

Introduzione al corso

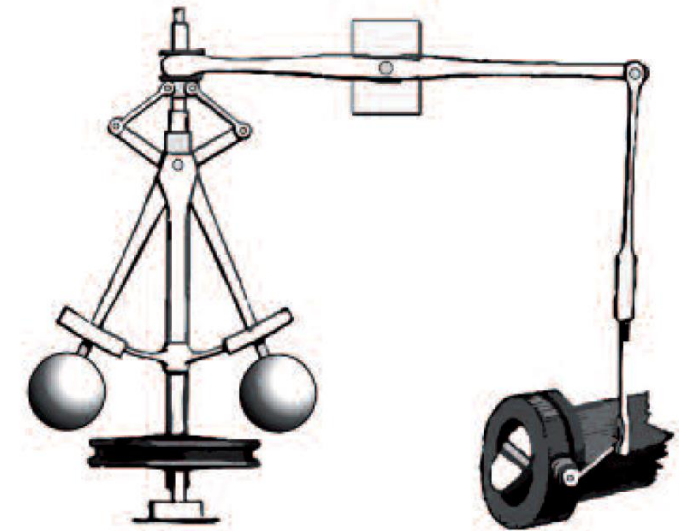
■ Programma del corso

- ◆ Problemi e sistemi di controllo – [Cap. 1]
- ◆ Richiami di modellistica (Fondamenti di Automatica) – [Cap. 2]
- ◆ Sistemi LTI nel dominio del tempo continuo [Cap. 3]
 - Stabilità [Cap. 4]
 - Funzione di trasferimento [Cap. 5]
 - Schemi a blocchi [Cap. 6]
 - Risposta in frequenza [Cap. 7]
- ◆ Sistemi LTI nel dominio del tempo discreto [Cap. 8]
 - Risposta in frequenza [Cap. 9]
- ◆ Sistemi di controllo a tempo continuo: stabilità [Cap. 10]
 - Funzioni di sensitività [Cap. 11]
 - Sintesi nel dominio della frequenza [Cap. 12]
 - Luogo delle radici [Cap. 13]
 - Regolatori standard [Cap. 15]

Storia dell'Automatica

◆ Il regolatore centrifugo di Watt (1788)

- Serviva a tenere costante la velocità di rotazione dell'albero motore nelle macchine a vapore
- A volte aveva problemi di funzionamento...
- James C. Maxwell (1868) discusse i motivi del *buon funzionamento* del regolatore nel lavoro «On governors»
 - «This condition is mathematically equivalent to the condition that all the possible roots, and all the possible parts, of the impossible roots of a certain equation shall be negative»
 - Riuscì a studiare solo il caso di polinomi di terzo grado e si augurò che qualcuno fosse capace di «prevedere» il segno della parte reale delle radici di un polinomio senza doverne calcolare le radici
- Edward J. Routh (1876)
 - Vinse il premio Adams Prize della Royal Society con il saggio in cui presentò il famoso *Criterio di Routh*
 - E.J. Routh fu anche il primo classificato nei Mathematical Tripos dell'Università di Cambridge nel 1854, mentre Maxwell arrivò 'solo' secondo (nel 1893 un certo Bertrand Russell fu 7° e nel 1905 Lord Keynes fu 12°)



◆ Il XX secolo

- Innovazioni ingegneristiche degli anni 40
 - Eletticità
 - Il volo
 - Un velivolo «instabile» è più manovrabile! Capirolo è semplice se si definisce la «stabilità» come la capacità di un sistema dinamico di riassorbire le perturbazioni
 - Meccanismi asserviti o «servomeccanismi» sono gli avi della moderna mecatronica e robotica
 - Anti-Aircraft servo problem (prevedere la traiettoria di un velivolo)
 - James, Nichols, Phillips, *Theory of servomechanisms* (1945)
 - Wiener, *Cybernetics* (1949): controllo e comunicazione nel mondo animale e in quello delle macchine
- La nascita dell'automatica moderna
 - Il ruolo della modellistica matematica
 - G. Box: «tutti i modelli sono sbagliati, ma qualcuno è utile»
 - I. Calvino: «La seconda rivoluzione industriale non si presenta come la prima con immagini schiacciati quali presse di laminatoi; o colate d'acciaio, ma come i bits d'un flusso di informazione che corre sui circuiti sotto forma d'impulsi elettrici. Le macchine di ferro ci sono sempre, ma obbediscono ai bit senza peso»

◆ Il XX secolo

- Mosca 1957: IFAC World Congress
- Presenta un lavoro un certo Rudolf Kalman «On the general theory of control systems»
 - Approccio a spazio di stato
- Ma il suo lavoro più famoso è «A new approach to linear filtering and prediction problems»
 - Nasce il famoso «Filtro di Kalman» di importanza fondamentale in decine di applicazioni
 - È in sostanza un «sensore virtuale», cioè un algoritmo capace di stimare una grandezza misurabile solo in maniera indiretta (es., orientamento di una astronave)
 - sarà uno degli algoritmi principali che porteranno l'uomo sulla luna



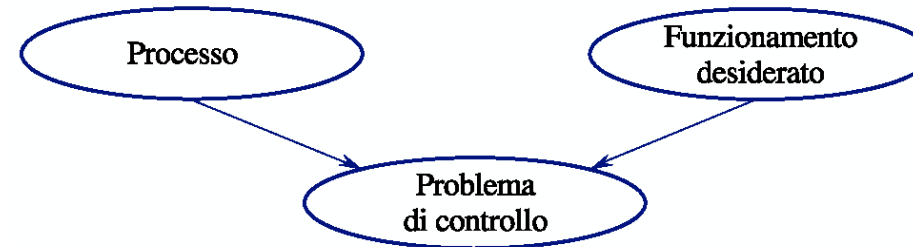
◆ E gli italiani?

- A. Ruberti (Aversa, 1927)
 - Primo ministro dell'Università e della Ricerca Scientifica
 - Primo Commissario Europeo
 - Fondatore di questa Università
 - Ideatore dei Programmi Quadro
- A. Lepschy (Padova, 1931)
 - Primo libero docente di Controlli Automatici
- G. Quazza (Vercelli, 1924)
 - Coordinatore dell'Executive Board dell'IFAC
 - Vittima di un incidente in montagna -> Quazza Medal
- E. Biondi (Catania, 1928)
 - Fondatore del Centro per lo studio della teoria dei sistemi del CNR
 - Fondatore della bioingegneria in Italia



Capitolo 1 – Problemi e sistemi di controllo

- I **problemi di controllo** consistono nell'imporre un **funzionamento desiderato** ad un **processo** assegnato



- ◆ **processo**: apparecchiatura, macchina o fenomeno fisico
- ◆ **funzionamento desiderato**: andamento nel tempo di alcune variabili del processo o grandezze di interesse (**variabile controllata**) coincidente con quello di altre variabili preassegnate (**segnale di riferimento**)
- ◆ **problema di controllo** ↳ Quella che vogliamo noi descritto dal segnale di riferimento
 - Obiettivo 1: variabile controllata = segnale di riferimento ↳ diverse da quelle controllate
 - l'obiettivo si raggiunge "manipolando" alcune variabili del processo (**variabile di controllo**) che determinano cambiamenti della variabile controllata
 - segnale di riferimento costante → **regolazione** → ↳ Algoritmo regolatore
 - segnale di riferimento variabile → **asservimento**
 - Obiettivo 2: reiezione dei disturbi

■ Concetto di **incertezza**

- ◆ l'andamento della variabile controllata non è influenzato solo dalla variabile di controllo ma anche da altre variabili non manipolabili (**disturbi**) → Se le potessimo controllare sarebbero variabili di controllo.
- ◆ l'andamento atteso della variabile controllata dipende dal valore di alcuni **parametri** interni al processo → Parametri. Se sono diversi non funziona un certo.
 - se il valore di tali parametri è **incerto**, l'andamento della variabile controllata non è prevedibile con esattezza
 - anche i disturbi possono avere un andamento **incerto**
- ◆ **condizioni nominali**
 - i parametri del processo hanno tutti i loro valori nominali
 - i disturbi hanno tutti il loro andamento nominale
- ◆ **condizioni perturbate**
 - i parametri del processo hanno valori incerti
 - i disturbi hanno andamento incerto

■ Esempi

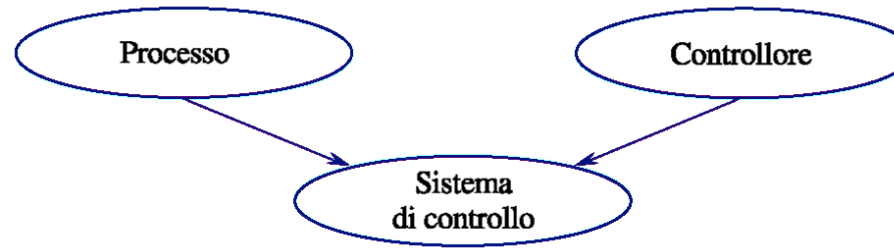
◆ controllo di un veicolo in un tratto di strada pianeggiante

- variabile controllata: posizione e velocità nel piano (dimensione: 4) *2 posizioni e 2 componenti sul piano*
- segnale di riferimento: posizione e velocità desiderate (dimensione: 4)
- variabile di controllo: posizione del volante, del freno, dell'acceleratore, del cambio (dimensione: 4) *↳ angolo di sterzo*
- parametri (incerti): massa del veicolo, coefficiente, attrito tra pneumatici e fondo stradale, efficienza del motore, ecc...
- disturbi (incerti): vento (intensità, direzione e verso della sua velocità), ...

◆ climatizzazione di un edificio

- variabile controllata: temperatura nei locali dell'edificio (dim. n)
- segnale di riferimento: temperatura desiderata nei locali (dim. n)
- variabile di controllo: portate d'aria inviate nei locali (dim. n)
- parametri (incerti): coefficienti di scambio termico, efficienza scambiatori di calore
- disturbi (incerti): insolazione, temperatura esterna, ...

- I **sistemi di controllo** consistono nel **complesso del processo e del regolatore** (o **controllore**)



- ◆ **controllore**: dispositivo che ha il compito di determinare l'andamento della **variabile controllata** tale da raggiungere l'**obiettivo di controllo**
- **sistemi di controllo naturali**: controllore e processo sono intimamente connessi (es. sistema di **regolazione della pressione arteriosa** o della **temperatura corporea**)
 - **sistemi di controllo artificiali**: il controllore è un dispositivo esterno al processo
 - **manuali**: l'azione di controllo è **esercitata dall'uomo** (es. pilota aereo)
 - **automatici**: l'azione di controllo è esercitata da un dispositivo appositamente progettato (es. cruise control autoveicolo)

■ Obiettivo ideale

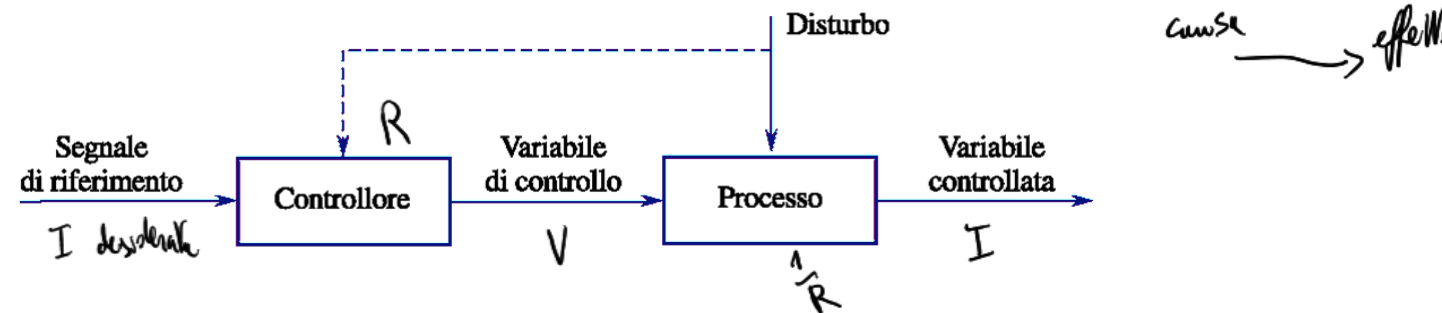
- ◆ variabile controllata = segnale di riferimento
- ◆ è di fatto irraggiungibile

■ Obiettivo pratico

- ◆ variabile controllata \approx segnale di riferimento
- ◆ l'approssimazione va precisata caso per caso
- ◆ viene tradotto nell'imporre che l'errore
 - errore = segnale di riferimento - variabile controllata
- ◆ soddisfi un insieme di **requisiti** (o **specifiche**) che esprimono la necessità che esso risulti "accettabilmente piccolo" in condizioni nominali e perturbate *rende tutto difficile*
- ◆ il significato di "accettabilmente piccolo" verrà chiarito in seguito
- ◆ a ciò si aggiunge un requisito che garantisca la **moderazione** della variabile di controllo *↳ deve raggiungere obiettivo senza spendere troppa energia*
- ◆ i due requisiti di sopra sono parzialmente in contrasto (es. elevata velocità di risposta di processi "naturalmente" lenti)

Es: fino a 300 km/h

■ Sistema di controllo in anello aperto *vedremo meglio poi*



- ◆ il **controllore** ha informazione solo sul segnale di riferimento ed eventualmente sul disturbo
- ◆ si parla anche di schema di controllo ad **azione diretta** o in **feedforward**
- ◆ vedremo che **soffre di scarsa robustezza** alle incertezze

Interconnessione in serie → uscita del controllore = input di processo.

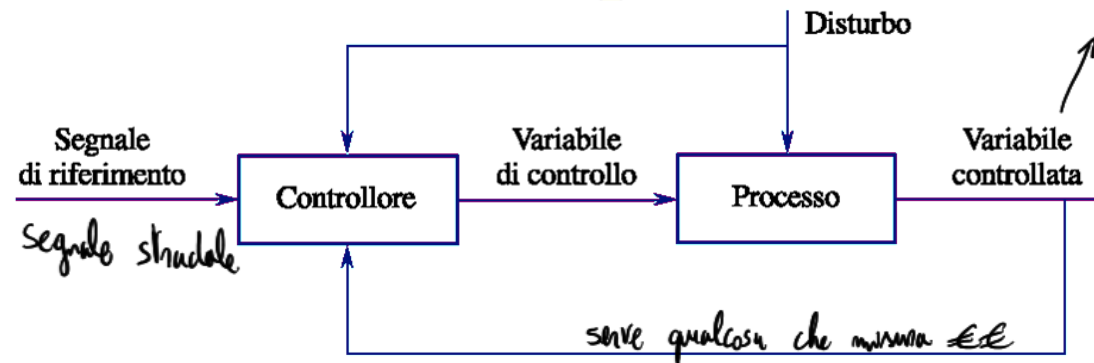
Funziona bene solo in condiz. nominali.

Es: $V = R \cdot i$ voglio corrente. $\Rightarrow i = \frac{V}{R}$. $V =$ variabile di controllo, es. a 1V per avere $\frac{1}{R}$ A.

$\frac{1}{R}$ = segnale di riferimento

Se R non è esatto, la corrente cambia e nasce errore

■ Sistema di controllo in anello chiuso \Rightarrow Per migliorare

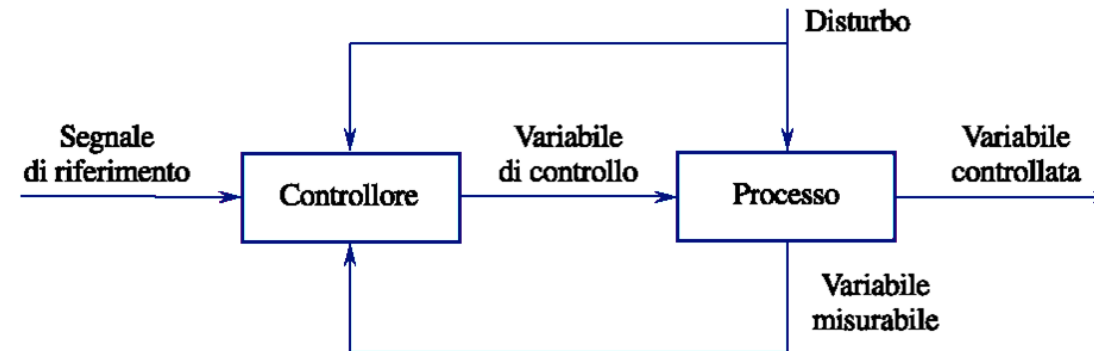


Confronto misura di v. controllata
e segnale riferimento.

Processo agisce sul controllore
e viceversa.

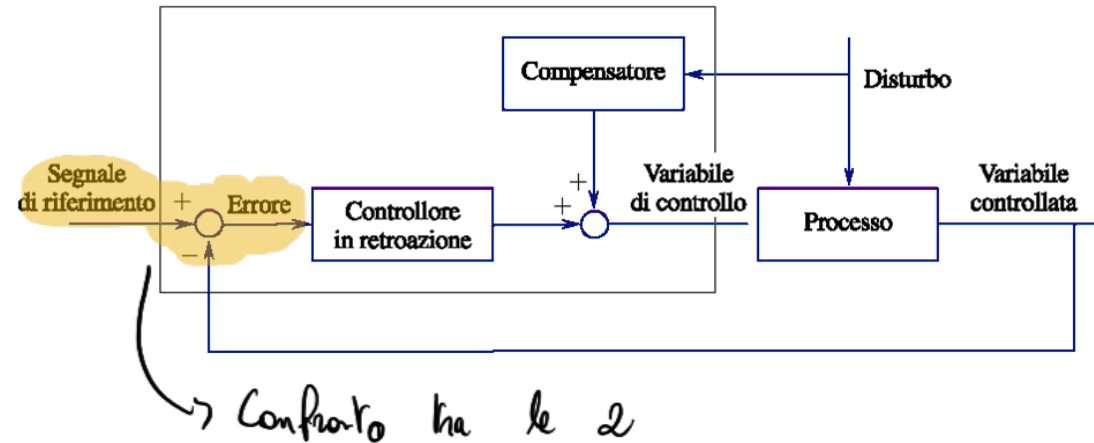
- ◆ il controllore ha informazione sia sul segnale di riferimento che sulla variabile controllata \rightarrow + complesso!
- ◆ se eventualmente il disturbo è misurabile ma **non manipolabile**, la sua compensazione è in ogni caso un'azione in anello aperto in quanto esso non dipende dalla variabile di controllo (da cui dipende invece la variabile controllata) cioè controllo su variabile controllata anche su base del disturbo.
- ◆ si parla anche di schema di controllo in **retroazione** o in **feedback** \rightarrow può essere pericolosa.
- ◆ vedremo che offre un buon grado di **robustezza** alle incertezze

■ Sistema di controllo in anello chiuso (2)



- ◆ analogo al precedente, **ma le informazioni sulla variabile controllata sono ottenute in maniera indiretta attraverso la misura di una variabile alternativa**
- ◆ ad es. nei reattori chimici **le variabili controllate sono le concentrazioni (difficilmente misurabili) mentre si retroazionano le temperature (facilmente misurabili)**
- ◆ è chiaro quindi che il controllo in retroazione è generalmente **più costoso** rispetto a quello in anello aperto
 - occorrono dispositivi in grado di effettuare la misura (**trasduttori**)

■ Sistema di controllo in anello chiuso (3)

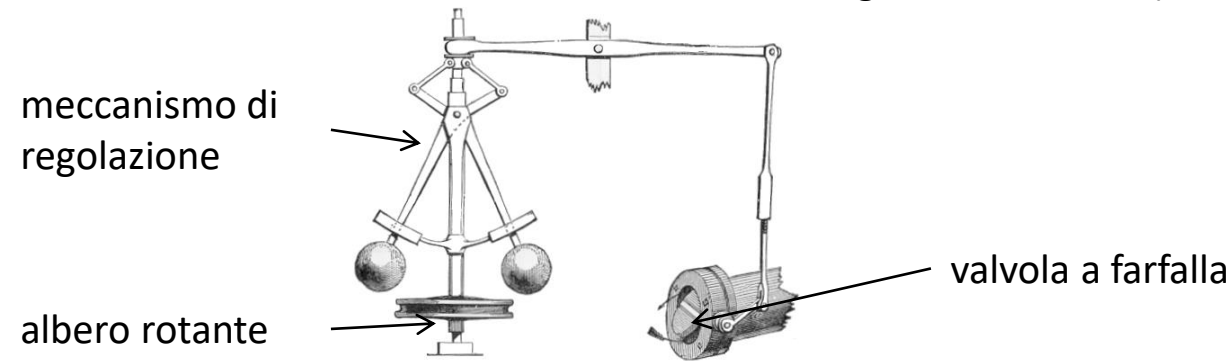


- ◆ il calcolo della variabile di controllo è sempre effettuato sulla base di un confronto tra variabile controllata e segnale di riferimento (**errore**)
- ◆ il **controllore** è costituito dal complesso di **controllore in retroazione e compensatore** e dei nodi **sommatori**
- ◆ tale struttura di controllo è certamente molto “potente” ma va progettata con attenzione in quanto può facilmente portare a funzionamenti non “graditi” (**instabilità**)

↳ piccola perturbazione → allarmamento forte del sistema

■ Aspetti realizzativi

- ◆ i primi controllori sono stati realizzati tramite sistemi meccanici
 - il primo controllore in retroazione della storia è il regolatore di Watt (1788)



- misurando la velocità angolare di un motore attraverso l'albero rotante, un meccanismo manovra opportunamente la valvola a farfalla di un motore per regolarne la velocità ad un valore costante
- ◆ fin dagli inizi del XX secolo i dispositivi di regolazione sono stati realizzati tramite sistemi idraulici e pneumatici dotati di maggiore flessibilità rispetto ai meccanismi, ma di notevole peso e ingombro
- ◆ la flessibilità è via via aumentata ed il peso e le dimensioni diminuiti con l'uso di regolatori realizzati tramite circuiti elettronici analogici
- ◆ oggi quasi tutti i controllori non sono altro che algoritmi eseguiti su microprocessori opportunamente programmati

■ Controllo di stabilità (ESP)

◆ Test dell'alce (moose test)

- Obiettivo: evitare capottamento del veicolo in caso di sterzata improvvisa
- Attuatori: coppia motore e coppia frenante alle singole ruote
- Sensori: accelerometri e sensori di velocità alle singole ruote



■ Adaptive Cruise Control (ACC)

◆ Guida in autostrada

- Obiettivo: mantenere una data velocità di crociera e la distanza dal veicolo che precede
- Attuatori: coppia motore e coppia frenante alle singole ruote
- Sensori: sensori di velocità alle singole ruote, radar (o camera)



■ Sistema di difesa missilistico

◆ Target tracking

- Obiettivo: colpire missili balistici
- Attuatori: sistema di lancio e comando missile
- Sensori: radar

■ Robotica

◆ Braccio manipolatore

- Obiettivo: compito di pick&place
- Attuatori: motori ai giunti e nel gripper
- Sensori: encoder ai giunti, sensori tattili nel gripper

Approved for Public Release
19-MDA-9906 (22 Jan 19)

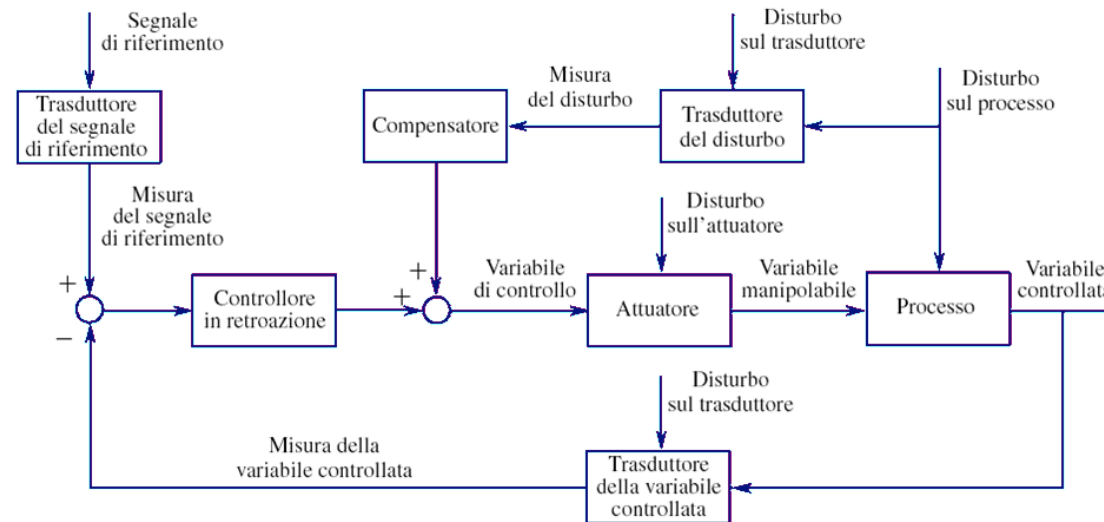
Two-fingered In-hand Object Handling Based on Force/Tactile Feedback

M. Costanzo, G. De Maria and C. Natale

 Università
degli Studi
della Campania
Luigi Vanvitelli
Scuola Politecnica e
delle Scienze di Base
Dipartimento di Ingegneria

“Additional experiments”

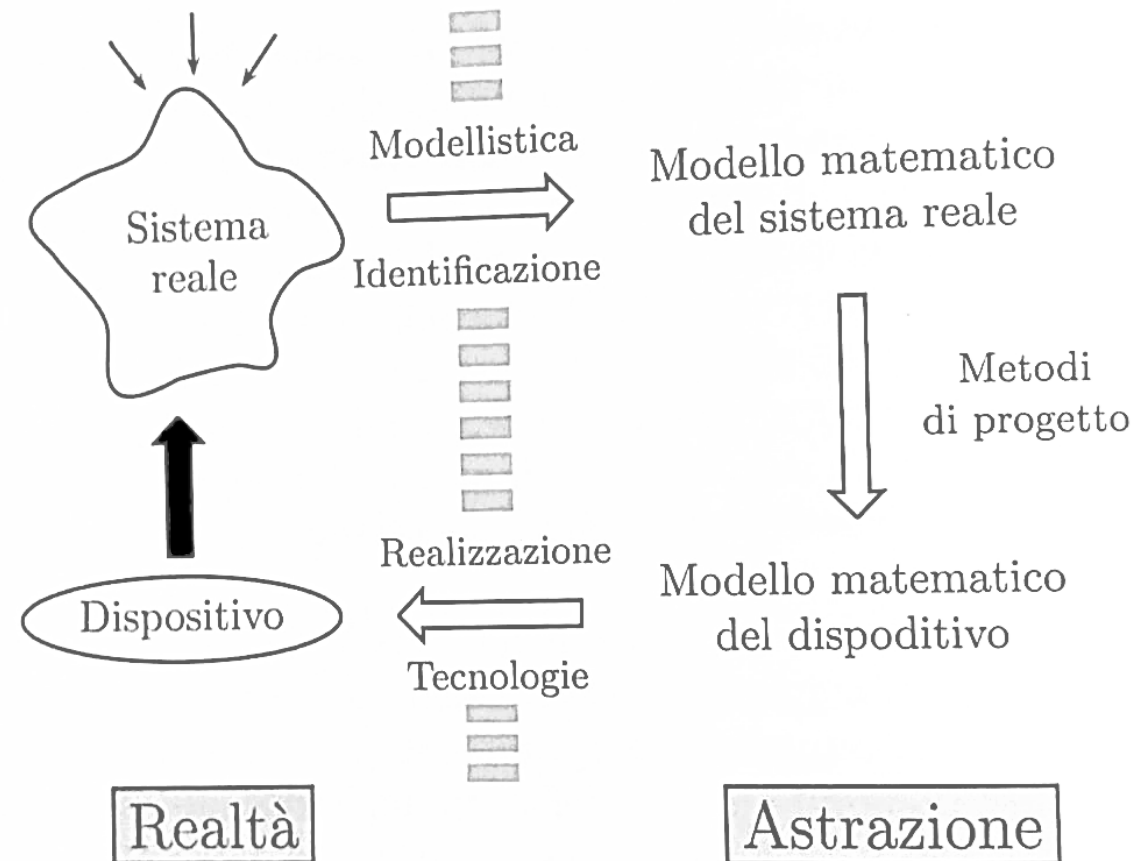
■ Strumentazione di processo



- ◆ la connessione di un processo al controllore può avvenire solo tramite l'uso di appropriati dispositivi
 - **trasduttori** in grado di fornire al controllore un segnale compatibile con la sua tecnologia realizzativa (di solito elettrico)
 - **attuatori** in grado di trasferire al processo la variabile manipolabile con un livello di potenza (di tipo compatibile con la natura del processo) sufficiente alla realizzazione dell'obiettivo di controllo
 - ad esempio in un robot la v.m. è una coppia e la v.c. è una tensione

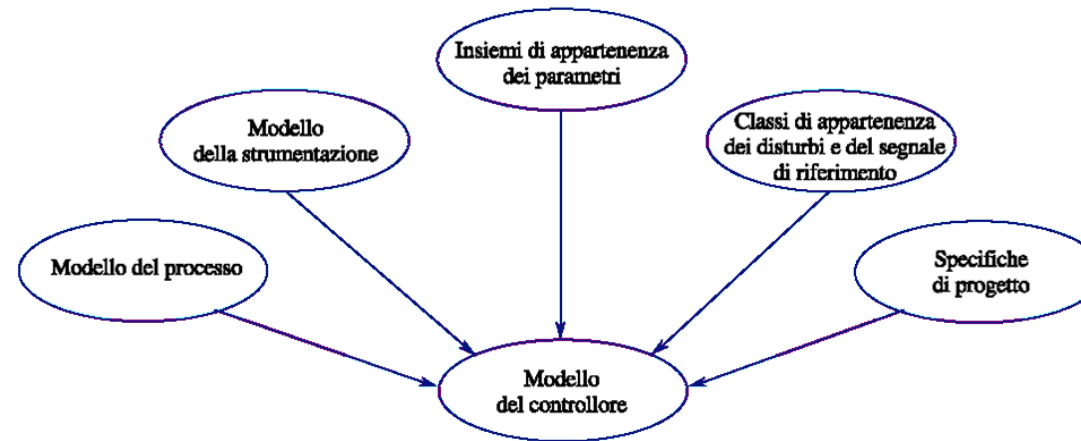
Ruolo della modellistica matematica

- ◆ nelle applicazioni i processi da controllare possono essere di natura molto diversa
- ◆ la stessa tecnologia realizzativa dei controllori è molto varia
- ◆ come è possibile trattare i problemi di controllo nei vari ambiti applicativi e inoltre prescindendo il più possibile dalla tecnologia del sistema di controllo?
- ◆ la teoria del controllo è basata sull'uso estensivo dei modelli matematici che avete avuto modo di trattare ampiamente nel corso di modellistica e simulazione
 - riformulazione del problema di controllo in termini puramente matematici
 - descrizione matematica (modelli) degli elementi costitutivi del sistema di controllo



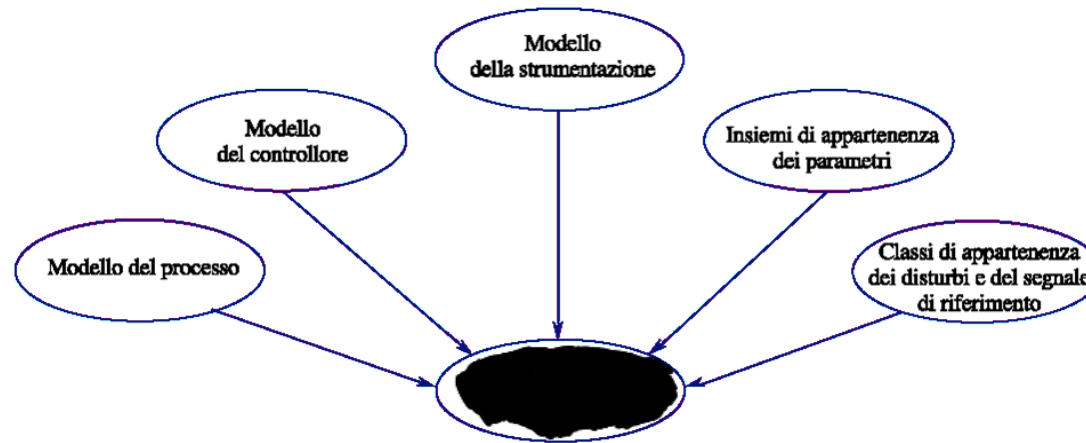
La conoscenza non può derivare dall'esperienza sola, ma occorre il paragone fra ciò che lo spirito umano ha concepito e ciò che ha osservato (A. Einstein)

■ Problema di sintesi



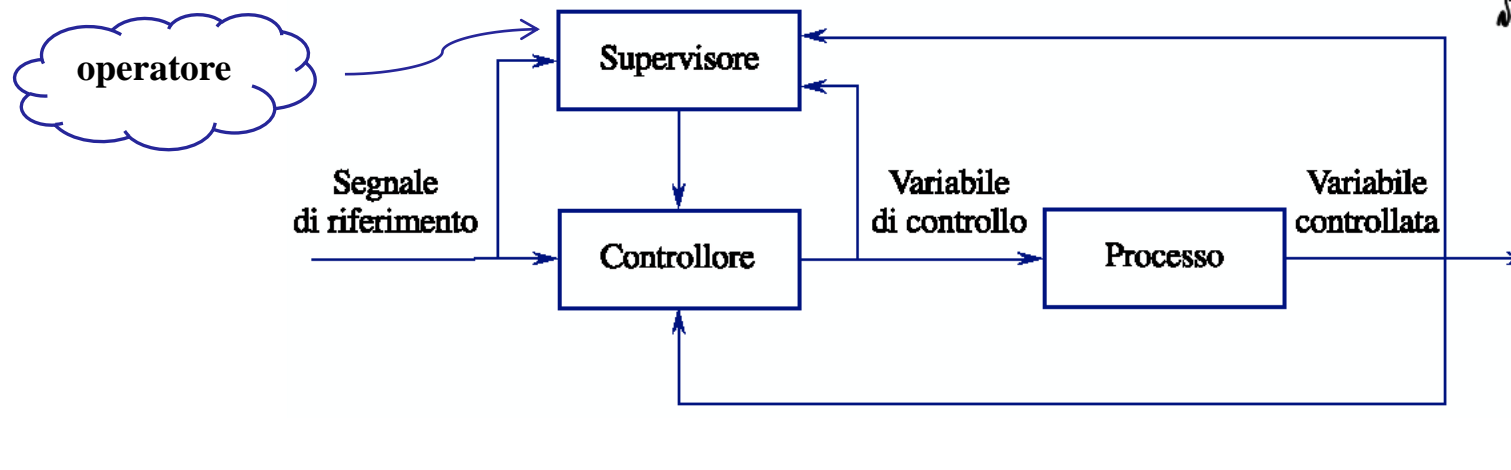
- ◆ la soluzione di un problema di controllo richiede
 - la riformulazione matematica del problema
 - la determinazione del modello matematico del controllore (**progetto** o **sintesi**)
 - la realizzazione del controllore
- ◆ il progetto è svolto nel “mondo della matematica” per cui può prescindere dalla natura fisica del problema
- ◆ le tre fasi non sono puramente sequenziali
 - ad es. in fase di sintesi occorre sempre porsi anche problemi di realizzabilità

■ Problema di analisi



- ◆ la valutazione delle prestazioni di un sistema di controllo è indispensabile al termine del progetto del regolatore per verificare che tutti i requisiti siano soddisfatti, sia quelli esplicitamente tenuti in conto che quelli trascurati
- ◆ metodi di analisi sono particolarmente utili anche in fase di progetto con tecniche di tipo trial and error
- ◆ una tecnica di analisi di grande importanza è la simulazione
 - simulazione digitale ed analogica
 - modello di dettaglio e modello per il progetto

■ Controllo, supervisione e automazione

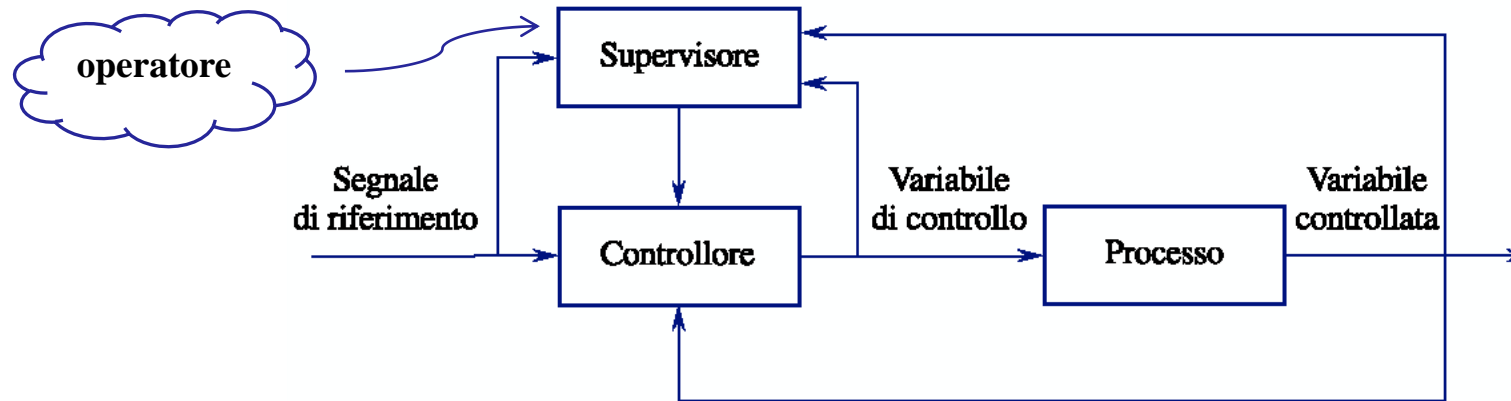


Non limitati a dispositivi che
impongono comportamento desiderato

gestisce interconnessione
tra i vari sistemi

- ◆ il **supervisore** è una sorta di **controllore di secondo livello** le cui funzioni sono
 - raccolta dati su variabili di controllo e controllata per fini
 - statistici (**SCADA**)
 - di riprogettazione del controllore (**controllo adattativo**)
 - diagnostica di guasti a: processo, controllore, strumentazione
 - gestione di situazioni di emergenza
 - alcune di tali funzioni richiedono l'intervento dell'**operatore** attraverso l'uso di una **interfaccia uomo-macchina**

■ Controllo, supervisione e automazione (2)



- ◆ in un **impianto automatizzato** sono presenti diversi sistemi di controllo di solito organizzati in **celle**
 - il comportamento desiderato della cella è una **sequenza di eventi** (non necessariamente temporizzati)
 - la **corretta sequenza di operazioni di ciascuna cella è controllata da un controllore logico programmabile (PLC)** → *Su cui gira il programma del supervisore*
 - il controllore deve anche essere in grado di gestire situazioni di emergenza, guasti e situazioni anomale (**condizioni perturbate**)
 - la metodologia che consente di trattare tali problemi è la teoria del **controllo dei sistemi ad eventi discreti** *perché attende un evento tipo l'operto che schiaccia.*
 - gli strumenti matematici usati sono **automi a stati finiti** e **reti di Petri**