



Fondamenti di Automatica 077II-9 CFU

Ovvero corso di base di controlli automatici



Università di Pisa, **Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione**

Laurea Triennale in Ingegneria Informatica

[28.02.22 – 14.04.22], [21.04.22 – 28.05.22]

Orario Lezioni:	Martedì	14:00 – 17:00	F2 + DAD 2LT INF
	Mercoledì	10:30 – 13:30	F2 + DAD 2LT INF
	Giovedì	11:30 – 13:30	F2 + DAD 2LT INF
Ricevimento	Martedì	16:30 – 18:00	DAD 2LT INF oppure per email

Docenti



Mario Innocenti (6 CFU)

Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione (DII),
Università di Pisa

Tel. 050-2217319, email: mario.innocenti@unipi.it

Lorenzo Pollini (3 CFU)

Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione (DII),
Università di Pisa

Tel. 050-2217363, email: lorenzo.pollini@unipi.it



Informazioni



- ☐ In base ai regolamenti previsti per il secondo semestre 2021 – 2022, le lezioni si terranno in presenza e contemporaneamente in DAD sull'aula del corso mediante Teams.
- ☐ Le lezioni in streaming non saranno registrate. Il docente farà uso di slides, della lavagna e dello schermo mediante Microsoft whiteboard.
- ☐ Le slides ed eventuale materiale aggiuntivo sono disponibili nel sito del docente.
- ☐ Le lezioni saranno erogate secondo l'orario ufficiale.
- ☐ Gli studenti si devono attenere alle disposizioni in materia COVID emanate dall'Ateneo.



Obiettivi Formativi



- **Obiettivi Formativi**

- Il corso si propone di fornire concetti di base per l'analisi ed il controllo di sistemi dinamici continui e discreti. Vengono presentate le tecniche principali per la valutazione della stabilità e delle proprietà strutturali. Viene affrontata la sintesi in frequenza di sistemi di controllo su applicazioni ingegneristiche di processi industriali. Al termine del corso, lo studente sarà in grado di:

- ☐ Rappresentare analiticamente una classe di processi dinamici naturali ed ingegneristici, che possano essere descritti da modelli basati su equazioni differenziali lineari.
- ☐ Definire le linee di massima per il progetto di sistemi di controllo standard nel tempo continuo e discreto.
- ☐ Usare metodologie progettuali basate sulla sistemistica e la valutazione analitica di processi dinamici.
- ☐ Usare strumenti numerici e di calcolo quali Matlab e Simulink, come supporto all'analisi ed alla sintesi.

- **Collocazione Didattica**

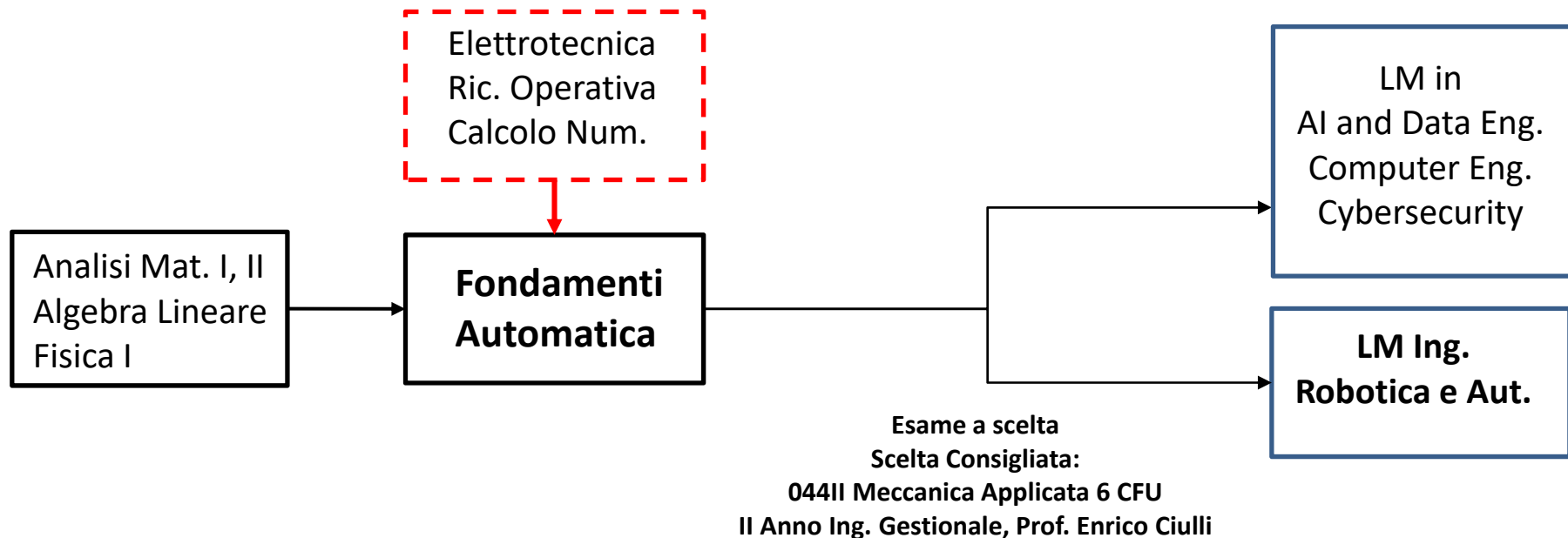
- Il corso fa parte dell'insieme degli insegnamenti caratterizzanti per la Laurea in Ingegneria Informatica ed appartiene al settore scientifico disciplinare ministeriale SSD ING-INF/04: Automatica.



Prerequisiti e Percorso Formativo



- **Prerequisiti / Corequisiti**
- **Prerequisiti formali**: Fisica Generale I, Analisi Matematica II ed Algebra Lineare.
- **Corequisiti**: Elettrotecnica, Ricerca Operativa, Calcolo Numerico.
- **Requisiti concettuali**: Conoscenze sulle scienze di base, in particolare meccanica ed elettrica, conoscenze degli strumenti matematici necessari per il corso (calcolo differenziale, geometria, algebra lineare, matrici, numeri complessi, serie e metodi di integrazione di equazioni differenziali)





Informazioni sul Materiale Didattico



- **Testi e Riferimenti**

- Il materiale in programma è disponibile in ampia quantità su testi sia italiani che stranieri di controlli automatici. Il testo base di riferimento è:
 - **“Fondamenti di Controlli Automatici”**, IV Edizione, P.Bolzern, R.Scattolini, N.Schiavoni, McGraw Hill, Milano.
 - La lista seguente presenta testi aggiuntivi che sono disponibili in biblioteca d’Ateneo e che possono contenere informazioni complementari ed esercizi svolti e da svolgere.
 - K. Ogata: “Modern Control Engineering”, Prentice Hall, Fifth Ed., 2010. (Tutti i capitoli)
 - G Dutton, S. Thompson, B Barraclough: “The Art of Control Engineering” Addison Wesley, 1997.
 - G. Franklin, D. Powell “Digital Control Systems”, Addison-Wesley, 1998
 - [Murray, Astrom: Feedback Systems](#), downloadable.
 - [WIKI Control Systems e Signals and Systems](#), downloadable.
 - Si assume che gli studenti abbiano accesso a MATLAB, per svolgere numericamente problemi ed esercizi. [LICENZA MATLAB](#)
- ☐ **Il materiale presentato a lezione va considerato come una traccia, da completarsi con lo studio nei testi di riferimento e può essere scaricato dal sito del docente: https://people.unipi.it/mario_innocenti/. Il materiale è disponibile agli studenti del corso e non può essere riprodotto né usato a fini commerciali senza il consenso dell’autore.**
- ☐ **Il materiale presentato a lezione fa riferimento a materiale disponibile da parte di altri autori, non vincolato a copyright. Si ringraziano i vari autori per la disponibilità ad uso didattico senza scopo di lucro.**



Informazioni sulla Verifica



- ☐ L'iscrizione all'esame avviene per via elettronica (valutami.unipi).
- ☐ A causa dell'elevato numero di studenti, lo spostamento dell'esame a data diversa da quella stabilita nell'appello non è consentito (eccetto deroghe come da regolamento di Ateneo).
- ☐ Lo studente ha a disposizione un **appello straordinario che si tiene a novembre**, secondo i criteri stabiliti dalla Scuola di Ingegneria.
- ☐ **L'esame è orale e comprende sia domande sugli aspetti teorici, che la soluzione di esercizi numerici. La valutazione dell'esame è fatta in base alla verifica delle conoscenze acquisite, alle capacità di sintesi e della presentazione orale del materiale.**
- ☐ L'esame viene verbalizzato indipendentemente dall'esito e deve essere sostenuto dopo aver superato gli esami relativi ai prerequisiti.
- ☐ Esercizi aggiuntivi a quelli presentati a lezione disponibili in rete su siti italiani e stranieri [Link ad esercizi in rete](#)
- ☐ Lo studente è responsabile per l'intero programma del corso e per gli argomenti propedeutici necessari alla comprensione del programma del corso stesso.
- ☐ La frequenza alle lezioni non è obbligatoria, ma fortemente suggerita. Le lezioni frontali costituiscono una parte fondamentale nel percorso formativo, oltre a permettere allo studente di avere chiarimenti sui concetti presentati. Il docente si assume la responsabilità di verificare periodicamente il numero di studenti a lezione a fini puramente statistici come richiesto dal Consiglio di Corso di Studio.



Informatica ed Automatica



□ Declaratoria del corso di laurea

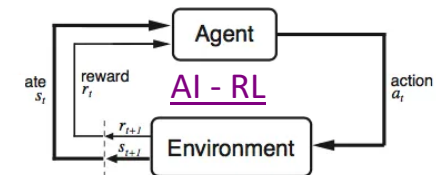
Il [Corso di Laurea in Ingegneria Informatica](#) si propone di formare laureati dotati di una preparazione culturale di base, di conoscenze ingegneristiche intersettoriali, di approfondite competenze informatiche, capaci di “realizzare, configurare e gestire elaboratori e reti di elaboratori, applicazioni software, sistemi di **automazione** industriale, sistemi informativi aziendali, servizi di calcolo e di rete, sistemi integrati di acquisizione, elaborazione e **controllo**”.

I possibili [sbocchi occupazionali](#) riguardano anzitutto le industrie informatiche operanti negli ambiti della produzione di hardware e software e le industrie per **l'automazione industriale**. Inoltre, vista la natura pervasiva dell'informatica, questo tipo di laureato è richiesto in tutte le imprese che utilizzano sistemi informativi e reti di calcolatori nell'ambito dei propri processi produttivi e/o gestionali, nelle imprese di servizi, in particolare nei servizi informatici della pubblica amministrazione. Sono infine molto diffuse, dati i modesti investimenti necessari, le attività libero-professionali, in particolare per la realizzazione di **sistemi di** calcolo e di **controllo** destinati ad applicazioni specifiche. I principali ruoli che un laureato in Ingegneria Informatica potrà ricoprire in questi ambiti sono i seguenti: - progettista e gestore di elaboratori, di reti di elaboratori e di servizi di rete; - progettista e gestore di sistemi e servizi in ambiente web; - progettista di sistemi software e di software applicativo con particolare riferimento alle tecnologie e metodologie object-oriented; - progettista di sistemi integrati di acquisizione, **elaborazione e controllo**; - progettista e gestore di centri per l'elaborazione dati.

Cosa codifica il software?

[Boston Dynamics](#)

[Telescopio James Webb](#)





Concetti Principali



- **Concetti Base:** Il corso si basa sulla integrazione di 3 componenti fondamentali comuni in particolare all'ingegneria dell'automazione, ma riscontrabili in larga misura nelle altre aree dell'ingegneria, in fenomeni naturali, in macchine ed elementi artificiali e nel comportamento stesso di specie viventi ivi compresa quella umana (... a volte...).

- ❑ **Sistema/Impianto/Processo:** L'oggetto di interesse. Macchinario, fenomeno naturale i quali sono descritti matematicamente con un'approssimazione tale da poter ricavarne gli elementi causali essenziali (Modellistica, Teoria dei Sistemi), producendo un **MODELLO** operativo.
- ❑ **Controllo:** "Un controllore misura il comportamento di un sistema, lo paragona a valori desiderati, calcola eventuali azioni correttive basandosi su specifiche della risposta del sistema a ingressi esterni e forza il sistema a variare il proprio funzionamento nel modo desiderato". (Controlli Automatici)
- ❑ **Informazione/Implementazione:** Elementi che permettono al controllore di conoscere l'evoluzione del sistema e di intervenire con interfaccia e potenza appropriate (sensori, attuatori).

- ❑ **Tipologia di intervento di controllo**
 - ❑ **Anello Aperto/Open Loop:** I requisiti di prestazioni sono preimpostati e non possono essere modificati durante l'operazione
 - ❑ **Anello chiuso/Closed loop:** Il controllore può modificare i comandi a seguito del comportamento del sistema



Concetti Principali



❑ Anello Aperto/Open Loop:

- Questa struttura di controllo è vincolata al livello di conoscenza del processo controllato
- La sequenza di controllo, una volta iniziata, non può essere modificata. Esempi possono essere lavatrice, microonde, oppure sistemi anche complessi come sistemi remoti (catene di montaggio, sistemi spaziali, quali sonde deep space, ecc.)

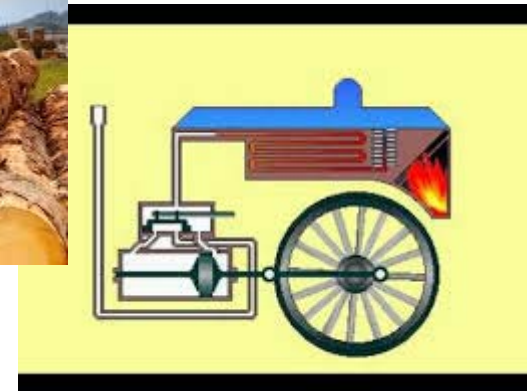
❑ Feedback/Retroazione/Anello Chiuso/...:

- Feedback è una procedura essenziale nei sistemi biologici, fisici, naturali ed artificiali. Il processo di retroazione gestisce come si cresce, come si risponde allo stress ed alle difficoltà e regola fattori quali la temperatura corporea, la pressione sanguigna, il livello di colesterolo. I meccanismi di feedback operano a tutti i livelli, dall'interazione delle proteine nelle cellule, ai macrosistemi ambientali complessi.
- Feedback è una procedura fondamentale tutte le volte che macchinari, processi industriali, sistemi informatici complessi e distribuiti devono operare mantenendo dei requisiti di precisione, caratteristiche operative e stato nominale i quali possono variare a causa di fattori esterni, guasti, variazioni ambientali, ecc.

Anello Aperto vs Anello Chiuso



Motivazione (Esempio Automotive 1)



Prima..

Informatica = 0

Automatica = 0.1

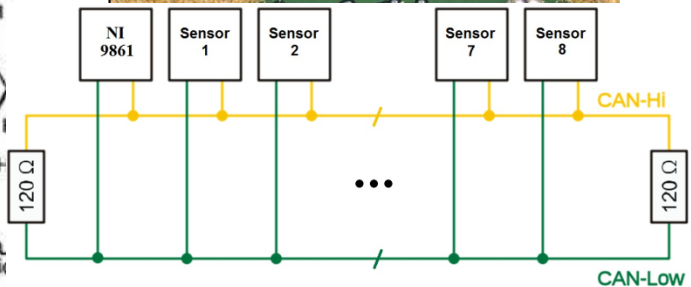
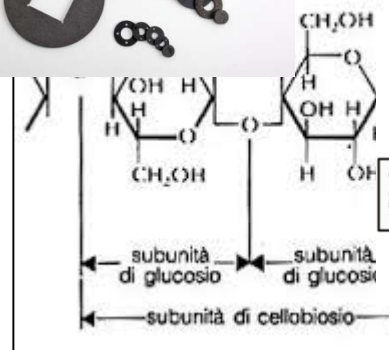
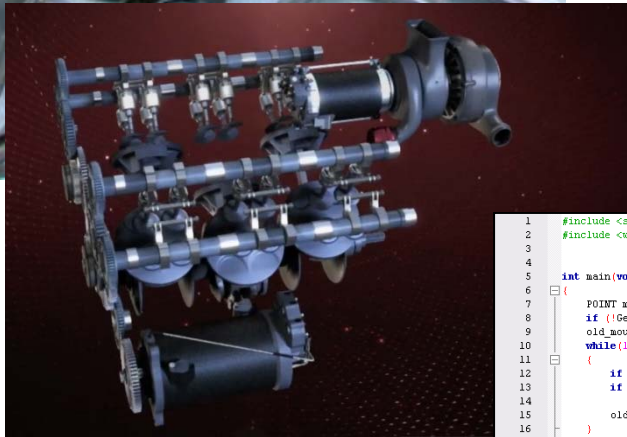


Cugnot, 1769





Motivazione (Esempio Automotive 2)



```
1 #include <stdio.h>
2 #include <windows.h>
3
4 int main(void)
5 {
6     POINT mouse, old_mouse;
7     if (!GetCursorPos(&mouse)) return -1;
8     old_mouse = mouse;
9     while(1)
10     {
11         if (!GetCursorPos(&mouse)) return -1;
12         if (mouse.x != old_mouse.x || mouse.y != old_mouse.y)
13             printf("X: %d Y: %d\n", mouse.x, mouse.y);
14         old_mouse = mouse;
15     }
16     return 0;
17 }
18
19
```





Motivazione (Automotive 2)

Adesso... io speriamo che si vince...



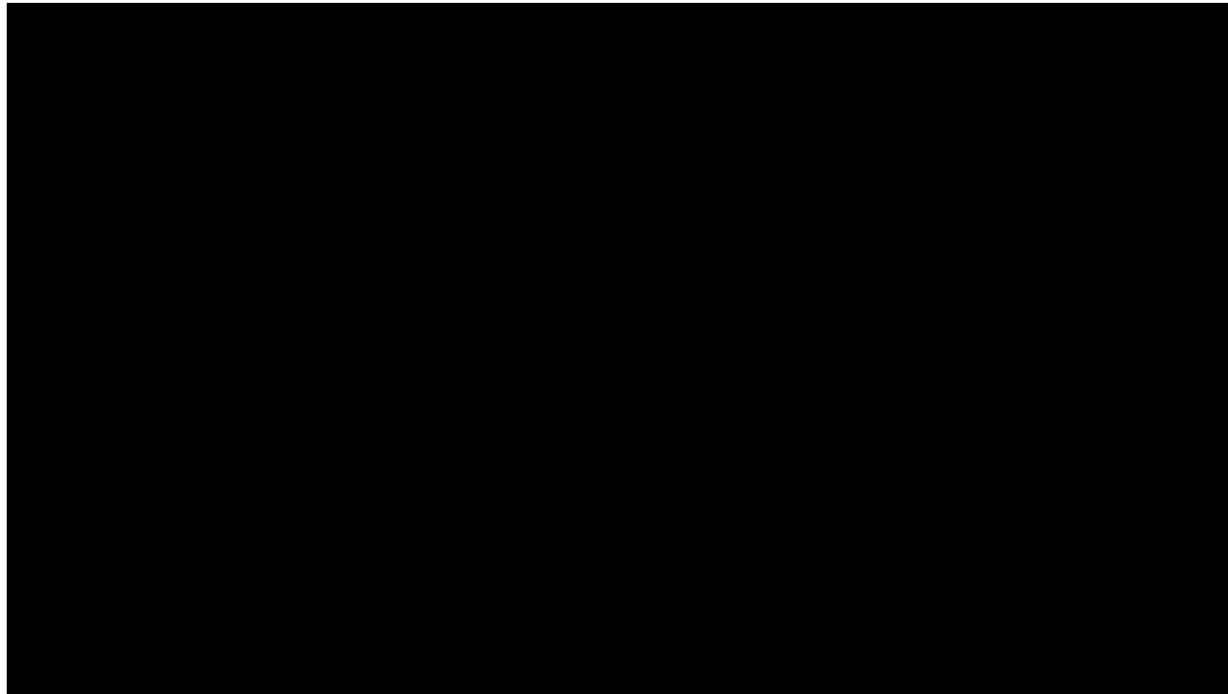
- **Fisica:** principi fondamentali di statica, dinamica, elettromagnetismo, ottica,...
- **Chimica:** combustione, proprietà materiali gassosi, liquidi, iniezione, calore,...
- **Ingegneria Meccanica:** materiali (carbonio, gomma, acciaio, titanio,...), motore, differenziale, cambio, ruote dentate, ammortizzatori, pompe,...
- **Ingegneria Aeronautica:** aerodinamica, fluidodinamica, effetto suolo,...
- **Ingegneria dell'Informazione:** schede di controllo, centraline di comando, processori, codifica, trasmissione segnali, acquisizione informazioni sullo stato, interfaccia uomo – macchina,...
- **Ingegneria Gestionale:** produzione, indagine di mercato, marketing, vendita, rapporto con l'utenza,...
- **Ingegneria Biomedica:** preparazione psico – fisica del pilota, training
- **Amministrazione:** regolamentazione componenti, soddisfacimento requisiti di emissione, qualifica conducente (patenti,..), ...



Motivazione (Esempio)



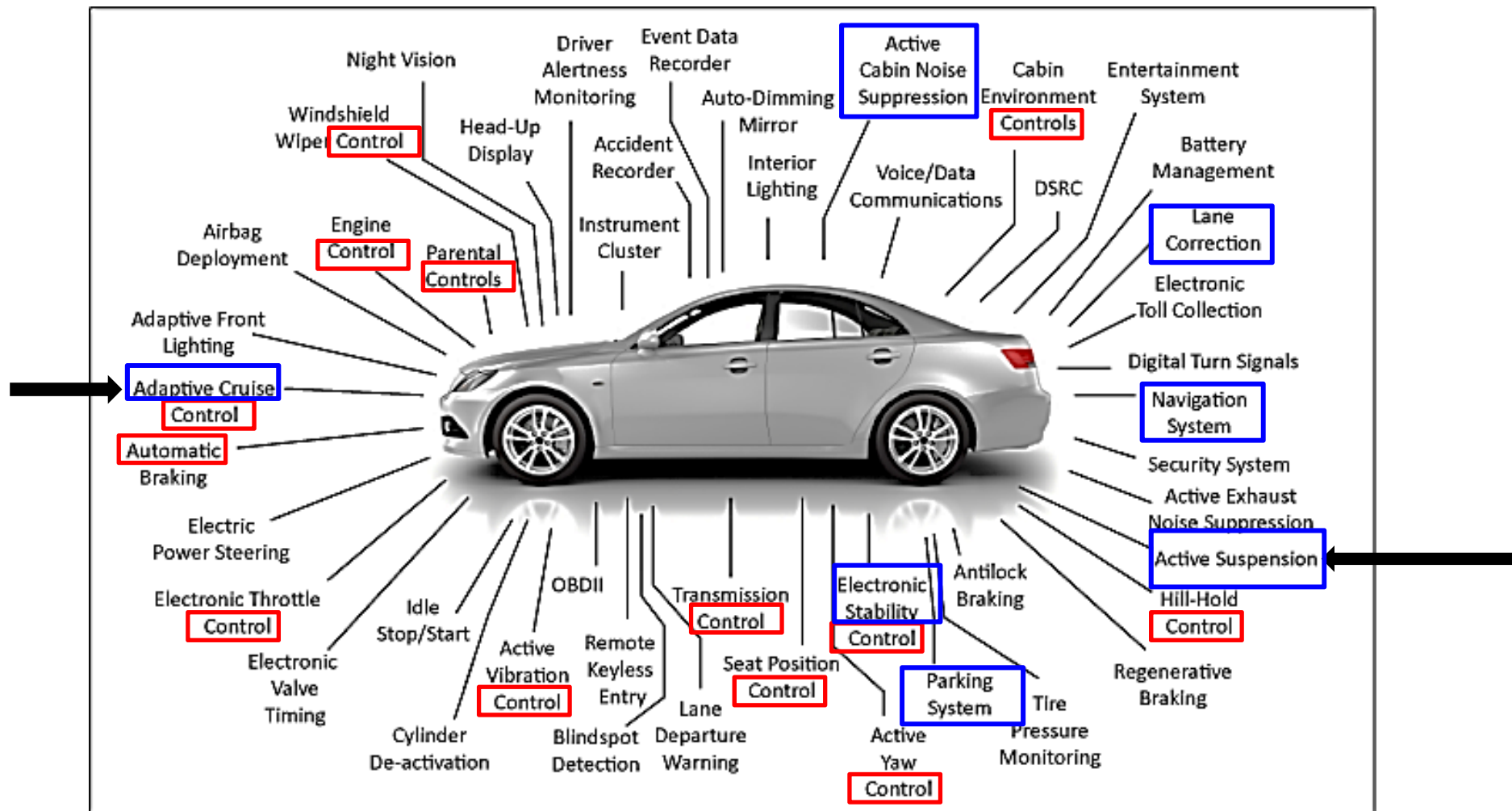
❑ **Domanda:** **dove e come** interveniamo come esperti di Automatica?



A high-tech company based in Parma, VisLab is focused on all aspects of autonomous driving—from the fundamentals of environmental perception all the way to productization and deployment—including machine learning, deep neural networks (DNNs), stereovision, robotics, sensor fusion, system calibration, and more. Founded in the late '90s as a research laboratory at the University of Parma, VisLab quickly established itself as a pioneer in vehicle autonomy before spinning off from the University in 2009. Since then, VisLab has continued its pioneering research under founder Alberto Broggi, establishing several internationally recognized milestones in self-driving along the way.



These are impressive amounts of software, yet if you bought a premium-class automobile recently, "it probably contains close to 100 million lines of software code," says Manfred Broy, a professor of informatics at Technical University, Munich, and a leading expert on software in cars. All that software executes on 70 to 100 microprocessor-based electronic control units (ECUs) networked throughout the body of your car.



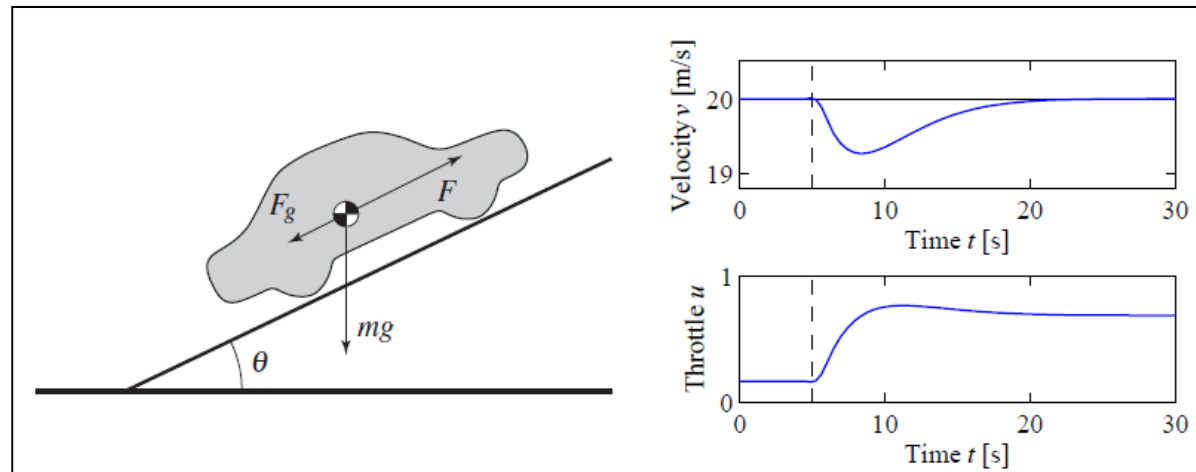


Cruise Control - Automotive



OBIETTIVO 1:

Mantenere una velocità costante in presenza di variazioni della pendenza stradale
(STABILITA', EQUILIBRIO)



- ❑ Informazioni sulla velocità ad ogni istante, informazioni sulla velocità desiderata e, se possibile, informazioni sulla pendenza della strada (**sensori**)
- ❑ Tempo necessario al recupero della velocità desiderata, come la velocità varia prima di tornare al valore desiderato (**controllo**)
- ❑ Azionamento dell'acceleratore, ovvero gestione del numero di giri del motore per annullare la variazione di velocità (**attuatori**)

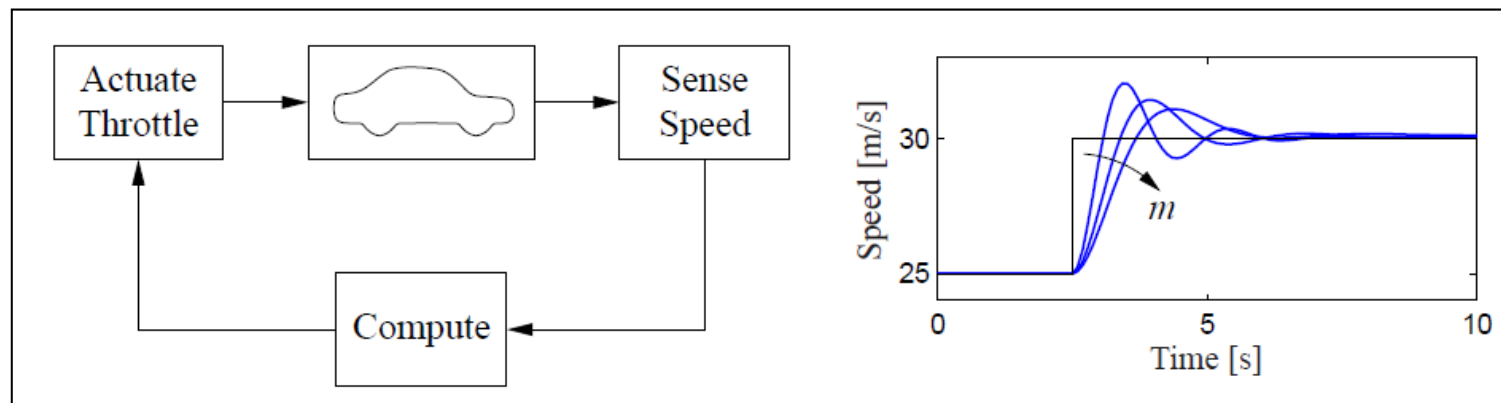


Cruise Control - Automotive



OBIETTIVO 2:

Variazione di velocità (INSEGUIMENTO DI UN COMANDO, TRACKING, PUNTO OPERATIVO)



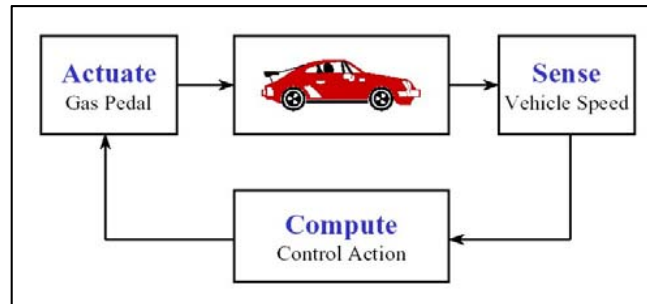
- ☐ Informazioni sulla velocità ad ogni istante, informazioni sulla velocità desiderata
- ☐ Tempo necessario per raggiungere la velocità desiderata, andamento della velocità nel transitorio (presenza o meno di oscillazioni)
- ☐ Azionamento dell'acceleratore, ovvero gestione del numero di giri del motore per fornire la necessaria accelerazione o decelerazione



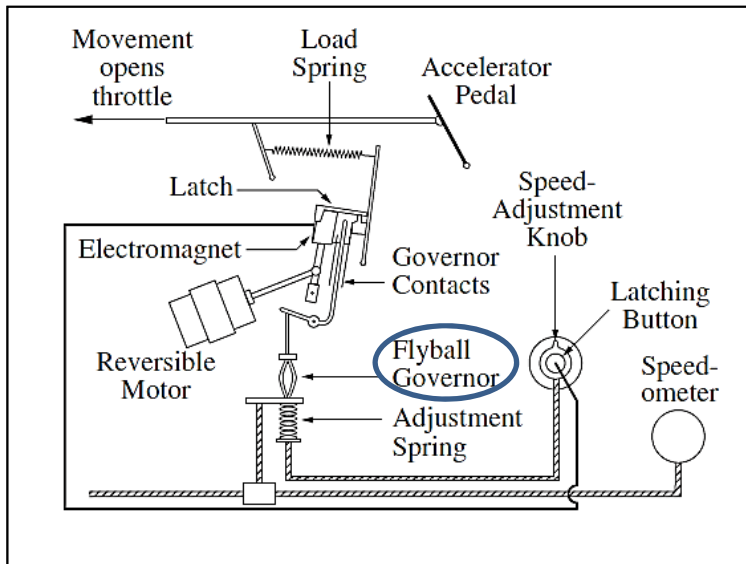
Cruise Control - Automotive



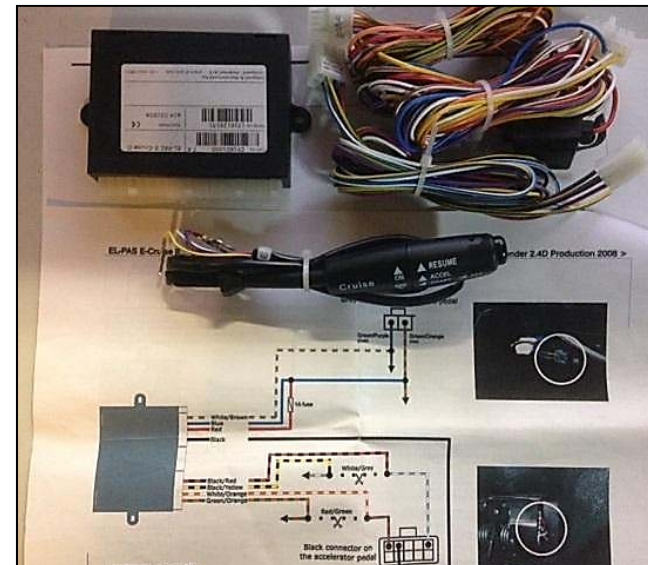
- Una volta **misurata** la velocità, **introdotto** il valore della velocità desiderata (sia da mantenere che da raggiungere), si può azionare il meccanismo che serve ad **attuare** la **decisione** di come deve variare la velocità dal valore corrente al valore desiderato.



Chrysler – 1958 (FIAT ?..)



Online

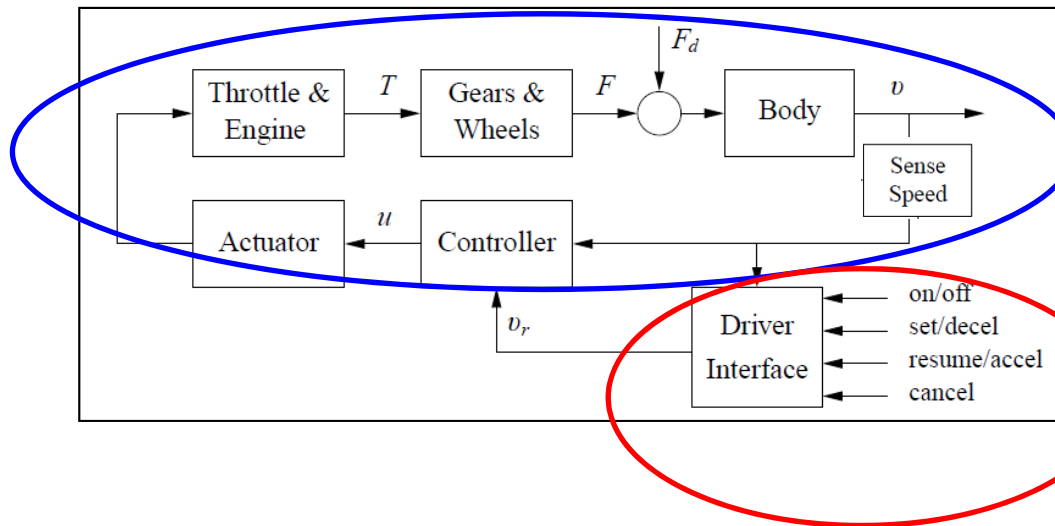




Cruise Control - Automotive

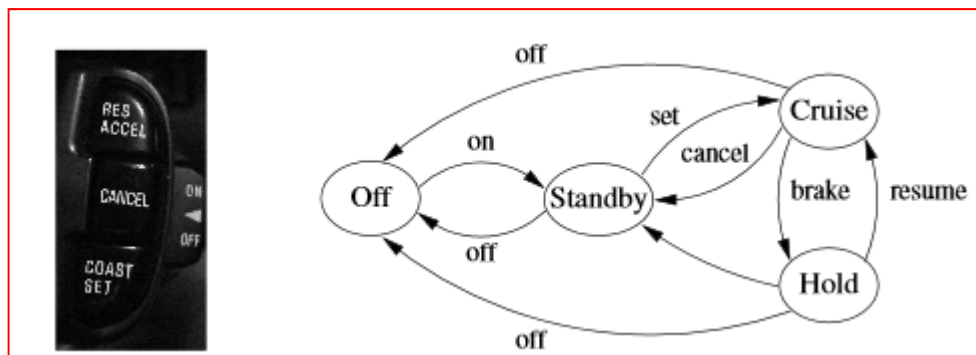


❑ **Impostazione matematica del problema** (tratta dal testo di Murray):



Anello operativo continuo, primi concetti in F.A.

Gestore High Level: Definisce gli stati possibili del sistema, primi concetti in R.O.



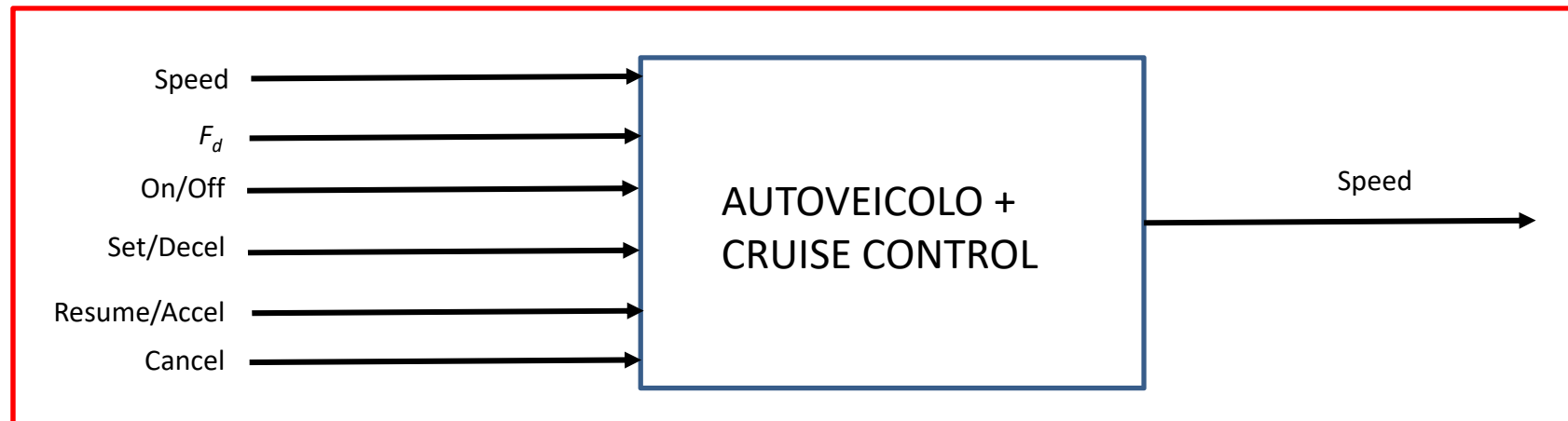
- Computational Intelligence
- Ricerca Operativa
- Teoria dei Grafi



Cruise Control - Automotive

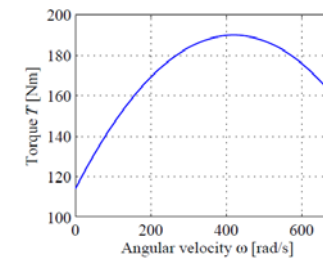
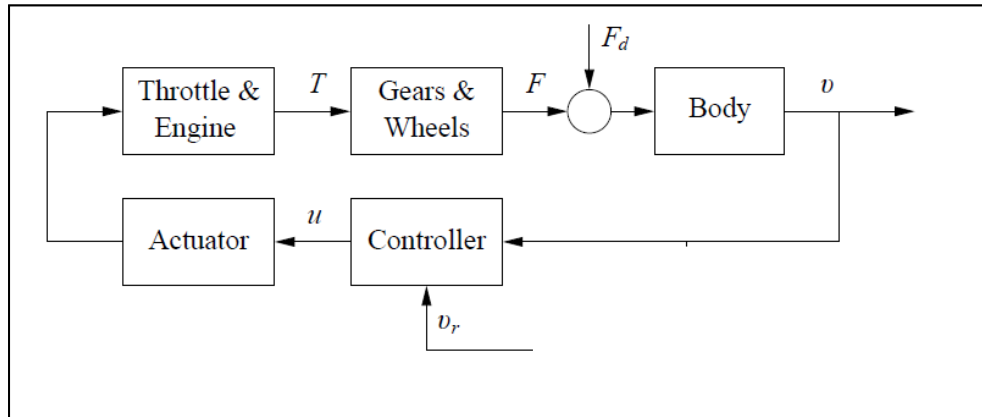


□ Descrizione grafica mediante “algebra a blocchi”:





Cruise Control - Automotive



1. Moto del veicolo

$$m \frac{dv}{dt} = F - F_d \quad \text{Forza motore - Somma Forze Disturbo (gravità, attrito, resistenza aerodinamica)}$$

2. Coppia motrice e forza motore (gentile concessione dei colleghi meccanici)

$$T(\omega) = T_m \left(1 - \beta \left(\frac{\omega}{\omega_m} - 1 \right)^2 \right) \quad T(\omega) \text{ Coppia motrice [} T_m \text{ coppia max.]. } T \text{ è funzione del sistema di iniezione, controllata dall'acceleratore (} 0 < u < 1 \text{) e dalla velocità angolare dell'albero motore } \omega.$$

$$\omega = \frac{n}{r} v =: \alpha_n v; (\alpha_i = 1, 2, 3, 4, ..) \quad \text{Velocità angolare motore funzione del rapporto di trasmissione e velocità tangenziale}$$

$$F = \alpha_n u T(\alpha_n v)$$



Cruise Control - Automotive



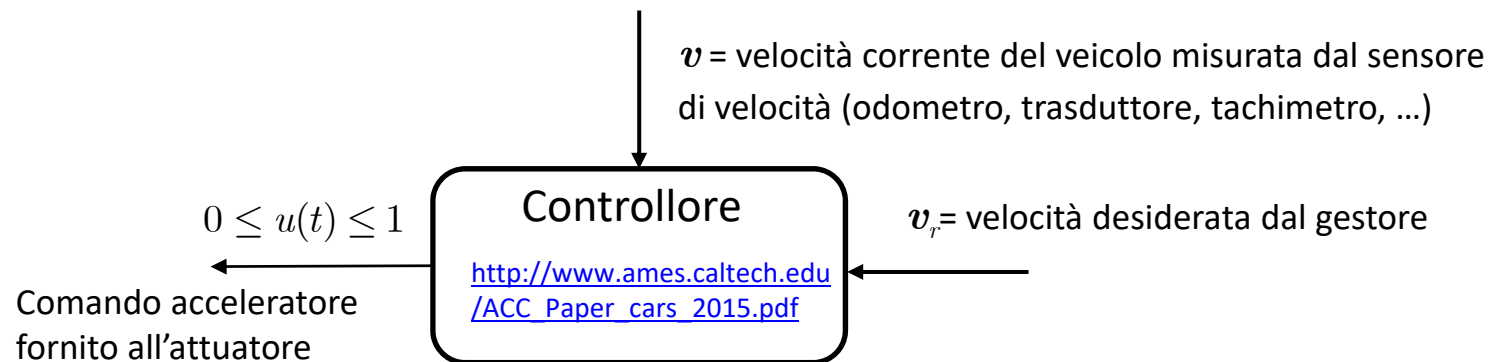
3. Forze di disturbo

$$F_d = mgC_r \operatorname{sgn}(v) + \frac{1}{2} \rho C_d A v^2 + mg \sin \theta$$

Forza di attrito, resistenza aerodinamica, gravità funzione della pendenza della strada

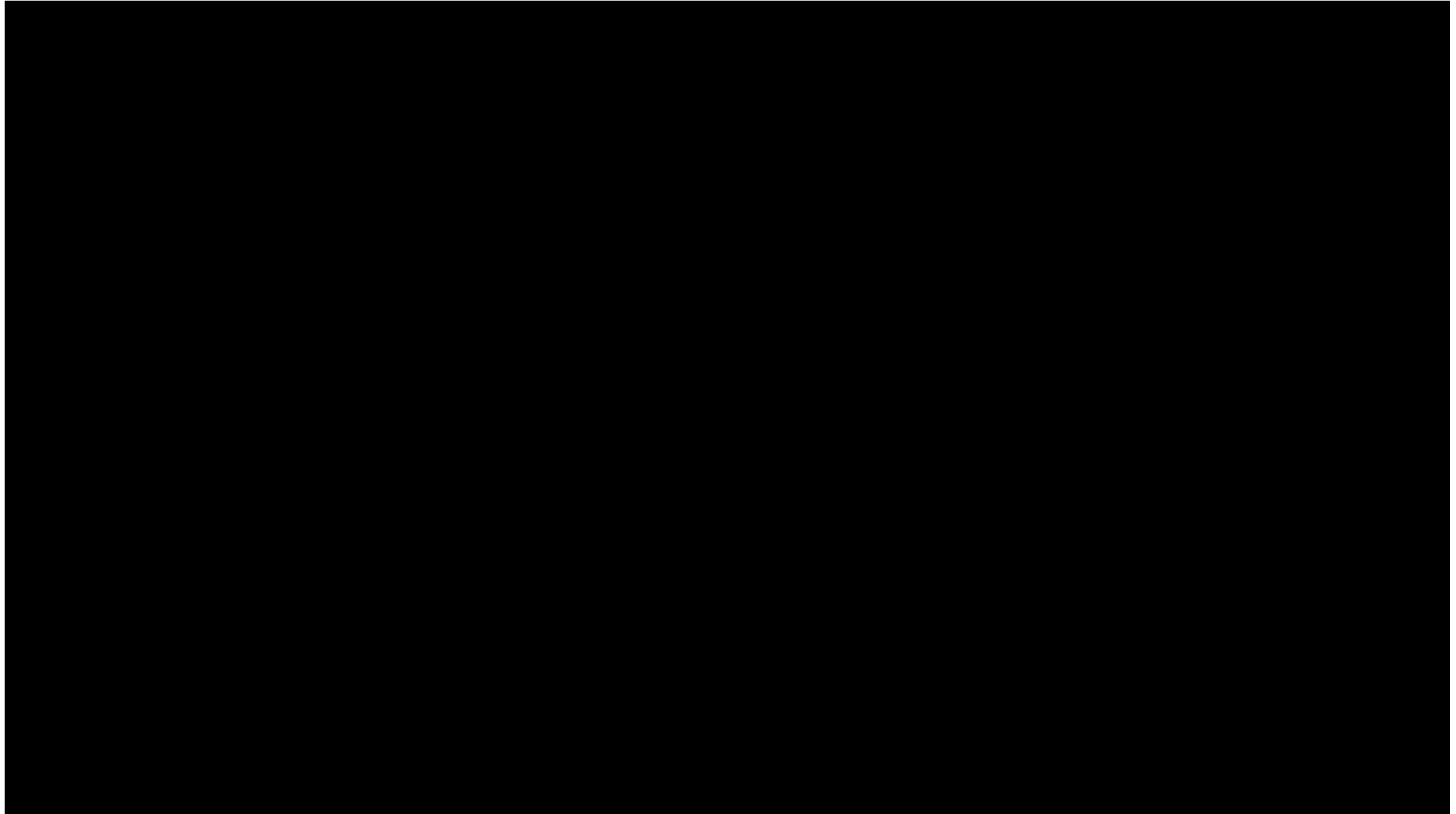
4. Sommario

$$m \frac{dv}{dt} = \alpha_n u T(\alpha_n v) - mgC_r \operatorname{sgn}(v) - \frac{1}{2} \rho C_d A v^2 - mg \sin \theta$$



Implementato sulla scheda di controllo in codice, per esempio C++

Obiettivo del Corso di F. A.





Controllo Attivo delle Sospensioni - Automotive

OBIETTIVO

Capacità di mantenere costante il livello del veicolo rispetto alla strada in maniera soddisfacente, fornendo comfort anche nell'affrontare imperfezioni nel manto stradale.

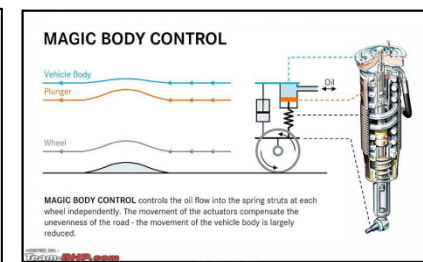
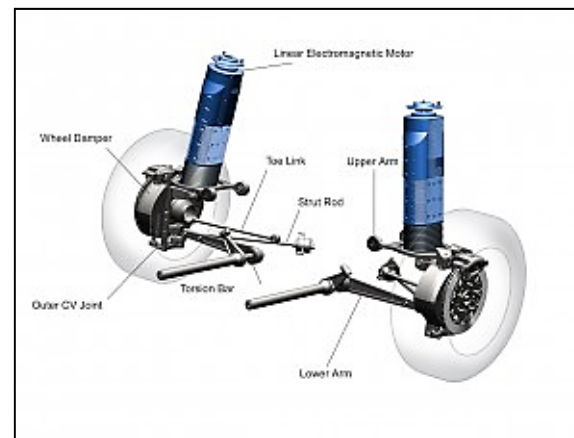
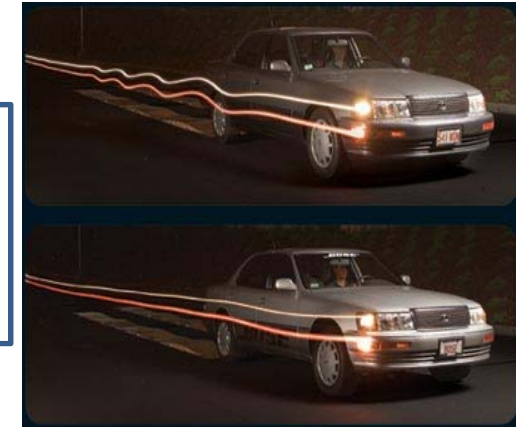


❑ (REIEZIONE DEL DISTURBO):

Quando il mezzo affronta le sconnessioni della strada, il veicolo non dovrebbe essere soggetto a grandi oscillazioni e queste dovrebbero comunque dissiparsi rapidamente.

- ❑ (STABILITA'): Teoricamente, il passeggero non dovrebbe essere soggetto ad alcun movimento verticale né rotatorio.

Active Suspension

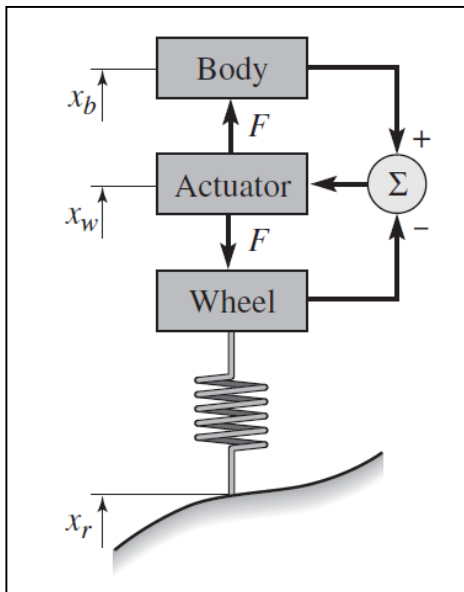
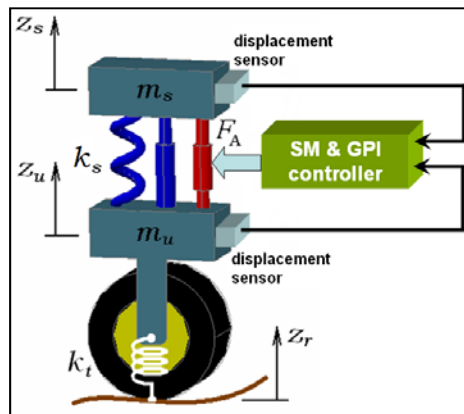




Controllo Attivo delle Sospensioni - Automotive



- ❑ **Impostazione matematica del problema:** Modello standard usato prende il nome di Quarter Car Model



- ❑ L'attuatore attivo addizionale esercita una forza F_A tra la ruota ed il corpo (1/4) della vettura in base alla distanza relativa tra corpo della vettura e centroide della ruota.

1. Movimento lineare (Legge di Newton)

$$\begin{cases} m_s \ddot{z}_s = F \\ m_u \ddot{z}_u = -F + k_s (z_r - z_u) \end{cases}$$

m_w = massa effettiva della ruota (incluso sospensione, freni, ecc.)

k_t = rigidezza pneumatico

$x_r(t)$ = disturbo dovuto al manto stradale

2. Forza totale di smorzamento (componente passiva lineare)

$$F = F_P + F_A$$

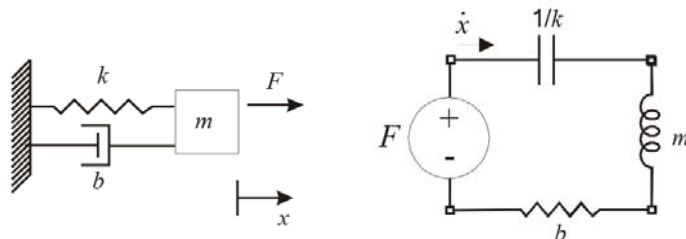
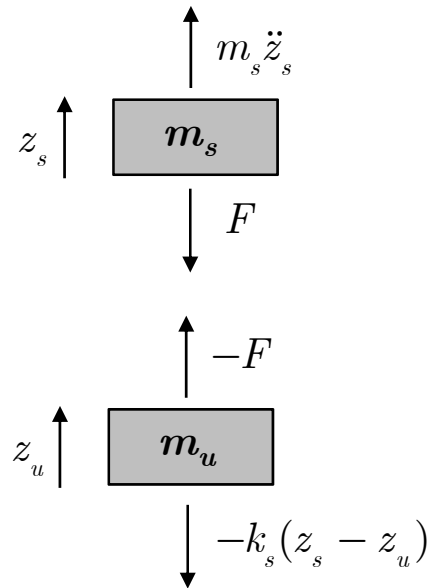
$$F_P = k(z_u - z_s) + c(\dot{z}_u - \dot{z}_s)$$



Controllo Attivo delle Sospensioni - Automotive



3. Diagramma corpo libero



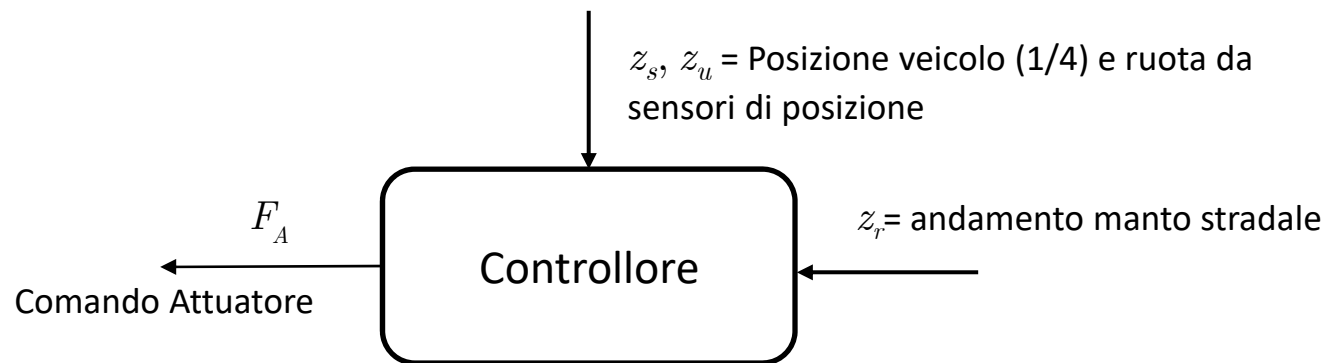
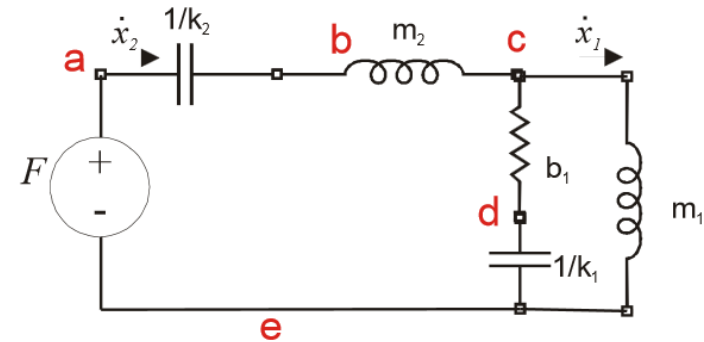
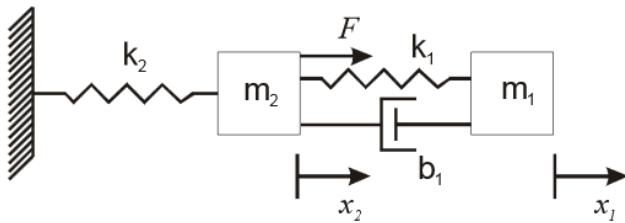
Key Concept: Analogous Quantities

Electrical Quantity	Mechanical Analog I (Force-Current)	Mechanical Analog II (Force Voltage)
Voltage, e	Velocity, v	Force, f
Current, i	Force, f	Velocity, v
Resistance, R	Lubricity, $1/B$ (Inverse friction)	Friction, B
Capacitance, C	Mass, M	Compliance, $1/K$ (Inverse spring constant)
Inductance, L	Compliance, $1/K$ (Inverse spring constant)	Mass, M
Transformer, $N1:N2$	Lever, $L1:L2$	Lever, $L1:L2$

Electrical Equation	Mech. Analogy I	Mech. Analogy II
$\epsilon = iR$	$v = \frac{f}{B}, B = \frac{1}{R}$	$f = vB, B = \frac{1}{R}$
$\epsilon = L \frac{di}{dt}$ $i = \frac{1}{L} \int \epsilon \cdot dt$	$v = \frac{1}{K} \frac{df}{dt}, K = \frac{1}{L}$ $f = K \int v \cdot dt = Kx$	$v = \frac{1}{M} \int f \cdot dt$ $f = M \frac{dv}{dt} = M \frac{d^2x}{dt^2}$
$\epsilon = \frac{1}{C} \int i \cdot dt$ $i = C \frac{d\epsilon}{dt}$	$v = \frac{1}{M} \int f \cdot dt, M = C$ $f = M \frac{dv}{dt}$	$f = K \int v \cdot dt = Kx$ $v = \frac{1}{K} \frac{df}{dt}$



Controllo Attivo delle Sospensioni - Automotive

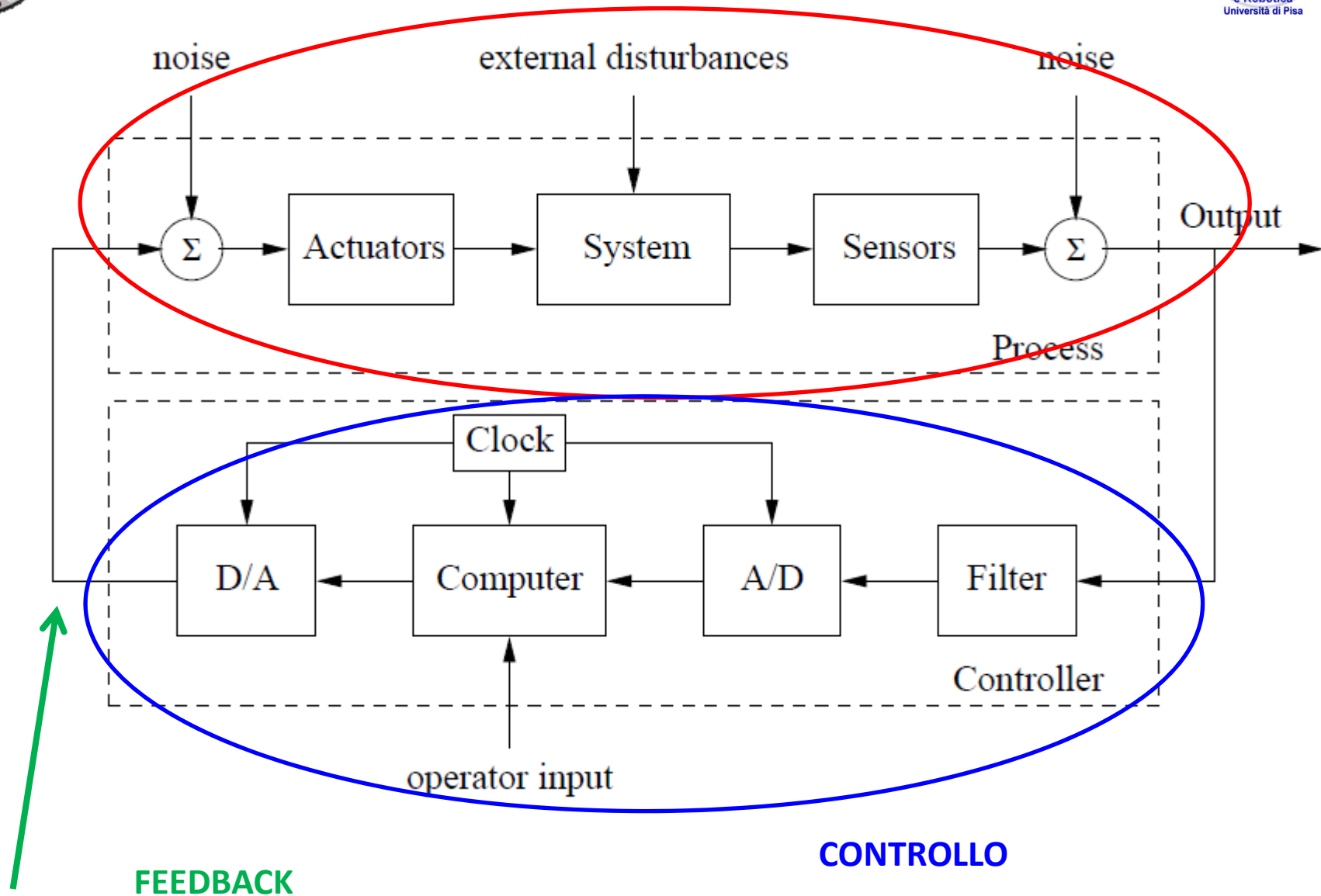


Obiettivo del Corso di F. A.



Concetti Principali

SISTEMA

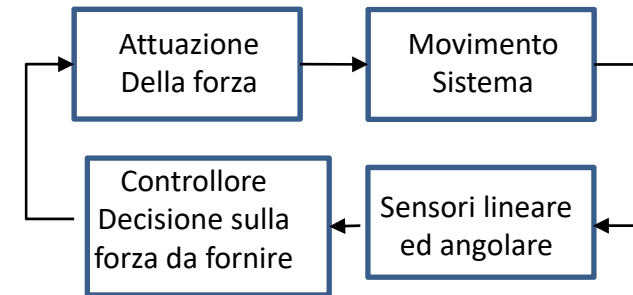
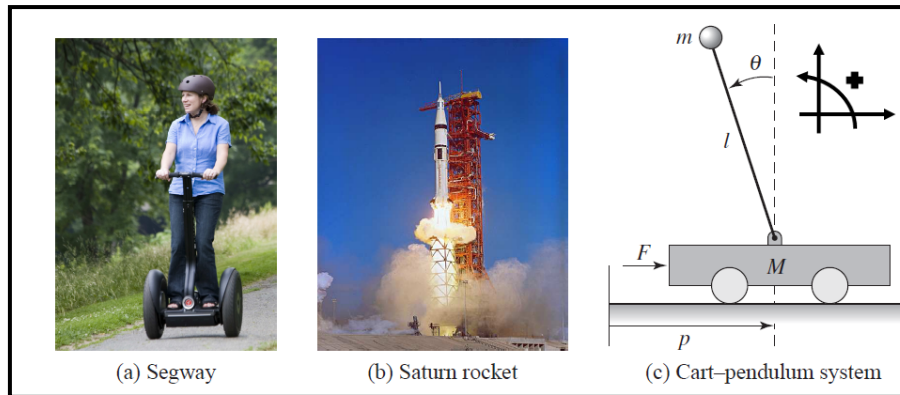




Esempi: Pendolo inverso



❑ Mantenimento verticale del pendolo mediante una forza di controllo applicata al carrello

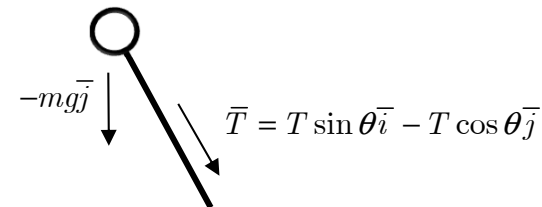
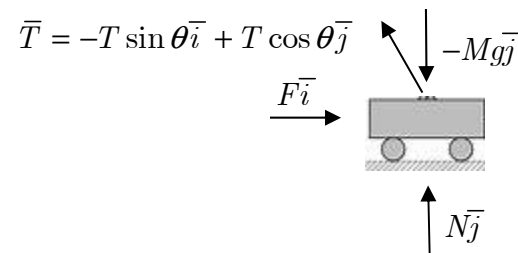


■ Ipotesi:

- M, m costanti
- L costante con massa trascurabile
- Legge di Newton (corpi rigidi, moto del centro di massa)
- Uso del diagramma del corpo libero per il calcolo delle forze

■ Sistema composto:

- Due gradi di libertà (DOF)
- Moto del carrello e moto del pendolo
- F forza di controllo





Esempi: Pendolo inverso

- Dinamica del carrello in componenti:

$$\bar{i} \Rightarrow F - T \sin \theta = M\ddot{x} \quad (0)$$

$$\bar{j} \Rightarrow N - Mg + T \cos \theta = 0 \rightarrow \text{equilibrio}$$

- Dinamica del pendolo in componenti:

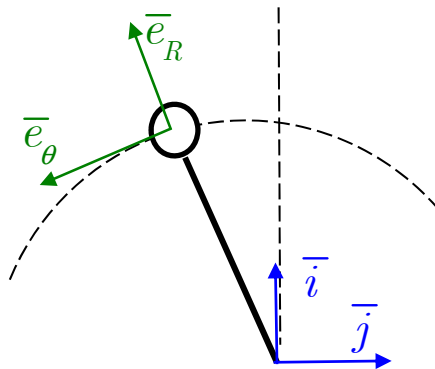
$$\bar{i} \Rightarrow T \sin \theta = ma_{Px} \quad (1)$$

$$\bar{j} \Rightarrow -T \cos \theta - mg = ma_{Py} \quad (2)$$

- Scrivere le equazioni in termini di variabili di stato del sistema (posizione e velocità del carrello e del pendolo)

- Dalla cinematica:

$$\bar{a}_P = \bar{a}_C + \bar{a}_{P/C} = \ddot{x}\bar{i} + \bar{a}_{P/C}$$



$$\bar{a}_{P/C} = L\ddot{\theta}[-\cos \theta \bar{i} - \sin \theta \bar{j}] - L\dot{\theta}^2[-\sin \theta \bar{i} + \cos \theta \bar{j}]$$

$$\bar{a}_P = [\ddot{x} - L\ddot{\theta} \cos \theta + L\dot{\theta}^2 \sin \theta]\bar{i} + [-L\ddot{\theta} \sin \theta - L\dot{\theta}^2 \cos \theta]\bar{j}$$

- Sostituendo in (1) e (2):

$$\bar{i} \Rightarrow T \sin \theta = m[\ddot{x} - L\ddot{\theta} \cos \theta + L\dot{\theta}^2 \sin \theta] \quad (3)$$

$$\bar{j} \Rightarrow -T \cos \theta - mg = m[-L\ddot{\theta} \sin \theta - L\dot{\theta}^2 \cos \theta] \quad (4)$$

- Eliminiamo T:

$$(3) * \cos \theta + (4) * \sin \theta$$



Esempi: Pendolo inverso



$$-mg \sin \theta = m[\ddot{x} \cos \theta - mL\ddot{\theta}] \quad (5)$$

- Sostituendo in (3) in (1):

$$F + mL\ddot{\theta} \cos \theta - mL\dot{\theta}^2 \sin \theta = (M + m)\ddot{x} \quad (6)$$

$$\begin{cases} m\ddot{x} \cos \theta - mL\ddot{\theta} + mg \sin \theta = 0 \\ (M + m)\ddot{x} + mL\dot{\theta}^2 \sin \theta - mL\ddot{\theta} \cos \theta = F \end{cases}$$



- **Trovare $x(t)$ e $\theta(t)$ dati: $x(t_0)$, $dx(t_0)/dt$, $\theta(t_0)$, $d\theta(t_0)/dt$ e $F(t)$**

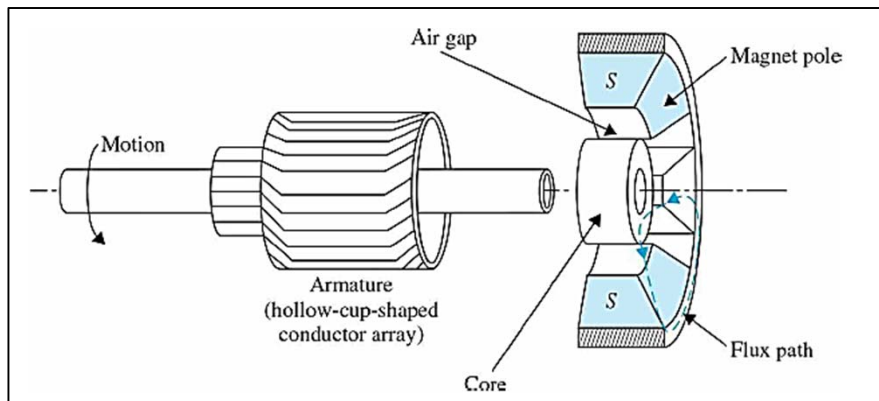
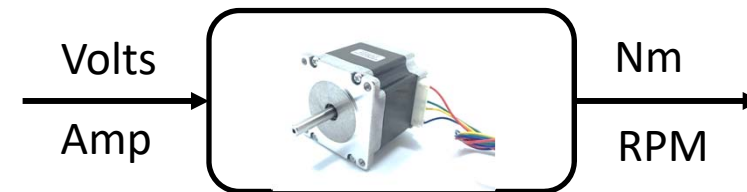
- 2 equazioni differenziali ordinarie del secondo ordine
- Equazioni sono accoppiate
- Non esiste una soluzione analitica
- Soluzione numerica mediante un algoritmo di integrazione



Esempi: Motore in corrente continua



- Il motore in continua (DC motor in inglese) è uno dei componenti principali nei sistemi industriali e provvede al trasferimento di energia elettrica in energia meccanica



- Il campo elettromagnetico generato dal circuito di armatura ed il magnete permanente determina la rotazione dell'albero motore
- La coppia motrice generata dall'interazione tra la corrente di armatura i_a ed il flusso magnetico ϕ del magnete permanente è data da:

$$T_m = K_m \phi i_a$$

- Durante il movimento del conduttore nel campo magnetico, si crea una forza che si oppone al moto (forza controelettromotrice) data da:

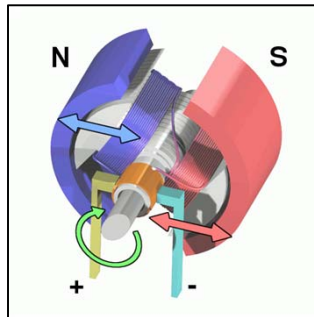
$$e_b = K_m \phi \omega_m = K_b \omega_m$$



Esempi: Motore in corrente continua



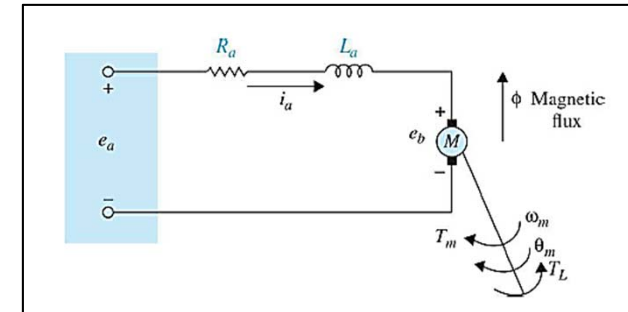
- Nel contesto dei controlli automatici siamo interessati alla determinazione di un modello dinamico semplificato del motore. In particolare assumiamo:
 - Modello lineare di comportamento
 - Flusso magnetico costante



Di Abnormaal - Opera propria,
CC BY-SA 3.0

$$T_m(t) = K_m \phi i_a(t) = K_i i_a(t)$$

- Consideriamo un circuito equivalente per il motore



$i_a(t)$ = armature current

R_a = armature resistance

$e_b(t)$ = back emf

$T_L(t)$ = load torque

$T_m(t)$ = motor torque

$\theta_m(t)$ = rotor displacement

K_i = torque constant

L_a = armature inductance

$e_a(t)$ = applied voltage

K_b = back-emf constant

ϕ = magnetic flux in the air gap

$\omega_m(t)$ = rotor angular speed

J_m = rotor inertia

B_m = viscous-damping coefficient



Esempi: Motore in corrente continua



- Dalla struttura del circuito di armatura si ha:

$$\frac{di_a(t)}{dt} = \frac{1}{L_a} e_a(t) - \frac{R_a}{L_a} i_a(t) - \frac{1}{L_a} e_b(t)$$

$$e_b(t) = K_b \omega_m(t) = K_b \frac{d\Theta_m(t)}{dt}$$

$$\frac{d^2\Theta_m(t)}{dt^2} = \frac{1}{J_m} T_m(t) - \frac{1}{J_m} T_L(t) - \frac{B_m}{J_m} \frac{d\Theta_m(t)}{dt}$$

$$T_m(t) = K_m \phi i_a(t) = K_i i_a(t)$$

- $T_L(t)$ rappresenta una coppia di disturbo dovuta al carico di frizione di Coulomb, mentre B_m modella la viscosità del sistema.

$$e_a(t)$$

$$\frac{di_a(t)}{dt} = \frac{1}{L_a} e_a(t) - \frac{R_a}{L_a} i_a(t) - \frac{1}{L_a} e_b(t)$$

$$T_m(t) = K_i i_a(t)$$

$$\frac{d^2\Theta_m(t)}{dt^2} = \frac{1}{J_m} T_m(t) - \frac{1}{J_m} T_L(t) - \frac{B_m}{J_m} \frac{d\Theta_m(t)}{dt}$$

$$\Theta_m(t)$$

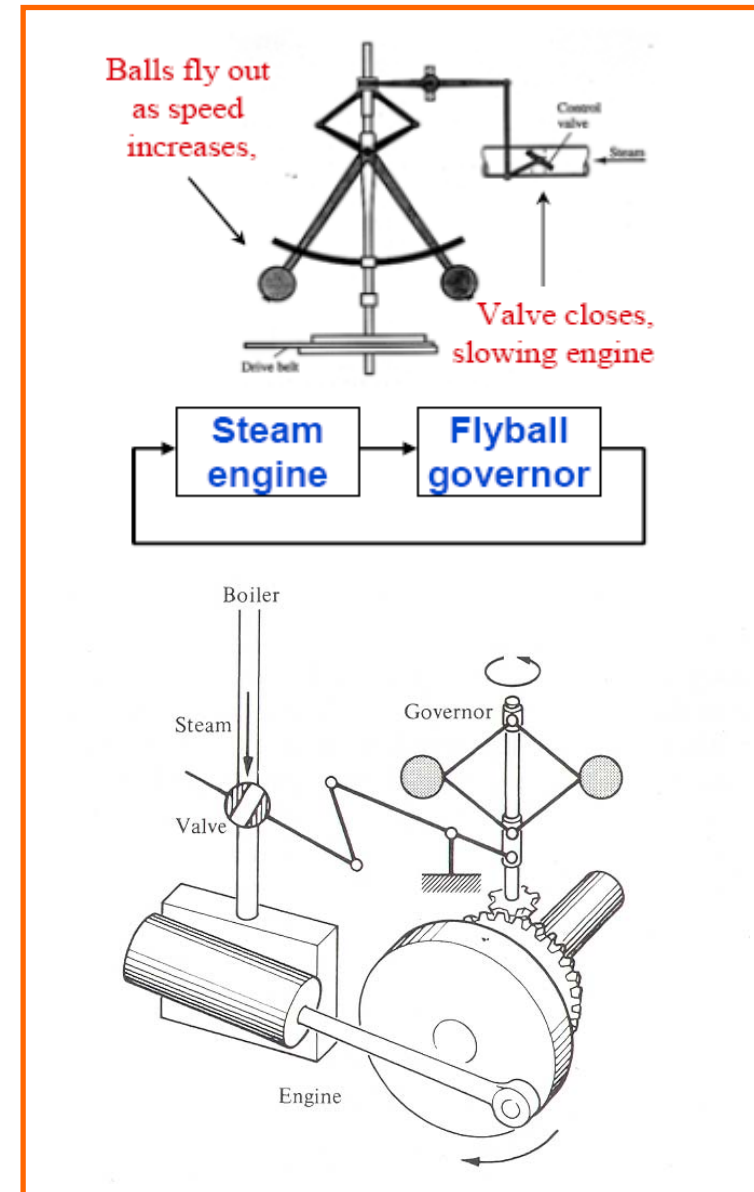




Cenni Storici



- Esempi di “controllo” si possono trovare presso i Greci ed i Romani
 - Lampade ad olio
 - Livello regolatori ad acqua
 - Orologi ad acqua
 - Apertura porte con contrappesi
 - ...
- Rivoluzione Industriale 1769, Regolatore di Watt (Regolatore di Portata di Vapore)
 - ❑ Sistema meccanico di regolazione di un motore a vapore
 - ❑ Quando la velocità aumenta, le sfere si spostano verso l'alto, chiudendo la valvola che porta il vapore dal boiler al pistone (e viceversa)





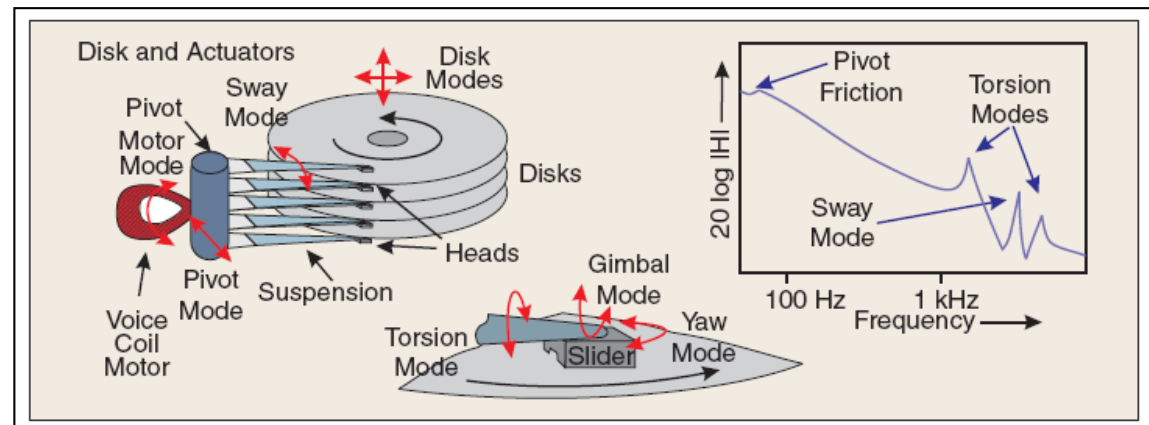
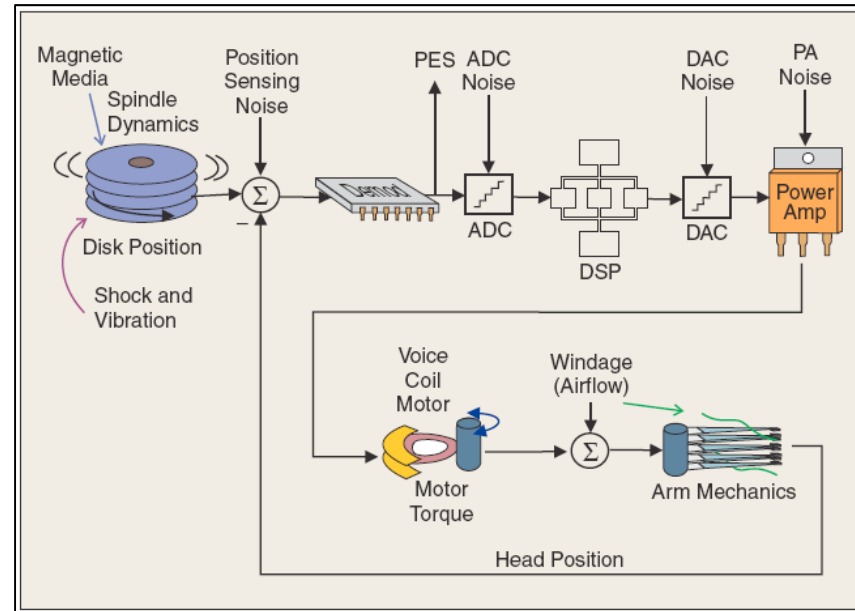
Cenni Storici



• 1950 Controllo di un Disk Drive (precisione e reiezione del disturbo)

- ❑ La posizione della testina rispetto alla traccia è letta direttamente dal disco.
- ❑ Mediante la tecnica di “Data sectoring” i dati e la posizione sono disposti spazialmente e poi convertiti in sequenza temporale in lettura.
- ❑ La posizione della testina è un segnale modulato nel dominio magnetico ed in seguito inserita nella legge di controllo.
- ❑ La legge di controllo provvede a far **inseguire la traccia e a muovere la testina da una traccia all'altra.**
- ❑ I problemi riguardano I disturbi causati da:

- **moto della puntina,**
- **l'aria sul disco,**
- **il rumore di misura dell'errore,**
- **I colpi,**
- **Le vibrazioni**



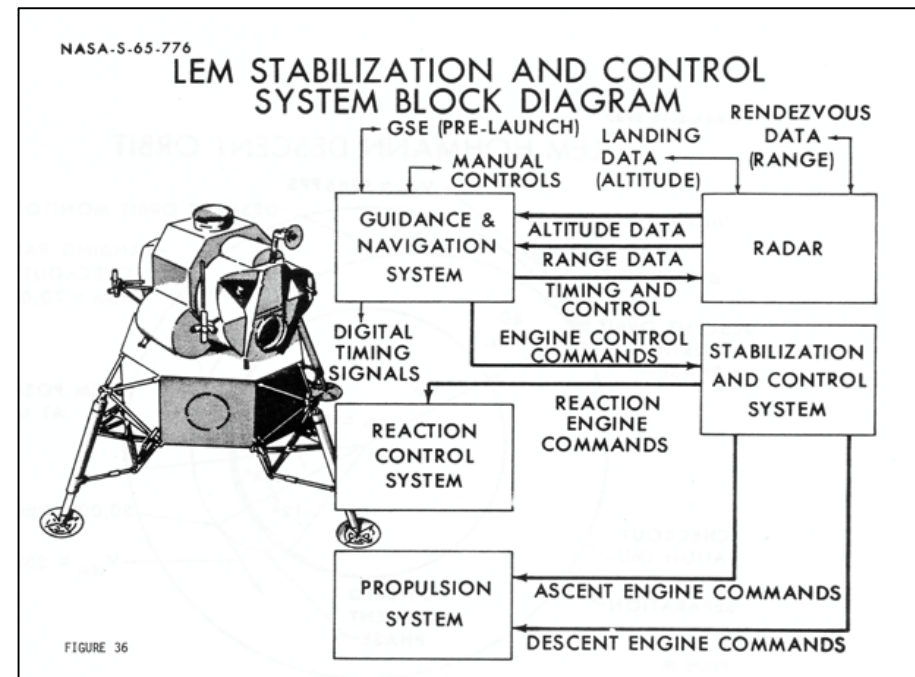
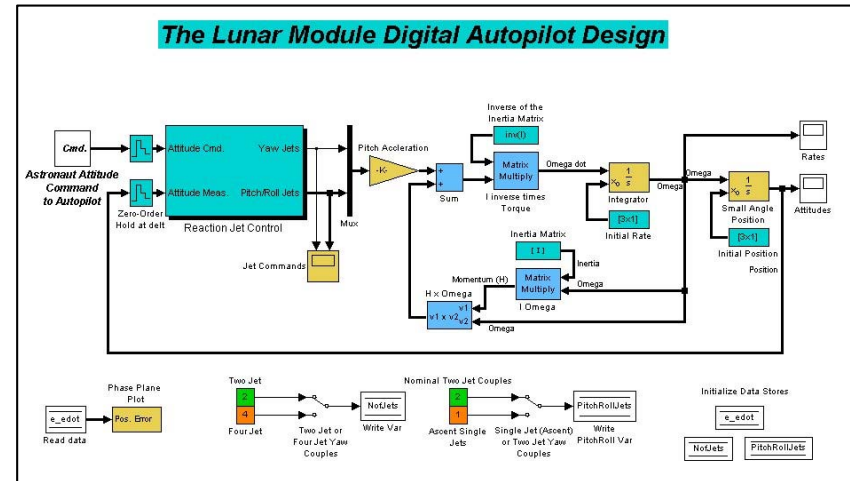
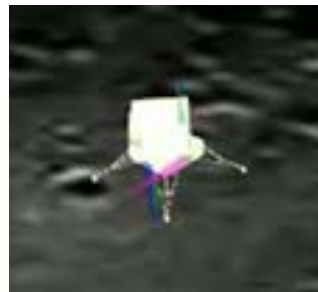
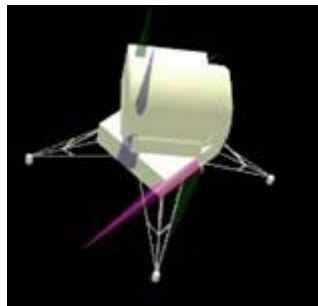


Cenni Storici



- 1969, Lunar Excursion Module (Precision, inseguimento di traiettoria)

□ Una delle molte applicazioni in campo aerospaziale





Cenni Storici



On board Apollo 11 was a computer called the Apollo Guidance Computer (AGC). It had **2048 words of RAM** (Random Access Memory). Each word comprised 16 binary digits (bits), with a bit being a zero or a one. This means that the Apollo computer had 32,768 bits of RAM memory. In addition, it had **36KB of Read Only Memory** (ROM), which is equivalent to 589,824 bits. This memory is programmed and cannot be changed once it is finalized.



To put that into more concrete terms, the latest phones typically have 4GB of RAM. That is 34,359,738,368 bits. This is more than one million (1,048,576 to be exact) times more memory than the Apollo computer had in RAM. The iPhone also has up to 512GB of ROM memory. That is 4,398,046,511,104 bits, which is more seven million times more than that of the guidance computer.

But memory isn't the only thing that matters. The Apollo 11 computer had a **processor** – an electronic circuit that performs operations on external data sources – which ran at **0.043 MHz**. The latest iPhone's processor is estimated to run at about 2490 MHz. Apple do not advertise the processing speed, but others have calculated it. This means that the iPhone in your pocket has over 100,000 times the processing power of the computer that landed man on the moon 50 years ago.

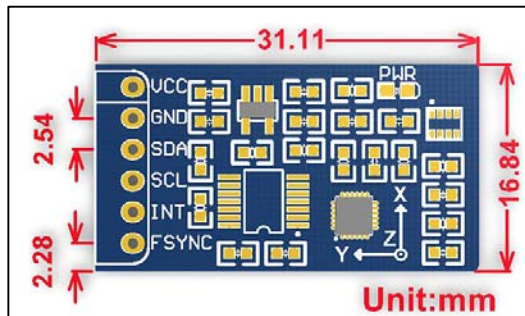
[Apollo Guidance Computer](#)



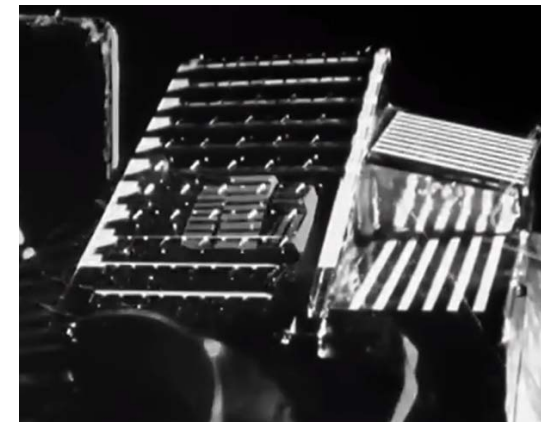
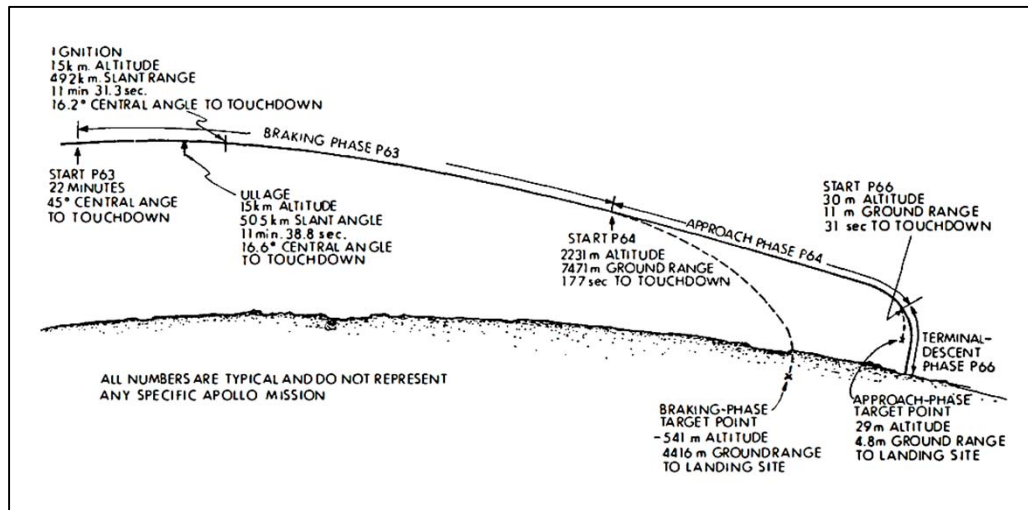
Apollo Guidance



MIT CHARLES STARK DRAPER
CAMBRIDGE, MASSACHUSETTS, 02139
LABORATORY

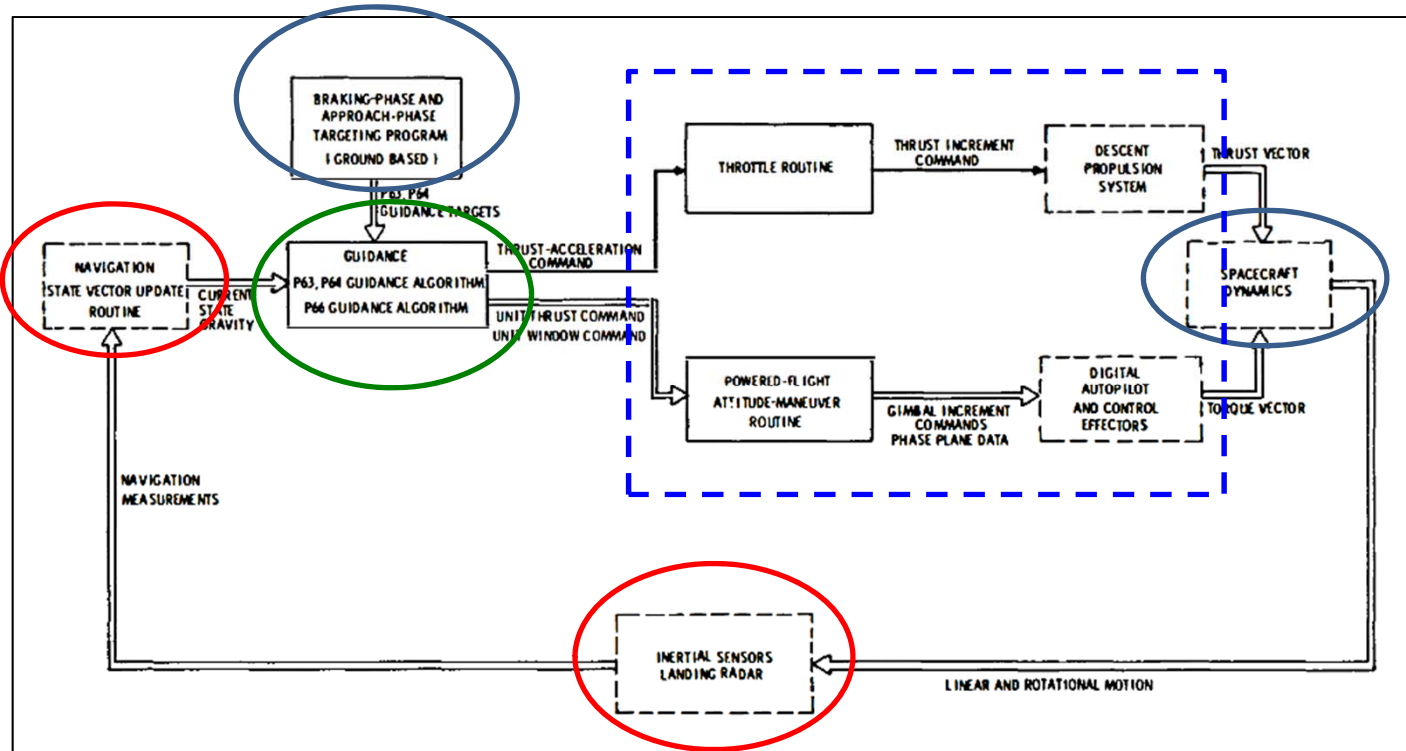


- 3 Gyroscopes
- 3 Accelerometers
- 3 Compass/Magnetometers
- 1 Barometric pressure sensor



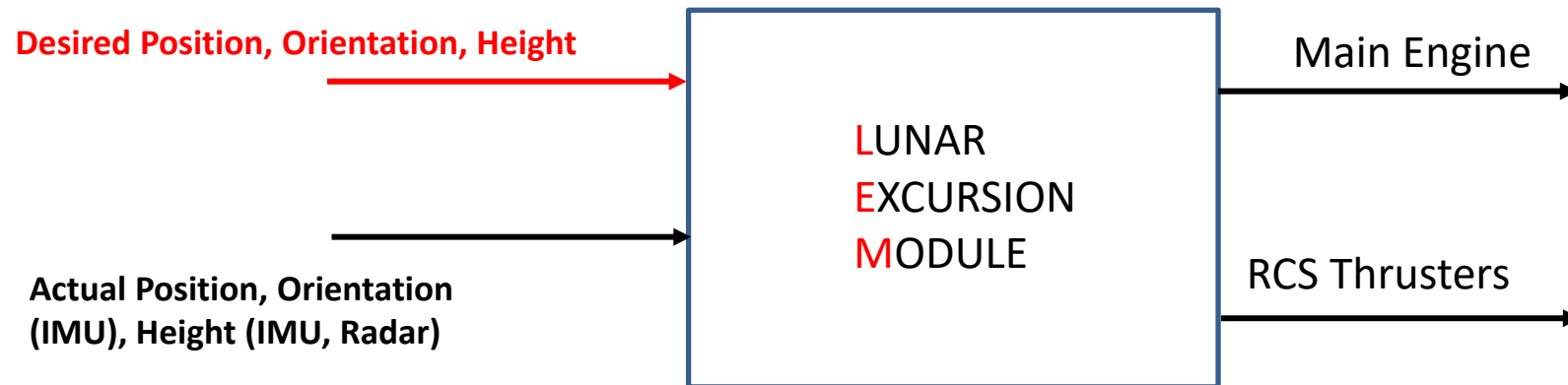
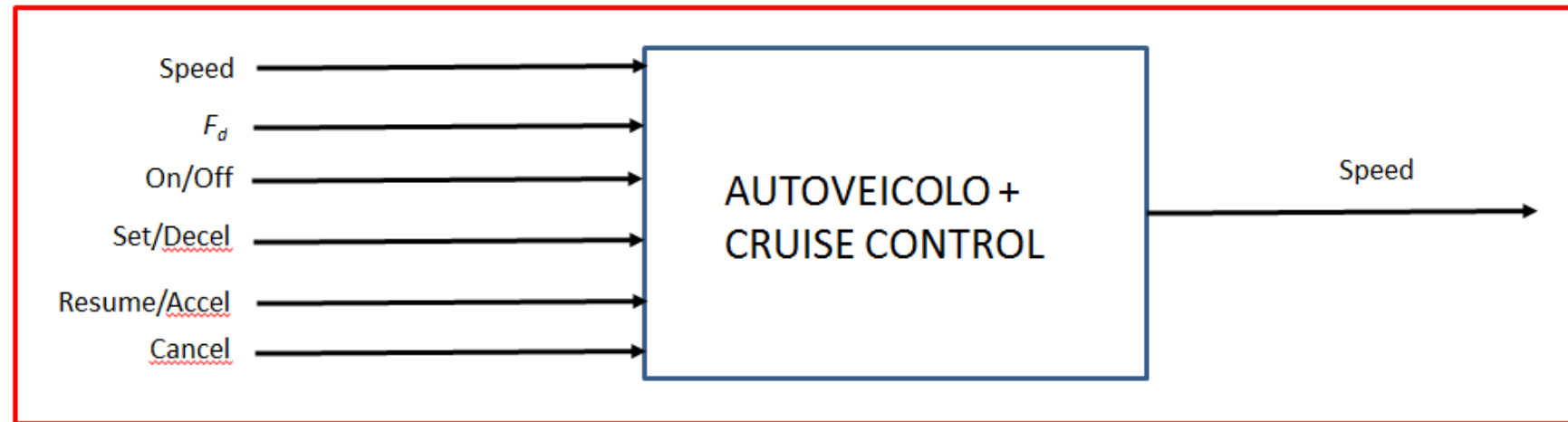


Apollo Guidance



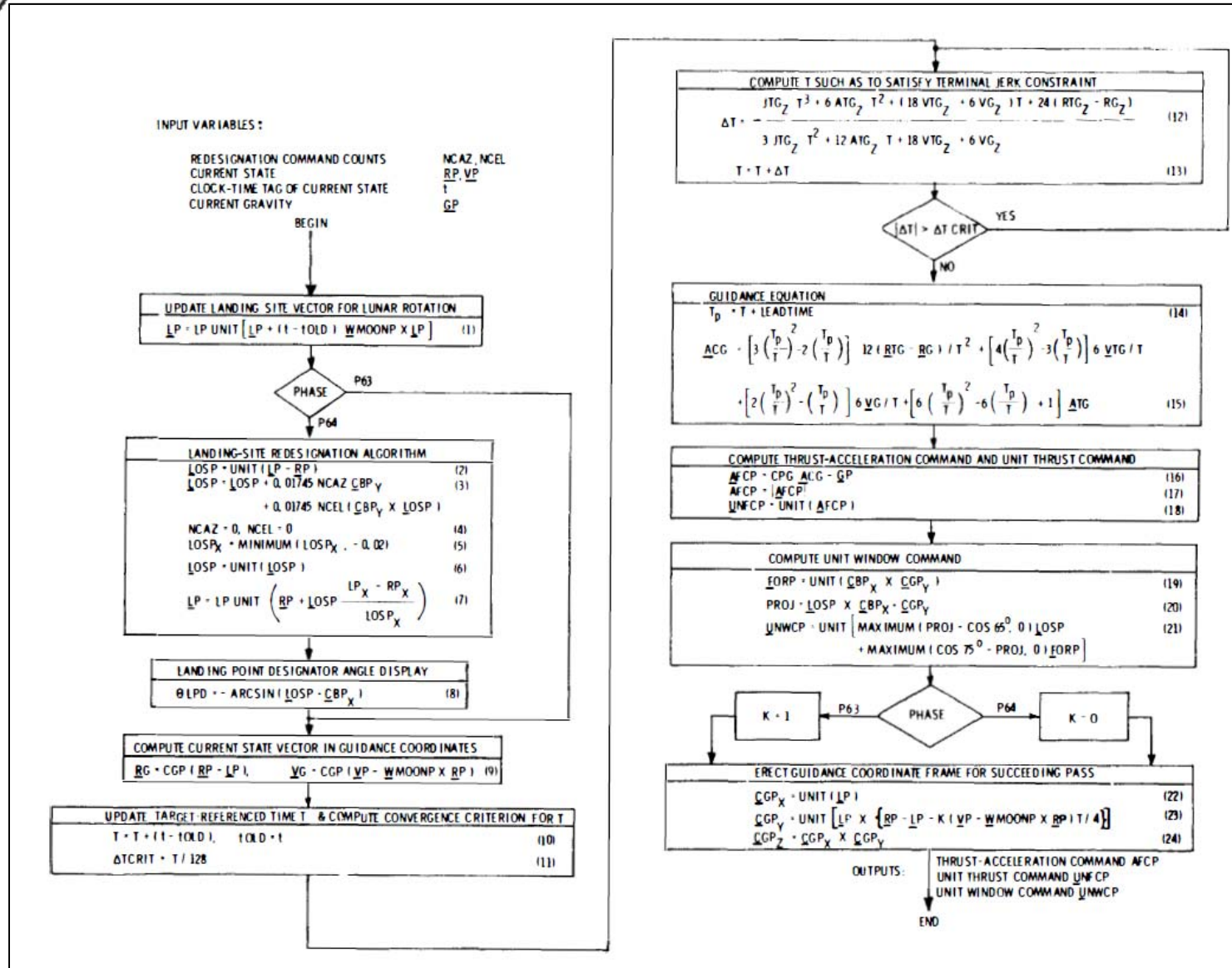


Paragone





Apollo Guidance



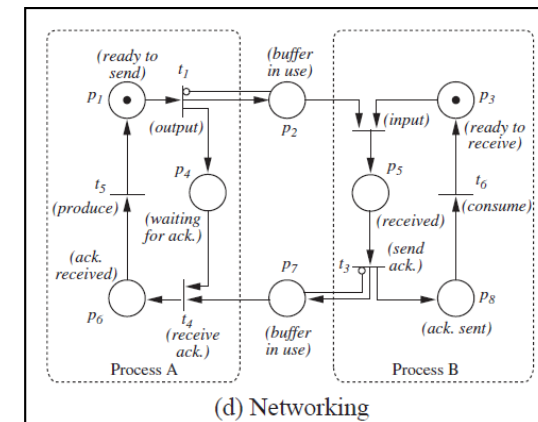
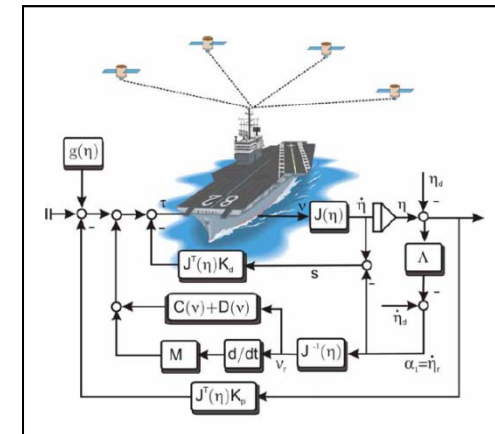


Applicazioni



❑ Aerospazio, Sistemi di Trasporto, Comunicazioni ed Energia

.. Aerospace and transportation encompasses a collection of critically important application areas where control is a key enabling technology. These application areas represent a significant part of the modern world's overall technological capability..



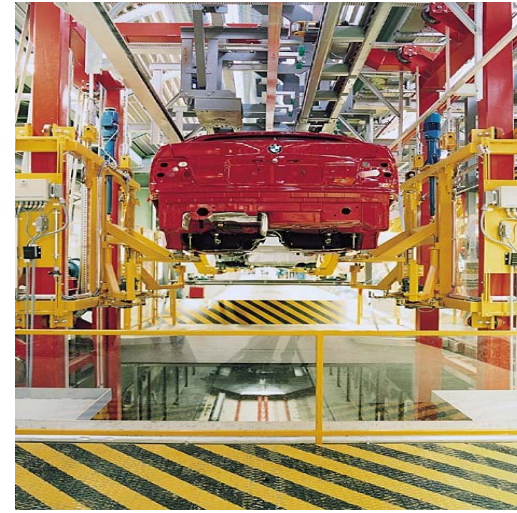


Applicazioni



□ Robotica

..Robotics and intelligent machines refer to a collection of applications involving the development of machines with humanlike behavior. Future applications will involve both increased autonomy and increased interaction with humans and with society. Control is a central element in all of these applications and will be even more important as the next generation of intelligent machines is developed..



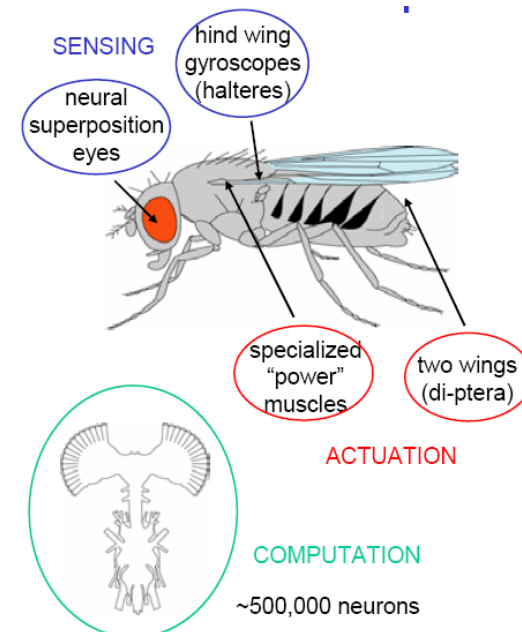
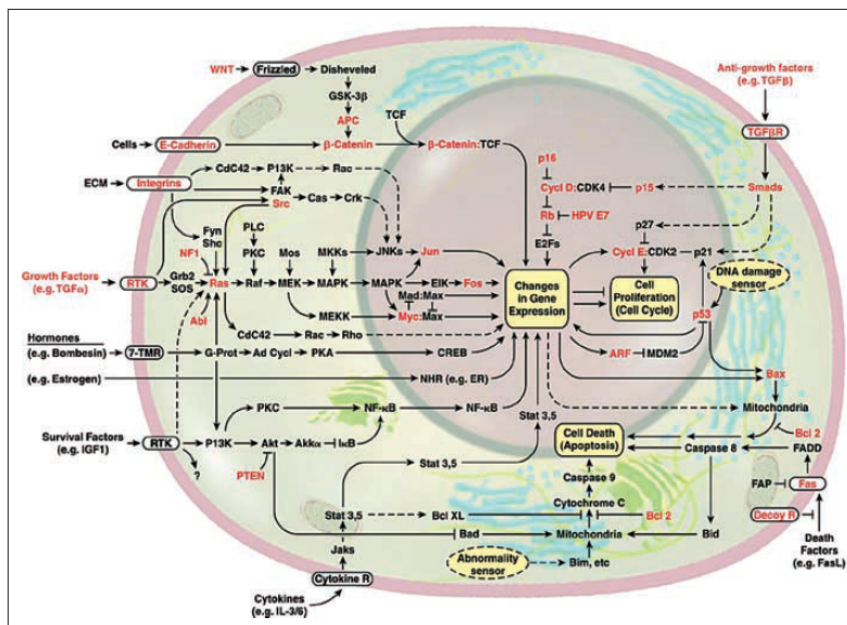


Applicazioni



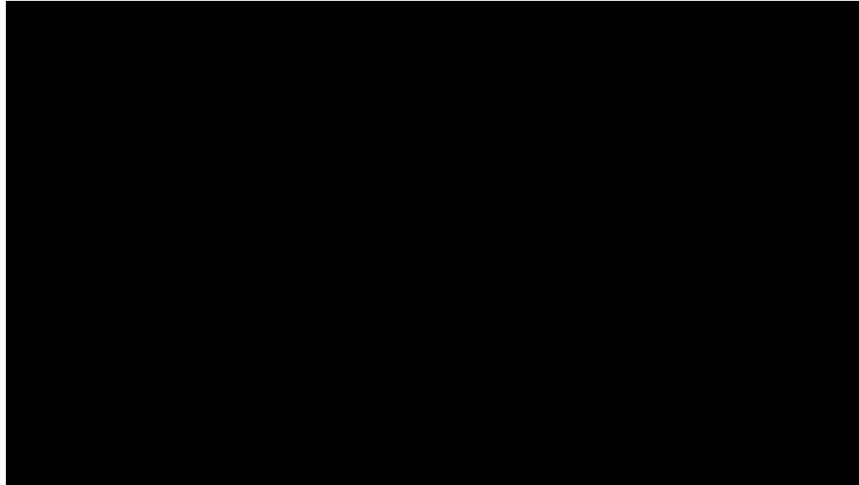
Medicina, Biologia

..A major theme is the science of reverse (and eventually forward) engineering of biological control networks. A wide variety of biological phenomena provide a rich source of examples for control, including gene regulation and signal transduction; hormonal, immunological, and cardiovascular feedback mechanisms; muscular control and locomotion; active sensing, vision, and proprioception; attention and consciousness; and population dynamics and epidemics (Covid ..)

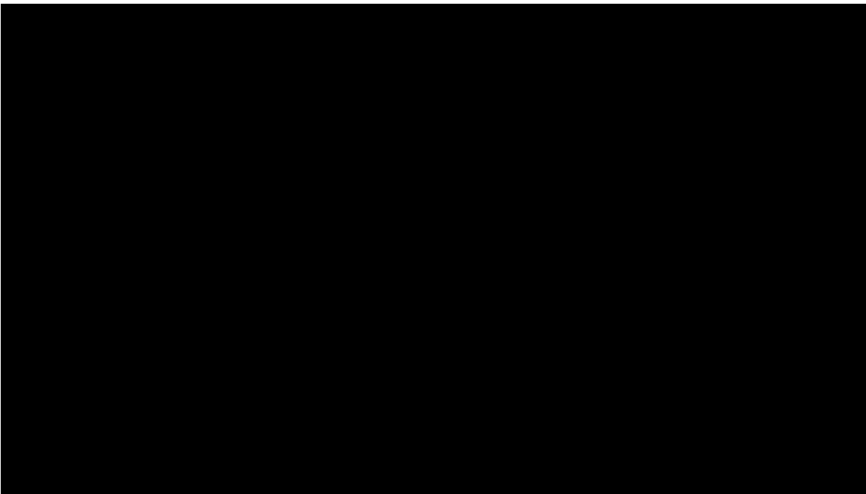




Applicazioni



La strada è ancora
lunga ..



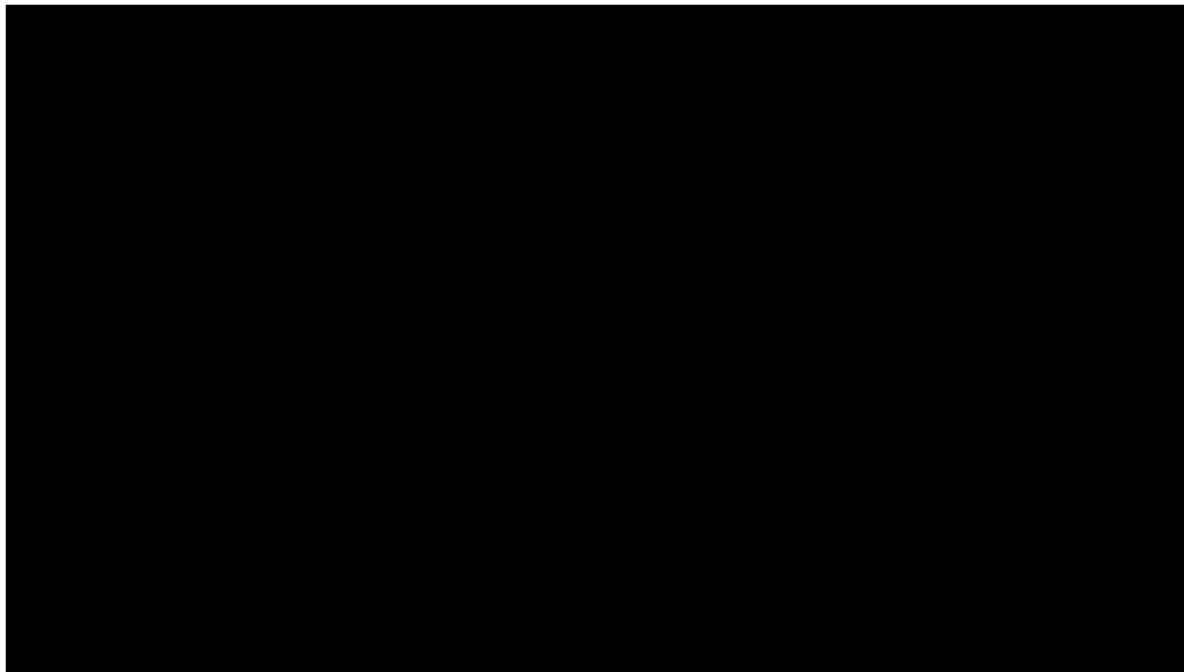
https://www.youtube.com/watch?v=YW_VR3Yx0DE

<https://www.youtube.com/watch?v=44KvHwRHb3A>



Cosa è la Teoria del Controllo?

- ❑ L'insieme di principi e metodi usati per il progetto di elementi che permettano a processi dinamici e impianti di raggiungere e/o mantenere prestazioni desiderate in modo autonomo e che si adattino automaticamente al variare dell'ambiente in cui essi operano ed alla presenza di guasti o perdite parziali di operatività



[Brian Douglas Introduction Lecture](#)

https://www.youtube.com/watch?v=ApMz1-MK9IQ&list=PLn8PRpmsu08pFBqgd_6Bi7msgkWFKL33b



Programma del Corso



- **Descrizione di massima del Programma**

□ L'attività frontale prevede l'approfondimento della maggior parte degli argomenti del programma del corso ed indica i riferimenti necessari per lo studio complementare autonomo. Le lezioni e le esercitazioni sono integrate.

- **Richiami:**

- Richiami di geometria, algebra lineare, algebra delle matrici, numeri complessi ed equazioni differenziali lineari.

- **Introduzione ai sistemi dinamici:**

- Modelli di sistemi dinamici tempo-continui. Descrizioni ingresso/uscita, operatore di ritardo e di integrazione. Calcolo operativo: la trasformata di Laplace. Metodi di anti-trasformazione. Funzione di Trasferimento, algebra a blocchi, sistemi in retroazione. Rappresentazioni ingresso/uscita e ingresso/stato/uscita ovvero in variabili di stato e loro soluzione.

- **Proprietà strutturali, analisi della risposta temporale ed armonica:**

- Sistemi composti. Controllabilità e osservabilità. Forme canoniche di controllo e di osservazione. Stabilità secondo Lyapunov. Criteri di stabilità per sistemi lineari. Criterio di Routh-Hurwitz. Risposta transitoria e a regime, poli dominanti. Risposta armonica per sistemi tempo-continui. Diagrammi di Bode, di Nyquist e di Nichols.



Programma del Corso



- **Elementi di Analisi dei sistemi di controllo:**
 - Azioni di controllo: ciclo aperto e ciclo chiuso, in avanti e in retroazione. Prestazioni generali di un sistema di controllo. Luogo delle radici. Principio del modello interno. Curve M-N. Struttura generale del controllore. Problematiche di sensitività alla variazione dei parametri e di robustezza ad incertezze di modello.
- **Tecniche di sintesi del controllore:**
 - Specifiche generali di progetto (Stabilità, prestazioni e reiezione del disturbo). Sintesi dei sistemi di controllo nel dominio del tempo e della frequenza. Rappresentazioni grafiche, criterio di stabilità di Nyquist, trasformazione da ciclo aperto a ciclo chiuso. Regolatori standard e regole di Ziegler-Nichols. Reti corretttrici. Sistemi con ritardo. Sintesi per tentativi, metodo analitico.
- **Sistemi discreti**
 - Teorema del campionamento
 - Trasformata Z
 - Rappresentazione dinamica dei sistemi discreti nel tempo ed in frequenza
 - Luogo delle radici
 - Sintesi di controllo



Programma del Corso

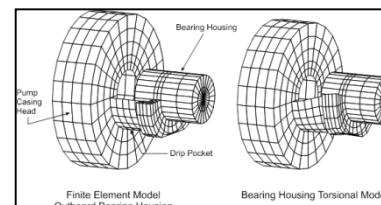
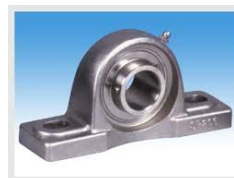


• Strumenti Matematici e Definizioni

- Calcolo differenziale lineare
- Elementi di Geometria ed Algebra Lineare
- Matrici e Numeri Complessi
- Trasformata di Laplace
- Diagrammi di Flusso e a Blocchi

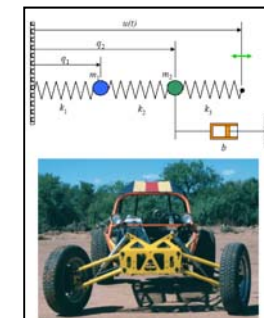
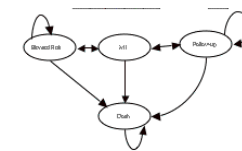
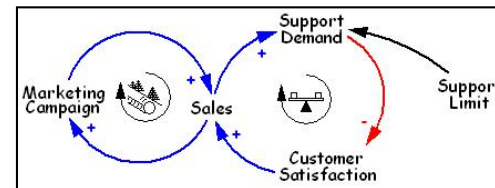
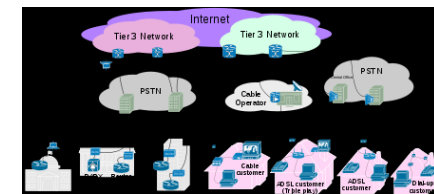
$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \quad y(t) = Ce^{At}x(0) + \int_{\tau=0}^t Ce^{A(t-\tau)}Bu(\tau)d\tau + Du(t)$$

- Definizione di Sistema, Processo
- Componenti del Processo
- Segnali di trasmissione delle informazioni



• Modellistica dei Sistemi Dinamici

- Legami Causa - Effetto
- Approssimazioni
- Astrazioni
- Elementi comuni a Processi diversi

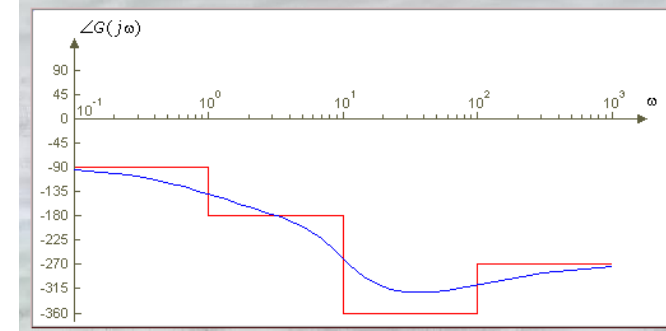
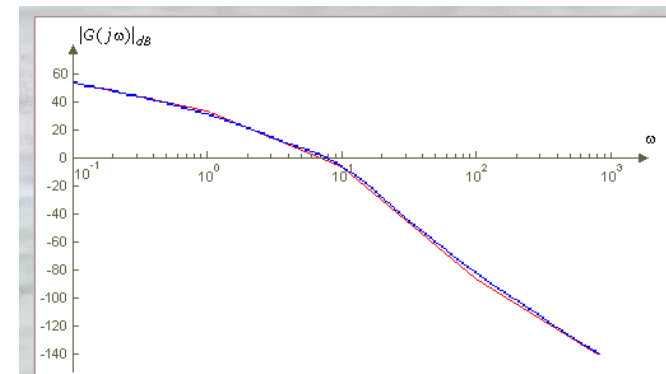
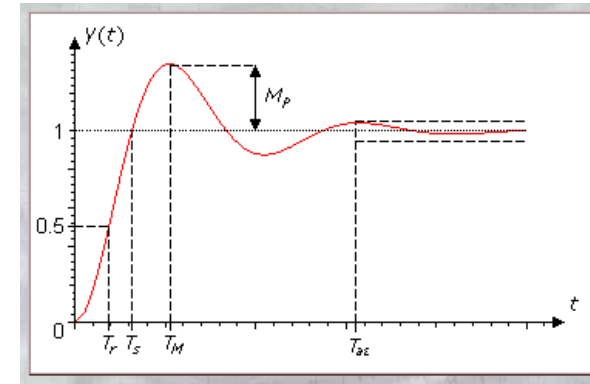
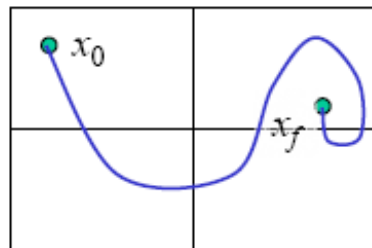
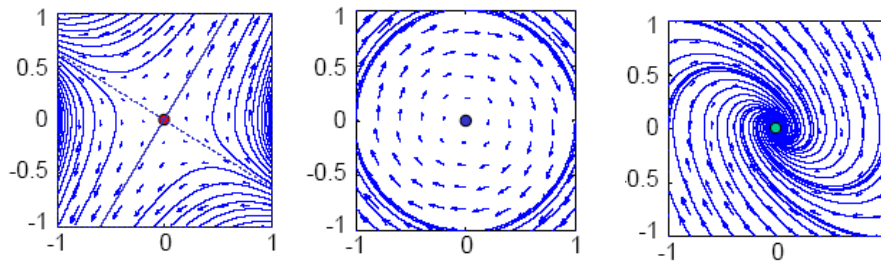




Programma del Corso



- **Analisi di Sistema**
 - Caratteristiche di Stabilità
 - Controllabilità ed Osservabilità
 - Risposta Temporale
 - Risposta in Frequenza





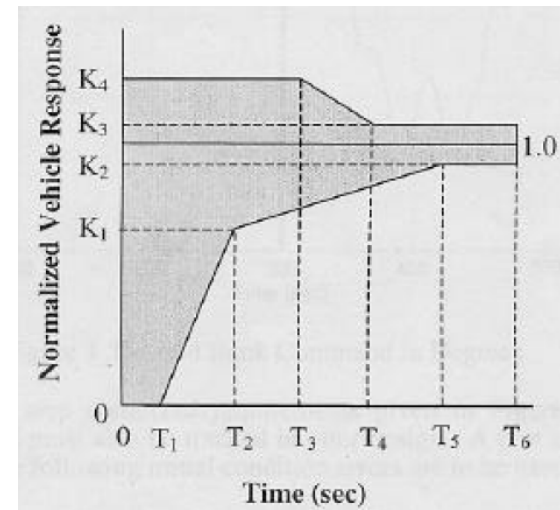
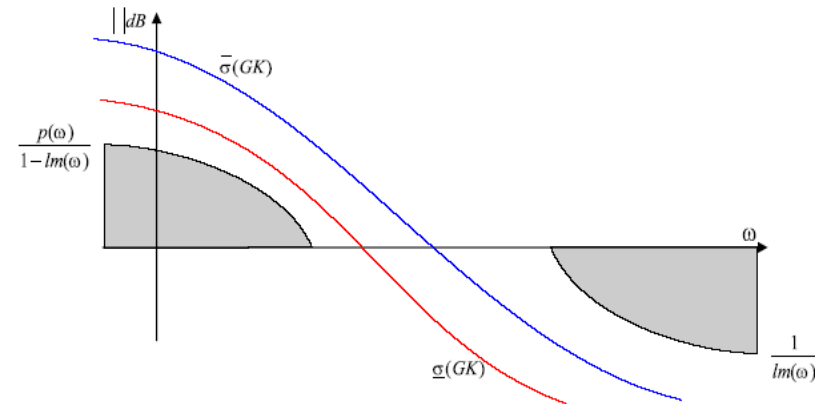
Programma del Corso



- **Specifiche e Struttura di un Sistema di Controllo**

- Stabilità
- Precisione della Risposta
- Errore rispetto alle Specifiche
- Attenuazione dei Disturbi
- Banda Passante
- Insensibilità a Errori di Modello e Rumore nei Componenti

$$K(s) = L\{k(t)\} = K_0 \frac{\prod_i (s + z_i)}{s^r \prod_j (s + p_j)}$$





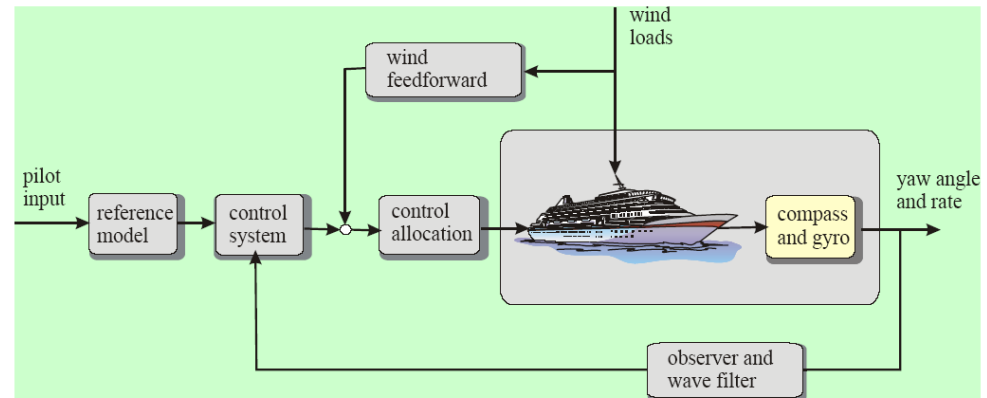
Programma del Corso



• Analisi e Sintesi

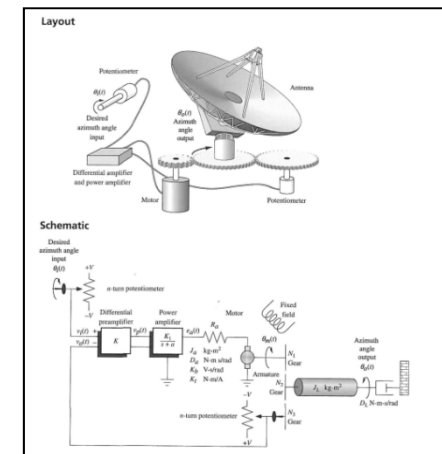
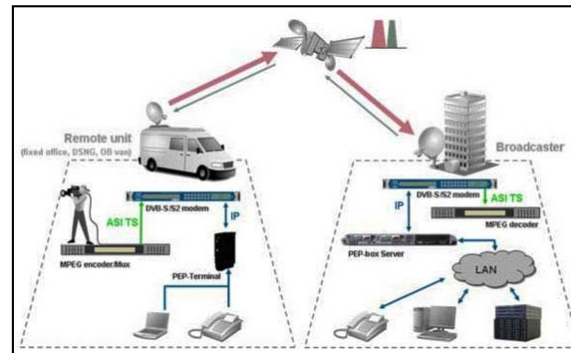
— Strumenti di Analisi e di Sintesi

- Criterio di Routh
- Luogo delle Radici
- Risposta nel Tempo
- Risposta in Frequenza
- Criterio di Nyquist

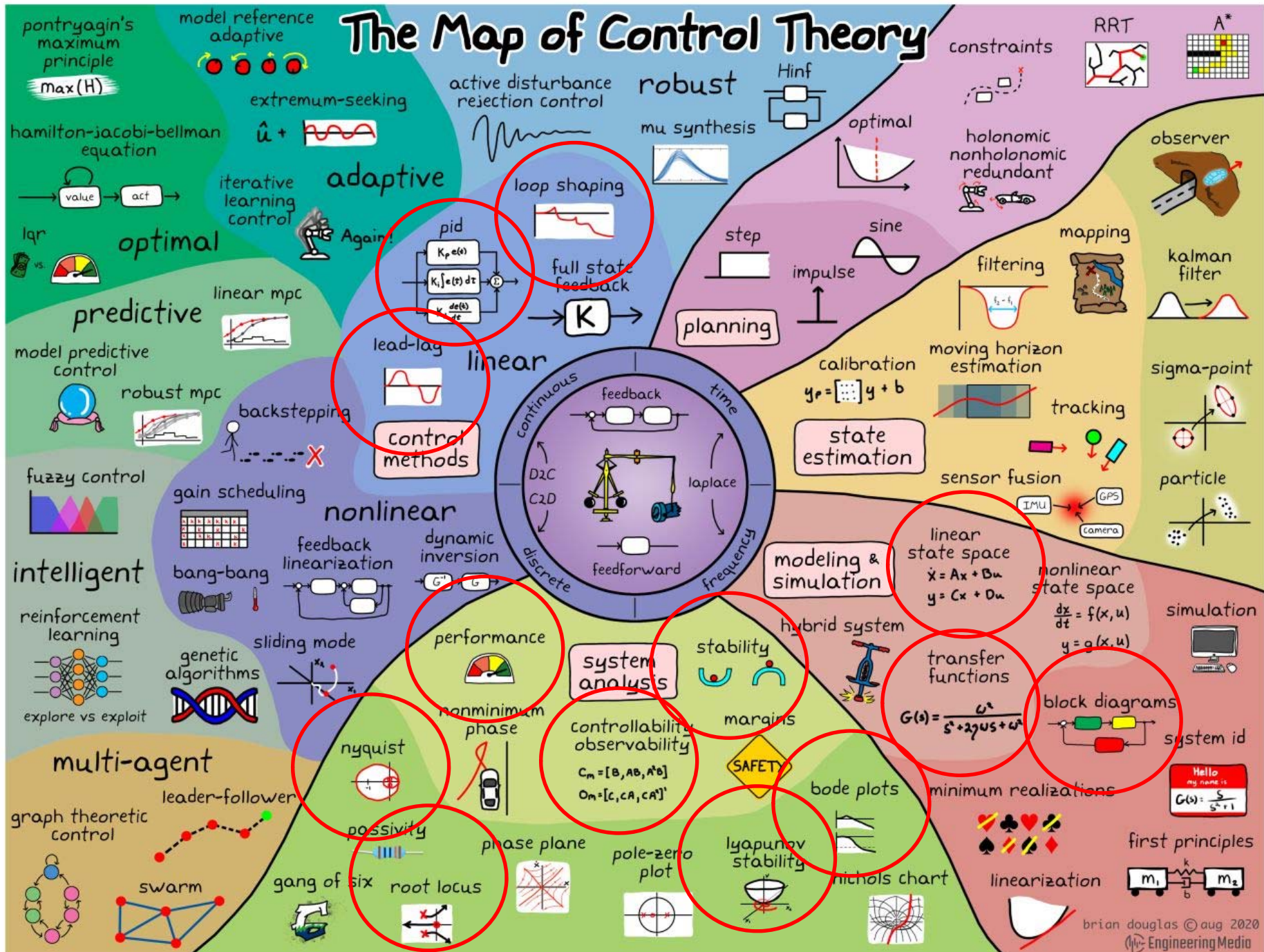


— Controllori Standard

- Controllori PID
- Reti Correttrici
- Filtri PB, PA, ...
- Controllore Statico
- Osservatore



The Map of Control Theory





Riferimenti

- Capitolo 1 Testo di Bolzern
- Capitolo 1 testo di Murray



Introduzione

Richiami

Modellistica

Descrizione

Prop. Strut.

Analisi 1

Analisi 2

Sintesi Prelim.

Contr. Avanzati

Con. Standard

