



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA  
**Dipartimento di Ingegneria Industriale DII**

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

MINIMIZZAZIONE DEI DISTURBI DINAMICI TRASMESSI AD UN UAV  
DURANTE OPERAZIONI DI MANIPOLAZIONE ROBOTICA AEREA

Relatore: Prof. Silvio Cocuzza

Laureando: Alberto Pasetto 1233965

Anno Accademico 2021/2022



## SOMMARIO

La manipolazione aerea può sfruttare la mobilità di un UAV (Unmanned Aerial Vehicle) per operare in luoghi poco accessibili o pericolosi. Una problematica è rappresentata dal fatto che la base fissa del manipolatore tipicamente viene sostituita da un multicottero che può traslare e ruotare, è soggetto a varie forze ed è inoltre un sistema sottoattuato. In particolare, in condizioni di volo stazionario (hovering flight), è possibile controllare solo la spinta complessiva delle eliche e la coppia sui tre assi del drone, quindi ogni movimento del manipolatore può provocare spostamenti anche ampi dell'UAV. Obiettivo di questa tesi è risolvere la cinematica inversa del manipolatore riuscendo ad inseguire una data traiettoria nonostante gli spostamenti della base e allo stesso tempo ridurre il disturbo del manipolatore sull'UAV.

Nel primo capitolo, dopo una breve descrizione dei vari tipi di UAV e degli ambiti di applicazione, viene introdotta la dinamica dei multicotteri evidenziando le difficoltà della manipolazione aerea. Viene quindi descritta la strategia di controllo del velivolo in condizioni di hovering e definito un modello multibody per validare il lavoro dei capitoli successivi; infine vengono introdotte le nozioni principali riguardanti la cinematica dei manipolatori.

Nel capitolo 2 si risolve la cinematica inversa del manipolatore tenendo conto dei movimenti della base: inizialmente viene introdotto uno Jacobiano generalizzato per le traslazioni orizzontali del drone (controllo ideale), questo viene quindi utilizzato in una procedura per la risoluzione della cinematica inversa che, progressivamente, viene modificata per tener conto delle varie forze agenti sull'UAV. La procedura viene quindi estesa per permettere di risolvere casi in cui sono presenti traslazioni e rotazioni del drone su tutti i tre assi; infine la procedura viene validata in Adams.

Nel terzo capitolo, utilizzando lo Jacobiano generalizzato già definito, viene minimizzato il disturbo del manipolatore ridondante sull'UAV concentrandosi in particolare sulla riduzione del rollio del drone. Assumendo inizialmente l'ipotesi di controllo ideale dell'UAV, dopo aver testato l'efficacia di una minimizzazione locale con il metodo del gradiente si passa alla definizione di uno Jacobiano esteso; nelle simulazioni in ambiente Adams questo metodo si dimostra efficace nel ridurre gli spostamenti orizzontali del drone e, per le operazioni in cui i movimenti verticali dell'UAV sono trascurabili, nell'inseguimento di traiettoria. Lo Jacobiano esteso viene combinato con la procedura del capitolo precedente per includere nella cinematica inversa gli effetti delle tre possibili traslazioni e delle tre possibili rotazioni dell'UAV, oltre a considerare le forze esterne agenti sul sistema. Alla fine, verrà valutata anche l'efficacia dell'uso di una batteria traslante per bilanciare l'UAV.

Nel quarto capitolo la procedura definita nei capitoli precedenti viene utilizzata per simulare nel piano il sollevamento di un carico appoggiato su una superficie orizzontale: prima viene considerato il caso di manipolatore non ridondante e poi per di manipolatore ridondante; in quest'ultimo caso vengono confrontati i risultati che si ottengono risolvendo la cinematica inversa con la soluzione a minime velocità dei giunti e con Jacobiano esteso, andando in particolare a osservare le differenze nei movimenti dell'UAV. L'uso di una batteria traslante per bilanciare l'UAV verrà valutato anche in questo caso.

Durante la tesi sono stati eseguiti dei test sperimentali che sono riportati nel capitolo 5: negli esperimenti un esacottero viene disturbato da un braccetto mobile e viene osservata la reazione del velivolo.

# INDICE

CAPITOLO 1: Introduzione.....	1
1.1 Ambiti di utilizzo e stato dell'arte .....	1
1.2 Multicotteri .....	3
1.2.1 Classificazione UAV e vantaggi dei multicotteri.....	3
1.2.2 Modello del drone utilizzato .....	4
1.2.3 Controllo del multicottero e modalità di volo.....	6
1.2.4 Interazione drone-manipolatore.....	8
1.3 Cinematica dei manipolatori .....	9
1.3.1 Cinematica diretta e inversa .....	10
1.3.2 Cinematica differenziale.....	10
1.3.3 Ridondanza.....	11
CAPITOLO 2: Compensazione dei movimenti della base .....	13
2.1 Jacobiano generalizzato per controllo ideale.....	13
2.2 Jacobiano generalizzato per controllo ideale con proiezione orizzontale della spinta delle eliche .....	18
2.3 Jacobiano generalizzato per controllo ideale con proiezione verticale della spinta delle eliche .....	24
2.4 Simulazioni con PID "morbido" .....	29
2.5 Jacobiano generalizzato completo con forze esterne.....	32
CAPITOLO 3: Minimizzazione dei disturbi del manipolatore ridondante sull'UAV .....	41
3.1 Minimizzazione del momento dovuto alla gravità con metodo del gradiente .....	41
3.2 Minimizzazione della coppia alla base del manipolatore con Jacobiano esteso .....	47
3.3 Effetto della traslazione del drone nello Jacobiano esteso.....	56
3.4 Jacobiano esteso con elemento di bilanciamento .....	59
3.5 Simulazioni con PID "morbido" .....	64
3.6 Jacobiano esteso con movimenti qualsiasi della base .....	68
3.7 Minimizzazione della coppia sul drone con problema ai minimi quadrati .....	73
3.8 Ampliamento del movimento del manipolatore con un contrappeso .....	75
CAPITOLO 4: Simulazione della presa di un carico.....	81
4.1 Carico su supporto elastico .....	81
4.2 Presa del carico con UAM a 2 gradi di libertà .....	81
4.3 Presa del carico con UAM ridondante a 3 gradi di libertà .....	85
4.4 Ampliamento del movimento del manipolatore con contrappeso .....	89
CAPITOLO 5: Test sperimentali: effetto dei disturbi sull'UAV.....	95
5.1 Descrizione dei componenti.....	95

5.2 Esperimenti svolti.....	97
5.3 Confronto con il simulatore Matlab.....	98
CAPITOLO 6: Conclusioni e sviluppi futuri.....	103
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....	105
APPENDICI: .....	110
A.1 Script Matlab per la risoluzione della cinematica inversa con Jacobiano esteso, sollevamento di un carico da supporto elastico .....	110
A.2 Parametri del controllo PID di multicotteri.....	117



# CAPITOLO 1: Introduzione

## 1.1 Ambiti di utilizzo e stato dell'arte

L'interesse per i veicoli aerei senza equipaggio (UAV) è cresciuto negli ultimi decenni, non solo nelle comunità di ricerca, ma anche all'interno delle aziende industriali e tra l'opinione pubblica con incentivi internazionali per lo sviluppo di queste tecnologie. Grazie alla loro versatilità e varietà gli UAV possono essere utilizzati in molti ambiti:

- **Fotografia, videoriprese, videosorveglianza:** rispetto ai tradizionali strumenti la mobilità degli UAV permette di avere accesso ad ambienti non raggiungibili e di effettuare riprese con nuove prospettive, ciò li ha resi commercialmente interessanti sia per uso civile che amatoriale [1].
- **interventi in caso di emergenza:** questi dispositivi sono in grado di raggiungere velocemente e senza rischi per gli operatori le zone colpite da eventi catastrofici per eventuali rilevamenti o ispezioni utili alla gestione delle operazioni di soccorso; sono inoltre in via di sviluppo progetti per la lotta agli incendi [2].
- **agricoltura:** in quest'ambito gli UAV sono utilizzati sia per il monitoraggio delle coltivazioni che per distribuire fertilizzanti o per operazioni di semina.
- **Trasporti:** alcune aziende stanno sperimentando e studiando degli UAV in grado di eseguire consegne aeree ed in grado di velocizzare i trasporti, sono anche presenti applicazioni per trasporti urgenti in ambito sanitario.
- **Archeologia e beni culturali:** spesso gli UAV vengono impiegati in ambito archeologico per mappare e monitorare siti eseguendo planimetrie e rilievi aerei [3].
- **Robotica Manipolazione aerea:** equipaggiando l'UAV con dei manipolatori è possibile eseguire operazioni di manutenzione o assemblaggio in luoghi poco accessibili o pericolosi sostituendo o cooperando con l'uomo [4].

Quest'ultimo ambito si differenzia dagli altri perché richiede che il sistema drone-manipolatore, anche indicato come UAM (Unmanned Aerial Manipulator), interagisca attivamente con l'ambiente circostante scambiando con esso forze e momenti e non si limiti ad acquisire informazioni tramite sensori, inoltre in molti casi è necessario utilizzare manipolatori a più gradi di libertà che influenzano considerevolmente la dinamica del velivolo; le principali problematiche sono legate ai seguenti aspetti:



*Figura 1. 1 Scenari applicativi per la manipolazione. Colonna di sinistra: ispezione di un ponte; colonna centrale: ispezione e fissaggio di linee elettriche ad alta tensione; colonna di destra: riparazione della pala del rotore di una turbina eolica [4].*

- In genere gli UAV sono sistemi sottoattuali e non è quindi possibile controllare contemporaneamente tutti i sei gradi di libertà che descrivono posizione e orientazione del velivolo. Di conseguenza i disturbi esterni, incluso il movimento di un manipolatore, possono facilmente alterare posizione e orientazione dell'organo terminale che ha il compito di afferrare e muovere oggetti rendendo impossibile lo svolgimento dell'operazione; in aggiunta alcune forze esterne come raffiche di vento sono difficili da modellare e vengono quindi trattate in maniera semplificata.
- Gli UAV più studiati per la manipolazione aerea sono i multicotteri per via della loro mobilità e per la possibilità di rimanere in volo stazionario [5] tuttavia l'aggiunta di peso può influenzare considerevolmente le performance di volo come stabilità e autonomia e quindi va limitato il più possibile; anche il movimento del manipolatore richiede ai motori uno sforzo aggiuntivo riducendo ulteriormente l'autonomia di volo.
- i sistemi comunemente utilizzati per la stima della posizione e della orientazione che fanno uso, per esempio, di girometri e GPS, non sono sufficientemente accurati per la manipolazione aerea.

Per questi motivi quest'ambito che pone sfide particolarmente complesse ha subito un rapido sviluppo solo negli ultimi anni. [6],[4],[7] riassumono lo stato dell'arte della manipolazione aerea. Sono stati studiati manipolatori con diverse configurazioni, dal peso ridotto e con baricentro il più possibile vicino a quello del drone [7], oltre all'aggiunta di elementi per compensare lo spostamento del centro di gravità [8][9]. Per stabilizzare la posizione dell'UAV vengono spesso utilizzati sensori aggiuntivi e sistemi di controllo più complessi [2][10] rispetto ai PID tradizionali [11], anche grazie alla maggiore disponibilità in termini di potenza computazionale a bordo del velivolo. Altre ricerche hanno analizzato l'efficacia di bracci robotici aggiuntivi per stimare posizione e orientazione dell'UAV o per mantenerlo fermo [12]. Nonostante i numerosi progressi in molti casi non si raggiunge l'accuratezza necessaria o si è vincolati ad agire in ambienti controllati, per esempio con sistemi di visione o indicatori per identificare la posizione dell'UAM.

L'oggetto di questa tesi saranno dei metodi per ridurre i disturbi dinamici esercitati dal manipolatore sul drone o per compensarne gli effetti, andando a sviluppare quanto esposto in [13].

## 1.2 Multicotteri

In questa parte vengono illustrate le motivazioni che portano a scegliere i multicotteri come piattaforma per la manipolazione aerea, si riportano le equazioni della dinamica dei multicotteri e il loro sistema di controllo, infine vengono introdotti gli approcci per il controllo degli UAM.

### 1.2.1 Classificazione UAV e vantaggi dei multicotteri

L'assenza di un pilota a bordo e le diverse applicazioni hanno determinato una gran varietà negli UAV per quanto riguarda dimensioni, configurazione meccanica, tipo di attuatori. Una possibile classificazione dai sistemi più manovrabili con minor autonomia ai sistemi meno manovrabili con maggior autonomia è presentata in [5]:

- 1) UAV ad ala rotante (RW-UAV): elicotteri convenzionali o coassiali, multicotteri (come quadricotteri, esacotteri, ...);
- 2) UAV convertibili caratterizzati dalla possibilità di modificare la propria configurazione per esempio tra la fase di decollo e di volo con eliche orientabili;
- 3) UAV bioispirati che imitano insetti;
- 4) UAV ad ala fissa (FW-UAV), utilizzati soprattutto nell'agricoltura per operazioni di mappatura
- 5) LtA-UAV che sfruttano gas più leggeri dell'aria per generare portanza.

Tra questi i più adatti alla manipolazione aerea sono i multicotteri perché:

- possono rimanere in volo stazionario durante le operazioni di manipolazione più stabilmente rispetto ad altre tipologie di velivolo grazie alla loro manovrabilità;
- sono in grado di decollare e atterrare verticalmente e non necessitano di piste di decollo;
- sono relativamente economici e maggiormente diffusi;

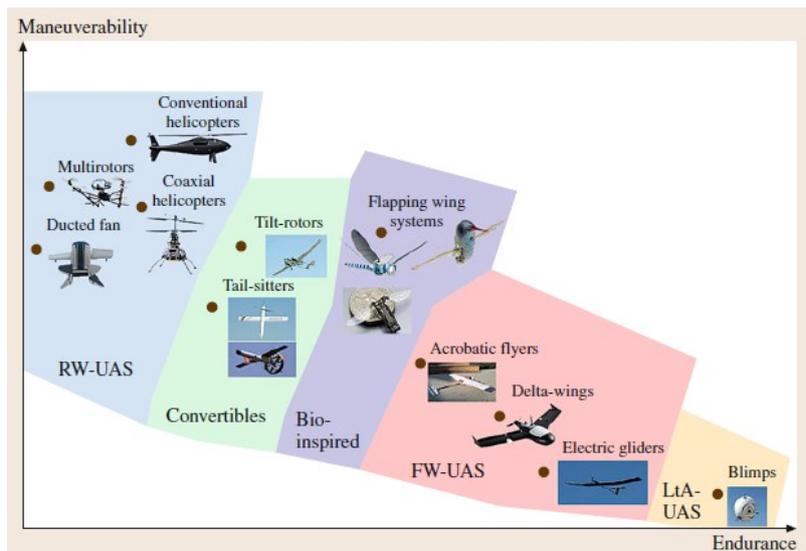


Figura 1. 2 Classificazione degli UAV in funzione di manovrabilità e autonomia [5]

### 1.2.2 Modello del drone utilizzato

In questa sezione verrà descritto il modello matematico del multirottore adatto ad essere equipaggiato con un manipolatore grazie alla sua capacità di carico [14].

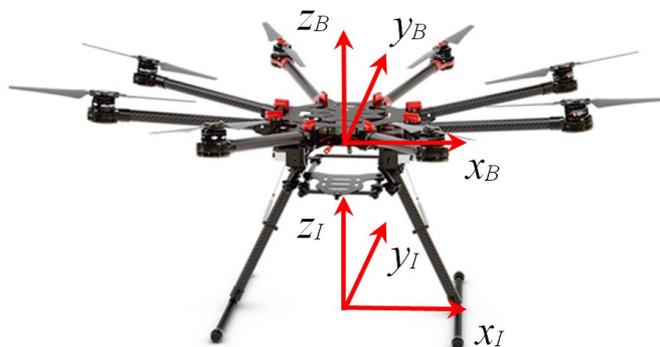


Figura 1. 3 DJI S1000: terna solidale al drone (B) e terna inerziale(I) [14]

Il drone considerato è un DJI S1000 ed ha una massa di circa 4 kg, è costituito da un telaio in CFRP con otto bracci su cui sono fissati i rispettivi rotori tutti uguali tra loro, al di sotto del corpo centrale è fissata la batteria. Delle otto eliche la metà ruota in verso antiorario e l'altra metà in verso orario. Considerando il sistema di riferimento solidale al drone con origine nel baricentro e numerando i rotori come in figura 4, L'UAV è controllato agendo sulla velocità angolare delle eliche modificandone la portanza generata:

- per aumentare l'altitudine ( $z_B$ ) si aumenta la velocità di rotazione di tutti i rotori;
- per ruotare il drone attorno all'asse  $x_B$  (rollio positivo) si aumenta la velocità di rotazione dei rotori 1, 2, 3, 4 e si riduce quella degli altri;
- per ruotare il drone attorno all'asse  $y_B$  (beccheggio positivo) si aumenta la velocità di rotazione dei rotori 3, 4, 5, 6 e si riduce quella degli altri;

- per ruotare il drone attorno all'asse  $z_B$  (imbardata positiva) si aumenta la velocità di rotazione dei rotori 2, 4, 6, 8 e si riduce quella degli altri;

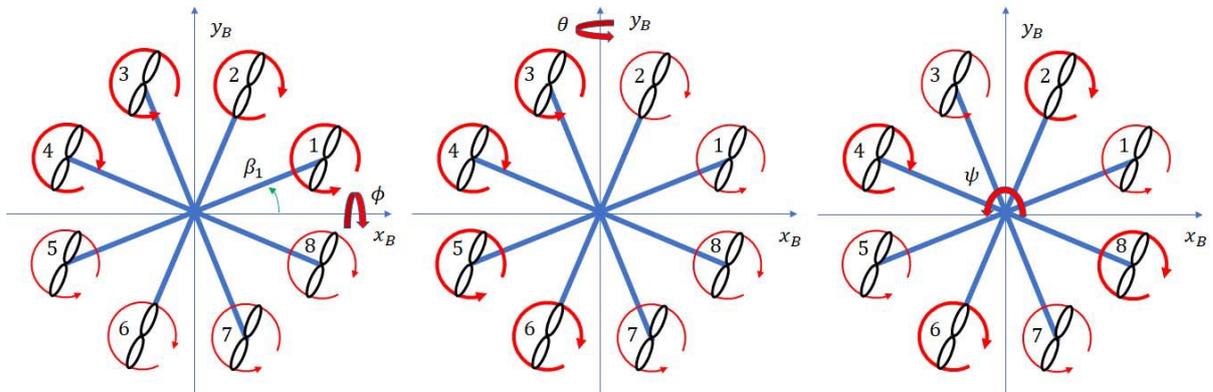


Figura 1. 4 Controllo di rollio, beccheggio e imbardata tramite la velocità angolare dei rotori, linee più spesse indicano velocità maggiori [10]

Con le ipotesi:

- l'UAV è trattato come un corpo rigido;
- le forze aerodinamiche sono trattate in maniera semplificata considerando il lift e il drag generati da ciascuna elica proporzionali al quadrato della sua velocità angolare;
- i vettori delle forze generate dalle eliche sono considerati paralleli a  $z_B$ ;
- si considerano condizioni vicine a quelle di hovering;

la dinamica tridimensionale del drone soggetto alla forza peso è descritta da:

$$\begin{aligned}
 m_{UAV} \ddot{x} &= \phi U_1 \\
 m_{UAV} \ddot{y} &= \theta U_1 \\
 m_{UAV} \ddot{z} &= -m_{UAV} g + U_1 \\
 I_x \ddot{\theta} &= \dot{\phi} \dot{\psi} (I_z - I_x) + I_{zr} \dot{\phi} \Omega - U_2 \\
 I_y \ddot{\phi} &= \dot{\theta} \dot{\psi} (I_y - I_z) + I_{zr} \dot{\theta} \Omega + U_3 \\
 I_z \ddot{\psi} &= \dot{\phi} \dot{\theta} (I_x - I_y) + U_4
 \end{aligned} \tag{1. 1}$$

Con

$$\begin{aligned}
 \Omega &= \Omega_1 - \Omega_2 + \Omega_3 - \Omega_4 + \Omega_5 - \Omega_6 + \Omega_7 - \Omega_8 \\
 U_1 &= b(\Omega_1^2 - \Omega_2^2 + \Omega_3^2 - \Omega_4^2 + \Omega_5^2 - \Omega_6^2 + \Omega_7^2 - \Omega_8^2) \\
 U_2 &= b[s(\beta_1)\Omega_1^2 + s(\beta_2)\Omega_2^2 + s(\beta_3)\Omega_3^2 + s(\beta_4)\Omega_4^2 + s(\beta_5)\Omega_5^2 + s(\beta_6)\Omega_6^2 + s(\beta_7)\Omega_7^2 + s(\beta_8)\Omega_8^2] \\
 U_3 &= b[c(\beta_1)\Omega_1^2 + c(\beta_2)\Omega_2^2 + c(\beta_3)\Omega_3^2 + c(\beta_4)\Omega_4^2 + c(\beta_5)\Omega_5^2 + c(\beta_6)\Omega_6^2 + c(\beta_7)\Omega_7^2 + c(\beta_8)\Omega_8^2] \\
 U_4 &= d(-\Omega_1^2 + \Omega_2^2 - \Omega_3^2 + \Omega_4^2 - \Omega_5^2 + \Omega_6^2 - \Omega_7^2 + \Omega_8^2) - I_{zr} \Omega
 \end{aligned}$$

Dove:  $m_{UAV}$  è la massa del drone;  $I_x, I_y, I_z$  sono le componenti del tensore d'inerzia diagonale dell'UAV;  $I_{zr}$  è il momento d'inerzia baricentrico delle eliche rispetto all'asse z;  $\Omega_i$  è il modulo della velocità angolare dell'i-esimo rotore;  $\beta_i$  è l'angolo tra l'asse  $x_B$  e l'i-esimo braccio;  $b, d$  sono rispettivamente il coefficiente di lift e di drag delle eliche.

$\Omega$  è nullo quando il drone è soggetto alla forza peso e in condizioni di hovering.  $U_1$  è la spinta generata da tutti i rotori e la sua direzione nel sistema di riferimento inerziale dipende dall'inclinazione dell'UAV che è invece legata ai momenti  $U_2, U_3, U_4$  attorno agli assi della terna  $x_B, y_B, z_B$ .

Attraverso un sistema di controllo agente sulle velocità dei rotori  $\Omega_i$  e quindi su  $U_1, U_2, U_3, U_4$  è possibile mantenere l'altitudine e l'orientazione desiderata dell'UAV. Il moto in direzione x e y non può essere controllato direttamente poiché il sistema è sottoattuato, nonostante ciò, data una traiettoria in x e y questa può essere seguita controllando opportunamente l'orientazione del drone.

In questa tesi il drone verrà modellato come un corpo rigido su cui agiscono le forze e le coppie di controllo  $U_1, U_2, U_3, U_4$ ; inoltre per semplicità verranno considerati moti in un piano verticale e si avrà un'unica rotazione ammissibile che verrà indicata con  $\phi$ . Le equazioni del moto, includendo anche il caso di angoli non piccoli, si riducono quindi a:

$$\begin{aligned} m_{UAV} \ddot{x} &= -s(\phi)U_1 \\ m_{UAV} \ddot{y} &= -m_{UAV}g + c(\phi)U_1 \\ I_z \ddot{\phi} &= U_2 \end{aligned} \quad (1. 2)$$

Con l'aggiunta del manipolatore le equazioni del moto si complicano quindi è stato realizzato un modello multibody in ambiente Adams in cui l'UAV è definito da un corpo rigido su cui agiscono i controlli  $U_1, U_2$  come appena descritto. I parametri inerziali che verranno utilizzati in questa tesi sono quelli del drone DJI S1000:

massa [kg]	4.2
Momento d'inerzia attorno all'asse orizzontale [kg m <sup>2</sup> ]	0.4097
Momento d'inerzia attorno all'asse verticale [kg m <sup>2</sup> ]	0.3421

Tabella 1. 1 Parametri inerziali del drone DJI S1000

Anche se in questa tesi il multicottero è considerato un corpo rigido, in futuro può essere utile considerare anche le vibrazioni della struttura: in [15] è stata svolta un'analisi modale sperimentale e sono stati vari modi di vibrare di questo drone, il primo modo di vibrare si presenta ad una frequenza di 19.57 Hz.

### 1.2.3 Controllo del multicottero e modalità di volo

Come si può vedere in [16][17][18][19][20], sono state proposte diverse strategie di controllo per il controllo dei multicotteri. Nonostante ciò, dato che, come mostrato in precedenza, non è possibile controllare contemporaneamente tutti i sei gradi di libertà, il sistema di controllo ha in generale un'architettura costituita da più anelli concentrici i loop principali, distinti dal fatto di essere eseguiti con frequenze diverse, sono:

- 1) anello di controllo esterno (position controller): riceve come input dei riferimenti per la posizione nello spazio e per l'angolo di imbardata e genera dei riferimenti per l'altitudine e per l'orientazione del drone
- 2) anello di controllo interno (attitude controller): riceve come input i riferimenti di altitudine e orientazione e genera i riferimenti per le forze e le coppie agenti sul drone.

Data una traiettoria da seguire nello spazio e l'imbardata desiderata in ogni istante, il position controller determina l'inclinazione del drone necessaria a seguirle generando così l'input per l'attitude controller.

Il loop di controllo interno, che viene eseguito con una frequenza maggiore rispetto a quello esterno, utilizza per la stima di rollio, beccheggio e imbardata i girometri contenuti nell'IMU (Inertial Measurement Unit) mentre l'altitudine può essere misurata con sensori a ultrasuoni oppure con barometri.

L'anello di controllo esterno necessita della stima della posizione. Nei droni commerciali questa viene in genere ricavata sfruttando gli accelerometri dell'IMU e GNSS, inoltre viene stimata la velocità attraverso sistemi di visione costituiti da videocamere a bordo del velivolo; quando è necessaria una stima più accurata vengono utilizzati ulteriori sensori i cui dati vengono spesso trattati con un filtro Kalman [17]. In [21] viene descritto un autopilota diffuso e, anche se sono presenti diversi loop di controllo, possono essere distinte la parte che riceve l'input di posizione e quella, eseguita con maggior frequenza, che riceve in input gli angoli.

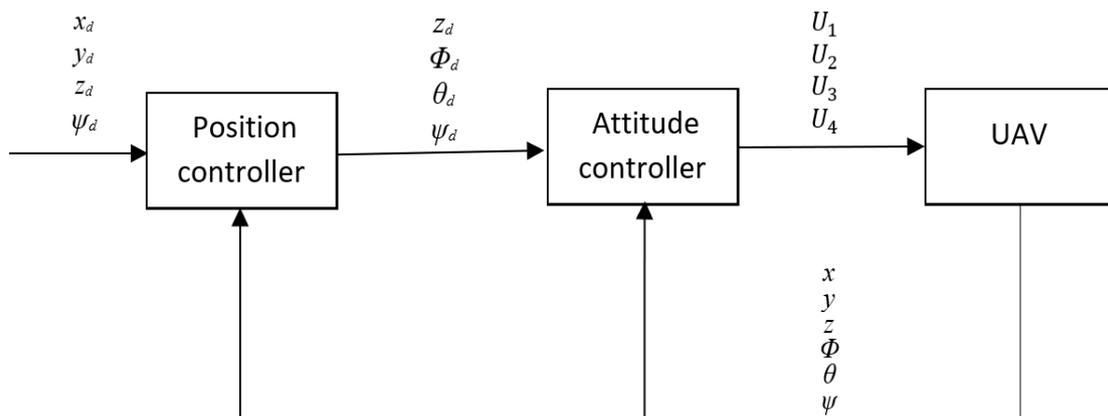


Figura 1. 5 Architettura del controllo del drone. Il pedice 'd' indica le grandezze di riferimento

A meno dei casi particolari in cui il position controller richiede un costo computazionale troppo elevato, i loop di controllo vengono eseguiti da un computer a bordo del drone che interpreta gli input provenienti dal pilota; si possono avere diverse situazioni che corrispondono a diverse modalità di volo [22], quelle più interessanti per operazioni di manipolazione aerea sono le seguenti:

- il sistema di controllo è come quello sopra descritto e i comandi del pilota sono la posizione e l'imbardata del drone. In questa modalità quando non vengono impartiti comandi dal pilota il drone cerca di mantenere la posizione rimanendo in volo stazionario, se agisce un disturbo esterno come il vento il drone si inclina in modo da contrastarne la forza. Per utilizzare questa modalità è necessario misurare la posizione del drone quindi non è sempre disponibile, per esempio per la maggior parte dei droni commerciali è necessario un sufficiente segnale GPS oppure superfici con texture ben visibili che il sistema di visione possa usare come riferimento.
- il sistema di controllo non utilizza il position controller e i comandi del pilota sono l'orientazione e l'altitudine del drone ( $z_d, \Phi_d, \theta_d, \psi_d$ ). Dato che questa modalità non richiede la stima della posizione è possibile utilizzarla in più situazioni rispetto a quella precedente, per esempio in assenza di segnale GPS; per contro, senza input dal pilota, nel caso di disturbi esterni come il vento non è in grado di mantenere il drone in condizioni di hovering. Se un disturbo fa inclinare il drone quest'ultimo subisce un'accelerazione a causa della componente orizzontale della spinta complessiva dei rotori, anche dopo aver recuperato l'assetto il drone continuerà a muoversi a velocità costante. Poiché questa modalità di volo richiede una maggiore abilità del pilota solitamente è disponibile solo su multicotteri destinati ad utilizzi professionali.

Nel modello Adams utilizzato per simulare il drone nel piano è stata considerata quest'ultima modalità di volo, è stato considerato un controllo di tipo PID sia sull'altitudine  $y$  che sulla rotazione  $\phi$  agendo rispettivamente sulla forza di controllo  $U_1$  e sulla coppia di controllo  $U_2$ . Considerando le condizioni di hovering:

$$U_1 = -k_{py}y - k_{dy}\dot{y} - k_{iy} \int_0^t y dt \quad (1.3)$$

$$U_2 = -k_{p\phi}\phi - k_{d\phi}\dot{\phi} - k_{i\phi} \int_0^t \phi dt$$

Verranno utilizzati principalmente due set di parametri per il controllo PID del drone: *PID rigido* e *PID morbido*.

		$k_p$	$k_i$	$k_D$
PID "rigido"	altitudine	1000 N/m	500 N s/m	500 N/(m s)
	rollio	600 Nm/rad	500 Nm s/rad	30 Nm/(rad s)
PID "morbido"	altitudine	37 N/m	8 N s/m	18 N/(m s)
	rollio	40 Nm/rad	35 Nm s/rad	9 Nm/(rad s)

Tabella 1. 2 Parametri dei controllori PID su altitudine e rollio

#### 1.2.4 Interazione drone-manipolatore

L'aggiunta di un manipolatore all'UAV ne altera la dinamica, a sua volta il manipolatore non ha più una base fissa. Per il controllo dell'UAM si possono distinguere due approcci [23]:

- controllo disaccoppiato di drone e manipolatore: drone e manipolatore sono considerati due sottosistemi separati e vengono controllati separatamente, nei casi più semplici l'interazione tra i due elementi viene ignorata e considerata come un disturbo mentre in

altri casi certi aspetti dell'interazione tra i due sistemi vengono modellati, per esempio in [24] si tiene conto dello spostamento del baricentro dell'UAM causato dal movimento del manipolatore.

- controllo accoppiato di drone e manipolatore: l'UAM viene considerato un unico sistema e gli stati del drone e del manipolatore vengono controllati simultaneamente. Poiché il modello dell'UAM è complesso, soprattutto quando vengono utilizzati manipolatori ridondanti, ed è necessaria una maggior potenza computazionale, questo approccio è meno diffuso anche se permette di raggiungere risultati migliori.

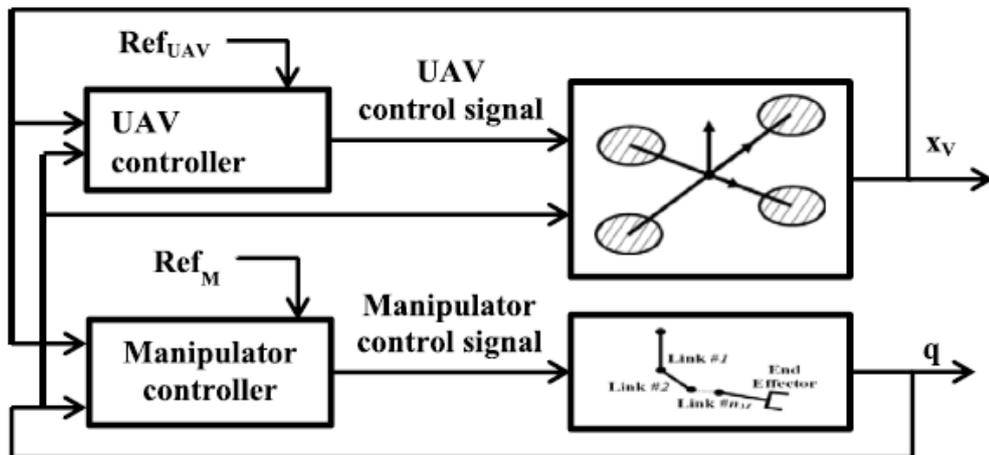


Figura 1. 6 Controllo disaccoppiato dell'UAM.  $x_v$ ,  $q$  indicano rispettivamente lo stato del drone e quello del manipolatore;  $Ref_{UAV}$  e  $Ref_M$  indicano gli stati che di riferimento [23]

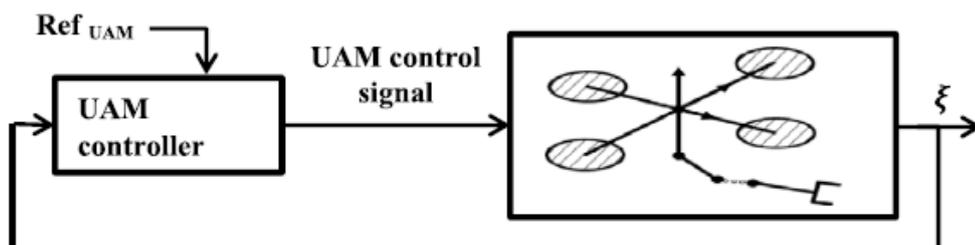


Figura 1. 7 Controllo accoppiato dell'UAM.  $\xi$  indica lo stato del sistema;  $Ref_{UAM}$  indica lo stato di riferimento [23]

### 1.3 Cinematica dei manipolatori

Vengono ora introdotte le nozioni principali sulla cinematica dei manipolatori necessarie a descrivere la relazione tra la configurazione del manipolatore e posizione/orientazione dell'organo terminale (end effector), si è fatto riferimento a [25]. Verranno considerati manipolatori a catena aperta e costituiti da corpi rigidi.

### 1.3.1 Cinematica diretta e inversa

Il manipolatore è costituito da corpi (link) collegati tra loro da  $n$  giunti che in genere sono rotoidali o traslazionali, la configurazione del manipolatore è descritta dalle variabili di giunto che vengono raccolte in un vettore  $(n \times 1) q$ , ad una estremità della catena cinematica è presente l'end effector che può essere un meccanismo per afferrare oggetti o un utensile.

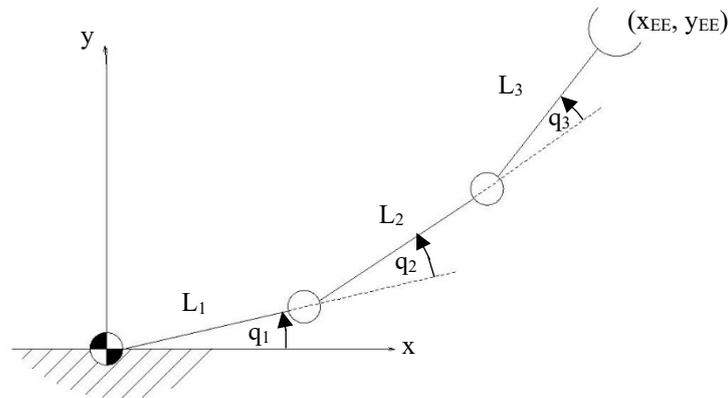


Figura 1. 8 Manipolatore piano a 3 gdl con indicazione delle variabili di giunto

La cinematica diretta permette di determinare posizione ed orientamento dell'organo terminale rispetto alla terna di riferimento della base a partire dalle variabili di giunto raccolte nel vettore  $q$ . Per una catena cinematica aperta questo problema ha sempre una soluzione che può essere trovata agendo ricorsivamente.

Il problema cinematico inverso riguarda invece la determinazione delle variabili di giunto, e quindi della configurazione del manipolatore una volta assegnati una o più componenti di posizione e orientamento dell'end effector; a differenza del problema diretto presenta delle difficoltà:

- Le equazioni da risolvere sono non lineari, non è quindi sempre possibile determinare una soluzione in forma chiusa;
- Possono non esistere soluzioni;
- Possono esistere infinite soluzioni se il manipolatore è ridondante;
- Possono esistere più soluzioni;

In questa tesi verranno considerati principalmente manipolatori con giunti rotoidali, tuttavia nella manipolazione aerea sono anche usati manipolatori con giunti traslazionali [9].

### 1.3.2 Cinematica differenziale

La cinematica differenziale studia la relazione tra le velocità dei giunti ( $\dot{q}$ ) e le corrispondenti velocità lineari e angolari dell'end effector ( $v$ ). Tale relazione è lineare nella velocità dei giunti e

può essere descritta attraverso una matrice che prende il nome di Jacobiano geometrico e dipende solo dalla configurazione e dalla geometria del manipolatore:

$$v = J(q) \dot{q} \quad (1.4)$$

La dimensione del vettore  $v$  dipende dal task da svolgere, per esempio se si vuole seguire una traiettoria nel piano senza vincoli sulla rotazione è un vettore  $2 \times 1$ .

Lo Jacobiano permette di individuare le configurazioni singolari del manipolatore, determinare se il manipolatore è ridondante, costruire algoritmi di inversione cinematica o dinamica. In questa tesi verrà utilizzata quest'ultima proprietà per determinare l'andamento delle variabili di giunto necessarie a seguire una data traiettoria dell'end effector partendo da una configurazione iniziale nota procedendo nel seguente modo:

- 1) Si discretizza il tempo e si descrive la traiettoria dell'end effector con la velocità corrispondente ad ogni istante;
- 2) Alla  $k$ -esima iterazione si calcola lo jacobiano geometrico in base alla configurazione nota dalle iterazioni precedenti;
- 3) Si determina la velocità dei giunti all'iterazione  $k$  invertendo la relazione lineare (1.4) :

$$\dot{q}_k = J^{-1}(q_{k-1}) v_k \quad (1.5)$$

- 4) Si determina la nuova configurazione per integrazione:  $q_k = q_{k-1} + \dot{q}_k \Delta t$

### 1.3.3 Ridondanza

Quando il numero di gradi di libertà del manipolatore ( $n$ ) è superiore al numero di variabili necessario ad eseguire una data operazione ( $m$ ) il manipolatore si dice cinematicamente ridondante, è importante notare che un manipolatore può non essere ridondante quando esegue un task ed esserlo eseguendone un altro.

In questo caso lo jacobiano non è una matrice quadrata e non è possibile risolvere la cinematica inversa come fatto nel paragrafo precedente. Si imposta quindi un problema di minimo soggetto al vincolo cinematico (1.4) e funzione obiettivo

$$g = \frac{1}{2}(\dot{q} - \dot{q}_0)^T W (\dot{q} - \dot{q}_0) \quad (1.6)$$

Dove  $W$  ( $n \times n$ ) è la matrice simmetrica definita positiva dei pesi e  $\dot{q}_0$  è un vettore che contiene le velocità desiderabili dei giunti. Con il metodo dei moltiplicatori di Lagrange si ottiene:

$$g'(\dot{q}, \lambda) = \frac{1}{2}(\dot{q} - \dot{q}_0)^T W (\dot{q} - \dot{q}_0) + \lambda^T (v - J \dot{q}) \quad (1.7)$$

Ponendo  $\frac{\partial g'}{\partial \dot{q}} = 0$  e  $\frac{\partial g'}{\partial \lambda} = 0$  :

$$\dot{q} = W^{-1} J^T (J W^{-1} J^T)^{-1} v + (I - W^{-1} J^T (J W^{-1} J^T)^{-1} J) \dot{q}_0 \quad (1.8)$$

Il primo termine corrisponde alla soluzione che minimizza  $\dot{q}^T W \dot{q}$  e quindi, nel caso  $W$  sia la matrice identità, la norma delle velocità dei giunti; il secondo termine corrisponde invece ad un vettore di velocità dei giunti che non altera le velocità dell'end effector e può essere sfruttato per ottimizzare altri obiettivi scegliendo opportunamente  $\dot{q}_0$ .

Se  $W$  è la matrice identità la soluzione che minimizza la norma di  $\dot{q}$  è:

$$\dot{q} = J^T (J J^T)^{-1} v = v \quad (1.9)$$

e la matrice  $J^\dagger = J^T (J J^T)^{-1}$  è la pseudo-inversa destra dello Jacobiano.

Analogamente a quanto fatto nel paragrafo precedente la cinematica inversa può essere risolta iterativamente attraverso la (1.8) dove  $\dot{q}_0$  può essere utilizzato per minimizzare/massimizzare localmente un obiettivo, per esempio per evitare ostacoli o configurazioni singolari.

Esistono diversi metodi di ottimo locale per la risoluzione della cinematica inversa di manipolatori ridondanti [26].

## CAPITOLO 2: Compensazione dei movimenti della base

In questo capitolo verrà risolto un problema di inseguimento di traiettoria per un UAM: come già accennato nella manipolazione aerea i movimenti del manipolatore influenzano il moto dell'UAV per cui è necessario tener conto di questo fenomeno nella cinematica inversa. Verrà quindi introdotto lo Jacobiano generalizzato, partendo dal caso di drone con controllo ideale i concetti verranno sviluppati per considerare un drone con controllo PID realistico; in parallelo verrà incluso l'effetto delle forze sul moto dell'UAM e quindi sulla cinematica inversa, validando i risultati in Adams. Alla fine del capitolo si disporrà di un metodo per seguire una data traiettoria determinando anche lo stato del velivolo.

### 2.1 Jacobiano generalizzato per controllo ideale

Considerando per semplicità il caso piano, sul multicottero in condizioni di hovering agiscono: una coppia di controllo  $U_2$  che contrasta le rotazioni del drone; una forza di controllo  $U_1$  che è parallela all'asse verticale della terna solidale al drone. Se si assume che la coppia di controllo riesca a compensare istantaneamente ogni disturbo la rotazione del drone è vincolata ad essere nulla; analogamente assumendo che la forza di controllo, che quindi ha sempre direzione verticale, compensi istantaneamente ogni disturbo anche l'altitudine dell'UAV è vincolata. In queste condizioni il controllo del drone è ideale e può essere assimilato ad un vincolo di tipo carrello agente sull'UAV che resta libero solo di traslare orizzontalmente.

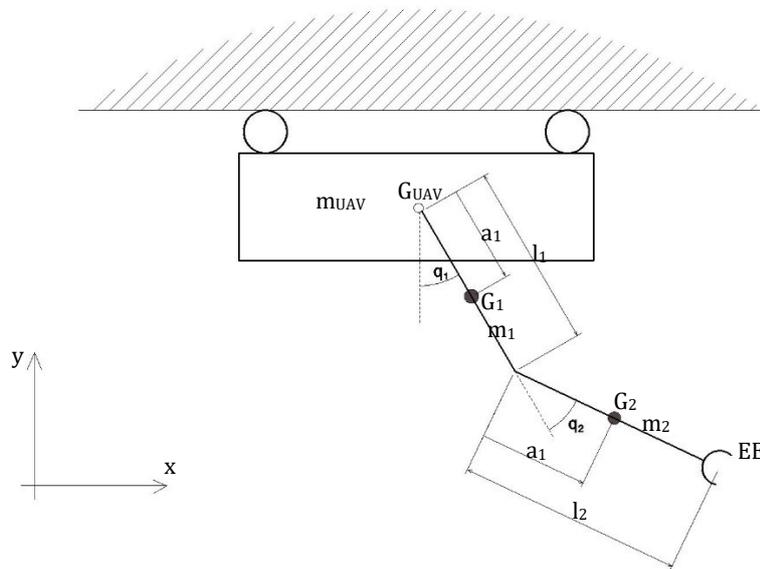


Figura 2. 1 Schema dell'UAM con controllo ideale

$m_{UAV}$	masse del drone	4.2 kg
$m_1, m_2$	massa dei link	1 kg
$a_1, a_2$	distanza del baricentro del link dal giunto con il link precedente/l'UAV	0.065 m
$l_1, l_2$	lunghezza del link	0.13 m

Tabella 2. 1 Parametri dell'UAM

Si vuole ora seguire una traiettoria, definita attraverso l'andamento della velocità nel tempo, con l'organo terminale. In questa tesi verrà considerata una traiettoria nel piano e non ci si interesserà dell'orientazione dell'end effector per cui in ogni istante il vettore che ne contiene le velocità  $v$  avrà due componenti, per non avere ridondanza viene ora considerato un manipolatore a due gradi di libertà:

$$\begin{Bmatrix} v_x \\ v_y \end{Bmatrix} = J(q) \begin{Bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{Bmatrix} \quad (2.1)$$

Volendo risolvere la cinematica inversa è necessario determinare la matrice 2x2 che lega velocità dell'organo terminale e quelle dei giunti. Indicando con  $l$  le lunghezze dei vari link, per un manipolatore con base fissa questa matrice è il seguente Jacobiano:

$$J = \begin{bmatrix} J_{11}(q) & J_{12}(q) \\ J_{21}(q) & J_{22}(q) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 c(q_1) + l_2 c(q_1 + q_2) & l_2 c(q_1 + 1_2) \\ l_1 s(q_1) + l_2 s(q_1 + q_2) & l_2 s(q_1 + 1_2) \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Nel caso di base mobile va invece definito lo Jacobiano generalizzato che è stato introdotto da tempo nell'ambito di manipolatori che operano nello spazio in assenza di gravità [27] e si basa sul fatto che le coppie esercitate su ogni giunto sono forze interne al sistema costituito da base e manipolatore, per cui valgono la conservazione della quantità di moto e del momento angolare. Combinando queste equazioni con lo Jacobiano (2.2) si determina lo Jacobiano generalizzato.

Nel caso di controllo ideale del drone la base trasla solo lungo l'asse x per cui è sufficiente scrivere la conservazione della quantità di moto lungo quest'asse, assumendo che la inizialmente il sistema sia fermo la quantità di moto è nulla:

$$(m_{UAV} + m_1 + m_2)\Delta\dot{x} + m_1 a_1 c(q_1)\dot{q}_1 + m_2(l_1 c(q_1) + a_2 c(q_1 + q_2))\dot{q}_1 + m_2 a_2 c(q_1 + q_2)\dot{q}_2 = 0 \quad (2.3)$$

Dove  $\Delta\dot{x}$  è la velocità di traslazione della base e gli altri termini sono elencati in Tabella 2.1.

La velocità di traslazione della base si somma a quella dell'end effector legata alla cinematica del manipolatore, per cui esprimendo  $\Delta\dot{x}$  in funzione delle velocità dei giunti dalla (2.3) si ottiene:

$$\begin{Bmatrix} v_x \\ v_y \end{Bmatrix} = J \begin{Bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \Delta\dot{x} \\ 0 \end{Bmatrix} = \left( J + \begin{bmatrix} A_1 & A_2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{Bmatrix} \quad (2.4)$$

dove i termini che legano la velocità della base a quelle dei giunti sono:

$$A_1 = -\frac{m_1 a_1 c(q_1) + m_2(l_1 c(q_1) + a_2 c(q_1 + q_2))}{m_{UAV} + m_1 + m_2} \quad (2.5)$$

$$A_2 = -\frac{m_2 a_2 c(q_1 + q_2)}{m_{UAV} + m_1 + m_2}$$

Lo Jacobiano generalizzato per drone con controllo ideale è quindi:

$$J_{gen} = \begin{bmatrix} J_{11}(q) + A_1(q) & J_{12}(q) + A_2(q) \\ J_{21}(q) & J_{22}(q) \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Nel caso il manipolatore stia tenendo un carico, per semplicità descritto come un'ulteriore massa ( $m_c$ ) solidale all'end effector, con baricentro allineato al secondo link, a distanza  $l_c$  dal giunto che collega i due link,  $A_1$  e  $A_2$  vengono sostituiti rispettivamente da:

$$A'_1 = -\frac{m_1 a_1 c(q_1) \dot{q}_1 + m_2 (l_1 c(q_1) + a_2 c(q_1 + q_2)) + m_c (l_1 c(q_1) + l_c c(q_1 + q_2))}{m_{UAV} + m_1 + m_2 + m_c} \quad (2.7)$$

$$A'_2 = -\frac{m_2 a_2 c(q_1 + q_2) + m_c l_c c(q_1 + q_2)}{m_{UAV} + m_1 + m_2 + m_c}$$

Uno script Matlab è stato implementato per risolvere la cinematica inversa dell'UAM utilizzando lo Jacobiano generalizzato così definito: dati come input la configurazione iniziale e la traiettoria desiderata dell'end effector (come profilo di velocità) lo script genera gli andamenti delle coordinate di giunto procedendo iterativamente come descritto nel paragrafo 1.3.2. Oltre a determinare la configurazione del manipolatore lo script determina anche la posizione lungo x del drone in accordo con l'ipotesi di controllo ideale.

Il metodo è stato quindi testato su un modello Adams dell'UAM: le velocità dei giunti determinate dallo script Matlab sono state imposte ai rispettivi giunti del modello multibody; prima è stato imposto il controllo ideale anche in Adams mentre in seguito su Adams è stato adottato il controllo PID rigido descritto in 1.2.3. Di seguito si riportano i risultati, in particolare gli errori di velocità e posizione misurati in Adams.

La traiettoria richiesta all'end effector consiste nello spostarsi verso destra (x positive) di 8 cm e verso il basso (y negative) di 15 cm e nel tornare indietro, vengono utilizzati profili trapezoidali di velocità con tempi di accelerazione di 0.5 s. Il giunto tra UAV e primo link (joint 0) è posto coincidente con il baricentro del drone e nella configurazione di partenza le variabili di giunto sono rispettivamente  $q_1 = -1.4 \text{ rad}$ ;  $q_2 = 2.8 \text{ rad}$ .

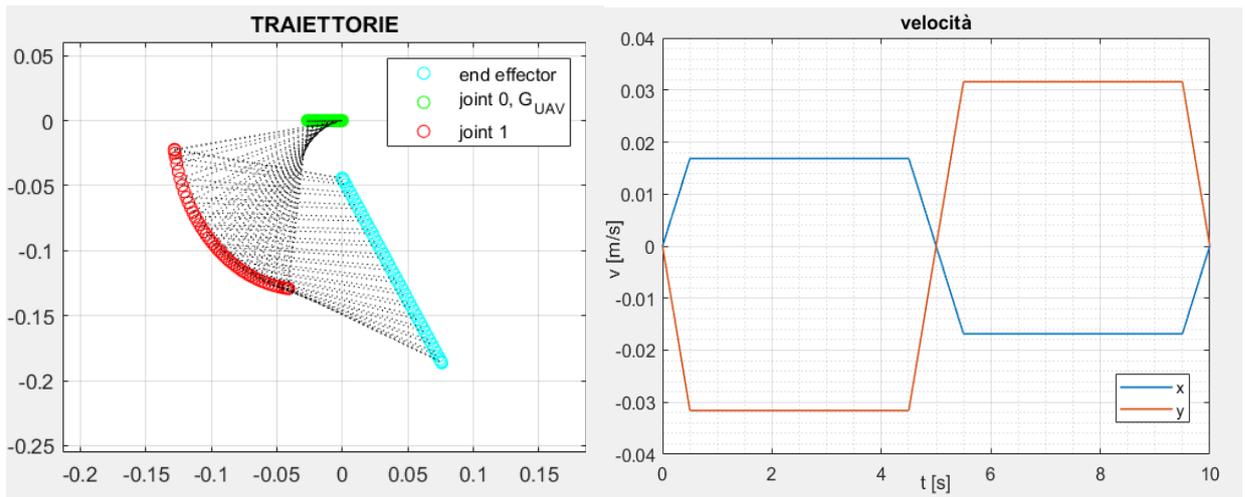


Figura 2. 2 A sinistra traiettorie dei vari elementi previste da Matlab con controllo ideale. A destra profili di velocità richiesti all'end effector.

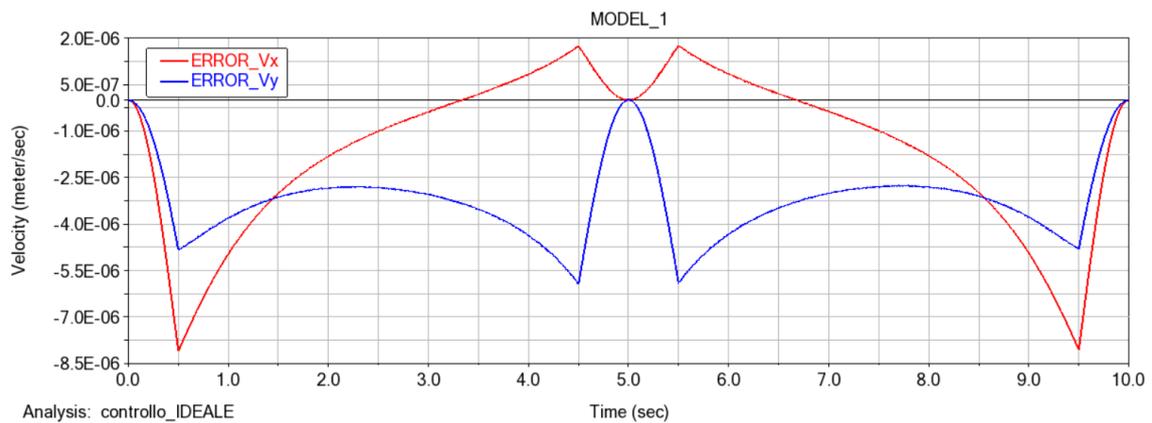


Figura 2. 3 Errore di velocità dell'end effector misurato in Adams con controllo ideale

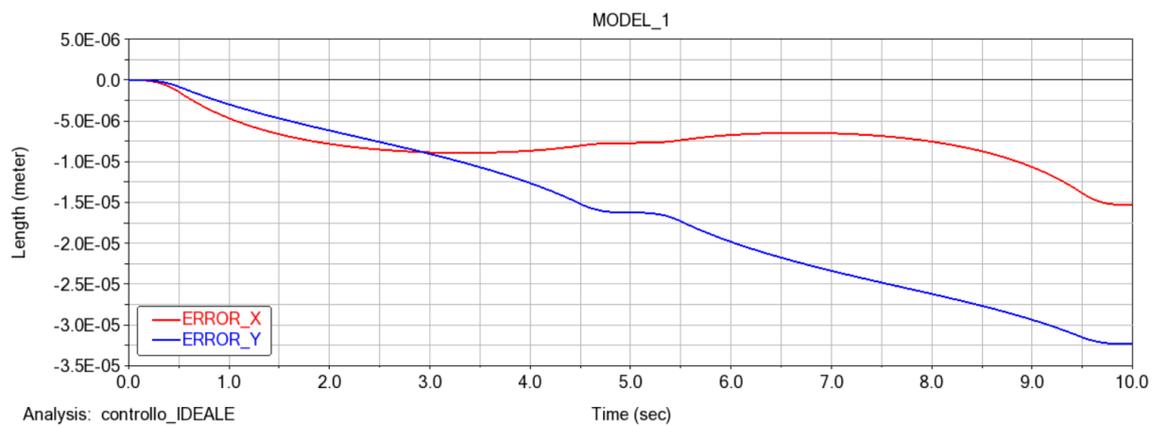


Figura 2. 4 Errore di posizione dell'end effector misurato in Adams con controllo ideale

Come si può osservare nel caso in cui anche in Adams viene utilizzato il controllo ideale la traiettoria viene seguita con successo: gli errori di velocità sono dell'ordine di  $1e-6$  m/s e quelli di posizione dell'ordine dei centesimi di millimetro.

Utilizzando il controllo PID sul drone invece l'errore di posizione in direzione orizzontale supera 7 cm; infatti appena inizia la simulazione il drone ruota in senso antiorario a causa del peso del manipolatore e quindi accelera verso sinistra a causa della componente orizzontale della spinta delle eliche. Dato che la forza di controllo  $U_1$  riesce a mantenere piccole le traslazioni verticali del drone, l'errore in direzione verticale non aumenta considerevolmente e rimane inferiore a 0.1 mm anche se si nota che nei tratti accelerati di traiettoria subisce un lieve aumento.

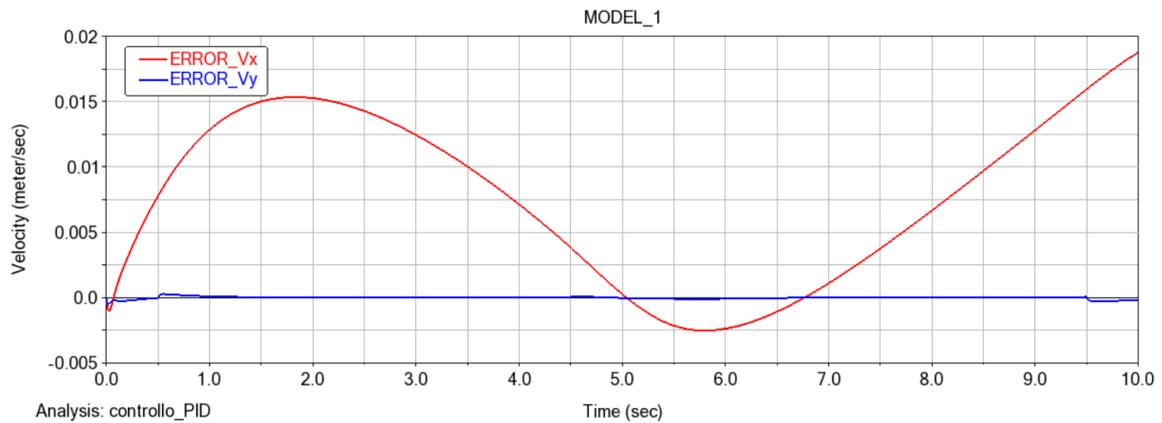


Figura 2. 5 Errore di velocità dell'end effector misurato in Adams con controllo PID rigido

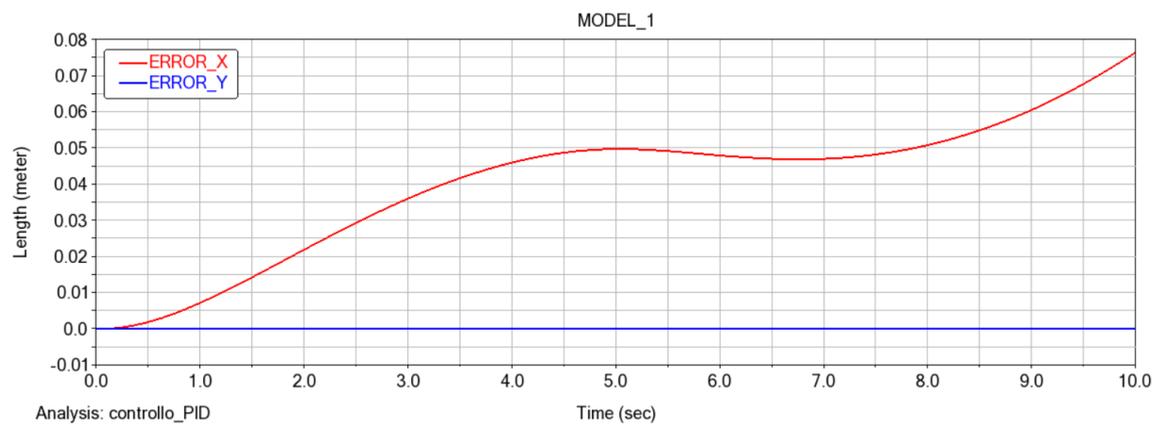


Figura 2. 6 Errore di posizione dell'end effector misurato in Adams con controllo PID rigido

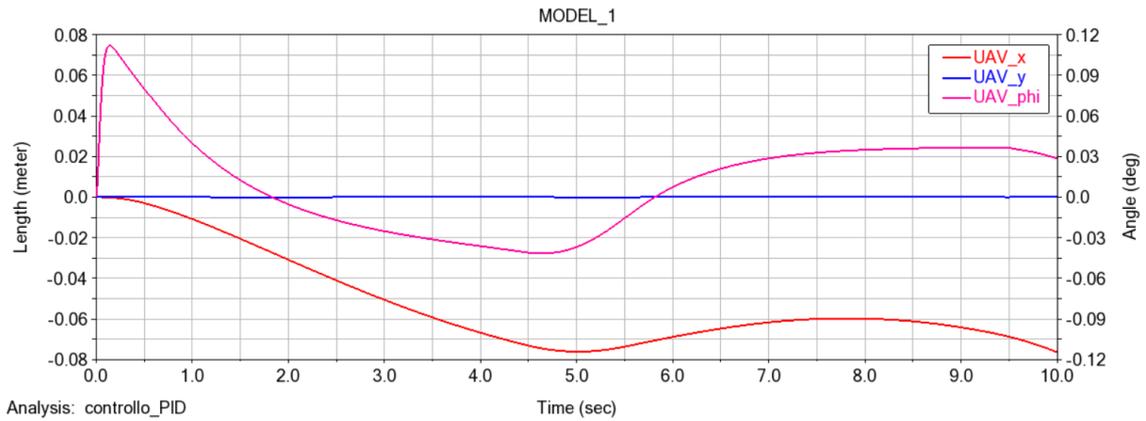


Figura 2. 7 Traslazioni e rotazioni del drone misurate in Adams con controllo PID rigido

## 2.2 Jacobiano generalizzato per controllo ideale con proiezione orizzontale della spinta delle eliche

Dalle simulazioni del paragrafo precedente si deduce che, rispetto al controllo ideale, il controllo PID del drone introduce delle forze esterne che spostano il sistema lungo x. Queste fanno sì che non sia più valida l'ipotesi di conservazione della quantità di moto e quindi per seguire la traiettoria voluta è necessario modificare la risoluzione della cinematica inversa tenendo conto di questa forza.

Poiché i controlli dell'UAV agiscono direttamente in direzione verticale e sul rollio si assumerà che gli spostamenti verticali della base e la sua rotazione rimangano trascurabili e quindi che il drone rimanga vincolato con un carrello.

Si procede allo stesso modo del paragrafo 2.1: la quantità di moto del sistema è

$$(m_{UAV} + m_1 + m_2)\Delta\dot{x} + m_1 a_1 c(q_1)\dot{q}_1 + m_2 (l_1 c(q_1) + a_2 c(q_1 + q_2))\dot{q}_1 + m_2 a_2 c(q_1 + q_2)\dot{q}_2 = p_x(t) \quad (2.8)$$

Con forze esterne non nulle la quantità di moto varia nel tempo, in particolare  $\frac{dp_x(t)}{dt} = F_x(t)$ , quindi la quantità di moto può ottenuta come:

$$p_x(t) = \int_0^t F_x dt + p_{x0} \quad (2.9)$$

che va riscritta in forma discreta per la risoluzione in Matlab:

$$p_{x(k)} = F_{x(k)}\Delta t + p_{x(k-1)} \quad (2.10)$$

quindi note le forze è possibile determinare la quantità di moto del sistema. Ora sommando come nella (2.4) la velocità di traslazione della base al contributo delle velocità dei giunti si nota che la quantità non nulla dà un contributo aggiuntivo che non dipende dalle velocità dei giunti:

$$\begin{Bmatrix} v_x \\ v_y \end{Bmatrix}_k = J_{gen} \begin{Bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{Bmatrix}_k + \frac{1}{m_{UAV}+m_1+m_2} \begin{Bmatrix} p_{xk} \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2.11)$$

Quindi alla k-esima iterazione della cinematica inversa le velocità dei giunti possono essere determinate tramite la (2.12):

$$\begin{Bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{Bmatrix}_k = J_{gen}^{-1}(q_{k-1}) \begin{Bmatrix} v_x - \frac{p_{xk}}{m_{UAV}+m_1+m_2} \\ v_y \end{Bmatrix}_k \quad (2.12)$$

La forza esterna orizzontale  $F_x$  viene determinata ad ogni iterazione dopo aver calcolato il rollio indotto dalle forze sul manipolatore, si noti che anche se nella formulazione dello Jacobiano generalizzato il rollio viene trascurato, è necessario tenerne conto nella determinazione delle forze.

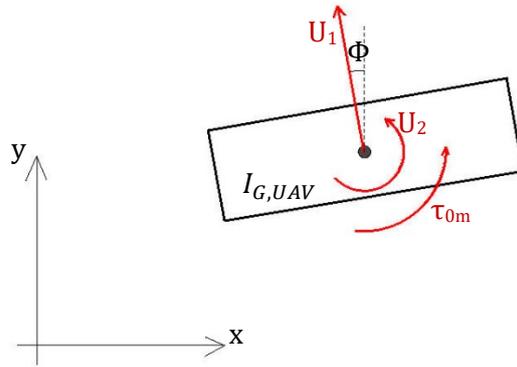


Figura 2. 8 Modello per la determinazione della componente lungo x della spinta delle eliche

La procedura è la seguente, per semplicità si considera il manipolatore fissato sul baricentro del drone:

- 1) A partire dallo stato alle iterazioni precedenti si calcola il momento baricentrico generato dal manipolatore sul drone, in questa fase il manipolatore viene considerato come se avesse base fissa. Nel caso in cui il primo link del manipolatore coincide con il baricentro del drone si ha:

$$\tau_{0m_k} = H_{man}(q_{k-1}) \frac{\dot{q}_{k-2} - \dot{q}_{k-1}}{\Delta t} + \tau_{0g}(q_{k-1}) \quad (2.13)$$

il primo termine a destra è dovuto all'accelerazione dei giunti mentre il secondo è dovuto alla gravità ed è il contributo più importante,  $H_{man}$  è una matrice  $2 \times 1$  tale che  $H_{man} \dot{q}$  è il momento angolare del manipolatore con polo il baricentro del drone.

- 2) Si calcola il momento dovuto al controllore PID:

$$U_{2k} = -k_{P\phi}\phi_{k-1} - k_{D\phi}\dot{\phi}_{k-1} - k_{I\phi}\sum_{j=1}^{k-1}\phi_j \Delta t \quad (2.14)$$

- 3) Dall'equazione del momento angolare del drone soggetto ai momenti  $\tau_{0m}$  e  $U_2$  si ricava la velocità di rollio del drone  $\dot{\phi}$  e la si integra, l'inerzia del manipolatore viene ignorata:

$$\dot{\phi}_k = \dot{\phi}_{k-1} - \frac{1}{I_{G,UAV}}(\tau_{0m_k} + U_{2k}) \quad (2.15)$$

$$\phi_k = \phi_{k-1} + \dot{\phi}_k \Delta t$$

- 4) Si calcola la forza esterna in direzione x:

$$F_{x_k} = -U_{1k} \cos(\phi_k) \quad (2.16)$$

Dove  $U_{1k}$  viene assunto in prima approssimazione uguale e opposto alla forza peso, nelle simulazioni già effettuate infatti non presenta variazioni percentuali maggiori del 5%.

Come per il caso precedente la cinematica inversa è stata risolta in Matlab e le risultanti velocità dei giunti sono state imposte in Adams monitorando l'errore sull'inseguimento di traiettoria e gli spostamenti del drone.

Rispetto al caso precedente è stata cambiata la configurazione iniziale in modo che all'istante iniziale i baricentri di manipolatore e drone siano allineati e quindi il sistema si trovi inizialmente in condizioni di equilibrio ( $q_1 = -0.32 \text{ rad}$   $q_2 = 2.228 \text{ rad}$ ). Visti i maggiori spostamenti dell'UAV previsti dallo script Matlab è stato necessario modificare la traiettoria dell'end effector: lo spostamento in x è stato ridotto da 8cm a 5cm e quello in y da 15 cm a 12 cm; inoltre è stato aggiunto un intervallo di tempo in cui l'end effector deve mantenere la posizione per verificare che l'UAM si stabilizzasse dopo aver eseguito l'operazione.

Si riportano i risultati ottenuti controllando il drone con il PID rigido.

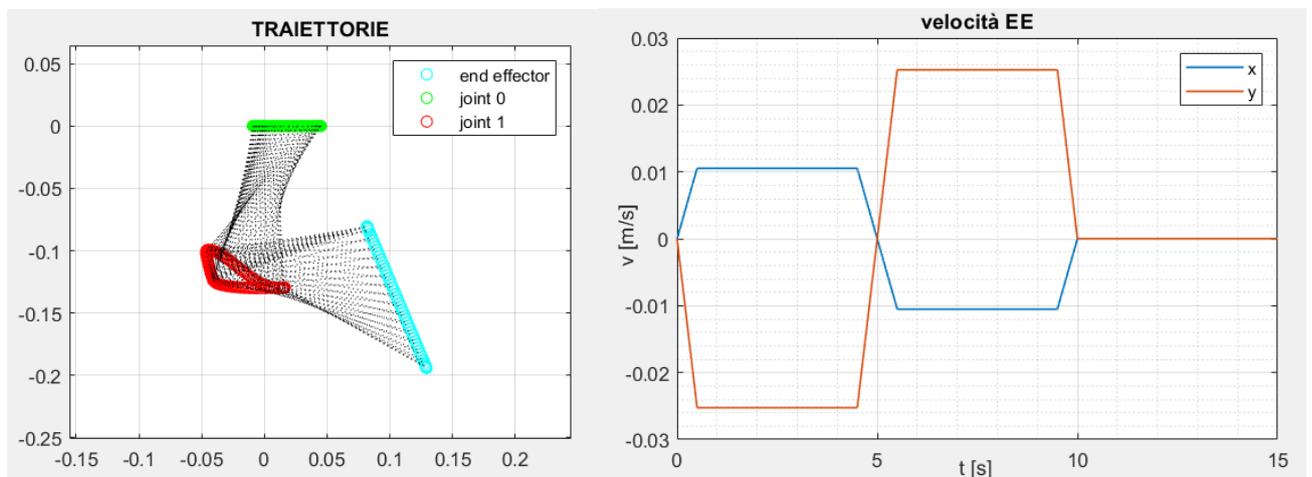


Figura 2.9 A sinistra traiettorie dei vari elementi previste da Matlab considerando la forza esterna orizzontale e controllo ideale. A destra i profili di velocità richiesti all'end effector

In questo caso l'UAM è in grado di seguire la traiettoria assegnata: risolvendo la cinematica inversa con un timestep pari a  $1e-3$  s, i massimi errori di posizione sono dell'ordine del decimo di millimetro.

Si osserva inoltre che, anche se la traiettoria imposta all'end effector è simmetrica, la traiettoria del manipolatore è differente tra andata e ritorno.

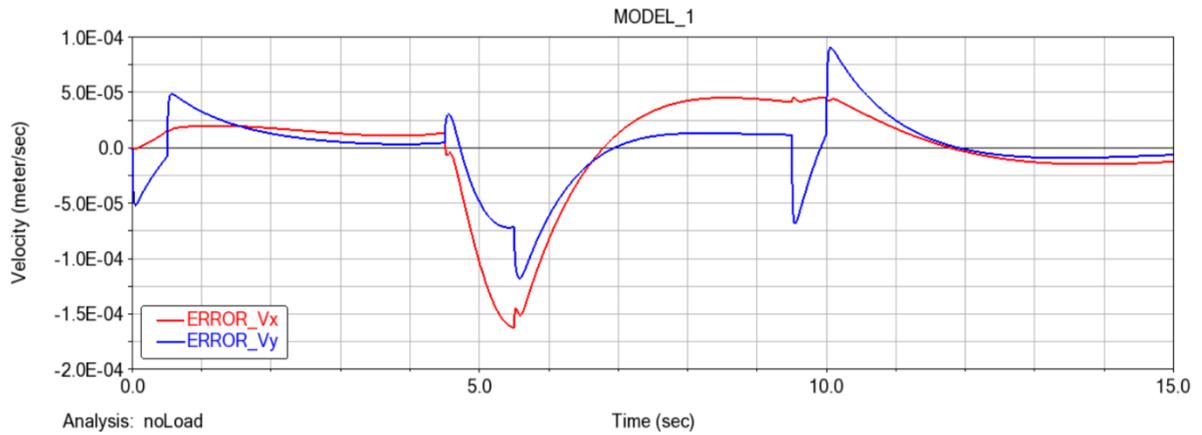


Figura 2. 10 Errore di velocità dell'end effector misurato in Adams considerando la forza esterna orizzontale nella cinematica inversa

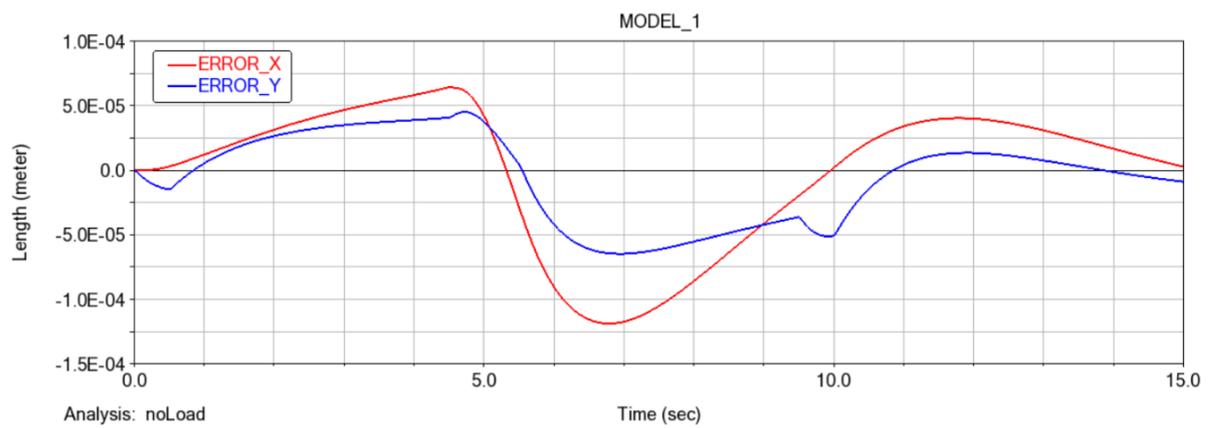


Figura 2. 11 Errore di posizione dell'end effector misurato in Adams considerando la forza esterna orizzontale nella cinematica inversa

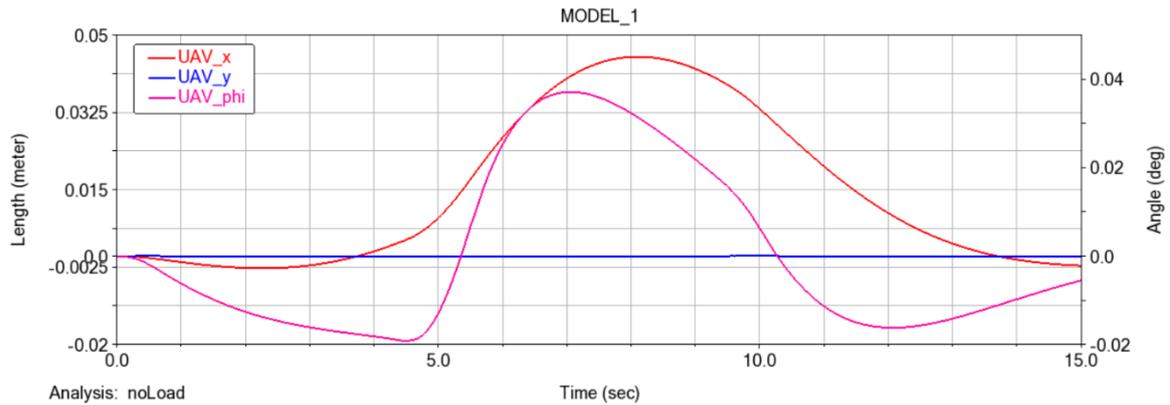


Figura 2. 12 Traslazioni e rotazioni del drone misurate in Adams considerando la forza esterna orizzontale nella cinematica inversa

Una volta risolto con successo l'inseguimento di traiettoria si è provato a simulare in maniera semplificata la presa di un oggetto: considerando sempre la traiettoria di figura 2.7 è stata aggiunta una massa puntiforme di 0.9 kg sull'end effector a partire dall'istante  $t=5$  s fino alla fine della simulazione. In Matlab questo è stato effettuato tenendo conto della massa del carico nello Jacobiano generalizzato utilizzando le (2.7); in Adams la presa del carico è stata simulata attivando un joint che fissa il secondo link al carico posizionato sull'end effector. La presa dell'oggetto verrà modellata meglio nel quarto capitolo.

In questo caso nell'istante in cui viene aggiunto il carico i controlli  $U_1$  e  $U_2$  non sono in grado di compensare istantaneamente il peso aggiuntivo e quindi non è più accettabile utilizzare lo Jacobiano generalizzato ricavato in ipotesi di controllo ideale. In particolare l'errore più rilevante è causato dall'abbassamento di 65 mm del drone che non è previsto dallo script Matlab e si ripercuote interamente sulla posizione dell'end effector; l'effetto del picco nel rollio è invece parzialmente compensato perché si tiene conto della sua influenza sulla forza orizzontale infatti l'errore lungo x rimane relativamente piccolo.

I risultati suggeriscono di includere nella cinematica inversa gli effetti delle forze esterne in direzione verticale.

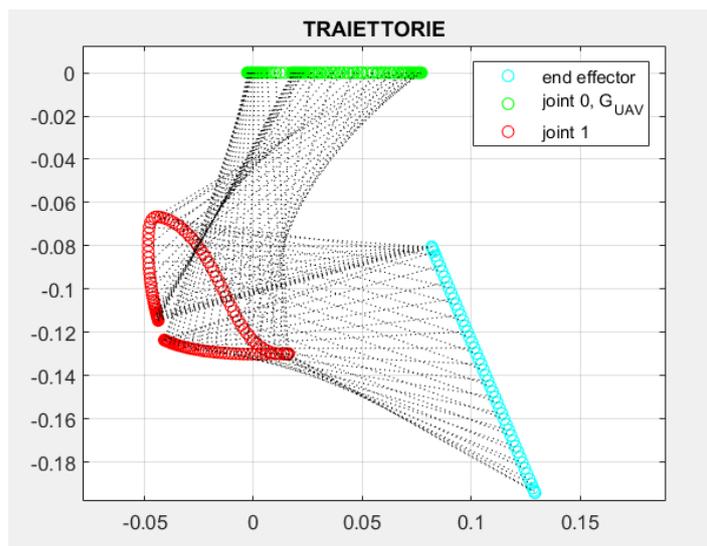


Figura 2. 13 Traiettorie dei vari elementi previste dallo script Matlab con controllo ideale e forza esterna orizzontale nell'operazione di presa di un carico. Si noti che l'UAV mantiene sempre l'altitudine

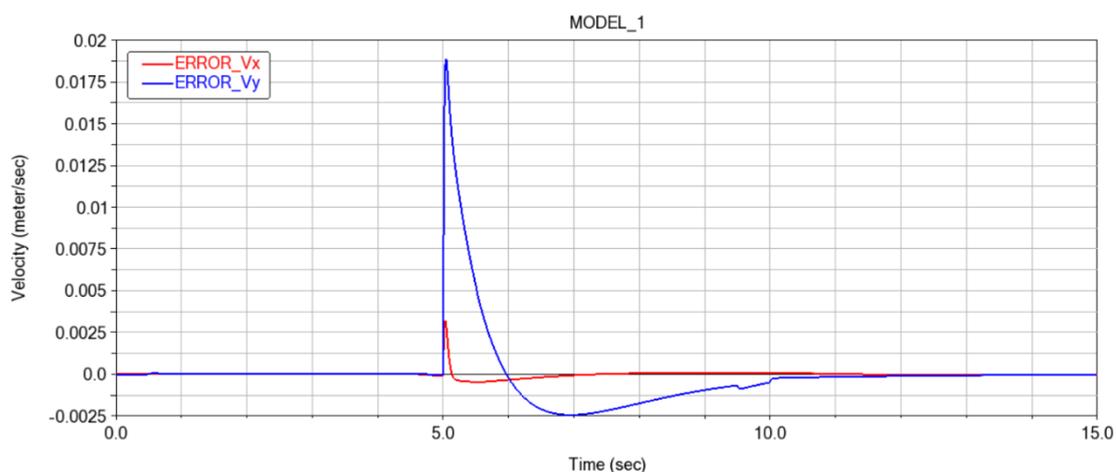


Figura 2. 14 Errore di velocità dell'end effector misurato in Adams per l'operazione di presa risolta considerando la forza esterna orizzontale nella cinematica inversa

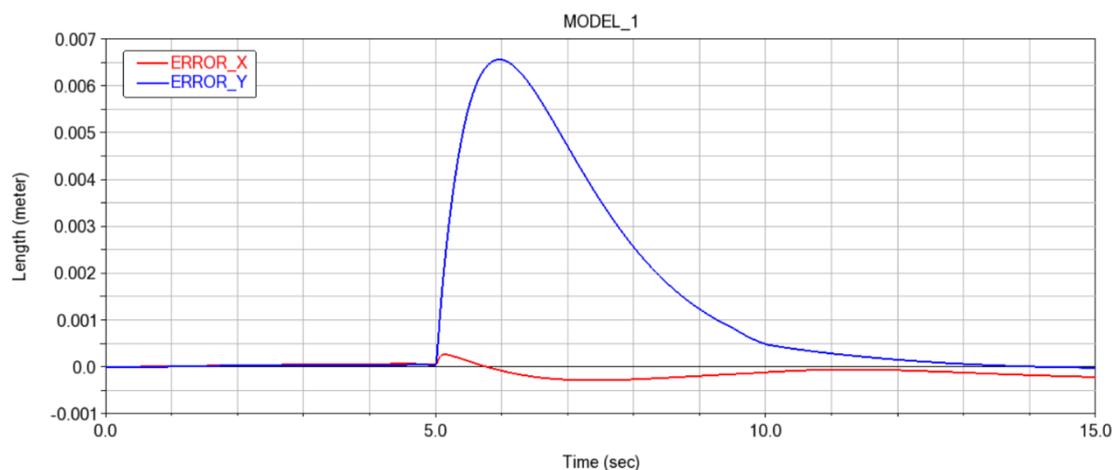


Figura 2. 15 Errore di posizione dell'end effector misurato in Adams per l'operazione di presa risolta considerando la forza esterna orizzontale nella cinematica inversa

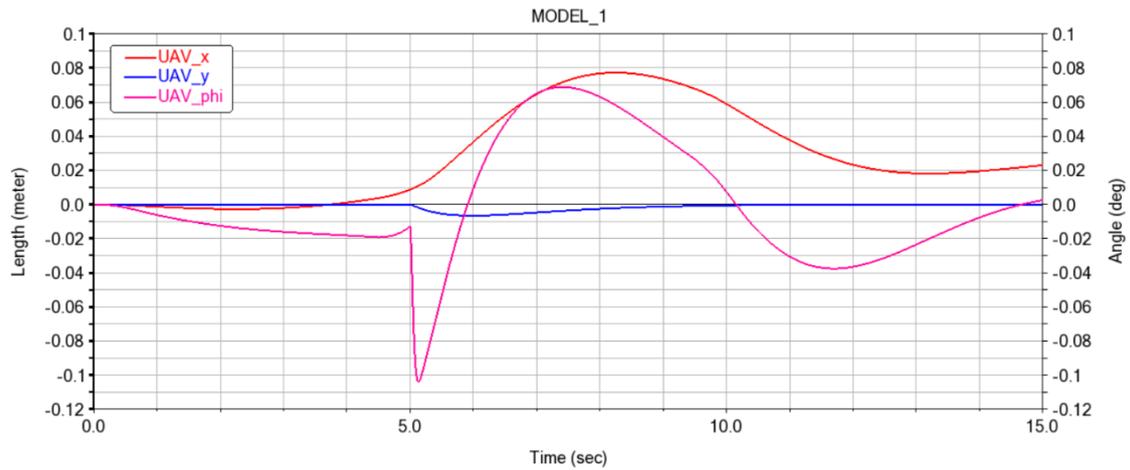


Figura 2. 16 Traslazioni e rotazioni del drone misurate in Adams per l'operazione di presa risolta considerando la forza esterna orizzontale nella cinematica inversa

### 2.3 Jacobiano generalizzato per controllo ideale con proiezione verticale della spinta delle eliche

Le simulazioni precedenti hanno mostrato che la forza di controllo del drone  $U_1$  è in grado di compensare le variazioni di altitudine indotte dall'inerzia del manipolatore rapidamente, però, quando viene afferrato un carico, l'aumento di peso fa abbassare l'UAM e l'altitudine di partenza viene recuperata dopo qualche secondo causando un errore nell'inseguimento di traiettoria. Di conseguenza è necessario tenere conto di questo fenomeno nella risoluzione della cinematica inversa.

Poiché i movimenti indotti dal manipolatore sul drone in direzione verticale sono compensati dal controllo e si è osservato che l'errore causato dal rollio nell'ultima simulazione è accettabile, viene utilizzato sempre lo Jacobiano generalizzato per controllo ideale. Analogamente a prima l'effetto delle forze esterne viene tradotto come componente verticale della quantità di moto, scrivendo già il sistema risolto ad ogni iterazione:

$$\begin{Bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{Bmatrix}_k = J_{gen}^{-1}(q_k) \begin{Bmatrix} v_{xk} - \frac{p_{xk}}{m_{UAV} + m_1 + m_2 + m_{ck}} \\ v_{yk} - \frac{p_{yk}}{m_{UAV} + m_1 + m_2 + m_{ck}} \end{Bmatrix} \quad (2.17)$$

La componente della quantità di moto  $p_{y_k}$  alla k-esima iterazione considerando anche la massa del carico si determina con la formula seguente

$$(m_{UAV} + m_1 + m_2 + m_{ck}) \dot{y}_k \approx p_{y_k} = p_{y_{k-1}} + F_{y_k} \Delta t \quad (2.18)$$

Dove la forza  $F_{y_k}$  è composta da un termine dovuto al controllo PID del drone e dal peso; per determinare la forza di controllo è necessario conoscere la velocità del baricentro del drone  $\dot{y}_k$  e quindi la posizione del drone. Si noti che, avendo considerato lo Jacobiano generalizzato per

controllo ideale, non è possibile conoscere gli spostamenti del drone dovuti alle accelerazioni del manipolatore quindi nella (2.18) il sistema è visto come un corpo rigido che si muove alla velocità del baricentro dell'UAV. Le forze agenti sono quindi:

$$F_{y_k} = U_{1k} \sin(\Phi) - (m_{UAV} + m_1 + m_2 + m_{c_k})g \quad (2.19)$$

$$U_{1k} = -k_{py}y_{k-1} - k_{Dy}\dot{y}_{k-1} - k_{Iy} \sum_{j=1}^{k-1} y_j \Delta t$$

Il controllo  $U_{1k}$  così calcolato viene sostituito anche nell'equazione (2.16) relativa alle forze orizzontali.

Si ripete la stessa simulazione di presa del carico del paragrafo 2.2 con l'unica differenza che ora la cinematica inversa viene risolta con il metodo appena proposto: la traiettoria desiderata, le condizioni iniziali, il controllo del drone (PID rigido) non sono state modificate.

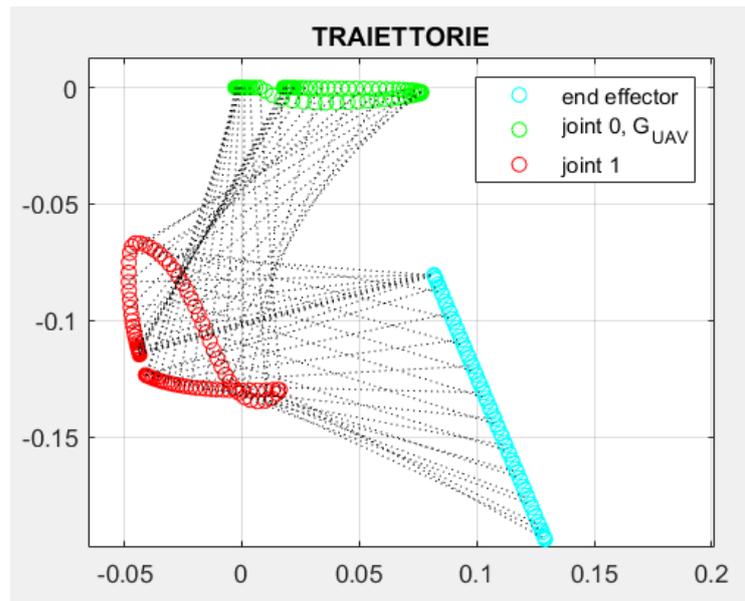


Figura 2.17 Traiettorie dei vari elementi previste in Matlab con Jacobiano generalizzato per controllo ideale e forze esterne orizzontali e verticali nell'operazione di presa di un carico. A differenza di Figura 2.11 l'UAV non mantiene sempre l'altitudine

Si osserva che:

- rispetto alla simulazione precedente l'errore di posizione in y è inferiore di un ordine di grandezza e ha valore massimo 0.3 mm. Infatti l'abbassamento del drone è previsto anche dalla cinematica inversa e viene quindi corretto;
- nell'istante in cui viene aggiunto il carico l'errore di velocità in y ha un picco che potrebbe essere dovuto al fatto di aver considerato l'ipotesi di controllo ideale nello Jacobiano generalizzato;
- al termine della simulazione l'errore di posizione in x è maggiore di 1 mm e sta crescendo linearmente, si deduce che in Matlab il rollio e quindi la forza orizzontale non sono predetti correttamente per esempio a causa della discontinuità di massa;
- nella cinematica inversa il rollio viene considerato solo per il calcolo delle forze.

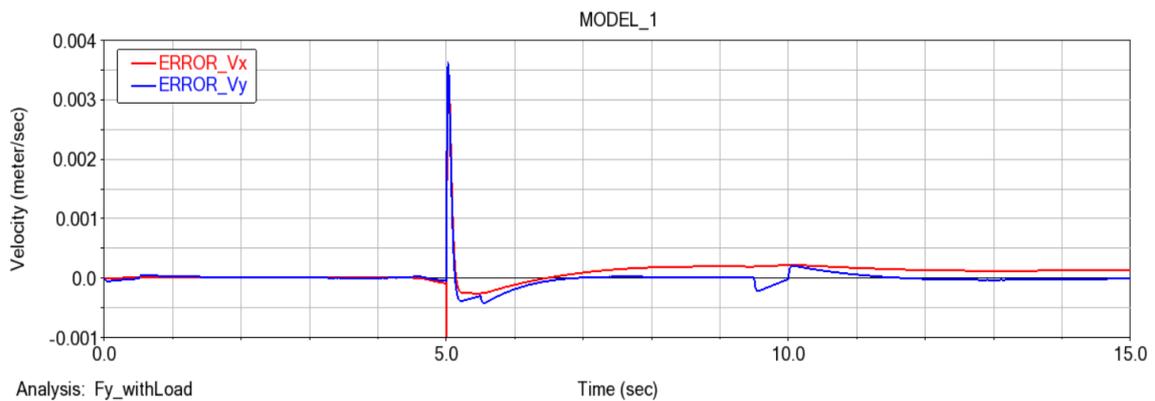


Figura 2. 18 Errore di velocità dell'end effector misurato in Adams per l'operazione di presa risolta considerando la forza esterna orizzontale e verticale nella cinematica inversa

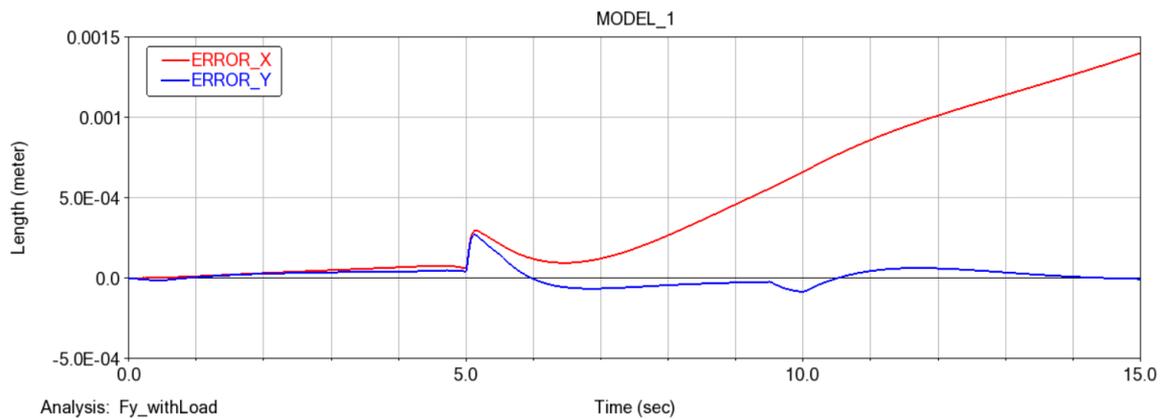


Figura 2. 19 Errore di posizione dell'end effector misurato in Adams per l'operazione di presa risolta considerando la forza esterna orizzontale e verticale nella cinematica inversa

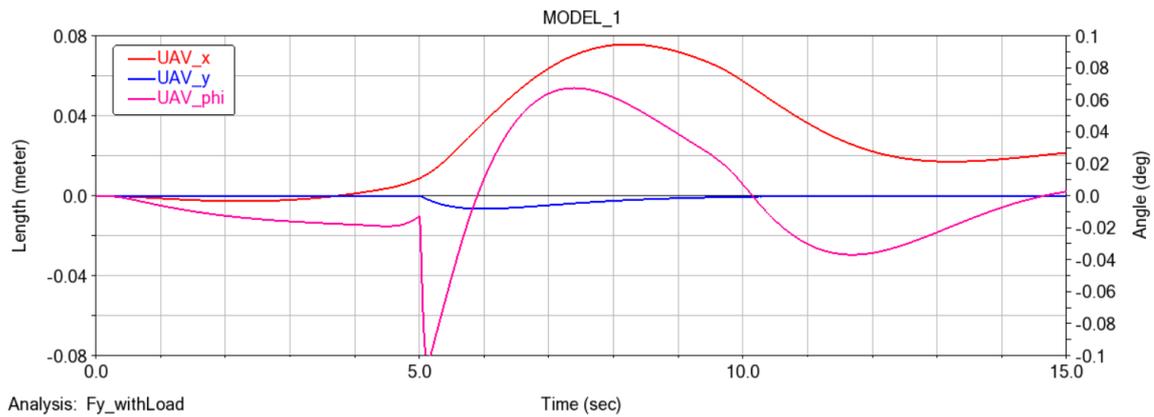


Figura 2. 20 Traslazioni e rotazioni del drone misurate in Adams per l'operazione di presa risolta considerando la forza esterna orizzontale e verticale nella cinematica inversa

Il metodo è stato testato anche per una traiettoria più rapida con effetti inerziali maggiori: all'end effector è stato imposto lo stesso spostamento dei casi precedenti (5 cm verso destra e 12 cm verso il basso), questa volta però la traiettoria viene eseguita in 3 s anziché 10 s, i profili di velocità imposti all'end effector sono trapezoidali con tempo di accelerazione di 0.1 s. Il carico viene aggiunto a 1.5 s.

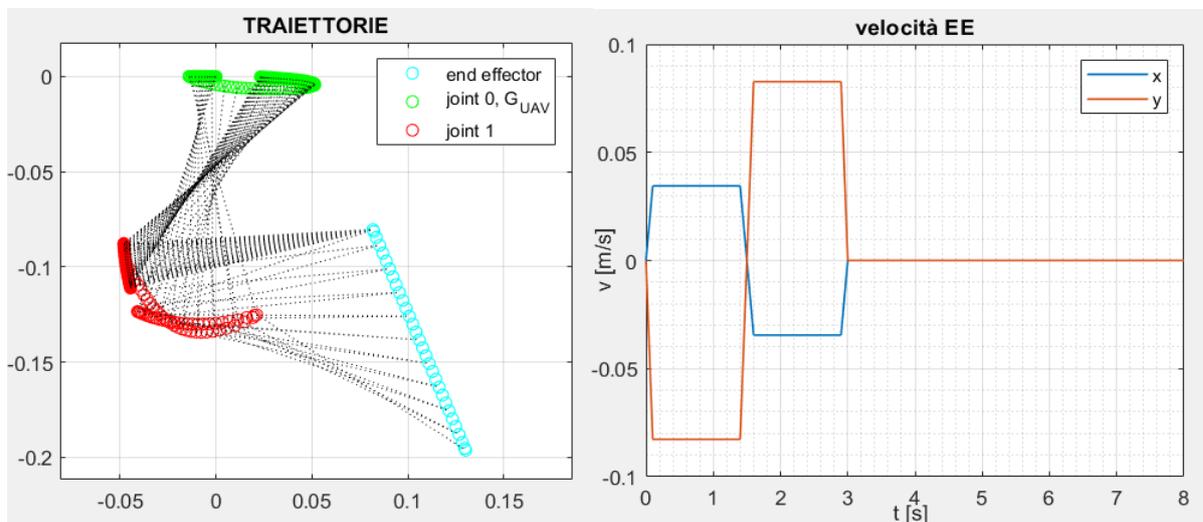


Figura 2. 21 A sinistra traiettorie dei vari elementi previste in Matlab con Jacobiano generalizzato per controllo ideale e forze esterne orizzontali e verticali nell'operazione di presa di un carico veloce. A destra profili di velocità richiesti all'end effector.

Rispetto alla traiettoria più lenta in questo caso si osserva che:

- l'errore di velocità in y è maggiore nei tratti accelerati per l'ipotesi di controllo ideale nello Jacobiano generalizzato;
- il rollio del drone raggiunge valori più elevati ma lo spostamento orizzontale del drone è minore perché la forza orizzontale agisce per un intervallo di tempo minore;

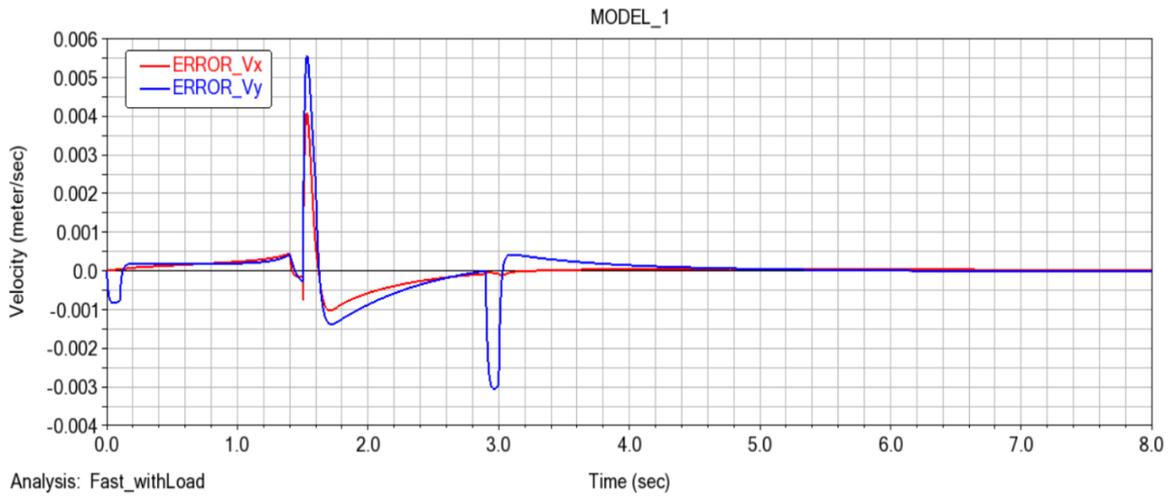


Figura 2. 22 Errore di velocità dell'end effector misurato in Adams per l'operazione di presa veloce risolta considerando la forza esterna orizzontale e verticale nella cinematica inversa

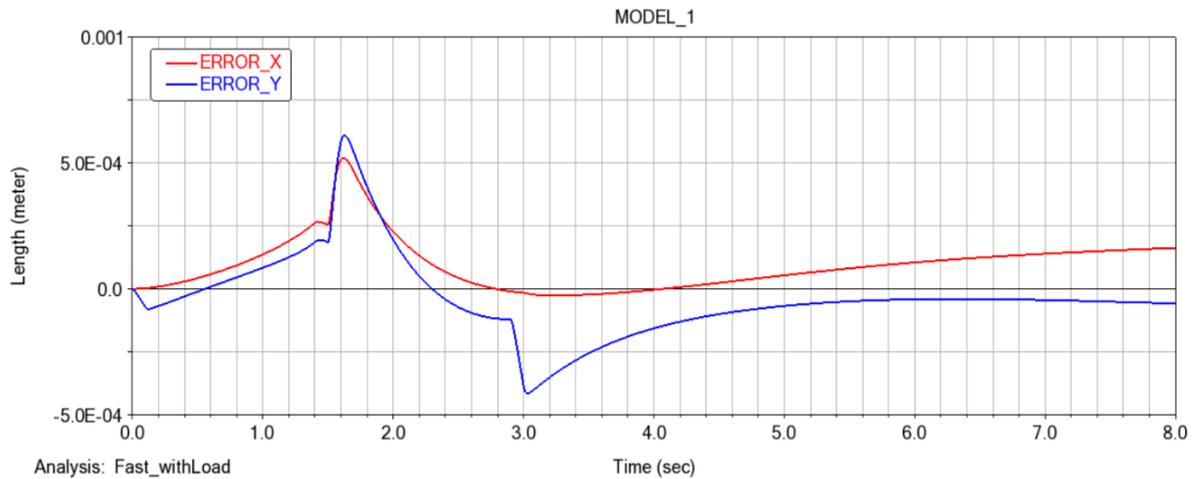


Figura 2. 23 Errore di posizione dell'end effector misurato in Adams per l'operazione di presa veloce risolta considerando la forza esterna orizzontale e verticale nella cinematica inversa

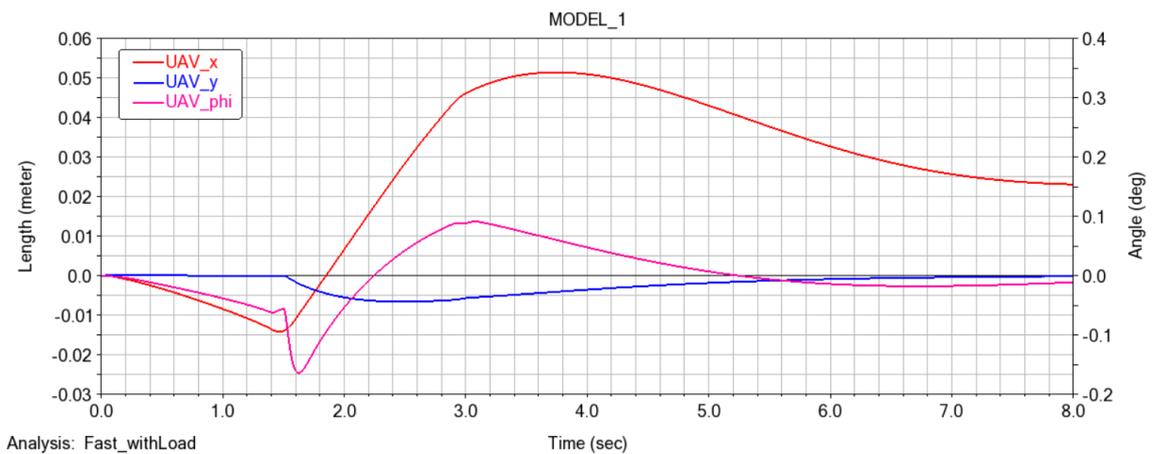


Figura 2. 24 Traslazioni e rotazioni del drone misurate in Adams per l'operazione di presa veloce risolta considerando la forza esterna orizzontale e verticale nella cinematica inversa

Perché le forze esterne siano valutate correttamente nella risoluzione della cinematica inversa, è importante monitorare la differenza tra la posizione e la rotazione dell'UAV tra lo script Matlab e la simulazione Adams.

Dalla Figura 2.24 si può notare che la posizione dell'UAV viene stimata con una buona accuratezza: la differenza in x è dell'ordine dei decimi di millimetro a fronte di movimenti di qualche centimetro mentre in y la differenza è inferiore al 5% del valore reale. Per quanto riguarda il rollio, invece, la differenza relativa tra Matlab e Adams in alcuni casi raggiunge anche il 10%: considerando che il rollio è importante sia per le forze sul drone che direttamente per la posizione e la velocità dell'end effector questa differenza potrebbe non essere accettabile.

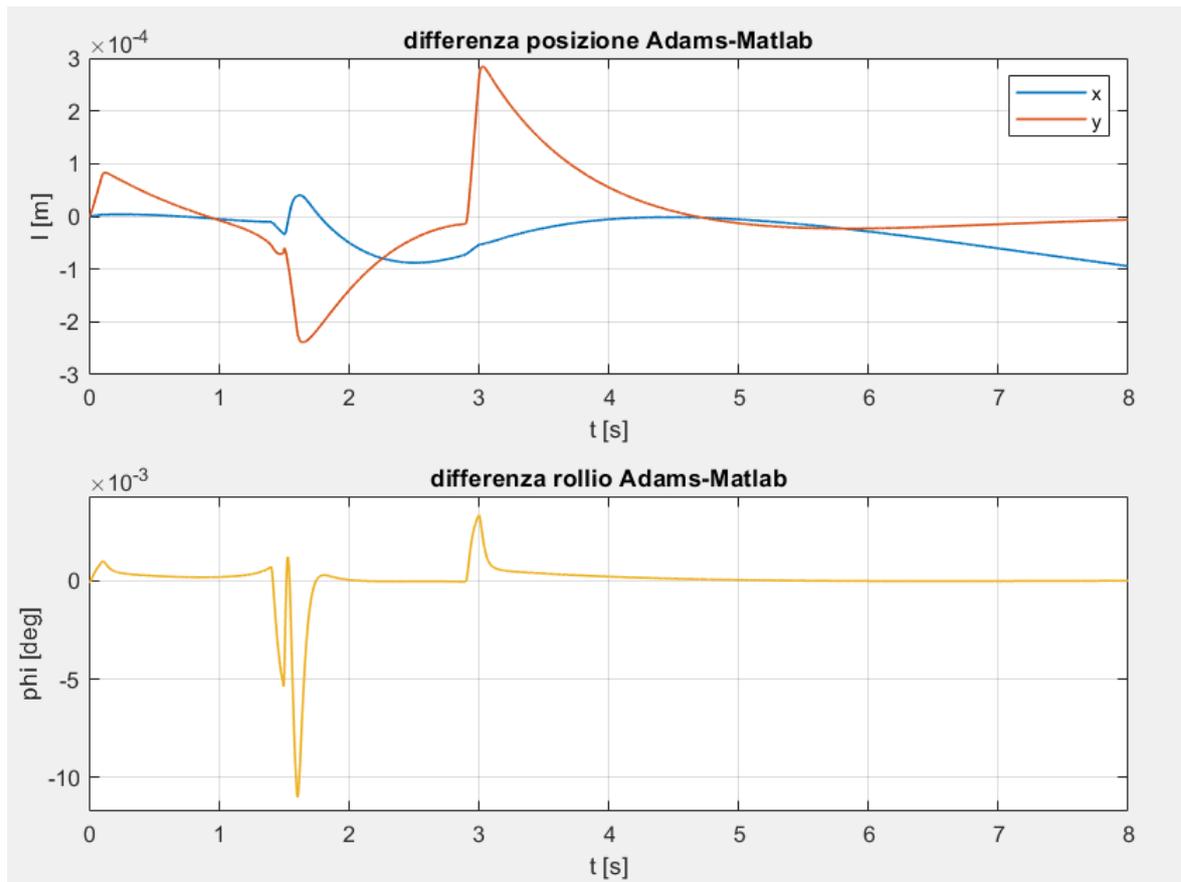


Figura 2. 25 Confronto tra posizione e rollio dell'UAV previsti da Matlab nella risoluzione della cinematica inversa (con Jacobiano generalizzato per controllo ideale considerando la forza esterna orizzontale e verticale) e tra posizione e rollio osservati in Adams con UAV controllato dal PID rigido

## 2.4 Simulazioni con PID “morbido”

Modificando i parametri del controllo, controllando l'UAV con il PID morbido anziché il PID rigido, ci si aspetta maggiori movimenti della base, quindi è necessario testare nuovamente il metodo proposto nel paragrafo precedente per verificare se è valido anche in questo caso.

		$k_p$	$k_i$	$k_d$
PID morbido	altitudine	37 N/m	8 N s/m	18 N/(m s)
	rollio	40 Nm/rad	35 Nm s/rad	9 Nm/(rad s)

Tabella 2. 2 parametri del controllo del drone "PID morbido"

Si analizza il caso di Figura 2.19, già testato con PID rigido, l'unica differenza è che il carico aggiunto all'istante 1.5 s, ha una massa di 0.3 kg anziché 0.9 kg per evitare un abbassamento eccessivo del drone dovuto alla gravità che porterebbe il manipolatore in una configurazione singolare.

Come si può osservare dai grafici ricavati con Adams, l'errore di posizione dell'end effector supera i 5 mm anche prima dell'aggiunta del carico e in seguito supera i 5 cm in direzione orizzontale.

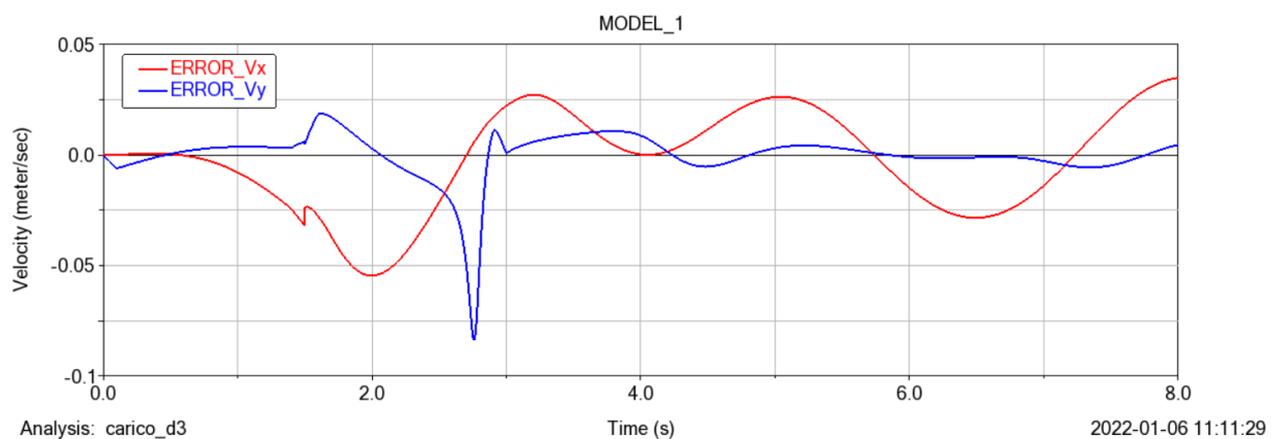


Figura 2. 26 Errore di velocità dell'end effector misurato in Adams per l'operazione di presa veloce con PID morbido e carico ridotto a 0.3 kg

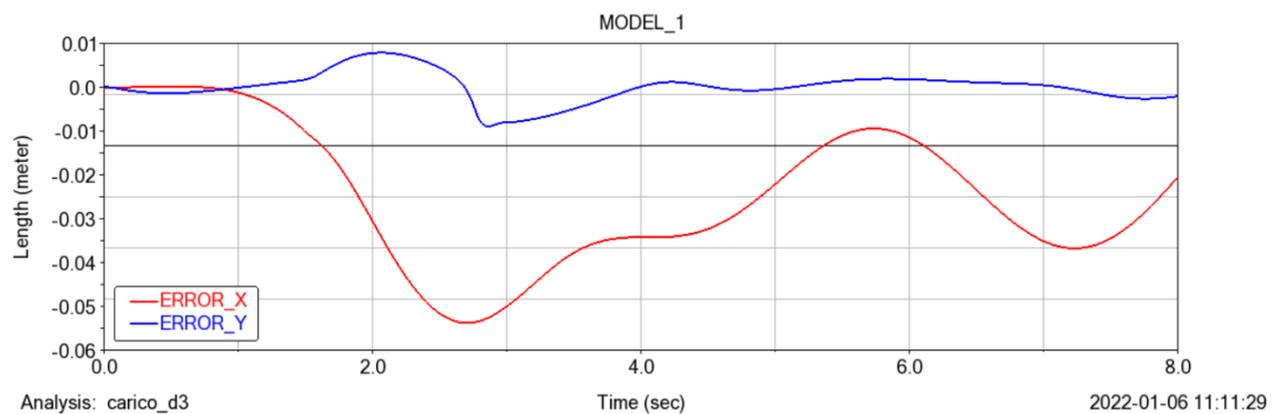


Figura 2. 27 Errore di posizione dell'end effector misurato in Adams per l'operazione di presa veloce con PID morbido e carico ridotto a 0.3 kg

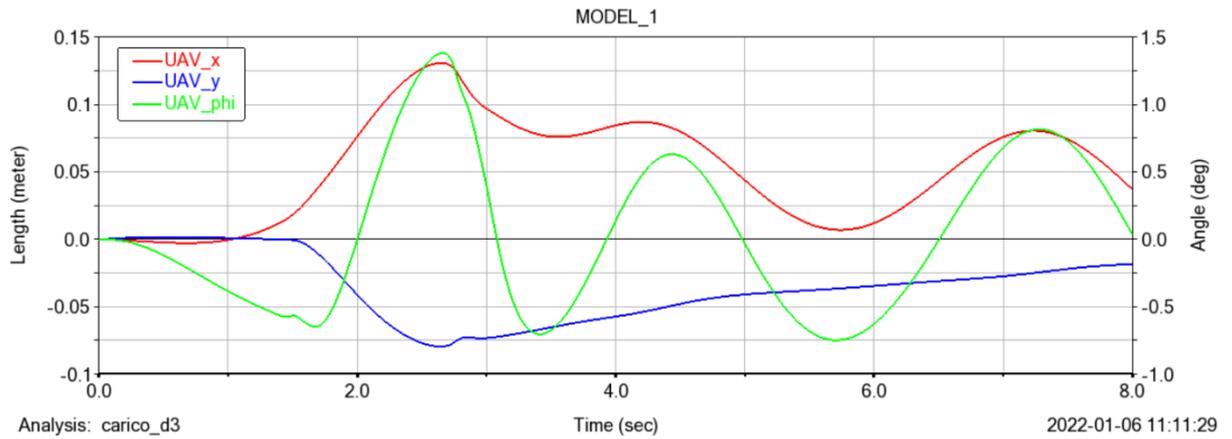


Figura 2. 28 Traslazioni e rotazioni del drone misurate in Adams per l'operazione di presa veloce con PID morbido e carico ridotto a 0.3 kg

Per correggere lo script si identificano le ipotesi che potrebbero non essere più valide utilizzando il PID morbido:

- 1) il controllo  $U_1$  non è più in grado di compensare in un tempo trascurabile gli spostamenti verticali provocati dall'inerzia del manipolatore;
- 2) la quantità di moto in direzione verticale non può essere considerata coincidente con il prodotto della massa complessiva e della velocità verticale del drone:  $(m_{UAV} + m_1 + m_2 + m_{c_k}) \dot{y}_k \neq p_{y_k}$ ;
- 3) il controllo  $U_2$  non è più in grado di compensare in un tempo trascurabile il rollio provocato dall'inerzia del manipolatore;
- 4) le forze esercitate dal manipolatore sul drone risentono delle accelerazioni del drone;

I primi due punti possono essere corretti facilmente sostituendo lo jacobiano generalizzato per controllo ideale con un nuovo Jacobiano generalizzato con la seguente ipotesi: il rollio del drone è vincolato ad essere nullo e le traslazioni sono libere.

Per fare ciò si procede analogamente a quanto fatto nel paragrafo 2.1: si scrive la conservazione della quantità di moto lungo  $y$ , si ricava la velocità di traslazione verticale della base in funzione delle velocità di giunto e si somma con la velocità dell'organo terminale derivante dal manipolatore a base fissa. Lo Jacobiano generalizzato diventa quindi:

$$J_{gen} = \begin{bmatrix} J_{11} + A'_1 & J_{12} + A'_2 \\ J_{21} + B'_1 & J_{22} + B'_2 \end{bmatrix} \quad (2. 20)$$

Dove i termini che legano la velocità di traslazione della base in  $y$  rispettivamente alla velocità del primo e del secondo giunto sono:

$$B'_1 = - \frac{m_1 a_1 s(q_1) + m_2 (l_1 s(q_1) + a_2 s(q_1 + q_2)) + m_c (l_1 s(q_1) + l_c s(q_1 + q_2))}{m_{UAV} + m_1 + m_2 + m_c} \quad (2. 21)$$

$$B'_2 = -\frac{m_2 a_2 s(q_1 + q_2) + m_c l_c s(q_1 + q_2)}{m_{UAV} + m_1 + m_2 + m_c}$$

$J_{11}, J_{12}, J_{21}, J_{22}$  sono gli elementi dello jacobiano del manipolatore con base fissa;  $A'_1, A'_2$  sono i termini relativi alla traslazione in x dell'UAV.

Risolviendo la cinematica inversa con questo Jacobiano generalizzato e simulando il sistema in Adams si osserva che l'errore di posizione lungo y si riduce ma la componente orizzontale non si riduce rispetto al caso con PID morbido precedente.

Se ne deduce che è necessario considerare anche l'influenza del moto del manipolatore sul rollio che a sua volta influenza le forze esterne determinando lo spostamento del drone in x.

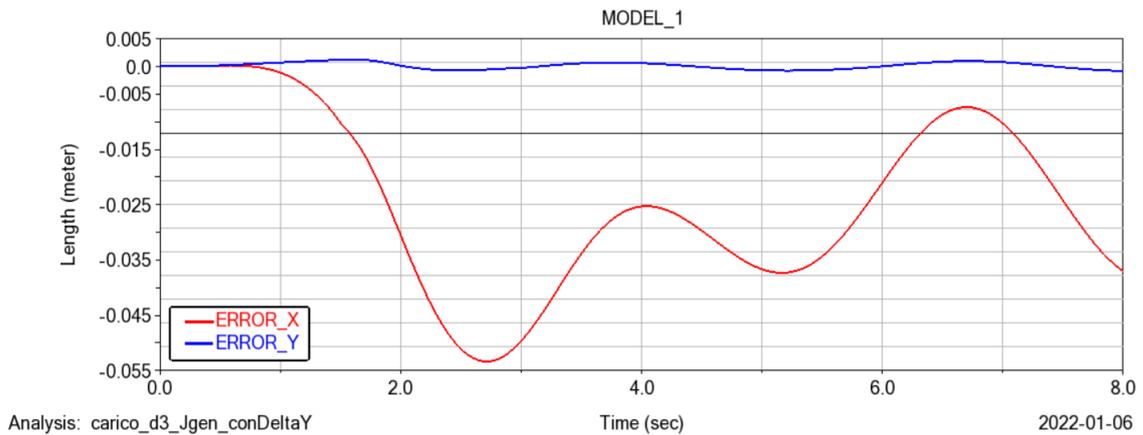


Figura 2. 29 Errore di posizione dell'end effector misurato in Adams con PID morbido risolvendo la cinematica inversa considerando la forza esterna orizzontale e verticale e tenendo conto di traslazioni sia in x che in y nello Jacobiano generalizzato

## 2.5 Jacobiano generalizzato completo con forze esterne

Come si è visto, con parametri del controllo del drone più morbidi, lo Jacobiano generalizzato che considera solo le traslazioni del drone (verticali e orizzontali) non permette di ottenere errori di posizione inferiori a ~1 cm. Per eliminare le ipotesi semplificative precedenti in questo paragrafo verrà usato uno Jacobiano generalizzato che considera il drone con traslazioni e rotazioni libere, in questo modo tutte le forze scambiate tra drone e manipolatore sono forze interne e sono considerate dallo jacobiano, le forze esterne agenti sul sistema invece saranno i controlli U1 e U2 e la gravità

Come base di partenza è stata utilizzata una libreria Matlab sviluppata per simulare manipolatori qualsiasi con base mobile nello spazio in assenza di forze esterne, il codice è anche in grado di risolverne la cinematica inversa [28]. Si segue un procedimento simile a quello riportato in [29],[30]. In questo caso la velocità generalizzata dell'end effector è data da:

$$v = J_b \dot{q}_b + J_a \dot{q}_a \quad (2.22)$$

Dove  $\dot{q}_b$  è il vettore delle velocità generalizzate della base,  $\dot{q}_a$  è il vettore delle velocità dei controlli;  $J_b$  e  $J_a$  sono matrici jacobiane che dipendono esclusivamente dalla geometria e dai controlli e non sono quindi influenzate da forze e accelerazioni del manipolatore.

La conservazione della quantità di moto e del momento angolare è garantita dalla seguente equazione:

$$H \begin{Bmatrix} \dot{q}_b \\ \dot{q}_a \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ K_x \\ K_y \\ K_z \end{Bmatrix} \quad (2.23)$$

Dove la matrice H dipende da masse e matrici di inerzia della base e dei link e da  $q_b, q_a$ . La matrice H può essere scomposta in una parte relativa alle velocità della base e una parte relativa alle velocità di giunto come:

$$H = [H_b \quad H_{bm}] \quad (2.24)$$

In assenza di forze esterne agenti sul sistema e con quantità di moto e momento angolare iniziale nulli, isolando  $\dot{q}_b$  dalla seconda equazione e sostituendolo nella prima si può scrivere la relazione che lega le velocità lineari e angolari dell'end effector con le velocità dei giunti ottiene lo Jacobiano generalizzato:

$$v = (J_a - J_b H_b^{-1} H_{bm}) \dot{q}_a = J_{gen} \dot{q}_a \quad (2.25)$$

Nel caso di forze esterne non nulle la quantità di moto e il momento angolare non si conservano ma variano nel tempo quindi, tramite gli stessi passaggi, si ottiene che in ogni istante:

$$v = (J_a - J_b H_b^{-1} H_{bm}) \dot{q}_a + J_b H_b^{-1} \begin{Bmatrix} p_x(t) \\ p_y(t) \\ p_z(t) \\ K_x(t) \\ K_y(t) \\ K_z(t) \end{Bmatrix} \quad (2.26)$$

Da questa è quindi possibile risolvere la cinematica inversa ottenendo  $\dot{q}_a$  ad ogni timestep dopo aver aggiornato quantità di moto e momento angolare con l'effetto delle forze esterne.

Dalla (2.23) le velocità generalizzate della base si possono esprimere come

$$\dot{q}_b = H_b^{-1} H_{bm} \dot{q}_a + H_b^{-1} \begin{Bmatrix} p \\ K \end{Bmatrix} \quad (2.27)$$

Di seguito viene descritta la procedura adottata ad ogni timestep per il calcolo di quantità di moto e momento angolare nel caso di forza di gravità e controllo su altitudine e rollio/beccheggio; ulteriori forze/momenti, per esempio causate da un carico applicato all'end effector, possono essere aggiunte facilmente. Dalla configurazione al timestep precedente sono noti:

- $R_0$ : vettore posizione dall'origine della terna di riferimento inerziale al baricentro dell'UAV
- $R_g$ : vettore posizione dall'origine della terna di riferimento inerziale al baricentro dell'UAM
- $A_0$ : matrice rotazione dalla terna inerziale a quella solidale all'UAV
- $\dot{q}_{b,k-1}$ : velocità generalizzate del drone all'iterazione precedente

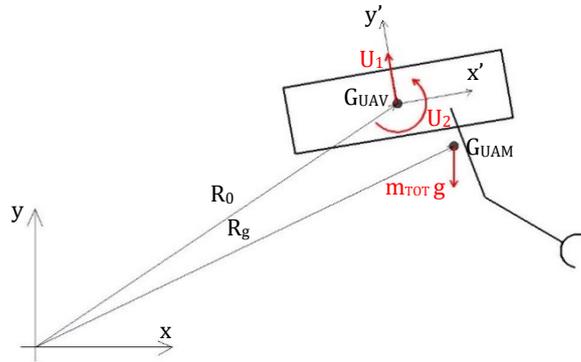


Figura 2.30 Forze e momenti agenti sull'UAM

Sono quindi noti anche i controlli PID,  $U_1$  e  $U_2$ . Per la quantità di moto si ha:

$$p_{k+1} = p_k + \left( A_0 \begin{Bmatrix} 0 \\ U_1 \\ 0 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ m_{TOT}g \\ 0 \end{Bmatrix} \right) \Delta t \quad (2.28)$$

Il momento angolare deve essere calcolato rispetto allo stesso polo dell'equazione (2) che nella libreria Matlab corrisponde al baricentro del drone, per cui si ha:

$$K_{k+1} = K_k + \left( -v_{b,k-1} \times p_k + \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ U_2 \end{Bmatrix} + (R_g - R_0) \times \begin{Bmatrix} 0 \\ m_{TOT}g \\ 0 \end{Bmatrix} \right) \Delta t \quad (2.29)$$

dove  $v_{b,k-1}$  indica le velocità lineari della base e corrisponde alle prime tre righe di  $\dot{q}_{b,k-1}$ .

Note le velocità dei giunti all'iterazione precedente lo jacobiano generalizzato permette di determinare le velocità lineari e angolari dell'end effector e quindi anche quelle di un carico fissato

rigidamente ad esso. Di conseguenza le forze d'inerzia dovute al carico possono essere considerate determinandone le accelerazioni come differenze finite.

Il nuovo algoritmo è stato testato con PID morbido del drone per la stessa traiettoria del paragrafo precedente: la massa del carico è stata ridotta ulteriormente da 0.3 kg a 0.25 kg per evitare che il manipolatore si avvicini troppo a configurazioni singolari.

Per comparare il nuovo approccio con il precedente il carico è stato aggiunto sempre istantaneamente modificando massa e inerzia del link.

Per chiarezza si riportano i profili di velocità dell'end effector.

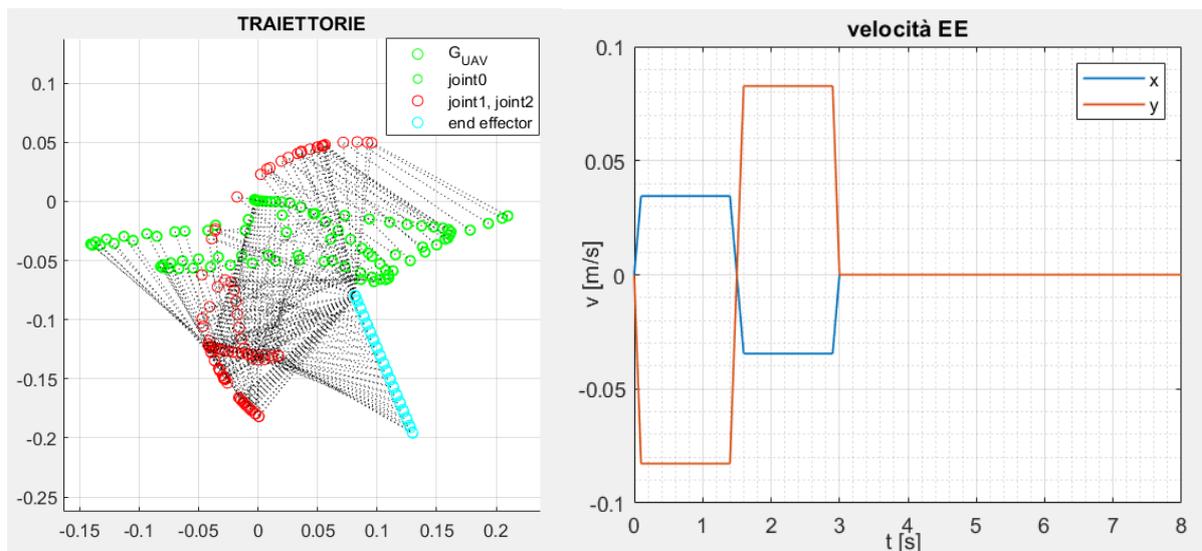


Figura 2.31 Traiettorie previste dallo script Matlab per la presa del carico di 0.25 kg con PID morbido, la cinematica inversa è stata risolta con Jacobiano generalizzato completo e forze esterne. A destra profili di velocità richiesti all'end effector

Si osserva che:

- I picchi nell'errore di velocità dell'end effector che si osservano a 4.5 s e a 7.4 s sono dovuti al fatto che il manipolatore si avvicina a delle configurazioni singolari poiché il baricentro del drone e l'end effector sono quasi sovrapposti e i link allineati; il gradino ad 1.5 s corrisponde all'aggiunta istantanea del carico;
- a differenza della simulazione con PID morbido precedente, l'errore di posizione dell'end effector è sempre inferiore ad 1 mm nonostante la vicinanza a configurazioni singolari;
- i movimenti del drone sono ampi e limitano lo spazio operativo, le oscillazioni in direzione orizzontale aumentano in ampiezza anche dopo il termine del movimento dell'end effector; simulazioni più lunghe mostrano che l'ampiezza delle oscillazioni non aumenta indefinitamente.

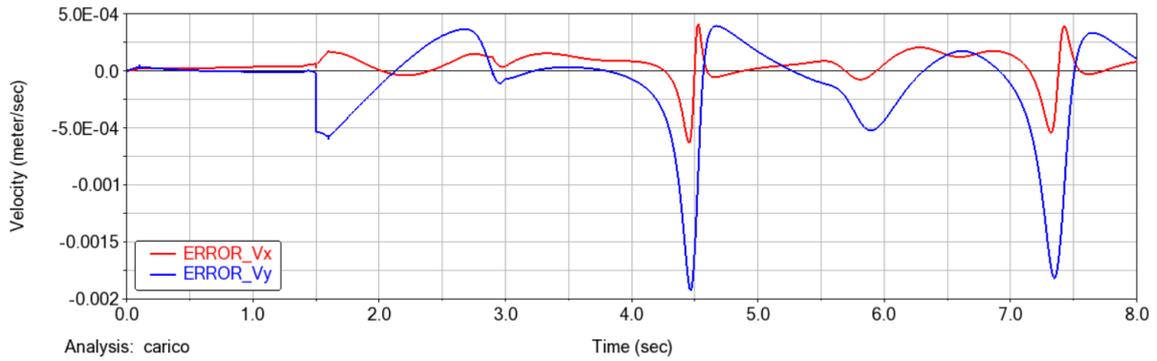


Figura 2. 32 Errore di velocità dell'end effector misurato in Adams per la presa di un carico di 0.25 kg con PID morbido, la cinematica inversa è stata risolta considerando Jacobiano generalizzato completo e forze esterne

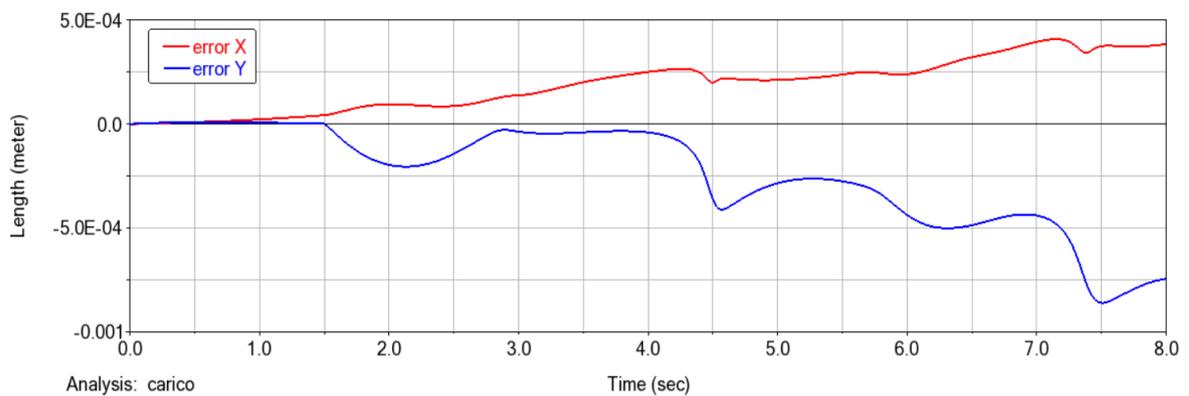


Figura 2. 33 Errore di posizione dell'end effector misurato in Adams per la presa di un carico di 0.25 kg con PID morbido, la cinematica inversa è stata risolta considerando Jacobiano generalizzato completo e forze esterne

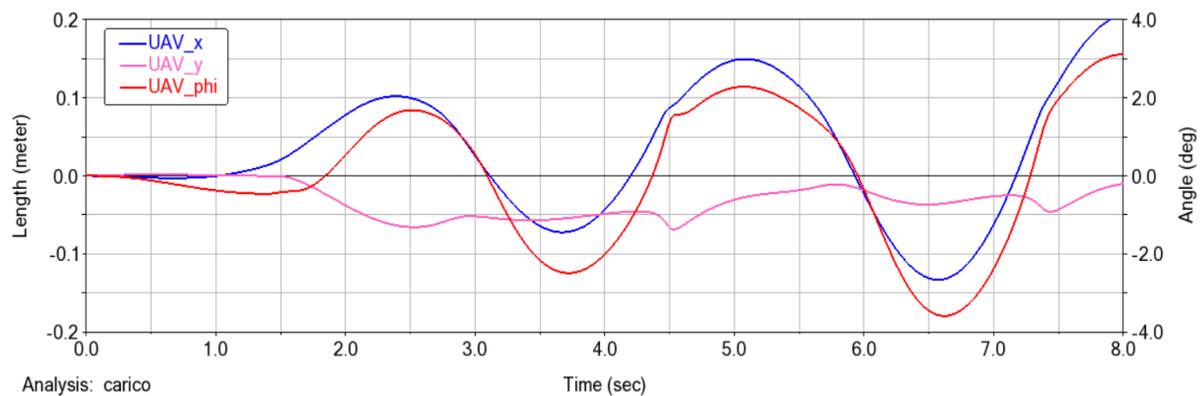


Figura 2. 34 Posizione e rollio del drone misurato in Adams per la presa di un carico di 0.25 kg con PID morbido, la cinematica inversa è stata risolta considerando Jacobiano generalizzato completo e forze esterne

Lo script è stato validato anche con un manipolatore ridondante con il primo giunto non coincidente con il baricentro del drone, è stata considerata una traiettoria circolare di diametro 10 cm e durata 10 s. Per il controllo del drone è stato utilizzato il PID morbido. Il primo giunto è spostato a destra rispetto al baricentro del drone di metà della lunghezza dei link, avendo considerato i baricentri di

ciascun link posti al centro dei rispettivi link è stata scelta la seguente configurazione iniziale di equilibrio:  $q_1 = -\frac{\pi}{4} \text{ rad}$ ;  $q_2 = \frac{\pi}{4} \text{ rad}$ ;  $q_3 = \frac{\pi}{4} \text{ rad}$ . Lo stesso caso è stato simulato in Adams importando le velocità dei giunti determinate dallo script.

Come si può osservare da Figura 2.36-2.37 lo script prevede bene la reazione del drone ai movimenti del manipolatore: l'errore sulla posizione del baricentro del drone è inferiore a 0.1 mm e l'errore sul rollio del drone è inferiore a 0.002° a fronte di angoli massimi di circa 2°.

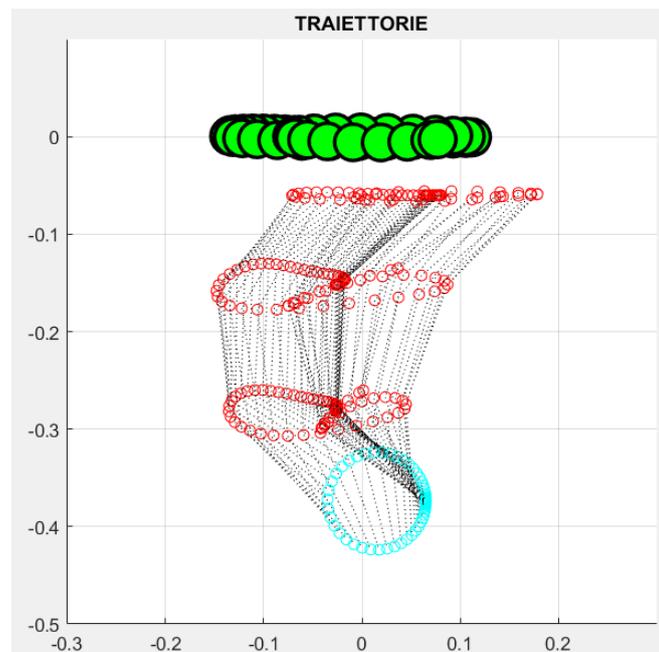


Figura 2. 35 Traiettorie degli elementi dell'UAM con manipolatore ridondante previste nella risoluzione della cinematica inversa e validate in Adams per il caso con traiettoria circolare e controllo PID morbido. In verde il baricentro del drone, in rosso i giunti, in azzuro l'end effector

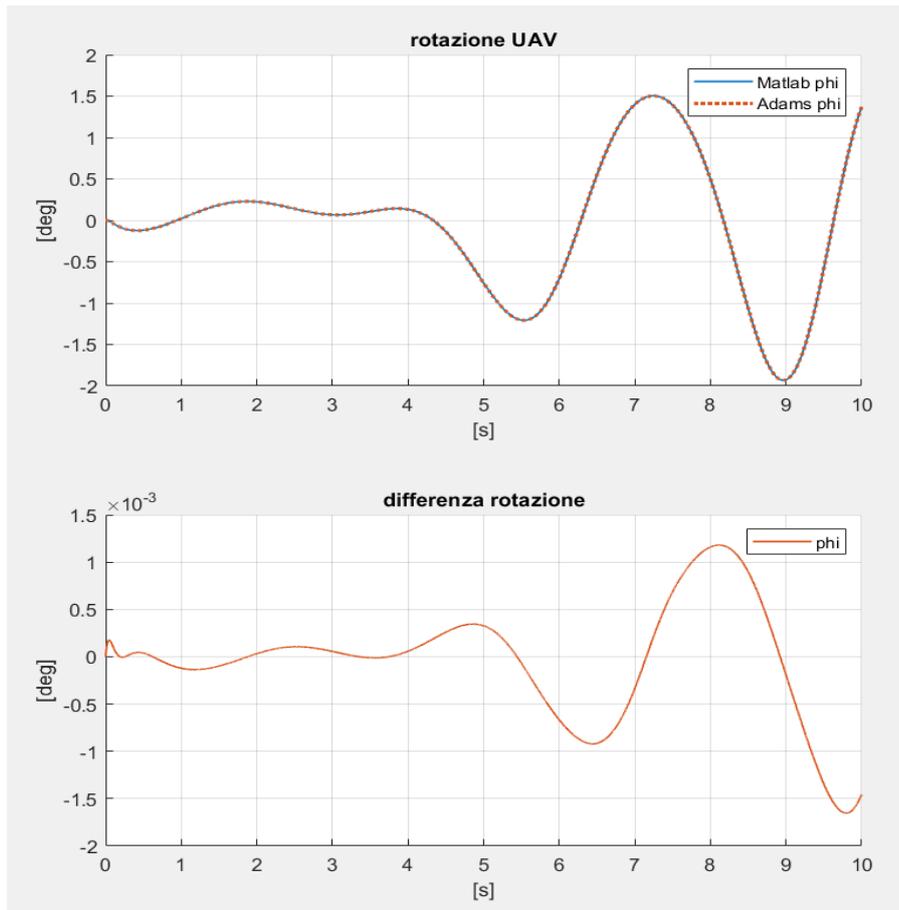


Figura 2. 36 Confronto tra la rotazione dell'UAV prevista dallo script Matlab e osservata in Adams per la traiettoria circolare seguita dall'UAM con manipolatore ridondante. Sopra il valore assoluto, sotto la differenza tra il valore di Adams e quello di Matlab

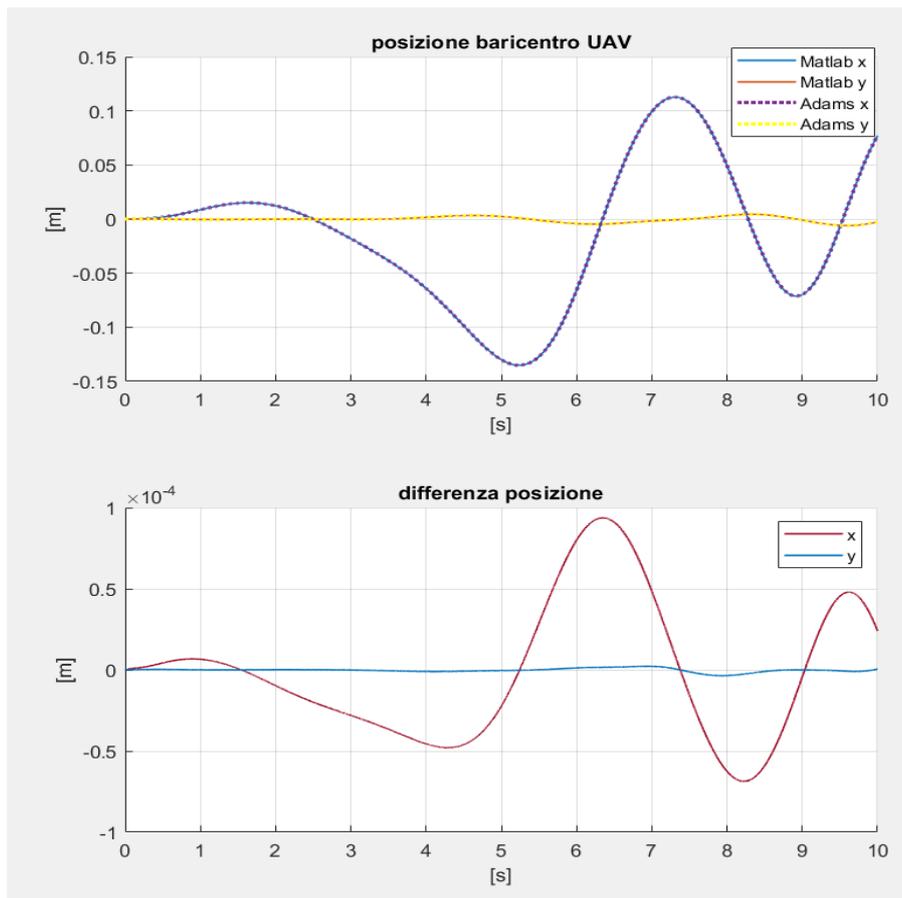


Figura 2. 37 Confronto tra la posizione dell'UAV prevista dallo script Matlab e osservata in Adams per la traiettoria circolare seguita dall'UAM con manipolatore ridondante. Sopra il valore assoluto, sotto la differenza tra il valore di Adams e quello di Matlab



## CAPITOLO 3: Minimizzazione dei disturbi del manipolatore ridondante sull'UAV

Come si è visto nel capitolo precedente durante il moto del manipolatore l'UAV può subire spostamenti ampi in direzione orizzontale a causa della componente orizzontale della spinta dei rotori. In questo capitolo verranno sviluppati dei metodi per ridurre la coppia esercitata dal manipolatore sul drone, e quindi le traslazioni di quest'ultimo, durante la risoluzione della cinematica inversa di un manipolatore ridondante a tre gradi di libertà. Nella risoluzione della cinematica inversa verrà utilizzato lo Jacobiano generalizzato descritto nel secondo capitolo: inizialmente quello relativo al controllo ideale in assenza di forze esterne e infine quello completo.

### 3.1 Minimizzazione del momento dovuto alla gravità con metodo del gradiente

Considerando il caso piano si vuole determinare l'andamento dei controlli del manipolatore nel tempo per seguire una data traiettoria dell'end effector descritta dalla velocità lungo x e lungo y; il manipolatore ha tre gradi di libertà e quindi un grado di libertà ridondante. Lo Jacobiano per il manipolatore a base fissa è il seguente:

$$J = \begin{bmatrix} j_{11} & j_{12} & j_{13} \\ j_{21} & j_{22} & j_{23} \end{bmatrix}$$

$$j_{11} = j_{12} + l_1 c(q_1)$$

$$j_{12} = j_{13} + l_2 c(q_1 + q_2) \quad (3.1)$$

$$j_{13} = l_3 c(q_1 + q_2 + q_3)$$

$$j_{21} = j_{22} + l_1 s(q_1)$$

$$j_{22} = j_{23} + l_2 s(q_1 + q_2)$$

$$j_{23} = l_3 s(q_1 + q_2 + q_3)$$

Nel caso la base del manipolatore sia l'UAV con controllo ideale e sia quindi libera di traslare lungo x, procedendo come nel paragrafo 2.1, lo Jacobiano generalizzato con manipolatore a tre gradi di libertà è:

$$J_{gen} = J + \begin{bmatrix} A_1 & A_2 & A_3 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Dove

$$A_3 = -\frac{1}{m_{UAV} + m_1 + m_2 + m_3 + m_c} [m_3 a_3 c(q_1 + q_2 + q_3) + m_c l_c c(q_1 + q_2 + q_3)]$$

$$A_2 = A_3 - \frac{1}{m_{UAV} + m_1 + m_2 + m_3 + m_c} [m_2 a_2 c(q_1 + q_2) + (m_3 + m_c) l_2 c(q_1 + q_2)]$$

$$A_1 = A_2 - \frac{1}{m_{UAV} + m_1 + m_2 + m_3 + m_c} [m_1 a_1 c(q_1) + (m_2 + m_3 + m_c) l_1 c(q_1)]$$

Poiché lo jacobiano non è invertibile, ad ogni timestep le velocità dei giunti vengono ricavate minimizzando la seguente funzione obbiettivo con vincolo  $v = J_{gen} \dot{q}$

$$g = \frac{1}{2} (\dot{q} - \dot{q}_0)^T W (\dot{q} - \dot{q}_0) \quad (3.3)$$

Dove  $W$  è una matrice di pesi e verrà assunta pari alla matrice identità  $I$ ,  $\dot{q}_0$  è un vettore contenete delle velocità dei giunti a scelta. Con il metodo dei moltiplicatori di Lagrange si ottiene:

$$g' = \frac{1}{2} (\dot{q} - \dot{q}_0)^T I (\dot{q} - \dot{q}_0) + \lambda^T (v - J \dot{q}) \quad (3.4)$$

Ponendo  $\frac{\partial g'}{\partial \dot{q}} = 0$  e  $\frac{\partial g'}{\partial \lambda} = 0$  si ottiene

$$\dot{q} = J_{gen}^T (J_{gen} J_{gen}^T)^{-1} v + (I - J_{gen}^T (J_{gen} J_{gen}^T)^{-1} J_{gen}) \dot{q}_0 \quad (3.5)$$

Ad ogni timestep la cinematica inversa viene risolta tramite questa equazione dopo aver scelto  $\dot{q}_0$ ;  $J_{gen}^T (J_{gen} J_{gen}^T)^{-1}$  è la pseudo-inversa destra dello Jacobiano generalizzato ( $J_{gen}^\dagger$ ). Scegliendo  $\dot{q}_0$  uguale al vettore nullo si ottiene la soluzione con velocità minime.

Il metodo del gradiente è un metodo locale che consiste nello scegliere il set di velocità dei giunti  $\dot{q}_0$  che minimizzano la funzione obbiettivo  $w(q)$  tramite la relazione  $\dot{q}_0 = k \frac{\partial w(q)}{\partial q}$  dove  $k$  è un numero reale negativo.

Di seguito la coppia sull'UAV dovuta alla gravità viene minimizzata riducendo la distanza  $x'_g$  tra il baricentro del drone e il baricentro dell'assieme manipolatore e carico. Per semplicità è stato assunto che il primo giunto coincida con il baricentro del manipolatore. la funzione obbiettivo  $w(q)$  da minimizzare viene quindi definita come:

$$w(q) = x'^2_g = \left[ m_1 a_1 s(q_1) + m_2 (l_1 s(q_1) + a_2 s(q_1 + q_2) + m_3 (l_1 s(q_1) + l_2 s(q_1 + q_2) + a_3 s(q_1 + q_2 + q_3))) + m_c (l_1 s(q_1) + l_2 s(q_1 + q_2) + l_c s(q_1 + q_2 + q_3))) \right]^2 / (m_1 + m_2 + m_3 + m_c)^2 \quad (3.6)$$

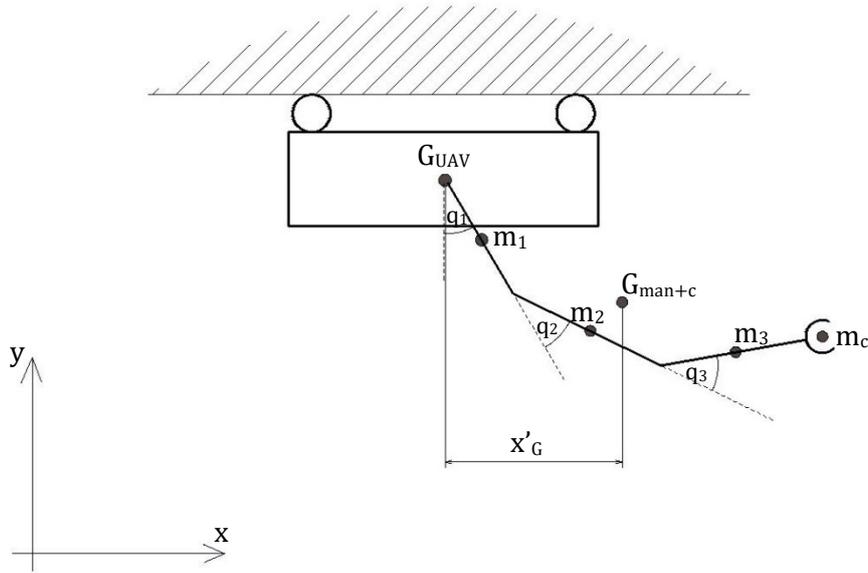


Figura 3. 1 Funzione obbiettivo per metodo del gradiente: distanza orizzontale tra il baricentro dell'UAV e quello di manipolatore e carico

Da cui si ricava

$$q_0 = k \frac{\partial x'_G}{\partial q_i} = k \frac{2 x'_G}{m_1 + m_2 + m_3 + m_c} \begin{Bmatrix} B_1 + B_2 + B_3 \\ B_2 + B_3 \\ B_3 \end{Bmatrix} \quad (3.7)$$

Dove

$$\begin{aligned} B_1 &= m_1 a_1 c(q_1) + (m_2 + m_3 + m_c) l_1 c(q_1) \\ B_2 &= m_2 a_2 c(q_1 + q_2) + (m_3 + m_c) l_2 c(q_1 + q_2) \\ B_3 &= m_3 a_3 c(q_1 + q_2 + q_3) + m_c l_c c(q_1 + q_2 + q_3) \end{aligned}$$

Questo metodo è stato testato sulla seguente traiettoria chiusa in cui ogni lato viene percorso con un profilo trapezoidale di velocità in assenza di carico: in uno script Matlab è stata risolta la cinematica inversa con ipotesi di controllo ideale del drone, prima determinando la soluzione con velocità minime e poi con il metodo del gradiente.

La configurazione iniziale del manipolatore è stata scelta in modo che il suo baricentro fosse allineato con quello del drone, quindi  $q_1 = -\frac{\pi}{6} \text{ rad}$ ,  $q_2 = \frac{2}{3}\pi \text{ rad}$ ,  $q_3 = -\frac{2}{3}\pi \text{ rad}$ .

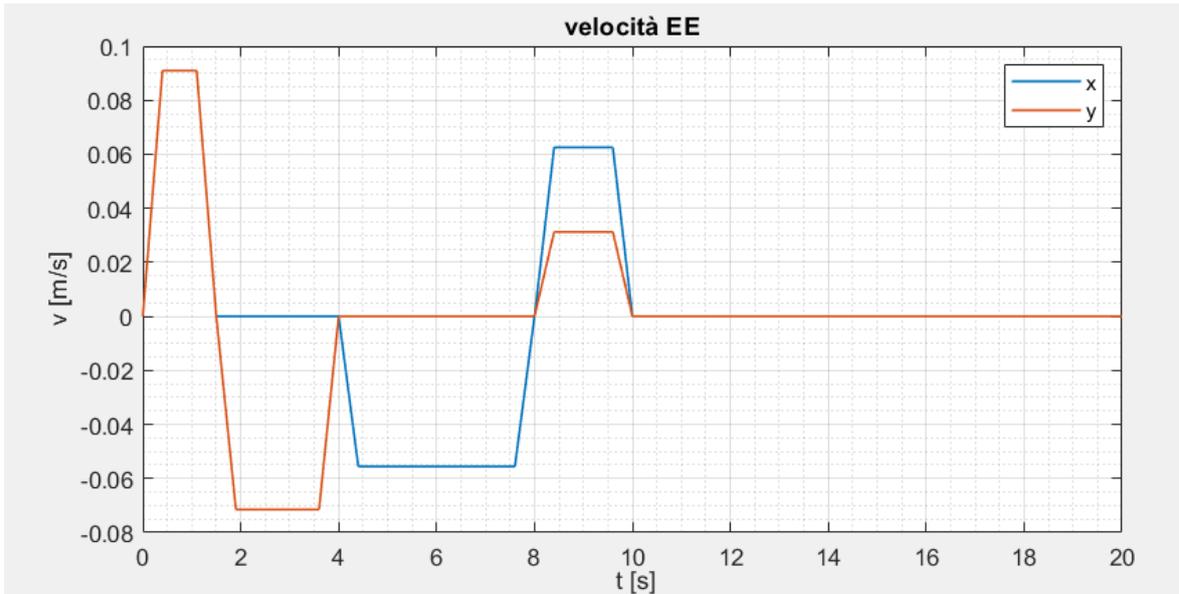


Figura 3. 2 profili di velocità richiesti all'end effector. I tratti accelerati hanno una durata di 0.4 s

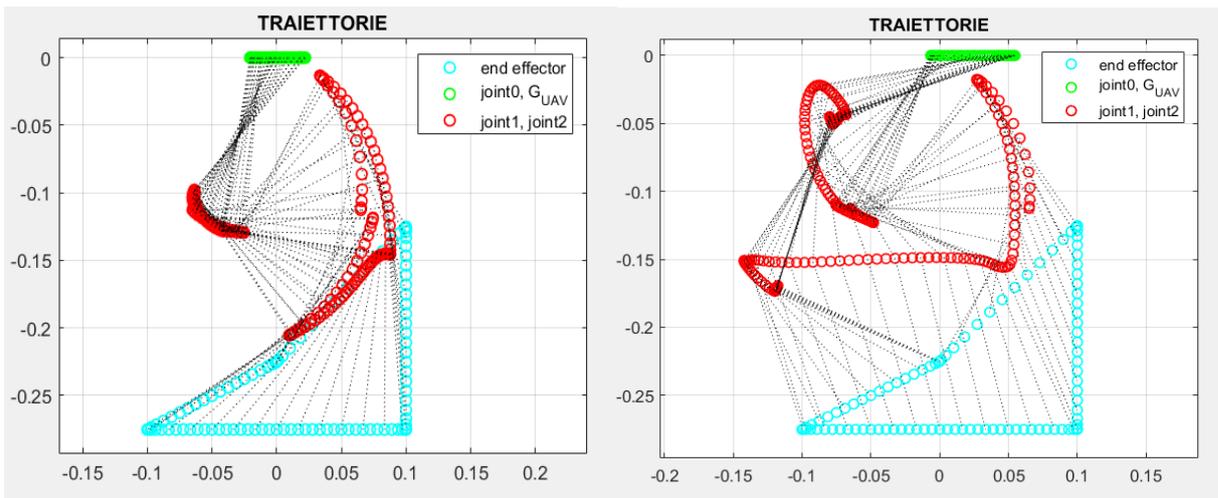


Figura 3. 3 Traiettorie previste dallo script Matlab per la risoluzione della cinematica inversa con ipotesi di controllo ideale dell'UAV. A sinistra soluzione con minime velocità dei giunti; a destra soluzione con metodo del gradiente

Dal grafico seguente, generato dallo script Matlab, si osserva che attraverso il metodo del gradiente la coppia dovuta alla gravità viene ridotta in un primo momento ma in seguito raggiunge un picco più elevato rispetto alla soluzione trovata tramite la pseudo-inversa. Aumentando il valore del parametro  $k$  nella (3.7) la coppia è più piccola nel tratto iniziale ma poi aumenta, al contrario con  $k$  più piccoli la coppia è più vicina a quella della soluzione a minime velocità.

Un ulteriore inconveniente è che, anche se posizione iniziale e finale dell'end effector sono coincidenti, lo stesso non si può dire della configurazione del manipolatore: la differenza è particolarmente accentuata utilizzando il metodo del gradiente dove  $q_3$  passa da  $-\frac{2}{3}\pi$  rad a circa  $+1.4$  rad.

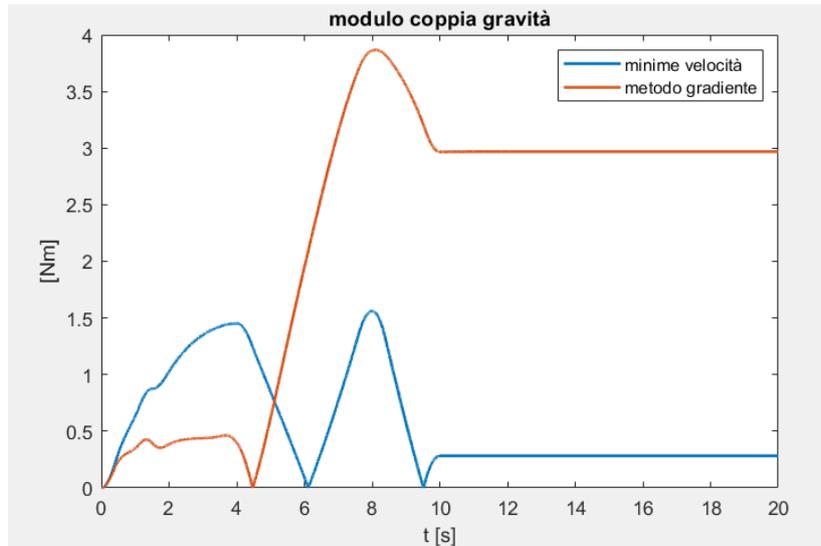


Figura 3. 4 valore assoluto del momento dovuto al peso del manipolatore sul baricentro del drone

Le simulazioni in ambiente Adams mostrano che, con drone controllato con PID rigido, la coppia fa inclinare il drone che si sposta orizzontalmente impedendo di eseguire il task con successo.

Inizialmente il drone si inclina verso destra (x positive) portando ad un errore di posizione poco inferiore ad 1cm, quando la coppia cambia segno, all'istante 4.5 s, il drone ruota in senso orario e accelera verso sinistra; a t=14 s il PID annulla il rollio e l'UAV continua a muoversi ad una velocità costante di circa 6 cm/s. Lo spostamento verticale del drone rimane inferiore a 0.1 mm

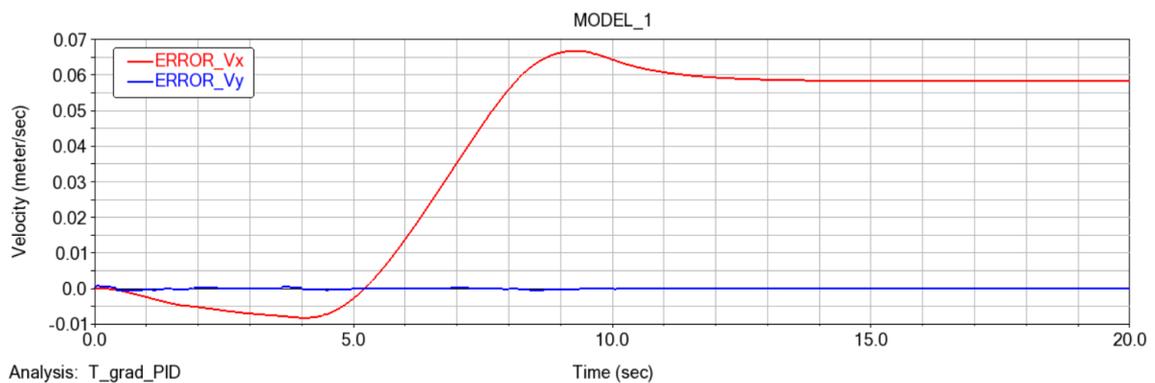


Figura 3. 5 Errore di velocità dell'end effector misurato in Adams con PID rigido. La cinematica inversa è stata risolta con il metodo del gradiente e ipotesi di controllo ideale.

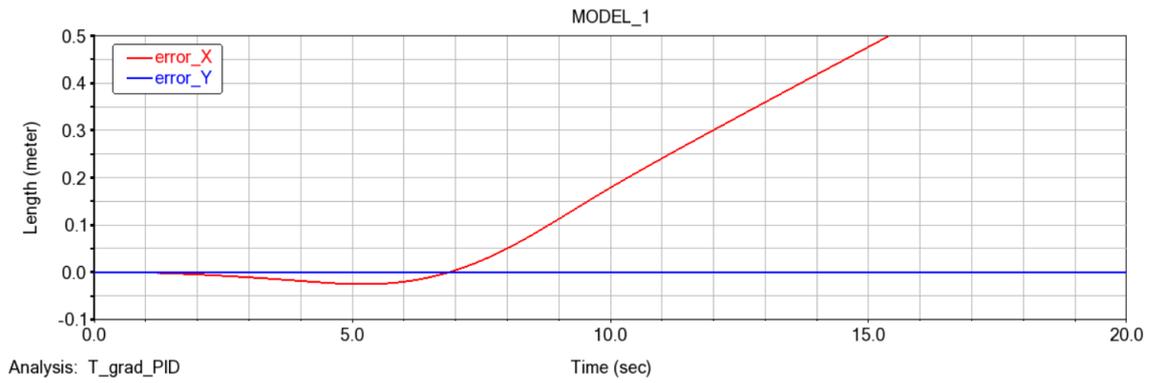


Figura 3. 6 Errore di posizione dell'end effector misurato in Adams con PID rigido. La cinematica inversa è stata risolta con il metodo del gradiente e ipotesi di controllo ideale.

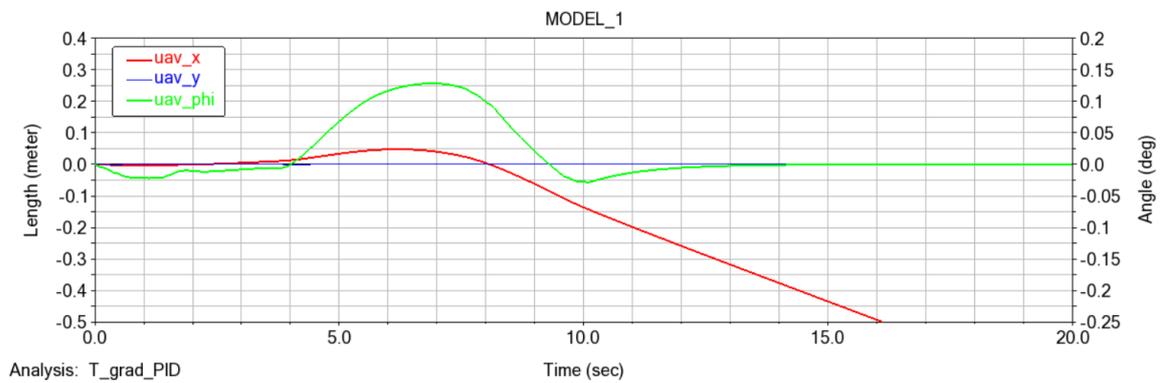


Figura 3. 7 movimenti dell'UAV misurati in Adams con PID rigido. La cinematica inversa è stata risolta con il metodo del gradiente e ipotesi di controllo ideale.

Come ci si aspetta, se anche in Adams viene utilizzato il controllo ideale l'end effector segue la traiettoria richiesta, la figura seguente mostra che la coppia agente tra drone e manipolatore è in accordo con quella prevista dallo script.

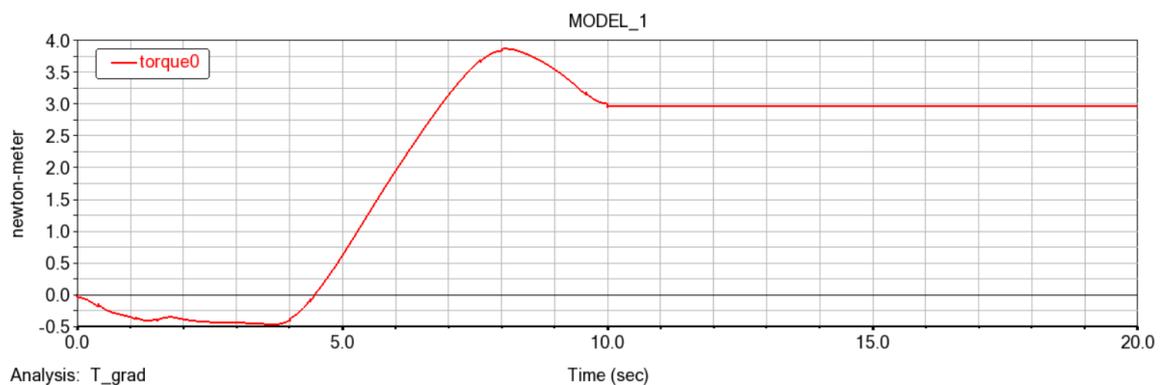


Figura 3. 8 Coppia esercitata dal manipolatore sull'UAV in Adams con controllo ideale. La cinematica inversa è stata risolta con il metodo del gradiente.

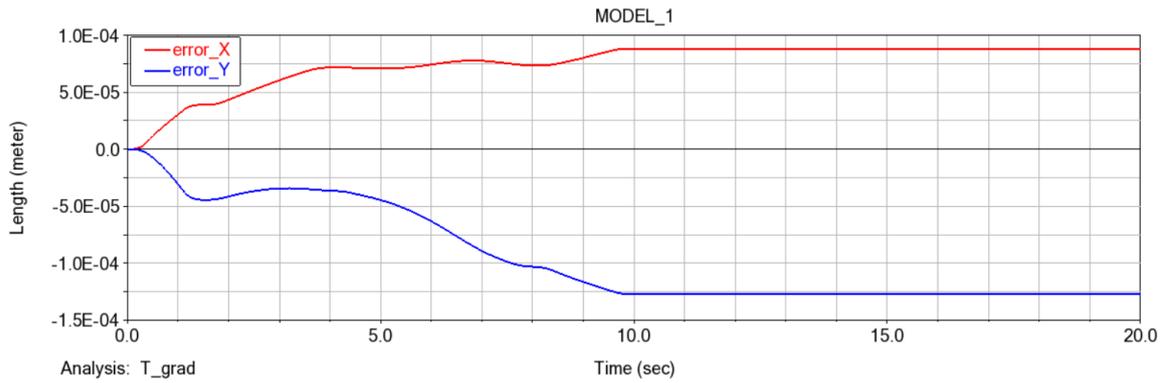


Figura 3. 9 Errore di posizione dell'end effector misurato in Adams con controllo ideale. La cinematica inversa è stata risolta con il metodo del gradiente.

### 3.2 Minimizzazione della coppia alla base del manipolatore con Jacobiano esteso

Per il manipolatore ridondante lo Jacobiano generalizzato ha dimensioni 3x2 e la cinematica inversa ha infinite soluzioni. Se si aggiunge un vincolo  $f_1\dot{q}_1 + f_2\dot{q}_2 + f_3\dot{q}_3 = b$  al problema è possibile avere un'unica soluzione che può essere ricavata come:

$$\begin{Bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{gen} \\ f_1 & f_2 & f_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} v_x \\ v_y \\ b \end{Bmatrix} \quad (3.8)$$

Formulando opportunamente il nuovo vincolo è possibile soddisfare un ulteriore requisito oltre all'inseguimento della traiettoria dell'end effector, la nuova matrice prende il nome di Jacobiano esteso. Considerando per semplicità il manipolatore fissato al baricentro del drone, di seguito si pone nulla la coppia  $\tau_{0m}$  applicata dall'attuatore tra l'UAV e il primo link, in questo modo si riduce la rotazione causata dal manipolatore sul drone.

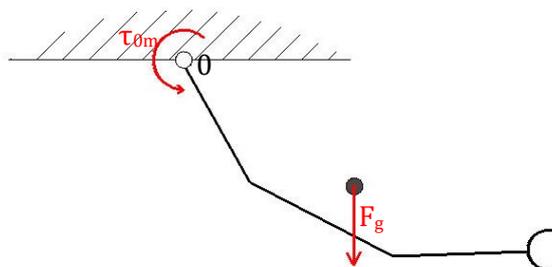


Figura 3. 10 schema per il calcolo della coppia esercitata dal manipolatore sul drone

Trascurando i movimenti del drone e quindi considerando il manipolatore come se avesse base fissa, l'equazione del momento angolare del manipolatore rispetto al baricentro dell'UAV è:

$$\frac{dK_0}{dt} = \tau_{0g} + \tau_{0m} \quad (3.9)$$

Dove  $\tau_{0g}$  è la coppia dovuta alla gravità e dipende solo dalla configurazione del manipolatore. Ponendo nullo  $\tau_{0m}$ , integrando e discretizzando nel tempo si ottiene

$$K_{0k}(q_k, \dot{q}_k) = K_{0k-1}(q_{k-1}, \dot{q}_{k-1}) + \tau_{0gk-1}(q_{k-1})\Delta t \quad (3.10)$$

Per ogni timestep il momento angolare può essere scritto in funzione delle velocità dei giunti:

$$K_{0k} = H_{bm,K_z}(q_k)\dot{q}_k \quad (3.11)$$

dove, essendo il polo dell'equazione del momento angolare coincidente con il baricentro del drone,  $H_{bm,K_z}$  corrisponde l'ultima riga della matrice  $H_{bm}$  dell'equazione (2.24), ha tante colonne quante le righe di  $q$  e dipende solo dal vettore  $q_k$  e dall'inerzia dei vari link.

Per ogni timestep  $k$  si esegue quindi la seguente procedura:

- 1) Si calcola il momento angolare del manipolatore con  $\tau_{0m} = 0$  a partire dallo stato precedente:  $K_{0k} = H_{bm,K_z}(q_{k-1})\dot{q}_{k-1} + \tau_{0gk-1}\Delta t$ ;
- 2) Si determina la matrice  $H_{bm,K_z}(q_k)$  assumendo  $q_k \approx q_{k-1}$  tenendo conto anche di un eventuale carico sull'end effector;
- 1) Si aggiunge l'equazione  $H_{bm,K_z}(q_k)\dot{q}_k = K_{0k}$  alla cinematica differenziale e si inverte lo Jacobiano esteso. Si ricorda che in questa fase non viene considerato l'effetto delle forze esterne ma viene utilizzato lo Jacobiano generalizzato del paragrafo 3.1 :

$$\begin{Bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{Bmatrix}_k = \begin{bmatrix} J_{gen}(q_{k-1}) \\ H_{bm,K_z}(q_{k-1}) \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} v_{xk} \\ v_{yk} \\ K_{0k} \end{Bmatrix} = J_{ext}^{-1} \begin{Bmatrix} v_{xk} \\ v_{yk} \\ K_{0k} \end{Bmatrix} \quad (3.12)$$

Con questo metodo ci si aspetta che la coppia sul drone e quindi i suoi spostamenti e rotazioni vengano ridotti, anche se ci si aspetta una riduzione dello spazio operativo.

Attraverso uno script Matlab la procedura appena descritta è stata utilizzata per determinare le velocità dei giunti nell'inseguimento della traiettoria dell'end effector. La traiettoria considerata richiede uno spostamento di 5 cm verso destra (x positive) e 12 cm verso il basso (y negative) con andata e ritorno percorsi con profili trapezoidali di velocità con tempi di accelerazione di 0.5 s. La traiettoria viene seguita senza carichi sull'end effector partendo da una configurazione di equilibrio.

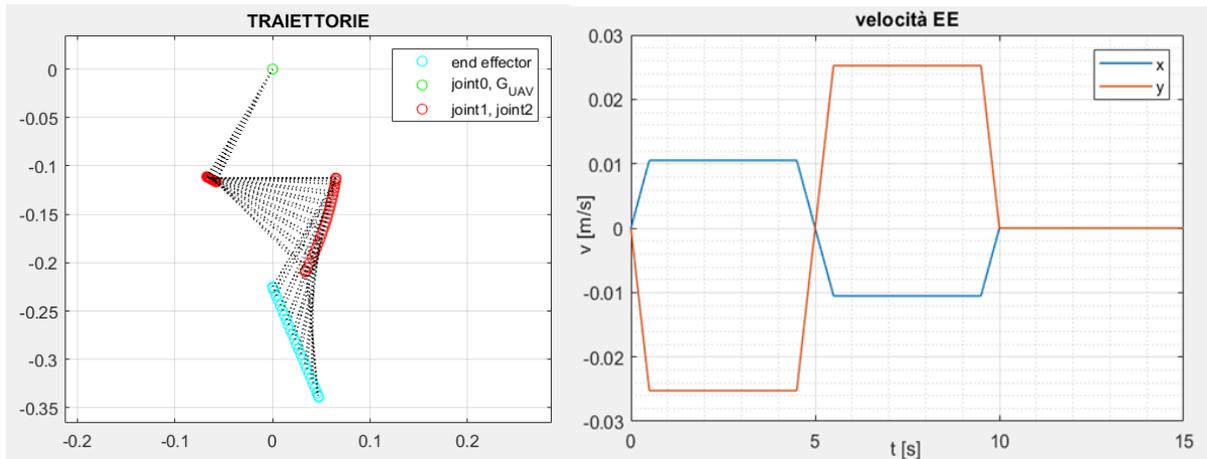


Figura 3. 11 A sinistra traiettorie previste dallo script Matlab nella risoluzione della cinematica inversa con Jacobiano esteso e controllo ideale. A destra profili di velocità richiesti all'end effector

Quindi le velocità dei giunti sono state importate nel modello Adams per verificare la correttezza del risultato. Utilizzando il controllo ideale anche in Adams si può osservare che l'errore di posizione nell'inseguimento di traiettoria è dell'ordine di  $1e-5$  m ed è quindi accettabile; anche la coppia misurata tra manipolatore e drone è dell'ordine di  $1e-3$  Nm mentre con il metodo del gradiente, anche se per una traiettoria diversa, la coppia superava i 3 Nm. Si nota che in corrispondenza delle discontinuità di accelerazione dell'end effector la coppia aumenta.

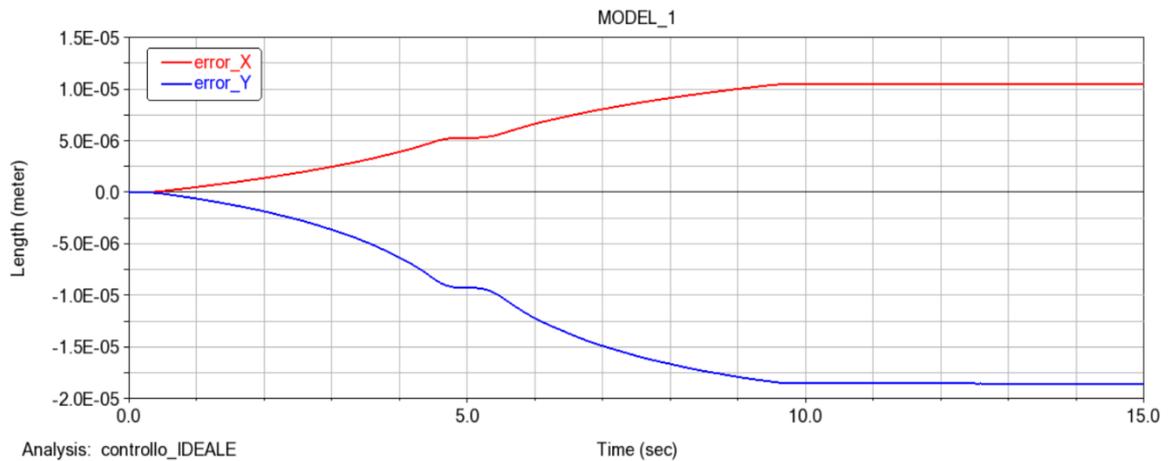


Figura 3. 12 errore di posizione dell'end effector misurato in Adams con controllo ideale.

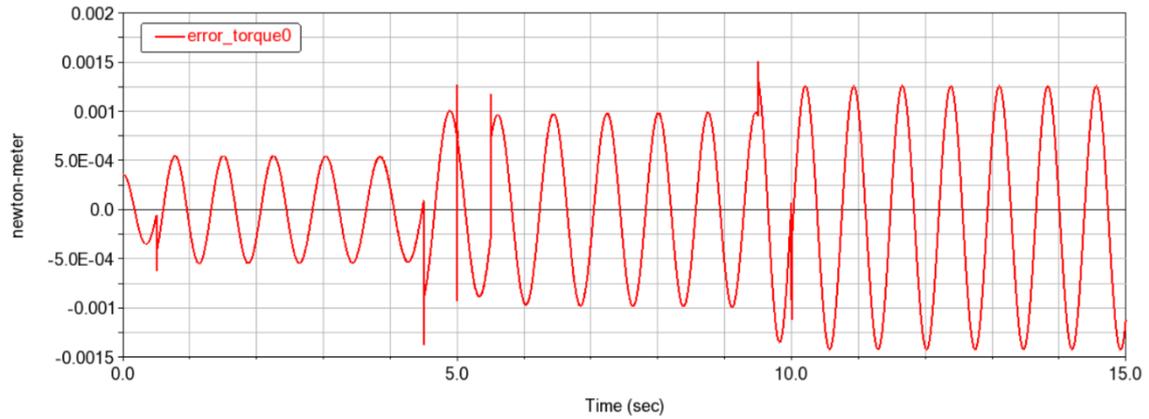


Figura 3. 13 coppia tra manipolatore e UAV misurata in Adams con controllo ideale

La simulazione è stata ripetuta utilizzando il controllo PID rigido in Adams:

- Anche se in Matlab viene utilizzata l'ipotesi di controllo ideale l'errore di posizione rimane comunque piccolo (inferiore a 0.1 mm) ed è dovuto al fatto che il controllo del drone non mantiene perfettamente nulla la variazione di altitudine durante i tratti accelerati come ipotizzato nello script Matlab;
- la coppia tra manipolatore e drone non mostra differenze rilevanti rispetto alla simulazione con controllo ideale dell'UAV;
- gli spostamenti della base sono piccoli: le traslazioni sono inferiori a 0.1 mm e il rollio oscilla con ampiezza di circa  $1e-4$  gradi.

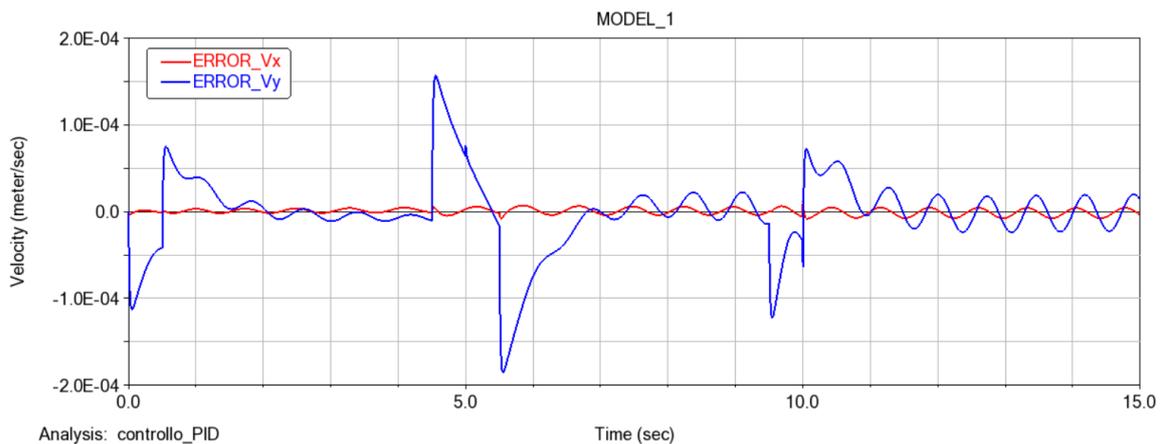


Figura 3. 14 errore di velocità dell'end effector misurato in Adams con controllo PID rigido. La cinematica inversa è stata risolta con lo Jacobiano esteso e ipotesi di controllo ideale

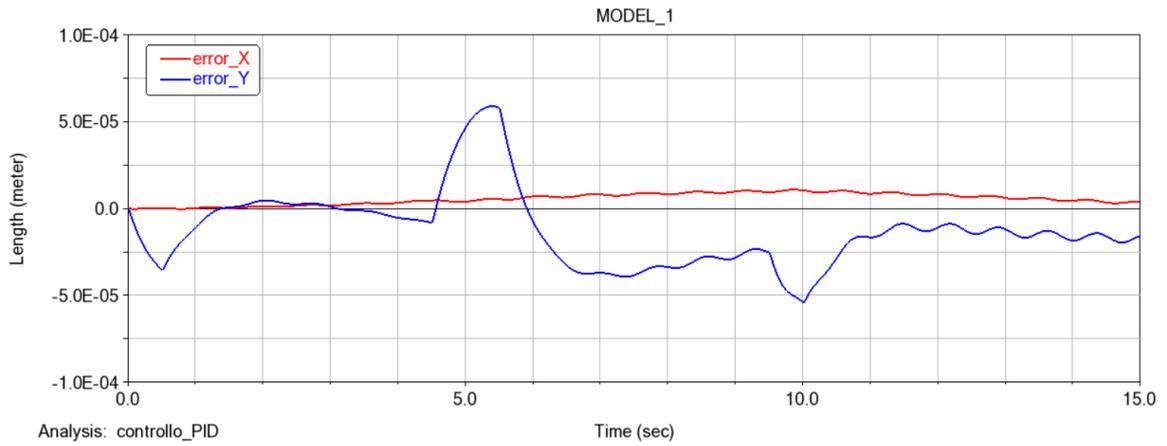


Figura 3. 15 errore di posizione dell'end effector misurato in Adams con controllo PID rigido. La cinematica inversa è stata risolta con lo Jacobiano esteso e ipotesi di controllo ideale

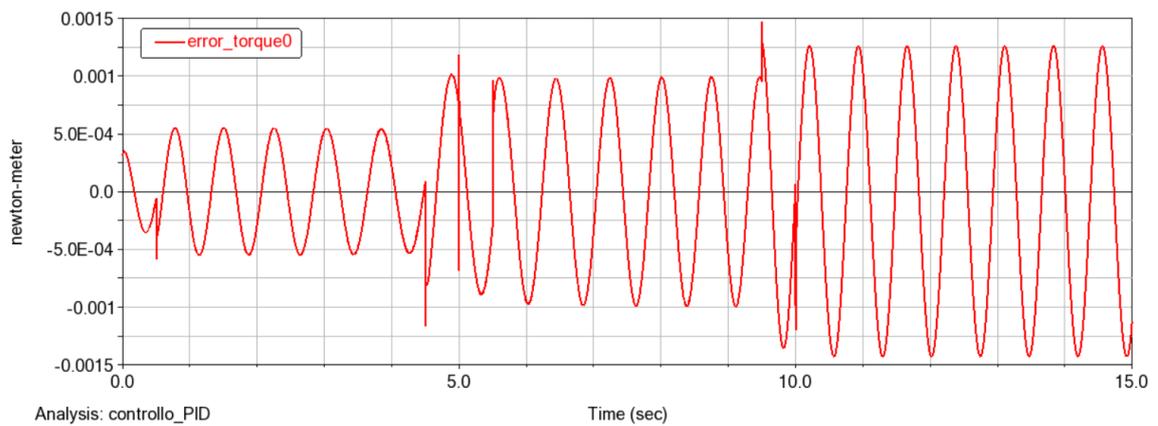


Figura 3. 16 coppia tra manipolatore e drone misurata in Adams con controllo PID rigido. La cinematica inversa è stata risolta con lo Jacobiano esteso e ipotesi di controllo ideale

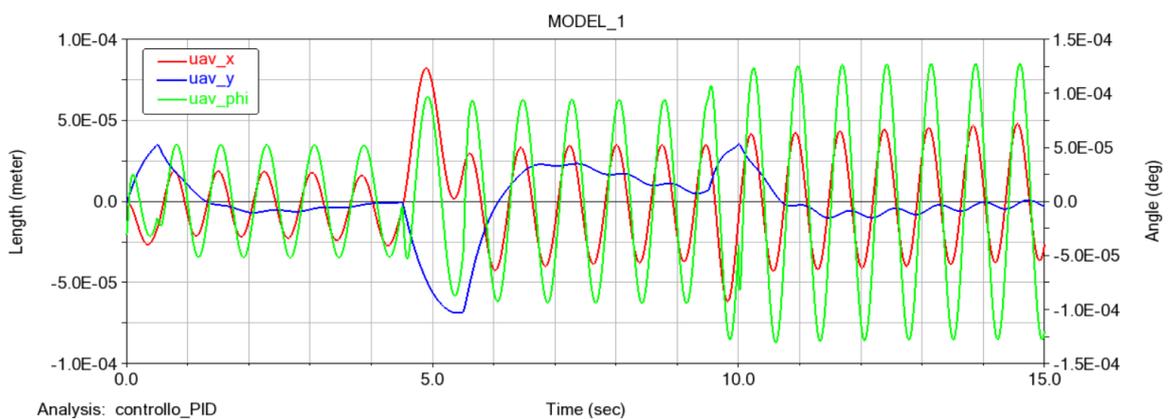


Figura 3. 17 spostamenti e rotazione del drone misurati in Adams con controllo PID rigido. La cinematica inversa è stata risolta con lo Jacobiano esteso e ipotesi di controllo ideale

Quindi, utilizzando il controllo PID rigido in Adams, è stata testata la seguente traiettoria, che è la stessa che era stata considerata con il metodo del gradiente. In questa traiettoria le accelerazione e le velocità sono maggiori, infatti l'errore in direzione verticale è maggiore perché la cinematica

inversa non tiene conto degli spostamenti verticali del drone causati dal movimento del manipolatore e il controllo del drone non è in grado di correggere istantaneamente questi effetti.

Rispetto al caso precedente coppia tra manipolatore e drone e gli spostamenti di quest'ultimo sono maggiori di un ordine di grandezza, l'errore di posizione dell'end effector rimane comunque inferiore a 0.5 mm.

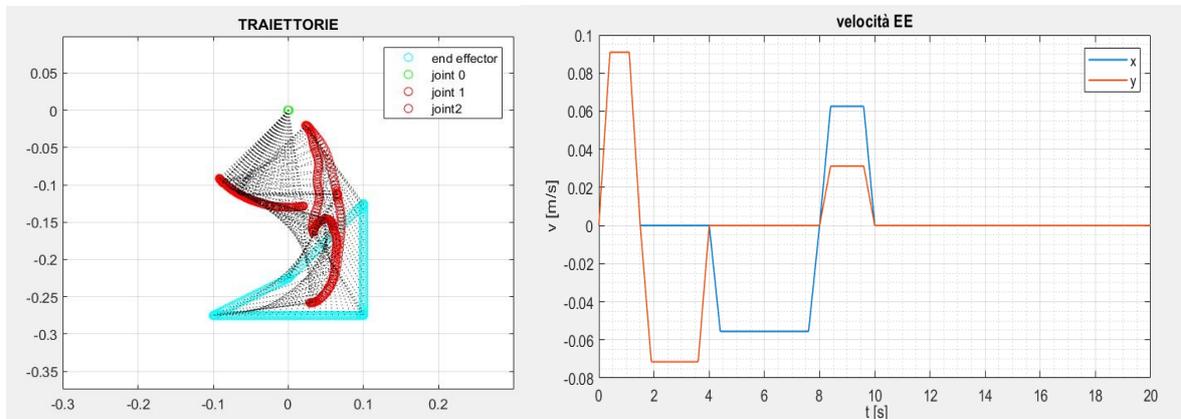


Figura 3. 18 A sinistra traiettorie previste dallo script Matlab nella risoluzione della cinematica inversa con Jacobiano esteso e controllo ideale. A destra profili di velocità richiesti all'end effector

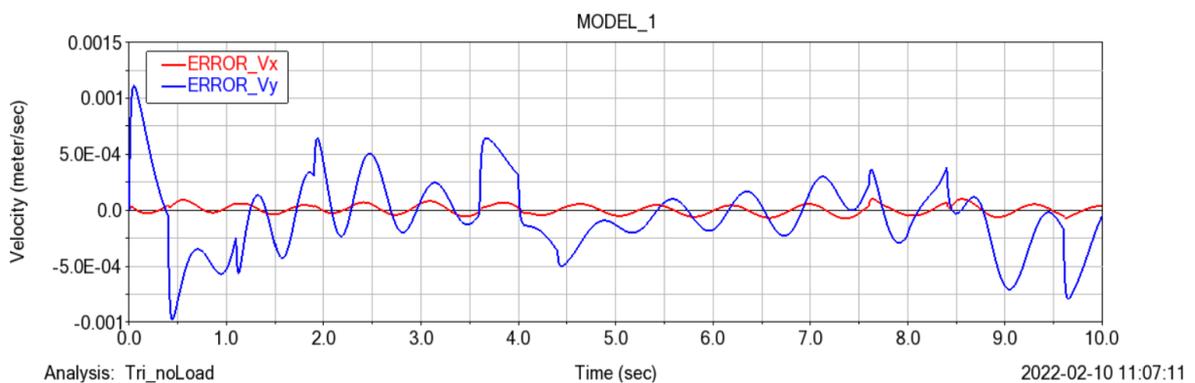


Figura 3. 19 errore di velocità dell'end effector misurato in Adams con controllo PID rigido

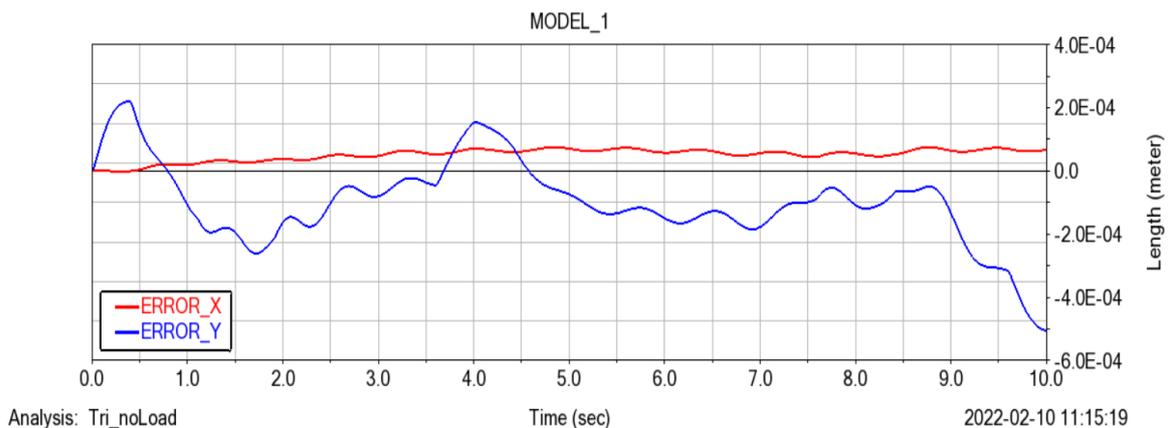


Figura 3. 20 errore di posizione dell'end effector misurato in Adams con controllo PID rigido

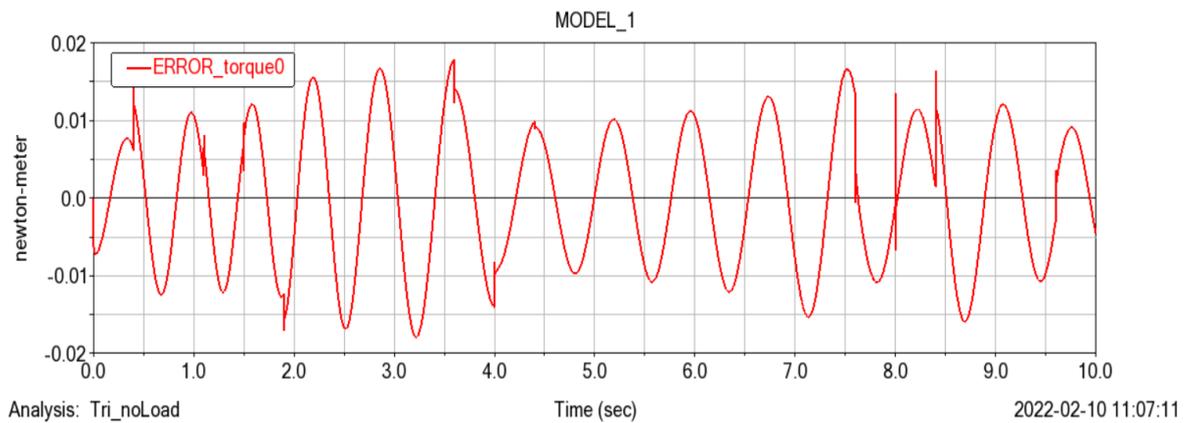


Figura 3. 21 coppia tra manipolatore e UAV misurata in Adams con controllo PID rigido

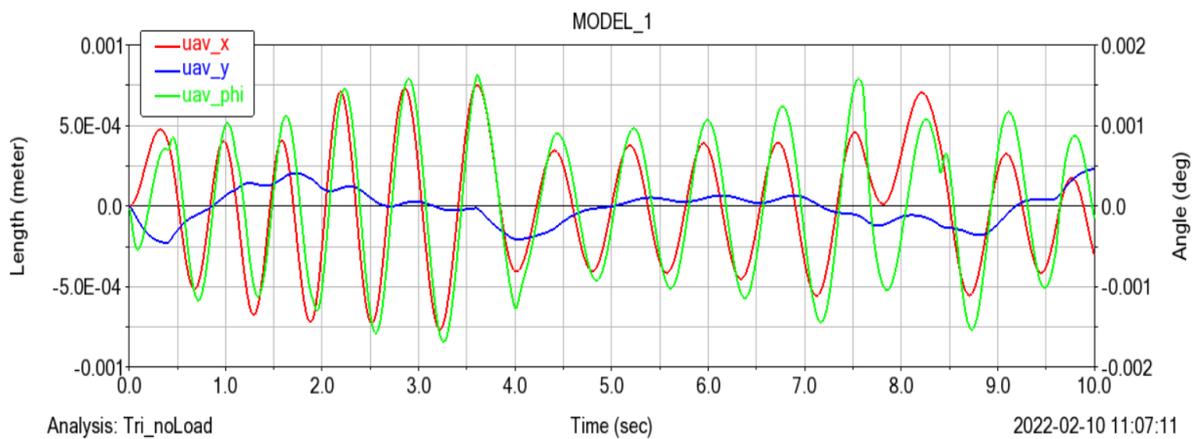


Figura 3. 22 spostamenti e traslazioni dell'UAV misurati in Adams con controllo PID rigido

La risoluzione della cinematica inversa attraverso lo Jacobiano esteso in cui lo Jacobiano generalizzato è ottenuto con ipotesi di controllo ideale ha mostrato risultati accettabili nell'inseguimento di traiettoria anche con controllo non ideale del drone in Adams in assenza di carico, quindi è stata seguita una traiettoria con carico.

La traiettoria richiesta all'end effector è quella di figura 3.9, all'istante  $t=5$  s viene aggiunta una massa di 0.9 kg sull'end effector. Il carico è aggiunto istantaneamente: nel modello multibody attivando un giunto.

Utilizzando il PID rigido per il controllo del drone, all'istante in cui viene aggiunto il carico si osserva:

- le velocità dei giunti aumentano e hanno un andamento oscillatorio;
- la coppia aumenta e dopo un picco istantaneo oscilla con ampiezza 0.2 Nm;
- gli spostamenti del drone sono maggiori, all'aggiunta del carico il drone si abbassa di circa 6 cm e ciò si riflette sull'errore di posizione dell'end effector;
- l'errore di posizione dell'end effector inizia ad aumentare;

Altre simulazioni hanno mostrato che l'errore dell'end effector e quello sulla coppia, gli spostamenti orizzontali e il rollio dell'UAV, l'ampiezza delle oscillazioni nelle velocità aumentano all'aumentare della distanza orizzontale tra l'UAV e il carico: se la traiettoria dell'end effector è verticale rimane solo l'errore dovuto all'abbassamento del drone.

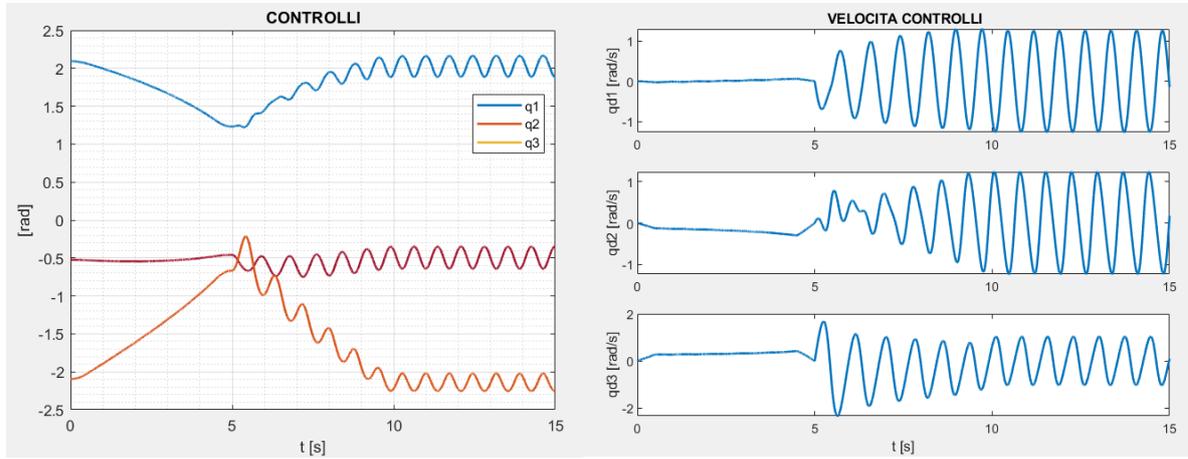


Figura 3. 23 risultato della cinematica inversa con Jacobiano esteso per la traiettoria di figura 3.9 con carico aggiunto a 5 s. A sinistra gli angoli dei giunti e a destra le velocità

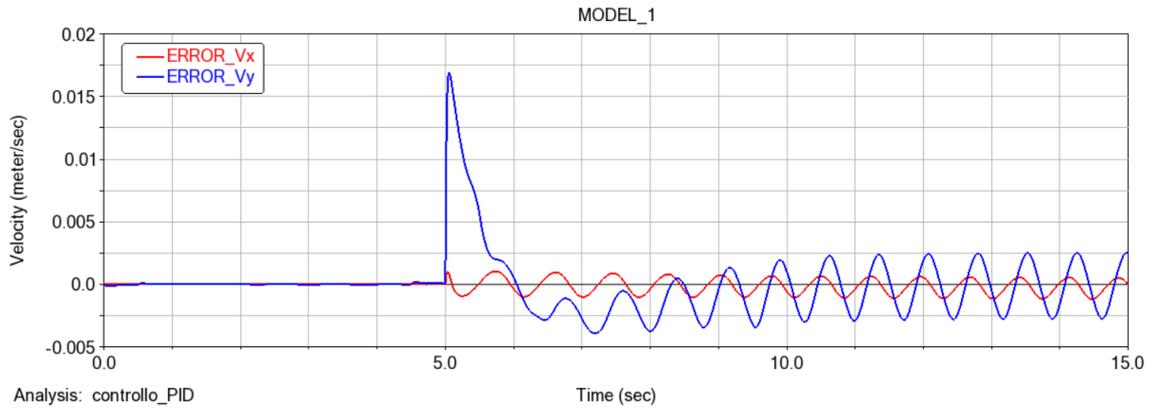


Figura 3. 24 errore di velocità dell'end effector misurato in Adams con carico aggiunto a 5 e con controllo PID rigido. La cinematica inversa è risolta con Jacobiano esteso e ipotesi di controllo ideale

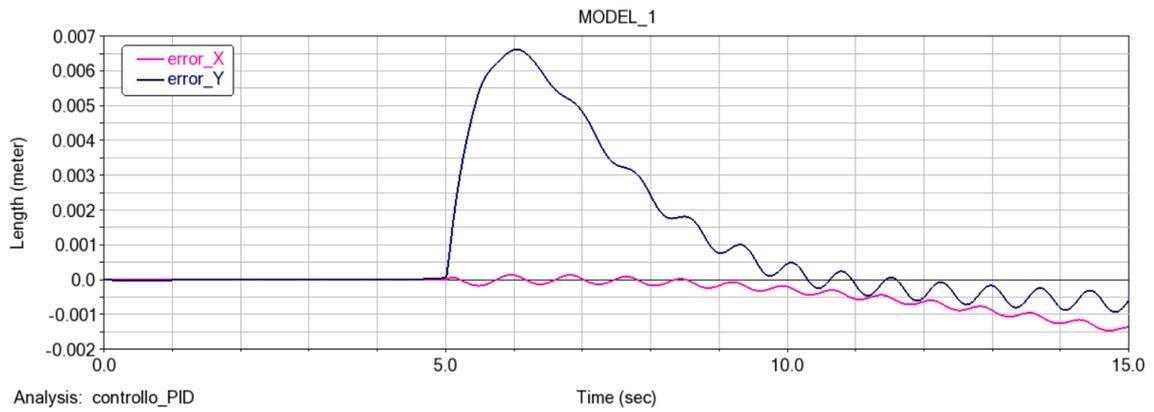


Figura 3. 25 errore di posizione dell'end effector misurato in Adams con carico aggiunto a 5 e con controllo PID rigido. La cinematica inversa è risolta con Jacobiano esteso e ipotesi di controllo ideale

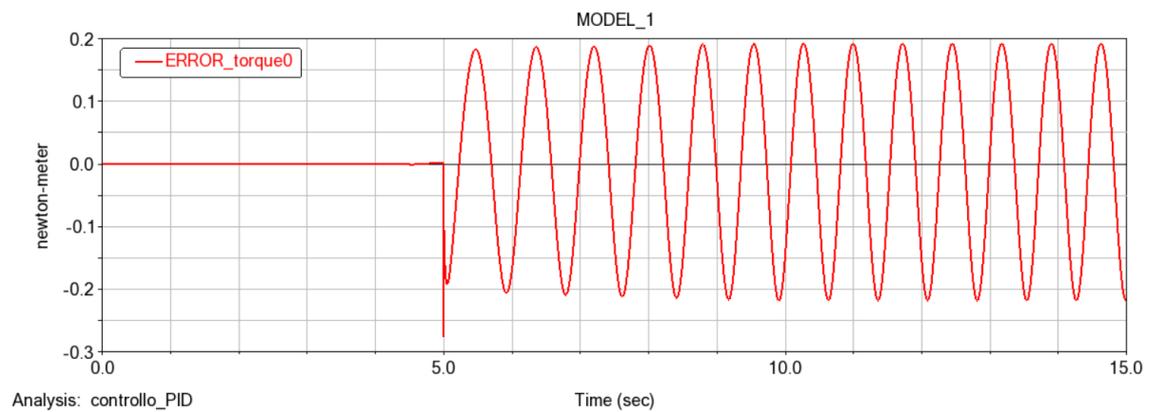


Figura 3. 26 errore nella coppia tra drone e manipolatore misurato in Adams con carico aggiunto a 5 s e con controllo PID rigido. La cinematica inversa è risolta con Jacobiano esteso e ipotesi di controllo ideale

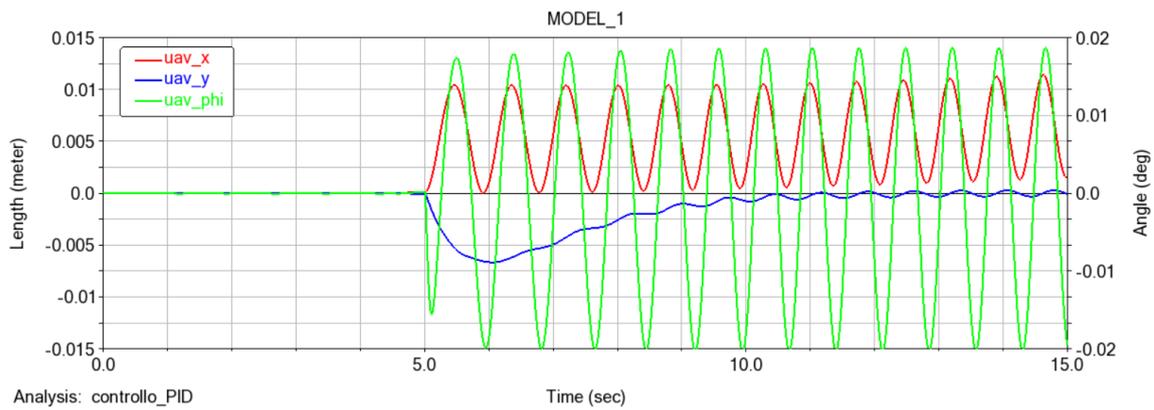


Figura 3. 27 movimenti dell'UAV misurati in Adams con carico aggiunto a 5 s e con controllo PID rigido. La cinematica inversa è risolta con Jacobiano esteso e ipotesi di controllo ideale

Come si vede dalle figure successive, se in Adams viene utilizzato il controllo ideale l'errore nella coppia persiste ma l'errore di posizione dell'end effector si riduce, anche se al termine della simulazione continua ad aumentare con andamento circa lineare. Il problema potrebbe essere

causato dal modo in cui viene aggiunto il carico che viene trattato come una discontinuità nelle masse e nelle forze.

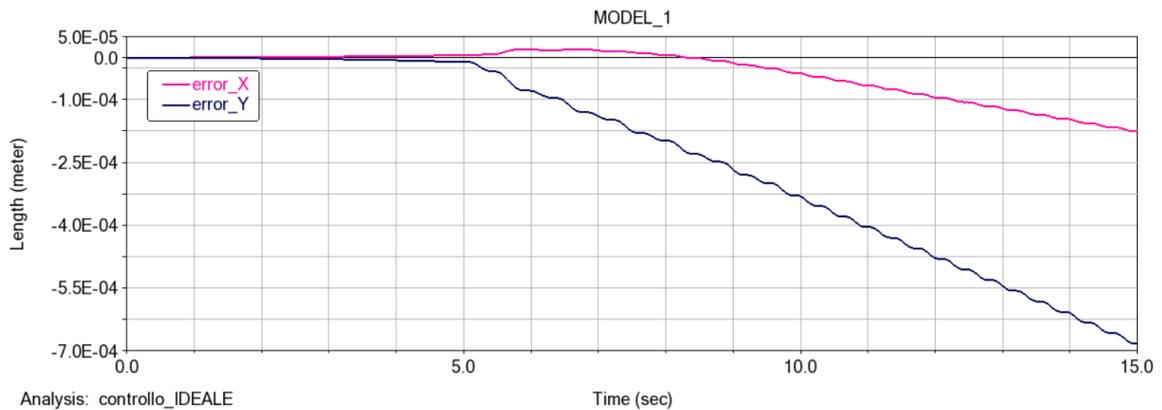


Figura 3. 28 errore di posizione dell'end effector misurato in Adams con carico aggiunto a 5 s e con controllo ideale. La cinematica inversa è risolta con Jacobiano esteso e ipotesi di controllo ideale

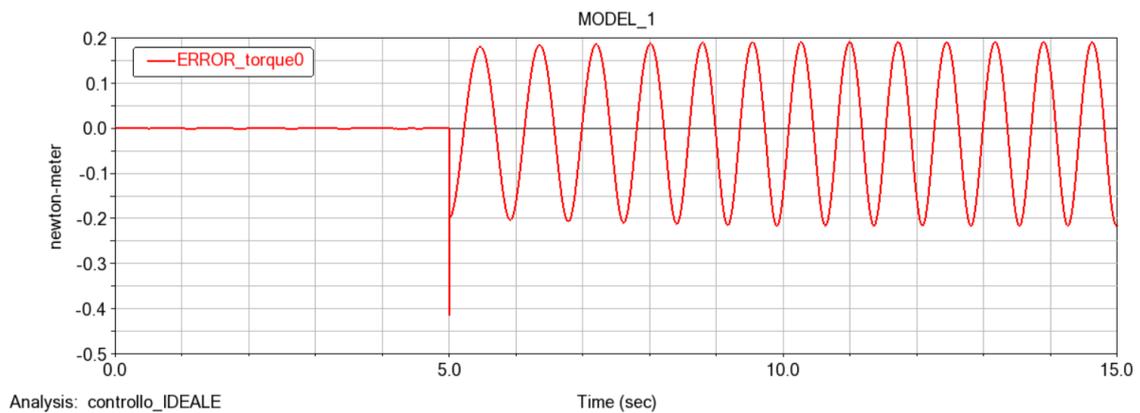


Figura 3. 29 errore nella coppia tra drone e manipolatore misurato in Adams con carico aggiunto a 5 s e con controllo PID rigido. La cinematica inversa è risolta con Jacobiano esteso e ipotesi di controllo ideale

### 3.3 Effetto della traslazione del drone nello Jacobiano esteso

Anche se annullando la coppia sul drone questo non si inclina e quindi non genera un'accelerazione in direzione orizzontale con la spinta dei rotori, l'UAV può comunque traslare a causa dell'inerzia del manipolatore. Le velocità in direzione x possono essere ricavate tramite lo jacobiano generalizzato per controllo ideale, le velocità in direzione y sono nulle nel caso di controllo ideale mentre con controllo reale del drone sono influenzate sia dal movimento del manipolatore sia dai parametri del controllo.

A causa delle traslazioni del drone si generano dei momenti ulteriori rispetto a quelli considerati in precedenza. Poiché per determinare le velocità verticali del drone sarebbe necessario includere anche il controllo del drone nella cinematica inversa, di seguito questa verrà trascurata; anche la velocità angolare del drone verrà trascurata.

L'equazione del momento angolare per il manipolatore rispetto al giunto tra drone e manipolatore, coincidente con il baricentro del drone è:

$$\frac{dK_0}{dt} = \tau_{0g} + \tau_{0m} + m_{mc} y_{Gm} \ddot{x}_{UAV} \quad (3.13)$$

Rispetto al caso in cui tutti i movimenti della base venivano trascurati è stato aggiunto l'ultimo termine in cui  $m_{m,c}$  è la somma delle masse del manipolatore e del carico,  $[x_{Gm} y_{Gm}]^T$  è il vettore che congiunge il baricentro del drone con il baricentro del sistema manipolatore-carico e  $\ddot{x}_{UAV}$  è l'accelerazione orizzontale del drone rispetto al sistema di riferimento assoluto. Ponendo nulla la coppia generata dall'attuatore  $\tau_{0m}$ , integrando e discretizzando nel tempo si ottiene:

$$K_{0k}(q_k, \dot{q}_k) - y_{Gm}(q_k) m_{m,c} \dot{x}_{UAVk} = K_{0k-1}(q_{k-1}, \dot{q}_{k-1}) + \tau_{0gk-1}(q_{k-1}) \Delta t \quad (3.14)$$

I termini a sinistra possono essere espressi in funzione delle velocità dei controlli del manipolatore  $\dot{q}_k$  tramite:

$$K_{0k} = H_{bm,K_z}(q_{k-1}) \dot{q}_k \quad \dot{x}_{UAVk} = J_{bx}(q_k) \dot{q}_k \quad (3.15)$$

dove  $J_{bx} = [A_1 \ A_2 \ A_3]$  si ottiene dalla conservazione della quantità di moto in direzione x:

$$\begin{aligned} A_3 &= -\frac{1}{m_{UAV} + m_1 + m_2 + m_3 + m_c} [m_3 a_3 c(q_1 + q_2 + q_3) + m_c l_c c(q_1 + q_2 + q_3)] \\ A_2 &= A_3 - \frac{1}{m_{UAV} + m_1 + m_2 + m_3 + m_c} [m_2 a_2 c(q_1 + q_2) + (m_3 + m_c) l_2 c(q_1 + q_2)] \\ A_1 &= A_2 - \frac{1}{m_{UAV} + m_1 + m_2 + m_3 + m_c} [m_1 a_1 c(q_1) + (m_2 + m_3 + m_c) l_1 c(q_1)] \end{aligned} \quad (3.16)$$

Analogamente al caso in cui le traslazioni del drone venivano trascurate per ogni timestep k si esegue la seguente procedura:

- 3) Si calcola il termine a destra dell'equazione dallo stato precedente:

$$b_k = H_{bm,K_z k-1} \dot{q}_{k-1} + \tau_{0gk-1} \Delta t$$

- 2) Si determinano le matrici  $H_{bm,K_z}(q_k)$  e  $J_{bx}(q_k)$  e  $y_{Gm}(q_k)$  assumendo  $q_k \approx q_{k-1}$

- 3) Si aggiunge l'equazione alla cinematica differenziale e si inverte lo Jacobiano esteso così ottenuto:

$$\begin{Bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{Bmatrix}_k = \left[ H_k(q_{k-1}) - y_{Gm}(q_{k-1}) m_{mc} J_{bx}(q_{k-1}) \right]^{-1} \begin{Bmatrix} v_{xk} \\ v_{yk} \\ b_k \end{Bmatrix} = J_{ext}^{-1} \begin{Bmatrix} v_{xk} \\ v_{yk} \\ b_k \end{Bmatrix} \quad (3.17)$$

Il metodo così aggiornato viene confrontato con quello che trascurava le traslazioni del drone nell'equazione del momento angolare del manipolatore, viene quindi simulata la stessa traiettoria quasi triangolare di figura 3.16 senza carico con drone controllato attraverso il PID rigido (i grafici non riportano l'intervallo di tempo successivo a 10 s). Come si può osservare per quanto riguarda l'inseguimento di traiettoria non ci sono differenze sensibili tra i due casi. Le differenze maggiori si notano sulla coppia esercitata dal manipolatore sul drone e sul rollio del drone che si riducono di un ordine di grandezza.

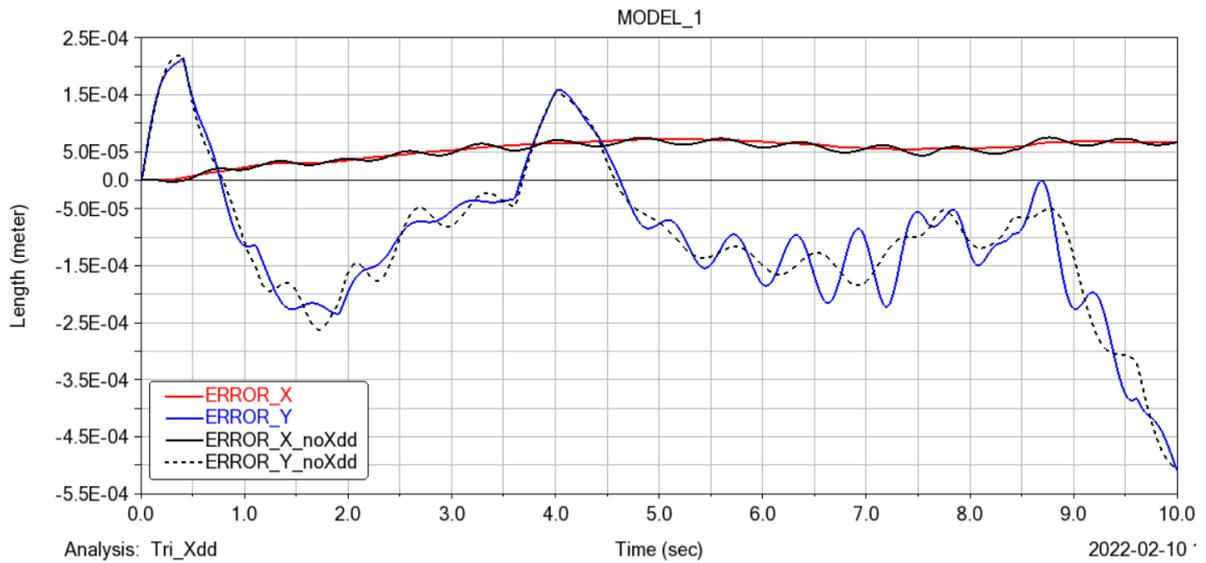


Figura 3. 30 errore di posizione dell'end effector misurato in Adams con controllo PID rigido risolvendo la cinematica inversa con Jacobiano esteso e ipotesi di controllo ideale. Confronto tra l'errore con (ERROR\_X, ERROR\_Y) e senza (ERROR\_X\_noXdd, ERROR\_Y\_noXdd) accelerazione in x della base nell'equazione del momento angolare del manipolatore.

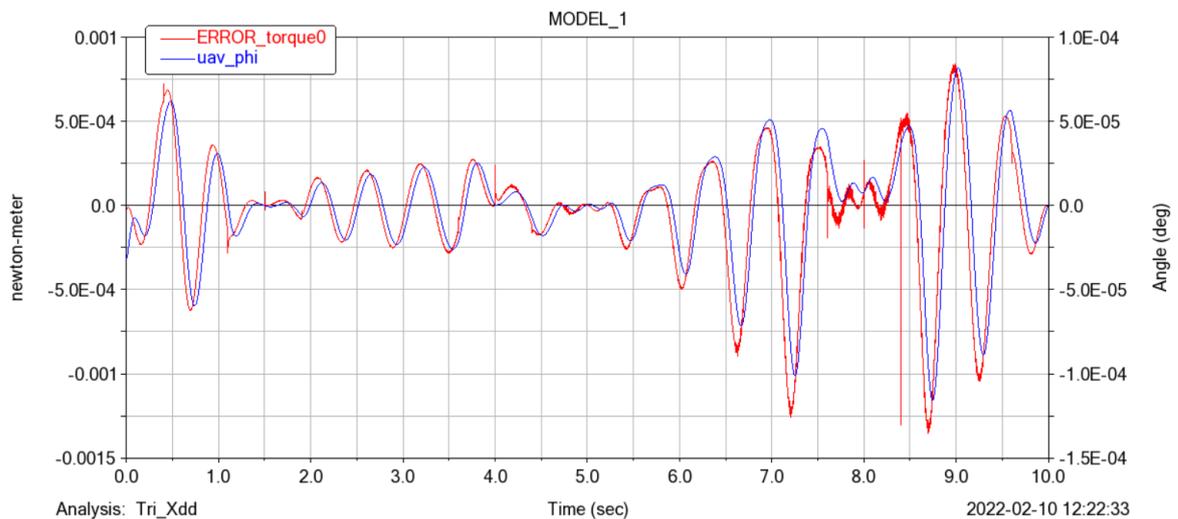


Figura 3. 31 Rollio del drone e coppia tra manipolatore e drone misurata in Adams con controllo PID rigido considerando l'accelerazione in x del drone nell'equazione del momento angolare del manipolatore. La cinematica inversa è risolta con la (3.17)

Si nota inoltre che, nonostante la coppia e il rollio si riducano molto, lo stesso non accade per gli spostamenti orizzontali del drone.

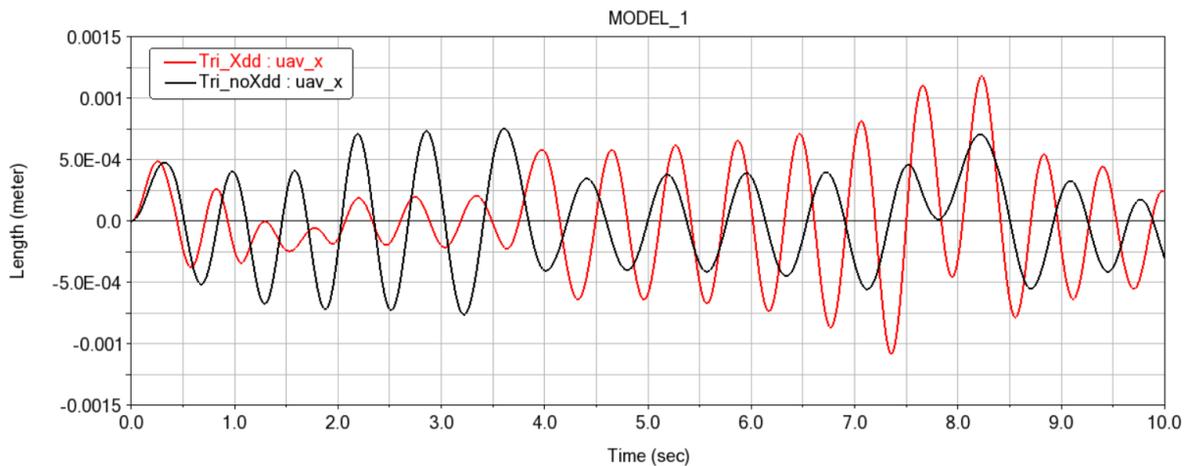


Figura 3. 32 traslazione orizzontale del drone misurata in Adams con controllo PID rigido risolvendo la cinematica inversa con Jacobiano esteso e ipotesi di controllo ideale. Confronto tra lo spostamento con (in rosso) e senza (in nero) accelerazione in  $x$  della base nell'equazione del momento angolare del manipolatore.

Anche con diversi parametri del controllo del drone si osserva che l'introduzione dell'accelerazione in  $x$  della base nell'equazione del momento angolare del manipolatore non provoca particolari differenze per quanto riguarda l'errore sull'end effector, la coppia tra manipolatore e UAV invece si riduce di un ordine di grandezza.

### 3.4 Jacobiano esteso con elemento di bilanciamento

In questo paragrafo viene mostrato come lo Jacobiano esteso può essere utilizzato anche per controllare degli elementi come dischi o masse per ridurre la coppia sul drone; inoltre questo caso può essere utile per capire il motivo per cui con il metodo dello jacobiano esteso le velocità dei giunti oscillano e perché nel momento in cui si aggiunge il carico gli errori iniziano a crescere linearmente.

Si considera un sistema semplice, costituito da un manipolatore con un singolo grado di libertà e da un elemento aggiuntivo per bilanciare la coppia esercitata dal manipolatore sul drone, si considera il caso di controllo ideale del drone. Per questo sistema viene risolta la cinematica inversa a livello delle accelerazioni imponendo l'accelerazione desiderata in direzione orizzontale dell'end effector attraverso un codice Matlab, non si pongono condizioni sull'accelerazione verticale dell'end effector.

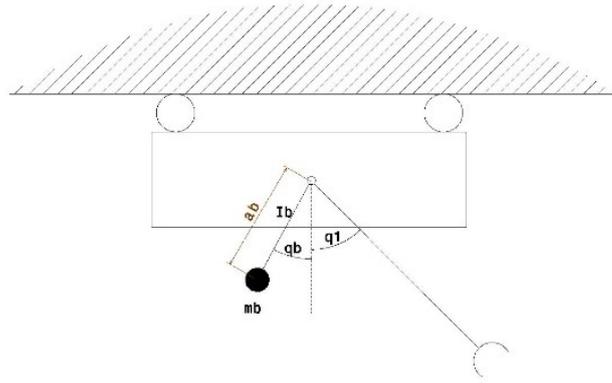


Figura 3. 33 UAM con elemento di bilanciamento e controllo ideale

La velocità richiesta ha solo un componente mentre i controlli dell'insieme manipolatore e elemento di bilanciamento sono due:  $q_1$  e  $q_b$ , quindi è possibile imporre che la coppia sul drone sia nulla con il metodo dello jacobiano esteso. Mentre per il manipolatore a tre gradi di libertà dei paragrafi precedenti la coppia veniva compensata dal manipolatore stesso, ora questa funzione è svolta da un elemento dedicato e, nel caso l'elemento di bilanciamento abbia massa trascurabile e momento di inerzia non nullo, esiste certamente una soluzione che annulla la coppia sulla base.

$m_{UAV}$	4 kg	Massa del drone
$m_1$	1 kg	Massa del link (manipolatore)
$I_1$	$6 \cdot 10^{-4} \text{ kg m}^2$	Momento d'inerzia baricentrico del link
$L_1$	0.2 m	Lunghezza del link
$a_1$	0.1 m	Distanza del baricentro del link dal giunto
$a_b$	0.1 m	Distanza del baricentro dell'elemento di bilanciamento dal giunto
$m_c$	1 kg	Massa del carico
$a_c$	1 kg	Distanza del baricentro del carico dal g
$m_b$		Massa dell'elemento di bilanciamento
$I_b$		Momento d'inerzia dell'elemento di bilanciamento rispetto al baricentro del drone (coincidente con il giunto)

Tabella 3. 1 Parametri dell'UAM con elemento di bilanciamento

Per risolvere la cinematica inversa a livello delle accelerazioni mantenendo nulla la coppia tra drone e manipolatore si usa la seguente:

$$\begin{Bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_b \end{Bmatrix} = J_{ext}^{-1} \begin{Bmatrix} \dot{v}_x \\ T_g \end{Bmatrix} - J_{ext} \begin{Bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_b \end{Bmatrix} \quad (3. 18)$$

Si determina la prima riga di  $J_{ext}$  ponendo nulla la quantità di moto del sistema in direzione x ottenendo lo jacobiano generalizzato:

$$J_{gen} = \left[ L_1 - \frac{1}{M} (m_1 a_1 + m_c a_c) c(q_1) \quad -\frac{1}{M} (m_b a_b) c(q_b) \right] \quad (3. 19)$$

Ponendo nulla la coppia esercitata dal manipolatore e dall'elemento di bilanciamento si ottiene la seconda riga :

$$\tau_g = [I_1 + m_1 a_1^2 + m_c a_c^2 \quad I_b + m_b a_b^2] \begin{Bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_b \end{Bmatrix} \quad (3.20)$$

Dove  $\tau_g = m_1 g a_1 c(q_1) + m_c g a_c c(q_1) + m_b g a_b c(q_b)$  è la coppia dovuta alla gravità.

Si ottiene quindi

$$J_{ext} = \begin{bmatrix} L_1 - \frac{1}{M}(m_1 a_1 + m_c a_c) c(q_1) & -\frac{1}{M}(m_b a_b) c(q_b) \\ I_1 + m_1 a_1^2 + m_c a_c^2 & I_b + m_b a_b^2 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

All'end effector è stata imposta una traiettoria con accelerazione continua in cui l'end effector percorre una distanza di circa 7 cm in 10 s, preleva, in alcuni casi, il carico e torna indietro. Sono stati considerati tre diversi casi per confrontare elementi di bilanciamento con massa trascurabile e momento d'inerzia non nullo e viceversa casi in cui l'elemento di bilanciamento è una massa puntiforme fissata su un braccio senza massa:

- 1) elemento di bilanciamento: disco  $m_b = 0$ ,  $I_b = 0.01 \text{ kg m}^2$

In questo caso il metodo dà buoni risultati e non si osservano oscillazioni: nell'istante in cui viene aggiunto il carico l'elemento di bilanciamento accelera per bilanciare il peso aggiuntivo con una discontinuità.

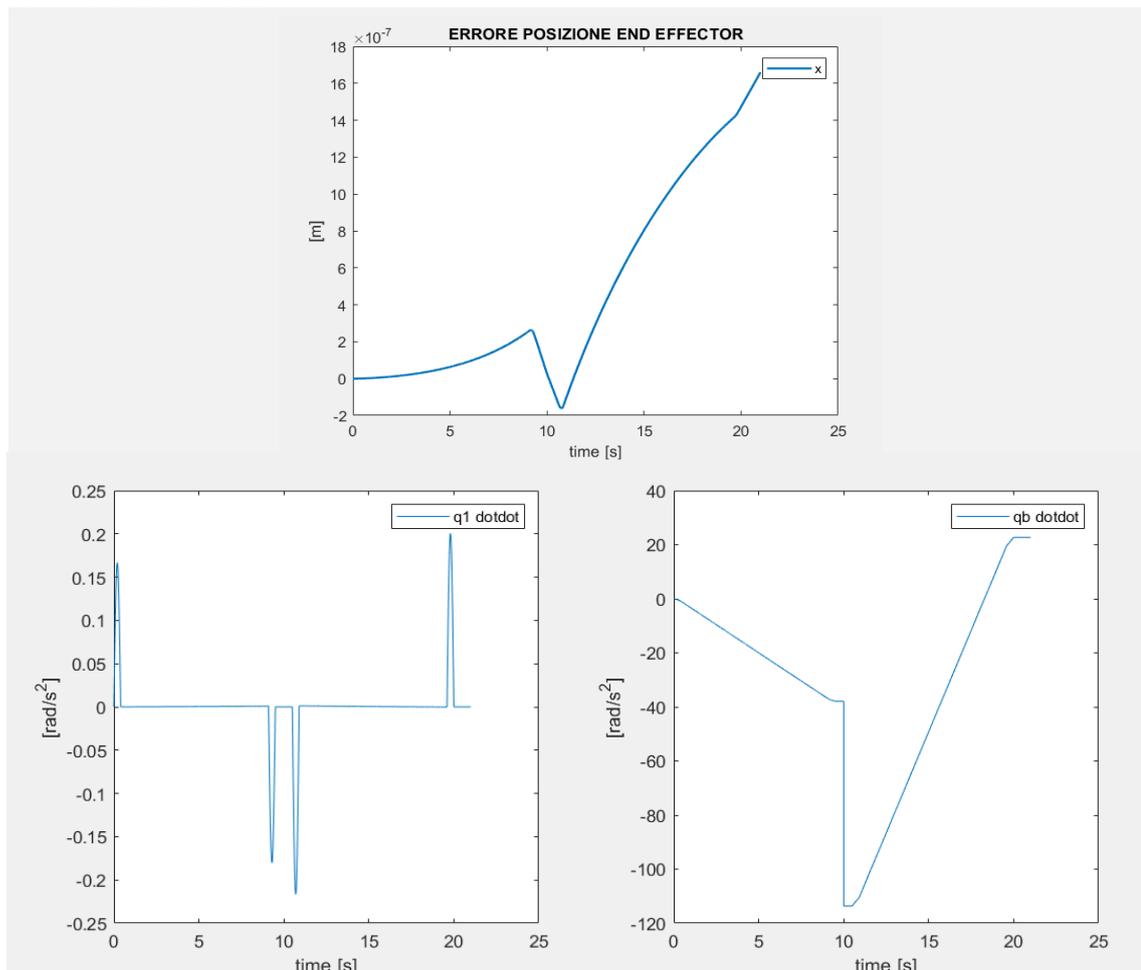


Figura 3.34 Minimizzazione della coppia sull'UAV tramite disco di bilanciamento: in alto errore di posizione dell'end effector, in basso accelerazione dei controlli di manipolatore ed elemento di bilanciamento. A  $t=10$  s viene aggiunto istantaneamente il carico.

2) elemento di bilanciamento: massa puntiforme  $m_b = 1 \text{ kg}$ ,  $I_b = 0$ ; caso senza carico

A differenza del caso precedente compaiono delle oscillazioni che sono legate all'effetto della gravità su  $m_b$ , infatti le oscillazioni scompaiono se nello script si pone nulla la forza peso sul braccio di bilanciamento. Per il manipolatore a tre gradi di libertà la coppia viene annullata agendo sui link del manipolatore che hanno massa non nulla, questo potrebbe spiegare l'origine delle oscillazioni. L'errore di posizione dell'end effector è dello stesso ordine di grandezza del caso precedente.

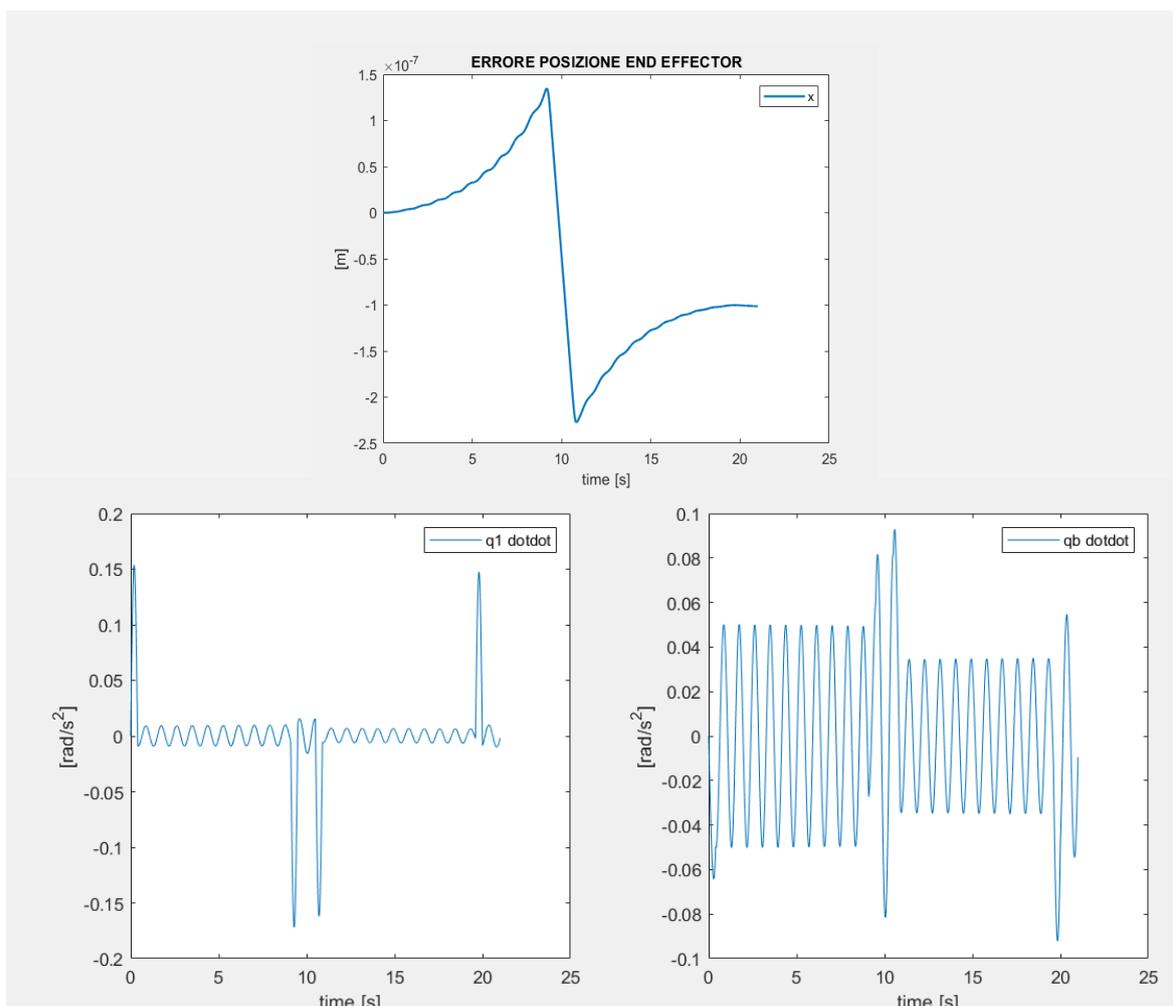


Figura 3.35 Minimizzazione della coppia sull'UAV tramite massa di bilanciamento senza carico: in alto errore di posizione dell'end effector, in basso accelerazione dei controlli di manipolatore ed elemento di bilanciamento.

3) elemento di bilanciamento: massa puntiforme  $m_b = 1 \text{ kg}$ ,  $I_b = 0$ ; caso con carico

In questo caso nell'istante in cui viene aggiunto il carico l'errore inizia ad aumentare come accadeva con il manipolatore a tre gradi di libertà. Il baricentro del sistema non rimane fermo per  $t > 10 \text{ s}$  e ciò indica che non è rispettata la condizione sulla quantità di moto che impone lo Jacobiano generalizzato per controllo ideale; si osserva comunque che riducendo il timestep calano anche gli errori di posizione di end effector e baricentro.

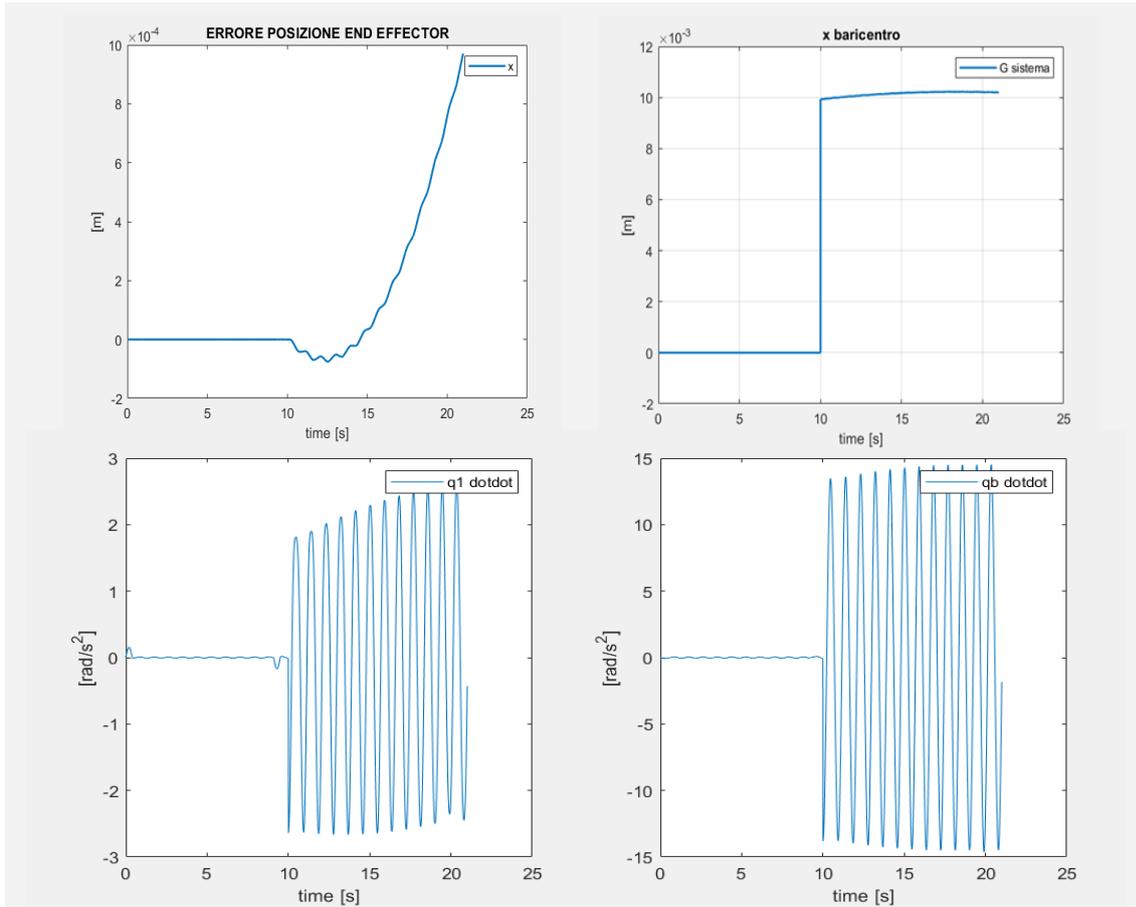


Figura 3.36 Minimizzazione della coppia sull'UAV tramite massa di bilanciamento: in alto a sinistra errore di posizione dell'end effector, in alto a destra posizione orizzontale del baricentro del sistema, in basso accelerazione dei controlli di manipolatore ed elemento di bilanciamento. A  $t=10$  s la massa del carico viene

Lo Jacobiano esteso ha determinante nullo e non è invertibile per i seguenti valori di  $q_1$  e  $q_2$ :

$$\begin{cases} q_1 = \pi \pm \cos^{-1} \left( \frac{a_b m_b c(q_b)(m_1 a_1^2 + m_c a_c^2 + I_1)}{(m_b a_b^2 + I_b)(m_1 L_1 - m_c a_c - m_1 a_1 + m_b L_1 + m_c L_1 + m_{UAV} L_1)} \right) + 2k\pi & \text{con } k \in \mathbb{N} \\ q_b \in \mathbb{R} \end{cases}$$

Per  $m_b = 0$  si ottengono le configurazioni singolari  $q_1 = \frac{\pi}{2} + k\pi$  che coincidono con quelle di un manipolatore a base fissa, per  $m_b \neq 0$  sostituendo i valori numerici del paragrafo precedente (con  $I_b = 0$ ) si ottengono configurazioni diverse. Queste configurazioni non vengono raggiunte dal terzo dei casi considerati in Matlab.

L'errore di posizione aumenta solo se  $m_b \neq 0$ , quindi si deduce che il metodo fallisce perché in questo caso il termine noto dipende dalla massa del carico, che è discontinua, anche se  $\dot{q}_1$  è nullo; infatti, il problema si verifica anche con  $m_b$  nullo se il carico viene aggiunto in un istante in cui  $\dot{q}_1$  è non nullo.

$$\begin{cases} \begin{Bmatrix} \dot{v}_x \\ T_g \end{Bmatrix} - J_{ext} \begin{Bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_b \end{Bmatrix} = \\ \begin{Bmatrix} \dot{v}_x + - \left( L_1 - \frac{m_1 a_1 + m_c a_c}{M} \right) s(q_1) \dot{q}_1^2 + \frac{\dot{m}_c}{M^2} (m_1 a_1 + m_c a_c) c(q_1) \dot{q}_1 + \frac{m_b a_b}{M} s(q_b) \dot{q}_b^2 + \frac{\dot{m}_c}{M} m_b a_b c(q_b) \dot{q}_b \\ m_1 g a_1 c(q_1) + m_c g a_c c(q_1) + m_b g a_b c(q_b) + \dot{m}_c a_c^2 \dot{q}_1 \end{Bmatrix} \end{cases} \quad (3.22)$$

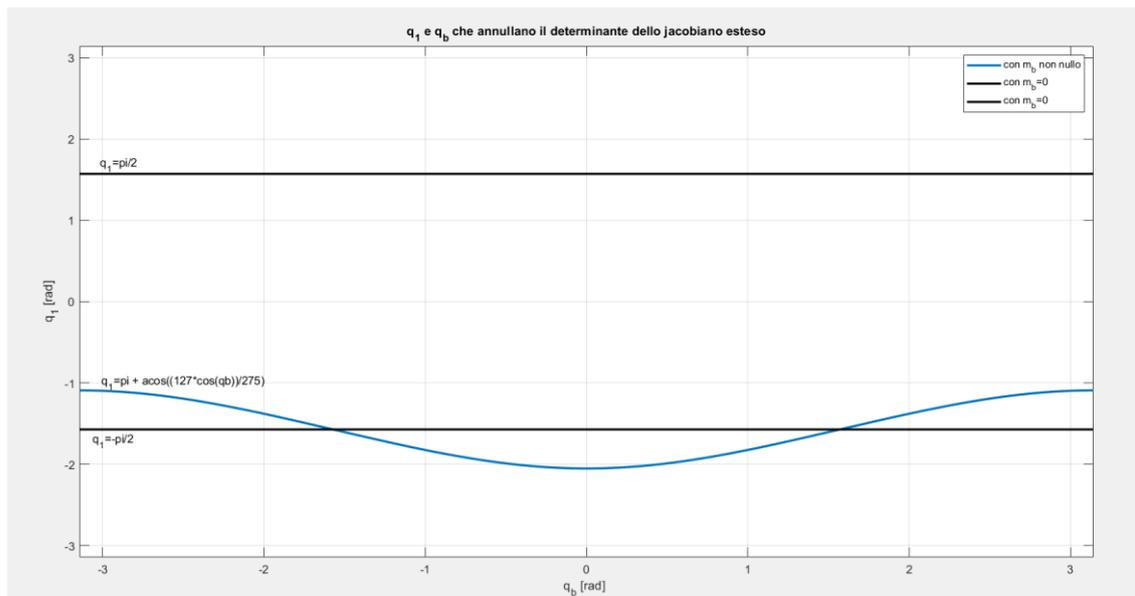


Figura 3. 37 configurazioni singolari dell'UAM con controllo ideale e con elemento di bilanciamento

### 3.5 Simulazioni con PID “morbido”

Analogamente a quanto fatto per lo Jacobiano generalizzato si vuole verificare se la procedura con Jacobiano esteso utilizzata nei paragrafi precedenti sia valida anche con un controllo del drone diverso e possibilmente più vicino ai valori reali.

Considerando la traiettoria di figura 3.16, le velocità dei giunti determinate con lo script Matlab utilizzando lo Jacobiano esteso e l'ipotesi di controllo ideale del drone (quindi utilizzando la (3.12) e la (3.2)) vengono importate in un modello Adams in cui il controllo del drone ha i seguenti parametri:

		$k_p$	$k_i$	$k_D$
PID “morbido”	altitudine	37 N/m	8 N s/m	18 N/(m s)
	rollio	40 Nm/rad	35 Nm s/rad	9 Nm/(rad s)

Tabella 3. 2 Parametro del controllo PID morbido sul drone

Il manipolatore è ancorato al baricentro del drone e la configurazione iniziale è di equilibrio. Rispetto alle simulazioni con PID rigido già effettuate nel paragrafo 3.2, l'unica differenza è nel modello Adams, infatti nella risoluzione della cinematica inversa le forze di controllo dell'UAV non vengono calcolate.

Si osserva che:

- l'errore in direzione orizzontale rimane accettabile mentre in direzione verticale è maggiore di 1 cm;
- la coppia agente tra manipolatore e drone ha un andamento simile rispetto a quella ottenuta con i parametri precedenti;

- il metodo limita la rotazione del drone con successo, infatti il massimo spostamento orizzontale del drone è inferiore a 1 mm; in direzione verticale invece gli spostamenti sono maggiori poiché sono contrastati solo dal controllo  $U_1$  e non è stata adottata nessuna strategia per limitare le forze scambiate con il manipolatore;

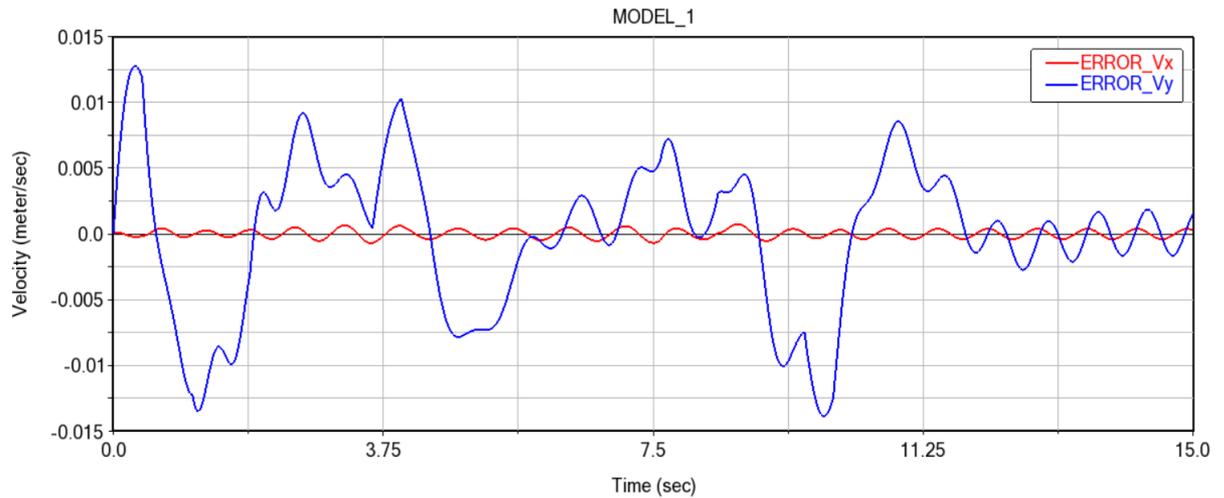


Figura 3. 38 Errore di velocità dell'end effector misurato in Adams con PID morbido. La cinematica inversa è risolta con Jacobiano esteso e ipotesi di controllo ideale nello Jacobiano generalizzato

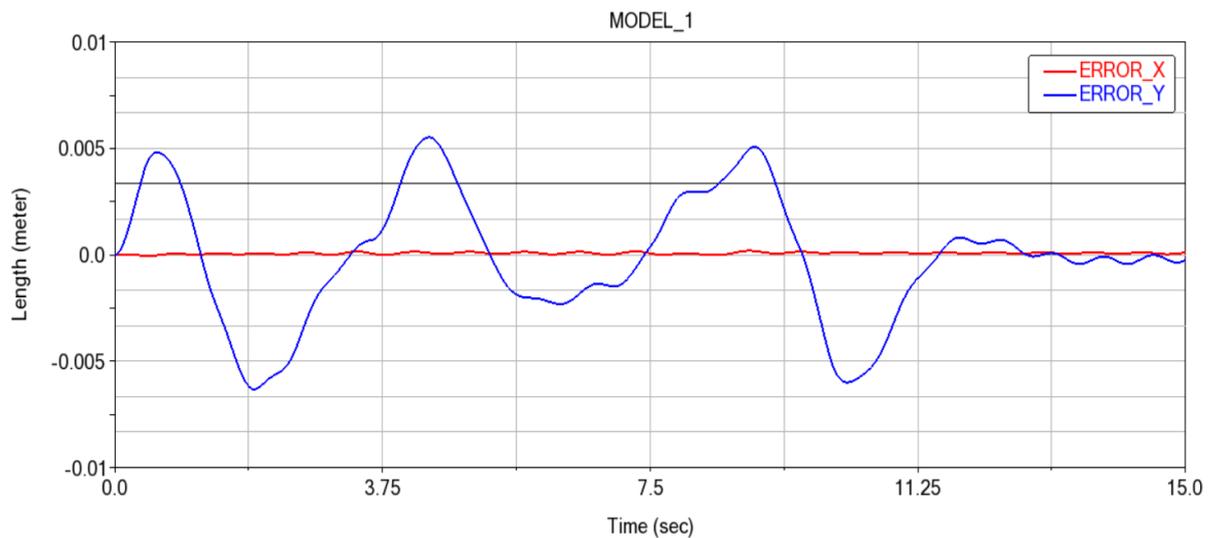


Figura 3. 39 Errore di velocità dell'end effector misurato in Adams con PID morbido. La cinematica inversa è risolta con Jacobiano esteso e ipotesi di controllo ideale nello Jacobiano generalizzato

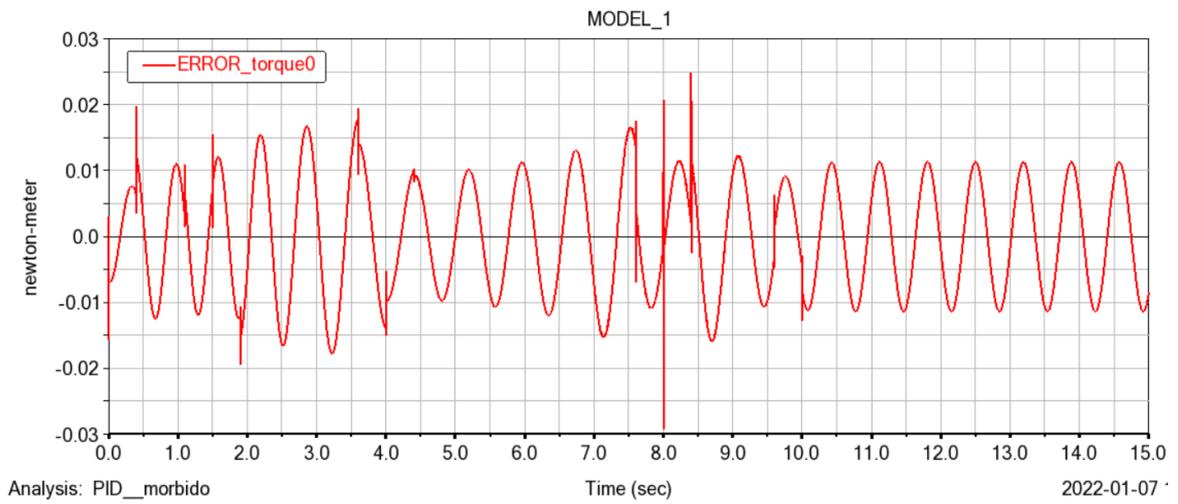


Figura 3. 40 Coppia esercitata dal manipolatore sul drone misurata in Adams con PID morbido. La cinematica inversa è risolta con Jacobiano esteso e ipotesi di controllo ideale nello Jacobiano generalizzato

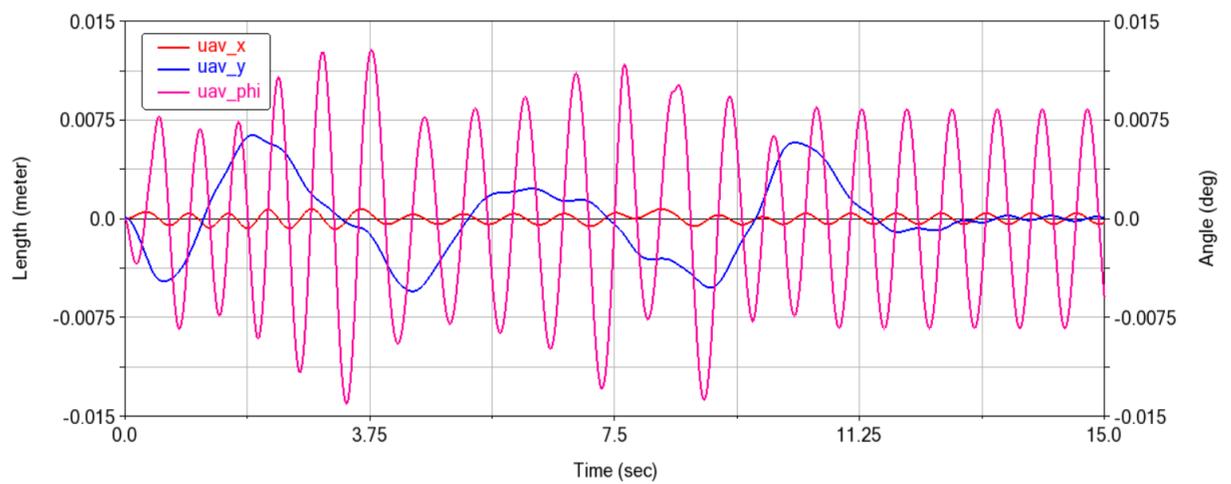


Figura 3. 41 Movimenti del drone in Adams con PID morbido. La cinematica inversa è risolta con Jacobiano esteso e ipotesi di controllo ideale nello Jacobiano generalizzato

Dal grafico seguente si può vedere che la componente verticale dell'errore di posizione dell'end effector è dovuta quasi esclusivamente allo spostamento del drone.

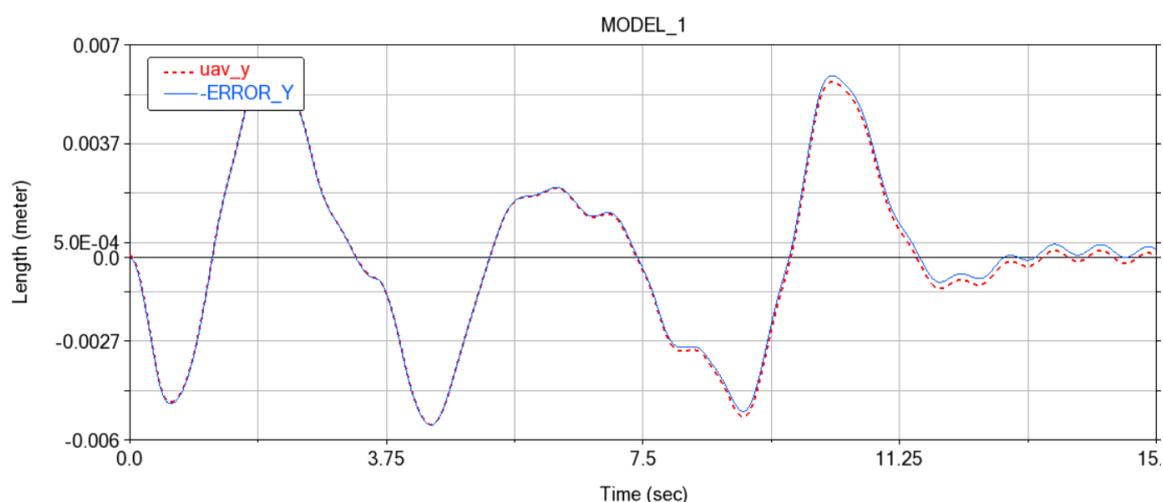


Figura 3. 42 Confronto tra la componente verticale dell'errore di posizione dell'end effector e variazioni di altitudine dell'UAV con controllo PID morbido in Adams

Se per il solo controllo verticale  $U_1$  si ripristinano i parametri PID precedenti l'errore di posizione dell'end effector coincide con quello delle simulazioni con i vecchi parametri. Si conclude quindi che il metodo dello jacobiano esteso così proposto in assenza di carico dà buoni risultati anche con un controllo "morbido" sul rollio ma sono necessarie delle modifiche nel caso di controllo "morbido" sull'altitudine.

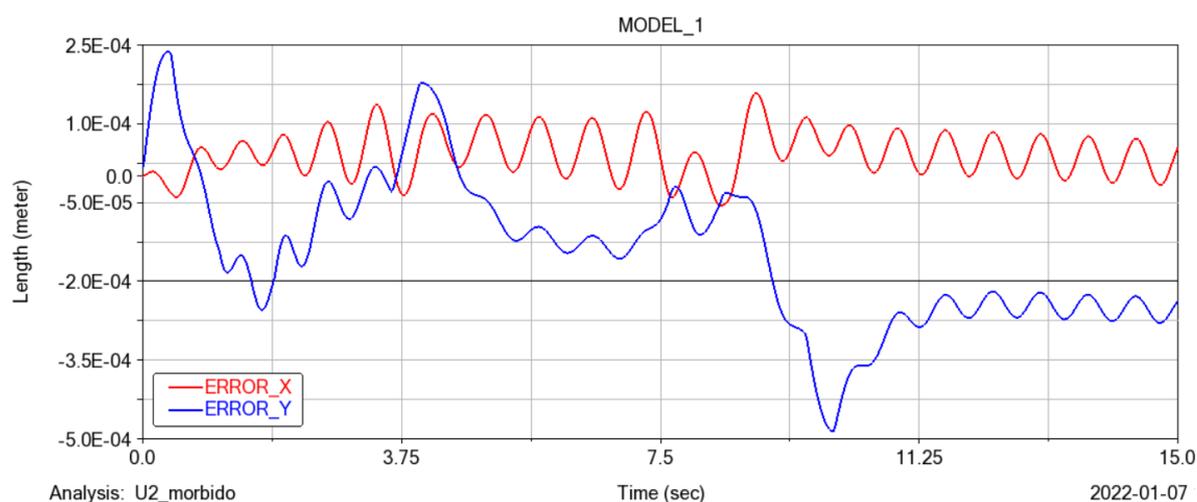


Figura 3. 43 Errore di posizione dell'end effector misurato in Adams con controllo PID morbido sul rollio ( $k_p=40$  Nm/rad,  $k_i=35$  Nm s/rad,  $k_D=9$  Nm/(rad s)) e controllo PID rigido sull'altitudine ( $k_p=37$  N/m,  $k_i=8$  N s/m,  $k_D=18$  N /m/s ). La cinematica inversa è risolta con Jacobiano esteso e ipotesi di controllo ideale nello Jacobiano generalizzato

### 3.6 Jacobiano esteso con movimenti qualsiasi della base

Nei paragrafi precedenti lo Jacobiano esteso è stato ottenuto trascurando alcuni movimenti dell'UAV, infatti la forza e la coppia di controllo non venivano considerate e non era quindi possibile determinare gli spostamenti del drone. Utilizzando le equazioni introdotte al termine del secondo capitolo è possibile prevedere i movimenti del drone e quindi i suoi effetti sulla coppia trasmessa dal manipolatore.

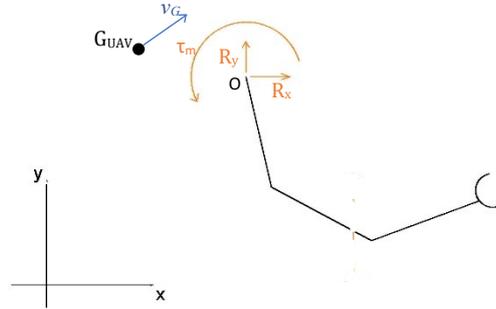


Figura 3. 44 Schema del manipolatore

Le forze e il momento esercitate dal drone sul manipolatore sono rispettivamente  $R_x, R_y, \tau_m$ ; si vuole minimizzare la coppia risultante tra drone e manipolatore sul baricentro dell'UAV ( $G_{UAV}$ ) che non è fermo ma si muove di velocità  $v_G$ . Scelto come polo il baricentro del drone, la variazione del momento angolare del manipolatore  $K_{man}$  calcolato rispetto al baricentro del drone è data da:

$$\frac{dK_{man}}{dt} = -v_G \times p_{man} + \tau + \left( \tau_m + \overrightarrow{G_{UAV}O} \times \begin{Bmatrix} R_x \\ R_y \\ R_z \end{Bmatrix} \right) \quad (3.23)$$

Il termine tra parentesi è il momento esercitato dal drone sul manipolatore e verrà quindi posto nullo,  $\tau$  contiene invece le altre coppie, dovute alla gravità e alle forze sull'end effector.

Analogamente a quanto fatto per l'intero sistema nel secondo capitolo, quantità di moto e momento angolare del solo manipolatore possono essere espresse in funzione delle velocità generalizzate della base e dei giunti, in questo caso non sono necessarie le prime tre righe della matrice relative alla quantità di moto per cui la matrice  $H_{man}$  ha solo tre righe:

$$K_{man} = H_{man} \begin{Bmatrix} \dot{q}_b \\ \dot{q} \end{Bmatrix} = [H_{b,man} \quad H_{bm,man}] \begin{Bmatrix} \dot{q}_b \\ \dot{q} \end{Bmatrix} \quad (3.24)$$

Integrando la (3.23) si può scrivere

$$[H_{b,man}(q_k) \quad H_{bm,man}(q_k)] \begin{Bmatrix} \dot{q}_{b,k} \\ \dot{q}_k \end{Bmatrix} = K_{man,k-1} + (\tau - v_{G,k-1} \times p_{man,k-1}) \Delta t \quad (3.25)$$

la quantità di moto del manipolatore  $p_{man,k-1}$  è nota dalle forze esterne e dalla quantità di moto dell'UAV all'iterazione precedente.

Esprimendo le velocità generalizzate dell'UAV in funzione di  $\dot{q}_k$  e di quantità di moto e momento angolare del sistema ( $\dot{q}_b = \dot{q}_a + H_b^{-1}\{p; K\}$ ); si ottiene infine

$$\left[ H_{b,man} H_b^{-1} H_{bm} + H_{bm,man} \right] \dot{q}_k = K_{man,k-1} + (\tau - v_{G,k-1} \times p_{man,k-1}) \Delta t - H_{bm}^T H_b^{-1} \begin{Bmatrix} p \\ K \end{Bmatrix} \quad (3.26)$$

Per il caso piano solo viene utilizzata solo l'ultima delle tre righe: la matrice riga di sinistra viene concatenata allo Jacobiano generalizzato mentre il termine a destra al termine noto. Nel caso  $G_{UAV} \equiv O$  l'equazione pone nulla la coppia del primo giunto in  $O$ .

Attraverso uno script Matlab è stata risolta la cinematica inversa dell'UAM con manipolatore ridondante a tre gradi di libertà utilizzando lo jacobiano esteso in assenza di carico, per il controllo del drone è stato utilizzato il PID morbido. Per valutare l'efficacia con accelerazioni più o meno intense e con derivata dell'accelerazione continua o no, sono state considerate due traiettorie:

- "cerchio": traiettoria circolare con diametro 6 cm e accelerazione con derivata continua;
- "segmento": traiettoria che si sposta di 10 cm a destra e 6 cm verso il basso con andata lenta e ritorno veloce, l'accelerazione è solo continua;

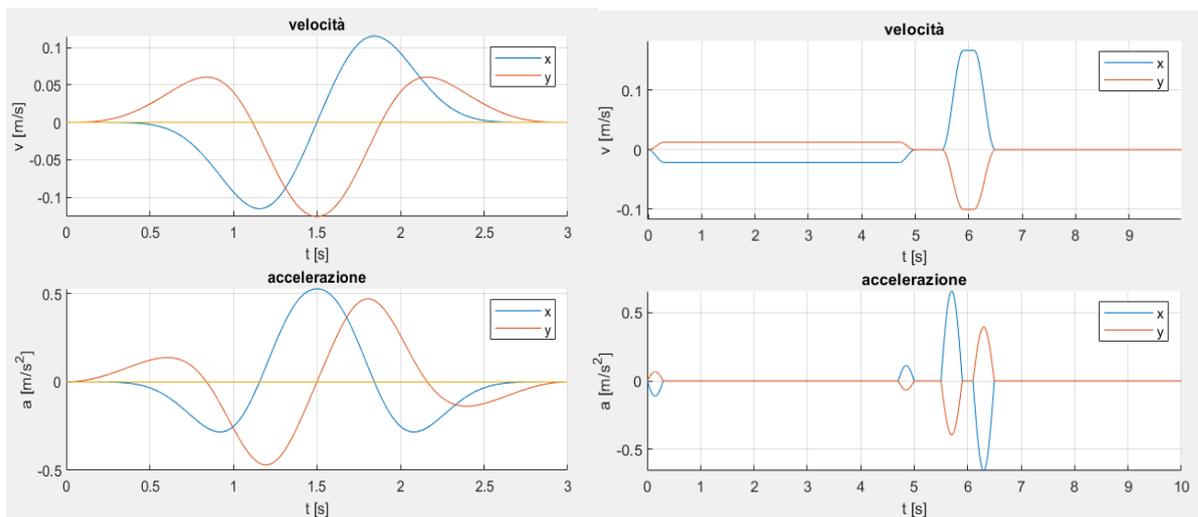


Figura 3. 45 Profili di velocità e accelerazione per traiettoria "cerchio" (a sinistra) e "segmento" (a destra)

È stato considerato sia il caso di manipolatore incernierato sul baricentro del drone sia il caso più generale. In tutti i casi considerati la traiettoria viene seguita correttamente con errori massimi dell'ordine di 0.1 mm, inoltre si osserva che la configurazione iniziale e finale sono simili e le differenze negli angoli di giunto iniziale e finale sono inferiore a 2°.

Nel caso di manipolatore incernierato sul baricentro del drone la coppia tra drone e manipolatore è dell'ordine di 1e-4 Nm e più piccola quando l'end effector si muove ed accelera lentamente, di conseguenza anche il rollio del drone si mantiene a 1e-4 rad. Anche se non è riportato, nel caso si elimini l'attuatore tra drone e manipolatore nel modello multibody, avendo quindi coppia perfettamente nulla tra drone e manipolatore, la traiettoria viene comunque seguita con un errore inferiore a 0.2 mm.

L'utilizzo dello Jacobiano esteso mantiene piccoli (1÷2 mm) anche gli spostamenti orizzontali del drone perché la componente orizzontale della spinta delle eliche è trascurabile e gli spostamenti del baricentro del manipolatore vengono mantenuti piccoli per ridurre la coppia dovuta alla gravità.

I tratti con accelerazione più elevata provocano delle oscillazioni di ampiezza di circa 1 mm nella posizione orizzontale del drone che comunque non influiscono significativamente sull'inseguimento della traiettoria.

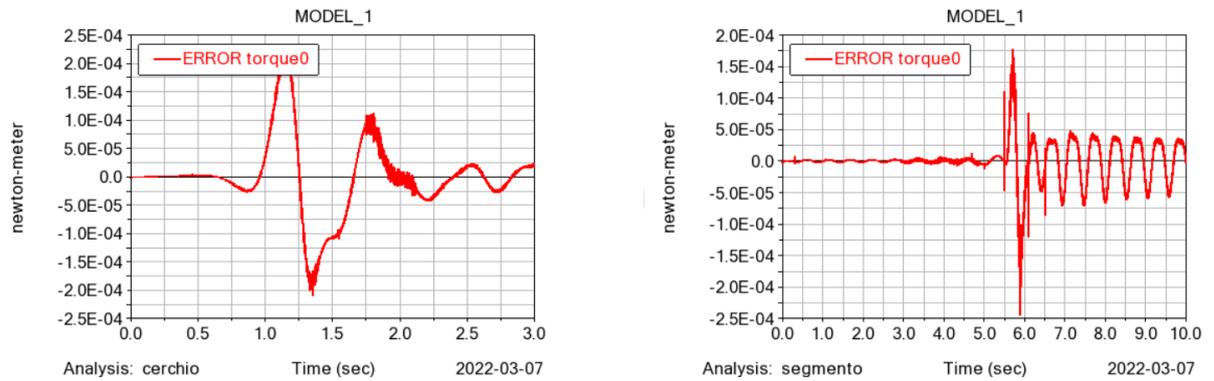


Figura 3. 46 Coppia esercitata dal manipolatore sul drone misurata in Adams con PID morbido per traiettoria “cerchio” (a sinistra) e “segmento” (a destra) con primo giunto coincidente col baricentro dell’UAV . La cinematica inversa è risolta con Jacobiano esteso che considera i movimenti della base e Jacobiano generalizzato completo di forze esterne.

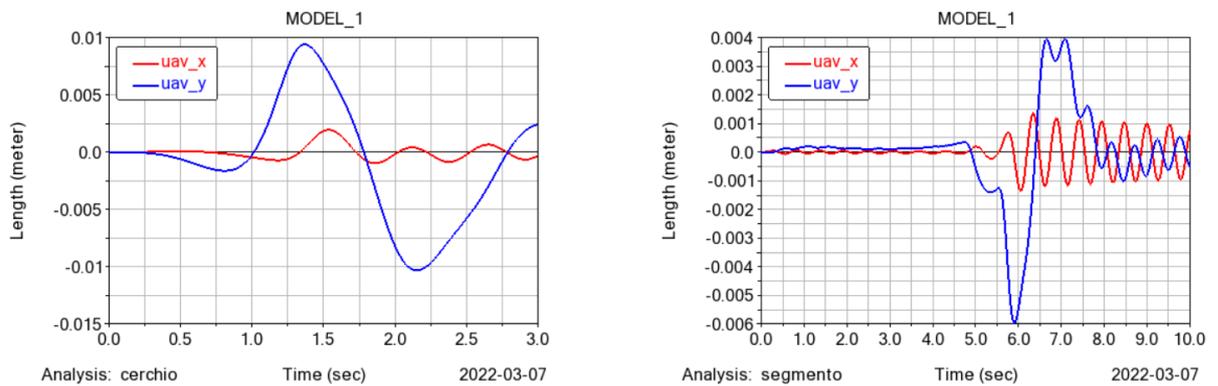


Figura 3. 47 Traslazioni del drone misurate in Adams con PID morbido per traiettoria “cerchio” (a sinistra) e “segmento” (a destra) con primo giunto coincidente col baricentro dell’UAV. La cinematica inversa è risolta con Jacobiano esteso che considera i movimenti della base e Jacobiano generalizzato completo di forze esterne.

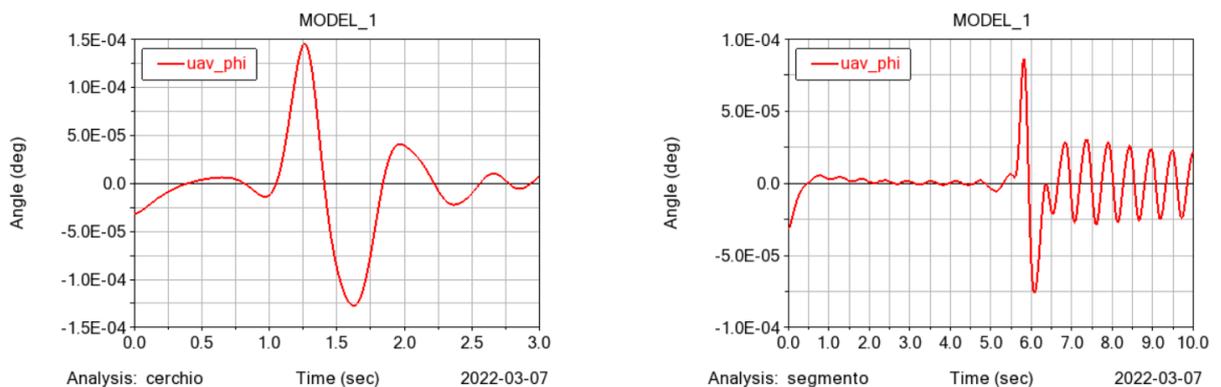


Figura 3. 48 Rotazione del drone misurata in Adams con PID morbido per traiettoria “cerchio” (a sinistra) e “segmento” (a destra) con primo giunto coincidente col baricentro dell’UAV. La cinematica inversa è risolta con Jacobiano esteso che considera i movimenti della base e Jacobiano generalizzato completo di forze esterne.

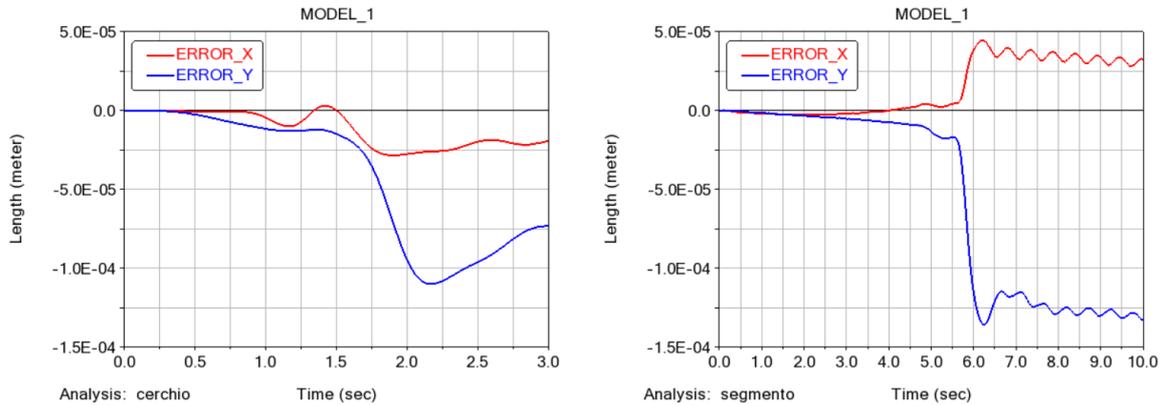


Figura 3. 49 Errore di posizione dell'end effector misurato in Adams con PID morbido per traiettoria "cerchio" (a sinistra) e "segmento" (a destra) con primo giunto coincidente col baricentro dell'UAV. La cinematica inversa è risolta con Jacobiano esteso che considera i movimenti della base e Jacobiano generalizzato completo di forze esterne.

Nel caso il primo giunto sia spostato orizzontalmente di 32.5 mm e verticalmente di 60 mm rispetto al baricentro del drone la configurazione iniziale del manipolatore è stata modificata in modo che il suo baricentro fosse allineato verticalmente a quello del drone; inoltre la traiettoria "segmento" è stata eseguita con segno opposto perché nella configurazione iniziale il manipolatore è già relativamente disteso.

In questo caso la coppia sul drone aumenta di un ordine di grandezza, nonostante questo il rollio e le traslazioni dell'UAV non aumentano. Riducendo il timestep l'errore sulla coppia diminuisce quindi potrebbe essere legato alle approssimazioni nell'equazione.

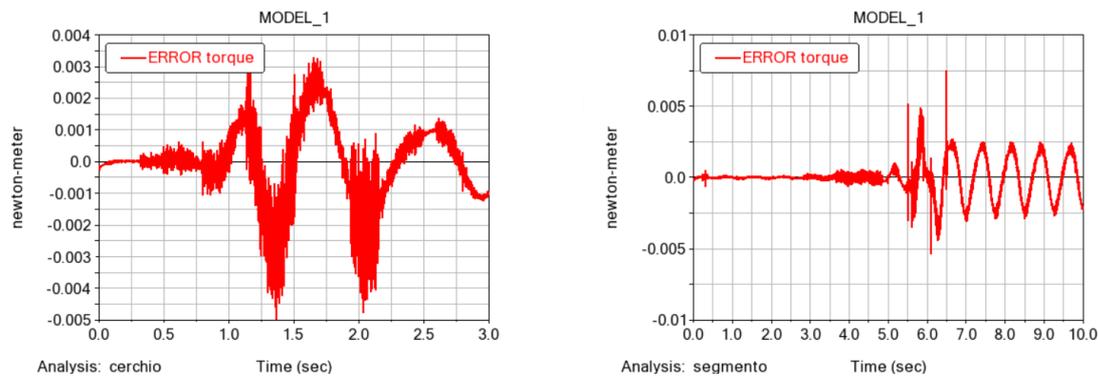


Figura 3. 50 Coppia esercitata dal manipolatore sul drone misurata in Adams con PID morbido per traiettoria "cerchio" (a sinistra) e "segmento" (a destra). La cinematica inversa è risolta con Jacobiano esteso che considera i movimenti della base e Jacobiano generalizzato completo di forze esterne

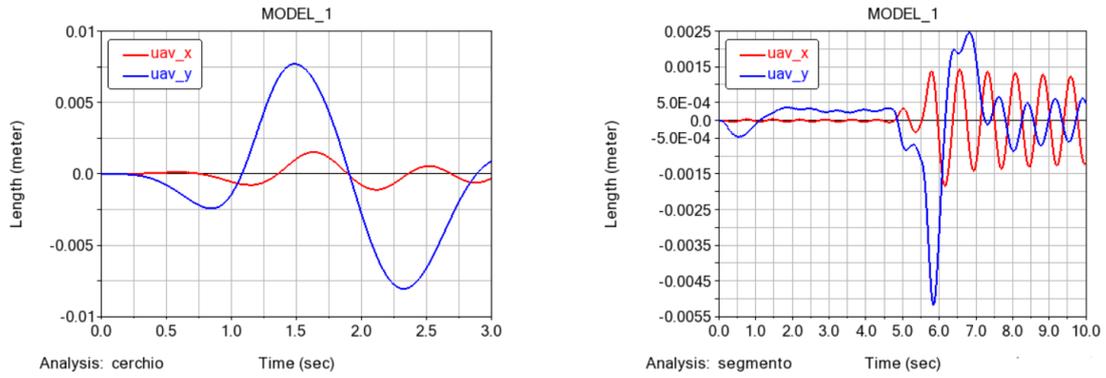


Figura 3. 51 Traslazioni del drone misurate in Adams con PID morbido per traiettoria “cerchio” (a sinistra) e “segmento” (a destra). La cinematica inversa è risolta con Jacobiano esteso che considera i movimenti della base e Jacobiano generalizzato completo di forze esterne

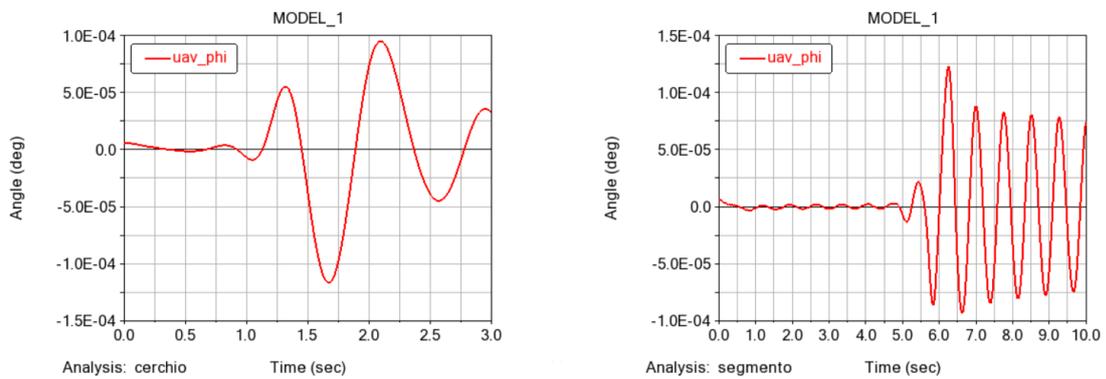


Figura 3. 52 Rotazione del drone misurata in Adams con PID morbido per traiettoria “cerchio” (a sinistra) e “segmento” (a destra). La cinematica inversa è risolta con Jacobiano esteso che considera i movimenti della base e Jacobiano generalizzato completo di forze esterne.

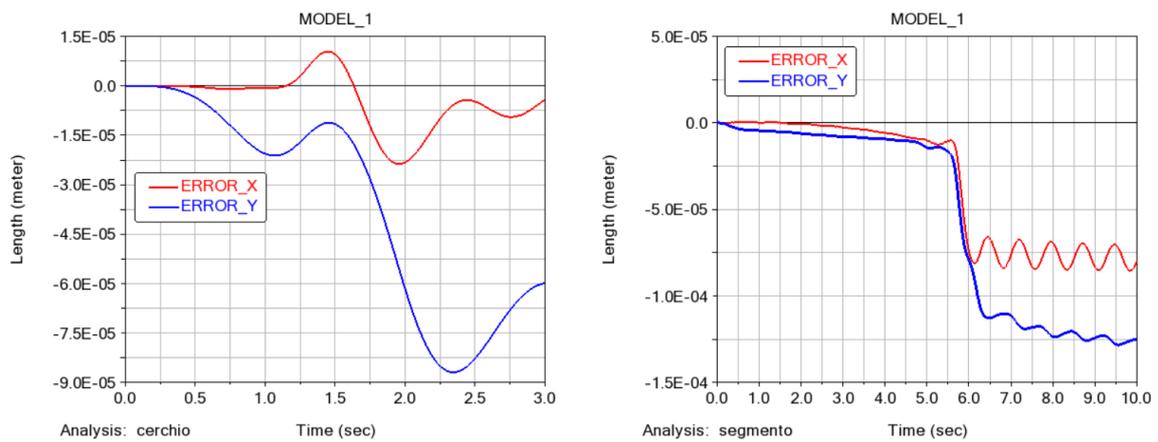


Figura 3. 53 Errore di posizione dell’end effector misurato in Adams con PID morbido per traiettoria “cerchio” (a sinistra) e “segmento” (a destra) con primo giunto non coincidente col baricentro dell’UAV. La cinematica inversa è risolta con Jacobiano esteso che considera i movimenti della base e Jacobiano generalizzato completo di forze esterne.

### 3.7 Minimizzazione della coppia sul drone con problema ai minimi quadrati

In [28] la coppia esercitata da un manipolatore sulla sua base fissa viene minimizzata localmente definendo un problema ai minimi quadrati per la risoluzione della cinematica inversa anche considerando i limiti dei giunti, i risultati sono stati validati anche con test sperimentali. Analogamente per il manipolatore aereo, anziché imporre nulla la coppia sul drone, dalla (3.26) si può passare ad un problema ai minimi quadrati minimizzando la seguente:

$$\left\| \left[ H_{b,man} H_b^{-1} H_{bm} + H_{bm,man} \right] \dot{q}_k - \left( K_{man,k-1} + (\tau - v_{G,k-1} \times p_{man,k-1}) \Delta t - H_{bm}^T H_b^{-1} \begin{Bmatrix} p_k \\ K_k \end{Bmatrix} \right) \right\|^2 \quad (3.27)$$

con vincolo della cinematica che, considerando movimenti qualsiasi della base e forze esterne, si ottiene dalla (2.26):

$$J_{gen}(q_{k-1}) \dot{q}_k = v_k - J_b H_b^{-1} \begin{Bmatrix} p_k \\ K_k \end{Bmatrix} \quad (3.28)$$

In questo modo, accettando che la coppia esercitata dal manipolatore sul drone non sia sempre nulla, è possibile limitare gli angoli, le velocità o le accelerazioni dei giunti senza ulteriori gradi di libertà ridondanti, seguendo la traiettoria richiesta.

Lo script Matlab per la risoluzione della cinematica inversa è stato modificato per risolvere il problema ai minimi quadrati appena descritto che, in pratica, è stato sostituito all'inversione dello Jacobiano esteso. Il metodo è stato quindi testato risolvendo la stessa traiettoria circolare del paragrafo 3.7 limitando la velocità dei giunti a 2 rad/s, in seguito i risultati sono stati confrontati con quelli dello Jacobiano esteso. il manipolatore è stato ancorato al baricentro dell'UAV per il controllo del drone è stato utilizzato il PID morbido in cui il coefficiente integrativo sul rollio è stato ridotto a 3 Nm/(rad s) per una maggiore stabilità.

Si può osservare che all'inizio del movimento, fino a che la velocità dei giunti non supera il limite imposto, la soluzione del problema ai minimi quadrati coincide con quella ottenuta attraverso lo Jacobiano esteso. Quando nel caso del problema ai minimi quadrati la velocità del giunto viene limitata ( $t \approx 1.15$ ) aumenta la coppia esercitata dal manipolatore sul drone; quando le velocità si riducono il metodo riesce nuovamente a mantenere trascurabile la coppia sul drone.

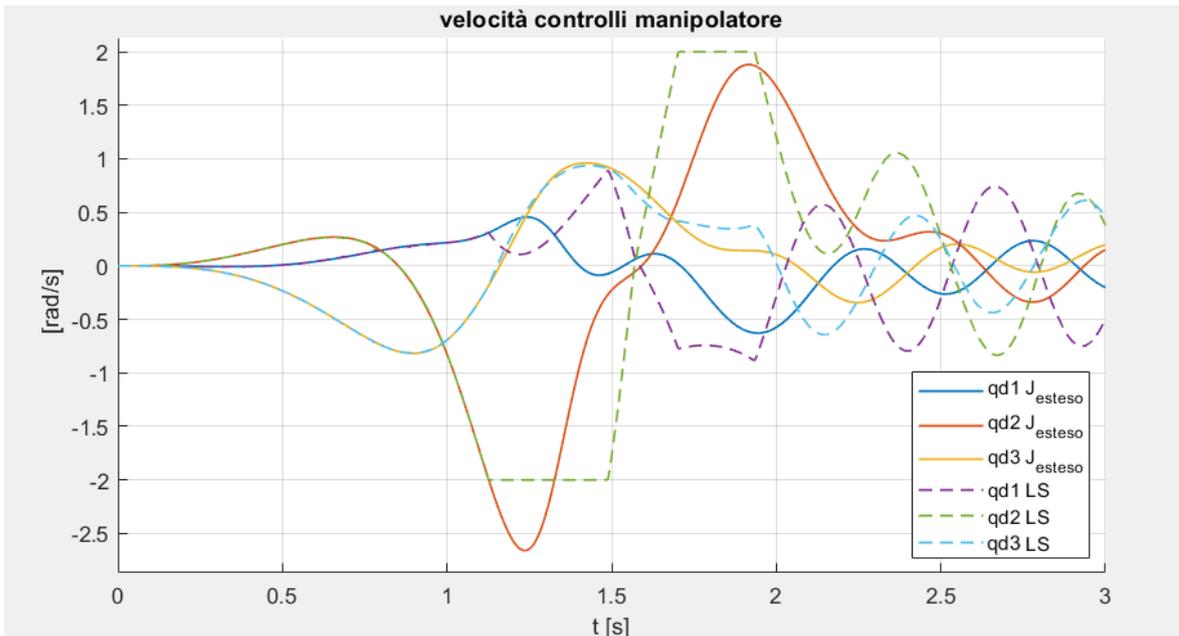


Figura 3. 54 Confronto delle velocità dei giunti ottenute tramite Jacobiano esteso e problema ai minimi quadrati. In entrambi casi nella cinematica inversa si tiene conto degli spostamenti della base e delle forze esterne.

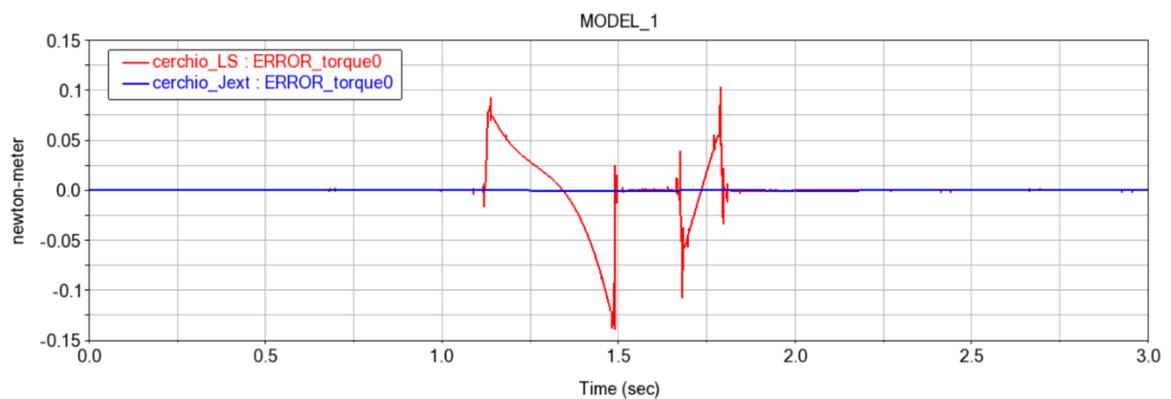


Figura 3. 55 Confronto della coppia esercitata dal manipolatore sul drone misurata in Adams per Jacobiano esteso (rosso) e problema ai minimi quadrati (blu). In entrambi casi nella cinematica inversa si tiene conto degli spostamenti della base e delle forze esterne.

In questo caso l'aumento di coppia fa inclinare il drone, nonostante ciò lo spostamento orizzontale dell'UAV non raggiunge valori assoluti maggiori rispetto a quelli osservati utilizzando lo Jacobiano esteso. Anche l'errore di posizione dell'end effector rimane inferiore a 0.11 mm.

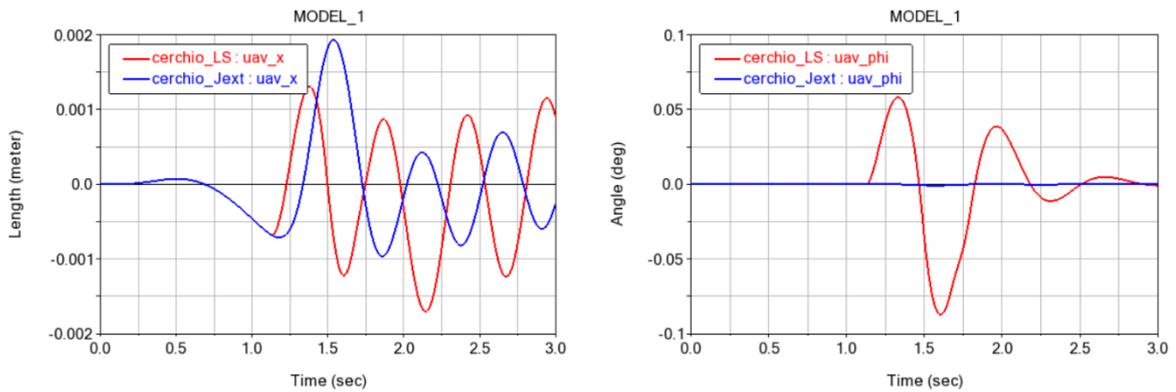


Figura 3. 56 Confronto dei movimenti dell'UAV per Jacobiano esteso (rosso) e problema ai minimi quadrati (blu). In entrambi casi nella risoluzione della cinematica inversa si tiene conto degli spostamenti della base e delle forze esterne.

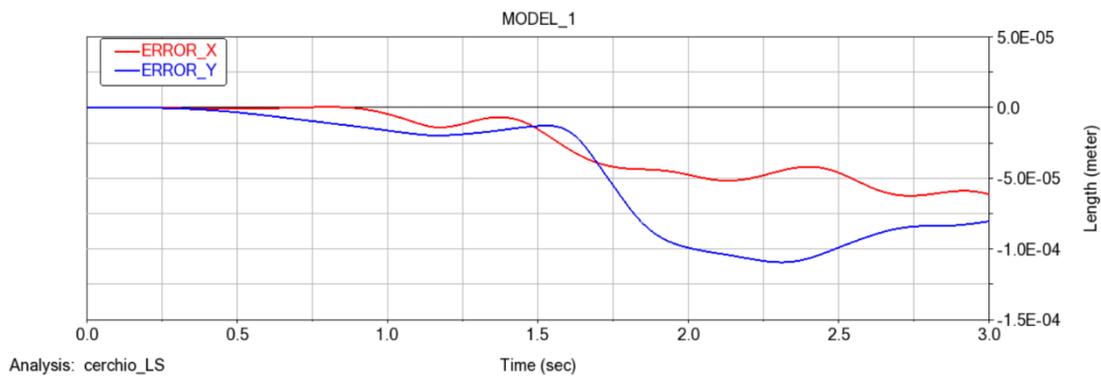


Figura 3. 57 Errore di posizione dell'end effector misurato in Adams risolvendo la cinematica inversa attraverso il problema ai minimi quadrati (equazioni (3.27), (3.28))

### 3.8 Ampliamento del movimento del manipolatore con un contrappeso

L'utilizzo dello Jacobiano esteso per mantenere nulla la coppia tra drone e manipolatore permette di contenere gli spostamenti del velivolo ma il vincolo sulla coppia presenta lo svantaggio di ridurre lo spazio operativo del manipolatore. In questo paragrafo, risolvendo la cinematica inversa con gli script già presentati, verrà valutata l'efficacia dell'uso di un contrappeso per bilanciare la coppia dovuta alla gravità agente sul manipolatore con un sistema simile a quello presentato in [8] e in [31] realizzabile anche nella pratica.

Considerando l'UAM con 3 gradi di libertà nel piano si ipotizza di montare la batteria su un giunto prismatico attuato disposto in orizzontale: si assume che il contrappeso abbia una massa di 2.2 kg e momento d'inerzia baricentrico  $10^{-4}$  kgm<sup>2</sup>, rispetto al caso precedente la massa del drone, considerato ora come un corpo rigido diverso dal contrappeso, è 2 kg; l'ordinata del baricentro della batteria rispetto alla terna solidale al drone è  $y' = 0.03$  m.

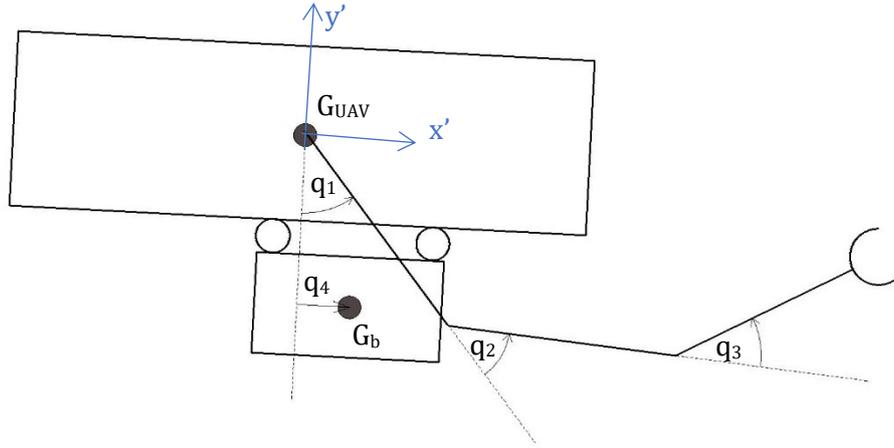


Figura 3. 58 Schema dell'UAM con batteria/contrappeso traslabile con gradi di libertà attuati e sistema di riferimento relativo

Nella risoluzione della cinematica inversa con batteria libera di traslare, la posizione della batteria viene considerata come un ulteriore grado di libertà del sistema e questa viene quindi inclusa nella definizione dello Jacobiano generalizzato e in quello esteso andando a modificare le matrici  $H, H_{man}$  dei paragrafi 2.5 e 3.6. Inizialmente si è tentato di risolvere la cinematica inversa tramite la pseudoinversa dello Jacobiano esteso (dimensione  $3 \times 4$ ), ma in questo modo si ottenevano accelerazioni e velocità dei giunti troppo elevate che non sono realizzabili nella pratica e rendevano non valida l'ipotesi di piccole variazioni nella configurazione dell'UAM tra due iterazioni successive. Quindi si è passati ad un problema ai minimi quadrati come presentato nel paragrafo 3.7 che ha permesso di limitare velocità ed accelerazioni. Infine, si è notato che controllare la posizione del contrappeso separatamente dagli altri giunti in modo da bilanciare il peso del manipolatore permette di ottenere risultati migliori, ad ogni iterazione si esegue quindi la seguente procedura:

- 1) Trascurando la rotazione dell'UAV si calcola la coordinata orizzontale del contrappeso  $x'_b$  relativa al sistema di riferimento con origine sul baricentro del drone che mantiene il baricentro complessivo di manipolatore e contrappeso allineati al baricentro del drone tramite:  $m_b x'_b + m_1 x'_1 + m_2 x'_2 + m_3 x'_3 = 0$ , dove l'apice indica che le coordinate sono espresse nel sistema relativo  $m_b$  è la massa del contrappeso e  $m_1, m_2, m_3$  sono le masse dei tre link del manipolatore;
- 2) Si determina la velocità di traslazione del contrappeso  $\dot{q}_{4,des}$  che permette di raggiungere la posizione determinata al punto 1, limitandola se necessario;
- 3) Si determinano le velocità dei giunti risolvendo il problema ai minimi quadrati vincolato: tra i vincoli oltre alla (3.28) si aggiunge  $\dot{q}_4 = \dot{q}_{4,des}$ , in questo modo si tiene conto anche dell'effetto del moto della batteria sul moto dell'end effector e si ottiene la seguente condizione:

$$\begin{bmatrix} J_{gen}(q_{k-1}) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dot{q}_k = \begin{Bmatrix} v_k - J_b H_b^{-1} \begin{Bmatrix} P_k \\ K_k \end{Bmatrix} \\ \dot{q}_{4,des} \end{Bmatrix} \quad (3.29)$$

Durante la risoluzione della cinematica inversa è stato inoltre imposto che: le velocità angolari dei giunti  $\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dot{q}_3$  restassero inferiori a 6 rad/s, la velocità lineare  $\dot{q}_4$  resti inferiore a 5 m/s, le accelerazioni angolari dei giunti  $\ddot{q}_1, \ddot{q}_2, \ddot{q}_3$  restassero inferiori a 6 rad/s, l'accelerazione lineare resti

$\ddot{q}_4$  inferiore a  $5 \text{ m/s}^2$ . Il valore assoluto di  $q_4$  è stato limitato a  $0.125 \text{ m}$ . Il caso di riferimento, con batteria solidale all'UAV, è stato ottenuto ponendo nullo  $\dot{q}_{4,des}$  nella (3.29).

Per il caso con e senza contrappeso mobile la traiettoria più ampia possibile è stata determinata aumentando l'ampiezza del movimento dell'end effector fino a che la cinematica inversa non è stata più risolvibile. Per l'organo terminale è stata considerata una traiettoria orizzontale di andata e ritorno, senza discontinuità di accelerazione, il movimento dura  $4 \text{ s}$  e i tratti accelerati hanno una durata di  $0.5 \text{ s}$ , al termine di questo movimento l'end effector viene mantenuto in posizione per un altro secondo.

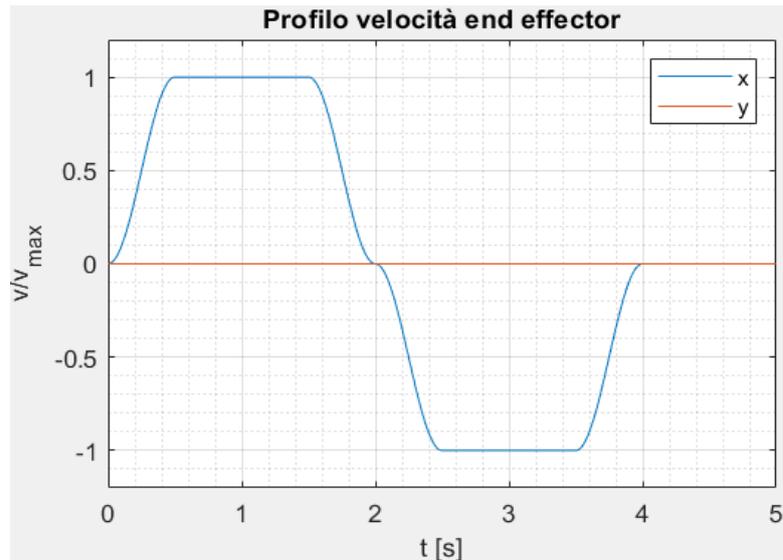


Figura 3. 59 Profilo di velocità dell'end effector imposto nella risoluzione della cinematica inversa, traiettorie con ampiezze diverse sono state ottenute moltiplicando questo profilo

La configurazione iniziale dell'UAM,  $q_1 = -\frac{\pi}{6} \text{ rad}$ ,  $q_2 = \frac{2}{3}\pi \text{ rad}$ ,  $q_3 = -\frac{2}{3}\pi \text{ rad}$ ,  $q_4 = 0 \text{ m}$ , è di equilibrio ed è riportata in Figura 3.60.

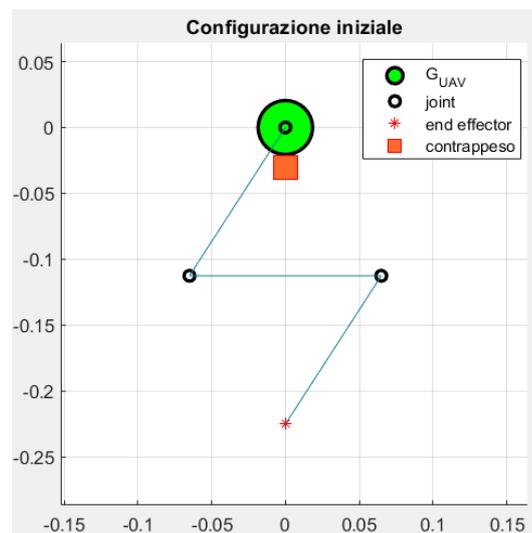


Figura 3. 60 Configurazione iniziale dell'UAM con batteria/contrappeso traslante

Dopo aver eseguito lo script Matlab per risolvere la cinematica inversa, i controlli di manipolatore e contrappeso sono stati importati in Adams per simulare anche in questo ambiente il moto, in modo analogo a come già fatto in precedenza.

Si ottengono i seguenti risultati:

- Batteria/Contrappeso fisso: l'end effector può seguire traiettorie con spostamento massimo fino a 0.13 m verso destra (x positive), le traslazioni orizzontali dell'UAV sono minori di 0.5 mm e il rollio è dell'ordine di  $10^{-4}$  °, la coppia esercitata da manipolatore e batteria sul drone è dell'ordine di  $10^{-1}$  Nm.

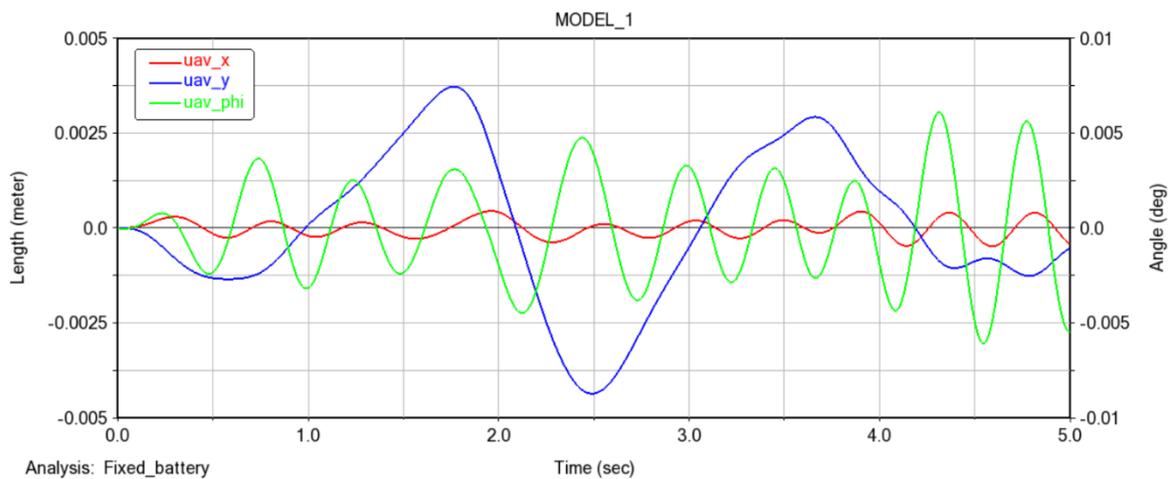


Figura 3. 61 Traslazioni e rotazioni del drone con batteria fissa, all'organo terminale è stata richiesta una traiettoria con spostamento orizzontale massimo di 13 cm

- Batteria/Contrappeso mobile: l'end effector può seguire traiettorie con spostamento massimo fino a 0.24 m verso destra (x positive), il rollio è maggiore rispetto al caso precedente ed è dell'ordine di  $10^{-1}$  °, la coppia esercitata da manipolatore e batteria sul drone è dell'ordine di  $10^{-1}$  Nm a meno di un picco di 1 Nm. Rispetto al caso con batteria fissa le traslazioni dell'UAV sono maggiori e superano i 7 mm in direzione orizzontale e 15 mm in direzione verticale tuttavia si evidenzia che le traiettoria dell'end effector ha un'ampiezza quasi doppia.

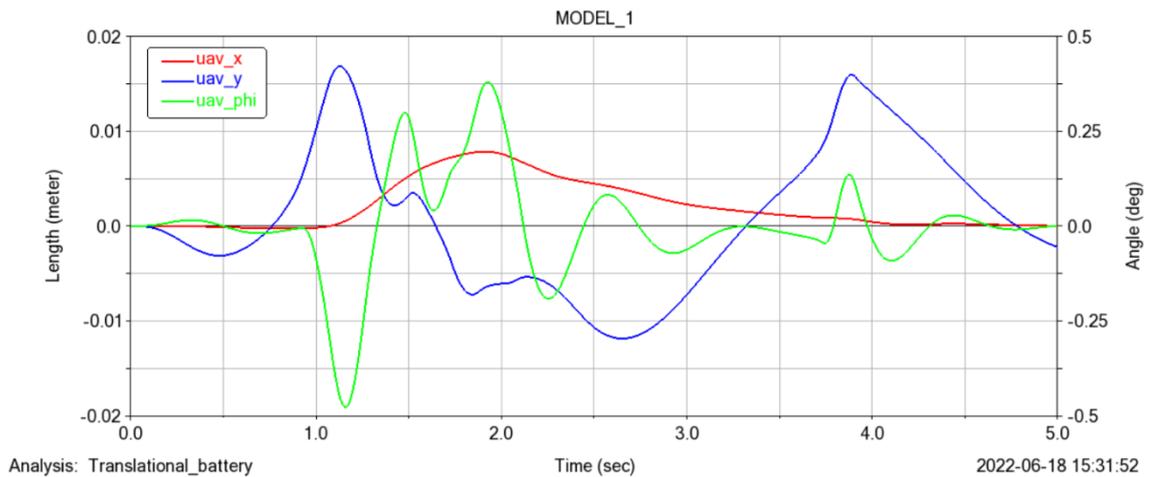


Figura 3. 62 Traslazioni e rotazioni del drone misurate in Adams con batteria mobile, all'organo terminale è stata richiesta una traiettoria con spostamento orizzontale massimo di 24 cm

In Figura 3.63 si riportano gli andamenti dei controlli di manipolatore e contrappeso per la traiettoria orizzontale di 24 cm sopra considerata. Si può osservare che il contrappeso inizialmente si sposta leggermente verso destra, in seguito si sposta verso sinistra per bilanciare il peso del manipolatore fino al limite di 0.125 m imposto. Si nota inoltre che la configurazione finale è molto diversa da quella iniziale.

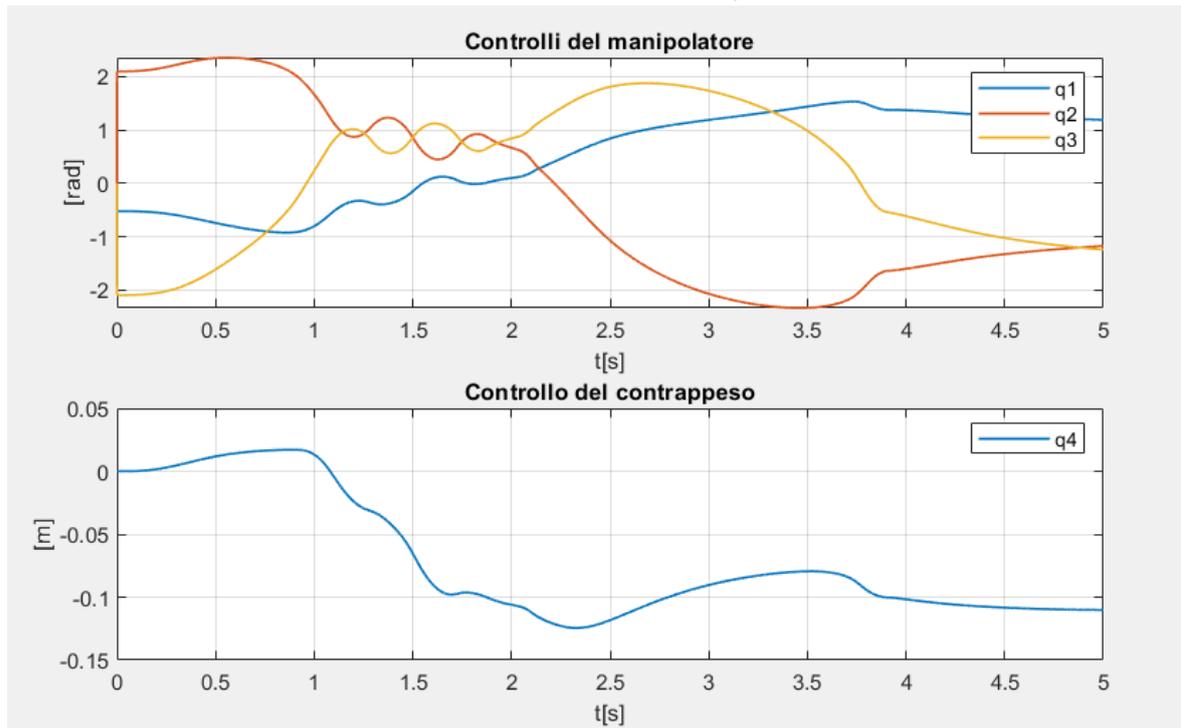


Figura 3. 63 Controlli di manipolatore e contrappeso per traiettoria dell'end effector con spostamento orizzontale massimo di 24 cm

Nell'intervallo 1-2 s si osservano delle oscillazioni nelle velocità dei giunti e l'errore di posizione dell'end effector è maggiore di 1 mm ma rimane sufficientemente piccolo per la maggior parte delle operazioni.

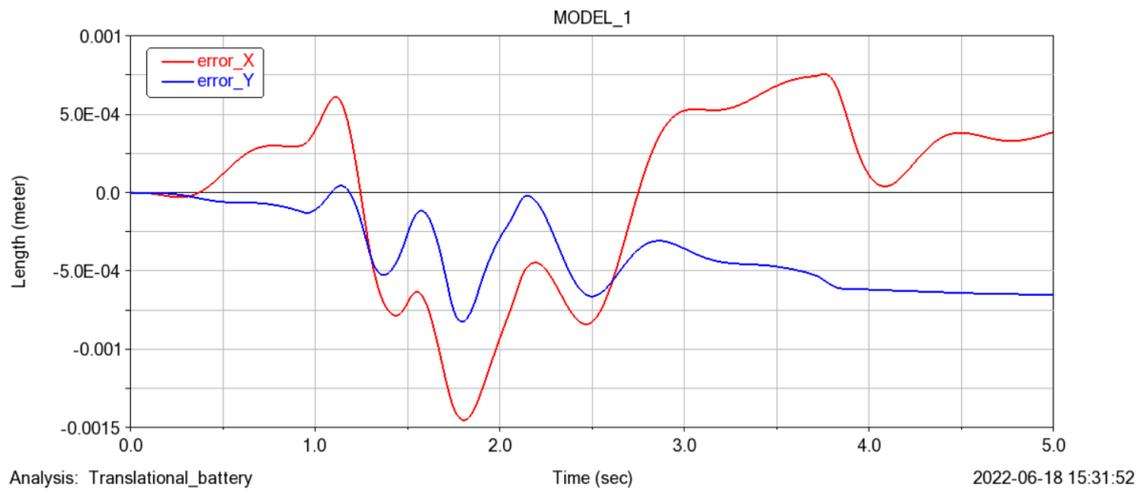


Figura 3. 64 Errore di posizione dell'end effector misurato in Adams con batteria mobile, all'organo terminale è stata richiesta una traiettoria con spostamento orizzontale massimo di 24 cm

Nei casi mostrati la corsa del contrappeso mobile è stata limitata a 0.125 m, aumentando questo valore è possibile ampliare ulteriormente lo spazio raggiungibile dall'organo terminale.

## CAPITOLO 4: Simulazione della presa di un carico

In questo capitolo, facendo uso dello Jacobiano generalizzato con forze esterne e dello Jacobiano esteso, viene risolta la cinematica inversa nel caso in cui l'UAM preleva un carico da terra e verranno analizzati gli spostamenti del drone.

### 4.1 Carico su supporto elastico

Nel capitolo precedente la presa del carico è stata trattata come un cambio istantaneo dell'inerzia: nell'istante prescelto veniva aggiunta una massa all'ultimo link del manipolatore e su questa agiva la forza peso. Questo modo di modellare il carico presentava diversi problemi in quanto erano presenti discontinuità e non si teneva conto del fatto che l'oggetto da prelevare deve essere appoggiato ad una superficie prima del prelievo o comunque sostenuto in qualche modo. Attraverso l'uso dello Jacobiano generalizzato e tenendo conto delle forze esterne come è stato fatto al termine del secondo capitolo, l'effetto del carico può essere considerato come una forza e dei momenti ed è quindi possibile modellare la presa dell'oggetto in modo più realistico.

Considerando il carico, per semplicità, una massa puntiforme e rigidamente attaccato all'organo terminale del manipolatore, la risultante delle forze agenti sull'end effector è data da: forza peso, forza d'inerzia, contatto. Indicando con  $x_c, y_c, z_c$  le coordinate della posizione del baricentro del carico:

$$F_{EE} = m_c \begin{Bmatrix} 0 \\ g \\ 0 \end{Bmatrix} - m_c \begin{Bmatrix} \ddot{x}_c \\ \ddot{y}_c \\ \ddot{z}_c \end{Bmatrix} + F_{contatto} \quad (4.1)$$

Modellando il contatto con una molla verticale di rigidezza  $k_S$  e indicando con  $y_S$  la quota a riposo del piano orizzontale su cui poggia il carico, la forza di contatto ha solo la componente in  $y$  non nulla e può essere descritta dalla seguente relazione:

$$F_{contatto,y} = \max(0, k_S(y_S - y_c)) \quad (4.2)$$

### 4.2 Presa del carico con UAM a 2 gradi di libertà

L'operazione di presa del carico è stata risolta in Matlab con il metodo proposto nel paragrafo 2.5 e validata in Adams per il manipolatore a due gradi di libertà fissato al baricentro del drone. La traiettoria considerata richiede uno spostamento dell'end effector di 2 e 12 cm rispettivamente verso  $x$  positivi e  $y$  negativi. È costituita da un'andata rapida, a  $t=1.6$  s il carico viene afferrato e sollevato lentamente fino a che non è più in contatto con il supporto elastico, quindi a  $t=9$  s l'end effector accelera e torna alla posizione iniziale dove rimane fino a  $t=30$  s; sono state utilizzate traiettorie con continuità di accelerazione; il carico considerato ha massa 0.5 kg; la rigidezza di contatto è 1000 N/m

È stato osservato che riducendo la componente derivativa del controllo PID sul rollio le oscillazioni orizzontali del drone si riducono durante questa operazione, quindi il coefficiente integrativo è stato ridotto a 3 N/(rad s) con conseguente riduzione dei picchi sulla coppia di controllo.

	$k_p$	$k_i$	$k_D$
altitudine	37 N/m	8 N s/m	18 N /m/s
rollio	40 Nm/rad	35 Nm s/rad	3 Nm/rad/s

Tabella 4.1 Parametri del controllo PID del drone utilizzati nell'operazione di presa

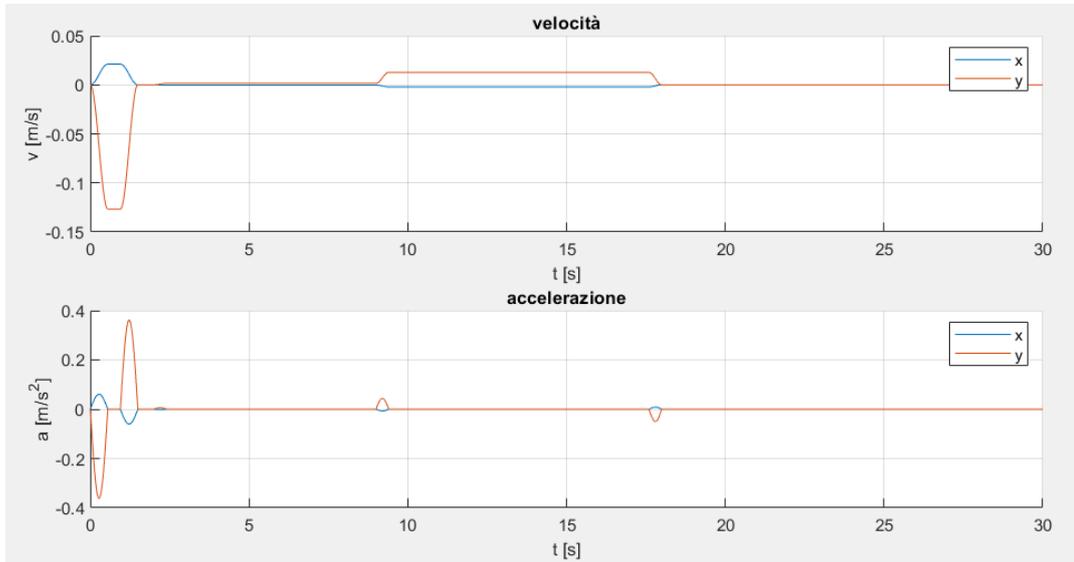


Figure 4.1 Traiettorie di riferimento dell'end effector

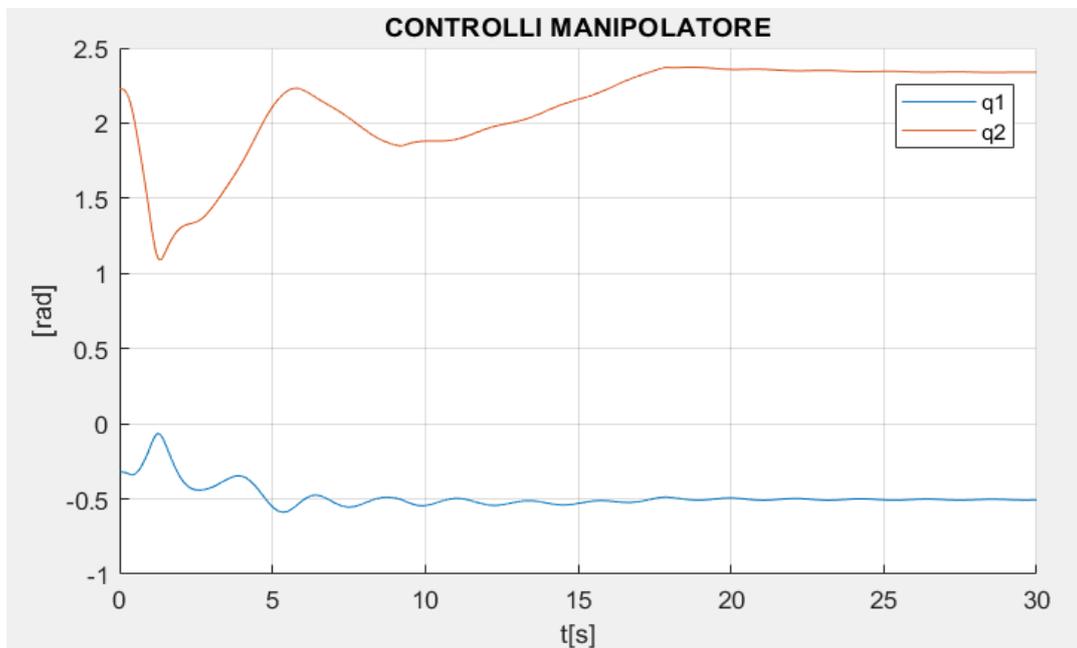


Figure 4.2: Risultato della cinematica inversa per la presa del carico su supporto elastico. La configurazione iniziale è di equilibrio, i parametri del controllo PID del drone sono descritti in Tabella 4.1

Si osserva che l'errore di posizione rimane inferiore a 0.1 mm anche se alla fine del movimento dell'end effector l'errore di velocità in x è circa costante e l'errore di posizione aumenta linearmente. Il piccolo errore di velocità potrebbe essere dovuto ad una differenza tra la posizione dell'end effector prevista da Matlab e quella di Adams, come conseguenza anche le forze agenti sul sistema e quindi gli spostamenti del drone sono leggermente diversi.

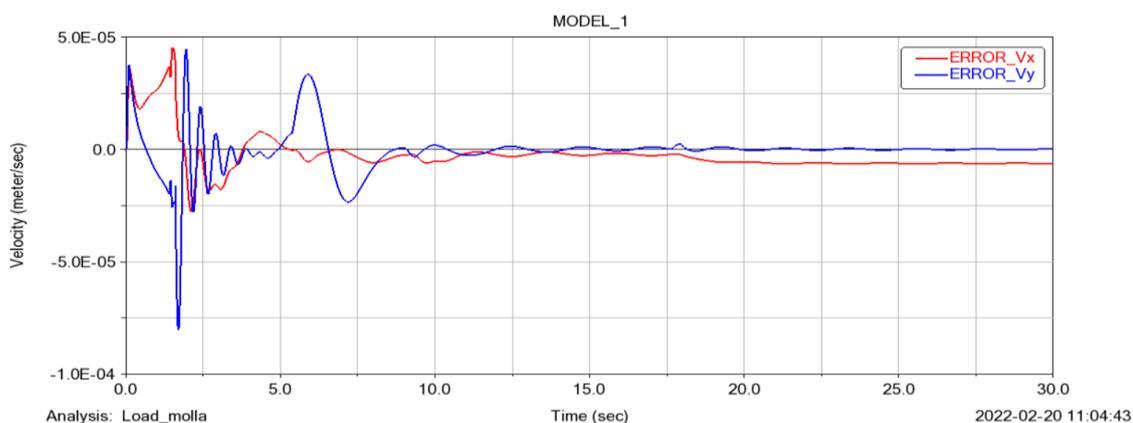


Figure 4.3 Errore di velocità dell'end effector misurato in Adams con parametri del controllo PID del drone di Tabella 4.1

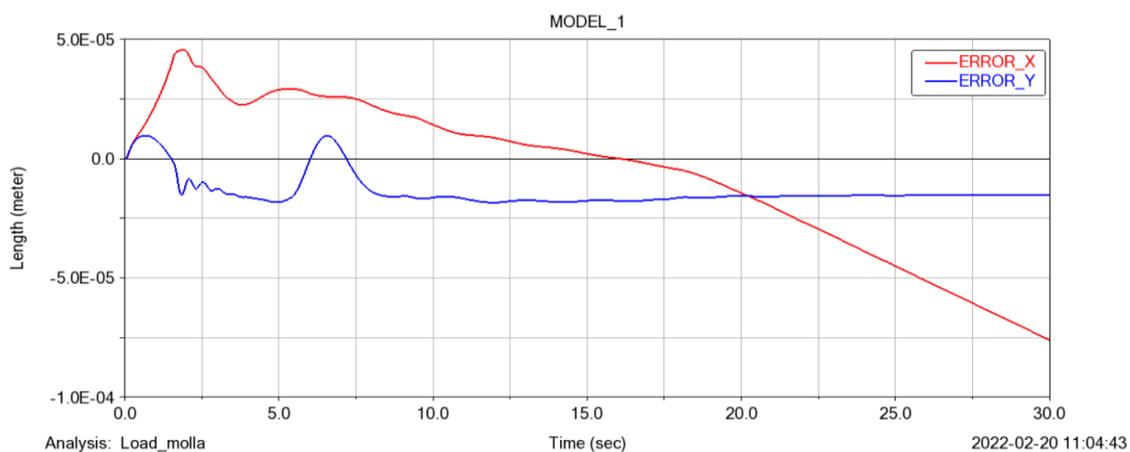


Figure 4.4 Errore di posizione dell'end effector misurato in Adams con parametri del controllo PID del drone di Tabella 4.1

Anche l'andamento della forza agente sull'organo terminale in Adams è in accordo con l'andamento previsto: una volta afferrato il carico la forza aumenta linearmente fino a coincidere con il peso una volta che  $\gamma_S < \gamma_C$ , nei tratti accelerati della traiettoria c'è una componente dovuta all'inerzia.

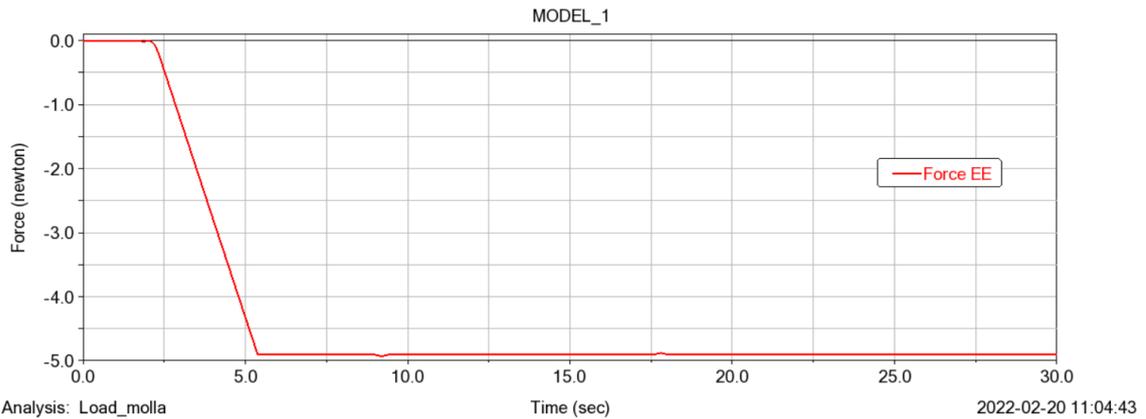


Figure 4.5 Reazione vincolare tra manipolatore e carico misurata in Adams per il sollevamento della massa da 0.5 kg appoggiato su una molla di rigidità 1000 N/m

Per quanto riguarda gli spostamenti dell'UAV si osserva che:

- All'inizio del movimento il drone si sposta verso destra di 5 cm, poi si riavvicina all'asse delle ordinate ma posizione iniziale e finale non coincidono: il drone è traslato verso il carico;
- Avendo ridotto l'azione derivativa sul rollio le oscillazioni si smorzano rispetto a quanto visto nel paragrafo 2.5;
- Lo spostamento verticale raggiunge un picco di 10 cm e torna all'altitudine iniziale lentamente;

In particolare, l'ultimo punto ha obbligato ad utilizzare un carico di massa ridotta e ad eseguire l'operazione in un tempo relativamente lungo. Per eseguire l'operazione più velocemente è necessario utilizzare un controllo PID più rigido oppure utilizzare altre strategie che aumentino temporaneamente la spinta quando viene afferrato il carico; per esempio triplicando tutti i coefficienti del controllo PID del drone è possibile terminare il movimento in 3.5 secondi anziché 18 e con un abbassamento del drone inferiore a 4 cm (Figura 4.7)

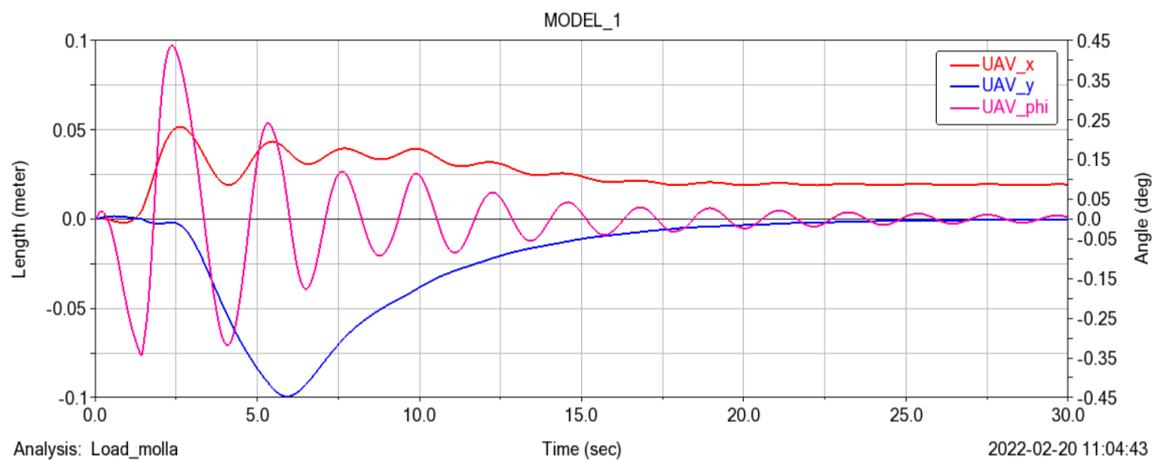


Figura 4.6 Movimenti dell'UAV in Adams con parametri del controllo PID del drone di Tabella 4.1 durante il sollevamento del carico

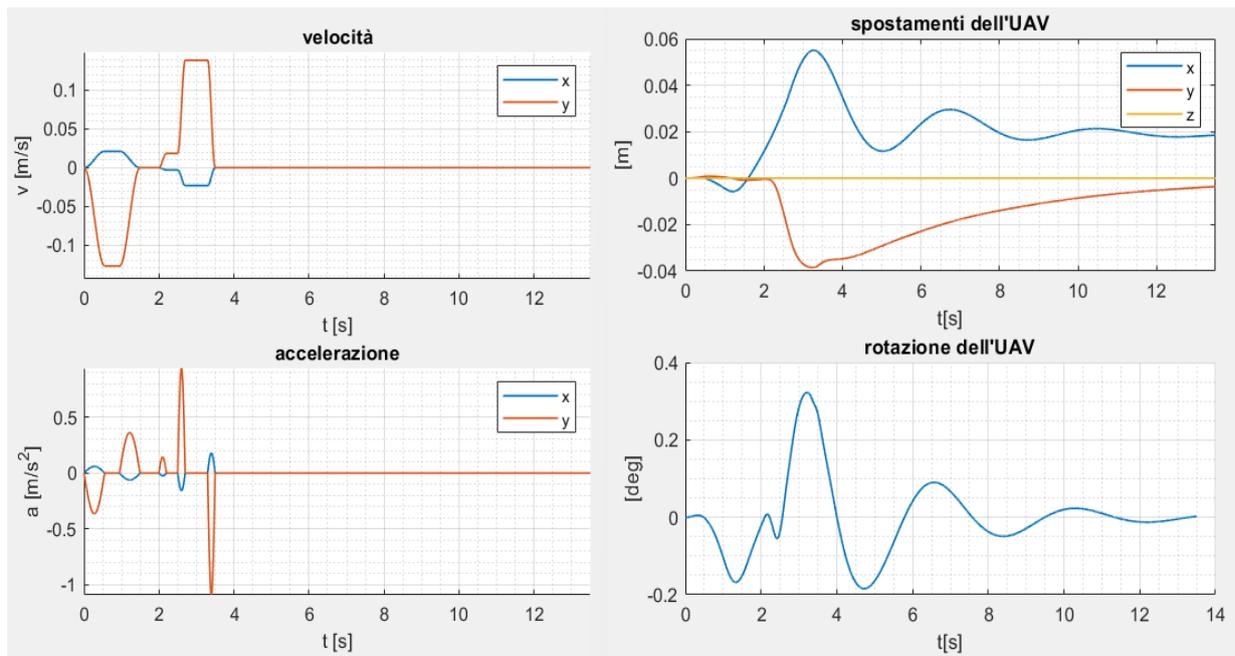


Figure 4.7 Presa del carico con manipolatore a due gradi di libertà e coefficienti del controllo PID del drone aumentati ( $k_{py}=111$  N/m,  $k_{iy}=24$  N s/m,  $k_{dy}=54$  N/m/s;  $k_{p\phi}=120$  Nm/rad,  $k_{i\phi}=105$  Nm s/rad,  $k_{d\phi}=9$  Nm/rad/s ). A sinistra la traiettoria di riferimento dell'end effector, a destra i movimenti del drone

### 4.3 Presa del carico con UAM ridondante a 3 gradi di libertà

Con un UAM a tre gradi di libertà e manipolatore fissato al baricentro del drone viene eseguita la stessa operazione del paragrafo 4.1 con l'unica differenza che lo spostamento verso x positivi viene aumentato da 2 cm a 8 cm mantenendo lo stesso profilo di velocità (Figura 4.1). Dato che, come visto in precedenza, il codice Matlab è in grado di prevedere con sufficiente accuratezza gli spostamenti e le forze e ci si vuole ora focalizzare sui movimenti dell'UAV causati dal manipolatore; vengono riportati unicamente i risultati riguardanti i movimenti del drone generati dallo script Matlab. Viene analizzato anche l'effetto dello Jacobiano esteso.

Inizialmente non viene utilizzato lo jacobiano esteso e la cinematica inversa viene risolta utilizzando la pseudo-inversa destra dello Jacobiano generalizzato, ottenendo così la soluzione con minime velocità dei giunti. In questo caso si osserva che:

- All'inizio del movimento, appena l'end effector si sposta verso destra ( $x > 0$ ) Il drone ruota in senso orario e di conseguenza accelera verso destra, il rollio viene poi stabilizzato dal controllo U2
- Lo spostamento orizzontale massimo dell'UAV è di circa 11 cm e si verifica poco dopo aver raggiunto il carico, alla fine del movimento il drone è traslato verso destra di 2 cm rispetto alla posizione iniziale;
- lo spostamento verticale segue quello che si osservava nel caso di manipolatore a due gradi di libertà;

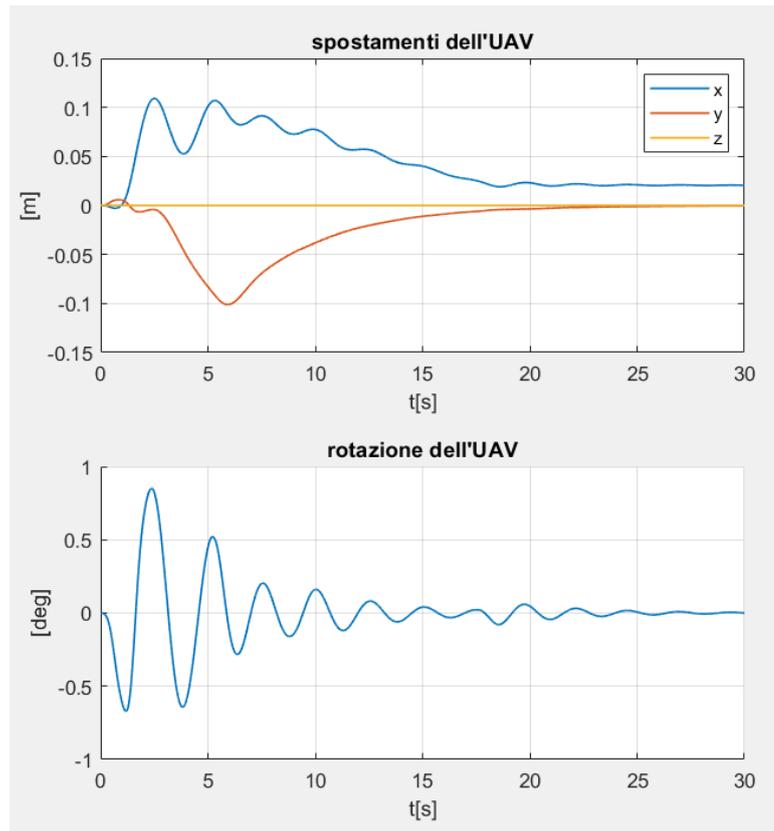


Figure 4.8 Movimenti dell'UAV per manipolatore ridondante ottenuti con la soluzione a minime velocità durante il sollevamento del carico di 0.5 kg appoggiato su una molla di rigidità 1000 N/m con parametri del controllo PID del drone di Tabella 4.1

Risolviendo la cinematica inversa utilizzando lo Jacobiano esteso mantenere nulla la coppia esercitata dal manipolatore sul drone si osservano le seguenti differenze:

- Prima di iniziare a sollevare il carico il manipolatore si muove riducendo lo spostamento del baricentro;
- A meno di piccole oscillazioni, il drone trasla lateralmente solo mentre il carico passa da essere appoggiato a terra a quando è interamente sostenuto dall'end effector;
- Alla fine del movimento l'UAV si è spostato a destra di circa 5 mm ed è sulla stessa verticale della posizione iniziale del baricentro del sistema UAM e carico, infatti sul sistema non agiscono forze esterne lungo x in quanto il rollio è praticamente nullo;
- La coppia di controllo  $U_2$ , che segue l'andamento della coppia tra drone e manipolatore, è trascurabile rispetto al caso precedente in cui raggiungeva i 0.7 Nm, per contro si notano delle piccole oscillazioni sul controllo  $U_1$  e su altre grandezze;

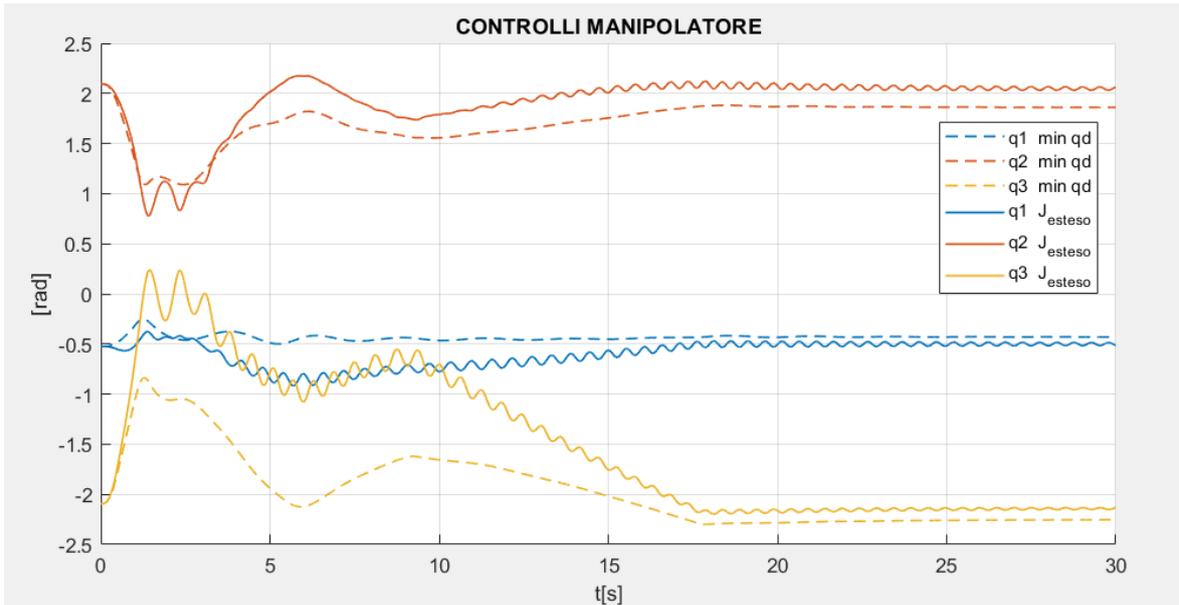


Figure 4.9 Controlli del manipolatore ridondante durante il sollevamento del carico con parametri del controllo PID del drone di Tabella 4.1. Confronto tra soluzione minime velocità e Jacobiano esteso.

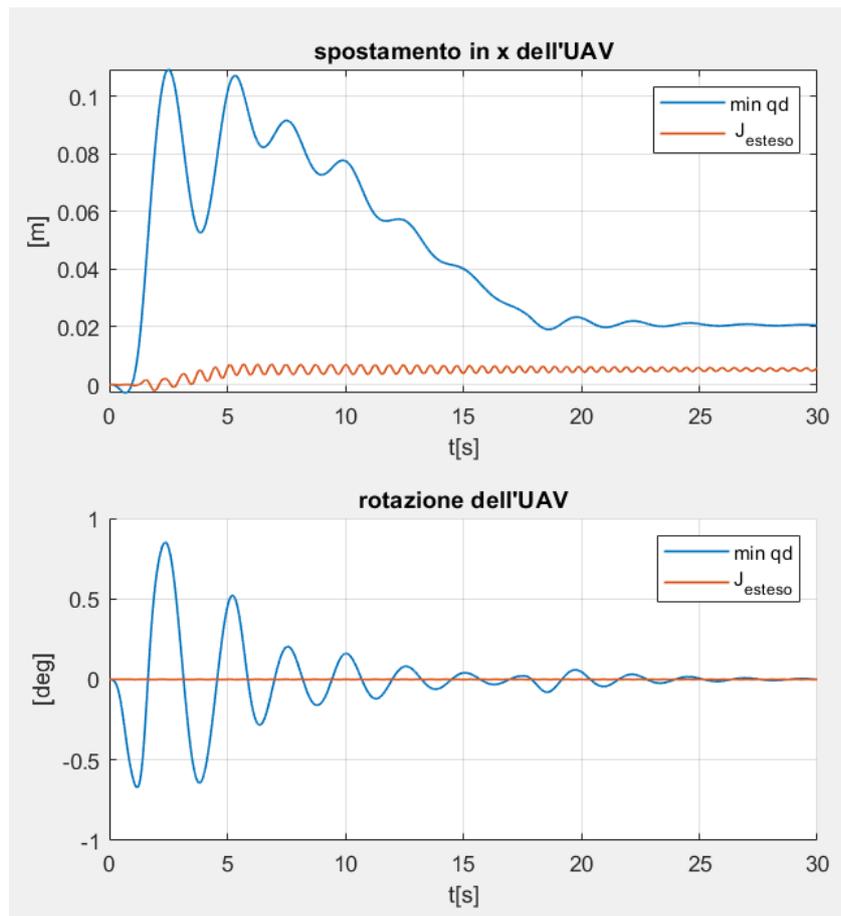


Figure 4.10 Confronto dei movimenti dell'UAV per soluzione a minime velocità dei giunti e Jacobiano esteso durante il sollevamento del carico con parametri del controllo PID del drone di Tabella 4.1.

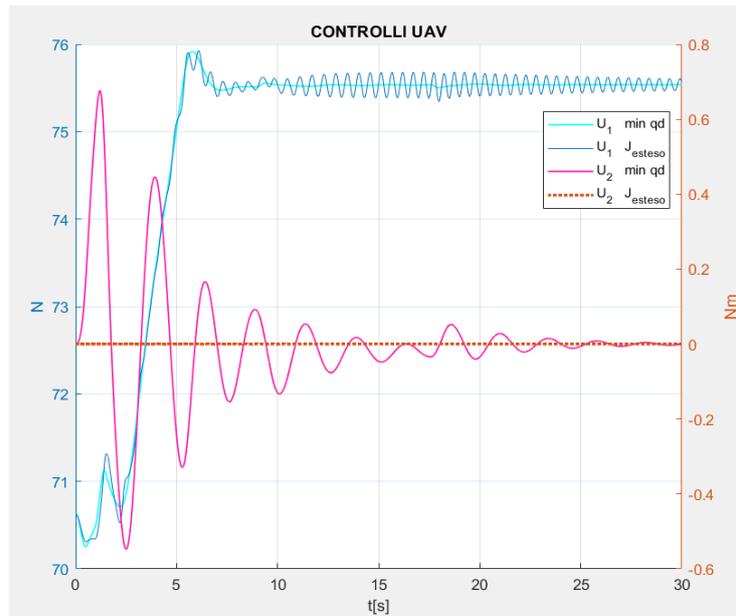


Figure 4.11 Confronto della forza e della coppia di controllo dell'UAV per soluzione minime velocità e Jacobiano esteso durante il sollevamento del carico con parametri del controllo PID del drone di Tabella 4.1

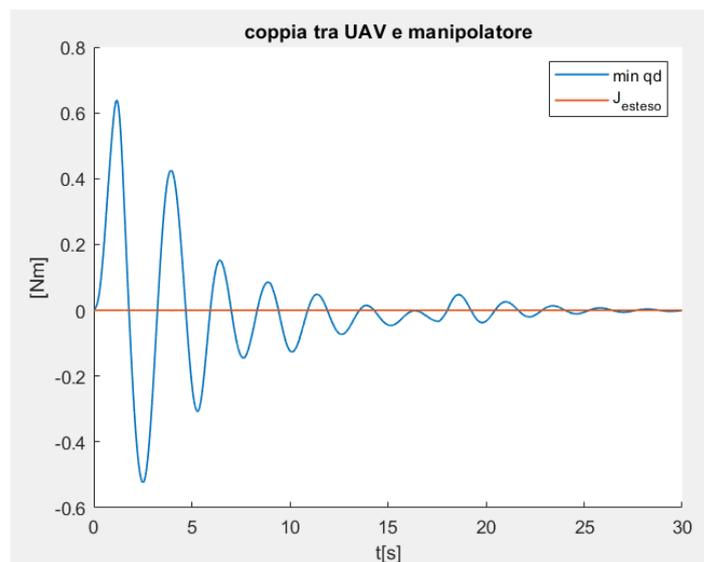


Figure 4.12 Confronto della coppia esercitata tra il manipolatore e il drone per soluzione a minime velocità e Jacobiano esteso durante il sollevamento del carico con parametri del controllo PID del drone di Tabella 4.1

Come spiegato in precedenza, durante queste simulazioni per il controllo del drone sono stati utilizzati i parametri PID di tabella 4.1 che non presentano instabilità riguardo al rollio e alle traslazioni orizzontali. Poiché con lo Jacobiano esteso il rollio rimane a valori trascurabili non risente di un cambio di parametri del controllo sul rollio. In figura 4.12 sono riportati i movimenti dell'UAV risultanti dall'utilizzo dello Jacobiano esteso e dalla soluzione a minime velocità con coefficiente derivativo del controllo sul rollio  $k_D = 9 \frac{Nm}{rad \cdot s}$ . Come si può vedere i movimenti ottenuti con lo Jacobiano esteso non sono stati influenzati dal cambio di parametro, invece con la soluzione a minime velocità l'ampiezza delle oscillazioni aumenta fino a far divergere la soluzione a  $t = 13$  s, quando la traiettoria obiettivo dell'end effector esce dallo spazio operativo del manipolatore

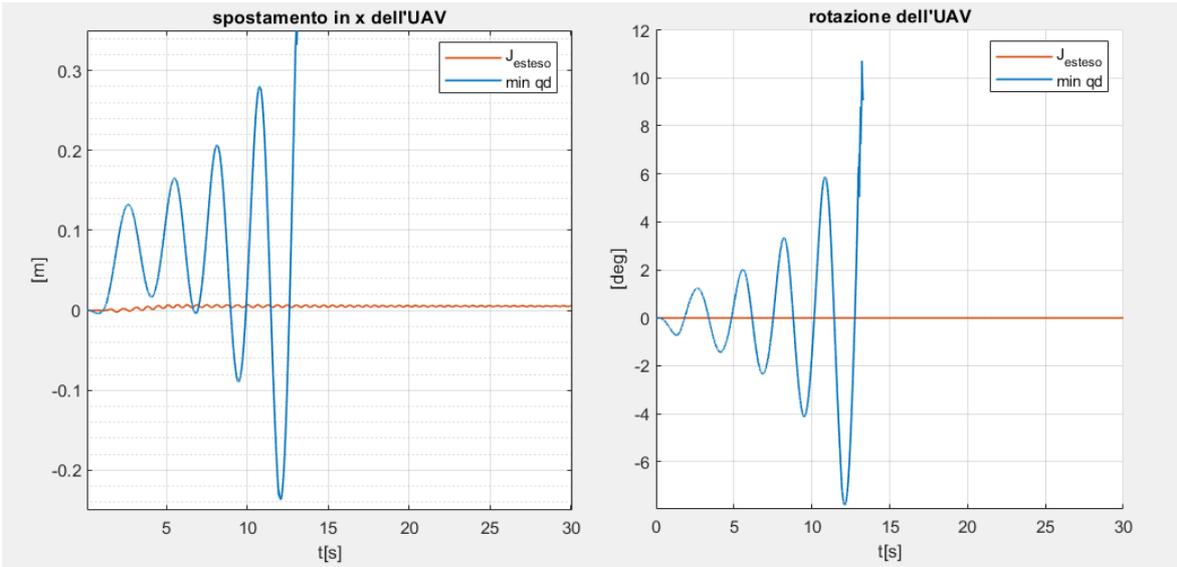


Figure 4.13 Movimenti dell'UAV con controllo instabile sul rollio ( $k_{p\gamma}=37 \text{ N/m}$ ,  $k_{i\gamma}=8 \text{ N s/m}$ ,  $k_{D\gamma}=18 \text{ N/m/s}$ ;  $k_{p\phi}=40 \text{ Nm/rad}$ ,  $k_{i\phi}=35 \text{ Nm s/rad}$ ,  $k_{D\phi}=9 \text{ Nm/rad/s}$ ) per soluzione minime velocità e Jacobiano esteso. A  $t=13 \text{ s}$  la soluzione alle minime velocità diverge.

#### 4.4 Ampliamento del movimento del manipolatore con contrappeso

In questo paragrafo, risolvendo la cinematica inversa con gli script già presentati, verrà valutata l'efficacia dell'uso del contrappeso come nel paragrafo 3.8 ma nel caso di sollevamento di un carico.

I parametri dell'UAM con contrappeso sono gli stesse del paragrafo 3.8: contrappeso di massa 2.2 kg e momento d'inerzia baricentrico  $10^{-4} \text{ kgm}^2$ , la massa del drone è 2 kg; l'ordinata del baricentro della batteria rispetto alla terna solidale al drone è  $y' = 0.03 \text{ m}$ .

Nella risoluzione della cinematica inversa con batteria libera di traslare, la posizione della batteria viene considerata come un ulteriore grado di libertà del sistema e questa viene quindi inclusa nella definizione dello Jacobiano generalizzato e in quello esteso. Come nel caso senza carico la risoluzione della cinematica inversa attraverso lo Jacobiano esteso genera accelerazioni e velocità elevate nei giunti, quindi, come nel paragrafo 3.8, la cinematica inversa è stata risolta con un problema ai minimi quadrati controllando la posizione del contrappeso separatamente dagli altri giunti in modo da bilanciare il peso di manipolatore e carico. Oltre a limitare velocità e accelerazioni dei giunti come nel caso senza carico, questa volta sono stati ottenuti risultati migliori penalizzando le soluzioni con velocità elevate dei giunti del manipolatore e quindi le configurazioni vicine a quelle singolari [26], il problema ai minimi quadrati minimizza quindi:

$$\left\| \left[ H_{b,man} H_b^{-1} H_{bm} + H_{bm,man} \right] \dot{q}_k - \left( K_{man,k-1} + (\tau - v_{G,k-1} \times p_{man,k-1}) \Delta t - H_{bm}^T H_b^{-1} \begin{Bmatrix} p \\ K \end{Bmatrix} \right) \right\|^2 \\ \alpha (|\dot{q}_1| + |\dot{q}_2| + |\dot{q}_3|) \quad (4.3)$$

È stato scelto  $\alpha = 0.08$ , come compromesso tra la coppia esercitata sul drone e i picchi di velocità dei giunti: con  $\alpha$  maggiori le velocità dei giunti sono minori ma il disturbo sul drone aumenta, con  $\alpha$  minori il disturbo sul drone diminuisce ma si osservano velocità e accelerazioni dei giunti maggiori.

Il profilo di velocità richiesto all'end effector è mostrato in Figura 4.14: l'end effector si sposta in basso di 5 cm e verso destra, a  $t = 1.6$  s, quando viene raggiunto lo spostamento massimo, viene afferrato il carico di 0.5 kg, che, come nelle altre simulazioni di questo capitolo, viene riportato alla posizione iniziale muovendosi ad una velocità ridotta mentre il carico è ancora a contatto con il suo supporto. Lo spostamento laterale richiesto all'end effector è stato aumentato progressivamente fino a che non è stato più possibile risolvere la cinematica inversa; la configurazione iniziale dell'UAM  $q_1 = -\frac{\pi}{6} \text{ rad}$ ,  $q_2 = \frac{2}{3}\pi \text{ rad}$ ,  $q_3 = -\frac{2}{3}\pi \text{ rad}$ ,  $q_4 = 0 \text{ m}$ , la rigidità del contatto è  $k_S = 1000 \text{ N/m}$ .

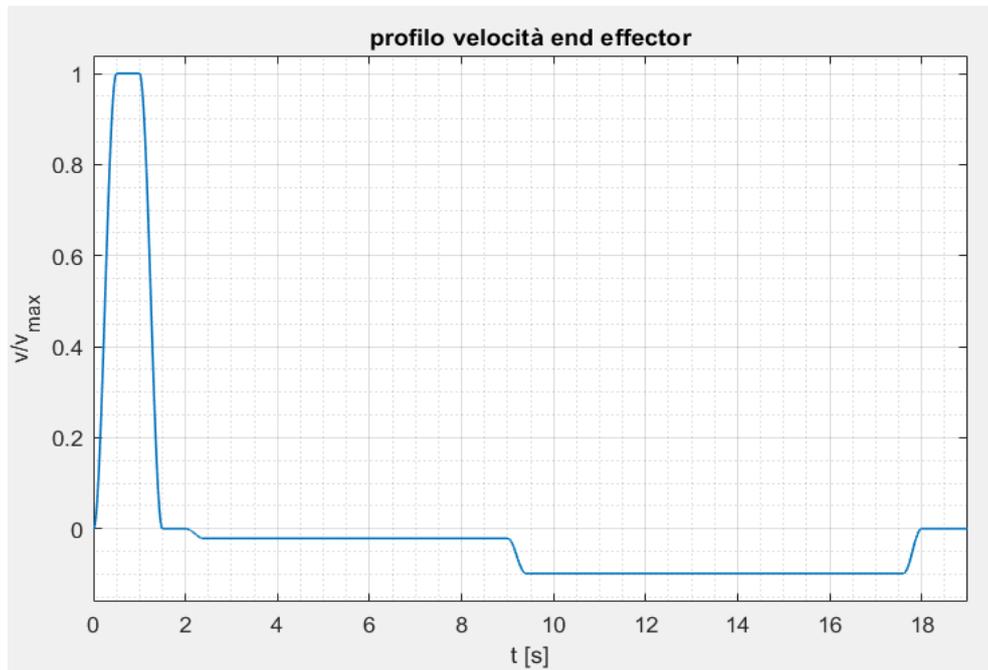


Figure 4.14 Profilo di velocità dell'end effector imposto nella risoluzione della cinematica inversa, traiettorie con ampiezze diverse sono state ottenute moltiplicando questo profilo

Dopo aver eseguito lo script Matlab per risolvere la cinematica inversa, i controlli di manipolatore e contrappeso sono stati importati in Adams per simulare anche in questo ambiente il moto, in modo analogo a come già fatto in precedenza.

Si ottengono i seguenti risultati:

- Batteria/Contrappeso fisso: l'end effector può seguire traiettorie con spostamento massimo fino a 0.11 m verso destra ( $x$  positive), le traslazioni orizzontali dell'UAV sono minori di 1 cm e, come nel paragrafo 4.3, sono dovute principalmente al fatto che il baricentro dell'UAV si allinea alla posizione iniziale del baricentro del sistema UAM-carico, il rollio è dell'ordine di  $10^{-2} \text{ }^\circ$ , la coppia esercitata da manipolatore e batteria sul drone è dell'ordine di  $10^{-1} \text{ Nm}$ .

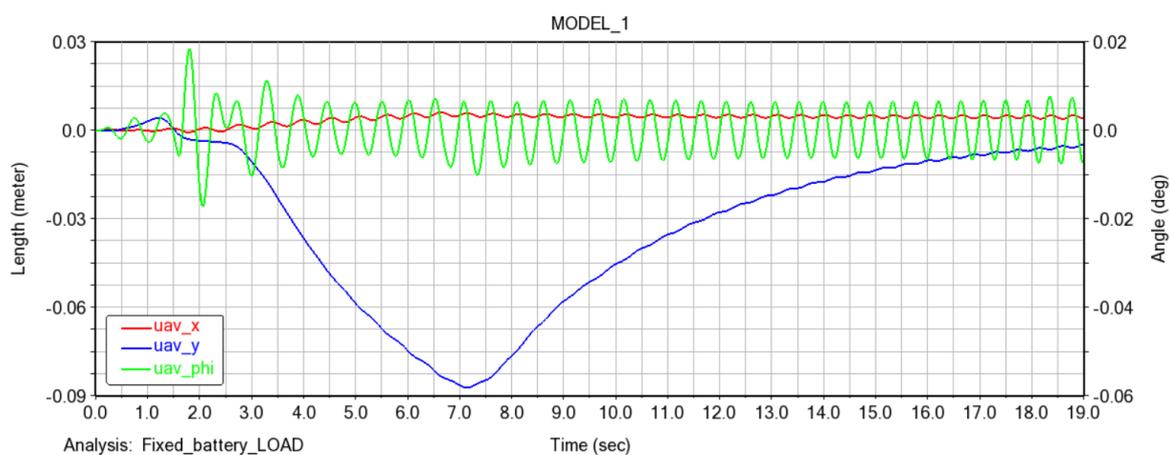


Figure 4.15 Traslazioni e rotazioni del drone con batteria fissa misurate in Adams, all'organo terminale è stata richiesta una traiettoria con spostamento orizzontale massimo di 11 cm

- Batteria/Contrappeso mobile: l'end effector può seguire traiettorie con spostamento massimo fino a 0.125 m verso destra (x positive, la coppia esercitata da manipolatore e batteria sul drone è dell'ordine di  $10^{-1}$  Nm come nel caso con contrappeso fisso ma l'andamento è diverso oscillando ad una frequenza minore, di conseguenza il rollio è maggiore (con oscillazioni dell'ordine di  $10^{-1}$  °). Rispetto al caso con batteria fissa le traslazioni dell'UAV sono maggiori con un massimo di circa 3 cm in direzione orizzontale.

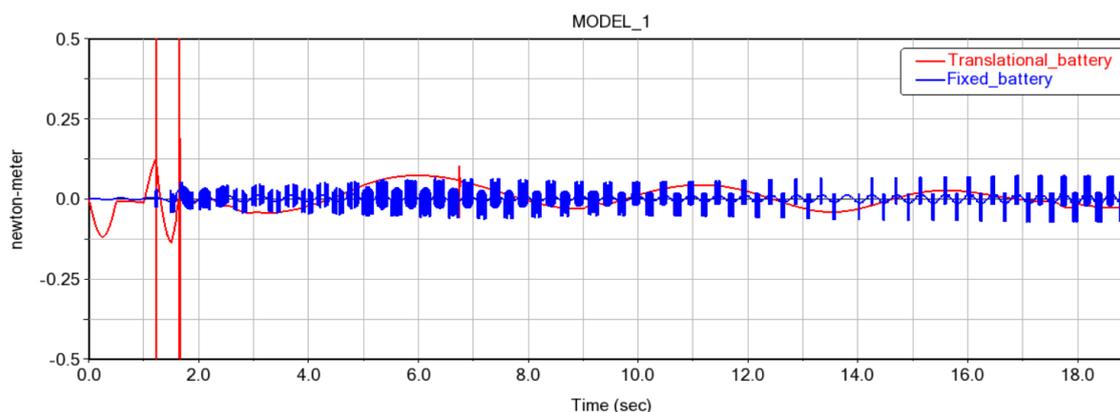


Figure 4.16 Confronto della coppia esercitata da manipolatore e contrappeso sul drone su Adams: in rosso il caso con contrappeso mobile, in blu con contrappeso bloccato

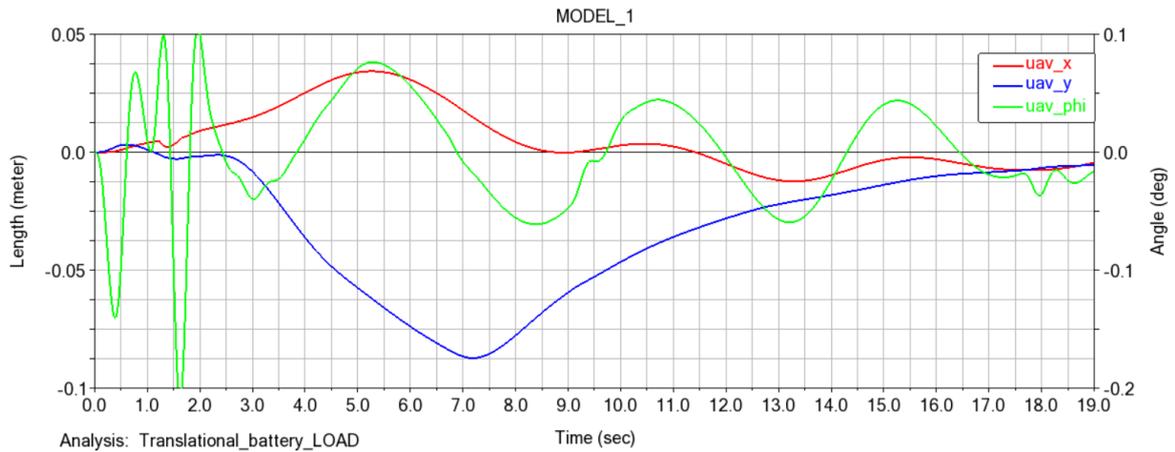


Figure 4.17 Traslazioni e rotazioni del drone con batteria fissa misurate in Adams, all'organo terminale è stata richiesta una traiettoria con spostamento orizzontale massimo di 12.5 cm

La figura 4.18 mostra i controlli di manipolatore e contrappeso: si osserva che all'inizio del movimento il contrappeso si sposta dalla parte opposta del carico fino a -0.125 mm, che è il limite imposto alla corsa del giunto, aumentando questo valore è possibile ampliare ulteriormente lo spazio raggiungibile dall'organo terminale.

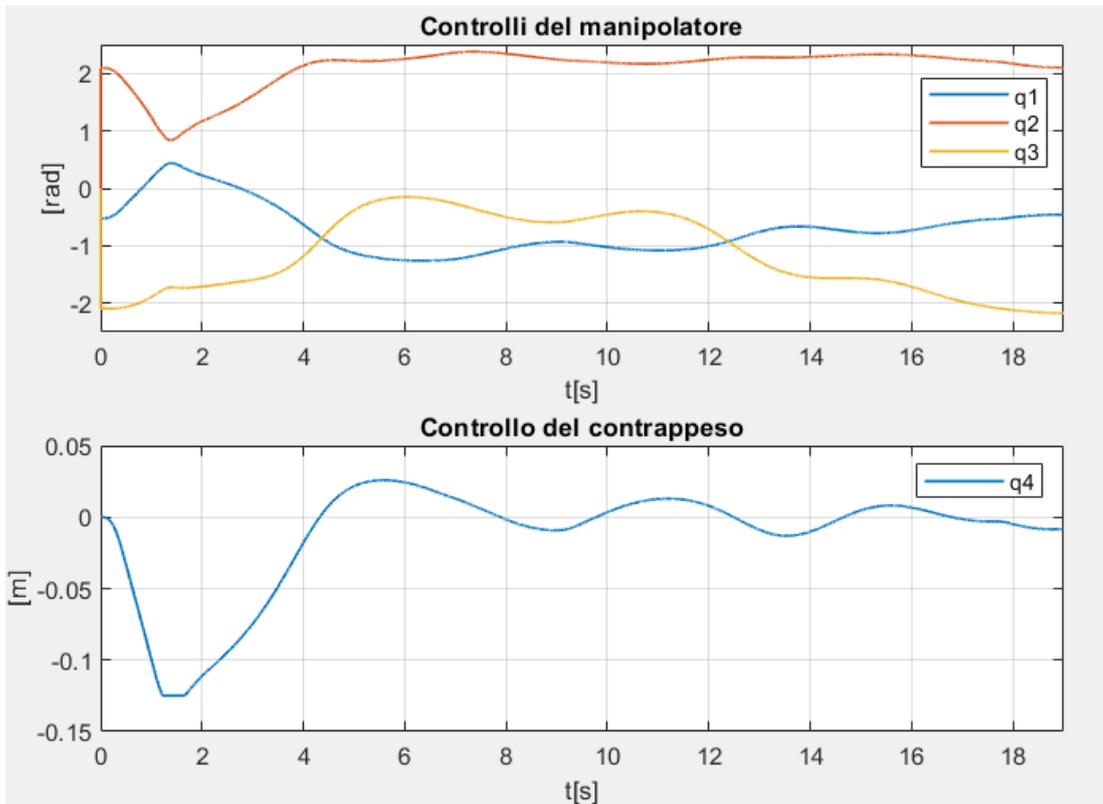


Figure 4.18 Controlli di manipolatore e contrappeso per traiettoria dell'end effector con spostamento orizzontale massimo di 12.5 cm

Figure 4. 2

Come nel caso senza carico l'errore di posizione dell'organo terminale è maggiore rispetto ai casi senza contrappeso tuttavia è sufficientemente ridotto per eseguire la maggior parte delle operazioni.

Si osserva però che, nel caso di sollevamento di un carico, l'aggiunta del contrappeso non è efficace quanto lo era nel caso di traiettoria orizzontale senza carichi aggiuntivi dove lo spazio raggiungibile veniva quasi raddoppiato grazie alla batteria mobile.

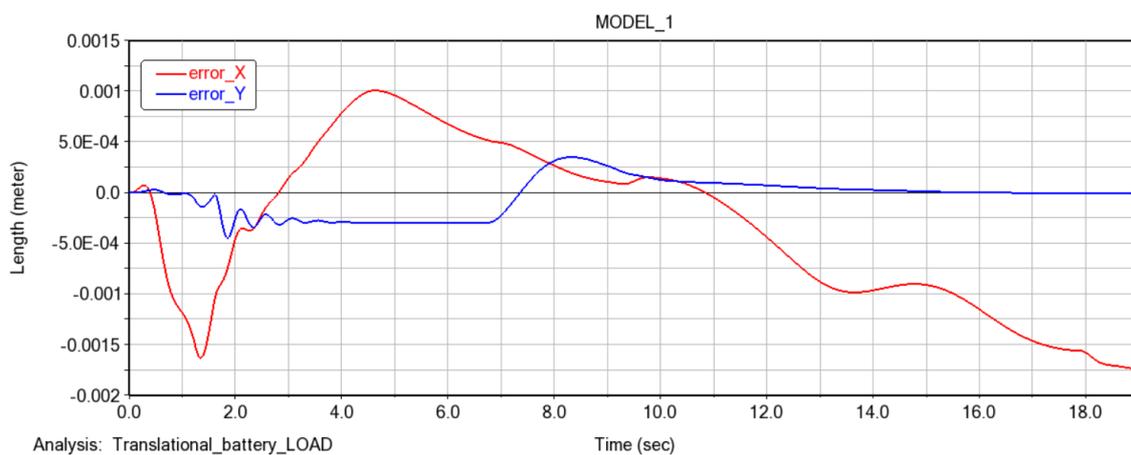


Figure 4.19 Errore di posizione dell'end effector misurato in Adams per il caso con contrappeso mobile, l'end effector raggiunge uno spostamento orizzontale massimo di 12.5 cm



## CAPITOLO 5: Test sperimentali: effetto dei disturbi sull'UAV

In questo capitolo verranno mostrati dei test in cui un esacottero è stato disturbato da una massa mobile ancorata al drone in modo da osservare l'effetto del disturbo sui movimenti del velivolo, in parallelo la stessa situazione è stata implementata su Matlab.

### 5.1 Descrizione dei componenti

L'esacottero utilizzato non è commerciale, essendo stato sviluppato per scopi di ricerca è equipaggiato con dei marker per lavorare con un sistema di visione Vicon che, costituito da 8 videocamere esterne al velivolo, è in grado di determinare la posizione dei marker con precisione submillimetrica, garantendo una stima accurata di posizione e orientazione del velivolo. Il ciclo di controllo del drone, che può sfruttare i segnali del sistema Vicon oppure basarsi solo sugli altri sensori (per esempio la videocamera solidale al drone), viene eseguito parzialmente da un computer a bordo dell'esacottero che collabora con l'autopilot Pixhawk [21] [22].



Figura 5. 1 Esacottero utilizzato per gli esperimenti: in alto foto del drone, in basso vista frontale da Solidworks (in blu si può distinguere la batteria al di sotto della quale verrà posizionato un braccetto per disturbare l'UAV)

Gli assi dei rotori sono verticali e la distanza tra gli assi di due rotori opposti è di 0.358 m, i bracci di ciascun rotore giacciono sul piano orizzontale e l'angolo tra bracci adiacenti è di 60°. I parametri inerziali sono riportati in tabella 5.1 (anche se noti, i momenti d'inerzia non principali non vengono riportati in quanto sono di due ordini di grandezza inferiori rispetto a quelli principali e i parametri inerziali verranno comunque modificati dall'aggiunta della struttura per disturbare il drone).

massa [kg]	3.5
Momento d'inerzia baricentrico asse rollio [kg m <sup>2</sup> ]	7.89 10 <sup>-2</sup>
Momento d'inerzia baricentrico asse beccheggio [kg m <sup>2</sup> ]	8.41 10 <sup>-2</sup>
Momento d'inerzia baricentrico asse imbardata [kg m <sup>2</sup> ]	1.339 10 <sup>-1</sup>

Tabella 5. 1 Parametri inerziali dell'esacottero utilizzato negli esperimenti, non è inclusa la struttura costruita per disturbare l'UAV

Per disturbare l'UAV è stato deciso di utilizzare un braccetto ancorato al di sotto dell'esacottero (in particolare al di sotto della batteria) e attuato da un servomotore la cui posizione angolare è controllata tramite Raspberry, in questo modo è possibile limitare i rischi nel caso il drone si sposti/inclini eccessivamente. All'estremità del braccetto di una lunghezza di circa 10 cm è stata fissata una barra filettata in modo da poter aggiungere delle rondelle/dadi e poter così aumentare la massa di disturbo. La struttura mostrata in figura 5.2 è provvisoria ed ha lo scopo di verificare la fattibilità dell'esperimento, quindi non ne è stata misurata la massa e gli altri parametri. Il braccetto sarà orientato in modo da ruotare attorno ad un asse parallelo a quello di rollio del drone.



Figura 5. 2 Struttura di supporto del braccetto di disturbo: all'alberino del servomotore viene fissato il braccetto con la massa aggiuntiva, la struttura viene ancorata al drone attraverso le due estremità superiori.

## 5.2 Esperimenti svolti

Gli esperimenti sono stati eseguiti all'interno di una stanza secondo la seguente procedura:

- 1) L'esacottero, controllato attraverso il radiocomando, decolla mantenendo il braccetto fermo;
- 2) Si attende che il velivolo si stabilizzi: utilizzando la Position mode [21] non è necessario che il pilota agisca sul radiocomando, utilizzando l'Attitude mode [21] il pilota deve agire sui comandi per evitare che l'esacottero si avvicini troppo alle pareti a causa dei disturbi;
- 3) Una volta che il drone è fermo, senza agire sul radiocomando, viene inviata una traiettoria predefinita da seguire al servomotore per muovere il braccetto e disturbare il velivolo;
- 4) L'esacottero atterra;
- 5) Attraverso il sistema Vicon viene salvata la posizione e l'orientazione del drone durante l'esperimento.

Sono stati eseguiti diversi esperimenti sia con movimento sinusoidale continuo del braccetto, sia imponendo profili di velocità angolare triangolari e portando il braccetto da una posizione verticale ad una orizzontale. La massa all'estremità del braccetto è stata progressivamente aumentata passando da 20 g iniziali a circa 85 g finali (aumentando ulteriormente il peso il servomotore utilizzato, che può sopportare una coppia massima di 1.6 kg\*cm, non è in grado di muovere correttamente il braccetto).

Durante l'esperimento sono stati osservati disturbi aerodinamici a cause delle pareti della stanza: nei test svolti utilizzando la Position mode l'esacottero si muove attorno alla posizione iniziale di qualche centimetro, anche senza nessun movimento del braccetto; nel caso di Attitude mode invece il drone inizia a traslare ed è necessario che il pilota agisca per evitare collisioni.

In conclusione non è stato possibile distinguere l'effetto del disturbo del braccetto, infatti questo effetto si confonde con le imprecisioni del sistema di controllo, con gli effetti aerodinamici difficili da modellare e con l'azione del pilota nel caso di Attitude mode, anche il non perfetto allineamento dei rotori può essere un'ulteriore fonte di disturbo.

In futuro si suggerisce di aumentare la massa del braccetto.



Figura 5. 3 Esacottero con braccetto (cerchiato in rosso) durante gli esperimenti

### 5.3 Confronto con il simulatore Matlab

Utilizzando la libreria e gli script del paragrafo 2.5 è stato replicato il sistema costituito dall'elicottero e dal braccetto di sbilanciamento. Nel simulatore il sistema viene trattato come un UAM costituito da due corpi rigidi e il movimento del drone viene determinato tramite l'equazione (2.27) che viene qui riportata:

$$\dot{q}_b = H_b^{-1} H_{bm} \dot{q}_a + H_b^{-1} \begin{Bmatrix} P \\ K \end{Bmatrix} \quad (5.1)$$

Analogamente al paragrafo 2.5, la quantità di moto e il momento angolare del sistema vengono determinate ad ogni iterazione in base alle forze esterne, le matrici  $H_{bm}$ ,  $H_b$  sono note dalla configurazione dell'UAM ma in questo caso l'andamento della velocità del giunto  $\dot{q}_a$  è nota.

In questo caso le forze e le coppie di controllo del drone sono determinate utilizzando l'autopilot PX4 [21]. I parametri del controllore utilizzati dall'elicottero sono noti ma non vengono riportati per brevità.

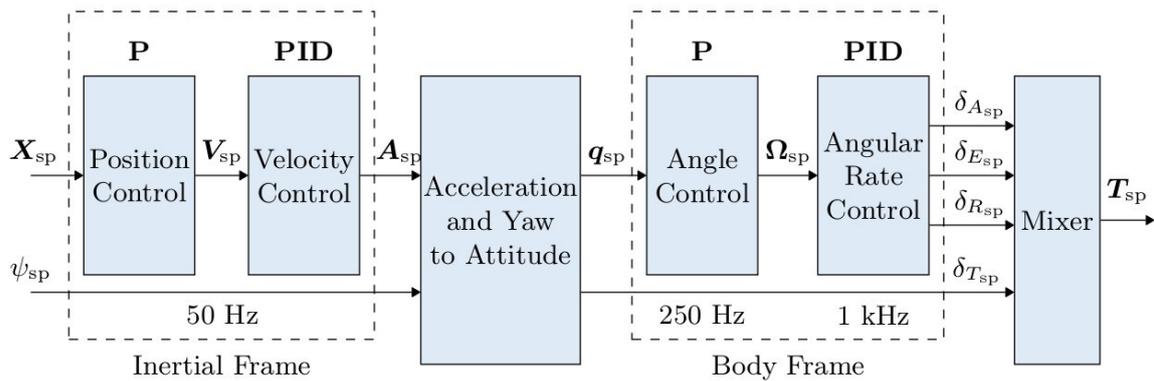


Figura 5. 4 Schema dell'autopilot PX4: utilizzando l'Attitude mode i Position e Velocity Control agiscono solo sull'altitudine mentre l'orientazione  $q_{sp}$  è un input dal pilota, le tre coppie e la spinta del drone sono input del mixer che determina come ripartire i controlli dei rotori in base alla geometria del velivolo [21]

Il controllore è costituito da diversi blocchi e dà come output un valore tra 0 e 1 per ogni rotore: 0 corrisponde alla velocità angolare minima del rotore e 1 alla velocità massima. Da questi valori si determina la velocità angolare  $\omega$  di ciascun rotore e quindi la spinta e il momento esercitati da ciascun rotore rispettivamente attraverso le seguenti relazioni:

$$F_L = C_L \omega^2 \quad (5.2)$$

$$\tau_D = \pm C_D \omega^2 \quad (5.3)$$

Dove  $C_L$  è il coefficiente di lift dell'elica e  $C_D$  è il coefficiente di drag dell'elica, il segno della coppia dipende dal verso di rotazione dell'elica; per l'esacottero questi coefficienti sono rispettivamente  $1.5 \cdot 10^{-3} \text{ N s}^2$  e  $4.59 \cdot 10^{-5} \text{ Nm s}^2$ . Dalla forza e dalla coppia esercitata da ciascun rotore, con passaggi che non vengono riportati, è possibile determinare la forza e la coppia agenti sull'UAM in base alla geometria dell'esacottero.

È stato scelto di utilizzare un simulatore che funziona analogamente all'algoritmo per la risoluzione della cinematica inversa, in questo modo sarà possibile inserire il nuovo sistema di controllo nello script per la risoluzione della cinematica inversa.

Per simulare i disturbi osservati negli esperimenti e non modellati nel simulatore si ipotizza che siano presenti delle forze e delle coppie di disturbo casuali con una la distribuzione in frequenza mostrata in Figura 5.5. In questo modo nel simulatore si osservano spostamenti dell'ordine del metro con braccetto fermo, compatibili con quanto osservato negli esperimenti reali considerando che nella realtà è necessario l'intervento del pilota per evitare collisioni. Si nota che questa è un'approssimazione in quanto gli effetti aerodinamici dovuti all'interazione con suolo e pareti non sono totalmente casuali e dipendono, per esempio, dalla vicinanza del velivolo a suolo e pareti.

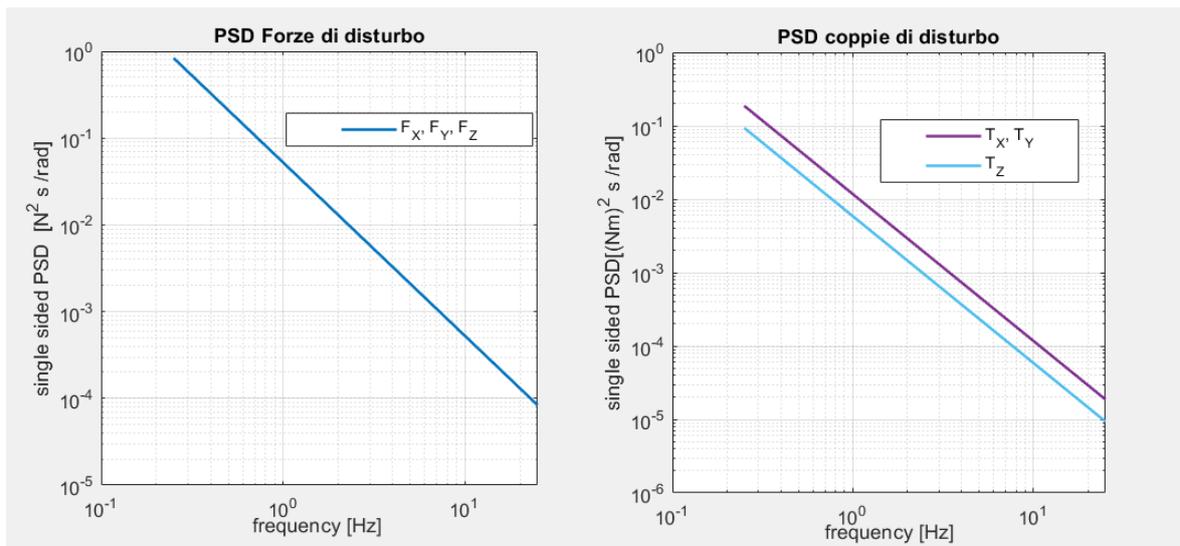


Figura 5. 5 Distribuzione in frequenza ipotizzata per le forze e le coppie di disturbo agenti sul drone con frequenze da 0.25 Hz a 25 Hz, la pendenza delle linee nei diagrammi doppio logaritmici è -2.

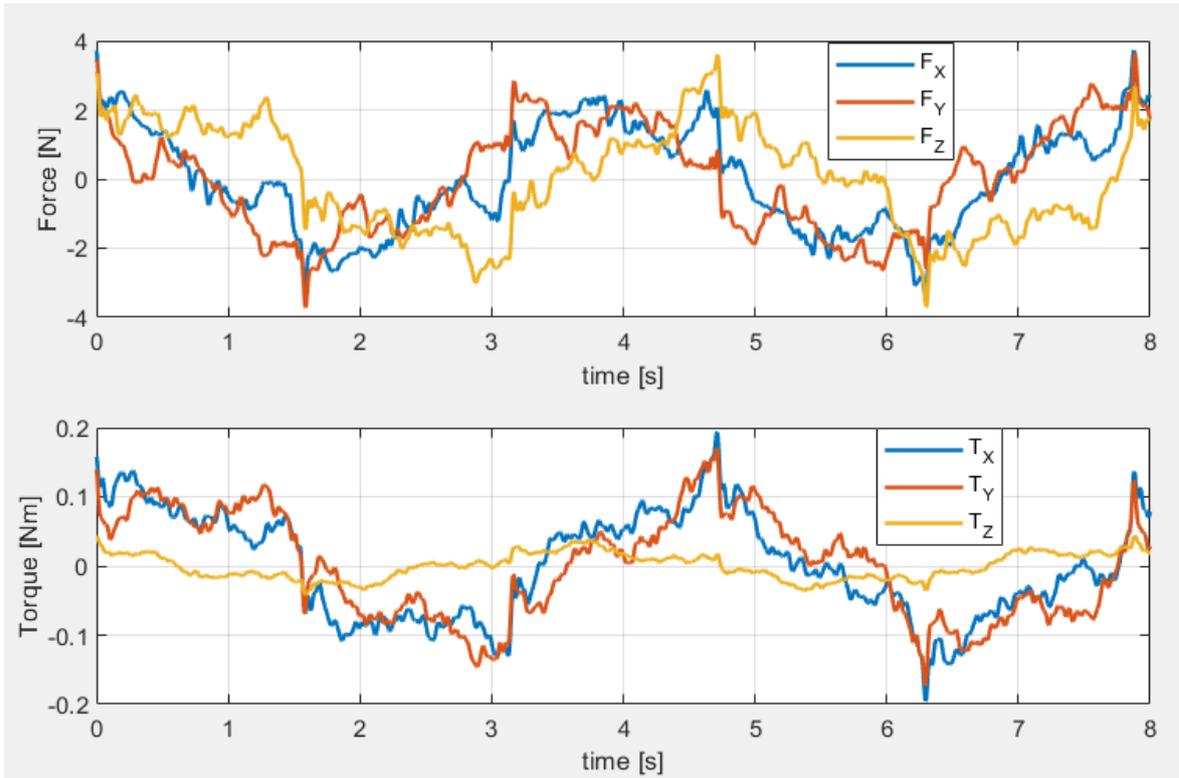


Figura 5. 6 Disturbi generati nel simulatore a partire dalle PSD ipotizzate.

È stato quindi replicato uno degli esperimenti reali nel simulatore, l'esperimento in questione è stato effettuato con massa di 85 g sul braccetto che viene fatto sollevare di 60° a partire dalla posizione verticale iniziale per poi tornare alla posizione di partenza compiendo l'intero movimento in 8 secondi. Come nell'esperimento reale il braccetto è orientato per muoversi dalla destra alla sinistra dell'UAV e viceversa su quello che è inizialmente il piano YZ, nell'esperimento il braccetto viene sollevato verso Y positive.

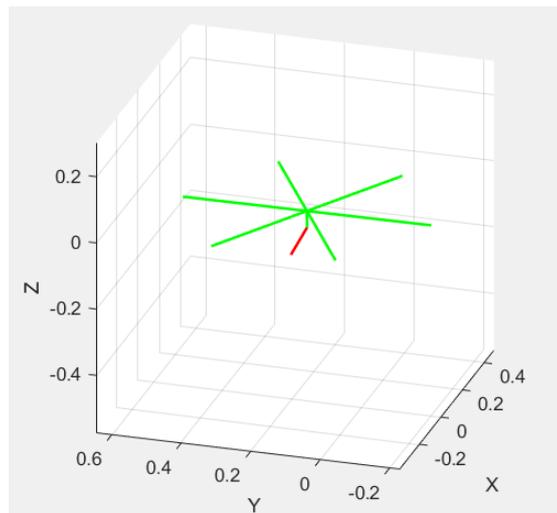


Figura 5. 7 Disposizione degli assi nel simulatore: il braccetto (in rosso) ruota attorno all'asse di rollio del drone, inizialmente coincidente con l'asse assoluto X

La simulazione è stata eseguita prima con braccetto fermo e poi con braccetto mobile, gli spostamenti sul piano orizzontale sono stati riportati in figura 5.8. Ci si aspetterebbe che, come si osserva nel simulatore eliminando i disturbi, quando il braccetto viene sollevato il velivolo si inclini e acceleri nella stessa direzione del braccetto (Y positivi). Questo fenomeno avviene nella simulazione, infatti nell'istante finale si osserva una differenza di circa 0.6 m nella posizione del drone tra i due casi; tuttavia, i disturbi, che hanno lo stesso andamento nei due casi simulati ma hanno un andamento diverso negli esperimenti reali, provocano già da soli spostamenti superiori ad 1 m. Considerando questo, con un diverso andamento temporale dei disturbi, tra le due simulazioni non è possibile determinare l'entità dell'effetto del braccetto con la massa di 85 g, esperimenti e simulazione sono quindi in accordo.

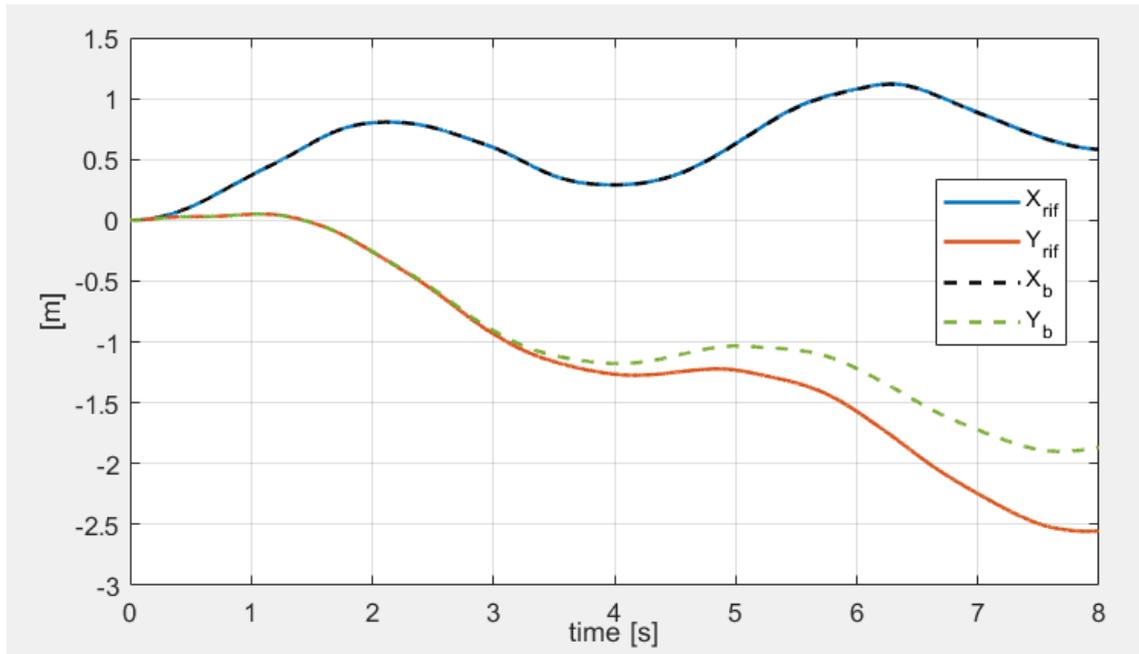


Figura 5. 8 Spostamenti dell'esacottero sul piano orizzontale: con linea piena la simulazione con braccetto fermo ( $X_{rif}$ ,  $Y_{rif}$ ), con linea tratteggiata simulazione con braccetto mobile ( $X_b$ ,  $Y_b$ ); l'andamento temporale di forze e coppie di disturbo è uguale nelle due simulazioni.



## CAPITOLO 6: Conclusioni e sviluppi futuri

Nelle operazioni di manipolazione aerea con UAV in volo stazionario il movimento del manipolatore altera lo stato dell'UAV che è un sistema sottoattuato. In particolare, in questo lavoro, è stato considerato un drone in cui il sistema di controllo agisce su altitudine, rollio, beccheggio e imbardata; questo sistema di controllo è infatti simile all'anello di controllo più interno che viene utilizzato nei multicotteri.

Per tenere conto degli spostamenti del drone nella risoluzione della cinematica inversa è stato utilizzato lo jacobiano generalizzato, è stato necessario includere l'effetto delle forze esterne come la gravità e la spinta dei rotori. Nel caso piano, inizialmente sono state considerate solo le traslazioni orizzontali del drone, ciò ha permesso di risolvere problemi di inseguimento di traiettoria nei casi in cui il controllo del drone è un PID sufficientemente rigido e assimilabile ad un controllo ideale. Per il drone controllato da un PID morbido nello Jacobiano generalizzato sono state considerate anche le traslazioni verticali e le rotazioni della base. Partendo da uno script Matlab per la risoluzione della cinematica inversa di manipolatori con base libera, è stato creato un nuovo script adatto a manipolatori con base libera e forze esterne che è stato validato con un modello multibody in Adams. Questo script permette anche di risolvere i casi in cui sono applicate delle forze all'organo terminale del manipolatore, come nel caso di sollevamento di un carico.

La coppia esercitata dal manipolatore sull'UAV può far sì che questo acceleri lateralmente quindi nella cinematica inversa di un UAM ridondante è stato imposto che è questa coppia fosse nulla utilizzando il metodo dello jacobiano esteso. Questo metodo si è rivelato efficace nel ridurre gli spostamenti laterali del drone: in alcuni casi, quando il controllo del drone mantiene sufficientemente piccoli i movimenti verticali dell'UAV, permette l'inseguimento di traiettoria anche ignorando le forze esterne nella risoluzione della cinematica inversa. Sono stati utilizzati anche altri metodi di minimo locale per ridurre il disturbo sul drone: il metodo del gradiente per ridurre la coppia dovuta alla gravità del manipolatore non è stato utile in quanto l'inclinazione del drone non viene ridotta sufficientemente causando così accelerazioni nel piano orizzontale; l'utilizzo di un problema ai minimi quadrati ha invece permesso di porre dei limiti alle velocità di giunto minimizzando la coppia sul drone.

Facendo uso dello jacobiano generalizzato è stata simulata l'operazione di presa di un carico appoggiato su un supporto elastico, prima con un manipolatore a due gradi di libertà e poi con un manipolatore ridondante a tre gradi di libertà. Il controllo del drone si è rivelato un fattore importante durante questa operazione sia per quanto riguarda il tempo necessario a sollevare il carico sia per quanto riguarda la stabilità, tuttavia la minimizzazione della coppia trasmessa dal manipolatore al drone permette di eliminare l'influenza dei parametri PID sul controllo del rollio.

È stato proposto un metodo per il controllo di un contrappeso che bilanci il manipolatore durante l'inseguimento di traiettoria: l'utilizzo dello Jacobiano generalizzato e di quello esteso permette di considerarne anche gli effetti inerziali. È stata valutata brevemente l'efficacia di questo metodo: in un caso in cui l'end effector seguiva una traiettoria orizzontale l'utilizzo del contrappeso mobile ha permesso di aumentare lo spazio raggiungibile di oltre l'80%; in un altro caso in cui veniva richiesto di sollevare un carico posto a destra dell'UAV l'utilizzo del contrappeso ha permesso di incrementare la distanza orizzontale solo da 11 cm a 12.5 cm.

Sono stati svolti dei test sperimentali in cui un esacottero è stato sbilanciato da un braccetto mobile. Gli esperimenti hanno evidenziato la presenza di disturbi, principalmente di natura aerodinamica, che non è stato possibile modellare in Matlab e Adams; questi disturbi sono risultati maggiori

dell'effetto del braccetto, la cui massa andrebbe quindi aumentata per evidenziare l'effetto desiderato.

Alcuni possibili sviluppi sono i seguenti:

- In questa tesi la cinematica inversa è stata risolta a livello delle velocità, risolvendola invece a livello delle accelerazioni si potrebbero ottenere dei risultati più accurati;
- L'utilizzo dello Jacobiano esteso o del problema ai minimi quadrati limita lo spazio operativo del manipolatore, l'aggiunta di un contrappeso controllato permette di ampliare il workspace tuttavia ciò dipende molto dalla traiettoria richiesta. Si suggerisce di testare altri metodi per controllare manipolatore e contrappeso, in particolare metodi di minimo globale (che però hanno un costo computazionale non compatibile con il real-time) potrebbero portare a risultati migliori vista la dinamica complessa del multicottero;
- Alcuni disturbi, per esempio quelli dovuti ad effetti aerodinamici, sono difficilmente modellabili quindi nelle operazioni di manipolazione aerea sarà necessario controllare il manipolatore anche con dei feedback che tengano conto dei movimenti del drone dovuti a questi disturbi;
- Il controllo del drone si è dimostrato un fattore importante nelle operazioni di manipolazione aerea e ciò suggerisce di analizzare varie strategie di controllo, per esempio aumentando attivamente la spinta delle eliche quando si solleva un oggetto.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

[1] <https://www.dji.com/it>

[2] V. Spurny et al., "Autonomous Firefighting Inside Buildings by an Unmanned Aerial Vehicle," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 15872-15890, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3052967.

[3] C. Holness, T. Matthews, K. Satchell and E. C. Swindell, "Remote sensing archeological sites through Unmanned Aerial Vehicle (UAV) imaging," *2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2016, pp. 6695-6698, doi: 10.1109/IGARSS.2016.7730748

[4] F. Ruggiero, V. Lippiello and A. Ollero, "Aerial Manipulation: A Literature Review" in *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 3, no. 3, pp. 1957-1964, July 2018, doi: 10.1109/LRA.2018.2808541.

[5] S. Leutenegger *et al.*, "Flying robots," in *Proc. Springer Handbook Robot.*, B. Siciliano and O. Khatib, Eds. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2016, pp. 623–669.

[6] Xilun DING, Pin GUO, Kun XU, Yushu YU, "A review of aerial manipulation of small-scale rotorcraft unmanned robotic systems", *Chinese Journal of Aeronautics*, Volume 32, Issue 1, 2019, Pages 200-214, ISSN 1000-9361, <https://doi.org/10.1016/j.cja.2018.05.012>.

[7] A. Ollero, M. Tognon, A. Suarez, D. Lee and A. Franchi, "Past, Present, and Future of Aerial Robotic Manipulators," in *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 38, no. 1, pp. 626-645, Feb. 2022, doi: 10.1109/TRO.2021.3084395.

[8] AlAkhras, A.; Sattar, I.H.; Alvi, M.; Qanbar, M.W.; Jaradat, M.A.; Alkaddour, M. The Design of a Lightweight Cable Aerial Manipulator with a CoG Compensation Mechanism for Construction Inspection Purposes. *Appl. Sci.* **2022**, *12*, 1173. <https://doi.org/10.3390/app12031173>

[9] Suarez, A.; Perez, M.; Heredia, G.; Ollero, A. "Cartesian Aerial Manipulator with Compliant Arm" *Appl. Sci.* 2021, *11*, 1001. <https://doi.org/10.3390/app11031001>

[10] G. Heredia et al., "Control of a multicopter outdoor aerial manipulator," *2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2014, pp. 3417-3422, doi: 10.1109/IROS.2014.6943038.

- [11] Salih, Atheer & Moghavvemi, Mahmoud & Mohamed, Haider & Gaeid, Khalaf. (2010). "Flight PID controller design for a UAV quadrotor". Scientific research and essays. 5. 3660-3667.
- [12] Suarez, A.; Sanchez-Cuevas, P.J.; Heredia, G.; Ollero, A. Aerial Physical Interaction in Grabbing Conditions with Lightweight and Compliant Dual Arms. *Appl. Sci.* **2020**, *10*, 8927. <https://doi.org/10.3390/app10248927>
- [13] E. Rossetto, "Interazione dinamica tra moto del manipolatore e dell'UAV nella manipolazione aerea", Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale, Università degli studi di Padova, a.a. 2019-2020, Relatori: A. Doria, S. Cocuzza.
- [14] S. Cocuzza, E. Rossetto and A. Doria, "Dynamic interaction between robot and UAV in aerial manipulation," 2020 19th International Conference on Mechatronics - Mechatronika (ME), 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/ME49197.2020.9286694.
- [15] Cocuzza, S., Doria, A. (2021). Modeling and Identification of Vibrations in a UAV for Aerial Manipulation. In: Niola, V., Gasparetto, A. (eds) Advances in Italian Mechanism Science. IFToMM ITALY 2020. Mechanisms and Machine Science, vol 91. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-55807-9\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-030-55807-9_21)
- [16] T. Baca, M. Petrlik, M. Vrba, V. Spurny, R. Penicka, D. Hert, and M. Saska, "The MRS UAV system: Pushing the frontiers of reproducible research, real-world deployment, and education with autonomous unmanned aerial vehicles," 2020, arXiv:2008.08050. [Online]. <http://arxiv.org/abs/2008.08050>
- [17] Pierre-Jean Bristeau, François Callou, David Vissière, Nicolas Petit. "The Navigation and Control Technology Inside the AR.Drone Micro UAV". *18th IFAC World Congress*, Aug 2011, Milano, Italy. pp.1477-1484
- [18] T. Baca, D. Hert, G. Loianno, M. Saska and V. Kumar, "Model Predictive Trajectory Tracking and Collision Avoidance for Reliable Outdoor Deployment of Unmanned Aerial Vehicles," 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2018, pp. 6753-6760, doi: 10.1109/IROS.2018.8594266.
- [19] ws Abdulsalam Najm, Ibraheem Kasim Ibraheem, "Nonlinear PID controller design for a 6-DOF UAV quadrotor system", Engineering Science and Technology, an International Journal, Volume 22, Issue 4, 2019, Pages 1087-1097, ISSN 2215-0986, <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2019.02.005>.

[20] A. Coglievina, "Controllo di un quadricottero per trasporto di carichi ignoti", Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria dell'Automazione, Università degli studi di Padova, a.a. 2014-2015, Relatore: A. Cenedese

[21] [https://docs.px4.io/v1.12/en/flight\\_stack/controller\\_diagrams.html](https://docs.px4.io/v1.12/en/flight_stack/controller_diagrams.html)

[22] [https://docs.px4.io/v1.12/en/getting\\_started/flight\\_modes.html](https://docs.px4.io/v1.12/en/getting_started/flight_modes.html)

[23] Hossein Bonyan Khamseh, Farrokh Janabi-Sharifi, Abdelkader Abdessameud, Aerial manipulation—A literature survey, *Robotics and Autonomous Systems*, Volume 107, 2018, Pages 221-235, ISSN 0921-8890, <https://doi.org/10.1016/j.robot.2018.06.012>.

[24] A. E. Jimenez-Cano, J. Martin, G. Heredia, A. Ollero and R. Cano, "Control of an aerial robot with multi-link arm for assembly tasks," 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2013, pp. 4916-4921, doi: 10.1109/ICRA.2013.6631279.

[25] Bruno Siciliano, Lorenzo Sciavicco, Luigi Villani, and Giuseppe Oriolo. "Robotics: modelling, planning and control". Springer Science & Business Media, 2010.

[26] Nenchev, Dragomir N.. "Redundancy resolution through local optimization: A review." *J. Field Robotics* 6 (1989): 769-798.

[27] Y. Umetani and K. Yoshida, "Resolved motion rate control of space manipulators with generalized Jacobian matrix," in *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 5, no. 3, pp. 303-314, June 1989, doi: 10.1109/70.34766.

[28] S. Cocuzza, I. Pretto, S. Debei, "Reaction torque control of redundant space robotic systems for orbital maintenance and simulated microgravity tests", *Acta Astronautica*, Volume 67, Issues 3–4, 2010, Pages 285-295, ISSN 0094-5765, <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2009.05.007>.

[29] C. Menon, A. Aboudan, S. Cocuzza, A. Bulgarelli, and F. Angrilli, "Free-Flying Robot Tested on Parabolic Flights: Kinematic Control", *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* 2005 28:4, 623-630

[30] Fabrizio Caccavale & Bruno Siciliano (2001) "Kinematic control of redundant free-floating robotic systems", *Advanced Robotics*, 15:4, 429-448, DOI: 10.1163/156855301750398347

[31] F. Ruggiero et al., "A multilayer control for multicopter UAVs equipped with a servo robot arm," 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2015, pp. 4014-4020, doi: 10.1109/ICRA.2015.7139760.

[32] A.Noordin, M. A. M. Basri, Z. Mohamed, "Simulation and experimental study on PID control of a quadrotor MAV with perturbation". **Bulletin of Electrical Engineering and Informatics**, [S.l.], v. 9, n. 5, p. 1811-1818, oct. 2020. ISSN 2302-9285. Available at: <<https://beei.org/index.php/EEI/article/view/2158>>.

[33] [Quadcopter Project - MATLAB & Simulink - MathWorks Italia](#)

[34] [AR.Drone 2.0 Support from Embedded Coder - File Exchange - MATLAB Central \(mathworks.com\)](#)



## APPENDICI:

### A.1 Script Matlab per la risoluzione della cinematica inversa con Jacobiano esteso, sollevamento di un carico da supporto elastico

```
clear; clc
close all

global BB SE SS S0 J_type Qe Qi
global cc ce c0
global m0 m mass inertia0 inertia
global num_q Ez d_time
global Gravity

num_q=3; %numero giunti

%PARAMETRI UAM (caso piano)
m1=1.000; m2=1.000; m3=1.000; muav=4.2; %masse link1, link2, link3, UAV
a1=0.065; a2=0.065; a3=0.065; %semilunghezze link(baricentri al centro
dei link)
Ig1=6e-4; Ig2=6e-4; Ig3=6e-4; %momenti inerzia baricentrici link
Iguav=0.4097; %momento inerzia baricentrico UAV
dx=0; dy=0;

q1=-pi/6; q2=2*pi/3; q3=-2*pi/3; %condizioni iniziali equilibrio( dx=0)
%q1=-pi/2; q2=2*pi/3; q3=2*pi/3; %condizioni iniziali equilibrio( dx=a)
%q1=-pi*0.5; q2=+pi*0.8; q3=-1.3837; %condizioni iniziali equilibrio( dx=a)
%q1=-pi/4; q2=pi/2; q3=asin(2^(1/2)-3/2)-pi/4; %condizioni iniziali equilibrio( dx=a/2)

d_time=0.001; %timestep simulazione

% PARAMETRI FORZE
g= -9.81; %accelerazione gravità
kc=1000; %rigidezza del contatto tra carico e terreno

kp_y=37; ki_y=8; kd_y=18; %controllo PID altitudine
kp_rz=40; ki_rz=35; kd_rz=9/3; %controllo PID rollio

p=[0 0 0]'; K=[0 0 0]'; % QdM e momento angolare rispetto Guav iniziali

%traiettoria standard
param.traj.type='cerchio';
param.traj.diam=0.1;
param.traj.T=30;
param.traj.angle=-pi-pi/4;
param.traj.angle_1=-pi;
param.traj.angle_2=0;
param.traj.maxq=[1 1 1]*10*pi;
param.traj.maxqd=100;
param.traj.EEvel=0.06;

%traiettoria custom: definita con velocità
custom_traj=1; %usare traiettoria custom?
f=12;
time=0:d_time:30;
```

```

ve_x=[0 0 v_smooth2(time(3:1.5/dt),0.55, 0.08) zeros(1,0.5/dt) . . .
v_smooth2(time(2/dt+1:(18)/dt),0.4, -0.08/5) zeros(1,f/dt)];

ve_y=[0 0 v_smooth2(time(3:1.5/dt),0.55,-0.12 ) zeros(1,0.5/dt) . . .
v_smooth2(time(2/dt+1:(18)/dt),0.4, 0.12/5) zeros(1,f/dt)];

ve_x=ve_x+ [zeros(1,9/dt) v_smooth2(time(9/dt+1:(18)/dt),0.4, -0.08*4/5)
zeros(1,f/dt) ];
ve_y=ve_y+ [zeros(1,9/dt) v_smooth2(time(9/dt+1:(18)/dt),0.4, 0.12*4/5)
zeros(1,f/dt) ];

m_load=0.5; %massa del carico
t_load=1.6; %istante presa carico

%animazione
max_asse=0.4; %dimensione plot
dt_animation=0.05; %intervallo animazione
OUTPUT_FILE=0; %generare output files?
file_pref='Jext_Load'; %prefisso nome files

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% define manipulator
param.sim.dt=d_time;
param.sim.T=param.traj.T;

% Unit vector in z-axis
Ez = [0;0;1];

%connection index
BB = [0 1 2];

%incidence matrix of directed graph
SS = SS_(BB);

%incidence matrix of directed graph for body 0
S0 = S0_(BB);

%incidence matrix of directed graph for end-links
SE = [0 0 1]; %=1 se link è terminal link

%joint type
J_type = [ 'R' 'R' 'R'];

%link vector: from centroid of link 0 to joint i
c0 = [[dx dy 0]' zeros(3,num_q-1)]; %3 x n

%link vector: from centroid of link i to end-point
ce = [zeros(3,num_q-1) [0 -a3 0]'];

%link 0 (base) inertia tensor and mass
inertia0 = diag([1;1;1])*Iguav; %(nel caso piano viene utilizzata solo Igz)
m0 = muav;

%links inertia tensor and mass
inertia = [ diag([Ig1;Ig1;Ig1]) diag([Ig2;Ig2;Ig2]) diag([Ig3;Ig3;Ig3])];
m = [ m1 m2 m3];

%total mass
mass = sum(m) + m0;

%roll pitch yaw angles from link 0 to i
Qi = [ [0;0;0] [0;0;0] [0;0;0]];

%position&orientation of end-points
Qe = zeros(3,3);

```

```

% link vector: from centroid of link i to joint j
cc = zeros(3,6,6);
cc(:,1,1) = [ 0 a1 0 ]';
cc(:,1,2) = [ 0 -a1 0 ]';
cc(:,2,2) = [ 0 a2 0 ]';
cc(:,2,3) = [ 0 -a2 0 ]';
cc(:,3,3) = [ 0 a3 0 ]';

% Initialize joint variables
q = [q1 q2 q3]'; qd = zeros(num_q,1); qdd = zeros(num_q,1);
% Initialize base velocity
v0 = [ 0 0 0 ]'; w0 = [ 0 0 0 ]';
% Initialize links velocity
vv = zeros(3,6); ww = zeros(3,6);
% Initialize base position&orientation
R0 = [ 0 0 0 ]'; A0 = eye(3,3); Q0 = [ 0 0 0 ]';

% Initialize force/torque
Fe = zeros(3,6); Te = zeros(3,6); %on end-points
F0 = [ 0 0 0 ]'; T0 = [ 0 0 0 ]'; %on base
tau = zeros(6,1); %joint

Gravity = [ 0 g 0 ]';

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% CINEMATICA INVERSA
time=0:d_time:param.sim.T;

% creazione traiettoria: determina posizione e angoli dei link
AA=calc_aa( A0 , q);
RR=calc_pos( R0, A0, AA, q);
[ initial_pos_EE , ORI_e ] = f_kin_e( RR, AA, j_num(1) );

if custom_traj==1
    U = mk_custom_trajectory_ff(initial_pos_EE,time,v);
else
    U = mk_trajectory_ff(param,initial_pos_EE);
end
lung = size(U.times,1);

% quota terreno tale che il carico si trova in equilibrio
% nella posizione in cui viene prelevato dall'EE
y_load=U.x_des(2,find(U.times==t_load));
Y0=y_load-m_load*g/kc;
if m_load==0; % non mostrare il terreno
    Y0=Y0-1000;
end

%inizializza variabili da salvare
pos_EE_save=zeros(3,lung); v_EE_save=zeros(6,lung); error_v=zeros(2,lung);
qd_save=zeros(num_q,lung); q_save=zeros(num_q,lung); qdd_save=zeros(num_q,lung);
R0_save=zeros(3,lung); rot_z_save=zeros(1,lung); v_base_save=zeros(6,lung);
U1_uav_save=zeros(1,lung); U2_uav_save=zeros(1,lung);
F_load_save=zeros(1,lung); F_load_con_save=zeros(1,lung);
F_load_acc_save=zeros(3,lung); ForceQ=zeros(num_q+6,lung);
last_draw=0;

[pos_EE_save(:,1) , ~ ] = f_kin_e( RR, AA, j_num(1) );
p_save=zeros(3,lung); K_save=zeros(3,lung);
p_save(:,1)=p; K_save(:,1)=K;

```

```

%inizializza variabili attuali
A0_prec=A0; R0_prec=R0; v_base_prec=[v0;w0];
q_prec=q; qd_prec=qd; p_prec=p; K_prec=K; K_man_prec=[0 0 0]';
acc_EE_prec=zeros(6,1); pos_EE=initial_pos_EE;

%%%%%%%%%%%%%% INIZIO DEL LOOP %%%%%%%%%%%%%%%
for k = 2:lung
    %velocità desiderata
    xd_EE=U.x_des_d(1:2,k);

    %angoli e posizioni dei vari elementi
    AA=calc_aa( A0_prec , q_prec );
    RR=calc_pos( R0_prec, A0_prec, AA, q_prec);

    % HH e sue sottomatrici
    HH = calc_hh( R0_prec, RR, A0_prec, AA );
    Hbm=HH(1:6,7:6+num_q);
    Hb=HH(1:6,1:6);

    % Jacobiano: non mi interessa l'orientazione e posZ dell'EE nella cinematica inversa
    [GJ,Js] = calc_gj( R0_prec, RR, A0_prec, AA, q_prec, 1 );
    GJcompl=GJ; Jscompl=Js; % matrici complete
    GJ(3:6,:)=[]; Js=Js(1:2,:); % matrici cinematica inversa
    % Jacobiano che lega v_base e qd
    Jbase= -Hb^-1*Hbm;

    %% EFFETTO FORZE ESTERNE %%%%%%%%%%%%%%%
    %gravità
    Rg=(m0*R0+sum(m.*RR,2))/mass; %baricentro del sistema
    Fg= [0;mass*g;0];
    TAUg=cross(Rg-R0,Fg);

    %controllo PID rollio
    RPY_prec=dc2rpy(A0_prec);
    rot_z_prec=-RPY_prec(3);
    U2=[0;0; kp_rz*(0-rot_z_prec) + kd_rz*(0-v_base_prec(6)) + . . .
        ki_rz*(0-sum(rot_z_save(1:k-1))*d_time)];

    %controllo PID altitudine
    U1_uav= (kp_y*(0-R0_prec(2)) + kd_y*(0-v_base_prec(2)) + . . .
        ki_y*(0-sum(R0_save(2,1:k-1))*d_time)-mass*g;
    U1=A0_prec*[0 U1_uav 0]'; % U1_uav è espresso nella terna solidale al drone

    %carico con contatto sul terreno e forze d'inerzia
    F_load_acc= -m_load*acc_EE_prec(1:3);
    F_load_con=contatto(kc,Y0,pos_EE);
    F_load= F_load_acc + F_load_con + [0 m_load*g 0]';
    if (k-1)*d_time<t_load
        F_load=[0 0 0]'; F_load_acc=[0 0 0]'; F_load_con=[0 0 0]';
    end

    % incremento di QdM e momento angolare rispetto baricentro drone
    p= p_prec + (U1+Fg+F_load)*d_time;
    K= K_prec + ( -cross(v_base_prec(1:3),p_prec)+ TAUg+U2+cross((pos_EE-. . .
        R0),F_load))*d_time;

    %%%%%%%%%%%%%%%
    %% EQUAZIONE AGGIUNTIVA COPPIA su UAV %%%%%%%%%%%%%%%
    % velocità del polo=Guav; QdM del manipolatore
    v0= v_base_prec(1:3);
    p_man= p - m0*v_base_prec(1:3);

```

```

%%
%% coppie sul manipolatore (polo Guav)
Rg_man= sum(m.*RR,2)/sum(m); %baricentro manipolatore
TAUg_man= cross(Rg_man-R0, [0; sum(m)*g; 0]); %coppia gravità
TAUee_man= cross(pos_EE-R0, F_load); %coppia carico su EE

%% incremento momento angolare del manipolatore per forze esterne
K_man= K_man_prec - cross(v0,p_man)*d_time + (TAUg_man+TAUee_man)*d_time;

%% matrice d'inerzia del manipolatore (modifica temporanea di global variables)
mass=mass-m0; m0=0; inertia0=inertia0*0;
HH_man= calc_hh( R0_prec, RR, A0_prec, AA ); riga=6;
m0 = muav; mass=mass+m0; inertia0 = diag([1;1;1])*Iguav;
Hm_man=HH_man(riga,7:end); % parte relativa a qd
Hb_man=HH_man(riga,1:6); % parte relativa a v_base

%%
%%
%%
%%Jacobiano esteso e termine noto
Jext= [ GJ ; ( Hb_man*Jbase+ Hm_man ) ];
Vext= [(xd_EE - Js*(Hb^-1)*[p;K]); ( K_man(3)-Hb_man*Hb^-1*[p;K] ) ];

%% risoluzione cinematica inversa
qd= Jext\Vext;

%%check
vreal= GJ*qd+ Js*(Hb^-1)*[p;K]; error_v(:,k)=vreal-xd_EE;
if (norm((vreal-xd_EE))>0.005*norm(xd_EE)&&norm(xd_EE)~=0)
    disp('!! errore velocità > 0.5% a t:'); disp(k*d_time);
elseif (norm((vreal))>0.001&&norm(xd_EE)==0)
    disp('!! errore velocità > 1 mm/s a t:'); disp(k*d_time);
end

%% accelerazione dell'EE per calcolo F_load
acc_EE=zeros(6,1);
acc_EE(1)=U.x_des_dd(1,k); acc_EE(2)=U.x_des_dd(2,k); acc_EE(3)=0;

%% movimenti della base
v_base= Jbase*qd_prec + Hb^-1*[p;K]; %velocità lineari e angolari base
A0= aw( v_base(4:6) ) * A0_prec; %si aggiorna A0 con Rodrigues formula
R0= R0_prec + v_base(1:3)*d_time;

%%DINAMICA per calcolo coppia dei joint
%%accelerazioni base
vd_base= (v_base-v_base_prec)/d_time;
%%accelerazioni joint
qdd=(qd-qd_prec)/d_time;
%%forze/coppie end point
Fe=[zeros(3,num_q-1) F_load]; Te=[zeros(3,num_q-1) [0;0;0]];
ForceQ(:,k)= r_ne_Fext( . . .
A0,AA,v_base(1:3),v_base(4:6),vd_base(1:3),vd_base(4:6),q,qd,qdd,Fe,Te,U1,U2);
%ForceQ(7) è la coppia sul primo joint, ForceQ(6) la coppia complessiva sull'UAV

%%
%%
%%
%% update variabili
qd_prec=qd; q_prec=q;
A0_prec=A0; R0_prec=R0;
v_base_prec=v_base;
p_prec=p; K_prec=K; K_man_prec=K_man;
[pos_EE , or_EE ] = f_kin_e( RR, AA, j_num(1) );
acc_EE_prec=acc_EE;

%% salvataggio

```

```

qd_save(:,k)=qd; q_save(:,k)=q; qdd_save(:,k)=qdd;
rot_z_save(k)=rot_z_prec;
R0_save(:,k)=R0_prec;
U1_uav_save(k)=U1_uav; U2_uav_save(k)=U2(3);
pos_EE_save(:,k)=pos_EE;
p_save(:,k)=p; K_save(:,k)=K;
v_base_save(:,k)=v_base_prec;
F_load_save(k)=F_load(2); F_load_con_save(k)=F_load_con(2);
F_load_acc_save(:,k)=F_load_acc;

%plot configurazione UAM
if k*d_time-last_draw>=dt_animation||k==lung
figure(5); if last_draw==0; clf(5); end
% ld on
draw_ff_2D(A0,R0,q,5,max_asse,0.5); hold on;
plot([-1 1],[Y0 Y0], 'k-'); % superficie contatto
plot(Rg_man(1),Rg_man(2), '*b') % baricentro manipolatore

hold off
text(-0.38, 0.18, num2str(d_time*k, 'time: %.2f s'))

last_draw=k*d_time;
end

end

%% FINE DEL LOOP

%% PLOT
errore_EE=U.x_des(1:2,:)-pos_EE_save(1:2,:); %errore di posizione EE

% posizione e orientazione drone
figure(1);
subplot(211); hold on; plot(time,R0_save); grid on
xlabel('t[s]'); ylabel('[m]'); title("spostamenti dell'UAV"); legend('x','y','z');
subplot(212); hold on; plot(time,rot_z_save*180/pi); grid on
xlabel('t[s]'); ylabel('[deg]'); title("rotazione dell'UAV")

% errore EE
figure(2); hold on; plot(time,errore_EE);
ylabel('[m]'); title('errore EE'); legend('x','y')

%QdM e momento angolare
figure(3); hold on
subplot(121); plot(time,p_save);legend('p_x','p_y','p_z');
subplot(122); plot(time,K_save);legend('K_x','K_y','K_z');

%controlli
figure(4); hold on; grid on; title('CONTROLLI MANIPOLATORE')
plot(time,q_save);legend('q1','q2','q3'); xlabel('t[s]'); ylabel('[rad]')

%forza EE
figure(6); hold on; title('CARICO')
subplot(211); plot(time,F_load_save);hold on; plot(time,F_load_con_save);
legend('Forza totale', 'Forza contatto');
subplot(212); plot(time,F_load_acc_save);legend('F acc X','F acc Y','F acc Z');

%controlli drone
figure(7); hold on; yyaxis left; grid on
plot(time(2:end),U1_uav_save(2:end)); ylabel('N')
yyaxis right; ylabel('Nm')
plot(time(2:end),U2_uav_save(2:end)); legend('U_1','U_2')
xlabel('t[s]')

figure(8); hold on

```

```

if dx==0&&dy==0
plot(time,ForceQ(7,:));
title('coppia tra UAV e manipolatore');% con r-ne')
else
plot(time,ForceQ(6,:)-(U2_uav_save(:)'));
title('coppia sul UAV dovuta a manipolatore con r-ne')
end
xlabel('t[s]'); ylabel('[Nm]')

if OUTPUT_FILE %genera *.txt di velocità end effector e q
fid=fopen(strcat(file_pref, '_EE.txt'),'w');

fprintf(fid, 'time\ttarget_Vx\ttarget_Vy\n');
fprintf(fid, '%.6e\t%.6e\t%.6e\n',[time;U.x_des_d(1:2,:)]);

fclose(fid);

fid=fopen(strcat(file_pref, '_j.txt'),'w');
fprintf(fid, 'time\tqdot1\tqdot2\tqdot3\n');
fprintf(fid, '%.6e\t%.6e\t%.6e\t%.6e\n',[time;qd_save]);
fclose(fid);

end

```

ELENCO DELLE FUNCTIONS	
<code>v=v_smooth2(time,ta,s)</code>	restituisce un vettore contenente un profilo di velocità con accelerazione continua, durata <i>time(end)</i> , tempo di accelerazione <i>ta</i> , spostamento complessivo <i>s</i>
<code>AA=calc_aa( A0 , q);</code>	restituisce matrici di rotazione delle terne solidali a ciascun link a partire dalla matrice di rotazione della terna base e dalle coordinate di giunto
<code>RR=calc_pos( R0, A0, AA, q);</code>	restituisce le posizioni ciascun link a partire dalla posizione della base, dalla sua orientazione e dalle coordinate di giunto
<code>[pos , ori] = f_kin_e ( RR, AA, joints );</code>	risolve la cinematica diretta del manipolatore calcolando la posizione/orientazione del punto specificato dal vettore <i>joints</i>
<code>U = mk_custom_trajectory (initial_pos_EE,time,v)</code>	restituisce l'oggetto U che contiene posizioni, velocità, accelerazioni dell'end effector nel tempo a partire dalla sua posizione iniziale e dai profili di velocità assegnati
<code>U = mk_trajectory_ff (param,initial_pos_EE)</code>	restituisce l'oggetto U che contiene posizioni, velocità, accelerazioni dell'end effector nel tempo a partire dai parametri della traiettoria in <i>param</i> e dalla posizione iniziale dell'end effector
<code>[GJ,Js] = calc_gj (R0, RR, A0, AA, q );</code>	restituisce lo Jacobiano generalizzato del sistema ( <i>GJ</i> ) e quello che lega velocità dell'end effector con velocità della base ( <i>Js</i> ) a partire da posizione ( <i>R0</i> ) e orientazione ( <i>A0</i> ) della base, posizioni ( <i>RR</i> ) e orientazioni ( <i>AA</i> ) dei link e dalle variabili di giunto <i>q</i>
<code>HH = calc_hh( R0, RR, A0, AA )</code>	restituisce la matrice d'inerzia aumentata $(6+num\_q) \times (6+num\_q)$ dell'UAM
<code>F =contatto(kc,Y0,Y)</code>	restituisce la forza di contatto in direzione y: $F=[0; \max(0,kc(Y-Y0)); 0]$

<code>Force = r_ne_Fext( A0, AA, v0,w0,vd0,wd0,q,qd,qdd, Fe,Te ,F0,T0 );</code>	risolve la dinamica inversa del manipolatore con il metodo ricorsivo di Newton-Eulero considerando le forze/coppie agenti sui link ( $F_e, T_e$ ), sulla base ( $F_0, T_0$ ), le velocità/accelerazioni lineari/angolari ( $v_0, w_0, v_{d0}, w_{d0}$ ) della base e dei giunti ( $q, q_d, q_{dd}$ )
<code>draw_ff_2D (A0,R0,q,n_f)</code>	nella figura $n_f$ crea un grafico conche rappresenta l'UAM a partire da posizione e orientazione della base e dalle variabili di giunto

## A.2 Parametri del controllo PID di multicotteri

Dai parametri raccolti di seguito sono stati estrapolati i parametri del controllo *PID morbido*.

DESCRIZIONE	PARAMETRI INERZIA (unità SI)		PARAMETRI PID (unità SI)			FONTE	
			Kp	Ki	Kd		
controllo PID sulle forze per minidrone Parrot, simulazioni Simulink e esperimenti reali	m	6.30E-02	altitude	0.8	0.24	0.5	[32]
	lx (roll)	5.83E-05	roll	0.011	0.01	0.0028	
	ly (pitch)	7.17E-05	pitch	0.013	0.01	0.002	
	lz (yaw)	1.00E-04	yaw	0.004	0.02	0.012	
controllo PID sulle forze, simulazioni Simulink	m	9.64E-01	altitude	184.02	103.73	225	[19]
	lx (roll)	8.55E-03	roll	0.88	0.9	0.3	
	ly (pitch)	8.53E-03	pitch	0.62	0.81	0.05	
	lz (yaw)	1.48E-02	yaw	0.99	0.49	0.56	
controllo PID sulle velocità angolari dei motori, simulazioni Simulink	m	4.58E-01	altitude	0.593	0.067	0.033	[20]
	lx (roll)	5.90E-03	roll	6.56	0	0.102	
	ly (pitch)	6.99E-03	pitch				
	lz (yaw)	1.17E-02	yaw				
controllo PID sulle forze, esempio Simulink su minidrone Parrot	m	6.30E-02	altitude	0.8	0	0.3	[33]
	lx (roll)	5.83E-05	roll	0.013	0.01	0.002	
	ly (pitch)	7.17E-05	pitch	0.01	0.01	0.0028	
	lz (yaw)	1.00E-04	yaw				
controllo PID sulle velocità angolari dei motori, esempio Simulink su ARDrone 2.0 con taratura parametri	m	4.58E-01	altitude				[34]
	lx (roll)	5.90E-03	roll	1.169	0.221	0.219	
	ly (pitch)	6.99E-03	pitch	0.844	0.221	0.219	
	lz (yaw)	1.17E-02	yaw				