



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA



DIPARTIMENTO  
DI INGEGNERIA  
DELL'INFORMAZIONE

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN  
INGEGNERIA INFORMATICA

# Analisi dei sensori coppia-forza per lo sviluppo di applicazioni industriali in ROS

*Relatore:*

PROF. STEFANO GHIDONI

*Correlatore:*

MATTEO TERRERAN, PhD

*Laureando:*

ANDREA STOCCO

2009353

Anno Accademico 2022/2023



## **Abstract**

I sensori coppia-forza sono componenti fondamentali nei sistemi robotici in quanto forniscono dati sulle forze e i momenti esterni applicati al robot. Questi dati possono essere utilizzati per applicazioni a supporto della collaborazione uomo-robot e per l'automatizzazione di attività che richiedono elevata precisione. ROS (Robot Operating System) é un framework che fornisce una vasta gamma di librerie e strumenti software per lo sviluppo di applicazioni robotiche. In questa tesi verranno mostrate delle possibili applicazioni ROS in ambito industriale per i sensori coppia-forza, dopo averne validato l'accuratezza di precisione e reattività attraverso alcuni esperimenti.



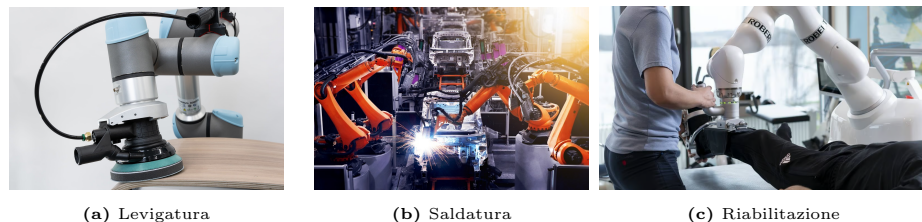
# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
<b>1 ROS</b>	<b>3</b>
1.1 Nodo . . . . .	3
1.2 Topic . . . . .	4
1.3 Service . . . . .	5
1.4 Topic e Service a confronto . . . . .	5
1.5 Workspace . . . . .	6
<b>2 Ambiente di lavoro</b>	<b>7</b>
2.1 UR5 . . . . .	7
2.2 FT300-S . . . . .	9
2.2.1 Collegamento via USB tra sensore e control box e via ether-	
net tra control box e computer . . . . .	10
2.2.2 Collegamento diretto via USB tra sensore e computer . . .	11
2.3 MoveIt . . . . .	12
2.4 Controllori . . . . .	13
<b>3 Validazione del sensore</b>	<b>15</b>
<b>4 Applicazioni industriali</b>	<b>17</b>
<b>5 Conclusioni</b>	<b>19</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>21</b>



# Introduzione

I robot manipolatori hanno rivoluzionato l'automazione industriale, permettendo lo svolgimento di operazioni complesse in modo rapido, preciso e sicuro. Uno dei modelli più utilizzato è l'**UR5** di **Universal Robot**. Si è scelto di utilizzarlo in questo studio, per via della sua flessibilità ed efficienza. Un ruolo chiave nel controllo di questi robot viene assunto dai sensori coppia-forza, che permettono di misurare e regolare la forza esercitata dal robot durante lo svolgimento delle proprie attività. La loro versatilità li rende strumenti preziosi in molti campi della **robotica industriale** e della **medicina**. Essi infatti consentono al robot di controllare la forza esercitata durante operazioni di assemblaggio, levigatura, saldatura o manipolazione degli oggetti. Vengono inoltre utilizzati nella riabilitazione fisioterapica, per valutare la forza muscolare e i progressi del paziente.



**Figura 1:** Applicazioni dei sensori coppia-forza

Questi sensori sono in grado di convertire le forze e le coppie applicati ad essi in segnali elettrici che possono essere interpretati da altri dispositivi. Esistono varie tipologie di sensori coppia-forza, ognuna delle quali ha un diverso meccanismo di funzionamento. I sensori **piezoelettrici**, per esempio, sfruttano la proprietà di alcuni materiali (cristalli piezoelettrici) di generare una carica elettrica se sottoposti a deformazione meccanica. Tale variazione può essere misurata per determinare la forza o la coppia applicata. Il sensore **FT 300-S** di **Robotiq** sfrutta proprio questo principio di funzionamento ed è in grado di misurare forze e coppie lungo i sei gradi di libertà (x, y, z, roll, pitch, yaw). Si è reso necessario installarlo manualmente sull'UR5 perché, questo robot, non è provvisto di

sensori coppia-forza integrati. In questa tesi verrà presentata l'implementazione di un sistema di controllo della forza per l'UR5 utilizzando i dati forniti dall'FT 300-S e il framework di sviluppo **ROS (Robot Operating System)**. ROS é un framework ampiamente utilizzato dalla comunità informatica perché fornisce strumenti e librerie per il controllo e la comunicazione tra le componenti di un sistema robotico. Alcuni test per la valutazione delle prestazioni del sensore in termini di reattività e precisione verranno descritti nel Capitolo 4. Nel Capitolo 5, invece, verranno presentate delle possibili applicazioni volte a dimostrare l'efficacia di tali sensori per lo svolgimento di attività industriali, come il **pick and place** e il **trasporto collaborativo**.



# Capitolo 1

## ROS

ROS (Robot Operating System) é un framework open-source disponibile in Python e C++ per lo sviluppo di applicazioni robotiche. Si tratta di un sistema centralizzato che permette alle diverse componenti del sistema (nodi) di comunicare tra loro sia in modo asincrono (topic) che sincrono (service). Offre inoltre una vasta gamma di strumenti di sviluppo, come un software per la visualizzazione grafica (RViz) e la possibilità di registrare e riprodurre dati, favorendo così il debugging e il testing delle applicazioni. La versione raccomandata e utilizzata é **ROS Noetic** per **Ubuntu Focal 20.04**. Questo capitolo ci fornirà una panoramica esaustiva dei concetti base del Robot Operating System e dell'ambiente di esecuzione associato [2].

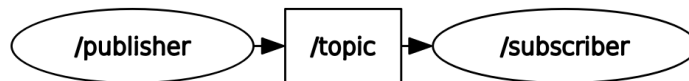
### 1.1 Nodo

Un **pacchetto** ROS contiene al suo interno codici sorgenti, librerie e dati di configurazione. Per creare un pacchetto é sufficiente eseguire il comando `catkin_create_pkg <nome_pacchetto>` all'interno della cartella `src/` situata nel workspace catkin. Un **nodo** é un eseguibile che sfrutta ROS per comunicare con altri nodi. Quando viene lanciato il comando `catkin_make`, ogni file sorgente in ogni pacchetto viene compilato dando origine ad un nodo. Impropriamente, si potrebbe quindi dire che un pacchetto é un insieme di nodi riguardanti la stessa applicazione. Per poter eseguire un nodo é sufficiente eseguire il comando `roslaunch <nome_pacchetto> <nome_nodo>`. Prima di eseguire un nodo é necessario, tuttavia, avviare un ROS Master. Lo scopo principale di un **ROS Master** é quello di consentire ai singoli nodi di localizzarsi a vicenda. Una volta fatto par-

tire, essi potranno comunicare tra loro attraverso topic o service. Per eseguire un ROS Master sarà sufficiente eseguire il comando `roscore` in un altro terminale.

## 1.2 Topic

I **topic** sono dei canali di comunicazione unidirezionali che consentono lo scambio di informazioni tra nodi sottoforma di messaggi. Un nodo che pubblica messaggi su un topic viene chiamato **publisher**, mentre un nodo che legge i messaggi da un topic viene chiamato **subscriber**.



**Figura 1.1:** Schema di comunicazione

Per pubblicare un messaggio su un topic bisogna utilizzare l'apposita funzione `publish()` passandole come parametro il messaggio che vogliamo pubblicare. A discapito del nome, questa funzione non pubblica effettivamente il messaggio, ma lo mette in una coda d'attesa (la cui dimensione viene specificata quando viene istanziato il publisher). Un thread separato si occupa di inviare effettivamente il messaggio al topic per renderlo visibile a tutti i nodi subscriber connessi. Se il numero di messaggi in coda supera la sua dimensione, i messaggi più vecchi verranno cancellati per fare spazio a quelli più recenti. Quando arriva un nuovo messaggio al subscriber, esso viene salvato in una coda d'attesa (stesso funzionamento di quella del publisher) fino a quando ROS non dà la possibilità al nodo di eseguire la funzione di callback. Tale funzione è definita dall'utente e si occupa di processare il messaggio ricevuto. ROS eseguirà una callback solo quando gli verrà dato il permesso di farlo. Ci sono due modi per farlo:

- `ros::spinOnce()` chiede a ROS di eseguire tutte le callback in sospeso restituendo poi il controllo all'utente
- `ros::spin()` chiede a ROS di attendere e di eseguire tutte le callback in sospeso fino a quando il nodo non viene spento. È equivalente a:

```
while (ros::ok()) {  
    ros::spinOnce();  
}
```

`ros::ok()` ritorna 0 quando:

- il nodo viene spento attraverso un SIGINT (Ctrl-C) oppure dalla chiamata di `ros::shutdown()` in un altro punto del codice
- un altro nodo con lo stesso nome viene eseguito

In altre parole `ros::spin()` vincola il nodo a rimanere sempre e solo in attesa di leggere nuovi messaggi. Se il nodo non deve solamente eseguire le callback, allora un loop con `ros::spinOnce()` é la scelta corretta.

## 1.3 Service

I **service** sono un'altra modalità di comunicazione tra nodi. A differenza dei topic, che consentono la comunicazione asincrona, i service instaurano una comunicazione di tipo 'client-server'. Il nodo **client** invia una richiesta al nodo service e attende la sua risposta prima di andare avanti con l'esecuzione. Per implementare un service in ROS é necessario per prima cosa definire la struttura dei messaggi di richiesta e risposta [6]. Successivamente il client potrà creare una richiesta nel formato specificato e inviarla al nodo service come parametro della funzione `call()`. Il nodo service elaborerà quindi la richiesta fornendo una risposta al client.

## 1.4 Topic e Service a confronto

I topic e i service sono due modalità di comunicazione molto diverse a livello concettuale. Con un topic si instaura una comunicazione asincrona in cui tutti i subscriber connessi attendono la pubblicazione di un messaggio da parte del publisher, mentre con un service é il 'server' che rimane in attesa di richieste da parte dei client connessi. Questo rende i topic più adatti per la trasmissione di flussi di dati continui (come quelli provenienti dai sensori) e i service più indicati nel caso di servizi puntuali, come la richiesta di un calcolo o di un'altra specifica azione ad un altro nodo [5]. Nel corso di questa tesi verranno utilizzate entrambe le modalità di comunicazione, con prevalenza di quella topic.

## 1.5 Workspace

Per poter eseguire codice ROS serve un ambiente che permetta l'organizzazione e l'utilizzo di tutti i pacchetti necessari. Al riguardo, **catkin** é il sistema di compilazione ufficiale di ROS che consente la creazione di un workspace per organizzare e gestire le applicazioni. I termini 'pacchetto' e 'applicazione' sono interscambiabili e possono essere utilizzati in modo equivalente. Una volta creato il workspace catkin [3], il codice sorgente contenuto all'interno dei pacchetti potrà essere compilato ed eseguito.

# Capitolo 2

## Ambiente di lavoro

Questo capitolo offrirá una panoramica sul setup dell'ambiente di lavoro. Si parlerá diffusamente delle caratteristiche e delle specifiche tecniche del robot e del sensore. Verranno, inoltre, mostrati i passaggi fondamentali che hanno consentito il controllo del sistema attraverso ROS.

### 2.1 UR5

La versione attuale dell'UR5 é quella appartenente alla **e-series**, rilasciata nel 2018. Tuttavia, in questa tesi, viene utilizzata la versione precedente della famiglia **CB3**, commercializzata a partire dal 2008.

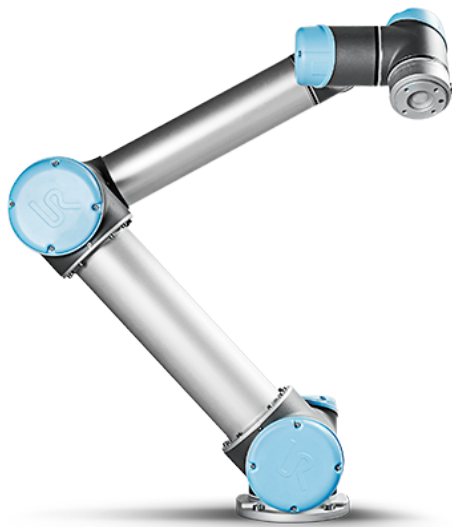
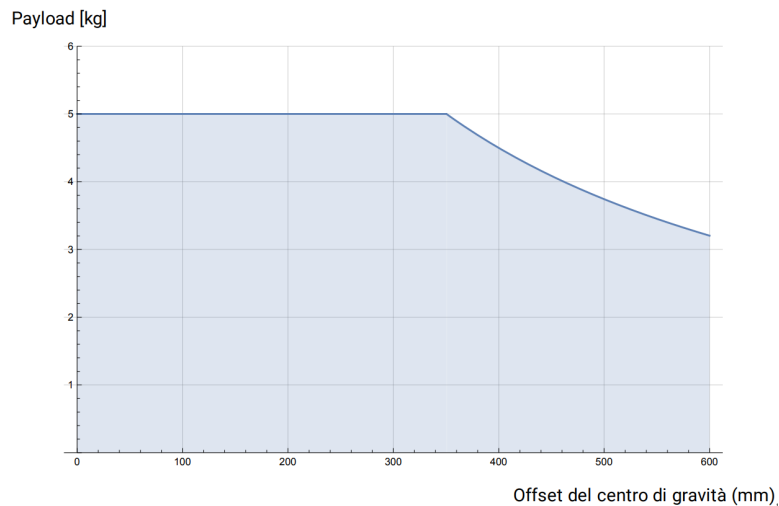


Figura 2.1: UR5/CB3

All'estremità del robot é possibile installare un **end effector**, ossia un dispositivo concepito per la manipolazione degli oggetti che fornisce l'unica possibile interazione con l'ambiente esterno. Il carico massimo sopportabile dall'UR5 dipende dall'offset del centro di gravità, ossia la distanza tra l'estremità del braccio robotico (punto di applicazione dell'end effector) e il centro di gravità dell'UR5.



**Figura 2.2:** Andamento del carico massimo sopportabile rispetto all'offset del centro di gravità

Come si può notare in Figura 2.2, l'UR5 é in grado di sopportare un carico massimo di 5kg finché l'estensione del braccio non supera i 350mm. Da qui in poi al crescere dell'offset seguirá una diminuzione del carico massimo applicabile. L'UR5 é collegato ad una **control box** che é un dispositivo alimentato elettricamente in grado di fornire energia sia al robot che alle periferiche collegate ad esso. Sulla control box é presente poi un'uscita ethernet per la connessione ad un PC per il controllo remoto, da cui vengono lanciati tutti gli applicativi sviluppati.



(a) Control box



(b) Teach pendant

**Figura 2.3**

In Figura 2.3 vengono mostrati la control box e il **Teach Pendant**, un dispositivo touchscreen collegato alla control box che consente il controllo diretto del robot. Sul Teach Pendant é eseguita un'interfaccia chiamata **Polyscope** che permette la programmazione dei movimenti del robot e il cambiamento di alcune sue impostazioni. Per poter controllare l'UR5 tramite ROS é, tuttavia, necessario installare sul Teach Pendant il plugin **externalcontrol.urcap**, creare un nuovo programma su Polyscope che preveda l'utilizzo del plugin e impostare l'indirizzo ip del computer remoto da cui verranno lanciati i nodi ROS.

## 2.2 FT300-S

Il sensore FT300-S di Robotiq é stato installato all'estremitá dell'UR5 e collegato alla control box tramite il proprio cavo di alimentazione.



Figura 2.4: FT300-S

É importante notare come la sua presenza non precluda la possibilità di installazione anche di un end effector, che può essere facilmente posizionato 'al di sopra' del sensore. L'FT300-S é in grado di rilevare forze e torsioni nel range di, rispettivamente,  $\pm 300N$  e  $\pm 30Nm$ . Siccome le misurazioni del sensore hanno un rumore di fondo intrinseco, é necessario scartare tutti i dati al di sotto delle soglie consigliate nel manuale [8] in quanto non attendibili. Per interfacciarsi con il sensore dal PC sono disponibili due modalità di comunicazione: **ModbusRTU** e **data stream**. La prima viene utilizzata per inviare comandi al sensore (es. azzeramento) e per richiedere informazioni su di esso, la seconda per ottenere un flusso continuo di dati relativi alle misurazioni effettuate. Per usufruire di tali modalità di comunicazione sono state provate due alternative:

- collegamento via USB tra sensore e control box e via ethernet tra control box e computer

- collegamento diretto via USB tra sensore e computer

### 2.2.1 Collegamento via USB tra sensore e control box e via ethernet tra control box e computer



**Figura 2.5:** Schema collegamento

Con la configurazione mostrata in Figura 2.5, per poter leggere i dati provenienti dal sensore, é stato necessario sviluppare un **driver**. Poi si é stabilita una connessione di rete tramite un **socket** collegato all'indirizzo IP del robot, alla porta **63351**. Su tale porta il sensore invierà un flusso continuo di messaggi ad una frequenza di 100Hz [8]. Come da manuale, i messaggi sono lunghi 16 byte e hanno la seguente struttura:

```

buff[0] = 0x20
buff[1] = 0x4E
buff[2] = Fx * 100 (LSB)      LSB = Least Significant Bit
buff[3] = Fx * 100 (MSB)      MSB = Most Significant Bit
buff[4] = Fy * 100 (LSB)
buff[5] = Fy * 100 (MSB)
buff[6] = Fz * 100 (LSB)
buff[7] = Fz * 100 (MSB)
buff[8] = Mx * 1000 (LSB)
buff[9] = Mx * 1000 (MSB)
buff[10] = My * 1000 (LSB)
buff[11] = My * 1000 (MSB)
buff[12] = Mz * 1000 (LSB)
buff[13] = Mz * 1000 (MSB)
  
```



```
buff[14] = LSB CRC      CRC = Cyclic Redundancy Check
buff[15] = MSB CRC
```

Ogni elemento dell'array contiene un byte in formato esadecimale. Le forze (F), i momenti (M) e il CRC vengono rappresentati con 2 byte ciascuno. Il byte più significativo e quello meno significativo vengono divisi e inviati come elementi differenti. I primi due byte sono fissati, gli ultimi due rappresentano il CRC (che consente la rilevazione di eventuali errori di trasmissione) e quelli intermedi codificano le forze e i momenti percepiti dal sensore. La control box, riceve tali messaggi e li converte nel formato:

(Fx, Fy, Fz, Mx, My, Mz)

Per rendere disponibili i dati ricevuti agli altri nodi, il driver, dopo averli convertiti in decimale, li pubblica sul topic `sensor_topic` [9].

### 2.2.2 Collegamento diretto via USB tra sensore e computer

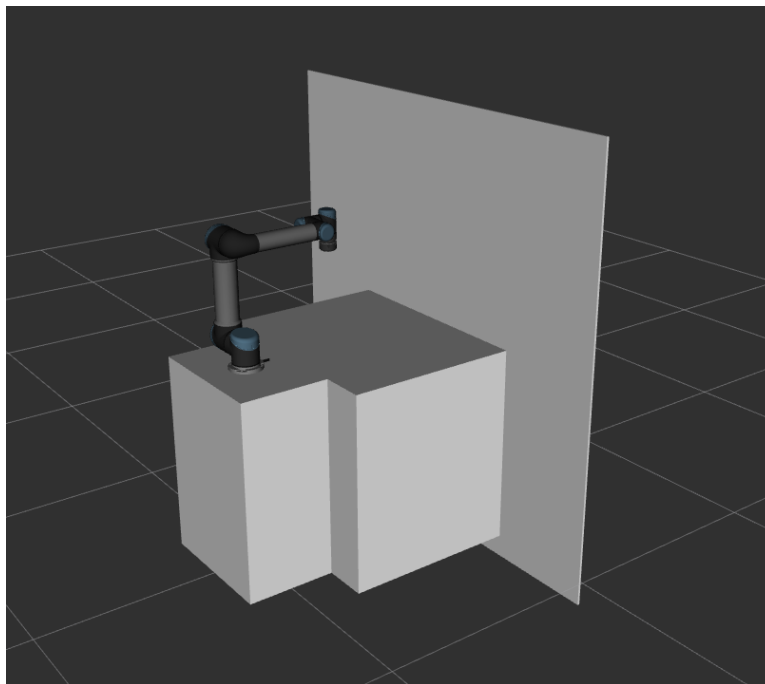


**Figura 2.6:** Schema collegamento

Con questa configurazione, invece, un driver per la lettura dei dati del sensore ci viene già fornito da Robotiq. Una volta scaricato il loro repository GitHub [10], per eseguire il driver è sufficiente far partire un nuovo nodo ROS con il comando `roslaunch robotiq_ft_sensor rg_sensor`. Il driver consente l'utilizzo di entrambe le modalità di comunicazione descritte in precedenza (ModbusRTU e data stream). Viene infatti creato il service `robotiq_ft_sensor_acc` per l'invio di comandi al sensore come, ad esempio, la richiesta di azzeramento. Inoltre, viene generato il topic `robotiq_ft_wrench` in cui vengono pubblicate le misurazioni prodotte dal sensore. Quindi, per avere il pieno controllo del sensore, è sufficiente creare un client per le richieste al service `robotiq_ft_sensor_acc` e un subscriber per leggere i dati presenti sul topic `robotiq_ft_wrench`. Per gli esperimenti e le applicazioni industriali descritte nel Capitoli 3 e 4 si è scelto di utilizzare questo secondo approccio e quindi di collegare direttamente il sensore al PC via USB.

## 2.3 MoveIt

Dopo aver introdotto i concetti base di ROS e descritto le principali caratteristiche di robot e sensore, in questa sezione si parlerà di **MoveIt**. MoveIt é un framework specifico di ROS specializzato nella **pianificazione del movimento**. Offre un'ampia gamma di strumenti e librerie per la generazione delle traiettorie, la gestione della cinematica, la simulazione e il controllo dei robot. Prima di procedere ulteriormente, é però opportuno fornire una breve introduzione ai file URDF. Gli **URDF (Unified Robot Description Format)** sono dei file basati sul formato XML (eXtensible Markup Language) e costituiscono uno standard per rappresentare la geometria, la cinematica e altre caratteristiche dei robot all'interno di ROS. Grazie a questi file, é possibile definire la gerarchia dei **link** del robot, specificandone anche informazioni quali le dimensioni, la massa e l'inerzia. Inoltre, gli URDF consentono di modellare i **giunti** del robot, definendone i limiti di movimento e le relazioni cinematiche con i link adiacenti. Robotiq e Universal Robot mettono a disposizione i file URDF dei propri prodotti. Per ricreare l'ambiente di lavoro presente in laboratorio é stato necessario 'unire' la rappresentazione del robot con quella del sensore in un nuovo file URDF contenente anche caratteristiche proprie dell'ambiente, come il tavolo su cui é montato il braccio, il piano di lavoro e il muro.

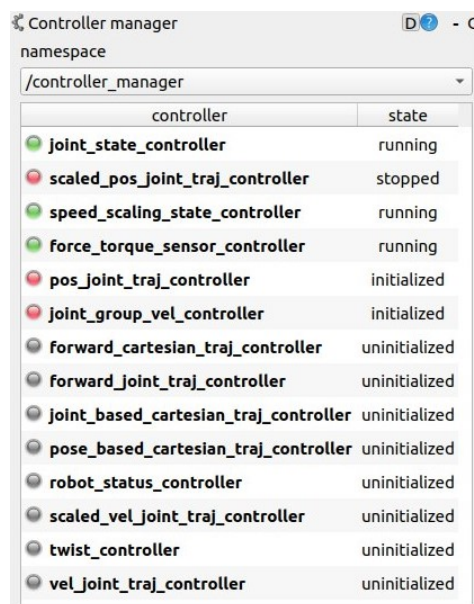


**Figura 2.7:** Simulazione dell'ambiente di lavoro su RViz

In Figura 2.7 viene mostrato l'ambiente di lavoro in cui sono state provate le applicazioni proposte. **RViz (ROS Visualization)** é uno strumento di visualizzazione 3D incluso in ROS che, oltre a consentire la visualizzazione dei movimenti del robot all'interno dell'ambiente, offre anche strumenti per interagire direttamente con esso. Per semplificare il processo di configurazione e setup del sistema, MoveIt mette a disposizione il **MoveIt Setup Assistant**, un software che fornisce un'interfaccia grafica per permettere agli utenti di generare i file di configurazione necessari all'utilizzo di MoveIt. In [12] la cartella `ur5_ft_moveit_config` é stata generata da MoveIt Setup Assistant a partire dal file `ur5_ft.urdf.xacro` (contenente la descrizione dell'ambiente) presente all'interno di `environment_description`. In `environment_manager` sono presenti dei **launch file** (file XML per l'avvio simultaneo di piú nodi e che permettono la definizione e il passaggio di parametri ad essi) che a cascata fanno partire nodi per il collegamento remoto del PC al robot, l'avvio di MoveIt e Rviz e l'inizializzazione del sensore. Sarà dunque sufficiente eseguire il comando `roslaunch environment_manager ur5_ft_load_all` per essere poi in grado di eseguire le applicazioni proposte nel Capitolo 4.

## 2.4 Controllori

L'UR5 possiede diversi **controllori** integrati per gestire il movimento e il funzionamento del robot.



The screenshot shows the 'Controller manager' window in ROS. It displays a table of controllers and their current states. The namespace is set to '/controller\_manager'.

controller	state
joint_state_controller	running
scaled_pos_joint_traj_controller	stopped
speed_scaling_state_controller	running
force_torque_sensor_controller	running
pos_joint_traj_controller	initialized
joint_group_vel_controller	initialized
forward_cartesian_traj_controller	uninitialized
forward_joint_traj_controller	uninitialized
joint_based_cartesian_traj_controller	uninitialized
pose_based_cartesian_traj_controller	uninitialized
robot_status_controller	uninitialized
scaled_vel_joint_traj_controller	uninitialized
twist_controller	uninitialized
vel_joint_traj_controller	uninitialized

Figura 2.8: Lista controllori UR5

In Figura 2.8, viene mostrata la lista dei controllori disponibili per manovrare l'UR5 insieme ai rispettivi stati di funzionamento. I controllori segnati in verde sono Read-Only controllers, ossia dei controllori che leggono solamente lo stato attuale del robot e lo pubblicano su un topic. Non c'è nessuna limitazione sul numero di controllori Read-Only in esecuzione nello stesso momento. Gli altri, invece, sono Commanding controllers, ossia controllori che consentono l'alterazione dello stato del robot. Non è possibile utilizzare più controllori di questo tipo contemporaneamente. MoveIt permette un controllo di tipo **posizionale**: ossia, internamente, calcola la traiettoria migliore per andare da un punto di partenza nello spazio ad un punto di arrivo. Una volta calcolata la traiettoria, con l'ausilio di `scaled_pos_joint_traj_controller` vengono modificati i valori dei giunti per consentire al robot di seguire la traiettoria specificata. Nelle applicazioni mostrate nel Capitolo 4 viene utilizzato anche il controllore di **velocità** `twist_controller`. Questo controllore riceve un comando di twist come input, che specifica la velocità di traslazione e rotazione lungo gli assi x, y e z. Il controllore, poi, lo traduce in comandi di controllo per i motori del robot. Essendo entrambi Commanding controllers, l'utilizzo di uno esclude l'utilizzo dell'altro. ROS mette a disposizione dei service per gestire i controllori attivi del robot. Ad esempio, `/controller_manager/switch_controller` si occupa di scambiare lo stato di esecuzione dei due controllori che riceve in input [13]. Tali service risultano, quindi, molto utili nelle applicazioni proposte perché permettono l'utilizzo del controllore più appropriato in base alle specifiche esigenze.

## **Capitolo 3**

### **Validazione del sensore**



## **Capitolo 4**

### **Applicazioni industriali**





## **Capitolo 5**

## **Conclusioni**



# Bibliografia

- [1] *Quigley, Morgan, et al. "ROS: an open-source Robot Operating System."*  
*ICRA workshop on open source software. Vol. 3. No. 3.2. 2009.*
- [2] *ROS Tutorials*, <http://wiki.ros.org/ROS/Tutorials>.
- [3] *Catkin Workspace*, <http://wiki.ros.org/ROS/Tutorials/InstallingandConfiguringROSEnvironment>.
- [4] *YouTube Tutorial*, <https://www.youtube.com/playlist?list=PLLSegLrePWgIbIrA4iehUQ-impvIXdd9Q>.
- [5] *Esempio topic e service*, <https://github.com/andreastocco01/ros/tree/main>.
- [6] *Creating ROS msg and srv* <http://wiki.ros.org/ROS/Tutorials/CreatingMsgAndSrv>.
- [7] *Download material for UR5* <https://www.universal-robots.com/cb3/>.
- [8] *Download FT300-S manual* <https://robotiq.com/support/ft-300-force-torque-sensor>.
- [9] *FT300-S driver* [https://github.com/andreastocco01/ft300\\_driver](https://github.com/andreastocco01/ft300_driver).
- [10] *Robotiq maintained repo* <https://github.com/TAMS-Group/robotiq>.
- [11] *MoveIt Tutorial* [https://ros-planning.github.io/moveit\\_tutorials/](https://ros-planning.github.io/moveit_tutorials/).
- [12] *Ambiente di lavoro* [https://github.com/andreastocco01/environment\\_setup](https://github.com/andreastocco01/environment_setup).
- [13] *Controller Manager* [http://wiki.ros.org/controller\\_manager](http://wiki.ros.org/controller_manager).