

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Industriale

Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale



M.S. in Space Engineering

IMPLEMENTATION OF A NET DEVICE TEST BED FOR SPACE
DEBRIS ACTIVE REMOVAL FEASIBILITY DEMONSTRATION

Estratto in italiano

Advisor: Prof. Michèle Lavagna
Advisor: Dr. Roberto Armellin

Students: Riccardo Benvenuto 750897
Riccardo Carta 740764

Academic year 2011-2012

Sommario

Il problema dei detriti spaziali è diventato estremamente rilevante negli ultimi anni a causa del numero elevato di oggetti orbitanti inattivi lungo orbite d'interesse commerciale e scientifico ed alcune soluzioni efficaci per eliminare tali detriti sono attualmente in via di sviluppo e ricerca. Per perseguire tale obiettivo, questo lavoro di tesi tratta la progettazione e la sperimentazione di un dispositivo composto da una rete, un guinzaglio (o tether) e un cannone spara rete, destinato a lanciare tale rete a forma di piramide o cono trascinata da quattro masse terminali, il cui compito è quello di avvolgere e catturare un bersaglio, la cui orbita sarà in seguito cambiata sfruttando il tether che collega il satellite madre alla rete. A causa delle difficoltà riscontrate per poter sperimentare il sistema in un ambiente operativo verosimile (microgravità), questo lavoro si concentra sullo sviluppo di un impianto di prova per caratterizzare, convalidare e testare il sistema di cattura proposto, simulando al meglio le condizioni operative orbitali, anche in un ambiente affetto da un'accelerazione di gravità pari a $1g$. Essendo il fenomeno molto veloce, il campo gravitazionale terrestre non influenza la dinamica del dispiegamento, quindi una buona corrispondenza tra prove a terra e in microgravità può essere possibile. In questo lavoro il progetto, il dimensionamento e la costruzione (tecnologia e manifattura) di tale dispositivo vengono evidenziati, sottolineando le scelte adottate per stabilizzare la sua forma durante la fase di volo e resistere ai carichi. Viene, inoltre, presentata una tecnica per misurare la velocità iniziale delle masse terminali, grazie alla quale i risultati simulati vengono convalidati. Questo parametro, oltre ad influenzare pesantemente il dispiegamento della rete, deve essere conosciuto con precisione in modo da rendere possibile il confronto tra simulazioni numeriche e prove sperimentali. In seguito alla descrizione dei componenti principali e dei meccanismi facenti parte del dispositivo sperimentale, e di come questi potrebbero essere modificati nel progetto di un segmento spaziale vero e proprio, l'analisi del moto della rete viene eseguita utilizzando videometria ad alta velocità. Nel lavoro si fa particolare attenzione alla traiettoria dei vertici della rete e all'evoluzione del suo dispiegamento: questo secondo punto, infatti, è particolarmente importante per il risultato della missione. Infine, viene proposto il confronto tra le simulazioni e i risultati sperimentali: sono discussi e messi in luce sia gli aspetti positivi che quelli negativi, dell'utilizzare un modello dinamico per simulare il dispiegamento di una rete, discretizzandola con molle e masse concentrate.

Parole chiave: detriti spaziali; rimozione forzata; rete; dispiegamento di grandi strutture flessibili; impianto sperimentale; ricostruzione moto 3D; videometria; validazione modello.

1 Estratto

Il sempre crescente sfruttamento dello spazio extra atmosferico attorno alla Terra, per motivi commerciali e scientifici, ha portato al progressivo affollamento delle orbite di interesse. L'insipiente corsa allo spazio guidata dalla fuorviante convinzione che questo sia illimitato, non aveva preso in considerazione, fino a qualche anno fa, lo sviluppo di strategie di disposal/deorbiting alla fine della vita operativa delle macchine spaziali.

1.1 Ambito di lavoro

In questo contesto di sovraffollamento delle orbite di interesse, il recente palesarsi della problematica della cosiddetta "spazzatura spaziale" ha risvegliato nella comunità scientifica (e commerciale) l'interesse per lo studio di strategie di riduzione del rischio di impatti in orbita. Per le orbite basse il problema di fatto si traduce nello studio di una tecnica di deorbiting, ovvero di rientro in atmosfera degli oggetti orbitanti non operativi: essendo questi più vicini alla Terra rendono più sensato questo tipo di approccio. Il caso opposto è rappresentato dall'orbita geostazionaria, la più lontana dalla Terra tra quelle interessate dal problema, per la quale il problema diventa di disposal, ovvero trasferimento orbitale verso una traiettoria chiusa più esterna detta "orbita cimitero". Il caso più ostico è rappresentato da quelle che sono chiamate "orbite medie", le quali, trovandosi appunto ad una quota intermedia tra quelle basse e la geostazionaria, non danno spunto per una soluzione immediata ed intuitiva.

L'indagine proposta si inserisce nell'ambito di quelle strategie adatte ad affrontare il problema delle orbite basse; lo studio mantiene comunque validità ed è estendibile più genericamente a tutte le situazioni per le quali si renda necessario effettuare un'operazione di aggancio con un oggetto non collaborante, a qualunque quota questo si trovi.

1.2 Stato dell'arte

Negli ultimi anni la comunità scientifica ha dedicato particolare attenzione al problema dalla "spazzatura spaziale" mossa dal sempre crescente rischio di impatto lungo le orbite: tale situazione rende lo sfruttamento dello spazio un'attività a maggior rischio e quindi più costosa.

La rimozione attiva di debris spaziale è un'operazione complessa: il punto chiave consiste nel trasferimento di quantità di moto tra il sistema attivo e quello passivo perché questo possa compiere il trasferimento orbitale, sia esso verso un rientro in atmosfera o verso un'orbita esterna.

Per cambiare arbitrariamente la quantità di moto del target, sebbene di primo acchito la necessità di agganciarsi rigidamente al corpo passivo venga data per scontata, i più recenti e promettenti studi indagano la possibilità di interagire con esso in maniera non necessariamente meccanica: si tratta dei cosiddetti dispositivi contactless. Tra i più significativi vi è Ion Beam Sheperd: il satellite operativo raggiunge la distanza di lavoro dal target per mezzo di un rendez-vous classico e, senza che vi sia contatto, investe il target con un fascio di ioni ad alta velocità emessi da un motore a ioni normalmente utilizzato per propulsione a bassa spinta. Tale procedura permette di cambiare la quantità di moto del corpo obiettivo senza necessità di contatto alcuno.

Alternativamente, prende sempre più consistenza la possibilità di effettuare il trasferimento orbitale realizzando un collegamento tra i due corpi declinando il concetto di docking in maniera differente: per mezzo del dispiegamento di una rete attaccata al satellite tramite un tether si "imbriglia" l'obiettivo. Il sistema che si viene a realizzare è del tipo a due corpi collegati da un tether attraverso il quale si ha modo di sfruttare diverse strategie di controllo, assolutamente non banali, ma promettenti.

In questo settore si inserisce il lavoro di tesi presentato: si intende agganciare il target mediante l'utilizzo di una rete in grado di chiudersi attorno ad esso impedendogli di uscirne. Attraverso un controllo da parte del satellite operativo, il sistema realizza il trasferimento orbitale.

1.3 Obiettivi del lavoro di tesi

La scelta di focalizzare l'attenzione sulla fattibilità di tale dispositivo ha portato al progetto di una rete adatta alla funzione proposta ed allo sviluppo ed implementazione di una linea sperimentale con lo scopo di studiare il comportamento di tale rete per applicazioni orbitali in ambiente spaziale. Il lavoro è stato svolto prendendo spunto dai risultati provenienti da un modello numerico di simulazione del dispiegamento sviluppato parallelamente presso lo stesso ateneo: tali spunti hanno dato origine ad una campagna sperimentale con l'obiettivo di validare tale modello e di renderlo un potente mezzo di indagine per la progettazione di reti per applicazioni spaziali.

La fattibilità del dispositivo è stata approfondita anche attraverso una fase di sperimentazione riguardante il meccanismo di chiusura della rete che garantisca la permanenza del target al suo interno, per realizzare in sicurezza il sistema a due corpi citato.

1.4 Spunti di originalità ed innovazione

Affrontando una tematica di alto interesse per la comunità mondiale, il problema della spazzatura spaziale viene affrontato in maniera ingegneristica, individuando le criticità e gli aspetti chiave su cui focalizzare l'indagine. La scelta di proporre l'utilizzo di una rete per realizzare l'interazione meccanica tra i corpi, senza la necessità di effettuare un aggancio (un docking) classicamente inteso, rappresenta l'aspetto chiave del lavoro: tale dispositivo ha il duplice effetto di eliminare le problematiche relative l'interazione meccanica con un corpo che non è progettato, e quindi predisposto, ad effettuare tale operazione, inoltre rilassa il requisito di smorzamento del moto proprio del target, sconosciuto con precisione.

Benché la più immediata tecnica per realizzare il trasferimento orbitale si avvalga dell'utilizzo di un classico motore, sia esso impulsivo o a bassa spinta, che deve quindi essere efficace su di una massa aumentata nella misura della massa dell'obiettivo, esistono tecniche che permettono di ottimizzare il payload avvalendosi di principi fisici che non richiedono alcun tipo di propellente. La realizzazione di un sistema a due corpi apre le possibilità all'utilizzo di strategie di trasferimento di quantità di moto tanto avveniristiche quanto fisicamente semplici, la cui efficacia viene tutt'ora studiata con risultati promettenti: la presenza di un tether di materiale conduttore permette di sfruttare l'effetto elettrodinamico generato dal moto di sistema immerso nel campo magnetico terrestre; la tensione che si viene a creare all'interno del tether a causa della tendenza dei due corpi ad allontanarsi per effetto del drift tra due orbite cofocali non coincidenti, e quindi ad allontanarsi progressivamente, può essere sfruttata tagliando improvvisamente il tether e quindi scaricando una reazione sui due corpi in direzioni opposte, ottenendo una variazione di quantità di moto.

Tali tecniche consentono la realizzazione di sistemi a massa ridotta rispetto a quelli basati su motori classici, che richiedono quindi una massa aggiuntiva di propellente, consentendo il progetto di sistemi economicamente più efficienti: il dispositivo studiato non preclude nessuna delle citate strategie, acquistando interesse scientifico/operativo.

Un ulteriore aspetto ad alto contenuto innovativo nasce in risposta alla già discussa necessità di realizzare un dispositivo di vincolo della rete attorno al target. La rete, di forma piramidale, è caratterizzata da una "bocca" in corrispondenza della sua base geometrica, lungo i suoi quattro lati sono integrati quattro fili di chiusura ciascuno facente capo ad una bobina azionata a molla. La configurazione di lancio prevede quindi la rete chiusa; questi dispositivi integrati sfruttano la quantità di moto necessaria al dispiegamento della rete stessa per svolgere le bobine ed aprire la "bocca della rete". L'esaurimento del moto di traslazione della rete al raggiungimento dell'obiettivo, consente alle molle delle bobine di riavvolgere i fili riportando il dispositivo in configurazione chiusa, contenendo il target.

Al fine di validare il simulatore numerico di dispiegamento, la sperimentazione si avvale di tecniche di misura di posizione e velocità di tipo videometrico: tecniche non intrusive e dalle ottime

prestazioni in termini di accuratezza delle misure.

1.5 Risultati e conclusioni critiche

La realizzazione del dispiegamento mediante il lancio impulsivo di quattro masse trattrici in fase sperimentale si è rivelata di successo: i risultati ottenuti hanno permesso la validazione e l'aggiornamento del simulatore numerico rendendolo efficace nella rappresentazione del fenomeno del dispiegamento della rete. Il confronto tra le misure ed il modello simulato è avvenuto considerando alcuni indicatori della qualità del dispiegamento rappresentativi della geometria della rete durante il suo moto. Un ulteriore indicatore, di tipo statistico, viene preso in considerazione con riferimento al dispiegamento nominale ottimo: su 50 prove di dispiegamento effettuate, il 10% si è discostato dal comportamento nominale oltre la tolleranza, rappresentando un fallimento.

La principale criticità di questo dispositivo deriva dall'utilizzo di un tether sul cui dispiegamento, ad oggi, non esiste una storia operativa affidabile rendendolo una tecnologia ancora da dimostrare.

Per quanto riguarda le prove di dispiegamento e chiusura la percentuale dei fallimenti è del 35% sul totale di 20 prove. Il dispositivo di chiusura si è dimostrato molto efficace in tutti i test positivi pur mantenendo una più alta percentuale di fallimento su un numero minore di prove. I risultati derivanti dalla sperimentazione sul dispositivo di chiusura permettono tuttavia di affermare la fattibilità di tale concept rendendolo meritevole di uno studio ancora più approfondito, tanto dal punto di vista del progetto quanto dal punto di vista dell'implementazione sperimentale in laboratorio.

Valgono le medesime considerazioni sull'utilizzo del tether, in questa applicazione ancora più diffuso, essendo i fili di chiusura dei dispositivi del tutto analoghi. In aggiunta, il dimensionamento delle rigidità delle molle che attivano il riavvolgimento costituisce il parametro chiave del dimensionamento. La tecnica di misura videometrica utilizzata si è dimostrata attendibile e potente dal punto di vista delle accuratezze permettendo di essere assolutamente non intrusivi in fase di misura. Tale approccio suggerisce l'implementazione di un sistema di visione computerizzata a bordo della missione spaziale allo scopo di monitorare le fasi operative del dispositivo e consentire una strategia di controllo in tempo reale.