

Controllo, Teoria del
Teoria dell'Enciclopedia Italiana di Scienze, Lettere ed Arti
Istituto della Enciclopedia Italiana "G. Treccani"
XXI Secolo -- Aggiornamento,

A. Bicchi
Centro I.R. "E. Piaggio", Università di Pisa

La teoria del controllo, o *automatica*, studia metodi per capire, governare e modificare il comportamento di sistemi dinamici naturali o artificiali, al fine di dotarli d'autonomia, cioè della capacità di raggiungere finalità assegnate senza diretta supervisione.

Per *sistema dinamico* si intende un insieme di grandezze variabili nel tempo in modo interdipendente. I sistemi dinamici oggetto della teoria del controllo possono essere di natura molto diversa: essi sono in molti casi elementari sistemi fisici (ad esempio meccanici, elettrici, termodinamici), ma anche d'altra natura, ad esempio biologica, economica-finanziaria, ecologica e ambientale. Molto spesso, in un sistema controllato convivono e interagiscono elementi di diversa natura, ed in particolare le *grandezze fisiche* del sistema da controllare, e le *informazioni* usate dalla logica del controllo.

La teoria del controllo riesce ad affrontare in modo generale ed unificato problemi di natura così diversa e complessa grazie soprattutto all'utilizzo di metodi e modelli matematici avanzati, che consentono di valutare quantitativamente ed obiettivamente le proprietà dei sistemi e di progettare sistematicamente le tecniche per correggerli. E' d'altronde vero che non tutti, anzi solo pochissimi dei sistemi fisici trattati ammettono descrizioni matematiche di soddisfacente precisione: la teoria del controllo perciò tratta perlopiù modelli matematici *approssimati* di sistemi reali. E' quindi una caratteristica essenziale dell'automatica l'attenzione alla *robustezza* dei metodi, vale a dire a quanto i risultati dello studio su modelli approssimati rimangono validi rispetto ai sistemi e alle condizioni reali.

Gli elementi fondamentali di un sistema dinamico controllato sono descritti in figura 1. Essi sono relativamente pochi, e la loro comprensione è immediata se ci si riferisce ad un semplice esempio, che utilizzeremo a più riprese a scopo illustrativo nel corso di questa esposizione. Si pensi dunque al problema di regolare la velocità di crociera di un autoveicolo che procede lungo una strada incontrando condizioni variabili, in modo da mantenere la velocità stessa vicina a certi valori di riferimento che il conducente imposta secondo le sue diverse necessità. Tradizionalmente è il conducente stesso ad agire sul pedale dell'acceleratore sulla base della velocità del veicolo letta dal tachimetro: le stesse funzioni possono essere svolte da un sistema di controllo automatico (quali i cosiddetti sistemi *cruise control* che si trovano ormai frequentemente nei moderni autoveicoli) ottenendo prestazioni migliori e sollevando il pilota da un compito alla lunga faticoso.

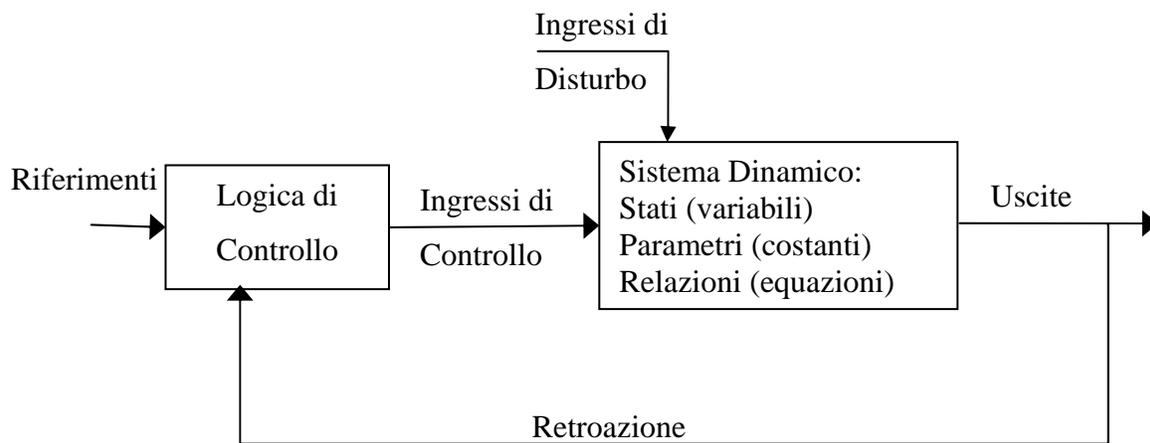


Figura 1

Il sistema fisico da controllare in quest'esempio è caratterizzato dalla massa inerziale del veicolo, dalle sue proprietà aerodinamiche, dagli attriti delle trasmissioni e dei pneumatici, dalla pendenza della strada, ecc.. Tutte queste grandezze sono *parametri* che influenzano la dinamica del sistema, espressa mediante le equazioni del moto del veicolo, ovvero le equazioni differenziali che legano la accelerazione, la velocità e la posizione del veicolo alla spinta che il motore produce.

Tra le grandezze che appaiono nelle equazioni dinamiche del sistema, è naturale riconoscere ad alcune un ruolo particolare. La spinta del motore può essere considerata una variabile indipendente, manovrabile a piacimento (seppure entro dati limiti) modulando la alimentazione del carburante al motore. Questa variabile, che è causa delle variazioni delle altre grandezze, è detta un *ingresso di controllo* per il sistema, ed è sovente collegata ad un dispositivo *attuatore* in grado di mettere in atto le manovre desiderate (nel caso in esame, questo potrebbe essere un piccolo motore elettrico che apre e chiude la valvola di alimentazione). Altre variabili indipendenti, che non sono gestibili, ma anzi possono opporsi alle finalità del controllo (ad esempio la spinta contraria del vento sul veicolo) sono invece detti *ingressi di disturbo*.

Le grandezze che variano nel tempo in modo dipendente dagli ingressi (ad esempio, la posizione del veicolo lungo la strada e la sua velocità) sono detti *variabili di stato* (o *stati*) del sistema. Una descrizione dello *stato* di un sistema consiste nell'assegnare valori ad un numero sufficiente di tali variabili, in modo che tutta l'evoluzione futura del sistema possa essere univocamente determinata con la sola conoscenza degli ingressi. Naturalmente, questa definizione ha valore teorico: è, infatti, in pratica impossibile conoscere esattamente a priori gli ingressi (in particolar modo, i disturbi) che saranno applicati, né la vera dinamica del sistema. In generale, poi, non è possibile conoscere direttamente il valore delle variabili di stato, eccetto che per alcune loro combinazioni, che possono essere misurate da opportuni dispositivi *sensori*: tali grandezze sono dette *uscite* del sistema. La grandezza la cui regolazione è l'oggetto principale del controllo (la velocità del veicolo, nell'esempio) è in particolare detta *uscita di riferimento* del sistema.

Lo scopo del controllo è in generale quello di utilizzare gli ingressi disponibili per regolare le uscite in accordo a valori di riferimento assegnati, a dispetto dei possibili disturbi. Ciò può essere ottenuto scegliendo il controllo sulla base delle informazioni disponibili, che sono fondamentalmente di due tipi: la conoscenza del modello dinamico e la misura delle uscite del sistema. Il primo tipo d'informazione permette di prevedere gli effetti che diversi ingressi di controllo avrebbero sul sistema, e quindi, in certa misura, di impostarli in modo da prefigurarne un corretto comportamento. Nel controllo di crociera, ad esempio, si tratterebbe di calcolare quali resistenze sarebbero incontrate dal veicolo alla velocità desiderata nel tratto di strada da affrontare, e quale spinta dovrebbe essere applicata dal motore per vincerle. Questo tipo d'azione di controllo è detta *in avanti (feedforward)* o *in anello aperto*.

Il secondo tipo di controllo basa invece la scelta degli ingressi sulla misura continua dei valori di uscita ed il loro confronto istante per istante con gli andamenti desiderati: ad esempio, se la velocità del veicolo è inferiore al valore di

riferimento impostato, la spinta del motore potrebbe essere aumentata, ovvero ridotta nel caso opposto, di una quantità tanto maggiore quanto maggiore è lo scarto. Questo tipo di azione di controllo viene detta in *retroazione* (*feedback*) o in *anello chiuso* (l'anello cui si fa riferimento è quello mostrato in figura 1).

Le differenze tra le due strategie sono evidenti: mentre l'efficacia dell'azione in avanti dipende fortemente dalla qualità delle informazioni sul modello del sistema e sui disturbi, la retroazione può in buona parte prescindere, basandosi principalmente sulla qualità dei sensori utilizzati. La retroazione è il meccanismo alla base del funzionamento di moltissimi sistemi, sia naturali sia artificiali. D'altronde, anche l'efficacia del controllo in retroazione è limitata da vari fattori, tra i quali la *stabilità* del sistema controllato e la sua sensibilità alle imprecisioni casuali (*rumore*) ed ai *ritardi* delle misure. Una delle problematiche principali della teoria del controllo è quella di fornire il migliore compromesso nell'utilizzo delle due strategie.

I sistemi dinamici sono solitamente controllati per agire in condizioni vicine a certe *condizioni nominali*, nelle quali il loro comportamento è migliore. Una condizione di funzionamento nominale, che spesso è uno stato di *equilibrio* per il sistema, si dice *stabile* se il sistema, quando si trovi ad operare in condizioni leggermente perturbate, continua ad evolvere senza allontanarsi troppo dalla condizione nominale; si dice poi *asintoticamente* stabile se questo scostamento è annullato nel tempo. Queste nozioni di stabilità, dette di Lyapunov dal nome del matematico russo che le ha rigorosamente definite e studiate, si riferiscono a perturbazioni degli stati del sistema: nel nostro esempio, se vi è un leggero aumento della velocità del veicolo mentre ogni altro parametro e ingresso è mantenuto costante, il corrispondente aumento della resistenza aerodinamica tende a frenare il veicolo, dando stabilità alla condizione precedente la perturbazione. Altrettanto importanti sono differenti nozioni di stabilità riferite a variazioni dei parametri o della struttura del modello (stabilità *strutturale*, *assoluta* o *totale*) o alla limitatezza delle variazioni delle uscite corrispondenti a limitate variazioni degli ingressi. Nell'esempio dell'autoveicolo, un cambiamento di pendenza della strada provoca una variazione della velocità di crociera che non è riassorbito dal sistema se non modificando la spinta del motore.

La stabilità è una delle principali specifiche richieste al funzionamento di un sistema controllato, spesso quantificata in termini di velocità di recupero delle condizioni nominali. Il controllo in retroazione influenza profondamente la stabilità, potendo sia rendere stabile e veloce un sistema che non lo è abbastanza di per sé (come nell'esempio del *cruise control*), che, all'opposto, rendere instabile un sistema che in assenza di retroazione sarebbe stabile. Il *ritardo* che può intercorrere tra il momento in cui si ha un certo valore d'uscita e l'effettiva applicazione della retroazione corrispondente, può causare questa instabilità: ne è un esempio quotidiano e macroscopico la difficoltà con la quale regoliamo la temperatura di un getto d'acqua da un rubinetto, quando a causa di un impianto idraulico non ben progettato si ha un consistente ritardo tra l'azione sul miscelatore e la effettiva variazione di temperatura dell'acqua. I ritardi di misura e/o d'attuazione in un sistema sono legati alle tecnologie adottate, e spesso sono economicamente irriducibili: la loro presenza costringe ad un uso accorto della retroazione, il cui progetto richiede tecniche matematiche anche sofisticate.

Lo sviluppo dell'automatica è strettamente correlato ai maggiori avanzamenti dell'industria e della tecnologia moderna. Nonostante i meccanismi di retroazione siano quasi onnipresenti nella fisiologia degli esseri viventi, e siano stati impiegati sin dall'antichità nelle macchine, la storia della teoria del controllo si può dire sia nata con lo studio, svolto da J.C. Maxwell nel 1868, della dinamica di regolatori centrifughi per macchine a vapore, del tipo introdotto da J. Watt nel tardo Settecento. Maxwell osservò per la prima volta esplicitamente il ruolo stabilizzante della retroazione, e gli effetti nocivi dei ritardi (descritti come una rincorsa alternante o "hunting" del riferimento) sulla stabilità. La relazione tra il modello matematico di un sistema e le sue proprietà di stabilità fu descritta per sistemi lineari generali da E.J. Routh negli anni immediatamente successivi. I sistemi di controllo automatico ebbero un ruolo importante negli avanzamenti tecnologici susseguenti, quali ad esempio la realizzazione dei primi aerei dei fratelli Wright agli inizi del ventesimo secolo.

La teoria del controllo ebbe una fortissima accelerazione negli anni intorno alla seconda guerra mondiale, contribuendo alla realizzazione di nuovi avanzati sistemi di pilotaggio per navi e aerei, di puntamento d'arma, e di telecomunicazione. Lo sviluppo dell'elettronica negli anni Quaranta e Cinquanta richiese più avanzate tecniche di stabilizzazione in retroazione, ad esempio per i nuovi amplificatori ad alte prestazioni che furono resi possibili dai primi transistor. In questa fase storica crebbero fortemente le tecniche d'analisi e sintesi del controllo *nel dominio della frequenza*, basate sulle trasformate dei segnali e sull'analisi delle risposte dei sistemi ad ingressi sinusoidali (*analisi armonica*). Si ebbe in quegli anni lo sviluppo di concetti quali quello di *funzione di trasferimento*, che rappresentando in modo completo e

compatto il rapporto tra l'ingresso e l'uscita di un sistema dinamico lineare, permisero di descrivere e analizzare complesse interconnessioni tra sottosistemi. Si definirono tecniche analitiche o grafiche, quali il *criterio di stabilità* di H. Nyquist per la stabilità dei sistemi in retroazione o le tecniche di sintesi basate sui *diagrammi* e le *relazioni integrali* di H. W. Bode per ottenere sistemi di controllo con assegnate specifiche di stabilità e di prestazioni. Molti dei fondamentali contributi di questo periodo sono tuttora alla base della progettazione di gran parte tra i più semplici schemi di controllo adottati nell'industria, tra i quali il più noto e diffuso è il cosiddetto *controllo PID* (da Proporzionale, Integrale, Derivativo). Nello stesso periodo, la teoria del controllo si apre anche ad orizzonti più vasti, abbracciando la teoria della probabilità e dei sistemi stocastici, e unificando nell'ambizioso programma della *cibernetica* di N. Wiener lo studio della comunicazione e del controllo negli esseri animati e nelle macchine.

Un secondo balzo in avanti della teoria del controllo avvenne negli anni Sessanta, in coincidenza con lo sviluppo tecnologico stimolato dalla corsa allo spazio tra il blocco occidentale e quello sovietico. Si assistette in questi anni a un progresso eccezionale in molte diverse direzioni di studio. La ripresa e l'estensione dei risultati di Lyapunov permisero di affrontare lo studio della stabilità di sistemi con elementi nonlineari (le tecniche in frequenza classiche sono solo applicabili a sistemi lineari). L'estensione dei metodi del calcolo delle variazioni a sistemi soggetti a vincoli sugli ingressi generò la teoria del *controllo ottimo*, sviluppata circa contemporaneamente e con approcci diversi da L. S. Pontryagin in URSS e da R. Bellman negli USA. Il controllo ottimo può dare preziose indicazioni sui segnali d'ingresso da usarsi per far raggiungere ad un sistema desiderate configurazioni finali ottimizzando la prestazione e minimizzando i costi connessi alla sua attuazione: un'esemplare applicazione è il controllo del vettore di un satellite artificiale tra il lancio e la messa in orbita, dove la riduzione del carburante necessario ha ovvio impatto sulla massa da lanciare.

La teoria del controllo sviluppata negli anni Sessanta poneva l'accento prevalentemente su tecniche *nel dominio del tempo* dei sistemi, rappresentati direttamente nello *spazio degli stati* dalle rispettive equazioni dinamiche. Grazie all'applicazione e allo sviluppo di una matematica piuttosto avanzata (usando principalmente strumenti d'analisi e algebra lineare), fu possibile raggiungere una soddisfacente comprensione di questioni teoriche fondamentali, quali la *controllabilità* e l'*osservabilità* dei sistemi lineari. Il primo concetto è relativo alla effettiva possibilità di poter guidare un dato sistema, mediante i suoi ingressi, ad assumere condizioni arbitrarie; il secondo si riferisce alla possibilità di conoscere l'intero stato di un sistema, potendo solo accedere alla misura di alcune grandezze di uscita. Il problema della sintesi di un controllore (o *regolatore*) per un sistema lineare, ottimo rispetto ad indici di prestazione e costi d'attuazione quadratici, o *sintesi LQR* (da *Linear Quadratic Regulator*), fu risolto brillantemente, così come venne risolto il problema della stima ottima degli stati ignoti di un sistema mediante filtraggio delle misure di uscite affette da rumore Gaussiano (*filtro ottimo* o *di Kalman*). Il cosiddetto *Teorema di Separazione* dimostrò che il sistema ottenuto connettendo un regolatore ed un filtro progettati indipendentemente in modo ottimo, ottiene ancora prestazioni globalmente ottime, mettendo così a disposizione una potentissima e sistematica tecnica di sintesi di sistemi di controllo detta *sintesi LQG* (da *Linear Quadratic Gaussian regulator*).

Il grande impulso teorico degli anni sessanta mise a disposizione una ricchezza di risultati che, assieme alla disponibilità di mezzi di calcolo elettronico adeguati, rese possibili verso la fine dei Settanta e nei primi Ottanta molte applicazioni dei controlli automatici a sistemi di complessità prima impensabile. Dalle applicazioni pratiche di quelle teorie ne furono peraltro evidenziate alcune limitazioni: in particolare, si riscontrò in certi casi che le soluzioni fornite non possedevano la necessaria *robustezza* rispetto alle inesattezze del modello e alla presenza di disturbi. Lo studio accurato di condizioni sotto le quali la stabilità e le prestazioni del sistema controllato potevano essere garantite in modo robusto e affidabile, reso necessario dalle necessità di sicurezza di applicazioni di grande responsabilità, svelò che il problema può essere formidabilmente complesso. Le tecniche in frequenza tornarono ad essere attentamente considerate, per la loro migliore capacità di catturare gli aspetti di robustezza; si ricorse a adatte teorie matematiche (quali l'analisi funzionale), e si svilupparono nuove teorie e tecniche di *controllo robusto*, quali ad esempio il *controllo H_∞* (*H-infinito*). La complessità della soluzione dei problemi del controllo robusto stimolò l'attenzione verso tecniche numeriche efficienti ed accurate per la progettazione assistita da calcolatore dei sistemi di controllo (*Computer-Aided Control System Design*, CACSD).

Sempre ad iniziare dagli anni Ottanta, la possibilità offerta dai nuovi processori elettronici di calcolare leggi di controllo sofisticate in pochi millisecondi aprì la porta ad un approccio più ambizioso verso i sistemi nonlineari, non più basato su locali approssimazioni lineari ma su tecniche esatte valide in campi più ampi. Utilizzando risultati matematici di geometria differenziale e di analisi dei sistemi dinamici, e sviluppandone di nuovi, si poterono affrontare problemi quali

lo studio della controllabilità e della osservabilità dei sistemi nonlineari, e la loro esatta trasformazione in sistemi lineari mediante retroazione.

Uno dei problemi più stimolanti che la teoria del controllo ha affrontato è quello di controllare sistemi di cui non si conoscano, completamente o in parte, i modelli. In modo figurato, si può pensare al problema che avremmo di fronte se richiedi di guidare un veicolo i cui comandi ci sono ignoti, o noti solo in parte. La osservazione delle risposte fornite dalle uscite del sistema in corrispondenza ad ingressi noti può fornire dati empirici essenziali per la costruzione di un modello, il che può essere fatto utilizzando opportune tecniche di *identificazione dei sistemi*. La teoria del controllo ha dedicato grande attenzione ai problemi di identificazione, utilizzando e sviluppando nuovi risultati con approcci diversi – statistici, di analisi funzionale, di apprendimento e generalizzazione (*machine learning*). Il modello di un sistema appreso empiricamente può naturalmente venire usato per controllare il sistema stesso. Quando le due fasi di identificazione e di controllo sono contestuali, cioè quando si tenta al contempo di usare la conoscenza attuale di un modello e la retroazione per fornire ingressi di controllo al sistema, e di usare la misura delle uscite corrispondenti a tali ingressi per migliorare la conoscenza del modello stesso e adattarsi alle sue variazioni, si parla di *controllo adattativo*. Lo studio del controllo adattativo, iniziato sin dagli anni Sessanta, ha dato luogo ad alcuni importanti sviluppi ed applicazioni, ad esempio nel campo della robotica. La difficoltà del problema in ogni modo è tale che esso si può considerare ancora ad oggi uno dei campi di ricerca più aperti ed impegnativi.

La rilevanza ed il livello di penetrazione delle tecniche di controllo nei dispositivi usati nella vita quotidiana sono andati vertiginosamente aumentando negli anni recenti. E' sufficiente pensare al numero di sistemi di controllo che sono oggi incorporati nei beni di consumo personali e domestici, nei dispositivi biomedicali o d'intrattenimento, per capire quanto diffuso stia divenendo il controllo automatico: in un autoveicolo di classe media, ad esempio, si contano oggi sino a molte decine di controllori, destinati a gestire funzioni disparate che vanno dalla frenatura, alla stabilità in curva, al controllo delle emissioni inquinanti, ecc.. I sistemi di controllo che si incontrano in queste moderne applicazioni utilizzano tipicamente una elettronica sviluppata appositamente per essere incorporata direttamente a bordo dei dispositivi (controllori *embedded*). La necessaria economicità di questi prodotti di massa, assieme alla complessità delle interazioni tra i diversi sottosistemi e con l'operatore umano, hanno sollevato problematiche nuove, legate da un lato allo sfruttamento oculato delle limitate risorse computazionali, e dall'altro alla compresenza di dinamiche continue e di logiche discrete di controllo (*sistemi ibridi*), che richiedono nuovi sofisticati strumenti di analisi e di sintesi.

Un altro terreno di grande potenziale sviluppo e di difficili sfide intellettuali per l'automatica è nei sistemi costituiti da molti agenti parzialmente o totalmente autonomi, che possono interagire tra di loro in collaborazione, o in competizione, o con scopi indipendenti. Sistemi di questo genere si incontrano ad esempio nello studio di problemi economico-finanziari, ecologici o sociologici, ma se ne prevede l'utilizzo anche nelle nuove generazioni di sistemi per la assistenza alla guida e alle gestione del traffico (aereo, navale o persino di auto private – come ad esempio nella guida assistita in caso di nebbia), o in sistemi multi-robot per la esplorazione o la sorveglianza. In questi sistemi, che si prevede saranno molto diffusi nel prossimo futuro anche a seguito del diffondersi delle tecnologie di comunicazione senza fili, le azioni da intraprendere devono essere decise da ogni agente in modo decentralizzato, cioè senza la possibilità di conoscere l'intero stato del sistema, ma solo sulla base di conoscenze limitate ad una zona individualmente accessibile e con informazioni scambiate tra agenti vicini. Come fare in modo che dal sistema complesso originato dalla interazione di molteplici volontà distinte emerga un comportamento complessivo coerente e sicuro, è certamente una delle più stimolanti sfide aperte dinanzi alla teoria del controllo.

Per la sua capacità di studiare sistemi complessi astraendo dai dettagli e fornendo linguaggi e strumenti comuni a domini diversi, è opinione diffusa che la teoria del controllo gioca oggi un ruolo cruciale e crescente nello sviluppo economico ed industriale delle società avanzate. L'automatica è situata, infatti, al crocevia dove le scienze dell'informazione s'incontrano con le principali tecnologie moderne: con quelle industriali, in tutte le applicazioni in cui si cerca di costruire macchine con sempre maggiore intelligenza, legando per così dire l'*acciaio* ed il *silicio*; e con quelle biologiche e medicali, dove si vogliono governare intelligentemente complessi processi fisiologici, biologici o ambientali mediante un'efficace ma sicura integrazione tra il *naturale* e l'*artificiale*.