
POLITECNICO DI MILANO

Facoltà del Design
Corso di Laurea in Design & Engineering



La realtà aumentata come supporto al progetto dell'allestimento espositivo

Relatore: Prof.ssa Monica Bordegoni
Correlatore: Prof.ssa Marina Carulli

Tesi di Laurea di:
Federico Cheula
matr.752135

A.A. 2012-2013

SOMMARIO

Il progetto di allestimento di uno spazio espositivo è spesso caratterizzato da operazioni di correzione successive alla messa in opera, ma, nel caso di oggetti di difficile movimentazione, queste attività non sono concesse. Inoltre, gli strumenti che vengono solitamente utilizzati per valutare le soluzioni progettuali non permettono la reale percezione dello spazio, a meno di non utilizzare costose riproduzioni fisiche delle unità da esporre.

La realtà aumentata, soprattutto nel caso di ambienti non digitalizzati, può essere un utile strumento progettuale, perché è in grado di generare rappresentazioni dinamiche, immersive ed interattive, sfruttando tecnologie a basso costo. Tuttavia, l'applicazione della realtà aumentata alle esposizioni prevede la digitalizzazione degli oggetti e la riproduzione fotorealistica della scena virtuale; a questo proposito, è necessario che anche le tecniche di acquisizione tridimensionale e di visualizzazione in tempo reale siano economicamente accessibili.

Lo scopo della tesi è quello di individuare una procedura di digitalizzazione e simulazione dell'allestimento espositivo, che faccia uso di strumentazione attualmente disponibile e a basso costo, ma che consenta riproduzioni virtuali immersive di buona qualità visiva. È stato analizzato l'ambito espositivo, individuando le situazioni più comuni ed adatte alla simulazione; l'importanza dell'illuminazione in questo settore ha richiesto l'approfondimento su alcuni temi dell'illuminotecnica. Inoltre, sono state analizzate le tecnologie di simulazione in realtà aumentata e di acquisizione tridimensionale, individuandone i limiti e le potenzialità.

Parole chiave: *esposizione culturale, progetto di allestimento, illuminotecnica, comfort, comunicazione, conservazione, simulazione virtuale, realtà aumentata, tracciamento geometrico, tracciamento fotometrico, fotorealismo, modellazione inversa, acquisizione dell'illuminazione.*

ABSTRACT

The project of setting up an exhibition space is often characterized by correction operations after the installation, but, if objects are hard to handle, these activities are not allowed. In addition, the typically tools that are used to evaluate design solutions do not permit the real perception of space, unless using expensive physical reproductions of the units to be displayed.

Augmented reality, especially in the case of not digitized environments, can be a useful design tool, because it is capable of generating dynamic, immersive and interactive representations, exploiting low-cost technologies. However, the application of augmented reality to exhibitions involves the digitization of the objects and the photorealistic rendering of the virtual scene; in this regard, the three-dimensional acquisition and real-time display techniques have to be economically accessible too.

The aim of the thesis is to identify a digitizing and simulation process of the exhibition content, which uses currently available and low cost equipment, but allows immersive virtual reproductions of good visual quality. It has been analyzed the exhibition area, identifying the most common situations suitable for the simulation; the importance of lighting in this area has required the study of some lighting technique issues. The augmented reality simulation and three-dimensional capture technologies have been also examined, identifying limits and potentials.

Keywords: *cultural exhibition, exhibition design, lighting technologies, comfort, communication, preservation, virtual simulation, augmented reality, geometric tracking, photometric tracking, photorealism, reverse modeling, light acquisition.*

INDICE

SOMMARIO

ABSTRACT

1 - INTRODUZIONE.....	1
2 - EXHIBITION DESIGN.....	3
2.1 - Esposizione.....	4
2.1.1 - Esposizione culturale.....	7
2.2 - Progetto dell'esposizione.....	9
2.2.1 - Prestito e organizzazione del trasporto.....	12
2.2.2 - Progetto dell'allestimento.....	13
2.3 - Obiettivi.....	17
2.3.1 - Comfort e comunicazione.....	17
2.3.2 - Cura e conservazione.....	21
2.4 - Profili professionali.....	24
2.4.1 - Progettista degli allestimenti.....	27
2.5 - Ambienti.....	28
2.6 - Contenuti.....	31
2.6.1 - Oggetti esposti.....	31
2.6.2 - Strutture dell'allestimento.....	33
3 - LIGHTING DESIGN.....	37
3.1 - Illuminotecnica.....	38
3.1.1 - Fotometria.....	40
3.1.2 - Colorimetria.....	41
3.2 - Progetto dell'illuminazione.....	43
3.3 - Obiettivi.....	46

3.3.1 - Comfort e comunicazione.....	46
3.3.2 - Cura e conservazione.....	49
3.4 - Profili professionali.....	50
3.5 - Ambienti.....	51
3.5.1 - Luce naturale.....	52
3.6 - Apparecchi di illuminazione.....	53
3.6.1 - Sorgenti luminose.....	55
3.6.2 - Sistemi ottici.....	59
4 - VIRTUAL SIMULATION.....	63
4.1 - Augmented Reality.....	64
4.2 - Sistemi di simulazione in realtà aumentata.....	66
4.2.1 - Dispositivi di visualizzazione.....	67
4.2.2 - Dispositivi di tracciamento geometrico.....	69
4.2.3 - Dispositivi di tracciamento fotometrico.....	73
4.3 - Scelta del sistema.....	77
4.4 - Requisiti.....	78
4.4.1 - Simulazione volumetrica.....	79
4.4.2 - Simulazione fotorealistica.....	81
4.4.2.1- Simulazione fotometrica.....	85
4.5 - Sistema scelto.....	88
4.5.1 - Sistema SPAR.....	90
5 - VIRTUAL MODELING.....	95
5.1 - Reverse modeling.....	97
5.2 - Sistemi di acquisizione tridimensionale.....	99
5.2.1 - Sistemi passivi.....	101
5.2.2 - Sistemi attivi.....	104
5.3 - Scelta del sistema.....	108
5.4 - Requisiti.....	111

5.4.1 - Acquisizione della forma.....	112
5.4.2 - Acquisizione del materiale.....	115
5.4.2.1 - Acquisizione della BRDF.....	118
5.5 - Sistema scelto.....	120
6 - IPOTESI.....	123
6.1 - Possibili applicazioni attuali.....	125
6.2 - Livelli di complessità.....	127
6.3 - Vincoli di compatibilità.....	129
6.4 - Situazioni di maggiore utilità.....	130
6.5 - Procedura di acquisizione e simulazione.....	133
7 - SCENARI APPLICATIVI.....	141
7.1 - Primo scenario.....	141
7.2 - Secondo scenario.....	147
8 - CONCLUSIONI.....	153
8.1 - Sviluppi futuri.....	153
8.2 - Conclusioni.....	155

BIBLIOGRAFIA

SITOGRAFIA

1 - INTRODUZIONE

L'obiettivo della tesi consiste nell'identificare una procedura ed alcune tecnologie che consentirebbero la simulazione dell'allestimento di un ambiente per esposizioni culturali temporanee e permanenti. In particolare vengono considerati oggetti di rilevanza artistico/culturale, per i quali esistono rischi e difficoltà di movimentazione, ed ambienti ospitanti che non sono stati digitalizzati. La finalità della simulazione è quella di fornire uno strumento che permetta di valutare, sia singolarmente sia complessivamente, l'aspetto estetico, l'illuminazione e l'organizzazione nello spazio in cui le opere saranno esposte.

Il processo che si ipotizza di utilizzare consiste nella digitalizzazione di oggetti destinati all'esposizione e nella rappresentazione virtuale degli stessi in un ambiente espositivo reale; queste operazioni vengono effettuate tramite strumenti di acquisizione ed una postazione per la visualizzazione in realtà aumentata.

Esistono dei requisiti che devono essere soddisfatti per fare in modo che l'intero processo di acquisizione e studio virtuale del posizionamento sia conveniente, efficace ed efficiente. In primo luogo la scansione tridimensionale deve far uso di strumenti che garantiscano una risoluzione ed una precisione di cattura adeguata per oggetti di medie dimensioni; inoltre, data l'elevata importanza dello studio estetico e di illuminazione dell'oggetto nell'ambiente espositivo, è opportuna anche l'acquisizione del materiale degli oggetti. Gli strumenti devono, quindi, garantire una buona qualità di acquisizione nel minor tempo possibile, ma con il minor numero di operazioni di post-processing.

Se l'acquisizione deve avere un alto livello di dettaglio, non da meno lo deve essere la rappresentazione virtuale in realtà aumentata, nella quale gli oggetti vengono renderizzati in tempo reale; per lo stesso motivo spiegato precedentemente, i requisiti di valutazione estetica richiedono, quindi, il più alto livello di fotorealismo che la tecnologia consente. A questo proposito risulta di particolare importanza l'acquisizione dell'illuminazione reale dell'ambiente ospitante e la rappresentazione fotorealistica

degli effetti generati da sorgenti di luce virtuali.

Data la necessità di studiare in modo complessivo l'ambiente espositivo, occorre che nella scena sia possibile posizionare più di un oggetto, così che possano essere visualizzati tutte le unità e le strutture di una stanza contemporaneamente. Lo studio della posizione e dell'orientamento delle opere deve essere inoltre effettuato in compresenza di figure professionali differenti, le quali, con altri dispositivi, possono visualizzare e valutare l'operato.

Attualmente esistono tecnologie consolidate per l'acquisizione di oggetti tridimensionali e tecnologie in via di sviluppo per le esperienze in realtà aumentata. Gli studi esistenti nel campo delle esposizioni in realtà aumentata riguardano solitamente l'utente finale (colui che visita la mostra), mentre non sono state ancora considerate ipotesi di applicazione di queste tecnologie in aiuto agli addetti dell'allestimento della mostra.

La tesi espone i quattro argomenti principali seguendo un percorso logico di esclusione sequenziale; per ogni macro-argomento viene fatta un'introduzione generale al tema trattato ed una descrizione di approfondimento relativa all'analisi effettuata nei capitoli precedenti. Questo significa che per tutti gli argomenti, escluso il primo, vengono tralasciate considerazioni che non partecipano al raggiungimento dell'obiettivo preposto.

2 - EXHIBITION DESIGN

Il mondo delle esposizioni, se si prende in considerazione il senso più largo del termine, comprende una varietà di soggetti e generi espositivi tanto ampia da rendere difficile il loro raggruppamento sotto un'unica definizione. Qualunque siano i temi trattati o gli obiettivi ricercati, l'esposizione è una presentazione di oggetti al pubblico ed il suo progetto realizzativo necessita di un grande numero di discipline, tra le quali il design trova spazio in vari settori: come interni, prodotto, comunicazione, illuminazione ed ergonomia. La figura del designer possiede, dunque, un ruolo chiave all'interno del progetto dell'allestimento e questa tesi punta ad analizzare un metodo in grado di fornire degli strumenti di progettazione innovativi basati sulla simulazione virtuale.

Il design espositivo è un'espressione creativa multidisciplinare in continua evoluzione che ha come obiettivo la realizzazione di ambienti comunicativi e la creazione di esperienze coinvolgenti e gratificanti[1]; alcuni degli aspetti che caratterizzano la realtà espositiva attuale, soprattutto in territorio estero e in eventi che attirano un grande numero di visitatori, sono: lo spazio narrativo, lo spazio performativo e l'esperienza simulata[1].

Lo spazio narrativo è un approccio espositivo che determina la gestione degli oggetti in base ad un racconto, realizzato mediante l'individuazione di relazioni tra gli oggetti stessi e l'ambientazione circostante.

Questo metodo ha lo scopo di generare maggiore coinvolgimento, tramite l'evocazione di risposte emotive nel pubblico visitante.



Figura 2.1 - Science Museum - Londra

Lo spazio performativo possiede, invece, come requisito l'interattività tra il visitatore e le strutture esposte, ponendo il movimento del corpo come elemento fondamentale dell'apprendimento; questo tipo di ambiente è solitamente utilizzato per mostre dedicate a pubblico di giovane età.

L'esperienza simulata si basa sull'immersione in ambienti multimediali mediante l'utilizzo di sistemi sofisticati; questo tipo di allestimento consente un coinvolgimento ancora maggiore dei visitatori, ma li allontana dal concetto classico di apprendimento incentrato sull'osservazione di oggetti fisici, rimpiazzato da linguaggi propri dell'intrattenimento. A fronte di questi sviluppi si denota l'uso sempre maggiore di tecniche un tempo estranee all'ambito espositivo, esportate dal mondo del cinema, dal teatro, dalla pubblicità; questo approccio consente di realizzare presentazioni molto più varie, elaborate e visivamente accattivanti, ma rischia di trasformare il materiale artistico e culturale in merce da vendere al maggior numero possibile di clienti[1].

Considerando l'intero panorama espositivo viene fatta una selezione delle situazioni che maggiormente trarrebbero vantaggio dalla simulazione come strumento del progetto espositivo, ignorando altri criteri discriminatori. Dopo aver determinato i tipi di esposizione sui quali concentrarsi ne viene studiato il processo, individuandone le fasi ed integrandolo con le azioni previste per il progetto virtuale; viene, quindi, condotta un'analisi di tutti gli ambienti nei quali vengono organizzate esposizioni culturali, delle categorie di oggetti che possono essere esposti e dei profili professionali interessati dall'allestimento virtuale dell'esposizione.

2.1 - ESPOSIZIONE

L'esposizione è una presentazione programmata di oggetti o concetti di vario tipo, "collocati in un dato spazio secondo un'articolazione di relazioni operate in ragione di un messaggio che si vuole trasmettere"[2]. La mostra ha come obiettivo la comunicazione di un tema particolare e può essere di breve o lunga durata.

Può essere fatta una prima distinzione tra esposizioni permanenti ed esposizioni temporanee; la differenza fondamentale tra le due categorie è “la dimensione spazio-temporale: statica in quelle permanenti, dinamica in quelle temporanee”[2]. Nelle esposizioni permanenti esiste un “rapporto di lunga durata tra il sistema degli oggetti esposti ed il contesto spaziale”[3]; ovviamente questo rapporto dipende dal tipo di ambiente ospitante e dal suo livello di caratterizzazione estetica. Inoltre, in un’esposizione permanente è probabile che la quantità di opere esposte sia molto alta e riguardi ambiti cronologici e geografici estesi; in questo caso la relazione esistente tra le opere e l’ambiente circostante non è mai troppo marcata e viene studiata in modo che perduri nel tempo.

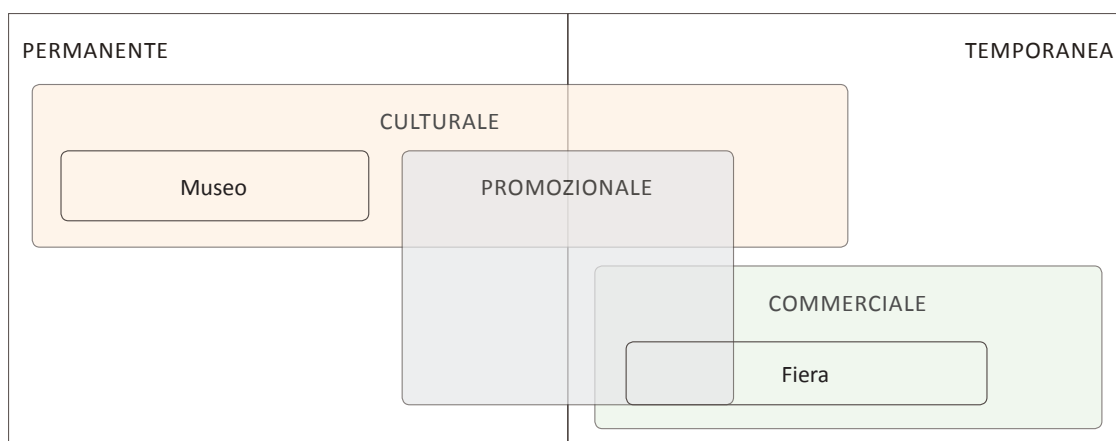
Le mostre temporanee vengono, invece, create solitamente attorno ad un unico argomento e consentono, quindi, maggiore flessibilità, caratterizzazione e massimizzazione delle risorse. La temporaneità dell’evento consente un alto livello di sperimentazione, a patto che gli obiettivi siano rispettati e la sicurezza degli oggetti assicurata; essa consente l’uso di soluzioni, metodi, tecniche e materiali innovativi, incrementando così la conoscenza in modo economicamente conveniente[4]. Le esposizioni temporanee possono essere a loro volta classificate in breve, medio e lungo termine: nel primo caso possono avere durata da qualche giorno a 1/2 mesi; il medio termine corrisponde ad un periodo che va dai tre ai sei mesi; le mostre a lungo termine rappresentano, invece, allestimenti che non rientrano in una programmazione precisa e non hanno, dunque, un termine prestabilito.

Le esposizioni possono inoltre essere classificate in base all’obiettivo intrinseco per le quali sono state organizzate: esistono esposizioni commerciali, le quali puntano a far conoscere/vendere un prodotto o servizio, ed esposizioni culturali le quali consentono di arricchire la conoscenza. La differenza fondamentale tra queste due categorie sta nel tipo di oggetto presentato e di azione espositiva effettuata: l’esposizione commerciale punta a distruggere l’aura di oggetti esistenti, spostandola su nuovi prodotti, mentre l’esposizione culturale punta alla conservazione dell’aura di oggetti che possiedono un qualche tipo di valore storico, artistico o scientifico.

L'aura può essere definita come "la percezione suggestiva e soggettiva di un'opera da parte del visitatore, il quale ne trae una sorta di emozione cognitiva che lo mette in contatto più diretto, immediato e non razionale, con il senso più profondo di un oggetto"[5].

Esiste una sotto-divisione all'interno delle esposizioni sia culturali sia commerciali, la quale riguarda la possibilità che ciò che viene esposto abbia carattere promozionale; per quanto riguarda le esposizioni commerciali-promozionali l'obiettivo non è la vendita istantanea, bensì la pubblicità; nelle esposizioni culturali-promozionali vengono presentati argomenti di carattere culturale ma con fronti promozionali, come la pubblicità ad artisti, designer e aziende effettuata mediante la presentazione delle loro creazioni[2].

É possibile riassumere i vari tipi di esposizione individuando delle macro-aree che potranno poi essere selezionate in base ai requisiti richiesti dal progetto, in modo da individuare gli ambiti più adatti all'uso delle tecnologie di simulazione; le classificazioni fin qui descritte possono essere intersecate tra loro individuando, ad esempio, l'area dell'esposizione culturale permanente, la quale per lo più corrisponde al museo. Le mostre commerciali, data la loro caratteristica di caducità nel tempo dettata dal mercato, non possono essere permanenti; la più classica delle esposizioni commerciali è la fiera, la quale può presentare esposizioni sia puramente commerciali sia commerciali-promozionali.



La frequenza con la quale è necessario progettare un allestimento espositivo è sicuramente maggiore nel caso di mostre temporanee; tuttavia anche le collezioni permanenti, nonostante il nome le faccia sembrare immutabili, necessitano di aggiornamenti, sia a causa dei nuovi approcci museologici e culturali, sia per le modifiche dettate dalle norme che definiscono la sicurezza e il controllo ambientale richiesto[6]. Tutti i tipi di esposizione, temporanee o permanenti, culturali o commerciali, possiedono sia pro che contro nell'utilizzo di metodi per la simulazione virtuale dell'allestimento. Tuttavia le esposizioni commerciali spesso presentano prodotti inseriti all'interno di strutture dissociate dall'ambiente circostante; inoltre la scarsa difficoltà di movimentazione degli oggetti commerciali e i tempi di progetto "in loco" pressoché nulli portano ad escludere parzialmente le esposizioni commerciali. L'analisi prosegue, invece, approfondendo le esposizioni culturali, le quali presentano condizioni più favorevoli alla simulazione virtuale dell'allestimento.

2.1.1 - ESPOSIZIONE CULTURALE

L'esposizione culturale, come spiegato precedentemente, è un evento che presenta oggetti fisici o concetti astratti, può essere di lunga o breve durata, e può comprendere argomenti che spaziano dall'arte, alla scienza, alla storia. Le esposizioni culturali vengono solitamente classificate in base al materiale esposto: esistono le esposizioni d'arte e le esposizioni interpretative.

La mostra d'arte presenta oggetti di particolare pregio artistico e "consiste solitamente in una raccolta di opere di artisti vari riguardo un certo argomento, oppure una raccolta di opere di un solo artista, del quale viene definito il profilo storico"[7]; l'esposizione interpretativa consiste, invece, in una presentazione di oggetti di interesse storico o scientifico e solitamente necessita, rispetto le mostre d'arte, di una maggior quantità di entità informative a supporto delle unità esposte.

La differenza tra esposizioni culturali temporanee e permanenti è molto marcata, soprattutto in Italia, dato il carattere prettamente conservativo dei musei, che si



Figura 2.2 - Arte Povera - Triennale, Milano

differenza dalla sperimentazione delle mostre a tempo limitato. Nei musei italiani si assiste prevalentemente alla gestione delle esposizioni secondo la tradizione della scuola museografica italiana, ma ultimamente anche ad approcci innovativi, come il coinvolgimento di artisti nel processo di allestimento o la riqualificazione degli ambienti espositivi[6]. Le manifestazioni temporanee consentono, in ogni caso, una maggiore libertà progettuale e l'obiettivo dell'ambiente espositivo risulta quello di attrarre, stimolare e stupire, oltre che mostrare; il progetto dell'effimero

incide ovviamente su tutte le scelte effettuate in merito alle strutture espositive e lo spazio allestito temporaneamente per una mostra culturale ha spesso caratteristiche contrastanti con l'ambiente in cui è inserito[8].

In territorio nazionale italiano le innovazioni che interessano l'ambiente espositivo, quali la multimedialità e l'interattività, vengono scarsamente considerate o giungono con un certo ritardo rispetto ad altri Paesi. Questo fatto è giustificato in parte dalle antiche tradizioni museografiche e dall'ampiezza del patrimonio storico/artistico: la conservazione delle opere viene solitamente messa in primo piano rispetto alle innovazioni espressive che potrebbero essere applicate, mentre la valorizzazione di una grande quantità di collezioni non consente la focalizzazione degli investimenti su quelle più importanti.

2.2 - PROGETTO DELL'ESPOSIZIONE

Il progetto espositivo è una sequenza di attività correlate che interessa una grande varietà di discipline, tecnologie e metodologie progettuali; ha come obiettivo la creazione ed il mantenimento di un ambiente comunicativo destinato a trasmettere un messaggio al pubblico mediante interazioni significative. È chiamato “progetto” poiché ha come scopo finale la realizzazione di un servizio, ovvero l'esposizione, e possiede i tratti che accomunano qualunque tipo di progetto: i tempi e le risorse di pianificazione, sviluppo ed esecuzione sono limitati, ed il procedimento è ciclico, perché i presupposti possono nascere da attività precedenti e le conclusioni tratte generano nuove idee e approcci per lo sviluppo di progetti futuri. Gli elementi procedurali nella pianificazione e nell'esecuzione di qualsiasi progetto sono universali, indipendentemente dal risultato; tuttavia, a differenza dei progetti a fine commerciale, l'obiettivo del progetto espositivo culturale non è la vendita di un prodotto, bensì la divulgazione di informazioni[9].

Le fasi principali che costituiscono il progetto dell'esposizione sono: ideazione, pianificazione e sviluppo, esecuzione, monitoraggio e controllo, conclusione.

Prima di analizzare le fasi progettuali dell'evento, è necessario accennare alle varie situazioni che si possono presentare durante lo sviluppo di un'esposizione culturale, soprattutto per quanto riguarda la prima fase di ideazione, la quale dipende dai presupposti (luogo, obiettivo, utenza), se già identificati, e dalla quale dipendono tutte le decisioni e azioni successive.

Il progetto espositivo può essere messo in atto in diverse condizioni iniziali[10]:

- per l'allestimento di un nuovo museo/mostra permanente: in questo caso è necessario individuare il tema e la mission (obiettivi che l'organizzazione si impegna ad ottenere), ma anche pianificare spazi interni e scegliere le strutture;
- per il riallestimento di una mostra permanente esistente: qui è necessario decidere ciò che può essere mantenuto del vecchio allestimento e quali sono le motivazioni;
- per l'allestimento di una mostra temporanea all'interno di una struttura espositiva: questa situazione comporta la scelta di un tema e di un target d'utenza specifico, ed

eventualmente l'identificazione della struttura desiderata;

- per l'allestimento di un'esposizione temporanea in un ambiente non espositivo: anche in questo caso è necessario decidere tema e target di pubblico, ma deve essere, inoltre, identificato il luogo destinato all'esposizione, verificandone l'adeguatezza.

1 - La prima fase, oltre alle attività presenti nelle differenti situazioni sopraelencate, comprende la raccolta di idee, il confronto con la mission e le esigenze del pubblico, e la selezione del progetto da sviluppare. Definito l'obiettivo dell'esposizione, segue la ricerca presso musei e collezioni, la stesura di un'indagine bibliografica e di un dossier con immagini e dati relativi alle opere scelte. Dal punto di vista della gestione avviene la valutazione delle risorse potenziali o disponibili.

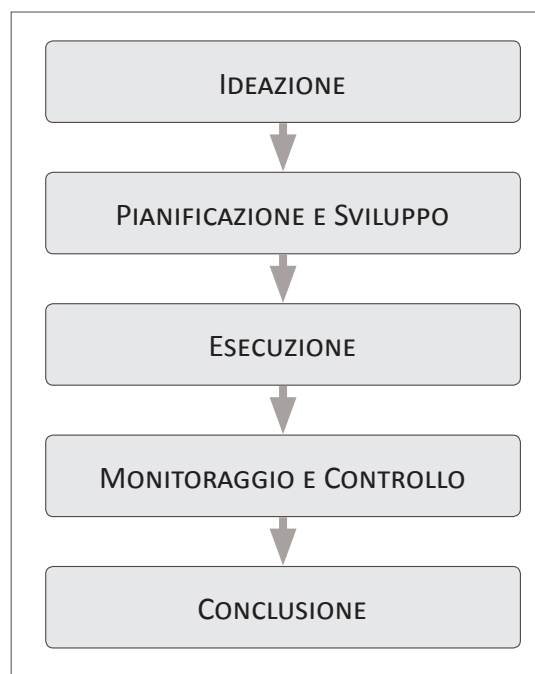
2 - Alla fase di ideazione segue quella di pianificazione e progettazione, nella quale vengono identificati i proprietari e l'ubicazione delle opere, da cui dipende la selezione delle stesse. Segue l'invio delle richieste di prestito o acquisizione ai proprietari delle collezioni e la richiesta di valutazione del premio assicurativo da parte di una società esterna. Ricevute le varie concessioni e l'approvazione a procedere viene organizzato il trasporto; contemporaneamente viene realizzato il progetto dell'allestimento, nonché la scelta delle ditte realizzatrici e fornitrici delle strutture necessarie.

In questa fase viene, inoltre, creato l'eventuale progetto educativo, avviene la ricerca di strategie promozionali e la realizzazione del catalogo dell'evento. In ambito organizzativo e di gestione viene realizzata una stima dei costi, la definizione del budget e la nomina del personale addetto alle varie mansioni.

3 - Segue la fase esecutiva o operativa, nella quale avviene l'allestimento vero e proprio dell'ambiente espositivo; tutte le strutture vengono posizionate e le opere acquisite vengono disimballate e anch'esse collocate secondo il progetto dell'allestimento. Nel frattempo viene attuato il piano promozionale e viene istruito il personale addetto alla didattica; avviene, quindi, la presentazione della mostra al pubblico e l'attuazione dei programmi educativi, nonché la conduzione di sondaggi sui visitatori. Durante questa

fase viene anche gestita la contabilità e l'amministrazione del personale e dei servizi per il pubblico.

4 - La fase di monitoraggio e controllo si sovrappone parzialmente alle fasi precedenti; le attività di controllo si sviluppano prima, durante e dopo il periodo dell'evento e comprendono la verifica dello stato di conservazione delle opere, la tutela delle stesse e il mantenimento della mostra durante tutto il periodo di accesso al pubblico, il quale comprende la sicurezza e l'accoglienza.



5 - Nella fase conclusiva, se l'esposizione era temporanea, vengono effettuate le operazioni di smontaggio, restituzione degli oggetti e sgombero del luogo espositivo. Vengono inoltre effettuate attività di valutazione dell'esposizione appena conclusa e del processo di sviluppo che ha permesso di realizzarla, nonché la stesura dei conti di bilancio.

Se si tratta, invece, di una mostra permanente, apparentemente essa sembra non avere conclusione; in realtà il progetto ha fine nel momento in cui vengono effettuate le valutazioni di bilancio ed efficacia, le quali impongono, con il passare del tempo, progetti di revisione e aggiornamento.

La simulazione del processo di allestimento comporterebbe, all'interno del progetto espositivo, l'aggiunta di alcune attività; queste operazioni, oltre a dare un apporto qualitativo al progetto, non necessariamente porterebbero ad un aumento di tempo e costi, perché la procedura verrebbe rallentata nella fase iniziale, ma velocizzata nella fase conclusiva. In particolare, nella fase di pianificazione, sarebbe necessario richiedere,

oltre al prestito dell'opera, anche la concessione ad acquisirne la forma (sempre che il modello virtuale non sia già disponibile); successivamente, in contemporanea con le fasi di progettazione dell'allestimento, verrebbe inviato un tecnico che ha il compito di effettuare l'acquisizione di tutte le opere e la gestione delle operazioni di post-processing dei modelli virtuali. La terza attività aggiuntiva andrebbe ad integrarsi alle operazioni progettuali dell'allestimento e consisterebbe, dunque, nella simulazione virtuale del posizionamento degli oggetti all'interno dell'ambiente reale.

2.2.1 - PRESTITO E ORGANIZZAZIONE DEL TRASPORTO

L'ottenimento delle opere è la prima difficoltà incontrata durante l'organizzazione di un'esposizione, perché la scelta delle unità da esporre, e quindi il percorso espositivo, dipendono da quali di esse è possibile procurare[11]. La richiesta di prestito e l'organizzazione del trasporto si trovano all'interno della fase di pianificazione e di progettazione; queste operazioni richiedono un approfondimento perché il progetto di allestimento in realtà aumentata ne influenza lo svolgimento.

La concessione del prestito dipende direttamente dal tipo di opere coinvolte e dai rischi per la loro integrità causati dal trasporto. Il controllo dei rischi per le collezioni è gestito in modo particolarmente rigido dalla legislazione italiana; il patrimonio culturale è infatti soggetto a [traumi meccanici, di variazioni climatiche, o può essere esposto a maggiori pericoli di furto o danneggiamento, nel periodo in cui ne sono delegate ad altri la tutela e la salvaguardia[5]. Alcuni oggetti possono anche venire esclusi dal prestito perché particolarmente fragili o perché di alto valore simbolico per la comunità alla quale appartengono; il trasferimento delle oggetti unici e non rinnovabili, ed i pericoli ad esso connessi, "possono essere giustificati solo dalle nuove opportunità di ricerca e interpretazione e di pubblicazione, e dal conseguente allargamento della fruizione"[5]. Dal punto di vista operativo il trasferimento delle opere ha inizio con la richiesta di prestito (se si tratta di un evento temporaneo) inviata dalla segreteria organizzativa

all'ente proprietario; viene inoltrata, assieme ai dati relativi alla mostra, la scheda di prestito, la quale rappresenta il contratto tra il possessore e il richiedente dell'opera. Quest'ultimo riceve così, oltre che la conferma del prestito, anche le misure e gli accorgimenti previsti per l'oggetto in questione. Viene in seguito incaricata una società esterna di calcolare il premio assicurativo che l'organizzazione deve pagare, corrispondente al valore dell'opera e al tempo durante il quale essa è assente dalla sua sede originaria[7].

Successivamente viene contattata la ditta che si occupa del trasferimento del materiale, la quale si affida anch'essa ad una società assicurativa. L'imballaggio deve essere chimicamente stabile e neutro, isolato dall'umidità e personalizzato per ogni oggetto, con gabbie su misura e sostegni laterali che impediscono il movimento[10].

La simulazione virtuale influenza il processo di trasferimento delle opere, in quanto richiede che venga concessa l'acquisizione virtuale degli oggetti, ma consente di effettuare valutazioni progettuali ancora prima del trasporto vero e proprio. La possibilità di valutare l'aspetto finale che l'esposizione dovrà avere consente di evitare la maggior parte delle azioni di correzione successive alla fase di posizionamento, riducendo tempi e risorse utilizzate ed evitando rischi di danneggiamento ulteriori; inoltre, l'acquisizione tridimensionale delle collezioni consente di creare un database di modelli digitali disponibili per progetti futuri e, nel caso di mostre itineranti, è necessaria solo per il primo evento.

2.2.2 - PROGETTO DELL'ALLESTIMENTO

Il progetto dell'allestimento e la sua realizzazione necessitano di approfondimento perché rappresentano le fasi che verrebbero coinvolte direttamente dal progetto virtuale.

Con il nome "allestimento" si intende sia il processo di preparazione di un'esposizione, sia la struttura fisica che ha il compito di esporre un'opera. "L'allestimento, inteso

come processo, comprende tutte quelle azioni che concorrono alla determinazione dell'immagine finale di un evento espositivo"[3] e lo spazio espositivo viene predisposto con l'obiettivo di trasformare l'aspettativa in "volontà di percepire e comprendere l'esperienza di ogni oggetto"[12].

Le opere sono solitamente esposte in condizioni diverse da quelle in cui si trovavano originariamente o da quelle previste dall'artista, quindi risulta essenziale creare delle "condizioni favorevoli sul piano della collocazione, dell'illuminazione, della climatizzazione e di vari parametri che rendano favorevole la fruizione stessa"[11]. Da questo punto di vista risalta, dunque, l'importanza del progetto di allestimento, nonché la sua complessità, perché responsabile di molti fattori disparati, alcuni di essi in contrapposizione tra di loro; ne è un esempio l'illuminazione, la quale deve essere adeguata a garantire sia la fruizione sia la conservazione delle opere.

Il progetto di pianificazione dello spazio, che nel caso in esame è un'ambiente espositivo esistente, consiste in un primo processo analitico, nel quale vengono identificate le esigenze di progetto, seguito da un processo di sintesi creativa, nella quale vengono affrontate e risolte questioni di carattere funzionale, estetico e tecnico.

La fase analitica genera un programma progettuale e consiste nell'osservazione, nella definizione dei parametri, nella ricerca e organizzazione dei dati e nella loro analisi e interpretazione. Una delle prime azioni effettuate è l'analisi dello spazio espositivo e della sua caratterizzazione originaria; questa fase è importante per identificare e comprendere le configurazioni spaziali, le geometrie, gli elementi strutturali, gli impianti, la posizione, il tipo e la quantità di aperture, ecc.[13].

Al fine di generare le migliori condizioni di fruizione può essere fatta la scelta di aumentare la superficie disponibile, attraverso l'uso di setti divisorii, oppure, per evitare l'alterazione visiva dell'architettura esistente si può optare per un allestimento poco intrusivo[5].

Dal punto di vista grafico i programmi di pianificazione dello spazio sono accompagnati da diagrammi che esprimono le relazioni tra le aree e le funzioni dell'ambiente esaminato.



Figura 2.3 - Galleria d'arte moderna "Raccolta Lercaro", Bologna

Nella vera e propria fase progettuale vengono formulate le prime ipotesi di organizzazione spaziale, in relazione alla documentazione raccolta precedentemente e agli obiettivi primari della mostra, quali il comfort, la comunicazione e la conservazione; la pianificazione viene inizialmente studiata in pianta, presupponendo l'utilizzo della planimetria della struttura espositiva. Le soluzioni di pianificazione dello spazio, come tutte le pratiche progettuali, comportano l'individuazione di compromessi e priorità; vengono dapprima realizzate disposizioni spaziali approssimative, ed in seguito, attraverso il perfezionamento e lo studio di dettaglio, le soluzioni definitive.

I fattori che devono essere espressi attraverso l'allestimento sono: i contenuti, le finalità, il percorso, i servizi[10]. La mostra deve, dunque, far percepire al visitatore sia il dettaglio di ogni contenuto sia il tema generale dell'esposizione ed il suo obiettivo, comunicando un percorso conoscitivo ed esperienziale. Alla scelta del percorso segue la selezione delle strutture e la distribuzione degli oggetti nello spazio e lungo le pareti in base anche a parametri relativi al costo e alla compatibilità estetica; vengono definiti i volumi, le forme, i colori, la luce e i materiali di tutti gli elementi presenti nell'ambiente.

A questo studio generale, chiamato di macro-allestimento, segue una fase successiva di micro-allestimento, nella quale rientra la progettazione dei mezzi di supporto e della segnaletica di orientamento, informativa e didattica, ed eventualmente la pianificazione degli elementi interni alle vetrine[5].

La presentabilità dei risultati progettuali viene garantita da varie tecniche che vanno dai classici disegni tecnici in bianco e nero ai rendering ad alta qualità grafica[13]. Gli elaborati tecnici che solitamente vengono forniti per il progetto di allestimento comprendono: una relazione generale nella quale vengono giustificate le scelte progettuali, degli elaborati grafici che illustrano la disposizione, gli orientamenti e i dettagli delle strutture utilizzate, una relazione relativa al loro dimensionamento e un piano di manutenzione[14].

Questi documenti definiscono tutte le caratteristiche necessarie per allestire lo spazio espositivo e sono il risultato di varie fasi progettuali che vanno dalla definizione di obiettivi e requisiti di progetto, alla generazione di soluzioni tecniche, all'approvazione definitiva ed esecuzione. Il processo di simulazione dell'allestimento di una mostra culturale potrebbe fornire, a questo proposito, degli strumenti di supporto alla generazione di elaborati tecnici preliminari e/o esecutivi.

Solitamente la verifica dei criteri progettuali viene effettuata dopo l'allestimento dei contenuti, apportando eventuali, ma non sempre possibili, modifiche al progetto. In particolare viene verificato che i parametri di conservazione, comfort e percezione rispondano alle caratteristiche progettuali definite nella fase iniziale; vengono inoltre effettuati controlli riguardo i requisiti energetici, di accessibilità e sicurezza generale dell'ambiente.

La simulazione dell'allestimento consente, invece, la verifica dei criteri progettuali prima dell'allestimento vero e proprio, rendendo possibile qualunque tipo di modifica e permettendo inoltre di valutare proposte differenti; essa subentra, quindi, in un campo dove il progetto dell'ambiente è fondamentale per il raggiungimento degli scopi ultimi, e fornisce uno strumento che non solo consente di simulare l'apparenza

visiva di oggetti e strutture nell'ambiente reale, ma permette di scegliere tra diverse varianti di percorso, strutture e materiali. La simulazione potrebbe inoltre supportare la generazione di disegni tecnici di progetto e potrebbe consentire valutazioni di carattere illuminotecnico.

2.3 - OBIETTIVI

Le finalità dell'allestimento di un evento espositivo culturale, oltre alla presenza dei servizi essenziali, della sicurezza e del comfort di base, sono la comunicazione di messaggi connessi con il materiale esposto ed eventualmente la sua conservazione; questo concetto è provato dalle funzioni che possiedono le strutture dell'allestimento, le quali rispondono ai due principali requisiti di divulgazione e protezione.

In questa analisi sono state prese in considerazione tutte le esposizioni culturali, le quali possono essere caratterizzate da obiettivi differenti; in particolare, in relazione al tipo di oggetti esposti, possono essere privilegiate le condizioni atte a proteggere le unità, come in un museo, ma può anche venire data più importanza all'aspetto comunicativo ed emozionale, come nelle esposizioni temporanee di arte contemporanea.

La simulazione dell'allestimento nell'ambiente reale può, dunque, essere un utile strumento, sia per valutare le componenti comunicative della mostra, sia per analizzare i parametri conservativi dei contenuti che lo richiedono.

2.3.1 - COMFORT E COMUNICAZIONE

L'efficacia comunicativa della mostra è molto importante per il successo della stessa[10], soprattutto se si tratta di un'esposizione temporanea, la quale, nel tempo limitato in cui si manifesta, deve saper attirare al meglio l'attenzione del pubblico.

Anche nelle mostre permanenti, quali i musei, la comunicazione risulta fondamentale, infatti l'interpretazione continua delle collezioni e l'attività educativa fanno parte

degli obiettivi principali[5]. In quest'ultimo caso, soprattutto in ambito nazionale, la comunicazione è sempre stata messa in secondo piano rispetto alla conservazione degli oggetti; al progetto dell'espressività dell'ambiente espositivo, dunque della sua componente visiva, è stata sempre data importanza soprattutto da parte di architetti e allestitori, ma non da direttori e curatori, i quali lo consideravano come un aspetto secondario alla conservazione[6]. Uno degli eventi più importanti nelle recenti trasformazioni del progetto espositivo è, invece, "la ricerca di coinvolgimento e immersione del pubblico in una scena più complessa e multimediale che vede, ad esempio, gli artisti sempre più partecipi nel ridefinire gli ambienti"[6].

La componente comunicativa di una mostra comprende tutto ciò che trasmette informazioni e sensazioni al pubblico visitante e racchiude due aspetti principali: l'atmosfera percepita dell'ambiente espositivo, la quale dipende dal modo in cui i sensi vengono stimolati, e le nozioni di carattere culturale che vengono acquisite dal visitatore tramite guide, pannelli e didascalie.

Questi due aspetti comunicativi sono molto differenti tra loro ma si influenzano l'un l'altro: ad esempio la condizione ambientale può essere favorevole o meno al mantenimento dell'attenzione e dell'interesse del visitatore nei confronti della componente informativa. Inoltre, in base al tipo di esposizione, la componente espressiva e quella educativa possono essere più o meno presenti e dominare l'una sull'altra.

Il progetto dell'atmosfera di un'esposizione è fondamentale per far vivere al visitatore un qualche tipo di esperienza sensoriale, utile per "comunicare in modo efficace i contenuti e le caratteristiche della mostra e valorizzarne la fruizione"[1]. La percezione dell'ambiente espositivo dipende prevalentemente dalla componente visiva, ma viene influenzata anche dagli stimoli inviati agli altri sensi, quali il tatto, l'udito, l'odorato e la sensibilità termica. Un elemento importante che contribuisce a definire l'atmosfera dello spazio espositivo è infatti il suono; al pari di luci e colori, la componente sonora è fondamentale per migliorare l'esperienza del visitatore, ma attualmente è ancora poco sfruttata, anche a causa della difficoltà nel generare ambienti audio circoscritti[1].

Gli elementi visivi risultano come i più adatti per essere studiati mediante la tecnologia di simulazione applicata al progetto di allestimento di un'esposizione culturale, affidando ad altra strumentazione l'eventuale completamento di uno studio multisensoriale. Lo studio dell'atmosfera visiva comprende la definizione del percorso, la distribuzione e l'illuminazione degli spazi, la determinazione di forme, colori e materiali, di tutto ciò che può essere personalizzato.

1 - Il **percorso** rappresenta l'itinerario visivo dell'esposizione e, insieme al luogo contenitore, è il primo elemento responsabile della comunicazione verso il pubblico visitante; lo studio del percorso consente di coniugare spazio e tempo, creando una struttura di narrazione[12].

Ogni allestimento ha una gerarchia di contenuti, tra i quali i più importanti devono essere percepiti in modo immediato; il percorso può seguire questo ordine, ma può anche mostrare un principio di esplorazione differente (tematico, cronologico, geografico, narrativo, ecc.). Dal punto di vista geometrico esistono svariate configurazioni possibili,



Figura 2.4 - Museo lapidario della città di Todi

a partire dalla scelta tra percorso lineare o aperto, ed eventualmente di forma a pettine, a catena, a stella, ecc. In ogni caso “non esistono modelli applicabili ad ogni situazione, ma solo dei generali criteri ispiratori”[5] che il progettista può rielaborare caso per caso, garantendo costantemente il benessere dei visitatori e la tutela degli oggetti.

2 - La **distribuzione** di oggetti e strutture all’interno dello spazio espositivo è a discrezione del progettista, il quale deve però seguire alcune regole ormai codificate[5]. La collocazione dei contenuti e la gestione dello spazio consente di analizzare l’ambiente espositivo in relazione ai fattori di comfort per le persone e sicurezza per le opere; essa permette inoltre, assieme ad altri parametri quali luce e colore, di definire i livelli di importanza e la distribuzione dei carichi visivi.

3 - La **forma** degli elementi fisici presenti nello spazio contribuisce a definire l’aspetto visivo dell’ambiente; essa fa riferimento alle strutture dell’allestimento, le quali possono ad esempio presentare fattezze geometriche od organiche, ma anche combinazioni di forme diverse per creare contrasti. La forma e le dimensioni delle strutture contribuiscono, congiuntamente alla loro distribuzione, alla pianificazione degli spazi fisici.

4 - L’**illuminazione**, data la natura quasi esclusivamente visuale delle esposizioni, risulta essere un elemento fondamentale del progetto di allestimento; lo studio della luce è però uno dei più complessi perché, oltre a determinare effetti luminosi di rilevanza estetica ed ergonomica, richiede la conoscenza della percezione e della psicologia comportamentale, ma anche della strumentazione e dell’analisi illuminotecnica[4]. Le limitazioni alle scelte che possono essere fatte nell’ambito del progetto di luce riguardano innanzitutto la conservazione degli oggetti, ma anche “la disponibilità di strumentazione, la disponibilità di sufficiente energia elettrica, gli effetti sui sistemi di ventilazione e riscaldamento, considerazioni architettoniche e il budget disponibile”[4]. Data la grande importanza che la luce possiede all’interno di un evento espositivo e la vastità dell’argomento, per essa viene dedicato un capitolo a parte.

5 - **Colori e materiali**, al pari della luce, sono importanti per determinare il rapporto tra l'ambiente espositivo e il materiale esposto; i colori "collaborano a definire lo spazio, dilatandolo o restringendolo, fornendo sussidi all'orientamento, isolando o avvicinando gli oggetti, evocando stili, ambienti, contesti"[5], mentre i materiali sono in grado di "deprimere o esaltare i pezzi esposti, attraverso il coordinamento, la neutralità voluta o il contrasto"[5]. I colori scuri e caldi, con tonalità cromatiche del fuoco, vengono utilizzati per generare atmosfere accoglienti e rilassanti: la luce calda e la semi-oscurità rendono gli spazi più ristretti; al contrario, se l'ambiente deve sembrare luminoso e aperto vengono utilizzati colori pallidi e abbondanza di bianco. L'uso del bianco per le pareti della struttura espositiva è utile per riflettere la luce presente nell'ambiente, assorbire la radiazione ultravioletta, ma anche per non interferire con la colorazione dei pezzi esposti; anche il grigio non influisce sull'effetto visivo degli oggetti, ma, rispetto al bianco, riduce il contrasto ed il bagliore[4].

Strettamente connesse con l'illuminazione, le scelte che riguardano il colore e il materiale dell'allestimento devono tenere in considerazione gli aspetti di psicologia e simbolismo; gli oggetti esposti possono infatti comunicare i possibili accostamenti cromatici grazie alla loro colorazione fisica, ma anche attraverso associazioni di carattere simbolico[4].

L'effetto visivo finale e l'atmosfera dell'esposizione sono determinati dalla combinazione di tutti questi parametri, in particolare dal colore, dalle caratteristiche materiche delle superfici e dal tipo di flusso luminoso incidente; le scelte per determinare questi aspetti devono, dunque, essere effettuate in modo simultaneo.

2.3.2 - CURA E CONSERVAZIONE

La cura e la conservazione dei beni culturali consiste nella prevenzione dei danni e nel rallentamento del degrado degli oggetti, attraverso il preciso controllo delle condizioni ambientali e l'attuazione di comportamenti specifici[15]; la corretta conservazione dei beni culturali è regolata da normative comuni a vari organismi internazionali, tra

i quali i più importanti sono l'ICOM (The International Council of Museums) e la CIE (Commission Internationale de l'Eclairage)[14]

La conservazione spesso non riguarda solamente le singole unità esposte, bensì comprende le collezioni nel loro complessivo, l'ambiente ospitante e i depositi di materiali, attraverso un "insieme globale di interventi tecnici e attività"[15] che consentono di rallentare le attività naturali di degrado e permettono di evitare costosi interventi di restauro. "La conservazione assoluta è impossibile"[5], ed entra inoltre in contrasto diretto con la fruizione, la quale ha lo scopo di presentare al meglio l'opera secondo criteri prevalentemente visivi; da queste considerazioni nasce l'obbligo, durante il progetto espositivo, di raggiungere dei compromessi tra l'effetto comunicativo e la conservazione del materiale esposto.

Il deterioramento delle opere può essere causato dall'azione dell'uomo, oppure può dipendere da fattori naturali di origine fisica, chimica o biologica.

I danni provocati dall'uomo possono dipendere da attività inopportune effettuate dal personale interno, oppure da azioni, consapevoli o inconsapevoli, operate da visitatori e/o intrusi.

I fattori naturali di degrado fisico possono essere di natura termo-igrometrica o causati dalla radiazione luminosa; i fattori chimici sono dovuti a reazioni tra elementi presenti nell'ambiente e sull'oggetto, quali l'ossigeno, l'acqua e l'anidride carbonica; i fattori biologici dipendono, invece, dall'attacco di insetti e microrganismi.

A tutte le opere vengono associate degli intervalli di valori, all'interno dei quali l'oggetto si trova nelle migliori condizioni di conservazione; tuttavia non è la sola persistenza al di fuori di questi intervalli a causare danni al materiale[15]. I danni riscontrati dipendono infatti dalla geometria dell'oggetto, dal tempo di esposizione e dall'intensità dell'agente di degrado, e ovviamente dalla natura del materiale costituente: ad esempio i materiali inorganici quali i vetri, i metalli, le ceramiche sono sensibili solamente agli agenti inquinanti e climatici, mentre i materiali organici come il legno, i tessuti, la carta sono soggetti a tutti gli agenti di degrado[16].

L'analisi dei rischi per le opere esposte consente di individuare i principali parametri responsabili delle azioni di degrado[15]:

1 - **Umidità relativa:** l'umidità relativa troppo bassa o troppo alta può causare la formazione di muffe, la corrosione e l'infragilimento, mentre le rapide variazioni di umidità possono provocare fessurazioni, raggrinzimenti e deformazioni.

2 - **Temperatura:** livelli troppo alti di temperatura determinano l'aumento di altri tipi di degrado, livelli troppo bassi possono determinare infragilimento del materiale e le rapide variazioni di temperatura sono causa di fessurazione, raggrinzimento e deformazione.

3 - **Illuminazione:** la luce troppo intensa e la presenza di radiazioni ultraviolette possono causare decolorazione, infragilimento e distruzione del materiale, mentre la radiazione infrarossa provoca l'aumento della temperatura delle superfici, dunque l'accelerazione di altri processi di degrado.

4 - **Infestazioni:** la formazione di muffe e funghi, o l'attacco da parte di tarme, insetti o roditori, può comportare il danneggiamento sia superficiale che interno degli oggetti.

5 - **Inquinamento:** la deposizione di particelle solide o il contatto con gas, acidi o sostanze contaminanti delle strutture possono causare il degrado del materiale, come corrosione, decolorazione e danneggiamento fisico.

6 - **Disastri:** eventi di grande entità quali incendi e inondazioni possono essere causa di gravi danneggiamenti quali incenerimento, bruciature e deposito chimico per quanto riguarda il danno da fuoco, oppure impregnazione, disintegrazione, deformazioni e infestazioni per quanto riguarda l'acqua.

7 - **Persone:** manipolazioni o restauri non necessari o non corretti possono determinare rotture e abrasioni; i furti sono causati da intrusioni esterne, mentre il sovraffollamento di visitatori provoca l'aumento di altri fattori quali la temperatura, gli inquinanti e l'umidità, con relativi danneggiamenti.

Recentemente è nato un nuovo approccio alla conservazione dei beni culturali che si basa sulla prevenzione, ovvero sullo studio delle cause del degrado dei materiali, sulla riduzione del rischio di danneggiamento e perdita, e sulla limitazione dell'uso del restauro.



Figura 2.5 - Restauro di una copia del David di Michelangelo

In particolare il restauro non viene visto più come l'azione principale della conservazione, bensì come un'eventualità limite utile per "programmare il futuro dell'opera restaurata"[5]. A fronte di questo approccio conservativo assumono maggior rilievo la registrazione delle caratteristiche fisiche e della storia degli oggetti, l'ambiente di deposito ed esposizione, tra cui le condizioni di illuminazione, temperatura e umidità, le strutture espositive e di sostegno.

I rischi di danneggiamento comprendono anche la manipolazione delle unità da

parte del personale interno, la quale può essere ridotta evitando lo spostamento degli oggetti se non in situazioni strettamente necessarie e facendo ricorso a personale specializzato[5]. A questo proposito la simulazione dell'allestimento gioca un ruolo fondamentale perché consente una maggiore definizione del progetto di posizionamento di opere e strutture e permette di evitare buona parte delle azioni correttive successive. La simulazione delle sorgenti luminose, oltre che contribuire a definire l'aspetto visivo di un'esposizione, potrebbe consentire la valutazione dei parametri relativi all'illuminazione delle opere, sfruttando gli strumenti dell'illuminotecnica virtuale.

2.4 - PROFILI PROFESSIONALI

L'identificazione dei profili professionali di base riscontrabili in un'esposizione culturale consente di capire qual è l'utenza di riferimento che andrebbe ad utilizzare la tecnologia per la simulazione. Vengono elencati e descritti i più importanti profili professionali che

agiscono all'interno dell'ambiente museale e delle esposizioni culturali temporanee, con particolare attenzione alle figure che maggiormente sono interessate dal processo organizzativo e progettuale dell'allestimento[17]. L'elenco deriva da un confronto e dalla sintesi delle professioni che è possibile trovare sia in Italia sia in paesi esteri, nonostante esistano delle differenze; ad esempio, la figura del designer dell'allestimento è meno definita in territorio nazionale rispetto che in altri paesi europei o americani[18].

1 - Direzione:

- **Direttore:** è responsabile dello sviluppo e dell'attuazione del progetto culturale e scientifico, della gestione complessiva, della conservazione, valorizzazione, promozione e godimento pubblico del patrimonio esposto e della ricerca scientifica ad esso connessa.

2 - Ambito ricerca, cura e gestione delle collezioni:

- **Curatore** (Conservatore nelle mostre permanenti): cura la conservazione, la gestione e la valorizzazione del patrimonio culturale esposto; collabora con il Direttore alla definizione dell'identità dell'organizzazione culturale, delle sue finalità generali, degli obiettivi strategici e della programmazione delle attività;

- **Registrar:** assicura dal punto di vista organizzativo la movimentazione delle opere, la relativa documentazione e le procedure che la regolano, soprattutto in connessione ai prestiti;

- **Assistente tecnico addetto alle collezioni:** svolge le attività connesse alla conservazione e alla gestione del patrimonio museale, sotto il coordinamento e la responsabilità scientifica del Curatore;

- Catalogatore;

- Restauratore.

3 - Ambito servizi e rapporti con il pubblico:

- **Responsabile dei servizi educativi:** elabora i progetti educativi e ne coordina la realizzazione, individuando le modalità comunicative e di mediazione, utilizzando strumenti adeguati e funzionali per i diversi destinatari dell'azione educativa;

- **Educatore:** realizza gli interventi educativi programmati adeguandoli alle caratteristiche e alle esigenze dei diversi destinatari;
- Responsabile dei servizi di documentazione;
- Coordinatore e operatore dei servizi di custodia e accoglienza;
- Responsabile della biblioteca.

4 - Ambito strutture e sicurezza:

- **Progettista degli allestimenti** (Designer/Architetto): cura gli allestimenti permanenti e/o temporanei delle esposizioni, predisponendo gli spazi ed assicurando le modalità ottimali di presentazione e conservazione delle unità;
- Preparatore;
- **Responsabile delle strutture e dell'impiantistica:** sovrintende e assicura la gestione e la manutenzione delle strutture e degli impianti;
- Responsabile del sistema informatico;
- Responsabile addetto della sicurezza.

5 - Ambito amministrativo, finanziario, gestionale e delle relazioni pubbliche:

- Responsabile amministrativo e finanziario;
- Responsabile di segreteria;
- Responsabile dell'ufficio stampa e delle relazioni pubbliche;
- Responsabile per lo sviluppo.

Da queste definizioni è facile individuare le professioni che con più probabilità avrebbero a carico la gestione della tecnologia per il posizionamento virtuale delle opere: il curatore, perché è colui che gestisce gli aspetti comunicativi dell'esposizione, e il progettista degli allestimenti, se presente, perché si occupa delle caratteristiche estetiche di tutto ciò che è presente nella mostra.

Altre figure professionali non utilizzerebbero direttamente la strumentazione, ma si troverebbero coinvolti nel progetto di posizionamento degli oggetti perché supervisori e/o fornitori di competenze: essi sono il Direttore e l'Educatore. Il Registrar e il Tecnico

delle collezioni non rientrano direttamente nel progetto dell'allestimento, ma gestiscono la movimentazione e la cura delle opere, dunque anche l'eventuale acquisizione tridimensionale; il Preparatore e il Responsabile dell'impiantistica si occupano, invece, della fase esecutiva del processo di posizionamento degli oggetti.

Un'ulteriore figura che potrebbe inserirsi all'interno del progetto espositivo è quella dell'artista, l'autore stesso delle opere che sono soggetto della mostra; spesso gli artisti contemporanei manifestano particolare interesse nell'organizzazione dello spazio espositivo, specificando le forme di presentazione delle loro opere[1].

2.4.1 - PROGETTISTA DEGLI ALLESTIMENTI

Il progettista è il profilo professionale che si occupa della progettazione e della gestione degli allestimenti di un'esposizione, usufruendo, se la struttura lo consente, della competenza di altre figure professionali che ne supportano l'operato.

Egli si confronta con la seconda figura professionale fondamentale per il progetto dell'allestimento, il curatore, con il quale esamina lo stabile destinato all'esposizione, ne valuta qualità e caratteristiche, definisce gli interventi su spazi interni ed arredi e compone un itinerario visivo adatto alla trasmissione di specifici messaggi. Il designer dialoga anche con l'educatore per definire e mettere in atto le strategie di trasmissione delle informazioni culturali, gestendo quindi gli strumenti e le modalità di comunicazione. Il progettista dell'allestimento è incaricato di ideare l'atmosfera dell'ambiente espositivo e di valutarne l'aspetto estetico effettuando un'analisi, sia complessiva che di dettaglio, dell'illuminazione, dei colori e dei materiali; egli stabilisce la distribuzione dei volumi, i rapporti spaziali tra le unità esposte, le relazioni tra di esse e l'ambiente circostante¹ e ha il compito di identificare "i disagi che possono peggiorare l'appropriazione dei significati e dei valori da parte del pubblico"[5].

Data la natura multidisciplinare delle esposizioni, il progetto dell'allestimento comporta un dialogo tra "persone che hanno visioni e stili fortemente individualizzati"[19], tra le

quali il designer rappresenta la voce di compromesso ed è in grado di comunicare con tutte le altre.

Le qualità che il designer deve possedere sono l'atteggiamento positivo nei confronti del progetto, creatività e abilità di problem solving; egli deve avere il desiderio di comunicare le proprie idee, uno sviluppato senso estetico, e buone abilità nella scrittura, nella gestione del progetto e nell'uso del computer. Deve inoltre dimostrare capacità interpretative, conoscenza del pubblico e, in generale, dell'ambito in cui opera[9].

Il profilo professionale qui descritto è sicuramente di notevole importanza per il buon esito di un progetto espositivo, ma è altresì vero che, in relazione alle caratteristiche dell'organizzazione, "a ciascuna funzione può non corrispondere sempre una figura professionale, bensì una stessa figura professionale può garantire l'esercizio e il presidio di più funzioni. In altri casi, all'interno della stessa funzione, è possibile che siano previste più figure professionali"[20]. Se l'organizzazione che gestisce l'esposizione è di ridotte dimensioni è quindi possibile che il ruolo del designer confluisca in quello del curatore, il quale avrebbe un maggior numero di competenze meno specifiche; nel caso opposto, il progetto dell'esposizione può essere affidato ad uno studio esterno, il quale comprende svariate persone con diverse competenze.

2.5 - AMBIENTI

L'ambiente espositivo rappresenta il contenitore all'interno del quale avviene l'incontro tra l'oggetto dell'esposizione e l'utente finale, e, al pari delle strutture dell'allestimento, risulta fondamentale per caratterizzare la comunicatività dell'esperienza; le caratteristiche dimensionali ed estetiche del luogo selezionato per una mostra influiscono sulle scelte progettuali per la definizione dell'allestimento, e l'equilibrio che si instaura tra quest'ultimo, le opere e l'ambiente garantisce il successo dell'evento[7].

In Italia, al contrario che in altri paesi europei o negli Stati Uniti, avviene più frequentemente la rifunzionalizzazione di edifici e manufatti architettonici storici, o

comunque preesistenti, i quali possono avere una rilevante caratterizzazione decorativa; in questo caso “le qualità spaziali dell’edificio impongono al progetto di allestimento un colloquio serrato sia con le caratteristiche dimensionali degli ambienti, sia con il loro aspetto materico e il loro apparato decorativo”[21].

L’ambiente dove vengono allestite esposizioni di tipo culturale permanente o temporaneo può essere uno spazio interno, come un museo, un padiglione o un palazzo, oppure esterno, come una piazza o un parco. Tuttavia, sono stati esaminati solo gli ambienti interni, perché più frequenti, e quelli che con più probabilità vengono destinati ad esposizioni culturali sono:

- **Museo:** edificio progettato appositamente per ospitare esposizioni permanenti; possiede, quindi, ottime condizioni di spazio e illuminazione.
- **Casa-museo:** abitazione che è stata riconvertita in museo permanente e presenta come opere esposte gli oggetti di arredo della casa; lo studio virtuale del posizionamento risulta utile solo nel caso di esposizioni temporanee, le quali sarebbero però di ridotte dimensioni.
- **Palazzo:** edificio storico di grandi dimensioni che è stato parzialmente o totalmente riconvertito in luogo espositivo; presenta di solito particolare pregio architettonico e decorativo, a differenza di un comune edificio.
- **Villa:** residenza comunemente isolata dai centri abitativi che è stata riconvertita in ambiente espositivo, può presentare sia oggetti di arredo da sempre conservati in essa sia oggetti provenienti dall’esterno; come il palazzo anche la villa è una ambiente non



Figura 2.6 - Mostra “Where are we going?” - Palazzo Grassi, Venezia

neutro.

- **Castello:** complesso di edifici fortificati riadattati parzialmente per l'esposizione di oggetti di interesse solitamente storico/artistico; l'ambiente può essere idoneo all'utilizzo della tecnologia per realtà aumentata solo se l'illuminazione risulta adeguata.
- **Chiesa:** edificio dedicato al culto religioso messo a disposizione temporaneamente per esposizioni; la scarsa illuminazione probabilmente non consente un'ottimale simulazione virtuale.
- **Edificio generico:** spazio pensato appositamente per esposizioni o, in caso contrario, scelto per le buone caratteristiche di spazialità ed illuminazione. Solitamente è un ambiente neutro dal punto di vista estetico ed adatto all'uso della tecnologia in esame.
- **Padiglione:** costruzione provvisoria o permanente appositamente studiata per esposizioni culturali o commerciali; l'ambiente è esteticamente neutro e presenta adeguati spazi e illuminazione per l'uso del posizionamento virtuale degli oggetti.
- **Università:** gruppo di strutture scientifiche destinate all'istruzione e alla ricerca, nelle quali vengono ricavati degli spazi per l'allestimento di mostre temporanee; l'ambiente è solitamente neutro e ben illuminato.

Gli ambienti più diffusi e dove più frequentemente vengono organizzate mostre culturali sono ovviamente i musei e gli edifici generici usati come aree espositive, perché mediamente possiedono buona distribuzione e disponibilità di spazi interni ed illuminazione adeguata; seguono palazzi, università, castelli e padiglioni; questi ambienti sono infatti destinati alla maggior parte delle mostre culturali e vengono chiamati musei, gallerie, fondazioni o associazioni culturali, a seconda del tipo di evento che contengono e del genere di organizzazione che li gestisce.

Esistono altri ambienti nei quali possono essere organizzate esposizioni culturali, come biblioteche, teatri, stazioni, aeroporti, aree dismesse; tuttavia le esposizioni organizzate in questi luoghi, oltre che essere poco frequenti, quasi mai richiedono un'accurata pianificazione dello spazio.

2.6 - CONTENUTI

Siccome la simulazione virtuale dell'allestimento prevede l'analisi di tutti i contenuti dell'esposizione, è importante comprendere quali sono gli elementi più frequenti per i quali è necessario ottenere il modello digitale. Il contenuto della mostra rappresenta tutto ciò che si desidera inserire nell'ambiente espositivo e comprende sia il materiale esposto sia le strutture dell'allestimento; quest'ultime comprendono a loro volta un'ampia varietà di elementi, ognuno dei quali presenta una o più funzioni. Le strutture espositive, dal punto di vista della simulazione, risultano importanti tanto quanto le opere, perché, per qualsiasi contenuto inserito nell'ambiente, deve essere valutato l'aspetto visivo e studiate le relazioni con gli elementi circostanti.

Il materiale che viene presentato all'interno di un evento espositivo può comprendere sia oggetti fisici sia concetti non tangibili; in questo studio viene analizzata solo la prima categoria perché maggiormente adatta alla simulazione, tuttavia non viene esclusa la possibilità di simulare l'allestimento di esposizioni che presentano solo concetti astratti, i quali verrebbero comunque trasmessi mediante immagini, fotografie e/o supporti di vario tipo.

2.6.1 - OGGETTI ESPOSTI

La classificazione degli oggetti che vengono esposti in una qualsiasi mostra è un'operazione complessa, data l'immensa varietà di caratteristiche che essi possiedono e l'elevato numero di criteri secondo i quali essi possono essere raggruppati.

Gli oggetti di una collezione vengono solitamente classificati in base all'autore, al soggetto o all'anno di realizzazione; all'interno di una mostra gli oggetti possono essere raggruppati tra loro in sezioni che differiscono tra loro per argomento, luogo di origine o periodo storico. In generale le esposizioni vengono distinte in base alla tipologia delle unità esposte o ai macro-argomenti nei quali si suddividono l'arte, la storia o la scienza; se esse, invece, appartengono allo stesso macro-argomento possono essere



Figura 2.7 - Statua divinità (Sekhmet) - Museo Egizio, Torino

distinte in base ai criteri menzionati precedentemente.

La classificazione degli oggetti che è utile sviluppare per i fini di questo studio non riguarda però i criteri sopracitati, bensì le caratteristiche formali, dimensionali e materiche; le unità che traggono maggiore vantaggio dalla simulazione virtuale vengono identificate mediante le seguenti proprietà: lo sviluppo spaziale, il volume, la difficoltà di movimentazione.

1 - Lo **sviluppo spaziale** rappresenta il numero delle direzioni nello spazio verso le quali l'oggetto si estende in

maniera prevalente. La simulazione dell'allestimento consente di studiare la posizione dell'oggetto e la sua illuminazione, dunque, privilegia lo studio di opere con sviluppo tridimensionale, soprattutto se l'ambiente consente di osservarle da un qualunque punto di vista; risulta conveniente studiare anche oggetti con sviluppo bidimensionale o monodimensionale, ma solo nei casi in cui essi non vengono posizionati a parete.

2 - Il **volume** dell'oggetto è significativo, in quanto la simulazione dell'allestimento è utile per valutare in modo complessivo la disposizione di varie unità di media grandezza. Gli oggetti molto grandi hanno come limitazione la dimensione dell'ambiente, anche se non costituiscono un problema rilevante per la simulazione digitale; gli oggetti eccessivamente piccoli, invece, vengono di solito raggruppati ed esposti in vetrine, le quali rappresentano un sotto-ambiente che può essere studiato in modo separato.

3 - La **difficoltà di movimentazione** degli oggetti dipende a sua volta da vari fattori, come il peso, la fragilità e il valore intrinseco, queste caratteristiche comportano dei requisiti di cautela maggiori per lo spostamento degli oggetti, i quali potrebbero richiedere l'uso di macchine per la collocazione nell'ambiente. In tutti i casi in cui il dislocamento

degli oggetti deve essere effettuato con grande attenzione per evitare danneggiamenti, l'uso della simulazione virtuale, che consente di predeterminare in modo accurato la posizione e l'effetto visivo complessivo, risulta essere molto vantaggiosa.

I criteri di selezione elencati sono validi per individuare i tipi di oggetto che maggiormente traggono vantaggio dal progetto virtuale di allestimento della mostra, ma per dare un'idea delle opere che rispondono a questi requisiti può risultare utile selezionare delle categorie che più frequentemente presentano questo tipo di unità. Questo può essere effettuato grazie alla classificazione ICCD (Istituto Centrale per il Catalogo e la Documentazione) del ministero per i Beni e le Attività Culturali, nella quale è presente la suddivisione del materiale, delle collezioni o delle unità conservate per tipologia. In questa classificazione è possibile individuare: Opere e oggetti d'arte (OA), Opere d'arte contemporanea (OAC), Beni storico scientifici (STS), Reperti archeologici (RA) e Strumenti musicali (SMO). Altre categorie, tra cui Disegno, Fotografia, Beni numismatici e Beni naturalistici, non presentano solitamente le caratteristiche necessarie per usufruire della simulazione.

2.6.2 - STRUTTURE DELL'ALLESTIMENTO

L'allestimento, inteso come oggetto, è l'insieme di tutte le strutture fisiche presenti all'interno dell'ambiente espositivo che fanno da ausilio alla comunicazione e alla sicurezza; esso ha il compito di far risaltare l'importanza degli oggetti esposti, facendoli divenire i protagonisti dell'esposizione e si differenzia, quindi, dall'installazione, nella quale ciò che è esposto assume minor rilievo[21].

La scelta delle strutture dell'allestimento cambia in base al tipo di ambiente e di esposizione. Nelle esposizioni permanenti vengono scelti materiali duraturi nel tempo, un'illuminazione che favorisca la visione oggettiva delle unità ed una caratterizzazione adatta ad un pubblico eterogeneo; diversamente avviene nelle mostre temporanee,

nelle quali vengono utilizzate tecnologie e materiali innovativi, a volte insoliti, e componenti di rapido assemblaggio e costi ridotti[14].

Nel caso in cui la componente estetica del luogo necessita di valorizzazione e conservazione, come frequentemente succede per le esposizioni in territorio nazionale, le scelte progettuali che potrebbero essere applicate vengono limitate. In generale sono due i percorsi progettuali che possono essere intrapresi in queste situazioni: nel primo caso lo spazio non viene modificato e il percorso dell'esposizione viene arricchito dall'apparato decorativo della struttura; nel secondo caso gli elementi decorativi vengono nascosti, completamente o parzialmente, attraverso schermature e pareti, e viene generato un nuovo spazio di fruizione[21].

In entrambi i casi emergono due punti importanti: la reversibilità dell'intervento e la sua limitazione allo stretto necessario; riguardo il solo primo caso, invece, è necessario che l'allestimento offra "simultaneamente la possibilità di leggere l'oggetto esposto e permettere la percezione dell'edificio"[6]. Questi parametri sono importanti sia per i requisiti di bassa intrusività richiesti dalle strutture ospitanti, sia, se si tratta di mostre temporanee, per la provvisorietà dell'evento. Un altro elemento importante che deve essere considerato è il cambiamento in atto nella società, la quale richiede un genere di allestimento che risponda a necessità di informazione e coinvolgimento, facendo assumere all'esposizione un sempre maggiore valore didattico o ricreativo[6].

A fronte di queste esigenze, la struttura allestitiva e le modalità con la quale essa viene progettata presentano un'evoluzione rispetto al passato, grazie anche ai nuovi materiali e tecniche costruttive disponibili.

Le strutture dell'allestimento possono avere funzioni di supporto, di illuminazione, di informazione, scenografiche, di sicurezza e di intrattenimento ricreativo; ovviamente le strutture possono contenere più funzioni, come ad esempio elementi di supporto che garantiscono sia la corretta visione sia la protezione dell'oggetto. Per qualunque tipo di struttura, così come per le opere da esporre, può essere simulato virtualmente il posizionamento, e deve quindi essere ottenuto il modello virtuale.

Le strutture espositive di base hanno il compito di sostenere e mantenere gli oggetti esposti in una posizione adeguata all'osservazione da parte del visitatore; esse possono essere costruite "ad Hoc" per l'esposizione o anche per i singoli oggetti, tuttavia, soprattutto in ambito museale, esistono delle categorie standard di supporti che vengono prodotti industrialmente: le vetrine, i piedistalli e gli espositori. Le vetrine sono dei locali miniaturizzati e protetti che, talvolta, fanno da mediazione tra le piccole dimensioni dell'oggetto e l'ampio spazio della galleria[12]. Le vetrine, a seconda delle caratteristiche dell'oggetto e della



Figura 2.8 - Vetrine centrali - Museo dell'ambiente, Lecce

loro disposizione all'interno dell'ambiente espositivo, possono ulteriormente essere classificate in: vetrine a parete, centrali e orizzontali, ognuna delle quali può possedere varie suddivisioni o ripiani al suo interno. I piedistalli, al contrario delle vetrine, non costituiscono un involucro protettivo, ma hanno la sola funzione di sollevare l'oggetto all'altezza visiva opportuna, come se fosse una porzione di pavimento demarcata[12]. Anche gli espositori non proteggono gli oggetti da intrusione esterna, ma, nonostante la struttura più semplice, accolgono solitamente più unità e le mantengono nella posizione corretta; anche per essi esistono varie categorie, tra cui gli espositori a parete, monofacciali e per lastre pavimentali. Ognuno di questi supporti può avere struttura modulare e, quindi, può essere posizionato nello spazio in combinazioni complesse.

Le strutture con funzione di illuminazione comprendono tutte le sorgenti luminose presenti nell'ambiente espositivo. I sistemi di illuminazione vengono scelti in base alla modalità espositiva desiderata e devono garantire sia l'illuminazione generale

dell'ambiente sia la luce d'accento su ogni singolo elemento che deve essere posto all'attenzione del visitatore[22]. Questi elementi fanno parte dell'argomento illuminotecnico e vengono ampiamente analizzati successivamente.

Le strutture di informazione comprendono tutti quegli elementi che, singolarmente o integrati in altre strutture, forniscono informazioni generali sull'esposizione e descrizioni di dettaglio delle opere. Tra di esse si trovano le didascalie, i pannelli, ma anche le postazioni multimediali. Le didascalie sono solitamente integrate ai supporti e sono il primo strumento di informazione delle opere esposte. I pannelli sono elementi distinti che possono avere diversi livelli di approfondimento, a seconda che trattino informazioni riguardo un singolo oggetto, un gruppo di oggetti, una stanza o l'esposizione in generale[5]. Le postazioni multimediali rappresentano un elemento innovativo all'interno dell'ambiente espositivo e possono fornire, oltre che informazioni riguardo la mostra, gli autori e le opere, anche servizi di intrattenimento ricreativo.

Oltre a tutti questi tipi di strutture, all'interno della mostra deve essere progettato l'impianto tecnologico, il quale comprende le connessioni alla rete informatica ed energetica; la posizione delle prese elettriche e dei cavi deve essere definita in contemporanea o successivamente il progetto della disposizione delle altre strutture.

3 - LIGHTING DESIGN

Il design dell'illuminazione comprende molti ambiti di applicazione e non è una disciplina isolata, bensì è integrata a vari settori progettuali, quali l'interior design, l'architettura, l'ergonomia, il design di prodotto e l'ingegneria elettrica. La conoscenza illuminotecnica è uno strumento importante per il progettista perché consente di definire l'adeguata illuminazione degli spazi, senza la quale, in qualsiasi settore di progetto, gli obiettivi non vengono pienamente raggiunti[23]. In tempi recenti le tecnologie per l'illuminazione si sono notevolmente espanse e sono diventate più complesse da gestire, rivelando la necessità di professioni tecniche specifiche.

Il design dell'illuminazione possiede generalmente come obiettivi il comfort della persona[1], il risparmio energetico e la generazione di particolari effetti visivi; recentemente tutti questi aspetti stanno diventando sempre più rilevanti nel progetto d'interni.

Negli anni recenti il dinamismo della luce si è rivelato una tendenza importante, prendendo come modello la luce naturale; come il cambiamento delle condizioni di illuminazione causate dalla posizione del sole e dal movimento delle nuvole, la luce artificiale può essere variata e programmata in intensità, colore e direzione. Questi nuovi scenari consentono l'armonizzazione della luce al passare del tempo ed evitano condizioni monotone di illuminazione, stimolando i sensi e prevenendo sintomi di affaticamento.



Figura 3.1 - Salone dell'Ercole - GNAM, Roma

L'efficienza energetica senza perdite di qualità è una delle sfide poste ai designer dai problemi energetici e di cambiamento climatico; l'utilizzo delle nuove tecnologie e lo studio dei livelli di illuminazione ha come obiettivo la riduzione degli sprechi mediante l'assegnazione delle quantità di luce appropriate per ogni ambiente e situazione[24]. La luce viene inoltre progettata per creare atmosfere particolari negli ambienti e per attrarre il pubblico visitante, oltre che per strutturare lo spazio e fornire aiuto all'orientamento; gli aspetti comunicativi dell'illuminazione sono oggi diventati ancora più efficaci grazie alle nuove tecnologie e alla mescolanza di tecniche appartenenti a settori differenti.

All'interno di questo percorso di tesi l'ambito illuminotecnico viene approfondito perché, associato al tema della simulazione dell'allestimento di esposizioni culturali, risulta particolarmente importante ai fini della valutazione dell'impatto comunicativo e dei fenomeni di alterazione causati dalla luce.

In questo capitolo, dopo aver introdotto la disciplina illuminotecnica, viene proposto un approfondimento legato all'illuminazione per ogni argomento trattato precedentemente; vengono inoltre identificati gli elementi principali che andrebbero inseriti nella scena virtuale, con l'obiettivo di analizzare la simulazione dell'illuminazione all'interno degli ambienti espositivi.

3.1 - ILLUMINOTECNICA

L'illuminotecnica è quel settore della progettazione che si occupa dell'illuminazione di ambienti, sia interni che esterni, utilizzando sia luce naturale che artificiale; essa si basa sul calcolo delle radiazioni luminose, con obiettivo la valutazione quantitativa e qualitativa della luce, ma fa riferimento a conoscenze interdisciplinari, tra cui psicologia, architettura ed elettrotecnica. L'analisi illuminotecnica viene effettuata per scegliere o valutare gli apparecchi di illuminazione di un ambiente; la progettazione dell'impianto di illuminazione dipende dai requisiti illuminotecnici, dalle proprietà fisiche e geometriche

dell'ambiente e dai mezzi disponibili per la realizzazione del sistema.

I requisiti illuminotecnici sono determinati dal livello di illuminamento che le superfici richiedono, rispondendo a requisiti estetici, ergonomici o conservativi. Per quanto riguarda il caso in esame gli ambienti presi in considerazione sono quelli a struttura chiusa, nella quale l'illuminamento dipende sia dal flusso diretto proveniente dalle sorgenti sia dai flussi riflessi e diffusi dalle pareti; questo comporta un calcolo più complicato rispetto a situazioni di ambienti aperti. I flussi rinviati dalle pareti possiedono una diversa composizione spettrale rispetto ai flussi diretti, a causa degli assorbimenti selettivi provocati dagli elementi colpiti; essi sono inoltre caratterizzati da una distribuzione spaziale e relativi effetti luminosi di tipo diffuso[14].

Il calcolo illuminotecnico è molto complesso e dispendioso perché dipende dal comportamento estremamente vario della luce distribuita all'interno di un ambiente, e dipende dal numero e dalle caratteristiche delle sorgenti luminose e dalle proprietà materiche di tutti gli oggetti presenti nello spazio analizzato. Il calcolo di precisione viene effettuato mediante l'utilizzo di computer e software specifici, grazie ai quali è possibile confrontare e valutare soluzioni progettuali differenti e apportare modifiche e correzioni prima della realizzazione definitiva, ma il processo richiede molto tempo, risorse e competenze.

I software di illuminotecnica permettono di valutare un elevato numero di parametri scegliendo il livello di precisione desiderato, ma, a causa della complessità del calcolo e dalla conseguente difficoltà a raggiungere risultati fedeli alla realtà in tutte le condizioni, devono ricorrere ad approssimazioni; spesso è necessario scegliere quali effetti luminosi e caratteristiche materiche rappresentare al meglio ed è obbligatorio raggiungere un compromesso tra qualità e tempo di calcolo[25].

Per mettere in relazione il comportamento fisico della radiazione elettromagnetica e le sensazioni percepite dall'occhio ed elaborate dal cervello, l'illuminotecnica fa uso di discipline psicofisiche quali la fotometria e la colorimetria, le quali riguardano rispettivamente la luce e il colore percepiti.

3.1.1 - FOTOMETRIA

“I principi fondamentali e le grandezze illuminotecniche derivano dalla fotometria, disciplina che studia la luce in funzione dello stimolo prodotto sull’occhio umano”[8]; lo studio della luce è infatti rilevante solo se applicato in funzione degli stimoli recepiti dal sistema visivo, il quale però è diverso da persona a persona. Per questo motivo è stata da tempo definita una curva di visibilità standard, ottenuta da rilevamenti statistici in varie condizioni di visibilità; essa viene chiamata funzione di efficienza luminosa e viene usata per “pesare” le radiazioni nel campo del visibile ed ottenere l’effettiva percezione dell’occhio.

Dalle grandezze radiometriche, le quali descrivono la luce in termini di potenza assoluta, è possibile ricavare le grandezze fotometriche; tra di esse le più importanti sono[14]:

1 - Il **flusso luminoso**: ha come unità di misura il lumen (lm) ed indica la quantità di energia luminosa (da 380 a 780 nm) emessa nell’unità di tempo; questa grandezza è una misura di potenza energetica, ma è pesata in relazione alla curva di visibilità dell’occhio umano.

2 - L’**illuminamento**: ha come unità di misura i lux (lx) ed esprime il rapporto tra il flusso luminoso e l’area della superficie colpita; a differenza del flusso luminoso, l’illuminamento viene solitamente associato agli ambienti e alla superficie cui fa riferimento.

3 - L’**intensità luminosa**: ha come unità di misura la candela (cd), è una grandezza vettoriale ed indica il rapporto tra il flusso luminoso emesso in una certa direzione da una sorgente e un angolo solido; la sorgente luminosa viene considerata come puntiforme e la rappresentazione nello spazio dei vettori uscenti da essa si chiama solido fotometrico.

4 - La **luminanza**: ha come unità di misura la candela al metro quadro (cd/m²) ed è il rapporto tra l’intensità luminosa emessa da una superficie in una direzione e la sua area; la luminanza è una grandezza che può dare indicazione della sensazione di luminosità ricevuta da una sorgente luminosa, sia primaria (corpo che emette luce) sia secondaria

(corpo che riflette la luce).

5 - La **riflettanza**: è una grandezza adimensionale e rappresenta il rapporto tra il flusso luminoso riflesso da una superficie e il flusso incidente sulla stessa; in base alle caratteristiche superficiali dei materiali la radiazione riflessa può avere un comportamento più o meno vicino a due estremi teorici: la riflessione perfettamente diffondente e la riflessione perfettamente speculare.

6 - La **trasmittanza**: è una grandezza adimensionale che indica il rapporto tra il flusso luminoso trasmesso dal materiale e il flusso incidente; come per la riflessione, anche la trasmissione delle radiazioni può possedere un comportamento intermedio tra due estremi: perfettamente diffondente e perfettamente trasparente.

7 - L'**assorbimento**: è anch'esso adimensionale ed esprime il rapporto tra il flusso luminoso assorbito dal materiale e il flusso incidente.

Le grandezze descritte fanno riferimento alla visione diurna, chiamata "fotopica", la quale corrisponde a livelli di luminanza percepita superiori ai 3 cd/m²; nel caso di luminanza percepita inferiore ai 0,001 cd/m² la visione viene chiamata "scotopica" e si presenta in situazioni notturne, mentre nel caso intermedio la visione viene chiamata "mesopica". Siccome la sensibilità ai colori da parte dell'occhio umano varia in base al livello di luminanza percepita, è necessario tenere in considerazione, durante la scelta di sorgenti e accessori, il tipo di situazione ambientale nella quale ci si trova[14].

3.1.2 - COLORIMETRIA

La colorimetria è una disciplina che ha come obiettivo la descrizione e la quantificazione della percezione umana del colore; essa fa riferimento alla teoria del tristimolo, secondo la quale ogni colore può essere riprodotto mediante la combinazione dei tre colori fondamentali. Le lunghezze d'onda di questi tre colori "corrispondono ai valori di massima sensibilità dell'occhio nel rosso, nel verde e nel blu per i tre tipi di recettori specifici di ciascun colore esistenti nella retina (i coni)"[26]. La presenza di fotorecettori

sensibili in modo non uniforme allo spettro luminoso è la causa di un fenomeno chiamato “metamerismo”, secondo il quale è possibile percepire nello stesso modo spettri di riflettanza anche molto diversi[14].

Il principio di miscelazione dei colori da cui prende spunto la teoria del tristimolo viene chiamato sintesi additiva; essa si riferisce alla somma di fasci luminosi a diversa frequenza ed è alla base del funzionamento degli schermi a colori, nei quali sono presenti tre fosfori corrispondenti ai tre colori primari (RGB). La sintesi sottrattiva fa, invece, riferimento alla mescolanza di pigmenti o alla somma di filtri semitrasparenti e alle colorazioni determinate dall'assorbimento delle frequenze complementari.

I modelli di percezione cromatica dell'uomo sono stati codificati dalla CIE (Commission International de l'Eclairage) tramite misure sperimentali basate sulla valutazione da parte di un campione di osservatori. La misura del colore è stata effettuata mediante il confronto, da parte dell'osservatore medio, tra una superficie illuminata

con luce monocromatica di lunghezza d'onda conosciuta ed una superficie perfettamente bianca illuminata da tre sorgenti regolabili, corrispondenti ai tre colori fondamentali.

Grazie a questi studi è stato possibile racchiudere tutti i colori in un diagramma di cromaticità, chiamato anche triangolo del colore, il quale “rappresenta le tinte e i livelli di saturazione a energia luminosa costante”[14]. Per definire completamente un colore è però necessario aggiungere un parametro chiamato “chiarezza”, il quale può essere rappresentato, come nel famoso albero dei colori di Munsel, utilizzando la terza

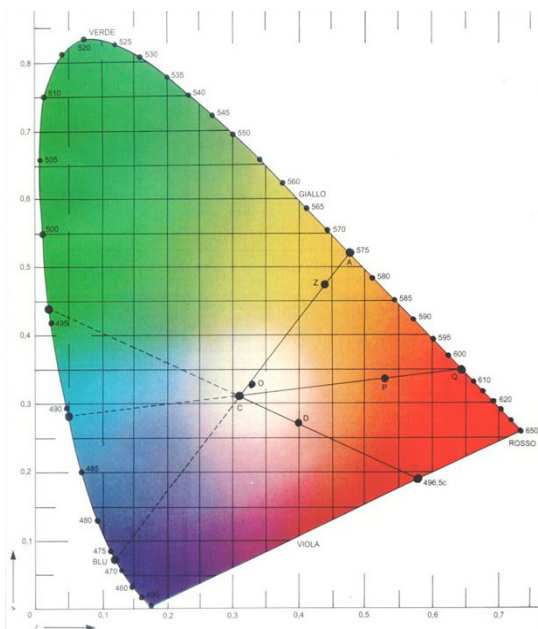


Figura 3.2 - Diagramma di cromaticità

dimensione ortogonale al piano.

La cromaticità, la saturazione e la chiarezza sono le uniche proprietà della luce che l'occhio umano è in grado di percepire[27] e la loro variabilità può essere descritta quantitativamente mediante gradi di sensazione intermedi ricavati da indagini statistiche. La misurazione di queste proprietà è necessaria per valutare le differenze tra colori diversi, le quali dipendono però dal giudizio dell'osservatore umano, che non si basa solamente su fenomeni fisici e fisiologici, ma anche psichici. Infatti la percezione del colore non dipende solamente dalle caratteristiche oculari, ma anche dalle vie neurali che trasmettono le informazioni e dall'elaborazione del cervello; ad esempio, la naturale tendenza dell'uomo ad individuare quattro colori elementari (rosso, verde, giallo e blu) dipende dal meccanismo di trasporto dell'informazione da parte dei neuroni[28].

3.2 - PROGETTO DELL'ILLUMINAZIONE

Come per il progetto dell'allestimento, il progetto dell'illuminazione all'interno di un'esposizione culturale risulta particolarmente complesso perché dipende dal coordinamento di un'ampia varietà di discipline e dalla gestione di numerose variabili tecniche[29].

Il progetto dell'illuminazione segue una procedura che è strettamente connessa con l'analisi dello spazio, del percorso, delle unità esposte, dei colori e materiali selezionati per l'allestimento, dando luogo ad una fusione armonica di tutti gli elementi[8]; esso è integrato al progetto generale dell'ambiente espositivo, quindi le sue fasi si svolgono in contemporanea alle decisioni che riguardano gli altri aspetti progettuali e ne vengono influenzate.

Inizialmente vengono identificati i parametri principali di progetto mediante l'analisi dell'ambiente, la definizione dei requisiti di conservazione, comunicazione e comfort, in rapporto alle attività svolte all'interno. Di grande importanza è la comprensione delle

condizioni architettoniche dell'ambiente ospitante e gli eventuali vincoli che possono condizionare e limitare le soluzioni progettuali; gli elementi che più frequentemente influenzano il progetto di illuminazione sono: la disposizione e la dimensione delle aperture, l'altezza del soffitto, le strutture, le pareti e i loro materiali. Nel caso l'edificio scelto sia già esistente tutti questi fattori devono essere analizzati e registrati, mentre se si tratta di un nuovo edificio in fase di pianificazione la scelta dell'illuminazione può influenzarne il progetto[23].

In ambito espositivo, il progetto della luce deve prima tenere conto, se necessario, della conservazione degli oggetti, e successivamente della loro valorizzazione[5]; questo implica la determinazione di vincoli specifici per la sicurezza delle unità esposte, le quali possono avere diversi livelli di sensibilità alla luce. In seguito vengono analizzati i parametri generali che definiscono le sensazioni ambientali e l'atmosfera desiderati, nonché l'apparenza generale e gli effetti psicologici generati, quindi la qualità del colore, l'intensità e l'uniformità dei flussi, l'efficienza e la flessibilità. Queste ultime sono caratteristiche generali della qualità della luce e non si riferiscono alla selezione delle sorgenti, bensì all'identificazione degli obiettivi e dei vincoli a cui la progettazione deve sottostare.

Successivamente vengono definiti i vari livelli di illuminazione, anche in relazione alle scelte che riguardano l'uso dell'illuminazione naturale, artificiale o mista. Nell'ambiente espositivo, così come avviene per qualsiasi altro ambito che richiede uno studio illuminotecnico, l'illuminazione viene suddivisa in tre famiglie principali: la luce d'ambiente, la luce zonale e la luce d'accento. Il progetto di luce stratificato è più efficiente rispetto all'illuminazione uniforme dello spazio perché nell'ambiente sono presenti elementi e superfici che possiedono livelli di importanza differenziati[23].

L'illuminazione ambientale viene garantita dalla disposizione organizzata nello spazio di varie sorgenti luminose, le quali hanno il compito di illuminare i piani principali di una stanza, ovvero il soffitto, il pavimento e i piani verticali che non interessano gli oggetti.

Essa genera illuminazione di fondo che determina il livello di contrasto rispetto agli oggetti ma, a volte, dopo aver studiato gli altri livelli di illuminazione, può anche risultare non necessaria; la luce ambientale è solitamente di tipo diffuso e può comprendere anche la luce naturale proveniente dall'esterno.

La luce zonale raggruppa superfici o elementi che richiedono un livello di luminanza differenziato dall'ambiente circostante, con l'obiettivo di far percepire un collegamento tra le parti coinvolte.

La luce d'accento viene originata da una o più sorgenti luminose che hanno il compito di illuminare un singolo elemento, per fare in modo che esso risalti rispetto all'ambiente circostante ed assuma determinati effetti visivi connessi al tipo di apparecchio utilizzato[29].

Esistono anche altre famiglie di illuminazione che in uno spazio espositivo sono meno frequenti, come il livello decorativo, che ha come obiettivo l'ornamento dello spazio, e il livello delle funzioni, il quale ha il compito di illuminare specifiche attività che vengono eseguite nell'ambiente.

Grazie alle informazioni ricavate viene effettuata la scelta e il posizionamento delle sorgenti e degli apparecchi di illuminazione, in modo che rispondano ai criteri stabiliti; nella maggioranza dei casi la selezione di questi elementi è un processo interattivo nel quale i fattori di selezione di ognuno vengono considerati in relazione al sistema di cui fanno parte[23]. In questa fase viene confermata la disposizione delle sorgenti luminose, in base sia ai requisiti di comfort, conservazione e comunicazione, sia alla scelta effettiva degli apparecchi, i quali possono presentare differenze rispetto all'ipotesi iniziale.

Oltre ai criteri già citati, per la scelta degli apparecchi risulta importante anche il costo e la compatibilità estetica rispetto all'ambiente circostante; la forma, lo stile, i materiali e i colori di lampade e strutture devono integrarsi all'architettura circostante.

3.3 - OBIETTIVI

Nel settore espositivo la luce non ha il solo compito di illuminare gli oggetti nel modo più consono alla comodità di fruizione, ma possiede anche come obiettivo la critica e l'interpretazione del materiale esposto, attraverso l'attribuzione di livelli di importanza differenziati e l'indicazione dei punti di osservazione[5]. La sua importanza risiede inoltre nell'analisi della radiazione elettromagnetica diffusa all'interno dell'ambiente espositivo, a fronte dell'eventuale necessità di cura e conservazione richiesta dal patrimonio artistico e culturale esposto.

Il progetto dell'illuminazione di un'esposizione possiede gli stessi obiettivi primari del progetto generale dell'allestimento; la luce agisce infatti come strumento comunicativo e i suoi parametri caratteristici vengono controllati per garantire la conservazione dei contenuti.

Attualmente l'evoluzione del progetto illuminotecnico all'interno degli spazi espositivi avviene con lo scopo di assicurare il comfort visivo dei visitatori e di permettere la valutazione espressiva d'insieme dell'ambiente. A fronte di questi obiettivi le fonti luminose presentano un progressivo miglioramento in termini di flessibilità, qualità della radiazione emessa, costanza delle prestazioni ed impatto visivo degli apparecchi; alcune tecnologie recenti che possiedono queste caratteristiche sono le fibre ottiche e i LED, l'utilizzo dei quali ha avuto un grande impatto sull'odierna industria dell'illuminazione[14].

3.3.1 - COMFORT E COMUNICAZIONE

L'illuminotecnica può essere applicata a moltissimi ambiti, ma all'interno della sfera comunicativa delle esposizioni essa "rappresenta una componente essenziale che assume il ruolo di strumento finalizzato alla percezione, senza il quale, semplicemente, l'esperienza visiva non può essere completata"[29]. La percezione visiva delle

opere, dell'ambiente, delle strutture e degli effetti, nonché l'efficacia comunicativa, dipendono in gran parte dalle condizioni di illuminazione, le quali sono responsabili dell'armonizzazione di volumi, cromatismi e contrasti[1].

La definizione dello spettro, dell'intensità e della direzione dei flussi luminosi consente di concentrare la luce su alcune zone e occultarne altre, permette di esaltare i contorni degli oggetti, dare consistenza alle superfici, generare ombre e penombre, creare o annullare la profondità, far risaltare forme e colori; la luce, attraverso questi effetti, può inoltre avere un forte potere evocativo, suggestionare ed emozionare[30]. Infatti, tanto i parametri fisiologici quanto quelli psichici, quali l'andamento ormonale, la temperatura corporea, l'umore, l'attività cognitiva[14], sono influenzati dai livelli di illuminamento, dalla configurazione spettrale dell'emissione, dalla temperatura di colore e dalla dinamicità della luce[14]; le risposte emotive e di gradimento relative all'illuminamento di un ambiente dipendono inoltre dal tipo di osservatore, in riferimento al sesso e all'età.

Gli obiettivi che riguardano gli aspetti comunicativi dipendono dal tipo di esposizione culturale in esame, e da essi consegue la scelta delle fonti luminose. Se la mostra presenta opere d'arte che devono essere presentate in modo oggettivo, per le quali è necessario riprodurre fedelmente la percezione dei colori, la scelta ricade su sorgenti che possiedono uno spettro di emissione il più possibile simile a quello della luce naturale; le fonti luminose artificiali preferibilmente utilizzate sono quelle che hanno uno spettro continuo, valori di illuminamento costanti e buona resa dei



Figura 3.3 - Mostra *Acquae* - Chiesa di S. Apollinare, Bologna

colori, in modo da non alterare la lettura cromatica del materiale esposto[14].

Nelle mostre temporanee, invece, “l’illuminazione assume il ruolo di complemento essenziale all’allestimento o, meglio, diventa parte integrante dello stesso”[14]. In questo tipo di esposizioni la luce può essere usata per creare atmosfere particolari, attraverso l’alterazione cromatica e/o spaziale e, a volte, mediante variazioni dinamiche della stessa; a questo proposito possono, quindi, essere scelti gli apparecchi di illuminazione più vari tra quelli presenti in commercio.

Uno degli aspetti comunicativi dell’illuminazione riguarda la percezione degli elementi nella scena relativa ai riflessi e alle ombre generate. Le riflessioni speculari dipendono dalle peculiarità superficiali degli oggetti e dal tipo di luce incidente; esse cambiano in base al punto di osservazione e consentono di comunicare informazioni riguardo la forma e l’aspetto di un oggetto. Le ombre possono agevolare o impedire la comprensione tridimensionale di oggetti, profondità e distanze, e sono in grado di celare o mettere in evidenza i dettagli, i contorni e le texture; le ombre possono essere proprie, se generate dall’oggetto su se stesso, o portate, se causate da altri elementi sull’oggetto o viceversa. La densità, la definizione e la dimensione delle ombre dipende dalle distanze tra sorgente, oggetto e sfondo, e dal tipo di fascio luminoso emesso dagli apparecchi (concentrato o diffondente)[14].

Lo studio dell’illuminazione permette di conferire ad ogni area dell’ambiente l’appropriata quantità di luce, consentendo, oltre che il risparmio energetico, il comfort visivo adeguato per ogni attività svolta nell’ambiente. Un’altra azione mirata al miglioramento del comfort è l’eliminazione delle interferenze[30], le quali sono fenomeni di disturbo presenti tra l’opera e il visitatore e riguardano la direzione dei fasci luminosi e la posizione di finestre e vetri di protezione; l’errato posizionamento di questi elementi può comportare, ad esempio, fenomeni di abbagliamento. Queste sono situazioni nelle quali si ha perdita di comfort o riduzione della capacità visiva a causa di contrasto eccessivo o distribuzione inopportuna delle luminanze[14].

3.3.2 - CONSERVAZIONE

“La conservazione del patrimonio artistico e culturale è regolata da una normativa generale e accettata da diversi organismi internazionali”[14], quali l’ICOM e la CIE.

Il livello di illuminazione, in relazione al tempo di esposizione, viene quantificato in ore/lux e dipende dal tipo di opera e dalla sua resistenza alla luce; questo significa che illuminando un oggetto con alta intensità luminosa per poche ore è equivalente a illuminare lo stesso a bassa intensità per molte ore. Esistono alcune opere molto sensibili anche a livelli di illuminamento molto bassi, che obbligano quindi la visione a intervalli di tempo molto limitati[8]. I valori massimi di illuminamento, in relazione al tipo di materiale, sono misurabili tramite l’utilizzo di luxmetri, strumenti che permettono di registrare le radiazioni nel campo del visibile; le radiazioni UV e IR sono misurabili rispettivamente con uvimetri e termometri, ma con maggiore difficoltà[14].

Sono stati identificati quattro livelli di fotosensibilità dei materiali, tra i quali risulta che le unità più sensibili sono le pitture, i tessuti e le stampe, mentre i vetri, i metalli e le ceramiche presentano bassa sensibilità alla luce. Come già accennato precedentemente i danni causati dalla radiazione luminosa sono principalmente i seguenti[8]:

1 - radiazioni ultraviolette (UV - 100/380 nm): causano decolorazione ed infragilimento del materiale; queste lunghezze d’onda sono le più dannose perché trasportano più energia.

2 - radiazioni infrarosse (IR): sono causa del riscaldamento superficiale dei materiali e dell’accelerazione di altri processi di degrado.

3 - bande del violetto, del blu e in parte del verde (400/550 nm): sono causa di alterazioni di natura fotochimica.

La presenza di sorgenti luminose è anche causa di danni indiretti alle opere, perché provoca l’innalzamento della temperatura: il surriscaldamento dell’ambiente causato dagli apparecchi di illuminazione non riguarda solamente il fenomeno di irraggiamento, bensì comprende anche la conduzione e la convezione, causati dai meccanismi di accensione e funzionamento delle sorgenti[8].

Nelle esposizioni permanenti che presentano unità particolarmente sensibili, le quali richiedono bassi livelli di illuminamento e sistemi di illuminazione con schermature delle radiazioni dannose, deve essere raggiunto un “compromesso tra esigenze percettive e necessità di conservazione delle opere esposte”[14]. Diversamente, nelle esposizioni temporanee, i valori di illuminamento possono essere leggermente superati a favore del risultato visivo desiderato[8], consentendo una scelta più ampia tra le sorgenti disponibili in produzione.

3.4 - PROFILI PROFESSIONALI

Il compito di creare scenari luminosi, quindi l’uso di ombre, colori e chiaro scuri, è affidato al progettista degli allestimenti, affiancato dal curatore e dal tecnico delle collezioni i quali sono responsabili della conservazione delle opere e, dunque, interessati dal progetto illuminotecnico.

Se le dimensioni dell’organizzazione che gestisce l’esposizione lo consentono, il progettista può essere affiancato dalla figura professionale del lighting designer, quale tecnico addetto solamente all’ideazione e controllo dell’illuminazione dell’ambiente espositivo; questa scelta viene effettuata in ragione della complessità che il progetto illuminotecnico può assumere.

Il lighting designer è uno specialista che ha padronanza della fisica di generazione e distribuzione della luce ed è a conoscenza della psicologia e fisiologia della percezione visiva dell’uomo[31]. Solitamente il progettista illuminotecnico lavora come consulente su base contrattuale per l’architetto o il designer di interni; il servizio di questa figura professionale è maggiormente richiesto quando il progetto prevede illuminazione specializzata e l’estetica, l’atmosfera e l’espressività sono elementi critici.

Nonostante sia il lighting designer di professione ad essere pienamente coinvolto nell’attività progettuale della luce, il progettista dell’allestimento si occupa della gestione completa dello spazio, definendone i requisiti, progettando l’arredo, valutando

gli elementi architettonici e l'interazione con l'utente; egli, avendo una conoscenza illuminotecnica di base, può dialogare e guidare il lighting designer verso gli effetti luminosi desiderati[23].

In ogni caso, le situazioni nelle quali è richiesto il lavoro di un lighting designer prevedono un budget elevato, in assenza del quale le valutazioni sull'illuminazione ambientale vengono compiute dal progettista dell'allestimento.

3.5 - AMBIENTE

Esiste un elevatissimo numero di sorgenti luminose e relativi dispositivi, con smisurate possibilità di combinazioni e, quindi, di effetti di luce, per i quali però esiste un limite di utilizzo che riguarda l'integrazione con l'ambiente scelto per l'esposizione; questo è un problema che interessa quasi esclusivamente la realtà espositiva italiana e, come già spiegato precedentemente, riguarda il prevalente utilizzo di strutture preesistenti e di interesse storico/culturale come luogo scelto per le esposizioni.

In questi manufatti architettonici, dal punto di vista illuminotecnico, la luce naturale è difficilmente controllabile, non sono consentiti grandi interventi di trasformazione strutturale e l'integrazione con impianti di illuminazione può risultare difficoltosa se non impossibile[29]. Ne consegue che gli allestimenti progettati in ambienti di questo tipo vengano caratterizzati da leggerezza formale e reversibilità, fornendo, quindi, minori possibilità di innovazione, a favore, invece, della conservazione.

Nel momento in cui vengono individuate delle soluzioni che permettono di non guastare la struttura architettonica, emerge un ulteriore problema che riguarda la fusione visiva della stessa con gli elementi di illuminazione; le lampade sono prodotti tecnologici che possiedono e comunicano un certo valore estetico e funzionale, ma, facendo parte dell'allestimento, devono anche integrarsi nell'ambiente circostante e assumere un valore spaziale, relazionandosi ad ogni altro elemento materiale ed immateriale della stanza. Questo problema viene affrontato esponendo e valorizzando i corpi illuminanti,

oppure nascondendoli alla vista dell'osservatore; quest'ultimo procedimento risulta essere però di complessa gestione, soprattutto per le sorgenti destinate all'illuminazione d'accento.

3.5.1 - LUCE NATURALE

La luce naturale è un'importante sorgente di illuminazione degli ambienti espositivi perché, in alternativa alle fonti artificiali, consente il risparmio energetico; essa garantisce inoltre uno standard di qualità dello spettro al quale le sorgenti artificiali si confrontano[4]. L'apertura dell'edificio verso l'esterno concede anche altri vantaggi che riguardano la ventilazione e il riscaldamento dell'edificio e la vista verso l'esterno, in grado di creare un effetto positivo sulle persone.

Tuttavia, la luce naturale possiede notevoli svantaggi, quali la presenza di bande dello spettro dannose che richiedono la presenza di schermature e/o configurazioni



Figura 3.4 - Sala degli Orazi e Curiazi - Musei Capitolini, Roma

particolari della struttura espositiva, in modo da limitare l'intensità e lo spettro luminoso entrante. L'utilizzo della luce naturale comporta, quindi, considerazioni architettoniche rilevanti ed è difficoltoso applicarla ad edifici già esistenti e non progettati per scopi espositivi[23].

La luce naturale è inoltre variabile nel tempo, in parte prevedibile come il percorso del sole durante il giorno e l'anno, in parte imprevedibile come le condizioni metereologiche. Spesso vengono raggiunti dei compromessi illuminando un ambiente con sorgenti di natura mista, sia naturale che artificiale,

e a volte la variabilità della luce naturale proveniente dall'esterno viene compensata mediante l'accensione programmata di lampade dimmerabili[14].

3.6 - APPARECCHI DI ILLUMINAZIONE

Il settore espositivo possiede una vasta esperienza nello studio delle regole di presentazione e fruizione del materiale esposto; quando ad esso vengono applicati i principi dell'illuminotecnica si genera un metodo di sviluppo tecnico che, "da una parte accoglie le crescenti esigenze di miniaturizzazione e di innovazione nei materiali, per una maggiore praticità ed efficienza d'impiego, dall'altra ottimizza la resa cromatica, perfeziona le proprietà ottiche per effetti personalizzati su oggetti o superfici"[29].

Dal punto di vista tecnico le strutture di illuminazione possono essere raggruppate in due famiglie: le fonti luminose autonome e le fonti aggregate in sistemi componibili[29]. La prima famiglia comprende lampade a piantana, a sospensione, a plafone, a incasso, tutte soluzioni isolate e autosufficienti, mentre nel secondo gruppo si trovano aggregazioni di lampade su binari elettrificati, con supporti a geometrie variabili. Gli elementi della seconda famiglia risultano più flessibili e, dunque, adattabili alle varie situazioni; essi consentono inoltre la gestione informatizzata dell'impianto, rendendo più efficace ed economico l'utilizzo, velocizzando le azioni di controllo e manutenzione e consentendo un'ampia varietà di combinazioni illuminotecniche.

Gli apparecchi luminosi vengono solitamente classificati in base al modo in cui emettono luce nello spazio ed assumono denominazioni di uso comune che non descrivono però il loro comportamento fotometrico; quelli più diffusi sono[23]:

- apparecchi a luce diretta, i quali proiettano luce verso il basso ed includono molti degli apparecchi a plafone, a incasso e faretti.
- apparecchi a luce indiretta, che proiettano luce verso il soffitto ed includono molti apparecchi a sospensione ed alcune lampade portatili.
- apparecchi a luce diretta/indiretta, i quali emettono luce sia verso il basso che verso

l'alto, ma non lateralmente; includono vari apparecchi a sospensione, lampade da tavolo e da terra.

- apparecchi a luce diffusa, che emettono luce uniformemente in tutte le direzioni e comprendono molte delle lampade a sospensione, con bulbo classico e alcune lampade da tavolo e da terra.

- apparecchi asimmetrici, i quali proiettano luce in direzioni specifiche; tra di essi troviamo gli apparecchi wall washer.

- apparecchi orientabili, che proiettano luce in modo diretto ma verso direzioni preferenziali, e comprendono apparecchi per luce d'accento, flood light e lampade portatili.

Gli apparecchi di illuminazione sono costituiti da tre gruppi di componenti principali[14]:

1 - i **componenti elettrici**, che hanno la funzione di trasformare l'energia elettrica in energia luminosa; di questo gruppo fanno parte la sorgente luminosa, che è l'elemento principale dell'apparecchio, il portalampada e l'eventuale gruppo di alimentazione.

2 - i **componenti ottici**, che hanno la funzione di indirizzare il flusso luminoso, vengono suddivisi in due sottogruppi: i filtri ottici e i modulatori di flusso. Le lampade presenti in commercio possono già avere la sorgente integrata ad un sistema ottico, quale un riflettore o un rifrattore.

3 - i **componenti meccanici**, che hanno la funzione di "proteggere e fornire sostegno a tutti gli altri componenti"[14]: fra di essi emergono il corpo dell'apparecchio, i dissipatori termici, lo snodo, gli elementi di montaggio.

La scelta e la combinazione degli elementi dell'apparecchio di illuminazione deve tenere conto del genere di ambiente a disposizione, dal tipo di oggetto che deve essere illuminato e dall'effetto di luce desiderato. L'ambiente espositivo può determinare alcuni vincoli per quanto riguarda la scelta dei componenti strutturali, e, come gli oggetti, può richiedere determinati limiti di illuminazione; dai requisiti conservativi e dalle proprietà comunicative dipende la scelta degli effetti visivi, i quali incidono, quindi, sulla scelta delle sorgenti luminose e dei sistemi ottici applicati ad esse.

3.6.1 - SORGENTI LUMINOSE

La scelta delle sorgenti luminose da disporre nell'ambiente espositivo è una fase importante, non solo per i motivi già citati che riguardano l'estetica e la conservazione delle opere, ma anche perché "rappresenta un orientamento tecnico qualitativo che si colloca a monte della scelta degli apparecchi e dei relativi sistemi di componibilità"[29] e "perché l'individuazione di una precisa tipologia sottende la capacità del manutentore, presente o futuro, di garantire le sostituzioni a parità di caratteristiche tecniche"[29]. A seconda che si tratti di una esposizione permanente o temporanea, gli aspetti sopracitati assumono un peso diverso: nelle esposizioni temporanee è di grande importanza la componente emozionale e comunicativa, dunque l'atmosfera che presenta l'ambiente espositivo, mentre nelle esposizioni permanenti assumono maggior rilievo le valutazioni contro il danneggiamento degli oggetti e le possibilità di manutenzione e sostituzione.

Per quanto riguarda l'effetto luminoso prodotto, le sorgenti vengono contraddistinte da caratteristiche quali[29]: la geometria di flusso, la temperatura di colore, la resa cromatica e l'efficienza luminosa, oltre al flusso luminoso emesso, già descritto precedentemente.

1 - La **geometria di flusso** rappresenta la forma che il fascio luminoso possiede e dipende dalle caratteristiche ottiche della sorgente e dalla presenza o meno di filtri ottici. La radiazione luminosa può essere generata da una sorgente di tipo puntiforme, come il filamento in tungsteno di una lampada a incandescenza, oppure di tipo diffuso, come nel caso di una superficie tubolare di una lampada a fluorescenza. Questa differenza, data dai vari tipi di estensione del punto focale, è importante per determinare i contorni e, dunque, il livello di sfumatura del flusso luminoso. Nel caso in cui la sorgente venga integrata in un sistema ottico separato, la geometria di proiezione dipende da involucro e riflettore.

2 - La **temperatura di colore** di una sorgente luminosa viene misurata in gradi Kelvin (K) e si riferisce alla temperatura di un corpo nero ideale che irradia luce di tonalità comparabile a quello della sorgente. Generalmente la tonalità della luce viene definita

come calda o fredda, in base alla motivazione psicologica che collega l'idea di caldo ai colori come rosso e arancio e l'idea di freddo ai colori come bianco e azzurro; in realtà a basse temperature di colore corrispondono colori "caldi", e viceversa.

Mentre per le lampade a incandescenza la temperatura di colore del filamento può essere approssimata a quella di un corpo nero, per le sorgenti luminose che emettono luce grazie a processi alternativi alla radiazione termica viene associata la cosiddetta "temperatura di colore correlata" (CCT), la quale corrisponde alla temperatura di colore di un corpo nero che maggiormente si avvicina alla tonalità della sorgente.

3 - La **resa cromatica** indica la capacità di una sorgente luminosa di rendere fedelmente il colore degli oggetti ed usa come termine di paragone una sorgente di riferimento che ha temperatura di colore compatibile.

La resa cromatica rappresenta "il modo in cui alcuni pigmenti appaiono all'occhio umano quando sono illuminati da un dato tipo di lampada"[14] e viene espressa mediante l'indice di resa cromatica (Ra, o CRI, Color Rendering Index), che è un numero adimensionale compreso tra 0 e 100.

4 - L'**efficienza luminosa** (lm/W) corrisponde al rapporto tra il flusso luminoso e la potenza assorbita; questo parametro manifesta, quindi, il rendimento del processo di trasformazione dell'energia elettrica in radiazione luminosa, ma fa riferimento alla curva di visibilità dell'occhio umano. In alcuni casi è necessario considerare l'efficienza dell'intero apparecchio illuminante, a causa della difficoltà di focalizzazione di alcune lampade, per le quali la combinazione con riflettori può causare una rilevante perdita di efficienza[14].

Altri parametri che caratterizzano una sorgente luminosa, oltre a tutte le caratteristiche dimensionali, sono: il tempo di accensione, la potenza elettrica assorbita, la posizione di funzionamento, il decadimento del flusso luminoso, l'attacco elettrico, la presenza di riflettore e la durata di vita[32].

Le sorgenti luminose possono essere raggruppate in base al principio fisico che sta alla base del loro funzionamento: esistono lampade ad incandescenza, lampade a scarica in gas, lampade ad induzione e sorgenti con diodi ad emissione luminosa; tuttavia, a causa

di perfezionamenti specifici, alcune delle principali categorie di lampade vengono comunemente identificate in modo distinto nonostante presentino principi di funzionamento analoghi.

Il mercato delle sorgenti luminose è in continua evoluzione, ma attualmente possono essere identificati cinque gruppi principali di lampade[23]:

1 - Le **lampade ad incandescenza** generano radiazione luminosa mediante il surriscaldamento di un filamento metallico di tungsteno, attraverso il quale viene fatta passare corrente elettrica. L'elevata temperatura e il basso spessore

del filamento comportano una luce più chiara, ma l'evaporazione del metallo avviene più velocemente. Le sorgenti ad incandescenza hanno uno spettro di emissione continuo e l'indice di resa cromatica è generalmente pari a 100. Esse sono inoltre dimmerabili, ovvero è possibile variarne l'intensità luminosa per mezzo di potenziometri e alimentatori elettronici, ma, rispetto ad altri tipi di lampada, hanno durata di vita breve e bassa efficienza luminosa.

2 - Le **lampade ad alogeni** possiedono lo stesso principio di funzionamento delle lampade ad incandescenza, ma, all'interno del bulbo, contengono una piccola quantità di gas alogeno che impedisce l'evaporazione del tungsteno. Per questo motivo il filamento è più sottile, genera una luce più bianca ed ha durata di vita maggiore. Le lampade alogene sono dimmerabili, presentano un indice di resa cromatica elevato (95-100) e sono più efficienti delle lampade a incandescenza tradizionali. Per queste lampade è però importante la posizione di funzionamento, perché, se errata, può causare la rottura del filamento.

3 - Le **lampade fluorescenti** sfruttano il principio della fluorescenza: all'interno della



Figura 3.5 - Varietà di sorgenti luminose

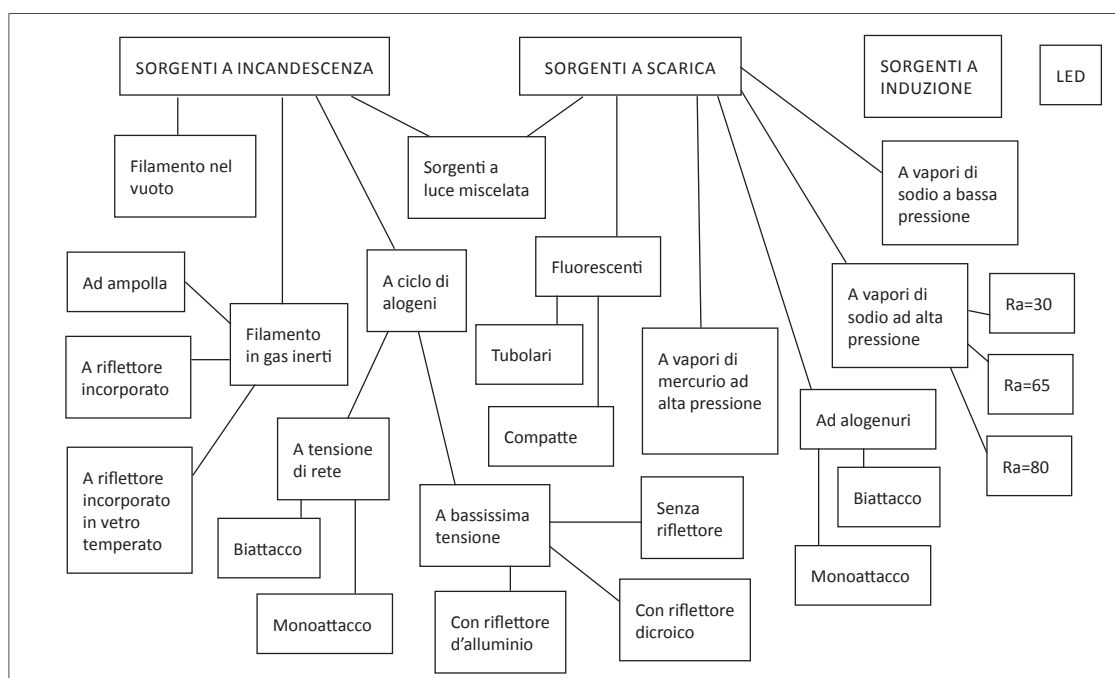
lampada l'energia elettrica applicata determina l'eccitamento del gas, il quale genera radiazione ultravioletta, che a sua volta viene assorbita dal rivestimento in fosforo del bulbo e convertita in luce visibile. Le lampade fluorescenti consentono di scegliere tra molte varianti che possiedono svariate peculiarità, quali l'estesa varietà di temperature di colore, effetti monocromatici o rese cromatiche particolarmente buone. Rispetto alle sorgenti a filamento esse hanno inoltre maggiore efficienza luminosa e durata di vita. Esistono due categorie di lampade a fluorescenza: quelle tubolari lineari e quelle a geometria variabile, chiamate comunemente "compatte"; quest'ultime rappresentano una valida alternativa alla comune incandescenza, anche se al momento possiedono una libertà di applicazione inferiore.

4 - Le **lampade a scarica ad alta intensità** generano luce mediante il passaggio di corrente elettrica attraverso un gas contenente vapori di sostanze metalliche; esse sono caratterizzate da elevate emissione ed efficienza luminosa e lunga durata di vita. In generale le sorgenti a scarica possono presentare alta o bassa pressione all'interno del bulbo; rispetto alle sorgenti a bassa pressione, quali le fluorescenti già descritte, quelle ad alta pressione sono più compatte, hanno uno spettro più completo, ma emanano maggior quantità di radiazione infrarossa. Per le lampade a scarica ad alta intensità la posizione è critica per il corretto funzionamento e solitamente richiedono tempi relativamente elevati per raggiungere la piena potenza e per il raffreddamento dopo spegnimento. Le tre famiglie principali di questa categoria di lampade si distinguono per il tipo di metallo presente: alogenuri metallici, vapori di sodio e vapori di mercurio, delle quali solo le prime presentano buona qualità del colore.

5 - I **diodi ad emissione di luce**, comunemente chiamati LED, sono dispositivi semiconduttori che emettono luce visibile sfruttando il principio dell'elettroluminescenza; le sorgenti luminose che li impiegano sono di recente sviluppo e, a causa della sostanziale differenza con tutte le altre sorgenti, quasi mai vengono denominate lampade. Siccome singolarmente i LED hanno un basso flusso luminoso, a causa delle ridotte dimensioni e la necessità di allontanare il calore, gli apparecchi di illuminazione sono costituiti da moduli dalle più svariate forme e dimensioni. La creazione di luce bianca può avvenire mediante l'accoppiamento di tre diodi monocromatici RGB, oppure mediante

l'integrazione con filtri di fosfori nella lente di un diodo a luce blu o ultravioletta. Le sorgenti LED hanno durata di vita elevatissima ed efficienza luminosa superiore ad alogene e incandescenza; esse possono inoltre raggiungere alti livelli di resa cromatica.

Altre sorgenti luminose che è giusto citare sono: le lampade a induzione, nelle quali la ionizzazione di elementi metallici responsabili dell'emissione luminosa è provocata da un campo elettromagnetico indotto da corrente elettrica ad alta frequenza; le sorgenti OLED, dispositivi di recente concezione che consistono in fogli di materiale organico semi-conduttivo in grado di emettere radiazione luminosa.



3.6.2 - SISTEMI OTTICI

La complessità degli effetti luminosi e i vincoli conservativi richiesti in un ambiente espositivo non sono affrontabili solo attraverso la scelta delle sorgenti di illuminazione, bensì esse devono essere abbinate con accessori di vario tipo, che hanno la funzione di

orientare i raggi luminosi; tali componenti si suddividono in due famiglie: i filtri ottici e i modulatori di flusso[29].

I filtri ottici consentono la trasmissione dell'intero flusso luminoso, il quale viene però alterato dalle proprietà geometriche e di composizione del materiale interposto. Tra di essi i più diffusi sono:

1 - i **rifrattori**, componenti trasparenti che modificano la direzione della luce incidente sfruttando il fenomeno della rifrazione; la lente di Fresnel, ad esempio, modifica l'angolo di rifrazione del flusso e lo concentra verso un obiettivo focale, il rifrattore per distribuzione ellittica consente di schiacciare la geometria del flusso luminoso, la lente diffondente genera una maggiore uniformità di flusso, riducendo lo scostamento tra il fascio primario e secondario.

2 - i **diffusori**, componenti di materiale traslucido, quali il vetro sabbiato o acidato, che hanno la funzione di deviare i raggi luminosi in tutte le direzioni, con sfumatura del flusso luminoso che può essere più o meno marcata.

3 - i **filtri**, componenti che modificano lo spettro di emissione di una sorgente assorbendo o riflettendo alcune bande specifiche; possono servire per modificare la tonalità della luce visibile, come i filtri cromatici, ma anche per trattenere radiazioni dannose quali l'ultravioletto e l'infrarosso.

4 - i **vetri di protezione**, i quali forniscono la sola protezione meccanica, ma assorbono parte del flusso luminoso e influiscono, come gli altri componenti, sul riscaldamento dell'apparecchio.

I modulatori di flusso trattengono e deviano una parte del flusso luminoso, variandone la geometria. Di questa categoria fanno parte:

1 - i **riflettori**, componenti che deviano parte del flusso luminoso in direzioni definite; il modo e la quantità di luce che viene riflessa o assorbita dipende dalla finitura superficiale del materiale costituente.

2 - gli **schermi paraluce**, componenti solitamente di materiale opaco che permettono di ridurre gli abbagliamenti laterali, come le alette direzionali o il sagomatore; quest'ultimo

consente anche di dare la forma desiderata al flusso luminoso con geometrie fisse o regolabili.

3 - le **griglie**, componenti costituiti da lamelle in materiale opaco o riflettente che, come il frangiluce alveolare, hanno la funzione di ridurre l'abbagliamento convogliando il flusso luminoso in un'unica direzione.

Discorso a parte viene fatto per i condotti ottici, i quali sono effettivamente dei modulatori di flusso, ma consentono di tenere a una distanza considerevole la sorgente di luce dal punto luminoso. Di questi sistemi fanno parte le fibre ottiche, tubi flessibili di piccolo diametro, e le guide di luce, condotti rigidi di grandi dimensioni. I vantaggi dei condotti ottici, quali la sicurezza, la versatilità e il risparmio energetico, fanno della conservazione e valorizzazione dei beni culturali una loro ottima applicazione; la sicurezza di utilizzo deriva dal fatto che i condotti sono indipendenti dal sistema elettrico e non producono calore.

Le fibre ottiche vengono solitamente collegate, tramite un bocchettone, a dispositivi chiamati illuminatori, i quali contengono la sorgente luminosa (alogeno o a scarica), dei filtri, un trasformatore o accenditore, il sistema di ventilazione[14].

4 - VIRTUAL SIMULATION

La simulazione virtuale può essere definita come la riproduzione di un sistema, statico o dinamico, reale o immaginario, generata grazie all'uso di un computer; essa ha lo scopo di trasmettere informazioni digitali, spesso in modo interattivo, per valutare, comprendere, e/o migliorare il sistema stesso[33]. In particolare la simulazione grafica prevede l'utilizzo di modelli digitali generati tramite software specifici (modellazione virtuale), ed è un utile strumento in moltissimi campi d'applicazione.

Nell'ambito di questa tesi la simulazione virtuale riguarda il progetto dell'allestimento di un ambiente espositivo e, attraverso l'uso di strumenti digitali, svolge la funzione di supporto alla valutazione espressiva e alla pianificazione dello spazio; questo tipo di simulazione visiva viene chiamata realtà virtuale ed ha lo scopo di far percepire delle entità sintetiche, fornendo dei metodi di interazione[34].

La realtà virtuale viene definita immersiva nel caso in cui l'utente venga isolato totalmente dal mondo reale ed abbia interazione completa con l'ambiente sintetico, grazie all'uso di dispositivi che simulano la percezione di tutti i sensi. A causa degli elevati costi, ingombri e fragilità della strumentazione, i sistemi di realtà virtuale più diffusi permettono soltanto una parziale immersione nel mondo virtuale, attraverso la trasmissione di dati visivi su schermo e, a volte, informazioni uditive e tattili; nonostante la componente visiva sia preponderante nella percezione di un'ambiente, le



Figura 4.1 - Sistema immersivo di realtà virtuale

tecniche digitali possono infatti simulare anche altri sensi, quali l'udito, attraverso casse acustiche o auricolari, e il tatto, mediante sistemi Haptic, dispositivi in grado di restituire feedback di forza o sensazioni tattili.

La realtà virtuale immersiva richiede una sofisticazione tecnica notevole, con elevati costi della strumentazione, e, rispetto ai sistemi correnti del mercato di massa attuale, non sarebbe così utile da giustificarne l'uso[35]; la realtà virtuale non immersiva, invece, trova oggi applicazione in numerosissimi ambiti, tra cui l'intrattenimento mediale, che comprende il mondo cinematografico e quello videoludico, e la progettazione ingegneristica, architettonica e industriale, come strumento di valutazione estetica e analisi funzionale[36].

La simulazione dell'allestimento di un ambiente espositivo rientra a tutti gli effetti nell'ambito progettuale di interni e risulta vantaggiosa perché consente la valutazione estetico/ergonomica della posizione di oggetti e strutture nello spazio. Nel caso, però, di ambienti per i quali non esiste ed è poco conveniente la ricostruzione virtuale, la simulazione in realtà aumentata, ovvero la sovrapposizione di oggetti sintetici all'ambiente reale, può dimostrarsi la soluzione migliore.

Per questo motivo in questo capitolo viene presentata un'introduzione generale sulle tecnologie di realtà aumentata e vengono approfonditi i temi che maggiormente possono interessare la simulazione dell'allestimento; viene, dunque, individuato il sistema più appropriato al caso in esame e ne viene descritto il funzionamento.

4.1 - AUGMENTED REALITY

La realtà aumentata viene definita come percezione diretta o indiretta di un ambiente fisico appartenente al mondo reale, arricchito dalla presenza di informazioni virtuali generate e manipolate elettronicamente.³⁹

Essa viene identificata come una delle posizioni all'interno del continuum della Mixed Reality, il quale si estende dall'ambiente reale all'ambiente virtuale e comprende anche

la virtualità aumentata. La realtà aumentata si trova più vicina al mondo reale, mentre la virtualità aumentata è prossima all'ambiente puramente virtuale, anche se esse sono destinate a fondersi sempre più, in conseguenza della progressiva diminuzione delle differenze tra reale e sintetico. La realtà mista può, inoltre, essere intesa come sottoinsieme della realtà mediata, la quale comprende anche altre forme di alterazione della realtà (es. Diminished Reality)[37].

La realtà aumentata ha il compito di migliorare la percezione e l'interazione con il mondo virtuale; il contenuto sintetico può permettere all'utente di ricavare delle informazioni supplementari dal mondo reale, all'interno del quale egli può effettuare la simulazione di attività di vario tipo.

Solitamente la realtà aumentata viene intesa come una tecnica visiva che combina contenuto reale e virtuale in real-time, ma può essere estesa anche ai metodi di arricchimento di tutti i sensi della percezione umana e può includere l'unione di contenuto virtuale tridimensionale a immagini fisse o di contenuto virtuale bidimensionale a immagini in movimento acquisite dalla realtà, purché la tecnica sia interessata da un qualche tipo di interazione[38].

La realtà aumentata trova spazio in molte applicazioni, in generale dove esiste la necessità o la possibilità di accrescere la percezione visuale dell'utente; essa può essere impiegata in campi quali la pubblicità, l'intrattenimento, la medicina, l'assemblaggio industriale, manutenzione e riparazione, la pianificazione dello spazio, ecc. In anni recenti, la capacità di elaborazione delle unità di calcolo è aumentata in modo vertiginoso, unitamente all'incremento di velocità

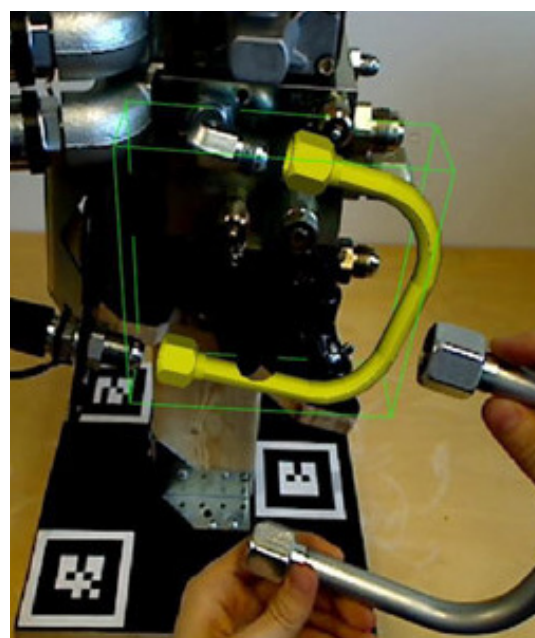


Figura 4.2 - Sistema di realtà aumentata per l'assemblaggio

e capacità di memorizzazione e trasmissione dati. Questo sviluppo della tecnologia ha consentito l'utilizzo della realtà aumentata anche su dispositivi portatili, quali smartphone e tablet, e a sua volta ha generato l'apertura verso i mercati di massa; la realtà aumentata sta così diventando, a tutti gli effetti, una forma di intrattenimento mediale digitale[37].

Come per la realtà virtuale, anche per la realtà aumentata esistono applicazioni che simulano la percezione degli altri sensi; a fronte però degli obiettivi preposti, in questa analisi vengono considerate solo le tecniche di simulazione visiva.

La realtà aumentata per applicazioni visive si serve della visione artificiale e delle tecniche di computer grafica, permettendo l'interazione tra utente, oggetti reali e oggetti virtuali. La ricerca sui sistemi di visione artificiale, applicata alla realtà aumentata, comprende la cattura e il tracciamento di marker o altri elementi della scena, la rilevazione ed il tracciamento del movimento, l'analisi di immagine, il riconoscimento dei gesti; le tecniche di grafica tridimensionale comprendono, ad esempio, il rendering fotorealistico e l'animazione interattiva[37].

4.2 - SISTEMI DI REALTÀ AUMENTATA

I sistemi di visualizzazione in realtà aumentata possono essere classificati in base all'ambiente d'uso, interno o esterno, e alla mobilità. Un sistema mobile permette all'utente di non essere vincolato alla stanza e muoversi liberamente attraverso l'uso di apparecchiature wireless; i sistemi fissi, invece, non consentono questa flessibilità e per essere usati in ambienti diversi devono essere smontati, riassemblati e riconfigurati[39]. La possibilità di utilizzare il sistema in ambienti interni, esterni o in entrambi i casi dipende sia dalle tecnologie utilizzate per il tracciamento, sia dal tipo di alimentazione energetica richiesta, la quale dipende dal sistema complessivo. Altri criteri di classificazione sono il costo e il consumo energetico: entrambi questi parametri dipendono dalla somma delle caratteristiche dei vari dispositivi utilizzati.

Gli elementi minimi necessari per realizzare un sistema che sfrutta la realtà aumentata sono: strumenti di visualizzazione, sistemi di tracciamento geometrico e unità di elaborazione. Inoltre la visualizzazione di scene in realtà aumentata è spesso associata a un qualche tipo di interazione con gli oggetti virtuali; a questo proposito sono necessari dispositivi e interfacce di comando, quali mouse e tastiera, touch-screen, joystick, guanti o marker indossabili.

Oltre ai dispositivi di tracciamento geometrico, indispensabili per il sistema di realtà aumentata perché responsabili della corretta registrazione tra ambiente reale e virtuale, esistono anche dispositivi di tracciamento fotometrico, necessari per l'acquisizione dell'illuminazione e utili nel caso in cui sia richiesto maggiore realismo grafico.

4.2.1 - DISPOSITIVI DI VISUALIZZAZIONE

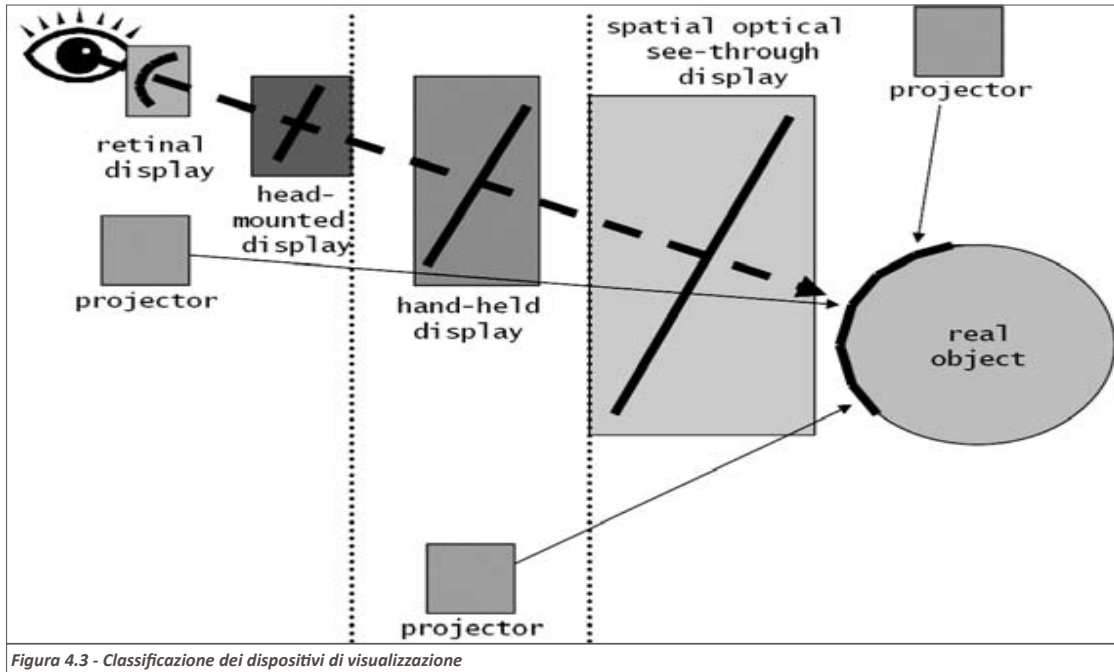
I dispositivi di visualizzazione hanno il compito di interporre, tra osservatore e realtà, delle informazioni visive elaborate dall'unità di calcolo; in base al tipo di ottica usata, l'immagine può essere proiettata su superfici planari o dalla forma più complessa.

Esistono due tecniche per la sovrapposizione delle immagini sintetiche su quelle virtuali:

- **Video-mixing**, nel caso in cui le immagini reali vengono acquisite da telecamere, elaborate e sommate alle informazioni grafiche generate a calcolatore, e proiettate su display collegati fisicamente agli strumenti di ripresa.

- **Optical-combination**, nella quale l'immagine reale viene visualizzata direttamente e l'informazione visiva generata a calcolatore viene sovrainpressa in semitrasparenza mediante sistemi ottici quali specchi o prismi, oppure proiettata sugli oggetti della scena[40].

Un'altra classificazione dei dispositivi di visualizzazione riguarda la distanza alla quale essi si trovano rispetto all'occhio. Esistono strumenti che sono collegati alla testa dell'osservatore e proiettano le immagini direttamente sulla retina (Retinal-display), o



su schermi in prossimità degli occhi (Head-mounted Display); altri che si trovano a media distanza e solitamente vengono sorretti dalla mano dell'utente (Hand-held Display); altri ancora che si trovano nello spazio circostante l'osservatore (Spatial Display); esistono anche dispositivi che proiettano l'immagine virtuale direttamente sulle superfici dell'ambiente e possono essere sia collegati che separati dall'osservatore[40]. La distanza alla quale viene interposta l'immagine sintetica è uno dei parametri responsabili del livello di immersione che è possibile raggiungere con un sistema di realtà aumentata.

Una proprietà che consente di rendere ancora più immersiva e realistica la visione di ambienti virtuali o reali aumentati è la simulazione della visione stereoscopica; questa tecnica consente di percepire la tridimensionalità degli oggetti sintetici e richiede il calcolo della scena virtuale da due punti di visione leggermente scostati tra loro, pari alla distanza interpupillare. Per poter riprodurre l'effetto della visione binoculare è necessario utilizzare, tranne nel caso della libera visione stereoscopica, di appositi dispositivi quali i visori stereoscopici o gli occhiali 3D[34].

La simulazione dell'allestimento, per valutare l'atmosfera generale dell'esposizione, richiede un buon livello di immersione, il quale può essere ottenuto grazie all'utilizzo di HMD; questi dispositivi sono però ancora in fase di sviluppo e presentano elevati prezzi commerciali. Inoltre l'eventuale visione stereoscopica all'interno del casco richiederebbe l'acquisizione e l'elaborazione di due punti di vista, appesantendo l'elaborazione della scena. I dispositivi che attualmente possono essere associati all'applicazione studiata sono, dunque, gli Hand-held display, quali i tablet, e i display di computer portatili.

4.2.2 - DISPOSITIVI DI TRACCIAMENTO GEOMETRICO

Il tracciamento geometrico serve per orientare l'oggetto virtuale nella stessa situazione prospettica dell'ambiente circostante visualizzato[38]; in particolare esso consente di determinare la posizione e l'orientamento del sensore rispetto alla scena o dell'oggetto rispetto al sensore, permettendo così la coordinazione tra mondo reale e virtuale, ma, in base alla tecnologia utilizzata, presenta alcuni aspetti critici che riguardano il tempo di latenza, l'accuratezza e la rumorosità dei dati[40].

I sistemi di tracciamento possono essere classificati in vari modi, quali le caratteristiche tecnologiche degli strumenti utilizzati, l'ambiente più consono all'utilizzo o la precisione con la quale vengono determinati posizione e orientamento[41].

Il tempo di utilizzo può influire negativamente sull'accuratezza, relativamente al fatto che il sistema di riferimento sia relativo o assoluto; in quest'ultimo caso, il tracciamento può essere classificato in base all'elemento fisso della scena che fa da riferimento: se sensori fissi inquadrano l'oggetto tracciato in movimento il tracciamento viene chiamato Outside-in, mentre se è il dispositivo di tracciamento a muoversi rispetto alla scena il sistema viene denominato Inside-out[42].

Esistono molte tecnologie di tracciamento della posizione, le quali vengono utilizzate più o meno comunemente sia negli spazi interni che esterni, come le telecamere digitali o altri sensori ottici, GPS, accelerometri, bussole, sensori wireless, ecc.; ognuna di

queste tecnologie può presentare diversi livelli di accuratezza e la scelta dipende dal tipo di sistema che deve essere sviluppato[39].

L'obiettivo di questa tesi è quello di analizzare gli strumenti per la realtà aumentata che consentono di apportare beneficio al progetto dell'allestimento di un esposizione, la quale, secondo le valutazioni fatte precedentemente, verrebbe organizzata in ambienti interni, in varie condizioni di luce, spazio e tempo disponibili. I principali metodi di tracciamento ad alta precisione che possono essere applicati alla realtà aumentata per ambienti interni sono[40]:

1 - **meccanico**: prevede il collegamento fisico del dispositivo di visione tramite strutture di sostegno ed il tracciamento viene effettuato mediante sensori posizionati in prossimità dei giunti; questo sistema consente una misura degli spostamenti molto precisa, ma impone all'utente uno spazio di lavoro limitato.

2 - **magnetico**: si basa sulla misura di corrente elettrica indotta da campi magnetici, i quali vengono generati da un emettitore costituito da tre bobine perpendicolari; è un sistema che non risente dei problemi di occlusione ed è molto accurato, ma gli oggetti metallici possono creare interferenze.

3 - **ottico**: questo sistema sfrutta la luce per calcolare, attraverso l'uso di tecniche varie, posizione e orientamento del soggetto inquadrato; fa uso di camere che inquadrano la scena da uno o più punti di vista e spesso gli elementi tracciati sono entità conosciute dal sistema (marker).

4 - **acustico**: si basa sull'emissione di ultrasuoni da parte di un dispositivo, del quale vengono tracciati la posizione e l'orientamento mediante l'impiego di sensori acustici; questo sistema è soggetto ad alta rumorosità dei dati e tende ad essere poco accurato per distanze relativamente alte, a causa della variabilità della velocità del suono in base a temperatura, pressione e umidità[34].

5 - **inerziale**: si basa sull'uso di giroscopi e accelerometri, i quali consentono un'elevata precisione, ma solo per movimenti rapidi e per i primi minuti di utilizzo. I dispositivi di tracciamento inerziale sono sistemi di misura relativa e con il passare del tempo

generano errori incrementali; solitamente vengono combinati con altri metodi di misura assoluti in modo da ridurre l'errore[43].

Tutte queste tecnologie di tracciamento consentono di determinare in modo continuativo i sei gradi di libertà che definiscono la posizione e l'orientamento della camera rispetto alla scena o dell'oggetto rispetto alla camera[44]; ognuna di queste tecnologie possiede però dei difetti o debolezze che necessitano di un'attenta valutazione durante la scelta del sistema.

Il sistema di tracciamento più idoneo al caso studiato risulterebbe essere quello ottico, il quale include però numerose varianti anche molto differenti tra loro che è necessario approfondire. I metodi di tracciamento ottico maggiormente diffusi sono i seguenti[41]:
1 - **Marker-based**: generalmente si basa sull'utilizzo di una camera che inquadra uno o più marker passivi (pattern stampati) posizionati nella scena; può essere sia Inside-out, se l'oggetto tracciato è fisso e la camera si muove, sia Outside-in, se accade l'opposto. In realtà potrebbero muoversi contemporaneamente sia la camera che il marker, ma in questo modo verrebbe perso il riferimento fisso con l'ambiente circostante. Il sistema di tracciamento Marker-based ha uno spazio di lavoro che è limitato solamente dal numero di marker posizionati nella scena e, sfruttando un semplice sensore d'immagine quale una webcam, risulta essere il più economico.

2 - **Markerless**: anche in questo caso una camera inquadra la scena dal punto di vista dell'osservatore, ma i punti di riferimento non sono pattern conosciuti, bensì elementi caratteristici individuati nell'ambiente; i sistemi di tracciamento Markerless possono essere di vari tipi, tra cui le tecniche Model-based, nelle quali il sistema compara e sovrappone un modello virtuale conosciuto dell'intera scena o parte di essa, e le tecniche Feature-based, nelle quali il sistema riconosce dei tratti caratteristici nell'immagine, quali punti e spigoli ed apprende la conformazione dell'ambiente attraverso il confronto tra frame diversi[37]. Queste tecniche, in termini di risultati, possono essere paragonate al tracciamento Marker-based, ma richiedono maggiori livelli di potenza di elaborazione e sono meno affidabili.

3 - **IR Marker-based**: questo metodo di tracciamento fa uso di marker attivi (sorgenti LED) o passivi (sfere diffondenti), che emettono o riflettono radiazioni luminose nel campo dell'infrarosso e sensori con appositi filtri; solitamente il sistema è fisso e sono presenti più camere che inquadrano la scena da posizioni diverse, evitando così le occlusioni. Il tracciamento fa uso del calcolo di triangolazione, usato anche in fotogrammetria, ed ha un range di lavoro limitato dalla grandezza della struttura fissa che sostiene i sensori[45].

4 - **Ibrido**: il tracciamento ottico, per ottenere maggiore accuratezza e affidabilità, può essere combinato altri sistemi di tracciamento quali il tracciamento magnetico e il tracciamento inerziale.

Il tracciamento ottico raggiunge risultati migliori a basse velocità di movimento, mentre i sensori di tracciamento inerziale lavorano meglio a velocità relativamente alte; la combinazione di questi sistemi complementari viene spesso utilizzata sui dispositivi mobili e consente un controllo maggiore sulla sovrapposizione di reale e virtuale.

Il sistema di realtà aumentata richiesto dall'applicazione in esame necessita un

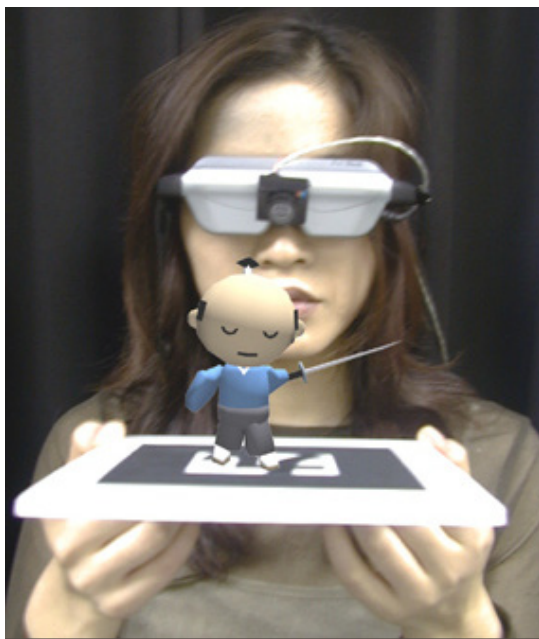


Figura 4.4 - Sistema di realtà aumentata marker-based

tracciamento di posizione e orientamento relativamente accurato, ma anche ridotti costi economici ed energetici. Il tracciamento ottico Marker-based (Inside-out) risulta essere, quindi, la migliore soluzione per l'applicazione studiata perché possiede molte caratteristiche vantaggiose, tra cui la non invasività, la mobilità, l'accuratezza e soluzioni a basso costo, oltre al costante e massiccio sviluppo di robusti algoritmi di elaborazione; esso possiede però alcuni svantaggi da non sottovalutare, quali il limitato range di utilizzo.

4.2.3 - DISPOSITIVI DI TRACCIAMENTO FOTOMETRICO

Il tracciamento fotometrico serve per illuminare l'oggetto sintetico dalle stesse condizioni di luce che riceverebbe un oggetto reale posto nella scena, e viene ottenuto mediante l'utilizzo di tecniche di acquisizione dell'illuminazione. Il processo richiede che vengano determinati gli effetti luminosi che la luce reale provoca sull'oggetto, ma anche l'influenza che l'oggetto virtuale ha nei confronti dell'ambiente circostante; solitamente questo comporta la proiezione di ombre, la riflessione dell'oggetto sulle superfici della scena reale, la rifrazione e l'emissione di luce[38].

La qualità delle interazioni dell'illuminazione aumenta in relazione alla quantità di informazioni di input disponibili, ovvero la geometria della scena, le proprietà dell'illuminazione e le proprietà dei materiali; l'aumento di queste informazioni e del tempo di pre-processing necessario per l'acquisirle, comporta però la diminuzione dell'accessibilità del metodo[46].

La scena della simulazione viene solitamente divisa in tre categorie: oggetti sintetici, scena locale e scena distante; la scena locale, a differenza della scena distante, interagisce fotometricamente con gli oggetti sintetici[47]. Il primo espediente che può essere usato per migliorare il realismo di una scena tracciata fotometricamente è la proiezione di ombre, perché aiuta a percepire la posizione degli oggetti virtuali; l'ombra portata dagli oggetti virtuali li fa apparire appoggiati al suolo o comunque relazionati con l'ambiente circostante e richiede solo l'acquisizione della posizione delle sorgenti luminose. La difficoltà nell'applicare la proiezione di ombre nella realtà aumentata fotorealistica giace nel fatto che l'illuminazione del mondo reale contiene un'ampia varietà di sorgenti luminose di vario tipo; all'aumentare del numero o dell'area delle sorgenti luminose, diventa più difficile generare ombre sintetiche verosimili[38].

Maggiore realismo può essere ottenuto acquisendo anche le proprietà delle sorgenti illuminanti e, in base ad esse, variando gli effetti di riflessione dei contenuti virtuali; questo comporta però la stima o la misurazione delle caratteristiche di riflettanza degli oggetti sintetici inseriti.

Un ulteriore livello di realismo può essere raggiunto mediante l'interazione luminosa tra la scena locale e gli oggetti virtuali; questo richiede però che vengano acquisite anche le caratteristiche geometriche e di riflettanza delle superfici reali che si trovano in prossimità dei modelli virtuali.

L'illuminazione di oggetti sintetici con luce reale è una tema di ricerca molto vasto ed è stato affrontato impiegando varie tecniche, quali l'IML (Image Based Lighting) e Monte Carlo Raytracing, gli approcci Texture-based con calcolo in hardware, o la registrazione delle radianze pre-calcolate (PRT).

L'obiettivo della ricerca scientifica è quello di ottenere un metodo che possa essere utilizzato in tempo reale, che sia automatico e che non richieda operazioni di pre-processing; esso dovrebbe consentire qualunque tipo di interazione virtuale e la qualità del rendering dovrebbe far combaciare visivamente la scena virtuale a quella reale[46]. Attualmente è ancora difficile conseguire tutti questi obiettivi perché il miglioramento di alcuni parametri comporta il peggioramento di altri; spesso le tecniche non raggiungono livelli qualitativi accettabili, oppure non hanno un frame rate adeguato per la simulazione in tempo reale, possono richiedere operazioni manuali di preparazione, quale l'acquisizione della geometria dell'ambiente, oppure necessitano di strumentazione particolare non adatta all'uso comune. La ricerca è tuttavia in continuo sviluppo ed alcuni approcci di riproduzione della luce reale consentono già oggi di ottenere una simulazione in realtà aumentata adatta al progetto di allestimento.

1 - Un primo metodo di adeguamento della luce virtuale a quella reale consiste nel posizionamento manuale nella scena di fonti luminose virtuali in corrispondenza di quelle reali, ipotizzandone o misurandone i parametri emissivi; questo approccio non richiede nessun dispositivo supplementare per essere realizzato, ma non è automatico, può risultare poco preciso e richiede tempo per la misurazione della luce reale e per l'inserimento delle sorgenti virtuali.

La misurazione della luce reale può anche essere effettuata mediante l'uso di tecniche

di Computer Vision applicate ad oggetti presenti nella scena; queste tecniche generano risultati migliori e possono essere automatizzate, ma richiedono l'utilizzo di dispositivi supplementari[37]. Esistono, ad esempio, tecniche che consentono di estrapolare la direzione delle sorgenti luminose reali mediante l'osservazione delle ombre proiettate da oggetti inquadrati; uno dei metodi più conosciuti consiste nel confronto tra l'immagine della scena e un'altra immagine della stessa scena con all'interno un oggetto target di geometria conosciuta[48]. Il risultato di questa tecnica dipende però dalle condizioni dell'ambiente inquadrato e non consente di simulare altri effetti oltre alla proiezione di ombre.

2 - L'acquisizione di tutti gli effetti dell'illuminazione di una scena può essere effettuata tramite l'uso di una sfera riflettente (light probe). In questa tecnica le immagini acquisite dall'ambiente vengono chiamate "light probe images" e possiedono la proprietà di omnidirezionalità, ovvero possiedono pixel per ogni direzione della scena; esse sono inoltre immagini ad alta gamma dinamica (HDR), ovvero i valori dei pixel sono linearmente proporzionali alla quantità di luce presente nell'ambiente reale[14]. Le immagini HDR vengono generate mediante la sovrapposizione e l'allineamento di fotografie della stessa scena catturate a differenti livelli di esposizione; in questo modo è possibile ricavare la funzione di risposta della camera, relativa all'intensità dei pixel per ogni canale rosso, verde e blu dell'immagine[38].

Le immagini HDR acquisite con una sfera riflettente vengono usate con algoritmi di Raytracing per generare le ombre proiettate dagli oggetti virtuali; lo stesso principio può essere sfruttato sostituendo la sfera riflettente con una camera Fish-eye (con lente emisferica)[38]. L'uso di immagini HDR per l'acquisizione della luce reale genera immagini molto realistiche, ma comporta lunghe operazioni di preparazione, rendendo il metodo poco adatto all'interazione; l'eventuale utilizzo di questa tecnica con immagini acquisite abitualmente (LDR) non produce buoni risultati perché i livelli di luce sono codificati in modo non lineare in relazione ai dispositivi di visualizzazione e, nel caso di elevati livelli di contrasto, alcune zone della scena inquadrata si saturano al valore massimo, compromettendo la resa[14].

3 - Esiste un metodo simile a quello che fa uso del light probe, ma che risolve il problema del range dinamico dell'illuminazione mediante l'uso di una sfera riflettente colorata di nero; essa consente di stimare posizione, colore e intensità delle sole sorgenti luminose presenti nella scena, oscurando il resto dell'ambiente. Come accade per il metodo da cui deriva, viene rilevata la sfera nella scena, viene generata un'immagine dell'ambiente, la quale viene poi mappata sulla geometria della scena distante, ma il processo non richiede operazioni off-line di preparazione[49].

Un altro metodo di acquisizione fotometrica che è stato sviluppato di recente consiste nell'approssimazione dell'illuminazione ambientale attraverso l'osservazione di una sfera diffondente. In questa tecnica la sfera viene rilevata automaticamente e l'illuminazione viene calcolata dalle intensità osservate sulla sua superficie, permettendo l'acquisizione, l'elaborazione e la proiezione della luce in tempo reale. In questo sistema vengono individuate tutte le possibili sorgenti luminose presenti nella scena e vengono scelte le più rilevanti; ovviamente l'operatività in tempo reale richiede delle

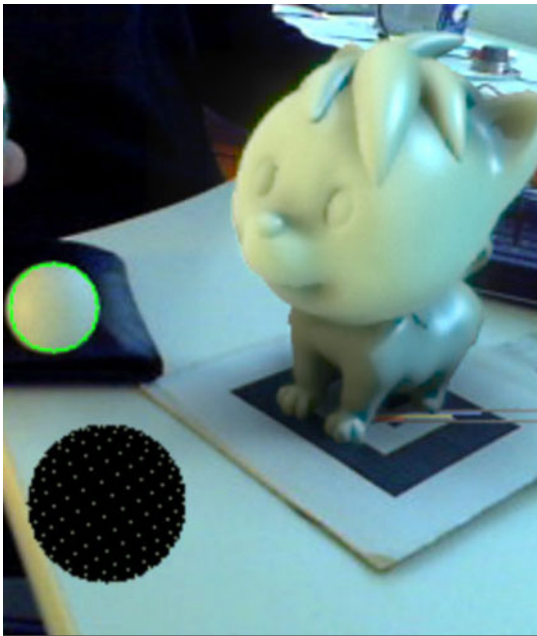


Figura 4.5 - Tracciamento fotometrico con sfera diffondente

approssimazioni, quale la presenza della luce ambiente, ma l'effetto visivo finale è molto realistico. Siccome le superfici diffondenti sono raramente sotto o sovrapposte, una singola cattura è sufficiente a calcolare l'illuminazione dell'ambiente; come il metodo precedente, questo processo non richiede, quindi, operazioni di pre-processing ed interagisce in tempo reale al variare delle condizioni di illuminazione[50].

Sono stati presentati alcuni metodi di acquisizione della luce reale, tra i quali solamente gli ultimi due possono

essere associati alla simulazione in realtà aumentata del progetto di allestimento; essi, implementati al tracciamento Marker-based, contribuiscono alla realizzazione di un'applicazione economica, automatica, che opera in real-time, non richiede operazioni di preparazione e fornisce discreta qualità visiva.

4.3 - SCELTA DEL SISTEMA

La scelta del sistema è la prima operazione da effettuare durante un progetto di Mixed Reality perché consente di valutare i sistemi di tracciamento, i dispositivi di visualizzazione, l'unità di elaborazione e le eventuali interfacce di comando più adeguati all'applicazione che deve essere sviluppata. Il tipo di applicazione è ovviamente il motivo principale per la scelta del sistema e comprende il tipo di rappresentazione e l'ambiente di utilizzo; gli altri criteri di scelta sono la complessità delle entità virtuali a disposizione, se non realizzate appositamente per l'applicazione, e le risorse disponibili.

1 - La **rappresentazione** della scena virtuale incide sulla scelta della strumentazione in relazione a vari aspetti. Il livello di immersione e gli altri parametri di realismo influiscono sulla scelta dei sistemi di visualizzazione e di tracciamento fotometrico, mentre la durata di utilizzo e la precisione della cattura di posizione e orientamento influenzano la scelta della tecnica di tracciamento geometrico. I sistemi di tracciamento geometrico che permettono di ottenere un alto livello di accuratezza sono quelli magnetici, inerziali, acustici e ottici, mentre la durata di utilizzo dipende sostanzialmente dai riferimenti di misura, se assoluti o relativi.

2 - L'**ambiente** è un altro fattore di scelta, in quanto l'usabilità del sistema dipende dalle caratteristiche del luogo nel quale viene effettuata la simulazione; l'ambiente può essere interno o esterno, può presentare varie condizioni di illuminazione, pavimentazione, dimensioni ed alimentazione elettrica. Il fattore ambientale influisce inoltre sulla mobilità che deve possedere il sistema, sia quando deve essere trasportato da un luogo all'altro, sia per utilizzarlo all'interno dell'ambiente: i fattori che ne influenzano la scelta

sono lo spazio di lavoro e i gradi di libertà di movimento consentiti.

3 - I **modelli virtuali** influiscono principalmente sulla potenza di calcolo richiesta per l'elaborazione; i fattori di complessità del modello sono il "peso" dei file e la massima quantità ipotizzata di modelli da gestire contemporaneamente. La pesantezza dei singoli oggetti virtuali dipende da vari attributi, quali il dettaglio della mesh o delle feature e il tipo di texture applicato.

4 - Le **risorse** possedute che incidono sulla scelta sono: le competenze necessarie per l'utilizzo di strumentazione e software, la disponibilità economica e il tempo disponibile; per quest'ultimo parametro è necessario considerare sia il tempo che la simulazione richiede per eseguire il lavoro, sia il tempo di setup degli strumenti, il quale può essere pressoché nullo ma anche molto elevato.

4.4 - REQUISITI

I requisiti delle applicazioni che sfruttano la realtà aumentata possono essere moltissimi: alcuni di essi sono basilari, come l'arricchimento calibrato della realtà, la visualizzazione in tempo reale e l'interazione con l'utente, altri specifici, come il fotorealismo, il calcolo delle occlusioni tra reale e virtuale o l'integrazione con tecniche di diminuzione della realtà.

In questo ambito di ricerca la simulazione digitale verrebbe utilizzata come strumento di supporto al progetto espositivo, quindi il sistema verrebbe utilizzato per disporre degli oggetti virtuali all'interno di un'ambiente reale, per i quali è necessario studiare l'effetto visivo complessivo e di dettaglio; oltre ai requisiti di base che un sistema di questo tipo deve possedere, l'applicazione in esame richiede che gli strumenti di simulazione permettano di analizzare la distribuzione spaziale di svariati oggetti nell'ambiente e che consentano di valutare l'effetto visivo nel modo più possibile simile alla realtà. Inoltre, gli eventuali requisiti di valutazione della radiazione luminosa per la conservazione delle opere, prevedrebbero anche il calcolo fotometrico dell'illuminazione.

Date le caratteristiche più frequenti che gli ambienti espositivi possiedono, ovvero spazi relativamente ampi e poco ostruiti dall'arredo, le tecniche di calcolo delle occlusioni e i metodi di diminuzione della realtà non vengono considerate come prioritarie e non vengono approfondite; è giusto, però, tenere in considerazione l'esistenza di queste tecniche che possono rappresentare utili sviluppi della tecnologia anche in questo settore.

4.4.1 - SIMULAZIONE VOLUMETRICA

La pianificazione dello spazio è una pratica progettuale che ha come obiettivo la suddivisione, la definizione e la gestione dei volumi di un ambiente interno; garantire l'uso dello spazio in modo efficiente e funzionale è un'attività complessa che richiede solitamente il lavoro di specialisti, quali architetti o interior designer[13].

Lo Space Planning comprende, infatti, un complesso sistema di processi relativi all'organizzazione dell'ambiente, che vanno dall'analisi e uso dei principi costruttivi, alle tecniche di controllo ambientale e sviluppo delle qualità spaziali desiderate.

In tutti i progetti di interni la gestione della luce, sia naturale sia artificiale, gioca un importante ruolo nel processo di pianificazione dello spazio; essa può richiedere conoscenze addizionali, come anche nel caso di progetti relativi ad edifici non ancora esistenti o che hanno caratterizzazione storica e decorativa rilevante[13].

L'uso del computer ha ormai da tempo cambiato il modo in cui designer e architetti si approcciano e realizzano progetti di pianificazione dello spazio. In questo campo, per illustrare l'impatto delle proposte progettuali, vengono fortemente applicate sia la realtà virtuale sia la realtà aumentata, seppur statica, attraverso la quale vengono renderizzati modelli virtuali in sovrapposizione ad immagini dell'ambiente reale[13]. "I professionisti del settore interior design e architettonico in generale hanno solitamente a disposizione una vasta gamma di soluzioni per realizzare i propri progetti"[36], ma, a differenza di altri ambiti progettuali, i software architettonici hanno una solida base di



Figura 4.5 - Simulazione in realtà aumentata della pianificazione dell'arredo

disegno 2D, integrata con componenti di modellazione 3D e rendering.

Recentemente anche la realtà aumentata dinamica sta subentrando nelle attività di progettazione e non viene usata solo per valutazioni estetiche, ma anche per migliorare la funzionalità, studiare l'ergonomia e la sicurezza del progetto. Essa può essere usata per migliorare il processo di sviluppo di prodotto, compito che viene solitamente affidato alla realtà virtuale, la quale attualmente non può però fornire un'esperienza tanto immersiva quanto è quella offerta dalla realtà aumentata[51].

Ultimamente si stanno diffondendo anche applicazioni per tablet e notebook che forniscono un alto grado di interazione, permettendo anche all'utente comune di posizionare nella propria stanza dei mobili virtuali ottenuti da un catalogo on-line; grazie alla crescita esponenziale della potenza di calcolo di questi dispositivi è oggi possibile pianificare lo spazio degli ambienti interni in modo interattivo, sia agendo su schemi bidimensionali sia viste tridimensionali.

La funzionalità del posizionamento di svariati oggetti nell'ambiente rappresenta l'obiettivo principale del sistema di simulazione in realtà aumentata per la pianificazione dello spazio espositivo, con la differenza che in questo caso, anziché oggetti d'arredo, verrebbero usati modelli virtuali di opere da esporre, e l'utenza di riferimento sarebbe il gruppo di professionalità addette all'allestimento.

4.4.2 - SIMULAZIONE FOTOREALISTICA

Il sistema in realtà aumentata può catturare meglio l'attenzione umana con rendering non fotorealistici chiaramente distinti dallo sfondo, oppure può rendere gli elementi virtuali indistinguibili dalla realtà, migliorando la percezione visuale[37]. Nel caso considerato, l'inserimento nella scena di oggetti virtuali, per i quali deve essere valutato l'impatto visivo, richiede il più alto livello di realismo possibile.

Nella computer grafica, il rendering fotorealistico fa riferimento a tecniche di riproduzione di immagini ad alta qualità, le quali, nel caso ideale, appaiono realistiche quanto immagini fotografiche e gli oggetti virtuali non possono essere distinti da quelli reali. Solitamente viene fatta distinzione tra rendering fotorealistico e rendering in tempo reale: nel primo caso i calcoli della simulazione dell'illuminazione sono molto complessi, con tempi e risorse necessari tanto più alti quanto più è elevata la fedeltà richiesta; nel secondo caso, invece, i calcoli devono essere molto veloci, per fare in modo che la simulazione dia risultati con frequenza di aggiornamento non avvertibile dall'occhio umano[52].

La simulazione dell'illuminazione di oggetti e ambienti viene ormai effettuata abitualmente anche in tempo reale, attraverso l'uso di software in grado di generare scene fotorealistiche interattive; queste applicazioni hanno come obiettivo il raggiungimento di un certo livello di verosimiglianza ma non necessariamente simulano il reale comportamento della luce[14]. Esse sfruttano modelli di illuminazione locale, i quali approssimano molti degli effetti luminosi reali, ad esempio applicando un livello di illuminamento costante (luce d'ambiente) per mascherare l'assenza del calcolo della luce indiretta e degli effetti secondari.

Il comportamento reale della luce può essere simulato solo da tecniche di illuminazione globale, come Raytracing e Radiosity, le quali possono essere utilizzate se non è richiesta frequenza di fotogrammi interattiva; per applicazioni interattive devono essere, invece, utilizzati metodi di generazione rapida d'immagine che permettono di evitare ritardi ed errori di visualizzazione dovuti al movimento dell'utente[42].

Il fotorealismo di un qualunque tipo di simulazione dipende da vari fattori, tra cui i più importanti sono:

1 - la **precisione del software**: la fedeltà con la quale i software riproducono gli elementi virtuali dipende da vari parametri, tra cui il calcolo quantitativo fotometrico e la rappresentazione qualitativa cromatica.

La precisione dell'algoritmo di calcolo che viene sfruttato dall'applicazione, in particolare la quantità e la qualità delle interazioni luce-materia simulate, determina il livello di realismo degli effetti luminosi virtuali generati; il livello di accuratezza dipende anche dal tempo entro il quale l'elaborazione deve essere effettuata. La gestione del colore da parte dei software di rendering incide, invece, sulla rappresentazione delle caratteristiche spettrali; esse vengono ad esempio approssimate a tre canali RGB, causando errori di slittamento dei colori, soprattutto nel caso di luci colorate e in presenza di molte interreflessioni[14].

2 - la **qualità dei modelli virtuali**: la qualità delle entità tridimensionali dipende dal loro livello di accuratezza geometrica e materica; se i colori e le forme, che siano stati creati a computer o acquisiti dalla realtà, non corrispondono alla controparte reale, l'effetto visivo virtuale risulta differente[14].

Nel caso in esame i principali elementi da posizionare nell'allestimento sono beni reali convertiti in virtuale, quindi la corretta trasposizione di forma e colore dipende dai metodi utilizzati per l'acquisizione, argomento approfondito nel capitolo sulla modellazione inversa.

3 - la **gestione delle informazioni**: la fedeltà con la quale vengono riprodotti gli elementi virtuali dipende anche da come viene gestita l'informazione dagli strumenti digitali. La sintesi additiva degli attuali dispositivi di registrazione e visualizzazione avviene in spazi di colore RGB relativi, che, a causa di discrepanze costruttive e tolleranze di produzione, variano da modello a modello. Una soluzione a questo problema è l'utilizzo dei profili ICC (International Color Consortium); questi profili standard fanno uso di formati PCS (Profile Connection Space), all'interno dei quali vengono memorizzate informazioni cromatiche in spazi colore assoluti e non in spazi colore RGB relativi[14].

4 - la **qualità dei dispositivi**: la qualità degli strumenti utilizzati incide ovviamente

sul realismo della rappresentazione; gli strumenti di registrazione e visualizzazione possono infatti indurre numerose alterazioni della realtà causate da imperfezioni e limiti tecnici dei componenti meccanici, ottici o elettronici. Ad esempio, la gamma di colori rappresentabile da strumenti digitali di visualizzazione (chiamata “gamut”) è più ristretta rispetto quella percepibile dall’occhio umano, mentre i dispositivi di registrazione sono affetti da varie aberrazioni ottiche; l’unica soluzione a questo problema è l’utilizzo di dispositivi di qualità elevata, ma che richiedono, quindi, un budget maggiore.

Siccome tra gli obiettivi della simulazione dell’allestimento compare anche lo studio dell’aspetto percettivo dell’ambiente, fornito dalla combinazione di luci, colori e materiali, risulta di particolare importanza associare le tecniche di rappresentazione fotorealistica alla simulazione in realtà aumentata.

A causa delle elevate prestazioni computazionali richieste, il fotorealismo (o in questo caso “videorealismo”) è da poco entrato tra gli obiettivi principali delle applicazioni per realtà aumentata in tempo reale; inoltre gli algoritmi di elaborazione dei dati acquisiti richiedono molta memoria di allocazione per poter operare. Nella realtà aumentata è, dunque, d’obbligo raggiungere dei compromessi tra la qualità e il tempo d’elaborazione, o tra la qualità e l’impiego di memoria[37].

Recentemente, grazie anche all’avanzamento tecnologico delle unità di calcolo, è stato possibile sviluppare tecniche di realtà aumentata che consentono a oggetti virtuali di essere illuminati in real-time da ambienti di illuminazione complessi, ottenendo buoni risultati in termini di fedeltà fotorealistica[38]. L’analisi qualitativa



Figura 4.6 - Simulazione fotorealistica in realtà aumentata

della luce, ignorando o approssimando severamente i reali meccanismi di trasporto luminoso, può dunque essere effettuata, mentre la valutazione quantitativa della radiazione elettromagnetica rimane ancora molto distante da questo tipo di applicazioni; oltre alle necessità di interazione in tempo reale, le simulazioni in realtà aumentata effettuate all'interno di ambienti non conosciuti presentano condizioni arbitrarie e non pre-calcolate, per le quali la stima del reale comportamento della luce risulta particolarmente ardua[50].

Se l'obiettivo finale di un'applicazione che fa uso di realtà aumentata è la visualizzazione di immagini che non sono distinguibili dalla realtà, risulta necessaria la visione e la combinazione realistica di oggetti virtuali e ambienti reali[38]. Esistono svariati approcci che, oltre a quelli già menzionati, possono migliorare il fotorealismo della rappresentazione in realtà aumentata[50]:

1 - nella realtà aumentata, l'illuminazione e le proprietà di materiali e sorgenti luminose raramente vengono simulate in modo appropriato; questo problema può essere parzialmente risolto mediante l'uso di metodi avanzati di rendering che sono stati sviluppati per l'industria cinematografica e per il gaming, i quali però, per simulare l'illuminazione in tempo reale, fanno comunque uso di espedienti e approssimazioni del fenomeno luminoso.

2 - l'illuminazione ambientale degli oggetti virtuali spesso non corrisponde con quella del mondo reale; questo problema può essere affrontato acquisendo l'illuminazione reale e applicandola agli oggetti sintetici immessi nella scena. Anche l'acquisizione dell'illuminazione reale è una tecnica che proviene dall'industria cinematografica, nella quale i modelli virtuali devono essere integrati in modo convincente nella scena reale; in questo caso, però, la fusione di dati reali e digitali avviene con un lungo processo di messa a punto, mentre nella realtà aumentata ciò deve avvenire rapidamente e in modo automatico.

3 - nelle simulazioni in realtà aumentata l'oggetto virtuale renderizzato appare perfetto, mentre il mondo reale sottostante è alterato da varie aberrazioni e difetti, i quali dipendono dalla qualità degli strumenti di ripresa e visualizzazione utilizzati.

Questo problema può essere risolto attraverso la calibrazione dei dispositivi di ripresa e mediante l'uso di opportune tecniche di filtraggio, le quali migliorano la coerenza della visualizzazione adattando gli effetti degli oggetti virtuali a quelli acquisiti della scena reale; gli effetti che solitamente vengono applicati sono la messa a fuoco e la sfocatura da movimento, ma anche il rumore, le distorsioni della lente e altri effetti secondari.

4.4.2.1 - SIMULAZIONE FOTOMETRICA

La simulazione accurata dell'illuminazione degli ambienti, a causa della grande quantità e complessità di calcolo richiesta, viene effettuata mediante l'uso di software specifici e richiede la conoscenza delle basi illuminotecniche e della tecnologia fotometrica; "si può parlare di simulazione in ambito illuminotecnico solo se si adoperano algoritmi che riproducono la fisica del fenomeno luminoso"[14], ovvero modelli di illuminazione globale, e le condizioni minime perché il progetto dell'illuminazione possa dare risultati fotometrici è l'analisi, oltre che della luce diretta, delle riflessioni multiple tra le superfici.

Per quanto riguarda il calcolo numerico dell'illuminazione, è necessario distinguere innanzitutto la luce naturale da quella artificiale. Nel primo caso devono essere considerate sia la luce diretta del sole sia la luce diffusa del cielo, le quali variano nel corso della giornata; la simulazione della luce naturale comporta ancor oggi approssimazioni notevoli che generano discrepanze rilevanti con la situazione reale[25]. Nel secondo caso viene presa in considerazione la luce generata dagli apparecchi illuminanti; la fedeltà della simulazione della luce artificiale dipende sia dalla precisione del calcolo delle radiazioni luminose presenti nell'ambiente sia dalla corretta conversione delle sorgenti luminose reali in formati virtuali. I programmi di rendering, per fare in modo che la rappresentazione della luce delle sorgenti avvenga in modo realistico, necessitano di informazioni ottenute direttamente dai produttori degli apparecchi; queste informazioni possono essere trovate all'interno dei file fotometrici standard quali IES, EULUMDAT, CIBSE, IESNA, i quali contengono le coordinate delle curve fotometriche delle sorgenti,

ovvero la rappresentazione grafica dell'intensità luminosa nello spazio.

Sia nel caso di luce artificiale, sia nel caso di luce naturale o una combinazione di entrambe, devono essere considerate approssimazioni che riguardano le proprietà diffusive dei materiali o caratteristiche materiche particolari[25].

Sono tre i metodi fondamentali che consentono di rendere gli effetti di illuminazione globale:

1 - **Ray Tracing**: questa tecnica trova corrispondenza con le dinamiche reali di propagazione della luce e consente la riproduzione di molti effetti luminosi, tra cui l'illuminazione diretta, la riflessione speculare, la rifrazione e la proiezione di ombre. Il funzionamento si basa sul "backward raytracing", ovvero il tracciamento dei raggi luminosi a ritroso, dal punto di osservazione verso la scena inquadrata dallo schermo, il che implica però che il calcolo sia funzionale a un solo punto di vista; il calcolo di Raytracing è inoltre dispendioso in termini di tempo, soprattutto in presenza di numerose fonti luminose.

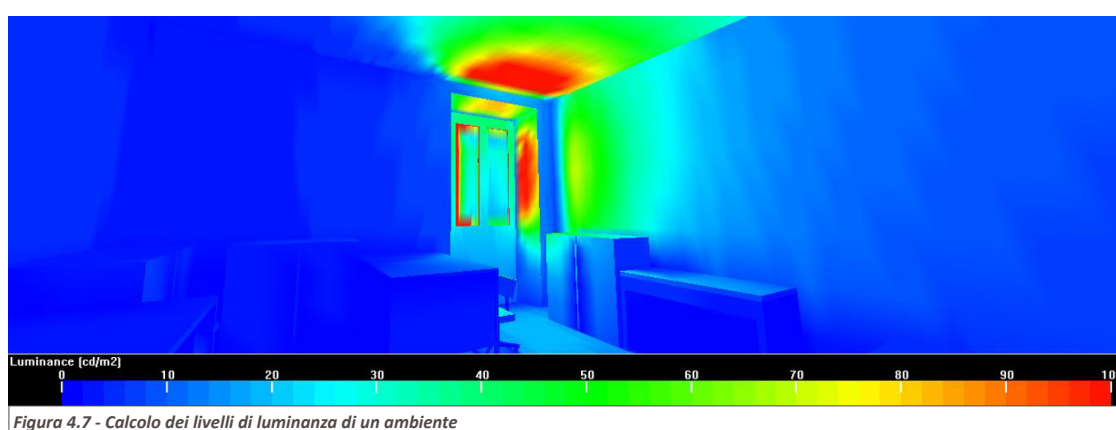
2 - **Radiosity**: questo metodo consiste nella suddivisione di ogni superficie in poligoni (mesh) e nel calcolo delle caratteristiche di illuminazione di punti discreti dell'ambiente; l'energia luminosa viene fatta rimbalzare all'interno dell'ambiente fino a che non viene completamente assorbita. Radiosity effettua un calcolo accurato delle interriflessioni e il risultato è indipendente dal punto di osservazione; tuttavia tutte le superfici vengono considerate come diffusori ideali, quindi non è consentita la rappresentazione delle riflessioni speculari. La suddivisione delle superfici in mesh comporta inoltre l'allocazione di molta memoria.

3 - **Photon Mapping**: questa tecnica consiste nella creazione di una mappa tridimensionale relativa al percorso di un certo numero di fotoni emessi dalle sorgenti luminose di una scena; dalla mappa di fotoni viene ricavata la stima della radianza riflessa sulle superfici, mediante la quale è possibile generare rendering relativi a punti di vista determinati. Il Photon Mapping consente di generare effetti luminosi particolari quali la rifrazione, le caustiche e lo scattering sub-superficie, ma richiede anch'esso elevati tempi di elaborazione.

Alcuni software usano, per ottenere risultati più realistici, la combinazione di queste tecniche: il Photon Mapping può essere usato come base per procedure di calcolo successive di Raytracing, in altri casi vengono eseguiti calcoli di Radiosity seguiti da Ray Tracing[25].

La simulazione dell'illuminazione tramite software illuminotecnici permette di effettuare sia valutazioni qualitative, attraverso i rendering, sia valutazioni quantitative, attraverso la determinazione di grandezze fotometriche; è possibile ottenere rappresentazioni grafiche o tabelle di parametri riguardo: l'illuminamento delle superfici (con statistiche come la media, i massimi, i minimi e la deviazione standard), la luminanza delle superfici (perfettamente diffondenti), l'irradianza (corrispettivo radiometrico dell'illuminamento), indici di visibilità e comfort visivo[23].

Tutti i programmi di simulazione dell'illuminazione globale presuppongono la conoscenza e l'inserimento di alcuni parametri di definizione della luce e dei materiali: sono richieste le dimensioni dell'ambiente, nonché la posizione e l'orientamento degli oggetti e delle fonti luminose presenti all'interno; è necessario che vengano associati i file fotometrici alle sorgenti luminose e che vengano applicate le caratteristiche di riflettanza e trasmittanza alle superfici; devono essere applicati dei fattori che modificano l'emissione delle sorgenti e valutati gli errori di calcolo, quali la perdita di luce, la presenza di zone non illuminate, la bassa definizione delle ombre, la discontinuità



delle zone illuminate (mottling), la saturazione di alcune zone dell'ambiente, l'errata rappresentazione dei colori[25].

Alcuni programmi consentono inoltre di calcolare gli effetti della luce naturale, per i quali è necessario inserire informazioni riguardo la luce del sole e le aperture verso l'esterno, includendo coordinate, data e ora del giorno e condizioni metereologiche.

La valutazione della quantità e della qualità della radiazione elettromagnetica presente in un ambiente espositivo può essere, dunque, valutata con la simulazione che fa uso di modelli di illuminazione globale. Tuttavia questi metodi richiedono tempi lunghi di elaborazione, e la necessità di acquisire le caratteristiche geometriche, materiche ed emmissive degli elementi presenti nell'ambiente comporta l'effettiva ricostruzione della struttura interna espositiva, approccio che favorirebbe, dunque, la pianificazione dello spazio in realtà virtuale.

La simulazione in realtà aumentata potrebbe però essere utile, in questo caso, come supporto pre-progettuale, con il quale è possibile valutare il posizionamento degli oggetti in modo sommario e, al tempo stesso, agevolare la ricostruzione dell'ambiente espositivo, in preparazione dell'analisi illuminotecnica off-line. La fase di acquisizione delle caratteristiche geometriche e materiche dell'ambiente potrebbe, quindi, essere effettuata e assistita da un'applicazione in realtà aumentata che al tempo stesso simulerebbe il posizionamento di opere e strutture.

4.5 - SISTEMA SCELTO

Nonostante siano stati effettuati molti studi e ricerche nel campo delle tecnologie di tracciamento, quelle che consentono sufficiente mobilità, affidabilità, accuratezza ed economicità sono le tecniche marker-based[44]; la popolarità di questi sistemi è provata in parte dalla loro facile implementazione e dalla disponibilità di solide applicazioni per il riconoscimento di marker[37].

La diffusione delle applicazioni per realtà aumentata con tracciamento di marker passivi

è dovuta soprattutto allo sviluppo di ARToolKit, “una serie di librerie di tracciamento e posizionamento open-source”[36] che sono state tradotte in vari linguaggi di programmazione. I sistemi basati su ARToolKit sono generalmente affidabili e allo stesso tempo economici; essi consentono di rilevare posizione e orientamento della scena ad ogni frame, senza porre vincoli sulla camera e richiedendo la sola presenza di un marker planare di geometria quadrata[44].

Il tracciamento ottico di marker consente, attraverso le tecniche di Image Processing, Pattern Recognition e Computer Vision, di individuare un elemento noto al sistema all'interno di un ambiente sconosciuto e determinarne posizione, orientamento e scala. La procedura di generazione di immagini in realtà aumentata viene eseguita ciclicamente ad ogni frame e si compone principalmente di due fasi: il tracciamento e l'identificazione/ricostruzione. Durante la prima fase, nelle immagini riprese dalla camera, viene individuato il marker, mediante il quali è possibile registrare i movimenti relativi alla scena; nella seconda fase, grazie ai dati ottenuti nella prima, avviene la ricostruzione del sistema di riferimento del mondo reale e la sovrapposizione delle entità sintetiche[39].

Gli errori di rilevazione, che possono compromettere il tracciamento stabile del marker, possono essere dovuti alla scorretta quantizzazione dei pixel, a valori di contrasto errati, al motion blur, al rumore dei dati, ecc.

I sistemi di visualizzazione che sfruttano le tecnologie di tracciamento ottico Marker-based possiedono però alcuni svantaggi che potrebbero compromettere l'utilità della simulazione; lo svantaggio più evidente, che riguarda comunque tutti i sistemi accurati di tracciamento, è il range limitato di spazio all'interno del quale è possibile operare. In particolare il sistema di tracciamento Marker-based presenta un ristretto campo di visione: se l'utente muove la camera o raggiunge una distanza eccessiva, il marker esce dalla visuale o non viene più riconosciuto e viene così perduto il riferimento per la sovrapposizione del contenuto virtuale. Questa scomoda limitazione può essere aggirata utilizzando il riconoscimento di tratti caratteristici dell'ambiente in aggiunta

alla rilevazione del marker, tecnica che possiede però bassa affidabilità. Un'alternativa è l'utilizzo di sistemi di tracciamento multi-marker, i quali combinano le informazioni ottenute da ogni marker presente nella scena, guadagnando accuratezza e solidità; ad esempio essi possono gestire parziali occlusioni e dedurre la posizione di un marker, anche se non visibile, sfruttando il tracciamento degli altri marker presenti nel campo di visione[37].

Un sistema di questo tipo può anche tracciare dei marker posizionati in modo non planare, ad esempio disposti a forma di cubo o fissati su un qualsiasi altro oggetto tridimensionale; il problema di questi sistemi è la difficoltà di misura di posizione e orientamento relativi tra i vari marker, il quale processo di calibrazione è dispendioso in termini di tempo e poco accurato se fatto manualmente. La calibrazione può però essere effettuata in modo automatico, facendo uso di tecniche SfM (Structure from Motion), le quali consentono di ricostruire elementi dello spazio confrontando immagini della scena acquisite da posizioni diverse. Solitamente la tecnica SfM richiede elevati tempi e potenza computazionale e viene eseguita in una fase che precede la simulazione; ultimamente sono stati però sviluppati algoritmi che mappano e localizzano l'ambiente in modo simultaneo attraverso un processo che incrementa l'accuratezza con il passare del tempo[37].

Spesso questi tipi di applicazioni consentono anche di variare dinamicamente il sistema, facendo uso di marker statici, utili per il tracciamento della camera, e marker dinamici, usati per movimentare gli oggetti sintetici; le operazioni di preparazione dell'ambiente, nelle quali avviene il posizionamento e la calibrazione dei marker nella scena, fa di però questo metodo un'alternativa abbastanza scomoda da utilizzare, soprattutto per ambienti di grandi dimensioni.

4.5.1 - SISTEMA SPAR

La necessità, soprattutto nel caso in esame, di simulare il posizionamento di oggetti muovendosi liberamente nell'ambiente non verrebbe soddisfatta da alcun metodo, se

non attraverso la dispendiosa e scomoda preparazione dello spazio espositivo mediante la distribuzione di numerosi marker al suo interno.

Questa problematica viene risolta da una tecnologia recentemente sviluppata dal gruppo KAEMaRT del Politecnico di Milano, mediante la quale è possibile “robotizzare” il marker di riferimento, spostarlo nell’ambiente e registrarne i movimenti.

La tecnologia SPAR (Space Planning Augmented Reality) fa uso di un robot (sul quale è applicato un marker), di un computer sorretto da un carrello mobile, che serve da postazione di lavoro, e una webcam, con la quale è possibile rilevare la posizione del marker. Attraverso l’uso di software specifici è possibile spostare il robot e inserire oggetti in una scena virtuale che si sovrappone all’ambiente reale circostante, muovendo il punto di vista in qualunque posizione e direzione. Inoltre, il sistema comprende anche un marker fisso all’interno della scena, che può essere inquadrato solo all’inizio e alla fine del processo, e permette di salvare e riaprire il progetto senza perdere riferimenti con l’ambiente.



Figura 4.8 - Postazione del sistema SPAR

Il sistema SPAR fa uso del comune robot per pulizie domestiche Roomba®, commercializzato dall’azienda americana iRobot. Roomba® dispone di due ruote motrici indipendenti e un terzo ruotino che lo mantiene stabile; l’azionamento separato delle due ruote consente al robot di muoversi lungo una direzione e ruotare su se stesso[36]. Roomba® è stato privato dei componenti delegati alla funzione di pulitura ed è stato modificato per fare in modo che comunicasse con il computer della postazione; un adattatore artigianale connette la porta seriale del robot ad una scheda “XBee”, la

quale permette la connessione wireless con il computer.

I dispositivi di visualizzazione e tracciamento sono attualmente lo schermo del portatile della postazione e una webcam di modesta qualità, i quali potrebbero però essere sostituiti da strumenti più sofisticati, quale un HMD.

Il sistema SPAR fa uso di tre software, anche se l'utente, per svolgere il lavoro, può utilizzare solo il primo[36]:

- **Interface**, si occupa del tracciamento del marker ed include le funzioni per l'inserimento di oggetti nella scena; questo software sfrutta le librerie open source ARToolKit per il tracciamento e le librerie grafiche OpenSceneGraph (OSG) per il rendering video.
- **Roomba Control**, è responsabile della gestione delle azioni del robot e sfrutta una versione modificata dell'applicativo messo a disposizione dall'azienda costruttrice.
- **Server**, ha il compito di inviare al robot i comandi ricevuti da Roomba Control e di inviare a Roomba Control i comandi ricevuti da Interface; esso, quindi, ha il compito di interpretare e tradurre i dati tra le altre applicazioni e il robot.

Il vantaggio di questo sistema consiste nella possibilità di muoversi all'interno di un ambiente spostando sia il punto di vista (la camera), sia l'elemento tracciato (il marker); solitamente se vengono mossi sia la camera sia il marker, "il sistema di tracciamento riesce comunque a determinare la posizione relativa tra i due, ma non nei confronti dell'ambiente circostante"[37]. In questo caso il riferimento rispetto all'ambiente viene mantenuto mediante un sistema di tracciamento che lavora in parallelo a quello Marker-based; il robot è infatti dotato di encoder che misurano la rotazione delle ruote e permettono la ricostruzione degli spostamenti del Roomba®. "I due tracciamenti lavorano sottraendo i dati dell'uno all'altro"[36], consentendo il mantenimento della posizione degli oggetti virtuali durante lo spostamento del robot.

Purtroppo questo tipo di tracciamento, come quello inerziale, è soggetto ad errori incrementali non eliminabili che sono causati da piccole perdite di aderenza delle ruote o dovuti a imprecisioni delle componenti meccaniche; questo significa che per distanze

elevate di percorrenza gli errori di posizionamento possono risultare elevati. La presenza del marker fisso permette di attenuare questo problema, perché, nel momento in cui viene inquadrato assieme al marker mobile, il sistema viene ricalibrato e gli errori incrementali annullati; tuttavia per evitare che la posizione degli oggetti virtuali non risulti eccessivamente variabile è necessario che il robot percorra limitati spostamenti ricalibrando saltuariamente il sistema di riferimento.

Attualmente il sistema SPAR dispone di questo metodo di tracciamento, ma non sono esclusi eventuali implementazioni future di altri sistemi di misura assoluta o relativa con obiettivo la riduzione degli errori.

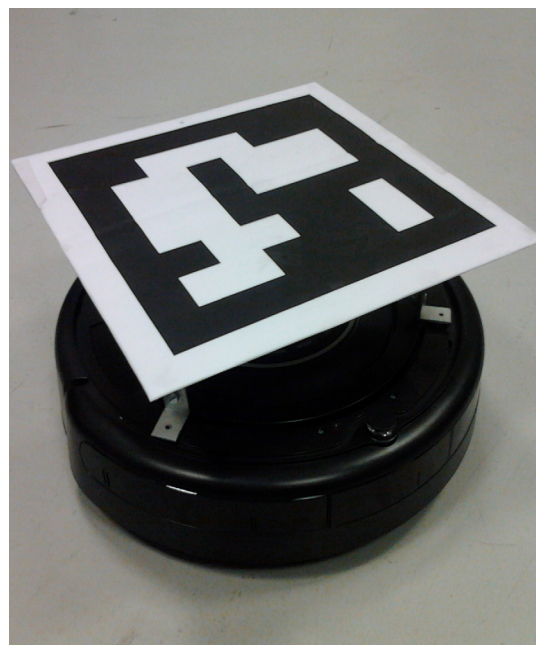


Figura 4.9 - Marker mobile della postazione SPAR

5 - VIRTUAL MODELING

La modellazione virtuale consiste nella realizzazione di entità sintetiche attraverso l'uso di strumenti hardware e software specifici; in particolare la modellazione virtuale tridimensionale consiste in una serie di processi di vario tipo, con i quali è possibile determinare le caratteristiche geometriche e materiche di un modello sintetico visualizzabile al computer in uno spazio virtuale[53]. Le tecniche e gli strumenti per la modellazione digitale sono oggi fortemente diffusi grazie all'incremento delle prestazioni computazionali e alla riduzione dei prezzi di processori e schede grafiche, oltre che dal continuo sviluppo di software e tecnologie specifiche per ogni applicazione[54].

I modelli tridimensionali possono essere ottenuti con processi di modellazione diretta o inversa. La modellazione diretta viene effettuata totalmente a calcolatore e comprende: le tecniche manuali, che fanno uso di strumenti di disegno e sono fortemente guidate dall'utente, e le tecniche procedurali, le quali sfruttano algoritmi di generazione automatica o semi-automatica. La modellazione inversa sfrutta, invece, dispositivi di rilievo che permettono di convertire oggetti esistenti del mondo reale in entità virtuali[63].

La modellazione tridimensionale è oggi fortemente diffusa in tutti i processi di progettazione, i quali hanno origine con la "formulazione concettuale dell'oggetto, che viene progressivamente definita nei suoi dettagli con le tecniche di rappresentazione proprie del disegno"[32]. Il processo più comune

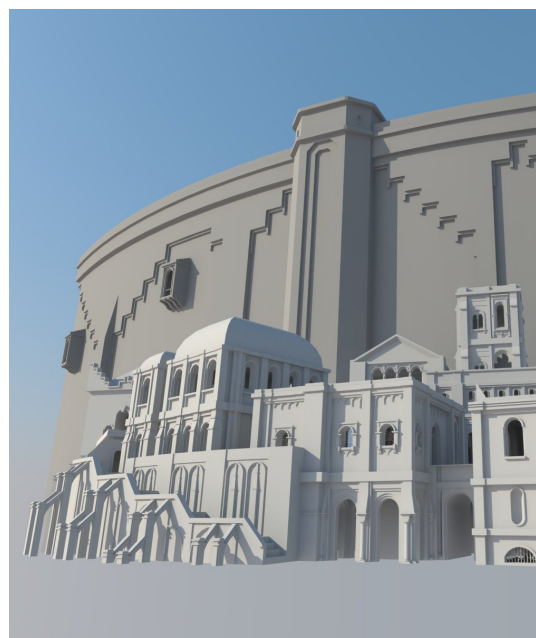


Figura 5.1 - Modello virtuale di strutture architettoniche

prevede poi la traduzione dell'astrazione grafica in oggetto digitale, mediante l'uso di software dedicati, e successivamente la creazione dell'oggetto fisico; al contrario, l'uso della modellazione inversa, determina prima la realizzazione di un modello fisico, il quale in seguito viene convertito in digitale.

In base al tipo di applicazione, la modellazione digitale e, di conseguenza, i modelli generati, sono caratterizzati da differenti priorità: se l'obiettivo è la realizzazione di immagini, come nell'ambito del cinema, dei videogiochi o della pubblicità, il modello deve essere realizzato in modo che appaia visivamente realistico; se, invece, lo scopo è la simulazione di fenomeni fisici o la messa in produzione, come nel settore meccanico industriale, il modello virtuale deve essere accurato dal punto di vista geometrico[54]. Esistono inoltre campi di applicazione, come l'industrial design, nei quali vengono realizzati modelli accurati sia dal punto di vista geometrico che materico; il modello, attraverso le tecnologie digitali, è infatti diventato uno strumento di supporto a tutte le fasi della progettazione industriale; esso viene utilizzato per comunicare le idee, per presentare la geometria, i materiali, il funzionamento, viene sottoposto ad analisi, simulazioni, verifiche e va a coincidere con il prodotto finale[55].

I modelli virtuali tridimensionali possono essere classificati in base alle primitive geometriche di cui sono costituiti; innanzitutto un modello sintetico può essere rappresentato da un solido di volume definito, oppure da un guscio che definisce la sola superficie esterna dell'oggetto. La modellazione per solidi si basa su entità geometriche elementari con le quali possono essere effettuate operazioni Booleane; un'evoluzione di questo metodo è la modellazione parametrica basata su feature, con la quale i solidi sono definiti da relazioni matematiche e vengono generati con operazioni simili a quelle effettuate nella realtà. La modellazione per superfici consiste, invece, nella realizzazione di modelli costituiti da curve e superfici free-form, che generano geometria bidimensionale di forma complessa; la modellazione poligonale permette anch'essa di ottenere il guscio esterno di un oggetto, il quale è però approssimato ad una superficie costituita da facce poligonali. Esistono inoltre tecniche di modellazione

che si basano su entità di tipo volumetrico (voxel) generate attorno a punti geometrici; altre che si basano sulla modellazione di forme poligonali controllate da curve free-form (Subdivision Surface). I moderni software di modellazione permettono una maggiore flessibilità perché gestiscono tecniche ibride, combinando, ad esempio, solidi e superfici, o primitive poligonali e volumetriche[56].

Nella simulazione dell'allestimento possono essere inseriti sia strutture realizzate mediante modellazione diretta sia beni culturali acquisiti con tecniche di modellazione inversa; tuttavia, quest'ultime tecnologie si trovano in una fase di sviluppo più arretrata e possiedono problematiche che possono compromettere il successo del processo di simulazione stesso. Per questo motivo viene fatto un approfondimento sulle tecnologie di Reverse Modeling, analizzandone le diverse categorie ed individuando i metodi che con più facilità possono essere associati alla simulazione del posizionamento di oggetti culturali.

5.1 - REVERSE MODELING

Spesso la modellazione inversa viene intesa solo come acquisizione di nuvole di punti e conversione in strutture poligonali o superfici texturizzate, ma può descrivere un più completo e generale procedimento di ricostruzione dell'oggetto; essa consiste infatti in un "processo che va dall'acquisizione tridimensionale di un oggetto fisico fino ad una sua forma di rappresentazione digitale, sia essa attraverso superfici poligonali o matematiche"[32]. La finalità delle tecnologie di Reverse Modeling è spesso quella di ottenere un modello virtuale che possa essere visualizzato, manipolato, misurato, utilizzato per rielaborazioni fisiche, grazie all'ausilio di un computer; queste tecnologie risultano particolarmente utili per ottenere l'equivalente virtuale di oggetti dalla forma complessa, oggetti che ad esempio possiedono geometrie free-form, per i quali sarebbe praticamente impossibile utilizzare tecniche di rilievo tradizionali[32].

La modellazione tridimensionale può essere impiegata in un'ampia varietà di settori che, a loro volta, includono un vastissimo insieme di modelli fisici dalle più svariate caratteristiche dimensionali, formali e materiche; nonostante questa variabilità di circostanze, i progressi scientifici raggiunti permettono "l'uso di strumenti estremamente differenziati per principio di funzionamento e campi di applicazione"[56]. Molte applicazioni richiedono che l'acquisizione sia ad elevata accuratezza geometrica e materica, ma necessitano al contempo di tecniche a basso costo, ad alta automazione, portabilità e flessibilità[57]; tutti questi sono gli obiettivi attuali della ricerca tecnologica in questo settore.

L'acquisizione di oggetti reali viene sfruttata in molte applicazioni, quali l'ispezione, l'identificazione di oggetti, la visualizzazione e l'animazione, e recentemente è diventata un fase importante e, a volte, fondamentale negli ambiti della progettazione industriale e dei Beni Culturali. In campo progettuale il Reverse Modeling è utile per convertire in digitale le maquette realizzate e, associato alle tecniche di Virtual Prototyping, offre la possibilità di rinnovare ciclicamente la rappresentazione dei modelli fisici e digitali,

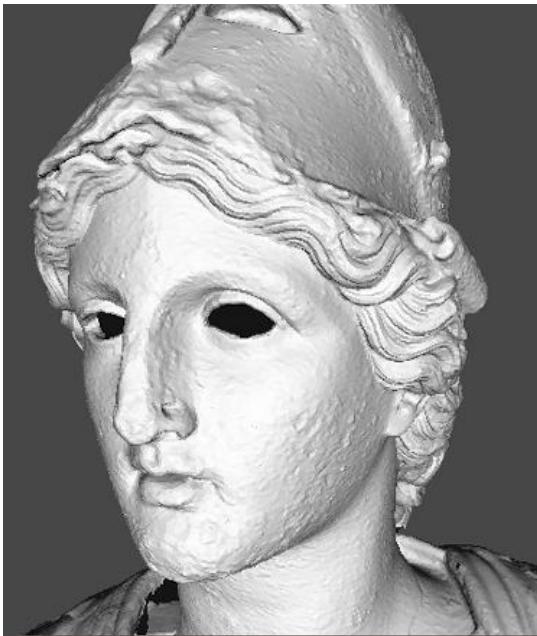


Figura 5.2 - Modello virtuale acquisito con Reverse Modeling

apportando le modifiche degli uni sugli altri e viceversa[56].

"Nel campo dei Beni Culturali lo sviluppo delle nuove tecnologie di acquisizione tridimensionale ha trovato un terreno fertile"[32], perché rappresenta una valida soluzione per il rilievo di geometrie complesse, in tempi relativamente rapidi e con strumenti che non entrano in contatto con la superficie, evitando rischi di alterazione delle proprietà materiche; in questo campo la modellazione inversa può avere molteplici obiettivi, come l'analisi e l'interpretazione del bene, la creazione di un patrimonio culturale

digitale, la ricostruzione virtuale delle forme originarie e la visualizzazione in realtà virtuale per l'educazione e l'intrattenimento[57].

Ad oggi, le due tecniche che sono state sviluppate ed utilizzate maggiormente nei Beni Culturali sono la fotogrammetria digitale e la scansione laser tridimensionale. La fotogrammetria è una tecnica "economica ma estremamente precisa, facilmente integrabile utilizzando diversi livelli di scala, basata su strumenti facilmente trasportabili ma tecnologicamente evoluti, che permettono acquisizioni veloci sia della geometria che della componente cromatica"[32]. La scansione laser è una tecnica veloce e con automatismi in fase di acquisizione, può variare la risoluzione di acquisizione in funzione della geometria, consente di rilevare forme ad alto livello di complessità ed è quasi sempre indipendente dalle condizioni di luce ambientale[32].

La tecnologia di modellazione inversa è richiesta a priori per usufruire della simulazione del progetto di allestimento, perché spesso quest'ultimo necessita della presenza di oggetti che non sono ancora stati digitalizzati; la particolarità di questa applicazione è il fatto che gli oggetti digitali rappresentano un valido strumento come in qualunque campo di progettazione, ma l'obiettivo non è lo sviluppo degli oggetti stessi, bensì la pianificazione dell'ambiente all'interno del quale essi devono essere posizionati. In questo caso, quindi, i soggetti dell'acquisizione tridimensionale sono le unità artistiche e culturali, mentre il soggetto della prototipazione virtuale è la disposizione degli oggetti e delle strutture all'interno del luogo destinato all'esposizione.

5.2 - SISTEMI DI ACQUISIZIONE TRIDIMENSIONALE

Gli strumenti di acquisizione tridimensionale consentono di inquadrare una scena reale e generare un'immagine tridimensionale, la quale può essere utilizzata per svariate applicazioni.

Una prima suddivisione può essere fatta tra tecniche distruttive e non distruttive. Le prime prevedono il sezionamento fisico dell'oggetto, l'acquisizione bidimensionale di

ogni sezione e l'elaborazione delle stesse per generare un modello tridimensionale sia della superficie esterna sia dei volumi interni; le seconde prevedono, invece, l'acquisizione di volumi tridimensionali senza compromettere l'integrità dell'oggetto. In quest'ultima classe esistono tecniche che consentono di catturare la sola superficie esterna di un oggetto, tramite radiazioni non ionizzanti o sensori meccanici, e tecniche che permettono di acquisire i volumi interni, grazie all'utilizzo di radiazioni ionizzanti o ultrasuoni[32].

Le tecniche che vengono approfondite per il caso in analisi sono ovviamente quelle non distruttive e che fanno uso di radiazioni non ionizzanti, e comprendono quegli strumenti che vengono generalmente usati per l'acquisizione della superficie esterna di beni artistici, culturali e di design.

Queste tecniche necessitano però di un'ulteriore classificazione che dipende dal tipo di radiazione elettromagnetica di cui fanno uso: le tecniche passive sfruttano la luce presente nell'ambiente, sia essa naturale o artificiale, mentre le tecniche attive utilizzano radiazione luminosa codificata, ovvero caratterizzata da contenuto informativo riconoscibile da un sensore elettronico. Inoltre i sensori attivi acquisiscono direttamente i punti della superficie dell'oggetto (Range-based modeling), mentre i sensori passivi, solitamente, forniscono solo immagini bidimensionali che richiedono una successiva elaborazione per ricavare le coordinate tridimensionali dei punti (Image-based modeling)[57]. Esistono inoltre tecniche ibride che combinano sensori attivi e passivi, utili particolarmente per acquisizioni sia geometriche che materiche particolarmente accurate e per oggetti che possiedono grandi dimensioni e piccoli dettagli, quali le strutture architettoniche.

A causa di limitazioni tecniche e requisiti applicativi, le tecnologie per la digitalizzazione tridimensionale vengono anche classificate in base alla grandezza degli oggetti ai quali sono applicate[58]; in questa ricerca viene però tralasciata l'acquisizione di oggetti di grandi dimensioni, mentre vengono approfonditi i metodi di ricostruzione virtuale di oggetti di medio-piccole dimensioni.

5.2.1 - SISTEMI PASSIVI

Come già accennato, la maggior parte dei sistemi passivi sfrutta tecniche di modellazione Image-based e si limita ad ottenere dati dalle immagini realizzate nell'ambiente, senza interagire direttamente con esso. Generalmente la strumentazione utilizzata è a basso costo e facile da movimentare; essa possiede sistemi ottici di acquisizione e software ad esecuzione manuale o automatica che permettono di effettuare valutazioni dimensionali tra punti caratteristici individuati sull'oggetto. Solitamente la modellazione Image-based impiega molteplici viste catturate nella scena; esistono tuttavia tecniche che fanno uso di una o due immagini per ricavare misure tridimensionali[57], ma non consentono la completa ricostruzione degli oggetti e non vengono, dunque, tenute in considerazione in questa analisi.

Una delle tecniche passive più conosciute ed utilizzate per l'acquisizione di geometrie tridimensionali è la fotogrammetria; in particolare questo metodo può essere applicato ad oggetti di qualsiasi dimensione, ma nel caso di piccoli oggetti e distanze di ripresa ridotte essa prende il nome di fotogrammetria dei vicini.

Questa tecnica fa uso di una macchina fotografica, la quale serve per acquisire immagini di un oggetto da angolazioni diverse; tra le riprese effettuate vengono individuati punti omologhi che consentono di generare una nube di punti rappresentante la forma dell'oggetto. I punti che vengono acquisiti con tecnica fotogrammetrica corrispondono a particolarità geometriche o cromatiche individuabili sull'oggetto, le quali possiedono, dunque, un adeguato livello di contrasto con lo sfondo. Per questi motivi la fotogrammetria richiede una buona illuminazione e gli oggetti più facilmente acquisibili sono quelli che possiedono forme geometriche regolari o molti punti caratteristici sulla superficie[32].

La fotogrammetria consente di stabilire relazioni geometriche tra le immagini e la scena reale, ottenendo informazioni metriche e tridimensionali molto accurate, ma richiede una procedura manuale molto lunga, soprattutto per geometrie complesse. Attualmente sono in fase di sviluppo procedure fotogrammetriche automatiche di Image-matching

che consentono di velocizzare il processo di allineamento delle immagini; tuttavia, se l'obiettivo principale dell'acquisizione tridimensionale non è l'accuratezza geometrica, esistono già oggi numerose tecniche automatiche di Computer Vision capaci di generare modelli tridimensionali accettabili per applicazioni di realtà virtuale[59].

Esistono svariati metodi passivi ed automatici che consentono di ottenere nuvole di punti sfruttando le sole informazioni contenute nelle immagini acquisite dalla scena. Gli algoritmi di elaborazione di questi metodi vengono classificati in base al tipo di informazione che utilizzano; i più importanti sono i seguenti:

1 - **Shape from Silhouette**: l'acquisizione di forma da silhouette è un metodo passivo che deriva dalla fotoscultura, il cui principio era quello di acquisire i profili di un oggetto da varie angolazioni per poi proiettarli su materiale da scolpire. Questa tecnica fa uso dello stesso principio, con la differenza che il processo è effettuato in virtuale con l'uso del calcolatore; il processo di acquisizione che sfrutta questa tecnica è robusto, veloce, automatizzato e a basso costo, ma, a causa del tipo di informazioni usate, limitato a oggetti di forma semplice. Recenti sviluppi di questa tecnica fanno uso di informazioni tratte dalla texture per correggere o migliorare la geometria acquisita[60].

2 - **Shape from Shading**: questa tecnica di acquisizione sfrutta le proprietà diffuse delle superfici, confrontando immagini dell'oggetto sottoposto a varie condizioni di illuminazione; la variazione della posizione della sorgente luminosa è causa del cambiamento dell'ombreggiatura sulla superficie, mediante la quale viene dedotta la geometria dell'oggetto. Questo metodo è relativamente semplice, ha un basso costo e cattura sia la geometria che la texture, ma, se non combinato con altri metodi, risulta essere poco accurato[58].

3 - **Shape from Texture**: l'acquisizione della forma mediante la valutazione della texture dell'oggetto inquadrato può essere effettuata solamente se quest'ultima è conosciuta dal sistema. Il principio consiste nell'identificazione di piccoli elementi ripetuti nella texture (texel) e nell'individuazione delle loro trasformazioni sulla superficie per dedurre l'andamento geometrico. Il metodo è semplice e a basso costo, ma ha limitate applicazioni ed è poco accurato[58].

4 - **Shape from Focus**: questa tecnica, per dedurre la geometria tridimensionale della scena, sfrutta la profondità di campo delle immagini acquisite. Il metodo consiste nell'acquisizione di fotografie dalla stessa posizione, ma con messa a fuoco differente, e nell'assegnazione ad ogni pixel della corretta coordinata di profondità. Questo sistema possiede però bassa risoluzione e accuratezza, e necessita inoltre di lenti speciali che comportano un costo della strumentazione relativamente alto[58].

5 - **Shape from Motion**: l'acquisizione della forma da movimento deriva direttamente dal metodo fotogrammetrico, ma a differenza di quest'ultimo, è un processo quasi totalmente automatico; algoritmi specifici di Computer Vision consentono di identificare punti omologhi tra immagini diverse e permettono di registrarne le coordinate tridimensionali in una scena virtuale. I vantaggi di questo metodo, conosciuto come SfM (Structure from Motion) sono il basso costo, la mobilità della strumentazione e la capacità di ottenere sia la geometria che la texture dell'oggetto; il processo di acquisizione delle immagini può essere inoltre velocizzato mediante l'uso di videocamere ad alta qualità (Shape from Video), con le quali è possibile ottenere filmati



Figura 5.3 - Tecnica di acquisizione Structure from Motion

in alta definizione ed estrarre frame utili per la fase di orienting[58].

In tutti i casi sopra descritti, un fattore importante ai fini della corretta acquisizione dell'oggetto è la calibrazione della camera, necessaria per eliminare le distorsioni delle immagini causate da ragioni ottiche e meccaniche. Nel caso di oggetti piccoli e distanze ravvicinate la calibrazione della camera risulta essere ancor più necessaria a causa della convergenza degli assi di ripresa.

Tra i vari sistemi di acquisizione, la tecnica Structure from Motion risulta essere particolarmente indicata per gli oggetti che vengono analizzati in questo studio, dei quali devono essere ricostruite in modo mediamente accurato sia la forma che la texture; anche se la varietà materica e geometrica è molto ampia, è facile pensare che la maggior parte di questi oggetti possieda discontinuità e superfici irregolari, per le quali è utile sfruttare procedure di allineamento automatiche.

Un vantaggio che possiedono i moderni software che sfruttano questo metodo è infatti l'automazione delle fasi di ricostruzione geometrica e materica, attraverso le quali è possibile ottenere rapidamente il modello digitale completo dell'oggetto.

5.2.2 - SISTEMI ATTIVI

I sistemi attivi per l'acquisizione di oggetti tridimensionali fanno uso di tecniche Range-based e sono pressoché indipendenti dalla texture dell'oggetto[32]; essi fanno uso di strumenti (range camera) costituiti generalmente da una sorgente luminosa e un sensore che ne capta la radiazione codificata riflessa dall'oggetto. Questi sistemi sono spesso basati su costosi sensori che permettono di ottenere la sola rappresentazione geometrica, anche se molto accurata e dettagliata[57]; ad oggi esistono sistemi che acquisiscono direttamente anche la riflettanza e il colore di ogni punto catturato, ma il risultato di quest'ultimo è qualitativamente scarso e viene usato soprattutto come supporto alla fase di allineamento delle scansioni.

Le tecniche Range-based consentono di registrare nubi di punti nello spazio in modo

automatico, con un alto livello di precisione, e non richiedono la presenza di elementi caratteristici sull'oggetto; analogamente ai pixel delle immagini bidimensionali, la superficie inquadrata dal sensore viene suddivisa in punti immagine, ai quali vengono però assegnate le tre coordinate spaziali ed eventualmente il colore[32].

Nell'ampia varietà di strumenti attivi di acquisizione è possibile fare una prima classificazione relativa al principio di funzionamento: il metodo della triangolazione e quello della misura di distanza. La tecnologia più appropriata viene scelta, in questo caso, in relazione alla dimensione dell'oggetto, la quale influisce sulla distanza a cui esso si deve trovare rispetto al sensore.

1 - Il principio della triangolazione viene sfruttato dagli strumenti per la scansione tridimensionale per determinare la posizione dei punti che vengono illuminati sulla superficie di un oggetto; la distanza tra la sorgente luminosa e il sensore di ripresa viene denominata baseline, mentre la distanza tra il piano di ripresa del sensore e il foro di entrata della luce è detta distanza focale. In generale, conoscendo l'inclinazione della fonte luminosa e i valori sopra citati è così possibile calcolare, attraverso relazioni trigonometriche, la distanza dei punti illuminati[32].

Esistono vari tipi di strumenti che sfruttano questo principio, tra cui gli scanner a lama di luce laser e i sensori a luce strutturata; nel primo caso viene proiettata una singola linea luminosa con luce laser, mentre nel secondo caso viene proiettato un pattern costituito da bande verticali o altre forme.

I sistemi a scansione laser acquisiscono la forma delle superfici proiettando linee di luce laser sull'oggetto, misurando la deformazione delle stesse mediante un rilevatore ottico integrato nello strumento e determinando la profondità di ogni singolo punto.

I laser scanner più diffusi fanno uso di una lama di luce generata dalla riflessione e rifrazione del laser in un sistema ottico di specchi e lenti; in questo caso un movimento meccanico micrometrico fa ruotare o traslare la lama di luce in direzione ortogonale a quella del segmento di luce stesso. Il volume di ripresa del sistema dipende, quindi, dal movimento del laser e dalla profondità di campo concessa dall'ottica; quest'ultima

viene spesso ampliata mediante meccanismi di basculaggio del piano immagine, i quali consentono così la messa a fuoco di un'area maggiore[32]. L'utilizzo della sorgente laser è vantaggioso perché genera un segnale molto luminoso e altamente focalizzato anche ad elevata distanza; i sistemi a scansione laser permettono di effettuare misure geometriche molto accurate, ma, rispetto alle altre tecnologie, hanno un costo più alto[58].

I sistemi a luce strutturata si basano sulla proiezione di pattern specifici sulla superficie dell'oggetto e sull'estrapolazione della geometria mediante l'osservazione della deformazione del pattern stesso[58].

Spesso vengono utilizzate sequenze di strisce verticali alternate di luce e ombra, che è un metodo simile al rilievo delle proiezioni di luce laser, ma in questo caso le lame di luce vengono prodotte tutte insieme. Un metodo alternativo che può essere utilizzato dai sistemi a luce strutturata, per ricavare le coordinate spaziali dei punti di una superficie, sfrutta la sovrapposizione di pattern simili che generano figure di interferenza (effetto



Figura 5.4 - Tecnica di acquisizione a proiezione di pattern

Moiré). I pattern proiettati possono essere semplici linee parallele in bianco e nero, ma anche disegni colorati dalla forma più varia, come griglie rettangolari o serie di cerchi; in ogni caso, l'acquisizione si basa sulla "conoscenza a priori della forma proiettata e sulla valutazione delle coordinate spaziali per ogni pixel dell'immagine"[32]. I sistemi a luce strutturata consentono di ottenere nuvole di punti senza che vengano sfruttati movimenti meccanici di precisione e sono solitamente caratterizzati da buona portabilità e facilità d'utilizzo[58].

2 - I sistemi di acquisizione a misura di distanza fanno uso di varie tecniche, tra cui la più diffusa è il tempo di volo (TOF, Time of Flight). Il funzionamento di questa tecnica consiste nella misura del tempo impiegato dalla luce (impulso laser) per raggiungere l'oggetto inquadrato e tornare allo strumento; questo intervallo di tempo, congiuntamente alla conoscenza degli angoli, permette di risalire alle coordinate spaziali di ogni punto della superficie, consentendo l'estrapolazione di una nube di punti. I sistemi a misura di distanza vengono denominati LIDAR o Laser Radar, e solitamente incorporano la sorgente luminosa e il sensore nella stessa unità; la radiazione luminosa utilizzata può essere sia pulsata che continua e la misura del tempo di volo può essere diretta o indiretta, mediante la modulazione del segnale in ampiezza o in frequenza[32].

I sistemi di acquisizione a tempo di volo vengono solitamente utilizzati per rilevare oggetti di grandi dimensioni, come strutture architettoniche, e richiedono una notevole distanza tra strumento e soggetto per ottenere livelli di precisione accettabili; di conseguenza, il campo di applicazione di questi strumenti è molto diverso rispetto a quello delle tecniche che sfruttano la triangolazione, le quali sono infatti utilizzate per acquisire oggetti di dimensioni ridotte e le loro distanze di ripresa generalmente non superano i 2 m.

Risulta importante constatare che, anche ai fini di questo studio, per distanze di acquisizione comprese tra 2 e 10 metri è da sempre esistito un vuoto strumentale, causato dai limiti delle due principali tecniche attive di acquisizione tridimensionale. Tuttavia, in tempi recenti, hanno iniziato a diffondersi tecnologie TOF a modulazione d'ampiezza o frequenza, in grado di includere nei campi di utilizzo anche oggetti di dimensioni ridotte e distanze ravvicinate; per questo motivo, le tecniche attive a tempo di volo, oltre ai sistemi a triangolazione, vengono prese in considerazione come gli strumenti maggiormente adatti per l'acquisizione geometrica di precisione delle unità destinate alle esposizioni culturali.

Nel caso in analisi, i sistemi attivi verrebbero utilizzati per la digitalizzazione di oggetti che, a causa di particolari caratteristiche materiche e geometriche, non possono essere

acquisiti con sistemi passivi; l'utilizzo delle tecniche Range-based è inoltre conveniente nel caso in cui l'organizzazione che gestisce l'esposizione, come un museo, è interessata a digitalizzare il patrimonio culturale posseduto, a fronte di vari obiettivi quali: la catalogazione, la documentazione, la conservazione preventiva, la ricostruzione dei beni danneggiati, la divulgazione e l'interazione digitale[61]. Tuttavia le tecniche attive non consentono di acquisire la texture in modo adeguato e, quindi, devono essere supportate da strumenti di acquisizione Image-based.

5.3 - SCELTA DEL SISTEMA

La scelta dei sistemi di acquisizione e delle tecniche di modellazione tridimensionale dipende dalla complessità del dato di partenza, dalle condizioni ambientali in cui esso si trova, dall'applicazione finale per la quale è richiesto il modello tridimensionale e dalle risorse disponibili; questi elementi non solo consentono di scegliere tra tecniche di acquisizione diverse, ma anche tra strumentazioni che sfruttano la stessa tecnica ma possiedono caratteristiche differenti.

1 - **L'oggetto fisico**, ovviamente, influisce sulla difficoltà di acquisizione, la quale dipende anche dalla [capacità degli strumenti di poter rispondere coerentemente al livello di complessità]³² geometrica e materica dell'oggetto stesso. Ad oggi non esiste nessun criterio oggettivo che consente di calcolare matematicamente la complessità di un oggetto; è possibile però effettuare una valutazione relativa che nasce dal confronto di modelli fisici secondo criteri di analisi predefiniti.

Le caratteristiche formali “prendono in considerazione tutti gli aspetti legati alle geometria, alla dimensione e allo sviluppo spaziale fino ad arrivare all'analisi sulla variazione di curvatura e alla presenza o meno di particolari in rapporto alla dimensione principale del modello”[32].

L'aspetto dimensionale delle unità da rilevare è determinante per capire quale livello di dettaglio è possibile raggiungere con i vari metodi di acquisizione tridimensionale

e quali non sono adatti per la categoria richiesta. L'estensione spaziale, come già spiegato in precedenza, rappresenta le direzioni verso le quali l'oggetto si estende nello spazio; il tipo di estensione determina il livello di difficoltà con la quale vengono allineate le riprese della superficie[32]. Se lo sviluppo dell'oggetto è monodimensionale o bidimensionale la corretta sovrapposizione delle riprese risulta complicata, mentre se lo sviluppo è tridimensionale l'allineamento risulta più semplice e preciso. Il rapporto tra la dimensione più grande del modello e il più piccolo particolare serve per capire la definizione con la quale è possibile catturare il dettaglio stesso; è facile intuire che, a parità delle altre condizioni, la precisione di acquisizione è maggiore se il rapporto genera un valore basso. Un altro aspetto geometrico che condiziona la scelta del metodo di acquisizione da utilizzare è la presenza di sottosquadri, i quali non consentono di raggiungere tutte le zone della superficie esterna dell'oggetto, impedendone la completa ricostruzione; il sistema di acquisizione influisce su questo fattore perché può possedere una capacità minore o maggiore di ridurre le zone d'ombra.

Le caratteristiche materiche che influiscono sulla qualità e sulla scelta del metodo di acquisizione sono: il colore, l'opacità e la finitura superficiale. In generale i materiali caratterizzati da un'alta percentuale di luce riflessa in modo diffuso e basse componenti di luce assorbita e luce riflessa in modo speculare sono quelli maggiormente adatti al rilievo ottico.

Per quanto riguarda l'opacità, è evidente capire che le superfici opache sono le migliori da acquisire, mentre la carenza di luce riflessa dei materiali trasparenti li rende poco compatibili con le tecniche ottiche di acquisizione. La finitura superficiale, che in realtà è una caratteristica geometrica di dettaglio, determina il tipo di risposta che la luce ha sull'oggetto e può variare da molto rugosa a molto lucida; in quest'ultimo caso essa determina una grossa difficoltà di acquisizione perché la maggior parte della radiazione luminosa incidente viene riflessa in una sola direzione e i riflessi sulla superficie cambiano a seconda del punto di vista. Il colore incide sulla complessità di acquisizione perché i metodi ottici funzionano tanto meglio quanto è minore la quantità di luce assorbita, dunque, le superfici migliori da rilevare sono quelle di colore chiaro. Inoltre, nel caso di tecniche attive, il colore che meno si discosta da quello della luce codificata,

meno interferisce con la radiazione incidente utilizzata per il rilievo. Per quanto riguarda le tecniche passive, invece, non è tanto il colore in sé che determina la complessità di acquisizione, quanto la presenza di contrasti che determinano punti caratteristici.

2 - L'**ambiente** dove avviene il rilievo incide mediante vari fattori, tra i quali i più importanti sono l'illuminazione, lo spazio disponibile e l'eventuale alimentazione elettrica.

Per quanto riguarda l'illuminazione, solitamente la condizione ottimale per l'uso di tecnologie di acquisizione attive è l'assenza di luce, dato che la presenza di altre radiazioni luminose può interferire con quelle usate per la misurazione; per tecniche che fanno uso di metodi passivi, invece, è utile che l'ambiente presenti un buon livello di intensità luminosa di tipo diffuso.

Lo spazio di movimentazione è un altro fattore di scelta molto importante perché gli strumenti di acquisizione tridimensionale devono essere spostati attorno all'oggetto per effettuare la cattura da angolazioni diverse; il sistema di acquisizione viene inoltre selezionato in base alla mobilità richiesta per il trasporto della strumentazione dal deposito al luogo dove viene effettuata l'acquisizione.

3 - Il **modello virtuale** influisce sulla scelta della tecnica di acquisizione in relazione alle caratteristiche richieste dall'applicazione finale per la quale esso viene generato.

I fattori richiesti dall'applicazione, nonché proprietà del modello sintetico, sono: la precisione e il livello di dettaglio geometrico desiderato, la qualità della texture, se richiesta, e la conformità dei dati ottenuti a standard esistenti[58].

4 - Le **risorse** possedute che incidono sulla scelta sono: la disponibilità economica, le competenze necessarie per l'utilizzo di strumentazione e software e il tempo disponibile per acquisizione e post-processing. Il tempo di acquisizione corrisponde alla durata di una singola ripresa effettuata con lo strumento, moltiplicata per il numero di riprese necessarie per poter generare una ricostruzione completa dell'oggetto; la durata della ripresa influisce prevalentemente sulle tecniche di acquisizione attive, mentre il tempo

di acquisizione delle tecniche passive è influenzato fortemente dall'elevato numero di riprese richieste. Sia le tecniche passive sia quelle attive, per ottenere un modello tridimensionale completo, necessitano di un certo tempo di post-elaborazione, il quale dipende sia dalla tecnologia utilizzata sia dalla complessità del modello.

5.4 - REQUISITI

La simulazione in realtà aumentata per il posizionamento dei contenuti di un allestimento richiede che vengano generati ed utilizzati dei modelli tridimensionali; mentre le strutture dell'allestimento possono essere modellate con tecniche dirette, le opere da esporre spesso non possiedono controparti virtuali, le quali, perciò, devono essere generate mediante tecniche di modellazione inversa.

Il requisito principale della tecnologia di Reverse Modeling applicata al progetto di allestimento è, dunque, l'acquisizione di oggetti, principalmente di geometria tridimensionale e di difficile movimentazione.

Uno degli obiettivi della simulazione è la valutazione degli spazi all'interno dell'ambiente espositivo; per raggiungere questo scopo i modelli digitali non devono necessariamente essere fedeli agli originali, bensì possono fornire anche solo una rappresentazione schematica. La rappresentazione fotorealistica dell'ambiente per la valutazione estetica e illuminotecnica richiede, invece, che i contenuti virtuali siano il più possibile fedeli agli originali, sia dal punto di vista geometrico che materico; nonostante sia relativamente semplice generare e interagire con entità virtuali tridimensionali, la loro visione fotorealistica richiede ancora notevoli sforzi e risorse[57]. Queste difficoltà dipendono sia dalla fedeltà con la quale i modelli virtuali vengono rappresentati, ma anche dal modo in cui essi vengono realizzati o acquisiti dalla realtà; l'acquisizione di forma e materiale di un oggetto può essere effettuata con dispositivi differenti e in passaggi separati, ma esistono tecniche, come quelle Image-based, che consentono la ricostruzione di tutte le proprietà in modo simultaneo ed con un unico tipo di strumentazione.

Due operazioni che devono essere eseguite prima di qualunque tipo di acquisizione sono la calibrazione della strumentazione e la pianificazione del progetto di presa. La calibrazione dei dispositivi utilizzati per il rilievo “consiste nell’estrazione dei parametri caratteristici interni di funzionamento, tali da poter controllare in maniera globale il comportamento dello strumento e gli errori introdotti nell’acquisizione del dato”[32]; la pianificazione del rilievo consiste, invece, nella definizione approssimativa del numero, delle distanze e degli orientamenti delle riprese rispetto all’oggetto, con obiettivo la completa ricostruzione geometrica o materica della superficie.

5.4.1 - ACQUISIZIONE DELLA FORMA

La forma degli oggetti tridimensionali può essere ricostruita in digitale attraverso l’uso di varie tecniche, le quali vengono sfruttate da un’ampia pluralità di strumenti hardware e software, caratterizzati da notevoli differenze di costo e accuratezza di rilievo della geometria[62].

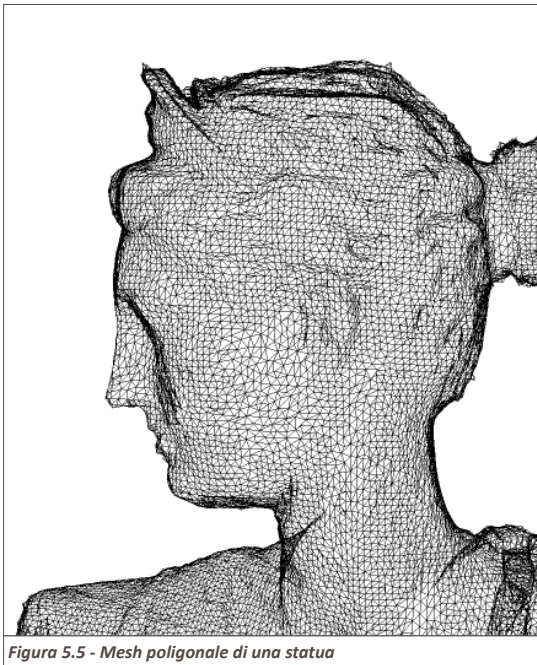


Figura 5.5 - Mesh poligonale di una statua

Generalmente, gli strumenti di acquisizione rilevano la forma di un oggetto approssimando la superficie reale ad una nube di punti digitale, la quale viene poi elaborata per ottenere una struttura poligonale chiamata mesh[32].

La nuvola di punti è costituita da gruppi di triplete di coordinate X,Y,Z nello spazio, corrispondenti ad ogni punto della superficie rilevato; in base alla tecnica usata la nube può essere strutturata, ovvero composta da una griglia di punti posizionati in modo logico, oppure non strutturata, quindi costituita da punti

disposti in modo disorganizzato nello spazio[32]. La mesh poligonale è una struttura costituita da vertici, spigoli e facce, solitamente triangoli o quadrilateri, e definisce un oggetto poliedrico; la mesh poligonale può essere rappresentata e memorizzata in configurazioni di dati differenti, le quali vengono scelte in base all'applicazione che ne fa uso.

Esiste una sequenza di operazioni, in parte comune a tutte le tecniche di acquisizione geometrica, che viene chiamata "3D acquisition pipeline"; dopo la calibrazione e la pianificazione del rilievo, le due fasi principali del processo consistono nella cattura delle informazioni mediante strumenti specifici e nell'elaborazione dei dati ottenuti attraverso l'uso del calcolatore e di software dedicati.

1 - Le informazioni acquisite durante il rilievo possono essere di vario tipo, a seconda della tecnica utilizzata; come spiegato precedentemente, i sensori attivi rilevano direttamente nuvole di punti, mentre i sensori passivi acquisiscono immagini bidimensionali.

Il rilievo dei dati viene eseguito in base alla pianificazione delle riprese effettuata precedentemente e, in relazione al tipo di oggetto e di strumentazione in uso, si può muovere il sensore attorno all'oggetto, o, mantenendo fisso lo strumento, far ruotare l'oggetto su una pedana mobile. Inoltre, in questa fase, il controllo ambientale è un parametro importante perché la tecnologia in uso può richiedere particolari condizioni di illuminazione della scena.

Come spiegato precedentemente, le proprietà materiche dell'oggetto sono molto importanti perché possono compromettere la corretta acquisizione geometrica effettuata con qualunque tecnica; in questo caso è possibile sfruttare metodi di trattamento superficiale che rendono il materiale dell'oggetto cooperante, ma non sempre essi possono essere utilizzati.

2 - Nella fase di elaborazione vengono effettuate varie operazioni atte a convertire i dati acquisiti in una struttura poligonale completa, che viene inoltre corretta ed ottimizzata per l'applicazione a cui è destinata.

Le tecniche passive presentano un'operazione di allineamento delle immagini

necessaria per rilevare i punti omologhi e generare la nube; in relazione alla complessità dell'oggetto questa operazione può essere effettuata in modo manuale, semi-automatico o totalmente automatico. Anche le tecniche di acquisizione attive, che acquisiscono porzioni di superfici, presentano un fase di allineamento dei dati; essa viene effettuata con una procedura semiautomatica che sfrutta la parziale sovrapposizione delle riprese individuando una corrispondenza geometrica. La fusione dei dati viene effettuata dopo che tutte le porzioni di mesh sono state allineate reciprocamente, e consiste nella generazione automatica di un'unica struttura che non tiene traccia delle riprese originali[32].

In tutti i metodi di acquisizione, l'operazione di conversione dalla nube di punti in superficie poligonale viene chiamata "meshing" e consiste nella costruzione di poligoni che hanno come vertici i punti della nuvola; la struttura poligonale viene creata in modo automatico rispettando vari requisiti impostati dall'utente, come il limite al numero e alla dimensione degli elementi[57]. Prima o dopo la ricostruzione della geometria poligonale, vengono effettuate operazioni manuali di filtraggio, le quali consentono di modificare le coordinate spaziali dei punti acquisiti che presentano informazioni sbagliate o non necessarie; queste operazioni comportano infatti l'eliminazione degli elementi estranei e la correzione dei dati incompatibili con la geometria[32].

Nella fase di elaborazione vengono inoltre effettuate operazioni di editing per correggere e rifinire la superficie poligonale generata. I software di elaborazione tridimensionale consentono di individuare e correggere: gli errori topologici, ovvero connessioni di poligoni costruite in modo errato, e le lacune della mesh, interruzioni che possono essere causate da zone d'ombra, caratteristiche riflettenti o riprese incomplete della superficie; la mesh poligonale può inoltre essere lisciata mediante l'utilizzo di algoritmi di riduzione del rumore geometrico e può essere regolarizzata attraverso algoritmi di remesh che riorganizzano la posizione dei vertici. Inoltre, in base agli obiettivi del modello digitale, possono essere effettuate operazioni di decimazione e di suddivisione, le quali rispettivamente diminuiscono e aumentano il numero dei poligoni della mesh. In alcuni campi di applicazione, quale la progettazione industriale, esiste un'ulteriore

passaggio che consiste nella ricostruzione della geometria mediante la conversione della mesh in superfici matematiche; tuttavia nell'ambito dei Beni Culturali questa fase non è necessaria perché gli oggetti sono solitamente caratterizzati da proprietà geometriche superficiali irregolari.

5.4.2 - ACQUISIZIONE DEL MATERIALE

La simulazione dell'allestimento prevede che vengano utilizzati modelli di illuminazione locale, i quali determinano rilevanti approssimazioni delle proprietà materiche delle entità virtuali; esistono però numerose tecniche che consentono di rappresentare in modo realistico i materiali, senza compromettere l'interattività del processo.

In queste applicazioni, la riproduzione delle proprietà visive di un modello sintetico viene chiamato "shading" e consiste nell'alterazione del colore di un oggetto in relazione a distanza, direzione e proprietà delle sorgenti luminose della scena; il metodo di rappresentazione del comportamento fisico del materiale può presentare vari livelli di qualità, all'aumentare della quale, però, diminuisce l'efficienza[63].

L'applicazione di un colore uniforme al modello tridimensionale permette di rappresentare molti materiali diversi, ma gran parte degli oggetti reali presentano notevoli discontinuità cromatiche; questa caratteristica, particolarmente comune negli oggetti destinati ad un'esposizione culturale, può essere riprodotta mediante l'utilizzo di tessiture (texture).

La texture è un'immagine digitale che viene riprodotta sulla superficie del modello per conferire colori e dettagli visivi senza appesantirne la geometria. "Le texture possono essere classificate secondo due tipologie: texture ripetibili e texture ad Hoc"[32]. Le texture ripetibili vengono replicate più volte sulla geometria dell'oggetto ed hanno la proprietà di nascondere le giunture (seamless); esse possono essere utilizzate su modelli digitali geometricamente diversi e sono poco sensibili ai problemi di risoluzione. Le texture ad Hoc vengono, invece, mappate singolarmente e sono, quindi, strettamente

relazionate con la geometria per la quale sono state generate; a parità di condizioni, queste texture hanno risoluzione inferiore rispetto alle quelle ripetibili.

Gli elementi che permettono di conferire proprietà materiche, come il colore, la lucentezza, la trasparenza, la rifrazione, vengono chiamati canali e ad essi è possibile assegnare varie texture o maschere coerenti tra loro che agiscono simultaneamente sull'oggetto. La maschera di specularità permette, ad esempio, di simulare l'effetto di lucidità variabile della superficie, mentre la maschera di opacità attribuisce caratteristiche di trasparenza alle aree desiderate.

Le texture consentono inoltre di simulare alcuni aspetti geometrici, come la rugosità e i dettagli in rilievo, i quali spesso non vengono modellati perché troppo piccoli rispetto alle dimensioni globali del modello; ad esempio, le mappe di bump conferiscono complessità all'oggetto sintetico evitando di appesantire la mesh poligonale[32]. Un'alternativa ancora più realistica è l'utilizzo delle mappe di displacement, capaci di generare rilievi tridimensionali che hanno influenza anche sulla geometria e sull'illuminazione, ma solo durante la fase di rendering.

1 - La fase di acquisizione della texture consiste nella cattura di una sequenza di immagini parzialmente sovrapposte. Per fare in modo che le immagini siano acquisite in modo corretto è necessario che lo strumento, solitamente una fotocamera digitale, venga utilizzato controllando manualmente esposizione, diaframma e bilanciamento del bianco; le fotografie devono infatti essere scattate in condizioni di illuminazione e toni di colore uniformi, in modo che l'unione delle riprese non generi discontinuità.

Un accorgimento che può essere utilizzato per migliorare il livello di accuratezza dell'acquisizione delle tessiture è l'utilizzo di fotocamere che gestiscono il formato Raw (negativo digitale); questo formato richiede uno spazio di memoria maggiore, ma registra i dati di immagine senza elaborazione e perdita di informazioni ed è, quindi, appropriato per operazioni di post-processing che riguardano il bilanciamento di colore, luminosità e contrasto[32].

Le immagini che vengono acquisite non dovrebbero presentare ombre, riflessi e colpi di luce, pratica che può essere parzialmente ottenuta controllando le condizioni di

illuminazione durante il rilievo; tuttavia, se sono presenti zone d'ombra impossibili da eliminare, l'acquisizione di immagini HDR e una successiva elaborazione dell'immagine possono consentirne l'attenuazione. Nel caso di rendering in real-time, invece, può essere utile l'utilizzo di texture parzialmente illuminate per simulare gli effetti dell'illuminazione globale che non vengono calcolati durante la simulazione.

2 - L'acquisizione delle immagini viene seguita dalla fase di elaborazione, nella quale possono essere eseguite varie ed eventuali operazioni; oltre all'unione delle riprese in un'unica texture, vengono effettuati vari interventi di correzione e miglioramento, quali la correzione delle distorsioni, la riduzione della risoluzione, il bilanciamento del bianco, l'eliminazione delle ombre e la creazione di texture per canali diversi.

Le distorsioni dell'immagine sono causate dalle imperfezioni ottiche e meccaniche degli strumenti utilizzati e possono essere parzialmente corrette grazie ai parametri ottenuti dalla calibrazione della camera; questa operazione è particolarmente importante per le tecniche di acquisizione passive, le quali basano sulle immagini rilevate anche la ricostruzione geometrica.

La risoluzione con la quale la texture viene acquisita è solitamente elevata e viene ridotta in fase di elaborazione, in relazione alle finalità del modello tridimensionale a cui viene applicata; in base a questo vengono determinate anche le proporzioni dell'immagine e il formato del file[32].

Il bilanciamento del bianco è necessario per correggere l'immagine di un materiale che viene influenzato dalla temperatura di colore delle sorgenti illuminanti; questa operazione può anche essere effettuata preliminarmente all'acquisizione della

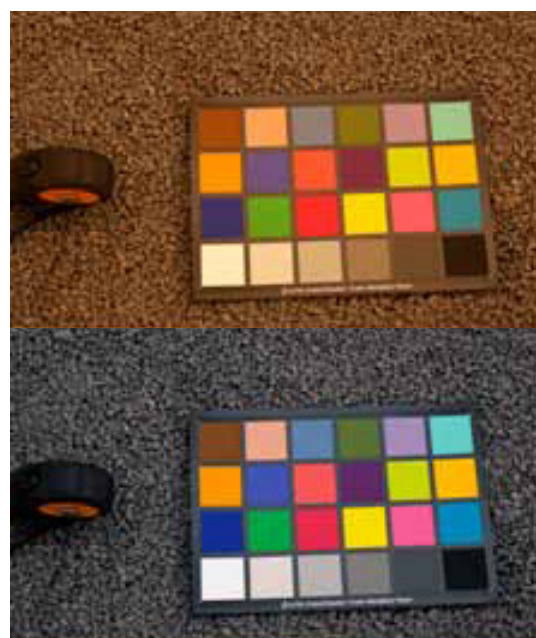


Figura 5.6 - Bilanciamento del colore con griglia di calibrazione

fotografia mediante l'uso di griglie di calibrazione (Color Checker) o pannelli neutro calibrati posti nella scena[61].

Inoltre, nel caso in cui gli oggetti riflettono la luce in modo speculare e il controllo dell'illuminazione non è sufficiente per attenuare le riflessioni, la corretta ricostruzione della texture richiede ulteriori elaborazioni delle immagini, come l'attenuazione del rumore e l'equalizzazione radiometrica.

5.4.2.1 - ACQUISIZIONE DELLA BRDF

I metodi di rappresentazione dell'interazione luce-materia che fanno uso di tecniche di tipo locale approssimano la riflessione della radiazione luminosa trattando separatamente le componenti diffusiva e speculare. Inoltre essi "modellano il modo in cui le superfici riflettono l'illuminazione prendendo in considerazione solo l'orientamento nello spazio della superficie rispetto alla direzione di incidenza della radiazione diretta"[63]; nella realtà l'effettivo comportamento della luce è più complesso perché dipende da molti altri fattori. L'illuminazione di un oggetto virtuale, calcolata con tecniche di tipo globale, viene definita in ogni punto da un'equazione matematica, il cui risultato dipende dall'ubicazione nello spazio, da posizione, direzione e proprietà delle sorgenti luminose, dal punto di osservazione, dalla posizione e proprietà dei materiali di tutti gli oggetti nella scena[63]. Quest'ultima proprietà riguarda anche i dati che vengono ottenuti tramite acquisizione e la loro qualità influisce direttamente sul realismo qualitativo e quantitativo della simulazione virtuale.

I materiali sono caratterizzati da intrinseche proprietà di dispersione della luce incidente che vengono identificate come: riflettanza, trasmittanza e assorbimento; le quantità fondamentali che codificano le proprietà di riflettanza e trasmittanza sono le funzioni BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function) e BTDF (Bidirectional Transmittance Distribution Function), le quali rappresentano il modo reale in cui il materiale di un oggetto riflette e trasmette la radiazione luminosa. Nelle simulazioni

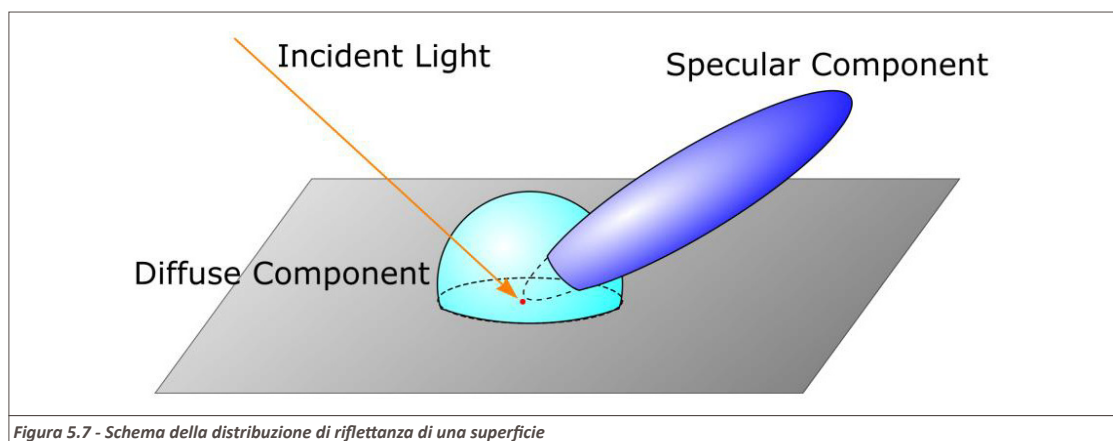


Figura 5.7 - Schema della distribuzione di riflettanza di una superficie

interattive queste proprietà vengono spesso approssimate assumendo le superfici come Lambertiane, ovvero uniformemente diffuse in tutte le direzioni, oppure possono essere semplificate considerando la distribuzione luminosa variabile nei confronti della direzione ma non della posizione sull'oggetto[62]. Le applicazioni che fanno uso di modelli di illuminazione globale, invece, per rappresentare correttamente il comportamento della luce, richiedono che ai materiali vengano assegnate le proprietà di riflettanza e trasmittanza adeguate.

Queste proprietà sono difficilmente acquisibili in modo accurato perché variano significativamente in relazione alla posizione sulla superficie, alla direzione e alla lunghezza d'onda della luce; inoltre, per la rappresentazione corretta di tutti i materiali dovrebbe essere tenuto in considerazione anche il fenomeno di Subsurface scattering, ovvero la fuoriuscita di raggi luminosi in punti diversi da quelli di entrata, a causa della dispersione della luce negli strati interni del materiale.

Tradizionalmente la BRDF di una superficie viene misurata con strumenti specifici costituiti da un rilevatore e una sorgente luminosa che si muove nello spazio circostante l'oggetto; tuttavia, esistono dei metodi di acquisizione della BRDF basati su tecniche Image-based, tra i quali alcuni funzionano solamente con oggetti planari o sferici, altri richiedono che la geometria dell'oggetto sia conosciuta e la luce calibrata in intensità e direzione. Quest'ultimo caso consiste nell'acquisizione di un elevato numero di

fotografie dell'oggetto, ma a differenza delle tecniche SfM, il punto di vista rimane fisso, mentre cambia la posizione della sorgente luminosa; inoltre gli oggetti con alta riflettività necessitano di scatti HDR, uno per ogni posizione della luce[64]. Con queste tecniche è possibile ottenere la dispersione luminosa di una superficie in modo abbastanza accurato e con strumenti economici, ma richiedono condizioni ambientali controllate e lunghi tempi di preparazione e rilievo.

5.5 - SISTEMA SCELTO

Ad oggi, per ogni tipo di oggetto e ambiente, non esiste una singola tecnica di modellazione inversa capace di soddisfare tutti i requisiti di elevata accuratezza geometrica, portabilità, completa automazione, fotorealismo, bassi costi, flessibilità ed efficienza[57]. Il panorama tecnologico attuale del rilievo tridimensionale è però caratterizzato da un'ampia varietà di strumenti tra loro complementari che si adattano alle esigenze di ogni particolare applicazione[59]; tuttavia, accade raramente che il sistema di acquisizione possa essere scelto fra molte alternative e spesso la scarsa disponibilità di tempo e budget rappresenta un forte vincolo.

Come per le tecnologie di simulazione, l'obiettivo di questa analisi è quello di individuare degli strumenti di acquisizione tridimensionale che facciano da supporto alla valutazione del progetto dell'allestimento, ma che siano anche a basso costo e che consentano comunque di raggiungere buoni risultati. A questo proposito le tecniche Image-based, ed in particolare gli applicativi che sfruttano lo Structure from Motion, risultano essere i più adatti per l'acquisizione delle unità destinate ad esposizioni culturali; essi, rispetto ai sistemi Range-based, hanno costi contenuti e ottima maneggevolezza, sono indipendenti dalla distanza di ripresa e dalle dimensioni dell'oggetto, presentano tempi minori di acquisizione e ricostruiscono automaticamente sia la geometria sia la texture. Questi sistemi dipendono però dalla luce ambientale e dal materiale dell'oggetto, parametri che incidono fortemente sul risultato geometrico[59]; in ogni caso, la

simulazione virtuale fotorealistica per valutazioni qualitative non richiede eccezionale fedeltà geometrica, ma presuppone una buona fedeltà materica che viene garantita da queste tecniche.

I sistemi di acquisizione che sfruttano lo Structure from Motion, come anche le tecniche fotogrammetriche manuali, si basano sulla correlazione delle immagini (Image-matching), ovvero sulla determinazione delle posizioni nello spazio di punti equivalenti. I sistemi SfM fanno però uso di Image-matching automatico, il quale consente di riprodurre oggetti di geometria complessa, ma presenta ancora aspetti problematici, come le oclusioni, le aree senza tessitura, le variazioni di illuminazione, i materiali non cooperanti, ecc.; alcune delle problematiche dipendono dal tipo di oggetto e sono comuni a tutte le tecnologie di acquisizione, mentre altre riguardano solo le tecniche passive.

Se l'oggetto da acquisire è costituito da un materiale che riflette la luce in maniera diversa in relazione al punto di vista, oppure non presenta sufficiente caratterizzazione superficiale, risulta difficile, se non impossibile, ricostruirne la geometria e la texture con tecniche Image-based; tuttavia, possono essere adottati accorgimenti ed effettuate operazioni di miglioramento delle immagini, equivalenti a quelle precedentemente descritte per l'acquisizione della texture.

Un'altra complicazione è causata dalla completa automatizzazione del processo, la quale

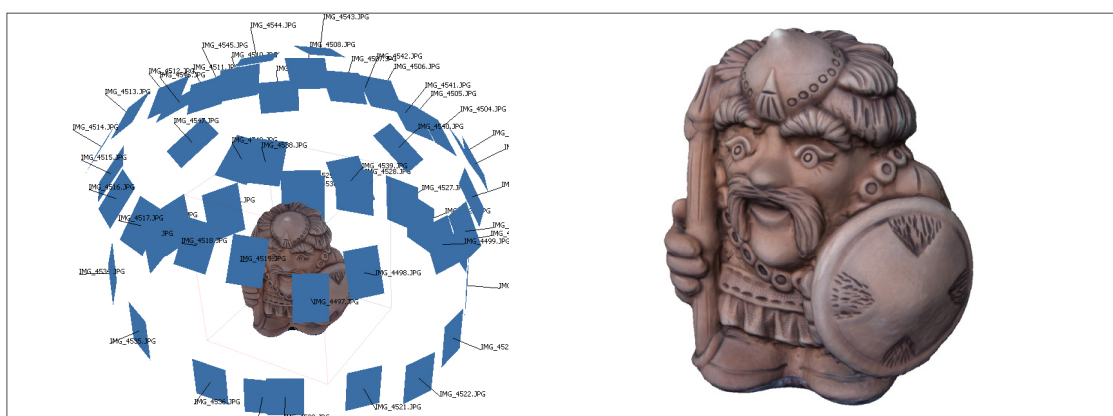


Figura 5.8 - Acquisizione di una statuetta in terracotta con tecnica Structure from Motion

comporta la ricostruzione di elementi della scena che non appartengono all'oggetto e che possono compromettere la qualità del modello; anche questo problema può essere risolto in una fase di pre-processing, durante la quale è possibile selezionare, all'interno delle fotografie, solo le aree appartenenti all'oggetto.

La procedura di acquisizione che si basa sulle tecniche fotogrammetriche digitali automatizzate prevede la cattura di una sequenza di immagini da numerosi punti di vista; il procedimento ha successo quando le immagini acquisite sono molto numerose, poco distanziate tra loro e coprono l'intera superficie dell'oggetto[57]. Questa procedura viene effettuata mediante l'utilizzo di una fotocamera digitale che può anche non essere calibrata; la tecnica di Image-matching automatica prevede infatti l'individuazione di un numero di punti sovrabbondante, utile anche per determinare i parametri di calibrazione della camera. La fase di allineamento, che consente di ottenere la nube di punti, viene eseguita in modo automatico, come anche le operazioni di generazione della mesh poligonale e di ricostruzione della texture.

Nonostante il confronto con gli strumenti di acquisizione attivi, come gli scanner laser, dimostri che spesso il rilievo geometrico Image-based genera risultati molto soddisfacenti, questa tecnica risulta poco affidabile e controllabile; per questo motivo, attualmente, i modelli generati con SfM possono essere usati solo per applicazioni che non richiedono elevata accuratezza geometrica.

Esistono svariati software in commercio che permettono di generare modelli tridimensionali sfruttando tecniche Image-based; se la complessità dell'oggetto non è elevata, molti di essi sono in grado di generare buoni risultati in termini di precisione geometrica e materica e possono essere semi-automatici o totalmente automatici. Alcuni applicativi possono essere utilizzati da utenti non specializzati e con risorse hardware di basso livello; essi sfruttano infatti i servizi online e il cloud computing per inviare le immagini e generare il modello.

6 - IPOTESI

Le fasi di allestimento di uno spazio espositivo sono profondamente interessate da continue operazioni di analisi e revisione; queste attività si manifestano soprattutto nella fase di valutazione della disposizione dei contenuti nello spazio, ovvero successivamente alla realizzazione fisica dell'allestimento. "I cambiamenti apportati sul cantiere rispetto al progetto esecutivo sono spesso consistenti e coinvolgono l'architetto quanto il curatore della mostra"[61].

In generale, gli strumenti di simulazione grafica servono proprio per determinare in anticipo le modifiche da apportare al progetto; in ambito espositivo, i mezzi comunemente utilizzati per la visualizzazione e la valutazione delle soluzioni progettuali sono molto validi, ma si riferiscono comunemente a rendering di immagini statiche bidimensionali, le quali, per quanto realistiche, non restituiscono "lo spazio nella sua complessità sensoriale ed emotiva"[61]. Questo tipo di valutazione può, tuttavia, essere effettuata mediante rappresentazioni dinamiche, immersive ed interattive, realizzabili con tecniche di realtà virtuale; la simulazione di spazi interamente digitali esiste da tempo e consente di realizzare rendering e simulazioni dinamiche, utili per valutare l'aspetto comunicativo e la funzionalità dell'allestimento progettato. Tuttavia questo procedimento è spesso lento e laborioso, perché prevede la ricostruzione completa degli ambienti reali, mediante la precisa acquisizione delle proprietà geometriche e materiche di tutte le strutture interne[38]. In questo settore la realtà aumentata risulta dunque

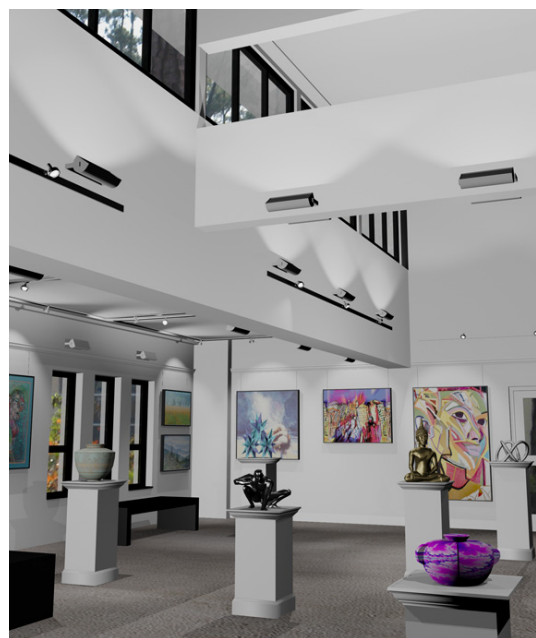


Figura 6.1 - Simulazione virtuale di un allestimento

essere una valida alternativa, perché in grado di generare rappresentazioni dinamiche ed immersive, ma senza la necessità di ricostruire totalmente gli ambienti espositivi. L'analisi effettuata in questa tesi interessa, dunque, la progettazione di allestimenti associata alle tecnologie di realtà aumentata; questa combinazione comporta però delle problematiche, tra le quali alcune sono comuni a tutti i tipi di simulazione, come la resa fotorealistica in tempo reale e l'acquisizione virtuale degli oggetti, mentre altre sono specifiche di questa tecnica, come la combinazione di entità virtuali a scene reali. Queste difficoltà sono state esaminate ed è stato possibile individuare alcune tecniche di acquisizione tridimensionale e di rappresentazione fotorealistica adatte alla simulazione dell'allestimento espositivo; in particolare sono state approfondite quelle tecniche che permettono di raggiungere gli obiettivi di progetto, ma senza aumentare in modo eccessivo il numero e il costo degli strumenti necessari.

La strumentazione richiesta, il cui costo viene confrontato con il budget disponibile, viene scelta in relazione alla complessità di simulazione ed acquisizione; questa complessità è determinata, a sua volta, oltre che dalle caratteristiche di ambienti e oggetti, dagli obiettivi di progetto che vengono valutati con la simulazione. Le finalità valutate possono essere: il comfort, la comunicazione, la sicurezza e la conservazione; questi obiettivi comprendono vari aspetti diversificati, i quali possono anche essere raggruppati in relazione al livello di complessità della simulazione richiesto per analizzarli.

Qualunque siano gli obiettivi che vengono valutati con la simulazione, è importante che il progetto dell'allestimento realizzato virtualmente vada a corrispondere in modo preciso al risultato reale finale; questa considerazione è fondamentale per dare senso al progetto virtuale stesso, il quale risulta efficace solo se consente di confrontare soluzioni e predeterminare quello che sarà l'aspetto finale della mostra. Le simulazioni vengono sempre effettuate tenendo conto degli inevitabili errori causati dalla strumentazione in uso; in questo caso è importante che la discrepanza tra l'allestimento fisico e il suo progetto virtuale sia minima, in modo che la tecnologia dia un reale contributo al raggiungimento degli obiettivi preposti e non debbano essere effettuati radicali

interventi di correzione successivi alla messa in opera dell'allestimento.

La ricerca effettuata ha permesso di individuare gli sviluppi attuali che possono migliorare la tecnologia di simulazione; grazie a questi sviluppi è possibile soddisfare tutti i livelli di complessità che può presentare la simulazione virtuale stessa, in relazione ai vari obiettivi di progetto. Sono stati inoltre determinati i vincoli di compatibilità, ovvero i parametri che devono essere rispettati per poter utilizzare le tecnologie di acquisizione e simulazione, e le situazioni di maggiore utilità, che definiscono il grado di adeguatezza delle tecnologie rispetto alla situazione specifica. La sintesi della ricerca ha permesso anche di identificare una procedura di acquisizione e simulazione, la quale consiste in una serie di operazioni da effettuare per valutare il progetto espositivo in realtà aumentata.

6.1 - POSSIBILI APPLICAZIONI ATTUALI

Viene fatto un elenco di possibili applicazioni dell'attuale tecnologia di simulazione sfruttata dal sistema SPAR; le tecniche e i dispositivi che possono essere implementati fanno riferimento a tecnologie già esistenti e collaudate.

1 - L'acquisizione dell'illuminazione reale mediante l'utilizzo di sfere a riflessione diffusa o sfere a riflessione speculare oscurate consente di visualizzare in modo interattivo un modello digitale illuminato dalle corrette condizioni di luce di un ambiente reale. Queste tecniche, associate al sistema di realtà aumentata SPAR, garantirebbero una simulazione maggiormente realistica senza richiedere operazioni aggiuntive; strutturalmente il robot potrebbe essere costituito dalla classica base del Roomba, al di sopra del quale viene fissato un cubo di marker multipli calibrati, e sopra di essi una sfera diffondente o riflettente.

Un sistema di questo tipo avrebbe però alcuni svantaggi: il tracciamento fotometrico richiederebbe lo spostamento del robot in ognuna delle posizioni destinate alle unità

posizionate, quando attualmente i modelli virtuali possono essere spostati manualmente in modo più rapido; inoltre il tracciamento fotometrico di ogni modello verrebbe memorizzato solo per la semisfera osservata da una direzione di visione specifica.

2 - L'attuale sistema di visualizzazione in realtà aumentata non fornisce elevate prestazioni di fotorealismo; la soluzione potrebbe essere l'implementazione di metodi avanzati di rendering, capaci di generare effetti di illuminazione complessi in tempo reale. L'utilizzo di queste tecniche è reso possibile dall'elevato avanzamento tecnologico hardware raggiunto e dallo sviluppo di algoritmi di simulazione della luce sempre più efficienti.

3 - Come nella maggior parte delle simulazioni in realtà aumentata, gli elementi virtuali visualizzati appaiono molto più nitidi delle immagini retrostanti della realtà, il cui livello di rumore e distorsione dipende dalla qualità dei dispositivi di registrazione utilizzati. Come già spiegato precedentemente, ai modelli sintetici potrebbero essere applicati degli effetti di filtraggio che li rendono visivamente coerenti alla scena reale.

4 - La valutazione dell'illuminazione all'interno di un ambiente espositivo è resa più realistica se vengono posizionati piani verticali e orizzontali in corrispondenza di pareti, soffitto e pavimento dell'ambiente, con l'obiettivo di proiettare su di essi gli effetti di luce e ombra. Questa operazione può essere effettuata sia durante la simulazione sia in una fase precedente di preparazione, mediante la ricostruzione geometrica dedotta dalla planimetria dello spazio espositivo; le eventuali correzioni possono essere eseguite in realtà aumentata, confrontando la struttura virtuale con quella reale.

5 - Una funzione che potrebbe essere implementata nel sistema utilizzato per l'allestimento è l'esportazione automatica delle coordinate di posizione e orientamento degli oggetti inseriti nella scena; questa operazione potrebbe essere effettuata esportando planimetrie e prospetti in formati grafici specifici per il disegno tecnico. Tuttavia, la realtà aumentata non costituisce uno strumento di misura preciso, quindi il metodo descritto potrebbe essere utilizzato solo come indicazione delle misure di massima tra gli oggetti, le strutture e le pareti dell'ambiente.

6 - A causa delle limitazioni che il rendering in real-time comporta per il calcolo dell'illuminazione, può essere utile individuare delle inquadrature specifiche e

renderizzarne il risultato in una fase off-line; questa operazione può essere effettuata dopo che sono stati posizionati e valutati tutti gli oggetti nell'ambiente, e consiste nel memorizzare riprese statiche della scena, relazionandole alla posizione degli oggetti e al punto di osservazione. Questa tecnica è simile al fotomontaggio, ma, a differenza di quest'ultimo, rientra nell'ambito della realtà aumentata perché include l'interazione con l'ambiente, necessaria per il tracciamento fotometrico.

7 - Il corretto calcolo delle riflessioni della luce presuppone che siano conosciute le proprietà materiche degli oggetti nella scena; per calcoli di illuminazione locale, le caratteristiche di riflettanza vengono solitamente stimate e semplificate rispetto al comportamento reale. Tuttavia, a fronte anche di uno studio off-line di livello qualitativo e quantitativo superiore, può essere utile l'implementazione nel processo della misura della riflettanze; a questo proposito esistono tecniche Image-based che permettono di calcolare la riflettanza di superfici piane, adatte al rilievo materico di pareti e pavimentazione.

8 - Un'ulteriore miglioramento del realismo del rendering off-line può essere realizzato mediante l'acquisizione di tutte le caratteristiche delle entità reali e l'assegnazione di tutte le proprietà alle entità virtuali; questa operazione è molto lunga e laboriosa, ma è l'unico metodo per realizzare un'analisi qualitativa e quantitativa di alto livello. Questo procedimento permette infatti di effettuare calcoli di illuminazione globale e viene utilizzato comunemente per le analisi illuminotecniche, con le quali è possibile ottenere risultati fotometrici accurati degli ambienti illuminati.

6.2 - LIVELLI DI COMPLESSITÀ

Grazie alla ricerca effettuata è stato possibile determinare ed associare diversi gradi di complessità della simulazione e della modellazione tridimensionale. In particolare sono stati identificati tre principali livelli, che corrispondono alle varie combinazioni di risorse ed esigenze di progetto per l'allestimento di esposizioni culturali; il primo livello fa riferimento alla tecnologia SPAR attuale, mentre i livelli successivi si riferiscono allo

sviluppo del sistema con le proposte elencate precedentemente.

1 - Il sistema SPAR consente già oggi di muovere il marker all'interno di una stanza, posizionando in modo interattivo vari modelli e sorgenti luminose digitali sovrapposte alla realtà; l'illuminazione può però essere rilevata solo manualmente, attraverso il posizionamento di sorgenti virtuali dalle caratteristiche stimate in corrispondenza delle sorgenti reali. Questo tipo di simulazione è adatto per una valutazione volumetrica dello spazio, la quale consiste nell'analisi di alcune componenti d'atmosfera, come il percorso, le forme e le distanze, ed alcune componenti di comfort e conservazione, come le distanze di sicurezza, l'affollamento e le vie di fuga.

Per quanto riguarda la complessità della modellazione virtuale, in questo livello non è necessario un elevato livello di dettaglio geometrico e materico, realizzabile mediante modellazione diretta, o tecniche di modellazione inversa Image-based con strumenti a basso costo.

2 - Il secondo livello rappresenta un insieme di tecniche e strumenti esistenti, che non sono ancora stati integrati tra loro e che consentirebbero di effettuare una simulazione rapida, a basso costo e con risultati visivi di buona qualità. Il sistema SPAR può essere sviluppato implementando tecniche interattive di acquisizione dell'illuminazione reale, come l'utilizzo di sfere diffondenti o semi-riflettenti, integrando il software per la gestione del robot con applicativi già esistenti di tracciamento fotometrico. In questo caso la simulazione può essere estesa alla valutazione qualitativa di altre componenti d'atmosfera e comfort che riguardano l'analisi della luce; in particolare possono essere studiati i cromatismi, i materiali, l'illuminazione, e tutti gli effetti che ne derivano, come i riflessi, le ombre, i contrasti, le interferenze visive, ecc.

In questo caso la modellazione virtuale assume maggiore importanza, dati i requisiti di fedeltà geometrica e materica più restrittivi. In questo livello di complessità l'acquisizione geometrica può essere garantita da sistemi di modellazione inversa Image-based o Range-based, in relazione alle proprietà degli oggetti; l'acquisizione della texture viene, invece, effettuata con sole tecniche Image-based e la riflettanza dei materiali può essere

assegnata stimandone le caratteristiche.

3 - Il terzo livello consiste nell'evoluzione del precedente, l'obiettivo però è la simulazione accurata delle caratteristiche materiche e geometriche per valutazioni fotometriche quantitative; questo comporta una procedura molto più lunga e complessa, che può richiedere inoltre l'utilizzo di tecnologie più costose. In questo caso la simulazione in realtà aumentata può essere utile solo come supporto per la valutazione qualitativa e per l'acquisizione delle proprietà geometriche e materiche dell'ambiente. La simulazione fotometrica deve, invece, essere effettuata con tecniche di illuminazione globale in una fase off-line successiva; essa necessita dei parametri di forma, texture e riflettanza di tutte le entità fisiche e virtuali, e dei parametri di colore, resa cromatica e geometria di flusso di tutte le delle sorgenti luminose reali e virtuali. Questo tipo di simulazione consente di valutare in modo preciso, oltre che l'aspetto comunicativo, anche i parametri di comfort e conservazione che derivano dai requisiti di illuminamento degli oggetti e delle aree dell'ambiente.

La digitalizzazione degli oggetti deve essere molto precisa, e comporta, quindi, l'utilizzo di strumenti Range-based per la ricostruzione geometrica, sistemi di acquisizione Image-based per l'ottenimento delle texture e sistemi Image-based o strumentazione specifica (fotogoniometro) per la misura delle riflettanze dei materiali (BRDF).

6.3 - VINCOLI DI COMPATIBILITÀ

Sono state individuati dei vincoli di utilizzo che servono per determinare se la simulazione dell'allestimento in realtà aumentata è effettivamente compatibile con il caso specifico; essi riguardano le risorse possedute, il genere di oggetti da acquisire e il tipo di ambiente espositivo.

1 - **Tempo**: il tempo disponibile determina la possibilità di effettuare la simulazione dell'allestimento, la cui durata è molto variabile e dipende dal numero di ambienti da

allestire, dalla complessità della simulazione e dal livello di definizione che il progetto ha raggiunto prima della riproduzione virtuale. Inoltre, se gli oggetti devono essere acquisiti, come più frequentemente accade, occorre tempo per le fasi di rilievo ed elaborazione, anche se queste operazioni possono in parte essere effettuate durante le prime fasi progettuali di pianificazione.

2 - **Budget:** il budget disponibile determina la possibilità di acquistare o meno la strumentazione necessaria, la cui qualità dipende dai livelli di complessità della simulazione e dell'acquisizione tridimensionale. La complessità della simulazione dipende a sua volta dagli obiettivi di progetto e dall'ambiente espositivo, mentre la complessità dell'acquisizione dipende dalle proprietà degli oggetti, dalle condizioni ambientali e dal livello di precisione richiesto.

3 - **Ambiente:** il posizionamento virtuale degli oggetti richiede che il luogo destinato all'esposizione sia libero ed accessibile prima dell'evento, parametro che dipende anche dal tempo a disposizione. Inoltre, per quanto riguarda il sistema SPAR, gli ambienti possono comportare difficoltà, o addirittura impossibilità operativa, se presentano pavimentazione irregolare; questo sistema infatti, basandosi su un robot che si sposta nello spazio, richiede che il suolo sia il più possibile pianeggiante.

4 - **Oggetti:** non sempre gli oggetti sono facilmente digitalizzabili, a causa della varietà di caratteristiche geometriche e materiche, ed inoltre è a volte necessario ottenere la concessione per l'acquisizione; se le unità richieste possiedono, quindi, caratteristiche tali da non poter essere acquisite con la tecnologia disponibile, o se non viene accettata la richiesta per la digitalizzazione, la simulazione non può essere effettuata.

6.4 - SITUAZIONI DI MAGGIORE UTILITÀ

Dalla ricerca svolta è stato possibile individuare una serie di situazioni per le quali la simulazione in realtà aumentata risulta più adatta; questi parametri devono essere considerati solo nel caso in cui vengano soddisfatti tutti i vincoli di compatibilità. I progetti espositivi che prevedono condizioni diverse da quelle elencate possono

comunque essere valutati mediante la simulazione, ma con maggiori difficoltà o con minori benefici.

1 - **Oggetti di difficile movimentazione:** la simulazione in realtà aumentata risulta maggiormente utile per oggetti di difficile movimentazione, la quale dipende da varie caratteristiche, come il peso, la fragilità o l'importanza intrinseca posseduta; ad esempio, gli oggetti di valore culturale, a differenza di quelli commerciali, possono frequentemente presentare queste caratteristiche.

2 - **Oggetti tridimensionali:** la simulazione dell'allestimento è più utile per oggetti fisici che hanno sviluppo spaziale tridimensionale e per i quali può essere valutato l'aspetto da più punti di osservazione; il procedimento può essere usato anche per valutare oggetti monodimensionali o bidimensionali, ma, se essi sono posizionati a parete, apporta minori benefici.

3 - **Oggetti medio-grandi:** non è vantaggioso verificare la disposizione di oggetti molto piccoli con la simulazione in realtà aumentata, perché solitamente essi vengono posizionati all'interno di strutture a sé stanti, per le quali può essere effettuato uno studio separato in realtà virtuale; inoltre gli oggetti di piccole dimensioni vengono solitamente disposti in gruppi numerosi, causando l'aumento dei tempi di acquisizione.

4 - **Oggetti digitalizzati:** gli oggetti, se di origine commerciale, come i prodotti di design, hanno solitamente una versione virtuale già disponibile, mentre gli oggetti storici o artistici necessitano di acquisizione tridimensionale che richiede tempo e risorse. Per questo motivo, dal punto di vista delle risorse necessarie e dei tempi di processo, è più conveniente l'utilizzo della tecnologia per realtà aumentata con oggetti per i quali già esiste il corrispettivo virtuale.

5 - **Oggetti di altezza medio-bassa:** se le strutture o gli oggetti virtuali sono molto alti, questo sistema può avere difficoltà ad inquadrarli interamente; questo accade perché il sistema si basa sul tracciamento costante del marker, il quale è posizionato a terra e vincola l'inquadratura della scena in altezza. Arretrare il punto di osservazione per includere gli oggetti nell'inquadratura rappresenta comunque uno svantaggio, perché la valutazione avviene da distante e la precisione di tracciamento diminuisce.

6 - **Rapporto oggetti-ambiente:** la visione dei modelli virtuali nell'ambiente reale è uno strumento utile per ogni tipo di progetto, ma se deve essere valutato il rapporto tra l'ambiente espositivo circostante e i contenuti inseriti, la simulazione aumentata assume maggior valore; le esposizioni culturali, ad esempio, vengono frequentemente organizzate in ambienti che presentano caratterizzazione decorativa, la quale deve essere tenuta in considerazione nelle scelte progettuali.

7 - **Ambiente poco allestito:** la mancanza del calcolo delle occlusioni nel software di realtà aumentata comporta la sovrapposizione delle entità virtuali agli oggetti reali nella scena, anche se quest'ultimi si trovano più vicini al punto di osservazione. Una soluzione a questo problema può essere la digitalizzazione degli oggetti reali presenti nell'ambiente espositivo, ma che comporta un'ulteriore fase di acquisizione; per questo motivo la simulazione in realtà aumentata è più favorevole se lo spazio espositivo è poco allestito.

8 - **Ambiente non digitalizzato:** è giusto tenere in considerazione l'eventualità che esista la ricostruzione digitale dell'ambiente predisposto all'esposizione. In questo caso la simulazione virtuale in realtà aumentata si dimostra meno utile, data la possibilità di effettuare lo studio di posizionamento interamente in ambiente virtuale; solitamente questo vantaggio dipende dalle dimensioni dell'organizzazione che organizza l'esposizione.

9 - **Ambiente di medie dimensioni:** l'utilizzo della tecnologia SPAR è ottimizzata per spazi di lavoro non troppo ampi, a causa dei possibili errori di posizionamento causati dal tracciamento relativo del robot; questo fatto non esclude l'utilizzo del sistema per realtà aumentata in ambienti di grandi dimensioni, ma in questo caso la procedura di simulazione prevedrebbe la valutazione dell'allestimento da posizioni relativamente distanti, oppure la suddivisione dello spazio in aree progettuali distinte, o anche il posizionamento di più marker fissi di posizione nota. Anche gli ambienti di ridotte dimensioni sono relativamente poco adatti, perché non permettono di indietreggiare se le entità virtuali non vengono inquadrare completamente.

10 - **Illuminazione ambiente:** se il progetto non prevede la modifica della luce presente nell'ambiente espositivo, sia essa naturale o artificiale, la simulazione risulta più semplice

da eseguire; il livello di illuminazione che solitamente rimane fisso, e che può essere usato durante la simulazione, è la luce ambiente. Al contrario, se le condizioni volute durante l'esposizione sono molto diverse da quelle presenti nell'ambiente durante la simulazione, la tecnologia attuale si dimostra poco precisa nel calcolare la rimozione della luce e il reilluminamento.

11 - Illuminazione poco complessa: le operazioni di calcolo necessarie per renderizzare la scena dipendono dalla complessità dell'illuminazione virtuale; il progetto di allestimento potrebbe richiedere effetti luminosi elaborati che con difficoltà riescono ad essere rappresentati sinteticamente in modo realistico ed in tempo reale. Tuttavia è possibile demandare i rendering fotorealistici a fasi di progetto off-line, dopo aver individuato e memorizzato alcune viste specifiche.

6.5 - PROCEDURA DI ACQUISIZIONE E SIMULAZIONE

É stata definita una procedura da seguire per usufruire della simulazione in realtà aumentata, la quale ha come obiettivo la valutazione delle scelte progettuali dell'allestimento di un'esposizione. Questo procedimento interessa sia la fase di ideazione, nella quale avviene la verifica di compatibilità con la tecnologia e la scelta della strumentazione adeguata, sia la fase di progettazione, in cui vengono effettuate varie operazioni relative all'acquisizione tridimensionale e alla simulazione virtuale.

1 - Valutazione: la valutazione della compatibilità tra il tipo di esposizione e la tecnologia di simulazione consiste nel capire se quest'ultima è effettivamente utilizzabile e se conferisce utilità e vantaggi rispetto al procedimento normale; questo tipo di valutazione viene effettuata prendendo in considerazione vari parametri (precedentemente esaminati) e riguarda le risorse disponibili, il tipo di oggetti, l'ambiente espositivo, il tipo di strutture e i requisiti della simulazione.

Per ogni oggetto dell'allestimento è necessario verificare se esso è in possesso

dell'organizzazione che gestisce l'esposizione e/o se esiste il suo corrispettivo digitale:

- se si è già in possesso del modello virtuale dell'oggetto è possibile tralasciare le operazioni di richiesta e rilievo tridimensionale;
- se l'oggetto richiesto è già stato digitalizzato, ma non è in possesso, è necessario fare richiesta al proprietario per ottenere il modello virtuale;
- se l'oggetto è in possesso ma non è ancora stato digitalizzato, è necessario procedere con le fasi di calibrazione e rilievo;
- se l'oggetto richiesto non è in possesso e non è stato digitalizzato, deve essere fatta richiesta di acquisizione, e, dopo opportuna calibrazione, deve essere organizzato il rilievo.

2 - Richiesta del modello virtuale: se gli oggetti sono già stati digitalizzati è possibile tralasciare buona parte delle fasi che riguardano l'acquisizione; questo può accadere nel caso di unità di origine commerciale, per le quali esiste già un modello di dettaglio, e nel caso di oggetti culturali che sono già stati digitalizzati per progetti virtuali precedenti di pianificazione espositiva o per altri scopi.

Nell'ambiente espositivo, oltre agli oggetti in mostra, devono essere posizionate varie strutture; anche per esse è necessario ottenere il modello virtuale, il quale, se non in possesso, deve essere richiesto all'azienda produttrice.

3 - Richiesta di acquisizione: nel caso in cui gli oggetti non siano di proprietà dell'organizzazione che gestisce l'esposizione e i modelli virtuali non siano disponibili, è necessario richiedere la concessione per l'acquisizione tridimensionale; questa operazione può essere effettuata contemporaneamente alla richiesta di prestito. Se la risposta del proprietario è negativa, è possibile che non venga concesso neppure il prestito; nel caso in cui venga concesso il prestito, ma non il rilievo, significa che l'oggetto non può essere digitalizzato per motivi di copyright o per ragioni di sicurezza.

4 - Calibrazione: prima dell'acquisizione e della simulazione devono essere effettuate operazioni di calibrazione; queste attività servono per ricavare le caratteristiche di

funzionamento dei vari dispositivi e sono necessarie per bilanciare i relativi errori meccanici, ottici e di calcolo.

In particolare è importante effettuare la regolazione della fotocamera usata per l'acquisizione e della videocamera usata per la simulazione; questi dispositivi, sfruttando entrambi sensori ottici, possono essere calibrati pressoché nello stesso modo, mediante l'uso di griglie di calibrazione e procedure automatiche o manuali di riconoscimento dei punti omologhi. Inoltre, un accorgimento che può essere adottato per calibrare tra loro i vari dispositivi di acquisizione, registrazione, calcolo e visualizzazione, è l'utilizzo di profili colore ICC, grazie ai quali è possibile trasferire informazioni cromatiche in spazi colore assoluti.

5 - **Rilievo**: nella fase di acquisizione un tecnico viene incaricato di effettuare il rilievo degli oggetti destinati all'esposizione; questa attività viene eseguita utilizzando gli strumenti selezionati nella fase di valutazione, in relazione alle caratteristiche delle unità richieste e al budget disponibile.

Prima del rilievo vero e proprio delle proprietà geometriche e materiche di un oggetto è necessario effettuare la pianificazione delle riprese; controllando le condizioni di illuminazione dell'ambiente, segue l'acquisizione dei dati, i quali possono essere nuvole di punti o immagini fotografiche. Le fotografie per l'acquisizione della texture, ed eventualmente per la ricostruzione geometrica, possono essere scattate in formato Raw, utilizzando griglie o pannelli per la calibrazione del colore e, in alcuni casi, possono essere acquisiti gli scatti necessari per ricostruire immagini HDR.

6 - **Elaborazione**: la fase di acquisizione prosegue con le operazioni di elaborazione dei dati ottenuti, che riguardano le caratteristiche geometriche e materiche dell'oggetto. Anche nei casi in cui si ottenga direttamente il modello digitale, l'elaborazione deve essere effettuata perché la simulazione richiede che gli elementi virtuali vengano ottimizzati per l'applicazione.

In questa fase vengono eseguite numerose operazioni con l'obiettivo di ottenere un modello virtuale completo ed ottimizzato; le azioni più importanti sono:

- la correzione e il filtraggio dei dati acquisiti, in modo manuale o semi-automatico;
- l'allineamento e la fusione dei dati acquisiti, in modo automatico o semi-automatico;
- la correzione dei dati elaborati, in modo manuale;
- l'ottimizzazione dei dati elaborati, in modo manuale;
- esportazione dei dati elaborati.



7 - Pianificazione: le fasi di pianificazione dell'allestimento vengono più probabilmente effettuate prima della simulazione, la quale viene utilizzata come strumento di valutazione e conferma. Il progetto dell'allestimento viene sviluppato in relazione alle finalità della mostra e, come già spiegato, consiste in una fase analitica e in una fase creativa; quest'ultima consiste nella scelta del percorso, nella selezione delle strutture e nella distribuzione di tutti gli elementi della scena.

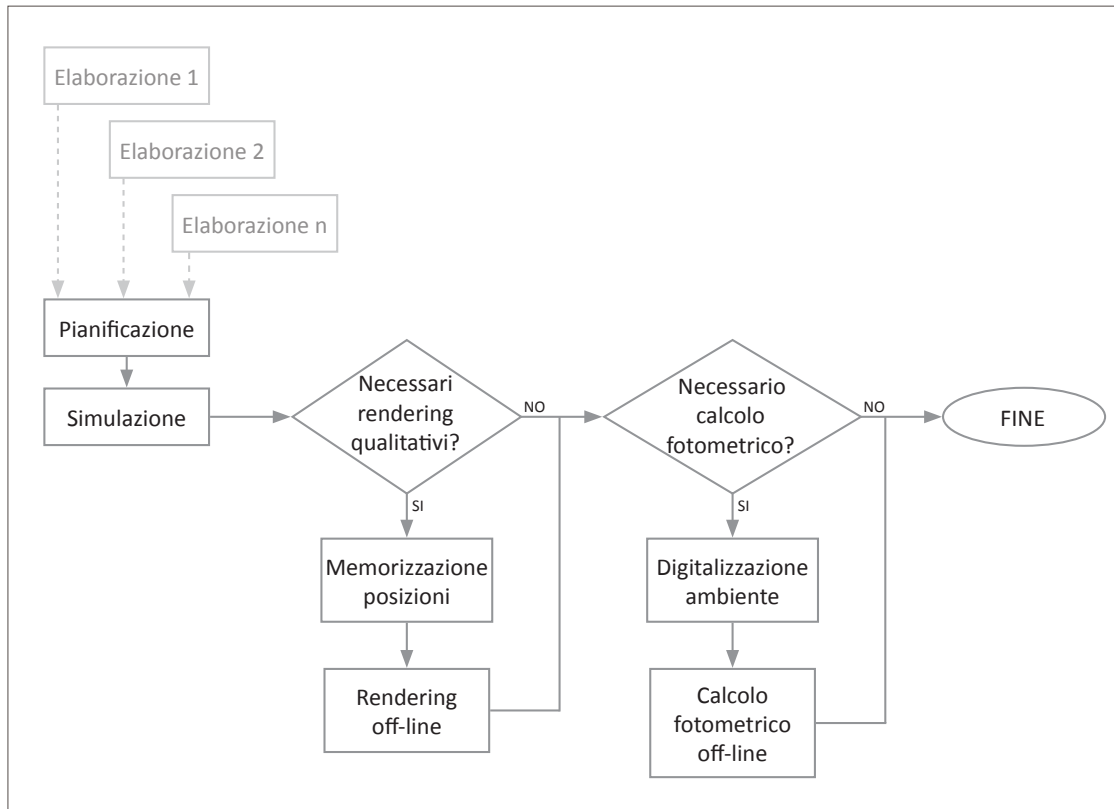
Ottenuti ed ottimizzati tutti i modelli virtuali richiesti, è possibile inserire gli stessi nel software per la simulazione; il posizionamento degli elementi della scena può essere effettuato durante la simulazione in realtà aumentata, ma può anche essere preparato precedentemente in ambiente totalmente virtuale.

8 - Simulazione: la simulazione vera e propria consiste nella visualizzazione in realtà aumentata dei modelli digitali di oggetti, strutture e sorgenti luminose in sovrapposizione all'ambiente reale; come l'acquisizione, anche la simulazione viene eseguita sfruttando gli strumenti selezionati durante la fase di valutazione. Le operazioni che vengono effettuate durante questa fase sono:

- inserimento ed orientamento nello spazio delle entità virtuali (oggetti, sorgenti luminose, strutture, piani);
- inserimento e valutazione di configurazioni alternative delle entità virtuali;
- registrazione delle caratteristiche luminose mediante il posizionamento manuale delle sorgenti o il tracciamento fotometrico automatico;
- assegnazione o acquisizione delle caratteristiche di riflettanza delle superfici dell'ambiente;
- modifica delle caratteristiche, della posizione e dell'orientamento delle singole entità virtuali, ed eventualmente inserimento di altre.

Attraverso la simulazione è, quindi, possibile verificare i criteri progettuali, valutare configurazioni alternative ed effettuare modifiche visualizzabili in tempo reale, come la sostituzione, lo spostamento e il ri-orientamento degli elementi della scena; inoltre può essere implementata una funzione di supporto alla generazione di disegni tecnici,

mediante la memorizzazione delle posizioni degli elementi inseriti, in relazione alla planimetria dello spazio espositivo.



9 - **Rendering qualitativo**: se le risorse lo consentono è possibile inoltre memorizzare alcune posizioni significative della scena allestita e, in una fase successiva, realizzare dei rendering fotorealistici off-line; questa operazione è utile solo nel caso in cui venga acquisita l'illuminazione dell'ambiente in ognuna delle posizioni destinate alle unità da esporre.

10 - **Calcolo fotometrico**: un'ulteriore fase può essere effettuata se gli oggetti inseriti richiedono il preciso controllo della radiazione incidente, con obiettivo la conservazione degli stessi. Questo comporta però la ricostruzione dello spazio espositivo in virtuale, l'ottenimento delle caratteristiche materiche di tutte le superfici dell'ambiente e

l'acquisizione delle proprietà delle sorgenti luminose; con questi dati è possibile effettuare uno studio illuminotecnico off-line con programmi specifici. Le operazioni che possono essere facilitate dalla simulazione in realtà aumentata sono la ricostruzione della struttura tridimensionale dell'ambiente e l'acquisizione di texture e riflettanze delle superfici con tecniche Image-based.

7 - SCENARI APPLICATIVI

Sono stati ipotizzati due possibili scenari, per i quali può essere utile la tecnologia di simulazione per il progetto di allestimento; vengono fatti due esempi molto diversi tra loro, così da evidenziare la flessibilità della procedura precedentemente descritta.

Nel primo scenario è stata ipotizzata la simulazione fotorealistica dell'allestimento di oggetti d'arte non ancora digitalizzati, disposti all'interno di ambienti decorati; nel secondo è stato considerato il posizionamento virtuale di oggetti di origine commerciale, all'interno di un ambiente universitario.

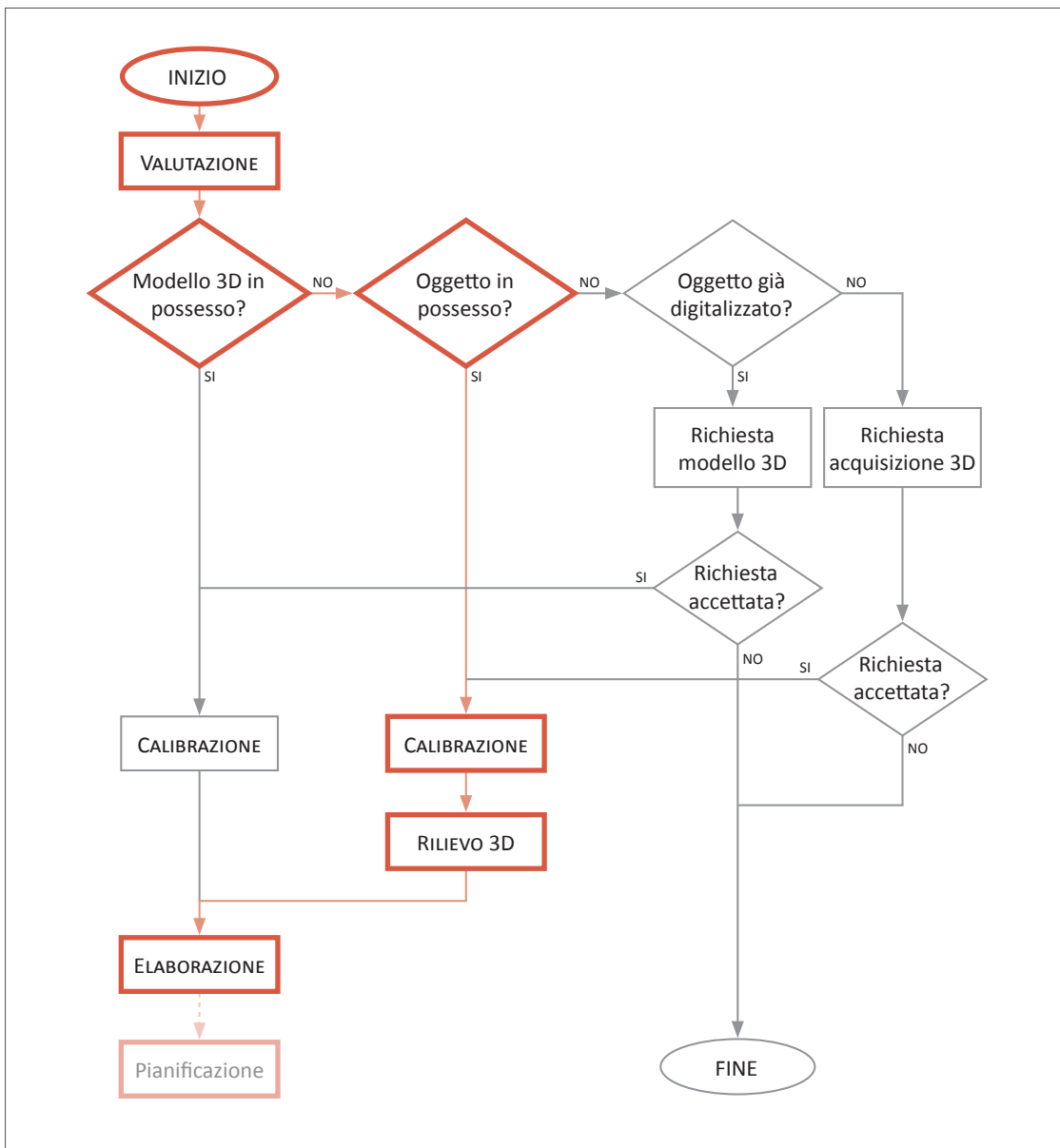
Ovviamente i progetti di allestimento possono prevedere il posizionamento di vari tipi di oggetti e strutture, che richiedono diverse sequenze di operazioni; tuttavia, per semplificare la trattazione, gli esempi proposti prevedono la valutazione di oggetti dello stesso tipo.

7.1 - PRIMO SCENARIO

L'ambiente che viene considerato in questa prima situazione progettuale è una struttura architettonica di interesse storico; essa possiede interni decorati e spazi riadattati per ospitare collezioni permanenti di arte antica. Gli oggetti da posizionare sono statue che non sono ancora state digitalizzate, ma appartengono all'organizzazione che gestisce l'esposizione; gli strumenti disponibili sono una fotocamera digitale, un computer portatile con vari software di elaborazione grafica e uno scanner laser 3D.

1 - Valutazione: nella fase di valutazione vengono determinati i vincoli di compatibilità con le tecnologie di acquisizione e simulazione, e vengono identificati i vantaggi della simulazione. In questo caso, il tempo e lo spazio sono disponibili, e il budget richiesto non è elevato perché gli strumenti da acquistare sono solo il robot e il relativo software di controllo. L'ambiente possiede pavimentazione regolare, illuminazione naturale

garantita da numerose aperture verso l'esterno e sorgenti artificiali a bassa temperatura di colore distribuite uniformemente sul soffitto; gli oggetti da posizionare sono statue antiche, la cui geometria può essere ricostruita con uno scanner laser e la texture acquisita con una fotocamera digitale.



Il modello virtuale delle statue non è disponibile, ma gli oggetti sono in possesso, quindi la procedura prosegue con la calibrazione della strumentazione e il rilievo geometrico e materico delle unità.

3 - Calibrazione: la calibrazione della strumentazione può essere effettuata una sola volta, e consiste nell'ottenimento dei parametri di deformazione d'immagine della fotocamera e della webcam; questa operazione viene effettuata mediante l'uso di griglie di calibrazione, riprese da angolazioni differenti, e attraverso



Figura 7.1 - Scansione laser di una statua

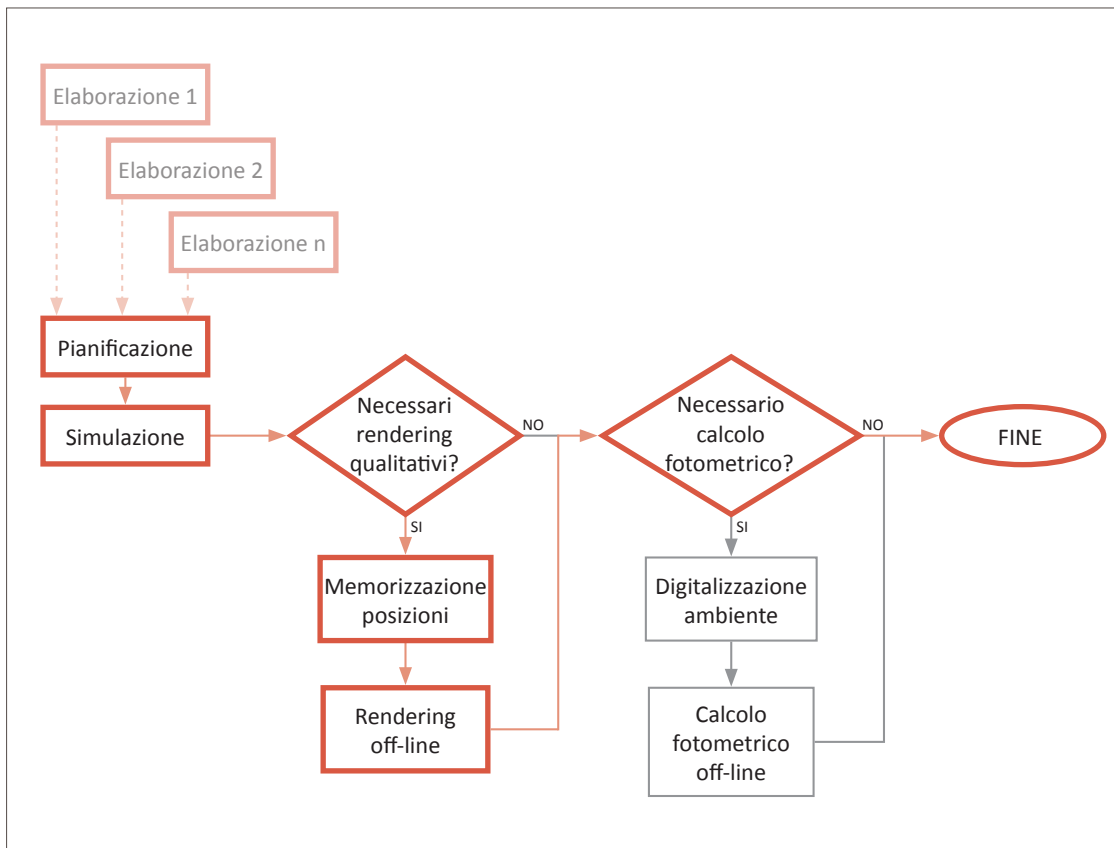
l'elaborazione con software specifici. In questo caso la valutazione dell'illuminazione è relativamente importante, dunque vengono utilizzati profili colore ICC per trasferire e rappresentare correttamente i colori, sia dei modelli virtuali sia dell'ambiente registrato durante la simulazione.

4 - Rilievo: il rilievo delle unità da esporre viene effettuato nel deposito dove esse si trovano, controllando le condizioni di illuminazione; le statue da digitalizzare sono rappresentazioni in marmo di figure umane leggermente sovradimensionate rispetto alla realtà.

L'acquisizione della geometria avviene mediante l'uso dello scanner laser, il quale genera una nube di punti per ogni ripresa eseguita; questa operazione viene preceduta dalla pianificazione delle riprese, ovvero la determinazione del numero e delle posizioni di scansione. In questo caso, la texture degli oggetti è pressoché uniforme, e può essere campionata in un qualsiasi punto della superficie; questa operazione viene eseguita con la fotocamera digitale e con una griglia calibrata per il bilanciamento dei colori.

5 - Elaborazione: in questa fase vengono effettuate tutte le operazioni che, dai dati grezzi, permettono di ottenere il modello poligonale completo degli oggetti. Le scansioni, attraverso l'uso di software specifici, vengono filtrate, allineate e fuse in un'unica struttura poligonale, la quale viene poi corretta dalle imperfezioni ed ottimizzata per la simulazione; in particolare, la decimazione dei poligoni dipende dalla complessità della scena virtuale, che deve essere messa in relazione anche alla potenza di calcolo del computer in uso.

Anche l'elaborazione della texture richiede vari passaggi, tra i quali il bilanciamento del bianco risulta molto importante per far assumere al modello la giusta tonalità cromatica; una volta che la texture viene applicata al modello digitale, può essere stimata la riflettanza delle superfici, in base al materiale di cui è costituito l'oggetto.



6 - Pianificazione: a partire dalla planimetria dell'ambiente è possibile progettare la disposizione delle statue, in relazione agli obiettivi dell'esposizione e alle caratteristiche di ambiente e oggetti. La scena virtuale può essere preparata precedentemente alla simulazione, disponendo i modelli virtuali, una volta pronti, nelle posizioni stabilite.

7 - Simulazione: la simulazione in realtà aumentata viene effettuata direttamente nell'ambiente espositivo, facendo uso della postazione e del robot; il marker fisso viene posizionato al centro della stanza, garantendo una più frequente e precisa ricalibrazione del marker mobile. In questo scenario è importante valutare l'effetto visivo degli oggetti e il loro rapporto con l'ambiente circostante; per questo motivo le operazioni effettuate consistono nella movimentazione del robot e nell'acquisizione dell'illuminazione in ognuna delle posizioni destinate agli oggetti.

Dopo aver acquisito in automatico la luce in una certa zona è possibile posizionare un oggetto e passare al successivo; in questo caso, l'illuminazione ambiente non viene implementata con sorgenti



Figura 7.2 - Acquisizione dell'illuminazione



Figura 7.3 - Posizionamento virtuale di una statua

virtuali perché la luce naturale e artificiale già presente è considerata sufficiente. Dopo che sono stati definiti posizioni e orientamenti di ogni oggetto, viene valutata la scena nel suo complesso e vengono esportate le coordinate relative ad un punto di riferimento individuato all'interno dell'ambiente; vengono, inoltre, registrate delle posizioni specifiche per la realizzazione di rendering off-line.



Figura 7.4 - Posizionamento virtuale di un'altra statua

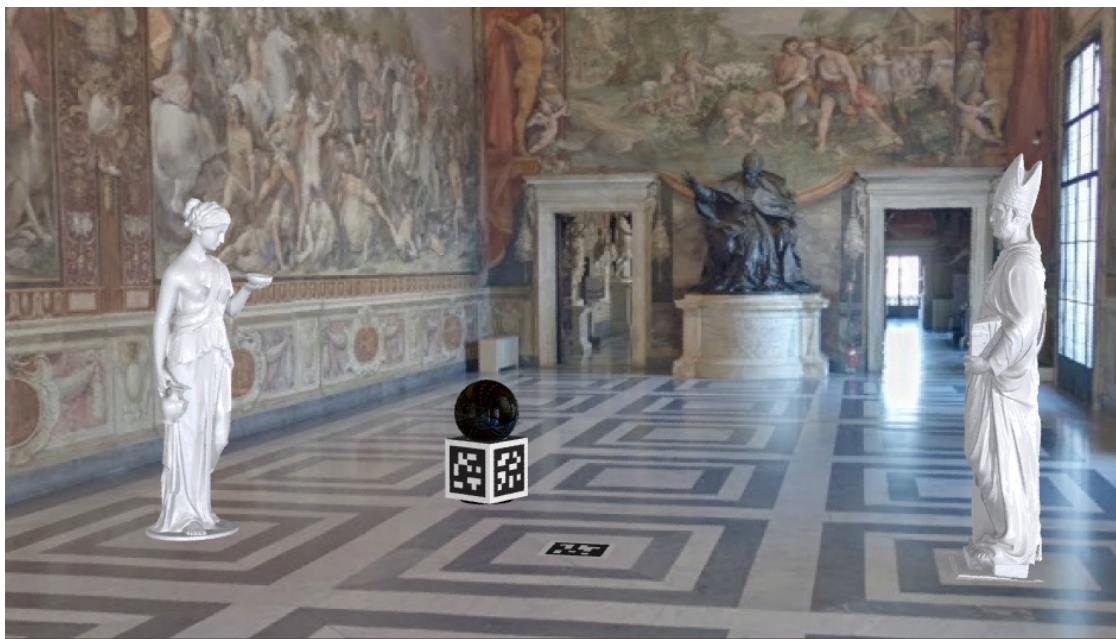


Figura 7.5 - Valutazione complessiva della scena

7.2 - SECONDO SCENARIO

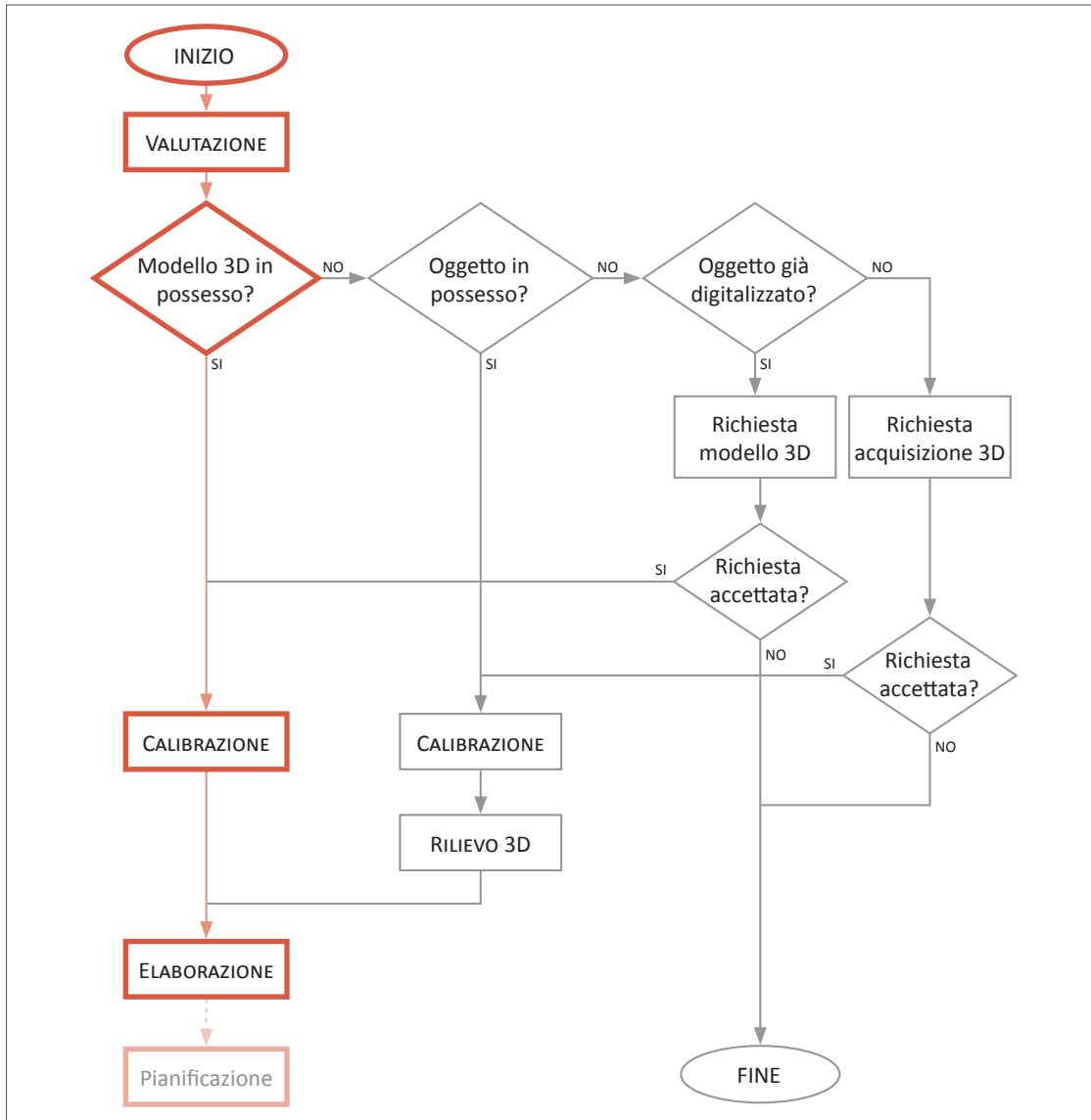
Nel secondo scenario viene ipotizzato il posizionamento di oggetti di origine commerciale all'interno di un ambiente universitario, con obiettivo l'apprendimento didattico; l'applicazione della tecnologia per realtà aumentata ad attività educative consiste nella valutazione estetica e funzionale di qualsiasi allestimento, ma con minori limitazioni rispetto ai progetti professionali.

In questo caso particolare, è stato simulato l'allestimento di prodotti di design d'arredo, per i quali è già esistente il corrispettivo digitale; questa applicazione si avvicina allo scopo per il quale il sistema SPAR è stato originariamente sviluppato, ovvero la pianificazione dell'arredamento, ma differisce da esso nel fatto che il posizionamento viene studiato per rendere funzionale la presentazione degli oggetti al pubblico, e non l'utilizzo degli stessi.

L'ambiente della simulazione è l'atrio di una struttura universitaria, mentre la strumentazione disponibile è la postazione per realtà aumentata, che comprende il robot, un computer portatile e vari software di elaborazione.

1 - Valutazione: in questo caso la simulazione dell'allestimento è facilmente attuabile perché il tempo e lo spazio sono disponibili, gli strumenti necessari sono già in possesso e la finalità del progetto non impone una qualità di risultato particolarmente elevata. L'ambiente presenta pavimentazione pressoché regolare e illuminazione artificiale ad alta temperatura di colore, ma bassa resa cromatica; gli oggetti dell'allestimento sono elementi d'arredo, in particolare poltrone e lampade, i cui modelli virtuali sono già esistenti e posseduti da progettista.

2 - Calibrazione: in questa situazione non sono richiesti strumenti di acquisizione, quindi gli unici dispositivi da calibrare sono quelli utilizzati per la simulazione. La videocamera usata per il tracciamento geometrico e fotometrico viene calibrata, determinando i parametri di deformazione dell'immagine, i quali vengono applicati in modo inverso alla rappresentazione finale.

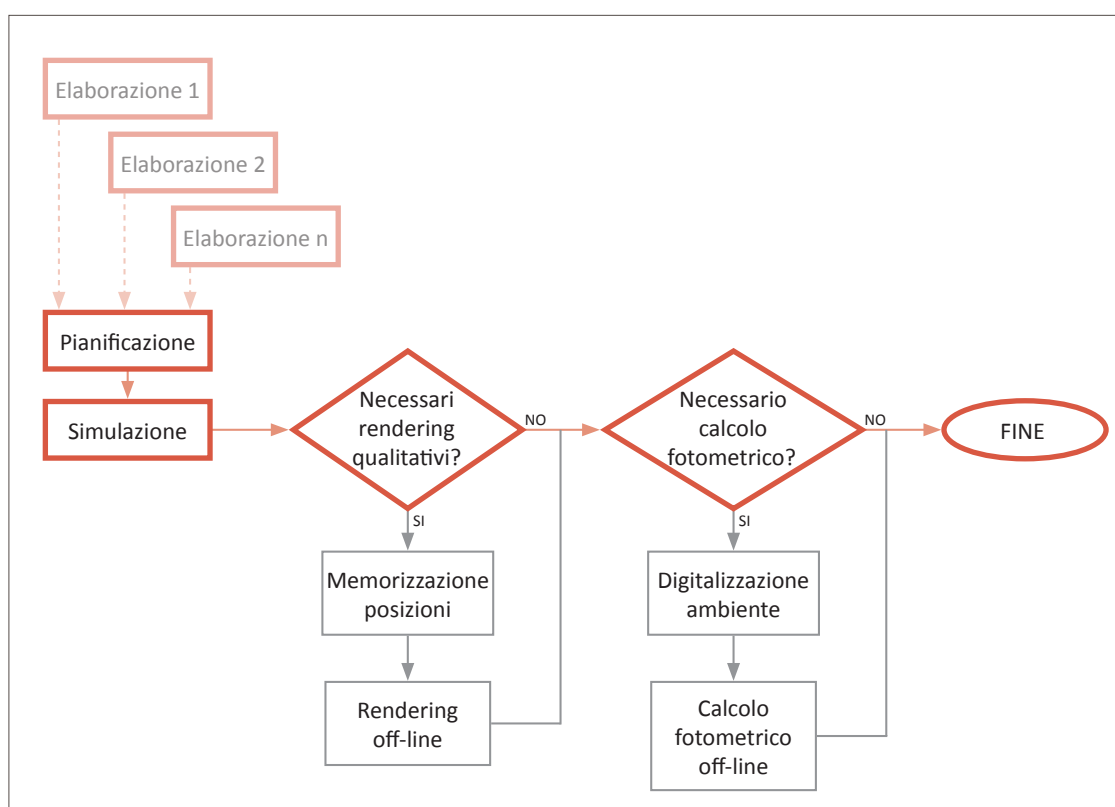


3 - Elaborazione: la fase di elaborazione richiede un numero di operazioni inferiore rispetto ad altre situazioni, perché i modelli virtuali sono già disponibili; essi devono essere solamente ottimizzati per la simulazione ed eventualmente corretti se affetti da errori di conversione tra formati digitali differenti. Se il prototipo virtuale ottenuto è stato realizzato con tecniche di modellazione per superfici o per solidi, esso deve

essere convertito in mesh poligonale, perché più facilmente gestibile da applicazioni in real-time; inoltre, la struttura poligonale deve essere decimata in relazione al numero di modelli visualizzati contemporaneamente, in base alla qualità degli effetti di illuminazione desiderati e alla potenza di calcolo del computer in uso, raggiungendo il giusto compromesso.

Gli oggetti di origine commerciale presentano spesso componenti di materiale diverso, i quali hanno però caratteristiche omogenee in ogni punto della superficie; possono, dunque, essere utilizzate texture ripetibili e riflettanze preimpostate dei vari materiali.

4 - Pianificazione: anche in questo caso la pianificazione dello spazio viene effettuata prima della simulazione, definendo la disposizione degli oggetti d'arredo in relazione alla planimetria dell'edificio. Lo spazio destinato all'esposizione presenta, però, delle



strutture che dovrebbero occludere la visione dei modelli sintetici durante la simulazione; per questo motivo, oltre al posizionamento virtuale degli oggetti, viene previsto l'inserimento di elementi geometrici regolari in corrispondenza delle strutture stesse.

5 - Simulazione: nello spazio scelto per valutare l'esposizione viene realizzata la simulazione, mediante l'uso del robot, della postazione e del marker fisso; la relativa complessità della struttura comporta la suddivisione della procedura di simulazione in fasi distinte, in ognuna delle quali viene valutato l'allestimento di aree espositive differenti.

L'illuminazione dell'ambiente è distribuita in modo omogeneo, consentendone un campionamento poco frequente; anche in questo caso non vengono inserite sorgenti artificiali virtuali perché la luce presente è considerata adatta per soddisfare gli obiettivi preposti. Ultimata la disposizione degli oggetti, la scena e le eventuali alternative di progetto vengono valutate in modo complessivo, esportando la configurazione definitiva.



Figura 7.6 - Robot e marker fisso nella scena



Figura 7.7 - Posizionamento virtuale di un oggetto



Figura 7.8 - Posizionamento virtuale di un altro oggetto



Figura 7.9 - Valutazione di una parte della scena

8 - CONCLUSIONI

Grazie alle informazioni raccolte nella ricerca, alle ipotesi di impiego attuali e ai possibili scenari applicativi della simulazione in realtà aumentata, è possibile individuare gli sviluppi futuri della tecnologia e trarre le conclusioni del lavoro svolto.

8.1 - SVILUPPI FUTURI

Sono stati identificati alcuni possibili sviluppi della simulazione in realtà aumentata che possono migliorare ulteriormente la qualità della riproduzione digitale, ma che fanno riferimento a tecniche e strumenti ancora poco funzionali o relativamente costosi. Queste tecnologie non sono state prese in considerazione come possibili applicazioni attuali, ma rappresentano la direzione verso la quale la simulazione in realtà aumentata potrà essere sviluppata in un prossimo futuro.

1 - Un problema che può riguardare il processo di simulazione dell'allestimento è la necessità di ottenere un ambiente molto buio con focalizzazioni della luce, più o meno intensa, solamente su alcune zone, situazione non poco frequente in campo espositivo. L'utilizzo di tecniche di tracciamento Marker-based e di dispositivi di visualizzazione digitali richiede che nell'ambiente ci siano condizioni di illuminazione sufficienti per effettuare la simulazione; questo comporta che il livello di luce voluta e studiata sia inferiore a quella effettivamente presente nell'ambiente nel momento della simulazione. Una possibile soluzione a questo problema può essere l'utilizzo del tracciamento ottico della radiazione infrarossa, con marker e telecamera appositi; questa soluzione consentirebbe di abbassare di qualche grado il livello di luce durante la simulazione. Un'altra soluzione potrebbe essere l'utilizzo di tecniche di re-illuminazione, le quali permettono di cambiare virtualmente l'illuminazione dell'ambiente acquisendo e rimuovendo la luce reale e generando nuovi effetti; queste tecniche richiedono però la

conoscenza del modello geometrico della scena.

2 - L'acquisizione dell'illuminazione reale è una questione affrontata con numerosi metodi, tra i quali, la soluzione che genera i risultati migliori è l'utilizzo di sfere a riflessione speculare; questa tecnica non può però essere utilizzata in modo interattivo perché richiede l'acquisizione di riprese multiple della scena per generare immagini HDR.

Recentemente, sono state tuttavia sviluppate videocamere che registrano immagini HRD in tempo reale, con le quali potrebbe essere tracciata l'illuminazione di un ambiente e proiettata in real-time su un modello virtuale; le limitazioni riguardano l'elevato costo di questi dispositivi e la gestione di grandi quantità di informazioni in tempo reale, ma in un prossimo futuro questi dispositivi potranno essere utili per molte applicazioni, eventualmente in combinazione con display HDR, oggi ancora in fase di sviluppo.

3 - Uno dei problemi dei sistemi di acquisizione dell'illuminazione, basati su sfere a riflessione diffusa o speculare, è la cattura di una porzione incompleta dell'ambiente circostante. Una soluzione potrebbe essere la messa a punto di algoritmi che uniscono le riprese effettuate da posizioni diverse ricostruendo l'immagine omnidirezionale completa, pratica che viene comunemente eseguita per immagini statiche. Un'altra soluzione è l'utilizzo di una camera fish-eye, la quale permette di registrare porzioni di ambiente maggiori, ma nel caso studiato comporterebbe notevoli problemi perché dovrebbe essere posizionata sul robot.

4 - Nel caso in cui debba essere valutato l'allestimento in un ambiente densamente allestito è possibile che gli oggetti reali si debbano interporre tra l'osservatore e alcuni elementi della scena virtuale; le occlusioni possono essere calcolate digitalizzando la geometria degli oggetti reali, operazione che però aumenta ulteriormente i tempi di progetto. Una soluzione che non determina azioni supplementari è il calcolo automatico delle occlusioni mediante opportuni algoritmi basati su mappe di profondità; tuttavia, attualmente, questi metodi sono poco precisi, a meno che non vengano sfruttati dispositivi aggiuntivi, come camere TOF o doppie camere per visione stereoscopica.

5 - Il vincolo dell'altezza di inquadratura causato dal marker comporta problemi di visione nel caso di oggetti alti o di ambienti ristretti che non consentono di arretrare

il punto di osservazione. L'utilizzo di una camera supplementare, posta al di sopra di quella usata per il tracciamento geometrico, potrebbe aggirare questo problema; in questo caso sarebbe però necessario calibrare la posizione e l'orientamento relativi tra le due camere, ed eventualmente sfruttare algoritmi di interpolazione e fusione d'immagine.

6 - Il livello di immersione della simulazione può essere aumentato mediante l'utilizzo di dispositivi di visualizzazione alternativi ai classici display; una soluzione è l'utilizzo di dispositivi in grado di simulare la stereoscopia, come schermi e occhiali 3D. Un'alternativa è l'uso di Head-mounted Display, capaci non solo di far percepire la stereoscopia, ma anche di isolare l'utente dall'ambiente circostante; tuttavia essi risultano ancora costosi o relativamente poco accurati. In futuro potranno inoltre essere utilizzati display trasparenti, eventualmente combinati con tecniche di tracciamento ottico, oppure occhiali che proiettano immagini virtuali sulla retina o sulla lente.

8.2 - CONCLUSIONI

In questa tesi è stato analizzato il settore delle esposizioni, in particolare l'ambito illuminotecnico connesso, ed è stata individuata una procedura ed alcuni strumenti di acquisizione e simulazione in grado di supportare il progetto di allestimento; sono stati inoltre identificati i possibili sviluppi della tecnologia e i livelli di complessità che essa può gestire.

L'individuazione delle condizioni iniziali per l'utilizzo della tecnologia di simulazione è iniziata escludendo le esposizioni di tipo commerciale, perché ritenute poco congrue con la simulazione dell'allestimento in realtà aumentata; l'analisi, che ha confermato questa ipotesi, è stata focalizzata sulle esposizioni culturali, sia temporanee sia permanenti, esaminandone la varietà di contenuti e ambienti.

Gli ambienti dove verrebbe utilizzata la tecnologia di simulazione in realtà aumentata sono musei, padiglioni ed edifici convertiti in spazi espositivi, come palazzi d'epoca, ville

e castelli; gli oggetti culturali che verrebbero esposti, ed eventualmente digitalizzati, sono le unità d'arte antica, moderna, contemporanea, oggetti di design, beni storici o scientifici e reperti archeologici.

La simulazione verrebbe effettuata con un sistema di realtà aumentata Marker-based che sfrutta un marker movimentato da un robot e una postazione con computer e webcam; un eventuale sviluppo di questa tecnologia può essere l'implementazione di un sistema di tracciamento fotometrico, che adopera un Light-probe speculare o diffusivo. L'acquisizione degli oggetti, se richiesta, verrebbe eseguita mediante strumenti di digitalizzazione Image-based o Range-based e software di elaborazione appropriati. I profili professionali che gestirebbero la postazione per la realtà aumentata sono il curatore o il progettista, quest'ultimo interno o esterno all'organizzazione. Se fosse richiesta la digitalizzazione degli oggetti, le figure professionali coinvolte sarebbero dei tecnici addetti all'acquisizione delle unità e all'elaborazione dei modelli tridimensionali. Inoltre, se le condizioni dovessero consentirlo, potrebbe essere presente un lighting designer, coinvolto nello studio virtuale dell'illuminazione.

La simulazione in realtà aumentata è utilizzabile nel caso in cui le risorse di tempo e budget siano sufficienti, il corrispettivo virtuale di ogni oggetto sia ottenibile, gli ambienti abbiano pavimentazione regolare e siano accessibili prima dell'inizio dell'evento. Soddisfatte queste condizioni, la simulazione è utile principalmente nel caso di contenuti a sviluppo tridimensionale, di difficile movimentazione, di medie dimensioni e che possiedono già una controparte virtuale; essa è inoltre adatta per ambienti decorati, poco allestiti, di medie dimensioni e che non siano stati digitalizzati, e anche nel caso di allestimenti progettati con illuminazione poco complessa e che sfruttano la luce ambiente già presente.

Ovviamente sono rare le esposizioni che rispondono a tutti questi requisiti, ma può essere vantaggioso usufruire della simulazione anche in situazioni di illuminazione complessa e nel caso di oggetti non ancora digitalizzati, allargando notevolmente il campo di applicabilità. In particolare, se gli oggetti devono essere acquisiti, le esposizioni maggiormente adatte ad essere supportate da questa tecnologia sono le esposizioni

temporanee itineranti, per le quali l'acquisizione tridimensionale degli oggetti è richiesta solo per il primo evento. Inoltre, la digitalizzazione delle unità culturali, può essere un vantaggio per quelle organizzazioni che hanno intrapreso un programma di archiviazione e divulgazione digitale dei beni posseduti.

Nel corso di questa ricerca è stato constatato che la simulazione in realtà aumentata può diventare un utile strumento di progetto in tutti i settori dove è richiesta la valutazione qualitativa del rapporto tra oggetti e ambiente, e, di conseguenza, anche nei loro relativi ambiti di formazione professionale; purtroppo, il numero di situazioni nelle quali la tecnologia di simulazione può essere sfruttata per supportare il progetto di allestimento viene limitato dalle numerose condizioni imposte dal livello tecnologico attuale.

Tuttavia, esistono alcuni principi che manifestano l'utilità dello sviluppo per questo impiego: innanzitutto, il sistema SPAR è stato concepito per l'arredo di qualsiasi ambiente, quindi l'ambito espositivo, seppur più ristretto, può rappresentare una valida estensione di applicabilità; inoltre, le tecnologie di acquisizione e simulazione sono in continuo miglioramento, rendendo compatibili un sempre maggior numero di situazioni.

In aggiunta, l'accostamento della simulazione virtuale all'ambito delle esposizioni, nel quale l'illuminazione rappresenta una componente fondamentale, ha permesso di analizzare le soluzioni esistenti nel campo della visione fotorealistica in realtà aumentata; questo settore è ancora poco conosciuto, ma è in rapida crescita, e i suoi sviluppi possono essere esportati in qualsiasi campo di applicazione.

È possibile concludere che la simulazione dell'allestimento espositivo in realtà aumentata è uno strumento di progetto flessibile che può adattarsi a varie esigenze; essa, nonostante l'uso di strumentazione a basso costo, consente di raggiungere buoni risultati qualitativi, e il campo di applicazione, oggi relativamente ristretto, potrà essere ampliato grazie al rapido sviluppo delle tecnologie di simulazione e acquisizione tridimensionale.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Dernie, D., *Design espositivo: progetti e allestimenti*, Logos, Modena, 2006
 - [2] Di Lauro, D., *Museo degli allestimenti: un museo degli allestimenti alla Triennale di Milano*, Tesi di Laurea, Politecnico di Milano, Milano, A.A. 2003-2004
 - [3] Busotti, A.J., *Il museo ed il suo allestimento dalle origini ad oggi: una proposta per il nuovo Museo Civico di Parma nel complesso San Paolo*, Tesi di Laurea, Politecnico di Milano, Milano, A.A. 1999-2000
 - [4] Belcher, M., *Exhibition in museum*, Leicester university press: Smithsonian institution press, Leicester; Londra; Washington, 1991
 - [5] Tomea Gavazzoli, M. L., *Manuale di museologia*, Rizzoli Etas, Milano, 2011
 - [6] Conti, A.P., *Allestire-riallestire nell'esistente: problematiche della museografia italiana contemporanea tra restauro e tecniche dell'esporre nei musei delle arti*, Tesi di Dottorato, Politecnico di Milano, Milano, 2008
 - [7] Pacifico, G., Putzu, M., *Allestire una mostra temporanea*, Roma, 2012, <http://www.gnam.beniculturali.it/index.php?it/101/dossier-per-i-docenti> (ultima visita 4 dicembre 2012)
 - [8] Galli, C.F.P., Giusti, R., Maccabelli, F., *Metodologia d'approccio all'illuminazione delle opere d'arte: studio di un apparecchio di illuminazione polifunzionale*, Tesi di Laurea, Politecnico di Milano, Milano, A.A. 1998-1999
 - [9] Dean, D. , *Museum Exhibition: Theory and practice*, Routledge, Londra; New York, 1994
 - [10] Citter, C., *Museologia e museografia*, <http://www.archeogr.unisi.it/C-CGBA/laboratori/lam/Museologia%20e%20Museografia%201.7.pdf>
-

(ultima visita 10 settembre 2012)

- [11] Giannini, A.M., Marzi, T., Viggiano, M.P., *Psicologia e società, Design*, Giunti Editore, Firenze, 2011
 - [12] Tommasini, G., Tracanzan, K, *L'allestimento e i suoi molteplici ambiti di applicazione tra evoluzione storica e prospettive future*, Tesi di Laurea, Politecnico di Milano, Milano, A.A. 1998-1999
 - [13] Karlen, M., *Space planning basics*, John Wiley & Sons, Hoboken, 2004
 - [14] Palladino, P., *Manuale di illuminazione*, Tecniche Nuove, Milano, 2005
 - [15] D'Agostino, V., *Condizioni microclimatiche e di qualità dell'aria negli ambienti museali*, Tesi di Dottorato, Università Federico II, Napoli, 2006
 - [16] Acefalo, E.M., Bonizzi, A., *Arte in lux: verso una corretta definizione dei requisiti illuminotecnici delle opere d'arte*, Tesi di Laurea, Politecnico di Milano, Milano, A.A. 2002-2003
 - [17] ICOM Italia, *Carta nazionale delle professioni museali*, Milano, ICOM Italia, 2008, <http://www.icom-italia.org/images/documenti/cartanazionaleprofessioni2008.pdf>
(ultima visita 4 dicembre 2012)
 - [18] University of Rochester, *Museum Job Descriptions*, <http://mag.rochester.edu/plugins/acrobat/teachers/MuseumCareers.pdf> (ultima visita 10 settembre 2012)
 - [19] Karp, I., Lavine, S.D., *Culture in mostra: politiche e poetiche dell'allestimento museale*, CLUEB, Bologna, 1995
 - [20] Istituto per i beni artistici, culturali e naturali, *Profili e Qualifiche professionali per i Musei della Regione Emilia-Romagna*, Stamperia della Regione Emilia-Romagna, Bologna, 2007, <http://ibc.regione.emilia-romagna.it/istituto/>
-

formazione-e-didattica/Musei/allegati-formazione-e-didattica/allegati-
formazione-operatori-museali/Musei_profili_qualifiche.pdf/view
(ultima visita 4 dicembre 2012)

- [21] Di Giorgio, G., *Introduzione all'allestimento*, Arcane, Roma, 2006
- [22] De Luca, M., *Che cos'è un museo*, Roma, 2012, <http://www.gnam.beniculturali.it/index.php?it/101/dossier-per-i-docenti>
(ultima visita 4 dicembre 2012)
- [23] Karlen, M., Benya, J.R., Spangler, C., *Lighting design basics*, John Wiley & Sons, Hoboken, 2012
- [24] Bien, H.M., Helle, M., *International lighting design index*, Avedition, Ludwigsburg, 2009
- [25] Bisegna, F., Gugliermetti, F., Barbalace, M., Monti, L., *Confronto tra software illuminotecnici*, 2010, http://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/illuminazione-pubblica/5-uniroma1-confronto-software.pdf
(ultima visita 10 settembre 2012)
- [26] Università degli studi di Milano, *Spettrofotometria e colorimetria*, 2008, http://www.brera.unimi.it/istituto/archo/download/Spettrofotometria_e_colorimetria.pdf
(ultima visita 4 dicembre 2012)
- [27] Botta, E., Rinaudo, G., *Colorimetria*, 2004, <http://www.iapht.unito.it/ifts/lez13-03-colorimetria.pdf>
(ultima visita 4 dicembre 2012)
- [28] Rastello, M.L., *Luce e colore*, 2010, http://www.inrim.it/ldm/cd_ldm/allegati/SI_intensita_lum/luce_e_colore.pdf
(ultima visita 4 dicembre 2012)
-

-
- [29] Pasetti, A., *Luci per esporre: illuminare tra design e tecnica*, Marsilio, Venezia, 2006
- [30] Pellegrini, P.C., *Allestimenti museali*, F.Motta, Milano, 2003
- [31] Steffy, G., *Architectural lighting design*, John Wiley & Sons, New York, 2002
- [32] Guidi, G., Russo, M., Beraldin, J.-A., *Acquisizione 3D e modellazione poligonale*, McGraw-Hill, 2010
- [33] Robinson, S., *Simulation: the practice of model development and use*, John Wiley & Sons, Chichester; Hoboken, 2004
- [34] Lizaranzu, J., *Sviluppo di un ambiente multimodale per l'interazione con il prototipo virtuale di un elettrodomestico*, Tesi di Laurea, Politecnico di Milano, Milano, A.A. 2009-2010
- [35] Druck, A., *When will virtual reality become a reality?*, 2006, <http://www.techcast.org/Upload/PDFs/061026231112tc%20%20aaron.pdf> (ultima visita 4 dicembre 2012)
- [36] Cristina, A., *Uno show room virtuale per il contract interior design*, Tesi di Laurea, Politecnico di Milano, Milano, A.A. 2011-2012
- [37] Siltanen, S., *Theory and applications of marker-based augmented reality*, 2012, <http://www.vtt.fi/inf/pdf/science/2012/S3.pdf> (ultima visita 4 dicembre 2012)
- [38] Gibson, S., Chalmers, A., *Photorealistic Augmented Reality*, Proceedings of Eurographics 2003, 2003
- [39] Carmignani, J., Furht, B., Anisetti, M., Ceravolo, P., Damiani, E., Ivkovic, M., *Augmented reality technologies, systems and applications*, Multimedia Tools and Applications, Gennaio 2011, Volume 51, N.1, pp. 341-377
-

-
- [40] Leoni, R., *Valutazione estetico funzionale di prodotti interattivi in realtà mista*, Tesi di Laurea, Politecnico di Milano, Milano, A.A. 2008-2009
- [41] Papagiannakis, G., Singh, G., Magnenat-Thalmann, N., *A survey of mobile and wireless technologies for augmented reality systems*, Computer Animation and Virtual Worlds, Febbraio 2008, Volume 19, N.1, pp. 3-22
- [42] Bimber, O., Raskar, R., *Spatial augmented reality, merging real and virtual worlds*, A K Peters, Wellesley, 2005
- [43] Facciolo, A., *Localizzazione di robot mobili a ruote per applicazioni di realtà aumentata*, Tesi di Laurea, Politecnico di Milano, Milano, A.A. 2009-2010
- [44] Haller, M., Billingham, M., Thomas, B.H., *Emerging technologies of augmented reality: interfaces and design*, Idea Group Pub., Hershey; Londra, 2007
- [45] Klein, G., *Visual tracking for augmented reality*, Tesi di Dottorato, University of Cambridge, Cambridge, 2006
- [46] Jacobs, K., Loscos, C., *Classification of illumination methods for mixed reality*, Computer Graphics Forum, Marzo 2006, Volume 25, N.1, pp. 29-51
- [47] Debevec, P., *Rendering synthetic objects into real scenes: bridging traditional and image-based graphics with global illumination and high dynamic range photography*, Proceedings of Siggraph '98, 1998
- [48] Sato, I., Sato, Y., Ikeuchi, K., *Illumination from shadows*, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Marzo 2003, Volume 25, N.3, pp. 290-300
- [49] Kanbara, M., Yokoya, N., *Real-time estimation of light source environment for photorealistic augmented reality*, Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition, 2004, pp. 911-914
-

-
- [50] Aittala, M., *Inverse lighting and photorealistic rendering for augmented reality*, *The visual computer*, Giugno 2010, Volume 26, N.6-8, pp. 669-678
- [51] Fite-Georgel, P., *Is there a reality in industrial augmented reality?*, IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, Ottobre 2011, pp. 201-210
- [52] Gadia, D., Villa, D., *Visualizzazione in ambienti di Realtà Virtuale di scenari fotorealistici basati su dati e calcoli illuminotecnici. Applicazione agli Esterni Urbani*, 2010, http://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/illuminazione-pubblica/12-unimi-realta-virtuale.pdf (ultima visita 4 dicembre 2012)
- [53] Menna, F., *Metodologie e tecniche per la modellazione tridimensionale inversa*, Tesi di Dottorato, Università degli studi di Napoli, Napoli, 2009
- [54] Brevi, F., *Il design delle superfici, i modelli digitali per il disegno industriale*, Poli.design, Milano, 2004
- [55] Ceconello, M., *Modelli virtuali per il progetto e la pianificazione*, 2011, http://www.academia.edu/1328917/Modelli_virtuali_per_il_progetto_e_la_pianificazione (ultima visita 4 dicembre 2012)
- [56] UdRD Design Representation, Dipartimento INDACO, Politecnico di Milano, *Realtà, simulazione e progetto, il ruolo del modello: seminario 16/17 giugno 2011*, Maggioli, Santarcangelo di Romagna, 2011
- [57] Remondino, F., El-Hakim, S., *Image-based 3D modelling: a review*, *The Photogrammetric Record*, Settembre 2006, Volume 21, N.115, pp. 269-291
- [58] Pavlidis, G., Koutsoudis, A., Arnaoutoglou, F., Tsioukas, V., Chamzas, C., *Methods for 3D digitization of Cultural Heritage*, *Journal of Cultural Heritage*, Gennaio-Marzo 2007, Volume 8, N.1, pp. 93-98
-

-
- [59] Remondino, F., *Rilievo e modellazione 3D di siti e architetture complesse*, Disegnare con, Dicembre 2011, Volume 4, N.8, pp. 90-98
- [60] Hernandez Esteban, C., Schmitt, F., *Silhouette and stereo fusion for 3D object modeling*, Computer Vision and Image Understanding, Dicembre 2004, Volume 96, N.3, pp. 367-392
- [61] Lamera, L., *Fissare la temporaneità, il reverse modeling degli allestimenti espositivi*, Tesi di Laurea, Politecnico di Milano, Milano, A.A. 2009-2010
- [62] Bernardini, F., Rushmeier, H., *The 3D model acquisition pipeline*, Computer Graphics Forum, Giugno 2002, Volume 21, N.2, pp. 149-172
- [63] Scateni, R., Cignoni, P., Montani, C., Scopigno, R., *Fondamenti di grafica tridimensionale interattiva*, McGraw-Hill, Milano, 2005
- [64] Wu, T.Y., Ma, W.C., Chuang, Y.Y., Chen, B.Y., Ouhyoung, M., *Image-based BRDF acquisition for non-spherical objects*, Proceedings of 2005 Workshop Computer Vision & Graphics, 2005
-

SITOGRAFIA

- <http://www.beniculturali.it>
 - <http://www.allestimentimuseali.beniculturali.it/>
 - <http://icom.museum/>
 - <http://www.icom-italia.org>
 - <http://www.simbdea.it/>
 - <http://www.artservicesrl.it/>
 - <http://culturaincifre.istat.it/>
 - <http://www.registrarte.org>
 - <http://www.gnam.beniculturali.it/>
 - <http://www.museoscienza.org/>
 - <http://www.googleartproject.com>
 - <http://www.barberiniallestimenti.it/>
 - <http://www.sistemalab.it/>
 - <http://www.domusweb.it>
 - <http://www.triennale.it>
 - <http://www.sistemamuseo.it>
 - <http://www.pentagono.it/>
-

-
- <http://www.palazzograssi.it>
 - <http://www.museoegizio.it/>
 - <http://www.fotozona.it/>
 - <http://www.iesna.org/>
 - <http://www.luceonline.it>
 - <http://www.accademiadellaluce.it>
 - <http://www.nist.gov>
 - <http://www.osram.com/>
 - <http://www.boscarol.com>
 - <http://www.erco.com>
 - <http://www.federica.unina.it>
 - <http://www.ptgui.com/>
 - <http://www.agisoft.ru/>
 - <http://www.promuseum-italia.com/>
 - <http://www.polhemus.com/>
 - <http://www.creaform3d.com>
 - <http://www.fit3d.info/>
 - <http://www.123dapp.com/catch>
-

-
- <http://www.photomodeler.com/>
 - <http://www.eng.cam.ac.uk>
 - <http://www.percro.org/>
 - <http://www.vtt.fi>
 - <http://www.siggraph.org/>
 - <http://www.archibase.net/>
 - <http://www.turbosquid.com/>
 - <http://www.3ds.com>
 - <http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/>
 - <http://www.inglobetechnologies.com>
 - <http://www.metaio.com/>
 - <http://planetpixelemporium.com/>
 - <http://www.dvetelepresence.com>
 - <https://developer.nvidia.com/>
-
