

Modellistica discreta di robot continui

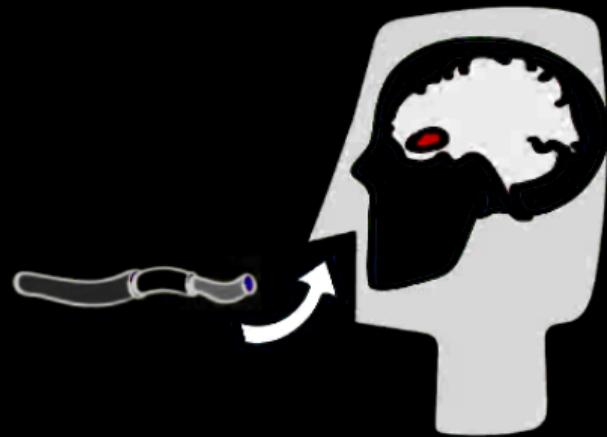
Elaborato di Robotica

Massimiliano Incudini (VR433300)

Università degli Studi di Verona

6 luglio 2020

Motivazioni

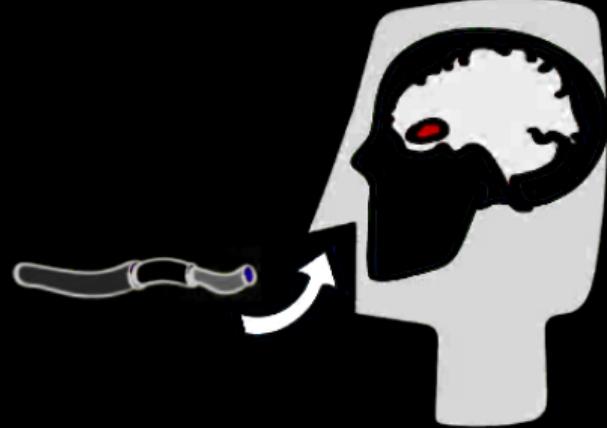


how can we build tiny little robots that are able to enter the human body through natural orifices or small incisions, to reach places minimally invasively for surgery?

—Jessica Burgner-Kahrs

Reference: *Task-specific Design of Tubular Continuum Robots for Surgical Applications*, Burgner-Kahrs, 2015

Motivazioni



Reference: *Task-specific Design of Tubular Continuum Robots for Surgical Applications*, Burgner-Kahrs, 2015

Obiettivi

- caratteristiche dei manipolatori continui

Obiettivi

- caratteristiche dei manipolatori continui
- utilizzi in campo medico

Obiettivi

- caratteristiche dei manipolatori continui
- utilizzi in campo medico
- modellazione del robot

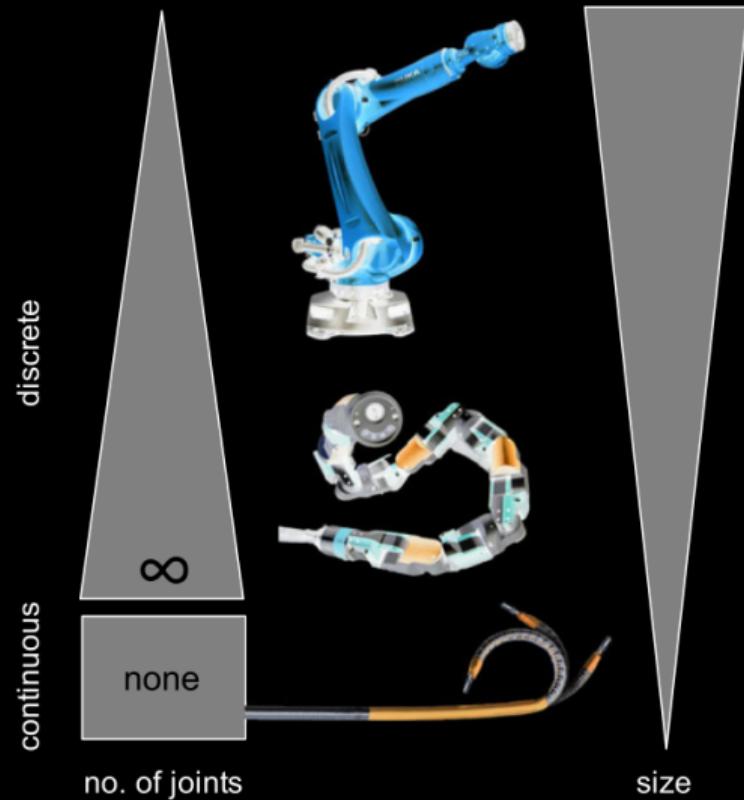
Obiettivi

- caratteristiche dei manipolatori continui
- utilizzi in campo medico
- modellazione del robot
- confronto di tecniche per la cinematica inversa

caratteristiche dei manipolatori continui

Terminologia

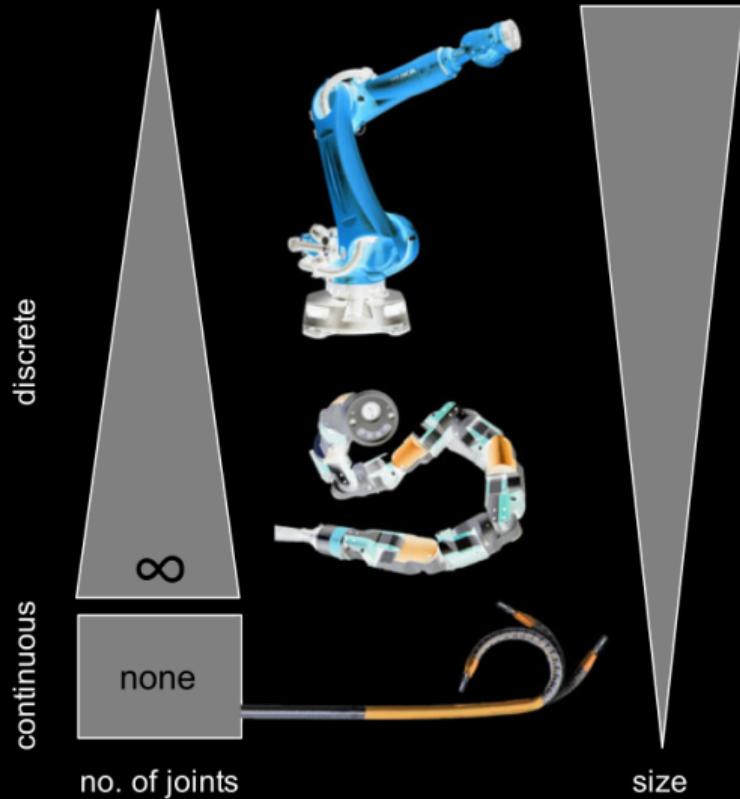
- continuum robot



Reference: *Continuum Robots for Medical Application: A Survey*, Burgner-Kars, Rucker, 2015

Terminologia

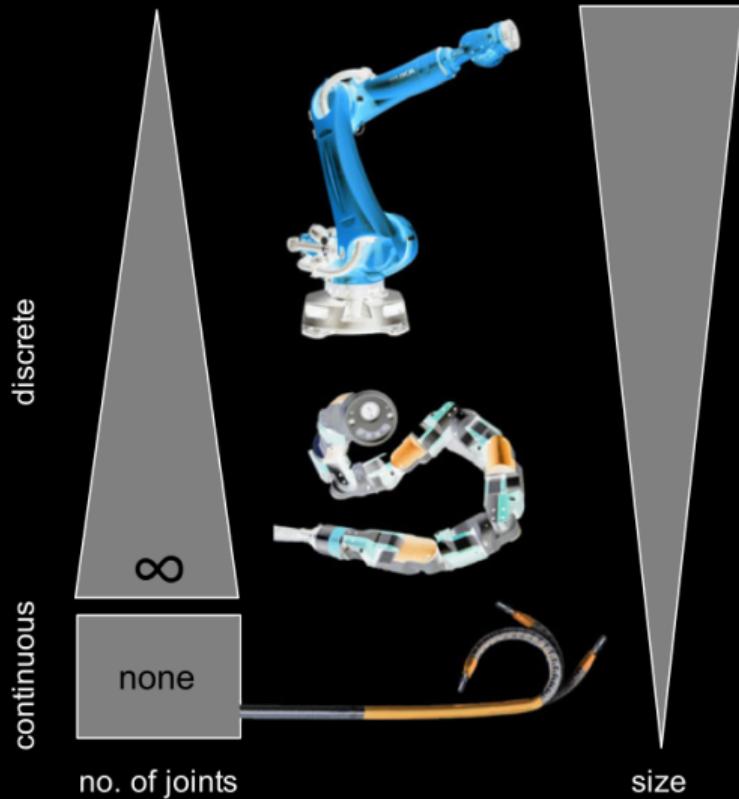
- continuum robot
- hyperredundant robot



Reference: *Continuum Robots for Medical Application: A Survey*, Burgner-Kars, Rucker, 2015

Terminologia

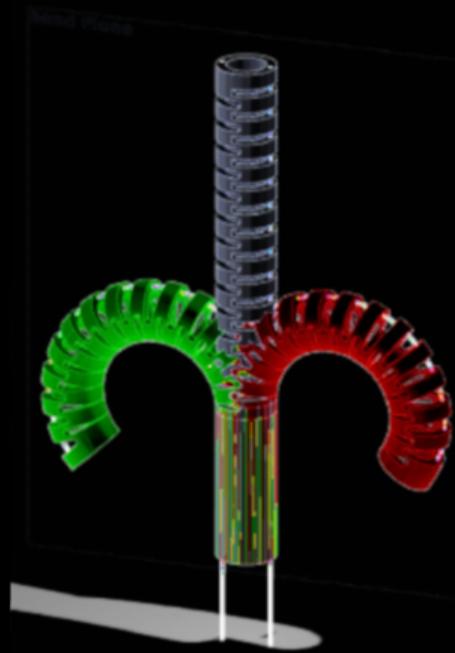
- continuum robot
- hyperredundant robot
- pseudocontinuum robot



Reference: *Continuum Robots for Medical Application: A Survey*, Burgner-Kars, Rucker, 2015

Struttura

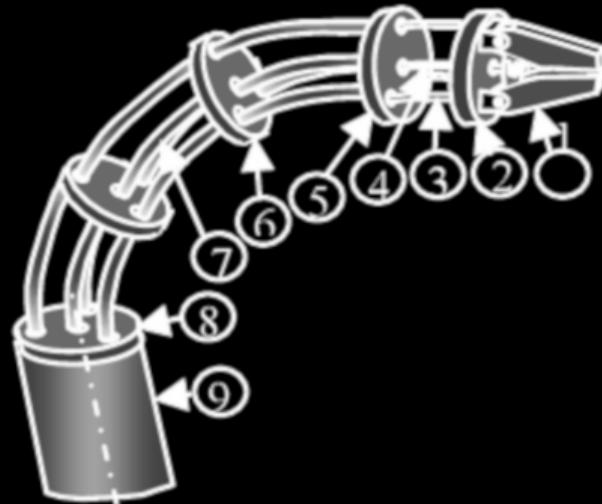
- single backbone



Reference: *Design of a new cable-driven manipulator with a large open lumen: Preliminary applications in the minimally-invasive removal of osteolysis*, Kutzer et al., 2011

Struttura

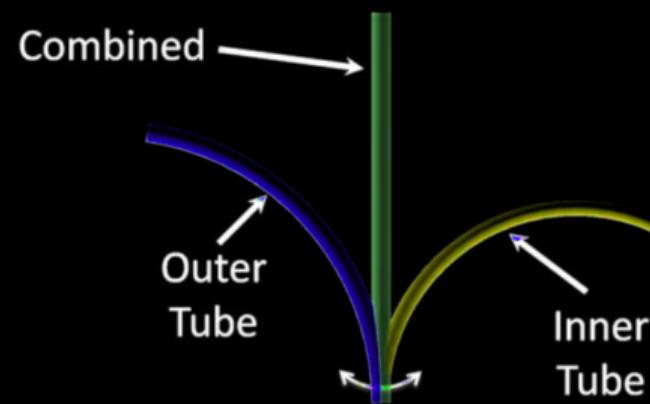
- single backbone
- multi-backbone



Reference: *Snake-Like Units Using Flexible Backbones and Actuation Redundancy for Enhanced Miniaturization*, Kutzer et al., 2011

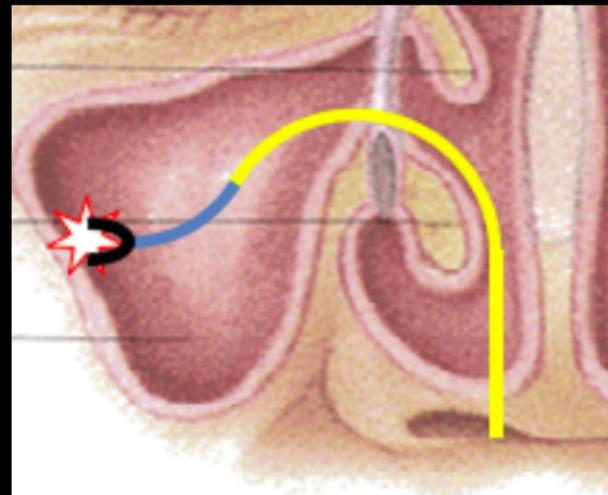
Struttura

- single backbone
- multi-backbone
- a tubi concentrici



Struttura

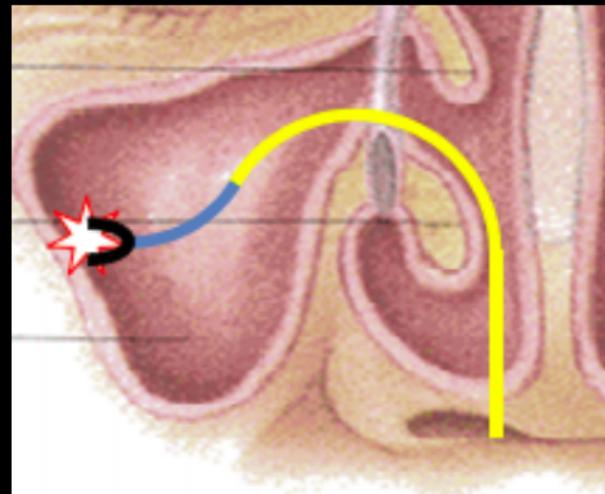
Solitamente composto da due componenti separate:



Struttura

Solitamente composto da due componenti separate:

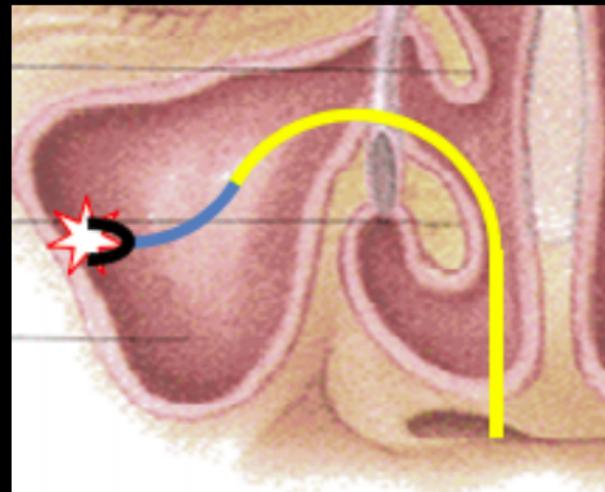
- parte prossimale



Struttura

Solitamente composto da due componenti separate:

- parte prossimale
- parte distale



Attuazione

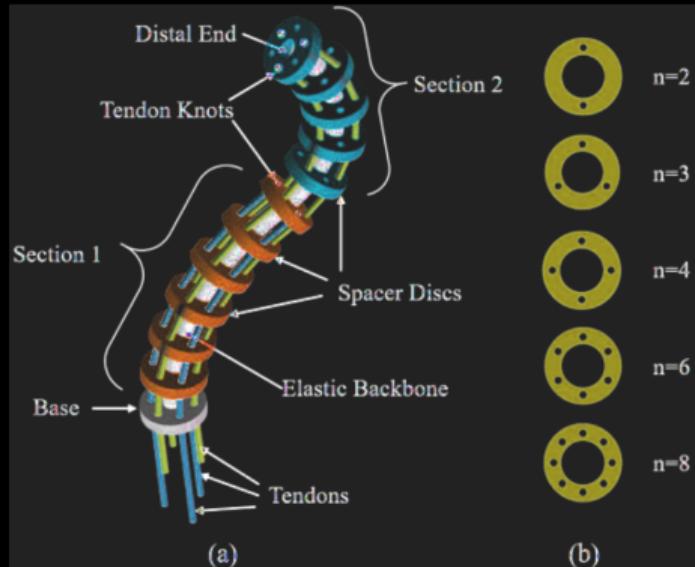
- estrinseca

Attuazione

- estrinseca
- intrinseca

Attuazione

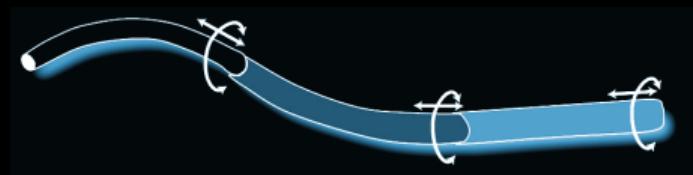
- estrinseca
 - nelle strutture multi-backbone
- intrinseca



Reference: *Kinematic comparison of surgical tendon-driven manipulators and concentric tube manipulators*, Li, Wu, Ren, You, 2017

Attuazione

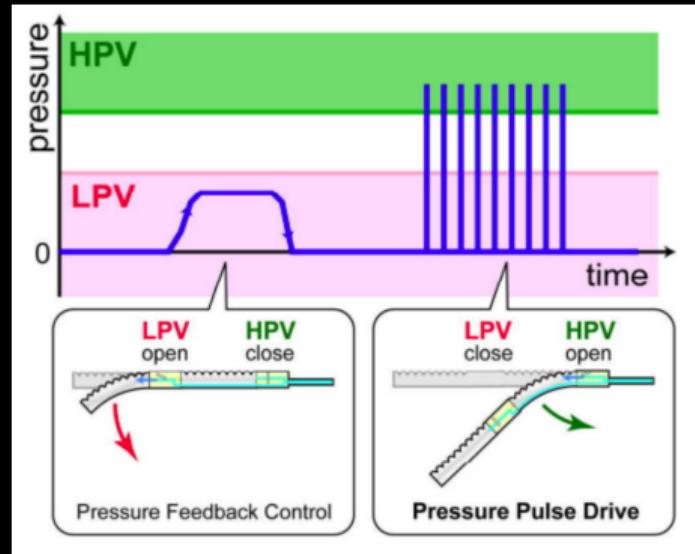
- extrinseca
 - nelle strutture multi-backbone
 - nelle strutture a tubi concentrici
- intrinseca



Reference: *Workspace characterization for concentric tube continuum robots*, Burgner-Kahrs et al., 2014

Attuazione

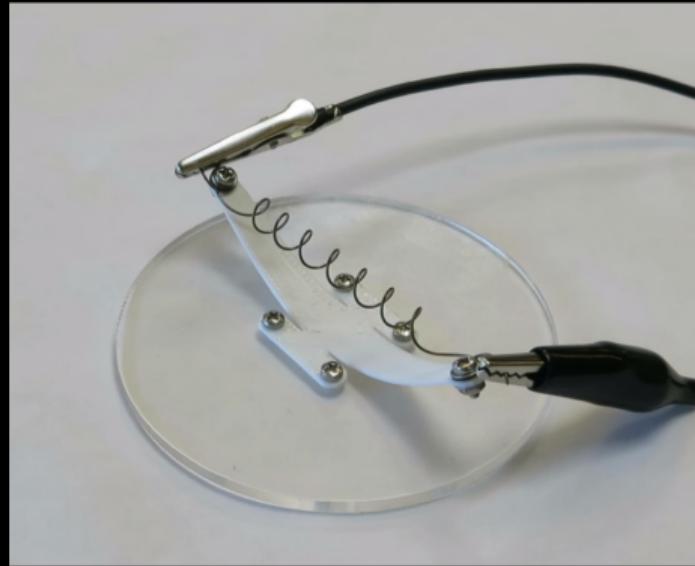
- estrinseca
 - nelle strutture multi-backbone
 - nelle strutture a tubi concentrici
- intrinseca
 - attraverso camera idraulica



Reference: *Precise Bending Angle Control of Hydraulic Active Catheter by Pressure Pulse Drive*, Ikuta et al., 2010

Attuazione

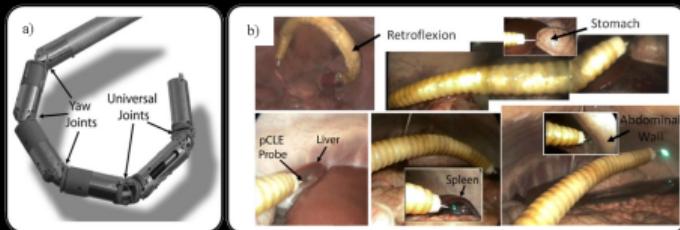
- estrinseca
 - nelle strutture multi-backbone
 - nelle strutture a tubi concentrici
- intrinseca
 - attraverso camera idraulica
 - attraverso shape memory effect



Reference: Clip "SMA actuator design", <https://www.youtube.com/watch?v=PxBPpPRkv6A>, 2015

Attuazione

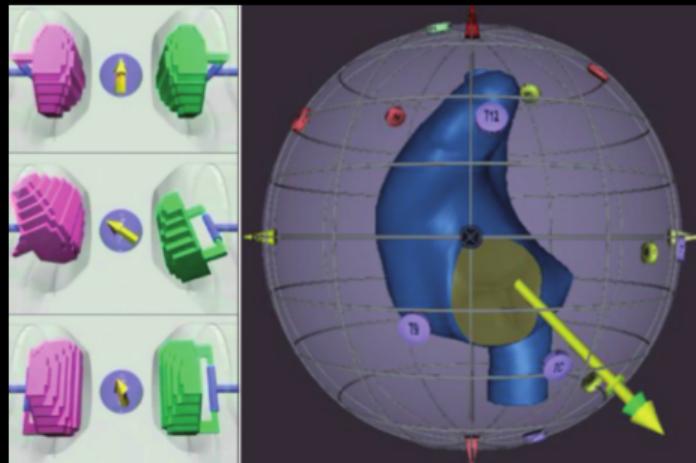
- extrinseca
 - nelle strutture multi-backbone
 - nelle strutture a tubi concentrici
- intrinseca
 - attraverso camera idraulica
 - attraverso shape memory effect
 - attraverso micro-motori



Reference: *A modular, mechatronic joint design for a flexible access platform for MIS*, Noonan et al., 2011

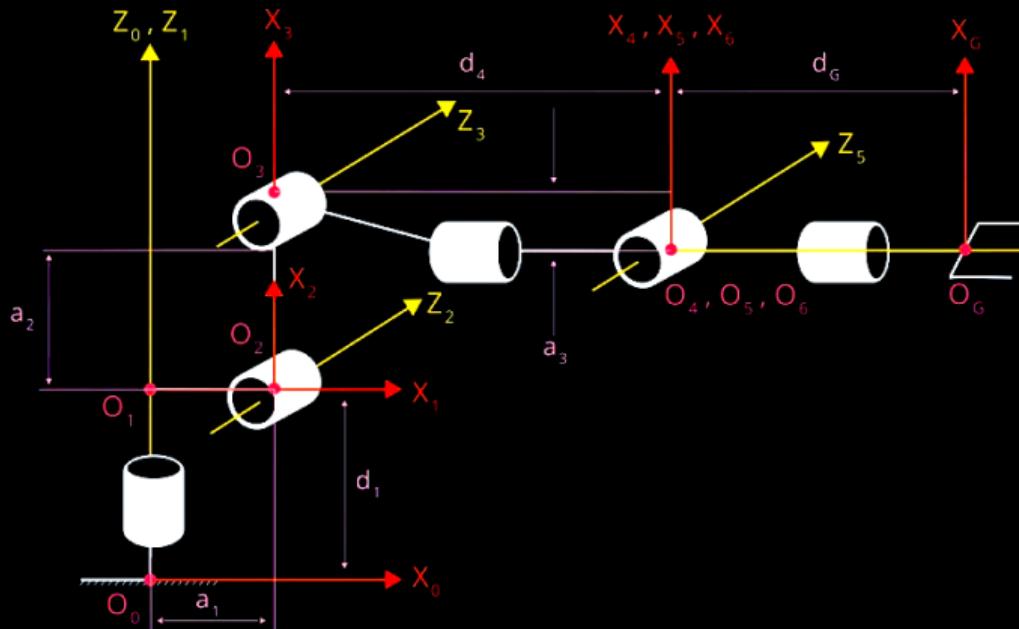
Attuazione

- extrinseca
 - nelle strutture multi-backbone
 - nelle strutture a tubi concentrici
- intrinseca
 - attraverso camera idraulica
 - attraverso shape memory effect
 - attraverso micro-motori
 - attraverso campi magnetici generati da MRI



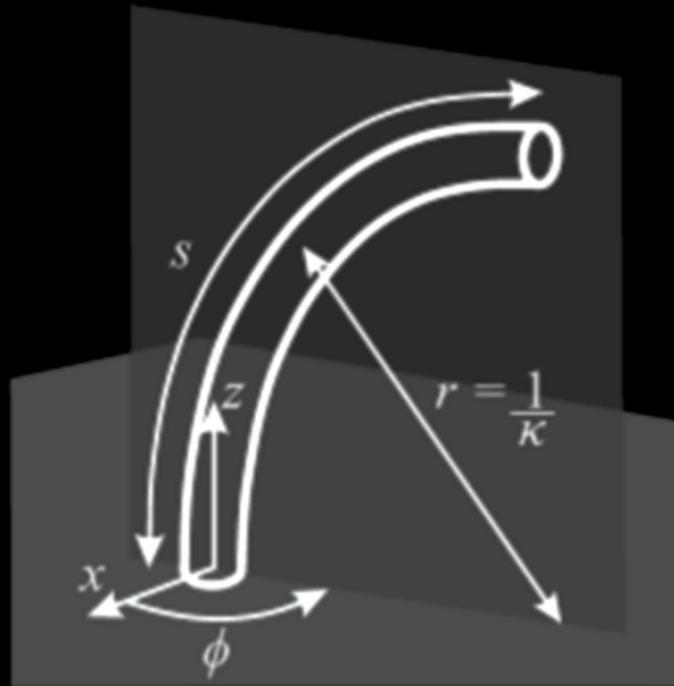
Reference: *Stereotaxis Niobe magnetic navigation system for endocardial catheter ablation and gastrointestinal capsule endoscopy*, Carpi, Pappone, 2009

- rigid link



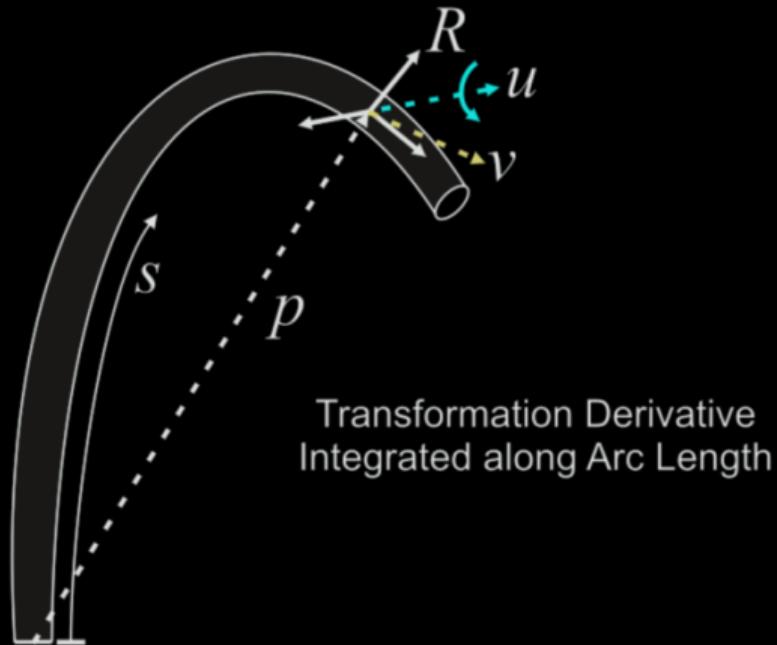
Reference: *Inverse Kinematics on Kuka Arm using ROS and Python*, <https://nitishpuri.github.io/posts/robotics/inverse-kinematics-on-kuka-arm-using-ros-and-python/>, 2019

- rigid link
- piecewise constant curvature



Reference: *Design and Kinematic Modeling of Constant Curvature Continuum Robots: A Review*, Webster, Jones, 2010

- rigid link
- piecewise constant curvature
- piecewise variable curvature



Reference: *A variable curvature continuum kinematics for kinematic control of the bionic handling assistant*, Mahl et al., 2014

utilizzi in campo medico

Alcune applicazioni in campo medico

- neurochirurgia



Alcune applicazioni in campo medico

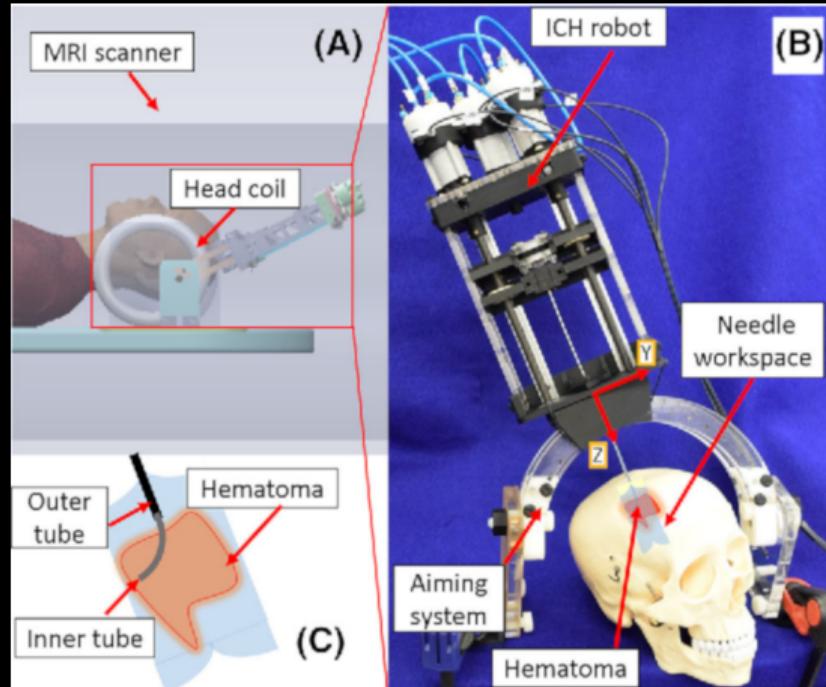
- neurochirurgia
 - somministrazione intracerebrale di farmaci



Reference: *Design choices in needle steering: A review*, Van der Berg et al., 2015

Alcune applicazioni in campo medico

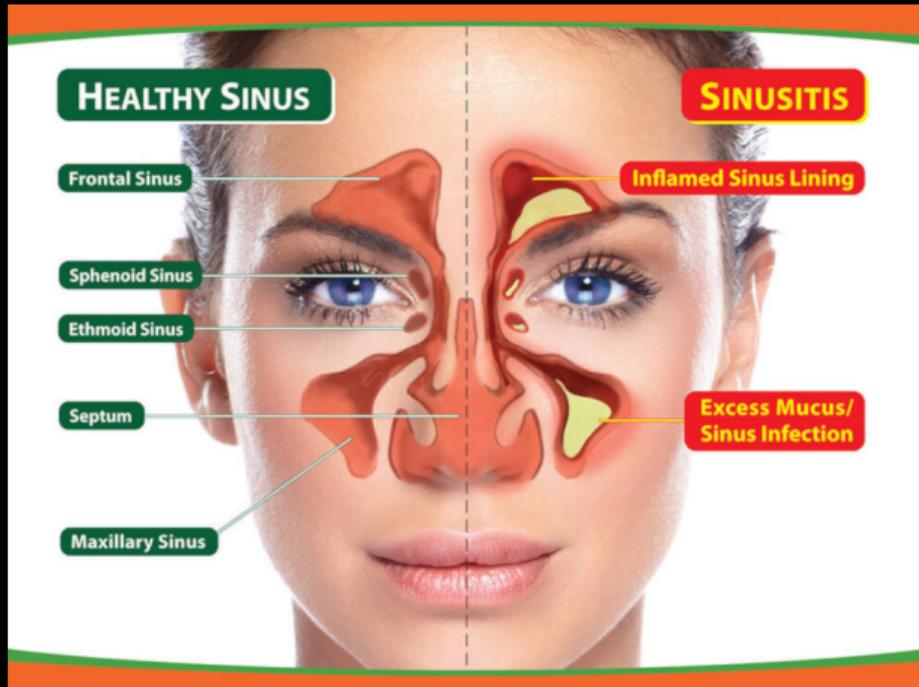
- neurochirurgia
 - somministrazione intracerebrale di farmaci
 - rimozione di emorragie



Reference: *Debulking From Within: A Robotic Steerable Cannula for Intracerebral Hemorrhage Evacuation*, Burgner et al., 2013

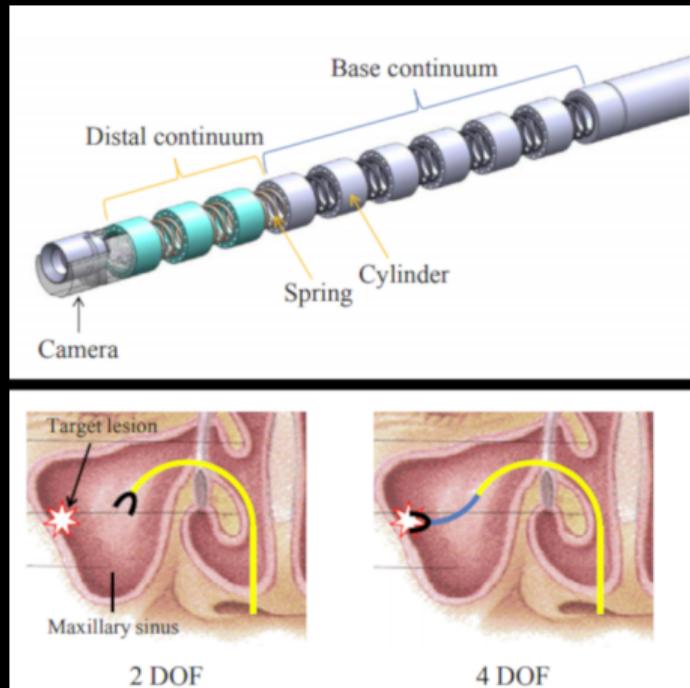
Alcune applicazioni in campo medico

- neurochirurgia
 - somministrazione intracerebrale di farmaci
 - rimozione di emorragie
- otorinolaringoiatria



Alcune applicazioni in campo medico

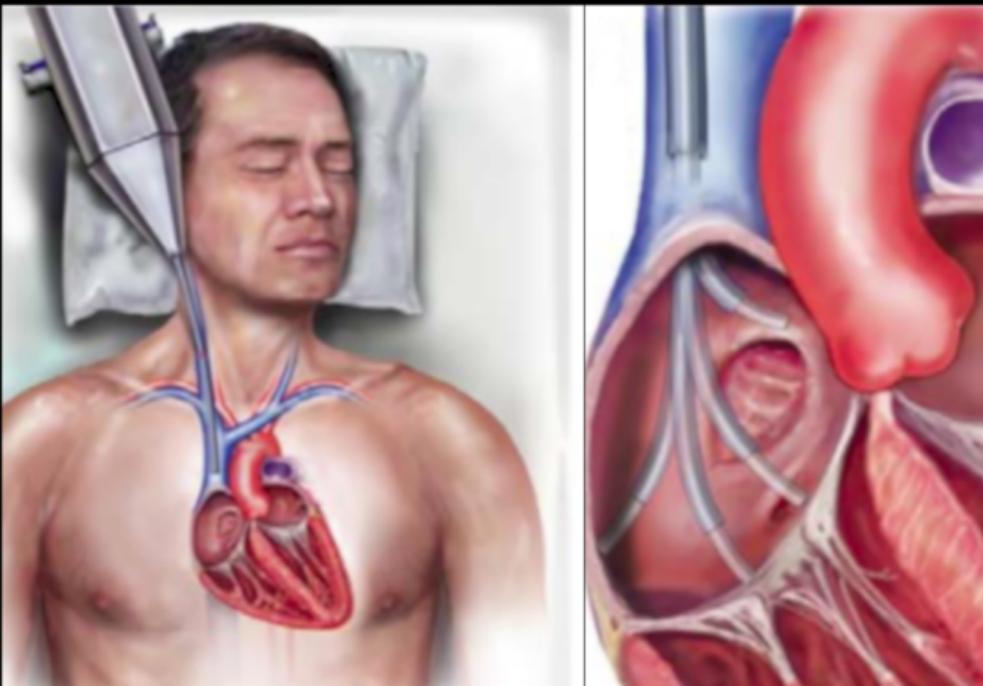
- neurochirurgia
 - somministrazione intracerebrale di farmaci
 - rimozione di emorragie
- otorinolaringoiatria
 - Functional Endoscopic Sinus Surgery



Reference: *Compact Design of a Dual Master-Slave System for Maxillary Sinus Surgery*, Yoon et al., 2013

Alcune applicazioni in campo medico

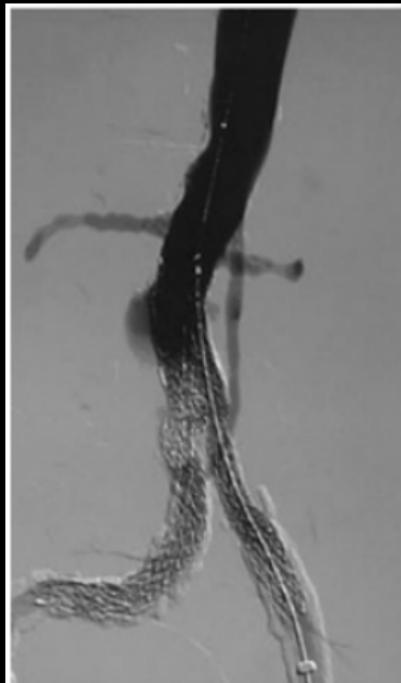
- neurochirurgia
 - somministrazione intracerebrale di farmaci
 - rimozione di emorragie
- otorinolaringoiatria
 - Functional Endoscopic Sinus Surgery
- cardiochirurgia
 - chirurgia intracardiac per via percutanea



Reference: *Percutaneous Steerable Robotic Tool Delivery Platform and Metal Microelectromechanical Systems Device for Tissue Manipulation and Approximation*, Vasiyev et al., 2013

Alcune applicazioni in campo medico

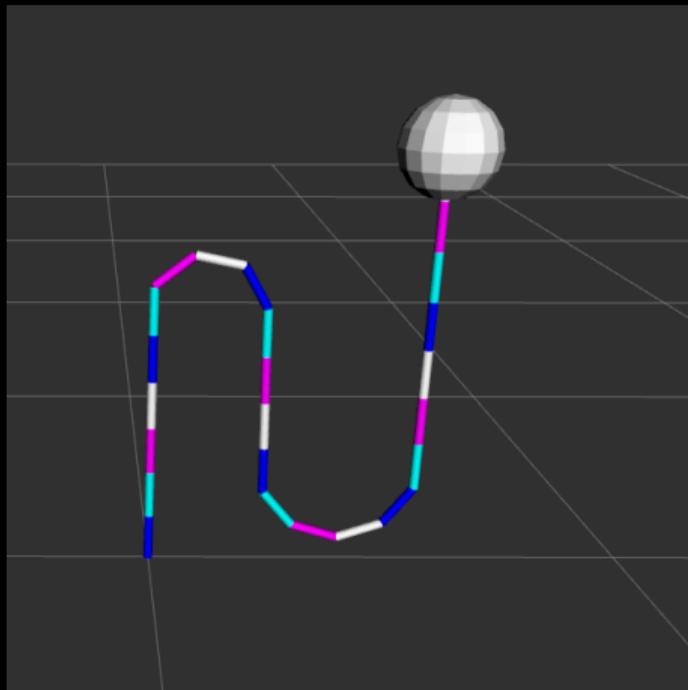
- neurochirurgia
 - somministrazione intracerebrale di farmaci
 - rimozione di emorragie
- otorinolaringoiatria
 - Functional Endoscopic Sinus Surgery
- cardiochirurgia
 - chirurgia intracardiac per via percutanea
- ...



modellazione del robot

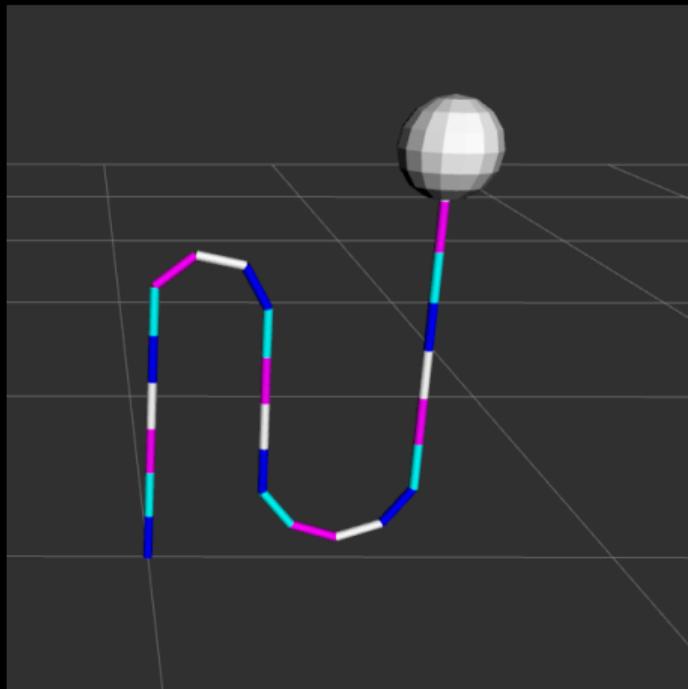
Modellazione

- modello **discreto**



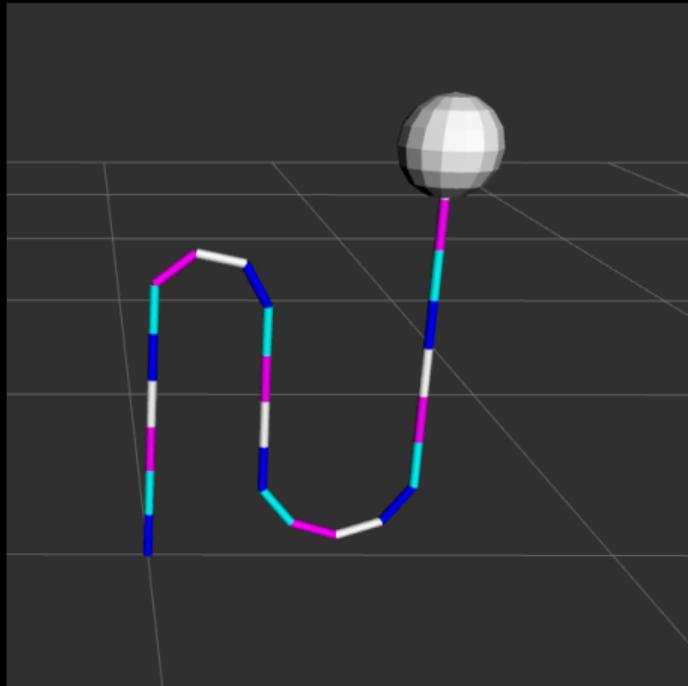
Modellazione

- modello **discreto**
 - approssimano un manipolatore continuo



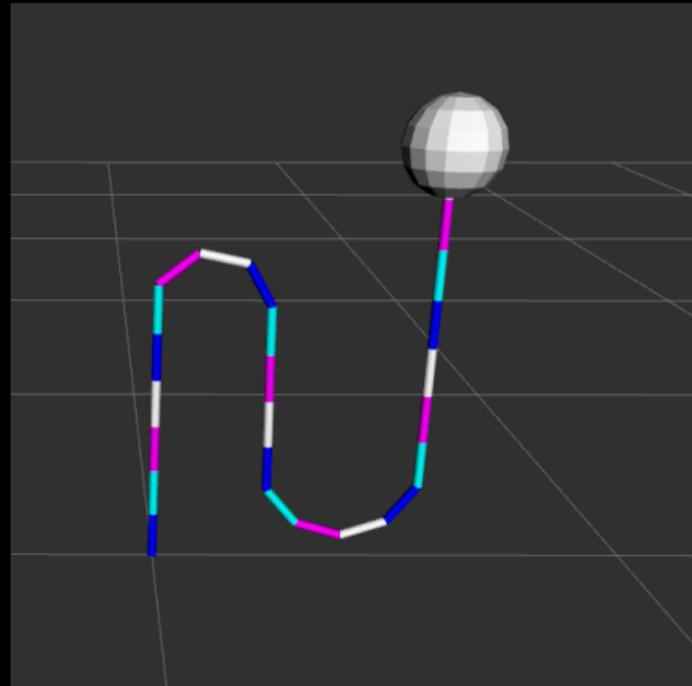
Modellazione

- modello **discreto**
 - approssimano un manipolatore continuo
- numero T arbitrario di link rigidi



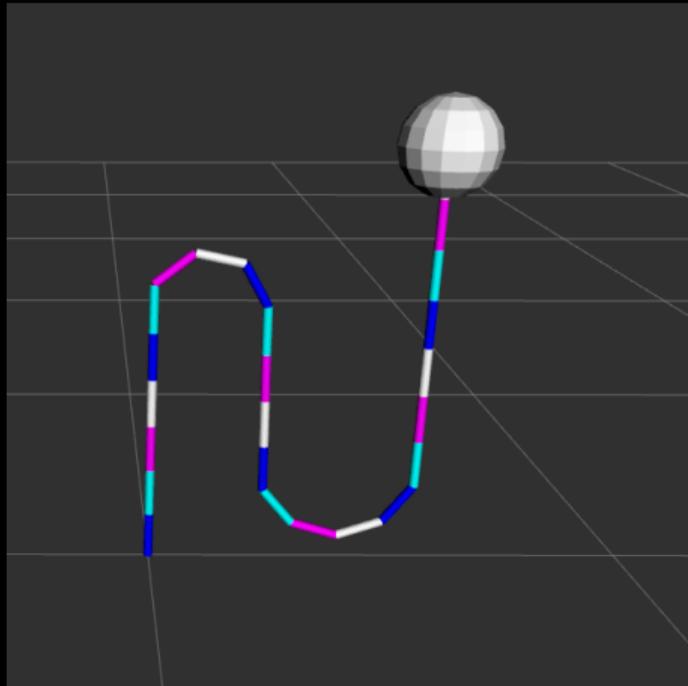
Modellazione

- modello **discreto**
 - approssimano un manipolatore continuo
- numero T arbitrario di link rigidi
- ogni link ha lunghezza ℓ_i



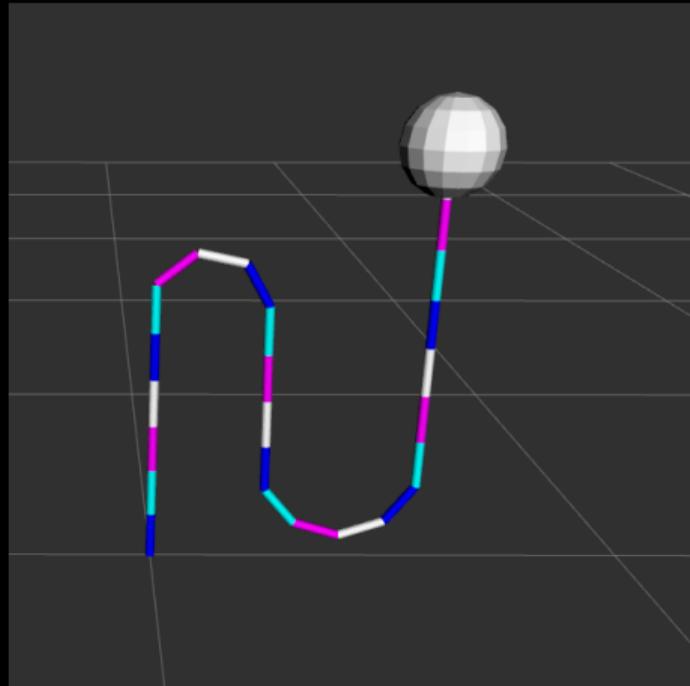
Modellazione

- modello **discreto**
 - approssimano un manipolatore continuo
- numero T arbitrario di link rigidi
- ogni link ha lunghezza ℓ_i
 - N link con lunghezza ℓ_i grande per la parte prossimale



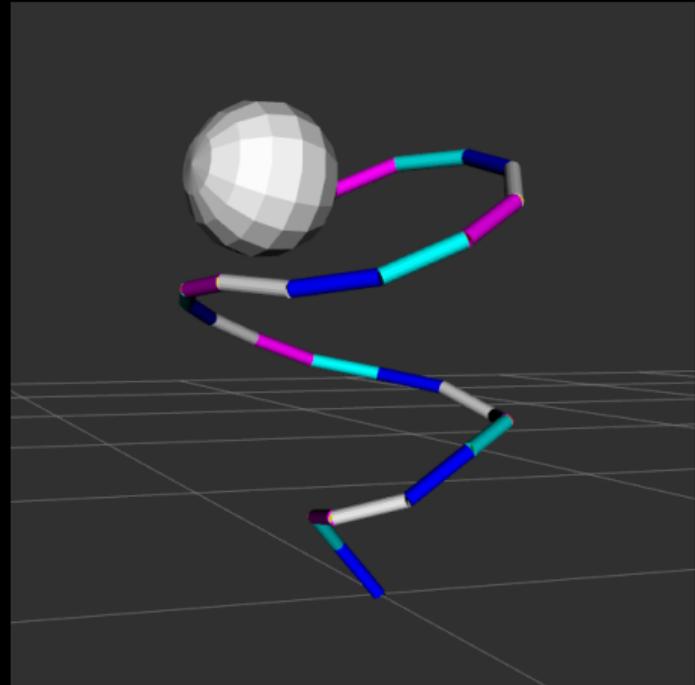
Modellazione

- modello **discreto**
 - approssimano un manipolatore continuo
- numero T arbitrario di link rigidi
- ogni link ha lunghezza ℓ_i
 - N link con lunghezza ℓ_i grande per la parte prossimale
 - M link con lunghezza $\ell_j < \ell_i$ per la parte distale
 - $T = N + M$



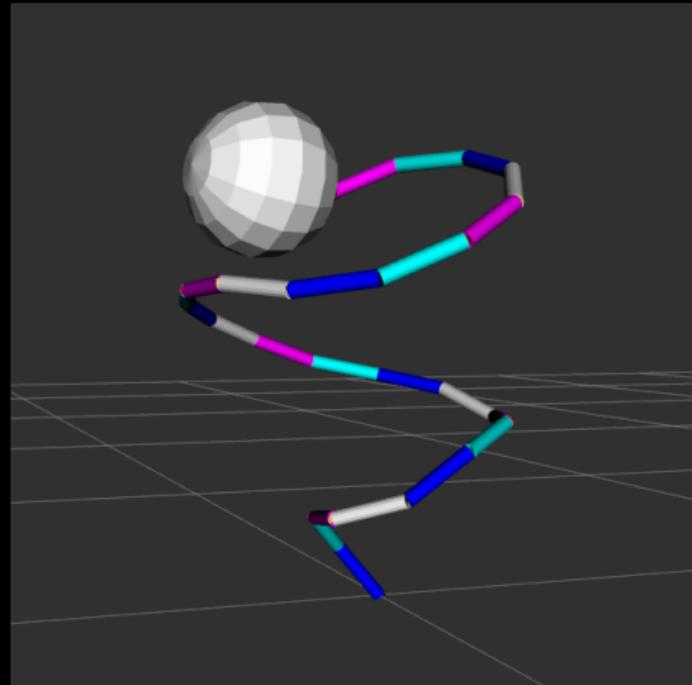
Modellazione

- modello **discreto**
 - approssimano un manipolatore continuo
- numero T arbitrario di link rigidi
- ogni link ha lunghezza ℓ_i
 - N link con lunghezza ℓ_i grande per la parte prossimale
 - M link con lunghezza $\ell_j < \ell_i$ per la parte distale
 - $T = N + M$
- ogni giunto è sferico



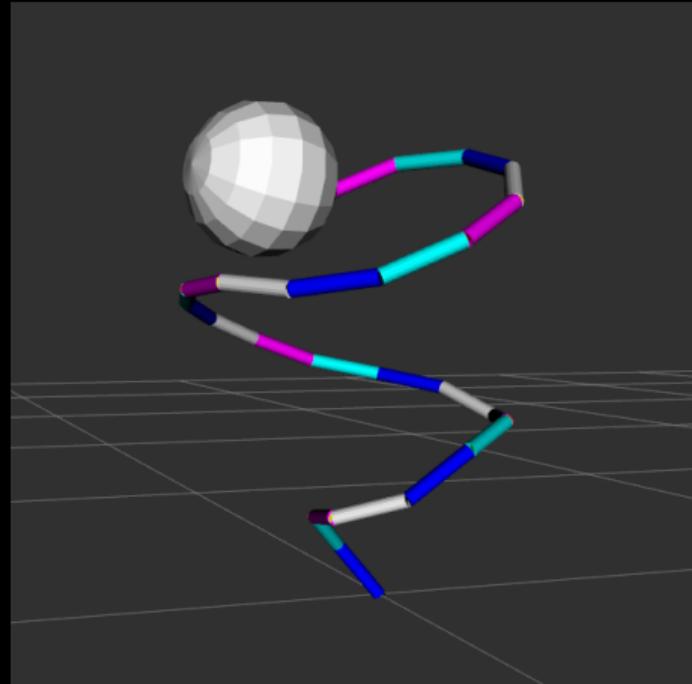
Modellazione

- modello **discreto**
 - approssimano un manipolatore continuo
- numero T arbitrario di link rigidi
- ogni link ha lunghezza ℓ_i
 - N link con lunghezza ℓ_i grande per la parte prossimale
 - M link con lunghezza $\ell_j < \ell_i$ per la parte distale
 - $T = N + M$
- ogni giunto è sferico
 - due giunti separati



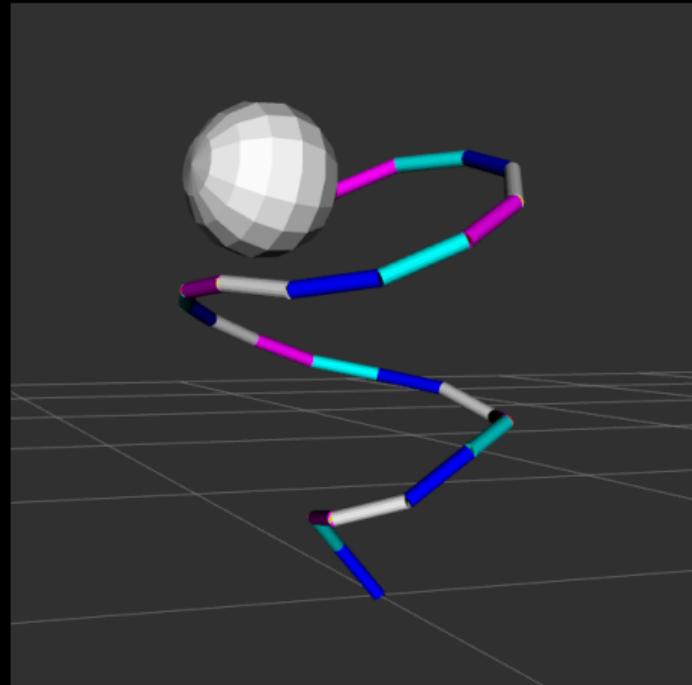
Modellazione

- modello **discreto**
 - approssimano un manipolatore continuo
- numero T arbitrario di link rigidi
- ogni link ha lunghezza ℓ_i
 - N link con lunghezza ℓ_i grande per la parte prossimale
 - M link con lunghezza $\ell_j < \ell_i$ per la parte distale
 - $T = N + M$
- ogni giunto è sferico
 - due giunti separati
 - uno ruota sul proprio asse x



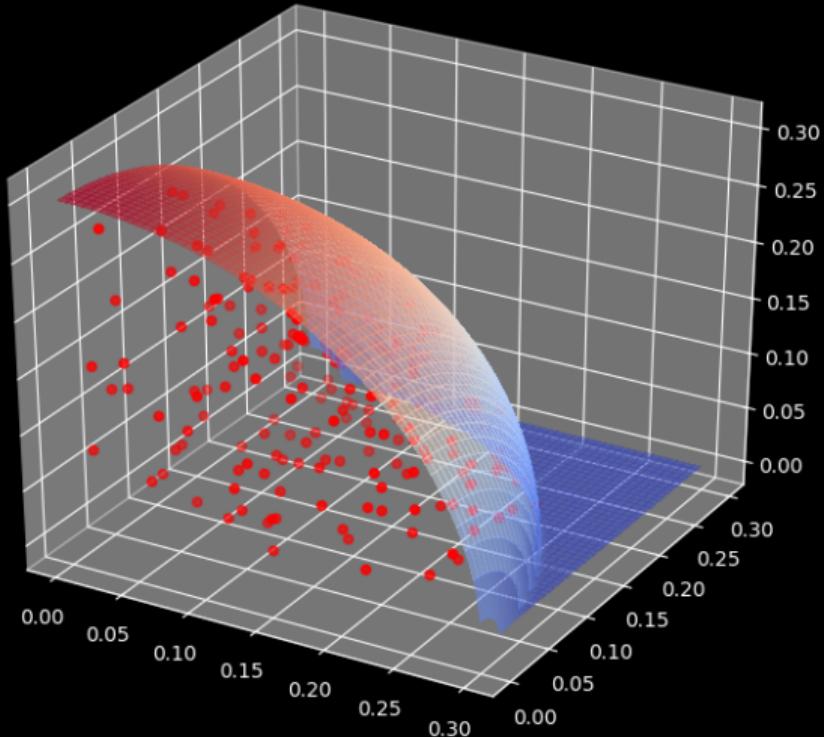
Modellazione

- modello **discreto**
 - approssimano un manipolatore continuo
- numero T arbitrario di link rigidi
- ogni link ha lunghezza ℓ_i
 - N link con lunghezza ℓ_i grande per la parte prossimale
 - M link con lunghezza $\ell_j < \ell_i$ per la parte distale
 - $T = N + M$
- ogni giunto è sferico
 - due giunti separati
 - uno ruota sul proprio asse x
 - uno ruota sul proprio asse y



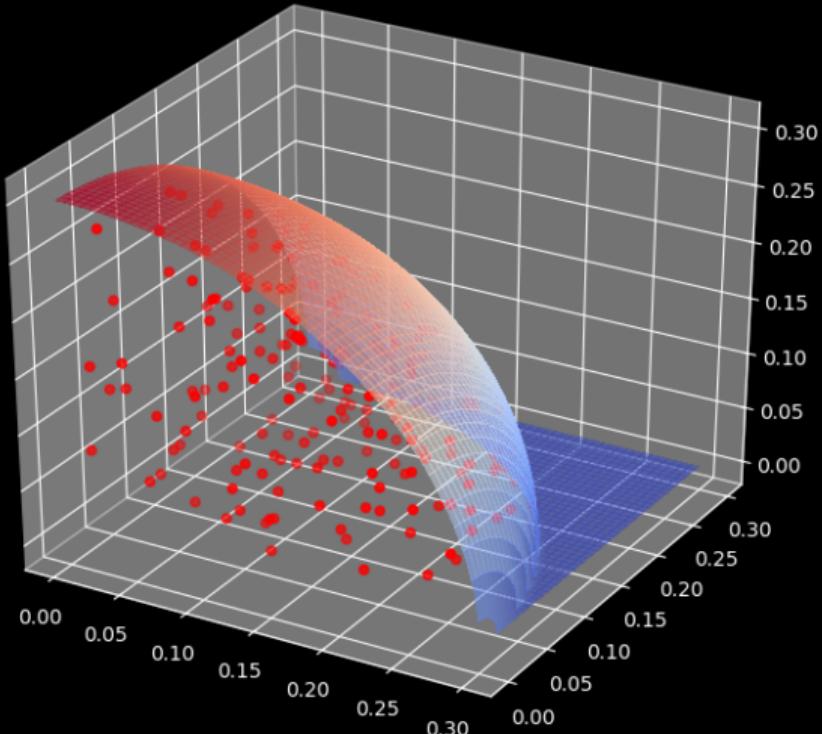
Spazio di raggiungibilità

- calcolo dello spazio di raggiungibilità



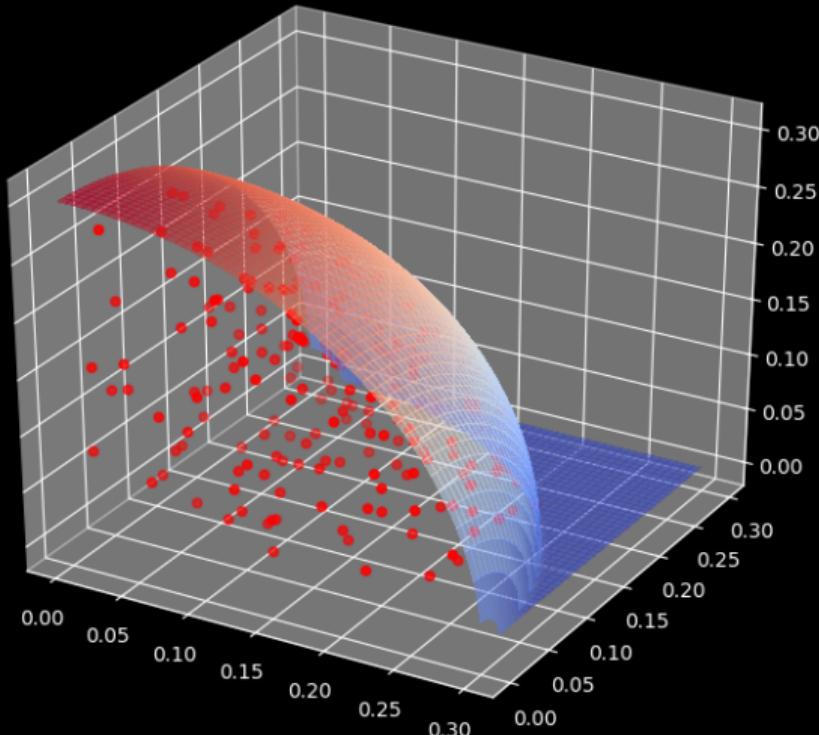
Spazio di raggiungibilità

- calcolo dello spazio di raggiungibilità
 - semisfera



Spazio di raggiungibilità

- calcolo dello spazio di raggiungibilità
 - semisfera
 - raggio $r = \sum_{i=1}^n \ell_i$



confronto di tecniche per la
cinematica inversa

Framework

TRAC-IK



SCIPY



- ottimizzazione applicata alla cinematica inversa

TRAC-IK: An open-source library for improved solving of generic inverse kinematics, Beeson, Ames, 2015

Framework

TRAC-IK



- ottimizzazione applicata alla cinematica inversa

SCIPY



- ottimizzazione “general purpose”

Framework

TRAC-IK



- ottimizzazione applicata alla cinematica inversa

SCIPY



- ottimizzazione “general purpose”
 - flessibile

Framework

TRAC-IK



- ottimizzazione applicata alla cinematica inversa
- package del framework ROS

SCIPY



- ottimizzazione “general purpose”
 - flessibile

Framework

TRAC-IK



- ottimizzazione applicata alla cinematica inversa
- package del framework ROS

SCIPY



- ottimizzazione “general purpose”
 - flessibile
- libreria di Python

Framework

TRAC-IK



- ottimizzazione applicata alla cinematica inversa
- package del framework ROS
- Newton + SLSQP

SCIPY



- ottimizzazione “general purpose”
 - flessibile
- libreria di Python

Framework

TRAC-IK



- ottimizzazione applicata alla cinematica inversa
- package del framework ROS
- Newton + SLSQP

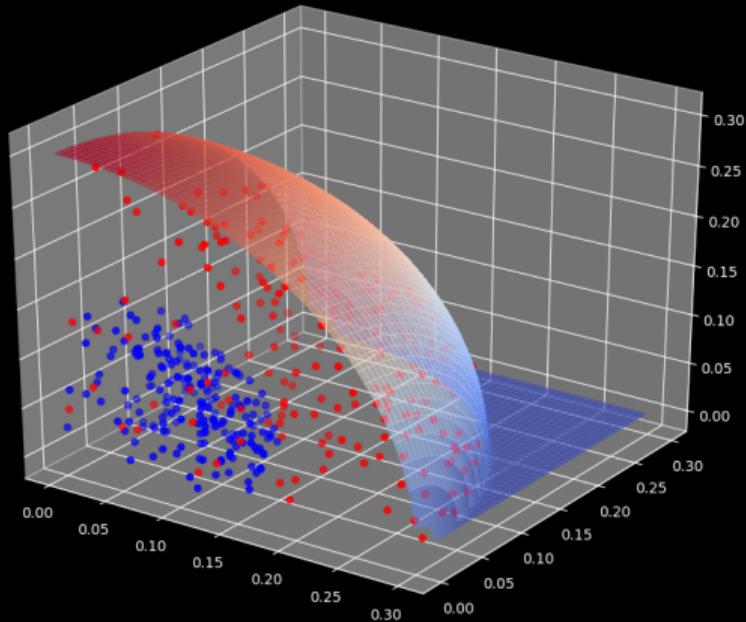
SCIPY



- ottimizzazione “general purpose”
 - flessibile
- libreria di Python
- diversi algoritmi
 - L-BFGS-B, TNC, SLSQP, COBYLA

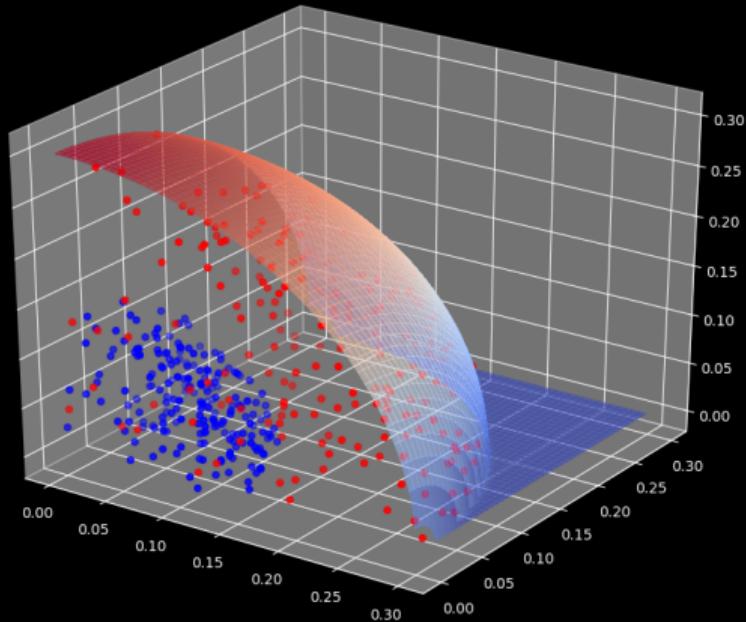
Formalizzazione dei problemi

- generazione punti end-effector •



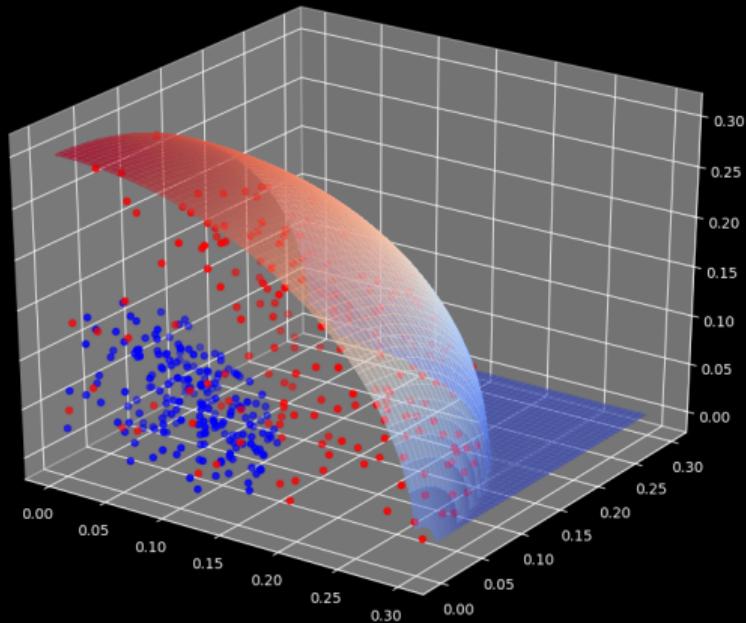
Formalizzazione dei problemi

- generazione punti end-effector •
- primo problema:



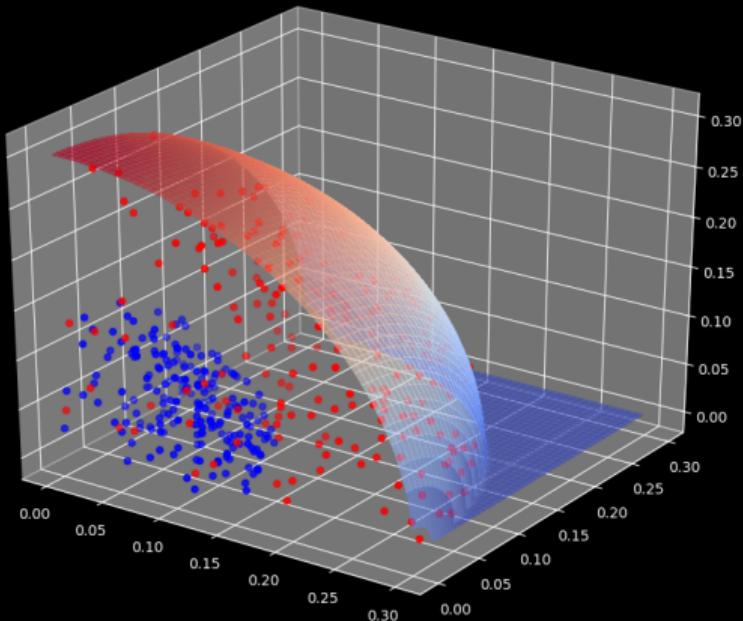
Formalizzazione dei problemi

- generazione punti end-effector •
- primo problema:
 - input: •



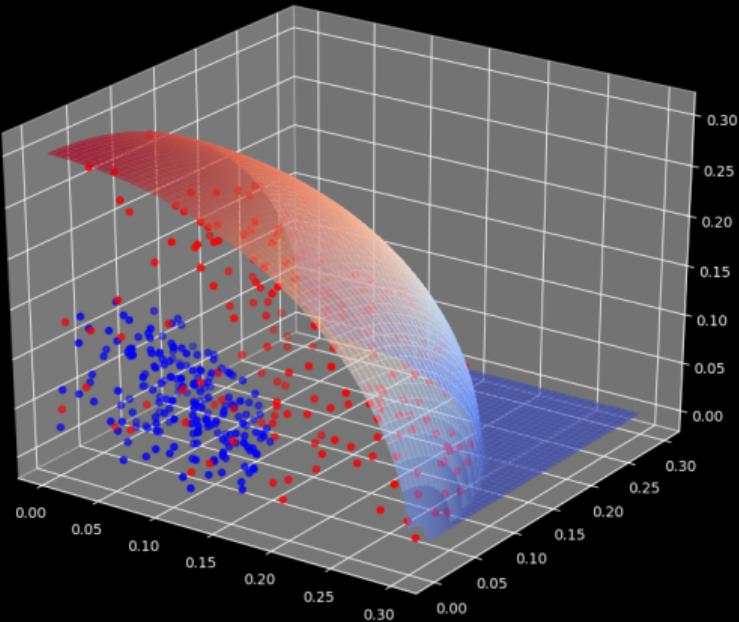
Formalizzazione dei problemi

- generazione punti end-effector •
- primo problema:
 - input: •
 - output: configurazione che fa coincidere la posizione dell'end-effector con •



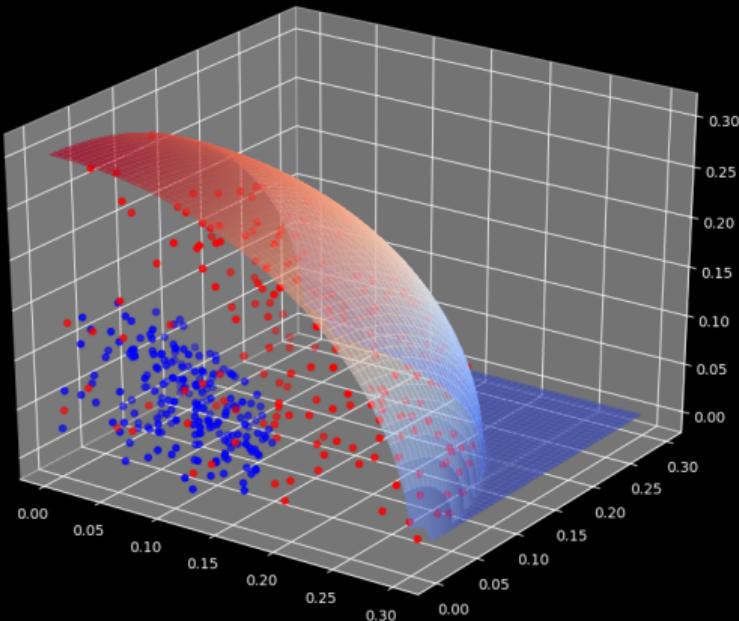
Formalizzazione dei problemi

- generazione punti end-effector •
- primo problema:
 - input: •
 - output: configurazione che fa coincidere la posizione dell'end-effector con •
- generazione punti intermedi •



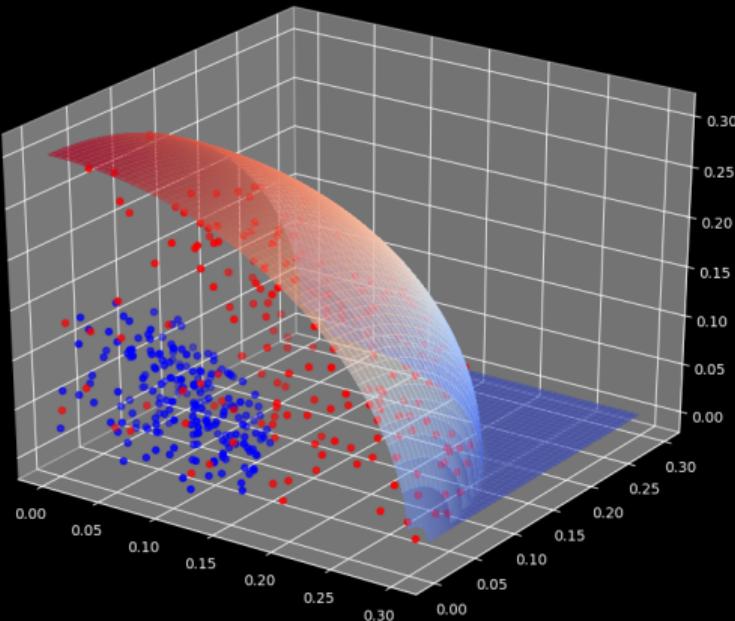
Formalizzazione dei problemi

- generazione punti end-effector •
- primo problema:
 - input: •
 - output: configurazione che fa coincidere la posizione dell'end-effector con •
- generazione punti intermedi •
- secondo problema:



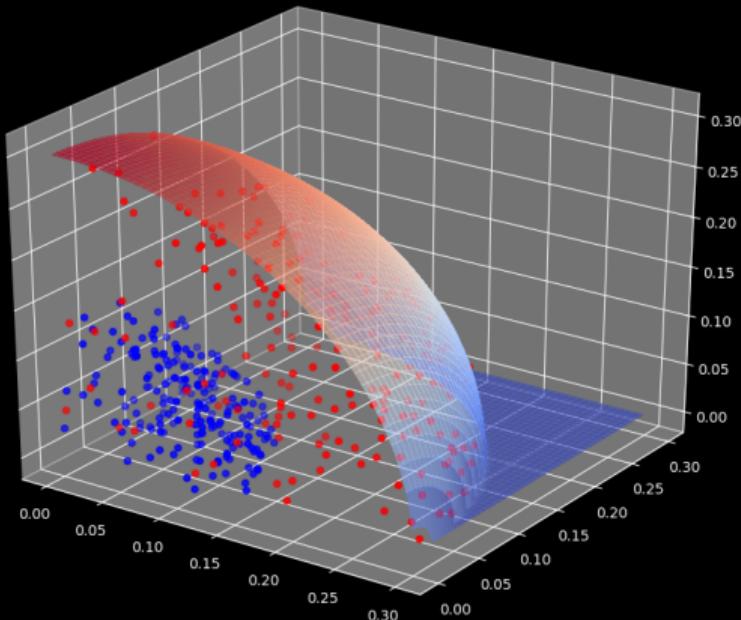
Formalizzazione dei problemi

- generazione punti end-effector •
- primo problema:
 - input: •
 - output: configurazione che fa coincidere la posizione dell'end-effector con •
- generazione punti intermedi •
- secondo problema:
 - input: •, •



Formalizzazione dei problemi

- generazione punti end-effector •
- primo problema:
 - input: •
 - output: configurazione che fa coincidere la posizione dell'end-effector con •
- generazione punti intermedi •
- secondo problema:
 - input: •, •
 - output: configurazione che fa coincidere la posizione dell'end-effector con • minimizzando la distanza del manipolatore da •



Ottimizzazione

Definiamo $\text{directkin}(\vec{\theta})$ la funzione di cinematica diretta del manipolatore.

Ottimizzazione

Definiamo $\text{directkin}(\vec{\theta})$ la funzione di cinematica diretta del manipolatore.

Definiamo $d(p_1, p_2)$ la distanza tra due punti, $d_{\text{man}}(p, \vec{\theta})$ la distanza di un punto p dal manipolatore nella configurazione $\vec{\theta}$.

Ottimizzazione

Definiamo $\text{directkin}(\vec{\theta})$ la funzione di cinematica diretta del manipolatore.

Definiamo $d(p_1, p_2)$ la distanza tra due punti, $d_{\text{man}}(p, \vec{\theta})$ la distanza di un punto p dal manipolatore nella configurazione $\vec{\theta}$.

$$\text{problema1}(\bullet) = \arg \min_{\vec{\theta}} d(\bullet, \text{directkin}(\vec{\theta}))$$

sotto i vincoli $|\theta_i| \leq \theta_{\max}$

Ottimizzazione

Definiamo $\text{directkin}(\vec{\theta})$ la funzione di cinematica diretta del manipolatore.

Definiamo $d(p_1, p_2)$ la distanza tra due punti, $d_{\text{man}}(p, \vec{\theta})$ la distanza di un punto p dal manipolatore nella configurazione $\vec{\theta}$.

$$\text{problema1}(\bullet) = \arg \min_{\vec{\theta}} d(\bullet, \text{directkin}(\vec{\theta}))$$

sotto i vincoli $|\theta_i| \leq \theta_{\max}$

$$\text{problema2}(\bullet, \bullet) = \arg \min_{\vec{\theta}} \left(\alpha d(\bullet, \text{directkin}(\vec{\theta})) + (1 - \alpha) d_{\text{man}}(\bullet, \vec{\theta}) \right)$$

sotto i vincoli $|\theta_i| \leq \theta_{\max}$

Valutazione degli algoritmi

- quale algoritmo è il migliore?

Valutazione degli algoritmi

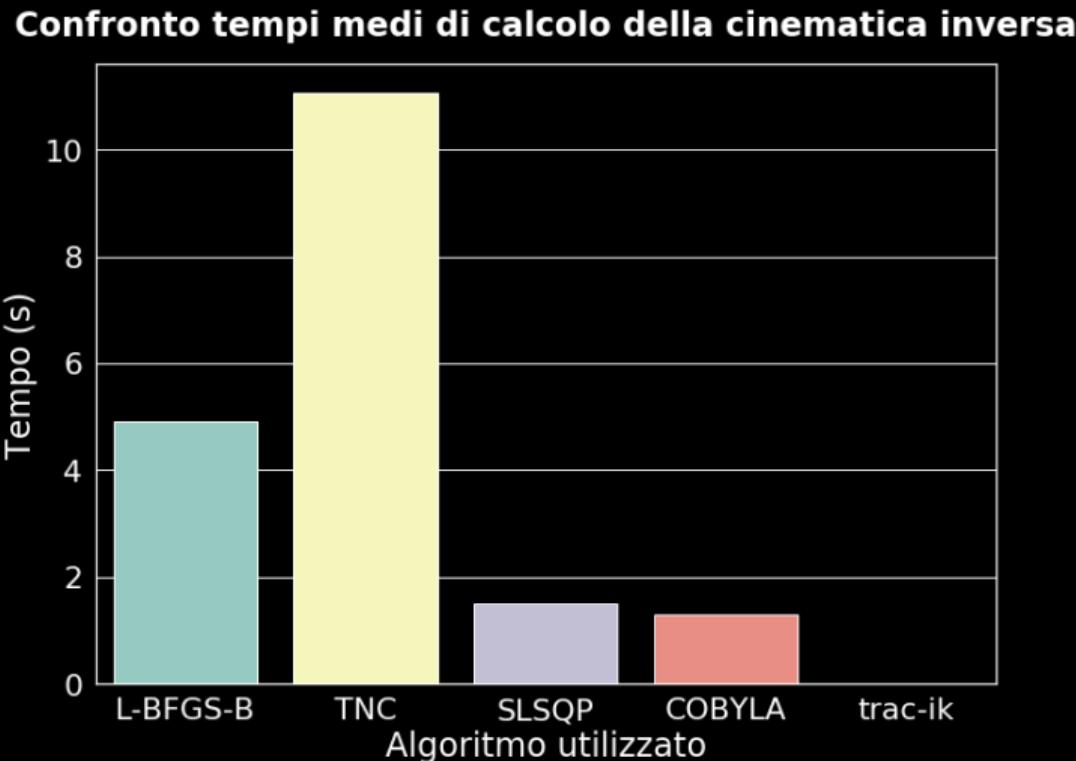
- quale algoritmo è il migliore?
 - efficiente 

Valutazione degli algoritmi

- quale algoritmo è il migliore?
 - efficiente 
 - efficace 100

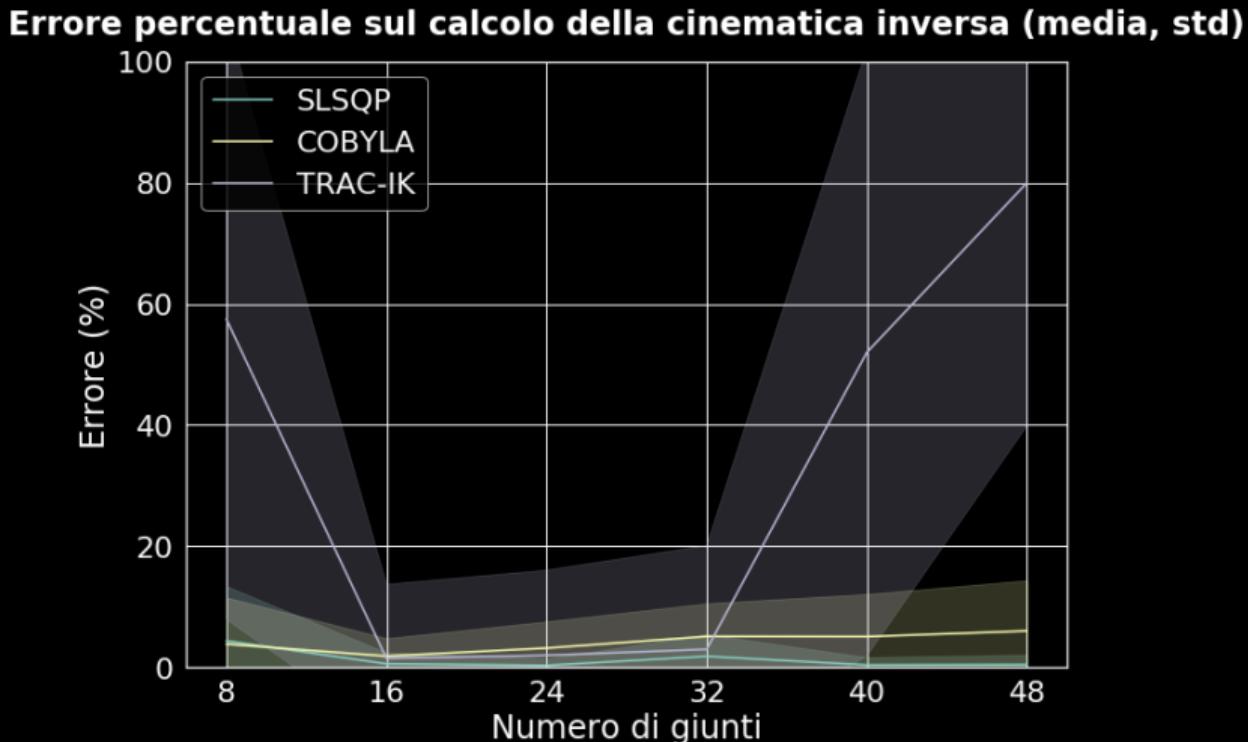
Valutazione degli algoritmi: tempi

Tempi medi di risoluzione del *Problema 1* su un campione di 200 punti uniformemente distribuiti nello spazio raggiungibile.



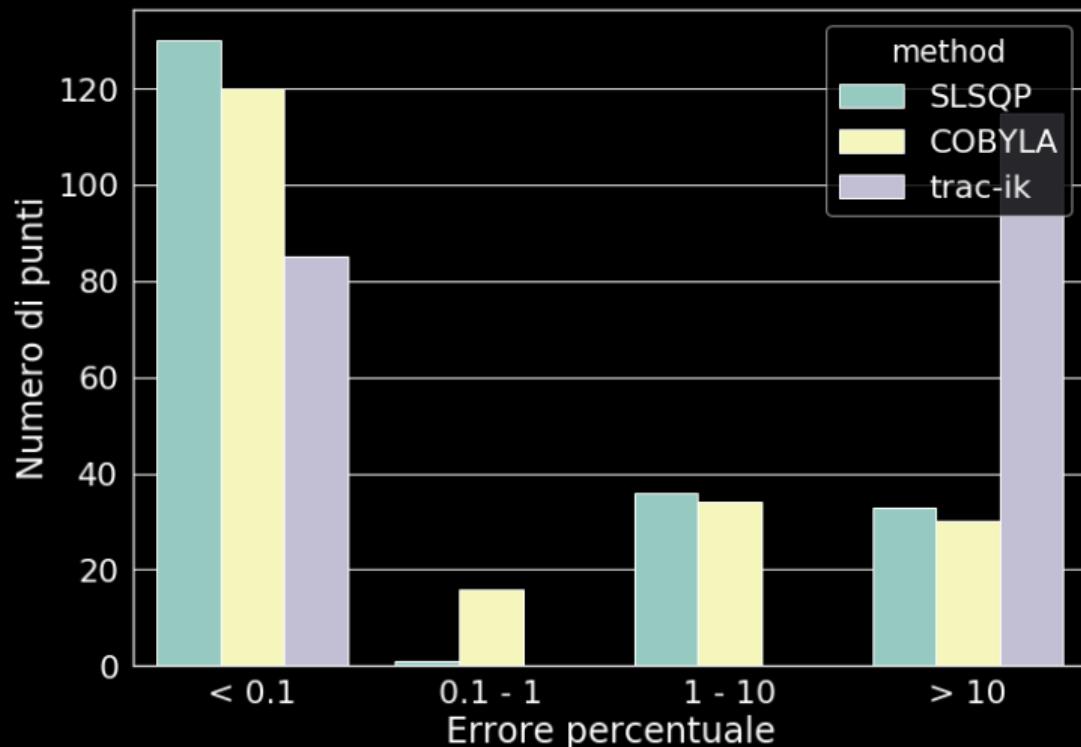
Valutazione degli algoritmi: errore sulla posizione

Errore percentuale sulle soluzioni del *Problema 1* su un campione di 200 punti uniformemente distribuiti nello spazio raggiungibile.



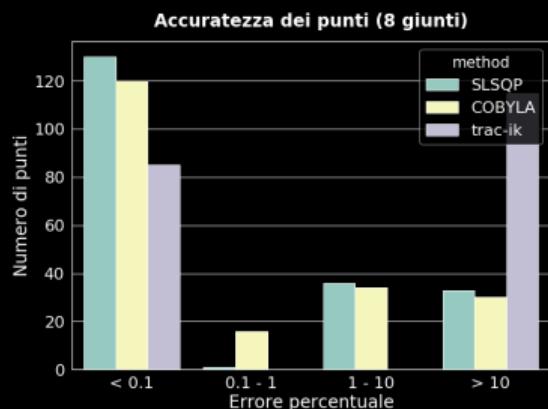
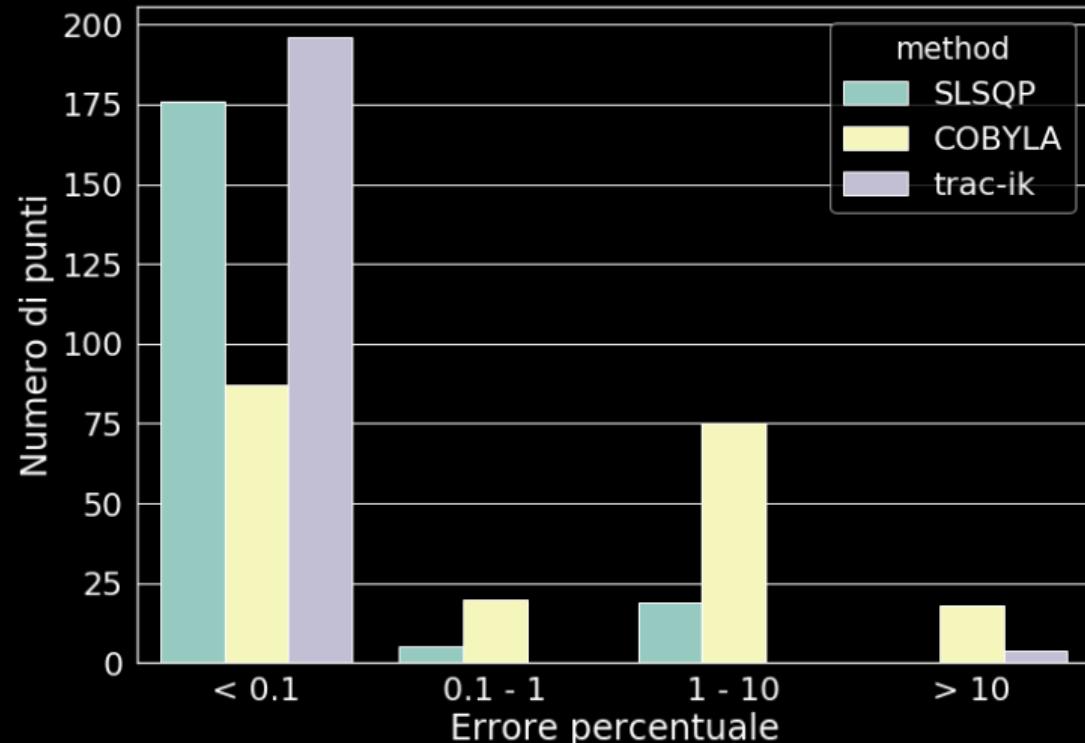
Valutazione degli algoritmi: accuratezza punti

Accuratezza dei punti (8 giunti)



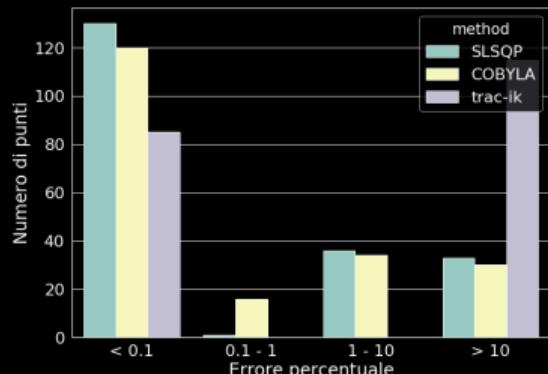
Valutazione degli algoritmi: accuratezza punti

Accuratezza dei punti (24 giunti)

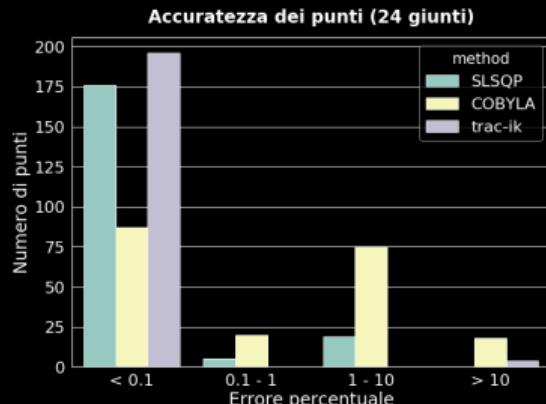
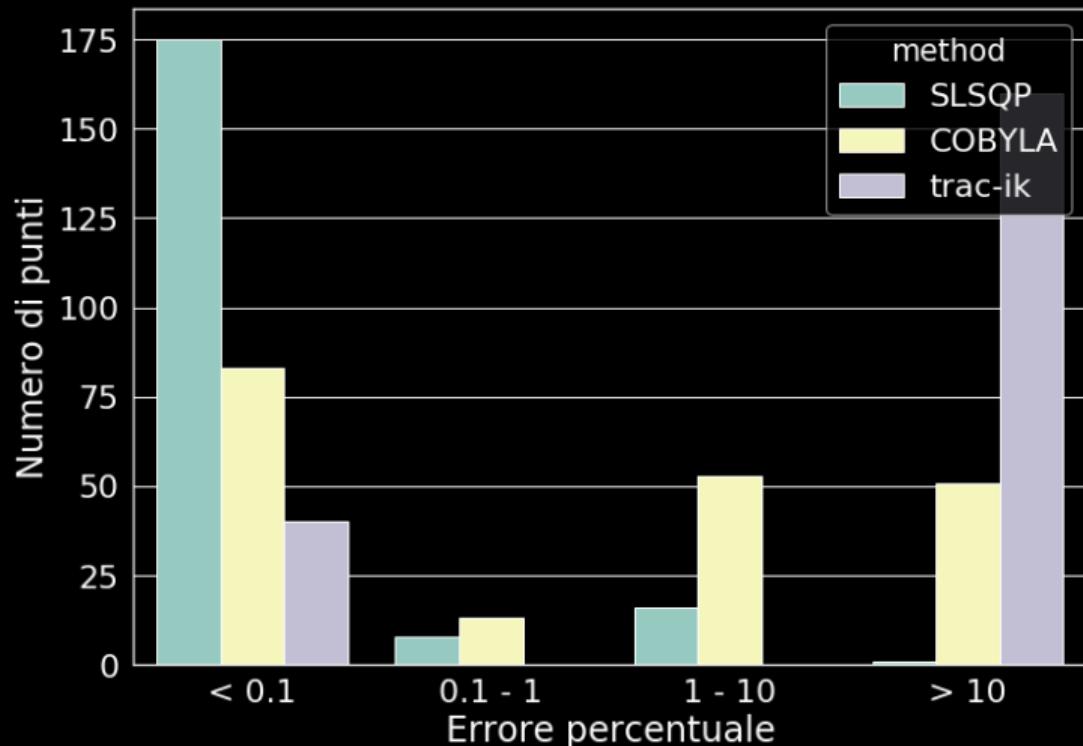


Valutazione degli algoritmi: accuratezza punti

Accuratezza dei punti (8 giunti)

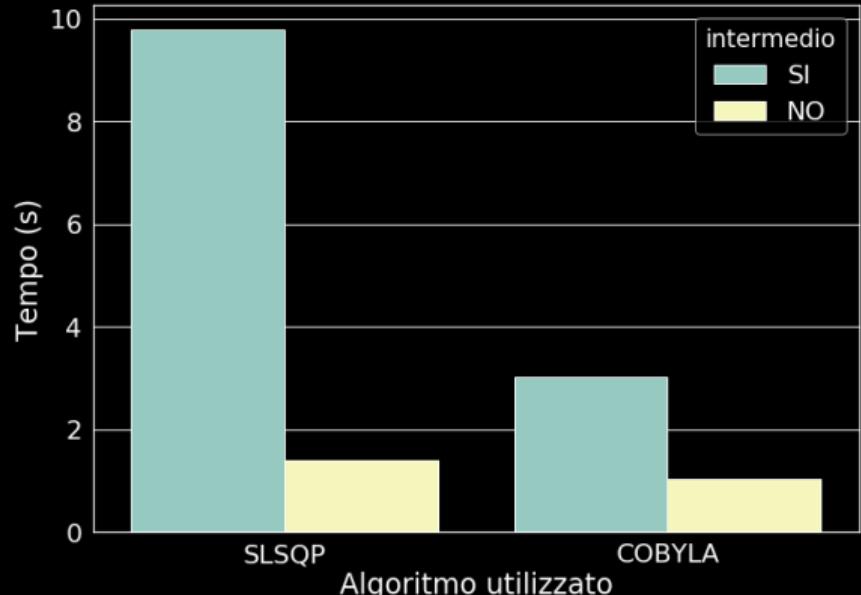


Accuratezza dei punti (48 giunti)

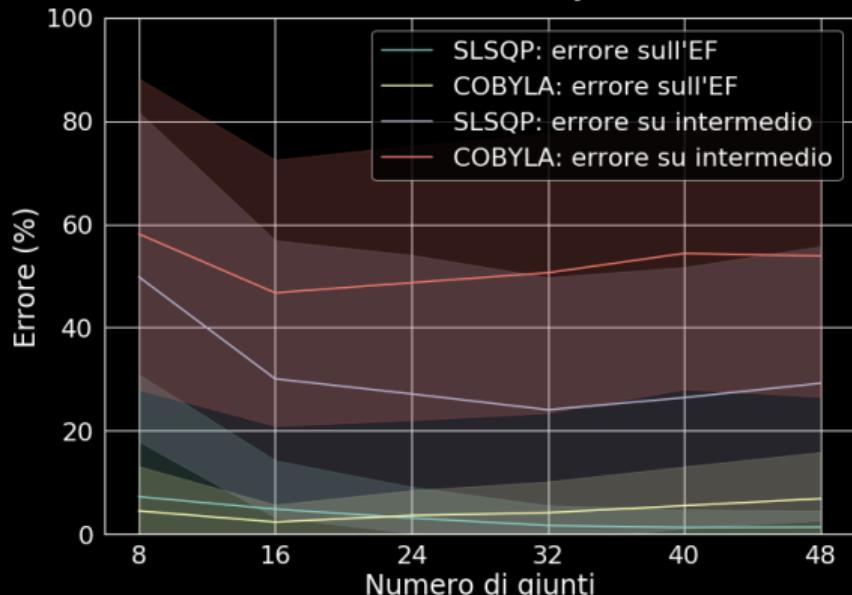


Valutazione degli algoritmi: *Problema 2*

Tempi di ottimizzazione con punto intermedio



Errore sull'end-effector e sul punto intermedio



Risultati

- TRAC-IK: ottimo con manipolatori di 16-32 giunti 100

Risultati

- TRAC-IK: ottimo con manipolatori di 16-32 giunti 100
- SCIPY + SLSQP valida alternativa a TRAC-IK con più di 32 giunti
 - ↳ posso dare forma al manipolatore

Risultati

- TRAC-IK: ottimo con manipolatori di 16-32 giunti 100
- SCIPY + SLSQP valida alternativa a TRAC-IK con più di 32 giunti
 - ↳ posso dare forma al manipolatore
 - ↳ tempi piuttosto lunghi

fine