
Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione
Corso di Laurea in Ingegneria Informatica

Relazione per la prova finale

***«Interfacce di realtà aumentata per la Human-Robot Collaboration:
sviluppo e validazione di un sistema bidirezionale basato su ROS 2»***

Relatore: Prof. Stefano Ghidoni
Correlatore: Dott. Matteo Terreran, PhD

Laureando: Federico Compagno
Matricola n.: 2101752

Padova, 22/09/2026

Anno Accademico 2025 - 2026



Industria 4.0

Digitalizzazione e interconnessione avanzata delle linee produttive tramite Industrial IoT (IIoT): sensori e dispositivi connessi in rete che raccolgono e scambiano dati continuamente.



Human-Robot Collaboration (HRC)

Evoluzione dai robot industriali tradizionali a cobot operanti nello stesso spazio lavorativo senza barriere, unendo l'adattabilità e l'intelligenza umana con la precisione della macchina.

Stato dell'arte

Tecnologia	Intuitività	Percezione Spaziale 3D	Flessibilità Operativa
Interfaccia GUI su Monitor 2D	Media (Mouse/Touchscreen)	Indiretta (Proiezioni 2D)	Media (Stazione fissa)
Realtà Aumentata	Altissima (Puntamento 3D)	Diretta (Ologrammi 3D nel campo visivo)	Massima (Wireless)



ROS2

ROS 2

- Architettura modulare a nodi e topic
- Gestione trasformazioni spaziali (TF2)
- Comunicazione bidirezionale



MAGIC LEAP 2

- Visore AR ad alte prestazioni
- Controller per raycasting 3D
- Acquisizione immagini e streaming dati
- No integrazione nativa ROS 2



UNITY

- Ambiente di sviluppo 3D
- Integrazione Magic Leap SDK
- Rendering olografico e feedback visivo
- Gestione topic ROS



COBOT FRANKA-EMIKA

- Cobot a 7 gradi di libertà
- Elevata sensibilità e sicurezza
- Nativa integrazione ROS 2

OBIETTIVO DEL LAVORO

SCOPO PRINCIPALE: Realizzare un'infrastruttura ad alte prestazioni per lo streaming dati/video in tempo reale e il controllo robotico in contesti HRC.

1. Streaming

Invio continuo di dati e flussi di immagini
a bassa latenza tra ML2 e ROS 2

2. Integrazione ROS 2

Gestione trasformate spaziali,
comunicazione bidirezionale
(publisher/subscriber)

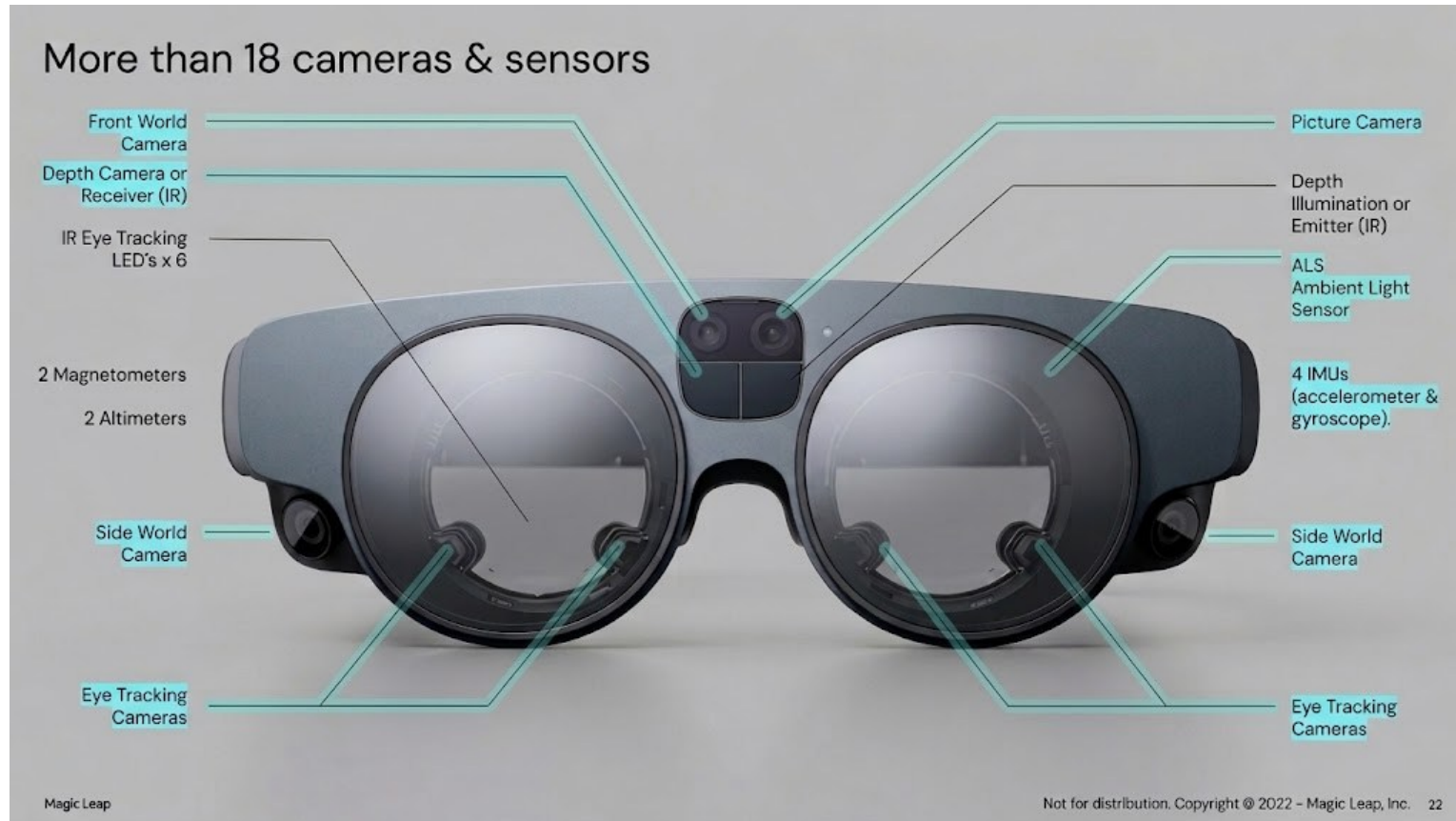
3. Puntamento 3D

Definizione della posa target nello spazio
3D tramite controller del Magic Leap 2

4. Feedback visivo AR

Rendering olografico della posizione
target

FOCUS: MAGIC LEAP 2



*Panoramica hardware di Magic Leap 2:
evidenziati i sensori e le camere di cui sono
stati estratti ed esposti i flussi dati.*

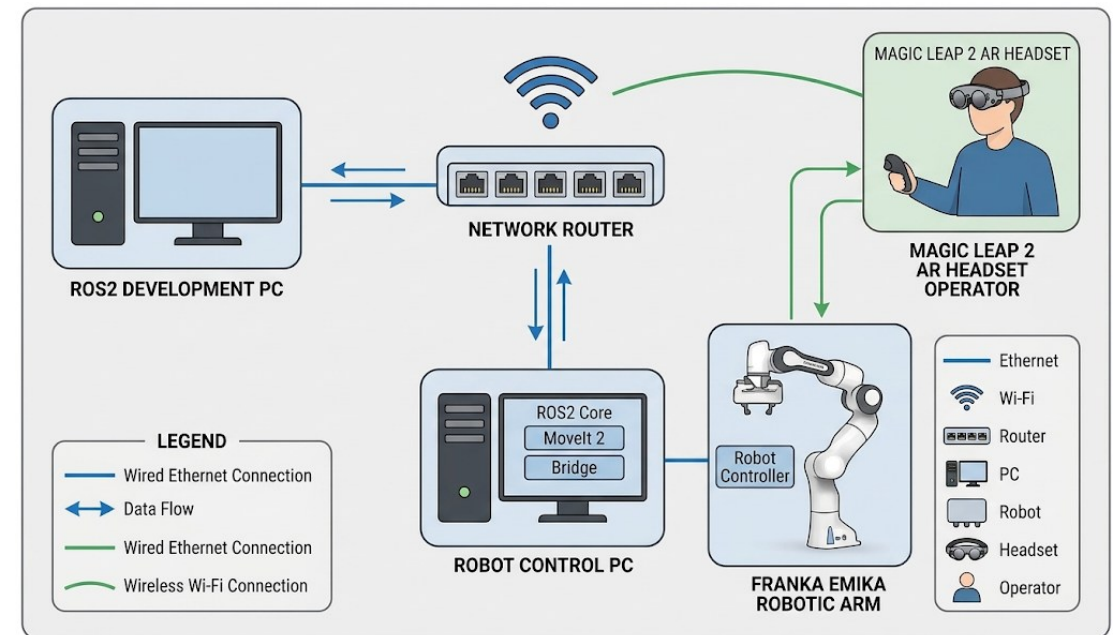
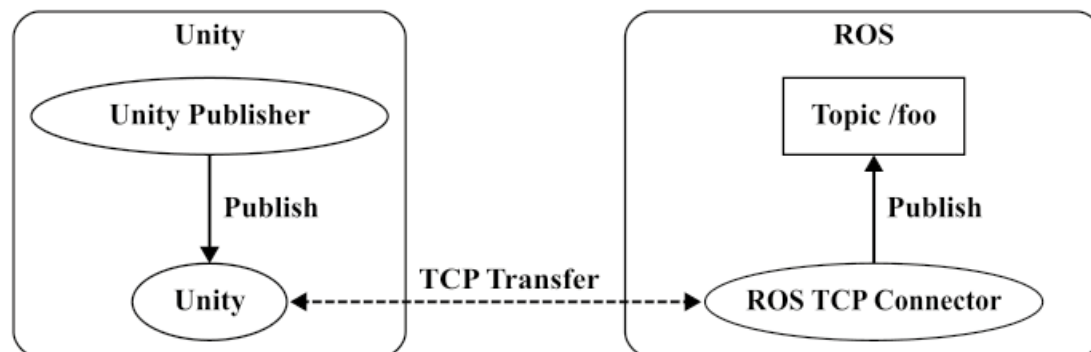
Magic Leap 2 - Unity App: Cattura il flusso video dalle telecamere e dai sensori e calcola la posa del raggio del controller 3D.



Ponte ROS-TCP-Connector: Canale di comunicazione socket ad alte prestazioni che serializza i messaggi C# in topic ROS 2.



Ecosistema Nodi ROS 2: Processa i frame video ed esegue il calcolo cinematico delle traiettorie.



Schema dell'infrastruttura di sistema: integrazione tra Magic Leap 2, PC di controllo ROS 2 / MoveIt 2 e manipolatore Franka Emika tramite rete locale Ethernet.

Tecnologia	Stream possibili	Frame rate	Formati possibili	Topic ROS 2
Picture Center	0: RGB camera	30, 60	JPEG	/magic_leap2/color/image_raw/compressed
	1: Mixed reality	30, 60	JPEG	/magic_leap2/mixed_reality/image_raw/compressed
Front World Camera	0	30	Grayscale	/magic_leap2/world_center/image_raw
	1	30	Grayscale	
Right World Camera	0	30	Grayscale	/magic_leap2/world_right/image_raw
	1	30	Grayscale	
Left World Camera	0	30	Grayscale	/magic_leap2/world_left/image_raw
	1	30	Grayscale	
Depth Camera	0: Short Range	1, 5	Depth32 DepthRaw	/magic_leap2/depth/image_raw /magic_leap2/infra/image_raw
	1: Long Range	5, 30, 60	Depth32 DepthRaw	/magic_leap2/depth/image_raw /magic_leap2/infra/image_raw
Eye Nasal Right Camera	0	30	Grayscale	/magic_leap2/eye_nasal_right/image_raw
Eye Nasal Left Camera	0	30	Grayscale	/magic_leap2/eye_nasal_left/image_raw
Eye Temple Right Camera	0	30	Grayscale	/magic_leap2/eye_temple_right/image_raw
Eye Temple Left Camera	0	30	Grayscale	/magic_leap2/eye_temple_left/image_raw

IMU	Tecnologia	Sorgenti possibili	Topic ROS 2
	Gyroscope	Left, Right, Compute_Pack	/magic_leap2/gyro_<source>/imu
	Accelerometer	Left, Right, Compute_Pack	/magic_leap2/accel_<source>/imu
	Light Sensor	/	/magic_leap2/light_sensor

Parametri intrinseci dei sensori ottici

- **Estrazione automatica:** Acquisizione dei parametri intrinseci di calibrazione di ciascuna fotocamera direttamente tramite le API di Magic Leap 2.
- **Pubblicazione ROS 2:** Invio sincronizzato tramite topic standard *sensor_msgs/msg/CameraInfo*.

Configurazione Dinamica del Bridge

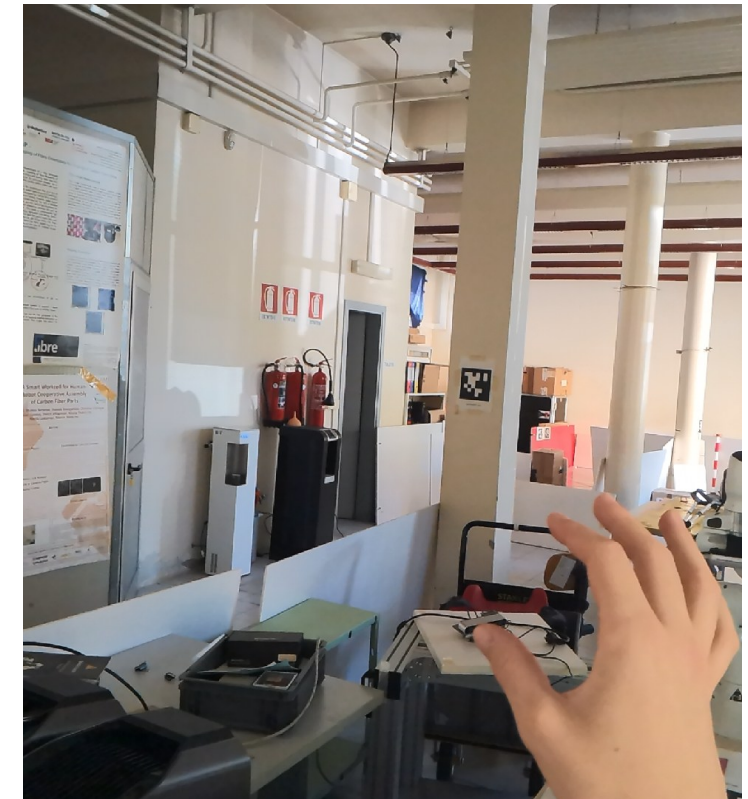
- **Disaccoppiamento da Unity:** Configurazione flessibile degli stream e sensori attivi senza dover ricompilare o modificare manualmente l'inspector di Unity.
- **Pipeline basata su file:** Un nodo parser converte un file di configurazione testuale in formato JSON, passandolo automaticamente all'inspector per abilitare o disabilitare selettivamente la pubblicazione dei singoli stream.



- **Camera:** Front World Camera
- **Stream:** 0
- **Format:** Grayscale
- **Frame rate:** 30 fps



- **Camera:** Depth Camera
- **Stream:** 1 (long range)
- **Format:** Depth32
- **Frame rate:** 5 fps



- **Camera:** Picture Center
- **Stream:** 0 (RGB Camera)
- **Format:** JPEG
- **Frame rate:** 30 fps

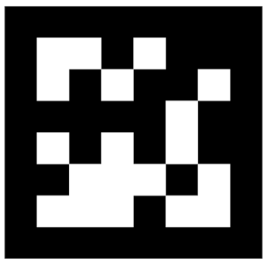
Ciascuna camera pubblica ad ogni frame sul topic **/tf** la propria posa rispetto all'origine globale **magicleap_world**, ossia il sistema di coordinate radice istanziato dal Magic Leap 2 al momento dell'avvio dell'applicazione.



TOPIC /TF

Ruolo e funzione

- Canale standard per pubblicare la posa tra sistemi di riferimento
- Memorizza trasformazioni nel tempo permettendo interpolazioni ed estrapolazioni tra frame.
- Struttura ad albero (TF Tree)

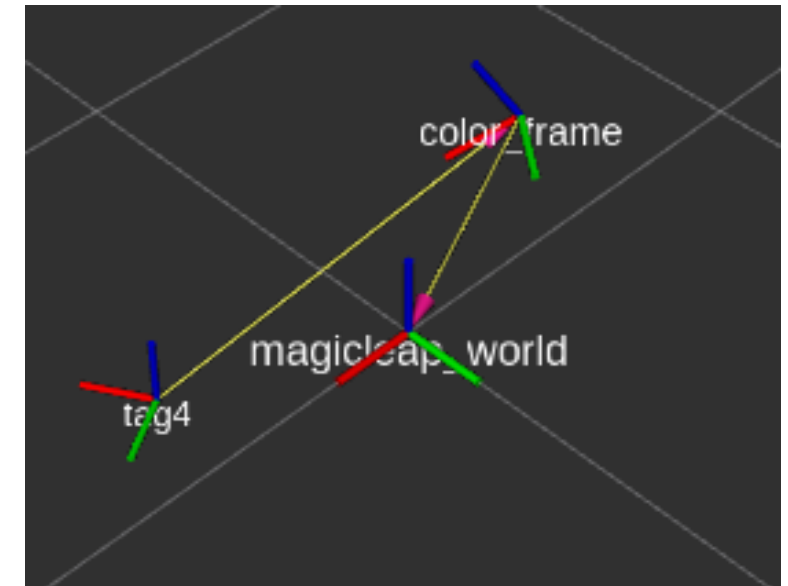


AprilTag

APRILTAG

Attraverso un nodo ROS 2 dedicato, le telecamere del Magic Leap 2 tracciano l'**AprilTag**, fornendo un'ancora spaziale fissa per unificare il frame del visore con quello del robot.

$$T_{\text{tag}}^{\text{magicleap_world}} = T_{\text{camera}}^{\text{magicleap_world}} \cdot T_{\text{tag}}^{\text{camera}}$$



Rappresentazione in RViz2 della catena di trasformazioni per la localizzazione spaziale: stima della posa del marker (tag4) rispetto al frame globale del visore via nodo AprilTag.

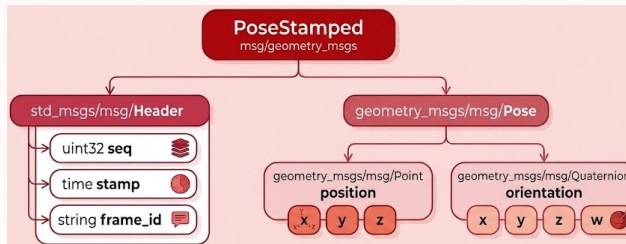


SELEZIONE DEL TARGET IN REALTA AUMENTATA

- **Piano Virtuale:** GameObject Unity ancorato al frame dell'AprilTag
- **Raycasting:** calcolo intersezione 3D (x, y, z) da controller
- **Feedback AR:** rendering sfera 3D sul punto mirato

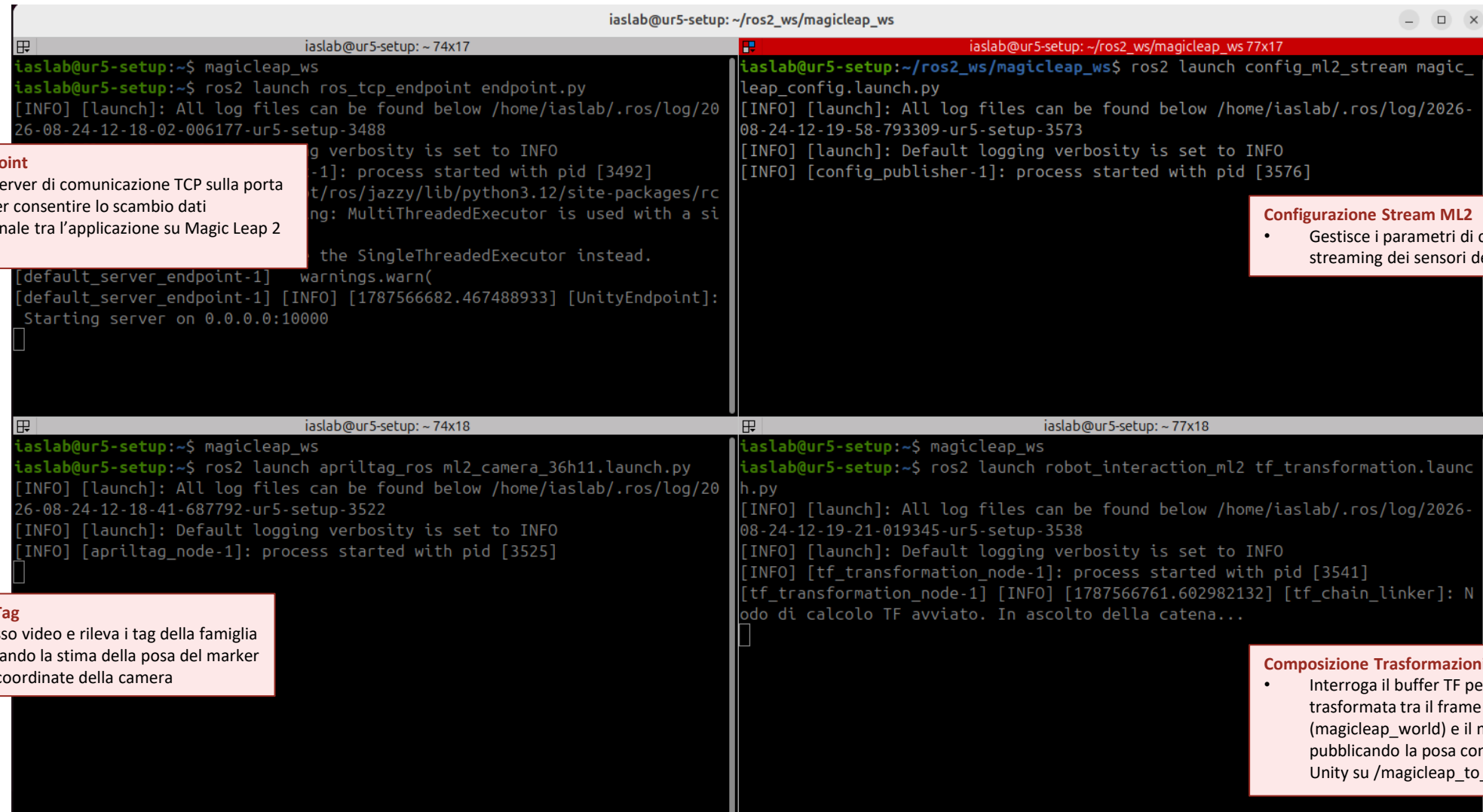
COMUNICAZIONE ROS 2

- **Topic:** /target_ball_pose
- **Tipo:** [geometry_msgs/msg/PoseStamped](#)



ESECUZIONE MANIPOLATORE

- **Ricezione:** callback su messaggio PoseStamped
- **TF2 Transform:** da magicleap_world a panda_link0 (frame base del robot)
- **MoveIt 2:** pianificazione cinematica inversa e invio traiettoria a Franka Panda



```

iaslab@ur5-setup: ~/ros2_ws/magicleap_ws
iaslab@ur5-setup:~$ magicleap_ws
iaslab@ur5-setup:~$ ros2 launch ros_tcp_endpoint endpoint.py
[INFO] [launch]: All log files can be found below /home/iaslab/.ros/log/2026-08-24-12-18-02-006177-ur5-setup-3488
[INFO] [launch]: Default logging verbosity is set to INFO
[INFO] [default_server_endpoint-1]: process started with pid [3492]
[INFO] [default_server_endpoint-1]: using the SingleThreadedExecutor instead.
[default_server_endpoint-1] warnings.warn(
[default_server_endpoint-1] [INFO] [1787566682.467488933] [UnityEndpoint]:
Starting server on 0.0.0.0:10000

iaslab@ur5-setup: ~/ros2_ws/magicleap_ws
iaslab@ur5-setup:~$ ros2 launch config_ml2_stream magic_
leap_config.launch.py
[INFO] [launch]: All log files can be found below /home/iaslab/.ros/log/2026-08-24-12-19-58-793309-ur5-setup-3573
[INFO] [launch]: Default logging verbosity is set to INFO
[INFO] [config_publisher-1]: process started with pid [3576]

iaslab@ur5-setup: ~/ros2_ws/magicleap_ws
iaslab@ur5-setup:~$ magicleap_ws
iaslab@ur5-setup:~$ ros2 launch apriltag_ros ml2_camera_36h11.launch.py
[INFO] [launch]: All log files can be found below /home/iaslab/.ros/log/2026-08-24-12-18-41-687792-ur5-setup-3522
[INFO] [launch]: Default logging verbosity is set to INFO
[INFO] [apriltag_node-1]: process started with pid [3525]

iaslab@ur5-setup: ~/ros2_ws/magicleap_ws
iaslab@ur5-setup:~$ magicleap_ws
iaslab@ur5-setup:~$ ros2 launch robot_interaction_ml2 tf_transformation.launch.py
[INFO] [launch]: All log files can be found below /home/iaslab/.ros/log/2026-08-24-12-19-21-019345-ur5-setup-3538
[INFO] [launch]: Default logging verbosity is set to INFO
[INFO] [tf_transformation_node-1]: process started with pid [3541]
[tf_transformation_node-1] [INFO] [1787566761.602982132] [tf_chain_linker]: N
odo di calcolo TF avviato. In ascolto della catena...
  
```

ROS-TCP-Endpoint

- Avvia il server di comunicazione TCP sulla porta 10000 per consentire lo scambio dati bidirezionale tra l'applicazione su Magic Leap 2 e ROS 2

Configurazione Stream ML2

- Gestisce i parametri di configurazione per lo streaming dei sensori del visore

Rilevamento AprilTag

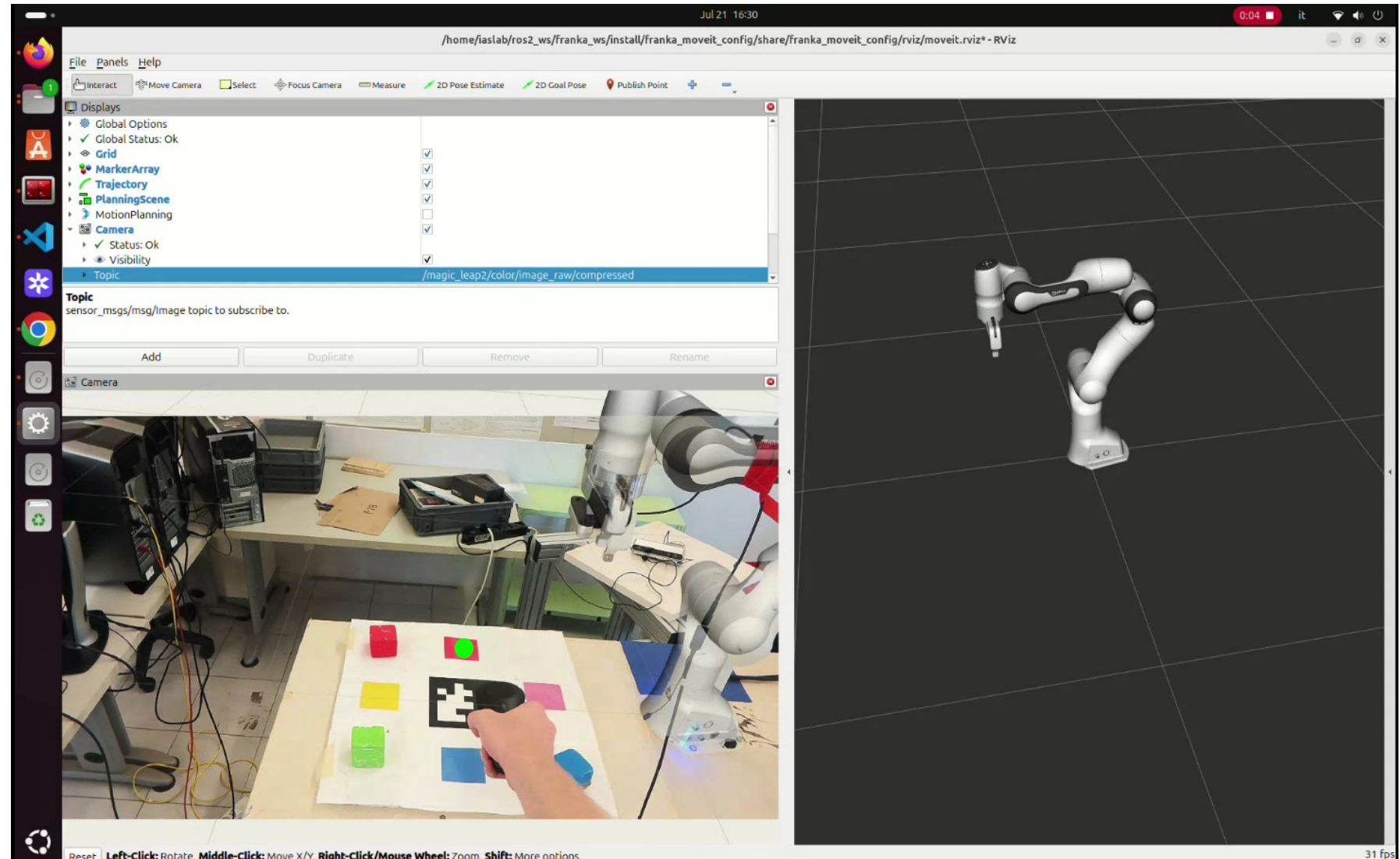
- Elabora il flusso video e rileva i tag della famiglia 36h11, calcolando la stima della posa del marker rispetto alle coordinate della camera

Composizione Trasformazioni TF

- Interroga il buffer TF per calcolare la trasformata tra il frame globale del visore (magicleap_world) e il marker (tag4), pubblicando la posa combinata a 20 Hz verso Unity su /magicleap_to_tag4_pose

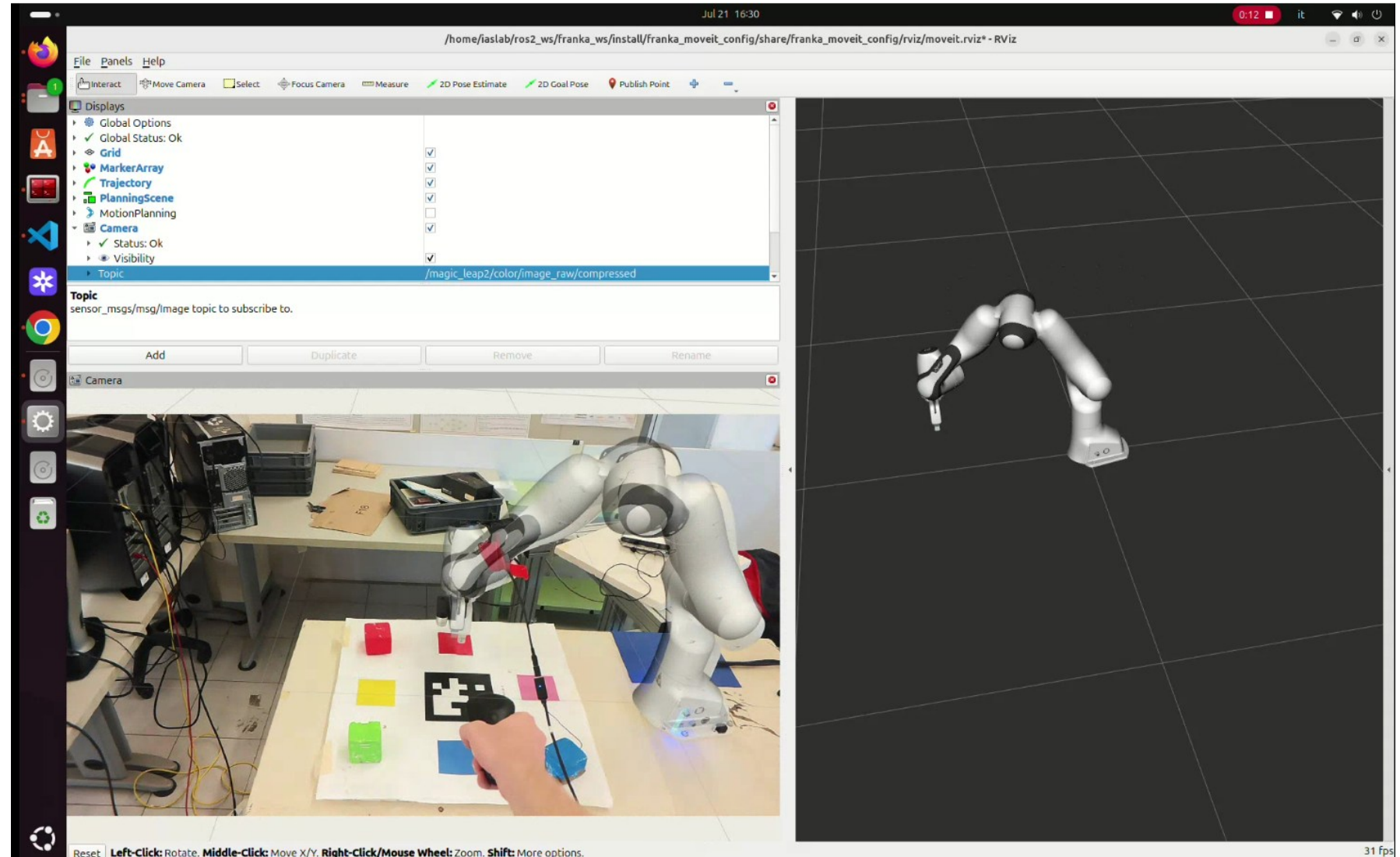
1. Puntamento 3D (Selezione Target)

- L'operatore individua la posizione desiderata tramite *raycasting* dal controller del Magic Leap 2.
- Il punto target (sfera verde) viene proiettato sul piano calibrato con AprilTag e inviato a ROS 2 (/target_ball_pose).



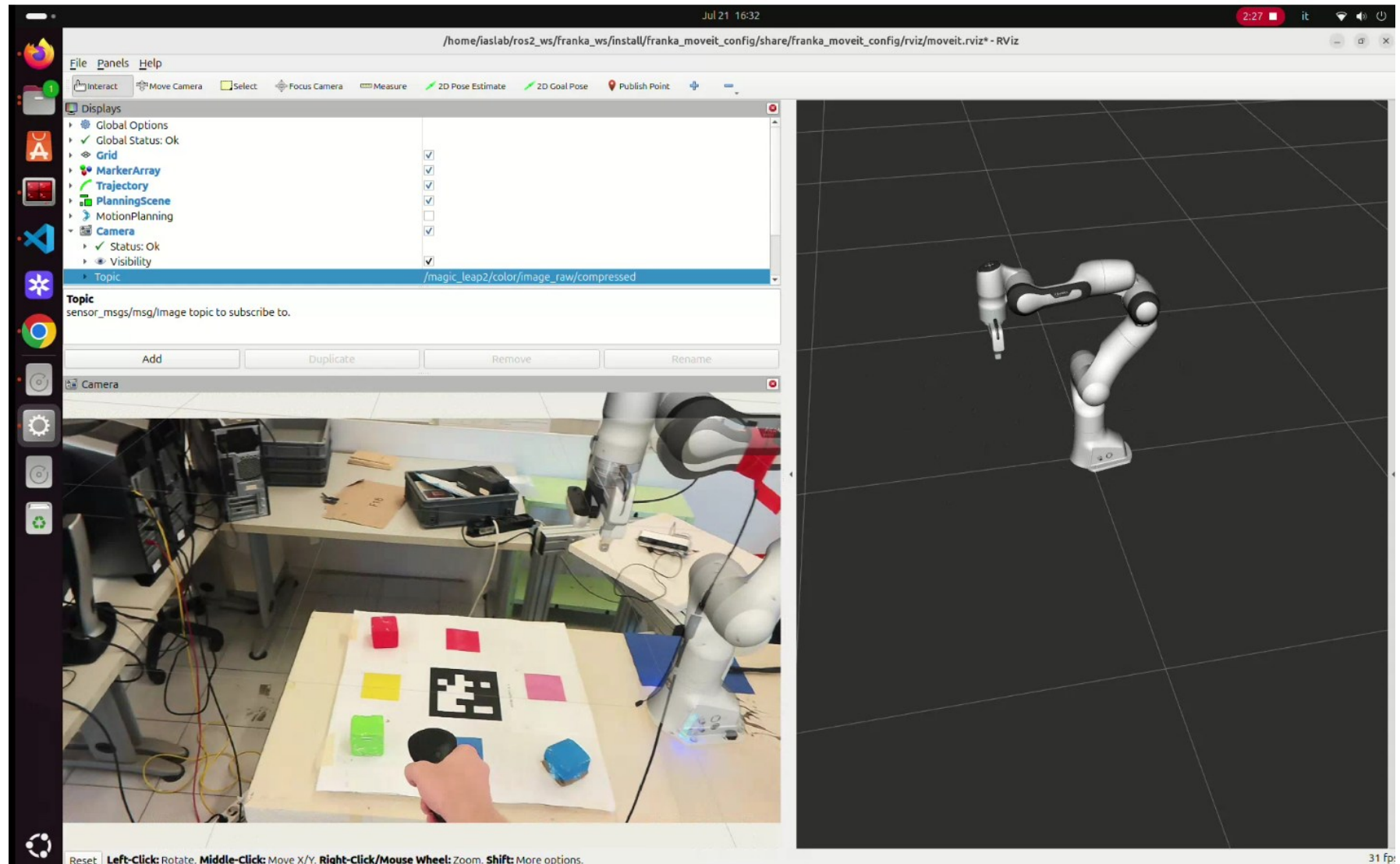
2. Pianificazione e Movimento

- MoveIt 2 calcola la cinematica inversa e pianifica una traiettoria ottimale priva di collisioni.
- Il cobot Franka Emika Panda esegue il movimento raggiungendo con precisione il target indicato.



3. Ritorno in sicurezza

- Completato il compito sul target, il braccio robotico rientra automaticamente in configurazione di riposo/sicurezza.
- Il sistema libera la zona di lavoro e si predispone per la ricezione del comando successivo.



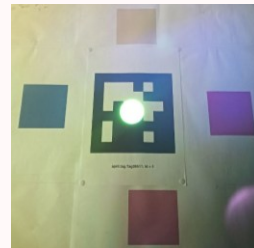
PRESTAZIONI E RISULTATI

1. Comunicazione e streaming video

- **Video in tempo reale:** le immagini e i dati catturati dal visore arrivano senza blocchi o ritardi visibili anche con più stream video contemporanei
- **Configurazione semplice:** possibilità di scegliere quali sensori e telecamere attivare tramite un file di testo senza dover modificare il progetto Unity

2. Allineamento spaziale

- **Aggancio preciso alla realtà:** grazie all'AprilTag, il visore sa in tempo reale dove si trova rispetto al tavolo di lavoro e al robot
- **Nessun disallineamento nel tempo:** gli ologrammi e i punti virtuali rimangono ben allineati agli oggetti reali anche se l'operatore si muove nella stanza



DEMO: allineamento e tracciamento real-time della sfera 3D sulla posizione del marker.

3. Controllo intuitivo del robot

- **Interazione naturale e conferma visiva immediata:** l'operatore seleziona un punto sul tavolo, evidenziato da una sfera virtuale, usando semplicemente il controller come puntatore
- **Movimento automatico e sicuro:** il robot riceve le coordinate del punto e calcola da solo la traiettoria migliore per raggiungerlo senza collisioni

OBIETTIVI RAGGIUNTI

- ✓ Infrastruttura bidirezionale fluida
- ✓ Localizzazione spaziale precisa
- ✓ Interazione HRI Intuitiva

POSSIBILI SVILUPPI FUTURI

-  Pipeline completa di pick-and-place autonomo
-  Controllo tramite gesti e hand-tracking
-  Eye tracking per l'intent prediction

LAVORI CORRELATI

- [HoloLens 2 Sensor Streaming – Stevens Institute of Technology](#)
- [HRC: An Augmented Reality Toolkit for Bi-Directional – University of Basilicata](#)
- [A 3D Mixed Reality Interface for Human-Robot Teaming – ETH Zurich](#)
- [RoSTAR: ROS-based Telerobotic Control via Augmented Reality – IEEE MMSP 2020](#)

SITOGRAFIA

- ❑ [Magic Leap 2 Developer Docs \(Unity OpenXR\)](#)
- ❑ [ROS-TCP-Endpoint \(GitHub Repository\)](#)
- ❑ [ROS 2 Documentation: Jazzy](#)
- ❑ [MoveIt 2 framework for ROS 2 \(GitHub Repository\)](#)
- ❑ [Come usare il Bridge \(GitHub Repository\)](#)
- ❑ [Robot Interaction Repository \(GitHub Repository\)](#)