



Interreg V-A Francia-Italia (ALCOTRA) 2014 - 2020

InterBITS Interventi di armonizzazione e valorizzazione del sistema BTS e ITS



Meccanica di volo di un quadricottero

10/2021

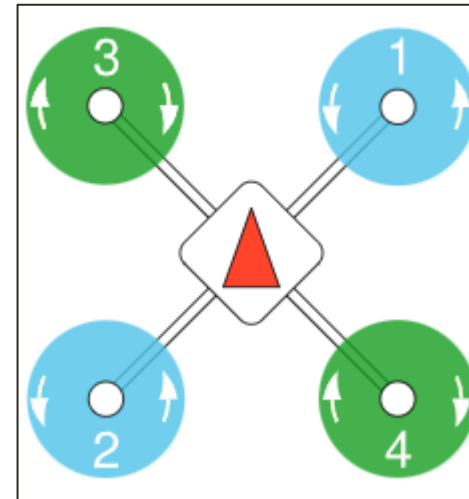


Meccanica di volo

Il principio fondamentale per il controllo di un quadricottero generico è la modifica della velocità dei rotori, in modo tale da generare una coppia lungo i tre assi che ne identificano la posa.

Meccanica di volo

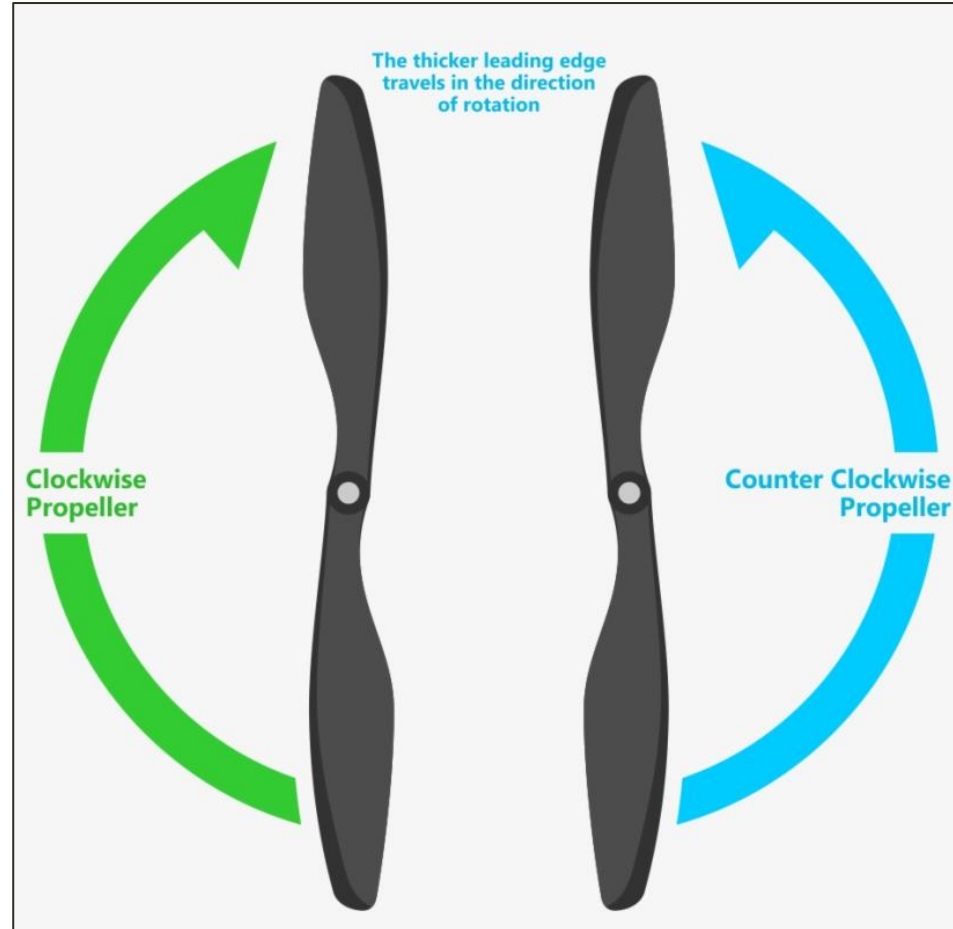
Ogni braccio del drone é dotato di un motore e un elica, essi sono montati a coppie opposte.



La rotazione del motore é determinata dal collegamento con la ESC.
A seconda della direzione del motore, bisogna installare l'elica
corretta: CW o CCW

Meccanica di volo

Identificare le eliche



Meccanica di volo

La coppia generata da queste coppie evita che l'UAS giri su se stesso, questo perché bisogna compensare la terza legge di Newton:

"Ad ogni azione corrisponde una reazione uguale e contraria"

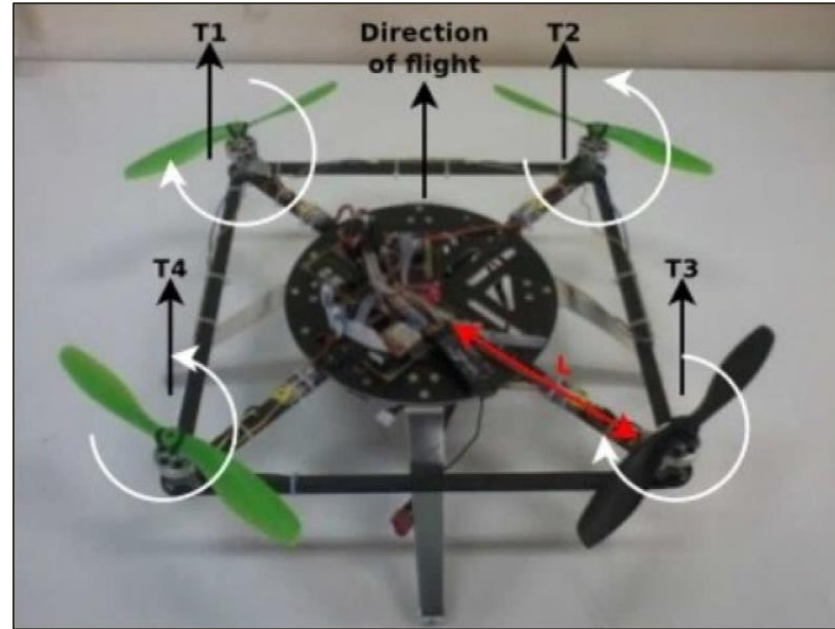
Per ogni forza, o momento, che un corpo A esercita su un altro corpo B, ne esiste istantaneamente un'altra uguale in modulo e direzione, ma opposta in verso, causata dal corpo B che agisce sul corpo A.

In termini matematici, il terzo principio può essere riassunto come:

$$f_{AB} = -f_{BA}$$

Meccanica di volo

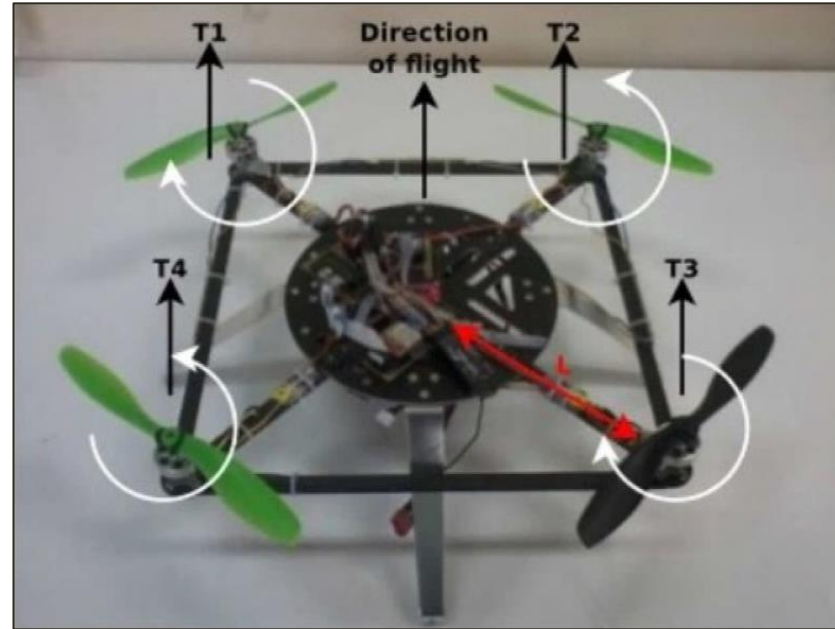
Forze e velocità di rotazione



- $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$: velocità di rotazione delle eliche
- T_1, T_2, T_3, T_4 : forze generate dalle eliche (Thrust)
- m : massa del drone
- Mg : forza peso del drone

Meccanica di volo

Momenti

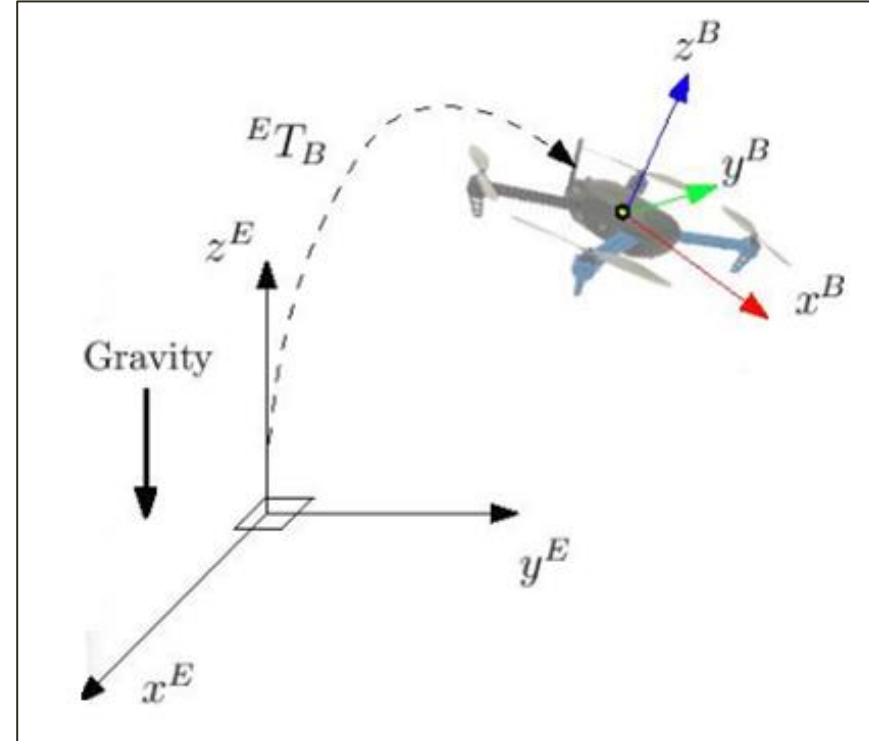


- M_1, M_2, M_3, M_4 : Momento generato dalla forza T_n

Il momento di una forza esprime la sua attitudine a imprimere una rotazione a un corpo rigido attorno a un asse quando questa non è applicata al suo centro di massa, altrimenti si avrebbe moto traslatorio.

Meccanica di volo

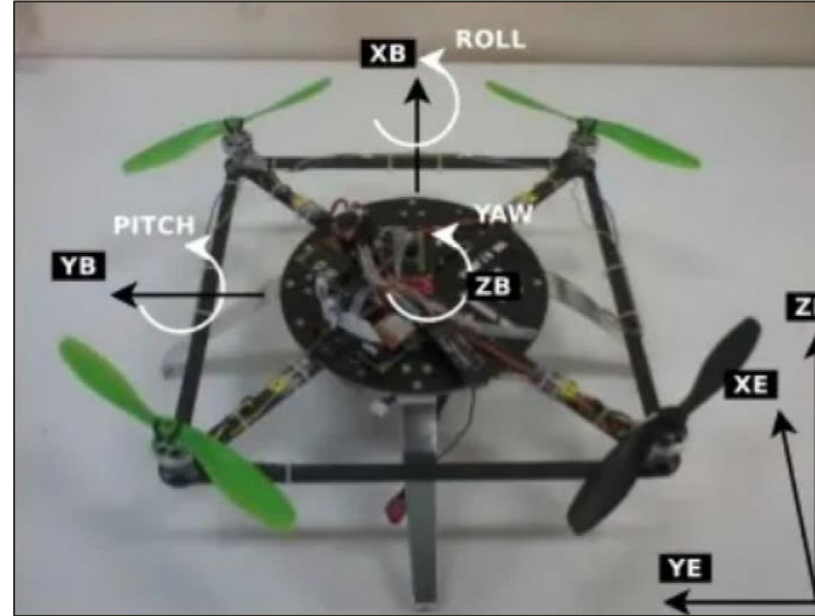
Sistemi di riferimento



- Il sistema di riferimento inerziale è indicato con World/Earth (E)
- Il sistema di riferimento del quadricottero è normalmente posto sul flycontroller e si identifica con Body (B)

Meccanica di volo

Angoli di Eulero



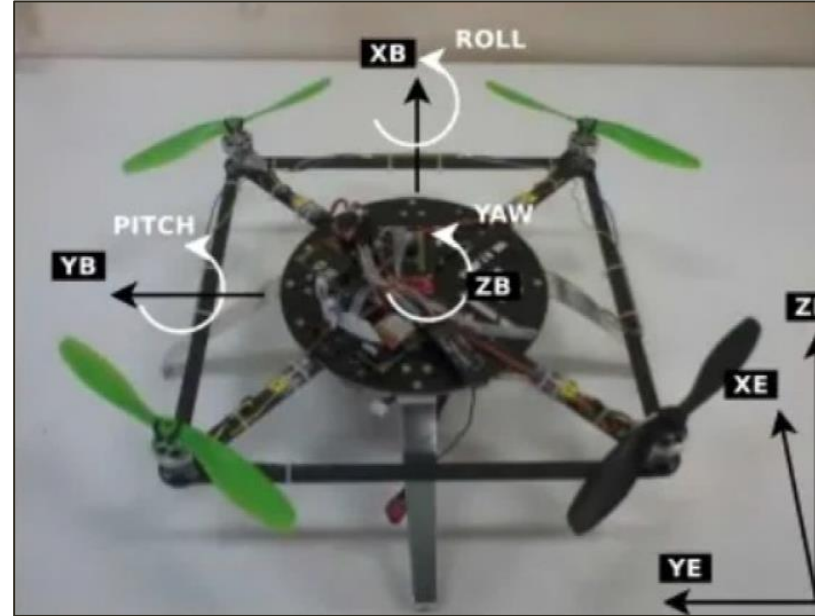
Gli angoli di Eulero a cui sono associati i tre movimenti del drone sono:

- **X** → Rollio → ϕ
- **Y** → Beccheggio → θ
- **Z** → Imbardata → ψ

Definiscono la matrice di rotazione dal sistema di riferimento E | sistema di riferimento B

Meccanica di volo

Angoli di Eulero



Le derivate dei tre angoli rispetto al tempo sono le velocità angolari del sistema:

- **X** → Rollio $\rightarrow \phi \rightarrow \frac{d}{dt} \rightarrow \dot{\phi}$
- **Y** → Beccheggio $\rightarrow \theta \rightarrow \frac{d}{dt} \rightarrow \dot{\theta}$
- **Z** → Imbardata $\rightarrow \psi \rightarrow \frac{d}{dt} \rightarrow \dot{\psi}$

Definiscono la matrice di rotazione dal sistema di riferimento E I sistema di riferimento B

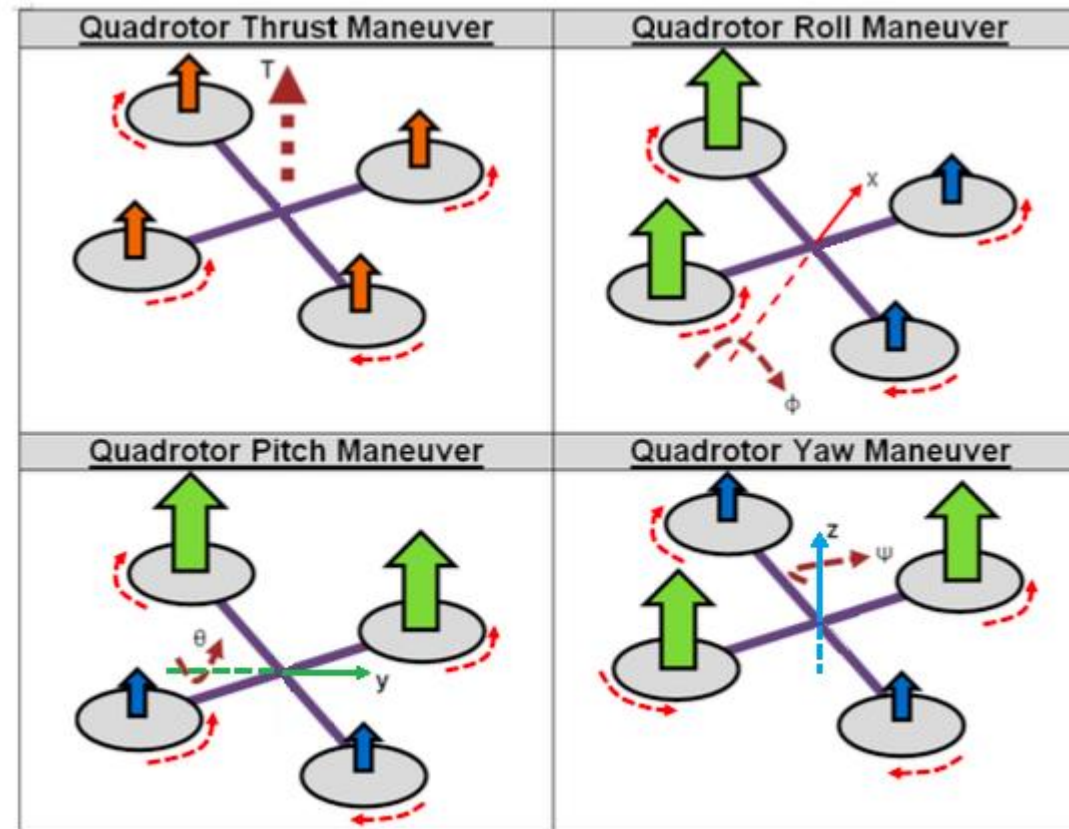
Meccanica di volo

OK, MA ORA COME LO FAI VOLARE?



Meccanica di volo

Cambiando la velocità di rotazione dei motori viene modificata di conseguenza anche l'accelerazione, e quindi si genera la coppia di controllo.



Meccanica di volo

Hovering

Condizione di equilibrio:

- $T_1 + T_2 + T_3 + T_4 = -mg$
- $T_{1,2,3,4} \parallel g$
- $M_1 + M_2 + M_3 + M_4 = 0$
- $(\omega_1 + \omega_3) - (\omega_2 + \omega_4) = 0$

Di conseguenza:

- $X \rightarrow \text{Rollio} \rightarrow \phi = 0 \rightarrow \frac{d}{dt} \rightarrow \dot{\phi} = 0$
- $Y \rightarrow \text{Beccheggio} \rightarrow \theta = 0 \rightarrow \frac{d}{dt} \rightarrow \dot{\theta} = 0$
- $Z \rightarrow \text{Imbardata} \rightarrow \psi = 0 \rightarrow \frac{d}{dt} \rightarrow \dot{\psi} = 0$

Meccanica di volo

Salire e scendere

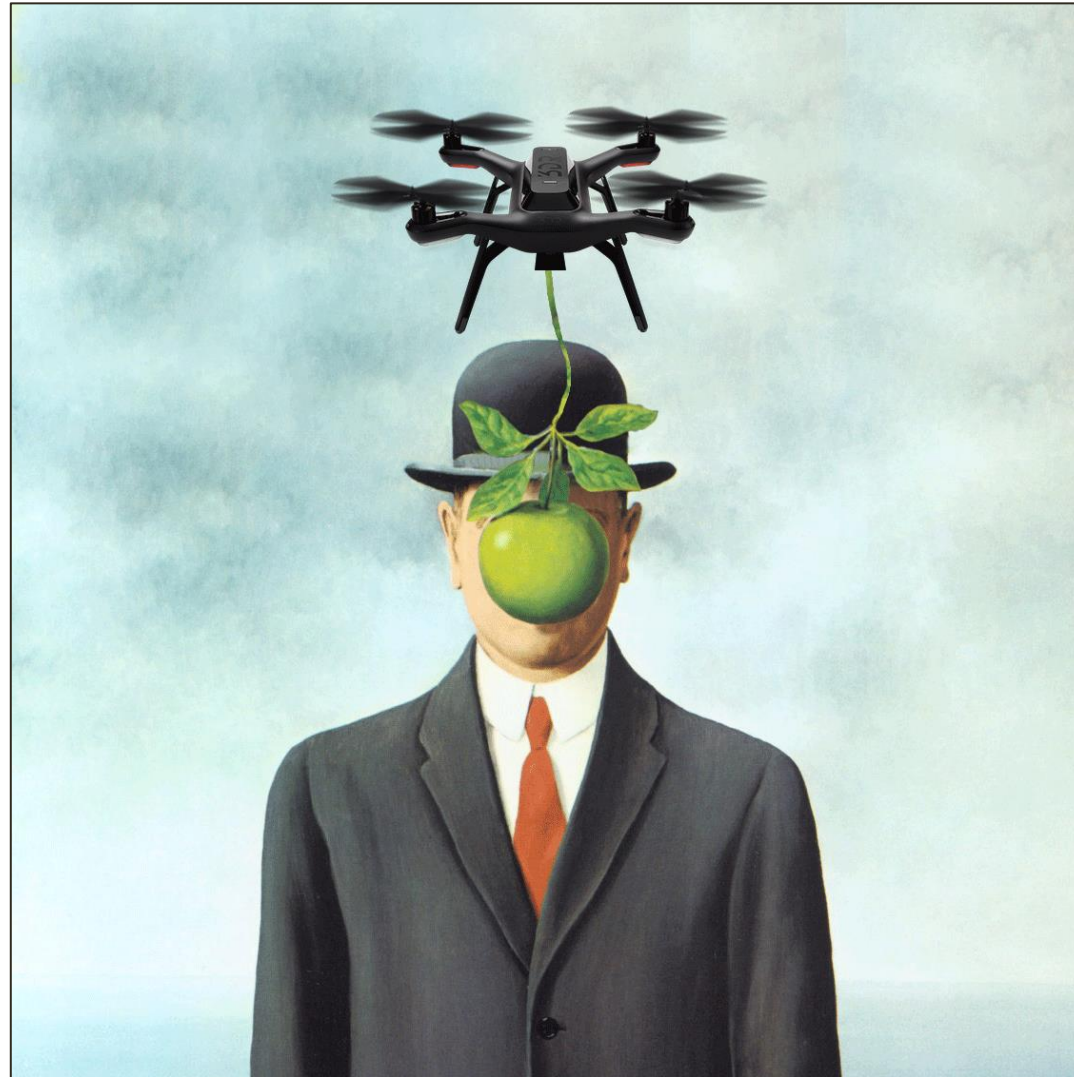
Le forze non sono in equilibrio

- $T_1 + T_2 + T_3 + T_4 \neq -mg$

Quindi variando la velocità di rotazione su tutti i motori si avrà:

- $T_1 + T_2 + T_3 + T_4 > -mg \rightarrow \text{SALE}$
- $T_1 + T_2 + T_3 + T_4 < -mg \rightarrow \text{SCENDE}$

Ora sapete
come fare
questo



Meccanica di volo

Imbardata

Le velocità dei motori non sono in equilibrio:

- $(\omega_1 + \omega_3) - (\omega_2 + \omega_4) = 0$

Di conseguenza:

- $Z \rightarrow \text{Imbardata} \rightarrow \psi \neq 0 \rightarrow \frac{d}{dt} \rightarrow \dot{\psi} = Ky((\omega_1 + \omega_3) - (\omega_2 + \omega_4))$
 $\rightarrow \psi = \int \dot{\psi} dt$

Meccanica di volo

Rollio

I momenti non sono in equilibrio:

- $M_1 + M_2 + M_3 + M_4 \neq 0$

Perché le velocità di rotazione sono state sbilanciate:

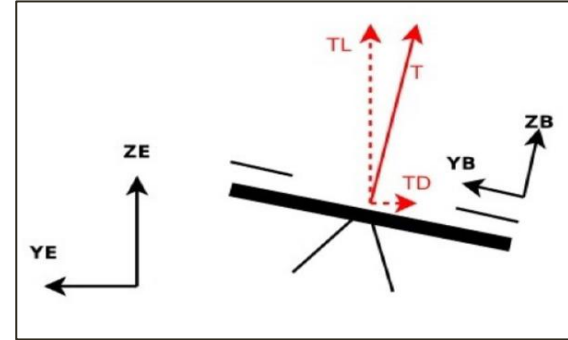
- $(\omega_1 + \omega_2) - (\omega_3 + \omega_4) \neq 0$

Di conseguenza le forze T non saranno più parallele alla gravità, quindi:

- $\text{X} \rightarrow \text{Rollio} \rightarrow \phi \neq 0 \rightarrow \frac{d}{dt} \rightarrow \dot{\phi} = Kr((\omega_1 + \omega_2) - (\omega_3 + \omega_4))$
 $\rightarrow \phi = \int \dot{\phi} dt$

Meccanica di volo

Rollio e forza di traslazione



La forza totale generata dalle eliche corrisponde a:

- $T = T_1 + T_2 + T_3 + T_4$

Che si può scomporre nelle sue due componenti:

- Forza di sollevamento: $T_L = T \cos \phi$
- Forza di trascinamento: $T_D = T \sin \phi$

Questo implica che $T_L = T \cos \phi = -mg$ ed è in equilibrio, in questo modo viene generato un moto traslatorio.

Dato che la sommatoria delle forze è stata divisa si necessiterà di più potenza per rimanere in hovering o effettuare un imbardata.

Meccanica di volo

Beccheggio

I momenti non sono in equilibrio:

- $M_1 + M_2 + M_3 + M_4 \neq 0$

Perché le velocità di rotazione sono state sbilanciate:

- $(\omega_1 + \omega_3) - (\omega_2 + \omega_4) \neq 0$

Di conseguenza le forze T non saranno più parallele alla gravità, quindi:

- $Y \rightarrow \text{Beccheggio} \rightarrow \theta = 0 \rightarrow \frac{d}{dt} \rightarrow \dot{\theta} = K_p((\omega_1 + \omega_2) - (\omega_3 + \omega_4))$
 $\rightarrow \theta = \int \dot{\theta} dt$

Dato che la sommatoria delle forze è stata divisa si necessiterà di più potenza per rimanere in hovering o effettuare un imbardata.

Meccanica di volo

Equazione di movimento generica

Assumendo che $K_f = K_r = K_p = K_y = K$ e che $F = K(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4)$

$$\dot{\phi} = K((\omega_1 + \omega_4) - (\omega_2 + \omega_3)) = K\omega_1 - K\omega_2 - K\omega_3 - K\omega_4$$

$$\dot{\theta} = K((\omega_1 + \omega_2) - (\omega_3 + \omega_4)) = K\omega_1 + K\omega_2 - K\omega_3 - K\omega_4$$

$$\dot{\psi} = K((\omega_1 + \omega_3) - (\omega_2 + \omega_4)) = K\omega_1 - K\omega_2 + K\omega_3 - K\omega_4$$

$$F = K(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4) = K\omega_1 + K\omega_2 + K\omega_3 + K\omega_4$$

Che in forma matriciale corrisponde a :

$$\begin{pmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \\ F \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k & -k & -k & k \\ k & k & -k & k \\ k & -k & k & -k \\ k & k & k & k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{pmatrix}$$

Meccanica di volo

Velocità angolare del drone

$$\begin{pmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \\ F \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k & -k & -k & k \\ k & k & -k & k \\ k & -k & k & -k \\ k & k & k & k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{pmatrix} = K \begin{pmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{pmatrix}$$

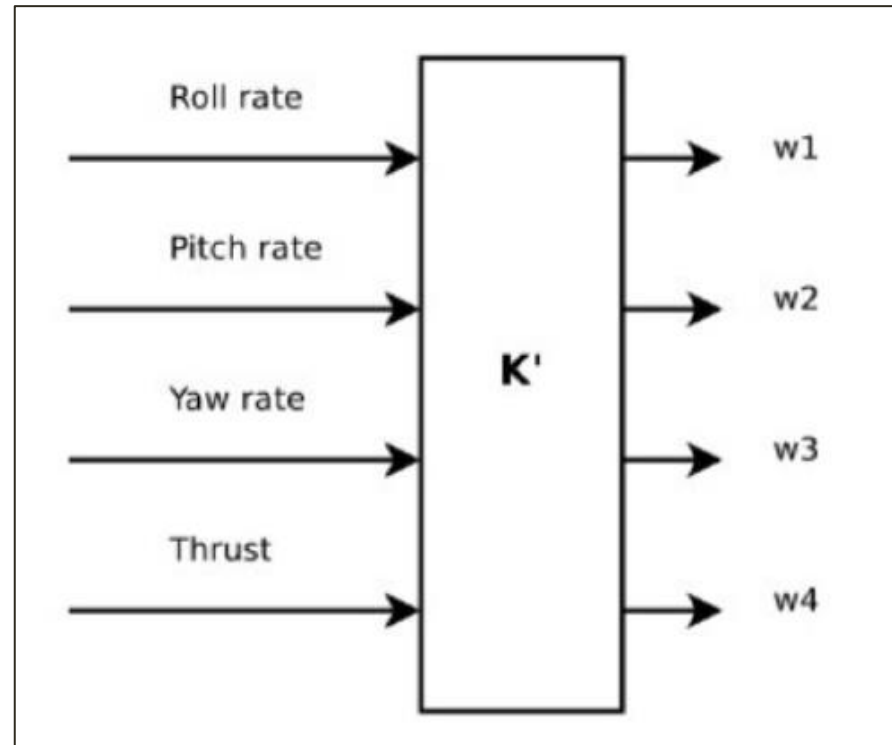
Questa equazione in forma matriciale permette di ottenere le velocità angolari del quadricottero in funzione della velocità di rotazione delle eliche.

Tuttavia se si vuole controllare il drone, bisogna capire in che modo imporre una certa velocità di rotazione delle pale rispetto al sistema di riferimento B del drone.

Meccanica di volo

Controllo del rollio, beccheggio, imbardata e accelerazione

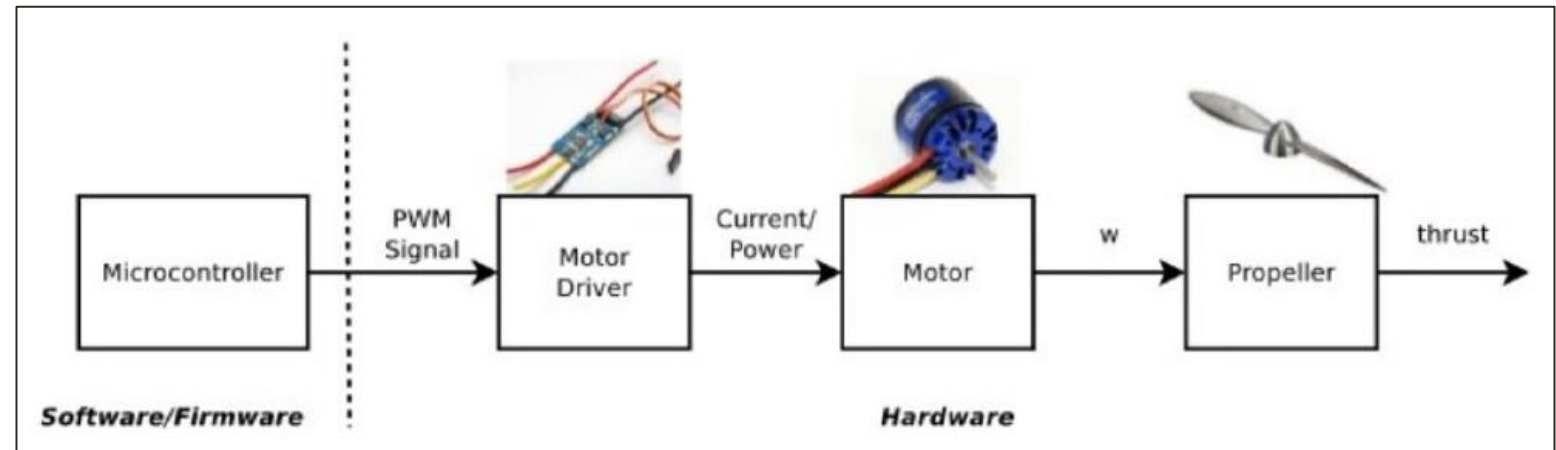
$$\begin{pmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{pmatrix} = K^{-1} \begin{pmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \\ F \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k & k & k & k \\ -k & k & -k & k \\ -k & -k & k & k \\ k & -k & -k & k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \\ F \end{pmatrix}$$



Mondo ideale
vs
mondo reale



Ho comprato e montato tutto, ma...

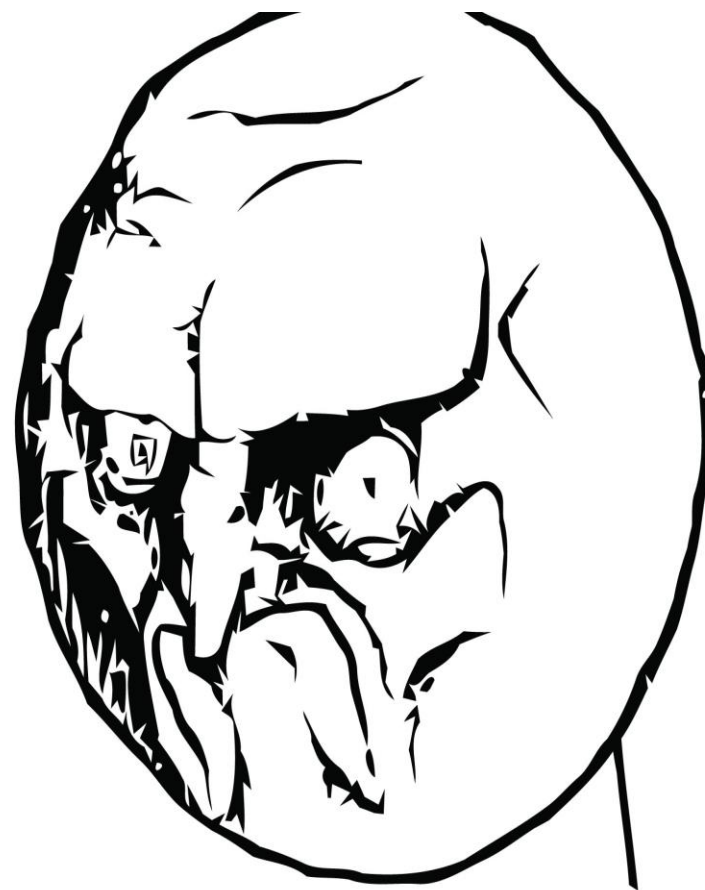


Supponiamo di aver scelto le ESC, i motori e le eliche (ovviamente tutti uguali), il fly controller e il suo firmware.

Il segnale PWM viene generato dal fly controller, ma...

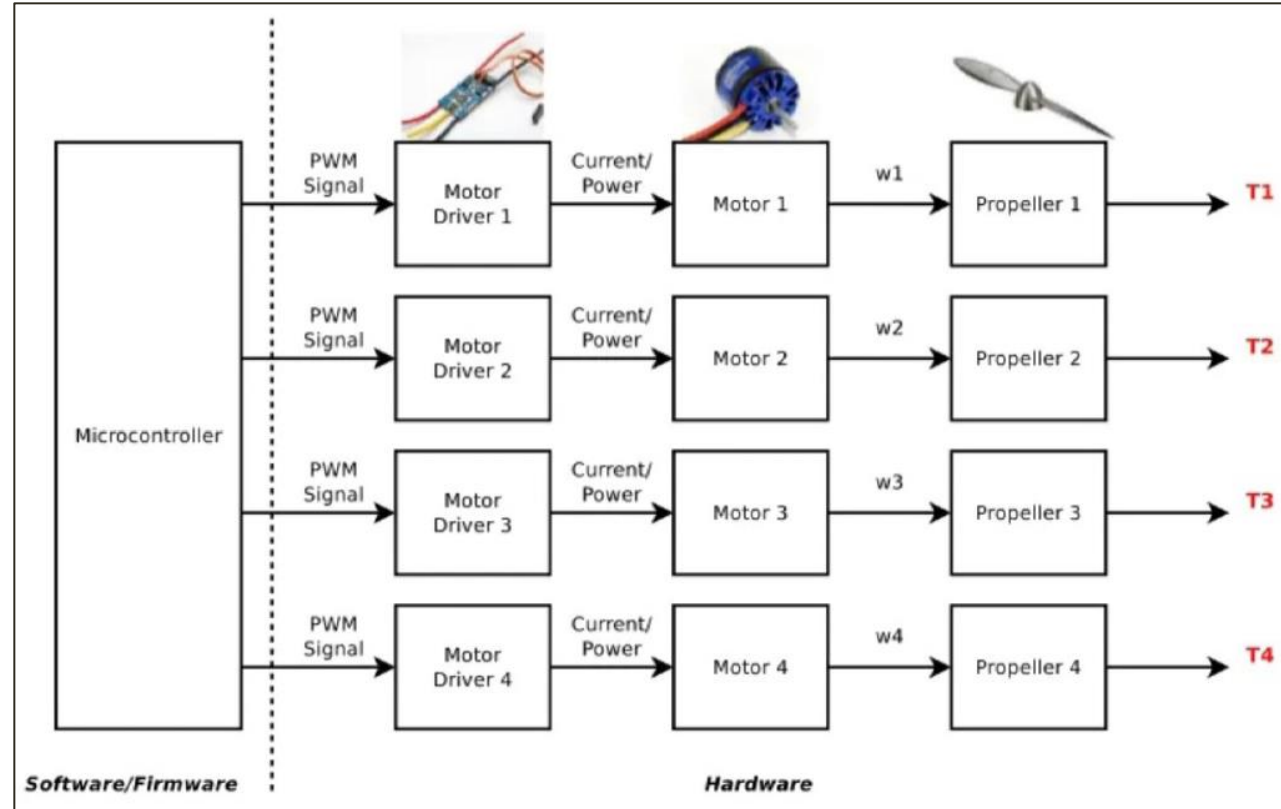
- Le ESC sono veramente tutte uguali?
- I motori sono veramente tutti uguali?
- Le eliche sono veramente tutte uguali?
- Il flycontroller è stato installato perfettamente al centro del frame?

La risposta è...



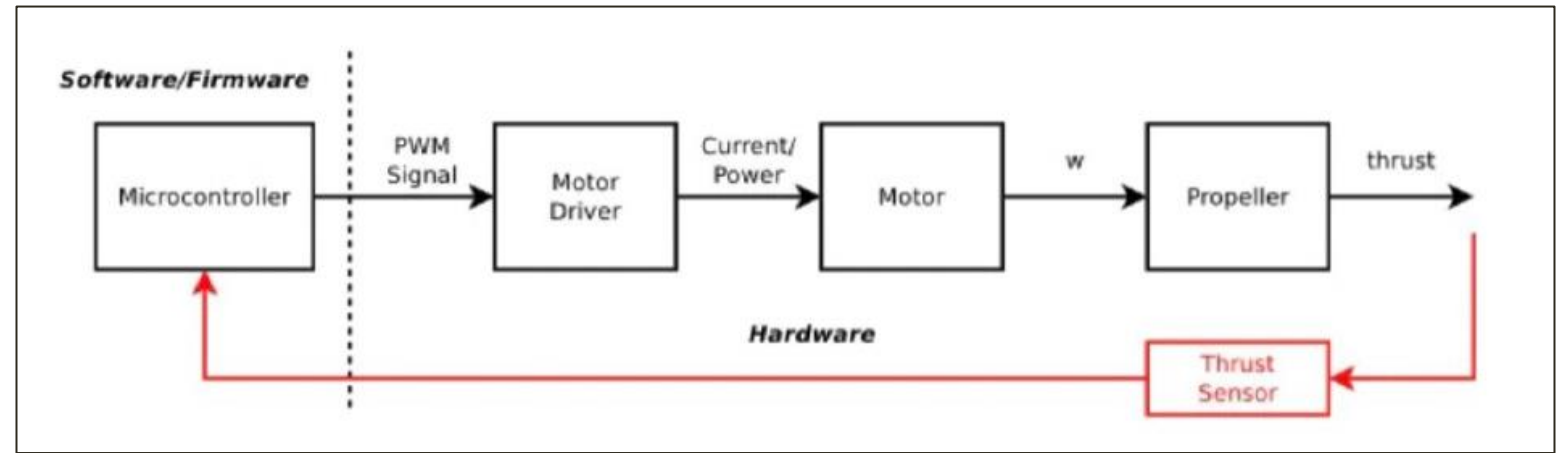
NO.

Questo
perché...



Lo stesso segnale PWM applicato a diversi elementi, provoca la generazione di forze diverse (questo anche se i componenti sono gli stessi)

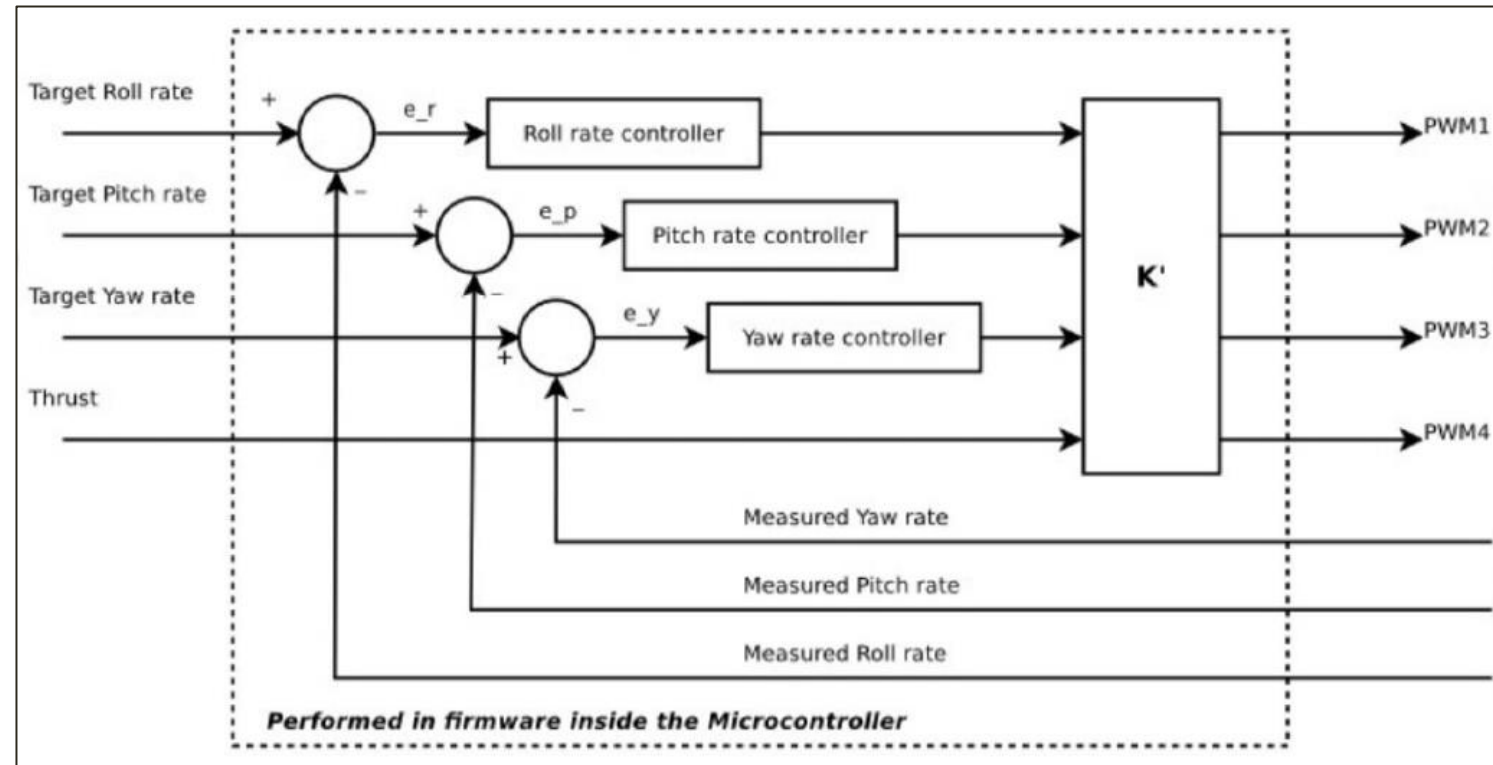
La soluzione è utilizzare un flycontroller



La soluzione al problema è la progettazione di un controllore che:

1. Riceva in ingresso l'accelerazione generata tramite un sensore
2. Compri la misura con il comando che abbiamo dato in input
3. Applichi la correzione necessaria
4. Ripeta tutto questo all'infinito

Scenario reale per il controllo della velocità



- Tramite un giroscopio è possibile ottenere la velocità angolare sui tre assi
- Il valore desiderato viene impostato tramite il radiocomando

È possibile controllare l'assetto invece della velocità?

Come fonti di misura abbiamo il giroscopio per la velocità angolare e un accelerometro per l'accelerazione sui tre assi.

Tuttavia:

- Il giroscopio ha un problema di deriva della misura che quindi viene approssimata
- L'accelerometro riesce a fornire una misura precisa solo se il sensore non si sta muovendo

Quindi abbiamo due differenti fonti di misura ma entrambe affette da due tipi diversi di errori...cosa possiamo fare?

1. Farlo volare lanciandolo dalla finestra
2. Fondere le misure in modo da ridurre l'errore e ottenere un informazione attendibile

Sensor fusion

L'idea di base è quella di ottenere una funzione che descriva l'errore come:

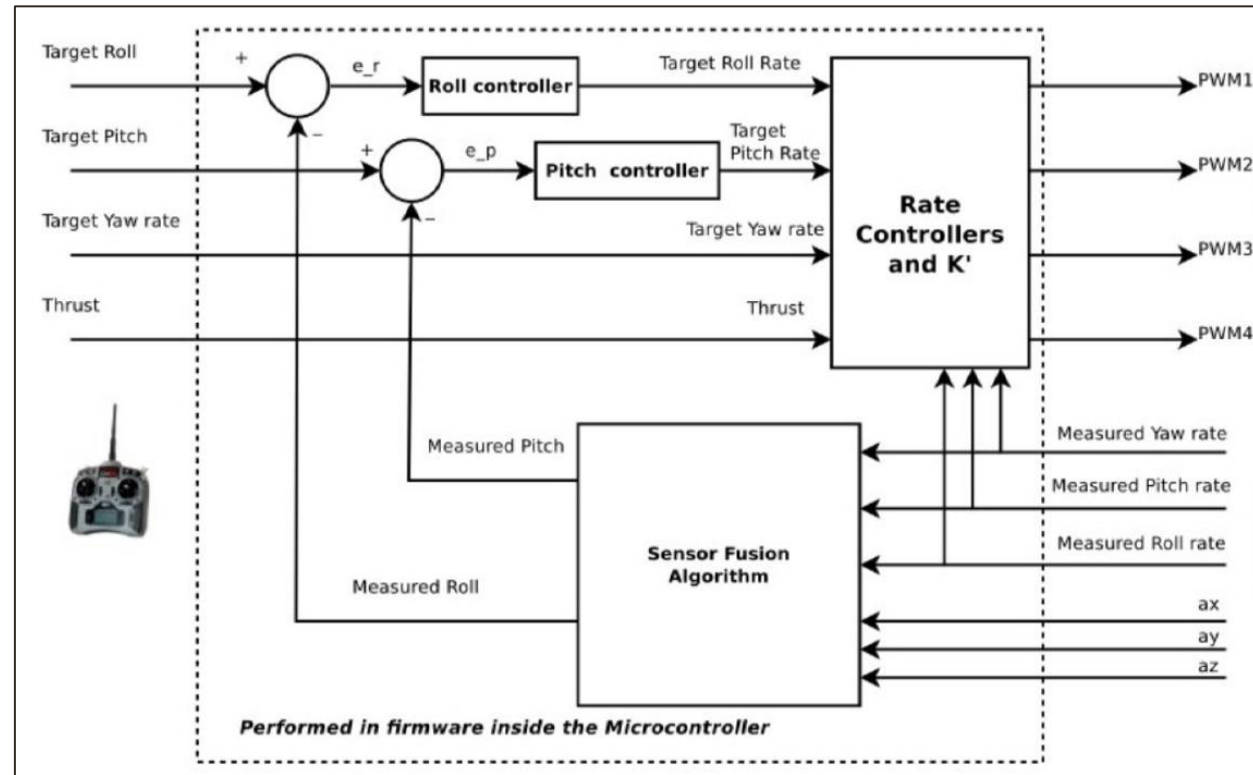
$$e(t) = reale(t) - stimato(t)$$

Quindi si vuole utilizzare un controllore in grado di garantire:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$$

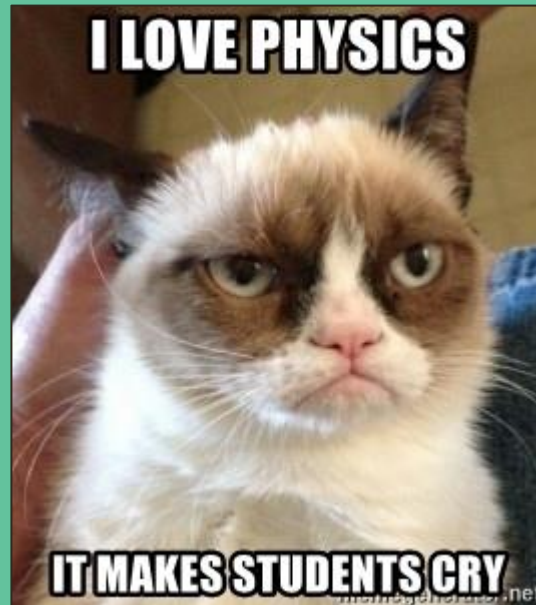
Il filtro di Kallman è un efficiente filtro ricorsivo che valuta lo stato di un sistema dinamico, a partire da una serie di misure soggette a rumore.

Per controllare
gli angoli, e
quindi
l'assetto, la
soluzione è ...



- Impostare l'assetto desiderato tramite il radiocomando
- Stimare l'assetto attuale tramite il filtro di Kalman
- Gli errori calcolati vengono inviati al controllore che restituisce la velocità per i singoli controllori

Fine Meccanica del volo



Pausa di 15 min

