Corso di Robotica 2

Pianificazione del moto tra ostacoli

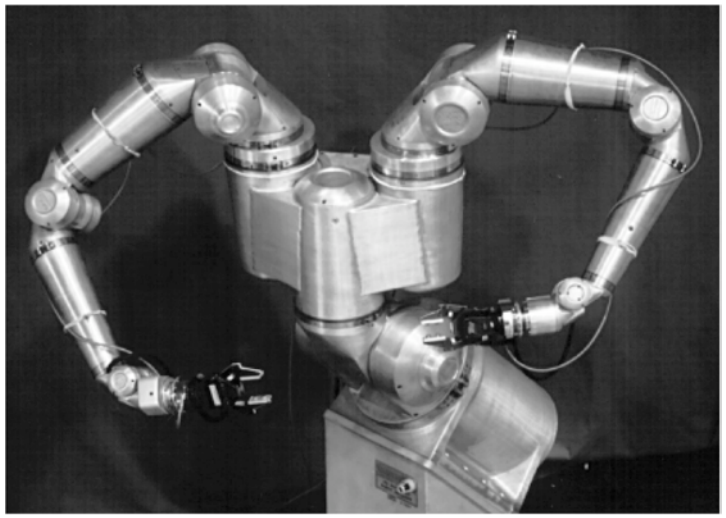
Introduzione

Prof. Alessandro De Luca

DIPARTIMENTO DI INFORMATICA
E SISTEMISTICA ANTONIO RUBERTI

SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Sistemi robotici

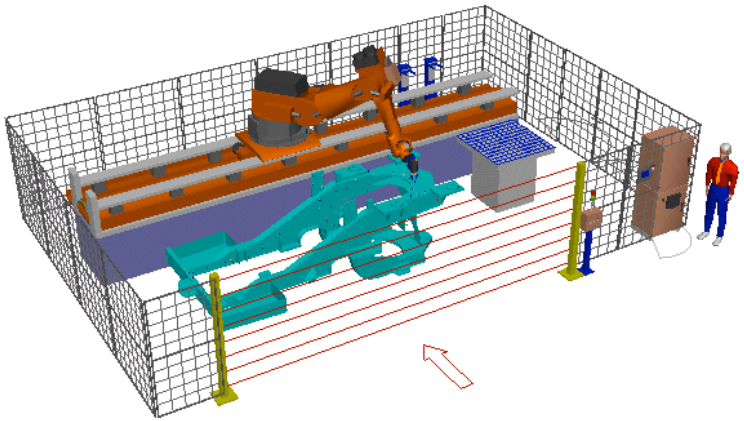


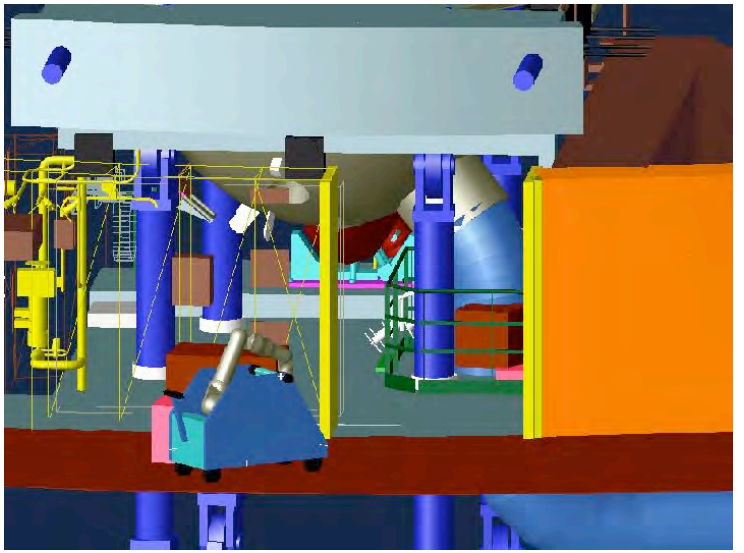
KB2017 Dual arm

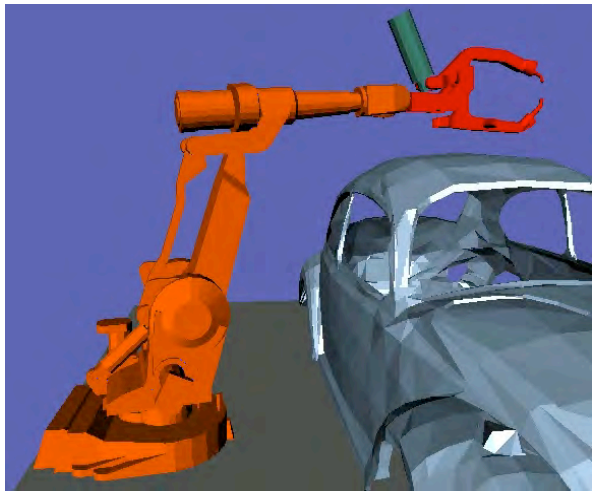
UB Hand - II

- sistemi multi-articolati di corpi
  - comandati nello spazio delle configurazioni (giunti)
  - in azione nello spazio di lavoro (cartesiano)

Robot industriali in celle con ostacoli



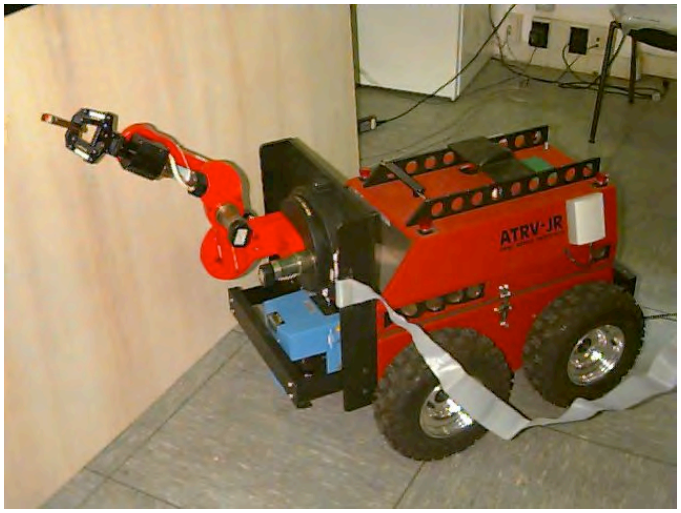


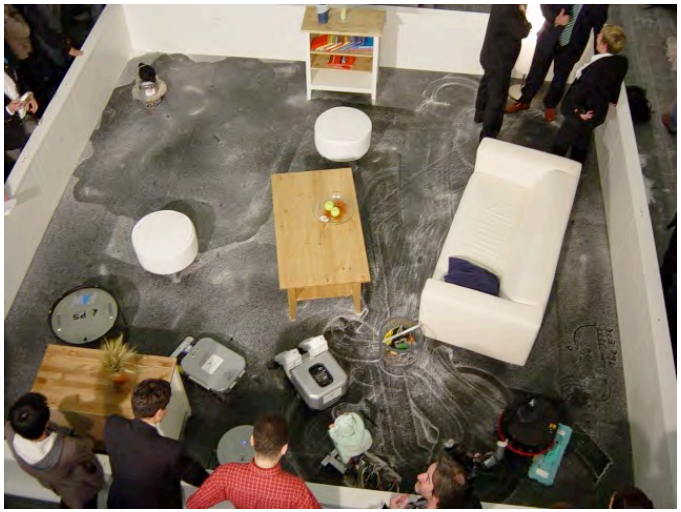


Robot mobili in ambienti non strutturati

LAMA robot

Hilare 2 robot





Esempi di applicazioni

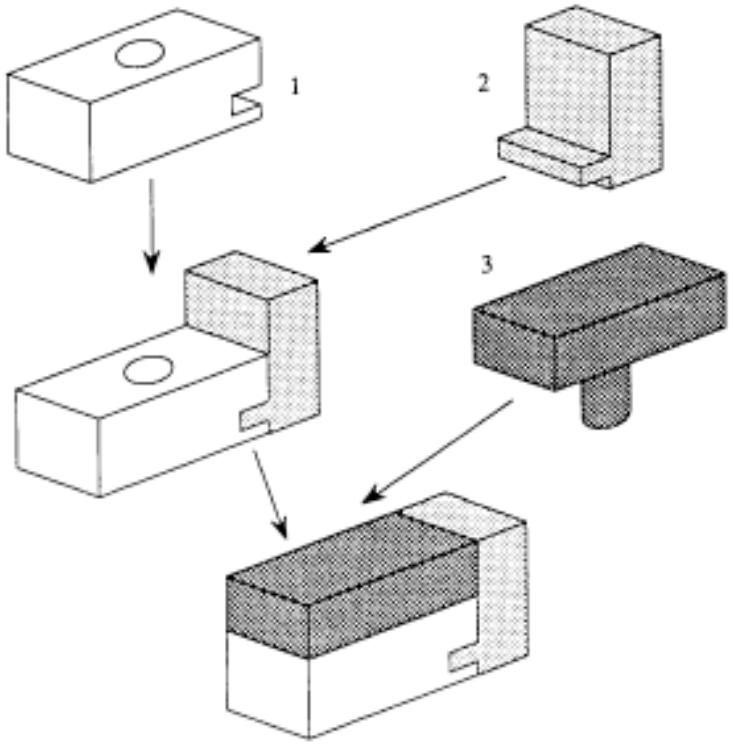
- ambito industriale
  - programmazione robot
  - set up di cella robotizzata
  - progetto di "part feeders"
- progetto CAD di parti per lavorazione manifatturiera
- progetto del layout e intervento (servicing) su tubi, cavi, …
- robotica mobile autonoma
  - esplorazione planetaria
  - sorveglianza
  - scouting di uso militare
- animazione grafica di "attori digitali" in video games, film,…
- immersione in ambienti virtuali
- pianificazione di operazioni chirurgiche robotizzate
- generazione di configurazioni e moti compatibili per complessi molecolari
  - docking
  - folding
- …

Obiettivi della pianificazione del moto

- determinare strategie di moto...
  - cammini geometrici
    - privi di collisioni
    - eventualmente, con contatti desiderati
  - traiettorie temporali
  - sequenze di comandi di moto sensor-based
- ...per realizzare compiti di alto livello
  - spostare il robot fino ad un goal senza collisioni
  - assemblare parti per ottenere un oggetto finale
  - costruire una mappa dell'ambiente
  - localizzare un target nell'ambiente

Assemblaggio

- disposizione iniziale e finale di oggetti
  - descrizione geometrica
- sequenza di relazioni spaziali
  - primitive di moto



Problema generale di pianificazione

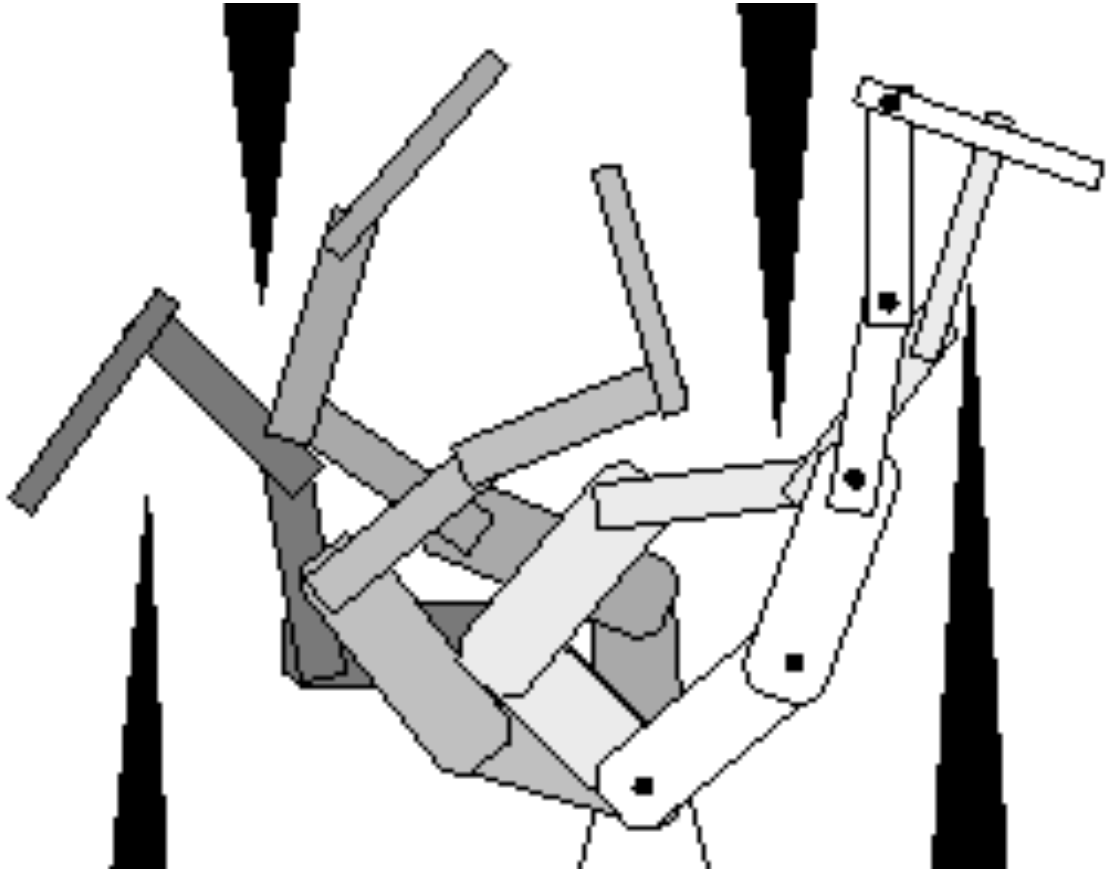
- determinare (se esiste) un cammino privo di collisioni per un oggetto rigido o articolato (il robot) tra ostacoli (statici o dinamici) nell'ambiente
- input
  - geometria del robot e degli ostacoli
  - cinematica del robot (gradi di libertà)
  - configurazione iniziale e finale del robot
- output
  - sequenza continua di configurazioni ammissibili che connette quella iniziale con quella finale

Problema del "piano mover"

singolo corpo rigido tridimensionale

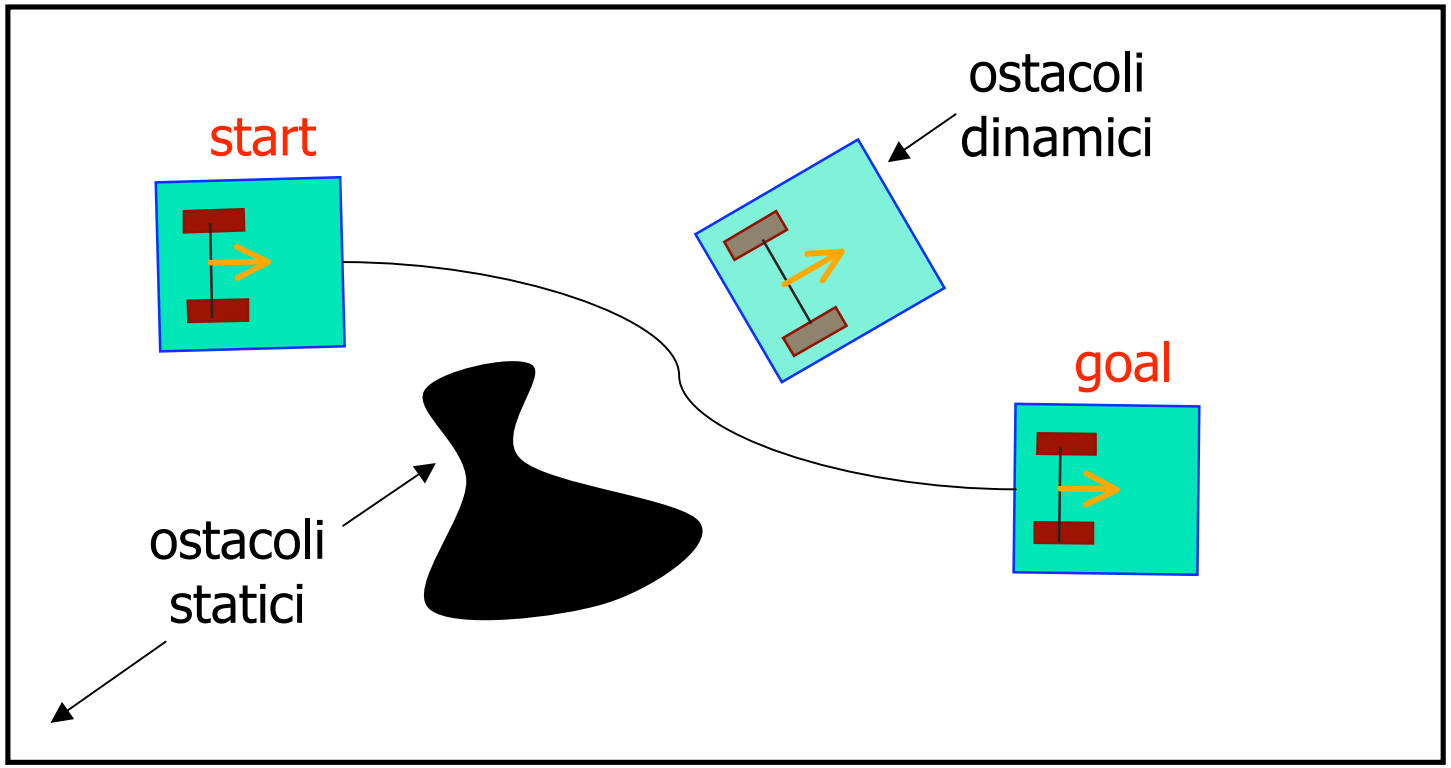
(nella formulazione originale, da spostare senza alzare = in 2D)

Robot articolati



corpo articolato con vari gradi di libertà (qui 5)

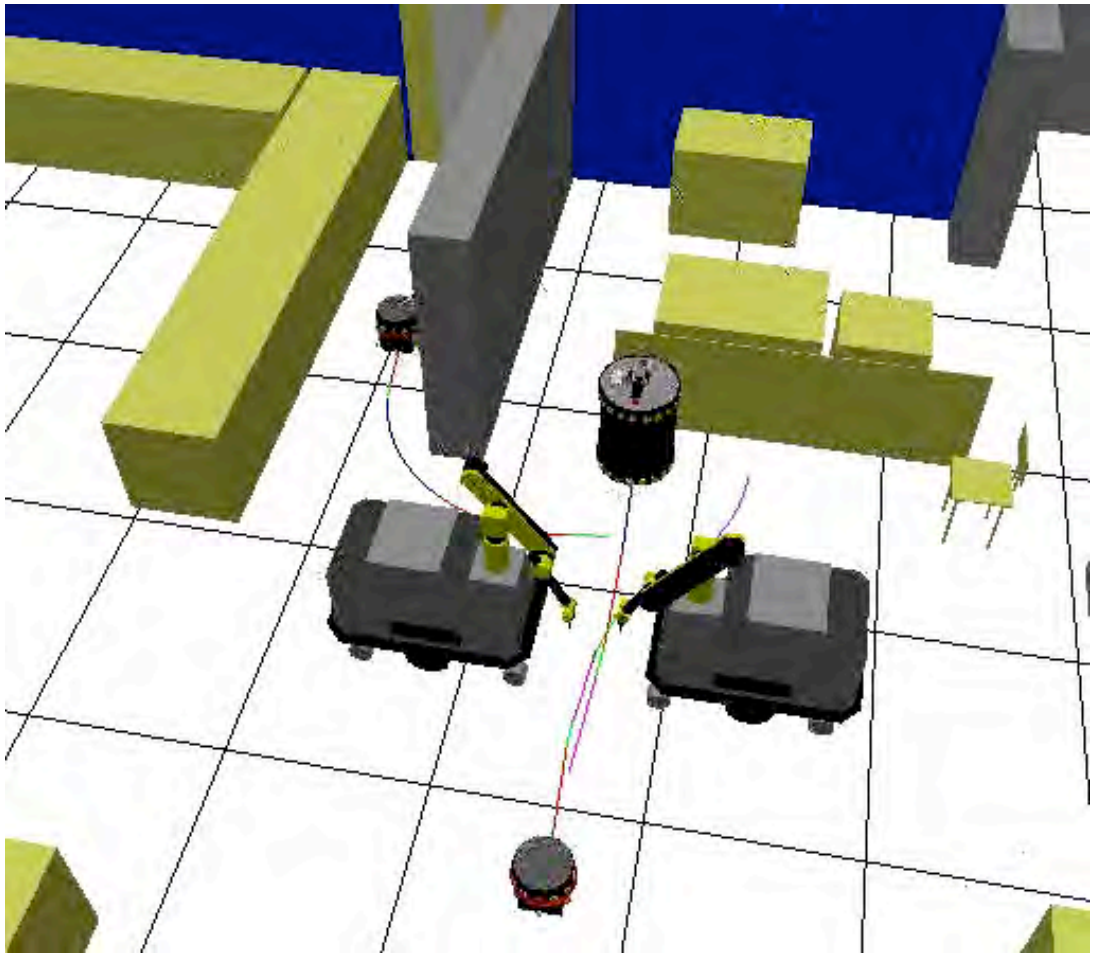
Robot mobili



singolo corpo con mobilità ristretta (WMR)

a causa dei vincoli anolonomi (puro rotolamento delle ruote)

Problemi multi-robot

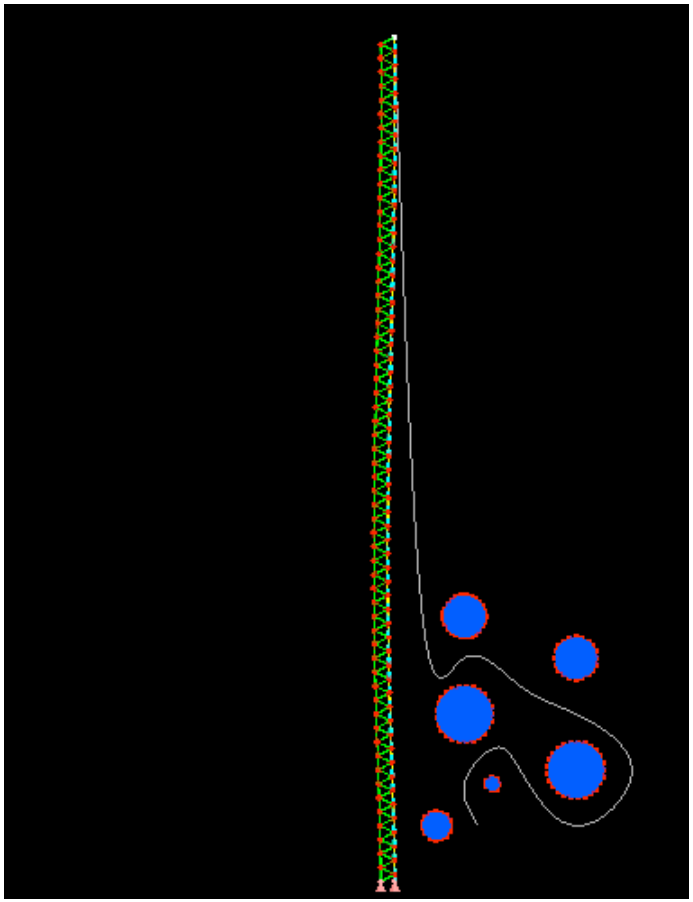


2 Pioneer
1 Nomad XR-400
2 Hilare con manipolatore a bordo

5 robot in moto simultaneo

Casi particolari di pianificazione

robot 3R sotto-attuato
(terzo giunto passivo)



robot iper-ridondante

Il problema base

Sia $\mathcal{A}$ un singolo corpo rigido — il *robot* — immerso in uno spazio euclideo $\mathcal{W} \equiv \mathbb{R}^N$, con $N = 2$ o 3, detto *spazio di lavoro*.

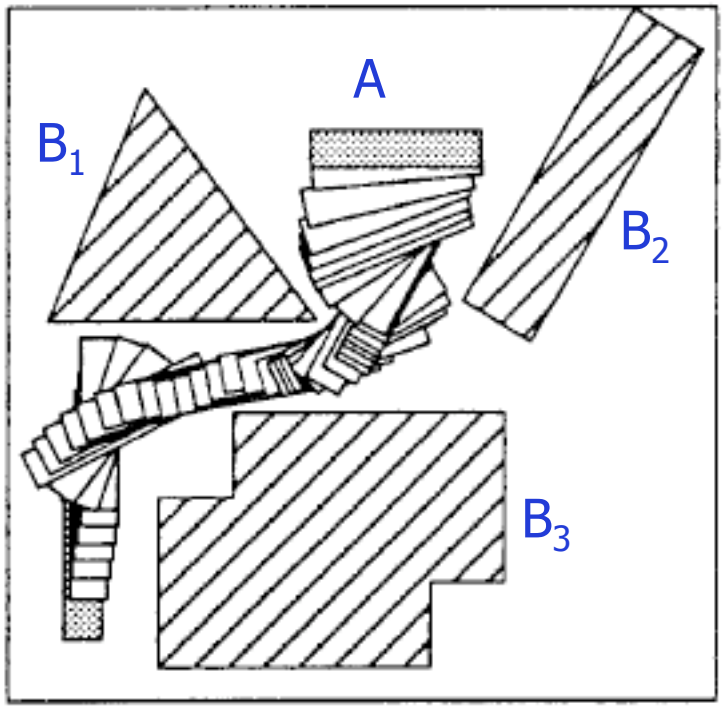
Siano $\mathcal{B}_1, \ldots, \mathcal{B}_q$ gli *ostacoli*, cioè oggetti rigidi fissi in $\mathcal{W}$.

Si assuma che tanto la geometria di $\mathcal{A}$, $\mathcal{B}_1, \ldots, \mathcal{B}_q$ quanto la locazione di $\mathcal{B}_1, \ldots, \mathcal{B}_q$ in $\mathcal{W}$ siano note con esattezza. Inoltre, si faccia l'ipotesi che non esistano vincoli cinematici che limitano il moto di $\mathcal{A}$ (diremo che $\mathcal{A}$ è un oggetto *in moto libero*).

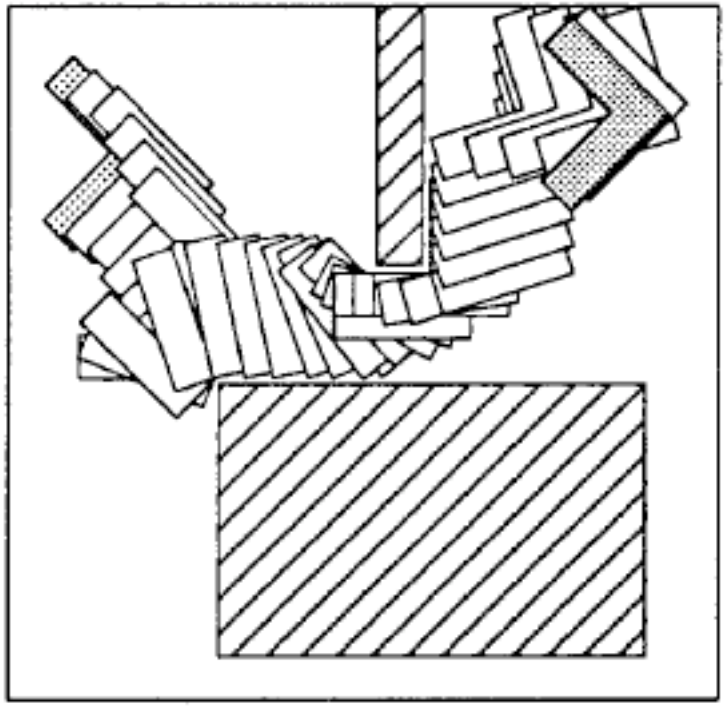
Il problema è: data una locazione iniziale e una locazione finale desiderata di $\mathcal{A}$ in $\mathcal{W}$, si generi un *cammino* τ, cioè una sequenza continua di locazioni di $\mathcal{A}$, che porta dalla locazione iniziale a quella finale e che è privo di collisioni (o contatti) tra $\mathcal{A}$ e gli ostacoli $\mathcal{B}_i$. Si segnali un fallimento se un tale cammino non esiste.

N.B. locazione = posa = posizione + orientamento

Due possibili istanze



robot A rettangolare
q=3 ostacoli



robot A L-shaped
q=2 ostacoli

spazio di lavoro $W = R^2$

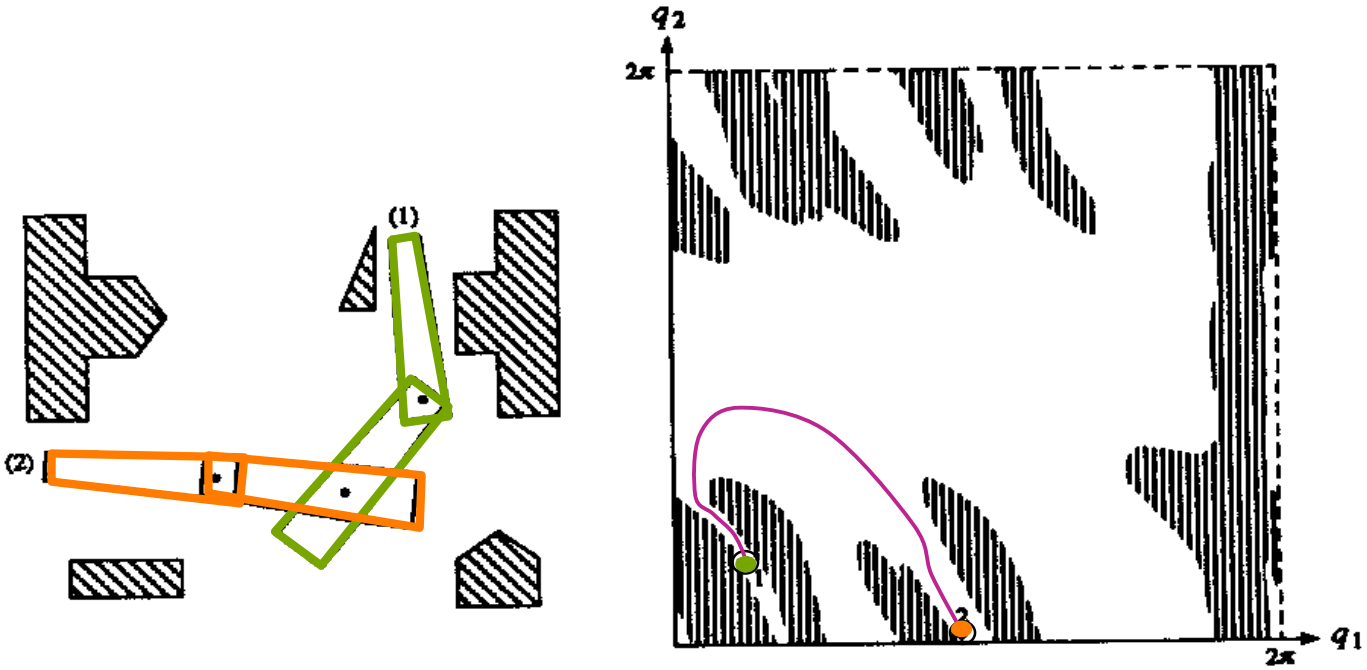
Estensioni al problema base

- ostacoli mobili
- robot multipli
- oggetti spostabili (assemblaggio)
- oggetti deformabili (limp materials)
- vincoli anolonomi
- vincoli dinamici
- vincoli di stabilità
- …

- pianificazione ottima
  - diversi criteri
- informazioni da sensori
  - costruzione di mappa/modello
  - ricerca/inseguimento di oggetti
  - ispezione
- incertezze
  - nel modello
  - nell'esecuzione (controllo)
  - nella percezione sensoriale
- moti "sensorless"
- integrazione di pianificazione e controllo
- integrazione con task planning di alto livello
- …

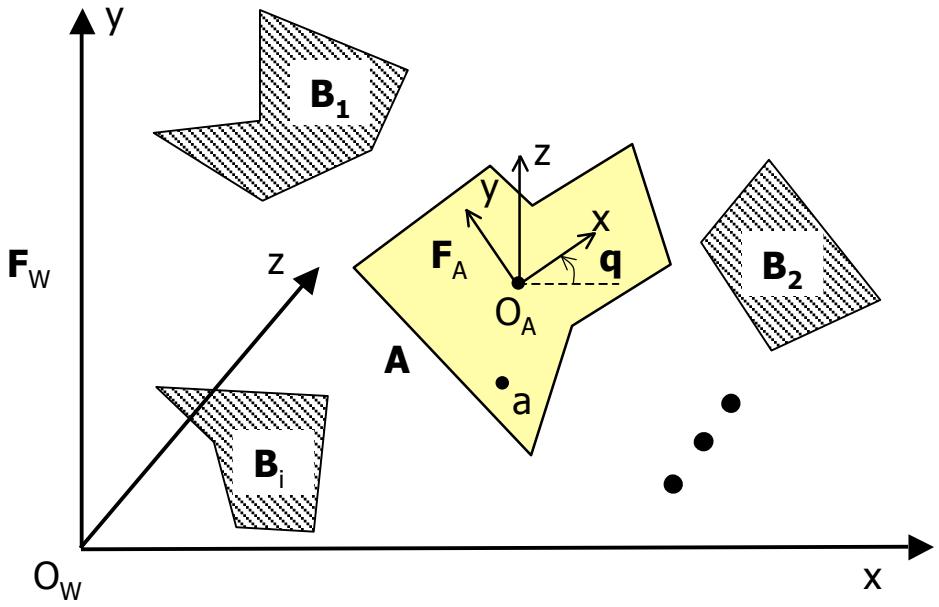
Spazio delle configurazioni (C-Space)

idea rappresentare il robot come un punto (configurazione del robot) in uno spazio opportuno (spazio delle configurazioni del robot o C-space) e determinare le 'immagini' degli ostacoli in questo spazio (C-ostacoli)



pianificazione del cammino di un punto

C-space di un corpo rigido



W = R^N spazio di lavoro (N = 2,3)
A oggetto mobile (robot)
B_1, B_2,..., B_i oggetti rigidi fissi in W
$\mathbf{F}_A$ terna (frame) mobile
($\rightarrow$ pos(a)$|_{\mathbf{F}_A}$ = costante = P_a)
$\mathbf{F}_W$ terna fissa (del mondo)
($\rightarrow$ pos(a)$|_{\mathbf{F}_W}$ = f(P_a, pos(O_A)$|_{\mathbf{F}_W}$)

(nessun vincolo cinematico
o dinamico sulla mobilità)

- una configurazione q di A: posizione e orientamento di F_A rispetto a F_W
- spazio delle configurazioni di A: lo spazio C di tutte le configurazioni di A
- A(q) sottoinsieme (compatto) di W occupato da A nella configurazione q
- a(q) posizione di un punto a $\in$ A in W, quando A è nella configurazione q

Rappresentazione di C

rappresentazione parametrica (minima) di una configurazione q in R^M
M = dim C

posizione di O_A in F_W: vettore in R^N

orientamento di F_A rispetto a F_W: matrice di rotazione NxN

} M = N(N+1) parametri (sovrabbondante!)

SO(N) = "Special Orthogonal Group": matrici NxN, ortonormali, determinante +1

l'orientamento può però essere descritto in modo minimale da N(N-1)/2 parametri

N = 2 (rotazione 2D): 1 parametro (l'angolo di rotazione intorno all'asse normale al piano)

N = 3 (rotazione 3D): 3 parametri (ad es., angoli di Eulero)

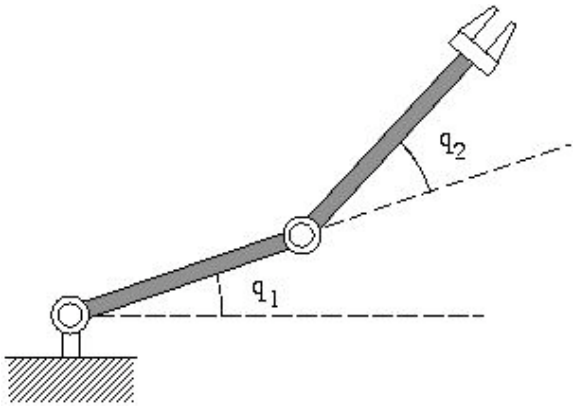
una rappresentazione minimale però non è iniettiva (la stessa configurazione è rappresentata da differenti valori degli angoli)

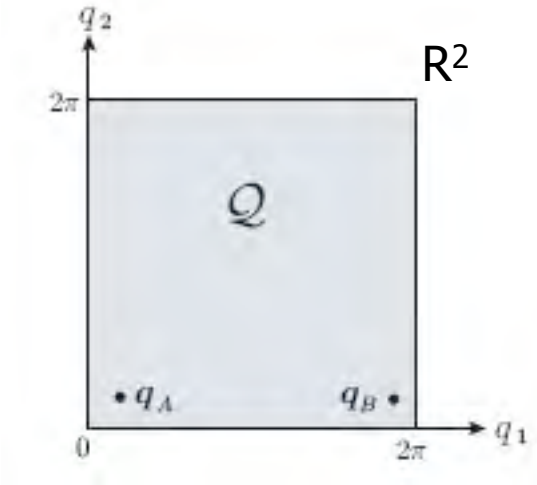
Esempi di dimensioni di C

poligono in R^2	$C: R^2 \times SO(2) \subset R^6$
	$\dim C = 2 + 1 = 3$
poliedro in R^3	$C: R^3 \times SO(3) \subset R^{12}$
	$\dim C = 3 + 3 = 6$
manipolatore in R^2	$C \subset (R^2 \times SO(2)) \times \ldots \times (R^2 \times SO(2)) \subset R^{6M}$
con M giunti	$\dim C = 3M$ - #vincoli imposti dai giunti
	$= 3M - 2M = M$
manipolatore in R^3	$C \subset (R^3 \times SO(3)) \times \ldots \times (R^3 \times SO(3)) \subset R^{12M}$
con M giunti	$\dim C = 6M$ - #vincoli imposti dai giunti
	$= 6M - 5M = M$
robot mobile in R^2	$C \subset (R^2 \times SO(2)) \times (R^2 \times SO(2)) \subset R^{12}$
con 1 rimorchio	$\dim C = 6$ - #vincoli imposti dall'aggancio
	$= 6 - 2 = 4$

Località della rappresentazione

- rappresentare una configurazione come una lista di M parametri reali indipendenti corrisponde ad avere C = $R^{(\dim C)}$
- questa rappresentazione ha però validità solo locale
- esempio: manipolatore planare 2R

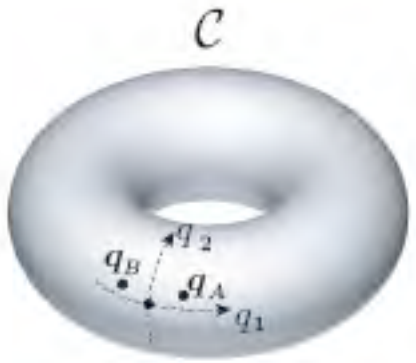




rappresentazione locale

$C = \{(q_1,q_2): q_1 \in [0,2\pi), q_2 \in [0,2\pi)\}$

è un "toro"
(varietà topologica)



rappresentazione
topologicamente corretta

corrispondenza biunivoca
solo locale

Metrica nel C-space

- per definire un cammino nel C-space è necessaria una nozione di continuità
- può essere introdotta specificando una funzione distanza d: C x C → R
- la distanza (≥ 0) tra due configurazioni q e q' deve andare a zero quando le regioni A(q) e A(q') occupate dal corpo tendono a coincidere
- ad esempio

$$d(q,q') = \max_{a \in A} ||a(q) - a(q')||$$

- a fini algoritmici (locali), è meno oneroso usare

$$d_{Eucl}(q,q') = || q - q' ||$$

Cammino in C

- un cammino in C da una configurazione q_{start} ad una q_{goal} è un'applicazione continua

$$\tau : [0,1] \rightarrow C$$

con $\tau(0) = q_{init}$, $\tau(1) = q_{goal}$

- se ogni coppia di configurazioni q_{start} e q_{goal} è connessa da un cammino → C è connesso
- A è in moto libero in W ⇔ in assenza di ostacoli, ogni cammino è ammissibile

C-ostacoli

- per definire un cammino privo di collisioni in C, occorre costruire le "immagini" degli ostacoli in C
- l'immagine in C di ogni ostacolo B_i in W è la regione

$$CB_i = \{q \in C \mid A(q) \cap B_i \neq \emptyset\}$$ C-ostacolo

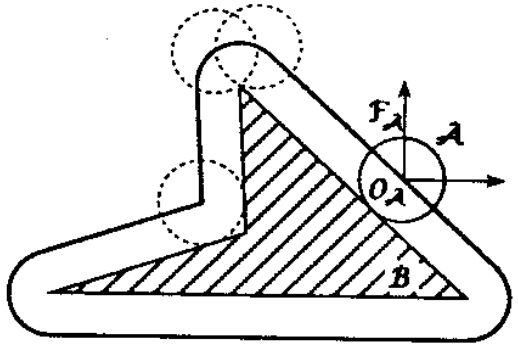
$$CB = U_i\, CB_i$$ regione dei C-ostacoli

$$C_{free} = C \setminus CB = \{q \in C \mid A(q) \cap (U_i\, CB_i) \neq \emptyset\}$$ spazio libero delle configurazioni

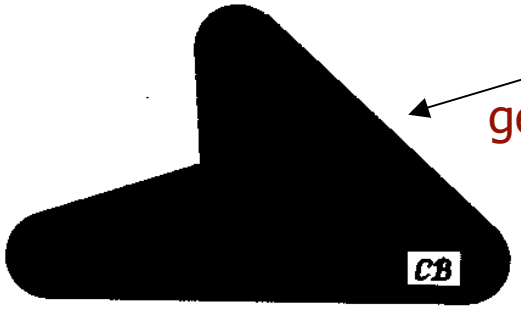
- $q \in C_{free}$ è una configurazione libera
- un cammino interamente $\in C_{free}$ è un cammino libero (semilibero se $\in$ closure(C_{free}))
- problema base di pianificazione: generare un cammino libero tra due date configurazioni q_{start} e q_{goal} se appartengono alla stessa componente connessa di C_{free}; altrimenti, riportare un fallimento

Esempi di C-ostacoli

- robot puntiforme in R^N
  - C è una copia di W
  - C-ostacoli sono copie degli ostacoli in W
- robot sferico (disco in R^2) o poliedrale (poligono in R^2) a orientamento costante in R^N
  - C è una copia di W
  - C-ostacoli sono ottenuti per accrescimento degli ostacoli in W con la "forma" del robot (scorre sull'ostacolo nell'orientamento fissato)



la frontiera è la curva descritta dall'origine di F_A

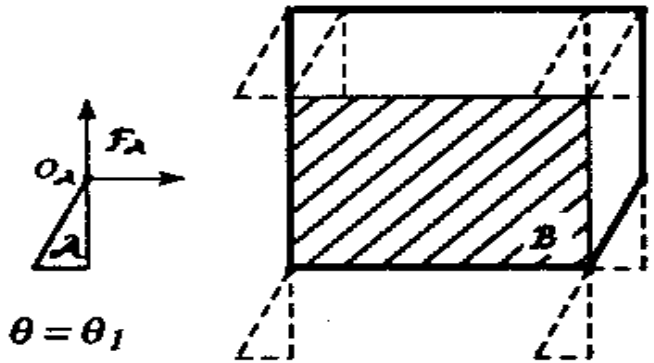


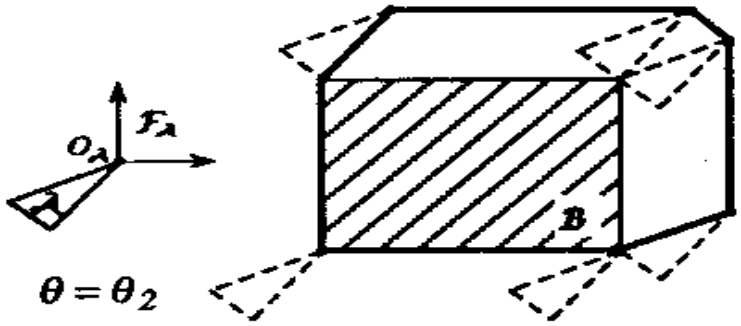
poligono generalizzato

cambia con la posizione di O_A in A ...

Esempi di C-ostacoli

… ma cambia anche con l'orientamento di A

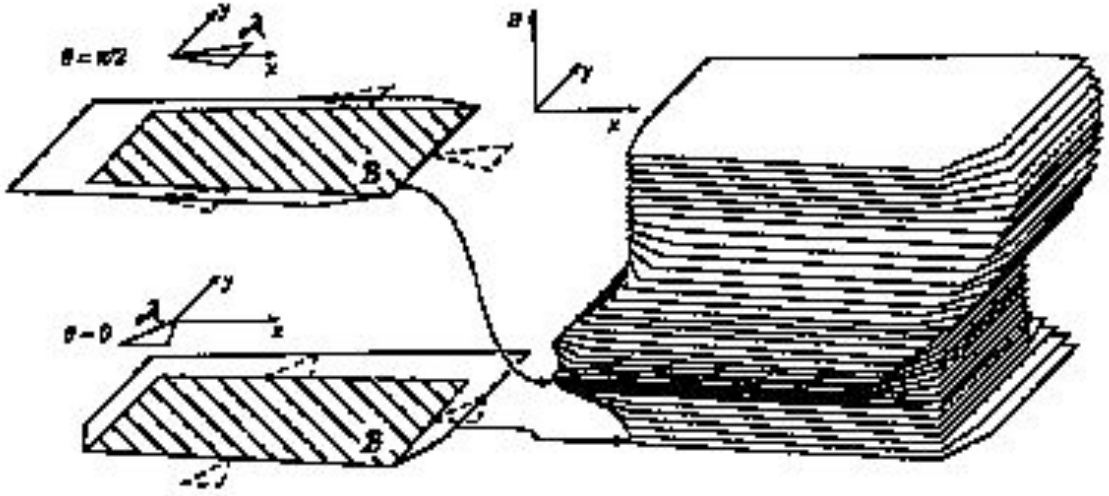




N.B. aumenta il numero di vertici!

Esempi di C-ostacoli

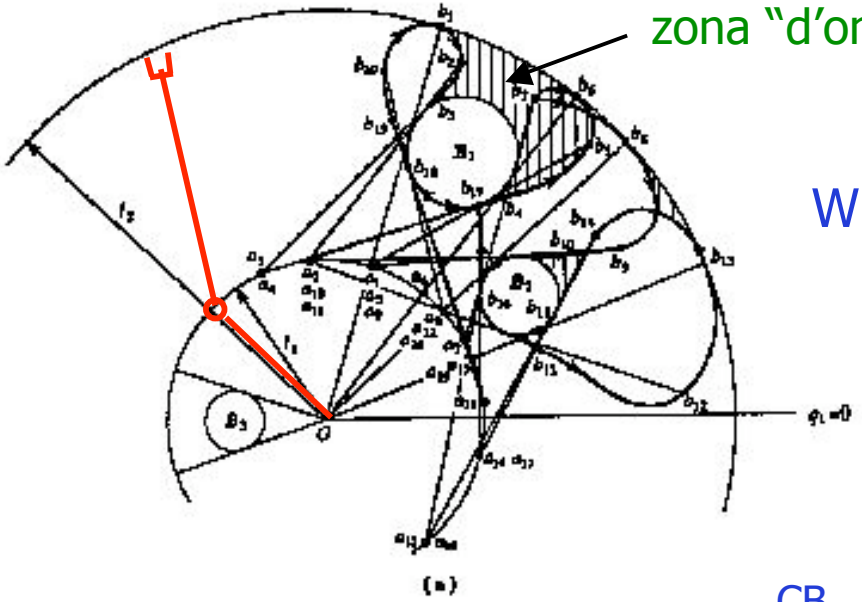
- robot poligonale libero di traslare e ruotare in R^2
  - $C = R^2 \times [0, 2\pi)$
  - C-ostacoli ottenuti per accrescimento composito (ripetuto per ogni valore dell'orientamento del robot)



variazione orientamento

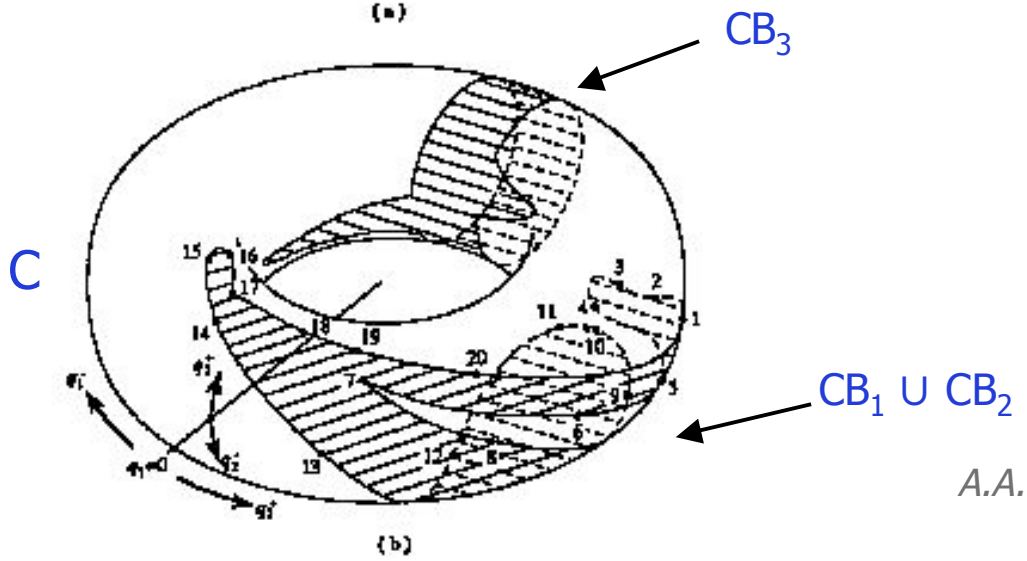
Esempi di C-ostacoli

- robot 2R planare

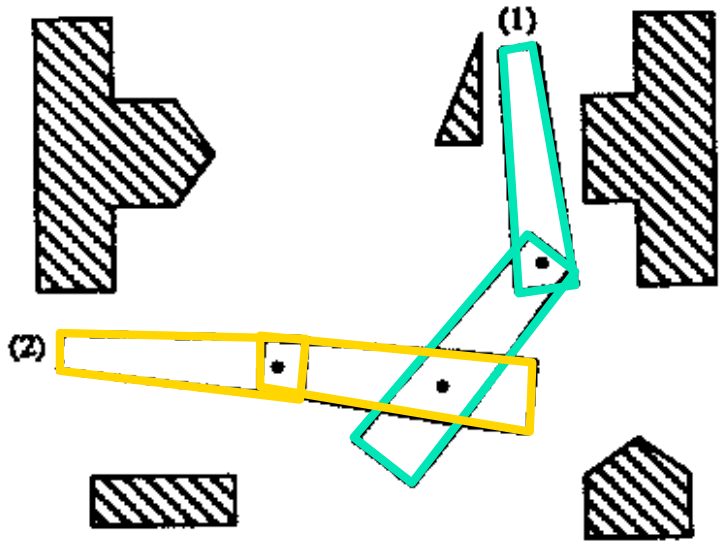


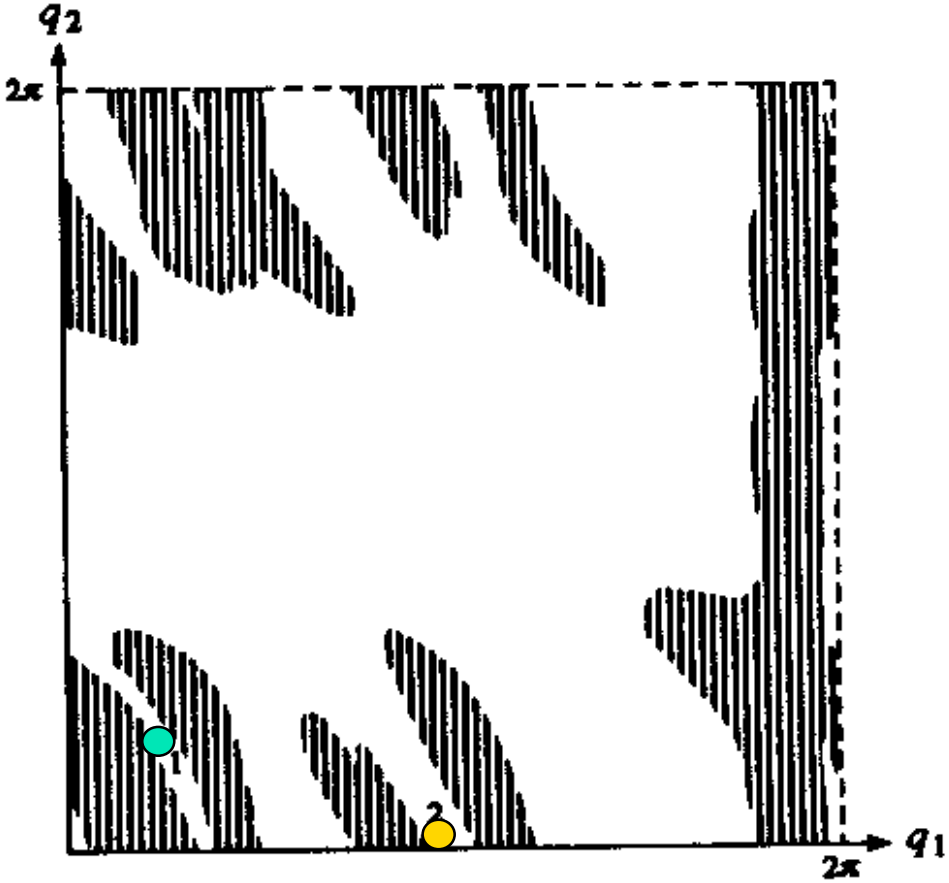
due tipi di C-ostacoli
- collisioni con ostacoli
- auto-collisioni

altre zone proibite sono causate dai fondo corsa ai giunti



Esempi di C-ostacoli





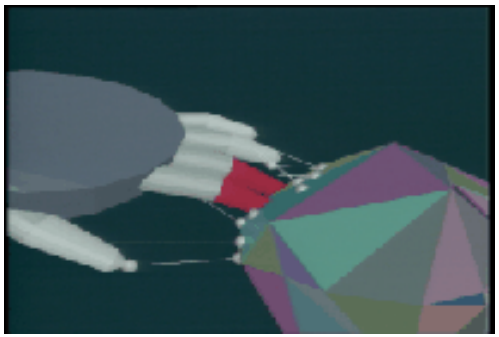
rappresentazione locale

Connessione di C-space

- C è connesso se ∃ un cammino tra tutte le coppie di configurazioni
- due cammini con gli stessi estremi sono omotopi se è possibile deformare con continuità uno nell'altro
- C è semplicemente connesso se tutti i cammini tra due configurazioni sono omotopi tra loro
- altrimenti, C è molteplicemente connesso
  - esempio: SO(3) è molteplicemente connesso, con due classi di cammini omotopi

Commenti finali

- per calcolare in modo esatto la regione dei C-ostacoli è necessario un modello algebrico degli ostacoli nello spazio di lavoro (dati disponibili in CAD)
- spesso sono convenienti approssimazioni o campionamenti
- la collisione tra robot (nella configurazione q) e ostacoli si valuta nello spazio di lavoro
  - utilizzando eventualmente la cinematica diretta del robot articolato
  - con algoritmi di collision check
    - software efficienti: I-Collide (per poliedri convessi) o V-Collide



- non tutti i metodi di pianificazione richiedono la costruzione esplicita della regione dei C-ostacoli