

ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA - CAMPUS DI CESENA
SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA BIOMEDICA

**STIMA DELLA SUPERFICIE CORPOREA IN
CONDIZIONI STATICHE E DINAMICHE:
STATO DELL'ARTE E SOLUZIONI
INNOVATIVE LOW-COST**

ELABORATA IN:
BIOINGEGNERIA DELLA RIABILITAZIONE

Relatore:
Prof. Angelo Cappello
Correlatore:
Prof.ssa Rita Stagni

Presentata da:
Marco Muraccini

Anno accademico 2014-15

Sessione 3

*Se devi chiedere non lo saprai mai,
se lo sai devi solo chiedere.*

Helena Ravenclaw

INDICE

Introduzione	1
---------------------------	----------

1 Panoramica delle tecnologie di reverse engineering per la scansione 3D.....	3
--	----------

1.1 Definizione di reverse engineering	3
1.2 Processo di acquisizione	3
1.3 Classificazione delle tecniche di RE	5
1.4 Pregi e difetti delle tecniche di scansione 3D	15
1.5 Esempi di scanner	19
1.5.1 Laser scanner	19
1.5.2 Scanner a luce strutturata	21
1.5.3 Scanner a onde millimetriche	29
1.5.4 Tabelle riportanti varie tipologie di scanner.....	30
1.6 Software	32

2 Microsoft Kinect	33
---------------------------------	-----------

2.1 Storia	34
2.2 Campi di utilizzo	34
2.3 Hardware	35
2.4 Caratteristiche tecniche	38
2.5 Funzionamento del sensore	39
2.6 Calcolo della mappa di profondità	41
2.7 Kinect 2.0	44
2.8 Ricostruzione 3D mediante Kinect	44

3 Ricostruzione di superfici 3D mediante l'uso di accelerometri e magnetometri.....	51
3.1 Ricostruzione di geometria parametrizzabile: ellissoide	55
3.2 Ricostruzione di una superficie generica	63
3.2.1 Metodo 1.....	65
3.2.2 Metodo 2	75
Conclusione e sviluppi futuri	92
Bibliografia	95
Sitografia	98

INTRODUZIONE

In questo progetto di tesi ci si addentrerà nel campo della scansione corporea, e più in generale di qualunque oggetto. In questo ambito le soluzioni proposte sono numerose e questo settore ha vissuto negli ultimi anni un'incredibile crescita, favorita anche dalla nascita delle stampanti 3D. Si può ragionevolmente supporre che tale crescita non sia destinata ad esaurirsi nei prossimi anni; ci sono i presupposti per cui questo settore occupi fette sempre più importanti del mercato.

In questa tesi ci si è occupati prevalentemente di tecniche di scansione del corpo umano, in quanto una descrizione geometricamente accurata della superficie corporea riveste una notevole importanza sia nelle applicazioni industriali che nello studio della biomeccanica del movimento. Per quanto riguarda le applicazioni industriali si pensi ad esempio all'utilizzo di scanner 3D in accoppiata alle moderne stampanti 3D per la realizzazione di protesi custom o al comparto sartoriale per il confezionamento di abiti su misura. Nell'ambito della biomeccanica essa può risultare utile sia per quanto riguarda gli aspetti cinematici e dinamici nei campi riabilitativo, ergonomico e sportivo, sia per quanto riguarda la stima delle grandezze antropometriche.

Attualmente esistono sistemi di scansione corporea low-cost che si stanno sempre più diffondendo e si può pensare ad un futuro neanche tanto lontano nel quale essi siano presenti in maniera diffusa nelle abitazioni. In tal caso le persone potrebbero farsi una scansione corporea e utilizzare il risultato per uno scopo ludico, ai fini dell'abbigliamento, o per una delle applicazioni sopra citate.

In tale contesto gli obiettivi di questa tesi sono:

- 1) Documentare quanto prodotto finora a livello scientifico, brevettuale ed industriale, evidenziando meriti e limiti di ciascuna soluzione.
- 2) Individuare e valutare la realizzabilità di soluzioni innovative low-cost.

Nel capitolo 1 verranno illustrate le conoscenze di base delle tecniche di reverse engineering, per poi passare ad un'analisi critica della letteratura, che permetterà una classificazione delle attuali tecniche di scansione. Verranno evidenziati pregi e difetti nell'uso delle singole tecniche, e verranno presentati alcuni esempi di sistemi attualmente in commercio.

Nel capitolo 2 sarà presentato un device nato per scopi ludici, ma che si sta rivelando utile in questi anni in svariate applicazioni, anche nel campo della scansione: il Kinect. In letteratura si trovano molti articoli inerenti ad esso; si è voluto approfondire il suo principio di funzionamento, e lo si è andati a testare nell'ambito di una scansione corporea.

Il capitolo 3 infine rappresenta il tentativo di introdurre una nuova tecnica per la stima della superficie corporea, e in generale di qualunque oggetto. Si tratta di un approccio innovativo, nel quale si vuole cercare di ricostruire una superficie a partire dalle informazioni in uscita da sensori inerziali posizionati su essa. Verranno proposti sostanzialmente due approcci alla soluzione del problema; di ognuno verranno messi in evidenza meriti e limiti.

Infine nella conclusione verranno messi in evidenza quelli che possono essere gli sviluppi futuri di questo tipo di approccio.

1. PANORAMICA DELLE TECNOLOGIE DI REVERSE ENGINEERING PER LA SCANSIONE 3D

1.1 Definizione di Reverse Engineering

Ottenere una descrizione tridimensionale digitalizzata di un oggetto target è il fine ultimo dell'ingegneria inversa (*Reverse Engineering, RE*), definita a tal proposito come il processo inverso della progettazione. Nel caso dei dati morfologici del prodotto si osserva che nel processo di ingegneria convenzionale l'idea del progettista, oggi spesso sviluppata in ambiente CAD, viene poi trasferita e materializzata in un prodotto finito. Mediante l'impiego delle tecniche di Ingegneria Inversa si ottiene, viceversa, direttamente una descrizione digitalizzata dell'oggetto o della forma in esame. Tale procedura, nell'ambito del processo di progettazione di un prodotto, fornisce uno strumento che, in ambito industriale, semplifica i processi di design assistito al calcolatore, aumentandone l'efficienza e diminuendo il tempo necessario allo sviluppo del progetto stesso. La RE è una pratica oggi molto diffusa in diversi ambiti, dall'ispezione alla progettazione industriale, dalla conservazione dei beni culturali all'architettura, dalla realtà virtuale al campo medico.

Nel corso di un processo di acquisizione, le coordinate 3D dei punti possono essere rappresentate in varie modalità, la più semplice delle quali consiste nell'uso della mappa di profondità, nella quale l'informazione della profondità può essere espressa in scala di grigi.

1.2 Processo di acquisizione

Il processo di RE si articola in quattro fasi principali [7]:

- **Pianificazione dell'acquisizione:** riguarda diversi aspetti. Innanzitutto la tipologia di scanner da utilizzare, ma anche il posizionamento del soggetto/oggetto da scansionare. Quest'ultimo aspetto non è di secondaria importanza, soprattutto nel caso di scansione del corpo umano, in quanto il soggetto deve cercare di rimanere immobile per la durata della scansione. Per

questo motivo è consigliabile che sia lo scanner a girare intorno al soggetto. Inoltre è necessario pianificare il numero di scansioni necessarie per acquisire la superficie di interesse: si deve cercare di ridurre il numero di scansioni per minimizzare tempi e costi, ma senza che il modello finale presenti buchi o parti non acquisite.

- **Acquisizione dei dati:** ogni singola scansione prende come input una porzione dell'oggetto reale che si vuole digitalizzare e avrà come output le coordinate di un numero finito di punti sulla superficie (nuvola di punti o *range-map*). Alla fine del processo di acquisizione dei dati si avranno a disposizione tante differenti *range-map*, ognuna delle quali con un differente sistema di riferimento. Si dovrà quindi procedere con l'elaborazione di tutti i dati raccolti con lo scopo di “fondere” le *range-map* in un unico modello 3D.
- **Elaborazione dei dati:** Il risultato di questa fase è una rappresentazione dell'oggetto attraverso una *mesh* poligonale che può essere esportata direttamente nel formato STL (*Solid To Layer*) per l'impiego in sistemi CAM e di Prototipazione Rapida, o per la fruizione attraverso sistemi di Realtà Virtuale o sul web. Per giungere a ciò sono necessari alcuni passaggi intermedi che possono essere implementati o meno nel software per l'elaborazione dei dati: rimozione dei punti che non appartengono all'oggetto da scansionare ma all'ambiente circostante, rimozione delle porzioni di superficie ridondanti, procedura di *fill-holes* e levigazione delle superfici attraverso *smoothing*. Infine, se necessario, per ridurre la dimensione del file si può pensare anche di ridurre il numero di punti. In questo caso si andrà a ridurre il numero dei punti sulle porzioni di superfici regolari, così da ottenere un alta densità di punti solo nelle porzioni di superfici non uniformi e complesse.
- **Creazione modello CAD 3D.**

La prima fase è di fondamentale importanza perché riguarda la scelta del sistema ottimale di scansione. Infatti essendo molteplici le tecniche di acquisizione, la scelta deve essere influenzata sia dalle caratteristiche dell'oggetto in esame, quali la complessità della forma, il materiale, le caratteristiche superficiali, le dimensioni e la trasportabilità, che dai requisiti di accuratezza e precisione, senza ovviamente tralasciare l'aspetto economico.

Durante l'acquisizione dei dati si deve necessariamente tenere conto del fatto che ogni scansione deve parzialmente sovrapporsi alle limitrofe (anche con una sovrapposizione dei punti fino al 30%, come indicato in [6]), in modo tale che nel processo di elaborazione si possano individuare punti notevoli comuni tra le scansioni per ricostruire l'oggetto in 3D. Infatti un passaggio importante nella ricostruzione del modello 3D è proprio quello di identificare 3 punti omologhi appartenenti a due scansioni successive (figura 1), proprio per facilitare la "fusione" delle range-map, le quali ricordiamo hanno sistemi di riferimento differenti.

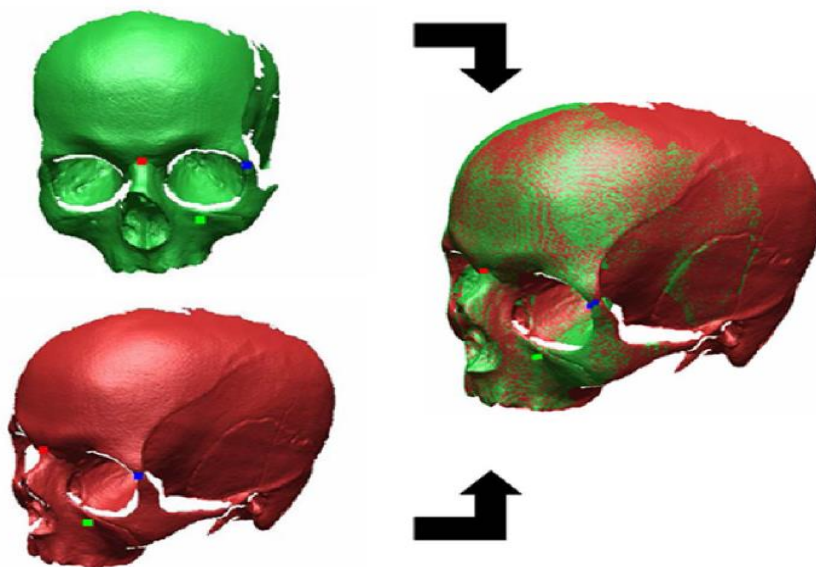


Figura 1: rappresentazione della fusione dei dati di due differenti range-maps tramite l'individuazione di tre punti omologhi.

1.3 Classificazione delle tecniche di RE:

Le tecniche di acquisizione delle caratteristiche degli oggetti sono molteplici ed è facile immaginare come non sia possibile definire una tecnica migliore delle altre che possa essere applicata in modo indifferenziato a qualsiasi problema di acquisizione: la scelta è influenzata sia dalle caratteristiche dell'oggetto da rilevare (dimensioni, complessità della superficie, trasportabilità) che dalle specifiche da soddisfare in termini di accuratezza,

tempo e costo. In generale le tecniche di RE possono essere classificate in base al modo in cui vengono acquisiti i dati:

Metodi a contatto: permettono il rilievo del pezzo attraverso il contatto fisico tra un sensore e la superficie dell'oggetto in esame. I sensori a contatto sono tipicamente sonde, costituite da bracci meccanici o catene, la cui posizione nello spazio può essere determinata con precisione ad ogni istante attraverso il movimento della sonda a contatto della superficie di un oggetto e, quindi, possibile acquisire dati quantitativi sulla sua forma. In questa categoria rientrano le Coordinate Measuring Machines (CMM), ampiamente utilizzate per misure di precisione nell'industria meccanica, e i digitalizzatori piezoelettrici. In generale, questi strumenti sono abbastanza lenti e non forniscono le informazioni colorimetriche dell'oggetto.

Metodi senza contatto: permettono la scansione dei punti sulla superficie del pezzo senza la necessità di un contatto fisico diretto ed è realizzata mediante tecniche indirette che richiedono normalmente l'invio di energia radiante sull'oggetto e la successiva rilevazione dell'energia trasmessa (metodi trasmissivi) o riflessa (metodi riflessivi). Di quest'ultima categoria, i sistemi ottici sono i più diffusi e possono essere suddivisi in passivi o attivi.

	Triangulation	Time delay	Monocular Images	Passive	Active	Direct	Indirect	Range	Surface Orientation
Laser triangulators	X				X	X		X	
Structured light	X				X	X		X	
Stereo vision	X			X		X		X	
Photogrammetry	X			X		X		X	
Time of Flight		X			X	X		X	
Interferometry		X			X	X		X	
Moiré fringe range contours			X		X		X	X	
Shape from focusing			X	X	X		X	X	
Shape from shadows			X		X		X	X	
Texture gradients			X	X			X		X
Shape from shading			X		X		X		X
Shape from photometry			X		X		X		X

Figura 2: classificazione delle tecniche di RE [3].

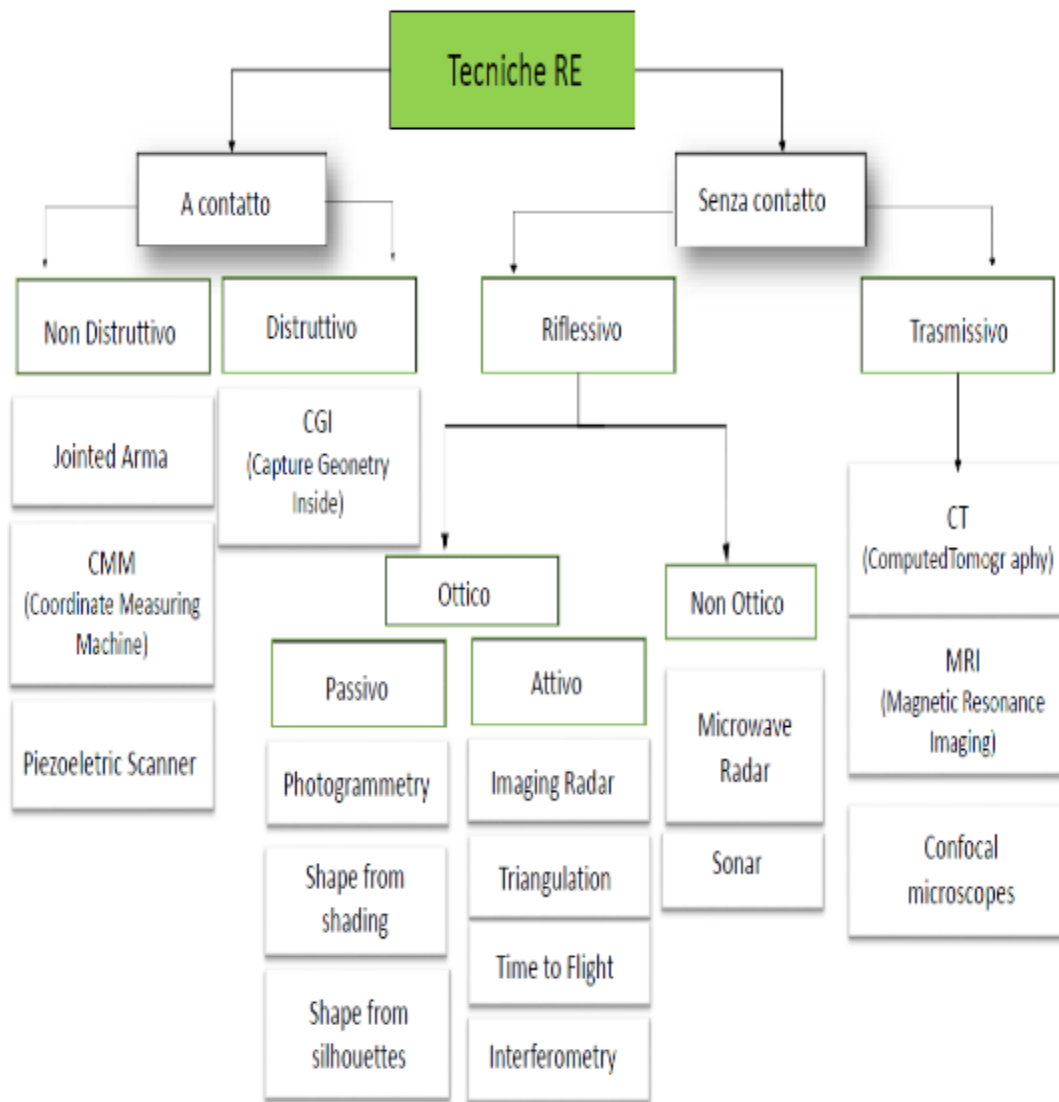


Figura 3: Tecniche di reverse engineering [7].

Le tecniche di RE a contatto solitamente offrono una maggiore accuratezza, ma hanno il pesante svantaggio di essere dipendenti dalla deformabilità del tessuto che si va a scansionare. Per questo motivo non sono adatte a scansioni corporee. Le tecniche senza contatto si dividono, come suggerisce la figura, in trasmissive o riflesse. Per quanto riguarda le tecniche trasmissive, esse ricostruiscono l'oggetto in esame tramite l'invio di una particolare energia elettro-magnetica e la successiva rilevazione dell'energia trasmessa. Tra queste troviamo risonanza magnetica e tomografia computerizzata, note metodiche di diagnostica per immagini. I costi elevati di entrambe le metodiche ne limitano l'uso al settore medico come strumento di indagine. TC e RMN però consentono, a differenza dei metodi riflessivi, di ottenere una rappresentazione volumetrica ad alta risoluzione della densità dello spazio scansionato, intorno e dentro all'oggetto. Ciò va oltre l'obiettivo di questa tesi; per questo motivo non verrà focalizzata l'attenzione su queste tecnologie. Con un principio di funzionamento simile alle trasmissive, agiscono le riflesse, le quali vanno a rilevare il segnale riflesso dall'oggetto. Le tecniche riflesse possono essere ottiche o non ottiche. Le tecniche non ottiche includono sensori acustici (utilizzanti ultrasuoni), elettromagnetici (infrarossi, ultravioletti, radar a microonde, ecc.) e altre tipologie di sensori come ad esempio il sonar. In questi casi si stima la distanza dell'oggetto valutando il tempo che l'onda emessa impiega per ritornare in seguito alla riflessione sulla superficie dell'oggetto. Rimanendo nell'ambito non ottico negli ultimi anni le tecnologie presenti sul mercato sono principalmente basate sull'uso di infrarossi e onde millimetriche [1].

Nei sistemi ottici è la luce che trasporta le informazioni utili alla misura. Come anticipato, i sistemi ottici si dividono in attivi e passivi.

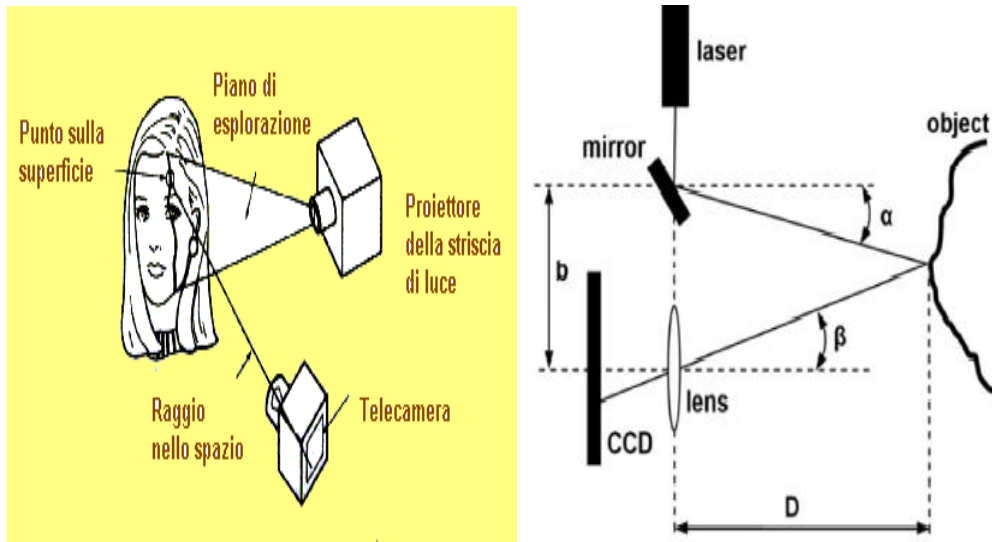
I **sistemi ottici passivi** sono, in generale, basati sull'acquisizione di molte immagini RGB prese da diversi punti di vista, sulla ricostruzione del contorno dell'oggetto ripreso (silhouette) e, infine, sull'integrazione di tali profili per la ricostruzione del modello 3D. Questi sistemi definiscono le coordinate dell'oggetto soltanto tramite l'uso delle informazioni contenute nelle immagini acquisite (per esempio, la fotogrammetria). Sono estremamente economici, semplici da usare e producono direttamente un modello completo; al contrario, la qualità e l'accuratezza del modello generato può risultare abbastanza bassa

per alcune tipologie di applicazioni. Come anticipato di questa categoria fa parte la fotogrammetria; un esempio è fornito dal sistema Atos II scanner (Gom GmbH, Germany), che sfrutta la proiezione di luce strutturata in combinazione con la fotogrammetria. Un altro esempio di sistemi passivi è lo **shape from silhouette (SFS)**. Esso è un metodo per la ricostruzione del modello dell'oggetto scansionato sfruttando le immagini della sua silhouette (sagoma). Una silhouette 2D è il set di contorni chiusi che delimita la proiezione dell'oggetto sul piano immagine. Queste tecniche iniziano con l'acquisizione delle immagini dell'oggetto da diversi punti di vista. Per ogni immagine viene estratta la silhouette usando tecniche di segmentazione. La segmentazione della silhouette dal resto dell'immagine e la sua successiva combinazione con altre silhouette prese da altre visuali è la parte fondamentale dell'elaborazione di questo tipo di dati. In generale però questo problema è stato già risolto e sono stati resi disponibili alcuni algoritmi dedicati [3]. L'output dell'algoritmo SFS è conosciuto come Visual Hull. Questo metodo ha alcuni vantaggi tra cui semplicità di utilizzo e implementazione, ma pecca in accuratezza. Per aumentare l'accuratezza si dovrebbe aumentare il numero di fotocamere utilizzate.

I sistemi ottici attivi sono in grado di acquisire in maniera rapida e precisa una grande quantità di dati, per questo rappresentano attualmente le tecnologie più utilizzate. Sono costruiti da una sorgente e da un sensore, e, mentre la sorgente emette una determinata forma di fonte illuminante, il sensore acquisisce il segnale di ritorno riflesso dalla superficie dell'oggetto. La sorgente scandisce lo spazio in modo regolare ed il sistema restituisce una matrice 2D che identifica e codifica i punti rilevati sulla superficie dell'oggetto (range-map). Queste tecnologie possono essere classificate in metodi a tempo di volo, a triangolazione o metodi interferometrici.

I sistemi attivi a triangolazione raggiungono un livello di accuratezza da medio ad alto con la possibilità, in pochi minuti di misurare migliaia di dati 3D in forma di nuvola di punti x, y, z. Il campo di lavoro di questi sistemi dipende dalla distanza relativa tra sorgente e sensore: normalmente, con una singola ripresa, si possono acquisire zone che vanno da poche decine di cm^2 al m^2 . La geometria dell'oggetto viene ricostruita tramite un processo di triangolazione

basato sull'impiego di tre informazioni: la direzione di emissione della fonte illuminante e le posizioni relative sia della sorgente che del sensore. Come fonte di emissione possono essere usate sia sorgente laser (laser scanner 3D) che sorgente di luce bianca. Questi sistemi raggiungono un buon livello di accuratezza, ed in alcuni casi, sono anche in grado di acquisire l'informazione di colore RGB.



$$D = \frac{b}{\tan(\alpha + \beta)}$$

Figura 4: scanner laser a triangolazione.

Questo tipo di approccio è sfruttato anche negli scanner 3D a luce strutturata. Questi scanner proiettano un pattern di luce sul modello (es. strisce) e, attraverso l'analisi della deformazione dei bordi del pattern proiettato sulla superficie, effettuata con complessi algoritmi, viene ricavata la geometria del modello. In particolare la deformazione indotta dalla superficie dell'oggetto viene acquisita tramite una telecamera digitale e sfruttata per il calcolo delle coordinate tridimensionali. Per citare qualche esempio di tecnologie che usano la luce strutturata: MobilCam 3D system (ViaLUX GmbH, Germany), e Broadway scanner (Artec Group, Inc., CA, USA). Anche il Kinect viene classificato come scanner a luce strutturata; verrà dedicato un capitolo ad esso data l'importanza che ricopre in questo settore.

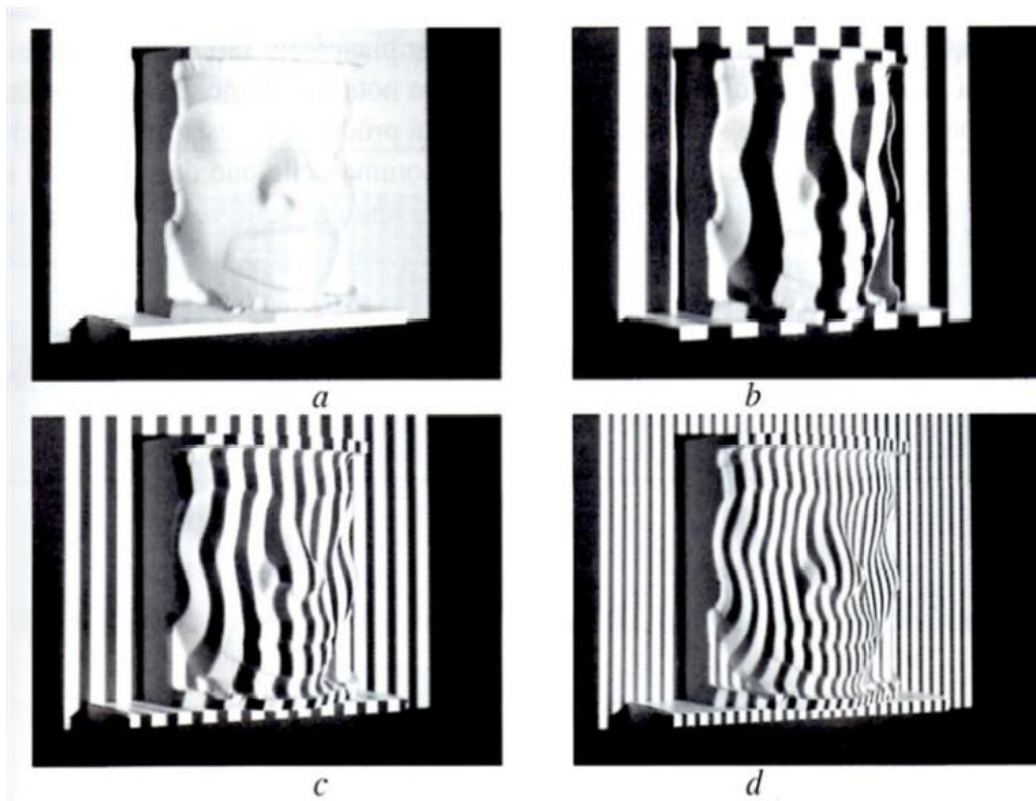
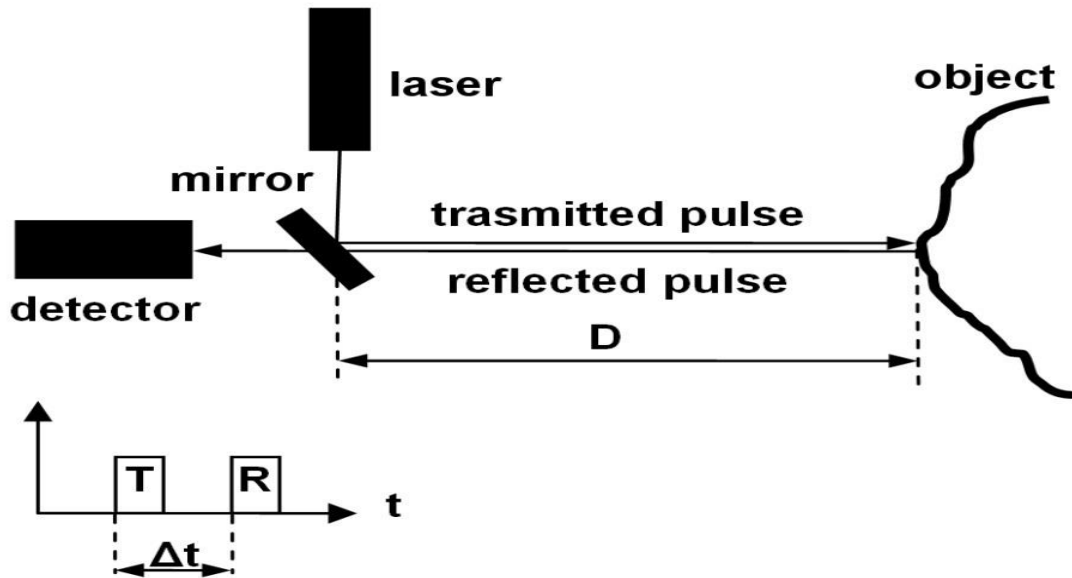


Figura 5: esempio di tecnica di scansione a luce strutturata sulla superficie di un oggetto: viene mostrato l'aumento della densità delle frange dall'immagine a) all'immagine b) [9].

I **sistemi a tempo di volo**, emettono un segnale ad impulsi ed utilizzano un sensore per la misura del tempo impiegato dal raggio laser per raggiungere la superficie dell'oggetto e ritornare in modo riflesso al dispositivo. In generale, sono meno precisi dei precedenti, ma permettono di acquisire superfici più ampie in una singola immagine. L'accuratezza di questi sensori è limitata alla precisione con cui si riesce a misurare l'intervallo temporale e, le distanze misurabili con questa tecnica vanno da poche decine di metri a qualche chilometro, con un'accuratezza che varia, di conseguenza, da qualche millimetro a qualche metro. Sono solitamente utilizzati per rilievi architettonici.



$$D = c * \Delta t / 2$$

Figura 6: illustra il principio di funzionamento degli scanner a tempo di volo.

Nei **metodi interferometrici** viene proiettato sulla superficie dell'oggetto un pattern che varia nello spazio o nel tempo, seguito da un mescolamento della luce riflessa con un pattern di riferimento [6]. Il pattern di riferimento demodula il segnale per rilevare eventuali variazioni nella geometria della superficie. Poiché la risoluzione è dell'ordine di grandezza della lunghezza d'onda del laser, risultano sistemi molto accurati e sono largamente utilizzati nel controllo delle superfici o nelle procedure di calibrazione delle CMM.

Tra i sistemi ottici attivi si trovano anche quelli che sfruttano la *proiezione di Frange di Moirè*. Il loro principio di funzionamento sfrutta l'interferenza meccanica della luce che si genera quando due reticoli angolarmente sfasati e costituiti da linee chiaro scure equispaziate vengono sovrapposti. Nascono le cosiddette frange di Moirè che hanno la proprietà di adagiarsi sulle superfici e permettono, tramite una sofisticata elaborazione di immagini, la determinazione delle coordinate dei punti appartenenti alla superficie stessa. Il vantaggio rispetto alla scansione laser consiste nella maggior velocità di digitalizzazione del modello dal momento che è disponibile per l'elaborazione l'intero campo visivo della telecamera. Però i sistemi che usano questo tipo di tecnologia peccano in accuratezza per quanto riguarda la profondità dei punti;

inoltre essi mostrano problemi di discriminazione di fase quando la superficie non presenta variazioni dolci nella forma [3].



Figura 7: mostra la proiezione di frange di Moirè.

Esistono altre tecniche che possono essere classificate come attive o passive, in base alle caratteristiche dello specifico scanner. Vengono presentate di seguito illustrandone le caratteristiche generali:

Shape from focusing:

La profondità dei punti può essere determinata sfruttando le proprietà focali di una lente. Una lente di una camera può essere usata come rilevatore di profondità sfruttando il fenomeno della “depth of view”. Infatti, la sagoma dell’immagine risulta sfocata di una quantità proporzionale alla distanza tra i punti dell’oggetto e il piano dell’oggetto a fuoco. Questa tecnica si è evoluta da un approccio passivo ad uno attivo. Nel caso passivo, la struttura della superficie è usata per determinare la quantità di sfocatura. Nel caso attivo viene proiettata luce sull’oggetto per evitare eventuali difficoltà nel discriminare la struttura della superficie. Alcuni studi [10] in questo ambito (attivo) hanno mostrato una moderata accuratezza fino a $1/400$ del campo esplorato, ma con una risoluzione spaziale non uniforme. In particolare la risoluzione di profondità risulta sostanzialmente minore della risoluzione perpendicolare all’asse di osservazione. Infine gli oggetti non allineati perpendicolarmente all’asse ottico, e aventi una dimensione della profondità più grande che la vista di profondità, verranno a fuoco in differenti range, complicando l’analisi della scena.

Shape from shadows:

Questa tecnica è una variante dell'approccio a luce strutturata. Il modello 3D dell'oggetto viene costruito catturando l'ombra di un oggetto noto proiettata sul target quando la luce si sta muovendo. I vantaggi di questo approccio sono basso costo e semplice hardware, anche se a scapito di una bassa accuratezza [3].

Shape from texture:

L'idea è di trovare possibili trasformazioni degli elementi della struttura (texels) per riprodurre l'orientazione della superficie dell'oggetto. Per esempio, data una superficie piana, l'immagine di un texel circolare è un'ellisse con valori degli assi che variano in funzione del suo orientamento. Un articolo di review delle tecniche sviluppate in questo ambito si trova nella bibliografia [11]. In ogni caso questi metodi risultano generalmente semplici e low cost, a discapito di una bassa accuratezza.

Shape from shading:

Questa tecnica richiede l'acquisizione dell'oggetto da un angolo di vista e variando la posizione della sorgente di luce, il che risulta in una variazione dell'ombreggiatura sulla superficie in esame. Una variante di questo metodo implica la variazione delle condizioni di illuminamento. Una review degli algoritmi utili per estrarre le informazioni delle superficie in esame, partendo dalla mappa di riflessione dell'immagine è nella referenza [12]. Anche in questo caso i componenti hardware sono semplici e low-cost, ma l'accuratezza ottenuta è bassa, specialmente in presenza di fattori esterni che influenzano la riflettanza dell'oggetto.

Onde millimetriche

Per onde millimetriche si intende la porzione di spettro con frequenze comprese convenzionalmente da 30 GHz a 300 GHz, e perciò con lunghezza d'onda tra 1 e 10 mm. Anche per gli scanner che sfruttano queste onde possono essere distinti in attivi o passivi [1]. Come è facilmente intuibile gli attivi usano i pattern riflessi delle onde millimetriche proiettate sul corpo, mentre i passivi elaborano le onde millimetriche emesse dal corpo umano. Questi sistemi offrono il vantaggio in termini di tempo ed efficienza di poter essere utilizzati senza che il paziente si tolga gli indumenti, in quanto le onde millimetriche

attraversano gli indumenti ma non la pelle [1]. Ciò potrebbe introdurre però anche problemi etici a causa del fatto che le parti intime del soggetto possono essere viste. Attualmente sono usati negli aeroporti per il rilevamento di oggetti metallici sotto gli indumenti e offrono una valida alternativa agli scanner a raggi X a bassa radiazione.

1.4 Pregi e difetti delle tecniche di scansione 3D

Le principali caratteristiche delle tecniche di imaging ottiche sono riassunte nella tabella sottostante. Ovviamente vengono indicate le caratteristiche generali delle tecniche; occorre tenere sempre in conto la possibilità di eccezioni. Il fatto che queste tecniche non acquisiscano tramite il contatto diretto è un punto a loro favore in quelle applicazioni nelle quali si va a scansionare un oggetto fragile o deformabile. L'evoluzione delle CPU e delle memorie ha portato negli ultimi anni alla possibilità di elaborare i dati sempre più velocemente e con migliori performance. Per questa ragione le tecniche che richiedono una costosa elaborazione dei dati (esempio fotogrammetria passiva) sono più efficienti che in passato.

TECHNOLOGY	STRENGTH	WEAKNESS
Laser triangulators	Relative simplicity Performance generally independent of ambient light High data acquisition rate	Safety constraint associated with the use of laser source Limited range and measurement volume Missing data in correspondence with occlusions and shadows Cost
Structured Light	High data acquisition rate Intermediate measurement volume Performance generally dependent of ambient light	Safety constraints, if laser based Computationally middle-complex Missing data in correspondence with occlusions and shadows Cost
Stereo Vision	Simple and inexpensive High accuracy on well-defined targets	Computation demanding Sparse data covering Limited to well defined scenes Low data acquisition rate
Photogrammetry	Simple and inexpensive High accuracy on well-defined targets	Computation demanding Sparse data covering Limited to well defined scenes Low data acquisition rate
Time-of-Flight	Medium to large measurement range Good data acquisition rate Performance generally independent of ambient light	Cost Accuracy is inferior to triangulation at close ranges
Interferometry	Sub-micron accuracy in micro-ranges	Measurement capability limited to quasi-flat surfaces Cost Limited applicability in industrial environment
Moiré fringe range contours	Simple and low cost Short ranges	Limited to the measurement of smooth surfaces
Shape from focusing	Simple and inexpensive Available sensors for surface inspection and microprofilometry	Limited fields of view Non-uniform spatial resolution Performance affected by ambient light (if passive)
Shape from shadows	Low cost Limited demand for computing power	Low accuracy
Texture gradients	Simple and low cost	Low accuracy
Shape from shading	Simple and low cost	Low accuracy

Figura 8: paragone tra le tecniche di scansione [3].

In figura viene presentato uno schema riassuntivo delle tipologie di scanner ottico nel quale vengono sottolineati i punti di forza e i punti deboli di ogni metodo. Per la scelta ottimale del metodo da utilizzare occorre tenere in

considerazione questi aspetti. In questo ampio panorama tecnologico, molte ricerche si sono anche concentrate anche sull'integrazione di dati ottenuti con metodologie differenti, per cercare di fornire maggiori informazioni nello stesso modello 3D. Un esempio di ciò potrebbe essere l'integrazione di dati provenienti da strumenti con un diverso grado di accuratezza [4].

Modelli tridimensionali realistici di corpi umani sono richiesti in molte applicazioni, si pensi all'animazione, alla realtà virtuale, all'antropometria e alla medicina, alla cosmetica, al comparto sartoriale etc. Diverse sono le considerazioni da tener presente quando l'oggetto da scansionare è una persona [13]:

- Problemi pratici (movimenti, respiro, capelli, occhi);
- Limiti fisici (statura, taglia, peso);
- Comfort del processo di scansione (postura da mantenere durante la scansione, tempo necessario, ambiente circostante);
- Approvazione della tecnologia di scansione (non nociva, sicura per gli occhi);
- Riservatezza dei dati;
- Problemi psicologici (“shock 3D”, nudità).

Gli ultimi anni hanno visto lo sviluppo e l'utilizzo di nuovi tipi di dispositivi, le telecamere di profondità come il Microsoft Kinect. Rispetto ai tradizionali scanner 3D sono in grado di catturare i dati di profondità e di immagine alle frequenze video, sono compatti, poco costosi, e facili da utilizzare [14].

1.5 Esempi di scanner

Vengono riportati in questa sezione alcuni esempi di scanner disponibili commercialmente. La gamma di dispositivi è praticamente illimitata, vengono riportati solo alcuni esempi che rappresentano tipologie di scanner particolarmente interessanti.

1.5.1 Laser scanner

In generale i laser scanner risultano ancora i sistemi più diffusi. Tra essi citiamo il seguente esempio:

Minolta Vivid 9i:

Konica Minolta Vivid-9i è uno scanner laser che sfrutta il principio della triangolazione. L'apparecchiatura è dotata di un gruppo di tre ottiche intercambiabili, tele, middle e wide, con distanza focale rispettivamente a 25, 14 e 8 mm e definizione compresa fra un massimo di 307000 (con area di scansione pari a 1300x1100 mm in condizione fine) e un minimo di 76000 punti (campo acquisibile pari a 111x84 mm in condizione fast). Le caratteristiche dello strumento sono state riassunte nelle tabelle seguenti. Inoltre ha la capacità di acquisizione della texture RGB del materiale e del dato geometrico.


	Focal Distance (mm)	Typical Scanning Distance (mm)
TELE	25	600 – 700
MIDDLE	14	700 – 800
WIDE	8	800 – 900

Figura 10: informazioni sullo strumento Konica Minolta Vivid-9i [5].




TELE Lens 	Measurement Distance		500	600	800	1000	2500
	mm						
	Object Size mm	Horizontal	93	111	148	185	463
Vertical		69	83	111	139	347	
MIDDLE Lens 	Measurement Distance		500	600	800	1000	2500
	mm						
	Object Size mm	Horizontal	165	198	263	329	823
Vertical		124	148	198	247	618	
WIDE Lens 	Measurement Distance		500	600	800	1000	2500
	mm						
	Object Size mm	Horizontal	299	359	478	598	1495
Vertical		224	269	359	449	1121	

Tabella 1: area acquisibile per ogni lente, con valori in mm. I dati sono stati presi dal datasheet dello strumento.

	TELE	MIDDLE	WIDE
<u>Accuracy</u>			
Distance: 600m	±0.05 mm	±0.10 mm	±0.20 mm
Distance: 1000 mm	±0.10 mm	±0.20 mm	±0.40 mm
<u>Precision</u>			
Distance: 600m	0.008 mm	0.016 mm	0.032 mm
Distance: 1000 mm	0.024 mm	0.048 mm	0.096 mm
<u>Resolution</u>			
Distance: 600m	111 x 83 x 40 mm	198 x 148 x 64 mm	359 x 269 x 108 mm
Distance: 1000 mm	185 x 139 x 110 mm	329 x 247 x 176 mm	598 x 449 x 284 mm
Conditions: Using Field Calibration System and Konica Minolta service software; Temperature: 20°C, Relative humidity: 65% or less			

Tabella 2: parametri presi dal datasheet dello strumento.

1.5.2 Scanner a luce strutturata

I sistemi a luce strutturata presentano molti vantaggi, tra i quali la velocità di acquisizione e la possibilità di sviluppare hardware low-cost. Proprio per la loro velocità di acquisizione essi possono essere sfruttati per la scansione 4D, cioè una scansione 3D real-time, con la possibilità di analizzare il movimento del soggetto. Per questi motivi risultano i sistemi che si sono maggiormente sviluppati negli ultimi anni; ne citiamo alcuni esempi:

Artec Eva – L - Spider:

Questi tre scanner appartengono alla stessa casa costruttrice e sfruttano il principio della luce strutturata. Come si vede in figura vengono commercializzati nella versione hand-held. Al prezzo di circa 5000 euro ciascuno, viene fornito sia lo scanner che il software per la ricostruzione real-time. Lo scanner cattura fino a 16 immagini 3D al secondo e le immagini vengono allineate automaticamente. Le caratteristiche tecniche vengono riportate in tabelle. Si nota in tutti i casi una buona risoluzione e accuratezza.

Specifiche	Artec Spider	Artec L	Artec Eva Lite	Artec Eva
Acquisizione texture	SI	NO	NO	SI
Risoluzione 3d fino a	0,1 mm	1,0 mm	0,5 mm	0,5 mm
Accuratezza punti 3D fino a	0,03 mm	0,2 mm	0,1 mm	0,1 mm
Risoluzione Texture 3D	1,3 mp	n/d	n/d	1,3 mp
Colori	24 bpp	n/d	n/d	24 bpp
Sorgente luminosa	diodo blu	luce flash (no laser)		
Campo visuale A x L distanza min	90 x 70 mm	598 x 459 mm	214 x 148 mm	214 x 148 mm
Campo visuale A x L distanza max	180 x 140 mm	1.196 x 918 mm	536 x 371 mm	536 x 371 mm
Distanza lavoro	0,17 - 0,35 m	0,8 - 1,6 m	0,4 - 1,0 m	0,4 - 1,0 m
Fotogrammi al secondo, fino a	7,5 fps	15 fps	16 fps	16 fps
Velocità di acquisizione fino a	1.000.000 pt/s	288.000 pt/s	2.000.000 pt/s	
Formato output	OBJ, PTX, STL, WRML, ASCII, AOP, CSV, PLY			
Capacità di elaborazione	40.000.000 triangoli / 1Gb RAM			
Elaborazione multi-processore	SI			
Dimensioni A x L x P	190x130x140 mm	353 x114x70 mm	261x158x63,7 mm	261x158x63,7 mm
Peso	0,85 kg	2,3 kg	0,85 kg	0,85 kg
Compatibilità	Windows Vista x64, Windows 7 x64			
Requisiti minimi del computer	Intel® Core™ Quad (I5 o I7 raccomandato), 8 Gb Ram, NVIDIA GeForce 9000			
Requisiti per supporto stereografico	NVIDIA Quadro o superiore			

Tabella 3: mostra le caratteristiche tecniche degli scanner Artec.

Lo scanner Artec L è adatto alla scansione di grandi oggetti come l'intero corpo umano, un cavallo od una macchina; esso ha una risoluzione 3D fino a 1,0 mm e pesa 2,3 Kg.

Il software a corredo in questi sistemi è in grado di riconoscere la geometria del solido ed allineare automaticamente le immagini 3D rilevate senza l'utilizzo di nessun tipo di marcatore o sistema di referenziazione. Per eventuali approfondimenti si rimanda al sito ufficiale (sitografia 1).

TC² e Sizestream:

TC² e Sizestream sono esempi di sistemi per la scansione dell'intero corpo umano, offrono una buona accuratezza e si possono considerare relativamente low-cost se il loro prezzo viene paragonato ad altri sistemi simili. Il prezzo di entrambi si aggira intorno ai 10000 euro. Visivamente si presentano come una cabina per il cambio abiti. La scansione dura qualche secondo, addirittura le ultime versioni si dicono in grado di lavorare in 4D. Entrambe le tecnologie fanno uso di 3-4 sensori contemporaneamente, per aggirare il problema sorto finora della necessità di moto relativo tra il soggetto e l'unico sensore. I sensori lavorano in una maniera simile al Kinect, anche se non sono stati trovati molti dettagli riguardanti il loro funzionamento. Essi vanno a costruirsi una mappa di profondità sfruttando l'emissione di infrarossi e seguendo la tecnica della luce strutturata. Non è questa la sede per snocciolare tutte le questioni relative ai sistemi in questione, per ulteriori dettagli si rimanda ai rispettivi siti web (sitografia (2) e (3)).

Viene riportato in figura il sistema Sizestream, mentre nella tabella vengono riportati alcuni dati inerenti TC².

Specifications		Operational Parameters	
Dimensions:	3.75'x5.5'	Average Circumferential Accuracy:	~ 3 mm
Area:	20 sq. ft.	Data Point Grid Density:	~ 1 mm x 1 mm
Power:	15 amp (one outlet)	Scan Duration:	~ 7 Seconds
Technology:	Depth Sensor	Data Density:	~ 1.5 - 2 Million
Operation System:	Windows 7	Scan Volume:	2.1 m h x .9 m w x 0.7 m d
		Scan Views:	4 angles, 4 heights

Tabella 4: riporta alcuni dati inerenti TC².



Figura 11: scanner total body Sizestream.

Fuel 3D scanify:

E' un sistema di scansione 3D portatile dalle prestazioni altamente professionali ma con un prezzo accessibile. Genera modelli 3D di altissima qualità, con una fedele cattura dei colori, per un'ampia gamma di applicazioni creative.

Essendo uno scanner palmare, si utilizza in modalità point-and-shoot, prendendo istantanee 3D di un oggetto da "cucire" successivamente insieme in post-produzione. Le dimensioni dell'oggetto non costituiscono quindi un problema per il Fuel 3D. Lo scanner palmare Scanify Fuel3D utilizza un sistema di cattura ad alta risoluzione (~ 350 micron) per la forma e le informazioni del colore degli oggetti. Scanify Fuel3D è il primo scanner 3D al mondo a combinare telecamere stereo pre-calibrati con immagini fotometriche per catturare ed elaborare i file in pochi secondi. Il costo dello scanner Scanify Fuel3D è meno di un decimo del costo di analoghi sistemi di scansione 3D portatili (1000 euro). Fuel3D eccelle particolarmente nella cattura di oggetti e superfici, tra cui: pelle (ad esempio volti e parti del corpo), tessuti, soggetti organici (ad es. piante, foglie, pietra, muratura, mattoni), cibo, opere (ad esempio dipinti con texture), statue e sculture.

La tecnologia Scanify Fuel3D è stata originariamente sviluppata all'Università di Oxford per l'imaging medicale. Il risultato è stato utilizzato con successo

negli ospedali di tutto il mondo. Da quel momento la Fuel3D Inc. ha deciso di sviluppare ulteriormente questa tecnologia ad alta risoluzione, portando avanti la mission di rendere la scansione 3D professionale accessibile a tutti.

Caratteristiche tecniche del Fuel 3D Scanify:

- risoluzione: campionamento a circa 350 micron.
- migliore risoluzione ottenibile: 250 micron.
- volume di scansione: 35 centimetri in diagonale in una singola immagine.
- dimensioni dello scanner: 255mm x 245mm x35mm
- peso dello scanner: 0,53 kg
- distanza operativa ottimale: circa 40cm
- requisiti minimi hardware: 2 GB di RAM, 1 GB di spazio su disco rigido
- processore dual -core.
- software incluso
- scanner palmare point-and-shoot
- cattura del colore
- telecamere stereo pre-calibrate
- esportazione in mesh poligonale: PLY, OBJ, STL
- connessione: USB
- compatibilità di sistema: Windows (7, 8 Pro), Mac OSX (10,7+)

Scanner 3D Sense:

Una soluzione interessante è quella proposta dallo scanner 3D Sense. Al prezzo di 350 euro viene fornito sia il sensore (come si vede dalla figura è hand-held) che il software per l'elaborazione delle immagini. Come per altri sensori non viene reso noto nel dettaglio come avviene la ricostruzione dell'immagine, se non che viene indicato che viene usato un approccio che si basa sulla luce strutturata. Vengono riportate alcune caratteristiche tecniche fornite dalla casa:

Massima risoluzione: 0.9 mm ; Accuratezza: 1 mm ; Massima frequenza: 30 fps

Depth image size: 240(w) x 320(h) px

Volume di scansione: Min: 0.2 * 0.2 * 0.2 m Max: 3 * 3 * 3 m

Range di lavoro: Min: 0.35 m Max: 3 m



Figura 12: scanner Fuel 3D scanify (a sinistra) e scanner Sense (a destra).

Styku:

Styku è un sistema che sfrutta il Kinect V2. Come si nota dalla figura esso è un sistema molto semplice: una pedana rotante motorizzata viene posta ad una distanza predeterminata da una colonna contenente il Kinect. Il soggetto sale sulla pedana che ruota su sé stessa con un periodo di 30 s; nel frattempo il Kinect acquisisce le immagini che saranno elaborate real-time da un software dedicato. Rappresenta un sistema semplice da un punto di vista hardware; il software per l'elaborazione delle immagini invece è stato dovuto creare ad-hoc. Non esistono in effetti attualmente software per l'elaborazione in real-time di immagini provenienti da Kinect V2, mentre ce ne sono svariati per quanto riguarda la prima versione del Kinect (ad esempio Skanect, software che verrà in seguito utilizzato per effettuare una prova di scansione col Kinect V1). Il prezzo di questo sistema si attesta intorno ai 7500 euro.



Figura 15: mostra il sistema Styku.

Il software fornito dal produttore necessita però di prestazioni elevate da parte del PC sul quale è installato per offrire le prestazioni desiderate. In particolare il PC deve avere un processore da almeno 3.1 GHz a 64 bit dual core, 4 GB di RAM, e una porta dedicata USB 3.0. Altre specifiche da soddisfare si possono trovare sul sito ufficiale (sitografia (7)). Se queste specifiche da parte del PC sono soddisfatte, i produttori garantiscono livelli di precisione e accuratezza assolutamente paragonabili a quelli del Kinect V2 (eventuali informazioni di questo tipo si possono trovare nel paragrafo dedicato).

Inoltre in uscita, oltre ad avere il modello 3D, vengono anche fornite le distanze tra parti anatomiche (esempio: lunghezza arti, misura circonferenza della vita, ecc.).

MC3D:

E' stato trovato un articolo molto interessante [15] riguardante un prototipo sviluppato dall'università di Northwestern University Evanston. Attualmente il prodotto risulta solo un prototipo, ma gli autori contano di commercializzarlo nel più breve tempo possibile. Si tratta comunque di una tecnica che si basa sull'emissione di luce strutturata, ma attraverso quello che viene nominato nell'articolo come Motion Contrast 3D [15]. Non è questa la sede per chiarire

nei dettagli il funzionamento di questo innovativo sensore, per eventuali informazioni si rimanda direttamente all'articolo in questione. Secondo le prove effettuate nell'articolo, questo sensore potrebbe arrivare a livelli di accuratezza e risoluzione quasi paragonabili ai laser scanner e molto superiori a quelli del Kinect, come illustrato nell'esempio riportato in figura. Secondo quanto poi riportano gli autori, esso potrebbe venire commercializzato ad un prezzo sostanzialmente accessibile; è chiaro che in tal senso non si possono avere informazioni aggiuntive dato che il prodotto non è arrivato ancora sul mercato.

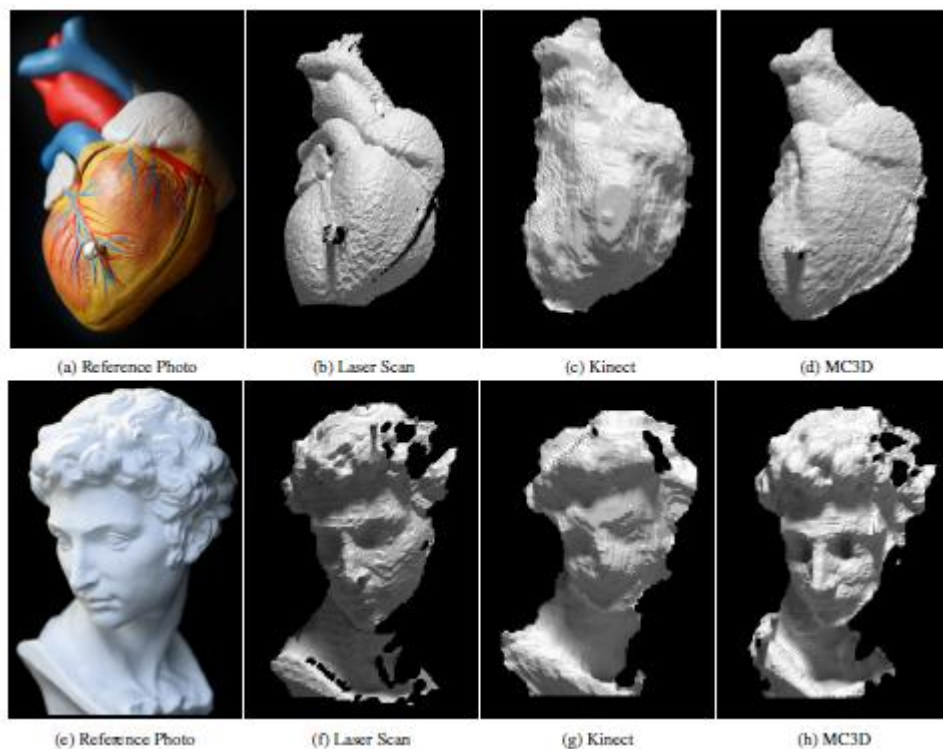


Figura 14: mostra la ricostruzione di immagini 3D con laser scanner, Kinect e MC3D. Viene riportata da [15].

1.5.3 Scanner a onde millimetriche

Esaminiamo un esempio di scanner a onde millimetriche:

Intellifit:

Scanner progettato per essere utilizzato nel settore dell'abbigliamento. Sebbene non sia stata trovata una sorgente indicante la frequenza dello scanner Intellifit, risulta probabile che lo scanner sia basato su una scansione attiva a 30 GHz. [1]. Intellifit utilizza un braccio di scansione cilindrico con un emettitore di onde millimetriche e 196 piccole antenne in un array lineare che inviano onde millimetriche e ricevono il segnale riflesso dal corpo. Molte persone possono essere scannerizzate in un tempo molto breve, ciò offre un vantaggio rispetto agli scanner ottici e laser che richiedono al soggetto di spogliarsi. Lo scanner in questione può essere utile per raccogliere informazioni su un grande numero di persone in breve tempo. Questo sistema ha il vantaggio di essere molto veloce, ma pecca in accuratezza (sitografia (4)).



Figura 13: riporta lo scanner Intellifit. Viene riportata da [1].

1.5.4 Tabelle riportanti varie tipologie di scanner

Sono attualmente presenti in commercio numerosi esempi di scanner 3D, la tabella seguente riassume alcune caratteristiche essenziali dei più diffusi:

Scanner	Cyberware	4ddynamics	4ddynamics	Vitronics	Vitronics	TC ²	SizeStream	SpaceVision	3dMbody
Type	WBX	Mephisto EX-pro or CX-pro	Gotcha	Vitus Smart LC	Vitus Smart XXL	KX-16	3D body scanner	Cartesia	Flex8
City	Monterey, CA	Antwerp	Antwerp	Wiesbaden	Wiesbaden	Cary, NC	Cary, NC	Tokyo	Atlanta, Georgia
Country	USA	Belgium	Belgium	Germany	Germany	USA	USA	Japan	USA
Web	www.cyberware.com	www.4ddynamics.com	www.4ddynamics.com	www.vitronic.de	www.vitronic.de	www.tc2.com	www.sizestream.com	www.space-vision.jp	www.3dmd.com
Price indication (US\$)	240,000	60,000-120,000	10,000	37,000	65,000	10,000	15,000	20,000	190,000
Technique	Laser line	Structured light projection	Structured light projection	Laser line	Laser line	Infrared	Infrared	Laser structured light	Stereophotogrammetry
Scanner space (w * d * h) (cm)	261 * 235 * 290	300 * 300 * 160	NA	220 * 220 * 260	210 * 210 * 290	114 * 168 * 200	107 * 165 * 216	198 * 229 * 240	440 * 346 * 225
Scanned volume (w * d * h) (cm)	130 * 50 * 200	100 * 100 * 200	NA	90 * 90 * 2100	120 * 120 * 2100	90 * 70 * 210	95 * 70 * 215	70 * 60 * 200	79 * 76 * 213
Scan heads	4	4-8	4-8	3	4	16	14	9	9
Point-point distance	<2 mm	<1 mm	<1 mm	7/cm ³	27/cm ³	1 mm	1 mm	3 mm	<1 mm
Scan duration (s)	17	2	1	12	12	3	6	2	0.002
Output format	.ply	.ply	.ply	ASCII .obj .stl	ASCII .obj .stl	Derived body dimensions	Derived body dimensions	.obj	TSB OBJ STL WRL PLY
Color	Yes	Yes	Yes	No	No	Yes	Yes	Yes	Yes
Moving components	Yes	No	No	No	No	No	No	No	No
Application software	Converters	No	No	(www.human-solutions.com)	(www.human-solutions.com)	Clothing related	Clothing related	no	various
Remarks						PC included			4D scanning possible

Tabella 5: vengono forniti alcuni esempi dei sistemi di scansione 3D per l'intero corpo che sono attualmente in commercio. Presa da [1].

	Price	Resolution	Precision	Max Scn Hgt	Technology	Export Frmt
Kinect	\$110	0,051 mm	/	/	/	/
Occipital SS	\$349	Up to 0,5 mm	Up to 4 mm	/	/	/
3DS Sense	\$399	1mm	0,9mm	3000x3000x3000	Strutured Light	.stl, .obj, .ply
DAVID	\$550	Up to 0,1 mm	/	165x165x165	Laser Triangulat*	/
DAVID LSKv2	\$680	0.5% of obj size	/	/	/	/
MB Digitizer	\$799	Up to 0.5 mm	Up to ± 2 mm	203x203x203	Laser Triangulat*	.stl, .thing
Shining ES-S	\$899	1.3 Mega pixel	Up to 0,1 mm	700x700x700	White Light	/
Fuel 3D	\$1,5K	Up to 0.25 mm	Up to 0.3 mm	350x350x350	Structured Light	.stl, .ply
Zeus	\$2,5K	0.125 mm	0.250 mm	/	/	.ply, .obj, .stl, .aio
RV 3D SS	\$11,7K	Up to 0,05 mm	Up to 0,03 mm	/	Structured Light	/
EVA Lite	\$12,9K	Up to 0.5 mm	Up to ± 0.1 mm	/	Structured Light	obj, .ply, .wrl, .stl, .aop, .ascii, .ptx, .e57, .xyzrgb
EVA	\$18K	Up to 0.5 mm	Up to ± 0.1 mm	750x750x1600	Structured Light	obj, .ply, .wrl, .stl, .aop, .ascii, .ptx, .e57, .xyzrgb
Spider	\$22K	Up to 0.1 mm	Up to ± 0.03 mm	180x140x140	Structured Light	obj, .ply, .wrl, .stl, .aop, .ascii, .ptx, .e57, .xyzrgb
Nikon MMcx	\$35K	/	Upto 0,0023 mm	/	Laser Beams	.stl
FARO LSArm	\$35K	/	/	/	Laser Arm	/
Mantis VF5	\$39K	Up to 0.5 mm	Up to 0.05 mm	/	Structured Light	obj, .ptx, .stl, .ascii, .pl
Creaf HS700	\$57K	Up to 0,05 mm	Up to 0.03 mm	/	Structured Light	/
S RexC CS	\$59,5K	0.035 mm	0.01 mm	/	Structured Light	.stl
S Comet L3D	\$70,9K	0,018 mm	/	/	Structured Light	/
S RexC 4	\$79,9K	0,030 mm	/	/	Structured Light	.stl /
S Comet 6	\$140K	0,030 mm	/	/	Structured Light	/

Tabella 6: riporta alcuni esempi di scanner coi relativi prezzi. Presa da sitografia (6).

La corsa allo scanner più economico ha portato alle soluzioni più disparate. Sono nate addirittura applicazioni per gli smartphone che ricostruiscono l'immagine 3D dalle informazioni della telecamera. Sono nati anche altri progetti tipo quello denominato 'sardauscan 3d scanner', che promette la costruzione di un laser scanner al costo di 30 dollari. In questo link (sitografia (5)) vengono fornite le istruzioni per la costruzione fai-da-te dello scanner. Per informazioni si può consultare il link, in questa sede non viene approfondito questo argomento. E' stato citato per portare un esempio di possibile scanner ultra-low cost, del quale però non si hanno informazioni riguardanti aspetti fondamentali da tenere presente quali la risoluzione.

Di esempi di tecniche di scansione ne sono state presentate diverse, e l'elenco potrebbe continuare ancora, data la vastità dei prodotti sul mercato in tale settore. Dato che un elenco completo risulterebbe impossibile da fare, ci si è limitati agli scanner che sembrano presentare i risultati migliori o che comunque rappresentano delle vere innovazioni in merito alla tecnica utilizzata per la scansione.

Per concludere questo paragrafo si voleva solo citare un interessante lavoro italiano [16] che ha portato poi allo sviluppo di un prototipo e al relativo brevetto. In questo articolo gli autori presentano uno scanner hand-held che loro stessi definiscono "optinertial". Si tratta essenzialmente di un sensore ottico sopra al quale viene posizionato un MARG (magnetometro, accelerometro, giroscopio), attraverso il quale possano venire determinati la posizione e l'orientamento del sensore attraverso un filtro di Kalman. Ulteriori dettagli si possono trovare nel relativo articolo; questa tecnica viene solo menzionata per illustrare come le tecniche di scansione possano essere sempre in evoluzione, e in particolare come si possano integrare anche informazioni derivanti da diverse tipologie di sensori (ottico e inerziale in questo caso).

1.6 Software

Non solo l'hardware, ma anche il software di questi sistemi di scansione sta incontrando una grande spinta propulsiva. Lo scopo principale del software risulta ovviamente quello della fusione delle immagini ricavate dall'hardware; perciò è fondamentale una ottimizzazione del processo di scansione e la "riparazione" delle immagini acquisite [1]. L'operazione di "fill-holes" è piuttosto complicata. La presenza di buchi è dovuta a diversi fattori; è normale che andando ad aumentare il numero di fotocamere e proiettori la dimensione e la quantità dei buchi verrà ridotta, ma dati mancanti saranno sempre presenti [1], quindi sono indispensabili tecniche di "filling". La ricostruzione della superficie di Poisson [17] è uno strumento che usa i punti della superficie iniziale e crea una nuova superficie chiusa senza buchi.

Il lavoro di Allen et al. [18] presenta l'uso di un modello di corpo umano per colmare i buchi presenti durante la scansione in maniera più realistica.

Da sottolineare è il fatto che i file delle scansioni corporee contengono una quantità enorme di dati. Se per esempio assumessimo un corpo con una superficie di 2 m^2 e una risoluzione di 1 mm, una scansione conterebbe 2 milioni di coordinate. Sebbene i computer siano in grado di memorizzare una quantità sempre crescente di dati, sarebbe importante memorizzare i dati nella maniera più efficiente possibile. La migliore via per derivare le informazioni più importanti è la PCA (analisi delle componenti principali) [19]. I componenti più importanti sono relativi al peso, all'altezza e alla lunghezza di braccia e gambe, ma in generale con solo 50 parametri può essere ricostruito il contorno generale di una scansione 3D dell'intero corpo umano.

2. MICROSOFT KINECT

Microsoft Kinect (inizialmente conosciuto con il nome Project Natal), è un accessorio per Xbox 360 sensibile al movimento del corpo umano, che permette al giocatore di interagire con la console senza l'utilizzo di alcun controller.



Figura 16: Microsoft Kinect.

Sebbene fosse stato inizialmente distribuito esclusivamente per Xbox 360, a partire dal 1 febbraio 2012 Microsoft ha reso disponibile una versione della periferica per i PC dotati del sistema operativo Windows 7 e Windows 8. Inoltre, nell'estate 2011 sono stati rilasciati i driver ufficiali per poter utilizzare Kinect nel proprio Personal Computer, favorendo lo sviluppo di varie applicazioni tra il mondo degli sviluppatori di software[20-21].

2.1 Storia

Kinect è stato annunciato al pubblico il 1 giugno 2009 durante la conferenza stampa di Microsoft all'E3 2009 (Electronic Entertainment Expo) con il nome Project Natal, poi rinominato Kinect alla presentazione ufficiale all'E3 2010. L'hardware di Kinect si basa su tecnologie della 3DV, una compagnia israeliana specializzata in tecnologie di riconoscimento dei movimenti tramite videocamere digitali che Microsoft ha prima finanziato e poi acquisito nel 2009, e sul lavoro della israeliana PrimeSense, che ha poi dato in licenza la tecnologia a Microsoft. Il software di Kinect è stato invece sviluppato internamente dai Microsoft Game Studios e, più precisamente, dai programmatori della Rare, la quale ha dovuto cancellare altri progetti per dedicarsi interamente alla periferica. L'uscita di Kinect ha provocato un grande sommovimento nella comunità di sviluppo libero di software per PC e Mac. Una moltitudine di programmatori è al lavoro sul reverse engineering sulla periferica, allo scopo di trovare nuove modalità di utilizzo di un dispositivo che si configura come il primo di una serie di sistemi che potrebbero davvero portarci ad un futuro alla Minority Report.

2.2 Campi di utilizzo

Kinect è uno strumento nato come componente aggiuntivo per la console XBOX 360, quindi il contesto principale rimane quello dei videogiochi. Alcuni esempi in commercio che utilizzano Kinect come unico controller sono Kinect Adventures, Kinect Animals ed il gioco di ballo Dance Central. Il costo relativamente basso, insieme alle funzionalità di body-tracking che il dispositivo offre, ha fatto incuriosire molti sviluppatori software: dopo qualche mese infatti il Web si è popolato di una moltitudine di applicazioni non strettamente legate al contesto dei videogames. Tra queste si possono citare programmi di visualizzazione di immagini, di riconoscimento del volto, plugin per software già esistenti e addirittura prototipi di riproduzione di una persona attraverso l'utilizzo di due Kinect.

Grazie a questo sensore è possibile eliminare mouse, tastiere e telecomandi: persone disabili potrebbero utilizzare questi dispositivi per abbattere numerose barriere che impediscono loro l'utilizzo della tecnologia. Il sensore può essere utilizzato anche nell'ambito della robotica utilizzando ad esempio la visione artificiale per il movimento degli automi, oppure per far volare un elicottero o per far muovere un piccolo veicolo, evitando ostacoli mediante la creazione di una mappa 3D dell'ambiente. Il dispositivo permette anche di risparmiare enormi budget per la realizzazione un sistema di motion capture.

Infine potrebbero essere realizzate anche applicazioni anche per l'intrattenimento e nel campo della medicina. La prima cosa che bisogna fare per lavorare con questi sensori è analizzarne l'hardware e il supporto fornito agli sviluppatori. In secondo luogo bisogna scoprire i driver e le funzionalità fornite dalle librerie.

2.3 Hardware

Kinect è dotato di telecamera RGB, sensore di profondità a raggi infrarossi composto da un proiettore a infrarossi e da una telecamera sensibile alla stessa banda. La telecamera RGB ha una risoluzione di 640 x 480 pixel, mentre quella a infrarossi usa una matrice di 320 x 240 pixel.



Figura 17: Microsoft Kinect: componenti interni

E' presente anche un insieme di microfoni utilizzato dal sistema per la calibrazione dell'ambiente in cui ci si trova mediante l'analisi della riflessione del suono sulle pareti e sull'arredamento. In tal modo il rumore di fondo e i suoni del gioco vengono eliminati ed è possibile riconoscere correttamente i comandi vocali. La barra del Kinect è motorizzata lungo l'asse verticale e segue i movimenti dei giocatori, orientandosi nella posizione migliore per il riconoscimento dei movimenti. I componenti, escluso il piccolo motore, non sono molto robusti: tutti gli ingranaggi sono in plastica e quindi facilmente usurabili.

Dato che le immagini vengono elaborate direttamente sul Kinect, Microsoft ha inserito nella periferica due schede ed una barra di supporto metallico in parallelo, separati da quattro distanziatori metallici. Sul lato è montata una piccola ventola per il raffreddamento che evita il surriscaldamento e il danneggiamento del dispositivo. Un altro componente particolare è la cella di Peltier posta tra l'IR e la barra metallica, che svolge il ruolo di sistema di raffreddamento (la cella di Peltier è un dispositivo termoelettrico costituito da molte giunzioni ad effetto Peltier in serie). Tra la telecamera RGB e il proiettore

IR è inoltre situato anche un piccolo LED di stato. Il dispositivo è dotato di un array di quattro microfoni collegato alla scheda madre con un connettore a cavo unico, che permette al Kinect di ricevere i comandi vocali. I microfoni sono tutti e quattro orientati verso il basso, tre sono sul lato destro del dispositivo ed uno sul lato sinistro: la scelta di questo orientamento è stata decisa da Microsoft in quanto ritenuto quello ottimale per la raccolta del suono. Per alimentare la periferica, Microsoft usa ben 12 Watt mentre le porte USB sono in grado di fornire in media 2,5 Watt di potenza, pertanto Kinect necessita anche di un cavo di alimentazione. Inoltre è da notare che il cavo proprietario USB che la periferica usa per collegarsi alle normali console potrebbe non essere riconosciuto dai sistemi operativi su PC: è possibile quindi utilizzare un adattatore, di norma venduto insieme al Kinect, che Microsoft inserisce nella confezione per questioni di compatibilità con le prime versioni delle console XBOX 360.

Ora che è stato descritto il sistema visivo ed uditivo del dispositivo bisogna capire come avviene l'elaborazione dei dati.

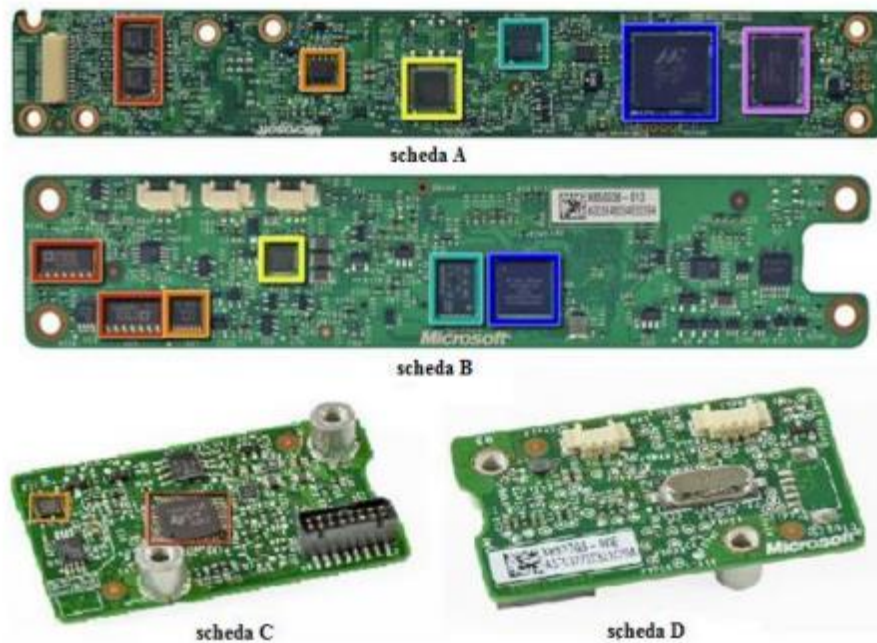


Figura 18: Schede hardware poste all'interno del Kinect.

La scheda madre ha sei chip. Osservando la scheda A della figura 8, da sinistra a destra sono rispettivamente montati:

- stereo ADC con microfono preamplificato (Wolfson Microelectronics WM8737G);
- N-Channel PowerTrench MOSFET (Fairchild Semiconductor FDS8984);
- controller USB 2.0 hub (NEC uPD720114);
- Pacchetto SAP 6 mm x 4,9 mm – SPI flash (H1026567 XBOX1001 X851716-005 Gepp);
- SoC per il controller dell'interfaccia della macchina fotografica (Marvell AP102);
- SDRAM DDR2 512 megabit (Hynix H5PS5162FF).

Nella scheda B sono montati:

- 2 CMOS Rail-to-Rail amplificatore d'uscita a basso costo (Analog Devices AD8694);
- un campionario e convertitore A/D 8 bit ad 8 canali, con interfaccia 12C (TI ADS7830I);
- Allegro Microsystems A3906;
- una memoria Flash 1Mb x 8 oppure 512Kb x 16 (ST Microelectronics M29W800DB);
- un processore d'immagini Soc Sensor (PrimeSense PS1080-A2).

Infine la scheda C dispone di un controller audio USB frontale e centrale (TI TAS1020B) e sul lato sinistro della scheda si può vedere un accelerometro (Kionix MEMS KXSD9) che probabilmente è utilizzato come stabilizzatore d'immagine.

2.4 Caratteristiche tecniche

Campo visivo (in gradi)	58°H, 45°V, 70°D
Risoluzione x/y (a 2 m dal sensore)	3 mm
Risoluzione z (a 2 m dal sensore)	10 mm
Range di lavoro	0.8 m - 3.5 m
Interfaccia USB	2.0
Consumo	2.25 W
Immagine di profondità	320 x 240 pixel
Immagine a colori RGB	640 x 480 pixel

Frame-rate	30 fps
Stream audio	4 canali 16 bit (fc 16KHz)

Tabella 7: Caratteristiche tecniche di Microsoft Kinect.

Il sistema è teoricamente in grado di misurare le distanze all'interno di un'area di 2 metri con un margine di errore di 1 cm (parametro fornito direttamente da Microsoft).

2.5 Funzionamento del sensore

Per capire come funziona la periferica è possibile dividere il sistema in tre sotto blocchi: il monitoraggio dei movimenti, il riconoscimento vocale ed il motore. La prima cosa che interessa ad un utente è farsi riconoscere. Questo compito è svolto dal sistema ottico, che permette di monitorare i movimenti in tempo reale. La struttura è molto complicata ma fornisce funzionalità che fino ad ora erano disponibili solo a fronte di spese notevoli. Il sistema, come abbiamo visto, è composto principalmente da due parti: un proiettore IR e una fotocamera RGB. La prima cosa che la periferica fa è creare una mappa di profondità della scena separando l'utente dagli oggetti inanimati. A seconda della distanza dal sensore, le figure compariranno in diversi colori sullo schermo: gli oggetti in grigio scuro sono quelli più lontani, in grigio chiaro quelli più vicini. Le figure umane che vengono riconosciute possono essere blu, verde, rosso, e così via. Per creare la mappa di profondità il proiettore IR del Kinect getta un fascio di raggi infrarossi (Microsoft ha assicurato che non sono pericolosi per il corpo e per la vista). I raggi riflessi vengono catturati dalla telecamera ad infrarossi e con un algoritmo viene determinato quanto può essere lontano o vicino un punto. Sulla base di queste informazioni è possibile assegnare una tonalità di grigio ad oggetti più o meno distanti. L'immagine acquisita dal sensore viene fatta passare in diversi filtri, in modo tale che il dispositivo possa capire cosa è una persona e cosa non lo è. L'intero sistema segue delle linee guida, riguardanti la conformazione generale del corpo. Questo permetterà in fase di

calibrazione di non confondere gli oggetti con le persone. Non tutte le persone hanno però la stessa conformazione fisica, inoltre spesso vengono utilizzati indumenti larghi o cappelli. Per questo vengono inseriti tra le linee guida degli algoritmi di riconoscimenti possibili cappelli o maglioni larghi. Quando questa fase di calibrazione è terminata il dispositivo converte la parte dell'immagine relativa all'identificazione del corpo in uno scheletro che nella fase di tracking permette il movimento delle articolazioni, escluse per ora quelle delle dita. L'intero sistema lavora a 30 fps ed ha 200 pose comuni per lo scheletro precaricate. Nel caso l'utente faccia un movimento che impedisca alla telecamera di riconoscere il gesto fatto, l'algoritmo userà una delle pose tra quelle presenti che più si adatta al caso per non perdere il tracciamento dell'utente.

La seconda funzionalità importante è il riconoscimento vocale. Abbiamo visto infatti che il Kinect ha un array di quattro microfoni pronti per essere usati a tale scopo.

Il sottosistema microfoni ha come obiettivo di essere sensibile al riconoscimento delle voci fino a 10 metri di distanza cercando di ignorare rumori ambientali. La larghezza del dispositivo Kinect è dovuta proprio al sistema di microfoni. Durante i suoi lavori Microsoft ha effettuato test in 250 abitazioni utilizzando 16 microfoni disposti in modo differente.

La soluzione ottima è stata l'array di quattro microfoni rivolti verso il basso, in modo da mantenere pulita la parte anteriore della periferica. L'array funziona meglio nel raccogliere le voci a distanza, ma necessita di aiuto. C'è un'unità di elaborazione a bordo del *Kinect* che toglie il rumore che si crea in prossimità dei sistemi surround 5.1, mentre un secondo sistema software *Beam Forming* agisce con la telecamera per capire dove si sta creando una possibile fonte di suoni intorno all'utente. Questo permette di aiutare il *Kinect* a capire quando non è l'utente a parlare ma altre persone intorno a lui. Il sistema di riconoscimento vocale, attivo solo su console, ha un modello acustico per ogni singolo paese che comprende anche diversi dialetti regionali. I microfoni sono in ascolto in ogni momento rendendo il sistema *Kinect open-mic*.

A questo punto rimane da capire come funziona il sotto blocco motore. L'idea di inserire un piccolo motore all'interno della base inferiore del Kinect è dovuta alle necessità di calibrazione nelle diverse abitazioni europee, asiatiche ed

americane. Per Microsoft la telecamera doveva essere in grado di muoversi in su ed in giù per calibrare ogni singolo spazio, effettuando movimenti di circa 30 gradi. Un'altra funzionalità importante del motore è quella dello zoom per la fotocamera, che permette di espandere lo spazio visivo. Questa funzionalità è stata progettata per la video chat di *Kinect*, in modo che se più utenti sono nella scena ed uno viene tagliato il motore gestisce in automatico lo zoom della fotocamera per far entrare tutti i partecipanti della conversazione sullo schermo.

2.6 Calcolo della mappa di profondità:

Le immagini di profondità semplificano molti problemi di *computervision* e di interazione come ad esempio:

- rimozione del background e segmentazione della scena;
- tracking di oggetti e persone;
- ricostruzione 3D degli ambienti;
- riconoscimento della posa del corpo;
- implementazione di interfacce basate su gesti.

La mappa di profondità della scena è un'immagine M di dimensione $m \times n$, in cui ciascun pixel $p(x, y)$ codifica la distanza nella scena 3D del punto (x, y) dal sensore. In letteratura esistono molte tecniche per calcolarla e le più utilizzate sono: la *stereo triangolazione*, che calcola la profondità di un oggetto combinando le immagini catturate da due telecamere, la tecnica *time of flight*, che invece utilizza solo una telecamera calcolando la distorsione che subisce un segnale luminoso proiettato sugli oggetti ed infine la *proiezione di pattern* (tecnica usata sul *kinect*). Questa ultima tecnica utilizza un sistema di visione stereo costituito da una coppia proiettore-telecamera. Nella scena viene proiettato un pattern luminoso (infrarosso) noto e la profondità degli oggetti è calcolata studiando la sua distorsione sugli oggetti. È possibile implementare questa tecnica con varie tecnologie:

- proiezione di linee e studio della loro curvatura sugli oggetti: non molto veloce e soggetta a disturbi quando gli oggetti sono in movimento;
- proiezione di pattern 2D periodici e studio del loro scostamento quando colpiscono gli oggetti: l'informazione 3D è ottenuta in real-time ma non è in grado di lavorare su lunghe distanze per via della distorsione del pattern;

-proiezione di pattern 2D pseudo-casuali: anche in questo caso i pattern sono 2D ma la loro casualità permette di ottenere accurate mappe 3D in real-time con un sistema molto semplice ed economico. In questo tipo di sensori la mappa di profondità della scena viene costruita utilizzando la tecnica della proiezione di pattern pseudo-casuali, mediante un sistema di visione stereo costituito da un proiettore IR e da una telecamera sensibile alla stessa banda. Questa tecnologia è stata brevettata nel 2005 da Zalevsky, Shpunt, Maizels e Garcia, sviluppata e integrata in un chip dalla compagnia israeliana *PrimeSense*.

Questa tecnica si basa su 3 elementi principali:

1. proiettore di pattern pseudo-casuali IR;
2. telecamera IR (in tecnologia CMOS);
3. unità di controllo (chip PS1080).

Il proiettore è molto semplice ed economico ed è costituito da un emettitore di raggi IR e da un generatore di pattern che devia tali raggi nella scena imprimendo ad essi angolazioni pseudo-casuali. Una volta proiettato il pattern, la telecamera acquisisce l'immagine IR della scena contenente il pattern distorto e la invia all'unità di controllo che costruisce così la mappa di profondità della scena. Con questo sistema è necessario acquisire una singola immagine e quindi utilizzare un singolo algoritmo di matching per determinare la profondità degli oggetti (dato che l'altra immagine è costituita dal pattern originale che è noto). L'unità di controllo, conoscendo la struttura del pattern proiettato, calcola lo scostamento fra i punti proiettati e quelli ripresi dalla telecamera determinando in questo modo la mappa di profondità della scena. La dimensione dei punti proiettati, la loro forma e orientazione non è costante ma dipende dalla distanza dal sensore. Il brevetto individua tre differenti tipologie di punti per tre differenti regioni dello spazio come mostrato in figura: una prima regione R1 (0.8 – 1.2 m) in cui si ha la massima risoluzione, una seconda regione R2 (1.2 – 2 m) con una buona accuratezza e una terza regione R3 (2 – 3.5 m) dove l'accuratezza è scarsa. PrimeSense non ha solo sviluppato un nuovo sistema di acquisizione della mappa 3D della scena, ma soprattutto una tecnologia capace di elaborare questi dati realizzando molti task di processing 3D. Infatti il chip PS1080 ha al suo interno molte funzionalità di processing per il tracciamento, per la ricostruzione della scena e per il riconoscimento di gesti.

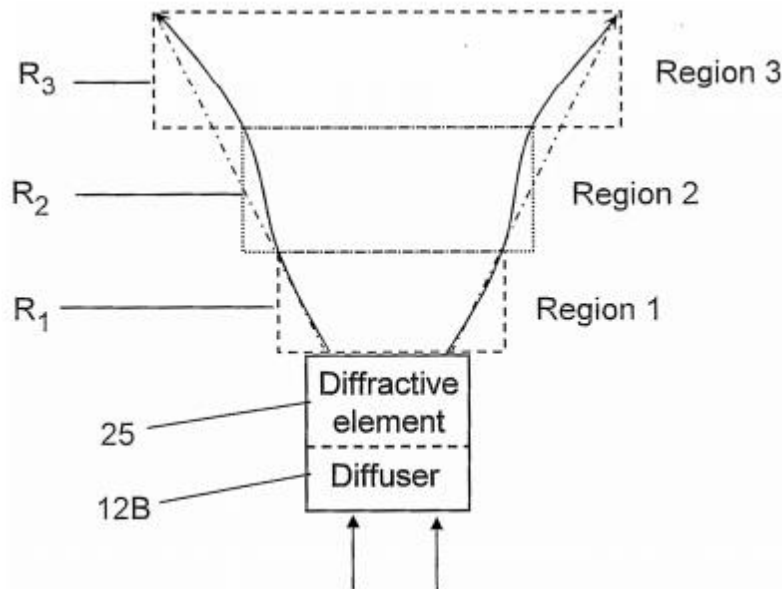


Figure 19: Regioni dello spazio individuate dal brevetto PrimeSense.



Figure 20: Esempio di pattern di proiezione IR.

2.7 Kinect 2.0

Per dovere di cronaca viene citato anche il Kinect One, conosciuto anche come *Kinect 2.0*, che rappresenta l'evoluzione del Kinect. In generale le componenti hardware sono simili al Kinect.

Feature	Kinect for Windows 1	Kinect for Windows 2
Color Camera	640 x 480 @30 fps	1920 x 1080 @30 fps
Depth Camera	320 x 240	512 x 424
Max Depth Distance	~4.5 M	~4.5 M
Min Depth Distance	40 cm in near mode	50 cm
Horizontal Field of View	57 degrees	70 degrees
Vertical Field of View	43 degrees	60 degrees
Tilt Motor	yes	no
Skeleton Joints Defined	20 joints	26 joints
Full Skeletons Tracked	2	6
USB Standard	2.0	3.0
Supported OS	Win 7, Win 8	Win 8
Price	\$299	TBD

Component	V1	V2
Technique	Structured-light	Time-of-flight
Depth Sensor	1.8 to 3.5 m	1.3 to 3.5 m
IR Depth Image	320 x 240	512 x 424
Colour Image	640 x 480	1920 x 1080
Infra-red Image	no IR	512 x 424
Audio Stream	16 kHz, 16-bit	48 kHz, 16-bit
Field of View hor:	57 degrees	70 degrees
Field of View ver:	43 degrees	60 degrees
Minimum Latency	102 ms	20-60 ms

Tabelle 8-9: confronto tra Kinect V1 e V2. Entrambe prese da [22].

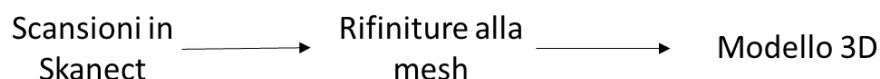
La principale differenza sta nella tecnica di acquisizione dei dati: mentre il Kinect V1 sfrutta la tecnica della luce strutturata, il Kinect V2 va a ricostruire la mappa di profondità sfruttando la tecnica del tempo di volo. Vengono presentate due tabelle che paragonano i sensori. Per ulteriori dettagli riguardanti il confronto tra i due sensori si rimanda a questo articolo interessante [22].

2.8 Ricostruzione 3D mediante Kinect

Si è voluta andare a testare la qualità delle acquisizioni di superfici 3D tramite l'uso del Kinect. Si è scelto di utilizzare il Kinect perché attualmente risulta lo scanner a minor prezzo in grado di fornire comunque una buona accuratezza nella ricostruzione delle superfici. Diciamo che il prezzo di questo sensore si aggira intorno ai 150 euro, ai quali vanno aggiunti 50 euro per l'adattatore per il PC. Esistono in realtà altri sensori simili al Kinect, e di prezzo solo leggermente superiore, come ad esempio Asus Xtion, o lo scanner 3D sense. Si è scelto comunque di utilizzare il Kinect data la sua enorme diffusione commerciale, che ha portato anche a diversi studi in letteratura con i quali fosse

possibile confrontare i dati ottenuti e soprattutto dai quali si apprendono le migliori condizioni di utilizzo del sensore [26-27-28-29]. Inoltre sono disponibili diversi software per l'elaborazione di immagini direttamente in uscita dal Kinect, mentre per gli altri sensori no. Tra questi citiamo Skanect (versione gratuita se viene utilizzata per scopi didattici, altrimenti la licenza commerciale costa 100 euro), 3D builder, Kscan3D, Scenect, Reconstruct me, Artec studio, Kinect fusion. La maggior parte dei software citati è gratuita, data l'enorme diffusione che questi sistemi stanno incontrando. Per eventuali informazioni relative a prezzi e performance dei singoli software si rimanda ai relativi siti web. Una particolarità: dei software sopra citati solo Kinect fusion e Kscan3D supportano il Kinect V2, gli altri sono progettati appositamente per la V1.

Le seguenti acquisizioni sono state svolte presso il laboratorio di Analisi del Movimento del Centro Protesi INAIL di Vigorso di Budrio (BO), dove erano già presenti tutte le strumentazioni necessarie. Per acquisire le immagini e creare i modelli 3D mediante scanner Kinect occorrono, oltre al sensore, un Personal Computer dotato di scheda grafica accelerata (ATI, Nvidia o Intel) ed un software dedicato. In particolare, dopo aver valutato direttamente le prestazioni dei software Kscan3D (sitografia (8), *LMI Technologies*) e Skanect (sitografia (44), *Occipital*) si è scelto di utilizzare il *software Skanect* in quanto automatizza molto il processo di ricostruzione rispetto a quanto non faccia il suo concorrente. Infatti, sfruttando i processori grafici a bordo della scheda video, il software riesce ad acquisire più frame per secondo e a fare il tracking degli oggetti, aggiungendo alla nuvola di punti le nuove informazioni, grazie a meccanismi di correlazione. Viene riportato uno schema estremamente semplificato della procedura seguita:



Viene riportato passo-passo il procedimento seguito:

- 1° *STEP*: una volta aperto il software si è selezionato il tipo di target (es: oggetto nel caso della protesi, corpo nel caso di paziente) e le dimensioni della box di scansione ($1 \times 1 \times 1 \text{ m}$);
- 2° *STEP*: Il target è stato tenuto in postazione fissa, mentre Kinect gli veniva fatto ruotare attorno. Per avere buoni risultati il sensore è stato mosso molto lentamente, con una frequenza di circa un giro al minuto (6 gradi al secondo), controllando di volta in volta il feedback visivo fornito dal software (i frames acquisiti con successo vengono evidenziati in verde, in rosso quelli che non sono stati correttamente catturati).
- 3° *STEP*: il modello è stato texturizzato con i colori naturali, per una migliore valutazione visiva del risultato, ed è stato esportato in formato PLY.
- 4° *STEP*: In MeshLab si sono eliminate le regioni di non interesse e qualora necessario si è modificata la mesh, semplificandola e chiudendo eventuali buchi.

Sapendo che le scansioni 3D effettuate con un Kinect sono influenzate molto dalle prestazioni del software e del PC utilizzato, in fase di prova, per verificarne l'accuratezza, sono stati posizionati sul target marcatori di diversa forma e dimensione.

Vengono riportate le immagini ottenute post elaborazione dei dati:



Figura 21: Ricostruzione tridimensionale del corpo.

La scansione è avvenuta impostando in Skanect come scena *body*, come recording feedback *GPU*, e come feedback quality *High*. A termine della ricostruzione è stato applicato il colore. In MeshLab sono stati eliminate le zone di non interesse. La mesh ricostruita è ricca di vertici e faccette ma non ricostruisce i più piccoli dettagli. Ovviamente una volta che si ha a disposizione il file in formato PLY, può risultare anche immediato passare ad una stampa 3D, ma ciò non era parte integrante del progetto di tesi.

Per valutare la risoluzione sono state fatte varie prove e sono stati usati a tal scopo dei marker (banalmente sono state usate delle monete e dei pezzettini di scotch). Di seguito viene illustrato come il sistema sia in grado di rilevare i marker.



Figura 22: viene mostrata una delle prove nelle quali si utilizzano marker di diversa dimensione.

Seguendo le indicazioni presenti in letteratura, le acquisizioni sono state effettuate in un ambiente nel quale era stata ridotta al massimo la luce solare, per evitare interferenze con gli infrarossi [26]. Per contro è allo stesso modo importante che la stanza sia ben illuminata da luce artificiale. Durante le acquisizioni si è inoltre cercato di rispettare il limite minimo di distanza tra

Kinect e soggetto: come si apprende da letteratura infatti [24-25-26], il Kinect deve essere usato per la ricostruzione di oggetti distanti almeno 50 cm. Come anticipato in precedenza, durante l'acquisizione il soggetto rimaneva immobile, mentre un aiutante gli faceva girare attorno il Kinect. Sono state effettuate anche delle prove in cui il soggetto era posizionato su una pedana rotante motorizzata, e il Kinect veniva tenuto immobile sul tavolo, ma in questo caso le acquisizioni non sono risultate soddisfacenti. Il motivo è presto spiegato: nel caso di soggetto sulla pedana rotante il Kinect risultava sempre alla stessa altezza rispetto al soggetto, quindi non riusciva a ricostruire in maniera accurata la parte superiore e la parte inferiore della persona. Invece nella situazione opposta il Kinect non solo veniva fatto ruotare attorno al soggetto, ma gli veniva imposto un movimento sinusoidale, in modo da riuscire ad acquisire con una certa accuratezza anche testa e piedi. Un possibile altro metodo per automatizzare il processo (senza bisogno di una persona che muova il Kinect) potrebbe essere quello di fondere le due tecniche di acquisizione presentate: il soggetto rimane immobile su una pedana rotante, il Kinect viene posizionato su un'asta che si alza/abbassa autonomamente ad una certa velocità (che sarebbe da calcolare in funzione del periodo di rotazione della pedana). Risulta chiaro comunque che la qualità del modello risultante dipenderà in ogni caso da tantissimi fattori: abbiamo già citato l'illuminazione e la distanza minima del Kinect, ci sono da aggiungere altri fattori, come per esempio la durata di acquisizione (e quindi il periodo di rotazione attorno al soggetto) o la presenza di eventuali zone non raggiunte. In ogni caso le nostre prove volevano dare un'indicazione qualitativa dei risultati. Si è pensato di vedere se la risoluzione ottenuta fosse paragonabile a quella dichiarata in letteratura [22-28]. Si è per questo scopo utilizzati i marker citati in precedenza. Dalla letteratura si evince che la risoluzione del Kinect risulta dell'ordine del mm, e ciò è stato verificato nelle acquisizioni tramite l'uso dei suddetti marker. E' stato confermato ad un livello qualitativo il livello di risoluzione; non ci si è sbilanciati in una valutazione quantitativa dato che, come anticipato, la qualità delle acquisizioni dipende da diversi fattori.

Se a partire dal modello 3D si volessero ricavare le distanze tra punti notevoli del corpo (esempio lunghezza arti, larghezza spalle o bacino) basterà importare il modello in Meshlab, dove c'è una funzionalità ad hoc per questo scopo.

3. RICOSTRUZIONE DI SUPERFICI 3D TRAMITE L'UTILIZZO DI ACCELEROMETRI E MAGNETOMETRI

Parte rilevante di questa tesi è stata la ricerca e lo studio di fattibilità di un nuovo possibile metodo di ricostruzione di superfici che non rientra tra le metodologie sopra nominate. Si tratta di un nuovo tipo di approccio al problema nel quale si è pensato di andare a stimare la superficie corporea (e in generale qualsiasi superficie) tramite l'uso di un grande numero di sensori (accelerometri e magnetometri) distribuiti sulla superficie. Questo approccio potrebbe portare numerosi vantaggi rispetto ad una tradizionale scansione 3D. Innanzitutto potrebbe portare ad una stima della superficie corporea sia in condizioni statiche che dinamiche senza l'ausilio di apparecchiature esterne (come telecamere o sorgenti di luce); inoltre esso potrebbe trovare potenziali applicazioni nel modellismo 3D e nel motion capture, con eventuali sbocchi nello studio della biomeccanica del movimento. Si potrebbe pensare ad esempio alla costruzione di una muta di materiale elastico, adattabile quindi ad essere indossata da persone diverse, al cui interno vengano inseriti, in posizioni predefinite, accelerometri e magnetometri triassiali. Nel caso statico i sensori inerziali sono in grado di fornire il loro orientamento rispetto al rispettivo campo di misura: gli accelerometri forniscono in uscita le tre componenti dell'accelerazione di gravità e i magnetometri l'intensità del campo magnetico lungo i rispettivi tre assi. Nel caso dinamico verrà aggiunta all'uscita degli accelerometri la componente di accelerazione derivante dal movimento. Si rende necessario l'uso dei magnetometri in aggiunta agli accelerometri in quanto dalle uscite di questi ultimi non si è in grado di stimare l'angolo di rotazione attorno all'asse verticale; in pratica dall'uscita di un accelerometro in condizione statica si ricavano solo due dei tre angoli che permettono di costruire la matrice di rotazione per passare dal sdr di laboratorio a quello locale del singolo accelerometro. Per ogni chip integrato (accelerometro + magnetometro triassiali) quindi, risulterà immediato stimare la matrice di rotazione per passare dal sdr di laboratorio a quello locale, e quindi avere a

disposizione i versori tangenti e normali ad ogni sensore. A partire da queste informazioni locali si può pensare di ottenere informazioni globali sulla superficie complessiva. I sistemi presentati nei capitoli precedenti hanno un grosso limite nella ricostruzione di superfici che presentano ‘occlusioni’, mentre questo limite verrebbe superato in questo caso. Un ulteriore vantaggio di questo approccio potrebbe essere rappresentato dal prezzo. Infatti un singolo chip che contiene accelerometro triassiale e magnetometro triassiale costa qualche euro; perciò con 200/300 euro potrebbe essere costruita una muta contenente centinaia di sensori. Questa strada infatti è motivata dallo sviluppo tecnologico in tale ambito; i sensori in questione, grazie ai progressi delle tecnologie CMOS-MEMS, risultano sempre più piccoli e meno costosi.

Si tratta di un approccio innovativo, del quale anche in letteratura si sono trovati pochi esempi. Tra gli esempi trovati citiamo [30] e [32]. In entrambi i casi però la situazione risulta semplificata dal fatto che viene imposta la distanza tra i sensori. Nell’articolo di Hoshi et al.[30], i sensori vengono direttamente collegati da link rigidi (vedi figura 23). A partire dalle uscite dei sensori vengono ricavati i 3 angoli (roll, pitch, yaw) che permettono di ottenere la matrice di rotazione per ogni link rigido rispetto al sdr globale (formule 1 e 2).

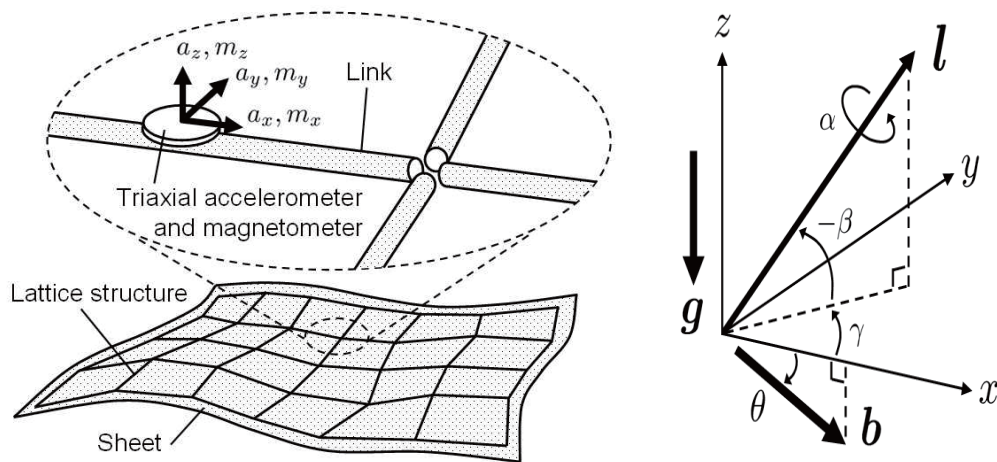


Figura 23: mostra la disposizione dei sensori lungo i link rigidi e il relativo sdr.

$$\begin{aligned}
\mathbf{G} &\equiv \begin{bmatrix} c\gamma & -s\gamma & 0 \\ s\gamma & c\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\beta & 0 & s\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\beta & 0 & c\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\alpha & -s\alpha \\ 0 & s\alpha & c\alpha \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} c\gamma c\beta & c\gamma s\beta s\alpha & -s\gamma c\alpha & c\gamma s\beta c\alpha & +s\gamma s\alpha \\ s\gamma c\beta & s\gamma s\beta s\alpha & +c\gamma c\alpha & s\gamma s\beta c\alpha & -c\gamma s\alpha \\ -s\beta & & & c\beta s\alpha & \\ & & & & c\beta c\alpha \end{bmatrix} \\
\mathbf{m} = \mathbf{G}^T \mathbf{b} &= b c\theta \begin{bmatrix} c\gamma s\beta \\ c\gamma s\beta s\alpha - s\gamma c\alpha \\ c\gamma s\beta c\alpha + s\gamma s\alpha \end{bmatrix} - b s\theta \begin{bmatrix} -s\beta \\ c\beta s\alpha \\ c\beta c\alpha \end{bmatrix} \quad \mathbf{a} = \mathbf{G}^T \mathbf{g} = -g \begin{bmatrix} -s\beta \\ c\beta s\alpha \\ c\beta c\alpha \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{1}$$

$$\tag{2}$$

Avendo a disposizione l'informazione della lunghezza dei link, è risultato relativamente semplice integrare le informazioni relative all'orientamento di ogni link e ricostruire la geometria finale. Questa non è la sede per discutere approfonditamente del suddetto articolo, quindi per eventuali approfondimenti si rimanda alla lettura dell'articolo [30]. Viene fatto solo notare che gli autori dell'articolo si sono posti in una condizione semplificata per la risoluzione del problema, imponendo una distanza fissa tra i sensori. Ciò non può essere supposto per lo scopo di questo paragrafo, quindi ci si è ispirati solo in parte all'articolo.

Anche nell'articolo di Saguin-Sprynski et al., [32] viene presentato un metodo simile. In questo caso gli autori hanno disposto 9 chip integrati (accelerometri + magnetometri) su un foglio deformabile, ma nel quale la distanza tra sensori non poteva variare. Gli autori hanno presentato un interessante algoritmo per la ricostruzione real-time della deformazione della superficie.

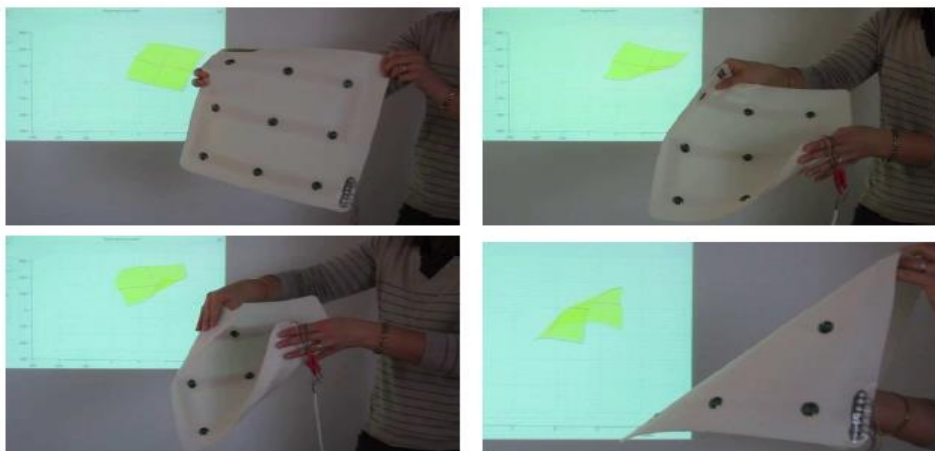


Figura 24: mostra la ricostruzione della superficie sensorizzata. Immagine presa da [32].

Per eventuali approfondimenti si rimanda anche in questo caso all'articolo citato.

In ogni caso entrambi gli articoli citati utilizzano una metodica per la stima della superficie che non è generalizzabile al caso di distanza tra sensori non nota.

Infatti si può supporre si debba andare a costruire una muta nella quale vengano inseriti i sensori inerziali, far indossare la muta ad un soggetto, e andare a ricostruire la sua superficie corporea. In questo caso è normale che il tessuto della muta debba essere deformabile consentendo ai sensori di muoversi rispetto alla situazione di partenza. Per questo la condizione di distanza fissa tra sensori non è applicabile per questo scopo.

Vanno fatte alcune precisazioni riguardo all'uso di sensori inerziali in questo ambito. Si è partiti, data la complessità del problema, limitandosi al caso statico.

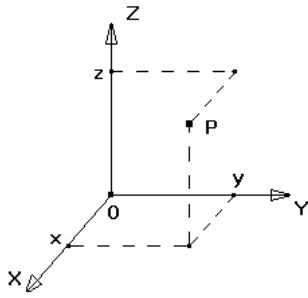
Per questo scopo non sono adatti i giroscopi (in quanto si prevede una acquisizione in statica), al contrario degli accelerometri. Infatti anche in statica l'uscita degli accelerometri non è nulla, a causa dell'accelerazione di gravità. Pertanto l'uscita degli accelerometri ci permette di stimare l'angolo che esso forma rispetto alla verticale. Usando solo accelerometri però non si riesce a stimare la matrice di rotazione del singolo sensore rispetto al sdr globale in quanto manca l'informazione dell'angolo di rotazione attorno all'asse verticale. Questa informazione non è deducibile dall'uscita degli accelerometri. Vengono introdotti a questo scopo i magnetometri. Se si suppone quindi l'uniformità del campo magnetico nella zona di interesse, dall'uscita dei sensori sono ricavabili le singole matrici di rotazione che permettono di passare dal sdr globale al sdr locale del singolo sensore. Il procedimento verrà illustrato in seguito. Sarà poi a partire da queste matrici di rotazione che si andrà a cercare di ricostruire la superficie. Non sarà sufficiente l'informazione derivante dai sensori per ricostruire la superficie; avremo bisogno di condizioni supplementari. Ad esempio nel primo esempio che illustrerò la condizione sarà rappresentata dal fatto che imporrò come geometria d'arrivo una forma nota e parametrizzabile.

Nel caso invece di geometrie non note il discorso sarà più complicato e andranno imposti vincoli ulteriori che verranno specificati in seguito.

3.1 Ricostruzione di geometria parametrizzabile: ellissoide

Per semplicità inizialmente si è partiti cercando di ricostruire una figura geometrica nota e parametrizzabile: l'ellissoide. Il fatto che la superficie sia parametrizzabile risulta un enorme vantaggio dal punto di vista computazionale; infatti essendo a conoscenza della forma che dovrà assumere la superficie in questione saremo in grado di imporre il vincolo che i punti appartengano a quella determinata superficie. Vengono presentati di seguito i passaggi per la risoluzione del problema; non verrà presentata la soluzione passo-passo per motivi di brevità. Per eventuali chiarimenti sul codice è possibile rivolgersi al sottoscritto tramite mail. In ogni caso per questo primo esempio è stato cercato di riportare tutte le formule usate sia in fase di costruzione, che in fase di stima dei parametri. Ciò per semplificare al lettore lo schema logico seguito in questo primo esempio, dato che negli esempi successivi molte formule verranno riprese.

In questo paragrafo si vuole ricostruire la superficie di un generico ellissoide centrato nell'origine e arbitrariamente ruotato. In particolare quindi si andranno a stimare i valori dei semiassi e gli angoli di rotazione rispetto al sistema di riferimento di laboratorio a partire dalle uscite dei sensori (accelerometri + magnetometri) posizionati sulla superficie dello stesso. Si tratta di una simulazione numerica; deve essere simulata quindi anche l'uscita dei sensori. Per fare ciò prima si è generato un ellissoide centrato nell'origine e con i valori dei semiassi a , b , c assegnati arbitrariamente. A questo scopo è stata usata la seguente formula parametrica, che fa riferimento al sdr in figura:



$$\begin{cases} x = a * \cos(u) * \cos(v) \\ y = b * \cos(u) * \sin(v) \\ z = c * \sin(u) \end{cases}$$

(3)

Figura 25: sdr globale

dove x, y, z sono le coordinate del sdr di laboratorio (figura 25), e i parametri u e v sono definiti negli intervalli: $-\pi/2 \leq u \leq \pi/2$, $-\pi \leq v \leq \pi$ (u definisce la latitudine e v la longitudine).

In particolare sono stati creati un punto “in cima” e un punto “in fondo”, per poi distribuire gli altri ad intervalli regolari lungo i paralleli. Per esempio si è cominciato con 10 punti lungo ogni parallelo.

I punti creati rappresentano la posizione dei sensori. A partire dalle loro posizioni si sono ricavate le singole matrici di rotazione per ogni sdr solidale con il proprio sensore (gli assi dell’accelerometro e del magnetometro coincidono) rispetto al sdr di laboratorio. Sono state tralasciate le traslazioni in quanto non influiscono sulle uscite dei singoli accelerometri e magnetometri. Sono state supposte note le coordinate dei singoli sensori, di conseguenza risultavano noti i rispettivi angoli u e v . Inoltre si è supposto l’asse x del sensore lungo i paralleli dell’ellissoide, l’asse y lungo i meridiani e l’asse z perpendicolare alla superficie e uscente.

Se viene indicata con R_k la matrice di rotazione del sensore k -esimo, per passare dal sdr locale a quello di laboratorio, essa è esprimibile come:

$$R_k = [v_p \ v_m \ v_n] \quad (4),$$

dove v_p, v_m, v_n rappresentano i tre versori: v_p è il versore tangente lungo il parallelo, v_m lungo il meridiano e v_n normale uscente dalla superficie. Essi vengono calcolati nella seguente maniera:

$$\begin{cases} \mathbf{vp} = [\delta x / \delta v(uo, vo) & \delta y / \delta v(uo, vo) & \delta z / \delta v(uo, vo)]' \\ \mathbf{vm} = [\delta x / \delta u(uo, vo) & \delta y / \delta u(uo, vo) & \delta z / \delta u(uo, vo)]' \\ \mathbf{vn} = \mathbf{vp} \times \mathbf{vm} \end{cases} \quad (5)$$

Nelle precedenti espressioni uo e vo rappresentano i rispettivi angoli di ogni sensore. I versori andranno poi normalizzati. Le espressioni riportate sono applicabili a ogni superficie; nel nostro caso i versori risulteranno:

$$\begin{cases} \mathbf{vp} = [-a * \cos(uo) * \sin(vo) & b * \cos(uo) * \cos(vo) & 0]' \\ \mathbf{vm} = [-a * \sin(uo) * \cos(vo) & -b * \sin(uo) * \sin(vo) & c * \cos(uo)]' \end{cases} \quad (6)$$

Il versore \mathbf{vn} viene calcolato direttamente in Matlab grazie alla funzione `cross`. I tre versori vengono normalizzati. In questa maniera si calcolano rapidamente tutte le matrici \mathbf{Rk} .

Viene poi definito il vettore magnetizzazione del sdr di laboratorio (supponendo che l'unico campo magnetico presente sia quello terrestre): esso è diretto verso il nord magnetico con inclinazione σ verso il basso. Viene assunto che il nord magnetico formi un angolo α (noto) con l'asse y (figura 25). Se l'intensità del campo magnetico viene indicata con B , le tre componenti del vettore magnetico risultano:

$$\mathbf{magn_lab} = [B * \cos(\sigma) * \sin(\alpha) \quad B * \cos(\sigma) * \cos(\alpha) \quad -B * \sin(\sigma)]' \quad (7)$$

A partire dalle \mathbf{Rk} possono essere ricavate le uscite dei singoli sensori:

$$\begin{aligned} [axk \ ayk \ azk]' &= \mathbf{Rk}' * [0 \ 0 \ g]' \\ [mxk \ myk \ mzk]' &= \mathbf{Rk}' * \mathbf{magn_lab} \end{aligned} \quad (8)$$

Una volta simulate le uscite dei sensori si è passati al procedimento inverso; supponendo note le uscite dei sensori e le loro posizioni, si è andati a stimare i

semiassi dell'ellissoide, dopo aver aggiunto rumore sia alle uscite dei sensori che alle loro posizioni. Si è usato un procedimento iterativo che andava a minimizzare la somma del quadrato degli scarti tra le uscite dei sensori e le uscite stimate dei sensori.

Partendo da valori pseudocasuali di a , b , c , ad ogni iterazione venivano calcolate le matrici R_k in funzione dei correnti valori di a , b , c (6); queste matrici sono state usate per andare a stimare le uscite dei singoli sensori utilizzando lo stesso procedimento illustrato in (8). In questo modo è stato possibile confrontare le uscite dei sensori con le uscite stimate e minimizzare la somma dei quadrati degli scarti grazie alla funzione `fminsearch`. Il limite di questo approccio deriva da un limite intrinseco al problema in sé: dalle uscite dei sensori è possibile stimare la matrice di rotazione R_k , ma non il relativo termine di traslazione T_k , a causa dell'uniformità dei campi gravitazionale e magnetico nell'intero laboratorio. Questo è un limite col quale si dovrà convivere in questo tipo di prove. In questo specifico caso di ricostruzione di un ellissoide questo limite sfocia in una indeterminazione sul fattore di scala dell'intera superficie: per essere chiari la stima dei tre semiassi è definita a meno di una costante. Per chiarire questo concetto si può pensare a due ellipsoidi i cui semiassi sono rispettivamente proporzionali di una stessa costante; in questo caso le uscite dei sensori risulteranno le stesse. Dalla figura seguente si comprende il precedente discorso:

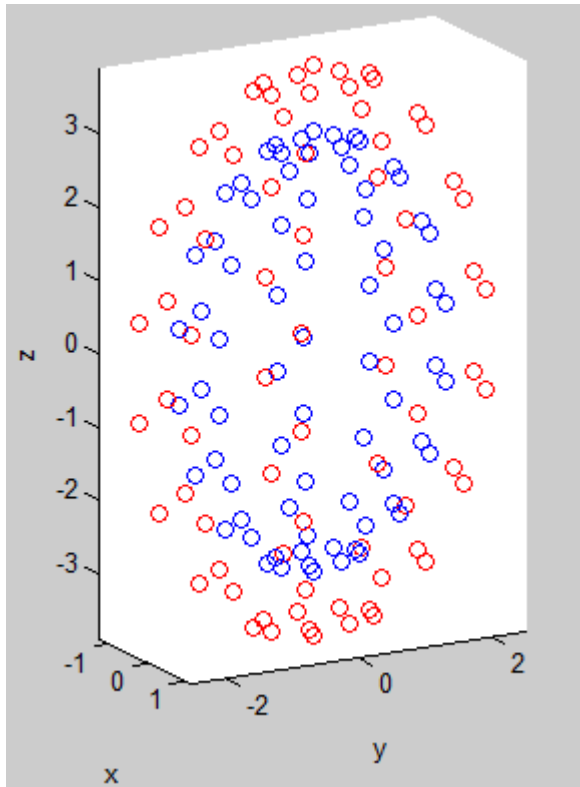


Figura 26: Vengono riportati due ellissoidi simili. In questo caso, le uscite dei sensori corrispondenti nelle due configurazioni risulteranno le stesse.

Per risolvere l'indeterminazione va aggiunto un vincolo supplementare: possibili soluzioni possono essere l'imposizione del volume, di un semiasse o semplicemente il passaggio per un punto. Sono tutte e tre condizioni valide che permettono di trovare in maniera univoca l'ellissoide di riferimento. La strada più semplice sia computazionalmente che da un punto di vista pratico risulta l'imposizione del passaggio da un punto noto. Si suppone quindi di conoscere a priori le coordinate di un punto e si stimano gli altri con le procedura sopra descritta. In questo modo si giunge ad una buona stima dei semiassi.

In assenza di rumore la ricostruzione avviene in maniera perfetta, anche partendo da condizioni iniziali lontane dal valore vero. Aggiungendo rumore alle uscite dei sensori il quadro non cambia: è stato aggiunto alle uscite dei sensori un rumore bianco con media nulla, distribuzione gaussiana, e deviazione standard pari all'1 per mille del fondo scala del relativo sensore (per gli accelerometri il fondo scala risulta $2 \cdot g$, dove g rappresenta l'accelerazione di gravità, per i magnetometri il fonda scala si può ritenere intorno ai 2 Gauss). Anche con l'aggiunta di rumore la procedura è in grado di ricostruire

fedelmente i punti, con errori nella stima dei semiassi che si attestano sotto al 1%.

Per generalizzare il caso appena trattato si può pensare di ruotare l'ellissoide. Il caso più generale di trattazione prevederebbe anche una traslazione del baricentro della figura. Come già anticipato la pura traslazione dell'intera geometria non influenza le uscite dei sensori, perciò, ai nostri fini, si può supporre nulla la traslazione. L'ellissoide viene sottoposto ad una rotazione generica di angoli: yaw attorno x, pitch attorno y e roll attorno z; per la convenzione degli angoli basta seguire la regola della mano destra facendo riferimento al sistema in figura (25). Vengono assegnati valori casuali agli angoli di rotazione. La matrice di rotazione risultante è la seguente, e rappresenta la matrice di rotazione per passare dalle coordinate ruotate alle coordinate non ruotate:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{R}_{RPY}(\phi, \theta, \psi) &= \text{Rot}(z_0, \phi) \text{Rot}(y_0, \theta) \text{Rot}(x_0, \psi) \\
 (9) \quad &= \begin{bmatrix} C_\phi C_\theta & -S_\phi C_\psi + C_\phi S_\theta S_\psi & S_\phi S_\psi + C_\phi S_\theta C_\psi \\ S_\phi C_\theta & C_\phi C_\psi + S_\phi S_\theta S_\psi & -C_\phi S_\psi + S_\phi S_\theta C_\psi \\ -S_\theta & C_\theta S_\psi & C_\theta C_\psi \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Di questa matrice ne verrà poi effettuata la trasposta e denominata \mathbf{R} per le successive formule. Ora si possono calcolare i vettori delle uscite dei sensori sull'ellissoide ruotato; basterà pre-moltiplicare per \mathbf{R} le uscite dei sensori posti sull'ellissoide non ruotato:

$$[ax_{rk} \ ay_{rk} \ az_{rk}]' = \mathbf{R} * [axk \ ayk \ azk]'$$

$$[mx_{rk} \ my_{rk} \ mz_{rk}]' = \mathbf{R} * [mxk \ myk \ mzk]' \quad (10),$$

dove r indica che stiamo ragionando sull'ellissoide ruotato.

La stessa cosa si può fare con le coordinate dei sensori:

$$[x_r \ y_r \ z_r]' = \mathbf{R} * [x \ y \ z]' \quad (11)$$

Una volta aggiunto rumore sia alle coordinate che alle uscite dei sensori, il procedimento risulta simile a quello effettuato per l'ellissoide non ruotato. Si tratterà in questo caso però di andare a stimare 6 parametri. Anche in questo caso si è fatto uso della funzione `fminsearch`. Nella funzione costo creata, il cui output sarà da minimizzare, si è andati inizialmente a calcolare la matrice di rotazione dell'intero ellissoide (9) in base ai correnti valori di roll, pitch, yaw (chiamata `R_ellissoide`), per poi stimare le singole matrici di rotazione dei singoli sensori (`Rk`). A questo punto vengono stimate le uscite dei singoli sensori:

$$[ax_{rk} \ ay_{rk} \ az_{rk}]' = \mathbf{R_ellissoide} * (\mathbf{Rk}' * [0 \ 0 \ g]')$$

$$[mx_{rk} \ my_{rk} \ mz_{rk}]' = \mathbf{R_ellissoide} * (\mathbf{Rk}' * [\mathbf{magn_lab}]') \quad (12)$$

Esse vengono confrontate con le uscite dei sensori e grazie alla funzione `fminsearch` si trovano i 6 parametri che fanno in modo che le uscite stimate siano più simili possibili alle uscite dei sensori. Come nel paragrafo precedente anche in questo caso si è andati ad imporre il passaggio della figura da un punto noto, al fine di evitare il problema di scala nella ricostruzione della geometria.

I risultati ottenuti si possono considerare soddisfacenti, anche in presenza di rumore e diminuendo il numero di punti utilizzati. Come nel caso precedente, gli errori nella stima dei semiassi si attestano sotto al 1 %, così come per gli errori di stima degli angoli di rotazione; ciò avendo supposto un rumore (sovrapposto all'uscita dei sensori) con media nulla e deviazione standard pari all'1 per mille del fondo scala del relativo sensore. Viene riportata una figura che illustra la ricostruzione effettuata:

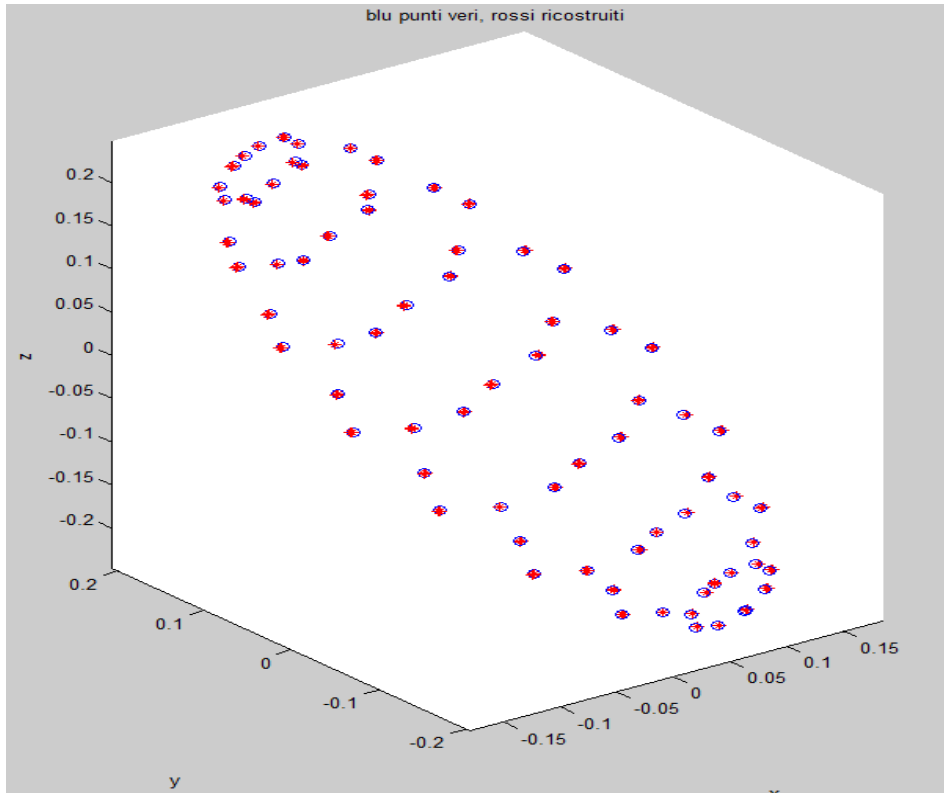


Figura 27: ricostruzione della superficie. In blu vengono riportati i punti da stimare, in rosso i punti stimati.

Il discorso precedente può essere facilmente esteso a qualunque geometria parametrizzabile. Discorso più complicato riguarda la ricostruzione di geometrie generiche, che verrà affrontata nei prossimi paragrafi.

3.2 Ricostruzione di una superficie generica

Nel caso di una superficie non parametrizzabile aumenta la difficoltà nella ricostruzione. In ogni caso cercare di ricostruire una superficie a partire da versori tangenti e normali alla superficie (direttamente ricavabili dalle uscite dei sensori grazie a (2)) risulta un problema under-constrained. Si pensi infatti al fatto che dalle uscite dei sensori si riescono a stimare le singole matrici di rotazione per passare dal sdr globale a quello locale del singolo sensore, ma non si ha alcuna informazione riguardo alla traslazione. Ciò è diretta conseguenza del fatto che il campo gravitazionale e il campo magnetico vanno inevitabilmente considerati costanti nel volume di misura. Eventualmente si potrebbe pensare all'induzione di un campo magnetico variabile dentro al volume di misura; ciò permetterebbe di avere anche l'informazione supplementare del termine di traslazione per ogni sensore, ma limiterebbe l'analisi a laboratori dove appunto si può creare questa variazione di campo magnetico.

Bisogna aggiungere perciò altri vincoli. La posizione dei sensori non può essere ritenuta nota, se non per specifiche acquisizioni effettuate in laboratori dotati di stereofotogrammetria. Lo stesso vale per la distanza tra i sensori; infatti si può immaginare che i sensori vengano disposti su una muta fatta di materiale deformabile e fatta indossare ad un soggetto (o oggetto). Si potrebbe pensare ad imporre come vincolo il volume della figura, ma ciò risulterebbe limitativo da un punto di vista pratico. Infine un vincolo da tenere in considerazione potrebbe essere rappresentato dalla massimizzazione della smoothness della superficie.

Per risolvere questo problema sono state effettuate varie simulazioni; non verranno illustrate tutte le prove, ma solo quelle più significative dal punto di vista del risultato finale. Vengono proposti in questa sede due tipologie di approcci, anche abbastanza differenti nell'implementazione, che sembrano condurre a buoni risultati, ognuno con relative limitazioni. Il punto in comune dei due metodi è che in entrambi i casi si è prevista una prima fase di acquisizione delle coordinate dei punti in una configurazione di partenza. Poi la configurazione di partenza verrà deformata e i termini da stimare saranno

appunto quelli relativi alla deformazione. In parole povere si partirà da una configurazione di partenza nella quale sono note sia le uscite dei sensori che le loro coordinate (tramite stereofotogrammetria), questa verrà deformata, e nella configurazione di arrivo saranno note solo le uscite dei sensori. L'obiettivo è chiaramente quello di determinare le posizioni dei sensori in questa nuova configurazione. Si è optato per questa scelta per avere una figura a cui fare riferimento (supponendo che le deformazioni non potessero essere troppo grandi) e per avere quindi qualche indicazione iniziale sulla posizione dei sensori nella configurazione di arrivo. L'idea è quella di confrontare le uscite dei sensori nelle due configurazioni per stimare la deformazione che i punti hanno subito, e quindi per stimare le loro coordinate. Si pensi ad esempio ad un'ipotetica muta elastica contenente in punti specifici i sensori. Essa in una prima fase di calibrazione può essere fatta indossare ad un soggetto; a questo punto possono venire acquisite le uscite dei sensori in statica e le posizioni dei sensori grazie ad apparecchiature stereofotogrammetriche. A questo punto la tuta può essere fatta indossare ad un'altra persona per acquisire, sempre in condizioni statiche, le uscite dei sensori. L'idea è di cercare di ricostruire le posizioni dei sensori in questa ultima configurazione a partire dalla conoscenza delle uscite dei sensori nelle due configurazioni e dalle coordinate dei sensori nella configurazione usata per la calibrazione, tenendo ovviamente come nota la corrispondenza tra sensori. Questo esempio illustra come in via teorica sia possibile ricostruire punti di una superficie anche senza l'uso di apparecchiature esterne e senza l'obbligo essere in laboratorio. Inoltre questo esempio fornisce la spiegazione del perché si decide di partire da una configurazione iniziale nota per poi deformarla: il fine è di avere informazioni supplementari sulla posizione dei sensori. Infine addirittura si potrebbe pensare di estendere questo procedimento alle misure in dinamica, il che potrebbe portare a numerosi sbocchi nello studio della biomeccanica del movimento.

Passiamo alla spiegazione dei due metodi implementati (denominati semplicemente in seguito come metodo 1 e metodo 2).

3.2.1 Metodo 1

Viene di seguito illustrata una procedura iterativa per la stima di un set di parametri caratterizzanti la struttura da stimare. Come spiegato precedentemente, si parte da una configurazione iniziale (che d'ora in poi indicheremo con pedice 1) della quale conosciamo sia le coordinate nello spazio che le uscite dei sensori. Questa configurazione iniziale può essere qualsiasi; ad esempio come illustrato nel paragrafo precedente, si può pensare addirittura di costruire una muta (all'interno della quale vengono posizionati i sensori) da fare indossare ad un soggetto, e acquisire tramite stereofotogrammetria le posizioni dei sensori. Per questioni di implementazione, dato che non ci si poteva porre il problema della costruzione della muta senza prima aver fatto adeguate simulazioni, abbiamo scelto di partire da un ellissoide, ma ciò, come appena spiegato, senza perdere di generalità rispetto a una qualsiasi altra forma geometrica. In posizioni predefinite dell'ellissoide andranno poi posizionati i sensori. L'unica cosa da tenere presente è che si devono costruire gli assi dei sensori ortogonali tra loro. Per ovviare a ciò, una volta posizionati i sensori lungo paralleli e meridiani, si è optato per scegliere gli assi del singolo sensore appunto lungo il parallelo e il meridiano corrispondente, e la normale uscente. Per garantire l'ortogonalità tra il versore v_p lungo il parallelo e v_m lungo il meridiano, si è scelto un ellissoide di rotazione (semiasse $a =$ semiasse b). In alternativa, per a e b generici, sarebbe bastata una semplice procedura di ortogonalizzazione:

$$v_m = v_m - \text{dot}(v_m, v_p) * v_p \quad (13)$$

Eventuali informazioni sulla costruzione dei versori e della matrice di rotazione R (per ogni sensore) si possono trovare nel paragrafo riguardante la ricostruzione dell'ellissoide. In particolare i versori v_p , v_m , v_n sono calcolati con (5). A questo punto viene generata la superficie deformata (d'ora in poi la indicheremo con pedice 2) tramite la seguente equazione, valida per ogni k -esimo sensore:

$$\begin{bmatrix} x2 \\ y2 \\ z2 \end{bmatrix} = \mathbf{M} * \begin{bmatrix} x1 \\ y1 \\ z1 \end{bmatrix} \quad (14) \quad \mathbf{M} = \begin{bmatrix} \alpha & 0 & 0 \\ 0 & \beta & 0 \\ 0 & 0 & \delta \end{bmatrix} \quad (15)$$

I coefficienti α , β , δ sono diversi da punto a punto. Tramite questa formulazione, ovviamente il singolo punto (sensore) nella configurazione 2 ha 3 gradi di libertà nello spazio e perciò può traslare senza vincoli. Questo per dire che la costruzione della geometria 2 con questa formula è una costruzione del tutto generale, che in linea teorica potrebbe portare ad una qualsiasi configurazione d'arrivo. Per sfruttare l'informazione della conoscenza della prima geometria è ovvio che la geometria 2 non debba differire molto dalla 1. Perciò per questo metodo è opportuno scegliere α , β , δ diversi da punto a punto, ma allo stesso tempo non troppo lontani da 1, altrimenti non avrebbe avuto senso partire dalla configurazione 1. In ogni caso poi sarà da stimare quanto α , β , δ si possono allontanare da 1 permettendo comunque la ricostruzione della superficie.

Il perché si è voluto usare questa rappresentazione è presto spiegato. Mentre per una geometria generica è difficile andare a calcolare i versori vp (lungo il parallelo) e vm (lungo il meridiano), in questo caso essi vengono calcolati come segue:

$$\begin{cases} vp2 = (\mathbf{M} * vp1) / norm(\mathbf{M} * vp1) \\ vm2 = (\mathbf{M} * vm1) / norm(\mathbf{M} * vm1) \\ vn2 = vp2 \times vm2 \end{cases} \quad (16)$$

Ciò deriva direttamente dalla definizione di vp e vm (5). In questo modo la matrice \mathbf{M} crea un collegamento diretto sia tra le coordinate che tra i versori. I versori $vp1$ e $vm1$ risultano ortogonali, ma in linea generale $\mathbf{M} * vp1$ non è ortogonale a $\mathbf{M} * vm1$. Perciò $vm2$ va ortogonalizzato rispetto $vp2$ tramite (13). Usando (16) siamo quindi in grado di ricavare tutte le matrici di rotazione per ogni sdr solidale col sensore e di conseguenza le rispettive uscite dei sensori.

La figura 2 viene successivamente ruotata di 3 angoli generici, come fatto nel paragrafo precedente riguardante la ricostruzione dell'ellissoide. Come già

specificato possiamo supporre nulla la traslazione del baricentro senza perdere di generalità. Tramite (12) risulta immediato ricavare le uscite dei sensori dopo la rotazione.

A questo punto inizia il processo inverso: ci si dimentica delle coordinate 2 e si va a ricostruirle a partire dalle uscite dei sensori nelle due configurazioni e dalle coordinate 1. La prima cosa da effettuare è la ‘registrazione delle normali’, che ci permette di stimare la matrice di rotazione dell’intera geometria. Se indichiamo con $output2_r$ la matrice (3*N) che contiene le uscite dei sensori della configurazione 2 ruotata, e con $output1$ la matrice (3*N) che contiene le uscite dei sensori nella configurazione 1 non ruotata, la relazione dalla quale è possibile stimare la matrice di rotazione R_{rot} (3*3) è la seguente:

$$\mathbf{output2_r} = \mathbf{R_{rot}} * \mathbf{output1} \quad (17)$$

Ciò rappresenta un sistema risolvibile ai minimi quadrati e costituisce la migliore approssimazione possibile della matrice di rotazione. Una volta stimata la matrice di rotazione risulta equivalente ragionare sulla configurazione 2 ruotata o meno: è quindi conveniente ragionare sulla configurazione non ruotata per confrontarla appunto con la configurazione 1 di partenza. Per ottenere le uscite dei sensori della configurazione 2 non ruotata si utilizza la formula (12).

La parte interessante dell’algoritmo di stima inizia ora. Si è pensato ad una procedura iterativa che andasse a minimizzare la somma dei quadrati degli scarti tra le uscite dei sensori e le uscite stimate in base all’attuale configurazione stimata. Viene illustrato uno schema a blocchi per semplificare il ragionamento:

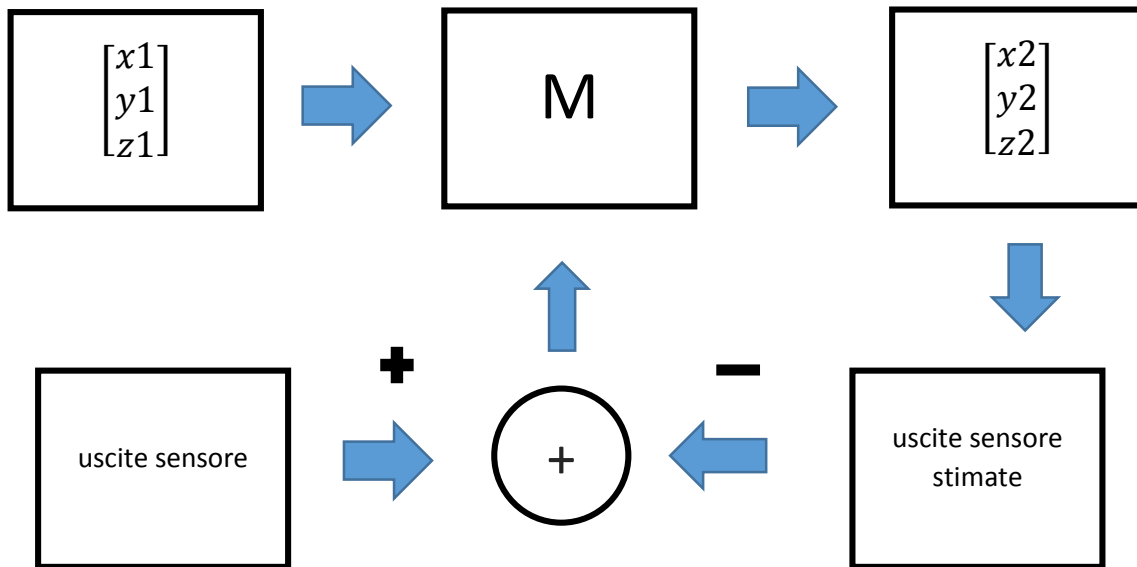


Figura 28: procedimento iterativo per la stima di M .

Quello illustrato è uno schema che ragiona localmente sensore per sensore. Praticamente per ogni k -esimo sensore viene fatto questo ragionamento: partendo dalle sue coordinate nella configurazione di partenza (note), e da una matrice M diagonale (15) con $\alpha, \beta, \gamma = 1$ (poi verrà spiegato perché si parte da queste condizioni iniziali), vengono calcolate le coordinate 2 (14) e di conseguenza le relative uscite del sensore, grazie alla stima dei vettori eseguita come (16). A questo punto queste uscite vanno semplicemente confrontate con le uscite vere del sensore; l'errore andrà a modificare α, β, γ della matrice M . Il procedimento dovrebbe portare alla stima dei valori di α, β, γ , tali per cui le coordinate 2 producano le uscite del sensore desiderate. Questo procedimento è stato implementato in una funzione costo, che in output riportava la somma dei quadrati degli scarti tra le uscite dei sensori e le uscite stimate in base all'attuale configurazione stimata. L'output è stato minimizzato grazie alla funzione `fminsearch`.

Come ci si poteva aspettare esiste più di una combinazione di parametri tali per cui le uscite del sensore stimate siano uguali alle uscite del sensore; ciò si ripercuote nel fatto che l'output della funzione costo presenta infiniti minimi locali e della stessa 'profondità'. Per comprendere questo aspetto si pensi ad esempio ad un punto della superficie che trasla parallelamente alla sua normale rispetto alla superficie (si guardi la figura per una migliore comprensione):

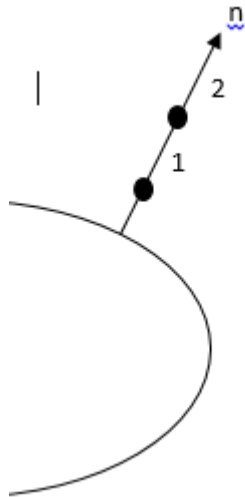


Figura 29: illustra una possibile indeterminazione nella stima dei punti.

Se si fa riferimento alla figura sovrastante, il sensore 1 e il sensore 2 giacciono sulla normale alla superficie; le loro uscite risulteranno perciò identiche. Facendo il ragionamento opposto, e quindi tornando a fare riferimento al processo iterativo descritto nello schema a blocchi, risulta ora chiaro come non sia possibile determinare univocamente gli alfa, beta, gamma per ogni sensore. Di questo si era già discusso in realtà anche all'inizio del capitolo: dalle sole uscite dei sensori non è possibile determinare le coordinate del relativo punto. Sono state perciò introdotte ipotesi semplificative. Per esempio il primo passo è stato verificare che le cose funzionassero in una condizione estremamente semplificata e non attuabile nella realtà: si è supposta nota la conoscenza di gamma per ogni sensore. Questa ipotesi corrisponderebbe nella realtà alla conoscenza della quota z di ogni sensore (o più in generale alla conoscenza di una delle tre coordinate del sensore nella configurazione 2). Come è facilmente comprensibile rappresenta una condizione molto forte e obbligherebbe in una eventuale prova sperimentale all'uso della stereofotogrammetria per avere una ragionevole accuratezza (che si vorrebbe cercare di evitare di usare, se si esclude una prima fase di calibrazione). Come anticipato però questa rappresenta solo una prova del fatto che il procedimento iterativo porta al risultato sperato a meno del fattore di traslazione. In effetti, imponendo la conoscenza di gamma, la ricostruzione dei punti risulta accurata, anche in presenza di rumore sulle uscite dei sensori. Tenendo presente ciò, siamo sicuri che il metodo, sotto dovute ipotesi, conduce alla soluzione esatta del problema. Si tratta ora di individuare ipotesi plausibili. Per esempio alcune ipotesi che si

possono prendere in considerazione sono: conoscenza a priori del volume, massima smoothness della superficie, imposizione di una distanza massima tra due sensori adiacenti, minimizzazione della distanza tra il sensore nella configurazione 2 e il corrispondente sensore nella configurazione 1. Le ipotesi di volume e di massima smoothness sono ipotesi ragionevoli, ma che fanno riferimento alla globalità dei sensori. Verranno prese in considerazione ma non in questa fase, perché come specificato precedentemente questa procedura iterativa lavora localmente sul singolo sensore. Per quanto riguarda l'ipotesi di imposizione di un range di distanza tra due sensori adiacenti nella configurazione 2, essa rappresenta un'ipotesi particolarmente sensata. Si pensi ad esempio alla costruzione di una muta elastica al cui interno sono posizionati i sensori. Per costruzione, avendo a disposizione informazioni sul materiale di cui è costituita la muta (esempio modulo elastico e massima deformazione), è possibile imporre un range di distanza tra due sensori. Il problema nasce dal fatto che gli errori nella stima di alfa, beta, gamma (e quindi nella stima delle coordinate dei singoli punti) tenderanno ovviamente a propagarsi. Per essere più chiari, supponendo nota la posizione del primo sensore (senza perdere di generalità perché non è di nostro interesse la determinazione della traslazione pura dell'intera figura), viene determinata la posizione del secondo sensore, imponendo oltre alla minimizzazione dell'errore sull'uscita dei sensori, anche la condizione sul range di distanza. La posizione del terzo sensore a sua volta viene riferita al secondo. E' normale che in questo modo gli errori tenderanno a propagarsi. In effetti provando ad implementare questa tecnica, i primi punti risultano costruiti abbastanza bene, mentre gli ultimi no. Per le prove effettuate la migliore condizione da imporre localmente risulta quindi la minimizzazione della distanza tra il sensore nella configurazione 2 e il relativo sensore nella configurazione 1. Questo ulteriore vincolo è oltretutto facilmente implementabile: è bastato aggiungere all'output della funzione costo un termine proporzionale alla distanza tra i relativi sensori. Anche questo termine verrà minimizzato. L'output della funzione costo sarà quindi:

$$output = k1 * \sum_1^6 (err_uscite_sensori)^2 + k2 * err_distanza \quad (18)$$

Per calcolare $err_distanza$ si ricorre all'uso della funzione `norm` in Matlab. I coefficienti k_1 e k_2 vengono scelti, dopo un certo numero di simulazioni, per garantire la migliore ricostruzione del punto. Ritornando alla formula (18), si può specificare che in realtà basterebbe confrontare le uscite lungo l'asse z del sensore (perpendicolare alla superficie). Ciò è stato verificato sperimentalmente.

I risultati di questa simulazione risultano accurati solo se i relativi sensori nelle due configurazioni non distano più di una distanza predeterminata. Vengono riportate due figure esplicative, nelle quali i pallini blu rappresentano la geometria da ricostruire, i pallini rossi quella ricostruita:

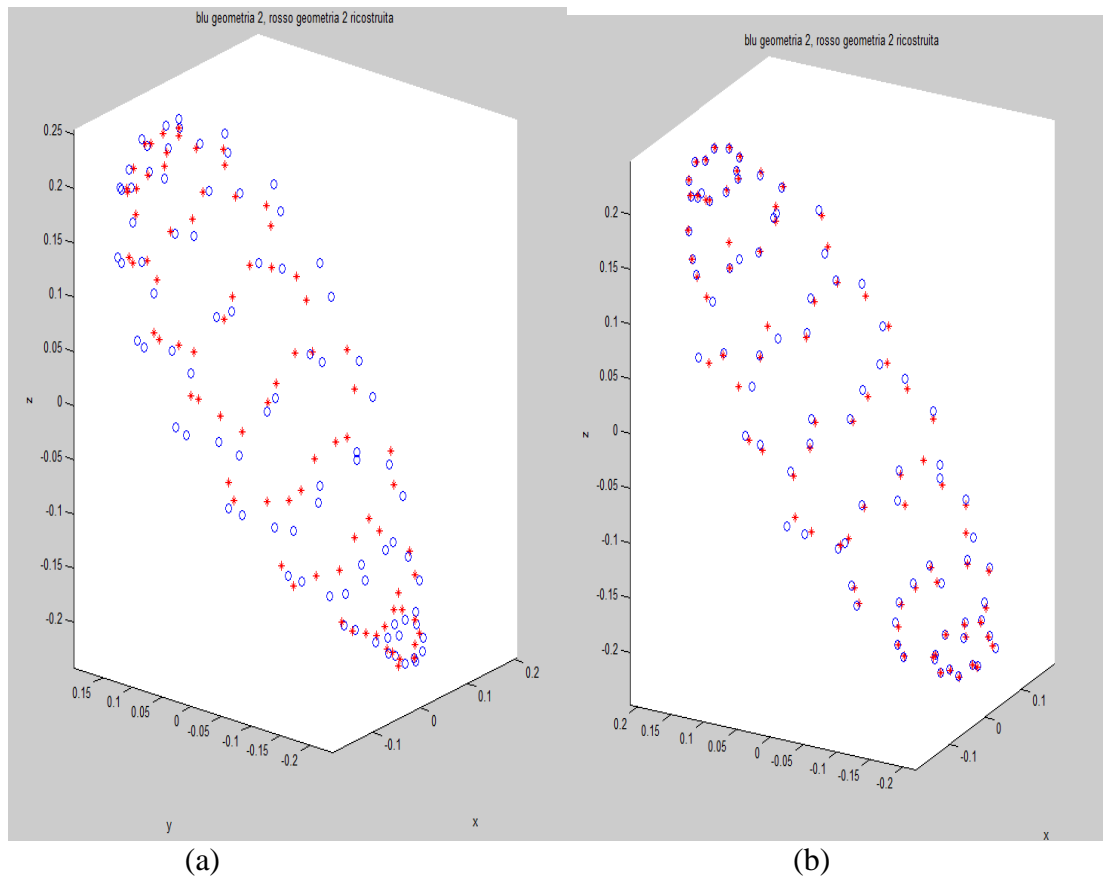


Figura 30 a: la geometria 2 è stata costruita tramite una deformazione smoothed rispetto alla geometria 1; in questo caso però la distanza tra i punti corrispondenti nelle due configurazioni (1 e 2) risulta considerevole. Si nota infatti che il sistema non riesce a ricostruire la geometria 2 con la dovuta accuratezza.

Figura 30 b: la geometria 2 è stata costruita tramite una deformazione con variazione random dei punti (std=0.1), nella quale i punti nella configurazione 2 vengono generati a partire dalla configurazione 1 tramite (14), con alfa, beta, gamma calcolati come segue:

$$\text{alfa, beta, gamma} = 1 + \text{std} * \text{randn}(1,1) \quad (19)$$

In tal caso mediamente alfa, beta, gamma risultano pari a 1, il che assicura che la figura 2 non risulti troppo differente dalla figura 1; il termine std viene fatto variare nelle varie simulazioni per individuare le limitazioni del modello. Risulta evidente che per std tendente a 0 il modello andrà a ricostruire perfettamente la geometria, mentre aumentando tale valore si incontreranno difficoltà nella ricostruzione.

Gli errori nella stima dei punti vengono valutati tramite RMSD (Root Mean Square Distance) tra i punti “veri” e i punti stimati. In quest’ultimo caso, per variazioni random dei punti nella configurazione 2 rispetto ai relativi punti della configurazione 1, si ottengo i seguenti errori, in funzione della std (19):

$$\text{dev.stand} = 0.5 \text{ m} \quad \rightarrow \text{RMSD} = 0.0426 \text{ m}$$

$$\text{dev.stand} = 0.1 \text{ m} \quad \rightarrow \text{RMSD} = 0.0085 \text{ m}$$

$$\text{dev.stand} = 0.01 \text{ m} \quad \rightarrow \text{RMSD} = 9.5531\text{e-}04 \text{ m}$$

Si ricorda che i semiassi dell’ellissoide di partenza sono 0.1, 0.2, 0.3 metri. Dunque considerare una deviazione standard nella formula (19) pari a 0.1 rappresenta comunque una variazione dei punti nella configurazione 2 rispetto ai rispettivi punti nella configurazione 1 abbastanza notevole. A valle di queste considerazioni si può affermare che, se si suppone comunque la deformazione subita dalla configurazione 2 non sia troppo elevata, questa tecnica può portare a buoni risultati. E’ chiaro che in una fase di progetto questi limiti vanno tenuti in forte considerazione.

A valle di questa procedura se ne può instaurare una successiva per tenere conto di aspetti ‘globali’ della figura, quali ad esempio la massimizzazione della smoothness ed eventualmente la conservazione del volume rispetto alla configurazione 1.

Per evitare appunto che, a causa del fattore di traslazione del singolo sensore, la geometria assuma una forma non consona, si possono cercare di imporre ulteriori vincoli.

Sono stati implementati due metodi per rendere massimamente smoothed la geometria: nel primo si andava a minimizzare il valore della superficie a parità di volume, nel secondo si è fatto un ragionamento per garantire la massima continuità alla funzione che descrive l'andamento dei versori normali alla stessa. Per quanto riguarda il primo ragionamento andava innanzitutto prevista una deformazione a volume costante per passare dalla geometria 1 alla geometria 2, per poi andare a cercare quella forma che minimizzasse la superficie. Questa prova non è andata a migliorare i risultati ottenuti in precedenza. Il secondo metodo implementato invece cercava di andare a garantire che non ci fossero discontinuità nei versi delle normali adiacenti. Per essere chiari: si supponga un elementino della superficie di forma qualsivoglia (per semplicità lo si può prendere triangolare, anche perché per tre punti passa uno e un solo piano) e ne si calcoli la normale. Se la geometria fosse sufficientemente smoothed, la normale di uno degli elementini adiacenti al primo preso in considerazione non dovrebbe avere verso troppo differente dalla prima. Detta in termini più rigorosi, la superficie sarà tanto più smoothed quanto la somma dei prodotti scalari tra le normali (normalizzate) a due elementini vicini sarà grande. Infatti, considerando solo due normali, il loro prodotto scalare sarà tanto più vicino ad 1 quanto i due versori risultano paralleli, tanto più vicino a 0 quanto i due versori sono ortogonali. Questo discorso vale ovviamente a valle di una procedura di normalizzazione delle normali. Questo ragionamento porta a stimare la geometria tale per cui:

$$\sum_1^N \text{dot}(\mathbf{n}_i, \mathbf{n}_{i+1}) \quad \text{sia massima} \quad (20)$$

Nella formula precedente n_i indica la normale (normalizzata) al triangolo i -esimo; la sommatoria va estesa a tutte le combinazioni di triangoli adiacenti.

Questo procedimento risulta interessante da un punto di vista implementativo, ma anche esso non ha portato a risultati apprezzabili.

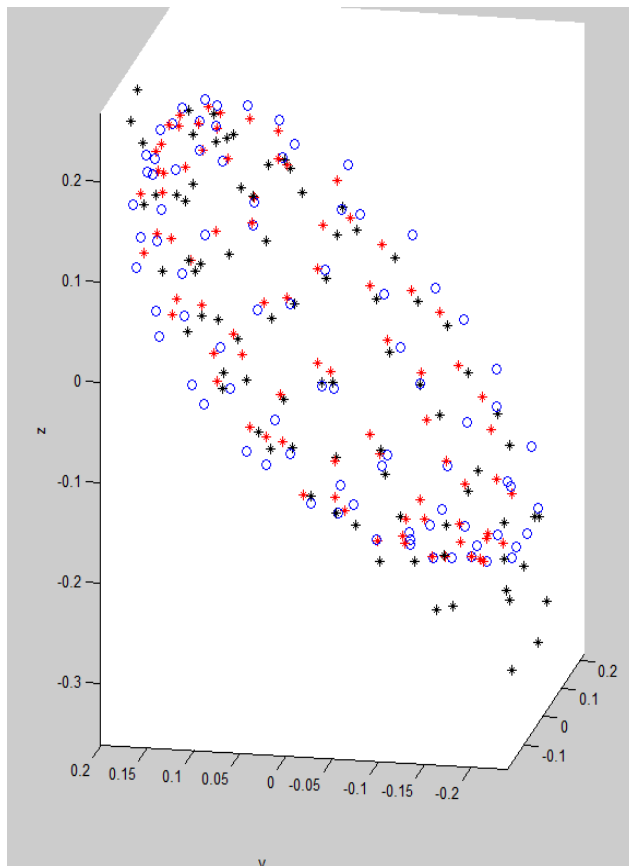


Figura 31: In blu viene riportata la geometria da ricostruire, in rosso la geometria ricostruita andando a ragionare solo in termini locali, in nero la geometria ricostruita andando ad imporre la procedura di massimizzazione della smoothness illustrata precedentemente.

I risultati non si possono considerare soddisfacenti; non viene neanche riportato in questo caso il valore di RMSD. Da fare notare che la procedura di massimizzazione è stata imposta a valle della procedura iterativa che porta alla stima dei punti rossi. In particolare come guess iniziale di quest'ultima procedura, erano state fornite appunto le coordinate rosse, che non risultavano troppo distanti dalle vere. Ciò conferma che appunto esiste un problema non relativo al guess iniziale, ma di concetto.

Si pensava infatti che le coordinate stimate col metodo locale fossero direttamente legate al punto vero tramite quello che può essere chiamato 'fattore di scala' c uguale per le tre coordinate dello stesso punto:

$$\begin{cases} X = c * \text{alfa} * x \\ Y = c * \text{beta} * y \\ Z = c * \text{gamma} * z \end{cases} \quad (21)$$

E' stato dimostrato che in generale così non è, quindi per ogni punto si dovrebbero andare a stimare altri tre coefficienti moltiplicativi. Ciò nasce dal

fatto che nella procedura iterativa locale illustrata sopra esistono infinite combinazioni di alfa, beta, gamma tali per cui i versori risultanti siano gli stessi.

In conclusione per questo tipo di tecnica non serve andare ad imporre a valle dei vincoli globali sull'intera geometria. Almeno per le prove effettuate ciò non ha portato a risultati ragionevoli.

Se viene utilizzato questo metodo i risultati saranno accurati solo entro un certo limite della deformazione che la figura 1 subisce per trasformarsi nella figura 2.

3.2.2 Metodo 2

Per superare i limiti presenti nella procedura appena illustrata, si è cercata un'altra strada che non andasse a ragionare in maniera esclusivamente locale (sul singolo sensore). Ne è scaturita una procedura molto interessante ed efficace. Di seguito ne verranno illustrati i passaggi principali.

Anche in questa situazione si è preferito partire da una prima geometria nota (in seguito verrà indicata con pedice 1 o con l'uso di coordinate in minuscolo); essa verrà deformata per giungere ad una nuova geometria (indicata con pedice 2 o con lettere maiuscole). La situazione di partenza può quindi essere riassunta come segue:

$$\begin{cases} X(u, v) = x(u, v) + fx(u, v) \\ Y(u, v) = y(u, v) + fy(u, v) \\ Z(u, v) = z(u, v) + fz(u, v) \end{cases} \quad (23)$$

Dove u, v rappresentano i parametri di latitudine e longitudine esattamente come lo erano per l'ellissoide (3); fx, fy, fz rappresentano le tre componenti di spostamento che, sommate alle coordinate 1 permettono di determinare le coordinate 2. La costruzione delle funzioni fx, fy, fz verrà chiarita tra poco; saranno funzioni dipendenti da un set di parametri, e saranno proprio quei parametri a dover essere stimati. A partire da (23), ed effettuando le derivate parziali lungo u e v è immediato ricavare:

$$\begin{cases} \delta \mathbf{P2} / \delta u = \delta \mathbf{P1} / \delta u + [\delta fx / \delta u & \delta fy / \delta u & \delta fz / \delta u]' \\ \delta \mathbf{P2} / \delta v = \delta \mathbf{P1} / \delta v + [\delta fx / \delta v & \delta fy / \delta v & \delta fz / \delta v]' \end{cases} \quad (24)$$

dove $\mathbf{P2}=[X \ Y \ Z]'$ e $\mathbf{P1}=[x \ y \ z]'$. Nella espressione appena riportata, i termini $\delta \mathbf{P1} / \delta v$ e $\delta \mathbf{P1} / \delta u$ risultano noti, dato che la geometria 1 è nota. Se vengono indicati con \mathbf{Vu} , \mathbf{Vv} i versori lungo u e v , e con k_u , k_v dei coefficienti incogniti, si può scrivere:

$$\begin{cases} \delta \mathbf{P2} / \delta u = k_u * \mathbf{Vu} \\ \delta \mathbf{P2} / \delta v = k_v * \mathbf{Vv} \end{cases} \quad (25)$$

In questa equazione i versori \mathbf{Vu} e \mathbf{Vv} sono noti (ricavabili direttamente dalle uscite dei sensori nella pratica, ricavabili dalla geometria nelle simulazioni su Matlab). Ciò che manca per la stima di $\delta \mathbf{P2} / \delta u$ e $\delta \mathbf{P2} / \delta v$ sono i coefficienti k_u , k_v . E' da fare notare che (25) vale per ogni sensore, ciò significa che ci saranno $2*(\text{numero sensori})$ coefficienti k_u , k_v da stimare. Mettendo insieme (24) e (25) il risultato è un sistema lineare, la cui risoluzione permette di stimare un vettore di parametri per la ricostruzione della superficie. Procedendo per gradi, supponiamo di partire come al solito da un ellissoide come geometria di partenza. In particolare l'ellissoide viene troncato per evitare le singolarità nei due poli, e viene assunto come ellissoide di rotazione attorno all'asse verticale (semiasse $a = \text{semiasse } b$) per fare in modo che il versore lungo il parallelo sia ortogonale al versore lungo al meridiano (vedi capitolo ellissoide). Ciò fornisce la motivazione per la quale partiamo da una geometria nota; in questo modo infatti si cerca innanzitutto una geometria non troppo differente da quella iniziale; in secondo luogo si parte da versori \mathbf{Vu} e \mathbf{Vv} già ortogonali tra loro nella geometria 1. Una volta generato l'ellissoide (3), vengono create le funzioni spostamento. Ovviamente in fase di costruzione della geometria 2 esse possono essere scelte in maniera qualsivoglia. Mentre la cosa intelligente è cercare di approssimare le funzioni generiche f_x , f_y , f_z che determinano la superficie 2 con funzioni predeterminate e dipendenti solamente da un set di coefficienti. Per essere più chiari, viene supposto, per ogni parallelo, uno spostamento periodico di 2π (non potrebbe essere altrimenti visto che la figura deve restare chiusa):

$$f_x(v) = k_1 + k_2 \sin(v) + k_3 \cos(v) + k_4 \sin(2v) + k_5 \cos(2v) + k_6 \sin(3v) + k_7 \cos(3v) + \dots$$

$$f_y(v) = k_{11} + k_{12} \sin(v) + k_{13} \cos(v) + k_{14} \sin(2v) + k_{15} \cos(2v) + k_{16} \sin(3v) + k_{17} \cos(3v) + \dots \quad (26)$$

$$f_z(v) = k_{21} + k_{22} \sin(v) + k_{23} \cos(v) + k_{24} \sin(2v) + k_{25} \cos(2v) + k_{26} \sin(3v) + k_{27} \cos(3v) + \dots$$

Mentre per ogni arco di meridiano viene supposto uno spostamento del tipo:

$$f_x(u) = c_1 + c_2 u + c_3 u^2 + c_4 u^3 + c_5 u^4 + c_6 u^5 + \dots$$

$$f_y(u) = c_{11} + c_{12} u + c_{13} u^2 + c_{14} u^3 + c_{15} u^4 + c_{16} u^5 + \dots \quad (27)$$

$$f_z(u) = c_{21} + c_{22} u + c_{23} u^2 + c_{24} u^3 + c_{25} u^4 + c_{26} u^5 + \dots$$

Possiamo supporre che in (27) i coefficienti c siano solo funzioni di v e periodici di 2π . A livello pratico quindi possiamo andare a sostituire al posto dei c in (27), una espressione del tipo (26). In questo modo vengono comunque rispettate (26) e (27). Per fare un esempio si può supporre di sommare ad ogni arco di meridiano una parabola, i cui coefficienti sono periodici di 2π . Le funzioni risultanti saranno:

$$f_x(u,v) = (k_1 + k_2 \sin(v) + k_3 \cos(v)) + (k_4 + k_5 \sin(v) + k_6 \cos(v)) * u + (k_7 + k_8 \sin(v) + k_9 \cos(v)) * u^2 \quad (28)$$

$$f_y(u,v) = (k_{10} + k_{11} \sin(v) + k_{12} \cos(v)) + (k_{13} + k_{14} \sin(v) + k_{15} \cos(v)) * u + (k_{16} + k_{17} \sin(v) + k_{18} \cos(v)) * u^2$$

$$f_z(u,v) = (k_{19} + k_{20} \sin(v) + k_{21} \cos(v)) + (k_{22} + k_{23} \sin(v) + k_{24} \cos(v)) * u + (k_{25} + k_{26} \sin(v) + k_{27} \cos(v)) * u^2$$

L'obiettivo di questo metodo è quello di stimare i coefficienti k a partire dall'equazione (24-25). Una volta stimati tutti i coefficienti k sarà banale ricostruire la superficie 2 grazie alle formule appena mostrate.

Per quanto riguarda il numero di parametri da stimare essi saranno:

$$N_i = 3 * (G + 1) * (2 * N_a + 1) - 3 + 2 * n_s \quad (29)$$

G rappresenta il grado del polinomio (27), Na il numero di armoniche (26), ns il numero di sensori utilizzati. La spiegazione di questo calcolo è semplice: $(G+1) * (2*Na + 1)$ rappresenta il numero di parametri da stimare per ogni asse, esso va naturalmente moltiplicato per 3. Il termine $2 * ns$ corrisponde ai due coefficienti k_u, k_v per ogni sensore (25); infine viene sottratto 3 in quanto appunto 3 dei coefficienti k non sono ricavabili. Essi non compaiono nelle espressioni delle derivate parziali di f_x, f_y, f_z lungo u e v , quindi è impossibile determinarli. Facendo riferimento a (26) i tre coefficienti non determinabili sono k_1, k_{10}, k_{19} . Questi 3 coefficienti sono quelli che determinano una traslazione rigida di tutta la geometria (avremo in generale un termine di traslazione lungo i tre assi cartesiani). Come si è sempre sottolineato infatti, dalla sola uscita di accelerometri e magnetometri non è possibile determinare la traslazione dell'intera figura.

Il numero di equazioni invece sarà:

$$N_{eq} = 6 * ns \quad (30)$$

Ciò deriva direttamente da (24-25). Una delle cose più interessanti di questo approccio è che fornisce una sorta di teorema di Shannon per lo spazio, nel senso che fornisce un'indicazione sul numero di sensori da usare in base alla regolarità/irregolarità della superficie. Si pensi per esempio ad una superficie da ricostruire estremamente regolare e smoothed (al limite una sfera). Per questo caso il numero di sensori da utilizzare per una buona stima sarà sicuramente inferiore rispetto al numero di sensori da applicare su una superficie irregolare. Questo approccio permette di fare questo tipo di valutazioni. Infatti in questo approccio, al variare di Na, G, ns , il sistema lineare risultante può avere $N_{eq} \geq N_i$. Se $N_{eq} > N_i$, il che equivale a:

$$4 * ns > 3 * (G + 1) * (2 * Na + 1) - 3 \quad (31)$$

la soluzione del sistema rettangolare sarà ai minimi quadrati, e questo è ovviamente il caso preferibile. Se $N_{eq} = N_i$ il sistema sarà quadrato e per la sua risoluzione basterà una semplice inversione di matrice. Se $N_{eq} < N_i$ occorrerà definire un criterio di ottimo. Il procedimento logico da seguire è il seguente: in base alla regolarità/irregolarità della superficie si vanno a scegliere G ed Na (ovviamente più vengono scelti grandi e più le funzioni approssimanti saranno

in grado di approssimare meglio lo spostamento). Verrà scelto quindi il numero di sensori da utilizzare in modo che $N_{eq} > N_i$.

Una volta scelti G , N_a , n_s , per la risoluzione del problema basterà andare a calcolare le derivate parziali lungo i paralleli (u costante) e lungo i meridiani (v costante) e risolvere il sistema lineare presentato in (24-25). Nelle prove effettuate si è tralasciato il fatto che il baricentro della struttura possa traslare rigidamente, per i motivi già elencati in precedenza. Comunque ciò non costituisce perdita di generalità. Inoltre si è evitato anche di ruotare, tramite un'unica matrice di rotazione, tutta la geometria. Il procedimento di registrazione delle normali è già stato illustrato, quindi non aggiungerebbe niente alla trattazione il fatto che la figura possa ruotare; saremmo in grado di stimare la matrice di rotazione.

Simulazioni:

Per testare l'efficacia del metodo sono state effettuate diverse simulazioni. Inizialmente si è partiti da un caso semplificato, poi procedendo per gradi si sono complicate le cose per valutare eventuali limiti della metodologia. Come primo esempio si è partiti dal caso in cui la geometria 2 viene espressa con le stesse funzioni spostamento f_x , f_y , f_z con cui poi andare a stimare i parametri. Per essere più chiari: partendo dalla geometria 1 (ellissoide troncato), viene generata la geometria 2 grazie a (23), e nella quale f_x , f_y , f_z risultano (28). Si è in pratica andati a sommare ad ogni arco di meridiano una parabola i cui coefficienti sono periodici di 2π . I coefficienti k sono stati scelti in maniera casuale; tenendo presente del fatto che la geometria 2 non potesse essere troppo differente dalla 1 sono stati scelti relativamente piccoli. Questa situazione risulta una situazione semplificata, in quanto poi nella fase di ricostruzione della superficie 2, vengono usate per l'approssimazione dello spostamento, le stesse f_x , f_y , f_z usate in precedenza. Risulta perciò ovvio il fatto che questa rappresenta una situazione non applicabile nella realtà: nella realtà si avrà una configurazione 2 generata da f_x , f_y , f_z vettori spostamento generici e non corrispondenti a (26); l'obiettivo di questo metodo è proprio cercare di approssimare questi vettori spostamento con altri vettori f_x , f_y , f_z nella forma

(26). Detto ciò ci aspettiamo che in questa simulazione, in assenza di rumore, i risultati siano perfetti.

Non si entrerà nei dettagli del codice; eventuali informazioni riguardanti aspetti puramente implementativi possono essere richiesti via mail. Una volta generata la superficie 2 ne sono stati calcolati i relativi versori V_u e V_v (per ogni sensore), semplicemente calcolando le derivate parziali lungo u e v ($\delta P2 / \delta u$, $\delta P2 / \delta v$) e normalizzandole. A questo punto si hanno tutte le informazioni per la stima dei parametri incogniti: ci si dimentica delle coordinate 2, e si va a costruire il sistema lineare $Ax=b$ (facendo riferimento all'equazione (25)). Il vettore dei termini noti, b , sarà un vettore colonna di $ns*6$ elementi e conterrà le derivate parziali lungo u e v dei punti nella configurazione 1 ($\delta P1 / \delta u$, $\delta P1 / \delta v$). La matrice A risulta di $(ns * 6)$ righe e $(3 * (G+1) * (2*Na + 1) - 3 + 2 * ns)$ colonne; la sua costruzione risulta leggermente complicata, ma la si può ottenere ragionando su (25-24). Il vettore delle incognite x a questo punto si ricava facilmente grazie all'uso della matrice pseudoinversa (ci si pone sempre nel caso di $N_{eq} > N_i$). Una volta ricavato x è immediato ricostruire la superficie 2 a partire dai parametri stimati, e confrontare i punti stimati con quelli reali. Nella prima simulazione si è partiti coi seguenti parametri di progetto: $Na=1$, $G=2$, $ns=36$ (6 paralleli, 6 meridiani). I risultati sono ottimi, come auspicato:

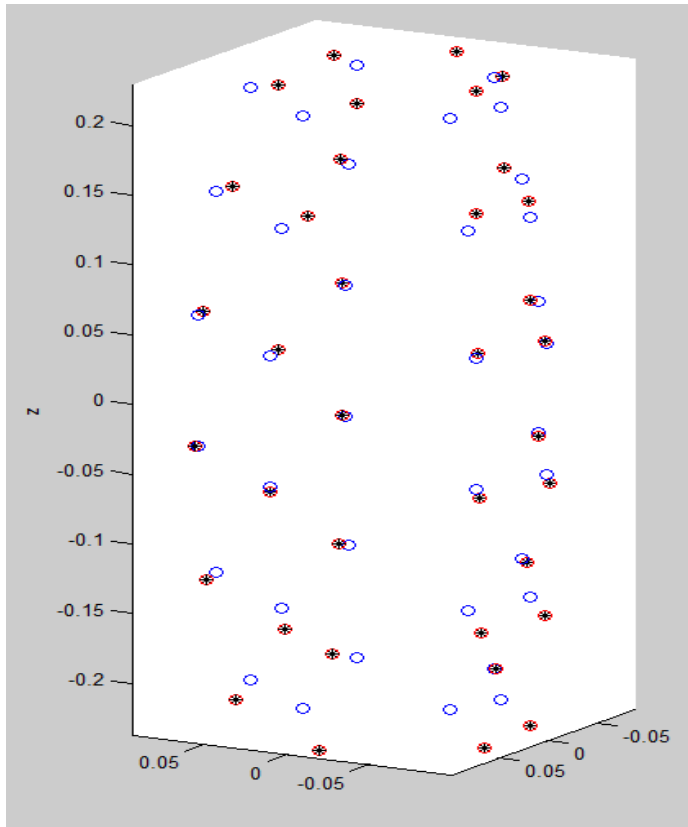


Figura 32: vengono riportati in blu i punti della geometria 1, in rosso quelli della geometria 2, in nero i punti ricostruiti.

Nella figura i punti blu rappresentano le posizioni dei sensori nella configurazione 1, i punti rossi nella configurazione 2, gli asterischi neri i punti ricostruiti. Si nota una perfetta ricostruzione, confermata anche dal fatto che i k stimati risultano identici ai k usati in fase di progetto. Il valore di RMSD risulta dell'ordine di $1e-11$. Sono da puntualizzare alcuni aspetti: innanzitutto in questa prova non è stato aggiunto rumore alle uscite dei sensori; ciò aggiunto alla semplificazione di cui si è parlato prima (usati in fase di costruzione vettori spostamento fx , fy , fz nella stessa forma di quelli usati per la loro approssimazione) conduce necessariamente ad una procedura che porta ad una ricostruzione perfetta. Inoltre i risultati sono ottimi anche con k grandi (e quindi laddove la superficie 2 sia significativamente diversa dalla 1); però ciò non può essere trasferito nella pratica in quanto, per deformazioni eccessive, i versori $\delta P2 / \delta u$ e $\delta P2 / \delta v$ non sarebbero più ortogonali, mentre i versori lungo u e v ricavati direttamente dalle uscite dei sensori risultano sempre ortogonali. In questo caso servirebbe procedura di ortogonalizzazione (se ne parlerà in seguito). Prescindendo da questi particolari che assumono rilevanza solo in presenza di grandi deformazioni, si può affermare che la procedura

implementata soddisfa le aspettative. Si ricorda, come già specificato, che senza perdere di generalità si è supposto che il baricentro della figura 2 coincida con quello della figura 1. Infatti un eventuale termine di traslazione non sarebbe possibile da stimare con questa procedura, ma non risulta neanche interessante ai nostri fini. Inoltre si è evitato di ruotare l'intera geometria 2; se fosse presente un'eventuale rotazione la procedura di stima della matrice di rotazione sarebbe quella già utilizzata nei paragrafi precedenti.

Interessante potrebbe essere a questo punto andare a valutare cosa succede se viene modificato il numero di sensori posizionati sulla superficie. Come anticipato prima, questo metodo fornisce delle indicazioni sul numero di sensori che è opportuno utilizzare (31). Facendo un parallelismo col campionamento di un segnale, questo metodo fornisce un 'criterio di Shannon spaziale'. Si sono effettuate delle prove che miravano a validare questo aspetto. Utilizzando gli stessi valori di N_a e G della prova precedente, si è andati a variare il numero di sensori utilizzati. Come prevedibile, se il numero di sensori viene aumentato, la stima rimane perfetta. Andando a diminuire progressivamente il numero dei sensori si vuole dimostrare che la stima risulta efficace se vale (31). Per $N_a=1$, $G=2$, il numero di sensori che permette un'accurata ricostruzione deve essere ≥ 6 . Come volevasi dimostrare ciò viene rispettato nelle simulazioni. Infatti per $n_s \geq 6$ la ricostruzione dei punti risulta accurata, per $n_s < 6$ no, e i punti stimati in questo caso risultano lontani dai punti veri. Ciò conferma la relazione (31). E' da sottolineare il fatto che queste prove sono state effettuate in assenza di rumore sull'uscita dei sensori. In presenza di rumore il discorso cambia leggermente. Per quanto riguarda ad esempio il caso $n_s=6$ (o più in generale $n_s = (3 * (G+1) * (2*N_a + 1) - 3) / 4$), dato che la soluzione del sistema lineare quadrato $Ax=b$ si ricava grazie ad una semplice inversione di matrice, l'entità dell'errore si ripercuote direttamente sulla stima dei coefficienti k e quindi sulla stima delle posizioni dei sensori. Nel caso invece di $n_s > 6$ ($n_s > (3 * (G+1) * (2*N_a + 1) - 3) / 4$), il metodo dei minimi quadrati permette di minimizzare l'influenza dell'errore sulla stima dei punti. Risulta evidente in questo caso che tanto è maggiore il numero di sensori, quanto l'errore nella stima dei punti sarà minore. Tutto questo discorso vale per un rumore bianco sovrapposto al segnale utile, ma ciò risulta un'ipotesi più che

ragionevole. Si tenga presente che il rumore riguarda sia gli accelerometri che i magnetometri, e se ne può assumere la deviazione standard pari all'1 per mille del fondo scala. Come valori di fondo scala si possono assumere: per gli accelerometri $2 * g$, per i magnetometri 2 Gauss. Dato che le nostre misure vanno effettuate in statica, si può ridurre l'entità del rumore attraverso un appropriato filtraggio. In ogni caso, tralasciando possibili operazioni di filtraggio che comunque andrebbero solo a migliorare la situazione, si può calcolare come questi errori si propagano alla matrice di rotazione e quindi ai due versori del piano tangente. A tal scopo è stato utilizzato un approccio di simulazione numerica. E' stato sovrapposto al segnale utile un rumore a media nulla e deviazione standard pari all'1 per mille del fondo scala del relativo sensore. A partire da queste uscite si è stimata la matrice di rotazione (risoluzione di un sistema di 6 equazioni (3 per l'accelerometro, 3 per magnetometro) in 3 incognite) e quindi dei relativi versori. In questo modo è stato possibile ottenere la deviazione standard sulle componenti dei due versori tangenti, ed è risultata dell'ordine di $1e-3$. Imponendo questo valore di deviazione standard al rumore che si è andati a sovrapporre ai versori V_u e V_v , si sono effettuate delle simulazioni per confermare quanto affermato in precedenza riguardo al numero di sensori. In particolare è stato aggiunto un rumore a media nulla e distribuzione gaussiana ai versori V_u , V_v , e si è andati a valutare come varia l'accuratezza della stima sia in funzione del numero di sensori sia del valore della deviazione standard del rumore. In linea di massima per deviazioni standard minori di $1e-3$, il rumore risulta talmente piccolo da non influenzare significativamente la stima, mentre per deviazioni standard maggiori di $5e-3$ l'errore sulla stima dei punti risulta elevato, e non permette una stima accurata se non con un numero molto elevato di sensori. Per il discorso inerente al valore della deviazione standard di cui si è parlato prima, il range di deviazioni standard su cui ha senso effettuare delle prove risulta da $1e-4$ a $1e-3$.

Per quanto riguarda l'accuratezza della stima in funzione del numero di sensori (a parità di deviazione standard, che si è supposta appunto dell'ordine di $1e-3$) si è confermato quanto auspicato: l'accuratezza aumenta all'aumentare di ns. In figura viene illustrato un trend esplicativo:

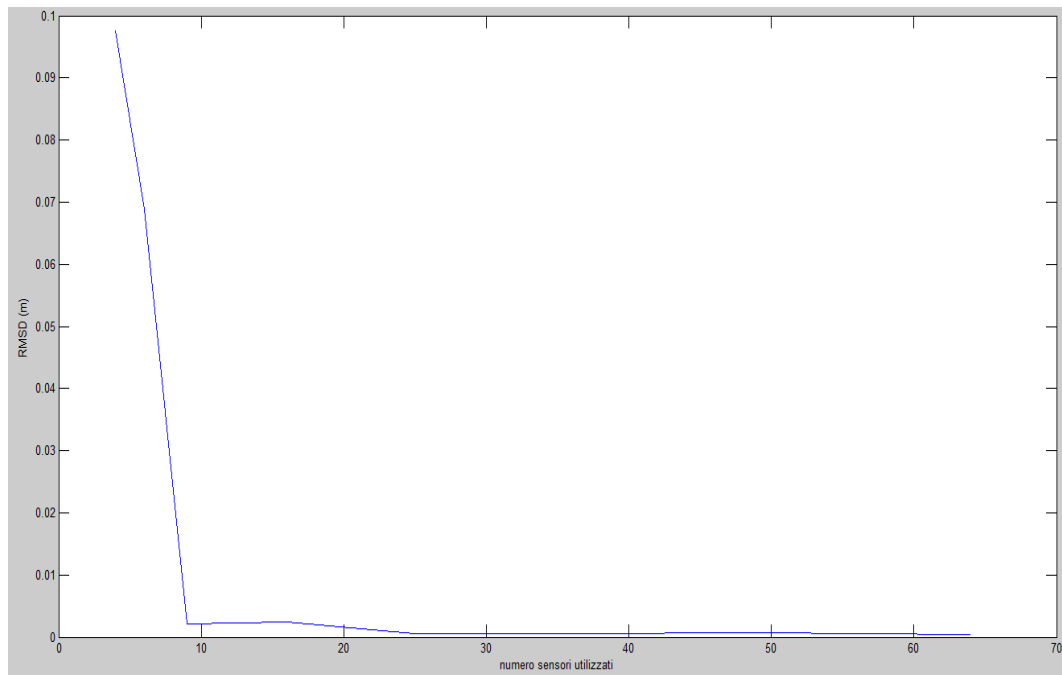


Figura 33: Il grafico rappresenta l'errore commesso nella stima dei punti (calcolato come RMSD) in funzione del numero di sensori utilizzati. Siamo sempre nella condizione in cui è presente rumore. L'errore commesso nella stima dei punti è stato calcolato come RMSD.

Come ci si aspettava l'errore nella stima diminuisce all'aumentare del numero dei sensori.

Finora è stato verificato che se la funzione approssimante è della stessa forma della funzione generatrice, il sistema giunge sempre ad una stima accurata per qualunque N_a e G (se viene preso in considerazione un numero adeguato di sensori).

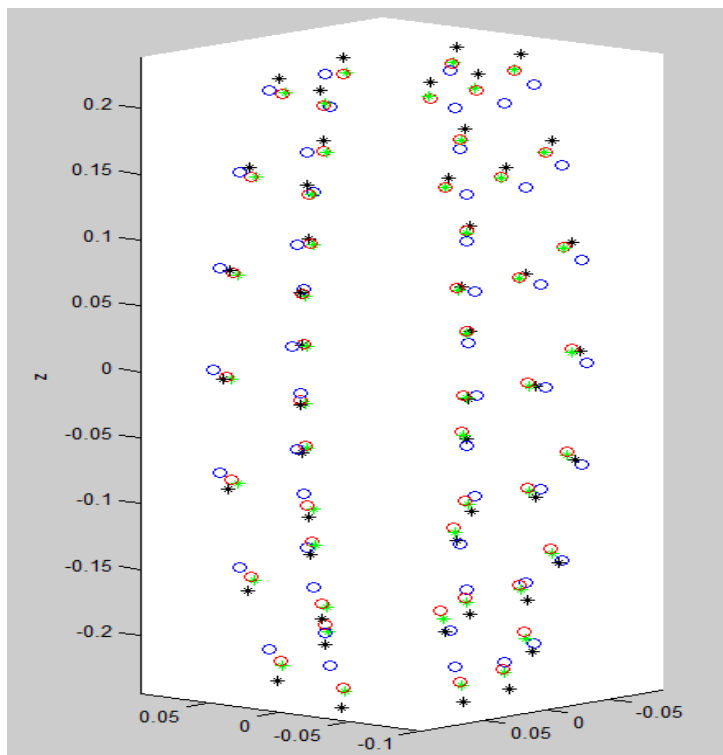
A questo punto rimane da testare come si comporta il sistema per la ricostruzione di una geometria qualunque. Si ricorda che nelle simulazioni effettuate fino ad ora, nella fase di costruzione della geometria 2 si sono usati f_x, f_y, f_z nella stessa forma con la quale essi poi vengono approssimati nel procedimento inverso. Ciò rappresenta chiaramente una semplificazione. La cosa interessante sarà vedere come i vettori di spostamento generici possano essere approssimati da f_x, f_y, f_z nella formulazione (26-27). Da un punto di vista pratico, sono state generate su Matlab due funzioni: `funzione_generatrice` e `funzione_approssimante`. La `funzione_approssimante` porta in output f_x, f_y, f_z nella stessa formulazione mostrata (26-27). La `funzione_generatrice` porterà

in output f_x , f_y , f_z generiche e modificabili per ogni prova che è possibile effettuare. La funzione `_generatrice` verrà richiamata inizialmente per costruire la figura 2, la funzione `_approssimante` verrà richiamata nella seconda parte del codice. Il codice è stato automatizzato per permettere all'utente di effettuare adeguate prove senza dover addentrarsi nel vivo del codice: esso infatti dovrà solamente decidere i) l'output della funzione `_generatrice` ii) i valori di N_a e G iii) il numero di sensori da applicare. Si ricorda che per una ricostruzione corretta il numero di sensori deve soddisfare (31).

Nelle prove effettuate emerge, come prevedibile, un problema relativo ad un fattore di scala, comune a tutte le coordinate. Questo discorso è già stato affrontato in precedenza ed è direttamente riconducibile all'impossibilità di estrarre, dalle uscite dei sensori, informazioni riguardanti la posizione del singolo sensore, ma solo del relativo orientamento. Dato che ciò rende impossibile una stima univoca della posizione dei sensori, si dovettero aggiungere un vincolo in fase di costruzione, come già per altro fatto nei paragrafi precedenti. Vincoli che permettono di giungere ad una stima univoca delle coordinate possono essere, come già anticipato, la conoscenza del volume o delle coordinate di un punto della configurazione da stimare. In questo caso si è optato per imporre la conoscenza del volume. Ciò implicherebbe da un punto di vista pratico la conservazione del volume nel passaggio dalla geometria 1 alla geometria 2.

Imponendo il suddetto vincolo, si sono effettuate diverse prove, e i risultati appaiono soddisfacenti in tutti i casi. In particolare, le varie prove sono state effettuate andando a variare la geometria 2, per verificare che effettivamente il metodo può condurre ad una buona stima per una qualunque geometria. Le prove effettuate sono numerose: ne vengono riportati solo alcuni esempi. L'unica cosa da tenere a mente nell'andare a generare f_x , f_y , f_z generiche, è il vincolo di periodicità lungo i paralleli. Non si può prescindere da questo vincolo, altrimenti la figura non risulterebbe più chiusa. In tutte le prove effettuate d'ora in poi ci si è sempre posti nella condizione tale per cui il problema sia risolvibile ai minimi quadrati (31), e alle uscite dei sensori si è sempre aggiunto un rumore pari all' 1 per mille del fondo scala del relativo sensore.

Una prima prova è stata quella di andare a sommare lungo i meridiani una funzione logaritmica del tipo: $c_1 + c_2 * \log(u + \pi/2)$, con coefficienti periodici di $2 * \pi$ in v . Si è andati ad approssimare questa funzione tramite f_x, f_y, f_z nella forma (26-27), in cui N_a e G vengono presi entrambi pari a 1. Detto in parole semplici, quello che si è cercato di fare è di approssimare, lungo i meridiani, una funzione logaritmica con una retta. I risultati saranno inevitabilmente approssimati. Viene illustrata in figura la superficie ricostruita e riportato il relativo RMSD a fianco:

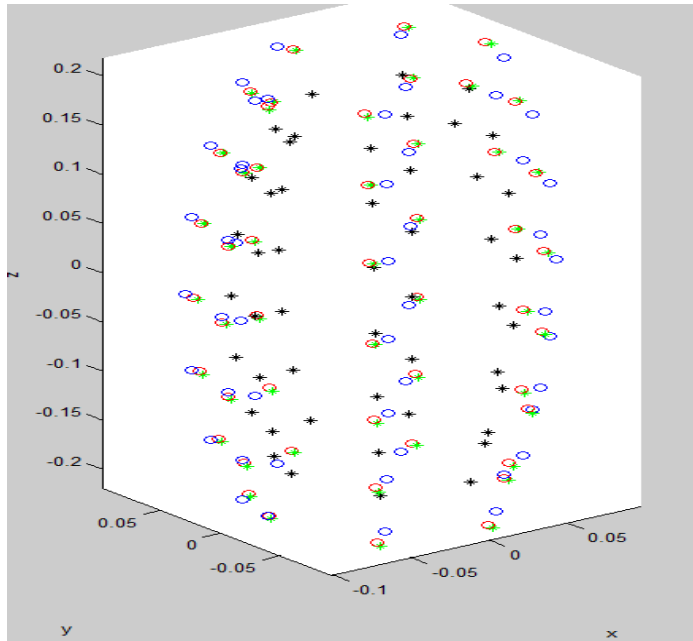


RMSD = 0.0043 m

Figura 34: I pallini blu rappresentano l'ellissoide di partenza, i rossi la geometria 2 da ricostruire, i neri sono i punti ricostruiti senza l'imposizione della conoscenza del volume, i verdi

rappresentano i punti ricostruiti a valle dell'imposizione di un coefficiente di scala (uguale per le tre coordinate di tutti i punti) tramite il quale si impone la conservazione del volume.

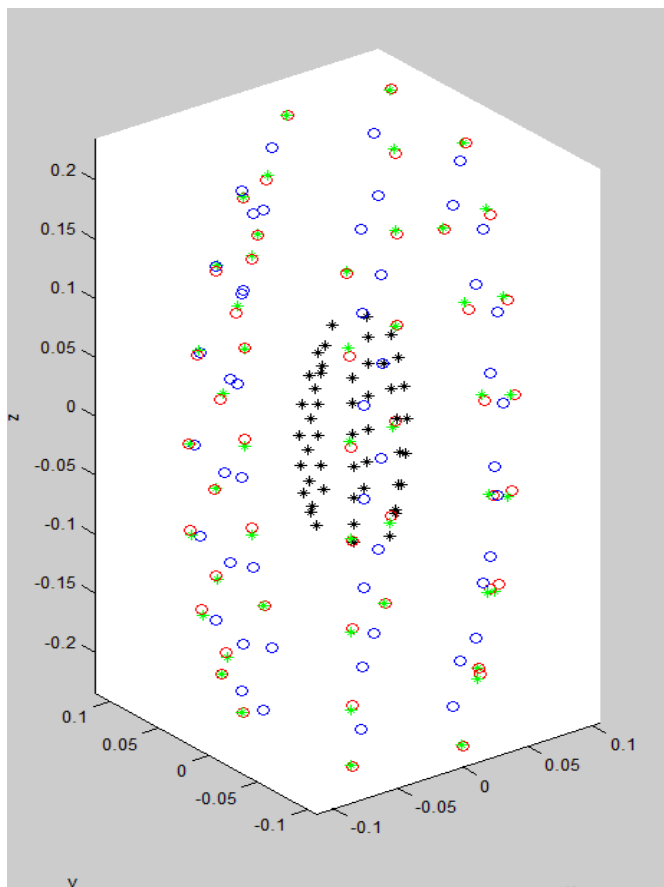
Se nella fase di ricostruzione si impone $G=2, N_a=1$ (si approssima con una parabola) il risultato è il seguente:



RMSD = 0.0043 m

Figura 35: sono da confrontare i pallini rossi (geometria vera) con i pallini verdi (stimata).

Infine si è andati ad approssimare il logaritmo con una cubica:



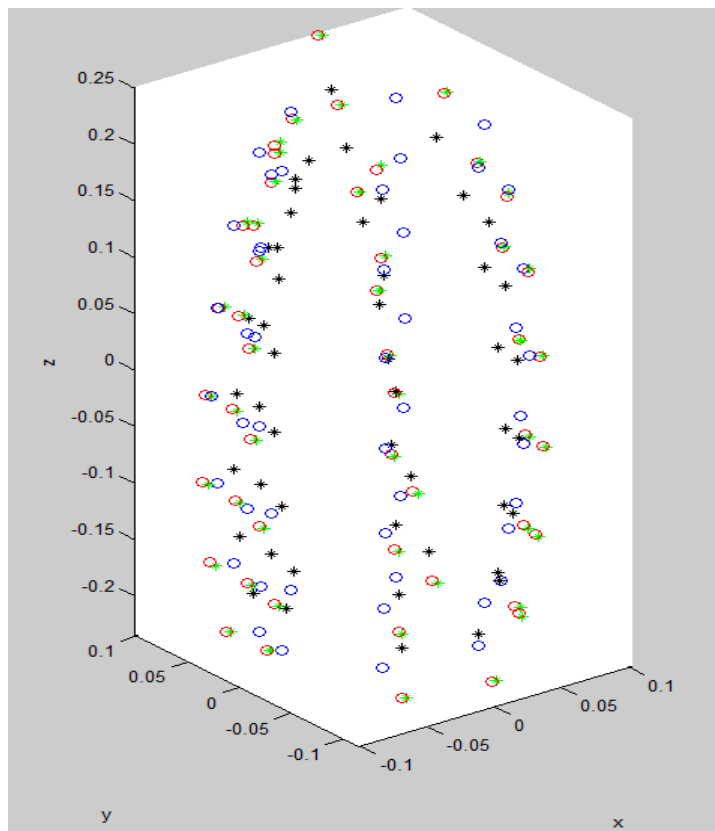
RMSD = 0.0035 m

Figura 36: sono da confrontare i pallini rossi (geometria vera) con i pallini verdi (stimata).

Come pronosticabile, all'aumentare del grado del polinomio approssimante, il sistema commette errori minori. Da tenere a mente che, se N e G del polinomio approssimante vengono aumentati senza aumentare di conseguenza il numero di sensori utilizzati, il sistema lineare risultante potrebbe essere formato da meno equazioni che incognite.

Già questa prima prova ci conforta dal punto di vista del risultato, ma vediamo cosa succede andando a complicare la geometria 2.

Nel seguente caso viene sommato lungo ogni meridiano un termine proporzionale a $c_1 + c_2 \cdot \log(u + \pi/2) + c_3 \cdot \sin(u)$, mentre lungo i paralleli viene sommato $k_1 + k_2 \cdot \sin(v) + k_3 \cdot \cos(v) + k_4 \cdot \sin(2v) + k_5 \cdot \cos(2v)$:

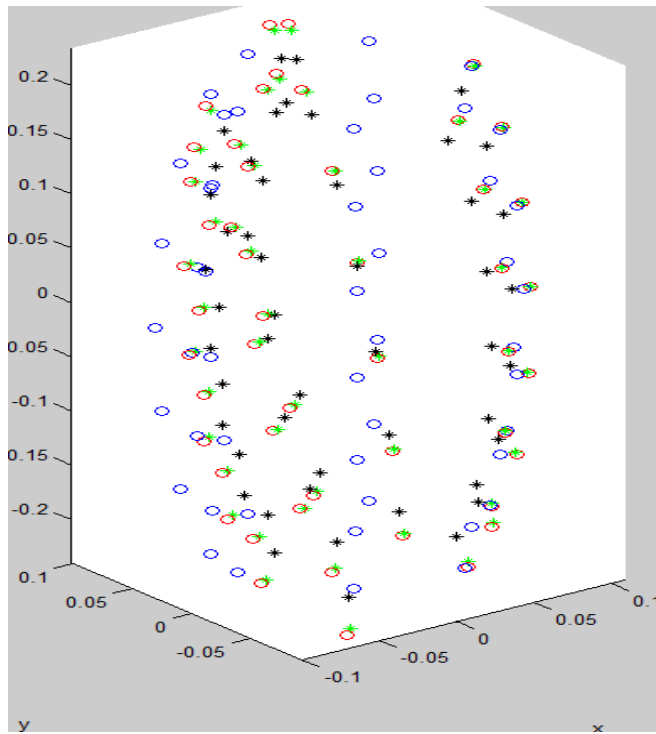


RMSD = 0.0036 m

Figura 37: sono da confrontare i pallini rossi (geometria vera) con i pallini verdi (stimata).

Come auspicato la ricostruzione avviene correttamente.

Nella seguente simulazione viene sommato lungo paralleli: $c_1 + c_2 \cdot \exp(u) + c_3 \cdot \sin(u)$, mentre lungo meridiani: $k_1 + k_2 \cdot \sin(2v) + k_3 \cdot \sin(v)$:



RMSD = 0.0109 m

Figura 38: sono da confrontare i pallini rossi (geometria vera) con i pallini verdi (stimata).

Anche in questa prova i risultati si possono considerare soddisfacenti.

A questo punto riportare altre prove non farebbe che continuare a confermare i risultati già ottenuti. Possiamo perciò dare una valutazione al metodo.

Possiamo affermare che questo metodo porta a soluzioni in generale migliori rispetto al metodo 1, nel quale si ottenevano buone stime solo per deformazioni (dalla geometria 1 alla geometria 2) non eccessive. Rimane da sottolineare che in questo metodo, nel caso di geometria 2 particolarmente irregolare, sarà necessario utilizzare una funzione approssimante (26-27) con tanti termini, il che equivale ad usare in fase di progetto N_a e G elevati. Ciò si va a riflettere anche sul numero di sensori minimi da utilizzare, e di conseguenza anche sulla velocità di esecuzione del codice. In linea teorica infatti la soluzione al sistema lineare che conduce alla stima dei punti è ricavabile semplicemente sfruttando la funzione `pinv` in Matlab. Nelle prove riportate sopra, l'esecuzione del codice richiedeva al massimo qualche secondo, in quanto la matrice A (di cui doveva essere calcolata la pseudoinversa) risultava di 200-300 righe per 100-150 colonne. Risulta evidente che se le sue dimensioni aumentano a causa dell'aumentato numero di sensori, la soluzione richiederà più tempo.

Un ulteriore aspetto interessante del metodo sta nel fatto che esso è generalizzabile a piacere, non solo dal punto di vista del numero di termini di cui è costituita la funzione approssimante, ma anche nei singoli termini. Per essere più chiari si faccia riferimento a (27), nella quale la funzione approssimante lungo i meridiani è stata definita come somma di polinomi di grado crescente. Se ci si accorgesse che una certa geometria non possa essere approssimata al meglio con (27), si possono aggiungere termini che vadano ad approssimare meglio. Ad esempio si potrebbe pensare di aggiungere termini logaritmici od esponenziali. La stessa cosa vale ovviamente anche lungo i paralleli.

Una limitazione di cui non si è discusso finora riguarda l'ortogonalità dei versori V_v e V_p . Essa deve essere garantita sia nella geometria 1 che nella geometria 2. Per quanto riguarda la geometria 1 (ellissoide di rotazione attorno l'asse verticale), la condizione di ortogonalità dei versori lungo u e v viene sempre rispettata. Ciò infatti è uno dei motivi principali per cui viene scelta questa figura. Nel caso della geometria 2 invece, dato che viene generata in maniera casuale, la condizione non è più rispettata. In fase di simulazione numerica ciò non costituisce un problema, ma lo costituisce laddove verranno impiegati accelerometri-magnetometri. Infatti a partire dalle uscite dei sensori verranno ricavati i due versori del piano tangente alla superficie, ed essi risulteranno per forza di cose perpendicolari. Essi andranno confrontati con le derivate parziali dei punti lungo u e v per la risoluzione del sistema lineare, le quali però, come spiegato prima, in generale non risultano ortogonali. Questo è un aspetto da tenere in considerazione laddove verranno effettuate prove con l'uso dei sensori. Vediamo come trattare questo caso: innanzitutto se si suppongono piccole deformazioni nel passaggio dalla geometria 1 alla geometria 2, il problema può essere considerato trascurabile, in quanto nella geometria 1 i versori partono ortogonali. Altrimenti, se così non fosse, sarà necessario trovare un metodo di ortogonalizzazione delle derivate parziali dei punti lungo u e v . Ciò aggiunge una piccola complessità, ma che sembra risolvibile senza particolari problemi. A questo punto c'è da aggiungere però che in una eventuale prova con l'uso di accelerometri-magnetometri, la geometria 1 non deve essere presa per forza come un ellissoide, anzi in generale

non sarà così. Infatti, avendo a disposizione le uscite dei sensori, si ricavano immediatamente i versori V_v e V_u , che risultano comunque ortogonali. Cade così il presupposto per cui si era scelto come geometria di partenza un ellissoide di rotazione. Questo punto è interessante perché permette di scegliere come geometria di partenza una geometria simile alla geometria da stimare. In generale infatti si è a conoscenza della forma della geometria che si vuole andare a stimare. Per fare un esempio si pensi ad una scansione corporea. Può essere costruita una muta di materiale elastico che contiene un certo numero di accelerometri-magnetometri in posizione predeterminate. In una prima fase di calibrazione la muta verrà fatta indossare ad un soggetto e verranno acquisite le uscite dei sensori e le loro relative posizioni (ad esempio con stereofotogrammetria). Questa geometria viene assunta come geometria 1. A questo punto cade il requisito di dover acquisire i dati in laboratorio, perché non è più necessaria la stereofotogrammetria. La muta verrà fatta indossare ad un altro soggetto, e tramite la procedura descritta sopra, vengono stimate le posizioni dei sensori, dalle quali si potrà poi costruire la silhouette del soggetto.

Per dare una valutazione al metodo presentato, esso sembra funzionare in generale con una geometria qualsivoglia, grazie al pregio di rappresentare un metodo assolutamente generalizzabile. Inoltre sembra offrire uno spunto per eventuali approfondimenti riguardo la migliore forma di funzione approssimante da scegliere per adattarsi al maggior numero possibile di superfici. E' chiaro che il metodo andrebbe testato in prove pratiche tramite la costruzione di una muta da far indossare ad un soggetto-oggetto, ma, a parte le difficoltà nella costruzione della muta, non ne dovrebbero sorgere altre, in quanto già in simulazione si è tenuto conto della presenza di rumore.

CONCLUSIONE E SVILUPPI FUTURI:

In questo progetto di tesi ci si è addentati nel campo della scansione corporea, e in generale di qualunque oggetto. Questo ambito propone già attualmente svariate soluzioni, inoltre si può ragionevolmente sostenere che le tecnologie inerenti ad esso subiranno un forte sviluppo nei prossimi anni.

Perciò innanzitutto si è cominciato dallo studio delle tecnologie già esistenti. Si sono passate in rassegna le varie tecniche per la scansione, studiandone il funzionamento ed evidenziandone per ciascuna eventuali pregi e difetti. A tal fine è stata effettuata una revisione critica della letteratura. Dopo aver classificato le tecniche di scansione, si sono messi in evidenza per ognuna di esse i meriti e i limiti. In letteratura si sono trovati numerosi studi che vanno a confrontare tecniche diverse; in generale si è riusciti a delineare il campo di applicazione per ogni tecnica. Sono stati riportati alcuni esempi di scanner attualmente in commercio, e ne sono state riportate le caratteristiche tecniche fornite dal costruttore. Gli scanner in commercio sono numerosi, sono stati scelti solo alcuni esempi significativi.

E' stato preso in esame in maniera più dettagliata un sensore recente (sviluppato nel 2009): il Kinect. Nato per scopi ludici, si è trasformato in un sensore dalle numerose prospettive di utilizzo. Già attualmente riveste un contributo importante nell'ambito della scansione corporea. Ne è stato analizzato il funzionamento, grazie anche alla vastità di articoli inerenti ad esso che si trovano in letteratura, e, data la sua importanza rivestita anche nel campo della scansione corporea, è stato deciso di effettuare delle acquisizioni che prevedessero il suo impiego. Le acquisizioni sono state effettuate all'INAIL di Budrio, tramite un software dedicato, Skanect. Realizzare un modello 3D si è dimostrato relativamente facile, e anche la successiva elaborazione dell'immagine è stata facilitata dall'uso di un software dedicato, Meshlab.

Infine parte rilevante del presente lavoro è stata la valutazione e lo studio di realizzabilità di un sistema innovativo low-cost. Si è pensato di cercare di sfruttare le uscite di accelerometri e magnetometri triassiali, posizionati su una superficie qualunque, per ricostruirne la forma. Nel caso statico infatti gli

accelerometri forniscono in uscita il vettore gravità, agendo sostanzialmente da inclinometri. Essi però non riescono a stimare l'angolo di rotazione attorno all'asse verticale, motivo per cui si sono introdotti anche i magnetometri. Il fine ultimo in questo campo sarebbe costruire una muta di materiale elastico da fare indossare ad un soggetto; questa muta dovrebbe contenere al suo interno un certo numero di sensori (ognuno dei quali è un accelerometro triassiale più un magnetometro triassiale) posizionati in punti determinati a priori. In funzione dell'uscita dei sensori, l'obiettivo sarebbe quello di ricostruire la superficie del soggetto. Si tratta in questo caso di un approccio estremamente innovativo; in letteratura si sono trovati casi simili, ma che in qualche modo andavano ad imporre la distanza tra i sensori. Nel nostro caso la distanza tra sensori non può essere ritenuta nota, ciò complica ulteriormente lo studio. In questo progetto di tesi si sono proposte delle soluzioni al problema, e sono state effettuate delle simulazioni numeriche per valutare l'affidabilità delle tecniche proposte. Non si è giunti alla costruzione della muta, si è tracciato quello che può considerarsi un percorso iniziale. In ogni caso, a parte le difficoltà nell'eventuale costruzione della muta e nell'acquisizione dei dati, la trattazione del problema in simulazione risulta del tutto equivalente ad una eventuale procedura pratica.

Per semplicità si è partiti dalla ricostruzione di geometrie parametrizzabili, per poi andare a complicare mano a mano il problema. Per la ricostruzione di una superficie generica sono stati presentati sostanzialmente due metodi. Di entrambi sono stati analizzati pregi e difetti. Una soluzione ottimale non è stata trovata, ma questo lavoro può comunque rappresentare un buon punto di partenza per ulteriori studi. L'approccio presentato che fa uso dei sensori per la stima della superficie 3D in condizioni statiche può certamente essere esteso al caso dinamico. Dato che il sistema non prevede che l'acquisizione dei dati sia effettuata in laboratori, un possibile e affascinante sbocco di questo approccio è che potrebbe portare alla stima della superficie corporea in movimento, senza l'ausilio di apparecchiature esterne (come ad esempio telecamere). Si pensi ad esempio ad una muta che può essere fatta indossare ad un atleta durante la sua attività sportiva; la ricostruzione real-time della superficie corporea fornirebbe indicazioni interessanti riguardanti ad esempio la correttezza del gesto atletico

eseguito, con eventualmente la possibilità di fornire un feed-back all'atleta per migliorare le performance.

Bibliografia:

Viene richiamata nel testo con l'uso di parentesi quadre.

- [1] H.A.M. Daanen, F.B. Ter Haar, 3D whole body scanners revisited, *Displays* 34 (4) (2013) 270–275.
- [2] H.A.M. Daanen, G.J. van de Water, Whole body scanners, *Displays* 19 (3) (1998) 111–120.
- [3] Sansoni G., Trebeschi M. and Docchio F., State-of-the-art and applications of 3D imaging sensors in industry, cultural heritage, medicine and criminal investigation, *Sensors*, 9, 568-901; doi:10.3390/s90100568, 2010
- [4] De Crescenzo F., Fantini M., Lucchi F., Persiani F., Santopoli N. and Reccia L., Ricostruzione 3D ed indagini non distruttive di un bassorilievo marmoreo nel suo contesto architettonico, *Proc. of Aiar 2010*, Pavia, ISBN 78-88-555-3181-8, 2010
- [5] Laser Scanner Konica Minolta Vivid-9i - User Manual
- [6] F.Lucchi, “Reverse Engineering tools: development and experimentation of innovative methods for physical and geometrical data integration and post-processing”, tesi di dottorato unibo 2013
- [7] T. Ricci, “Integrazione di dati antropometrici e termografici per l’analisi della distribuzione di temperatura all’interfaccia moncone-protesi d’arto inferiore”, tesi di laurea unibo 2015.
- [8] Guidi G., Russo M. and Beraldin J-A., *Acquisizione 3D e modellazione poligonale*, McGraw-Hill, pp.466, 2010
- [9] Guidi G., Russo M., Magrassi G. and Bordegoni M, Performance Evaluation of Triangulation Based Range Sensors, *Sensors*, 10, 7192-7215, doi:10.3390/s100807192, 2010
- [10] Nayar, S.; Watanabe, M.; Noguchi, M. Real-time focus range sensor, *Proc. IEEE Int. Conf. Computer Vision*, Cambridge, Ma, June 20-23, 1995; pp. 995-1001

- [11] Nitzan, D. Three-Dimensional Vision Structure for Robot Applications. *IEEE T. Pattern. Anal.* 1988, *10*, 291-308
- [12] Horn, B.; Brooks, M.J. *Shape from Shading*; MIT Press: Cambridge, MA, 1989
- [13] Dr.Nicola D'Apuzzo, "3D Human Body Scanning technologies. Overview, Trends, Applications", hometrica consulting
- [14] J.Tong, J. Zhou, L.Liu, Z.Pan, H.Yan, " Scanning 3D Full Human Bodies using Kinects", *IEEE TRANSACTIONS ON VISUALIZATION AND COMPUTER GRAPHICS*, VOL. 18, NO. 4, APRIL 2012
- [15] N. Matsuda, O. Cossairt, and M. Gupta. Mc3d: Motion contrast 3d scanning. In *ICCP*, 2015
- [16] D. Grivon, E. Vezzetti, M. Violante, Study and development of a low cost "OptInertial" 3D scanner, *Precis. Eng.* 38 (2) (2014) 261–269.
- [17] M. Bolitho, M. Kazhdan, R. Burns, H. Hoppe, Parallel poisson surface reconstruction, *Lect. Notes Comput. Sci.* 5875 (2009) 678–689. LNCS.
- [18] B. Allen, B. Curless, Z. Popovic', The space of human body shapes: reconstruction and parameterization from range scans, *ACM Trans. Graphics* 22 (2003) 587–594.
- [19] C. Shu, P. Xi, Z.B. Azouz. Consistent parametrization and principal component analysis of 3D anthropometry data, in: *International WEAR conference Banff*, 2007. ISBN: 980363 6 1
- [20] Greg Borenstein, *My Making Things See*.
- [21] Jeff Kramer, Nicolas Burrus, Florian Echtler, Daniel Herrera C., and Matt Parker, *Hacking the Kinect*.
- [22] Amon, C. & Fuhrmann, F. (2014). Evaluation of the spatial resolution accuracy of the face tracking system for kinect for windows v1 and v2. *Proceedings of the 6th Congress of the Alps Adria Acoustics Association*.

- [23] S. Kean, J. Hall, and P. Perry. Meet the Kinect: An Introduction to Programming Natural User Interfaces. Apress, 2011.
- [24] J. Kramer, N. Burrus, F. Etcher, D. Herrera, and M. Parker. Hacking the Kinect. Apress, 2012.
- [25] S. Song, S. Yu, W. Xu, Study on 3D body scanning, reconstruction and measurement techniques based on kinect, J. Tianjin Polytech. Univ. 31 (2012). 34–37+41.
- [26] J. Tong, J. Zhou, L. Liu, Z. Pan, H. Yan, Scanning 3D full human bodies using kinects, IEEE Trans. Visual. Comput. Graphics 18 (2012) 643–650.
- [27] R. Wang, J. Choi, G. Medioni, Accurate full body scanning from a single fixed 3D camera, in: Proc. – Jt. 3DIM/3DPVT Conf.: 3D Imaging, Model., Process., Vis. Transm., 3DIMPVT, 2012, pp. 432–43.
- [28] Hamed Sarbolandi, Damien Leoch, Andreas Kolb - *Kinect Range Sensing: Structured-Light versus Time-of-Flight* - KinectJournal of Computer Vision and Image understanding May 21, 2015;
- [29] David Webster, Ozkan Celik - *Experimental Evaluation of Microsoft Kinect's Accuracy and Capture Rate for Stroke Rehabilitation Applications* - IEEE Haptics Symposium 2014, 23-26 February, Houston, Tx, USA;
- [30] Takayuki Hoshi and Hiroyuki Shinoda: Gravity-Based 3D Shape Measuring Sheet, Proc. SICE Annual Conference 2007, pp. 2126-2131, Takamatsu (Japan), 17-20 Sep., 2007.
- [31] Takayuki Hoshi, Sayo Ozaki, and Hiroyuki Shinoda: Three-Dimensional Shape Capture Sheet Using Distributed Triaxial Accelerometers, Proc. 4th International Conference on Networked Sensing Systems (INSS 2007), pp. 207-212, Braunschweig (Germany), 6-8 Jun., 2007.
- [32] Nathalie Saguin-Sprynski, Laurent Jouanet, Bernard Lacolle, Luc Biard. Surfaces Reconstruction Via Inertial Sensors for Monitoring. Le Cam, Vincent and Mevel, Laurent and Schoefs, Franck. *EWSHM - 7th European Workshop on Structural Health Monitoring*, Jul 2014, Nantes, France. 2014.

Sitografia:

Viene richiamata nel testo con l'uso di parentesi tonde.

- (1) <https://www.artec3d.com/>
- (2) <http://www.tc2.com/>
- (3) <http://www.sizestream.com/>
- (4) <http://intellifitpss.com/>
- (5) <http://www.instructables.com/id/Sardauscan-sub-30-Opensource-3d-laser-scanner/>
- (6) <http://www.sculpteo.com/blog/2015/03/03/guide-3d-scanners/>
- (7) <http://www.styku.com/bodyscanner>
- (8) <http://www.kscan3d.com/>
- (9) <http://skanect.occipital.com/>