

UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA INFORMATICA

# **Ricerca sistematica dei metodi di calibrazione multi-sensore per robot mobili**

**Relatore**

Prof. Stefano Ghidoni

**Laureando**

Mattia Scantamburlo

**Correlatore**

Davide Allegro

ANNO ACCADEMICO 2023-2024

Data di laurea 24/09/2024

*Ai miei genitori, che mi hanno sostenuto nel mio percorso accademico.  
Al mio relatore e il mio correlatore per il prezioso aiuto che mi hanno fornito nella scrittura  
della tesi.  
Ai miei amici per le serate rilassanti di cui avevo bisogno.*

# Sommario

Nell'ambito della Computer Vision, la calibrazione tra sensori di vario tipo a bordo di un robot mobile consente di rendere i dati provenienti dai sensori coerenti tra di loro, ed è per questo cruciale allo scopo garantire un funzionamento corretto e accurato. In particolare, la calibrazione multi-sensore consente di integrare le informazioni percepite da diverse fonti sensoriali come telecamere, LIDAR e IMU. Quando la calibrazione multi-sensore avviene nel contesto di un robot mobile, permette un'interazione coerente con l'ambiente circostante. Tuttavia, la calibrazione di questi sensori può risultare anche molto complessa, soprattutto in contesti difficili, come nel caso di robot mobili che si spostano liberamente sul piano, introducendo problematiche non banali.

Con l'avanzamento significativo delle tecnologie, dei sensori e delle comunicazioni, e l'applicazione delle tecniche di rilevamento ostacoli, la guida autonoma sta gradualmente assumendo il ruolo di tecnologia cruciale, in grado di rivoluzionare il futuro della mobilità. In un sistema di guida autonoma, i sensori risultano fondamentali per la percezione dell'ambiente circostante, infatti la loro corretta calibrazione rispetto a un punto di riferimento comune (tipicamente la base del robot) è essenziale per garantire sicurezza e realizzabilità di tali veicoli [1].

Questa tesi si propone di condurre una ricerca sistematica sulla letteratura scientifica esistente (ovvero uno strumento di ricerca con l'obiettivo di riassumere dati provenienti da articoli), fornendo un quadro completo delle metodologie più recenti e utilizzate nella calibrazione dei sensori, con un focus particolare su robot e veicoli in movimento. Verranno quindi esaminate le capacità e le prestazioni tecniche dei sensori che vengono comunemente impiegati nei veicoli autonomi, come telecamere, LIDAR e RADAR, analizzandone le diverse condizioni operative. Verranno poi considerate le principali categorie di calibrazione e le tecnologie disponibili per la calibrazione multi-sensore. La tesi evidenzierà dapprima alcune delle sfide più attuali, per poi analizzare le possibili direzioni di ricerca futura per i sistemi di guida autonoma.



# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione e contesto</b>	<b>3</b>
1.1	Introduzione . . . . .	3
1.1.1	Calibrazione multi-sensore . . . . .	3
1.1.2	Scopo e struttura della tesi . . . . .	4
1.2	Problemi e sfide nella calibrazione multi-sensore . . . . .	4
1.2.1	Differenze tra sensori . . . . .	4
1.2.2	Sincronizzazione temporale . . . . .	5
1.2.3	Incertezze ambientali e dinamiche . . . . .	6
1.3	Applicazioni della calibrazione multi-sensore . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Metodi di calibrazione multi-sensore</b>	<b>12</b>
2.1	Panoramica dei metodi di calibrazione . . . . .	12
2.1.1	Metodi basati su modelli (Model-based) . . . . .	13
2.1.2	Metodi basati su apprendimento (Learning-based) . . . . .	15
2.1.3	Metodi basati su movimento (Motion-based) . . . . .	16
2.1.4	Metodi basati su strumenti (Instrument-based) . . . . .	18
2.1.5	Tabella riassuntiva . . . . .	19
2.2	Tecniche di valutazione delle prestazioni . . . . .	21
<b>3</b>	<b>Metodologie di ricerca di selezione degli articoli</b>	<b>23</b>
3.1	PRISMA 2020 . . . . .	23
3.2	Fase di ricerca . . . . .	24
3.2.1	Definizione degli obiettivi di ricerca . . . . .	24
3.2.2	Scelta dei database e delle risorse . . . . .	24
3.2.3	Stringhe di ricerca utilizzate . . . . .	24
3.3	Fase di selezione . . . . .	26
3.3.1	Criteri di selezione degli articoli . . . . .	26
3.3.2	Processo di filtro e selezione . . . . .	27

<b>4</b>	<b>Analisi dei risultati</b>	<b>34</b>
4.1	Tabelle di Raggruppamento . . . . .	34
4.1.1	Tabelle comparative . . . . .	34
4.2	Descrizione Riassuntiva degli Articoli . . . . .	45
4.2.1	Sintesi degli articoli principali . . . . .	45
<b>5</b>	<b>Discussione dei risultati</b>	<b>51</b>
5.1	Analisi delle Caratteristiche dei Metodi . . . . .	51
5.1.1	Confronto tra metodi . . . . .	51
5.2	Ricerca Futura . . . . .	54
5.2.1	Aree di miglioramento . . . . .	54
5.2.2	Nuove direzioni di ricerca . . . . .	55
<b>6</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>57</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>59</b>



# Elenco delle figure

1.1	Un esempio di posizionamento dei sensori in un veicolo automatizzato per permettere la percezione periferica. Le regioni rosse sono coperte dai LIDAR. Le regioni grigie sono coperte dalle telecamere. Le regioni azzurre sono coperte dai RADAR a basso/medio raggio. Le regioni blu sono coperte dai RADAR a lungo raggio. . . . .	5
1.2	Navigazione autonoma (visione dell'ambiente circostante a sinistra e interazione con altri veicoli a destra) . . . . .	7
1.3	Un esempio di robot usato per l'esplorazione utilizzato per l'analisi degli ambienti subacquei, con indicazioni sui vari sensori e controller che sono presenti al suo interno. . . . .	8
1.4	Un esempio di robot usato in ambito industriale che esegue in test di configurazioni. . . . .	9
1.5	Un esempio di robotica di servizio sono gli aspirapolvere automatizzati. . . . .	10
2.1	Metodo che sfrutta il modello pinhole, il quale è una rappresentazione semplificata di una telecamera che simula la proiezione di punti 3D su un piano 2D attraverso un foro (pinhole). . . . .	13
2.2	Rappresentazione grafica della calibrazione learning based . . . . .	15
2.3	Nella figura è presente la rappresentazione di come avviene la traslazione e rotazione dei sistemi di riferimento dell'IMU e dei sensori "l" e "i". In particolare notiamo che abbiamo una rototraslazione unica tra uno dei sensori e se stesso nelle due posizioni. Mentre rimane costante quella tra un sensore e un altro all'interno del robot . . . . .	16
2.4	Le immagini rappresentano alcuni dei possibili marker che vengono utilizzati nelle calibrazioni instrument-based . . . . .	18
3.1	Stringa di ricerca usata su Scopus . . . . .	25
3.2	Articoli trovati per anno . . . . .	25

3.3	Andamento dell'indice (nell'asse X ci sono punti associati agli articoli, mentre nell'asse Y c'è il valore dell'indice associato a ogni articolo) . . . . .	30
3.4	tabella fase ricerca Scopus . . . . .	31
3.5	Articoli in base alla selezione . . . . .	32



# Elenco delle tabelle

2.2	Tabella riassuntiva di vantaggi e svantaggi . . . . .	20
4.10	Tabella riassuntiva metodi . . . . .	44
4.16	Tabella con descrizioni dei metodi . . . . .	49



# Capitolo 1

## Introduzione e contesto

Nel contesto dei robot mobili, la calibrazione multi-sensore è una delle fasi più rilevanti, poiché consente d'integrare i dati provenienti dai vari sensori, generando una visione unificata dell'ambiente, la quale a sua volta aumenta il livello di precisione delle azioni svolte dal robot. In questo capitolo introduttivo è esposto il contesto in cui viene adottata la calibrazione multi-sensore, il motivo per cui è così rilevante negli ambiti in cui viene adottata, i maggiori problemi e le sfide che devono essere superate per avere un uso pratico di questa tecnica, i campi in cui viene solitamente usata, i problemi che risolve quando viene utilizzata e in conclusione gli aspetti generali che ne chiariscono il funzionamento.

### 1.1 Introduzione

#### 1.1.1 Calibrazione multi-sensore

Per quanto riguarda i robot mobili, l'abilità del robot di comprendere correttamente quello che ha intorno deriva dalla fusione delle percezioni dei vari sensori presenti a bordo, precedentemente calibrati rispetto a un riferimento comune. Senza questa fase, avremmo delle visioni unilaterali e parziali di quello che il robot ha attorno a sé, ad esempio alcuni dei sensori di tipo LIDAR danno una misura buona di quanto un oggetto sia distante, ma non di quale colore sia, mentre le telecamere danno al contrario una buona misura del colore, ma non della distanza. La calibrazione dei sensori effettuata tra i sensori e il sistema di riferimento o solo tra i sensori, fa in modo che le informazioni provenienti da questi ultimi siano allineate tra loro. Senza questa fase ci sarebbe il rischio di avere degli errori causati da un basso grado di precisione, qualità necessaria per le applicazioni tipiche della calibrazione come la navigazione autonoma. L'importanza di questa fase nella costruzione e progettazione di robot mobili, come già anticipato, è legata alle necessità di precisione delle azioni svolte dal robot, quindi anche di affidabilità del suo utilizzo.

Queste caratteristiche sono prioritarie negli ambienti dinamici in cui viene applicata la calibrazione. Un altro ambito in sviluppo dove la calibrazione ha un ruolo importante, sono i veicoli a guida autonoma. In questo caso infatti, anche le più minuscole incoerenze tra le informazioni a disposizione, possono provocare incidenti.

### **1.1.2 Scopo e struttura della tesi**

Lo scopo di questa tesi è quello di effettuare una ricerca sistematica di tutti i metodi utilizzati per la calibrazione di molteplici sensori nel caso di robot o veicoli in movimento. I vari articoli scelti sono stati analizzati secondo un criterio definito a priori, per poi confrontare i metodi contenuti negli articoli. Nel secondo capitolo sono state chiarite le modalità di ricerca degli articoli, come i criteri, il modello per la selezione e i database usati. Nel terzo capitolo sono esposti il contesto, gli aspetti generali e le maggiori applicazioni della calibrazione multi-sensore. Nel quarto capitolo è stato fatto un raggruppamento in funzione delle caratteristiche dei metodi, con lo scopo compararli e di esporre le differenze. Nel quinto è stata fatta la discussione dei risultati e l'analisi delle possibili evoluzioni future. Infine nel sesto sono state riassunte in maniera concisa le maggiori osservazioni e conclusioni derivate da questa ricerca.

## **1.2 Problemi e sfide nella calibrazione multi-sensore**

### **1.2.1 Differenze tra sensori**

Uno degli elementi fondamentali che la calibrazione multi-sensore deve affrontare, è la presenza di sensori di tipologie diverse. Quindi deve integrare informazioni provenienti da sensori con funzionamenti che differiscono tra loro, e che hanno dati in formati unici per ogni tipo. In particolare ogni categoria di sensore è unica e presenta vantaggi e svantaggi a seconda del contesto. Alcuni tra i più usati nei robot mobili sono:

- LIDAR (Laser Imaging Detection and Ranging, [2]), strumento di telerilevamento che permette di rilevare la distanza di un oggetto o di una superficie usando un impulso laser.
- IMU è un sensore inerziale che permette il monitoraggio della dinamica di un mezzo in movimento.
- Telecamere RGB: dispositivi di acquisizione di immagini in grado di catturare informazioni visive suddividendole nei tre colori primari: rosso, verde e blu. Sono una categoria di sensore molto utilizzato e di grande utilità nell'ambito della robotica.
- RADAR: un sensore posizionato a bordo del robot/veicolo, basato sulla tecnologia radar (radio detection and ranging), la quale permette mediante l'utilizzo di onde elettroma-

gnetiche (nello spettro delle onde radio e microonde), di determinare la posizione di un oggetto ed eventualmente la sua velocità.

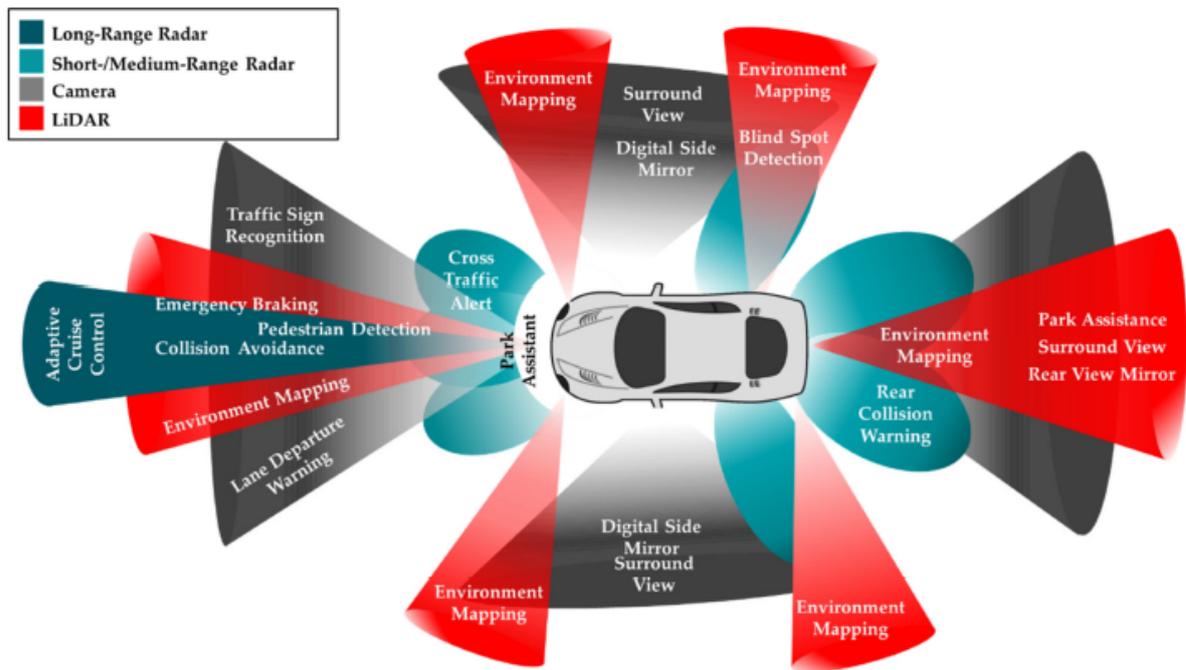


Figura 1.1: Un esempio di posizionamento dei sensori in un veicolo automatizzato per permettere la percezione periferica. Le regioni rosse sono coperte dai LIDAR. Le regioni grigie sono coperte dalle telecamere. Le regioni azzurre sono coperte dai RADAR a basso/medio raggio. Le regioni blu sono coperte dai RADAR a lungo raggio.

## 1.2.2 Sincronizzazione temporale

Il problema della sincronizzazione temporale è una sfida con la quale ci si deve spesso confrontare nel realizzare un sistema che deve gestire il flusso di dati proveniente da più fonti, come nel caso in cui si abbia una molteplicità di sensori.

Il problema nasce dal fatto che i sensori possono inviare dati con una frequenza differente. Ad esempio l'n-esimo dato proveniente da diversi flussi di dati può fare riferimento, a seconda della fonte di provenienza, a istanti temporali differenti. Alcuni casi pratici sono quelli delle telecamere, che hanno spesso una frequenza intorno ai 30 FPS e dei sensori LIDAR, che invece ricevono e inviano dati a una frequenza tipicamente più bassa (prossima ai 5 Hz). In generale le possibili soluzioni per effettuare quella che viene definita calibrazione temporale, che verranno poi analizzate in dettaglio, sono due:

- **Sincronizzazione interna:** che garantisce che i sensori all'interno dello stesso sistema siano sincronizzati tra loro, in modo che i dati acquisiti abbiano un riferimento temporale in comune e possano essere correttamente integrati.
- **Sincronizzazione esterna:** che implica la sincronizzazione dei sensori con una fonte di segnali di tempo esterna, come ad esempio un segnale GPS, con lo scopo di assicurare che i dati siano allineati con altri sistemi esterni.

### 1.2.3 Incertezze ambientali e dinamiche

Un altro aspetto problematico è che il contesto in cui inseriremo il robot mobile. Quest'ultimo può disturbare il processo di calibrazione, influenzandone la precisione e l'affidabilità generando incertezze [3].

Alcuni di questi disturbi possono venire dall'ambiente:

- L'illuminazione, le condizioni atmosferiche e la presenza di polvere.
- Altri disturbi possono venire dalle proprietà degli oggetti percepiti, come la riflessione, la forma e il materiale di cui sono fatti.
- In altri casi ancora, sono presenti vibrazioni o rumori acustici che interferiscono con la precisione delle misurazioni.

Esistono poi, proprio perché nell'ambito dei robot mobili si ha un contesto dinamico, delle interferenze dovute proprio a questa dinamicità:

- Il movimento dello stesso robot combinato a quello degli oggetti circostanti rende complessa la calibrazione, ad esempio a causa della presenza di ostacoli (statici e dinamici) e di punti ciechi, non sempre la calibrazione in movimento viene effettuata coerentemente.
- Esiste la possibilità che una calibrazione effettuata in un dato momento non sia più valida in futuro a causa di qualche danneggiamento dei sensori.
- In uno scenario in cui ci sono più veicoli autonomi (AV) cooperativi, una interazione non corretta tra veicoli può generare un errore di calibrazione.

## 1.3 Applicazioni della calibrazione multi-sensore

L'importanza nei settori che utilizzano le tecniche di calibrazione tra sensori di vario tipo, deriva dal fatto che queste tecniche garantiscono un alto livello di precisione del modello dell'ambiente, di conseguenza anche delle azioni del robot nei vari contesti dinamici.

### **Navigazione autonoma**

Un esempio di applicazione della calibrazione multi-sensore si può trovare nell'ambito della

navigazione autonoma, che si tratti di veicoli o robot autonomi [8]. In questo contesto, la calibrazione è molto importante.

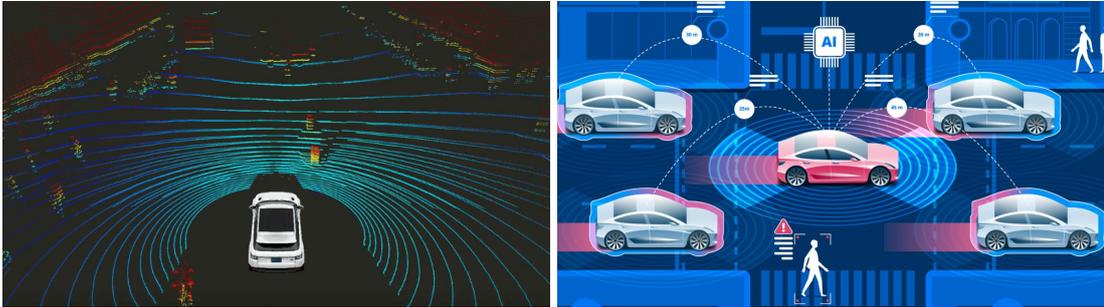


Figura 1.2: Navigazione autonoma (visione dell'ambiente circostante a sinistra e interazione con altri veicoli a destra)

Qui viene usata per avere una corretta localizzazione e il corretto tracciamento di un percorso. Si nota anche che un minimo errore può causare problemi molto rilevanti per il veicolo e per le persone al suo interno.

### **Robotica di esplorazione**

La robotica di esplorazione si occupa della progettazione e la costruzione di robot che sono studiati per interagire con ambienti ostili e spesso non sicuri per gli esseri umani, ad esempio i rover [16].

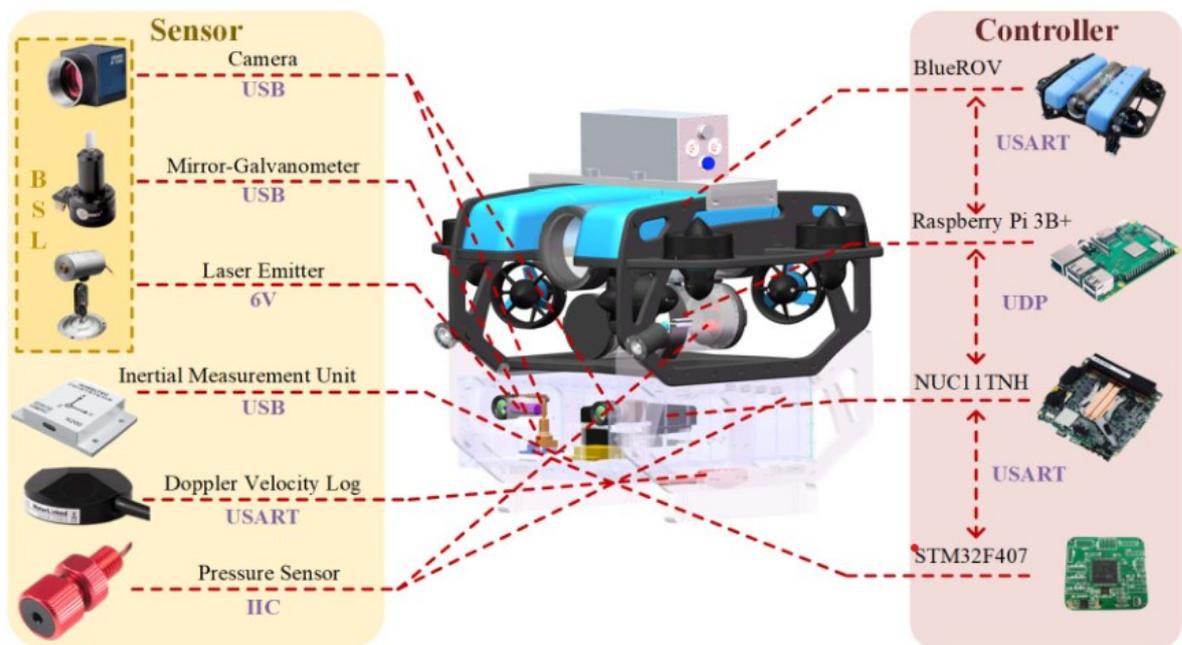


Figura 1.3: Un esempio di robot usato per l'esplorazione utilizzato per l'analisi degli ambienti subacquei, con indicazioni sui vari sensori e controller che sono presenti al suo interno.

### Automazione industriale

Questa applicazione coincide con la progettazione di robot che sostituiscono completamente o in parte i compiti dell'essere umano nell'industria [32]. Anche in questo caso la sicurezza è il requisito fondamentale, che quindi necessita un alto livello di accuratezza e coerenza nei dati per poter superare in maniera efficiente e agevole gli oggetti che si interpongono tra la posizione attuale dell'agente e l'obiettivo che deve raggiungere.

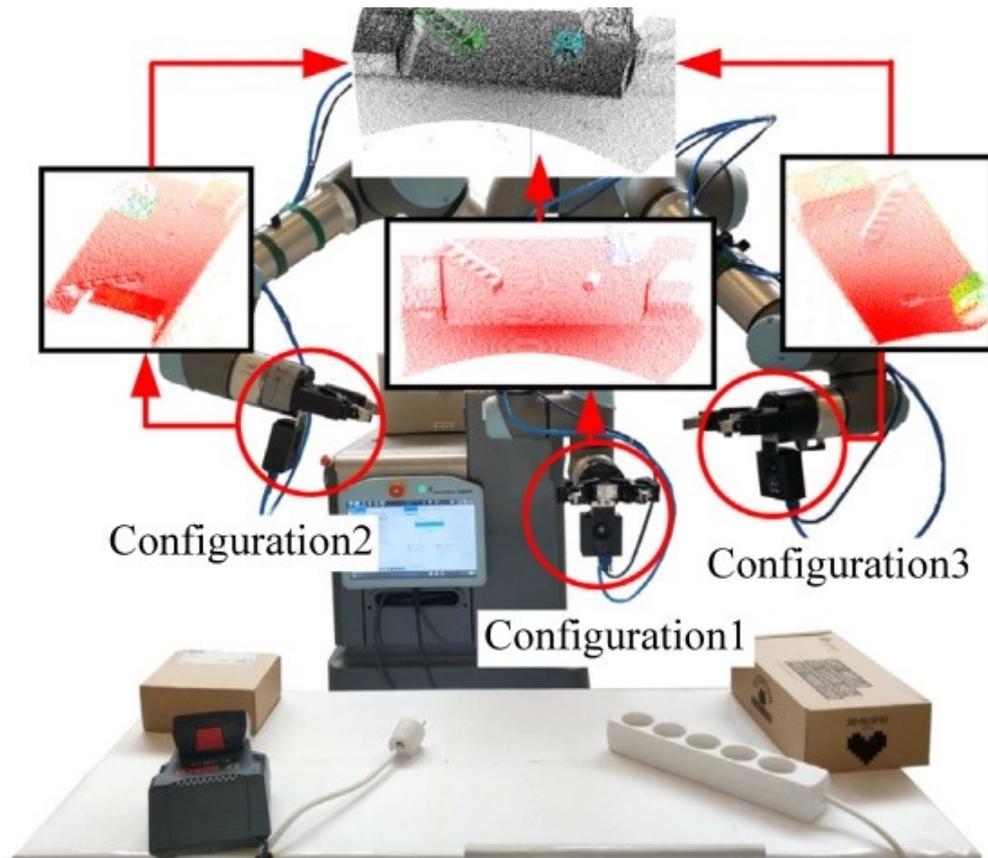


Figura 1.4: Un esempio di robot usato in ambito industriale che esegue in test di configurazioni.

### **Robotica di servizio**

L'ambito della robotica di servizio si occupa invece della progettazione di robot domestici con lo scopo di assistere nelle mansioni quotidiane delle persone. Anche in questo caso, come nei precedenti sono alti i requisiti di sicurezza e affidabilità, principalmente a causa dell'alto livello di interazione con persone e ambienti abitati.



Figura 1.5: Un esempio di robotica di servizio sono gli aspirapolvere automatizzati.



# Capitolo 2

## Metodi di calibrazione multi-sensore

Per calibrare in modo efficiente ed efficace i sensori di un robot mobile sono state condotte numerose ricerche, che hanno prodotto una vasta letteratura scientifica sull'argomento. Nel corso degli anni, le metodologie sviluppate si sono raggruppate in diverse categorie, in base alle loro caratteristiche principali.

Sebbene esistano numerosi metodi per la calibrazione tra sensori, alcuni di essi sono stati specificamente adattati e ottimizzati per particolari tipi di applicazioni e sensori.

In questo capitolo, sono stati esaminati i principali metodi di calibrazione multi-sensore e le relative categorie, con un focus particolare sul contesto dei robot mobili e sulle tecniche applicabili ai sensori utilizzati in questo ambito.

E' stata anche fatta un'analisi su quali siano dei buoni criteri di valutazione per i metodi presenti negli articoli.

### 2.1 Panoramica dei metodi di calibrazione

Un aspetto molto importante da considerare nel fare una panoramica sui metodi che vengono utilizzati in letteratura, è il fatto che non esiste una nomenclatura condivisa dalla comunità. Questo aspetto fa sì che ci siano delle difficoltà nel raggruppare i metodi di un determinato tipo, oltre a questo problema, esiste spesso la possibilità che due articoli si riferiscano allo stesso metodo ma con due nomi differenti. Per ovviare a queste ambiguità, in questa revisione è stato fatto riferimento ai metodi in maniera generale, ovvero in funzione di quattro categorie:

- Model-based (2.1.1)
- Learning-based (2.1.2)
- Motion-based (2.1.3)
- Instrument-based (2.1.4)

Successivamente verrà specificato il significato attribuito a ciascuna di esse.

Notiamo però che esistono concetti che sono trasversali alle categorie, come ad esempio:

- Online-calibration: termine che si riferisce al fatto che la calibrazione avviene in tempo reale. Di contro esiste la possibilità di calibrare i sensori precedentemente al funzionamento del robot. Questo elemento è spesso fondamentale in condizioni dinamiche, come nel caso di utilizzo di robot mobili.
- Self-calibration: concetto che si riferisce a un tipo di calibrazione svolta in maniera autonoma, semplicemente raccogliendo i dati dai sensori. Quindi senza necessità di un intervento umano di alcun tipo.

### 2.1.1 Metodi basati su modelli (Model-based)

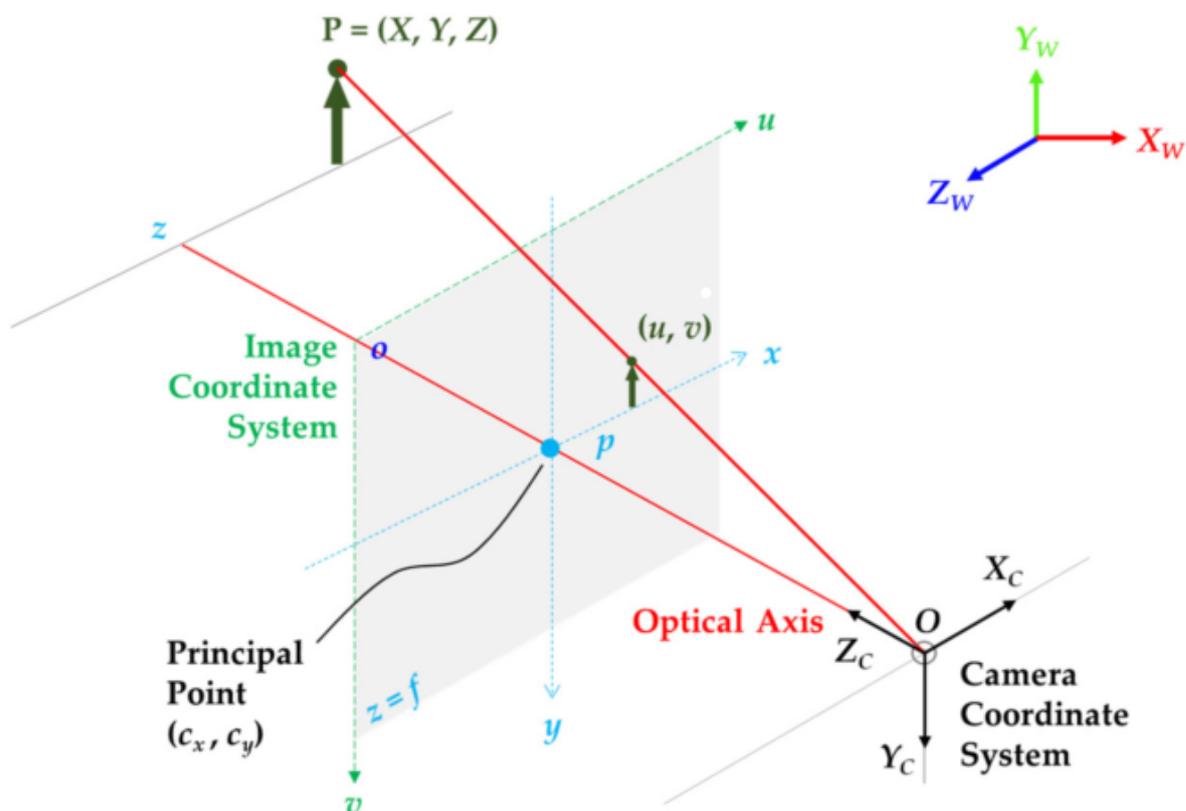


Figura 2.1: Metodo che sfrutta il modello pinhole, il quale è una rappresentazione semplificata di una telecamera che simula la proiezione di punti 3D su un piano 2D attraverso un foro (pinhole).

I metodi che verranno definiti da ora in poi model-based, sono una categoria molto vasta che sfrutta una rappresentazione matematica (vedi ad esempio il modello pinhole in figura 2.1) dei sensori per poter descrivere in maniera accurata le loro interazioni con l'ambiente [10] [6].

Più dettagliatamente tecniche model-based fanno uso della geometria e il posizionamento reciproco dei sensori nel robot per poter effettuare delle trasformazioni, quindi anche calibrare tra loro le varie fonti di dati.

Un elemento particolarmente vantaggioso è il fatto che, avendo una rappresentazione molto precisa, se vengono fatti degli errori dovuti alla conformazione dei sensori o del robot, questi vengono molto spesso rilevati e poi corretti in fase di costruzione. Questo contribuisce a incrementare il livello di robustezza del sistema. Non risulta quindi insolito che questa categoria di metodi possa essere spesso usata in contesti critici, dove il più piccolo errore può essere rilevante, come la guida autonoma o la robotica di servizio.

Un esempio di calibrazione di questo tipo, può essere un modello che descrive la relazione geometrica tra un sensore LIDAR e una camera. Con questi metodi, la calibrazione verrebbe effettuata allineando la nuvola di punti del LIDAR con le immagini della camera, mediante una rappresentazione accurata del mondo tridimensionale circostante.

I metodi basati su modelli hanno i seguenti vantaggi:

- **Precisione:** Elevata dovuta all'utilizzo di modelli matematici rigorosi.
- **Affidabilità:** Alta, in quanto si basa su principi fisici e geometrici.
- **Robustezza:** Alta, in quanto è in grado di correggere gli errori dei sensori.

mentre gli svantaggi sono i seguenti:

- **Complessità:** Bassa, in quanto la costruzione del modello matematico richiede applicazione di conoscenze non banali.
- **Adattabilità:** Bassa, in quanto una volta costruito il modello, non si ha più possibilità di aggiustarlo senza effettuare di nuovo la calibrazione.
- **Scalabilità:** Bassa, in quanto con l'incrementare del numero dei sensori, il modello diventa sempre più complesso e di gestione difficile.

## 2.1.2 Metodi basati su apprendimento (Learning-based)

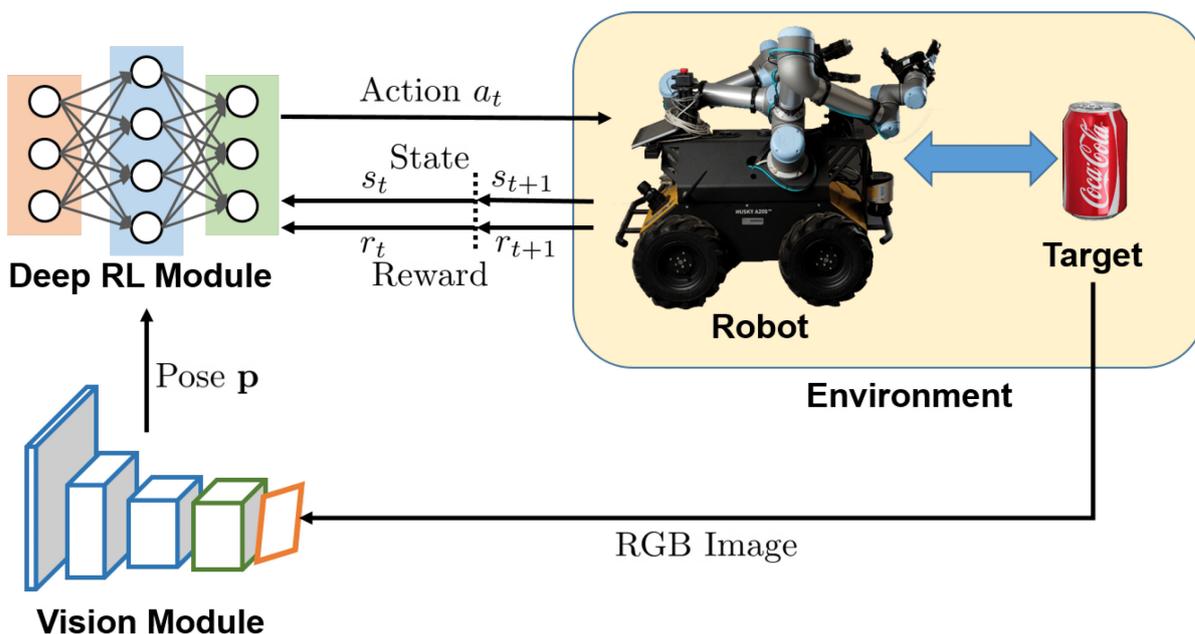


Figura 2.2: Rappresentazione grafica della calibrazione learning based

Il recente sviluppo di tecniche basate sull'apprendimento autonomo, come le reti neurali, ha permesso di introdurre un cambiamento nella calibrazione multi-sensore (vedi ad esempio figura 2.2). Grazie alla capacità di conservare e successivamente rielaborare grandi quantità di dati in tempi sufficientemente veloci, è stata possibile la creazione di metodi di calibrazione che hanno la capacità di imparare il modo con cui effettuare la calibrazione mentre il robot è in azione [32] [30] [31].

Notiamo anche, che il funzionamento su cui si basa questa categoria di tecniche poggia sul fatto che l'agente intelligente riesca a trovare relazioni tra i dati di sensori differenti, istante per istante.

Ad esempio una rete neurale potrebbe ricevere in input i dati raccolti da un sensore LIDAR e da una camera, e potrebbe dover trovare una relazione tale da poter integrare le misurazioni, creando quindi un modello unico e coerente dell'ambiente esterno.

Questo tipo di calibrazione garantisce non solo una migliore precisione, ma permette anche al robot di adattarsi alle condizioni non note a priori che si può trovare di fronte.

Per quanto riguarda i metodi basati sull'apprendimento, hanno i seguenti vantaggi:

- **Adattabilità:** Molto alta, in quanto sono metodi con una buona adattabilità, soprattutto per la capacità di apprendere dai nuovi dati.
- **Scalabilità:** Buona, in quanto possono essere gestiti con questa tecnica molti sensori.

- **Flessibilità:** Alta, in quanto il tipo di sensore non condiziona molto la qualità di questa tecnica che si basa solo sui valori dei dati.

mentre gli svantaggi sono i seguenti:

- **Complessità:** Troppo alta, questo perché è necessaria una potenza computazionale molto grande e una grande quantità di dati per allenare l'agente.
- **Affidabilità:** Non costante, poiché in questo caso si ha una grande dipendenza della qualità della tecnica. Inoltre, se la qualità dei dati è bassa, non è affidabile.
- **Robustezza:** Bassa, poiché se l'agente non è ben allenato non si ha una buona robustezza.
- **Precisione:** Bassa, perché dipende dalla fase di training dell'agente.

### 2.1.3 Metodi basati su movimento (Motion-based)

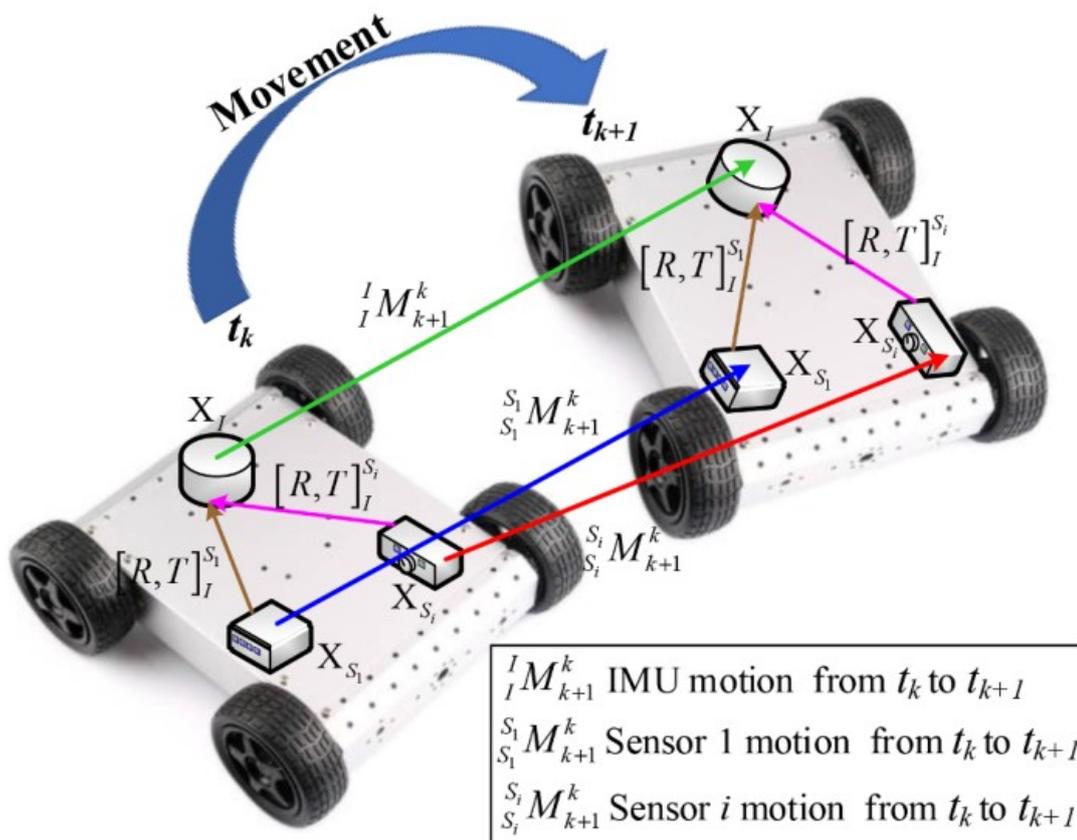


Figura 2.3: Nella figura è presente la rappresentazione di come avviene la traslazione e rotazione dei sistemi di riferimento dell'IMU e dei sensori "1" e "i". In particolare notiamo che abbiamo una rototraslazione unica tra uno dei sensori e se stesso nelle due posizioni. Mentre rimane costante quella tra un sensore e un altro all'interno del robot

Le tecniche di tipo motion-based, diversamente da altre categorie, offrono la possibilità di avere una calibrazione dinamica, ovvero che avviene sfruttando il movimento del robot/veicolo stesso. Questi metodi, infatti, si basano sull'idea che è possibile utilizzare il movimento del robot come informazione aggiuntiva [8] [20] [22]. Il principio con cui funzionano questi metodi è il fatto che è possibile osservare e analizzare le variazioni dei dati provenienti dalle varie fonti sensoriali mentre il robot è in moto. Spesso il funzionamento di questa tecnica è reso possibile mediante la traslazione e la rotazione dei sistemi di riferimento dei sensori e del robot in funzione del movimento che compie (in figura 2.3). Ad esempio un robot potrebbe ricevere informazioni da un LIDAR e mettere in relazione il modo in cui variano con la sua posizione e l'orientamento. Un vantaggio di questa tecnica è la capacità di calibrare in maniera continua nel tempo. Quindi mentre il robot si muove e raccoglie dati, possiamo aggiornare i dati della calibrazione per renderla adatta ai nuovi scenari. Questo tipo di calibrazione è particolarmente adeguata ai contesti dinamici, nei quali un adattamento repentino alle variazioni, garantisce un alto grado di precisione e affidabilità.

I metodi basati sul movimento hanno i seguenti vantaggi:

- **Adattabilità:** Molto alta, in quanto la calibrazione avviene in maniera dinamica, durante il movimento.
- **Flessibilità:** Alta, perché funziona senza la presenza di modelli o altri supporti.
- **Complessità:** Bassa, perché non richiede grande elaborazione dei dati o un set up complicato da creare.

mentre gli svantaggi sono i seguenti:

- **Precisione:** Bassa, in quanto in determinate situazioni potrebbe non essere altrettanto preciso quanto metodi model-based o instrument-based.
- **Affidabilità:** Bassa, in quanto si potrebbe avere un movimento limitato, quindi una calibrazione di bassa qualità.
- **Robustezza:** Variabile, poiché anche in questo caso la caratteristica considerata è molto condizionata dalla qualità del movimento.
- **Scalabilità:** Variabile, perché anche questa caratteristica è condizionata dalla qualità del movimento.

### 2.1.4 Metodi basati su strumenti (Instrument-based)

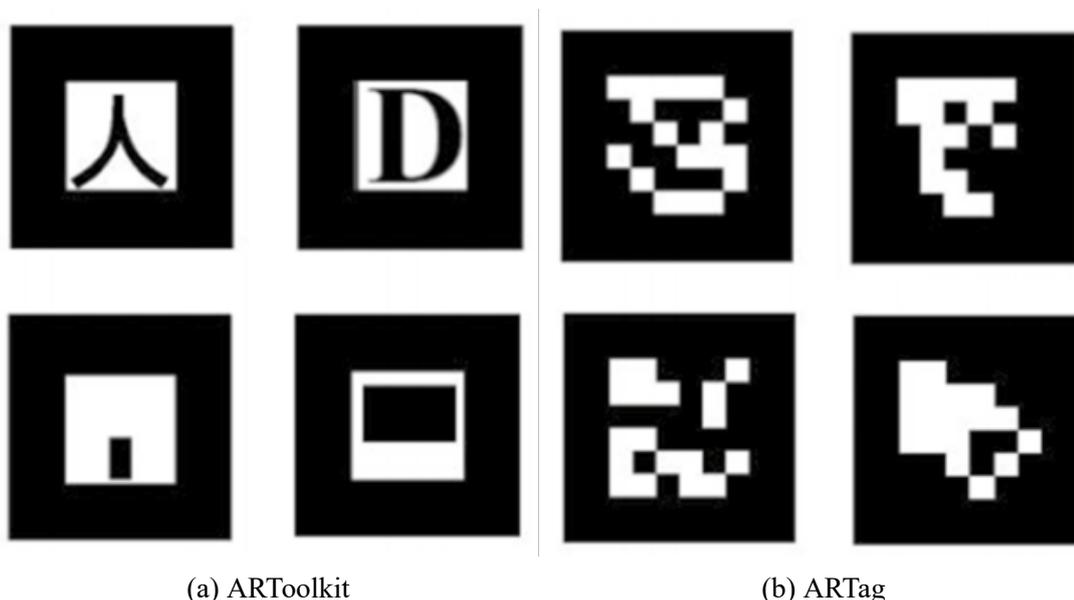


Figura 2.4: Le immagini rappresentano alcuni dei possibili marker che vengono utilizzati nelle calibrazioni instrument-based

I metodi di calibrazione instrument based includono tutte le tecniche che per fare una calibrazione devono sfruttare un supporto esterno [7] [9] [14]. Quello che fanno queste tecniche, è utilizzare ad esempio un laser tracker o una superficie con target (vedi figura 2.4b e 2.4a), per determinare precisamente la posizione e l'orientamento dei sensori.

Anche in questo caso, come per le tecniche model-based, si ha un alto grado di precisione. Spesso questo metodo viene combinato con la calibrazione model-based, creando a partire dai dati raccolti un modello geometrico.

E' importante notare che queste categorie di calibrazione non sono quasi mai presenti singolarmente una tecnica di calibrazione reale, infatti è molto più probabile trovare delle combinazioni di due o più categorie in un caso reale.

I metodi basati su strumenti hanno i seguenti vantaggi:

- **Precisione:** Molto alta, in quanto si fa affidamento a degli strumenti esterni che sono studiati specificatamente per fornire una calibrazione precisa.
- **Affidabilità:** Alta, anche grazie al fatto che i risultati con un dato strumento sono riproducibili, quindi esistono già delle calibrazioni per il confronto.
- **Robustezza:** Alta, in quanto abbiamo una calibrazione molto precisa, quindi delle piccole variazioni sono tollerate.

mentre gli svantaggi sono i seguenti:

- **Complessità:** Alta, per il fatto che richiede degli strumenti specifici.
- **Adattabilità:** bassa, in quanto è necessario un ambiente controllato (dovuto alla presenza degli strumenti in posizioni specifiche).
- **Scalabilità:** Limitata, infatti se in futuro si decidesse di aggiungere dei nuovi sensori nascerebbe la necessità di usare strumenti specifici per la loro calibrazione.

### **2.1.5 Tabella riassuntiva**

Nella tabella riassuntiva 2.1.5 sono stati assegnati dei voti basati su quanto buone sono le tecniche sotto i vari punti di vista:

- 5: Ottimo
- 4: Molto buono
- 3: Buono
- 2: Sufficiente
- 1: Insufficiente

<b>Caratteristiche</b>	<b>motion-based</b>	<b>learning-based</b>	<b>instrument-based</b>	<b>model-based</b>
<b>Precisione</b>	3	2	5	4
<b>Affidabilità</b>	2	Dipendente dai dati	4	4
<b>Robustezza</b>	Dipendente dal movimento	2	4	4
<b>Adattabilità</b>	3	4	2	2
<b>Complessità</b>	2	4	3	3
<b>Scalabilità</b>	2	3	2	2

Tabella 2.2: Tabella riassuntiva di vantaggi e svantaggi

## 2.2 Tecniche di valutazione delle prestazioni

All'interno degli studi di nuovi metodi appartenenti alle categorie prima elencate, sono spesso presenti (non sempre) delle tecniche per valutare le prestazioni di efficienza, velocità, ...etc. Tra queste, quelle individuate sono:

- **Analisi comparativa:** questo tipo di analisi prevede la valutazione di una tecnica in funzione di altre, ovvero funziona per paragone con altre tecniche tipicamente utilizzate e usate come campione di confronto [28].
- **Accuratezza:** questa tecnica valuta le prestazioni mediante l'utilizzo di metodi matematici e statistici. Le misure che vengono analizzate con questa metodologia, sono i dati raccolti dai sensori, come ad esempio le posizioni relative (esprese nelle tre coordinate del sistema di riferimento 3D). Nelle sperimentazioni che vengono fatte si raccolgono dei dati, solitamente in più modalità e configurazioni, variando angolazioni e posizioni dell'oggetto che viene usato per la calibrazione [19].  
Inoltre spesso le misure che vengono prese in considerazione vengono comparate con il cosiddetto ground-truth, il quale è il valore reale dalla misura che stiamo cercando di ottenere con il sensore [19].
- **Robustezza:** questa tecnica fa una valutazione misurando quanto il metodo che viene studiato è flessibile alle variazioni che si possono presentare nelle situazioni reali. Ad esempio delle oscillazioni nel valore misurato dovute alla presenza di disturbi nell'acquisizione di dati da parte dei sensori [19]. Vengono anche spesso definiti dei margini (indicati solitamente con  $\delta$ ) per definire entro quali limiti si possono tollerare gli errori.
- **Efficienza:** questo tipo di valutazione delle prestazioni ha come focus principale la velocità degli algoritmi usati. Infatti in molte situazioni in cui si adotta la calibrazione, specialmente nel contesto di robot mobili, eseguire delle operazioni entro dei margini di tempo è necessario. Gli studi che fanno uso di questo criterio sono quelli che si riferiscono a delle applicazioni real time.

Infine è bene tenere conto del fatto che non esistono metriche migliori di altre, questo perché il criterio per misurare la prestazione di un metodo deve avere un certo grado di coerenza con la tecnica analizzata. Ad esempio non ha senso valutare l'efficienza in un sistema che non ha nessuna necessità in termini di velocità.



## Capitolo 3

# Metodologie di ricerca di selezione degli articoli

In questo capitolo è presente un'analisi del metodo adottato per la ricerca degli articoli, e successivamente della selezione tra quelli che sono risultati dalla fase di ricerca. Inoltre si fa notare che per le varie fasi di questa ricerca sistematica esposte in questo capitolo sono stati considerati i metodi proposti dal PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) <sup>1</sup>, principalmente con lo scopo di rendere l'intero processo replicabile e complessivamente affidabile.

### 3.1 PRISMA 2020

"I metodi e i risultati delle ricerche sistematiche dovrebbero essere sufficientemente in dettaglio da permettere ai lettori di considerare affidabili e applicabili i risultati della ricerca" [4].

Questa filosofia espressa dal metodo PRISMA assieme ad altri elementi, come la chiarezza e la trasparenza con le quali vengono esposte le idee in esso, hanno portato all'adozione delle sue tecniche come guida per questa ricerca sistematica. Il PRISMA, nella sua versione attuale, è un insieme di tre documenti, nei quali sono presenti delle linee guida raggruppate in una checklist con 27 punti da rispettare. Tra questi è presente il consiglio di inserire una rappresentazione schematica di come è stata eseguita la fase di ricerca e selezione degli articoli presi in considerazione, in modo da rendere evidenti i passaggi e le scelte fatte (3.4).

---

<sup>1</sup><https://www.prisma-statement.org/prisma-2020>

## 3.2 Fase di ricerca

La fase di ricerca è la parte del processo nella quale, tramite un insieme di scelte, si determinano i mezzi con i quali ottenere il materiale utilizzato nella revisione. Ad esempio la stringa di ricerca e i database usati sono dei buoni mezzi di partenza.

### 3.2.1 Definizione degli obiettivi di ricerca

Prima di iniziare la fase di ricerca è importante capire quali siano gli obiettivi che essa si pone, poiché questo fornirà una direzione chiara, assicurando che la tesi sarà focalizzata e coerente con le domande di ricerca. Nel caso di questa revisione sistematica, lo scopo è quello di trovare un insieme di articoli rappresentativi delle tecniche, che vengono tipicamente adottate per effettuare la calibrazione tra diversi sensori.

### 3.2.2 Scelta dei database e delle risorse

La revisione sistematica è stata svolta analizzando le risorse da una base di dati con riassunti, citazioni di articoli e link per poterne effettuare la lettura, Scopus [5]. Similmente ad altre piattaforme Scopus fornisce una serie di filtri basati sul numero di citazioni, anno di pubblicazione, coerenza con la stringa di ricerca, ...etc. Un motivo per cui questo database è stato scelto, è il fatto che diversamente da altre opzioni permette di inserire una struttura logica nella barra di ricerca, integrando costrutti come:

- OR: equivalente all'OR logico, però effettuato sulla presenza di termini nel titolo e nell'abstract di un articolo.
- AND: equivalente all'AND logico, però effettuato sulla presenza di termini nel titolo e nell'abstract di un articolo.
- ?: ovvero la possibile presenza in una stringa di carattere qualsiasi.
- \*: uguale al ?, ma con un numero di caratteri indefinito.

Inoltre è possibile di specificare dove eseguire la ricerca, ad esempio solo sul titolo, solo sull'abstract o su entrambi.

### 3.2.3 Stringhe di ricerca utilizzate

Sapendo che la ricerca è stata effettuata sul titolo e sull'abstract degli articoli presenti nel database di Scopus, sono state scelte le parole che più erano frequenti negli articoli coerenti con l'oggetto della tesi. Inoltre nella stringa di ricerca è stata aggiunta una struttura a gruppi tematici: sono presenti dei gruppi di parole coerenti concettualmente, separate da un "AND". Ad

esempio è presente un blocco di parole separate da OR che sono coerenti al concetto di sensore. La stringa risultante, alla fine di queste considerazioni e di vari tentativi è stata:

```
TITLE-ABS-KEY (
( ( hand-eye ) OR ( motion-based ) OR ( learning-based ) OR (model-based) OR (instrument-based) OR (extrinsic*) ) AND
( calibrat* OR calibration OR calibrate ) AND
(sensor* OR ( multi-sensor ) OR ( sensor*-to-car* ) OR lidar* OR radar* OR camera* OR IMU*) AND
( ( mobile OR autonomous OR ( autonomous AND driving ) OR motion* OR navigat* OR unmanned OR wheeled) AND
( robot* OR vehicle* ) ) ) AND
PUBYEAR > 2018 AND PUBYEAR < 2025
```

Figura 3.1: Stringa di ricerca usata su Scopus

Tramite questa stringa di ricerca (vedi figura 3.1) siamo riusciti a ottenere un numero di articoli pari a 616, i quali hanno la seguente distribuzione negli anni considerati (in figura 3.2).

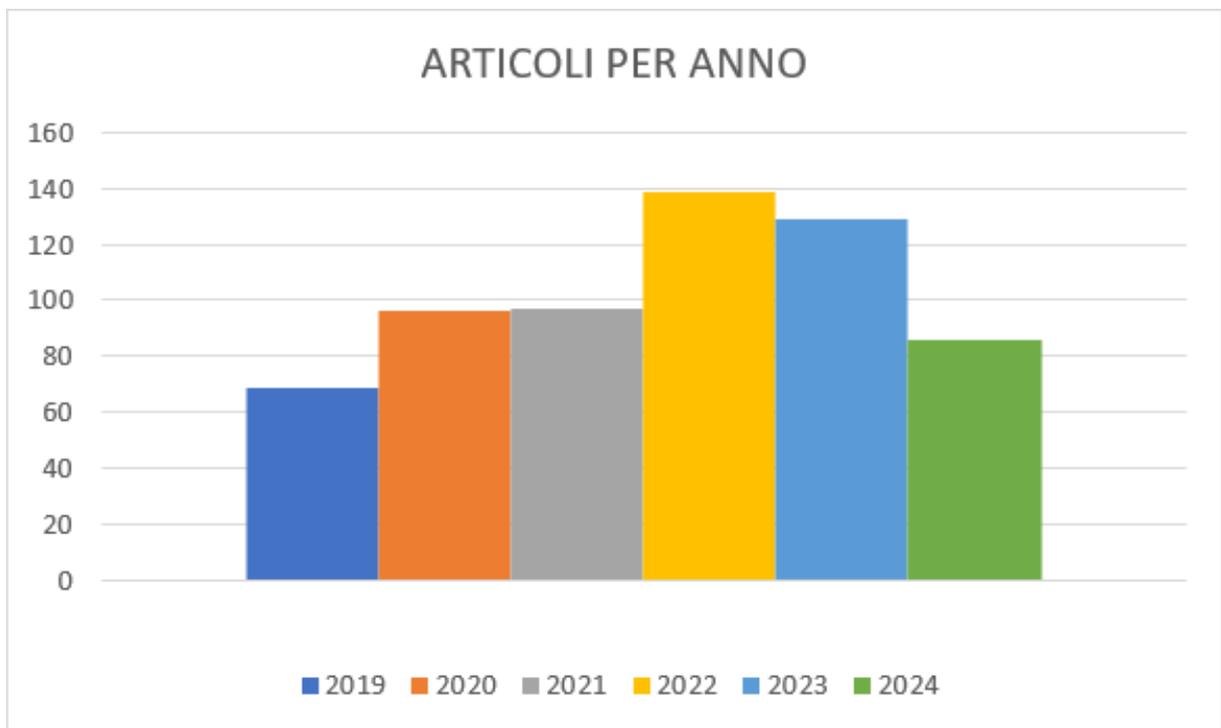


Figura 3.2: Articoli trovati per anno

Notiamo che i raggruppamenti presenti nella stringa sono:

- Gruppo con le parole chiave riguardanti il metodo di calibrazione.
- Gruppo riguardante il concetto di calibrazione.
- Gruppo contenente i possibili sensori citati.
- Gruppo riguardante il concetto di movimento nel robot o nel veicolo.
- Gruppo che esprime il fatto che la calibrazione avviene in un robot/veicolo.

Un 'altro elemento di cui è stato tenuto in considerazione, è il fatto che si voleva fare una ricerca sui metodi attuali e utilizzati. Per fare questo è stato imposto un ulteriore filtro nella stringa, che impone una data di pubblicazione non inferiore al 2019. Questo ha permesso di considerare solo articoli pubblicati negli ultimi cinque anni (in quanto l'anno 2024, nella data di stesura della tesi non è completo è stata fatta la scelta di includere anche il 2019).

### **3.3 Fase di selezione**

La fase di selezione è la parte nella quale vengono scelti i diversi fattori, che determinano l'insieme di articoli tra quelli disponibili per la stesura della ricerca sistematica, che verranno utilizzati.

#### **3.3.1 Criteri di selezione degli articoli**

La scelta dei criteri con i quali effettuare la selezione è stata basata sia sulle caratteristiche specifiche di ognuno dei 616 articoli che su quelle più generali del journal o della conference sul quale sono stato pubblicati. Per avere quindi informazioni sulle riviste in cui gli articoli erano pubblicati, è stata fatta la scelta di affidarsi per uniformità dei dati sulle riviste a un solo database.

Tra le varie possibilità, quella che è risultata tra le più complete e espressive, è stata Scimago [5].

Tra le caratteristiche dell'articolo prese in considerazione sono presenti:

- Citazioni: perché danno una rappresentazione di quanto l'articolo è stato preso in considerazione dalla comunità.
- Anno di pubblicazione: in quanto un articolo pubblicato nell'anno corrente tipicamente contiene informazioni più recenti e aggiornate.

Mentre tra le caratteristiche del journal o della conference che sono state considerate ci sono:

- Numero totale di riferimenti alla rivista: che dà una misura del credito che viene dato alla rivista dalla comunità.
- Percentuale femminile come rappresentazione dell'inclusione e della diversità.
- Il numero totale di citazioni per documento negli ultimi tre anni, che da una misura di quanto significativi sono gli articoli pubblicati nella rivista.
- Il numero totale di documenti negli ultimi tre anni, che dà una rappresentazione di quanto prolifica sia stata la rivista.
- L'indice di Hirsch, come rappresentazione dell'impatto a lungo termine della produttività e dell'impatto delle pubblicazioni sul numero di citazioni della rivista .

- L'indice SJR di Scimago misura l'influenza scientifica delle riviste accademiche, si basa sul numero di citazioni e sul prestigio delle pubblicazioni di una rivista.
- Il quartile di appartenenza, ovvero una posizione rispetto alle altre riviste nello stesso ambito accademico.
- Numero totale di articoli pubblicati dalla rivista: perché da un'indicazione di quanto essa sia stata produttiva in un dato numero di anni (in questo caso 3).

E' importante osservare che i fattori che vengono considerati, hanno spesso un'importanza, non tanto singolarmente, bensì in combinazione tra di loro.

Ad esempio l'anno di pubblicazione e le citazioni: in questo caso va infatti notato che preso da solo, il numero di citazioni promuoverebbe gli articoli buoni ma più datati, poiché hanno avuto più tempo per ricevere citazioni dagli studi fatti successivamente. Allo stesso modo l'anno di pubblicazione, come criterio singolo non avrebbe molto peso sulla qualità effettiva dell'articolo. Quindi, quello che è auspicabile fare in questa situazione è una valutazione pesata dei vari fattori, dove attribuiremo a ciascuno di essi un coefficiente che rappresenterà quanto quello specifico fattore è rilevante.

### 3.3.2 Processo di filtro e selezione

Come anticipato, per la fase di filtraggio baseremo la scelta degli articoli sui fattori precedentemente elencati, pesati in base alla loro rilevanza. I coefficienti utilizzati sono:

- Citazioni: 0.25
- Indice SJR: 0.15
- Anno di pubblicazione: 0.1
- Numero di citazioni per documento negli ultimi tre anni: 0.1
- Indice di Hirsch: 0.1
- Quartile di appartenenza: 0.1
- Numero totale di articoli pubblicati negli ultimi tre anni: 0.05
- Percentuale femminile: 0.05
- Numero di riferimenti per documento: 0.05
- Numero di riferimenti negli ultimi tre anni: 0.05

Invece la formula utilizzata è la seguente:

$$\text{Media ponderata} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i \cdot p_i)}{\sum_{i=1}^n p_i} \quad (3.1)$$

dove  $x_i$  è il valore associato al fattore per un particolare articolo, mentre  $p_i$  è il valore del coefficiente associato al fattore. Notiamo però che la sommatoria:

$$\sum_{i=1}^n p_i = 1$$

quindi semplifichiamo in:

$$\text{Media ponderata} = \sum_{i=1}^n (x_i \cdot p_i) \quad (3.2)$$

A questa formula si deve aggiungere una normalizzazione, in quanto è desiderabile che il valore risultante sia un indice compreso tra 0 e 1, quindi anche i singoli  $x_i$  dovranno rispettare questa regola. Come conseguenza sono stati imposti ai valori  $x_i$ , per ognuno dei fattori  $i$ -esimi, degli aggiustamenti. Ad esempio per le citazioni, il valore  $x_i$  considerato sarà il numero delle citazioni divisi per il numero massimo di citazioni tra gli articoli trovati. La formula finale con tutti gli aggiustamenti (ottenuta svolgendo la sommatoria) è:

$$\begin{aligned} & \frac{\text{citazioni}}{\max(\text{citazioni}_1 : \text{citazioni}_{616})} \cdot p_{\text{citazioni}} \\ & + \frac{\text{sjr}}{\max(\text{sjr}_1 : \text{sjr}_{616})} \cdot p_{\text{sjr}} \\ & + \frac{1}{\text{quartile}} \cdot p_{\text{quartile}(Q_i)} \\ & + \frac{\text{hindex}}{\max(\text{hindex}_1 : \text{hindex}_{616})} \cdot p_{\text{hindex}} \\ & + \frac{\text{citazioni\_documento}}{\max(\text{citazioni\_documento}_1 : \text{citazioni\_documento}_{616})} \cdot p_{\text{citazioni\_documento}} \\ & + \frac{1}{2025 - \text{anno\_pubblicazione}_1} \cdot p_{\text{anno\_pubblicazione}} \\ & + \frac{\text{riferimenti\_per\_documento}}{\max(\text{riferimenti\_per\_documento}_1 : \text{riferimenti\_per\_documento}_{616})} \cdot p_{\text{riferimenti\_per\_documento}} \\ & + \frac{\text{riferimenti\_totali}}{\max(\text{riferimenti\_totali}_1 : \text{riferimenti\_totali}_{616})} \cdot p_{\text{riferimenti\_totali}} \\ & + \frac{\text{percentuale\_femminile}}{\max(\text{percentuale\_femminile}_1 : \text{percentuale\_femminile}_{616})} \cdot p_{\text{percentuale\_femminile}} \\ & + \frac{\text{produttività}}{\max(\text{produttività}_1 : \text{produttività}_{616})} \cdot p_{\text{produttività}} \end{aligned}$$

Dove vale che:

$$\text{quartile}(Q_i) = \begin{cases} 1 & \text{se } Q_i = \text{"Q1"} \\ 2 & \text{se } Q_i = \text{"Q2"} \\ 3 & \text{se } Q_i = \text{"Q3"} \\ 4 & \text{se } Q_i = \text{"Q4"} \\ 1000 & \text{se } Q_i = \text{"-"} \end{cases}$$

Si nota che nella sezione precedente (3.3.2) il valore 1000 è stato associato al trattino (-), in quanto per alcune riviste non era stata fatta la suddivisione in quartili e il trattino è stato messo al posto del valore. In questi casi è stato usato un valore molto alto in modo da rendere nulla l'influenza del quartile di appartenenza della rivista sulla formula (vedi 3.3.2).

La parte successiva consiste nel procurarsi i dati. Si ricorda che tali dati sono stati ottenuti tramite i database di Scimago e Scopus. Un problema emerso è che i dati di Scimago non sono aggiornati all'ultimo anno, e alcune riviste compaiono solo nei ranking degli anni precedenti. Per ovviare a questo problema, è stata fatta la scelta di estendere i dati sulle riviste a quelli degli ultimi 5 anni. Anche con questi accorgimenti, non tutti gli articoli trovavano corrispondenze nei dati di Scimago, ma la causa era la loro completa assenza sulla piattaforma.

Poiché le riviste in questione (quelle completamente assenti su Scimago) non sono ne tra le principali, ne tra le più prolifiche, è stata presa la decisione di accettare quest'incompletezza dei dati come prezzo per avere uniformità nei criteri di valutazione dei journal e delle conference, e quindi di non utilizzare altri database al di fuori di Scimago.

A questo punto con la formula(3.3.2) e i dati è stata prodotta una classifica, basata sul valore dell'indice, dato dalla media ponderata dei fattori per ciascun articolo. Tra i valori è stato riscontrato un range che va da 0.017 a un massimo di 0.57.

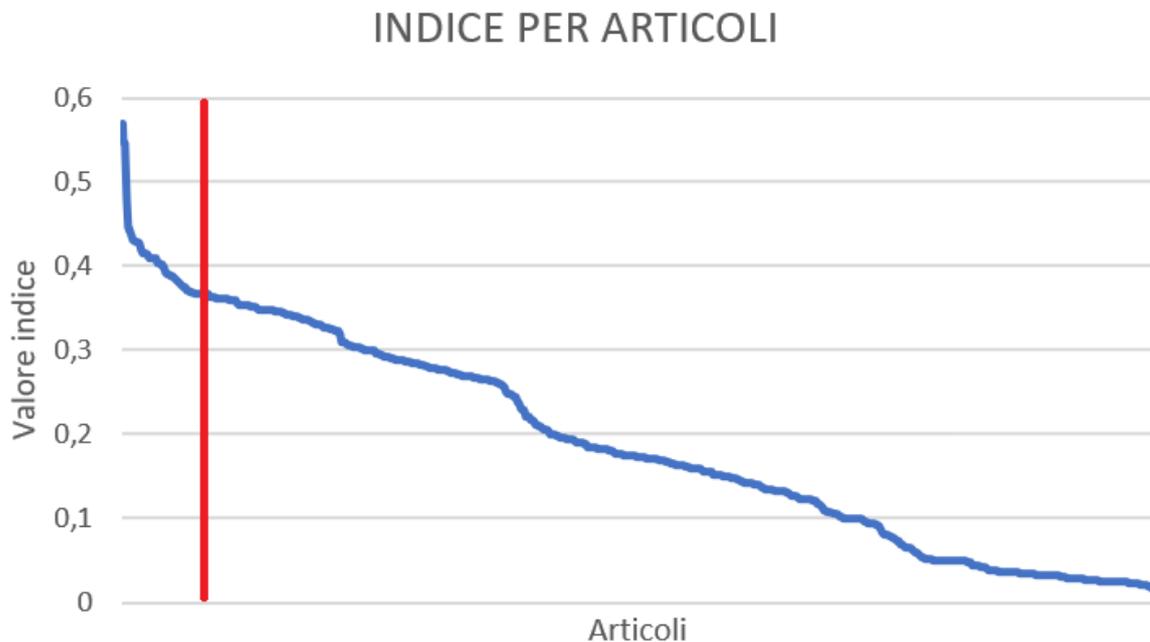


Figura 3.3: Andamento dell'indice (nell'asse X ci sono punti associati agli articoli, mentre nell'asse Y c'è il valore dell'indice associato a ogni articolo)

Si assume che i primi cinquanta articoli siano un numero sufficiente per effettuare una ricerca completa.

Si nota che a questo numero di articoli corrisponde una soglia, equivalente a 0.366 (sul grafico 3.3 segnato dalla linea in rosso), che si può notare essere un valore relativamente molto alto.

Si riporta di seguito un ulteriore processo di selezione definito screening, non basato su criteri superficiali come le citazione o la rivista, bensì sulla lettura di titolo, abstract e testo.

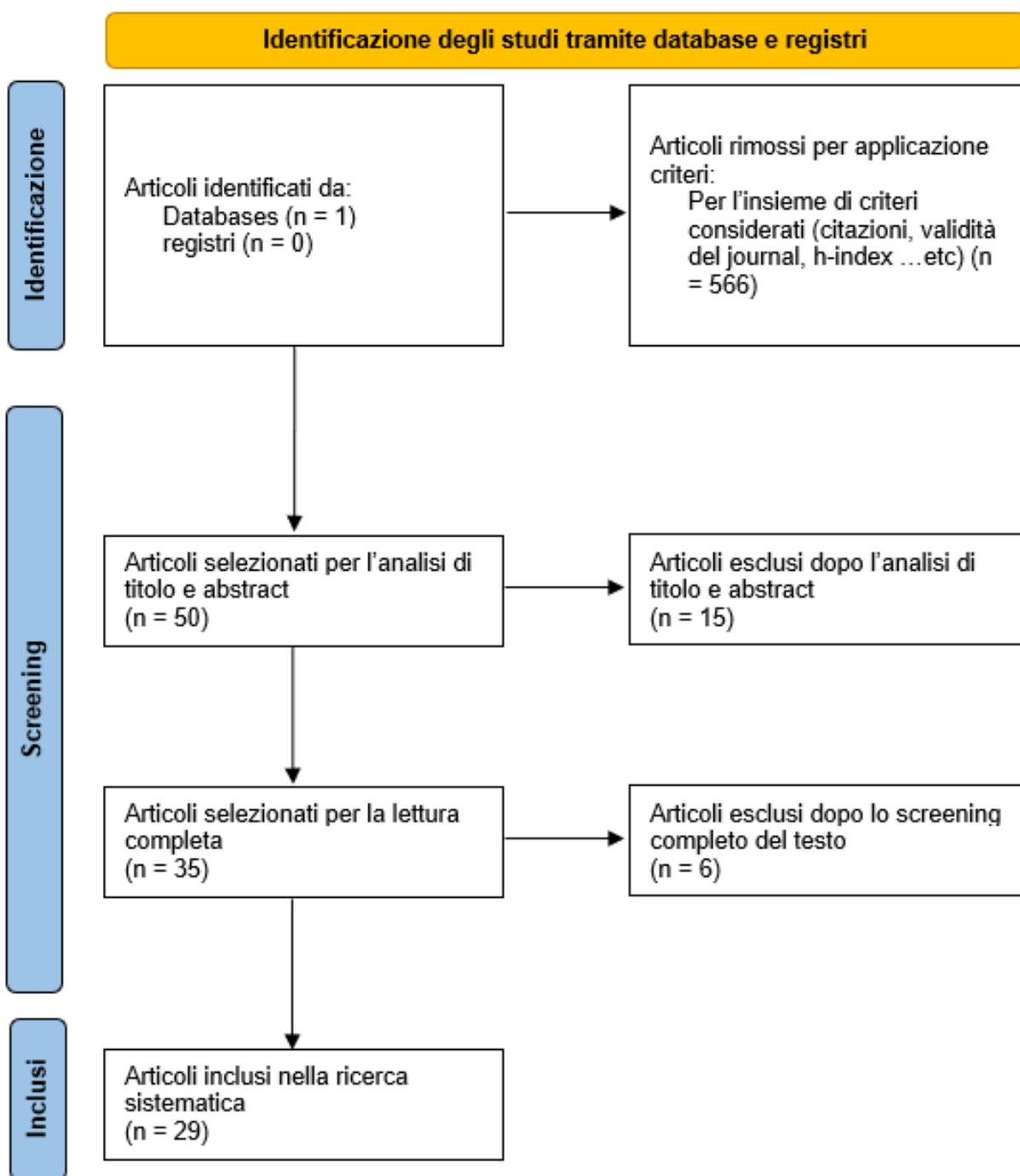


Figura 3.4: tabella fase ricerca Scopus

Notiamo che dell'insieme di articoli considerati nello screening, quelli che alla fine sono stati presi in considerazione da questa ricerca consistono del 58% del totale (ovvero 29 sui 50 letti).

Questo, al contrario dell'apparenza è un buon risultato, in quanto molti degli articoli scartati (42%, ovvero 21 sui 50 letti) non sono stati considerati perché il tipo di articolo non poteva

essere considerato (ad esempio le 6 revisioni trovate, ovvero il 12% degli scartati). Per una chiara visualizzazione della selezione degli articoli fare riferimento alla figura 3.5.

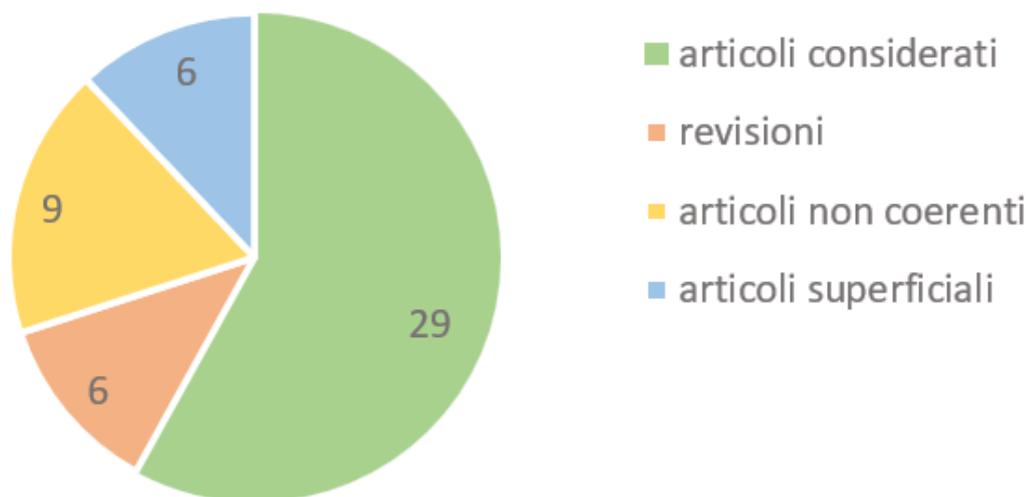


Figura 3.5: Articoli in base alla selezione



# Capitolo 4

## Analisi dei risultati

In questo capitolo sono stati analizzati i risultati della ricerca svolta secondo le modalità descritte nel capitolo (3). Per rendere la comparazione più chiara sono stati rappresentati i vari articoli in base ad alcuni campi all'interno di una tabella. Inoltre è stata riportata anche la descrizione degli specifici metodi usati negli articoli.

### 4.1 Tabelle di Raggruppamento

#### 4.1.1 Tabelle comparative

Nella tabella 4.1.1 sono stati riportati tutti i metodi presenti in ciascun articolo per effettuare la calibrazione. La posizione nella tabella degli articoli rispetta quella della classifica generata a partire dall'indice calcolato nel capitolo 3. Le colonne delle tabelle includono i seguenti campi:

- **Anno di pubblicazione:** Che coincide con l'anno nel quale l'articolo è stato pubblicato nella rivista.
- **Citazioni:** Rappresenta il numero di volte nelle quali l'articolo è stato citato in altri articoli dalla sua pubblicazione. E' una buona rappresentazione di quanto l'articolo è stato rilevante nella comunità scientifica.
- **Categoria:** Rappresenta il gruppo di appartenenza del metodo utilizzato. Dà un indicazione generica di come sarà effettuata la calibrazione nell'articolo.
- **Sensori:** Sono i sensori che il metodo presente nell'articolo è in grado di calibrare.
- **Criteri di valutazione:** Sono i criteri che sono presenti nell'articolo come forma di validazione della tecnica proposta.
- **Applicazione:** Coincide con l'ambito per cui la tecnica proposta dall'articolo è pensata (non necessariamente equivale a quello in cui viene applicata).

- **Self-calibrated:** Ovvero se la calibrazione del robot avviene in maniera autonoma oppure se è necessario un supporto esterno. Ad esempio un ambiente controllato (presenza di target o altri elementi) non lo rende self-calibrated.

<b>Metodo</b>	<b>Anno</b>	<b>Citazioni</b>	<b>Categoria</b>	<b>Sensori</b>	<b>criterio di valutazione</b>	<b>Applicazione</b>	<b>self-calibrated</b>
«DC-VINS: Dynamic Camera Visual Inertial Navigation System with Online Calibration» [6]	2021	1	model-based	camera-IMU	accuratezza	navigazione autonoma	Si
«Meta-Calib: A generic, robust and accurate camera calibration framework with ARUCO-encoded meta-board» [7]	2024	1	model-based, instrument-based	camera	accuratezza, robustezza, efficienza	generica	Si
«A novel motion-based online temporal calibration method for multi-rate sensors fusion» [8]	2022	3	motion-based	RISS, IMU, GNSS	accuratezza, robustezza, efficienza	navigazione autonoma	Si
«Improvements to target-based 3D LiDAR to camera calibration» [9]	2020	98	model-based, instrument-based	camera, LIDAR	robustezza, efficienza, accuratezza	generica	No

<b>Metodo</b>	<b>Anno</b>	<b>Citazioni</b>	<b>Categoria</b>	<b>Sensori</b>	<b>criterio di valutazione</b>	<b>Applicazione</b>	<b>self-calibrated</b>
«Targetless Spatiotemporal Calibration of Multi-LiDAR Multi-IMU System Based on Continuous-Time Optimization» [10]	2024	2	model-based	LIDAR, IMU,	accuratezza, robustezza, efficienza, analisi comparativa	navigazione autonoma	Si
«Design, calibration, and testing of a mobile sensor system for air pollution and built environment data collection: The urban scanner platform» [11]	2023	18	model-based	camera, IMU, anemometro, LIDAR, GPS	accuratezza	Robotica di servizio	No
«Online Calibration of Extrinsic Parameters for Solid-State LiDAR Systems» [12]	2024	0	model-based	LIDAR	accuratezza	Navigazione autonoma	Si

<b>Metodo</b>	<b>Anno</b>	<b>Citazioni</b>	<b>Categoria</b>	<b>Sensori</b>	<b>criterio di valutazione</b>	<b>Applicazione</b>	<b>self-calibrated</b>
«Adaptive Point-Line Fusion: A Targetless LiDAR-Camera Calibration Method with Scheme Selection for Autonomous Driving» [13]	2024	0	model-based	camera, LIDAR	accuratezza, robustezza	Navigazione autonoma	No
«Probability-Based LIDAR-Camera Calibration Considering Target Positions and Parameter Evaluation Using a Data Fusion Map» [14]	2024	0	model-based, instrument-based	camera, LIDAR	accuratezza	Navigazione autonoma	no
«A Novel Machine Learning-Based ANFIS Calibrated RISS/GNSS Integration for Improved Navigation in Urban Environments» [15]	2024	1	instrument-based, learning-based, model based	camera-camera	accuratezza, robustezza	Navigazione autonoma	No

Metodo	Anno	Citazioni	Categoria	Sensori	criterio di valutazione	Applicazione	self-calibrated
«Structured Light-Based Underwater Collision-Free Navigation and Dense Mapping System for Refined Exploration in Unknown Dark Environments» [16]	2024	1	model-based	IMU, precision sensor, DVL, sensore di luce strutturata	accuratezza, robustezza	Robotica di esplorazione	No
«MUN-FRL: A Visual-Inertial-LiDAR Dataset for Aerial Autonomous Navigation and Mapping» [17]	2024	0	model-based	camera, IMU, LIDAR, GNSS, RTK	accuratezza, robustezza	Robotica di esplorazione	No
«Robust odometry and mapping for multi-lidar systems with online extrinsic calibration» [18]	2021	109	model-based	LIDAR	accuratezza	generica	Si

Metodo	Anno	Citazioni	Categoria	Sensori	criterio di valutazione	Applicazione	self-calibrated
«Automatic extrinsic calibration method for lidar and camera sensor setups» [19]	2022	120	model-based	camera, LIDAR	accuratezza, robustezza	Navigazione autonoma	No
«Fast monocular visual-inertial calibration and initialization with weak environmental control and motion control» [20]	2024	0	model-based, motion based	LIDAR, IMU	accuratezza, efficienza, robustezza	Navigazione autonoma	No
«Robust calibration of vehicle solid-state LiDAR-camera perception system using correlation-weighted correspondences in natural environments» [21]	2023	3	model-based	camera, LIDAR	accuratezza, robustezza	Navigazione autonoma	No

Metodo	Anno	Citazioni	Categoria	Sensori	criterio di valutazione	Applicazione	self-calibrated
«Accuracy-and Simplicity-Oriented Self-Calibration Approach for In-Vehicle GNSS/INS/Vision System With Observability Analysis» [22]	2023	2	motion-based, model based	GNSS, IMU, INS, camera	accuratezza, analisi comparative, efficienza, robustezza	Navigazione autonoma	Si
«Soft2: Stereo visual odometry for road vehicles based on a point-to-epipolar-line metric» [23]	2022	49	motion-based, model-based	camera	accuratezza, robustezza	Navigazione autonoma	No
«MIMC-VINS: A versatile and resilient multi-IMU multi-camera visual-inertial navigation system» [24]	2021	71	model-based, motion-based	IMU	accuratezza, robustezza	Navigazione autonoma	Si

Metodo	Anno	Citazioni	Categoria	Sensori	criterio di valutazione	Applicazione	self-calibrated
«IN2LAAMA: Inertial lidar localization and autocalibration and mapping» [25]	2020	72	model-based, motion-based	LIDAR, IMU	accuratezza, robustezza	Navigazione autonoma	Si
«Targetless camera-LiDAR calibration in unstructured environments» [26]	2020	38	model-based, motion based	camera, LIDAR	accuratezza, efficienza, robustezza	Navigazione autonoma	Si
«Target-Free and User-Friendly Online Extrinsic Calibration of LiDAR-IMU-Camera Systems Guided by Motion Excitation Assessment» [27]	2024	0	motion-based, model-based instrument-based	LIDAR, IMU, camera	accuratezza, robustezza, efficienza	Navigazione autonoma	No
«Automatic Multi-Camera Calibration and Refinement Method in Road Scene for Self-driving Car» [28]	2023	0	motion-based	camera	accuratezza, efficienza, analisi comparativa, robustezza	Navigazione autonoma	Si

<b>Metodo</b>	<b>Anno</b>	<b>Citazioni</b>	<b>Categoria</b>	<b>Sensori</b>	<b>criterio di valutazione</b>	<b>Applicazione</b>	<b>self-calibrated</b>
«Drone-enabled multi-modal platform for inspection of industrial components» [29]	2022	8	model-based, instrument-based	camera, IMU, LIDAR	accuratezza	robotica industriale	No
«PSNet: LiDAR and camera registration using parallel Subnetworks» [30]	2022	7	learning-based, model-based, instrument-based	camera, LIDAR	accuratezza,	Navigazione autonoma	No
«CalibBD: Extrinsic calibration of the LiDAR and camera using a bidirectional neural network» [31]	2022	6	model-based, instrument-based learning-based	camera, LIDAR	accuratezza, efficienza,	Navigazione autonoma	Si

Metodo	Anno	Citazioni	Categoria	Sensori	criterio di valutazione	Applicazione	self-calibrated
«Learning-based object detection and localization for a mobile robot manipulator in SME production» [32]	2022	82	learning-based	camera (2D, 3D),	efficienza, accuratezza	Robotica industriale	No
«Design, calibration, and evaluation of a backpack indoor mobile mapping system» [33]	2019	59	motion-based, model-based	camera, LIDAR, IMU	accuratezza, robustezza, efficienza	Robotica di servizio	No
«Targetless Lidar-camera via Cross-modality Structure Consistency» [34]	2023	2	model-based	camera, LIDAR	accuratezza	generica	No

Tabella 4.10: Tabella riassuntiva metodi

## 4.2 Descrizione Riassuntiva degli Articoli

### 4.2.1 Sintesi degli articoli principali

Nella tabella 4.2.1 una breve descrizione dei metodi utilizzati in ciascun articolo. Si nota che non in tutti gli articoli la calibrazione multi-sensore è il focus principale, tuttavia una descrizione accurata di questa è presente in ogni articolo preso in considerazione.

Metodo	Descrizione
«DC-VINS: Dynamic Camera Visual Inertial Navigation System with Online Calibration» [6]	Calibrazione estrinseca online tra una telecamera montata su un meccanismo in movimento e un'IMU montata sulla carrozzeria del veicolo integrata in una pipeline di Visual Odometry.
«Meta-Calib: A generic, robust and accurate camera calibration framework with ArUco-encoded meta-board» [7]	Introduce un framework di calibrazione per telecamere che si basa su una scheda ArUco [35]. Offre una calibrazione robusta, generica e accurata per diverse configurazioni di telecamere.
«A novel motion-based online temporal calibration method for multi-rate sensors fusion» [8]	Tecnica di calibrazione temporale online per la fusione di sensori a diverse frequenze, basata sui vincoli di movimento dei sensori.
«Improvements to target-based 3D LiDAR to camera calibration» [9]	Sviluppo un metodo di adattamento per la trasformazione da LiDAR a telecamera monocolare che evita il compito complesso di estrarre i bordi del bersaglio dalla nuvola di punti.
«Targetless Spatiotemporal Calibration of Multi-LiDAR Multi-IMU System Based on Continuous-Time Optimization» [10]	Approccio di calibrazione spaziotemporale accurato e facile da usare, progettato per sistemi con più LiDAR e più IMU, basato su una stima batch in tempo continuo. Questo metodo supporta sia LiDAR meccanici rotanti che LiDAR a stato solido con piccolo campo visivo (FoV).

<b>Metodo</b>	<b>Descrizione</b>
«Design, calibration, and testing of a mobile sensor system for air pollution and built environment data collection: The urban scanner platform» [11]	Metodi di calibrazione di sensori che calibrano informazioni sul grado di inquinamento dell'aria, sul meteo e sull'ambiente circostante tramite LIDAR e GPS.
«Online Calibration of Extrinsic Parameters for Solid-State LIDAR Systems» [12]	Metodo per la calibrazione online tra più LIDAR a stato solido, individuando le corrispondenze tra punti delle nuvole di punti dei vari sensori.
«Adaptive Point-Line Fusion: A Targetless LiDAR–Camera Calibration Method with Scheme Selection for Autonomous Driving» [13]	Metodo di calibrazione estrinseca senza l'uso di bersagli per telecamere monoculari e sensori LIDAR con campi visivi non sovrapposti.
«Probability-Based LIDAR–Camera Calibration Considering Target Positions and Parameter Evaluation Using a Data Fusion Map» [14]	Analisi dettagliata degli effetti dell'uso di bersagli di calibrazione sulla fusione dei dati e dei fattori chiave da considerare nella loro disposizione durante la calibrazione estrinseca.
«A Novel Machine Learning-Based ANFIS Calibrated RISS/GNSS Integration for Improved Navigation in Urban Environments» [15]	Utilizzo di una tecnica di calibrazione innovativa basata su un sistema Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) basato sull'apprendimento automatico, al fine di migliorare l'accuratezza e l'affidabilità del RISS.
«Structured Light-Based Underwater Collision-Free Navigation and Dense Mapping System for Refined Exploration in Unknown Dark Environments» [16]	I parametri estrinseci tra il DVL (Doppler Velocity Log) e la telecamera sono calibrati in modo innovativo utilizzando BSL (Batch Smoothing and Learning), migliorando così la robustezza del processo.

<b>Metodo</b>	<b>Descrizione</b>
«MUN-FRL: A Visual-Inertial-LiDAR Dataset for Aerial Autonomous Navigation and Mapping» [17]	la calibrazione viene effettuata utilizzando un approccio combinato che coinvolge la visualizzazione (camera), l'inerzia (IMU) e il LIDAR.
«Robust odometry and mapping for multi-lidar systems with online extrinsic calibration» [18]	Propone un sistema per ottenere una calibrazione estrinseca robusta e simultanea, l'odometria e anche la mappatura nel caso di LIDAR multipli.
«Automatic extrinsic calibration method for lidar and camera sensor setups» [19]	Metodo per calibrare i parametri estrinseci di qualsiasi coppia di sensori, inclusi LiDAR, telecamere monoculari o stereo, indipendentemente dalle loro modalità o combinazioni.
«Fast monocular visual-inertial calibration and initialization with weak environmental control and motion control» [20]	Metodo di calibrazione rapida e inizializzazione dei sensori visivi monoculari e inerziali (IMU) in condizioni di controllo dell'ambiente e del movimento deboli. Vengono anche sfruttate tecniche di ottimizzazione per allineare i dati visivi e inerziali.
«Robust calibration of vehicle solid-state LiDAR-camera perception system using line-weighted correspondences in natural environments» [21]	Approccio innovativo per calibrare in modo robusto i parametri estrinseci di un sistema LiDAR a stato solido e telecamera in un ambiente naturale.
«Accuracy-and Simplicity-Oriented Self-Calibration Approach for In-Vehicle GNSS/INS/Vision System With Observability Analysis» [22]	Metodo di self-calibration preciso e "plug-and-play" per sistemi di navigazione GNSS/inerziali (INS) e visivi installati su veicoli.

<b>Metodo</b>	<b>Descrizione</b>
«Soft2: Stereo visual odometry for road vehicles based on a point-to-epipolar-line metric» [23]	La calibrazione viene realizzata utilizzando una metrica basata sulla linea epipolare per odometria visiva stereo su veicoli strada.
«MIMC-VINS: A versatile and resilient multi-IMU multi-camera visual-inertial navigation system» [24]	Calibrazione tra telecamere e IMU, determinazione dei parametri estrinseci che definiscono le relazioni spaziali tra sensori. Determinazione della posizione e dell'orientamento relativo di ciascun sensore all'interno del sistema.
«IN2LAAMA: Inertial lidar localization autocalibration and mapping» [25]	Calibrazione estrinseca basata su un LiDAR 3D e un'unità di misura inerziale a sei gradi di libertà (IMU).
«Targetless camera-LiDAR calibration in unstructured environments» [26]	Metodo di calibrazione che consente di ottenere una stima accurata della trasformazione rigida a sei gradi di libertà (6-DOF), cioè i parametri estrinseci, tra la telecamera e i sensori LiDAR
«Learning-based object detection and localization for a mobile robot manipulator in SME production» [32]	Utilizzo di algoritmi di apprendimento automatico per migliorare la rilevazione e la localizzazione degli oggetti, adattando e ottimizzando la calibrazione basata sui dati di addestramento e test.
«Design, calibration, and evaluation of a backpack indoor mobile mapping system» [33]	Calibrazione dei sensori presenti in uno zaino, tra cui LIDAR e camere con lo scopo di effettuare la mappatura dell'ambiente

<b>Metodo</b>	<b>Descrizione</b>
«Targetless Lidar-camera Calibration via Cross-modality Structure Consistency» [34]	Calibrazione senza bersagli basata sulla coerenza strutturale tra modelli di dati di LiDAR e telecamera, utilizzo di tecniche di ottimizzazione per la calibrazione.
«Target-Free and User-Friendly Online Extrinsic Calibration of LiDAR-IMU-Camera Systems Guided by Motion Excitation Assessment» [27]	Framework innovativo di calibrazione estrinseca online e target-free per LiDAR, IMU e telecamera.
«Automatic Multi-Camera Calibration and Refinement Method in Road Scene for Self-driving Car» [28]	Metodo robusto automatico per la calibrazione e il perfezionamento di più telecamere (sia pinhole che fisheye) in scenari stradali.
«Drone-enabled multimodal platform for inspection of industrial components» [29]	Calibrazione estrinseca per determinare la posizione e l'orientamento relativo tra i diversi sensori montati sul drone. Includendo l'allineamento spaziale tra telecamere, LIDAR e altri sensori.
«PSNet: LiDAR and camera registration using parallel Subnetworks» [30]	Utilizzo della tecnologia PSNet, una rete neurale convoluzionale (CNN) end-to-end progettata per la calibrazione. Creazione di una rete di calibrazione che utilizza sottoreti parallele per ottenere caratteristiche a diverse risoluzioni, che vengono poi fuse tra loro.
«CalibBD: Extrinsic calibration of the LiDAR and camera using a bidirectional neural network» [31]	Utilizzo di una rete neurale che non richiede bersagli specifici né una configurazione offline per trovare la trasformazione a sei gradi di libertà (6 DoF) tra LiDAR e telecamera. Metodo target-free.

Tabella 4.16: Tabella con descrizioni dei metodi



# Capitolo 5

## Discussione dei risultati

In questo capitolo, è stata fatta una discussione dei risultati mostrati nel capitolo precedente (4), sia dal punto di vista del metodo specifico sia dal punto di vista della categoria a cui appartiene. Tramite questa osservazione critica dei risultati è stato possibile trarre diverse conclusioni, non di immediata intuizione nella lettura di un singolo articolo, ma che sono invece evidenti tramite una lettura più completa degli articoli presenti nella letteratura. Ad esempio ci si potrebbe accorgere che alcune tipologie di calibrazione sono più efficaci in alcuni contesti di altre.

### 5.1 Analisi delle Caratteristiche dei Metodi

#### 5.1.1 Confronto tra metodi

Nel fare il confronto dei vari metodi analizzati sono stati presi in considerazione alcuni dei campi utilizzati nella tabella 4.2.1.

Si osserva che per quanto riguarda sensori, criteri di valutazione e categorie, la somma dei valori non equivale al numero di articoli, questo perché i campi hanno spesso più di un valore.

#### Conteggio per Anno

- **2019:** 1 articolo
- **2020:** 4 articoli
- **2021:** 3 articoli
- **2022:** 7 articoli
- **2023:** 5 articoli
- **2024:** 9 articoli

### **Conteggio per criteri di valutazione**

- **robustezza:** 18 articolo
- **accuratezza:** 29 articoli
- **efficienza:** 10 articoli
- **analisi comparativa:** 3 articoli

### **Conteggio per Categoria**

- **Model-based:** 22 articoli
- **Motion-based:** 7 articoli
- **Instrument-based:** 6 articoli
- **Learning-based:** 4 articoli

### **Conteggio per Sensori**

- **Camera:** 18 articoli
- **LIDAR:** 18 articoli
- **IMU:** 13 articoli
- **GNSS:** 3 articoli
- **RISS:** 1 articolo
- **Anemometro:** 1 articolo
- **DVL:** 1 articolo
- **RTK:** 1 articolo
- **Sensore di luce strutturata:** 1 articolo
- **Pression sensor:** 1 articolo

### **Conteggio per Applicazione**

- **Generica:** 4 articoli
- **Navigazione autonoma:** 17 articoli

- **Robotica industriale:** 4 articoli
- **Robotica di servizio:** 2 articoli
- **Robotica d'esplorazione:** 2 articoli

### Conteggio per Self-calibrated

- **Si:** 13 articoli
- **No:** 16 articoli

Le considerazioni risultanti sono state:

- **Sensori:** I sensori più frequenti sono le camere (spesso con l'abbinamento 2d e 3d), IMU e LIDAR. I quali sono anche i sensori che dominano gli ambiti della guida autonoma e la robotica di esplorazione. Altre tipologie di sensore come il GNSS e l'anemometro sono meno comuni e usate in contesti più specifici.
- **Criteri di valutazione:** Il criterio di valutazione presente in ogni articolo è l'accuratezza delle tecniche, questo rispecchia il fatto che una delle metriche più rilevanti nelle applicazioni è la precisione. Secondariamente abbiamo robustezza e efficienza, anch'esse molto utilizzate. Infine notiamo che l'analisi comparativa è una tecnica inusuale e mai utilizzata singolarmente.
- **Self-calibration:** Anche la self calibration divide pressoché a metà gli articoli. Spesso inoltre gli articoli che fanno uso di questa tecnica evidenziano la necessità di implementare l'autocalibrazione in futuro.
- **Numero di citazioni:** per quanto riguarda il numero di citazioni, si osserva il fatto che gli articoli più vecchi hanno effettivamente un maggior numero di citazioni.
- **Criteri di valutazione:** osserviamo che i criteri maggiormente utilizzati sono accuratezza e robustezza, come si poteva immaginare dal contesto dinamico e preciso di applicazione delle tecniche.
- **Applicazioni:** notiamo che per quanto riguarda le applicazioni, quella emergente è la navigazione autonoma, forse anche alla recente attenzione da parte dell'industria automobilistica a questo settore. Secondariamente invece abbiamo robotica industriale, robotica di Servizio e robotica di esplorazione, per le quali delle nuove tecniche sono comunque in sviluppo.

## 5.2 Ricerca Futura

### 5.2.1 Aree di miglioramento

Tra i vari articoli, alcuni di quelli che fanno parte di questa ricerca sistematica hanno evidenziato la presenza di aree che hanno delle possibilità di miglioramento. Qui sono state riportate le osservazioni che questi articoli hanno fatto nei vari anni in cui sono stati pubblicati:

- Rebello et al. [6] 2021: Esplicita la necessità di effettuare miglioramenti nell'ambito della robustezza in ambienti dinamici, specialmente nel caso di calibrazione online.
- Zhou et al. [7] 2024: Mostra alcune limitazioni nell'adattamento a scenari reali e complessi.
- Mahdi et al. [15] 2024: Afferma che la dipendenza da una grande quantità di dati e di capacità computazionale può diventare un problema nell'addestramento degli algoritmi.
- Jiao et al. [18] 2021: Evidenza un problema nella calibrazione stabile e precisa con l'aumentare del numero di sensori LIDAR.
- Eckenhoff et al. [24] 2021: Osserva che la maggior parte dei metodi con un solo punto di vista ha una limitata scalabilità e complessità di integrazione con diversi IMU e telecamere.
- Wang et al. [27] 2024: Osserva che la gran parte dei metodi target-free hanno necessita di aggiustare alcuni parametri e ha bisogno di una sincronizzazione temporale.
- Li et al. [10] 2024: Evidenzia delle difficoltà nel gestire la sincronizzazione e la calibrazione temporale di molteplici LIDAR e IMU nel contesto target-less.
- Wu et al. [30] 2022: Osserva la presenza di limitazioni nella calibrazione di LIDAR e telecamere in ambienti complessi e variabili.
- Zhou et al. [13] 2024: Nota che l'allineamento delle caratteristiche osservate in modalità diverse può essere una sfida nel caso in cui sia presente rumore nelle misurazioni.
- Yamada e Yaguchi [14] 2024: Osserva che tipicamente la nuvola di punti 3D ha una bassa risoluzione e non ha informazioni sul colore.
- Xue et al. [20] 2024: Evidenzia le limitazioni che sono presenti quando si usa una calibrazione monoculare in ambienti con poco movimento.
- Zhou et al. [32] 2022: Nota la complessità della fase di addestramento per la rilevazione di oggetti nelle tecniche che fanno uso di reti neurali per effettuare la calibrazione.
- Li et al. [28] 2023: Osserva la difficoltà nella calibrazione di camere in presenza di

vibrazioni (o altri disturbi) nelle tecniche contemporanee.

## 5.2.2 Nuove direzioni di ricerca

Analizzando i vari articoli sono anche risultate evidenti delle direzioni di ricerca comuni nell'ambito della calibrazione multi-sensore e in particolare nel caso dei robot mobili.

- **Miglioramento della robustezza e della precisione**

Alcuni articoli osservano che l'accuratezza, specialmente nei contesti dinamici è ancora molto limitata. Una direzione possibile è quindi quella di ricercare algoritmi più resilienti che forniscano precisione anche in situazioni disturbate, che spesso i robot mobili si trovano ad affrontare [6] [15].

- **Riduzione della dipendenza dagli schemi target-based**

Una direzione futura potrebbe essere quella di basare la calibrazione non più sugli elementi di un ambiente strutturato bensì utilizzando elementi già presenti nelle circostanze [10] [34].

- **Integrazione multi-sensore**

In alcuni articoli si nota che sensori con tassi di aggiornamento differenti presentano difficoltà ulteriori nella calibrazione. Quindi una direzione futura potrebbe essere quella di sviluppare tecniche migliori per effettuare la calibrazione tra questi tipi di sensori [24] [11].

- **Ottimizzazione del tempo e della complessità**

Un'altra direzione è quella di sviluppare tecniche che riducano significativamente le risorse necessarie [8] [7].

- **Miglioramento nei sistemi di navigazione in ambienti complessi**

Una direzione di ricerca futura è quella di ridurre l'effetto della scarsa visibilità, anche mediante tecniche come la luce strutturata [16].

- **Applicazione delle tecniche di machine-learning nella calibrazione**

Una direzione di crescita della tecnologia potrebbe essere quella di ridurre la dimensione dei data-set e del tempo necessario per allenare i modelli poi usati nella calibrazione [32] [15].

- **Autocalibrazione (self-calibration)**

In alcuni articoli si evidenzia la necessità di ridurre la presenza dell'intervento umano nella calibrazione. Quindi si potrebbe rendere le tecniche sempre più autonome [21].



# Capitolo 6

## Conclusioni

Negli ultimi anni il campo della robotica ha visto un notevole progresso nell'ambito della calibrazione, anche tramite l'introduzione di nuove tecniche volte a risolvere i problemi pratici che l'utilizzo dei sistemi robotici autonomi ha portato ad affrontare. Recentemente sono state introdotte molteplici tecniche e metodi, i quali mirano a rendere le applicazioni della calibrazione multi-sensore sempre più efficiente, e migliore sotto diversi punti di vista come la robustezza e l'accuratezza.

Parte del processo stesso di evoluzione della tecnica sono le sfide che mira a risolvere. Tra queste, la presenza di un ambiente dinamico, la presenza di interferenze, sensori di difficile integrazione. Questa tesi ha fatto un particolare focus sulla calibrazione di sensori in robot mobili. Anche con l'utilizzo di protocolli standard, come PRISMA, è stata fatta una revisione sistematica della letteratura presente su questa tipologia di metodi. Come già affermato in precedenza con questo tipo di analisi generale, possono emergere degli aspetti che la scrittura di un articolo non avrebbe evidenziato. Infatti questa revisione ha reso possibile una comprensione approfondita su quali metodi siano migliori nei vari ambiti, oltre che alla individuazione delle caratteristiche, dei vantaggi e degli svantaggi di ciascuna di esse. Nello specifico ciò che è stato evidenziato è che i metodi model-based e instrument-based sono tra i più consigliati nei casi di situazioni poco dinamiche o con cambiamenti limitati, come la mappatura di ambienti; Mentre le tecniche motion-based sono le più indicate nel caso la precisione sia meno rilevante e lo sia invece l'abilità di effettuare cambiamenti rapidi nella calibrazione dei sensori. I metodi learning-based sono stati tra i più infrequenti e di conseguenza, vista la minima informazione fornita, hanno prodotto un numero minore di conclusioni. Ma questo era parzialmente prevedibile vista la recente comparsa tra le tecniche usate per la calibrazione in robot mobili.

Un altro aspetto emerso nella scrittura della revisione è il fatto che ci sono molte difficoltà pratiche come la calibrazione di sensori con frequenze differenti o la necessità di grandi risorse per effettuare la calibrazione. Oltre a questo sono stati individuati negli articoli molti spunti

per la ricerca futura, come la riduzione dell'utilizzo dei target di calibrazione e l'utilizzo di tecniche self-calibrated (vedi sezione 5.2.2). Questo in particolare comunica che il campo della calibrazione multi-sensore ha ancora molti miglioramenti tecnologici possibili, di conseguenza può avere nei prossimi anni uno sviluppo notevole.

# Bibliografia

- [1] D. J. Yeong, G. Velasco-Hernandez, J. Barry e J. Walsh, «Sensor and Sensor Fusion Technology in Autonomous Vehicles: A Review,» *Sensors*, vol. 21, n. 6, 2021, ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s21062140. indirizzo: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/6/2140>.
- [2] IBM. «What is LiDAR? »Indirizzo: <https://www.ibm.com/topics/lidar>.
- [3] Q. Huang, K. Zhu, K. Wu, W. Hua e Y. Zhu, «Multi-sensor Fusion for Perception in Complex Traffic Environments,» in *Communication, Computation and Perception Technologies for Internet of Vehicles*, Y. Zhu, Y. Cao, W. Hua e L. Xu, cur. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023, pp. 147–161, ISBN: 978-981-99-5439-1. DOI: 10.1007/978-981-99-5439-1\_8. indirizzo: [https://doi.org/10.1007/978-981-99-5439-1\\_8](https://doi.org/10.1007/978-981-99-5439-1_8).
- [4] M. J. Page et al., «PRISMA 2020 explanation and elaboration: updated guidance and exemplars for reporting systematic reviews,» *BMJ*, vol. 372, 2021. DOI: 10.1136/bmj.n160. eprint: <https://www.bmj.com/content/372/bmj.n160.full.pdf>. indirizzo: <https://www.bmj.com/content/372/bmj.n160>.
- [5] Elsevier, *Scopus: Access to Global Research*, <https://www.scopus.com/>, 2024.
- [6] J. Rebello, C. Li e S. L. Waslander, «DC-VINS: Dynamic Camera Visual Inertial Navigation System with Online Calibration,» in *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*, 2021, pp. 2559–2568.
- [7] P. Zhou et al., «Meta-Calib: A generic, robust and accurate camera calibration framework with ArUco-encoded meta-board,» *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 212, pp. 357–380, 2024.
- [8] W. Liu, Z. Li, S. Sun, H. Du e M. A. Sotelo, «A novel motion-based online temporal calibration method for multi-rate sensors fusion,» *Information Fusion*, vol. 88, pp. 59–77,
- [9] J.-K. Huang e J. W. Grizzle, «Improvements to target-based 3D LiDAR to camera calibration,» *IEEE Access*, vol. 8, pp. 134 101–134 110, 2020.

- [10] S. Li, X. Li, S. Chen, Y. Zhou e S. Wang, «Targetless Spatiotemporal Calibration of Multi-LiDAR Multi-IMU System Based on Continuous-Time Optimization,» *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2024.
- [11] A. Ganji et al., «Design, calibration, and testing of a mobile sensor system for air pollution and built environment data collection: The urban scanner platform,» *Environmental Pollution*, vol. 317, p. 120 720, 2023.
- [12] M. O. Mints, R. Abayev, N. Theisen, D. Paulus e A. von Gladiss, «Online Calibration of Extrinsic Parameters for Solid-State LIDAR Systems,» *Sensors*, vol. 24, n. 7, p. 2155, 2024.
- [13] Y. Zhou et al., «Adaptive Point-Line Fusion: A Targetless LiDAR–Camera Calibration Method with Scheme Selection for Autonomous Driving,» *Sensors*, vol. 24, n. 4, p. 1127, 2024.
- [14] R. Yamada e Y. Yaguchi, «Probability-Based LIDAR–Camera Calibration Considering Target Positions and Parameter Evaluation Using a Data Fusion Map,» *Sensors*, vol. 24, n. 12, p. 3981, 2024.
- [15] A. E. Mahdi, A. Azouz, A. Noureldin e A. Abosekeen, «A Novel Machine Learning-Based ANFIS Calibrated RISS/GNSS Integration for Improved Navigation in Urban Environments,» *Sensors*, vol. 24, n. 6, p. 1985, 2024.
- [16] Y. Ou et al., «Structured Light-Based Underwater Collision-Free Navigation and Dense Mapping System for Refined Exploration in Unknown Dark Environments,» *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2024.
- [17] R. G. Thalagala, O. De Silva, A. Jayasiri, A. Gubbels, G. K. Mann e R. G. Gosine, «MUN-FRL: A Visual-Inertial-LiDAR Dataset for Aerial Autonomous Navigation and Mapping,» *The International Journal of Robotics Research*, p. 02 783 649 241 238 358, 2024.
- [18] J. Jiao, H. Ye, Y. Zhu e M. Liu, «Robust odometry and mapping for multi-lidar systems with online extrinsic calibration,» *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 38, n. 1, pp. 351–371, 2021.
- [19] J. Beltrán, C. Guindel, A. De La Escalera e F. García, «Automatic extrinsic calibration method for lidar and camera sensor setups,» *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 23, n. 10, pp. 17 677–17 689, 2022.
- [20] Y. Xue et al., «Fast monocular visual-inertial calibration and initialization with weak environmental control and motion control,» *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 208, p. 111 024, 2024.

- [21] S. Tang et al., «Robust calibration of vehicle solid-state LiDAR-camera perception system using line-weighted correspondences in natural environments,» *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023.
- [22] S. Li, X. Li, Y. Zhou, S. Wang e S. Chen, «Accuracy-and Simplicity-Oriented Self-Calibration Approach for In-Vehicle GNSS/INS/Vision System With Observability Analysis,» *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023.
- [23] I. Cvišić, I. Marković e I. Petrović, «Soft2: Stereo visual odometry for road vehicles based on a point-to-epipolar-line metric,» *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 39, n. 1, pp. 273–288, 2022.
- [24] K. Eickenhoff, P. Geneva e G. Huang, «MIMC-VINS: A versatile and resilient multi-IMU multi-camera visual-inertial navigation system,» *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 37, n. 5, pp. 1360–1380, 2021.
- [25] C. Le Gentil, T. Vidal-Calleja e S. Huang, «IN2LAAMA: Inertial lidar localization autocalibration and mapping,» *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 37, n. 1, pp. 275–290, 2020.
- [26] M. Á. Muñoz-Bañón, F. A. Candelas e F. Torres, «Targetless camera-LiDAR calibration in unstructured environments,» *IEEE Access*, vol. 8, pp. 143 692–143 705, 2020.
- [27] Y. Wang, X. Zhang, R. Wang, Z. Song, S. Zhang e Y. Tong, «Target-Free and User-Friendly Online Extrinsic Calibration of LiDAR-IMU-Camera Systems Guided by Motion Excitation Assessment,» *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2024.
- [28] J. Li, J. Pi, P. Wei, Z. Luo e G. Yan, «Automatic Multi-Camera Calibration and Refinement Method in Road Scene for Self-driving Car,» *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2023.
- [29] P. Nooralishahi, F. López e X. P. Maldague, «Drone-enabled multimodal platform for inspection of industrial components,» *IEEE Access*, vol. 10, pp. 41 429–41 443, 2022.
- [30] Y. Wu, M. Zhu e J. Liang, «PSNet: LiDAR and camera registration using parallel Subnetworks,» *IEEE Access*, vol. 10, pp. 70 553–70 561, 2022.
- [31] A. D. Nguyen e M. Yoo, «CalibBD: Extrinsic calibration of the LiDAR and camera using a bidirectional neural network,» *IEEE Access*, vol. 10, pp. 121 261–121 271, 2022.
- [32] Z. Zhou, L. Li, A. Fürsterling, H. J. Durocher, J. Mouridsen e X. Zhang, «Learning-based object detection and localization for a mobile robot manipulator in SME production,» *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 73, p. 102 229, 2022.

- [33] S. Karam, G. Vosselman, M. Peter, S. Hosseinyalamdary e V. Lehtola, «Design, calibration, and evaluation of a backpack indoor mobile mapping system,» *Remote sensing*, vol. 11, n. 8, p. 905, 2019.
- [34] N. Ou, H. Cai e J. Wang, «Targetless Lidar-camera Calibration via Cross-modality Structure Consistency,» *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2023.
- [35] J. Jiang, X. Luo, Q. Luo, L. Qiao e M. Li, «An overview of hand-eye calibration,» *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 119, n. 1, pp. 77–97, 2022.