



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Industriale DII

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Tesi di laurea magistrale

Metodi per il posizionamento preciso di manipolatori robotici aerei
basati sulla dinamica UAV-manipolatore

Methods for the precise positioning of aerial robotic manipulators
based on the UAV-manipulator dynamics

Relatore

Prof. Silvio Cocuzza

Studente

Magrini Alessandro

1233964

Anno Accademico 2021/2022

ABSTRACT

In questa tesi vengono proposti alcuni metodi per il controllo della posizione di un manipolatore aereo utilizzando il moto di un braccio robotico ad 1 grado di libertà.

Viene dapprima introdotta la dinamica degli UAV (Unmanned Aerial Vehicle), evidenziando le caratteristiche e le problematiche del controllo che viene usato nel caso preso in esame (hovering flight).

Poi si analizza, ricorrendo all'uso del software Adams per le simulazioni multibody, il moto del manipolatore aereo, ed in particolare la sua posizione, velocità, accelerazione e le forze agenti su di esso al variare del moto imposto al braccio.

Sono stati analizzati tre casi che differiscono per il moto del braccio. Il primo è una rotazione nel piano del manipolatore, partendo da posizione verticale, fino a un certo angolo con ritorno in posizione iniziale. Il secondo moto imposto al braccio è una rotazione nel piano del manipolatore, partendo da posizione verticale, fino a un certo angolo nel piano del moto del manipolatore. Mentre nell'ultimo caso il braccio compie una rotazione completa a velocità angolare costante nel piano del manipolatore.

Inizialmente, è stato considerato un controllo ideale, in cui le risposte del controllo all'errore di posizione sono istantanee, e, successivamente, è stato considerato un controllo reale. Per ognuno di questi casi si è studiato il moto dell'UAV al variare dei parametri che ne governano il controllo in hovering.

Infine, vengono proposti e validati tramite simulazione dinamica dei metodi per controllare la posizione del drone tramite il movimento controllato del braccio.

SOMMARIO

- Sezione 1 è un'introduzione ai manipolatori aerei (UAV) e al loro uso comune. Verrà introdotta la dinamica degli UAV e le caratteristiche del loro moto lungo le direzioni x , y , z e le rotazioni di imbardata, beccheggio e rollio. Inoltre, è esposto il tipo di controllo usato per il manipolatore aereo preso in esame; vengono presentate le equazioni che governano il controllo, le sue caratteristiche, i parametri e le problematiche ad esso legate. Infine, viene mostrato come creare un controllo in Adams, software usato per effettuare le simulazioni descritte nelle sezioni seguenti.
- In sezione 2, si considera il seguente moto del braccio: una rotazione nel piano del manipolatore, partendo da posizione verticale, fino a un certo angolo con ritorno in posizione iniziale. Si analizzano la posizione, velocità, accelerazione, le forze agenti sul manipolatore, prima considerando un controllo ideale, cioè con risposte istantanee all'errore e poi, considerando un controllo reale, variando i parametri del controllo.
- In sezione 3, il moto del braccio è una rotazione nel piano del manipolatore, partendo da posizione verticale, fino a un certo angolo nel piano del moto del manipolatore. Si analizzano la posizione, velocità, accelerazione, le forze agenti sul manipolatore, prima considerando un controllo ideale, e poi considerando un controllo reale, variando i parametri del controllo.
- In sezione 4, il moto del braccio, dopo un transitorio iniziale in cui il braccio parte da fermo e accelera, è una rotazione a velocità angolare costante nel piano del manipolatore. Si analizzano la posizione, velocità, accelerazione, le forze agenti sul manipolatore, prima considerando un controllo ideale, e poi considerando un controllo reale, variando i parametri del controllo.
- In sezione 5, prendendo in considerazione i tre casi descritti nelle sezioni precedenti, vengono proposti metodi per il controllo della posizione e della velocità del manipolatore controllando il movimento del braccio.

INDICE

1	INTRODUZIONE	9
1.1	DINAMICA UAV	10
1.2	CONTROLLO	11
1.2.1	Controllo PID su Adams	13
1.3	DATI UAV E BRACCIO	16
1.4	MODELLO ADAMS.....	17
1.5	PARAMETRI PID USATI NELLA SIMULAZIONE	18
2	MOTO DEL BRACCIO DI ANDATA E RITORNO.....	20
2.1	CONTROLLO IDEALE	22
2.2	CONTROLLO PID CON VALORI DEI PARAMETRI ALTI	24
2.2.1	Caso particolare: $K_i = 0$	29
2.3	CONTROLLO PID CON VALORI DEI PARAMETRI BASSI.....	33
2.3.1	Caso particolare: $K_i = 0$	37
3	BRACCIO IN POSIZIONE AVANZATA	41
3.1	CONTROLLO IDEALE	43
3.2	CONTROLLO PID CON VALORE DEI PARAMETRI PID ALTI.....	45
3.2.1	Caso particolare: $K_i = 0$	49
3.3	CONTROLLO PID CON VALORE DEI PARAMETRI PID BASSI.....	53
3.3.1	Caso particolare: $K_i = 0$	57
4	BRACCIO ROTANTE.....	61
4.1	CONTROLLO IDEALE	63
4.2	CONTROLLO PID CON VALORE DEI PARAMETRI PID ALTI.....	65
4.2.1	Caso particolare: $K_i = 0$	68
4.3	CONTROLLO PID CON VALORE DEI PARAMETRI PID BASSI.....	71
4.3.1	Caso particolare: $K_i = 0$	73
5	CONTROLLO POSIZIONE	74
5.1	METODO 1 – MOTO “AVANTI-FERMO-INDIETRO”	74

5.1.1	Controllo con valori dei parametri PID alti.....	76
5.1.1.1	Caso particolare: $K_i=0$	78
5.1.2	Controllo con valori dei parametri PID bassi.....	80
5.1.2.1	Caso particolare: $K_i=0$	82
5.2	METODO 2 – MOTO “ACCELERATO-VELOCITA’ COSTANTE-DECELERATO”	84
5.2.1	Controllo con valori dei parametri PID alti e k_i nullo	86
5.2.2	Controllo con valori dei parametri PID bassi e k_i nullo	92
5.3	METODO 3 – MOTO “ACCELERATO-VELOCITA’ COSTANTE-DECELERATO”	93
5.3.1	Controllo con valori dei parametri PID alti.....	95
5.3.2	Controllo con valori dei parametri PID bassi.....	96
6	CONCLUSIONI.....	97
	BIBLIOGRAFIA	99

1 INTRODUZIONE

Un UAV (Unmanned Aerial Vehicle) è un velivolo caratterizzato dall'assenza di un pilota umano a bordo. Il suo volo e i suoi movimenti sono controllati da un computer a bordo del velivolo oppure tramite il controllo remoto di un navigatore o pilota, sul terreno o in altre posizioni.

Attualmente, sono impiegati per diversi scopi come ad esempio:

- Fotografia e videoriprese: gli UAV vengono utilizzati per effettuare riprese o fotografie aeree e in luoghi difficilmente accessibili [1].
- Ispezione, ricerca e salvataggio: questi velivoli possono raggiungere zone colpite da eventi catastrofici senza rischi per l'uomo; sono utili per effettuare ispezioni e aiutare a pianificare operazioni di salvataggio [2].
- Logistica e trasporti: gli UAV possono essere utilizzati da aziende per effettuare e velocizzare le consegne.
- Soccorso medico: questi dispositivi possono essere utilizzati, inoltre, per trasportare materiale sanitario velocemente, in caso di emergenza.
- Agricoltura: gli UAV sono utilizzati sia per il monitoraggio delle coltivazioni tramite analisi delle immagini sia per distribuire i fertilizzanti.
- Archeologia: questi dispositivi possono essere utilizzati per monitorare ed effettuare rilievi planimetrici su siti archeologici [3] [4].
- Manipolazione aerea: gli UAV possono essere equipaggiati con bracci robotici ed effettuare operazioni di manutenzione e assemblaggio sostituendo l'uomo [5].

Quest'ultimo ambito di utilizzo dei droni è diverso dalle precedenti.

In questo caso il velivolo deve interagire con l'ambiente scambiando forze e momenti con quest'ultimo tramite il braccio robotico.

Negli altri casi il velivolo aveva solo il compito di trasportare oggetti o di acquisire immagini o effettuare riprese senza interagire con l'ambiente esterno.

Una problematica di questo sistema la seguente: non è possibile controllare contemporaneamente tutti i sei gradi di libertà del velivolo, di conseguenza, la posizione del velivolo sarà influenzata e alterata dalle operazioni del braccio robotico.

L'elaborato si concentra su questo tipo di utilizzo degli UAV, più interessante dei precedenti.

Il sistema formato da UAV e braccio è detto UAM (Unmanned Aerial Manipulator).

Gli articoli [5],[6],[7],[8] danno una descrizione dello stato dell'arte attuale di questi sistemi.

1.1 DINAMICA UAV

L'UAV nel caso preso in esame è un ottocottero, ed è dotato appunto di otto eliche identiche azionate da motori elettrici. Per minimizzare l'effetto giroscopico quattro eliche girano in senso antiorario e quattro eliche girano in senso orario. Questo UAV, come la maggior parte degli UAV multi-rotore, è controllato agendo sulle velocità angolari delle eliche. Aumentando o diminuendo insieme le otto velocità angolari delle eliche cambia la portanza globale e il velivolo si muove lungo la direzione verticale. Aumentando la velocità angolare delle eliche 1, 2, 3, 4 e diminuendo della stessa quantità le velocità angolari delle eliche 5, 6, 7, 8 non cambia la forza verticale globale, ma si genera una coppia attorno all'asse x_b che controlla la rotazione di rollio (ϕ).

Inoltre, la stessa operazione eseguita sui seguenti diversi gruppi di eliche: 3, 4, 5, 6 e 1, 2, 7, 8 genera una coppia attorno all'asse y_b che controlla la rotazione di beccheggio (θ).

Infine, aumentare le velocità angolari delle quattro eliche che ruotano in senso orario e diminuire della stessa quantità la velocità angolare delle quattro eliche in rotazione in senso antiorario genera una coppia attorno all'asse z_b che controlla la rotazione di imbardata (ψ).

Le tre rotazioni (rollio, beccheggio, imbardata) concesse dal velivolo sono rappresentate in Figura 1, dove una linea più spessa significa un aumento della velocità angolare [9].

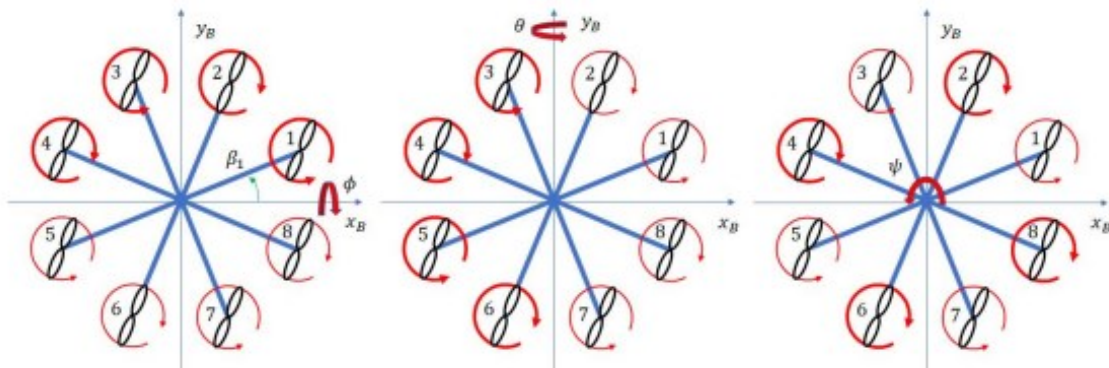


Figura 1: rollio, beccheggio e imbardata del velivolo [9]

1.2 CONTROLLO

L'UAV è sotto azionato, perché non c'è possibilità di generare direttamente le spinte nelle direzioni x e y: le rotazioni di rollio e di beccheggio alterano la direzione della spinta e rendono possibili i movimenti lungo le direzioni x e y.

Il controllo utilizzato per controllare la posizione verticale z e le rotazioni di rollio e di beccheggio è un controllo PID. Ulteriori tecniche di controllo sono presentate in [10], [11], [12].

L'azione di controllo PID è la seguente:

$$\Delta F = k_p e(t) + k_d \dot{e}(t) + k_i \int_0^t e(t) d\tau$$

Dove $e(t)$ è l'errore di posizione ed è definito come la differenza tra una posizione di riferimento e la posizione attuale:

$$e(t) = z(t)_{REF} - z(t) \quad o \quad e(t) = \theta(t)_{REF} - \theta(t) \quad o \quad e(t) = \phi(t)_{REF} - \phi(t)$$

I parametri K_p , K_d , K_i sono i guadagni del controllo.

Si chiama controllo PID in quanto l'azione di controllo è la somma di tre azioni: proporzionale, derivativa e integrativa.

- Il primo termine è il termine proporzionale, produce un comando proporzionale all'errore di posizione. È l'equivalente di una molla in un sistema meccanico. Porta prontezza al controllo; maggiore è il valore di K_p e maggiore è la prontezza del sistema alla risposta. Se si usasse il termine proporzionale da solo la risposta non sarebbe accettabile in termini di overshoot e tempo di assestamento.
- Il secondo termine è il termine derivativo, produce un comando proporzionale alla derivata dell'errore di posizione. È l'equivalente di uno smorzatore in un sistema meccanico. L'azione derivativa contrasta o aiuta l'azione in base al segno della derivata dell'errore; riduce la prontezza, porta stabilità e riduce l'overshoot. Con K_d alto, il tempo di assestamento aumenta e il sistema impiega molto tempo ad assestarsi alla posizione desiderata.
- Il terzo termine è il termine integrativo, produce un comando proporzionale all'integrale dell'errore di posizione. Non esiste un parallelo meccanico. L'azione integrativa rafforza l'azione proporzionale, aumentando l'overshoot e portando instabilità; deve essere quindi limitata. Questa azione serve per eliminare l'errore a regime.

Il sistema formato da drone e braccio è stato simulato in Adams; il modello è un modello 2D dove il controllo PID agisce sulla coordinata verticale z e sulla rotazione ϕ . La forza verticale generata dal controllo è chiamata U_1 , mentre la coppia che agirà sulla coordinata ϕ è chiamata U_2 , come mostrato in figura sotto.

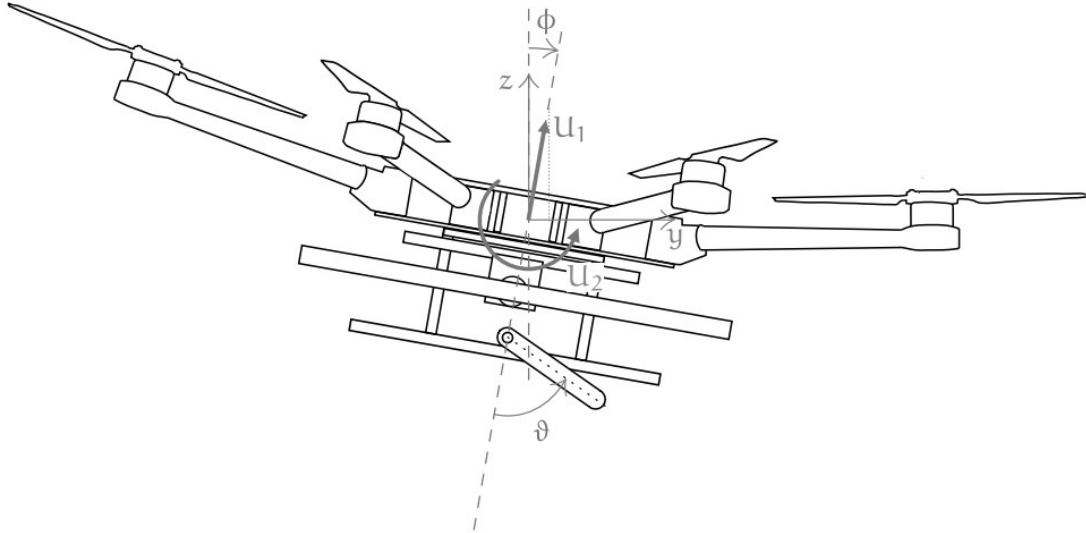


Figura 2: forze agenti sul drone

1.2.1 Controllo PID su Adams

Su Adams il riferimento è il seguente: Y è la coordinata verticale mentre la rotazione lungo Z è il rollio.

Dopo aver creato il modello del drone si seleziona “Control toolkit” sotto il box “Elements”, si creano per primi le “input functions” che in questo caso sono otto:

- Y effettiva: posizione effettiva in Y
- VY effettiva: velocità effettiva lungo Y
- AZ effettiva: rotazione effettiva lungo Z
- WZ effettiva: velocità angolare effettiva lungo Z
- Y desiderata: riferimento di posizione in Y
- VY desiderata: riferimento di velocità lungo Y
- AZ desiderata: riferimento di rotazione lungo Z
- WZ desiderata: riferimento di velocità angolare lungo Z

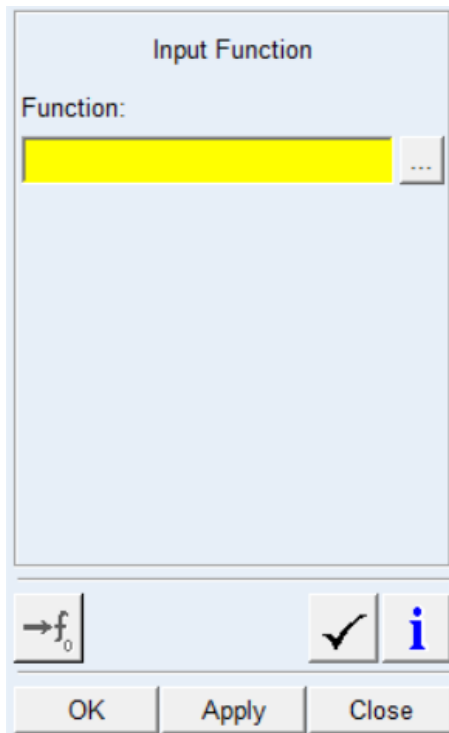


Figura 3: Input function block su Adams

Di conseguenza si creano quattro “summing junction”:

- Y: Y desiderata – Y effettiva
- VY: VY desiderata – VY effettiva
- Rollio: AZ desiderata – AZ effettiva
- Velocità di rollio: WZ desiderata – WZ effettiva

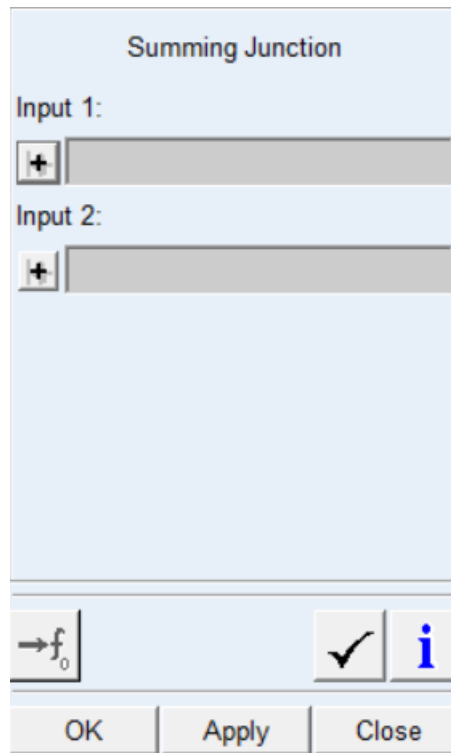


Figura 4: Summing junction block su Adams

Infine, si crea il controllo selezionando il blocco PID: “create a PID-controller block”.

Si devono creare due controlli differenti: uno per la forza U1 e uno per la coppia U2.

Per quanto riguarda la forza U1: sotto input andrà inserita la “summing junction” ‘Y’ e sotto derivative input va inserita la “summing junction” ‘VY’.

Per quanto riguarda la forza U2: sotto input andrà inserita la “summing junction” ‘rollio’ e sotto derivative input va inserita la “summing junction” ‘velocità di rollio’.

Negli spazi colorati di giallo in figura ci vanno inseriti i valori dei parametri o guadagni del controllo PID, ossia i valori di K_p , K_i , K_d . I parametri sono definiti per ogni forza o coppia di controllo agente sul sistema.

PID Controller

Input:

Derivative Input:

P Gain:

I Gain:

D Gain:

Initial Condition:

$\rightarrow f_0$

OK Apply Close

Figura 5: PID controller block su Adams

1.3 DATI UAV E BRACCIO

Dati di massa, inerzie, dimensioni dell'UAV e del braccio sono riassunti nelle tabelle sottostanti.

Massa UAV [kg]	Momento di inerzia attorno all'asse x_b [kgm ²]	Momento di inerzia attorno all'asse y_b [kgm ²]	Momento di inerzia attorno all'asse z_b [kgm ²]
4.2	0.4097	0.4097	0.3421

Tabella 1: parametri inerziali dell'UAV

Massa braccio [kg]	Lunghezza [m]	Momento di inerzia baricentrico [kgm ²]	Posizione centro di massa [m]
1	0.13	1.408	0.065

Tabella 2: parametri inerziali del braccio

Lo schema del sistema è rappresentato dalla figura sottostante:

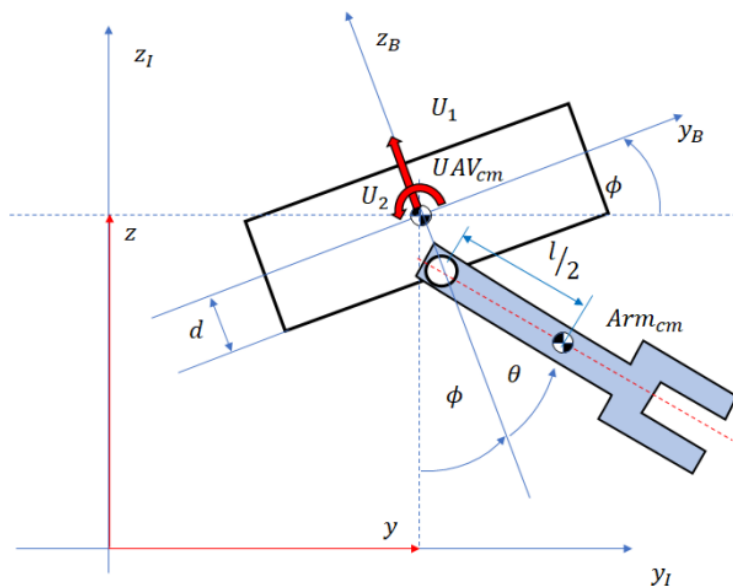


Figura 6: schema del sistema UAV + braccio [9]

1.4 MODELLO ADAMS

Le simulazioni sono effettuate su Adams. Nel software sono stati creati i due diversi “bodies”: UAV e braccio con i dati di inerzia e dimensioni descritti in precedenza. I due “bodies” sono collegati tra loro tramite un giunto rotazionale. Tramite questo vincolo saranno imposti diversi tipi di moto al braccio. Il sistema a questo punto ha 7 gradi di libertà: 6 gradi di libertà del drone (3 traslazioni e 3 rotazioni) in aggiunta al grado di libertà dato dalla rotazione relativa del braccio rispetto al drone.

Lo scopo di questo elaborato è quello di muovere in modo controllato il braccio e in base a questo cercare di controllare la posizione e la velocità del drone. Nel modello quindi la rotazione relativa del braccio rispetto al drone viene controllata con un “Motion”. Inoltre, viene applicato un vincolo planare al drone in modo da mantenere il moto nel piano. Infine, la rotazione di rollio e la traslazione verticale sono controllate dal controllo PID.

In questo modo è libera solo la coordinata x del drone.

1.5 PARAMETRI PID USATI NELLA SIMULAZIONE

I parametri del controllo PID forniti in relazione a questo UAV sono i seguenti:

	Kp	Kd	Ki
Y	1000	500	500
φ	600	30	500

Tabella 3: parametri PID alti

Visti i loro valori saranno chiamati: “parametri PID alti”.

Dato che lo scopo dell’elaborato è variare i parametri del controllo e metterli in relazione con il comportamento dell’UAV, sono stati usati altri parametri, oltre quelli forniti.

Tra gli articoli scientifici e tesi che riguardano UAV e il loro controllo sono stati presi in considerazione i parametri presenti in [13]. Il drone riguarda un UAV del peso di 63 grammi che, come nel caso preso sotto esame, ha come uscita del controllo ha una variazione di forza.

I parametri sono i seguenti:

	Kp	Kd	Ki
Y	0.8	0.5	0.24
φ	0.011	0.0028	0.01

Tabella 4: parametri PID [13]

Dato che l’uscita PID è un ΔF , si può fare una proporzione con le masse e le inerzie che dipende dalla coordinata su cui si sta lavorando.

Per la coordinata ϕ :

$$K_{proporzionato} = K_{articolo} * \frac{I_{drone}}{I_{drone articolo}}$$

Per la coordinata y:

$$K_{proporzionato} = K_{articolo} * \frac{M_{drone}}{M_{drone articolo}}$$

Risultano i seguenti parametri:

	Kp	Kd	Ki
Y	53	33	16
φ	74	11	57

Tabella 5: parametri PID bassi

Dati i loro valori saranno chiamati: “parametri PID bassi”.

Ci si potrebbe trovare in un caso diverso, in cui l’uscita del velivolo è una variazione di velocità angolare delle eliche. Per completezza, è riportato anche questo caso.

Lo scopo è trovare una relazione tra $\Delta\omega$ e ΔF .

La forza di lift, è legata alle velocità dalla seguente espressione, nel caso di un quadricottero:

$$F = k_f(\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_4^2) = 4k_f\omega^2$$

Si differenzia, così si vede in che relazione stanno dF e $d\omega$:

$$dF = 8k_f\omega d\omega$$

Dove la velocità angolare ω è tale da creare una forza di lift che eguaglia il peso:

$$4k_f\omega^2 = mg \rightarrow \omega = \sqrt{\frac{mg}{4k_f}}$$

Per quanto riguarda la coordinata y :

$$K_{proporzionato} = 8k_f\omega K_{articolo} * \frac{M_{drone}}{M_{drone\ articolo}}$$

Il momento che fa ruotare il drone lungo ϕ vale:

$$M = L * k_f * \omega_1^2 + L * k_f * \omega_2^2 = 2Lk_f\omega^2$$

Si differenzia, così si vede in che relazione stanno dM e $d\omega$:

$$dM = 4k_fL\omega d\omega$$

Per quanto riguarda la coordinata ϕ :

$$K_{proporzionato} = 4k_fL\omega K_{articolo} * \frac{I_{drone}}{I_{drone\ articolo}}$$

2 MOTO DEL BRACCIO DI ANDATA E RITORNO

Il braccio parte dalla posizione verticale ($\theta=0$) e ritorna nella stessa posizione alla fine del moto dopo 10 s. Il valore massimo dell'angolo è $\theta = 65.1^\circ$ a 5 secondi dall'inizio del moto e la velocità angolare ω è nulla [9].

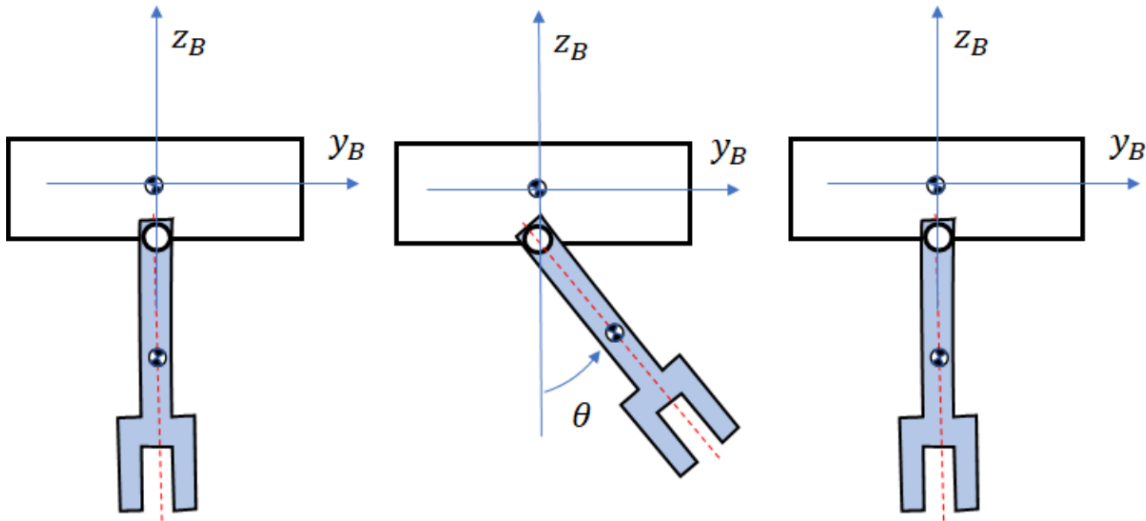


Figura 7: moto del braccio [9]

Il moto del braccio è triangolare simmetrico per la velocità angolare, il valore massimo di velocità angolare è pari a $\omega = 0.4545$ rad/s a 2.5 s dall'inizio del moto e assume valore pari a $\omega = -0.4545$ rad/s a 7.5 s. Il ritorno è simmetrico all'andata.

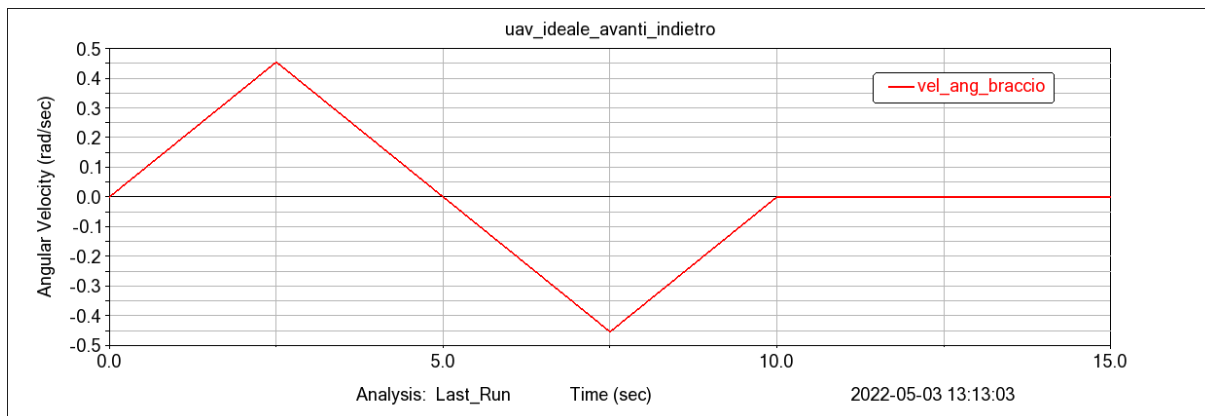


Figura 8: velocità angolare del braccio

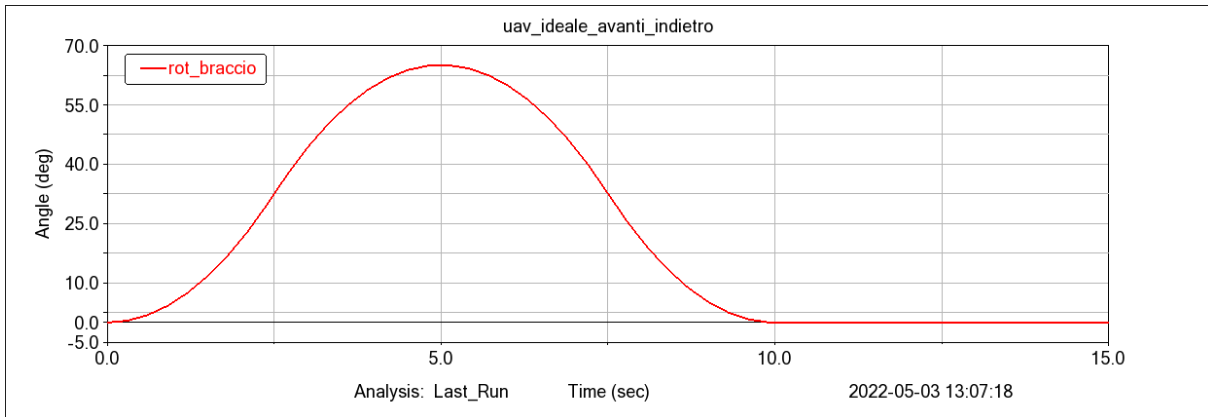


Figura 9: rotazione del braccio

Matematicamente, il moto è definito come segue:

$$\omega(t) = \begin{cases} \frac{0.4545}{2.5} * t & \text{per } t < 2.5s \\ 0.4545 - \frac{0.4545}{2.5} * (t - 2.5) & \text{per } 2.5s \leq t < 7.5s \\ -0.4545 + \frac{0.4545}{2.5} * (t - 7.5) & \text{per } 7.5s \leq t < 10s \\ 0 & \text{per } t \geq 10s \end{cases}$$

2.1 CONTROLLO IDEALE

Al posto di un controllo PID, è presente in giunto traslazionale, tra UAV e il “ground” che lascia libero solo lo spostamento in direzione x dell’UAV. Non sono permessi, quindi, spostamenti lungo y e ϕ , e il velivolo occuperà sempre la posizione desiderata $\phi=0$ e $y=0$. È come se ci fosse un controllo PID ideale con risposta istantanea all’errore.

Il movimento dell’UAV è continuo ma la velocità presenta dei punti angolosi, negli istanti in cui il drone presenta delle discontinuità di velocità; di conseguenza, anche il grafico dell’accelerazione lungo x avrà alcune discontinuità, come mostrano i grafici sottostanti. L’UAV ritorna nella posizione di partenza ($x=0$).

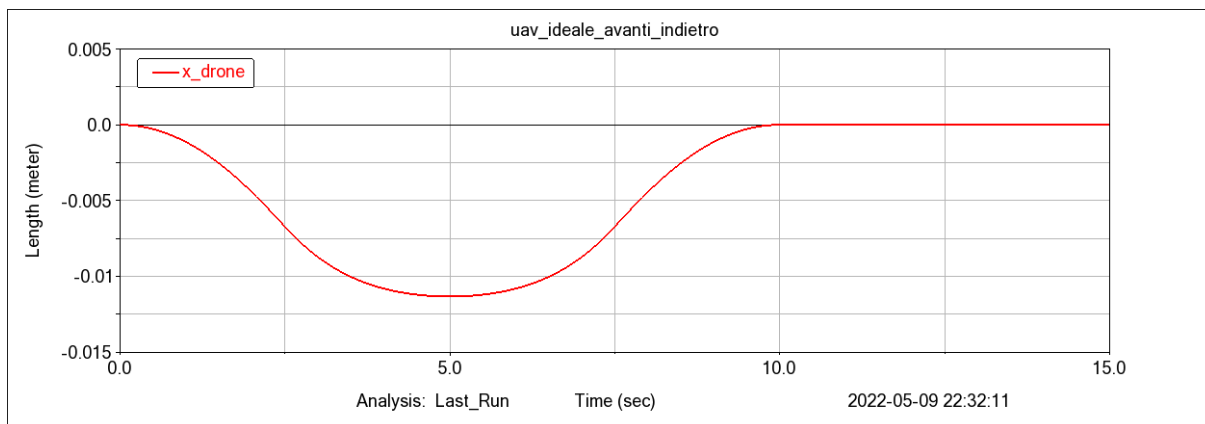


Figura 10: posizione lungo x dell’UAV

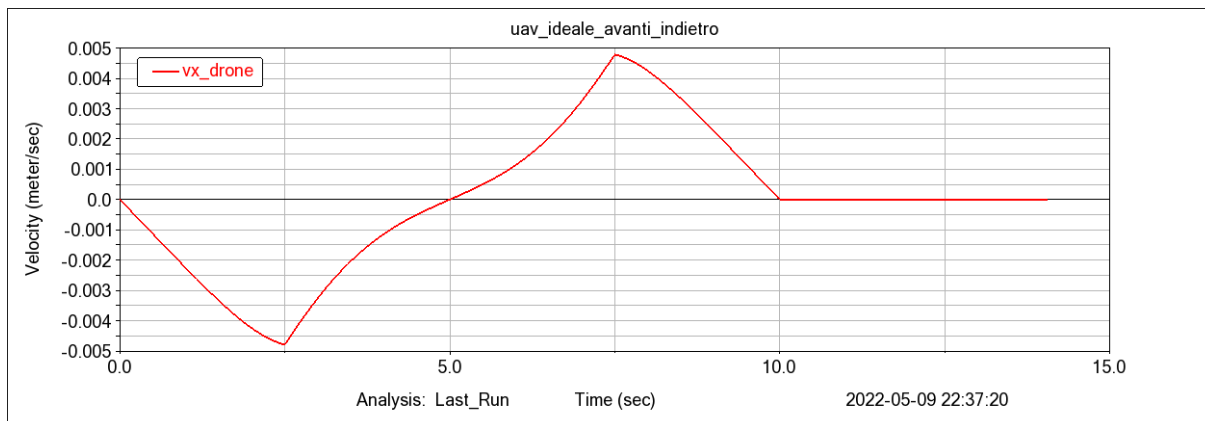


Figura 11: velocità lungo x dell’UAV

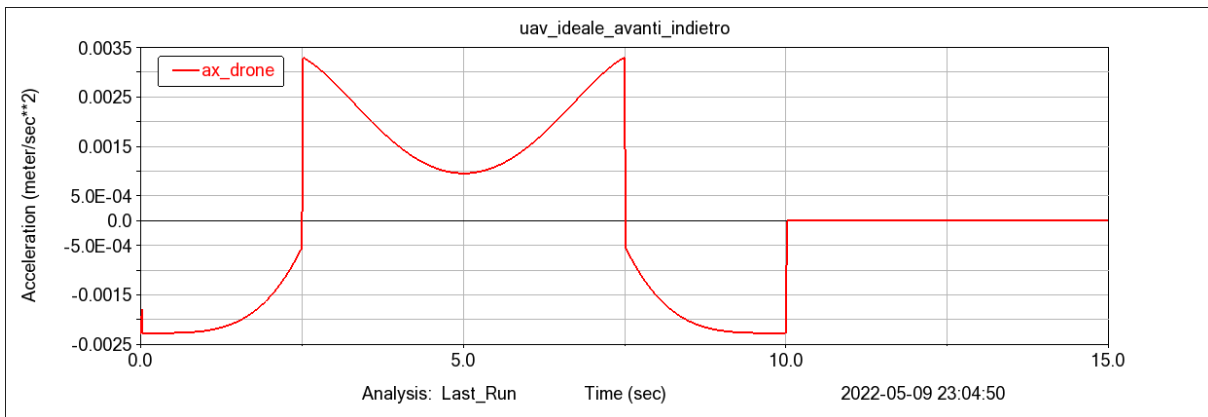


Figura 12: accelerazione lungo x dell'UAV

Dato che non agiscono forze esterne sul sistema, il baricentro totale del sistema UAV + braccio rimane invariato:

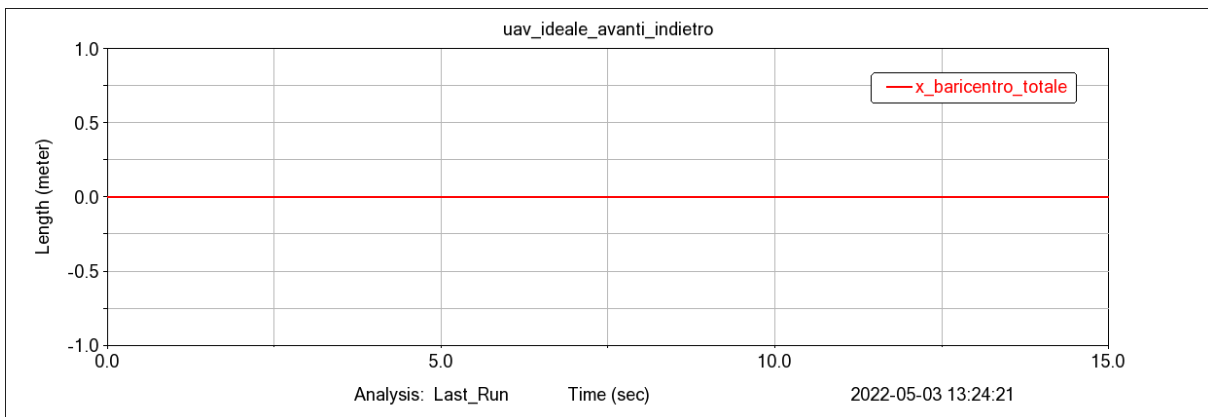


Figura 13: grafico baricentro complessivo del sistema UAV + braccio

Infatti, per la conservazione della quantità di moto, il centro di massa del braccio si sposta verso le x positive durante il moto e il drone, di conseguenza, si sposta verso le x negative. Raggiunto il valore massimo dell'angolo, il braccio torna in posizione iniziale muovendosi lungo le x negative, mentre il drone, di conseguenza, si sposta verso le x positive. In questo modo il baricentro totale del sistema rimane nella posizione iniziale.

2.2 CONTROLLO PID CON VALORI DEI PARAMETRI ALTI

A differenza del caso precedente non è presente il giunto traslazionale lungo x, ma è stato creato un controllo PID che controlla la coordinata y e la rotazione ϕ del drone.

Nel primo caso che si va ad analizzare i parametri del controllo PID sono i seguenti:

	Kp	Kd	Ki
Y	1000	500	500
ϕ	600	30	500

Tabella 6: controllo PID con valori dei parametri alti

Il drone torna in posizione desiderata ($\phi=0$ e $y=0$) dopo circa 15 secondi.

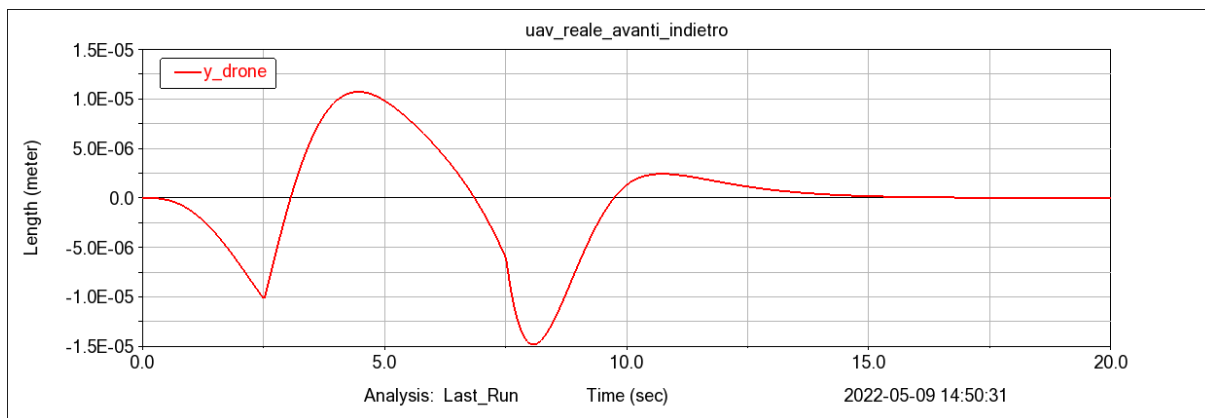


Figura 14: posizione lungo y dell'UAV

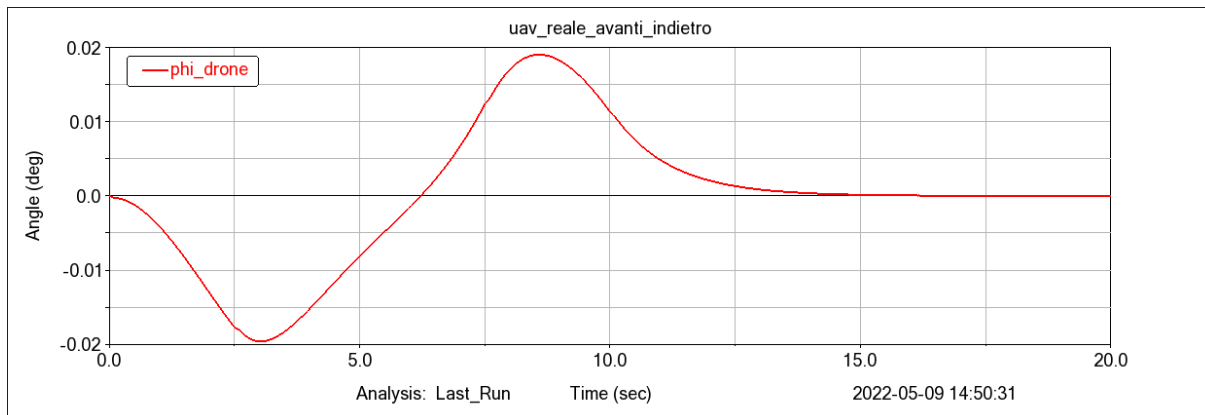


Figura 15: rollio dell'UAV

Dato che è un sistema sotto controllato l'UAV si sposta lungo x e lungo questa direzione non recupera la posizione iniziale.

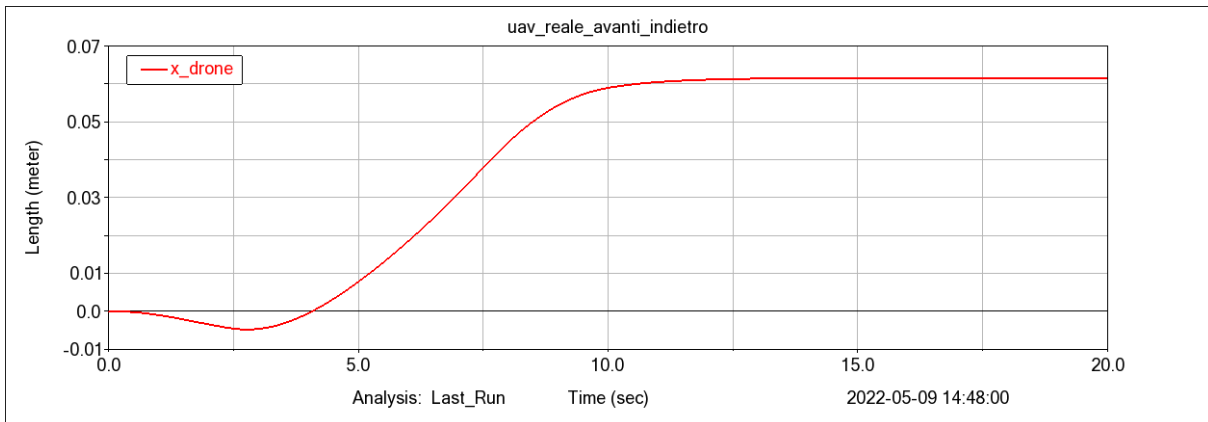


Figura 16: posizione lungo x dell'UAV

Il velivolo si sposta lungo le x positive, e si ferma a circa 60 mm dalla posizione iniziale. Si può notare che l'UAV all'inizio del moto si muove lungo le x negative ed è a causa della conservazione della quantità di moto. Infatti, nel caso con controllo ideale la posizione del baricentro complessivo rimane invariata, dato che non ci sono forze esterne. In questo caso, invece, abbiamo una componente della forza di lift lungo x che fa muovere il drone in quella direzione.

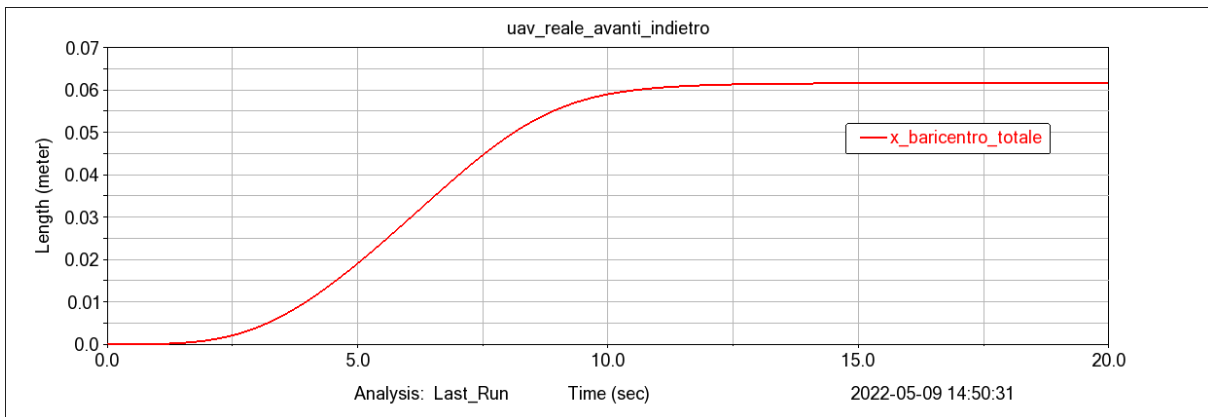


Figura 17: grafico baricentro complessivo UAV + braccio

Sotto la forza di lift il sistema UAV + braccio si muove solo lungo le x positive.

Nelle figure seguenti è rappresentato l'andamento della velocità e accelerazione lungo x del velivolo.

Dopo circa 15 secondi sia la velocità sia l'accelerazione sono entrambe pari a zero. Quindi l'UAV, dopo un moto lungo x con velocità e accelerazioni non costanti, si ferma.

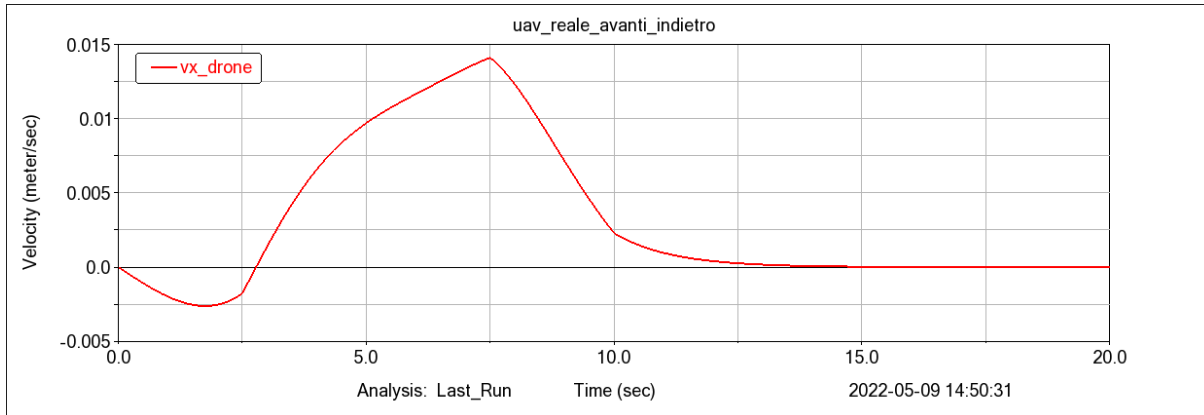


Figura 18: velocità lungo x dell'UAV

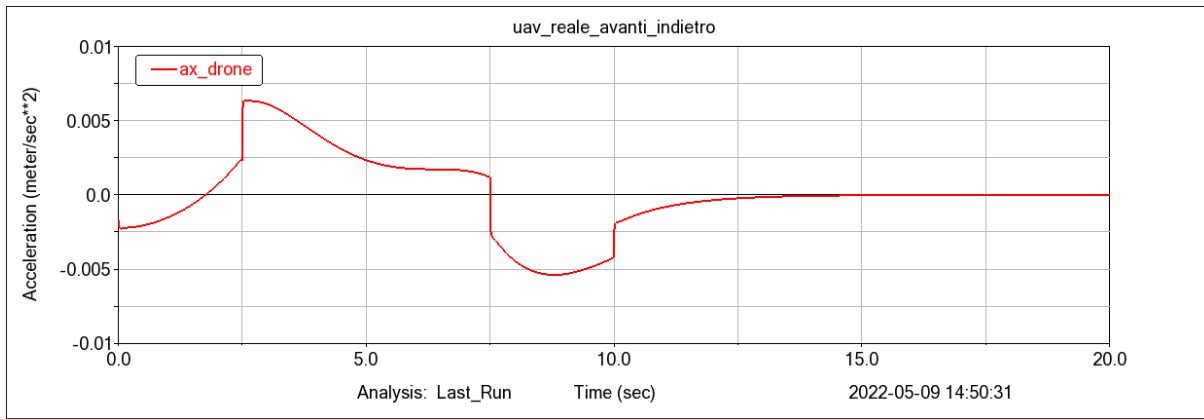


Figura 19: accelerazione lungo x dell'UAV

La forza che fa spostare il velivolo è la componente della forza di lift lungo x.

È stata calcolata come:

$$F_{\text{lift}_x} = F_{\text{lift}} * \sin\phi$$

Integrando la forza nel tempo trovo l'impulso e di conseguenza posso trovare la variazione di quantità di moto:

$$\Delta p = \int F_{\text{lift}_x} dt$$

Si può trovare la quantità di moto tra l'istante iniziale e un istante t leggendo il valore dell'integrale nel grafico per il valore di t.

L'andamento è il seguente:

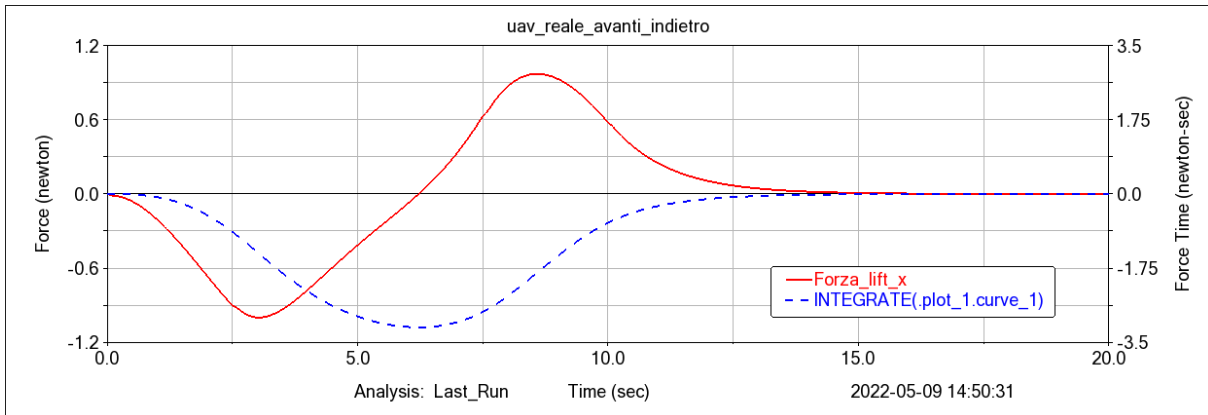


Figura 20: grafico componente della forza di lift lungo x e il suo impulso

Dato che la curva dell'impulso è zero dopo circa 15 secondi, quindi il drone è fermo perché:

$$\Delta p = p_{\text{finale}} - p_{\text{iniziale}} = 0$$

mentre in qualsiasi istante compreso tra 0 e 15 secondi, la curva dell'impulso ha un valore non nullo, questo implica che il drone ha una variazione della quantità di moto non nulla rispetto all'istante iniziale e quindi si muoverà con una certa velocità.

Nelle figure seguenti è rappresentato l'andamento delle coordinate y e ϕ in confronto alle azioni del controllo che agiscono sulle rispettive coordinate.

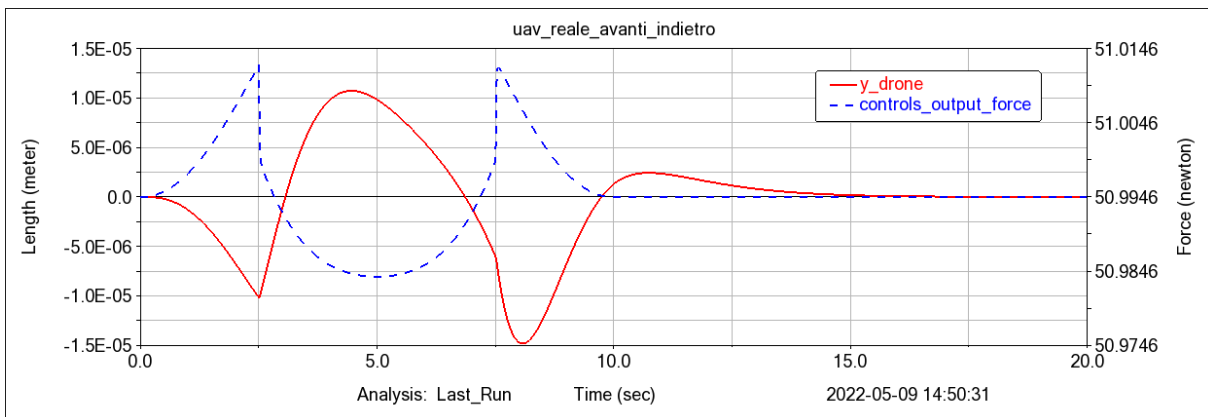


Figura 21: grafico coordinata y dell'UAV vs forza di controllo

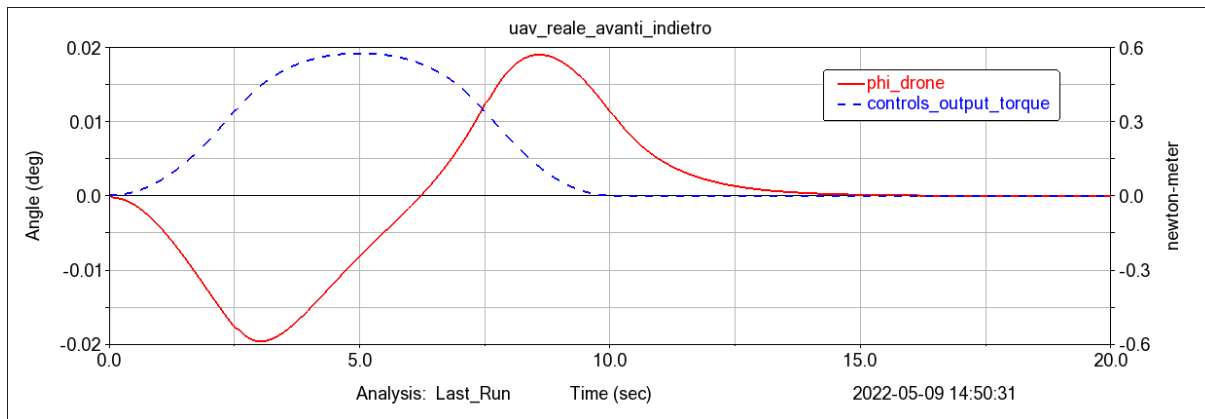


Figura 22: grafico rollio dell'UAV vs coppia di controllo

Dopo 15 secondi, quando il moto del braccio è terminato, il controllo ha riportato il velivolo nella posizione $\phi=0$ e $\gamma=0$. La coppia è nulla e la forza è pari alla forza di gravità in modo da mantenere il velivolo in hovering.

2.2.1 Caso particolare: $K_i = 0$

Un comportamento molto differente dal caso precedente si ottiene ponendo K_i della coppia di controllo pari a zero.

I parametri del controllo PID sono i seguenti:

	K_p	K_d	K_i
Y	1000	500	500
ϕ	600	30	0

Tabella 7: controllo PID con valori dei parametri alti e K_i della coppia pari a zero

Il drone torna in posizione desiderata ($\phi=0$ e $y=0$) dopo circa 15 secondi.

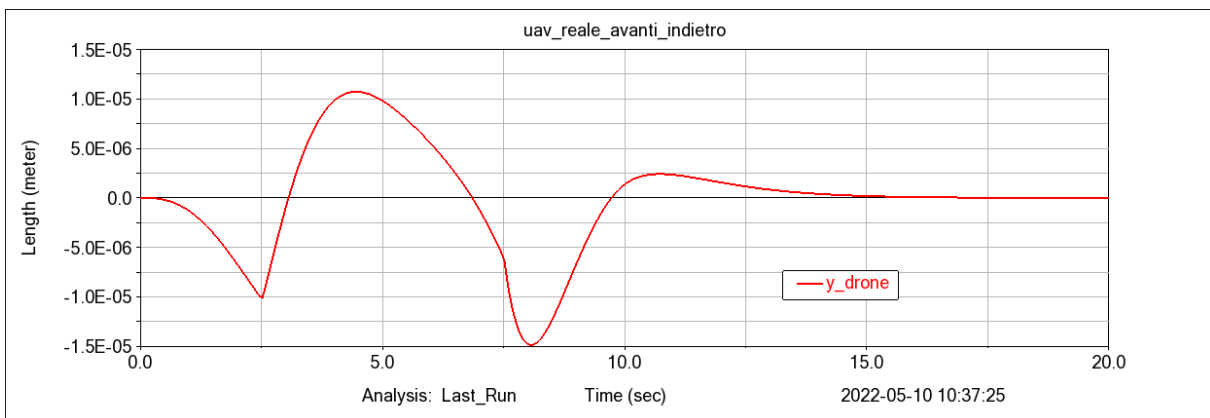


Figura 23: posizione lungo y dell'UAV

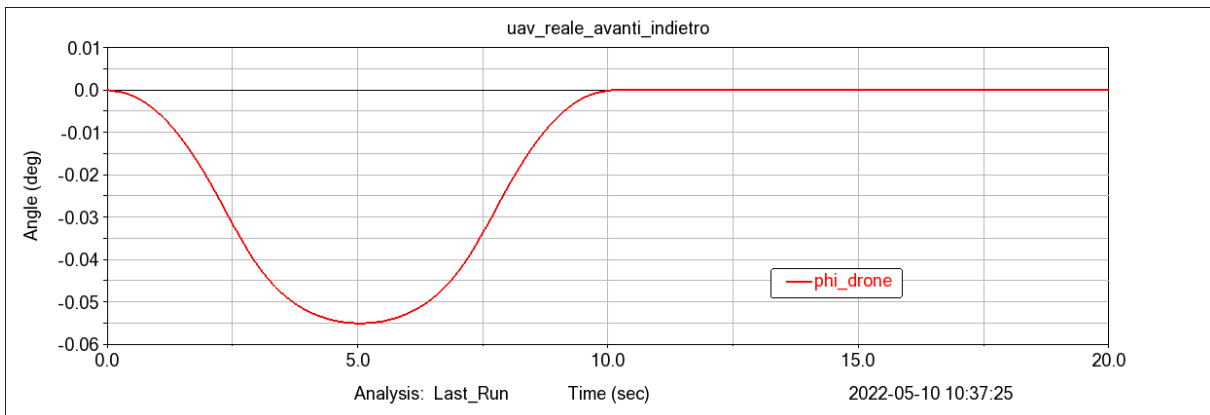


Figura 24: rollio dell'UAV

L'UAV si sposta lungo x e lungo questa direzione non recupera la posizione iniziale.

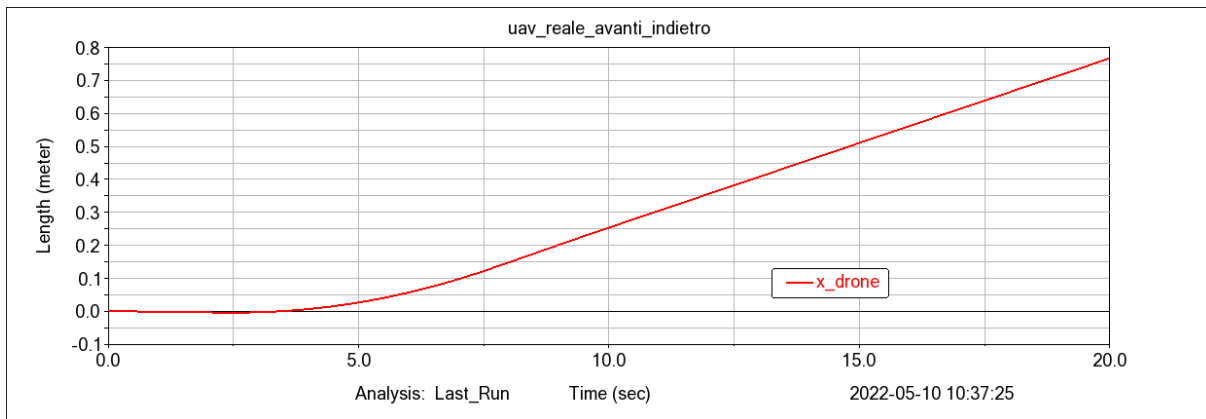


Figura 25: posizione lungo x dell'UAV

Il velivolo si sposta lungo le x positive, e dopo 10 secondi non si ferma, anzi mantiene una velocità costante.

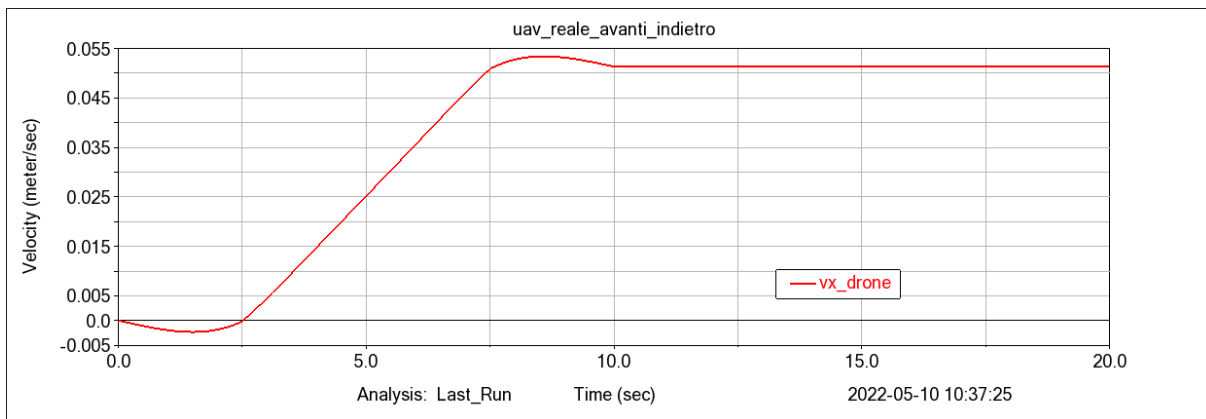


Figura 26: velocità lungo x dell'UAV

Dopo circa 10 secondi l'accelerazione è pari a zero. Quindi l'UAV, dopo un moto lungo x con velocità e accelerazioni non costanti, prosegue a velocità costante.

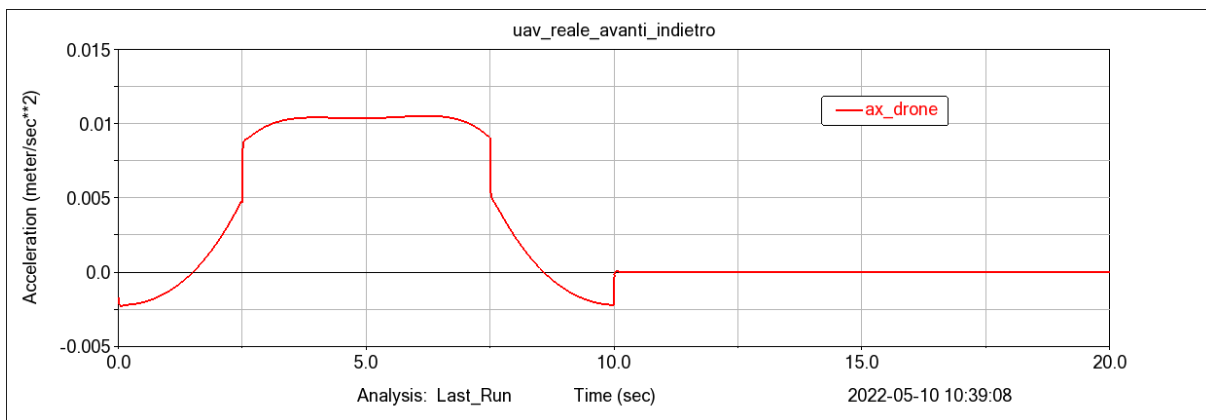


Figura 27: accelerazione lungo x dell'UAV

L'UAV si inclina solo da una parte e subisce un'accelerazione che non viene compensata. Quando il controllo riporta il drone con $\phi=0$, il drone mantiene una velocità costante che acquisisce nel transitorio.

L'andamento della forza di lift e il suo impulso è il seguente:

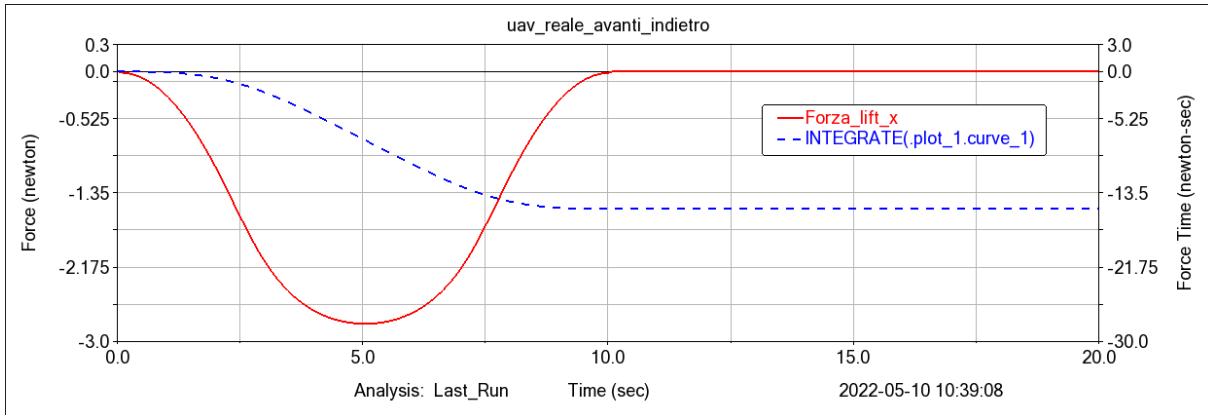


Figura 28: grafico componente della forza di lift lungo x e il suo impulso

Dato che la curva dell'impulso è costante ma non nulla nemmeno dopo che finisce il moto del braccio, il velivolo continua a velocità costante:

$$\Delta p = p_{\text{finale}} - p_{\text{iniziale}} \neq 0$$

$$p_{\text{finale}} \neq p_{\text{iniziale}}$$

Invece, in qualsiasi istante compreso tra 0 e 10 secondi, la curva dell'impulso ha un valore che varia, questo implica che l'UAV sta subendo una variazione della quantità di moto rispetto all'istante iniziale e quindi è sottoposto ad una accelerazione.

Nelle figure seguenti è rappresentato l'andamento delle coordinate y e ϕ in confronto alle azioni del controllo che agiscono sulle rispettive coordinate.

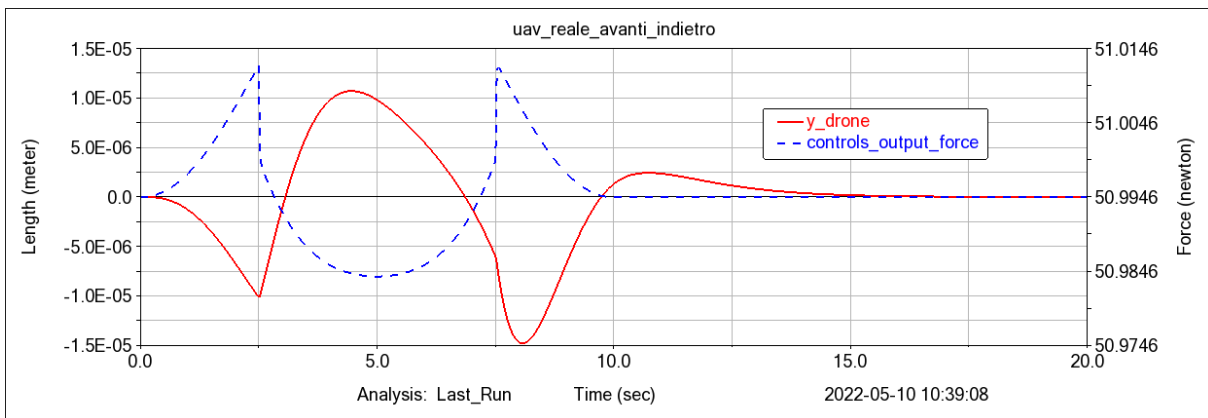


Figura 29: grafico coordinata y dell'UAV vs forza di controllo

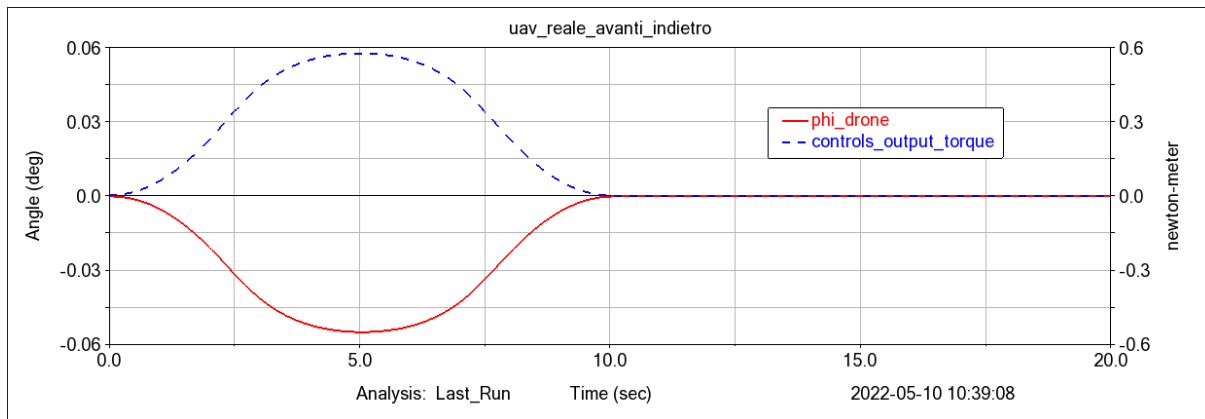


Figura 30: grafico rollio dell'UAV vs coppia di controllo

Dopo 15 secondi, quando il moto del braccio è terminato, il controllo ha riportato il velivolo nella posizione $\phi=0$ e $\gamma=0$. La coppia è nulla e la forza è pari alla forza di gravità in modo da mantenere il velivolo in hovering.

2.3 CONTROLLO PID CON VALORI DEI PARAMETRI BASSI

I parametri del controllo PID sono i seguenti:

	Kp	Kd	Ki
γ	53	33	16
ϕ	74	11	57

Tabella 8: controllo PID con valori dei parametri bassi

Il drone torna in posizione desiderata ($\phi=0$ e $\gamma=0$) dopo circa 18s.

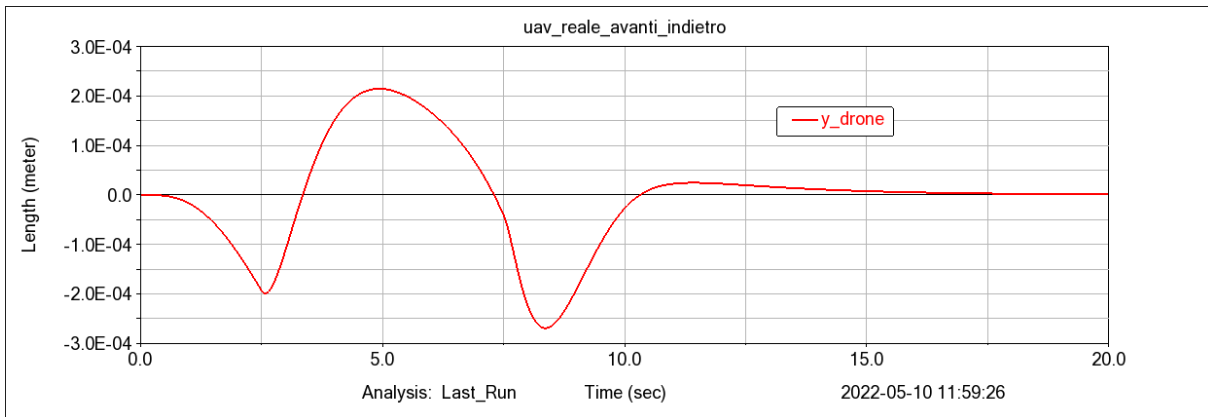


Figura 31: posizione lungo y dell'UAV

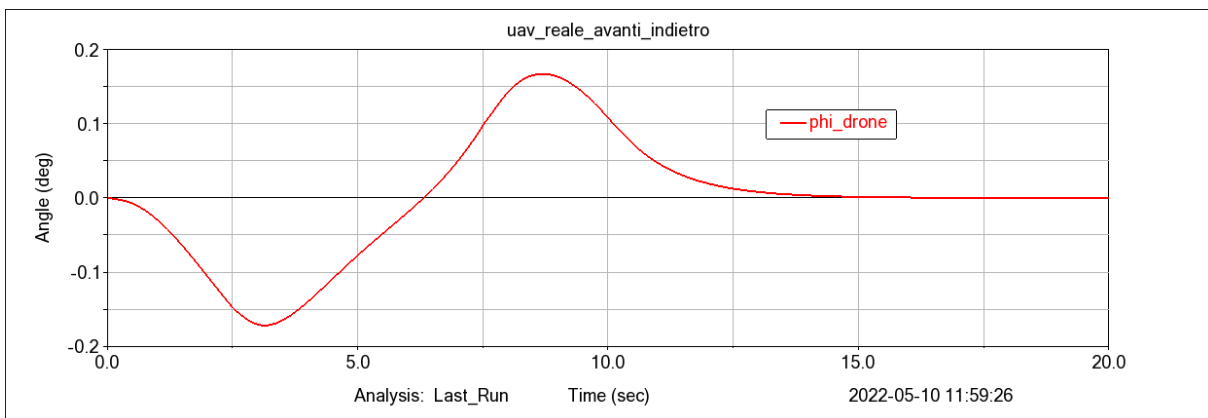


Figura 32: rollio dell'UAV

I valori massimi di γ e ϕ sono maggiori con valori dei parametri del controllo minori.

L'UAV si sposta lungo x e lungo questa direzione non recupera la posizione iniziale.

Il velivolo si sposta lungo le x positive, e si ferma a circa 550 mm dalla posizione iniziale, un valore maggiore del caso con valori del controllo alti.

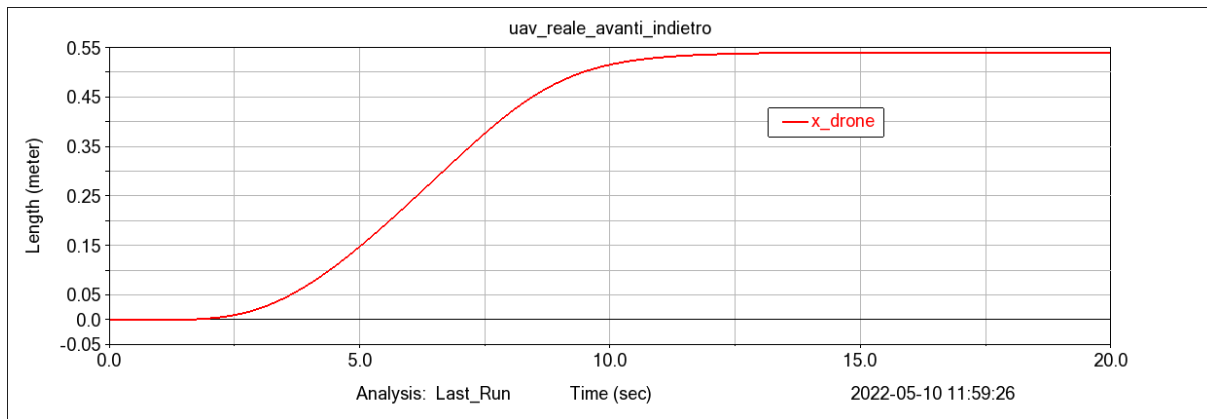


Figura 33: posizione lungo x dell'UAV

Nelle figure seguenti è rappresentato l'andamento della velocità e accelerazione lungo x del velivolo.

Dopo circa 15 secondi sia la velocità sia l'accelerazione sono entrambe pari a zero. Quindi l'UAV, dopo un moto lungo x con velocità e accelerazioni non costanti, si ferma. I valori massimi dell'accelerazione e della velocità sono maggiori con valori dei parametri del controllo minori.

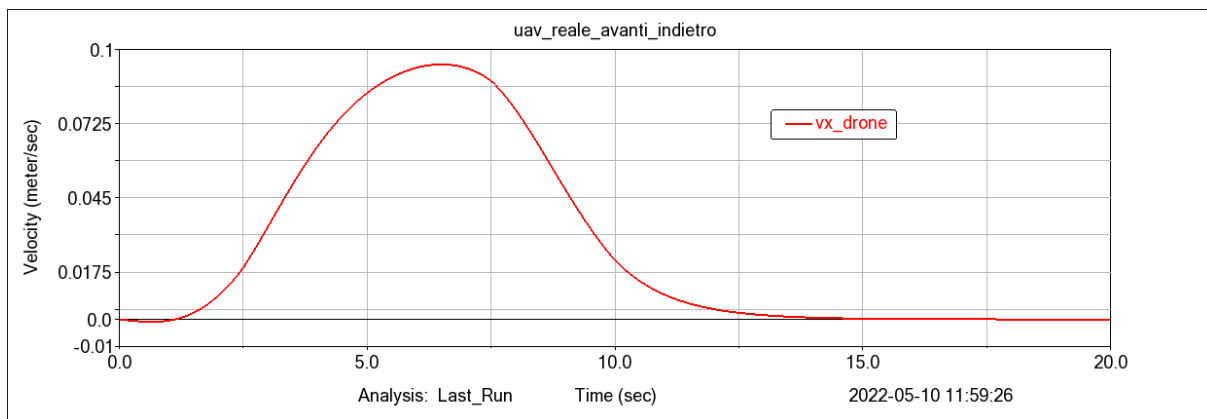


Figura 34: velocità lungo x dell'UAV

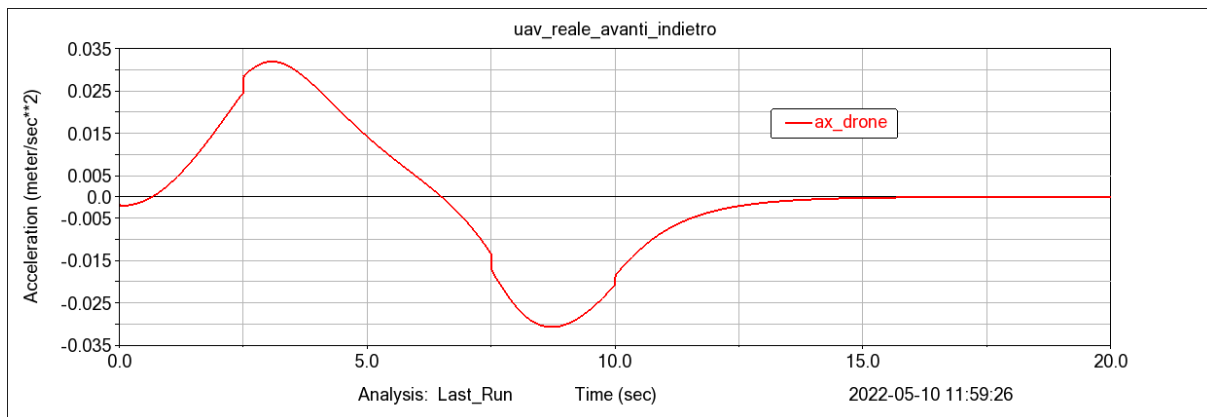


Figura 35: accelerazione lungo x dell'UAV

L'andamento della forza di lift lungo x e il suo impulso è il seguente:

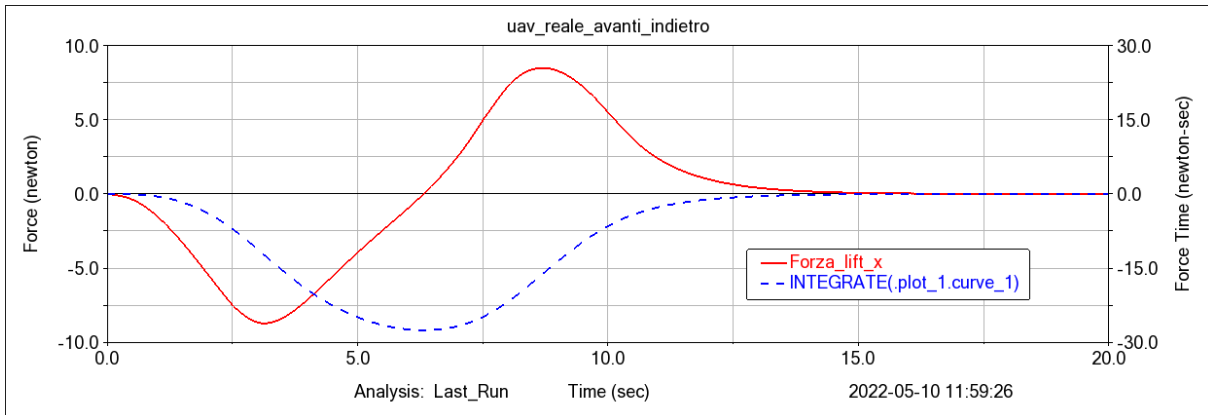


Figura 36: grafico componente della forza di lift lungo x e il suo impulso

Dato che la curva dell'impulso è zero dopo circa 15 s quindi il drone è fermo perché:

$$\Delta p = p_{\text{finale}} - p_{\text{iniziale}} = 0$$

$$p_{\text{finale}} = p_{\text{iniziale}}$$

mentre in qualsiasi istante compreso tra 0 e 15s, la curva dell'impulso ha un valore non nullo, questo implica che il drone ha una variazione della quantità di moto non nulla rispetto all'istante iniziale e quindi si muoverà con una certa velocità.

Nelle figure seguenti è rappresentato l'andamento delle coordinate y e ϕ in confronto alle azioni del controllo che agiscono sulle rispettive coordinate.

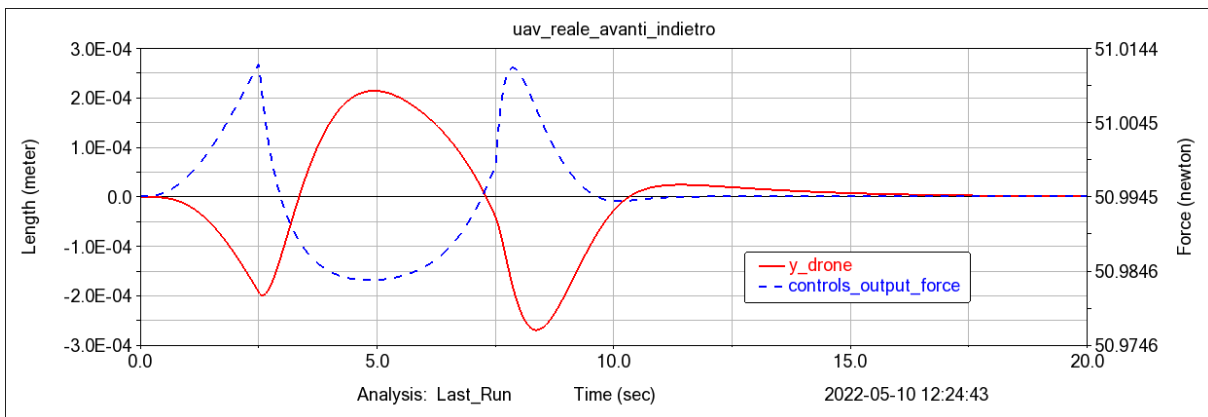


Figura 37: grafico coordinata y dell'UAV vs forza di controllo

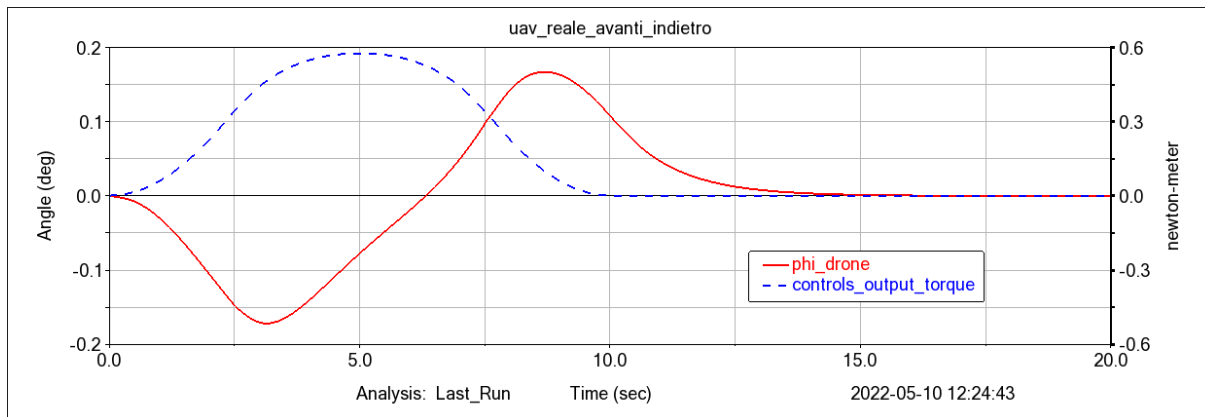


Figura 38: grafico rollio dell'UAV vs coppia di controllo

Dopo 15s, quando il moto del braccio è terminato, il controllo ha riportato il velivolo nella posizione $\phi=0$ e $\gamma=0$. La coppia è nulla e la forza è pari alla forza di gravità in modo da mantenere il velivolo in hovering.

2.3.1 Caso particolare: $K_i = 0$

Un comportamento molto differente dal caso precedente si ottiene ponendo K_i della coppia di controllo pari a zero.

I parametri del controllo PID sono i seguenti:

	Kp	Kd	Ki
γ	53	33	16
ϕ	74	11	0

Tabella 9: controllo PID con valori dei parametri alti e K_i della coppia pari a zero

Il drone torna in posizione desiderata ($\phi=0$ e $\gamma=0$) dopo circa 20s.

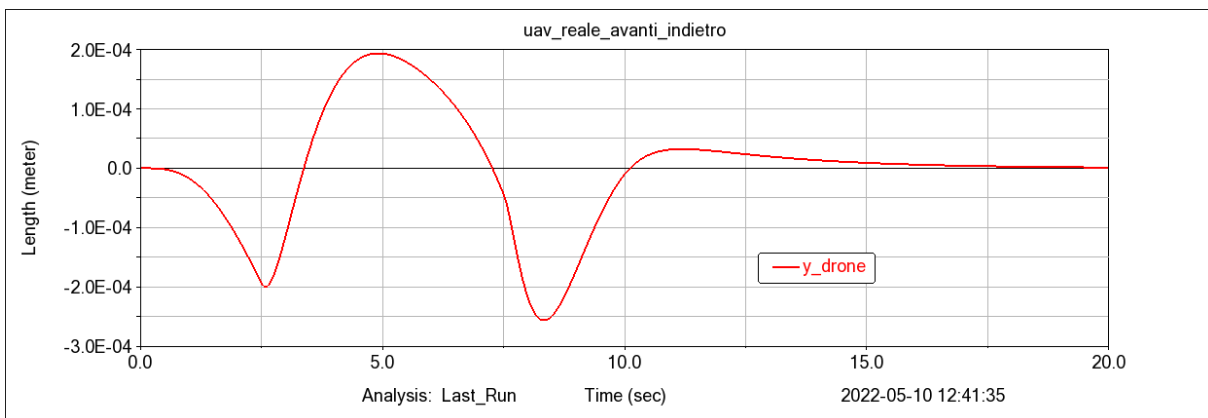


Figura 39: posizione lungo y dell'UAV

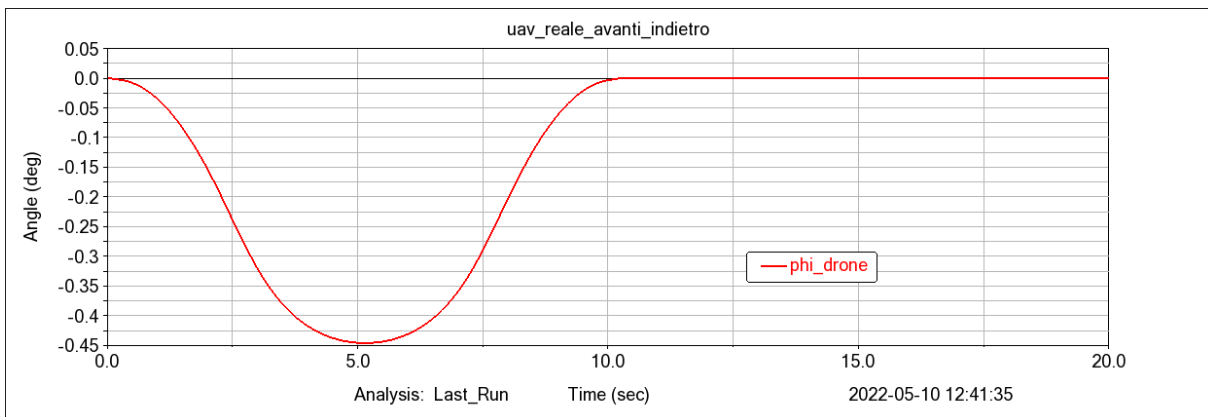


Figura 40: rollio dell'UAV

Dato che è un sistema sotto controllato l'UAV si sposta lungo x e lungo questa direzione non recupera la posizione iniziale.

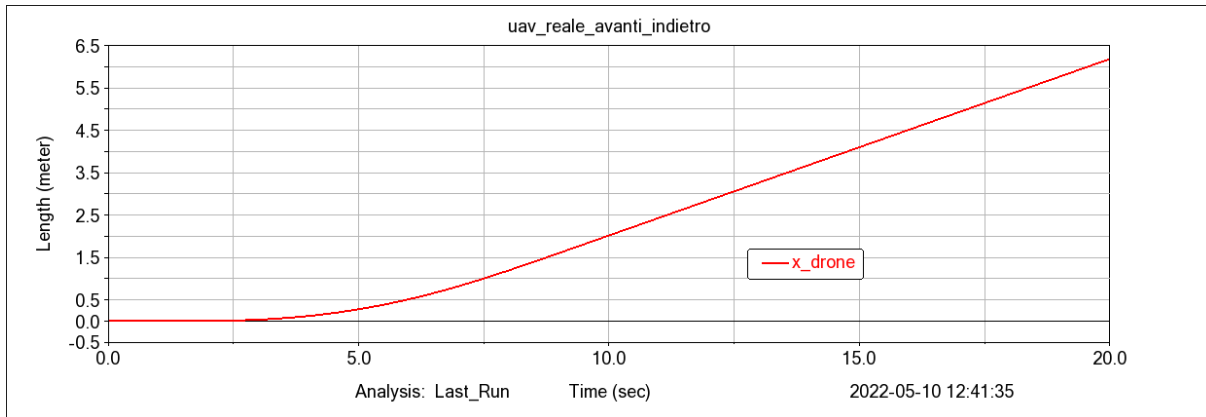


Figura 41: posizione lungo x dell'UAV

Il velivolo si sposta lungo le x positive, e dopo 10 secondi non si ferma, anzi mantiene una velocità costante.

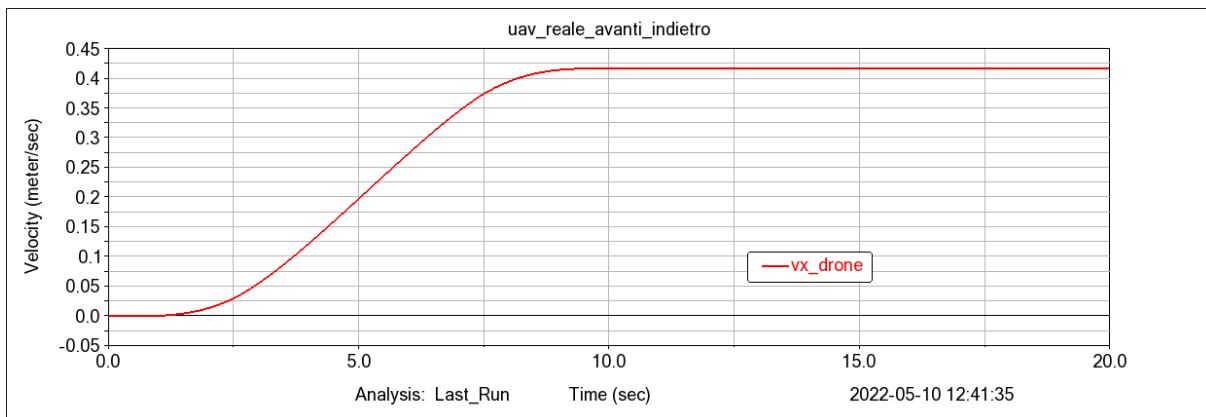


Figura 42: velocità lungo x dell'UAV

Dopo circa 10 secondi l'accelerazione è pari a zero. Quindi l'UAV, dopo un moto lungo x con velocità e accelerazioni non costanti, prosegue a velocità costante.

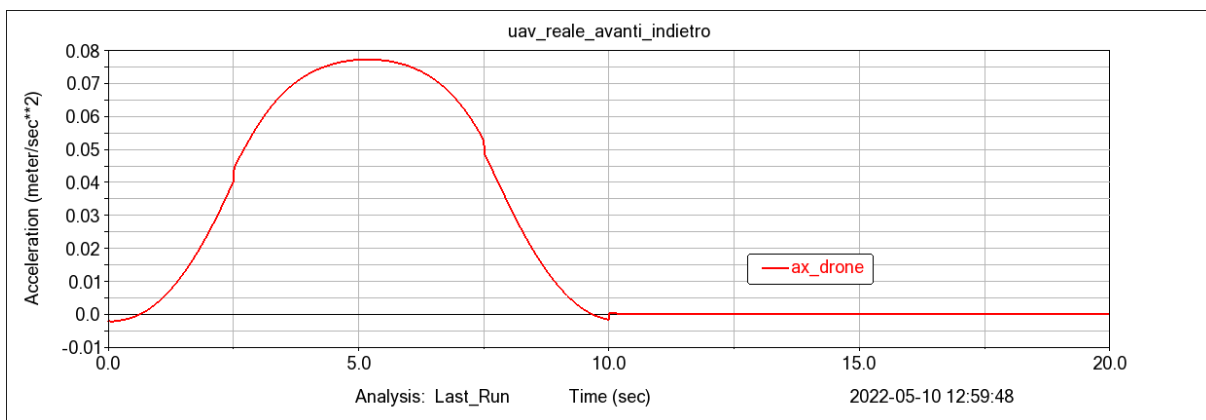


Figura 43: accelerazione lungo x dell'UAV

L'UAV si inclina solo da una parte e subisce un'accelerazione che non viene compensata. Quando il controllo riporta il drone con $\phi=0$, il drone mantiene una velocità costante che acquisisce nel transitorio.

L'andamento della forza di lift e il suo impulso è il seguente:

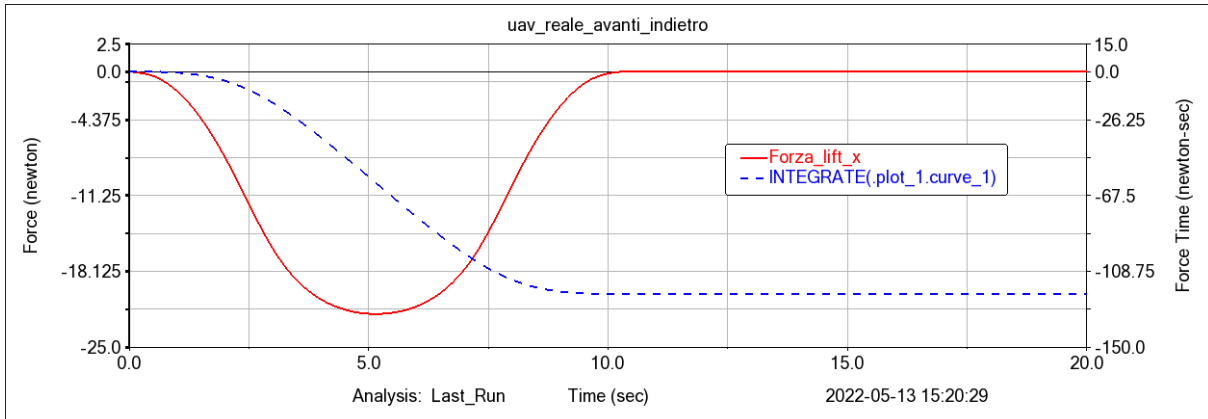


Figura 44: grafico componente della forza di lift lungo x e il suo impulso

Dato che la curva dell'impulso è costante ma non nulla nemmeno dopo che finisce il moto del braccio, il velivolo continua a velocità costante. Invece, in qualsiasi istante compreso tra 0 e 10 secondi, la curva dell'impulso varia, questo implica che l'UAV sta subendo una variazione della quantità di moto rispetto all'istante iniziale e quindi è sottoposto ad una accelerazione.

Nelle figure seguenti è rappresentato l'andamento delle coordinate y e ϕ in confronto alle azioni del controllo che agiscono sulle rispettive coordinate.

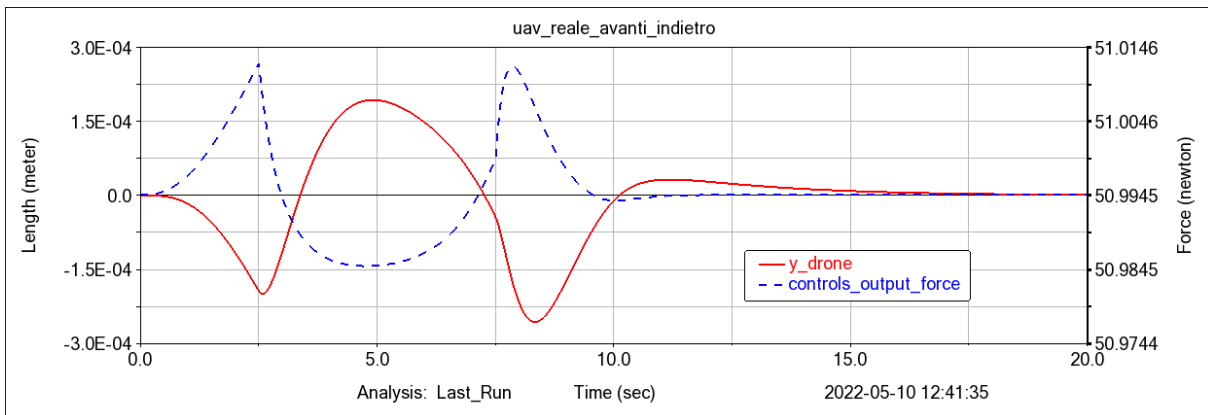


Figura 45: grafico coordinata y dell'UAV vs forza di controllo

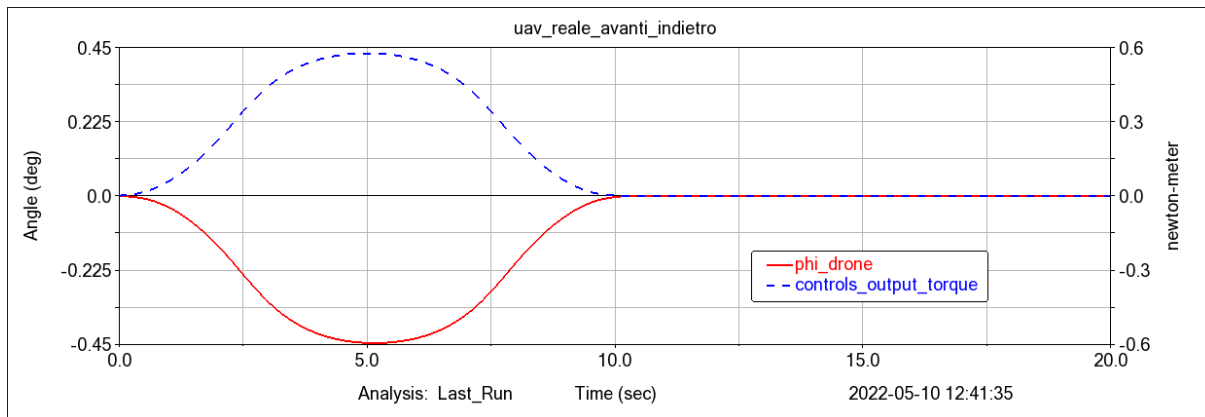


Figura 46: grafico rollio dell'UAV vs coppia di controllo

Dopo 18 secondi, quando il moto del braccio è terminato, il controllo ha riportato il velivolo nella posizione $\phi=0$ e $\gamma=0$. La coppia è nulla e la forza è pari alla forza di gravità in modo da mantenere il velivolo in hovering.

3 BRACCIO IN POSIZIONE AVANZATA

Il moto del braccio è triangolare per la velocità angolare, ma in questo caso non viene effettuato il ritorno in posizione iniziale. Quindi, il braccio parte dalla posizione verticale ($\theta=0$) e rimane fermo al valore massimo pari a $\theta = 65.1^\circ$, che si ottiene dopo 5 secondi dall'inizio del moto.

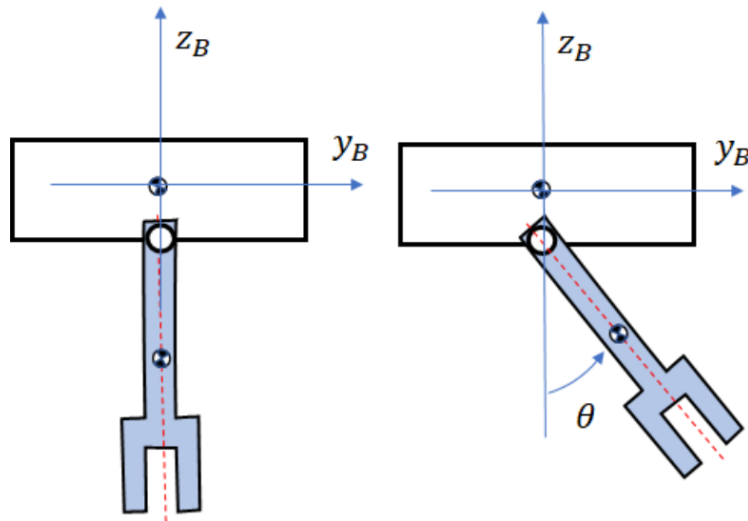


Figura 47: moto del braccio [9]

Il valore massimo di velocità angolare è pari a $\omega = 0.4545$ rad/s a 2.5 secondi dall'inizio del moto.

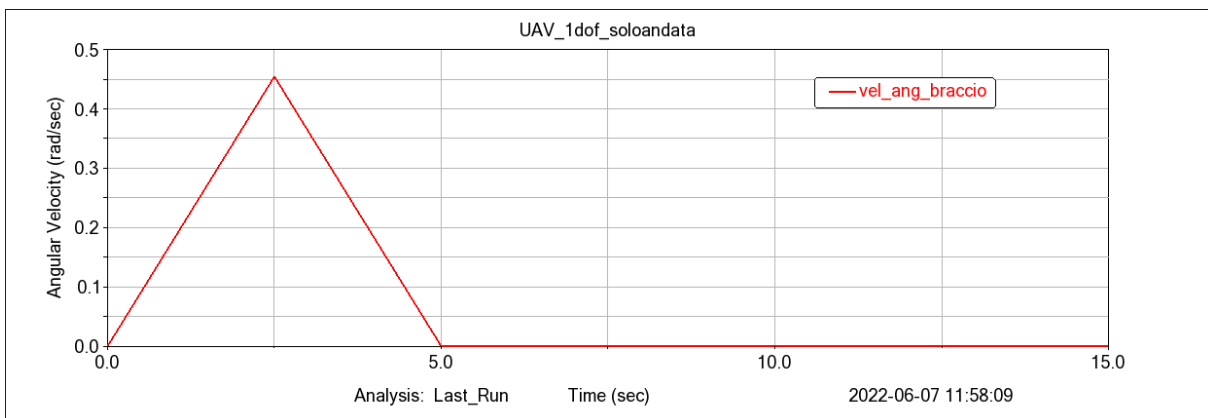


Figura 48: velocità angolare del braccio

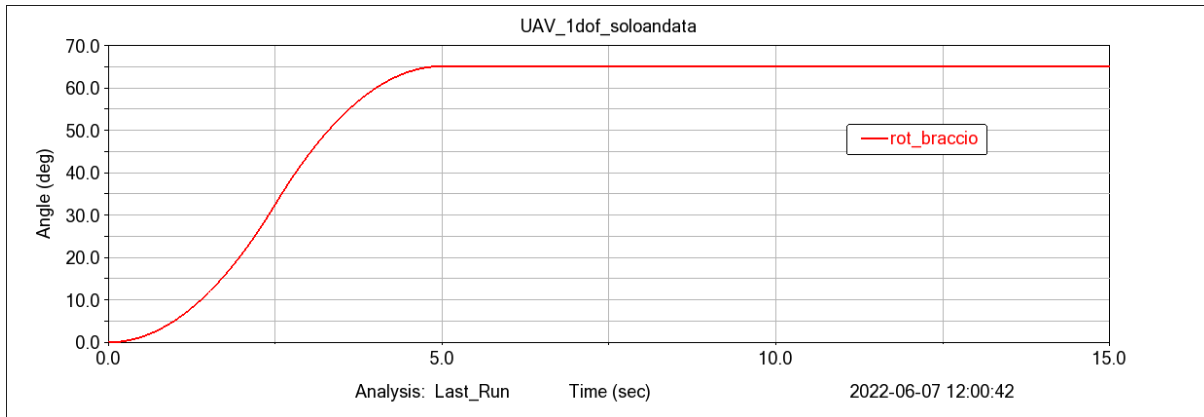


Figura 49: rotazione del braccio

Matematicamente, il moto è definito come segue:

$$\omega(t) = \begin{cases} \frac{0.4545}{2.5} * t & \text{per } t < 2.5s \\ 0.4545 - \frac{0.4545}{2.5} * (t - 2.5) & \text{per } 2.5s \leq t < 5s \\ 0 & \text{per } t \geq 5s \end{cases}$$

3.1 CONTROLLO IDEALE

Come nel caso precedente, al posto di un controllo PID, è presente in giunto traslazionale, tra UAV e il “ground” che lascia libero solo lo spostamento in direzione x dell’UAV. Non sono permessi, quindi, spostamenti lungo y e ϕ , e il velivolo occuperà sempre la posizione desiderata $\phi=0$ e $y=0$. È come se ci fosse un controllo PID ideale con risposta istantanea all’errore.

Il movimento dell’UAV è continuo ma la velocità presenta dei punti angolosi, negli istanti in cui il drone presenta delle discontinuità di velocità; di conseguenza, anche il grafico dell’accelerazione lungo x avrà alcune discontinuità, come mostrano i grafici sottostanti.

L’UAV, in questo caso, si muove e non ritorna nella posizione di partenza.

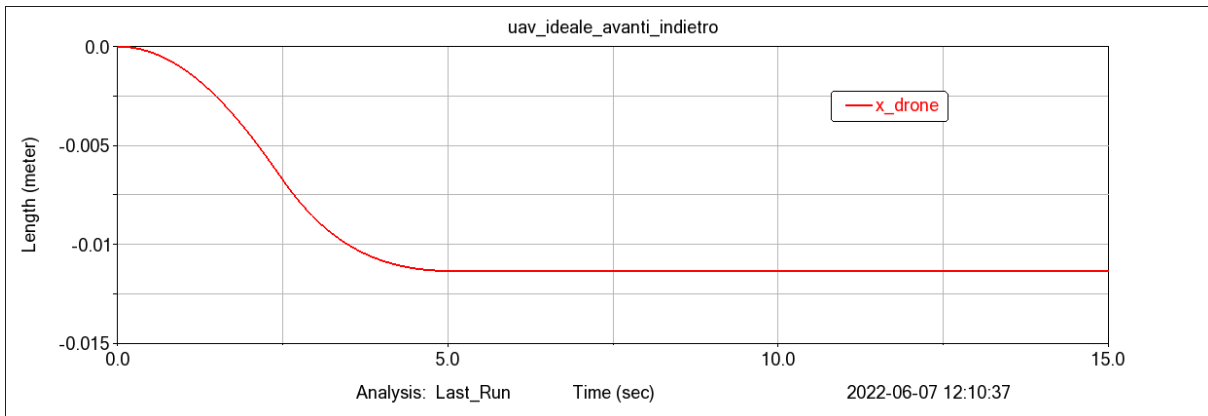


Figura 50: posizione lungo x dell’UAV

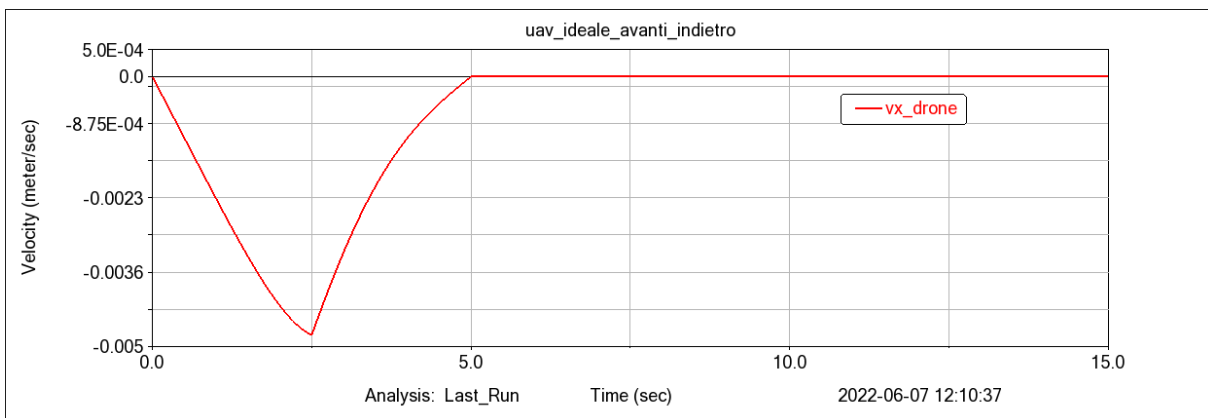


Figura 51: velocità lungo x dell’UAV

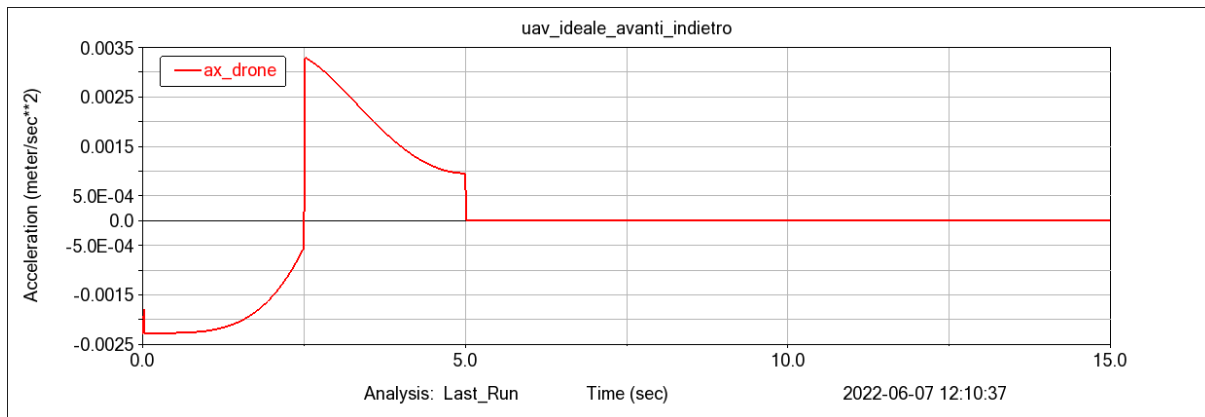


Figura 52: accelerazione lungo x dell'UAV

Dato che non agiscono forze esterne sul sistema, il baricentro totale del sistema UAV + braccio rimane invariato:

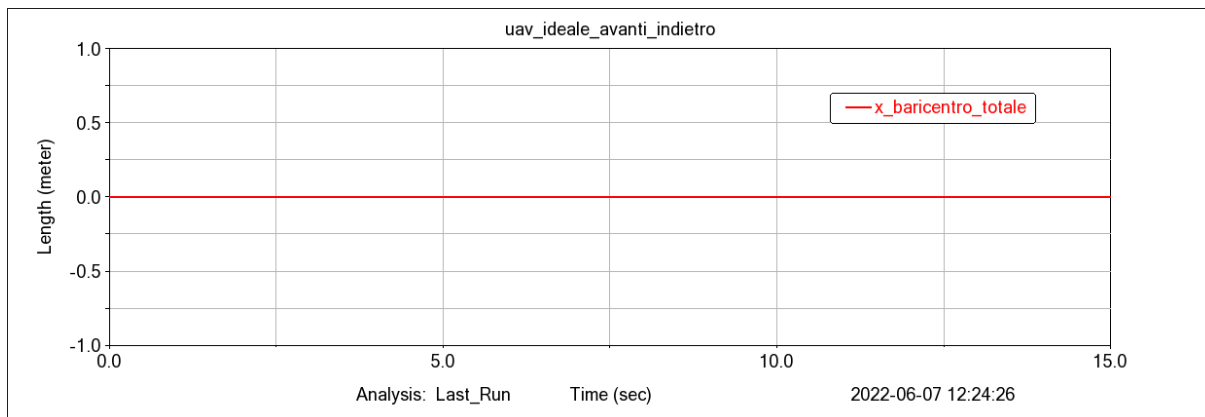


Figure 53: grafico baricentro complessivo del sistema UAV + braccio

Infatti, per la conservazione della quantità di moto, il centro di massa del braccio si sposta verso le x positive durante il moto e il drone, di conseguenza, si sposta verso le x negative. Raggiunto il valore massimo dell'angolo, il braccio si ferma, e il drone, di conseguenza, si ferma in una posizione che non è quella iniziale. In questo modo il baricentro totale del sistema rimane nella posizione iniziale.

3.2 CONTROLLO PID CON VALORE DEI PARAMETRI PID ALTI

A differenza del caso precedente non è presente il giunto traslazionale lungo x, ma è stato creato un controllo PID che controlla la coordinata y e la rotazione ϕ del drone.

I parametri del controllo PID sono i seguenti:

	Kp	Kd	Ki
Y	1000	500	500
ϕ	600	30	500

Tabella 10: controllo PID con valori dei parametri alti

Il drone torna in posizione desiderata ($\phi=0$ e $y=0$) dopo circa 12s.

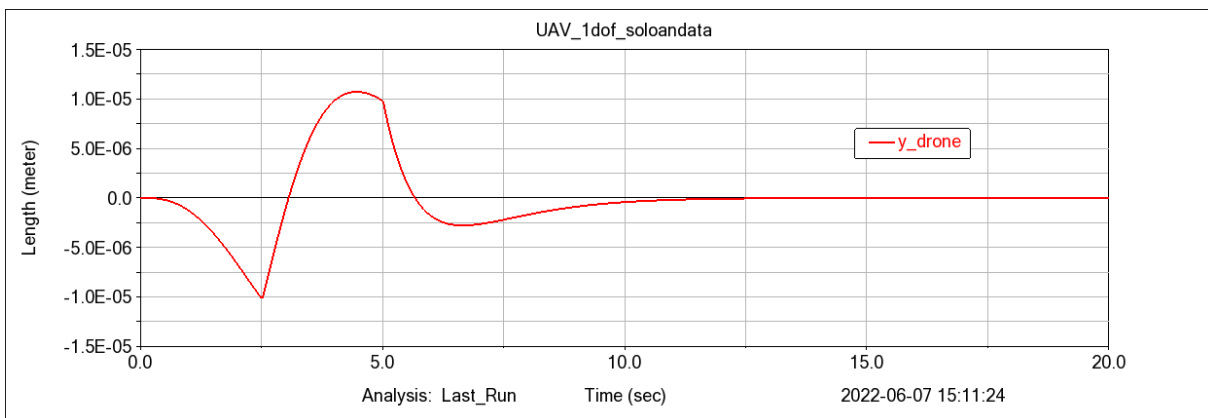


Figura 54: posizione lungo y dell'UAV

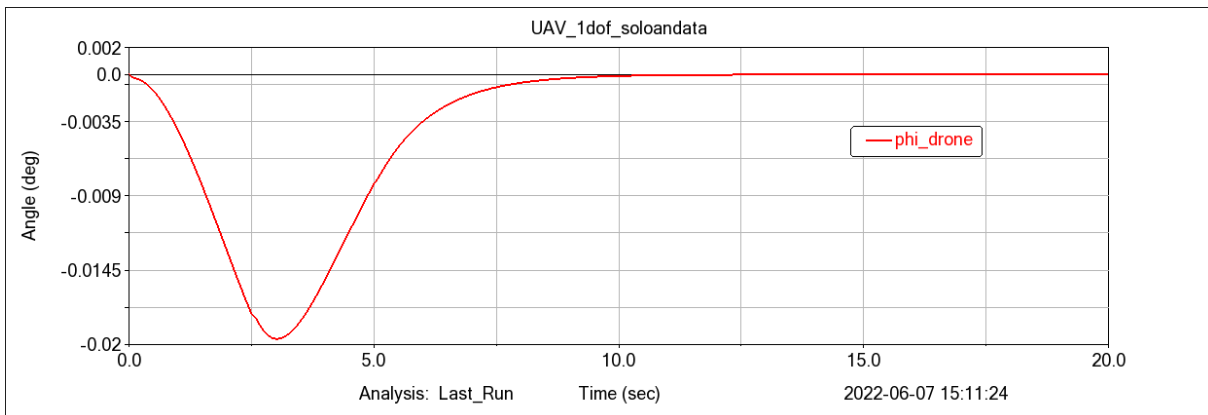


Figura 55: rollio dell'UAV

L'UAV si sposta lungo x e lungo questa direzione non recupera la posizione iniziale.

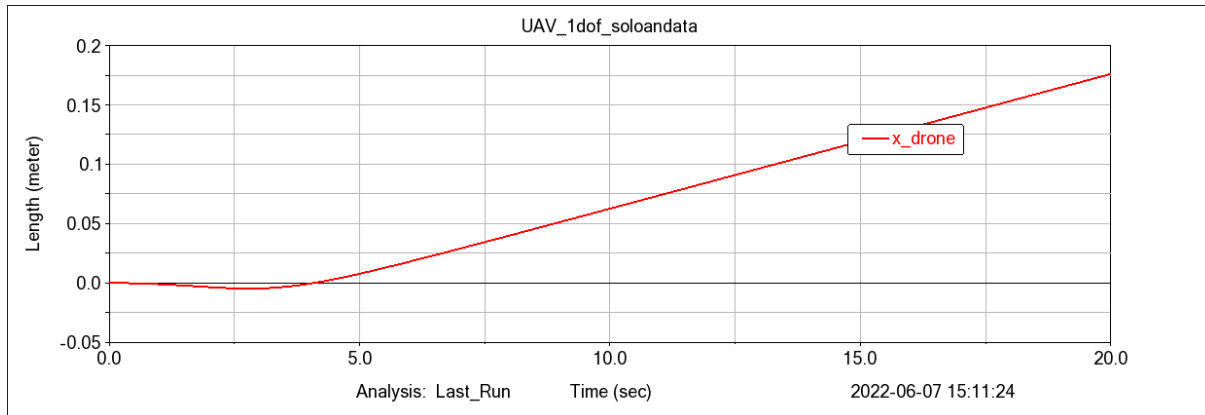


Figura 56: posizione lungo x dell'UAV

Il velivolo si sposta lungo le x positive, e dopo 5 s non si ferma, anzi mantiene una velocità costante.

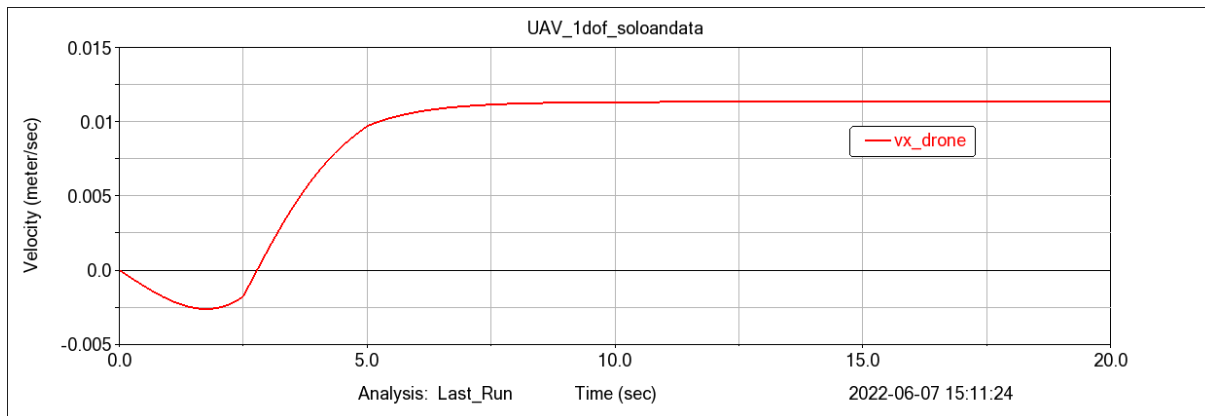


Figura 57: velocità lungo x dell'UAV

Dopo circa 10 s l'accelerazione è pari a zero. Quindi l'UAV, dopo un moto lungo x con velocità e accelerazioni non costanti, prosegue a velocità costante.

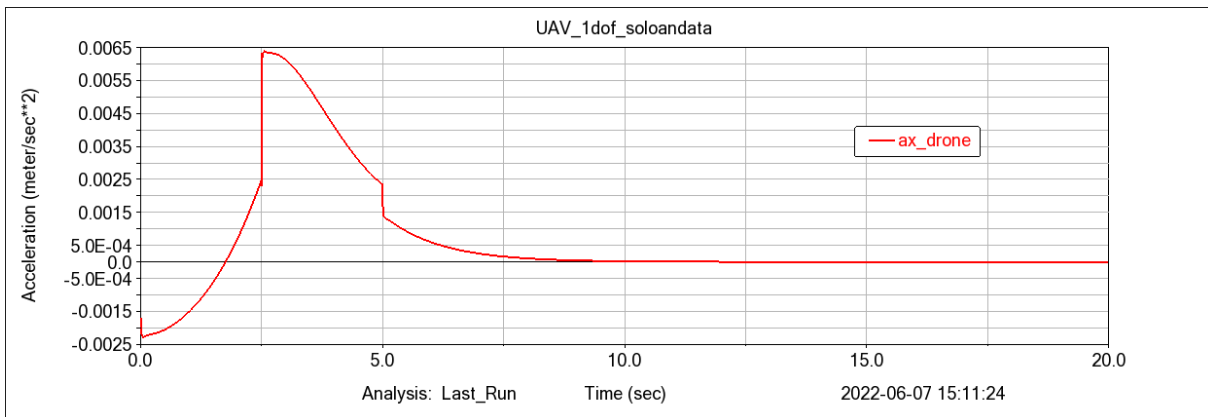


Figura 58: accelerazione lungo x dell'UAV

L'UAV si inclina solo da una parte e subisce un'accelerazione che non viene compensata. Quando il controllo riporta il drone con $\phi=0$, il drone mantiene una velocità costante che acquisisce nel transitorio.

L'andamento della forza di lift e il suo impulso è il seguente:

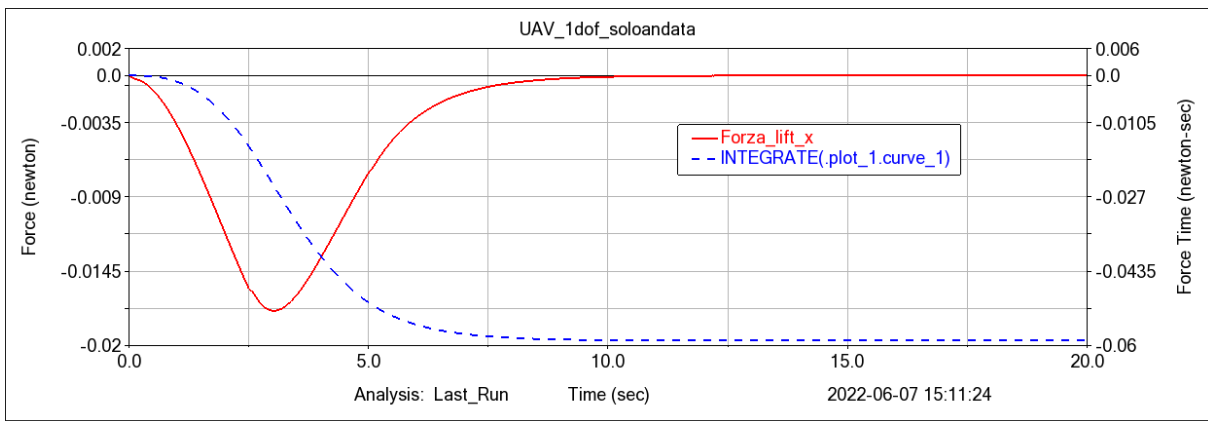


Figura 59: grafico componente della forza di lift lungo x e il suo impulso

Dato che la curva dell'impulso è costante ma non nulla nemmeno dopo che finisce il moto del braccio, il velivolo continua a velocità costante. Invece, in qualsiasi istante compreso tra 0 e 10 secondi, la curva dell'impulso varia, questo implica che l'UAV sta subendo una variazione della quantità di moto rispetto all'istante iniziale e quindi è sottoposto ad una accelerazione.

Nelle figure seguenti è rappresentato l'andamento delle coordinate y e ϕ in confronto alle azioni del controllo che agiscono sulle rispettive coordinate.

3 BRACCIO IN POSIZIONE AVANZATA

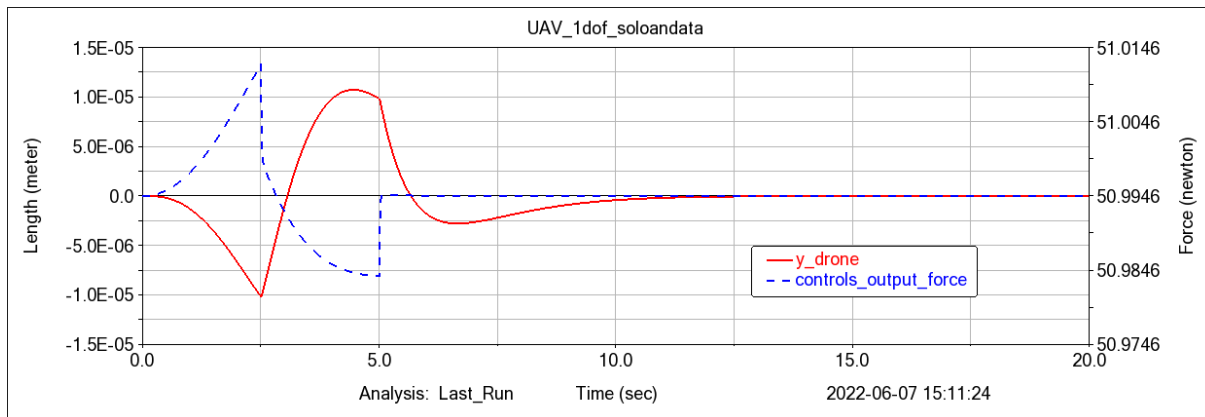


Figura 60: grafico coordinata y dell'UAV vs forza di controllo

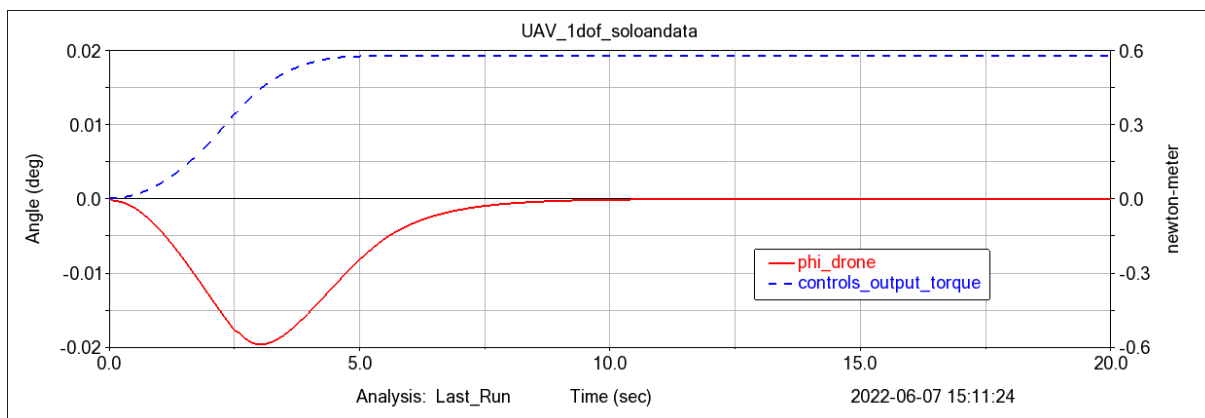


Figura 61: grafico rollio dell'UAV vs coppia di controllo

Quando il moto del braccio è terminato, il controllo ha riportato il velivolo nella posizione $\phi=0$ e $y=0$. La forza è pari alla forza di gravità in modo da mantenere il velivolo in hovering, mentre la coppia è tale da mantenere la posizione $\phi=0$ considerando la coppia costante dovuta alla forza di gravità esercitata dal braccio.

3.2.1 Caso particolare: $K_i = 0$

Un comportamento molto differente dal caso precedente si ottiene ponendo K_i della coppia di controllo pari a zero.

I parametri del controllo PID sono i seguenti:

	K_p	K_d	K_i
Y	1000	500	500
ϕ	600	30	0

Tabella 11: controllo PID con valori dei parametri alti e K_i della coppia pari a zero

Il drone torna in posizione desiderata ($y=0$) dopo circa 12s, mentre non recupera la posizione lungo ϕ .

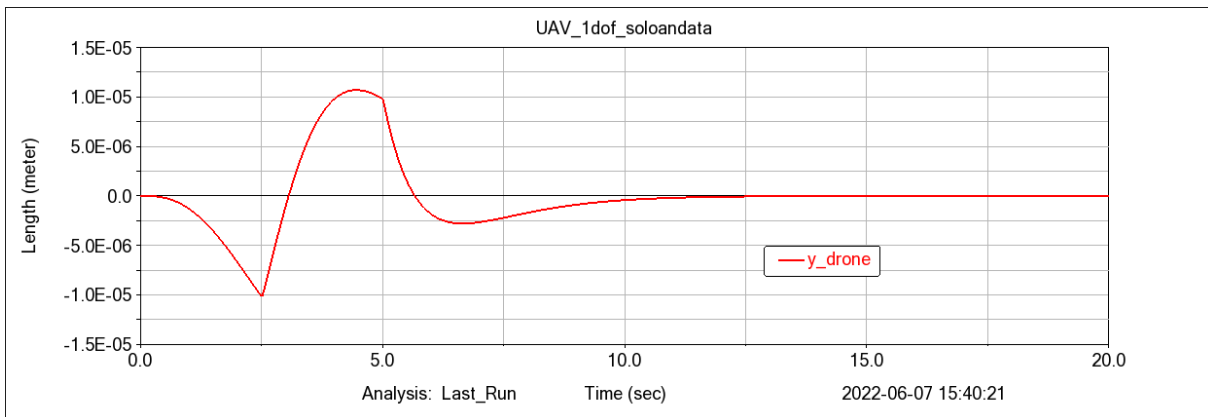


Figura 62: posizione lungo y dell'UAV

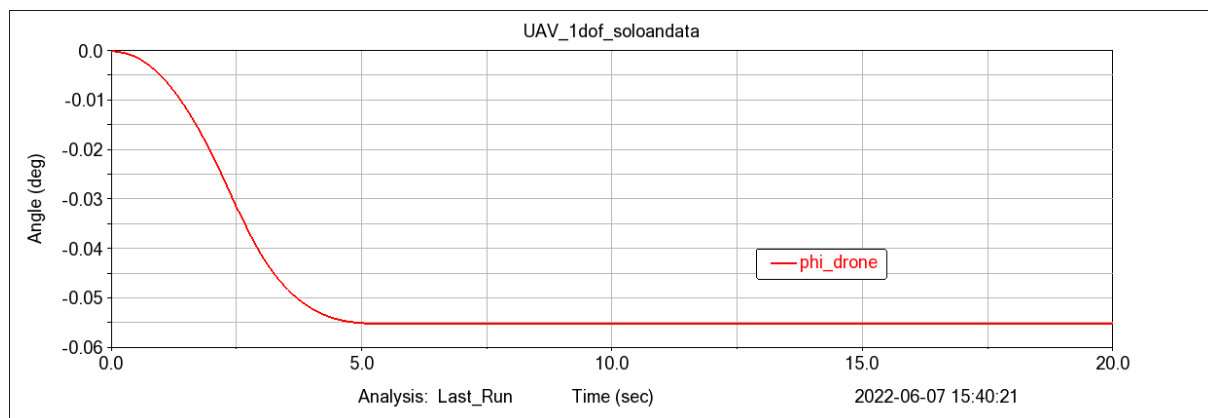


Figura 63: rollio dell'UAV

L'UAV si sposta lungo x e lungo questa direzione non recupera la posizione iniziale.

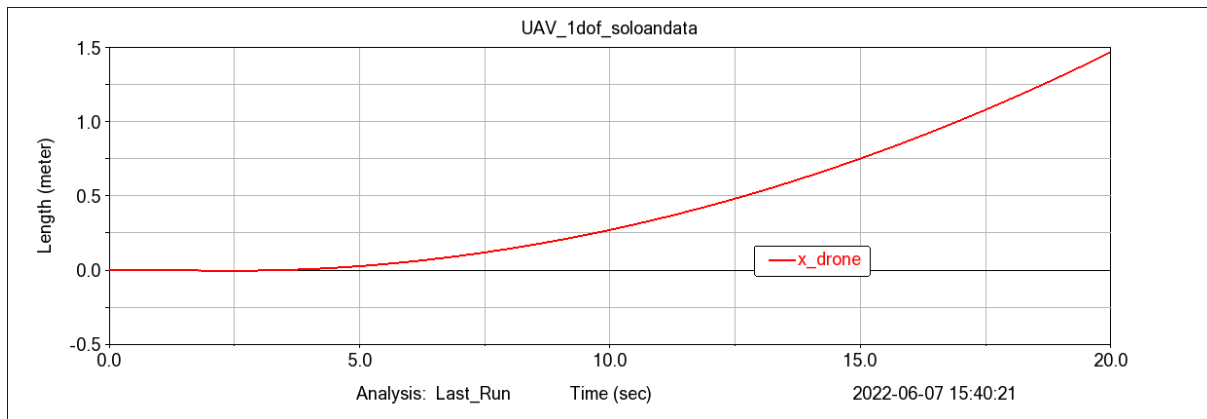


Figura 64: posizione lungo x dell'UAV

Il velivolo si sposta lungo le x positive, e dopo 5 s non si ferma, anzi continua ad aumentare la sua velocità.

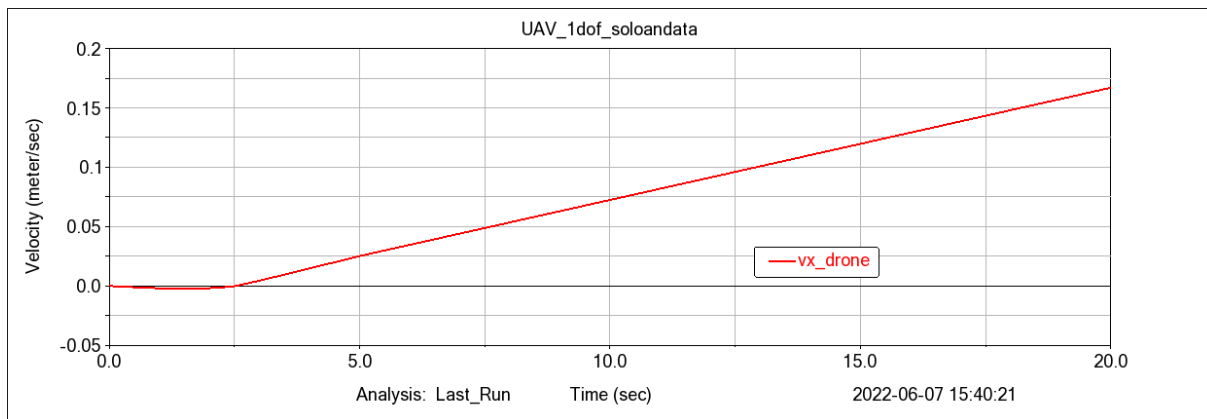


Figura 65: velocità lungo x dell'UAV

Dopo circa 5 s l'accelerazione è costante diversa da zero. Quindi l'UAV, dopo un moto lungo x con accelerazione non costanti, prosegue con un moto ad accelerazione costante.

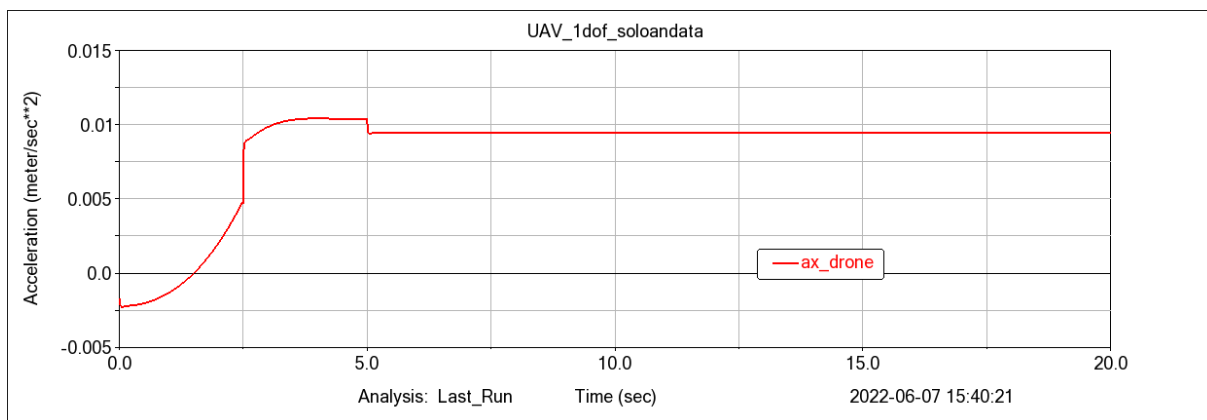


Figura 66: accelerazione lungo x dell'UAV

L'UAV si inclina solo da una parte e rimane inclinato quando il moto del braccio è terminato. Subisce un'accelerazione che rimane costante, data dal rollio costante. Il controllo non riporta il drone con $\phi=0$, perché manca il termine integrativo del controllo che compensa disturbi costanti come il momento della forza di gravità del braccio che agisce sull'UAV. Il drone mantiene un'accelerazione costante.

L'andamento della forza di lift e il suo impulso è il seguente:

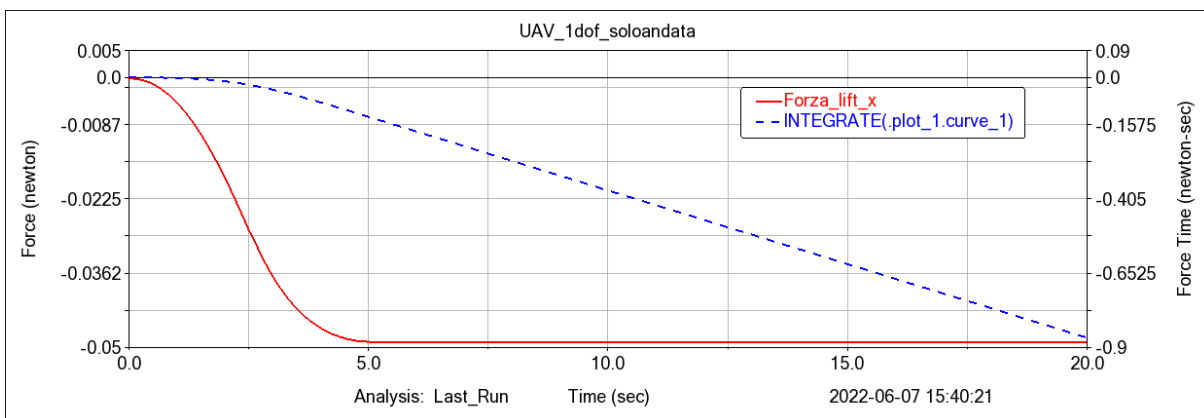


Figura 67: grafico componente della forza di lift lungo x e il suo impulso

A differenza dei casi precedenti, la forza di lift di è costante e non si annulla nemmeno dopo che finisce il moto del braccio, di conseguenza che la curva dell'impulso è crescente. Il velivolo continua ad accelerazione costante e aumenterà quindi la sua velocità.

Nelle figure seguenti è rappresentato l'andamento delle coordinate y e ϕ in confronto alle azioni del controllo che agiscono sulle rispettive coordinate.

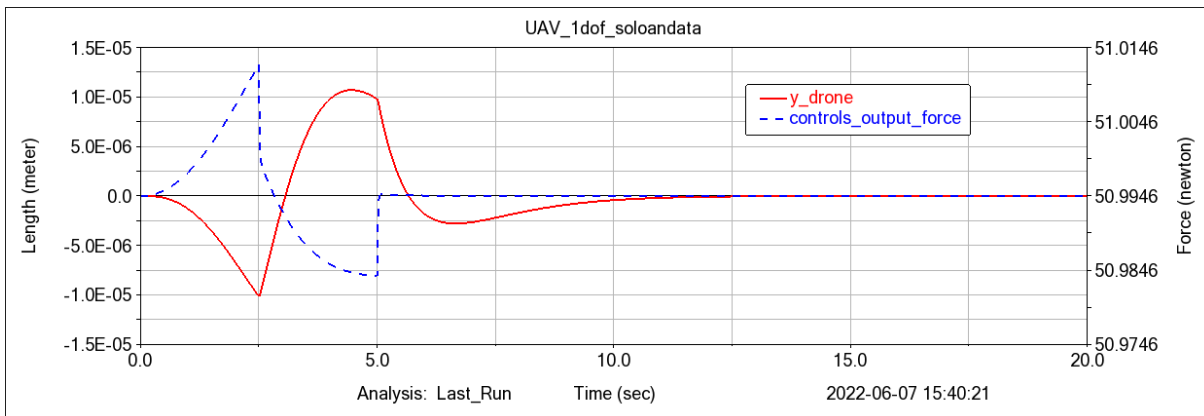


Figura 68: grafico coordinata y dell'UAV vs forza di controllo

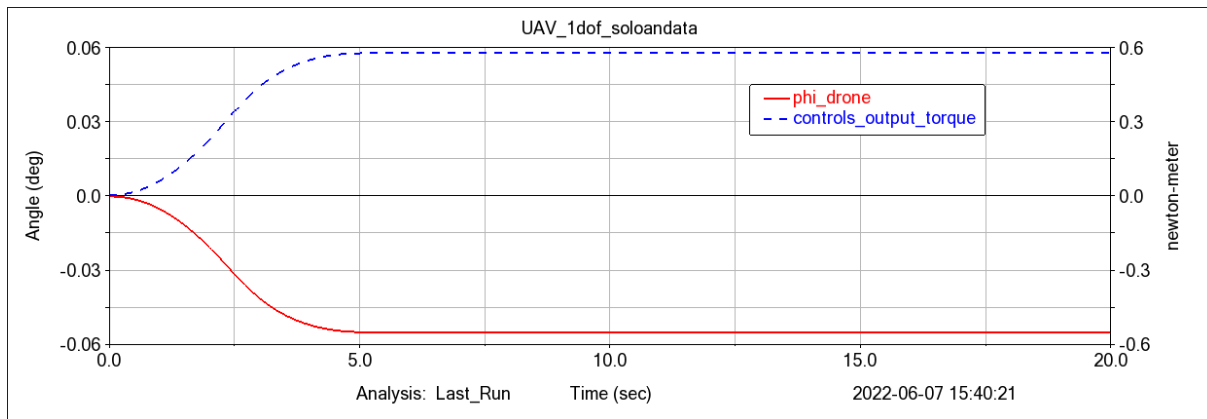


Figura 69: grafico rollio dell'UAV vs coppia di controllo

Dopo 15s, quando il moto del braccio è terminato, il controllo ha riportato il velivolo nella posizione $y=0$. La forza è pari alla forza di gravità in modo da mantenere il velivolo in hovering, mentre la coppia è tale da mantenere la posizione considerando la coppia costante dovuta alla forza di gravità esercitata dal braccio.

3.3 CONTROLLO PID CON VALORE DEI PARAMETRI PID BASSI

I parametri del controllo PID sono i seguenti:

	Kp	Kd	Ki
γ	53	33	16
ϕ	74	11	57

Tabella 12: controllo PID con valori dei parametri bassi

Il drone torna in posizione desiderata ($\phi=0$ e $\gamma=0$) dopo circa 18s.

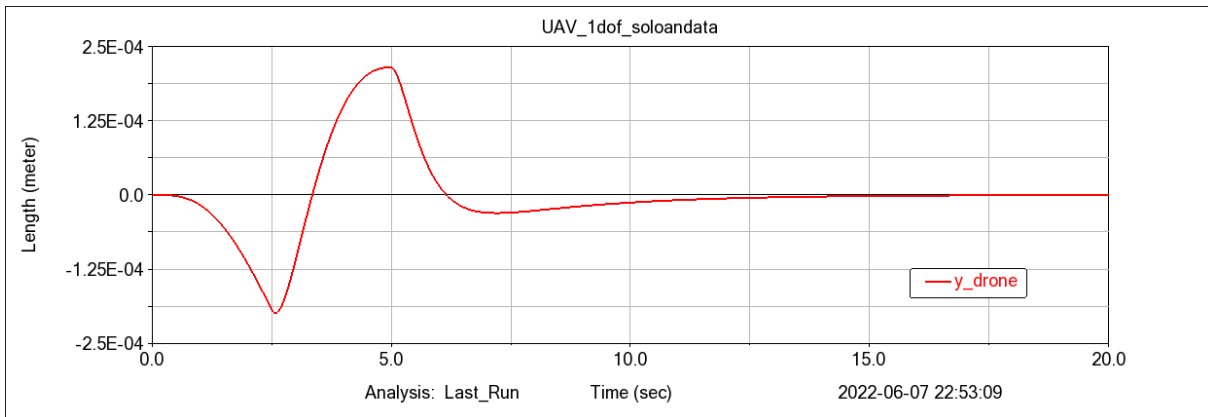


Figura 70: posizione lungo y dell'UAV

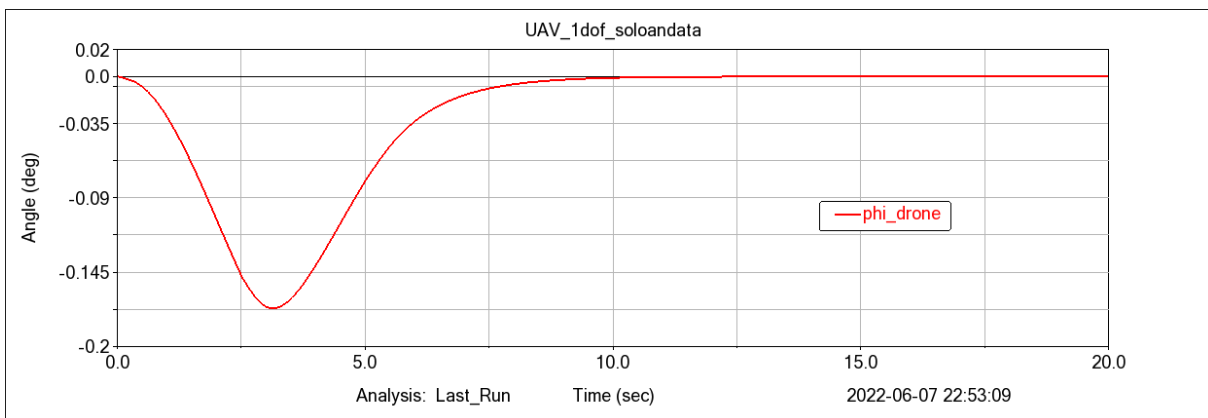


Figura 71: rollio dell'UAV

I valori massimi di γ e ϕ sono maggiori con valori dei parametri del controllo minori.

L'UAV si sposta lungo x e lungo questa direzione non recupera la posizione iniziale.

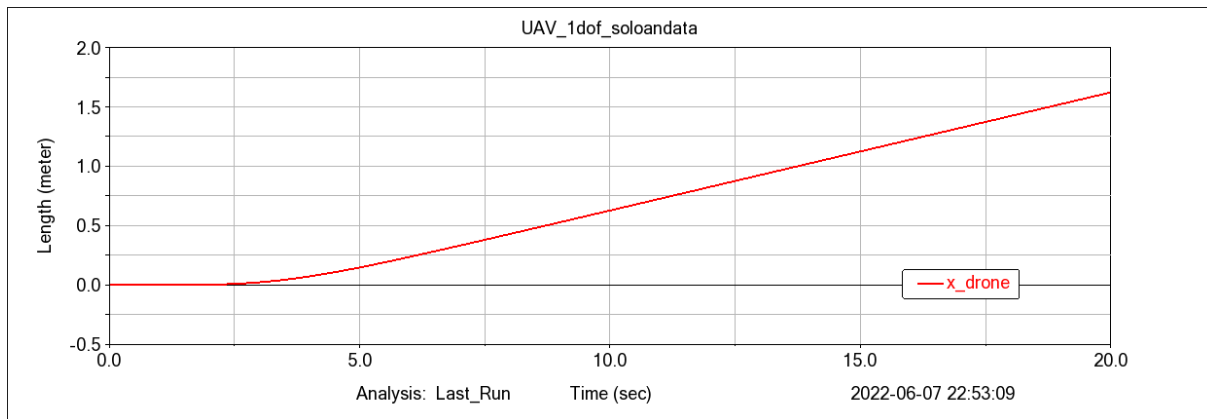


Figura 72: posizione lungo x dell'UAV

Il velivolo si sposta lungo le x positive, e dopo 5 s non si ferma, anzi continua con una velocità costante.

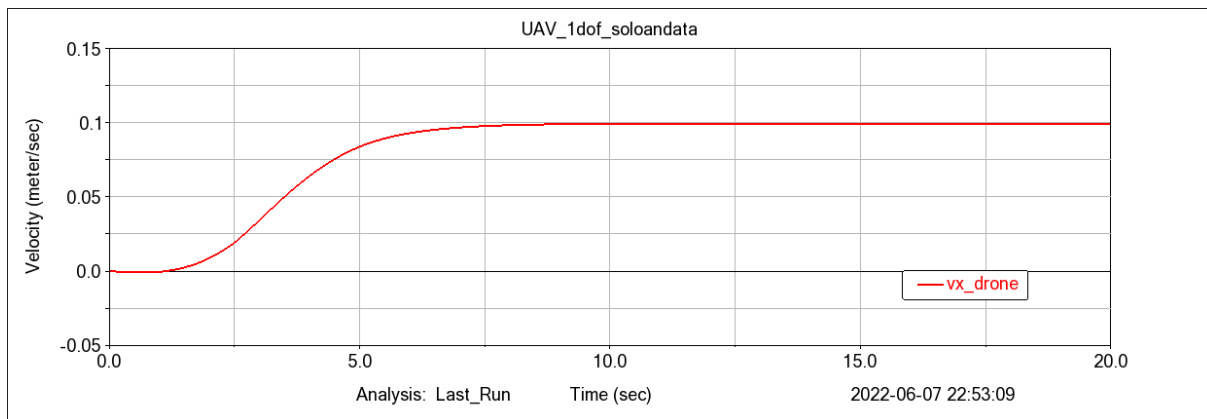


Figura 73: velocità lungo x dell'UAV

Infatti, dopo circa 5 s l'accelerazione è uguale a zero. Quindi l'UAV, dopo un moto lungo x con accelerazione non costanti, prosegue con un moto ad accelerazione nulla.

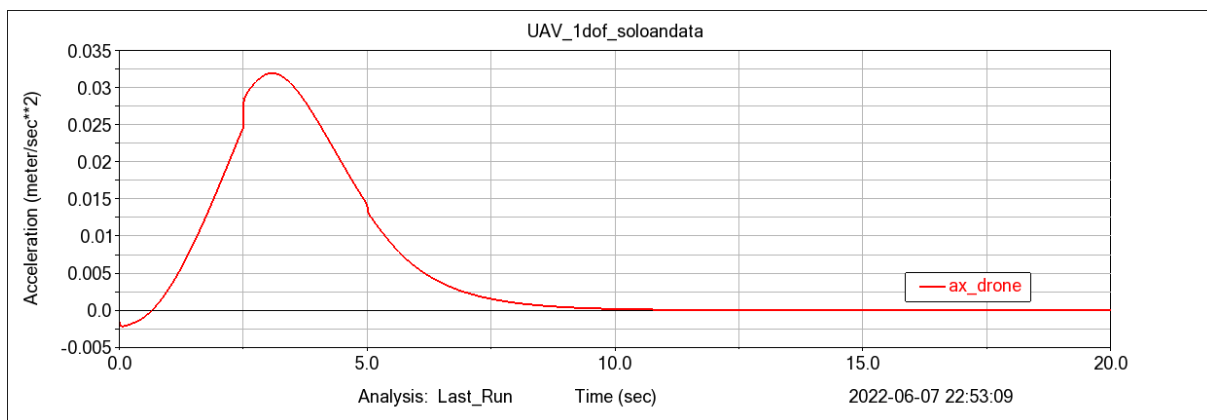


Figura 74: accelerazione lungo x dell'UAV

L'UAV si inclina solo da una parte e subisce un'accelerazione che non viene compensata. Quando il controllo riporta il drone con $\phi=0$, il drone mantiene una velocità costante che acquisisce nel transitorio.

L'andamento della forza di lift lungo x e il suo impulso è il seguente:

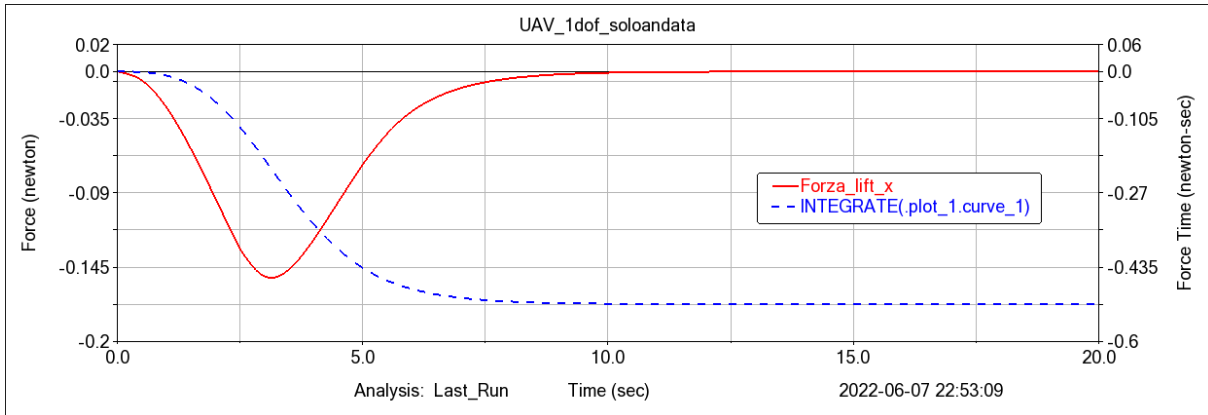


Figura 75: grafico componente della forza di lift lungo x e il suo impulso

Dato che la curva dell'impulso è costante ma non nulla nemmeno dopo che finisce il moto del braccio, il velivolo continua a velocità costante. Invece, in qualsiasi istante compreso tra 0 e 10 s, la curva dell'impulso varia, questo implica che l'UAV sta subendo una variazione della quantità di moto rispetto all'istante iniziale e quindi è sottoposto ad una accelerazione.

Nelle figure seguenti è rappresentato l'andamento delle coordinate y e ϕ in confronto alle azioni del controllo che agiscono sulle rispettive coordinate.

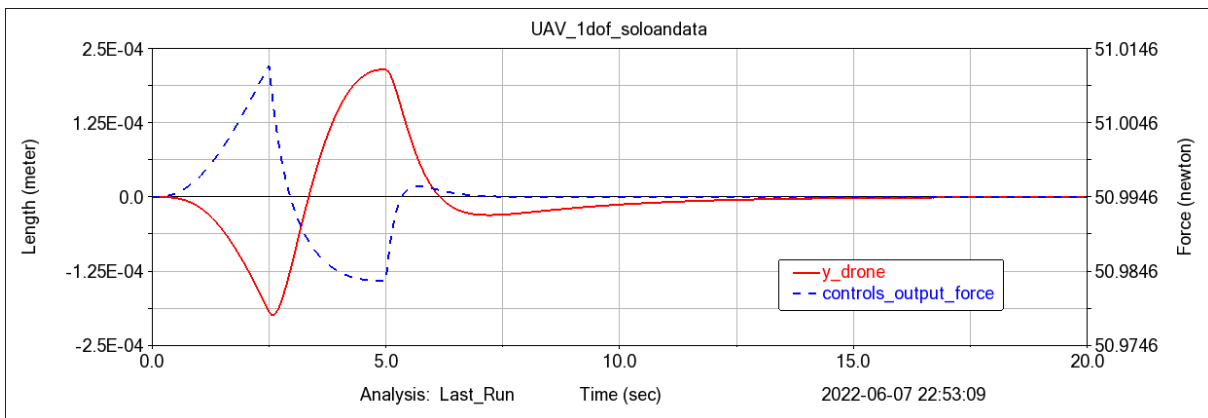


Figura 76: grafico coordinata y dell'UAV vs forza di controllo

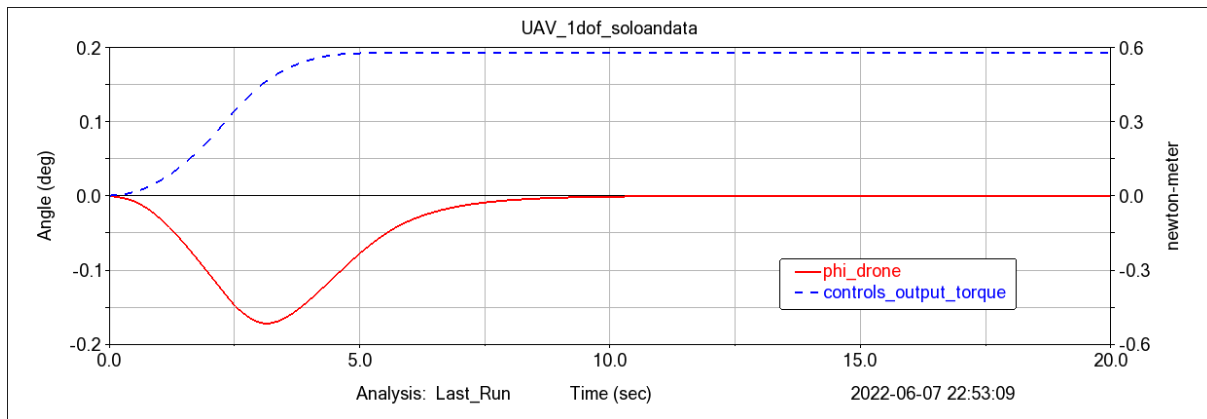


Figura 77: grafico rollio dell'UAV vs coppia di controllo

Quando il moto del braccio è terminato, il controllo ha riportato il velivolo nella posizione $\phi=0$ e $y=0$. La forza è pari alla forza di gravità in modo da mantenere il velivolo in hovering, mentre la coppia è tale da mantenere la posizione $\phi=0$ considerando la coppia costante dovuta alla forza di gravità esercitata dal braccio.

3.3.1 Caso particolare: $K_i = 0$

Un comportamento molto differente dal caso precedente si ottiene ponendo K_i della coppia di controllo pari a zero.

I parametri del controllo PID sono i seguenti:

	K_p	K_d	K_i
Y	53	33	16
ϕ	74	11	0

Tabella 13: controllo PID con valori dei parametri bassi e K_i della coppia pari a zero

Il drone torna in posizione desiderata ($y=0$) dopo circa 12s, mentre non recupera la posizione lungo ϕ .

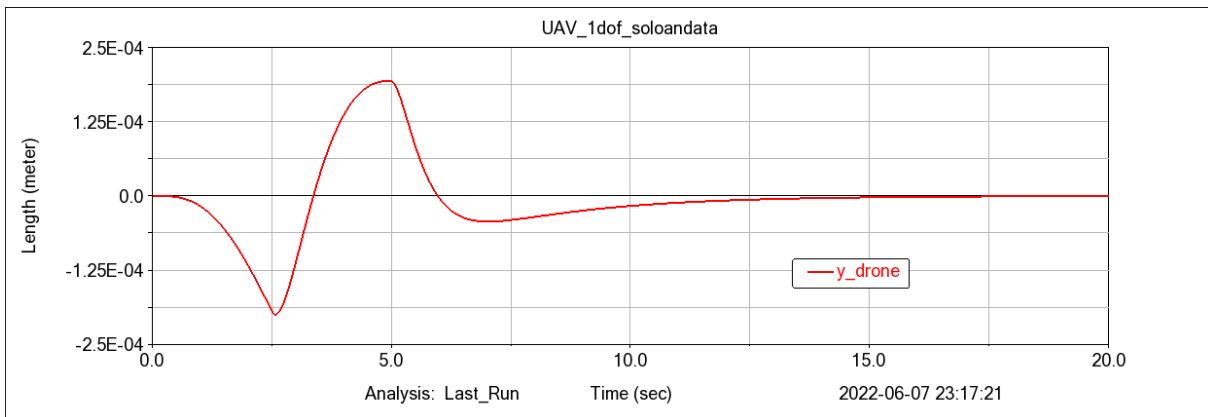


Figura 78: posizione lungo y dell'UAV

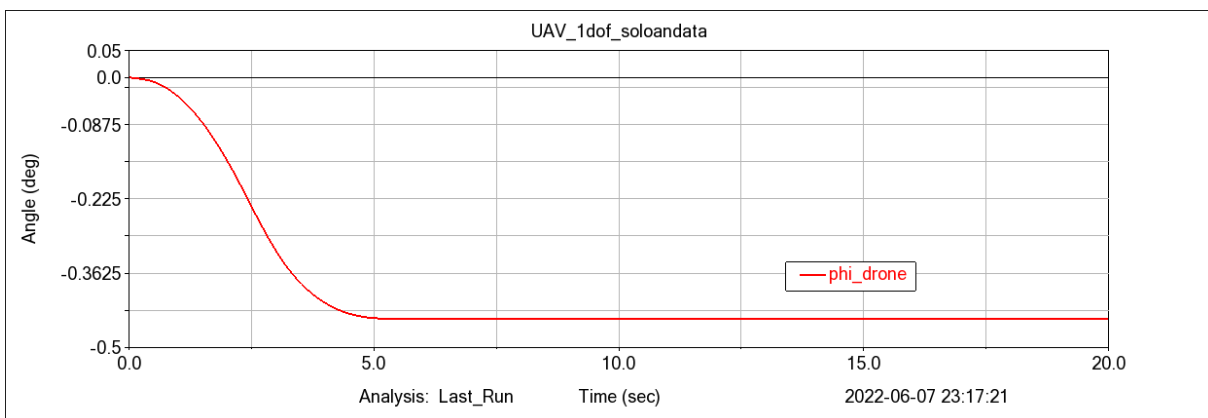


Figura 79: rollio dell'UAV

L'UAV si sposta lungo x e lungo questa direzione non recupera la posizione iniziale.

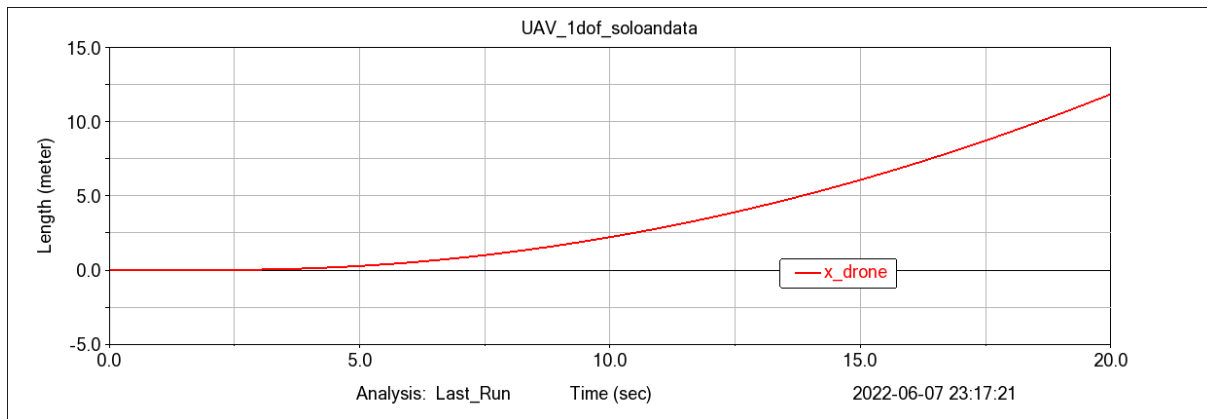


Figura 80: posizione lungo x dell'UAV

Il velivolo si sposta lungo le x positive, e dopo 5 s non si ferma, anzi continua ad aumentare la sua velocità.

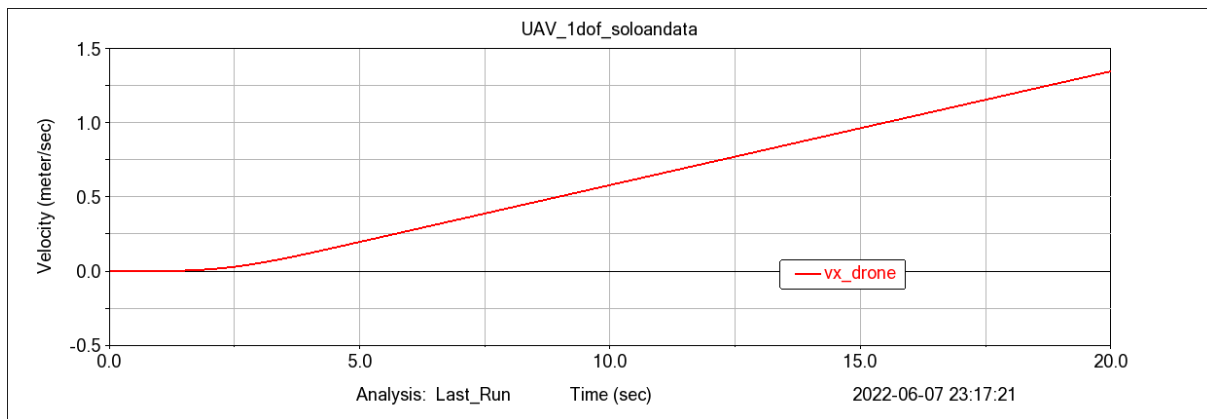


Figura 81: velocità lungo x dell'UAV

Dopo circa 5 s l'accelerazione è costante diversa da zero. Quindi l'UAV, dopo un moto lungo x con accelerazione non costanti, prosegue con un moto ad accelerazione costante.

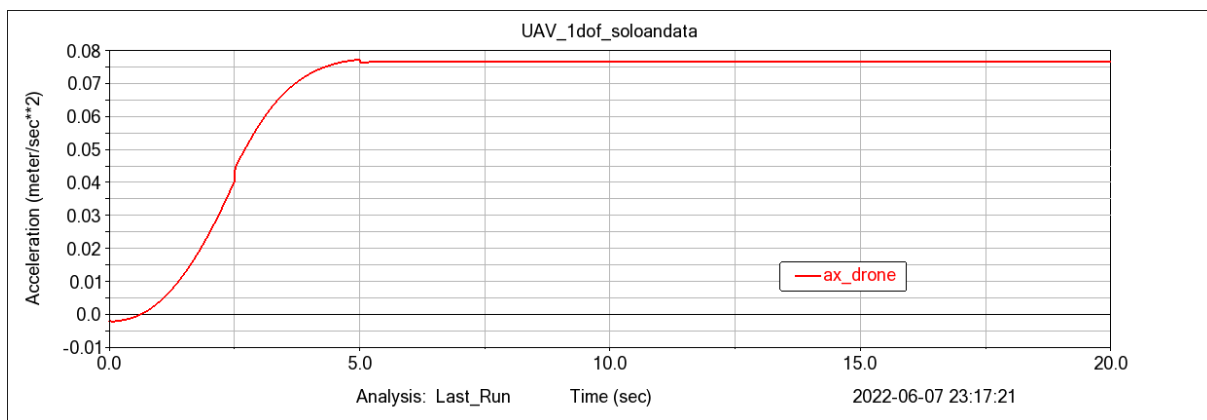


Figura 82: accelerazione lungo x dell'UAV

L'UAV si inclina solo da una parte e rimane inclinato quando il moto del braccio è terminato. In questo modo subisce un'accelerazione che rimane costante, data dal rollio costante. Il controllo non riporta il drone con $\phi=0$, quindi il drone mantiene un'accelerazione costante.

L'andamento della forza di lift e il suo impulso è il seguente:

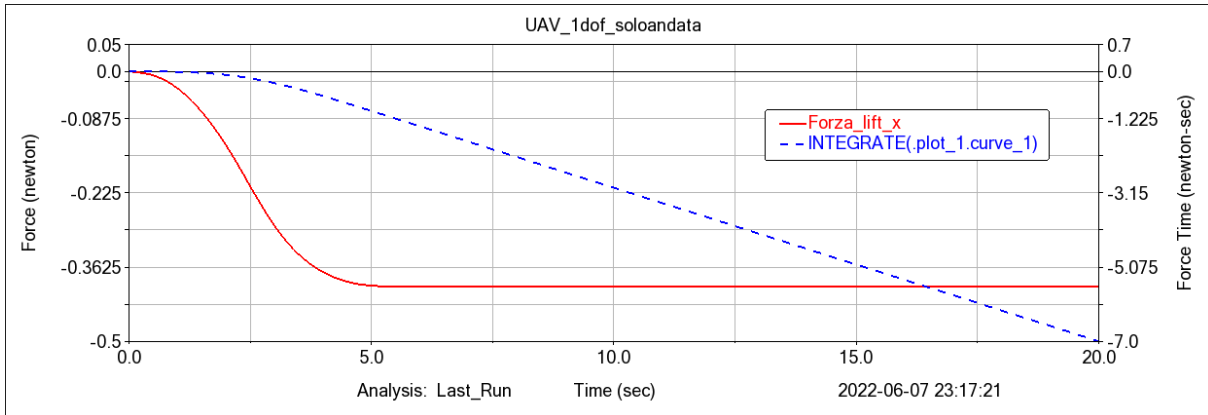


Figura 83: grafico componente della forza di lift lungo x e il suo impulso

Dato che la curva dell'impulso è crescente, e la forza di lift di conseguenza è costante, dopo che finisce il moto del braccio, il velivolo continua ad accelerazione costante e aumenterà quindi la sua velocità.

Nelle figure seguenti è rappresentato l'andamento delle coordinate y e ϕ in confronto alle azioni del controllo che agiscono sulle rispettive coordinate.

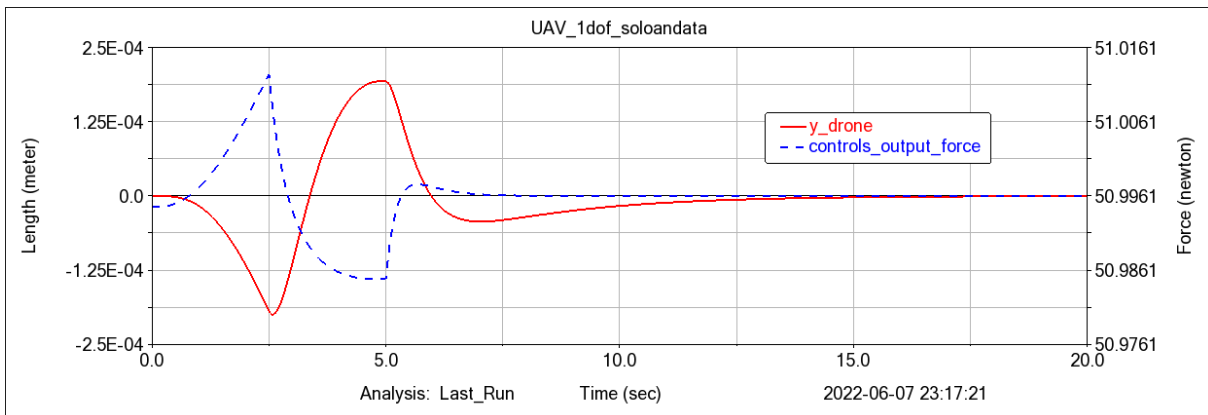


Figura 84: grafico coordinata y dell'UAV vs forza di controllo

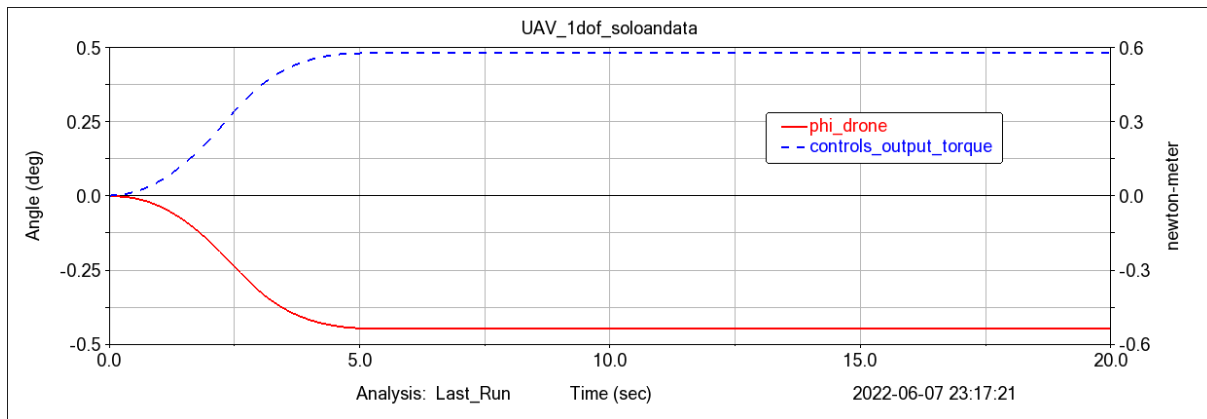


Figura 85: grafico rollio dell'UAV vs coppia di controllo

Dopo 15s, quando il moto del braccio è terminato, il controllo ha riportato il velivolo nella posizione $y=0$. La forza è pari alla forza di gravità in modo da mantenere il velivolo in hovering, mentre la coppia è tale da mantenere la posizione considerando la coppia costante dovuta alla forza di gravità esercitata dal braccio.

4 BRACCIO ROTANTE

In questo caso, il braccio è formato da un link dal peso di 0.1 kg e da un peso alla sua estremità di 0.2 kg. È stato deciso di diminuire la massa del braccio in quanto il movimento che dovrà compiere sarà una rotazione di 360 gradi [15]; con la prospettiva futura di provare nella realtà tramite esperimenti ciò che è simulato qui, si è giunti alla conclusione di diminuire il peso per evitare di dover utilizzare un motore troppo pesante.

Il sistema simulato su Adams è il seguente:

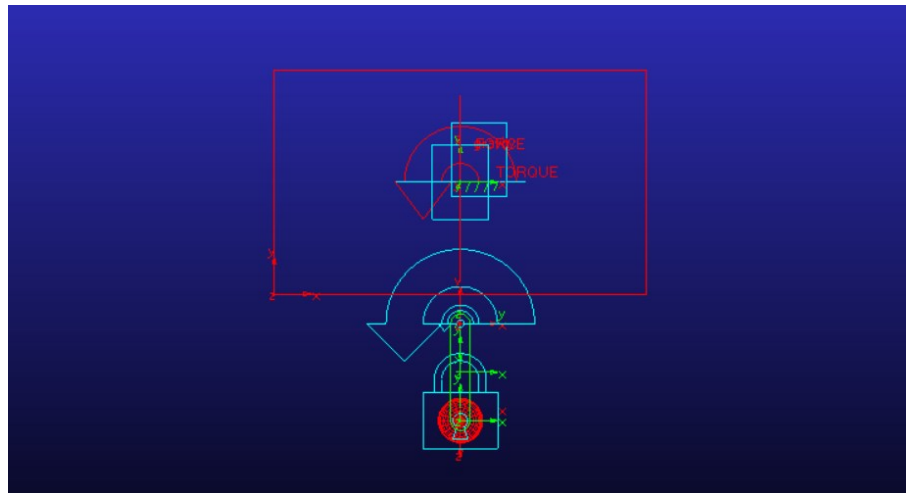


Figura 86: modello Adams con braccio rotante

Per quanto riguarda il moto del braccio stata utilizzata la seguente funzione sul software Adams:

$$\omega(t) = \text{STEP}(0, 0, \text{DeltaT}, \text{vel ang})$$

dove “DeltaT” è l’intervallo di tempo in cui ho accelerazione angolare non nulla, e “vel ang” è il valore a regime della velocità angolare del braccio.

Il parametro “DeltaT” è settato su 10 secondi mentre “vel ang” verrà fatto variare per studiare il suo effetto sul moto dell’UAV.

Quindi il braccio parte da fermo in posizione verticale accelera per 10 secondi fino a raggiungere la velocità angolare impostata e poi la mantiene costante.

Il moto imposta risulta essere il seguente: ad esempio se la velocità angolare a regime è 20 gradi/s:

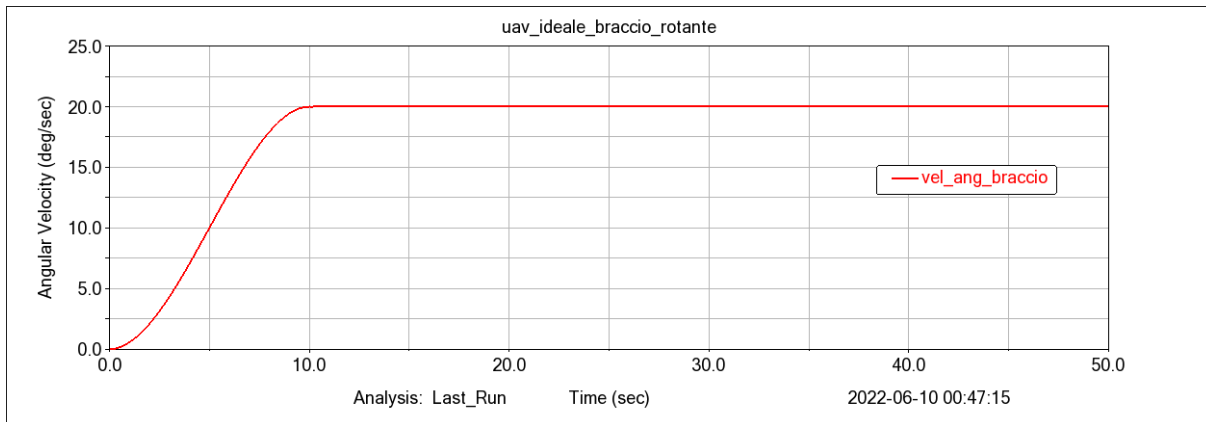


Figura 87: velocità angolare del braccio con valore massimo pari a 20 gradi/s

Invece, se si aumenta la velocità angolare massima, ad esempio, a 100 gradi/s, il braccio raggiunge sempre in 10 secondi la velocità imposta. Risulta quindi:

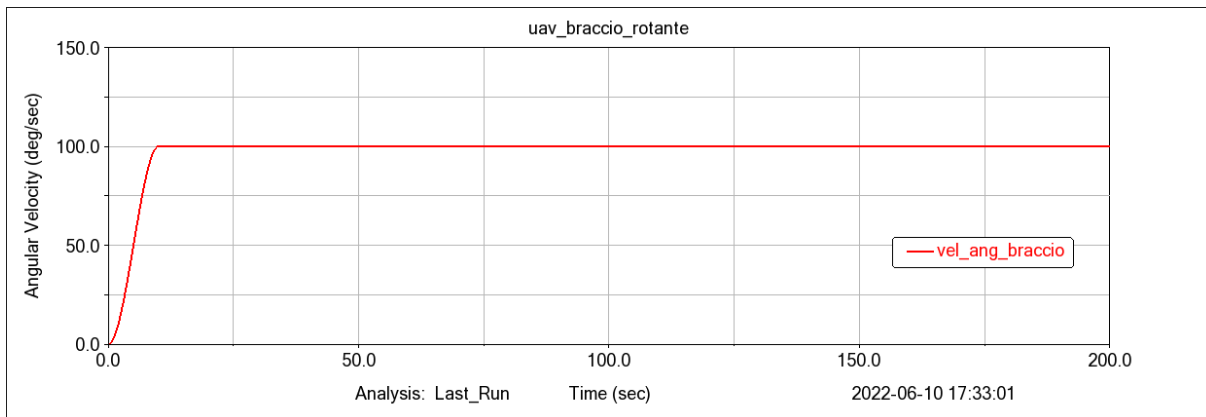


Figura 88: velocità angolare del braccio con valore massimo pari a 100 gradi/s

4.1 CONTROLLO IDEALE

Per ora, consideriamo un controllo con risposta istantanea all'errore.

Nel primo caso la velocità angolare a regime è 20 gradi/s.

L'UAV oscilla attorno alla posizione di equilibrio:

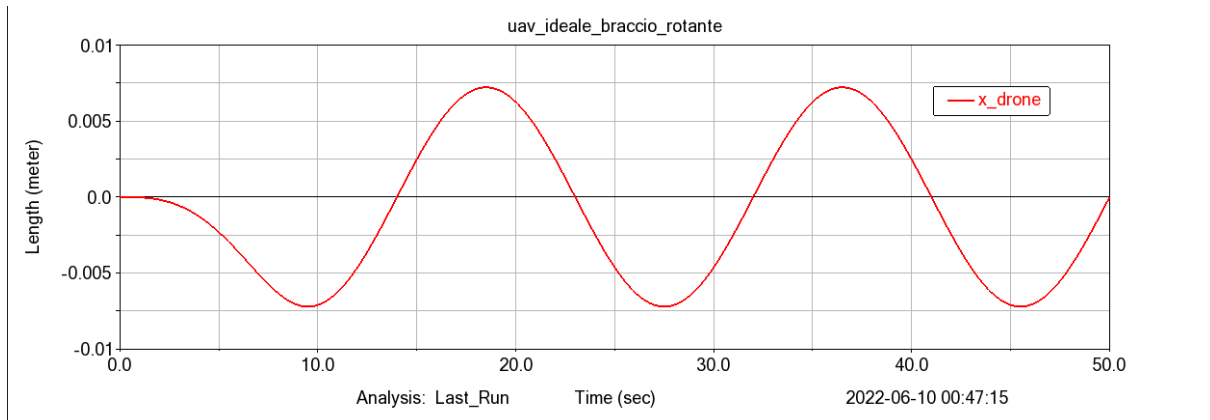


Figura 89: posizione lungo x dell'UAV

Dato che non agiscono forze esterne sul sistema, il baricentro totale del sistema UAV + braccio rimane invariato:

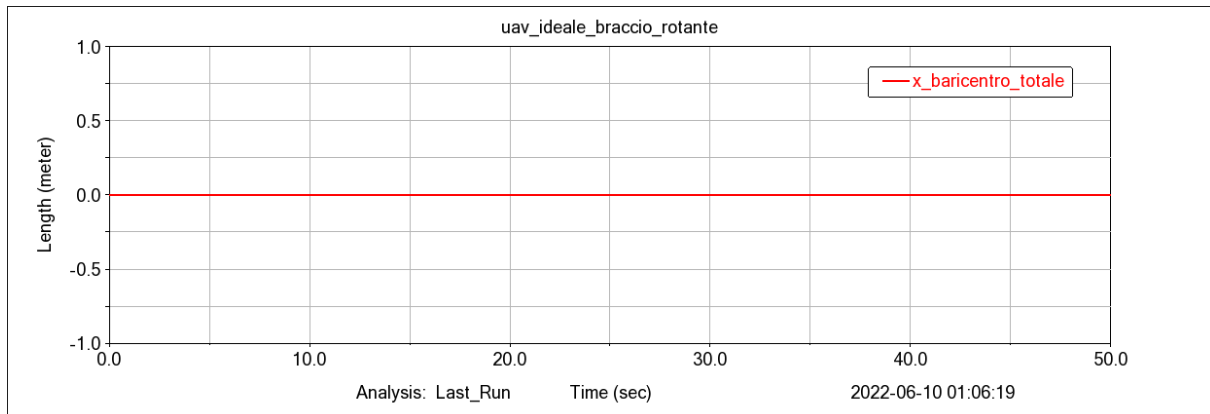


Figura 90: grafico baricentro complessivo del sistema UAV + braccio

Infatti, per la conservazione della quantità di moto, quando il centro di massa del sistema braccio + peso si sposta verso le x positive, il drone, di conseguenza, si sposta verso le x negative. Viceversa, quando il centro di massa del sistema braccio + peso si sposta verso le x negative, il drone, di conseguenza, si sposta verso le x positive. In questo modo il baricentro totale del sistema rimane nella posizione iniziale.

Nel secondo caso la velocità angolare a regime è 100 gradi/s.

Anche in questo caso l'UAV oscilla attorno alla posizione di equilibrio. La frequenza di oscillazione aumenta all'aumentare della velocità angolare del braccio.

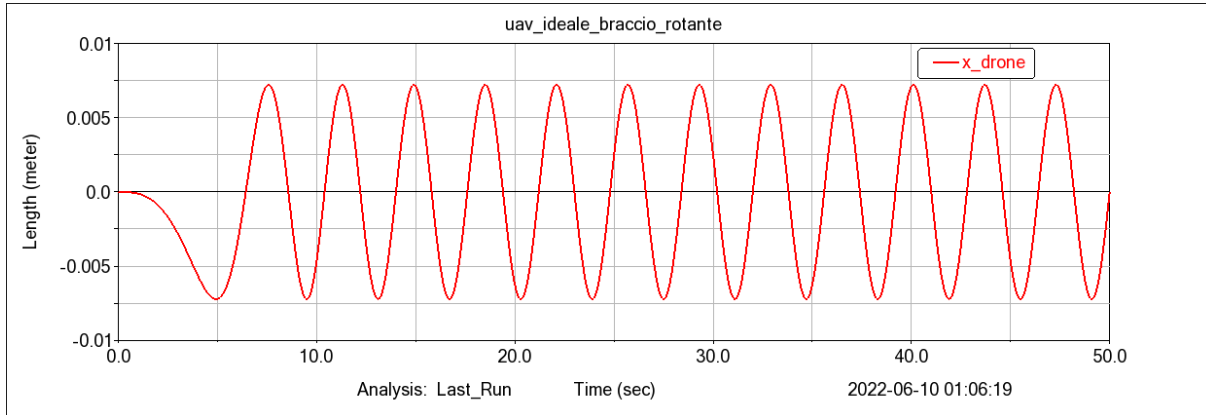


Figura 91: posizione lungo x dell'UAV

Come prima, dato che non agiscono forze esterne sul sistema, il baricentro totale del sistema UAV + braccio rimane invariato:

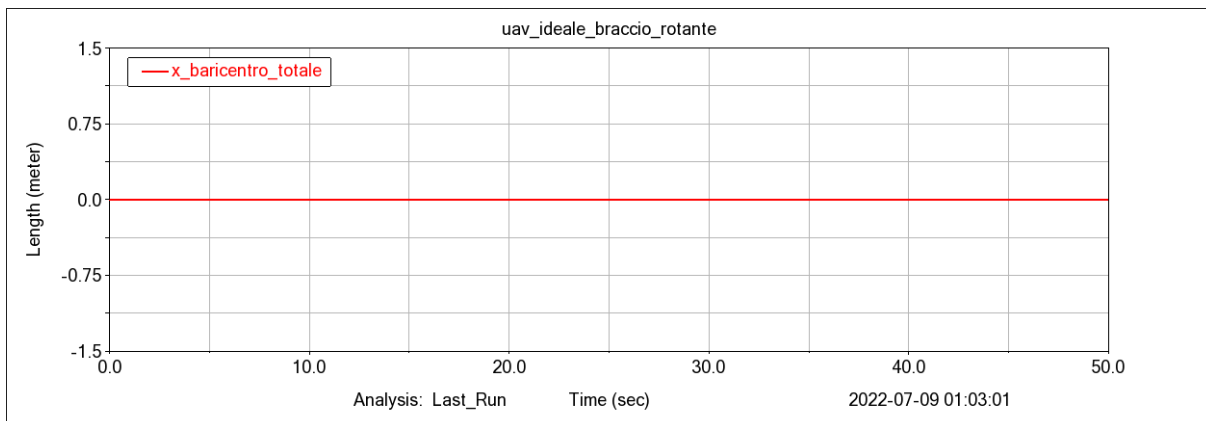


Figura 92: grafico baricentro complessivo del sistema UAV + braccio

4.2 CONTROLLO PID CON VALORE DEI PARAMETRI PID ALTI

I parametri del controllo PID sono i seguenti:

	Kp	Kd	Ki
γ	1000	500	500
ϕ	600	30	500

Tabella 14: controllo PID con valori dei parametri alti

Nel primo caso la velocità angolare a regime è 20 gradi/s.

Il moto lungo x dell'UAV è il seguente:

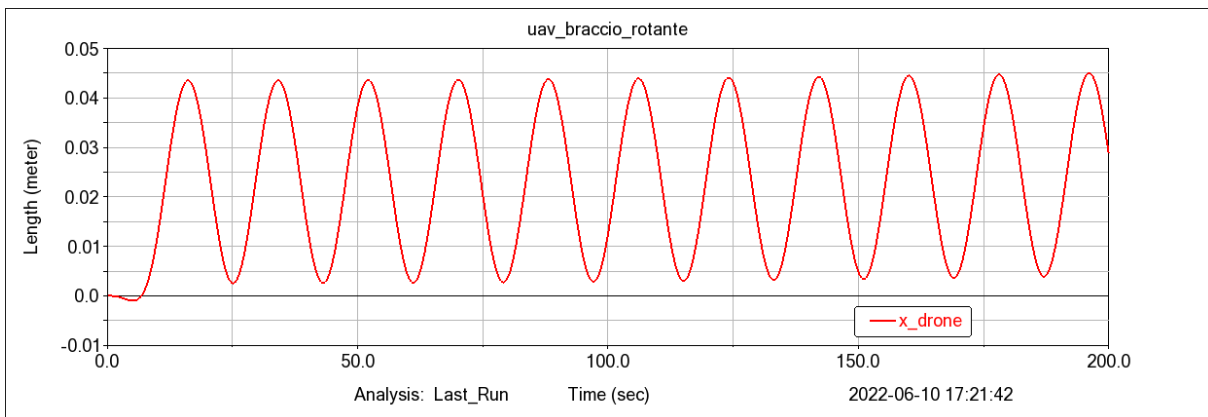


Figura 93: posizione lungo x dell'UAV

Si nota l'UAV oscilla e tende a divergere. Quindi non oscilla attorno alla posizione di equilibrio come nel caso di controllo ideale. Questo fenomeno si nota di più a velocità del braccio elevate in quanto la frequenza di oscillazione del drone sarà maggiore.

Nel secondo caso la velocità angolare a regime è impostata a 100 gradi/s.

Ora si nota meglio il movimento del drone, che diverge sempre di più verso le x positive.

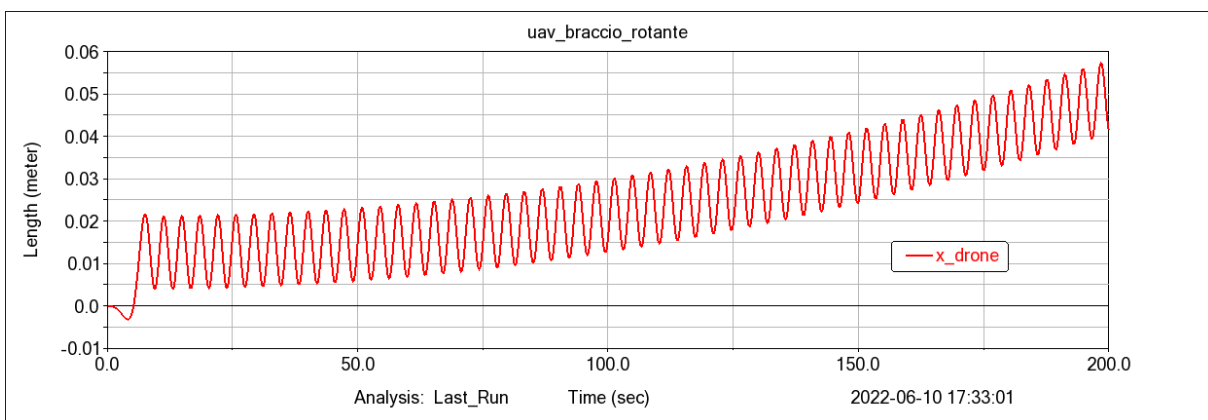


Figura 94: posizione lungo x dell'UAV

Però, aumentando ancora la velocità angolare del braccio il velivolo si sposta lungo le x negative, a differenza dei casi precedenti.

Ad esempio, si pone la velocità angolare a regime del braccio molto alta, pari a 400 gradi/s, il moto lungo x dell'UAV è il seguente:

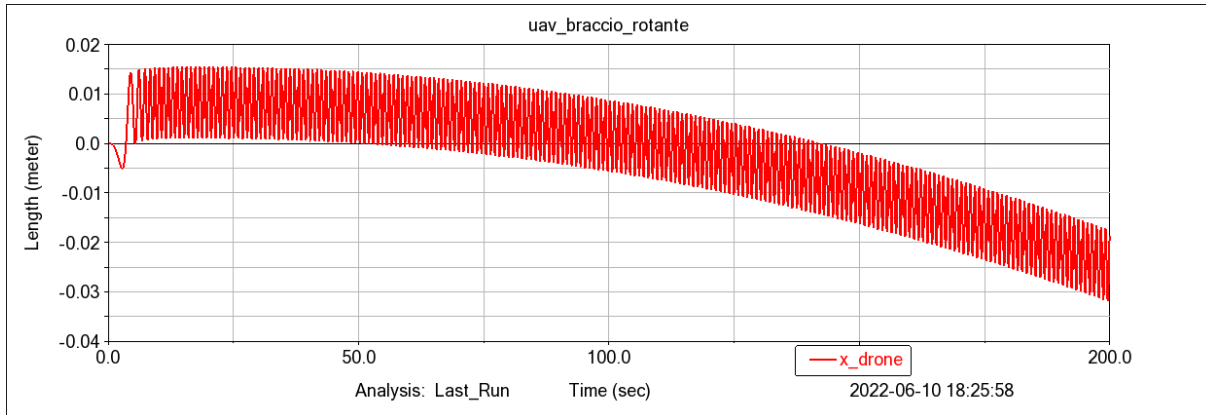


Figura 95: posizione lungo x dell'UAV

Il drone, ora, si sposta lungo le x negative.

Per capire il perché di questo fenomeno bisogna confrontare i grafici della forza di controllo e la rotazione di rollio del drone.

I grafici risultanti sono i seguenti:

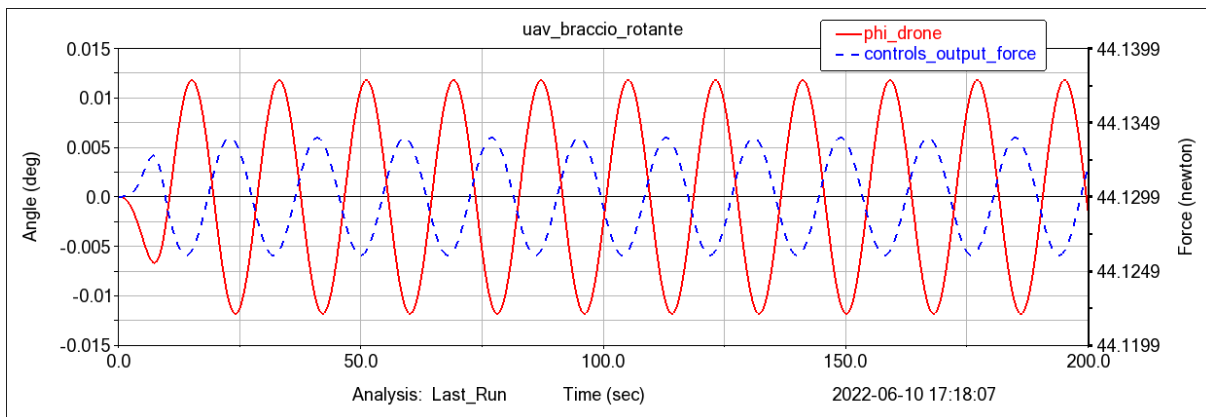


Figura 96: grafico della forza di controllo vs rotazione del drone con velocità angolare a regime pari a 20 gradi/s

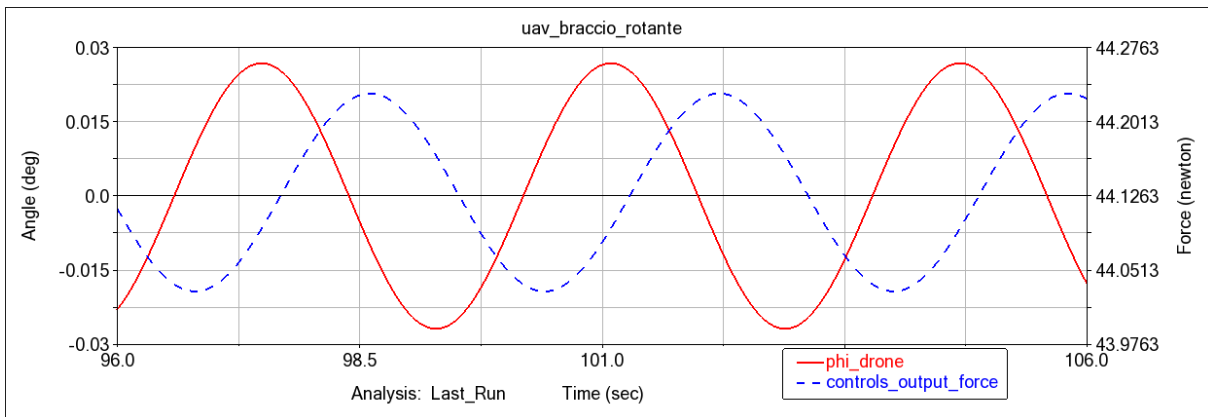


Figura 97: grafico della forza di controllo vs rotazione del drone con velocità angolare a regime pari a 100 gradi/s

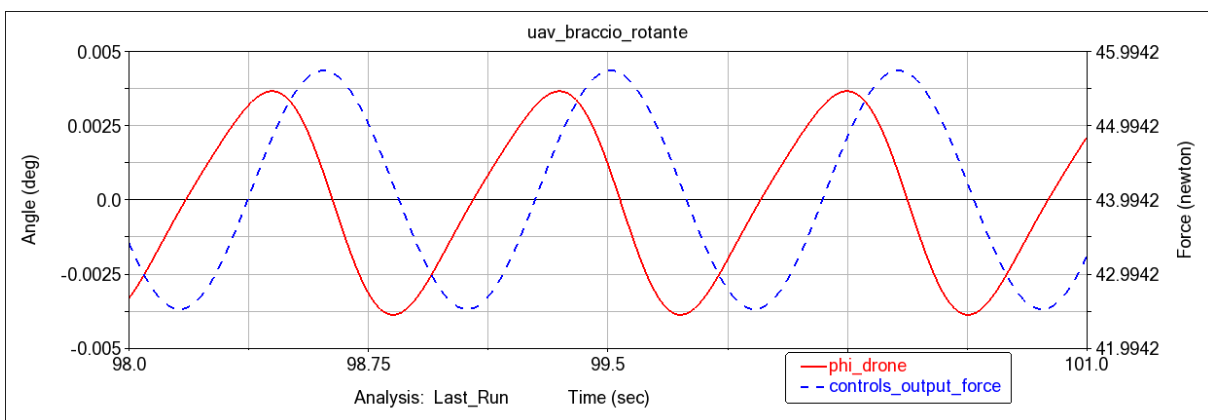


Figura 98: grafico della forza di controllo vs rotazione del drone con velocità angolare a regime pari a 400 gradi/s

Tutto dipende dallo sfasamento tra ϕ e la forza generata dal controllo.

A velocità maggiori ho la frequenza con cui oscilla la forza di controllo che aumenta e il range di valori, tra cui oscilla la forza sono maggiori con velocità angolare maggiore.

Se si utilizzano velocità angolari piccole: l'angolo di rollio e la forza sono "quasi" in controfase. Ne risulta che il drone è sottoposto a forze maggiori quando ha angolo ϕ negativo, che lo porta a muoversi lungo x positive (vedi Figura 95 e 96).

Aumentando il valore della velocità angolare la differenza di fase diminuisce, lo si nota confrontando Figura 94 e Figura 95.

Se si utilizzano velocità angolari grandi: l'angolo di rollio e la forza sono "quasi" in fase. Ne risulta che il drone è sottoposto a forze maggiori quando il drone è con angolo ϕ positivo, che porta il drone a muoversi lungo x negative (vedi Figura 97).

Si nota che aumentando la velocità angolare del braccio, le oscillazioni del drone aumentano e aumenta, a parità di tempo, la distanza che percorre. In generale, con questi parametri il drone percorre pochi centimetri in 200 secondi di simulazione.

4.2.1 Caso particolare: $K_i = 0$

I parametri del controllo PID sono i seguenti:

	Kp	Kd	Ki
γ	1000	500	500
ϕ	600	30	0

Tabella 15: controllo PID con valori dei parametri bassi e K_i della coppia pari a zero

Ponendo $k_i=0$, cambia in modo sostanziale il moto del velivolo.

Con velocità angolare pari a 20 gradi/s, lo spostamento lungo x del drone è il seguente:

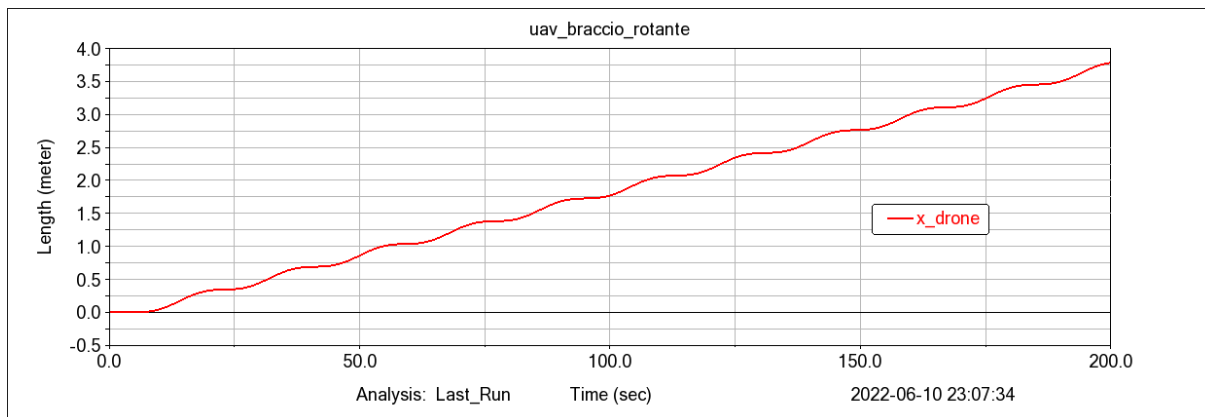


Figura 99: spostamento lungo x dell'UAV

Facendo uno zoom e aggiungendo il rollio del drone otteniamo questa immagine:

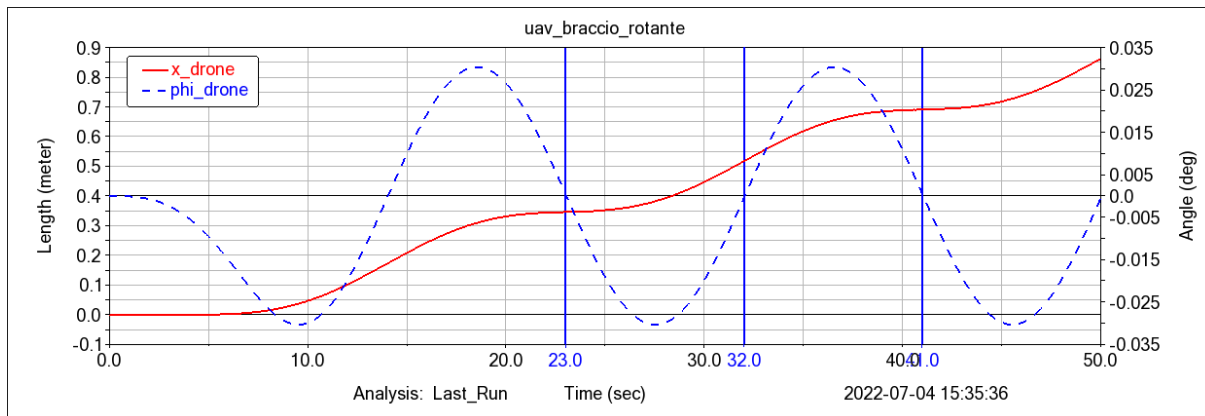


Figura 100: zoom del grafico dello spostamento lungo x dell'UAV vs rollio dell'UAV

Per comodità sono state tracciate tre righe verticali. Dalla prima ($t = 23s$) alla seconda ($t = 32s$) il rollio è negativo e il drone accelera lungo le x negative. Dalla seconda ($t = 32s$) alla terza ($t = 41s$) il rollio è positivo, il drone decelera ma non torna verso le x negative. All'istante $t = 41s$ la velocità è nulla, il velivolo non torna verso le x negative ma ha solo il movimento verso le x positive. Il moto è una sequenza di accelerazioni e decelerazioni.

Il grafico della forza di controllo e del rollio del drone da una spiegazione a questo moto particolare dell'UAV. Si può notare che le due curve sono in quadratura di fase (cioè sfasate di 90 gradi una dall'altra). Nel semiperiodo in cui il rollio del drone è positivo la forza di controllo ha in media lo stesso valore che assume nel semiperiodo negativo del rollio.

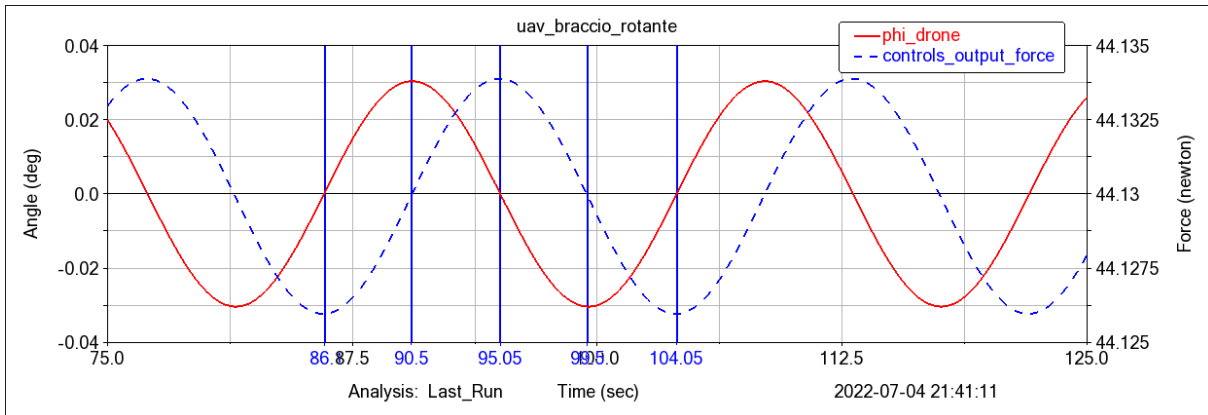


Figura 101: grafico della forza di controllo vs rollio del drone con velocità angolare a regime pari a 20 gradi/s

Con velocità angolare pari a 100 gradi/s, lo spostamento lungo x del drone è il seguente:

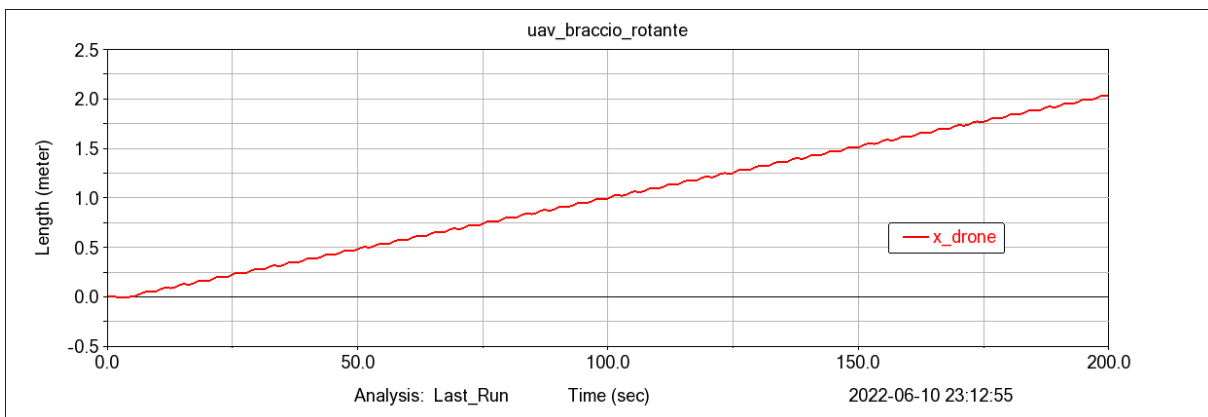


Figura 102: spostamento lungo x dell'UAV

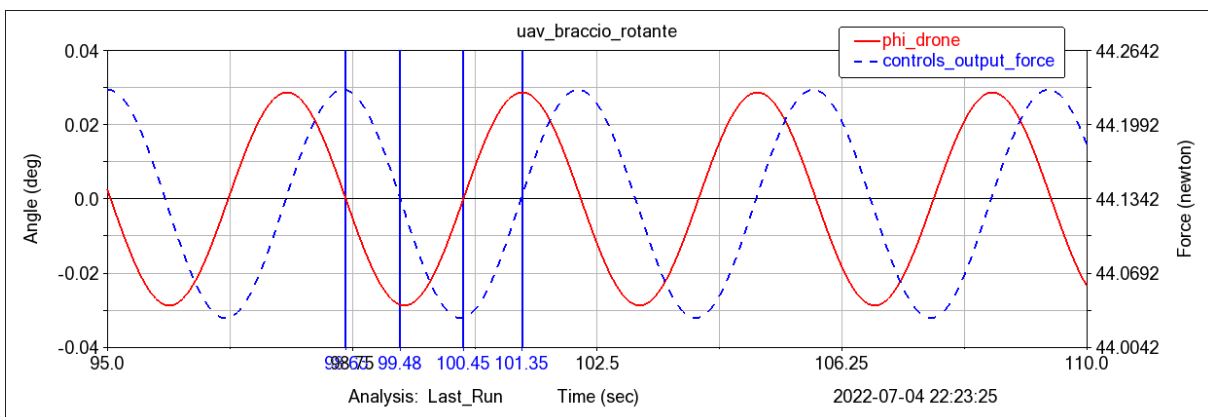


Figura 103: grafico della forza di controllo vs rotazione del drone con velocità angolare a regime pari a 100 gradi/s

Le considerazioni che si possono fare in questo caso sono le stesse fatte in precedenza.

Si nota che, in questo caso, il drone percorre alcuni metri mentre nel caso precedente solo pochi centimetri a parità di tempo. Inoltre, si nota che se si vuole spostare il drone di molti metri è meglio utilizzare velocità angolari del braccio basse. In questo modo, bastano pochi giri del braccio per muovere di molti metri il drone; questo è dovuto al fatto che, se il braccio si muove lentamente, il drone rimane per più tempo inclinato e subisce una certa accelerazione più a lungo.

Anche settando la velocità angolare a regime del braccio a valori alti, l'UAV continua a muoversi verso le x positive.

4.3 CONTROLLO PID CON VALORE DEI PARAMETRI PID BASSI

I parametri del controllo PID sono i seguenti:

	Kp	Kd	Ki
γ	53	33	16
ϕ	74	11	57

Tabella 16: controllo PID con valori dei parametri bassi

Con velocità angolare pari a 20 gradi/s, lo spostamento lungo x del drone è il seguente:

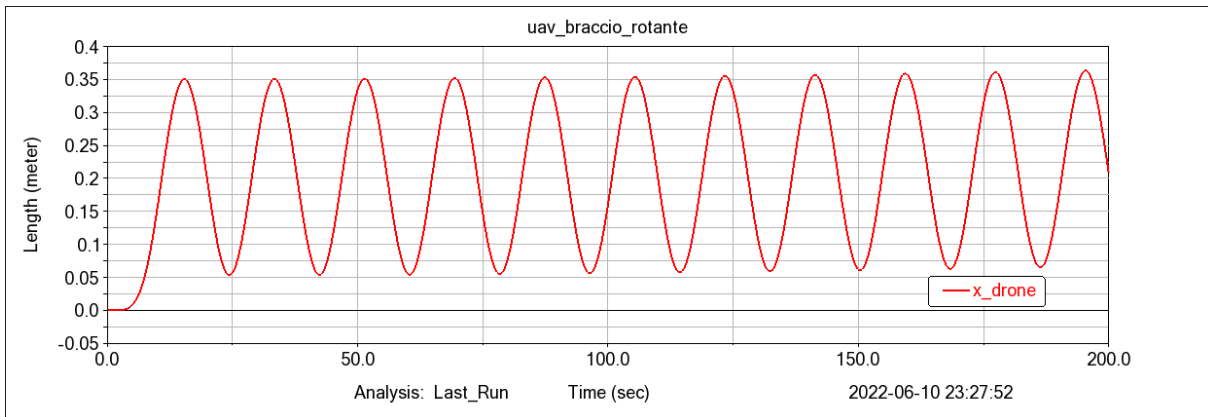


Figura 104: spostamento lungo x dell'UAV con velocità angolare a regime pari a 20 gradi/s

Con velocità angolare pari a 100 gradi/s, lo spostamento lungo x del drone è il seguente:

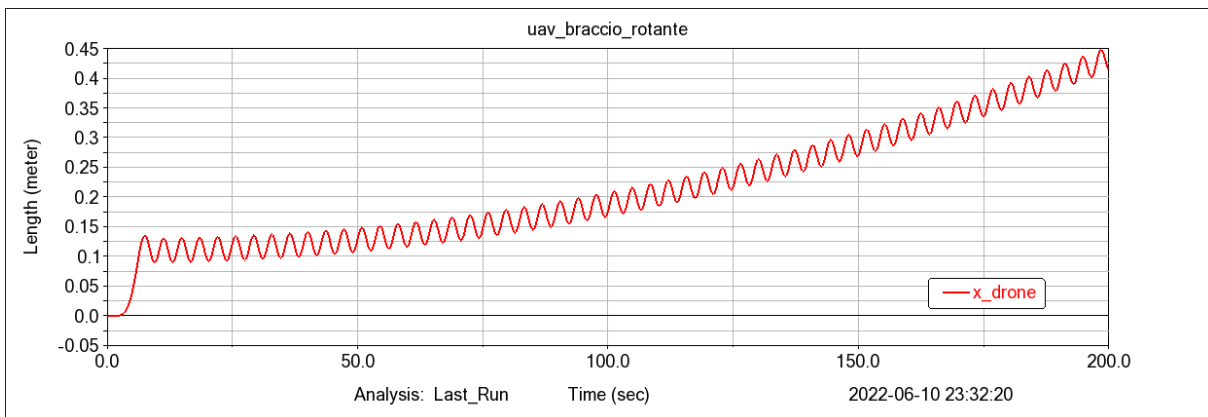


Figura 105: spostamento lungo x dell'UAV con velocità angolare a regime pari a 100 gradi/s

Lo spostamento del drone rispetto al caso precedente è leggermente maggiore in questo caso con guadagni del controllo minori.

I rispettivi grafici della forza di controllo e del rollio del drone sono:

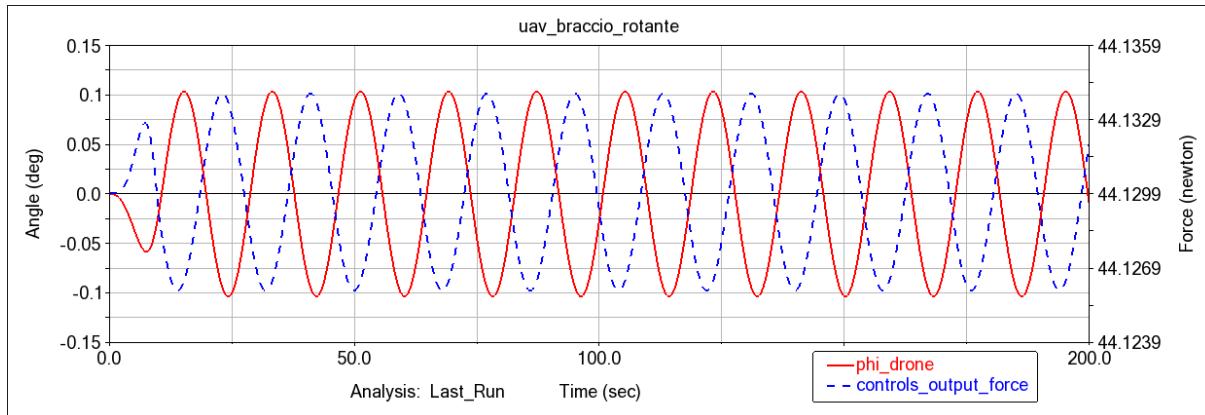


Figura 106: grafico della forza di controllo vs rotazione del drone con velocità angolare a regime pari a 20 gradi/s

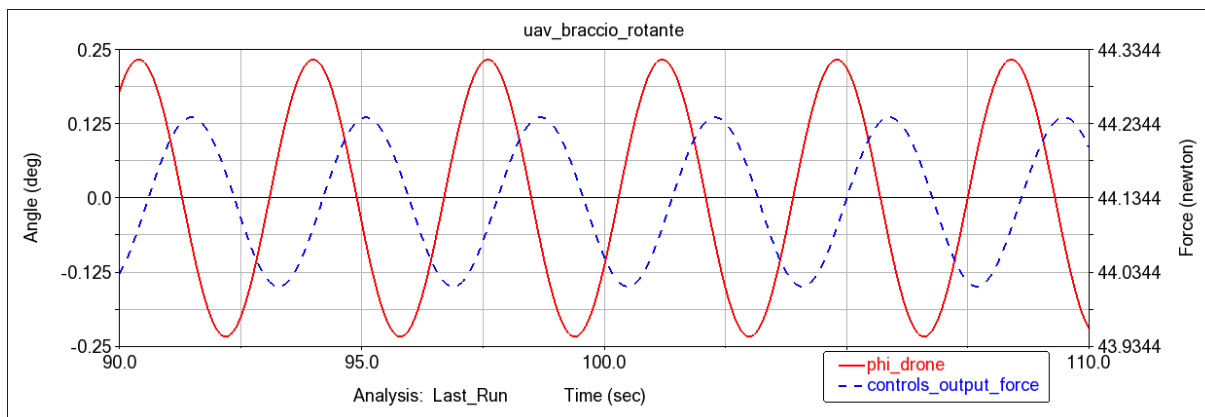


Figura 107: grafico della forza di controllo vs rotazione del drone con velocità angolare a regime pari a 100 gradi/s

Le considerazioni fatte prima si possono fare anche in questo caso. Se si utilizzano velocità angolari piccole: l'angolo di rollio e la forza sono "quasi" in controfase. Ne risulta che il drone è sottoposto a forze maggiori quando ha angolo ϕ negativo, che lo porta a muoversi lungo x positive.

Aumentando il valore della velocità angolare la differenza di fase diminuisce.

Anche in questo caso, si nota che aumentando la velocità angolare del braccio, le oscillazioni del drone aumentano e aumenta, a parità di tempo, la distanza che percorre. In generale, con questi parametri il drone percorre pochi centimetri in 200 secondi di simulazione.

4.3.1 Caso particolare: $K_i = 0$

I parametri del controllo PID sono i seguenti:

	Kp	Kd	Ki
γ	53	33	16
ϕ	74	11	0

Tabella 17: controllo PID con valori dei parametri bassi e K_i della coppia pari a zero

Con velocità angolare pari a 20 gradi/s, lo spostamento lungo x del drone è il seguente:

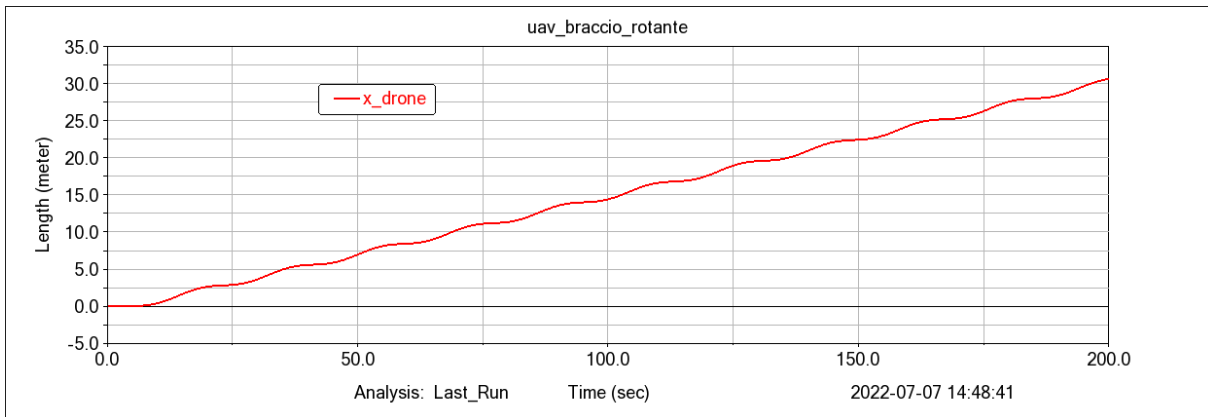


Figura 108: spostamento lungo x dell'UAV

Mentre con velocità angolare pari a 100 gradi/s:

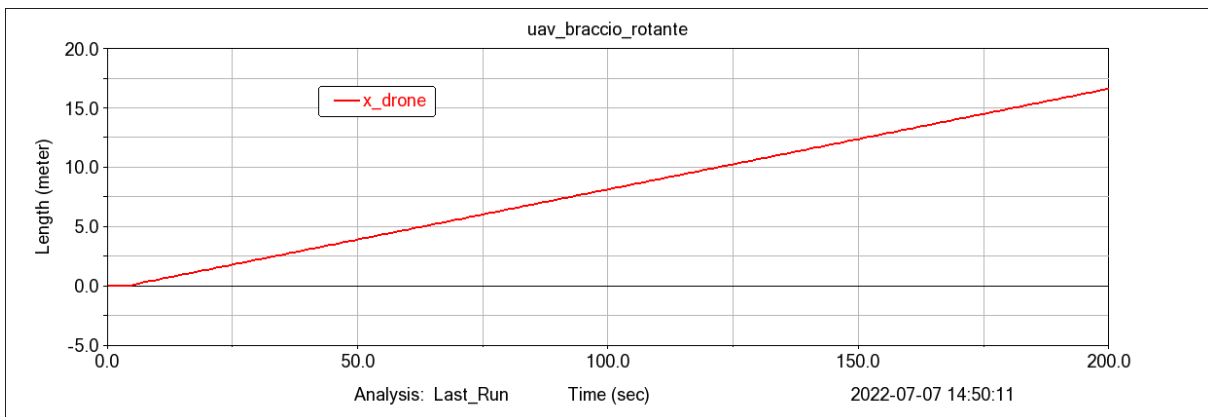


Figura 109: spostamento lungo x dell'UAV

Ora l'UAV percorre quasi 30 m in 200 secondi di simulazione. Anche in questo caso bastano pochi giri del braccio per muovere di molti metri il drone.

Anche settando la velocità angolare a regime del braccio a valori alti, l'UAV continua a muoversi verso le x positive.

Il moto consiste in una sequenza di accelerazioni e decelerazioni.

5 CONTROLLO POSIZIONE

Verranno ora presentati tre metodi per posizionare in modo preciso il drone controllando il movimento del braccio, sulle basi dei moti del braccio visti nei capitoli precedenti e dei conseguenti spostamenti del velivolo.

5.1 METODO 1 – MOTO “AVANTI-FERMO-INDIETRO”

Il primo metodo che viene proposto sfrutta il movimento del braccio, che parte da una posizione verticale, raggiunge un certo angolo e si ferma; la fase di ritorno in posizione verticale sarà dopo un certo intervallo di tempo.

In figura, un esempio di come potrebbe essere la velocità angolare del braccio: l'andata è un moto triangolare per quanto riguarda la velocità angolare della durata di 5 secondi, poi rimane a velocità nulla per 45 secondi con il braccio fermo inclinato di 65.1° . Infine, la fase di ritorno della durata di 5 secondi è simmetrica al moto di andata.

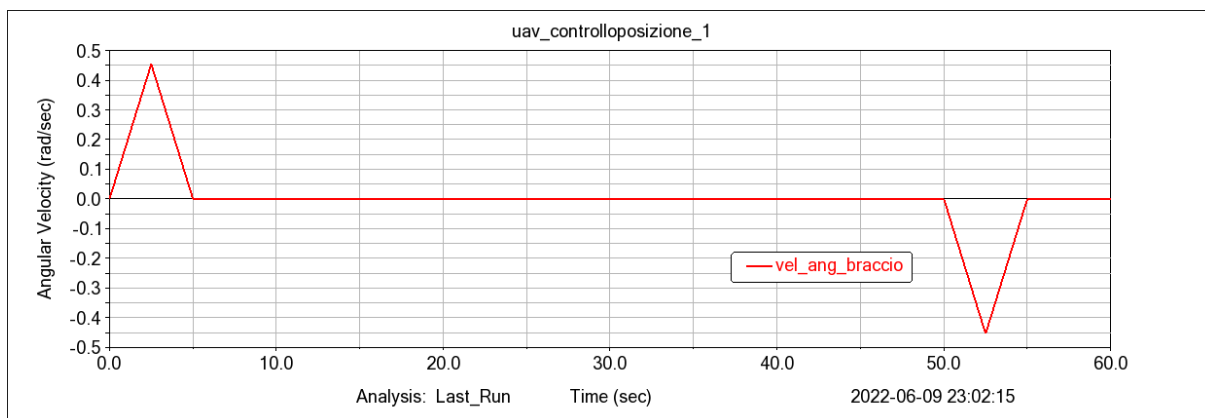


Figura 110: velocità angolare del braccio

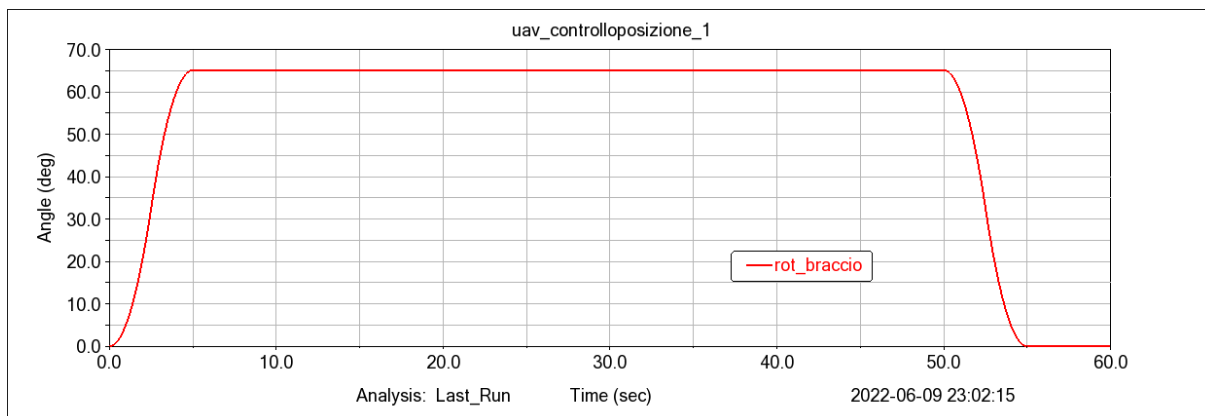


Figura 111: rotazione del braccio

Matematicamente, il moto viene descritto in questo modo:

$$\omega(t) = \begin{cases} \frac{0.4545}{2.5} * t & \text{per } t < 2.5s \\ 0.4545 - \frac{0.4545}{2.5} * (t - 2.5) & \text{per } 2.5s \leq t < 5s \\ 0 & \text{per } 5s \leq t < 50s \\ 0.4545 - \frac{0.4545}{2.5} * (t - 47.5) & \text{per } 50s \leq t < 52.5s \\ -0.4545 + \frac{0.4545}{2.5} * (t - 52.5) & \text{per } 52.5s \leq t < 55s \\ 0 & \text{per } t \geq 55s \end{cases}$$

La risposta a questo moto del drone, come negli altri casi, dipenderà dai parametri del controllo.

I parametri su cui si può lavorare sono:

- la durata del moto accelerazione e decelerazione costante del braccio
- Il picco di velocità massima
- il tempo in cui il braccio rimane fermo in posizione avanzata

5.1.1 Controllo con valori dei parametri PID alti

I parametri del controllo PID sono i seguenti:

	Kp	Kd	Ki
γ	1000	500	500
ϕ	600	30	500

Tabella 18: controllo PID con valori dei parametri alti

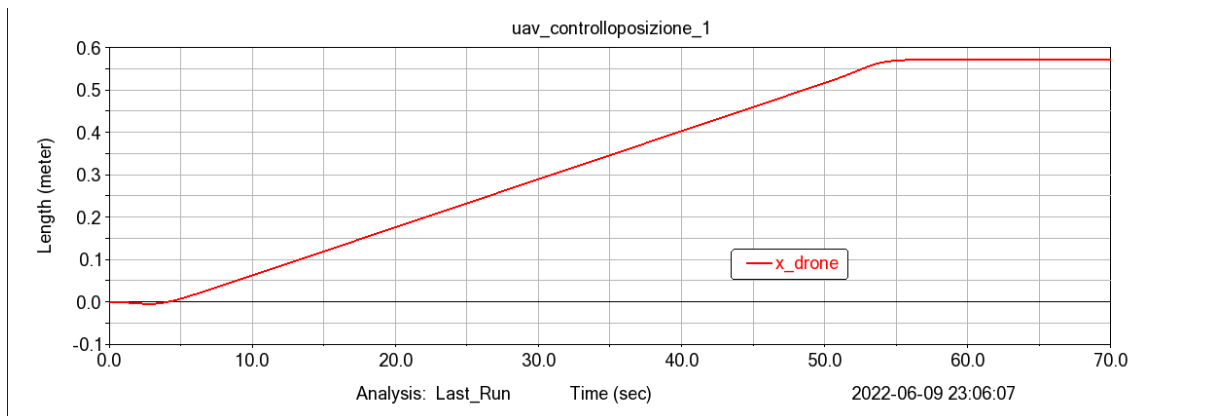


Figura 112: posizione lungo x dell'UAV

Con questi parametri, è possibile controllare la posizione dell'UAV in quanto alla fine del moto il velivolo è fermo a circa 0.55 metri dalla posizione iniziale.

In particolare, nei primi istanti, a causa del movimento del braccio, l'UAV si inclina e accelera. Dopo 10 secondi, il controllo ha riportato il velivolo in posizione desiderata ($\phi=0$), e il moto è ad accelerazione nulla e a velocità costante.

Quando il braccio compie il moto di ritorno, l'UAV si inclina dalla parte opposta e frena. Dopo 60 secondi, il moto del braccio è terminato e l'UAV è fermo.

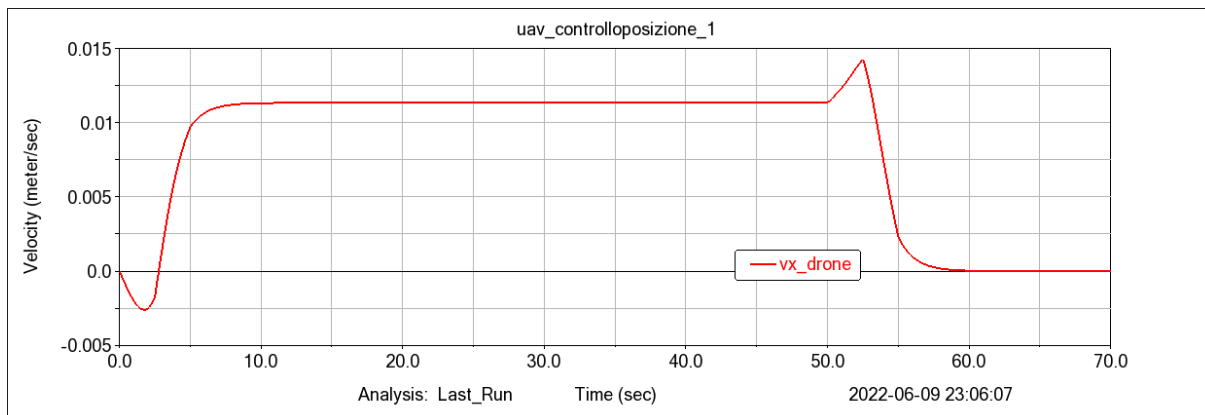


Figura 113: velocità lungo x dell'UAV

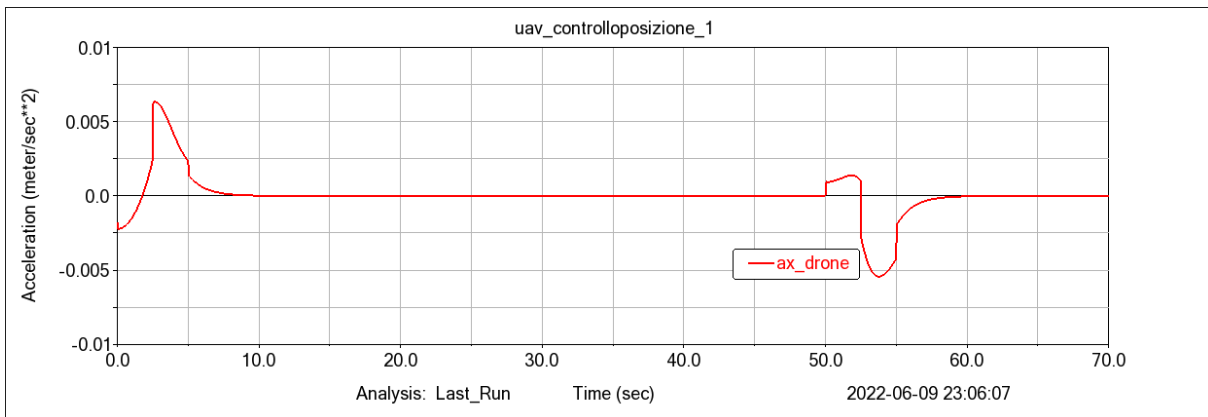


Figura 114: accelerazione lungo x dell'UAV

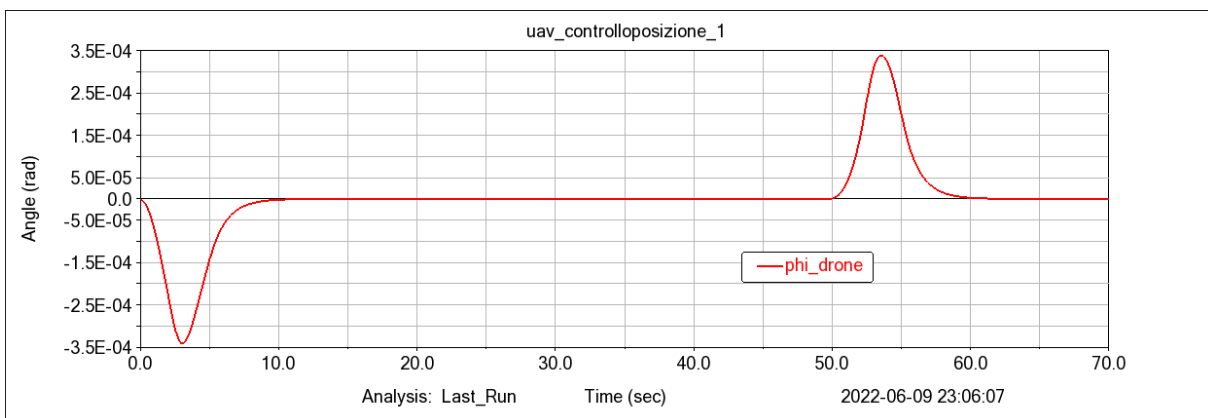


Figura 115: rollio dell'UAV

Controllando la durata della fase a velocità costante si può controllare la posizione dell'UAV. Inoltre, è possibile agire sul moto del braccio per controllare le accelerazioni del velivolo.

5.1.1.1 Caso particolare: $K_i=0$

I parametri del controllo PID sono i seguenti:

	K_p	K_d	K_i
γ	1000	500	500
ϕ	600	30	0

Tabella 19: controllo PID con valori dei parametri alti e $k_i=0$

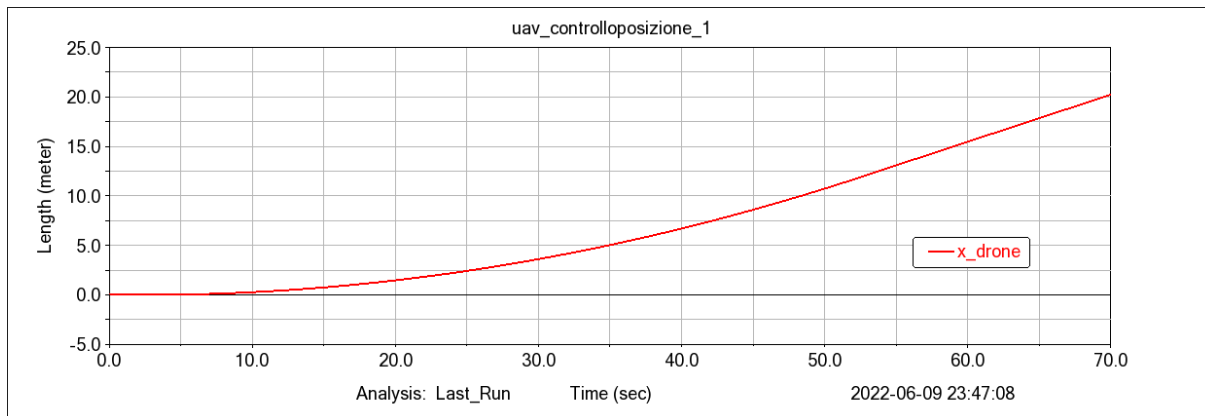


Figura 116: posizione lungo x dell'UAV

Con questi parametri ma con il k_i della coppia di controllo pari a zero, non è possibile controllare la posizione dell'UAV in quanto alla fine del moto il velivolo non è fermo, anzi prosegue a velocità costante. In particolare, nei primi istanti, a causa del movimento del braccio, l'UAV si inclina e accelera. Dopo 5 secondi, il controllo non ha riportato il velivolo in posizione desiderata, che mantiene così un rollio non nullo e il moto è ad accelerazione costante. La velocità quindi in questo intervallo di tempo continua a crescere. Quando il braccio compie il moto di ritorno, l'UAV torna in posizione desiderata ($\phi=0$), l'accelerazione si annulla, ma non la velocità che si mantiene costante. Dopo 60 secondi, il moto del braccio è terminato e il velivolo prosegue con velocità costante pari a 0.47 m/s.

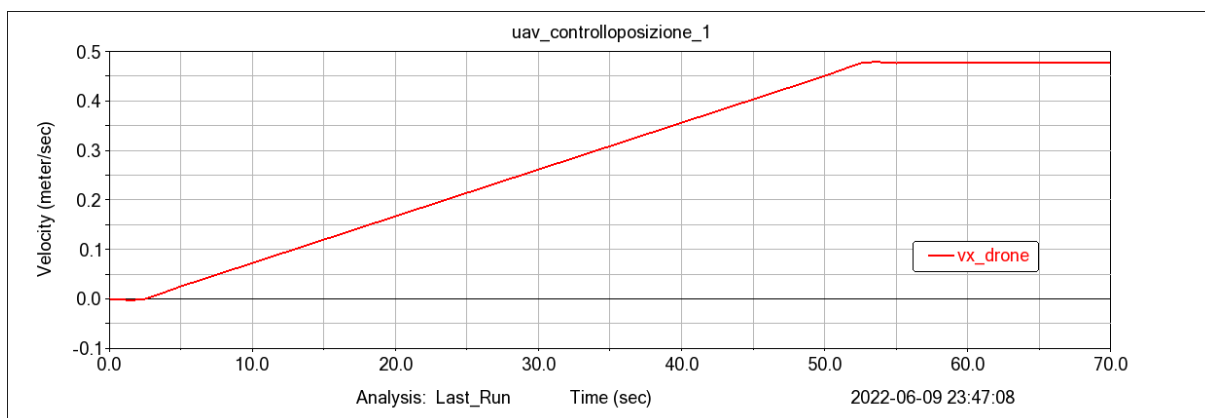


Figura 117: velocità lungo x dell'UAV

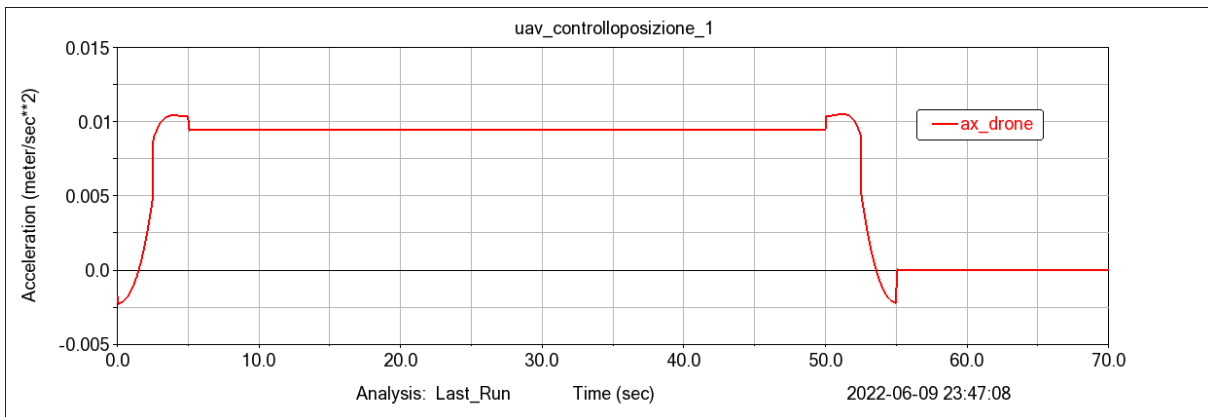


Figura 118: accelerazione lungo x dell'UAV



Figura 119: rollio dell'UAV

Controllando la durata della fase ad accelerazione costante si può controllare la velocità dell'UAV, ma in ogni caso il velivolo non si ferma a moto terminato.

5.1.2 Controllo con valori dei parametri PID bassi

I parametri del controllo PID sono i seguenti:

	Kp	Kd	Ki
γ	53	33	16
ϕ	74	11	57

Tabella 20: controllo PID con valori dei parametri bassi

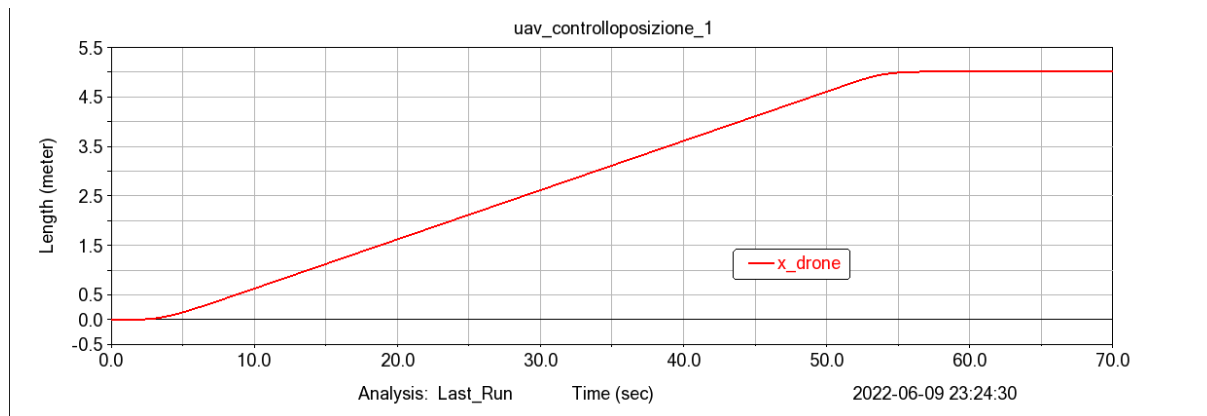


Figura 120: posizione lungo x dell'UAV

Con questi parametri, è possibile controllare la posizione dell'UAV in quanto alla fine del moto il velivolo è fermo a circa 5 metri dalla posizione iniziale (contro i 0.55 metri del caso con parametri del controllo alti). In particolare, nei primi istanti, come nel caso precedente, a causa del movimento del braccio, l'UAV si inclina e accelera. Dopo 10 secondi, il controllo ha riportato il velivolo in posizione desiderata ($\phi=0$), e il moto è ad accelerazione nulla e a velocità costante. Quando il braccio compie il moto di ritorno, l'UAV si inclina dalla parte opposta e frena. Dopo 60 secondi, il moto del braccio è terminato e il velivolo è fermo.



Figura 121: velocità lungo x dell'UAV

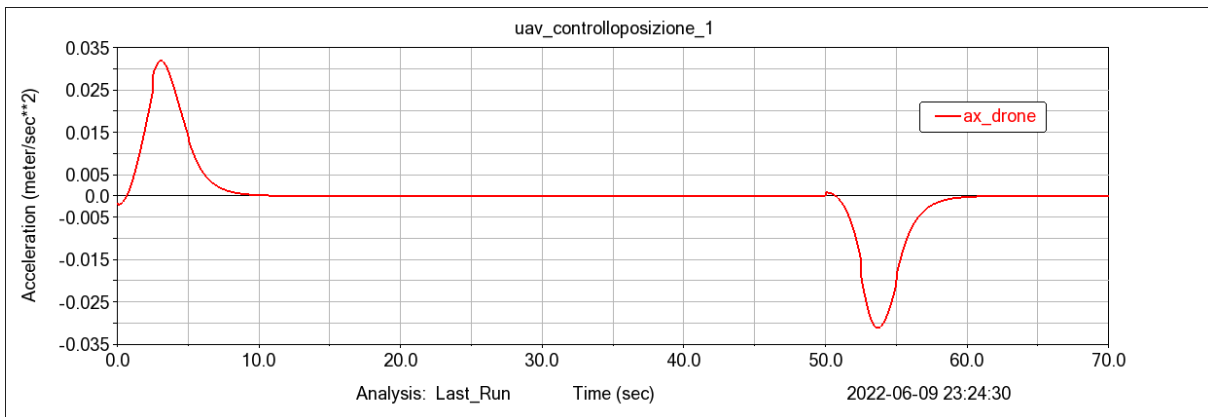


Figura 122: accelerazione lungo x dell'UAV

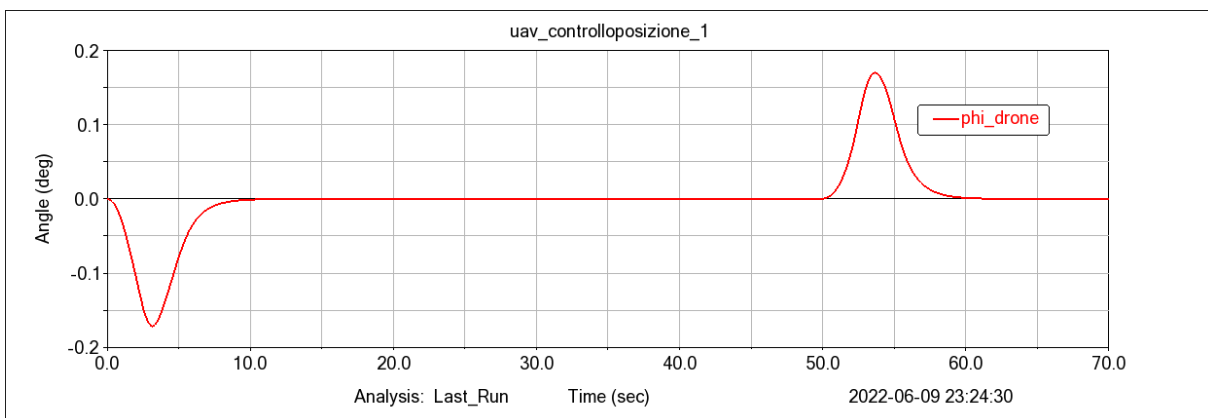


Figura 123: rollio dell'UAV

Analogamente al caso precedente, controllando la durata della fase a velocità costante si può controllare la posizione dell'UAV. Inoltre, è possibile agire sul moto del braccio per controllare le accelerazioni del velivolo.

5.1.2.1 Caso particolare: $K_i=0$

I parametri del controllo PID sono i seguenti:

	K_p	K_d	K_i
γ	53	33	16
ϕ	74	11	0

Tabella 21: controllo PID con valori dei parametri bassi e $k_i=0$

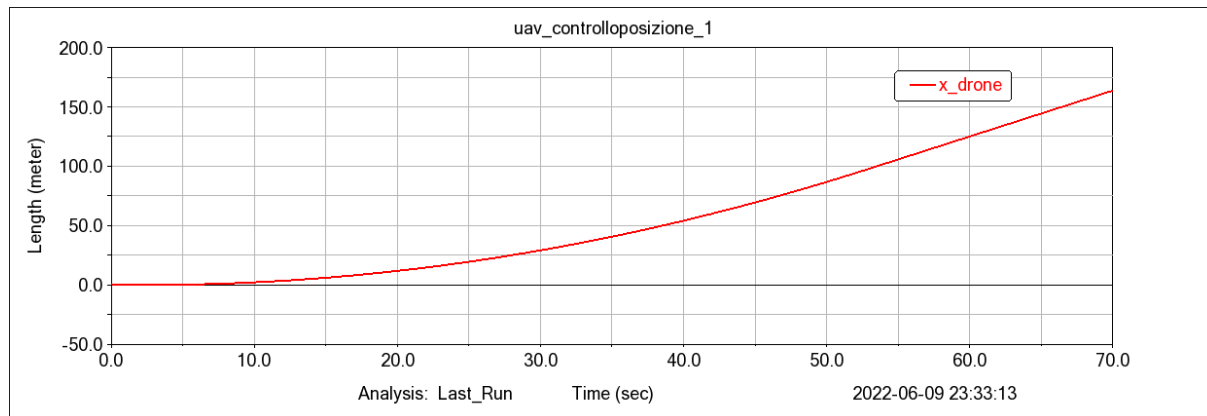


Figura 124: posizione lungo x dell'UAV

Con questi parametri ma con il k_i della coppia di controllo pari a zero, non è possibile controllare la posizione dell'UAV in quanto, come visto in precedenza, alla fine del moto il velivolo non è fermo, anzi prosegue a velocità costante. In particolare, nei primi istanti, a causa del movimento del braccio, l'UAV si inclina e accelera. Dopo 5 secondi, il controllo non ha riportato il velivolo in posizione desiderata, che mantiene così un rollio non nullo (si può notare il valore maggiore rispetto al caso con valori del controllo alti e k_i nullo) e il moto è ad accelerazione costante. La velocità quindi in questo intervallo di tempo continua a crescere. Quando il braccio compie il moto di ritorno, l'UAV torna in posizione desiderata ($\phi=0$), l'accelerazione si annulla, ma non la velocità che si mantiene costante. Dopo 60 secondi, il moto del braccio è terminato e il velivolo prosegue con velocità costante pari a 3.8 m/s, contro i 0.47 m/s del caso con parametri alti e k_i nullo.

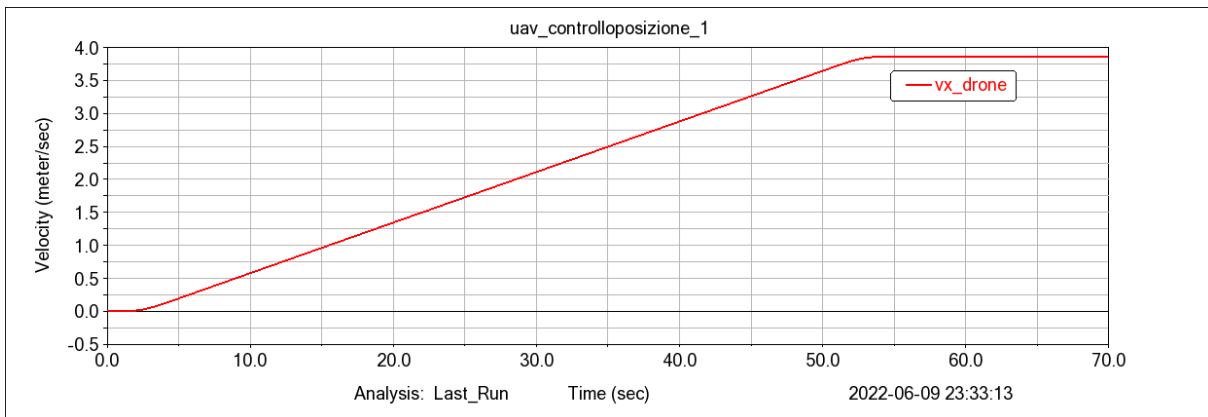


Figura 125: velocità lungo x dell'UAV

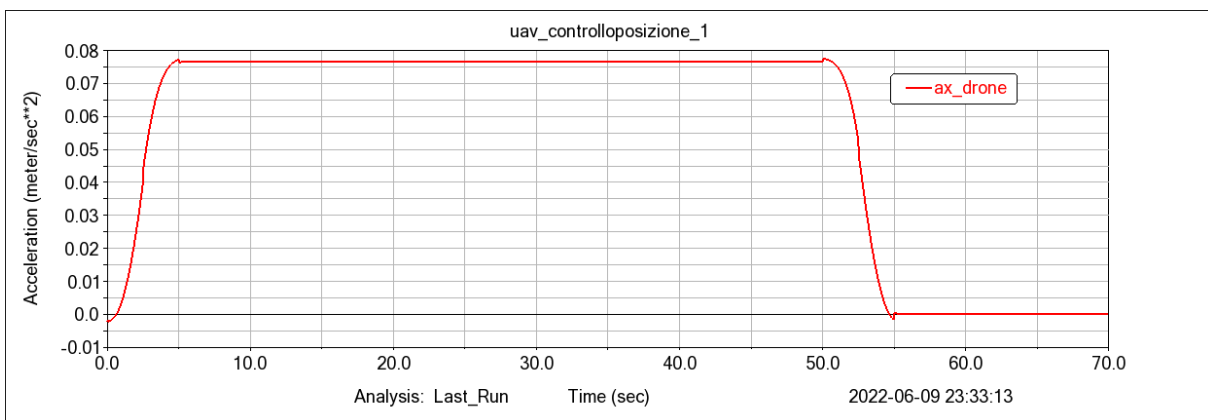


Figura 126: accelerazione lungo x dell'UAV

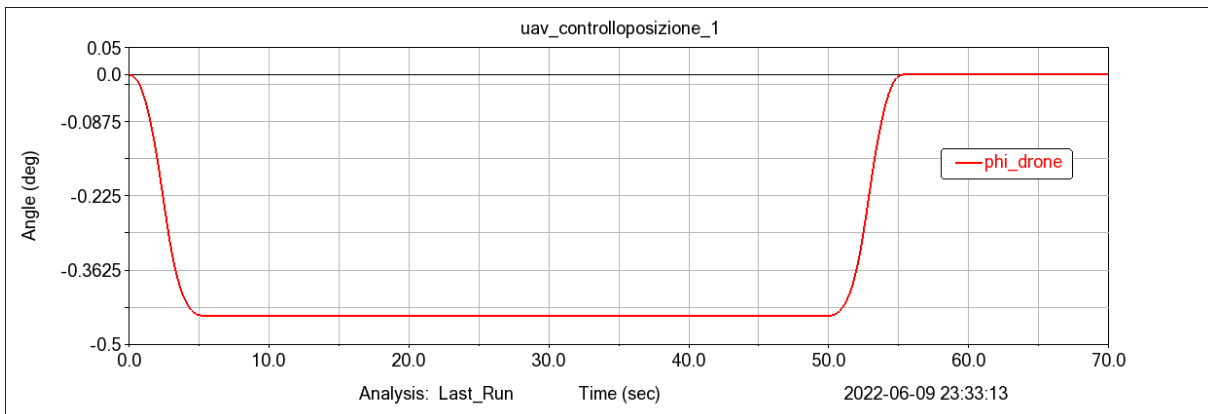


Figura 127: rollio dell'UAV

Analogamente al caso precedente, controllando la durata della fase ad accelerazione costante si può controllare la velocità dell'UAV, ma in ogni caso il velivolo non si ferma a moto terminato.

5.2 METODO 2 – MOTO “ACCELERATO-VELOCITA’ COSTANTE-DECELERATO”

Il secondo metodo che viene proposto sfrutta il movimento del braccio, che parte da una posizione verticale, viene accelerato, raggiunge una certa velocità angolare e la mantiene costante; dopo un certo intervallo di tempo il braccio decelera con la stesse legge con cui ha accelerato e si ferma nuovamente in posizione verticale.

In figura, un esempio di come potrebbe essere l’accelerazione angolare del braccio: l’andata è un moto triangolare della durata di 10 secondi, poi è presente una fase ad accelerazione nulla per 110 secondi con il braccio che prosegue con velocità angolare costante. Infine, la fase di frenata della durata di 10 secondi è simmetrica al moto di andata.

Questo metodo è ben applicabile quando il valore del k_i della coppia è nullo.

Si utilizza un valore di velocità massima basso, così da permettere al velivolo di compiere molta strada.

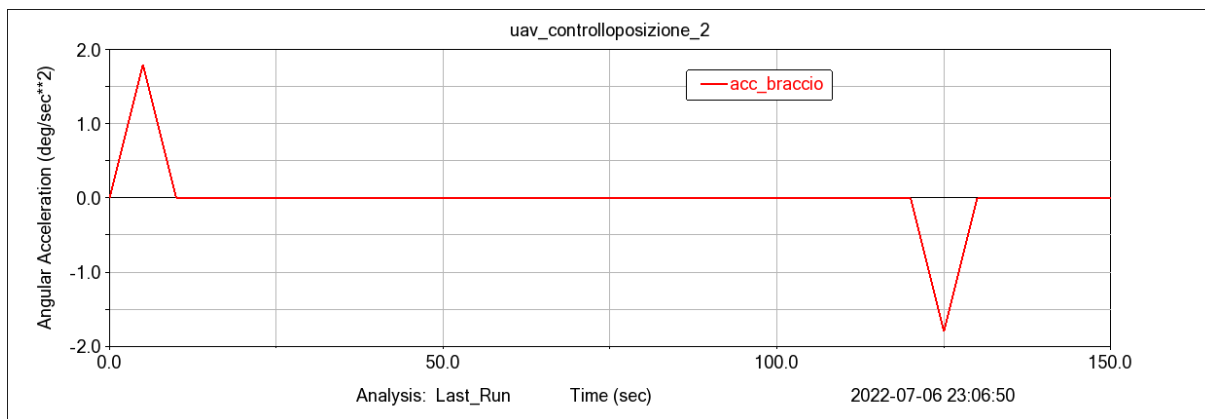


Figura 128: accelerazione del braccio

Matematicamente, il moto viene descritto in questo modo:

$$\alpha(t) = \begin{cases} \frac{1.8}{5} * t & \text{per } t < 5s \\ 1.8 - \frac{1.8}{5} * (t - 5) & \text{per } 5s \leq t < 10s \\ 0 & \text{per } 10s \leq t < 120s \\ 1.8 - \frac{1.8}{5} * (t - 115) & \text{per } 120s \leq t < 125s \\ -1.8 + \frac{1.8}{5} * (t - 125) & \text{per } 125s \leq t < 130s \\ 0 & \text{per } t \geq 130s \end{cases}$$

Il valore massimo dell’accelerazione è di 1.8 gradi/s² e si raggiunge dopo 5 s.

Per integrazione si trova la legge di moto della velocità angolare del braccio.

Il valore massimo della velocità angolare sarà invece 9 gradi/s, e questa velocità verrà mantenuta costante per 110 secondi.

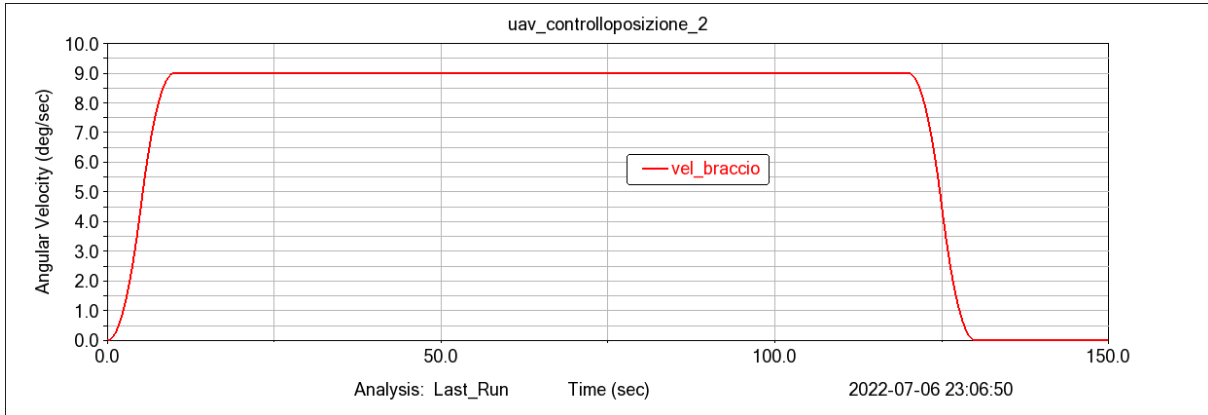


Figure 129: velocità angolare del braccio

Integrando la curva troviamo quanti gradi spazza il braccio, durante il suo moto:

$$\text{Tratto iniziale: } \frac{\left(10s * 9 \frac{\text{gradi}}{s}\right)}{2} = 45 \text{ gradi}$$

$$\text{Tratto a velocità costante: } 110s * 9\text{gradi} = 990 \text{ gradi}$$

$$\text{Tratto finale: } \frac{\left(10s * 9 \frac{\text{gradi}}{s}\right)}{2} = 45 \text{ gradi}$$

$$\text{Totale: } 1080 \text{ gradi} \rightarrow 3 \text{ giri}$$

La risposta a questo moto del drone, come negli altri casi, dipenderà dai parametri del controllo.

5.2.1 Controllo con valori dei parametri PID alti e k_i nullo

I parametri del controllo PID sono i seguenti:

	Kp	Kd	Ki
γ	1000	500	500
ϕ	600	30	0

Tabella 22: controllo PID con valori dei parametri alti e $k_i=0$

Con i parametri alti e il k_i della coppia di controllo pari a zero, è possibile controllare la posizione dell'UAV in quanto alla fine del moto il velivolo è fermo a circa 4 metri dalla posizione di partenza.

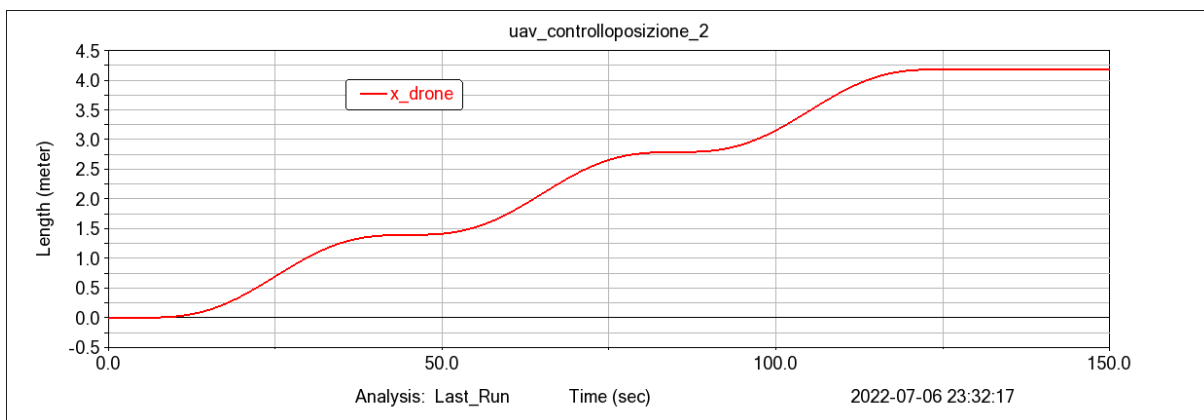


Figura 130: posizione lungo x dell'UAV

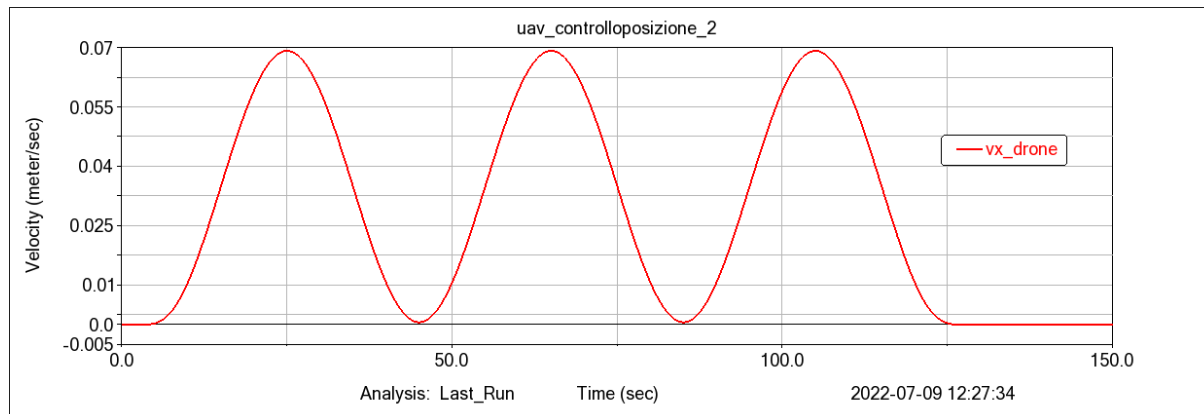


Figura 131: velocità lungo x dell'UAV

In questo caso è il grafico del rollio del drone è il seguente:

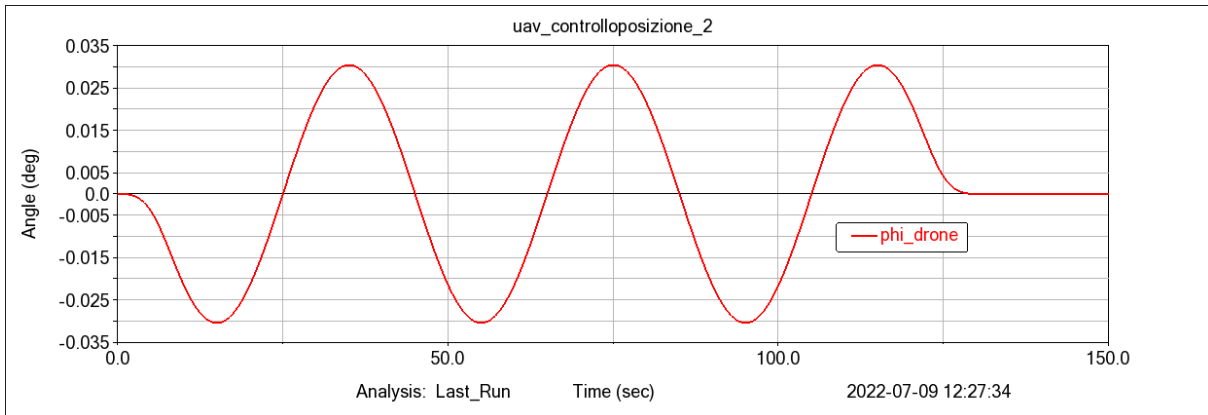


Figura 132: rollio dell'UAV

Di conseguenza la forza di lift e il suo impulso sono le seguenti:

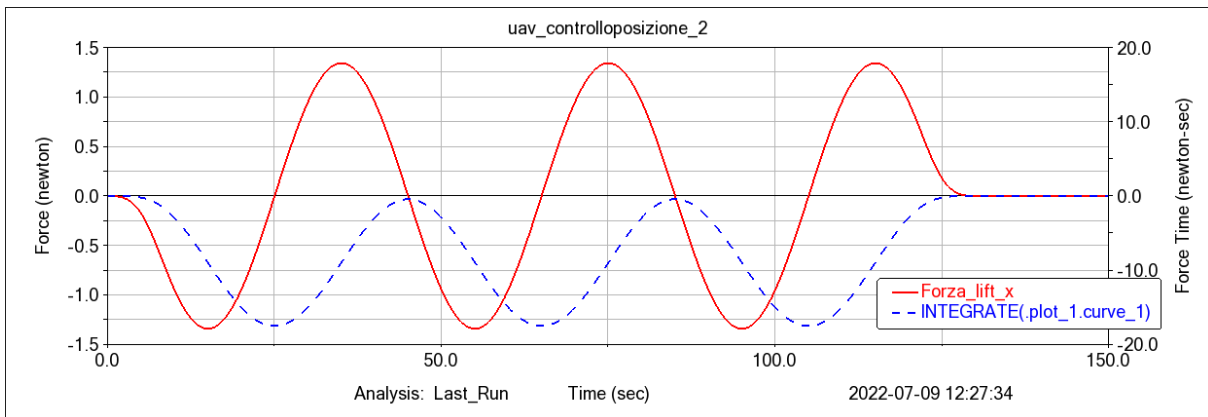


Figura 133: grafico componente della forza di lift lungo x e il suo impulso

Il drone si ferma perché le accelerazioni si compensano dato che il numero di giri è intero e il drone si ferma nella stessa posizione in cui è partito.

Non a caso, è stato deciso di far effettuare al braccio un numero intero di giri. In questo modo il braccio parte e finisce il suo moto dalla stessa posizione, cioè quella verticale.

Se il numero di giri non fosse un intero il braccio finirebbe il moto formando un certo angolo con la verticale.

Ad esempio, supponiamo che la fase di accelerazione e di decelerazione siano effettuate sempre in 10 secondi, e che la velocità massima angolare sia sempre di 9 gradi/s. La durata della fase a velocità costante non sia più 110 secondi ma si riduca a 90 secondi.

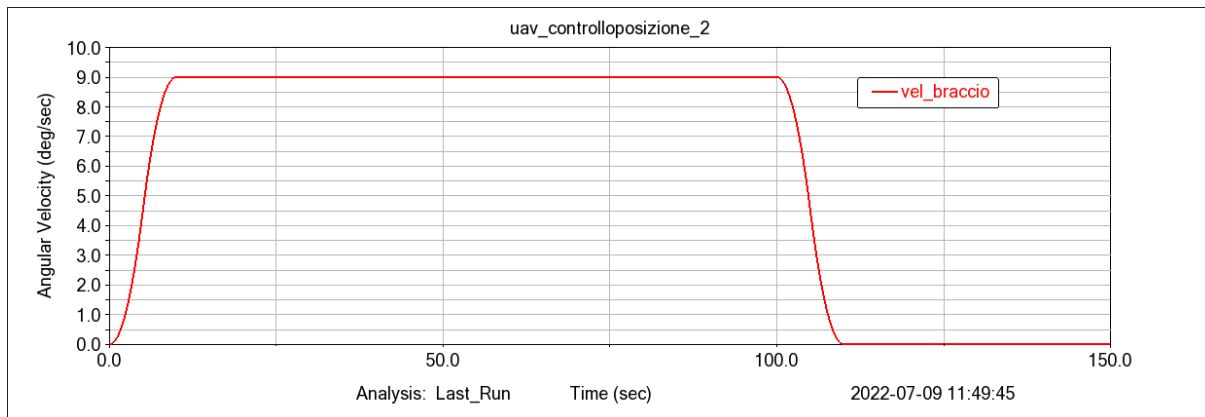


Figura 134: velocità angolare del braccio

Integrando la curva troviamo quanti gradi spazza il braccio, durante il suo moto:

$$\text{Tratto iniziale: } \frac{\left(10s * 9 \frac{\text{gradi}}{s}\right)}{2} = 45 \text{ gradi}$$

$$\text{Tratto a velocità costante: } 90s * 9 \text{gradi} = 810 \text{ gradi}$$

$$\text{Tratto finale: } \frac{\left(10s * 9 \frac{\text{gradi}}{s}\right)}{2} = 45 \text{ gradi}$$

$$\text{Totale: } 900 \text{ gradi} \rightarrow 2.5 \text{ giri}$$

Il braccio si ferma in posizione verticale ma spostato di 180 gradi rispetto alla posizione iniziale.

Il grafico della posizione x è il seguente:

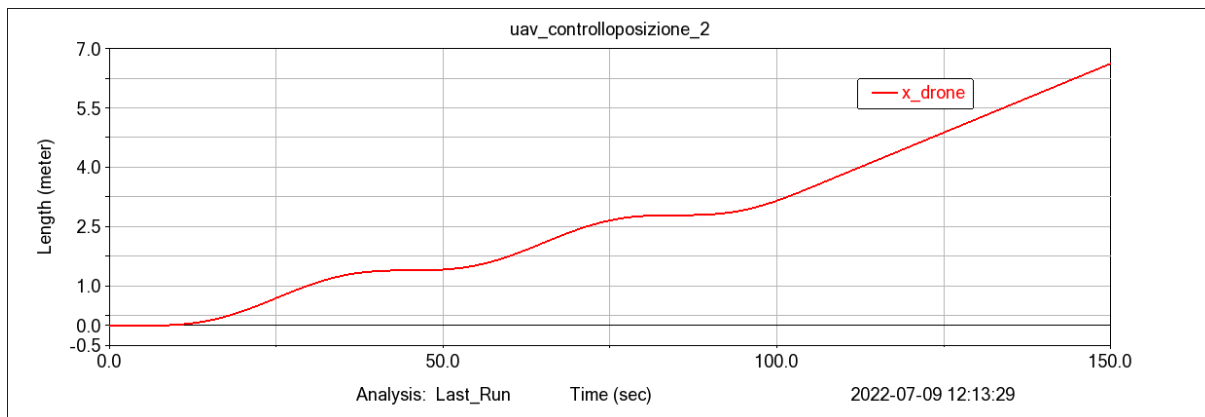


Figura 135: posizione lungo x dell'UAV

In questo modo non è più controllabile la coordinata x in quanto il drone si sposta con velocità costante.

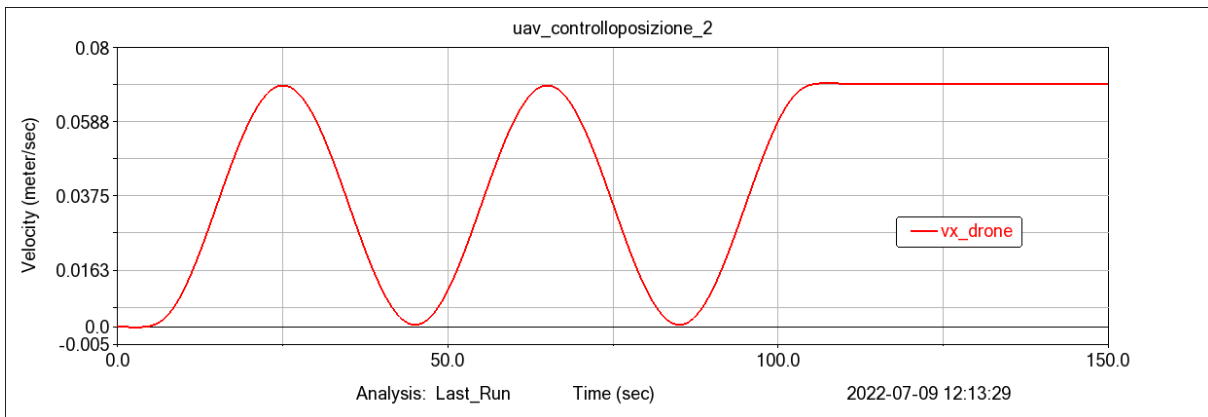


Figura 136: velocità lungo x dell'UAV

In questo caso è il grafico del rollio del drone è il seguente:

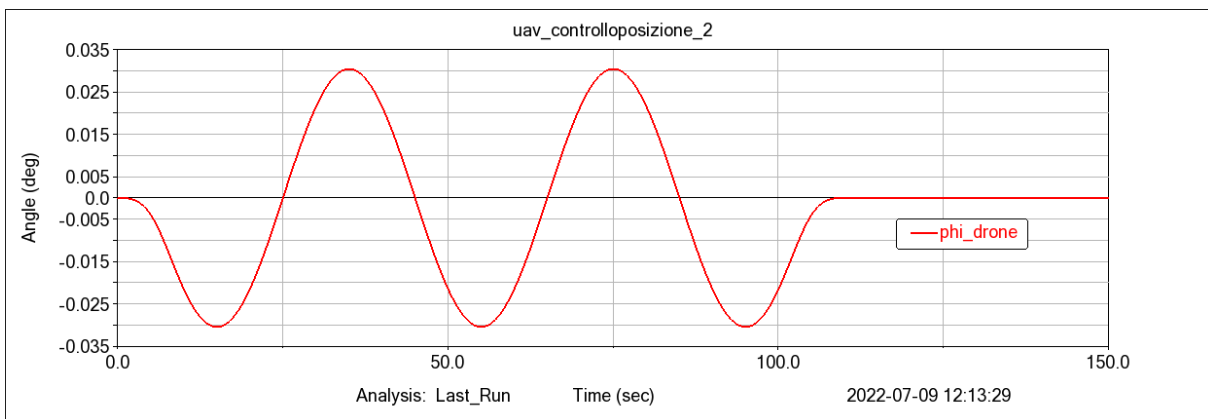


Figura 137: rollio dell'UAV

Di conseguenza la forza di lift e il suo impulso sono le seguenti:

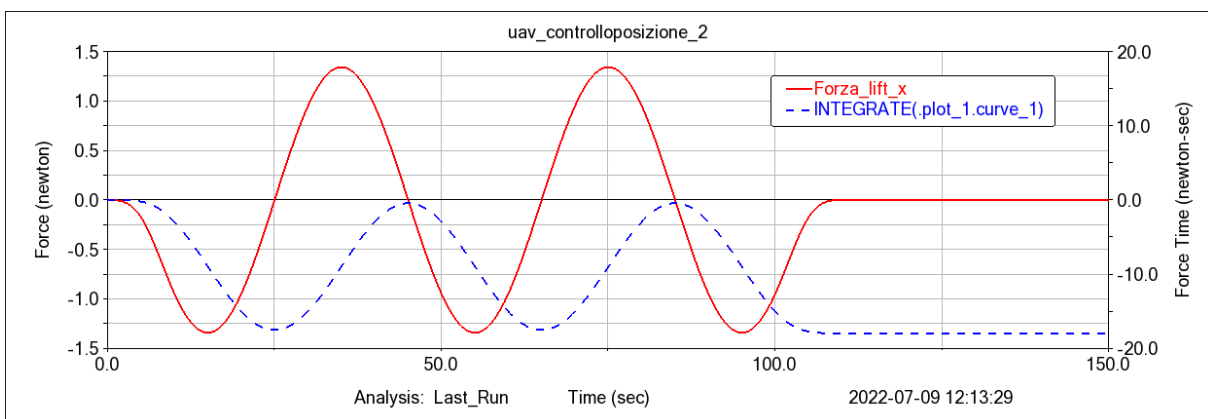


Figura 138: grafico componente della forza di lift lungo x e il suo impulso

Dato che il numero di giri del braccio non è un numero intero l'integrale della forza di lift lungo x (che rappresenta l'impulso che essa trasmette al velivolo) alla fine del moto non è nullo e quindi il drone si muoverà con moto a velocità costante.

Invece, ora supponiamo sempre che la fase di accelerazione e di decelerazione siano effettuate in 10 secondi, e che la velocità massima angolare sia sempre di 9 gradi/s, mentre la durata della fase a velocità costante sia di 80 secondi.

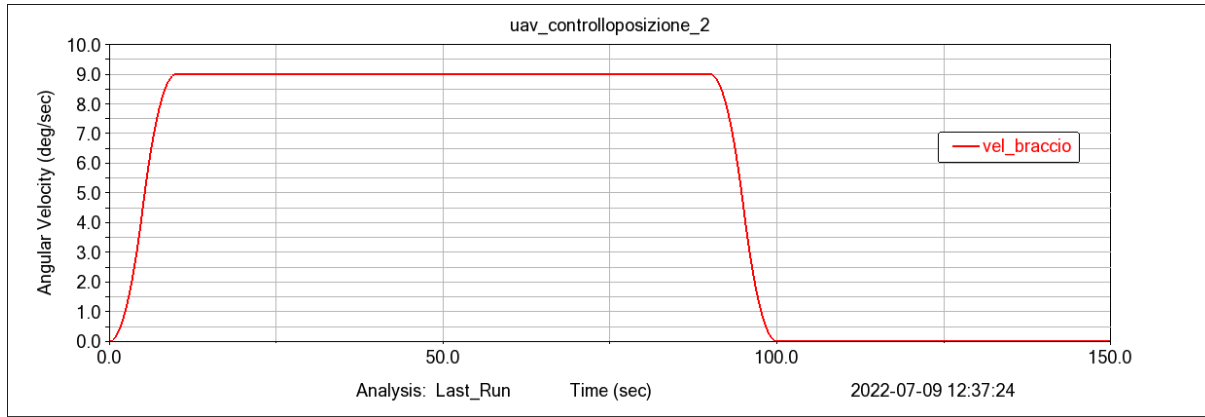


Figure 139: velocità angolare del braccio

Integrando la curva troviamo quanti gradi spazza il braccio, durante il suo moto:

$$\text{Tratto iniziale: } \frac{\left(10s * 9 \frac{\text{gradi}}{s}\right)}{2} = 45 \text{ gradi}$$

$$\text{Tratto a velocità costante: } 80s * 9\text{gradi} = 720 \text{ gradi}$$

$$\text{Tratto finale: } \frac{\left(10s * 9 \frac{\text{gradi}}{s}\right)}{2} = 45 \text{ gradi}$$

$$\text{Totale: } 810 \text{ gradi} \rightarrow 2.25 \text{ giri}$$

Il braccio non si ferma in posizione verticale ma sarà spostato di 90 gradi rispetto ad essa.

Il grafico della posizione x è il seguente:

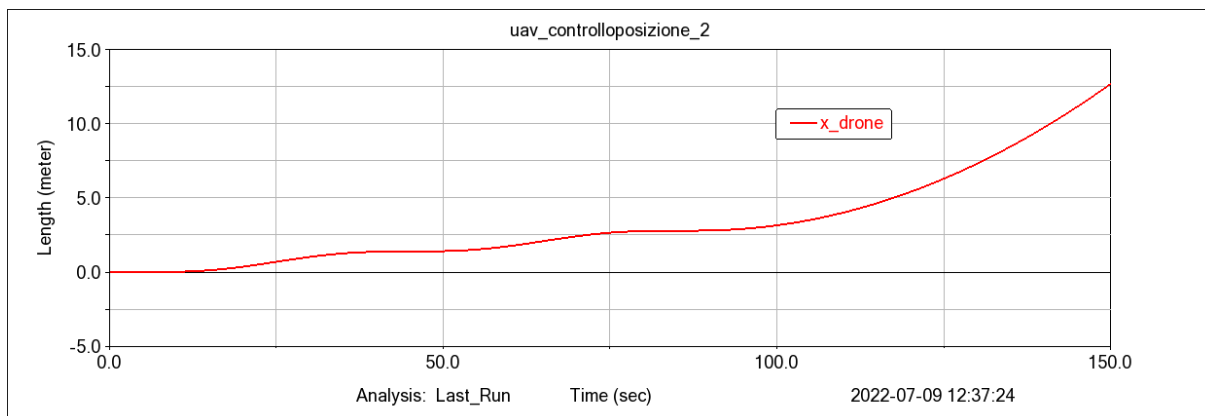


Figure 140: posizione lungo x dell'UAV

In questo modo non è più controllabile la coordinata x in quanto il drone si sposta con accelerazione costante.

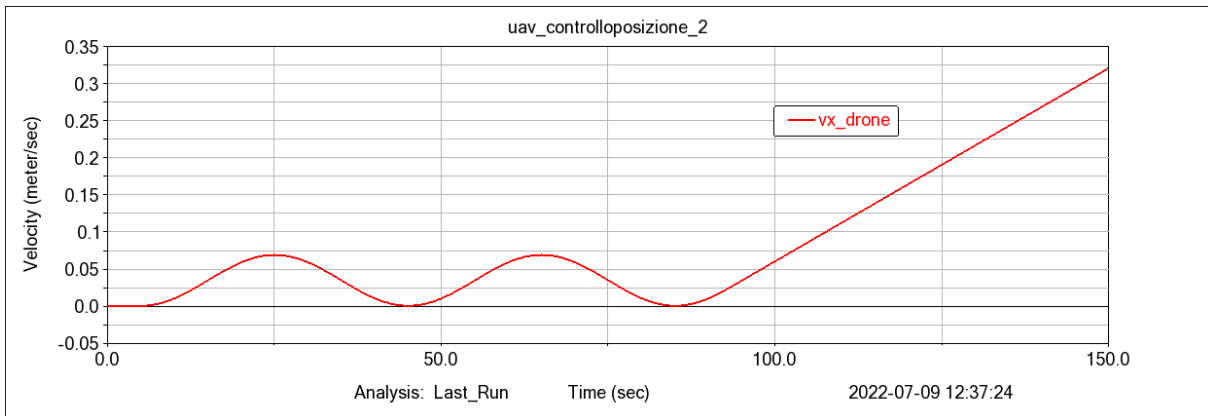


Figura 141: velocità lungo x dell'UAV

In questo caso è il grafico del rollio del drone è il seguente:

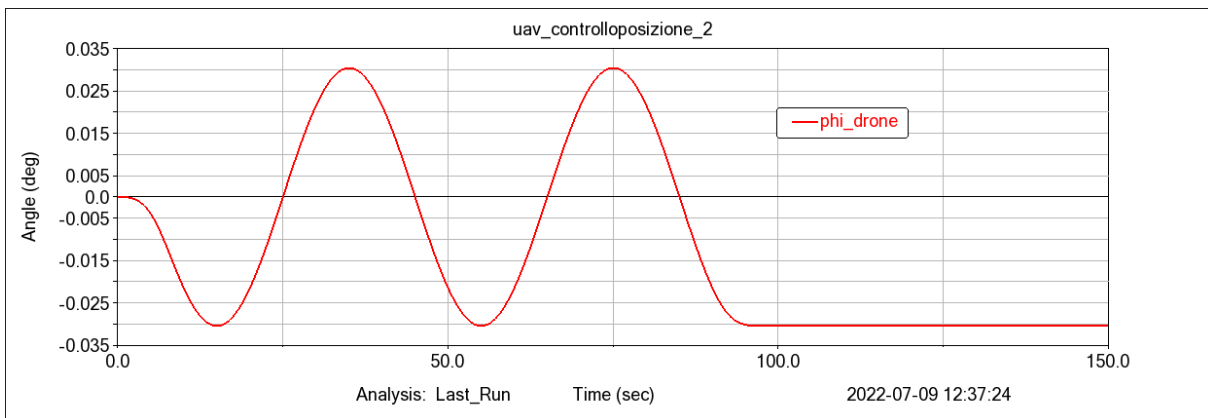


Figura 142: rollio dell'UAV

A causa del Ki della coppia di controllo nullo il sistema non è in grado di recuperare la posizione $\phi=0$ e il velivolo mantiene un rollio non nullo a moto terminato che lo porta ad accelerare verso le x positive.

5.2.2 Controllo con valori dei parametri PID bassi e k_i nullo

I parametri del controllo PID sono i seguenti:

	Kp	Kd	Ki
γ	53	33	16
ϕ	74	11	0

Tabella 23: controllo PID con valori dei parametri bassi

Con questi parametri e il k_i della coppia di controllo pari a zero, è possibile controllare la posizione dell'UAV in quanto alla fine del moto il velivolo è fermo a circa 35 metri dalla posizione di partenza.

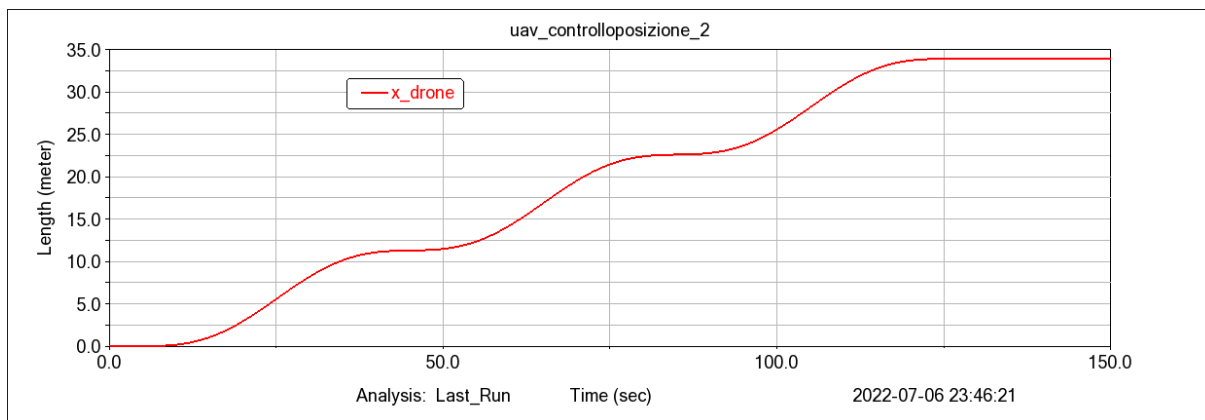


Figura 143: posizione lungo x dell'UAV

Anche in questo caso, è stato deciso che il braccio effettua un numero intero di giri.

Analogamente a prima, se il numero di giri non fosse intero il drone non si fermerebbe ma continuerebbe il suo moto a velocità o accelerazione costante e in base alla posizione finale che assume il braccio.

In questi casi non sarebbe più controllabile la coordinata x in quanto il drone si sposta con velocità o accelerazione costante.

5.3 METODO 3 – MOTO “ACCELERATO-VELOCITA’ COSTANTE-DECELERATO”

Il terzo metodo che viene proposto, come nel caso precedente sfrutta il movimento del braccio, che parte da una posizione verticale, raggiunge una certa velocità angolare e la mantiene costante; dopo un certo intervallo di tempo il braccio decelera con la stesse legge con cui ha accelerato e si ferma nuovamente in posizione verticale.

Questo caso è ben applicabile quando il valore del k_i della coppia non è nullo.

A differenza del caso precedente, si utilizza un valore di velocità massima alto, così che si possa apprezzare maggiormente lo spostamento dell’UAV.

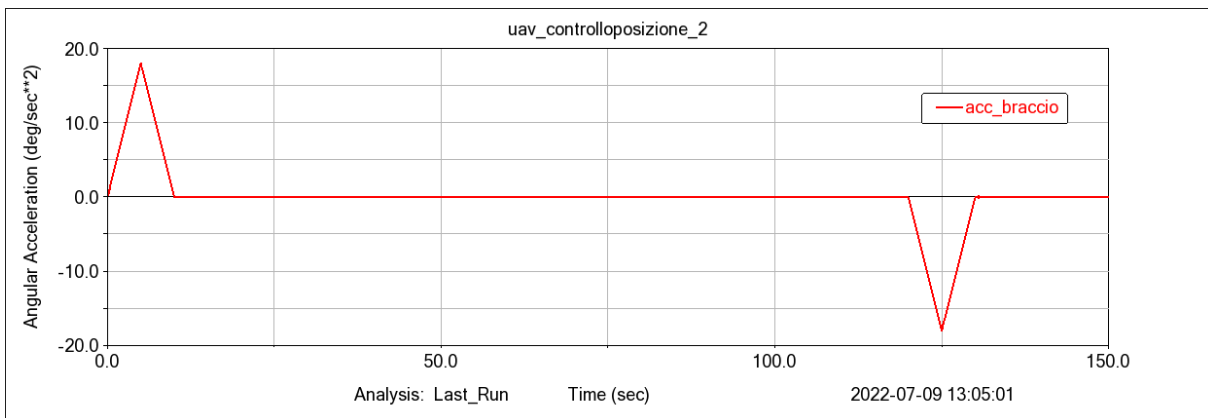


Figura 144: accelerazione del braccio

Matematicamente, il moto viene descritto in questo modo:

$$\alpha(t) = \begin{cases} \frac{18}{5} * t & \text{per } t < 5s \\ 18 - \frac{18}{5} * (t - 5) & \text{per } 5s \leq t < 10s \\ 0 & \text{per } 10s \leq t < 120s \\ 18 - \frac{18}{5} * (t - 115) & \text{per } 120s \leq t < 125s \\ -18 + \frac{18}{5} * (t - 125) & \text{per } 125s \leq t < 130s \\ 0 & \text{per } t \geq 130s \end{cases}$$

Il valore massimo dell’accelerazione è di 18 gradi/s² e si raggiunge dopo 5 s.

Per integrazione si trova la legge di moto della velocità angolare del braccio.

Il valore massimo della velocità angolare sarà invece 90 gradi/s, e questa velocità verrà mantenuta costante per 110 secondi.

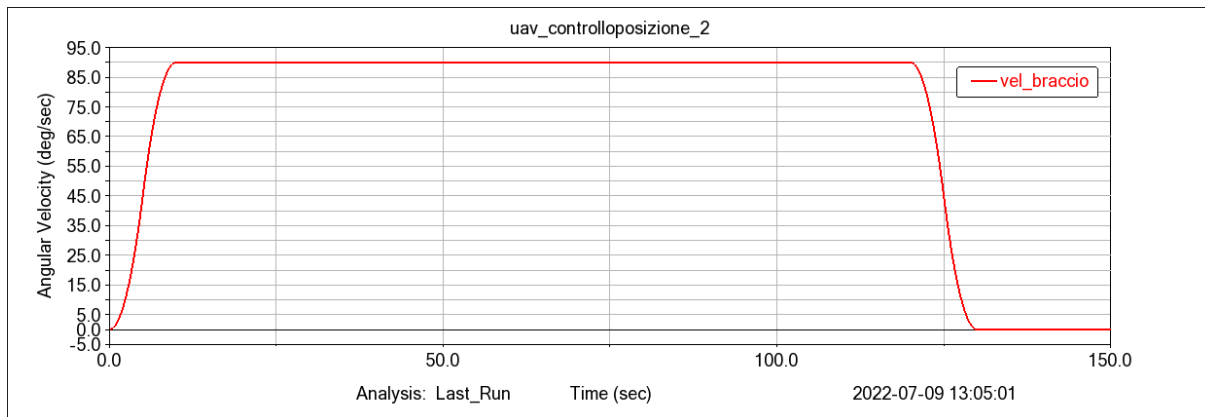


Figure 145: velocità angolare del braccio

Integrando la curva troviamo quanti gradi spazza il braccio, durante il suo moto:

$$\text{Tratto iniziale: } \frac{\left(10s * 90 \frac{\text{gradi}}{s}\right)}{2} = 450 \text{ gradi}$$

$$\text{Tratto a velocità costante: } 110s * 90 \text{ gradi} = 9900 \text{ gradi}$$

$$\text{Tratto finale: } \frac{\left(10s * 9 \frac{\text{gradi}}{s}\right)}{2} = 450 \text{ gradi}$$

$$\text{Totale: } 10800 \text{ gradi} \rightarrow 30 \text{ giri}$$

La risposta a questo moto del drone, come negli altri casi, dipenderà dai parametri del controllo.

5.3.1 Controllo con valori dei parametri PID alti

I parametri del controllo PID sono i seguenti:

	Kp	Kd	Ki
γ	1000	500	500
ϕ	600	30	500

Tabella 24: controllo PID con valori dei parametri alti

La posizione lungo x del drone è la seguente:

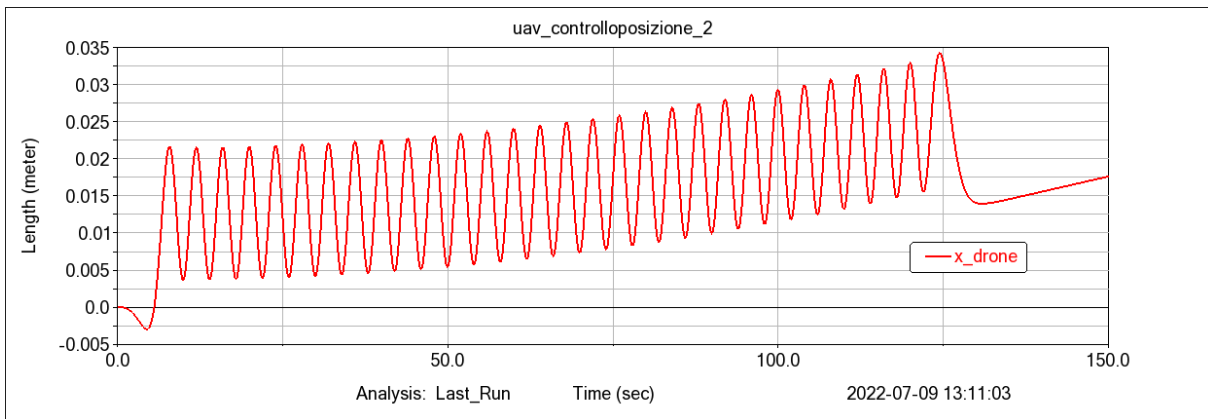


Figura 146: posizione lungo x dell'UAV

Non si riesce a controllare la posizione in quanto ha terminato il moto del braccio il drone mantiene una velocità residua costante anche se il numero dei giri del braccio è un numero finito.

5.3.2 Controllo con valori dei parametri PID bassi

I parametri del controllo PID sono i seguenti:

	Kp	Kd	Ki
γ	53	33	16
ϕ	74	11	57

Tabella 25: controllo PID con valori dei parametri bassi

La posizione lungo x del drone è la seguente:

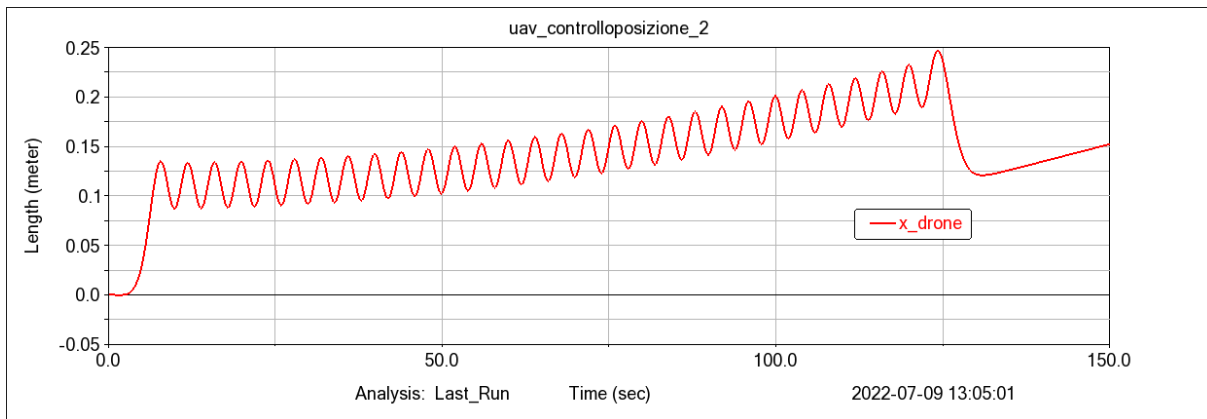


Figura 147: posizione lungo x dell'UAV

Non si riesce a controllare la posizione in quanto ha terminato il moto del braccio il drone mantiene una velocità residua costante anche se il numero dei giri del braccio è un numero finito.

6 CONCLUSIONI

In questa tesi, si è studiato come il moto di un braccio robotico ad 1 grado di libertà influenzi il moto dell'UAV su cui è montato; in particolare si sono prese in considerazione diverse leggi di moto del braccio e si è studiata la risposta dell'UAV, concentrandosi su accelerazione, velocità, spostamento, rollio e altitudine dell'UAV.

Il braccio è stato fatto muovere in tre diversi modi: i primi due riguardano una semplice oscillazione da una da una posizione verticale fino a un angolo noto; mentre nel terzo caso il braccio è mosso con un moto circolare uniforme salvo i primi istanti in cui accelera. Lo scopo è muovere il braccio in modo controllato e posizionare il drone in una posizione voluta.

Si considera dapprima un controllo ideale, cioè con risposta istantanea; rappresenta appunto un caso ideale, il velivolo non viene sbilanciato in quanto non ha rollio e differenza di altitudine. Considerando poi controllo PID reale, sono stati fatti variare i parametri del controllo da valori alti a valori più bassi. Prendendo in considerazione poi che alcuni controllori sono semplicemente controllori PD è stato studiato il moto del velivolo annullando il termine integrativo dell'azione di controllo che agisce sul rollio. Il moto con Ki nullo cambia decisamente rispetto al caso precedente.

Si è poi cercato di controllare la posizione del drone considerando tutti i casi precedenti.

Il risultato finale è il seguente: sia con valori alti dei guadagni e sia con valori più bassi o che il termine integrativo sia nullo, controllando opportunamente il braccio e con i giusti accorgimenti si riesce ad ottenere un valore della posizione finale controllato, noto e fisso nel tempo con velocità e accelerazione nulla dell'UAV.

In particolare, quando è presente un controllore PID conviene utilizzare un movimento del braccio che consiste in una rotazione da posizione verticale fino a un angolo noto con ritorno in posizione iniziale dopo un intervallo di tempo scelto appositamente in base allo spostamento che si desidera effettuare al drone. Mentre se si ha un controllo PD per la coppia che agisce sul rollio del velivolo, conviene usare un movimento rotante del braccio a velocità angolare costante; in base ai giri del braccio (con parametri bassi ne bastano pochi per effettuare alcuni metri) e quindi in relazione alla durata del tratto a velocità angolare costante è possibile controllare la coordinata x dell'UAV.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Bingshuang Zhang and Lingqing Zhang. «Study on the application of 3d modeling based on uav photography in urban planning— Taking Yi Jiequ area in Du Jiangyan as an example», In *AIP Conference Proceedings*, volume 1864, page 020226. AIP Publishing LLC, 2017.
- [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. Augugliaro et al., "The Flight Assembled Architecture installation: Cooperative construction with flying machines," in *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 34, no. 4, pp. 46-64, Aug. 2014, doi: 10.1109/MCS.2014.2320359.
- [5] 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
- [6] 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.
- [7] 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>.
- [8] 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>
- [9] S. Cocuzza, E. Rossetto e A. Doria, «Dynamic interaction between robot and UAV in aerial manipulation», *2020 19th International Conference on Mechatronics - Mechatronika (ME)*, pp. pp. 1-6, 2020

- [10] G. Heredia et al., "Control of a multirotor outdoor aerial manipulator," 2014 IEEE/RSJ *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2014, pp. 3417-3422, doi: 10.1109/IROS.2014.6943038.
- [11] Aws 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>.
- [12] 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
- [13] A. Noordin, M. Basri e Z. Mohamed, «Simulation and experimental study on PID control», *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, p. pp. 1811~1818, Vol. 9, No. 5, October 2020.
- [14] 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
- [15] E. Marozin, "Effetto della manipolazione sulla posizione e assetto di un drone", Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica, Università degli studi di Padova, a.a. 2020-2021, Relatori: A. Doria, S. Cocuzza

