



UNIVERSITÀ DI PISA

Tesi di Laurea Specialistica in Ingegneria Informatica

6 Maggio 2010

REALIZZAZIONE DI ALGORITMI CON
CALIBRAZIONE IN TEMPO REALE PER IL
RICONOSCIMENTO DI POSTURE DELLA
MANO MEDIANTE TESSUTO
SENSORIZZATO

CANDIDATO

Clara Bacciu

RELATORI

Prof. Marco Avvenuti

Prof. Alessio Vecchio

Ing. Mario Tesconi

Dott. Andrea Marchetti

SOMMARIO

Il presente lavoro è stato svolto presso il centro di ricerca "E. Piaggio" dell'Università di Pisa, e consiste nella realizzazione e sperimentazione di algoritmi di calibrazione in tempo reale per un sistema indossabile, con lo specifico obiettivo di riconoscere un insieme discreto di posture della mano. In particolare, il sistema è stato sviluppato e testato con successo per un guanto sensorizzato creato proprio nei laboratori del Centro "E. Piaggio", fabbricato utilizzando una speciale tecnica brevettata di deposizione di materiale piezoresistivo su un substrato tessile.

Nelle applicazioni sviluppate precedentemente per il riconoscimento di posture con lo stesso tessuto, era necessaria una fase preliminare di calibrazione del sistema, durante la quale venivano registrati i dati dei sensori per ciascuna postura da riconoscere, da svolgersi quasi ad ogni utilizzo del sistema stesso.

Grazie agli algoritmi da noi sviluppati, questa fase può essere eliminata: all'utente viene richiesto solamente che all'accensione o al reset del sistema la mano venga tenuta aperta e rilassata. Questo risultato è stato ottenuto limitando il riconoscimento ad un insieme di posture nelle quali ogni singolo dito della mano è tenuto completamente piegato o completamente disteso.

Il lavoro ha dato risultati incoraggianti, come dimostrato dalle applicazioni realizzate per testare il sistema e per esplorare alcuni suoi possibili utilizzi, e ha contribuito a rendere il guanto del Centro Piaggio uno strumento più efficace per l'interazione gestuale con il computer.

INDICE

1	INTRODUZIONE	7
I STATO DELL'ARTE 9		
2	RICONOSCIMENTO DI POSTURE DELLA MANO E TESSUTI SENSORIZZATI	11
2.1	Riconoscimento di posture	11
2.2	Tessuti sensorizzati	15
3	IL GUANTO SENSORIZZATO DEL CENTRO PIAGGIO	19
3.1	Descrizione del sistema	20
3.2	Sistemi di riconoscimento sviluppati al centro Piaggio	23
II REALIZZAZIONE DEL SISTEMA 27		
4	CALIBRAZIONE IN TEMPO REALE	29
4.1	Analisi dei dati	29
4.2	Algoritmi di calibrazione	30
5	RICONOSCIMENTO DI POSTURE	39
5.1	Calcolo dello stato di ogni dito	39
5.2	Confronto con posture campione	40
5.3	Libreria Simulink	42
5.4	Test condotti	43
5.5	Dimostrativi	44
6	CONCLUSIONI	47
6.1	Punti deboli e sviluppi futuri	47
BIBLIOGRAFIA 50		

INTRODUZIONE

Il lavoro descritto in questa tesi è stato svolto presso il centro di ricerca "E. Piaggio" dell'Università di Pisa situato al Polo Tecnologico di Navacchio, in collaborazione con un collega della facoltà di Ingegneria Informatica, Matteo Abrate.

Lo scopo è riconoscere un insieme di posture della mano utilizzando il guanto in tessuto sensorizzato sviluppato presso il centro di ricerca, senza che sia necessaria una fase preventiva di calibrazione del sistema.

Con il termine **postura** intendiamo la posizione assunta dalla mano rispetto ad un sistema di riferimento solidale al dorso della mano stessa, in particolare lo stato di flessione o rilassamento delle dita. Ad esempio, sono posture la mano chiusa (pugno), la mano aperta e la mano con l'indice disteso.



Figura 1: Le posture di mano aperta, mano chiusa e mano chiusa con indice disteso.

La postura non caratterizza la mano in termini di posizione nello spazio, orientamento o movimento. Per questo motivo il saluto militare, il pollice verso, il saluto fatto agitando la mano e l'azione di chiudere la mano a pugno (movimento di chiusura) non sono posture. La posizione e l'orientamento nello spazio rispetto ad un sistema fisso descrivono invece quella che viene spesso denominata **posa**. In questa trattazione sarà anche utilizzato il termine **gesto** per descrivere situazioni in cui la mano si muove, cambiando quindi posa o postura nel tempo.

I modelli meccanici che descrivono la postura della mano possono essere anche molto articolati e complessi, dipendentemente dal numero di gradi di libertà che occorrono per caratterizzarli. In fisica, con "gradi di libertà" si intendono le coordinate indipendenti che sono necessarie per descrivere la posizione e la rotazione di un corpo nello spazio rispetto ad un dato sistema di riferimento. Ad esempio, un corpo rigido nello spazio avrà 6 gradi di libertà: 3 coordinate descriveranno la sua posizione e 3 il modo in cui è ruotato. I modelli della mano più complessi arrivano a necessitare di un gran numero di gradi di libertà, anche 20 o 30, ma in questo lavoro ci si concentra su modelli molto semplificati aventi fino a 5 gradi di libertà, uno per ogni dito. Non si cerca infatti di ricostruire la postura esatta assunta dalla mano in ogni sua possibile configurazione. Il tipo di riconoscimento trattato è invece quello in cui la reale postura della mano viene associata ad una particolare postura campione scelta all'interno di un insieme discreto di posture di interesse espresse in termini di completa flessione o estensione di ogni dito. Ad esempio si tenta di capire se l'utente sta assumendo una postura simile a quella di mano aperta, pugno chiuso o indice disteso. Il sistema eleggerà quella più simile, o nessuna in caso di eccessiva dissomiglianza.

Per il riconoscimento delle posture della mano, l'uso di guanti sensorizzati è tra i metodi più utilizzati. Ormai da circa un decennio vengono studiati e commercializzati diversi modelli di guanti di questo tipo, le cui prestazioni e fedeltà nel riconoscimento dipendono dallo scopo per cui ciascun sistema è stato ideato: si va da guanti molto precisi apposti per *motion capture* ad altri che riconoscono un insieme limitato di posture.

La novità dell'approccio da noi discusso riguarda l'uso del tessuto sensorizzato sviluppato dai ricercatori del centro Piaggio: non si tratta di un tessuto con dei sensori applicati, ma di una vera e propria integrazione tra componente sensibile e substrato tessile. Con esso sono stati realizzati vari capi d'abbigliamento, tra cui, appunto, un guanto.

Nelle applicazioni che prevedevano l'utilizzo del guanto Piaggio, fino ad ora, era sempre prevista una fase preliminare di calibrazione, durante la quale il sistema doveva "memorizzare" le posture prima di poterle effettivamente riconoscere. Questo non era un problema, dato che il sistema è stato sviluppato per essere impiegato principalmente nel campo dell'ingegneria biomedica. Noi abbiamo invece pensato di cercare di includerlo in ambiti, come ad esempio quello dell'interazione multimediale con il computer, in cui i tempi di *set-up* devono essere brevi e il riconoscimento non necessita di un elevatissimo grado di fedeltà.

Sono stati perciò realizzati alcuni algoritmi che consentono di effettuare una calibrazione del guanto in tempo reale, così da poter usare, per il riconoscimento delle posture, i segnali da esso emessi senza che sia richiesta una fase esplicita di *training* nella quale l'utente debba registrare ognuno dei simboli da riconoscere. Le posture così riconosciute, come già detto, fanno parte di un insieme discreto costituito da quelle esprimibili in termini di flessione o estensione di ogni dito (5 gradi di libertà).

Grazie all'uso di questi algoritmi e del sistema di riconoscimento sviluppati, la fase esplicita di calibrazione viene eliminata. All'utente viene richiesto semplicemente che durante l'accensione o il *reset* del sistema la mano venga mantenuta aperta e rilassata.

Come dimostrazione sono stati creati alcuni prototipi di applicazioni: un semplice riconoscitore di posture, un'esempio di navigazione in una scena tridimensionale, il gioco della morra cinese contro il computer.

La trattazione che segue è suddivisa in due parti.

La prima comprende due capitoli, il primo dei quali (pag. 11) descrive diverse tecnologie utilizzate attualmente per la fabbricazione di tessuti sensorizzati e per il riconoscimento delle posture assunte dalla mano, mentre il secondo (pag. 19) spiega l'architettura del sistema del guanto sviluppato al centro Piaggio.

Nella seconda parte viene descritto il sistema da noi realizzato: il capitolo 4 (pag. 29) espone le soluzioni proposte per far sì che il sistema del guanto sia autocalibrato, mentre nel capitolo 5 (pag. 39) viene spiegato il metodo con il quale è possibile effettuare il riconoscimento delle posture.

Infine, nel capitolo 6 (pag. 47) sono presentate le conclusioni tratte dallo studio eseguito e i suoi possibili sviluppi.

Parte I

STATO DELL'ARTE

RICONOSCIMENTO DI POSTURE DELLA MANO E TESSUTI SENSORIZZATI

2.1 RICONOSCIMENTO DI POSTURE

La raccolta dei dati necessari al riconoscimento delle posture della mano può essere fatta essenzialmente in tre modi [7]:

1. Usando un approccio basato sulla *computer vision*, con il quale una o più telecamere catturano un certo numero di immagini al secondo e le inviano al sistema per l'analisi.
Spesso in questo modo si cerca anche di riconoscere i gesti, la posizione e l'orientamento della mano. L'utente può avere le mani completamente libere (riconoscimento *bare-hand*) o può dover indossare speciali guanti che migliorano la visibilità delle mani, provvisti di *marker* attivi (ad esempio LED) o passivi (aree colorate o riflettenti) facilmente rilevabili: la posizione dei marker viene rilevata dalle telecamere e messa in relazione con la postura.
2. Mediante guanti **sensorizzati** che forniscono dati sulla flessione delle dita o sul contatto tra le dita.
Anche in questo caso in genere vengono cercati metodi per rilevare gesti, posizione e orientamento, aggiungendo però ai guanti sensori come accelerometri, giroscopi o magnetometri.
3. Con un approccio ibrido, basato sia su computer vision che su guanto sensorizzato.

Nell'utilizzo del primo metodo un fattore critico è il posizionamento delle telecamere: l'occlusione del campo visivo è un problema grave, dato che la visibilità delle mani è fondamentale per un riconoscimento robusto, e se il campo è troppo ristretto l'utente non sarà libero di muoversi con naturalezza.

Un altro fattore importante è il numero di telecamere utilizzate. Per il riconoscimento della postura una telecamera può essere sufficiente, ma se sono necessarie informazioni sulla profondità, per esempio per tracciare movimenti in 3 dimensioni, possono esserne necessarie due o più. L'uso di più dispositivi di acquisizione, collocati in modo da osservare la mano da punti di vista differenti, che aumenta la quantità di informazioni estraibili (oltre che ovviamente il costo complessivo del sistema), rende complicati gli algoritmi di riconoscimento, che devono gestire più flussi di immagini, ma sicuramente ha anche il vantaggio di ridurre il problema dell'occlusione.

Altri fattori fondamentali di questo approccio sono ovviamente gli algoritmi di estrazione dell'informazione dalle immagini e quelli per la loro elaborazione ai fini del riconoscimento. Data la loro complessità, questi algoritmi possono essere causa di eccessiva latenza del sistema, di grande importanza in scenari di tipo interattivo o *real-time*.

Gli studi in questo campo sono davvero numerosi, e ancora non si è affermato un metodo dominante. Alcune delle tecniche base per l'identificazione della mano includono: la segmentazione dell'immagine in base al colore, modelli basati su *blob*, tracciamento dei

contorni. I metodi per il riconoscimento includono invece estrazione di caratteristiche analizzate con modelli statistici e algoritmi di apprendimento.

Tra i sistemi basati sull'approccio *bare-hand* è interessante quello sviluppato all'Università di Bonn [11], che si propone di tracciare la postura e la posa di entrambe le mani dell'utente per comandare videogiochi 3D.



Figura 2: Prototipo dell'Università di Bonn per il tracciamento di postura e posa di entrambe le mani.

Tre telecamere sono connesse contemporaneamente al PC; l'intersezione degli spazi visivi delle tre telecamere costituisce il volume di lavoro del sistema di tracciamento. Per ciascuna mano vengono identificate le punte dell'indice, del pollice e il centro del palmo e da questi dati viene ricavata la posa.

Il tipo di *set-up* è un po' ingombrante e probabilmente inadatto all'uso *consumer*, e le telecamere non sono economiche (l'acquisizione per scopi interattivi necessita di elevati frame-rate).

Un altro studio è stato compiuto all'Università di Waikato, in Nuova Zelanda [4], con l'obiettivo di creare un sistema di riconoscimento di gesti che fornisca un controllo facile e naturale di documenti condivisi in ambienti di lavoro collaborativi. Dato lo scopo, è un presupposto necessario che gli utilizzatori non siano obbligati ad indossare guanti o marker di qualche genere ogni volta che vogliono interagire con il sistema.

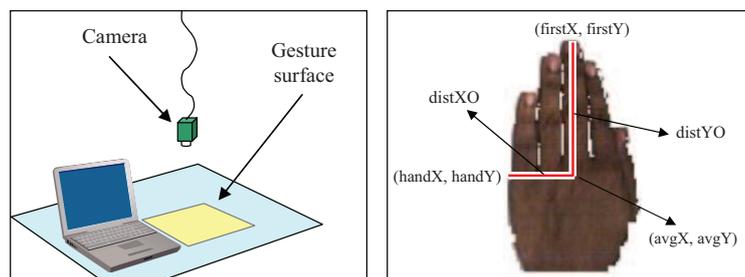


Figura 3: Sistema HAND3D dell'Università di Waikato: setup dell'area di lavoro e caratteristiche utilizzate dall'algoritmo di riconoscimento.

Il prototipo, chiamato HAND3D, consiste in una telecamera singola che pende a circa 50 cm di altezza su una superficie bianca che serve da area sulla quale compiere i gesti. Non richiede calibrazione, a parte il controllo sull'area inquadrata dalla telecamera. Il riconoscimento si

basa sull'identificazione del colore della pelle e su calcoli di distanze e aree per isolare l'immagine della mano in ogni fotogramma. Vengono riconosciuti spostamenti a 3 gradi di libertà, rotazioni orizzontali e verticali, movimenti del pollice e la postura a pugno chiuso.

Tra i sistemi che sfruttano l'uso di guanti colorati ricordiamo quello sviluppato da Dorner nel 1994 [5], che si avvale di una telecamera e di un guanto con uno schema di *marker* a colori posti sulle giunture.



Figura 4: Il guanto di Dorner con marker colorati.

Permette di rilevare la postura e il movimento della mano ed originariamente faceva parte di un'interfaccia per il riconoscimento del linguaggio dei segni americano. La scarsa potenza di calcolo dell'hardware del tempo tuttavia non consentiva l'utilizzo in *real-time*.

Nel 2009 è stato ideato da Wang e Popović [15] un altro sistema basato su guanto colorato che si propone di realizzare un'interfaccia per ambienti tridimensionali.



Figura 5: Il guanto con lo speciale schema di colori ideato da Wang e Popović.

Usa ancora una singola telecamera per tracciare un guanto di normale tessuto sul quale è stato stampato uno schema di colori appositamente studiato per semplificare il problema della stima della posa. Ogni immagine acquisita viene confrontata con le immagini precedentemente inserite in un vasto database. La posa viene identificata scegliendola tra quella corrispondente all'immagine del database che più si avvicina (metodo *nearest neighbor*) a quella acquisita. Sono di fondamentale importanza gli algoritmi di *preprocessing* dell'immagine e quelli di ricerca nel database, le cui prestazioni rendono possibile l'uso in tempo reale.

Nella seconda categoria di metodi di acquisizione dei dati per la stima della postura, della posa e dei gesti della mano si trovano i guanti sensorizzati, realizzati sia con speciali tessuti che con apparati di sensori più tradizionali come elettrogoniometri rigidi o flessibili posti in corrispondenza delle articolazioni, superfici di contatto elettrico o

fibre ottiche. Il prezzo di questi dispositivi è molto variabile, a seconda dei sensori e dell'elettronica utilizzata. Le prestazioni e la fedeltà nel riconoscimento dipendono dallo scopo per cui ciascun sistema è stato ideato: si va da guanti molto precisi apposti per *motion capture* ad altri che riconoscono un insieme limitato di posture.

Tra i sistemi un po' datati, ormai non più in produzione, ricordiamo il P5 Glove distribuito dalla Essential Reality, pensato per migliorare l'esperienza di gioco su PC.



Figura 6: Il P5 Glove della Essential Reality.

È dotato di sensori dell'angolo di flessione di ogni dito, in un range che va da 0 a 90 gradi con risoluzione di 0,5 gradi, e consente il tracciamento della posizione e dei movimenti della mano a 6 gradi di libertà grazie ad una stazione base che si avvale di un sistema ottico capace di rilevare la luce infrarossa emessa dal guanto stesso. È disponibile ad un prezzo molto contenuto, intorno ai 90 dollari.

Il Pinch Glove della Fakespace Labs, pensato per interagire con applicazioni che richiedono una vasta gamma di gesti, è un sistema che si basa su un'idea completamente diversa: comprende un paio di guanti in tessuto che sulla punta di ogni dito contengono delle aree sensibili al contatto elettrico tra le dita stesse.



Figura 7: Pinch Glove della Fakespace Labs.

Per ogni gesto o combinazione di gesti di contatto tra due o più dita può essere programmata una funzione a seconda della specifica applicazione, come ad esempio un comando on/off. Il sistema non richiede calibrazione e i gesti sono indipendenti dalla conformazione delle mani che indossano i guanti, ma non fornisce informazioni su movimento, posizione o orientamento.

Il Peregrine, più recente, è un guanto in tessuto sviluppato appositamente come controller per videogiochi, che mira ad eliminare la necessità di usare la tastiera per impartire comandi.



Figura 8: Il gaming glove Peregrine.

Può essere considerato un “successore” semplificato del Pinch Glove, dato che condivide con esso l’idea di riconoscere combinazioni di “tocco” delle punte delle dita (anche se in una fascia di prezzo molto diversa, dato che il Peregrine costa più o meno 150 dollari contro i circa 2000 del Pinch Glove). Permette di compiere più di 30 azioni programmabili, grazie a 18 sensori di tocco posizionati in vari punti delle dita e a 3 *pad attivatori* sul palmo e sul pollice: toccando con le dita queste zone sensibili, una combinazione di normali tasti di tastiera viene prodotta dal software configurabile che accompagna il prodotto. Può essere calibrato per adattarsi a mani di diverse dimensioni, ridefinendo la posizione esatta dei punti di contatto, anche se per il momento è disponibile solo per la mano sinistra (è previsto che il Peregrine venga usato principalmente insieme al mouse, di solito tenuto con la destra).

Il 5DT Data Glove 14 è stato invece sviluppato per soddisfare i requisiti richiesti da sistemi di *motion capture* e animazione in tempo reale.



Figura 9: Il guanto per *motion capture* 5DT Data Glove 14.

Si interfaccia con il computer via USB o wireless ed esiste sia per la mano destra che per la sinistra. Si basa su 14 sensori a fibre ottiche che misurano la flessione e l’abduzione (allontanamento dalla linea mediana della mano) delle dita con una precisione di 8 bit per dito. Necessita di una calibrazione mano aperta/mano chiusa per ogni utente.

2.2 TESSUTI SENSORIZZATI

Indumenti realizzati con tessuti sensorizzati possono, in maniera non intrusiva, raccogliere o trasmettere in tempo reale alcuni dati fisiologici (attività cardiaca, frequenza respiratoria, temperatura, attività

muscolare, sudorazione, movimento, caduta...) di chi li indossa. Possono quindi essere utilizzati per scopi riabilitativi o di monitoraggio dei parametri vitali dei pazienti in ospedale, di anziani nelle loro abitazioni o di lavoratori che operano in condizioni di rischio (ad esempio vigili del fuoco o subacquei), oppure per lo studio del comportamento e delle abitudini di vita, oppure ancora per la valutazione della preparazione atletica degli sportivi: il comportamento e i movimenti del soggetto che li indossa possono rimanere spontanei, non disturbati dalla presenza dello strumento di misura.

Questi abiti "intelligenti", possono essere ottenuti semplicemente accessoriando normali capi d'abbigliamento con componenti elettronici (fili, sensori, display, ecc.) oppure facendo in modo che le piste conduttive e i sensori facciano parte del tessuto stesso, cioè che siano realizzati al suo interno con materiali o fibre innovative.

Esistono ovviamente anche progetti in cui si seguono entrambi gli approcci contemporaneamente, come la SmartShirt della Sensatex [6], una maglietta intessuta con fibre conduttive che riceve segnali elettrici vitali di chi la indossa tramite degli elettrodi fissati sul tessuto e, tramite una trasmittente wireless, li invia ad un dispositivo per l'analisi che è anche capace di inviare messaggi di allerta. I segnali elettrici possono anche essere inviati all'utente, in modo da svolgere funzioni di elettrostimolazione.

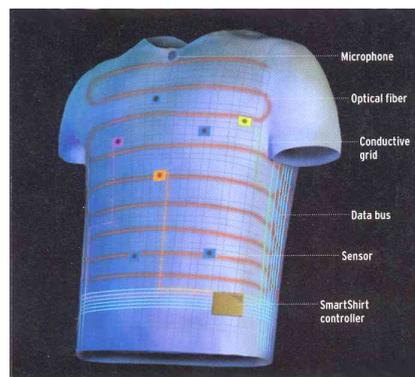


Figura 10: SmartShirt della Sensatex per il monitoraggio dei segnali vitali.

Altri esempi sono la LifeShirt della VivoMetrics, dotata tra l'altro di speciali bande per il monitoraggio dell'attività polmonare, e l'HealthVest della SmartLife, con sensori e piste completamente integrati nel tessuto.

Sempre nell'ambito della ricerca biomedica, al centro di ricerca "E. Piaggio" dell'università di Pisa è stato ideato un nuovo tipo di tessuto sensorizzato: su un substrato tessile altamente flessibile e adattabile vengono integrate delle piste di un materiale elastico, conduttivo e capace di rilevare le deformazioni del tessuto stesso [2].

Dai ricercatori che hanno ideato il tessuto sono stati realizzati prototipi di diversi capi d'abbigliamento che hanno come applicazioni principali la medicina dello sport e la riabilitazione:

- una maglia per la rilevazione della postura e dei movimenti degli arti superiori (Upper Limb Kinaesthetic Garment, ULKG)
- una ginocchiera per rilevare i movimenti di torsione e flessione-estensione del ginocchio (descritta dettagliatamente in [Tesconi 12])



Figura 11: LifeShirt e Healthvest, ancora per il monitoraggio dei segnali vitali.

- una scarpa dotata di un sensore di pressione costituito dello stesso materiale dei sensori degli altri indumenti, che se usata insieme alla ginocchiera permette di analizzare il sincronismo tra passi e movimenti del ginocchio
- un guanto per analizzare la postura della mano, oggetto principale di questa trattazione, che verrà descritto nel capitolo successivo.



Figura 12: I prototipi realizzati al centro "E. Piaggio" dell'Università di Pisa. Da sinistra a destra: l'ULKG, la ginocchiera e la ginocchiera con la scarpa.

IL GUANTO SENSORIZZATO DEL CENTRO PIAGGIO

Il guanto sensorizzato del Centro Piaggio è un dispositivo che permette di rilevare la postura della mano, ed è stato sviluppato per essere principalmente utilizzato nel contesto dell'ingegneria biomedica, con applicazioni nel campo della riabilitazione, della medicina dello sport, e dell'interazione multimediale.



Figura 13: Il guanto sensorizzato del Centro Piaggio, con le piste di elastomero in evidenza (in nero).

Il guanto Piaggio si distingue per la sua particolare **indossabilità** (è leggero, elastico e aderente) e per il **basso costo** dei componenti e del processo di realizzazione. Queste caratteristiche sono dovute alla scelta dei sensori: delle piste di **elastomero conduttivo** integrate su un normale tessuto elastico¹, che sostituiscono il classico e scomodo apparato di componenti elettronici e fili impiegato solitamente nei guanti sensorizzati.

L'elastomero, in quanto materiale piezoresistivo, varia la sua resistenza elettrica come conseguenza di una sollecitazione fisica, perciò, tramite una misura di resistenza, risulta possibile quantificare la deformazione del tessuto. Tale informazione deve essere infine processata per poter essere ricondotta alla configurazione meccanica della mano, ad esempio in termini di angoli delle articolazioni, di posizioni relative delle dita o anche solo di somiglianza ad una particolare postura-campione.

Nel seguito verranno trattate maggiormente le caratteristiche del guanto legate al nostro lavoro, e in particolare all'utilizzo del sensore nello scenario di riconoscimento di un insieme di posture di interesse.

¹ Il tessuto utilizzato è la Lycra (detta anche Elastan o Spandex), una fibra sintetica elastica, robusta e durevole. Le piste sono fatte di Elastosil, un elastomero conduttivo costituito da una miscela di silicone e carbonio commercializzata dalla Wacker LTD (<http://www.wacker.com>). La miscela viene spalmata sul tessuto con l'ausilio di apposite maschere, e fissata mediante cottura in forno (circa 130 °C per un'ora).

Per una descrizione meno focalizzata, si vedano gli articoli [8, 13, 14] del gruppo di ricerca del Centro Piaggio.

3.1 DESCRIZIONE DEL SISTEMA

Il sistema del guanto Piaggio è costituito da tre moduli hardware distinti.

Il primo è il guanto vero e proprio, collegato all'elettronica di acquisizione tramite un connettore. Il guanto è economico e intercambiabile e può quindi essere facilmente sostituito, ad esempio nel caso in cui si sia deteriorato oppure sia semplicemente preferibile una taglia diversa o un guanto sinistro piuttosto che destro. Ciò lo rende particolarmente utile in contesti in cui sia desiderabile che ogni utente abbia il proprio guanto personale, come in quello della riabilitazione in strutture specializzate.

L'elettronica di acquisizione consiste in un modulo per l'elaborazione analogica (front-end analogico) e in un convertitore analogico/digitale, che possono essere realizzati in schede separate, come nel caso della strumentazione da laboratorio, o accorpati in un'unica scheda portatile da posizionare sul braccio [de Toma 3].



Figura 14: Il sistema nella configurazione da laboratorio: il guanto, il front-end analogico (a sinistra) e la scheda di acquisizione che realizza la conversione A/D (in alto).

Il segnale legato alla postura della mano attraversa quattro livelli successivi di elaborazione:

1. La postura della mano determina una deformazione del tessuto del guanto;
2. Il guanto trasmette questa informazione sotto forma di tensioni elettriche al front-end analogico;
3. Il modulo elabora i segnali ottenuti ed espone i risultati ad un convertitore analogico/digitale collegato al computer;

4. I segnali vengono digitalizzati. A questo punto l'informazione è disponibile per essere analizzata oppure utilizzata da un'eventuale applicazione.

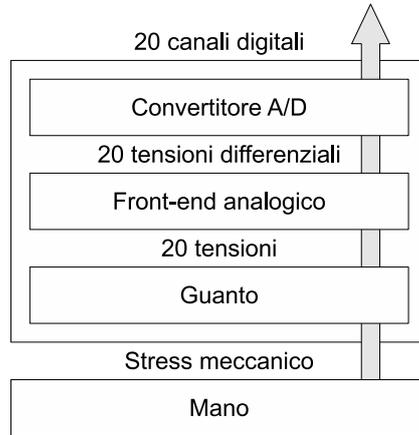


Figura 15: I quattro livelli di elaborazione del segnale.

Nel primo livello, la mano che indossa il guanto deforma il tessuto sensorizzato a seconda della postura assunta. Questo fenomeno è influenzato da alcuni fattori:

- La dimensione della mano rispetto a quella del guanto.
- Il fatto che il guanto possa essere indossato in modo diverso da utenti diversi o di volta in volta dallo stesso utente, e che possa per giunta spostarsi durante una sessione di utilizzo.

Questi fenomeni determinano di fatto una diversa localizzazione e intensità della deformazione del guanto a parità di postura assunta.

Sul tessuto sono disposte le piste di elastomero, secondo il layout rappresentato in figura 16.

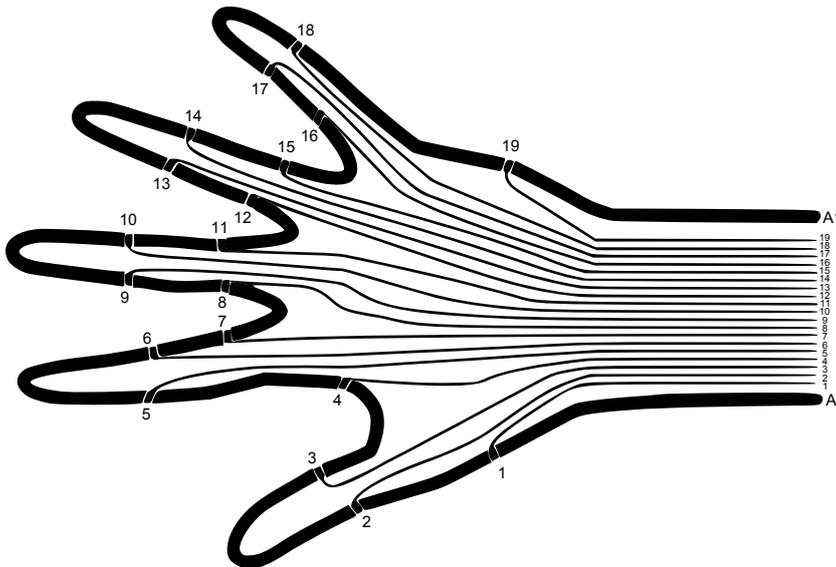


Figura 16: Layout delle piste di elastomero

Il percorso più spesso, che segue la sagoma della mano, è quello che funge da sensore, e risulta diviso in 20 segmenti consecutivi nei punti

di connessione con le piste più sottili. Il numero e la disposizione di questi segmenti sono stati scelti per ottenere una misura ridondante della deformazione: infatti se la stoffa in un punto è tesa, risulteranno tesi con diversa intensità tutti i segmenti appartenenti alla zona intorno a quel punto. Ad esempio, il fatto che un dito sia piegato non viene percepito da un solo segmento di sensore, ma almeno da 5.

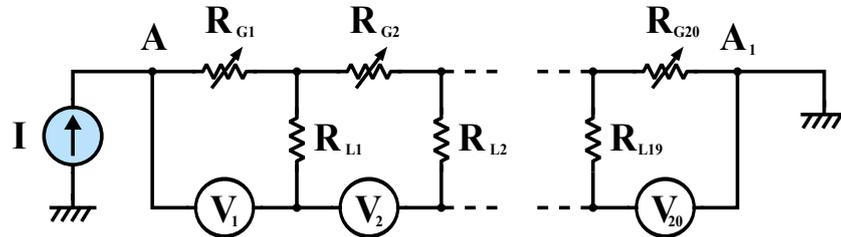


Figura 17: Circuito del guanto e del front-end analogico

Ogni segmento corrisponde ad una resistenza variabile ($R_{G1}, R_{G2} \dots R_{G20}$) nel circuito in figura 17, mentre le sottili piste di connessione sono rappresentate dalle resistenze $R_{L1}, R_{L2} \dots R_{L19}$. Durante il funzionamento, una corrente costante I dell'ordine dei μA generata dal front-end analogico viene fatta scorrere lungo la pista esterna, dal terminale A al terminale A_1 . La caduta di tensione provocata ai capi di ogni segmento viene quindi misurata dai voltmetri ideali $V_1, V_2 \dots V_{20}$. Data l'idealità dei voltmetri, sulle resistenze $R_{L1}, R_{L2} \dots R_{L19}$ non scorre corrente, e conseguentemente non si ha alcuna caduta di tensione lungo le interconnessioni². Ciò consente di utilizzare l'elastomero per realizzare anche le linee di connessione, senza preoccuparsi che una loro deformazione influenzi le letture.

Le 20 tensioni differenziali così ottenute sono proporzionali all'entità della deformazione percepita dal corrispondente segmento, per via del comportamento piezoresistivo dell'elastomero.

Nel valutare i segnali prodotti dal guanto e dal front-end analogico devono essere considerati molteplici fattori:

- Il sensore elastomerico ha di per sè forti problemi di non linearità, presenta elevate costanti di tempo durante i transitori di rilassamento ed è intrinsecamente rumoroso (si veda [8] a pagina 373).
- Gli amplificatori che realizzano la lettura di tensione introducono un rumore elettrico non trascurabile.
- La corrente costante I può presentare variazioni indesiderate.
- Due guanti possono avere differenze di fabbricazione anche molto evidenti. In particolare, possono presentare una resistenza complessiva del sensore a riposo molto differente.
- L'età (usura) delle piste di elastomero e le condizioni ambientali (temperatura, umidità) influiscono in modo apprezzabile sulla risposta del sensore. In particolare, misure della resistenza complessiva del sensore a riposo condotte in momenti distanti nel tempo possono risultare differenti.

² Il comportamento dei voltmetri è approssimato mediante l'uso di amplificatori da strumentazione, che presentano un'alta impedenza di ingresso. Ovviamente la corrente sulle interconnessioni ottenuta in questo modo non è nulla, ma sufficientemente bassa da essere trascurabile.

I segnali sono anche influenzati da alcuni parametri impostabili agendo sulla configurazione del front-end analogico:

- La tensione V_S , che controlla la corrente di lettura I con una legge lineare, può essere aumentata per migliorare il rapporto segnale-rumore. Il suo effetto è quello di scalare in ampiezza i segnali finali. È possibile però che aumentando eccessivamente V_S , il sistema entri in saturazione, cominciando quindi a mostrare letture errate.
- Le resistenze del percorso di alimentazione (R) possono essere cambiate per migliorare il rapporto segnale-rumore, ancora tenendo conto del problema della saturazione.
- La tensione V_{REF} può essere controllata in modo da far uscire il sistema dalla condizione di saturazione.

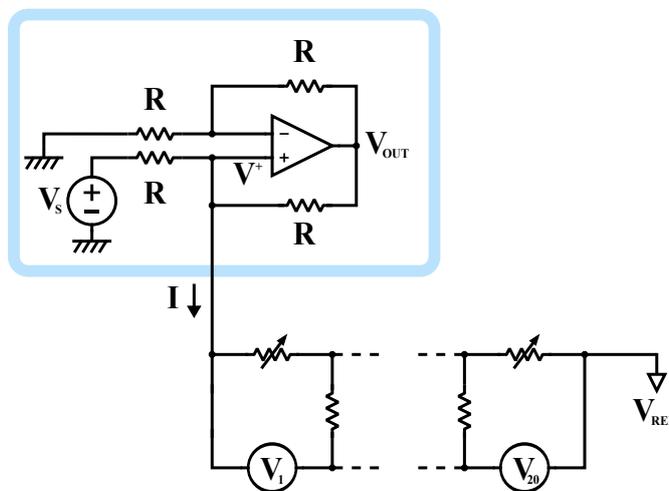


Figura 18: Circuito del guanto e del front-end analogico con generatore di corrente mostrato nel dettaglio. Sono evidenziati i parametri V_S , le resistenze del percorso di alimentazione (R) e V_{REF} .

L'ultimo passo consiste nel convertire in digitale i 20 segnali ottenuti dal front-end analogico. Il campionamento viene eseguito ad una frequenza di 100 Hz (nella configurazione da laboratorio) o 50 Hz (nella configurazione portatile), tipicamente con una risoluzione di 12 bit sull'intervallo di tensioni da 0 a 5 volt.

3.2 SISTEMI DI RICONOSCIMENTO SVILUPPATI AL CENTRO PIAGGIO

Dal gruppo di ricerca che ha ideato il guanto è stata sviluppata un'applicazione di test che mira a riconoscere un insieme di posizioni di presa di oggetti e l'alfabeto dell'American Sign Language (ASL), per un totale di 32 simboli [14].

Durante la fase di calibrazione all'utente è richiesto di mantenere per pochi secondi ciascuna delle posture-simbolo in modo da permettere al sistema di registrare lo stato dei sensori. Successivamente l'utente può ripresentare al sistema le varie posture e vedere mostrata a video l'immagine rappresentante la postura riconosciuta.

Il riconoscimento avviene confrontando il vettore formato dai valori in uscita da ciascun sensore con quello della media dei valori registrati in fase di calibrazione, calcolando una semplice distanza euclidea: la postura scelta è quella che presenta distanza minore.

Durante i test la percentuale di riconoscimento subito dopo la calibrazione è stata del 100% se il guanto non veniva rimosso, e del 98% se il guanto veniva tolto e poi indossato nuovamente dallo stesso utente.

Presso il centro Piaggio sono stati anche svolti diversi lavori di tesi. Uno di questi [10] aveva lo scopo di realizzare un modello cinematico della mano che fosse il più possibile aderente alla realtà e di realizzarne una rappresentazione virtuale in tempo reale, utilizzando tecniche di regressione lineare per valutare gli angoli delle articolazioni a partire dallo stato dei sensori. Per calibrare il sistema occorre registrare le posizioni di mano aperta e mano chiusa in una apposita fase di calibrazione. Successivamente si può controllare un modello 3D della mano a uno (solo chiudere le dita lunghe), due (dita lunghe e pollice separati) o 5 (tutte le dita separate) gradi di libertà. Gli angoli ottenuti con questo metodo sarebbero potuti essere una base di partenza per realizzare un riconoscitore, ma la presenza di una fase di calibrazione esplicita ci ha portato a considerare di realizzare un sistema che prevedesse un modello della mano ancora più semplice.

Un secondo lavoro [9] si occupava invece di realizzare un prototipo di sistema indossabile per il controllo dell'ambiente, di ausilio a persone con disabilità motorie. Il sistema, tramite un'interfaccia audio, descrive all'utente le possibili azioni da compiere, strutturate in menu ad albero. L'utente, in corrispondenza dell'azione desiderata (spegnimento o accensione di una luce, della televisione, della radio), esegue il gesto di chiudere la mano, oppure muove il polso per uscire dall'attuale menu. Il gesto viene acquisito dal sistema di elaborazione osservando le derivate di alcuni canali e processato, attivando o disattivando i dispositivi corrispondenti all'azione scelta. Un apposita fase di calibrazione permette all'utente di settare per ogni canale le soglie corrispondenti alla tensione minima e massima di ogni segmento di sensore sulla base delle proprie capacità di movimento delle articolazioni. Con questo metodo vengono riconosciuti dei gesti, e non delle posture: non c'è modo di capire se l'utente sta mantenendo la mano chiusa a pugno, ma solo se l'ha chiusa, oltretutto solo se abbastanza rapidamente. In più, i gesti riconosciuti sono solo due. È però a partire da questo lavoro che è nata l'idea di basare il nostro sistema su un metodo di calibrazione che aggiornasse in tempo reale le soglie di tensione minima e massima sopra descritte.

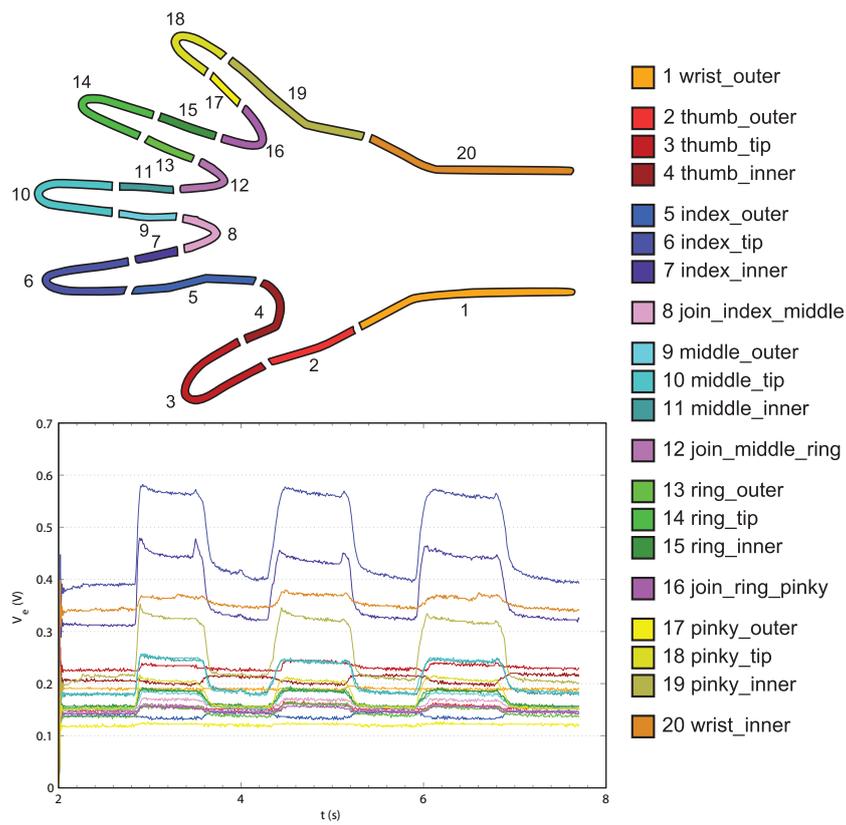


Figura 19: I 20 segmenti del sensore e i relativi segnali prodotti durante chiusure e rilassamenti della mano. Nella legenda è stata usata la denominazione dei canali da noi definita per agevolare il lavoro.



Figura 20: Interfaccia dell'applicazione per il riconoscimento dell'American Sign Language

Parte II

REALIZZAZIONE DEL SISTEMA

Sono stati realizzati alcuni algoritmi che consentono di effettuare una calibrazione del guanto in tempo reale, così da poter usare, per il riconoscimento delle posture, i segnali da esso emessi senza che sia richiesta una fase esplicita di *training* nella quale l'utente debba registrare ognuno dei simboli da riconoscere. All'utente non è neanche richiesto di calibrare il guanto con movimenti di mano aperta/mano chiusa prima di poter usare il sistema: è sufficiente che al momento dell'accensione (o del *reset*) la mano venga tenuta aperta e rilassata.

Questi risultati sono stati ottenuti semplificando notevolmente il problema del riconoscimento in modo da sfruttare solamente l'informazione sullo stato di totale tensione/rilassamento dei sensori, come si vedrà nel capitolo 5, a pagina 39.

4.1 ANALISI DEI DATI

I nostri primi tentativi di interpretare i segnali del guanto per il riconoscimento di posture della mano si sono basati su un lavoro di tesi svolto precedentemente al centro Piaggio [10]. Il sistema in esso descritto prevede la ricostruzione dello stato meccanico di un modello della mano a 5 gradi di libertà in termini degli angoli di flesso-estensione di ogni singolo dito¹. Con una fase preliminare di calibrazione, in cui l'utente registra lo stato dei sensori con la mano a riposo e poi chiusa a pugno, il sistema è in grado di ottenere buoni risultati, sfruttando un algoritmo basato sulla regressione lineare. La nostra idea iniziale era quella di ricavare similmente le informazioni sugli angoli e poi utilizzarle per il riconoscimento.

Dato però che il riconoscimento di un insieme discreto di posture è un problema molto differente da quello della ricostruzione degli angoli, abbiamo cercato di capire se fosse possibile semplificare l'approccio, ricominciando dall'analisi dei dati. Per farlo abbiamo deciso di creare un database in cui registrare l'uscita dei sensori durante determinate sequenze di posture, e dei blocchi Simulink di interfacciamento per la simulazione e il test degli algoritmi sviluppati.

Analizzando in particolare alcune sequenze in cui la mano veniva alternativamente aperta e chiusa, ci siamo resi conto che poteva essere utile sfruttare per il riconoscimento la forma ben distinguibile ed approssimativamente trapezoidale del segnale di alcuni sensori, che corrisponde alla classica forma che si nota negli studi, svolti dai ricercatori del centro Piaggio, sulla caratterizzazione dinamica e sulla risposta del sensore a stimoli meccanici con forma d'onda rettangolare [8]. L'idea che sta alla base del sistema di calibrazione è quindi quella di sfruttare il fatto che il livello più alto del segnale indica che il sensore si trova in uno stato di totale tensione, mentre il livello più basso indica uno stato di totale rilassamento.

¹ La flessione di ogni dito è caratterizzata mediante l'angolo tra il metacarpo e la falange prossimale. La perdita di informazione rispetto ad un modello con più gradi di libertà per dito non è molto elevata, dato che i vincoli anatomici impongono una sorta di corrispondenza lineare tra gli angoli delle articolazioni delle falangi.

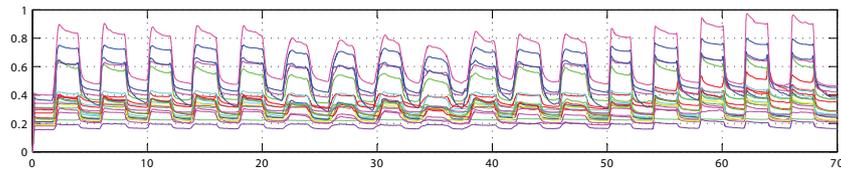


Figura 21: Andamento dei canali più rilevanti durante successive chiusure e aperture della mano ripetute per 70 secondi.

Ovviamente, non sempre tutti i venti segnali reagiscono ad un movimento presentando una forma corrispondente a quella classica, a causa di diversi fattori quali la disposizione del particolare segmento sul guanto, il modo in cui il guanto calza, il movimento effettivamente compiuto e lo stato di degrado del sensore. Gli algoritmi di calibrazione sviluppati, descritti di seguito, non risolvono questo problema, e suppongono di ricevere segnali di forma perlomeno vagamente trapezoidale, lasciando quindi ai moduli successivi l'onere di avere a che fare con segnali possibilmente mal calibrati.

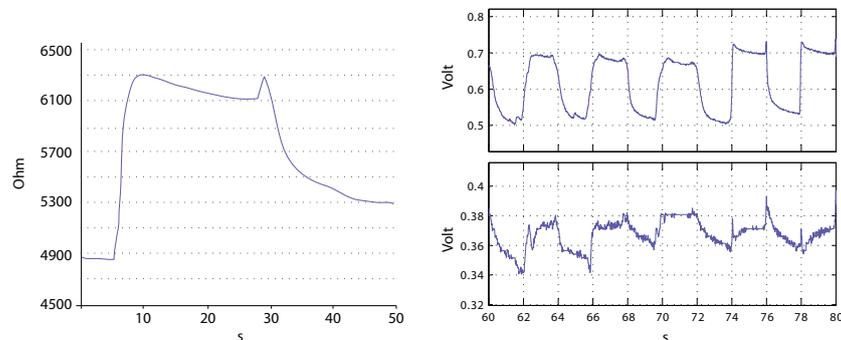


Figura 22: A sinistra, il segnale ottenuto dagli studi sulla risposta del sensore. A destra, un canale che presenta un andamento simile e un altro che invece risulta eccessivamente irregolare.

4.2 ALGORITMI DI CALIBRAZIONE

I segnali ottenuti dai sensori del guanto presentano in genere un andamento simile alla forma desiderata, descritta nel paragrafo precedente, ma ognuno traslato di un proprio offset e avente un proprio range dinamico, entrambi variabili nel tempo. Dato che l'effettivo valore dell'offset e del range dinamico di ogni canale è conseguenza di molteplici fattori [vedi descr. guanto], è stato scelto di realizzare un sistema di calibrazione che prescindere da tali fattori, per ottenere segnali normalizzati all'intervallo $[0, 1]$, dove il valore 0 è interpretato come totale rilassamento e il valore 1 come massima tensione del sensore corrispondente.

Una classica strategia per ottenere questo risultato consiste nel registrare i valori minimi e massimi per ogni canale durante una fase esplicita di calibrazione, nella quale l'utilizzatore è tenuto ad effettuare movimenti di esempio quali la chiusura e l'apertura di tutte le dita della mano, impiegando poi questi valori limite durante l'effettivo uso del sistema per calcolare in tempo reale i segnali normalizzati. I limiti minimi e massimi, da ora in avanti indicati rispettivamente con gli identificatori *offset* e *roof*, vengono usati ad ogni passo per traslare

e scalare singolarmente ogni canale mediante il calcolo riportato nel seguente listato in pseudocodice, dove $x(k)$ indica il valore del canale al passo k :

```
// Aggiornamento (passo k per k>=0)
x_norm(k) = (x(k) - offset) / (roof - offset)
```

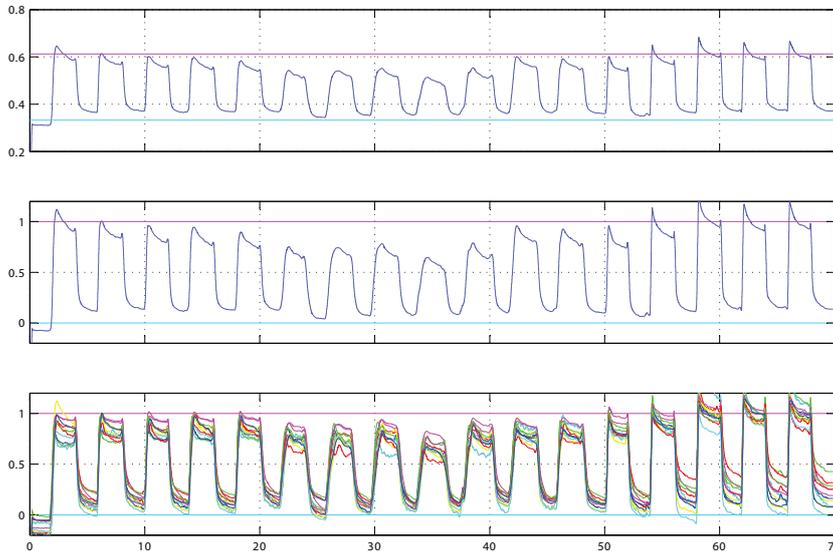


Figura 23: Normalizzazione con offset e roof calcolati *offline* di un test mano aperta/mano chiusa. Il primo grafico riporta l'andamento originale di un canale (*index_outer*) e i due limiti (offset in celeste e roof in magenta). Il secondo e il terzo mostrano i risultati della normalizzazione, rispettivamente sul solo canale *index_outer* e su tutti i canali rilevanti per il test scelto.

L'approccio appena descritto presenta però alcune caratteristiche poco desiderabili, che portano ad una riduzione degli scenari applicativi del sistema:

- È richiesto all'utente di effettuare una fase esplicita di calibrazione prima di ogni sessione di utilizzo, con tempi di *set-up* non trascurabili.
- L'utente può essere obbligato a ripetere la calibrazione all'interno di una singola sessione di utilizzo, per via del fatto che l'offset e il range dinamico possono variare apprezzabilmente anche nell'arco di pochi minuti.
- Nel caso in cui l'utente non abbia mosso alcuni sensori durante la calibrazione (ad esempio non abbia chiuso il pollice), si possono presentare risultati errati nella valutazione dei canali corrispondenti durante l'utilizzo, rendendo necessario ripetere la fase di calibrazione.

L'algoritmo proposto si è evoluto a partire da questo metodo, procedendo per passi di raffinamento successivi in cui è stato identificato un problema e proposta una strategia di soluzione.

La prima versione del nuovo algoritmo rimuove la fase esplicita di calibrazione, calcolando per ogni canale di interesse i valori di

offset e roof *online*, durante la fase di utilizzo, richiedendo solo che l'accensione o il reset del sistema avvengano in condizione di rilassamento di tutti i sensori (mano aperta e a riposo). Ad ogni passo, offset viene aggiornato calcolando il minimo tra il valore attuale del segnale x e il vecchio valore di offset, mentre roof, dualmente, viene aggiornato calcolando il massimo tra x e il vecchio valore di roof.

```
// Inizializzazione
```

```
offset(0) = x(0)
roof(0) = x(0)
```

```
range(0) = 0
x_norm(0) = 0
```

```
// Aggiornamento (passo k per k>0)
```

```
offset(k) = min(offset(k-1), x(k))
roof(k) = max(roof(k-1), x(k))
```

```
range(k) = roof(k) - offset(k)
x_norm(k) = (x(k) - offset(k)) / range(k)
```

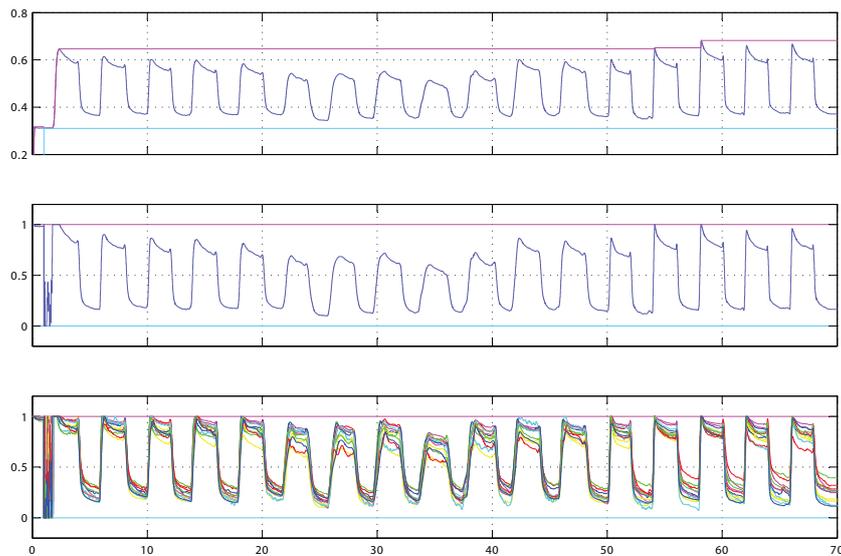


Figura 24: Normalizzazione con offset e roof calcolati online

Osservando il grafico dei risultati (figura 24) si nota subito un problema: i segnali precedenti la prima tensione di ogni sensore producono uscite normalizzate che assumono valori casuali tra zero e uno. Ciò accade perchè offset e roof sono inizialmente troppo vicini, e quindi il range calcolato finisce per coincidere con quello del rumore, facendo sì che le escursioni aleatorie vengano interpretate come valide finchè il sensore corrispondente non viene teso completamente almeno una volta. Questo rappresenta un problema, perchè finchè l'utente non tende completamente ciascun settore di sensore il sistema di riconoscimento a valle non può funzionare correttamente, avendo come input alcuni canali che presentano valori casuali.

Una soluzione consiste nell'inizializzare roof ad un valore più alto, in modo da avere un range dinamico più grande, così che le oscillazioni dovute al rumore vengano, nel caso peggiore, mappate in un intervallo accettabilmente piccolo rispetto a quello del segnale, ad esempio $[0, 0.2]$. Si introduce quindi il parametro di inizializzazione `smallest_range`, uguale per tutti i canali (dato che l'escursione del rumore è uguale per ogni canale), che corrisponde alla distanza minima tra `offset` e `roof` per cui il rumore produce un effetto sul segnale normalizzato sufficientemente trascurabile.

```
// Inizializzazione

offset(0) = x(0)
roof(0) = x(0) + smallest_range

range(0) = smallest_range
x_norm(0) = 0
```

```
// Aggiornamento (passo k per k>0)

offset(k) = min(offset(k-1), x(k))
roof(k) = max(roof(k-1), x(k))

range(k) = roof(k) - offset(k)
x_norm(k) = (x(k) - offset(k)) / range(k)
```

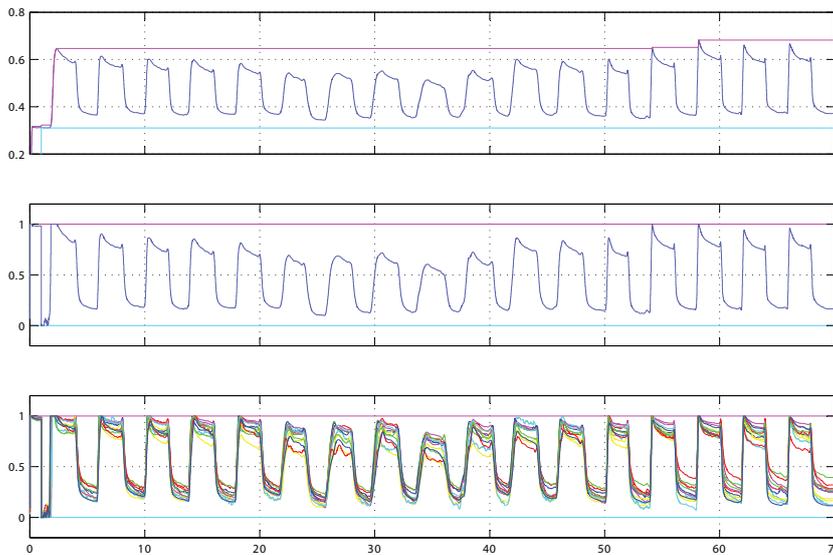


Figura 25: Normalizzazione con l'aggiunta di `smallest_range` (0.01)

Con questo metodo, il range calcolato tende solo ad ampliarsi: il valore di `offset` può solo diminuire, per via dell'operazione di minimo, e quello di `roof` viceversa può solo aumentare, per via dell'operazione di massimo. Il range dinamico del segnale invece può anche diminuire, e il vero valore di `offset` può, in certi momenti, discostarsi anche sensibilmente da quello calcolato. Ciò porta al problema che il segnale presenta variazioni all'interno di un range di valori che a lungo andare non coinciderà più con quello calcolato, producendo quindi un segnale normalizzato degradato.

La soluzione proposta è quella di comprimere lentamente range con il passare del tempo, modificando roof e offset di un certo ammontare. Vengono introdotti i parametri `offset_raise_speed` e `roof_fall_speed`, che sono le dimensioni, calcolate in percentuale rispetto al range stimato al passo precedente, rispettivamente dell'ammontare di salita dell'offset e di discesa del roof.

```
// Inizializzazione

offset(0) = x(0)
roof(0) = x(0) + smallest_range

range(0) = smallest_range
x_norm(0) = 0
```

```
// Aggiornamento (passo k per k>0)

increased_offset = offset(k-1) + range(k-1) *
  offset_raise_speed
offset(k) = min(increased_offset, x(k))

decreased_roof = roof(k-1) - range(k-1) * roof_fall_speed
roof(k) = max(decreased_roof, x(k))

range(k) = roof(k) - offset(k)
x_norm(k) = (x(k) - offset(k)) / range(k)
```

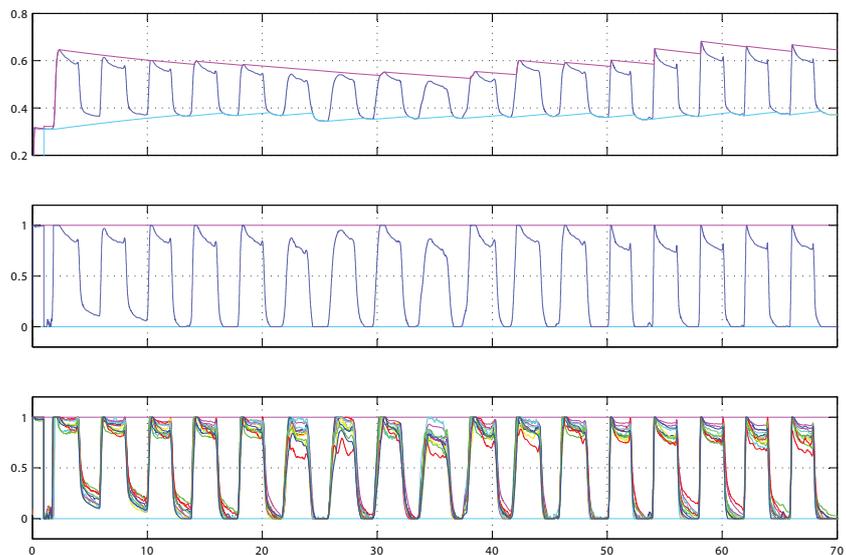


Figura 26: Normalizzazione con limiti convergenti, con `offset_raise_speed=0.0002` e `roof_fall_speed=0.0002`

Con questa soluzione però è possibile che lunghi tempi di inattività o posture mantenute per troppo tempo facciano sì che i limiti `roof` e `offset` si avvicinino troppo l'uno all'altro, e che di conseguenza si ottenga un valore di `range` minore di `smallest_range`.

Il modo scelto per ovviare a questo problema consiste nel bloccare sia la discesa di `roof` che la salita di `offset` se la distanza che verrebbero ad avere risultasse pari o inferiore a `smallest_range`.

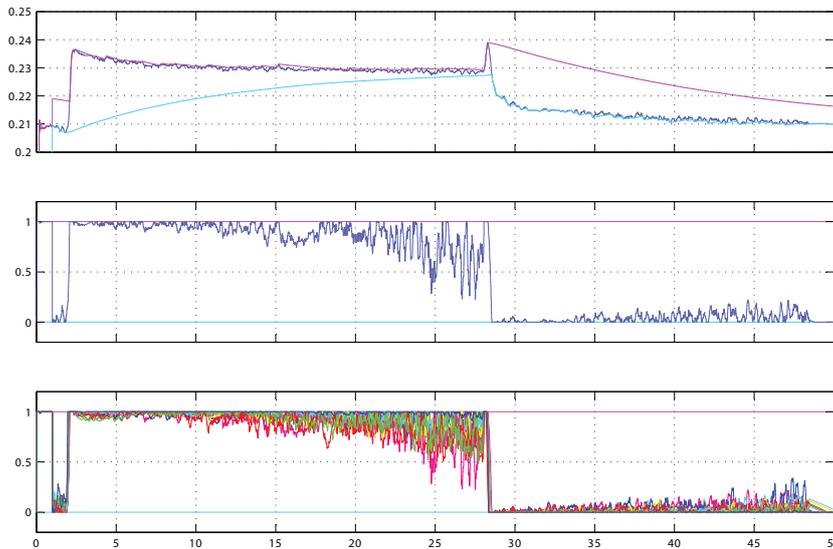


Figura 27: Normalizzazione con limiti convergenti di un test in cui la mano viene mantenuta chiusa per circa 25 secondi, con $\text{offset_raise_speed}=0.0006$ e $\text{roof_fall_speed}=0.0006$

```
// Inizializzazione

offset(0) = x(0)
roof(0) = x(0) + smallest_range

range(0) = smallest_range
x_norm(0) = 0
```

```
// Aggiornamento (passo k per k>0)

increased_offset = offset(k-1) + range(k-1) *
  offset_raise_speed
offset(k) = min(increased_offset, x(k), roof(k-1) -
  smallest_range)

decreased_roof = roof(k-1) - range(k-1) * roof_fall_speed
roof(k) = max(decreased_roof, x(k), offset(k-1) +
  smallest_range)

range(k) = roof(k) - offset(k)
x_norm(k) = (x(k) - offset(k)) / range(k)
```

L'algoritmo può essere ulteriormente migliorato in modo da ridurre la durata dei transitori. Per fare questo, potremmo semplicemente aumentare il valore dei parametri di velocità $\text{offset_raise_speed}$ e roof_fall_speed . Ciò avrebbe però un effetto secondario negativo: range verrebbe a comprimersi più rapidamente, rendendo il sistema troppo sensibile, cioè troppo incline ad abbandonare lo stato attuale. Vorremmo quindi fare in modo che il limite che si trova più vicino al segnale x si muova rapidamente incontro al segnale stesso, provando praticamente a catturarlo, mentre l'altro, più lontano, rallenti il suo movimento. I limiti saranno quindi aggiornati di un ammontare che

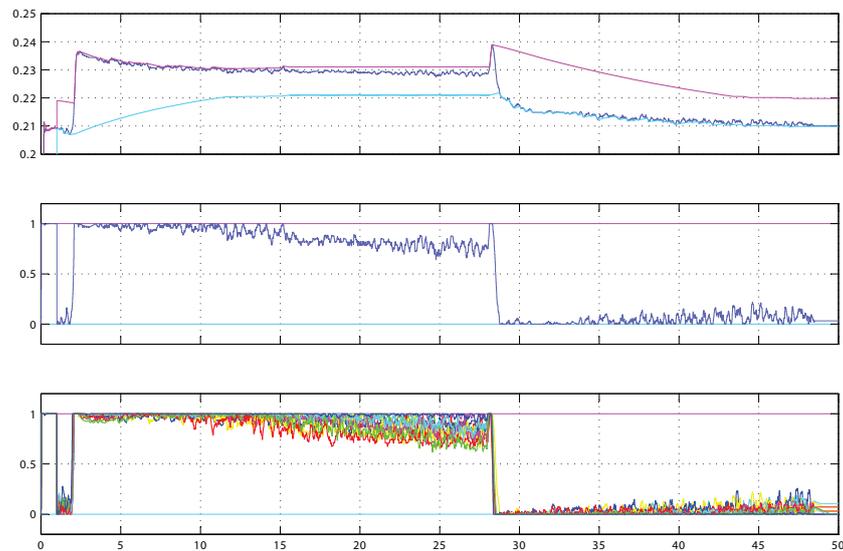


Figura 28: Normalizzazione con limiti convergenti fino ad una distanza minima di $\text{smallest_range}=0.01$ di un test in cui la mano viene mantenuta chiusa per circa 25 secondi, con $\text{offset_raise_speed}=0.0006$ e $\text{roof_fall_speed}=0.0006$

non dipende solamente dal range stimato al passo precedente e dal corrispondente parametro di velocità, ma anche dalla distanza normalizzata tra i limiti e il segnale x .

```
// Inizializzazione
```

```
offset(0) = x(0)
roof(0) = x(0) + smallest_range
```

```
range(0) = smallest_range
x_norm(0) = 0
```

```
// Aggiornamento (passo k per k>0)
```

```
increased_offset = offset(k-1) + range(k-1) *
  offset_raise_speed * (1 - x_norm(k-1))
offset(k) = min(increased_offset, x(k), roof(k-1) -
  smallest_range)
```

```
decreased_roof = roof(k-1) - range(k-1) * roof_fall_speed
  * x_norm(k-1)
roof(k) = max(decreased_roof, x(k), offset(k-1) +
  smallest_range)
```

```
range(k) = roof(k) - offset(k)
x_norm(k) = (x(k) - offset(k)) / range(k)
```

L'ultimo problema preso in considerazione riguarda i picchi che il segnale presenta quando si compie un movimento molto rapido. L'aggiornamento di roof con l'operatore di massimo risente troppo di questi picchi, e di fatto porta spesso il valore di roof troppo in alto. La tecnica scelta per ridurre l'impatto di questo fenomeno consiste nel

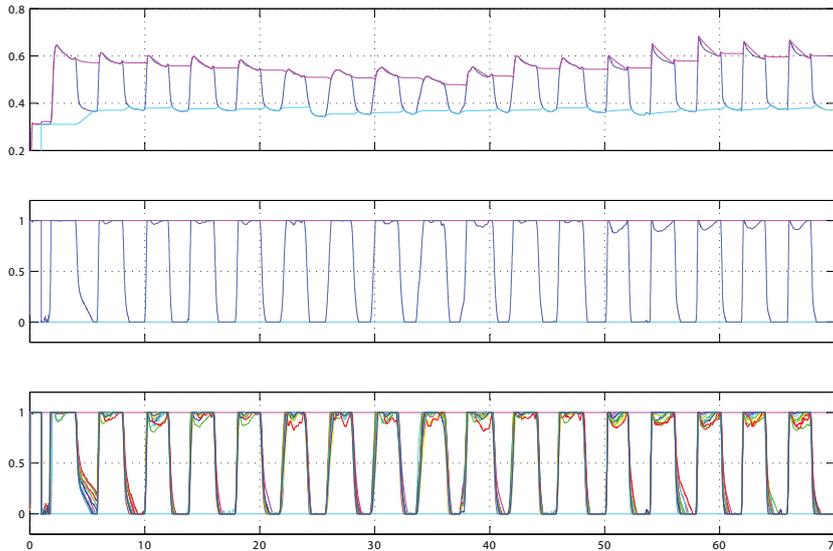


Figura 29: Normalizzazione "magnetica"

penalizzare la salita di roof: il valore usato nell'operazione di massimo non sarà $\text{roof}(k-1)$, ma una media pesata tra $x(k)$ e $\text{roof}(k-1)$, con il parametro di peso denominato `roof_raise_lazyness`. Utilizzando questo metodo bisogna tenere presente che il valore di x può ora superare quello di `roof` e di conseguenza x_{norm} può assumere un valore maggiore di 1.

```
// Inizializzazione

offset(0) = x(0)
roof(0) = x(0) + smallest_range

range(0) = smallest_range
x_norm(0) = 0
```

```
// Aggiornamento (passo k per k>0)

increased_offset = offset(k-1) + range(k-1) *
  offset_raise_speed * max(1 - x_norm(k-1), 0)
offset(k) = min(increased_offset, x(k), roof(k-1) -
  smallest_range)

decreased_roof = roof(k-1) - range(k-1) * roof_fall_speed
  * x_norm(k-1)
roof(k) = max(decreased_roof, min(x(k) *
  (1-roof_raise_lazyness) + roof(k-1) * roof_raise_lazyness,
  x(k)), offset(k-1) + smallest_range)

range(k) = roof(k) - offset(k)
x_norm(k) = (x(k) - offset(k)) / range(k)
```

Con l'algoritmo appena descritto si ottiene un sistema di calibrazione non esplicita, che "cattura" il segnale originale nello stato alto o basso, facendo rimanere stabile, per piccole variazioni intorno ai limiti, il

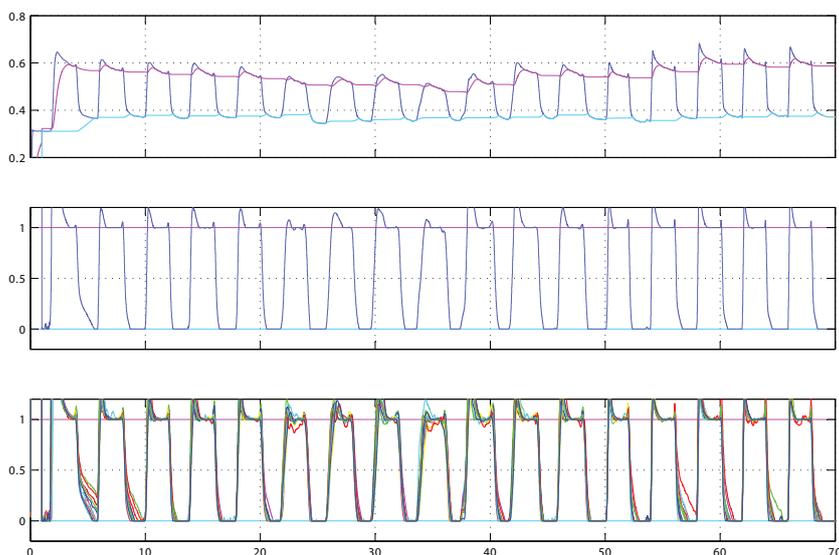


Figura 30: Normalizzazione “magnetica” con rimozione dei picchi, con `roof_raise_lazyness=0.98`

segnale normalizzato. Un altro aspetto positivo di questo approccio è che i canali vengono calibrati separatamente e possibilmente anche in tempi diversi: finché un dito non viene mosso i suoi canali non vengono calibrati, ma appena verrà piegato `offset` e `roof` inizieranno ad adattarsi. Tra l’altro, se dopo un certo tempo il sistema non fosse più calibrato (ad esempio a causa di una posizione intermedia mantenuta troppo a lungo), sarebbe comunque in grado di riadattarsi dopo pochi movimenti di apertura e chiusura della mano. Queste caratteristiche rendono il sistema abbastanza robusto, benché inadatto a riconoscere stati intermedi di tensione del sensore.

Anche se non sono stati compiuti test al riguardo, è verosimile che questo algoritmo di calibrazione si possa applicare anche a sistemi che si basano su altri indumenti sensorizzati sviluppati al centro Piaggio con la tecnologia dell’elastomero, ammesso che presentino segnali di forma simile a quello trapezoidale.

Come già accennato, la calibrazione di un canale può fallire nel caso in cui l’andamento del segnale corrispondente non somigli a quello previsto. I moduli per il riconoscimento realizzati, descritti nel capitolo successivo, sono quindi costretti ad avere a che fare con canali potenzialmente mal calibrati.

RICONOSCIMENTO DI POSTURE

Il riconoscitore sviluppato parte dall'ipotesi semplificativa di osservare solamente lo stato di totale flessione/estensione di ogni singolo dito, che può essere facilmente ricavato dallo stato di totale tensione/rilassamento dei sensori. Le 5 informazioni così ottenute vengono poi combinate per valutare la presenza di una postura complessa, come ad esempio "mano chiusa" (in cui tutte le dita devono risultare piegate) o "forbici" (in cui pollice, anulare e mignolo devono risultare piegati, mentre indice e medio estesi).

Il riconoscitore lavora quindi in due fasi successive:

1. Si ottiene un vettore con 5 componenti a valori in $[0,1]$ che caratterizza lo stato di flessione/estensione di ogni dito a partire dai 20 canali normalizzati, riducendo quindi lo spazio di lavoro da 20 dimensioni a 5.
2. Si confronta il vettore così ottenuto con vettori campione che rappresentano le posture complesse di interesse.

Con il sistema realizzato risulta possibile riconoscere, ad esempio, le posture di "mano aperta" e "mano chiusa", o una in cui il dito indice sia disteso e le altre dita piegate. Non è possibile invece capire se le dita sono semipiegate, si incrociano o si toccano; non si può quindi ad esempio identificare il simbolo della lettera "C" del linguaggio dei segni, oppure distinguere la lettera "U" dalla "V".

Il fatto che non si riconoscano posture in cui le dita sono in uno stato intermedio di flessione è dovuto al metodo di calibrazione, come già spiegato nel capitolo 4 (pag. 29). La causa per cui invece non si può capire se le dita si incrociano o si toccano è insita nel sensore, che non reagisce al contatto, ma solo allo stress meccanico, come si è visto nel capitolo 3 (pag. 19).

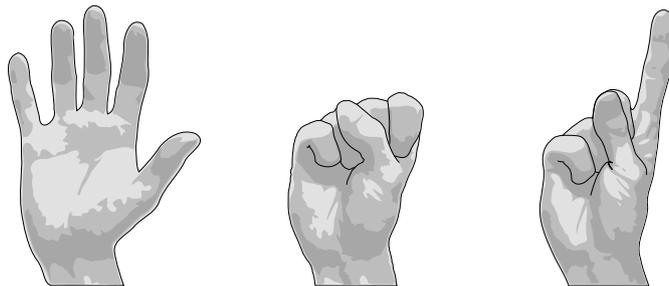


Figura 31: Esempi di posture riconoscibili: mano aperta, mano chiusa, indice disteso.

5.1 CALCOLO DELLO STATO DI OGNI DITO

Vengono analizzati principalmente 12 dei 20 canali originali: 3 per ciascun dito lungo. Si vengono quindi a formare 4 gruppi. Ognuno dei canali scelti corrisponde ad un settore di sensore che presenta le seguenti caratteristiche:

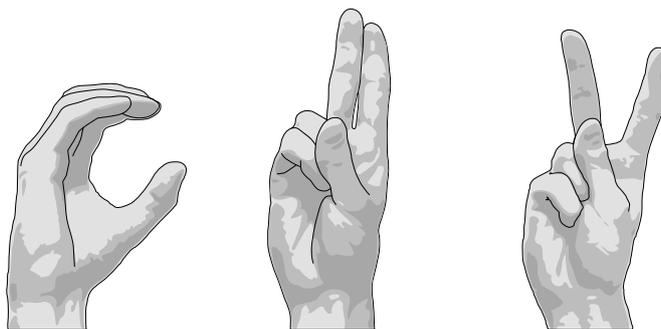


Figura 32: Le lettere C, U e V del linguaggio dei segni. La prima non è riconoscibile, mentre le rimanenti due non sono distinguibili l'una dall'altra.

- ha una reazione apprezzabile al movimento di flessione/estensione del dito di interesse
- ha una reazione trascurabile ad altri movimenti
- reagisce al movimento del dito in modo coordinato con gli altri sensori del gruppo
- il canale corrispondente è in genere ben calibrato

I 3 segnali di ciascun gruppo sono aggregati con una media pesata. I pesi sono assegnati in modo da penalizzare il sensore sulla punta del dito; questo perchè sperimentalmente si è notato che esso risponde poco se il dito viene piegato senza piegarne la punta e a noi interessa invece catturare in egual modo entrambi i modi di flettere il dito.

I quattro segnali così ottenuti sono più robusti, rispetto ai 12 segnali originali, sia riguardo i disturbi dati dai movimenti delle dita vicine, sia riguardo malfunzionamenti di uno dei settori del gruppo. L'operazione di media ha anche il vantaggio di ridurre l'effetto del rumore che è presente in ogni segnale proveniente dal sensore.

Per avere informazioni anche riguardo al dito pollice, viene aggiunto all'analisi un tredicesimo canale, corrispondente ad uno dei suoi sensori (thumb_outer). Per questo dito non siamo stati in grado di trovare più settori di sensore con i requisiti elencati sopra. Probabilmente ciò è dovuto alla complessa meccanica del pollice e alla disposizione dei settori di sensore (che non è concepita ad hoc per questa applicazione). Il pollice risulta essere quindi un punto debole del sistema da noi proposto, dato che il segnale che se ne ricava è meno robusto degli altri quattro.

I canali rimanenti (quelli relativi al polso, alle giunzioni tra le dita e i due restanti del pollice) non sono stati oggetto di questo studio.

5.2 CONFRONTO CON POSTURE CAMPIONE

I valori dei 5 segnali appena descritti formano un vettore che identifica qualitativamente la postura assunta dall'utente. Esso costituisce l'input del sistema di riconoscimento, che deve confrontarlo con i vettori campione corrispondenti ad ogni postura che si vuole riconoscere.

Questi vettori sono gli elementi di uno spazio a 5 dimensioni, ma è stato scelto di consentire a chi deve esprimere la postura campione di

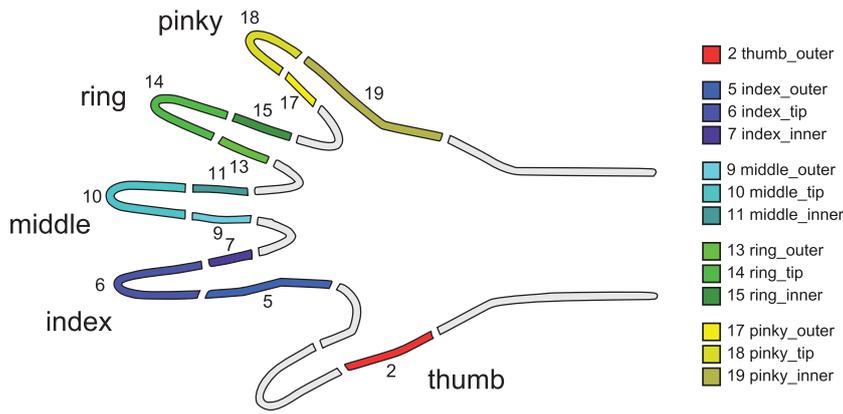


Figura 33: I settori di sensore analizzati nel nostro lavoro, da cui viene ricavato lo stato di flessione/estensione di ogni dito.

ignorare lo stato delle dita che non ritiene rilevanti, riducendo così la dimensione dei vettori e quindi dello spazio. Ad esempio, la postura di mano chiusa può essere definita ignorando il contributo del dito pollice; così facendo si otterrà uno spazio a 4 dimensioni.

Un vettore campione deve perciò descrivere lo stato della mano nella forma [thumb_bent, index_bent, middle_bent, ring_bent, pinky_bent], indicando se ciascun dito è piegato (componente a valore 1), disteso (componente a valore 0) o se deve essere ignorato (-). Se lo stato di un dito deve essere ignorato, la componente corrispondente del vettore di ingresso non sarà presa in considerazione.

Le posture campione che sono state da noi prevalentemente utilizzate nelle prove in laboratorio sono quelle senza la componente del pollice, per via del fatto che la valutazione dello stato del pollice è poco affidabile, come spiegato nel paragrafo precedente.

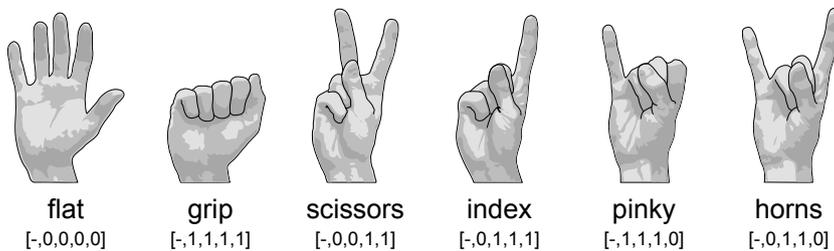


Figura 34: Le posture “a 4 dita” da noi principalmente utilizzate.

Altre posture che abbiamo considerato nei test sono:

- ancora ignorando il pollice: quelle in cui un dito è tenuto piegato e le altre dita sono distese (ad esempio il simbolo di “ok” [-, 1, 0, 0, 0])
- comprendendo tutte le dita: “fist” [1, 1, 1, 1, 1], “one” [0, 1, 1, 1, 1], “two” [0, 0, 1, 1, 1], “three” [0, 0, 0, 1, 1], “four” [1, 0, 0, 0, 0], “five” [0, 0, 0, 0, 0]

L’elenco comunque non esaurisce le posture utilizzabili, che ovviamente sono tutte le combinazioni possibili degli stati delle 5 dita nelle configurazioni ritenute praticabili dall’utente.

Il sistema valuta la distanza euclidea tra il vettore di ingresso e ciascun vettore campione, e produce un punteggio, calcolato come

$1 - \frac{|v_{in} - v_s|}{\sqrt{d}}$, dove d indica la dimensione dello spazio considerato¹, v_s il vettore campione, e v_{in} il vettore di ingresso senza le componenti che il vettore campione indica di ignorare. Si è scelto quindi di assegnare punteggio pari ad 1 se si ottiene un risultato di identità, 0 se i vettori si trovano alla massima distanza possibile. Ad esempio, confrontando il vettore di ingresso $[0.8, 0.9, 0.75, 0.7, 0.8]$ con i vettori campione corrispondenti alla postura di “fist” $[1, 1, 1, 1]$ e di “five” $[0, 0, 0, 0]$, si otterrà un punteggio di 0.7798 per il primo e di 0.2072 per il secondo.

A questo punto è immediato selezionare la postura campione con il punteggio più alto, magari solo se supera un certo valore minimo, al di sotto del quale si decide di non eleggere nessuna postura.

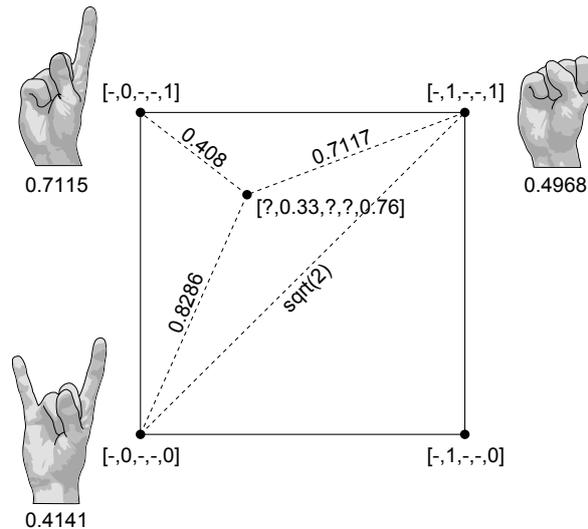


Figura 35: Esempio di valutazione di tre posture in un sottospazio a 2 dimensioni, in cui vengono considerati solo lo stato dell'indice e del mignolo. La prima, la terza e la quarta componente del vettore d'ingresso vengono ignorate. Le distanze (indicate accanto ai segmenti che uniscono i vettori) vengono divise per $\sqrt{2}$ (la distanza massima in questo sottospazio) e complementate ad 1 per ottenere i punteggi indicati sotto ogni disegno rappresentante la postura.

È possibile combinare il punteggio ottenuto da due posture mediante operazione di minimo, per ottenere una valutazione della presenza contemporanea di entrambe, o di massimo, per ottenere una valutazione della presenza di almeno una delle due. Applicando invece il complemento a uno su un punteggio si può ottenere una valutazione dell'assenza della postura corrispondente.

5.3 LIBRERIA SIMULINK

L'elaborazione dei segnali, dall'acquisizione dal sensore fino al calcolo della postura delle dita, è stata realizzata in ambiente Simulink.

È stato creato un modello che permette di utilizzare come input i valori dei segnali memorizzati nel database o di acquisirli in tempo reale.

¹ Quindi \sqrt{d} è la distanza massima possibile tra un vettore di ingresso e un vettore campione, considerando che entrambi hanno componenti a valori nell'intervallo $[0, 1]$.

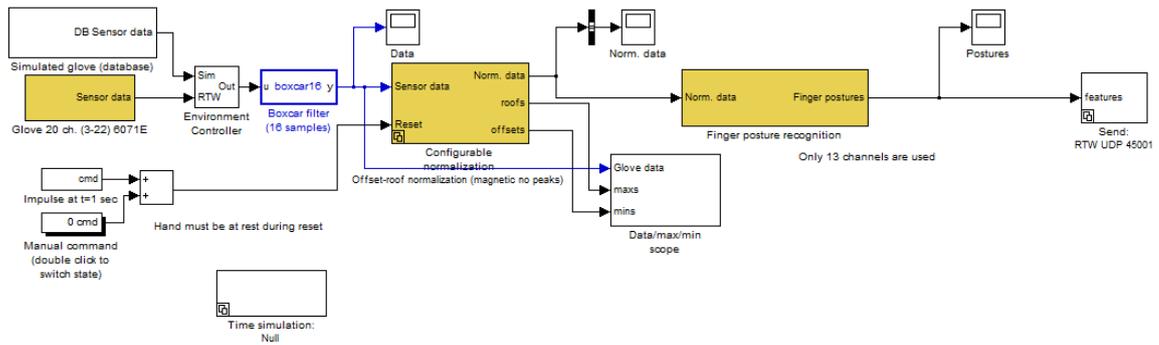


Figura 36: Il modello Simulink. I blocchi più rilevanti sono colorati di giallo.

Dopo un filtraggio con filtro a media mobile, i segnali passano nel blocco di normalizzazione che implementa gli algoritmi descritti, e da lì al blocco che effettua il riconoscimento della postura di ogni dito. I dati sulla postura vengono poi inviati tramite socket UDP ad un programma che calcola le posture complesse.

Sono presenti anche un comando manuale di reset del sistema, un blocco che rallenta l'esecuzione e simula il comportamento in tempo reale da usare nel caso si voglia eseguire il "playback" dei dati nel database, e un blocco che permette di visualizzare il risultato della normalizzazione di ciascun canale separatamente.

I blocchi visibili in piccolo nella figura 36, insieme ad altri utilizzati nelle varie fasi di studio, sono stati raccolti in una libreria Simulink.

5.4 TEST CONDOTTI

Il sistema è stato testato con diversi guanti e diversi utenti. Per ciascuna coppia guanto-utente sono stati eseguiti tre tipi di test:

1. 6 chiusure e aperture consecutive della mano alla frequenza di circa un Hz
2. postura "grip" mantenuta per 30 secondi e successiva postura "flat" mantenuta per altri 30 secondi
3. sequenza in rapida successione di "fist" [1,1,1,1,1], "one" [0,1,1,1,1], "two" [0,0,1,1,1], "three" [0,0,0,1,1], "four" [1,0,0,0,0], "five" [0,0,0,0,0], "scissors" [-,0,0,1,1], "index" [-,0,1,1,1], "ok" [-,1,0,0,0], "middle ok" [-,0,1,0,0], "ring ok" [-,0,0,1,0], "pinky ok" [-,0,0,0,1], "flat" [-,0,0,0,0].

I risultati sono incoraggianti: utilizzando guanti in buone condizioni il sistema ha riconosciuto le posture presentategli in quasi tutti i casi. Nei casi in cui c'è stato fallimento è stato sufficiente che l'utente accentuasse il gesto o, nel caso peggiore, che lo ripetesse.

Se il guanto utilizzato presentava difetti di fabbricazione o era ormai troppo usurato o aveva alcune piste danneggiate, i risultati non sono stati sempre buoni. Questo perchè troppi segnali presentavano un range dinamico effettivo troppo più piccolo di `smallest_range` (e quindi erano affetti da rumore troppo elevato) o comunque avevano una forma troppo diversa da quella classica trapezoidale.

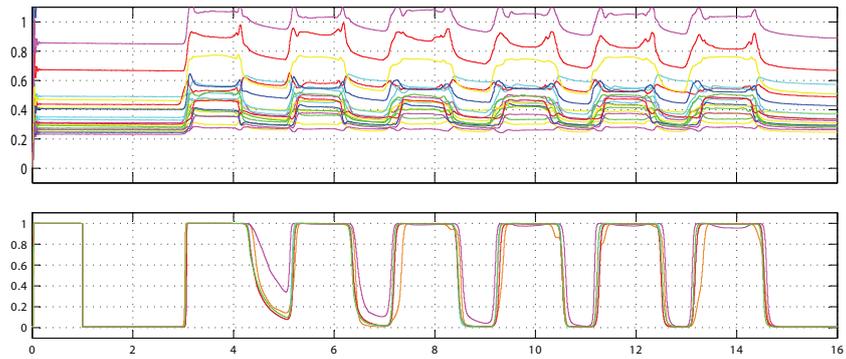


Figura 37: Esempio di esecuzione del test numero 1. In alto i segnali dei 20 sensori non normalizzati. In basso i segnali dello stato di flessione/rilassamento di ogni dito. Si nota come tutte le dita diano informazioni corrette durante le chiusure e le aperture della mano.

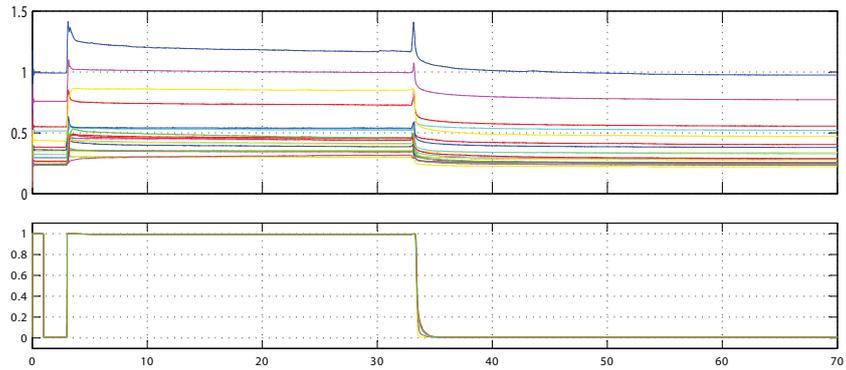


Figura 38: Esempio di esecuzione del test numero 2. In alto i segnali dei 20 sensori non normalizzati. In basso i segnali dello stato di flessione/rilassamento di ogni dito. Si nota come, nonostante la lunghezza del test, il canale di ciascun dito si mantiene stabile e non presenta fluttuazioni dovute al rumore.

5.5 DIMOSTRATIVI

Sono state realizzate alcune applicazioni dimostrative per testare il sistema e per esplorare alcuni suoi possibili utilizzi, specialmente in campo interattivo.

Per facilitare la creazione di questi prototipi è stata usata una libreria da noi sviluppata.

Sia le applicazioni che la libreria sono stati scritti utilizzando il linguaggio Python².

Per una descrizione completa, si rimanda alla tesi del collega Matteo Abrate [1].

Riconoscitore grafico di posture

Si tratta di un'applicazione di test molto semplice, che permette di definire alcune posture campione e mostra la rappresentazione grafica di quella che ottiene il punteggio più alto, oppure nessuna immagine se neanche una supera un punteggio di almeno 0.5.

² <http://www.python.org>

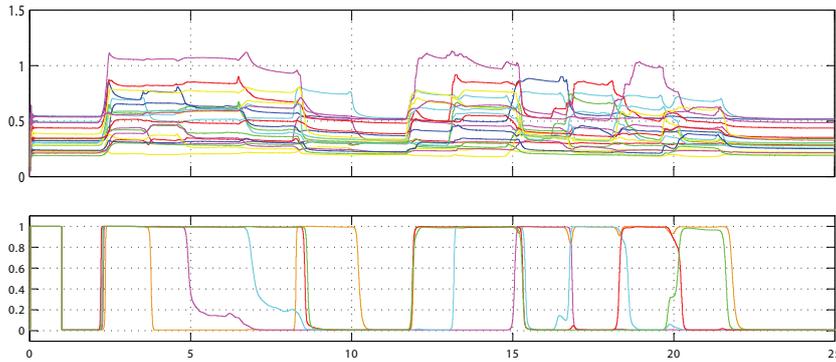


Figura 39: Esempio di esecuzione del test numero 3. In alto i segnali dei 20 sensori non normalizzati. In basso i segnali dello stato di flessione/rilassamento di ogni dito. Durante alcuni cambi di posa alcuni canali presentano una variazione meno netta, ma comunque nella norma.

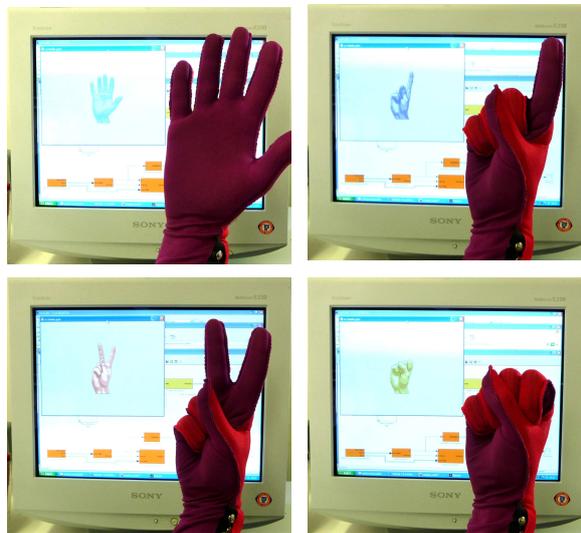


Figura 40: L'interfaccia del riconoscitore di posture.

Morra cinese

Utilizzando questa applicazione è possibile giocare a morra cinese contro il computer.

Le 3 posture tipiche del gioco vengono identificate ignorando il canale del pollice: "rock" corrisponde a $[-, 1, 1, 1, 1]$, "paper" corrisponde a $[-, 0, 0, 0, 0]$, ed infine "scissors" a $[-, 0, 0, 1, 1]$.

La partita comincia quando l'utente chiude la mano a pugno e inizia a scuoterla. Contestualmente alla quarta scossa il giocatore deve formare la sua postura e il computer contemporaneamente ne sceglie una in modo casuale.

Viene eletta la postura che ottiene il punteggio più alto al di sopra di 0.5 e viene confrontata con quella del computer.

Per riconoscere i gesti di movimento che danno la temporizzazione al gioco è stato utilizzato un accelerometro fissato sul dorso della mano.

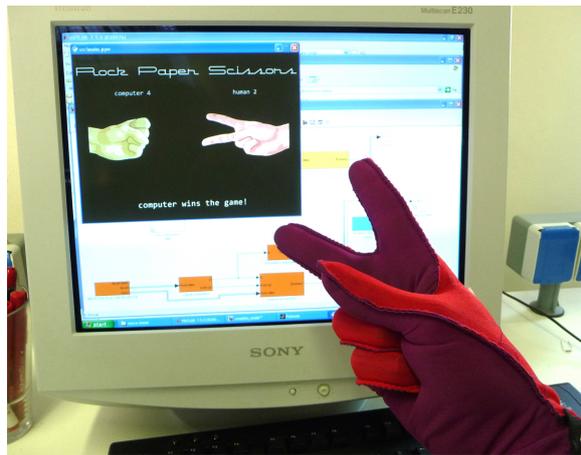


Figura 41: Gioco della morra cinese.

Navigazione di una scena tridimensionale

Questa applicazione è stata pensata per funzionare con l'ausilio di una telecamera e di marker a luce infrarossa montati sul guanto.

L'utente può spostare una scena 3D "afferrandola" e trascinandola, mantenendo sempre la mano nello spazio visibile alla telecamera.

Il sistema riconosce la postura di "grip" $[-, 1, 1, 1, 1]$ e di "eyes" $[-, 0, 0, 1, 1]$ (soli indice e medio distesi). Viene eletta quella con il punteggio più alto al di sopra di 0.5.

Se viene scelta "grip", si attiva il trascinarsi della scena nelle tre dimensioni dello spazio, fino a che la postura non viene abbandonata. Se invece viene eletta "eyes" e la mano viene spostata a destra, a sinistra, in alto o in basso, il punto di vista sulla scena viene ruotato verso quella direzione.

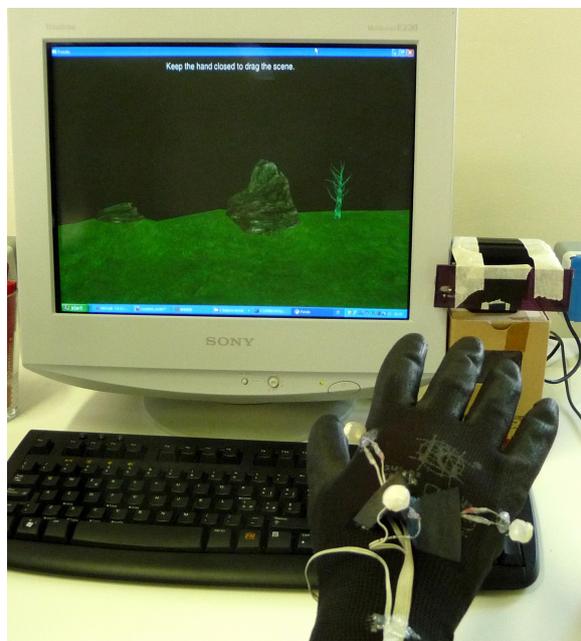


Figura 42: Un utente utilizza l'applicazione di navigazione in una scena 3D

CONCLUSIONI

Il presente lavoro si basa sul guanto sviluppato al centro di ricerca "E. Piaggio" dell'Università di Pisa, fabbricato utilizzando una tecnica brevettata di deposizione di materiale piezoresistivo su substrato tessile. Questo speciale sensore è stato impiegato per il riconoscimento di posture della mano.

Nelle applicazioni sviluppate precedentemente, era necessaria una fase preliminare di calibrazione del sistema, durante la quale venivano registrati i dati dei sensori per ciascuna postura da riconoscere, da svolgersi quasi ad ogni utilizzo del sistema stesso. Sono stati dunque studiati e realizzati degli algoritmi per eliminare questa fase di calibrazione esplicita.

I segnali ottenuti dai sensori del guanto presentano ognuno un proprio offset e un proprio range dinamico, entrambi variabili nel tempo in conseguenza di molteplici fattori. È stato scelto di realizzare un sistema di calibrazione automatica che prescindendo da tali fattori, per ottenere in tempo reale segnali normalizzati all'intervallo $[0, 1]$, dove il valore 0 è interpretato come totale rilassamento e il valore 1 come massima tensione del sensore corrispondente.

Il riconoscitore sviluppato parte dall'ipotesi semplificativa di osservare solamente lo stato di totale flessione o estensione di ogni singolo dito, che può essere facilmente ricavato dallo stato di totale tensione o rilassamento dei sensori del guanto attraverso un'operazione di media. Le 5 informazioni così ottenute sono state poi combinate per valutare la presenza di una postura complessa, come ad esempio "mano chiusa" (in cui tutte le dita devono risultare piegate) o "forbici" (in cui pollice, anulare e mignolo devono risultare piegati, mentre indice e medio estesi), per un totale di 20 posture testate.

Grazie agli algoritmi da noi sviluppati, la fase di calibrazione esplicita è stata eliminata: all'utente viene richiesto solamente che all'accensione o al reset del sistema la mano venga tenuta aperta e rilassata.

I risultati ottenuti sono incoraggianti, come dimostrato dalle applicazioni realizzate per testare il sistema e per esplorare alcuni suoi possibili utilizzi, specialmente in campo interattivo: un semplice riconoscitore di posture, il gioco della morra cinese contro il computer e la navigazione in un ambiente tridimensionale svolta "afferrando" la scena.

6.1 PUNTI DEBOLI E SVILUPPI FUTURI

L'approccio seguito dal sistema realizzato è pensato per il tipo di tessuto sensorizzato usato per il guanto Piaggio, ed è quindi teoricamente applicabile anche ad altri sistemi basati sullo stesso tessuto, a patto che il segnale dei sensori sia tale da avere la forma approssimativamente trapezoidale che si nota negli studi, svolti dai ricercatori del centro Piaggio, sulla caratterizzazione dinamica e sulla risposta del sensore a stimoli meccanici con forma d'onda rettangolare (Lorussi et al. [8]).

Non tutti i segnali dei sensori del guanto reagiscono ad un

Le applicazioni già sviluppate richiedevano una fase preliminare di calibrazione

Sono stati sviluppati algoritmi di calibrazione automatica

È stato realizzato un nuovo riconoscitore di posture

Il guanto Piaggio può ora essere utilizzato per il riconoscimento di posture senza richiedere all'utente di calibrare esplicitamente il sistema

Applicazione ad altri indumenti in tessuto sensorizzato

Il sistema può produrre segnali mal calibrati...

... che potrebbero essere rilevati e scartati, o utilizzati come misura dell'usura del guanto

movimento presentando una forma corrispondente a quella appena descritta, a causa di diversi fattori quali la disposizione del particolare sensore sul guanto, il modo in cui il guanto calza, il movimento effettivamente compiuto e lo stato di degrado del sensore. Gli algoritmi di calibrazione sviluppati lasciano quindi ai moduli successivi l'onere di avere a che fare con segnali possibilmente mal calibrati. Si potrebbe pensare di aggiungere al sistema di riconoscimento un modo per capire se un particolare canale presenta gravi problemi di calibrazione, e quindi debba essere scartato o comunque debba avere un peso minore nella decisione sulla postura individuata. Questa misura sulla "bontà" dei canali potrebbe anche essere sfruttata per rendersi conto di quando il guanto inizia ad essere troppo usurato: se troppi canali diventano inservibili sarà necessario rimpiazzarlo.

Il riconoscimento dello stato del pollice può essere migliorato

Un punto debole del nostro sistema è il riconoscimento dello stato del pollice, dato che non siamo stati in grado di individuare più di un settore di sensore con i requisiti idonei, cosa che rende il suo segnale meno robusto degli altri. Questo difetto potrebbe probabilmente essere eliminato se venisse progettata una configurazione dei sensori più adatta, nei termini delle caratteristiche da noi cercate.

Valutazione più rigorosa dei sistemi di calibrazione

I sistemi di calibrazione potrebbero essere valutati con un approccio più teorico, oppure essere sottoposti a test da condurre con un elevato numero di campioni, raccolti con guanti e persone differenti.

Impiego di altri sensori indossabili

Si potrebbe anche pensare di realizzare un diverso sistema di calibrazione automatica, basando il calcolo dei valori di massima e minima tensione di un sensore su stime della postura della mano realizzate con l'uso di altri dispositivi indossabili, ad esempio sensori elettromiografici, in grado di percepire l'attività muscolare.

Aumentare il numero di posture riconoscibili

Sarebbe inoltre interessante studiare, a partire da quelli da noi proposti, dei nuovi algoritmi di calibrazione automatica che permettano il riconoscimento di un maggior numero di posture, facendo in modo ad esempio che il grado di flessione di ogni dito possa essere espresso non solo a valori binari.

Un altro modo per aumentare il numero di posture riconosciute potrebbe essere quello di aggiungere al guanto uno strato di sensori anche sul palmo, con dei punti più spessi posizionati sui polpastrelli, con lo scopo di rilevare la pressione sulle dita. Data la genericità degli algoritmi proposti è ragionevole pensare che sarebbero applicabili per riconoscere se un dito tocca o meno un oggetto o un altro dito.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Matteo Abrate. Adattamento di un guanto con tessuto sensorizzato al campo dell'interazione gestuale: realizzazione di prototipi esplorativi, 2010. (Citato a pagina 44.)
- [2] Danilo de Rossi et al. Us patent application publication number us 2010/0010379 a1. devices and method for monitoring the form of three-dimensional objects, 2005. (Citato a pagina 16.)
- [3] Gianluca de Toma. Studio e sviluppo di un'interfaccia elettronica per acquisizione ed elaborazione di segnali provenienti da sistemi indossabili, 2009. (Citato a pagina 20.)
- [4] Pushkar Dhawale, Masood Masoodian, and Bill Rogers. Bare-hand 3d gesture input to interactive systems, 2006. (Citato a pagina 12.)
- [5] Brigitte Dorner. Chasing the colour glove: Visual hand tracking, 1994. (Citato a pagina 13.)
- [6] Jayaraman et al. Us patent number us 6,970,731 b1. fabric-based sensor for monitoring vital signs, 2005. (Citato a pagina 16.)
- [7] Joseph J. LaViola. A survey of hand posture and gesture recognition techniques and technology, 1999. (Citato a pagina 11.)
- [8] Federico Lorussi, Enzo Pasquale Scilingo, Mario Tesconi, Alessandro Tognetti, and Danilo de Rossi. Strain sensing fabric for hand posture and gesture monitoring. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 9(3):372–381, September 2005. (Citato alle pagine 20, 22, 29 e 47.)
- [9] Manuele Maggi. Sviluppo e progettazione di sistemi indossabili come ausilio per disabili per la gestione di sistemi domotici, 2009. (Citato a pagina 24.)
- [10] Vitaliano Opiari. Monitoraggio del movimento tramite sistemi indossabili: sviluppo di un modello cinematico della mano e sua implementazione in realtà virtuale, 2009. (Citato alle pagine 24 e 29.)
- [11] Markus Schlattmann, Johannes Broekelschen, and Reinhard Klein. Real-time bare-hands-tracking for 3d games. (Citato a pagina 12.)
- [12] Mario Tesconi. *A wearable system for lower limb movement analysis: A sensing system realized with conductive elastomer sensors to monitor kinematic variables of lower limbs*. VDM Verlag. (Citato a pagina 16.)
- [13] Alessandro Tognetti, Nicola Carbonaro, Giuseppe Zupone, and Danilo de Rossi. Characterization of a novel data glove based on textile integrated sensors. In *Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBCo6*, pages 2510–2513, 2006. (Citato a pagina 20.)

- [14] Alessandro Tognetti, Raphael Bartalesi, Federico Lorussi, and Danilo de Rossi. Body segment position reconstruction and posture classification by smart textiles. *Transaction of the Institute of Measurement and Control*, 29(3-4):215-253, 2007. (Citato alle pagine 20 e 23.)
- [15] Robert Y. Wang and Jovan Popović. Real-time hand-tracking with a color glove. *ACM Transactions on Graphics*, 28(3):1-8, 2009. ISSN 0730-0301. doi: <http://doi.acm.org/10.1145/1531326.1531369>. (Citato a pagina 13.)