

Università di Pisa - corso di laurea magistrale in Ingegneria Biomedica

CHIRURGIA ASSISTITA DAL CALCOLATORE

Dispensa del corso del Prof. Vincenzo Ferrari AA 2016-17

LOCALIZZATORI (tranne quelli con tecnologia ottica)

Come detto nella dispensa introduttiva, è possibile rendere la chirurgia più accurata e sicura disponendo di sistemi di navigazione che localizzano lo strumentario chirurgico e che fondono la loro posa in modo coerente con le immagini dell'anatomia del paziente.

I sistemi di navigazione chirurgica:

- Offrono la visualizzazione di una replica virtuale dinamica degli strumenti sullo schermo che si muovono coerentemente rispetto all'anatomia virtuale (modello 3D paziente specifico), facilitando la comprensione delle relazioni spaziali.
- Permettono un posizionamento automatizzato di strumenti, se manovrati da robot, utilizzando un modello di previsione basato su posizioni correnti e precedenti e sull'anatomia.
- Permettono di predire le conseguenze del movimento (informazioni che possono essere fornite direttamente al chirurgo che sta manipolando gli strumenti o ad un sistema robotico che sta eseguendo un determinato compito per conto del chirurgo sotto il suo controllo).

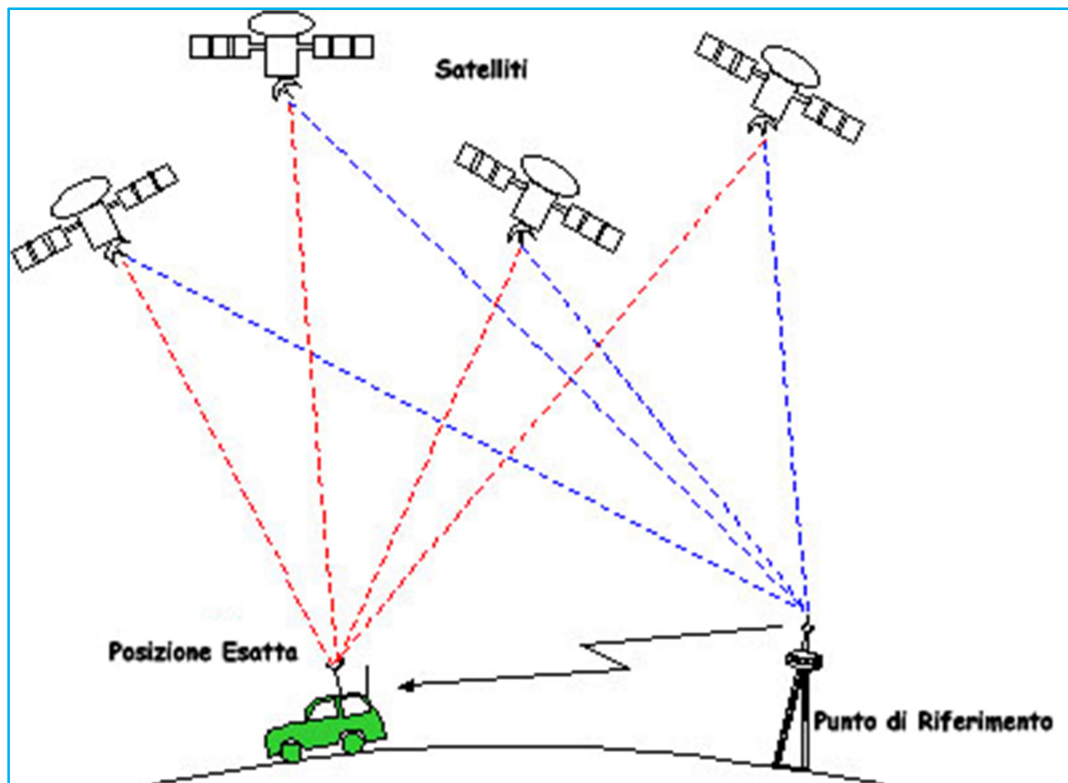
Al fine di implementare tali sistemi sono necessari sistemi di localizzazione in grado di determinare **in tempo reale la posizione e l'orientamento di un oggetto nello spazio**.

I primi sistemi di localizzazione utilizzati in sala operatoria erano essenzialmente digitalizzatori meccanici; in seguito vennero sostituiti da sistemi di rilevamento ottici basati su camere, data la loro elevata precisione e capacità di lavorare su spazi relativamente grandi. Tuttavia i sistemi ottici richiedono che l'oggetto da tracciare giaccia lungo la linea di vista del dispositivo di localizzazione; con tali tecniche pertanto è precluso il monitoraggio di strumenti flessibili all'interno del corpo. Per ovviare a questa problematica sono stati sviluppati sistemi di localizzazione con tecnologia elettromagnetica in grado di monitorare strumenti come cateteri e aghi all'interno del corpo.

Vediamo ora con un certo grado di dettaglio le tecnologie di localizzazione disponibili (e non) per la sala operatoria (esclusa quella ottica che è descritta nella dispensa successiva).

PERCHÉ IL GPS PUO' ESSERE UTILIZZATO IN SALA OPERATORIA

Il navigatore chirurgico permette di visualizzare l'anatomia virtuale insieme allo strumentario chirurgico (anch'esso virtuale) mantenendo sempre coerenti le relazioni spaziali tra di essi con la realtà. Il paradigma è lo stesso del navigatore per auto dove sulla mappa si ha una visualizzazione coerente della posizione dell'auto. Si potrebbe quindi pensare di utilizzare la stessa tecnologia di localizzazione GPS, utilizzata dai navigatori per auto, anche in sala operatoria.



Il *Global Positioning System* (GPS) è un sistema di navigazione globale basato su satelliti; tale tecnologia consente di ottenere un'informazione precisa circa la posizione del ricevitore che ha effettuato la richiesta di localizzazione. Questo è possibile grazie ad una rete di satelliti geostazionari che orbitano intorno alla terra.

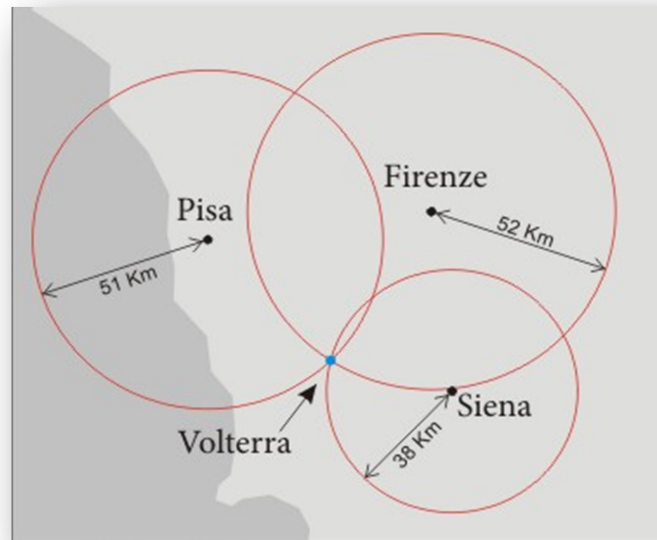
I satelliti emettono **segnali radio** attraverso i quali è possibile calcolare la posizione del ricevitore conoscendo:

- Il tempo di volo del segnale radio ricevuto da ciascun satellite;
- La posizione dei satelliti rispetto alla terra.

Il ricevitore GPS riceve il segnale radio proveniente dal satellite che orbita nelle sue vicinanze e riesce a calcolare la distanza sulla base del tempo di volo. In particolare la *velocità* di propagazione dell'onda elettromagnetica emessa dal satellite è pari a quella della luce, mentre il *tempo* è quello impiegato dal segnale emesso dal satellite per giungere al ricevitore. Il segnale digitale inviato dal satellite contiene l'orario esatto di trasmissione poiché a bordo dei satelliti del GPS vi sono orologi atomici. Il ricevitore è in grado di determinare il tempo di volo come differenza tra l'orario di trasmissione e quello di ricezione, e di calcolare poi la sua distanza dallo specifico satellite:

$$\text{Distanza} = \text{Velocità} \cdot \text{Tempo}$$

Una volta nota la distanza da ciascun satellite, la posizione del ricevitore è ricavata attraverso metodi di posizionamento sferico (*trilaterazione*). La **trilaterazione**, come la triangolazione topografica, consiste nel collegare idealmente una serie di punti formando una rete di triangoli adiacenti per determinare le coordinate ignote. Mentre la trilaterazione si avvale della misura dei lati dei triangoli (ad esempio le distanze tra il ricevitore ed i satelliti nel sistema GPS) la triangolazione si avvale della misura degli angoli.



1 Esempio di trilaterazione in topografia

Nel sistema GPS tramite le informazioni inviate da almeno 3 satelliti è possibile determinare la posizione del ricevitore con un certo margine di errore dovuto principalmente al fatto che l'orologio del ricevitore non essendo atomico non è accurato come quello presente nei satelliti. Per ottenere misure più accurate è necessario agganciare almeno 4 satelliti permettendo così di risincronizzare anche l'orologio del ricevitore.

All'interno della sala operatoria non è possibile utilizzare i sistemi GPS poiché ci troviamo in ambienti *indoor* nei quali il segnale è elettromagnetico è attenuato. Non è altresì possibile una replica indoor del sistema GPS, posizionando gli emettitori all'interno della stanza, poiché la radiazione elettromagnetica propagandosi troppo velocemente richiederebbe la misura del tempo con una granularità troppo spinta: ad esempio, per poter misurare distanze con un'accuratezza di 1 mm dovrei avere un'accuratezza nella misura del tempo pari a: $1 \text{ mm} / 300.000 \text{ km/s} = 3.33 \cdot 10^{-12} \text{ s}$.

Anziché il tempo di volo vero e proprio, si potrebbe misurare lo sfasamento tra l'onda trasmessa e quella riflessa, come avviene nei sistemi radar. Quest'approccio è utilizzato nelle telecamere a tempo di volo impiegate anche in ambienti indoor ma non permette la localizzazione di punti specifici ma solo la ricostruzione di superfici (con un'accuratezza che generalmente non scende sotto al cm).

SISTEMI DI LOCALIZZAZIONE MECCANICI

I *sistemi di localizzazione meccanici* sono stati i primi ad essere stati impiegati in ambito biomedico.

I sistemi meccanici sono costituiti da una serie di link rigidi e giunti; e grazie all'utilizzo della

cinematica diretta e conoscendo le relazioni esistenti tra i sistemi di riferimento solidali a ciascun link si può determinare la posizione ed orientamento della parte terminale del sistema rispetto ad un sistema di riferimento solidale alla base.

I sistemi meccanici possono essere classificati in:

- Sistemi meccanici *passivi*
- Sistemi meccanici *attivi*

Un **sistema meccanico passivo** è una catena cinematica formata da link e giunti nei quali sono posizionati degli *encoder* per la misurazione degli angoli ai giunti (nel caso di giunti cilindrici) dell'elongazione/accorciamento dei giunti (nel caso di giunti prismatici). L'*encoder* è un un apparato elettromeccanico che converte la posizione angolare del suo asse in un segnale elettrico digitale. Esistono varie tecniche per il rilevamento degli angoli: capacitiva, induttiva, potenziometrica e fotoelettrica. Utilizzando appropriate connessioni meccaniche, si è in grado di misurare spostamenti angolari, movimenti rettilinei e circolari, nonché velocità di rotazione e accelerazioni.

Un esempio di sistema meccanico passivo è anche il braccio robotico (come FaroArm: sistema commerciale portatile per le misure 3D di alta precisione [4-5]).

Un **sistema meccanico attivo** è una catena cinematica formata da link e giunti attuati: un robot. Questi dispositivi sono azionati mediante attuatori, posti tipicamente in corrispondenza dei giunti, i quali determinano la configurazione della catena. Generalmente un giunto attuato è anche sensorizzato oppure è possibile determinarne la posizione/orientamento indirettamente. Si è interessati a conoscere, per ogni istante, la posizione ed orientamento dell'*end-effector* del braccio robotico rispetto al sistema di riferimento del robot posto alla sua base. L'operatore può controllare il movimento della catena cinematica attraverso un'apposita interfaccia utente, ad esempio un joystick e determinare la posizione di ciascun punto raggiunto.

I **vantaggi** derivanti da questa tipologia di sistemi sono:

- Frequenza di aggiornamento di $\sim 100\text{Hz}$ con latenza inferiore a 1ms;
- Elevata accuratezza geometrica;
- Buona precisione (dipende dalla corretta cinematica);
- Semplicità di utilizzo e di sterilizzazione;
- Resistenti alle radiazioni;
- Robusti, poiché il loro funzionamento non è influenzato dall'ambiente e funzionano anche oscurando la linea di vista.

Gli **svantaggi** sono:

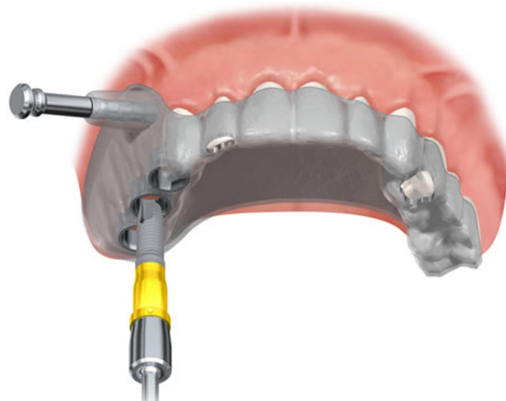
- Localizzazione di un solo punto per volta;
- Il volume di lavoro ridotto potrebbe non soddisfare le esigenze della procedura chirurgica da eseguire;

- Ingombranti in termini di occupazione di volume;

Nella categoria dei localizzatori meccanici possiamo considerare anche le **dime chirurgiche**. La dima chirurgica è realizzata solitamente in resina o materiali plastici, progettata a partire dalle immagini volumetriche del paziente e realizzata con tecniche di prototipazione rapida come la stampa 3D. La dima prevede canali di foratura e/o feritoie di taglio per guidare procedure di foratura e/o taglio eseguite manualmente con utensili come frese e seghe.

La dima è costruita a partire dalla segmentazione delle immagini e presenta una faccia con il negativo della struttura da operare che consiste solitamente in una superficie ossea. Durante l'intervento chirurgico, la dima è posizionata (o incastrata in alcuni casi) sulla parte anatomica da operare. L'accoppiamento della dima con la parte anatomica permette di riferire coerentemente i fori e/o i tagli pianificati sulle immagini sui tessuti reali.

Un esempio di utilizzo di dime chirurgiche è in ambito ortodontico. Grazie all'elaborazione dell'immagine ottenuta tramite tomografia computerizzata delle ossa mascellari è possibile progettare virtualmente il tipo, il numero e la sede degli impianti dentali considerando l'anatomia e le strutture nervose e vascolari da proteggere. Il modello, ricavato dalle immagini del paziente, verrà stampato, solitamente in materiale plastico, e presenterà dei fori nelle posizioni pianificate. Il dentista, dopo aver posizionato correttamente la dima nella bocca del paziente (sui denti rimanenti, se vi sono) potrà forare inserendo la punta del trapano in corrispondenza dei fori presenti sulla dima.



La precisione del posizionamento dell'impianto può facilitare la gestione clinica di casi complicati, migliorando in generale la prevedibilità, la sicurezza e la precisione del posizionamento dell'impianto rispetto al posizionamento tradizionale a mano libera. Tuttavia, l'utilizzo delle dime per il posizionamento di impianti presenta alcuni limiti. La procedura implantologica è sensibile alle tecniche che vengono coinvolte per la creazione del modello della dima, per la pianificazione del trattamento, per la fabbricazione e il posizionamento della dima nella bocca del paziente durante l'intervento chirurgico. Un qualsiasi errore in una di queste fasi può influenzare l'accuratezza e la precisione del posizionamento dell'impianto [10].

Oggi la dima chirurgica trova impiego anche in altri interventi di protesica articolare, come il ginocchio, in chirurgia maxillofacciale, per guidare le resezioni e per il corretto fissaggio di protesi, ed in chirurgia spinale per la guida nell'inserimento delle viti peduncolari.

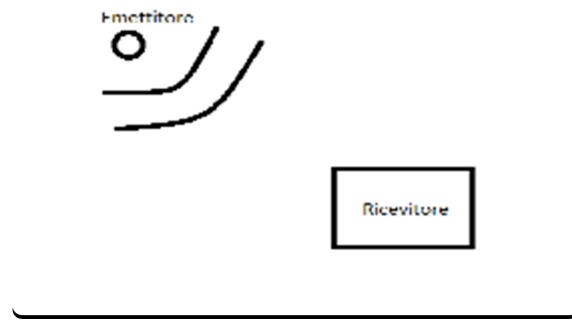
Il posizionamento della dima chirurgica è un aspetto fondamentale. Un errato posizionamento della dima, infatti, compromette l'utilità della stessa poiché il trasferimento della pianificazione effettuata sulle immagini preoperatorie sull'anatomia intraoperatoria sarà errato. La dima deve essere quindi

progettata per evitare quanto più possibile posizionamenti errati.

La dima chirurgica è stata presentata in questo paragrafo dedicato ai sistemi di localizzazione meccanici poiché è un dispositivo fisico che permette di riportare sull'anatomia in modo coerente canali di foratura e feritoie di taglio. Da sottolineare però che non si tratta di un dispositivo che permette di localizzare punti generici nello spazio, poiché è un pezzo meccanico rigido che non permette nessun tipo di adattamento.

SISTEMI DI LOCALIZZAZIONE AD ULTRASUONI

Come detto in precedenza realizzare un sistema GPS *in-door* con elevata accuratezza non è possibile, anche a causa dell'elevata velocità con la quale si propaga la radiazione elettromagnetica nell'aria. Lo stesso concetto del GPS, basato sul tempo di volo dei segnali e sulla trilaterazione, può essere implementato ricorrendo a onde con velocità di propagazione più bassa quali gli ultrasuoni. Tali sistemi sono costituiti come nel GPS da: emettitore e ricevitore. Purché in passato siano stati sviluppati sistemi di localizzazione basati sugli ultrasuoni, oggi non sono più in uso. Cerchiamo di capire in questo paragrafo quali sono i limiti intrinseci di questo approccio.



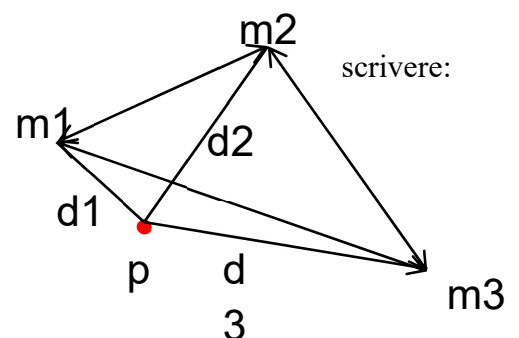
La misura della posizione può essere effettuata sfruttando due diverse informazioni ricavabili dall'onda che giunge al ricevitore: il **tempo di volo** o la **coerenza di fase**.

Il **tempo di volo** è determinato a partire dal tempo necessario affinché il suono emesso dai trasmettitori, generalmente posti sull'oggetto mobile del quale si vuol determinare la posa, raggiunga i sensori posti in posizioni fisse e note nell'ambiente. I trasmettitori emettono periodicamente un impulso ad ultrasuoni ed un solo emettitore per volta è attivo al fine di poter rivelare univocamente le distanze rispetto a ciascuno di essi. Attraverso la trilaterazione è poi possibile determinare la posizione di ciascun trasmettitore nello spazio. Nota la posizione degli emettitori (in figura m_1, m_2, m_3), una volta calcolata tramite il tempo di volo la distanza ricevitore-emettitore (rispettivamente d_1, d_2, d_3), è possibile ricavare la posizione $P(p_x, p_y, p_z)$ dell'emettitore.

Dal punto di vista analitico, per singolo emettitore possiamo

$$|P - m_i|^2 = d_i^2$$

$$(P - m_i)^T * (P - m_i) = d_i^2$$



Se si considera il caso 3D, con 3 ricevitori, si possono ottenere le seguenti due equazioni lineari e un'equazione quadratica (usando l'equazione del primo ricevitore e le due equazioni date dalla differenza tra la prima e rispettivamente la seconda e la terza):

$$\begin{aligned}(p - m_1)^T * (p - m_1) &= d_1^2 \\ 2 * (m_1^T - m_2^T)p &= d_2^2 - d_1^2 + m_1^T m_1 - m_2^T m_2 \\ 2 * (m_1^T - m_3^T)p &= d_3^2 - d_1^2 + m_1^T m_1 - m_3^T m_3\end{aligned}$$

Dalla precedente formula, si ottengono le tre coordinate del punto p. In particolare si possono risolvere per prime le due equazioni lineari ricavando le coordinate x e y come funzione della coordinata z. Successivamente, sostituendo x ed y nella quadratica si può determinare z. In generale avremo tre possibili casi:

- *Una soluzione reale*: singolo punto di intersezione.
- *Due soluzioni reali*: due punti di intersezione (in casi con particolari configurazioni geometriche del punto p rispetto agli emettitori).
- *Soluzione immaginaria*: non ci sono punti di intersezione tra le tre sfere (questo succede quando c'è un errore di misura che rende impossibile la soluzione del sistema).

Con l'utilizzo di 4 emettitori si elimina il caso della doppia soluzione reale grazie all'inserimento di un ulteriore vincolo geometrico.

Tutto ciò al fine di determinare la posizione di un punto. Poi, per poter determinare la posizione e l'orientamento di un oggetto nello spazio sarà necessario posizionarvi almeno 3 emettitori e accenderli in sequenza con una separazione temporale minima maggiore di quella necessaria per raggiungere tutti i ricevitori [12].

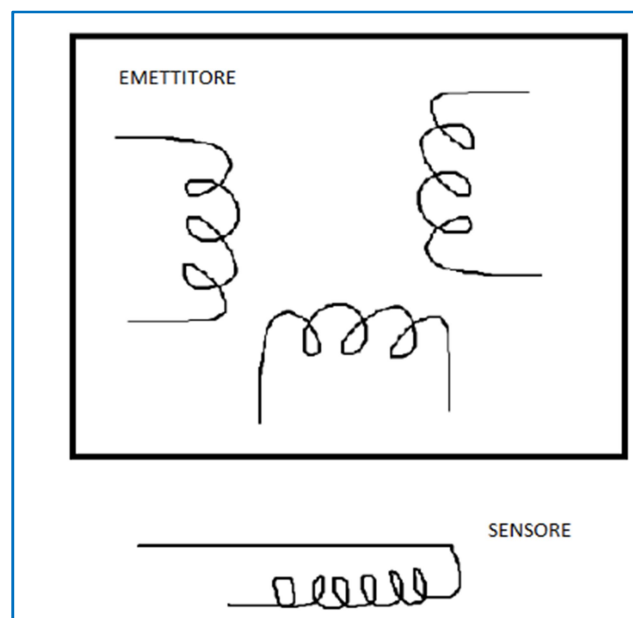
La velocità di propagazione dell'onda ultrasonica, che varia in base all'umidità ed alla temperatura, in un tipico ambiente indoor è di circa 330m/s e pertanto per percorrere 1m (la distanza minima a cui ha senso posizionare i ricevitori) impiega circa 3 ms. Poiché l'onda può rimbalzare sulle pareti, al fine di evitare di rilevare segnali riflessi (chissà dove), anziché solo i segnali diretti dall'emettitore al ricevitore, è necessario attendere un tempo pari a 3 o 4 volte il tempo massimo di volo tra emettitore e ricevitore tra l'invio di impulso ed il successivo al fine di far esaurire il fenomeno di eco. Se si considerano 3 emettitori e si suppone di voler effettuare delle misure ad una distanza massima di 1m, ognuno di essi dovrà quindi lavorare in una finestra temporale di almeno 12 ms. Considerando poi che sono necessari almeno 3 emettitori, il tempo totale per poter determinare la posizione e l'orientamento di un oggetto nello spazio sale a 48 ms durante i quali l'oggetto dovrebbe rimanere quanto più possibile fermo (poiché il calcolo della posa dell'oggetto a partire dalle posizioni di 3 punti presuppone che questi rimangano rigidamente vincolati tra loro). Ciò significa che la localizzazione con gli ultrasuoni è fattibile ma richiede dinamiche molto lente degli oggetti nella scena. Inoltre la velocità del suono in aria è influenzata da fattori ambientali come temperatura, pressione barometrica e umidità e quindi la misura può diventare imprecisa.

La localizzazione di un punto nello spazio con il metodo della *coerenza di fase* si basa sul principio che l'onda emessa e quella ricevuta non sono in fase a causa della distanza tra emettitore e ricevitore. Data l'intrinseca periodicità dell'onda, sarà possibile determinare univocamente le distanze fino alla lunghezza d'onda λ del segnale impiegato (dopodiché l'onda riflessa e quindi lo sfasamento si ripresenterà in modo periodico). Se si considera di voler ottenere delle misure fino alla distanza di un metro, la frequenza del segnale dovrebbe quindi essere $f = v/\lambda = 330 \text{ Hz}$ ma saremmo nella banda dell'udibile.

Abbiamo visto che per localizzare dei punti in sala operatoria non è possibile utilizzare il tempo di volo delle onde elettromagnetiche (poiché troppo veloci) né di quelle sonore (poiché troppo lente). Di fatto oggi si usano onde elettromagnetiche ma sfruttando l'effetto dell'onda e non il tempo di volo. L'effetto può essere di induzione elettromagnetica (nei localizzatori elettromagnetici descritti sotto) o fotoelettrico sul sensore di una camera (nei localizzatori ottici descritti nella dispensa successiva).

SISTEMI DI LOCALIZZAZIONE ELETTROMAGNETICI

I sistemi di localizzazione cosiddetti elettromagnetici utilizzano le informazioni relative all'esposizione di un sensore costituito da una spira ad un campo elettromagnetico. I sistemi di



localizzazione elettromagnetici sono costituiti da:

- Un *emettitore*: generatore di campo magnetico composto da più bobine (almeno 5) con posizionamento ed orientamento relativo noto;
- Il *sensore* è una spira (collegata con 2 fili), solitamente con un traferro interno [18].



(il sensore è il cilindretto nero sopra la moneta)



In figura sopra è riportato l'emettitore del sistema commerciale AURORA prodotto dalla *Northern Digital Inc.* (NDI). Il sistema è in grado di rilevare la posizione di sensori elettromagnetici con un'accuratezza massima di circa 1mm. Il sistema genera un campo elettromagnetico variabile a bassa intensità ed il volume di lavoro può essere approssimato ad un cubo da 50cm di lato.

Il funzionamento dei sistemi di localizzazione elettromagnetici si basa sulla misura della corrente indotta sul sensore a seguito del campo elettromagnetico emesso dalle bobine dell'emettitore.

Attraverso l'attivazione sequenziale di ogni emettitore in intervalli diversi di tempo noti, è possibile determinare la posizione e l'orientamento del sensore a partire dalla lettura delle correnti indotte sulla spira.

Le prestazioni del sistema elettromagnetico dipendono da diversi fattori tra cui il metodo di generazione del campo magnetico. Ci sono due tipi di generazione di sorgenti: *impulsi DC o AC*.

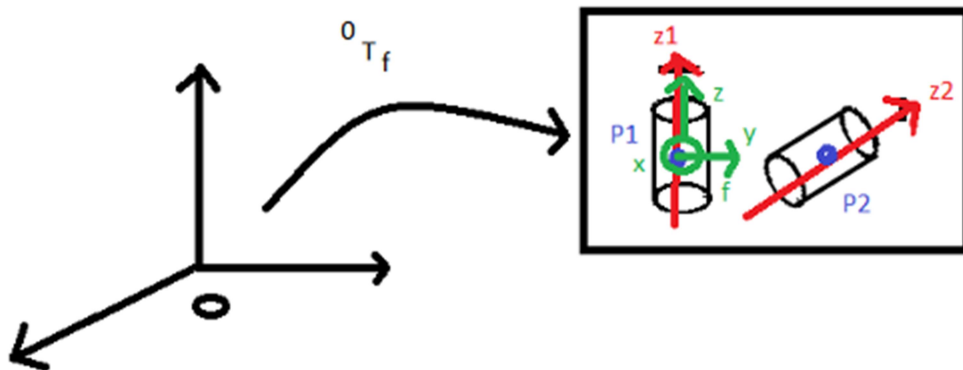
Un sistema di localizzazione che utilizza degli impulsi DC è molto sensibile alla presenza di *metalli* e *materiali magnetici* collocati vicino al volume da tracciare. La maggior parte delle interferenze ambientali sono DC e quindi è difficile ridurre questo fenomeno applicando tecniche di filtrazione convenzionali. Un cambiamento del campo magnetico può essere il risultato di diversi eventi, ad esempio una variazione del segnale di pilotaggio all'interno del trasmettitore o di un cambio di posizione o di orientamento tra il sistema di generazione del campo e le bobine di ricezione. La presenza di materiali metallici o altri materiali conduttivi o apparecchiature che producono un campo elettromagnetico in prossimità del trasmettitore o del ricevitore possono provocare distorsioni del campo che possono portare inevitabilmente ad errori elevati nella localizzazione [20].

Le grandezze geometriche che caratterizzano un sensore elettromagnetico costituito da una singola spira sono principalmente il baricentro e il suo asse. La spira ha una *simmetria cilindrica* ed è pertanto possibile determinare la posizione del baricentro e l'orientamento a meno della rotazione lungo il suo asse principale. Con un singolo sensore si è quindi in grado di determinare 5 gradi di

libertà. Accoppiando più spire è possibile determinare tutti e 6 i gradi di libertà. In commercio esistono sensori a sei gradi di libertà che di fatto al loro interno integrano due spire.

ESEMPIO

Nota la posizione e l'orientamento di due sensori a 5 g.d.l solidali ad un corpo rigido nel sistema di riferimento di un localizzatore, definire una matrice di rototraslazione con la quale poter calcolare



la posizione di ciascun punto del corpo rigido rispetto al localizzatore.

In verde è riportato il sistema di riferimento del sensore 1, in nero il sistema di riferimento del localizzatore e in rosso l'asse dei sensori.

Se si considerasse un solo sensore, non si riuscirebbe a costruire la matrice di rototraslazione a partire dalla conoscenza della posizione del baricentro p e dall'orientamento dell'asse principale z di un solo sensore:

$${}^0T_1 = \begin{matrix} ? & ? & z_{1x} & P_{1x} \\ ? & ? & z_{1y} & P_{1y} \\ ? & ? & z_{1z} & P_{1z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{matrix}$$

invece, combinando le informazioni relative a due sensori vincolati tra loro posso determinare posso determinare tutti e 6 di g.d.l., ad esempio:

$$\hat{x} = \frac{\widehat{z1} \times (P2 - P1)}{|\widehat{z1} \times (P2 - P1)|}$$

$$\hat{y} = \hat{z} \times \hat{x}$$

$$\hat{z} = \widehat{z1}$$

$${}^0T_1 = \begin{matrix} x_x & y_x & z_x & P_{1x} \\ x_y & y_y & z_y & P_{1y} \\ x_z & y_z & z_z & P_{1z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{matrix}$$

si è in grado di determinare la matrice di trasformazione che permette di passare dal sistema di riferimento del localizzatore al sistema di riferimento del sensore elettromagnetico.

Si invitano gli studenti a segnalare inesattezze, errori e parti non chiare!

BIBLIOGRAFIA

- [1] Kwoh YS, Hou J, Jonckheere EA, Hayati S, “A robot with improved absolute positioning accuracy for CT guided stereotactic brain surgery”, *IEEE Trans Biomed Eng*; 35(2): 153-60.
- [2] Drake JM, Joy M, Goldemberg A, Kreindler D, “Computer and robotic assisted resection of brain tumors”, In Proceedings of 91 ICAR. Fifth International Conference on Advanced Robotics. Robots in Unstructured Environments. Pisa, Italy; 899-904.
- [3] Davies BL, Hibbred RD, Ng WS, Timoney AG, Wickham JE, “A robotic assistant for prostate surgery”, In Proceedings of IEEE/EMBS Conference. Paris, France; 1052-4
- [4] <http://www.faro.com/it-it/prodotti/metrologia/braccio-misura-cam2arm/panoramica>
- [5] S.Martelli, S. Bignozzi, M. Bontempi, S. Zaffagnini and L. Garcia, “Comparison of Optical and a Mechanical Navigation System”, Laboratotio di Biomeccanica, Istituto Ortopedici Rizzoli, Bologna; Italy
- [6] https://it.wikipedia.org/wiki/Sistema_chirurgico_da_Vinci
- [7] Villa R, “A technique for the presurgical simulation of the position of computer-assisted, template-based, planned implants: a clinical report”, in *J Prosthet Dent.*, 2014 Nov;112(5),
- [8] Abdul Aziz Al Sawai, C. S. Rajmohan, Hussein Labib, Said Tabiuk, “Advances in Dental Implant Positioning Techniques and Their Clinical Implications”, *Open Journal of Stomatology*, 2017, **07**, 02,
- [9] Brandon M. Stapleton, Wei-Shao Lin, Athanasios Ntounis, Bryan T. Harris, Dean Morton, “Application of digital diagnostic impression, virtual planning, and computer-guided implant surgery for a CAD/CAM-fabricated, implant-supported fixed dental prosthesis: A clinical report”, *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 2014, **112**, 3,
- [10] Azari, A. e Nikzad, S. (2008), computer-assistita implantologia: background storico e potenziali risultati-un commento. *Int. J. Med. Robotica Comput. Assist. Surg.* 4:. 95-104. doi: 10.1002 / rcs.188
- [11] Michael Fluckiger; Bradley J. Nelson, “Ultrasound Emitter Localization in Heterogeneous Media”, 2007 29th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society
- [12] D. E. Manolakis, “Efficient solution and performance analysis of 3-D position estimation by trilateration”, *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 32(4), pp. 1239-1248, 1996.
- [13] http://www.hitl.washington.edu/research/knowledge_base/virtual-worlds/EVE/I.D.1.b.TrackingDevices.html
- [14] Qi Wang ; Mark Howell ; Sheronica James ; Gregory T. Clemente, “Head motion tracking for functional MRI using an air ultrasound array”, 2014 IEEE International Ultrasonics Symposium, Anno: 2014, Pagina s : 738 - 741 , DOI: 10.1109 / ULTSYM.2014.0182
- [15] E. M. Friets et al., “A Frameless Stereotaxic Operating Microscope for Neurosurgery”, *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 36(6), pp. 608-617, 1989.
- [16] T. Yano, M. Tone e A. Fukumoto, “Range Finding and Surface Characterization Using High-Frequency Air Transducers”, *Ultrasonics, Ferroelectrics e Frequency Control*, IEEE Transazioni su, 34 (2): 232-236, marzo 1987
- [17] Volodymyr V. Kindratenko, “A survey of electromagnetic position tracker calibration techniques”, National Center for Supercomputing Applications (NCSA) University of Illinois at Urbana-Champaign 405 North Mathews Avenue, Urbana, IL 61801, USA
- [18] Mengfei Li, Tomasz Bien, Georg Rose, “FPGA based electromagnetic tracking system for fast catheter navigation”, *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Volume 4, Issue 9, September 2013 ISSN 2229-5518

[19] Filippo Attivissimo; Anna Maria Lucia Lanzolla; Sabatina Carlone; Pietro Larizza; Gioacchino Brunetti, “TDM-FDM configuration of electromagnetic tracking system for image-guided surgery devices”, 2017 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), Year: 2017, Pages: 1 - 6, DOI: 10.1109/I2MTC.2017.7969719

[20] V. Kindratenko, “A survey of electromagnetic position tracker calibration techniques Volodymyr”, National Center for Supercomputing Applications (NCSA) University of Illinois at Urbana-Champaign 405 North Mathews Avenue, Urbana, IL 61801, USA