

Alberto Isidori
lezione del
24 Settembre 2012

Geometry in Feedback Design

Riflessioni e critiche (costruttive)

Opportunità e sfide

Conclusioni

Geometry in Feedback Design



Nel decennio 1960-1970 la teoria dei sistemi lineari multivariabili ha conseguito progressi enormi: iniziata con l'introduzione dei concetti di controllabilità, osservabilità e minimalità, la teoria si è rapidamente evoluta verso la messa a punto di metodi (soprattutto **geometrici**) di analisi e progetto di sistemi di controllo a retroazione.

In sintesi, questi metodi hanno fornito una risposta completa alla domanda:
“**cosa si può ottenere mediante la retroazione ?**”

Con il 1970 (circa) inizia uno sforzo collettivo teso ad estendere questo corpo di teorie a classi il più possibile generali di sistemi nonlineari.

Personalmente, ho avuto la fortuna di assistere in posizione privilegiata – e in parte di contribuire – a tutte le fasi dello sviluppo della teoria dei sistemi di controllo nonlineari, che ha impegnato molti studiosi sino ai giorni nostri.

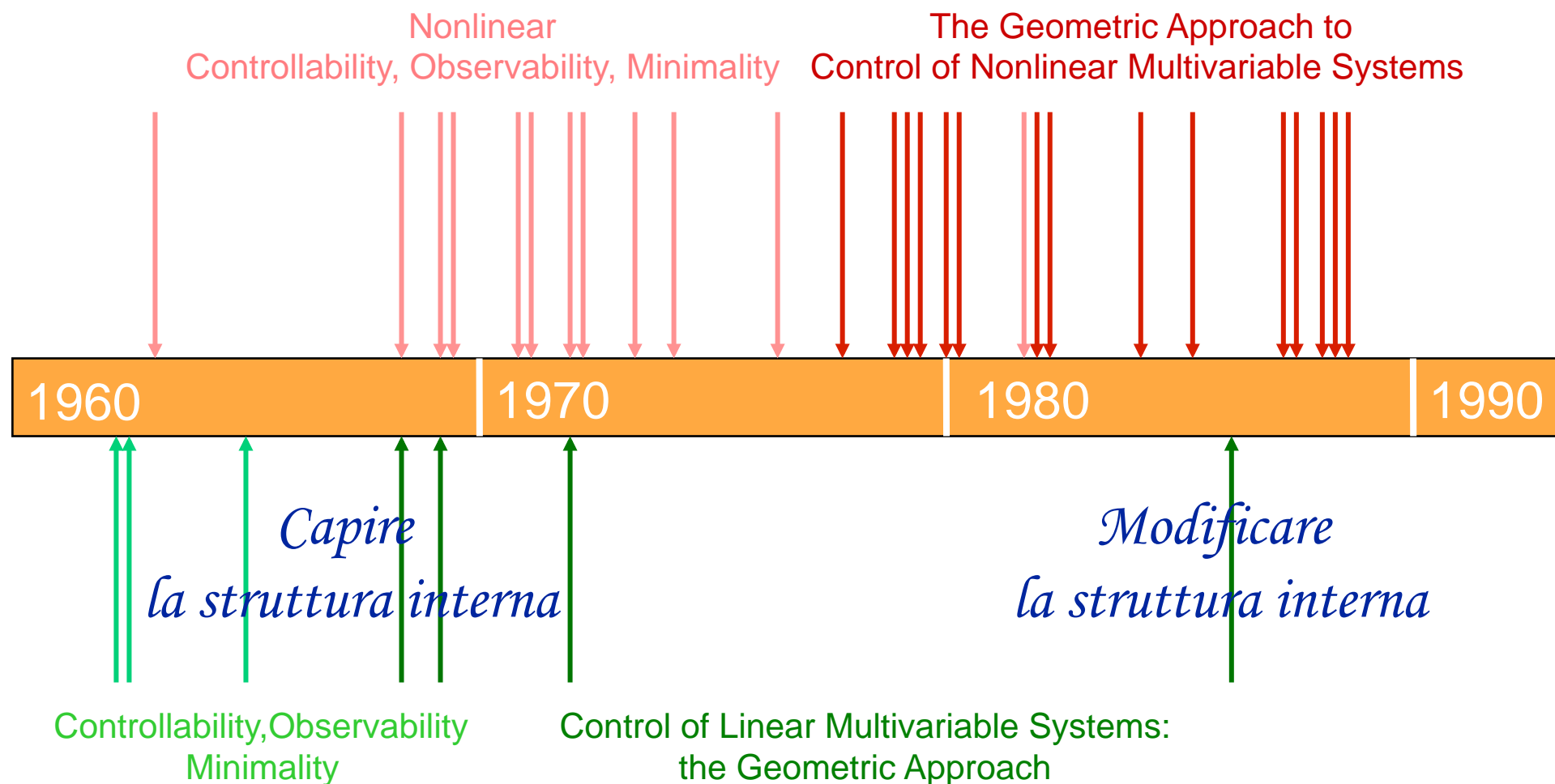
Le mie scuse anticipate se il riassunto storico che mi accingo a fare sarà semplificato, polarizzato, autobiografico, narcisistico e nostalgico.



Un filo conduttore: **timelines**, sui cinque temi:

- *Analisi della struttura interna*
- *Uso del controllo per modificare la struttura interna*
- *Dinamica zero*
- *Stabilizzazione*
- *Regolazione e inseguimento*

Il contesto:
le forze propulsive negli anni 60 e 70:





THE BELL SYSTEM TECHNICAL JOURNAL

(COPYRIGHT 1952, AMERICAN TELEPHONE AND TELEGRAPH COMPANY)

VOLUME XXXI

MARCH 1952

NUMBER 2

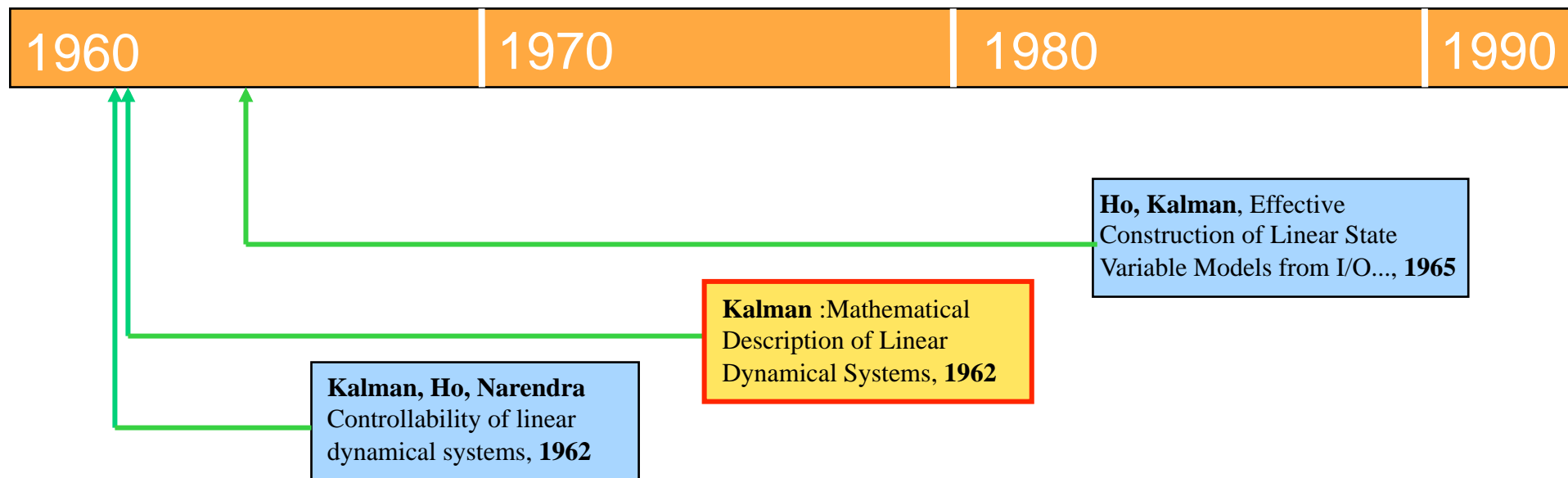
Introduction to Formal Realizability Theory—I

By BROCKWAY McMILLAN

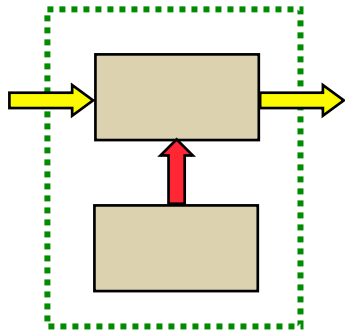
(Manuscript received October 15, 1951)



Capire la struttura interna dei sistemi lineari

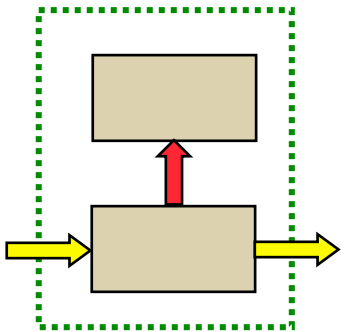


La **struttura interna** di un sistema è svelata
La **geometria** è lo strumento adatto



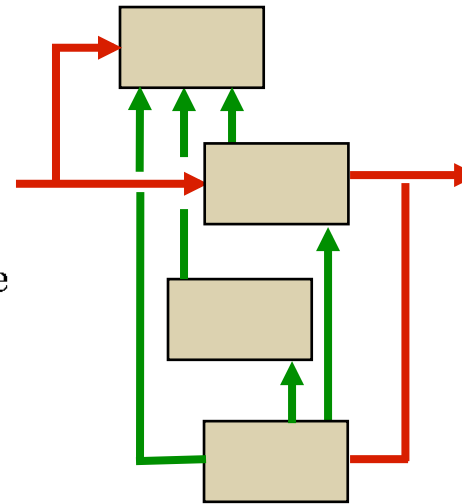
The **set** \mathcal{P} of states reachable from $x = 0$ is the smallest **subspace** satisfying

- $A\mathcal{P} \subset \mathcal{P}$
- $\text{Im}(B) \subset \mathcal{P}$



The **set** \mathcal{Q} of unobservable states is the largest **subspace** satisfying

- $A\mathcal{Q} \subset \mathcal{Q}$
- $\mathcal{Q} \subset \ker(C)$



$$H = \begin{pmatrix} T_0 & T_1 & T_2 & \cdots \\ T_1 & T_2 & T_3 & \cdots \\ T_2 & T_3 & T_4 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix}$$

$$\downarrow T_i = CA^i B$$

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned}$$

se e solo se
il rango
di H è finito



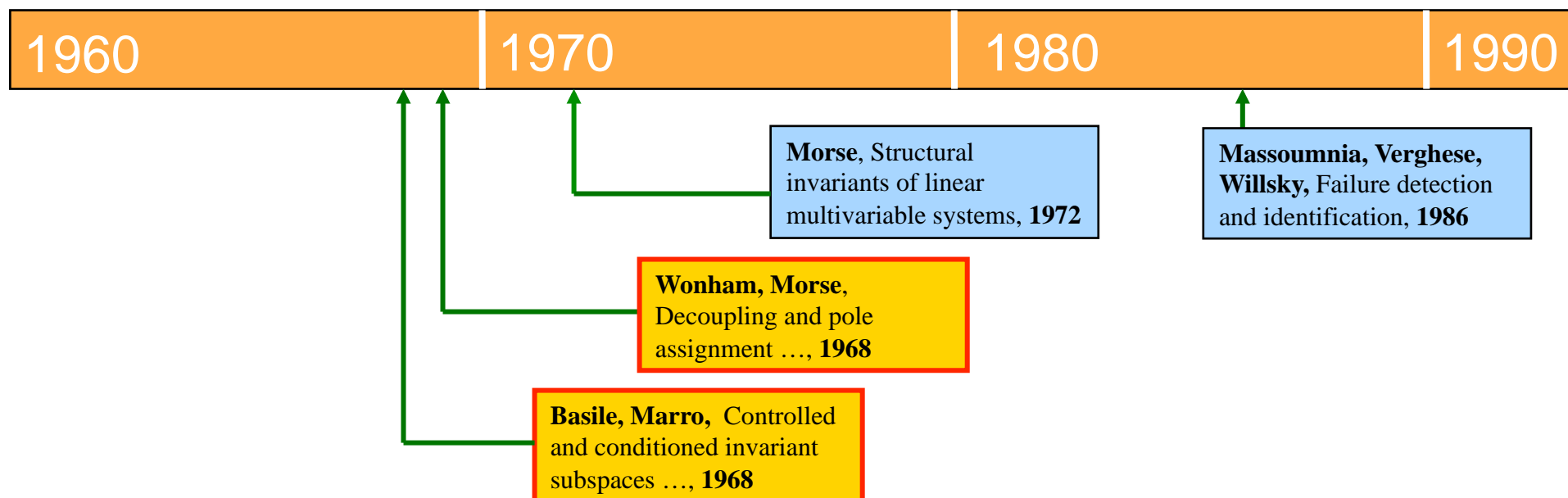
J.S.I.A.M. CONTROL
Ser. A, Vol. 1, No. 2
Printed in U.S.A., 1963

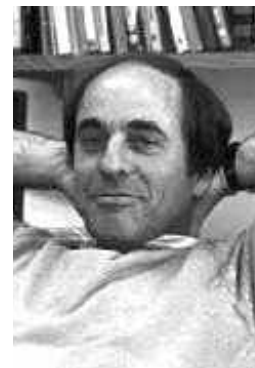
MATHEMATICAL DESCRIPTION OF LINEAR
DYNAMICAL SYSTEMS*

R. E. KALMAN†

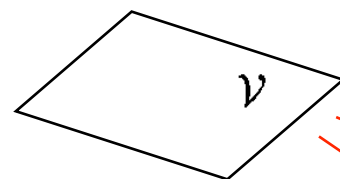
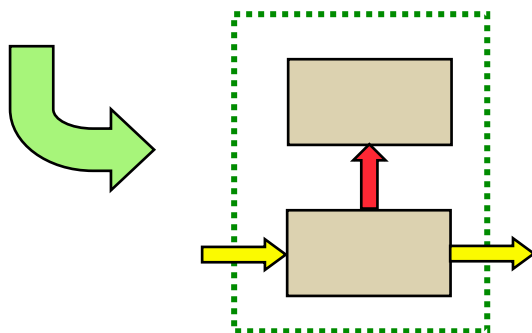
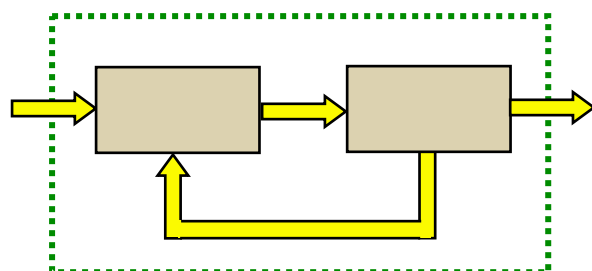


*Modificare la struttura interna
dei sistemi lineari MIMO:
l'approccio geometrico*





Modificare la **struttura interna** usando la retroazione

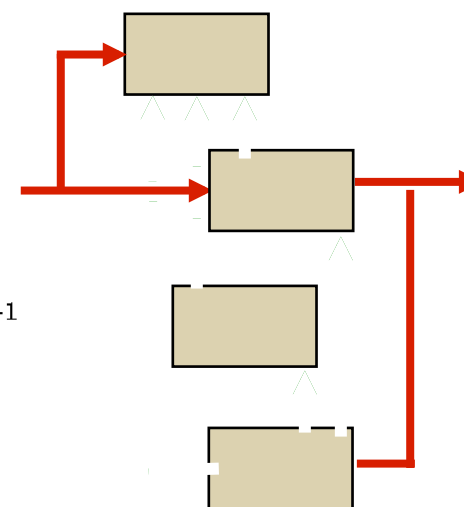


La **geometria** è lo strumento adatto

- feedback invariants
- disturbance decoupling
- noninteracting control
- geometric interpretation of zeros
- regulation and tracking

L'azione del **gruppo di trasformazioni**

$$\begin{aligned}
 A &\mapsto T(A + BF - GC)T^{-1} \\
 B &\mapsto TBU \\
 C &\mapsto VCT^{-1}
 \end{aligned}$$





➤ *Analisi della struttura interna di
un sistema nonlineare*

Chow W.L., Uber systeme
von linearen partiellen
differentialgleichungen
ester ordnung,
Math. Ann., vol. 117 (1938)

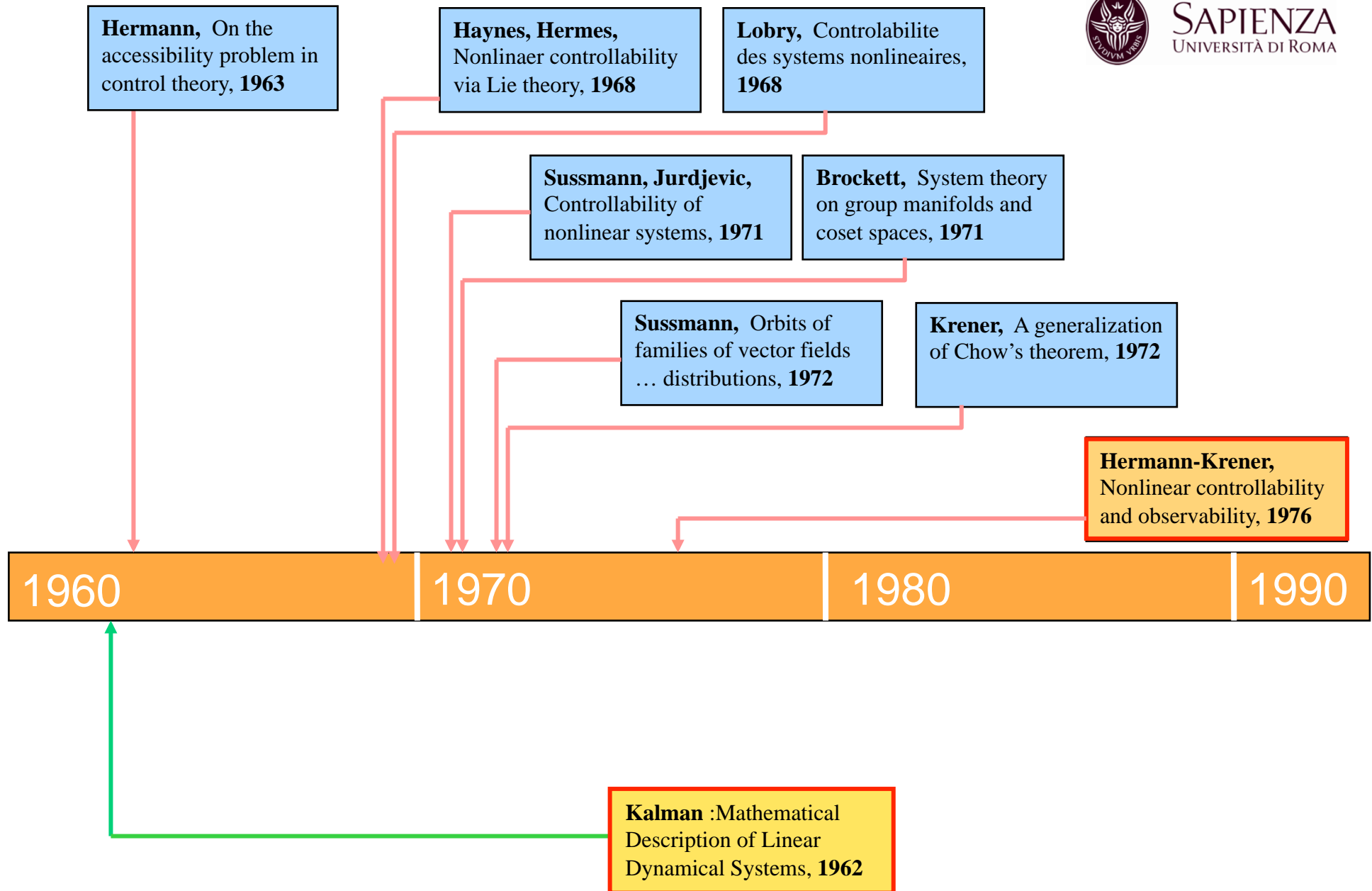
1960

1970

1980

1990

Kalman :Mathematical
Description of Linear
Dynamical Systems, **1962**





SIAM J. CONTROL
Vol. 8, No. 4, November 1970

CONTROLABILITE DES SYSTEMES NON LINEAIRES*

CLAUDE LOBRY†

Introduction. Dans cet article on étudie le problème de l'accessibilité pour des systèmes non linéaires du type :

SIAM J. CONTROL
Vol. 8, No. 4, November 1970

NONLINEAR CONTROLLABILITY VIA LIE THEORY*

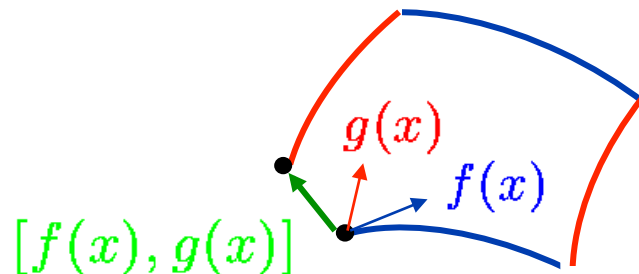
G. W. HAYNES† AND H. HERMES‡

1. Introduction. The form of the control system studied throughout most of this paper is

$$(1) \quad \dot{x}(t) = B(x(t))u(t), \quad \dot{x} = dx/dt,$$

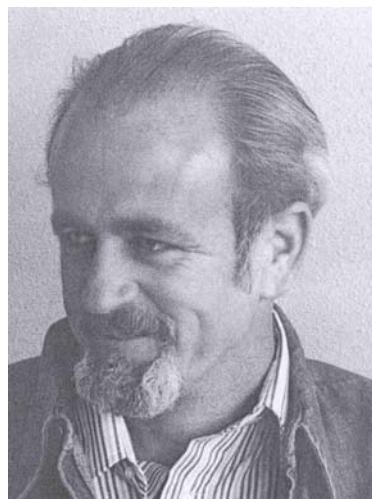
La geometria differenziale
è lo strumento adatto

$$\dot{x} = f(x)u + g(x)v$$



"The calculation that everybody must have done at least once in his/her lifetime"





SIAM J. CONTROL
Vol. 12, No. 1, February 1974

A GENERALIZATION OF CHOW'S THEOREM AND THE BANG-BANG THEOREM TO NONLINEAR CONTROL PROBLEMS*

ARTHUR J. KRENER†

Abstract. The main results of this paper are two-fold. The first, Theorem 1, is a generalization of the work of Chow and others concerning the set of locally accessible points of a nonlinear control system. It is shown that under quite general conditions, this set lies on a surface in state space and has a nonempty interior in the relative topology of that surface.

The second result, Theorem 3, generalizes the bang-bang theorem to nonlinear control systems using higher order control variations as developed by Kelley and others. As a corollary we obtain Halkin's bang-bang theorem for a linear piecewise analytic control system.



TRANSACTIONS OF THE
AMERICAN MATHEMATICAL SOCIETY
Volume 180, June 1973

ORBITS OF FAMILIES OF VECTOR FIELDS AND INTEGRABILITY OF DISTRIBUTIONS

BY

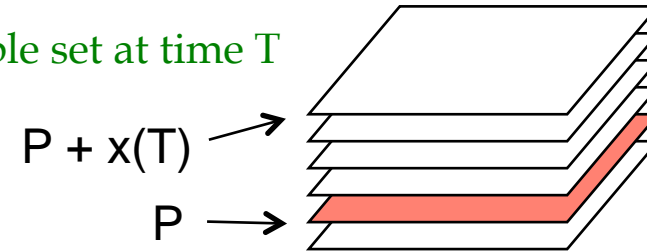
HÉCTOR J. SUSSMANN

ABSTRACT. Let D be an arbitrary set of C^∞ vector fields on the C^∞ manifold M . It is shown that the orbits of D are C^∞ submanifolds of M , and that, moreover, they are the maximal integral submanifolds of a certain C^∞ distribu-

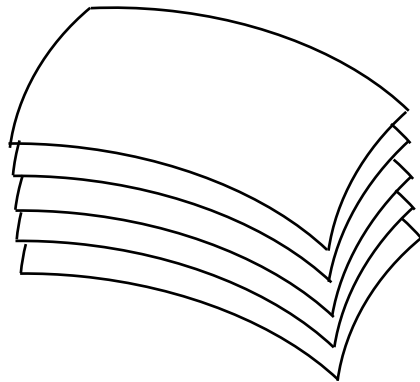
La transizione verso il quadro nonlineare:

P e Q **partizionano** lo spazio di stato

Reachable set at time T



subspaces \Rightarrow **submanifolds**



$$\dot{x} = f(x) + g(x)u$$

States reached at a fixed time T are confined to one of such submanifolds.

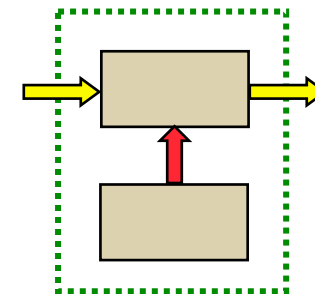
Each submanifold (leaf) contains an open set of reachable points.



The state space is partitioned (foliated) into **integral manifolds** of Δ the smallest **distribution** satisfying

- $[f, \Delta] \subset \Delta, [g, \Delta] \subset \Delta$

- $g \in \Delta$ At each x , $\Delta(x)$ is spanned by the vectors of an ideal of the Lie algebra of $f(x)$ and $g(x)$.





**Kalman, Pattern
recognition properties of
multilinear machines, 1968**

(Paper presented at IFAC International Symposium on Technical and
Biological Problems of Control, Yerevan, Armenian SSR, September 1968.)

PATTERN RECOGNITION PROPERTIES OF MULTILINEAR MACHINES

by

R. E. Kalman
Stanford University
Stanford, Calif., USA
and

Centre d'Automatique
École Nationale Supérieure des Mines
Paris, FRANCE

1960

1970

1980

1990

**Ho, Kalman, Effective
Construction of Linear State
Variable Models from I/O..., 1965**



Kalman, Pattern recognition properties of multilinear machines, **1968**

AI, Direct construction of minimal bilinear realizations, **1973**

A nonlinear input-output map admits a finite-dimensional bilinear realization if and only if the rank of the Hankel matrix is finite,

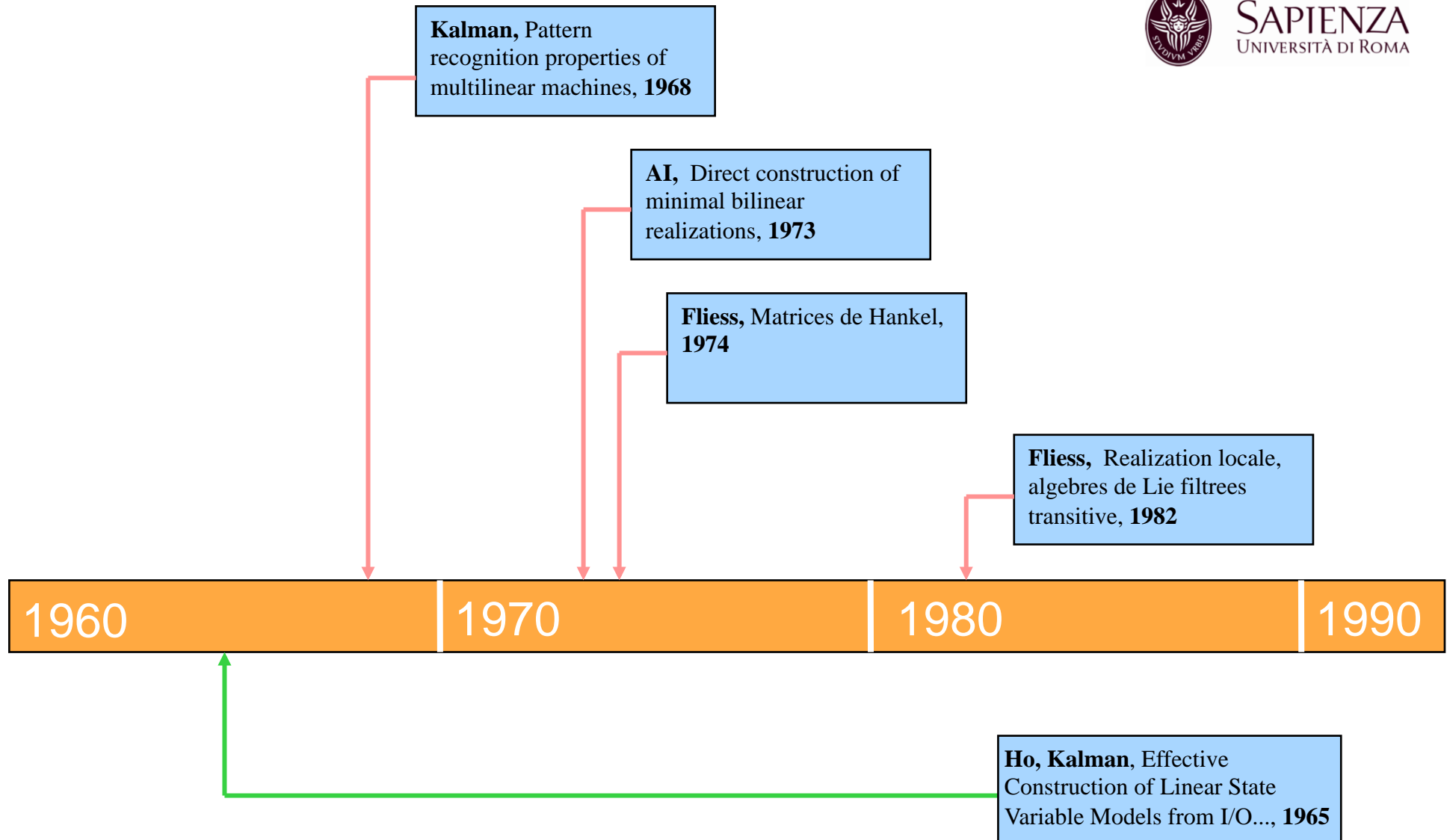


$$T_{..} = C(A^{i_k} N^{j_k})^k B$$

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Nxu + Bu \\ y &= Cx \end{aligned}$$



Ho, Kalman, Effective Construction of Linear State Variable Models from I/O..., **1965**





Lo spartiacque

Nonlinear Controllability and Observability

ROBERT HERMANN AND ARTHUR J. KRENER, MEMBER, IEEE

Abstract—The properties of controllability, observability, and the theory of minimal realization for linear systems are well-understood and have been very useful in analyzing such systems. This paper deals with analogous questions for nonlinear systems.

I. INTRODUCTION

FREQUENTLY, control systems of the following form are used to model the behavior of physical, biological, or social systems,

$$\Sigma: \begin{aligned} \dot{x} &= f(x, u) \\ y &= g(x) \end{aligned} \quad (1)$$

where $u \in \Omega$, a subset of \mathbf{R}^l , $x \in M$, a C^∞ connected manifold of dimension m , $y \in \mathbf{R}^n$ and f and g are C^∞ functions.

the state space M is still too large, then one would like to apply a systematic technique to reduce M and still preserve the input-output structure of the model.

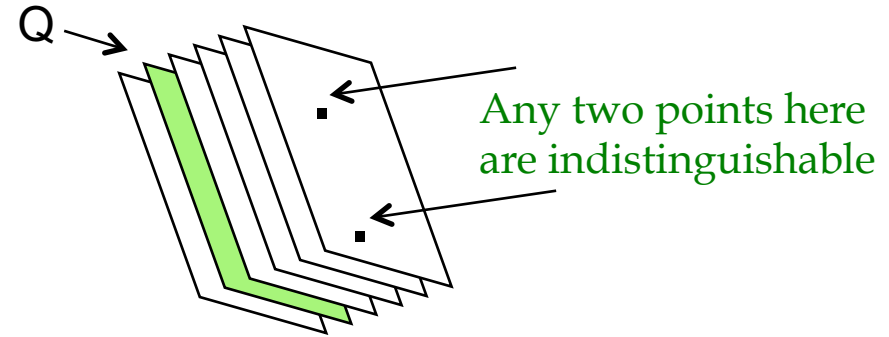
Using the ideas of controllability and observability, in the early 1960's Kalman and others carried out this program for linear systems. The similar questions for nonlinear systems were not effectively treated until the early 1970's. Based on the work of Chow [5], Hermann [9], Haynes-Hermes [8], and Brockett [9] and working independently, Lobry [21], [22], Sussman-Jurdjevic [25], and Krener [19], [20] developed the nonlinear analog of linear controllability in terms of the Lie algebra \mathcal{F} of vector fields on M generated by the vector fields $f(\cdot, u)$ corresponding to constant controls $u \in \Omega$.

It was shown that if the dimension of \mathcal{F} is constant or if the system Σ is analytic, then there exists a unique maxi-



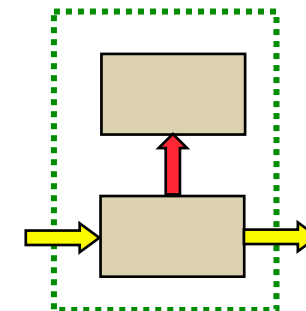
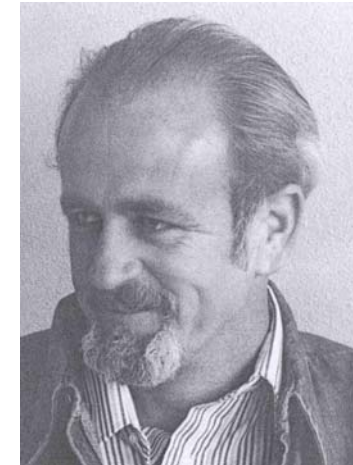
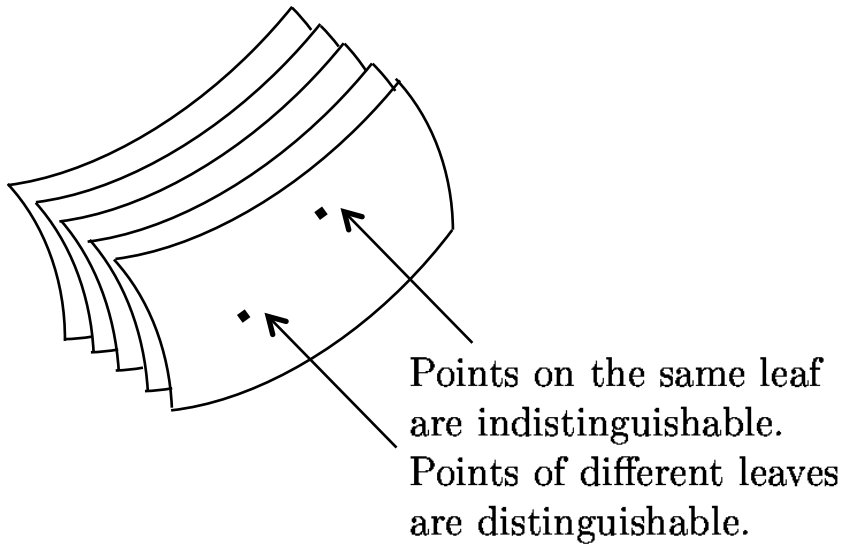
In the linear systems theory, linear subspaces of the state space which have particular properties are studied. Because one distinguishes between points and tangent vectors in a nonlinear setting, the concept of subspace generalizes to two different ones. A k -dimensional *regularly imbedded submanifold* M' of M is a subset of M such that around each point of M' there exists a coordinate neighborhood U such that $M' \cap U$ is given by $\{x_j = c_j; j = 1, \dots, n - k\}$ where c_1, \dots, c_{n-k} are constants. On $M' \cap U$, one has local coordinates given by (x_{n-k+1}, \dots, x_n) . A distribution Δ on M is a mapping which assigns to each $x \in M$ a subspace $\Delta(x)$ of $T_x M$ in a smooth (analytic) fashion. If each of these subspaces is of dimension k , Δ is said to be of rank k . The connection between the two concepts is the following: M' is an *integral submanifold* of Δ if for every $x \in M'$, $\Delta(x) = T_x M' \subseteq T_x M$. In other words, $\Delta(x)$ is the tangent space to M' at x .

La transizione verso il quadro nonlineare:
P e Q **partizionano** lo spazio di stato



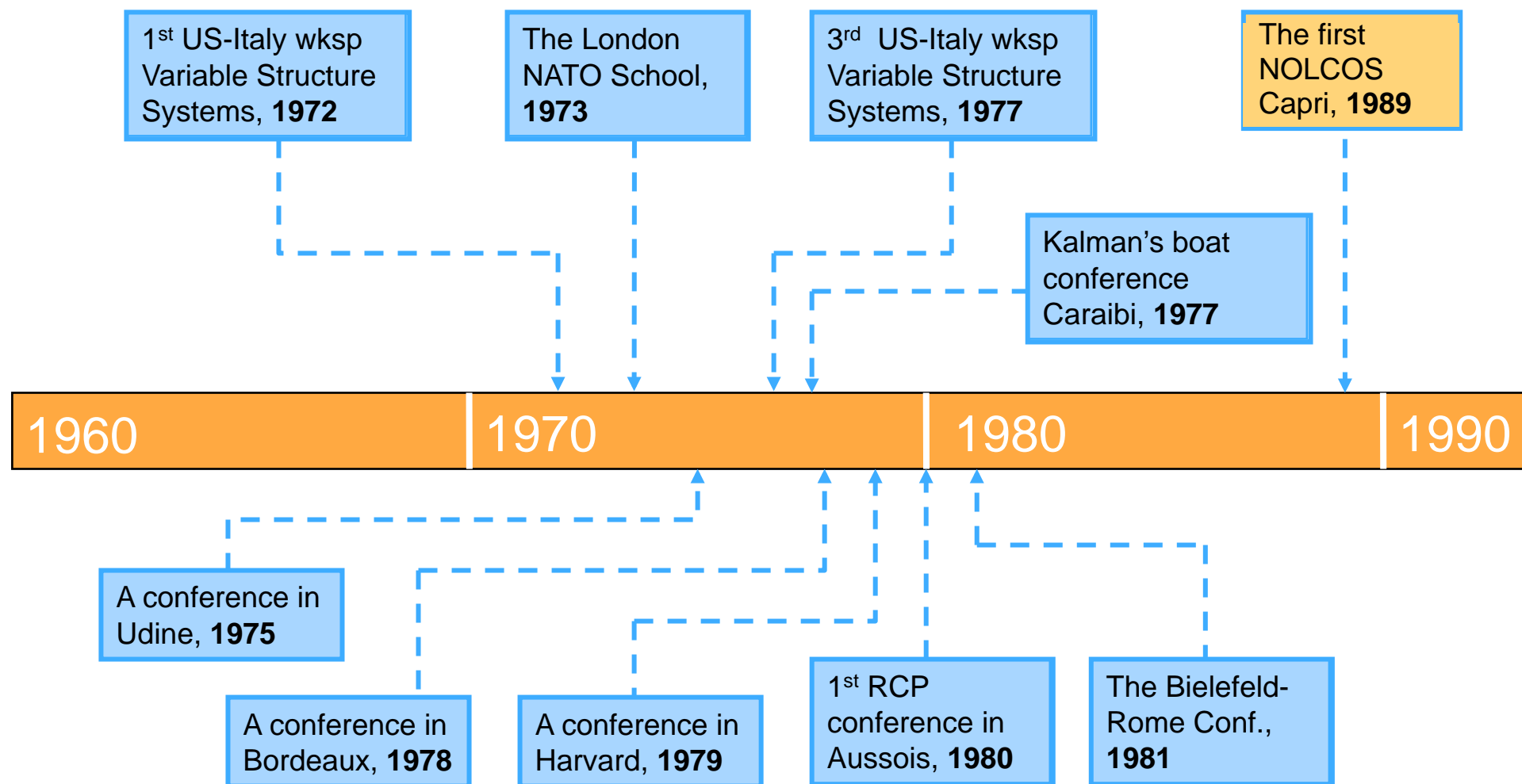
The state space is partitioned (foliated) into **integral manifolds** of Ω the largest **distribution** satisfying

- $[f, \Omega] \subset \Omega, [g, \Omega] \subset \Omega$
- $\Omega \subset \ker(dh)$





Il decennio **magico** 1972-1981: le piccole conferenze





SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Geometric Methods in System Theory

*Proceedings of the NATO Advanced Study Institute
held at London, England, August 27–September 7, 1973*

edited by

D. Q. MAYNE and R. W. BROCKETT



Contents		page
C. Lobry		
<i>Dynamical polysystems and control theory</i>	. . . . .	1
R.W. Brockett		
<i>Lie algebras and lie groups in control theory</i>	. . . . .	43
A. Isidori and A. Ruberti		
<i>Realization theory of bilinear systems</i>	. . . . .	83
J.M.C. Clark		
<i>An introduction to stochastic differential equations on manifolds</i>	. . . . .	131
L. Markus		
<i>General theory of global differential dynamics</i>	. . . . .	150
P. Stefan		
<i>Two proofs of Chow's theorem</i>	. . . . .	159
H. Hermes		
<i>On necessary and sufficient conditions for local controllability along a reference trajectory</i>	. . . . .	165
A.J. Krener		
<i>The high order maximal principle</i>	. . . . .	174
M.L.J. Hautus		
<i>Optimal control on manifolds</i>	. . . . .	185
J.Grote		
<i>Problems in geodesic control</i>	. . . . .	194
R.M. Hirschorn		
<i>Controllability in nonlinear systems</i>	. . . . .	205
G.S. Goodman		
<i>Control theory in transformation systems</i>	. . . . .	215
S. Johansen		
<i>The imbedding problem for finite Markov chains</i>	. . . . .	227
R. Hermann		
<i>Some remarks on the geometry of systems</i>	. . . . .	237
H.J. Sussmann		
<i>Minimal realizations of nonlinear systems</i>	. . . . .	243
V. Jurdjevic		
<i>Causal dynamical systems: irreducible realizations</i>	. . . . .	253
E. Fornasini and G. Marchesini		
<i>On the internal structure of bilinear input-output maps</i>	. . . . .	263
K.N. Swamy and T.J. Tarn		
<i>Optimal control of discrete bilinear systems</i>	. . . . .	275
D.L. Elliott		
<i>Diffusions on manifolds arising from controllable systems</i>	. . . . .	285
J.T.-H. Lo		
<i>Signal detection on lie groups</i>	. . . . .	295
A.S. Willsky		
<i>Some estimation problems on lie groups</i>	. . . . .	305

DEUXIEME PARTIE

GEOMETRIE DIFFERENTIELLE, ALGEBRES DE LIE, SERIES FORMELLES

APPLICATION A LA COMMANDE DES SYSTEMES NON-LINEAIRES

(Sous la responsabilité de M. FLIESS, I.D. LANDAU et C. LOBRY)

	<u>Page</u>
2.0 Introduction	185
2.1 Controlabilité des systèmes non-linéaires	187
C. LOBRY	
2.2 Complète controlabilité sur les groupes linéaires	215
G. SALLET	
2.3 Controlabilité des systèmes bilinéaires	229
B. BONNARD	
2.4 Sur la théorie structurelle et le problème de la réjection des perturbations dans les systèmes non-linéaires	245
A. ISIDORI	
2.5 Observabilité et observateurs des systèmes non-linéaires .	295
A. ISIDORI	
2.6 Stabilisation des systèmes non-linéaires	307
J.P. GAUTHIER, G. BORNARD	
2.7 Réalisation des systèmes réguliers (ou bilinéaires) et séries formelles non commutatives	325
G. JACOB	
2.8 Développements fonctionnels et calcul symbolique non-com- mutatif	359
M. FLIESS	
2.9 La propriété d'approximation des systèmes réguliers (ou bilinéaires)	379
M. FLIESS, D. NORMAND-CYROT	
2.10 Modélisation dynamique des colonnes de distillation	385
G. BORNARD, J.P. GAUTHIER	
2.11 Identification par systèmes à état affine et applications aux centrales électriques	409
D. NORMAND-CYROT	
2.12 Modélisation d'un écosystème lacustre	419
S. GENTIL	



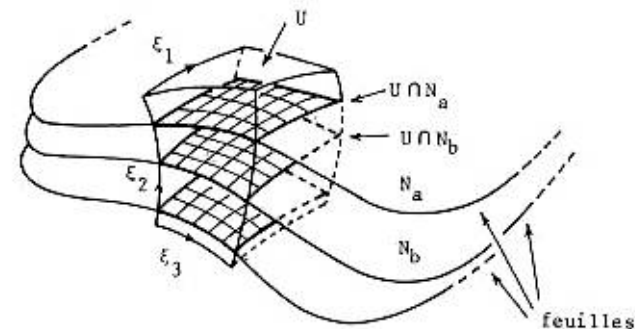
SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

SUR LA THEORIE STRUCTURELLE
ET LE PROBLEME DE LA REJECTION DES PERTURBATIONS
DANS LES SYSTEMES NON LINEAIRES

A. ISIDORI
Istituto di Automatica
Università di Roma

Résumé

Le but de la première partie est ce de présenter quelques concepts de base de la théorie structurelle des systèmes non linéaires en temps continu. En particulier on illustre l'utilité de certains outils géométrique-différentiels (les distributions invariantes) dans l'analyse des propriétés d'accessibilité, d'observabilité et dans la décomposition locale de l'espace d'état. Dans la deuxième et la troisième partie, on utilise ces résultats pour résoudre quelques problèmes de réjection des perturbations, dans les systèmes nonlinéaires, par bouclage de l'état ou de la sortie. Dans le dernier cas, on considère aussi le problème de l'observation de l'état d'un système avec entrées inaccessibles.



FIRST ANNOUNCEMENT - CALL FOR PAPERS



International Federation of Automatic Control

SYMPOSIUM
on

**NONLINEAR
CONTROL SYSTEMS
DESIGN**

14-16 June 1989
CAPRI - ITALY

Organized by:

Dipartimento di Informatica e Sistemistica
Università di Roma «La Sapienza»

Associazione Nazionale Italiana per l'Automazione
ANIPLA

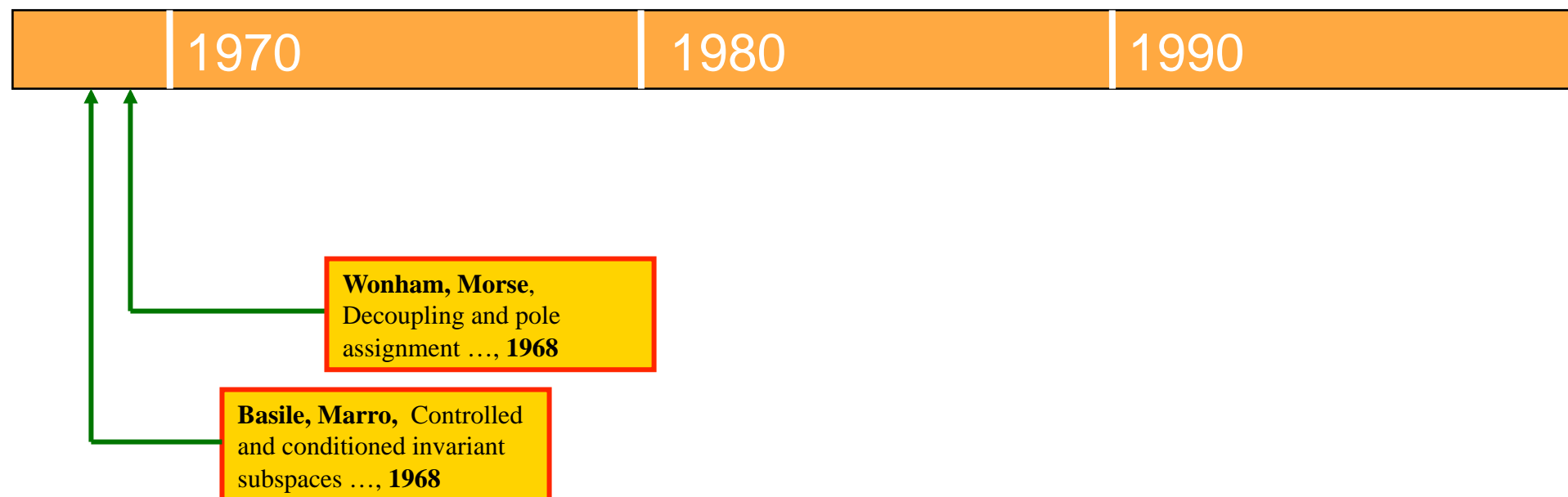


SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA



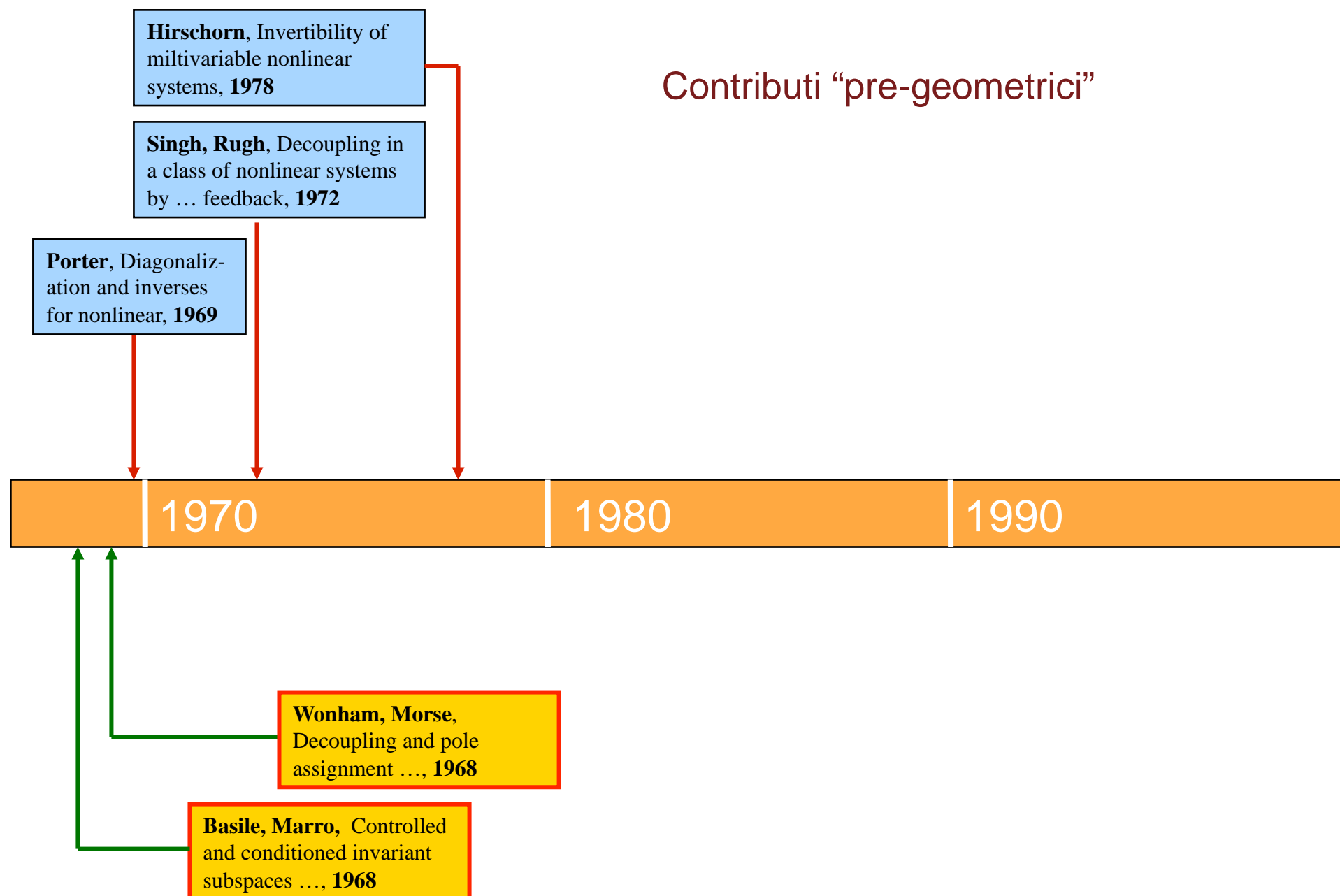


➤ *Modifica della struttura interna
di un sistema nonlineare*





Contributi “pre-geometrici”





Hermann-Krener,
Nonlinear controllability
and observability, **1976**

AI, Krener, CGG, SM,
Nonlinear decoupling ...
diferential geometric, **1979**

London NATO
School , 1973

La fortuna di essersi trovato al posto giusto al momento giusto !

Primavera 1977: il 3rd workshop su "Variable Structure Systems" in Taormina: Krener presenta il suo **landmark work**

1977-78: ci si prepara per la visita di Krener a Roma (imparando la geometria differenziale sul libro di Boothby)

Primavera 1979: Visita di Art Krener a Roma

Primavera 1979: La corsa a scrivere un rapporto interno

Estate 1979: Il rapporto presentato al meeting di Harvard

3 anni

6 anni

1970

1980

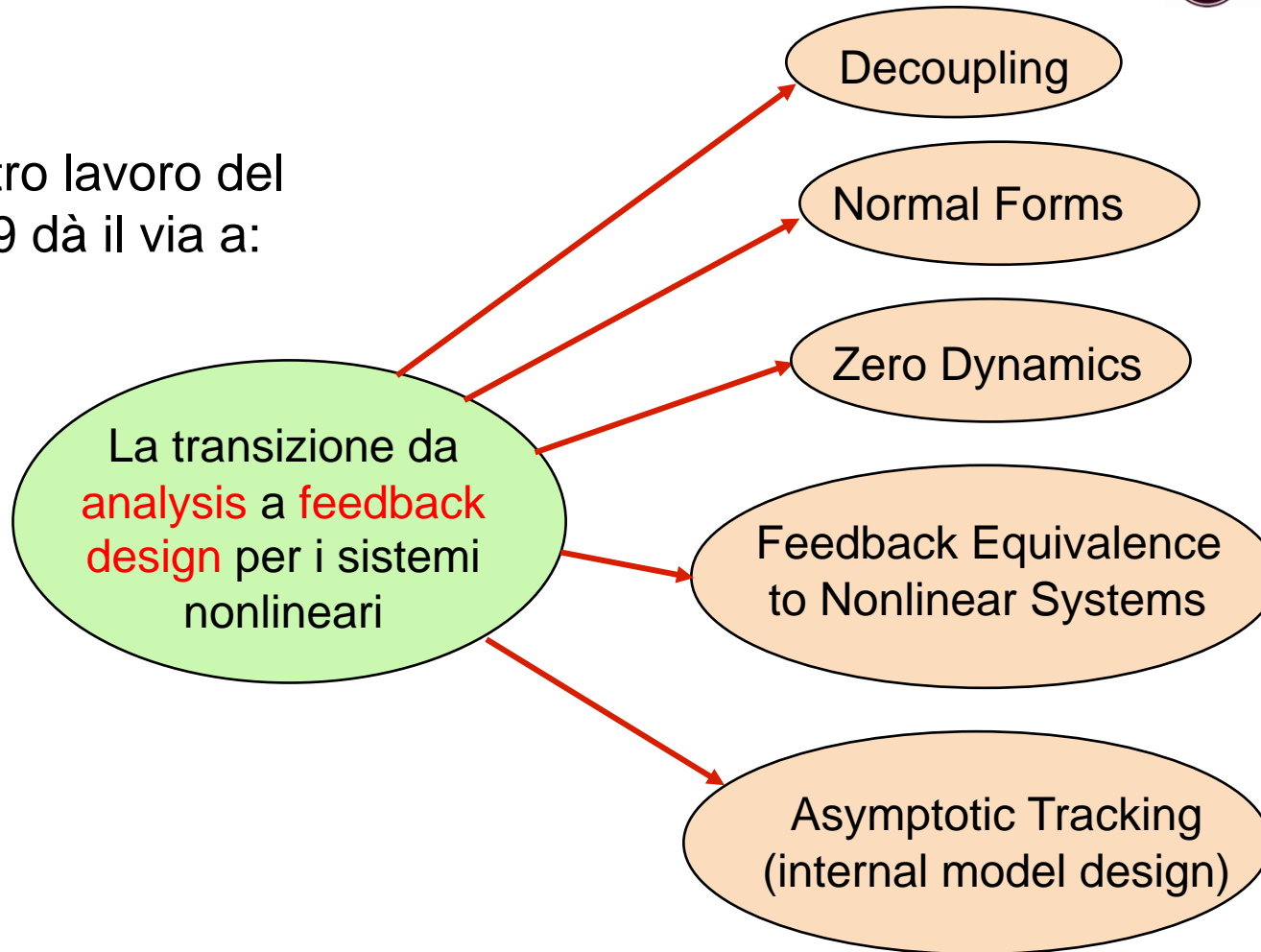
1990

Wonham, Morse,
Decoupling and pole
assignment ..., **1968**

Basile, Marro, Controlled
and conditioned invariant
subspaces ..., **1968**

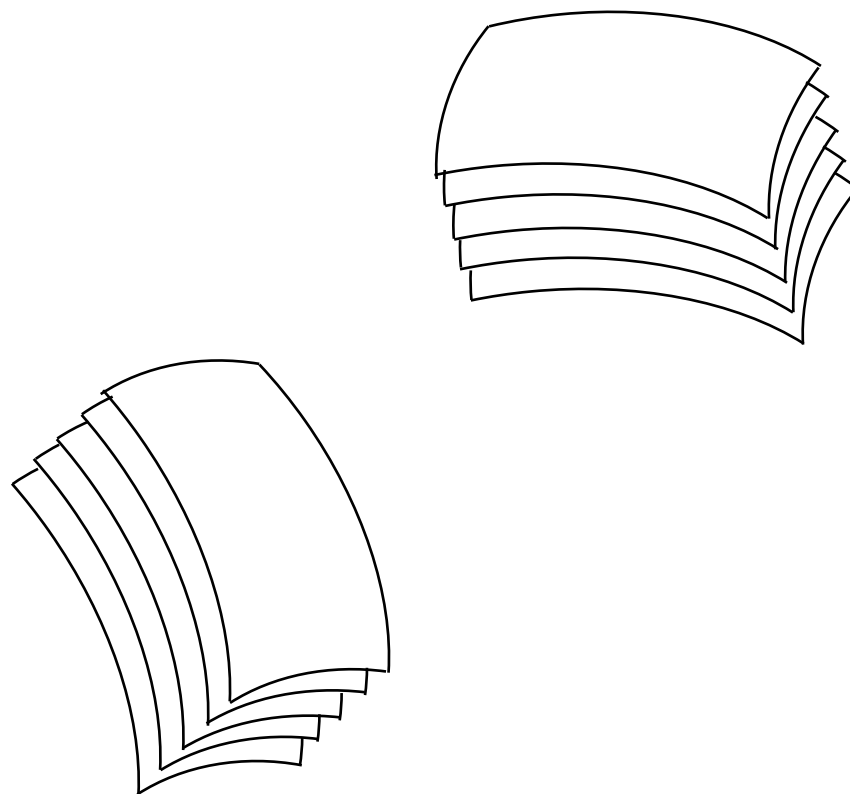


Il nostro lavoro del
1979 dà il via a:

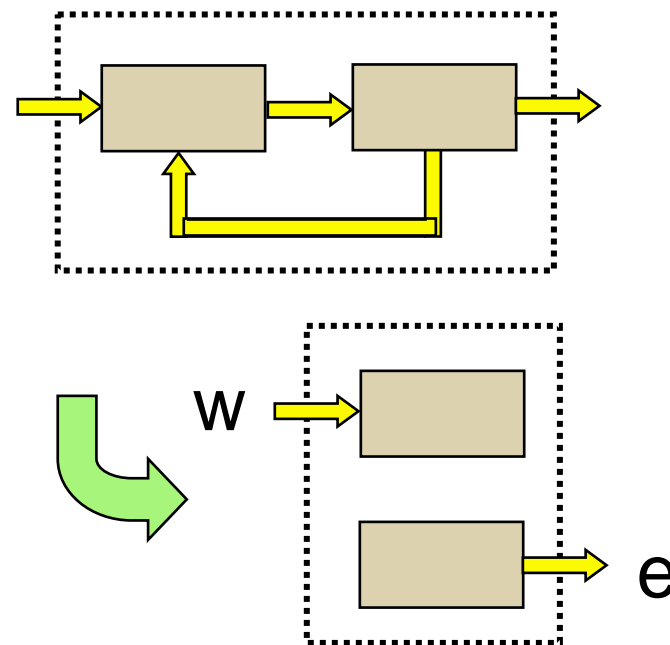
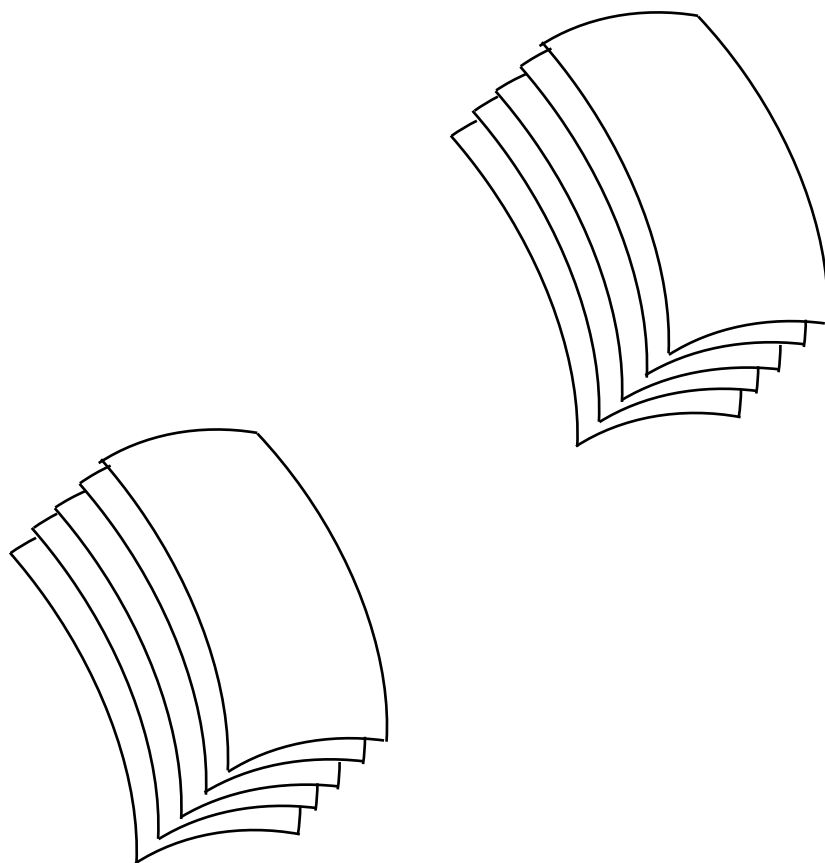




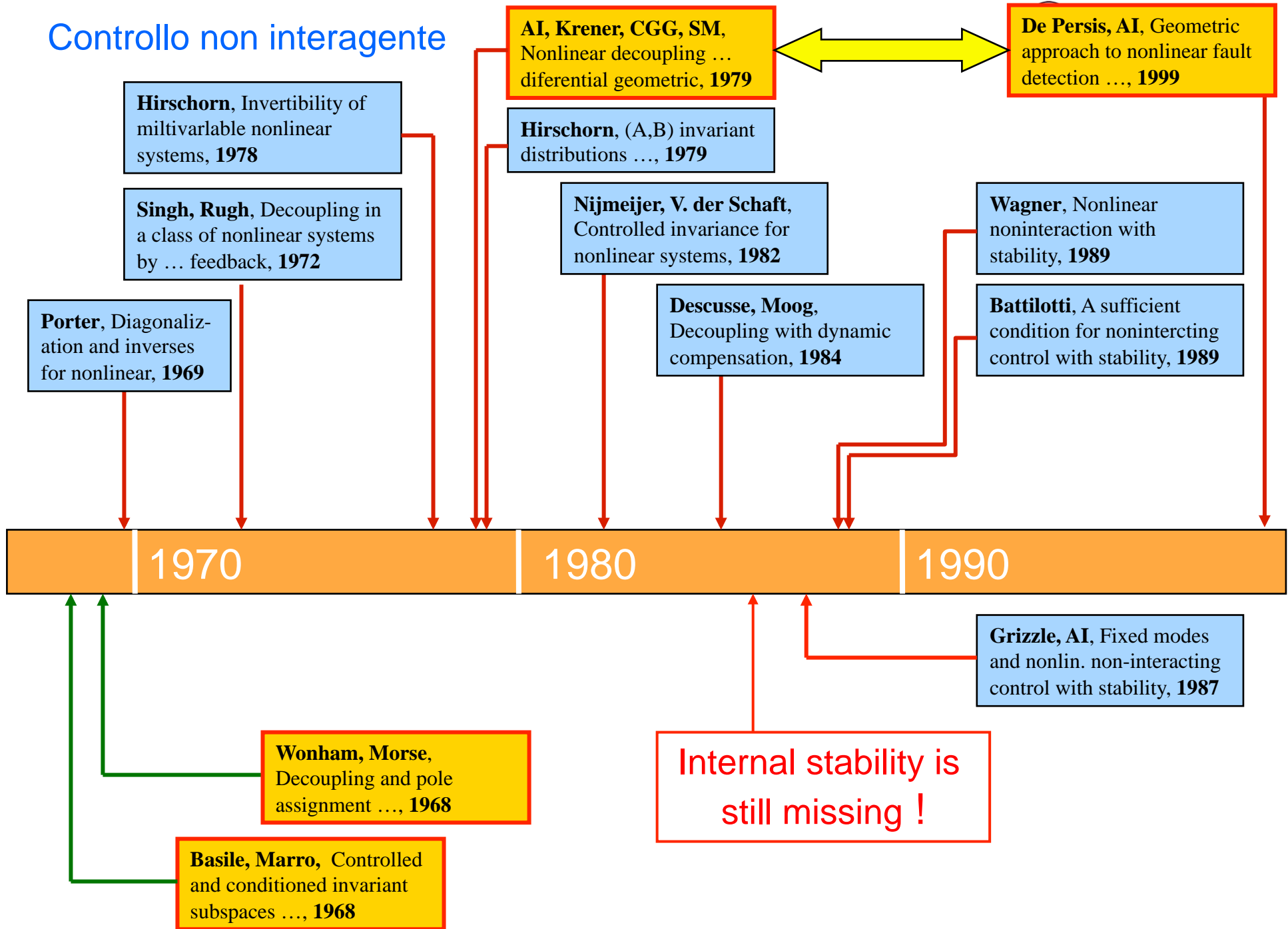
Feedback is used to change the shape of certain foliations, so as to obtain that the states excited by the exogenous input are unobserved through the regulated output



Feedback is used to change the shape of certain foliations, so as to obtain that the states excited by the exogenous input are unobserved through the regulated output



Controllo non interagente





NONLINEAR NONINTERACTION WITH STABILITY BY DYNAMIC STATE FEEDBACK*

K. G. WAGNER†

Abstract. The dynamic feedback noninteraction with stability problem for square affine systems with a nonsingular decoupling matrix is investigated. First, a characterization of the class of dynamic feedbacks resulting in a noninteractive system is given. It is then shown that these feedbacks induce a certain subdynamic, which is determined by the given system and the decoupling matrix. A necessary and sufficient condition of this subdynamic is necessary for the achievement of an analogous result on the static feedback case. © 1991 Society for Industrial and Applied Mathematics. *Key words:* nonlinear noninteracting control, stability, dynamic state feedback, and Grizzle.

A Sufficient Condition for Nonlinear Noninteracting Control with Stability Via Dynamic State Feedback

Stefano Battilotti

Abstract—In this paper we give a sufficient condition to solve the problem of achieving local noninteracting control with stability for a class of nonlinear systems. A scalar output depends on only the i th scalar input is generally known as the nonlinear noninteracting control problem. Necessary and sufficient conditions for solving the noninteracting control problem (without stability) via regular static state feedback were given in [4], [11], [12], [17]. Dynamic extension has also been considered in [7], [13], [18], [19].

A Geometric Approach to Nonlinear Fault Detection and Isolation

Claudio De Persis and Alberto Isidori, *Fellow, IEEE*

Abstract—We present in this paper a differential-geometric approach to the problem of fault detection and isolation for nonlinear systems. A necessary condition for the problem to be solvable is derived in terms of an unobservability distribution, which is computable by means of suitable algorithms. The existence and regularity of such a distribution implies the existence of changes of coordinates in the state and in the output space which induce an "observable" quotient subsystem unaffected by all fault signals but one. For this subsystem, a fault detection filter is designed.

feedback. In this way, a number of obstructions inherent in the Beard-Jones approach, namely the necessity of a vector relative degree and the stability of certain fixed modes were removed (see Section II).

The core of the Beard-Jones fault detection filter is a Luenberger observer, designed in such a way that the resulting "error" system, in which the faults are viewed as inputs and the residuals are viewed as outputs, has a diagonal (and nontrivial)



Una tematica associata:
feedback linearization

Krener, On the equivalence of control systems and the linearization ... , 1972



SIAM J. CONTROL
Vol. 11, No. 4, November 1973

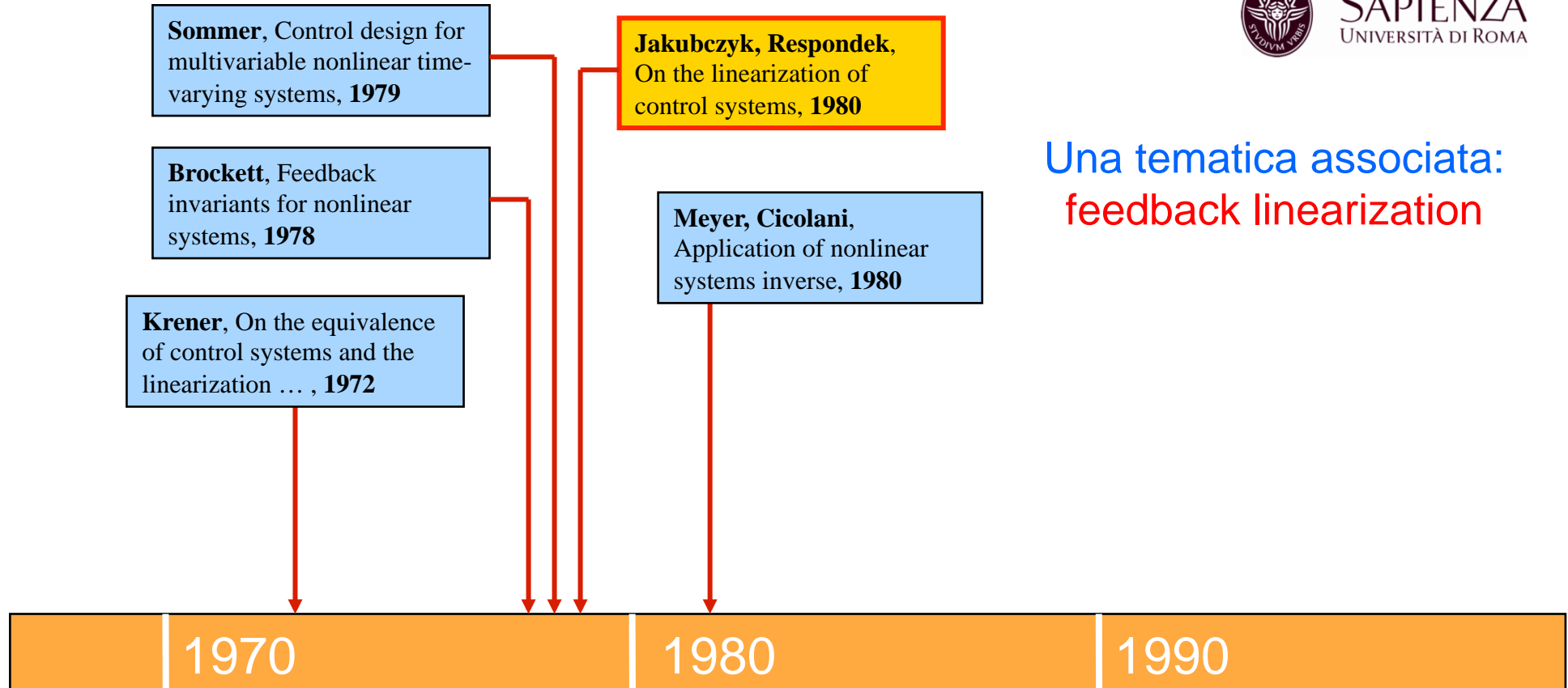
**ON THE EQUIVALENCE OF CONTROL SYSTEMS AND THE
LINEARIZATION OF NONLINEAR SYSTEMS***

ARTHUR J. KRENER†

Abstract. Given two control systems where the control enters linearly, a necessary and sufficient condition is derived that these systems be locally diffeomorphic, i.e., that there exist a local diffeomorphism between the state spaces which carries a trajectory of the first system for each control into the trajectory of the second system for the same control. As a corollary we derive necessary and sufficient conditions for a system to be locally diffeomorphic to a linear system.



Una tematica associata:
feedback linearization





Una tematica associata: feedback linearization

Sommer, Control design for multivariable nonlinear time-varying systems, **1979**

Brockett, Feedback invariants for nonlinear systems, **1978**

Krener, On the equivalence of control systems and the linearization ... , **1972**

Jakubczyk, Respondek, On the linearization of control systems, **1980**

Meyer, Cicolani, Application of nonlinear systems inverse, **1980**

AI, Moog, De Luca, Sufficient sufficient conditions for full linearization via dynamic, **1986**



L'assenza di dinamica zero, unitamente alla possibilità di acquisire grado relativo via feedback dinamico implica l'esistenza di un feedback e di un cambio di coordinate che rende il sistema lineare e controllabile..

Proceedings of 25th Conference on Decision and Control Athens, Greece - December 1986

A SUFFICIENT CONDITION FOR FULL LINEARIZATION VIA DYNAMIC STATE FEEDBACK

WA8 - 11:45

A. Isidori*, C.H. Moog**, A. De Luca***

* Visiting Professor, Department of Electrical and Computer Engineering Arizona State University Tempe, Arizona

** Laboratoire d'Automatique E.N.S.M.-Unite' Associee au C.N.R.S. Nantes, France

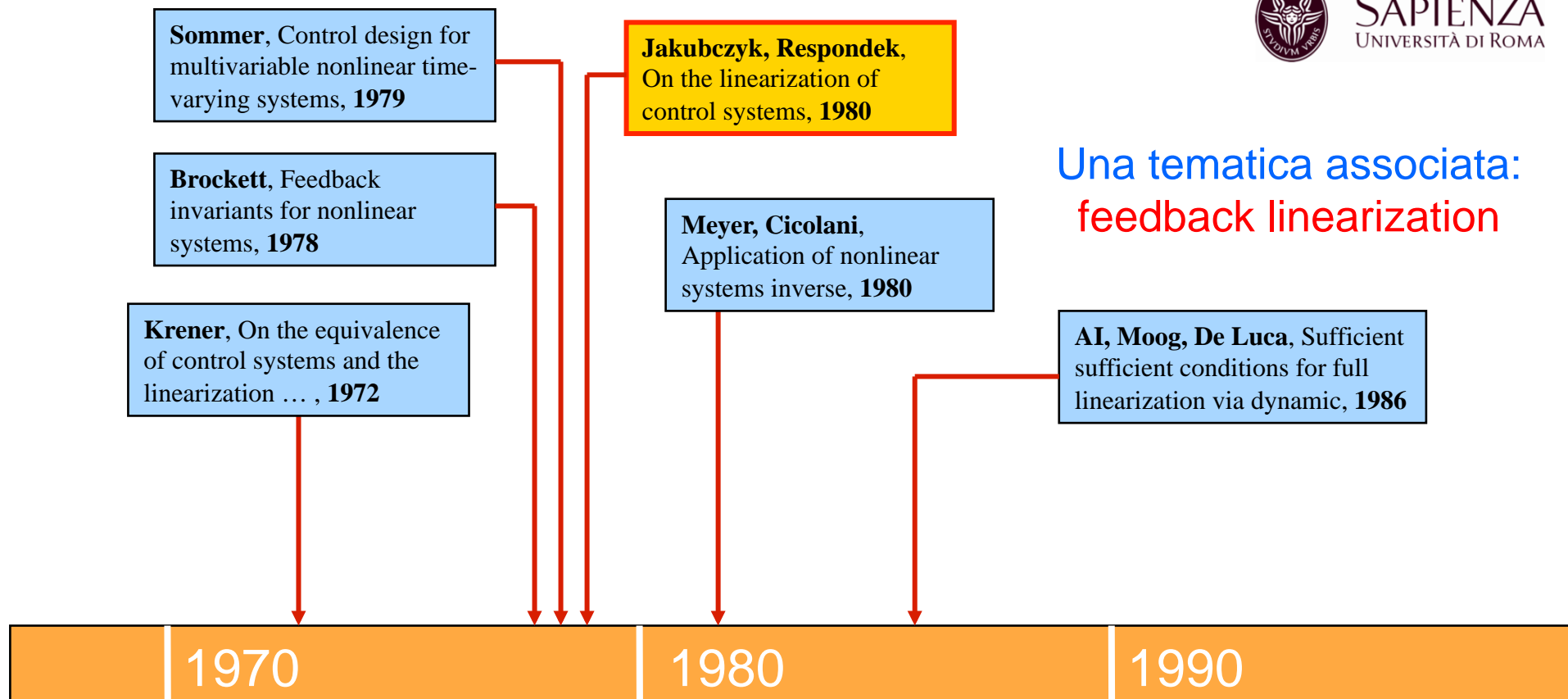
*** Dipartimento di Informatica e Sistemistica Universita di Roma "La Sapienza" Roma, Italy

Abstract

The purpose of this paper is to show that any square invertible nonlinear system whose inverse is "state-free" can be turned into a fully linear controllable and observable system by means of dynamic state-feedback and coordinates transformations. A nonlinear system has an inverse which is "state-free" if the value of the input (at time t) can be expressed as a function of the values (at t) of the output and a finite number of its derivatives.

It is known that feedback can induce unobservability if and only if Δ^* (the so-called maximal controlled invariant distribution contained in the differential of h) is nonzero. Thus, the issue is to consider systems which have $\Delta^* = 0$ and to be sure that such a condition is not lost along the decoupling procedure.

Based on a recent understanding of the nonlinear equivalents of the notion of "transmission zeros," described in [6], it is shown here that the right class



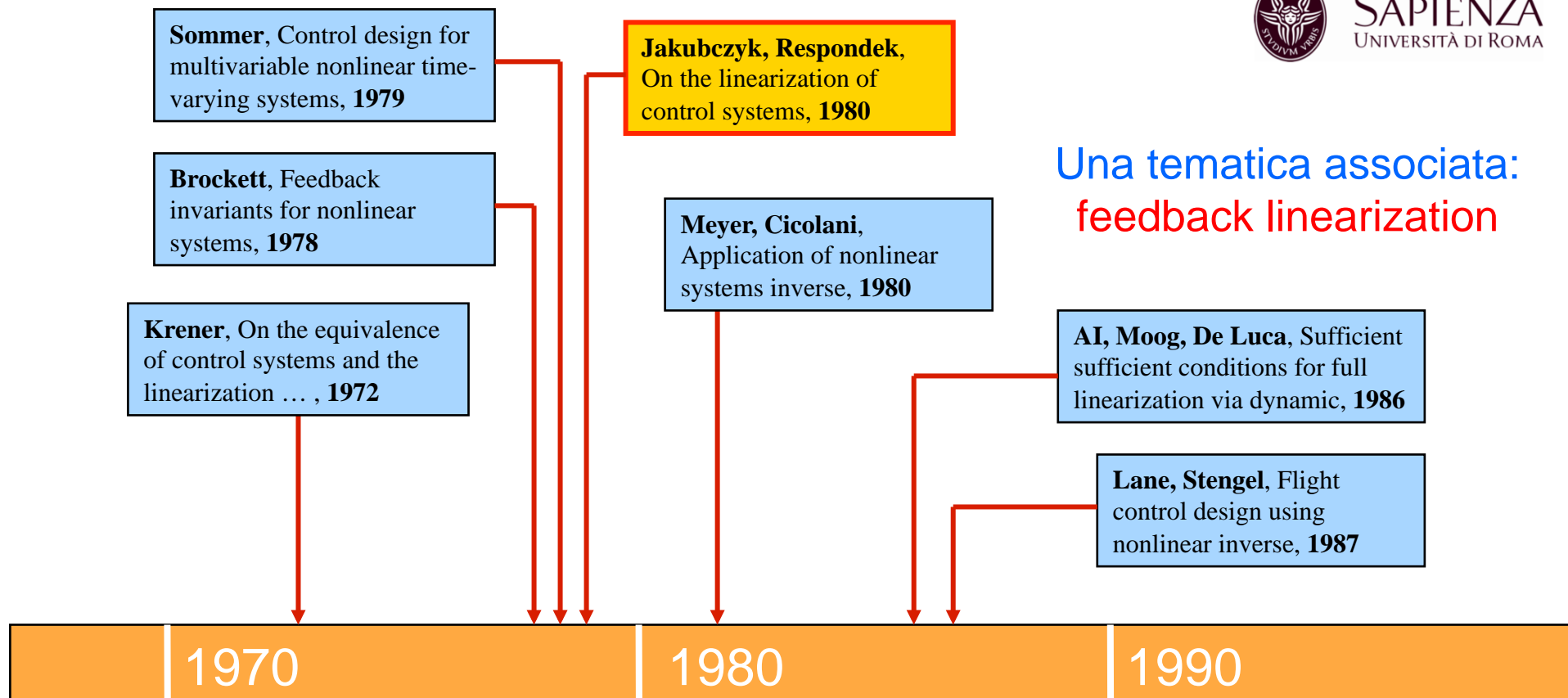
Una tematica associata:
feedback linearization

L'assenza di dinamica zero, unitamente alla possibilità di acquisire grado relativo via feedback dinamico implica l'esistenza di un feedback e di un cambio di coordinate che rende il sistema lineare e controllabile..

... soon after reappeared under different name: le uscite per le quali la dinamica zero diventa banale si chiameranno "flat outputs"



Una tematica associata:
feedback linearization





➤ *La dinamica zero*

Chi era costei ? Un **ossimoro** ?

Tutto ha avuto inizio nel 1979. quando la nozione di **invarianza controllata** è stata estesa a sistemi nonlineari

Nei sistemi **lineari**, gli zeri sono gli autovalori della parte inosservabile di un sistema reso **massimamente inosservabile** mediante retroazione

NONLINEAR ZERO DISTRIBUTIONS **TP3-5:00**

<p>A J Krener Department of Mathematics University of California Davis, California 95616</p>	<p>A Isidori Istituto di Automatica Università di Roma Via Eudossiana 18 00184 Roma</p>
--	---

Introduction

This paper generalizes the concept of a zero from a linear to nonlinear system. We start by briefly reviewing the concept of zero for a linear system. This is quite a complicated idea and many different definitions have been proposed. Of necessity we cannot discuss them all and we refer the reader to the excellent survey paper of MacFarlane and Karcanias [1] for a full treatment. The particular definition that we shall adopt is from Desoer and Schulman [2].

forward calculation shows that (2.2) holds and that there exists f such that (2.3) holds so z is a zero of $T(s)$ as before (2.1). The vectors f and x^0 are called the input and state zero vectors respectively

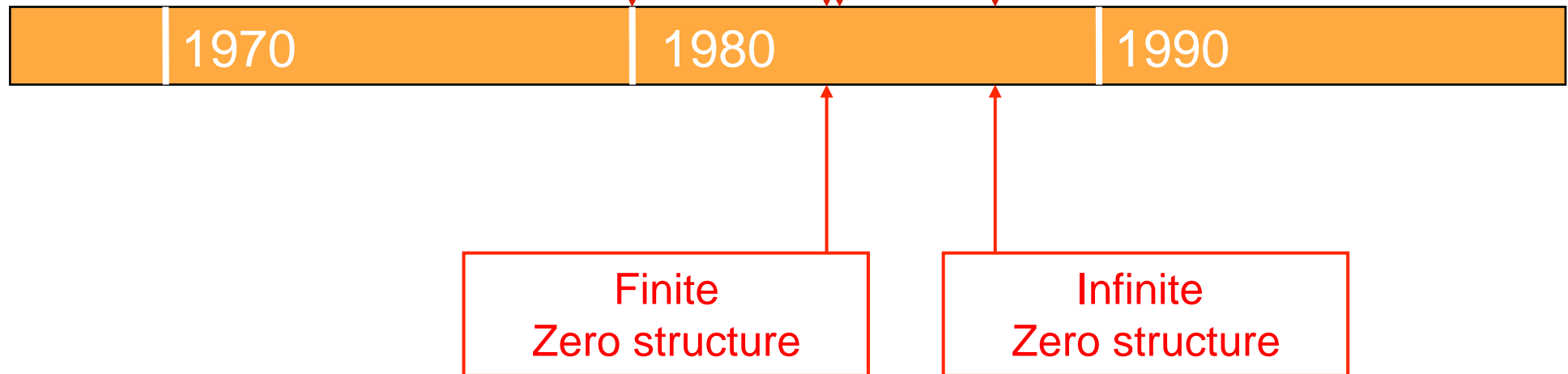
By linearity if z^i , x^i and f^i satisfy (2.2) and (2.3) for $i = 1, \dots, k$ and x^0 is a linear combination of $\{x^1, \dots, x^k\}$

$$x^0 = \sum_{i=1}^k \alpha_i x^i$$

then there exists an input

$$u(t) = \sum_{i=1}^k \alpha_i f^i e^{z^i t}$$

resulting in zero output. Therefore it is natural to consider the space of all state zero directions, i.e. all initial conditions x^0 for which there exists an input which zeroes the output. This is precisely





A FREQUENCY DOMAIN PHILOSOPHY FOR NONLINEAR SYSTEMS,
WITH APPLICATIONS TO STABILIZATION AND TO ADAPTIVE CONTROL

A relative degree 1 system, in local coordinates
can be expressed as

$$\dot{z} = f_1(z, y) \quad (2.4)$$

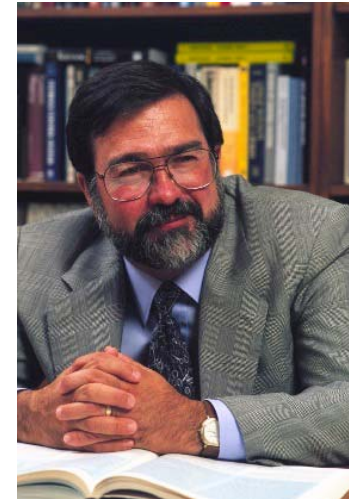
$$\dot{y} = L_f h(z, y) + u L_g h(z, y) .$$

In this setting, the zero dynamics is the (n-1)-th
order system

$$\dot{z} = f_1(z, 0) . \quad (2.5)$$

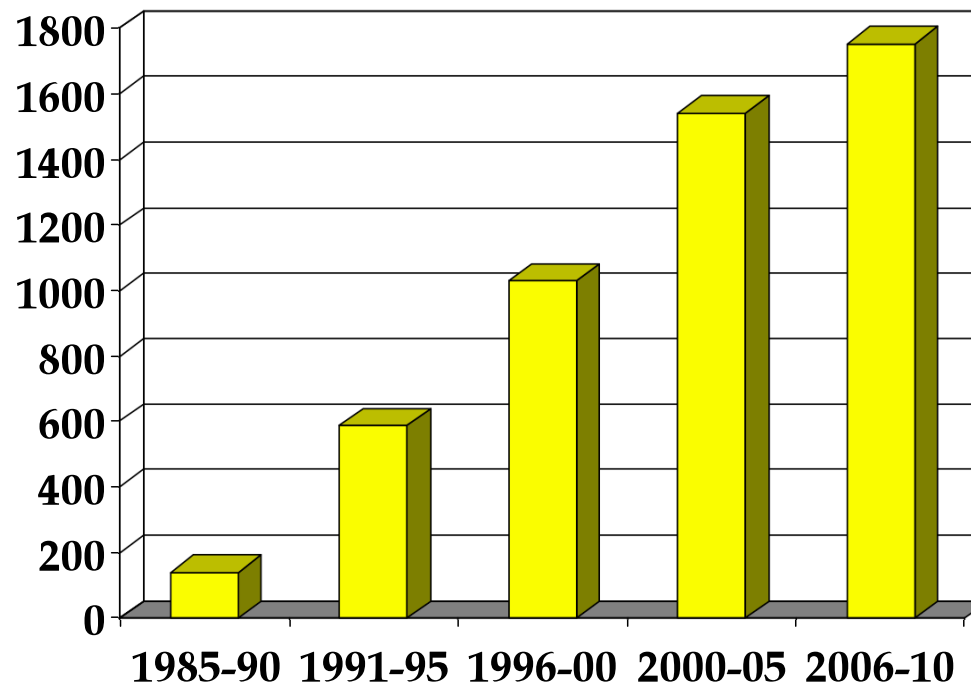
Definition 2.4.

The
system (2.1) is globally minimum phase on M provided
it is minimum phase and the zero dynamics (2.6) is
globally asymptotically stable.



Malgrado diversi tentativi di reintrodurre lo stesso concetto sotto nomi differenti

la terminologia “Zero Dynamics” è divenuta standard





Proceedings of 23rd Conference
on Decision and Control
Las Vegas, NV, December 1984

FP2 - 4:00

A FREQUENCY DOMAIN PHILOSOPHY FOR NONLINEAR SYSTEMS,
WITH APPLICATIONS TO STABILIZATION AND TO ADAPTIVE CONTROL

Theorem 3.1. Suppose the system (3.1) on \mathbb{R}^n is globally minimum phase and satisfies (H1)-(H2). Consider the output feedback law

$$u = -ky \quad (3.1)$$

For any bounded open set $U \subset \mathbb{R}^n$ there exists k_U such that for all $k > k_U$ the closed-loop system (2.1)-(3.1) is locally and globally asymptotically stable to x_0 on U .

Questo è **errato**. Infatti, affinché il Teorema sia valido occorre che la dinamica zero sia localmente esponenzialmente stabile. Altrimenti ci possono essere insiemi limite non banali. Ma inaugura l'interesse nel concetto di “**stabilizzazione con regione di attrazione garantita**”.



Un risultato analogo (i.e. **sotto high-gain output feedback, l'uscita si avvicina a zero, mentre gli altri stati si avvicinano a traiettorie della dinamica di $f(x)+g(x)\alpha(x)$ ristretto Δ^***) apparve, simultaneamente e indipendentemente, in

INT. J. CONTROL, 1985, VOL. 42, NO. 6, 1369-1385

High-gain feedback in non-linear control systems†

RICCARDO MARINO‡

High-gain state and output feedback are investigated for non-linear control systems with a single additive input by using singular perturbation techniques.

Classical approximation results (Tihonov-like theorems) in singular perturbation theory are extended to non-linear control systems by defining a composite additive control strategy, a control-dependent fast equilibrium manifold and non-linear change of coordinates.

L'analisi è tuttavia solo locale, e la possibile occorrenza di insiemi limite non banali (dovuta a mancanza di iperbolicità) non viene discussa.



Il problema della stabilizzazione con regione di attrazione garantita era stato affrontato anche in

IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATIC CONTROL, VOL. AC-31, NO. 10, OCTOBER 1986

Potentially Global Stabilizability

A. BACCIOTTI

Abstract—In this note we consider a particular class of nonlinear systems with a controllable linear part. We prove that by an appropriate choice of a feedback law, it is possible to transform the system in such a way that the origin is asymptotically stable and the region of attraction is arbitrarily large.

Bacciotti, in un articolo successivo (NOLCOS 1992) presentò quello che viene comunemente riconosciuto come l'argomento più elegante per dimostrare che, nei sistemi che hanno una dinamica zero globalmente stabile, **high gain output feedback** garantisce **semiglobal practical stability**.



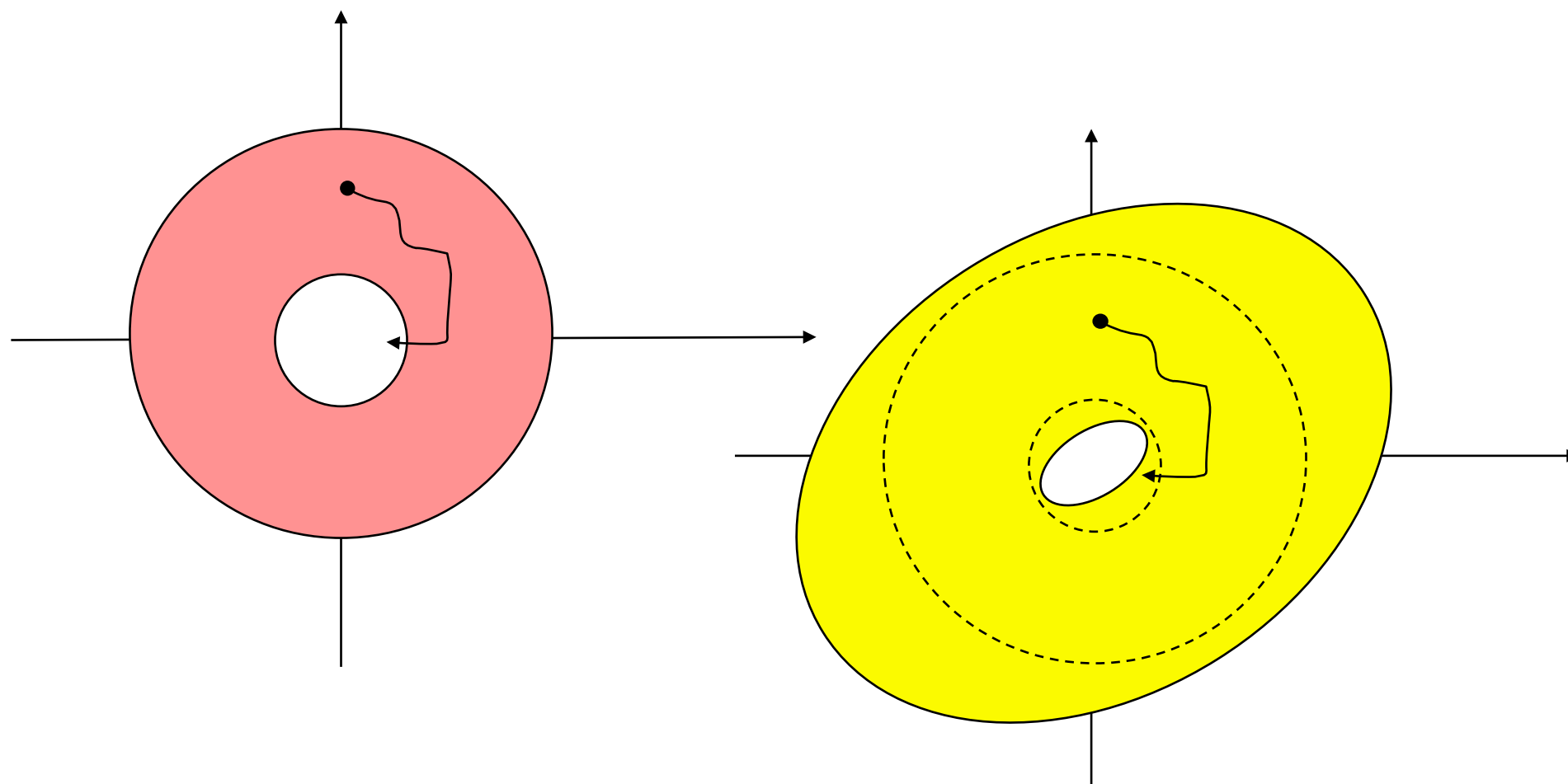
Gli argomenti usati in precedenza si basavano sul cosiddetto Teorema di **Tichonov** ed erano incompleti, in quanto il teorema in questione considera orizzonti di tempo finiti. Meglio sarebbe stato appellarsi, come suggerito da **Knobloch**, ai risultati di **Fenichel**.

L'argomento di Bacciotti fece piazza pulita di tutto e, a tutt'oggi, grazie anche all'uso fattone da Teel-Pray, è l'argomento base per provare risultati di tipo **high-gain** (che, per un buffo bisticcio di parole, di fatto è uno **small-loop-gain**)



$$\begin{aligned}\dot{z} &= f(z, y) \\ \dot{y} &= a(z, y) + b(z, y)u\end{aligned}$$

Let $V(z)$ be a Lyapunov function for $\dot{z} = f(z, 0)$. Pick $W(x) = V(z) + y^2$.
Then, by high-gain, $\dot{W}(x)$ can be rendered negative on





Nei sistemi lineari, gli zeri sono poli del sistema inverso, e un concetto importante è quello di struttura di zeri all'infinito

ON THE NONLINEAR EQUIVALENT OF THE NOTION OF
TRANSMISSION ZEROS

A. Isidori
Dipartimento di Informatica e Sistemistica
Università di Roma "La Sapienza"
Roma, Italy

C.H. Moog
Laboratoire d'Automatique
E.N.S.M. - Unité Associée au C.N.R.S.
Nantes, France

*Abstract. The purpose of
notion of "transmission zero
dynamics and unobservable
any invertible linear system
It is also shown that some
Hirschorn and Singh, may be*

SIAM J. CONTROL AND OPTIMIZATION
Vol. 27, No. 3, pp. 658-672, May 1989

© 1989 Society for Industrial and Applied Mathematics
012

RANK INVARIANTS OF NONLINEAR SYSTEMS*

M. D. DI BENEDETTO[†], J. W. GRIZZLE[‡], AND C. H. MOOG[§]

Abstract. A linear algebraic framework for the analysis of rank properties of nonlinear systems is introduced. This framework gives a high-level interpretation of several existing algorithms built around the recursive computation of certain algebraic ranks associated with right-invertibility, left-invertibility, and dynamic decoupling. Furthermore, it can be used to establish links between these algorithms and the differential algebraic approach, as well as to solve some static and dynamic noninteracting control problems.

Key words. invertibility, decoupling, zeros at infinity, differential algebra, nonlinear systems analysis

AMS(MOS) subject classifications. primary 93C10; secondary 93B25

1. Introduction. Consider a nonlinear control system of the following form:

$$\begin{aligned} (1.1a) \quad & \dot{x} = f(x) + g(x)u, \\ \Sigma: \quad & \\ (1.1b) \quad & y = h(x) \end{aligned}$$



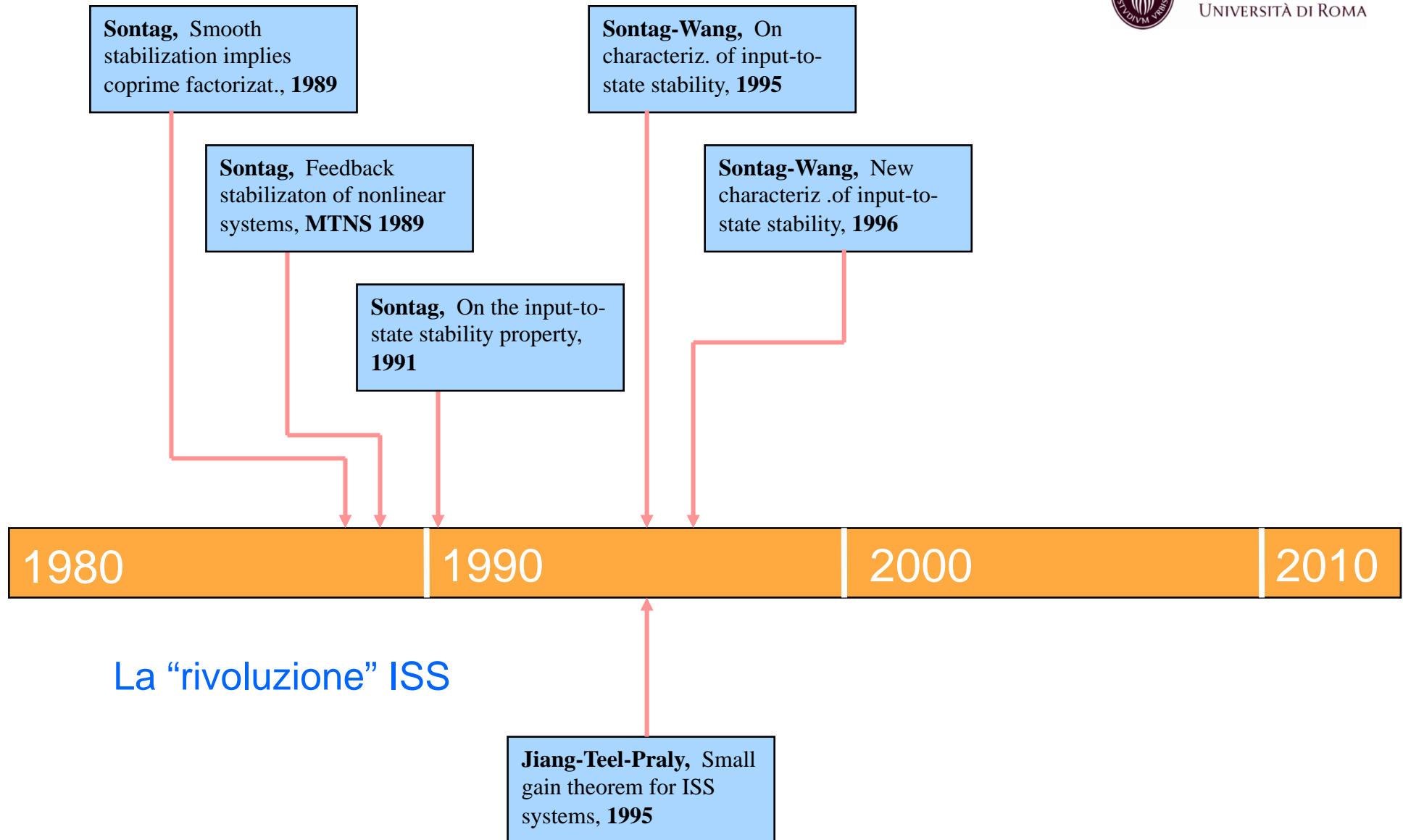
➤ *Stabilizzazione nonlineare*

Verso la meta degli anni ottanta avviene un **paradigm-shift**: l'interesse vira esclusivamente verso problemi di **stabilizzazione** (semiglobale/globale) e **stabilizzazione robusta** (N.B. anche chi vi parla rimane intrappolato, quasi senza accorgersene, in questo **paradigm shift**) e l'attenzione alle tematiche proprie dei sistemi nonlineari MIMO viene meno (colpa di chi ? forse anche di coloro che non avevano molta simpatia per le sottigliezze dei sistemi MIMO)

Input-to-state stability (ISS)

Controllo adattativo nonlineare

Stabilizzazione dall'uscita

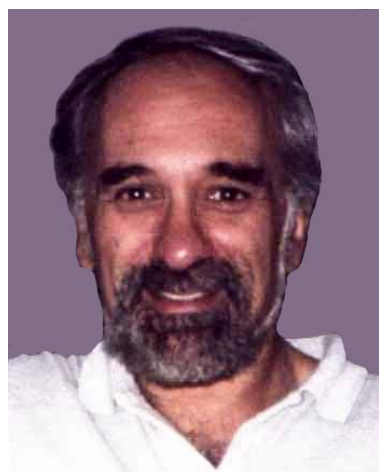




Definition 10.4.1. System (10.15) is said to be input-to-state stable if there exist a class \mathcal{KL} function $\beta(\cdot, \cdot)$ and a class \mathcal{K} function $\gamma(\cdot)$, called a gain function, such that, for any input $u(\cdot) \in L_\infty^m$ and any $x^\circ \in \mathbb{R}^n$, the response $x(t)$ of (10.15) in the initial state $x(0) = x^\circ$ satisfies

$$\|x(t)\| \leq \beta(\|x^\circ\|, t) + \gamma(\|u(\cdot)\|_\infty) \quad (10.16)$$

for all $t \geq 0$.



Definition 10.4.2. A C^1 function $V : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ is called an ISS-Lyapunov function for system (10.15) if there exist class \mathcal{K}_∞ functions $\underline{\alpha}(\cdot)$, $\bar{\alpha}(\cdot)$, $\alpha(\cdot)$, and a class \mathcal{K} function $\chi(\cdot)$ such that

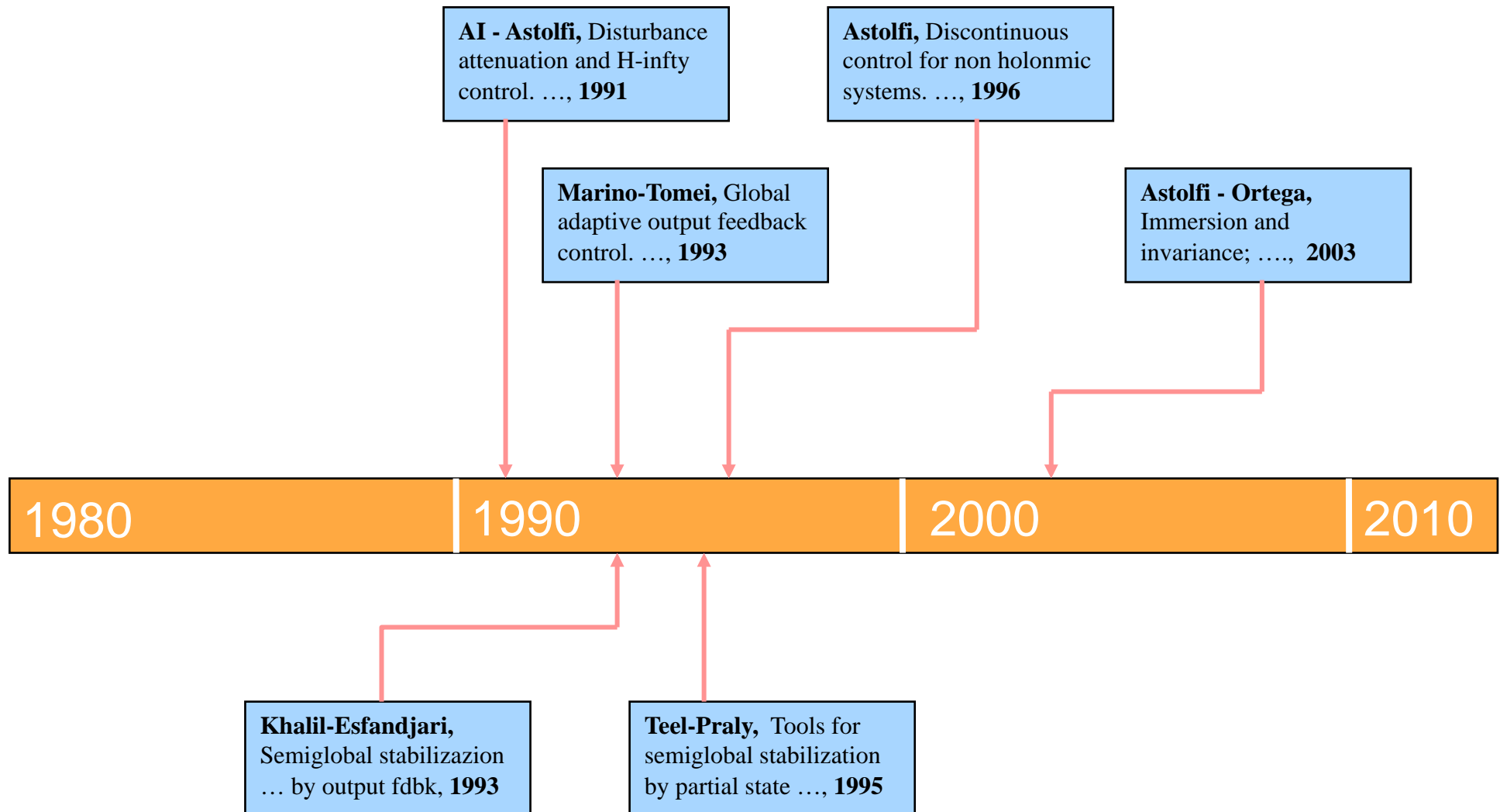
$$\underline{\alpha}(\|x\|) \leq V(x) \leq \bar{\alpha}(\|x\|) \quad \text{for all } x \in \mathbb{R}^n \quad (10.18)$$

and

$$\|x\| \geq \chi(\|u\|) \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial V}{\partial x} f(x, u) \leq -\alpha(\|x\|) \quad \text{for all } x \in \mathbb{R}^n. \quad (10.19)$$



Stabilizzazione robusta e adattativa



Disturbance Attenuation and H_∞ -Control Via Measurement Feedback in Nonlinear Systems

Alberto Isidori, *Fellow, IEEE*, and Alessandro Astolfi, *Member, IEEE*

Abstract—This paper presents a new method for disturbance attenuation and stability for an affine system. The concept of disturbance norms can be given in terms of the rms amplitude. Final controllers are also surprisingly simple. The analysis of the control

Global Adaptive Output-Feedback Control of Nonlinear Systems, Part I: Linear Parameterization

Riccardo Marino and Patrizio Tomei, *Member, IEEE*

Global Adaptive Output-Feedback Control of Nonlinear Systems, Part II: Nonlinear

TOOLS FOR SEMIGLOBAL STABILIZATION BY PARTIAL STATE AND OUTPUT FEEDBACK*

ANDREW TEEL[†] AND LAURENT PRALY[‡]

Abstract—This paper presents a new method for stabilization and adaptive control laws for nonlinear systems is presented. The method relies upon the notions of system immersion and manifold invariance and, in principle, does not require the knowledge of a (control) Lyapunov function. The construction of the stabilizing control laws resembles the procedure used in nonlinear regulator theory to derive the (invariant) output zeroing manifold and its friend. The method is well suited in situations where we know a stabilizing controller of a nominal reduced order model, which we would like to robustify with respect to higher order dynamics.

Immersion and Invariance: A New Tool for Stabilization and Adaptive Control of Nonlinear Systems

Alessandro Astolfi, *Senior Member, IEEE*, and Romeo Ortega, *Fellow, IEEE*

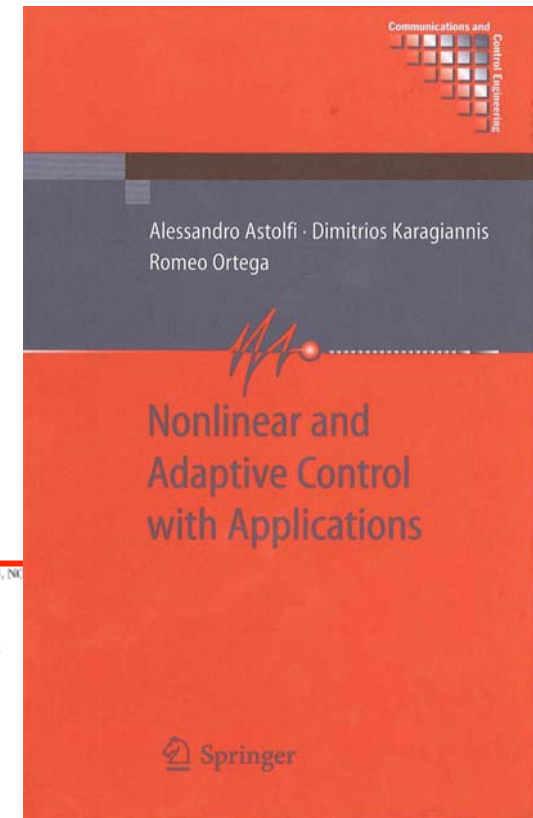
Abstract—A new method to design asymptotically stabilizing and adaptive control laws for nonlinear systems is presented. The method relies upon the notions of system immersion and manifold invariance and, in principle, does not require the knowledge of a (control) Lyapunov function. The construction of the stabilizing control laws resembles the procedure used in nonlinear regulator theory to derive the (invariant) output zeroing manifold and its friend. The method is well suited in situations where we know a stabilizing controller of a nominal reduced order model, which we would like to robustify with respect to higher order dynamics.

controller or in the analysis of the closed loop system. For systems with Lagrangian or Hamiltonian structures Lyapunov functions are replaced by storage functions with passivity being the sought-after property [27]. Alternatively, the input-to-state stability point of view [38], the concept of nonlinear gain functions and the nonlinear version of the small gain theorem [14], [40] have been used in the study of cascaded or interconnected systems.

At the same time, the input-to-state stability theory of output-zeroing

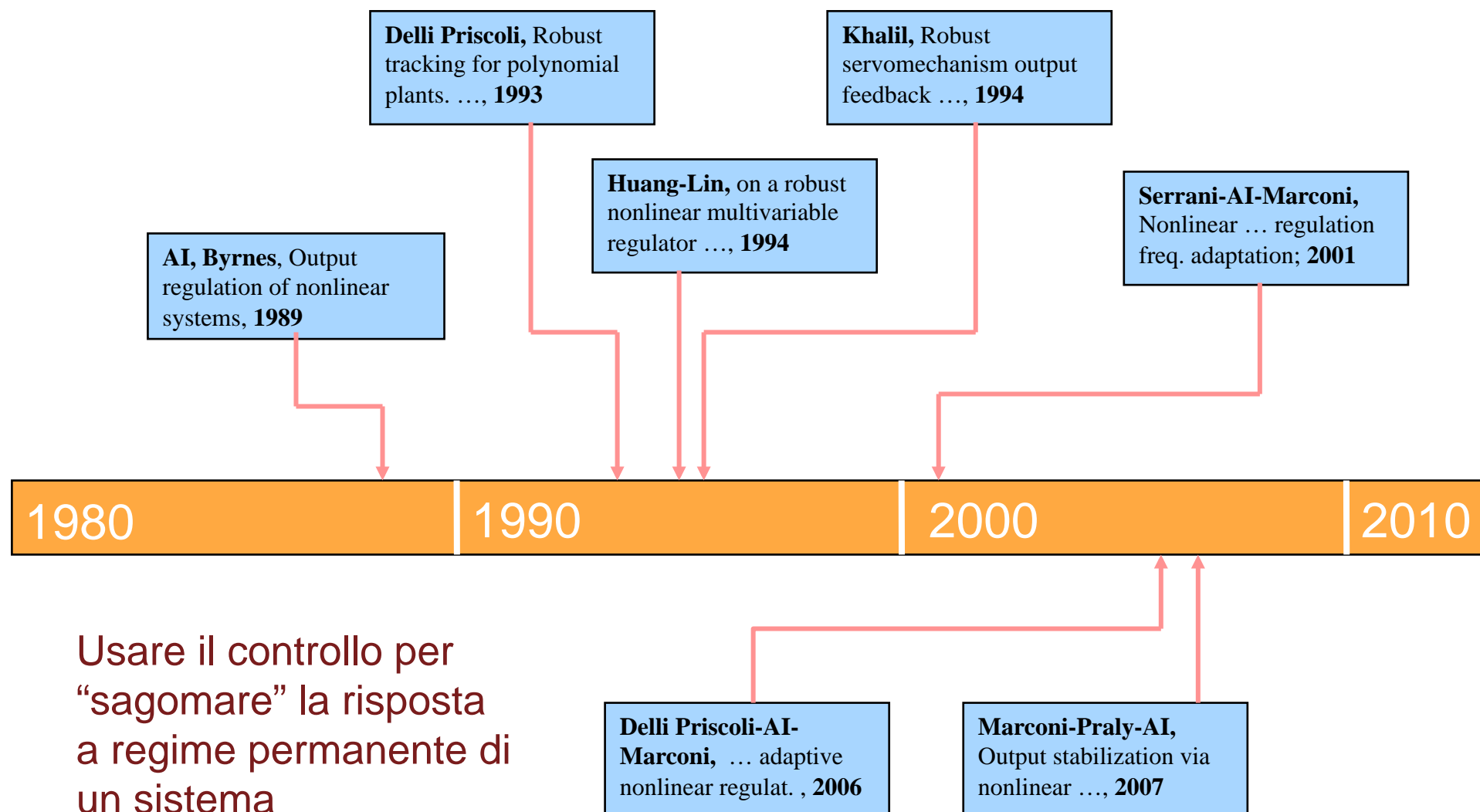


SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA





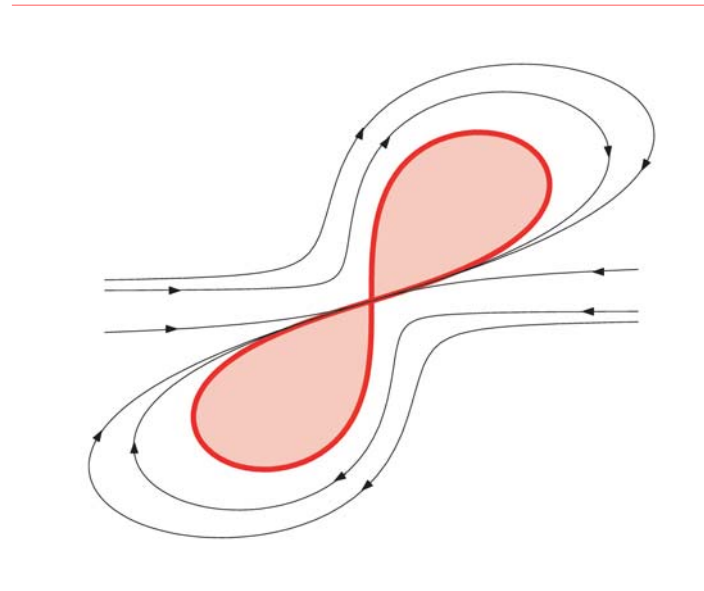
➤ *Regolazione e inseguimento*



L'intuizione iniziale nel risolvere il problema della regolazione era stato quello di usare il teorema della varietà centrale (**locale**) per analizzare il regime permanente.

Successivamente, appellandosi al concetto di insieme limite di un insieme (generalizzazione dell'idea originaria di Birkhoff), si è arrivati a una caratterizzazione **globale** del regime permanente in un sistema nonlineare.

La figura 8
di Vinograd



Un insieme
attrattivo e
stabile:
esistono
funzioni di
Lyapunov



Vive la Géométrie !

En l'un [l'esprit de géométrie] les principes sont palpable, mais éloignez de l'usage commun, de sorte qu'on a peine à tourner la teste de ce côté là manque d'habitude; mais pour peu qu'on s'y tourne on voit les principes à plein; et il faudrait avoir tout à fait l'esprit faux pour mal raisonner sur des principes si gros qu'il est presque impossible qu'ils échappent [B. Pascal, 1672]

Riflessioni e critiche (costruttive)



Una prima riflessione ...

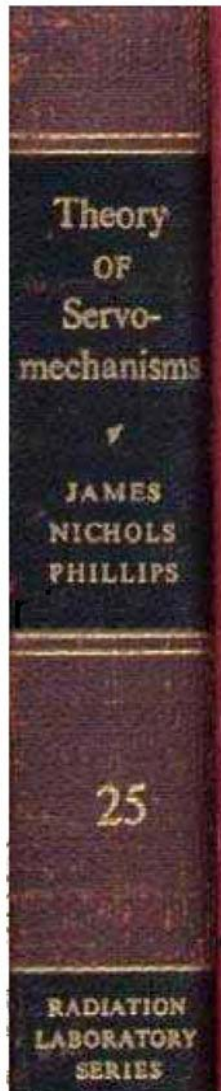
- ❑ i principi e le tecniche dell'Automatica sono pervasivi
- ❑ sono efficaci e molto spesso **abilitanti** nello sviluppo di tutte le altre tecnologie
- ❑ però l'Automatica è sconosciuta al grande pubblico
- ❑ quando addirittura non viene confusa con altre discipline
- ❑ l'Automatica è la **Tecnologia Nascosta**, per eccellenza
- ❑ come tale, facile bersaglio di operazioni di “semplificazione”

Perche ?

- ❑ e' piu facile descrivere gli apparati che le idee
- ❑ non siamo cosi bravi come l'Apple a influenzare i consumatori, inducendoli a comperare una versione nuova dell' i-Phone ogni anno



L'Automatica è per sua natura trasversale ...



Hubert M. James

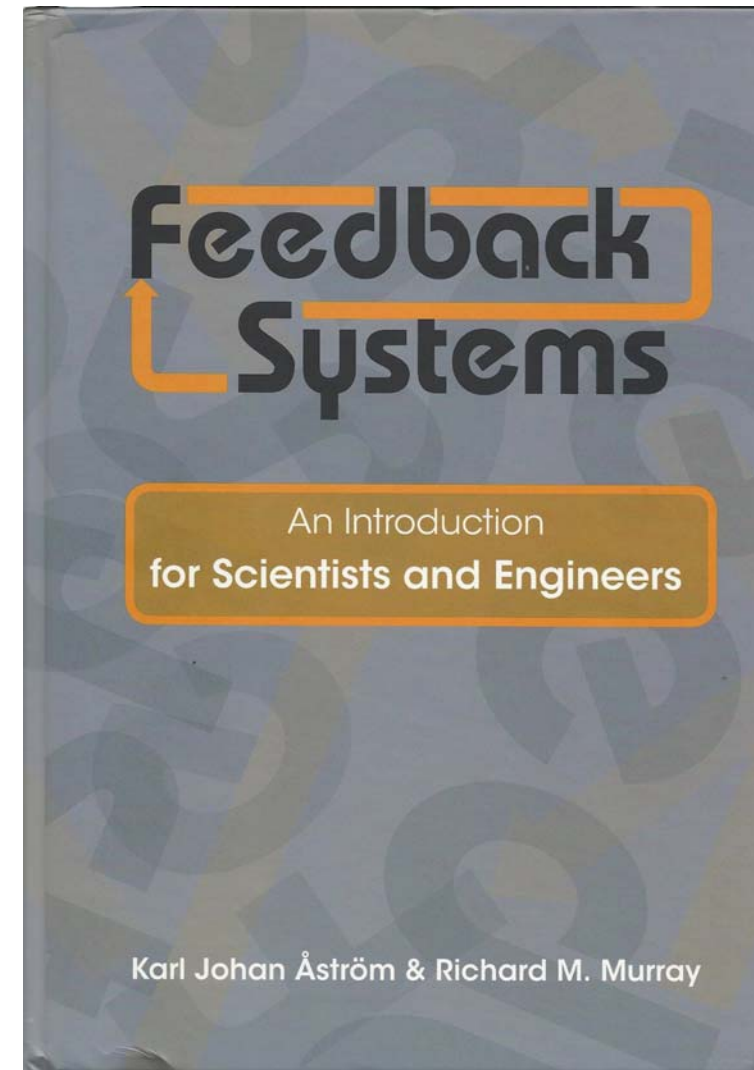
Professore di Fisica, Purdue University

Nathaniel B. Nichols

Direttore di Ricerca, Taylor Instruments Companies

Ralph S. Phillips

Professore Ass. di Matematica, University of Southern California



Nel corso degli anni questo concetto si è appannato, ma per fortuna è stato recuperato in tempi recenti



Due errori, a mio avviso, che hanno pesato ...

L'aver (deliberatamente) trascurato l'Automatica sull'onda di un facile entusiasmo verso una "Teoria dei Sistemi"

Sull'onda dell'entusiasmo suscitato dalle idee di Kalman e dalla comparsa di molti libri di testo sul soggetto "Linear System Theory", dal 1971 circa - in poi – l'Automatica (intendendo come tale la disciplina che tratta l'analisi e il progetto dei sistemi a retroazione) è stata messa in secondo piano, rispetto all'analisi (non il progetto) di proprietà che sono semplicemente propedeutiche al progetto stesso

In questo modo, è stato messo da parte per lo meno l'80% del bagaglio di concetti, a vantaggio di un 20% solo propedeutico. Le motivazioni furono diverse:

- le altre discipline non hanno mostrato particolare interesse
- la Teoria dei Sistemi è rimasta quella che era nel 1970, l'Automatica (intesa come feedback design) ha avuto enormi sviluppi



Due errori, a mio avviso, che hanno pesato ...

L'aver (deliberatamente) sradicato l'Automatica dal contesto (naturale) delle applicazioni industriali

Il “credo” anni 70 era più o meno il seguente: si fa un modello matematico e poi si studia come utilizzare/influenzare il comportamento del modello, a prescindere dal contesto dal quale il modello stesso è stato estratto

Questo credo si è dimostrato fallace per diversi motivi:

- non esiste UN modello di per se, esistono modelli diversi a seconda dei problemi, e la deduzione/analisi di questi non può prescindere dal contesto fisico su cui si opera
- questo credo si basa su una precisa dicotomia: sistema controllato/ sistema controllante, che poteva essere valida ai tempi di Bode, Nichols, ecc. ma che è rapidamente venuta meno
- si perde la visione unitaria del problema reale

Che fare ... ?

Questi errori sono diventati, nel corso del tempo, palesi e – fortunatamente – oggi quasi tutti ne sono divenuti consapevoli

Ci piaccia o no, l'attuale sistema formativo nel nostro paese pone molte difficoltà a percorsi formativi trasversali, in particolare a un ragionevole percorso formativo in Automatica

Occorrerebbe:

- rinsaldare o recuperare i rapporti con l'ingegneria Industriale
- aprirsi di più alle applicazioni biologico/mediche
- inventarsi percorsi formativi che consentano queste aperture

Opportunità e sfide



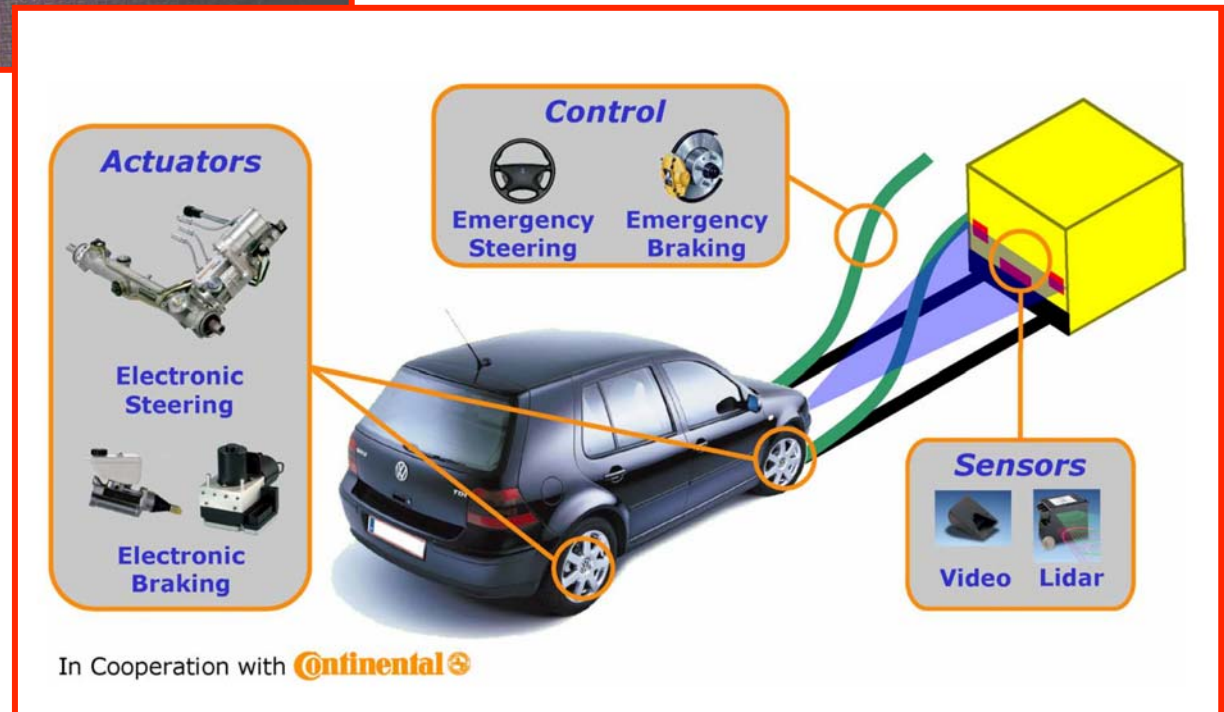
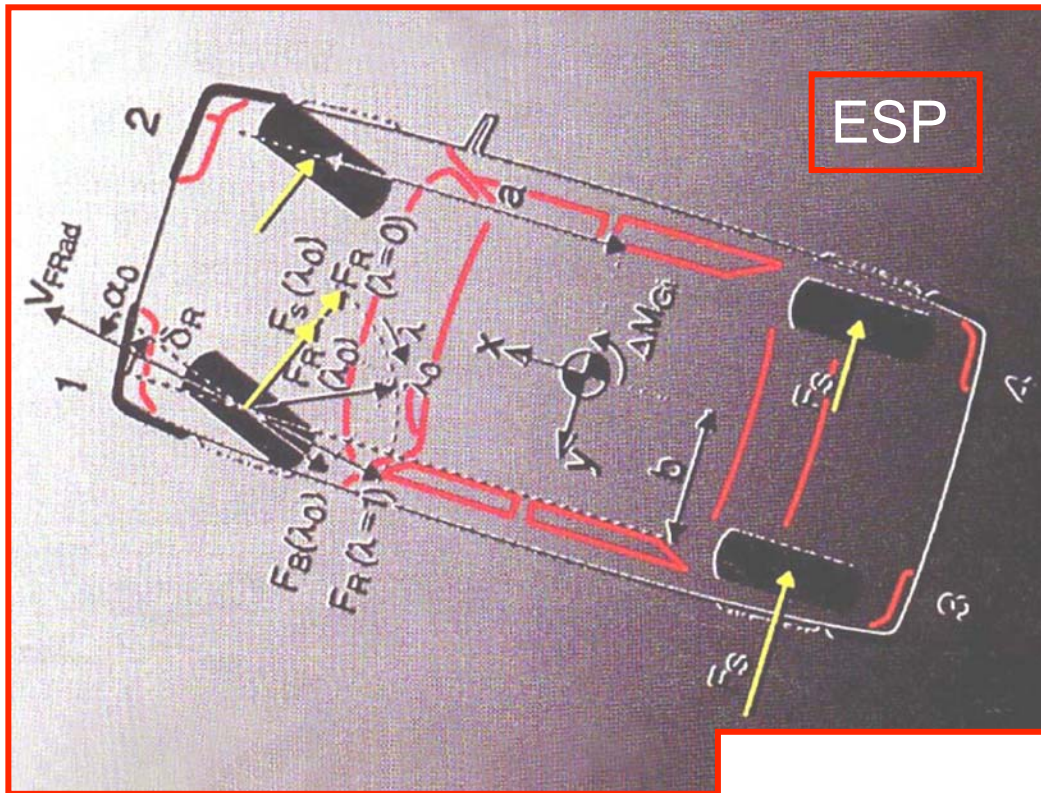
Nuove forze trainanti:

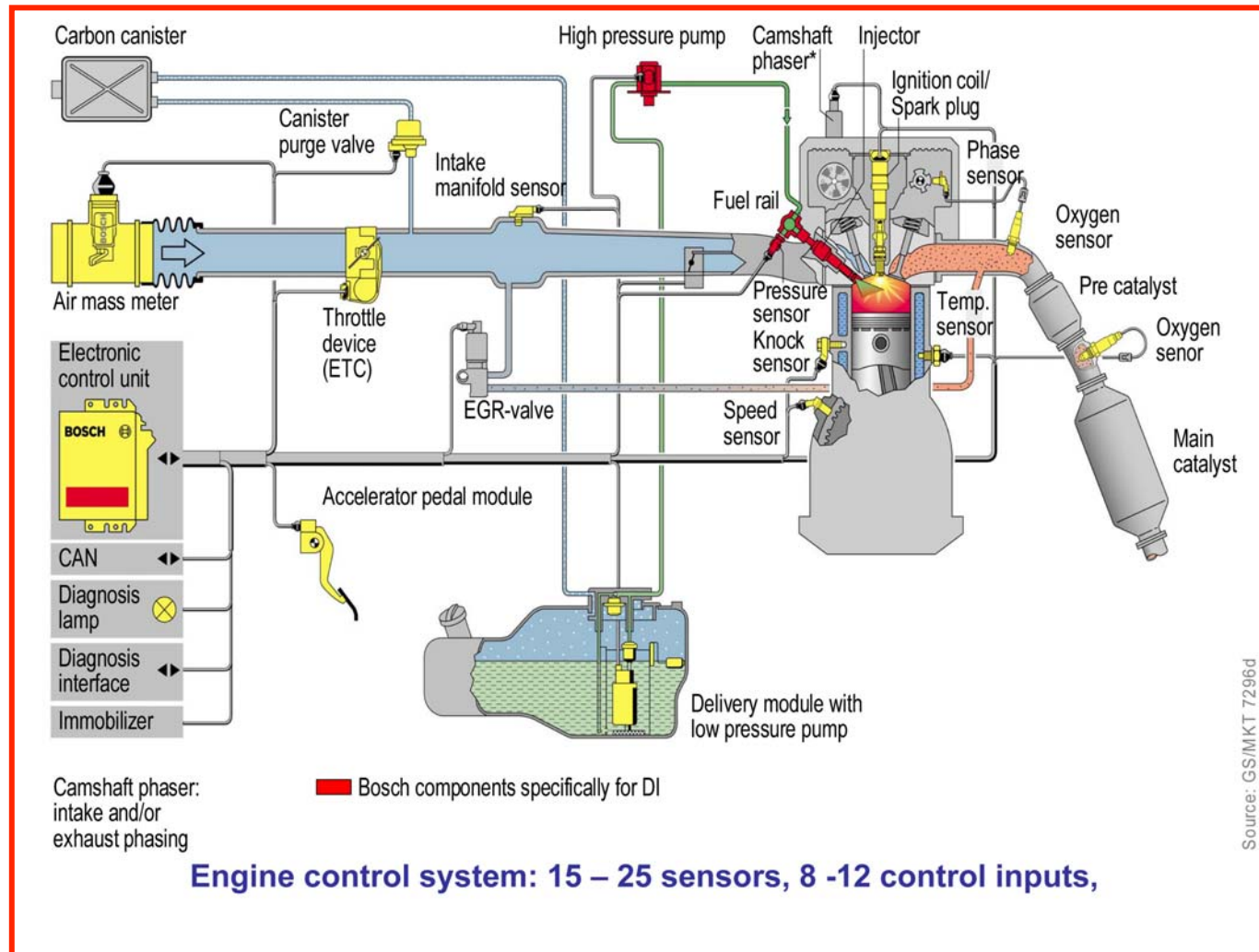
- ❑ Integrazione, nel progetto, di processo, controllo e elaborazione
- ❑ Ricchezza di attuatori e sensori
- ❑ Necessità di auto-diagnosi e auto-riconfigurabilità
- ❑ Distribuzione spaziale di grandi sistemi, integrati da reti di trasmissione dati

L'Automatica è la **Tecnologia Abilitante** in molti settori nei quali le nazioni tecnologicamente avanzate effettuano investimenti strategici

Nuove opportunità:

- ❑ Sicurezza nei trasporti (individuali e collettivi)
- ❑ Risparmio di energia e materie prime
- ❑ Energia da fonti rinnovabili
- ❑ Robotica avanzata
- ❑ Biologia e Medicina
- ❑ Fisica

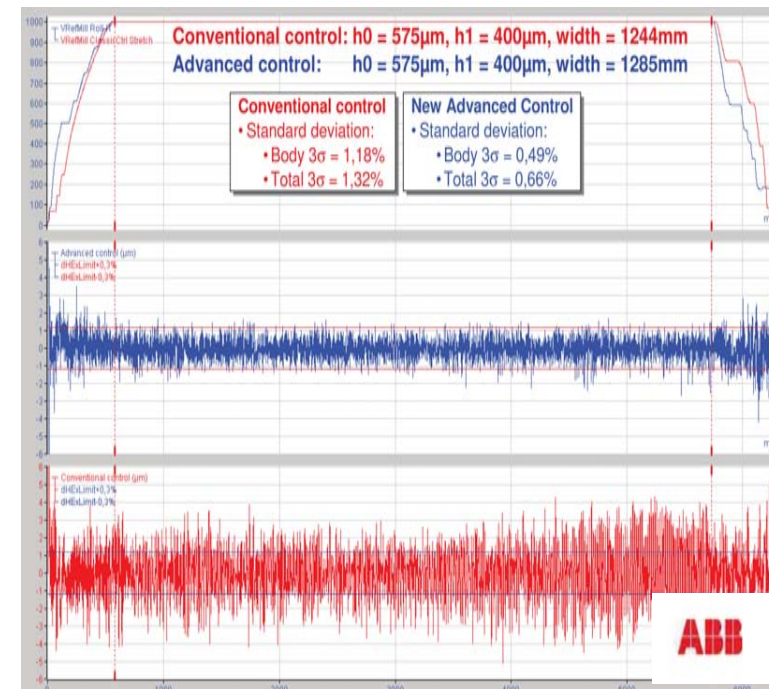
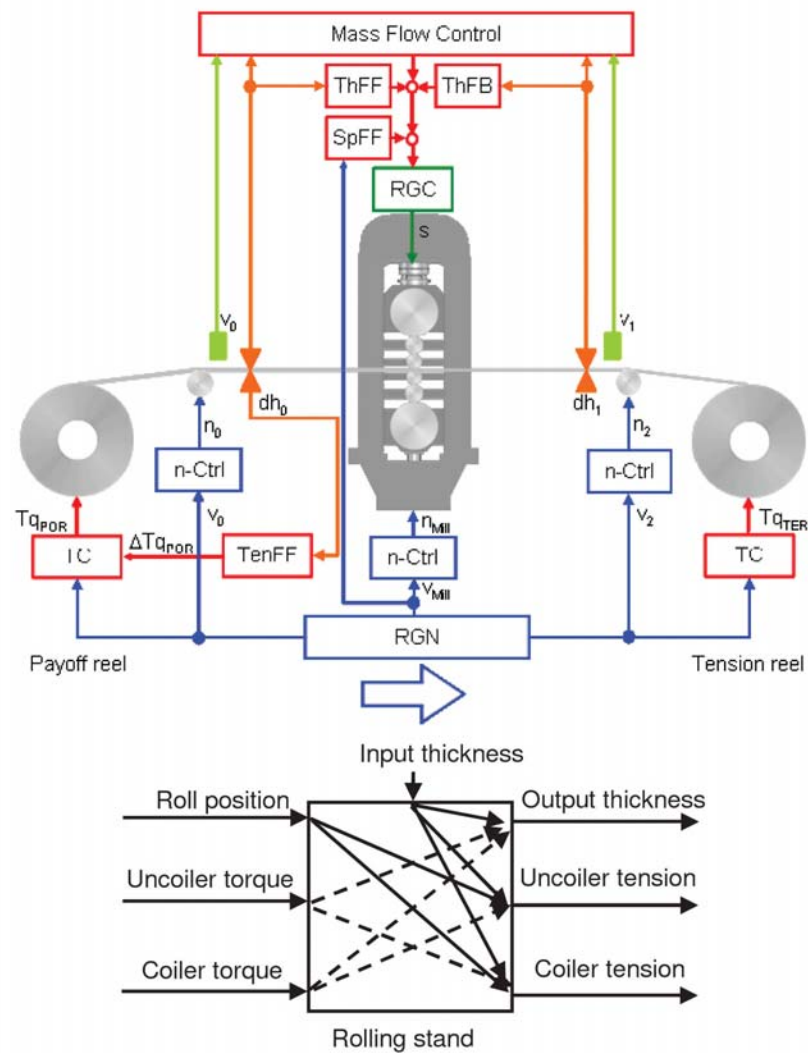






SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

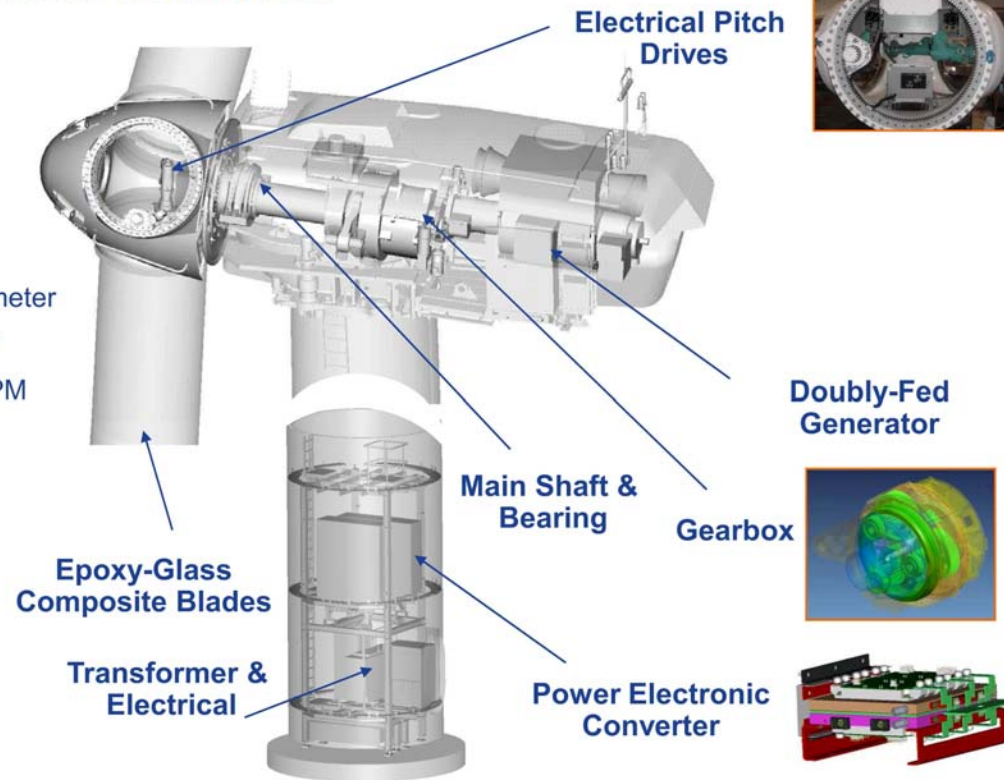


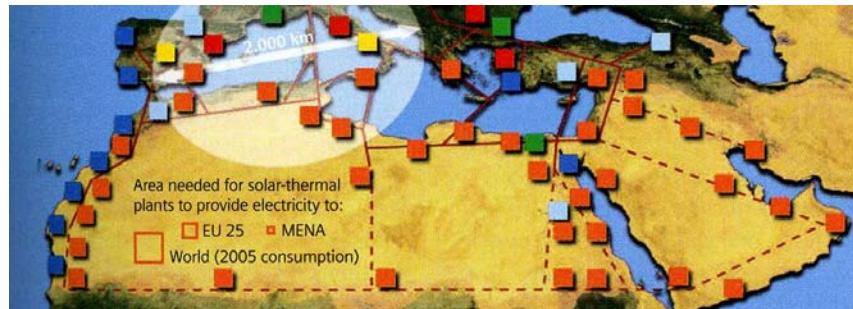


Wind Turbine Controls

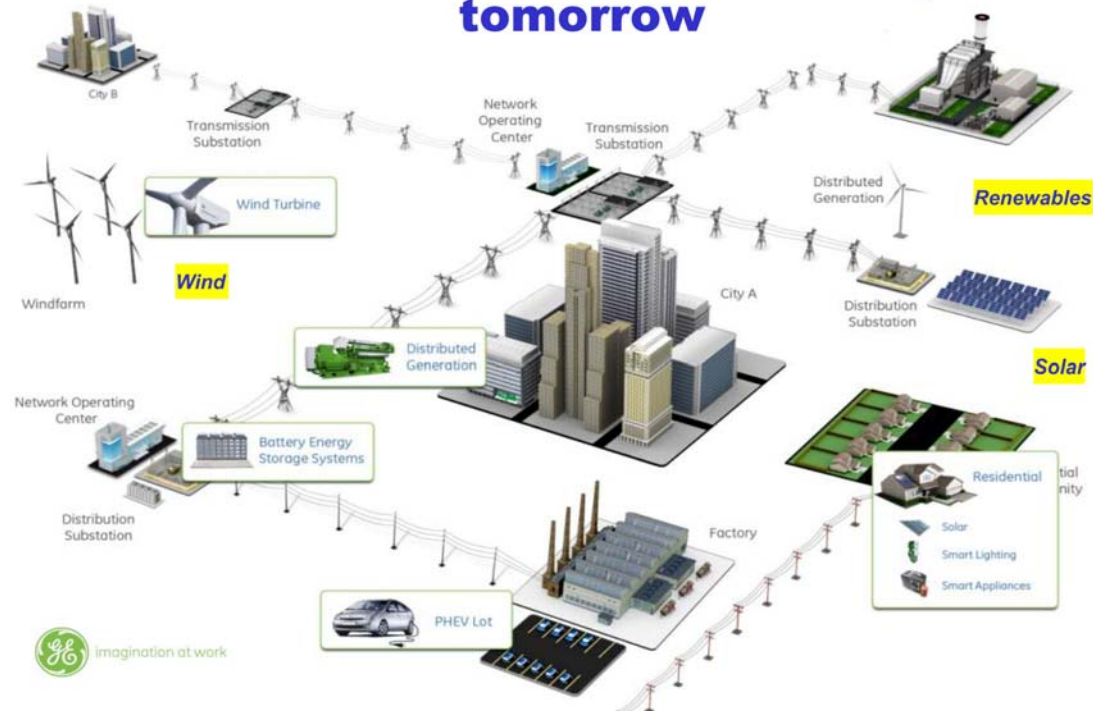
GE 1.5 MW

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





Smart Grid and Controls...today and tomorrow



Pictures of the Future

The Magazine for Research and Innovation | Fall 2009

www.siemens.com/pof

SIEMENS

20XX



Modernizing Infrastructures

Developing solutions that are economical and sustainable



Virtual Realities

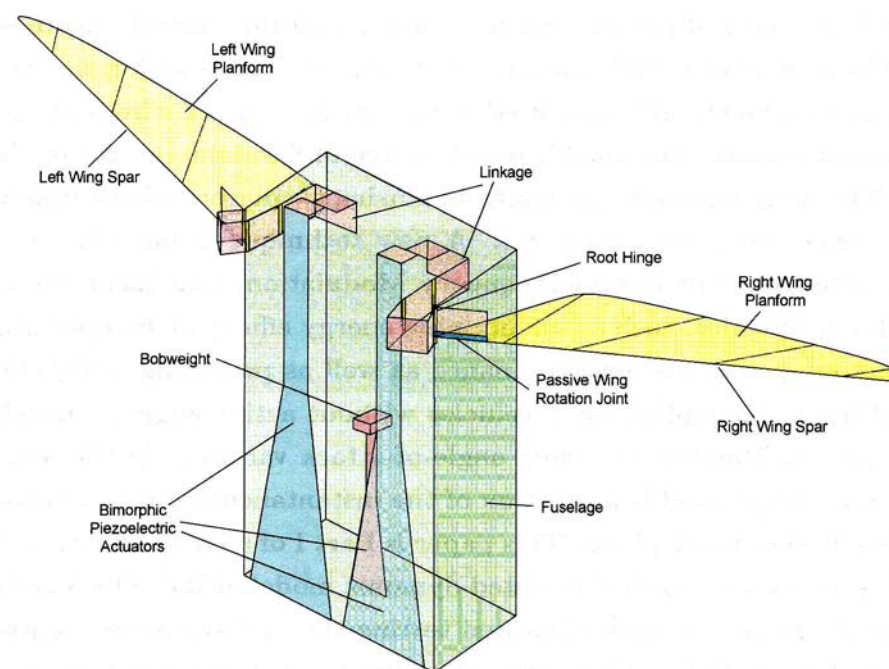
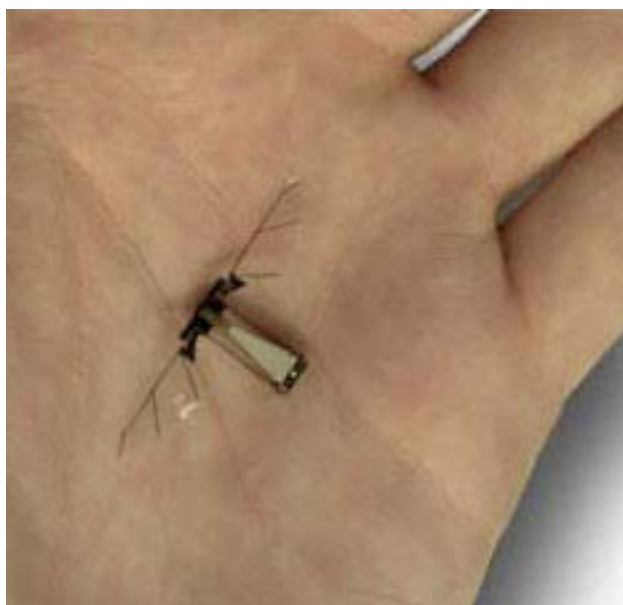
Mission-critical technologies for industry and healthcare

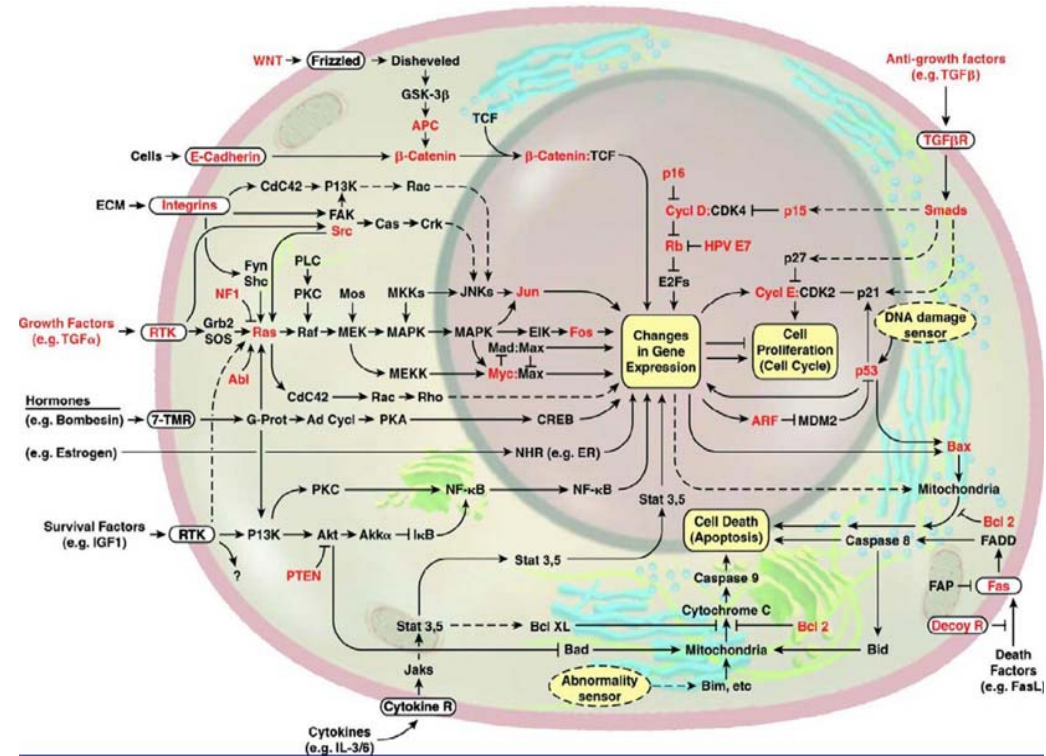


Tomorrow's Grids

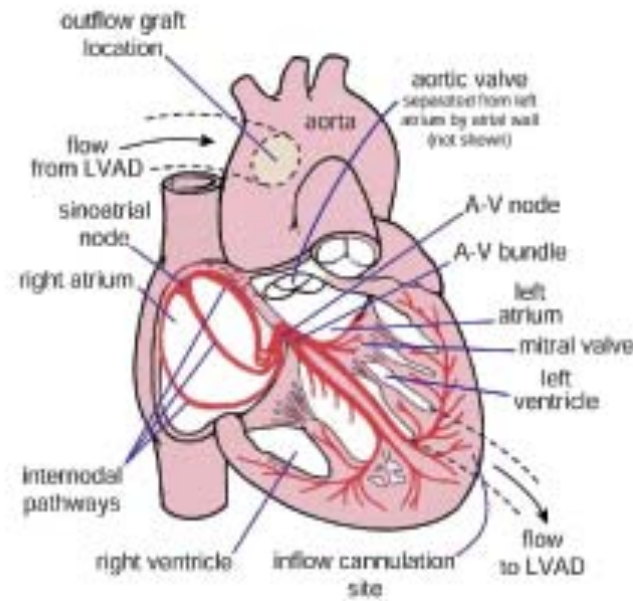
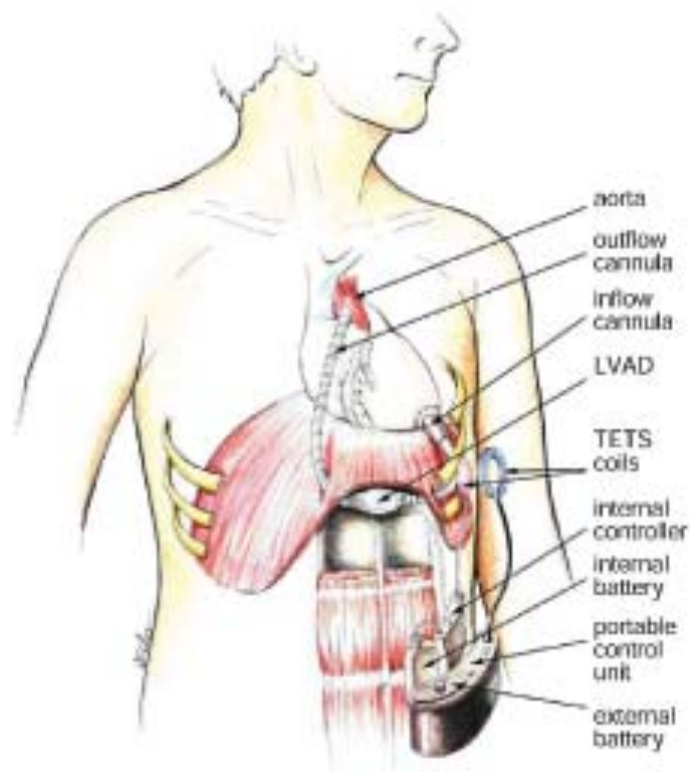
How Vehicles, Cities and Alternative Energy Sources will Interact

Nel 2006, il primo decollo di un micro-robot della dimensione di un insetto, **ad ala battente**, sviluppato alla Harvard University. Il sogno di Leonardo si avvera.





Modellistica, nelle cellule tumorali, dei flussi di informazione (Hananan-Weinber) responsabili di crescita, differenziazione e apoptosi. Recettori, proteine enzimatiche e loro ruolo nelle reazioni catalitiche.



Left Ventricular Assist Device



Artificial Pancreas





SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

The Impact of Control Technology

OVERVIEW, SUCCESS STORIES,
AND RESEARCH CHALLENGES

EDITED BY:

Tariq Samad and Anuradha Annaswamy

SPONSORS:

IEEE Control Systems Society

Institute for Advanced Study, Technical University of Munich

CoTeSys, Technical University of Munich

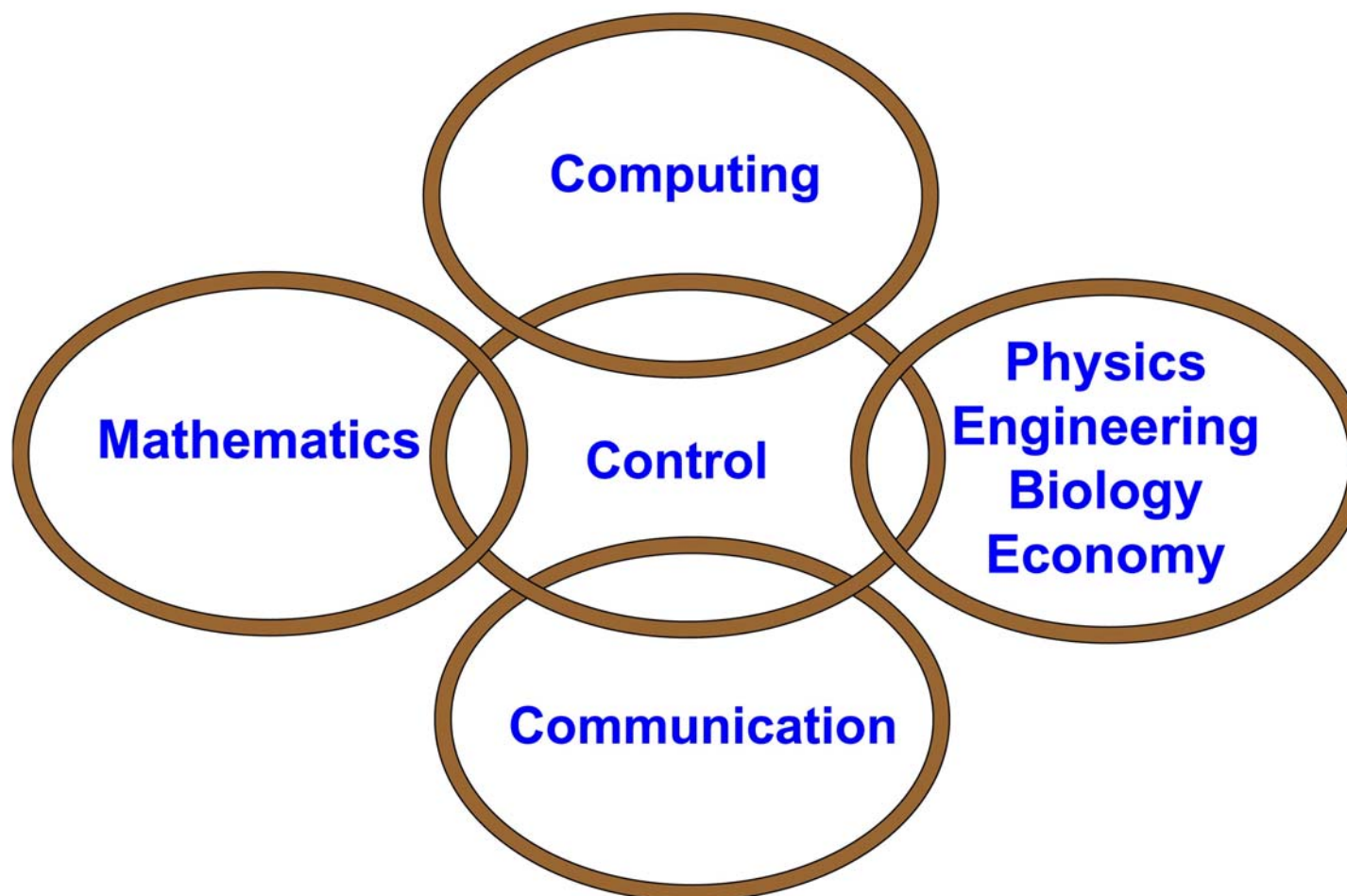
Deutsche Forschungs-Gemeinschaft

U.S. National Science Foundation





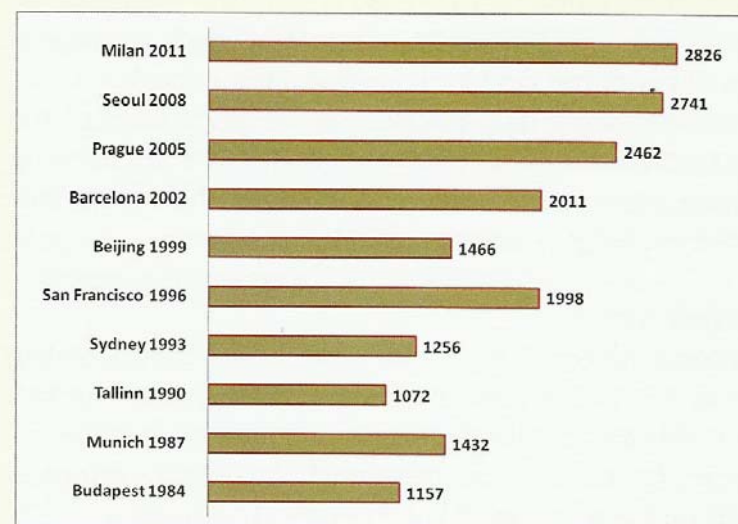
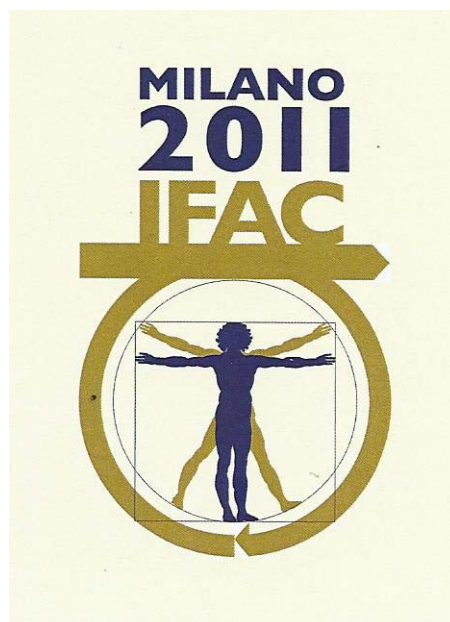
Il Pentafoglio





La nota positiva

La ricerca in Automatica nel mondo è in costante espansione e la qualità della ricerca accademica in Automatica in Italia è di altissimo livello



La nota positiva

La ricerca in Automatica nel mondo è in costante espansione e la qualità della ricerca accademica in Automatica in Italia è di altissimo livello

Le opportunità ci sono, occorre solo il coraggio di accettare la sfida



Conclusioni



E' motivo di grande soddisfazione e orgoglio constatare che un consistente numero dei giovani che ho contribuito a formare si sono **affermati** nella carriera accademica.

Tutti questi colleghi non solo hanno già raggiunto (o sono vicinissima a) il traguardo della “professorship”, ma si sono imposti, con il **loro** nome, come **eccellenze** nella ricerca.

Il merito è tutto loro. Io credo di essere stato soltanto un modesto e forse utile esempio. La mia filosofia, infatti, è stata quella di stimolarli a “camminare con le loro gambe” il prima possibile.

A tutti, un grandissimo **grazie** per essere qui oggi.

Vorrei anche ringraziare il Direttore del Dipartimento e il Preside di Facoltà per avere reso possibile questo evento, e le autorità accademiche della Sapienza per la loro presenza.

Un ringraziamento particolare ai diversi colleghi che sono venuti da fuori Roma: un riconoscimento che mi riempie di soddisfazione e che va ben al di là dei miei modesti meriti.

Un grazie anche ai colleghi tutti del Dipartimento per le molteplici manifestazioni di stima.

Non dimenticate che sono stato semplicemente una persona **molto fortunata**: mi sono trovato al momento giusto e al posto giusto.

Sussiste peraltro il detto di L.Pasteur “**Chance favors only the prepared mind**”.



Ancora un grazie ai colleghi tutti del Dipartimento, e alla Facoltà, per una cosa che per me ha un grande significato: dopo 29 anni, il nome Automatica è tornato “pronunciabile”.

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INFORMATICA
AUTOMATICA E GESTIONALE ANTONIO RUBERTI

... anche se ancora per poco, mi sento nuovamente a casa ...



Vorrei concludere con un ringraziamento a coloro il cui aiuto è stato indispensabile nelle diverse fasi della mia carriera.

Procedo per ordine cronologico:

Innanzitutto i docenti delle discipline di base, nel lontano biennio 1960-62. Se non avessi appreso da loro il giusto rigore scientifico, non avrei in alcun modo potuto raggiungere i traguardi che ho raggiunto.

Il Prof. **Ruberti**, cui questo Dipartimento è intitolato, per aver visto giusto indirizzandomi allo studio dei sistemi nonlineari: un'intuizione, la sua, che è risultata vincente.



Il Prof. **John Zaborszky** che, con enorme e **disinteressata** stima, mi ha aperto le porte dell'ambiente accademico U.S.A.

I Proff. **Manfred Thoma** e **Hans Knobloch** che, anche loro con enorme e **disinteressata** stima, mi hanno aperto le porte dell'ambiente accademico europeo.

Sergio Bittanti, per aver reso possibile il Congresso IFAC a Milano e per il costante generoso supporto, unitamente a **Guido Guardabassi**, in tanti anni di amicizia e collaborazione, soprattutto in ambito IFAC.

Roberto Tempo e **Renzo Piva**, per avere generosamente promosso, in questi ultimi due anni, importantissimi riconoscimenti.

Ai quali, sino a due anni fa, **non osavo nemmeno pensare**.

