

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in

Ingegneria Meccanica



Qualificazione e applicazione di tecniche di
visione per la misura di vibrazioni strutturali

Relatore: Prof. Emanuele ZAPPA

Co-relatore: Ing. Giorgio BUSCA

Tesi di Laurea di:

Fabio DONATI Matr.724972

Anno Accademico 2009- 2010

Indice

SOMMARIO	1
ABSTRACT	3
INTRODUZIONE	5
1. STATO DELL'ARTE	9
1.1. INTRODUZIONE	9
1.2. APPLICAZIONI CHE NON NECESSITANO DI TARGET	9
1.3. APPLICAZIONI CHE NECESSITANO DI TARGET	10
1.4. CONSIDERAZIONI FINALI.....	13
2. INTRODUZIONE ALLE TECNICHE UTILIZZATE	17
2.1. PATTERN MATCHING.....	17
2.1.1. <i>Sum of Squared Differences</i>	18
2.1.2. <i>Sum of Absolute Differences</i>	18
2.1.3. <i>Normalised Cross-Correlation</i>	19
2.1.4. <i>Ottimizzazioni della tecnica</i>	19
2.2. BLOB DETECTION.....	23
2.2.1. <i>Media del perimetro</i>	25
2.2.2. <i>Baricentro in binario</i>	25
2.2.3. <i>Baricentro in scala di grigi</i>	26
2.2.4. <i>baricentro in scala di grigi quadratico</i>	26
2.2.5. <i>Interpolazione tramite ellisse</i>	27
2.2.6. <i>Interpolazione con una distribuzione gaussiana</i>	27
2.3. EDGE DETECTION	28
3. CONFRONTO TRA LE TECNICHE IN LABORATORIO	35
3.1. INTRODUZIONE	35
3.2. SET DI MISURA.....	35
3.3. SVOLGIMENTO DELLE PROVE.....	38
3.4. PATTERN MATCHING.....	39
3.5. BLOB DETECTION.....	47
3.6. EDGE DETECTION	59
3.7. CONCLUSIONI.....	66

4.	APPLICAZIONE DELLE TECNICHE PER MISURE DI VIBRAZIONI	69
4.1.	INTRODUZIONE	69
4.2.	DESCRIZIONE DELLA STRUTTURA.....	69
4.3.	SET DI MISURA.....	71
4.4.	ANALISI DEI DATI: PATTERN MATCHING	75
4.5.	ANALISI DEI DATI: EDGE DETECTION	86
4.6.	ANALISI DEI DATI: BLOB DETECTION	93
4.7.	CONFRONTO TRA LE TECNICHE	97
5.	MISURE DI VIBRAZIONI MEDIANTE PATTERN MATCHING	109
5.1.	INTRODUZIONE	109
5.2.	SET DI MISURA.....	109
5.3.	ANALISI DEI DATI	112
5.4.	TEST SULL’AFFIDABILITÀ DELLA TECNICA A DISTANZE ELEVATE	120
5.5.	VANTAGGI E SVANTAGGI CONNESSI ALLA TECNICA.....	124
5.5.1.	<i>Semplicità allestimento della prova</i>	<i>124</i>
5.5.2.	<i>Analisi quasistatica.....</i>	<i>125</i>
5.5.3.	<i>Svantaggi.....</i>	<i>128</i>
5.6.	CONCLUSIONI.....	129
6.	MISURA A BORDO DELLA STRUTTURA VIBRANTE: TEST DI FATTIBILITÀ	131
6.1.	INTRODUZIONE	131
6.2.	DESCRIZIONE DELLA STRUTTURA.....	131
6.3.	SETUP DI MISURA	132
6.4.	ESECUZIONE DELLA PROVA	134
6.5.	ANALISI DEI DATI	135
6.6.	CONCLUSIONI.....	143
	CONCLUSIONI	147
	BIBLIOGRAFIA	153

Indice delle figure

Figura 1.2.1 Ponte tracciato(Immagine tratta dal lavoro di J. Morlier, P. Salom e F. Bos)	10
Figura 1.3.1 Posizionamento della videocamera e del target(Immagine tratta dallo studio di A. Mazen Wahbeh, John P. Caffrey e Sami F. Masri)	11
Figura 1.3.2 Foglio riportante il blob tracciato applicato alla struttura(Immagine tratta dal lavoro di Sang-Chan Kim, Hak Kyeong Kim, Chae-Gue Lee e Sang-Bong Kim).....	11
Figura 1.3.3 Target utilizzato per tracciare la posizione della struttura(Immagine tratta dallo studio effettuato da Yoshio Fukuda, Maria Q. Fengy e Masanobu Shinozuka).....	12
Figura 1.3.4 Target applicato alla struttura in analisi (Immagine tratta dal lavoro di C.C.Chang, M.ASCE, e X.H.Xiao).	12
Figura 2.1.1 Possibili pattern da utilizzare	21
Figura 2.1.2 Possibili pattern da utilizzare.....	21
Figura 2.1.3 Possibili pattern da utilizzare.....	22
Figura 2.1.4 Possibili pattern da utilizzare.....	22
Figura 2.2.1 Estrazione di un blob da un'immagine.....	23
Figura 2.2.2 selezione del blob in funzione di parametri geometrici.....	24
Figura 2.3.1 Edge cromatico(a destra) ed edge fisico(a sinistra)	28
Figura 2.3.2 Profilo di luminosità ideale calcolato lungo la linea blu	29
Figura 2.3.3 Profilo di luminosità realmente acquisito dal sensore	29
Figura 2.3.4 Funzioni utilizzate per approssimare il gradiente del profilo di luminosità acquisito	30
3.2.1 micrometro utilizzato per imporre lo spostamento al target	35
Figura 3.2.2 micrometro utilizzato per imporre lo spostamento al target ottimizzato per l'analisi delle immagini effettuata mediante edge detection.....	36
Figura 3.2.3 target utilizzato per la misura	36
Figura 3.2.4 Griglia di taratura.....	37
Figura 3.3.1 Spostamento imposto dal micrometro	38
Figura 3.3.2 Immagine ripresa dalla telecamera Marlin	39
Figura 3.4.1 Riconoscimento del pattern da parte del software	40
Figura 3.4.2 Spostamenti orizzontali misurati tramite pattern matching	40
Figura 3.4.3 Spostamenti verticali misurati tramite pattern matching	41

Figura 3.4.4 Spostamenti orizzontali misurati con retta di taratura Per immagini ottenute tramite la telecamera Marlin	42
Figura 3.4.5 Discrepanza tra misura e retta teorica ricavata per immagini ottenute tramite la Telecamera Marlin	42
Figura 3.4.6 Spostamenti orizzontali misurati con retta di taratura Per immagini ottenute tramite la telecamera Prosilica	43
Figura 3.4.7 Discrepanza tra misura e retta teorica ricavata per immagini ottenute tramite la Telecamera Prosilica	44
Figura 3.4.8 Pattern utilizzato per la misura	44
Figura 3.4.9 Individuazione del pattern nell'immagine.....	45
Figura 3.4.10 Discrepanza tra misura e retta teorica ricavata per immagini ottenute tramite la Telecamera Prosilica	45
Figura 3.4.11 Discrepanza tra misura e retta teorica ricavata per immagini ottenute tramite la Telecamera Marlin	46
Figura 3.5.1 Immagine invertita per il calcolo del blob.....	47
Figura 3.5.2 immagine ottenuta applicando una soglia inferiore ai valori di luminosità dell'immagine	48
Figura 3.5.3 Confronto tra dati ottenuti retta di taratura e retta di interpolazione dei dati ottenuti dalla videocamera Marlin.....	49
Figura 3.5.4 Discrepanza tra misura e retta teorica blob 1(a sinistra) e blob 2(a destra).....	50
Figura 3.5.5 Discrepanza tra misura e retta teorica blob 3(a sinistra) e blob 4(a destra).....	50
Figura 3.5.6 Confronto tra dati ottenuti, retta di taratura e retta di interpolazione dei dati ottenuti dalla Prosilica.....	51
Figura 3.5.7 Differenza blob 1(a sinistra) e blob 2(a destra)	52
Figura 3.5.8 Differenza blob 3(a sinistra) e blob 4(a destra)	52
Figura 3.5.9 Variazione dello scostamento ed della varianza massimo al variare del blob.....	53
Figura 3.5.10 Variazione dello scostamento massimo e della varianza al variare della dimensione rappresentativa del blob	54
Figura 3.5.11 Immagine ottenuta tramite la Marlin	54
Figura 3.5.12 Immagine ottenuta tramite la Prosilica.....	55
Figura 3.5.13 Dettaglio del target Marlin(a sinistra) e Prosilica(a destra).....	56
Figura 3.5.14 Linea lungo la quale si valuta il profilo di luminosità.....	56
Figura 3.5.15 Profilo di luminosità ottenuto dalle due immagini	57
Figura 3.5.16 Derivata del profilo di luminosità ottenuto dalle due immagini ..	57

Figura 3.5.17 Filtro derivativo Prosilica(a sinistra) e Marlin(a destra).....	58
Figura 3.6.1 Immagini ottenute tramite le due telecamere; A)Prosilica; B)Marlin;.....	59
Figura 3.6.2 Dati misurati tramite edge detection(telecamera Marlin).....	59
Figura 3.6.3 Dati misurati tramite edge detection confrontati con la retta di taratura(telecamera Marlin).....	60
Figura 3.6.4 Differenza tra dati misurati e retta di taratura (telecamera Marlin)	61
Figura 3.6.5 Dati misurati tramite edge detection lungo una sola riga di pixel confrontati con la retta di taratura(telecamera Marlin)	61
Figura 3.6.6 Differenza tra dati misurati e retta di taratura lungo una sola riga di pixel(telecamera Marlin).....	62
Figura 3.6.7 Dati misurati tramite edge detection confrontati con la retta di taratura (telecamera Prosilica).....	63
Figura 3.6.8 Differenza tra dati misurati e retta di taratura lungo (telecamera Prosilica)	63
Figura 3.6.9 Dati misurati tramite edge detection lungo una sola riga di pixel confrontati con la retta di taratura(telecamera Prosilica)	64
Figura 3.6.10 Differenza tra dati misurati e retta di taratura lungo una sola riga di pixel(telecamera Prosilica).....	65
Figura 4.2.1 vista laterale della struttura	70
Figura 4.2.2 immagine della copertura ripresa dalla piazza.....	70
Figura 4.2.3 Immagine della struttura ripresa dall'alto	70
Figura 4.2.4 Travatura reticolare di sostegno per la copertura	71
Figura 4.3.1 Disegni della struttura in analisi	72
Figura 4.3.2 Posizionamento delle telecamere.....	73
Figura 4.3.3 Provino messo in trazione.....	73
Figura 4.3.4 Immagine ottenuta dalla telecamera Sony convertita in bianco e nero.....	74
Figura 4.3.5 Immagine ottenuta con la telecamera Marlin	75
Figura 4.4.1 Pattern utilizzato per l'analisi dei filmati Marlin.....	75
Figura 4.4.2 Profilo di luminosità lungo il bordo della flangia.....	76
Figura 4.4.3 spostamento misurato in pixel video 1	76
Figura 4.4.4 spostamento misurato in mm	77
Figura 4.4.5 Modulo del segnale nel dominio delle frequenze	78
Figura 4.4.6 segnale filtrato passa-alto	78
Figura 4.4.7 Segnale filtrato nel dominio delle frequenze	79
Figura 4.4.8 Spettro del segnale in accelerazione	80

Figura 4.4.9 Accelerazioni misurate dall'accelerometro	80
Figura 4.4.10 Modulo dello spettro dei dati accelerometrici	81
Figura 4.4.11 confronto dati in accelerazione tra video e accelerometro	81
Figura 4.4.12 confronto tra accelerometro e video in spostamento	82
Figura 4.4.13 Dati video e accelerometro nel dominio del tempo	83
Figura 4.4.14 Pattern utilizzato per l'analisi dei dati ottenuti dalla telecamera Sony.....	83
Figura 4.4.15 confronto dati ricavati dai video	84
Figura 4.4.16 confronto segnale filtrato dei video	84
Figura 4.4.17 confronto spettri video e accelerometro	85
Figura 4.4.18 Confronto spettri in spostamento.....	85
Figura 4.5.1 Localizzazione dell'edge della flangia	86
Figura 4.5.2 Profilo di luminosità dell'edge analizzato.....	87
Figura 4.5.3 Dati ottenuti tramite l'edge detection	87
Figura 4.5.4 Taratura edge detection.....	88
Figura 4.5.5 Modulo dello spettro del segnale ottenuto tramite l'applicazione dell'edge detection ai dati ottenuti tramite la telecamera Marlin.....	88
Figura 4.5.6 Modulo dello spettro in accelerazione	89
Figura 4.5.7 Confronto spettro dati video e accelerometro in spostamento.....	89
Figura 4.5.8 Confronto in accelerazione tra i dati video e quelli accelerometrici	90
Figura 4.5.9 Edge detection telecamera Sony	90
Figura 4.5.10 Individuazione degli edge per la taratura.....	91
Figura 4.5.11 Dati ottenuti dai video confrontati	91
Figura 4.5.12 Modulo dello spettro rappresentato in accelerazione	92
Figura 4.5.13 Modulo dello spettro rappresentato in spostamento	92
Figura 4.6.1 Fori utilizzati come blob per l'analisi	93
Figura 4.6.2 Blob telecamera Sony	93
Figura 4.6.3 Determinazione dei blob.....	94
Figura 4.6.4 Dati ottenuti dall'analisi dei blob	94
Figura 4.6.5 spettro dei dati analizzati mediante blob analisi	95
Figura 4.6.6 segnale filtrato passa alto.....	95
Figura 4.6.7 spettro del segnale in accelerazione.....	96
Figura 4.6.8 Confronto spettro del segnale tra accelerometri e blob detection...	96
Figura 4.6.9 Confronto spettro del segnale tra accelerometri e blob detection in accelerazione	97

Figura 4.7.1 Differenza tra lo spettro ottenuto tramite il pattern matching applicato al video della telecamera Marlin e spettro ottenuto dall'accelerometro	98
Figura 4.7.2 Differenza tra spettro pattern matching applicata al video della telecamera Sony e spettro ottenuto dall'accelerometro	99
Figura 4.7.3 Differenza tra spettro in accelerazione del pattern matching applicata al video della telecamera Marlin e spettro ottenuto dall'accelerometro	99
Figura 4.7.4 Differenza tra spettro in accelerazione del pattern matching applicata al video della telecamera Sony e spettro ottenuto dall'accelerometro	100
Figura 4.7.5 Differenza tra spettro dell'edge detection applicata al video della telecamera Marlin e spettro ottenuto dall'accelerometro	101
Figura 4.7.6 Differenza tra spettro edge detection applicata al video della telecamera Sony e spettro ottenuto dall'accelerometro	101
Figura 4.7.7 Differenza tra spettro in accelerazione del edge detection applicata al video della telecamera Marlin e spettro ottenuto dall'accelerometro	102
Figura 4.7.8 Differenza tra spettro in accelerazione del pattern matching applicata al video della telecamera Sony e spettro ottenuto dall'accelerometro	102
Figura 4.7.9 Differenza tra spettro Blob detection applicata al video della telecamera Marlin e spettro ottenuto dall'accelerometro	103
Figura 4.7.10 Differenza tra spettro in accelerazione del blob detection applicata al video della telecamera Marlin e spettro ottenuto dall'accelerometro	103
Figura 5.2.1 Schema della struttura su cui sono state eseguite le prove	110
Figura 5.2.2 Pistone oleodinamico utilizzato per applicare il carico in C	110
Figura 5.2.3 Pistone oleodinamico utilizzato per applicare il carico in B	111
Figura 5.2.4 Area inquadrata dalla telecamera.....	111
Figura 5.3.1 Pattern utilizzato per analizzare i filmati	112
Figura 5.3.2 Spostamento misurato durante la prova in analisi	113
Figura 5.3.3 Determinazione del diametro della trave in pixel.....	113
Figura 5.3.4 Spostamento misurato dalla telecamera in mm.	114
Figura 5.3.5 Spettro del segnale in spostamento.....	115
Figura 5.3.6 Modulo dello spettro del segnale in accelerazione	116
Figura 5.3.7 segnale misurato mediante l'accelerometro	116
Figura 5.3.8 Modulo del segnale accelerometrico osservato nel dominio delle frequenze	117

Figura 5.3.9 Rappresentazione del segnale in accelerazione	118
Figura 5.3.10 Dati in spostamento rappresentati nel dominio delle frequenze	118
Figura 5.3.11 Confronto nel dominio delle frequenze del segnale in spostamento	119
Figura 5.4.1 Immagine ripresa dalla telecamera durante la misura	120
Figura 5.4.2 Spostamento in pixel.....	121
Figura 5.4.3 Spostamento misurato in mm	121
Figura 5.4.4 Modulo dello spettro dei segnali in analisi.....	122
Figura 5.4.5 Modulo dello spettro dei segnali in analisi rappresentato in accelerazione	122
Figura 5.5.1 copertura inquadrata dalla piazza sottostante	124
Figura 5.5.2 Carico applicato alla struttura.....	125
Figura 5.5.3 Spostamento misurato durante la rottura del provino.....	126
Figura 5.5.4 mm di spostamento in funzione del carico applicato.....	126
Figura 5.5.5 Forza ottenuta analizzando lo spostamento	127
Figura 5.5.6 confronto tra la forza ottenuta tramite la cella di carico e quella ottenuta analizzando lo spostamento.....	128
Figura 6.2.1 vista laterale del palazzo	131
Figura 6.2.2 vista dall'alto della superficie eliportuale e del palazzo sottostante	132
Figura 6.3.1 Attuatore oleodinamico utilizzato per il forzamento	133
Figura 6.3.2 Schema di misura.....	134
Figura 6.5.1 Frame del video analizzato mediante pattern matching	135
Figura 6.5.2 Pattern utilizzato per tracciare la posizione apparente del palazzo	135
Figura 6.5.3 Modo di vibrare associato alla frequenza in analisi.....	136
Figura 6.5.4 Spostamento misurato lungo l'intera storia temporale.....	137
Figura 6.5.5 Ingrandimento di un breve tratto del segnale misurato	137
Figura 6.5.6 particolare dello spettrogramma del segnale	138
Figura 6.5.7 Spettri dei vari spezzoni di segnale	138
Figura 6.5.8 Pattern utilizzato per tracciare un secondo punto all'interno dell'immagine	139
Figura 6.5.9 spettro di una porzione di segnale analizzato tracciando due punti differenti dell'immagine	140
Figura 6.5.10 Modello utilizzato per calcolare il centro di rotazione	141

Indice dell tabelle

Tabella 3.4.1 Dati ottenuti analizzando le immagini tramite pattern matching ..	46
Tabella 3.5.1 Dati elaborati analizzando le immagini ottenute tramite la telecamera Marlin.....	51
Tabella 3.5.2 Dati elaborati analizzando le immagini ottenute tramite la telecamera Prosilica	53
Tabella 3.6.1 Dati ottenuti dall'analisi delle misurazioni effettuate tramite edge detection	65
Tabella 4.3.1 Caratteristiche degli accelerometri utilizzati per l'analisi.....	71
Tabella 4.7.1 Dati di RMS per video telecamera Marlin	104
Tabella 4.7.2 Dati di RMS per video telecamera Sony	105
Tabella 5.4.1 MSE ricavati dalle sei prove	123

Sommario

In questo lavoro sono state caratterizzate tre differenti tecniche per la misura di vibrazioni utilizzando strumenti di visione applicati al monitoraggio di strutture civili. Le tecniche analizzate sono: pattern matching, edge detection, blob analisi. Gli algoritmi sono stati confrontati tramite analisi effettuate in laboratorio ed applicazioni reali. Le analisi in laboratorio riportate sono state ottenute tracciando un target di posizione nota per mezzo di due diverse telecamere. Le applicazioni sono state eseguite eccitando mediante un carico a gradino alcune strutture appartenenti al nuovo palazzo della regione Lombardia con sede a Milano; è stato misurato il moto libero di tali strutture mediante due telecamere ed è stato validato in seguito con i dati ottenuti dagli accelerometri. È stato proposto inoltre un test di fattibilità effettuato posizionando la telecamera a bordo del misurato. Durante la stesura del lavoro sono stati evidenziati i vantaggi e gli svantaggi associati ad ognuna delle tecniche proposte e al sistema di misura in generale. Sono state analizzate le caratteristiche della misura ottenuta tramite l'utilizzo di strumenti di visione.

Parole chiave: vibrazioni; tecniche di visione, incertezza, monitoraggio strutturale, qualificazione, applicazioni.

Abstract

In this work three video techniques are been characterized in measure of vibration in application that concern dynamic monitoring of civil structures. The techniques analyzed are: pattern matching, edge detection and blob analysis. The algorithms are compared in laboratory and real applications. The analyses in laboratory are obtained tracing a target with note position by two cameras. The real applications are performed exciting civil structures belonging at the new palace of region in Milan with step load. The measures obtained by the two cameras are compared with the data measured by accelerometers. Later is proposed a test of feasibility done by positioning the video camera on board of the measured object. During the writing of this study are analyzed the advantages and disadvantages associated with each of the proposed techniques. We have analyzed the characteristics of the measure obtained through the use of tools vision compared to that produced by accelerometers.

Key words: vibrations; vision, uncertainty, structural health monitoring, qualification, applications.

Introduzione

L'impegno profuso per la ricerca di tecniche da applicare al monitoraggio di strutture civili è in notevole crescita. Le ricerche effettuate sono dettate dall'esigenza di fornire ai proprietari delle strutture dei dati che confermino la messa in sicurezza della struttura. I principali fattori che influenzano la sicurezza sono: agenti esterni, errori progettuali, danni fisici strutturali, danni ambientali, deterioramento dovuto all'invecchiamento [1][2]. Il monitoraggio di strutture civili attualmente viene eseguito mediante una rete di trasduttori opportunamente posizionati, collegati tramite cavi ad uno o più computer centrali. I computer vengono utilizzati per controllare i parametri di acquisizione e immagazzinare i dati ottenuti dalle prove [3]. Le tecniche sviluppate possono essere suddivise in due famiglie: tecniche che si basano su sensori che necessitano il contatto fisico con l'oggetto da tracciare e tecniche dette a non contatto poiché possono effettuare la misura senza la necessità di interagire con il misurato [4]. Le principali tecniche a contatto si avvalgono di sensori che misurano: spostamenti (LVDT [5]), deformazioni (estensimetri e fibre ottiche [6]) o accelerazioni (accelerometri [7]). Le misure effettuate mediante le principali tecniche a non contatto sono eseguite utilizzando: laser doppler [5], sistemi di tracciamento GPS [8][9][10], e algoritmi di visione che sfruttano le immagini ottenute per mezzo di telecamere.

Le tecniche di visione sono state implementate per ottenere informazioni sulla forma di determinati oggetti. Il notevole sviluppo tecnologico avvenuto negli ultimi anni ha consentito l'utilizzo degli strumenti di visione per misurare posizioni e spostamenti dei target tracciati. Nel lavoro proposto verranno qualificate tre differenti tecniche di visione applicandole al monitoraggio strutturale e verranno analizzate le problematiche che questo concerne; in particolar modo verranno evidenziati gli effetti della distanza, della scala, della luce ambientale, del rumore e del tipo di posizionamento delle telecamere nella misura. Nei capitoli successivi verranno esposti gli algoritmi che caratterizzano le tre tecniche; successivamente verrà descritta un'analisi statica effettuata in laboratorio per valutare l'efficacia delle tre tecniche se non influenzate dalla velocità di spostamento del target. L'analisi statica verterà sul tracciamento di un target mediante le tre tecniche e utilizzando due telecamere differenti, questo

ci permetterà di confrontare le tecniche in statica al variare delle dimensioni del target e della qualità delle immagini acquisite. Una volta caratterizzate le tecniche in statica, verrà effettuata l'analisi dinamica di una struttura vibrante effettuata mediante i tre differenti algoritmi. La misura dinamica può essere effettuata tramite una serie di misure statiche se la velocità del fenomeno da misurare è notevolmente inferiore alla velocità di acquisizione delle immagini da parte delle telecamere. La prova proposta verrà eseguita mediante due telecamere che riprenderanno una struttura eccitata tramite un tipo di forzamento detto a gradino; alla struttura verrà applicato un carico che sarà rimosso in modo talmente rapido da poter considerare la rimozione istantanea. In questo caso è stato scelto di non applicare target alla struttura in modo da porci nella situazione peggiore dal punto di vista misuristico. Per applicare le tecniche in analisi verranno utilizzati dei target "naturali" presenti nella struttura eccitata. Una volta definite le caratteristiche dinamiche verrà scelta la tecnica, tra le tre analizzate, che presenta le caratteristiche più favorevoli per la misura di vibrazioni di strutture effettuata senza l'applicazione aggiuntiva di target. In seguito verrà proposta un'applicazione ottimizzando il set di misura per l'utilizzo della tecnica selezionata che ne definirà ulteriormente le caratteristiche. In fine verrà descritto un test di fattibilità per effettuare una prova posizionando la telecamera a bordo della struttura vibrante. In questa prova verranno selezionati gli accorgimenti utili per compiere l'acquisizione, analizzate le peculiarità della misura effettuata ed i possibili vantaggi e svantaggi che comporta compiere la misura in queste condizioni.

1. Stato dell'arte

1.1. Introduzione

In questo capitolo verranno analizzate alcune delle principali tecniche di visione che sono state proposte per la misura di vibrazioni ed il monitoraggio di strutture civili. Gli articoli presenti in letteratura applicano soventemente le tecniche in analisi per ottenere informazioni sulle vibrazioni di ponti. Gli studi effettuati sono principalmente applicati a ponti poiché avendo rigidezze inferiori ad altri edifici queste strutture architettoniche, si prestano particolarmente all'utilizzo degli strumenti di visione per la misura. Le minori rigidezze associate ai ponti determinano a parità di forzamento spostamenti superiori, e quindi meglio identificabili attraverso le tecniche di visione. Le analisi eseguite sui ponti possono comunque ritenersi valide anche per le misure effettuate su strutture con caratteristiche dinamiche simili. Le applicazioni analizzate verranno suddivise in due categorie principali: quelle che necessitano dell'applicazione di un target alla struttura per determinarne il movimento, e quelle che individuano la posizione dell'oggetto tracciato senza la necessità di introdurre ulteriori operazioni sul misurando.

1.2. Applicazioni che non necessitano di target

Le applicazioni che non necessitano dell'introduzione di un target specifico sulla struttura generalmente utilizzano l'edge detection per tracciare oggetti flessibili. Solitamente l'utilizzo di strumenti di visione per il monitoraggio di oggetti flessibili, come ad esempio cavi, è notevolmente vantaggioso poiché permette di ottenere una misura senza influenzare il moto del cavo. Un ulteriore vantaggio è la possibilità di tracciare la posizione di un numero considerevole di punti appartenenti al cavo e ciò consente di ricostruirne il moto completo. Un'applicazione della tecnica in analisi è stata descritta da Y.F.Ji e C.C.Chang [11], i quali propongono un algoritmo che utilizza l'edge detection per individuare la posizione dei cavi metallici appartenenti alla struttura di un ponte. Per effettuare la misura riportata vengono utilizzate due telecamere situate in

posizione spaziale nota, e tramite rette epipolari viene ricostruita la posizione del cavo nello spazio istante per istante. La ricostruzione dello spostamento tridimensionale nel tempo implica l'aggiunta di incertezza nella misura, per questo motivo sovente vengono utilizzate tecniche che misurano il movimento del cavo tramite edge detection nella sola direzione verticale [12]. La misura bidimensionale del movimento, se applicata con le opportune considerazioni, ottimizza l'individuazione della posizione del cavo [13]. Un'applicazione analoga è stata presentata da J. Morlier, P. Salom, F. Bos [14], i quali propongono l'edge detection per monitorare gli spostamenti di un intero ponte. Il lavoro riportato individua correttamente la posizione del ponte istante per istante, va comunque considerato che si tratta di un ponte pedonale a bassa rigidità, il che comporta spostamenti elevati.



Figura 1.2.1 Ponte tracciato (Immagine tratta dal lavoro di J. Morlier, P. Salom e F. Bos)

Il fatto che la misura individua spostamenti considerevoli permette di montare ottiche basse sulla telecamera. L'utilizzo di ottiche grandangolari comporta una perdita nella risoluzione dell'immagine e quindi nella qualità nella misura, ma mette in condizione l'operatore di poter riprendere l'intero ponte.

1.3. Applicazioni che necessitano di target

Valutiamo ora alcune applicazioni di tecniche che necessitano il posizionamento di un target specifico sulla struttura. Lo studio effettuato da A. Mazen Wahbeh, John P. Caffrey e Sami F. Masri [15] valuta la misura dello spostamento

verticale di un punto appartenente al ponte tracciando due led opportunamente posizionati (Figura 1.3.1).

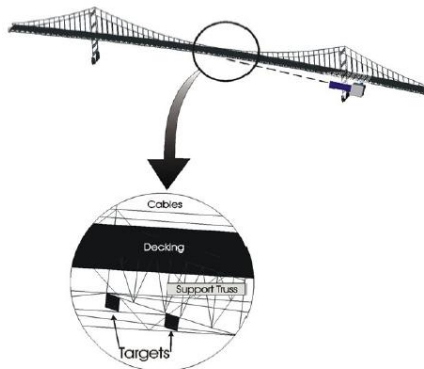


Figura 1.3.1 Posizionamento della videocamera e del target (Immagine tratta dallo studio di A. Mazen Wahbeh, John P. Caffrey e Sami F. Masri)

I LED emettono luce e vengono percepiti dalla telecamera che li inquadra come due zone di colore sostanzialmente differente dal resto degli oggetti in sfondo. Utilizzando la blob detection si traccia la posizione dei led e poiché questi sono rigidamente collegati alla struttura, si individua la posizione del ponte. Il vantaggio principale associato alla tecnica proposta è la possibilità di effettuare prove durante le ore notturne. In alternativa all'utilizzo dei led si può utilizzare un foglio di carta rappresentante un cerchio di colore nero su sfondo bianco [16]. Utilizzando questo espediente è possibile identificare la posizione del centro del cerchio mediante blob detection.



Figura 1.3.2 Foglio riportante il blob tracciato applicato alla struttura (Immagine tratta dal lavoro di Sang-Chan Kim, Hak Kyeong Kim, Chae-Gue Lee e Sang-Bong Kim)

Il foglio deve essere vincolato alla struttura da tracciare in modo da poter considerare la posizione della figura circolare coincidente con il punto di cui si necessita conoscere la posizione. Per ottenere più informazioni dalla misura effettuata tramite videocamera è stato studiato il target rappresentato in Figura 1.3.3.



Figura 1.3.3 Target utilizzato per tracciare la posizione della struttura (Immagine tratta dallo studio effettuato da Yoshio Fukuda, Maria Q. Fengy e Masanobu Shinozuka)

Utilizzando la blob detection vengono individuate le ubicazioni dei quattro blob di colore bianco nell'immagine; queste informazioni, se associate alle geometria del target, possono essere utilizzate per ricavare la posizione relativa della telecamera rispetto al pattern in termini di distanza e angolazione [17][18][19]. Un'altra tipologia di pattern applicata ad una struttura vibrante è quella proposta da C.C.Chang, M.ASCE, e X.H.Xiao [20] e rappresentata in Figura 1.3.4.



Figura 1.3.4 Target applicato alla struttura in analisi (Immagine tratta dal lavoro di C.C.Chang, M.ASCE, e X.H.Xiao).

Il target utilizzato per la misura permette di individuare tramite l'algoritmo di Harris e Stephens [21] una griglia di punti, ognuno dei quali è identificabile con un angolo di uno dei quadrati di colore bianco presenti nel pattern [22]. Note le dimensioni dei quadrati è possibile ricavare la posizione del target rispetto alla telecamera.

1.4.Considerazioni finali

L'utilizzo degli strumenti di visione per il monitoraggio strutturale è una pratica relativamente recente e quindi ancora in piena fase di sviluppo. Confrontando le analisi presenti in letteratura si può affermare che in genere le applicazioni che necessitano di target aggiuntivi da applicare alla struttura utilizzano frequentemente la blob detection per l'elaborazione delle immagini. Questo è principalmente dovuto alla semplicità di utilizzo che contraddistingue la tecnica citata. L'edge detection viene utilizzata in applicazioni particolari che necessitano di tracciare la posizione di numerosi punti della struttura per ricostruirne il movimento. Il pattern matching non è una tecnica che in genere viene applicata al tracciamento della posizione di strutture atte ad uso civile. Vi sono altre tecniche che possono essere utilizzate esclusivamente previo posizionamento del target sulla struttura poiché necessitano di pattern estremamente regolari e di dimensioni note da poter tracciare (es. corner detection). In bibliografia non sono state trovate applicazioni incentrate sull'analisi dell'incertezza associata al monitoraggio di strutture civili tramite le varie tecniche di visione. Le applicazioni individuate e riportate in questo capitolo si pongono sovente di proporre una tecnica e valutarne le caratteristiche talvolta confrontandola con l'approccio classico al problema. Nel lavoro proposto verrà effettuato uno studio delle problematiche connesse alla misura di vibrazioni tramite tecniche di visione in applicazioni strutturali. L'analisi evidenzierà le caratteristiche degli algoritmi di visione analizzate in modo da fornire dei criteri di scelta per effettuare la misura. Nei capitoli

successivi verranno inoltre descritti i vantaggi e gli svantaggi legati all'utilizzo di tecniche di visione utilizzate per il monitoraggio dinamico di strutture civili.

2. Introduzione alle tecniche utilizzate

2.1. Pattern matching

Il pattern matching è una tecnica che permette di identificare ed individuare la posizione di una porzione di immagine (pattern) all'interno dell'immagine stessa. Questa tecnica è molto diffusa nell'ambito della computer vision poiché permette di individuare posizione, rotazione e fattore di scala di un oggetto o una parte di esso, all'interno dell'immagine in cui questo è raffigurato. Il fattore di scala e la rotazione individuano rispettivamente eventuali variazioni della distanza tra la telecamera e target e possibili rotazioni relative tra telecamera e misurando. Nelle analisi effettuate si è ipotizzato di misurare un moto bidimensionale puramente traslatorio del target, situato in un piano perpendicolare all'asse ottico della telecamera. Le ipotesi introdotte permettono di tracciare la posizione del target individuando la sola posizione del pattern all'interno dell'immagine. La posizione del pattern può essere determinata mediante diversi algoritmi quelli più diffusi sono SSD, SAD, NCC. Tutti e tre gli algoritmi sono caratterizzati da una prima fase comune che consiste nel far scorrere il pattern sull'immagine da analizzare al fine di stimare in ogni posizione la similarità fra pattern e porzione dell'immagine in analisi [23].

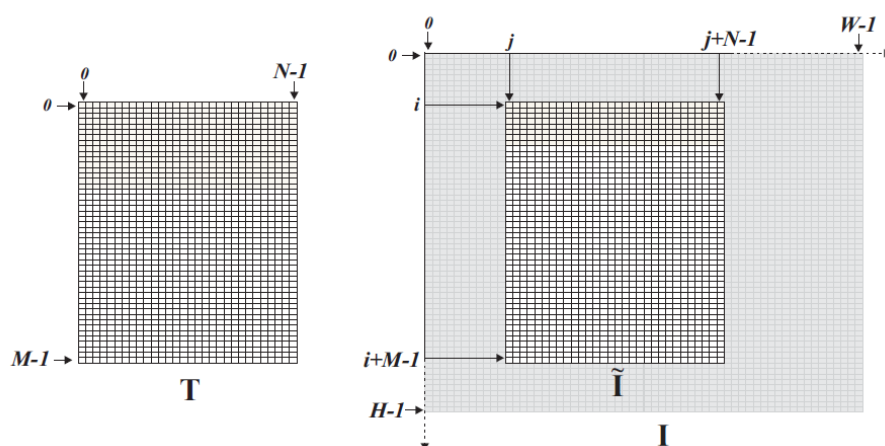


Figura 2.1.1 Rappresentazione dal pattern e dell'immagine in analisi

Gli algoritmi si differenziano nella scelta della funzione da utilizzare per la stima della similarità [24].

2.1.1. Sum of Squared Differences

$$SSD(i, j) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} (I(i + m, j + n) - T(m, n))^2$$

Equazione 2.1.1.1

Interpretando $\tilde{I}(i, j)$ (la sottoimmagine associata alla posizione (i, j) ed avente le stesse dimensioni di T) e T come vettori di uno spazio a $M \cdot N$ dimensioni, SSD rappresenta il quadrato della norma $L2$ (norma euclidea) della differenza dei due vettori.

2.1.2. Sum of Absolute Differences

$$SAD(i, j) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} |I(i + m, j + n) - T(m, n)|$$

Equazione 2.1.2.1

Interpretando $\tilde{I}(i, j)$ e T come vettori, SAD rappresenta la norma $L1$ della differenza dei due vettori. Se il pattern rispecchia fedelmente una porzione di immagine vi sarà una posizione (i, j) in cui sia SAD che SSD sono nulli. Se invece il pattern non viene estratto dall'immagine in analisi non vi sarà possibilità di annullare i due parametri poiché nessuna zona dell'immagine sarà esattamente identica al pattern per via del rumore di acquisizione; in tal caso si sceglie come posizione di somiglianza tra pattern e immagine quella che presenta un valore SAD o SSD più basso .

2.1.3. Normalised Cross-Correlation

$$NCC(i, j) = \frac{\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} (I(i+m, j+n) * T(m, n))}{\sqrt{\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} (I(i+m, j+n))^2} * \sqrt{\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} (T(m, n))^2}}$$

Equazione 2.1.3.1

Interpretando $\tilde{I}(i, j)$ e T come vettori, NCC rappresenta il coseno dell'angolo fra $\tilde{I}(i, j)$ e T

$$NCC(i, j) = \frac{\tilde{I}(i, j) * T}{|\tilde{I}(i, j)| * |T|} = \cos \theta$$

Equazione 2.1.3.2

ed è quindi dipendente dalla sola direzione dei due vettori, assumendo il valore massimo (pari a 1) quando i due vettori sono paralleli ($\tilde{I}(i, j) = \alpha * T$).

Rispetto a SSD e SAD, NCC costituisce una misura di similarità più robusta rispetto a possibili variazioni fotometriche dell'immagine. infatti, a differenza di SSD e SAD, NCC risulta insensibile a variazioni proporzionali dell'intensità luminosa dell'immagine [25][26].

2.1.4. Ottimizzazioni della tecnica

Un problema derivato dall'utilizzo di questi algoritmi per il posizionamento del pattern all'interno dell'immagine è l'onerosità computazionale che questi comportano. La complessità computazionale di un algoritmo di pattern matching è pari al prodotto delle dimensioni di immagine e pattern:

$$Noperazioni = (H * W) * (M * N)$$

Equazione 2.1.4.1

Di conseguenza, quando queste sono significative (ad esempio immagine 1920*1088 pixel e pattern 256*256 pixel) il costo computazionale diviene enorme. E' quindi necessario individuare dei metodi che consentano di velocizzare l'esecuzione e renderla compatibile con i vincoli sui tempi di elaborazione imposti dall'applicazione [27]. Fra i metodi proposti ricordiamo:

– Ricerca *Multi-resolution*

Si cerca prima in una immagine a risoluzione ridotta e poi si raffina la ricerca alla risoluzione piena (é possibile anche lavorare con più di due livelli di risoluzione)

– Ricerca basata su *Sub-template*

Si fa una prima ricerca con un sub-template e poi si fa la ricerca con l'intero pattern solo nei punti che presentano un buon match con il sub-template.

– SAD-SSD con opzione di *Call-out*

E' possibile interrompere il calcolo della SAD (o della SSD) quando il suo valore è maggiore del minimo corrente.

– Uso di *bounds* calcolabili in modo efficiente

Ad esempio per la *SAD* è possibile sfruttare la relazione:

$$SAD(i, j) \geq \left| \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} I(i + m, j + n) - \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} T(m, n) \right|$$

Equazione 2.1.4.2

La scelta del pattern da utilizzare è fondamentale per ottimizzare la ricerca ed ottenere dei buoni risultati di posizionamento. Ecco alcune osservazioni generali

che ci permetteranno di effettuare buone scelte al momento dell'utilizzo della tecnica [28]:

Il pattern deve essere asimmetrico in modo da poter essere inequivocabilmente identificato. Il pattern a forma circolare mostrato in Figura 2.1.1 (a sinistra) può essere ruotato attorno al centro del cerchio senza ottenere differenze lungo la ricerca del pattern quindi l'algoritmo potrebbe trovare la corretta posizione del pattern ma con un angolo sbagliato. È buona norma quindi utilizzare pattern che non abbiano particolari simmetrie.



Figura 2.1.1 Possibili pattern da utilizzare

Pattern con forme complesse comportano tempi computazionali più elevati rispetto a pattern con geometrie più semplici. Se il pattern scelto presenta geometrie troppo semplici però c'è la possibilità di avere dei match spuri, bisogna perciò essere sicuri di aver inserito sufficienti dettagli nel pattern in modo da avere un'identificazione univoca.



Figura 2.1.2 Possibili pattern da utilizzare

Il pattern deve contenere sufficienti dettagli per poter essere identificato in entrambe le direzioni di pertinenza. In Figura 2.1.3 (a sinistra) infatti non vi sono punti di riferimento per posizionare il pattern nella direzione verticale, il problema viene risolto nella figura successiva che presenta oltre ad edge verticali anche alcuni edge orizzontale che permettono di collocare il pattern nell'esatta posizione.



Figura 2.1.3 Possibili pattern da utilizzare

Se si vuole cercare un pattern di dimensioni semplici si deve cercare di ritrarre anche un po' di sfondo in modo da aumentare le informazioni a disposizione dell'algoritmo ed ottenere una soluzione univoca.



Figura 2.1.4 Possibili pattern da utilizzare

2.2.Blob detection

Una tecnica molto utilizzata nel campo della computer vision è la blob detection, tale tecnica permette di individuare la posizione del baricentro di un blob all'interno dell'immagine. Il blob è una zona cromaticamente differente dalle parti adiacenti dell'immagine come mostrato in Figura 2.2.1.



Figura 2.2.1 Estrazione di un blob da un'immagine

Dalla figura si può notare che la pallina utilizzata dal gatto è di colore differente rispetto all'ambiente circostante questa può essere facilmente estratta dal contesto ricavando un blob [29]. Questa tecnica è molto diffusa in applicazioni che richiedono l'object tracking, poiché per ottenere buoni risultati è sufficiente applicare all'oggetto, di cui si necessitano le coordinate, un marker di colore differente dal contesto in cui si effettua la misura. Un ulteriore vantaggio da attribuire alla blob detection è la modesta onerosità computazionale che essa comporta nell'eseguire la misura.

Analizziamo ora le varie fasi che portano all'individuazione della posizione del blob. Per prima cosa bisogna compiere un'operazione di sogliaatura nell'immagine come mostrato in Figura 2.2.1. Questa operazione consiste nell'assegnare il valore di intensità nullo a pixel che originariamente hanno un

valore al di fuori di una soglia prestabilita. In tal modo i pixel esterni al blob assumeranno un valore di 0 mentre i pixel interni al blob manterranno il valore originale. L'individuazione del fattore di soglia è molto importante poiché permette di isolare il blob da possibili rumori di fondo che comprometterebbero l'identificazione dell'esatta posizione del blob [30][31]. È importante valutare attentamente i parametri di soglia poiché se impostati troppo elevati eliminerebbero parte del blob, mentre se fossero troppo bassi includerebbero nella misura del rumore di fondo compromettendola.

Una volta applicata la soglia otterremo un'immagine simile a quella mostrata in Figura 2.2.1. Come si può notare dall'immagine lo sfondo non è stato eliminato totalmente, alcuni elementi ininfluenti dal punto di vista della misura possono persistere all'interno dell'immagine perché sono caratterizzati da valori cromatici simili a quelli del blob da analizzare. Per ovviare a tale problema esistono innumerevoli metodi, i più diffusi prevedono di valutare la geometria del blob in modo da poterlo confrontare con blob spuri derivati dalla sogliaatura. Il metodo più semplice consiste nel valutare le dimensioni del blob da analizzare, ed eliminare blob che stanno al di fuori di un range impostato attorno a tali dimensioni, in questo modo verranno mantenuti nell'immagine da analizzare solo blob di dimensione simile a quello da analizzare. Un secondo test da poter utilizzare è quello che prende in considerazione la forma del blob, nel caso in esame è un test di circolarità, che esclude blob spuri che non rispettano determinati parametri geometrici.



Figura 2.2.2 Selezione del blob in funzione di parametri geometrici

Nella Figura 2.2.2 viene rappresentata l'immagine ottenuta una volta applicati i filtri descritti in precedenza. Una volta isolato il blob bisogna eseguire la misura per determinarne la posizione. Per effettuare tale misura esistono diversi algoritmi con distinte caratteristiche [32]:

2.2.1. Media del perimetro

Un semplice metodo utilizzato per ricavare le coordinate di un blob, è la media aritmetica delle posizioni dei pixel situati sul perimetro del blob, scelti preventivamente tramite un'operazione di sogliatura.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n x_i$$

Equazione 2.2.1.1

Dove x_i sono le coordinate dell' i -esimo pixel in analisi, n è il numero di pixel da analizzare e \bar{x} è la coordinata lungo x del blob. Questa operazione va ripetuta 2 volte per ottenere entrambe le coordinate per posizionare il blob nel piano.

2.2.2. Baricentro in binario

Questa tecnica prevede una sogliatura in binario, ovvero ai pixel all'interno del blob viene dato il valore 1 mentre ai pixel esterni viene assegnato il valore 0.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n i * I_{i,j}}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n I_{i,j}}$$

Equazione 2.2.2.1

Dove $I_{i,j}$ vale 1 per i pixel interni al blob e 0 per quelli esterni, ed i è la posizione lungo x del dato pixel. Anche in questo caso l'operazione va ripetuta per avere la direzione lungo y

2.2.3. Baricentro in scala di grigi

Questo caso è simile al precedente con la peculiarità di utilizzare come $I_{i,j}$ il valore di intensità del pixel anziché il valore binario.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n i * I_{i,j}}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n I_{i,j}}$$

Equazione 2.2.3.1

In questo modo si fa una media pesata della posizione del pixel con l'intensità cromatica che lo caratterizza. Come nei casi precedenti l'operazione è da ripetere per l'asse verticale.

2.2.4. Baricentro in scala di grigi quadratico

Questo caso rispecchia il caso precedente con eccezione per il valore di intensità cromatica che ora viene elevato al quadrato attribuendone maggior rilievo rispetto alla posizione fisica.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n i * I_{i,j}^2}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n I_{i,j}^2}$$

Equazione 2.2.4.1

2.2.5. Interpolazione tramite ellisse

Questa tecnica prevede di effettuare un'interpolazione ai minimi quadrati del perimetro del blob per approssimarlo con un'ellisse. I cinque parametri ottenuti dall'interpolazione sono: il centro, il semiasse maggiore, il semiasse minore, e la loro rotazione nel piano x-y. Quest'ultimo parametro è difficile da ottenere quando l'ellisse approssima un cerchio.

2.2.6. Interpolazione con una distribuzione gaussiana

Questo sistema simile al precedente approssima l'intensità cromatica del blob come una distribuzione gaussiana in 2 dimensioni.

$$I(x, y) = \frac{K}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{(1-\rho)^2}} e^{\frac{-1}{2(1-\rho)^2}[(\frac{x}{\sigma_x})^2 - 2\rho(\frac{x}{\sigma_x})(\frac{y}{\sigma_y}) + (\frac{y}{\sigma_y})^2]}$$

Equazione 2.2.6.1

I sei parametri da stimare sono: $x, y, \sigma_x, \sigma_y, \rho, K$; dove K è il fattore di scala, x e y le deviazioni dalla media, σ_x e σ_y le rispettive deviazioni standard e ρ è il coefficiente di correlazione.

2.3.Edge detection

Una tecnica molto utilizzata per determinare la posizione di un oggetto tramite sistemi di visione è l'edge detection. L'obbiettivo di questa pratica è individuare l'esatta posizione di un edge ovvero una brusca variazione di intensità luminosa nell'immagine dovuta ad una rapida transizione cromatica. I metodi che si basano su questa tecnica vanno quindi a ricercare dei bordi che separano zone molto chiare da zone molto scure all'interno dell'immagine. In genere gli edge sono derivati da un bordo fisico dell'oggetto o da un bordo cromatico che separa due zone di colore differente.



Figura 2.3.1 Edge cromatico(a destra) ed edge fisico(a sinistra)

Acquisendo un'immagine tramite sensori CCD o CMOS si discretizza la realtà rappresentandola in un numero di punti definito dalla capacità del sensore. I punti che compongono l'immagine vengono chiamati pixel e ad ognuno di essi viene associato un valore di luminosità. Per trovare la posizione dell'edge all'interno dell'immagine bisogna andare a ricercare quei pixel dove avviene la transizione, ovvero dove la luminosità associata varia da un basso ad un alto valore o viceversa. Un'analisi di questo tipo consente l'individuazione del bordo con precisione un pixel, si può stabilire infatti che l'edge sta tra il pixel "bianco" e quello "nero" ma non si riesce a definire l'esatta posizione all'interno di questo range.

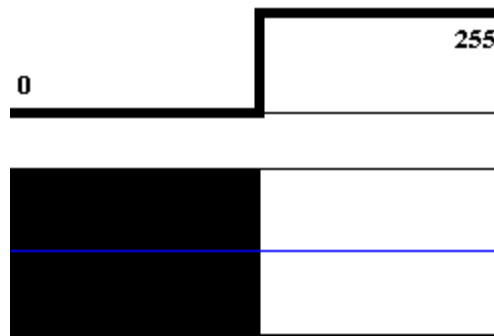


Figura 2.3.2 Profilo di luminosità ideale calcolato lungo la linea blu

Per migliorare la precisione di questa misura senza dover acquistare sensori capaci di acquisire un numero maggiore di pixel si è scelto di andare ad indagare la posizione dell'edge al di sotto della dimensione del pixel tramite algoritmi di sub-pixel analysis. Questi algoritmi si basano sul fatto che l'edge in realtà non viene acquisito come gradino ideale (Figura 2.3.2, Figura 2.3.3.a) ma il profilo di luminosità segue una data curva (Figura 2.3.3.b) dovuta al sistema di acquisizione. Fisicamente ciò significa che la transizione non avviene passando direttamente tra pixel "bianco" e "nero" ma ci sono una serie di pixel a valore intermedio tra l'uno e l'altro (Figura 2.3.3.c). Gli algoritmi di subpixel analysis sfruttano questo fenomeno per individuare l'esatta posizione del bordo all'interno dell'immagini [33].

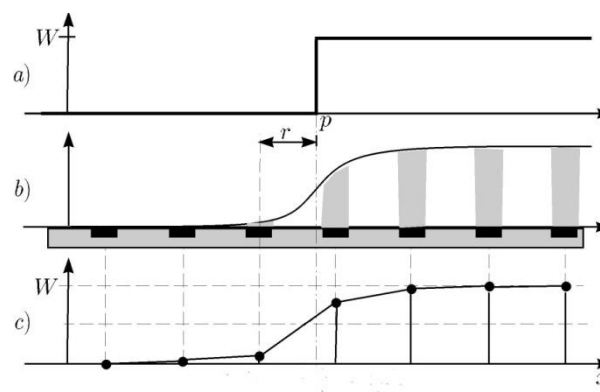


Figura 2.3.3 Profilo di luminosità realmente acquisito dal sensore

Le tecniche più utilizzate per l'individuazione dell'edge tra un pixel e l'altro possono essere raggruppate in tre classi: reconstruction techniques, interpolation techniques and Moment-based techniques [34][35].

L'idea che sta alla base delle tecniche di ricostruzione è di ricomporre il gradiente del profilo di luminosità dell'edge partendo dal segnale discreto acquisito in precedenza. Le funzioni più utilizzate a tale fine sono la gaussiana, sinc e splines rappresentate rispettivamente nelle sezioni a, b e c della Figura 2.3.4. Utilizzando la funzione sinc si ottiene una ricostruzione ottimale del gradiente, sfortunatamente questa funzione non può essere sempre utilizzata per i grossi oneri computazionali che essa comporta. Un'altra funzione molto utilizzata per l'approssimazione del gradiente è la gaussiana, anche in questo caso vi sono però problemi riguardanti il tempo di elaborazione dei dati poiché non è possibile risolvere il problema in forma chiusa.

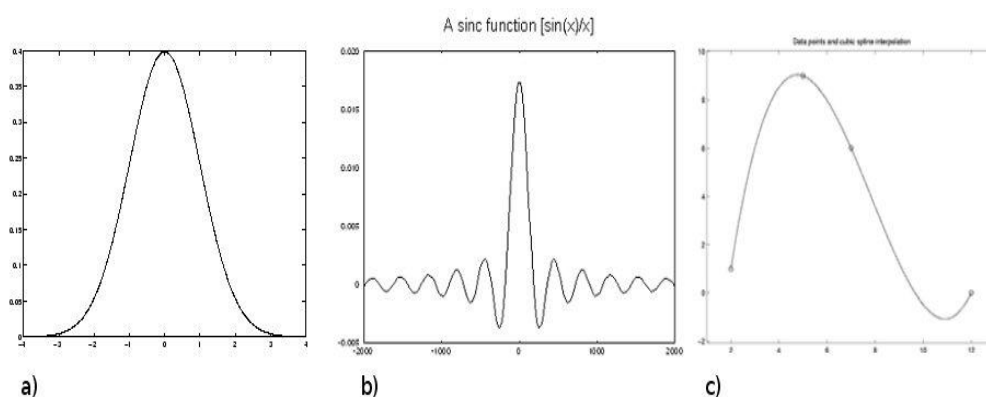


Figura 2.3.4 Funzioni utilizzate per approssimare il gradiente del profilo di luminosità acquisito

Per ricostruire il profilo di luminosità bisogna infatti fare la convoluzione della gaussiana con la funzione gradino che rappresenta l'edge ideale, questa nuova funzione viene chiamata in letteratura “erf”. Come è noto la gaussiana non è integrabile in forma chiusa, si deve quindi risolvere il problema con metodi numerici stimandone il risultato. Un'altra soluzione recentemente adottata è sostituire la funzione “erf”, che come detto è difficile da stimare, con la tangente iperbolica [36]. L'utilizzo della tangente iperbolica permette di ottenere un

problema risolvibile analiticamente con un errore stimato tra le due funzioni sempre inferiore all'1%, il che è compatibile con l'incertezza associata alla misura di luminosità nella maggior parte delle applicazioni. Un'ulteriore tecnica che si utilizza per ricavare il gradiente del profilo di luminosità è l'utilizzo di funzioni spline, ovvero semplici polinomi che interpolano i punti con condizioni sulla continuità delle derivate ai bordi. L'utilizzo di questo sistema è molto meno accurato dei precedenti però consente di stimare il gradiente in maniera robusta e con tempi di calcolo limitati.

Le tecniche di interpolazione si differenziano da quelle di ricostruzione poiché non tentano di ricostruire l'intero gradiente del profilo di luminosità ma si limitano ad approssimare la parte centrale di questo [37]. L'obiettivo è di fare in modo di ottenere una curva approssimante da cui ricavare il massimo e quindi la posizione del bordo. La ricostruzione avviene solo in una piccola regione dell'edge in genere 3-4 pixel è quindi poco stabile rispetto a pixel spuri, è inoltre necessario prestare molta cura nello scegliere la finestra all'interno della quale individuare i valori da interpolare per evitare di prendere valori di bordo che falserebbero la misura. Le curve interpolanti più utilizzate sono i polinomi in genere di secondo o terzo grado.

Le tecniche basate sui momenti prendono i dati derivanti dal gradiente del segnale per compiere misure statistiche come ad esempio: gray-level moments, spatial moments, centroid values, local energy values, expectation values, etc. Le tecniche che cercano il centroide sono molto semplici e rapide da implementare ma la loro accuratezza non è molto alta [38]. I metodi basati sull' expectation values calcolano i valori previsti del gradiente in tutta la regione da analizzare e cercano il valore reale che fa eccezione, quest'ultimo è il punto in cui si trova l'edge. I gray-level moments lavorano similmente al centroide prendendo in considerazione anche l'intensità luminosa in modo da realizzare delle medie pesate sulla posizione del pixel.

Un importante fenomeno che caratterizza la misura effettuata tramite edge detection è l'effetto subpixel. Analizzando le misure acquisite mediante edge detection si nota che queste sono affette da un disturbo periodico sinusoidale di periodo un pixel [39]. Il disturbo è dovuto alla morfologia dei sensori digitali utilizzati per acquisire immagini. Poiché l'effetto subpixel è legato intrinsecamente alla tecnologia utilizzata per ottenere le immagini, può essere

ridotto tramite tecniche opportunamente studiate ma non può essere completamente eliminato.

3. Confronto tra le tecniche in laboratorio

3.1.Introduzione

In questo paragrafo vengono riportati i risultati di alcune prove condotte al fine di verificare l'attendibilità delle tecniche in analisi. In particolare si cercherà di analizzare le variazioni dell'incertezza di misura al diminuire delle dimensioni del target e al variare del sensore utilizzato nell'acquisizione delle immagini.

3.2.Set di misura

Si sono scelti dei target di tipologia e dimensioni diverse stampati su un foglio di carta applicato alla testa di un micrometro che ne determina la traslazione orizzontale.



3.2.1 Micrometro utilizzato per imporre lo spostamento al target

Poiché le tecniche in analisi presentano caratteristiche differenti sono stati scelte diverse tipologie di target da tracciare. Per le immagini analizzate tramite blob detection e pattern matching la figura tracciata è di forma quadrata inclinata di 45° rispetto all'orizzontale, mentre per l'edge detection è stato scelto un riquadro costituito da una parte di colore bianco ed una di colore nero in modo da ottenere un edge cromatico come mostrato in Figura 3.2.2.

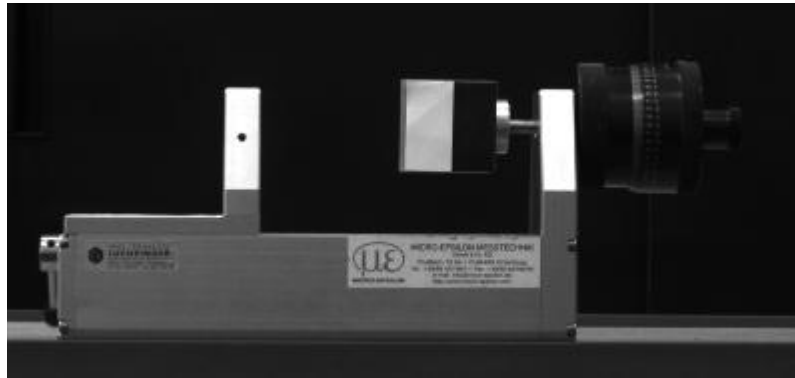


Figura 3.2.2 Micrometro utilizzato per imporre lo spostamento al target ottimizzato per l'analisi delle immagini effettuata mediante edge detection

Tramite il micrometro è possibile traslare il target con un'elevata accuratezza sulla posizione, poiché l'ordine di grandezza dell'incertezza del micrometro è molto più piccolo rispetto a quello delle telecamere in uso. Sul target sono stati stampati quattro blob di forma quadrata e di dimensioni note come mostra la Figura 3.2.3.

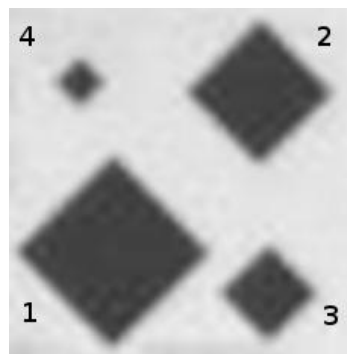


Figura 3.2.3 Target utilizzato per la misura

Per semplicità assegniamo un numero ad ogni blob, indicando con 1 il rombo di dimensioni maggiori e sequenzialmente gli altri sino a nominare il blob di dimensioni minori con il 4 (Figura 3.2.3). Il blob 4 ha lati di lunghezza 5mm, le dimensioni raddoppiano per i blob 3 e 2, mentre il blob 1 è 1,5 volte il blob 2.

Il target è stato ripreso attraverso 2 telecamere: una AVT Marlin F131b con montato un sensore CMOS cypres (Active pixels :1280X1024, pixel size: 6.7 μm x 6.7 μm), e una Prosilica GE680 con montato un sensore CCD Kodak (Active pixels : 640 (H) x 480 (V) ,pixel size: 7.4 μm (H) x 7.4 μm (V)). Sulla Marlin è stata montata una focale da 8 mm mentre sulla Prosilica, avendo un sensore più piccolo, è stata montata una focale da 12 mm per poter mantenere un rapporto tra le dimensioni del target ripreso in pixel e le dimensioni reali in mm il più possibile simile tra le due telecamere. Le telecamere sono state posizionate a distanza dal micrometro tale da avere un rapporto pixel/mm di circa uno in modo da poter analizzare le due tecniche in prossimità del limite di misura. Più l'ordine di grandezza degli spostamenti in gioco è inferiore alla dimensione del pixel più le misure ottenute presenteranno imprecisioni. Di seguito verranno riportati i risultati dell'analisi per spostamenti di circa 0.1 pixel in termini di confronto tra spostamento impresso e quello stimato. Per poter convertire gli spostamenti, stimati in pixel con le diverse tecniche, in millimetri è necessario conoscere la corrispondenza pixel/mm, a questo scopo prima dell'esecuzione delle prove viene posizionata una griglia di taratura (Figura 3.2.4) sulla testa micrometrica in corrispondenza del target utilizzato per le prove.

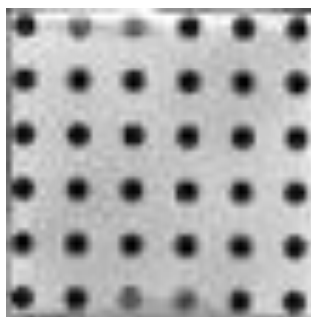


Figura 3.2.4 Griglia di taratura

La taratura prevede di acquisire un'immagine della griglia per ogni telecamera utilizzata. Si determina la posizione dei blob della griglia mediante una blob detection, in questo modo abbiamo i valori delle posizioni in pixel. Mediante la posizione si ricava la distanza tra un blob e quello adiacente, ipotizzando di avere n righe e m colonne di blob avremo $(m-1)*n$ distanze orizzontali ed $(n-1)*m$ distanze verticali in pixel. Al fine di minimizzare gli errori si mediano le

distanze ottenendo un valore medio tra un blob ed il successivo. Nota la spaziatura in mm tra due blob si può facilmente ricavare il rapporto pixel/mm di taratura. Dato il rapporto pixel/mm posso ricavare la legge di moto teorica quando è noto lo spostamento in mm imposto dalla testa micrometrica.

3.3.Svolgimento delle prove

La misura viene eseguita riprendendo l'immagine da entrambe le telecamere ogni 0.1 mm di traslazione del target. Per ridurre gli effetti di distorsione nei bordi dell'immagine dovuti alle lenti degli obiettivi si cerca di posizionare il target al centro dell'immagine di entrambe le telecamere. L'effetto di distorsione può comunque venire eliminato mediante una calibrazione appropriata.

La prova prevede di acquisire un'immagine per telecamera ogni 0.1 mm analizzando una traslazione totale di 10 mm acquisendo un totale di 100 immagini per ogni telecamera. Così facendo si riesce a ricostruire lo spostamento reale, imposto dal micrometro e lo spostamento misurato dalle telecamere mediante le tecniche di blob analisi e di pattern matching. La legge di moto nota sarà quindi una retta passante per l'origine che correla la traslazione in mm con lo spostamento in pixel misurato dalle immagini.

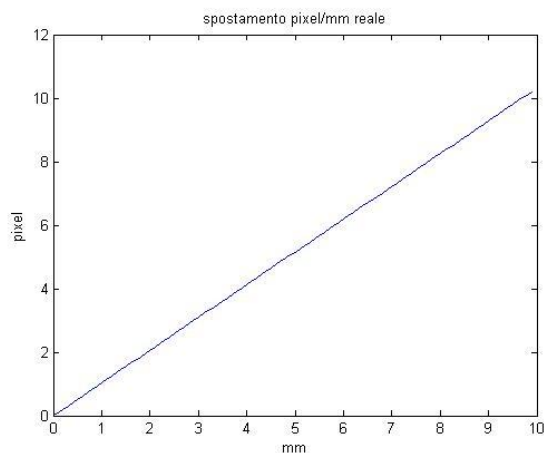


Figura 3.3.1 Spostamento imposto dal micrometro

Si valutano poi gli spostamenti misurati tramite blob detection, edge detection e pattern matching. Per descrivere l'analisi si prendono in esame le immagini ottenute tramite la videocamera Marlin, le medesime considerazioni possono essere fatte anche per le immagini ricavate dalla Prosilica.



Figura 3.3.2 Immagine ripresa dalla telecamera Marlin

Come si può notare dall'immagine (Figura 3.3.2) le due telecamere si trovano a distanze diverse dal target poiché avendo sensori di dimensioni diverse necessitano di posizioni diverse per ottenere un rapporto pixel/mm simile, questa problematica può essere ridotta od eliminata utilizzando lunghezze focali diverse per gli obiettivi montati sulle due telecamere. Nel caso in analisi montando sulla Prosilica un obiettivo con focale da 12 mm e sulla Marlin uno con focale da 8mm si riduce il problema ma non lo si elimina completamente.

3.4. Pattern matching

Come pattern da analizzare si sceglie l'intero target traslante, per un'analisi più approfondita verrà valutata in un secondo momento la qualità della misura utilizzando una porzione più piccola dell'immagine.

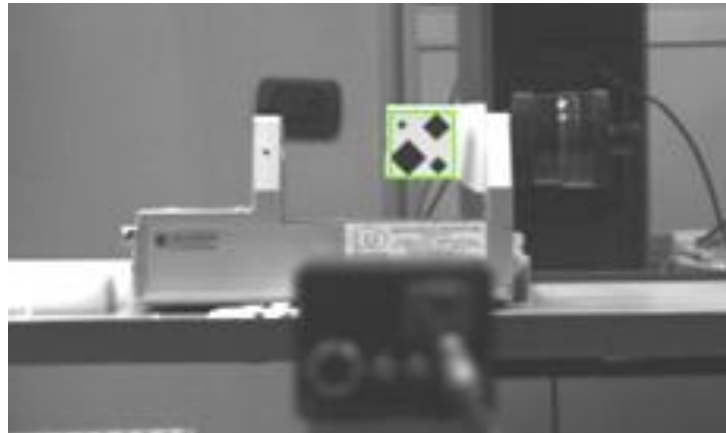


Figura 3.4.1 Riconoscimento del pattern da parte del software

Viene calcolata la posizione del baricentro del pattern in analisi in ogni immagine. Imponendo come punto di partenza la prima immagine si riesce a fare un'analisi differenziale del movimento del target punto per punto. Rappresentando su un grafico (Figura 3.4.2) i risultati ottenuti si può notare che gli spostamenti misurati tramite pattern matching rispecchiano quelli teorici calcolati da taratura.

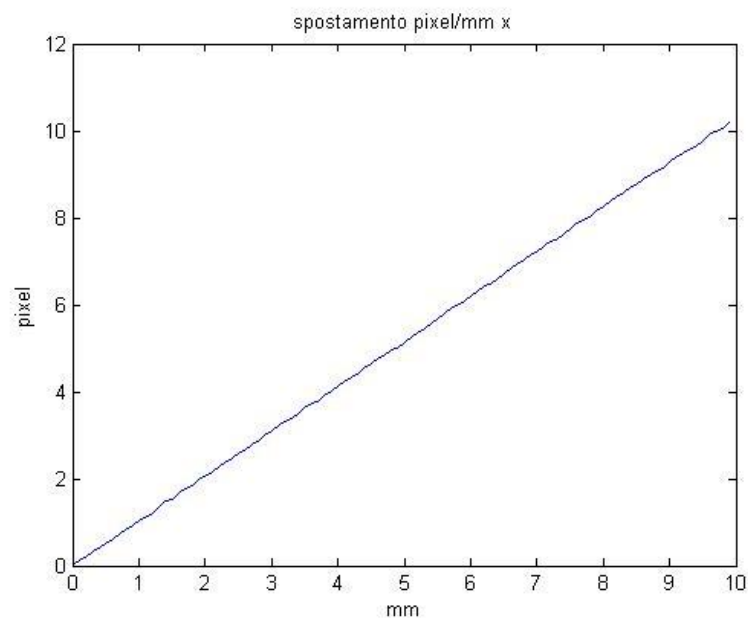


Figura 3.4.2 Spostamenti orizzontali misurati tramite pattern matching

Per valutare il posizionamento della telecamera vengono valutati gli spostamenti verticali misurati. Come si nota dal grafico (Figura 3.4.3) c'è un leggero trend dovuto probabilmente alla non perfetta ortogonalità tra la direzione di spostamento del target e l'asse ottico della telecamera, un'altra causa di tale trend potrebbe essere una leggera rotazione della telecamera attorno al suo asse ottico.

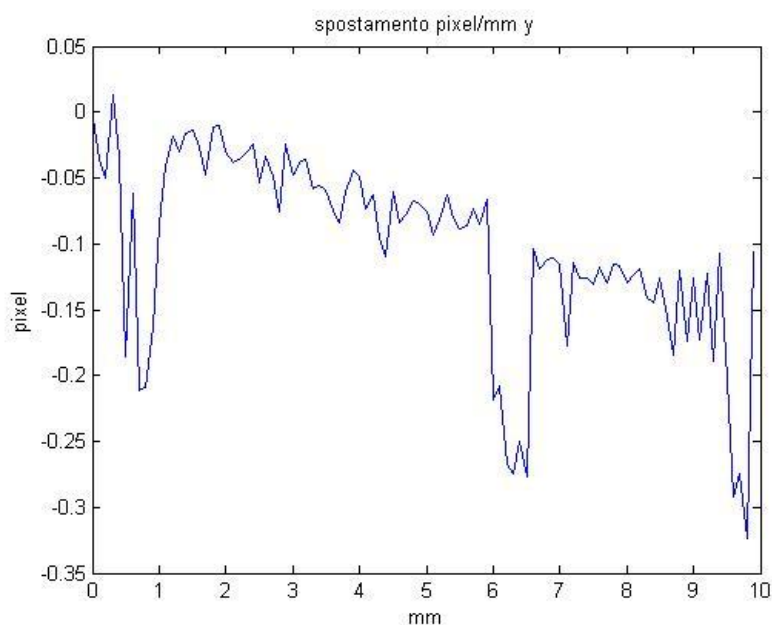


Figura 3.4.3 Spostamenti verticali misurati tramite pattern matching

Per considerare anche quest'effetto sommiamo vettorialmente lo spostamento verticale e quello orizzontale ottenendo così il movimento realmente misurato dalla telecamera (Equazione 2.2.6.1).

$$S = \sqrt{x^2 + y^2}$$

Equazione 2.2.6.1

Confrontiamo ora gli spostamenti misurati con la legge di moto teorica calcolata in precedenza.

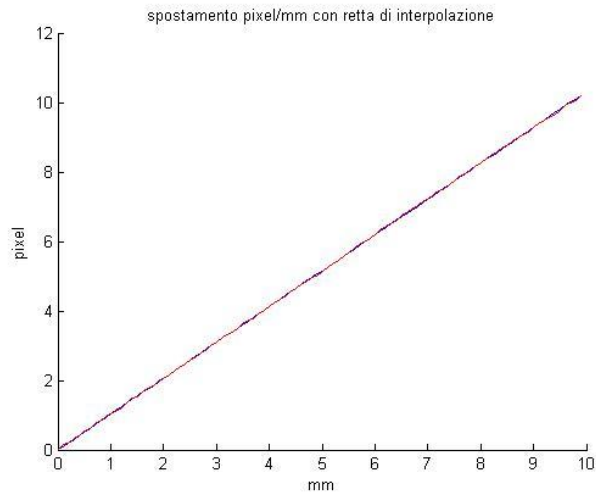


Figura 3.4.4 Spostamenti orizzontali misurati con retta di taratura per immagini ottenute tramite la telecamera Marlin

Il moto ottenuto tramite l'utilizzo del pattern è coerente con quanto ipotizzato dalla teoria, valutiamo ora la differenza tra l'andamento teorico e quello sperimentale per avere un'indicazione dell'accuratezza della misura.

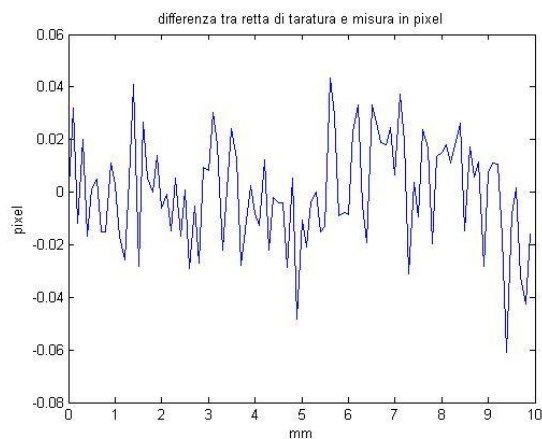


Figura 3.4.5 Discrepanza tra misura e retta teorica ricavata per immagini ottenute tramite la telecamera Marlin

La differenza tra l'andamento teorico e la misura resta sempre al di sotto di 0.05 pixel conoscendo il rapporto tra pixel misurati e mm effettivi di spostamento ottenuto dalla taratura (1.03 Pixel/mm) si può facilmente ricavare la discrepanza della misura in mm. Ripercorrendo le stesse operazioni con le immagini ottenute dalla telecamera Prosilica si ottiene un andamento analogo.

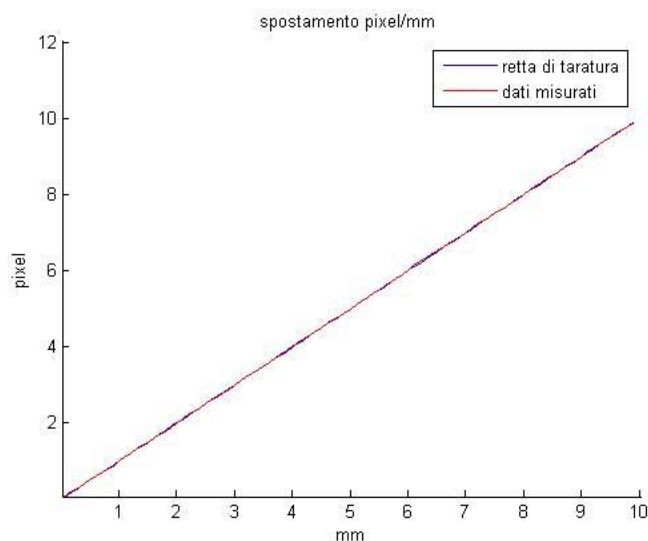


Figura 3.4.6 Spostamenti orizzontali misurati con retta di taratura per immagini ottenute tramite la telecamera Prosilica

Come si può notare in Figura 3.4.6 l'andamento ricavato è molto simile a quello ottenuto con la telecamera Marlin. In questo caso a differenza del precedente la differenza tra retta misurata e retta ideale presenta uno spiccato andamento periodico con periodo di circa 1 mm. Il motivo di tale differenza è dovuto al fatto che, nel caso precedente, questo andamento veniva coperto dal rumore che peggiorava leggermente la qualità della misura. Lo scostamento massimo nel caso delle immagini in analisi resta compresa tra ± 0.03 pixel.

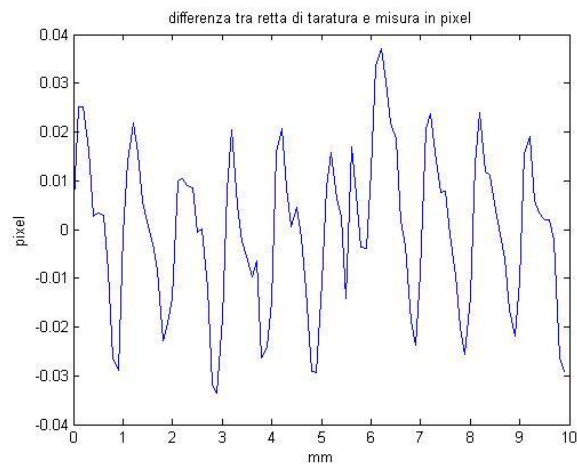


Figura 3.4.7 Discrepanza tra misura e retta teorica ricavata per immagini ottenute tramite la telecamera Prosilica

Si è provato a ripetere le prove fatte utilizzando un pattern di dimensioni inferiori, si è scelto di utilizzare come pattern per le misure un solo blob (Figura 3.4.8).

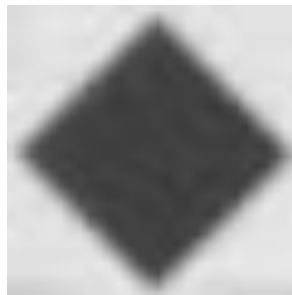


Figura 3.4.8 Pattern utilizzato per la misura

Come si nota dall'immagine il software riconosce comunque il pattern all'interno dell'immagine nonostante le ridotte dimensioni.

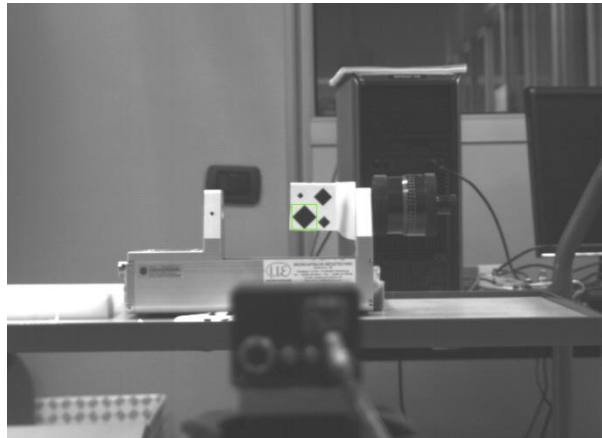


Figura 3.4.9 Individuazione del pattern nell'immagine

Ripetendo le operazioni eseguite al passo precedente valutiamo la discrepanza tra misura ottenuta e la retta teorica utilizzando questo nuovo pattern per le due telecamere.

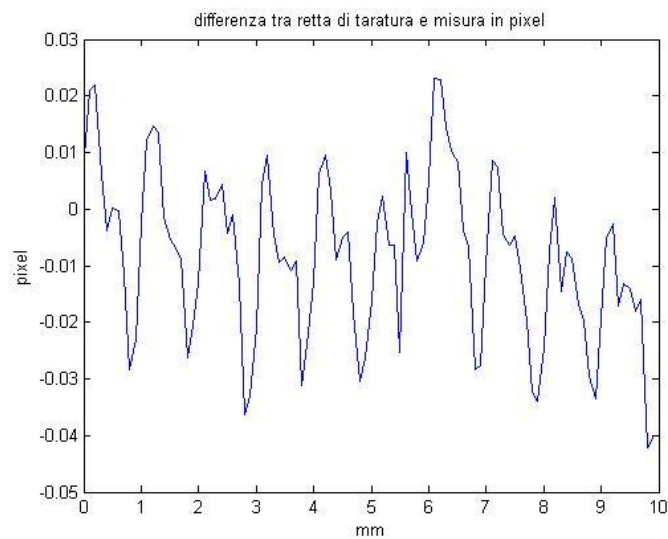


Figura 3.4.10 Discrepanza tra misura e retta teorica ricavata per immagini ottenute tramite la telecamera Prosilica

Per la Prosilica otteniamo una discrepanza paragonabile all'utilizzo del pattern di dimensioni maggiori.

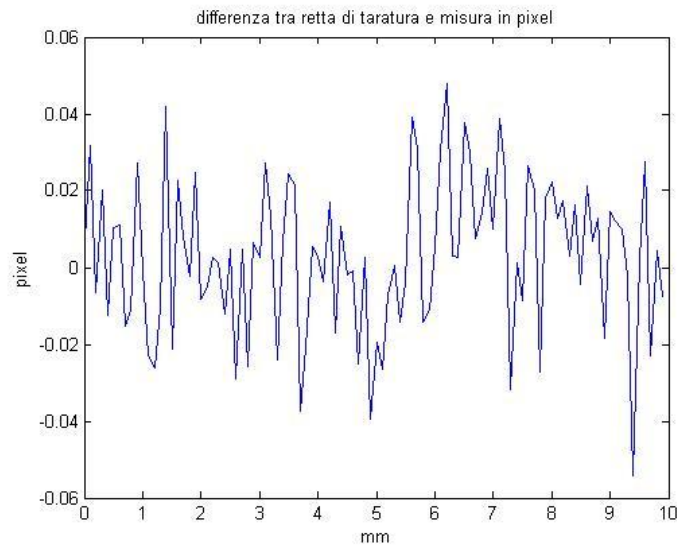


Figura 3.4.11 Discrepanza tra misura e retta teorica ricavata per immagini ottenute tramite la telecamera Marlin

Anche per la telecamera Marlin non vi sono evidenti variazioni nella qualità di misura al diminuire della dimensione del pattern. Entrambe le misure indicano che la qualità della tecnica in analisi non è influenzata in modo significativo dalla dimensione del pattern utilizzato.

	Massima discrepanza	Σ
Marlin	0.061	0.02
Prosilica	0.037	0.016
Marlin un blob	0.054	0.012
Prosilica un blob	0.042	0.015

Tabella 3.4.1 Dati ottenuti analizzando le immagini tramite pattern matching

Il valore di deviazione standard ricavato dalle misure e la discrepanza massima non crescono significativamente al diminuire della dimensione del pattern. Nel caso della Marlin la qualità della misura migliora leggermente al diminuire della dimensione del pattern per la Prosilica sembra invece peggiorare. La misura ottenuta dalle immagini della Prosilica sembra essere migliore poiché meno influenzata dal rumore di fondo evidenziato in precedenza. In seguito verranno analizzate le possibili cause di tale rumore.

3.5.Blob detection

Successivamente si analizzano le medesime immagini tramite blob detection. Avendo utilizzato dei blob di forma romboidale ci si aspetterà un effetto sub-pixel nella misura, effetto che può essere rilevantemente ridotto utilizzando blob di forma circolare. La tecnica utilizzata per valutare la posizione del centro del blob riceve in ingresso l'immagine acquisita, e ne calcola l'opposta (Figura 3.5.1) trasformando i bianchi in neri e viceversa.

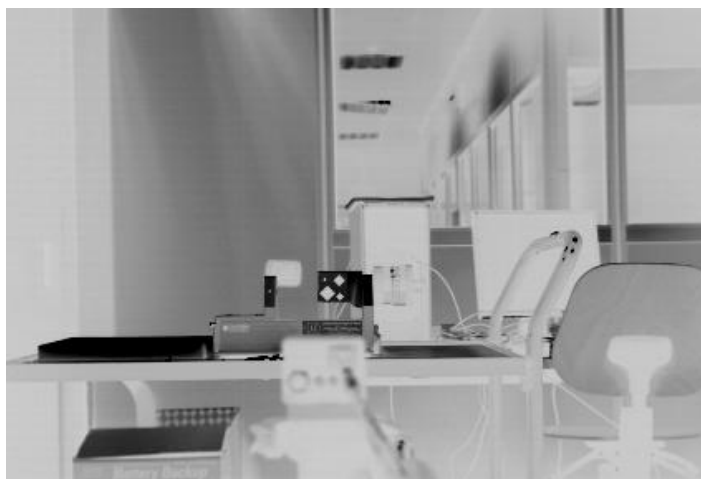


Figura 3.5.1 Immagine invertita per il calcolo del blob

Successivamente viene posto un limite inferiore alla luminosità ammissibile in modo da eliminare il rumore proveniente dalle zone dell'immagine non appartenenti al blob, quest'operazione viene comunemente nominata soglia. Sogliando si ricava un'immagine (Figura 3.5.2) avente come unica zona con valori di luminosità diversi da zero quella appartenente al blob, mentre nella restante parte della regione di interesse tutti i valori di luminosità sono nulli. Per ottenere la posizione del centro del blob si fa una media pesata sulla luminosità dei valori di posizione lungo l'asse verticale ed orizzontale.

$$x = \sum_{j=1}^n x_j * i_j$$

Equazione 2.2.6.1

$$y = \sum_{j=1}^n y_j * i_j$$

Equazione 2.2.6.2

Dove x e y rappresentano la posizione del centro del blob, x_j e y_j indicano le posizioni lungo i due assi dell'elemento j -esimo e i_j è l'indice di luminosità associato al dato elemento.

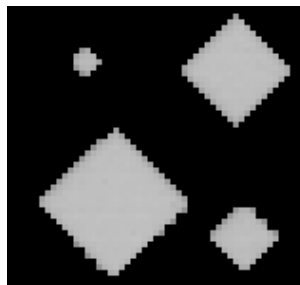


Figura 3.5.2 Immagine ottenuta applicando una soglia inferiore ai valori di luminosità dell'immagine

Analizzando la posizione di un blob per volta si riesce a valutare la misura al variare della dimensione del blob. Il procedimento per ottenere i grafici riportati di seguito è del tutto simile a quello utilizzato per valutare i dati ottenuti dal pattern matching.

Valutiamo per la misura dello spostamento laterale del blob grande (1) mediante le immagini ottenute tramite la videocamera Marlin. Come si può notare dalla Figura 3.5.3 la retta di taratura e di interpolazione sono sovrapposte, ciò indica l'assenza di trend nell'incertezza di misura.

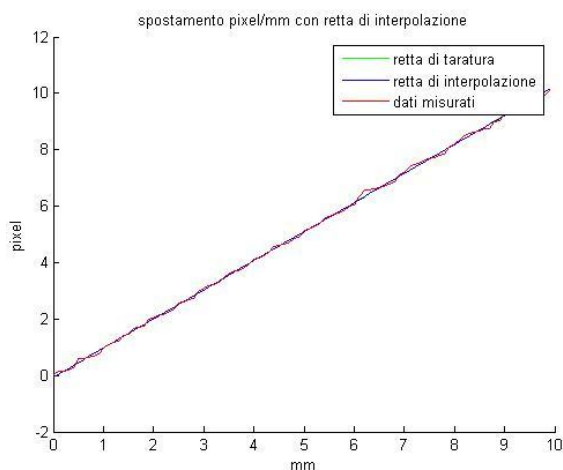


Figura 3.5.3 Confronto tra dati ottenuti retta di taratura e retta di interpolazione dei dati ottenuti dalla videocamera Marlin

Per approfondire l'analisi viene valutata la differenza tra la retta di taratura e i dati ricavati, ciò consentirà di confrontare l'entità dell'incertezza associata alla misura nelle varie configurazioni. Di seguito vengono riportati i dati ottenuti analizzando le immagini acquisite tramite la telecamera Marlin al diminuire della dimensione del blob.

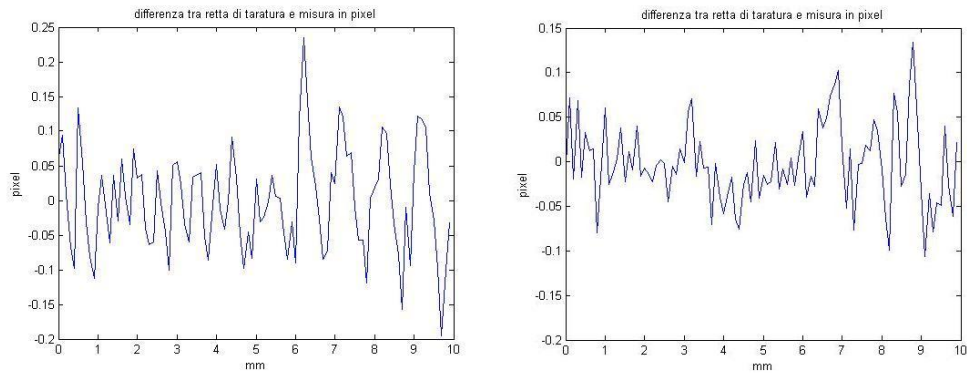


Figura 3.5.4 Discrepanza tra misura e retta teorica blob 1 (a sinistra) e blob 2 (a destra)

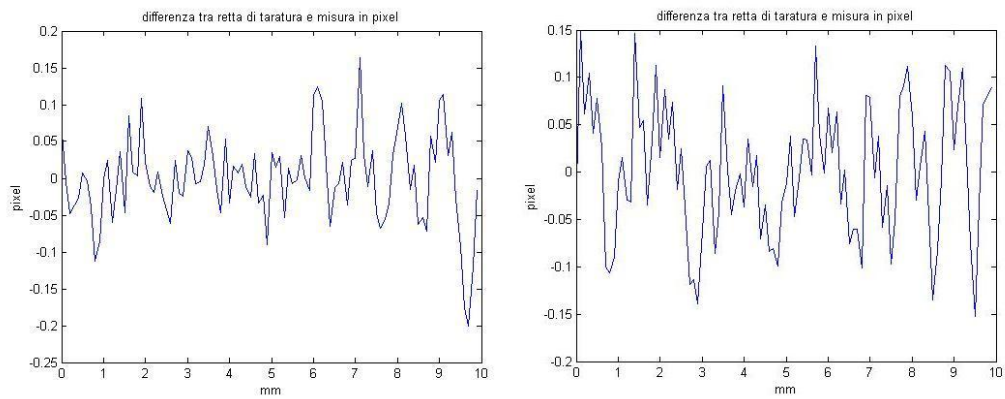


Figura 3.5.5 Discrepanza tra misura e retta teorica blob 3 (a sinistra) e blob 4 (a destra)

Dai grafici si osserva che all'apparenza la differenza tra la misura e la retta teorica non cresce al diminuire della dimensione del blob e si assesta nell'intorno di 0.15 pixel con picchi sporadici che raggiungono 0.2 pixel. Per avere un riscontro numerico delle sensazioni avute osservando i grafici viene valutata la deviazione standard nei 4 casi.

Blob	Massima differenza	σ
1	0.23	0.073
2	0.13	0.044
3	0.2	0.059
4	0.15	0.069

Tabella 3.5.1 Dati elaborati analizzando le immagini ottenute tramite la telecamera Marlin

Dalla Tabella 3.5.1 si nota che escludendo il valore associato al blob 1 la deviazione standard cresce al diminuire delle dimensioni del blob, ciò indica che la qualità della misura peggiora anche se di quantità poco significative. Nonostante il leggero trend misurato, osservando la deviazione standard non si può determinare una legge che lega la variazione delle dimensioni del blob con l'incertezza della misura ottenuta. Si prendono in considerazione ora le immagini ottenute dalla videocamera Prosilica. I dati vengono analizzati in modo del tutto simile a quanto fatto in precedenza per le immagini acquisite tramite la Marlin.

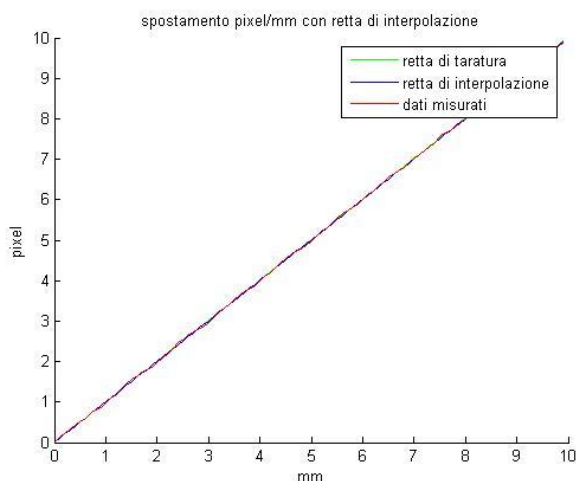


Figura 3.5.6 Confronto tra dati ottenuti, retta di taratura e retta di interpolazione dei dati ottenuti dalla Prosilica

Esaminando lo spostamento orizzontale del target ottenuto analizzando il blob 1 si osserva che, come nel caso precedente, la retta di interpolazione è sovrapposta a quella di taratura. La misura presenta quindi un trend di entità trascurabile. Valutiamo graficamente la differenza al variare della dimensione del blob.

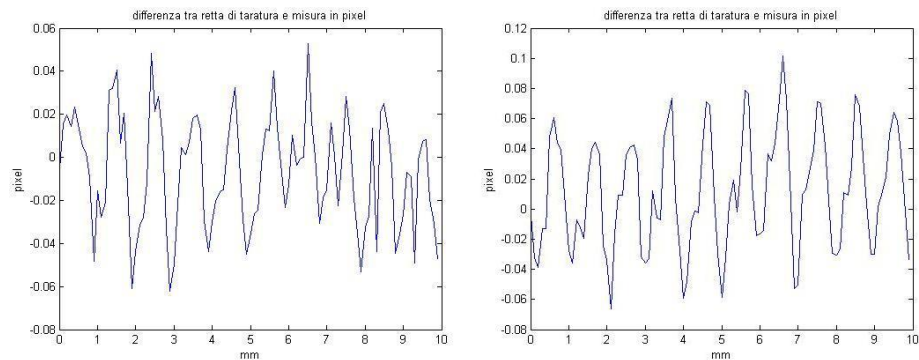


Figura 3.5.7 Differenza blob 1 (a sinistra) e blob 2 (a destra)

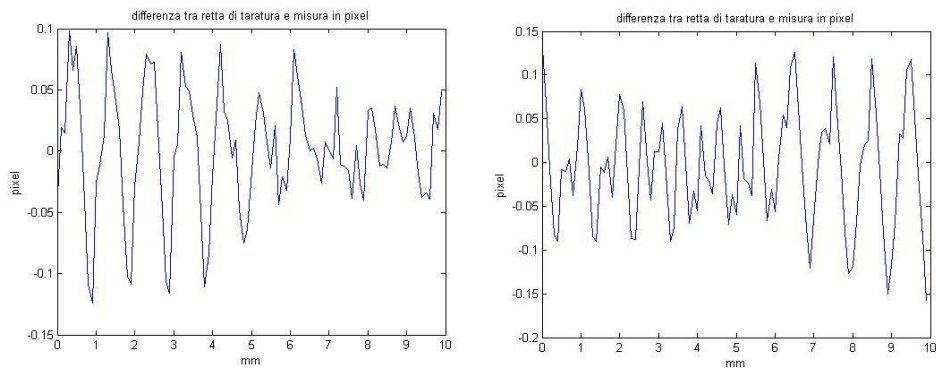


Figura 3.5.8 Differenza blob 3 (a sinistra) e blob 4 (a destra)

Come si può notare graficamente in questo caso la differenza sembra crescere al diminuire della dimensione del blob in analisi. Per verificare tale ipotesi valutiamo la deviazione standard delle quattro serie di dati.

Blob	Massima differenza	σ
1	0.06	0.025
2	0.10	0.038
3	0.12	0.049
4	0.15	0.066

Tabella 3.5.2 Dati elaborati analizzando le immagini ottenute tramite la telecamera Prosilica

L'andamento, riscontrato analizzando i dati, rispecchia quanto visto in precedenza per i dati ottenuti dalla telecamera Marlin cioè la dimensione del blob influenza l'incertezza di misura.

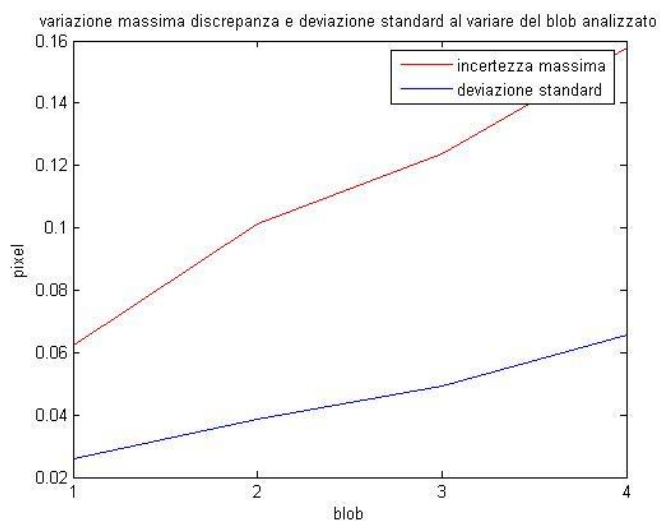


Figura 3.5.9 Variazione dello scostamento massimo e della varianza al variare del blob

Diminuendo la dimensione del blob in questo caso lo scostamento aumenta, per blob con dimensione massima 30 pixel la differenza è paragonabile a quella ottenuta analizzando i dati mediante il pattern matching; per blob di dimensioni

minori l'incertezza cresce. Vengono valutati ora i dati ricavati in funzione della dimensione rappresentativa del blob in analisi in modo da poter correlare la qualità della misura con le dimensioni del blob. Si è scelta come dimensione rappresentativa la lunghezza del lato dei blob quadrati.

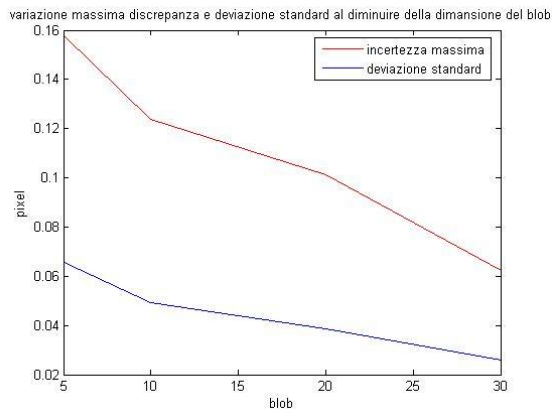


Figura 3.5.10 Variazione dello scostamento massimo e della varianza al variare della dimensione rappresentativa del blob

Si sceglie di analizzare il parametro di deviazione standard come il più rappresentativo dell'incertezza in quanto meno influenzato da valori sporadici.

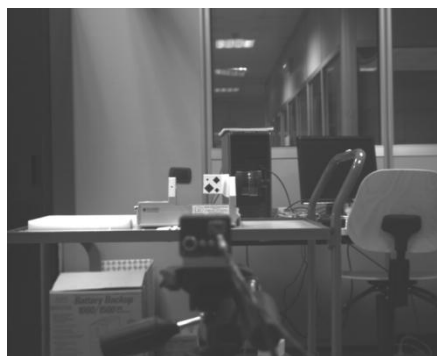


Figura 3.5.11 Immagine ottenuta tramite la Marlin

I risultati ottenuti analizzando le immagini delle due telecamere tramite la blob detection sembrano contrastare; la misura ricavata tramite le immagini della telecamera Prosilica (Tabella 3.5.2) presenta un'incertezza crescente al diminuire della dimensione del blob, l'incertezza associata alla misura effettuata tramite le immagini Marlin (Tabella 3.5.1) non decresce all'aumentare della dimensione del blob. L'immagine ottenuta tramite la Marilin (Figura 3.5.11) sembra presentare più rumore rispetto a quella ottenuta tramite la Prosilica (Figura 3.5.12). Successivamente si valuta con maggiore attenzione la zona utilizzata per la misura in entrambe le immagini.

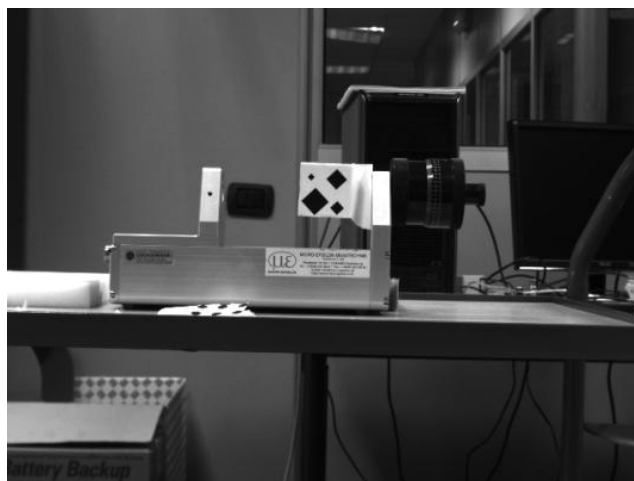


Figura 3.5.12 Immagine ottenuta tramite la Prosilica

Per cercare il motivo di questa incoerenza vengono confrontate le immagini analizzate.



Figura 3.5.13 Dettaglio del target Marlin(a sinistra) e Prosilica(a destra)

L'immagine di sinistra sembra essere più sfuocata rispetto all'altra, ciò potrebbe essere dovuto alla diversa qualità del sensore delle telecamere oppure alle ottiche montate. In seguito viene quantificata la differenza di qualità che persiste tra le due immagini. Per valutare l'effetto che la qualità dell'immagine provoca sul bordo del blob viene valutato il profilo di luminosità lungo una linea posta in direzione perpendicolare al bordo del blob come mostrato in figura.

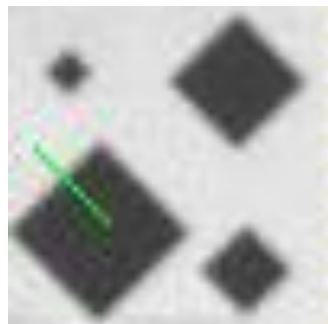


Figura 3.5.14 Linea lungo la quale si valuta il profilo di luminosità

Le due immagini presentano profili di luminosità notevolmente differenti, le immagini provenienti dalla telecamera Marlin sono nel complesso più luminose rispetto a quelle ottenute tramite la Prosilica. Il parametro di luminosità ricavato parte infatti da un valore più alto (circa 240) e si assesta nella zona “nera” in un valore prossimo al 70. I dati ricavati dalla Prosilica sono invece più scuri come si può notare anche osservando le immagini.

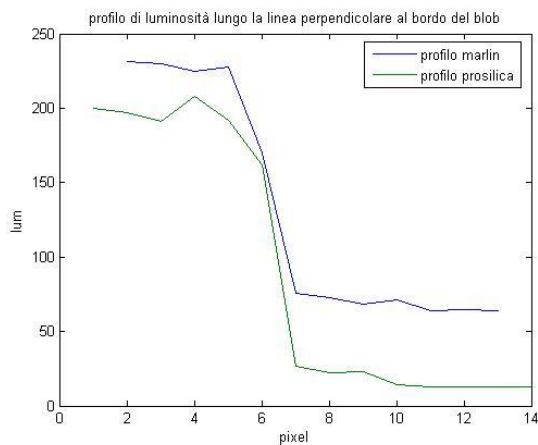


Figura 3.5.15 Profilo di luminosità ottenuto dalle due immagini

Per determinare se la differenza tra le due immagini è dovuta solo alla diversa luminosità si osserva la derivata del profilo in modo da confrontare la pendenza delle due curve.

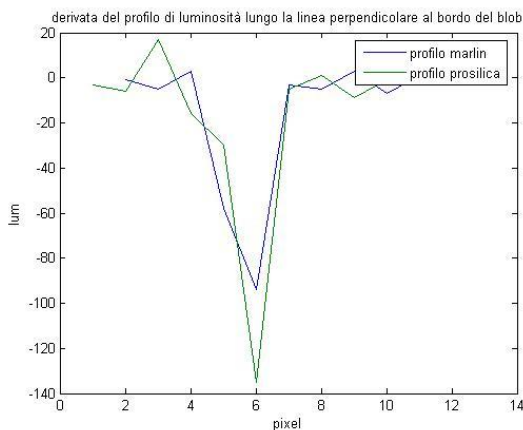


Figura 3.5.16 Derivata del profilo di luminosità ottenuto dalle due immagini

Dal grafico risulta evidente che il profilo derivante dalla Prosilica è più pendente avendo una derivata in modulo superiore. La maggiore pendenza ricavata dalla

derivata indica una zona di transizione tra bianco e nero di entità inferiore. Come accennato in precedenza analizzando le immagini tramite la blob detection si compie una sogliatura, la qualità di tale operazione migliora con l'aumentare della derivata del profilo di luminosità. Più la derivata è alta più la distinzione tra "bianco" e "nero" è netta, più si riesce tramite una sogliatura a isolare il blob dallo sfondo.

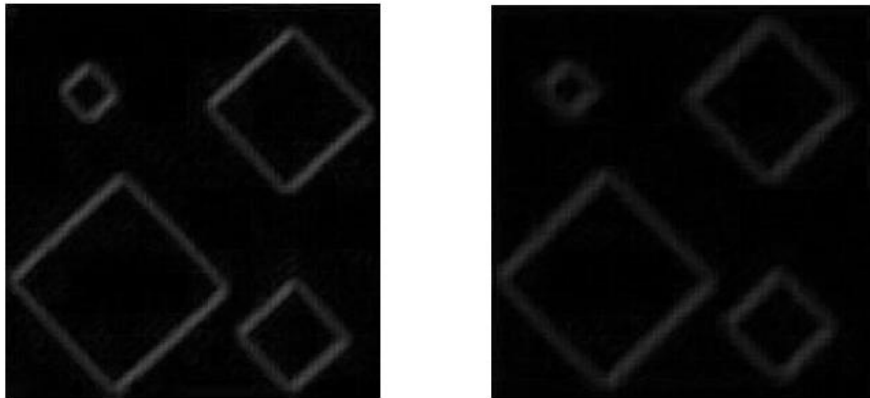


Figura 3.5.17 Filtro derivativo Prosilica(a sinistra) e Marlin(a destra)

Derivando la luminosità lungo tutta l'immagine appare maggiormente chiaro come la differenza di qualità persistente tra le due immagini influenzi in modo chiaro la capacità di definire un bordo all'interno del quale racchiudere il blob. Osservando le due immagini è evidente come quella a sinistra ottenuta derivando un'immagine acquisita tramite la Prosilica sia decisamente più nitida rispetto all'immagine a destra. La differenza ottenuta analizzando le due immagini quindi è dovuta a degli errori di entità superiore derivati dalla qualità delle immagini che sommati a quelli dovuti all'incertezza intrinseca nella tecnica hanno fatto sì che analizzando le immagini ottenute dalla Marlin al diminuire delle dimensioni del blob non migliorasse la qualità della misura. Le immagini acquisite tramite la Prosilica avendo una qualità migliore hanno risentito in minore parte di quest'effetto mostrando degli evidenti vantaggi nell'usare blob di dimensioni maggiori.

3.6. Edge detection

Analogamente a quanto fatto per le precedenti tecniche si analizzano i dati ottenuti tramite edge detection.

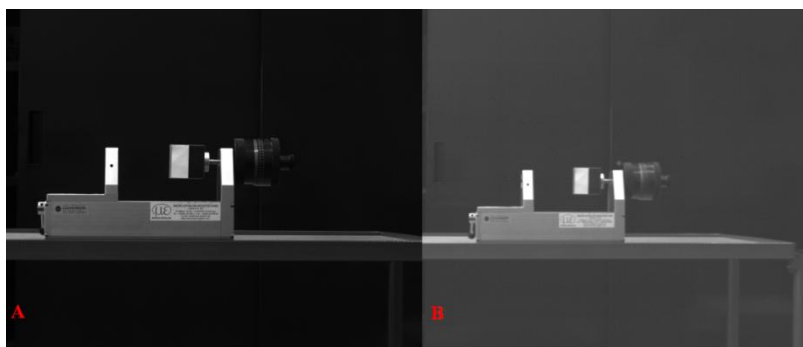


Figura 3.6.1 Immagini ottenute tramite le due telecamere; A)Prosilica; B)Marlin;

Nel caso in analisi le immagini sono differenti rispetto a quelle utilizzate per pattern matching e blob detection poiché è stato necessario ripetere la prova per cambiare il target inquadrato (Figura 3.6.1).

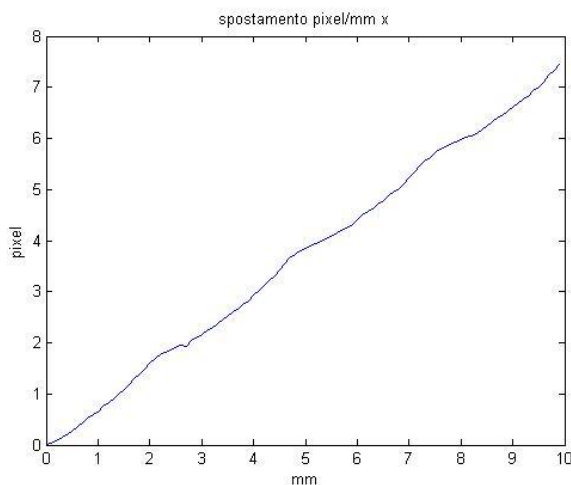


Figura 3.6.2 Dati misurati tramite edge detection(telecamera Marlin)

La misura è stata ottenuta individuando la posizione del edge lungo 37 righe di pixel che lo intersecano. La posizione rappresentata in Figura 3.6.2 è la media delle 37 posizioni ottenute mediante l'edge detection. In seguito analizzeremo la misura effettuata considerando una sola riga di pixel che individua la posizione dell'edge. Lo svolgimento della prova è stato eseguito in modo analogo a quanto fatto per le prove precedenti e descritto nel paragrafo 3.3. In Figura 3.6.2 si osservano i dati ricavati analizzando le immagini acquisite mediante la telecamera Marlin. In seguito viene tracciata la retta di taratura in modo da poter valutare la qualità della misura effettuata.

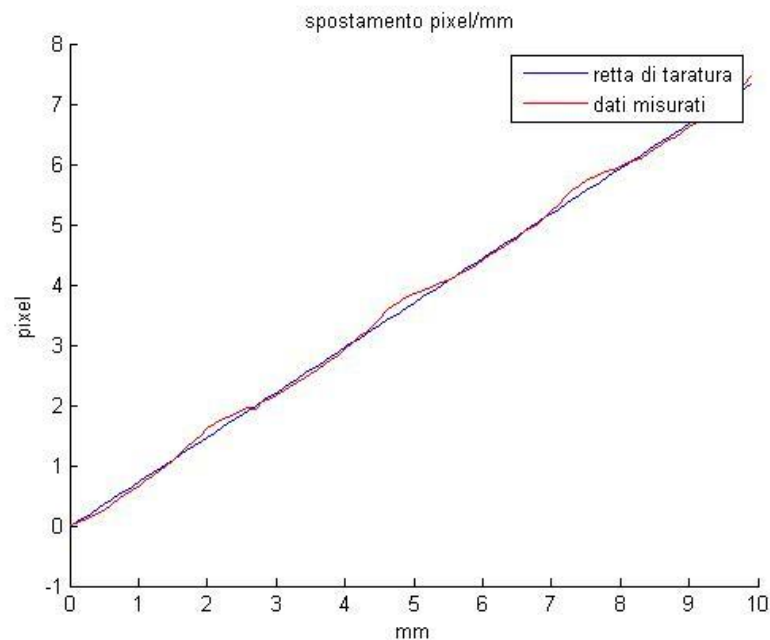


Figura 3.6.3 Dati misurati tramite edge detection confrontati con la retta di taratura (telecamera Marlin)

I dati misurati rispecchiano l'andamento della retta di taratura con buona approssimazione. In questa prova il rapporto pixel/mm da cui si ricava la pendenza della retta di taratura è 0.74, questo parametro è considerevolmente inferiore ad 1 ciò sarà da tener conto nelle considerazioni fatte sulla qualità della misura nel caso in esame. In Figura 3.6.3 si osserva la differenza tra i due dati

rappresentati in modo da avere un'indicazione dell'errore come fatto in precedenza.

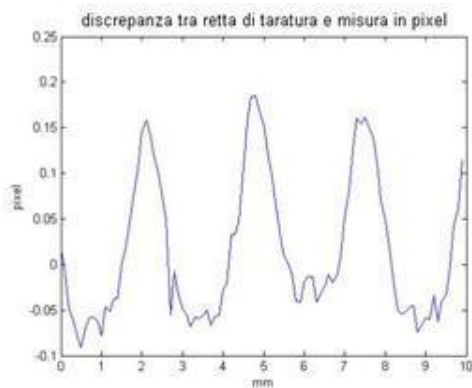


Figura 3.6.4 Differenza tra dati misurati e retta di taratura (telecamera Marlin)

Osservando la Figura 3.6.4 si determina una discrepanza compresa tra circa 0,2 e -0,1 pixel che presenta un andamento periodico di periodo circa 3mm. Successivamente viene considerata la misura ottenuta analizzando una sola riga di pixel.

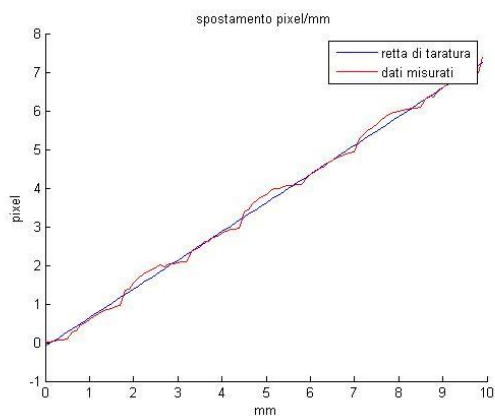


Figura 3.6.5 Dati misurati tramite edge detection lungo una sola riga di pixel confrontati con la retta di taratura (telecamera Marlin)

Anche utilizzando una sola riga di pixel la misura rispecchia l'andamento ipotizzato. Al fine di ottenere un parametro di confronto si valuta lo scostamento ottenuto.

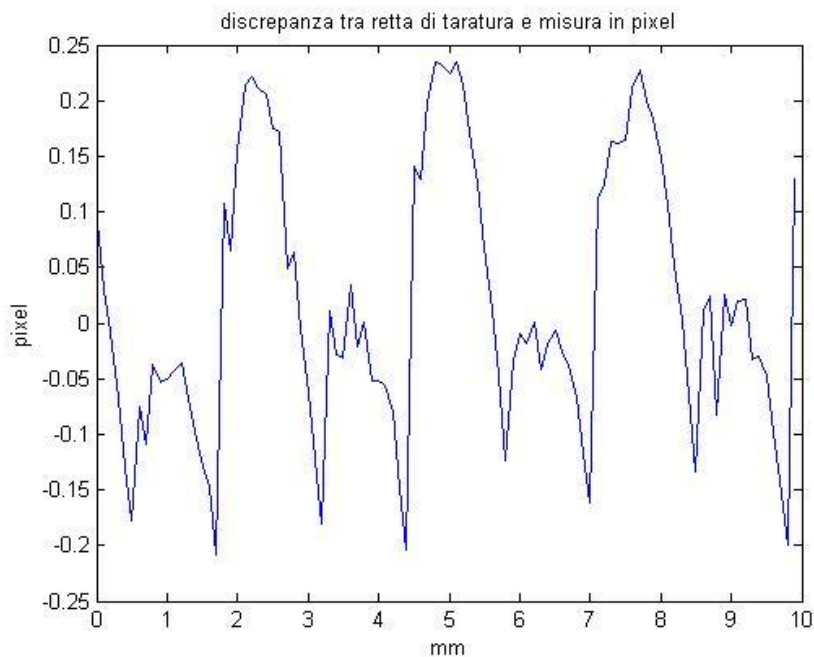


Figura 3.6.6 Differenza tra dati misurati e retta di taratura lungo una sola riga di pixel (telecamera Marlin)

La misura presenta scostamenti che vanno da circa 0.25 a -0.23 pixel sembra quindi peggiorare rispetto al caso precedente. Lo scostamento è comunque periodico in questo caso di periodo 1 pixel che convertito in mm sono circa 1.35 mm. Lo scostamento periodico è dovuto all'effetto sub-pixel associato all'edge detection e documentato nel paragrafo 2.3. L'effetto sub pixel non è visibile nella misura eseguita in precedenza perché l'operazione di media tra le varie righe ne riduce l'efficacia. In seguito si valutano i dati ottenuti tramite la telecamera Prosilica. Come si può evincere dalla Figura 3.6.7 la misura è più accurata rispetto ai casi precedenti questo è dovuto alla telecamera utilizzata ed a un rapporto pixel/mm superiore.

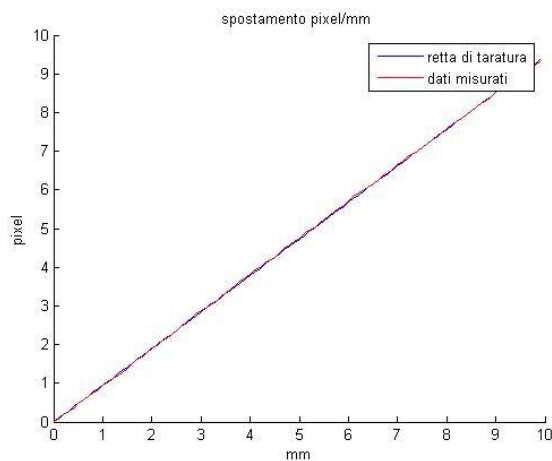


Figura 3.6.7 Dati misurati tramite edge detection confrontati con la retta di taratura (telecamera Prosilica)

Il rapporto pixel/mm associato ai dati misurati vale circa 0.95 ovvero, a fronte di uno spostamento fisico di 1 mm, avremo uno spostamento della proiezione del target sul sensore di 0.95 pixel decisamente superiore rispetto al caso precedente. La qualità della misura ottenuta sarà quindi influenzata in modo positivo dalla migliore risoluzione dell'immagine.

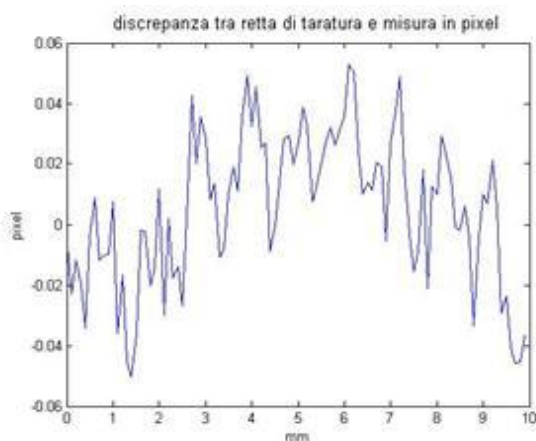


Figura 3.6.8 Differenza tra dati misurati e retta di taratura lungo (telecamera Prosilica)

In questo caso i dati si discostano dalla retta di taratura per valori che risiedono tra circa $\pm 0,05$ pixel e nei dati non si riconosce un palese effettivo effetto sub-pixel. In seguito vengono rappresentati i dati ottenuti analizzando una sola riga di pixel dell'immagine come fatto in precedenza.

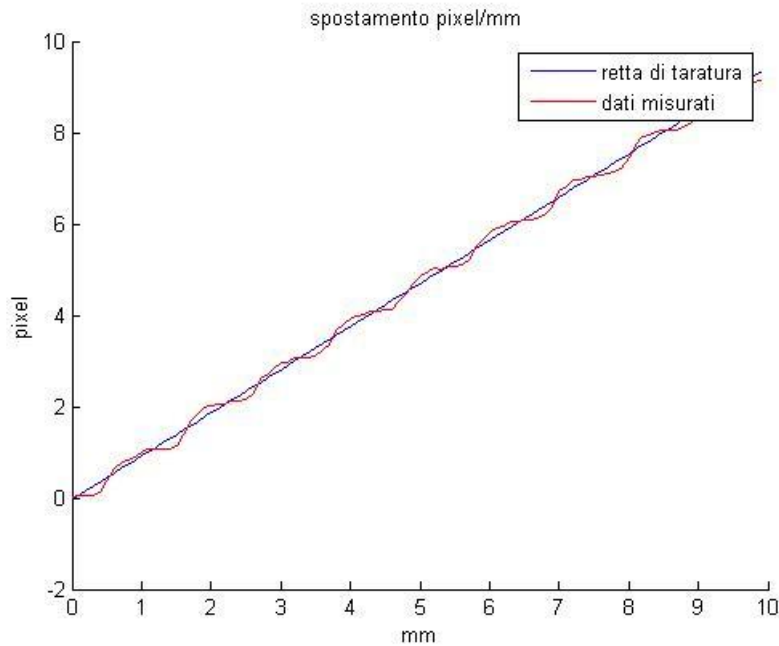


Figura 3.6.9 Dati misurati tramite edge detection lungo una sola riga di pixel confrontati con la retta di taratura (telecamera Prosilica)

Come si può notare in Figura 3.6.9 la qualità della misura peggiora in modo notevole utilizzando una sola riga di pixel dell'immagine. Per valutare quantitativamente lo scostamento viene rappresentata la differenza tra retta di taratura e dati misurati nel caso di analisi, che si ricorda concerne il profilo di luminosità di una sola riga di pixel studiato mediante edge detection, per immagini ottenute tramite la telecamera Prosilica.

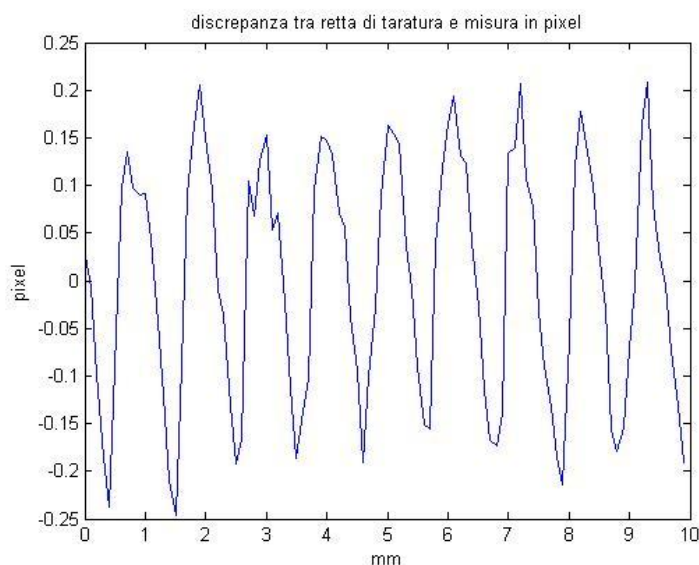


Figura 3.6.10 Differenza tra dati misurati e retta di taratura lungo una sola riga di pixel (telecamera Prosilica)

Osservando la Figura 3.6.10 si nota un effetto sub-pixel molto marcato nei dati analizzati. I valori misurati si discostano dalla retta di taratura per valori compresi tra ± 0.25 pixel ovvero di una quantità notevolmente superiore rispetto ai dati non mediati analizzati in precedenza. Per avere un'indicazione quantitativa della misura effettuata vengono classificati i dati ottenuti nei quattro casi in funzione di valore massimo e deviazione standard dello scostamento tra dati misurati e retta di taratura.

	Massima differenza	σ
Marlin mediato	0.1852	0.0781
Marlin singolo pixel	0.2352	0.1215
Prosilica mediato	0.0527	0.0247
Prosilica singolo pixel	0.2470	0.1276

Tabella 3.6.1 Dati ottenuti dall'analisi delle misurazioni effettuate tramite edge detection

La Tabella 3.6.1 conferma quanto teorizzato precedentemente. La qualità della misura migliora se aumenta il rapporto pixel/mm e se vengono utilizzate più righe di pixel per stimarne la posizione. Essendo che le misure effettuate rasentano il limite della tecnica per quanto riguarda la risoluzione un decremento anche lieve del rapporto pixel/mm provoca una notevole riduzione di qualità della misura difficilmente recuperabile anche con l'utilizzo di più righe di immagine. Non si notano notevoli miglioramenti di qualità della misura dovuti ad una miglior risoluzione se si utilizza una sola riga di pixel poiché l'effetto sub-pixel ne oscura i benefici.

3.7. Conclusioni

Le tecniche di blob analisi, pattern matching ed edge detection presentano incertezze paragonabili utilizzando blob di dimensioni adeguate, immagini di discreta qualità e numero sufficiente di righe trasversali all'edge da analizzare. La blob analisi in condizioni ottimali riesce ad ottenere discrepanze massime inferiori a 0.06 pixel con una deviazione standard di 0.026, il pattern matching ha una discrepanza massima di 0.037 ed una deviazione standard pari a 0.016, mentre l'edge detection ha una differenza massima di 0.053 e deviazione standard pari a 0.025. Il pattern matching è però più stabile in quanto meno influenzato dalla dimensione del pattern. La qualità della misura ottenuta tramite la blob detection peggiora notevolmente al diminuire delle dimensioni del blob mentre il numero di righe di pixel utilizzate caratterizza in modo significativo la misura ottenuta tracciando un edge. La qualità dell'immagine acquisita invece influenza la misura ottenuta mediante tutte le tecniche analizzate, anche se in modo più significativo quelle ottenute tramite blob analisi ed edge detection. In conclusione si può affermare che le misure ottenute tramite pattern matching offrono incertezze inferiori rispetto a quelle ricavate tramite blob analisi ed edge detection. Un ulteriore vantaggio associato all'utilizzo del pattern per la misura di spostamento è la stabilità della tecnica in quanto meno influenzata da dimensioni del misurato e dal rumore proveniente dall'esterno.

4. Applicazione delle tecniche per misure di vibrazioni

4.1.Introduzione

In questo capitolo vengono applicate e qualificate le tecniche di pattern matching, edge detection e blob analisi se utilizzate per misurare vibrazioni. La misura dinamica viene effettuata tramite una serie di misure statiche del fenomeno, poiché si ritiene che la dinamica della struttura vibrante sia notevolmente più lenta rispetto alla dinamica interna delle telecamere. La misura viene effettuata mediante una telecamera che inquadra una struttura forzata per mezzo di un carico a gradino. Utilizzeremo due diverse telecamere al fine di valutarne l'influenza nella misura. I dati ottenuti dalle immagini analizzate verranno confrontati con quelli ottenuti da accelerometri opportunamente posizionati, utilizzati in questa sede come riferimento. Il vantaggio delle tecniche proposte rispetto agli accelerometri comunemente utilizzati risiede nella semplicità di installazione in quanto non richiedono contatto con la struttura per il montaggio e lo smontaggio di apparecchiatura specifica. Un ulteriore vantaggio è la misura di spostamenti quasistatici che non è possibile effettuare mediante gli accelerometri. La frequenza minima acquisibile mediante accelerometri varia in funzione delle caratteristiche di costruzione da qualche Hertz a frazioni di Hertz, tuttavia vi sono dei limiti sotto ai quali questi strumenti di misura non permettono ottenere dati significativi .

4.2.Descrizione della struttura

Le prove sono state eseguite sulla copertura appartenente a “piazza delle città lombarde” situata a Milano adiacentemente al “palazzo Lombardia”, nuova sede della regione Lombardia nell’ambito del collaudo della struttura stessa. La struttura su cui sono state eseguite le prove è costituita da un’intelaiatura in acciaio posta a circa 50 m da terra rivestita da due teli di materiale polimerico separati tramite aria in pressione.



Figura 4.2.1 vista laterale della struttura

La prova è stata eseguita sulla struttura in acciaio, i teli sono stati montati in un secondo momento.



Figura 4.2.2 immagine della copertura ripresa dalla piazza

La copertura è stata progettata per proteggere la piazza sottostante da eventi atmosferici. Le travi portanti della struttura poggiano sui palazzi che circondano la piazza, la forma particolare della struttura segue quindi quella dei palazzi.



Figura 4.2.3 Immagine della struttura ripresa dall'alto

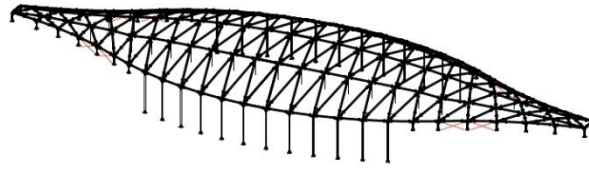


Figura 4.2.4 Travatura reticolare di sostegno per la copertura

4.3.Set di misura

Le misure sono state effettuate riprendendo una struttura costituita da travature reticolari caricate verticalmente come mostrato in Figura 4.3.1. Poiché la misura di vibrazioni mediante strumenti di visione è tuttora in fase di studio sulla copertura sono stati posizionati degli accelerometri per ottenere dati di confronto. L'utilizzo di accelerometri per la caratterizzazione dinamica di strutture civili è l'approccio tradizionale tramite il quale queste misurazioni vengono eseguite. Lo scopo della caratterizzazione del sistema di visione proposto è di evitare in un futuro l'utilizzo di accelerometri in situazioni che richiedono rilevanti problematiche nel montaggio di apparecchiature sulla struttura. Per le analisi sono stati utilizzati dei piezo-accelerometri PCB modello 393A03 le cui caratteristiche sono evidenziate in Tabella 4.3.1.

TIPO SENSORE	FONDO SCALA	BANDA PASSANTE	SENSIBILITÀ	RISOLUZIONE
Piezo Acc PCB 393A03	5 g	0.1 Hz – 1000 Hz	1 V/g	0.00001 g rms

Tabella 4.3.1 Caratteristiche degli accelerometri utilizzati per l'analisi

Il posizionamento degli accelerometri è stato particolarmente difficoltoso poiché è avvenuto tramite una pedana mobile situata nella piazza sottostante la

copertura situata a più di 50 m da terra. Dovendo acquisire dati mediante gli accelerometri è stato necessario tirare alcuni cavi sino al palazzo adiacente per trasmettere il segnale. L'utilizzo delle telecamere per misurare lo spostamento della struttura non obbliga ad operazioni dirette sulla copertura.

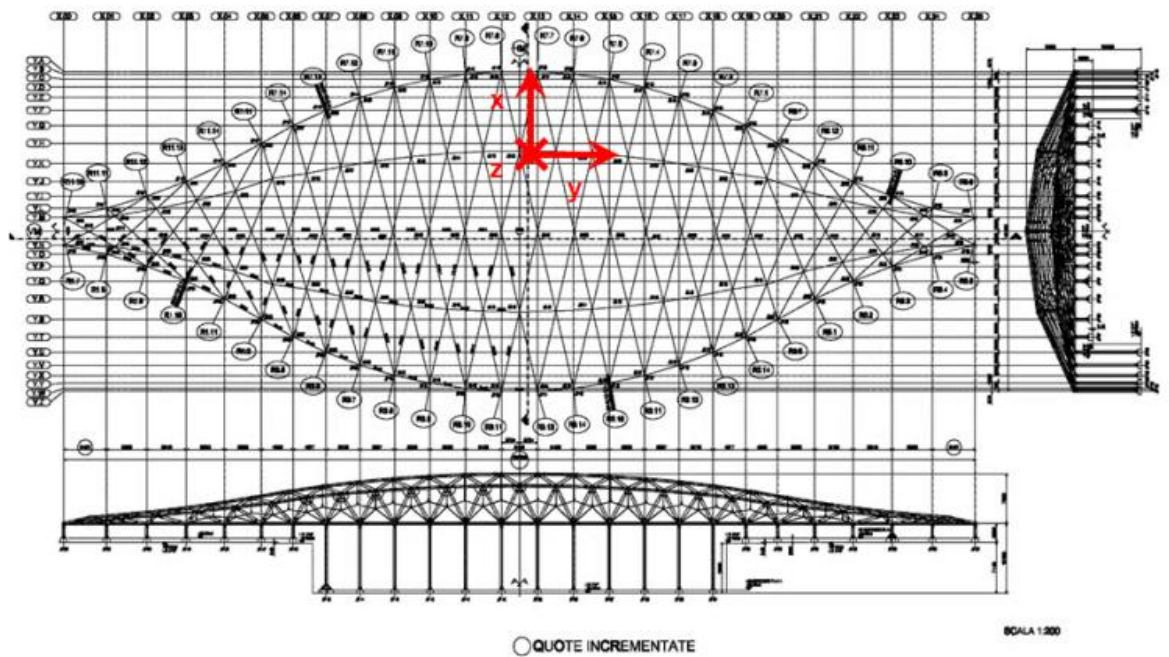


Figura 4.3.1 Disegni della struttura in analisi

Le telecamere sono state posizionate mediante due cavalletti su un terrazzo metallico situato a circa 30 m dal punto di misura come mostrato in Figura 4.3.2, ad un'altezza confrontabile con esso.

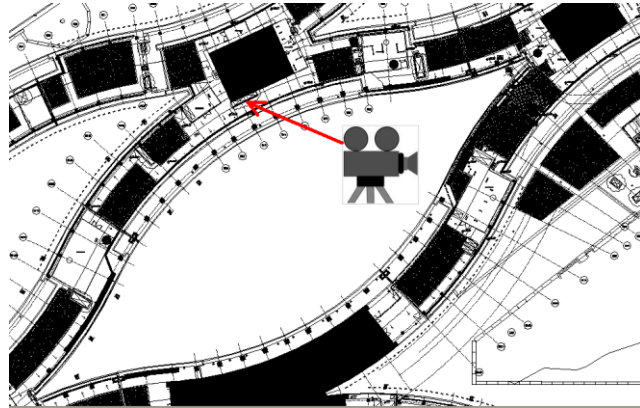


Figura 4.3.2 Posizionamento delle telecamere

Le prove sono state eseguite vincolando un capo della cinghia nel centro della struttura (Figura 4.3.1), mentre l'altro capo è stato obbligato ad un provino appositamente progettato (Figura 4.3.3). Il provino impiegato è stato dimensionato in modo da avere nella sezione minima un'area di estensione tale da provocare la rottura quando soggetta ad un determinato carico di trazione. All'estremo inferiore del provino è stata vincolata una struttura su cui sono stati appoggiati dei pesi. Il carico retto dal provino è stato aumentato sino a provocarne la rottura.



Figura 4.3.3 Provino messo in trazione

La struttura durante la fase di carico si inflette abbassandosi gradualmente, quando il provino raggiunge il carico critico si rompe permettendo alle travi di tornare nella loro posizione di equilibrio. La rottura del provino causa la rimozione quasi istantanea del carico imposto alla struttura, ciò può essere considerato come una forza a gradino applicata verticalmente e ci permette di andare ad indagare le frequenze proprie della copertura. La struttura è stata ripresa attraverso due telecamere: una AVT Marlin F131b con montato un sensore CMOS cypres(Active pixels :1280X1024,pixel size: 6.7 μm x 6.7 μm) che acquisisce immagini in bianco e nero, e una telecamera analogica Sony DCR-HC30E con montato un sensore CCD da 3 mm(tipo 1/6, Active pixels :720X576) in grado di acquisire immagini a colori. Sulla telecamera Marlin è stata montata una focale da 50 mm mentre la telecamera Sony possiede un obbiettivo integrato con zoom($f=43$ mm-430 mm).

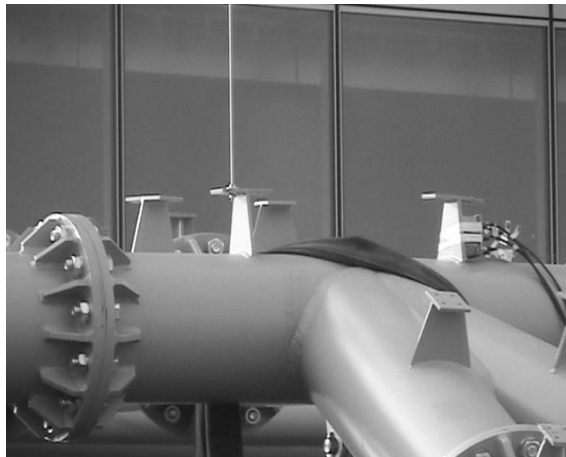


Figura 4.3.4 Immagine ottenuta dalla telecamera Sony convertita in bianco e nero

In Figura 4.3.4 e in Figura 4.3.5 vengono mostrate le aree inquadrare dalle due telecamere.



Figura 4.3.5 Immagine ottenuta con la telecamera Marlin

Tre accelerometri sono posti in corrispondenza del luogo di misura per ottenere i dati di accelerazione della struttura scomposta in tre assi ortogonali tra loro. L'accelerometro che verrà utilizzato per il confronto è quello posto in direzione verticale, i restanti due sono stati posizionati per controllare eventuali spostamenti in direzione trasversale. I dati verranno confrontati in accelerazione derivando le informazioni in spostamento ottenute mediante le telecamere

4.4. Analisi dei dati: pattern matching

Per ottenere i dati di spostamento della struttura in direzione verticale tramite il pattern matching si è scelto di tracciare la posizione della flangia mostrata in Figura 4.4.1.



Figura 4.4.1 Pattern utilizzato per l'analisi dei filmati Marlin

Il pattern utilizzato inquadra l'intero bordo che suddivide la flangia dallo sfondo circostante. La scelta è ricaduta su questo particolare perché presenta notevoli variazioni di luminosità come mostrato in Figura 4.4.2 e permette quindi di minimizzare gli errori di posizionamento.

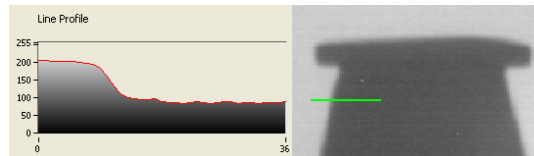


Figura 4.4.2 Profilo di luminosità lungo il bordo della flangia

Analizzando la prima prova con il pattern riportato in Figura 4.4.1 si ottiene uno spostamento misurato in pixel mostrato in Figura 4.4.3. La frequenza di campionamento stimata è di 29.6 Hz.

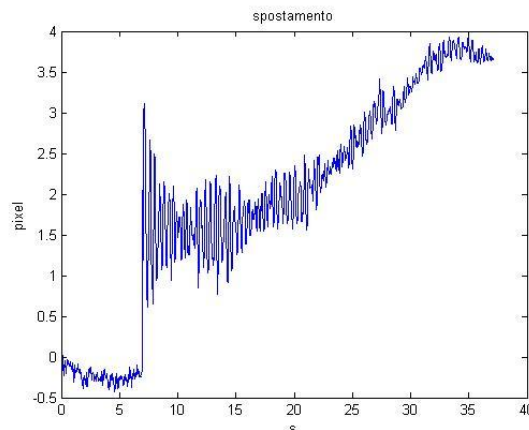


Figura 4.4.3 Spostamento misurato in pixel video 1

Dai dati si nota l'istante in cui è avvenuta la rottura del provino, ovvero dove lo spostamento misurato supera 1 pixel. Negli istanti successivi alla rottura del provino la struttura vibra liberamente ed è in questo tratto che andremo a misurare le frequenze proprie della struttura in direzione verticale. Per convertire la misura in mm si è dovuto tarare il sistema. La conversione da pixel a mm è stata ottenuta analizzando alcune caratteristiche geometriche del pattern

note e rapportandole alle quantità misurate in pixel. Per mezzo di una semplice equazione è stato ricavato il rapporto tra pixel misurati e mm effettivi di spostamento.

$$R_{app} = \frac{\text{pixelflangia}}{\text{mmflangia}} = 0.8569 \text{ Pix/mm}$$

Equazione 2.2.6.1

Per convertire i dati misurati in millimetri è sufficiente dividerli per il rapporto ricavato in precedenza, così facendo si ricava il grafico mostrato in Figura 4.4.4.

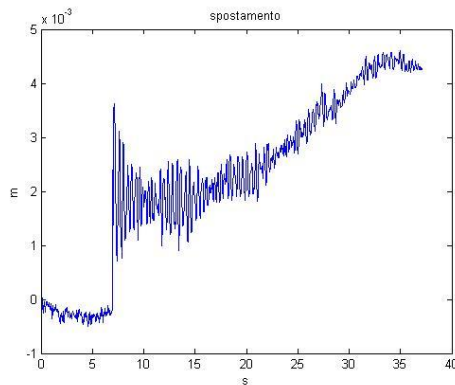


Figura 4.4.4 Spostamento misurato in mm

Da teoria si potrebbe ipotizzare che una volta rotto il provino la struttura oscilli attorno alla sua posizione di equilibrio, questo fenomeno non sembra comparire nei dati misurati. Come si può notare nelle figure precedenti in seguito alla rimozione del carico la struttura oscilla con un trend crescente. Il trend può essere dovuto a dei disturbi a bassa frequenza dati da movimenti della telecamera, per verificare quest'ipotesi confronteremo successivamente i dati misurati con le telecamere e l'accelerometro.

Valutiamo ora il segnale nel dominio delle frequenze convertito mediante la trasformata di Fourier. Tramite quest'operazione ricaveremo le prime frequenze proprie della struttura.

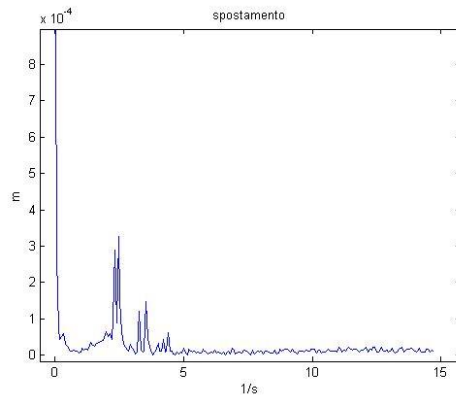


Figura 4.4.5 Modulo del segnale nel dominio delle frequenze

Il sistema a fronte di un'eccitazione di tipo a gradino vibra principalmente a delle determinate frequenze dette frequenze proprie della struttura. Il segnale misurato evidenzia quattro frequenze proprie della struttura tra i due e i quattro Hz. Per eliminare i disturbi a bassa frequenza si a filtra il segnale. Per filtrare il segnale è stato utilizzato il filtro di Butterworth con frequenza limite di 0.7403 Hz. Il segnale filtrato nel dominio del tempo è stato rappresentato nella Figura 4.4.6.

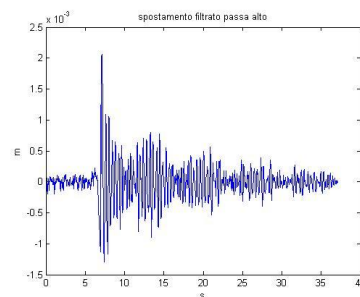


Figura 4.4.6 Segnale filtrato passa-alto

Proviamo a valutare ora il segnale filtrato nel dominio delle frequenze.

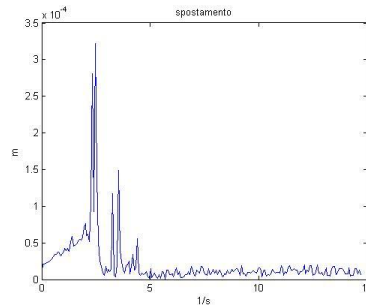


Figura 4.4.7 Segnale filtrato nel dominio delle frequenze

Come ipotizzato in teoria il segnale rispecchia quello non filtrato con il modulo delle basse frequenze che tende a zero. Proviamo ora a derivare lo spostamento nel dominio delle frequenze per ottenere l'accelerazione subita dalla struttura nel punto di misura durante la prova. Derivare nel dominio delle frequenze significa moltiplicare lo spettro per ω^2 ad ogni frequenza interessata dallo spettro come mostrati in Equazione 2.2.6.2.

$$Acc(\omega) = spost(\omega) * \omega^2 = spost(\omega) * (2 * \pi * f)^2$$

Equazione 2.2.6.2

Applicando la relazione precedente si ottiene il modulo dello spettro del segnale in accelerazione come mostrato in Figura 4.4.8.

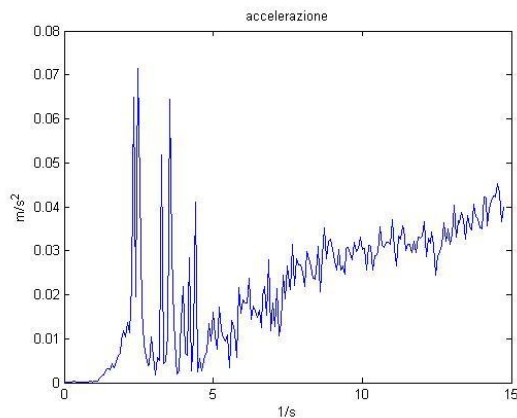


Figura 4.4.8 Spettro del segnale in accelerazione

Come si nota dal grafico l'operazione di doppia derivazione accentua il rumore ad alta frequenza, ciò è dovuto al fatto che lo spettro viene moltiplicato per il quadrato di ω , e dunque va con il quadrato della frequenza in analisi.

Successivamente si confrontano i dati ricavati con quelli ottenuti dall'accelerometro posto in direzione verticale. L'accelerometro ha campionato la prova ad una frequenza di 64Hz. La presenza dell'accelerometro oltre a permettere il confronto dei dati ottenuti consente di verificare l'assenza di eventuali frequenze proprie situate oltre i 14 Hz che potrebbero creare problemi di aliasing nell'analisi dei dati video.

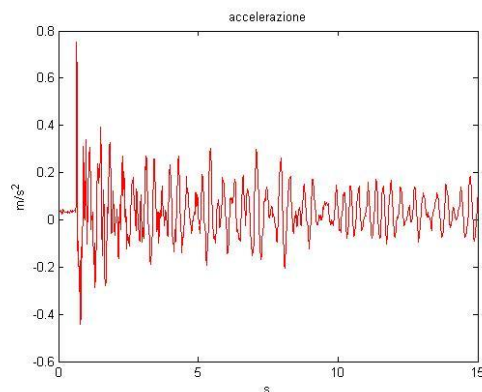


Figura 4.4.9 Accelerazioni misurate dall'accelerometro

I dati dell'accelerometro vengono convertiti nel dominio delle frequenze in modo da poter confrontare i dati ottenuti con i dati video analizzati in precedenza. La conversione viene effettuata tramite l'analisi di Fourier e viene rappresentato solamente il modulo dello spettro ottenuto.

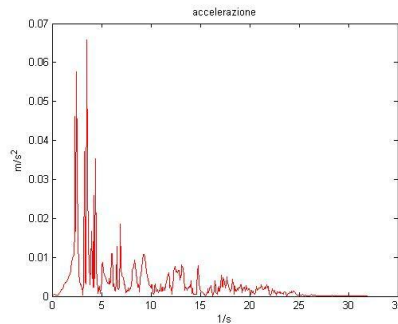


Figura 4.4.10 Modulo dello spettro dei dati accelerometrici

Osservando la Figura 4.4.10 si nota che il modulo delle armoniche a bassa frequenza corrisponde con i dati ricavati dal video, proviamo a confrontare i dati sovrapponendoli.

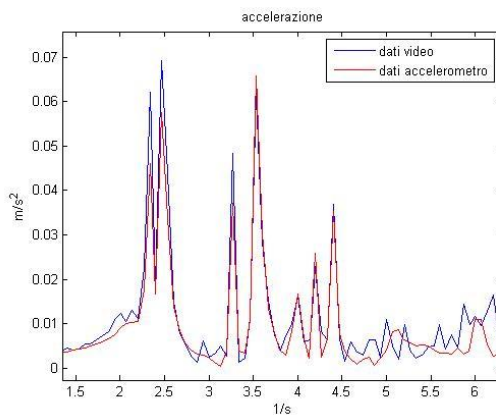


Figura 4.4.11 Confronto dati in accelerazione tra video e accelerometro

In Figura 4.4.11 si nota chiaramente che i dati ottenuti dalle due tecniche corrispondono per armoniche di frequenza inferiore a 5 Hz, per le armoniche superiori i dati tendono a discostarsi. Il fenomeno descritto è dovuto all'operazione di derivata nel dominio delle frequenze che accentua il rumore ad alta frequenza. Derivando i dati ottenuti dal video per convertirli da spostamenti ad accelerazioni si accentua il rumore, essendo il segnale molto basso in ampiezza in quel range di frequenze il fenomeno risulta più evidente.

In seguito viene eseguita ora un'operazione simile alla precedente, al fine di confrontare i dati in spostamento. I dati accelerometrici vengono integrati in modo da ottenere i dati in spostamento. L'operazione di integrazione nel dominio delle frequenze si effettua dividendo il segnale in accelerazione per il quadrato di ω come mostrato in Equazione 2.2.6.3.

$$Spost(\omega) = \frac{Acc(\omega)}{\omega^2} = \frac{Acc(\omega)}{(2 * \pi * f)^2}$$

Equazione 2.2.6.3

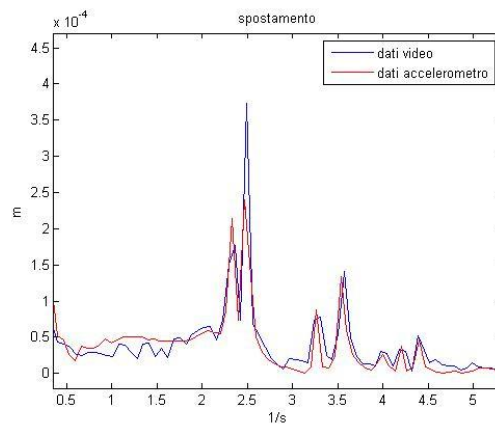


Figura 4.4.12 Confronto tra accelerometro e video in spostamento

In Figura 4.4.12 si osserva che i dati del video e dell'accelerometro evidenziano le stesse frequenze proprie della struttura. A differenza del caso precedente integrando viene accentuato il rumore a bassa frequenza, questo fenomeno non disturba in modo determinante il segnale poiché a bassa frequenza il rumore è in modulo molto inferiore ai dati sensibili. In Figura 4.4.13 vengono confrontati i dati nel dominio del tempo in accelerazione; gli spostamenti ricavati tramite le tecniche video sono stati derivati tramite il metodo delle differenze finite.

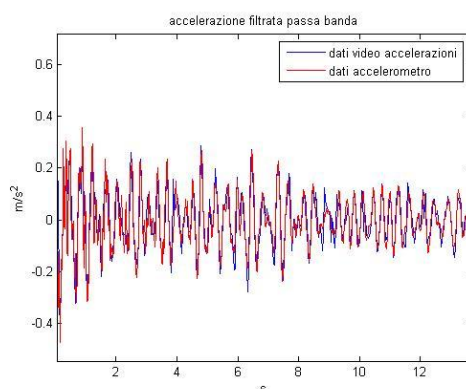


Figura 4.4.13 Dati video e accelerometro nel dominio del tempo

I dati in accelerazione confrontati nel dominio del tempo confermano quanto ricavato nel dominio delle frequenze, si denota un andamento comune ottenuto dalle 2 tecniche, il dato video è più rumoroso ciò è dovuto alla derivazione per lo stesso fenomeno descritto nel dominio delle frequenze.

In seguito verranno analizzati i dati ottenuti dalla videocamera a colori e confrontiamoli con quelli ricavati in precedenza. Per l'analisi dei dati della telecamera Sony è stato utilizzato il pattern raffigurato in Figura 4.4.14.



Figura 4.4.14 Pattern utilizzato per l'analisi dei dati ottenuti dalla telecamera Sony

I dati ottenuti sono rappresentati in Figura 4.4.15 confrontati con quelli ottenuti dalla telecamera precedente.

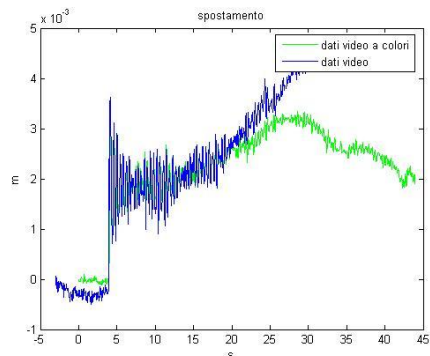


Figura 4.4.15 Confronto dati ricavati dai video

Come si può notare dopo circa venti secondi dalla rottura i dati differiscono in modo significativo, questo è dovuto principalmente a disturbi a bassa frequenza che modificano il segnale. La natura dei disturbi a bassa frequenza in questo caso è dovuta a movimenti incontrollati delle telecamere. Applichiamo ai segnali un filtro passa-alto per eliminare questi disturbi e confrontare il segnale acquisito.

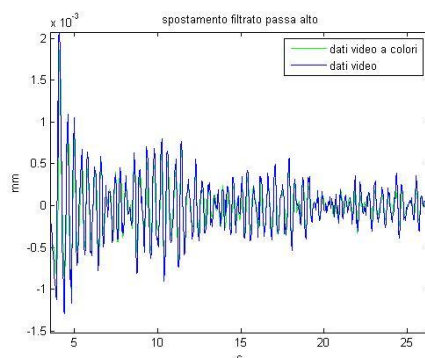


Figura 4.4.16 Confronto segnale filtrato dei video

Eliminando i disturbi a bassa frequenza emerge il segnale effettivamente misurato. Ripetendo le operazioni compiute sui dati ottenuti dal video precedente si ricavano gli spettri in spostamento ed accelerazione per i dati ottenuti dalla telecamera Sony.

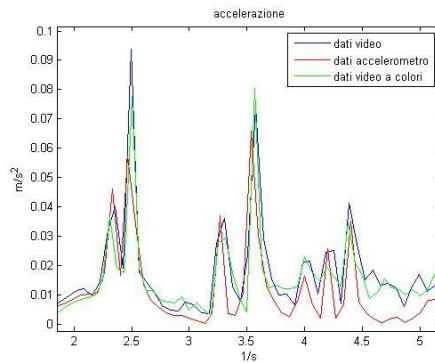


Figura 4.4.17 Confronto spettri video e accelerometro

Lo spettro mostra come i dati ottenuti dalle tre tecniche evidenziano risultati simili come descritto in Figura 4.4.17.

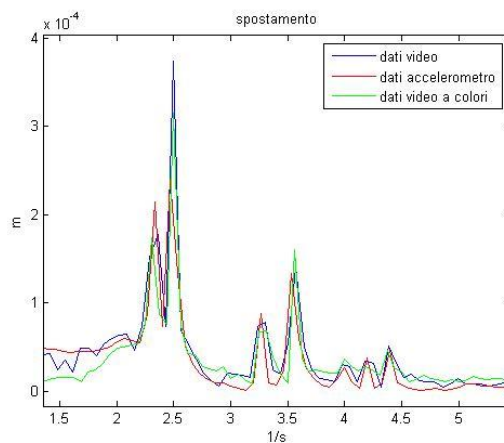


Figura 4.4.18 Confronto spettri in spostamento

4.5. Analisi dei dati: Edge detection

I dati ottenuti tramite la prova descritta nel paragrafo 4.3 sono stati successivamente analizzati utilizzando l'edge detection. Elaborando le medesime immagini tramite tecniche differenti ha permesso di valutare l'influenza dell'algorithmo nella misura. La misura tramite edge detection è stata effettuata valutando gli spostamenti verticali della flangia mostrata in Figura 4.5.1.

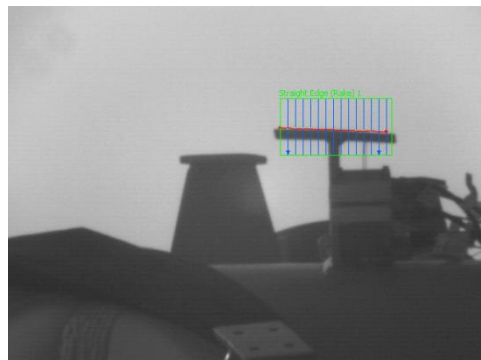


Figura 4.5.1 Localizzazione dell'edge della flangia

La scelta del punto di misura è ricaduta sulla flangia poiché è saldata alla struttura quindi ne rispecchia gli spostamenti. Un ulteriore motivo che ha influenzato la scelta della flangia come target è che se ne conoscono le dimensioni in modo da poter tarare il sistema di misura inoltre il contrasto con lo sfondo rende il bordo un ottimo edge da individuare.

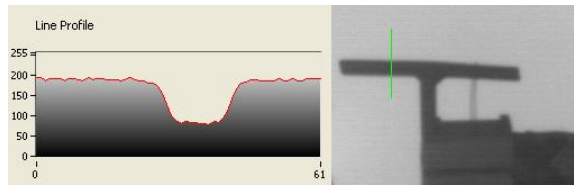


Figura 4.5.2 Profilo di luminosità dell'edge analizzato

La tecnica prevede di misurare la posizione dell'edge lungo la direzione verticale. La posizione dell'edge viene determinata in ogni colonna di pixel dell'immagine che lo raffigura. La posizione dell'edge effettiva viene ricavata mediando le posizioni ottenute in precedenza dalle colonne di pixel. Dall'analisi fatta derivano i dati riportati in Figura 4.5.3.

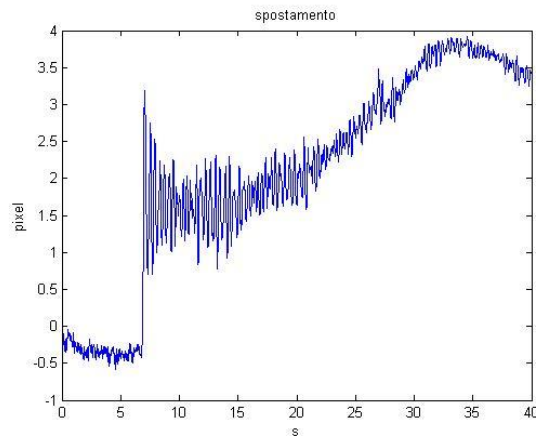


Figura 4.5.3 Dati ottenuti tramite l'edge detection

La taratura del sistema avviene come nel caso del pattern matching individuando un oggetto di dimensione nota e rapportandola alla misurazione effettuata in pixel come descritto in Equazione 2.2.6.1. L'oggetto di cui si conosce lo spessore è la flangia mostrata in Figura 4.5.4. Anche nel caso dell'edge detection si è scelto di non inserire un target per la taratura del sistema in modo da considerare il caso in cui non si possa intervenire sull'oggetto da misurare.

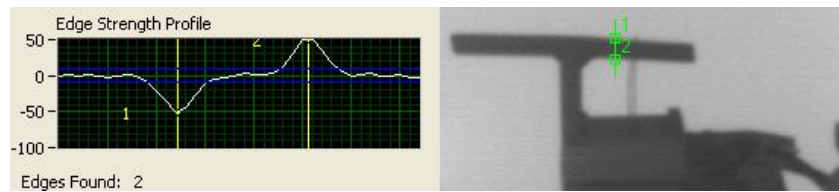


Figura 4.5.4 Taratura edge detection

Una volta tarato il sistema si effettua un'analisi in frequenza del segnale come fatto nel caso del pattern matching.

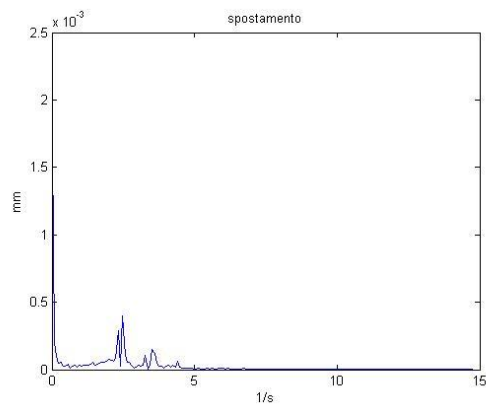


Figura 4.5.5 Modulo dello spettro del segnale ottenuto tramite l'applicazione dell'edge detection ai dati ottenuti tramite la telecamera Marlin

Lo spettro ottenuto copre un range di frequenze che va da 0 a 14.8 ovvero la metà della frequenza di campionamento utilizzata per acquisire i dati. Valutiamo ora lo spettro in accelerazione applicando l'Equazione 2.2.6.2.

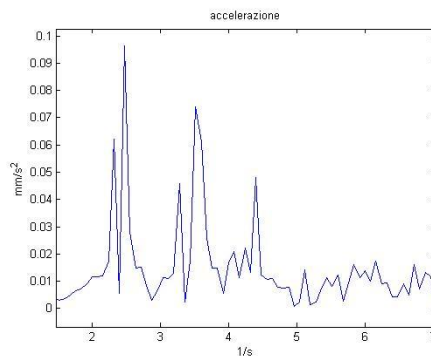


Figura 4.5.6 Modulo dello spettro in accelerazione

Come nel caso precedente l'operazione di derivazione accentua il rumore ad alta frequenza. Per valutare l'attendibilità dei dati si confrontano con quelli ottenuti per mezzo dell'accelerometro.

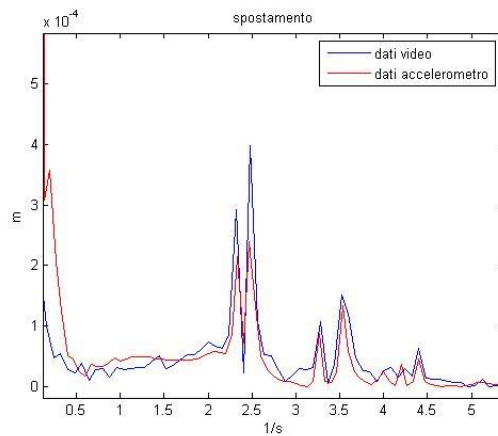


Figura 4.5.7 Confronto spettro dati video e accelerometro in spostamento

Sia i dati accelerometrici che quelli ottenuti dall'edge detection individuano le stesse frequenze di risonanza della struttura. I dati video rendono difficoltoso il riconoscimento dei due picchi a basso modulo posti oltre i 4 Hz, mentre nei dati accelerometrici dove questi picchi risultano più evidenti. Per completezza vengono confrontati anche gli spettri in accelerazione.

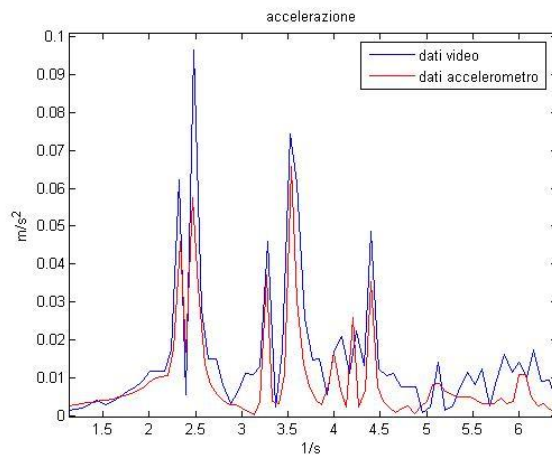


Figura 4.5.8 Confronto in accelerazione tra i dati video e quelli accelerometrici

Al fine di verificare l'attendibilità della tecnica si valutano i dati ottenuti tramite la telecamera Sony analizzati mediante l'edge detection. Per la misura si sceglie la flangia in Figura 4.5.9 che presenta un edge molto marcato.

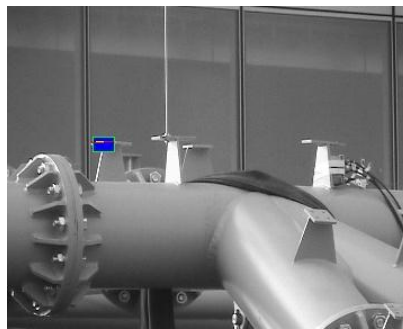


Figura 4.5.9 Edge detection telecamera Sony

Per la taratura si utilizza la tecnica mostrata in precedenza per analizzare i dati ricavati tramite la telecamera Marlin. L'accuratezza della taratura decresce in questo caso poiché i bordi non sono ben definiti ma presentano delle ombre che ne complicano l'individuazione esatta, inoltre la distanza tra l'edge e la telecamera varia lungo la direzione del bordo rendendo impossibile l'individuazione di un parametro singolo di taratura.

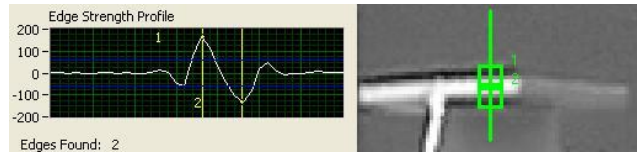


Figura 4.5.10 Individuazione degli edge per la taratura

In Figura 4.5.11 si osservano i dati ottenuti tramite il video a colori confrontati con le misure effettuate sul video in bianco e nero.

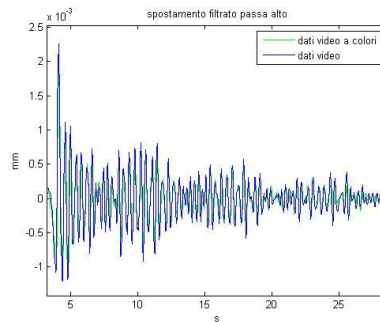


Figura 4.5.11 Dati ottenuti dai video confrontati

I dati mostrati in Figura 4.5.11 evidenziano uno spostamento misurato confrontabile tra le due telecamere. Le piccole variazioni nei dati sono dovute principalmente a errori di taratura ed a rumore a bassa frequenza. Successivamente si rappresentano gli spettri ottenuti dai video e dall'accelerometro.

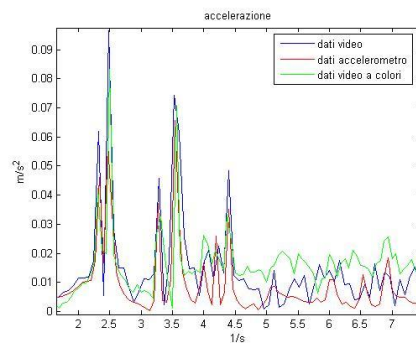


Figura 4.5.12 Modulo dello spettro rappresentato in accelerazione

I picchi a bassa frequenza vengono individuati correttamente da tutte le tecniche. Ad alta frequenza nelle tecniche video il rumore viene amplificato come descritto nel caso precedente.

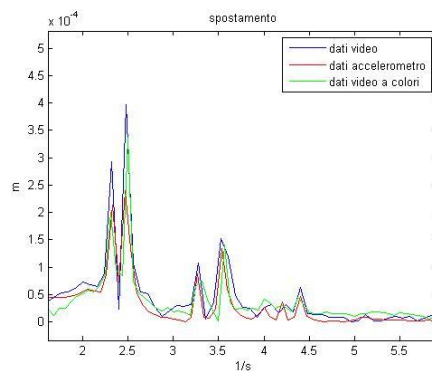


Figura 4.5.13 Modulo dello spettro rappresentato in spostamento

In Figura 4.5.13 si nota in modo chiaro come i picchi degli spettri corrispondano riuscendo ad individuare le frequenze di risonanza della struttura eccitata in direzione verticale.

4.6. Analisi dei dati: Blob detection

I filmati ottenuti sono stati analizzati tramite la tecnica di Blob detection al fine di valutare l'attendibilità della tecnica nell'applicazione descritta in precedenza. I blob utilizzati per il tracciamento della posizione della struttura sono i fori evidenziati in Figura 4.6.1.

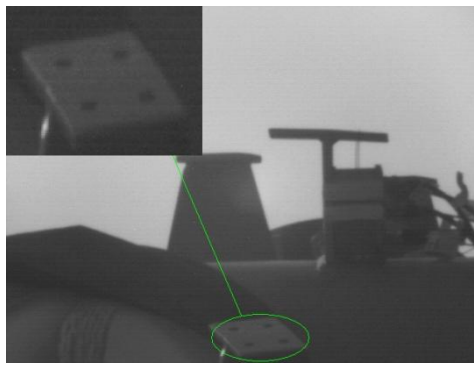


Figura 4.6.1 Fori utilizzati come blob per l'analisi

Dall'immagine si nota che i fori sono di piccole dimensioni, per ottenere una misura confrontabile con le altre tecniche si è optato per tracciare le posizioni dei quattro fori contemporaneamente in modo da avere una misura più robusta.

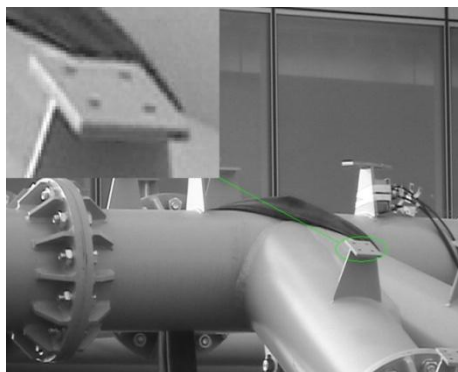


Figura 4.6.2 Blob telecamera Sony

Per i filmati ottenuti con la telecamera Sony non è stato possibile misurare lo spostamento mediante blob detection poiché avendo una risoluzione pixel/mm inferiore alla telecamera Marlin non si ottiene sufficiente precisione nella determinazione della posizione dei blob.

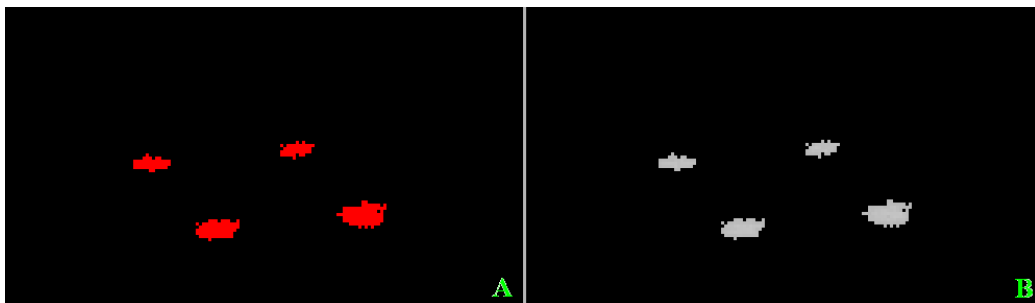


Figura 4.6.3 Determinazione dei blob

I blob vengono selezionati mediante un'operazione di sogliatura e filtrati in funzione della percentuale di area in pixel che occupano nell'intera immagine (Figura 4.6.3 A). L'immagine viene invertita in modo da avere blob "chiari". Per individuare la posizione dei fori si fa una media della posizione di ogni singolo pixel selezionato pesandola con l'intensità di grigio che lo caratterizza (Figura 4.6.3 B).

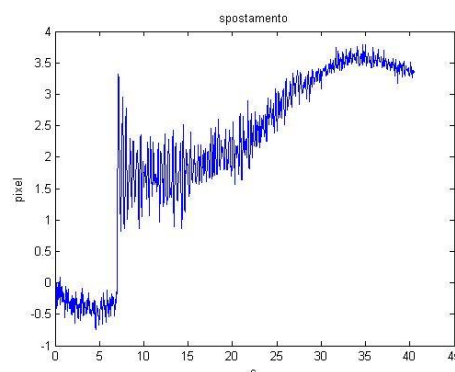


Figura 4.6.4 Dati ottenuti dall'analisi dei blob

I dati estratti dall'elaborazione del filmato sono mostrati in Figura 4.6.4. Per convertire i dati in pixel è stato utilizzato lo stesso fattore utilizzato nel caso del pattern matching poiché la taratura sulla piastra di misura sarebbe stata difficoltosa, la distanza tra le due misurazioni inoltre è molto inferiore a quella tra telecamera e punti di misura per cui l'errore di taratura dovuto alla non corretta collocazione si può considerare trascurabile. Analizzando i dati in frequenza si ottiene lo spettro mostrato in Figura 4.6.5.

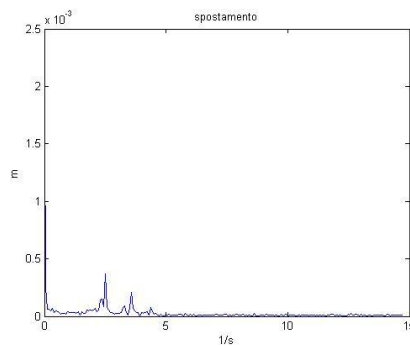


Figura 4.6.5 spettro dei dati analizzati mediante blob analisi

Dalla figura si denota che vi sono maggiori difficoltà nell'individuare i picchi di risonanza rispetto agli spettri ottenuti nei casi precedenti.

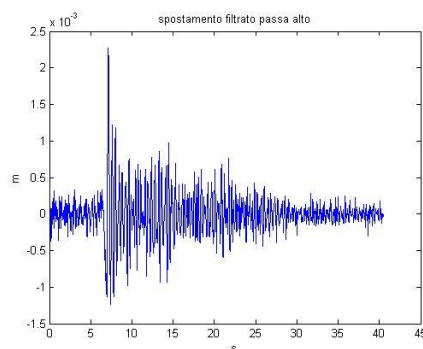


Figura 4.6.6 segnale filtrato passa alto

In Figura 4.6.6 viene mostrato il segnale filtrato per eliminare il rumore a bassa frequenza. Il segnale presenta molto più rumore rispetto a quello analizzato tramite le altre tecniche. Per completezza osserviamo lo spettro in accelerazione.

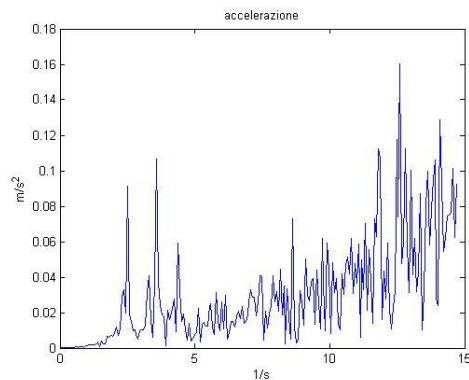


Figura 4.6.7 spettro del segnale in accelerazione

Anche nello spettro rappresentato in accelerazione si notano delle discordanze rispetto ai segnali misurati in precedenza. Per verificare l'attendibilità del segnale confrontiamolo con quello ottenuto dagli accelerometri.

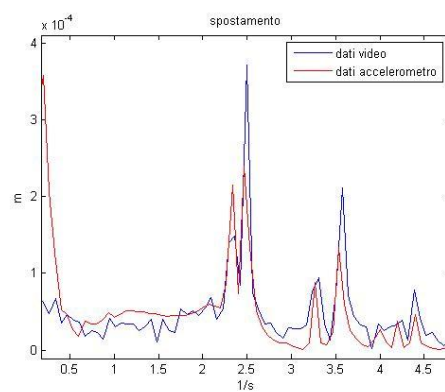


Figura 4.6.8 Confronto spettro del segnale tra accelerometri e blob detection

Come si può notare l'algorithmo individua i picchi di interesse in frequenza, mentre in modulo ne sottostima alcuni e sovrastima altri. Nel paragrafo successivo verrà trattata un'analisi quantitativa sulla bontà dei dati ottenuti tramite le tre tecniche video descritte.

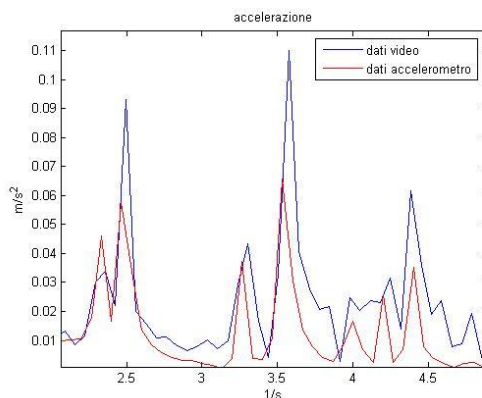


Figura 4.6.9 Confronto spettro del segnale tra accelerometri e blob detection in accelerazione

4.7. Confronto tra le tecniche

Per valutare l'efficienza delle tecniche analizzate (pattern matching, edge detection e blob analisi) sono stati confrontati i risultati con quelli ottenuti tramite gli accelerometri. Si è scelto di utilizzare gli accelerometri per la validazione delle tecniche perché sono strumenti molto utilizzati in applicazioni di questo tipo e quindi se ne conoscono approfonditamente le caratteristiche di misura. Valutiamo ora la differenza tra il modulo dello spettro in spostamento ottenuto con il pattern matching e il modulo dello spettro derivato dagli accelerometri. È stato valutato lo scostamento tra i moduli degli spettri confrontati, in modo da ottenere un'indicazione riguardante l'entità delle discrepanze in gioco.

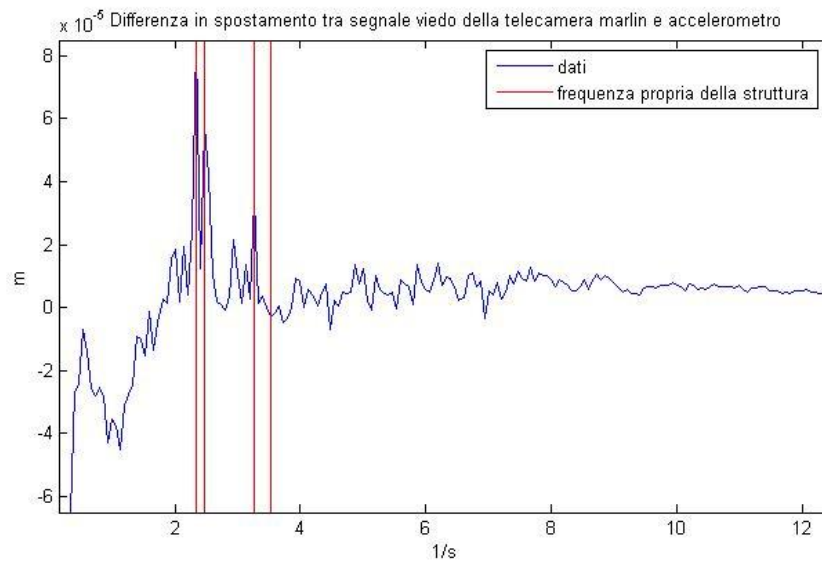


Figura 4.7.1 Differenza tra lo spettro ottenuto tramite il pattern matching applicato al video della telecamera Marlin e spettro ottenuto dall'accelerometro

Come si denota dalla Figura 4.7.1 la differenza massima in modulo resta al di sotto di 0.1 mm. Dalla trattazione si esclude il picco nell'origine dove gli errori sono maggiori, e sono dovuti principalmente all'errato posizionamento medio della storia temporale ed al rumore a bassa frequenza presente nei dati ottenuti dai video. Il valore massimo di differenza si ha nella zona dei picchi di risonanza della struttura, per le frequenze distanti dalla risonanza il valore di differenza decresce con il modulo degli spettri. Viene valutata ora la differenza del modulo dello spettro per i dati ottenuti mediante la telecamera Sony.

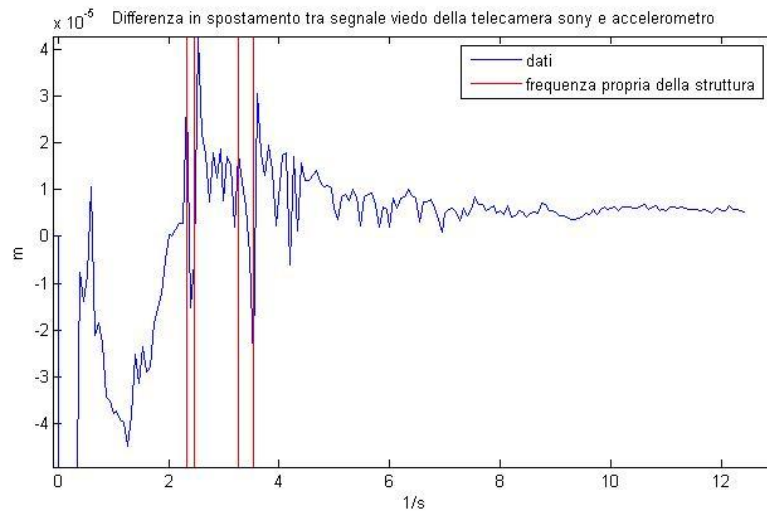


Figura 4.7.2 Differenza tra spettro pattern matching applicata al video della telecamera Sony e spettro ottenuto dall'accelerometro

In questo caso viene evidenziata una minore differenza puntuale nella zona di risonanza ma una maggiore discrepanza complessiva lungo il range di frequenze che va da 0 a 8 Hz. In Figura 4.7.3 vengono rappresentati i dati ottenuti in accelerazione.

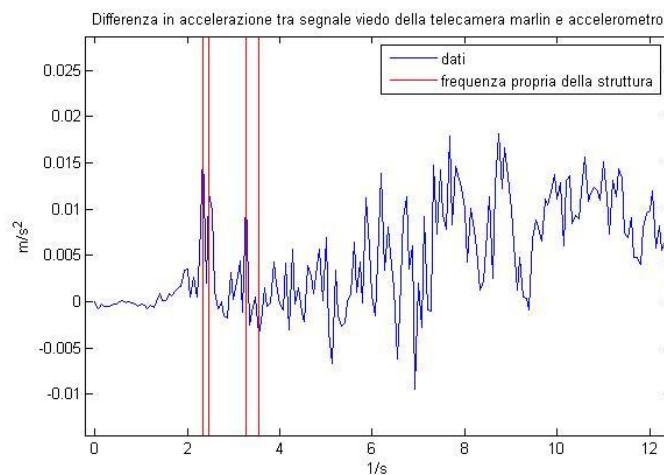


Figura 4.7.3 Differenza tra spettro in accelerazione del pattern matching applicata al video della telecamera Marlin e spettro ottenuto dall'accelerometro

La differenza tra gli spettri eseguita sui dati in accelerazione evidenzia il rumore ad alta frequenza acquisito dai video. Nel caso in analisi dovendo convertire i dati da spostamento ad accelerazione viene significativamente incrementato il rumore presente nei dati ad alta frequenza ovvero quello dovuto principalmente a errori nell'individuazione della posizione della struttura da parte della tecnica. Il rumore è comunque limitato visto che la differenza si mantiene vicino allo zero e presenta solo un lieve trend che va con il quadrato delle frequenze.

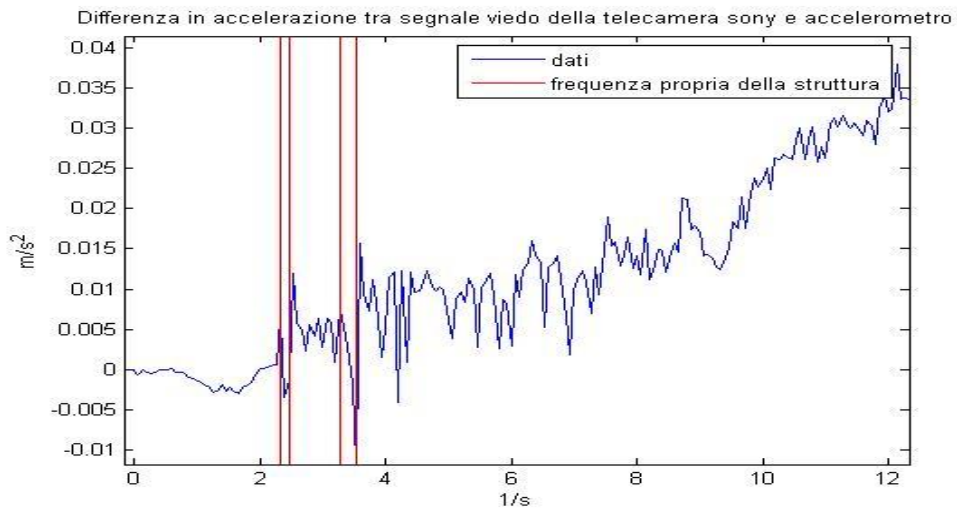


Figura 4.7.4 Differenza tra spettro in accelerazione del pattern matching applicata al video della telecamera Sony e spettro ottenuto dall'accelerometro

Nel caso della telecamera Sony è presente un trend dovuto al fatto che il modulo delle alte frequenze dello spettro in spostamento non si azzerava, la successiva operazione di derivazione comporta un'elevazione al quadrato della loro frequenza.

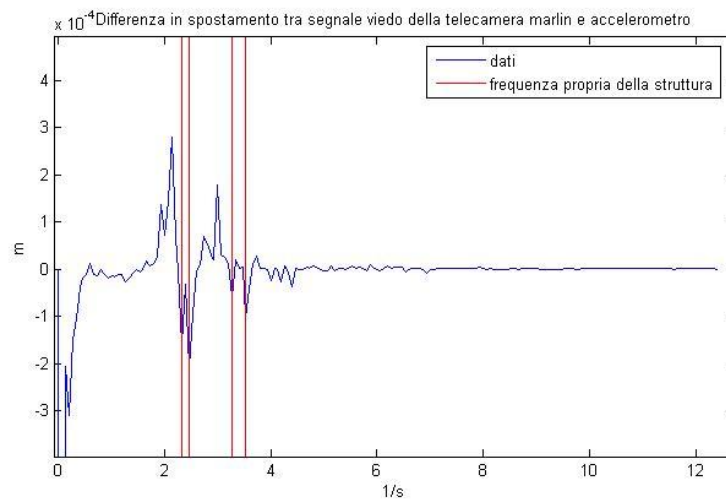


Figura 4.7.5 Differenza tra spettro dell'edge detection applicata al video della telecamera Marlin e spettro ottenuto dall'accelerometro

La differenza tra lo spettro derivato dall'edge detection e l'accelerometro è molto marcata nella zona di risonanza.

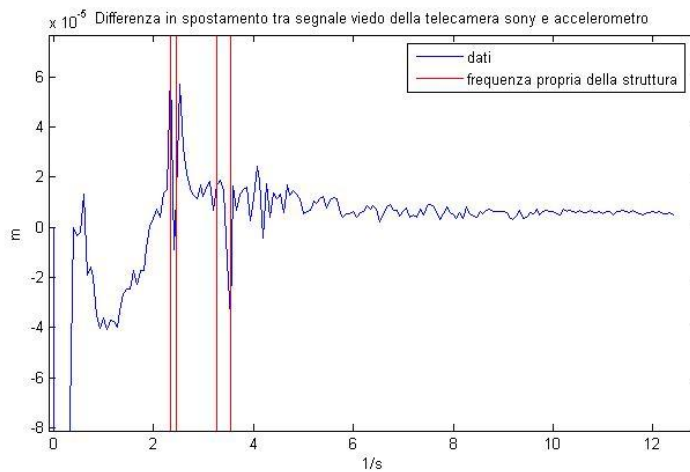


Figura 4.7.6 Differenza tra spettro edge detection applicata al video della telecamera Sony e spettro ottenuto dall'accelerometro

La tecnica applicata al video ottenuto dalla telecamera Sony presenta meno differenze puntuali con gli accelerometri rispetto al video acquisito tramite la telecamera Marlin.

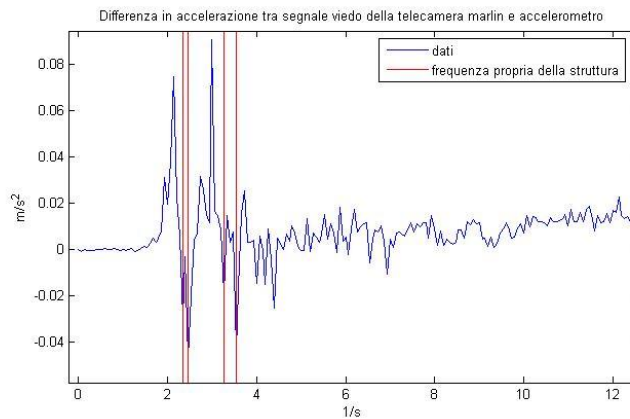


Figura 4.7.7 Differenza tra spettro in accelerazione del edge detection applicata al video della telecamera Marlin e spettro ottenuto dall'accelerometro

I dati sono rispecchiati nella differenziazione dello spettro in accelerazione, le differenze maggiori però continuano ad essere nella zona delle prime frequenze di risonanza.

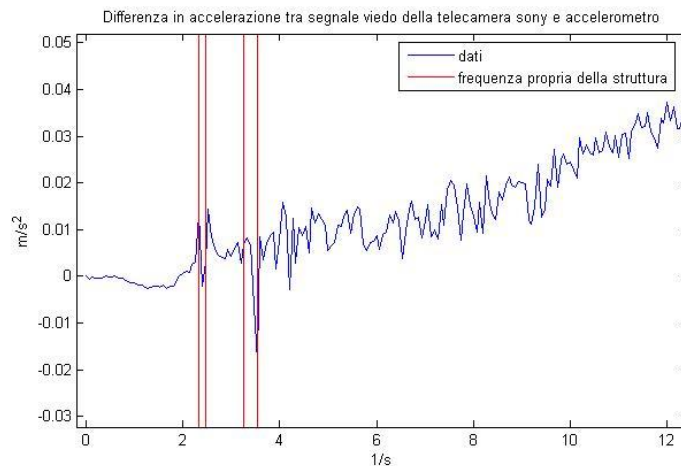


Figura 4.7.8 Differenza tra spettro in accelerazione del pattern matching applicata al video della telecamera Sony e spettro ottenuto dall'accelerometro

Nella Figura 4.7.8 al contrario della precedente la discrepanza maggiore si misura nella zona delle alte frequenze come visto per i dati analizzati mediante pattern matching. Di seguito verranno analizzati i dati ottenuti elaborando i video tramite la blob detection:

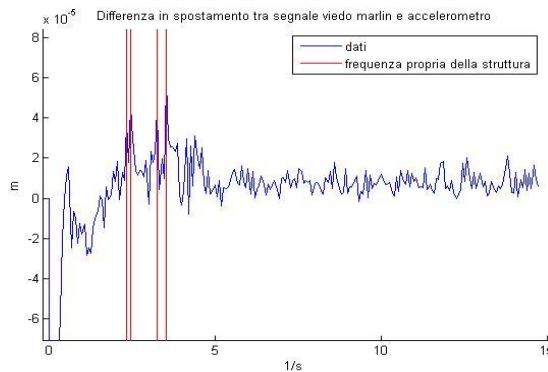


Figura 4.7.9 Differenza tra spettro Blob detection applicata al video della telecamera Marlin e spettro ottenuto dall'accelerometro

La differenza nella zona di risonanza è confrontabile con quella ottenuta per le tecniche precedenti a differenze del rumore ad alta frequenza sembra che sembra di entità superiore.

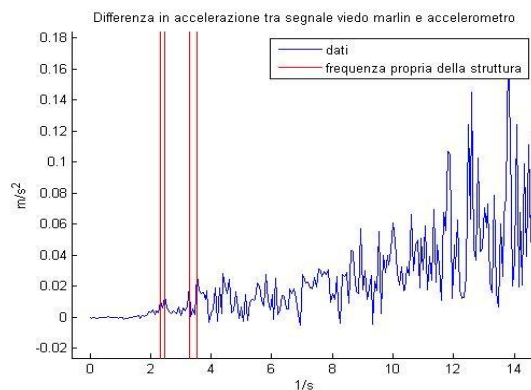


Figura 4.7.10 Differenza tra spettro in accelerazione del blob detection applicata al video della telecamera Marlin e spettro ottenuto dall'accelerometro

Come anticipato il rumore ad alta frequenza sembra più alto in modulo se paragonato ai dati analizzati precedentemente.

Per avere un'analisi quantitativa degli errori ottenuti analizzando le tecniche proposte si è calcolato l'RMS (Equazione 2.2.6.1) per ogni spettro ottenuto.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum (vid(f) - acc(f))^2}{N}}$$

Equazione 2.2.6.1

Dove vid sono i dati dello spettro ottenuto dai video in funzione della frequenza, acc sono i dati dello spettro ottenuti dall'accelerometro in funzione della frequenza, N è il numero di punti analizzato ed f è la frequenza considerata.

	Spostamento [m]	Accelerazione [m/s ²]
RMS blob	0.000263	0.0429
RMS edge	0.000291	0.0148
RMS pattern	0.000284	0.0073

Tabella 4.7.1 Dati di RMS per video telecamera Marlin

I dati ottenuti in spostamento sono poco attendibili perché fortemente influenzati dal picco nell'origine degli spettri, si sceglie quindi di analizzare i dati in accelerazione dove questo problema è attenuato. Confrontando i dati ottenuti dalle due telecamere si nota che quelli acquisiti tramite la telecamera Marlin presentano una discrepanza media inferiore rispetto a quelli ricavati dalla Sony. La migliore qualità dei dati acquisiti dalla telecamera Marlin è probabilmente dovuta al miglior rapporto pixel/mm a disposizione. Analizzando i video ripresi tramite la telecamera Sony non è possibile utilizzare la blob detection poiché la definizione dei blob non è sufficiente per l'elaborazione dei dati. Tramite quest'analisi si denota che il livello di definizione dell'immagine, rappresentato

dal rapporto pixel/mm, come è lecito attendersi influenza in modo determinante la qualità della misura effettuata.

	Spostamento [m]	Accelerazione [m/s ²]
RMS blob	-	-
RMS edge	0.000287	0.0169
RMS pattern	0.000288	0.0152

Tabella 4.7.2 Dati di RMS per video telecamera Sony

Confrontando le diverse tecniche in accelerazione si osserva che la misura effettuata mediante pattern matching comporta l'RMS minimo, seguita da edge detection e infine blob detection. Valutando l'RMS in spostamento si nota che tutte le tecniche presentano valori confrontabili, ciò è probabilmente dovuto al fatto che analizzando le immagini tramite blob detection ed edge detection cresce il rumore ad alta frequenza. Analizzando i dati a bassa frequenza si osserva come tutte le tecniche ottengono buoni risultati nell'individuazione delle prime frequenze proprie della struttura (Figura 4.4.17, Figura 4.5.13, Figura 4.6.8). L'utilizzo del pattern per analizzare i filmati è vantaggioso sia in funzione della qualità di misura sia per la semplicità di utilizzo. Per applicare il pattern matching ad un filmato è sufficiente individuare una zona di interesse non omogenea e univoca nell'immagine, le caratteristiche descritte sono molto comuni e facilmente individuabili rendendo la tecnica in analisi di notevole interesse. L'edge detection presenta un RMS superiore al pattern ma comunque di buona qualità. L'analisi di immagini attraverso la ricerca di bordi può essere difficoltosa in immagini che raffigurano un target omogeneo o con differenze di luminosità poco marcate. L'utilizzo della blob detection senza applicare un target di alcun tipo è molto più difficoltoso rispetto all'implementazione delle tecniche descritte in precedenza. Il blob deve essere di dimensioni adeguate e deve avere un intensità cromatica molto differente rispetto allo sfondo in modo da essere individuato con relativa semplicità. Ritrovare le caratteristiche descritte senza dover applicare un target alla struttura non è sempre possibile. La tecnica di blob detection è inoltre meno stabile delle precedenti poiché è influenzata in modo determinante dal valore di soglia che si ritiene opportuno utilizzare. In conclusione dall'analisi effettuata è emerso che il pattern matching offre migliori probabilità di riuscita in una misura di vibrazioni se non si ha la possibilità di applicare un target appositamente studiato, rispetto alle tecniche di

edge detection e blob detection. Tutte le tecniche hanno ottenuto un risultato attendibile, e possono comunque essere impiegate nella misura di vibrazioni conoscendone le caratteristiche.

5. Misure di vibrazioni mediante pattern matching

5.1. Introduzione

In questo capitolo valuteremo quantitativamente le misure di vibrazioni effettuate utilizzando tecniche di pattern matching. Le prove sono state svolte sulla struttura analizzata nel capitolo precedente eccitata in direzione orizzontale. Le misurazioni sono state eseguite con l'intento valutare vibrazioni tramite una telecamera ottimizzando la posizione di misura per l'utilizzo della tecnica di pattern matching. Le misure acquisite verranno poi confrontate con quelle ricavate da accelerometri opportunamente posizionati, ponendo particolare attenzione nell'analisi di vantaggi e svantaggi connessi alle due tecniche di misura.

5.2. Set di misura

Le misurazioni sono state eseguite applicando un carico a gradino prima lungo la direzione x e in un secondo momento in direzione y della struttura in Figura 5.2.1 descritta nel capitolo precedente. Sulla struttura a differenza di quanto descritto nel capitolo precedente è stato montato il telo in materiale polimerico che la riveste. La telecamera è stata posizionata nel punto A mostrato in Figura 5.2.1, puntata in direzione z in modo da riprendere la trave orizzontale più esterna della copertura (Figura 5.2.4) da una distanza di circa 12 m.

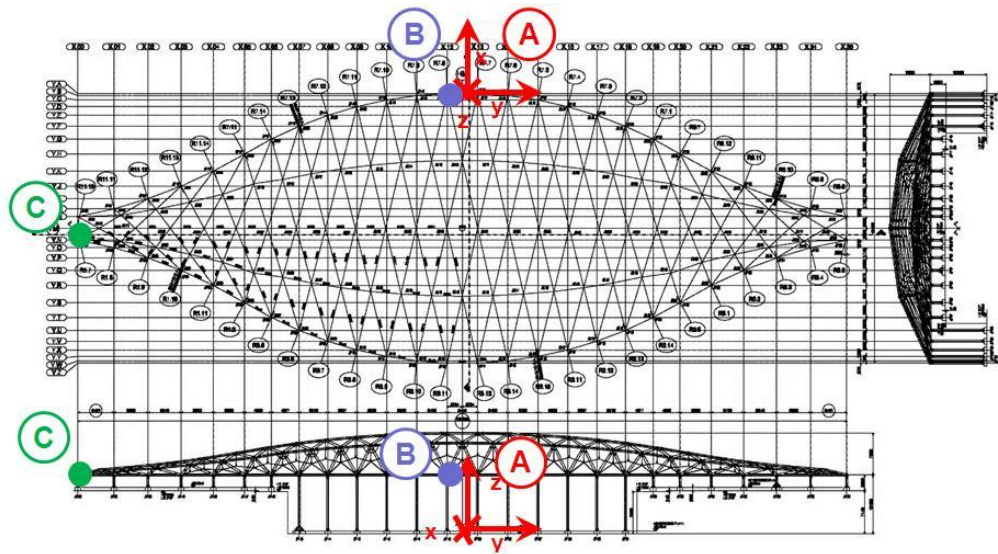


Figura 5.2.1 Schema della struttura su cui sono state eseguite le prove

Le prove in direzione x sono state effettuate applicando un carico a gradino nel punto B, mentre per quelle in direzione y il punto di applicazione del carico è C. La forzante è stata generata per mezzo di un pistone idraulico come mostrato in Figura 5.2.2 e in Figura 5.2.3. Sul pistone è stata montata una cella di carico che permette monitorare la forzante applicata al sistema.



Figura 5.2.2 Pistone oleodinamico utilizzato per applicare il carico in C



Figura 5.2.3 Pistone oleodinamico utilizzato per applicare il carico in B

Come per le misure effettuate nel capitolo precedente il carico a gradino è stato imposto interponendo dei provini di diametro noto tra il pistone e la cinghia legata alla copertura. I provini sono dimensionati per rompersi ad un carico noto, la forzante di rottura è stata inoltre verificata tramite la cella di carico. In corrispondenza del punto B è stato posto anche un accelerometro triassiale in modo da poter confrontare i dati ottenuti tramite la telecamera. Per la misura è stata utilizzata una telecamera HD CANON Legria HF 21 che monta un sensore di tipo CMOS da 1/4" e riprende immagini a colori da 1920X1080 pixel a 25 Hz. L'obiettivo integrato nella telecamera di tipo zoom 15x ($f=4,1-61,5$ mm) utilizzato nelle prove in esame a lunghezza focale massima. Si è scelto di monitorare la struttura a zoom massimo per ottenere una misura di spostamento quanto più accurata possibile.



Figura 5.2.4 Area inquadrata dalla telecamera

5.3. Analisi dei dati

I filmati sono stati ottenuti riprendendo immagini ad una frequenza di 25 Hz. Le immagini sono state analizzate mediante la tecnica di pattern matching utilizzando come pattern da tracciare quello mostrato in Figura 5.3.1. Si è scelto il pattern in Figura 5.3.1 poiché inquadra numerosi edge appartenenti alla trave da tracciare, minimizzando così gli errori connessi alla tecnica.

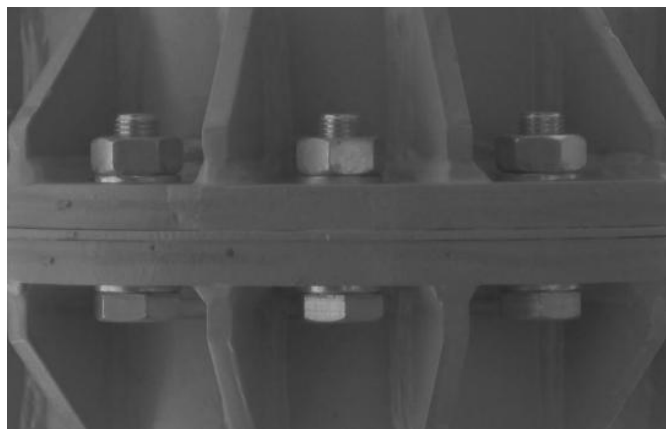


Figura 5.3.1 Pattern utilizzato per analizzare i filmati

Analizzando il video derivato dalla prova effettuata il giorno 19/04/2010 con carico massimo di 4.14 tonnellate si ottengono i dati di spostamento mostrati in Figura 5.3.2.

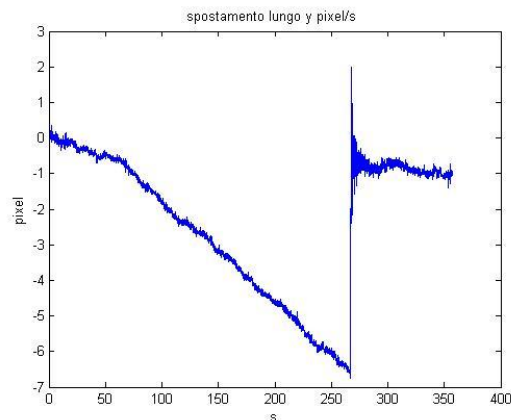


Figura 5.3.2 Spostamento misurato durante la prova in analisi

I dati raffigurati evidenziano una zona di carico della struttura negli attimi precedenti alla rottura del provino a circa 267 secondi dall'inizio dell'acquisizione. Negli istanti successivi alla rottura è possibile misurare il moto libero smorzato della struttura. Per poter quantificare lo spostamento espresso in pixel è necessario tarare il sistema. La taratura è stata eseguita misurando il perimetro della sezione circolare della trave tracciata tramite un metro, noto il perimetro eseguendo una semplice analisi geometrica si è ricavato il diametro di quest'ultima in mm.



Figura 5.3.3 Determinazione del diametro della trave in pixel

Per ottenere il diametro misurato dalla telecamera in pixel è sufficiente effettuare un edge detection sull'immagine come mostrato in Figura 5.3.3.

$$Rapp = \frac{\text{pixeldiametro}}{\text{mmdiametro}}$$

Equazione 2.2.6.1

Dal rapporto tra i due valori si ottiene il parametro per convertire le misurazioni precedentemente effettuate da pixel a mm come descritto in Equazione 2.2.6.1. Per ottenere il segnale in mm è sufficiente dividere ogni punto misurato in pixel per il parametro ricavato in precedenza. La Figura 5.2.3 mostra il segnale ottenuto tramite la tecnica di pattern matching convertiti in m. Analizzando il moto libero del sistema nel dominio delle frequenze si ottiene il grafico mostrato in Figura 5.3.5.

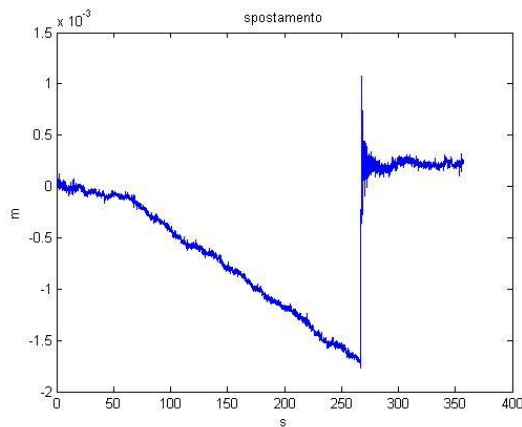


Figura 5.3.4 Spostamento misurato dalla telecamera in mm.

Dalla figura si ricavano facilmente le frequenze delle armoniche del segnale. I picchi del modulo dello spettro del segnale, ottenuto analizzando il moto libero

della copertura, corrispondono alle frequenze proprie del sistema, nel caso in analisi vi sono due picchi evidenti a 1.7 ed a 2.3 Hz.

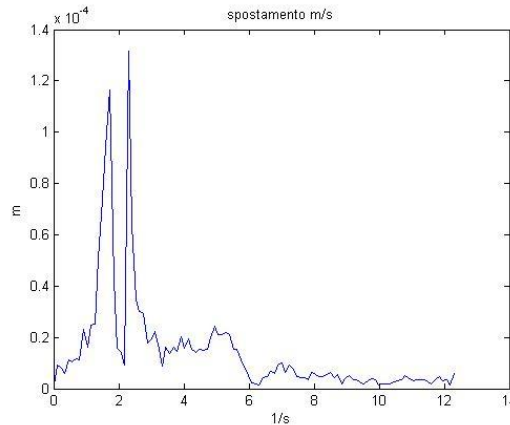


Figura 5.3.5 Spettro del segnale in spostamento

Per poter confrontare il segnale con quello ottenuto tramite gli accelerometri è necessario compiere un'operazione di doppia derivazione. La derivazione del segnale può essere fatta nel dominio delle frequenze tramite una semplice moltiplicazione come descritto in Equazione 2.2.6.2.

$$Acc(\omega) = spost(\omega) * \omega^2 = spost(\omega) * (2 * \pi * f)^2$$

Equazione 2.2.6.2

Come ampiamente documentato nei capitoli precedenti derivando il segnale nel dominio delle frequenze si eleva a potenza il rumore presente nel segnale. In Figura 5.3.6 si osserva che il rumore ad alta frequenza è effettivamente aumentato rispetto al segnale rappresentato in spostamento, durante l'analisi e il confronto con gli accelerometri dovremo tener conto di questo inconveniente per evitare di incorrere in errori di valutazione.

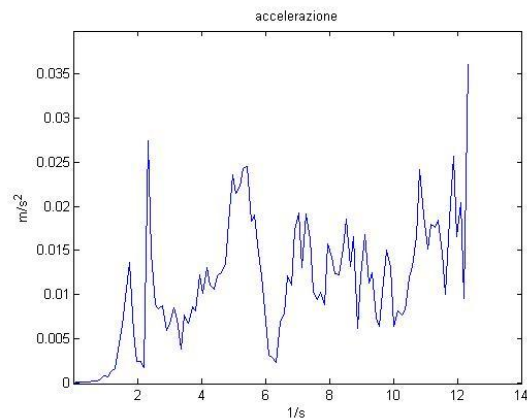


Figura 5.3.6 Modulo dello spettro del segnale in accelerazione

Per verificare la misura effettuata mediante la telecamera la confrontiamo con quella ottenuta tramite gli accelerometri. In Figura 5.3.7 si osserva che il segnale prima dell'istante di rottura del provino è nullo, questo avviene perché l'accelerometro non è sensibile alle accelerazioni di breve entità causate dallo spostamento dovuto al carico crescente applicato alla struttura.

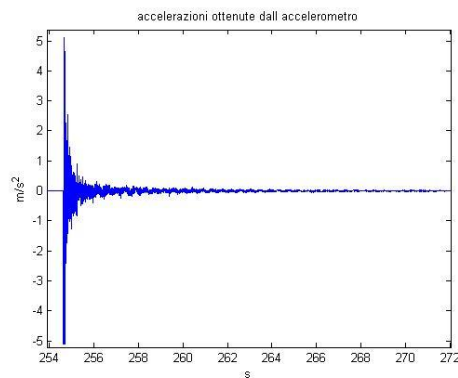


Figura 5.3.7 Segnale misurato mediante l'accelerometro

In Figura 5.3.8 vengono rappresentati i dati accelerometrici espressi nel dominio delle frequenze.

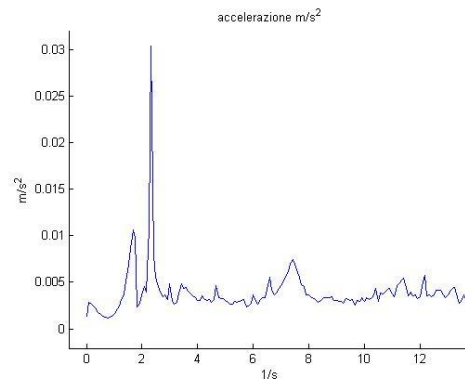


Figura 5.3.8 Modulo del segnale accelerometrico osservato nel dominio delle frequenze

Il segnale è composto da armoniche che raggiungono frequenze massime di circa 100 Hz. Il video ottenuto tramite la telecamera è stato campionato a 25 Hz permettendo di individuare armoniche che compongono il segnale non superiori a 12.5 Hz. La Figura 5.3.8 mostra che le frequenze che formano il segnale superano ampiamente i 12.5 Hz osservabili tramite il video, è quindi lecito aspettarsi del leakage all'interno degli spettri ricavati analizzando il segnale ottenuto mediante le telecamere.

Per poter eseguire un confronto con gli accelerometri vengono ricavati i dati video in accelerazione ottenuti derivando il segnale nel dominio del tempo.

$$Diff(x_t) = \frac{x_{t+1} - x_t}{d_t}$$

Equazione 2.2.6.3

Dove x_t è il segnale all'istante t e d_t è il tempo trascorso tra un'acquisizione e la successiva. Ripetendo l'operazione di derivazione per due volte sul segnale acquisito si ottiene l'accelerazione misurata mediante la telecamera.

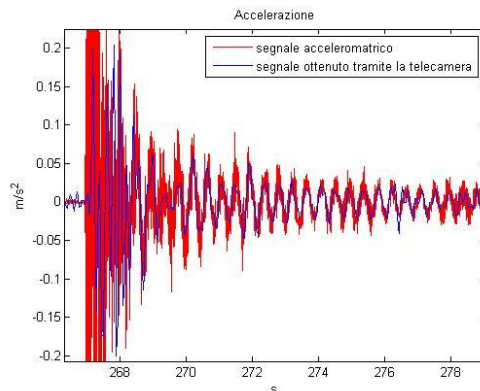


Figura 5.3.9 Rappresentazione del segnale in accelerazione

Il segnale accelerometrico rispecchia l'andamento del segnale video. La differenza tra i due segnali è dovuta al fatto che il segnale video campiona a 25 Hz e quindi non riesce ad acquisire in modo completo armoniche di frequenze superiori ai 12.5 Hz, mentre gli accelerometri, campionando a 2048 Hz, ottengono un segnale che può essere composto da armoniche che raggiungono i 1024 Hz. Proviamo a valutare i dati ottenuti nel dominio delle frequenze in modo da poter confrontare i dati accelerometri con quelli video.

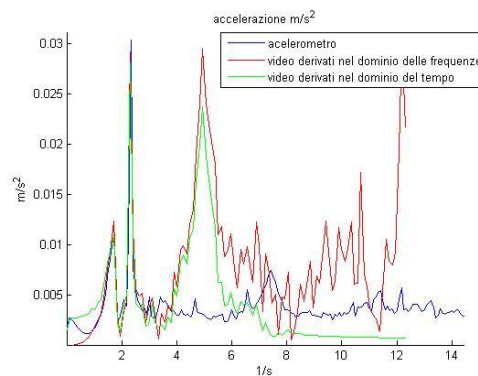


Figura 5.3.10 Dati in spostamento rappresentati nel dominio delle frequenze

In Figura 5.3.10 si osserva che i dati accelerometrici corrispondono ai dati video sino ad una frequenza di circa 4 Hz. Per le frequenze superiori ai 4 Hz i dati

video derivati mediante le due tecniche si scostano da quelli accelerometrici, questo è dovuto al fenomeno dell'aliasing. Per quanto riguarda il segnale video derivato nel dominio delle frequenze all'aliasing viene sommato l'incremento di rumore dovuto alla derivazione. Per ovviare a questo inconveniente si dovrebbe filtrare il segnale durante l'acquisizione, per quanto riguarda le telecamere in ipotesi verosimile per effettuare quest'operazione è aumentare il tempo di esposizione nell'acquisizione delle immagini in modo da "mediare" le alte frequenze del segnale.

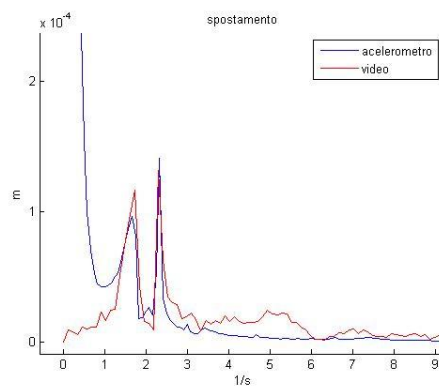


Figura 5.3.11 Confronto nel dominio delle frequenze del segnale in spostamento

Confrontando il segnale in spostamento le imprecisioni dovute all'aliasing sono molto meno evidenti poiché non è stata eseguita l'operazione di doppia derivazione necessaria per ottenere le accelerazioni. In Figura 5.3.11 si nota che le frequenze proprie della struttura si individuano chiaramente con entrambe le tecniche. I due spettri si scostano per frequenze inferiori ad 1 Hz, questo perché il segnale dell'accelerometro risulta impreciso a bassa frequenze per via della doppia integrazione eseguita sul segnale.

5.4. Test sull'affidabilità della tecnica a distanze elevate

Al fine di verificare l'attendibilità della tecnica quando utilizzata per applicazioni che necessitano di distanze di acquisizione superiore, è stata effettuata una prova con le medesime caratteristiche di quella analizzata in precedenza posizionando la telecamera a circa 50 m dal target da riprendere. La configurazione di carico della struttura è la stessa utilizzata per le prove effettuate a 12 m di distanza. Si è deciso di riprendere la medesima trave ripresa in precedenza in modo da valutare solamente l'effetto della distanza nella misura.



Figura 5.4.1 Immagine ripresa dalla telecamera durante la misura

Poiché la struttura poggia sul palazzo sottostante non è stato possibile riprendere la trave posizionando la telecamera in posizione verticale, ma si è dovuto inclinare di alcuni gradi l'asse ottico in modo da inquadrare il target acquisendo dalla "piazza delle città lombarde" situata sotto la copertura. La prova è stata eseguita applicando un carico massimo di 4110 Kg. Ripetendo le operazioni descritte in precedenza si ottiene la misura di spostamento in pixel rappresentata in Figura 5.4.2.

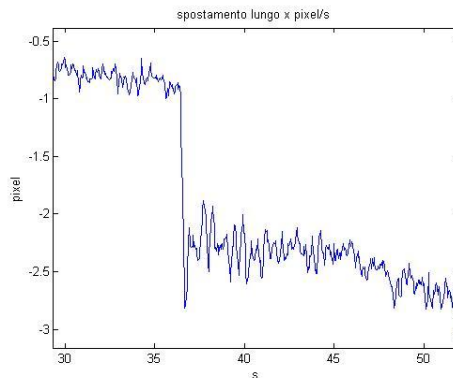


Figura 5.4.2 Spostamento in pixel

Come si evince dal grafico la misura di vibrazioni viene effettuata utilizzando spostamenti misurati di entità inferiore ad 1 pixel.

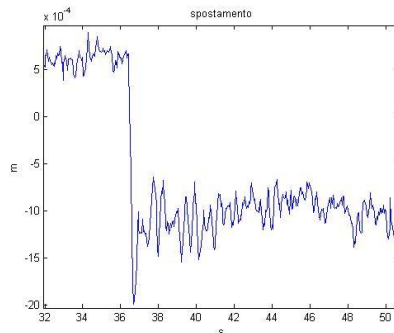


Figura 5.4.3 Spostamento misurato in mm

Quadruplicando la distanza di acquisizione aumenta di quattro volte il rapporto pixel/mm (passa da circa 0,3 nel caso precedente a circa 1,3), peggiorando la qualità della misura. In Figura 5.4.4 si confronta il modulo dello spettro del segnale video con quello accelerometrico come descritto nell'analisi fatta nel paragrafo precedente.

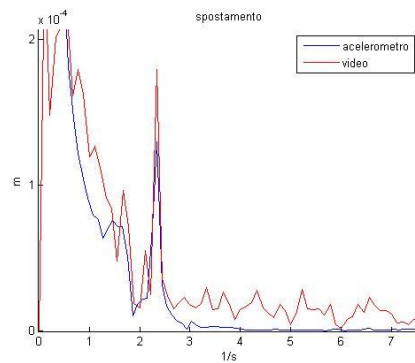


Figura 5.4.4 Modulo dello spettro dei segnali in analisi

Il segnale video è molto più disturbato rispetto ai casi precedenti, ma stima comunque in modo sufficientemente accurato la seconda frequenza della copertura. La prima frequenza propria misurata nelle prove precedenti viene coperta dal rumore del segnale, per visualizzarla proviamo a osservare il segnale rappresentato in accelerazione.

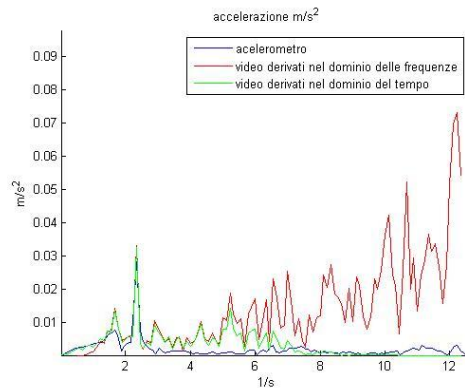


Figura 5.4.5 Modulo dello spettro dei segnali in analisi rappresentato in accelerazione

In Figura 5.4.5 si nota come nonostante la distanza considerevole rispetto agli spostamenti in gioco, l'analisi dei dati in frequenza sia comunque sufficientemente accurata. Per avere un parametro indicativo della qualità della misura valutiamo l'errore quadratico medio ottenuto confrontando lo spettro in accelerazione dei video e dell'acelerometro come descritto in Equazione 2.2.6.1.

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^N (err_i - \overline{err})^2}{N}$$

Equazione 2.2.6.1

Dove N è il numero di dati ed err è la differenza tra il modulo dello spettro dei dati accelerometrici ed il modulo dello spettro dei dati video. In Tabella 5.4.1 vengono rappresentati i dati di MSE ottenuti nelle varie prove.

MSE	Dati derivati in frequenza	Dati derivati in tempo
1° prova	2.6*10 ⁻⁵	4.4*10 ⁻⁶
2° prova	3.7*10 ⁻⁵	2.1*10 ⁻⁵
3° prova	3.6*10 ⁻⁵	1.7*10 ⁻⁵
4° prova	1.6*10 ⁻⁵	1.1*10 ⁻⁵
5° prova	1.9*10 ⁻⁵	1*10 ⁻⁵
Prova a 50 m	2*10 ⁻⁴	9.1*10 ⁻⁶

Tabella 5.4.1 MSE ricavati dalle sei prove

Dai dati ottenuti è evidente che aumentando la distanza la qualità della misura peggiora derivando il segnale nel dominio delle frequenze. I dati ottenuti derivando nel tempo non mostrano una decisa influenza della distanza nel calcolo del MSE. I dati confrontati nel dominio del tempo sono composti da tutte le frequenze che costituiscono il segnale. Il segnale accelerometrico presenta armoniche che il segnale video non è in grado di acquisire. Il calcolo della differenza tra i due segnali confrontati da cui deriva l'MSE è influenzato maggiormente dalla presenza di armoniche in eccesso da parte dei dati accelerometrici rispetto all'effettivo errore di misurazione. L'MSE non è quindi un parametro rappresentativo dell'errore di misurazione nei segnali confrontati nel dominio del tempo.

5.5. Vantaggi e svantaggi connessi alla tecnica

L'utilizzo di telecamere per misurare vibrazioni presenta numerosi vantaggi, di seguito verrà fatta un accurata analisi descrivendoli singolarmente.

5.5.1. Semplicità allestimento della prova

La prova in analisi come quelle eseguite nel capitolo precedente sono state eseguite senza compiere operazioni dirette sulla struttura. L'analisi di vibrazioni avrebbe potuto ottenere risultati migliori se avessimo posizionato target appositamente studiati sulla struttura; l'intento delle prove effettuate era di porci nella situazione peggiore in modo da dimostrare che, tramite delle semplici operazioni, e senza la necessità di apparecchiature altamente specializzate e costose si possono ottenere buoni risultati nella misura di vibrazioni.



Figura 5.5.1 Copertura inquadrata dalla piazza sottostante

Per l'acquisizione dei dati sono stati utilizzati solamente un cavalletto ed una videocamera, e si è inquadrata la struttura su cui non è stato necessario intervenire; per l'utilizzo degli accelerometri di controllo invece è stato necessario raggiungere la struttura posta a circa 50 m di altezza per poter applicare i sensori, inoltre si è dovuto tirare i cavi per permettere al segnale

acquisito di raggiungere il computer per essere memorizzato. Il problema si è poi ripetuto durante la rimozione delle apparecchiature.

5.5.2. Analisi quasistatica

Un importante vantaggio da attribuire all'utilizzo delle telecamere è la possibilità di misurare spostamenti di tipo quasistatico sulla struttura. Le telecamere effettuando misure in spostamento permettono di acquisire qualsiasi movimento della struttura anche se caratterizzato da basse accelerazioni. Gli accelerometri invece, non avendo sensibilità a lievi contributi accelerativi, in genere associati a spostamenti a bassa frequenza, non permettono di misurarli. Come esempio riportiamo un'analisi eseguita tramite i dati video che non sarebbe stato possibile compiere se avessimo avuto solamente il segnale acquisito mediante gli accelerometri. Una prima fase ci ha permesso di individuare la rigidità trasversale della struttura. Per misurare la rigidità (definita come spostamento/forza applicata) abbiamo calcolato la forza applicata alla struttura nell'istante della rottura del provino mediante i dati ottenuti tramite la cella di carico.

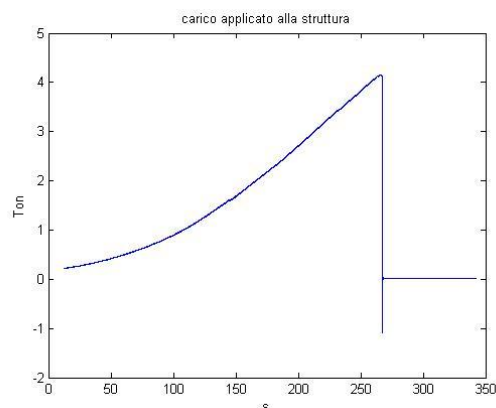


Figura 5.5.2 Carico applicato alla struttura

Il carico applicato al momento della rottura è il massimo del diagramma rappresentato in Figura 5.5.2. Per valutare lo spostamento associato a tale carico si è deciso di misurare il salto che il segnale compie una volta rotto il provino.

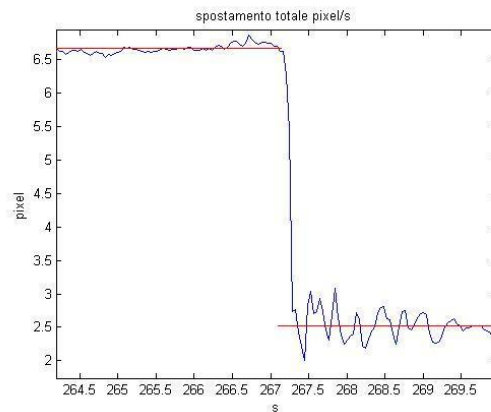


Figura 5.5.3 Spostamento misurato durante la rottura del provino

L'entità del salto viene quantificata come la media delle posizioni misurate negli istanti precedenti alla rottura del provino meno la media delle posizioni misurate negli istanti successivi alla rottura del provino; in Figura 5.5.3 le due medie vengono rappresentate tramite i tratti rossi.

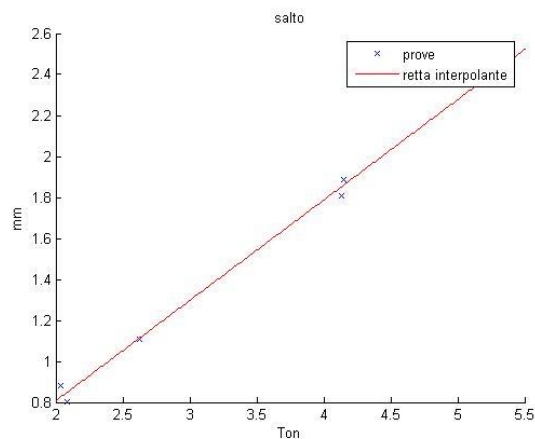


Figura 5.5.4 Spostamento in funzione del carico applicato

In Figura 5.5.4 è stata rappresentata la collocazione delle 5 prove in funzione del carico applicato alla struttura e dello spostamento ottenuto una volta rotto il provino. Per l'analisi precedente è stato scelto di non considerare la prova effettuata a 50 m dalla struttura perche affetta da maggior rumore rispetto alle altre. Le prove si collocano lungo una retta la cui inclinazione indica la rigidezza trasversale della struttura. La retta in Figura 5.5.4 è stata calcolata minimizzando la differenza tra retta e punti ottenuti dalle prove. Nel caso in analisi è stata calcolata una rigidezza di:

$$k = 0.4318 \text{ mm/ton}$$

Equazione 5.5.2.1

Una volta ottenuta la rigidezza trasversale della struttura è possibile anche calcolare la forza applicata tramite lo spostamento misurato, è sufficiente infatti dividere lo spostamento ottenuto per k.

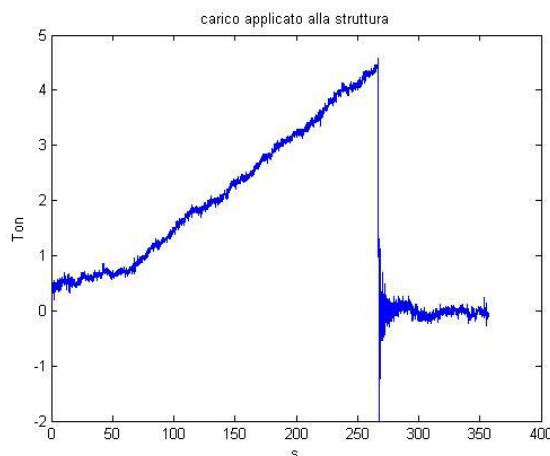


Figura 5.5.5 Forza ottenuta analizzando lo spostamento

La forza ottenuta è rumorosa negli istanti precedenti alla rottura del provino. Negli istanti successivi alla rottura non vi sono forze effettivamente applicate

alla struttura, la misura ottenuta prende in considerazione le inerzie dovute alle accelerazioni causate dalla rottura del provino. In Figura 5.5.6 vengono confrontati i dati ottenuti e la misura effettuata tramite la cella di carico:

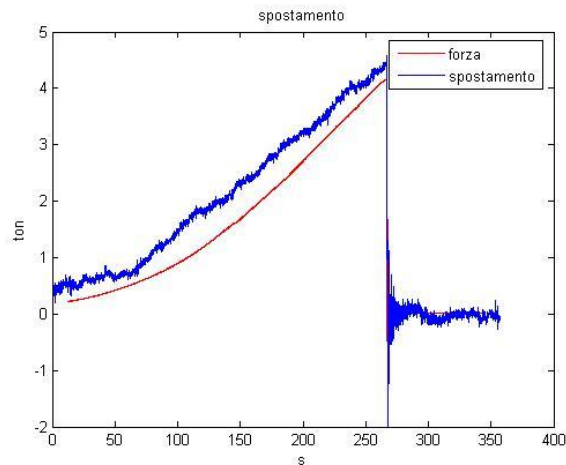


Figura 5.5.6 Confronto tra la forza ottenuta tramite la cella di carico e quella ottenuta analizzando lo spostamento

Il carico ricavato mediante lo spostamento rispecchia l'andamento ottenuto dai dati misurati tramite la cella di carico. Le differenze di misura che vi sono tra una tecnica e l'altra sono dovute principalmente ai pochi campioni utilizzati per ricavare la rigidità e quindi alla poca accuratezza associata a k . Tutta l'analisi in forza effettuata non sarebbe stato possibile farla se la misura fosse avvenuta solamente tramite gli accelerometri.

5.5.3. Svantaggi

L'utilizzo di telecamere nella misura di vibrazioni non permette di acquisire il segnale ad alte frequenze di campionamento; le telecamere vengono progettate per impieghi differenti rispetto alla misura per questo presentano alcune lacune, la frequenza di campionamento massima per le telecamere commerciali è di circa 25Hz. In questo modo è possibile analizzare solo vibrazioni che hanno

frequenze inferiori a 12.5 Hz al fine di evitare aliasing. Esistono anche telecamere ad alta frequenza di campionamento ma hanno costi elevati e raggiungono circa una frequenza di campionamento di 150 Hz. Un ulteriore difetto della tecnica è l'impossibilità di applicare filtri al segnale durante l'acquisizione se non mediante soluzioni ottiche lavorando con i tempi di acquisizione della telecamera. L'impossibilità di applicare filtri comporta la possibilità di aliasing nel segnale impossibile da verificare se non mediante controlli trasversali effettuati tramite altri strumenti.

5.6. Conclusioni

In questo capitolo abbiamo voluto dimostrare come si possano ottenere misure di discreta qualità utilizzando attrezzature che comportano un costo in tempo e denaro limitati. Utilizzando elementi in grado di fissare saldamente la telecamera alla struttura anziché i cavalletti e dei target ottimizzati per la tecnica proposta si potrebbe migliorare la qualità della misura ottenuta; i vantaggi e gli svantaggi evidenziati sarebbero comunque presenti nelle analisi ottenute. Le misure effettuate sono state ottenute mediante la tecnica di pattern matching che da un'analisi precedente è risultata la migliore tra quelle confrontate per applicazioni di questo tipo

6. Misura a bordo della struttura vibrante: test di fattibilità

6.1. Introduzione

In questo paragrafo cercheremo di valutare la possibilità di misurare vibrazioni mediante pattern matching posizionando la telecamera sull'oggetto vibrante. Lo scopo della prova è di stabilire se sia possibile misurare le vibrazioni di una struttura eccitata posizionando la telecamera sopra la struttura stessa e riprendendo l'ambiente circostante. Un ulteriore obiettivo della prova è di determinare gli accorgimenti necessari per migliorare la qualità della misura.

6.2. Descrizione della struttura

La prova è stata eseguita sulla superficie eliportuale situata sul tetto di un edificio che circonda "Piazza delle città lombarde" ed adiacente al "palazzo Lombardia", nuova sede della regione Lombardia.

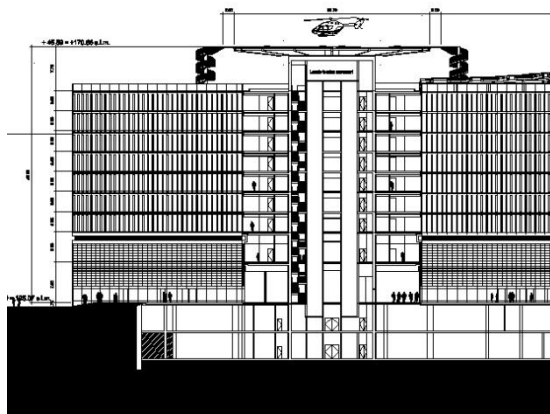


Figura 6.2.1 Vista laterale del palazzo

L'elisuperficie in oggetto è di forma rotonda, sorretta da travi a raggiera che poggiano sul tetto del palazzo.

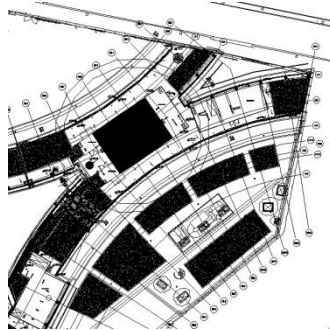


Figura 6.2.2 Vista dall'alto della superficie eliportuale e del palazzo sottostante

6.3. Setup di misura

Le prove sono state eseguite eccitando verticalmente la struttura con un eccitatore inerziale e misurandone lo spostamento nella medesima direzione mediante tecniche video e accelerometriche. Per le prove di forzamento imposto della struttura è stato utilizzato un sistema di eccitazione, realizzato con un pistone oleodinamico disposto in posizione verticale, che movimentava una massa con moto oscillatorio.



Figura 6.3.1 Attuatore oleodinamico utilizzato per il forzamento

Il sistema scelto ha permesso di realizzare corse dell'ordine di ± 50 mm, con masse di acciaio dell'ordine di 120 kg. In Figura 6.3.1 è riportata una foto dell'attuatore idraulico posizionato sulla struttura. Si è ritenuto di operare con un segnale di tipo stepped sine, ossia di procedere ad eccitazioni sinusoidali a frequenza variabile all'interno del campo di misura 2 Hz–10 Hz, aumentando la risoluzione in frequenza in prossimità delle risonanze. Al fine di ricostruire i modi di vibrare delle struttura sono stati posizionati alcuni accelerometri lungo due circonferenze concentriche centrate con il centro dell'eliporto(Figura 6.3.2). Per ogni frequenza di prova si sono misurati 20 s di risposta a regime tramite gli accelerometri.

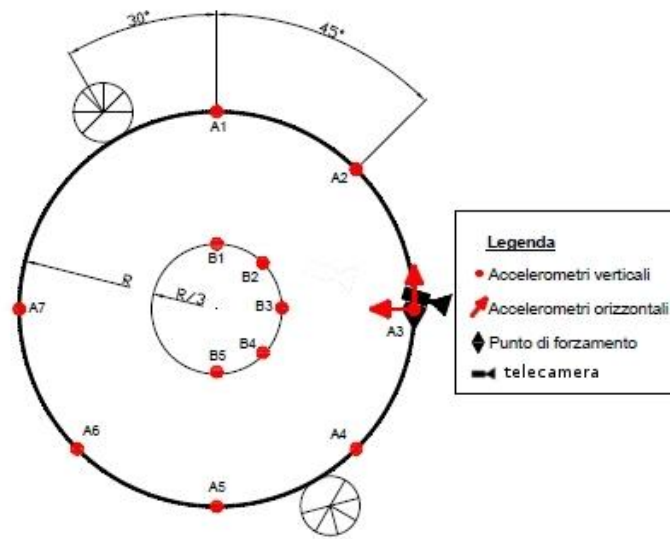


Figura 6.3.2 Schema di misura

La telecamera è stata posizionata su di un cavalletto in prossimità del punto di forzamento e con l'obiettivo rivolto verso alcuni oggetti presenti nell'ambiente circostante e selezionati per poter essere tracciati mediante la tecnica di pattern matching. Per la misura è stata utilizzata una telecamera HD CANON Legria HF 21 che monta un sensore di tipo CMOS da 1/4" e riprende immagini a colori da 1920X1080 pixel a 25 Hz. L'obiettivo integrato nella telecamera di tipo zoom 15x ($f=4,1-61,5$ mm) utilizzato nelle prove in esame a lunghezza focale massima.

6.4. Esecuzione della prova

La prova è stata eseguita riprendendo i target selezionati mentre il pistone oleodinamico eccitava la struttura a frequenza nota. Si è scelto di acquisire con la telecamera il range di frequenze eccitate che va da 3.49 a 3.66 Hz. Mediante alcune rilevazioni ambientali effettuate tramite gli accelerometri sono state ricavate in precedenza le frequenze proprie della struttura. Il range di frequenze acquisite mediante video è stato scelto in modo da includere al suo interno una

frequenza propria dell'eliporto situata a 3.56 Hz. A differenza degli accelerometri la telecamera non è sincronizzata con il sistema di forzamento quindi si è dovuto acquisire tutta la storia temporale che intercorre tra le frequenze indicate inclusi i transitori tra una frequenza e l'altra. Gli accelerometri come accennato in precedenza acquisiscono solamente 20 secondi di storia a regime per frequenza analizzata.

6.5. Analisi dei dati

Il video ottenuto è stato analizzato mediante la tecnica di pattern matching.



Figura 6.5.1 Frame del video analizzato mediante pattern matching

In Figura 6.5.1 si rappresenta un fotogramma del video utilizzato per l'analisi. L'oggetto che si è scelto di tracciare all'interno del filmato è l'angolo basso dell'edificio inquadrato. Il pattern in Figura 6.5.2 inquadra l'angolo selezionato ed è stato scelto perché presenta le caratteristiche richieste per l'analisi descritte nel paragrafo 2.1.



Figura 6.5.2 Pattern utilizzato per tracciare la posizione apparente del palazzo

Tramite gli accelerometri è stato ricavato il modo di vibrare associato alla frequenza in analisi (Figura 6.5.3).

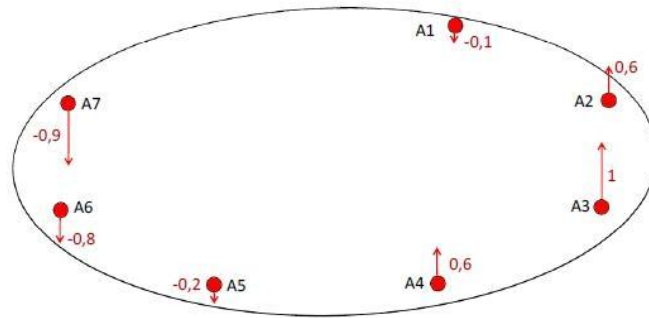


Figura 6.5.3 Modo di vibrare associato alla frequenza in analisi

Come si osserva dalla Figura 6.5.3 se eccitato a 3.56 Hz in direzione verticale l'eliporto compie un moto di beccheggio lungo l'asse posto in direzione radiale e passante per il punto di forzamento. La telecamera essendo posizionata in A3 compie un moto rotatorio, il cui centro di istantanea rotazione è il centro dell'eliporto. Il moto della telecamera quindi è composto da una rotazione attorno al suo asse, una traslazione verticale, ed una traslazione radiale che vista l'entità degli spostamenti si può considerare trascurabile. Lo spostamento apparente misurato dalla telecamera sarà quindi una composizione di questi fattori. Poiché necessita una complessa implementazione, nonché di un'elevata accuratezza nella misura, suddividere le componenti descritte mediante le immagini ottenute dalla prova si è scelto di procedere focalizzando l'attenzione sulla frequenza misurata, senza convertire i pixel misurati in spostamento reale della telecamera.

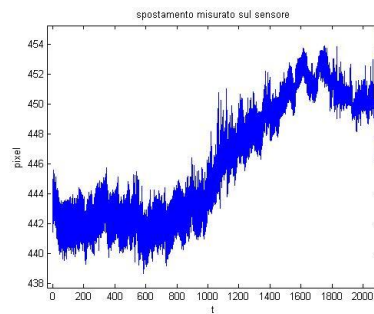


Figura 6.5.4 Spostamento misurato lungo l'intera storia temporale

Non suddividere in componenti lo spostamento misurato non comporta variazioni sulla frequenza del segnale misurato poiché entrambe le componenti sono in fase. In Figura 6.5.4 viene rappresentato il segnale misurato sul sensore. Osservando il segnale si nota che è affetto rumore a bassa frequenza dovuto probabilmente a movimenti della telecamera.

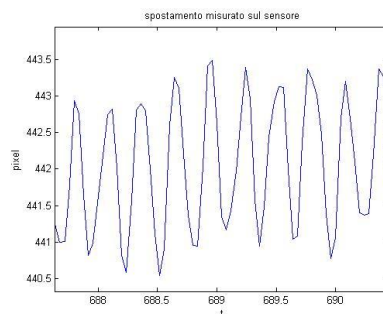


Figura 6.5.5 Ingrandimento di un breve tratto del segnale misurato

Al fine di analizzare le frequenze dei singoli tratti suddividiamo il segnale nelle singole storie temporali da associare alle frequenze. Per avere un indicazione delle zone da utilizzare per l'analisi è stato utilizzato uno spettrogramma del segnale(Figura 6.5.6).

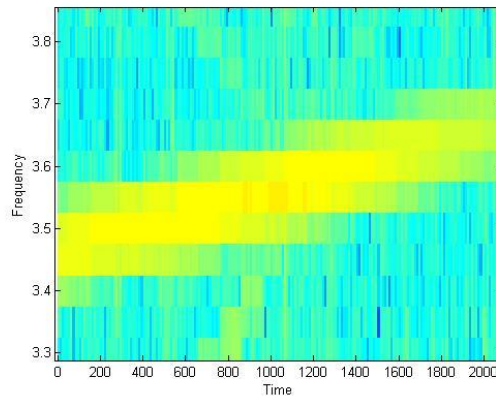


Figura 6.5.6 Particolare dello spettrogramma del segnale

Il segnale è stato suddiviso in 18 storie temporali di cui è stato calcolato lo spettro. Gli spettri sono stati rappresentati in Figura 6.5.7.

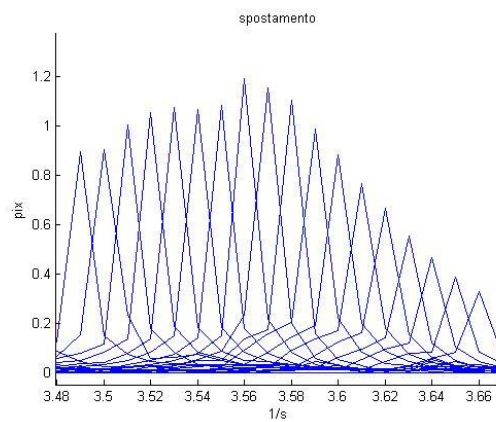


Figura 6.5.7 Spettri dei vari spezzoni di segnale

Il sistema è stato eccitato nel periodo ripreso dalla telecamera tra 3.49 e 3.66 Hz con passo tra un forzamento e l'altro di 0.01 Hz. Dai dati misurati si evince una risposta del sistema alla stessa frequenza del forzamento come ipotizzabile tramite la teoria. Osservando il modulo degli spettri si nota che il picco di risonanza misurato si attesta sui 3.56 Hz equivalente a quello misurato tramite

gli accelerometri. Al fine di verificare l'attendibilità delle acquisizioni è stato individuato numericamente il centro di rotazione della telecamera. Per effettuare tale misura è necessario individuare un altro punto all'interno dell'immagine posto a distanza dalla telecamera differente rispetto a quello tracciato in precedenza. L'oggetto scelto per l'analisi è la finestra inquadrata in Figura 6.5.8.



Figura 6.5.8 Pattern utilizzato per tracciare un secondo punto all'interno dell'immagine

Individuato il pattern è stata ripetuta l'analisi mediante pattern matching. Una volta ottenute le due storie temporali è stato individuato in esse un tratto a pari frequenza e ne è stato calcolato lo spettro. Gli spettri rappresentati in Figura 6.5.9 sono differenti poiché rappresentano lo spostamento apparente di oggetti posti a distanze dalla telecamera notevolmente differenti.

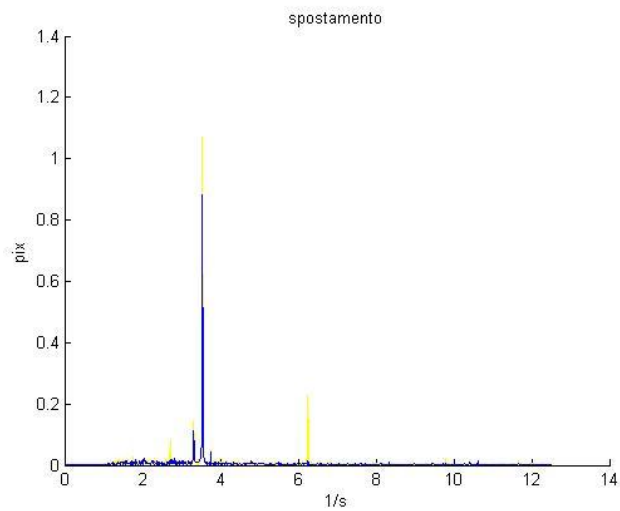


Figura 6.5.9 Spettro di una porzione di segnale analizzato tracciando due punti differenti dell'immagine

Al fine di ricavare numericamente la distanza tra la telecamera ed il suo centro di rotazione è necessario conoscere la distanza tra oggetti tracciati tramite pattern e la telecamera. Le distanze tra la telecamera e l'edificio tracciato, e di conseguenza tra la telecamera ed il container sono note. Utilizzando le informazioni in possesso viene stimato il rapporto geometrico focale/dimensione pixel tramite l'Equazione 5.5.3.1.

$$\frac{f}{\text{dimensione pixel}} = \frac{d_1 * h_{1pix}}{h_{1mm}}$$

Equazione 5.5.3.1

Dove d_1 è la distanza tra telecamera e container, h_{1pix} è l'altezza della proiezione del container sull'obiettivo in pixel, ed h_{1mm} è l'altezza fisica del container in mm.

Stimato il rapporto focale/dimensione pixel è possibile ricavare la distanza tra la telecamera e la finestra tracciata:

$$d_2 = \frac{f}{\text{dimensione pixel}} * \frac{h_{2mm}}{h_{2pix}}$$

Equazione 5.5.3.2

Dove h_{2mm} è l'altezza fisica della finestra, ed h_{2pix} è l'altezza della proiezione della finestra sul sensore in pixel. Ottenuti i parametri geometrici che caratterizzano il sistema di acquisizione e gli oggetti acquisiti possiamo valutare la distanza tra la telecamera ed il punto attorno al quale compie la rotazione.

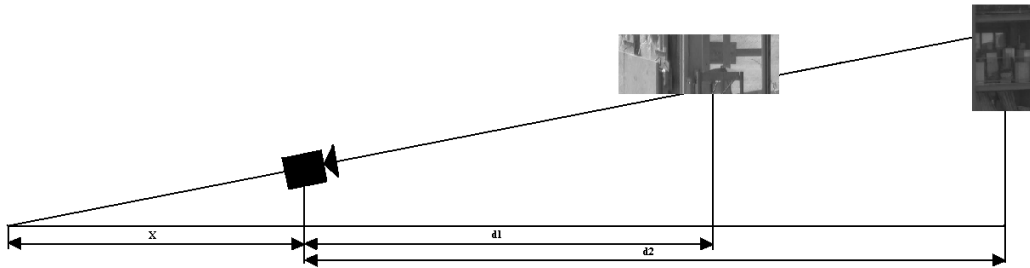


Figura 6.5.10 Modello utilizzato per calcolare il centro di rotazione

Per determinare il parametro desiderato utilizziamo il massimo degli spettri rappresentati in Figura 6.5.9, ovvero il valore di ampiezza degli spostamenti apparenti misurati nella frequenza di forzamento. I parametri ottenuti sono in pixel, convertiamoli in mm mediante l'Equazione 5.5.3.3.

$$SpostApp = Y_{max} * d * \frac{\text{dimensione pixel}}{f}$$

Equazione 5.5.3.3

Dove Y_{max} è in pixel e d è la distanza tra la telecamera e l'oggetto considerato. Ottenuti i due spostamenti apparenti associati alle due misurazioni calcoliamo il centro di rotazione:

$$\frac{SpostApp1}{d_1 + x} = \frac{SpostApp2}{d_2 + x}$$

Equazione 5.5.3.4

Da cui si ricava x ovvero la distanza tra la telecamera ed il centro di rotazione. Nel caso preso in esame la telecamera dista 21.604 m dal centro di rotazione. Considerando che la misura viene effettuata durante il forzamento del modo rappresentato in Figura 6.5.3 e conoscendo la geometria dell'eliporto sappiamo che in realtà l'effettivo centro di rotazione della struttura coincide con il centro di essa posto a circa 20 m dalla posizione della telecamera. L'errore compiuto nell'analisi effettuata si attesta attorno all'8%, grandezza ragionevole viste le pesanti approssimazioni introdotte.

6.6. Conclusioni

La misura di vibrazioni mediante pattern matching effettuata posizionando la telecamera a bordo dell'oggetto vibrante è più complessa rispetto ai casi precedentemente analizzati. I fattori da considerare prima di compiere la misura sono notevoli inoltre si inserisce nella catena di misura dei parametri i cui valori di incertezza sono in genere non trascurabili. Al fine di ottenere una misura congrua bisogna assicurarsi di conoscere accuratamente la geometria dell'oggetto di cui si vuole conoscere la posizione istante per istante, e degli oggetti da tracciare tramite la tecnica. Nel caso analizzato si conosceva accuratamente la geometria dell'eliporto e del palazzo adiacente poiché eravamo in possesso dei disegni costruttivi, ma si è dovuta ricostruire la distanza della finestra inquadrata tramite tecniche di visione. Va esaminata con particolare attenzione la posizione della telecamera, questa deve essere ottimizzata in funzione della geometria del misurato e del tipo spostamento che si vuole acquisire inoltre ci si deve assicurare che la telecamera sia vincolata all'oggetto vibrante. Nel test effettuato la telecamera è stata fissata al cavalletto situato in prossimità dell'eccitatore, in questa configurazione la dinamica del cavalletto potrebbe influire sulla misura effettuata; inoltre l'asse ottico della telecamera è stato inclinato di circa 4 gradi verso il basso per poter inquadrare gli oggetti scelti per la ricostruzione del movimento. Per lo stesso motivo non è stato possibile fare passare l'asse ottico per il centro di rotazione effettivo ma in realtà si trova a circa 4 metri dal centro della struttura. Per ottimizzare la posizione della telecamera e poter implementare un modello accurato che rispecchi la realtà è necessario conoscere le tipologie di movimenti che la struttura può compiere una volta eccitata, il modello utilizzato infatti è stato implementato conoscendo il modo di vibrare individuato mediante gli accelerometri. Nonostante le pesanti approssimazioni fatte durante l'analisi siamo riusciti a misurare la frequenza a cui l'oggetto vibra e ad avere un'indicazione della frequenza propria eccitata e della posizione del centro di istantanea rotazione dell'eliporto. Utilizzando gli accorgimenti descritti in questo paragrafo si ritiene che si possa effettuare una misura attendibile. Un'importante considerazione da fare riguardo alla tecnica in analisi è che a fronte di una maggiore complessità nella realizzazione della misura rispetto all'osservazione esterna del fenomeno non vi sono dei vantaggi rilevanti in termini di misure effettuate. Utilizzando telecamere che inquadrano il fenomeno dall'esterno c'è una maggiore semplicità

nella realizzazione della misura rispetto all'utilizzo di accelerometri, questo è dovuto al fatto che non è necessario raggiungere fisicamente la struttura ed applicarvi complesse apparecchiature, ma è sufficiente riprenderla dall'esterno. Utilizzando la tecnica proposta in questo paragrafo invece è comunque necessario raggiungere la struttura per posizionare la telecamera, il vantaggio si riduce quindi a non dover posizionare cavi che raggiungano il sensore. Nonostante le problematiche esposte talvolta la misura effettuata a bordo dell'oggetto vibrante potrebbe essere l'unica strada percorribile per poter estrarre le informazioni necessarie; si pensi al caso in cui una struttura viene eccitata da un evento accidentale non prevedibile (es. un terremoto, un incidente o un danneggiamento strutturale), in questa situazione le immagini riprese dalle telecamere dell'impianto di sicurezza potrebbero fornire indicazioni utili per ricostruire l'accaduto. Nelle possibili applicazioni descritte ma anche in altre situazioni le informazioni ottenute tramite la prova effettuata potrebbero rivelarsi utile per ottenere dati significativi dall'analisi dei dati.

Conclusioni

Nel lavoro proposto sono state prese in considerazione tre differenti tecniche di visione utilizzate per il tracciamento statico e dinamico di strutture civili. In una prima analisi è stata eseguita una prova statica che ha permesso di delineare le caratteristiche di misura delle tecniche quando non influenzate dal fattore temporale. La prova in laboratorio ha evidenziato che le tecniche di pattern matching, edge detection, e blob analysis presentano incertezze paragonabili nella misura di spostamento se applicate in condizioni ottimali. La qualità delle condizioni di misura per gli algoritmi in esame è dettata rispettivamente dalle dimensioni del pattern, dell'edge, e del blob analizzato. Riducendo le dimensioni dell'oggetto tracciato è emerso che l'incertezza di misura aumenta per edge detection e blob analysis, mentre rimane sostanzialmente inalterata utilizzando il pattern matching. Analizzando i dati ottenuti tramite due diverse telecamere è stato possibile affermare che, come è lecito aspettarsi, le misurazioni conseguite mediante edge detection e blob analysis, sono influenzate significativamente dalla qualità delle immagini acquisite. I dati analizzati tramite pattern matching sono comunque influenzati dalla qualità delle immagini ma in minor misura rispetto alle altre due tecniche. I risultati ottenuti dal confronto statico evidenziano che tutte e tre le tecniche sono adeguate per la misura ma, l'utilizzo del pattern matching offre considerevoli vantaggi rispetto alle altre quali: una maggiore stabilità nella misura poiché meno influenzato dalla dimensione del misurato e dalla qualità delle immagini.

Successivamente è stata proposta un'applicazione dinamica in cui sono state confrontate le tre tecniche analizzate in statica. La misura dinamica viene effettuata tramite una serie di misure statiche poiché si ritiene che la dinamica del fenomeno sia notevolmente più lenta rispetto alla dinamica interna delle telecamere che caratterizza l'acquisizione delle immagini. Nell'analisi è stata monitorata una struttura vibrante senza l'utilizzo di target specifici posizionati sulla struttura. L'obiettivo della prova è stato verificare l'attendibilità delle tre tecniche utilizzate per monitorare una struttura vibrante situata a circa 30 m dalla telecamera e senza interagire con essa; queste ipotesi permettono di porci nella peggiore delle ipotesi verificabili in applicazioni di questo genere. L'esito della prova ha evidenziato che l'utilizzo del pattern per analizzare i filmati è

vantaggioso sia in funzione della qualità di misura sia per la semplicità di utilizzo. L'affermazione precedente è motivata dal fatto che per applicare il pattern matching ad un filmato è sufficiente individuare una zona di interesse non omogenea e univoca nell'immagine; le caratteristiche descritte sono molto comuni e facilmente individuabili questo rende la tecnica di notevole interesse. L'analisi di immagini attraverso l'edge detection può essere difficoltosa in immagini che raffigurano un target omogeneo o con differenze di luminosità poco marcate. L'analisi dei dati tramite edge detection fornisce comunque misurazioni di buona qualità. L'utilizzo della blob detection senza applicare un target di alcun tipo è molto più difficoltoso rispetto all'implementazione delle tecniche descritte in precedenza. Il blob deve essere di dimensioni adeguate e deve avere un'intensità cromatica molto differente rispetto allo sfondo in modo da essere individuato con relativa semplicità. Ritrovare le caratteristiche descritte senza dover applicare un target alla struttura non è sempre possibile. La tecnica di blob detection è inoltre meno stabile delle precedenti poiché è influenzata in modo determinante dal valore di soglia che si ritiene opportuno utilizzare. Dall'analisi effettuata è emerso che il pattern matching offre migliore accuratezza in una misura di vibrazioni se non si ha la possibilità di applicare un target appositamente studiato, rispetto alle tecniche di edge detection e blob detection. In fine è stata fatta un'analisi sull'influenza della qualità delle immagini nella misura, e ne è risultato che questa influenza notevolmente, come previsto e già verificato nel caso statico, l'accuratezza di misura. Un ulteriore fattore che è emerso è la correlazione tra rapporto Pixel/mm che si determina nella misura (e quindi indirettamente dimensione percepita dell'oggetto tracciato) e dati ottenuti. Tutte le tecniche hanno ottenuto un risultato attendibile, e possono comunque essere impiegate nella misura di vibrazioni conoscendone le caratteristiche. Sia la prova statica sia la prova dinamica hanno eletto il pattern matching come tecnica ottimale per la misura di vibrazioni tramite strumenti di visione.

In seguito è stata proposta un'applicazione del pattern matching ad una struttura vibrante. La prova effettuata è stata improntata sull'utilizzo della tecnica in analisi tracciando il target più consono per la misura tramite tale algoritmo. L'obiettivo della prova è stato mettere in luce vantaggi e svantaggi da attribuire all'utilizzo del pattern matching, o più in generale degli strumenti di visione, per compiere la misura di vibrazioni. I privilegi emersi utilizzando le tecniche di visione sono: la semplicità di allestimento della prova e la possibilità di compiere un'analisi statica del fenomeno. L'acquisizione di spostamenti

quasistatici è molto importante vista l'impossibilità di compiere tale misura tramite accelerometri. Gli svantaggi sono prettamente tecnologici e consistono nell'impossibilità da parte delle telecamere attuali di misurare frequenze di vibrazione molto elevate o di filtrare il segnale durante l'acquisizione.

Infine è stata proposta una prova per valutare la fattibilità per effettuare la misura di vibrazioni tramite strumenti di visione posizionando la telecamera a bordo dell'oggetto vibrante. Dalla trattazione si evince che a fronte di notevoli difficoltà da dover superare per compiere la misura nella configurazione proposta non vi corrispondano altrettanti benefici. La misura di vibrazioni mediante pattern matching effettuata posizionando la telecamera a bordo dell'oggetto vibrante è più complessa rispetto ai casi precedentemente analizzati. I fattori da considerare prima di compiere la misura sono notevoli. Al fine di ottenere una misura congrua bisogna assicurarsi di conoscere accuratamente la geometria dell'oggetto di cui si vuole conoscere la posizione istante per istante, nonché degli oggetti da tracciare tramite la tecnica. Utilizzando telecamere che inquadrano il fenomeno dall'esterno c'è una maggiore semplicità nella realizzazione della misura rispetto all'utilizzo di accelerometri, questo è dovuto al fatto che non è necessario raggiungere fisicamente la struttura ed applicarvi complesse apparecchiature, ma è sufficiente riprenderla dall'esterno. Impiegando la tecnica proposta in questo capitolo invece è comunque necessario raggiungere la struttura per posizionare la telecamera, il vantaggio si riduce quindi a non dover posizionare cavi che raggiungano il sensore. Nonostante le problematiche esposte talvolta la misura effettuata a bordo dell'oggetto vibrante potrebbe essere l'unica strada percorribile per poter estrarre le informazioni necessarie; si pensi al caso in cui una struttura viene eccitata da un evento accidentale non prevedibile (es. un terremoto, un incidente o un danneggiamento strutturale), in questa situazione le immagini riprese dalle telecamere dell'impianto di sicurezza potrebbero fornire indicazioni utili per ricostruire l'accaduto. Nelle possibili applicazioni descritte ma anche in altre situazioni le informazioni ottenute tramite la prova effettuata potrebbero rivelarsi utile per ottenere dati significativi dall'analisi dei dati

Nel lavoro descritto sono state studiate diverse tecniche di visione per la misura di vibrazione ed è stata proposta quella che a fronte di dati scientifici è stata ritenuta la combinazione migliore di fattori per effettuare l'acquisizione ed elaborazione dei dati. A livello attuale queste tecniche sono in grado di effettuare queste rilevazioni con buona qualità di misura, e costi contenuti.

L'utilizzo di sistemi di visione inoltre fornisce dati che non è possibile ottenere tramite le tecniche classiche, è quindi ragionevole valutare anche la possibilità di utilizzarle in parallelo ad esse per avere una visione completa del fenomeno. In conclusione si può affermare che la misura di vibrazioni effettuata tramite strumenti di visione offre notevoli vantaggi rispetto alle tecniche classiche anche in ottica futura. Con il progredire della tecnologia le telecamere, che costituiscono un ramo dell'elettronica in pieno sviluppo, miglioreranno in qualità dell'immagini e velocità di acquisizione rendendo le tecniche proposte sempre maggiormente competitive. È logico inoltre pensare che in corrispondenza ad un avanzamento della tecnologia disponibile vi sarà una riduzione dei prezzi permettendo di effettuare misurazioni tramite le tecniche descritte a costi sempre più contenuti.

Bibliografia

- [1] Farrar CR, Prime MB. Doebling SW, "A summary review of vibration-based damage identification methods," Shock Vib Dig 1998.
- [2] Aktan AE, editors. Chase SB, "Health monitoring and management of civil infrastructure systems.," SPIE; 2001. p. 4337.
- [3] Couvreur G., Razinkov O., Kundig C., Van der Auweraer H., and De Roeck G Peeters B., "Continuous Monitoring of the Øresund Bridge: System and Data Analysis," Structure and Infrastructure Engineering: Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance 2009.
- [4] Yoshio Fukuda, Masanobu Shinozuka, Soojin Cho, Chung-Bang Yun Jong Jae Lee, "Development and application of a vision-based displacement measurement system for structural health monitoring of civil structures," Smart Structures and Systems, Vol. 3, No. 3, 373-384, 2007.
- [5] Gindy M, Davis J. Nassif HH, "Comparison of laser Doppler vibrometer with contact sensors for monitoring bridge deflection and vibration," 2005.
- [6] H. M. Lee, Hojjat Adeli, I. Lee H. S. Park, "A New Approach for Health Monitoring of Structures: Terrestrial Laser Scanning," Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering: Volume 22, Issue 1, pages 19–30, January 2007.
- [7] Gusella V., Marsili R., Rossi G. Gioffre M., "Comparison between accelerometer and laser vibrometer to measure traffic excited vibrations on bridges," 4th International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques: Advances and Applications, June 21, 2000 - June 23, 2000.
- [8] S. Nakamura, "GPS measurement of wind-induced suspension bridge girder displacements.," J Struct, 2000.
- [9] Guo JJ, Jiang JJ. Xu L, "Time–frequency analysis of a suspension bridge

based on GPS," J. Sound, 2002.

- [10] Zumpano G, Meng X, Cosser E, Roberts G, Dodson A. Meo M, "Measurement of dynamic properties of a medium span suspension bridge by using the wavelet transforms," Mech Syst Signal Process, 30 Novembre 2004.
- [11] C.C.Chang Y.F.Ji, "Nontarget Stereo Vision Technique for Spatiotemporal Response Measurement of Line-Like Structures," Journal of engineering mechanics, 2008.
- [12] A.Cigada, A.Manenti, E. Zappa G.Busca, "Vision-based measurements for slender structures vibration monitoring," Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems, 2009.
- [13] S. Silva, J. Bateira E. Caetano, "A vision system for vibration monitoring of civil engineering structures," Techniques, 2010.
- [14] P. Salom, F. Bos J. Morlier, "New image processing tools for structural dynamic monitoring," Key Engineering Materials, Damage Assessment of Structures VII, 2007.
- [15] John P. Caffrey, Sami F. Masri A. Mazen Wahbeh, "A vision-based approach for the direct measurement of displacements in vibrating system," Department of Civil and Environmental Engineering, University of Southern California, IOP Publishing Ltd 2003.
- [16] Hak Kyeong Kim, Chae-Gue Lee and Sang-Bong Kim Sang-Chan Kim, , p. 6, A Vision System for Identifying Structural Vibration, 2006.
- [17] Masanobu Shinozuka Jong Jae Lee, "A vision-based system for remote sensing of bridge displacement," Department of Civil & Environmental Engineering, University of California, NDT&E International, 2006.
- [18] J. J. Lee & M. Shinozuka, "Real-Time Displacement Measurement of a Flexible Bridge," , Department of Civil & Environmental Engineering, University of California, 2006.

- [19] Maria Q. Fengy and Masanobu Shinozukaz Yoshio Fukuda, "Cost-effective vision-based system for monitoring dynamic response of civil engineering structures," , Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, www.interscience.wiley.com, 2009.
- [20] M.ASCE e X.H.Xiao C.C.Chang, "Three-Dimensional Structural Translation and Rotation Measurement Using Monocular Videogrammetry," *Journal of engineering mechanics*, Luglio 2010.
- [21] Chris Harris & Mike Stephens, "A combined corner and edge detector," Plessey Research Roke Manor, United Kingdom, 1988.
- [22] C.C.Chang & Y.F.Ji, "Flexible Videogrammetric Technique for Three-Dimensional Structural Vibration Measurement," *Journal of engineering mechanics*, Giugno 2007.
- [23] Luigi Di Stefano, "Individuazione di forme," Appunti del corso di elaborazione dell'immagine, ARCES, Uneversità di bologna, 2004.
- [24] Yoshihiko Nomura Hitoshi Nishiguchi, "A study on SSD calculation between input image and subpixel-translated template images and its applications to a subpixel image matching problem," *SPIE*, Vol. 7252, 72520R, 2009.
- [25] Barry, Bohs, Laurence, Trahey, Gregg Friemel, "Relative performance of two-dimensional speckle-tracking techniques: normalized correlation, non-normalized correlation and sum-absolute-difference," *Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium*, v 2, p 1481-1484, 1995.
- [26] Konstantinos G. Derpanis, "Relationship Between the Sum of Squared Difference (SSD) and Cross Correlation for Template Matching," York University, 2005.
- [27] John K. Tsotsos W. James MacLean, "Fast pattern recognition using normalized grey-scale correlation in a pyramid image representation," *Machine Vision and Applications*, P.163–179, 2008.
- [28] National Instruments. (2004, Oct.) <http://www.ni.com/it/>. [Online].

<http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/3763>

- [29] Patrick Goebel. (2006, May) <http://www.pirobot.org>. [Online]. <http://www.pirobot.org/blog/0008/>
- [30] M. R., Snow, W. L., Childers, B. A. and Goad, W. K. Shortis, "The influence of storage media on the accuracy and repeatability of photogrammetric measurements using CCD cameras.," Proceedings, SPIE Vol. 2067 Videometrics II, Boston Massachusetts, P. 80-92 September 1993.
- [31] H. A. Beyer, "Determination of radiometric and geometric characteristics of frame grabbers.," Proceeding SPIE Vol.2067 Videometrics II, Boston, Massachusetts, pp 93-103, September 1993.
- [32] T. A. Clarke, & T. Short M. R. Shortis, "A comparison of some techniques for the subpixel location of discrete target images," Proc. SPIE Vol. 2350, p. 239-250, Videometrics III, 1994.
- [33] Augusto Sarti, Stefano Tubaro Federico Pedersini, "Estimation and Compensation of Subpixel Edge Localization Error," IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, VOL. 19, NO. 10, Novembre 1997.
- [34] Jun Gao, Lei Wang Xiaojia Wang, "A Survey of Subpixel Object Localization for Image Measurement," IEEE, 0-7803-8629-9/04, 2004.
- [35] Gongkang Fu, Upendra P. Poudel Jian Ye, "High-accuracy edge detection with Blurred Edge Model," Image and Vision Computing 23, P.453-467, 2005.
- [36] Alfredo Cigada, Remo Sala, Emanuele Zappa Angela Cantatore, "Hyperbolic tangent algorithm for periodic effect cancellation in sub-pixel resolution edge displacement measurement," ELSEVIER, Measurement 42, 2009.
- [37] Mitsuru Baba Kozo Ohtani, "A Fast Edge Location Measurement with Subpixel Accuracy Using a CCD Image," IEEE Instrumentation and

Measurement Technology Conference, Budapest, Hungary, May 21-23, 2001.

- [38] Owen Robert Mitchell, Mark L. Akey, Anthony P. Reeves Edward P. Lyvers, "Subpixel Measurements Using a Moment-Based Edge Operator," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence VOL. 11, N°12, Dicembre 1989.
- [39] Remo Sala, Emanuele Zappa Alfredo Cigada, "On the reduction of subpixel error in image based displacement measurement," Proceedings, XVII IMEKO World Congress, Dubrovnik, Croatia, 22 – 27 Giugno 2003.
- [40] Mayrai Gindyb, Joe Davis Hani H. Nassifa, "Comparison of laser Doppler vibrometer with contact sensors for monitoring bridge deflection and vibration," 2004.