DIN

DEPARTMENT OF INDUSTRIAL ENGINEERING

PhD Course in Mechanics and Advanced Engineering Sciences (DIMSAI)

YEARLY PHD STUDENT REPORT - AY *2016/2017*

Curriculum number *X*
Cycle *XXX*

Candidate: *Gianluca Rossetti*
Supervisor: *Fabrizio Giulietti*

Single and multi-agent control strategies for Remotely Piloted Aircraft Systems

ALMA MATER STUDIORUM ~ UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
IL PRESENTE MATERIALE È RISERVATO AL PERSONALE DELL'UNIVERSITÀ DI BOLOGNA E NON PUÒ ESSERE UTILIZZATO AI TERMINI DI LEGGE DA ALTRE PERSONE O PER FINI NON ISTITUZIONALI

Flight Mechanics Laboratory

Research work focused on RPAS:

- Modelling
- Preliminary sizing
- Detail project
- Avionics
- Flight testing
- Control laws development

FLIGHT MECHANICS LAB

IL PRESENTE MATERIALE È RISERVATO AL PERSONALE DELL'UNIVERSITÀ DI BOLOGNA E NON PUÒ ESSERE UTILIZZATO AI TERMINI DI LEGGE DA ALTRE PERSONE O PER FINI NON ISTITUZIONALI

Ph.D. research activities

Research topics:

- RPAS modelling and simulation
- Flight management software development
- Single and multi-agent motion planning & control

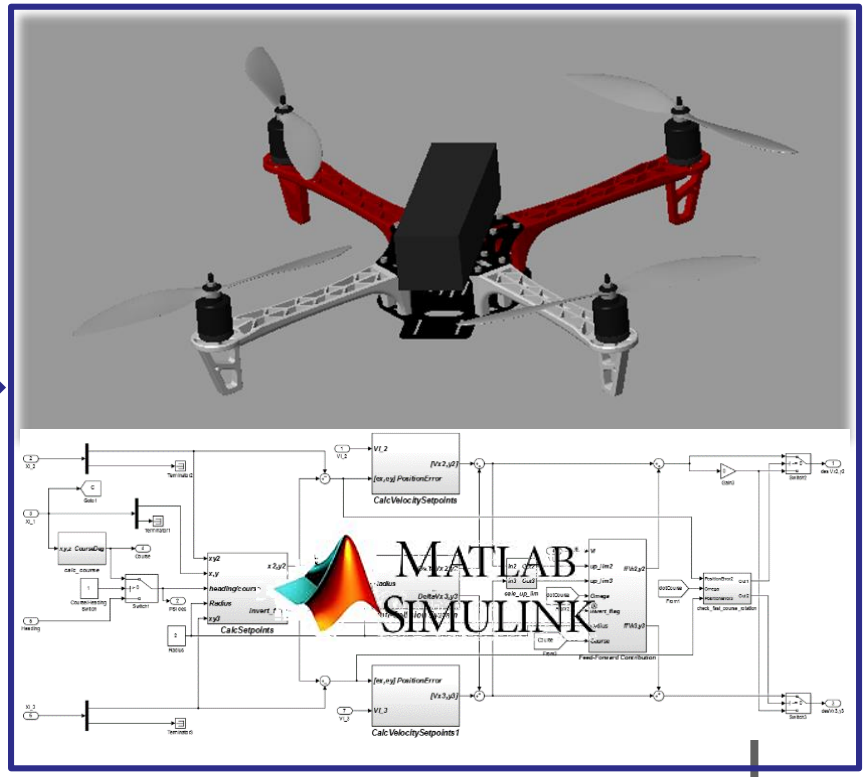
The use of RPASs for civil operations is growing; multirotor vehicles represent the most popular category into the market.

IL PRESENTE MATERIALE È RISERVATO AL PERSONALE DELL'UNIVERSITÀ DI BOLOGNA E NON PUÒ ESSERE UTILIZZATO AI TERMINI DI LEGGE DA ALTRE PERSONE O PER FINI NON ISTITUZIONALI

Research activities:
RPAS modelling & simulation

Mathematical modelling for different vehicle configurations.

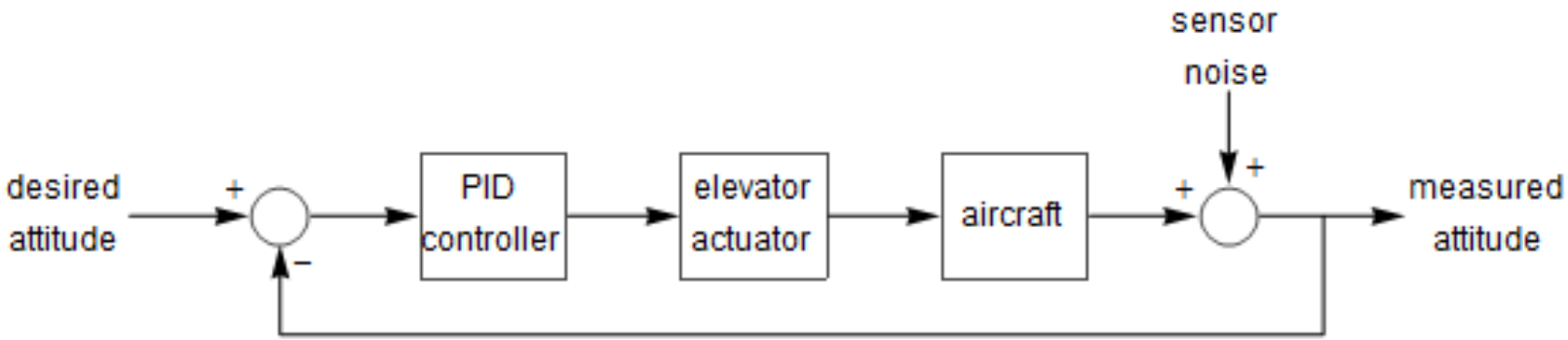
Model parameters can be obtained via experimental identification, calculations or the combination of both ways.



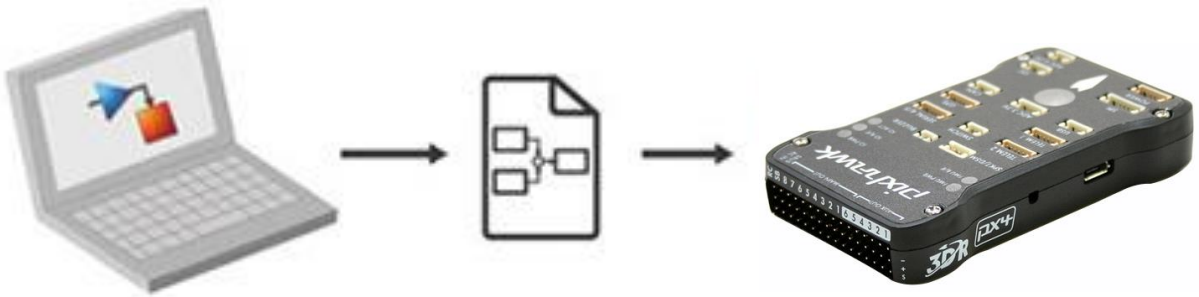
IL PRESENTE MATERIALE È RISERVATO AL PERSONALE DELL'UNIVERSITÀ DI BOLOGNA E NON PUÒ ESSERE UTILIZZATO AI TERMINI DI LEGGE DA ALTRE PERSONE O PER FINI NON ISTITUZIONALI

Research activities:
Flight management software development

RPAS control design:



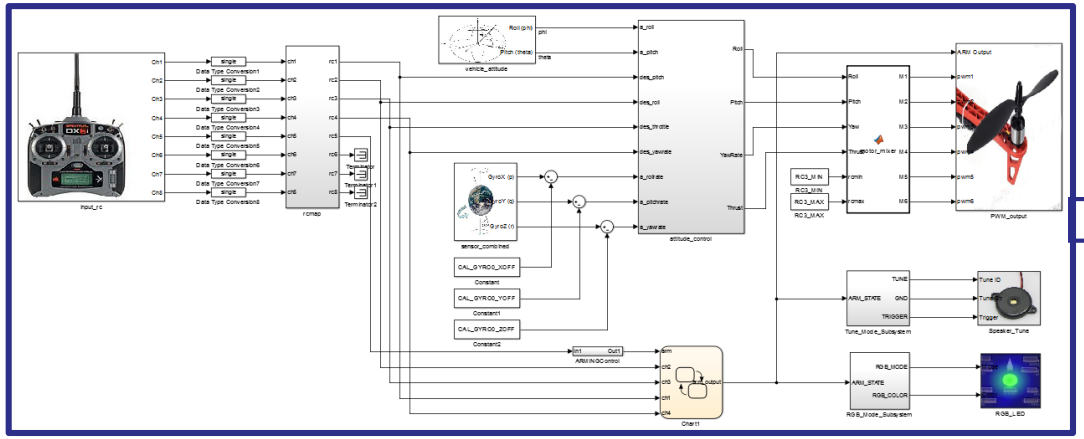
Automatic code generation:

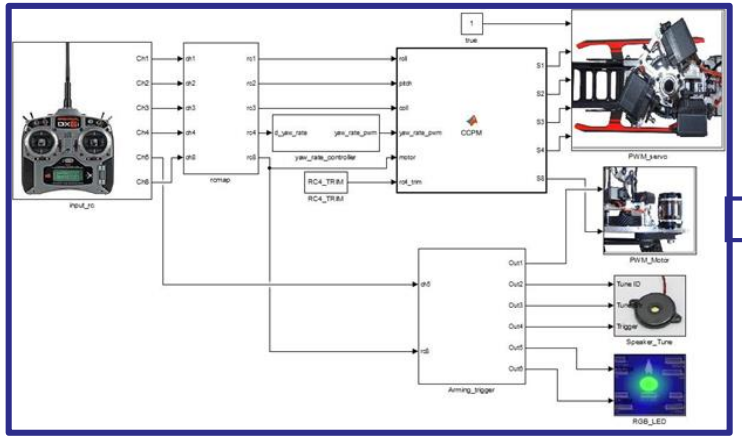


IL PRESENTE MATERIALE È RISERVATO AL PERSONALE DELL'UNIVERSITÀ DI BOLOGNA E NON PUÒ ESSERE UTILIZZATO AI TERMINI DI LEGGE DA ALTRE PERSONE O PER FINI NON ISTITUZIONALI

Research activities:
Flight management software development

Experimental firmwares for different vehicle configurations.

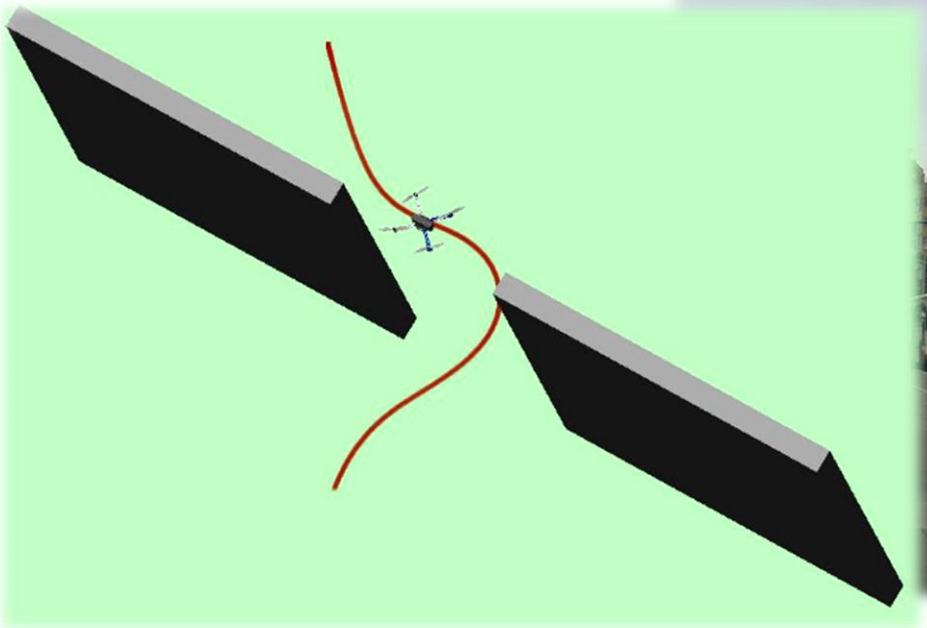


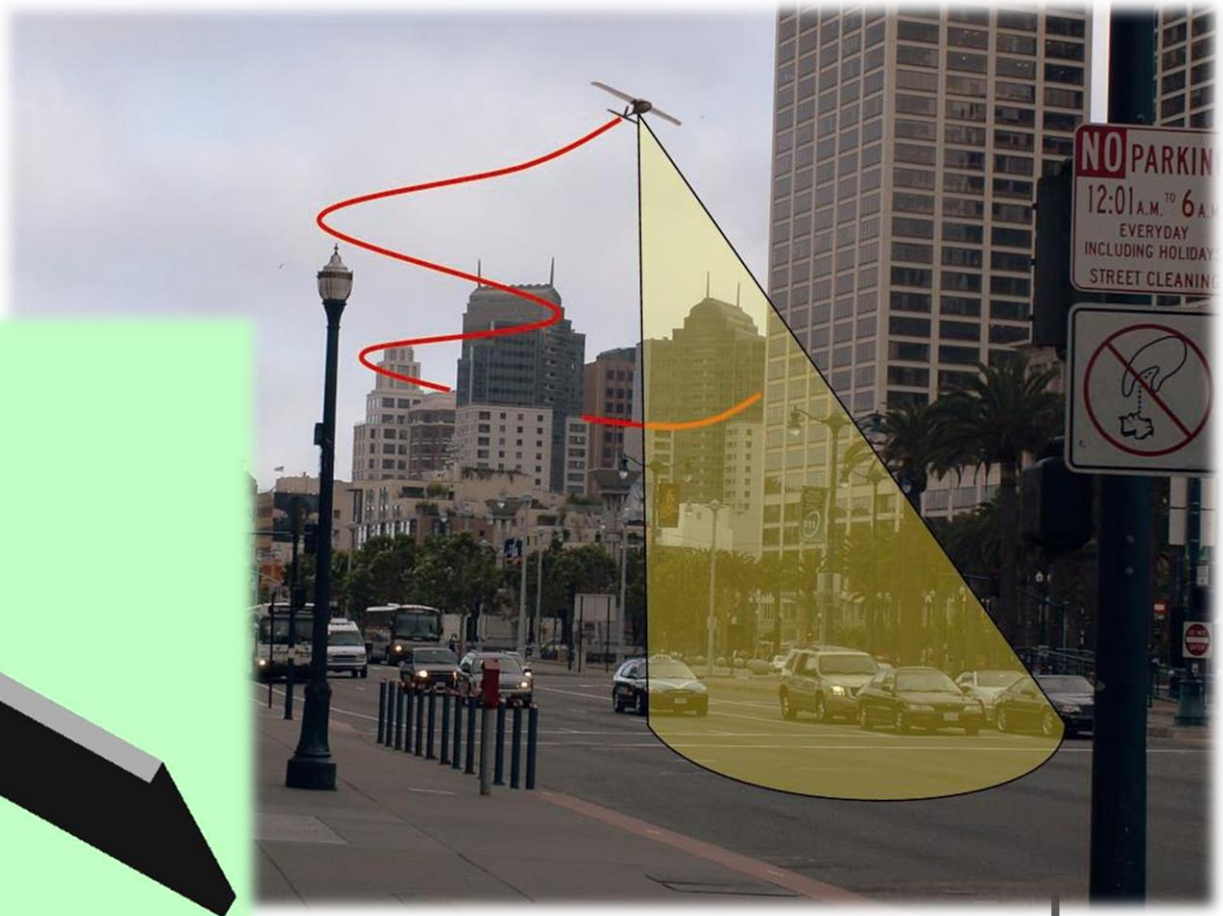


IL PRESENTE MATERIALE È RISERVATO AL PERSONALE DELL'UNIVERSITÀ DI BOLOGNA E NON PUÒ ESSERE UTILIZZATO AI TERMINI DI LEGGE DA ALTRE PERSONE O PER FINI NON ISTITUZIONALI

RPAS motion planning & control

RPASs need autonomous navigation to complete their tasks safely and efficiently.





IL PRESENTE MATERIALE È RISERVATO AL PERSONALE DELL'UNIVERSITÀ DI BOLOGNA E NON PUÒ ESSERE UTILIZZATO AI TERMINI DI LEGGE DA ALTRE PERSONE O PER FINI NON ISTITUZIONALI

RPAS motion planning & control – 2
Motion planning problem

Motion planning problem:

Minimize $q(\cdot)$ $\quad J = \int_0^T \|q(t) - q_T\|_1 dt \qquad q = [x, y, z]^T \quad trajectories$

Subject to $\quad q^{(j)}(0) = q_0^{(j)},\ j \in \{0, \dots, r\}\,,$

$q^{(j)}(T) = q_T^{(j)},\ j \in \{0, \dots, r\}\,,$

$h(q, t) \geq 0\,,\ \forall t \in [0, T],$

IL PRESENTE MATERIALE È RISERVATO AL PERSONALE DELL'UNIVERSITÀ DI BOLOGNA E NON PUÒ ESSERE UTILIZZATO AI TERMINI DI LEGGE DA ALTRE PERSONE O PER FINI NON ISTITUZIONALI

RPAS motion planning & control – 3

Motion planning problem

Motion planning problem:

Minimize $q(\cdot)$ $\quad J = \int_0^T \|q(t) - q_T\|_1 dt \qquad q = [x, y, z]^T \quad trajectories$

Subject to

$\underline{q^{(j)}(0) = q_0^{(j)}}, \; j \in \{0, \dots, r\}\,,$ → Initial condition

$\underline{q^{(j)}(T) = q_T^{(j)}}, \; j \in \{0, \dots, r\}\,,$ → Terminal condition

$\underline{h(q, t) \geq 0}\,, \; \forall t \in [0, T],$ → Vehicle constraints, environmental constraints

IL PRESENTE MATERIALE È RISERVATO AL PERSONALE DELL'UNIVERSITÀ DI BOLOGNA E NON PUÒ ESSERE UTILIZZATO AI TERMINI DI LEGGE DA ALTRE PERSONE O PER FINI NON ISTITUZIONALI

RPAS motion planning & control – 4
Motion planning problem

Motion planning problem:

Minimize $q(\cdot)$ $\quad J = \int_0^T \|q(t) - q_T\|_1 dt \qquad q = [x, y, z]^T \quad trajectories$

Subject to $\quad \underline{q^{(j)}(0) = q_0^{(j)}}, \; j \in \{0, \dots, r\}\,,$ → Initial condition

$\underline{q^{(j)}(T) = q_T^{(j)}}, \; j \in \{0, \dots, r\}\,,$ → Terminal condition

$\underline{h(q, t) \geq 0}\,, \; \forall t \in [0, T],$ → Vehicle constraints, environmental constraints

B-spline parameterization:

$$\hat{q}(t) = \sum_{l=1}^{n} c_l \, b_l(t) = c^T b(t) \qquad b = [b_1, \dots, b_n]^T \quad c = [c_1, \dots, c_n]^T$$

IL PRESENTE MATERIALE È RISERVATO AL PERSONALE DELL'UNIVERSITÀ DI BOLOGNA E NON PUÒ ESSERE UTILIZZATO AI TERMINI DI LEGGE DA ALTRE PERSONE O PER FINI NON ISTITUZIONALI

RPAS motion planning & control – 5
B-splines

B-spline parameterization:

$$\hat{q}(t) = \sum_{l=1}^{n} c_l \, b_l(t) = c^T b(t)$$

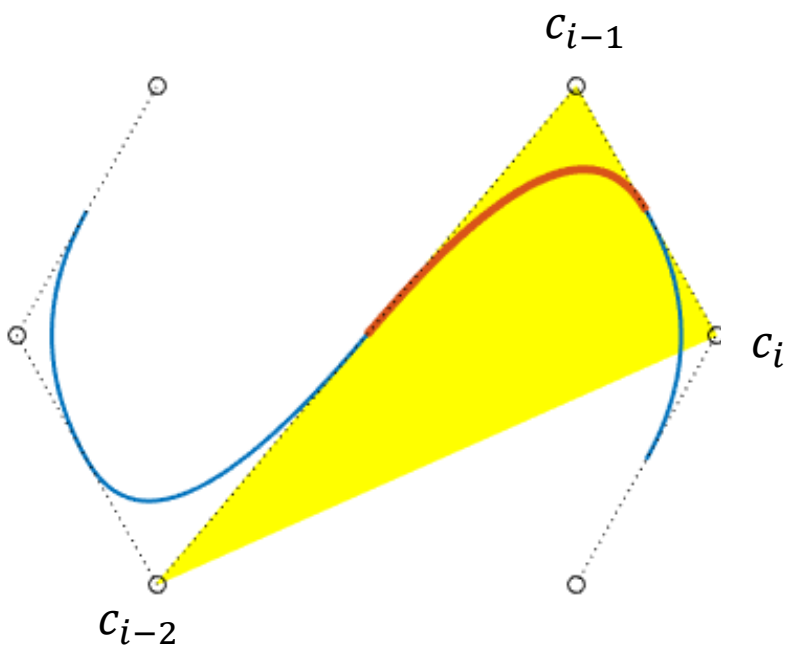
Convex hull property of B-spline:

$$c \geq 0 \rightarrow \hat{q}(t) \geq 0, \forall t \in [0, T]$$

Obstacle avoidance:

$$-a(t)^T q(t) + b(t) \geq r \ ,$$
$$a(t)^T w_i(t) - b(t) \geq 0 \ \forall i \in \{1, \dots, n_{w_i}\} \ ,$$
$$a_i(t)^T a_i(t) \leq 1 \ .$$

Bounds on a spline function can be enforced by imposing them on the coefficients.

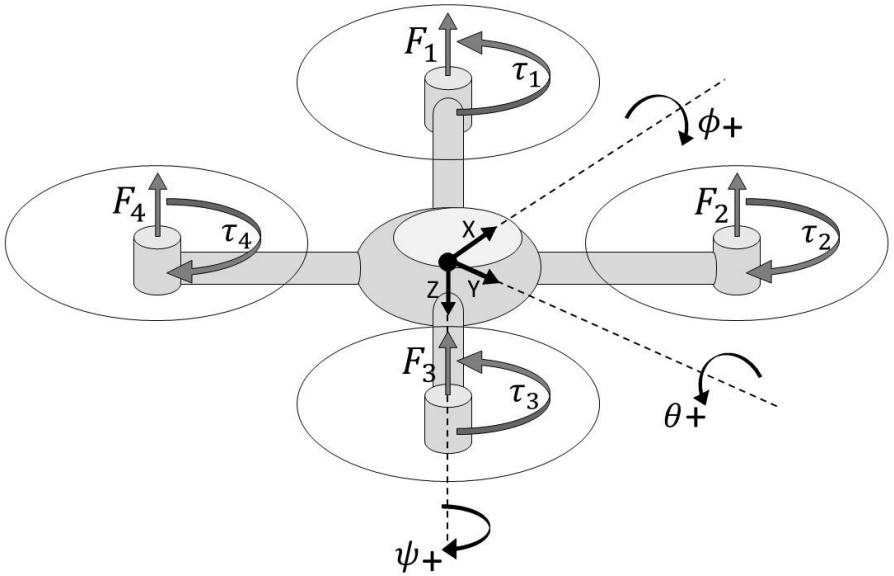


IL PRESENTE MATERIALE È RISERVATO AL PERSONALE DELL'UNIVERSITÀ DI BOLOGNA E NON PUÒ ESSERE UTILIZZATO AI TERMINI DI LEGGE DA ALTRE PERSONE O PER FINI NON ISTITUZIONALI

RPAS motion planning & control – 6
Vehicle constraints

Dynamic model:

$$\begin{cases} \ddot{x} = \cos\phi \sin\theta \dfrac{F_{tot}}{m} \\ \ddot{y} = -\sin\phi \dfrac{F_{tot}}{m} \\ \ddot{z} = -\cos\phi \cos\theta \dfrac{F_{tot}}{m} + g \\ \ddot{\phi} = \dfrac{1}{J_x}\tau_\phi \\ \ddot{\theta} = \dfrac{1}{J_y}\tau_\theta \end{cases}$$



Inputs:

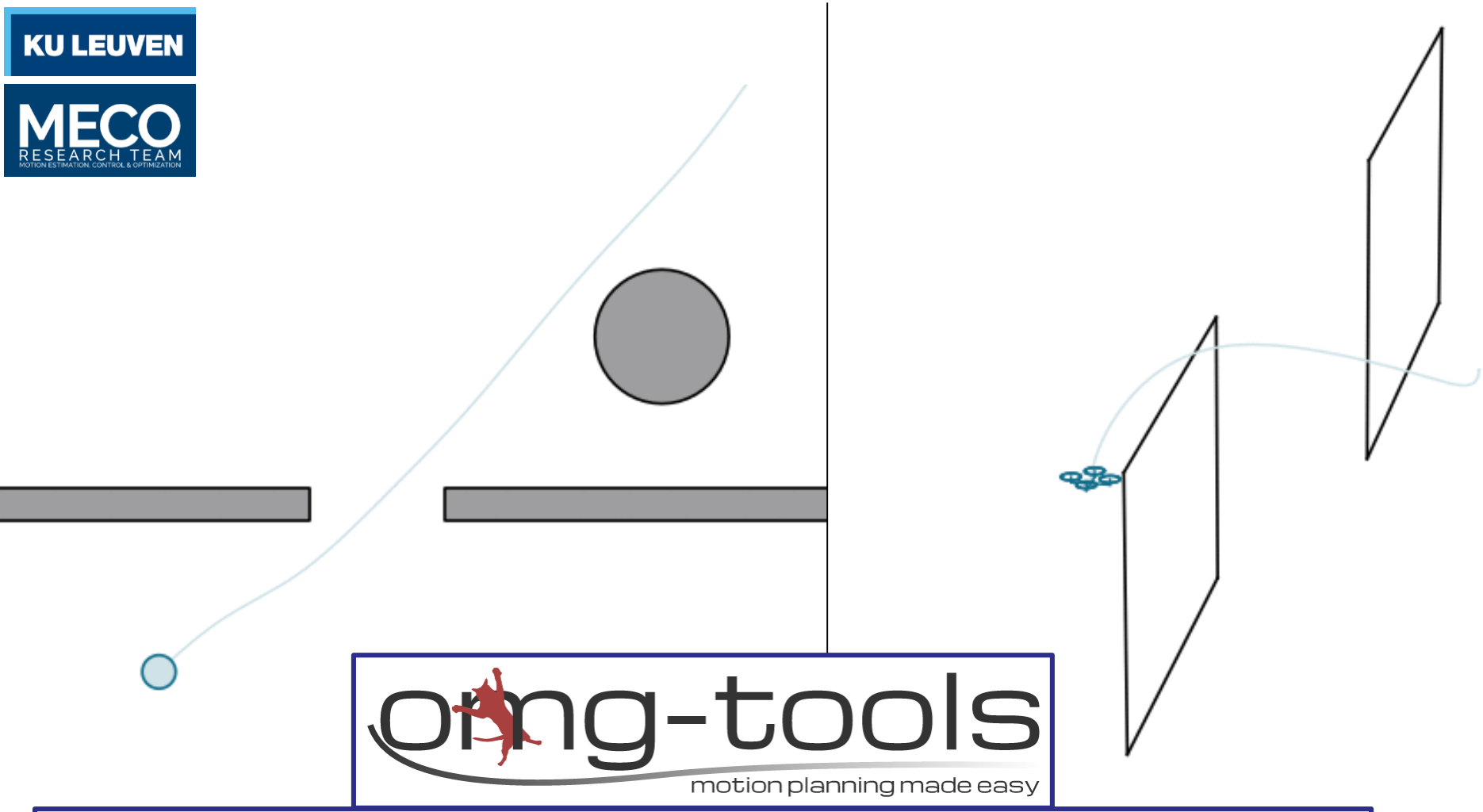
$$\begin{cases} u_1 = f = {F_{tot}}/{m} \\ u_2 = \dot{\phi} = \omega_r \\ u_3 = \dot{\theta} = \omega_p \end{cases}$$

Model constraints:

$$\begin{cases} f_{min} \le f \le f_{max} \\ \phi_{min} \le \phi \le \phi_{max} \\ \dot{\phi}_{min} \le \dot{\phi} \le \dot{\phi}_{max} \\ \theta_{min} \le \theta \le \theta_{max} \\ \dot{\theta}_{min} \le \dot{\theta} \le \dot{\theta}_{max} \end{cases}$$

IL PRESENTE MATERIALE È RISERVATO AL PERSONALE DELL'UNIVERSITÀ DI BOLOGNA E NON PUÒ ESSERE UTILIZZATO AI TERMINI DI LEGGE DA ALTRE PERSONE O PER FINI NON ISTITUZIONALI

RPAS motion planning & control – 7
omg-tools

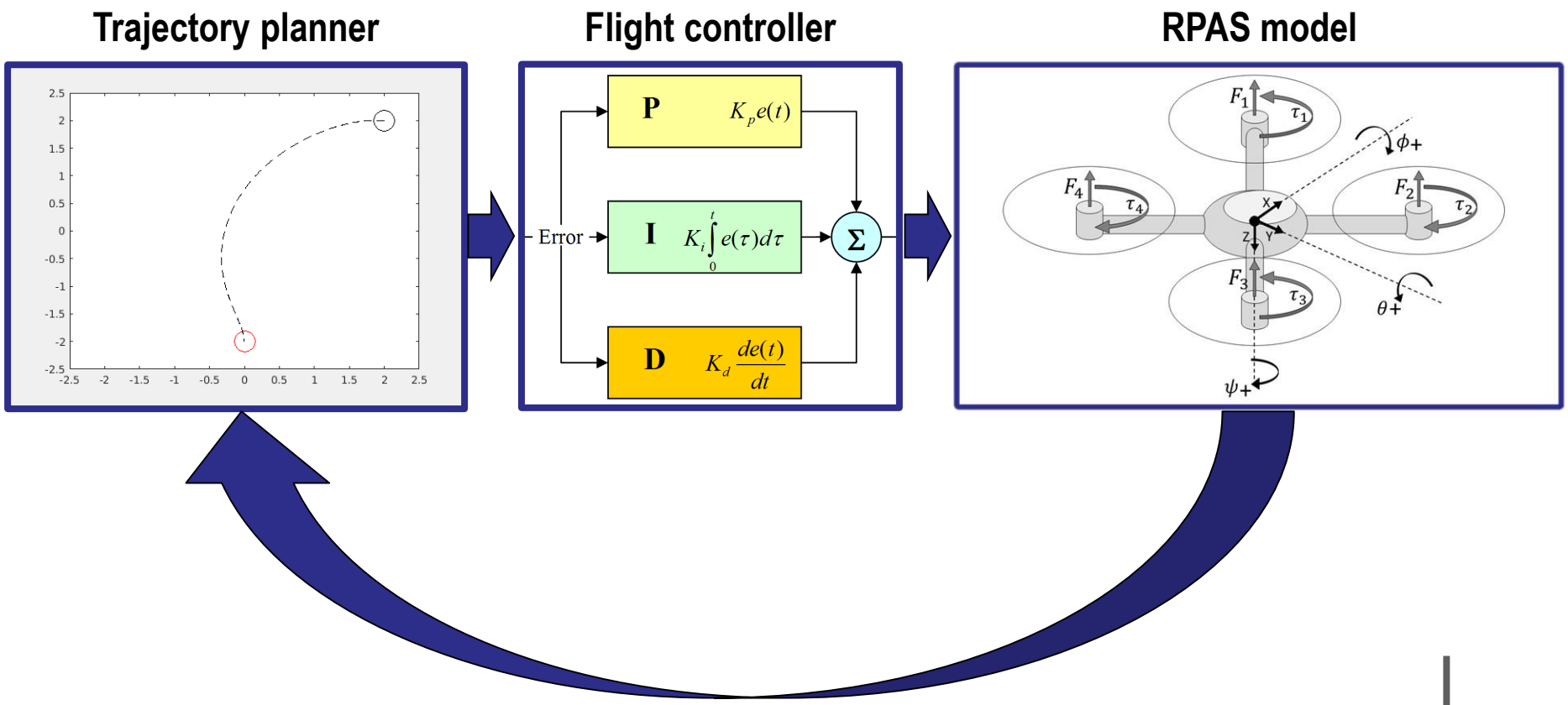


Toolbox for modeling, simulating and embedding motion planning problems.

IL PRESENTE MATERIALE È RISERVATO AL PERSONALE DELL'UNIVERSITÀ DI BOLOGNA E NON PUÒ ESSERE UTILIZZATO AI TERMINI DI LEGGE DA ALTRE PERSONE O PER FINI NON ISTITUZIONALI

RPAS motion planning & control – 8
Model predictive control

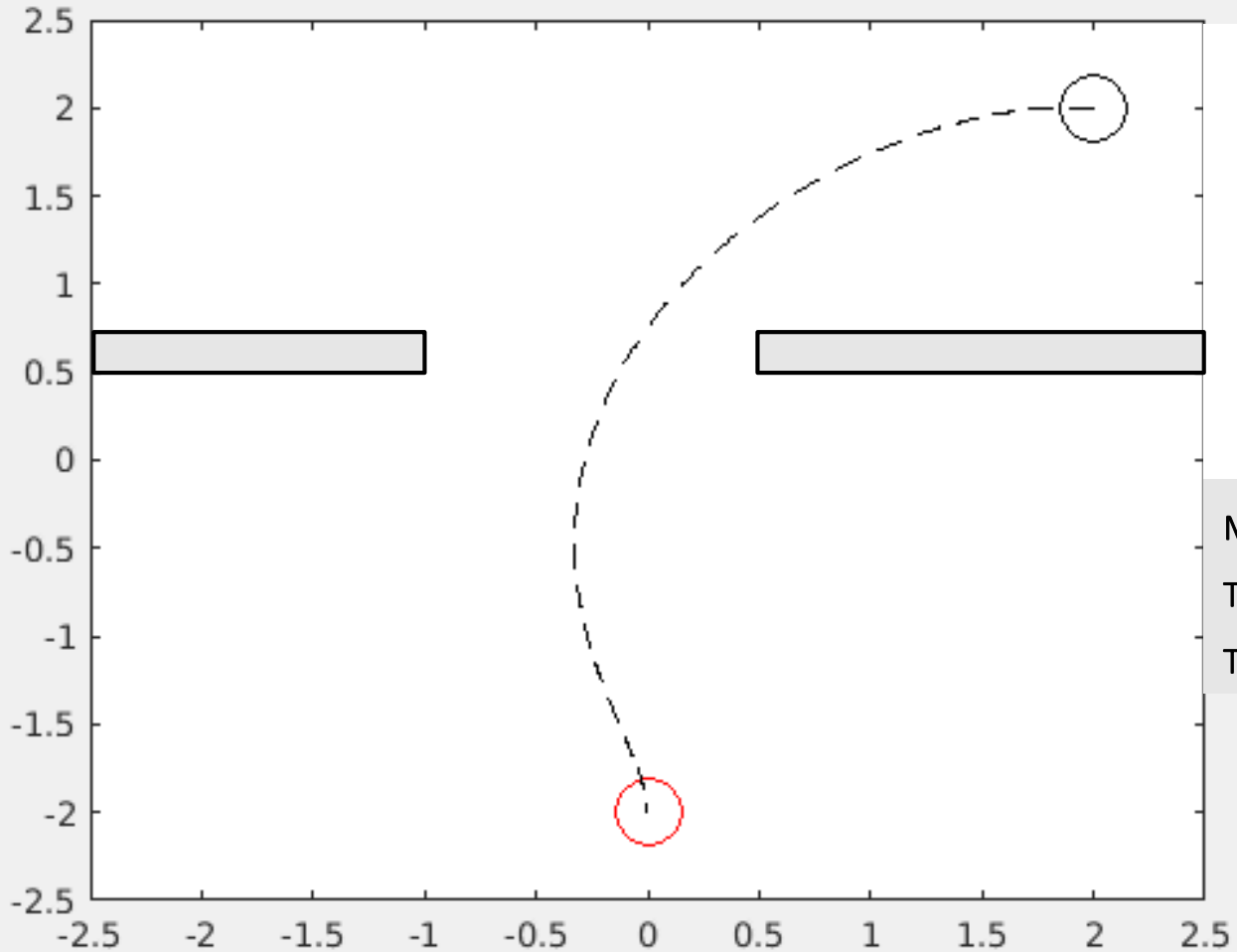
The motion planning is performed repeatedly in receding horizon.

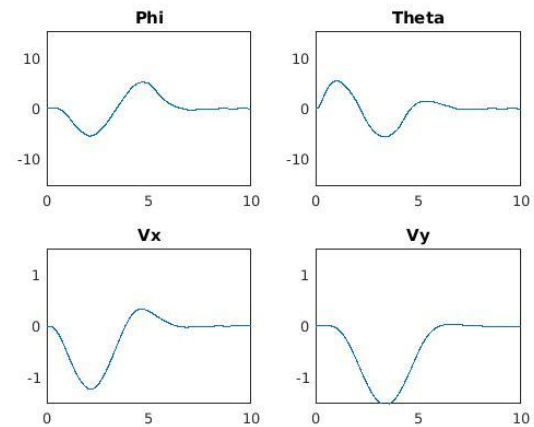


IL PRESENTE MATERIALE È RISERVATO AL PERSONALE DELL'UNIVERSITÀ DI BOLOGNA E NON PUÒ ESSERE UTILIZZATO AI TERMINI DI LEGGE DA ALTRE PERSONE O PER FINI NON ISTITUZIONALI

RPAS motion planning & control – 9

example





Model sample time = 0.01 s

Trajectory average solving time = 0.2 s

Trajectory update time = 0.25 s

IL PRESENTE MATERIALE È RISERVATO AL PERSONALE DELL'UNIVERSITÀ DI BOLOGNA E NON PUÒ ESSERE UTILIZZATO AI TERMINI DI LEGGE DA ALTRE PERSONE O PER FINI NON ISTITUZIONALI

Extension to formation of multiple quadrotors - 1

$$\underset{\forall\, i:\, x_i(\cdot)}{\text{Minimize}} \quad \sum_{i=1}^{N}\left(J_i(x_i) + \boxed{\sum_{j=1}^{M_i} \boldsymbol{w} \int_0^T \boldsymbol{\varepsilon}_j \, dt} \right)$$

Subject to

$$x_i(t) \in \mathcal{X}_i$$

(State, input, environment constraints)

$$g_{ij}(x_i(t), x_j(t), \boldsymbol{\varepsilon}_j) \leq 0\,, \quad \forall j \in M_i$$

(Formation constraints)

$$\forall t \in [0, T]\,, \forall i \in [1, \dots, N]$$

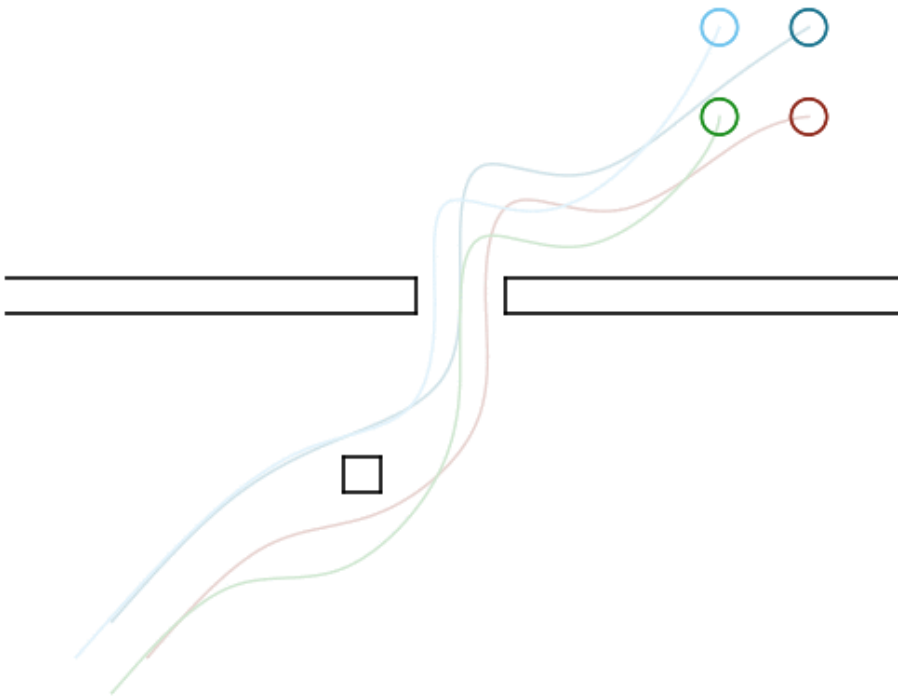
ε : **SOFT-FORMATION DEVIATION**
(variable)

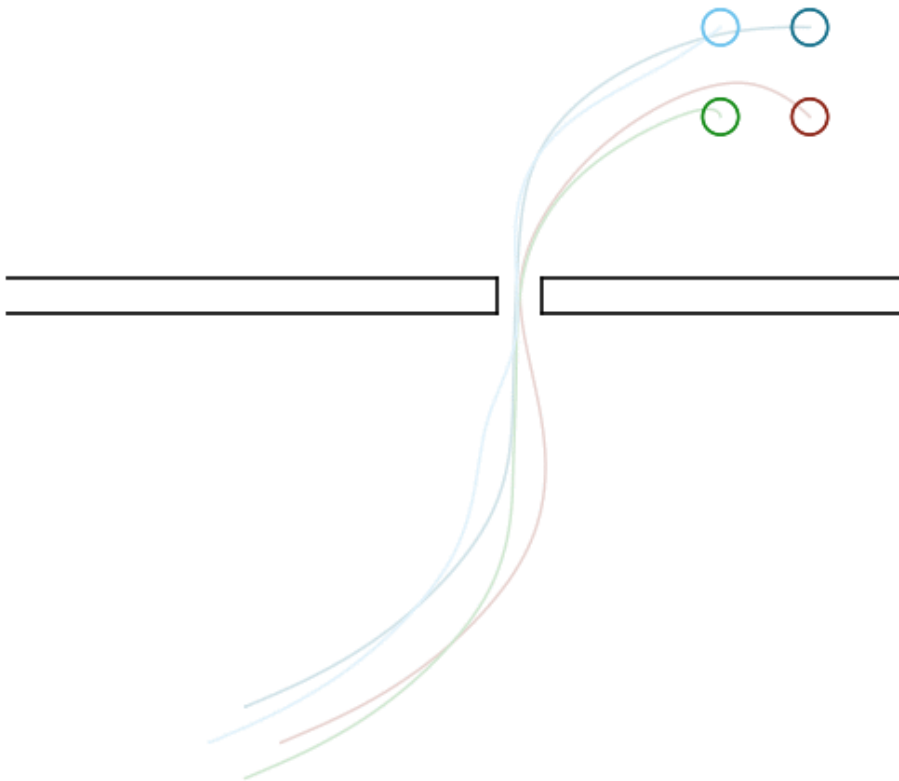
w : **SOFT-FORMATION WEIGHT**
(parameter)

IL PRESENTE MATERIALE È RISERVATO AL PERSONALE DELL'UNIVERSITÀ DI BOLOGNA E NON PUÒ ESSERE UTILIZZATO AI TERMINI DI LEGGE DA ALTRE PERSONE O PER FINI NON ISTITUZIONALI

Extension to formation of multiple quadrotors - 2

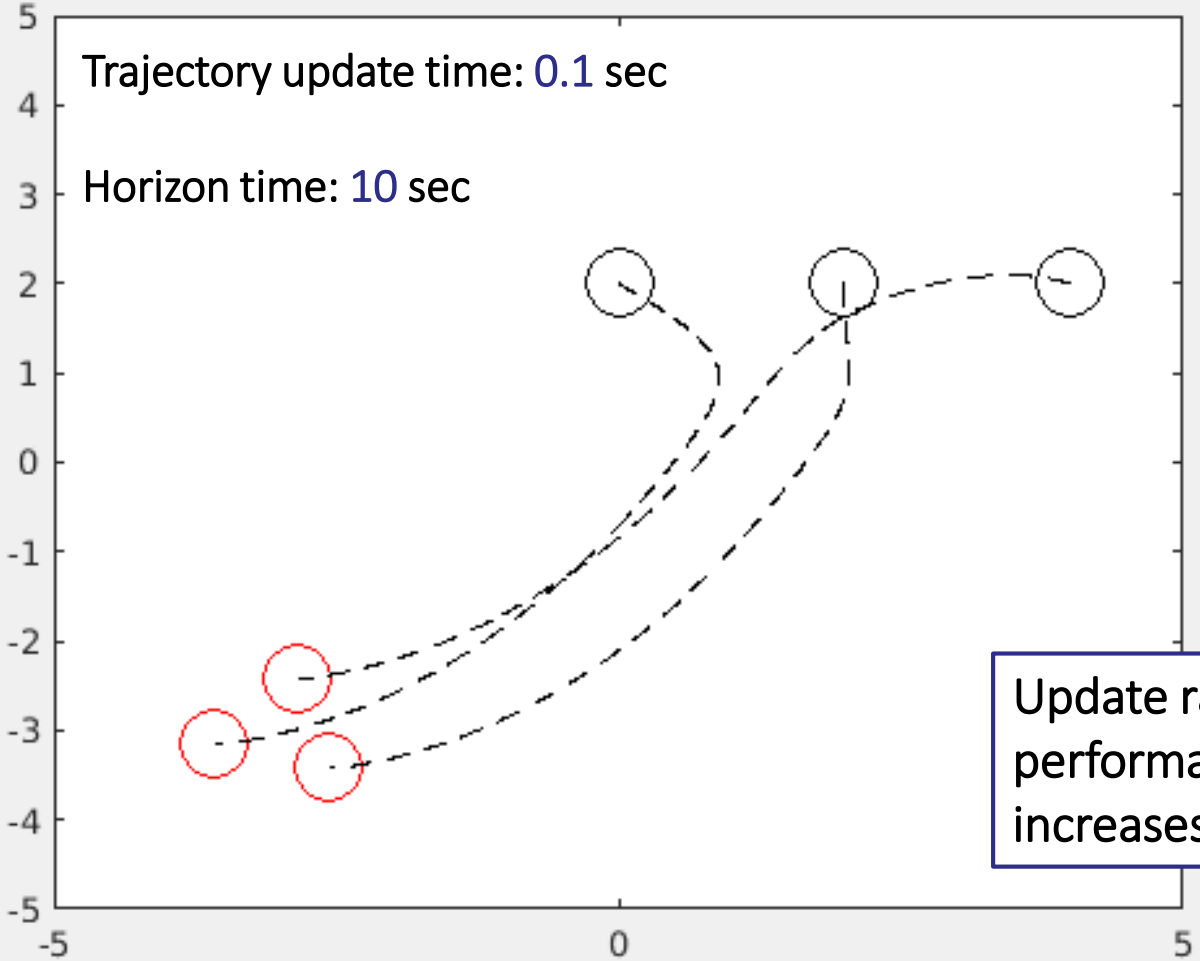
Examples:





IL PRESENTE MATERIALE È RISERVATO AL PERSONALE DELL'UNIVERSITÀ DI BOLOGNA E NON PUÒ ESSERE UTILIZZATO AI TERMINI DI LEGGE DA ALTRE PERSONE O PER FINI NON ISTITUZIONALI

Extension to formation of multiple quadrotors - 2



Update rate improves MPC performance but also increases computational load

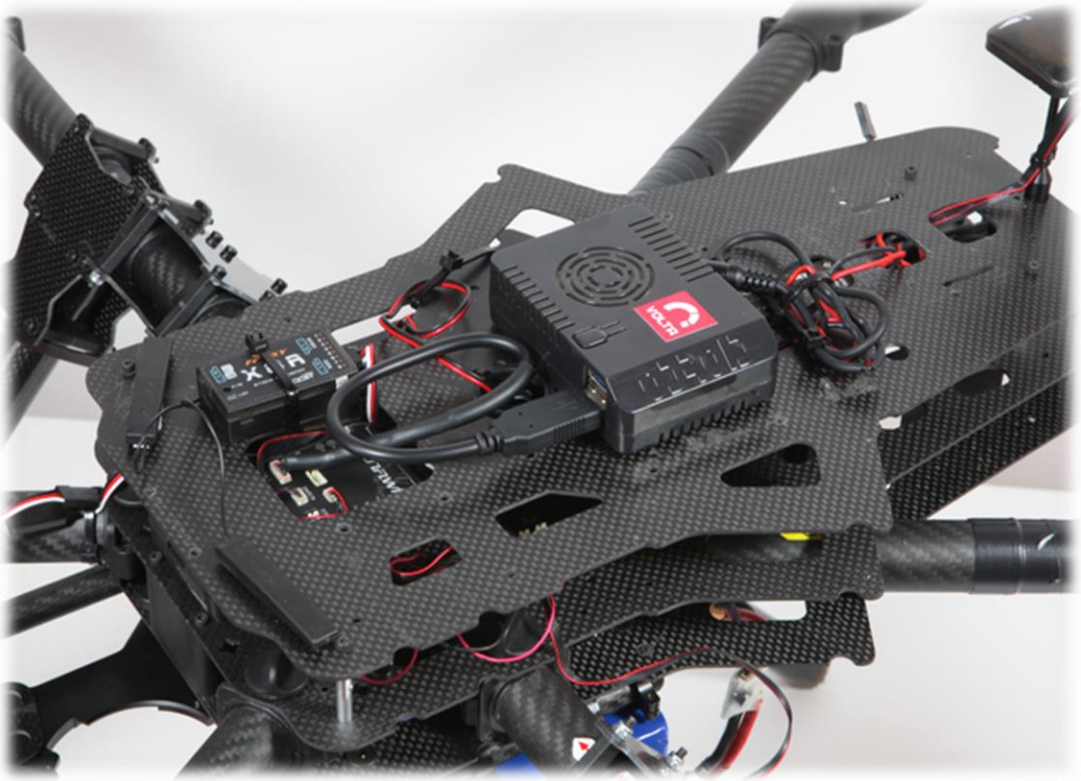
IL PRESENTE MATERIALE È RISERVATO AL PERSONALE DELL'UNIVERSITÀ DI BOLOGNA E NON PUÒ ESSERE UTILIZZATO AI TERMINI DI LEGGE DA ALTRE PERSONE O PER FINI NON ISTITUZIONALI

Current work

Experimental validation:

Fast hardware companion for onboard computing capabilities

ubuntu ROS MAVLINK python



IL PRESENTE MATERIALE È RISERVATO AL PERSONALE DELL'UNIVERSITÀ DI BOLOGNA E NON PUÒ ESSERE UTILIZZATO AI TERMINI DI LEGGE DA ALTRE PERSONE O PER FINI NON ISTITUZIONALI

Papers:

- E. L. de Angelis, F. Giulietti, G. Rossetti, “Multirotor Aircraft Formation Flight Control with Collision Avoidance Capability”, submitted for revision to Aerospace Science and Technology.

- F. Giulietti, G. Pipeleers, G. Rossetti, R. Van Parys, “Optimal Autonomous Quadrotor Navigation in an Obstructed Space”, RED UAS 2017 International Conference, Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems, 3 – 5 Oct 2017.

IL PRESENTE MATERIALE È RISERVATO AL PERSONALE DELL'UNIVERSITÀ DI BOLOGNA E NON PUÒ ESSERE UTILIZZATO AI TERMINI DI LEGGE DA ALTRE PERSONE O PER FINI NON ISTITUZIONALI

Thank you.

IL PRESENTE MATERIALE È RISERVATO AL PERSONALE DELL'UNIVERSITÀ DI BOLOGNA E NON PUÒ ESSERE UTILIZZATO AI TERMINI DI LEGGE DA ALTRE PERSONE O PER FINI NON ISTITUZIONALI