

ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
CAMPUS DI CESENA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'ENERGIA ELETTRICA E
DELL'INFORMAZIONE "GUGLIELMO MARCONI"

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA BIOMEDICA

Validazione di un sistema GNSS-RTK multibanda a basso
costo per la misura della velocità del cammino

Tesi in

Bioingegneria della Riabilitazione LM

Relatore

Prof. Lorenzo Chiari

Presentata da

Luca Reggi

Correlatori

Dott. Sabato Mellone

Dott. Luca Palmerini

Anno Accademico 2018-2019

Sommario

INTRODUZIONE	4
Capitolo 1 – LA VELOCITÀ DEL CAMMINO.....	6
1.1 Parametro clinico.....	6
1.2 Protocolli di misura	12
1.3 Strumenti di misura	16
Capitolo 2 – IL GNSS.....	20
2.1 L’infrastruttura del GNSS.....	20
2.2 I segnali GNSS	22
2.3 Tecniche di osservazione	24
2.3.1 Misurazione Code Based.....	25
2.3.2 Misurazione Carrier Phase.....	27
2.4 Fonti di errore.....	28
2.5 GNSS Augmentation	30
2.6 Metodi di misura della velocità	32
2.7 Utilizzo in clinica	33
Capitolo 3 – simpleRTK2B.....	36
3.1 Caratteristiche tecniche.....	37
3.2 Protocolli di comunicazione.....	40
3.2.1 Standard RTCM.....	40
3.2.2 Protocollo NTRIP	41
3.2.3 NMEA 0183.....	42
3.3 Configurazione basata su protocollo NTRIP	45
Capitolo 4 – PROTOCOLLO DI VALIDAZIONE.....	48
4.1 Prova preliminare	50

4.2	Protocolli di acquisizione.....	51
4.2.1	Validazione con cronometro.....	51
4.2.2	Validazione con gold standard.....	52
4.2.3	Validazione in ambiente urbano	55
4.3	Elaborazione dei dati	57
4.3.1	Selezione dei dati	58
4.3.2	Sincronizzazione delle misure	60
4.3.3	Analisi del passo	62
Capitolo 5 – ANALISI DEI RISULTATI.....		65
5.1	Prova di validazione con cronometro	68
5.2	Prova di validazione con gold standard	71
5.3	Prova di validazione in ambiente urbano.....	76
Capitolo 6 – CONCLUSIONI		78
BIBLIOGRAFIA		80
RINGRAZIAMENTI.....		84

INTRODUZIONE

Nella pratica clinica lo studio della velocità del cammino ha acquisito negli ultimi vent'anni una importanza crescente. Un elevato numero di studi ha infatti dimostrato come la misura di questo parametro possa essere utilizzata come strumento predittivo di mortalità, disabilità e future ospedalizzazioni, per citarne alcune; inoltre, viene largamente impiegata singolarmente o all'interno di test motori per la misura oggettiva del cambiamento nello status dei pazienti, ad esempio prima e dopo una terapia. La maggior parte di questi test viene condotta all'interno delle strutture cliniche, con problematiche legate alle limitate distanze utilizzabili ed alla mancanza di validità ecologica. Nel corso degli anni, si sono quindi ricercati degli strumenti capaci di effettuare una valida e accurata misura della velocità anche in ambiente di vita reale senza, ad esempio, vincoli sul luogo e momento della misura o il bisogno di un continuo monitoraggio da parte di un esaminatore. Uno dei possibili che consente di abilitare questo tipo di indagine è senz'altro il GPS, in quanto è un servizio disponibile gratuitamente a livello mondiale e può essere facilmente utilizzato senza bisogno di particolari accorgimenti. Una delle principali limitazioni, che ne ha rallentato sin qui l'utilizzo, riguarda le basse prestazioni ottenibili in presenza di ostacoli come alti edifici o zone con una fitta vegetazione. Per aumentare l'accuratezza sulla localizzazione raggiungibile ad un livello accettabile per un'applicazione clinica anche in queste condizioni, fino a qualche anno fa, era necessario utilizzare strumentazioni professionali del costo di alcune migliaia di euro. Ad oggi invece questa spesa, con l'immissione sul mercato di moduli GNSS a basso costo capaci di misure differenziali RTK, è diminuita notevolmente rendendo questi ricevitori, seppure leggermente meno affidabili della loro controparte di alta gamma, accessibili al consumatore medio. Lo scopo di questa tesi consiste dunque, nella validazione della misura della velocità di cammino effettuata con uno di questi nuovi ricevitori, chiamato simpleRTK2B.

Il lavoro di tesi è suddiviso in sei capitoli: partendo da una ricerca bibliografica sulla velocità del cammino e sul suo utilizzo nella clinica, seguirà una breve introduzione alle

basi del sistema di navigazione satellitare globale; successivamente verrà descritto il ricevitore simpleRTK2B e le sue caratteristiche principali, focalizzandosi sulla configurazione qui utilizzata per ottenere un sistema basato sul posizionamento differenziale noto come *Real Time Kinematic*; in seguito, verranno presentati i protocolli di validazione creati per l'analisi dell'accuratezza, le elaborazioni necessarie ad estrarre il dato finale sulla velocità media e, infine, verranno presentati e discussi i principali risultati.

Capitolo 1 – LA VELOCITÀ DEL CAMMINO

1.1 Parametro clinico

La locomozione può essere considerata una funzionalità distintiva in tutto il regno animale, ha infatti un ruolo centrale nell'abilità di procacciarsi il cibo, fuggire da un pericolo e sopravvivere. Nell'uomo, la capacità di camminare è alla base di moltissime azioni comuni necessarie per l'indipendenza dell'individuo nella comunità. Per queste ragioni, un semplice indicatore di mobilità ha la potenzialità di agire come rilevatore di salute e funzionalità sia nell'invecchiamento sia nella malattia [1]. È interessante notare infatti come, in tutte le specie animali viventi, l'invecchiamento sia caratterizzato da un rallentamento dei movimenti. Questo fisiologico rallentamento della mobilità riflette una lenta e progressiva perdita di vitalità dell'organismo, evidenziando come molti apparati ed organi vitali siano alla base della locomozione [2] (figura 1.1).

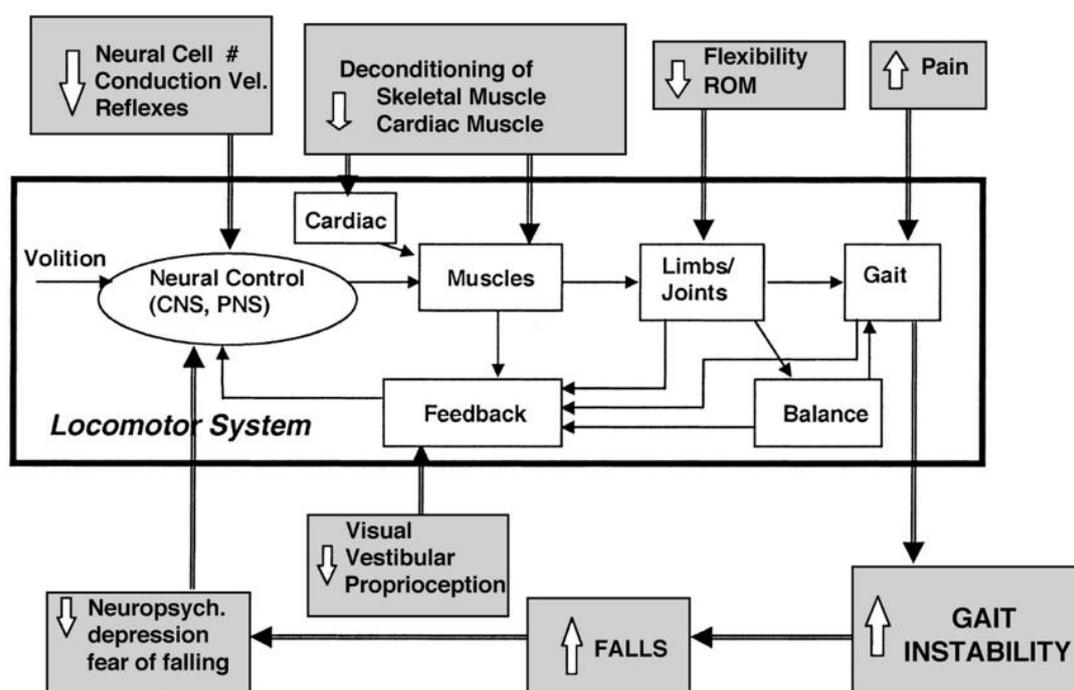


Figura 1.1 Diagramma a blocchi semplificato che mostra alcuni dei fattori fisiologici e neurofisiologici associati al cammino [3].

Camminare d'altronde richiede la coordinazione e la cooperazione di diversi sistemi quali: muscolo-scheletrico, sensoriale, nervoso e cardiocircolatorio. Ferrucci et al., nel tentativo di enumerare le componenti critiche alla locomozione e fruibili alla misurazione nella pratica clinica, hanno proposto un modello di avvenimenti a cascata che avvengono durante il cammino. Partendo dall'intenzione di muoversi, il cervello crea un programma motorio che è trasmesso tramite i nervi periferici verso i muscoli, che lo espletano in una determinata sequenza. Trasformando l'energia da chimica in fisica, i muscoli applicano forza allo scheletro, il quale mediante le articolazioni trasmette questa forza al terreno attraverso i piedi, che stabilizzano e permettono l'avanzamento del corpo. Inoltre, questa attività richiede che il sistema circolatorio trasporti in modo continuo i nutrienti e l'ossigeno ai vari apparati e che i sistemi visivo, propriocettivo e vestibolare assicurino un feedback continuativo [4].

Non sempre un malfunzionamento di questi sistemi viene riconosciuto e identificato in una malattia, o perché di intensità "subclinica" o per via della difficile diagnosi, e spesso viene imputato all'invecchiamento. Questa incapacità di rilevare piccole anomalie, unita alla capacità del corpo umano di attuare strategie di funzionamento alternative, porta in molti casi alla diagnosi tardiva di una patologia. Essendo il cammino influenzato da molti sistemi, è lecito chiedersi se un malfunzionamento di questi si rifletta su di esso ed in particolare sulla velocità con cui avviene il movimento. Da un paio di decenni infatti, sempre più studi sono stati condotti su questo parametro, per capire se, effettivamente, fosse in grado di evidenziare l'insorgere di patologie o avvenimenti di interesse clinico.

Ne è un esempio il lavoro condotto dall'IANA (*International Academy on Nutrition and Aging*) che mostra come, la velocità del cammino (*Walking Speed, WS*) abbia un'ottima validità come strumento predittivo di mortalità, disabilità, ospedalizzazioni, demenza e cadute [5].

Alcuni risultati di questa review, condotta su una vasta popolazione di anziani che vivono in comunità, mostrano (Figura 1.2) come per diversi valori della WS varino le predizioni di futuri eventi avversi di interesse clinico. La soglia più accreditata per la distinzione tra soggetti in una buona forma fisica e non è 1.0 m/s, mentre una velocità inferiore di 0.6 m/s viene spesso usata come indicatore di alta probabilità di declino fisico e non solo [5],[6].

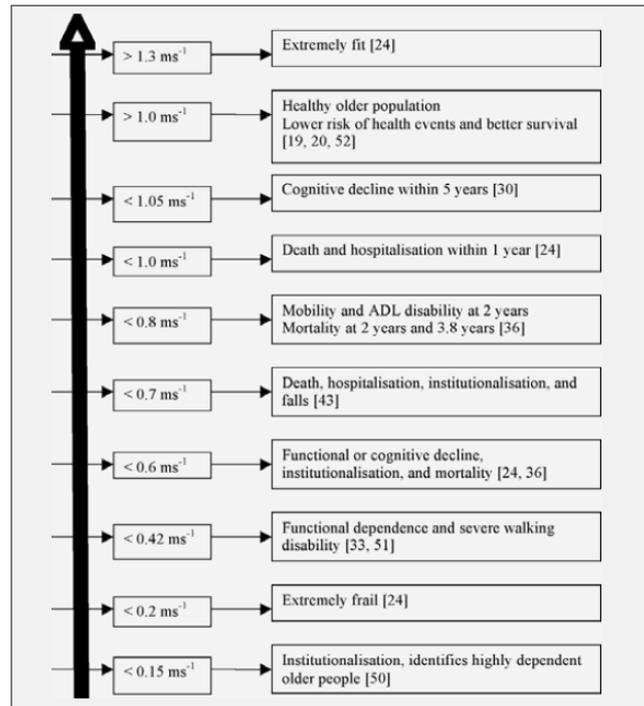


Figura 1.2 Valori soglia per la velocità del cammino a passo usuale associati ad avvenimenti avversi trovati in letteratura.

Nella review condotta da Studenski et al. su una popolazione totale di 34485 over sessantacinquenni viene in aggiunta proposta come unica soglia media di distinzione 0.8 m/s. Questo lavoro inoltre mostra molto bene la relazione tra WS e tasso di sopravvivenza: i risultati (Figura 1.3) evidenziano una diminuzione del tasso di sopravvivenza a 5 e 10 anni al decrescere della velocità sia per gli uomini che per le donne [7].

Gait Speed, m/s	5-Year Survival (95% CI), % ^a						10-Year Survival (95% CI), %					
	Men			Women			Men			Women		
	Age 65-74	Age 75-84	Age ≥85	Age 65-74	Age 75-84	Age ≥85	Age 65-74	Age 75-84	Age ≥85	Age 65-74	Age 75-84	Age ≥85
Speed <0.4	68 (47-82)	60 (38-76)	25 (15-36)	80 (71-86)	69 (58-78)	47 (40-54)	56 (23-80)	15 (4-33)	8 (3-18)	58 (46-69)	35 (24-47)	11 (5-19)
≥0.4 to <0.6	77 (72-81)	57 (49-64)	31 (24-39)	88 (85-90)	75 (68-80)	61 (50-70)	53 (41-64)	23 (15-31)	6 (3-11)	67 (61-72)	42 (36-48)	18 (9-30)
≥0.6 to <0.8	79 (74-83)	65 (57-71)	49 (35-61)	91 (89-93)	82 (78-86)	74 (69-78)	57 (52-62)	31 (24-38)	11 (3-28)	74 (71-77)	52 (46-57)	23 (18-28)
≥0.8 to <1.0	85 (82-88)	75 (69-79)	54 (43-64)	93 (91-95)	89 (86-91)	73 (59-83)	67 (62-71)	43 (36-50)	14 (7-25)	80 (75-83)	62 (56-68)	39 (22-56)
≥1.0 to <1.2	90 (85-93)	83 (76-87)	68 (57-77)	96 (94-98)	91 (87-94)	61 (35-79)	69 (63-74)	53 (46-59)	50 (6-84)	86 (82-89)	73 (70-77)	33 (13-54)
≥1.2 to <1.4	93 (86-96)	85 (79-89)	62 (46-74)	96 (94-97)	93 (87-96)	67 (5-95)	75 (40-91)	51 (16-78)	NE	83 (38-96)	80 (72-86)	NE
Speed ≥1.4	95 (89-97)	93 (86-96)	91 (51-99)	97 (94-99)	95 (72-99)	NE	93 (81-98)	50 (6-84)	NE	87 (71-95)	92 (71-98)	NE
All gait speeds	87 (82-91)	74 (65-81)	46 (39-53)	93 (91-94)	84 (80-87)	64 (58-70)	62 (58-66)	36 (30-42)	10 (8-13)	77 (71-82)	54 (46-60)	22 (15-29)

Figura 1.3 Tasso di sopravvivenza a cinque e dieci anni in uomini e donne suddivisi per età e velocità del cammino. (Abbreviations: CI, confidence interval; NE, not estimable due to small number of participants in categories.)

È importante sottolineare però che, nonostante sia una misura continua, anche la velocità del cammino soffre di effetto pavimento e soffitto, soprattutto se misurata su distanze brevi [8],[9]. Quindi, è necessario, utilizzare valori di riferimento specifici alle abilità del proprio gruppo di studio, le quali variano ad esempio per condizione medica pregressa o età [10]. Questa problematica è comunque molto più pronunciata in altri test di misura di funzionalità e progresso molto utilizzati in clinica, come ad esempio le misure autovalutative [6].

I test di performance fisica sono oramai una pratica comune in ambito clinico e vengono utilizzati sia come strumento predittivo che come misura oggettiva di cambiamento nello status dei pazienti, ad esempio prima e dopo una terapia. Alcuni dei test maggiormente utilizzati sono la *Short Physical Performance Battery* (SPPB), la *Berg Balance Scale* (BBS) e il *Time Up and Go* (TUG). Queste prove, nonostante abbiano mostrato buone caratteristiche in termini di affidabilità e validità [5],[11], sono a confronto con la singola valutazione della velocità del cammino di più lunga e complessa somministrazione: ad esempio la SPPB ha un tempo di somministrazione 3 volte più lungo, utilizzando anche misure di equilibrio e alzata dalla sedia. Inoltre, per quanto riguarda la validità predittiva in termini di ospedalizzazioni, declino motorio e di salute, la sola WS si è dimostrata un indice di predizione valido tanto quanto l'intera SPPB [5]. Nel lavoro di Montero et al. [12] viene in aggiunta mostrato come, la velocità del cammino sia utilizzata per predire nuove cadute e la necessità di un accompagnamento (Figura 1.4). Infine, viene evidenziato come questa capacità sia molto maggiore che in altri test come il POMA (*Performance Oriented Mobility Assessment*) o il Get up & Go (Figura 1.5).

Gait Velocity	>1.1 m/s (N = 34)	0.7–1.0 m/s (N = 42)	<0.7 m/s (N = 25)	RR (95% CI)	p Value
Subjects with any adverse events, % (n)	20% (7)*	34% (14) [†]	72% (18)* [†]	3.5 (1.7–7.0)* 2.1 (1.3–3.4) [†]	<.002 <.001
New fall, % (n)	12% (4)*	24% (10) [†]	60% (16)* [†]	5.4 (2.0–14.3)* 2.6 (1.4–4.9) [†]	<.0005
Hospitalization, % (n)	8.8% (3)*	17% (7) [†]	52% (13)* [†]	5.9 (1.9–18.5)* 3.0 (1.4–3.6) [†]	<.005
Need for a caregiver, % (n)	3% (1)*	17% (7) [†]	28% (7)* [†]	9.5 (1.3–72.5)* 1.64 (0.7–4.1) [†]	<.007
Nursing home placement, % (n)	0	0	12% (3)	N/A	
Fracture, % (n)	3% (1)*	10% (4) [†]	8% (2)* [†]	2.7 (0.3–28.4)* 0.8 (0.8–4.2) [†]	
Death, % (n)	0	10% (4)	8% (2)	N/A	

Figura 1.4 Capacità di predizione della velocità del cammino dopo 2 anni di follow-up.

(Notes: *Comparisons between high and low gait velocity. [†]Comparisons between intermediate and low gait velocity. N/A not applicable; RR ¼ relative risk; CI ¼ confidence interval.)

Outcome	Low Gait Velocity	abn. POMA	abn. Get Up & Go
Total events	10.1 (2.2–46)*	2 (0.6–6.4)	0.7 (0.3–2)
New falls	10.9 (2.0–58)*	1.4 (0.4–5.4)	0.8 (0.3–2.4)
Hospitalization	12.3 (1.9–79)*	1.1 (0.3–4.2)	0.7 (0.2–2.4)
Fracture	2.4 (0.2–33)	2.4 (0.4–16.4)	2.3 (0.3–16.4)
Death	1.8 (0.3–4)	1 (0.1–10.5)	0.2 (0.01–2.6)

Figura 1.5 Comparazione tra capacità predittiva di WS, POMA e Get Up & Go dopo 2 anni di

follow-up. (Notes: Low gait velocity: ,0.7 m/s, abn. POMA (abnormal Performed Oriented Mobility Assessment; score ,20/28), abnormal Get Up & Go (score ,4/5 or ,10). Data were adjusted for demographics and functioning variables and are shown as odds ratios (95% confidence intervals) from a multiple logistic regression analysis. *Statistically significant.)

Un'ulteriore prova delle potenzialità della WS come singola misura predittiva viene data nel lavoro di Hardy et al. [6], dove vengono utilizzati 6 test per la misura di salute e funzionalità (WS sui 4m, SPPB, Short Form-36 Health Survey, NHIS ADL, EuroQol, Global Health) su una baseline di un anno. Dopo 8 anni di follow-up, lo studio rivela come solo un cambiamento nella velocità del cammino sia significativamente associato con il tasso di sopravvivenza.

Una revisione sistematica condotta nel 2009 da Graham et al. [8] mostra come su 126 gruppi di pazienti, i principali ambiti nei quali la WS viene utilizzata come parametro clinico sono: neurologico 44%, geriatrico 21%, ortopedico 10%, cardiovascolare 7% e altro 26%. Fanno parte di quest'ultimo dato ben 17 gruppi di soggetti sani, in quanto ben 61 su 108 studi analizzati sono di carattere descrittivo.

In ambito neurologico, la velocità del cammino è largamente utilizzata come predittore della capacità di deambulazione e conseguente struttura post ricovero. Questo parametro permette di suddividere i soggetti in camminatori autonomi, di limitata autonomia e che necessitano assistenza [13], consentendo quindi di ipotizzare il percorso post ospedaliero. Nel lavoro di Rabadi et al. [14], la sola WS permette di identificare nel 78% delle volte se il paziente potrà essere dimesso a casa o in una struttura specializzata e l'aggiunta del punteggio FIM (*Functional Independence Measure*) non varia significativamente questo valore. Inoltre, la velocità del cammino valutata sui 5 m a passo normale si è rivelata essere la misura più sensibile, in pazienti neurologici, per identificare cambiamenti longitudinali della condizione motoria [15].

Questo parametro infine, mostra un'ottima affidabilità test-retest ($ICC > 0.9$) [16], inter-rater [9] e intra-rater, oltre ad una alta sensibilità al cambiamento [17]. Queste caratteristiche unite alla facile, veloce ed economica amministrazione dei test ha portato la velocità del cammino ad essere considerata come un sesto parametro vitale [2]. Sebbene, i vantaggi derivanti da questa misura siano molteplici, il suo utilizzo nella pratica clinica è ancora scarso: la principale motivazione risiede nella mancata standardizzazione dei protocolli di misura, come ad esempio distanza, ritmo e tipologia di partenza. Esistono difatti pareri contrastanti su quale sia la distanza ottimale su cui valutare la velocità media, o se l'utilizzo di un ritmo veloce sia più informativo di quello usuale [5]. Oltre a questo, sono state espresse alcune critiche sulla validità ecologica di questo parametro, ossia se i risultati ottenuti in un ambiente protetto come quello clinico possano essere traslati nella realtà [8].

1.2 Protocolli di misura

La velocità del cammino come parametro clinico viene utilizzata sia singolarmente sia all'interno di test più strutturati come la *Short Physical Performance Battery* o il *Multiple Sclerosis Functional Composite* (MSFC). In questo capitolo si tratterà la sola misura della WS e i vari protocolli utilizzati nella pratica medica, evidenziandone i pro e i contro. Come si è anticipato precedentemente, la misura di questo parametro non segue standard ben definiti e mostra una grande variabilità per metodiche e distanze. Volendo fare una macro-divisione dei possibili test, questi ricadono principalmente in due tipologie: la prima consiste nel misurare il tempo di percorrenza di una distanza nota, la seconda, invece, nel determinare la distanza percorsa in un dato tempo. In entrambe è dunque facile estrarre l'informazione sulla velocità media del soggetto, dividendo lo spazio percorso per il tempo. Oltre che per la tipologia di variabile misurata, queste due classi di test si differenziano spesso anche per le distanze percorse: le prime sono solitamente brevi dai 2 ai 15 metri, mentre nel secondo caso si richiede al soggetto di percorrere distanze notevolmente maggiori, essendo i test più comuni basati da 2 a 12 minuti di camminata [8]. Questa distinzione non è comunque assoluta, un test piuttosto usato infatti, definito del "corridoio lungo", è quello sui 400 metri che per distanza percorsa è paragonabile al *Six Minute Walking Test* (6MWT) [18].

Nel definire un test per la misura della velocità del cammino bisogna sostanzialmente definire cinque cose: la distanza o tempo, il ritmo del passo, la tipologia di partenza, l'utilizzo o meno di incoraggiamenti e l'ambientazione della prova. Per quanto riguarda il primo parametro, bisogna innanzitutto distinguere tra brevi, solitamente minori di 15 m, e lunghe distanze poiché, sebbene i risultati siano molto correlati, le prime riflettono bene la funzionalità degli arti inferiori, mentre le seconde sono più una misura della fitness e sono notevolmente influenzate anche da altri fattori, come la capacità cardiovascolare, la funzionalità respiratoria e il tono muscolare [8]. La notevole variabilità sulle brevi distanze è mostrata nella review di Graham et al., in cui si evidenzia che a seconda del gruppo di studio sia spesso associata una distanza piuttosto che un'altra: ad esempio in pazienti cardiovascolari viene spesso usata 4 m, in geriatria 6 m e in pazienti neurologici 10 m [8]. Queste differenze, però, sembrano essere dettate più dalla convenienza (tempo e spazio) nella somministrazione del test che da un effettivo aumento

dell'efficacia [10], soprattutto nel caso di velocità del cammino usuale [5]. Questa differenza non significativa nella stima della WS sulle brevi distanze è sottolineata anche nel lavoro di review di Peel et al. [19]; viceversa non è comprovata tra test brevi e lunghi, in quanto ci sono diverse evidenze riportate nello studio di Carvalho et al. [20] che mostrano come nella maggior parte dei casi i soggetti non riescano a mantenere la propria velocità usuale su un lungo tratto e quindi la distanza stimata dalla velocità ricavata dal test breve tende a sovrastimare quella effettiva. In contraddizione a questo però, i risultati di Dobkin et al. [21] mostrano come per pazienti con emiparesi non ci sia differenza significativa sulla velocità media utilizzata per compiere i 15m e il 6MWT. Questa discordanza dei risultati può essere dovuta a molti fattori, primo tra i quali la diversa tipologia di soggetti, ed è quindi buona norma utilizzare entrambi i test, se possibile, senza dimenticare che il 6MWT è influenzato da più fattori. È infine importante evidenziare come l'utilizzo di protocolli in cui sia necessaria un'inversione di marcia, ad esempio un test da 10 m composto da andata e ritorno, incida significativamente sul tempo di esecuzione e, quindi, porti a risultati differenti in confronto a un test sulla stessa distanza percorsa in un'unica direzione [10].

Un parametro che influenza significativamente la velocità del cammino è il ritmo richiesto nella prova, che solitamente si suddivide in velocità di cammino usuale e confortevole o massima velocità sostenibile senza correre. Nello studio di Graham et al. [10] viene evidenziato come il ritmo sia la sola variabile che influenza significativamente la performance, al contrario di tipologia di partenza e distanza percorsa. La variabilità nell'utilizzo di una velocità piuttosto che l'altra è nettamente a favore del ritmo usuale [16],[19], poiché quest'ultimo è più sicuro per il paziente, considerando pazienti anziani o soggetti con difficoltà di deambulazione. Inoltre, risulta maggiormente correlato con la funzionalità fisica, mentre un passo sostenuto evidenzia una associazione maggiore con la massa muscolare e con la percezione che il soggetto ha della propria salute [9]. Le due velocità hanno inoltre una capacità comparabile di discriminare soggetti a rischio di caduta [22]. Sebbene sia più standard la scelta di un ritmo usuale, la misura di della massima velocità può essere utile in specifiche indagini e la differenza tra le due WS può essere, secondo Dobkin et al. [21], un utile indice dell'abilità di deambulazione.

Per quanto riguarda la tipologia di partenza esistono due protocolli: uno statico, nel quale il soggetto parte da fermo posizionato all'inizio del percorso e uno dinamico, in cui il candidato parte alcuni metri prima della zona di misurazione, in modo da eliminare gli effetti dell'accelerazione ed utilizzare un valore della velocità stazionario nel tratto di interesse. Anche in questo caso non c'è un protocollo di riferimento e la partenza statica viene leggermente più usata rispetto a quella dinamica, con la prima preferita in campo geriatrico e la seconda in quello neurologico [10]. Sebbene, come ci si aspetta, una partenza dinamica porti a WS leggermente più alte, la differenza da un protocollo statico non è significativa [9],[10],[19].

L'utilizzo di un incoraggiamento verbale durante i test non è molto impiegato, o quantomeno viene poche volte riportato nel protocollo di misura degli studi: infatti nella review di Graham et al. [8] solo 4 su 108 studi ne menzionano l'utilizzo o meno. Nella maggior parte dei casi si tratta di frasi standard come "continua così" e "stai andando bene" o possono essere, nel caso di prove più lunghe, informazioni sul tempo trascorso o il numero di giri mancanti. Nel lavoro di Guyatt et al. [23] viene mostrato come la distanza percorsa in un 6MWT da uno stesso soggetto su due prove distinte, senza incoraggiamento e con, aumenti in modo significativo nel secondo caso. Inoltre, è probabile che l'utilizzo di queste frasi sia di maggiore impatto su prove a ritmo massimo che usuale. Nonostante siano pochi i dati su quanto e in quali casi l'utilizzo d'incoraggiamenti influenzino il risultato di un test, è sempre buona norma specificare se vengono utilizzati, consentendo una migliore interpretazione e confronto dei dati.

Un ultimo aspetto da considerare nella formulazione di un protocollo per la misura della velocità del cammino è la scelta dell'ambientazione del test, cioè se verrà condotto in ambiente clinico o in uno scenario appartenente alla quotidianità. Questa differenziazione è dovuta al fatto che, sebbene la misura della WS sia ritenuta valida e affidabile, test come il 10mWT hanno mostrato scarsa validità ecologica [24]. Una critica mossa a questa tipologia di prova, seppur molto usata, soprattutto all'interno di strutture cliniche, è che la misura della velocità del cammino non rispecchia quella mantenuta dal soggetto durante azioni quotidiane come andare a fare la spesa o una camminata. Le ragioni sono principalmente due: una distanza così breve potrebbe non essere rappresentativa della velocità mantenuta su percorsi più lunghi come nel 6MWT; inoltre un ambiente protetto e privo di ostacoli come un ospedale potrebbe facilitare il cammino.

Per quanto riguarda quest'ultimo aspetto, nonostante sia ragionevole pensare che la WS sia minore in un ambiente esterno che in uno interno, i risultati di diversi studi mostrano invece come la differenza tra test condotti all'interno rispetto che all'esterno, basati sulla stessa misura, sia non significativa [25],[26]. Sorprendentemente inoltre, in alcuni casi, viene riportata una velocità maggiore all'esterno [27], anche in condizioni avverse come con manto innevato [28]. Questo risultato è interpretato dagli stessi soggetti, che dichiarano come, all'aperto, si sentano più liberi di camminare e meno costretti dall'ambiente ospedaliero che provoca in loro un effetto oppressivo, "feeling boxed in" [20].

Sebbene l'utilizzo di test come il 6MWT dia dei risultati confrontabili, in alcuni casi addirittura sottostimati in ambiente clinico rispetto all'esterno, ed è quindi appropriata, per motivazioni logistiche, la somministrazione al chiuso, non lo è pienamente l'uso di test brevi come il 4mWT o il 10mWT. L'utilizzo di quest'ultima tipologia è tra le più impiegate, soprattutto per via della veloce e facile somministrazione e dell'alta validità predittiva, ma alcuni lavori hanno mostrato come utilizzare la WS calcolata in questi test e utilizzata per fare previsioni sul comportamento del soggetto su distanze maggiori porti a considerazioni errate. Nel lavoro di Taylor et al. [27] viene mostrato che per i soggetti con velocità $<0.8\text{m/s}$ nel 10mWT viene sovrastimata la distanza percorsa sui 300 metri all'esterno, mentre per soggetti con WS maggiore della soglia non ci sono differenze significative. In un secondo studio [20] la distanza sul 6MWT, in questo caso misurata in ambiente clinico, viene sovrastimata dalla velocità ricavata dal 30mWT sia per soggetti veloci che lenti, mentre anche in questo caso il tragitto percorso all'esterno dai più lenti è minore di quello previsto.

In conclusione, non è possibile dare una definizione chiara di protocollo, in quanto questo varia notevolmente in base al tipo di studio e applicazione. Quello che però risulta chiaro è la necessità di una maggior standardizzazione, in quanto molte delle differenze risultano non significative sul risultato finale. Infine, è buona norma, per permettere una più chiara comparazione dei dati, descrivere il protocollo usato in tutte le sue parti.

1.3 Strumenti di misura

In questo capitolo verrà trattato l'aspetto pratico della misurazione della velocità del cammino, ossia la strumentazione. Lo strumento in assoluto più utilizzato, sia per la sua economicità che per la facilità d'uso, è senza dubbio il cronometro, in quanto definito un percorso di lunghezza nota e misurato il tempo di percorrenza è facile estrarre la velocità. Il suo utilizzo non richiede nessuna particolare abilità da parte dell'utilizzatore, ma ne richiede la continua presenza, rendendone problematico l'utilizzo nel caso di prove lunghe su gruppi di individui numerosi. Un altro potenziale svantaggio del cronometro è il suo unico output, ovvero il fatto di restituire solo la velocità media, non permettendo ulteriori risultati. Per poter ottenere misure più accurate e l'informazione sulla velocità istantanea si possono utilizzare sistemi ottici basati su telecamere (es. OptoTrack, NDI) o pedane computerizzate (es. GAITRite system), le quali permettono di determinare anche parametri come la lunghezza del passo e la sua frequenza, oltre che la velocità del cammino. Nonostante l'alta accuratezza, questi sistemi sono per lo più utilizzati in laboratori specializzati sia per la loro dimensione che per l'alto costo.

Nel caso in cui, inoltre, lo studio richieda la misura della WS in ambiente esterno, una tecnologia che si è sviluppata molto negli ultimi decenni, con l'avanzamento dei sistemi microelettromeccanici (MEMS) è quella dei sensori inerziali (*Inertial measurement units*, IMU), i quali montano al loro interno un accelerometro e un giroscopio, misurando rispettivamente l'accelerazione e la velocità angolare. Durante il cammino, i segmenti corporei seguono un moto ciclico e i pattern di movimento di ogni segmento si ripetono ad ogni passo. Questo movimento ciclico induce delle accelerazioni e dei cambiamenti nella velocità angolare periodiche che possono essere misurate dal sensore inerziale attaccato ad uno specifico segmento. I sensori possono essere utilizzati su diverse parti del corpo (Figura 1.6a) e misurare quindi diversi segnali (Figura 1.6b). Partendo da questi dati, vengono poi applicati differenti modelli e metodi (Figura 1.6c) per la stima della velocità del cammino, che varia a seconda del posizionamento (Figura 1.6d).

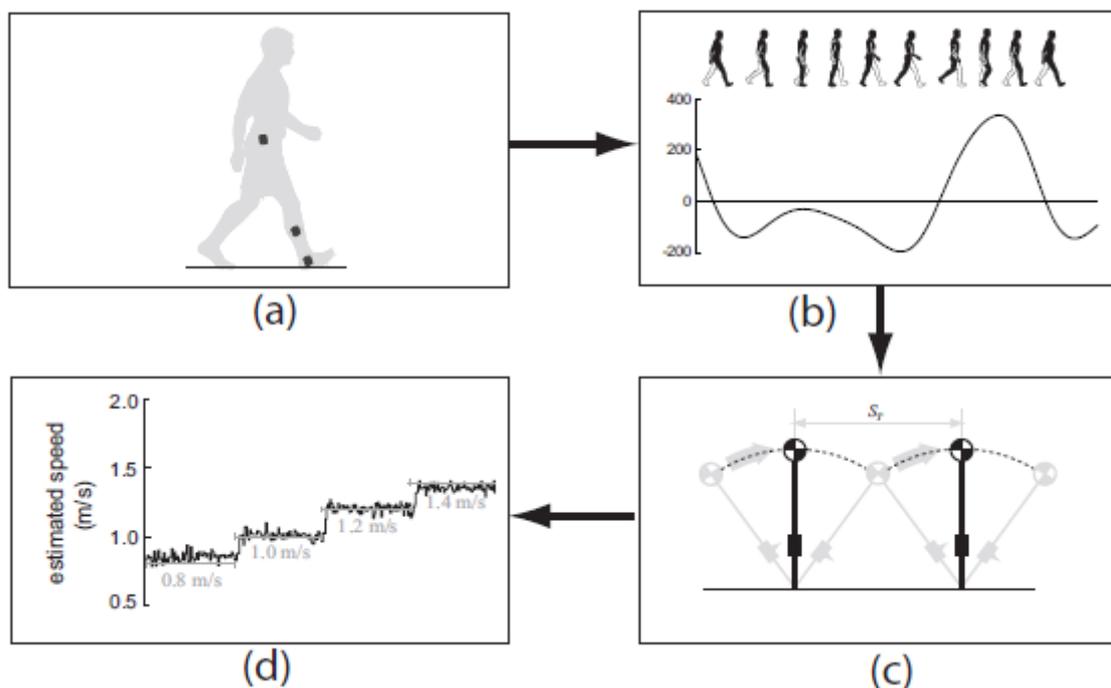


Figura 1.6 Modello generico di stima della velocità del cammino. (a) Sensori inerziali attaccati su diversi segmenti corporei. (b) Misura dell'accelerazione e/o velocità angolare proveniente dal sensore, contenente l'informazione sulla velocità del cammino. (c) Algoritmo del pendolo inverso che estrae la WS dalla precedente misura. (d) Differenti velocità a seconda dell'IMU considerata.

Nella review condotta da Yang et al. [29], viene mostrato come i sensori inerziali utilizzati nella stima della velocità del cammino varino notevolmente, da mono a triassiali, a seconda del tipo di modello e algoritmo utilizzato. Il posizionamento più comune è su coscia, stinco e piede, essendo gli arti inferiori i principali segmenti interessati dal cammino, ma in alcuni casi viene posizionato anche nella parte bassa della colonna vertebrale. I principali algoritmi utilizzati per la stima della WS possono essere raggruppati in tre categorie: modelli di astrazione, modelli basati sulla cinematica del passo e modelli ad integrazione diretta.

Nel primo caso, invece di calcolare la velocità basandosi su modelli fisici, si cerca di non considerare nel dettaglio la biomeccanica del passo, ma di astrarre il sistema e costruire una black-box che racchiuda al suo interno le relazioni tra la velocità del cammino e le misure dei sensori dal punto di vista dei processi informativi. Si vanno quindi ad utilizzare reti neurali a diversi strati che, prese in ingresso le misure dei sensori restituiscono la

velocità. Sebbene, l'addestramento della rete richieda tempo, il metodo per la stima della WS è veloce ed estremamente semplificato, ed è quindi adatto per applicazioni in tempo reale. L'accuratezza sul calcolo però è generalmente bassa, ed è difficile controllare la consistenza dell'algoritmo su soggetti multipli.

La seconda tipologia, al contrario, si basa sull'utilizzo di modelli semplificati del passo che, in questo caso, seguono principi fisici e non sono quindi sensibili all'addestramento basato su un determinato soggetto. Alcuni aspetti della cinematica degli arti inferiori, oltre alla lunghezza del passo, possono essere determinati dalle misure dei sensori sulle gambe e attraverso l'utilizzo di modelli, che ne semplificano la trattazione, è possibile determinare con facilità lunghezza del passo e quindi la velocità del cammino. Un esempio è l'algoritmo proposto da Miyazaki [29] basato sull'utilizzo di un giroscopio (monoassiale) attaccato alla coscia e un modello simmetrico del passo. In questo metodo, ogni gamba viene modellata come un singolo segmento e, quando il tallone tocca terra, la distanza tra i piedi forma un triangolo isoscele; quindi calcolando l'angolo tra i due segmenti attraverso il sensore è possibile, usando la trigonometria, ricavare la lunghezza del passo. Sebbene in questo modo si evitino complicate configurazioni di sensori, l'accuratezza della stima dipende dalla complessità del modello.

In anni più recenti, in un numero sempre più crescente di studi si è utilizzato il metodo dell'integrazione diretta per stimare la velocità del cammino. Un generico algoritmo di questo tipo include i seguenti passi:

- (1) definire un punto di inizio e fine di ogni ciclo del passo;
- (2) determinare l'orientazione del sensore inerziale rispetto al sistema di coordinate globale;
- (3) proiettare la misura dell'accelerazione nel sistema globale in base all'orientazione istantanea del sensore e rimuovere l'accelerazione dovuta alla gravità;
- (4) integrare l'accelerazione nel sistema di coordinate globali del punto di partenza, ottenendo la velocità istantanea del sensore e la lunghezza del passo associata.

La principale problematica legata a questo algoritmo è che, la doppia integrazione amplifica gli errori di misura, richiedendo l'utilizzo di sensori che abbiano un'alta accuratezza, e sebbene questa sia aumentata nel corso del tempo, essendo l'errore

inevitabile, questi metodi necessitano di strategie correttive per limitare l'aumento dell'errore.

Per quanto riguarda la misura prolungata della velocità del cammino in ambiente esterno, i sensori inerziali, ad oggi, sono i più utilizzati, sia per il loro costo contenuto sia per le dimensioni ridotte. Tuttavia, si riscontrano alcune problematiche riguardo il loro utilizzo, ad esempio, si basano su complessi algoritmi sia per quanto riguarda la conversione delle misurazioni in parametri del passo, sia per via della compensazione del rumore; inoltre, la loro calibrazione viene solitamente fatta in condizioni di cammino normale e non è assicurato che situazioni come la presenza di salite e discese o anomalie nel passo del soggetto portino ad una corretta identificazione dei parametri [30].

Per queste motivazioni diversi studi hanno vagliato l'ipotesi di stimare la velocità del cammino attraverso dispositivi GPS, che rendono la stima della velocità diretta e meno ambigua e non richiedendo una calibrazione, permettono un utilizzo generico in grado di funzionare in diverse condizioni ambientali e in presenza di deambulazione patologica. Essendo questo lavoro di tesi incentrato sull'utilizzo del GPS, questo verrà presentato in modo più esaustivo nel capitolo successivo.

Capitolo 2 – IL GNSS

Il sistema satellitare globale di navigazione (GNSS, “Global Navigation Satellite System”) è costituito da un insieme di costellazioni di satelliti orbitanti attorno alla Terra, le quali in modo continuo, trasmettono dei segnali che permettono all’utente di determinare la propria posizione tridimensionale con copertura globale. La più famosa e datata costellazione in funzione è quella americana chiamata “Global Positioning System”, o più brevemente GPS, entrata in funzione nel 1978 e resa disponibile al pubblico nel 1994. Oltre a questa, nel 2011 è stata nuovamente ripristinata la costellazione Russa denominata GLONASS, e nel corso degli ultimi anni altre agenzie spaziali stanno portando a compimento le proprie, tra cui quella Europea (GALILEO) e quella Cinese (BeiDou). Il principio del posizionamento si basa sul risolvere un problema geometrico, che utilizza le distanze (“range”) dell’utente da un insieme di almeno quattro satelliti del GNSS con coordinate note. Questi range sono determinati dal ricevitore utilizzando i segnali e i dati di navigazione trasmessi dai satelliti, in questo modo la posizione può essere calcolata con un’accuratezza di alcuni metri. Attraverso l’utilizzo di tecniche di posizionamento avanzato è però possibile arrivare ad accuratezze dell’ordine del centimetro.

2.1 L’infrastruttura del GNSS

La struttura base di un sistema GNSS (Figura 2.1) è composta principalmente da tre segmenti: quello spaziale che comprende i satelliti, il segmento di controllo (detto anche di terra), responsabile del corretto funzionamento dell’infrastruttura e l’utente finale che attraverso un apposito ricevitore è in grado di captare il segnale e risolvere il problema PVT (Posizione Velocità Tempo).

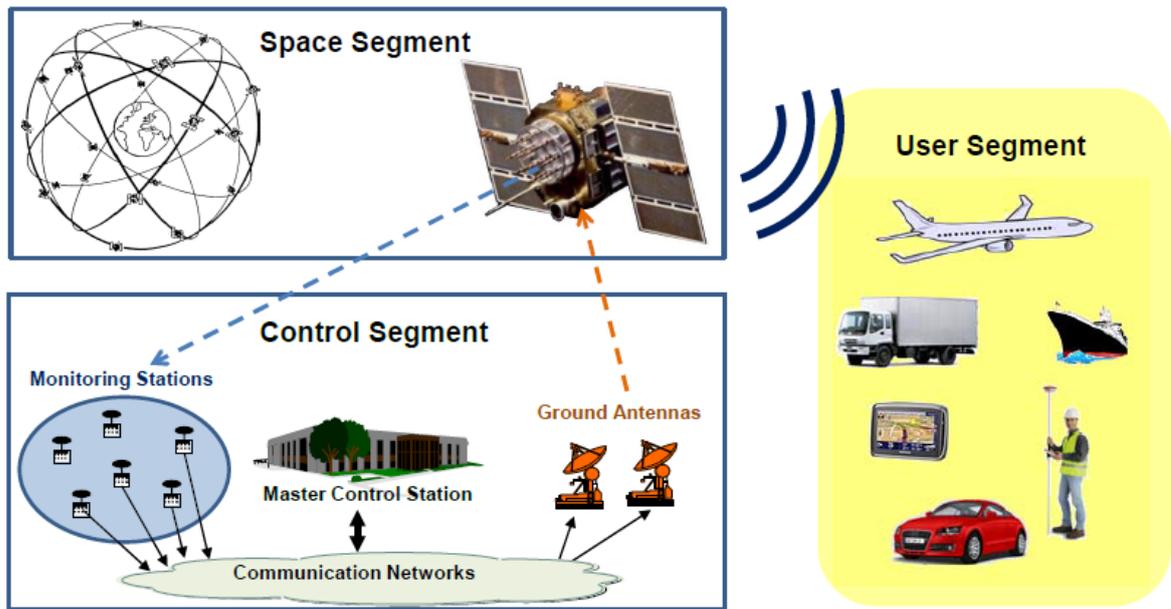


Figura 2.1 Generica infrastruttura di un sistema di posizionamento globale.

Le principali funzioni del segmento spaziale sono quelle di generare e trasmettere i segnali code e carrier e immagazzinare e ritrasmettere il messaggio di navigazione, caricato dal segmento di terra. Tutte le trasmissioni sono sincronizzate attraverso un orologio atomico all'interno dei satelliti.

Il segmento di controllo GNSS è composto invece da una rete di stazioni di monitoraggio, una stazione di controllo principale e antenna di terra. Le sue principali mansioni sono il controllo e il mantenimento dello stato e della configurazione della costellazione, la predizione delle effemeridi e l'evoluzione del clock del satellite, il mantenimento delle corrispondenze tra le scale temporali e l'invio del messaggio di navigazione a tutti i satelliti.

Per quanto riguarda invece il segmento dell'utilizzatore, è formato principalmente dal ricevitore, che attraverso una antenna è in grado di determinare gli pseudo-range e risolvere le equazioni di navigazione in modo da ottenere il tempo e le coordinate, rispetto al centro di fase dell'antenna.

2.2 I segnali GNSS

I satelliti trasmettono i vari segnali di navigazione contemporaneamente a diverse frequenze della banda L, range dello spettro radio da 1 a 2 GHz. Le principali componenti del segnale risultante sono [31]:

- (1) *Carrier* o portante, segnale sinusoidale ad una data frequenza, su cui vengono modulati gli altri;
- (2) *Ranging code*, sequenza di zeri e uni che permettono al ricevitore di determinare il tempo di viaggio del segnale dal satellite al ricevitore; sono anche chiamate sequenze PRN (*Pseudorandom Noise*) o codici PRN;
- (3) Messaggio di navigazione, un codice binario che fornisce informazioni sull'effemeridi del satellite (elementi pseudo-Kepleriani e la posizione e velocità del satellite), i parametri del bias del clock, l'almanacco (con le effemeridi degli altri satelliti con minore accuratezza), lo stato di funzionamento e altre informazioni complementari.

Per quanto riguarda l'allocazione delle bande di frequenza, al fine di evitare che molteplici servizi utilizzino le stesse frequenze del servizio GNSS, esistono due regioni dette ARNS (*Aeronautical Radio Navigation Service*) nelle quali non sono permesse interferenze al segnale, in quanto quest'ultimo viene utilizzato anche per applicazioni di *Safety of Life*. Queste corrispondono alla parte alta della banda L (1559-160MHz) e a quella bassa (1151-1214MHz), le quali contengono alcuni dei segnali GNSS anche se non la totalità, come si vede in figura 2.2.

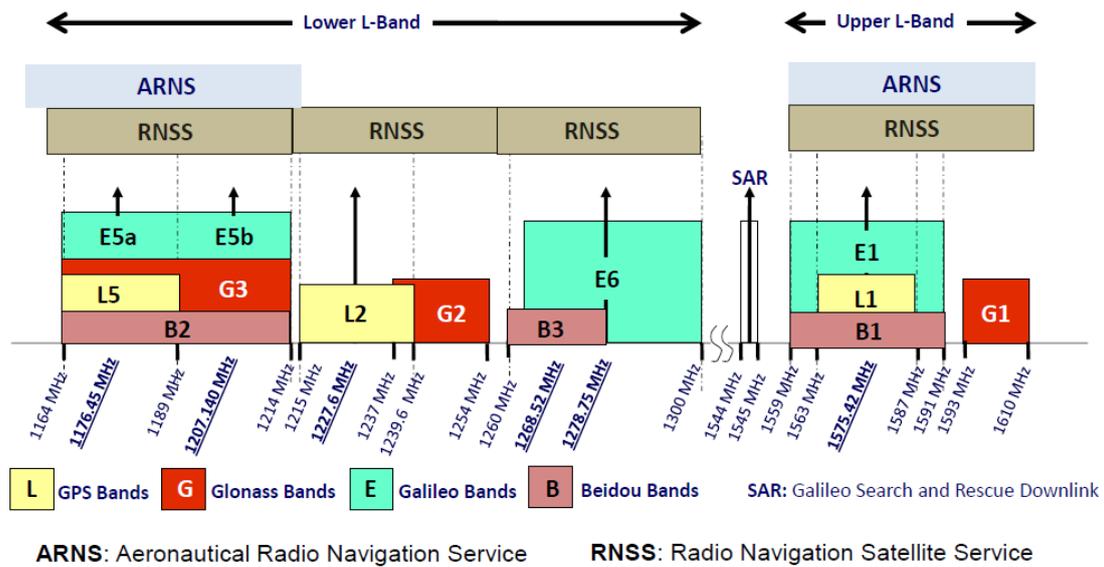


Figura 2.2 Bande di frequenza dei segnali delle costellazioni GPS, GLONASS, GALILEO e BeiDou.

Volendo portare un esempio dei segnali utilizzati, il servizio GPS è sempre stato suddiviso in due, lo *Standard Positioning Service* che è libero e gratuito per tutti gli utenti ed utilizza la sola banda L1 e il *Precise Positioning Service* che invece è criptato e riservato ad applicazioni militari, il quale utilizza sia la frequenza L1 che L2. Esistono particolari tecniche di modulazione che permettono di inviare segnali diversi sulla stessa frequenza. Per quanto riguarda il nostro ambito di interesse, quello civile, ad oggi il GPS utilizza quattro diverse frequenze portanti: L1, L2C, L5 e L1C [32].

- (1) L1 (1575.42 MHz) su cui viene trasmesso il *Coarse/Acquisition (C/A) code*. Questa sequenza contenente 1023 bit è trasmessa ad una velocità di 1.023 Mbit/s così che il codice si ripeta ogni millisecondo. La durata di ogni chip è quindi di 1 μ s con una lunghezza d'onda di 293.1m.
- (2) L2C (1227.60 MHz), se combinato con L1, permette di correggere il ritardo introdotto dalla ionosfera e di ottenere una acquisizione più veloce del segnale; infine, avendo una potenza maggiore, consente di aumentare il range di operabilità.
- (3) L5 (1176 MHz), segnale di nuova generazione con una potenza e una banda maggiore e un design avanzato, se usato in combinazione con i primi due permette

una accuratezza sub-metrica senza strategie correttive. Questo segnale ha al suo intero due PRN che sono trasmessi in quadratura.

(4) L1C (1575.42 MHz) permette una migliore integrazione tra il GPS e le altre costellazioni.

2.3 Tecniche di osservazione

Il concetto di base del GNSS consiste nel misurare il tempo che un segnale impiega nel tragitto tra satellite e ricevitore. Moltiplicando questo tempo per la velocità della luce (c), si ottiene la distanza tra i due.

$$Distanza = c * (t_R - t^S) = \Delta t_R^S * c \quad (2.1)$$

La misurazione del tempo trascorso è fatta dal ricevitore in base alla comparazione tra il segnale ricevuto all'antenna e il segnale di riferimento generato all'interno del ricevitore, questa replica viene fatta scorrere sul segnale ricevuto fino a che non si ottiene la massima correlazione (Figura 2.3). Entrambi questi segnali sono affetti da errori di clock, quindi, la distanza misurata non è quella vera e per questo motivo viene chiamata pseudo-distanza (o "pseudo-range"). Inoltre, siccome i segnali viaggiano attraverso gli strati atmosferici, si aggiungono ulteriori fonti di errore che vanno tenute in considerazione e modellate per riuscire a calcolare una distanza accurata.

Esistono due tecniche di misura, la prima si basa sul codice pseudorandom (PRN), specifico per ogni satellite, e viene detta *Code Based*. La seconda invece si basa sul confronto tra la fase della portante ricevuta e quella internamente generata e viene chiamata *Phase Based*.

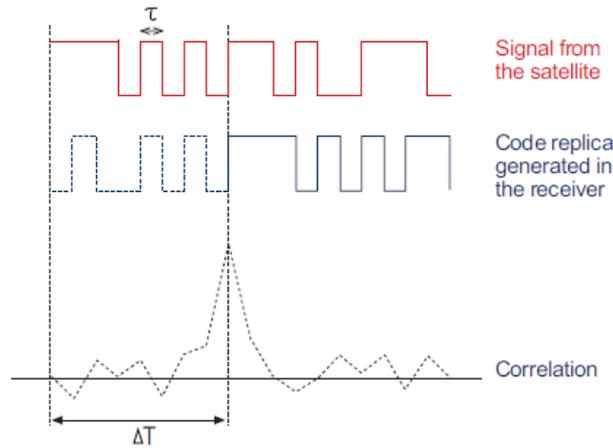


Figura 2.3 Calcolo del tempo di viaggio del segnale.

2.3.1 Misurazione Code Based

Questa tecnica è utilizzata per misurare la differenza temporale tra il segnale PRN ricevuto e la copia generata internamente al ricevitore. Il range può essere espresso in questo modo:

$$R_R^S = c * [(t_R - \delta_R) - (t^S - \delta^S)] \quad (2.2)$$

dove δ^S è l'offset del clock del satellite e δ_R è invece quello del ricevitore. Essendo l'orologio atomico del satellite altamente stabilite, δ^S è generalmente molto piccolo e può essere modellato da un polinomio con i valori dei coefficienti trasmessi nel messaggio di navigazione. Diversamente, l'orologio a bordo del ricevitore è molto meno accurato, ed essendo δ_R grande deve essere trattato come un'incognita e deve essere stimata dalla seguente funzione:

$$R_R^S = c * \Delta t + c * (\delta^S - \delta_R) = \rho + c * \Delta t \quad (2.3)$$

dove c è la velocità della luce e ρ è la vera distanza tra satellite e ricevitore, che può essere espressa da un vettore nel sistema di riferimento geocentrico come:

$$\rho = \sqrt{(X^S - X_R)^2 + (Y^S - Y_R)^2 + (Z^S - Z_R)^2} \quad (2.4)$$

Entrando in gioco una quarta incognita, per risolvere il problema della posizione del ricevitore non basta risolvere il problema di trilaterazione utilizzando tre range, ma serve aggiungerne un quarto e risolvere un sistema di quattro equazioni (Figura 2.4).

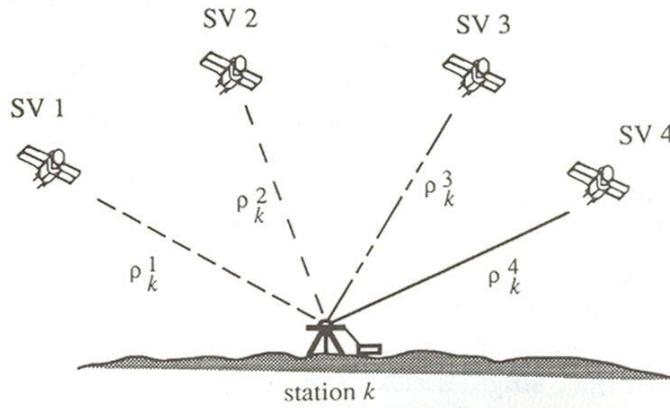


Figura 2.4 Numero di satelliti minimo per risolvere problema PVT.

La soluzione PVT ottenuta con questa metodologia viene detta “code based”, e ha una accuratezza teorica di circa 30-60 cm corrispondente allo 0.1 – 0.2 % della lunghezza d’onda (300 m). Nella realtà però, si arriva a circa 5 – 10 m in quanto numerose fonti di errori si sommano al risultato finale (vedi 2.5).

$$p = \rho + d_{\rho} + c * (dt - dT) + d_{ion} + d_{trop} + \varepsilon_{mp} + \varepsilon_p \quad (2.5)$$

dove:

p = misura dello pseudorange

ρ = distanza vera

c = velocità della luce

dt = offset del clock del satellite rispetto il tempo GPS

dT = offset del clock del ricevitore rispetto il tempo GPS

d_{ion} = ritardo ionosferico

d_{trop} = ritardo troposferico

ε_{mp} = errore da multipath

ε_p = rumore del ricevitore

2.3.2 Misurazione Carrier Phase

Questa tecnica di misura si basa sul confronto tra la fase della portante emessa dal satellite e quella generata localmente dal ricevitore. A causa della distanza percorsa, l'onda generata dal primo arriva shiftata al secondo e questo sfasamento è proporzionale alla distanza tra i due. Inoltre, per via dell'effetto Doppler, causato dal moto relativo tra i due oggetti, questo sfasamento non è costante ma varia nel tempo. La misura della distanza, che deriva dall'osservazione della fase, consiste nel determinare lo sfasamento per un certo intervallo di tempo $\Delta T (= t - t_0)$ a partire da un istante di riferimento t_0 , detto tempo di aggancio di fase. La distanza tra i due viene quindi calcolata contando il numero intero e le frazioni di cicli della portante accumulati (chiamata anche, *Accumulated delta range*) al ricevitore. In realtà, in quest'ultimo si tiene conto solo dei cicli dopo l'aggancio di fase, mentre restano incogniti il numero di quelli iniziali, cioè il numero di lunghezze d'onda intere N della portante comprese tra il satellite e il ricevitore relative a prima dell'istante t_0 . Questa incognita viene chiamata ambiguità d'intero (*Integer Ambiguity*) e per la sua determinazione, che è il nodo principale di questa tecnica, esistono varie strategie che ne variano i tempi di elaborazione e la possibilità di avere una risoluzione in tempo reale o meno.

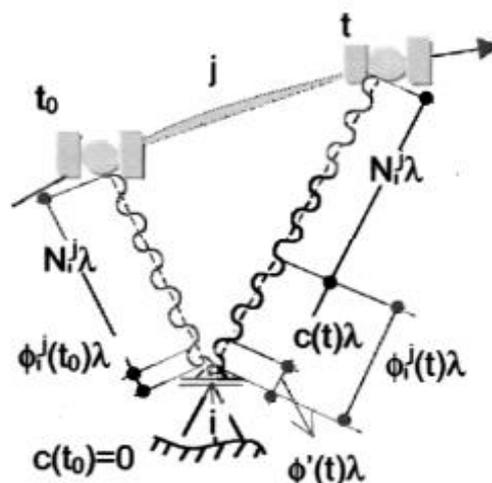


Figura 2.5 Schematizzazione misura carrier phase.

All'istante t_0 (aggancio del segnale):
$$\Phi_i^j(t_0) + \lambda * N = \rho_i^j(t_0) \quad (2.5)$$

All'istante t (dopo $c(t)$ cicli):
$$\Phi_i^j(t) + \lambda * N = \rho_i^j(t) \quad (2.6)$$

essendo
$$\Phi_i^j(t) = \Phi_i^j(t_0) + c(t) * \lambda \quad (2.7)$$

Quindi ad ogni istante d'osservazione successivo aumenta il numero di cicli accumulati $\Phi_i^j(t)$ (2.7) dal tempo t_0 , mentre l'ambiguità N relativa a quel determinato satellite rimane costante. È essenziale tuttavia che, durante l'acquisizione, il ricevitore non perda mai il contatto con i satelliti, in quanto se ciò accade, si ha un cosiddetto *cycle slip*, ovvero un salto nel conteggio di quantità non nota il quale provoca l'introduzione di una nuova ambiguità che dovrà essere nuovamente stimata. L'utilizzo della portante del segnale invece del codice PRN, essendo la lunghezza d'onda di circa 20 cm, permette un'accuratezza teorica migliore arrivando a circa 0.2 mm. Ovviamente anche in questo caso sono presenti fonti di errore esterno che riducono la bontà della misura.

2.4 Fonti di errore

Esistono diverse tipologie di errori che vanno ad inficiare la misura della distanza tra satellite e ricevitore, sommandosi al vero range (2.5) e rendendo il risultato non una distanza reale, ma una pseudo-distanza. Come vedremo, alcuni di questi errori possono essere ridotti attraverso l'utilizzo di modelli o attraverso tecniche che combinano più osservazioni del medesimo satellite.

- (1) Ritardo ionosferico: la ionosfera è uno strato dell'atmosfera largo circa 900 Km, al suo interno sono presenti vari tipi di gas ionizzati dalla radiazione solare, la cui quantità varia in base all'attività solare e all'orario del giorno. Questo strato agisce da mezzo dispersivo e introduce un ritardo nel segnale che dipende dalla sua frequenza e, nei casi peggiori, può arrivare a 300 ns che corrispondono a circa 100 m di errore sulla stima del range.
- (2) Ritardo troposferico: anche la troposfera causa un ritardo nel segnale, ma in questo caso essendo elettricamente neutra non funge da mezzo dispersivo ed è quindi indipendente dalla frequenza. I principali fattori che determinano l'ammontare di questo ritardo sono: la temperatura, umidità, pressione e

densità. Essendo questi parametri molto variabili, lo è anche l'errore che aggiunge dai 2.5 ai 25 m alla distanza.

- (3) Errori nel clock del satellite: sono causati principalmente da due fattori, il primo relativistico dovuto al fatto che in orbita un orologio tende ad andare più veloce che sulla terra, causando un errore di circa 11 m; il secondo invece dipende dalla stabilità del clock, che per gli orologi atomici a bordo dei satelliti corrisponde ad un drift tra gli 8.5 ns e i 17.5 ns al giorno, ed è equivalente ad un errore sul range tra i 2.5 m e i 5.5 m circa.
- (4) Errori nei dati sull'effemeridi: causati da imprecisioni sulla stima di queste da parte del segmento di controllo o per via di messaggi di navigazione datati, portano ad una stima della posizione del satellite diversa da quella vera, con un contributo di circa 2 m sull'errore totale.
- (5) Errori nel ricevitore: questi dipendono dalla qualità dell'hardware utilizzato e principalmente derivano dal rumore termico, interferenze e bias del centro di fase dell'antenna.
- (6) Multipath: questo errore è dovuto alla ricezione di un segnale eco, ovvero precedentemente riflesso su qualche superficie e quindi che ha compiuto un tragitto maggiore.
- (7) Diluizione di precisione (DOP): è causata dal posizionamento relativo nello spazio tridimensionale dei satelliti utilizzati nel calcolo della posizione. Esistono quindi a parità di numero di satelliti dei posizionamenti più favorevoli di altri nel ridurre l'incertezza sulla posizione (Figura 2.6), avendo a che fare con la geometria della disposizione si parla anche di *Geometrical DOP*.

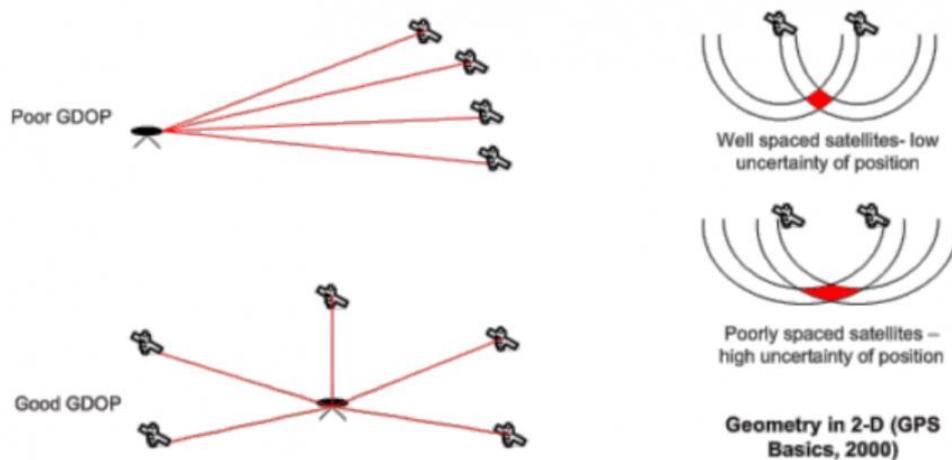


Figura 2.6 Schematizzazione del “Geometrical DOP” in 2D.

Per ridurre l’effetto di questi errori sulla stima finale esistono numerose tecniche più o meno efficaci e complesse, di cui per brevità si porteranno solo alcuni brevi esempi. Per quanto riguarda il ritardo ionosferico è possibile una quasi completa rimozione impiegando un ricevitore a multipla frequenza che, utilizzando la *ionospheric-free signal combinations* al primo ordine è in grado di rimuovere il 99.99% del ritardo. Nel caso invece, se ne abbia a disposizione soltanto una si adoperano dei modelli trasmessi all’interno del messaggio di navigazione, come il GPS Klobuchar, che è in grado di ridurne il 50%. Anche l’instabilità del clock del satellite è compensata attraverso un modello che utilizza una funzione quadratica. Infine, nel caso di errore da multipath, se non è possibile utilizzare il ricevitore in spazi aperti si devono impiegare antenne con particolari design, come il *choke ring* [33].

2.5 GNSS Augmentation

Nel caso in cui l’implementazione di questi modelli non sia sufficiente a garantire il grado di accuratezza richiesto da alcune applicazioni di precisione esistono delle tecniche che permettono di aumentare di molto le performance del ricevitore attraverso l’utilizzo di

informazioni esterne. Queste si possono suddividere in tre categorie: sistemi di augmentation, tecniche differenziali e di *precise point positioning* [34].

Le prime si possono suddividere, in base alla provenienza dell'informazione correttiva, in *Satellite-Based Augmentation System* (SBAS) e *Ground-Based Augmentation System* (GBAS). Entrambe queste infrastrutture consentono una maggiore integrità del segnale e un'accuratezza della soluzione al di sotto del metro (1σ). Le GBAS sono solitamente utilizzate localmente, per esempio nelle vicinanze di aeroporti, mentre lo SBAS può avere copertura anche continentale. L'infrastruttura dello SBAS si basa sull'utilizzo di stazioni di riferimento, stazioni di uplink e satelliti geostazionari: le prime captano i segnali provenienti dal GNSS ed avendo una posizione nota possono stimare gli errori sul posizionamento dei satelliti, sul loro clock e fornire una stima del ritardo ionosferico; queste informazioni vengono quindi trasmesse alle stazioni di uplink che le inviano ai satelliti geostazionari che a loro volta ritrasmettono ai ricevitori compatibili con il servizio SBAS.

Per quanto riguarda le tecniche differenziali invece, si basano sull'utilizzo di una o più stazioni di riferimento fisse, chiamate basi, che comunicano con un ricevitore libero di muoversi detto rover di cui si vuole stimare la posizione. Il principio di funzionamento consiste nel fatto che, essendo la base in una posizione nota con precisione, questa può calcolare l'errore sulla stima del posizionamento e inviare le informazioni correttive al rover attraverso segnali radio (protocollo RTCM) o internet (protocollo NTRIP), se disponibile. Esistono due principali tecniche differenziali che sono il *Differential GNSS* (DGNSS o DGPS) e il *Real Time Kinematic* (RTK). Queste si differenziano per il tipo di misura utilizzata: il primo utilizza una misurazione *code based* con un'accuratezza di circa 1 m (1σ) su un'area di qualche decina di km; mentre il secondo basandosi su una misurazione *carrier-phase* arriva ad accuratezze centimetriche, ma è sempre limitato come il DGNSS sulla distanza di operabilità.

Un'ultima tecnica che permette di arrivare ad accuratezze del centimetro e inferiori, nel caso di una soluzione statica in condizioni favorevoli, è il *Precise Point Positioning* (PPP). Questa si basa sulla acquisizione di informazioni precise riguardo alla posizione dei satelliti e i loro clock, prodotte in tempo reale da una rete di stazioni di riferimento distribuite sul globo, che vengono combinate con le osservazioni di un ricevitore GNSS

a doppia frequenza, in modo da rimuovere al primo ordine il disturbo ionosferico. La principale differenza con le tecniche differenziali è che non richiede le osservazioni da una o più stazioni di riferimento locali e il metodo PPP produce un posizionamento assoluto e non relativo alla stazione come il RTK e inoltre consente una copertura globale, rendendo questa tecnica una valida alternativa per quelle aree dove non è possibile utilizzare la tecnica di *Real Time Kinematic*. Tuttavia, questa tecnologia non è ancora molto consolidata e necessita di lunghi tempi di convergenza per arrivare alla massima performance e per questo motivo è, al momento, usata soprattutto in post-processing.

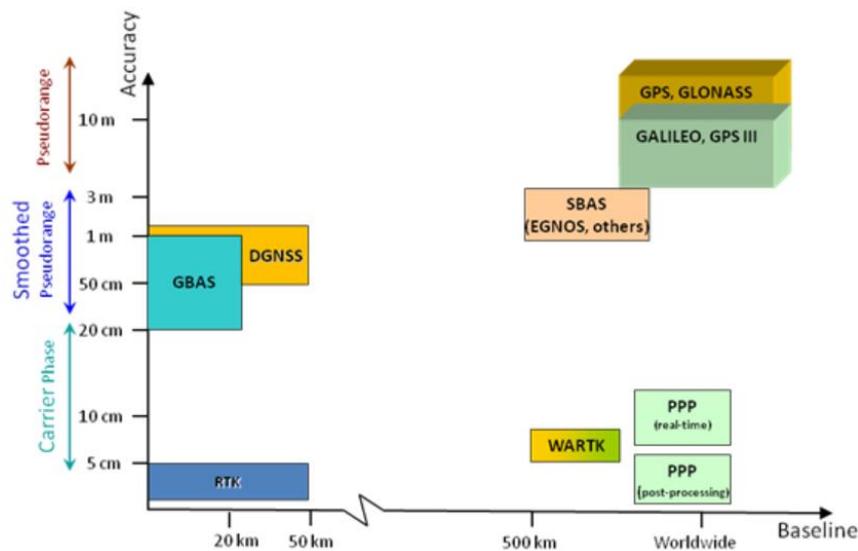


Figura 2.7 Accuratezza e performance del GNSS e delle tecniche di augmentation [34].

2.6 Metodi di misura della velocità

I ricevitori GNSS possono determinare la velocità con tre diversi metodi: derivando la stima della posizione, utilizzano lo shift Doppler e differenziando due misure consecutive della fase della portante (*TDCP- Time-Differenced Carrier Phase*) [35].

Nel primo metodo si divide semplicemente la distanza tra due posizioni consecutive per il tempo (2.8), è sicuramente il modo più semplice, ma anche il più inaccurato, con

un'incertezza del m/s, se la posizione del ricevitore (u) utilizzata è stata calcolata attraverso la misura degli pseudorange (*code based*).

$$v = \frac{r_u(t_2) - r_u(t_1)}{t_2 - t_1} \quad (2.8)$$

Migliore è l'accuratezza della misura nel caso venga utilizzato lo shift Doppler, arrivando ad un'incertezza dell'ordine del cm/s. Quest'ultimo è dato dalla differenza tra la frequenza del segnale trasmesso dal satellite e quella ricevuta dal ricevitore, per via del loro moto relativo, e si calcola dalla formula (2.9) dove, f_{Ti} è la frequenza ricevuta, f_{Ti} è quella trasmessa, '*' rappresenta un prodotto vettoriale, '||·||' l'operatore norma, c la velocità della luce e r_i e v_i rispettivamente la i-esima posizione e velocità del satellite.

$$D = f_{Ri} - f_{Ti} = -f_{Ti}/c \cdot \left[(v_i - v_u) * \frac{r_i - r_u}{\|r_i - r_u\|} \right] \quad (2.9)$$

Il terzo metodo consiste nel calcolare una differenza temporale di misurazioni *carrier phase* consecutive dello stesso satellite a piccoli intervalli temporali (<1Hz), in questo modo molte delle principali fonti di errore, inclusa l'ambiguità d'intero vengono risolte, arrivando a dell'accuratezze dell'ordine del mm/s.

2.7 Utilizzo in clinica

L'utilizzo del GPS per la misura della velocità del cammino fu proposto già alla fine degli anni '90 da Schutz et al. [36], che elencarono alcuni dei potenziali vantaggi nell'utilizzo, tra cui la portabilità, il mancato intralcio dei movimenti, la possibilità di un monitoraggio continuo basato su un servizio gratuito e disponibile in tutto il mondo. A quel tempo però, per via della forzata degradazione del segnale da parte del dipartimento della difesa americano (*Selective Availability*), l'accuratezza raggiungibile era piuttosto bassa. Dal maggio del 2000, con la rimozione di questa limitazione, si è ripreso lo studio sulla possibilità di utilizzare questo strumento in clinica per lo studio del cammino. Il GPS, infatti, offre l'opportunità di una misura continuativa del cammino in ambiente esterno, senza limitazioni sulla distanza o la possibile influenza sui parametri che un ambiente chiuso come un laboratorio o un ospedale possiedono. Un secondo vantaggio, consiste nella possibilità di associare ad una misura la posizione e il luogo in cui viene ottenuta,

aumentando la quantità di informazioni associabile ai parametri del cammino e a una loro possibile variazione, ad esempio, monitorando la presenza di tratti in salita e discesa o per finalità epidemiologiche. È stato di fatto utilizzato in diversi studi per monitorare la WS per periodi prolungati, in modo da classificare gli spostamenti, suddividendo ad esempio tra camminata e utilizzo della bicicletta o della macchina, in modo da quantificare l'attività [37] e ottenere informazioni riguardo ai luoghi più frequentati dagli adolescenti [38]. Oltre che per la misura della velocità, è stata provata la sua efficacia nella stima della spesa energetica sia in piano che in presenza di dislivelli, rispetto a cardiofrequenzimetri e accelerometri che nel secondo caso sono meno accurati [39]. Uno studio di Gernigon et al. [40] mostra come il GPS possa essere utilizzato nel monitoraggio di pazienti con arteriopatia obliterante periferica che provoca un cammino claudicante, caratterizzato da dolore che forza il rallentamento del passo fino allo stop e scompare dopo circa una decina di minuti di riposo, consentendo di riprendere a camminare. Attraverso questo strumento è possibile valutare un importante parametro come la massima distanza percorsa (MWD, *Maximal Walking Distance*) prima che il dolore diventi insostenibile e consente un monitoraggio dei tempi di riposo, oltre che della WS. Un lavoro simile è stato condotto anche da Le Faucheur et al. [41], i quali hanno mostrato come l'utilizzo del GPS nella misura del MWD porti a risultati correlati alla prova su tapis roulant, considerata ad oggi un gold standard, ma in contrapposizione mostrano come la mediana del MWD_{GPS} sia circa tre volte maggiore di quella misurata in laboratorio, fornendo una ulteriore evidenza di come l'utilizzo di un tapis roulant e la possibilità di un cammino senza costrizioni possano influire sui parametri del passo.

In due studi condotti da Terrier et al. [42],[43] viene utilizzato un ricevitore ad alte prestazioni, che utilizza un procedimento differenziale basato su misurazione carrier-phase, per la misura delle fluttuazioni durante il cammino libero di: velocità, lunghezza e frequenza del passo. Attraverso l'impiego di questa attrezzatura di precisione arrivano ad una accuratezza teorica di circa 0.02 km/h e potendo utilizzare una frequenza di campionamento di 5 Hz riescono a mostrare come questi parametri abbiano una fluttuazione di tipo frattale attorno al valore medio. Viene inoltre ipotizzato che, utilizzando un'antenna più ergonomica e meno ingombrante, si potrebbe evitare piccole fluttuazioni nella misura dello spostamento verticale del tronco date dall'inerzia del dispositivo durante il cammino e arrivare a misurare il lavoro esterno del cammino,

calcolato appunto, in base al movimento verticale del soggetto e alla variazione di velocità istantanea. L'utilizzo di ricevitori a doppia frequenza capaci di misure differenziali garantiscono misure molto accurate, ma rimangono dispositivi piuttosto costosi (qualche migliaio di euro) e pesanti, sebbene con l'utilizzo di uno zaino non si altera il cammino. Due lavori successivi hanno quindi cercato di utilizzare una strumentazione meno costosa ed ingombrante. Townshend et al. [44] hanno testato un ricevitore a singola frequenza con campionamento a 1 Hz, ottenendo ottimi risultati con un errore medio sulla WS di 0.01 m/s (SD 0.07) per quanto riguarda la velocità stimata attraverso *Doppler shift*, e 0.01 m/s (SD 0.11) nel caso di variazione della posizione nel tempo. Queste misure sono comunque ottenute nella miglior condizione possibile, ovvero su un percorso rettilineo e in un ambiente senza ostacoli; inoltre non si tratta di una velocità istantanea, ma mediata su un tragitto di 10 m a velocità pressoché mantenuta costante. Difatti, in un secondo test su un percorso curvilineo la velocità ottenuta con lo sfasamento Doppler ha un errore medio di 0.06 m/s (SD 0.12). Nel lavoro successivo di Noury-Desvaux et al. [45], viene utilizzato un ricevitore a singola frequenza con sistema di augmentation EGNOS, controparte europea dello SBAS americano, ottenendo il 92,4 % di corretta detezione dei periodi di stop e camminata; mentre per quanto riguarda la stima della velocità raggiunge un'accuratezza di 0.1 km/h (0.1-0.1, CI 95%). Sebbene questi risultati siano incoraggianti, esistono comunque delle problematiche riguardo all'utilizzo del GPS in clinica, come l'alto consumo, l'impiego solo all'esterno, la dipendenza da condizioni atmosferiche e presenza di ostacoli che limitano la visibilità del cielo e, infine, possibili problematiche di privacy riguardo alla localizzazione [46]. Inoltre, fino a pochi anni fa l'accesso ad apparecchiature multibanda e capaci di utilizzare tecniche differenziali, come RTK, era molto oneroso dal punto di vista economico.

3.1 Caratteristiche tecniche

Il simpleRTK2B è una scheda applicativa indipendente, che permette di utilizzare e valutare la tecnologia multibanda GNSS unitamente alla funzionalità RTK. Questo dispositivo si basa sul modulo ZED-F9P della u-blox ed è montato su una scheda Arduino UNO, di dimensioni 68x53 mm e peso 19.5 g (senza modulo radio), ed è compatibile con diversi sistemi come Arduino, STM32 Nucleo, Raspberry Pi o GNSS esterno per sistemi di autopilota Pixhawk.

È possibile utilizzare il dispositivo in varie modalità, sia come singolo ricevitore che in modalità base – ricevitore, variando l'accuratezza raggiungibile e il range di utilizzo. Alcune delle possibili configurazioni di utilizzo sono:

- (1) configurazione indipendente senza l'utilizzo di correzioni RTK/SSR esterne, *accuratezza raggiungibile 1 m (1σ)*;
- (2) configurazione indipendente con correzioni via NTRIP da una stazione di riferimento, *accuratezza raggiungibile < 1cm (1σ)*;
- (3) configurazione base–ricevitore utilizzando due dispositivi, *accuratezza raggiungibile < 1 cm (1σ)*.

Il simpleRTK2B consente il tracking delle principali costellazioni GNSS (GPS, GLONASS, BeiDou e GALILEO) su diverse bande di frequenze, sia nella parte alta che bassa della banda L (figura 3.2) [47], permettendo la riduzione dei tempi di convergenza (<10 s), l'aumento del tasso di risoluzione dell'ambiguità d'intero e quindi la possibilità di ottenere una precisione centimetrica in diverse condizioni [48].

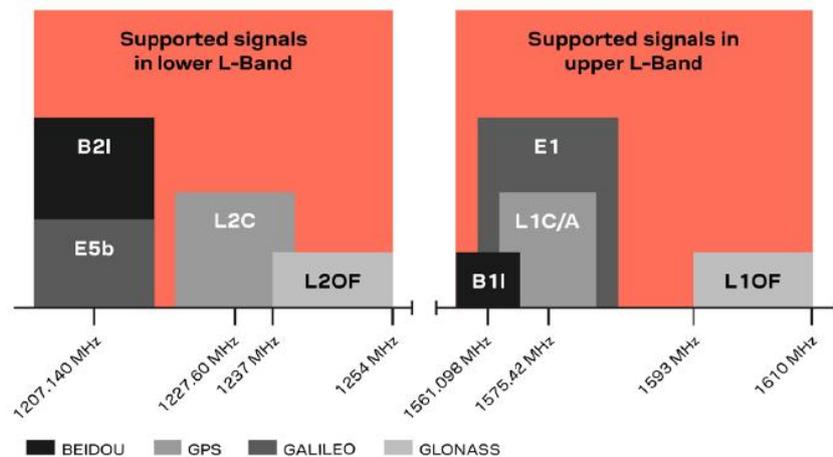


Figura 3.2 Costellazioni GNSS e segnali supportati da ZED-F9P.

SimpleRTK2B supporta quattro diverse fonti di alimentazione (3.3 V o 5 V), che sono: la porta GPS USB, quella XBEE USB, il connettore Pixhawk e i pin di connessione ad Arduino. Il dispositivo è inoltre dotato di un sistema di protezione nel caso di multi-alimentazione. La micro-USB denominata POWER+GPS viene utilizzata per avere completo accesso al chip ZED-F9P e grazie al software u-center è possibile configurare completamente il ricevitore. Questa interfaccia inoltre permette, se collegata a PC, tablet o smartphone, la ricezione dei dati NMEA dal dispositivo (vedi paragrafo 3.2.3).

Il ricevitore simpleRTK2B possiede, in aggiunta, uno slot XBEE che permette l'inserimento di un modulo a radiofrequenza per la comunicazione tra base e ricevitore o, in alternativa, l'utilizzo di un componente per la trasmissione Bluetooth. Per l'accesso a questo modulo è necessario l'utilizzo della porta POWER+XBEE, la quale monta un convertitore FTDI USB-to-UART e comporta l'installazione di specifici drivers [49].

Infine, per completare una breve descrizione delle porte utilizzate, nella scheda è saldato un connettore SMA che permette il collegamento all'antenna, la quale può essere sia passiva che attiva con un'alimentazione supportata di 3.3 V. Quella da me utilizzata è la ANN-MB-00 (IP67) della u-blox, un'antenna attiva GNSS a doppia banda (Figura 3.3), di dimensioni 60.0 x 55.0 x 22.5 mm e peso 167 g, incluso il cavo di collegamento da 5m.

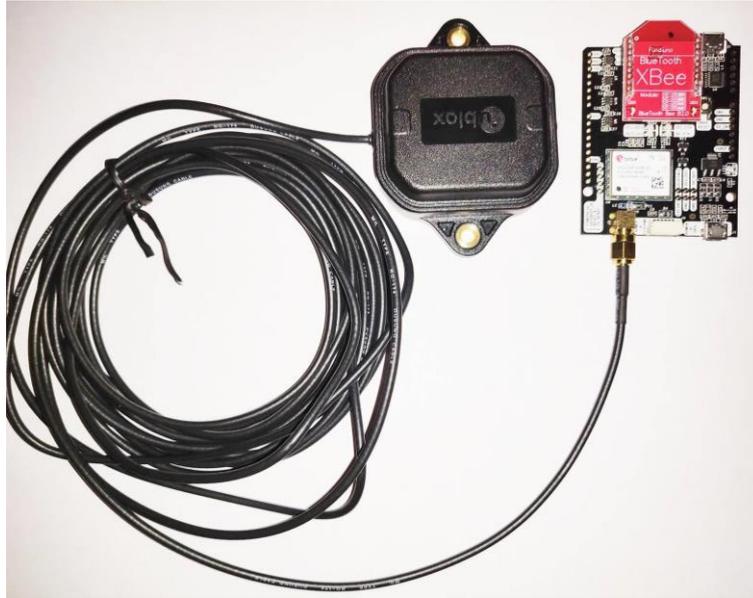


Figura 3.4 SimpleRTK2B con modulo Bluetooth XBee e antenna u-blox.

Nel dispositivo sono presenti cinque LED di stato, chiamati:

- (1) POWER → la scheda è alimentata.
- (2) GPS FIX → spento in assenza di una posizione valida, lampeggiante ad 1 Hz quando raggiunta.
- (3) RTK FIX → spento in presenza di una soluzione RTK valida, lampeggiante mentre riceve i dati correttivi e acceso quando non riceve correzioni.
- (4) XBEE>GPS → il modulo radio XBEE riceve dati e li ritrasmette al chip ZED-F9P.
- (5) GPS>XBEE → il dispositivo trasmette dati verso il modulo radio XBEE che li ritrasmette all'esterno.

In questo lavoro di tesi verrà testata la configurazione (2), la quale verrà spiegata nel dettaglio nel paragrafo 3.3.

3.2 Protocolli di comunicazione

In questo paragrafo verranno trattati e introdotti tre protocolli di comunicazione di dati satellitari che vengono utilizzati dal ricevitore simpleRTK2B nell'ottenere la configurazione impiegata in questo lavoro di tesi. In ordine saranno presentati, lo standard RTCM, il protocollo NTRIP e lo standard NMEA 0183.

3.2.1 Standard RTCM

La *Radio Technical Commission for Maritime service* (RTCM) è una organizzazione scientifica no-profit internazionale, composta da enti governativi e non, nata nel 1947 negli Stati Uniti come commissione del governo e ad oggi un ente indipendente con membri in tutto il mondo. Le mansioni della RTCM consistono nella regolazione della comunicazione radiofonica marittima regionale ed internazionale, nel proporre cambiamenti normativi e sviluppare standard tecnici [50]. Questa organizzazione è composta da numerosi comitati speciali tra cui la "Special Committee (SC) 104" riguardante il sistema di navigazione satellitare globale differenziale (DGNS), la quale a partire dal 1983 ha sviluppato numerose versioni dello standard fino alla più recente 3.3.

Questo standard è stato sviluppato per permettere la trasmissione in tempo reale dei dati correttivi, necessari al funzionamento delle tecniche di posizionamento DGNS e RTK, in modo da consentire la comunicazione tra ricevitori di diversi produttori. Grazie a questo standard è stata possibile la creazione di reti di stazioni di riferimento dette CORS (*Continuously Operating Reference Station*).

La versione 3.x di questo standard è nata per superare alcune limitazioni legate alla insufficiente strutturazione del formato, che richiedeva un'alta larghezza di banda nella trasmissione, così da migliorare l'operabilità RTK e supportare le reti-RTK. Tutti i messaggi RTCM 3.0 sono scritti in binario ed iniziano con una sequenza prefissata di 8 bit seguiti da altri 6 riservati, mentre, la lunghezza totale è legata al tipo di messaggio (Figura 3.5).

Preamble	Reserved	Message Length	Data Message	Checksum
8 bits	6 bits	10 bits	n bits	24 bits
0xD3	Not defined	Message Length in bytes	Variable length in bytes	QualComm definition CRC-24Q

Figura 3.5 Struttura messaggio RTCM versione 3.1.

Tra i messaggi più utilizzati si trovano, per citarne alcuni, il messaggio 1004 riguardante le osservazioni GPS sulle bande L1 e L2, il 1012 che ha un contenuto simile ma riguardante GLONASS, e il 1005 che contiene informazioni riguardanti la stazione di riferimento. Esiste inoltre una categoria di messaggi chiamati *Multiple Signal Messages* (MSM) i quali, nati con l'intento di uniformare il contenuto a dispetto della costellazione utilizzata, sono suddivisi in sette tipologie MSM1-MSM7, contenenti via via un numero di informazioni crescenti: ad esempio, il MSM7 fornisce con un'alta risoluzione i dati correttivi RTK, lo pseudorange, il phaserange, il doppler e il SNR.

3.2.2 Protocollo NTRIP

Il protocollo NTRIP (*Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*) permette la trasmissione di dati correttivi DGNSS o RTK attraverso la rete, in accordo con le specifiche pubblicate dalla *Radio Technical Commission for Maritime Services*, in particolare lo standard RTCM 10410.1. Questo protocollo è stato sviluppato nel 2004 dalla *German Federal Agency for Cartography and Geodesy* (BKG) in collaborazione con l'università di Dortmund e l'azienda *Trimble Terrasat*, ed è un progetto open source basato sul linguaggio HTTP 1.1.

Un network NTRIP è costituito da tre entità software: un NtripServer, un NtripClient e un NtripCaster (Figura 3.6), dove quest'ultimo è il vero server HTTP, mentre i primi due agiscono come client nella comunicazione. Partendo dal basso si hanno le NtripSource, ricevitori GNSS di cui si conosce con precisione la posizione, le quali provvedono alla generazione dei dati correttivi. Ognuna di queste fonti è identificata da un ID detto *mountpoint* ed è in comunicazione con il caster attraverso un software chiamato NtripServer che ne assicura la comunicazione. La gestione di tutta l'infrastruttura è affidata al NtripCaster che mantiene l'elenco delle fonti attive, gestisce le richieste

d'accesso da parte degli NtripClient e, infine, ritrasmette i dati ottenuti dalla fonte selezionata al client richiedente attraverso internet [51].

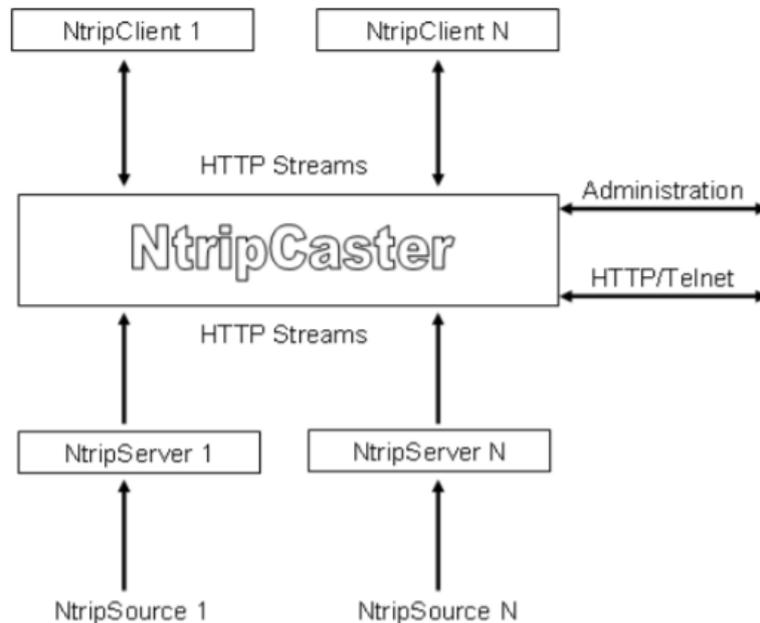


Figura 3.6 Generica struttura di un servizio NTRIP.

3.2.3 NMEA 0183

Il NMEA 0183 è uno standard nato per permettere la comunicazione tra diverse strumentazioni marittime come ecoscandagli, sonar, anemometri, girobussole, ricevitori GPS e molti altri strumenti. È definito e mantenuto dalla *National Marine Electronics Association*, una associazione di rivenditori elettronici nata nel 1957. Nonostante sia nato prima dell'invenzione del GPS, ad oggi NMEA è un formato standard di rappresentazione dei dati supportato da tutte le aziende del settore, come ad esempio il linguaggio ASCII è un linguaggio standard nel mondo del computer. Lo scopo del NMEA è quello di fornire all'utilizzatore delle apparecchiature la possibilità di combinare hardware e software in maniera più agevole e, inoltre, facilita gli sviluppatori software nel creare applicativi

compatibili con un'ampia gamma di ricevitori. Essendo questo standard in forma testuale (.txt) è di facile comprensione, ma di minor compattezza a confronto con il RTCM; inoltre i suoi messaggi non contengono dati come pseudorange o fase, ma solo informazioni riguardanti la navigazione, ad esempio latitudine, longitudine e velocità rendendolo inutilizzabile ai fini differenziali.

Il NMEA 0183 utilizza un semplice protocollo di comunicazione seriale ASCII che definisce come i dati vengano trasmessi in stringhe chiamate *sentence* da un singolo *talker* a molteplici *listeners* contemporaneamente. A livello applicativo, lo standard definisce il contenuto di ogni tipologia di stringa, così che il ricevente possa decifrare correttamente i messaggi. Ognuna di queste righe inizia con il carattere '\$' e per poterne definire il contenuto la prima parola è composta da cinque lettere: le prime due definiscono il tipo di dispositivo che utilizza quella *sentence*, ad esempio GP per un ricevitore GPS, e le successive tre indicano invece il contenuto della sequenza. Esistono inoltre delle stringhe proprietarie, che iniziano con il carattere 'P' seguito da ulteriori tre lettere che ne identificano il detentore, ad esempio 'GRM' per Garmin. I dati all'interno sono tutti separati da virgole, anche nel caso manchi un elemento; non possono inoltre essere più lunghi di 80 caratteri (esclusi i separatori) e terminano con un ritorno a capo (Figura 3.6). Una caratteristica comune a molti dei messaggi è il *checksum* finale posto dopo il carattere '*', che corrisponde a due cifre esadecimali risultanti dal calcolo di un OR esclusivo a 8 bit fra tutti i caratteri compresi tra '\$' e '*', quest'ultimi esclusi.

Per l'estrazione delle frasi di interesse dal file NMEA, è stata utilizzata una funzione di MATLAB appositamente creata, che permette l'estrazione di tutte le *sentence* del medesimo tipo, salvandole in un apposito file di testo. Dopo di che, per l'estrapolazione dei dati, dalle frasi contenute in quest'ultimo, è stata utilizzata la funzione *textscan*.

```

$GNGSA,A,3,28,23,13,11,25,20,,,,,,,,,1.01,0.51,0.87,4*03
$GPGSV,3,1,11,02,27,115,37,06,24,071,33,12,76,357,48,14,19,317,40,1*65
$GPGSV,3,2,11,15,04,181,29,17,04,039,30,19,20,043,30,24,60,137,49,1*6B
$GPGSV,3,3,11,25,47,277,51,29,21,205,49,32,31,300,47,1*57|
$GPGSV,3,1,11,02,27,115,,06,24,071,33,12,76,357,41,14,19,317,,6*6B
$GPGSV,3,2,11,15,04,181,20,17,04,039,25,19,20,043,,24,60,137,43,6*68
$GNGLL,4425.02998,N,01156.00339,E,073253.40,A,D*71
$GNRMC,073253.60,A,4425.03002,N,01156.00359,E,2.501,76.79,170619,,R,V*24
$GNVTG,76.79,T,,M,2.501,N,4.631,K,D*1F
$GNGGA,073253.60,4425.03002,N,01156.00359,E,4,12,0.54,2.2,M,44.9,M,0.6,0000*68
$GNGSA,A,3,12,14,25,24,02,32,06,29,19,,,,,1.06,0.54,0.92,1*0D
$GNGSA,A,3,88,82,80,79,81,69,70,78,,,,,1.06,0.54,0.92,2*0D
$GNGSA,A,3,26,31,21,01,13,04,09,,,,,1.06,0.54,0.92,3*05

```

Figura 3.6 Esempio di dati nello standard NMEA 0183, estratto da una prova di acquisizione.

Esistono moltissime tipologie di messaggi e a seconda delle necessità dell'utilizzatore si può decidere quali mostrare. Nella figura sopra sono mostrati i messaggi di default restituiti da simpleRTK2B e sono [52]:

- (1) GPGSV → stringa riguardante i satelliti GNSS in vista dal dispositivo, con cui i primi due caratteri si possono identificare diverse costellazioni come GP (GPS), GA (GALILEO), GL (GLONASS) e GB (BeiDou). Le principali informazioni contenute riguardano l'ID del satellite, l'elevazione, l'azimuth e il SNR.
- (2) GNGLL → stringa contenente informazioni riguardo tempo, latitudine e longitudine del ricevitore, in cui il prefisso GN indica che considera diverse costellazioni.
- (3) GNVTG → stringa riferita alle informazioni di velocità del ricevitore e tragitto.
- (4) GNGGA → stringa riguardante la qualità del dato come per esempio, l'indicatore sulla qualità del posizionamento, il numero di satelliti utilizzati, la diluizione di precisione orizzontale.
- (5) GNGSA → stringa che identifica gli ID dei satelliti utilizzati nel trovare la soluzione PVT e fornisce informazione sulla diluizione di precisione.
- (6) GNRMC → stringa riassuntiva contenente alcune informazioni minime. Essendo il messaggio maggiormente utilizzato per l'estrazione dei dati utilizzati in questa tesi, nella Tabella 1 c'è un esempio con l'intero contenuto del messaggio riportato di seguito.

\$GNRMC,073253.60,A,4425.03002,N,01156.00359,E,2.501,76.79,170619,,R,V*24

Name	Example	Units	Format	Description
<i>Message ID</i>	\$GNRMC	-	string	RMC Message ID
<i>UTC Time</i>	073253.60	-	hhmmss.ss	UTC time
<i>Status</i>	A	-	character	Status, V = Navigation receiver warning, A = Data valid,
<i>Latitude</i>	4425.03002	-	ddmm.mmmmm	Latitude (degrees & minutes)
<i>N/S Indicator</i>	N	-	character	North/South indicator
<i>Longitude</i>	01156.00359	-	ddmm.mmmmm	Longitude (degrees & minutes)
<i>E/W Indicator</i>	E	-	character	East/West indicator
<i>Speed Over Ground</i>	2.501	knots	numeric	Speed over ground
<i>Course Over Ground</i>	76.79	degrees	numeric	Course Over Ground
<i>Date</i>	170619	-	ddmmyy	Date in day, month, year format
<i>Magnetic Variation</i>	-	degrees	numeric	Magnetic variation value. Only supported in ADR 4.10 and above.
<i>E/W Indicator</i>	-	-	character	Magnetic variation E/W indicator. Only supported in ADR 4.10 and above.
<i>Position Fix Mode</i>	R	-	character	Mode Indicator : R RTX fix, F RTK float
<i>Navigation Status</i>	V	-	character	Navigational status indicator (V = Equipment is not providing navigational status information)
<i>Checksum</i>	*24	-	hexadecimal	Checksum
<CR><LF>	-	-	character	Carriage return and line feed

Tabella 1 Descrizione stringa RMC.

3.3 Configurazione basata su protocollo NTRIP

In questa configurazione, che è stata utilizzata, si ottiene la funzionalità RTK utilizzando un solo dispositivo simpleRTK2B. In questo caso, infatti, le informazioni correttive, necessarie a risolvere l'ambiguità d'intero e arrivare ad un'accuratezza centimetrica, vengono fornite da una stazione di riferimento fissa appartenente alla *EUREF Permanent GNSS Network* (EPN), una rete europea composta da oltre 300 stazioni di riferimento, creata e mantenuta operativa da oltre 100 agenzie ed università Europee. La stazione utilizzata è ubicata a Medicina (BO) ed è sotto il controllo dell'Agenzia Spaziale Italiana che ha come centro operativo il Centro di Geodesia Spaziale "Giuseppe Colombo" a Matera, che gestisce questo servizio e ne fornisce l'accesso gratuito previa registrazione all'ASI Caster².

² http://geodaf.mt.asi.it/gps_caster_access.php

Il ricevitore simpleRTK2B è alimentato attraverso una batteria esterna da 10400 mAh, collegata attraverso un cavo micro-USB alla porta POWER+GPS, mentre la comunicazione tra questo e la stazione di riferimento viene effettuata attraverso internet e più specificatamente utilizzando il protocollo NTRIP. Per permettere la trasmissione tra il Caster ASI e il nostro ricevitore viene utilizzata un'applicazione Android chiamata "Lefebure NTRIP Client", installata su uno smartphone (OnePlus 6) la quale sfruttando la connessione dati, permette la ricezione dei dati correttivi in formato RTCM 3.2 provenienti dalla stazione. Questo client è sviluppato dalla "Lefebure Design" ed è scaricabile gratuitamente, nella versione base, dal Play Store di Google; attualmente è disponibile la versione 2019.06.21. I dati correttivi vengono trasferiti al ricevitore attraverso collegamento Bluetooth tra il modulo XBEE e lo smartphone; inoltre, utilizzando questa connessione, è possibile salvare sull'applicazione i dati provenienti da simpleRTK2B per poi essere analizzati. Il funzionamento di questa app è molto intuitivo: nella schermata "NTRIP Setting" (Figura 3.8a) vanno inserite le credenziali di accesso alla rete EPN e va selezionato l'ID corrispondente alla stazione di Medicina (MEDI00ITA0), mentre nella sezione *Receiver Settings* (Figura 3.8b) va impostato il tipo di connessione, il dispositivo a cui collegarsi e il salvataggio dei dati GPS.

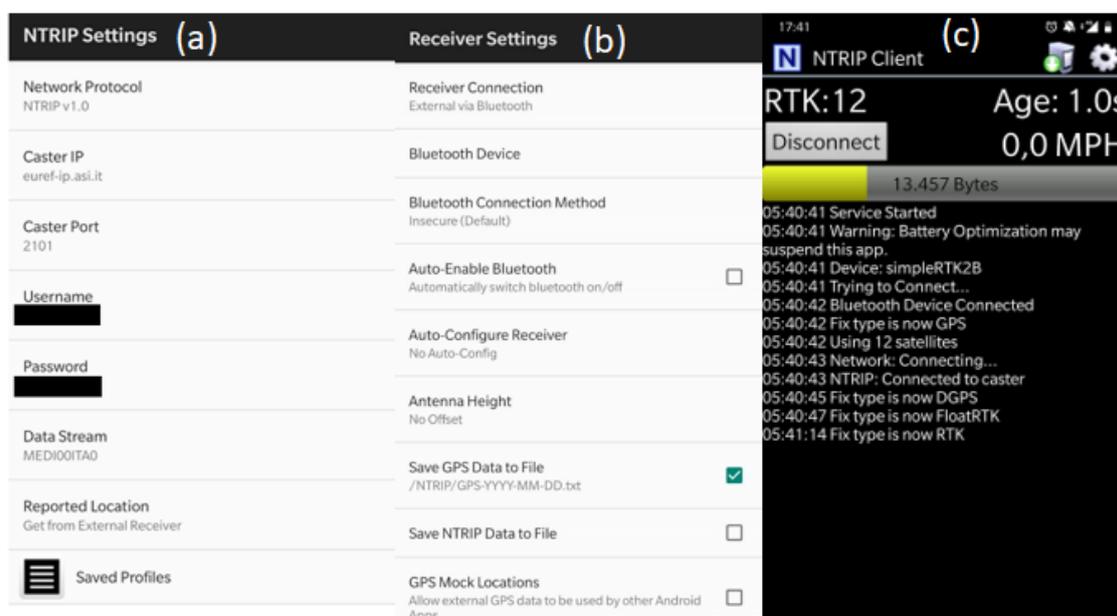


Figura 3.8 a) Schermata settaggio servizio NTRIP; b) schermata di settaggio del ricevitore; c) schermata principale dell'app.

Effettuati questi settaggi, cliccando *Connect* nella schermata principale, dopo aver effettuato la connessione al dispositivo e al NTRIP caster, inizierà il trasferimento dei dati correttivi e la soluzione PVT passerà da semplice GPS fix a RTK fix (Figura 3.8c). Quest'ultimo grado di accuratezza è ottenibile nel caso in cui simpleRTK2B riesca a risolvere l'ambiguità d'intero, che dipende da vari fattori, come la distanza dalla fonte delle correzioni (nel caso in esame circa 20 km), dalle condizioni atmosferiche, dalla presenza di ostacoli e dal numero di satelliti sopra un certo grado di elevazione. Un ultimo aspetto da considerare è il numero di satelliti utilizzato nel calcolo della soluzione che, per motivi di progettazione dell'app, è di massimo 12.

I dati trasmessi dal nostro ricevitore e salvati dall'applicazione sono scritti nel formato standard *NMEA 0183*, utilizzato per la comunicazione di dati di navigazione satellitare, e vengono salvati in un unico file di testo denominato "GPS-YYYY-MM-DD.txt". Non potendo cambiare il nome del file conviene a seguito di ogni prova esportarlo, ad esempio su Dropbox, e in seguito cancellarlo in modo che i dati successivi non vengano aggiunti al file precedente.

Capitolo 4 – PROTOCOLLO DI VALIDAZIONE

In questo capitolo verranno presentate le prove effettuate per la validazione della misura della velocità del cammino fornita da simpleRTK2B; per ognuna di queste verranno spiegati sia i protocolli di acquisizione sia le elaborazioni dei dati eseguite in MATLAB. Inizialmente sarà presentata una prova statica preliminare, eseguita per valutare il comportamento del ricevitore e la qualità delle correzioni RTK ricevute dalla stazione di Medicina: tale prova è stata considerata necessaria a causa della distanza non trascurabile (circa 20 km) tra la stazione e i luoghi scelti per le successive prove dinamiche. Successivamente verranno affrontate le tre prove principali:

- (1) Validazione con cronometro;
- (2) Validazione con gold standard;
- (3) Validazione in ambiente urbano.

La strumentazione necessaria al funzionamento e al trasporto del dispositivo simpleRTK2B è la medesima nelle tre prove:

- (1) Ricevitore simpleRTK2B con modulo Xbee Bluetooth;
- (2) Antenna ANN-MB-00 (IP67);
- (3) Batteria portatile da 10400 mAh per l'alimentazione del dispositivo tramite cavo micro-USB;
- (4) Smartphone (OnePlus 6) con connessione internet;
- (5) Zaino in cui è stata inserita una placca di metallo nell'estremità superiore, su cui poter attaccare esternamente l'antenna (dotata di base magnetica), in modo da garantire una visione del cielo più libera possibile. Inoltre, l'utilizzo di una base metallica è consigliato per aumentare la ricezione del segnale da parte dell'antenna. Lo zaino è anche utilizzato per il trasporto dell'attrezzatura, come mostrato in figura 4.1.



Figura 4.1 A sinistra lo zaino utilizzato per l'attacco dell'antenna e il trasporto della strumentazione mostrata a destra.

L'utilizzo di uno zaino, seppur sovradimensionato rispetto agli strumenti da trasportare, non è stato considerato di impedimento al cammino; inoltre, il fatto che l'antenna non sia posizionata sull'individuo non influenza la stima della velocità, essendo lo zaino abbastanza stretto da poter essere considerato solidale con il corpo. È indubbio che un contenitore meno ingombrante ed ergonomico sia preferibile in possibili future applicazioni, soprattutto nel caso di test sulla corsa, ma nel caso qui in esame, ovvero la validazione dello strumento durante il cammino, è stato considerato ininfluenza.

Tutte le prove descritte in seguito sono state condotte dal medesimo soggetto, un ragazzo di 26 anni, alto 1.78 m e con un peso di 80 kg, sano e senza disturbi conclamati del cammino. Lo svolgimento delle prove da parte di un singolo soggetto non inficia la validazione dello strumento, in quanto quest'ultima dipende soprattutto dal numero di prove effettuate e dagli strumenti di confronto utilizzati; inoltre, verranno sperimentati diversi ritmi di camminata così da coprire parzialmente diverse categorie di livello funzionale.

4.1 Prova preliminare

Lo scopo di questa prova iniziale è stato quello di prendere confidenza con il ricevitore e verificarne le potenzialità, soprattutto in termini di qualità della soluzione PVT ottenibile. Questo test consiste in una misurazione statica di tredici minuti (fs 15.15 Hz) con partenza da freddo (*Coldstart*), ovvero iniziare un'acquisizione senza prima aver permesso al ricevitore di tracciare i satelliti. Il ricevitore simpleRTK2B viene utilizzato nella configurazione trattata nel paragrafo 3.3, senza in questo caso l'utilizzo dello zaino, ma appoggiato sulla stessa placca metallica posizionata in cima a un treppiedi (figura 4.2). Lo scopo di questa prova consiste nel valutare la dinamica e il tempo necessario dall'accensione al raggiungimento della soluzione *RTK fix*, ovvero quando il ricevitore riesce a risolvere l'ambiguità d'intero. Oltre a ciò, verrà valutata la velocità del dispositivo perché, nonostante la sua posizione statica, il meccanismo con cui la soluzione PVT è ottenuta dai ricevitori GPS/ GNSS, la rende diversa da zero.



Figura 4.2 Setup prova preliminare.

4.2 Protocolli di acquisizione

4.2.1 Validazione con cronometro

Questa prima prova ha permesso il confronto tra la velocità media ottenuta dal dispositivo simpleRTK2B e quella ricavata misurando il tempo necessario a percorrere tratti di lunghezza costante pari a 50 m, utilizzando un cronometro digitale Finis 3X-100M (accuratezza 1/100 di secondi). L'utilizzo di un cronometro, benché influenzato dai tempi di reazione dell'esaminatore, è giustificato dal fatto di essere uno degli strumenti maggiormente utilizzati in ambito clinico per questa tipologia di test. Per standardizzare il tragitto e le distanze percorse, è stata scelta come luogo dell'acquisizione la pista d'atletica situata allo Stadio Comunale "Ermes Muccinelli" di Lugo (RA), foto in figura 4.3, che dista circa 25 km in linea d'aria dalla stazione di riferimento di Medicina (BO).



Figura 4.3 Stadio comunale Ermes Muccinelli.

La distanza di 50 m è stata scelta in modo da poter ottenere otto valori di velocità compiendo un intero giro della pista: inoltre in diversi punti dell'ovale sono presenti linee segnaletiche corrispondenti a questo intervallo, che hanno permesso una corretta determinazione delle distanze. Come verifica dell'effettiva misura, i tratti sono stati misurati attraverso un odometro analogico (Stanley MW40M, con accuratezza decimetrica) e segnalati attraverso dei birilli, posizionati in corrispondenza delle linee di segnalazione per aumentarne la visibilità. La prova è stata effettuata nella corsia più

interna, cercando di rimanere vicino al bordo, in modo che la distanza totale percorsa fosse di circa 400 m. Come partenza è stata selezionata una di queste linee e, posizionandosi con entrambe le punte dei piedi dietro quest'ultima, la prova ha avuto inizio a seguito del via da parte del soggetto, preceduto da un countdown da tre. In questo modo si elimina il tempo di reazione da parte del soggetto che cammina e si minimizza anche quello dell'esaminatore che cronometra. Al termine di ciascun tratto, il soggetto dovrà fermarsi con la stessa modalità della partenza, con il tempo che verrà fermato solo quando entrambi i piedi sono sulla linea. È stata quindi effettuata, al termine di ogni intervallo, una piccola pausa di una decina di secondi rimanendo immobili, così da essere in grado separare gli otto tratti e permettere all'esaminatore di segnare il tempo; dopodiché viene effettuata la medesima procedura di partenza iniziale. Terminato l'ottavo tratto viene disconnesso il client dal dispositivo, salvato e caricato l'intero log dei dati su Dropbox, prima di effettuare il giro successivo. Per effettuare l'acquisizione nelle migliori condizioni possibili, prima dell'inizio di ogni giro, è necessario attendere qualche decina di secondi dopo la connessione del client NTRIP con il dispositivo per fare in modo che quest'ultimo arrivi alla soluzione PVT di qualità maggiore: questo tempo è leggermente maggiore (fino ad un paio di minuti) alla prima accensione.

L'intera prova consiste in sei giri di pista effettuati a tre diversi ritmi di camminata: lenta, normale e veloce senza correre. L'utilizzo di diverse velocità permette lo studio sull'applicabilità di questo dispositivo in diverse categorie funzionali di soggetti. L'esaminato dovrà, quindi, in modo arbitrario cercare di camminare alla velocità prevista e mantenerla il più costante possibile. Al termine si avranno quindi sedici valori di velocità medi per ogni ritmo, misurati da simpleRTK2B e ricavati dal cronometro. L'intera acquisizione viene fatta con una frequenza di campionamento pari a 5 Hz.

4.2.2 Validazione con gold standard

In questa seconda prova dinamica viene utilizzato come strumento di confronto un gold standard nella misura della velocità 2D, permettendo in questo modo di effettuare una valutazione reale (e non dipendente dall'azione di un esaminatore) dell'accuratezza di simpleRTK2B. Il dispositivo utilizzato è il "Fitlight" (Medical Graphics Italia Srl, Milano), un sistema di fotocellule a LED wireless, composto da otto moduli, i quali

permettono la misura dei tempi di passaggio con un'accuratezza del millesimo di secondo. Per effettuare l'acquisizione in un luogo il più possibile privo di ostacoli, si è utilizzata anche in questo caso una pista d'atletica, in particolare quella situata al Centro Sportivo Universitario Terrapieno – Palacus a Bologna, che dista, in linea d'aria, circa 20 km dalla stazione di riferimento di Medicina (BO). Oltre al sistema "Fitlight", è stato utilizzato, durante l'intera prova, anche il GPS per uso sportivo GPEXE LT (Exelio srl – Udine, Ita). Questo secondo ricevitore inserito in una pettorina a livello della zona cervicale (figura 4.4) è dotato di una frequenza di campionamento fissa a 18.18 Hz e un errore tipico di stima nella misura delle distanze pari a 1.6–8 % (CV: 1.1-5.1 %), secondo lo studio di Hoppe et al. [53].



Figura 4.4 GPEXE con pettorina.

Il sistema di fotocellule è stato calibrato toccando la parte anteriore delle celle nell'ordine di utilizzo dopo l'accensione. Successivamente sono stati utilizzati, per il fissaggio del sistema, degli strip adesivi su una serie di ostacoli da corsa (figura 4.5a) a un'altezza di circa 1 m, corrispondente alla zona del bacino. Per la prova sono state utilizzate solo sette delle otto fotocellule disponibili, per via del malfunzionamento di una di queste; inoltre, la distanza tra di esse, che inizialmente doveva essere pari a 10 m, è stata ridotta a 6.25 m in quanto, la consolle di comando (un tablet) non riusciva a rilevare tutte le celle, probabilmente data l'eccessiva lontananza. Le distanze sono state misurate utilizzando una cordella metrica con accuratezza centimetrica.



Figura 4.5 a) Fotocellula montata su ostacolo; b) percorso di acquisizione.

Per standardizzare la distanza di inizio e fine test sono stati definiti due intervalli di 1 m alle due estremità (figura 4.5b), così che il soggetto partisse con le punte dei piedi prima della linea e terminasse allo stesso modo: questa modalità permette anche di minimizzare i transitori di accelerazione e decelerazione alle due estremità della prova. La distanza totale misurata con simpleRTK2B è quindi composta di sei tratti da 6.25 m e due da 1 m per un totale di 39.5 m: il confronto delle velocità medie è stato effettuato sui 37.5 metri centrali. L'intera prova consiste in tre ripetizioni per ogni ritmo di camminata, lento, normale, veloce (senza correre) e casuale, in cui c'è l'alternarsi di tutte e tre le velocità precedenti. Quest'ultima tipologia di prova è stata aggiunta per valutare il comportamento del ricevitore GNSS a cambiamenti di velocità improvvisi. Al soggetto viene quindi chiesto di partire quando pronto e mantenere il più possibile il ritmo richiesto percorrendo la corsia a destra del sistema mantenendo una traiettoria il più rettilinea possibile.

Come per il protocollo descritto in precedenza (paragrafo 4.2), il client NTRIP viene riavviato ad ogni prova, permettendo così la separazione dei dati; prima di ogni partenza bisogna attendere un breve lasso di tempo, in modo da permettere la connessione al caster

ASI e il raggiungimento della soluzione PVT di miglior qualità. Per quanto riguarda il dispositivo GPEXE, l'accensione è avvenuta prima dell'inizio delle prove e terminata conclusa l'intera batteria. La frequenza di campionamento utilizzata da simpleRTK2B è pari a 15.15 Hz.

4.2.3 Validazione in ambiente urbano

Entrambi i protocolli descritti precedentemente mirano ad effettuare delle acquisizioni nelle migliori condizioni possibili per il ricevitore simpleRTK2B; sia per quanto riguarda la visibilità del cielo, sia per il fatto di attendere fino al raggiungimento della soluzione PVT di massima qualità (*RTK fix*), prima di effettuare la prova. In questo modo, infatti, si possono fare delle valutazioni sulla massima performance del ricevitore. Non in tutti i casi però ci si può porre nelle condizioni ottimali: questo può essere dovuto a vari fattori come ad esempio la mancanza di uno spazio aperto nelle vicinanze o l'impossibilità di aspettare il tempo necessario alla convergenza del dispositivo, ma anche per via di precise scelte di protocollo sperimentale, come la necessità di valutare la velocità del cammino su tragitti quotidiani. Per questo motivo, lo scopo di questa ultima prova è di valutare il comportamento di simpleRTK2B all'interno di un'area urbana, sia dal punto di vista della qualità della soluzione ottenuta, sia riguardo alla stima della velocità media. Per motivazioni logistiche il test è stato effettuato nella città di Lugo (Ra) che, purtroppo, non essendo una città densamente popolata, non presenta aree con edifici sufficientemente alti da limitare in modo sostanziale la visibilità del cielo. Per rendere il più difficoltoso possibile il tracking dei satelliti da parte del ricevitore, si è cercato di percorrere strade più strette possibili con edifici o alti alberi su entrambi i lati (figura 4.6); inoltre, anche per motivi di sicurezza, si è sempre cercato di stare il più a lato possibile della carreggiata, in modo che passando molto vicino alle case, un intero settore risultasse ostruito.



Figura 4.6 Foto di due strade percorse durante la prova.

La prova consiste, partendo da un punto stabilito, nel camminare ad una velocità ritenuta confortevole dal soggetto per tratti di lunghezza variabile. Il soggetto oltre ad indossare lo zaino con il ricevitore utilizza una ruota di misurazione (Stanley MW40M) per valutare la distanza compiuta e un esaminatore cronometra (cronometro Finis 3X-100M) i tempi di percorrenza. Misurando una velocità media, per cercare di uniformare il numero di campioni su cui viene calcolata, si è cercato di effettuare distanze di circa 100 m, ma per via di ostacoli o attraversamenti pedonali, non sempre è stato possibile: la distanza percorsa è stata comunque registrata al decimetro grazie all'odometro. In corrispondenza della fine di ogni tratto, il soggetto si ferma restando in posizione, in modo da permettere la scrittura di tempo e distanza e suddividere il dato nel log del GPS. I due tragitti lunghi rispettivamente 1301.2 e 1550.7 m, sono stati effettuati nella stessa giornata e la frequenza utilizzata da simpleRTK2B è stata di 10 Hz.

4.3 Elaborazione dei dati

Le elaborazioni effettuate sono state condotte interamente su MATLAB R2018b ed è stato utilizzato il programma Google Earth Pro come supporto nella visualizzazione delle coordinate geografiche dei punti attraversati. In generale, l'elaborazione dei dati nelle tre prove di validazione, seppur differenziandosi caso per caso, mirano ad estrapolare dall'intera acquisizione i dati riguardanti i periodi di movimento per focalizzare il confronto delle velocità e ripulirli da eventuali tratti non pertinenti. Il dato sulla velocità misurata da simpleRTK2B è ottenuto in due modi, il primo dei quali è fornito come output dal dispositivo stesso e compare nelle due *sentence* NMEA, VTG e RMC, delle quali verrà utilizzata la seconda, in quanto contiene anche le informazioni riguardanti latitudine, longitudine e tempo. La velocità è espressa in nodi, poiché il linguaggio NMEA è nato nelle applicazioni marittime, e va quindi convertito in m/s attraverso l'equivalenza $1 \text{ nodo} \cong 0.514 \text{ m/s}$. Il metodo con cui simpleRTK2B calcola questa velocità non è noto, essendo di proprietà dell'azienda produttrice del chip ZED-F9P, ma generalmente i moderni ricevitori GNSS calcolano la soluzione PVT come uscita di un algoritmo ricorsivo (es. filtro di Kalman), che combina diverse tecniche di misura. La seconda velocità utilizzata è, invece, ottenuta come derivata temporale della posizione, calcolata dividendo le distanze tra le singole posizioni per la differenza tra gli istanti di acquisizione che le hanno prodotte. Questo secondo metodo, seppur teoricamente meno accurato, consente un maggiore controllo di questa misura, conoscendone esattamente l'origine. Per quanto riguarda l'elaborazione dei dati, condotta sul ricevitore GPEXE LT utilizzato nella seconda prova, è stata condotta in egual modo a quella per i dati di simpleRTK2B, così da consentire un confronto affidabile.

Per quanto riguarda l'analisi statistica riportata di seguito, è stata condotta sia fra le velocità medie, appartenenti alla stessa categoria di ritmo di camminata, sia sull'intera popolazione in riferimento alla specifica prova di validazione. Per valutare l'agreement tra le misure del ricevitore simpleRTK2B e lo strumento utilizzato nella prova di validazione, è stato utilizzato il grafico di Bland-Altman, il quale permette la quantificazione delle differenze tra le due stime, mostrando il valor medio delle differenze e i limiti di agreement ($LOA = M_{diff} \pm 1.96 \cdot SD_{diff}$). Sono stati in seguito calcolati due

importanti parametri: il SEM (*Standard Error of Measurment*), che permette di stimare l'errore standard compiuto dallo strumento in un set di misure ripetute (4.1), dove N è il numero di set confrontati e il MDC (*Minimal Detectable Change*), che indica, la più piccola variazione nei dati associabile ad un effettivo cambiamento e non al rumore (4.2).

$$SEM = \frac{SDdiff}{\sqrt{N}} \quad (4.1)$$

$$MDC = 1.96 * SEM * \sqrt{2} \quad (4.2)$$

Inoltre, per valutare il grado e il tipo di associazione tra le velocità misurate con strumenti diversi, si sono utilizzate l'analisi di correlazione e quella di regressione, in quanto, anche se mostrano un'informazione molto simile, quest'ultima permette tramite uno scatter plot un'interpretazione visiva immediata. Dal coefficiente di correlazione (Spearman, per dati non gaussiani) è stato poi calcolato quello di determinazione (R^2), che interpreta il risultato dal punto di vista della varianza spiegata. Infine, per completare l'analisi statistica sono stati impiegati due test statistici non parametrici, per via della distribuzione non gaussiana delle velocità. Il primo test utilizzato è il *Wilcoxon signed rank test*, visto che per la costruzione dei protocolli le misure possono essere considerate appaiate, il quale valuta se le differenze tra i due set di misure provengono da una distribuzione con mediana nulla, quindi se l'errore medio tende a zero. La seconda analisi utilizzata è il *Wilcoxon rank sum test*, che permette di valutare l'ipotesi nulla che i dati provengano da distribuzioni continue con le stesse mediane.

4.3.1 Selezione dei dati

Non tutti i dati registrati dal nostro ricevitore sono stati utilizzati nel calcolo della velocità: difatti, ad esempio, nelle prime due prove vengono scartati tutti i dati stazionari appartenenti alla parte iniziale (prima di partire) e finale. Questo viene fatto attraverso l'utilizzo di una soglia sulla velocità minima, che trova l'ultimo (il primo, nel caso del tratto finale) indice oltre al quale la velocità è sempre maggiore (o minore). Sempre in questi due casi, per analizzare il caso migliore, vengono tolti sia i dati che non presentano una soluzione PVT di qualità RTK, sia quelli che, pur risultando in questa categoria, mostrano di utilizzare, per il calcolo della soluzione, dei dati correttivi vecchi e quindi non affidabili (figura 4.7). Questi due ultimi requisiti possono essere verificati andando

ad estrarre dalla *sentence* GGA i valori corrispondenti rispettivamente ai campi *Position fix indicator* (in ordine di qualità crescente: 1 = GPS, 2 = DGPS, 5 = FloatRTK, 4 = RTK) e quello relativo alla *Age of differential correction*, che durante un corretto funzionamento sono minori di due secondi. Fortunatamente, anche per via del fatto che c'erano delle buone condizioni atmosferiche durante le acquisizioni (cielo sereno), i dati scartati fanno riferimento all'intervallo di tempo (poche decine di secondi al massimo) concesso al ricevitore prima di iniziare la camminata, mentre durante il movimento tutti i dati rientravano in queste specifiche.

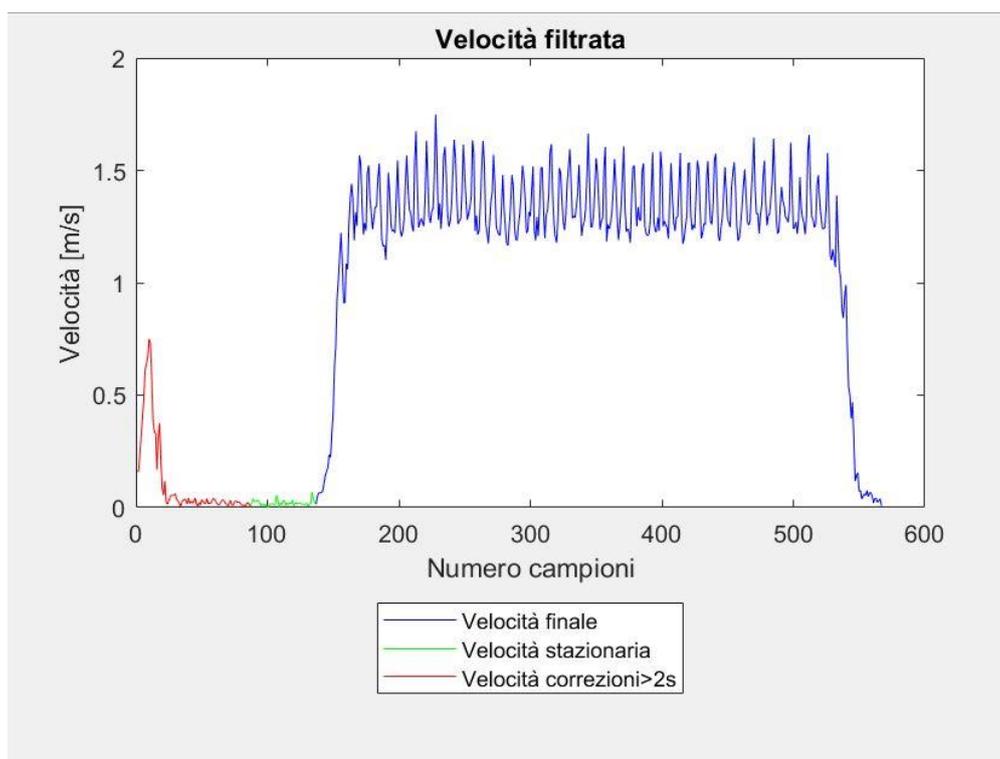


Figura 4.7 Esempio generico di selezione dei dati fatta nelle prime due prove.

Per quanto riguarda la validazione in ambiente urbano invece, a parte questo primo intervallo di inizializzazione, sono stati utilizzati i dati considerando tutte le *fix quality*, in quanto era nello scopo della prova verificare l'andamento della qualità della soluzione. L'unico tratto eliminato riguarda il primo dei due tragitti effettuati, per via del fatto che, durante un breve tratto dopo la fine di un intervallo di misurazione, il cronometro non è partito. Per isolarlo è bastato, noto il punto di ricerca per via della misurazione

dell'odometro, eliminare i dati del tratto a velocità diverse da zero, poiché una volta accorti del malfunzionamento ci si è fermati e poi ripartiti.

4.3.2 Sincronizzazione delle misure

Utilizzando sistemi non sincronizzabili automaticamente, si sono utilizzate due differenti metodologie di sincronizzazione, che permettono successivamente di confrontare velocità appartenenti allo stesso tratto di percorso. Per quanto riguarda la prima e l'ultima prova di validazione, la sincronizzazione è stata molto elementare, in quanto, sfruttando il fatto che il soggetto si ferma all'inizio e alla fine di ogni tratto per una decina di secondi, quindi la velocità torna a zero, è bastato impostare una soglia di velocità minima per suddividere i tratti in movimento in cui l'esaminatore cronometrava il tempo.

Un procedimento più complesso è stato invece utilizzato nella validazione con gold standard, in quanto per il protocollo utilizzato non è stato possibile utilizzare la metodica precedente. Il problema principale consiste in una corretta selezione dei campioni appartenenti al metro che precede la prima fotocellula. Una volta determinati, è possibile considerare il campione successivo come la posizione del primo sensore (con una accuratezza di qualche centimetro) e sincronizzare i successivi tratti utilizzando i tempi di percorrenza misurati dalle fotocellule, confrontati con i timestamp dei ricevitori GPS/GNSS. Inizialmente, si è tentato di suddividerli in base alla distanza misurata da simpleRTK2B, calcolando l'integrale di linea delle posizioni, ma, constatando che queste si disponevano seguendo una traiettoria sinusoidale, sintomo del fatto che il ricevitore è in grado di seguire l'andamento del centro di massa del corpo (di tipo sinusoidale), si arrivava ad una sottostima del primo tratto, che invece è rettilineo. Invece di calcolare l'integrale di linea, si sono calcolate le distanze progressive dal punto iniziale, utilizzando la formula dell'emisenoverso (metodo trigonometrico per calcolare le distanze su una superficie sferica). Anche in questo caso però, seppur in maniera minore, il primo metro potrebbe risultare sottostimato se la distanza utilizzata come confronto, presa tra l'inizio e il punto, si discosta dalla linea di zero della sinusoide, che corrisponde ad un avanzamento rettilineo. Utilizzando come punto di partenza questa misura, si è quindi utilizzato un algoritmo iterativo che, noto il numero di campioni appartenenti al tratto compreso tra la prima e la seconda fotocellula ($N = \text{tempo di percorrenza}$

misurato/periodo di campionamento), partendo dall'indice corrispondente alla distanza più prossima al metro, calcolasse la velocità media nelle “m” finestre di lunghezza “N” successive a quest'ultimo (figura 4.8).

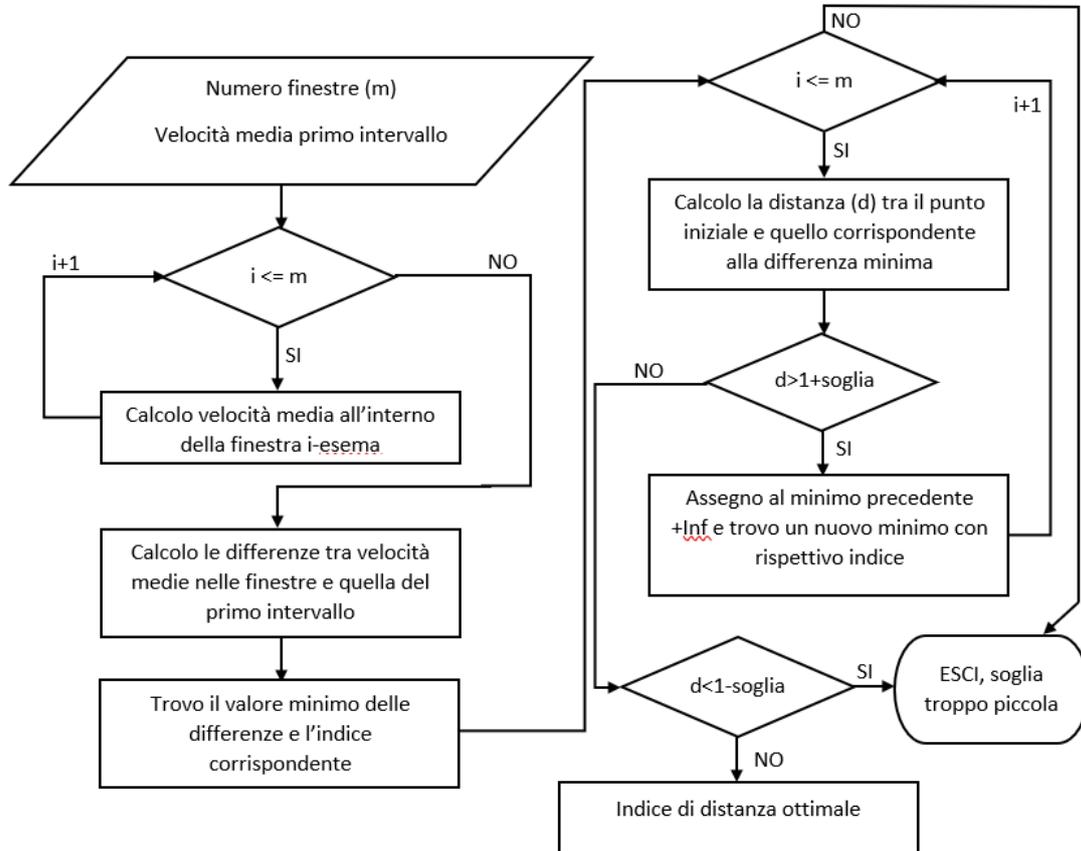


Figura 4.8 Diagramma di flusso che mostra nella colonna di destra l' algoritmo per la ricerca della minima differenza di velocità e a sinistra quello per la verifica della distanza.

Sono state utilizzate dieci finestre di ricerca, in quanto, la prima stima difficilmente si discosta di più di un paio di decimetri. Calcolate le differenze tra le velocità medie nelle finestre e quella delle fotocellule sul primo tratto, si sceglie l'indice della differenza minore. Purtroppo, in alcuni casi, ovvero quando la misura del gold standard è abbastanza diversa, ad esempio minore, da quella stimata e il trend della velocità istantanea tende a diminuire, risulta che l'algoritmo prende sempre l'ultimo punto, anche se questo corrisponde ad un campione più distante di un metro. Come ulteriore controllo si è quindi creato un secondo ciclo “for”, il cui funzionamento è schematizzato nella colonna di

sinistra della figura 4.8, che valuta la distanza del punto da quello iniziale e se, utilizzando una soglia risulta troppo distante, ripete il confronto con un nuovo minimo. Nel caso in cui, non venga trovata una distanza che rientri nella soglia (0.05 m) questa viene aumentata. Per poter calcolare la dimensione della finestra, non essendo il campionamento di simpleRTK2B uniforme, si è effettuato un ricampionamento a 15.15 Hz.

4.3.3 Analisi del passo

Dato l'andamento sinusoidale della posizione, si è deciso di analizzarlo e cercare di stimare la lunghezza dei semi-passi, così da verificare questa supposizione e calcolare una distanza percorsa in base al prodotto fra questa lunghezza e il numero di passi. Essendo un andamento ciclico si è cercato di individuare dei punti che si ripetessero nel tempo nella stessa posizione, ma essendo questa traiettoria schiacciata, soprattutto in cammini a velocità usuale e veloce, e non perfettamente sinusoidale (figura 4.9), risultava difficile farlo direttamente.

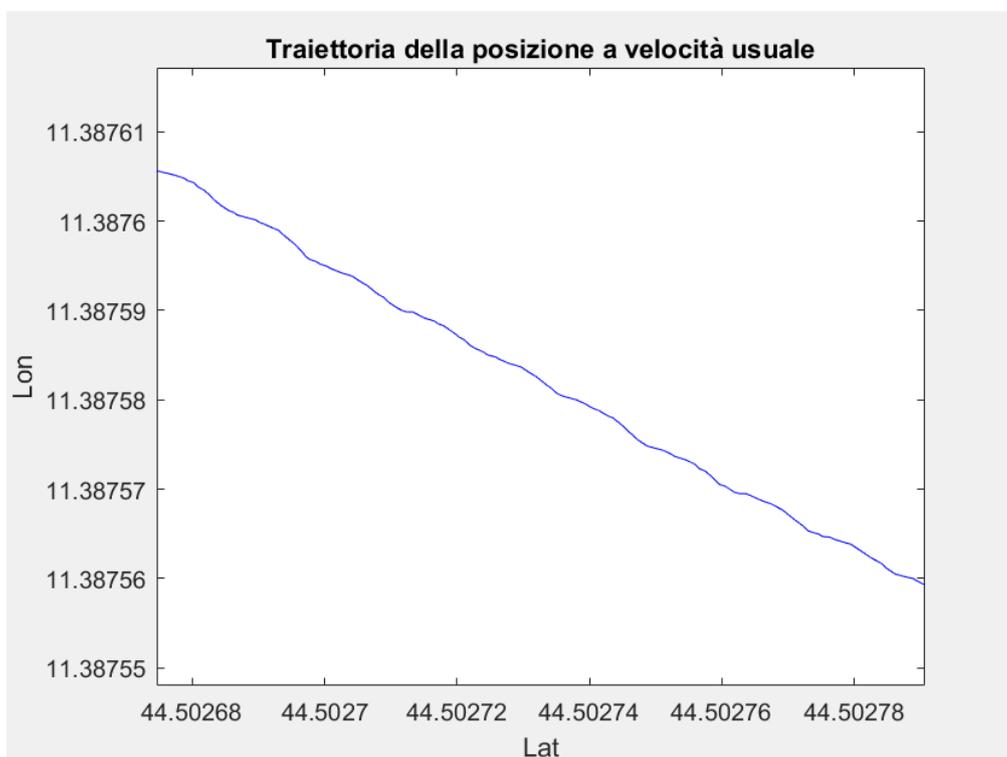


Figura 4.9 Andamento sinusoidale della traiettoria della posizione a velocità usuale.

Questa analisi è stata quindi condotta sul dato della velocità istantanea, che mostra anch'essa un andamento periodico ed è associata punto per punto al valore della posizione. Utilizzando la funzione “findpeaks” e facendo un tuning dei parametri quali, la minima altezza del picco, la minima distanza tra picchi e il valore minimo della prominenza, si è cercato e verificato visivamente di selezionare tutti i picchi non spuri (figura 4.10). Individuati i massimi e conoscendo l'indice di posizione nel vettore, è stato possibile traslarli sul dato di posizione (figura 4.11) e verificare che questi si inseriscono molto bene nei punti di flesso della sinusoide. L'interpretazione di cosa rappresentano questi punti sarà trattata nel capitolo successivo.

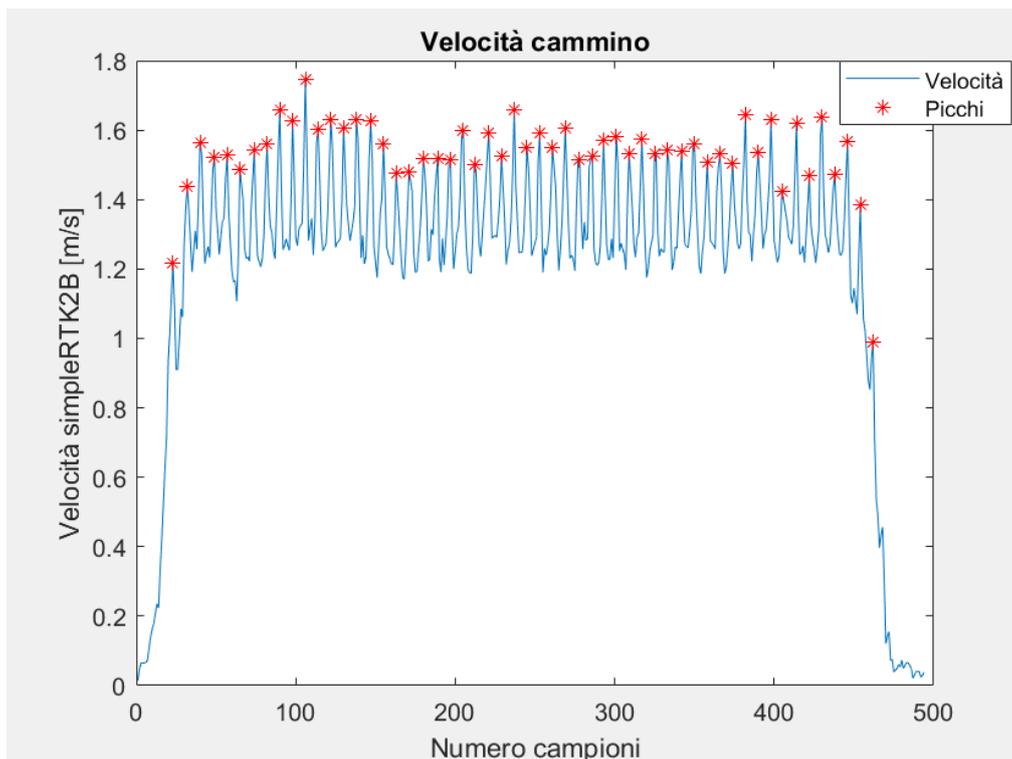


Figura 4.10 Ricerca dei picchi di massimo sulla velocità misurata da simpleRTK2B.

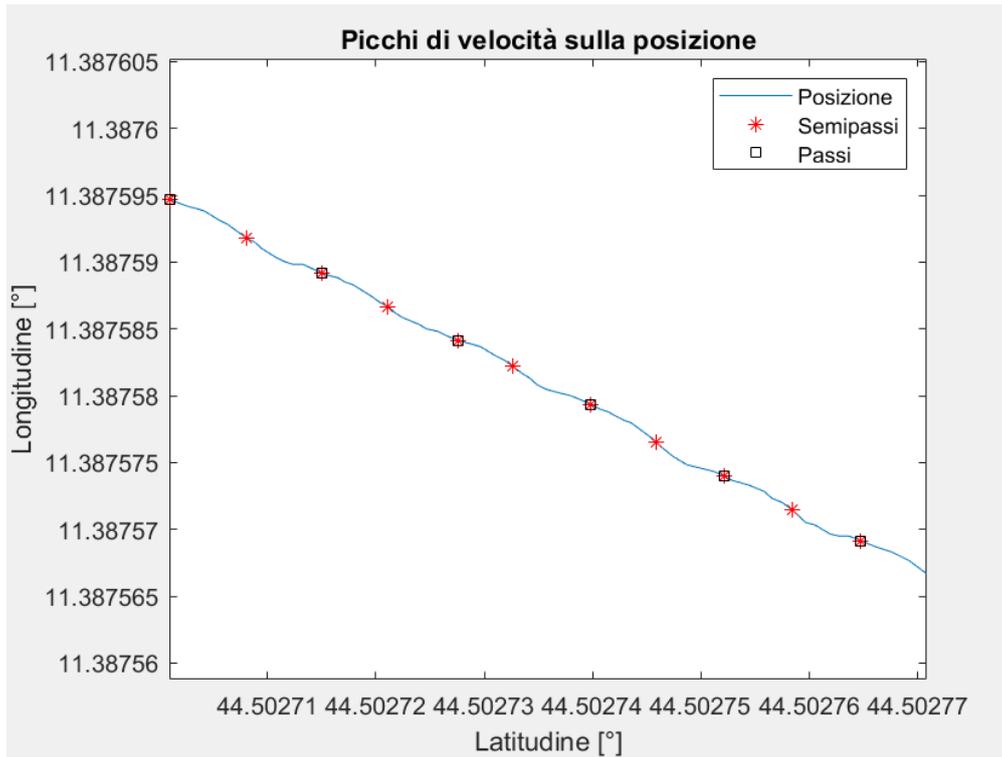


Figura 4.11 Picchi di velocità riportati sulla traiettoria della posizione.

Capitolo 5 – ANALISI DEI RISULTATI

La presentazione e discussione dei risultati partirà dalla prova statica preliminare, il cui scopo era di valutare i tempi e la dinamica della soluzione PVT ottenuta da simpleRTK2B, fornire una stima sulla precisione della posizione e valutare il rumore di fondo sulla velocità. Per quanto riguarda i primi due obiettivi, in figura 5.1 viene riassunto l'andamento della posizione, con un codice colore per indicare la qualità di quest'ultima.

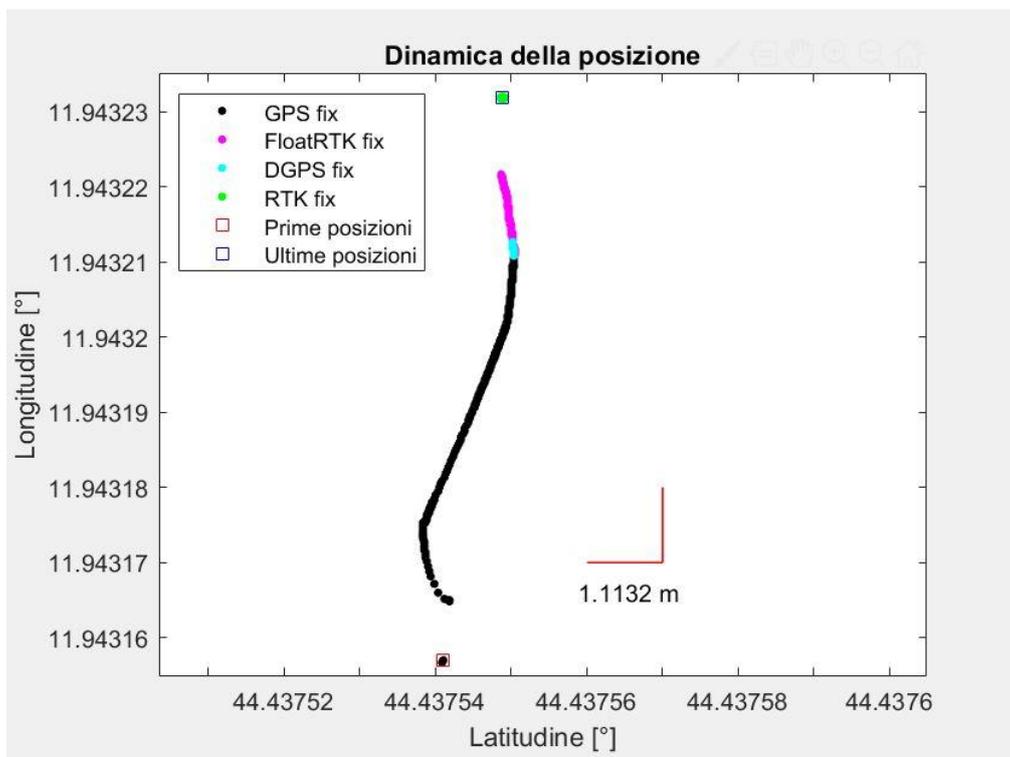


Figura 5.1 Dinamica della posizione stimata da simpleRTK2B in situazione statica.

Come si può notare dal riferimento in rosso, che copre un tratto pari a 1.1132 m, corrispondente alla variazione della quinta cifra decimale [54], la distanza tra i punti neri, corrispondenti ad una soluzione non differenziale e quelli verdi di qualità RTK, passa dai circa 6 m iniziali a 1.7 m degli ultimi. Questo range di accuratèzze è simile a quello ottenibile da un normale ricevitore GPS, partendo da quello presente in un normale smartphone ($\pm 5-10$ m), fino a raggiungere i 2-3 m di imprecisione di un ricevitore GPS

da escursionismo. Dopo questo tratto iniziale durato 35 s, il ricevitore entra in modalità differenziale grazie alle correzioni inviate dalla stazione di riferimento e scaricate dal client NTRIP e in altri 33 s riesce a risolvere per l'ambiguità di intero, entrando in modalità RTK per il resto della prova. Considerando che il primo tratto, che va dall'accensione alla prima soluzione GPS ottenuta è di 8 s, il simpleRTK2B partendo da freddo in 1 minuto e 17 secondi arriva ad una accuratezza inferiore al decimetro. Bisogna considerare comunque che, non avendo utilizzato uno strumento di confronto validato o un punto geodetico noto con precisione, non bisognerebbe parlare di accuratezza, ma solo di precisione, ovvero quanto la misura è dispersa attorno al proprio valor medio; ciò detto, l'accuratezza nominale del chip ZED-F9P riportata sul datasheet è di 0.01 m + 1 ppm CEP [47]. Questo dato sembra infatti essere confermato dalla dispersione che la soluzione

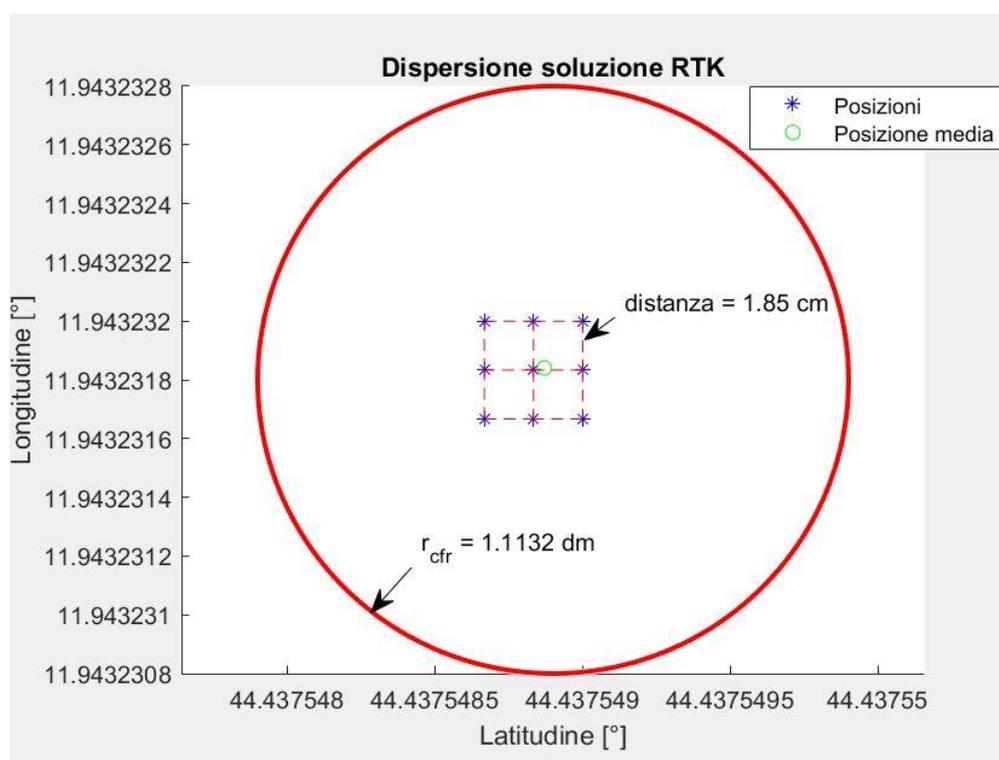


Figura 5.2 Dispersione della soluzione RTK all'interno di un cerchio di raggio 1.1132 dm centrato sulla posizione media.

RTK ha attorno al valor medio, figura 5.2, disponendosi su una griglia di quantizzazione a 9 punti, distanti 1.85 cm gli uni dagli altri.

Il fatto che la posizione media si posizioni esternamente ai punti della griglia è dovuto al fatto che è appunto un valore medio calcolato matematicamente e dipende dalla distribuzione del numero di campioni sui 9 punti; ma considerando i circa 7500 valori di posizione raffigurati, la tendenza è quella di convergere verso il centro della griglia. Un ultimo dato interessante, estrapolabile da questa prova, riguarda il rumore di fondo della velocità (figura 5.3), ottenuto senza nessun tipo di filtraggio software da parte del ricevitore.

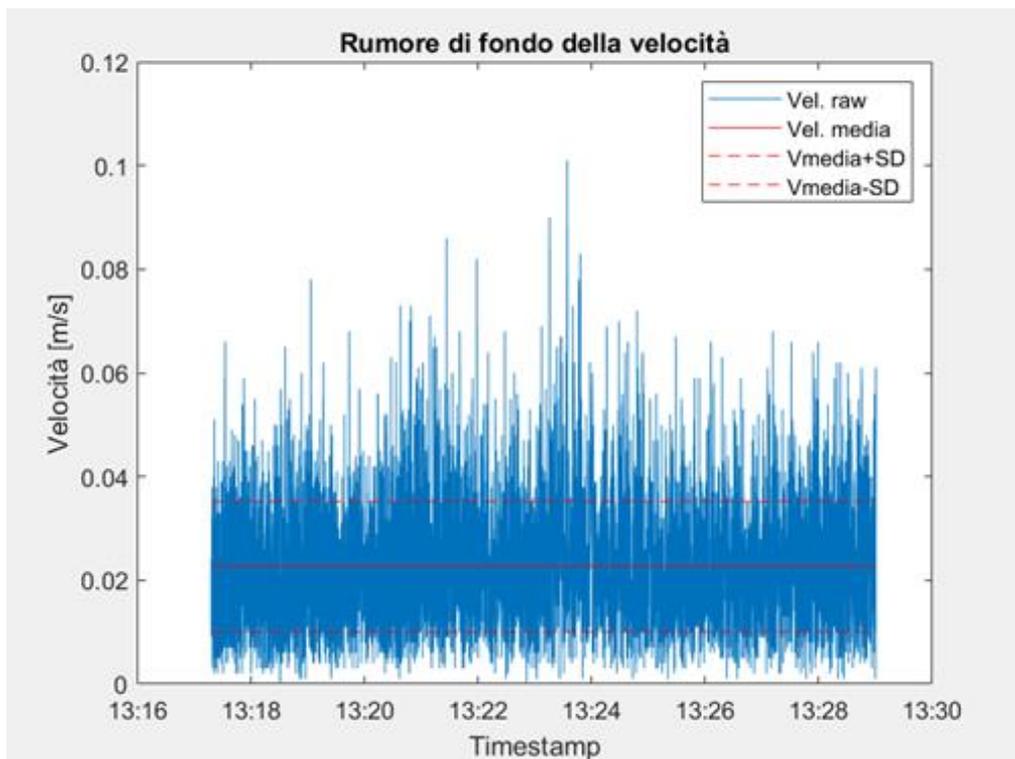


Figura 5.3 Rumore di fondo della velocità durante acquisizione statica.

Questi valori diversi da zero sono dovuti al fatto che, il ricevitore basa il calcolo della soluzione PVT su una continua stima della distanza tra esso e i vari satelliti in vista utilizzati, e l'errore che compie dipende da vari fattori: primo tra tutti il metodo di calcolo utilizzato, unitamente alle fonti di errore discusse nel paragrafo 2.4. Questo errore sul calcolo della distanza si propaga, oltre che sulla posizione (figura 5.2), anche sulla velocità con un valore medio di 0.023 ± 0.013 m/s (1σ).

5.1 Prova di validazione con cronometro

In questo paragrafo verrà trattata l'analisi dei risultati ottenuti nella prima delle due prove di validazione in condizioni ottimali, quella con il cronometro. In figura 5.4 viene mostrato un esempio di confronto tra le due velocità ricavate da simpleRTK2B e quella ottenuta dal cronometro, su tutti e otto gli intervalli appartenenti alla seconda prova con velocità usuale.

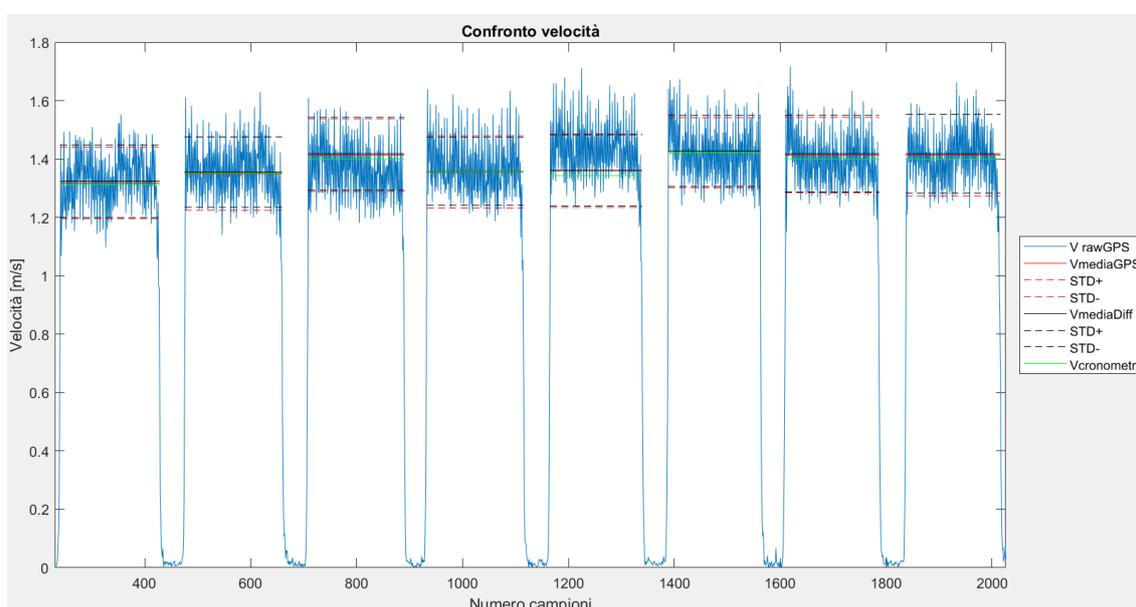


Figura 5.4 Confronto tra le due velocità medie ricavate da simpleRTK2B e quella ottenuta dalla misura del cronometro.

I risultati delle analisi statistiche, effettuate per tipologia di ritmo e unendo tutte e tre le diverse velocità utilizzate, sono mostrati in Tabella 2, dove vengono riportati, rispettivamente per la velocità fornita da simpleRTK2B e quella calcolata come derivata della posizione (“V derivata”), la media delle differenze, i limiti di agreement superiore ed inferiore, il SEM, il MDC e i coefficienti di correlazione e determinazione.

Origine del dato	Ritmo	Media Differenze (m/s)	LOA + (m/s)	LOA – (m/s)	SEM (m/s)	MDC (m/s)	R	R ²
<i>simpleRTK2B</i>	<i>Usuale</i>	-0.0083	0.0054	-0.0219	0.0049	0.0137	0.977	0.936
<i>V derivata</i>	<i>Usuale</i>	-0.0126	8.469e-04	-0.0260	0.0048	0.0134	0.938	0.880
<i>simpleRTK2B</i>	<i>Lento</i>	-0.0173	-0.0102	-0.0243	0.0025	0.0071	0.979	0.959
<i>V derivata</i>	<i>Lento</i>	-0.0203	-0.0128	-0.0278	0.0027	0.0075	0.979	0.959
<i>simpleRTK2B</i>	<i>Veloce</i>	-0.0016	0.0182	-0.0213	0.0071	0.0198	0.994	0.988
<i>V derivata</i>	<i>Veloce</i>	-0.0091	0.0111	-0.0294	0.0073	0.0202	0.988	0.977
<i>simpleRTK2B</i>	<i>Totale</i>	-0.0090	0.0100	-0.0281	0.0069	0.0190	0.997	0.993
<i>V derivata</i>	<i>Totale</i>	-0.0140	0.0031	-0.0311	0.0062	0.0171	0.998	0.996

Tabella 2 Analisi statistica prova di validazione con cronometro.

Dall'analisi di questi risultati si possono subito trarre alcune considerazioni. La prima è che le due velocità ricavabili da *simpleRTK2B* sono molto simili e in alcuni casi la derivata della posizione è migliore di quella calcolata dal ricevitore: questo potrebbe essere dovuto al fatto che il ricevitore utilizza comunque una tecnica differenziale RTK per stimare la posizione, e quindi risulta molto precisa. Questa similarità dei risultati è confermata anche dal *Wilcoxon rank sum test*, in quanto accetta l'ipotesi nulla in tutte e i quattro confronti, compreso quello totale, fra la velocità ricavata dal cronometro e le due calcolate dal ricevitore, con dei p-value pari a 0.6013 e 0.4704 rispettivamente per la velocità *simpleRTK2B* e quella derivata nel caso delle prove raggruppate.

Un secondo aspetto degno di nota è il fatto che in tutte le prove ci sia una tendenza da parte del ricevitore a sovrastimare la velocità media ricavata dal cronometro, poiché i grafici di Bland Altman sono stati calcolati sottraendo a quest'ultima il dato di *simpleRTK2B*. Questa considerazione è confermata dai risultati del *Wilcoxon signed rank test*, che rifiuta l'ipotesi nulla in tutte le prove ($p = 3.2167e-06$, velocità ricevitore), tranne per il caso della velocità *simpleRTK2B* nella prova veloce ($p = 0.7564$), considerando quindi la differenza tra le velocità non appartenente ad una distribuzione a mediana nulla.

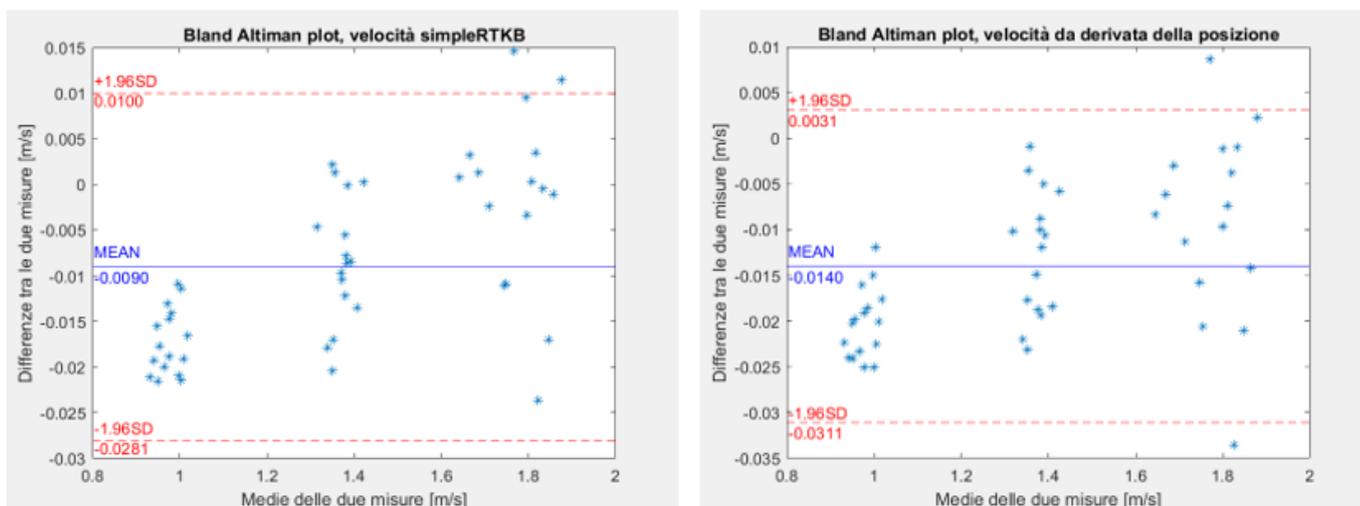


Figura 5.5 Grafici di Bland Altman complessivi della prova di validazione con cronometro.

Un risultato inaspettato è, inoltre, la tendenza del ricevitore ad effettuare una stima migliore e meno dispersa al diminuire della velocità (figura 5.5); questo comportamento è difatti insolito, in quanto generalmente i ricevitori GNSS aumentano la loro incertezza alle basse velocità.

Un ultimo aspetto che emerge da questa prova, riguarda i valori di SEM e MDC, i quali risultano notevolmente piccoli e sottintendono un errore medio e un'accuratezza migliore di quella dichiarata per il dispositivo (0.05 m/s). Una plausibile spiegazione per questi valori può essere ricercata sia nella tipologia di prova, in quanto la velocità confrontata è una media calcolata su un tratto di 50 m ad andatura costante, che tende a far convergere il valore medio a quello vero, sia dal tipo di strumento utilizzato per il confronto. Infatti, come Philippe Terrier et al. [42] sostengono nel loro lavoro, utilizzando dispositivi ad alta accuratezza e frequenze di campionamento maggiori di 1 Hz, gli strumenti tradizionali per il calcolo di tempo e distanza non possono più essere considerati un riferimento. Detto questo però, il cronometro risulta ancora uno strumento molto utilizzato per la misura delle velocità medie, anche all'aperto.

5.2 Prova di validazione con gold standard

Per quanto riguarda, invece, l'analisi dei dati della prova di validazione con il dispositivo gold standard, in figura 5.6 sono raffigurate le velocità medie ottenute con entrambe le metodologie, per la prima di ognuno dei quattro ritmi presenti nel protocollo sperimentale. Come si può notare, l'ultima prova, quella a ritmo casuale, ha due intervalli in meno, perché in fase di acquisizione due delle fotocellule hanno smesso di funzionare e quindi, i dati ottenuti per entrambi i test a questo ritmo non saranno più mediati lungo tratti della stessa lunghezza, ma verranno utilizzati due intervalli da 6.25 m e due da 12.5 m.

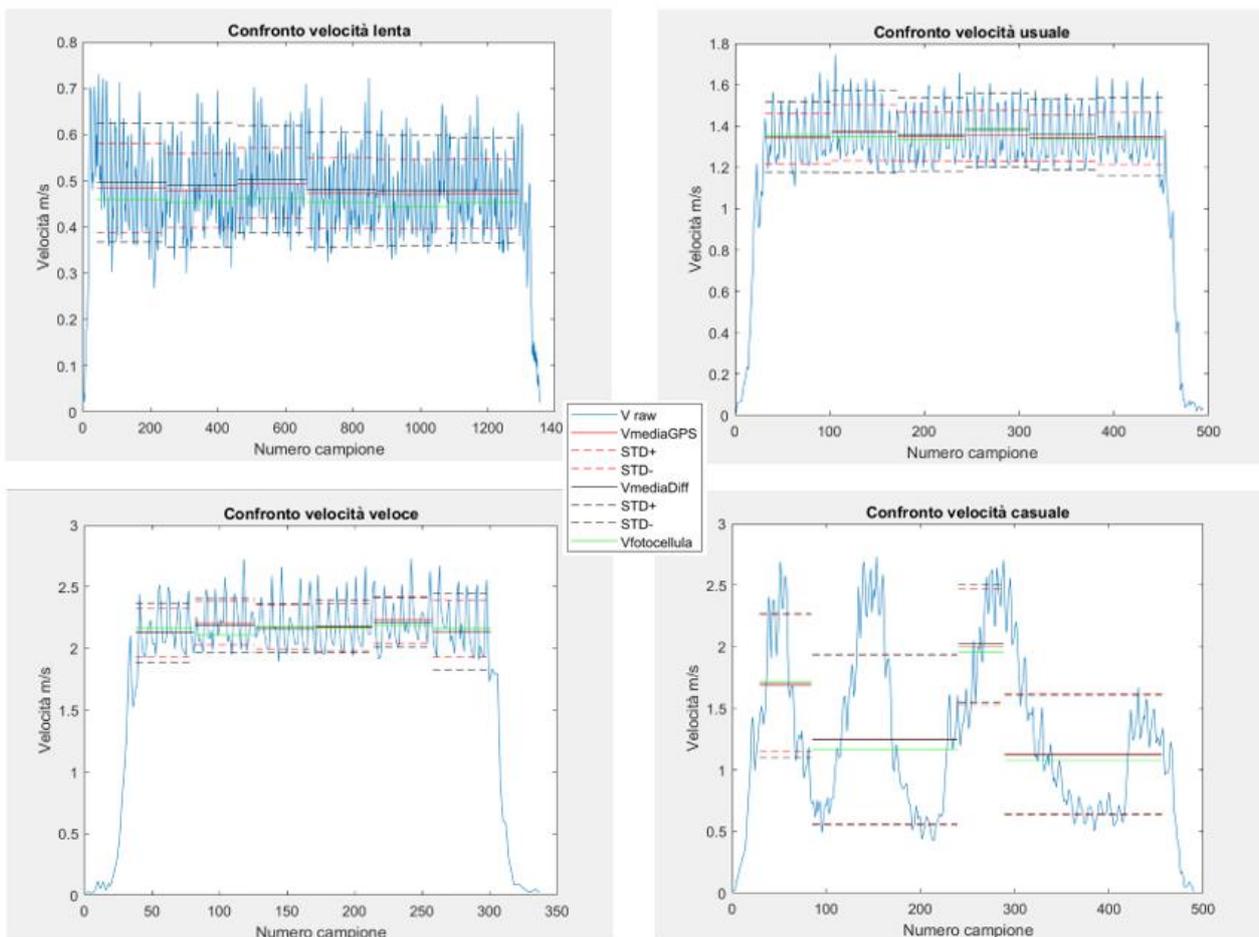


Figura 5.6 Confronto tra velocità medie della prima prova in ognuno dei quattro ritmi di cammino.

Anche visivamente i valori delle velocità medie ricavate dal ricevitore risultano piuttosto vicine a quelle misurate dal sistema di fotocellule, ma per un'analisi più approfondita verranno ora riassunti nella Tabella 3 i risultati dei test statistici condotti sui quattro ritmi, mostrando sia la velocità calcolata da simpleRTK2B che quella derivata dalla posizione; inoltre, verranno mostrati i risultati complessivi sia delle misure ottenute con il ricevitore in esame, sia quelle ottenute con il dispositivo GPEXE.

Origine del dato	Ritmo	Media Differenze (m/s)	LOA + (m/s)	LOA - (m/s)	SEM (m/s)	MDC (m/s)	R	R²
<i>simpleRTK2B</i>	<i>Usuale</i>	0.0019	0.0334	-0.0442	0.0113	0.0367	0.7217	0.5354
<i>V derivata</i>	<i>Usuale</i>	-0.0075	0.0292	-0.0292	0.0132	0.0315	0.6037	0.3645
<i>simpleRTK2B</i>	<i>Lento</i>	-0.0214	-0.0110	-0.0318	0.0038	0.0104	0.9422	0.8878
<i>V derivata</i>	<i>Lento</i>	-0.0299	-0.0186	-0.0412	0.0041	0.0113	0.9360	0.8761
<i>simpleRTK2B</i>	<i>Veloce</i>	-0.0139	0.0573	-0.0851	0.0257	0.0712	0.7979	0.6367
<i>V derivata</i>	<i>Veloce</i>	0.0047	0.0731	-0.0636	0.0247	0.0684	0.7876	0.6203
<i>simpleRTK2B</i>	<i>Casuale</i>	-0.0386	0.0402	-0.1174	0.0284	0.0788	0.9286	0.8622
<i>V derivata</i>	<i>Casuale</i>	-0.0405	0.0542	-0.1352	0.0342	0.0947	0.9762	0.9529
<i>simpleRTK2B</i>	<i>Totale</i>	-0.0147	0.0408	-0.0702	0.0200	0.0555	0.9821	0.9646
<i>V derivata</i>	<i>Totale</i>	-0.0147	0.0471	-0.0765	0.0223	0.0618	0.9799	0.9601
<i>GPEXE</i>	<i>Totale</i>	0.0454	0.1610	-0.0702	0.0417	0.1156	0.9687	0.9384

Tabella 3 Analisi statistica prova di validazione con gold standard.

I risultati ottenuti da questa prova confermano molti dei dati e delle ipotesi fatte precedentemente, consolidando alcuni di questi, essendo stato utilizzato in questo caso un dispositivo per la validazione più accurato e indipendente dall'azione umana. Prima di tutto è confermato il fatto che l'accuratezza sulla velocità media migliora utilizzando ritmi di camminata più lenti, essendo anche in questo caso la prova con SEM e MDC migliori, anche se questa prova è l'unica in cui il *Wilcoxon rank sum test* rifiuta l'ipotesi nulla (p -value = 0.0015 e 2.7793e-04 rispettivamente per velocità simpleRTK2B e derivata della posizione). Come era prevedibile, diminuendo le distanze percorse e utilizzando un gold

standard per la comparazione, il SEM e il MDC sono aumentati in tutte le prove, restando comunque inferiori nei primi due ritmi all'accuratezza di simpleRTK2B. Un dato interessante riguarda la prova a ritmo casuale, nettamente la peggiore delle quattro; sebbene calcolata su un numero di tratti diverso e di diversa lunghezza, questo peggioramento conferma l'ipotesi che degli errori così bassi siano dovuti al fatto di mantenere una velocità costante e mediare su un elevato numero di valori. In questo modo infatti l'accuratezza sulla stima migliora; non a caso, i risultati migliori si hanno nelle prove più lente dove, sebbene il ritmo sia costante come nelle altre prove, aumenta il numero di campioni su cui mediare. In ultimo, facendo riferimento sempre al ritmo casuale, la anormale differenza tra SEM e MDC nei due metodi di stima della velocità potrebbe suggerire che la derivata della posizione diminuisca la sua precisione se ci si discosta da un andamento costante. Per quanto riguarda invece il confronto con il GPS sportivo si nota come la sua accuratezza sia circa la metà di quella di simpleRTK2B; inoltre la velocità restituita da GPEXE LT è un dato pre-elaborato e filtrato da un algoritmo proprietario, di cui non si conosce il funzionamento. Resta comunque un ottimo GPS, non utilizzando una tecnica differenziale, e un dispositivo più ergonomico e compatto di simpleRTK2B, adatto all'applicazione sportiva.

L'elaborazione condotta su questa seconda prova (paragrafo 4.3.3) ha portato inoltre ad un interessante risultato, riguardo alla capacità di estrarre dai dati ottenuti da simpleRTK2B l'informazione sulla lunghezza del passo. Per meglio interpretare i risultati ottenuti e mostrati nelle figure 4.10 e 4.11, si è creato un plot 3D che unisce all'informazione sulla posizione, quella sulla velocità (figura 5.7a).

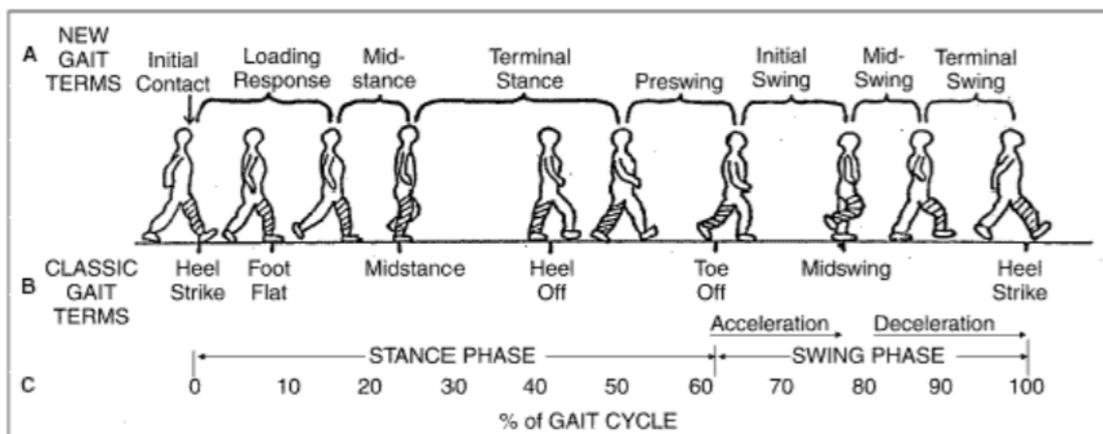
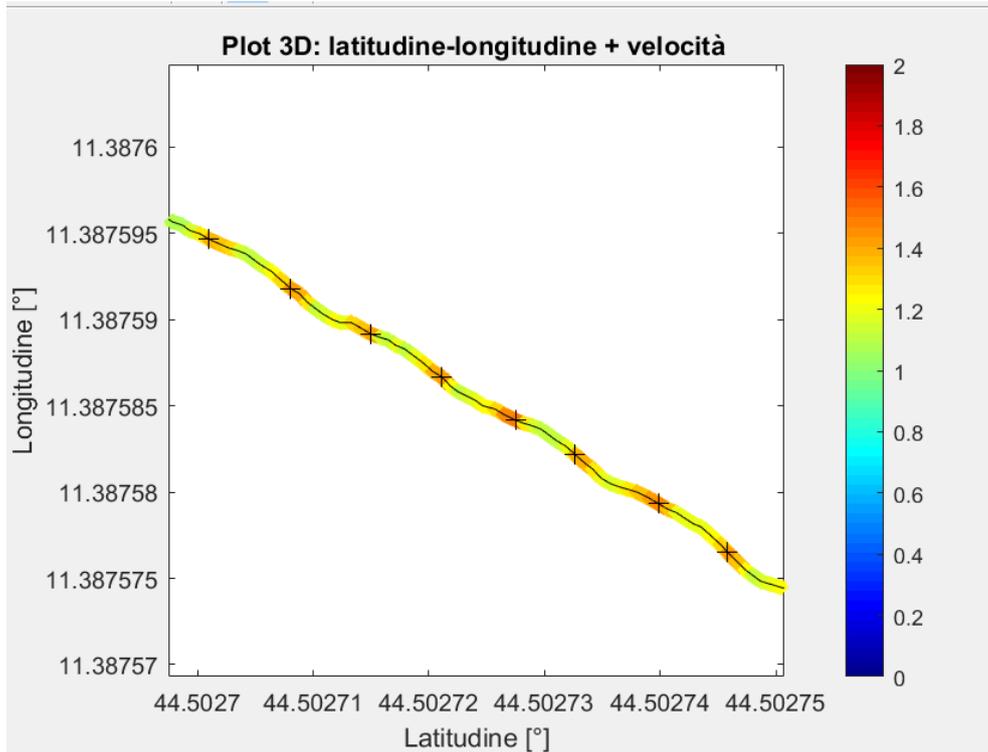


Figura 5.7 a) Visualizzazione dell'andamento della velocità lungo la traiettoria della posizione; b) schematizzazione dell'andamento del passo.

Durante il cammino, schematizzato in figura 5.7b, gli arti inferiori compiono un movimento ciclico che consente il progredire del corpo, mantenendo un assetto stabile; questa sequenza si compone di un'alternanza di fasi di appoggio e avanzamento dovuti ad una serie di interazioni tra il piede e il terreno. Durante un avanzamento rettilineo, il centro di massa corporeo, seguendo le oscillazioni periodiche del tronco, delinea una traiettoria sinusoidale nel piano trasverso [55], simile a quella misurata dal ricevitore simpleRTK2B. Analizzando l'andamento della velocità, è possibile interpretare il picco di quest'ultima, corrispondente ad un colore più caldo, come l'attimo in cui l'arto

inferiore effettua *il toe off*; infatti, è proprio in questo momento che si ha un'accelerazione che consente la fase di swing e l'avanzamento del corpo. Al termine della fase di swing, in corrispondenza del *heel strike* si ha una fase di decelerazione, corrispondente ai picchi della traiettoria sinusoidale (colore verde); difatti in quel momento, il corpo, e di conseguenza anche il CoM, è parzialmente inclinato verso il lato dell'arto che ha concluso la fase di swing. Potendo quindi interpretare i picchi sulla traiettoria come un atto del ciclo del passo, si è potuto calcolare la lunghezza del semipasso (e di conseguenza del passo); di seguito (Tabella 4) sono riportati i valori medi di lunghezza e distanza percorsa stimate in questo modo, insieme l'errore relativo compiuto sull'effettiva distanza di 39.5 m.

Ritmo	Semipasso medio (m)	Distanza stimata (m)	Errore relativo %
<i>Usuale</i>	0.7177	39.4711	0.0732
<i>Lenta</i>	0.3641	39.5473	0.12
<i>Veloce</i>	0.9803	0.9803	1.56
<i>Casuale</i>	0.7428	39.3673	0.34

Tabella 4 Valori medi sulla stima del passo.

Considerando l'altezza del soggetto (1.78 m) e la proporzione che quantifica la lunghezza del passo, come circa 80-90 % di questa misura, otteniamo un ipotetico passo di 1.51 m, molto simile a quello ottenuto moltiplicando per due la lunghezza dei semipassi delle prove a velocità usuale e casuale; nelle altre due va considerato il fatto di aver mantenuto una velocità al di fuori della norma.

I risultati delle due prove e il loro raggruppamento, che corrisponde ad un totale di 27 tratti in cui è stata stimata la velocità, sono mostrati nella Tabella 5.

Origine del dato	Prova	Media differenze velocità (m/s)	LOA + (m/s)	LOA – (m/s)	SEM (m/s)	MDC (m/s)	Errore relativo % sulla distanza
<i>simpleRTK2B</i>	<i>Prova 1</i>	0.0561	0.1358	0.0236	0.0202	0.0561	0.2421
<i>V derivata</i>	<i>Prova 1</i>	0.0357	0.0724	0.0011	0.0129	0.0368	
<i>simpleRTK2B</i>	<i>Prova 2</i>	0.0850	0.1836	-0.0135	0.0355	0.0985	1.00
<i>V derivata</i>	<i>Prova 2</i>	0.0294	0.1337	-0.0750	0.0376	0.1043	
<i>simpleRTK2B</i>	<i>Totale</i>	0.0827	0.1638	0.0015	0.0293	0.0811	-
<i>V derivata</i>	<i>Totale</i>	0.0327	0.1130	-0.0477	0.0290	0.0803	-

Tabella 5 Analisi statistica prova di validazione in ambiente urbano.

Questi risultati, seppur preliminari, poiché ricavati da un protocollo di acquisizione con molte componenti di variabilità al di fuori del nostro controllo, mostrano una conferma dal punto di vista dell'accuratezza nella stima della velocità media anche in un ambiente non ottimale. Anche dal punto di vista della stima della distanza totale, il ricevitore *simpleRTK2B* si comporta molto bene, con un errore minore dell'1%. Un aspetto da considerare è l'esclusione di uno degli intervalli nella prima prova, in quanto, a seguito di un tratto di circa 30 m all'interno di un edificio, il ricevitore, avendo perso il segnale, ha fornito una stima della velocità notevolmente affetta da errore.

Capitolo 6 – CONCLUSIONI

Lo scopo di questo lavoro di tesi è consistito nell'elaborare un protocollo di validazione che mirasse alla stima dell'accuratezza di un sistema GNSS-RTK multibanda a basso costo per la misura della velocità del cammino, utilizzando il ricevitore simpleRTK2B prodotto dall'azienda ArduSimple. Per via della strumentazione a disposizione è stata possibile una validazione della sola velocità media, essendo comunque quest'ultima il principale parametro in studi che mirano alla misura della velocità del cammino. I risultati ottenuti sono molto promettenti, in quanto si è ottenuto un errore medio nella misura pari a 0.021 (SD 0.0016) m/s, e una variazione minima rilevabile di 0.059 (SD 0.0045) m/s, considerando i valori totali della prova di validazione con gold standard effettuata in condizioni ottimali. Anche nel test in ambiente urbano simpleRTK2B ha dimostrato, seppur non riuscendo a mantenere una soluzione di qualità RTK in luoghi con visibilità del cielo parzialmente limitata, di ottenere un SEM pari a 0.0265 (SD 0.012) m/s e una MDC di 0.0739 (SD 0.033) m/s. I valori ottenuti riguardo alla capacità di distinguere cambiamenti significativi rientrano nelle soglie suggerite dallo studio di Perera et al. [56] corrispondenti a 0.05 m/s e 0.1 m/s, rispettivamente riguardo alla detezione di piccole e sostanziali variazioni nella velocità. In quest'ultimo caso non è infatti necessario porsi nelle condizioni ottimali di visuale del cielo libera da ostacoli.

L'utilizzo di un ricevitore GPS/GNSS come simpleRTK2B in studi sul cammino al di fuori dall'ambiente clinico permette di ottenere, oltre al dato sulla velocità, il tempo e la distanza percorsa, anche informazioni riguardo al tipo di percorso effettuato, utilizzabile ad esempio in studi epidemiologici o per una possibile interpretazione di un dato anormale. Infine, come è stato dimostrato, consente anche una stima della lunghezza del passo piuttosto accurata, svincolandosi da complesse procedure di inizializzazione e analisi dei dati tipiche di altri dispositivi (es. IMU).

Una possibile limitazione di questo lavoro riguarda principalmente il fatto di non aver effettuato una caratterizzazione sul dato di velocità istantanea, utilizzando ad esempio un sistema stereofotogrammetrico. Sebbene di minor interesse clinico rispetto a quella media, considerando il cammino di una persona generalmente costante lungo distanze simili a quelle qui utilizzate, lo studio della velocità istantanea avrebbe permesso una

stima sull'accuratezza che non risentisse del calcolo della media; essendo quest'ultima influenzata dal numero di campioni, il suo effetto varia in base alla distanza percorsa, la frequenza di campionamento e la velocità utilizzata (nel caso di prove a lunghezza costante). Oltre a questo, l'utilizzo di un solo soggetto, seppur su prove ripetute, può essere considerata una limitazione soprattutto riguardo al range di velocità misurate, in quanto nel nostro caso il soggetto ha dovuto simulare diversi ritmi di camminata snaturando il proprio.

Questo lavoro di tesi può essere comunque considerato un primo approccio all'utilizzo di questa nuova categoria di ricevitori, accessibili ora al consumatore medio, per la stima della velocità del cammino. Per una completa valutazione delle potenzialità e possibile utilizzo di questi strumenti (es. simpleRTK2B) applicati alla clinica, servono indubbiamente molti altri studi condotti in ambienti più controllati, con protocolli e strumentazioni differenti. Inoltre, è necessaria una indagine più approfondita delle possibili configurazioni e filtraggi concessi da simpleRTK2B, come d'altronde la possibilità di potersi creare un proprio sistema base-ricevitore che consenta di diminuire i 20 km di distanza dalla stazione di Medicina o sopperirne la mancanza.

BIBLIOGRAFIA

- [1] S. Studenski, «Bradypedia: is gait speed ready for clinical use?», *J. Nutr. Health Aging*, vol. 13, n. 10, pagg. 878–880, dic. 2009.
- [2] S. Fritz e M. Lusardi, «White paper: “walking speed: the sixth vital sign”», *J. Geriatr. Phys. Ther.* 2001, vol. 32, n. 2, pagg. 46–49, 2009.
- [3] J. M. Hausdorff *et al.*, «Etiology and modification of gait instability in older adults: a randomized controlled trial of exercise», *J. Appl. Physiol.*, vol. 90, n. 6, pagg. 2117–2129, giu. 2001.
- [4] L. Ferrucci *et al.*, «Subsystems contributing to the decline in ability to walk: bridging the gap between epidemiology and geriatric practice in the InCHIANTI study», *J. Am. Geriatr. Soc.*, vol. 48, n. 12, pagg. 1618–1625, dic. 2000.
- [5] G. Abellan van Kan *et al.*, «Gait speed at usual pace as a predictor of adverse outcomes in community-dwelling older people an International Academy on Nutrition and Aging (IANA) Task Force», *J. Nutr. Health Aging*, vol. 13, n. 10, pagg. 881–889, dic. 2009.
- [6] S. E. Hardy, S. Perera, Y. F. Roumani, J. M. Chandler, e S. A. Studenski, «Improvement in Usual Gait Speed Predicts Better Survival in Older Adults: GAIT SPEED GAIN PREDICTS SURVIVAL», *J. Am. Geriatr. Soc.*, vol. 55, n. 11, pagg. 1727–1734, nov. 2007.
- [7] S. Studenski, «Gait Speed and Survival in Older Adults», *JAMA*, vol. 305, n. 1, pag. 50, gen. 2011.
- [8] J. E. Graham, G. V. Ostir, S. R. Fisher, e K. J. Ottenbacher, «Assessing walking speed in clinical research: a systematic review», *J. Eval. Clin. Pract.*, vol. 14, n. 4, pagg. 552–562, ago. 2008.
- [9] H. Kim, I. Park, H. joo Lee, e O. Lee, «The reliability and validity of gait speed with different walking pace and distances against general health, physical function, and chronic disease in aged adults», *J. Exerc. Nutr. Biochem.*, vol. 20, n. 3, pagg. 46–50, set. 2016.
- [10] J. E. Graham, G. V. Ostir, Y.-F. Kuo, S. R. Fisher, e K. J. Ottenbacher, «Relationship Between Test Methodology and Mean Velocity in Timed Walk Tests: A Review», *Arch. Phys. Med. Rehabil.*, vol. 89, n. 5, pagg. 865–872, mag. 2008.
- [11] T. M. Steffen, T. A. Hacker, e L. Mollinger, «Age- and gender-related test performance in community-dwelling elderly people: Six-Minute Walk Test, Berg Balance Scale, Timed Up & Go Test, and gait speeds», *Phys. Ther.*, vol. 82, n. 2, pagg. 128–137, feb. 2002.
- [12] M. Montero-Odasso *et al.*, «Gait velocity as a single predictor of adverse events in healthy seniors aged 75 years and older», *J. Gerontol. A. Biol. Sci. Med. Sci.*, vol. 60, n. 10, pagg. 1304–1309, ott. 2005.
- [13] M. G. Bowden, C. K. Balasubramanian, A. L. Behrman, e S. A. Kautz, «Validation of a Speed-Based Classification System Using Quantitative Measures of Walking Performance Poststroke», *Neurorehabil. Neural Repair*, vol. 22, n. 6, pagg. 672–675, nov. 2008.
- [14] M. H. Rabadi e A. Blau, «Admission ambulation velocity predicts length of stay and discharge disposition following stroke in an acute rehabilitation hospital», *Neurorehabil. Neural Repair*, vol. 19, n. 1, pagg. 20–26, mar. 2005.

- [15] N. M. Salbach, N. E. Mayo, J. Higgins, S. Ahmed, L. E. Finch, e C. L. Richards, «Responsiveness and predictability of gait speed and other disability measures in acute stroke», *Arch. Phys. Med. Rehabil.*, vol. 82, n. 9, pagg. 1204–1212, set. 2001.
- [16] C. L. Muñoz-Mendoza, J. Cabrero-García, A. Reig-Ferrer, M. J. Cabañero-Martínez, e carmen munoz, «Evaluation of walking speed tests as a measurement of functional limitations in elderly people : A structured review», 2010.
- [17] M. B. van Iersel, M. Munneke, R. A. J. Esselink, C. E. M. Benraad, e M. G. M. Olde Rikkert, «Gait velocity and the Timed-Up-and-Go test were sensitive to changes in mobility in frail elderly patients», *J. Clin. Epidemiol.*, vol. 61, n. 2, pagg. 186–191, feb. 2008.
- [18] A. B. Newman *et al.*, «Association of long-distance corridor walk performance with mortality, cardiovascular disease, mobility limitation, and disability», *JAMA*, vol. 295, n. 17, pagg. 2018–2026, mag. 2006.
- [19] N. M. Peel, S. S. Kuys, e K. Klein, «Gait Speed as a Measure in Geriatric Assessment in Clinical Settings: A Systematic Review», *J. Gerontol. Ser. A*, vol. 68, n. 1, pagg. 39–46, gen. 2013.
- [20] C. Carvalho, K. S. Sunnerhagen, e C. Willén, «Walking speed and distance in different environments of subjects in the later stage post-stroke», *Physiother. Theory Pract.*, vol. 26, n. 8, pagg. 519–527, nov. 2010.
- [21] B. H. Dobkin, «Short-distance walking speed and timed walking distance: redundant measures for clinical trials?», *Neurology*, vol. 66, n. 4, pagg. 584–586, feb. 2006.
- [22] A. Middleton, G. D. Fulk, T. M. Herter, M. W. Beets, J. Donley, e S. L. Fritz, «Self-Selected and Maximal Walking Speeds Provide Greater Insight Into Fall Status Than Walking Speed Reserve Among Community-Dwelling Older Adults»:., *Am. J. Phys. Med. Rehabil.*, vol. 95, n. 7, pagg. 475–482, lug. 2016.
- [23] G. H. Guyatt *et al.*, «The 6-minute walk: a new measure of exercise capacity in patients with chronic heart failure», *Can. Med. Assoc. J.*, vol. 132, n. 8, pagg. 919–923, apr. 1985.
- [24] J. P. Stellmann *et al.*, «Ecological Validity of Walking Capacity Tests in Multiple Sclerosis», *PLOS ONE*, vol. 10, n. 4, pag. e0123822, apr. 2015.
- [25] D. Brooks, S. Solway, K. Weinacht, D. Wang, e S. Thomas, «Comparison between an indoor and an outdoor 6-minute walk test among individuals with chronic obstructive pulmonary disease»11No commercial party having a direct financial interest in the results of the research supporting this article has or will confer a benefit upon the author(s) or upon any organization with which the author(s) is/are associated., *Arch. Phys. Med. Rehabil.*, vol. 84, n. 6, pagg. 873–876, giu. 2003.
- [26] K. Donovan, S. E. Lord, H. K. McNaughton, e M. Weatherall, «Mobility beyond the clinic: the effect of environment on gait and its measurement in community-ambulant stroke survivors», *Clin. Rehabil.*, vol. 22, n. 6, pagg. 556–563, giu. 2008.
- [27] D. Taylor, C. M. Stretton, S. Mudge, e N. Garrett, «Does clinic-measured gait speed differ from gait speed measured in the community in people with stroke?», *Clin. Rehabil.*, vol. 20, n. 5, pagg. 438–444, mag. 2006.
- [28] Willen, «Walking Speed Indoors and Outdoors in Healthy Persons and in Persons With Late Effects of Polio», *J. Neurol. Res.*, 2013.
- [29] S. Yang e Q. Li, «Inertial Sensor-Based Methods in Walking Speed Estimation: A Systematic Review», *Sensors*, vol. 12, n. 5, pagg. 6102–6116, mag. 2012.

- [30] P. Terrier e Y. Schutz, «How useful is satellite positioning system (GPS) to track gait parameters? A review», *J. NeuroEngineering Rehabil.*, vol. 2, n. 1, pag. 28, 2005.
- [31] J. Sanz Subirana, J. M. Juan Zornoza, e M. Hernández-Pajares, *Fundamentals and algorithms. Vol. 1. Vol. 1.* Noordwijk: ESA Communications, 2013.
- [32] «GPS.gov: New Civil Signals». [In linea]. Available at: <https://www.gps.gov/systems/gps/modernization/civilsignals/>. [Consultato: 21-mag-2019].
- [33] M. Karaim, M. Elsheikh, e A. Noureldin, «GNSS Error Sources», in *Multifunctional Operation and Application of GPS*, R. B. Rustamov e A. M. Hashimov, A c. di InTech, 2018.
- [34] «GNSS Augmentation - Navipedia». [In linea]. Available at: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GNSS_Augmentation. [Consultato: 17-mag-2019].
- [35] Keskin Muharrem, «An Overview of GNSS and GPS based Velocity Measurement in Comparison to Other Techniques». dic-2018.
- [36] Y. Schutz e A. Chambaz, «Could a satellite-based navigation system (GPS) be used to assess the physical activity of individuals on earth?», *Eur. J. Clin. Nutr.*, vol. 51, pagg. 338–9, mag. 1997.
- [37] G. Klous *et al.*, «Mobility assessment of a rural population in the Netherlands using GPS measurements», *Int. J. Health Geogr.*, vol. 16, n. 1, pag. 30, dic. 2017.
- [38] R. Maddison, Y. Jiang, S. vander Hoorn, D. J. Exeter, C. N. Mhurchu, e E. Dorey, «Describing patterns of physical activity in adolescents using global positioning systems and accelerometry.», *Pediatr. Exerc. Sci.*, vol. 22, n. 3, pagg. 392–407, 2010.
- [39] P.-Y. de Müllenheim *et al.*, «Using GPS, accelerometry and heart rate to predict outdoor graded walking energy expenditure», *J. Sci. Med. Sport*, vol. 21, n. 2, pagg. 166–172, feb. 2018.
- [40] M. Gernigon, A. Fouasson-Chailloux, C. Colas-Ribas, B. Noury-Desvaux, A. Le Faucheur, e P. Abraham, «Test-retest Reliability of GPS derived Measurements in Patients with Claudication», *Eur. J. Vasc. Endovasc. Surg.*, vol. 50, n. 5, pagg. 623–629, nov. 2015.
- [41] A. Le Faucheur, P. Abraham, V. Jaquinandi, P. Bouyé, J. L. Saumet, e B. Noury-Desvaux, «Measurement of Walking Distance and Speed in Patients With Peripheral Arterial Disease: A Novel Method Using a Global Positioning System», *Circulation*, vol. 117, n. 7, pagg. 897–904, feb. 2008.
- [42] P. Terrier, Q. Ladetto, B. Merminod, e Y. Schutz, «High-precision satellite positioning system as a new tool to study the biomechanics of human locomotion», *J. Biomech.*, vol. 33, n. 12, pagg. 1717–1722, dic. 2000.
- [43] P. Terrier, V. Turner, e Y. Schutz, «GPS analysis of human locomotion: Further evidence for long-range correlations in stride-to-stride fluctuations of gait parameters», *Hum. Mov. Sci.*, vol. 24, n. 1, pagg. 97–115, feb. 2005.
- [44] A. D. Townshend, C. J. Worringham, e I. B. Stewart, «Assessment of Speed and Position during Human Locomotion Using Nondifferential GPS»: *Med. Sci. Sports Exerc.*, vol. 40, n. 1, pagg. 124–132, gen. 2008.
- [45] B. Noury-Desvaux, P. Abraham, G. Mahé, T. Sauvaget, G. Leftheriotis, e A. Le Faucheur, «The Accuracy of a Simple, Low-Cost GPS Data Logger/Receiver to Study Outdoor Human Walking in View of Health and Clinical Studies», *PLoS ONE*, vol. 6, n. 9, pag. e23027, set. 2011.

- [46] M. Schimpl, C. Lederer, e M. Daumer, «Development and Validation of a New Method to Measure Walking Speed in Free-Living Environments Using the Actibelt® Platform», *PLoS ONE*, vol. 6, n. 8, pag. e23080, ago. 2011.
- [47] «ZED-F9P_DataSheet_(UBX-17051259).pdf». .
- [48] «simpleRTK2B multiband RTK application board with u-blox ZED-F9P», *ArduSimple*. .
- [49] «simpleRTK2B hookup guide», *ArduSimple*. .
- [50] «RTCM - General Overview», *Radio Technical Commission for Maritime Services*. [In linea]. Available at: <http://rtcm.org/about.html>. [Consultato: 01-lug-2019].
- [51] E. Lenz, «Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (NTRIP) – Application and Benefit in Modern Surveying Systems», pag. 11, 2004.
- [52] «Interface Manual ZED-F9P UBX NMEA and RTCM protocols». .
- [53] M. W. Hoppe, C. Baumgart, T. Polglaze, e J. Freiwald, «Validity and reliability of GPS and LPS for measuring distances covered and sprint mechanical properties in team sports», *PLOS ONE*, vol. 13, n. 2, pag. e0192708, feb. 2018.
- [54] «Decimal degrees», *Wikipedia*. 20-giu-2019.
- [55] Md. Akhtaruzzaman, A. A. Shafie, e Md. R. Khan, «GAIT ANALYSIS: SYSTEMS, TECHNOLOGIES, AND IMPORTANCE», *J. Mech. Med. Biol.*, vol. 16, n. 07, pag. 1630003, nov. 2016.
- [56] S. Perera, S. H. Mody, R. C. Woodman, e S. A. Studenski, «Meaningful Change and Responsiveness in Common Physical Performance Measures in Older Adults: MEANINGFUL CHANGE AND PERFORMANCE», *J. Am. Geriatr. Soc.*, vol. 54, n. 5, pagg. 743–749, mag. 2006.

RINGRAZIAMENTI

Alcuni ringraziamenti al termine di questo lungo percorso che ha portato al compimento di questo lavoro di tesi sono più che doverosi.

In primis ci tengo a ringraziare il professor Chiari che con pazienza mi ha aiutato e sostenuto di fronte ai numerosi ostacoli sorti durante lo svolgimento e la stesura di questo lavoro; inoltre, ringrazio i miei correlatori Sabato e Luca per l'aiuto che mi hanno dato in questi mesi.

Un ringraziamento speciale va ad Elena che in più occasioni si è resa disponibile ad aiutarmi e senza di cui, non so se sarei riuscito nell'impresa di comprare il dispositivo simpleRTK2B.

Infine, ci tengo a ringraziare anche la professoressa Fantozzi e Federico per la strumentazione utilizzata e per la disponibilità con un così breve preavviso.