



# UNIVERSITÀ DI PISA

DEPARTMENT OF COMPUTER SCIENCE

**Master Degree in Computer Science**

ARTIFICIAL INTELLIGENCE

## **A Data Collection System for Ground-Truth Mass Distribution Learning**

Candidato

**Michele Morisco**

Relatori

**Gianpaolo Palma**

**Daniela Giorgi**

**A.Y 2025-2026**

# OBIETTIVI

- Realizzare un sistema hardware e software per acquisire i dati necessari per stimare le informazioni sulla distribuzione di massa di un oggetto.

# OBIETTIVI

- Realizzare un sistema hardware e software per acquisire i dati necessari per stimare le informazioni sulla distribuzione di massa di un oggetto.
- Sviluppare un sistema veloce, scalabile e automatico
- Valutare l'accuratezza, riducendo al minimo gli errori nei risultati

# DISTRIBUZIONE DI MASSA

Descrive come la materia è distribuita all'interno di un sistema o di un corpo.



Centro di Massa (CM)

=

Punto dove si assume sia concentrata  
tutta la massa  
Utile per analizzare il movimento

Tensore di inerzia

=

Descrive la distribuzione di massa  
attorno al suo CM  
Fondamentale per l'analisi del moto  
rotazionale

# DISTRIBUZIONE DI MASSA

## Perché?

- Mancanza di strumenti e dati che definiscono i parametri inerziali
- Migliorare il digital twin dell'oggetto, consentendo una simulazione più realistica
- Supportare la simulazione con comportamenti fisici plausibili e feedback agli utenti
- Realtà Estesa (XR) applicata alla riabilitazione e a patologie motorie.



# BACKGROUND

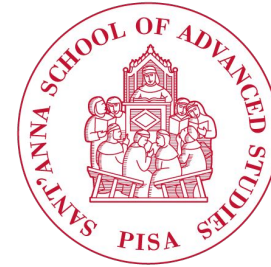


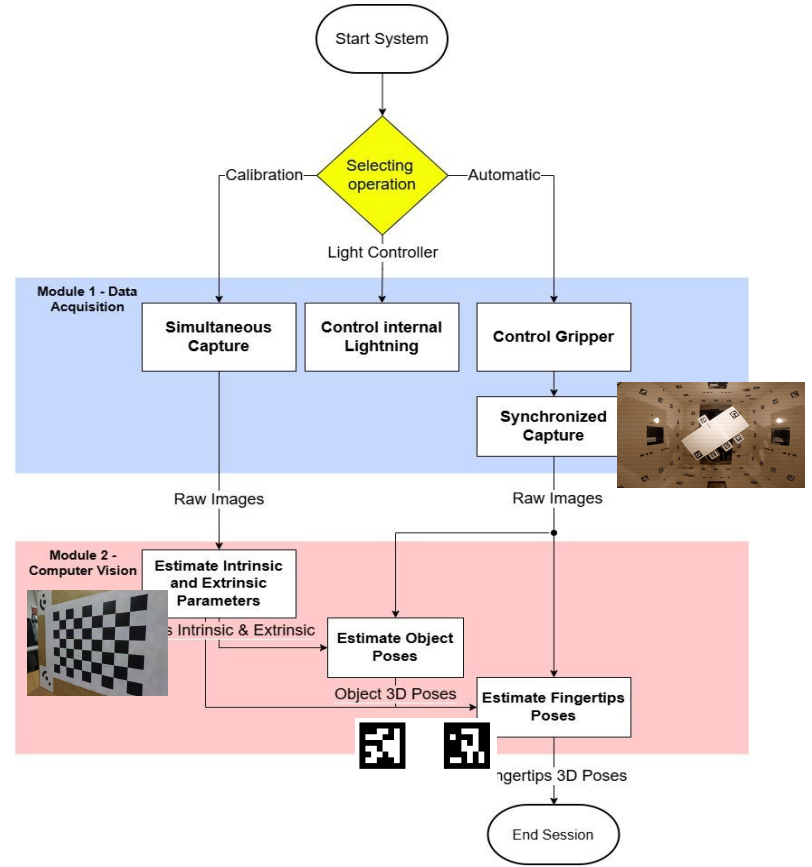
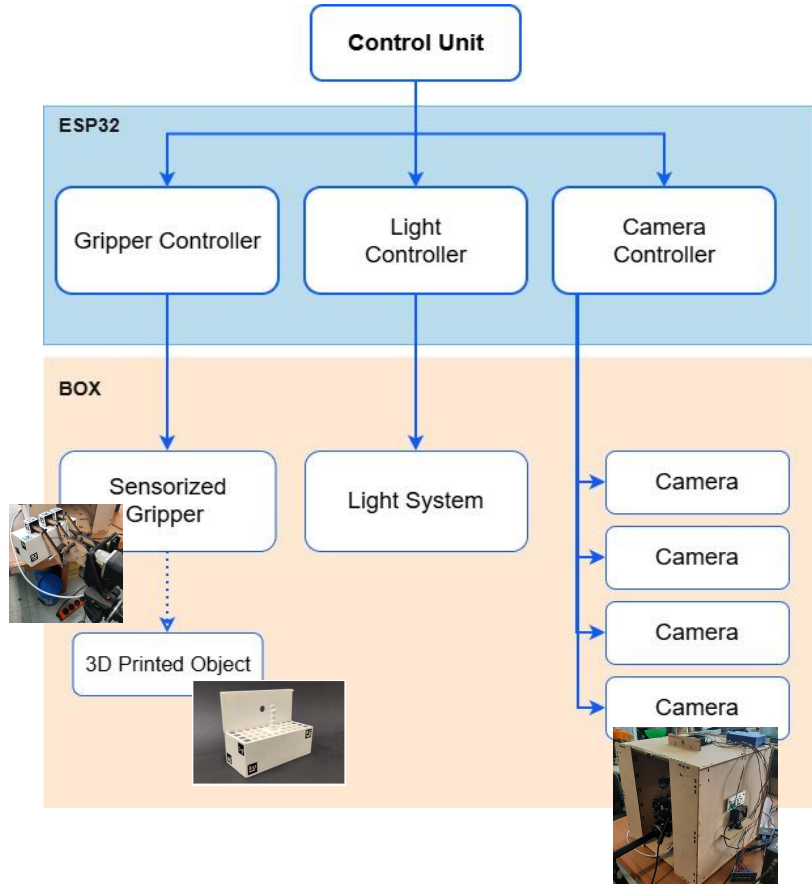
**SUN** (Social and hUman ceNtered) XR è un progetto che mira a ricercare e sviluppare soluzioni di Realtà Estesa che integrano il mondo fisico a quello virtuale in modo convincente, da una prospettiva umana e sociale.

# BACKGROUND

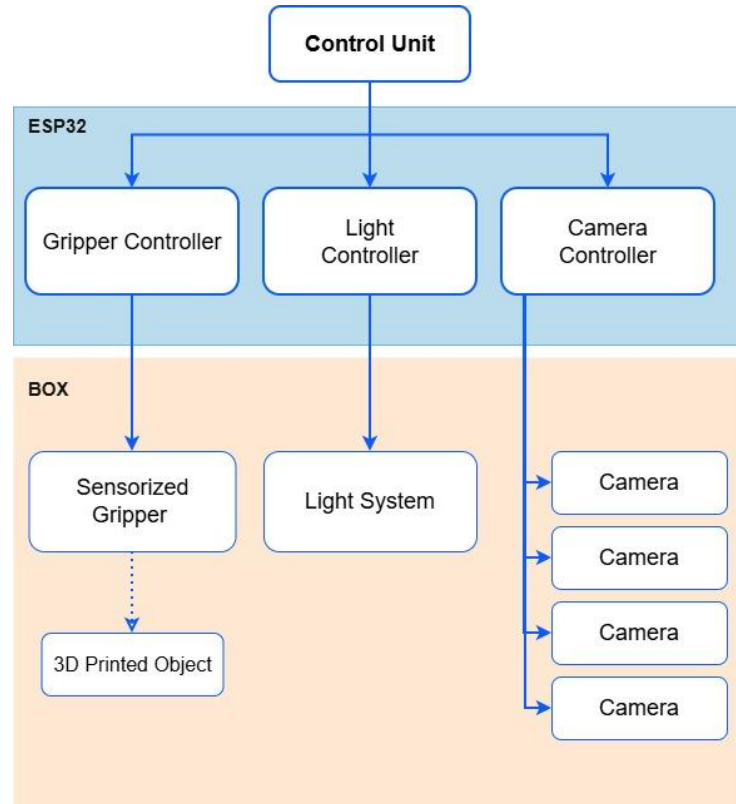


↔  
in collaborazione con

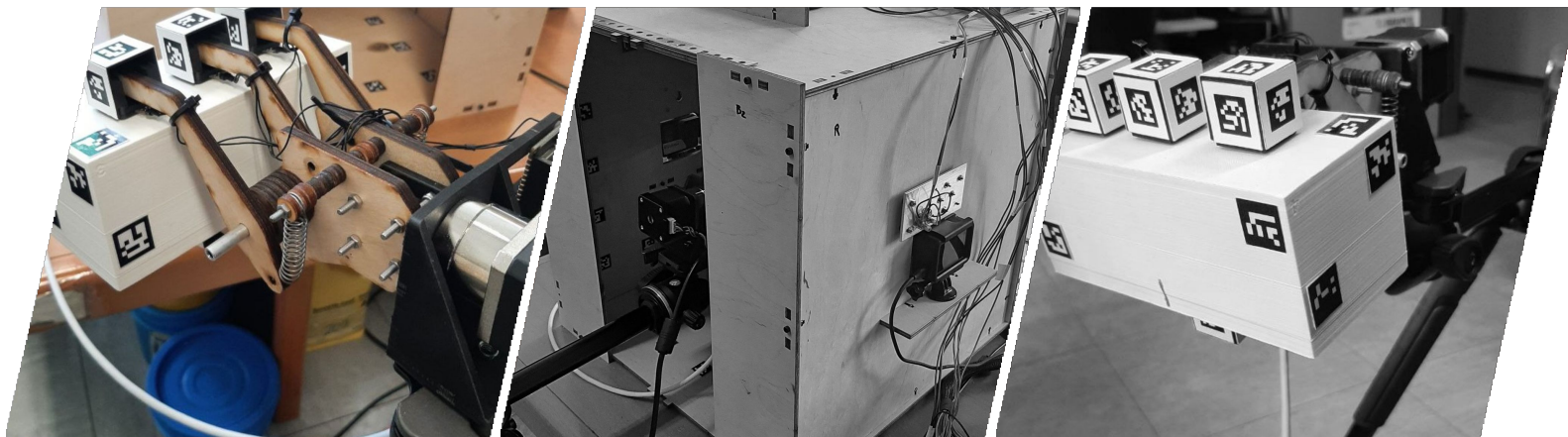




# ARCHITETTURA HARDWARE



# PASSIVE HAND-SHAPED GRIPPER



# PASSIVE HAND-SHAPED GRIPPER



Sensore di pressione sensibile alla forza



Molla

Motore Passo-Passo

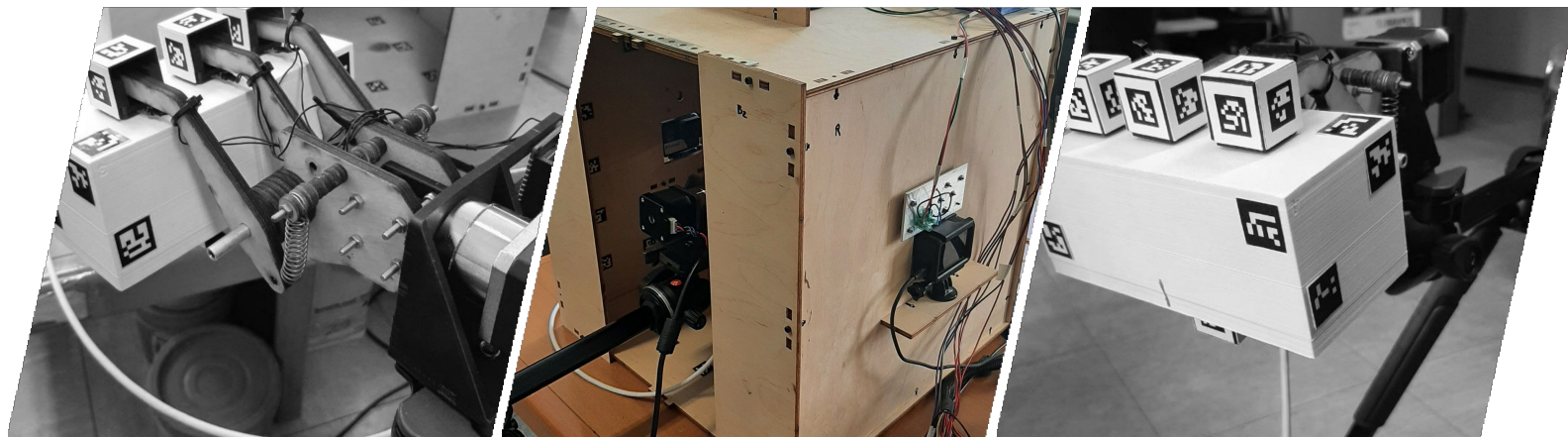
Gripper come approssimazione della mano umana

Pollice caricato a molla e tre dita fisse

Ogni dito ha un sensore di pressione

Motore passo-passo per rotazione del gripper intorno all'asse di pronosupinazione

# IMAGE-BASED ACQUISITION BOX

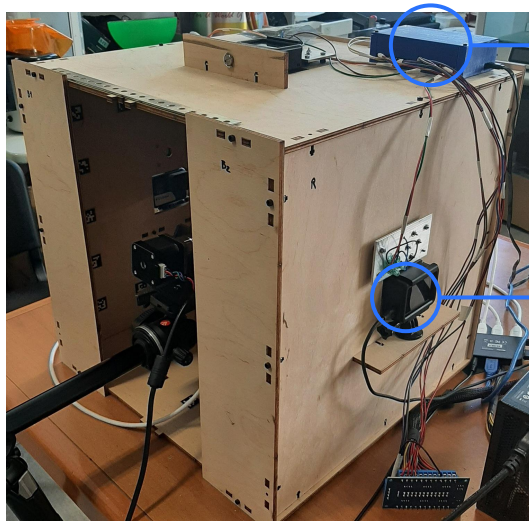


# IMAGE-BASED ACQUISITION BOX

Scatola di compensato provvista di un sistema di illuminazione LED

4 telecamere GoPro sui lati

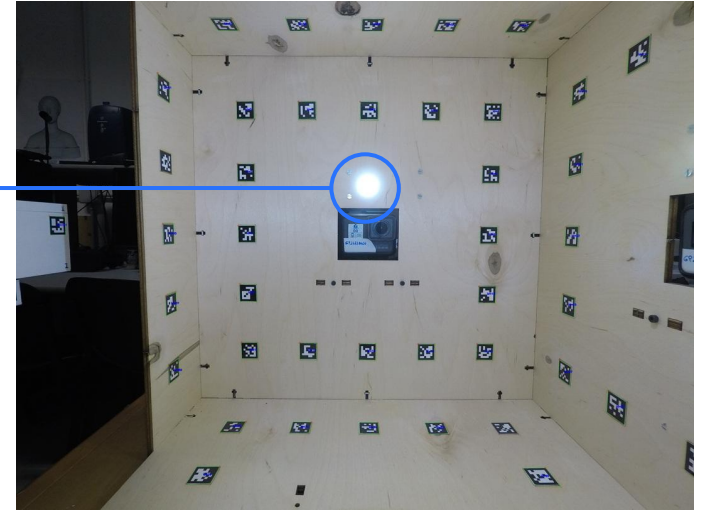
Riduce le influenze da fattori esterni e facilita la calibrazione//acquisizione



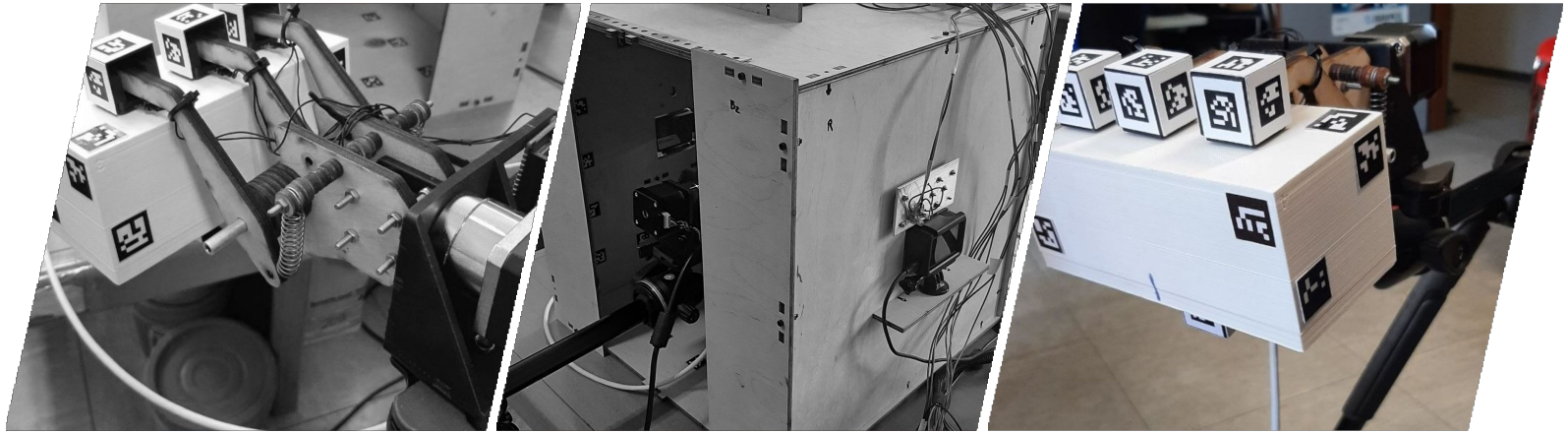
ESP32 microcontrollore

Camera GoPro

Sistema illuminazione



# MODULAR 3D PRINTED OBJECT

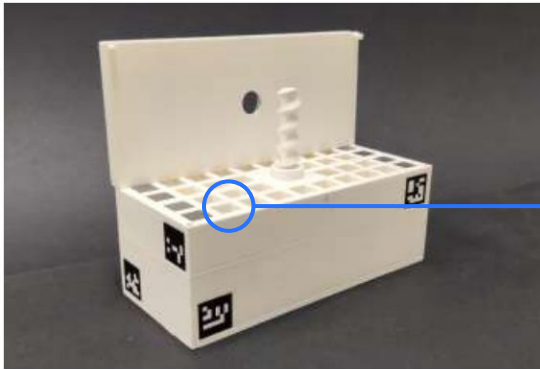


# MODULAR 3D PRINTED OBJECT

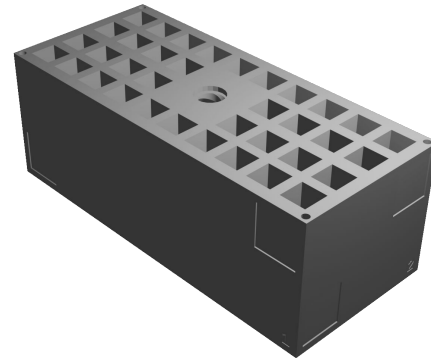
Parallelepipedo stampato in 3D

36 cavità per inserire barre di ferro

Possibilità di diverse configurazioni per la distribuzione della massa



Cavità per inserimento barra



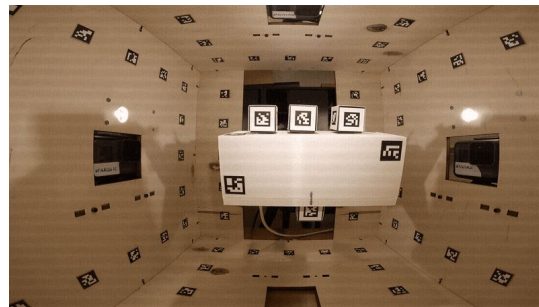
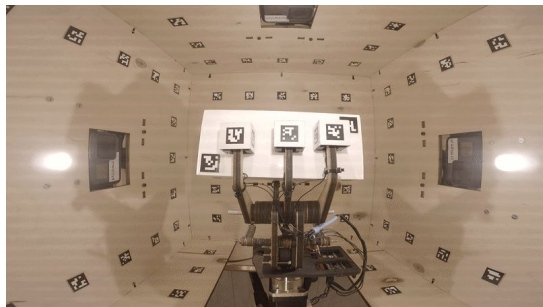
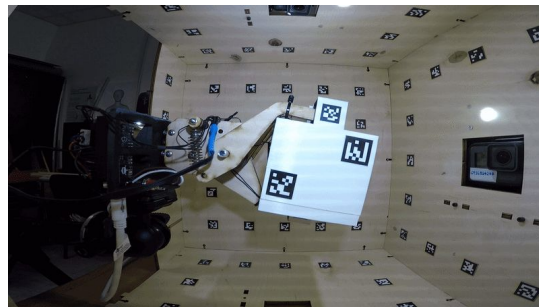
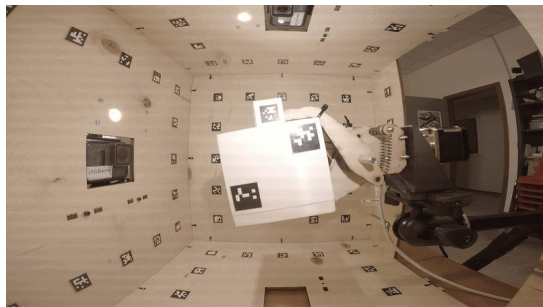
# ARCHITETTURA SOFTWARE



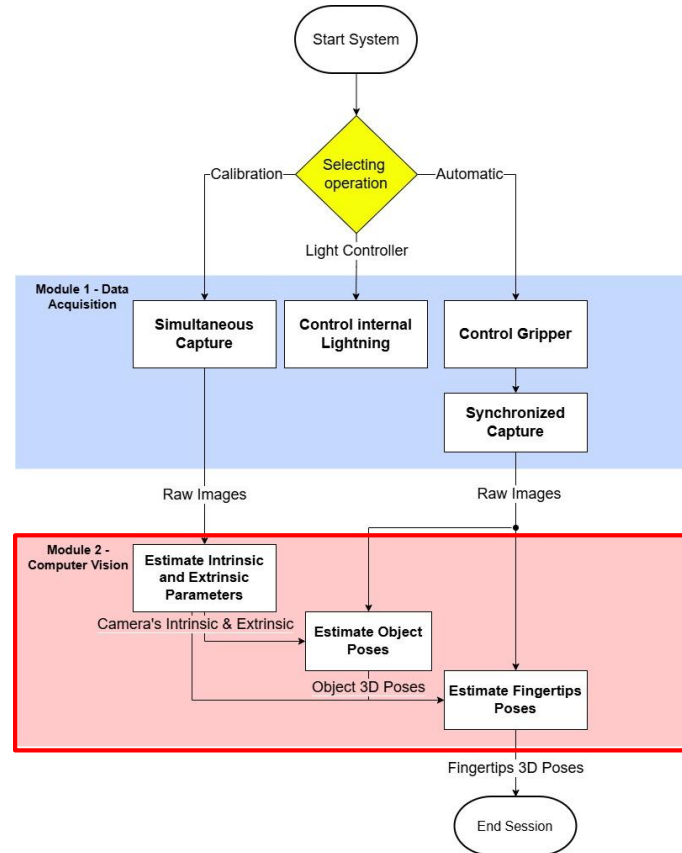
# MODULO DATA ACQUISITION



# MODULO DATA ACQUISITION

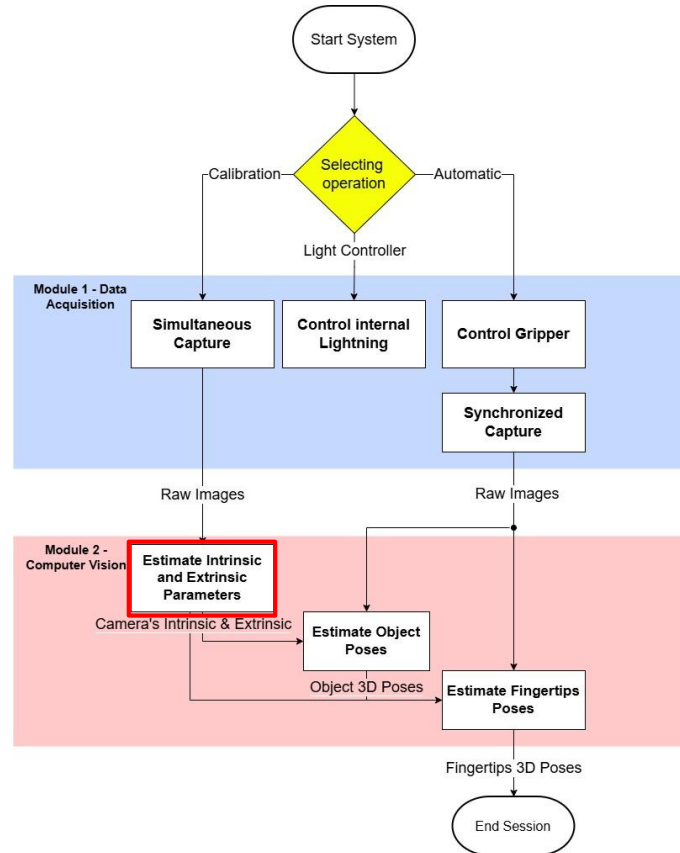


# MODULO COMPUTER VISION

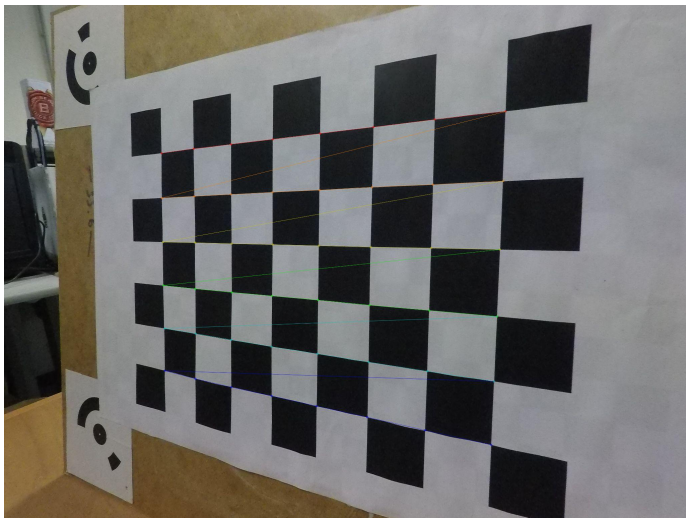


→ Stima punto contatto tra sensore e superficie oggetto

# STIMA PARAMETRI INTRINSECI/ESTRINSECI



# CALIBRAZIONE CAMERA



Chessboard Corners Detection

$$K = \begin{bmatrix} f_x & s & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$f_x, f_y$  è la lunghezza focale, orizzontale e verticale.

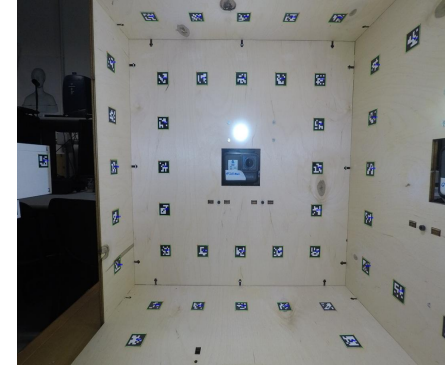
$c_x, c_y$  è il punto principale che rappresenta il centro ottico del sensore.

$s$  è il coefficiente di skew.

La calibrazione della camera, per mezzo di una scacchiera, permette di stimare la matrice della camera  $K$  e i coefficienti di distorsione.

Una calibrazione precisa  $\longrightarrow$  garantisce che gli oggetti appaiono con proporzione e dimensione corretta, prevedendo distorsioni

# MARKER ARUCO



**Object points**  
+  
**Image Points**

Punti di riferimento affidabili per i sistemi di computer vision

Identificazione robusta dei marker

Dizionario ID - pattern

Perspective-n-Point (PnP) stima la posizione dell'oggetto da un insieme di object points, usando gli intrinseci della camera.

# STIMA POSIZIONE CAMERA



ArUco Marker Detection



`cv::solvePnP()`



$$x = K[R|t]X$$

`rvec`

`tvec`

# STIMA POSIZIONE CAMERA



ArUco Marker Detection



`cv::solvePnP()`



$$x = K[R|t]X$$

`rvec`

`tvec`

# STIMA POSIZIONE CAMERA



ArUco Marker Detection



`cv::solvePnP()`

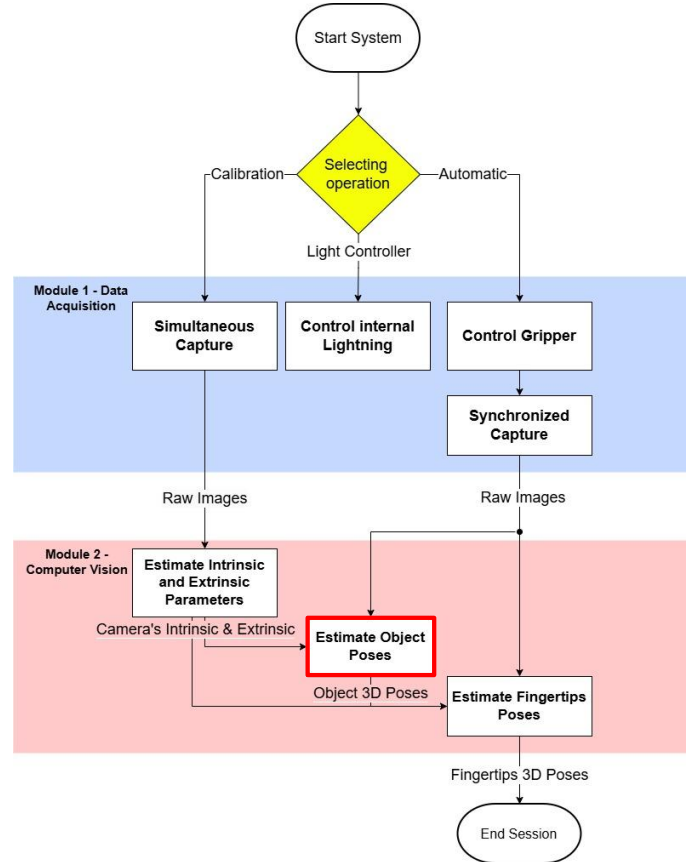


$$x = K[R|t]X$$

**rvec**

**tvec**

# STIMA POSIZIONE OGGETTO



# STIMA POSIZIONE OGGETTO

$$\min_{t_x, t_y, t_z, \alpha, \beta, \gamma} \sum \|p - KCO(t_x, t_y, t_z, \alpha, \beta, \gamma)P\|^2$$



`cv::LMSolver::Callback`



`SolveObjectPose` class



$$\begin{matrix} & \mathbf{R} & & \\ \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & & \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \\ 1 \end{bmatrix} & \mathbf{t} \end{matrix}$$

# STIMA POSIZIONE OGGETTO



$$\min_{t_x, t_y, t_z, \alpha, \beta, \gamma} \sum \|p - KCO(t_x, t_y, t_z, \alpha, \beta, \gamma)P\|^2$$



cv::LMSolver::Callback

-----> SolveObjectPose class



$$\begin{matrix} & \mathbf{R} & & \\ \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & & \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \\ 1 \end{bmatrix} & \mathbf{t} \end{matrix}$$

# STIMA POSIZIONE OGGETTO



$$\min_{t_x, t_y, t_z, \alpha, \beta, \gamma} \sum \|p - KCO(t_x, t_y, t_z, \alpha, \beta, \gamma)P\|^2$$



`cv::LMSolver::Callback`

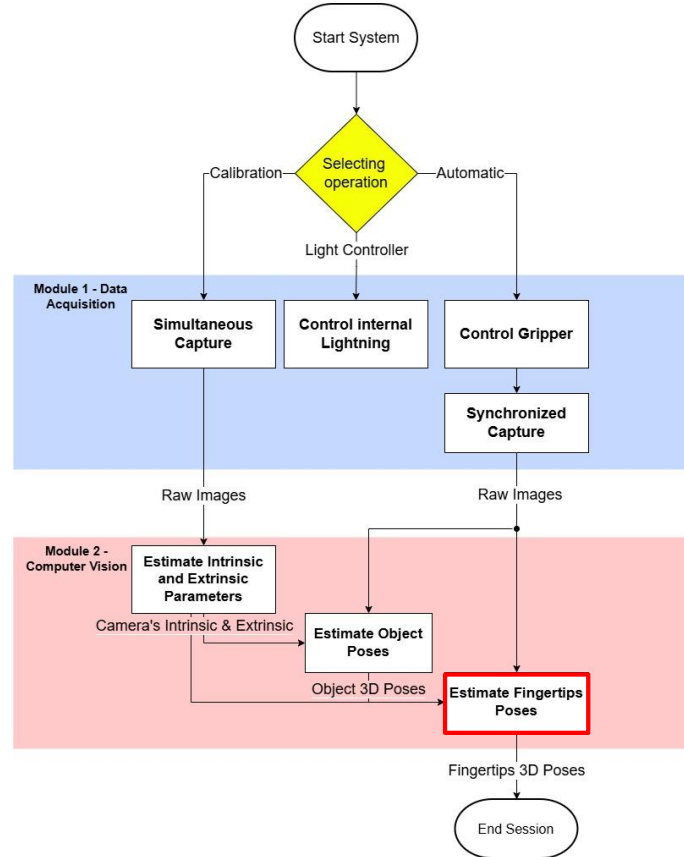
`SolveObjectPose` class

$$\begin{matrix} \mathbf{R} \\ \mathbf{t} \end{matrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ottimizzatore non  
lineare LevMar

$$J_f = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x_1} & \frac{\partial f_m}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial x_n} \end{pmatrix}$$

# STIMA POSIZIONE DITA



# STIMA POSIZIONE DITA

$$\min_{t_x, t_y, t_z, \alpha, \beta, \gamma} \sum \|p - KCOF(t_x, t_y, t_z, \alpha, \beta, \gamma)P\|^2$$



`cv::LMSolver::Callback`



`ComputeFingerPose` class



$$\begin{matrix} \mathbf{R} \\ \mathbf{t} \end{matrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

# STIMA POSIZIONE DITA



$$\min_{t_x, t_y, t_z, \alpha, \beta, \gamma} \sum \|p - KCOF(t_x, t_y, t_z, \alpha, \beta, \gamma)P\|^2$$



`cv::LMSolver::Callback`  $\dashrightarrow$  `ComputeFingerPose` class  $\longrightarrow$

$$\begin{matrix} \mathbf{R} \\ \mathbf{t} \end{matrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

# STIMA POSIZIONE DITA



$$\min_{t_x, t_y, t_z, \alpha, \beta, \gamma} \sum \|p - KCO F(t_x, t_y, t_z, \alpha, \beta, \gamma) P\|^2$$



`cv::LMSolver::Callback`

`-----> ComputeFingerPose class`



**R**

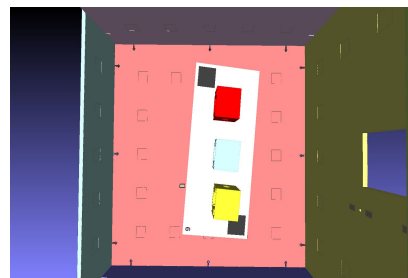
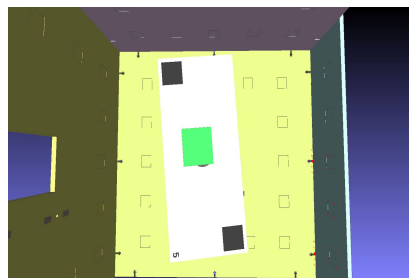
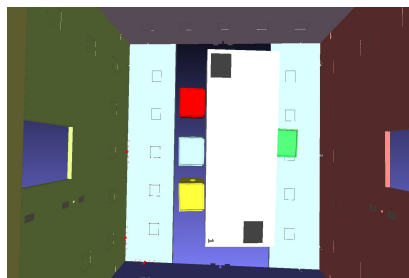
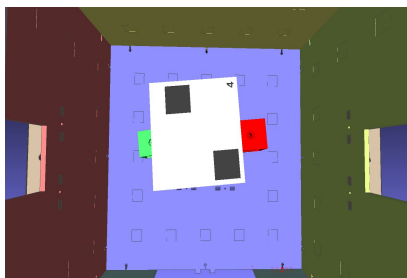
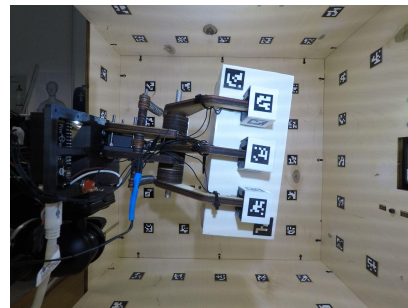
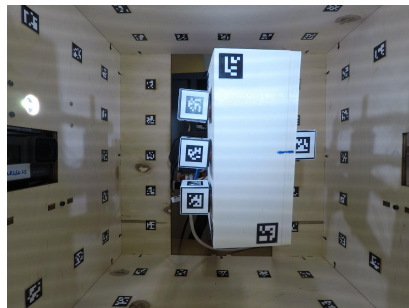
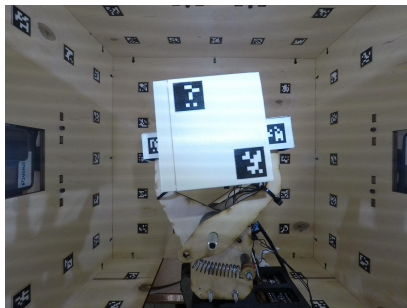
$$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{t}$$



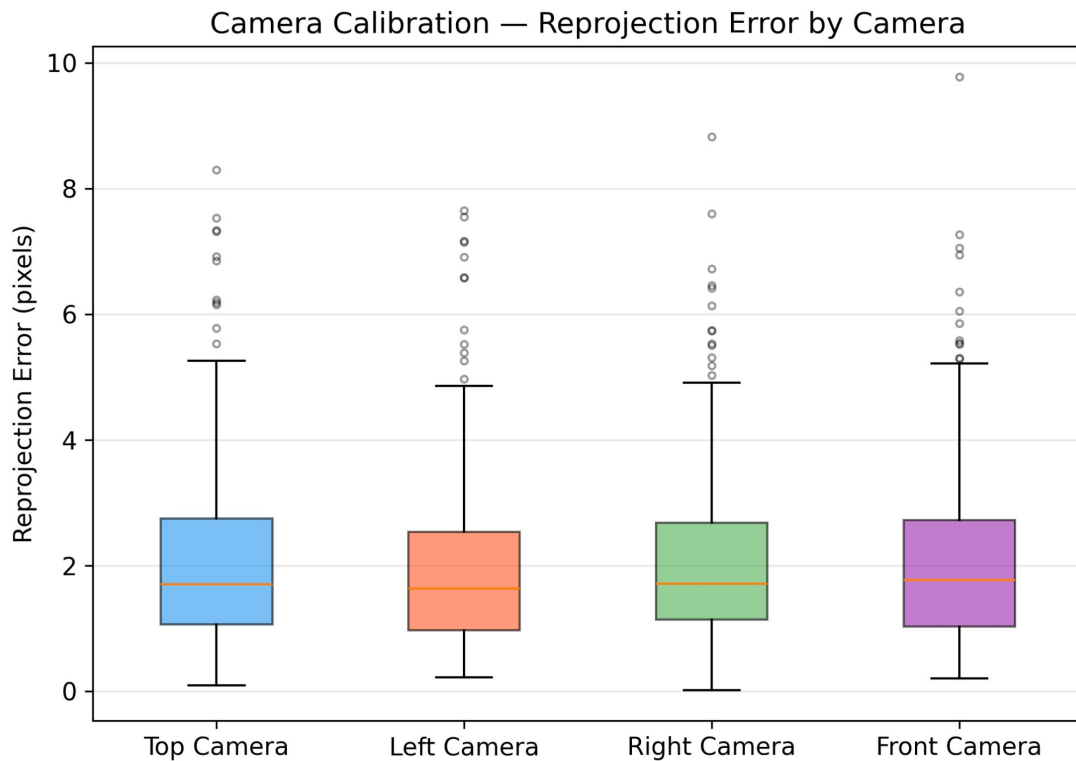
Ottimizzatore non  
lineare LevMar

$$J_f = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x_1} & \frac{\partial f_m}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial x_n} \end{pmatrix}$$

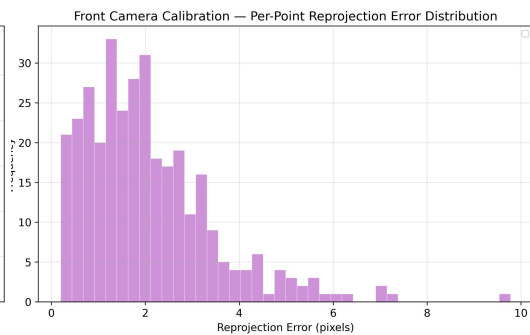
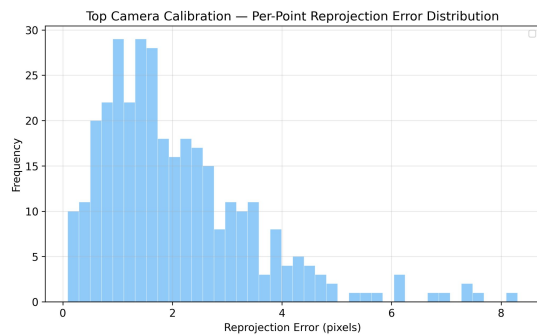
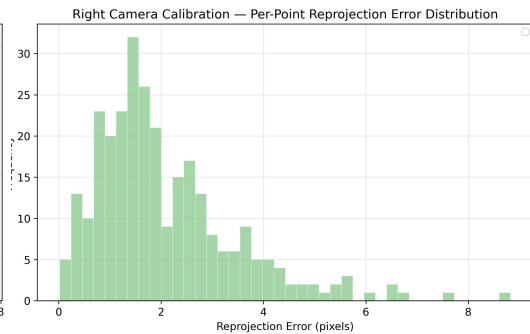
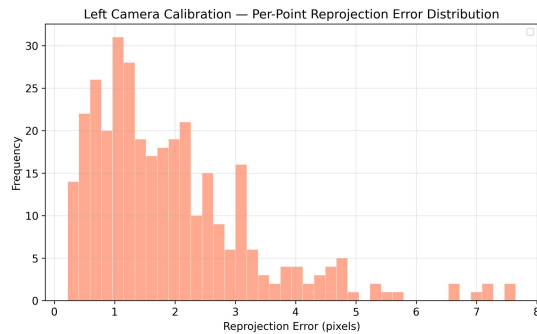
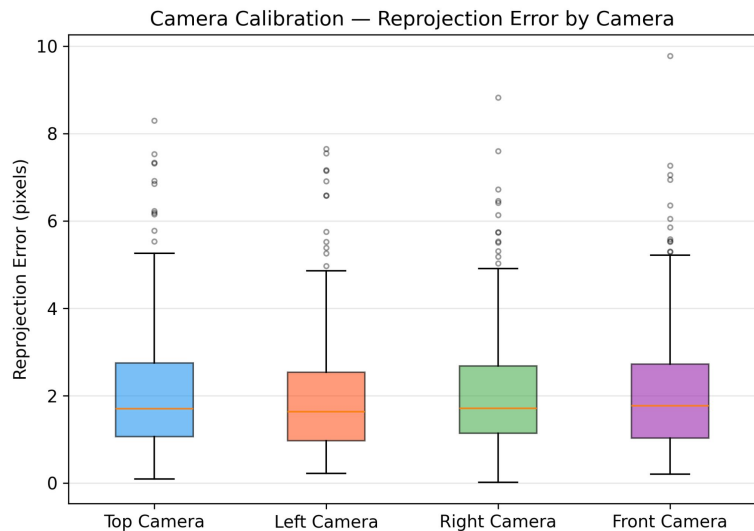
# RISULTATI



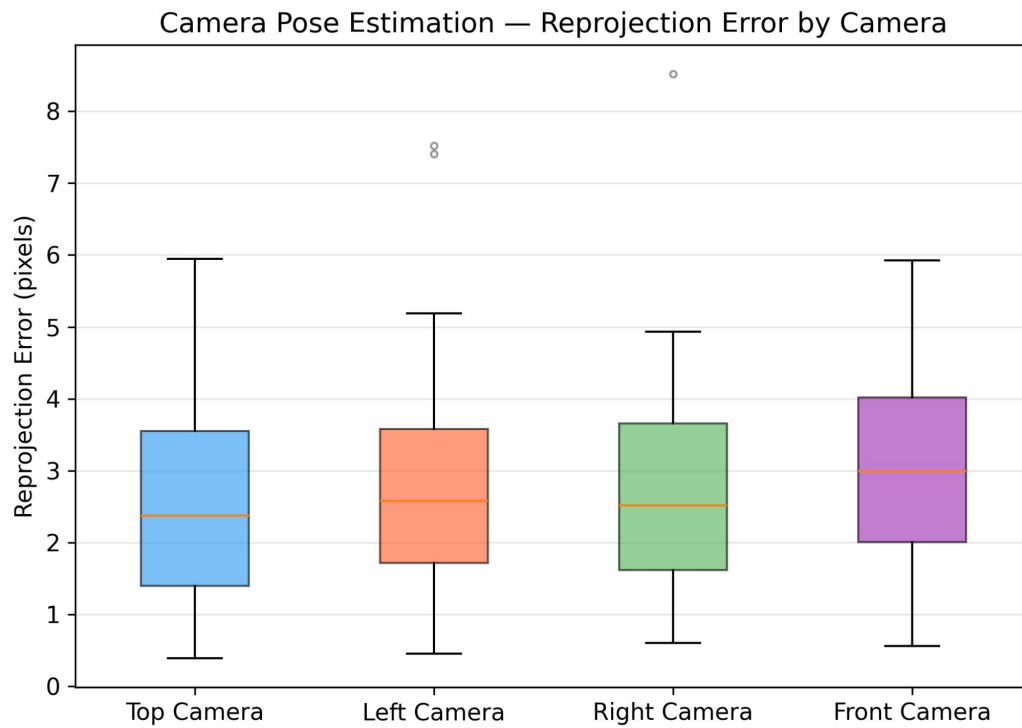
# STIMA DEI PARAMETRI INTRINSECI



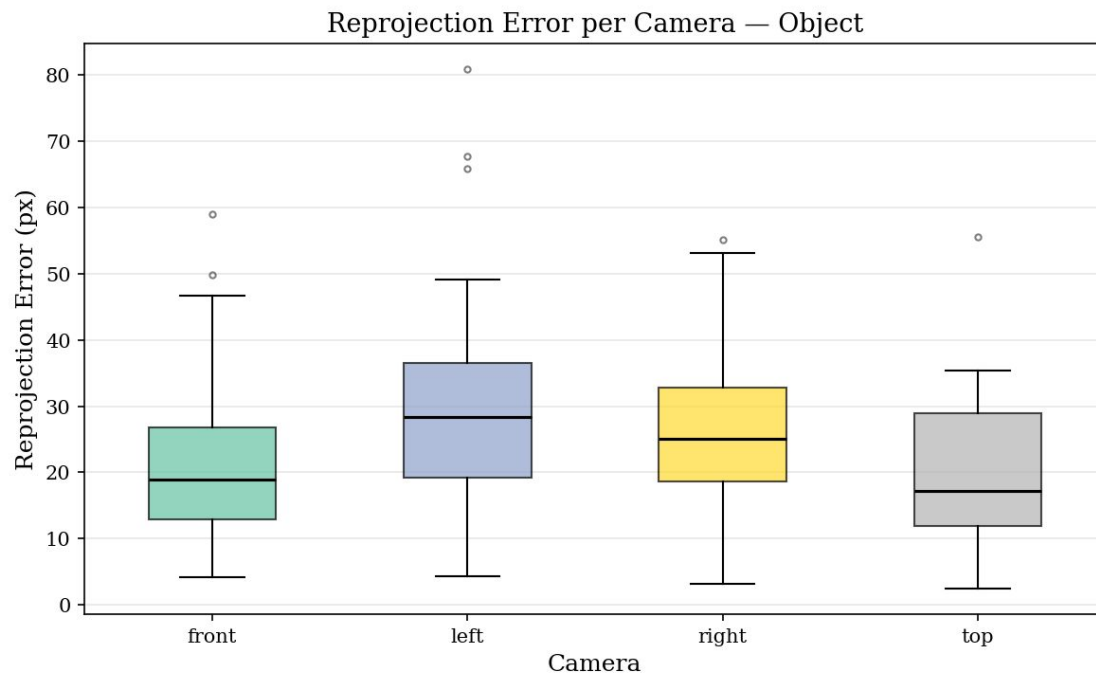
# STIMA DEI PARAMETRI INTRINSECI



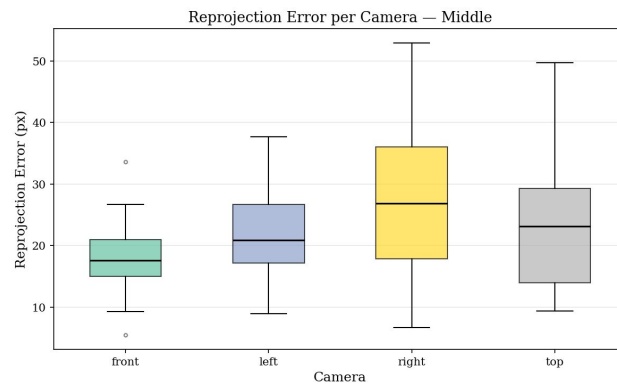
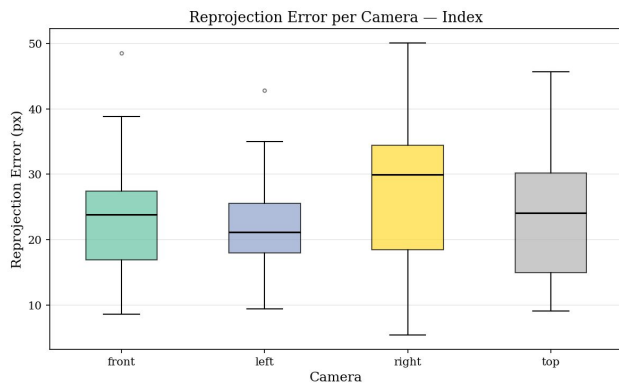
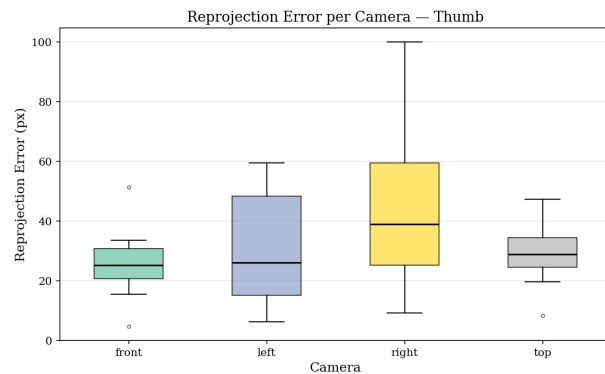
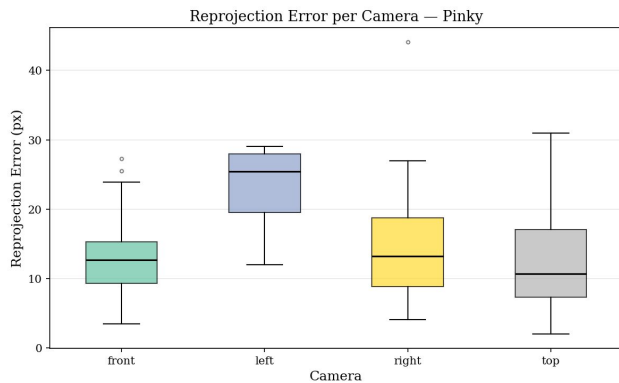
# STIMA DEI PARAMETRI ESTRINSECI



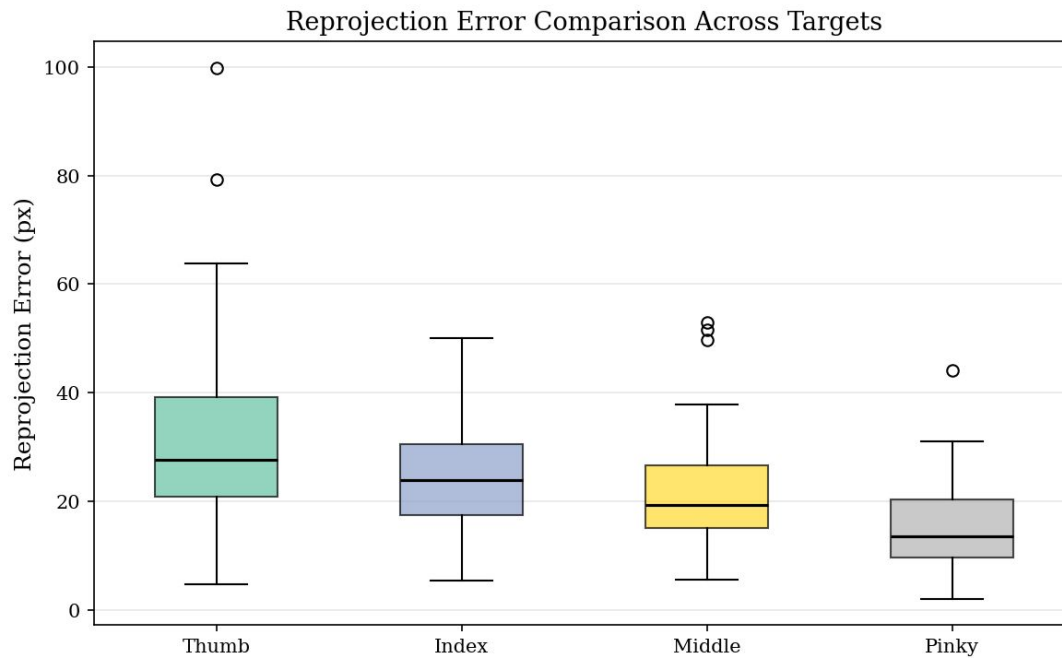
# STIMA POSIZIONE OGGETTO



# STIMA POSIZIONE DITA - CAMERA



# STIMA POSIZIONE DITA



# CONCLUSIONI

- Alta consistenza per la stima dei parametri intrinseci e estrinseci delle camere.
- La stima della posizione delle dita nel gripper rimane una delle sfide più significative.
- Persistono diverse limitazioni, causate dalle limitazioni hardware.
- Piccoli errori nella calibrazione si propagano e influiscono sulla stima delle posizioni.
- Base di riferimento per lo sviluppo di un dataset, supportando le attività di ricerca di **SUN**.



**GRAZIE PER L'ATTENZIONE**