



Corso di Robotica 2

Robot in contatto con l'ambiente: Introduzione

Prof. Alessandro De Luca

DIPARTIMENTO DI INFORMATICA
E SISTEMISTICA ANTONIO RUBERTI



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

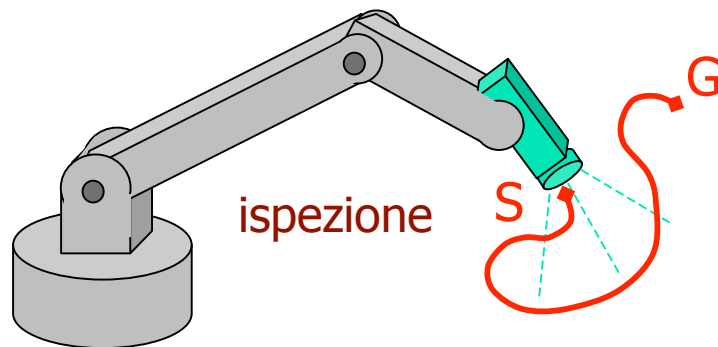


Interazione robot-ambiente

il robot può interagire con l'**ambiente**

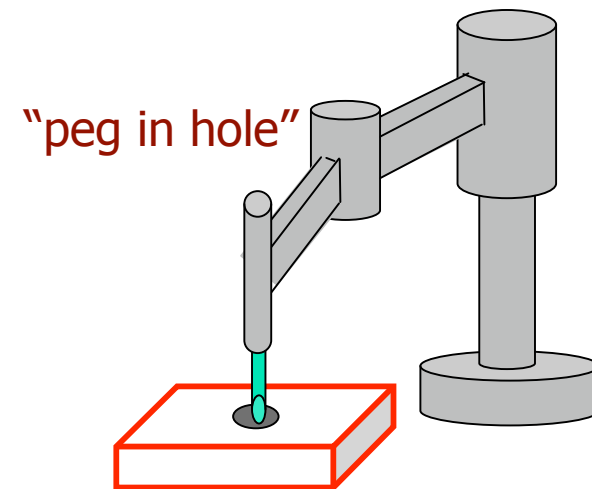
- **modificando lo stato** dell'ambiente (es: operazioni di pick-and-place)
- **scambiando forze** con esso (es: compiti di assemblaggio)

controllo di moto libero



sensori: posizione (encoder)
velocità (tachimetrica)
ai giunti o visione nel cartesiano

controllo di moto cedevole



sensori: come prima +
forza/coppia al polso



Cedevolezza

PASSIVA



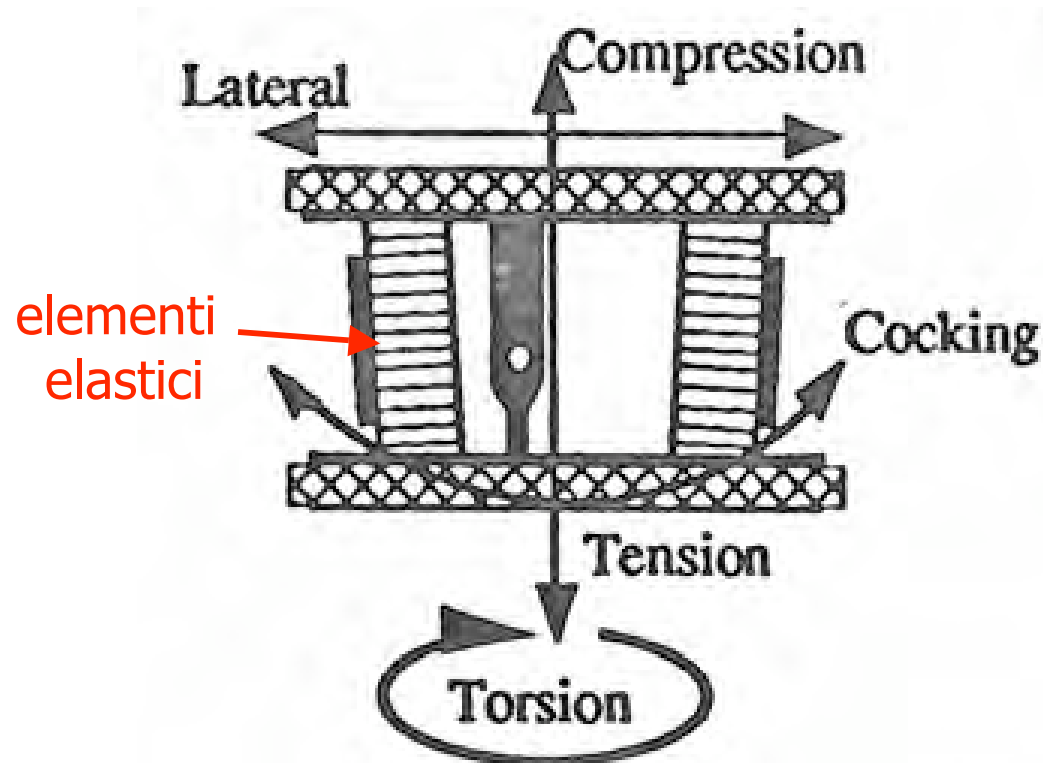
ATTIVA

l'end-effector del robot è equipaggiato con **dispositivi meccanici** che "cedono" alle forze applicate al TCP (Tool Center Point)
(**RCC** = Remote Center of Compliance)

il robot è dotato di un **controllo (elettronico/informatico)** che reagisce opportunamente alle forze applicate (e misurate da sensore) al TCP

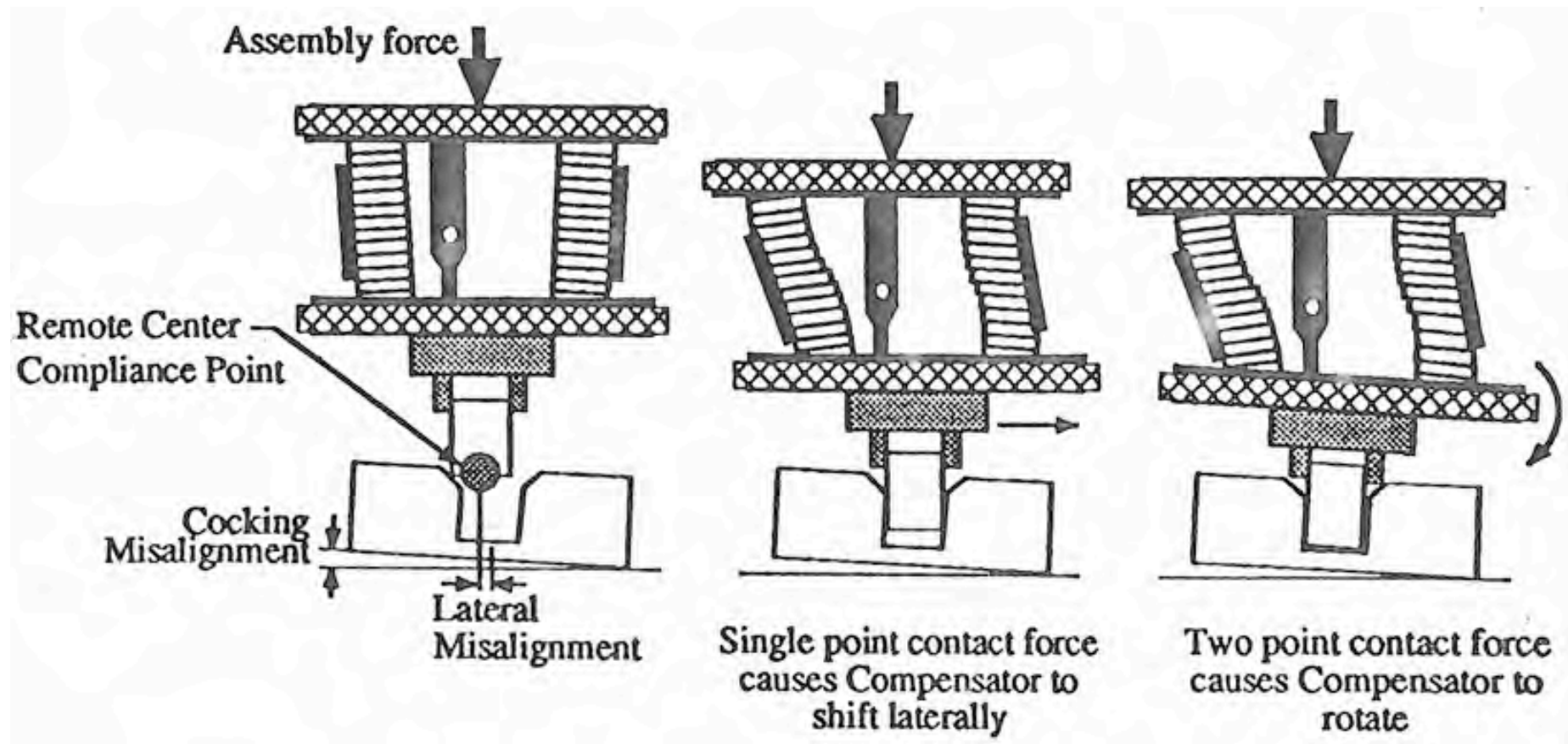


Remote Center of Compliance



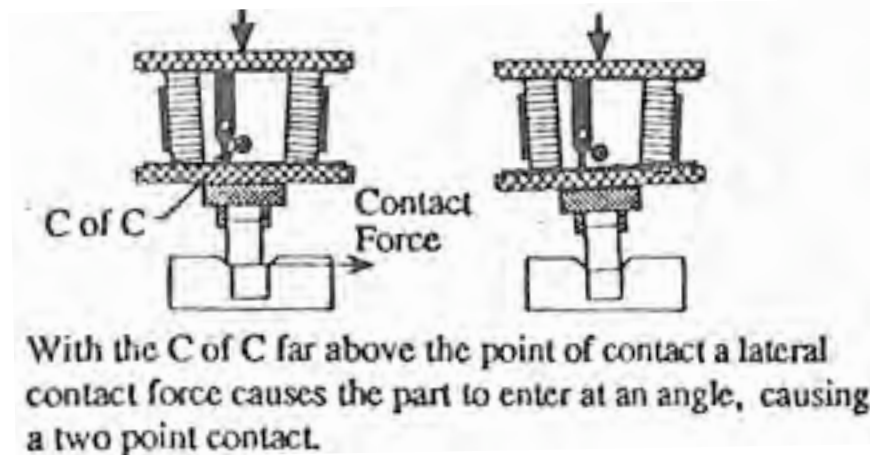
modelli di RCC della ATI

Azione del RCC in caso di errori di allineamento

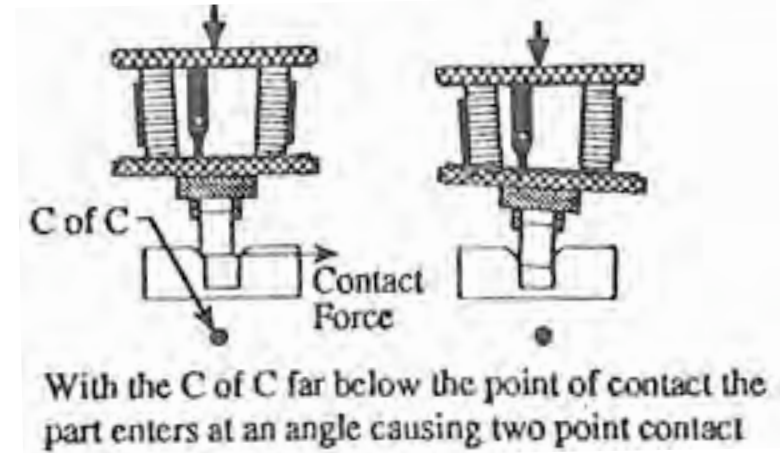




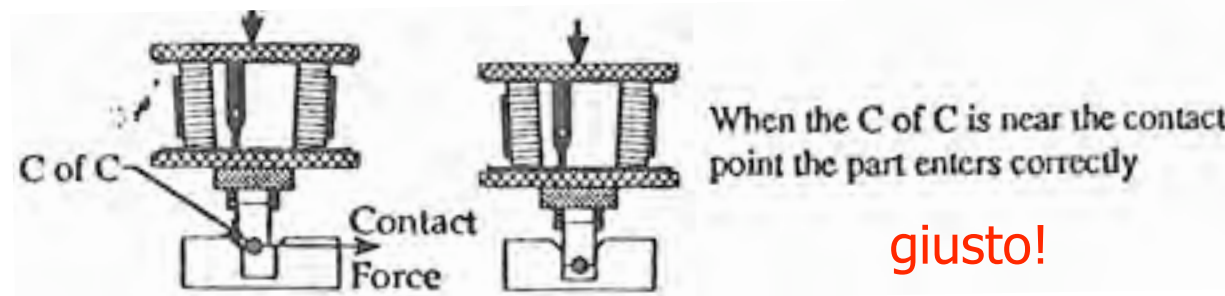
Posizione del Centro di Cedevolezza



troppo alto...



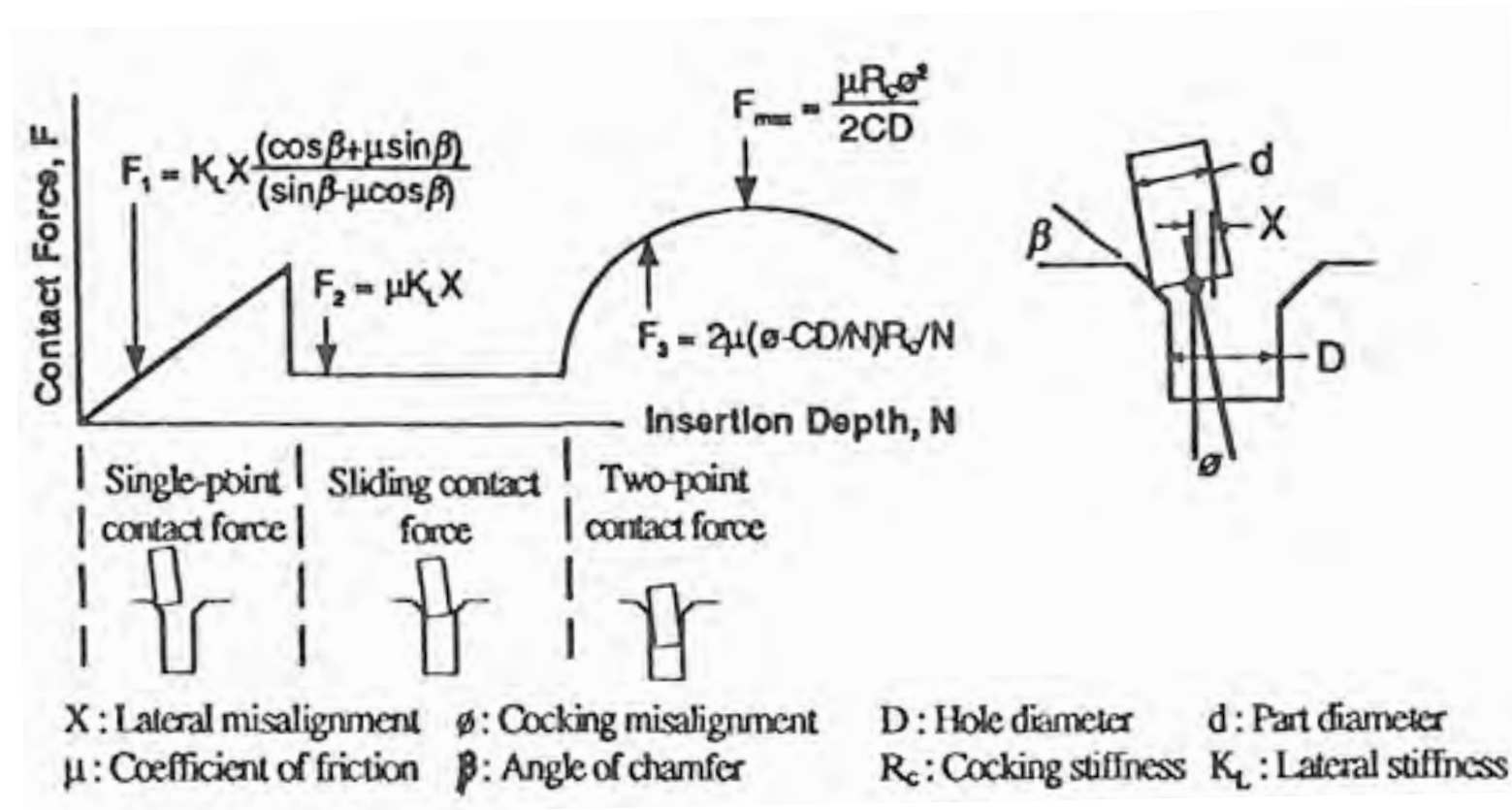
troppo basso...



giusto!

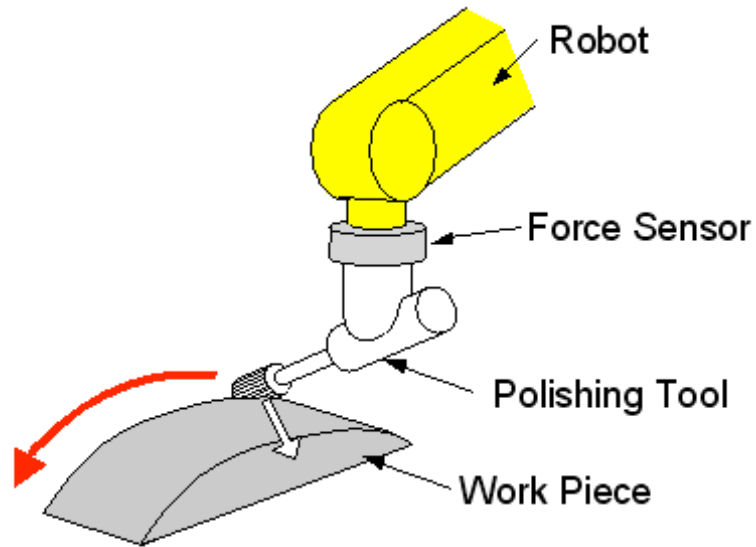


Andamento della forza di contatto



angle of chamfer = angolo di "invito" del foro

Cedevolezza attiva contour following



Following with constant pushing force



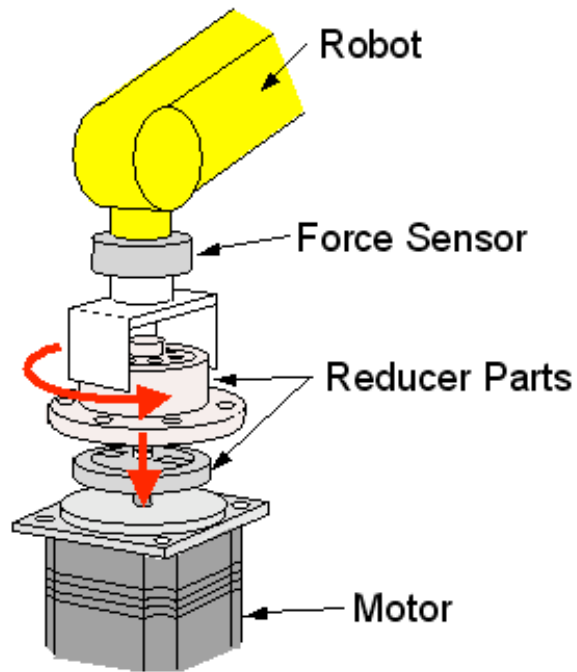
Washstand



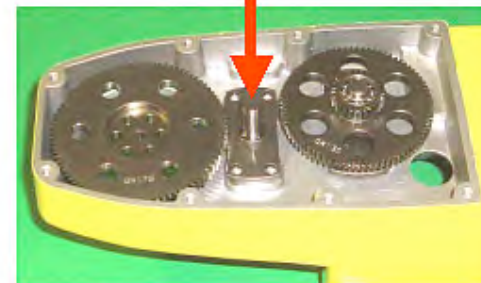
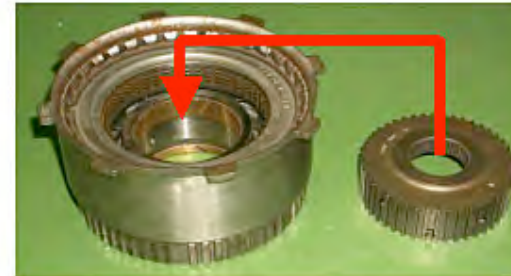
Metal Cabinet

Cedevolezza attiva

“matching” di parti



Phase matching by force sensing



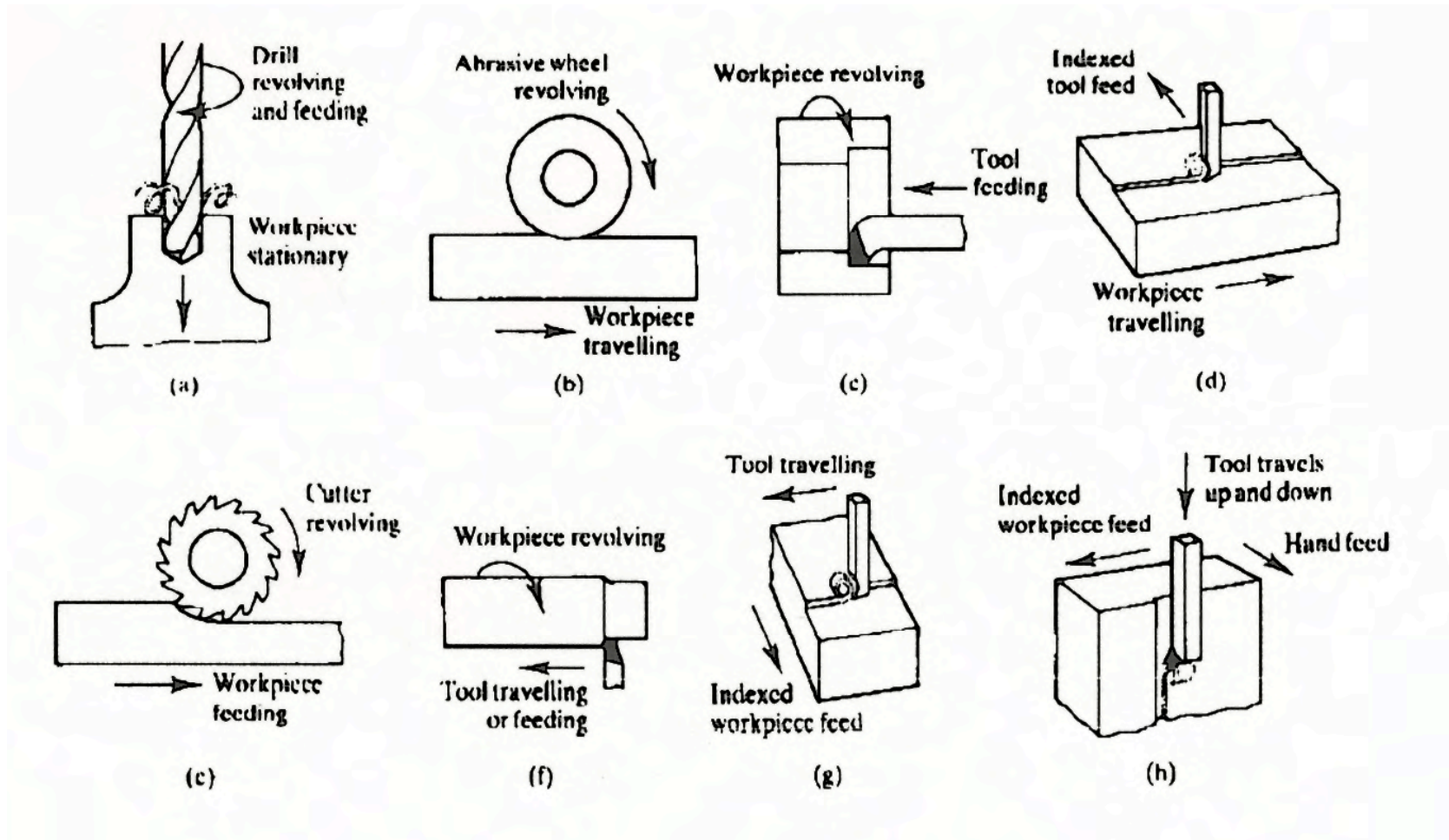
Gear Parts

Compiti con interazione ambientale



- lavorazioni meccaniche
 - sbavatura, finitura di superficie, assemblaggio,...
- tele-manipolazione
 - il feedback di forza migliora l'abilità dell'operatore nei sistemi master-slave
- sistemi multi-robot
 - l'ambiente è un altro robot con comportamento dinamico attivo
- mani robotiche a elevata destrezza
 - presa e manipolazione richiedono cooperazione di forza/moto fra le dita
- "sondaggio" per **identificazione della forma**
 - l'integrazione di dati sensoriali di forza e velocità permette di seguire il contorno di oggetti non noti

Esempi di lavorazioni meccaniche





In ogni caso...

- le specifiche sul **moto** sono integrate da specifiche sulle **forze**
 - obiettivi di controllo **ibridi**
- le forze esercitate al contatto possono essere **controllate** esplicitamente o semplicemente mantenute **limitate** in modo indiretto



Approcci esistenti in letteratura

- **controllo esplicito della sola forza** [Whitney]
 - usato in operazioni quasi-statiche (assemblaggio) per evitare inceppamenti nell'inserzione
- **controllo attivo di rigidezza** [Paul, Shimano, Salisbury]
 - forza di contatto controllata attraverso il posizionamento dell'E-E
 - il robot reagisce come una molla compressa
- **controllo di impedenza** [Hogan]
 - impone un comportamento dinamico desiderato (ad es., forze su sistema massa-molla-smorzatore) all'E-E
 - imita il comportamento umano in un ambiente sconosciuto
- **controllo ibrido di forza-posizione** [Mason]
 - decompone lo spazio del compito in direzioni complementari in cui è controllata o la forza, o lo spostamento, usando
 - un modello **puramente cinematico** del robot [Raibert, Craig]
 - un modello **dinamico** del robot [Khatib]

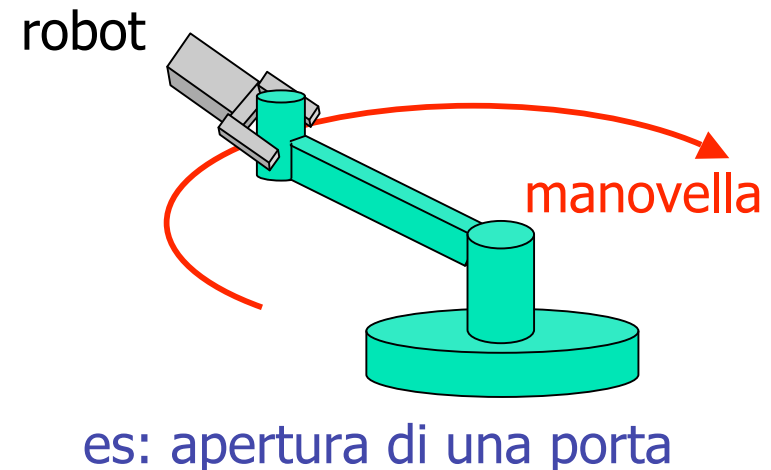
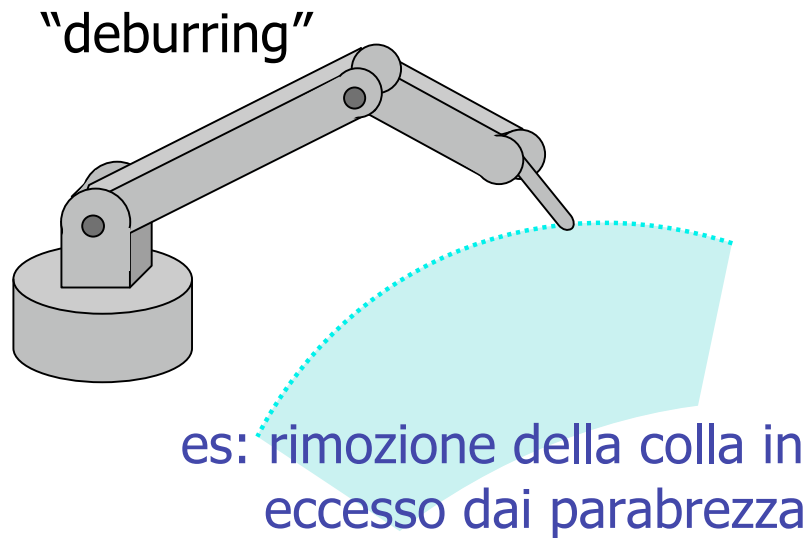
l'approccio più appropriato per i compiti rapidi e accurati a cui siamo interessati...



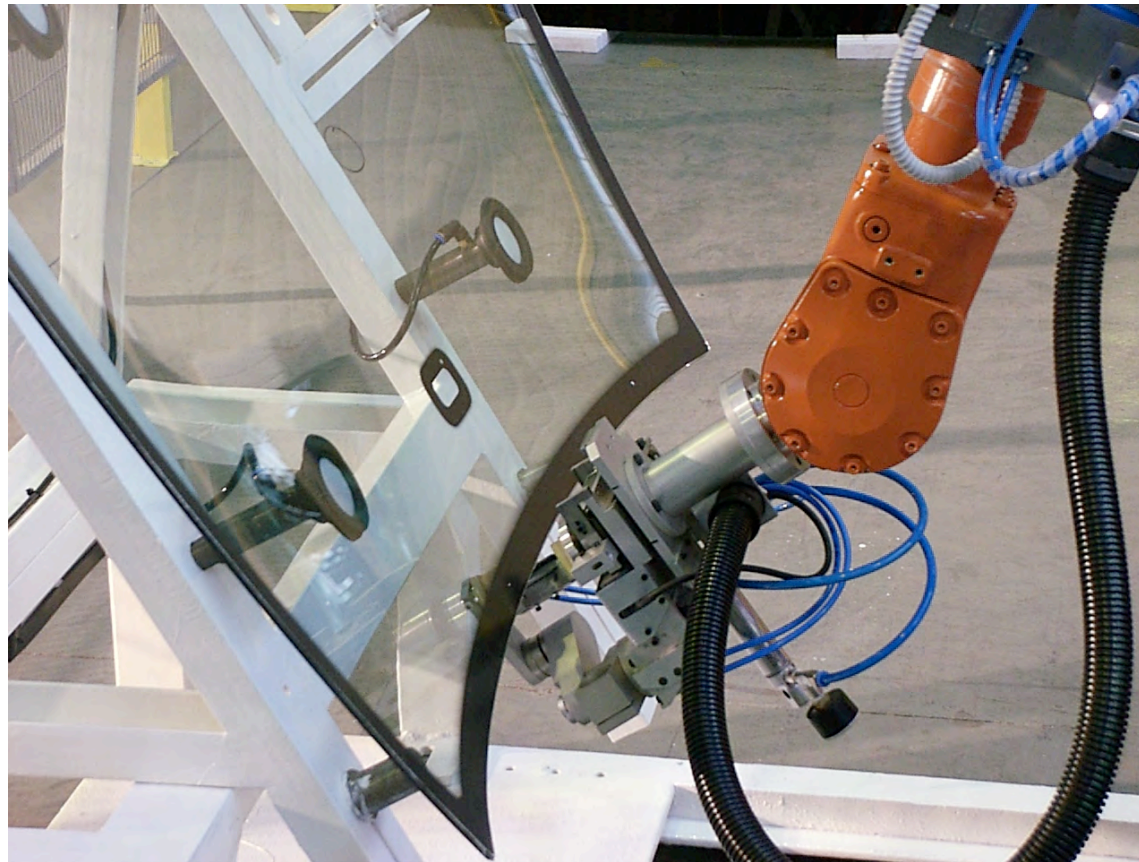
Problemi di interesse

compiti con interazione ambientale che richiedano

- **inseguimento accurato** da parte dell'E-E di traiettorie (anche a **velocità elevata**) definite sulle superfici di oggetti
- **controllo delle forze/coppie** applicate al contatto con l'ambiente, a bassa (**soffice**) o elevata (**rigido**) "stiffness"



Sbavatura robotizzata di parabrezza



presso il centro di eccellenza ABB a Cecchina, 2002



Controllo di impedenza vs. ibrido

modello dell'ambiente (↔ contesto del controllo)

controllo di impedenza

- ambiente = sistema meccanico sottoposto a **deformazioni piccole ma finite**
- forze al contatto scaturiscono da bilanciamento di due **sistemi accoppiati dinamicamente** (R+A)
- assegna caratteristiche dinamica desiderate all'interazione forze/movimento

controllo ibrido di forza/moto

- l'**ambiente rigido** riduce i gradi di libertà di moto del robot quando è in contatto
- le forze sono tentativi di violare i **vincoli cinematici** imposti dall'ambiente
- decompone lo spazio in direzioni dove sono ammissibili o **solo moto** o **solo forze** di reazione

- il **livello di conoscenza** dell'ambiente è solo apparentemente diverso
- nel controllo d'impedenza, la **misura delle forze di contatto** può essere necessaria o meno



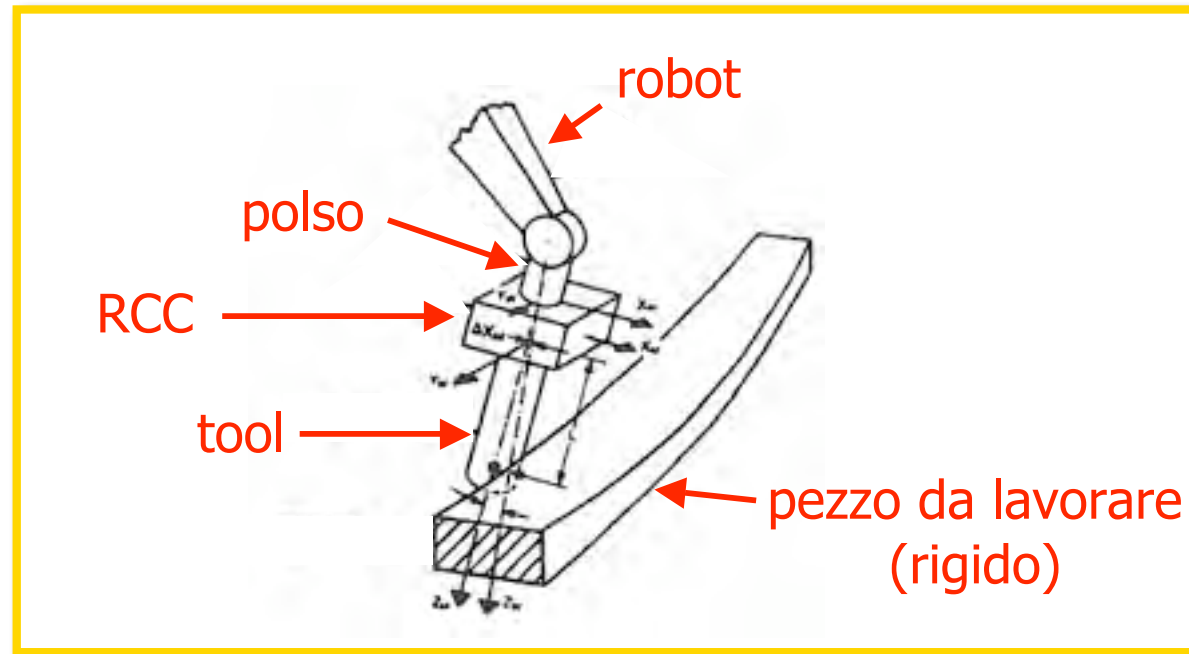
Video

- apertura di una porta con **controllo d'impedenza**
- inserzione di un pistone con **controllo ibrido** forza-posizione (visuale)





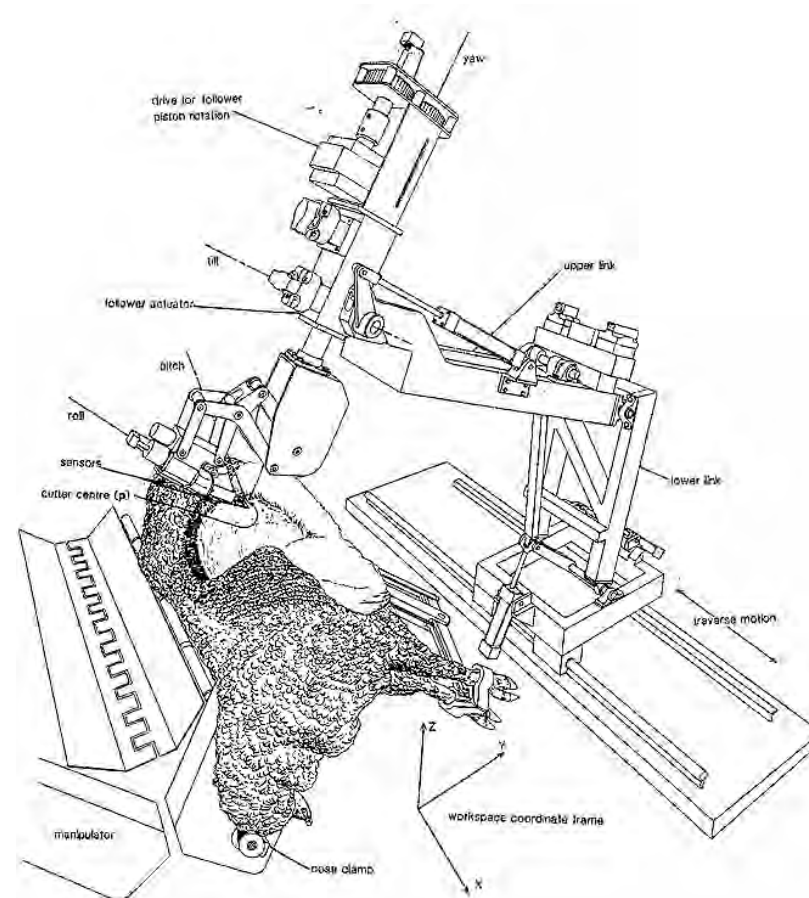
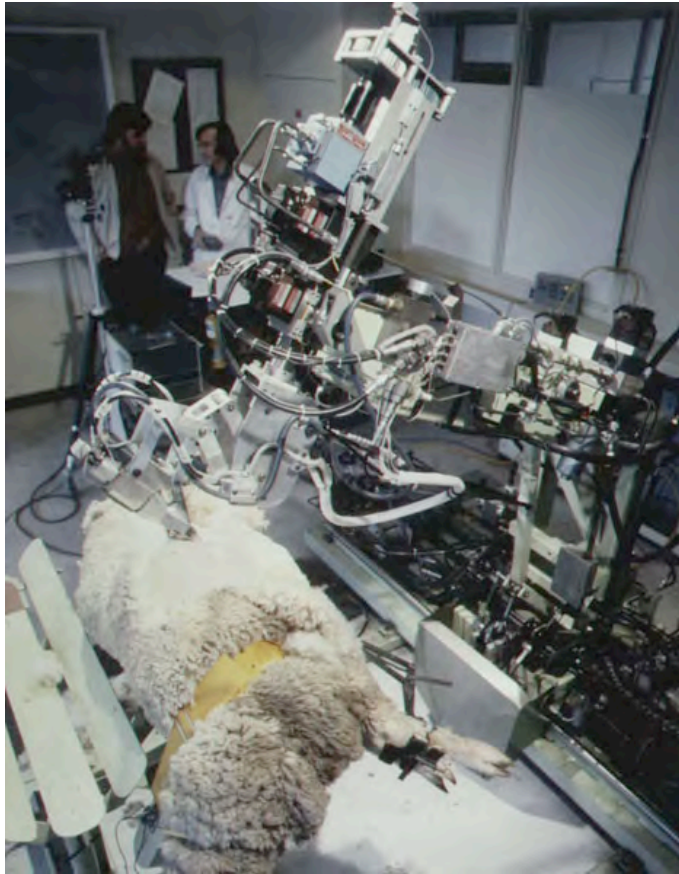
Una tipica situazione vincolata...



l'end-effector del robot deve seguire in modo stabile il profilo del pezzo da lavorare, esercitando determinate forze



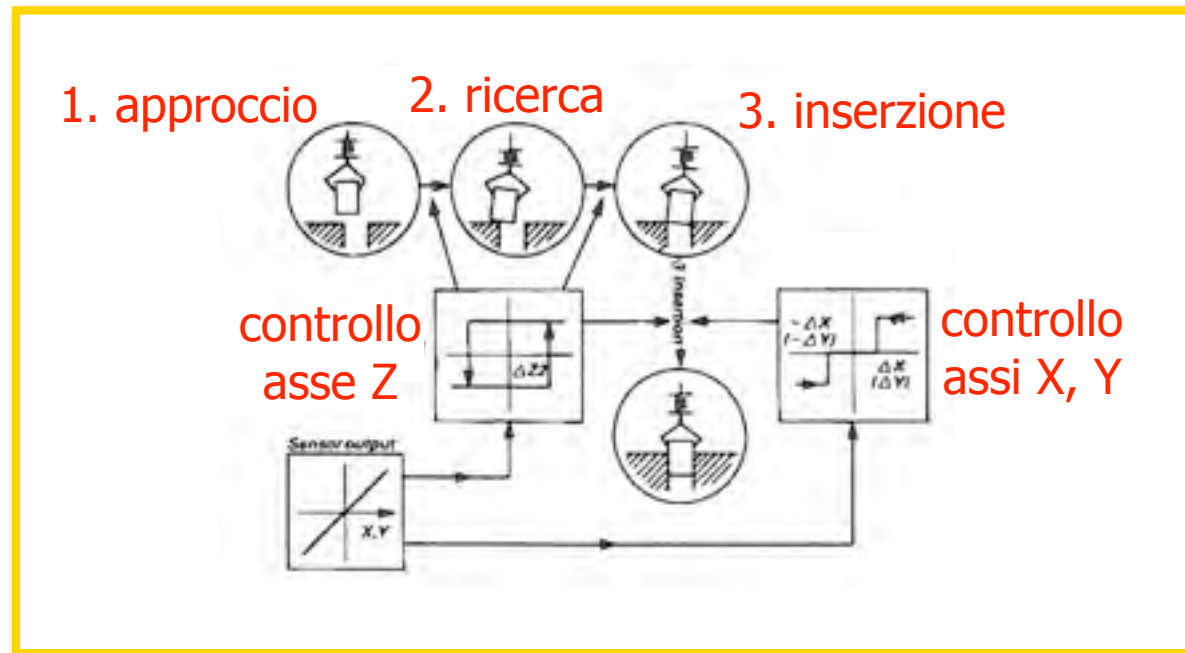
Una situazione cedevole...



Trevelyan (AUS): sistema **Oracle** in un test del 1981



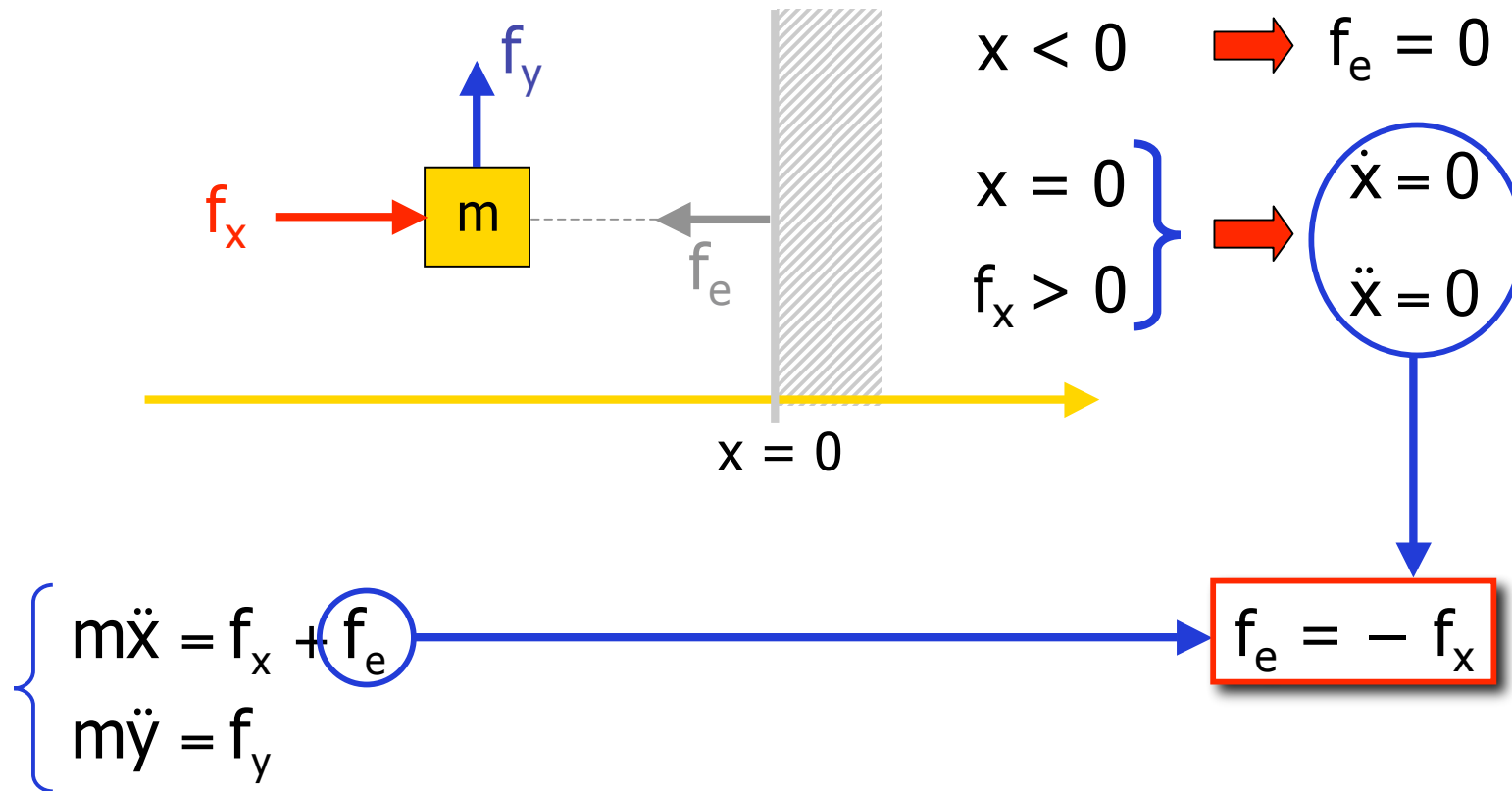
Un'interazione mista



l'elaborazione delle misure di forza, con associata sequenza di movimenti, permette la corretta inserzione aiutata da una sufficiente cedevolezza passiva



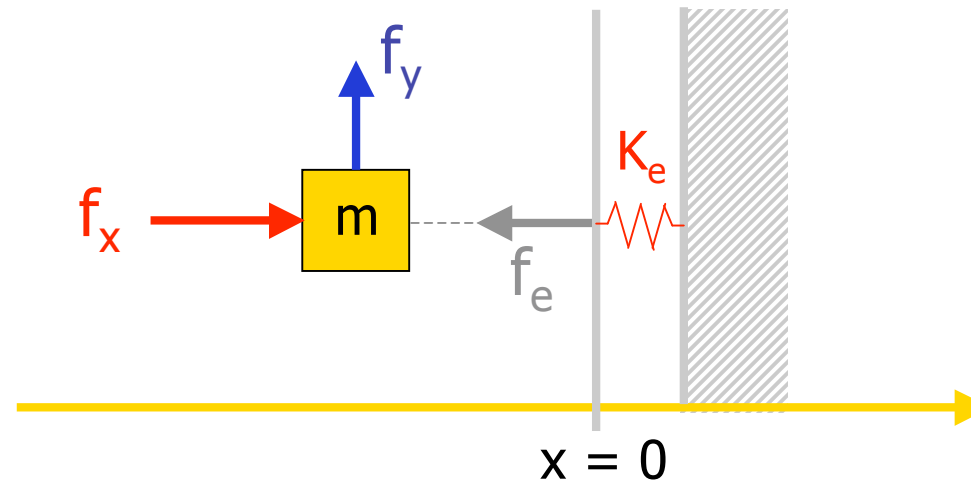
Situazione vincolata ideale



“ideale” = robot (qui visto come massa cartesiana)
+ ambiente entrambi **infinitamente RIGIDI**



Situazione di contatto cedevole



$$x < 0 \quad \Rightarrow \quad f_e = 0$$

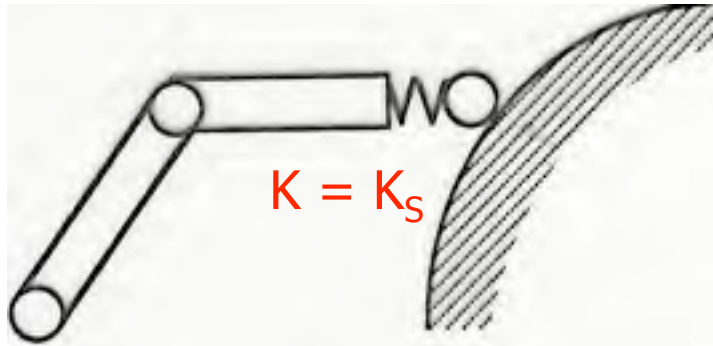
$$x \geq 0 \quad \Rightarrow \quad f_e = -K_e x$$

Tipi di contatti robot-ambiente schematizzabili con una sola costante elastica

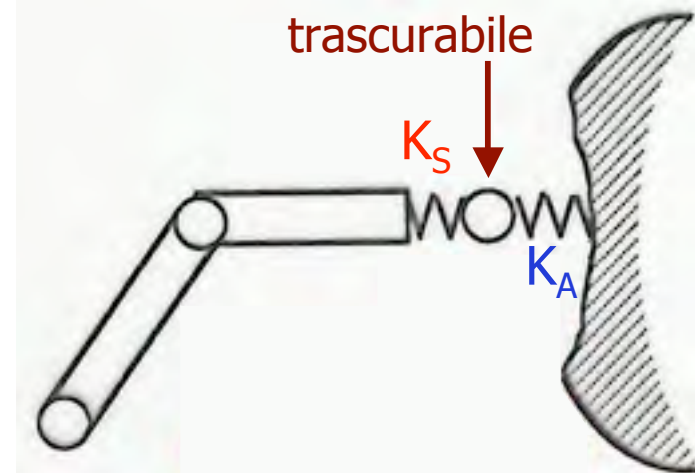


cedevolezza
sensore di forza

ambiente rigido

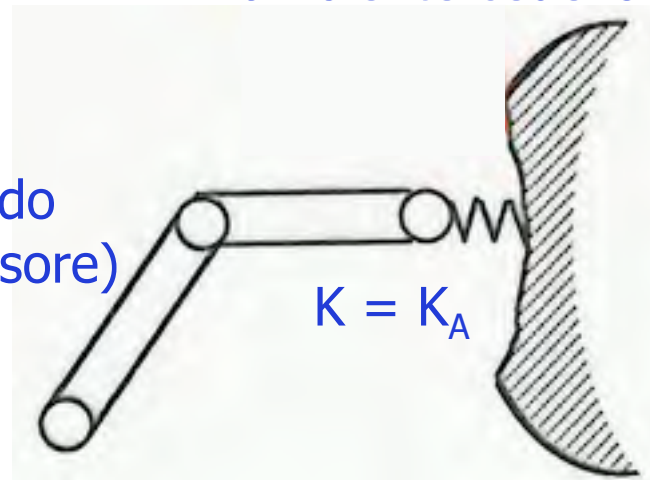


massa intermedia
trascurabile



ambiente cedevole

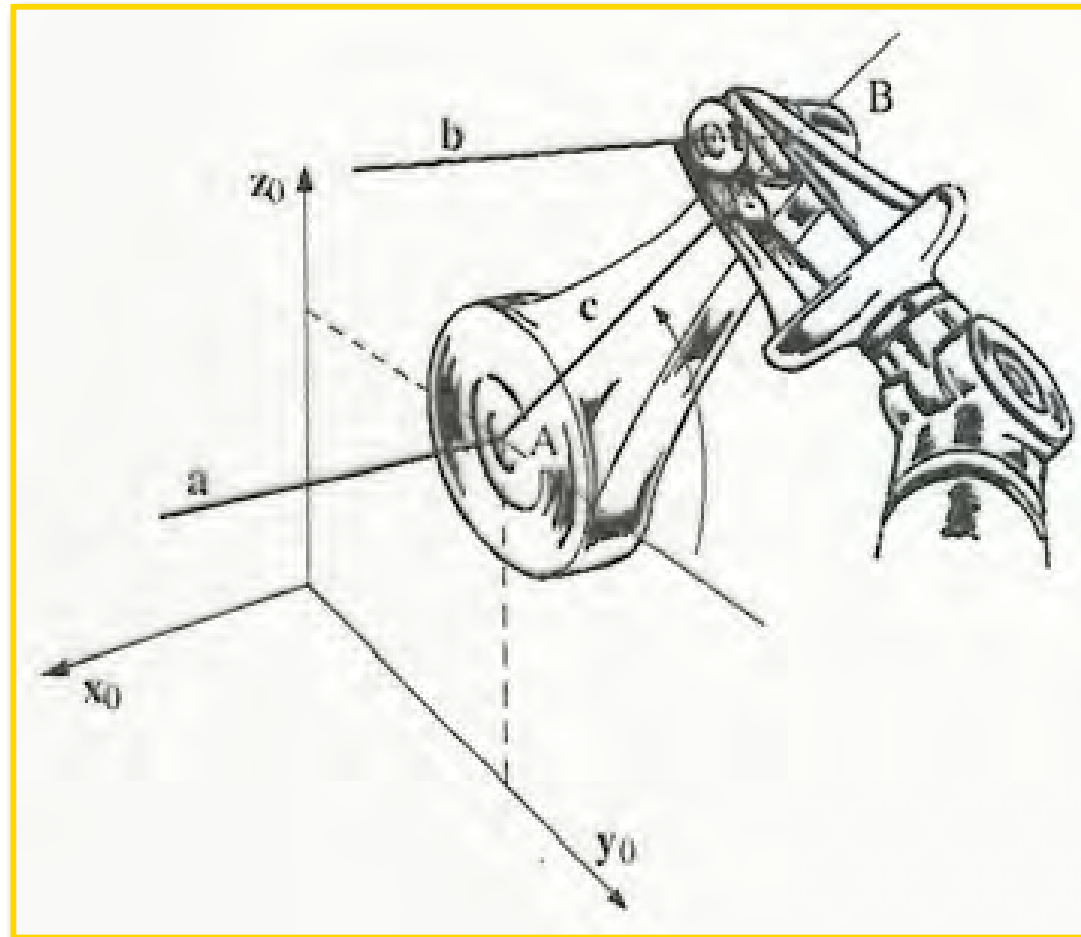
robot rigido
(incluso sensore)



$$\frac{1}{K} = \frac{1}{K_S} + \frac{1}{K_A} \Rightarrow K = \frac{K_S K_A}{K_S + K_A}$$

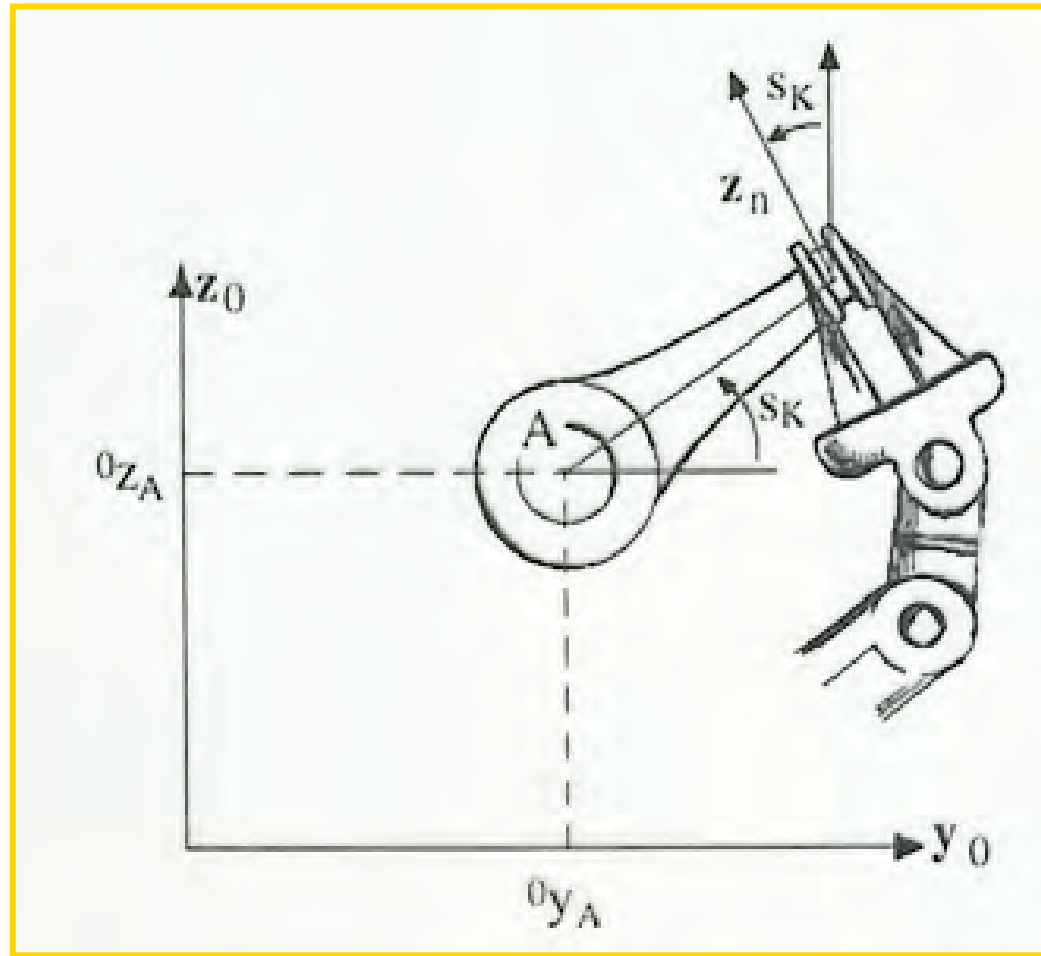
molle in serie =
somma cedevolezza

Compiti che richiedono controllo ibrido



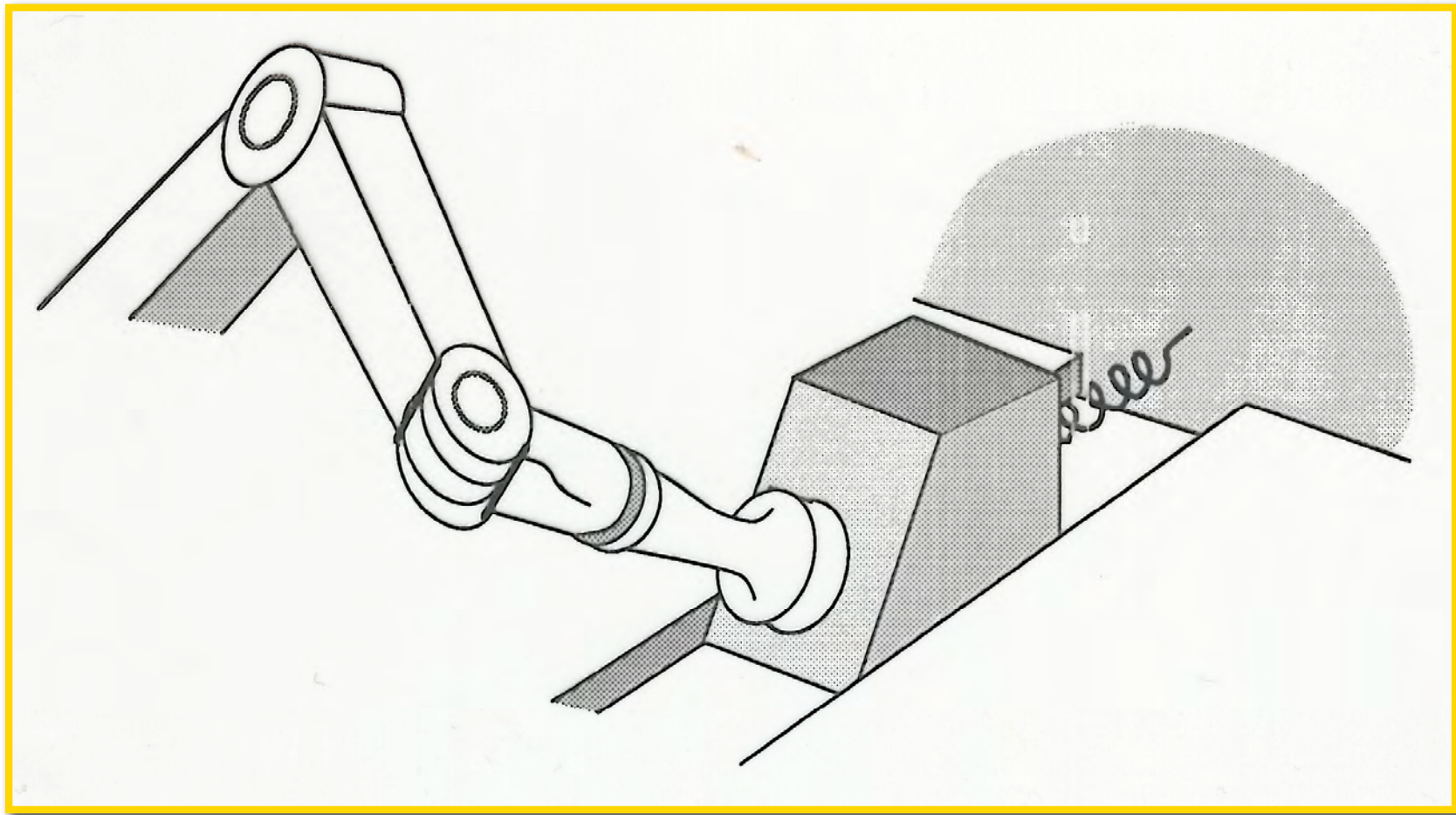
robot che ruota una manovella
con manicotto folle

Compiti che richiedono controllo ibrido



robot che ruota una manovella
con manicotto fisso

Compiti che richiedono controllo ibrido



robot che spinge una massa
ancorata elasticamente lungo una guida