



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

*Il Controllo Automatico:
una tecnologia abilitante e pervasiva*

*Alberto Isidori
11 Febbraio 2022*



Feedback Systems

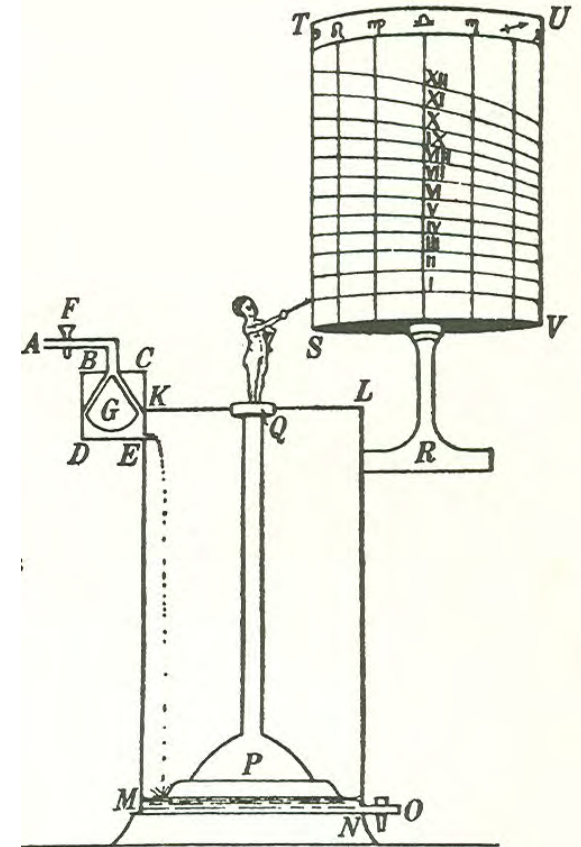
Il nucleo di ogni sistema di Controllo Automatico è l'idea di *feedback*.

Gli umani hanno sempre copiato la natura nella concezione delle loro invenzioni: l'idea di *feedback* non fa eccezione.

L'introduzione di questo concetto nel progetto di dispositivi concepiti dall'uomo risale al secolo d'oro della civiltà ellenistica (III a.C.).

Lo studioso **Ktesibios**, che ha vissuto in Alessandria (circa 240-280 a.C.) e il cui lavoro è stato tramandato a noi da Vitruvio (*de Architectura*) è accreditato per l'invenzione del primo dispositivo contenente un meccanismo di *feedback*:

la regolazione di livello in un orologio ad acqua.

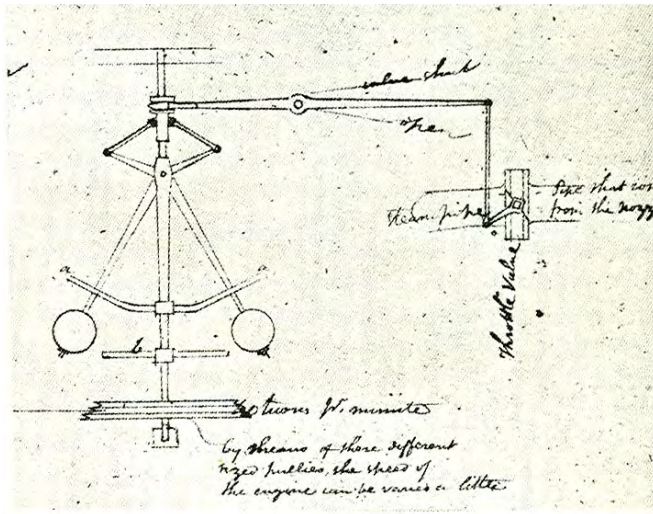




Feedback Systems

L'idea di feedback, per moderare la velocità di apparati rotanti, viene utilizzata - nel XVIII secolo – per la concezione del *centrifugal governor*.

Nel 1787 **T. Mead** brevetta un dispositivo di questo genere per la regolazione della velocità in un **mulino a vento**.



Nel 1789, **Boulton & Watt** usano lo stesso principio per controllare la valvola di ammissione del vapore.

Il Controllo = la tecnologia abilitante nella prima rivoluzione industriale.

Quando la velocità aumenta le masse si allontanano dall'asse e, **mediante il tiro di una fune**, la tela viene arrotolata: l'area delle pale si riduce



Le radici della Teoria del Controllo Automatico sono illustri. Sin dall'inizio, si è nutrita dei contributi rigorosi di matematici e fisici e della creatività di grandi ingegneri.

Tra i grandi fisici del XIX secolo, **James C. Maxwell**:

ON GOVERNORS

Putting $(dA/d\phi)\omega = K$, the equations become

$$(25) \quad A \frac{d^2\theta}{dt^2} + X \frac{d\theta}{dt} + K \frac{d\phi}{dt} + G\phi = L,$$

$$(26) \quad B \frac{d^2\phi}{dt^2} + Y \frac{d\phi}{dt} - K \frac{d\theta}{dt} = 0.$$

The condition of stability of the motion indicated by these equations is that all the possible roots, or parts of roots, of the cubic equation

$$(27) \quad ABn^3 + (AY + BX)n^2 + (XY + K^2)n + GK = 0$$

shall be negative; and this condition is

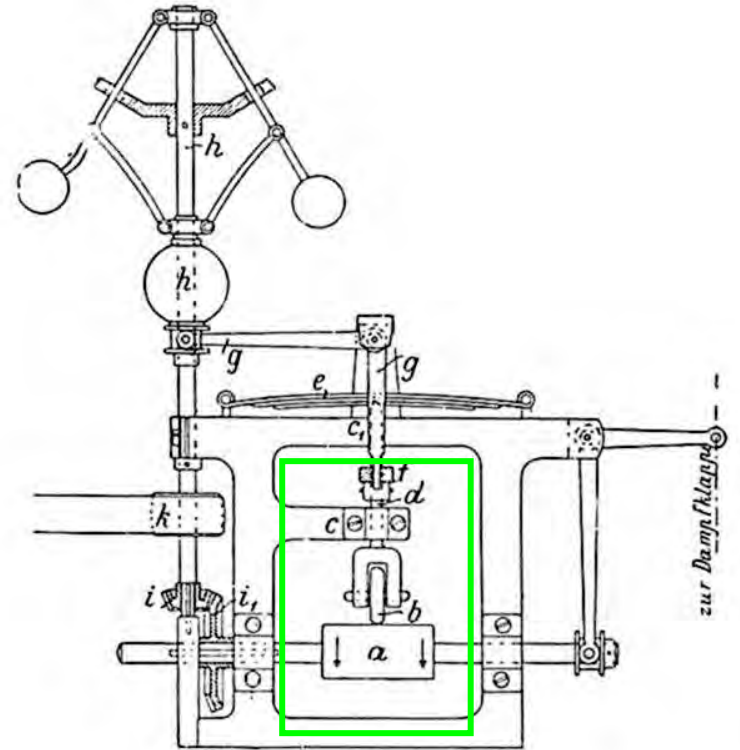
$$(28) \quad \left(\frac{X}{A} + \frac{Y}{B} \right) (XY + K^2) > GK.$$



Ricercando le radici ...

L'articolo di Maxwell costituisce il primo studio rigoroso della stabilità del *governor* di Watt e può essere considerata il primo contributo alla cosiddetta **Teoria del Controllo**.
(1868-1789=79 anni !!)

Tra I grandi ingegneri del XIX secolo, **Werner von Siemens**, che nel 1882 brevettò un *centrifugal governor* nel quale un'azione di controllo **integrale** viene deliberatamente introdotta allo scopo di azzerare l'errore in condizioni stazionarie. Il movimento del collare viene integrato mediante un integratore meccanico "*wheel-and-disk*".





Ricercando le radici ...

Wilbur Wright (1901) fa appello al concetto di *feedback* per stabilizzare l'assetto e ottenere manovrabilità di una macchina volante:

l'era del volo é iniziata e il Controllo ne é la tecnologia abilitante.

All'inizio del XX secolo, il concetto di *feedback* viene introdotto nel progetto di sistemi di guida automatica. Nel 1922 **Nicholas Minorsky** introduce il cosiddetto controllo PID nel progetto di autopiloti per navi.

Il controllore di Minorsky fu sperimentato con successo sulla USS *New Mexico*.

Tuttavia, fu presto rimosso in quanto “*the ship crew was strenuously opposed to automatic steering*”.

Nel 1947, il primo volo completamente senza pilota di un C-53 attraverso l'Atlantico, compresi decollo e atterraggio.





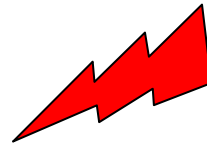
1948: Norber Wiener opportunamente introduce il termine *Cybernetics*, dalla parola greca «κυβερνώ», i.e. «governo» o «controllo».

1948: CC = Control & Communication

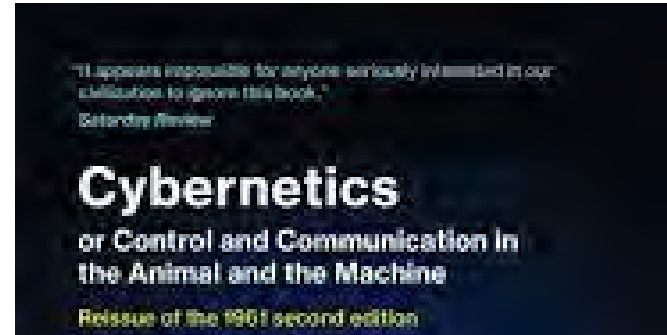
1946-1955: The ENIAC

1950s: CCC= Computer, Control & Communication

1980s: *ICT: Information & Communication Technology*



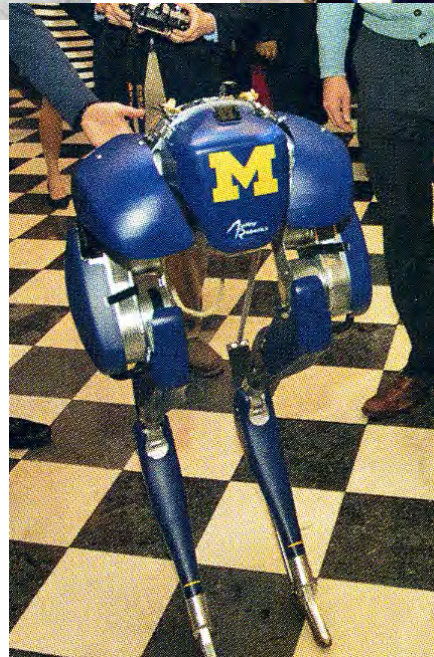
Bang ! Il termine **Control** é sparito!





SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

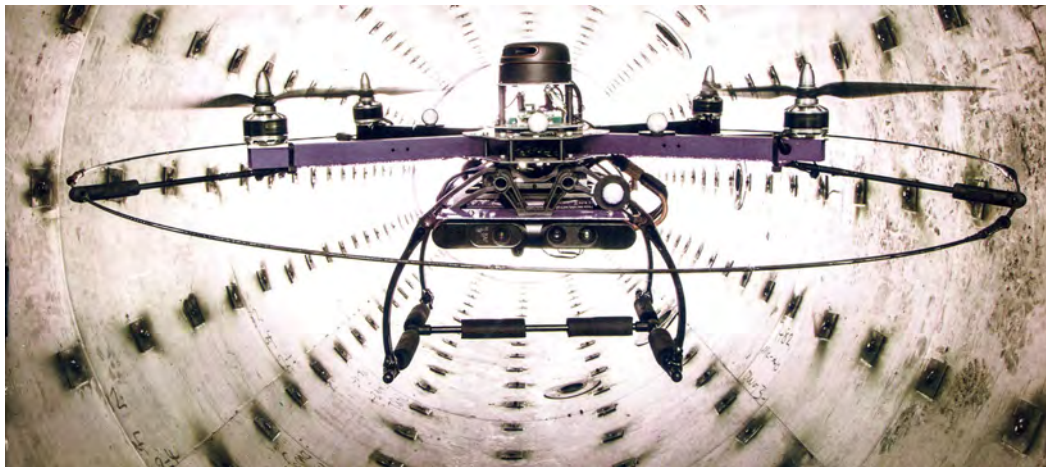
Ma il controllo é ovunque ...





SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

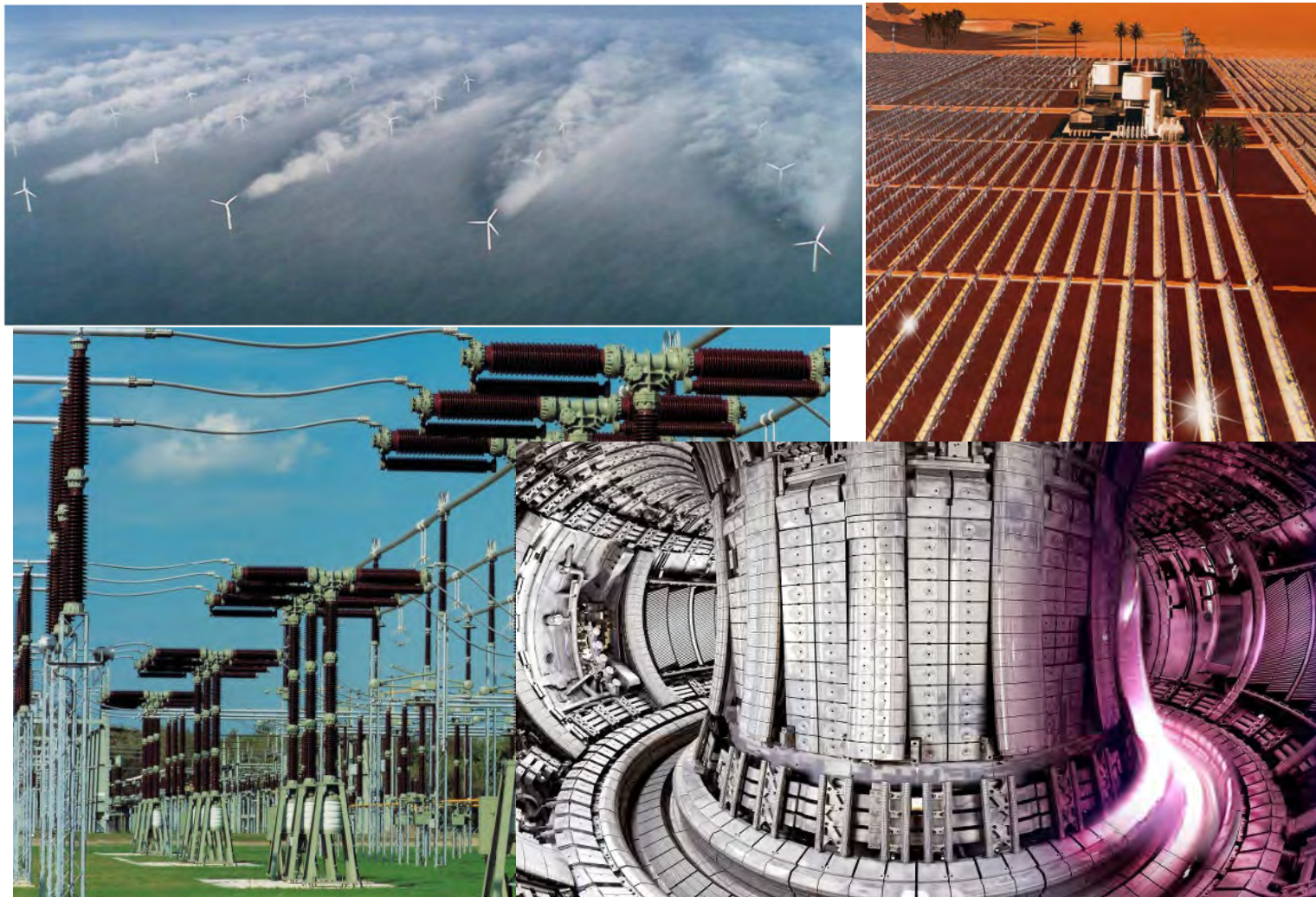
Ma il controllo é ovunque ...





SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Ma il controllo é ovunque ...

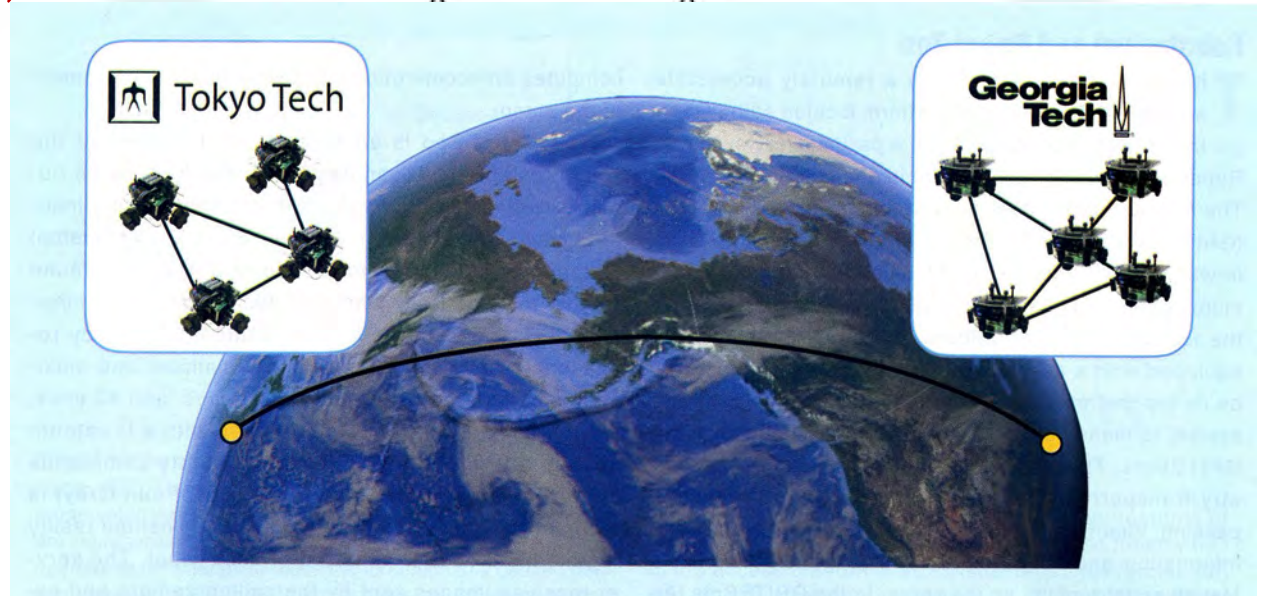
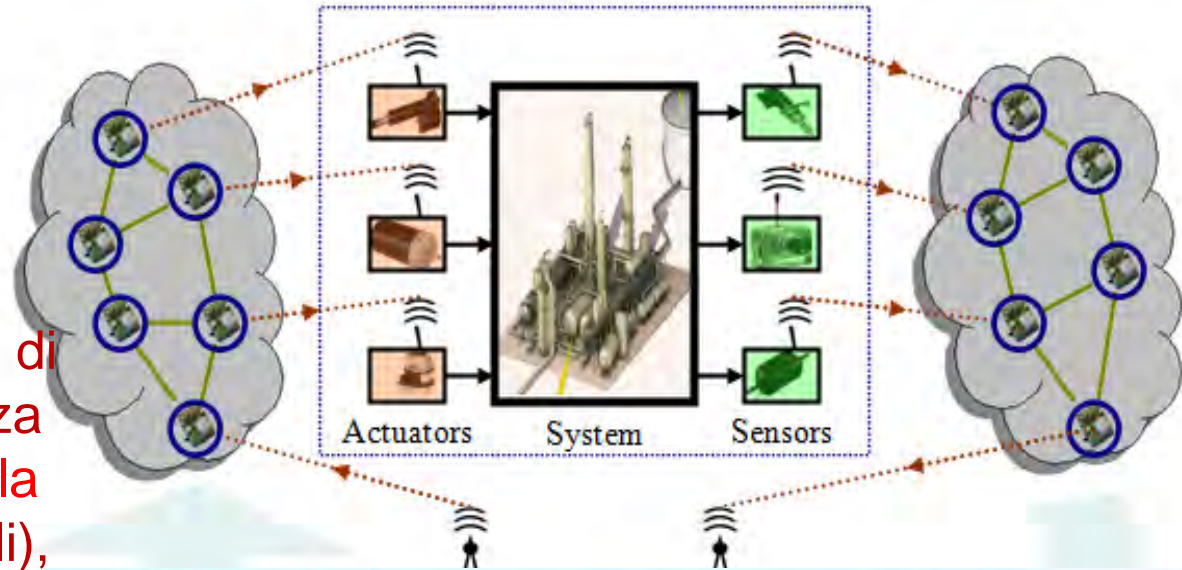




Ma il controllo é ovunque ...

Controllo
industriale e
wireless
communications

Affrontare problemi di
controllo in presenza
di vincoli indotti dalla
rete: ritardi (variabili),
perdita di pacchetti,
limitata capacità dei
canali.





Alcune osservazioni ...

I principi e le tecniche del **Controllo Automatico** sono pervasivi, efficaci e molto spesso indispensabili nello sviluppo di molte tecnologie.

Tuttavia, il **Controllo Automatico** è sconosciuto al grande pubblico, quando non è confuso con altre discipline.

Esemplare, da questo punto di vista è l'uso improprio del termine «*cyber*», oggi usato per indicare essenzialmente «*internet-connected*», a dispetto del significato originale pensato da Wiener.

Alcuni addirittura ritengono il Controllo una «*obscure niche of Software Engineering*»

Il **Controllo Automatico** è la *Hidden Technology*.

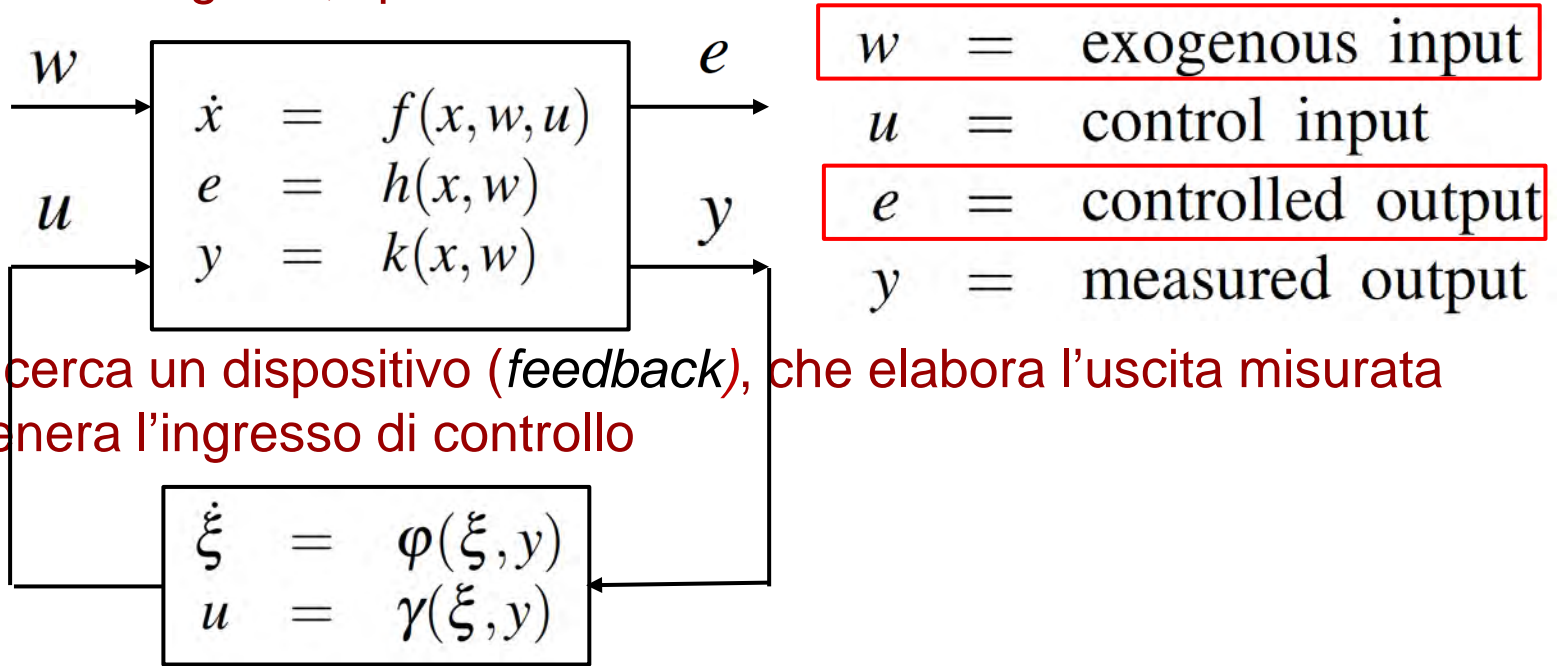
Perché ?

It is much easier to talk about devices than ideas (K.J.Astrom).



The model-based control paradigm

Un modello matematico del dispositivo/processo da controllare viene assegnato, tipicamente nella forma



Si ricerca un dispositivo (*feedback*), che elabora l'uscita misurata e genera l'ingresso di controllo

affinché, nel sistema «*closed-loop*» risultante, l'ingresso esogeno influenzi l'uscita controllata in un modo desiderato.

Un caso speciale: si conosce un modello per gli ingressi esogeni

$$\dot{w} = s(w) \quad \text{esosistema}$$



The model-based control paradigm

Usualmente, si cerca di ottenere un sistema «*closed-loop*»

$$\begin{aligned}\dot{w} &= s(w) \\ \dot{x} &= f(x, w, \gamma(\xi, k(x, w))) \\ \dot{\xi} &= \varphi(\xi, k(x, w)) \\ e &= h(x, w)\end{aligned}$$

nel quale:

1. l'orbita positiva di un insieme compatto di c.i. sia limitata
2. l'uscita controllata $e(t)$ converga asintoticamente a zero.

Questo problema di «ingegneria» solleva un certo numero di interessanti problemi di «matematica applicata»:

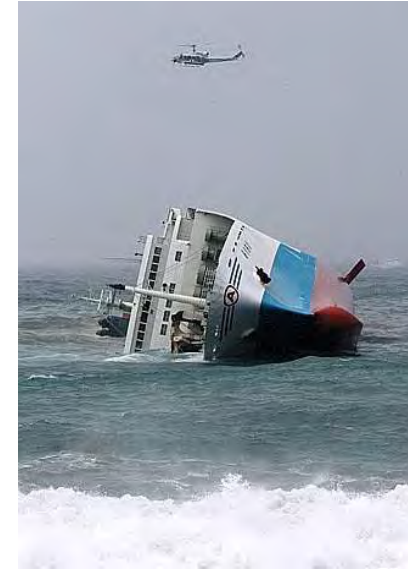
1. Caratterizzare il luogo al quale le traiettorie convergono (lo «*steady-state locus*»)
2. La sintesi di una struttura di controllo che induca, nel *closed-loop*, uno *steady-state locus* candidato all'interno del luogo ove $e=0$.
3. Rendere tale candidato asintoticamente stabile.



Atterraggio sicuro in alto mare

Circa 10 anni fa una grande nave si rovescia al largo delle coste del Giappone: un elicottero tenta un atterraggio di emergenza.

Simili disastri (e simili necessità di soccorso) non sono rari. Si ricordi, ad esempio, la fuoriuscita di petrolio della Exxon Valdez nel Prince William Sound, Alaska, il 24 Marzo 1989. La collocazione del Prince William Sound rendeva l'accesso mediante elicottero la migliore soluzione possibile.





Atterraggio sicuro in alto mare

Una sfida per il controllo:
Il progetto di un autopilota
per l'atterraggio autonomo
di un elicottero sul ponte
di una nave che rolla e
beccheggia.
Il modello 6 DOF é
sottoattuato: solo 4
controlli indipendenti.

$$\dot{p}^i = R v^b$$

$$\dot{R} = R \text{Skew}(\omega^b)$$

$$M \dot{v}^b = -M \text{Skew}(\omega^b) v^b + f^b$$

$$J \dot{\omega}^b = -\text{Skew}(\omega^b) J \omega^b + \tau^b,$$

Il problema di controllo:

- inseguire un movimento costituito dalla sovrapposizione di oscillazioni di frequenza, ampiezza e fase **non note**
- e nel contempo mantenere un assetto corretto
- malgrado incertezze e perturbazioni.

Atterraggio sicuro in alto mare



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA





Generatori eolici galleggianti

Un'analisi condotta nel 2006 dal Dip. per l'Energia degli USA, da GE ed MIT ha stimato che le risorse di energia ottenibile da generatori eolici disponibili sulle coste Atlantiche e Pacifiche degli USA eccedono la necessità di produzione di energia elettrica.

Una torre elica alta 100 m che è visibile se collocata a 35 km dal prevalgono venti più forti e più r centinaia di metri rendono impc

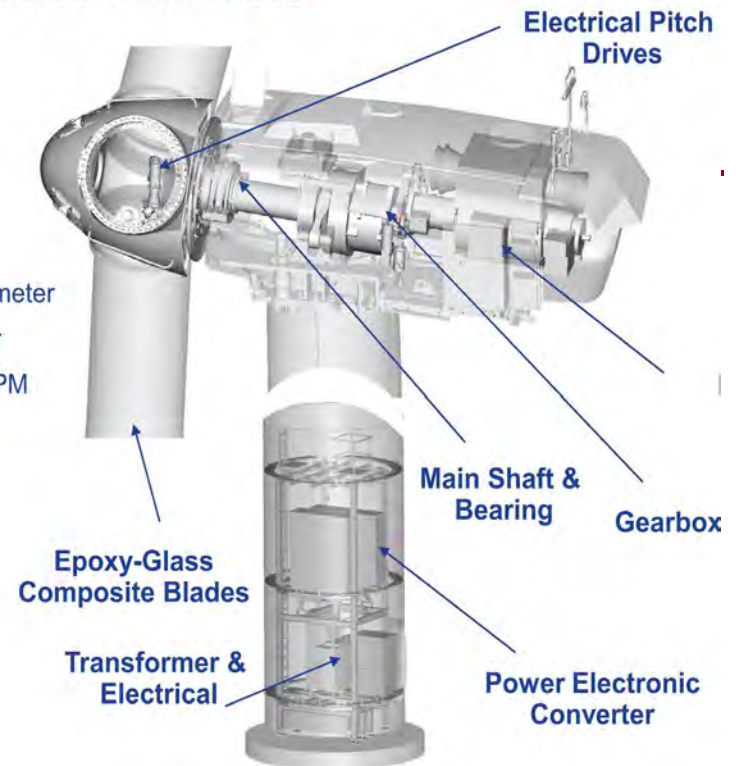
Energia eolica generata da torri problema.



Wind Turbine Controls

GE 1.5 MW

- 77 M Rotor Diameter
- 50-100 M Tower
- Speed 10-20 RPM
- Variable Pitch





Generatori eolici galleggianti



Il problema di controllo:

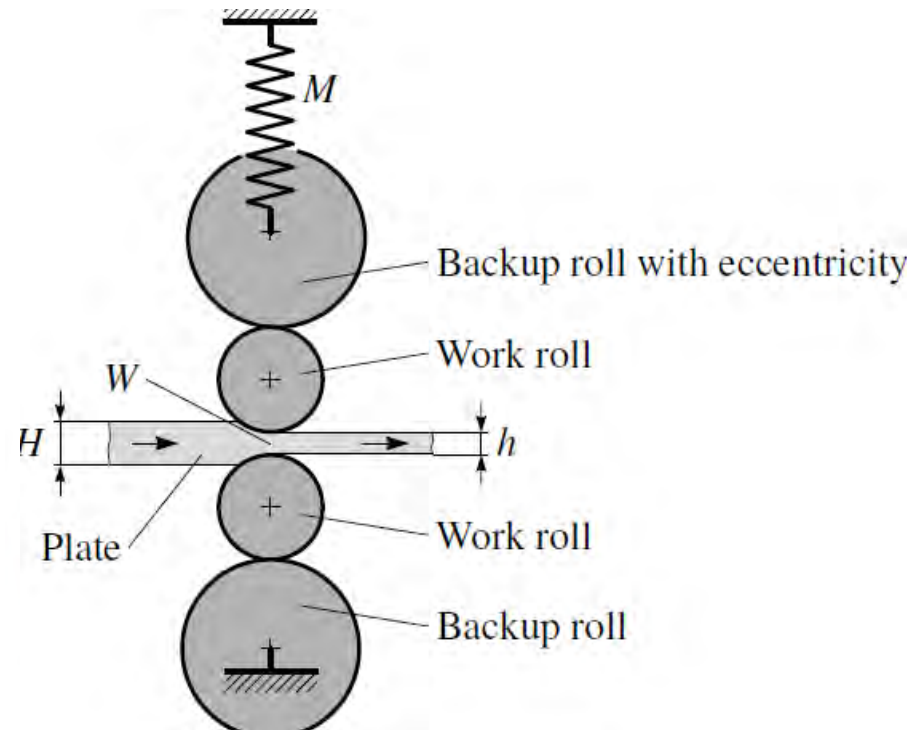
- attenuare l'effetto di disturbi costituiti dalla sovrapposizione di oscillazioni di frequenza, ampiezza e fase **non note**
- in presenza di incertezze e perturbazioni
- coordinare dinamicamente le singole turbine eoliche, in modo da attenuarne le interazioni e aumentare l'efficienza energetica.



Compensazione di guasti in dispositivi rotanti

Assimmetrie meccaniche e/o elettriche nelle macchine rotanti (derivanti da consumo, danni, difetti di costruzione) possono essere modellate, in molti casi, come disturbi che variano periodicamente.

Gli esempi abbondano:
tamburi usurati in una gabbia di laminazione
memorie a disco in un PC
albero a collo d'oca deformato
in un motore a combustione
avvolgimenti di rotore
danneggiati in un motore elettrico



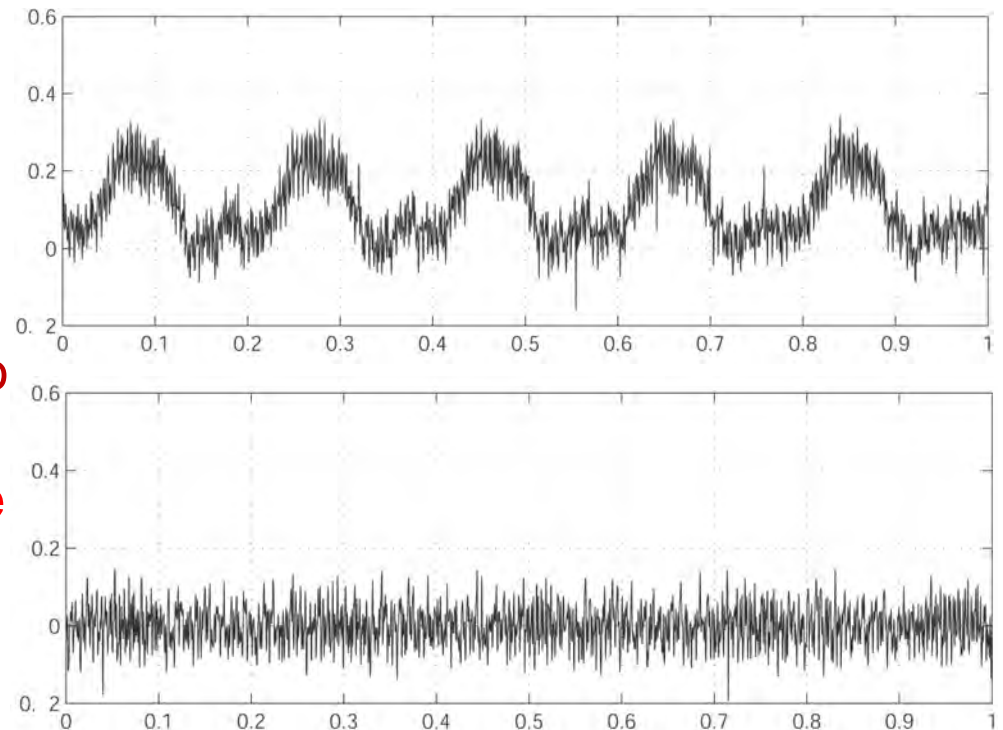


Compensazione di guasti in dispositivi rotanti

Una sfida per il controllo: soppressione attiva di disturbi periodici via *feedback*.

Ancora una volta il problema di attenuare (o azzerare) l'effetto di disturbi costituiti dalla sovrapposizione di oscillazioni di frequenza, ampiezza e fase non note

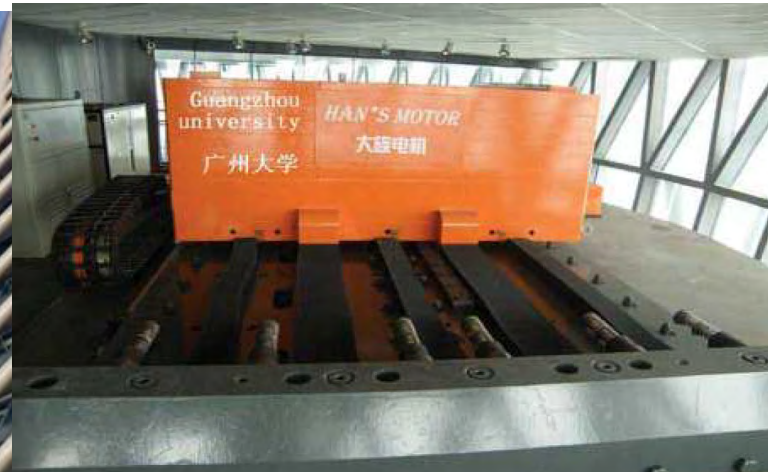
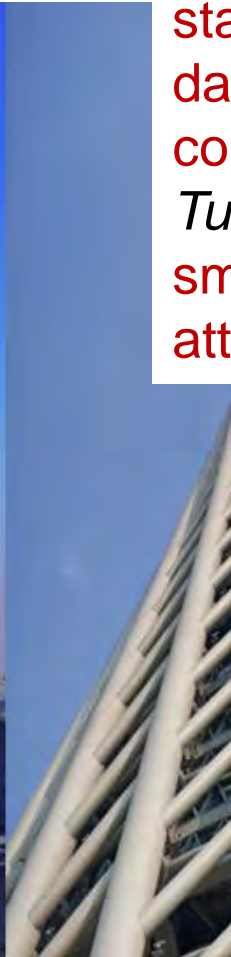
Se questo problema viene risolto via *feedback*, il dispositivo di controllo deve includere un sistema in grado di produrre oscillazioni che compensino l'effetto del guasto. Inoltre, questo dispositivo può essere usato per riconoscere e isolare il guasto e attivare segnali di allarme o disporre una riconfigurazione.





Soppressione attiva delle vibrazioni

La tecnologia del controllo attivo delle strutture (edili) é divenuta un ingrediente significativo nell'attenuazione delle vibrazioni indotte dal vento negli edifici molto elevati. La torre di Guangzhou (Canton) è stabilizzata, rispetto a movimenti causati da important tifoni, da un systema misto composto da un smorzatore passivo *Tuned Mass Damping* e da uno smorzatore attivo *Active Mass Damping* attuato da un motore lineare induzione



The allowable stroke if the AMD is 2 m, at a peak speed of 0,5 m/s



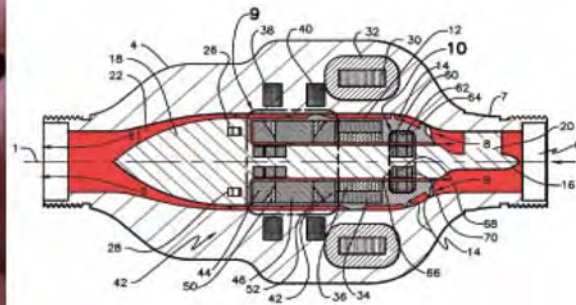
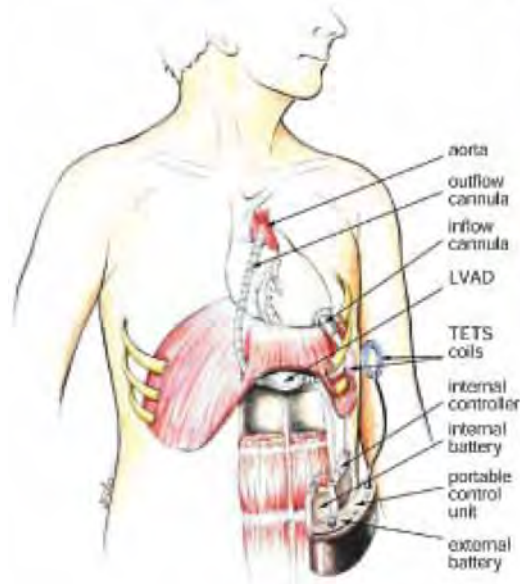
Il Controllo in protesica

La necessità di attenuazione attiva di disturbi periodici è comune anche in protesica.

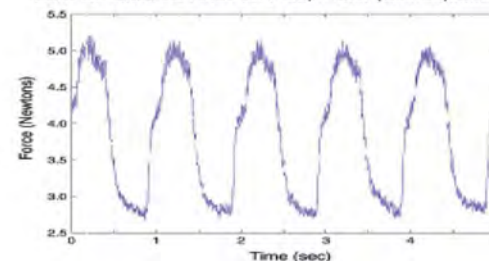
Left-Ventricular Assist Devices (LVAD).

Questi sono dispositivi protesici impiantati per cooperare con il cuore naturale nel pompare il sangue, per mezzo di pompe levitate magneticamente e controllare mediante *feedback*.

Il problema di controllo qui é di levitare magneticamente la girante della pompa, e al contempo attenuare il carico periodico causato dal pompaggio da parte del cuore naturale.



Axial Disturbance Force on Pump Rotor (Calf Experiment)





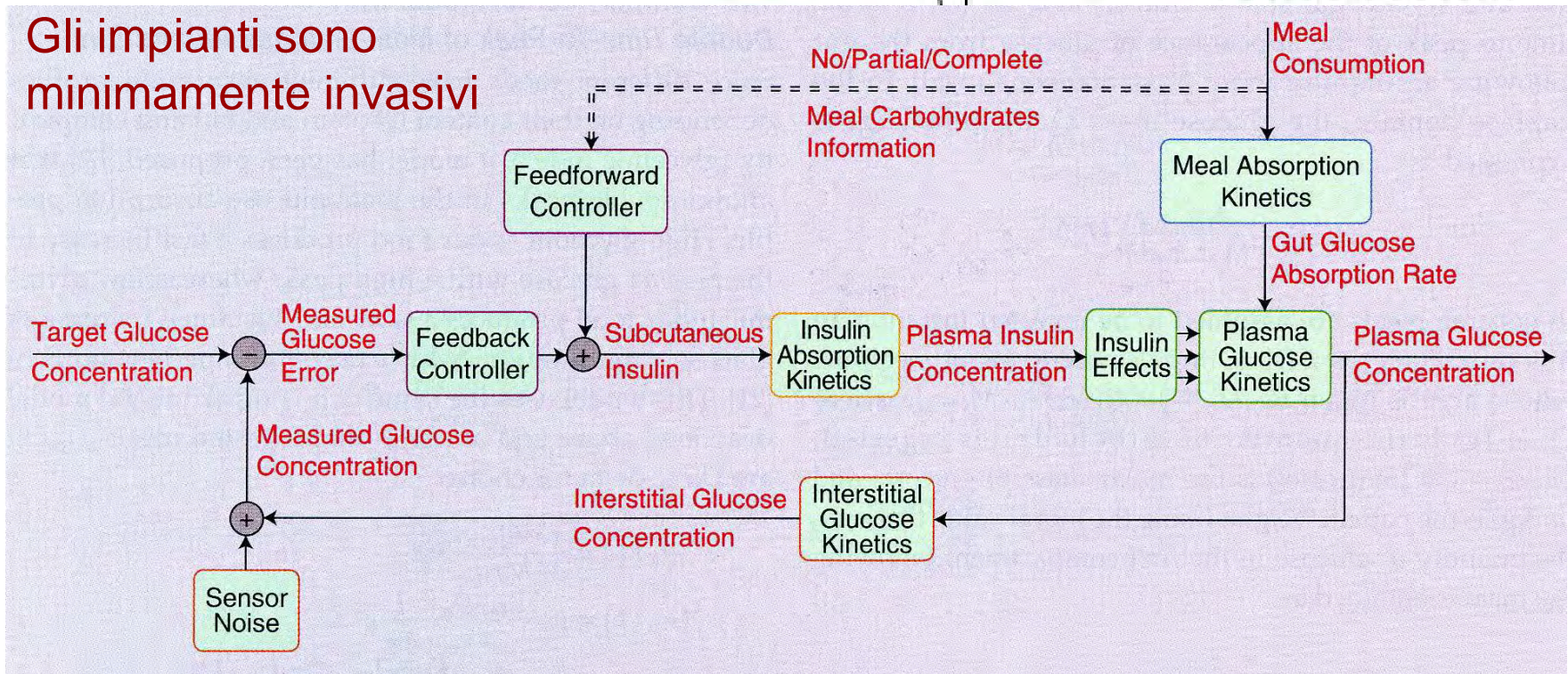
Il Controllo in protesica

Il Pancreas artificiale per i pazienti diabetici.

Il Sistema di controllo monitorizza il livello di glucosio e rilascia insulina.

Gli impianti sono minimamente invasivi

Artificial Pancreas Device System





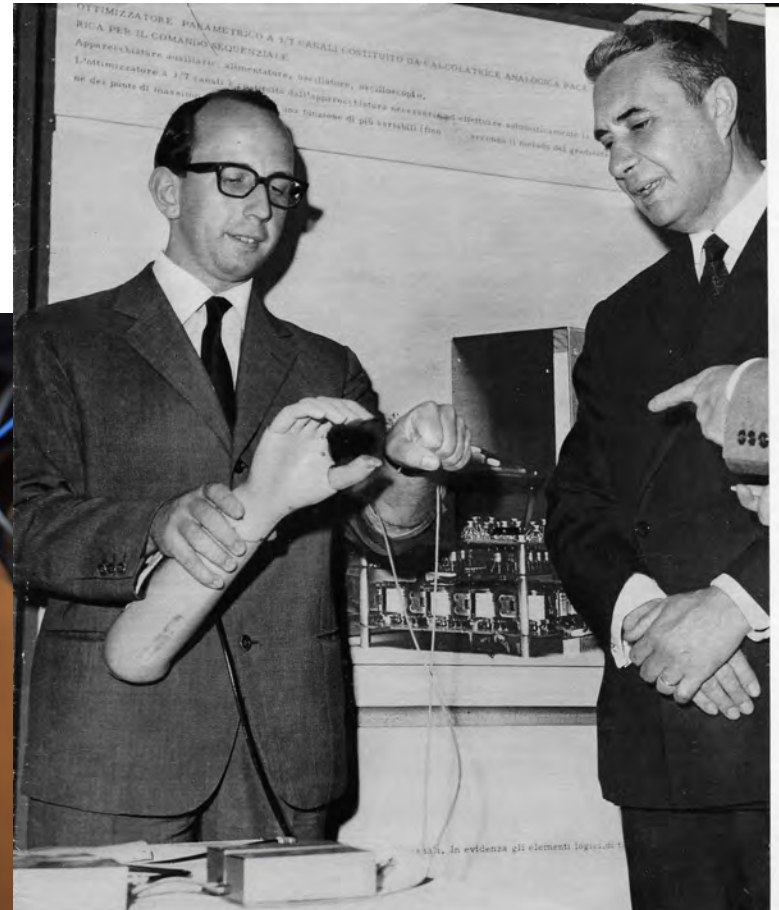
Il Controllo in protesica

Il controllo é da lungo tempo una tecnologia abilitante in
Protesica Ortopedica.

Le mani artificiali a controllo
mioelettrico sono uno dei
fiori all'occhiello di R&S in
Italia.



2018 – Hannes, the artificial hand developed by IIT and INAIL



1966 – Rassegna Internazionale di Elettronica a Roma



Modeling and Control of the HPA axis



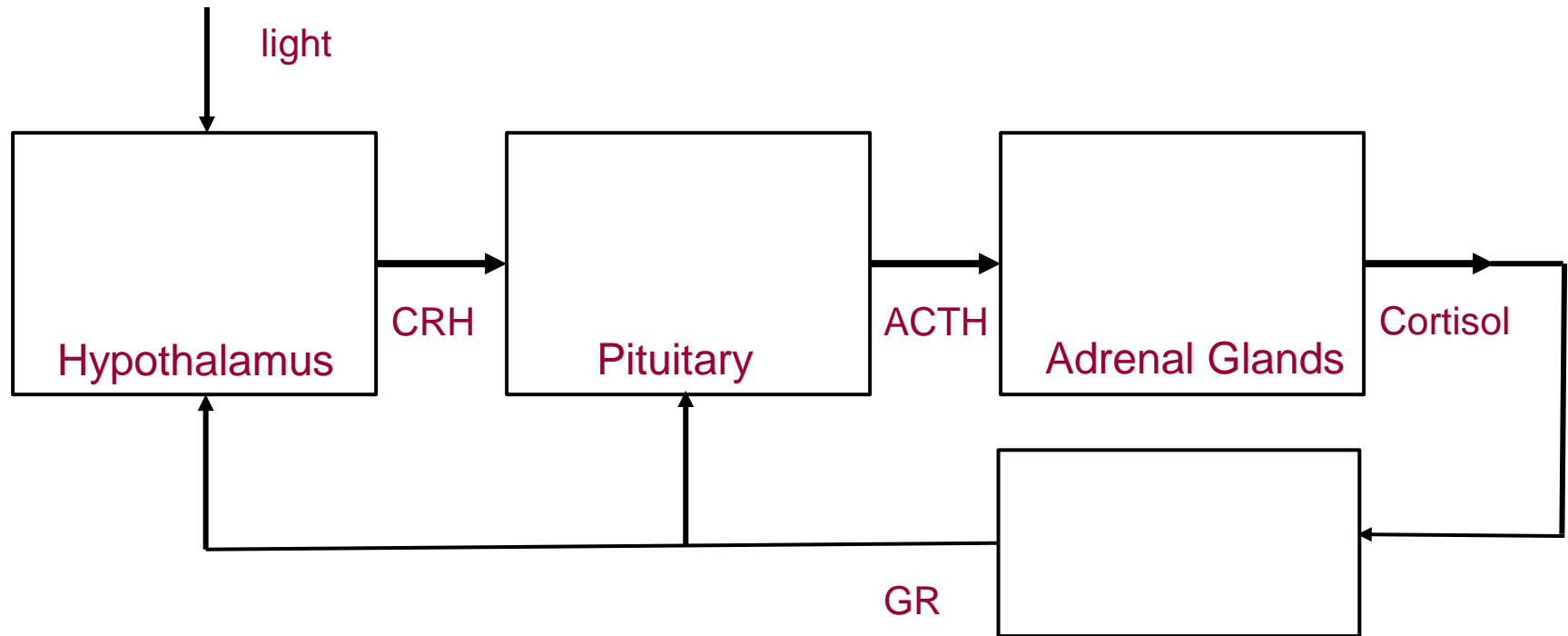
L'asse HPA é un sistema biologico formato da ipotalamo, pituitaria e ghiandole adrenali.

Le interazioni tra questi sono soprattutto dovute a tre ormoni.

Corticotropin-releasing hormone (CRH) é secreto nell'ipotalamo e rilasciato nei vasi portali del peduncolo ipofisario.

Attraverso il sangue é trasportato nella pituitaria anteriore, dove stimola il rilascio di *adrenocorticotropic hormone* (ACTH) dalla ghiandola pituitaria.

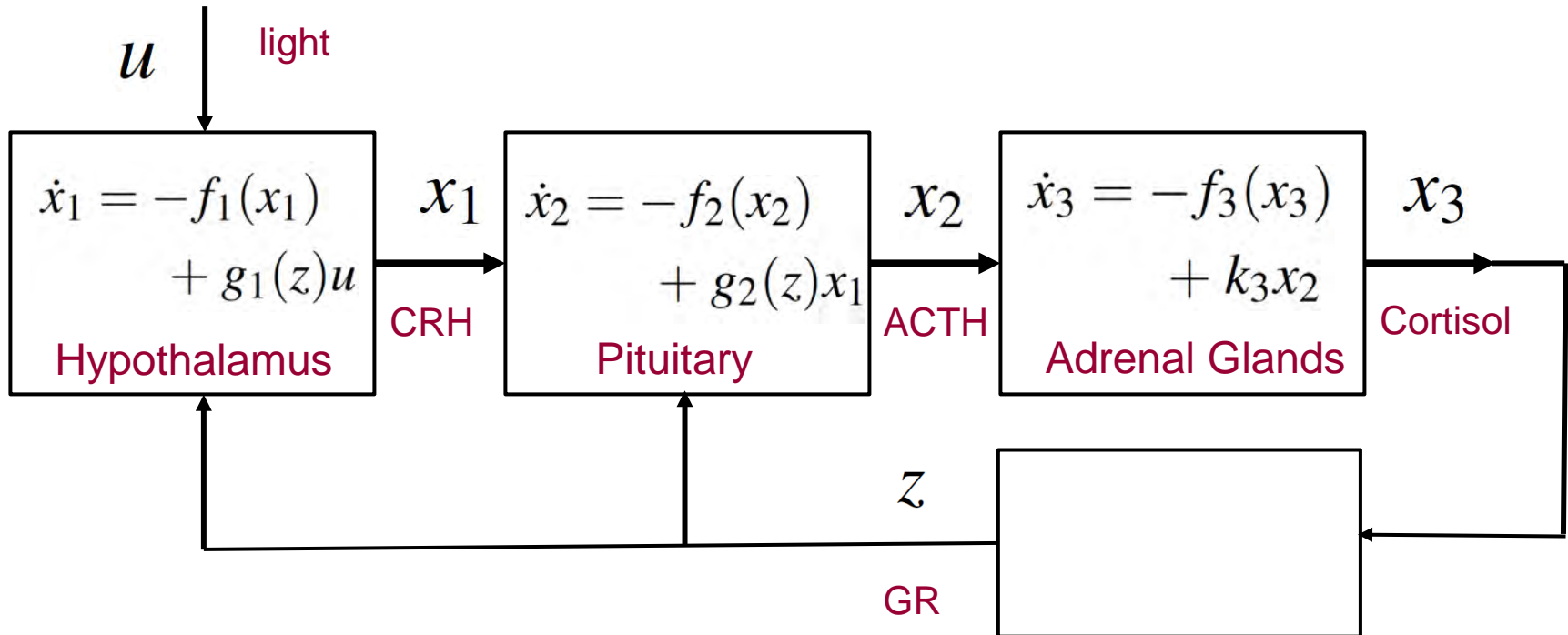
ACTH si muove attraverso il flusso sanguigno e stimola la secrezione di *cortisol* nelle ghiandole adrenali .



Il cortisolo forma complessi con i *ricettori glucocorticoidi (GR)* e *mineralocorticoidi (MR)* e il complesso GR a sua volta si lega con CRH e ACTH per regolare la produzione di cortisolo..

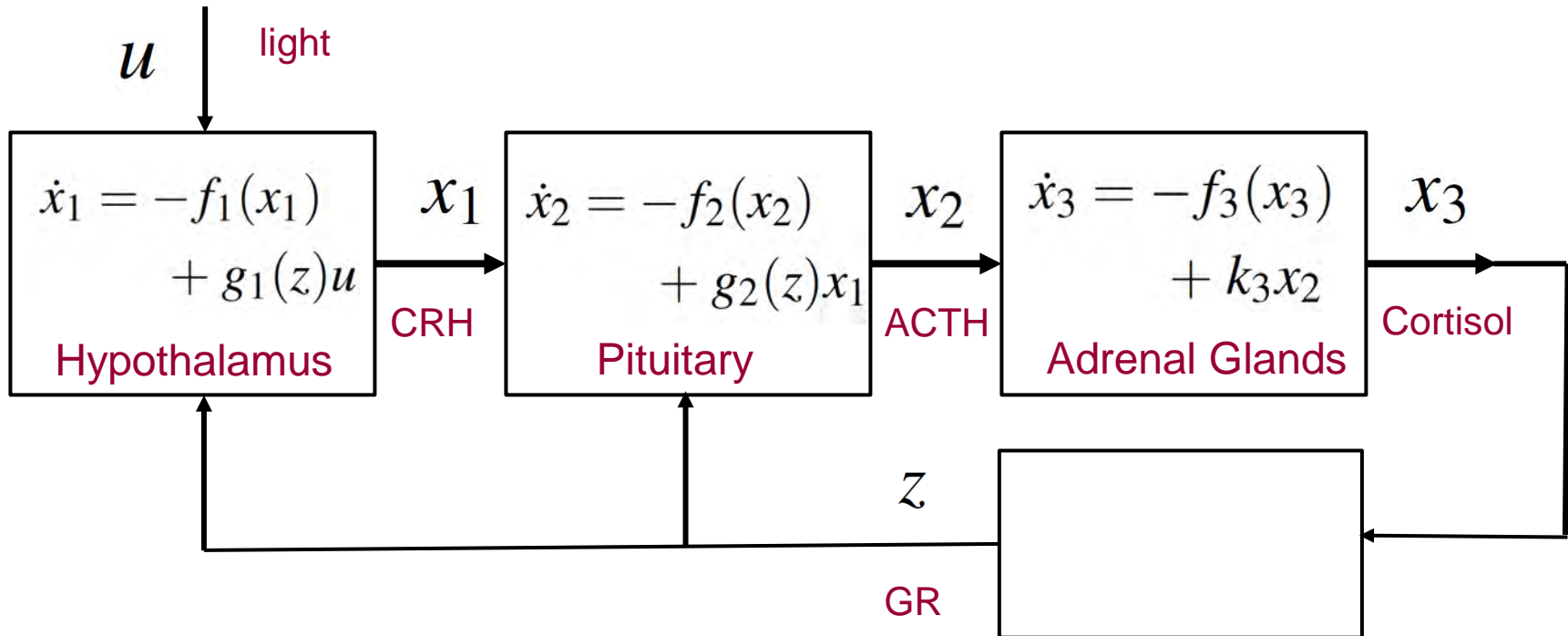
Il modello viene usato per determinare l'esistenza di soluzioni oscillatorie, collegabili a *ritmi ultradiani* ($T < 24$ h) osservati nei dati, e per determinare l'esistenza di molteplici punti fissi, collegabili a fenomeni di ipercortisolemia o ipocortisolemia.

Il *ritmo circadiano* ($T = 24$ h), invece, è conseguenza di ingressi esterni all'asse



Le equazioni del modello sono in parte basate su osservazioni fenomenologiche e differiscono da autore a autore.

$$f_i(x_i) = \lambda_i x_i + b_i \frac{x_i}{a_i + x_i} \quad g_i(z) = \mu_i \frac{z^{\alpha_i}}{c_i^{\alpha_i} + z^{\alpha_i}}$$



Se si considerano parametri fisiologicamente ragionevoli, il sistema mostra un solo punto di equilibrio, globalmente asintoticamente stabile (GAS). Perturbando i parametri si osserva una **biforcazione**, ed emergono due ulteriori equilibri. Dei tre, uno é instabile e due sono stabili. Questo potrebbe spiegare una correlazione tra livelli eccessivi e duraturi di cortisolo e depressione, diabete, obesità viscerale, osteoporosi, e una correlazione tra concentrazione inadeguata di cortisolo e disturbi della memoria o crisi adrenali.



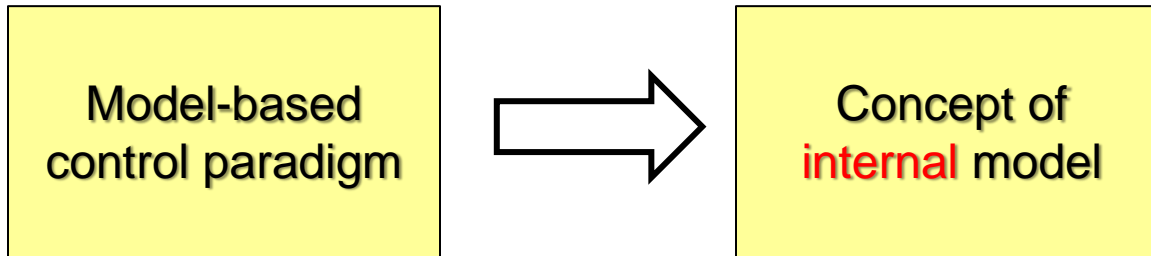
SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

La potenza del feedback





The concept of internal model



Modelli interni sono correntemente usati in differenti aree della scienza e dell'ingegneria per descrivere come organismi viventi o dispositivi di controllo/calcolo artificiali contengano **al loro interno conoscenze** relative a eventi che hanno luogo nell'**ambiente circostante**.

Il Principio del Modello Interno (IMP) nella Teoria del Controllo.

La regolazione asintotica può essere ottenuta solo se:

- il controllore utilizza un *feedback* dalla variabile controllata,
- incorpora, in questo *feedback*, un **modello che riproduce** la struttura dinamica degli ingressi esogeni che devono essere rigettati e/o riprodotti.



The concept of internal model

Il Principio del Modello Interno nella Modellistica di Sistemi Biologici.

Gli organismi viventi devono mantenere livelli precisi di concentrazione di quantità vitali (*omeostasi, adattamento*) e reagire opportunamente a disturbi provenienti dall'ambiente (*rilevamento e reiezione dei disturbi*).

In questo contesto, la domanda che si pone è la seguente:

- se si osserva, sperimentalmente, che un dato sistema reagisce – **regolandosi** - rispetto a tutta una classe di ingressi esogeni, cosa si può dire a proposito della **struttura interna** di questo sistema ?

Il Principio del Modello Interno in Neuroscienza.

Kenneth Craik (1943): “**only an internal model of reality enables us to predict events the nervous system is a calculating machine capable of modeling or paralleling external events**”.

Ci sono molte ragioni per ritenere che le capacità acquisite (di rispondere a eventi esterni) sono abilitate dalla presenza, nel cervello, di **modelli interni** delle reazioni sensoriali attese in conseguenza a certi comandi motori, che consentono la produzione di segnali di errore quando gli ingressi sensoriali effettivi non corrispondono a quelli attesi.



The concept of internal model

Un punto di vista analogo è presente anche nelle problematiche relative all'impiego dei **metodi di AI in Robotica**.

In un recente articolo (*IEEE SPECTRUM*, Novembre 2021), a proposito dell'addestramento di Robot “*all-purpose*”, si osserva che:

“**Toddlers don't need a massive amount of data to draw conclusions. They simply observe the world, create a **mental model** of how it works, and take action, and use the results of their action to adjust the mental model..**”.

In un certo senso, l'approccio basato sul modello interno è analogo all'approccio “simbolico” in AI (*expert systems* = “la conoscenza è rappresentabile da un insieme di regole e può essere codificata”). Diverso, quindi, dall'approccio “connessionista” in AI (*deep learning* = “addestramento di reti neurali mediante analisi di enormi quantità di dati”).



Back to model-based control

Un problema notevole di matematica applicata

Caratterizzare il luogo al quale le traiettorie convergono asintoticamente (lo «*steady-state locus*»)

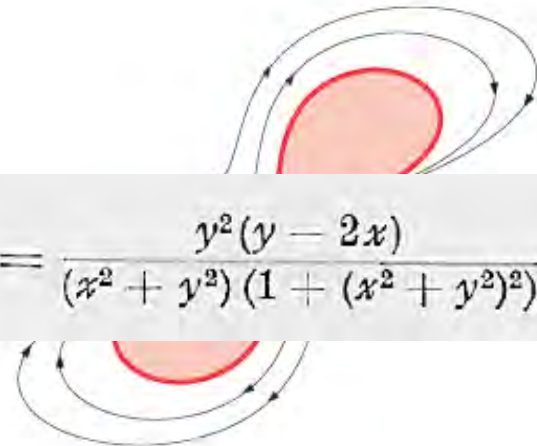
G.D.Birkhoff (1927): “with an arbitrary dynamical system ... there is associated always a closed set of ‘central motions’ which do possess this property of regional recurrence, towards which all other motions of the system in general tend asymptotically”

The ω -limit set di un punto

*The ω -limit di un insieme compatto
(un concetto piú recente)*

$$(40.1) \quad \dot{x} = \frac{x^2(y-x) + y^5}{(x^2 + y^2)(1 + (x^2 + y^2)^2)}; \quad \dot{y} = \frac{y^2(y-2x)}{(x^2 + y^2)(1 + (x^2 + y^2)^2)}$$

Quest'ultimo é stabile
asintoticamente nel senso
di Lyapunov





Back to model-based control

Lo «*steady-state locus*» nei sistemi in questione.

Tali sistemi, siano essi biologici o realizzati dall'uomo, aumentati con la sorgente esterna (*esosistema*) di stimoli, hanno una struttura del tipo

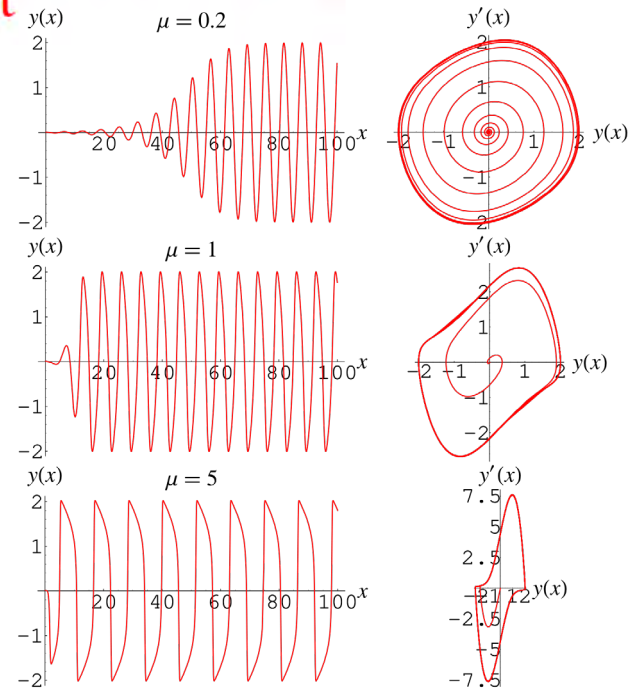
$$\begin{aligned} \dot{w} &= s(w) & w(0) &\in W & \text{a compact invariant set} \\ \dot{z} &= F(w, z) & z(0) &\in X & \text{a close set} \end{aligned}$$

Se le traiettorie sono ultimamente limitate, queste convergono a un insieme invariante

$$\{(w, z) : z = \pi(w)\}$$

Se tale mappa è a valore unico e differenziabile

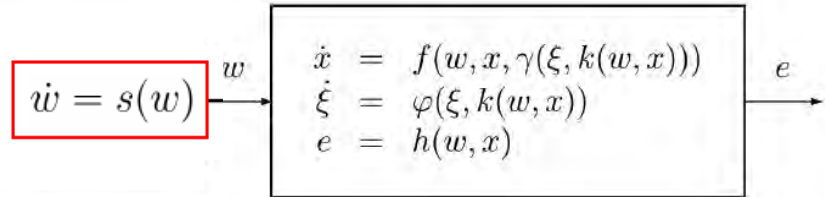
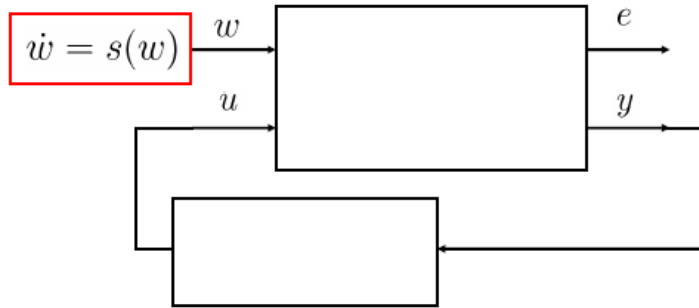
$$\frac{\partial \pi}{\partial w} s(w) = F(w, \pi(w))$$





Back to model-based control

La necessità di un «modello interno» compreso nel controllore



Assumiamo che $e=0$ implichi $y=0$

Se la mappa il cui grafo descrive lo *steady-state locus* è a valore unico e differenziabile, esiste una mappa $\xi = \sigma(w)$

Tale che

$$\frac{\partial \sigma}{\partial w} s(w) = \varphi(\sigma(w), 0)$$

Due campi di vettori σ -related.

Il controllore incorpora «una σ -copia» dell'esosistema.



Back to model-based control

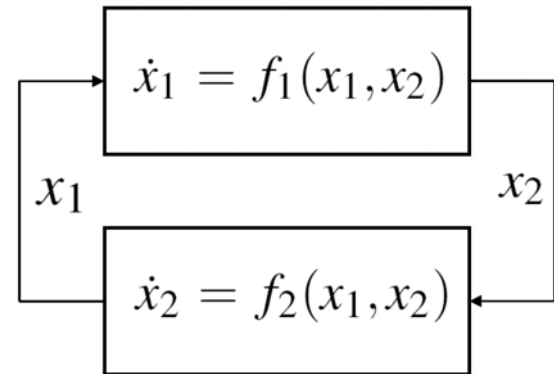
Un altro problema notevole di matematica applicata

Analizzare la stabilità di sistemi interconnessi.

Se il controllore incorpora una copia dell'esosistema, il sistema composto controllore+controllato possiede un insieme (compatto) invariante sul quale l'uscita controllata si annulla.

Il problema è ora quello di rendere tale insieme **stabile asintoticamente**.

La teoria classica della stabilità usualmente considera un solo sistema. Uno sviluppo notevole, motivato da esigenze di controllo, è stato lo sviluppo di metodi sistematici per lo studio della stabilità di sistemi composti.



Essenziali, da questo punto di vista, sono state le nozioni di **input-to-state stability**

$$\|x(t)\| \leq \beta(\|x(0)\|, t) + \gamma\left(\max_{s \in [0, t]} \|u(s)\|\right)$$

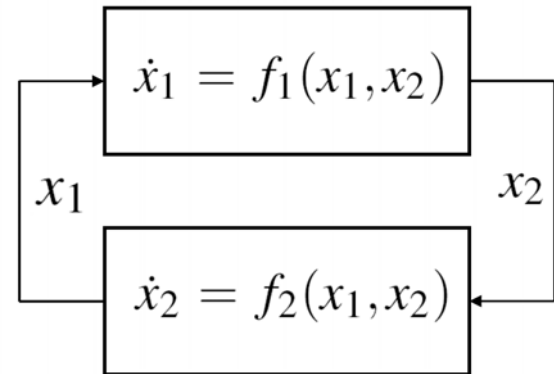
e il cosiddetto **small-gain theorem**.



Back to model-based control

Se la composizione delle funzioni di guadagno dei due componenti è una **contrazione**, il sistema composto è GAS.

the gain function



Essenziali, da questo punto di vista, sono state le nozioni di **input-to-state stability**

$$\|x(t)\| \leq \beta(\|x(0)\|, t) + \gamma\left(\max_{s \in [0, t]} \|u(s)\|\right)$$

e il cosiddetto **small-gain theorem**.



*Grazie per la vostra pazienza
e per la vostra attenzione*