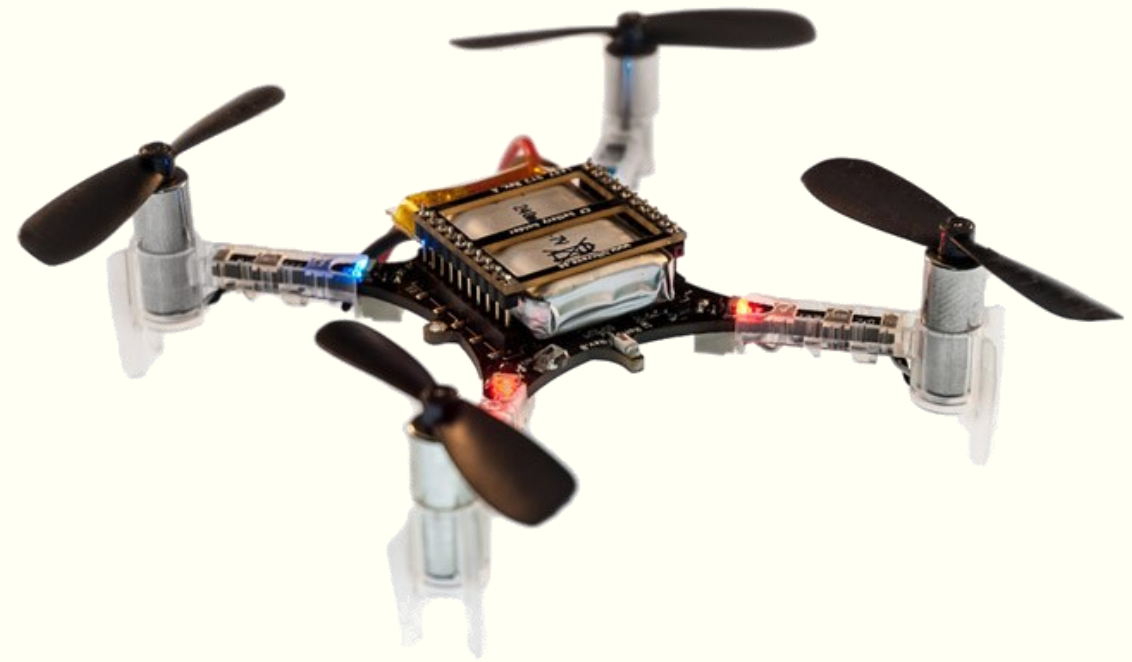
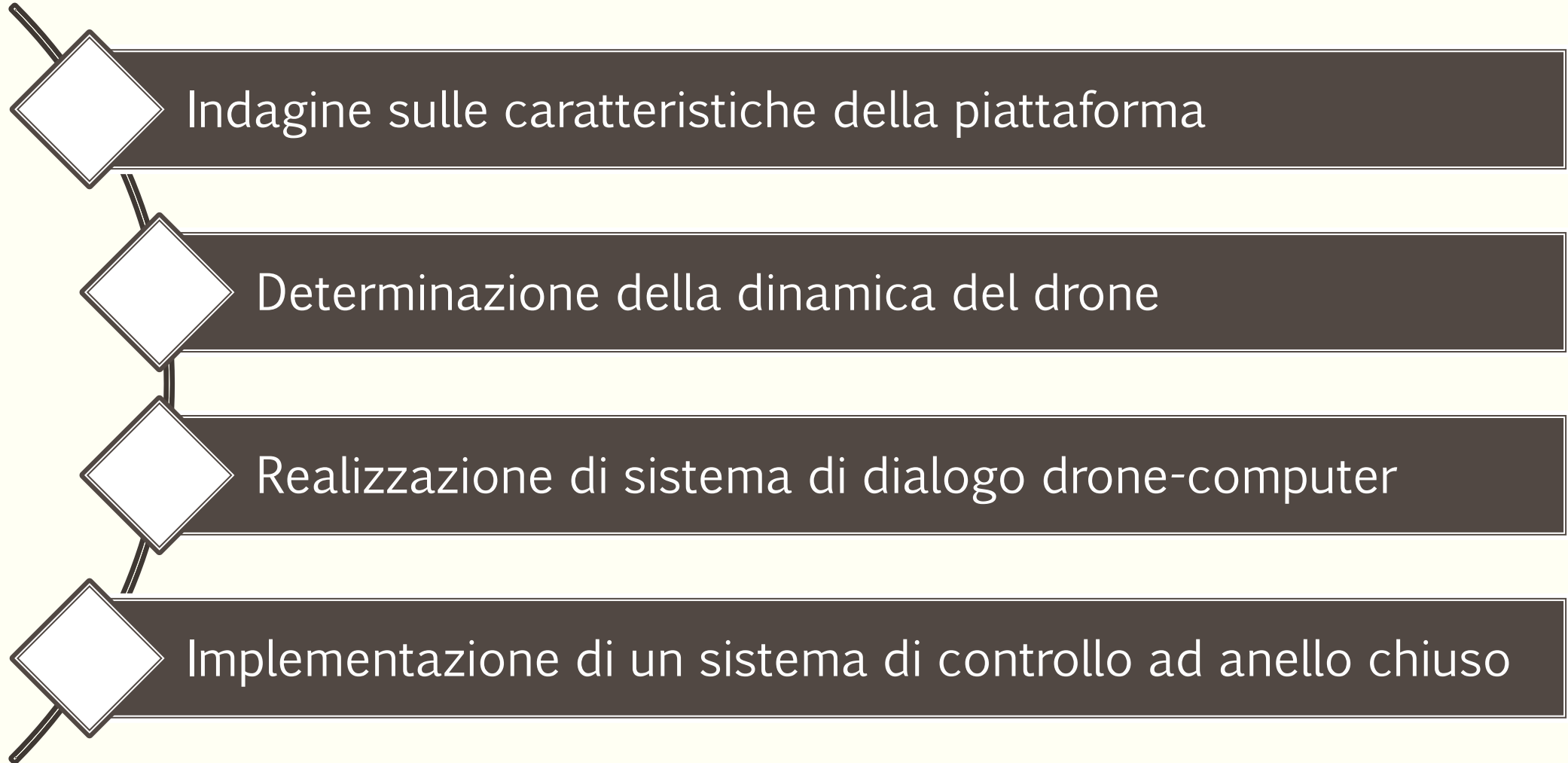


MODELLIZZAZIONE E CONTROLLO DEL DRONE QUADRIROTORE CRAZYFLIE 2.1



Relatore: Prof. Gianni Bianchini
Candidato: Edoardo Caproni

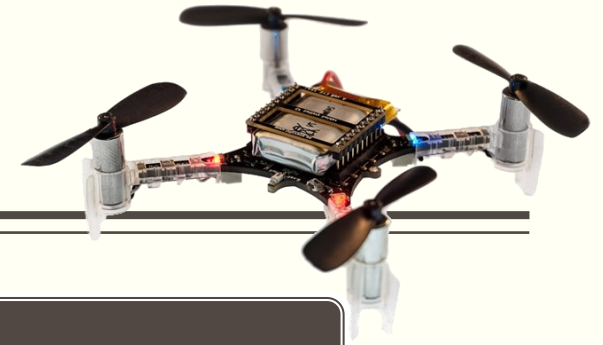
Obiettivi





INDAGINE SULLE CARATTERISTICHE DELLA PIATTAFORMA ROBOTICA

Caratteristiche del quadrirotore Crazyflie 2.1



- Dimensioni ridotte: 92 x 92 x 29 mm
- Leggero: 27 g di peso e 15 g di payload
- Scocca in FR-4 con duplice scopo: PCB e frame strutturale
- 4 motori a coppie oraria e antioraria
- Batteria LiPo 250 mAh: 7 minuti di volo garantiti
- Micro Controller Unit STM32F405

FR-4

Flame Retardant 4, materiale composito di fibra di vetro e resina epossidica

LiPo

Lithium-Polymer Battery

STM32F405

- ARM Cortex M4
- 168 MHz
- 192 kB SRAM
- 1MB flash

Connettività

Modulo gestione radio & potenza nRF51822

- ARM Cortex-M0
- 32 MHz
- 16 kB SRAM
- 128 kB flash
- Bluetooth LE 2.4 GHz
- Ricetrasmittitore 2.4 GHz



Bluetooth Low Energy

- Controllo attraverso applicazione per dispositivi mobili

Porta micro-USB

- Ricarica (40 min)
- Flashing del firmware



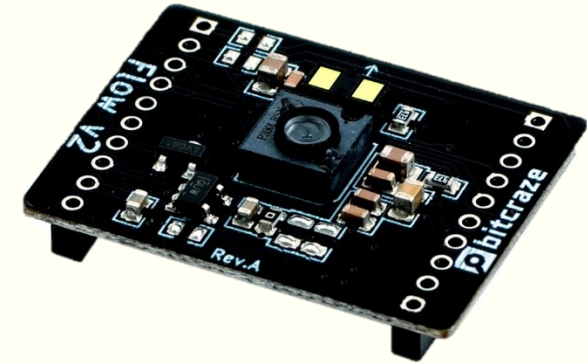
Crazyradio PA

- Dongle USB per pc
- Basato su nRF24LU1+, un chip della Nordic Semiconductor
- Amplificazione segnale in uscita 20 dBmW
- Range > 1km (linea di visuale)



Sensoristica

- Giroscopio e accelerometro a 3 assi: BMI088
- Sensore di pressione di alta precisione: BMP388
- Deck di espansione FlowDeck V2:
 - ❖ telecamera a tempo di volo (VL53L1x)
 - ❖ sensore di flusso ottico (PMW3901)



Rangefinder fino a 4 m

80 mm di quota
42° cono di visione

Sensor fusion attraverso filtro di Kalman esteso configurabile



DETERMINAZIONE DELLA DINAMICA DEL DRONE

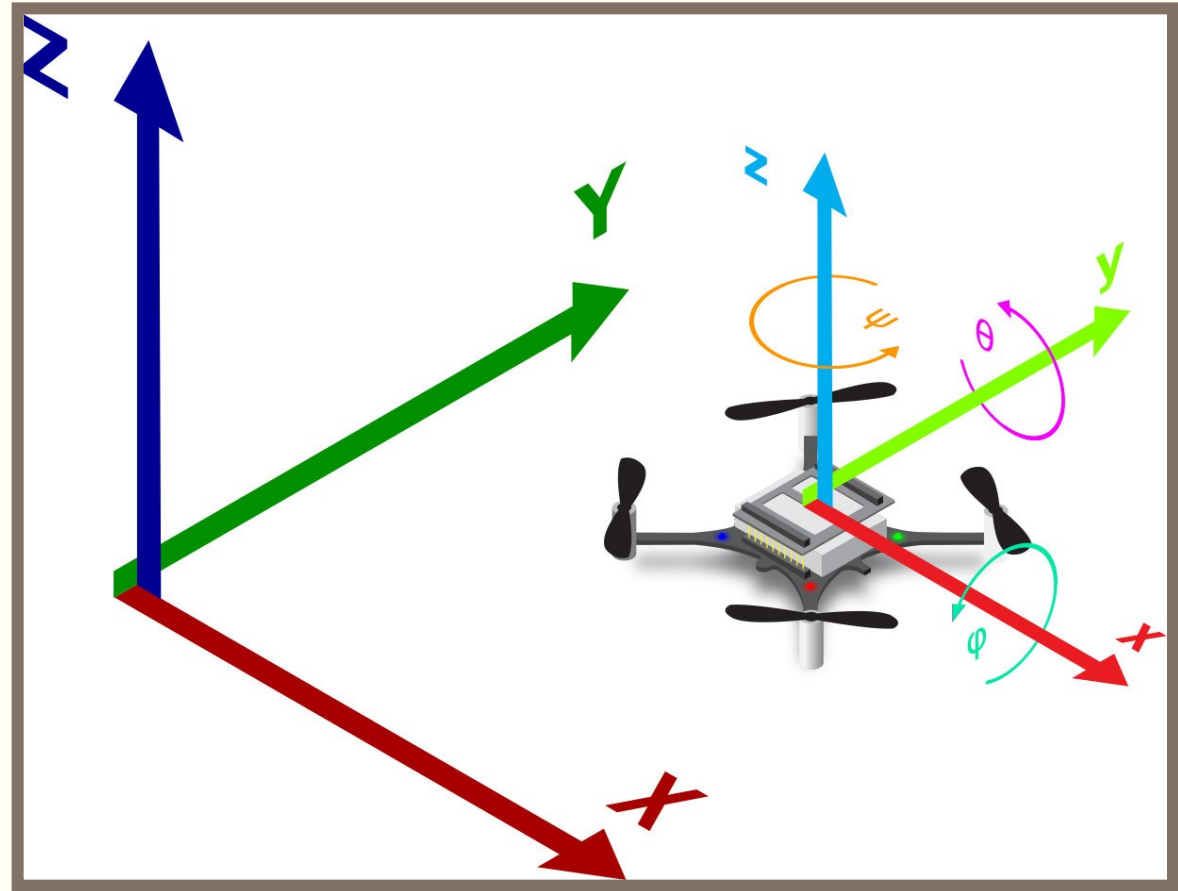
Sistema di riferimento – Standard ENU (East-North-Up)

Sistema di riferimento globale: XYZ

Sistema di riferimento locale: xyz

Angoli di Eulero (configurazione 1-2-3)

- ϕ : rollio/roll – rotazione oraria attorno all'asse x
- θ : beccheggio/pitch – rotazione antioraria attorno all'asse y
- ψ : imbardata/yaw – rotazione oraria attorno all'asse z

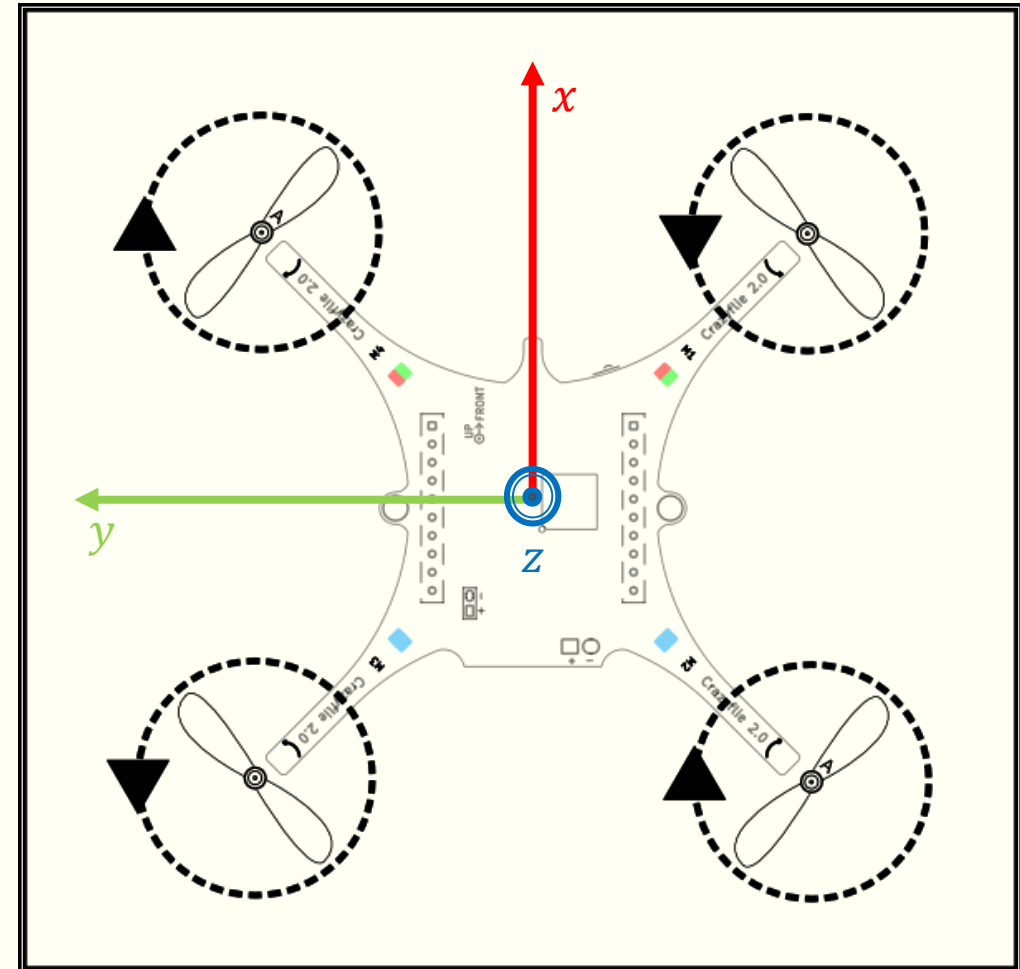


Variabili di controllo

Sistema sottoazionato: rollio e beccheggio accoppiati con movimenti lungo y e x rispettivamente

4 gradi di libertà:

- ❖ Thrust/spinta U_1
- ❖ Momento di roll U_2
- ❖ Momento di pitch U_3
- ❖ Momento di yaw U_4



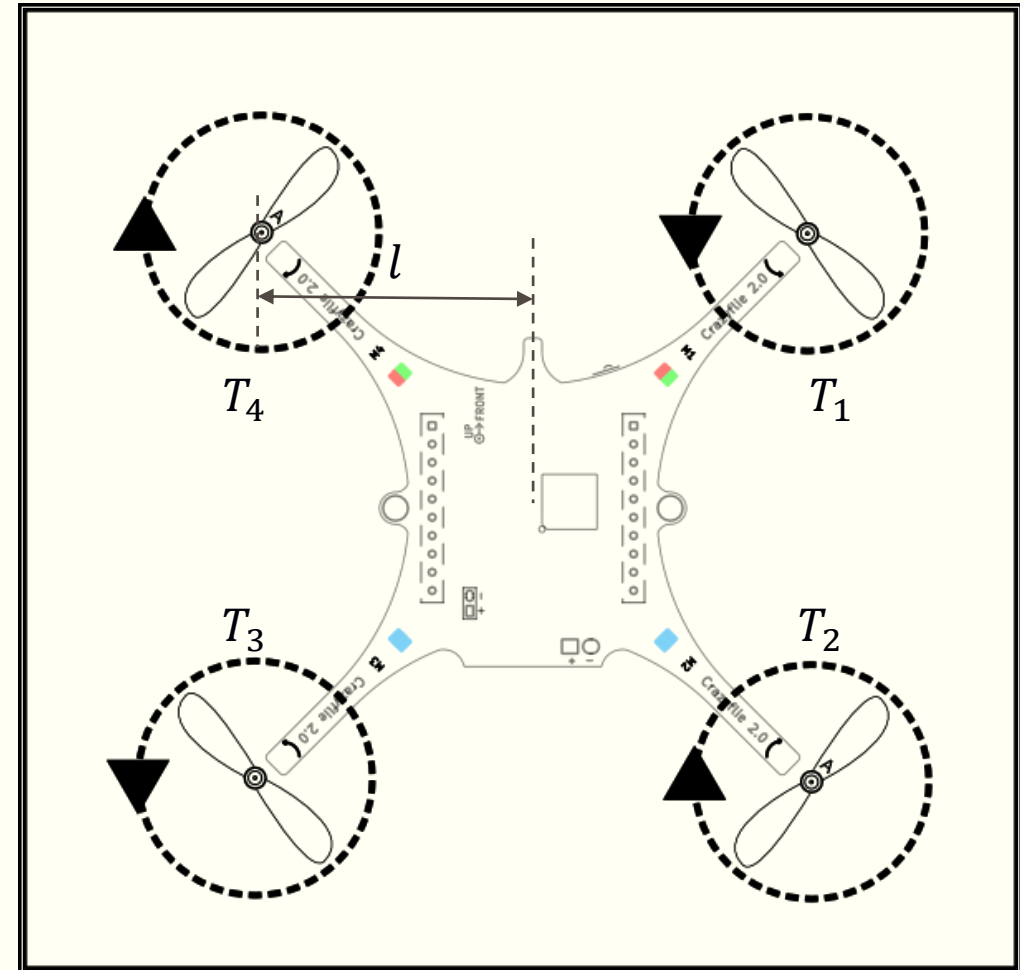
Variabili di controllo

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ -l & -l & l & l \\ l & -l & -l & l \\ d & -d & d & -d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{bmatrix}$$

$$T_i = b \cdot \Omega_i^2; \quad \Omega_i \geq 0$$

Dove $d \cdot b = c$, coefficiente di drag

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b & b & b & b \\ -lb & -lb & lb & lb \\ lb & -lb & -lb & lb \\ c & -c & c & -c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Omega_1^2 \\ \Omega_2^2 \\ \Omega_3^2 \\ \Omega_4^2 \end{bmatrix}$$



Modello dinamico

6 variabili di stato, rilevabili dai sensori quindi nel sistema :

- Posizione $\Gamma = (x, y, z)$
- Velocità $\dot{\Gamma} = (\dot{x}, \dot{y}, \dot{z})$
- Orientamento $\theta = (\phi, \theta, \psi)$
- Variazione degli angoli di Eulero $\dot{\theta}^I = (\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi})$

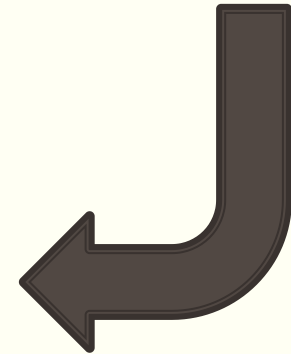
Trasformazione
da sistema
body-frame a
inerziale

$$\dot{\Gamma}^I = R \cdot V^B$$

$$\dot{\theta}^I = T \cdot \omega^B$$

matrice di rotazione $R = \begin{bmatrix} c_\theta c_\psi & c_\theta s_\psi & s_\theta \\ -c_\phi s_\psi - s_\phi s_\theta c_\psi & c_\phi c_\psi - s_\phi s_\theta s_\psi & s_\phi c_\theta \\ s_\phi s_\psi - c_\phi s_\theta c_\psi & -s_\phi c_\psi - c_\phi s_\theta s_\psi & c_\phi c_\theta \end{bmatrix}$

matrice di trasformazione
(inversa della matrice delle variazioni
degli angoli di Eulero coniugata) $T = \frac{1}{c_\theta} * \begin{bmatrix} c_\theta & -s_\phi s_\theta & -c_\phi s_\theta \\ 0 & c_\phi c_\theta & -s_\phi c_\theta \\ 0 & s_\phi & c_\phi \end{bmatrix}$



Modello dinamico

Equazioni della dinamica:

$$F = \frac{d(mV)}{dt}$$

$$\tau = \frac{d(I\omega)}{dt}$$



$$F^B = m\dot{V}^B + \omega^B \times mV^B$$

$$\tau^B = I\dot{\omega}^B + \omega^B \times I\omega^B$$

m e I determinate
sperimentalmente

Correlazione con le variabili di controllo:

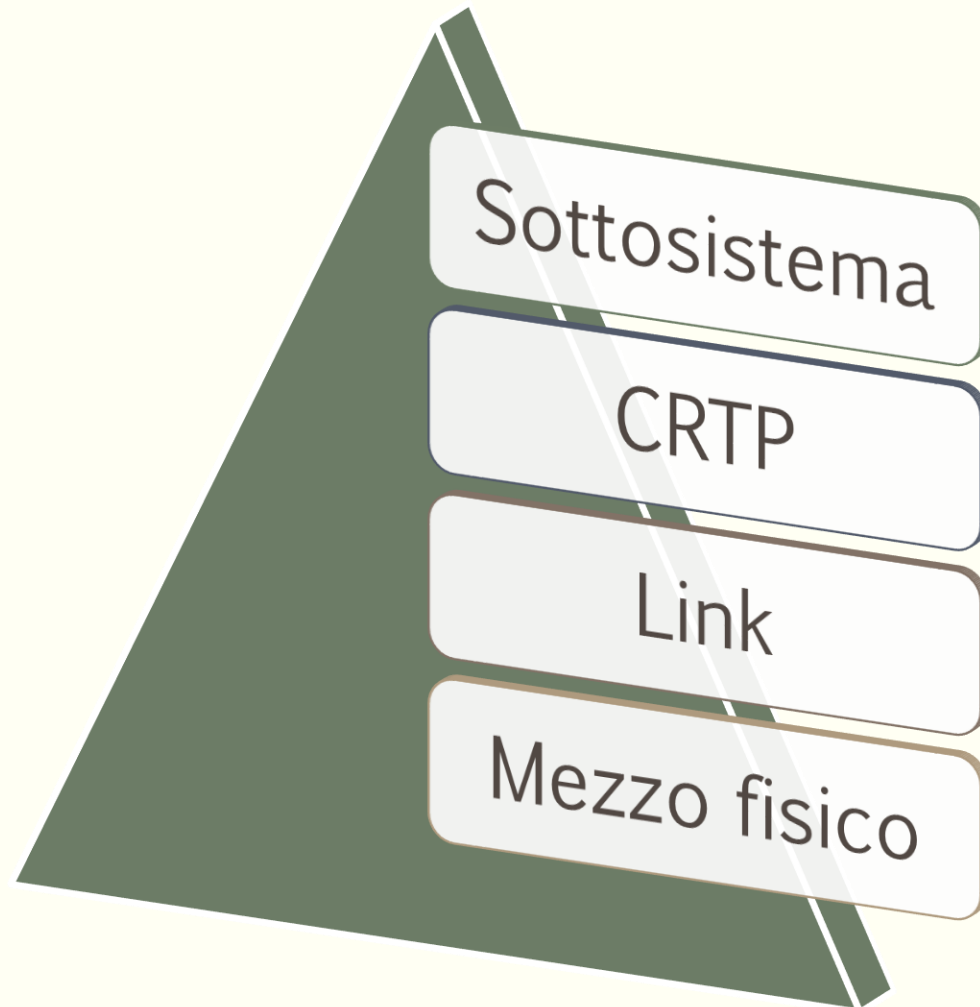
$$F^B = R^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -mg \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ U_1 \end{bmatrix}$$

$$\tau^B = \begin{bmatrix} U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix}$$



REALIZZAZIONE DI SISTEMA DI DIALOGO DRONE-COMPUTER

Protocollo di comunicazione



- ❖ Mezzo fisico: USB/radio
- ❖ Link: gestione pacchetti attraverso canale di trasmissione e canale di ricezione verso Crazyflie
- ❖ CRTP – Crazy RealTime Protocol: routing del pacchetto attraverso *porta* (associata a un sottosistema) e *canale* (specifica funzionalità del sottosistema)
- ❖ Sottosistemi: Logging, Parametri, Console, Commander, etc...

Struttura pacchetto:

- Porta (4 bits)
- Canale (2 bits)
- Payload (31 Bytes)

15:3 = NULL PACKET

Logging & Parametri

Logging (sola lettura):

- Scelta delle variabili dal ToC
- Creazione LogConfiguration
- Invio al drone
- Logging automatico, eventualmente attraverso invio di *null packets* (polling)

LogConfig contiene:

- Posizione (6 B)
- Orientamento come quaternione compresso (4 B)
- Velocità lineari (6 B)
- Velocità angolari (6 B)

TOTALE 22/26 Bytes

Parametri (lettura & scrittura)

- Scelta parametri dal ToC
- Invio al drone solo quando il relativo comando viene invocato

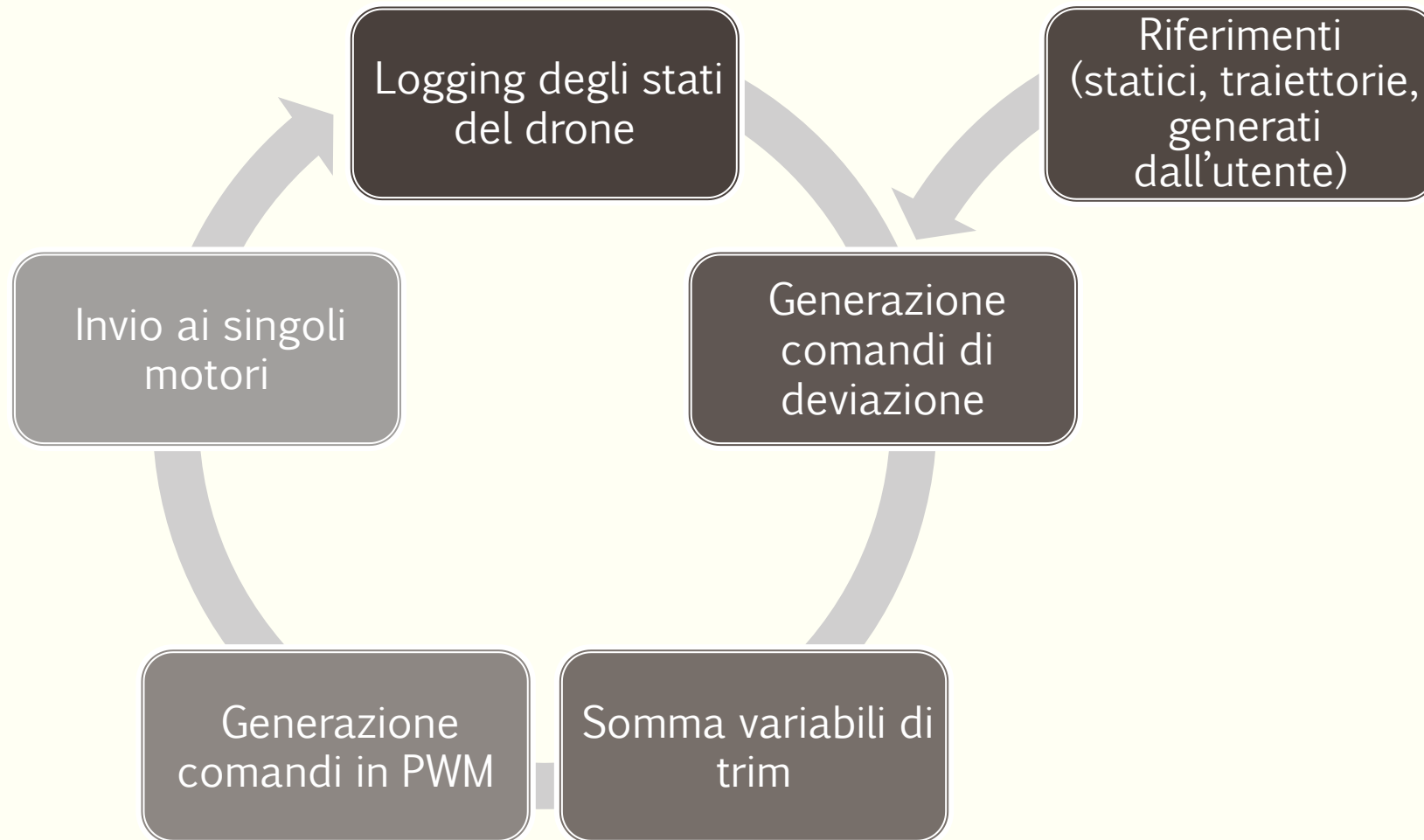
Parametri in uso:

- Flag per la gestione dei motori off-board
- Valori di controllo dei motori in PWM (unsigned int da 16 bit – 0~65'535)

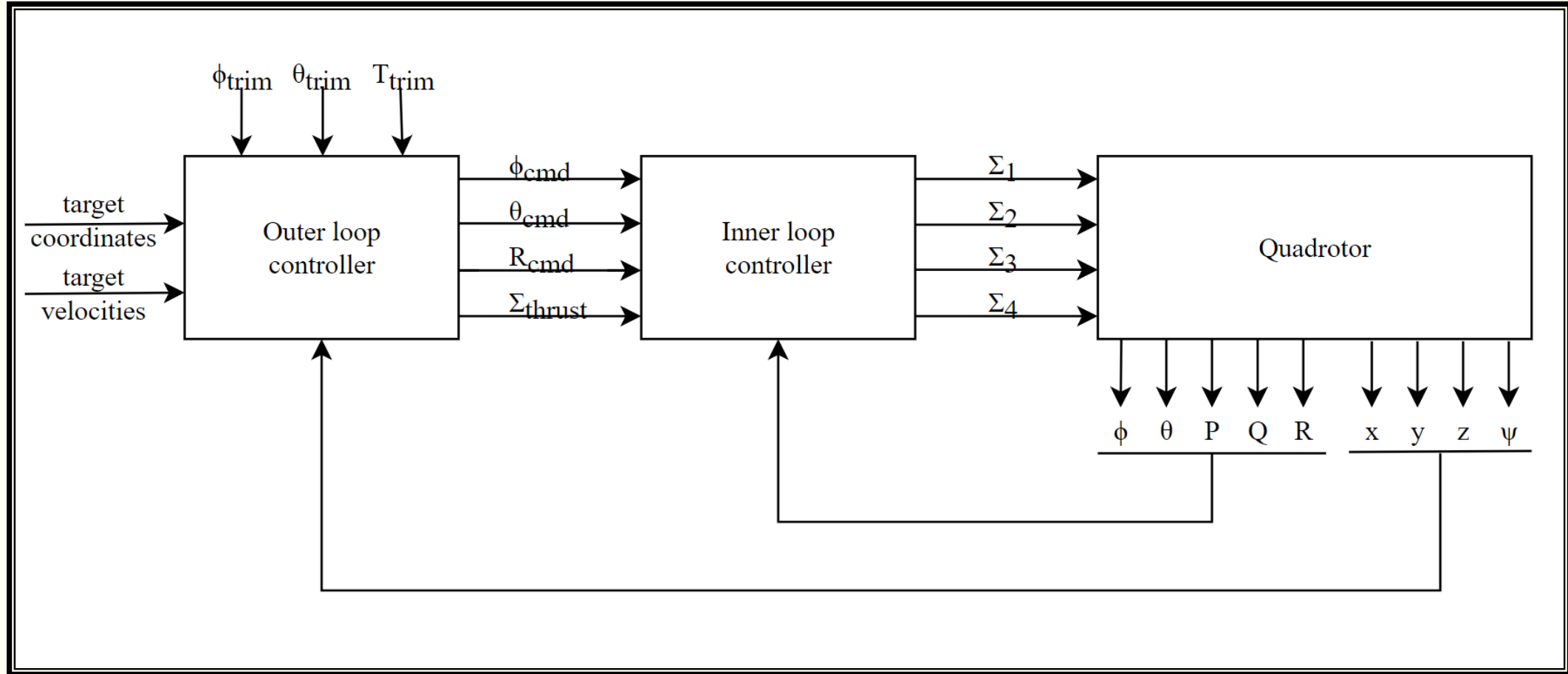


IMPLEMENTAZIONE DI UN SISTEMA DI CONTROLLO AD ANELLO CHIUSO

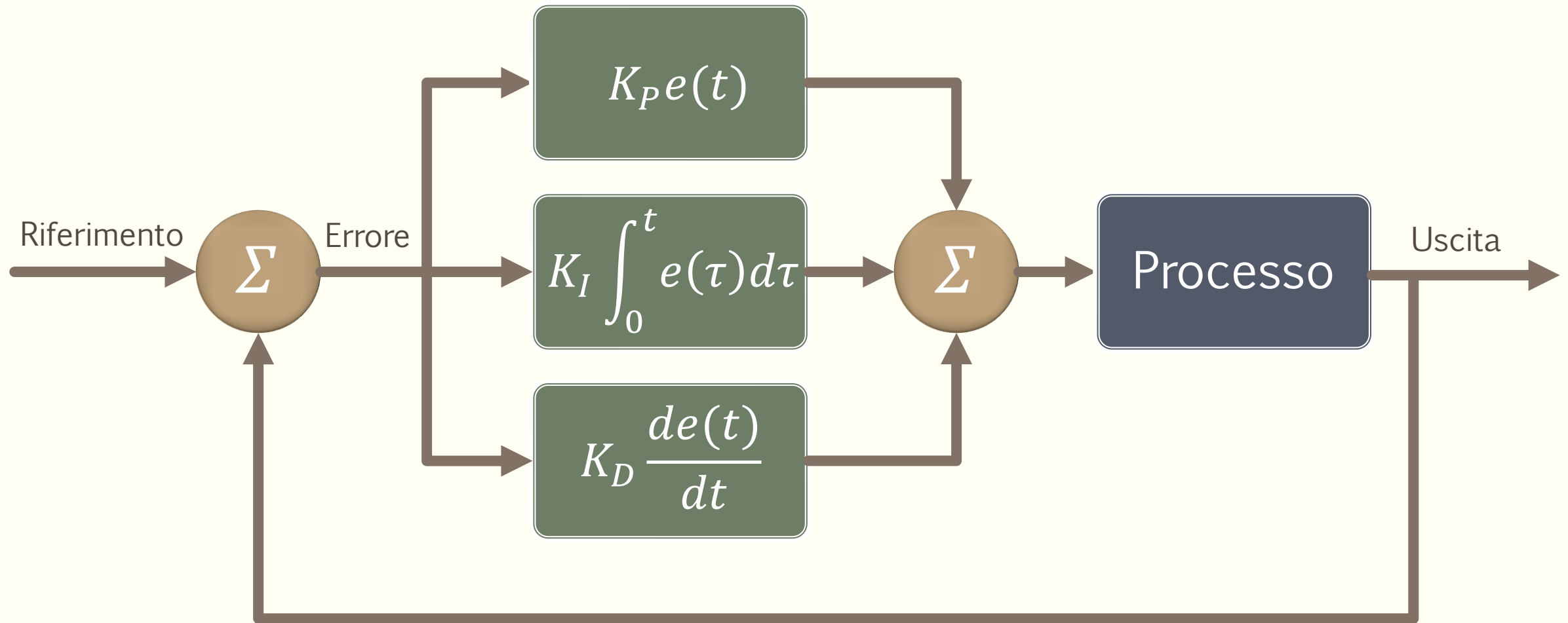
Ciclo di controllo



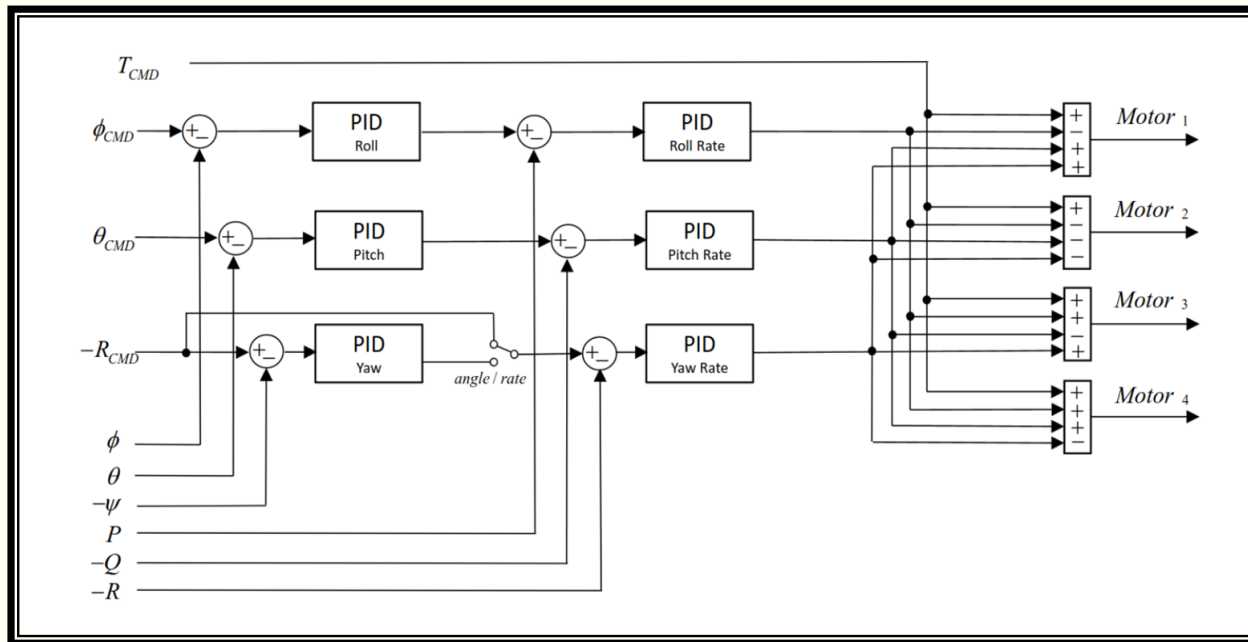
Ciclo di controllo



Struttura controllore PID



Anello di controllo interno o di orientamento



Due ordini di PID in cascata:

- 1) Dati comandi in pitch, roll generare riferimenti in pitch rate e roll rate (yaw scolleganto in quanto affetto da errore di deriva)
- 2) Date le uscite del primo ordine, generare comandi in PWM
- 3) Combinazione lineare dei comandi in PWM per ciascun motore

Anello di controllo esterno o di navigazione

Calcolo distanza drone-riferimento in coordinate locali

$$S_{along} = x_{err} \cdot \cos(\psi) + y_{err} \cdot \sin(\psi)$$

$$S_{across} = x_{err} \cdot \sin(\psi) - y_{err} \cdot \cos(\psi)$$



Generazione comandi dalle deviazioni rispetto al target

$$\Delta\phi_{CMD}(t) = Kp_{along} \cdot S_{along}(t) + Ki_{along} \int S_{along}(t) dt$$

$$\Delta\theta_{CMD}(t) = Kp_{across} \cdot S_{across}(t) + Ki_{across} \int S_{across}(t) dt$$

$$\Delta R_{CMD}(t) = Kp_{\psi} \cdot \psi_{err}(t)$$

$$\Delta T_{CMD}(t) = Kp_z \cdot z_{err}(t) + Ki_z \int z_{err}(t) dt$$



Somma comandi con valori di trim/hover

$$\phi_{trim} = 0$$

$$\theta_{trim} = 0$$

$$R_{trim} = 0$$

$$T_{CMD} = 36'000$$



La sapienza è figliola della speranza
~Leonardo da Vinci