



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



DIPARTIMENTO
DI INGEGNERIA
DELL'INFORMAZIONE

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA INFORMATICA

PANORAMICA SULLA COMPONENTISTICA E CONFIGURAZIONE
DI PELLE ROBOTICA MULTIMODALE

Relatore:
Prof. Zanoni Enrico

Laureando:
Rebecchi Giulio

ANNO ACCADEMICO: 2021/2022

Data di laurea: 25 Novembre 2022

Abstract

Lo scopo di questo elaborato è quello di offrire al lettore una panoramica esaustiva sulla componentistica e configurazione che stanno alla base della realizzazione di una pelle robotica multimodale, ovvero una pelle elettronica modulare dotata di multipli tipi di sensori, progettata per essere utilizzata da una moltitudine di robot.

L'elaborato inizia con una breve introduzione riguardo l'utilità di una pelle robotica multimodale nell'ambito scientifico-tecnologico.

Segue immediatamente la descrizione delle singole cellule artificiali, ovvero dei moduli che uniti formano la pelle, dove vengono definite le specifiche della componentistica elettronica utilizzata, tra cui i sensori di vario genere montati su ogni cellula (prestando particolare attenzione alla realizzazione di un innovativo sensore di pressione capacitivo).

Viene poi illustrato come le cellule appena descritte formino una rete di comunicazione distribuita in diversi pezzi di pelle grazie alle loro porte di connessione, tramite l'uso di meccanismi software e di hardware esterno aggiuntivo.

Si prosegue con la spiegazione delle procedure di configurazione e localizzazione automatica delle cellule che, utilizzando gli accelerometri ed i LED delle cellule stesse, permettono di ricostruire in 3D le forme dei pezzi di pelle applicati ad un robot, per poi unire tali ricostruzioni in una rappresentazione omogenea utile ad individuare le cellule.

Vengono quindi delineate le tecniche (basate sugli accelerometri) tramite le quali la pelle può acquisire autonomamente sia parametri di tipo cinematico-dinamico che dati strutturali riguardanti gli arti robotici su cui è montata, dimostrando inoltre l'utilità di tali informazioni tramite metodi per la stima di modelli cinematici accurati.

Infine si mostra la soluzione al problema del montaggio della pelle sulle superfici dei robot per cui è appositamente progettata, interessandosi anche al cablaggio necessario.

Indice

Introduzione	1
1 Cellule sensoriali multimodali	2
1.1 Versione originale	2
1.1.1 Approccio	2
1.1.2 Descrizione del sistema	3
1.1.3 Modulo Tattile Multimodale HEX-O-SKIN	4
1.1.4 Risultati sperimentali	8
1.2 Versione aggiornata	12
1.2.1 Approccio	12
1.2.2 Aggiornamenti cellula unitaria	12
1.2.3 Sensore di forza discreto	13
1.2.4 Risultati sperimentali	19
2 Rete di comunicazione delle cellule	26
2.1 Rete dei moduli tattili (TMN)	26
2.1.1 Formazione della rete	26
2.1.2 Calibrazione della rete	27
2.1.3 Ridondanza della rete	28
2.1.4 Performance di rete	28
2.1.5 Migliorie	28
2.2 Unità di sezione tattile (TSU)	29
2.3 Cluster di calcolo tattile (TCC)	30
2.3.1 Controllore tattile	30
2.3.2 Controllore del robot	30
3 Configurazione e localizzazione automatica delle cellule	31
3.1 Ricostruzione dei pezzi di pelle in 3D	32
3.1.1 Approccio	32
3.1.2 Specifiche della pelle	32
3.1.3 Formulazione del problema	34
3.1.4 Soluzione del problema	36
3.1.5 Scalabilità	41

3.1.6	Limitazioni	41
3.1.7	Risultati sperimentali	42
3.2	Organizzazione spaziale autonoma delle ricostruzioni in 3D	45
3.2.1	Motivazioni ed approccio	45
3.2.2	Note sui moduli	46
3.2.3	Riutilizzo della ricostruzione 3D	46
3.2.4	Stima visiva della posa dei pezzi di pelle	47
3.2.5	Rappresentazione omogenea di un corpo rigido	51
3.2.6	Integrazione con un modello cinematico noto	52
3.2.7	Risultati sperimentali	53
4	Acquisizione automatica di informazioni e modelli cinematici/dinamici	56
4.1	Calibrazione autonoma ad anello aperto	57
4.1.1	Approccio	57
4.1.2	Sistema robotico	58
4.1.3	Esplorazione strutturale	61
4.1.4	Stima cinematica	64
4.1.5	Risultati Sperimentali	71
4.2	Modellazione cinematica autonoma con pelle modulare	73
4.2.1	Approccio	73
4.2.2	Sistema robotico	73
4.2.3	Algoritmi ausiliari	74
4.2.4	Analisi puntuale della circonferenza (CPA) con accelerometro	75
4.2.5	Estrazione del modello cinematico	82
4.2.6	Integrazione con le ricostruzioni in 3D	84
4.2.7	Risultati Sperimentali	86
5	Montaggio della pelle	89
5.1	Ancorare la pelle robotica ai robot	89
5.2	Sistema di gestione del cablaggio	90
	Conclusioni	92
	Bibliografia	93

Introduzione

Le capacità di un robot, umanoide o meno, di interagire in modo costruttivo e sicuro con i propri dintorni sono dettate per definizione dalla quantità e qualità delle informazioni su tali dintorni, in modo parallelo agli esseri umani ed alla loro interazione con l'ambiente in cui operano.

Tipicamente i robot ricavano tali informazioni da sensori integrati altamente specializzati, imitando ancora gli umani ed i loro organi sensoriali. Basti pensare alla telecamera che fissa un braccio robotico come ad un paio d'occhi che fissano un braccio in carne ed ossa.

Gli umani sono però dotati di un organo sensoriale estremamente utile ed esteso che è ancora raro osservare in versione robotica, ovvero la pelle. La pelle umana è infatti ricca di minuscoli organi sensoriali e terminazioni nervose che ci permettono di identificare una svariata moltitudine di stimoli con una precisione eccellente, fornendo informazioni sullo stimolo in sé e su dove esso si sia manifestato sulla superficie della pelle stessa. Tali informazioni tattili guidano le nostre azioni volontarie e ci avvisano di pericoli in cui ci saremmo altrimenti imbattuti.

Molti robot, soprattutto bracci manipolatori ed umanoidi, potrebbero però trarre enorme beneficio dalle informazioni che una pelle robotica fornirebbe loro, donandogli ad esempio la capacità di valutare la forma, consistenza e temperatura di un oggetto tramite il tatto distribuito, oppure quella di percepire la presenza di un altro robot o essere umano in contatto con la propria struttura, evitando possibili movimenti che danneggerebbero l'entità percepita.

Sono queste potenzialità della pelle umana che hanno spinto la squadra di studiosi composta da Philipp Mittendorf, Gordon Cheng *et al.* ad intraprendere un'opera di ricerca e sviluppo volta all'implementazione di una soluzione completa per la creazione di una pelle robotica multimodale, ovvero una pelle artificiale capace di percepire multiple modalità sensoriali.

Il risultato di tale sforzo collettivo è visibile nell'articolo riassuntivo [1], che tratta diversi aspetti riguardanti la realizzazione della pelle multimodale: la componentistica e configurazione della pelle, la gestione dei dati prodotti da quest'ultima, il controllo dei robot che ne vengono dotati, e le applicazioni già sperimentate.

Quanto segue in questo elaborato è un resoconto approfondito sul primo di questi aspetti appena elencati, volto ad unire in modo utile e funzionale le nozioni contenute negli articoli di ricerca rilevanti (elencati nella Bibliografia), che vengono solo parzialmente illustrati nell'articolo riassuntivo [1].

Capitolo 1

Cellule sensoriali multimodali

La pelle multimodale di cui tratta questo elaborato (oltre che l'intero articolo [1], di cui questo elaborato approfondisce solamente la Sezione II) è costituita da multipli moduli tattili multimodali, detti anche cellule. Tali cellule hanno la capacità di percepire multipli stimoli e fornire a qualsiasi robot su cui sono montate una varietà di dati ed informazioni altrimenti inaccessibili.

Lo sviluppo dei moduli è iniziato con una versione originale, aggiornata in seguito con una modalità sensoriale aggiuntiva (ed altre migliorie). Quanto segue è la descrizione delle due versioni, prima quella originale, seguita da quella aggiornata.

1.1 Versione originale

1.1.1 Approccio

L'approccio proposto, riportato da [2], si concentra sull'infrastruttura necessaria a rendere aree estese capaci di percezione tattile multimodale. Con questo scopo è stato sviluppato un modulo sensoriale intelligente accompagnato da una scheda d'interfaccia basata sui Field-Programmable-Gate-Array (FPGA) che collega una rete di moduli tattili (HEX-O-SKIN) ad un processore basato su computer ed al rispettivo controllore del robot. Il design del modulo HEX-O-SKIN ha tenuto conto di tre proprietà chiave:

- 1) Un Convertitore Analogico Digitale (ADC) locale al modulo stesso aumenta l'integrità dei dati;
- 2) La pre-elaborazione diminuisce la larghezza di banda necessaria al trasferimento ed all'elaborazione dei dati;
- 3) L'instradamento attivo dei dati aumenta la robustezza della rete di moduli.

I vantaggi di queste tre proprietà sono stati combinati in un piccolo modulo esagonale.

Dato il fatto che i robot interagiscono intensamente con l'ambiente circostante, è molto probabile che alcune delle connessioni tra moduli cedano prima o poi. Per ovviare a ciò attraverso la rete di moduli l'alimentazione è instradata passivamente mentre i dati vengono instradati attivamente. La maggior parte delle disconnessioni può quindi essere gestita con una semplice ricalibrazione della rete (spiegata in seguito nella Sezione 2.1).

1.1.2 Descrizione del sistema

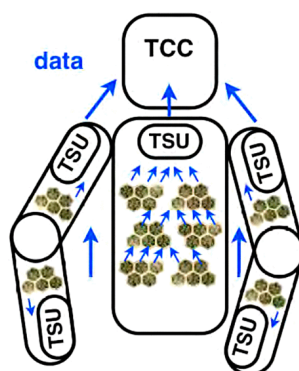


Figura 1.1: Panoramica della connessione dei pezzi di pelle, delle TSU, e del TCC. | Fig. da [2]
Termine in figura: *Dati*

Il sistema è separato in multipli sottosistemi hardware (vedi Fig. 1.1). La percezione tattile ha origine nell'HEX-O-SKIN, che è una piccola scheda a circuito stampato (PCB) esagonale con trasduttori¹ per ogni modalità sensoriale, ed un controllore locale per convertire ed elaborare i segnali dei sensori. Ogni HEX-O-SKIN ha quattro porte, ognuna delle quali fornisce una alimentazione ed una connessione Ricevitore-Trasmettitore-Asincrona-Universale (UART²) che può essere usata per connetterla ai moduli limitrofi.

Pezzi di pelle

Sono costituiti da multipli moduli HEX-O-SKIN incastonati in un pezzo di elastomero. All'interno di un pezzo di pelle, i pacchetti di dati sono instradati attivamente da un vicino al prossimo dal controllore locale. Dato che il confine di ogni pezzo di pelle offre le porte dei moduli tattili più esterni, è possibile connettere direttamente pezzi di pelle diversi. Per coprire un segmento di un robot, si può progettare un pezzo di pelle di una specifica forma.

Dato le dimensioni dei moduli tattili e la quindi limitata flessibilità del pezzo di pelle, non è raccomandabile applicare pezzi di pelle che vanno da una parte all'altra di articolazioni. Questa limitazione viene superata grazie all'uso di Unità di Sezione Tattile (TSU).

Unità di Sezione Tattile (TSU)

È l'interfaccia tra multiple porte dell'HEX-O-SKIN di un singolo o di multipli pezzi di pelle e la "spina dorsale" robotica. Connessioni aggiuntive in generale incrementano la ridondanza e la larghezza di banda provvedendo quindi a rendere il sistema più robusto e riducendo la latenza.

¹Wikipedia, *Trasduttore*, URL: <https://it.wikipedia.org/wiki/Trasduttore>

²Wikipedia, *UART*, URL: <https://it.wikipedia.org/wiki/UART>

Cluster di calcolo tattile (TCC)

Riceve i dati di ogni modulo tattile tramite Pacchetti-Datagramma-Utente (UDP) dalle rispettive TSU. I dati sono quindi verificati, filtrati e valutati su un controllore a reazione multimodale. È contenuto in un singolo PC, ma con la possibilità di allargare il concetto ad un cluster di PC.

1.1.3 Modulo Tattile Multimodale HEX-O-SKIN

Caratteristiche del modulo

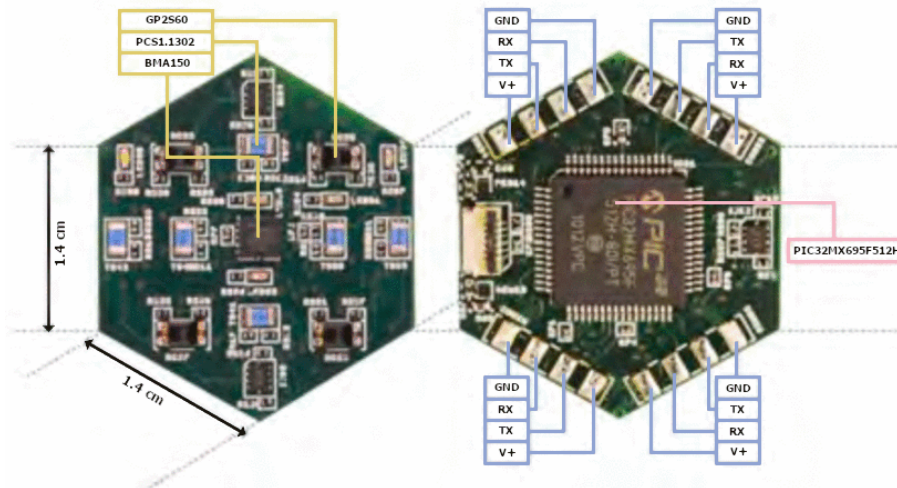


Figura 1.2: Modulo tattile (HEX-O-SKIN), visto di fronte (sinistra) e dal retro (destra). | Fig. da [2]

Le caratteristiche di base del modulo tattile multimodale sono:

- 1) Modalità sensoriali: 3
- 2) Sensori: 7 × temperatura, 3 × accelerazione, 4 × prossimità
- 3) Frequenza di aggiornamento: > 1 kHz
- 4) Porte combinate dati/alimentazione: 4
- 5) Alimentazione: < 50 mA con 3.3 V, 40 MHz, LEDs OFF
- 6) Peso: < 2 g
- 7) Area: 5.1 cm²
- 8) Spessore massimo: 3.6 mm

Per il design meccanico dei prototipi dei moduli tattili multimodali (HEX-O-SKIN), sono stati usati PCB rigidi esagonali (Fig. 1.2). Rispetto a rettangoli o triangoli un esagono risulta una forma regolare molto compatta, che riesce a coprire piani senza lasciare buchi connettendosi ai suoi vicini solo tramite i lati, ideale per reti di scambio dati.

Sono stati usati PCB rigidi dato che i PCB flessibili possono avere problemi nel mantenere l'integrità delle saldature, offrono comunque poca flessibilità quando stratificati ed aumentano i costi. La flessibilità ed elasticità è stata invece inserita nelle interconnessioni tra moduli tattili. Ridurre la dimensione di quest'ultimi aumenta il numero di interconnessioni guadagnando ulteriore flessibilità e pieghevolezza. In questo caso il prototipo era limitato dalle dimensioni del microcontrollore, ma questo concetto può essere ridotto in scala.

Sensore	GP2S60	BMA150	PCS1.1302
Modalità Sensoriali	Pressione Pre-tocco	Vibrazione Orientamento Temperatura	Temperatura Flusso termico
Dimensioni [mm]	3.2x1.7x1.1	3x3x0.9	1.3x2x0.5
Risoluzione Laterale	10 bit N.A.	4mg LSB 0.5 °C	0.06 °C
Intervallo	N.A.	±8g -30 ~+98 °C	-5 ~+55 °C
Risoluzione Spaziale	$> 0.8 \frac{1}{cm^2}$	$> 0.2 \frac{1}{cm^2}$	$> 1.2 \frac{1}{cm^2}$
Risoluzione Temporale	50kHz Limite del Sensore	1.5kHz Limite del Sensore	$\tau = 2.6s$ Limite del Sensore
Numero di Sensori per Singolo Modulo	4	1	6

Tabella 1.1: Caratteristiche e modalità sensoriali dei sensori

Nel prototipo illustrato sono stati usati tre diversi metodi di trasduzione basati su sensori discreti con montaggio per superfici, disponibili sul mercato (vedi Tab. 1.1): un accelerometro MEMS³ per le vibrazioni e la ricostruzione delle superfici, sensori ottici riflettenti per la prossimità, un sensore di temperatura resistivo combinato con una fonte termica per le misurazioni del flusso termico e della temperatura assoluta. Questo approccio ha permesso di imitare la maggior parte delle sensazioni umane in modo veloce e a basso costo, lasciando comunque la possibilità di aggiungere altri sensori discreti con cambiamenti minimi al sistema.

Di seguito vengono discusse nel dettaglio le scelte per i vari sensori.

Percezione del tocco leggero

La pelle umana può solitamente percepire anche il tocco più leggero, sensazione qui emulata dalla percezione di prossimità. Lo SHARP GP2S60 può essere usato sia come sensore di prossimità che di pressione, nonostante qui venga usato solo come sensore di prossimità. Il GP2S60 è un sensore ottico attivo con un emettitore che ha un consumo massimo piuttosto alto: 50 mA con 3.3 V. Viene usata una corrente massima di circa 20 mA per emettitore con quattro emettitori per modulo tattile. È stata sperimentata con successo una soluzione di risparmio energetico, che accende l'emettitore solamente durante il breve periodo di conversione ADC, che è un minimo di 1 μs con l'ADC usato. Un tempo totale di conversione di 50 μs ad una frequenza d'aggiornamento di 1 kHz ridurrebbe per esempio il consumo da 20 ad 1 mA per emettitore.

Uno svantaggio di questa tecnica è l'accoppiamento del disturbo di commutazione tra moduli tattili limitrofi che operano in modo asincrono. Il rumore appare quando lo stato degli emettitori limitrofi non corrisponde ogni volta che è in atto una misurazione di prossimità.

³Wikipedia, MEMS, URL: <https://it.wikipedia.org/wiki/MEMS>

Da notare, quando si utilizza un materiale trasparente per la pelle questo accoppiamento peggiora parzialmente a causa della diffusione nel materiale della pelle e parzialmente a causa dei riflessi sulle superfici della pelle. Ciò può essere risolto sincronizzando i moduli limitrofi.

Sensore di vibrazione ed accelerazione quasi-statica

Sensazioni di impatto, rilevamento dello slittamento e ruvidità di contatto possono essere dedotti da segnali di vibrazione. Si è qui optato per usare un accelerometro 3D per emulare la percezione delle vibrazioni umana. Il BOSCH BMA150 è un piccolo accelerometro 3D a basso consumo con un sensore di temperatura aggiuntivo integrato. Il sensore è complesso e potente con una bassa risoluzione spaziale, non critica per l'utilizzo qui inteso. Grazie all'accelerometro 3D è possibile rilevare l'accelerazione in movimento e misurare due su tre angoli d'orientamento con l'aiuto della gravità.

Percezione della temperatura

Gioca un ruolo importante nel sistema tattile umano. Nonostante il BMA150 offra un sensore di temperatura, la bassa risoluzione di 0.5 °C è lontana da quella umana di 0.1 °C. Viene quindi usato un resistore PCS1.1302 PT1000 marca JUMO GmbH & Co. KG piazzato in una configurazione a Ponte di Wheatstone⁴. L'uscita del bridge è poi amplificata da un singolo amplificatore operazionale per sensore, configurato come amplificatore differenziale. Dato il consumo di potenza del robot e dei moduli la pelle genera una sovratemperatura superficiale, le cui variazioni vengono utilizzate per rilevare il contatto o correnti d'aria sulla pelle stessa.

Processore locale e gestione dei dati

Per convertire ed elaborare localmente i dati, per poi inserirli in pacchetti da instradare in una rete di moduli è stato scelto il microcontrollore PIC32MX695F512H, disponibile sul mercato. Uno dei vantaggi del PIC32 scelto è l'ADC (Convertitore Analogico Digitale) interno da 1-M (Mega) campioni a 10 bit, utilizzato per acquisire le letture dei sensori di temperatura e prossimità. Una variabile interna relativa al Phase-Locked-Loop (PLL⁵) può scalare l'oscillatore interno fino ai 48 MHz; si può quindi avere la capacità d'elaborazione per un ciclo di pre-elaborazione attivato da un timer o risparmiare energia. Tutte le letture dei sensori sono acquisite ad un dato intervallo di timer all'interno di un ciclo d'elaborazione e filtrate attraverso un filtro passa basso.

I dati sono poi inseriti in pacchetti ed inviati al buffer di trasmissione della porta principale, con un pacchetto formato da: un comando, un ID di modulo, ed i dati del sensore (il bit più significativo di ogni byte è impostato ad 1 solo nei limitatori di pacchetto, per rendere possibile la sincronizzazione all'inizio ed alla fine di una finestra).

⁴Wikipedia, *Ponte di Wheatstone*, URL: https://it.wikipedia.org/wiki/Ponte_di_Wheatstone

⁵Wikipedia, *Phase-locked loop*, URL: https://it.wikipedia.org/wiki/Phase-locked_loop

I pacchetti in entrata dai moduli limitrofi sono ricevuti su una delle porte secondarie ed indirizzati alla porta principale (ulteriori dettagli nella Sottosezione 2.1.2). Con il PIC32MX695F512H si possono usare quattro dei sei UART da 10 Mb/s disponibili. Sono però possibili 12 Mb/s mettendo la periferica in overclock ed utilizzando il suo controllore DMA (Direct Memory Access) integrato, processo già sperimentato in questa versione poi perfezionato al tempo della versione aggiornata (Sezione 1.2).

Alimentazione e peso

Il consumo energetico di un modulo tattile dipende in gran parte sulla sua modalità operativa. La maggior parte dell'alimentazione, fino a 200 mA a 3.3 V, va ai LED attivi. Cinque LED per modulo offrono del feedback visivo, mentre quattro LED infrarossi necessitano di rimanere attivi mentre sta venendo effettuata una misurazione di prossimità.

Il microcontrollore consuma circa 50 mA a 3.3 V e 40 MHz, ma questo consumo può essere ridotto: diventa 6 mA portando il PLL a 4 MHz (ulteriormente riducibile introducendo delle modalità riposo). Senza alcuna modalità di risparmio energetico, vengono correntemente consumati 130 mA a 3.3 V per modulo tattile. Usando la tecnica di risparmio proposta discutendo la percezione del tocco leggero ed alcune modalità riposo, si potrebbe ridurre il consumo a 47 mA. Un robot con 2600 moduli consumerebbe quindi approssimativamente 400 W.

Il prototipo di un pezzo di pelle con cinque moduli tattili pesa circa 25 g: con il design corrente, per coprire un umanoide sarebbero necessari 2600 moduli per un totale di 13 kg. Diminuendo lo spessore dei PCB da 1.6 a 0.5 mm e riducendo lo spessore dell'elastomero, integrando inoltre al suo interno delle cavità, è stimabile un peso di 10 g per un pezzo di pelle con cinque moduli tattili. Ciò porterebbe ad un peso accettabile di 5.2 kg per un umanoide completo.

Materiali della pelle

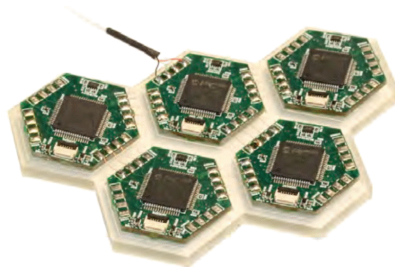


Figura 1.3: Retro di un pezzo di pelle con cavi visibili. | Fig. da [2]

La pelle è fatta di Tango Plus trasparente, un elastomero per la prototipazione rapida (vedi Fig. 1.3) che conduce la luce infrarossa ed ha una risoluzione di stampa sufficiente di 16 μm . Utilizzare tale materiale offre diversi vantaggi: possono essere aggiunte microstrutture di diverso materiale nella pelle (come pattern geometrici sulla superficie o addirittura anelli non trasparenti per evitare l'accoppiamento dei sensori di prossimità), un nuovo layout di pelle può essere progettato in CAD e stampato in un paio d'ore, e l'elastomero offre protezione ai moduli.

1.1.4 Risultati sperimentali

I seguenti risultati sono stati ottenuti sperimentando sulle varie modalità sensoriali delle cellule HEX-O-SKIN integrate con un braccio robotico leggero KUKA (vedi Fig. 1.8).

Reazione a prossimità: multi-tocco

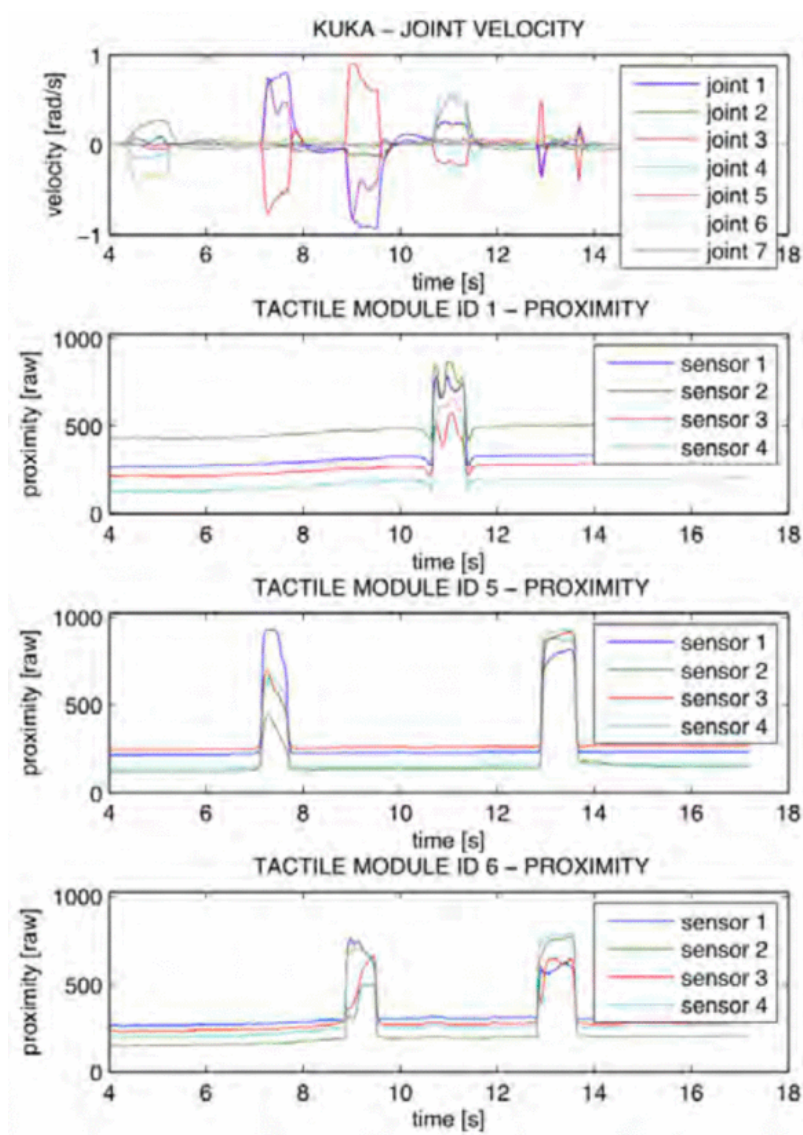


Figura 1.4: Dati selezionati dal controllore di prossimità per il multi-tocco. | Fig. da [2]
Titoli dei grafici dall'alto: *KUKA - Velocità dell'articolazione*, *Modulo Tattile ID 1 - Prossimità*, *Modulo Tattile ID 5 - Prossimità*, *Modulo Tattile ID 6 - Prossimità*

Una parte del controllore tattile (vedi Sottosezione 2.3.1) reagisce all'avvicinamento di oggetti in multipli punti di contatto della pelle utilizzando le letture dei sensori di prossimità. Quando viene raggiunta una soglia di 200 dalla lettura di un sensore, viene aggiunta una velocità laterale costante di -0.05 m/s al segmento del robot su cui il sensore è locato. Dato che la reazione finale è una sovrapposizione di più reazioni dovute a diversi sensori, il movimento incrementa con la superficie toccata e tocchi diametralmente opposti annullano il movimento. In Fig. 1.4 sono stati riportati dei dati sull'esperimento.

Reazione a temperatura: correnti d'aria

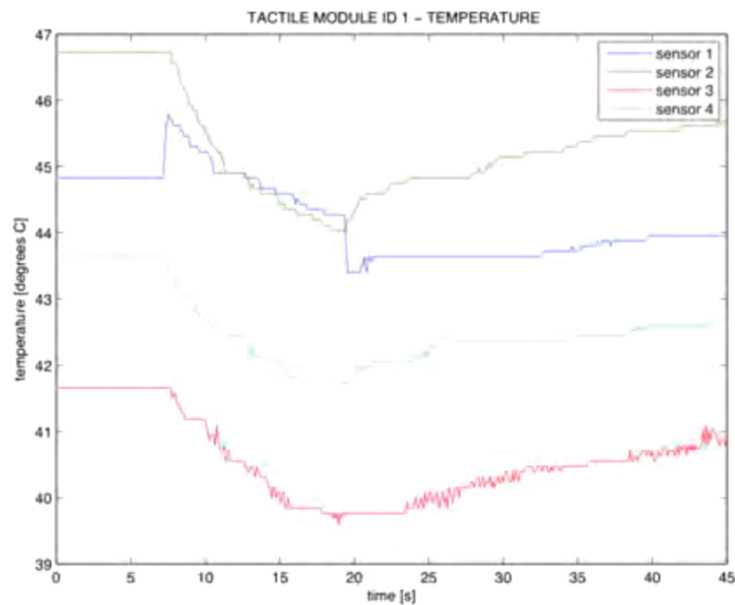


Figura 1.5: Dati sulla temperatura durante il tocco di un modulo tattile privo di pelle. | Fig. da [2]
Titoli degli assi del grafico: *Ascisse: tempo[s]* - *Ordinate: Temperatura [°C]*

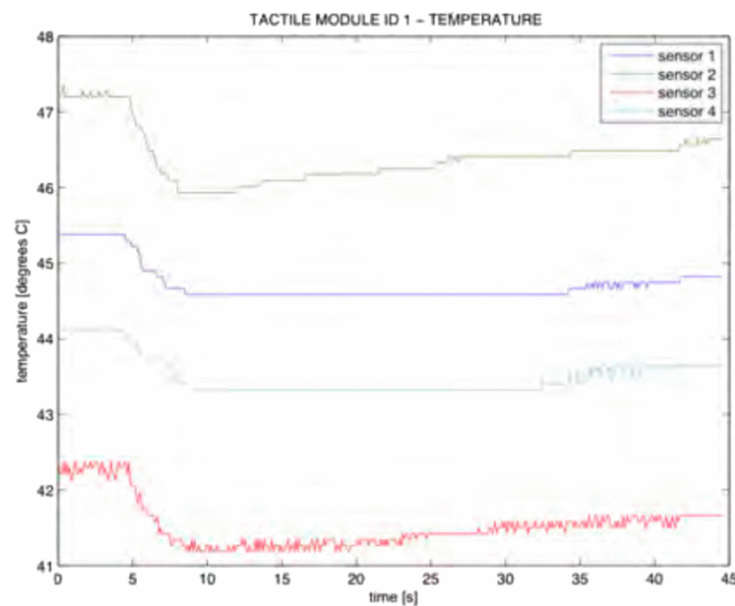


Figura 1.6: Dati sulla temperatura durante il soffio su di un modulo tattile privo di pelle. | Fig. da [2]
Titoli degli assi del grafico: *Ascisse: tempo[s]* - *Ordinate: Temperatura [°C]*

Il microcontrollore ed il robot generano una sovratemperatura verso l'ambiente. L'effetto raffreddante del tocco umano può quindi essere utilizzato per causare un movimento evasivo, qui implementato come una soglia costante su di un segnale filtrato basso: ciò permette al robot di reagire al tocco di una mano ed al soffio sulla pelle. Nelle Fig. 1.5 e 1.6 sono stati riportati dei dati sull'esperimento.

Reazione all'accelerazione: impatto

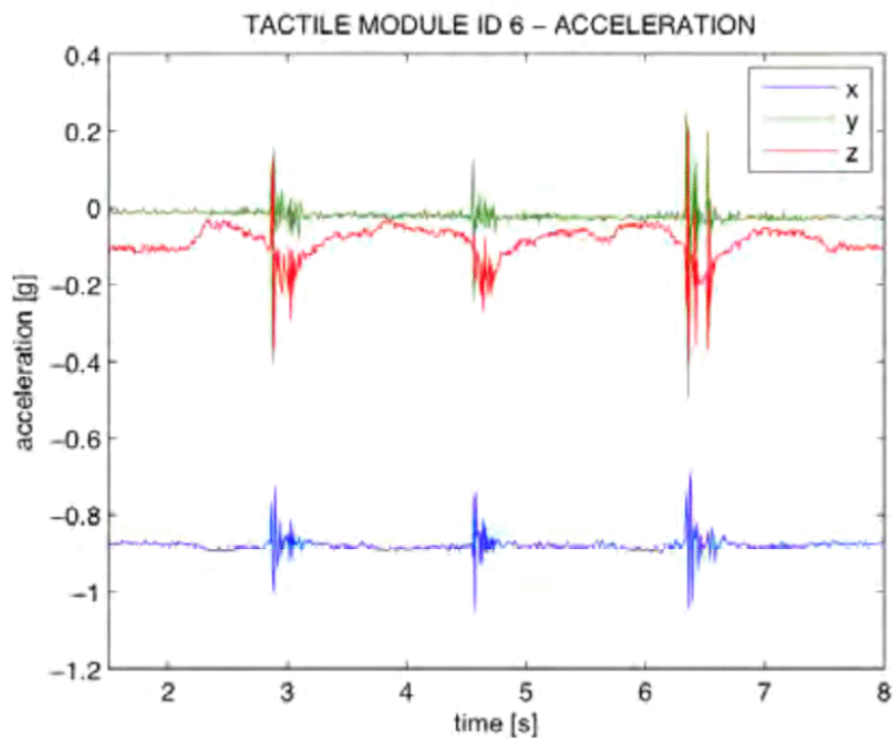


Figura 1.7: Dati sull'accelerazione derivanti dall'impatto contro un braccio KUKA. | Fig. da [2]
Titoli degli assi del grafico: *Ascisse = tempo[s]*, *Ordinate = Accelerazione [g]*

Data la natura costante dei movimenti robotici, è possibile individuare impatti inaspettati con eventuali oggetti esterni tramite il tasso di cambio dell'accelerazione assoluta. Il robot è stato quindi programmato per invertire la direzione di movimento di un segmento ogni qualvolta l'accelerazione normale al piano di un modulo toccasse una soglia di magnitudine costante. Dato l'effetto che un impatto ha sull'accelerazione dell'intero segmento robotico (con inoltre la propagazione delle vibrazioni lungo il robot), è possibile usare un singolo modulo per rilevare impatti su di un intero segmento, ed addirittura segmenti adiacenti. In Fig. 1.7 sono stati riportati dei dati sull'esperimento.

Mantenimento dell'orientamento di un dispositivo d'estremità

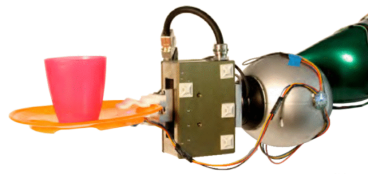


Figura 1.8: Modulo montato su di una pinza per il controllo dell'orientamento. | Fig. da [2]

Per dimostrare le possibilità di accelerometri 3D distribuiti, è stato implementato un controllore di mantenimento dell'orientamento per il dispositivo d'estremità del braccio KUKA (in Fig. 1.8): due controllori proporzionali per gli assi di beccheggio e rollio stabilizzano l'orientamento del dispositivo d'estremità basandosi sul vettore d'accelerazione. Dato che l'accelerometro misura una sovrapposizione del vettore di gravità e quello d'accelerazione del movimento, vengono normalizzati i valori degli assi prima di calcolare i due angoli dell'orientamento.

Ciò permette di stabilizzare un bicchiere appoggiato su di un piatto tenuto dal dispositivo d'estremità (una pinza) mentre il robot è in movimento. È inoltre possibile rilevare ulteriori accelerazioni da altri movimenti, dato che fanno variare il valore assoluto dell'accelerazione dal valore di 1 g ($g = 9.80 \text{ m/s}^2$). In Fig. 1.9 sono stati riportati dei dati sull'esperimento.

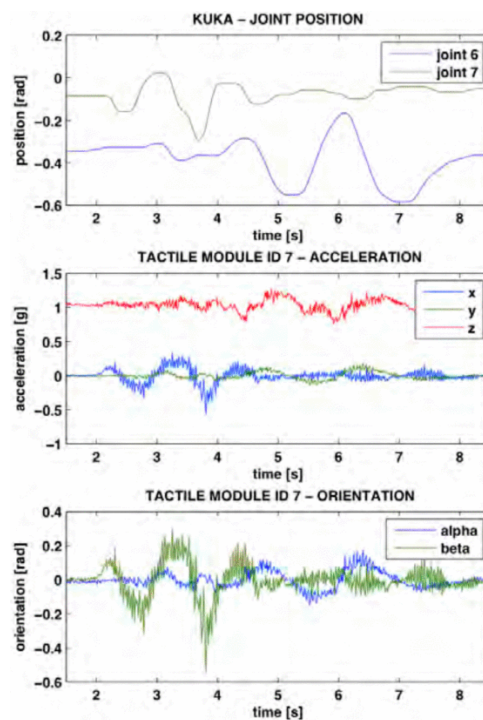


Figura 1.9: Dati selezionati dal controllore dell'orientamento del dispositivo d'estremità. | Fig. da [2]
Titoli dei grafici dall'alto: *KUKA - Posizione dell'articolazione*, *Modulo Tattile ID 7 - Accelerazione*, *Modulo Tattile ID 7 - Orientamento*

1.2 Versione aggiornata

1.2.1 Approccio

L'approccio dietro l'aggiornamento dei moduli multimodali, riportato da [3], consiste principalmente nell'aggiunta rispetto alla versione originale (Sezione 1.1) della modalità di percezione sensoriale della forza (intesa come pressione sulla superficie), tramite l'uso di un sensore di forza discreto progettato e sviluppato dagli stessi creatori dei moduli.

Il sensore di forza valuta accuratamente la deformazione di una cavità metallica tramite la misurazione della capacità elettrica di quest'ultima, ed eccelle nella sua robustezza (rispetto ai fragili MEMS per tale tipo di misurazione), aiutato nel suo funzionamento anche da un redesign completo dell'elastomero che ricopre i moduli.

Viene inoltre aggiornato in modo minore il resto del modulo.

1.2.2 Aggiornamenti cellula unitaria

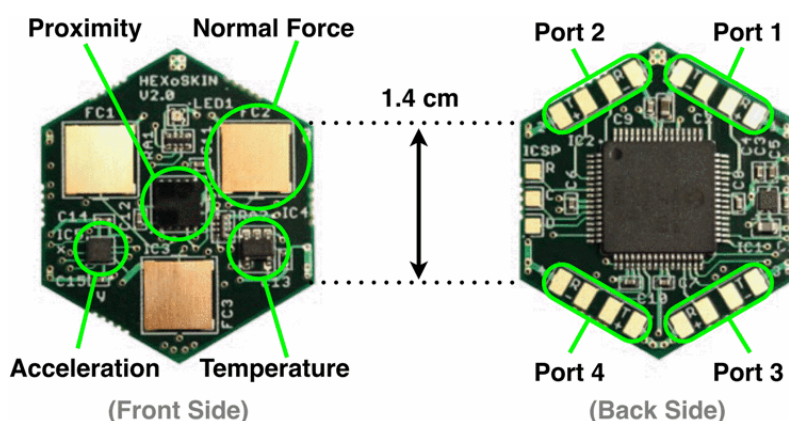


Figura 1.10: Cellula unitaria intelligente multimodale HEX-O-SKIN. Lato frontale con 4 modalità sensoriali. Retro con microcontrollore e 4 porte per l'alimentazione/dati. | Fig. da [3]
Termini in figura dall'alto a destra in senso antiorario: *Porta 1*, *Porta 2*, *Forza Normale*, *Prossimità*, *Accelerazione*, (*Fronte*), *Temperatura*, *Porta 4*, (*Retro*), *Porta 3*

La versione aggiornata del modulo tattile multimodale HEX-O-SKIN (vedi Fig. 1.10) gode di diverse migliorie. Fra tutte spicca l'aggiunta di tre sensori di forza per modulo (descritti nel dettaglio in seguito) che permettono la percezione di una nuova modalità sensoriale, ovvero quella della pressione sulla superficie del modulo.

Le altre migliorie sono un aggiornamento dei componenti del modulo: viene infatti scelto come nuovo microcontrollore il PIC24F, che offre nuovi tipi di pre-elaborazione (come ad esempio la capacità dei moduli di percepire localmente tocchi rapidi/impatti, segnati nei pacchetti di dati con dei bit di flag), ed aggiornati tutti i sensori (di nota l'accelerometro BOSCH BMA250, rispetto al vecchio BMA150).

In aggiunta, le porte dei PCB rigidi che costituiscono i moduli vengono ora connesse usando PCB flessibili invece che cavetti di rame.

1.2.3 Sensore di forza discreto

Parti

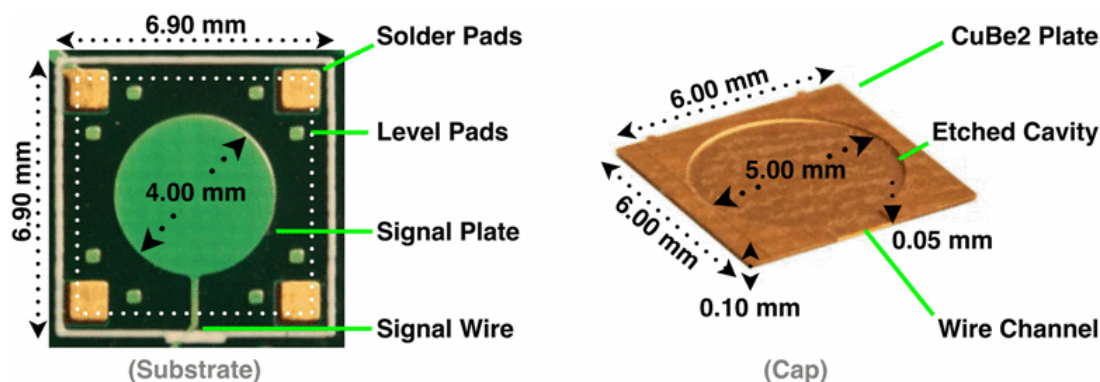


Figura 1.11: Progetti del substrato e della copertura per la nuova cella sensore di forza. Piazzare la copertura sul substrato dà origine ad una cavità circolare che si deforma sotto forze normali. | Fig. da [3] Termini in figura dall'alto a destra in senso antiorario: *Piastra di CuBe2*, *Contatti per la Saldatura*, *Supporti di Pareggiamento*, *Piastra del Segnale*, *Cavo del Segnale*, *(Substrato)*, *(Copertura)*, *Canale per il Cavo*, *Cavità Litografata*

La nuova cella sensore di forza discreta consiste di due componenti principali (vedi Fig. 1.11): una sottile copertura deformabile conduttiva con una cavità micro-strutturata, ed un substrato rigido e piatto con una piastra conduttiva.

La copertura è creata a partire da una lastra di CW101C-R1060 rame-berillio CuBe2 dello spessore di $t_{plate} = 100\mu m$, in un processo litografico veloce ed economico. Il CuBe2 ha eccellenti proprietà elastiche, un'alta resistenza alla corrosione, basso scorrimento viscoso (creep) e buona conduttività. Può essere unito con i comuni contatti di rame di un PCB in un processo standard di saldatura. È possibile utilizzare questa lega inizialmente indurita, dato che non cambia proprietà durante il processo di saldatura grazie al basso stress imposto sul materiale durante il processo di litografia. Operando sulle HEX-O-SKIN, il substrato consiste di un ordinario PCB FR4⁶ spesso $t_{subs} = 0.85mm$ che, quando comparato allo spessore della copertura, è quasi-piano e quasi-rigido.

L'effettivo elemento capacitivo del sensore è costituito da due piastre conduttive, ovvero un contatto circolare sul PCB e la parte della copertura metallica sovrastante ad esso (Fig. 1.12).

⁶Wikipedia, *FR4 (materiale)*, URL: [https://it.wikipedia.org/wiki/FR4_\(materiale\)](https://it.wikipedia.org/wiki/FR4_(materiale))

Assemblaggio

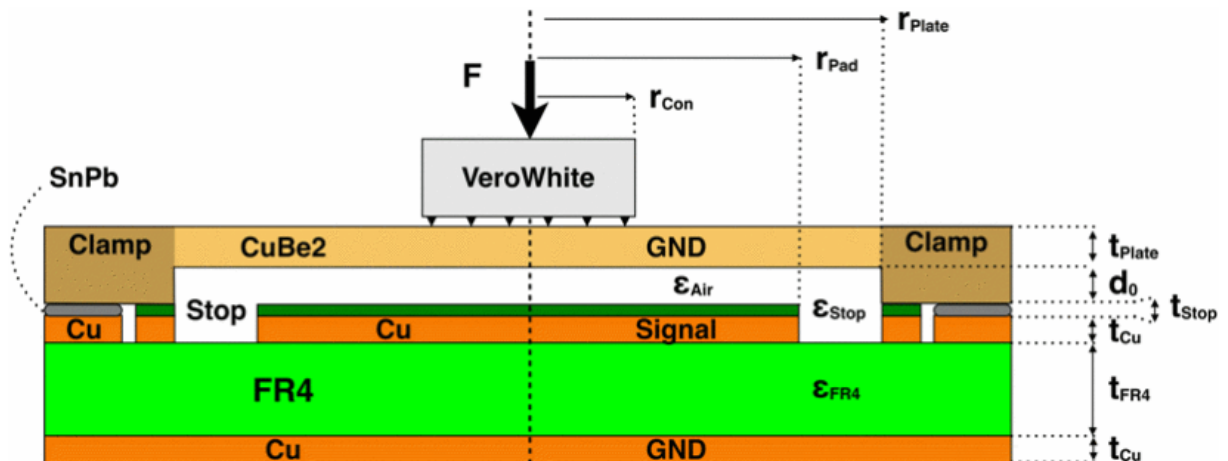


Figura 1.12: Sezione trasversale di un modello semplificato con simmetria rotatoria della cella di forza. | Fig. da [3]

L'obiettivo del team di Philipp Mittendorfer, Gordon Cheng *et al.* di integrare la cella di forza nella fabbricazione automatizzata delle cellule unitarie che costituiscono la pelle (fabbricazione che utilizza macchine Pick&Place ed un processo di saldatura per rifusione), è stato reso possibile dalla loro invenzione di un design speciale qui descritto.

Il design allinea automaticamente la copertura, relativamente al substrato, durante il passo di saldatura. Tale passo è importante dato che il processo di assemblaggio Pick&Place ha una precisione nettamente inferiore rispetto al processo di manifattura chimica/litografica per il substrato e la copertura.

L'autoallineamento è basato su effetti capillari che hanno luogo in mezzo alla copertura ed i contatti, attraverso la lega per saldatura liquida. Ciò serve a ridurre due fonti d'incertezza: l'allineare la cavità ed il canale per il cavo orizzontalmente sopra la piastra ed il cavo del segnale, ed il minimizzare lo scostamento verticale della piastra del condensatore che si viene a creare (per aumentarne la capacità).

Per il secondo scopo, sono stati aggiunti supporti di pareggiamento per minimizzare gli effetti di galleggiamento causati dalla lega per saldatura liquida (vedi Fig. 1.11). Comparandoli con i contatti per la saldatura scoperti, la piastra del segnale ed i supporti di pareggiamento sono ricoperti da un sottile strato di comune materiale resistente alla saldatura (stagno-piombo SnPb) spesso $t_{stop} = 30\mu m$ che appoggia sopra il rame.

Questo sottile strato di isolante è importante per prevenire un cortocircuito del sensore capacitivo: senza, entrambi i conduttori si toccherebbero nel caso di un carico pesante sulla cella. Idealmente, lo spessore dello strato resistente alla saldatura definisce lo spessore delle saldature tra la copertura in CuBe2 ed i contatti. Il volume di lega per la saldatura liquida viene controllato con una maschera per la saldatura.

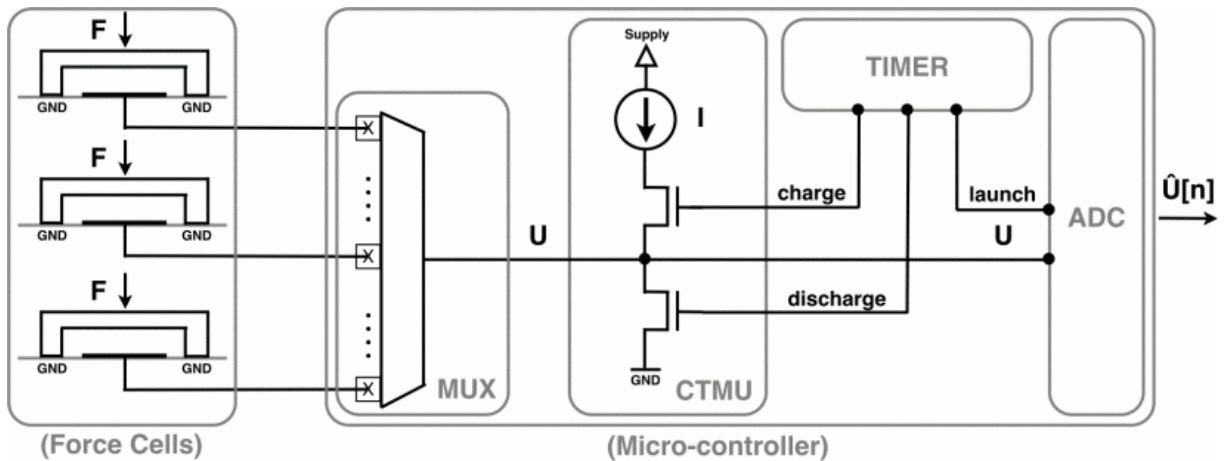


Figura 1.13: Elettronica di conversione utilizzata con il PIC24F: Multiplexer Analogico, unità di misura del tempo di carica, timer e convertitore analogico-digitale. | Fig. da [3]
 Termini in figura dall'alto verso il basso e da sinistra a destra: *Generatore, Timer, Carica, Avvia, Scarica, (Celle di Forza), (Microcontrollore)*

Per ridurre il numero di componenti, viene utilizzata l'unità di misura del tempo di carica (CTMU), un modulo per il rilevamento del tocco capacitivo, integrato nel nuovo processore PIC24F delle celle. Il CTMU offre un generatore di corrente costante programmabile e commutabile, direttamente collegato al timer ed all'ADC (convertitore analogico-digitale) del processore (vedi Fig. 1.13). Il CTMU permette di generare una corrente costante I , il timer di limitare il tempo di carica T , e l'ADC di misurare il valore finale del voltaggio U .

Il CTMU può essere multiplexato a qualsiasi dei 16 input analogici disponibili e misurare la capacità di un condensatore collegato. Dato che il condensatore sarà stato scaricato in anticipo, la capacità totale può essere direttamente calcolata come:

$$C_{total} = \frac{Q}{U} = \frac{I \cdot T}{U} \quad (1.1)$$

Viene utilizzata la massima corrente disponibile $I_{max} = 55\mu A$, permettendo così la massima frequenza d'aggiornamento e concedendo agli effetti resistivi parassiti il minor tempo possibile per interferire. Il voltaggio massimo $U_{max} = 3.0V$ è limitato dal voltaggio del generatore e dalla portata dell'ADC.

Viene misurato il voltaggio massimo solamente nel caso di assenza di un carico (pressione) sul sensore. Appena le piastre del condensatore vengono avvicinate (dalla pressione fisica di un carico sul sensore), la capacità C aumenta: mantenendo la carica Q costante, il voltaggio U diminuisce. Un algoritmo di ottimizzazione della portata potrebbe quindi massimizzare il tempo di carica nel caso d'assenza di carico, generando valori personalizzati T_{cus} per ognuna delle celle di forza. Qui, viene utilizzato un tempo euristico di default $T_{def} = 2.5\mu s$, sia per i tempi di carica che di scarica, così da poter comparare i segnali grezzi da diverse celle di forza. La capacità iniziale del sensore di forza e di tutti i condensatori parassiti, come ad esempio i contatti o l'ADC, si sommano in un valore iniziale di $C_{init} = 46pF$.

Con una frequenza di campionamento di 200 kHz ed una risoluzione di 12 bit, una conversione da analogico a digitale richiede approssimativamente $T_{ADC} \approx 5\mu s$, quindi una misurazione di forza completa richiede circa $T_{force} \approx T_{ADC} + 2 \cdot T_{def} \approx 10\mu s$. Una cellula unitaria potrebbe quindi campionare tutte e tre le sue celle di forza con una frequenza d'aggiornamento $f_{samp} = 33kHz$. Viene qui usata una frequenza d'aggiornamento di $f_{samp} = 2.5kHz$ insieme ad un filtro ed una decimazione per abbassare la frequenza di trasmissione a $f_{tran} = 250Hz$.

Il filtro digitale usato in combinazione con la frequenza di sovracampionamento ha due scopi: come filtro passa basso per obbedire al Teorema del Campionamento di Nyquist, e per filtrare rumore non correlato, aumentando la proporzione segnale-rumore (detta Signal to Noise Ratio, o SNR). Filtrare nel dominio digitale è più efficace, dato il risparmio sui componenti digitali (con relativo abbassamento dei costi), la riduzione degli effetti parassiti, e soprattutto la possibilità di riprogrammare il filtro ed ottenere curve del filtro più ripide. Il filtraggio nei sistemi di controllo è generalmente evitato dati gli slittamenti di fase inerenti, ma utilizzando dati non filtrati potrebbero avvenire fenomeni di aliasing e picchi indesiderati.

Di conseguenza si è deciso di utilizzare un filtro mediano (detto tale in quanto sceglie l'elemento centrale da una sequenza ordinata di elementi) non lineare sugli ultimi $N = 10$ campioni. I filtri mediani non degradano i fronti nei segnali, ma riducono efficientemente i campioni anomali. In questo caso con $N = 10$ ed una conseguente decimazione dello stesso fattore, il caso peggiore di slittamento di fase per la risposta ad un gradino è metà della frequenza d'aggiornamento $\frac{1}{2f_{tran}} = 2ms$. In termini di elaborazione eseguita sul PIC24F, il calcolo mediano⁷ richiede $T_{med} = 65\mu s$ per tutte e tre le celle sensore.

Dato che il campionamento è gestito da una routine senza interruzione attivata da timer, accadono piccole manifestazioni di jitter (disturbo nella cadenza di un segnale periodico) dei campioni. Un ammontare ragionevole di jitter dei campioni è però una misura di protezione efficace contro il rumore armonico, e quindi desiderabile.

⁷kth_smallest(array[],10,5) di N. Wirth, implementato da N. Devillard

Pelle composita

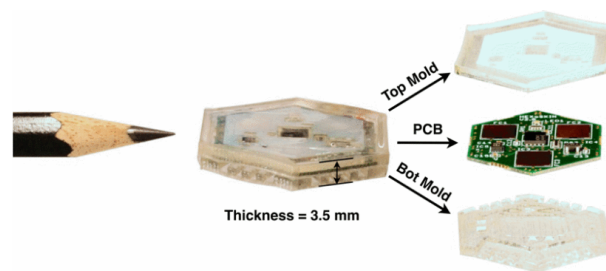


Figura 1.14: Parti della cellula unitaria: stampo superiore, elettronica, stampo inferiore. | Fig. da [3]
Termini in figura dall'alto: *Stampo Superiore, PCB, Stampo Inferiore, Spessore = 3.5 mm*

La pelle composita è il materiale che incapsula le cellule multimodali unitarie (vedi Fig. 1.14). Il materiale si divide in uno stampo superiore ed inferiore, entrambi con all'interno un'impronta negativa della forma dell'unità e dei suoi componenti. Lo stampo inferiore incapsula l'elettronica dell'infrastruttura (i PCB flessibili che connettono le porte delle unità adiacenti) ed omogenizza il peso che agisce tra la cellula unitaria ed il piano di supporto sotto quest'ultima.

Lo stampo superiore incapsula 4 tipi di sensori con modalità sensoriali diverse, che vanno tutte considerate durante il design. Il sensore di prossimità infrarosso richiede la trasmissione ottica della luce infrarossa all'interno della pelle e riflesso limitato sullo strato di pelle stessa. Il sensore di temperatura ha bisogno di un buon accoppiamento termico con la superficie senza essere coperto da uno strato eccessivo di materiale isolante. Il sensore di vibrazione richiede la propagazione di onde attraverso la pelle ed un materiale che faccia attrito con le superfici per individuare scivolamenti e ruvidità. Le celle di forza discrete qui presentate richiedono una sufficiente distribuzione della forza tra di loro (sono tre per cellula unitaria) ed una concentrazione della forza su di esse.

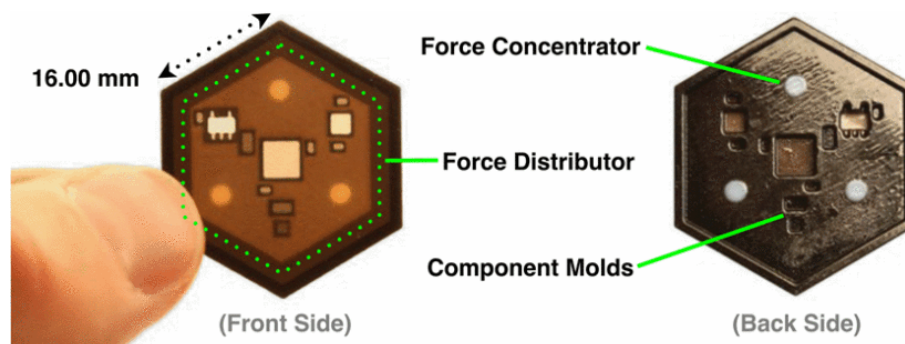


Figura 1.15: Copertura superiore microstrutturata (fronte e retro) fatta di TangoPlusBlack (morbido) e TangoGrey (duro), scelti per aumentare il contrasto rispetto alla versione trasparente. | Fig. da [3]
Termini in figura dall'alto in basso e da sinistra a destra: *Concentratore di Forza, Distributore di Forza, Ritagli per Componenti, (Fronte), (Retro)*

Gli stampi vengono stampati con una macchina da prototipazione (una stampante 3D) Objet Polyjet, che permette di creare pezzi di pelle artificiale personalizzati in un tempo estremamente breve e con alta precisione (risoluzione di stampa di $28\mu m$).

Lo strato superiore consiste di due materiali diversi (vedi Fig. 1.15), un materiale soffice simil-gommoso chiamato TangoPlus Black/Transparent (TPT) ed un materiale duro simil-plastica ABS chiamato VeroWhite/Grey (VW).

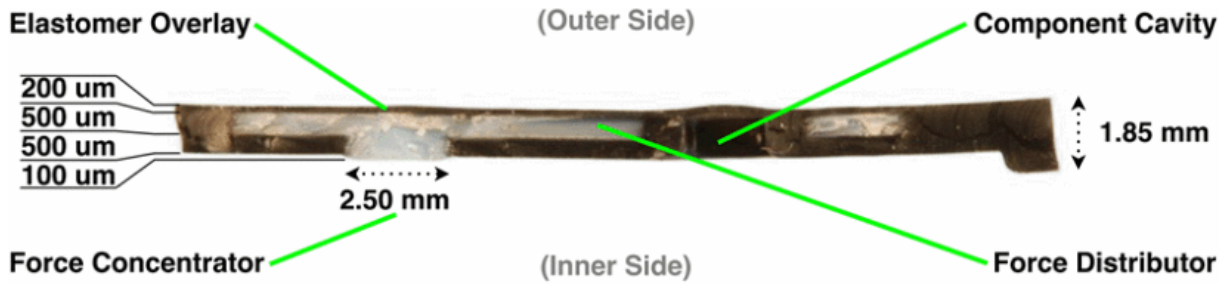


Figura 1.16: Sezione trasversale della copertura superiore al centro di uno dei pilastri concentratori di forza, per illustrare la microstruttura interna del materiale composito. | Fig. da [3]
Termini in figura dall'alto a destra in senso antiorario: *Cavità per Componente, (Lato Esterno), Copertura d'Elastomero, Concentratore di Forza, (Lato Interno), Distributore di Forza*

Uno strato rigido di VW spesso $t_{dist} = 500\mu m$, situato $t_{over} = 200\mu m$ sotto la superficie "epidermica" di TPT della pelle, agisce come collettore della pressione distribuita sulla cellula unitaria. La forza accumulata è quindi concentrata da tre pilastri sui tre sensori di forza disponibili per cella unitaria. I pilastri si estendono attraverso il TPT interno allo stampo superiore e circa $t_{tpe} = 100\mu m$ oltre la superficie interna.

Tutti i sensori delle altre modalità sensoriali sono allineati a degli appositi fori progettati nella stampa del duro materiale VW, con lo spazio rimanente nei fori riempito di morbido materiale TPT per garantire il contatto tra le superfici dei sensori ed i materiali della pelle, attenuando però al contempo l'influenza meccanica del materiale duro sulla componentistica.

Le misure rappresentate (vedi Fig. 1.16) sono necessariamente dettate dalle dimensioni (gli spessori) dei componenti e dalla minima dimensione strutturale sicura ($200\mu m$) per il corretto funzionamento della stampante 3D, che sotto tale soglia di precisione potrebbe (molto probabilmente) produrre delle stampe di bassa qualità.

1.2.4 Risultati sperimentali

Piattaforma di prova

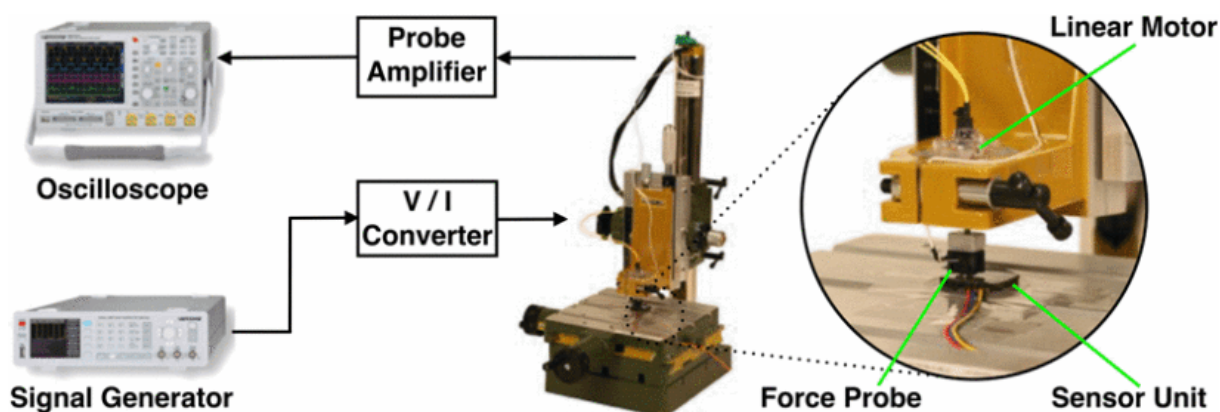


Figura 1.17: Piattaforma di prova per la valutazione dinamica della pelle artificiale. | Fig. da [3]
Termini in colonna da sinistra a destra: *Oscilloscopio, Generatore di Segnali, Amplificatore della Sonda, Convertitore V/I, Sonda di Forza, Motore Lineare, Unità Sensoriale*

Per rilevare le caratteristiche salienti della cella di forza, viene utilizzata una piattaforma di prova (vedi Fig. 1.17). Il componente principale di questa piattaforma è un motore lineare a spire (detto anche un Voice Coil Motor, VCM), che converte la corrente in forza lineare. Un controllore di corrente converte segnali di voltaggio arbitrari provenienti da un generatore di tensione in una corrente regolata attraverso il VCM. La piattaforma di prova genera tra gli $0.12 - 3.12N$, valori vincolati dalla massa di $12g$ della punta e dalla corrente massima del VCM.

Le forze applicate vengono misurate direttamente con un sensore FSG-15N1A sulla punta del pistone lineare (la punta piatta del diametro di $5mm$ del sensore è anche ciò che fa contatto con la pelle). La piattaforma di prova può essere ampliata con un modulo peltier TECB-1, per generare temperature più alte o basse.

Risposta ai segnali ripetitivi

La Fig. 1.18 mostra la risposta ad una serie di pattern di forza sinusoidali o rettangolari, direttamente applicata alla cella di forza 3 di una cellula unitaria. Gli scostamenti dei valori in stato di quiete delle tre celle di forza sulla stessa cellula unitaria sono dovuti a differenze inevitabili nel processo di produzione, nella lunghezza del cavo nella cella di forza, e nella capacità parassite. Tali scostamenti permanenti possono essere facilmente compensati in un passo di calibrazione automatica.

Non sono stati individuati effetti di accoppiamento tra le celle di forza nel rumore di fondo. Per valutare l'isteresi del sensore, sono state rappresentate in un grafico (sovrapposte) le sequenze in discesa e risalita dei campioni del segnale (vedi Fig. 1.19). Non è stata rilevata alcuna isteresi significativa.

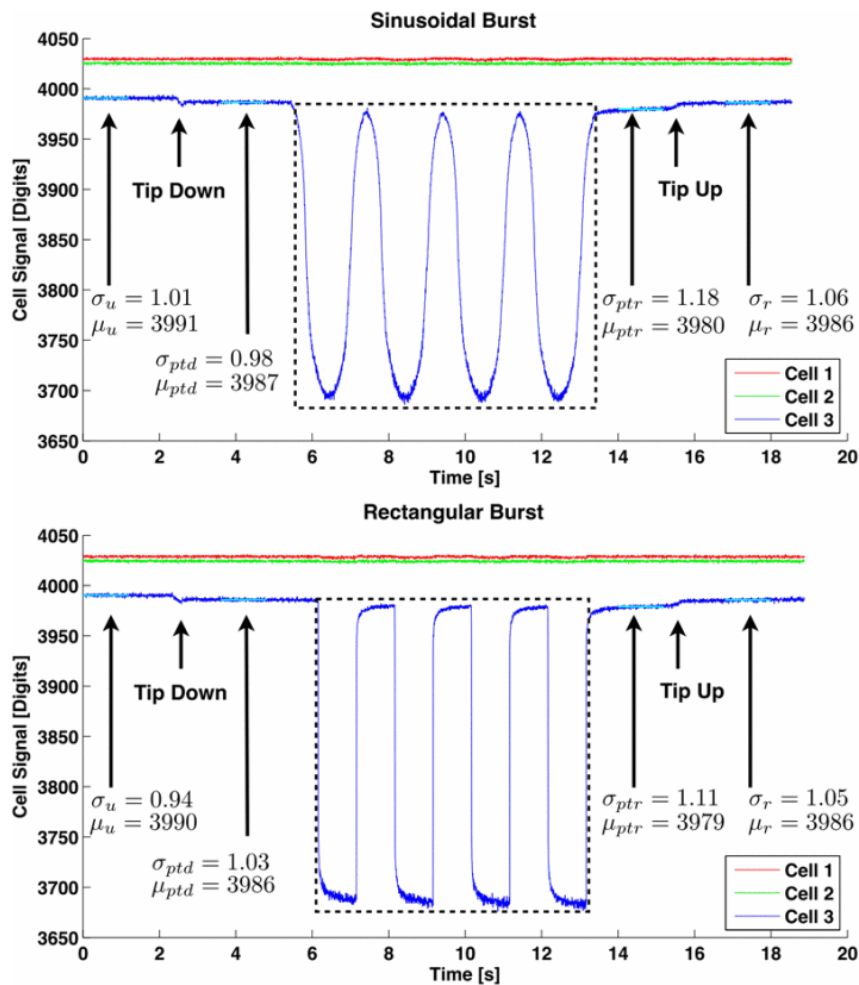


Figura 1.18: Risposta della cella unitaria ad una serie di 4 onde sinusoidali o rettangolari con una forza di 0-3.12 N ed un periodo di 2 s. Le frecce indicano l'applicazione e la rimozione della punta appartenente alla piattaforma di prova dal peso di 12 g. | Fig. da [3]

Legenda dei termini in figura: *Sinusoidal Burst* = Serie Sinusoidale, *Rectangular Burst* = Serie Rettangolare, *Cell Signal [Digits]* = Segnale della Cella [Cifre], *Time [s]* = Tempo [s], *Tip Down* = Applicazione Punta, *Tip Up* = Rimozione Punta

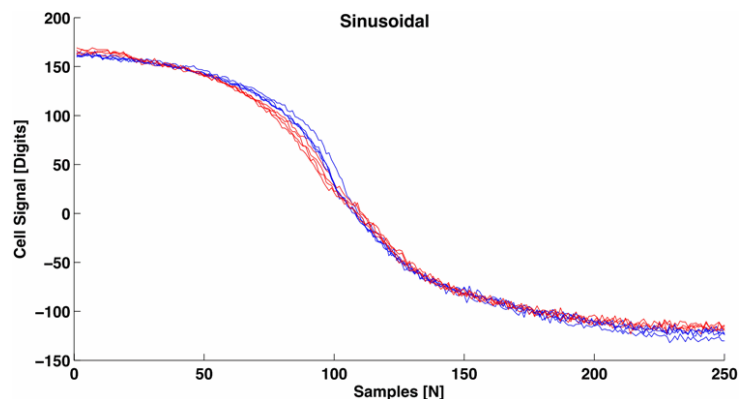


Figura 1.19: Sequenze di campioni del segnale sinusoidale in Fig. 1.18 sovrapposte in discesa e risalita. | Fig. da [3]

Titolo Ascisse: *Campioni [N]*

Risposta al gradino

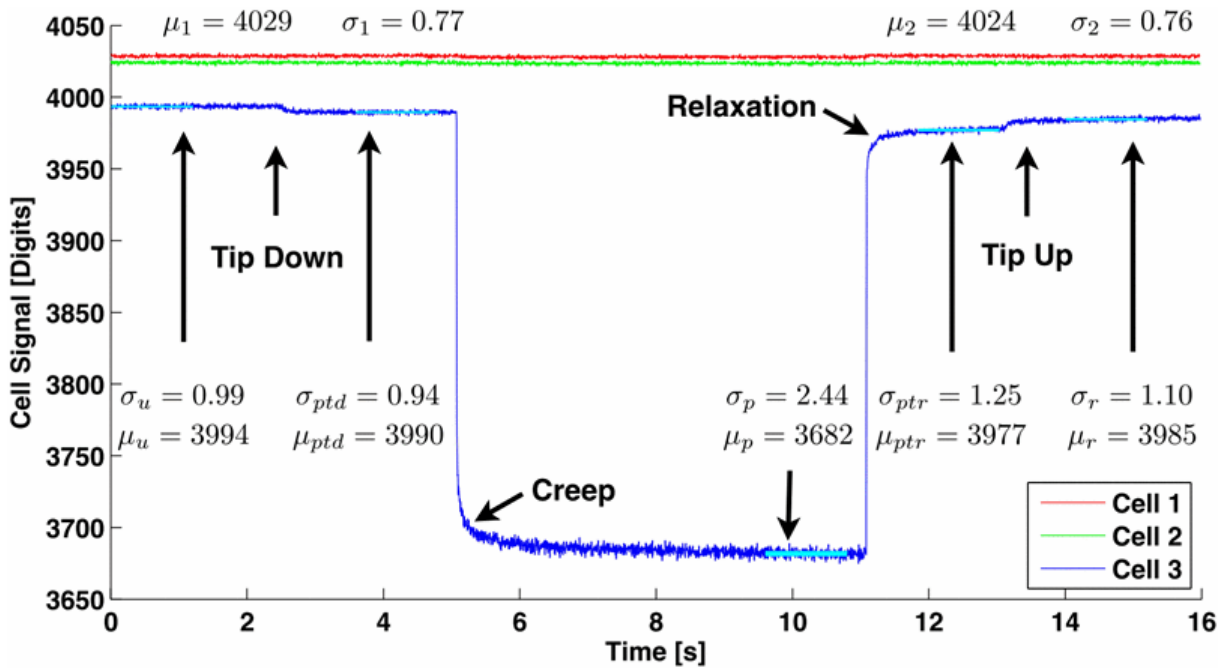


Figura 1.20: Risposta della cella unitaria ad un singolo gradino con una forza di 0-3 N ed un periodo di 6 s. Le frecce indicano l'applicazione e la rimozione della punta appartenente alla piattaforma di prova dal peso di 12 g, oltre che regioni d'interesse. | Fig. da [3]

Termini delle frecce da sinistra a destra: *Applicazione Punta*, *Scorrimento Viscoso*, *Rilassamento degli Sforzi*, *Rimozione Punta*

La Fig. 1.20 mostra la risposta ad un gradino in salita ed in discesa con un'ampiezza di 3N direttamente applicato sulla cella di forza 3. Da questi dati vengono calcolati i valori medi μ e le deviazioni standard σ . Nel caso della cella 3 sono state scelte le regioni stabili indicate con una finestra di $N_{win} = 300$ campioni. Per le celle di forza 1 e 2 sono stati presi in considerazione tutti i campioni ($N_{all} = 3995$). Viene quindi eseguita un'analisi di Fourier con una rappresentazione tramite istogramma di tutti i segnali del rumore (escludendone la media). A parte il rumore gaussiano bianco, non vi è alcuna presenza di rumore spettrale, specialmente per quanto riguarda le frequenze armoniche del clock di sistema o della rete di alimentazione a 50 Hz.

Si è poi calcolato l'intervallo di sistema δ , confrontando i valori medi nello stato senza carico μ_u e nello stato di carico massimo μ_p (limite della piattaforma di prova):

$$\delta = |\mu_u - \mu_p| \approx 312 \quad (1.2)$$

La proporzione segnale-rumore (Signal to Noise Ratio, SNR) può essere quindi calcolata come:

$$\text{SNR} = \frac{\delta}{\sigma_u} \approx 315 \quad \text{or} \quad \text{SNR}_{db} \approx 20 \log \left(\frac{\delta}{\sigma_u} \right) \approx 49.97 \text{dB} \quad (1.3)$$

Confrontando il risultato all'intervallo dinamico (segnale casuale) or al SNR (segnale sinusoidale) di un ADC, la risoluzione sarebbe di 8 bit. Non è presente alcuna sovralongazione od oscillazione del segnale dopo il gradino. Il segnale del sensore raggiunge il 70% dell'intervallo totale δ di risposta al gradino in un singolo periodo di campionamento di $T_{s,70} = 4ms$, il 90% dopo $T_{s,90} = 8ms$ ed il 95% dopo $T_{s,95} = 36ms$. Il breve tempo d'assestamento è dovuto al design specifico della cella di forza ed al filtro mediano.

La pelle composita mista incorpora inerentemente una certa quantità di scorrimento viscoso e di rilassamento degli sforzi, dato il suo comportamento da materiale viscoso. La differenza tra σ_u e σ_r è dovuta ad un leggero rilassamento a lungo termine della differenza tra μ_u e μ_r .

Fitting con curve

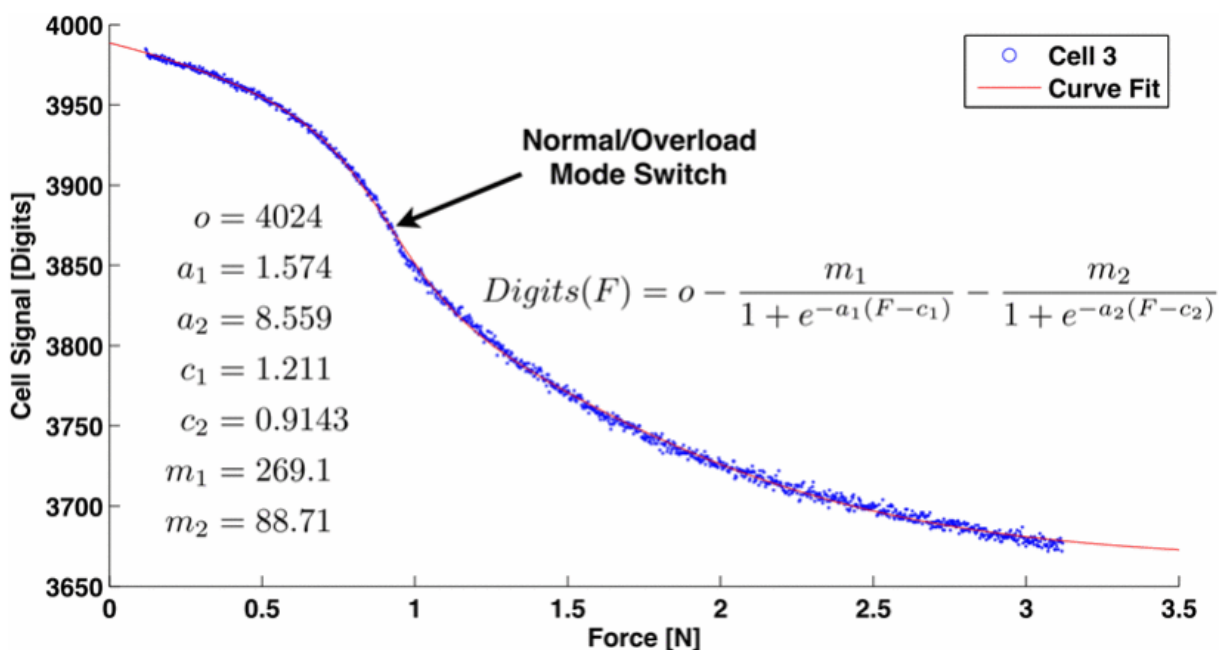


Figura 1.21: Curva e parametri di regressione funzionale per generare automaticamente una tabella di corrispondenze per la conversione forza/cifre. | Fig. da [3]
Termine della freccia: *Cambio Modalità Normale/Sovraccarico*

La Fig. 1.21 mostra un modello di regressione funzionale per elaborare la mappatura non lineare tra i valori delle letture di una cella di forza e la quantità di forza scatenante. Una sovrapposizione di due funzioni sigmoidi $Digits(F) = o - \frac{m_1}{1 + e^{-a_1(F-c_1)}} - \frac{m_2}{1 + e^{-a_2(F-c_2)}}$ (dove "Digits" significa cifre) si adatta perfettamente alla cella di forza, dato che le loro proprietà (reale, derivabile, chiusa, etc.) combaciano con il suo comportamento. Dato il comportamento diviso in due zone (normale/sovraccarico), sono necessarie due funzioni sigmoidi.

Inoltre, data la derivabilità di questa funzione, è possibile calcolare la sensibilità non lineare $S(F) = \frac{dDigits(F)}{dF}$, che raggiunge il suo massimo assoluto di $-290 \frac{Digits}{N}$ a $F_{sw} = 0.92$. Raggiunto questo valore di forza la cella commuta tra la modalità normale e di sovraccarico.

Risposta al chirp

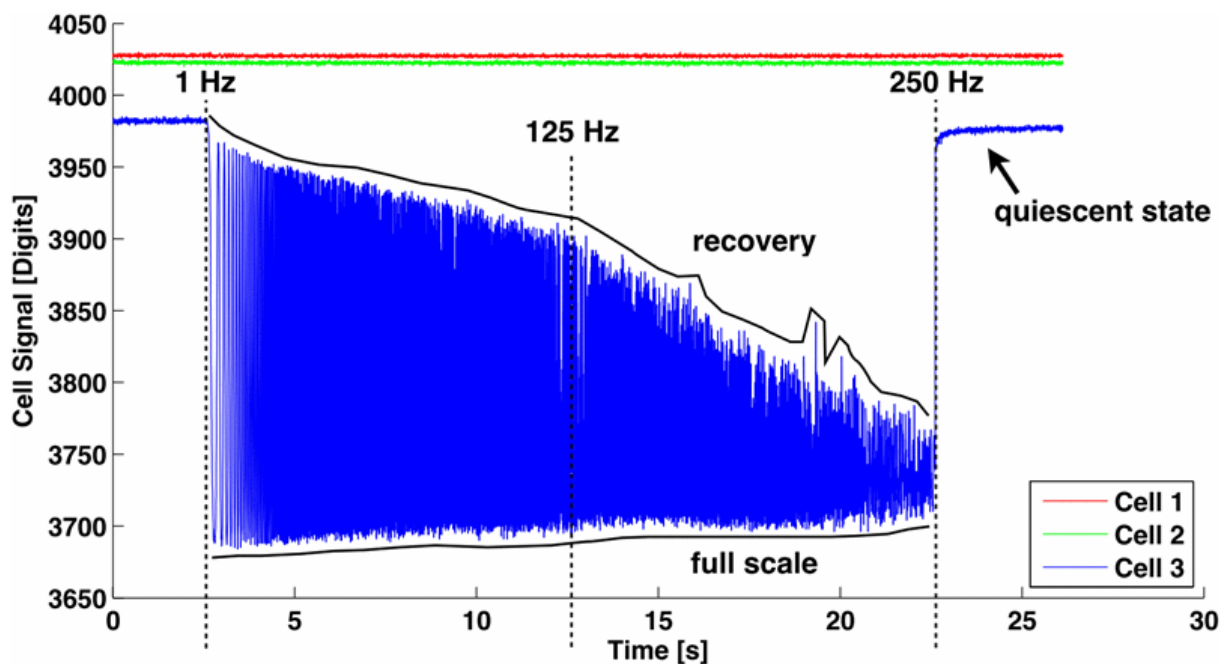


Figura 1.22: Risposta della cella di forza 3 ad un chirp lineare sinusoidale da 1 Hz a 250 Hz, con una forza di 0.12-3.12 N ed un periodo di 20 s. | Fig. da [3]

Legenda dei termini in figura: *Quiescent State* = Stato di *Quiete*, *Recovery* = *Recupero*, *Full Scale* = *Massimo della Scala dei Valori*

La Fig. 1.22 mostra la risposta ad un chirp lineare sinusoidale (un segnale sinusoidale che aumenta uniformemente la sua frequenza nel tempo) tra gli 1 ed 250 Hz con una forza oscillante tra gli 0.12 ed i 3.12 N direttamente sulla cella di forza 3. La visibile diminuzione in ampiezza della risposta è una combinazione delle caratteristiche meccaniche della pelle e del filtro medio non lineare (i filtri mediani troncano le forme d'onda sinusoidali in base alla loro frequenza, mentre causano meno distorsioni sui segnali a gradino).

Si può anche osservare come il sensore si avvicini al massimo valore del suo intervallo per tutte le frequenze, ma non ritorni allo stato di quiete per le frequenze più alte. Ciò mostra che il tempo di recupero dell'intero sistema (incluso la massa della punta attaccata alla piattaforma di prova, o qualsiasi altro oggetto che applichi forze variabili) è più lungo del tempo di reazione. Il sistema si stabilizza quindi su una deviazione vicina al massimo della scala dei valori, invece che su uno stato medio o di quiete.

Tale comportamento è vantaggioso per della pelle artificiale dato che permette di individuare picchi di forza che potrebbero danneggiare gli oggetti manipolati o il robot stesso (vedi l'ultimo esperimento, sulla Robustezza). I valori anomali sono dovuti ad imperfezioni e risonanze armoniche nella piattaforma di prova.

Area ricettiva

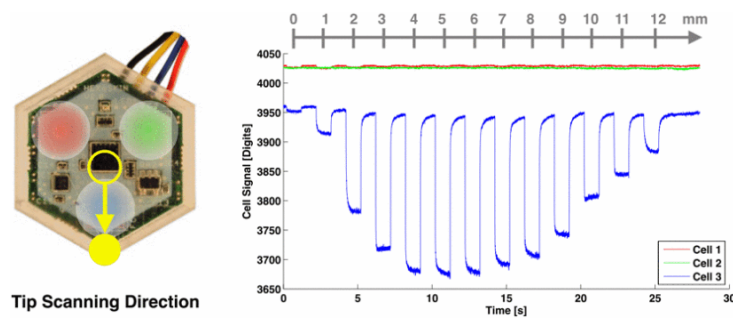


Figura 1.23: Aree ricettive e risposta della cella di forza 3 ad uno stimolo rettangolare, con una forza tra gli 0.12-3.12 N ed un periodo di 2 s, con scorrimento dello stimolo lungo la direzione indicata durante le fasi di forza minore. | Fig. da [3]

Termine in figura: *Direzione di Scansione della Punta*

La Fig. 1.23 mostra l'area ricettiva di una cella di forza 3. L'area ricettiva è stata campionata scansionando con l'estremità di prova lungo la linea indicata sulla superficie della cellula unitaria, applicando una stimolazione rettangolare di 0.12 – 3.12N e spostando la punta di un millimetro durante ogni fase di forza minore (portando ad una leggera asimmetria). Confrontando l'estensione delle aree ricettive di approssimativamente 12mm (vedi cerchi rosso/verde/blu in Fig. 1.23) con la dimensione della cellula unitaria (in Fig. 1.10), è chiaro che ci siano ancora zone insensibili.

Ciò impone un limite alla dimensione e/o al raggio degli oggetti individuabili. Una copertura d'area ricettiva completa potrebbe essere raggiunta con celle sensore più densamente distribuite.

Variazione termica

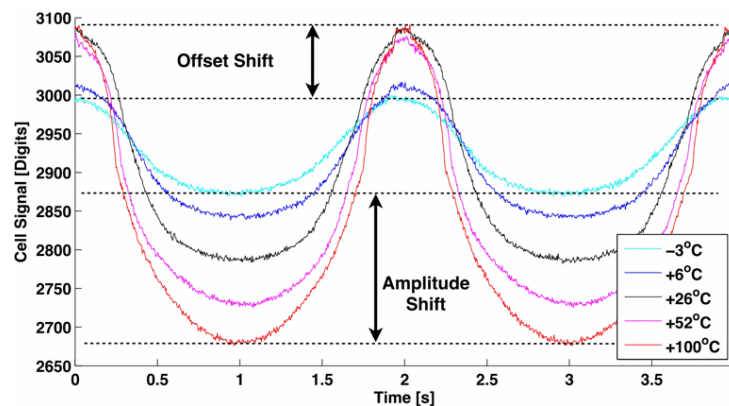


Figura 1.24: Risposta della cella di forza 3 ad uno stimolo sinusoidale, con una forza tra gli 0.12-3.12 N ed un periodo di 2 s, a diverse temperature. | Fig. da [3]

Legenda: *Offset Shift* = Cambio dello Scostamento, *Amplitude Shift* = Cambio d'ampiezza

La Fig. 1.24 mostra il cambiamento della risposta del sensore allo stesso stimolo di forza ma con temperature diverse. Per evitare limiti vincolanti, è stato ridotto il tempo di carica a $T_{red} = 1.875\mu s$. L'energia termica è stata apportata e rimossa dal retro della pelle e misurata con il sensore LM71 nello strato superiore.

Scostamenti significativi accadono solo alle basse temperature, ed il cambiamento in ampiezza può essere approssimato con un modello lineare di guadagno $-1.9 \frac{\text{Digits}}{^{\circ}\text{C}}$.

Robustezza

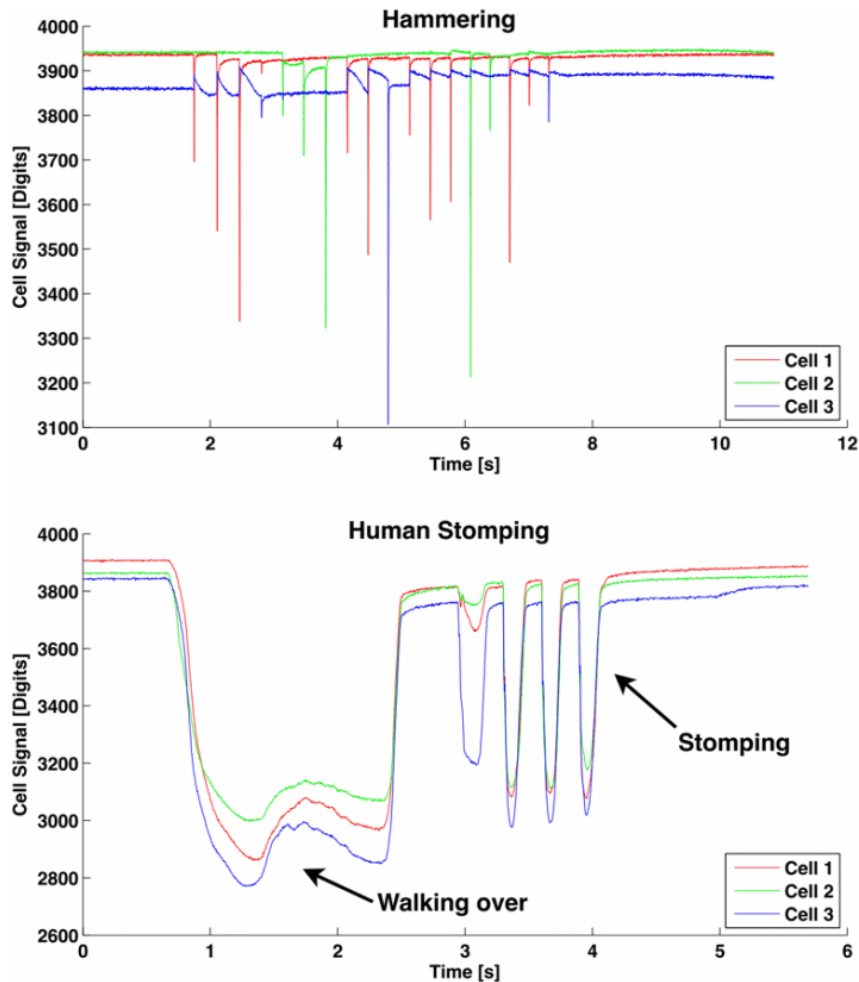


Figura 1.25: Cellula unitaria sotto carichi (umano di 80 kg che cammina e pesta un'unità) ed impatti (martellate conto un'unità in diversi punti) eccessivi. | Fig. da [3]

Legenda: *Hammering* = *Martellamento*, *Stomping* = *Pestoni*, *Walking Over* = *Camminata*

La Fig. 1.25 mostra la reazione di una cellula unitaria rispetto a carichi eccessivi ed impatti generati da un umano che cammina sopra ad una cellula poggiata per terra, la pesta e la martella. Dato l'alto stress, la pelle composita mostra effetti di rilassamento leggermente maggiori, ma comunque reversibili (non si sono rilevati scostamenti permanenti).

L'intervallo di sistema incrementato $\delta \approx 1000$ indica inoltre l'esistenza di un terza modalità, di "ultra-sovraccarico", corrispondente al caso della cella di forza completamente collassata.

Capitolo 2

Rete di comunicazione delle cellule

Le singole cellule della pelle multimodale (Capitolo 1) sono moduli¹ che connessi tra di loro formano dei pezzi di pelle. Tali pezzi di pelle costituiscono nel loro insieme una rete di comunicazione detta Rete dei Moduli Tattili (TMN).

Quanto segue, riportato da [2] (e dalla Sezione II-B di [1] dove indicato), è la descrizione delle specifiche di tale rete e dei meccanismi che le permettono di formarsi e calibrarsi autonomamente, oltre che dell'hardware aggiuntivo necessario ai moduli tattili per funzionare correttamente, ovvero le unità di sezione tattile (TSU) che si connettono ai pezzi pelle ed al cluster di calcolo tattile (TCC) a cui si connettono le TSU.

2.1 Rete dei moduli tattili (TMN)

Le caratteristiche di base della rete dei moduli tattili (TMN) sono:

- 1) Calibrazione di rete automatica
- 2) Ritardo d'inoltro per salto (hop): 300 μ s
- 3) Frequenza d'aggiornamento con otto moduli tattili: 1 kHz
- 4) Spessore elastomero della pelle: 6 mm
- 5) Peso del pezzo di pelle con cinque moduli: 25 g

2.1.1 Formazione della rete

Per formare una struttura complessiva che connette i moduli tattili, viene utilizzata una comunicazione modulo-modulo con instradamento attivo per i dati e passivo per l'alimentazione. Il vantaggio di un sistema attivo è la possibilità di poter instradare i dati evitando le connessioni rotte, oltre che di poter offrire multiple connessioni al PC al fine di aumentare la larghezza di banda e la ridondanza. Nel contempo, la sensibilità alle Interferenze Elettro-Magnetiche (EMI) è ridotta dato che le connessioni ad alta velocità si estendono solo per pochi millimetri.

¹Nonostante il contenuto di questo capitolo sia riferito alla versione originale dei moduli tattili multimodali (Sezione 1.1) le informazioni riportate rimangono valide anche per la loro versione aggiornata (Sezione 1.2), dato che quest'ultima non apporta modifiche notevoli alle specifiche o al funzionamento della rete.

Ogni modulo tattile ha quattro porte, ed una porta consiste di quattro fili: due per l'instradamento passivo dell'alimentazione e due linee UART bidirezionali per la comunicazione modulo-modulo. Durante il montaggio, quando i moduli sono orientati ed allineati correttamente, è possibile connettere due porte direttamente, qui con piccoli cavi di rame.

2.1.2 Calibrazione della rete

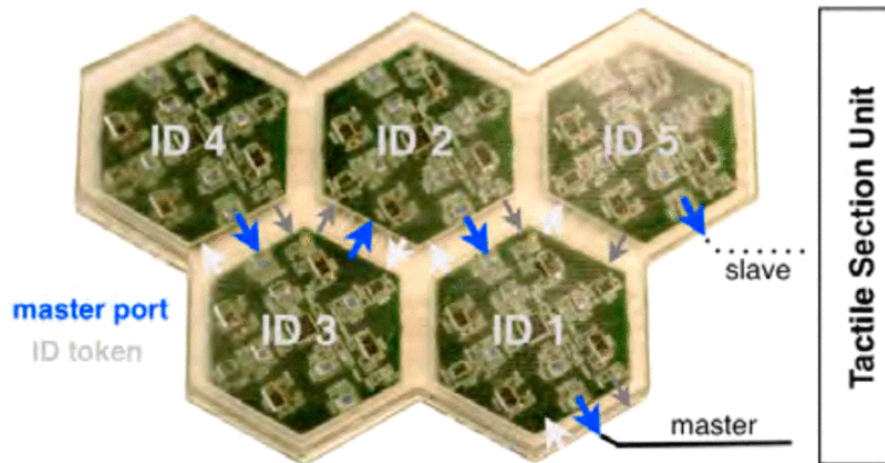


Figura 2.1: Esempio di calibrazione della rete per un pezzo di pelle. | Fig. da [2]
Termini in figura da sinistra a destra: *Porta Principale*, *Token ID*, *Principale (master)*, *Secondario (slave)*, *Unità di Sezione Tattile*

Ogni HEX-O-SKIN deve conoscere due impostazioni di rete elementari: il suo ID unico per discernere l'origine di un pacchetto, e quale delle quattro porte è la porta principale, a cui mandare tutti i pacchetti generati e quelli in entrata dalle altre tre porte dette secondarie. Queste impostazioni sono determinate da un algoritmo di calibrazione di rete che si avvia come parte del codice di accensione dei moduli, perciò è possibile usare esattamente lo stesso firmware su ogni modulo tattile.

Per fornire ad ogni modulo un ID unico, viene iniettato un token ID (un pacchetto specifico) nella rete (da una delle TSU). Iniziando dall'ID 0, ogni modulo tattile senza un ID incrementa il token di 1 e segna questo ID come il proprio. Il token viene poi passato in giro fino a che ritorna alla TSU (vedi Fig. 2.1).

Per impostare la porta principale, ogni porta TSU (porta di un modulo a cui si connette la TSU su di un pezzo di pelle) inietta un token di broadcast. La prima porta su di ogni modulo tattile su cui viene ricevuto il token è impostata come porta principale. Il token viene poi passato alle tre porte rimanenti, impostate come secondarie.

Per la robustezza della rete, è necessario impostare la porta principale di ogni modulo automaticamente. Questo garantisce che almeno una connessione, non necessariamente la più veloce, al PC venga trovata. La calibrazione automatica degli ID ritorna inoltre il numero totale di moduli connessi.

2.1.3 Ridondanza della rete

La robustezza della rete fa uso della sua struttura altamente ridondante. Per un singolo nodo, è necessario che solamente una delle quattro porte sia funzionale. Ogni volta che viene eseguito l'algoritmo di calibrazione di rete, esso tiene conto solo delle porte funzionali. Una connessione rotta si comporta come una porta non connessa ed i dati vengono instradati attraverso un'altra.

È ovviamente necessario gestire rotture parziali, come una porta che opera a senso unico. Lo stesso concetto si estende alle TSU. Una TSU dovrebbe avere multiple porte d'interfaccia ad un singolo pezzo di pelle, ma un singolo pezzo di pelle dovrebbe connettersi a più di una singola TSU per essere in grado di isolare unità rotte mantenendo i pezzi di pelle connessi in vita.

2.1.4 Performance di rete

I moduli hanno una frequenza di generazione dei dati tra gli 0.1 ed 1 kHz. Negli esperimenti su questa versione originale dei moduli (vedi Sottosezione 1.1.4), un pacchetto di 8 Byte è necessario per ognuna delle tre modalità sensoriali, la frequenza di generazione è 0.1 kHz, e la frequenza di trasferimento UART è limitata a 2 Mb/s (date le necessità di routine del processore, vedi **Processore locale e gestione dei dati** nella Sezione 1.1). Un singolo modulo multimodale genera quindi un massimo di 24 kb/s.

Per una stima di latenza cumulativa è considerato solo il caso peggiore del ritardo proveniente dall'instradamento attivo dei dati. Il tempo misurato che un pacchetto impiega a saltare (hop) da un modulo secondario (connesso ad una porta secondaria) alla porta principale di un altro modulo è di 300 μ s. Dato che ogni modulo ha altre due porte secondarie e produce i propri dati, potrebbero avere la precedenza fino ad altre tre transazioni.

Con un massimo di otto moduli tattili su una singola linea UART, il caso peggiore per l'ultimo modulo sarebbe di 6.3 ms (caso peggiore siccome è considerato improbabile avere una catena continua di più di 8 moduli in fila).

2.1.5 Migliorie

Nella versione originale (Sezione 1.1) i salti modulo-modulo dei pacchetti causano la maggior parte della latenza critica del controllore e limitano la frequenza d'aggiornamento dell'intero sistema. Di conseguenza nella versione aggiornata (Sezione 1.2) dei moduli si è implementato un trasferimento dei pacchetti basato sul DMA (Direct Memory Access) con 12 Mb/s.

Inoltre, come fatto notare nell'articolo più recente [1] (Sezione II-B), le uniche limitazioni alle dimensioni della rete dei moduli sono l'alimentazione e la larghezza di banda per la comunicazione. Una singola porta di uno dei moduli può (al tempo dell'articolo) supportare connessioni fino a 66 moduli, con 4 Mb/s a 250 Hz.

2.2 Unità di sezione tattile (TSU)

Come mostrato (vedi Fig. 1.1 nella Sezione 1.1) multiple unità di sezione tattile (TSU) sul robot raccolgono i dati da diversi pezzi di pelle. Una TSU potrebbe inoltre essere integrata nel controllore locale di un'articolazione riutilizzandone le strutture d'alimentazione e di rete.

Riferendosi alla versione originale (Sezione 1.1), è stata usata come TSU una scheda Enclustra SX1 FPGA con l'aggiunta di un NX1, dato che l'NX1 fornisce il processore fisico necessario per l'Ethernet Gigabit. È stato implementato del codice scritto in VHDL² per consentire una conversione ad alta velocità tra i pacchetti degli UART ed i pacchetti UDP dell'Ethernet Gigabit, utilizzando la dimensione minima per i pacchetti UDP di 69 Byte per l'invio di un pacchetto generato dalla TMN, ovvero dalla rete. Ciò rende possibile la raccolta di informazioni da multiple TSU con la minima latenza.

Uno schema complessivo proveniente da [1], riferito alla versione più recente delle cellule (Sezione 1.2) illustra la connessione tra le TSU ed il TCC (contenuto nel PC ospite) tramite uno Switch Gigabit (vedi Fig. 2.2).

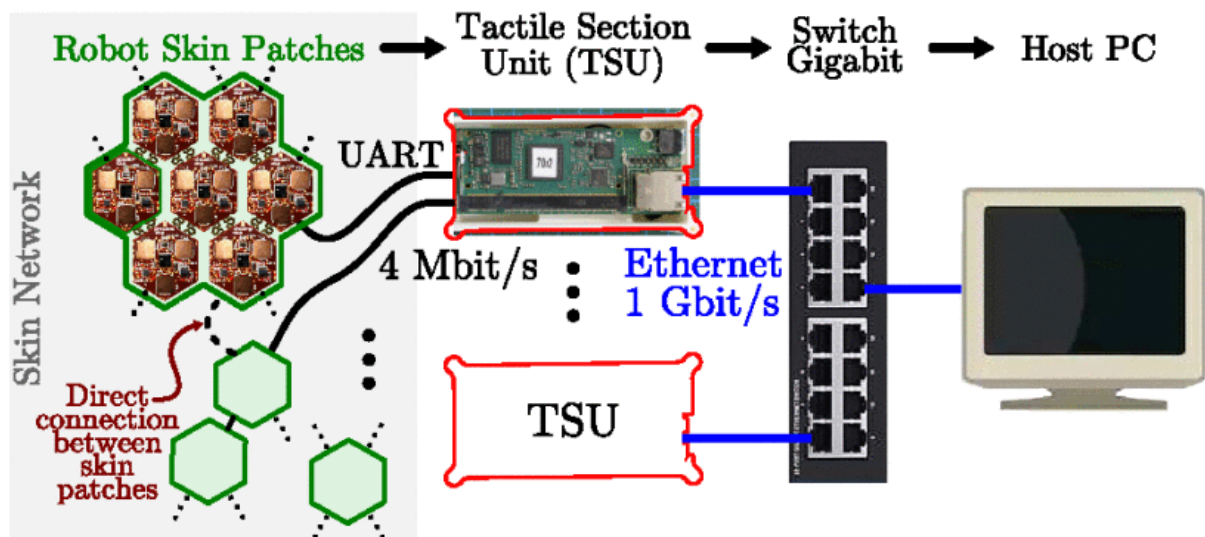


Figura 2.2: Rete della pelle robotica ed interfaccia di comunicazione verso un PC ospite. | Fig. da [1]
Termini in figura da sinistra a destra, poi in basso: *Pezzi di Pelle Robotica, Unità di Sezione Tattile, Switch Gigabit, PC Ospite, Rete della Pelle, Connessione diretta tra pezzi di pelle*

²Wikipedia, *VHDL*, URL: <https://it.wikipedia.org/wiki/VHDL>

2.3 Cluster di calcolo tattile (TCC)

Il cluster di calcolo tattile (TCC) riceve i dati da tutti i pezzi di pelle tramite le TSU. È progettato come una pipeline d'elaborazione che ha la possibilità di lavorare su un singolo PC o un cluster di computer dedicati all'elaborazione.

La catena d'elaborazione del TCC ha inizio con i dati sensoriali sotto forma di pacchetti UDP, che vengono raccolti dalle TSU. Gli errori di trasmissione sono filtrati dalle porte della TMN, e nuovi dati sono quindi inoltrati al prossimo stadio d'elaborazione. Un filtro della TMN deriva quindi dati di più alto livello, come l'orientamento ed il movimento dai segnali grezzi degli accelerometri. Inoltre, il filtro della TMN verifica e calibra i dati dei sensori, come per esempio aggiustamenti degli offset (scostamenti) per i sensori di prossimità.

Le informazioni sono poi passate al controllore tattile, descritto a seguire (da sottolineare come l'argomento del controllo sia trattato in modo più esteso nella sezione IV dell'articolo [1], mentre qui venga solo menzionato non essendo centrale alle tematiche trattate).

2.3.1 Controllore tattile

Le informazioni sul tocco per ogni singola modalità e la desiderata reazione risultante sono mappate ad un movimento del robot. Per fare ciò, è necessario provvedere informazioni sull'ID del segmento robotico e la posizione (x, y, z) e l'orientamento (α, β, γ) relativi di ogni modulo tattile in relazione al sistema di coordinate del segmento su cui si trova.

La reazione complessiva di un segmento è la sovrapposizione delle reazioni locali di ogni sensore sul segmento. Una reazione locale manipola la velocità del rispettivo segmento con un valore proporzionale o costante. Il valore è aggiunto ai rispettivi DoF (gradi di libertà, in questo caso di un'articolazione robotica) nel sistema di coordinate del segmento. È stato implementato un Controllore Sliding-Mode³ per ogni sensore di prossimità con lo scopo di sperimentare sulla TMN. I controllori manipolano le velocità laterali del segmento $(\dot{x}, \dot{y}, \dot{z})$ su cui sono locati.

Per gli esperimenti sulla versione originale dei moduli (vedi Sottosezione 1.1.4), il controllore proporzionale per l'orientamento è attivo solo sul dispositivo d'estremità del robot. Tale controllore manipola due delle tre velocità angolari $(\dot{\alpha}, \dot{\beta}, \dot{\gamma})$ del segmento d'estremità.

2.3.2 Controllore del robot

Infine, tutti i movimenti dei segmenti del robot (un braccio robotico KUKA per gli esperimenti della Sottosezione 1.1.4, raffigurato in Fig. 1.8) sono inoltrati al suo controllore .

Una catena cinematica inversa calcola le velocità delle articolazioni desiderate basate sulla rotazione desiderata del segmento. I valori di controllo delle articolazioni della catena sono sovrapposti con l'obiettivo globale del robot ed inviati a quest'ultimo.

³Wikipedia, *Controllo Sliding Mode*, URL: https://it.wikipedia.org/wiki/Controllo_sliding_mode

Capitolo 3

Configurazione e localizzazione automatica delle cellule

Le informazioni sensoriali generate dalle cellule multimodali descritte nel Capitolo 1 racchiudono un enorme potenziale per il controllo dei robot su cui viene applicata la pelle artificiale.

Per sfruttare appieno tale potenziale in diverse applicazioni è però necessario etichettare i moduli da cui provengono le letture dei sensori, per combinare tali dati con informazioni spaziali che localizzino la singola cellula etichettata rispetto al robot o ad un suo singolo pezzo.

La Sezione II-C dell'articolo [1] propone un metodo completamente automatizzato basato sulle capacità multimodali delle cellule stesse per fornire tale configurazione e localizzazione:

- 1) Montaggio dei pezzi di pelle sul robot d'interesse (approfondito nel Capitolo 5);
- 2) Ricostruzione in 3D dei singoli pezzi di pelle basata sull'inizializzazione con etichettatura della rete di cellule (già illustrata nel Capitolo 2) e sull'utilizzo degli accelerometri triassiali integrati in ognuno dei moduli ;
- 3) Fusione delle ricostruzioni locali dei pezzi di pelle in una ricostruzione 3D globale tramite l'uso dei LED di ogni modulo multimodale come marcatori visivi, seguita dalla combinazione di tale organizzazione spaziale con modelli cinematici (descritti nel Capitolo 4) al fine di estrapolare le trasformazioni omogenee che determinano la locazione delle cellule.

In questo capitolo vengono illustrati in ordine i due algoritmi di ricostruzione, con la ricostruzione globale che utilizza quella locale come un sotto algoritmo.

Inoltre, la combinazione tra ricostruzioni e modelli cinematici viene affrontata sia in questo capitolo (vedi Sottosezione 3.2.6) che in quello sui modelli stessi (vedi Sottosezione 4.2.6).

3.1 Ricostruzione dei pezzi di pelle in 3D

3.1.1 Approccio

L'approccio qui presentato, riportato da [4], per la ricostruzione in 3D di superfici robotiche fornite di pelle artificiale fonde le informazioni statiche sulla forma e dimensione delle cellule unitarie uniformi (descritte nel Capitolo 1) con le informazioni dinamiche per ogni unità, ovvero le unità limitrofe e le misurazioni del proprio accelerometro triassiale. Ciò rende la ricostruzione 3D possibile in un tempo molto breve, fornendo la posizione e l'orientamento di ogni unità in un pezzo di pelle relativamente all'unità d'origine scelta automaticamente per ogni pezzo.

Viene campionato un insieme di vettori di gravità complementari, comandando attivamente o passivamente le parti del corpo robotiche in un numero variabile di pose diverse, mentre la pelle artificiale rimane non deformata. La procedura utilizzata fa esplicitamente uso delle capacità di connessione intelligente della pelle artificiale, in grado di esplorare i collegamenti tra vicini.

Spostare il problema nell'ambito della teoria dei grafi ed effettuare un'ottimizzazione locale invece che globale, permette al sistema di adattarsi rapidamente ad eventuali cambiamenti, ad esempio cancellando le connessioni tra cellule su parti del corpo diverse quando tali informazioni divengono note (grazie ad esempio all'algoritmo d'esplorazione Alg. 4.1, nella Sezione 4.1).

Dato che non vengono utilizzati sensori esterni e solo poche informazioni note a priori indipendenti dal robot, l'algoritmo può essere trasferito rapidamente da un robot all'altro. Inoltre il metodo di calibrazione proposto risparmia tempo e permette inizializzazioni e ricalibrizioni rapide, non facendo uso di stimolazioni esterne sulla pelle artificiale.

3.1.2 Specifiche della pelle

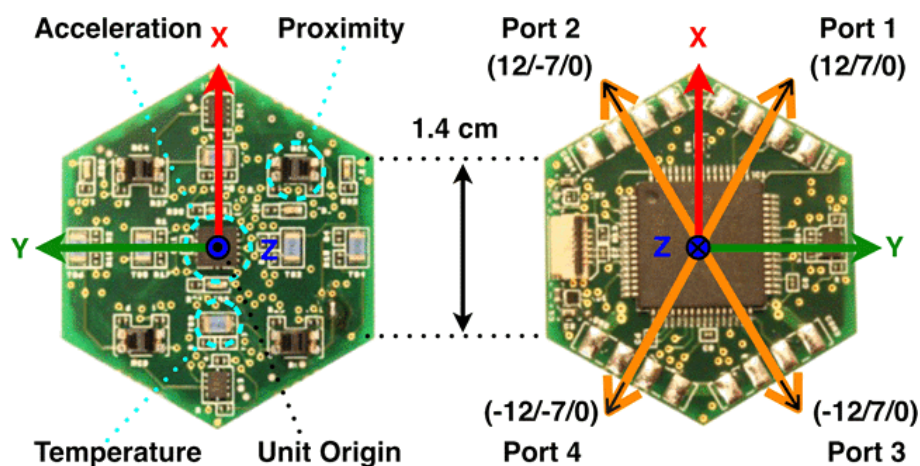


Figura 3.1: L'unità sensoriale già vista nella Fig. 1.2, ma con evidenziati i 3 assi del sistema di riferimento dell'accelerometro triassiale ed i vettori delle 4 porte in tali coordinate. | Fig. da [4]

Le unità sensoriali utilizzate nell'approccio proposto sono le medesime cellule per la costruzione di una pelle artificiale multimodale descritte estensivamente nella Sezione 1.1, più precisamente la versione originale di tali unità sensoriali.

Nonostante il metodo per la ricostruzione 3D dei pezzi di pelle spiegato qui in seguito sia quindi stato sviluppato e collaudato per la versione originale delle cellule multimodali, nessuno degli aggiornamenti apportati alla versione successiva delle cellule (Sezione 1.2) lo rende incompatibile od obsoleto (come osservabile dal fatto che nella Sezione 3.2 venga utilizzata questa stessa ricostruzione 3D sulla cellula aggiornata come passo base per il processo completo descritto in tale sezione).

Sono qui riportate solo le caratteristiche salienti della cellula sensoriale utili ai fini della ricostruzione 3D. Ogni unità sensoriale (SU, rappresentata in Fig. 3.1), è dotata di un accelerometro BOSCH BMA150 impostato ad un intervallo di $\pm 2g$ ed una frequenza di output di $1kHz$. Un processore sul retro di ogni SU consente la conversione, pre-elaborazione ed invio dei segnali del sensore in modo locale.

Le unità limitrofe sono connesse attraverso quattro porte, con 4 cavi per porta (2 per i dati e 2 per l'alimentazione), che offrono ognuna una connessione dati bidirezionale a $12Mbit/s$. Solo certe combinazioni di porte possono essere connesse per obbedire al loro schema di polarità. Almeno una porta sul bordo di un pezzo di pelle (SP), dove un pezzo di pelle è definito come una rete di unità vicine strettamente connesse, deve essere connessa ad un'interfaccia per computer.

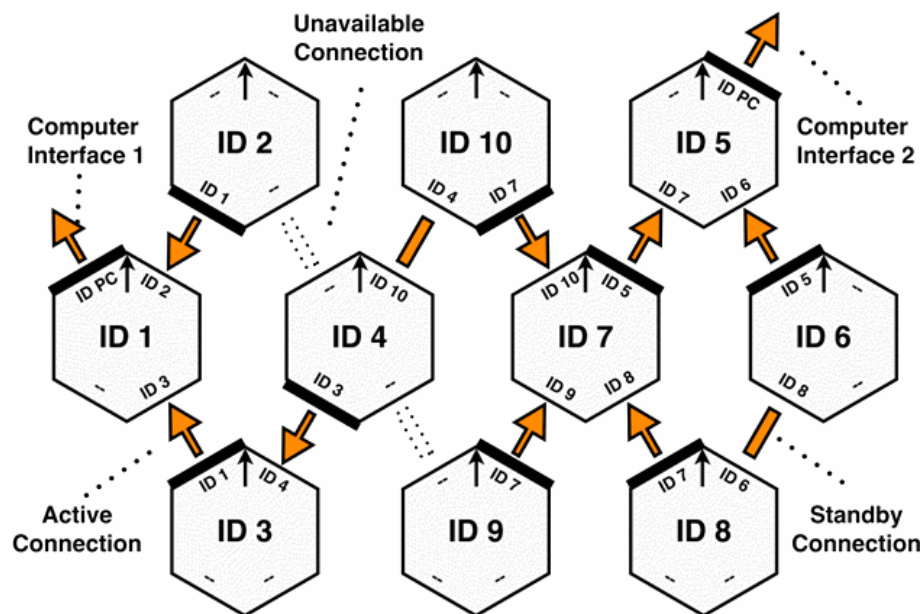


Figura 3.2: Esplorazione automatica della rete utilizzando la comunicazione locale. | Fig. da [4]
 Termini in figura dall'alto a destra in senso antiorario: *Interfaccia al Computer 2*, *Connessione non Disponibile*, *Interfaccia al Computer 1*, *Connessione Attiva*, *Connessione in Attesa*

Eseguendo un algoritmo d'esplorazione automatico (il cui risultato viene illustrato in Fig. 3.2), la rete di SU scopre tutte le porte di comunicazione bidirezionali disponibili, imposta le vie d'instradamento ottimali verso il computer, distribuisce ID unici alle unità ed esplora i vicini di rete ad ogni porta (tale funzionalità della rete di SU è affrontata in dettaglio nel Capitolo 2).

La posizione e l'orientamento del sensore d'accelerazione triassiale su di una SU, i vettori delle porte, e la grandezza della forma esagonale sono noti e statici rispetto al sistema di riferimento (e coordinate) della SU stessa.

3.1.3 Formulazione del problema

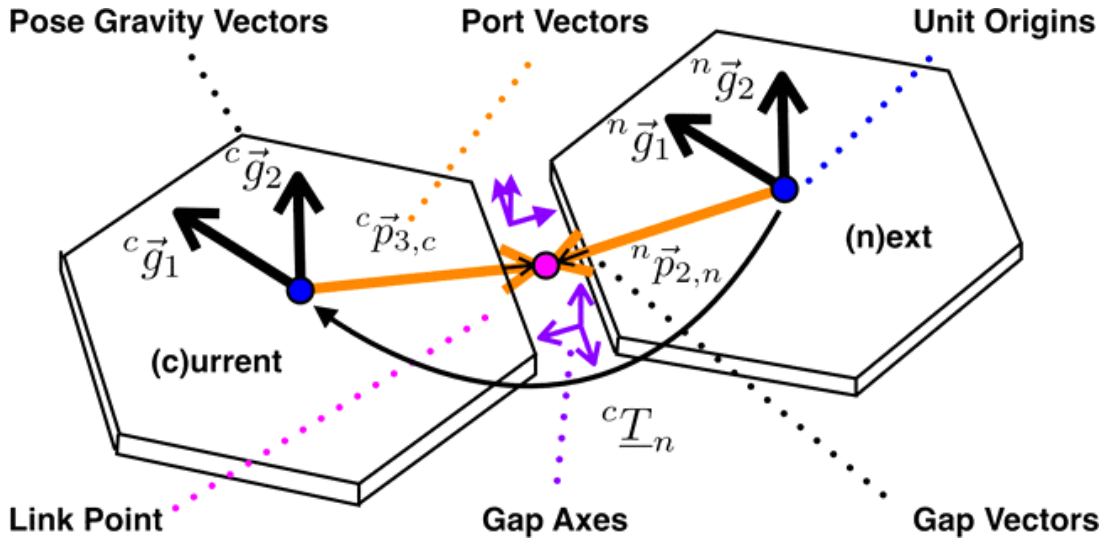


Figura 3.3: Modello del collegamento formato dall'elastomero tra due unità sensoriali. | Fig. da [4]
 Termini in figura dall'alto a destra in senso antiorario: *Origini delle Unità*, *Vettori delle Porte*, *Vettori della Gravità di Posa*, *(c)urrent = Unità Corrente*, *Punto di Collegamento*, *Assi dello Spazio Vuoto*, *Vettori dello Spazio Vuoto*, *(n)ext = Unità Successiva*

L'obiettivo è quello di stimare efficientemente le posizioni e gli orientamenti relativi di unità sensoriali (SU) uniformi, distribuite sulla superficie di parti robotiche, utilizzando informazioni statiche note a priori ed informazioni dinamicamente generate dalla rete di SU.

Dato che la pelle artificiale è costituita da una ripetizione della stessa rigida cella unitaria le trasformazioni di corpi rigidi, caratterizzate da una rotazione ${}^c R_n$ ed una traslazione ${}^c \vec{t}_n$, descrivono adeguatamente la connessione tra due SU limitrofe c ed n (vedi Fig. 3.3). Non accade alcun cambiamento di scala, deformazione, ribaltamento o proiezione tra le cellule unitarie uniformi:

$${}^c \underline{T}_n = \begin{bmatrix} {}^c R_n & {}^c \vec{t}_n \\ \underline{0} & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Si presuppone inoltre che il collegamento tra due unità c ed n , direttamente connesse attraverso le rispettive porte l_c ed l_n , può essere approssimato imponendo il punto di connessione dei vettori delle porte estesi ${}^c \vec{p}_{l_c,c}$ e ${}^n \vec{p}_{l_n,n}$ uguali in coordinate comuni:

$${}^c \underline{T}_n \cdot {}^n \vec{p}_{l_n,n} \equiv {}^c \vec{p}_{l_c,c} \quad (3.2)$$

Tale presupposto si basa su alcune proprietà specifiche della pelle artificiale utilizzata:

- 1) Le cellule della pelle artificiale non si sovrappongono;
- 2) Una densa tassellazione (distribuzione ordinata e regolare) di sottili cellule unitarie esagonali su una superficie vincola il posizionamento e l'allineamento locale di ogni cellula;
- 3) Le porte devono essere vicine ed inizialmente allineate per essere connesse direttamente;

- 4) La dimensione dello spazio vuoto tra le cellule nella tassellazione è nota a priori;
- 5) La componente traslazionale di un piccolo vuoto riempito d'elastomero tra cellule esagonali rigide può essere ignorata;
- 6) Il punto di rotazione dell'elastomero nello spazio vuoto tra le cellule è approssimativamente centrato;

Basandosi su questi presupposti, è possibile ignorare il cambiamento dei piccoli vettori dello spazio vuoto (vedi Fig. 3.3) ed aggiungere metà della dimensione nota dello spazio vuoto direttamente ad ogni vettore di porta, formando i quattro vettori delle porte estesi ${}^u\vec{p}_{l_u,u}$ illustrati, noti nelle coordinate della cellula unitaria u . Combinando le Equazioni (3.1) e (3.2) si ottiene:

$${}^c\vec{t}_n = {}^c\vec{p}_{l_c,c} - {}^c\underline{R}_n \cdot {}^n\vec{p}_{l_n,n} \quad (3.3)$$

Ciò mostra che la traslazione relativa ${}^c\vec{t}_n$ può essere calcolata a partire dalla rotazione relativa ${}^c\underline{R}_n$ e dalle porte connesse. Vengono poi utilizzate le informazioni provenienti dall'algoritmo d'esplorazione della rete per trovare le porte direttamente connesse, e le misurazioni dei vettori gravitazionali di ogni unità per stimare la rotazione relativa.

Quando tutte le trasformazioni locali in un pezzo di pelle (SP) sono note, l'orientamento e la posizione di ogni SU detta u , relativi ad un'unità d'origine scelta detta o , possono essere calcolati come una catena cinematica tra u ed o , con un numero variabile d'unità x nel mezzo:

$${}^o\underline{T}_u = {}^o\underline{T}_x \cdot \dots \cdot {}^x\underline{T}_u \quad (3.4)$$

Una stima d'errore assegnata ad ogni trasformazione locale permette di minimizzare l'errore inerentemente accumulato, cercando una catena cinematica ottimale per ognuno dei pezzi di pelle. La forma e le dimensioni dell'unità, come anche la posizione e l'orientamento di ogni sensore su di un'unità, sono noti nelle coordinate dell'unità. Grazie all'Equazione (3.4), è possibile trasformare queste informazioni note in delle coordinate rispetto al pezzo di pelle comune.

Questo permette la ricostruzione della superficie del pezzo di pelle (oltre che della forma parziale dell'oggetto sottostante), ma soprattutto la ricostruzione dell'orientamento e posizione di ogni sensore appartenente a tale pezzo di pelle, relativamente al sensore origine del pezzo.

3.1.4 Soluzione del problema

Algoritmo 3.1 Ricostruzione in 3D di multipli pezzi di pelle

- 1: Rilevamento di (U) unità sensoriali disponibili
 - 2: Creazione di un grafo della pelle con U vertici
 - 3: Esplorazione dei vicini di rete di ogni unità = liste dei vicini
 - 4: Creazione degli archi orientati relativi alle porte a partire dalle liste dei vicini
 - 5: Cancellazione degli archi non diretti (ad es. tra parti del corpo diverse)
 - 6: Analisi delle componenti connesse del grafo = pezzi di pelle
 - 7: **while** Ciclo di ricostruzione **do**
 - 8: Campionamento dei vettori di gravità in multiple pose (P)
 - 9: Stima delle rotazioni relative agli archi a partire dai vettori di gravità e delle porte
 - 10: Calcolo dei pesi degli archi a partire dagli errori di stima
 - 11: Trovare l'unità con il percorso cumulativo più breve per ogni pezzo di pelle
 - 12: Impostare tali unità come origini dei rispettivi pezzi di pelle e memorizzare i percorsi
 - 13: Impostare posizione ed orientamento delle origini dei pezzi di pelle ai valori predefiniti
 - 14: Aggiornare gli orientamenti delle unità rimanenti lungo i percorsi di calcolo
 - 15: Aggiornare le posizioni delle unità rimanenti lungo i percorsi di calcolo
 - 16: **end while**
-

Rappresentazione tramite grafo

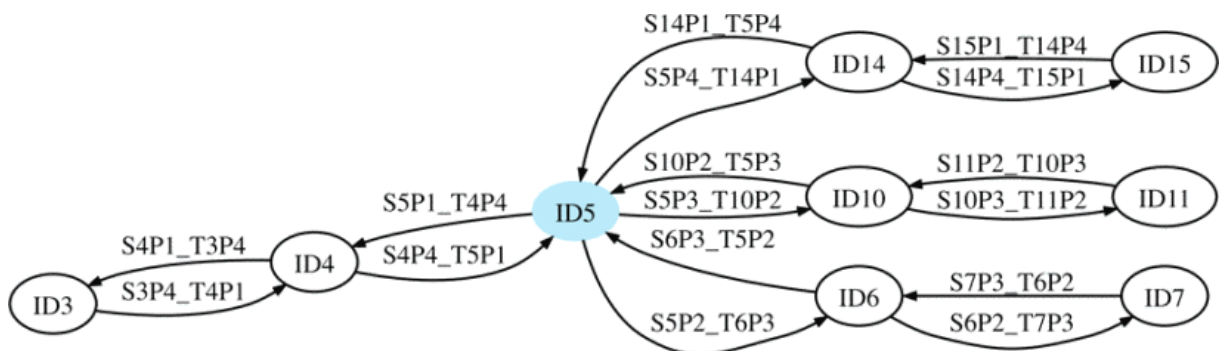


Figura 3.4: Visualizzazione parziale (con GraphViz) del grafo appartenente al pezzo di pelle in Fig. 3.5. | Fig. da [4]

La teoria dei grafi (qui implementata con BGL¹) offre una rappresentazione adeguata per la pelle artificiale, e metodi per gestire efficientemente configurazioni arbitrarie di unità sensoriali (SU).

Si inizia scorrendo il risultato dell'esplorazione automatica della rete (vedi Sottosezione 3.1.2) trasferendo tale risultato in un grafo vuoto (vedi Alg. 3.1), attaccando una mappa di proprietà al grafo, con una variabile per il numero di pezzi di pelle ed un vettore per memorizzare l'origine di ogni pezzo di pelle.

Per ogni unità sensoriale viene creato un vertice, attaccando una mappa di proprietà con il suo ID unico e segnaposti per l'ID del suo pezzo di pelle, la sua matrice d'orientamento relativo ed il suo vettore di posizione.

¹J. G. Siek e L. Q. Lee e A. Lumsdaine, "The Boost Graph Library", Addison-Wesley, 2001, versione 1.4.9

Per ogni vicino nella lista di vicini della rete, viene creato un arco orientato, attaccando una mappa di proprietà con l'ID dell'unità di provenienza e d'arrivo, oltre che la porta di provenienza e d'arrivo, e segnaposti per la matrice di rotazione relativa ed il peso dell'arco relativamente all'errore di stima. Dato che tutte le connessioni sono bidirezionali, ognuna aggiunge due archi (vedi Fig. 3.4).

Per la ricostruzione 3D dei pezzi di pelle, solo le connessioni ravvicinate sono d'interesse (vedi la Sottosezione 3.1.3). Tutti gli altri archi devono quindi essere cancellati o silenziati. Qui, vengono implementati due metodi: si cancellano gli archi collegati alle interfacce del computer (che si comportano come unità con ID di valore massimo), e si cancellano gli archi tra parti diverse del corpo (informazione nota grazie all'Alg. 4.1, della Sezione 4.1), dato che queste possono essere connesse solo con lunghi cavi.

L'esecuzione dei prossimi passi richiede che la stima della rotazione relativa corrispondente ad un arco (spiegata nella sotto-sottosezione successiva **Stima della rotazione relativa**) sia completata per ogni arco del grafo.

Prima di tutto, si avvia un algoritmo delle componenti connesse sull'intero grafo, che ritorna il numero di pezzi di pelle S ed assegna ogni unità ad un pezzo di pelle s . Successivamente si cerca per ogni pezzo di pelle l'unità con il percorso cumulativo più breve verso tutte le altre unità del pezzo di pelle, basandosi sull'algoritmo del percorso più breve di Dijkstra (tenendo conto dei pesi per le stime degli errori, stime peggiori portano ad archi più lunghi), impostandola come origine o_s del pezzo di pelle s .

Dato che le posizioni ${}^w\vec{t}_{o_s}$ e gli orientamenti ${}^w\underline{R}_{o_s}$ dei pezzi di pelle (rispetto al sistema di riferimento del mondo esterno, detto *world*) non sono definiti, vengono impostati a dei valori predefiniti pari a:

$${}^w\vec{t}_{o_s} = \vec{0} \quad \text{and} \quad {}^w\underline{R}_{o_s} = \underline{I}, s \in \{1, \dots, S\} \quad (3.5)$$

Partendo da ogni origine o_s , si procede per propagazione lungo i percorsi più brevi aggiornando di conseguenza tutti gli orientamenti relativi ${}^{o_s}\underline{R}_u$ e posizioni relative ${}^{o_s}\vec{t}_u$ delle unità lungo la catena cinematica:

$${}^{o_s}\underline{R}_n = {}^{o_s}\underline{R}_c {}^c\underline{R}_n \quad (3.6a)$$

$${}^{o_s}\vec{t}_n = {}^{o_s}\vec{t}_c + {}^{o_s}\underline{R}_c {}^c\vec{t}_n \quad (3.6b)$$

Stima della rotazione relativa

La componente rotazionale ${}^c\underline{R}_n$ della trasformazione ${}^c\underline{T}_n$ tra due unità direttamente connesse c ed n combina due componenti: l'allineamento ripetitivo iniziale di $\frac{2\pi}{6}$ delle porte nella tassellazione esagonale, e la deformazione dell'elastomero nello spazio tra le unità, semplificato come una rotazione al punto di connessione (vedi Fig. 3.3). Data l'Equazione (3.3) entrambe possono essere stimate allo stesso tempo. Tuttavia, è possibile aggiungere specifiche informazioni aggiuntive, in caso una componente non sia completamente definita, come mostrato in seguito.

Viene stimata la rotazione ${}^c\underline{R}_n$ basandosi sulle misurazioni dei vettori di gravità delle unità ${}^c\vec{g}_c(t)$ e ${}^n\vec{g}_n(t)$ in funzione del tempo t , ottenute con l'accelerometro triassiale di ogni unità. Ciò è reso possibile dal fatto che il campo gravitazionale ${}^w\vec{g}({}^w\vec{r} + {}^w\vec{s})$ nelle coordinate dell'ambiente w (world), per un robot sulla superficie della Terra (${}^w\vec{r} = 6371km$, $M = 5.9 \times 10^{24}kg$, $G = 6.7 \times 10^{-11} \frac{m^3}{kg \cdot s^2}$), è indipendente dal punto di misurazione (${}^w\vec{s} \ll {}^w\vec{r}$), dalla massa del robot ($m \ll M$), e dal tempo t .

$${}^w\vec{g}({}^w\vec{r} + {}^w\vec{s}) = -\frac{G(M+m)}{|{}^w\vec{r} + {}^w\vec{s}|^3}({}^w\vec{r} + {}^w\vec{s}) \approx {}^w\vec{g} \quad (3.7)$$

La matrice di rotazione relativa in funzione del tempo ${}^c\underline{R}_n(t)$ collega allora direttamente i due vettori di gravità locali ${}^c\vec{g}_c(t)$ e ${}^n\vec{g}_n(t)$:

$${}^c\underline{R}_n(t) {}^n\vec{g}_n(t) = {}^c\vec{g}_c(t) \quad (3.8)$$

Dato che per stimare l'orientamento relativo di corpi rigidi non è sufficiente una singola misurazione dei vettori di gravità, viene qui utilizzato un metodo per combinare le misurazioni dei vettori di gravità ${}^c\vec{g}_c(t)$ e ${}^n\vec{g}_n(t)$ in un numero totale P di diverse pose p diverse, per ottenere le informazioni complementari mancanti. Vengono quindi attivamente o passivamente mossi i pezzi di pelle in pose diverse nel tempo tra le le misurazioni.

Attivamente significa che il robot attiva spontaneamente un'articolazione rotante significativa, mentre passivamente significa che un operatore esterno cambia l'orientamento dell'intero robot o comanda il movimento di un'articolazione rotante significativa. Tale metodo presume che la rotazione relativa ${}^c\underline{R}_n(t)$ cambi a malapena valore durante il tempo T di ricostruzione:

$${}^c\underline{R}_n(t) \approx {}^c\underline{R}_n, t \in [0, T] \quad (3.9)$$

Il presupposto del corpo (quasi) rigido rende possibile generare continuamente nuovi insiemi di vettori di gravità, cambiando l'orientamento ${}^b\underline{R}_w(t)$ della parte del corpo b (rispetto all'ambiente esterno w) su cui è montato il pezzo di pelle, al tempo t :

$${}^c\underline{R}_n {}^n\underline{R}_w(t) {}^w\vec{g} = {}^c\underline{R}_w(t) {}^w\vec{g} \quad (3.10a)$$

$${}^n\underline{R}_w(t) \equiv {}^c\underline{R}_w(t) \equiv {}^b\underline{R}_w(t) \quad (3.10b)$$

Il bisogno di informazioni complementari richiede che il seguente sistema d'equazioni, per determinare i 9 elementi sconosciuti della matrice di rotazione 3×3 ${}^c\underline{R}_n$, sia definito come:

$${}^c\underline{R}_n {}^n\vec{g}_{n,p} = {}^c\vec{g}_{c,p} \quad (3 \times P) \quad (3.11a)$$

$$\det({}^c\underline{R}_n) = 1 \quad (1) \quad (3.11b)$$

$${}^c\underline{R}_n^T = {}^c\underline{R}_n^{-1} \quad (3) \quad (3.11c)$$

L'Equazione (3.11a) può fornire fino a 9 equazioni indipendenti basate su $P = 3$ vettori di gravità ortogonali:

$${}^u\vec{g}_{u,1}^T {}^u\vec{g}_{u,2} = {}^u\vec{g}_{u,1}^T {}^u\vec{g}_{u,3} = {}^u\vec{g}_{u,2}^T {}^u\vec{g}_{u,3} \equiv 0, u \in \{n, c\} \quad (3.12)$$

Date le proprietà aggiuntive della matrice di rotazione. definite nelle Equazioni (3.11b) e (3.11c), è sufficiente fornire al sistema un insieme di $P = 2$ misurazioni di gravità indipendenti, per mantenere un sistema sovradeterminato. Certe rotazioni delle parti del corpo, per raggiungere nuove pose, sono escluse per ottenere equazioni indipendenti all'interno dell'Equazione (3.11a). Rotazioni attorno al vettore di gravità o rotazioni multiple di π attorno a qualsiasi asse portano ad equazioni linearmente dipendenti.

Viene usata una soluzione generale ristretta del problema di Procuste² per trovare una matrice di rotazione cR_n che mappi strettamente un insieme variabile ${}^nN^{P \times 3}$ di P vettori di gravità ${}^n\vec{g}_{n,p}$ ad un insieme variabile ${}^cC^{P \times 3}$ di P vettori di gravità ${}^c\vec{g}_{c,p}$. La risoluzione effettiva della mappatura è quindi eseguita con una decomposizione ai valori singolari (SVD) dei due insiemi di campioni nN e cC :

$${}^{nc}U {}^{nc}\Sigma {}^{nc}V^T = svd({}^nN {}^cC) \quad (3.13)$$

La matrice di rotazione cR_n viene realizzata a partire dai vettori singolari sinistri di ${}^{nc}U$, quelli destri di ${}^{nc}V$ e ${}^{nc}\Sigma'$:

$${}^cR_n = {}^{nc}U {}^{nc}\Sigma' {}^{nc}V^T \quad (3.14)$$

La matrice ${}^{nc}\Sigma'$ (notare la presenza dell'apice) è una matrice identità $I^{3 \times 3}$ con il valore singolare più basso nella posizione (3, 3) rimpiazzato dal determinante $det({}^{nc}U {}^{nc}V^T)$, per imporre che cR_n sia una matrice ortogonale speciale:

$${}^{nc}\Sigma' = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & det({}^{nc}U {}^{nc}V^T) \end{pmatrix} \quad (3.15)$$

I valori singolari originali ${}^{nc}\sigma_1 \geq {}^{nc}\sigma_2 \geq {}^{nc}\sigma_3$ presenti in ${}^{nc}\Sigma$ (notare l'assenza dell'apice) vengono usati solamente per stimare la qualità della stima. Nei calcoli successivi viene presunto che tutti i vettori di gravità siano normalizzati:

$$|\vec{g}| \equiv 1[g] \quad (3.16)$$

Le deviazioni di \vec{g} dal valore costante di $\frac{GM}{r^2}$ indicano effetti aggiuntivi percepiti dall'accelerometro (vedi l'Equazione (3.18)). Con la normalizzazione, l'approccio diventa indipendente dalla costante locale. La stima di cR_n in sé non viene influenzata dalla normalizzazione, dato che la rotazione conserva la lunghezza di un vettore.

²P.H.Schonemann, "A generalized solution of the orthogonal Procrustes problem", Psychometrika 31, pp. 1-10, 1966

La qualità della stima viene quindi differenziata in sole quattro categorie con i corrispondenti pesi ${}_{nc}w$ degli archi del grafo (peso maggiore per una stima peggiore):

$$\text{Stima non definita} \quad {}_{nc}\sigma_1 < 1, {}_{nc}\sigma_2 < 1 \quad {}_{nc}w = 3 \quad (3.17a)$$

$$\text{Stima parzialmente definita} \quad {}_{nc}\sigma_1 \geq 1, {}_{nc}\sigma_2 < 1 \quad {}_{nc}w = 2 \quad (3.17b)$$

$$\text{Stima completamente definita} \quad {}_{nc}\sigma_1 \geq 1, {}_{nc}\sigma_2 \geq 1, {}_{nc}\sigma_3 < 1 \quad {}_{nc}w = 1 \quad (3.17c)$$

$$\text{Stima eccessivamente definita} \quad {}_{nc}\sigma_1 \geq 1, {}_{nc}\sigma_2 \geq 1, {}_{nc}\sigma_3 \geq 1 \quad {}_{nc}w = 1 \quad (3.17d)$$

Nel caso di una stima non o solo parzialmente definita, non è possibile stimare completamente la componente rotazionale attorno al punto di collegamento nell'elastomero tra le cellule. L'allineamento delle porte connesse può comunque essere rinforzato, aggiungendo un insieme di assi dello spazio vuoto tra le unità (vedi Fig. 3.3) scalati (10% della grandezza di un'unità) e con il segno corretto (entranti od uscenti) ai due insiemi di dati ${}_{n}N$ e ${}_{c}C$. L'influenza di questi assi di supporto svanisce quando le misurazioni di gravità (P vettori per unità) sono ben definite, ma aiuta a stabilizzare l'output del sistema in casi non o solo parzialmente definiti.

Segue una descrizione del processo di campionamento dei vettori di gravità. I vettori di gravità ${}^u\vec{g}_{u,p}$ di ogni unità u in un pezzo di pelle vengono misurati in diverse pose p con l'accelerometro allineato all'origine dell'unità. L'accelerometro non misura solo una versione ruotata del vettore di gravità globale ${}^W\vec{g}$, ma anche la derivata seconda della posizione dell'origine dell'unità, trasformata dalle coordinate globali ${}^w\vec{o}_u(t)$ in coordinate dell'unità ${}^u\vec{o}_u(t)$ dalla trasformazione di corpo rigido ${}^uT_{w,p}(t)$ della posa p :

$${}^u\vec{a}_{u,p}(t) = \frac{d^2}{dt^2}({}^uR_{w,p}(t){}^w\vec{o}_{u,p}(t) + {}^w\vec{t}_{u,p}(t)) + {}^uR_{w,p}(t){}^w\vec{g} \quad (3.18)$$

Ciò mostra che, per poter essere in grado di estrarre il vettore di gravità dai dati dell'accelerometro, il pezzo di pelle deve mantenere una posa statica nelle coordinate globali. Viene poi fatta la media di $K = 100$ campioni sequenziali rilevati ad $1kHz$ in ogni posa p (campionare una posa p richiede quindi $100ms$) per diminuire l'influenza del rumore di segnale e di vibrazioni :

$${}^u\vec{g}_{u,p} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^S {}^u\vec{a}_{u,p}[k] \quad (3.19)$$

3.1.5 Scalabilità

L'integrazione di nuove versioni delle unità cellulari con dimensioni scalate richiede un aggiornamento delle informazioni specifiche riguardanti le unità. Unità più piccole incrementerebbero ovviamente il numero di trasformazioni consecutive; nonostante ciò comporti la possibilità di aumentare potenziali errori di propagazione, l'aumento del numero di percorsi alternativi, l'influenza diminuita di una singola trasformazione (locale), e la superficie di campionamento più estesa dovrebbero comunque portare ad una diminuzione dell'errore complessivo.

Un numero maggiore di cellule unitarie e delle loro connessioni incrementerebbe anche la robustezza data la molteplicità delle ridondanze di rete. Le eventuali connessioni od unità mal funzionanti sono ignorate durante la calibrazione di rete, e solo le componenti connesse vengono etichettate come pezzi di pelle.

Per risparmiare tempo d'elaborazione ai livelli più alti, la maggior parte delle elaborazioni relative possono essere delegate alle cellule unitarie. Trovare i vicini diretti attraverso l'esplorazione di rete è un metodo estremamente rapido, che richiede circa $130ms$ per accendere ed esplorare $U = 31$ unità (dove la maggior parte del tempo sono attese statiche).

Per quanto riguarda la potenza di calcolo, l'approccio illustrato è efficiente, dato che la stima della rotazione viene calcolata numericamente con una SVD mentre gli algoritmi del grafo hanno complessità nota. Tutti pezzi di pelle mostrati nella Sottosezione 3.1.7 possono essere ricostruiti con una frequenza $f \approx 10Hz$ nella modalità di prova con singola posa ad aggiornamento automatico (tempo di campionamento $100ms$). Si ha quindi un tempo di campionamento per $P = 2$ pose piuttosto rapido, ovvero $< 250ms$.

3.1.6 Limitazioni

L'approccio appena discusso si limita esclusivamente alla ricostruzione in 3D della forma di tutti i pezzi di pelle presi singolarmente, ma non tratta la ricostruzione in 3D distribuita nello spazio dei pezzi di pelle considerati nel loro complesso, data l'assenza di informazioni sulle trasformazioni reciproche tra le unità d'origine dei vari pezzi di pelle. Tale problematica viene estensivamente discussa oltre che risolta nella Sezione 3.2.

3.1.7 Risultati sperimentali

Ricostruzione della forma di un oggetto vettore

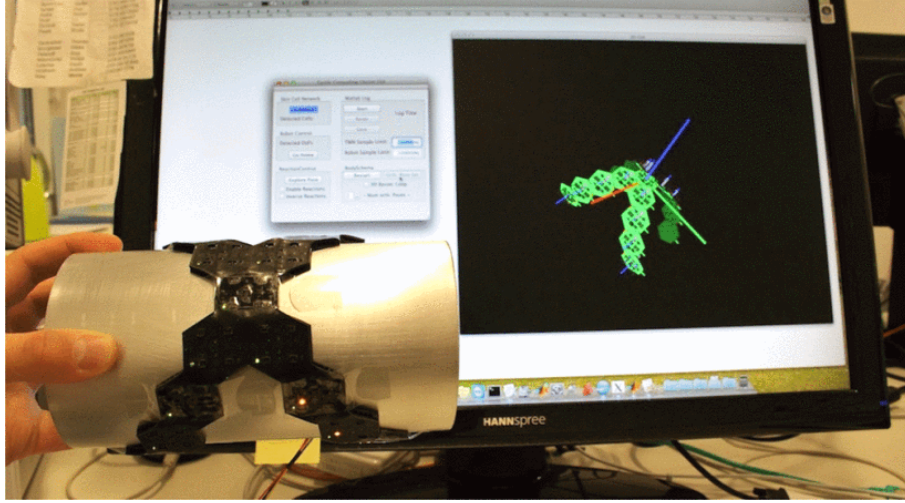


Figura 3.5: Ricostruzione 3D di un cilindro vettore tramite il pezzo di pelle X17. | Fig. da [4]

In questo esperimento viene fornito il risultato qualitativo sulla qualità della ricostruzione di un oggetto vettore. Viene posizionato un pezzo di pelle a forma di X di $U = 17$ unità cellulari sulla superficie di un oggetto geometricamente noto, ovvero un cilindro d'alluminio con un raggio misurato di $r_{real} = 50.1mm$ (vedi Fig. 3.5).

Viene campionato un insieme minimo di vettori di gravità in $P = 2$ pose ortogonali, la prima col cilindro in piedi su una scrivania e la seconda col cilindro sostenuto da una mano come raffigurato in Fig. 3.5 (per tenere conto delle vibrazioni). Viene quindi confrontata la nuvola di punti generata ${}^{ost}\vec{t}_u$, costituita dalle $U = 17$ origini appartenenti alle unità u , con la realtà di base, ovvero la superficie parametrizzata del cilindro vettore. Per farlo viene utilizzata la funzione *fgcylinder* della libreria MATLAB LSGE³.

La funzione stima un raggio di $r_{est} = 49.80mm$ (basandosi su un algoritmo dei minimi quadrati), offrendo un array $d_{est}[U]$ delle minime distanze radiali tra le origini appartenenti alle U unità ed il modello della superficie parametrizzata (vedi Fig. 3.6). Tale array viene utilizzato, insieme alla differenza tra il raggio del cilindro reale r_{real} e quello stimato r_{est} , per costruire una metrica quantitativa dell'errore di ricostruzione ε_{recon} :

$$\Delta = r_{est} - r_{real} \quad (3.20)$$

$$\varepsilon_{recon} = \sqrt{\frac{1}{U} \sum_{u=1}^U (d_{est}[u] + \Delta)^2} \quad (3.21)$$

³”The least squares geometric elements library”, EUROMET Repository of Software, versione 0.7.6

Per l'esperimento mostrato in Fig. 3.5 si è quindi ottenuta una differenza di $\Delta = -0.30mm$ ed un errore di $\varepsilon_{recon} = 1.62mm$. Non è stato considerato né lo spessore di $f \approx 3.4mm$ della pelle, né sono stati calibrati gli accelerometri triassiali. È invece stato modellato statisticamente l'elastomero in mezzo alle cellule come un'estensione dei vettori delle porte corrispondenti, con un valore dell'estensione pari a metà della distanza tra le cellule ($\frac{1.77}{2}mm$).

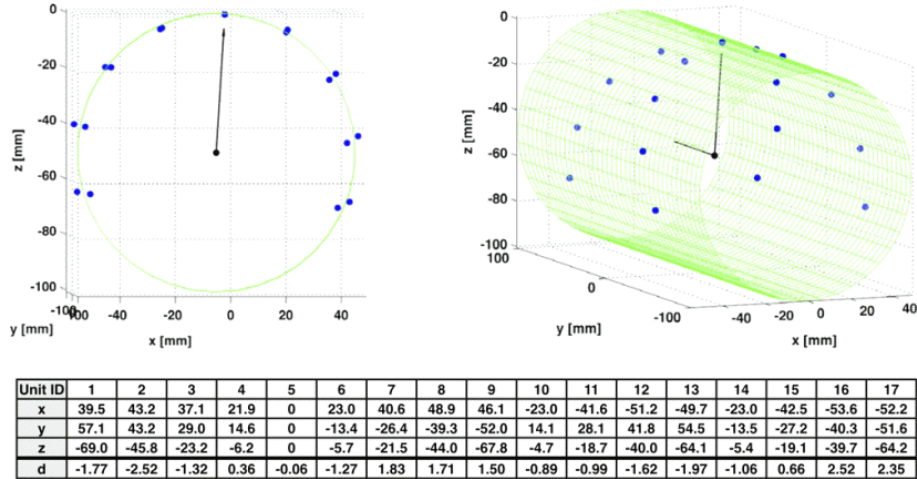


Figura 3.6: Confronto della nuvola di punti del cilindro con la realtà di base. | Fig. da [4]

La scelta delle origini di ogni unità come punti di campionamento risulta ottimale per la ricostruzione di superfici concave come il cilindro, mentre i punti sul bordo della forma esagonale sarebbero ideali per la ricostruzione di superfici convesse. Con una diminuzione della dimensione dell'unità cellulare, relativamente alla curvatura di una parte del robot sottostante al pezzo di pelle, tale differenza risulta irrilevante.

Caso specifico di un anello di cellule chiuso

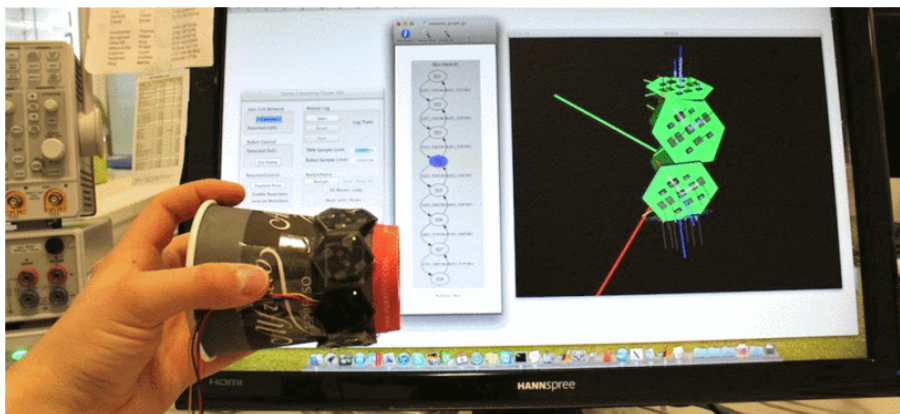


Figura 3.7: Ricostruzione di un pezzo di pelle con 8 unità a forma di anello chiuso. | Fig. da [4]

In questo esperimento, vengono forniti i risultati qualitativi sulla ricostruzione in 3D del caso di un anello di cellule chiuso. Per farlo, vengono unite $U = 8$ unità in un pezzo di pelle nella configurazione più lunga possibile (una linea retta). Le due terminazioni non connesse di questo pezzo di pelle vengono poi attaccate insieme con del nastro adesivo, per formare un anello (vedi Fig. 3.7). Per stabilizzare l'anello tra le pose, il pezzo di pelle è stato fissato su un bicchiere di carta. Vengono poi campionate $P = 2$ pose ortogonali, una col bicchiere in piedi sul tavolo ed una col bicchiere tenuto in mano, per tenere conto delle vibrazioni.

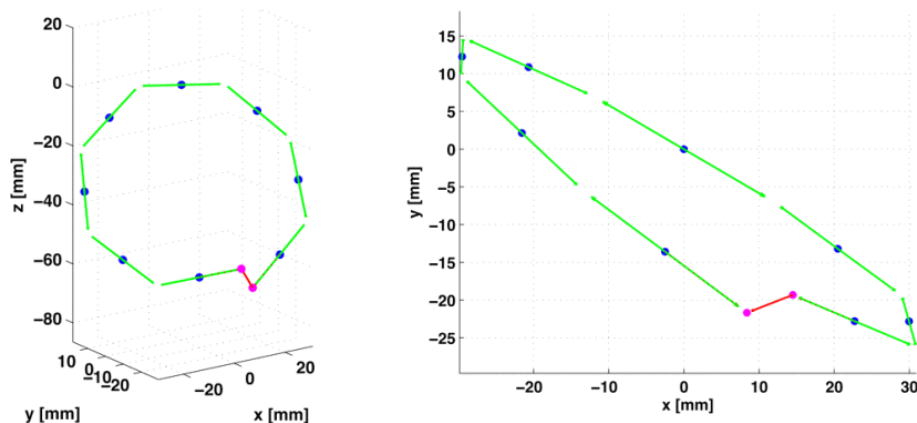


Figura 3.8: Differenza tra i punti di collegamento nell'esperimento dell'anello chiuso. | Fig. da [4]

La Fig. 3.8 illustra la differenza tra i punti di collegamento ${}^{o_s}\vec{p}_{2,1}$ e ${}^{o_s}\vec{p}_{3,8}$, appartenenti alle porte 2 e 3 (ravvicinate ma non connesse) delle rispettive unità di ID 1 ed ID 8. Nell'esperimento riportato il vettore di differenza $\vec{\delta} = [-6.10; -2.36; 8.16]mm$ ha una lunghezza di $|\vec{\delta}| = 10.46mm$, che confrontato alla lunghezza dell'anello $L = 222.28mm$ (somma dei 16 vettori delle porte accumulati) dà un'errore del 4.71%.

La curvatura della pelle e di conseguenza anche l'errore del modello semplificato per lo spazio vuoto tra le cellule (ogni spazio vuoto qui approssima una rotazione di $360/8 = 45^\circ$) hanno valori più alti rispetto all'esperimento **Ricostruzione della forma di un oggetto vettore**.

3.2 Organizzazione spaziale autonoma delle ricostruzioni in 3D

3.2.1 Motivazioni ed approccio

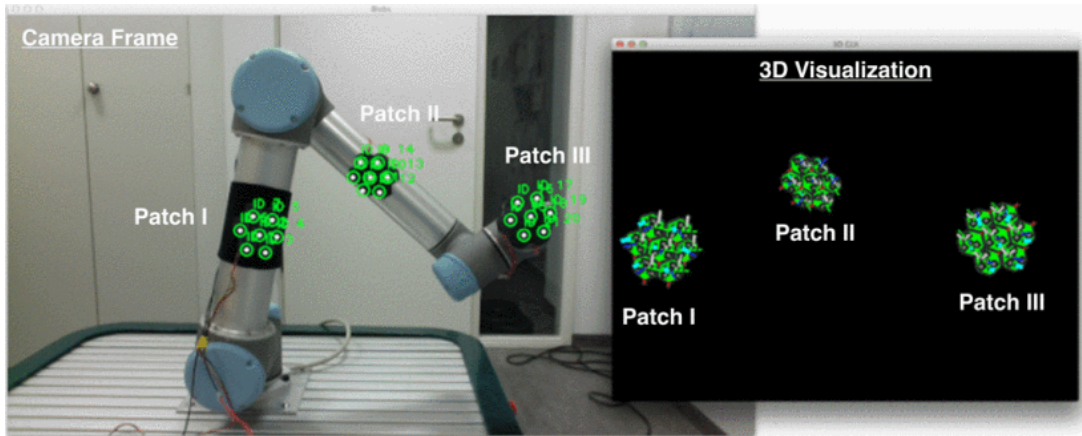


Figura 3.9: La figura rappresenta 3 pezzi di pelle, ognuno formato da 7 cellule della pelle multimodale. Questi pezzi di pelle sono stati piazzati arbitrariamente su di un braccio robotico UR-5 (ogni pezzo su un segmento diverso). La superficie di ogni pezzo di pelle viene individualmente ricostruita in 3D, trasformata in un insieme di marcatori ottici, ed unita in modo visivo ad una singola rappresentazione omogenea. L'informazione locale e visiva viene utilizzata per calibrare la posa di ogni pezzo di pelle rispetto ad un sistema di riferimento globale. | Fig. da [5]

L'approccio qui descritto, riportato da [5], offre una soluzione al problema dell'organizzazione autonoma nello spazio 3D delle ricostruzioni di pelle artificiale. Ovvero, permette di individuare e rappresentare la posizione dei vari pezzi di pelle dislocati nello spazio tridimensionale, relativamente ad un sistema di coordinate globali (vedi Fig. 3.9). I singoli pezzi di pelle, già ricostruiti localmente uno ad uno in 3D grazie al metodo illustrato nella Sezione 3.1, verrebbero piazzati tutti nella stessa posizione d'origine e con lo stesso orientamento predefinito senza tale organizzazione spaziale (limitazione già menzionata nella Sottosezione 3.1.6).

La soluzione che segue soddisfa tale bisogno di un'organizzazione globale delle ricostruzioni locali della pelle tramite l'uso di un sensore ottico esterno (una telecamera) che possa sfruttare i LED integrati in ognuno dei moduli della pelle stessa, usandoli come dei marcatori ottici attivi, utili a determinare la posizione e l'orientamento relativo dei pezzi di pelle nel sistema totale. Tale approccio ottico risulta più veloce, preciso, e di facile uso rispetto agli approcci di stimolazione tattile di innumerevoli sensori sparsi su più superfici.

Inoltre, i moduli della pelle operano in modo migliore rispetto ai marcatori ottici passivi (come quelli per il motion tracking), potendo essere disposti in diverse forme per adattarsi a diverse superfici, ma soprattutto continuando a funzionare pur venendo parzialmente occlusi.

Viene qui inoltre descritto come l'algoritmo a seguire possa integrarsi ai modelli cinematici di corpi rigidi per ottenere informazioni sulle cellule multimodali montate su catene cinematiche.

3.2.2 Note sui moduli

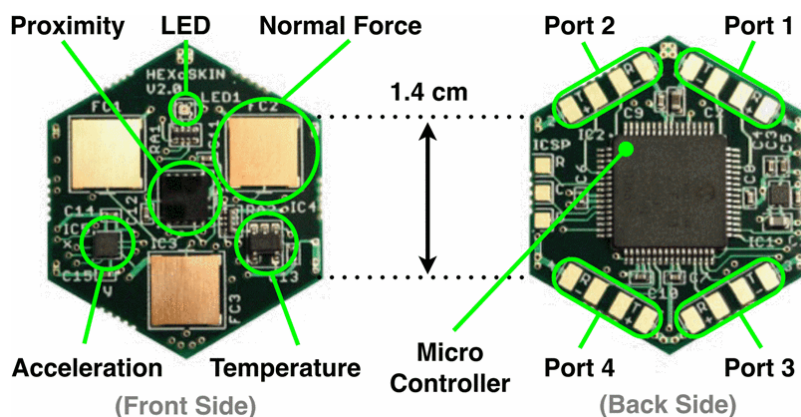


Figura 3.10: Il modulo multimodale aggiornato già visto nella Fig. 1.10, ma con il LED RGB integrato messo in evidenza. | Fig. da [5]

I moduli multimodali utilizzati nell'approccio di ricostruzione globale di questa sezione sono la versione aggiornata (aggiornamenti esplorati nella Sezione 1.2) dei moduli utilizzati nella ricostruzione locale dei singoli pezzi della pelle (approfondita nella Sezione 3.1).

La soluzione qui presentata utilizza, per ottenere la ricostruzione complessiva, il LED RGB (diode emettitore di luce rossa verde blu, vedi Fig. 3.10) e l'accelerometro triassiale BOSCH BMA250 integrati in ogni modulo, dei quali sono noti la posizione e l'orientamento nelle coordinate del modulo.

I moduli interconnessi formano dei pezzi di pelle che possono a loro volta connettersi in una rete intelligente in grado di esplorarsi ed organizzarsi all'avvio, come già descritto nella Sottosezione 3.1.2.

3.2.3 Riutilizzo della ricostruzione 3D

La ricostruzione tridimensionale complessiva di tutti i pezzi di pelle, in un sistema di riferimento globale che tenga conto della posizione e dell'orientamento relativi di ogni pezzo, necessita per definizione delle ricostruzioni locali dei singoli pezzi per poter funzionare.

Tale ricostruzione locale viene svolta riutilizzando l'algoritmo di ricostruzione 3D illustrato nella Sezione 3.1 che, facendo uso del solo accelerometro presente in entrambe le versioni dei moduli tattili (originale ed aggiornata), funziona come previsto anche con la versione aggiornata dei moduli (nonostante la creazione dell'algoritmo per gli originali).

L'algoritmo restituisce per ogni pezzo di pelle s la posizione e l'orientamento di ogni modulo u appartenente ad esso, relativamente al sistema di riferimento del modulo d'origine o_s del pezzo. Tali informazioni spaziali prendono la forma della trasformazione omogenea ${}^{o_s}T_u$.

3.2.4 Stima visiva della posa dei pezzi di pelle

Algoritmo 3.2 Stima visiva della posa dei pezzi di pelle

- 1: Calcolo delle posizioni relative dei LED in 3D per tutti i pezzi di pelle
 - 2: **for** Localizzazione di tutti (U) i moduli **do**
 - 3: Spegnimento di tutti i LED
 - 4: Acquisizione dell'immagine a colori dello sfondo (BC_u)
 - 5: Accensione di un singolo LED (u)
 - 6: Acquisizione dell'immagine a colori del primo piano (FC_u)
 - 7: Conversione delle immagini a colori in scala di grigi (BG_u e FG_u)
 - 8: Sottrazione dell'immagine di sfondo dal primo piano (D_u)
 - 9: Sfocatura dell'immagine di differenza (DB_u)
 - 10: Trasformazione in immagine binaria tramite soglia (B_u)
 - 11: Esecuzione di un rilevatore di macchie con vincoli
 - 12: Controllo e memorizzazione delle coordinate della macchia ($v\vec{c}_u$)
 - 13: **end for**
 - 14: Esecuzione del **solvePnP** per tutti i pezzi di pelle con $N \geq 6$ LED visibili
-

Dopo aver ottenuto le singole ricostruzioni tridimensionali dei pezzi di pelle come descritto nella Sottosezione 3.2.3 precedente a questa, bisogna fonderle nel sistema di riferimento globale.

Per fare ciò risulta quindi necessario stimare la posa di ogni pezzo di pelle rispetto al sistema, obiettivo che viene qui raggiunto tramite una stima visiva (sintetizzata nell'Alg. 3.2) che coinvolge i LED di ogni modulo che costituisce i pezzi di pelle ed una telecamera esterna.

Più precisamente, per trasformare un pezzo di pelle in un marcatore visivo assoluto con 6 DoF (6 gradi di libertà, ovvero il movimento nei 3 assi e la rotazione attorno ad essi) e per stimare la sua posa relativa rispetto al sistema di riferimento della telecamera con un algoritmo PnP⁴, è necessario fornire un insieme di $N \geq 6$ corrispondenze puntuali indipendenti tra lo spazio visivo (i pixel dell'immagine) e lo spazio 3D.

Generazione dei marcatori

Per la generazione di caratteristiche visive (composizioni visive d'interesse) note e localizzabili nello spazio 3D viene fatto uso dei LED RGB integrati dentro ciascuno dei moduli tattili. Grazie all'algoritmo di ricostruzione 3D utilizzato nella Sottosezione 3.2.3, la posizione ${}^{o_s}\vec{t}_u$ e l'orientamento ${}^{o_s}\underline{R}_u$ di ogni modulo u sono noti relativamente al modulo d'origine o_s del pezzo di pelle s a cui appartengono entrambi i moduli. L'appartenenza dei moduli ai loro pezzi di pelle è nota grazie al passo di analisi delle componenti connesse nell'algoritmo di ricostruzione 3D.

Dato che tutti i LED hanno una posizione statica $(7.9, 0, 0)^T$ nelle coordinate del loro modulo, si può calcolare direttamente la posizione ${}^{o_s}\vec{f}_u$ delle loro caratteristiche visive:

$${}^{o_s}\vec{f}_u = {}^{o_s}\vec{t}_u + {}^{o_s}\underline{R}_u \cdot (7.9, 0, 0)^T \quad (3.22)$$

⁴Perspective-n-Point o Prospettiva-e-Punto, ovvero un tipo di problema da risolvere per connettere dei punti nello spazio 3D alle loro corrispondenti proiezioni nei pixel di un'immagine acquisita da una telecamera.

Siccome ogni LED può essere individualmente controllato dal sistema principale, le caratteristiche visive salienti possono essere generate con semplicità. Date le proprietà che assimilano i piccoli LED a fonti di luce puntuale (dimensioni di $1 \times 1 \text{ mm}$, angolo visivo di 120°), tali caratteristiche visive saranno dall'aspetto circolare nello spazio visivo.

Localizzazione visiva

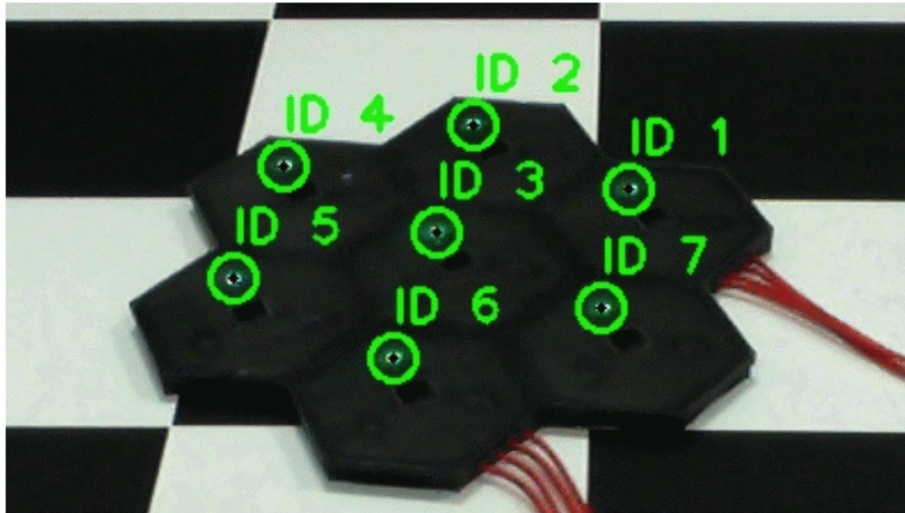


Figura 3.11: Dato che è possibile comandare individualmente il LED di ogni modulo, si è in grado di localizzare la posizione individuale dei singoli LED (pallini neri al centro dei cerchi verdi degli ID) nell'inquadratura della telecamera. Il risultato illustrato è un'inquadratura (zoom 3.2x) del pezzo di pelle di prova ottenuta da una webcam 720HD da una distanza di 30 cm. | Fig. da [5]

Per identificare e localizzare (vedi Fig. 3.11) le caratteristiche visive (LED) nel sistema di riferimento della telecamera viene controllato attivamente lo stato ON/OFF dei LED, sottraendo (a coppie) le immagini di sfondo con tutti i LED spenti da quelle di primo piano con un solo LED acceso alla volta. Viene utilizzata openCV⁵ per tutte le routine d'elaborazione delle immagini.

Aggiungere caratteristiche colorate (con fino a 7 combinazioni RGB di base disponibili) permetterebbe l'identificazione di multipli LED in un colpo solo, riducendo così il tempo di localizzazione di un fattore pari a 7 (potendo gestire una stima visiva completa della posa di un singolo pezzo di pelle con $N \geq 6$ moduli tramite una singola immagine di primo piano).

Ad ogni modo, il valore digitale della tinta delle macchie generate dai LED nell'immagine dipende fortemente dall'angolo e dalla distanza d'osservazione. È quindi consigliabile svolgere la prima mappatura in modo robusto con un solo LED u alla volta.

⁵Libreria openCV, versione 2.4.8

Le immagini a colori del primo piano FC_u e dello sfondo BC_u sono acquisite con stretta prossimità temporale per evitare cambiamenti notevoli nello sfondo. Tali immagini sono poi convertite in scala di grigi ottenendo FG_u e BG_u , sottratte tra di loro per calcolare l'immagine delle differenze locali D_u :

$$D_u = FG_u - BG_u \quad (3.23)$$

L'immagine della differenza viene quindi sfocata (*blur*) e trasformata in una a valori binari tramite l'uso di una soglia (*threshold*):

$$DB_u = GaussianBlur(D_u, size, sigma) \quad (3.24a)$$

$$B_u = Thresh(DB_u, max(max(DB_u)/2, minVal)) \quad (3.24b)$$

Dato il punto luminoso generato dai LED, si è riscontrato che una sfocatura nel raggio di pixel $size = 9 \times 9$, $sigma = 2 \times 2$ con una soglia per la trasformazione binaria del 50% risulta efficace. Impostare un valore minimo euristico (ad esempio $minVal = 40$) esclude false rilevazioni quando nessun LED è visibile.

Questo processo d'elaborazione può essere ripetuto e multiple (M) immagini binarie possono essere moltiplicate elemento per elemento (AND logico pixel per pixel), con lo scopo di formare un'immagine di sovrapposizione BO_u che escluda cambiamenti nello sfondo non correlati al controllo del LED:

$$BO_u = B_u^{(1)} \circ \dots \circ B_u^{(M)} \quad (3.25)$$

Questa immagine finale BO_u viene quindi analizzata con un rilevatore di macchie (*blob*) con $maxArea = 500$, $minArea = 1$ impostati come vincoli. Quando il LED corrente u risulta visibile il rilevatore di macchie dovrebbe restituire solo una macchia (0) con le coordinate puntuali (pt) della macchia ${}^v\vec{c}_u = (x, y, 1)^T$ approssimativamente al centro del LED nel sistema di riferimento visivo v (ovvero il sistema di riferimento della telecamera):

$${}^v\vec{c}_u = BlobDetector(BO_u, maxArea, minArea)(0).pt \quad (3.26)$$

Se nessuna o più di una macchia vengono restituite, la caratteristica visiva viene considerata non disponibile ed esclusa dalla stima della posa.

Stima delle pose

Le coordinate dei pixel ${}^v\vec{c}_u$ del LED e le relative coordinate nello spazio 3D ${}^{o_s}\vec{f}_u$ dello stesso sono collegate dalla trasformazione omogenea ${}^v\underline{T}_{o_s}$ (tra i sistemi di coordinate della telecamera v e del pezzo di pelle s) e dalla matrice di proiezione della telecamera \underline{A} :

$${}^v\vec{c}_u = \underline{A} \cdot {}^v\underline{T}_{o_s} \cdot {}^{o_s}\vec{f}_u \quad (3.27a)$$

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.27b)$$

$${}^v\underline{T}_{o_s} = \begin{bmatrix} {}^v\underline{R}_{o_s} & {}^v\vec{t}_{o_s} \\ \underline{0} & 1 \end{bmatrix} \quad (3.27c)$$

Data una telecamera calibrata (avendo quindi \underline{A} nota) ed $N \geq 6$ punti di corrispondenza indipendenti, si può stimare in modo univoco⁶ la trasformazione omogenea ${}^v\underline{T}_{o_s}$. Qui viene utilizzato l'algoritmo solvePnP Ransac (della libreria openCV, di parametri iterationsCount=100, reprojectionError=8.0) con il metodo CV_EPNP⁷ per stimare questa trasformazione se più di 6 punti di corrispondenza sono disponibili per ogni pezzo di pelle.

⁶D. Leng e W. Sun, "Finding all the solutions of pnp problem", International Workshop on Imaging Systems and Techniques, pp. 1-5, 2009

⁷F. Moreno-Noguer, V. Lepetit e P. Fua, "EPnP: Efficient Perspective-n-Point Camera Pose Estimation", openCV 2.4.8

3.2.5 Rappresentazione omogenea di un corpo rigido

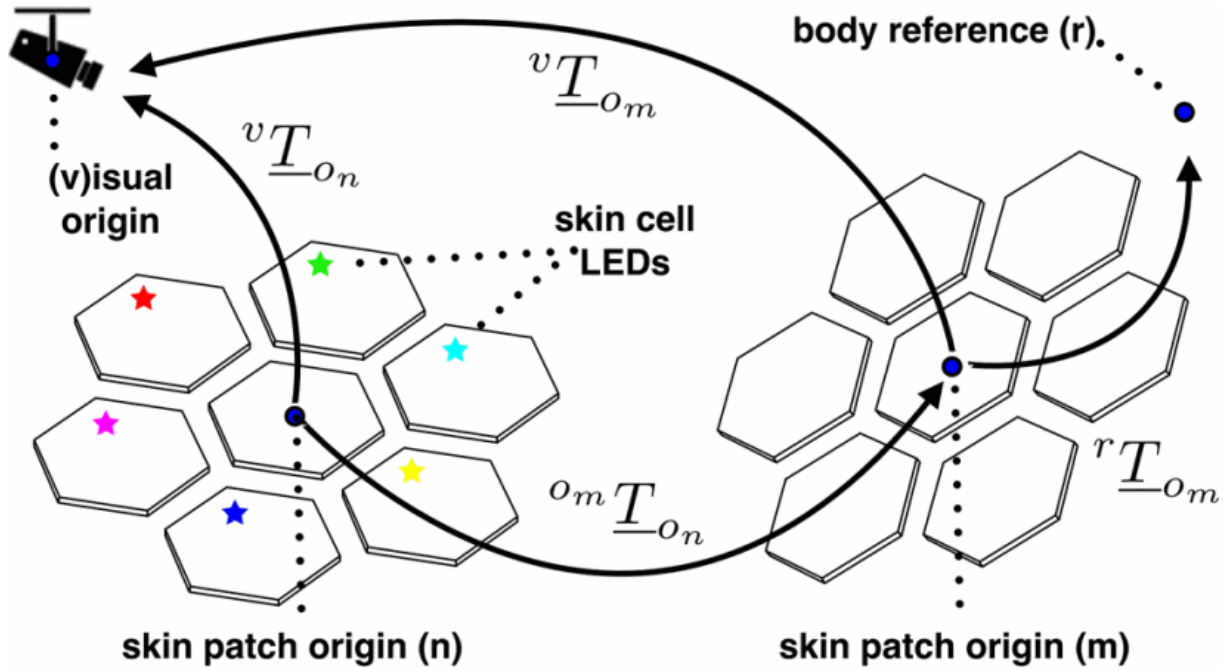


Figura 3.12: Stima della trasformazione (${}^{o_m}T_{o_n}$) tra due pezzi di pelle, tramite la stima delle pose (${}^vT_{o_n}$ e ${}^vT_{o_m}$) con la telecamera (v). Se la posizione di un pezzo di pelle visibile (m) è già memorizzata, un nuovo pezzo di pelle (n) può essere attaccato ad una rappresentazione omogenea (r). | Fig. da [5]
 Termini in figura dall'alto a destra in senso antiorario: (r)iferimento del corpo, LED delle cellule, origine (v)isiva, origine del pezzo di pelle (n), origine del pezzo di pelle (m)

Una volta che sono state stimate le trasformazioni ${}^vT_{o_s}$, possono essere rappresentati in un sistema comune di coordinate visive v (della telecamera) tutti i pezzi di pelle simultaneamente visibili. Ciò permette già la combinazione delle ricostruzioni 3D locali di tali pezzi di pelle (che contengono le trasformazioni dei moduli rispetto alle origini del pezzo ${}^{o_s}T_{o_u}$, vedi Sezione 3.2.3) in una singola rappresentazione omogenea di un corpo rigido, che localizza gli stimoli tattili multimodali relativi ai moduli dei pezzi in uno spazio comune.

A causa delle possibili occlusioni e dell'inquadratura limitata, solo un piccolo insieme di pezzi di pelle alla volta risulta visibile allo stesso tempo. Per mappare i pezzi di pelle rimanenti, e di conseguenza un intero corpo rigido, è necessario riposizionare la telecamera.

Per non perdere tutte le stime già effettuate, bisogna impostare (vedi Fig. 3.12) un sistema comune di coordinate di riferimento del corpo rigido detto r , ad esempio imponendogli il valore d'identità I_4 con le prime coordinate v_1 utilizzate per la telecamera:

$${}^rT_{v_1} = I_4 \quad (3.28)$$

Nuovi pezzi di pelle n possono essere aggiunti a tale rappresentazione omogenea r del corpo quando risultano simultaneamente visibili con almeno un pezzo di pelle noto in memoria m :

$${}^r\underline{T}_{o_n} = {}^r\underline{T}_{o_m} \cdot {}^{o_m}\underline{T}_{o_n} \quad (3.29a)$$

$${}^{o_m}\underline{T}_{o_n} = ({}^v\underline{T}_{o_m})^{-1} \cdot {}^v\underline{T}_{o_n} \quad (3.29b)$$

Risulta allora possibile stimare e visualizzare la posizione e l'orientamento relativi di tutti i moduli (e quindi di tutti i diversi pezzi di pelle) applicati sullo stesso corpo rigido (ad esempio un braccio robotico od un robot umanoide) in una posa (quasi) statica. L'intero processo di ricostruzione e stima visiva è piuttosto rapido, impiegando in totale $\leq 1.5s$ per cellula.

3.2.6 Integrazione con un modello cinematico noto

Infine (come menzionato nella Sezione II-C di [1]), nel caso sia già noto il modello cinematico (vedi Capitolo 4) di segmenti ed articolazioni del corpo rigido su cui sono piazzati i vari pezzi di pelle, risulta possibile determinare la trasformazione omogenea (${}^j\underline{T}_u$) tra ogni singola cellula della pelle artificiale (u) ed il sistema di coordinate dell'articolazione interessata (j).

Per farlo bisogna acquisire la ricostruzione 3D globale nella posa statica (φ) del modello (anch'essa nota) tramite il metodo visivo descritto in questa sezione. È necessario conoscere anche la trasformazione omogenea (${}^r\underline{T}_B$) tra la base (B) del modello ed il sistema di riferimento del corpo rigido (r) appena utilizzato per la ricostruzione.

Si utilizzano quindi le trasformazioni note, una delle quali è la trasformazione omogenea (${}^B\underline{T}_j(\varphi)$) tra il sistema di riferimento dell'articolazione j e la base B del modello cinematico (nella la posa φ), per calcolare la trasformazione omogenea (${}^j\underline{T}_u$) tra la cellula u del pezzo di pelle s (con cellula origine o_s) e l'articolazione j :

$${}^j\underline{T}_u = ({}^B\underline{T}_j(\varphi))^{-1} \cdot ({}^r\underline{T}_B)^{-1} \cdot {}^r\underline{T}_{o_s} \cdot {}^{o_s}\underline{T}_u \quad (3.30)$$

Si conosce adesso la posizione e l'orientamento di ciascuna cellula della pelle artificiale relativamente ad ogni articolazione (ed anche alla base) del robot su cui la pelle stessa è applicata.

Tale conoscenza rimane valida per qualsiasi nuova posa del robot, dato che la stima visiva valida per una singola posa quasi-statica è ora stata combinata ai riferimenti delle articolazioni in tale posa, estraendo appunto informazioni sulle trasformazioni indipendenti dalla posa.

3.2.7 Risultati sperimentali

Vengono qui di seguito valutate le prestazioni dell'approccio illustrato tramite esperimenti di confronto con la realtà di base. Tutti le prove visive sono state svolte utilizzando la web-cam calibrata (matrice della telecamera nota, annullamento della distorsione) di un MacBook Pro (Mid2012), con una risoluzione di 1280x720 ed $M = 3$ immagini binarie per ogni rilevazione.

Le prestazioni del metodo di ricostruzione 3D per i singoli pezzi di pelle (qui utilizzato come parte del processo complessivo) sono invece valutate in modo esteso nella Sottosezione 3.1.7, restituendo un errore di ricostruzione relativo inferiore al 5%.

Precisione assoluta e relativa per un singolo pezzo di pelle

Segue l'analisi qualitativa e quantitativa della precisione di stima della posa di un piccolo pezzo di pelle. Si è scelta una forma compatta di 7 moduli (uno al centro circondato dagli altri) come forma predefinita di prova, dato il suo numero di moduli vicino al minimo consentito ($N \geq 6$), le sue dimensioni ristrette e la sua usuale comparsa come sottoinsieme di moduli in pezzi di pelle più estesi. I pezzi di pelle più estesi dovrebbero inoltre portare a risultati migliori, dato il loro spazio visivo maggiore ed i loro insiemi di punti altamente ridondanti (utili dell'eliminazione di valori anomali).

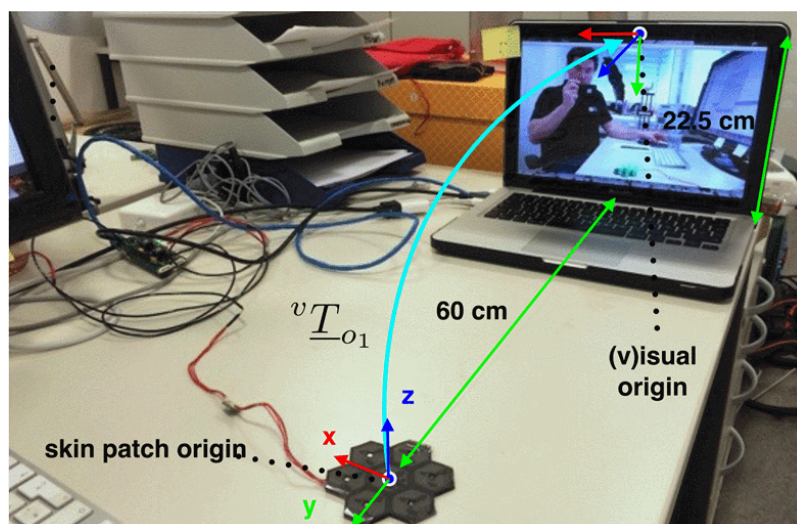


Figura 3.13: Setup di prova per il controllo di plausibilità della precisione assoluta. L'immagine mostra approssimativamente le coordinate locali della telecamera e del pezzo di pelle. | Fig. da [5]
Termini in figura da sinistra a destra: *Origine del pezzo di pelle*, *Origine (v)isiva*

Tramite l'analisi della **precisione assoluta** risulta possibile valutare solo qualitativamente la stima restituita, dato che la trasformazione telecamera-oggetto risulta difficile da misurare. Per questa prova si è appoggiato il pezzo di pelle su di un tavolo, approssimativamente a 600mm dal centro del lato inferiore del display (del portatile) con la telecamera integrata ad un'altezza approssimativa di 225mm, posizionando il display verticalmente ed allineando la coordinata y del pezzo di pelle con la proiezione dell'asse z visivo sul tavolo (vedi Fig. 3.13).

L'algoritmo di stima della posa (${}^vT_{o_1}$) ha restituito un vettore di traslazione del valore di ${}^v\vec{t}_{o_1} = (8.1, 193.4, 597.6)^T mm$ ed uno di rotazione di ${}^v\vec{r}_{o_1} = (1.634, 0.015, -0.020)^T rad$, vicini ai valori attesi della rotazione di 1.57 radianti attorno al vettore \vec{e}_x e della traslazione misurata di $(0, 225, 600)^T mm$. Tali valori sono coerenti con la sistemazione impostata e rinforzano la scelta di una calibrazione automatica dei sistemi di riferimento (dato che quella manuale risulterebbe infattibile e/o incline agli errori).

Con l'analisi della **precisione relativa** viene invece valutata quantitativamente la qualità di stima della posa. Vengono quindi eseguite diverse trasformazioni relative e note, in modo preciso, nello spazio 3D. Per i movimenti traslazionali è stata utilizzata una rotaia lineare ad alta precisione, mentre per quelli rotazionali sono state utilizzate le ultime due articolazioni di un braccio robotico UR-5. In ogni prova, la posa relativa del pezzo di pelle (rispetto alla telecamera) viene stimata indipendentemente prima e dopo ogni movimento. Per i movimenti traslazionali sono stati utilizzati spostamenti relativi di $20mm$, e di $0.175rad$ per quelli rotazionali (sempre approssimativamente lungo/attorno ai vettori delle coordinate visive indicati).

Sono state poi calcolate le norme dei movimenti relativi a partire dalla differenza tra le due pose stimate indipendentemente per il pezzo di pelle. Multiple prove sono state effettuate, con il pezzo di pelle piatto oppure piegato attorno alla superficie di un cilindro (raggio $40mm$) e a diverse distanze iniziali dalla telecamera ($\approx 0.6/1.0/1.4m$). Con tali prove sono state messe alla prova diverse parti del sistema: la telecamera monoculare, l'algoritmo di ricostruzione 3D, e l'algoritmo di risoluzione "solvePnP".

I risultati nella Tab. 3.1 indicano una precisione traslazionale sotto i $10mm$ ed una rotazionale sotto i $0.07rad$ (4°), per distanze tra l'oggetto e la telecamera fino ad $1.4m$. Tale risultato è soddisfacente per un sistema con telecamera monoculare come quello utilizzato, dato che tali sistemi sono solitamente proni ad errori nella valutazione di movimenti lungo l'asse ottico e a lunghe distanze dalla telecamera stessa.

Distanza dalla telecamera	0.6m		1.0m		1.4m	
Forma del pezzo di pelle	Piatto	Piegato	Piatto	Piegato	Piatto	Piegato
Traslazione (${}^v\vec{e}_z, 20mm$)	19.53	17.66	23.02	25.95	26.18	23.09
Traslazione (${}^v\vec{e}_y, 20mm$)	19.88	19.73	19.67	19.84	21.66	19.91
Rotazione (${}^v\vec{e}_z, 0.175rad$)	-	0.172	-	0.178	-	0.182
Rotazione (${}^v\vec{e}_y, 0.175rad$)	-	0.145	-	0.106	-	0.184

Tabella 3.1: Risultati della stima relativa

Comportamento con pezzi di pelle estesi ed occlusione parziale



Figura 3.14: Inquadratura della telecamera e visualizzazione 3D assoluta della suola di una scarpa, dotata di un pezzo di pelle costituito da 23 moduli tattili. Sei dei moduli nel mezzo sono occlusi da un biglietto da visita. | Fig. da [5]

L'algoritmo illustrato può gestire anche pezzi di pelle più grandi ed occlusioni parziali. In Fig. 3.14, viene mostrato un pezzo di pelle piuttosto esteso costituito da 23 moduli e parzialmente occluso, attaccato ad una scarpa. Per misurare il caso peggiore in termini d'occlusione, è stato bloccato il modulo centrale del pezzo di pelle predefinito per le prove, piazzando il pezzo su di un cilindro (raggio $40mm$) ad una distanza di $1.0m$ dalla telecamera, muovendolo poi di $20mm$ lungo l'asse visivo $v\vec{e}_z$.

Il risultato stimato di $25.68mm$ indica che persino configurazioni minimali ($N = 6$ moduli) funzionano a dovere.

Qualità della stima della posa per multipli pezzi di pelle

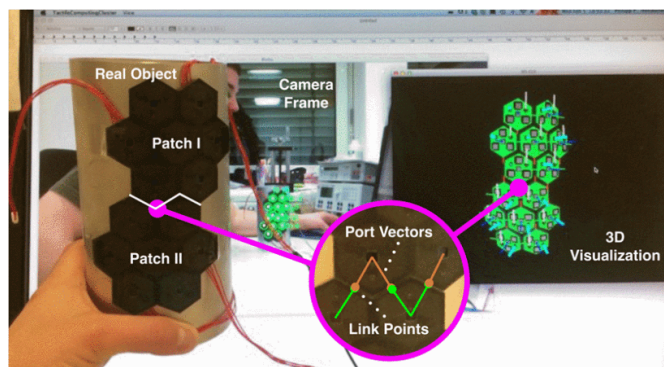


Figura 3.15: Due pezzi di pelle non connessi su di un cilindro, ricostruiti separatamente in 3D ed uniti in una singola rappresentazione dall'algoritmo visivo. | Fig. da [5]
Termini nel cerchio: *Vettori di Porta, Punti di Connessione*

Per valutare la qualità ottenuta dalla stima della posa relativa tra due pezzi di pelle distinti, questi sono stati posizionati fisicamente vicini senza essere connessi (vedi Fig. 3.15) su di un cilindro (raggio $50mm$), misurando quindi la differenza tra le coppie di vettori delle porte idealmente connesse tra i due pezzi (tali vettori delle porte sono noti all'algoritmo di ricostruzione 3D, come spiegato nella Sottosezione 3.1.2).

Nell'esperimento, posizionando il cilindro ad $1.0m$ di fronte alla telecamera, tutti e tre i possibili punti di connessione tra i moduli di confine hanno riportato discrepanze $\leq 3mm$.

Capitolo 4

Acquisizione automatica di informazioni e modelli cinematici/dinamici

L'applicazione della pelle multimodale su di un robot ha come obiettivo finale quello di permettere al robot di percepire un maggior numero di stimoli che lo circondano, per reagire di conseguenza tramite dei segnali di controllo.

In un modo simmetrico a quanto appena detto, si possono attuare i segmenti articolati dei robot su cui è montata la pelle tramite specifici segnali di controllo per generare delle misurazioni sensoriali che permettano di ottenere più informazioni sul robot stesso.

È infatti possibile, tramite gli accelerometri montati su ogni modulo multimodale, ricavare delle informazioni dette parametri di Denavit-Hartenberg¹ (DH) che sono in grado di descrivere univocamente i modelli cinematici/dinamici dei robot a cui si riferiscono. Questi parametri sono essenziali per il controllo di qualsiasi robot dotato di catene complesse di attuatori, come ad esempio un braccio robotico o un robot umanoide.

Sono qui di seguito descritti due metodi di stima e ricostruzione cinematica in grado di fornire tali parametri DH utilizzando la pelle multimodale, entrambi menzionati nella Sezione II-D dell'articolo riassuntivo [1].

Il primo metodo ricava i parametri DH tramite una calibrazione ad anello aperto, che inizia con un'esplorazione strutturale basata sugli accelerometri per terminare poi con la costruzione e, appunto, parametrizzazione iterativa di catene cinematiche per singoli arti robotici.

Il secondo metodo, basato in parte sull'esplorazione strutturale del primo, compie un'analisi tramite accelerometri dei vettori d'asse e radiali che definiscono il moto circolare delle cellule rispetto alle articolazioni rotatorie di bracci robotici. Da tali vettori è poi possibile estrarre dei parametri DH, o creare direttamente catene cinematiche con un metodo innovativo qui illustrato.

Viene inoltre mostrato nella Sottosezione 4.2.6 come le informazioni sulle cellule ricavate nel Capitolo 3 possano aiutare ad ottenere ancora più dettagli sui modelli cinematici e sulla locazione di ogni cellula rispetto al robot ed alle sue articolazioni.

¹Wikipedia, *Convenzione di Denavit-Hartenberg*,
URL: https://it.wikipedia.org/wiki/Convenzione_di_Denavit-Hartenberg

4.1 Calibrazione autonoma ad anello aperto

4.1.1 Approccio

L'approccio che segue, riportato da [6], utilizza l'accelerometro triassiale integrato nelle cellule multimodali già presentate nel Capitolo 1 per compiere un processo di esplorazione, modellazione e calibrazione cinematica di un robot munito di pelle artificiale. Ciò risulta possibile dato che un segmento centrale del robot rimane statico durante la procedura, permettendo di valutare i movimenti del robot tramite gli accelerometri distribuiti sulla sua superficie, per ottenere sia la struttura che i parametri cinematici.

Il metodo scelto risulta quindi ad anello aperto, non richiedendo ulteriori manipolatori o punti di fissaggio per il robot (i quali lo renderebbero un metodo ad anello chiuso). Inoltre, l'utilizzo di sensori interni elimina il rumore dei metodi ad anello aperto con sistemi di misurazione esterni.

Algoritmo 4.1 Esplorazione Strutturale (dell'intero robot)

- 1: Individuazione del numero di SU (U) e di DoF (D) disponibili
 - 2: Movimento di un DoF alla volta, con campionamento di tutti i vettori di gravità delle SU
 - 3: Creazione della matrice d'attività $\underline{A}^{U \times D}$, tramite l'uso di una soglia sui campioni
 - 4: Fusione delle SU con vettori riga di \underline{A} simili in segmenti
 - 5: Fusione dei DoF con vettori colonna di \underline{A} simili in articolazioni
 - 6: Estrazione delle sequenze di connessione dai vettori riga
 - 7: Individuazione del segmento di riferimento (RS)
 - 8: Determinazione dei segmenti d'estremità disponibili
 - 9: Assemblaggio di una sequenza seriale per un arto robotico
-

Il primo passo (vedi Alg. 4.1) del processo analizza la dipendenza strutturale del robot. Applicando modelli di stimolazione a tutti i gradi di libertà (Degree of Freedom, DoF²), uno dopo l'altro, il robot individua quali unità sensoriali (SU) reagiscono a quali DoF. Dato che ogni segmento del robot viene dotato di almeno una SU, il metodo qui illustrato è poi in grado di fondere diversi DoF in articolazioni e diverse SU in segmenti, discriminando la dipendenza cinematica tra articolazioni e segmenti.

Tale metodo offre informazioni sul numero di parti del corpo presenti, su quali SU appartengano a quale parte del corpo, su come le articolazioni (che combinano multipli DoF) connettano le parti del corpo, e su quali parti del corpo siano segmenti d'estremità (ovvero alla fine di una catena seriale, come palmi o dita di bracci robotici).

²Wikipedia, *Degrees of freedom (mechanics)*,
URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Degrees_of_freedom_\(mechanics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Degrees_of_freedom_(mechanics))

Algoritmo 4.2 Stima Cinematica (dell'arto selezionato)

- 1: Istanziamento del modello della catena seriale dell'arto selezionato (Alg. 4.1)
 - 2: Generazione di dati per l'addestramento in (P) pose casuali
 - 3: Ottimizzazione dei parametri del modello per adattarsi al meglio ai dati d'addestramento
-

Nel secondo passo (vedi Alg. 4.2) del processo, viene utilizzata la conoscenza strutturale ottenuta dal passo precedente per costruire un modello cinematico per i DoF e le SU che si trovano sullo stesso arto. Un arto robotico è qui inteso come la connessione di articolazioni e segmenti tra il segmento stazionario ed uno dei segmenti d'estremità.

Il robot genera allora un insieme di dati d'addestramento per ogni arto, muovendo e campionando i DoF e le SU relative. Ogni insieme di dati d'addestramento contiene le misurazioni del vettore di gravità statico e dell'accelerazione dinamica in risposta al modello di movimento isolato dei DoF, per multiple pose dei DoF. Un algoritmo d'ottimizzazione globale minimizza quindi l'errore tra le letture generate dal modello cinematico e l'insieme dei dati d'addestramento.

Il lato vantaggioso di questo approccio è il bisogno di una quantità minima di conoscenza note a priori indipendenti dal robot per il suo funzionamento, ovvero un modello fisico che possa mettere in relazione attuazione e sensazione. Sono da tenere a mente solo pochi vincoli: bisogna avere almeno una SU per segmento ed un segmento statico, e nessuno anello chiuso è richiesto durante la calibrazione. Utilizzando un osservatore interno non ci sono limitazioni dovute all'occlusione o ad altri componenti esterni. Questo metodo è in grado di acquisire le informazioni d'interesse in un breve tempo, risultando specialmente utile per ricalibrizioni autonome sul momento.

4.1.2 Sistema robotico

Specifiche della pelle

Le SU utilizzate in questo approccio all'esplorazione e modellazione cinematica di un robot sono i moduli tattili multimodali descritti nella Sezione 1.1, ovvero la versione originale di tali cellule per la formazione di una pelle artificiale. Si fa qui uso dell'accelerometro triassiale disponibile su ogni SU, ovvero un BOSCH BMA150 con una risoluzione di 10 bit, impostato con un intervallo di $\pm 2g$ ed una frequenza di campionamento di $1kHz$. L'allineamento e la posizione del sistema di riferimento dell'accelerometro sulla propria SU sono informazioni note e statiche. È di conseguenza sufficiente stimare le relazioni cinematiche prendendo in considerazione il sistema di riferimento dell'accelerometro di ogni SU.

Nonostante quanto segue sia stato progettato e testato sulla versione originale dei moduli tattili, nessun aggiornamento alla versione successiva dei moduli descritta nella Sezione 1.2 rende il metodo di calibrazione qui illustrato obsoleto (dato che utilizza solo l'accelerometro di bordo dei moduli, di cui entrambe le versioni sono dotate).

Vincoli del sistema

Per iniziare, si presume di essere nella situazione della cinematica dei corpi rigidi, dove le articolazioni con uno o più DoF sono connesse da segmenti non deformabili. Durante l'intero processo di calibrazione un segmento di riferimento del robot deve rimanere statico nelle coordinate globali. La scelta del segmento statico influenza fortemente l'esito del metodo qui illustrato, dato che ha rappresenta la radice dell'esplorazione strutturale nonché del modello cinematico.

È necessario che ogni DoF possa essere attuato indipendentemente e liberamente, dato che impatti con i limiti del DoF e/o oggetti attorno al robot interferirebbero con la generazione del movimento ed il campionamento sensoriale. In aggiunta, non risulta possibile gestire le cinematiche ad anello chiuso e sottoattuate con le tecniche qui descritte. Si presume inoltre che si possa controllare il robot con comandi di velocità e che i sensori di posizione siano calibrati.

Il robot deve essere dotato di almeno una SU per segmento, dato che solo allora risulta possibile distinguere in modo non ambiguo la sequenza delle articolazioni e dei segmenti che formano l'albero cinematico del robot. La stima del modello cinematico si limita momentaneamente ad articolazioni con un singolo DoF, ed articolazioni con multipli DoF possono essere realizzate con sequenze ravvicinate di DoF.

Relazione sensore-attuatore

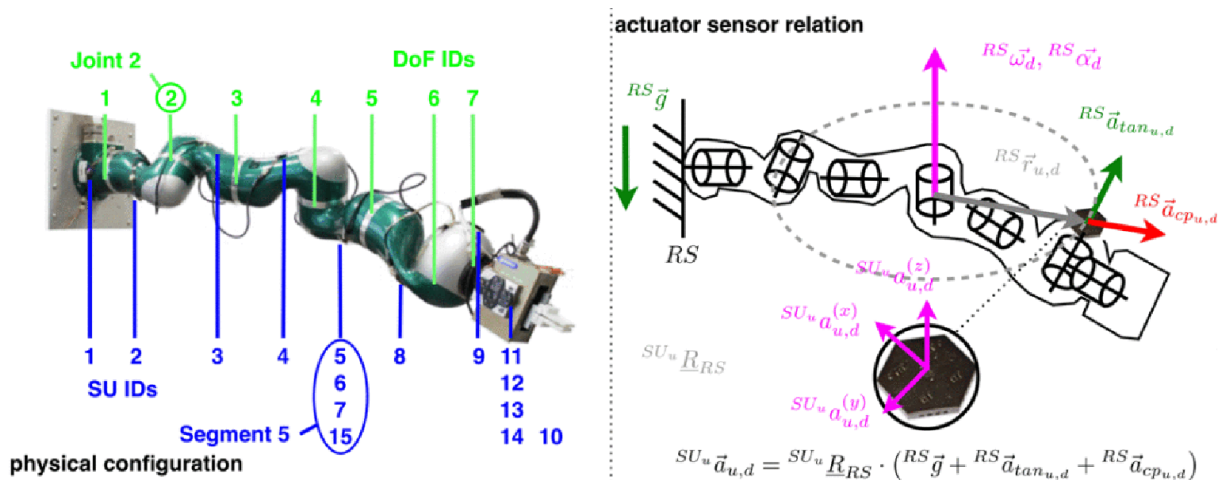


Figura 4.1: Sinistra: distribuzione sconosciuta di unità sensoriali (SU) e di gradi di libertà (DoF) su di un braccio robotico articolato. Destra: le accelerazioni che agiscono su di una SU quando un singolo DoF rotante viene attuato, con un segmento di riferimento (RS) statico. | Fig. da [6]

Legenda: *Joint* = Articolazione, *Segment* = Segmento, *Physical Configuration* = Configurazione Fisica, *Actuator Sensor Relation* = Relazione Sensore-Attuatore

Escludendo le deformazioni della pelle, ogni SU segue l'accelerazione del proprio punto di montaggio. Dato un segmento di riferimento statico (RS) come in Fig. 4.1, l'accelerazione di tutti i punti di montaggio può essere direttamente controllata attuando i rispettivi DoF.

Un cambio della velocità ($\frac{d}{dt} {}^{RS}\omega_d(t) = {}^{RS}\alpha_d(t)$) di un DoF rotante (d) ha un'influenza diretta sull'accelerazione della SU (u), composta da tre effetti diversi:

- 1) L'accelerazione tangenziale (${}^{RS}\vec{a}_{tan_{u,d}}$), dipendente dall'accelerazione rotazionale del DoF (${}^{RS}\vec{\alpha}_d$) e dal vettore (${}^{RS}\vec{r}_{u,d}$), tra l'asse del DoF (d) ed il punto di montaggio della SU (u):

$${}^{RS}\vec{a}_{tan_{u,d}} = {}^{RS}\vec{\alpha}_d \times {}^{RS}\vec{r}_{u,d} \quad (4.1)$$

- 2) L'accelerazione centripeta (${}^{RS}\vec{a}_{cp_{u,d}}$), dipendente dalla velocità angolare (${}^{RS}\vec{\omega}_d$) del DoF e dal vettore (${}^{RS}\vec{r}_{u,d}$):

$${}^{RS}\vec{a}_{cp_{u,d}} = {}^{RS}\vec{\omega}_d \times ({}^{RS}\vec{\omega}_d \times {}^{RS}\vec{r}_{u,d}) \quad (4.2)$$

- 3) Ed il vettore di gravità ${}^{RS}\vec{g}$.

Un accelerometro non può distinguere ma percepisce tutti gli effetti allo stesso tempo, nel suo sistema di coordinate locali:

$${}^{SU_u}\vec{a}_{u,d} = {}^{SU_u}\underline{R}_{RS} \cdot \left({}^{RS}\vec{g} + {}^{RS}\vec{a}_{tan_{u,d}} + {}^{RS}\vec{a}_{cp_{u,d}} \right) \quad (4.3)$$

La matrice di rotazione ${}^{SU_u}\underline{R}_{RS}$ tra il sistema di riferimento statico e la SU, ed il vettore ${}^{RS}\vec{r}_{u,d}$, dipendono dalla cinematica sconosciuta del robot.

4.1.3 Esplorazione strutturale

Generazione della matrice d'attività

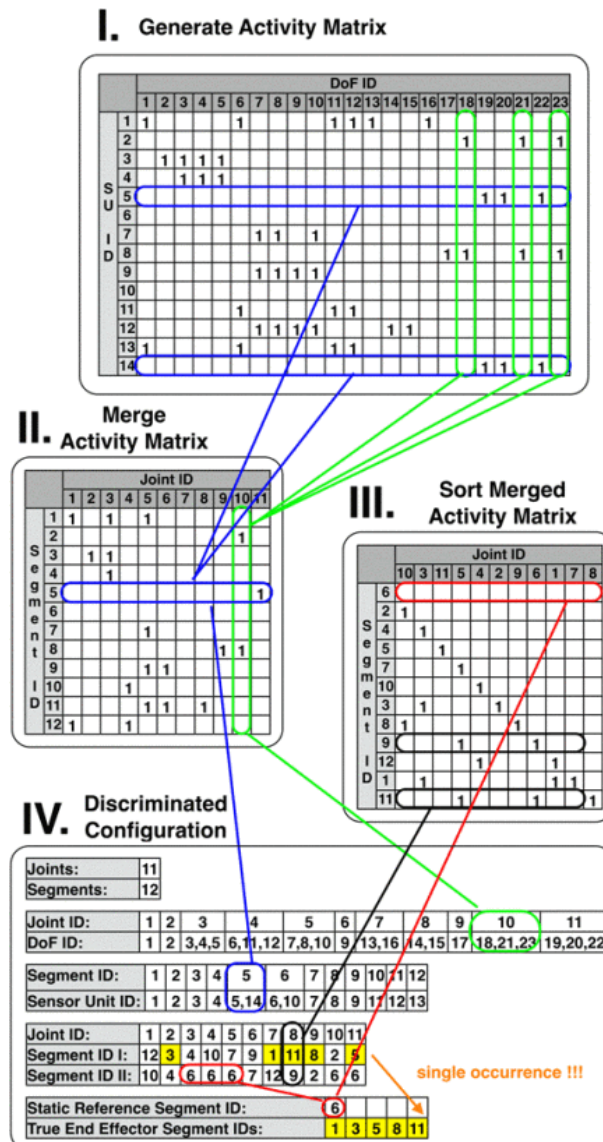


Figura 4.2: Passi dell'algoritmo d'esplorazione strutturale per una matrice d'attività di un robot umanoide "simulato". Le SU ed i DoF disponibili, oltre che i segmenti e le articolazioni del corpo, vengono etichettati automaticamente con ID consecutivi. | Fig. da [6]

Legenda: *Activity Matrix* = *Matrice d'Attività*, *Merge/ed* = *Fusione/Fusa*, *Joint* = *Articolazione*, *Segment* = *Segmento*, *Sensor Unit* = *Unità Sensoriale*, *Static Reference* = *Riferimento Statico*, *True End Effector* = *Segmento d'Estremità Proprio*, *Single Occurrence* = *Singola Comparsa*

Ciò a cui la spiegazione dell'esplorazione strutturale si riferisce con matrice d'attività è una matrice binaria (vedi Fig. 4.2) con i seguenti elementi: un "1" quando una SU può venire mossa dall'attuazione di un DoF durante la calibrazione, oppure uno "0" quando non si percepisce tale movimento della SU (o il movimento è solo minore).

Nella sotto-sottosezione **Relazione sensore-attuatore** (alla fine della sottosezione precedente) sono stati riassunti i tre effetti che si possono misurare con l'accelerometro relativamente ad un DoF rotante in movimento.

Entrambi gli effetti dinamici dipendono dalla distanza radiale (${}^{RS}\vec{r}_{u,d}$). Quando il valore assoluto di tale vettore si avvicina a zero, tali effetti dinamici svaniscono. Inoltre, i movimenti dinamici introducono altre fonti di rumore, come vibrazioni lungo il robot ed effetti di accoppiamento tra i DoF. Tali disturbi renderebbero la separazione tra i due stati binari degli elementi della matrice un compito molto difficile, seppure essenziale.

Perciò viene invece utilizzato il terzo effetto, di natura statica. Cambiare la posizione di un DoF da una iniziale ad un'altra cambia l'orientamento di tutti i segmenti relativi ad esso nello stesso modo (per definizione della cinematica dei corpi rigidi). Ciò ruota anche il vettore di gravità nelle coordinate dell'accelerometro ${}^{RS}\vec{g}$ nello stesso modo. Si possono allora applicare delle soglie fisse ai valori nei tre assi dell'accelerometro di ogni SU, per ottenere i corretti valori binari degli elementi nella matrice d'attività. Dato che il vettore di gravità può essere misurato staticamente in entrambe le pose, non sono più necessarie le accortezze legate ai problemi causati dalle misurazioni dinamiche.

Si presenta però un problema quando alcuni degli assi dei DoF sono esattamente verticali (paralleli alla gravità, o quasi), dato che in tali situazioni il vettore di gravità ruota solo attorno al proprio asse senza cambiare i valori nei tre assi dell'accelerometro. Per ovviare a tale casistica, si può utilizzare una proprietà della matrice d'attività: multiple matrici d'attività dello stesso robot possono essere combinate da una funzione di OR logico applicata elemento per elemento.

L'approccio più sicuro per la generazione di due matrici d'attività complementari è quello di ruotare il segmento statico del robot di 90° attorno ad uno degli assi orizzontali dopo la prima della due generazioni. Ciò assicura che nessun asse di rotazione sia allineato o quasi con la verticale in entrambe le matrici, eliminando così la possibilità di elementi erroneamente impostati al valore "0" nella matrice d'attività finale.

Fusione in segmenti ed articolazioni

Le SU che si trovano sullo stesso segmento sono soggette alla stessa "attività", e dovrebbero quindi (idealmente) avere gli stessi vettori di riga nella matrice d'attività (definita nella sotto-sottosezione **Generazione della matrice d'attività**). Di conseguenza, tutti i vettori di riga identici nella matrice d'attività possono essere fusi per ottenere dei segmenti (vedi Fig. 4.2).

Si applica un principio simile ai DoF posizionati in modo vicino (ad esempio i tre DoF dell'articolazione di una spalla). I DoF che si trovano vicini hanno vettori di colonna identici nella matrice, e possono conseguentemente essere fusi per ottenere articolazioni.

Ciò porta ad una matrice d'attività compatta, che offre un contesto complessivo per comprendere l'attività delle articolazioni e dei segmenti. Il numero di righe è il numero di segmenti individuati mentre il numero di colonne è il numero di articolazioni.

Il numero dei segmenti dev'essere sempre un'unità in più del numero delle articolazioni. Tale condizione è una conseguenza naturale di una struttura robotica ad albero, dove un'articolazione aggiuntiva connette sempre un segmento del corpo già presente al nuovo.

Connettività articolazione-segmento

La matrice d'attività compatta ottenuta dalle fusioni può venire quindi riordinata nella forma triangolare inferiore. Solo una forma strettamente triangolare inferiore, dove la diagonale secondaria ($l_{(n+1)(n)}, n \in \mathbb{N}$) deve contenere solo elementi del valore "1" (con la dimensione della matrice che dev'essere $(n + 1 \text{ righe}) \times (n \text{ colonne})$), offre quanto necessario per il prossimo passo dell'algoritmo. Se la matrice non dovesse essere tale, significa che uno dei vincoli espressi precedentemente è stato violato (vedi la sotto-sottosezione **Vincoli del sistema**).

L'algoritmo procede quindi lungo la diagonale secondaria ($l_{(n+1)(n)}, n \in \mathbb{N}$), andando dagli indici più bassi a quelli più alti. Mentre scorre lungo la matrice d'attività fusa e riordinata (vedi Fig. 4.2) l'algoritmo cerca righe identiche tranne che per l'elemento correntemente nella diagonale secondaria.

Tale elemento nella diagonale in è in termini pratici l'articolazione, individuata dall'indice di colonna corrente, che connette i due segmenti in esame, individuati dagli indici delle due righe confrontate.

Segmenti ed arti

La connettività articolazione-segmento appena estratta rappresenta un albero cinematico gerarchico. Il segmento di riferimento statico (radice) del robot corrisponde al vettore di riga nullo nella matrice d'attività fusa (vedi Fig. 4.2). I segmenti d'estremità "veri e propri" (foglie, come ad esempio le punte delle dita di un robot umanoide) sono connessi esattamente ad una ed una sola articolazione. I segmenti che si connettono a più di due articolazioni (come il palmo di una mano umanoide) sono segmenti d'estremità "falsi" (nodi interni dell'albero) e possono essere utilizzati come segmenti di riferimento per dei sotto-arti (come le dita attaccate ad un palmo).

Ciò che viene qui considerato un arto è una sequenza di segmenti connessi da articolazioni, che inizia da un segmento di riferimento e termina con un segmento d'estremità "vero" o "falso". Con il braccio robotico leggero KUKA (vedi Fig. 4.1) l'albero cinematico è triviale, avendo un solo arto (ovvero un albero con un ramo ed una foglia).

4.1.4 Stima cinematica

In questa sottosezione viene descritta in dettaglio la costruzione e stima automatica dei modelli cinematici per arti robotici, con la definizione di arto robotico data precedentemente nella sotto-sottosezione **Segmenti ed arti**. Data la natura esplicita del modello (ovvero che calcola il proprio stato futuro basandosi su quello attuale) ed il tipo di sensore utilizzato (un accelerometro triassiale), per ottenere come risultato il modello cinematico desiderato bisogna fornire informazioni aggiuntive al sistema.

Qui, le informazioni aggiuntive sono fornite sotto forma di una funzione d'errore, parte della quale è un modello esplicito di catena seriale. Con un algoritmo di ottimizzazione globale viene infine minimizzato l'errore tra un insieme di dati d'addestramento e le previsioni del modello parametrizzato.

Modello della catena seriale

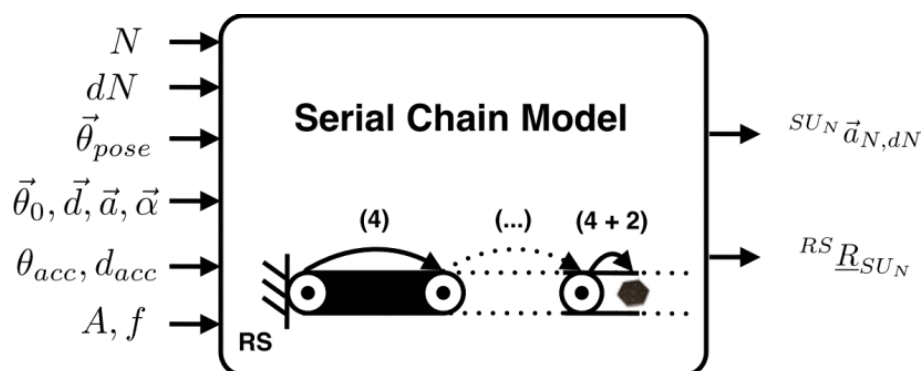


Figura 4.3: Schema I/O per il modello della catena seriale. | Fig. da [6]

Il modello della catena seriale (vedi Fig. 4.3) descrive la relazione sensore/attuatore tra il segmento di riferimento statico ed il sistema di coordinate dell'accelerometro che appartiene all' N_{th} -esimo segmento nella catena seriale di un arto robotico.

Vengono qui utilizzati i parametri Denavit-Hartenberg (DH) per definire le trasformazioni tra gli assi dei DoF partendo dal punto di riferimento, oltre che l'ultima trasformazione al sistema di coordinate dell'accelerometro. Il modello della catena seriale fa sempre riferimento al segmento statico, dato che è l'unico punto di riferimento statico noto nel sistema.

I parametri DH rappresentano le trasformazioni asse-asse con un numero minimo di quattro parametri (θ, d, a, α) , un fatto che risulta specialmente utile quando i parametri devono essere ridotti per un algoritmo d'ottimizzazione globale. Con solamente quattro parametri non è però possibile rappresentare la posizione e l'orientamento liberi del sistema di coordinate dell'accelerometro, rispetto all'asse del DoF che controlla il segmento dell'accelerometro stesso.

Vengono quindi introdotti due parametri aggiuntivi, una rotazione (θ_{acc}) ed una traslazione (d_{acc}) lungo l'asse z per l'ultima trasformazione tra l'asse di un DoF virtuale (asse z dell'accelerometro) ed il sistema libero di coordinate dell'accelerometro.

Il modello accetta allora un array variabile di N parametri DH ($\vec{\theta}_0, \vec{d}, \vec{a}, \vec{\alpha}$), due parametri aggiuntivi (θ_{acc} e d_{acc}) e la posa parziale dell'arto robotico ($\vec{\theta}_{pose}$) come input. Da tale input assembla una matrice di trasformazione tra il sistema di coordinate del riferimento statico ed il sistema di coordinate dell'accelerometro:

$${}^{SU_N}\underline{T}_{RS} = {}^{SU_N}\underline{T}_{DoF_{N+1}} \cdot \left(\prod_{d=1}^N {}^{DoF_{(d+1)}}\underline{T}_{DoF_{(d)}} \right) {}^{DoF_1}\underline{T}_{RS} \quad (4.4)$$

La trasformazione (${}^{DoF_1}\underline{T}_{RS}$) tra il sistema di coordinate del riferimento statico e l'asse del primo DoF non può essere determinata (vedi la sotto-sottosezione **Limitazioni** a seguire), e viene perciò inizializzata con la matrice d'identità (\underline{I}).

Le matrici che seguono sono le trasformazioni DH tra $N + 1$ DoF consecutivi, includendo l'asse del DoF finale (virtuale) allineato con l'asse z dell'accelerometro:

$${}^{DoF_{(d+1)}}\underline{T}_{DoF_{(d)}} = \begin{pmatrix} c\theta_d & -s\theta_d c\alpha_d & s\theta_d \sin\alpha_d & a_d c\theta_d \\ s\theta_d & c\theta_d c\alpha_d & -c\theta_d \sin\alpha_d & a_d s\theta_d \\ 0 & s\alpha_d & c\alpha_d & d_d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

Il parametro (θ_d) è qui composto della deviazione DH (θ_{0_d}), dalla posizione del DoF (θ_{pose_d}) e da un modello di movimento (θ_{patt_d}):

$$\theta_d = \theta_{0_d} + \theta_{pose_d} + \theta_{patt_d} \quad (4.6)$$

L'ultima trasformazione permette il libero posizionamento ed orientamento dell' N_{th} -esimo sistema di riferimento dell'accelerometro relativamente all'asse del DoF virtuale:

$${}^{SU_N}\underline{T}_{DoF_N} = \begin{pmatrix} c\theta_{acc} & -s\theta_{acc} & 0 & 0 \\ s\theta_{acc} & c\theta_{acc} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_{acc} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.7)$$

Il modello della catena seriale contiene anche il modello del movimento (vedi la sotto-sottosezione **Generazione automatizzata di dati per l'addestramento del modello**) che viene utilizzato per ogni DoF durante l'esplorazione. È inoltre possibile controllare l'ampiezza (A), la frequenza (f), ed il DoF (dN) su cui viene generato il modello di movimento.

Un output del modello della catena seriale è la matrice di rotazione (${}^{RS}\underline{R}_{SU_N}$) tra il sistema di coordinate dell'accelerometro ed il segmento di riferimento statico per la posa corrente ($\vec{\theta}_{pose}$), che è la trasposta della matrice di rotazione 3×3 (${}^{SU_N}\underline{R}_{RS}$) contenuta in alto a sinistra nella trasformazione (${}^{SU_N}\underline{T}_{RS}$).

L'altro output del modello è l'accelerazione massima (${}^{SU_N}\vec{a}_{N,dN}$) dell'accelerometro sull' N_{th} -esimo segmento, misurata nelle coordinate dell'accelerometro, dovuta ad un modello di movimento esplorativo attuato sul DoF selezionato (dN). Il modello di catena calcola tale valore ruotando la seconda derivata numerica della posizione dell'accelerometro (${}^{RS}\vec{p}_{N,dN}(t)$), contenuta come vettore colonna di 3 elementi in alto a destra nella matrice (${}^{SU_N}\underline{T}_{RS}$), dalle coordinate del riferimento statico alle coordinate dell'accelerometro:

$${}^{SU_N}\vec{a}_{N,dN} = {}^{SU_N}\underline{R}_{RS} \cdot {}^{RS}\vec{a}_{N,dN} \quad (4.8)$$

$${}^{RS}\vec{a}_{N,dN} = \left({}^{RS}\vec{p}_{N,dN}(h) + {}^{RS}\vec{p}_{N,dN}(-h) - 2 \cdot {}^{RS}\vec{p}_{N,dN}(0) \right) / h^2 \quad (4.9)$$

Il valore viene preso nel punto attorno all'istante ($t = 0$) in cui si prevede la massima d'accelerazione del modello di movimento (vedi sotto-sottosezione successiva) con un passo temporale di derivazione pari ad $h = \frac{1}{1000 \cdot f}$.

Generazione automatizzata di dati per l'addestramento del modello

Per poter trovare parametri significativi per il modello cinematico è necessario generare un insieme descrittivo di misurazioni in un numero (P) di pose diverse ($\vec{\theta}_{pose_p}$) dei vari (D) DoF dell'arto robotico.

Il metodo qui proposto per ottenere tali misurazioni è di generare casualmente le posizioni dei DoF per ogni posa all'interno di un intervallo di rotazione $[-\pi, \pi]$. Con un robot reale lo spazio di lavoro disponibile è ovviamente ristretto da auto-collisioni ed dagli intervalli veri e propri di ogni attuatore.

Come descritto precedentemente nella sotto-sottosezione **Relazione sensore-attuatore**, grazie agli accelerometri triassiali montati sui moduli, risulta possibile misurare gli effetti statici e dinamici che agiscono su ogni SU nella posa corrente (p). Viene quindi campionato in modo statico il vettore di gravità (${}^{SU_u}\vec{g}_{u,p}$) di ogni accelerometro (u) in ogni posa (p). Per misurare l'effetto dinamico è invece necessario che il robot applichi modelli di movimento isolati a tutti i propri DoF (d). È importante che venga mosso solo un DoF alla volta, per essere in grado di separare direttamente l'informazione relativa ad ogni DoF.

Dato che si utilizza un accelerometro, il robot deve generare un modello di movimento per i DoF ($\theta_{patt_d}(t)$) che tale sensore sia in grado di misurare. Si è qui ottimizzata tale generazione verso l'accelerazione tangenziale (${}^{SU_u}\vec{a}_{tan_{u,d}}$), dato che dipende direttamente dall'accelerazione angolare ($\alpha_{patt_d}(t)$). L'accelerazione centripeta (${}^{SU_u}\vec{a}_{cp_{u,d}}$) richiede invece un'alta velocità angolare ($\omega_{patt_d}(t)$). Con un limite naturale imposto dall'accelerazione angolare, il robot può raggiungere velocità angolari elevate solo dopo un certo tempo, portando inoltre a pericolosi movimenti ad alta velocità con un ampio intervallo di movimento angolare ($\Delta\varphi_{patt_d}$).

Per massimizzare l'accelerazione tangenziale, bisogna avere un'alta accelerazione angolare ($\alpha_{patt_d}(t)$). Al fine di evitare oscillazioni, è consigliabile smussare il controllo della velocità angolare ($\omega_{patt_d}(t)$), oltre che l'accelerazione ($\alpha_{patt_d}(t)$) e lo strappo (derivata nel tempo dell'accelerazione $\frac{d}{dt}\alpha_{patt_d}(t)$) indotti. Allo stesso tempo, si ha la necessità che il DoF ritorni nella stessa posizione ($\theta_{patt_d}(T)$), una volta che il modello di movimento esplorativo sul particolare DoF (d) si ferma e viene spostato al prossimo DoF ($d + 1$). Un possibile modello di movimento ($\theta_{patt_d}(t)$) per i DoF che soddisfa tutti requisiti sopra elencati è un'onda sinusoidale, con le derivate (prima e seconda) come segue:

$$\theta_{patt_d}(t) = \frac{A}{2\pi f}(1 - \cos(2\pi ft)) \quad (4.10)$$

$$\omega_{patt_d}(t) = A \sin(2\pi ft) \quad (4.11)$$

$$\alpha_{patt_d}(t) = 2\pi f A \cos(2\pi ft) \quad (4.12)$$

Queste equazioni offrono delle linee guida sul dimensionamento dei parametri (f ed A) del modello di movimento. La scelta dell'ampiezza (A) è limitata dalla massima velocità dei DoF del robot. ($2\pi f A$) dev'essere minore della massima accelerazione dei DoF, e sotto un valore che porti ad un eccessivo accoppiamento tra i DoF come conseguenza della massa distribuita. ($\frac{A}{2\pi f}$) dev'essere abbastanza piccolo per poter essere in grado di ignorare l'influenza del vettore di gravità rotante.

Ad ogni modo, ($2\pi f A$) deve risultare sufficientemente grande cosicché l'effetto del modello di movimento di un DoF sulla misurazione dell'accelerometro (${}^{SU_u}\vec{a}_{u,d}$) risalti rispetto al rumore di fondo del sensore. Dato che modelli sinusoidali senza termine per i DoF non permetterebbero lo spostamento del modello di movimento tra i vari DoF, vi è bisogno di un'ulteriore funzione di finestrazione ($F(t)$). L'effettivo modello di comando per il motore ($\theta_{patt_{com_d}}(t)$) diventa quindi:

$$\theta_{patt_{com_d}}(t) = \theta_{patt_d}(t) \cdot F(t) \quad (4.13)$$

Nella realtà, questo modello di movimento comandato e le relative derivate devono obbedire ai vincoli imposti da un robot reale. Qui, l'attenzione è concentrata su misurazioni simulate generate dal modello della catena seriale stesso. Ignorando l'influenza della funzione di finestrazione, il simulatore offre il massimo valore numerico dell'accelerazione dinamica (${}^{SU_u}\vec{a}_{dyn_{u,d,p}}$) per ogni SU (u) (in ogni posa (p), per il modello ($\theta_{patt_d}(t)$) su ogni DoF (d)) al tempo $t = 0$.

Funzione d'errore

La funzione d'errore ha accesso sia ai dati d'addestramento (appena generati nella sotto-sottosezione **Generazione automatizzata di dati per l'addestramento del modello** immediatamente precedente a questa) che al modello della catena seriale (definito nella sotto-sottosezione precedente **Modello della catena seriale**).

Ad ogni chiamata della funzione d'errore, l'ottimizzatore passa ad essa un insieme dei parametri correnti, appartenenti al modello della catena seriale (vedi **Modello della catena seriale**), per una catena parziale di $N \leq D$ DoF. La funzione d'errore valuta allora il modello della catena seriale in ogni posa parziale ($\vec{\theta}_{pose_p}$) delle (P) pose dell'insieme dei dati d'addestramento.

Vengono valutati e confrontati solamente i valori dell'accelerazione, in risposta ad un modello d'attuazione di un DoF, per un massimo di tre DoF direttamente precedenti all'accelerometro interessato (per maggiori dettagli vedi la sotto-sottosezione **Ottimizzazione dei parametri** immediatamente successiva a questa).

Infine, la funzione d'errore ritorna un errore totale positivo ad una sola dimensione (e_T) costituito da due parti:

$$e_T = e_1 + e_2, \quad e_T \geq 0 \quad (4.14)$$

La prima parte (e_1) è una misura della deviazione dei P vettori di gravità campionati durante l'addestramento, (${}^{SU_N}\vec{g}_{N,p}$) ruotati nelle coordinate del riferimento statico dalla corrente matrice di rotazione (${}^{RS}\underline{R}_{SU_N}^{mod,p}$) del modello di catena seriale:

$$e_1 = \sum_{p=1}^P \left| {}^{RS}\vec{g}_{N,p} - \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P {}^{RS}\vec{g}_{N,p} \right|^2 \quad (4.15)$$

$${}^{RS}\vec{g}_{N,p} = {}^{RS}\underline{R}_{SU_N}^{mod,p} \cdot {}^{SU_N}\vec{g}_{N,p} \quad (4.16)$$

La seconda parte (e_2) è una misura della discrepanza tra le accelerazioni calcolate dal modello di catena seriale (${}^{SU_N}\vec{a}_{dyn_{N,d,p}}^{mod}$), attuando i modelli di movimento sugli ultimi tre DoF, e le accelerazioni campionate durante l'addestramento (${}^{SU_N}\vec{a}_{dyn_{N,d,p}}^{train}$):

$$e_2 = \sum_{p=1}^P \sum_{\substack{d>0 \\ d=N-3}}^N \left| {}^{SU_N}\vec{a}_{dyn_{N,d,p}}^{mod} - {}^{SU_N}\vec{a}_{dyn_{N,d,p}}^{train} \right|^2 \quad (4.17)$$

Ottimizzazione dei parametri

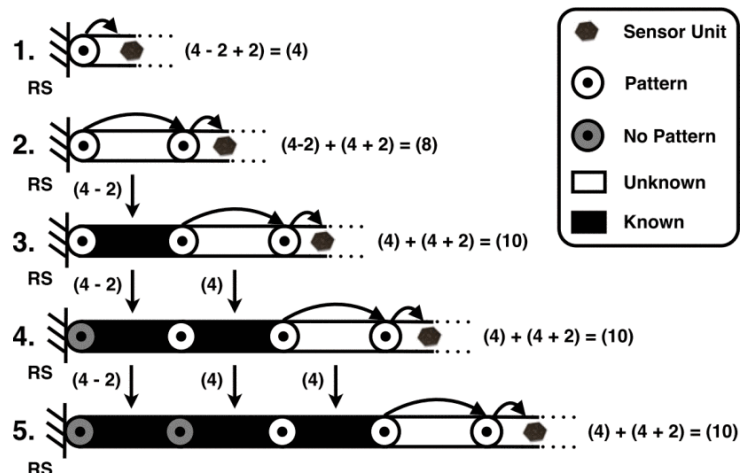


Figura 4.4: Stima progressiva dei parametri della catena seriale da un segmento di riferimento statico fino a quello d'estremità, evidenziando il numero di parametri riutilizzati (freccie verso il basso) e nuovamente stimati, oltre che i DoF da attuare ad ogni passo. | Fig. da [6]

Legenda in alto a destra, dall'alto: *Unità Sensoriale, Attua, Non Attuare, Non Noto, Noto*

L'algoritmo d'ottimizzazione dei parametri minimizza il valore (e_T) della funzione d'errore (appena definita nella sotto-sottosezione immediatamente prima di questa) aggiustando D insiemi di parametri DH ($\vec{\theta}_0, \vec{d}, \vec{a}, \vec{\alpha}$).

Dato che non è possibile fornire una derivata della funzione d'errore algoritmica, viene utilizzato un algoritmo d'ottimizzazione globale randomizzato (MLSL_LDS)³ insieme ad un ottimizzatore locale privo di derivata (LN_NELDERMEAD)⁴ della libreria NLOpt⁵. Si può avere la certezza di aver trovato un vero minimo locale quando il valore di (e_T) risulta vicino a zero.

Purtroppo, con la definizione della funzione d'errore scelta, il minimizzatore locale si blocca spesso in minimi locali. Ciò rende un approccio a singolo passo, in cui si stimano tutti i parametri cinematici della catena seriale in un colpo solo, impossibile. Si fa quindi uso esplicito degli accelerometri distribuiti su ogni segmento per ridurre il numero di parametri da stimare allo stesso tempo, alleggerendo il compito dell'ottimizzatore.

Nella Fig. 4.4 viene mostrato come vengano riutilizzati i parametri cinematici già stimati tra gli assi dei DoF reali. Allora, partendo dal segmento di riferimento statico, l'algoritmo d'ottimizzazione deve solamente stimare i parametri per le nuove trasformazioni. Queste sono le trasformazioni tra l'asse del DoF precedente e l'asse di quello nuovo (entrambi DoF reali), oltre che la trasformazione dell'asse del DoF virtuale ed i parametri aggiuntivi utilizzati per localizzare il sistema di coordinate libero dell'accelerometro (vedi la sotto-sottosezione precedente **Modello della catena seriale**).

³A. H. G. Rinnooy Kan and G. T. Timmer, "Stochastic global optimization methods", *Mathematical Programming*, vol. 39, pp. 27-78, 1987

⁴J. A. Nelder and R. Mead, "A simplex method for function minimization", *The Computer Journal* 7, pp. 308-313, 1965

⁵Steven G. Johnson, NLOpt v2.2.4, <http://ab-initio.mit.edu/nlopt>

Per i primi due DoF l'ammontare di parametri da stimare è ulteriormente ridotto, grazie a vincoli aggiuntivi (vedi la sotto-sottosezione **Limitazioni** immediatamente successiva a questa). Dai tre DoF in poi, la quantità dei nuovi parametri per passo rimane fissa a (10), (4) per la trasformazione DH reale e (4+2) per il sistema di coordinate dell'accelerometro. Un altro vantaggio di tale approccio incrementale è che non c'è alcun bisogno di attuare con il modello di movimento tutti e quanti i DoF ad ogni chiamata della funzione d'errore. Attuare gli ultimi tre DoF prima dell'accelerometro corrente è abbastanza per la maggior parte delle configurazioni robotiche (due assi non triviali aiutano ad allineare la stima di un terzo asse, quello sotto esame, quando si ha una struttura preesistente). Ciò riduce significativamente il tempo di chiamata della funzione d'errore e sembra addirittura ridurre il numero di minimi locali.

Attuare tutti i DoF ogni volta renderebbe difficile anche la scelta di un criterio di terminazione globale per l'algoritmo, data l'accumulazione degli errori di stima su di una catena crescente. Si utilizza un criterio di terminazione globale ($e_T \leq e_{T_{stop}}$) ed un criterio di terminazione locale relativo ($\frac{\Delta e_T}{e_T} \leq e_{T_{ftol_{rel}}}$) per prevenire sprechi di tempo nei minimi locali. L'algoritmo d'ottimizzazione globale richiede dei limiti e dei valori iniziali, perciò sono stati definiti i seguenti limiti con il valore iniziale impostato al centro di ognuno degli intervalli creati dai limiti stessi:

$$\theta_{0_d} \in [-\pi; \pi], d_d \in [-1; 1], a_d \in [0; 1], \alpha_d \in [-\pi; \pi] \quad (4.18a)$$

$$\theta_{acc} \in [-\pi; \pi], d_{acc} \in [-1; 1] \quad (4.18b)$$

Limitazioni

L'approccio per la stima del modello cinematico appena presentato soffre di alcune limitazioni. È possibile stimare indipendentemente solo i parametri cinematici di ognuno degli arti robotici identificati. I singoli modelli cinematici per ogni arto possono però essere fusi efficientemente in una singola rappresentazione omogenea tramite l'utilizzo dell'algoritmo di ricostruzione 3D globale discusso nella Sezione 3.2, che utilizza le cellule multimodali come marcatori visivi.

Le trasformazioni (${}^{DoF_1}T_{RS}$) tra il primo DoF di un arto ed il sistema di coordinate unico del segmento di riferimento non possono essere stimate dato che il segmento statico non può essere mosso, e vengono quindi inizializzate con la matrice d'identità (I).

Per la stessa ragione, due parametri (θ_{0_1} e d_1) della prima trasformazione (${}^{DoF_2}T_{DoF_1}$) sono arbitrari. In determinate configurazioni robotiche i veri parametri (d_d ed a_d) Denavit-Hartenberg (DH), oltre che l'estensione (d_{acc}), non possono essere determinati analizzando solamente i dati degli accelerometri (ad esempio nel caso in cui tutti gli assi dei DoF di un arto siano allineati).

4.1.5 Risultati Sperimentali

Esplorazione strutturale

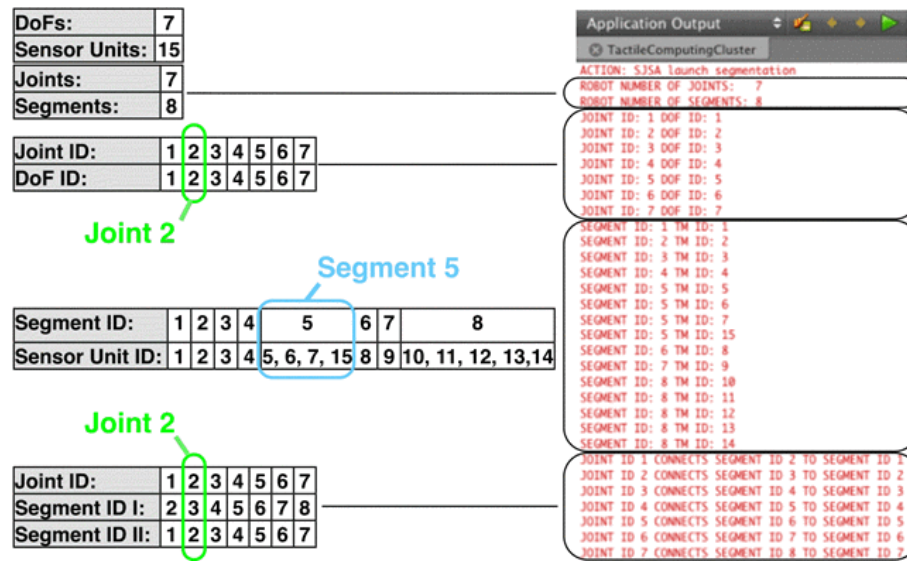


Figura 4.5: Risultato dell' algoritmo di esplorazione strutturale per la configurazione mostrata nella Fig. 4.1. L' Articolazione 2 ed il Segmento 5 sono evidenziati in entrambe le figure. | Fig. da [6]

La Fig. 4.5 mostra i risultati ottenuti dall' algoritmo d' esplorazione strutturale applicato sul braccio robotico leggero KUKA mostrato in Fig. 4.1. Per generare una matrice d' attività valida, sono stati sottratti 1000 valori misurati dagli accelerometri, campionati ad $1kHz$ in una posa statica del robot, da altri 1000 campioni, acquisiti con la stessa frequenza durante un movimento controllato (con velocità angolare $\omega_d = 0.5 \frac{rad}{s}$) su ogni DoF (d). Il robot attua ogni singolo DoF noto un DoF alla volta in sequenza, ritornando alla posizione iniziale dopo ogni movimento.

È poi stata confrontata la differenza assoluta dei valori medi per i tre assi degli accelerometri con una soglia costante di $0.05g$, impostando il valore d' attività ad "1" qualora la differenza risultasse maggiore della soglia. Questo metodo ha ritornato risultati attendibili per la maggior parte delle pose del robot.

Stima cinematica

DoF-DoF Transformation Parameters

	DoF 1-2 DoF		DoF 2-3 DoF		DoF 3-4 DoF		DoF 4-5 DoF		DoF 5-6 DoF		DoF 6-7 DoF	
	real	est	real	est	real	est	real	est	real	est	real	est
θ_0	0.100	0.000	0.200	0.203	-0.100	-0.113	0.300	0.303	-0.400	-0.423	0.100	0.117
d	0.100	0.000	-0.100	-0.101	0.000	-0.004	0.100	0.096	0.100	0.104	-0.300	-0.298
a	0.200	0.204	0.300	0.298	0.200	0.206	0.300	0.302	0.200	0.198	0.300	0.297
α	1.570	1.552	1.570	1.574	1.570	1.572	1.570	1.568	1.570	1.585	1.570	1.570

DoF-SU Transformation Parameters

	DoF 1-1 SU		DoF 2-2 SU		DoF 3-3 SU		DoF 4-4 SU		DoF 5-5 SU		DoF 6-6 SU		DoF 7-7 SU	
	real	est	real	est	real	est	real	est	real	est	real	est	real	est
θ_0	0.130	0.000	0.220	0.261	-0.130	-0.320	0.270	0.329	-0.200	-0.205	0.140	0.155	0.150	0.158
d	0.050	0.000	0.100	0.137	0.050	0.665	-0.050	-0.055	0.060	0.064	-0.070	-0.067	0.040	0.043
a	0.110	0.119	0.120	0.115	0.150	0.151	0.090	0.089	0.110	0.108	0.150	0.152	0.070	0.067
α	1.000	0.983	0.000	0.017	0.050	0.048	-0.070	-0.066	1.570	1.573	-1.580	-1.582	2.000	1.996
θ_{acc}	0.100	0.067	-0.110	-0.150	0.200	0.396	0.200	0.134	-0.130	-0.135	-0.160	-0.169	0.400	0.409
d_{acc}	0.050	-0.099	0.100	0.067	0.050	-0.115	-0.050	0.107	0.060	0.064	-0.070	0.127	0.040	0.162

Optimization Steps

	1-7	2-7	3-7	4-7	5-7	6-7	7-7	Total
iterations	255	1018	2825	455	2297	301	521	7672
time [s]	0.528	5.532	28.363	5.416	31.842	4.758	9.426	85.87
eT	0.055	0.076	0.099	0.090	0.075	0.096	0.094	-

Figura 4.6: Risultato della stima dei parametri cinematici basata su un'insieme di dati d'addestramento, confrontata con i veri parametri della simulazione. Sono evidenziate in rosso le discrepanze di ± 0.1 (radianti o metri). | Fig. da [6]

Titoli delle tabelle dall'alto: *Parametri delle Trasformazioni DoF-DoF*, *Parametri delle Trasformazioni DoF-SU*, *Passi d'Ottimizzazione*

Al fine di convalidare l'approccio di stima cinematica, è stato usato il modello della catena seriale per generare insiemi di dati d'addestramento simulati per diverse configurazioni robotiche. Viene qui presentato un caso con un numero di DoF ($D = 7$) simile a quello di un braccio robotico leggero KUKA. Il simulatore crea automaticamente $P = 20$ pose $\vec{\theta}_{pose}$ pseudo-casuali con un intervallo di $\pm 2.62 rad$. Il modello di catena seriale genera quindi, grazie ai valori reali della simulazione (che simula il robot descritto dalla catena come se fosse fisico), le misurazioni di gravità statiche (${}^{SU_u}\vec{g}_{u,p}$) ed anche quelle dell'accelerazione dinamica (${}^{SU_u}\vec{a}_{dyn,u,d,p}$) in ogni posa (p). Per simulare il rumore dei sensori (ed altre imperfezioni come scostamenti nei valori) durante le misurazioni virtuali, sono stati aggiunti valori pseudo-casuali con un'ampiezza di $\pm 0.01g$ ad ogni misurazione.

L'insieme di dati d'addestramento che ne risulta viene quindi passato all' algoritmo d'ottimizzazione, utilizzato con un criterio di terminazione globale $e_{T_{stop}} = 0.1$ ed un criterio di terminazione locale relativo $e_{T_{ftol_{rel}}} = 1^{-6}$. Dopo un totale di 7672 iterazioni in 86 secondi (elaborazione eseguita con un MacBook Pro - 2.26 GHz Core 2 Duo, 4GB RAM, Lion), l'algoritmo ha restituito i valori stimati qui listati in Fig. 4.6, che li mette a confronto con i parametri reali su cui si basava la simulazione delle misurazioni per l'addestramento.

Si può notare che non vi sono deviazioni notevoli nei parametri delle trasformazioni tra DoF e DoF, a parte la limitazione nota che interessa due parametri della prima trasformazione tra DoF (θ_{0_1} e d_1), evidenziata in rosso. Le deviazioni nei parametri delle trasformazioni tra DoF ed SU mostrano invece la presenza di ambiguità con la notazione scelta per descrivere il sistema di coordinate dell'accelerometro tramite dei parametri DH estesi.

4.2 Modellazione cinematica autonoma con pelle modulare

4.2.1 Approccio

L'approccio di questa sezione, riportato da [7], offre un metodo rapido ed autonomo per l'esplorazione, costruzione e calibrazione di modelli cinematici per manipolatori robotici tramite l'uso di accelerometri distribuiti. Rispetto ai comuni approcci di calibrazione cinematica, il metodo qui descritto si affida solo a sensori ed attuatori interni al robot, ovvero la pelle multimodale che fornisce gli accelerometri ed i controllori delle articolazioni. La soluzione qui riportata può gestire sia la calibrazione automatica degli accelerometri che la modellazione cinematica stessa.

Nonostante non siano necessari aiuti esterni (come ad esempio marcatori visivi) per la calibrazione cinematica, è comunque possibile integrare in modo vantaggioso (vedi Sottosezione 4.2.6) i risultati dell'algoritmo con delle ricostruzioni tridimensionali distribuite, ottenute appunto tramite l'uso dei moduli della pelle multimodale come marcatori visivi combinato ancora all'accelerometro di bordo (vedi Sezione 3.2).

4.2.2 Sistema robotico

Specifiche della pelle

Il metodo di stima e ricostruzione cinematica che segue si basa sulla versione aggiornata dei moduli tattili multimodali presentata in precedenza nella Sezione 1.2, ed utilizza l'accelerometro triassiale integrato in ogni modulo.

Calibrazione dell'accelerometro

L'accelerometro triassiale qui adoperato è il BOSCH BMA250 di ogni modulo tattile, un sensore estremamente piccolo (2x2x1 mm) ed economico. Possiede i suoi benefici, come ad esempio un centro quasi comune per tutti gli assi, ma non senza alcuni difetti: nonostante venga calibrato dal produttore, l'accelerometro risulta soffrire di scostamenti significativi e di alcune differenze nei guadagni. Lo scostamento di $\pm 0.08g$ presente su ogni asse contribuirebbe ad un errore fino ai $\pm 5^\circ$ nella stima di un vettore.

È stata perciò sviluppata una routine di calibrazione rapida che stima tutti e tre i guadagni (uG) e gli scostamenti (uO) degli assi, orientando la norma dei campioni di gravità (${}^u g_p$) in $P = 6$ pose (p) complementari sulla sfera unitaria:

$$[{}^uG, {}^uO] = \arg \min_{{}^uG, {}^uO} \sum_{p=1}^P (\|{}^u g_p\| - 1)^2 \quad (4.19)$$

Confrontato con altri approcci, tale metodo non richiede allineamenti esatti o strumentazione speciale per la calibrazione. Con due esecuzioni della routine, una subito dopo l'altra, le correzioni dello scostamento scendono a $\leq \pm 0.001g$ durante la seconda esecuzione.

Requisiti del robot

Per coprire un ampio spettro di configurazioni robotiche, vengono imposti pochi requisiti per il robot. Il robot deve accettare segnali di controllo della velocità (emulati), restituendo del feedback posizionale che possa essere derivato (2 volte) in accelerazioni delle articolazioni. L'approccio qui descritto può gestire (momentaneamente) solo articolazioni rotanti, che costituiscono comunque la maggioranza delle articolazioni utilizzate per i robot (ad es, umanoidi).

Almeno un sistema di riferimento del corpo (come il torso di un umanoide o la base di montaggio per un braccio manipolatore) deve rimanere completamente stazionario durante l'intero processo, prendendo qui il nome di sistema di riferimento di base.

4.2.3 Algoritmi ausiliari

L'approccio di analisi e modellazione cinematica per arti robotici descritto in questa sezione fa uso dell'algoritmo esplorativo Alg. 4.1 (descritto nella Sezione 4.1) al fine di distinguere la sequenza di articolazioni e segmenti nella struttura cinematica del robot d'interesse.

Ciò permette l'individuazione della base stazionaria del robot (necessaria per l'algoritmo di stima) e di quali moduli multimodali appartengono a quale segmento degli arti robotici. Conoscere quali moduli appartengono ai segmenti d'estremità di ogni arto permette anche la scelta degli accelerometri ottimali per gli algoritmi di stima e ricostruzione cinematica illustrati qui di seguito. Le informazioni sulla sequenza delle articolazioni negli arti sono inoltre necessarie per il corretto completamento della modellazione cinematica (vedi la Sottosezione 4.2.5).

Inoltre, come spiegato nella Sottosezione 4.2.6, il processo di modellazione cinematica può essere migliorato e reso ancora più utile dall'integrazione con l'algoritmo di ricostruzione tridimensionale (basato sugli accelerometri e sui marcatori visivi) mostrato nella Sezione 3.2.

4.2.4 Analisi puntuale della circonferenza (CPA) con accelerometro

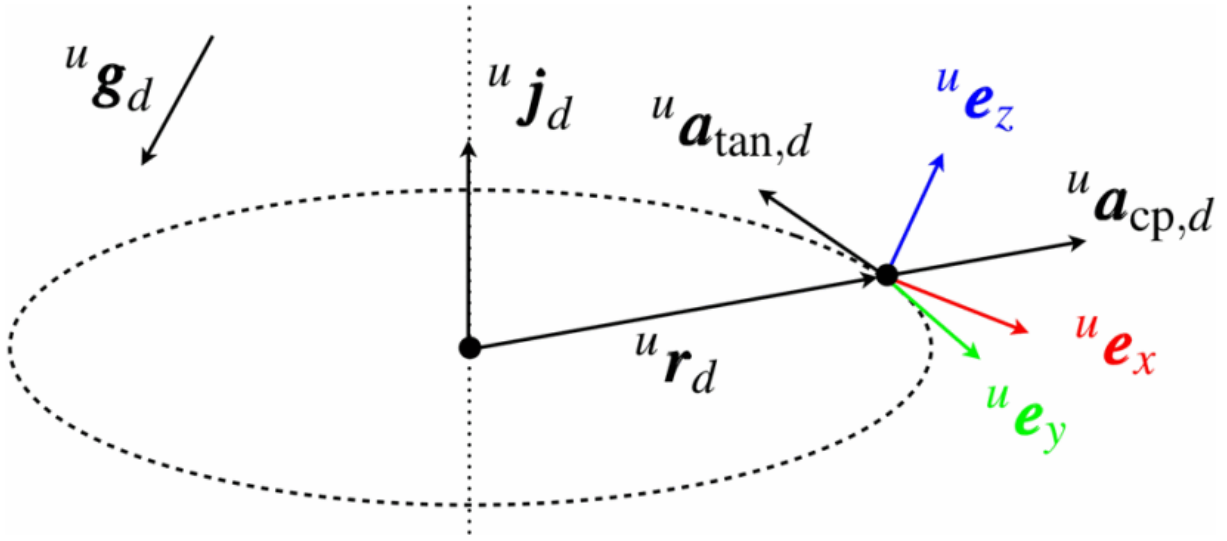


Figura 4.7: La figura illustra i vettori della circonferenza (${}^u j_d, {}^u r_d$) assieme alle componenti dell'accelerazione (${}^u g_d, {}^u a_{tan,d}, {}^u a_{cp,d}$) a cui è soggetto un accelerometro (u) durante il moto attorno all'asse di un'articolazione rotante (d). | Fig. da [7]

Nella spiegazione a seguire viene illustrato come estrarre i vettori della circonferenza (${}^u j_d, {}^u r_d$) per ogni articolazione (d), a partire dalle misurazioni (${}^u a_d[n]$) di un accelerometro (u), appartenente ai moduli della pelle multimodale, durante movimenti di prova quasi-statici e dinamici attuati sull'asse di ogni articolazione (d), un'articolazione alla volta ed in sequenza.

Nonostante l'accelerometro (u) possa essere scelto da uno qualsiasi dei moduli tattili distribuiti sui segmenti del robot, si sottintende da qui in poi che l'accelerometro scelto appartenga ad un modulo multimodale piazzato sul segmento d'estremità dell'arto robotico d'interesse, dato che tale scelta permette in seguito la stima dell'intera catena cinematica.

Durante il movimento rotatorio (vedi Fig. 4.7) attorno all'asse di un'articolazione (${}^u j_d$) l'accelerometro è soggetto alla somma di tre accelerazioni:

$${}^u a_d[n] = {}^u a_{tan,d}[n] + {}^u a_{cp,d}[n] + {}^u g_d[n] \quad (4.20)$$

Tutte le componenti dipendono da una delle variabili dell'articolazione ($\varphi_d, \omega_d = \dot{\varphi}_d, \alpha_d = \dot{\omega}_d$) e dai vettori della circonferenza (${}^u j_d, {}^u r_d$):

$${}^u g_d[n] = Rot({}^u j_d, \varphi_d[n] - \varphi_d[0]) \cdot {}^u g_d[0] \quad (4.21)$$

$${}^u a_{tan,d}[n] = \alpha_d[n] \cdot \|{}^u r_d\| \cdot \left({}^u j_d \times \frac{{}^u r_d}{\|{}^u r_d\|} \right) \quad (4.22)$$

$${}^u a_{cp,d}[n] = \omega_d[n]^2 \cdot \|{}^u r_d\| \cdot \left({}^u j_d \times \left({}^u j_d \times \frac{{}^u r_d}{\|{}^u r_d\|} \right) \right) \quad (4.23)$$

Le scelte progettuali compiute nell'approccio qui illustrato si basano su tre proprietà:

- 1) le due componenti dinamiche, ovvero l'accelerazione tangenziale (${}^u a_{tan,d}[n]$) e centripeta (${}^u a_{cp,d}[n]$), sono ortogonali fra di loro;
- 2) le direzioni delle componenti dinamiche appena citate sono stazionarie nel sistema di coordinate dell'accelerometro (u);
- 3) ogni componente dipende da un'altra variabile dell'articolazione.

Queste proprietà permettono infatti di progettare specifici modelli di movimento ed algoritmi, mirati entrambi alla stima dei diversi vettori della circonferenza.

Movimenti esplorativi

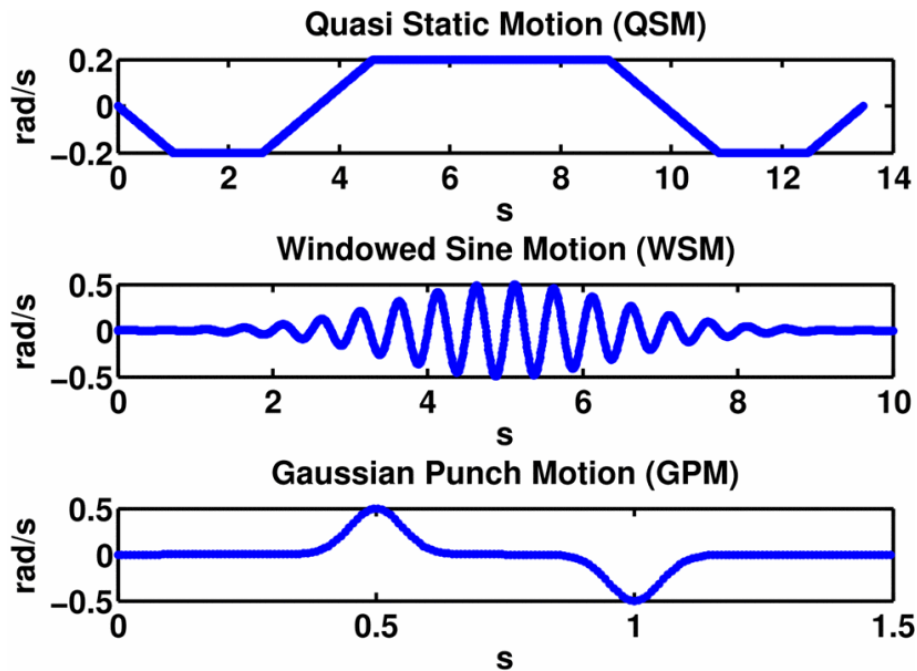


Figura 4.8: La figura mostra i tre movimenti di prova ed i rispettivi acronimi. | Fig. da [7]

Viene eseguito un insieme di movimenti statici e dinamici sull'asse di ogni articolazione (d), un'articolazione alla volta ed in sequenza:

- 1) Il **Movimento Quasi-Statico (QSM)** è una funzione della velocità angolare nel tempo, costituita da tre gradini trapezoidali (vedi Fig. 4.8). L'articolazione si muove in entrambe le direzioni e si ferma infine alla posizione iniziale ($\varphi_d[0]$). Il QSM è progettato per generare rapidamente misurazioni del vettore di gravità, minimizzando al contempo altre influenze derivanti dal movimento stesso.

Vengono usati i seguenti parametri euristici: $\max(|\omega_d|) = 0.2 \frac{rad}{s}$, $|\Delta\varphi_d| \leq 0.53rad$ e $T_{ramp} = 1s$.

- 2) Il **Movimento Sinusoidale Finestrato (WSM)** è una funzione sinusoidale di controllo della velocità angolare nel tempo, a cui viene applicata una funzione di finestrata Gaussiana (vedi Fig. 4.8):

$$\omega_{d,WSM}(t) = e^{-\frac{(t-T_m)^2}{2T_\sigma^2}} (A \cdot \sin(2\pi ft)) \quad (4.24)$$

Il WSM è progettato per generare alte accelerazioni angolari dell'articolazione, minimizzando nel frattempo i cambi di posizione, la velocità e lo strappo (derivata dell'accelerazione) dell'articolazione stessa. Ciò è necessario per stimare la direzione del vettore d'accelerazione tangenziale.

Vengono usati i seguenti valori euristici: $A = 0.5 \frac{rad}{s}$, $f = 2Hz$, $T_m = 2.5s$, $T_\sigma = 0.7s$.

- 3) Il **Movimento Impulsivo Gaussiano (GPM)** è una funzione della velocità angolare nel tempo che combina due pulsazioni Gaussiane, una positiva ed una negativa (vedi Fig. 4.8):

$$\omega_{d,GPM}(t) = A \cdot \left(e^{-\frac{(t-T_m)^2}{2T_\sigma^2}} - e^{-\frac{(t-2T_m)^2}{2T_\sigma^2}} \right) \quad (4.25)$$

Il GPM genera una polarità tracciabile nelle accelerazioni dell'articolazione, mentre minimizza i cambi di posizione, la velocità e lo strappo dell'articolazione. Tale polarità risulta necessaria per correggere il segno del vettore d'accelerazione tangenziale.

Vengono usati i seguenti valori euristici: $A = 0.5 \frac{rad}{s}$, $T_m = 0.5s$, $T_\sigma = 0.5s$.

Stima del vettore d'asse unitario dell'articolazione

Algoritmo 4.3 Stima del vettore d'asse unitario dell'articolazione

- 1: **for** $d = 1$ fino a D **do**
 - 2: Campionamento dei valori ${}^u a_d[n]$, $\varphi_d[n]$ durante il QSM sull'articolazione (d)
 - 3: Risoluzione di ${}^u j_d = \min_{{}^u j_d} ({}^u e_d)$
 - 4: **end for**
-

Il vettore d'asse unitario dell'articolazione (${}^u j_d$, $\|{}^u j_d\| = 1$) può essere stimato (vedi Alg. 4.3) nelle coordinate dell'accelerometro (u) a partire dai campioni del vettore di gravità registrati durante un QSM (vedi Fig. 4.9). Il problema della stima viene qui risolto minimizzando una funzione d'errore composta da tre componenti, avvicinandosi al valore sconosciuto dell'asse per l'articolazione:

$${}^u j_d = \arg \min_{{}^u j_d} \left(\sum_{i=1}^3 (W_i \cdot {}^u e_{d,i}) \right) \quad (4.26)$$

La prima componente dell'errore è un vincolo integrato ad alta priorità e impone la lunghezza unitaria dell'asse:

$${}^u e_{d,1} = (\|{}^u j_d\| - 1)^2 \quad (4.27)$$

La seconda componente a media priorità (con $W_2 = 10$) dell'errore minimizza la varianza del prodotto scalare tra vettori per tutti (N) i campioni:

$${}^u e_{d,2} = \sum_{n=1}^N \left({}^u g_d[n]^T \cdot {}^u j_d - \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N {}^u g_d[n]^T \cdot {}^u j_d \right)^2 \quad (4.28)$$

Il terzo errore è un vincolo più lieve (con $W_3 = 1$), ed è definito come la lunghezza della differenza tra i campioni di gravità misurati ed i vettori predetti da una rotazione angolare attorno all'asse (R(asse,angolo)) partendo dal vettore di gravità (${}^u g_d[0]$) e dalla posizione ($\varphi_d[0]$) iniziali, il tutto al quadrato:

$${}^u e_{d,3} = \sum_{n=1}^N \|R({}^u j_d, \varphi_d[n] - \varphi_d[0]) {}^u g_d[0] - {}^u g_d[n]\|^2 \quad (4.29)$$

Quest'ultima componente serve come termine di stabilizzazione attorno ai casi singolari (ovvero i casi critici, come ad esempio il caso in cui l'asse dell'articolazione risulta collineare alla gravità), offrendo comunque la corretta polarizzazione dell'asse nei casi non singolari.

Il problema di minimizzazione viene risolto con un minimizzatore locale privo di derivata (della GNU Scientific Library, Nelder and Mead Simplex, nmsimplex2rand) e multipli punti di partenza collocati sulla sfera unitaria (ad es. $\pm e_x, \pm e_y, \pm e_z$).

Vengono usati i seguenti parametri euristici: una dimensione del passo iniziale di 0.01 ed una dimensione di terminazione di $1e-9$ oppure 2000 iterazioni. I campioni di gravità vengono normalizzati e passati attraverso un filtro Gaussiano (dimensione o size=11, sigma=2.83) prima di essere utilizzati.

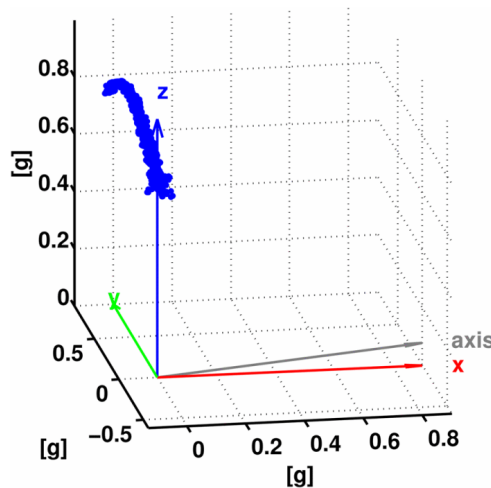


Figura 4.9: La figura mostra i campioni di gravità per la stima dell'asse della seconda articolazione del braccio UR-5, insieme all'asse (axis) dell'articolazione già stimato. | Fig. da [7]

Stima del vettore tangente unitario

Algoritmo 4.4 Stima del vettore tangente unitario

- 1: **for** $d = 1$ fino a D **do**
 - 2: Campionamento dei valori ${}^u a_d[n], \varphi_d[n]$ durante il WSM sull'articolazione (d)
 - 3: Sottrazione della gravità dai campioni $\Rightarrow {}^u a_{dyn,d}[n]$
 - 4: Sottrazione delle accelerazioni lungo l'asse dell'articolazione $\Rightarrow {}^u \hat{a}_{dyn,d}[n]$
 - 5: Assemblaggio della matrice di campioni ${}^u A_d$
 - 6: SVD della matrice di campioni $\Rightarrow [{}^u U_d, {}^u S_d, {}^u V_d]$
 - 7: Estrazione dell'autovettore più grande $\Rightarrow {}^u n_d$
 - 8: Correzione del segno del vettore tangente unitario tramite il GPM $\Rightarrow {}^u \hat{n}_d$
 - 9: **end for**
-

La direzione del vettore tangente unitario (${}^u n_d, \|{}^u n_d\| = 1$) può essere stimata (vedi Alg. 4.4) nelle coordinate dell'accelerometro (u) a partire dai campioni dell'accelerazione dinamica registrati durante il WSM, mentre la sua polarità (il suo verso) può essere corretta dai campioni registrati durante il GPM (vedi Fig. 4.10).

Per conservare le componenti dinamiche dell'accelerazione (${}^u a_{dyn,d}[n]$), bisogna innanzitutto sottrarre la gravità (vedi l'Equazione (4.21)) dai dati grezzi:

$${}^u a_{dyn,d}[n] = {}^u a_d[n] - {}^u g_d[n] \quad (4.30)$$

Si prosegue sottraendo i movimenti non correlati lungo l'asse dell'articolazione:

$${}^u \hat{a}_{dyn,d}[n] = {}^u a_{dyn,d}[n] - \left(({}^u j_d)^T \cdot {}^u a_{dyn,d}[n] \right) {}^u j_d \quad (4.31)$$

Viene inoltre sottratto il valore medio rimanente per impedire che una sottrazione della gravità incompleta interferisca con la successiva decomposizione ai valori singolari:

$${}^u \tilde{a}_{dyn,d}[n] = {}^u \hat{a}_{dyn,d}[n] - \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N {}^u \hat{a}_{dyn,d}[n] \quad (4.32)$$

Si assembla quindi un matrice (${}^u A_d$) da tutti i campioni:

$${}^u A_d = [{}^u \tilde{a}_{dyn,d}[1], \dots, {}^u \tilde{a}_{dyn,d}[N]]^T \quad (4.33)$$

Viene poi attuata una decomposizione ai valori singolari (svd) su tale matrice:

$$[{}^u U_d, {}^u S_d, {}^u V_d] = \text{svd}({}^u A_d) \quad (4.34)$$

Per una funzione sinusoidale di controllo della velocità angolare, la relazione tra l'ampiezza massima dell'accelerazione tangenziale e quella dell'accelerazione centripeta è data dai parametri (f ed A):

$$\frac{\max({}^u a_{tan,d})}{\max({}^u a_{cp,d})} = \frac{\max(\alpha_d)}{\max((\omega_d)^2)} = \frac{2\pi f}{A} \quad (4.35)$$

Data l'ortogonalità tra l'accelerazione tangenziale e quella centripeta, tenendo conto della dominanza per i parametri sinusoidali scelti ($f = 2Hz$, $A = 0.5 \frac{rad}{s}$), il vettore tangente unitario è il primo/più grande autovettore della SVD:

$${}^u n_d = [V_{11} V_{21} V_{31}]^T \quad (4.36)$$

Data la simmetria assiale (simmetria pari sull'asse verticale) della funzione di finestra Gaussiana, la polarità (o verso) del vettore tangente unitario non può essere estratta dal WSM. Proprio per questa ragione è stato sviluppato il GPM, che ha invece una simmetria puntuale (simmetria dispari rispetto al centro della funzione).

Vengono nuovamente sottratti i vettori di gravità dai dati grezzi dell'accelerometro registrati durante il GPM. Si calcola quindi l'ampiezza tangenziale moltiplicando i campioni d'accelerazione dinamica con il vettore tangente precedentemente estratto:

$${}^u a_{tan,d}[n] = ({}^u n_d)^T \cdot {}^u a_{dyn,d}[n] \quad (4.37)$$

L'ampiezza tangenziale (${}^u a_{tan,d}[n]$) viene poi correlata con l'accelerazione angolare dell'articolazione ($\alpha_d[n]$) per determinarne la fase:

$${}^u C_d[m] = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} (({}^u a_{tan,d}[n])^* \cdot \alpha_d[n + m]) \quad (4.38)$$

Se il vettore risulta in fase opposta, ne si corregge la polarità (${}^u \hat{n}_d$):

$${}^u \hat{n}_d = \text{copysign}(1, |\max({}^u C_d)| - |\min({}^u C_d)|) \cdot {}^u n_d \quad (4.39)$$

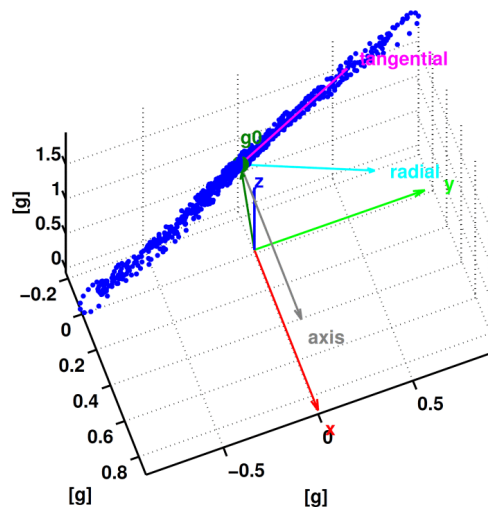


Figura 4.10: La figura mostra un esempio reale dei dati grezzi filtrati utilizzati per la stima del vettore tangente unitario della seconda articolazione del braccio robotico UR-5, insieme alla tangente (tangential) già stimata, al vettore unitario dell'asse (axis), a quello radiale (radial) ed alla gravità (g0). | Fig. da [7]

Algoritmo 4.5 Stima della distanza radiale

- 1: **for** $d = 1$ fino a D **do**
 - 2: Campionamento dei valori ${}^u a_d[n]$, $\varphi_d[n]$, $\alpha_d[n]$ durante il WSM sull'articolazione (d)
 - 3: Sottrazione della gravità dai campioni $\Rightarrow {}^u a_{dyn,d}[n]$
 - 4: Calcolo dell'ampiezza tangenziale $\Rightarrow {}^u a_{tan,d}[n]$
 - 5: Compensazione dei ritardi reciproci tra $\alpha_d[n]$ ed ${}^u a_{tan,d}[n]$
 - 6: Utilizzo del modello lineare dei minimi quadrati $\Rightarrow {}^u d_d$
 - 7: **end for**
-

Stima della distanza radiale e calcolo del vettore radiale

La distanza radiale (${}^u d_d$) può essere stimata (vedi Alg. 4.5) a partire dalla relazione lineare:

$${}^u a_{tan,d}[n] = \alpha_d[n] \cdot {}^u d_d \quad (4.40)$$

Per farlo, viene qui utilizzata una ricostruzione lineare basata sul metodo dei minimi quadrati, applicata sull'insieme dei dati registrati durante il WSM:

$${}^u d_d = \arg \min_{{}^u d_d} \sum_{n=1}^N ({}^u a_{tan,d}[n] - ({}^u d_d \cdot \alpha_d[n]))^2 \quad (4.41)$$

È importante che i campioni del sensore nell'Equazione (4.40), ma anche nell'Equazione (4.30), abbiano tutti la stessa frequenza di campionamento e che non esibiscano ritardi reciproci. Ai segnali con frequenze di campionamento diverse possono essere aggiunti o tolti campioni per raggiungere una frequenza comune. I ritardi vengono invece introdotti ad esempio dai filtri per segnali (per l'aggiunta di campioni, la riduzione del rumore, la derivazione), dall'utilizzo di un sistema operativo non in tempo reale o da semplici ritardi nella comunicazione. I ritardi (${}^u \Delta_d$) individuati vengono compensati con una correlazione degli insiemi di campioni non allineati:

$${}^u \Delta_d = \arg \max_{{}^u \Delta_d} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} (({}^u a_{tan,d}[n])^* \cdot \alpha_d[n + {}^u \Delta_d]) \quad (4.42)$$

Si può infine calcolare il vettore radiale (${}^u r_d$), che punta all'origine dell'accelerometro partendo dal punto lungo l'asse dell'articolazione (${}^u j_d$) più vicino all'accelerometro stesso:

$${}^u r_d = {}^u d_d \cdot ({}^u \hat{n}_d \times {}^u j_d) \quad (4.43)$$

Vincoli

L'algoritmo per la CPA (analisi puntuale della circonferenza) appena illustrato ha due importanti vincoli: gli assi delle articolazioni non possono essere allineati con la verticale (la gravità) per poter essere in grado di distinguere la loro polarità, ed è richiesta una minima distanza radiale per stimare il vettore tangente.

Il primo vincolo riguarda solo il primo asse, dato che gli assi delle articolazioni successive possono essere messi automaticamente in pose diverse da quella critica. Per quanto riguarda il primo asse, o risulta possibile cambiare manualmente l'orientamento del riferimento di base, oppure un metodo aggiuntivo (come l'osservazione visiva) deve assistere nella decisione binaria. Se viene individuata una distanza radiale troppo piccola, si può scegliere un'altra cellula della pelle artificiale che si trova sul segmento d'estremità interessato.

4.2.5 Estrazione del modello cinematico

In questa sottosezione viene illustrato come estrarre un modello cinematico dai vettori della circonferenza stimati in precedenza combinati ad una sequenza nota di articolazioni, dove tale sequenza termina con un segmento d'estremità dotato di un accelerometro (u). A tale fine, si applica qui un algoritmo innovativo che risulta semplice e robusto, progettato per gestire intrinsecamente la trasformazione verso il sistema libero delle coordinate dell'accelerometro.

Questo algoritmo è stato ideato per ovviare alla complessità algoritmica di altri due metodi esistenti⁶ per l'estrazione dei parametri minimali di Denavit-Hartenberg (DH) da una CPA.

Trasformazioni accelerometro-articolazione

In un primo passo viene calcolata la trasformazione omogenea (${}^d T_u$), dal sistema di coordinate dell'accelerometro (u) ad ogni nuovo sistema di coordinate dell'articolazione (d) che viene definito, per tutte le articolazioni (D).

Per definire tale sistema di coordinate dell'articolazione (d), si allinea l'asse dell'articolazione (${}^u j_d$) con l'asse z (e_z), in modo simile alle coordinate DH. Inoltre, si allinea l'asse x con il vettore radiale (${}^u r_d$), in modo tale che l'origine delle coordinate si trovi all'intersezione tra gli assi appena imposti.

⁶B. Mooring, M. Driels, e Z. Roth, "Fundamentals of Manipulator Calibration", John Wiley and Sons Inc., Aprile 1991

La matrice di rotazione (dR_u) tra entrambi (u e d) i sistemi di coordinate può essere calcolata tramite un algoritmo di Procuste⁷. I due insiemi di vettori (N ed M_d) che devono venire mappati in tale algoritmo sono gli assi corrispondenti nei sistemi di coordinate (rispettivamente u e d):

$$N = [e_x, e_z] \quad M_d = \left[\frac{u_{r_d}}{\|u_{r_d}\|}, u_{j_d} \right] \quad (4.44a)$$

L'algoritmo di Procuste risolve tale mappa con una SVD:

$$[U_d \Sigma_d V_d] = \text{svd} (N M_d^T) \quad (4.44b)$$

$${}^dR_u = U_d \hat{\Sigma}_d V_d^T \quad (4.44c)$$

$$\hat{\Sigma}_d = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \det(U_d V_d^T) \end{pmatrix} \quad (4.44d)$$

La matrice di trasformazione omogenea può quindi essere definita come:

$${}^dT_u = \begin{pmatrix} {}^dR_u & {}^dR_u u_{r_d} \\ \underline{0}^T & 1 \end{pmatrix} \quad (4.45)$$

Trasformazioni articolazione-articolazione

Per calcolare le trasformazioni da articolazione ad articolazione nella posa iniziale, sono richieste ulteriori informazioni riguardanti la sequenza di articolazioni e segmenti che è possibile ottenere dall'algoritmo d'esplorazione strutturale Alg. 4.1 contenuto nella Sezione 4.1.

Tale algoritmo presenta alcuni vincoli, come la necessità di almeno un accelerometro per segmento dell'arto da esplorare, per distinguere se diversi DoF (gradi di libertà) sono in realtà parte della stessa articolazione, e quali accelerometri appartengano allo stesso segmento.

Nel caso di accelerometri distribuiti come indicato, la CPA qui descritta può utilizzare comunque anche solo un accelerometro d'estremità, ma il vincolo per l'esplorazione viene rispettato. Per ovviare a tale vincolo ed utilizzare quindi un singolo accelerometro (u) posizionato sul segmento d'estremità sia per l'algoritmo d'esplorazione strutturale che per quello di CPA, possiamo qui fornire informazioni aggiuntive ed inferire quindi articolazioni con singoli DoF, ed ID delle articolazioni linearmente crescenti dalla base al sistema di riferimento dell'accelerometro.

La trasformazione tra due articolazioni consecutive (${}^dT_{d+1}$) può quindi essere calcolata a partire dalle trasformazioni accelerometro-articolazione come:

$${}^dT_{d+1} = {}^dT_u \cdot {}^{d+1}T_u^{-1} \quad (4.46)$$

⁷P.H.Schonemann, "A generalized solution of the orthogonal Procrustes problem", Psychometrika 31, pp. 1-10, 1966

Modello della catena cinematica completa

Si assembla quindi il modello cinematico diretto⁸ dal sistema di riferimento della base fino a quello dell'accelerometro piazzato sul segmento d'estremità, tenendo conto della posizione angolare di ogni articolazione (φ_d) data dalla posa corrente.

La trasformazione (${}^d T_{d'}(\varphi_d)$), che permette di includere la posizione angolare corrente di ogni articolazione rotante, può essere modellata con una rotazione (R(asse,angolo)) attorno all'asse z:

$${}^d T_{d'}(\varphi_d) = \begin{pmatrix} R(e_z, \varphi_d[n] - \varphi_d[0]) & \underline{0} \\ \underline{0}^T & 1 \end{pmatrix} \quad (4.47)$$

La catena cinematica (${}^B T_u(\varphi)$) può essere infine calcolata come una concatenazione delle trasformazioni omogenee ora note:

$${}^B T_u(\varphi) = {}^B T_1 \cdot \prod_{d=1}^{D-1} ({}^d T_{d'}(\varphi_d) \cdot {}^d T_{d+1}) \cdot {}^D T_{D'} \cdot {}^D T_u \quad (4.48)$$

Per ultimare tale concatenazione, la trasformazione (${}^B T_1$) dal sistema di riferimento della prima articolazione a quello di base può essere scelta liberamente (ad es. ${}^B T_1 = \underline{I}_4$).

4.2.6 Integrazione con le ricostruzioni in 3D

Le catene cinematiche per singoli arti robotici che si ottengono tramite il processo di modellazione indicato nella Sottosezione 4.2.5, possono essere fuse in un'unica rappresentazione omogenea di un corpo rigido tramite l'algoritmo di ricostruzione 3D illustrato nella Sezione 3.2.

Tale algoritmo utilizza gli accelerometri ed i LED montati su ogni cellula dei pezzi di pelle artificiale per ottenere una ricostruzione tridimensionale totale della pelle stessa, relativa ad un riferimento fisso del corpo rigido scelto nell'ambiente. I LED di ogni pezzo di pelle, ricostruito tramite gli accelerometri, funzionano infatti come marcatori visivi per il rilevamento ottico della posizione/rotazione del pezzo stesso rispetto al sistema di riferimento del corpo rigido scelto.

È quindi possibile fondere in modo efficiente diverse catene cinematiche, utilizzando i pezzi di pelle sui segmenti d'estremità degli arti robotici modellati come marcatori visivi. Una volta note e fissate le posizioni/rotazioni relative dei pezzi di pelle (nonché delle cellule) che contengono gli accelerometri usati per le modellazioni cinematiche, si ripercorrono in modo inverso le catene modellate partendo dagli accelerometri stessi, per arrivare a determinare le trasformazioni ottimali che permettono di collegare i diversi arti alla stessa base di riferimento.

⁸La cinematica diretta usa i parametri già noti delle articolazioni per calcolare/prevedere la posizione dell'estremità del modello cinematico, al contrario della cinematica inversa che calcola i parametri necessari al raggiungimento di una posizione dell'estremità del modello cinematico nota/desiderata.

Il sistema di riferimento del corpo rigido viene in pratica utilizzato per fissare nello spazio tridimensionale le estremità degli arti robotici modellati al fine di far convergere le catene cinematiche ad una stessa base robotica in modo sensato, imponendo così valori precisi alle trasformazioni omogenee (${}^B T_1$) tra i sistemi di riferimento delle prime articolazioni al sistema della base (prima valorizzate liberamente).

Inoltre, come menzionato alla fine della Sezione II-D in [1], le ricostruzioni 3D dei singoli pezzi di pelle possono essere utilizzate per determinare in modo efficiente le trasformazioni omogenee di ogni singola cellula della pelle rispetto alle articolazioni ed alla base del robot.

Invece che eseguire la CPA e la modellazione cinematica qui illustrate per ogni cellula che si trova sugli arti interessati, basta farlo solamente per le cellule d'origine dei pezzi di pelle montati su tali arti. Dato che le ricostruzioni della pelle offrono le trasformazioni (${}^{o_s} T_u$) tra ogni cellula (u) di un pezzo di pelle (s) e la cellula d'origine (o_s) dello stesso, diviene immediato allungare le catene cinematiche dalle cellule d'origine (nelle quali terminavano le modellazioni) fino a tutte le altre cellule dei pezzi di pelle sparsi sul robot:

$${}^B T_u(\varphi) = {}^B T_{o_s}(\varphi) \cdot {}^{o_s} T_u \quad (4.49)$$

Si possono così ottenere delle nuove trasformazioni omogenee (${}^B T_u(\varphi)$) che localizzano ogni cellula (u) rispetto alla base (B) dell'arto robotico su cui si trova la cellula, con l'arto in una determinata posa (φ). Inoltre, bloccando il calcolo delle nuove catene cinematiche ad una qualsiasi articolazione (d) prima della base (B) si ottengono le trasformazioni omogenee (${}^d T_u(\varphi)$) che localizzano ogni cellula (u) rispetto ad un'articolazione (d), per la posa (φ):

$${}^d T_u(\varphi) = {}^d T_{o_s}(\varphi) \cdot {}^{o_s} T_u \quad (4.50)$$

Infine, nel caso l'articolazione scelta (d) sia quella che controlla direttamente il segmento su cui si trova la cellula d'interesse (u), la posa dell'articolazione (φ_d) diventa allora irrilevante, e la trasformazione omogenea (${}^d T_u$) viene riscritta di conseguenza.

Le nuove trasformazioni omogenee appena ottenute (che completano totalmente la localizzazione e ricostruzione 3D delle cellule discussa nel Capitolo 3) ed i parametri DH estraibili dalle modellazioni cinematiche eseguite nel capitolo corrente risultano fondamentali per le tecniche di controllo del robot basate sulla pelle multimodale descritte nella Sezione IV dell'articolo [1].

4.2.7 Risultati Sperimentali

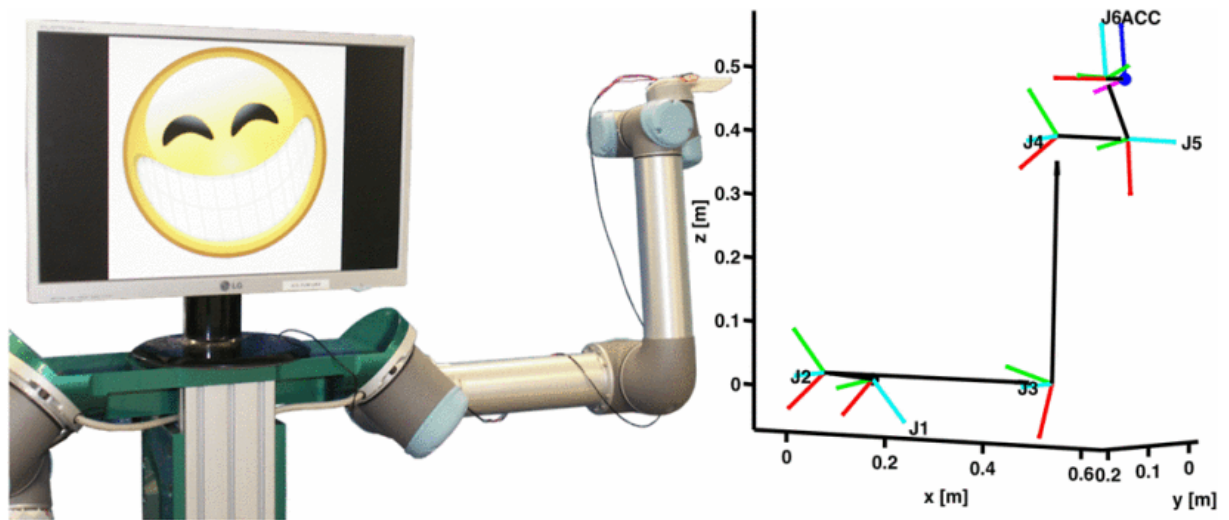


Figura 4.11: Risultati del nuovo metodo, che ha acquisito con successo il modello cinematico del braccio sinistro del TOM (Tactile Omni-directional Manipulator) tramite un singolo accelerometro montato sull'estremità dell'arto. | Fig. da [7]

L'approccio appena illustrato è stato valutato tramite l'applicazione su di un braccio robotico UR-5 (Universal Robots) a 6 assi, montato su di un robot appositamente costruito detto TOM (vedi Fig. 4.11). La frequenza di campionamento dell'accelerometro utilizzata è di $250Hz$, la frequenza di controllo del robot è di $62.5Hz$ (interpolata a $125Hz$ nel robot), e la frequenza di campionamento del robot è di $125Hz$. Tutti i segnali sono stati convertiti ad una frequenza di campionamento comune di $250Hz$ e passati attraverso dei filtri Gaussiani (size=11, sigma=2.83).

Sono stati utilizzati per la stima dei vettori approssimativamente 3500 punti di campionamento durante ogni QSM e 2500 durante ogni WSM. Per la decisione binaria ad ogni GPM sono stati invece utilizzati meno di 400 campioni. Una stima completa per tutte le articolazioni ($D = 6$) è durata approssimativamente $180s$.

Confronto tra CPA stimata e realtà di base

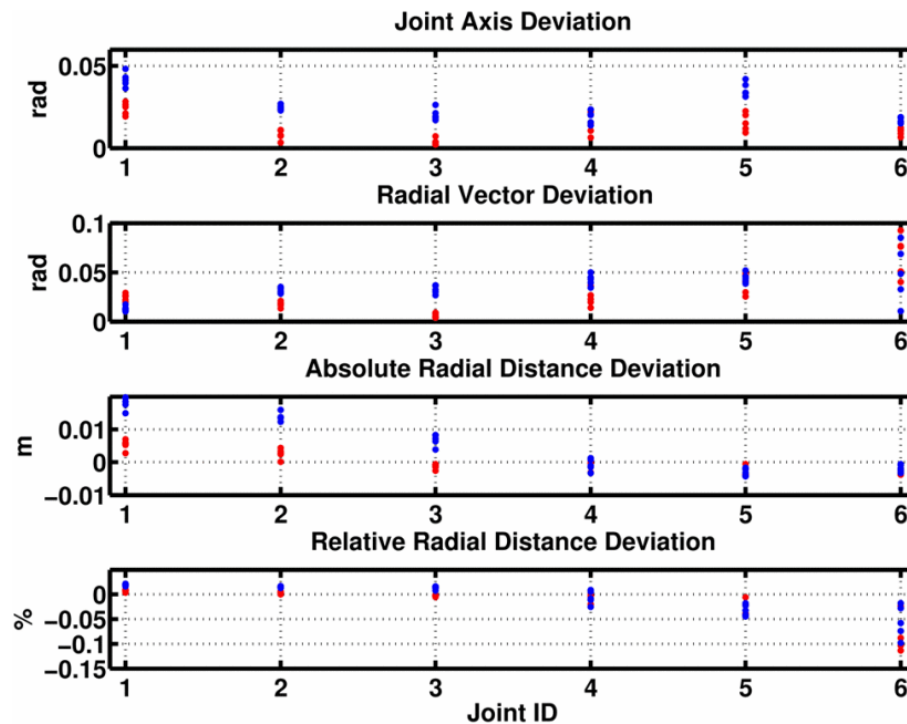


Figura 4.12: La figura mostra la deviazione dei vettori della CPA rispetto ai vettori CPA estratti da un modello cinematico ideale, in 2 pose iniziali del robot (rosso, blu) con 5 prove per posa. | Fig. da [7] Termini in figura dall'alto: *Deviazione dell'Asse dell'Articolazione*, *Deviazione del Vettore Radiale*, *Deviazione Assoluta della Distanza Radiale*, *Deviazione Relativa della Distanza Radiale*, *ID Articolazione*

In questo esperimento sono stati confrontati i vettori della circonferenza (${}^u j_d, {}^u r_d$) stimati dall'algoritmo di CPA con i vettori della realtà di base estratti da un modello cinematico ideale, calcolato a partire dai parametri DH del robot ed una posizione nota dell'accelerometro.

I risultati in Fig. 4.12, ottenuti in 10 prove per due diverse pose del robot, mostrano una deviazione angolare di $\leq 0.05rad$ per gli assi delle articolazioni ed una di $\leq 0.09rad$ per i vettori radiali, con uno scostamento radiale di $\leq 0.02m$ oppure $\leq 11\%$.

La precisione dell'allineamento per i vettori radiali decresce con il diminuire della distanza, mentre la stima degli assi delle articolazioni non dipende dalla posizione. La deviazione della distanza radiale cresce in modo assoluto e diminuisce in modo relativo con l'aumentare della distanza di stima. Specialmente con distanze radiali piccole, il rumore del moto (strappi, vibrazioni) e dei sensori rende l'estrazione dei piccoli effetti tangenti difficoltosa. Con grandi distanze radiali, e quindi una grande massa in moto, diventano invece difficoltosi i movimenti di base. L'insieme di parametri euristici qui utilizzati per definire il QSM, WSM e GPM risulta un buon compromesso.

Confronto tra modello cinematico stimato e realtà di base

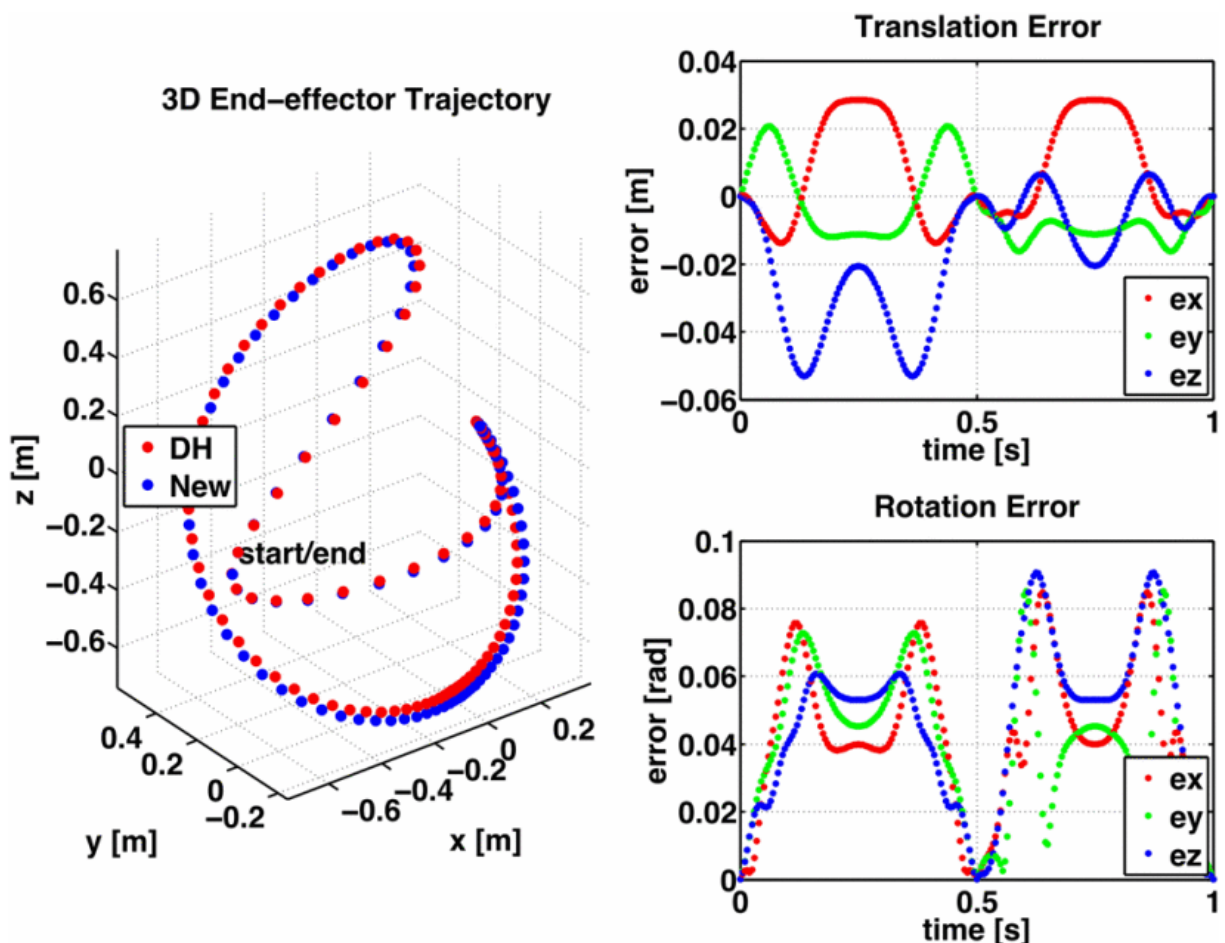


Figura 4.13: La figura mostra la discrepanza di un modello cinematico estratto con il nuovo metodo (New), confrontato ad un modello cinematico ideale (DH) calcolato con i parametri DH del robot ed un piazzamento noto dell'accelerometro. | Fig. da [7]

Titoli dei grafici in senso antiorario da sinistra: *Traiettoria 3D del Segmento d'Estremità*, *Errore di Rotazione*, *Errore di Traslazione*

In questo esperimento è stato confrontato l'algoritmo di estrazione cinematica qui presentato con un modello cinematico ideale, calcolato a partire dai parametri DH del robot ed una posizione nota dell'accelerometro nel modello.

Per farlo, è stato preso uno degli insiemi di vettori CPA precedentemente stimati (vedi l'esperimento precedente). Dato il libero piazzamento del sistema di riferimento di base, si sono dovuti registrare (${}^{B_{new}}T_{B_{dh}}$) entrambi i modelli cinematici nella posa iniziale. Si è quindi confrontata la trasformazione globale fino all'estremità (${}^B T_u(\varphi)$) di entrambi i modelli, eseguendo simultaneamente un ampio movimento sinusoidale ($f = 1\text{Hz}$, $\Delta\varphi_d = \pm\pi$) su tutti ($D = 6$) gli assi delle articolazioni.

I risultati in Fig. 4.13 mostrano un errore di traslazione di $\leq 0.05\text{m}$ ed uno scostamento rotazionale di $\leq 0.09\text{rad}$ per l'approccio minimale (un solo accelerometro sul segmento d'estremità) utilizzato per la stima del modello cinematico.

Capitolo 5

Montaggio della pelle

Un aspetto fondamentale e non scontato nella progettazione di una pelle artificiale intesa per l'uso con bracci robotici, robot umanoidi e simili è appunto il sistema di montaggio che permette alla pelle di essere montata in modo sicuro e funzionale sui robot stessi.

Quanto segue è la soluzione a tale problema per la pelle descritta in questo elaborato e nell'articolo [1], da cui è riportata tale soluzione di montaggio (contenuta nella Sezione II-E).

5.1 Ancorare la pelle robotica ai robot

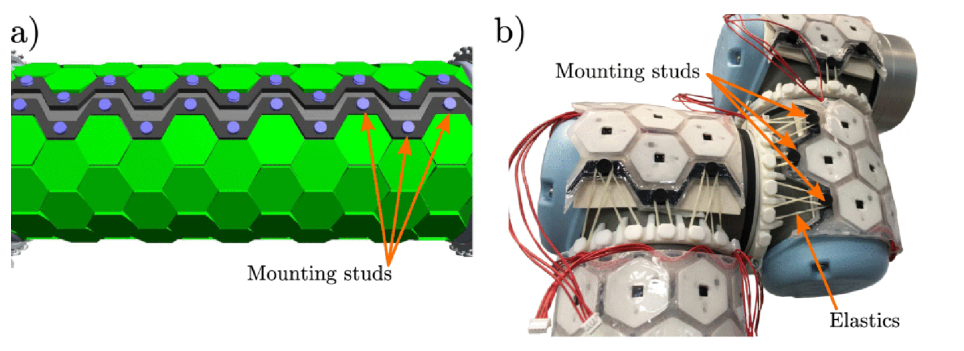


Figura 5.1: Meccanismo d'aggancio per la pelle artificiale. Le borchie di montaggio permettono il dispiegamento rapido dei pezzi di pelle sul robot. a) Progetto CAD. b) Sul robot reale. | Fig. da [1]
Termini in figura: *Borchie di montaggio, Elastici*

Montare un gran numero di cellule artificiali su di un robot è un compito difficile, dato che il sistema risultante dev'essere affidabile, semplice da utilizzare, facile da mantenere, e soprattutto deve interferire il meno possibile con i movimenti del robot. Questi vincoli sono stati considerati sin dall'inizio per la progettazione delle cellule illustrate nel Capitolo 1, e per illustrare come sono state affrontate alcune delle sfide chiave, vengono qui presentati i dettagli del montaggio della pelle nel caso del braccio robotico industriale UR5.

La prima considerazione per la progettazione è stata quella della facilità di montaggio e rimozione della pelle dal robot: il meccanismo d'aggancio dev'essere il più semplice e versatile possibile. Tenendo conto di tale nozione, si è deciso di utilizzare un sistema di borchie di montaggio (vedi Fig. 5.1a) connesse tra di loro da un insieme d'elastici (vedi Fig. 5.1b), permettendo quindi di regolare lo sforzo meccanico applicato ai pezzi di pelle in modo intuitivo.

Dato che le cellule della pelle sono costituite da elementi rigidi, non risulta facile ricoprire in modo affidabile superfici con piccoli raggi di curvatura. Inoltre, dato che le cellule robotiche sono incapsulate in un elastomero, piegare un pezzo di pelle per adattarlo ad una superficie curva tende a strato esterno dell'elastomero stesso, che genera di conseguenza pressioni parassite sui sensori di forza (discussi nella Sezione 1.2).

Tali problematiche sono state risolte inserendo uno strato di materiale soffice ed elastico tra la superficie interna della pelle artificiale e la superficie del robot, al fine di smussare spigoli troppo acuti, aumentare il raggio di curvatura, ed anche alleviare in parte lo sforzo meccanico applicato alla pelle quando la si piega.

5.2 Sistema di gestione del cablaggio

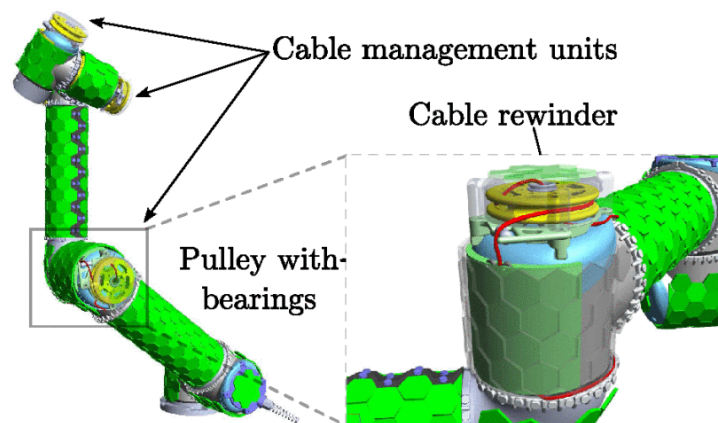


Figura 5.2: Sistema di gestione del cablaggio. | Fig. da [1]

Termini dall'alto: *Unità di gestione del cavo, Riavvolgitore del cavo, Puleggia con cuscinetti a sfera*

Uno dei problemi principali legati alla copertura di un robot con un gran numero di cellule artificiali è il cablaggio della rete di cellule.

Nonostante la comunicazione senza fili sia stata considerata, l'idea è stata presto abbandonata per problemi di banda, latenza, ed alimentazione.

In circostanze normali, i cavi dell'alimentazione e quelli che trasportano i segnali di controllo del robot passano attraverso un insieme di appositi centri di connessione nelle articolazioni. Ciò minimizza i disturbi meccanici e migliora quindi l'affidabilità dell'intero sistema. Purtroppo, in molti casi queste canaline per cavi non sono accessibili o semplicemente inadatte ad ospitare ulteriore cablaggio aggiuntivo.

L'unica alternativa rimanente è quindi quella di far passare i cavi fuori dal robot. Nonostante ciò sia una pratica comune nell'industria (specialmente per l'aggancio di dispositivi d'estremità a bracci robotici), diventa rapidamente un problema con l'aumentare del numero di dispositivi connessi oppure della complessità dei compiti assegnati al robot.

Inoltre, nel caso della pelle multimodale qui trattata, i cavi esterni non devono interferire con i sensori montati sulle cellule, particolarmente quelli di prossimità. I cavi devono quindi scorrere sotto la rete cellulare, incrementando considerevolmente il rischio di interazioni meccaniche parassite della pelle con il robot.

Nella pratica, tali problematiche sono state risolte utilizzando un sistema di riavvolgitori del cavo e pulegge. Il cavo circola attraverso un insieme di canaline, le cui estremità sono dotate di cardini montati su cuscinetti a sfera per minimizzare l'attrito. Un insieme di bobine per il cavo (tipicamente una per articolazione) mantiene il cavo sotto una tensione costante ma regolabile, assicurandosi così che non vi sia alcuna interazione indesiderata con i sensori di prossimità. L'intero sistema, adattato al robot UR, è mostrato nella Fig. 5.2.

Conclusione

La soluzione di Philipp Mittendorfer, Gordon Cheng *et al.* per la costruzione e configurazione di una pelle robotica multimodale è altamente efficace ed efficiente, riuscendo a dotare svariate configurazioni robotiche di multiple modalità sensoriali (e dei benefici che ne derivano) con un costo contenuto in termini di risorse, tempo e prezzi di realizzazione.

L'approccio scalabile alla progettazione elettronica delle singole cellule multimodali permette eventuali aggiunte di sensori ad hoc per aumentarne le modalità sensoriali, mentre la tecnica di realizzazione dei pezzi di pelle permette la prototipazione rapida su qualsiasi robot.

La ricostruzione 3D della pelle e la stima di modelli cinematici sono estremamente rapide e precise rispetto ad altri approcci che fanno uso di sensori esterni, e possono fornire al robot (al suo controllore) preziosi dati aggiuntivi oltre alle modalità sensoriali delle singole cellule.

La pelle eccelle nelle sperimentazioni qui descritte, e nella Sezione V dell'articolo riassuntivo [1] è possibile vederla utilizzata con successo in diverse applicazioni che ne evidenziano l'utilità e versatilità, mostrandone e facendone intuire l'enorme potenziale.

Bibliografia

- [1] Gordon Cheng, Emmanuel Dean-Leon, Florian Bergner, Julio Rogelio Guadarrama Olvera, Quentin Leboutet e Philipp Mittendorfer. «A Comprehensive Realization of Robot Skin: Sensors, Sensing, Control, and Applications». In: *Proceedings of the IEEE* 107.10 (ott. 2019), pp. 2034–2051.
- [2] Philipp Mittendorfer e Gordon Cheng. «Humanoid Multimodal Tactile-Sensing Modules». In: *IEEE Transaction on Robotics* 27.3 (giu. 2011), pp. 401–410.
- [3] Philipp Mittendorfer e Gordon Cheng. «Integrating Discrete Force Cells into Multi-Modal Artificial Skin». In: *12th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots* (nov. 2012), pp. 847–852.
- [4] Philipp Mittendorfer e Gordon Cheng. «3D Surface Reconstruction for Robotic Body Parts with Artificial Skin». In: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (ott. 2012), pp. 4505–4510.
- [5] Philipp Mittendorfer, Emmanuel Dean-Leon e Gordon Cheng. «3D Spatial Self-organization of a Modular Artificial Skin». In: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (set. 2014). Chicago, IL, USA, pp. 3969–3974.
- [6] Philipp Mittendorfer e Gordon Cheng. «Open-loop Self-calibration of Articulated Robots with Artificial Skins». In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation* (mag. 2012), pp. 4539–4545.
- [7] Philipp Mittendorfer e Gordon Cheng. «Automatic Robot Kinematic Modeling with a Modular Artificial Skin». In: *IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots* (nov. 2014). Madrid, Spain, pp. 749–754.