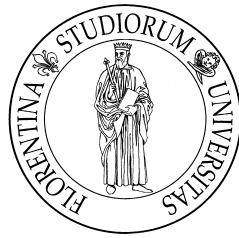


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI FIRENZE
Facoltà di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali
Corso di Laurea Specialistica in Scienze e Tecnologie
dell'Informazione



Tesi di Laurea

METODI DI APPRENDIMENTO AUTOMATICO
PER L'ANALISI IN LINEA DELLA
DEAMBULAZIONE: SVILUPPO E VALUTAZIONE
DI UN APPLICATIVO PER SMARTPHONE

AHADU TSEGAYE

Relatore *Prof. Angelo Maria Sabatini*

Co-Relatore *Prof. Maria Cecilia Verri*

Anno Accademico 2010-2011

Revisione 4.15

INDICE

	Pagina
1 Sommario	1
<hr/>	
PARTE i Stato dell'arte	
2 Introduzione	5
3 Cenni alla Chinesiologia	7
3.1 Analisi dei movimenti del corpo umano	7
3.2 L'andatura durante la deambulazione	9
3.3 Breve storia dello studio della deambulazione umana	9
3.4 Ciclo di deambulazione (Gait Cycle)	10
3.4.1 Confronto fra Falcata (Stride) e Passo (Step)	11
3.5 Parametri che descrivono il pattern (schema) della deambulazione	12
4 Lo stato dell'arte	15
4.1 Materiali	15
4.1.1 Osservazione diretta del paziente	15
4.1.2 Stereofotogrammetria	15
4.1.3 Sensori Inerziali	15
4.2 Metodi	21
4.2.1 Analisi	21
<hr/>	
PARTE ii Lavoro svolto	
5 Materiali e Metodi	25
5.1 Introduzione	25
5.2 Creazione ed addestramento del modello	25
5.2.1 Dati	25
6 Applicazione Android	31
6.1 Introduzione	31
6.2 Metodologia di programmazione usata: Agile e Unit Test	32
6.3 Organizzazione del programma	35
6.3.1 Android Manifest	35
6.3.2 Codice sorgente	36
6.3.3 Risorse	36
6.3.4 Librerie	39
6.4 Funzionamento	39
6.4.1 Interfaccia	39
6.4.2 Comunicazione Bluetooth	39
6.4.3 Gestione della connessione	39
6.4.4 Gestione Thread	41
7 Validazione	49
8 Risultati e Conclusioni	51
<hr/>	
PARTE iii Appendice	
A Sulle HMM	55

A.1 Problema: Modellare segnali	55
A.2 Processi di Markov	56
A.2.1 Tempo e spazio discreti	57
A.3 HMM	58
A.3.1 HMM ad emissioni continue	59
A.3.2 Tipi di HMM	59
A.4 Tre problemi per le HMM	60
A.4.1 Algoritmo di Viterbi in Tempo Reale	62
A.5 Problemi di implementazione di HMM	65
B Tempo Reale, In Linea, Latenza	69
B.1 Tempo Reale	69
B.2 Algoritmi in linea	69
B.3 Latenza	70
C Cenni di Meccanica classica	71
C.1 Cinematica	71
C.1.1 Moto rettilineo di una particella	71
C.2 Moto Angolare di una particella	72
C.3 Dinamica (Cinetica)	73
D Sensori	75
D.1 Accelerometro	75
D.2 Giroscopio	75
D.3 Magnetometro	75
D.4 IMU	76
E Su Android	79
E.1 Android OS	79
E.1.1 Linux Kernel	79
E.1.2 Librerie Native Android	81
E.1.3 Tempo di esecuzione di Android: Dalvik	81
E.1.4 Application Framework	83
E.1.5 Applications	83
E.1.6 Struttura di un Android App	83
E.2 Le componenti principali di un Applicativo Andorid	83
E.2.1 Activity	84
E.2.2 Intent	85
E.2.3 Servizi	85
E.2.4 Content Provider	85
E.3 Broadcast Receiver	86
E.4 Application Context	86
E.5 Intefaccia Utenti (UI)	86
E.5.1 Layout XML	87
E.5.2 Eventi di Input	87
E.5.3 Menu	87
E.5.4 Barra delle Azioni	87
E.5.5 Dialoghi	87

SOMMARIO

[*TODO: riscrivere alla fine*]

In questo lavoro si affronta il problema dell'analisi della deambulazione umana mediante l'uso di sensori indossabili e dispositivi di computazione portabili smartphone.

Parte I

STATO DELL'ARTE

INTRODUZIONE

Ipotesi: è possibile costruire un sistema intelligente e portatile in grado di riconoscere e monitorare i movimenti di un individuo e di fornirne informazioni a riguardo in tempo reale (vedi B.1). Per ridurre la complessità del problema di riconoscimento di un movimento generico, prendiamo in considerazione solo gli arti inferiori nella deambulazione entro un intervallo di velocità e pendenza del terreno.

A questo punto si tratta di riconoscere le 8 fasi della deambulazione normale studiate dalla Chinesiologia (vedi capitolo 3), vale a dire il problema della *segmentazione automatica in tempo reale della deambulazione umana*.

La soluzione del problema qui menzionato, avrebbe risvolti immediati in Medicina per la riabilitazione per la diagnosi e/o assistenza a persone con problemi di deambulazione, nella Robotica e Computer Grafica per la emulazione/simulazione della deambulazione umana, nel mondo dello sport agonistico per l'apprendimento di specifiche tecniche motorie ed in innumerevoli altri settori.

Il problema della segmentazione della deambulazione è stato ampiamente affrontato in letteratura e con svariate combinazioni di materiali e metodi.

Per quanto riguarda i materiali, sono state proposte soluzioni parziali che si basano semplicemente sull'osservazione diretta di un fisiatra oppure su strumenti ottici, basati su sistemi di telecamere e marker (segnali riconoscibili dalle telecamere); strumenti inerziali, basati su sensori fisici: accelerometri, giroscopi, elettromagnetometri ecc. Questi ultimi sono stati posizionati in svariate parti del corpo ed in diverse combinazioni.

Per quanti riguarda i metodi, gli ambiti scientifici nei quali viene affrontato il problema spaziano dalla Cinematica per lo studio delle forze, all'Analisi Matematica per lo studio di curve, alle Macchine a stati finiti per lo studio di sequenze temporali, e più di recente all'Apprendimento Automatico per la capacità di astrarre sulle differenze individuali nel compiere qualsiasi azione.

Nonostante il vasto numero di lavori, non è ancora stata data una soluzione soddisfacente al problema. Tutti i metodi proposti peccano di dipendenza dagli strumenti che usano, vale a dire che variando questi ultimi, variano le prestazioni dei metodi e di dipendenza dai soggetti sui quali vengono fatti gli esperimenti. Questo significa che le soluzioni sin ora proposte sono fatte su misura per specifici casi.

Il nostro obiettivo è creare un metodo che dipenda il meno possibile dai materiali, che tenga conto della variabilità interpersonale e che abbia una complessità computazionale abbastanza bassa da poter essere usato su uno Smartphone.

Le nostre scelte sono quindi cadute su pochi sensori semplici per la raccolta dei dati e sulle HMM (Hidden Markov Models vedi appendice A.3) per gestire la componente temporale, creando così un sistema a efficace basso costo, portatile, semplice da utilizzare e .

CENNI ALLA CHINESIOLOGIA

κίνησις (kinēsis): mobilità,
 λογία (logia): studio di

Lo studio dei principi su cui si fondano la meccanica e l'anatomia del movimento umano.

www.merriam-webster.com[1]

La Chinesiologia studia il movimento umano sotto diversi aspetti: biomeccanico, del controllo motorio e della psicologia del moto.

L'approccio biomeccanico [2] consiste nell'applicazione dei principi della Meccanica allo studio di organismi viventi: principalmente proprietà fisiche di materiali biologici, segnali biologici, modellazioni e simulazioni biomeccaniche.

Per restringere l'ambito, noi ci concentriamo sulle interazioni biomeccaniche dell'apparato locomotore (scheletro e muscoli). La branca della Meccanica Classica (vedi appendice C) che viene utilizzata dalla Biomeccanica è la Cinematica [3] che si occupa di descrivere la posizione ed il moto di oggetti nello spazio, senza riferimento alle forze o masse coinvolte (vale a dire alle cause e agli effetti di tale moto).

3.1 ANALISI DEI MOVIMENTI DEL CORPO UMANO

Per un trattamento rigoroso dei movimenti del corpo umano, è necessario stabilire dei piani di riferimento, lungo i quali collocare le diverse parti del corpo (vedi figura 1).

Definizione 1 (Piani che tagliano il corpo umano). I movimenti del corpo umano vengono descritti in riferimento a tre piani:

1. **Frontale o Coronale:** piano verticale che divide il corpo in parte anteriore e posteriore.
2. **Sagittale:** piano verticale che divide il corpo in parte sinistra e destra.
3. **Trasversale o Orizzontale:** piano orizzontale che divide il corpo in parte superiore ed inferiore.

Ad esempio la deambulazione o corsa avviene principalmente lungo il piano sagittale, sollevare le braccia lateralmente comporta un movimento sul piano frontale, mentre la rotazione della testa per guardarsi intorno avviene principalmente lungo il piano trasversale.

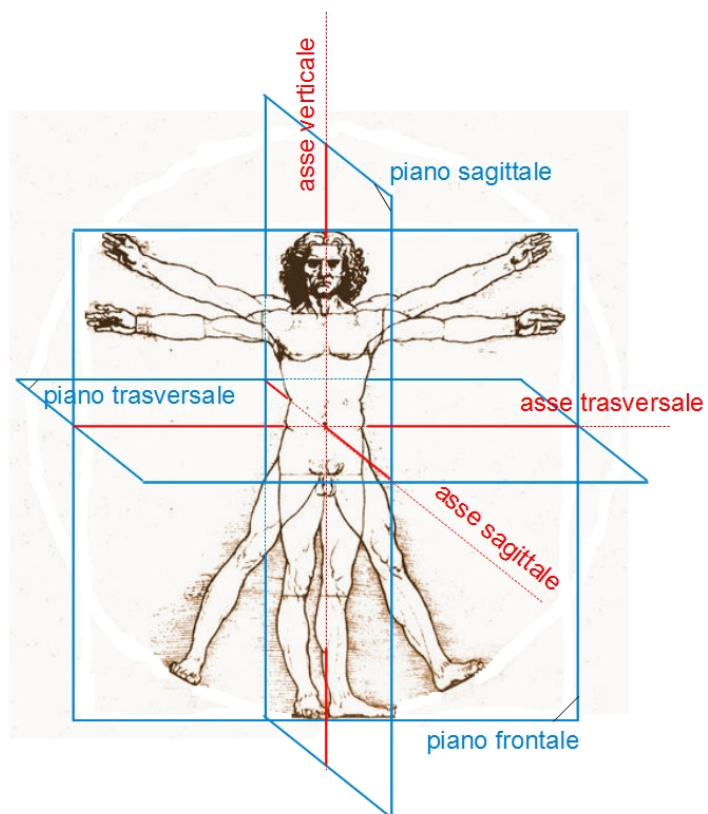


Figura 1.: Immagine riadattata. Originale cortesia di <http://sciencephoto.com>

3.2 L'ANDATURA DURANTE LA DEAMBULAZIONE

Viene definita Andatura (Gait) la sequenza di movimenti degli arti inferiori che un animale compie su una superficie solida durante la locomozione [4]. Gli animali possiedono diverse forme di andatura che scelgono in base alla velocità, ed al terreno ed ad altre variabili.

La Deambulazione (o Camminata) è una delle principali forme di andatura degli animali aventi arti inferiori ed avviene tipicamente a velocità inferiore a quelle della Corsa (che a sua volta è una forma di locomozione).

Definizione 2 (Deambulazione Normale). Una Deambulazione normale (negli esseri umani) è composta di due macro fasi per ciascun piede:

1. fase di appoggio (Stance), in cui il piede supporta tutto il peso del corpo e
2. Fase in aria (Swing), in cui il piede è in aria e porta avanti il baricentro del corpo, mentre il peso del corpo è sull'altro piede.

I due arti inferiori sono sempre alternativamente nelle due fasi e per circa il 25% del tempo sono in contatto simultaneo con il pavimento.

3.3 BREVE STORIA DELLO STUDIO DELLA DEAMBULAZIONE UMANA

Un primissimo contributo allo studio dell'andatura umana è stato dato dai fratelli Wilhelm Weber, fisico, e Eduard Weber, anatomista. I Weber, nel loro libro *The Mechanics of Human Motions* [5], pubblicato nel 1836, definiscono e misurano per la prima volta la durata delle fasi della Deambulazione Normale (vedi definizione 2), usando solamente un cronometro ed un telescopio con una scala.

Un grande contributo a questo campo è stato dato dal fisiologo francese Étienne Jules Marey, che nel 1873 pubblicò il trattato *Animal Mechanism: a Treatise on Terrestrial and Aerial Locomotion* dove con l'uso di scarpe a camera d'aria collegate a un registratore e della Cronofotografia Geometrica¹ e con l'uso di soggetti vestiti con abiti aderenti e neri con bottoni di metallo e strisce riflettenti, riuscì a misurare la durata del contatto del piede con il suolo, durante la camminata in piano, su un terreno regolare. Inoltre egli introdusse il concetto dell'efficienza energetica del movimento.

Il fotografo inglese Edward Muybridge, nel 1887 con l'uso della fotografia seriale, con 48 fotocamere elettriche sincronizzate riuscì a catturare la fase in volo di un cavallo al galoppo.

L'anatomista tedesco Wilhelm Braune, ed il matematico tedesco Otto Fisher, negli anni 1890, con l'uso di un sistema a 4 fotocamere, un tubo luminoso attaccato al corpo ripreso ed un sistema di riferimento rettangolare, riuscirono a analizzare per la prima volta l'andatura in 3D ed a stabilire i metodo per il calcolo dei parametri meccanici dello stesso.

Nel 1938 Elftman e 20 anni dopo Frankel diedero grossi contributi agli studi di tipo cinetico sul passo normale e patologico².

M.P. Murray, negli anni '60, con l'uso della fotografia a luce interrotta e più tardi

¹ più riprese fotografiche vengono impresse sulla stessa fotografia, in modo che possa essere ripresa una sequenza di azioni della persona. Si tratta di un antenato della cinepresa.

² passo affetto da una qualunque tipo di deformazione rispetto al passo normale

con il sistema 3D, diede dei contributi allo studio cinetico in pazienti normali e patologici.

J Perry con l'uso di goniometri elettronici monoassiali ha sviluppato un nuovo sistema di terminologie per l'andatura sia normale che patologica.

3.4 CICLO DI DEAMBULAZIONE (GAIT CYCLE)

L'unità di base per la descrizione dell'andatura nella deambulazione è il ciclo di andatura (Gait Cycle) (vedi figura 2). Si tratta della sequenza di azioni compiute dal corpo dall'istante dell'impatto di un tallone a terra fino al impatto successivo dello stesso tallone. Il ciclo di andatura ha una durata compresa nell'intervallo di [0.5-2] secondi, in base alla velocità. Il ciclo di andatura è suddiviso in due fasi: una di appoggio, in cui il piede è a contatto con il terreno, ed una aerea.

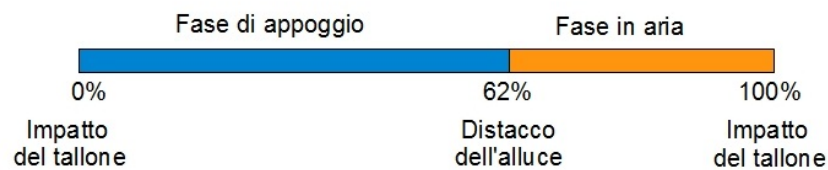


Figura 2.: Ciclo completo di andatura



Figura 3.: Fase di appoggio

Le due fasi possono essere ulteriormente suddivise. In queste vi sono eventi che determinano l'inizio e la fine di una fase. Per definizione un ciclo di deambulazione inizia e termina con la fase HS (Heel Strike) ovvero impatto del tallone con il suolo. All'evento HS cui segue la fase LR (Load Response) fase di risposta al carico, ovvero il peso del corpo si sposta per gran parte sul piede avanti. A termine della fase LR, si verifica l'evento FF (Foot Flat) appoggio plantare, in cui il piede avanti si trova piatto sul suolo. L'evento FF è seguito dalla fase MS (Mid Stance) fase di appoggio intermedio in cui il corpo si propelle in avanti ed il piede indietro si innalza da. L'evento che termina la fase MS è HO (Heel Off) distacco del tallone, che indica la transizione ad una transizione tra la fase TS (Terminal Stance) propulsione ed una breve fase nota come PSw (Pre Swing) pre distacco che precede la fase in aria. In questa transizione il corpo viene nuovamente spinto in avanti, e tale spinta provoca l'ultimo evento della fase di

EVENTO	FASE	
HS - impatto del tallone		Fase di appoggio
	LR - risposta al carico	
FF - appoggio plantare		
	MS - appoggio intermedio	
HO - distacco del tallone		
	TS - propulsione	
	Psw - pre distacco	
TO - distacco dell'alluce		Fase in aria
HS	ISw - accelerazione	
	MSw - superamento	
	TSw - decelerazione	

Tabella 1.: Ulteriori suddivisioni del cammino in eventi e fasi.

appoggio del piede ovvero TO (Toe Off) distacco dell'alluce. Dopo TO inizia la fase in aria del piede. In questa fase il piede in aria si porta davanti al piede portante permettendo così l'inizio di un nuovo ciclo di deambulazione. Anche la fase in aria può essere suddivisa in tre sottofasi: ISw (Initial Swing) propulsione iniziale in cui l'arto viene accelerato, MSw (Mid Swing) propulsione mediale in cui l'arto per aria sorpassa quello a terra ed infine TSw (Terminal Swing) decelerazione, in preparazione per l'atterraggio, ovvero l'evento iniziale HS.

3.4.1 Confronto fra Falcata (Stride) e Passo (Step)

La falcata, che va dal impatto del tallone con il suolo fino al successivo contatto dello stesso piede, è sinonimo di ciclo di andatura (Gait Cycle), mentre il passo comincia dal impatto di un tallone e termina al impatto dell'altro tallone. Una falcata coincide esattamente con due passi (vedi figura 4).

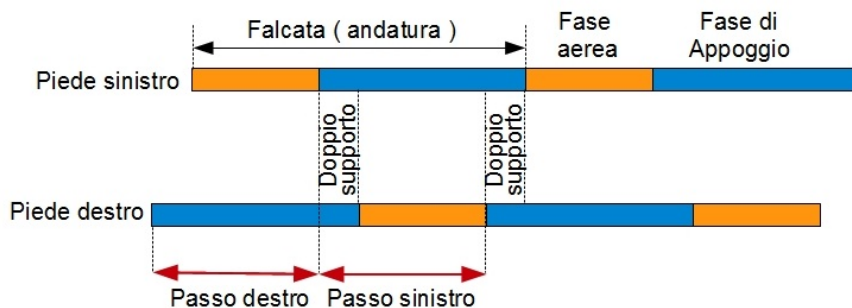


Figura 4.: Andatura e Passo a confronto

NOME PARAMETRO	UNITÀ DI MISURA	DESCRIZIONE
Andatura	(sec)	durata di un completo ciclo di andatura
Passo	(sec)	durata di un completo passo sinistro o destro
Contatto	(sec, %)	durata del periodo in cui i piedi rimangono a contatto con il terreno
Contatto a piede singolo	(sec, %)	durata del periodo in cui solo un piede rimane a contatto con il terreno
Doppio contatto	(sec, %)	durata del periodo in cui entrambi i piedi rimangono contemporaneamente a contatto con il terreno
Fase aerea	(sec, %)	durata del periodo in cui il piede è in aria

Tabella 2.: Parametri temporali

3.5 PARAMETRI CHE DESCRIVONO IL PATTERN (SCHEMA) DELLA DEAMBULAZIONE

NOME PARAMETRO	UNITÀ DI MISURA	DESCRIZIONE
Lunghezza dell'andatura	(cm)	distanza tra due punti di impatto successivi dello stesso tallone
Lunghezza del passo	(cm)	distanza tra due punti di impatto successivi di talloni opposti
Larghezza del passo	(cm)	distanza laterale tra due punti di impatto successivi di talloni opposti
Angolo del piede	(grad)	angolo tra il collo del piede e lo stinco

Tabella 3.: Parametri spaziali

NOME PARAMETRO	UNITÀ DI MISURA	DESCRIZIONE
Cadenza	(passi/min)	numero di passi al minuto
Velocità del passo	(m/s)	numero di metri percorso al secondo

Tabella 4.: Parametri di velocità

Il mondo scientifico che si è confrontato con il problema della segmentazione della deambulazione, e più in generale sull'analisi della deambulazione ed individuazione delle sue varie fasi, è molto vasto e variegato. Per avere una visuale completa sul panorama di ricerca in questo ambito, si può suddividere lo stato dell'arte per materiali e metodi usati.

4.1 MATERIALI

Per materiali si intende tutto l'arsenale fisico, usato per captare, misurare e raccogliere dati riguardanti la deambulazione. I materiali possono, a loro volta, essere suddivisi in quelli che permettono di fare misure dirette dei parametri della deambulazione, ovvero spostamento, velocità e accelerazione sia lineare che angolare di arti e articolazioni; e quelli che permettono di fare misurazioni indirette della deambulazione con sistemi di tracciamento del movimento.

4.1.1 Osservazione diretta del paziente

Il fisiatra è figura medica che si occupa di diagnosi, terapia e riabilitazione di persone con problemi di limitazioni di attività, in questo caso motorie. Un fisiatra è in grado, ad occhio nudo, di fare una stima accurata dei parametri della deambulazione umana.

4.1.2 Stereofotogrammetria

Metodologia di ricostruzione di oggetti ed del loro moto in tre dimensioni basato sulla sovrapposizione di immagini riprese da più telecamere posizionate intorno all'oggetto (vedi figura 5). Sull'oggetto vengono posizionati dei marker [[TODO: in italiano?](#)] che sono i punti di riferimento per le telecamere. La ricostruzione del moto dell'oggetto avviene mediante il calcolo degli spostamenti relativi dei marker. [[TODO: METTERE UNA NOSTRA FOTO](#)]

4.1.3 Sensori Inerziali

I sensori inerziali misurano, le forze inerziali (vedi appendice C) che agiscono su di essi (vedi appendice D).

- **Resistori Sensibili alla forza:** misurano la forza esercitata dalla massa della persona, sul piano di deambulazione, accelerata dalla forza di gravità.
- **Giroscopi** misurano l'accelerazione (momento) angolare. Questo può essere fatto meccanicamente con un giroscopio a rotazione o elettronicamente con un giroscopio a vibrazione (vedi appendice D.2).
- **Accelerometri** misurano il peso per unità di massa, questa quantità è nota come forza specifica o g-force. In altre parole, misurando il peso il sensore misura l'accelerazione in un riferimento inerziale relativo all'accelerometro stesso.

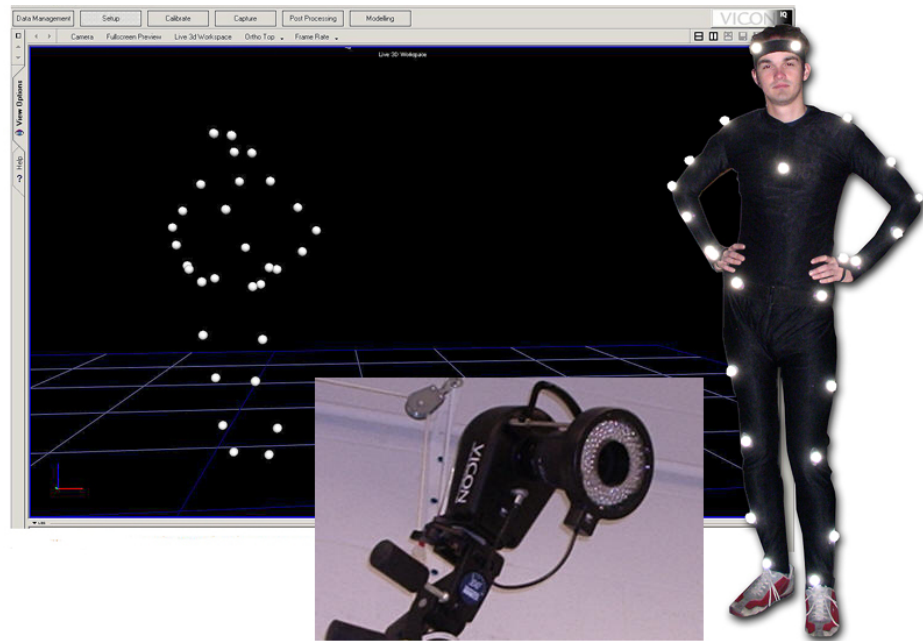


Figura 5.: Strumentazione del sistema stereofotogrammetrico Vicon

SENSORE	FSR
POSIZIONE DEL SENSORE	sotto le scarpe
HARDWARE	trasduttori ?? progettati come degli interruttori meccanici, sensibili al peso FSR ¹
LIMITAZIONI	<ul style="list-style-type: none"> – non è possibile distinguere le variazioni di peso dovute alla deambulazione da quelle dovute allo spostamento di peso di altra natura. – passi tremolanti riducono l'affidabilità della percezione di un evento che stabilisca l'inizio o la fine di una fase del passo.

Tabella 5.: Sensori di forza: FSR

SENSORE	Giroscopio
POSIZIONE DEL SENSORE	coscia, stinco, coscia e stinco
HARDWARE	Giroscopi
VANTAGGI	<ul style="list-style-type: none"> – non influenzati dalla forza di gravità; – non influenzati da vibrazioni o scosse dovute alla deambulazione; – meno influenzate (rispetto alle FRS) dal posizionamento sul corpo.
LIMITAZIONI	<ul style="list-style-type: none"> – non è possibile distinguere le variazioni di peso dovute alla deambulazione da quelle dovute allo spostamento di peso. – passi tremolanti riducono l'affidabilità della percezione di un evento che stabilisca l'inizio o la fine di una fase del passo.

Tabella 6.: Giroscopi

SENSORE	Accelerometro
POSIZIONE DEL SENSORE	piede, collo del piede, stinco, polpaccio, coscia, schiena
HARDWARE	Accelerometri MEMS ²
VANTAGGI	<ul style="list-style-type: none"> – permettono di individuare quasi tutte le fasi del cammino; – sono dimensioni ridotte e costano poco.
LIMITAZIONI	<ul style="list-style-type: none"> – influenzati dalla forza di gravità; – il loro posizionamento sul corpo è critico.

Tabella 7.: Accelerometri: MEMS

HARDWARE	Magnetometro
FORZA MISURATA	il campo magnetico terrestre
POSIZIONE DEL SENSORE	piede, collo del piede, stinco, polpaccio, coscia, schiena
VANTAGGI	<ul style="list-style-type: none"> • il campo magnetico, non essendo influenzato dal movimento della persona o dalla forza di gravità, offre un punto di riferimento per l'orientamento del corpo, e le misure hanno un'accuratezza maggiore. • In combinazione con altri sensori giroscopio permette di determinare 5 fasi del cammino.
LIMITAZIONI	<ul style="list-style-type: none"> • influenzati dalla forza di gravità; • il loro posizionamento sul corpo è critico.

Tabella 8.: Magnetometri

- **Magnetometri** misurano il campo magnetico. Vi sono più modi per misurare il campo magnetico, quello maggiormente usato detto Fluxgate funziona mediante un meccanismo elettrico (vedi appendice D.3).

I sensori qui presentati sono stati usati per l'analisi della deambulazione in diversi numeri e combinazioni. Una classificazione può essere fatta sulla base della grandezza fisica misurata dal singolo sensore o dall'insieme di sensori scelti. Tale grandezza fisica può essere:

FORZA Il corpo umano esercita una forza (peso) sulla superficie su cui si trova. Un sensore per misurare tale forza, deve essere posizionato, tra il corpo e la superficie. La collocazione naturale di un sensore di forza è sotto la suola delle scarpe. I trasduttori ³ per tale scopo vengono progettati interruttori meccanici dipendenti dal peso o Resistori Sensibili alla forza (FSR).

Metodi di riabilitazione o di aiuto di persone con la sindrome del piede cadente (foot drop) basati sulla Stimolazione Elettrica Funzionale (FES) usavano inizialmente le FSR [6]. Mentre i primi sistemi di questo tipo usavano micro interruttori puramente meccanici, ovvero azionati direttamente dalla pressione del piede, sistemi più recenti sono azionati da valori soglia (threshold) ottenuti mediante uno o più trasduttori FSR posizionati sotto il tallone, il metatarso e l'alluce [7, 6]. Questi metodi a differenza dei primi, sono meno soggetti ad attivazioni dovute a spostamenti di peso non dovuti alla deambulazione. Con un interruttore singolo sotto il tallone si riescono ad ottenere informazioni sugli eventi HO e HS. Aggiungendo

³ Un trasduttore è un dispositivo che converte un tipo di energia in un altro.

ulteriori sensori sotto il metacarpo o l'alluce si hanno informazioni sugli eventi FF e TO [6]. Un'altra tecnica che è stata usata per misurare la forza è usare suole sensibili alla forza, che ricoprono l'intera suola con una matrice di sensori[8]. L'accuratezza ed affidabilità di tali sistemi dipende soprattutto dai materiali usati.

Un'altra tecnica è basata su un sensore di pressione connesso ad un piccolo tubo, incollato al perimetro esterno della scarpa. In questo modo le variazioni nella forza esercitata sulla suola si manifestano in variazioni pneumatiche, che vengono poi misurate dal sensore di pressione[9].

Sistemi di individuazione di eventi di deambulazione basati su sensori di forza, sono considerati abbastanza standard per essere usati come riferimento per determinare l'accuratezza di metodi novelli per la medesima funzione. Ciò è dovuto al fatto che un sensore posto sotto i piedi sembra essere la scelta più naturale per sistemi di misura della deambulazione.

Danno risultati soddisfacenti per la deambulazione normale 2. Gli svantaggi dei sensori della forza sono l'impossibilità di discernere tra variazioni di carico dovute alla deambulazione da quelle dovute a spostamenti del peso (ad esempio da una gamba all'altra). Una deambulazione strascicata riduce notevolmente l'affidabilità della individuazione degli eventi della deambulazione [10]. Altri difetti di questi sistemi sono la poca durata, e la limitata applicabilità [11].

ACCELERAZIONE ANGOLARE La maggior parte degli studi che hanno usato un giroscopio hanno optato per lo stesso tipo di sensore unidimensionale nella configurazione a singolo sensore [12, 13, 14] o tre sensori [15]. In tutti i casi i dati sono stati elaborati in differita (offline vedi B.2). Sono state testate innumerevoli combinazioni di posizionamenti dei sensori: coscia [14], stinco [12], coscia e stinco [13] e su entrambe gli stinchi ed una sola coscia [15].

Dal segnale del sensore sono stati calcolati l'angolo dell'articolazione del ginocchio [13], l'angolo dell'articolazione dell'anca mediante l'integrazione della velocità angolare [14]. Uno dei problemi più comuni del giroscopio è il drift (deviazione) causata da una imprecisa calibrazione dello strumento. Un altro approccio è il cosiddetto studio di Wavelet: la stima del HS, e HO mediante lo studio analitico del segnale del giroscopio in funzione del tempo [15, 12]. La validazione del sistema è stata fatta su ciascun sistema, confrontando i risultati ottenuti mediante un sistema basato su telecamere noto come Vicon, in condizioni di laboratorio. Un grande vantaggio della analisi del moto in generale mediante il giroscopio, è che questi non subisce l'effetto dell'accelerazione di gravità [16]. Inoltre le vibrazioni dei sensori durante gli esperimenti non influenzano il giroscopio [17]. I giroscopi, rispetto agli FSR, sono meno sensibili al posizionamento sul corpo, un giroscopio posto in qualunque posizione di un segmento del corpo lungo lo stesso piano fornisce con variazioni minime gli stessi valori. Infine nessun tipo di movimento che non riguardi l'asse che percepisce il sensore viene catturato dallo strumento [13].

FORZA E ACCELERAZIONE ANGOLARE Al fine di individuare gli eventi HS e HO, è stato messo a punto un sistema composto da tre FSR per catturare il carico verticale ed un giroscopio per misurare la velocità di rotazione del piede sul piano sagittale (vedi figura 1) [18]. Una volta posizionati gli FSR sotto il tallone, il primo ed il quarto metatarso ed il giroscopio monoassiale sul tallone, il sistema era in grado di individuare le fasi di appoggio e fase in aria in linea. La validazione è stata fatta in condizioni di laboratorio, anche questa volta con sistemi di cattura del movimento.

Il sistema è stato incassato in una suola per poter essere usato con un meccanismo di FES di correzione della ricaduta del piede [19]. I vantaggi principali del sistema qui descritto sono l'affidabilità e la robustezza: riesce a distinguere semplici spostamenti di peso (ad esempio stando fermi, alzandosi o sedendosi) da variazioni di carico dovute alla deambulazione. I difetti del sistema sono collegati ai difetti degli FSR: la loro poca durata.

ACCELEROMETRIA La tecnologia MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) (vedi appendice D) permette uno sviluppo di accelerometri in miniatura a basso consumo energetico, adatti al monitoraggio della deambulazione [20]. I sensori usati negli esperimenti, misurano l'accelerazione in due [10, 11, 21, 22, 23] o tre dimensioni [16, 24, 25], avendo più sensori monoassiali [16, 21, 22], biassiali [10, 11, 23, 26] o triassiali [25, 24]. Per misurare sia l'accelerazione lineare che rotazionale, i sensori vengono sistemati su coscia [11], stinchi [16, 25, 21], coscia e stinchi [22, 26], coscia, stinchi e bacino [23], piede, coscia, stinchi e bacino [24] o busto [10].

L'elaborazione dei dati provenienti dai suddetti sensori è stata fatta sia in modalità in linea che in differita. L'elaborazione in differita comprende l'analisi temporale dell'accelerazione verticale nel piano sagittale, i cambiamenti da positivo a negativo e viceversa, che sono stati correlati rispettivamente agli eventi HS e HO [10]. Un altro approccio ha dimostrato che è possibile rilevare gli eventi TO, ISw, TSw, HS sulla base dei dati della velocità angolare e lineare sul piano sagittale e frontale [21].

Per quanto riguarda i sistemi in linea è stato dimostrato che permettano di rilevare gli eventi LO, MS, TS, PSw [16, 26] oppure HS e HO [11]. L'uso di accelerometri necessita di elaborazioni ulteriori del segnale per compensare all'influenza della forza di gravità. Il posizionamento dei sensori è un altro aspetto delicato, dovuto al movimento di muscoli durante la deambulazione. Un vantaggio degli accelerometri, è che l'evento HO è individuabile anche in individui che non hanno un contatto con il tallone molto definito [16] o con deambulazione strascicata [10].

ACCELEROMETRIA E ACCELERAZIONE ANGOLARE Il metodo di misurazione può essere basato su un modello bidimensionale su un piano sagittale [17, 27, 28, 29, 30, 31] oppure tridimensionale [32, 33]. Per modelli bidimensionali il gruppo di sensori può essere composto da due sensori inerziali unidimensionali ed un giroscopio bidimensionale [17] oppure da un unico sensore inerziale bidimensionale che misuri le componenti tangenziali e radiali dell'accelerazione [27]. I sistemi tridimensionali usano di solito un giroscopio tridimensionale ed un sensore inerziale tridimensionale [32, 33]. Le unità di sensori sono montati su piedi [28, 33], stinco e coscia [17, 27, 30], o piedi, stinchi e cosce [31, 32]. I dati sono stati elaborati primariamente in differita ed hanno fornito informazioni sull'accelerazione di segmenti di arti, velocità di giunture ed eventi quali HS, TO e FF. La validazione di questi sistemi è stata fatta su soggetti sani [17, 27, 28, 31] e con problemi di deambulazione. I dati ottenuti sono stati confrontati con quelli prodotti da un sistema di ripresa in movimento : WATSMARTTM [32], ViconTM [17], interruttori a piede [28, 29, 30].

ACCELEROMETRIA, ACCELERAZIONE ANGOLARE E CAMPO MAGNETICO La misurazione del campo magnetico terrestre mediante un magnetometro fornisce il campo gravitazionale terrestre ed una misura di riferimento per l'orientamento del corpo. Al contrario dell'accelerometria, il campo magnetico non è influenzato dai movimenti del corpo. Sono state prodotte unità contenenti sensori sia uniassiali [34] che biassiali [35] in combinazione

con un magnetometro. I sensori sono stati posizionati al piede e stinco di una gamba oppure di entrambe le gambe. I sistemi sono in grado di determinare angoli tra diverse articolazioni in tre dimensioni mediante l'analisi dei dati in differita [35] o mediante l'analisi tempo reale [34]. Tali sistemi hanno permesso di individuare cinque eventi della deambulazione: LO, MS, TS, PSw e fase in aria con l'uso di misure dell'accelerazione e della sua derivata prima [34]. Anche gli eventi HS e TO sono stati individuati in corrispondenza di picchi nella rotazione lungo il piano sagittale dello stinco. Un modello di un doppio pendolo può essere usato per calcolare la lunghezza di un passo [36].

INCLINOMETRIA Un sensore di inclinazione può essere usato per determinare l'inclinazione di una parte del corpo. Consiste di un elemento inerziale che percepisce la forza di gravità, come un liquido o un sistema costituito da una massa ed una molla. Quando il sensore è inclinato, la forza di gravità causa uno spostamento dell'elemento inerziale relativo al sistema del sensore. Tale spostamento viene registrato in una resistenza o capacitanza. Questi sistemi non sono abbastanza affidabili perché non distinguono la deambulazione da altri tipi di spostamenti del piede [19]. Inoltre rispondono ad accelerazioni, il che produce degli errori grossolani nei loro dati.

4.2 METODI

La grande sfida del rilevamento della deambulazione è di individuare gli eventi della deambulazione mentre la persona sta camminando ovvero in linea. Tradizionalmente il problema è stato affrontato con un insieme di regole basate su valori di soglia sulle emissioni, principalmente di interruttori da piede, e da tutti gli altri sistemi di sensori descritti in 4.1.3. Tutti gli algoritmi pubblicati, consistono di gruppi di euristiche che cercano di identificare alcune caratteristiche dei parametri della deambulazione. Le regole sono state applicate con i seguenti approcci: analisi funzionale di dati non elaborati [15, 37, 38], di dati derivati [19], tecniche di apprendimento induttivo [8, 11, 16, 39] oppure macchine a stati finiti [19, 40].

4.2.1 *Analisi*

L'analisi funzionale comprende metodi matematici per disegnare curve che permettono di estrarre caratteristiche corrispondono a determinate fasi della deambulazione. Le derivate prime e seconde dei dati dell'accelerazione verticale e orizzontale dal piede permettono di determinare gli eventi HS e TO soltanto usando delle regole basate su valori di soglia, con un'elaborazione in tempo reale. [37].

Parte II

LAVORO SVOLTO

MATERIALI E METODI

5.1 INTRODUZIONE

Il lavoro complessivo, può essere suddiviso in tre fasi principali:

1. **Creazione ed addestramento di un modello:** scelta di un modello consono al problema e ottimizzazione dei relativi parametri,
2. **Implementazione:** stesura applicativo per Android che implementi il modello,
3. **Validazione:** i risultati ottenuti sono stati validati correlando un parametro spaziale del cammino (la distanza percorsa) a partire da quelli temporali ottenuti con la segmentazione (cadenza e velocità) e successivamente verificandone la correttezza con misurazioni dirette dei parametri spaziali (misurazione della distanza fatta con il GPS).

5.2 CREAZIONE ED ADDESTRAMENTO DEL MODELLO

Il sistema adattivo scelto sono le HMM. La scelta di queste ultime è giustificato sia dagli studi che il gruppo di ricerca capitanato dal prof. Sabatini, al centro di Bio-Robotica di Sant'Anna¹ sta portando avanti sulla classificazione automatica del movimento umano, sia dal fatto che lavori come *A Hidden Markov Model-based stride segmentation technique applied to equine inertial sensor trunk movement data* di Pfau [41] abbiano dimostrato le loro ottime potenzialità. Inoltre gli interessi futuri di ricerca scientifica del gruppo saranno orientati sia verso la stima dei parametri di un'attività nota sia verso la classificazione di diverse attività (se si considerano modelli di HMM gerarchici [42]). Entrambi i compiti possono essere portati a termine dalle HMM.

5.2.1 Dati

Sono stati scelti 6 soggetti sani (con deambulazione normale) e sono stati sottoposti a 5 sessioni di cammino e 5 sessioni di corsa. Le prove sono state compiute su un tapis roulant su un intervallo di velocità [3-7]Km/h per il cammino e [8-12]Km/h per la corsa. Ciascuna sessione è stata della durata di 2 minuti. La prima sessione alla velocità di 3Km/h e con un incremento di 1Km/h in ciascuna sessione successiva.

Le sessioni sono state tutte eseguite posizionando una IMU D sul collo del piede dei soggetti. Il tipo di sensore usato è un giroscopio monoassiale con asse di sensibilità orientato sul piano mediale-laterale (vedi figura 1).

I segnali sono stati raccolti dal sensore ad una frequenza di 100 Hz e filtrati

¹ <http://www-arts.sssup.it/>

Attività	cammino	corsa
Soggetti	6	5
Velocità	{3,4,5,6,7}Km/h	{8,9,10,11,12}Km/h
Durata	2 minuti per attività	
Strumenti	IMU, Vicon, tapis roulant	
Luogo	Laboratorio	
Dati raccolti	valori giroscopio monoassiale	
Frequenza campionamento	100 Hz	

Tabella 9.: Tabella riassuntiva della raccolti dati

passa-basso² a 15Hz mediante un filtro forward-backward³ di Butterworth⁴. Dai dati raccolti, quelli considerati per lo studio sono quelli compresi nell'intervallo dai 50 ai 110 secondi.

I dati acquisiti con la IMU sono stati sincronizzati con i dati acquisiti mediante stereofotogrammetria. A tale scopo è stato impiegato un sistema ottico commerciale di analisi del moto, il sistema Vicon [43], composto di 4 telecamere ed il software WorkstationTM. Le telecamere sono state disposte intorno al tapis roulant, in modo da poter tracciare il movimento di 5 marker retroriflettenti⁵. I marker sono dei bulbi sferici in plastica di circa 14mm di diametro, attaccati ad una superficie quadrata della stessa dimensione, alle quali viene applicato del nastro biadesivo, mediante il quale vengono incollate sulla parte del corpo che vuole studiare. I marker sono stati posizionati sull'arto inferiore sinistro: sul tallone, sulla lato esterno della caviglia, sulla giuntura metatarso-falange dell'alluce, sulla coscia e sulla schiena, tra la zona lombare e sacrale. Con il sistema Vicon è stata tracciata la traiettoria in 3D, con un campionamento a 50Hz ed un accuratezza di ± 10 mm. e ricostruito tutta la sequenza di movimenti in 3D degli esperimenti, visualizzandoli a video. Dai dati ottenuti con il sistema Vicon sono stati generati dei segnali di riferimento per le fasi del cammino mediante la procedura descritta in [18].

Il grafico del segnale del giroscopio posizionato sul piede ha una struttura abbastanza definita e ripetitiva (vedi grafico 6). Nel grafico, l'ascissa rappresenta i campioni e l'ordinata la velocità angolare in gradi al secondo ($^{\circ}/s$). La forma del grafico può essere descritta a grandi linee come un picco negativo seguito da un tratto quasi orizzontale ed un secondo picco negativo ed uno positivo. Tale sequenza rappresenta un passo completo e si ripete quasi identica a se stessa durante la camminata.

Per semplicità si può indicare uno stato S_i con l'evento da cui ha inizio, ad esempio con lo stato HS indico lo stato S_1 .

Gli eventi (t_{HS} , t_{FF} , t_{HO} , t_{FO}) sono determinati mediante soglie, sulla velocità angolare ω_k , ricavate da studi pregressi [28] come mostra la Tabella 11,

- 2 Un filtro passa-banda, è uno strumento elettronico che lascia passare frequenze in un intervallo e blocca il passaggio o di frequenze (o le attenua) fuori dall'intervallo. Un passa-basso lascia passare le frequenze basse, e smorza quelle a frequenze alte.
- 3 Il filtro viene passato in entrambe le direzioni per avere un segnale simmetrico
- 4 Detto anche filtro a magnitudine massimamente piatta nella banda che passa, in modo da avere meno disturbo possibile.
- 5 Dispositivo o superficie che riflette la luce alla sua sorgente minimizzando la dispersione di luce

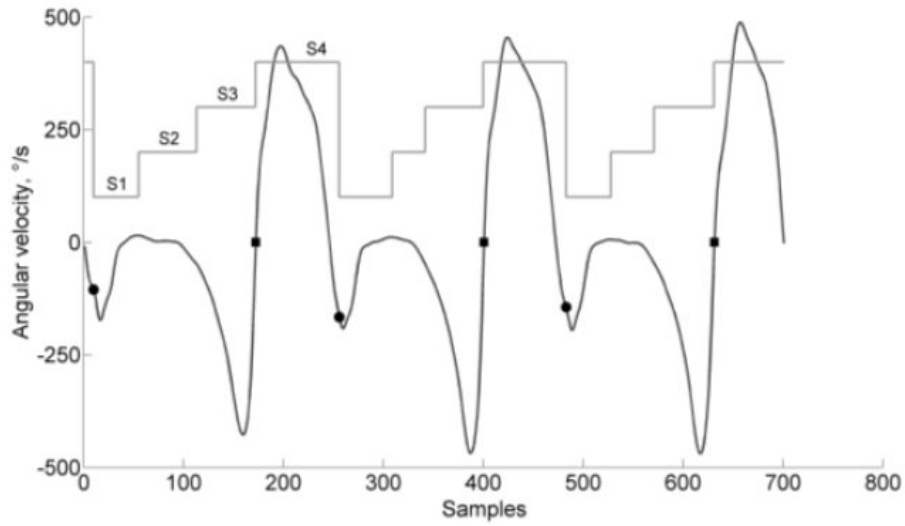


Figura 6.: Grafico del segnale di un giroscopio posizionato sul piede

Stato	inizio	fine
S_1	t_{HS}	t_{FF}
S_2	t_{FF}	t_{HO}
S_3	t_{HO}	t_{FO}
S_4	t_{FO}	t_{HS}

Tabella 10.: Le quattro fasi della deambulazione e gli eventi (tempo iniziale e finale) che li definiscono.

Evento	regola
t_{HS}	$\omega_k \leq 0$ e $\min_1 \leq \omega_k$ $\max_{\forall k} \widetilde{\omega}_k - \omega_k $
t_{FF}	$ \omega_k \geq ??^\circ/\text{sec}$
t_{HO}	$ \omega_k \geq 50^\circ/\text{sec}$
t_{FO}	$\omega_k = 0$ se ω da negativo è diventato positivo e cresce fino al suo massimo.

Tabella 11.: Regole mediante le quali vengono ricavati gli eventi che delimitano le 4 fasi del cammino.

dove $\widetilde{\omega}_k$ è il valore non filtrato del giroscopio.

Si assume che i segnali del giroscopio siano modellati mediante una HMM:

$$\text{Deamb_HMM} = \langle N, M, \mathbf{A}, \mathbf{B}, \pi \rangle \quad (5.1)$$

dove:

1. $N = 4$ è la cardinalità dell'insieme degli stati $S = \{HS, FF, HO, FO\}$,
2. $M = |V|$ è la cardinalità dell'insieme finito dei valori di osservazione ω ($^\circ/\text{sec}$) del giroscopio,
3. \mathbf{A} è la matrice di transizione (vedi appendice A),
4. \mathbf{B} è la matrice di probabilità di emissione delle osservazioni ω per ciascuno stato. Ad ogni stato è stata associata una funzione di densità di probabilità gaussiana univariata.
5. π è il vettore di probabilità a priori.

A questo punto sono state addestrate le HMM. Come prima operazione, è stato etichettato un sottoinsieme dei dati: ad una sequenza Ω di dati è stato associato un vettore Y di etichette. Questo è stato fatto con l'uso di un sistema stereofotogrammetrico (sistema di telecamere Vicon).

Dato che nella deambulazione normale le uniche transizioni tra stati sono quelle tra stati contigui o quelle che riportano nello stesso stato, il modello migliore il tipo di HMM scelto è il modello left-right (vedi appendice A.3.2). Ciò significa che la matrice di transizione gode della proprietà di avere transizioni solo verso stati successivi (da qui il nome da sinistra - a destra):

$$a_{ij} > 0 \quad \text{sse} \quad j = i \quad \text{oppure} \quad j = i + 1 \quad \text{oppure} \quad (i = N \quad \text{e} \quad j = 1) \quad (5.2)$$

Una volta deciso il tipo di HMM da adottare, si devono stimare i parametri del modello. La stima (dei parametri del modello) della massima verosimiglianza (Maximum Likelihood Estimation - MLE) $\ell(\Omega, \text{Deamb_HMM})$ non è un problema convesso dato. Il problema dei massimi locali viene aggirato con un'attenta inizializzazione dei parametri.

A	HS	FF	HO	TO
HS	0.985	0.015	0.0	0.0
FF	0.0	0.998	0.002	0.0
HO	0.0	0.0	0.991	0.009
FO	0.007	0.0	0.0	0.993

Tabella 12.: Matrice di Transizione

Assumendo che possa avvenire solo una transizione tra stati contigui, in ciascun ciclo di deambulazione possono essere fatte delle stime approssimative dei paramtri della HMM:

$$\begin{aligned}
 \pi_i &= N_i / N_{\text{tot}} \\
 a_{ij} &= C / N_i \quad \text{dove} \quad j = (i + 1) \% Q \\
 \mu_i &= \frac{1}{N_i} \sum_{t=1}^T \Omega(t) \\
 \sigma_i &= \sqrt{\frac{1}{N_i - 1} \sum_{t=1}^T (\Omega(t) - \mu_i)^2}
 \end{aligned} \tag{5.3}$$

dove N_i è il numero di valori etichettati con l'etichetta i -esima nel vettore di etichette Y e C è il numero di cicli di deambulazione nel training set.

[*ERR: VERRI: POCO CHIARO - I parametri di emissione (μ e σ) per ciascuno stato i sono stimati calcolando delle medie e deviazioni standard empiriche dagli output osservabili dei quali si conosce lo stato che li ha emessi.*

] La validazione è stata fatta con l'approccio leave-one-subject-out cross-validation (LOOCV). Il metodo consiste nell'addestrare un modello su $P-1$ ($P = 6$) soggetti e testarne la validità su 1 soggetto. Ripetendo P volte la procedura per ciascuno dei soggetti alla fine i risultati vengono combinati.[
TODO: spiegare come più in dettaglio]

Tutta la prima fase della creazione addestramento e validation incrociata del modello è stata fatta off-line, mediante un Mathworks MATLAB (R2008a) ed l'HMM toolbox [44]. Nella fase di test, viene usato l'algoritmo di decodifica di Viterbi 4 sui dati del giroscopio, per trovare la sequenza di stati che con maggior verosimiglianza ha prodotto le osservazioni (sequenze di valori del giroscopio). Il modello left-right può portare a considerare cicli di deambulazione aggiuntivi (insertions), o meno di quelli effettivi (deletions). Il problema delle inserzioni viene risolto mediante l'applicazione di un'euristica: per i presupposti del tipo di deambulazione considerata (velocità e pendenza del terreno).

I parametri del modello stimati da una delle esecuzioni della validazione incrociata è il seguente: Dati: HMM

Le seguenti sono un esempio di osservazioni: 12400 dati Giroscopio

B	$\mu[^\circ/\text{SEC}]$	$\sigma^2[^\circ/\text{SEC}]$
HS	-52.2	12711.8
FF	-11.8	898.7
HO	-180.1	35806.8
FO	233	14980.3

Tabella 13.: Matrice di Emissione

	π
HS	0.180
FF	0.278
HO	0.279
FO	0.264

Tabella 14.: Distribuzione di probabilità iniziale

time	O
1	0.37694
2	0.37694
3	0.37694
4	0.37694
5	-1.9058
\vdots	\vdots
24800	-16.831

Tabella 15.: Osservazioni Giroscopio: velocità angolari

APPLICAZIONE ANDROID

6.1 INTRODUZIONE

La seconda parte del lavoro è relativa allo sviluppo di un'applicazione per uno Smartphone Android che segmenta in linea il cammino, a partire da dati giroscopici (vedi fig 7). Una volta posizionata la IMU (vedi appendice D.4) sul

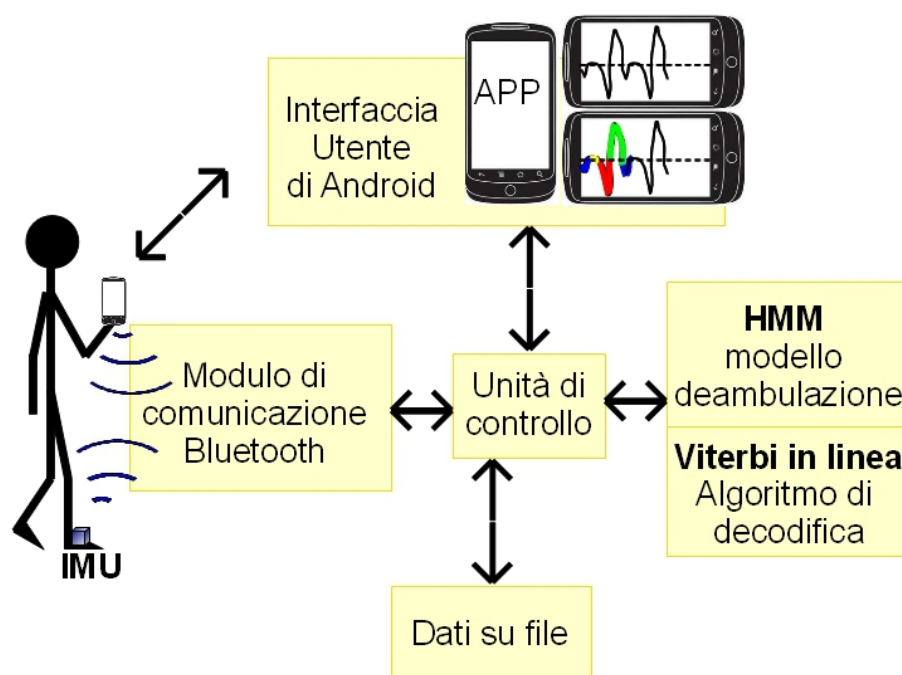


Figura 7.: Architettura dell'applicazione per Smartphone

collo del piede, lo Smartphone vi interagisce tramite una connessione Bluetooth. L'utente controlla la IMU mediante l'applicazione, quindi può impostarne i parametri: ad esempio la frequenza di campionamento e gli intervalli di campionamento per ciascun sensore su ciascun asse spaziale. Impostati i parametri l'utente può acquisire dati dalla IMU mediante un servizio di data logging (nel file system dello Smartphone), oppure li può visualizzare come un grafico dinamico. Inoltre è possibile abilitare la segmentazione in linea del segnale di deambulazione, sulla base di un modello HMM addestrato in differita (vedi sezione 5.2), impiegando una versione dell'algoritmo di Viterbi [49]. Nell'ultimo caso il grafico dinamico rappresentante il segnale del giroscopio viene tracciato in linea¹ con un colore a seconda della fase della deambulazione: HS-blu, FF-giallo, HO-rosso, TO-verde.

¹ La segmentazione ha una latenza massima di 10ms

6.2 METODOLOGIA DI PROGRAMMAZIONE USATA: AGILE E UNIT TEST

Per l'implementazione dell'algoritmo di Viterbi e le funzioni utilizzate nella fase di analisi del segnale, è stata utilizzata una tecnica nota come Agile Programming (AP): una tecnica che permette lo sviluppo di programmi in cicli di lavoro iterativi ed incrementali in termini di funzionalità. Tale metodologia è stata corroborata da una tecnica di verifica del codice sorgente detta Unit Test (UT). Per Unit (unità) si intende la più piccola parte funzionante di un programma che può essere testata, nei linguaggi orientati ad oggetti un metodo costituisce un'unità. Per UT in Java si intende la verifica del funzionamento di ciascun metodo di una classe.

Tra i benefici apportati dall'UT si possono annoverare:

- Semplificazione della procedura di Refactoring: procedura di modifica della struttura di un programma che non ne altera il funzionamento complessivo.
- Automatizzazione dell'integrazione di moduli di programma: l'interazione fra moduli deve essere testata ed in mancanza di UT viene fatta su misura per ogni caso.
- Creazione di documentazione "concreta": i vari casi di test costituiscono degli esempi concreti di utilizzo di ciascun modulo e dell'interazione fra di essi. Un vantaggio che la documentazione fornita mediante UT ha rispetto alla documentazione classica è che ogni modifica apportata al programma si ripercuote sul funzionamento dei casi di test, mentre la documentazione classica rischia di diventare obsoleta se tale cambiamento non viene trascritto.

La limitazioni maggiori sono:

- Lo UT è orientato alla funzionalità di singoli moduli di programmi, quindi aspetti come la performance o funzionalità che necessitano di molti moduli sono difficilmente testabili mediante UT.
- La scelta dei casi di test tra l'esorbitante numero di possibile scelte è spesso un problema difficile.
- Vi sono casi in cui lo UT non può essere affatto applicato, come ad esempio nei programmi non deterministici o in un ambiente multithread.

SCRITTURA DI UNO UT . Lo UT istanzia l'oggetto dalla classe da testare, ed invoca il metodo con valori per i quali è noto il comportamento (teorico) del metodo da testare.

Il test viene eseguito, per la prima volta, prima di aver implementato il metodo da testare, ed ovviamente fallisce². Il passo successivo è di implementare il minimo indispensabile per far funzionare il test. Se il test viene superato dal codice scritto, viene scritto un altro test, ed un altro pezzo di codice, iterando la procedura finché non si ha tutto il programma desiderato.

A titolo di esempio di seguito verrà illustrato lo sviluppo della classe che gestisce le operazioni di tipo statistico:

```
1 // la classe da costruire
2 public class StatisticsOperations{...}
```

² Eclipse IDE TM utilizza il framework JUnit che semplifica la gestione degli UT.

```

3 // l'insieme di test
4 public class StatisticsOperationsTest extends TestCase {...}

```

Codice 6.1: Sviluppo di una classe mediante la tecnica di programmazione Agile

Le operazioni necessarie per lavorare sulle HMM erano:

- verificare la validità di valori di probabilità
- verificare la completezza di un insieme di alternative probabilistiche
- calcolare la Probabilità di un dato assumendo quanto estratto da una distribuzione Normale ($\mathcal{N}(x, \mu, \sigma)$) con media μ e varianza σ^2 note.

Creazione delle le firme dei metodi

```

1 public class StatisticsOperations{
2     public static boolean areCompleteProbabilisticAlternatives(
        ArrayList<Object> alternatives) {...}
3     public static boolean isValidProbabilityValue(double value)
        {...}
4     public static double gaussian(double x, double mu, double
        sigma_square) {...}
5 }

```

Codice 6.2: Firme dei metodi da implementare

Creazione di un test vuoto (destinato a fallire).

Implementazione dei test per cinque casi rappresentativi dei degli intervalli esterni ed interni a quello di riferimento (0,1).

```

1 public class StatisticsOperationsTest extends TestCase {
2     ... // metodi setUp e tearDown che per ora non uso
3
4     public void testIsMinusOneACorrectProbabilityValue() {
5         boolean expected = false;
6         boolean actual = StatisticsOperations.
            isValidProbabilityValue(-1);
7         assertEquals(expected, actual);
8     }
9     public void testIsZeroACorrectProbabilityValue() {
10        boolean expected = true;
11        boolean actual = StatisticsOperations.
            isValidProbabilityValue(0);
12        assertEquals(expected, actual);
13    }
14    public void testIsPointFiveACorrectProbabilityValue() {
15        boolean expected = true;
16        boolean actual = StatisticsOperations.
            isValidProbabilityValue(.5);
17        assertEquals(expected, actual);
18    }
19
20    public void testIsOneACorrectProbabilityValue() {
21        boolean expected = true;

```

```

22     boolean actual = StatisticsOperations.
        isValidProbabilityValue(1);
23     assertEquals(expected, actual);
24 }
25
26 public void testIsTwoACorrectProbabilityValue() {
27     boolean expected = false;
28     boolean actual = StatisticsOperations.
        isValidProbabilityValue(2);
29     assertEquals(expected, actual);
30 }
31
32 public void testIsRandNumACorrectProbabilityValue() {
33     boolean expected = false;
34     double randomProbabilityValue = Math.random();
35     if (randomProbabilityValue >= 0 &&
        randomProbabilityValue <= 1){
36         expected = true;
37     }
38     boolean actual = StatisticsOperations.
        isValidProbabilityValue(randomProbabilityValue);
39     assertEquals(expected, actual);
40 }
41
42 }

```

Codice 6.3: Casi di test di contorno

Sviluppo del corpo del metodo che si sta testando. Questa fase (la più importante) è notevolmente agevolata dalle precedenti. Il programmatore ha chiare la funzione da implementare e le relative problematiche.

```

1  public class StatisticsOperations{
2      public static boolean areCompleteProbabilisticAlternatives(
        ArrayList<Object> alternatives) {...}
3      public static boolean isValidProbabilityValue(double value)
        {
4          if (value >= 0 && value <= 1)
5              return true;
6          else
7              return false;
8      }
9      public static double gaussian(double x, double mu, double
        sigma_square) {...}
10 }

```

Codice 6.4: Implementazione dei metodi da testare

La esecuzione del test sul metodo riscritto porta ad uno dei seguenti esiti:

1. superamento di tutti i test, quindi lo sviluppo del metodo è completato,
2. fallimento di almeno un test, il metodo deve essere corretto ed i test devono essere nuovamente eseguiti.

6.3 ORGANIZZAZIONE DEL PROGRAMMA

6.3.1 *Android Manifest*

AndroidManifest.xml (vedi Appendice E.1.6) è il file che viene usato come punto di partenza e di riferimento dal compilatore Dalvik (vedi Appendice E.1.3).

```

1 <?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
2 <manifest xmlns:android="http://schemas.android.com/apk/res/android"
3     package="imu.Interface" android:versionCode="1" android:versionName="1.0">
```

Codice 6.5: AndroidManifest testata

Il nome del Java package, serve come identificativo unico per l'applicazione.

```

3     <uses-permission android:name="android.permission.BLUETOOTH" />
4     <uses-permission android:name="android.permission.BLUETOOTH_ADMIN" />
5     <uses-permission android:name="android.permission.WRITE_EXTERNAL_STORAGE"
        />
6     <uses-sdk android:minSdkVersion="8" />
7     ...
```

Codice 6.6: AndroidManifest permessi

Dato che il nucleo (kernel) di Android-OS è basato su Linux (vedi Appendice E) usa una politica di Access Control³ molto simile a quello del sistema operativo Linux. Tutti i servizi che non sono forniti da un programma diverso da quello in uso possono essere utilizzati solo se l'utente dà il permesso di utilizzarli, vale a dire che un programma non può interagire con altri programmi se non con l'esplicita autorizzazione dell'utente. Per questo motivo l'applicazione deve elencare tutte le richieste di permessi di cui necessita. L'elenco deve essere fatto nella porzione iniziale dell'AndroidManifest Dichiarazione dei permessi che l'applicazione deve avere dall'utente per accedere ad alcune parti dell'API⁴ di Android e per interagire con altri applicativi. La riga 4 chiede il permesso di fare la discovery (ricerca) di dispositivi e di associarsi a dispositivi trovati, la riga precedente invece il permesso di connettersi a dispositivi associati⁵. L'ultimo permesso serve per poter scrivere su un dispositivo d'immagazzinamento esterno, questo ci serve per poter salvare ad esempio l'output dell

```

8     <application android:icon="@drawable/spinningtop02"
9         android:label="@string/app_nameicon"
10        android:name="imu.objects.MailBoxes">
```

Codice 6.7: AndroidManifest dichiarazione dell'attività principale

Vengono dichiarati il nome dell'applicazione, l'icona, ed un'etichetta. In questo punto si dichiara anche il nome dell'oggetto che può essere visibile a livello globale di applicazione. Infatti l'oggetto MailBoxes che è un vettore di MailBox (vedi 6.4.4) che sono a loro volta utilizzati per lo scambio di dati tra thread.

³ Accesso controllato dell'utente di un filesystem o di un servizio

⁴ Application Programming Interface: interfaccia ad un codice che viene messo a disposizione come servizio in modo che terzi possano usarlo per sviluppare altro software, avvolte anche in altri linguaggi. In dettaglio una API nei linguaggi orientati ad oggetti, sono concepiti come l'insieme di tutti i metodi pubblici che le classi pubbliche offrono.

⁵ L'associazione è la prima connessione, nella quale vi è una forma di identificazione e associazione dei due dispositivi. Per connessione invece si intendono le connessioni successive alla prima, in cui un dispositivo conosce già l'altro e, più rapidamente, possono iniziare una conversazione.

```

11     <activity android:name=".IMUinterface" android:configChanges="
        orientation">
12         <intent-filter>
13             <action android:name="android.intent.action.MAIN" />
14             <category android:name="android.intent.category.LAUNCHER" />
15         </intent-filter>
16     </activity>
17     <activity android:name=".Saveactivity" android:label="@string/
        save_name" />
18     <activity android:name=".SensSetupactivity" android:label="@string/
        sens_name" />
19     <activity android:name=".Provaactivity" android:label="@string/
        prova_name" />
20     <activity android:name=".EmbeddedSensDataPlottingvActivity"
        android:label="@string/prova_name" android:configChanges="
        orientation"
21         android:theme="@android:style/Theme.NoTitleBar.Fullscreen" />
22     <activity android:name=".TemporalDataPlottingvActivity"
        android:configChanges="orientation" android:theme="@android:style/
        Theme.NoTitleBar.Fullscreen" />
23
24

```

Codice 6.8: AndroidManifest elenco di tutte le attività

Sezione di AndroidManifest in cui si elencano i componenti fondamentali (vedi Appendice E.2) utilizzati nell'applicazione. Il nostro applicazione, che ha una struttura molto semplice, ed utilizza solo Activity ed Intent. Il l'Activity principale (Main Activity) è IMUInterface.

La dichiarazione di una Activity è composta da un nome e da una classe Java. Inoltre sono dichiarate altre impostazioni iniziali: se sono gestiti o meno i 2 orientamenti dello schermo, se lo schermo deve essere visualizzato senza la barra dei titoli in testa allo schermo.

6.3.2 Codice sorgente

Tutto il codice sorgente (Java) deve essere contenuto nella cartella *src* del progetto. Abbiamo strutturato il codice in 5 package (cartelle di Java):

- **activities:** le Activity, corrispondono indicativamente ciascuna ad una schermata sullo Smartphone,
- **objects :** dati, modelli o contenitori su cui fare operazioni,
- **services:** operazioni fondamentali dell'applicazione, che qui coincidono agli algoritmi che si applicano alla HMM.
- **tests:** test prodotti dall'utilizzo della metodologia Agile (vedi 6.2),
- **util:** operazioni di supporto al resto del codice.

6.3.3 Risorse

Le risorse sono costituite da tutti i file che fanno parte dell'applicazione, ma non sono codice sorgente (vedi Appendice E.1.6) vale a dire file xml, immagini, testo ecc. La sezione più importante delle risorse è la cartella **layout**. Questa contiene una serie di file xml, che in teoria, per ciascuna Activity dovrebbe essere creato un file xml da mettere nella cartella layout, con lo stesso nome della Activity.

Layout

Un file di layout (impaginazione) è un documento xml in cui viene descritta la struttura dell'interfaccia utente di una Activity. Layout deve essere composto di elementi grafici predefiniti in Android oppure deve essere di tipo View o ViewGroup⁶. Ogni file di layout deve contenere esattamente un elemento radice. Ogni elemento grafico ha un identificativo unico, con cui può essere richiamato dal codice sorgente, tramite l'indicizzazione automatica. EclipseTM permette di definire un layout sia in modalità xml che in modalità grafica (WYSIWYG⁷). Ad esempio il layout della activity principale (ImuInterface) è il seguente

```

1 <?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
2 <LinearLayout xmlns:android="http://schemas.android.com/apk/res/android"
3     android:orientation="vertical" android:layout_width="fill_parent"
4     android:background="#111111" android:layout_height="fill_parent">

```

Codice 6.9: LinearLayout:impaginazione della schermata principale

Un LinearLayout è un tipo di layout che può contenere altri layout, in sostanza serve ad organizzare oggetti. Sono impostate alcune delle proprietà (orientamento, larghezza ecc) dell'oggetto.

```

5 <TextView android:layout_height="wrap_content"
6     android:text="@string/ImuActivity_title" android:textStyle="bold"
7     android:id="@+id/AppName" android:layout_width="320dip">
8 </TextView>

```

Codice 6.10: TextView: oggetto contenente testo

Questo è un oggetto che contiene testo non modificabile dall'utente. Qui viene visualizzato il titolo della schermata, contenuto nella variabile di stringa "@string/ImuActivity_title".

```

9 <EditText android:id="@+id/editText1"
10     android:layout_height="wrap_content"
11     android:layout_width="match_parent">
12 </EditText>
13 <EditText android:id="@+id/editText2"
14     android:layout_height="wrap_content"
15     android:layout_width="match_parent">
16 </EditText>
17 ....

```

Codice 6.11: EditText:oggetto contenente campi di testo modificabili

Vi sono subito sotto il titolo della schermata, quattro campi di testo (di cui sono riportate solo 2 a titolo illustrativo).

```

25 <LinearLayout android:background="#111111"
26     android:layout_height="fill_parent"
27     android:layout_weight="1"
28     android:layout_width="fill_parent"
29     android:orientation="horizontal">
30     ...
31 <Button android:id="@+id/button2" android:layout_height="wrap_content"
32     android:text="Start" android:gravity="center_vertical|
33         center_horizontal"
34     android:layout_width="55dip">

```

⁶ Sia la View che la ViewGroup appartengono al package android.view e sono componenti importanti dell'interfaccia utente

⁷ What You See Is What You Get



Figura 8.: Schermata della Activity iniziale dell'applicazione

```

34     </Button>
35     ...
36 </LinearLayout>
37     ...

```

Codice 6.12: Esempio di LinearLayout contenente un Button

La parte seguente della schermata, percorrendola dall'alto verso il basso, è un altro LineraLayout contenente altri campi di testo e bottoni. La schermata risultante dal layout è quella dell'immagine 8.

File grafici

I file grafici sono distribuiti su tre cartelle **drawable-hdpi**, **drawable-ldpi**, **drawable-mdpi** in cui salvare formati a definizioni diverse delle stesse immagini per diversi dispositivi.

Valori

Il file più importante in questa cartella è `strings.xml` in cui vengono salvate tutte le stringhe da visualizzare sulle varie schermate. L'utilità maggiore di mantenere

le stringhe in un file unico, è l'internazionalizzazione dell'applicazione. Con il tipo di mercato mondiale che hanno gli applicativi Android, avere il testo tradotto in più lingue è necessario.

Altri File

Qualunque tipi di file, che non sia compatibile con quelli menzionati precedentemente, vanno nella cartella `raw`. Ad esempio, in fase di sviluppo, per testare l'algoritmo di Viterbi, abbiamo usato un file contenente dati di un giroscopio, acquisito nella fase precedente del lavoro.

6.3.4 *Librerie*

Le librerie usate sono quelle di Android 2.2 (vedi Appendice E.1.2).

6.4 ARCHITETTURA

6.4.1 *Interfaccia Utente*

La linea guida per lo sviluppo della UI (Interfaccia Utente) è stata quella della massima ergonomia, in linea con la filosofia di sviluppo di interfacce utente di Android.

La navigazione tra le schermate dell'applicazione è guidata da widget che sono oggetti grafici della UI di un programma, che hanno lo scopo di facilitare all'utente l'interazione con il programma.

All'avvio del programma, viene visualizzato sullo schermo del dispositivo, un menu dal quale è possibile

6.4.2 *Comunicazione Bluetooth*

`BluetoothAdapter` Rappresenta l'adattatore Bluetooth del dispositivo locale e permette di fare le operazioni più importanti sullo stesso:

- Ricerca (discovery) di dispositivi,
- Query su una lista di dispositivi connessi,
- istanziazione di un dispositivo Bluetooth (`BluetoothDevice`) usando un indirizzo MAC noto,
- creazione di una server-socket (`BluetoothServerSocket`) per accettare richieste di connessione da altri dispositivi Bluetooth.

6.4.3 *Gestione della connessione*

`ConnectThread` è un `Runnable` che gestisce le connessioni mediante thread. Dati un dispositivo `BluetoothDevice`, un adattatore `BluetoothAdapter` ed il numero identificativo del dispositivo, se questo non è connesso, viene creata una socket `RFCmm` con l'UUID pronta per una comunicazione. All'avvio del thread (con il metodo `run()`) avviene la connessione. Il thread lancia a sua volta un thread al quale delega la gestione delle socket create (`manageConnectedSocket`). Quest'ultimo invia un segnale di inizio acquisizione dati sui canali creati e li acquisisce se disponibili.



Figura 9.: Collegamento fra le schermate dell'applicazione

6.4.4 Gestione Thread

Il sistema operativo Android è multithread. Un applicazione che risponda rapidamente alle richieste dell'utente deve necessariamente smistare i compiti a più thread, dando la precedenza ai thread di risposta all'utente. Il più importante di questi è lo UI Thread (User Interface Thread). Una regola di base della programmazione di applicativi Android è, nella creazione di un'activity, che si deve assolutamente evitare di sovraccaricare, o ancora peggio, eseguire istruzioni potenzialmente bloccanti all'interno dello UI Thread. La prassi per la gestione di operazioni con un comportamento imprevedibile dal punto di vista temporale, come ad esempio le operazioni di rete o di lettura e scrittura di file, è di incaricare altri thread che possano, se necessario, essere eseguiti in background, o fermati se necessario.

Abbiamo ritenuto utile avere un protocollo di comunicazione fra thread mediante una struttura che abbiamo chiamato mailbox, in cui n thread possano inserire e consumare dati.

MailBox

L'oggetto MailBox è un buffer di tipo generico, a cui si può accedere per ora solo mediante un inserimento ed un prelievo sincronizzati, ma ciò potrebbe essere facilmente esteso a 3 modalità:

1. **Sincronizzata:** l'inserimento e prelievo di dati dalla mailbox è bloccante, un thread inserisce un dato se c'è spazio nel buffer, un altro thread utilizza il dato, se esiste. Ciascuno attende il proprio turno per compiere l'azione. La sincronizzazione viene gestita con un meccanismo di semafori che Java fornisce. I metodi di accesso sono:

```
1 synchronized public void put(T object)
2 synchronized public T get()
```

Un thread alla volta può prendere, in mutua esclusione, l'accesso in scrittura al buffer, chiamando per primo il metodo put (vedi algoritmo ??). Il valore contenuto nel buffer è sempre visibile a tutti i thread. Questo risultato è stato ottenuto dichiarando la variabile con la parola chiave volatile.

```
1 volatile private T buffer = null;
```

Normalmente, ciò che avviene al momento in cui un thread prende l'accesso in mutua esclusione ad una variabile, è che si copia nel proprio stack di lavoro la variabile e modifica quella e solo prima di rilasciare la variabile la aggiorna all'esterno. Altri thread che fossero abilitati a vedere la variabile nel momento in cui è in modifica, vedrebbero un valore incongruente con il valore reale della stessa. La parola chiave volatile, impedisce ai thread che la modificano di crearsene una copia, e li vincola a lavorare direttamente sulla variabile⁸ garantendone la visibilità in tutti i momenti.

⁸ la parola chiave volatile impedisce un possibile ripristino del valore di una variabile, il che rende potenzialmente pericolosa per la perdita di dati

```

1  synchronized public void put(T object){
2      //se il buffer è vuoto
3      if (buffer == null){
4          //inserisci l'oggetto
5          buffer = object;
6          //notifica tutti i thread in attesa sul buffer
7          this.notifyAll();
8      }else{
9          try{
10             //altrimenti attendi una notifica sul buffer
11             this.wait();
12             buffer = object;
13         }catch (InterruptedException e) {
14             e.printStackTrace();
15         }
16     }
17 }

```

Un thread può prelevare il dato immesso da un altro nella mailbox, usando il metodo `get()` (vedi algoritmo ??). Mentre il dato viene prelevato, questo non può essere modificato. Appena il thread ha preso il dato, lo elimina dal buffer.

```

1  synchronized public T get(long d){
2      T temp = null;
3      //il buffer è vuoto
4      if(buffer == null){
5          try {
6              //attendi una notifica sul buffer
7              this.wait();
8              //salva il contenuto del buffer
9              temp = buffer;
10             //svuota il buffer
11             buffer = null;
12         } catch (InterruptedException e) {
13             e.printStackTrace();
14         }
15     } else {
16         temp = buffer;
17         buffer = null;
18         //notifica tutti i thread in attesa sul buffer
19         this.notifyAll();
20     }
21     return temp; }

```

Queste due operazioni implicano che devono essere eseguite in ordine, ed alternati (`put(datoi)`, `get()`, `put(datoj)`, `get()` ecc).

2. **Temporizzata:** ciò che avviene è molto simile al caso precedente: i thread vengono sincronizzati sul buffer. La differenza è che attendono solo una predeterminata quantità di tempo prima di inserire dati nuovi nel buffer. Ciò significa che sovrascrivono qualunque dato non sia stato consumato in tempo.

3. **Condizionata:** la variante, in questo caso, sta nel superare l'attesa in scrittura nel momento in cui si verifichi una determinata condizione.

Test per il protocollo di comunicazione MailBox

Il primo esperimento riuscito sul protocollo è stato quello di due thread, un produttore ed un consumatore che comunicano tramite una MailBox. Il produttore genera una sequenza ordinata di numeri dispari, crea un oggetto Point nel seguente modo:

```

1  new Point(x++, Math.sin(x))
2  \end{verbatim}
3
4  L'oggetto così creato viene inserito dallo stesso produttore nella
   MailBox. Il consumatore può tentare di prelevare l'oggetto
   chiamando \verb|get()|. Mandando in stampa su console una
   sessione di comunicazioni si ha:
5
6  \begin{table}%
7  \centering
8  \begin{tabular}{l l}
9  put:& (70913.0, 0.921)\&
10 get:& (70913.0, 0.921)\&
11 put:& (70915.0, -0.737)\&
12 get:& (70915.0, -0.737)\&
13 put:& (70917.0, -0.307)\&
14 get:& (70917.0, -0.307)\&
15 put:& (70919.0, 0.993)\&
16 get:& (70919.0, 0.993)\&
17 put:& (70921.0, -0.519)\&
18 get:& (70921.0, -0.519)\&
19 put:& (70923.0, -0.561)\&
20 get:& (70923.0, -0.561)\&
21 put:& (70924.0, 0.393)
22 \end{tabular}
23 \caption{Sequenza di scritture su console da parte di un thread che
   crea la coppia (x, sin(x)) e da un altro che consuma il valore
   usando il protocollo MailBox}
24 \end{table}
25
26 Ho reimplementato lo stesso esperimento su Android, con una semplice
   activity per visualizzare il punto generato dal thread
   produttore, come il centro di un cerchio.
27 \begin{figure}
28 \centering
29 \includegraphics[width=.6\textwidth]{imgs/
   MailBoxCommTestAndroid.jpg}
30 \caption{Prova di funzionamento del protocollo di comunicazione
   fra thread implementato su Android}
31 \label{fig:mailbox_comm_test_android}
32 \end{figure}
33
34 \subsection{HMM}

```

```

35 L'interfaccia \verb|HiddenMarkovModel| è pensata per fornire uno
    scheletro per tutti i tipi di HMM.
36 Chi implementa l'interfaccia, dovrebbe partire dalla creazione di un
    insieme di stati  $S$  ed un insieme di simboli di osservazione
     $V$ . A questo punto le dimensioni delle strutture dati che
    conterranno i parametri sono note, e le implementazioni dei
    seguenti metodi accessori agli stessi dovrebbero assicurarsi che
    vengano rispettate tali dimensioni.
37 \begin{itemize}
38   \item \verb|setA(ArrayList<Object> mtx)|, \verb|getA()|: rendere
        accessibile la matrice di transizioni
39   \item \verb|setB(ArrayList<Object> mtx)|, \verb|getB()|:
        rendere accessibile la matrice di emissioni
40   \item \verb|setPi(ArrayList<Double> vec)|, \verb|getPi()| rendere
        accessibile il vettore di prior
41   \item \verb|areValidObservations(ArrayList<Object> observations)
        |, chi implementa l'interfaccia potrebbe anche decidere di
        verificare la validità di una nuova osservazione,
        verificandone l'appartenenza all'insieme delle osservazioni.
42 \end{itemize}
43 \subsubsection{Scheletro di un HMM}
44 Una prima implementazione dell'interfaccia è la classe \verb|HMM|
    che obbliga chi la vuole usare ad implementarla solo passando al
    costruttore un insieme di stati. Questo viene ottenuto rendendo
    privato il costruttore di default
45 \begin{lstlisting}[language=java, style=eclipse, caption=Costruttori
    HMM , label=code:hmm1]
46 private HMM() {...}
47 public HMM(HashMap<String, Object> states) {...}

```

Codice 6.13: Creazione di un oggetto Point

L'assegnazione dei parametri avviene solo dopo una serie di controlli sui dati in ingresso che mirano a garantire una serie di proprietà degli stessi.

Assegnazione della matrice di transizioni(vedi codice ??):

per prima cosa la matrice deve essere quadrata con dimensione pari al numero di stati. Successivamente a tale verifica si deve verificare la validità dei valori di probabilità di transizione per ciascuna coppia di stati, nonché la loro completezza come alternative probabilistiche (vale a dire che la loro somma è uguale a 1). Questa è un'operazione costosa, ma necessaria, per garantire un minimo di correttezza.

```

1 public void setA(ArrayList<Object> mtx) {
2     boolean isFitTransitionMtx = true;
3
4     if (mtx != null &&
5         // la matrice di transizione deve essere quadrata
6         // della cardinalità e della stessa dimensione
7         // dell'insieme degli stati
8         mtx.size() == S.size() &&
9         ((ArrayList<Object>) mtx.get(0)).size() == S.size()) {
10
11         // ogni elemento della matrice deve essere un valore
12         // di probabilità valido:
13         for (int i = 0; i < S.size(); i++){

```



```

14         isFitTransitionMtx &=
15         StatisticsOperations.
            areCompleteProbabilisticAlternatives((
                ArrayList<Object>) transitionsMtx.get(i));
16     }
17     // solo a questo punto assegno i valori alla matrice
18     if (isFitTransitionMtx){
19         A = transitionsMtx;
20     }
21 }else {
22     //lancio un errore oppure
23     //forzo l'utente a inizializzare
24     //A correttamente
25 }
26 }

```

Codice 6.14: Impostazione della matrice di transizione

La stessa procedura viene eseguita per l'assegnazione delle prior (vedi codice 6.15):

```

1 public void setPI(ArrayList<Object> prior) {
2     if (prior != null &&
3         prior.size() == S.size() &&
4         StatisticsOperations.
            areCompleteProbabilisticAlternatives(prior)){
5         PI = prior;
6     } else {
7         //lancio un errore oppure
8         //forzo l'utente a inizializzare
9         //A correttamente
10    }
11 }

```

Codice 6.15: Impostazione del vettore delle prior

L'implementazione delle matrici di emissione è delegato a HMM specializzate, ad emissioni discrete o continue.

HMM ad emissioni discrete

Un'implementazione concreta di un HMM (utilizzabile come oggetto) è quella della HMM ad emissioni discrete

```

1 public class DiscreteHMM extends HMM {...}

```

Codice 6.16: Firma della classe HMM ad emissioni discrete

Questa eredita dalla classe HMM tutto ciò che contiene, e fornisce una sua implementazione della matrice di emissioni (vedi codice 6.17). Anche in questo caso vengono eseguiti dei controlli sui valori che vengono assegnati: la dimensione della matrice di emissioni $B : N \times M$ dove $N = |S|$ (Cardinalità dell'insieme degli stati dell'HMM) e $M = |V|$ cardinalità dell'insieme dell'alfabeto di osservazioni; i valori assegnati forniscono un'insieme completo di alternative probabilistiche.

```

1 public void setB(ArrayList<Object> mtx) {
2     boolean isFitEmissionMtx = true;

```

```

3      // il numero di righe della matrice di
4      // emissione deve essere pari al numero di stati
5      if (mtx != null &&
6          mtx.size() == S.size() &&
7          // il numero di colonne di mtx essere
8          // pari al numero di simboli osservabili
9          ((ArrayList<Object>) mtx.get(0)).size() == V.size()) {
10         for (int i = 0; i < S.size(); i++) {
11             // la somma di tutte le probabilità di osservazione
12             // deve essere pari a 1
13             isFitEmissionMtx &= StatisticsOperations
14                 .areCompleteProbabilisticAlternatives((
15                 ArrayList<Object>) mtx
16                 .get(i));
17         }
18         if (isFitEmissionMtx) {
19             B = mtx;
20         }
21     } else {
22         //lancio un errore oppure
23         //forzo l'utente a inizializzare
24         //B correttamente
25     }
}

```

Codice 6.17: Impostazione della matrice di emissioni

HMM ad emissioni continue

L'implementazione della HMM ad emissioni continue, nella gerarchia di classi, è un'altra diramazione a partire dalla classe HMM. Una HMM ad emissioni continue ha una distribuzione di probabilità sulle emissioni. Dato che la distribuzione più comunemente utilizzata è quella Gaussiana (o Normale), è stata implementata una classe con tale distribuzione.

```
1 public class NormalHMM extends HMM
```

Codice 6.18: Firma della classe HMM ad emissioni continue

Operazioni sulle HMM

La classe di base che gestisce le operazioni sulle HMM discrete è

```
1 public class HMMOperations
```

Codice 6.19: Firme dell'operatore delle HMM

Questa permette di eseguire gli algoritmi più importanti sulle HMM, come l'algoritmo Forward-Backward (vedi Appendice 2, 3), l'algoritmo di Viterbi (vedi Appendice 4) e la sua variante offline.

Per le operazioni sulle HMM continue la classe che implementa gli algoritmi sopra menzionati è

ContinuousHMMOperations

Dopo aver creato ed inizializzato una `NormalHMM`, si può richiamare ad esempio la segmentazione nel seguente modo:

```

1  // creo l'HMM ed il suo operatore
2  ContinuousHMMOperations contHMMOp
3  NormalHMM nHMM
4  ...
5  // qui creo i parametri
6  // states, A, Pi, emissionMtx
7  ...
8  // inizializzo la HMM
9  // con i parametri creati
10 nHMM = new NormalHMM(states);
11 nHMM.setA(A);
12 nHMM.setPI(Pi);
13 nHMM.setContB(emissionMtx);
14 //collego l'operatore con l'HMM
15 contHMMOp = new ContinuousHMMOperations(nHMM);
16 ...
17 // un modo per acquisire osservazioni di
18 // prova è di leggerli da un file
19 observation = reader.readLine()
20 ...
21 // finalmente eseguo la segmentazione
22 contHMMOp.onlineViterbi(observation)

```

Codice 6.20: Applicazione dell'operatore su HMM

VALIDAZIONE

La terza fase del lavoro è la validazione. Abbiamo utilizzato un semplice meccanismo di triangolazione per fare una rapida verifica di funzionamento del lavoro totale. In dettaglio, data la cadenza (passi/minuto) e la velocità di deambulazione (m/sec), si può stimare la distanza percorsa. Allo stesso momento, si può usare un dispositivo GPS¹ per stimare la distanza percorsa e confrontare i due risultati. Ci si aspetta di avere degli errori considerevoli sull'approssimazione della distanza del GPS, in quanto ha un'accuratezza di (± 15 m).

La IMU è stata posizionata sul collo del piede di un soggetto, il quale è stato sottoposto a 6 sessioni di cammino su threadmill. Ciascuna sessione era della durata di 1:30 minuti. La velocità del threadmill è stata regolata a 2Km/h per la prima sessione ed aumentata di 1 km/h ad ogni sessione fino a 8Km/h.

La segmentazione di ciascuna sessione di cammino è stata salvata su un file, dal quale è stata calcolata la cadenza. Per calcolare la cadenza è sufficiente conoscere contare il numero di cicli di deambulazione al minuto. Quello che abbiamo fatto è calcolare la cadenza usando ognuno dei 4 eventi, determinati dalla segmentazione, per calcolare la cadenza. Facendo la media dei 4 risultati abbiamo ottenuto una buona stima della cadenza. Questa operazione è stata ripetuta per ciascuna velocità.

Abbiamo ottenuto una distribuzione di valori di cadenza per ciascuna velocità. A questo punto applicando una regressione lineare abbiamo trovato una relazione tra cadenza e velocità.

Dopo aver caricato bene le batterie dello Smartphone, siamo usciti dal laboratorio ed abbiamo fatto la prova per le strade di Pontedera. Il soggetto degli esperimenti, ha indossato anche in questo caso la IMU sul collo del piede. La velocità di cammino, qui è stata scelta del soggetto. Sullo Smartphone è stato attivato il segmentatore e su un altro il GPS. La distanza ed il percorso fatto tra i due punti è stata stimata dal GPS.

I dati del GPS, sono riferiti a coordinate geografiche² che sono state convertite per poter calcolare distanze in metri.

¹ Global Positioning System

² longitudine, latitudine

Parte III

APPENDICE

SULLE HMM

I HMM sono strumenti di modellazione di sequenze temporali. Un comune esempio di applicazione è il riconoscimento della comunicazione verbale (Speech Recognition) [45]. Una sequenza temporale non è altro che un segnale.

Definizione 3 (Segnale). Un segnale è il risultato osservabile di un processo, che in base al numero di sorgenti di provenienza viene detto

- **Puro**, se a sorgente unica
 - **Corrotto** altrimenti
-

Un segnale può essere di natura discreta o continua rispetto al tempo. Ad esempio un segnale che consista in una sequenza di caratteri viene incluso fra i segnali discreti, mentre la comunicazione verbale fra i segnali continui.

La sorgente di un segnale (il processo), a sua volta, può essere stazionaria, se le sue proprietà statistiche non variano nel tempo, o non stazionaria altrimenti.

A.1 PROBLEMA: MODELLARE SEGNALI

Il problema della modellazione dei segnali è di fondamentale importanza, in molti settori. Le motivazioni principali sono la riproduzione dei segnali e la scoperta delle loro sorgenti. Esistono varie tipologie di modelli dai quali scegliere per modellare al meglio un dato segnale. La suddivisione maggiore è quella fra modelli deterministici e stocastici.

- Modelli deterministici: descrivono il segnale mediante le sue proprietà note. Ad esempio la luce ha una velocità pari a 300.000km/s.
- Modelli stocastici: descrivono le proprietà statistiche del segnale. Un esempio di modello statistico sono i processi gaussiani, i processi markoviani ed i le HMM (Hidden Markov Models). In questi modelli si assume che il segnale possa essere caratterizzato come un Processo Parametrico Stocastico, con parametri stimabili in modo algoritmico.

I modelli deterministici descrivono i comportamenti di tutti i parametri di un segnale, in tutte le condizioni possibili. In molti casi però, i segnali di interesse sono abbastanza complessi, o oscurati, da non poterne conoscere tutti i parametri, quindi i modelli deterministici risultano inefficaci. L'alternativa sono i modelli stocastici che descrivono solo un sottoinsieme dei parametri che caratterizzano un segnale, oppure una risultante di questi, e dato che il segnale si comporta solo in parte come i parametri descritti, il modello può fornire solo una descrizione probabilistica del segnale.

Definizione 4 (Spazio campionario Ω).

$$\Omega = \{\omega : \omega \text{ è il risultato di un esperimento}\} \quad (\text{A.1})$$

Definizione 5 (Evento E).

$$E \subseteq \Omega \quad (A.2)$$

Definizione 6 (Spazio di probabilità $\langle \Omega, F, \wp \rangle$).

$$F = \{E : E \text{ gode di qualche proprietà} \mid |F| \geq 0\}$$

$$\wp : F \rightarrow \mathfrak{R} \quad \text{t.c.}$$

1. $\wp(E) \geq 0$
 2. $\wp(\Omega) = 1$
 3. $E_i \cap E_j = \emptyset \Leftrightarrow \wp(E_i \cup E_j) = \wp(E_i) + \wp(E_j)$
-

Definizione 7 (Variabile Stocastica X). Una variabile stocastica quantifica gli elementi dello stato campionario

$$X : \Omega \rightarrow \mathfrak{R} \quad (A.3)$$

Queste possono essere discrete:

$$\wp(X = k) \stackrel{\text{def}}{=} \wp(\{w : X(w) = k\}) \quad (A.4)$$

oppure possono essere continue:

$$\wp(a \leq X \leq b) \stackrel{\text{def}}{=} \wp(\{w : a \leq X(w) \leq b\}) \quad (A.5)$$

Definizione 8 (Processo Stocastico St). Dato uno spazio di probabilità $\langle \Omega, F, \wp \rangle$

$$St = \{F_t : t \in T\} \quad \text{dove } t \text{ è il tempo} \quad (A.6)$$

A.2 PROCESSI DI MARKOV

Un processo di Markov è un processo stocastico che gode della proprietà di Markov o assenza di memoria. I processi di Markov si possono essere raggruppati in base al tempo che può essere discreto o continuo, ed allo spazio degli stati che può essere anche esso discreto e finito o continuo.

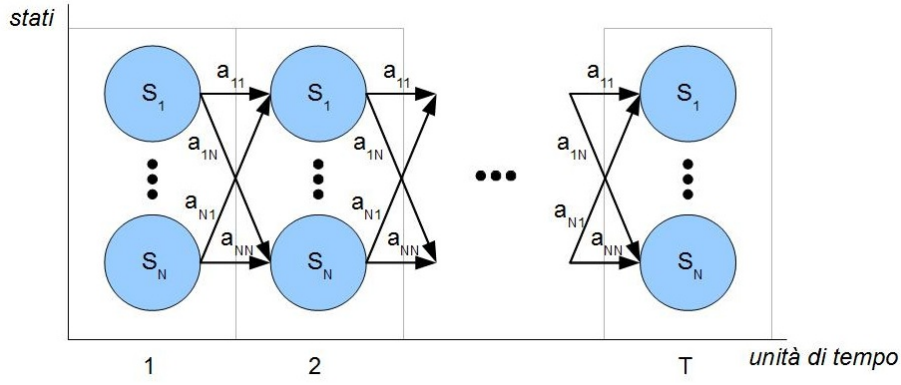


Figura 10.: Rappresentazione a lattice di Processo Discreto di Markov

A.2.1 Tempo e spazio discreti

Ad ogni unità temporale il processo transita casualmente da uno stato ad un altro. Dunque è impossibile prevedere in modo deterministico in che stato si troverà il sistema in un istante di tempo futuro.

Definizione 9 (Processi di Markov (spazio-tempo) Discreti). $\langle N, A, \pi \rangle$ Processo stocastico con:

- un numero finito di stati $S = \{s_1, \dots, s_N\}$,
 - un vettore di probabilità a priori π che determina $\forall i = 1, \dots, N$ la probabilità che il processo sia nello stato S_i a tempo $t_1 = 0$, ovvero $p(q_0 = \pi_i)$, dove q_k è lo stato del processo markoviano a tempo k .
 - una matrice di transizione $(N \times N)$ che indica la probabilità di transire da ogni stato ad ogni altro.
-

Si può dare una descrizione probabilistica completa dei processi di Markov Discreti con la seguente equazione:

$$p[q_t = s_j | q_{t-1} = s_i, \dots, q_0 = s_p] \quad (A.7)$$

Ovvero la probabilità che il processo di Markov si trovi nello stato s_j a tempo t dato che a tempo $t-1$ si trovava nello stato s_i , e ..., e nello stato iniziale q_0 era nello stato s_p . Un caso speciale di (A.7) in cui la probabilità che il sistema si trovi in un determinato stato nel presente dipende solo dall'istante di tempo precedente e non da tutta la storia a partire dal primo istante di tempo.

Definizione 10 (Modelli di Markov del Primo Ordine).

$$p[q_t = S_j | q_{t-1} = S_i] \quad (A.8)$$

Le Catene di Markov ad ogni istante temporale compiono una transizione di stato con una probabilità nota. Tale probabilità è descritta nella Matrice delle Probabilità di Transizione.

Definizione 11 (Matrice delle Probabilità di transizione).

$$A = a_{i,j} = p[q_t = S_j | q_{t-1} = S_i] \quad \text{con } 1 \leq i, j \leq N \quad (\text{A.9})$$

Proprietà delle a_{ij} derivanti dal fatto che sono dei valori di probabilità:

1. $a_{ij} \geq 0$
2. $\sum_{j=1}^N a_{ij} = 1$

All'istante di tempo iniziale $t = 0$, lo stato della Catena marcoviana è determinato da una distribuzione di probabilità. Un vettore $\pi : 1 \times N$ che a ciascuno stato fa corrispondere la probabilità che sia lo stato iniziale, questa è nota come probabilità a Priori o probabilità dello stato iniziale.

Definizione 12 (Distribuzione di probabilità dello stato iniziale).

$$\pi_i = p(q_1 = S_i) \quad \text{con } 1 \leq i \leq N \quad (\text{A.10})$$

A.3 HMM

Avvolte le osservazioni sono funzioni probabilistiche di qualche stato nascosto (cioè esiste un processo stocastico nascosto che produce una sequenza di osservazioni).

Definizione 13 (Matrice di probabilità delle Osservazioni).

$$B = \{b_j(k)\} \\ \text{dove } b_j(k) = p[v_k \text{ all'istante } t | q_t = s_j] \quad \text{con } 1 \leq j \leq N, 1 \leq k \leq M \quad (\text{A.11})$$

Definizione 14 (HMM a Osservazioni discrete).

$$\text{HMM} = \langle N, M, A, B, \pi \rangle \quad (\text{A.12})$$

dove:

1. $N = |S|$ è l'insieme degli stati $S = \{s_1, \dots, s_N\}$,
 2. $M = |V|$ è un insieme finito di Simboli di Osservazione $V = \{v_1, \dots, v_M\}$,
 3. A è la matrice di transizione definita in (A.9),
 4. B è la matrice di probabilità dei Simboli di Osservazione definita in (A.11),
 5. π è il vettore di probabilità a priori definito in (A.10).
-

Un HMM può essere usato per generare una sequenza di osservazioni $O = \{O_1, O_2, \dots, O_T\}$ nel seguente modo:

Algorithm 1 genera sequenze con HMM

```

1:  $q_1 = \arg \max_{1 \leq i \leq N} \pi_i$ 
2: for  $t = 1, \dots, T; t++$  do
3:    $o_t = \max_{1 \leq s \leq N} [b_{q_t, s}]$ 
4:    $q_t = \arg \max_{1 \leq j \leq N} a_{i, j}$ 
5: end for
6: return {modello}

```

A.3.1 HMM ad emissioni continue

Nel caso in cui le osservazioni siano continue è necessario avere un modello che associ ad ogni stato una distribuzione di emissione, invece che un singolo valore. Un esempio di distribuzione è la gaussiana mono variata. In questo caso la definizione della matrice di emissione descritta in (A.11) diventa

$$B = b_j(x) = \mathcal{N}(x, \mu_j, \sigma_j) = \frac{1}{\sigma_j \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu_j)^2}{2\sigma_j^2}} \quad \text{per } 1 \leq j \leq N \quad (\text{A.13})$$

La formula può essere generalizzata a più gaussiane multivariate dette *mixture gaussiane*

$$B = b_j(x) = \sum_{m=1}^M c_{j,m} \mathcal{N}(x, \mu_j, \Sigma_j) \quad \text{per } 1 \leq j \leq N \quad (\text{A.14})$$

Ovviamente è possibile applicare qualunque tipo di distribuzione al posto della gaussiana.

Dalla definizione (A.14) segue

$$\int_{-\infty}^{\infty} b_j(x) dx = 1 \quad \text{per } 1 \leq j \leq N \quad (\text{A.15})$$

A.3.2 Tipi di HMM

Vi sono casi particolari di HMM che sono considerati importanti per la loro ricorrenza nella descrizione di sistemi naturali. Il più generico tipo di HMM è noto come *Ergodico*, in cui ogni stato è connesso ad ogni altro stato, quindi la matrice di transizione è una matrice senza zeri.

Un modello più significativo è il modello *Bakis* o *Sinistra-Destra*. In questo modello l'aumentare del tempo, causa una variazione monotona crescente modulo N sull'indice degli stati. Questo modello è conforme ai segnali le cui proprietà variano con il tempo. Le matrici di transizione dei modelli *Sinistra-Destra*, godono della proprietà

$$\begin{aligned} a_{i,j} &= 0 \quad \forall j < i \\ a_{i,j} &= 0 \quad j > i + \Delta \end{aligned} \quad (\text{A.16})$$

La seconda condizione serve ad evitare che vi siano grossi balzi in avanti sugli stati, di solito $\Delta = 2$. Inoltre le probabilità iniziali hanno il vincolo

$$\pi_i = 1 \Leftrightarrow i = 1 \quad (\text{A.17})$$

supponendo di avere gli stati ordinati da 1 ad N

A.4 TIPI DI PROBLEMI CHE SI AFFRONTANO CON LE HMM

Generalmente con le HMM si affrontano 3 tipologie di problemi.

1. **Valutazione:** dati O e λ , calcolare $p(O|\lambda)$ in modo ottimale.
2. **Decodifica:** dati O e λ , trovare la sequenza di stati $Q = q_1, q_2, \dots, q_T$ "migliore", secondo un criterio di ottimalità, che possa aver generato O .
3. **Apprendimento:** dato λ , regolarne i parametri per massimizzare $p(O|\lambda)$?

Valutazione

Il problema della valutazione (Evaluation) consiste nel calcolare la probabilità che una certa sequenza di osservazioni sia stata prodotta da un dato modello. La soluzione del problema permette, dati diversi modelli candidati $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ ed una sequenza di osservazioni O , di scegliere λ_k con $\max_{1 \leq i \leq n} \{p(O|\lambda_i)\}$.

Una soluzione naïve del problema della valutazione è quello di enumerare tutte le possibili sequenze di stati (detti anche percorsi) $Q = q_1, \dots, q_T$ dove $q_i \in S = s_1, s_2, \dots, s_N$ e calcolare per ciascuna la probabilità che l'osservazione sia stata prodotta da essa e moltiplicare il risultato per la probabilità che quel particolare percorso venga scelto.

$$\begin{aligned}
 p(O|\lambda) &= \sum_{1 \leq t \leq T, i \in \{\text{tutti } Q\}} p(O_t|Q_i, \lambda) p(Q_i|\lambda) \quad \text{dove} \\
 p(O|Q_i, \lambda) &= \prod_{1 \leq t \leq T} p(O_t|q_{i,t}, \lambda) \\
 &= b_{q_{i,1}}(O_1) * \dots * b_{q_{i,T}}(O_T) \quad \text{e} \\
 p(Q_i|\lambda) &= \pi_{q_1} * a_{q_1, q_2} * \dots * a_{q_{T-1}, q_T}
 \end{aligned} \tag{A.18}$$

L'algoritmo ha complessità esponenziale, $O(N^T)$.

La soluzione ottima a questo problema è data dall'algoritmo di programmazione lineare noto come algoritmo Forward. L'idea su cui si basa è di considerare dei percorsi parziali per rappresentare osservazioni parziali. Vengono definite le variabili $\alpha_{i,t}$ come la probabilità di aver osservato la sequenza parziale O_1, \dots, O_t e di essere nello stato S_i all'istante temporale t

$$\alpha_{i,t} = p(o_1, \dots, o_t, q_T = S_i|\lambda) \tag{A.19}$$

Dalla definizione (A.19) ricaviamo la matrice $\alpha(N \times T)$ nella quale vengono inserite le probabilità parziali per ogni combinazione stato-tempo, di modo che al passo temporale successivo il calcolo possa essere basato su tali valori e non ricalcolando tutto dal primo istante di tempo.

La complessità dell'algoritmo Forward è $O(NT)$. Il netto miglioramento è dovuto al fatto che i risultati parziali vengono riutilizzati, limitando il numero di calcoli da svolgere ad ogni istante temporale a N . La struttura grafica su cui si basa l'algoritmo Forward è detta struttura a traliccio.

Decodifica

Il secondo problema è noto come problema di Decodifica in cui si cerca la sequenza di stati $Q = q_1, \dots, q_T$ che ha generato una data sequenza di osservazioni $O = o_1, \dots, o_T$. Dato che, al contrario del problema della Valutazione,

Algorithm 2 Forward

```

1: {1. Inizializzazione}
2: for  $j = 1$  to  $N=|S|$  do
3:    $\alpha_{j,1} = \pi_j b_j(o_1)$       { La probabilità congiunta di partire dal  $j$ -esimo
      stato }
4: end for                        { ed emettere il primo segnale dallo stesso}

5: {2. Induzione}
6: for  $t = 1$  to  $T - 1$  do
7:   for  $j = 1$  to  $N$  do
8:      $\alpha_{j,t+1} = [\sum_{i=1}^N \alpha_{i,t} a_{i,j}] b_j(o_{t+1})$   { La probabilità congiunta di
      arrivare al }
9:   end for                      {  $j$ -esimo stato ed emettere il  $t +$ 
      1-esimo segnale}
10: end for
11: {3. Terminazione}
12: for  $j = 1$  to  $N$  do
13:    $\varphi(O|\lambda) = \sum_{j=1}^N \alpha_{j,T}$ 
14: end for

```

non esiste un'unica soluzione al problema di Decodifica, quello che si fa è di stabilire un criterio di ottimalità in funzione del quale fare la ricerca.

Un possibile criterio di ottimalità della sequenza è quello di scegliere gli stati q_t che all'istante di tempo t sono i più probabili. Tale criterio massimizza il numero atteso di stati corretti individualmente.

Per risolvere il problema necessitiamo di due variabili β e γ . La prima è definita come risultato dell'algoritmo Backward, che computa il processo inverso dell'algoritmo Forward.

$$\beta_{i,t} = \varphi(o_{t+1} \dots o_T | q_t = S_i, \lambda) \quad (A.20)$$

Algorithm 3 Backward

```

1: {1. Inizializzazione}
2: for  $j = 1$  to  $N=|S|$  do
3:    $\beta_{j,T} = 1$ 
4: end for
5: {2. Induzione}
6: for  $t = T - 1$  to  $1$  do
7:   for  $i = 1$  to  $N$  do
8:      $\beta_{i,t} = \sum_{j=1}^N a_{i,j} b_j(o_{t+1}) \beta_{j,t+1}$ 
9:   end for
10: end for

```

La seconda variabile, γ è definita come la probabilità di essere in uno stato S_i al tempo t , data un'osservazione O ed un modello λ .

$$\gamma_{i,t} = \wp(q_t = S_i | O, \lambda) \quad (A.21)$$

γ può essere calcolata in funzione delle variabili di Forward e Backward:

$$\gamma_{i,t} = \frac{\alpha_{i,t} \beta_{i,t}}{\wp(O | \lambda)} = \frac{\alpha_{i,t} \beta_{i,t}}{\sum_{j=1}^N \alpha_{j,t} \beta_{j,t}} \quad (A.22)$$

$\alpha_{i,t}$, fornisce le probabilità delle osservazioni parziali fino a t , mentre $\beta_{i,t}$, da $t+1$ in poi, essendo correntemente nello stato S_i . Il denominatore dell'equazione (A.22) è un fattore di normalizzazione che rende γ un valore di probabilità, quindi sarà valida la proprietà

$$\sum_{i=1}^N \gamma_{i,t} = 1 \quad (A.23)$$

Usando γ è possibile trovare lo stato q che individualmente è il più probabile al tempo t :

$$q_t = \arg \max_{0 \leq i \leq N} \gamma_{i,t} \quad (A.24)$$

Anche se (A.24) massimizza il numero di stati più probabili scegliendo quelli che individualmente sono i più probabili, potrebbe creare problemi nel momento in cui si considera una sequenza di stati. Se la HMM ha anche transizioni nulle, la sequenza generata da (A.22) potrebbe essere non valida, perché non vi è nessun controllo sulla probabilità di co-occorrenza di stati.

Il criterio di ottimalità può essere cambiato ad individuare la miglior sequenza di lunghezza T che massimizzi la probabilità di tutti gli stati nella sequenza. Per trovare il cammino migliore, viene usato un metodo di programmazione dinamica detto algoritmo di Viterbi. L'algoritmo di Viterbi individua la migliore sequenza di stati che rispondano a una data sequenza di osservazioni:

$$\delta_{i,t} = \max_{q_1, \dots, q_{t-1}} \wp(q_1 \dots q_t = S_i, o_1 \dots o_t | \lambda) \quad (A.25)$$

Nella matrice δ vengono inserite le probabilità, mentre per tenere traccia del percorso migliore si usa una variabile ψ :

$$\psi_{i,t} = \arg \max_{q_1, \dots, q_{t-1}} \wp(q_1 \dots q_t = i, o_1 \dots o_t | \lambda) \quad (A.26)$$

La procedura completa per trovare il percorso di stati più probabile è la seguente:

A.4.1 Algoritmo di Viterbi in Tempo Reale

Il problema dell'algoritmo di Viterbi in molte applicazioni reali, è la latenza. I sistemi che utilizzano l'algoritmo hanno spesso necessità di avere risultati immediati, in tempo reale. Trovare la sequenza di stati più verosimile che ha generato una sequenza di osservazioni è (come mostrato dall'algoritmo 4) fattibile con l'algoritmo di Viterbi, tracciando percorsi nella sequenza temporale di stati ed una volta arrivato a termine (tempo finale T), ricostruendo a ritroso il cammino

Algorithm 4 Viterbi

```

1: {Inizializzazione}
2: for  $i = 0$  to  $N$  do
3:    $\delta_{i,1} = \pi_i b_i(o_1)$ 
4:    $\psi_{i,1} = 0$ 
5: end for
6: {Iterazione}
7: for  $t = 2$  to  $T$  do
8:   for  $i = 1$  to  $N$  do
9:      $\delta_{i,t} = \max_{1 \leq j \leq N} [\delta_{j,t-1} a_{j,i}] * b_i(o_i)$ 
10:     $\psi_{i,t} = \arg \max_{1 \leq j \leq N} [\delta_{j,t-1} a_{j,i}]$ 
11:   end for
12: end for
13: {Terminazione}
14:  $P^* = \max_{1 \leq i \leq N} [\delta_{i,T}]$ 
15:  $q_T^* = \arg \max_{1 \leq i \leq N} [\delta_{i,T}]$ 
16: {Backtracking}
17: for  $t = T - 1$  to  $1$  do
18:    $q_t^* = \psi_{q_{t+1}^*, t+1}$ 
19: end for
[1]

```

migliore. Un problema significativo dell'algoritmo è che assume che la sequenza temporale sia finita. Vi sono molti casi pratici in cui l'applicazione dell'algoritmo sarebbe utile, per i quali i dati sono un flusso continuo ed incessante di dati. Una possibile soluzione è l'applicazione dell'algoritmo di Viterbi a finestre successive di dati, dopo la quale restituire solo una parte iniziale degli decodificati [46], [47](perché hanno una probabilità maggiore di essere corretti). Questa soluzione, conduce a una decodifica sub-ottimale.

Un'altra soluzione consiste nel confrontare più percorsi su una finestra temporale in espansione, finché le soluzioni non convergono. Nel lavoro [48] per la localizzazione automatica di un soggetto via video, la finestra temporale viene dinamicamente ridimensionata in base a un'euristica che bilancia latenza e accuratezza. Questo tipo di approccio non garantisce la convergenza dei percorsi considerati. L'approccio che noi abbiamo usato nel lavoro è quello proposto da Bloit et al [49].

Definizione 15 (Cammino locale). Viene detta cammino locale, la sequenza di stati $s(a, b, i)$ ottenuta applicando l'algoritmo di Viterbi alla finestra temporale dall'istante temporale a all'istante b (con $a < b$) e compiendo il backtracking da uno stato arbitrario i al tempo b .

Definizione 16 (Punto di Fusione). Si definisce punto di fusione, l'istante temporale $\tau < T$ t.c per $a \leq t \leq \tau$, tutti i cammini locali appartenente all'insieme dei cammini locali $CL = \{s(a, b, i), \forall i \in S\}$ (dove S è l'insieme degli stati dell'HMM), sono uguali.

Un punto di fusione gode della seguente proprietà: i cammini locali fino al punto di fusione (che per definizione sono tutti uguali) sono sempre uguali al cammino globale (quello ottenibile con l'algoritmo di Viterbi originale ⁴)¹.

$$a = 0, b = 0$$

Apprendimento

L'ultimo problema è quello dell'Apprendimento che consiste nel configurare i parametri di λ per massimizzare la probabilità di una sequenza di dati osservati. Non è noto un metodo analitico per risolvere il problema, infatti, data una sequenza finita di osservazioni, non esiste un modo ottimo di stimare i parametri di λ . Possiamo però scegliere λ in modo da massimizzare localmente $p(O|\lambda)$, con un procedimenti iterativi come

- Baum-Welch
- Expectation-Modification
- Tecniche basate sul gradiente

La procedura iterativa è detta riestimazione, e consiste in un miglioramento graduale (in base ad un criterio) ed un aggiornamento dei parametri. Per descrivere le riestimazione, è necessario definire la variabile ξ come la probabilità di essere in un certo stato in un istante di tempo ed essere in un altro nel successivo istante di tempo:

$$\begin{aligned} \xi_t(i, j) &= p(q_t = S_i, q_{t+1} = S_j | O, \lambda) \\ &= \frac{\alpha_{i,t} a_{i,j} b_i(o_t) \beta_{j,t+1}}{p(O|\lambda)} = \frac{\alpha_{i,t} a_{i,j} b_i(o_t) \beta_{j,t+1}}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \alpha_{i,t} a_{i,j} b_i(o_t) \beta_{j,t+1}} \end{aligned} \quad (A.27)$$

Possiamo correlare γ e ξ nel seguente modo

$$\gamma_{i,t} = \sum_{j=1}^N \xi_t(i, j) \quad (A.28)$$

Definizione 17. Numero di transizioni attese

- Numero di transizioni attese da S_i

$$\sum_{t=1}^{T-1} \gamma_{i,t} \quad (A.29)$$

- Numero di transizioni attese da S_i a S_j

$$\sum_{t=1}^{T-1} \xi_t(i, j) \quad (A.30)$$

- $\bar{\pi}_i$ = numero di volte nello stato S_i a tempo $t = 1$ atteso

$$= \gamma_{i,1} \quad (A.31)$$

¹ per la dimostrazione consultare [49]

- $\bar{a}_{i,j} = \frac{\text{numero di transizioni attese dallo stato } S_i \text{ allo stato } S_j}{\text{numero di transizioni attese dallo stato } S_i}$

$$= \frac{\sum_{t=1}^{T-1} \xi_t(i,j)}{\sum_{t=1}^{T-1} \gamma_{i,t}} \quad (\text{A.32})$$

- $\bar{b}_j(k) = \frac{\text{numero di volte nello stato } S_j \text{ osservando } v_k}{\text{numero di volte atteso nello stato } S_i}$

$$= \frac{\sum_{t=1}^T \gamma_{j,t} \quad \text{t.c. } o_t = v_k}{\sum_{t=1}^T \gamma_{j,t}} \quad (\text{A.33})$$

Dato il modello $\lambda = (A, B, \pi)$ indico il modello riestimato con $\bar{\lambda} = (\bar{A}, \bar{B}, \bar{\pi})$. L.Baum et al[50] hanno dimostrato che nel processo di riestimazione è vera una delle seguenti alternative:

1. $\lambda = \bar{\lambda}$
2. $\wp(O|\bar{\lambda}) > \wp(O|\lambda)$

Nel secondo caso è possibile sostituire $\bar{\lambda}$ a λ , ripetendo l'iterazione, finché non si verifica una condizione d'arresto, ed il risultato della procedura è detto stima di massima verosimiglianza (maximum likelihood estimate) dell'HMM

Algorithm 5 Baum-Welsh o Maximum Likelihood Expectation.

Require: maxlikelihood($\lambda = A, B, \pi$)

1: **repeat**

2: $\pi_i = \gamma_1(i)$ $a_{ij} = \frac{\sum_{t=1}^{T-1} \xi_t(i,j)}{\sum_{t=1}^{T-1} \gamma_t(i)}$ $b_j(k) = \frac{\sum_{t=1, O_t=v_k}^T \gamma_t(j)}{\sum_{t=1}^T \gamma_t(j)}$

- 3: **if** $\lambda = \tilde{\lambda}$ **then**
 4: **return** λ
 5: **else if** $\wp(O|\tilde{\lambda}) > \wp(O|\lambda)$ **then**
 6: maxlikelihood($\tilde{\lambda}$)
 7: **end if**
 8: **until** {una condizione limite}
-

A.5 PROBLEMI DI IMPLEMENTAZIONE DI HMM

Vi sono diversi problemi che si devono affrontare per implementare le HMM ed i vari algoritmi sinora descritti. Alcuni di questi sono

- Ridimensionamento (scaling): la procedura di riestimazione, comporta una lunga sequenza di prodotti di valori di probabilità. Ciò fa in modo che i valori tendano esponenzialmente a zero, quindi vi è un inevitabile problema di underflow. L'unico modo di ovviare al problema è quello di ridimensionare i valori, moltiplicandoli per un coefficiente che non dipenda dallo stato, ma solo dal tempo. Alla fine del processo, i coefficienti di ridimensionamento vengono eliminati.

Ad esempio nella procedura di riestimazione si calcola la matrice di transizione con l'equazione (A.32)

$$\bar{a}_{i,j} = \frac{\sum_{t=1}^{T-1} \alpha_{i,t} a_{i,j} b_j(o_{t+1}) \beta_{j,t+1}}{\sum_{t=1}^{T-1} \sum_{j=1}^N \alpha_{i,t} a_{i,j} b_j(o_{t+1}) \beta_{j,t+1}} \quad (\text{A.34})$$

Usando un coefficiente di ridimensionamento è $c_t =$

$$\frac{1}{\sum_{j=1}^N \alpha_{i,t}} \quad (\text{A.35})$$

si ottiene un $\alpha_{j,t}$ scalato

$$\hat{\alpha}_{j,t} = \frac{\sum_{j=1}^N \hat{\alpha}_{j,t-1} a_{i,j} b_j(o_t)}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \hat{\alpha}_{i,t-1} a_{i,j} b_j(o_t)} \quad (\text{A.36})$$

Nel momento in cui vengono calcolati i $\beta_{j,t}$, vengono eliminati i fattori di ridimensionamento:

$$\hat{\beta}_{j,t} = c_t \beta_{j,t} \quad (\text{A.37})$$

La modifica più importante deve essere applicata all'algoritmo Forward, perché si è interessati al valore di probabilità. In questo caso non è possibile semplicemente sommare $\alpha_{j,t}$, perché sono valori scalati e privi di significato se presi singolarmente. In questo caso viene usata la seguente proprietà:

$$\prod_{t=1}^T c_t \sum_{i=1}^N \alpha_{i,T} = 1 \quad (\text{A.38})$$

$$\prod_{t=1}^T c_t \wp(O|\lambda) = 1 \Leftrightarrow \wp(O|\lambda) = \frac{1}{\prod_{t=1}^T c_t}$$

Qui introduciamo il logaritmo della probabilità, in modo che il valore sia calcolabile su un computer

$$\log(\wp(O|\lambda)) = - \sum_{t=1}^T \log c_t \quad (\text{A.39})$$

- Molteplici sequenze di osservazione. Nelle HMM Sinistra-Destra, non si possono usare singole sequenze di osservazioni per addestrare il modello, perché questo tipo di modello tende a uscire molto facilmente da uno stato, quindi ad ogni stato corrispondono pochissime osservazioni. Ciò implica che per una quantità di dati sufficiente a fare una stima affidabile dei parametri del modello si devono usare più sequenze di osservazioni.
- Stime dei parametri iniziali. Un problema tutt'ora irrisolto è come scegliere i valori dei parametri iniziali in modo tale che i massimi locali corrispondano al massimo globale della funzione di verosimiglianza (likelihood). Normalmente quello che si fa è scegliere valori casuali oppure uniformi per poi iniziare la procedura di riestimazione. Invece per quanto riguarda i parametri B è necessaria una buona stima iniziale, che solitamente viene fatta con un processo di segmentazione e media delle osservazioni in stati.
- Insufficienza di dati. Un problema frequente è che il numero di osservazioni è troppo basso per consentire di avere una stima abbastanza buona dei parametri del modello. Una possibile soluzione è quella di aumentare il numero di dati, ma ciò è spesso impraticabile. L'approccio inverso è quello di ridurre il numero di parametri, come ad esempio il numero di stati. Ciò è in teoria sempre praticabile, ma spesso poco sensato, in quanto vi sono delle motivazioni valide per avere quei parametri. Una terza alternativa è quella di interpolare tra un insieme di stime di parametri con un'altro da un modello per il quale si ha un numero sufficiente di dati di addestramento. L'idea è quella di progettare insieme al modello, anche una versione ridotta dello stesso, per il quale il numero di dati in possesso sia sufficiente. Date le stime per i parametri del modello $\lambda = (A, B, \pi)$ come per la versione ridotta $\lambda' = (A', B', \pi')$ il modello interpolato è ottenuto come

$$\tilde{\lambda} = \epsilon\lambda + (1 - \epsilon)\lambda' \quad (\text{A.40})$$

dove ϵ rappresenta un peso che viene associato ai parametri del modello, ed $(1 - \epsilon)$ il peso associato a quelli del modello ridotto. Il valore di ϵ viene determinato in funzione dei dati di addestramento. Mercer et al [?] hanno dimostrato che è possibile stimare l' ϵ ottimo mediante l'algoritmo Forward-Backward, espandendo la HMM a partire da (A.40).

- Scelta della dimensione e tipo del modello. Si tratta della scelta dei parametri che si deve fare all'inizio per rappresentare al meglio il problema con le HMM. Il tipo di HMM, Ergodico o Sinistra-Destra, la dimensione del modello cioè numero di stati, l'alfabeto di osservazione, discreti o continui, a distribuzione singola o a misture di distribuzioni. Non vi è un metodo standard, o migliore di prendere queste decisioni, ma devono essere fatte in base al tipo di segnale che si sta modellando.

SISTEMI IN TEMPO REALE, ALGORITMI IN LINEA ED IL PROBLEMA DELLA LATENZA E ACCURATEZZA

B.1 TEMPO REALE

La nozione di Tempo Reale (Real Time, RT) si contrappone ad una di tempo logico o virtuale, in quanto misura di una quantità fisica. La seconda forma di tempo, quella logica è una misura di tipo qualitativo e rappresenta l'ordine di eventi.

In diversi ambiti, la nozione di sistema RT assume significati diversi:

- Informatica, si parla di Computazione RT (Real Time Computing - RTC) o computazione Reattiva: lo studio di sistemi software e hardware soggetti a vincoli di tempo reale. Un esempio di tale sistema sono i sistemi operativi RT (un esempio è LynxOS), che garantiscono tempi di risposta ben definiti, a differenza dei sistemi operativi non RT (anche se solitamente hanno tempi di risposta brevi).
Un altro esempio sono i linguaggi di programmazione Sincroni come ChuckK, che è un linguaggio concorrente per l'elaborazione di file audio.
- Simulazioni, RT si riferisce ad una sincronizzazione con le tempistiche reali, ovvero gli eventi nel processo simulato devono avvenire allo stesso tempo degli eventi nel processo reale. Un esempio sono i video giochi.
- Trasferimento di dati, elaborazione di media, RT significa, senza un ritardo percettibile dall'utente.

Sistemi RT possono essere classificati in base alla conseguenza di un ritardo nei tempi di risposta.

- Sistemi Hard RT Un ritardo può avere delle conseguenze catastrofiche, ad esempio un sistema di pilotaggio.
- Sistemi Soft RT Un ritardo non ha conseguenze sulla vita o di tipo economico, ad esempio un sistema per la visualizzazione di file video.

Per garantire che tali scadenze vengano rispettate, deve essere noto il tempo di esecuzione massima dei singoli processi di un programma. Questo problema è molto complesso e spesso si ottengono solo soluzioni parziali.

B.2 ALGORITMI IN LINEA

Un algoritmo è detto in linea (online), se è in grado di dare un risultato a partire da un sottoinsieme di dati in ingresso in un determinato ordine. Un algoritmo fuori linea (offline) invece, deve avere tutti i dati inizialmente per poter fornire un risultato.

Esempi dei due tipi di algoritmi sono l'algoritmo di ordinamento a inserzione (Insertion Sort) che ha bisogno di 1 numero in più alla volta per poter fornire dopo n esecuzioni una lista ordinata, mentre l'algoritmo di ordinamento per selezione (Selection Sort) ha bisogno dell'intera lista di numeri per poter cominciare a ordinare.

Dato che un algoritmo in linea prende decisioni basate solo su parte dei dati di cui necessiterebbe la risoluzione del problema in questione, le decisioni prese possono risultare non ottimali. Uno degli obbiettivi dello studio degli algoritmi in linea è di valutare la qualità delle decisioni possibili in tali circostanze. Il metodo che viene utilizzato per formalizzare quest'idea è noto come Analisi Competitiva: vengono confrontate le prestazioni relative di un algoritmo in linea e fuori linea ottimale sulla stessa istanza di un problema.

B.3 LATENZA

Il concetto di latenza nell'ambito informatico/ingegneristico assume svariati significati. Generalmente fa riferimento ad un ritardo rispetto ad un tempo atteso in un sistema. In base al sistema varia la definizione di latenza.

CENNI DI MECCANICA CLASSICA

C.1 CINEMATICA

La Cinematica[51] è lo studio del moto di corpi materiali, senza considerare le cause e conseguenze di tale moto. La parte della Meccanica che si occupa delle cause e conseguenze del moto dei corpi è la Dinamica o Cinetica. La Cinematica fornisce una descrizione geometrica dei possibili moti.

Il soggetto mediante il quale vengono condotti gli studi in Cinematica è la particella, vale a dire un corpo immaginario, che occupa un singolo punto dello spazio. Un insieme di particelle le cui distanze relative rimangono invariate in ogni riferimento spaziotemporale.

C.1.1 Moto rettilineo di una particella

Le quantità principali di cui si occupa sono

Posizione

Il vettore posizione della particella P nel punto A: $\mathbf{r} = (x_A, y_A, z_A)$ con magnitudine $|\mathbf{r}| = \sqrt{x_A^2 + y_A^2 + z_A^2}$ (m).

Spostamento

Lo spostamento da A a B di P: $\mathbf{r}_{AB} = \mathbf{r}_B - \mathbf{r}_A$ (m)

Distanza

La distanza $s = \int_{t_1}^{t_2} \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2} dt$ (m) dove t è il tempo.

Velocità

La **velocità**

- **media** $\bar{\mathbf{v}} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t}$ (m/s) con $\Delta t > 0$
- **istantanea** $\mathbf{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t}$ con magnitudine $|\mathbf{v}| = \frac{ds}{dt}$ (m/s)

Accelerazione

L'accelerazione

- **media** $\bar{\mathbf{a}} = \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t}$ con $\Delta t > 0$ (m/s²)
- **istantanea** $\mathbf{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t}$ (m/s²)

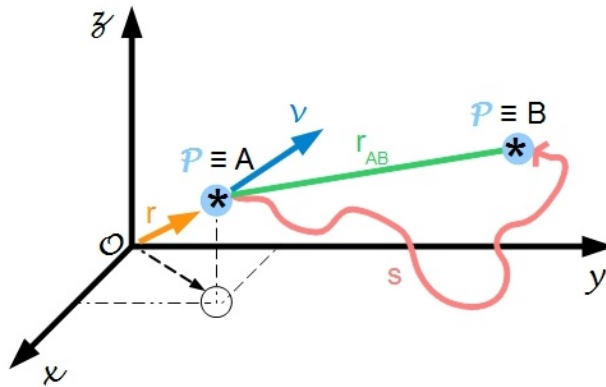


Figura 11.: Moto Rettilineo di una particella

C.2 MOTO ANGOLARE DI UNA PARTICELLA

Posizione

Il vettore posizione della particella P nel punto A rispetto ad un asse di rotazione $O - z$ è $\mathbf{r}(t)$. La posizione angolare del punto P è $\mathbf{r}_\perp(t) = r_{\perp x} \cos \theta \mathbf{i} + r_{\perp x} \sin \theta \mathbf{j}$ (rad)

Velocità

La velocità angolare è data da: $\omega = \frac{d\theta}{dt}$ (rad/s)

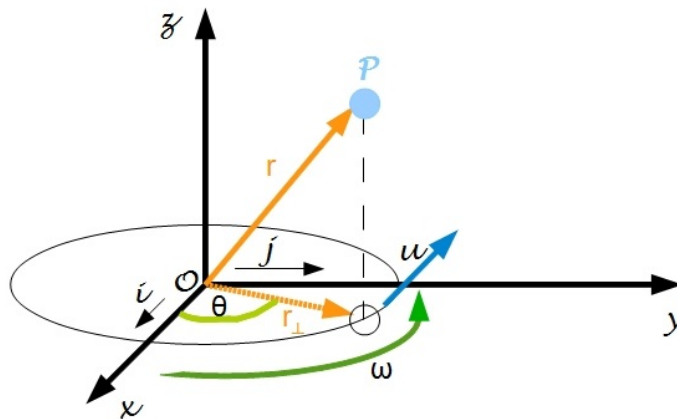


Figura 12.: Moto Angolare di una particella

Accelerazione

L'accelerazione angolare è data da: $\alpha = \frac{d\omega}{dt}$ (rad/s²)

C.3 DINAMICA (CINETICA)

Branca della meccanica che si occupa di forze che producono, arrestano o modificano il moto di corpi. Le due leggi fondamentali della Dinamica sono quelle di Newton, in particolare la seconda:

$$F = ma \quad (C.1)$$

SENSORI

Principalmente in questo lavoro usiamo un giroscopio monoassiale. In letteratura, l'analisi della deambulazione viene affrontata mediante accelerometri, giroscopi e magnetometri.

D.1 ACCELEROMETRO

Un accelerometro (vedi figura 13) è un dispositivo elettromeccanico che misura le forze di accelerazione. Tali forze possono essere sia statiche, come la forza di gravità, che dinamiche, causate muovendo l'accelerometro.

Gli usi immediati di un accelerometro sono

- misurando l'accelerazione statica delle forza di gravità, si può calcolare l'angolo a cui è inclinato lo strumento.
- misurando l'accelerazione dinamica si può analizzare il modo in cui si sta muovendo il dispositivo

Un applicazione industriale importante è l'airbag nelle macchine, la cui apertura scatta se l'accelerometro percepisce una brusca frenata. Un'altra applicazione è quella implementata dalla Apple, nei suoi portatili per la protezione del disco rigido: se il portatile dovesse cadere mentre acceso, l'accelerometro capta la caduta libera ed il sistema operativo si auto termina immediatamente in modo che la testina non sia sul disco.

D.2 GIROSCOPIO

Il giroscopio è uno strumento per misurare l'accelerazione di rotazione (momento angolare) di un corpo. Vi sono diversi tipi di giroscopi, meccanici, a vibrazione, a fibre ottiche ecc.. Un disco rotante in assenza di torsione esterna, mantiene la direzione della sua rotazione. Quando viene applicata una torsione viene applicata al disco, ad angolo con il suo asse di rotazione, il disco ruota sul piano determinato dalle due assi (rotazione iniziale e torsione) nella direzione che va dall'asse di rotazione iniziale a quello della torsione.

Il tipo di giroscopio che usiamo in questo lavoro è il cosiddetto giroscopio piezoelettrico, o MEMS (Micro Electro Mechanical System) o a vibrazione. Si basa sul principio di Coriolis: un oggetto che vibra, continua a vibrare sullo stesso piano se la struttura che lo sostiene è in rotazione. La misurazione della velocità angolare avviene nel seguente modo: un elemento piezoelettrico (oggetto di forma tubolare) oscilla a causa di una rotazione, quindi viene misurata la forza di Coriolis sulla sezione longitudinale dell'elemento, dopo essere stata convertita in un voltaggio elettrico dallo stesso elemento piezoelettrico.

D.3 MAGNETOMETRO

Il Magnetometro è uno strumento che misura il campo magnetico. Questo può essere fatto in diversi modi. Il metodo pre elettronico, è quello inventato da Coulomb ed usa un ago magnetico sospeso.

Il metodo elettronico chiamato elettromagnetometro o Magnetometro Fluxgate

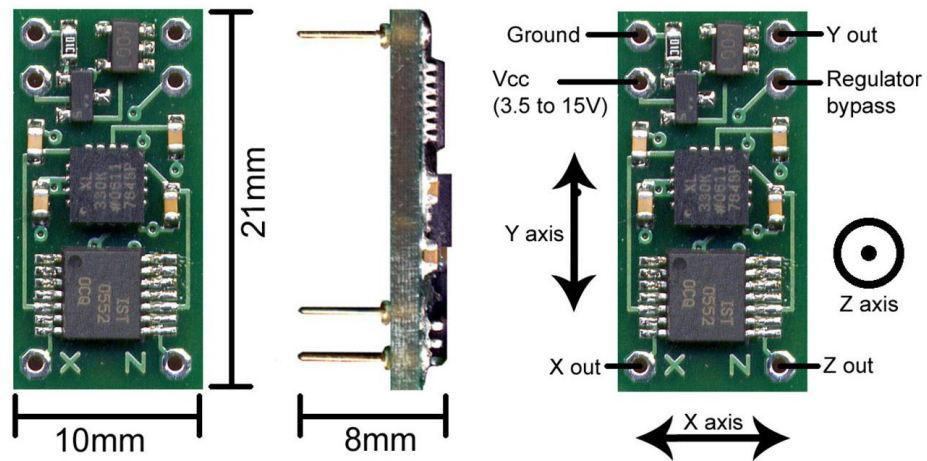


Figura 13.: Accelerometro triassiale, cortesia di <http://www.dimensionengineering.com>

è basato sulla saturazione di materiali magnetici. Questi ha un centro in ferro, ed intorno ad esso due fili conduttori. Attraverso il primo filo fluisce corrente elettrica. Il ferro è un elemento magnetico, ma in condizioni normali gli assi magnetici sono orientati in direzioni casuali e la forza magnetica totale è prossima a zero. Nel momento in cui comincia a fluire corrente nel filo, gli assi si allineano e creano un campo magnetico percepibile come aumento del campo magnetico creato dalla corrente nel filo. La quantità di forza magnetica che può produrre il ferro è limitata, il ferro giunge ad un livello di saturazione, dopo di che cambia bruscamente polarità, al che giunge alla saturazione e cambia polarità e così via. Questo processo induce corrente nel secondo filo che avvolge il ferro. Se la procedura avvenisse in un ambiente magneticamente neutrale il voltaggio nei due file dovrebbe combaciare, altrimenti vi sarà un dislivello proporzionale al campo magnetico di disturbo. L'intensità del campo magnetico terrestre superficiale è circa 50,000 nanoTesla.

D.4 IMU

Inertial Measurement Unit, (Unità di Misura Inerziale), è l'integrazione di più sensori. Questo fornisce le misure fatte dai sensori interni con eventuali correzioni fatte in base alla temperatura interna dello strumento stesso. Le IMU sono usate come sistemi di navigazione inerziali di aerei, missili.

La IMU che abbiamo usato per ha la seguente scheda di definizione:

IMU		
Sensore	Intervallo di misurazione	Risoluzione
Accelerometro triassiale	x[$\pm 1g-3g$], y[$1.5g-2g/8g$], z[$2g-16g$],	[12-14 bit]
Giroscopio triassiale	[$\pm 2000-1600^\circ/\text{sec}$],	[12-16 bit]
Magnetometro triassiale	[± 4 gauss],	12 bit
Termometro	[$-55-155^\circ/\text{C}$]	12bit
Connettività		
Bluetooth per le brevi distanze		
Frequenza di campionamento		
$\geq 300 \text{ Hz}$		
Dimensioni strumento		
$60 \times 30 \times 40 \text{ mm}$		

Tabella 16.: Scheda tecnica IMU

Android è una piattaforma completa¹ totalmente open source² progettata per dispositivi mobili. Android è di proprietà della società Open Handset Alliance, con Google come maggiore azionario. L'obiettivo di Google è accelerare lo sviluppo della tecnologia mobile ed offrire all'utente un'esperienza sempre più ricca ed allo stesso tempo meno costosa. Android è pensato per essere pronto all'uso dal punto di vista di tutti i possibili attori:

- **Utenti:** I dispositivi hanno una configurazione di default che permette un funzionamento immediato e performante ma che può in un secondo momento essere profondamente riconfigurato su misura.
- **Sviluppatori:** Uno sviluppatore ha bisogno soltanto dell' Kit di sviluppo di Android (Android SDK³), che comprende anche un emulatore, ma permette anche di sviluppare su un vero dispositivo. Uno sviluppatore ha accesso al codice dell'intera piattaforma Android.
- **Manufattori:** Android è portabile⁴ e (eccetto alcuni driver per specifici hardware) permette di far funzionare dispositivi immediatamente. I venditori non sono tenuti a rendere disponibile alla comunità le proprie aggiunte. In molti casi dispositivi Bluetooth e Wi-Fi, sono gestiti da codice proprietario. Ma dato che lo sviluppo di codice viene regolato da una API (Application Programming Interface ovvero un'Interfaccia di Programmazione di un'Applicazione), il problema è facilmente gestibile.

Android è ottimizzato per dispositivi mobili, che ovviamente hanno il requisito fondamentale della dimensione ridotta. Gli obiettivi dei progettisti del sistema erano la massimizzazione della durata della batteria, ottimizzazione della memoria, ottimizzazione delle risorse computazionali.

E.1 ANDROID OS

E.1.1 *Linux Kernel*

Il sistema operativo Android [52] si basa sulla versione 2.6 di Linux [53] per i servizi centrali di sistema come la sicurezza, la gestione della memoria e dei processi, lo stack di rete ed i modelli dei driver (vedi figura 14). Il Kernel funziona anche da livello di astrazione tra l'hardware e lo stack di software. Tutte le applicazioni Android vengono eseguite in processi Linux separati, dopo aver avuto i premissi richiesti dal sistema Linux

¹ Comprensiva di tutto il software necessario per un dispositivo mobile

² L'intero stack di Android, vale a dire i moduli Linux del sistema operativo, le librerie native, il framework e gli applicativi, è completamente gratuito e modificabile. Viene distribuito sotto licenze business-friendly (Apache/MIT), in modo che chiunque possa estenderlo, modificarlo ed usarlo liberamente.

³ Software Development Kit

⁴ Android non fa nessun tipo di assunzione sul tipo di dispositivo su cui verrà montato.



Figura 14.: Architettura di sistema di Android, cortesia di <http://developer.android.com>

E.1.2 Librerie Native Android

Le librerie di Android sono principalmente composte da librerie C/C++ della comunità open source. Queste librerie vengono esposte sotto forma di servizi di sistema per i programmatori che vogliano usarli come funzioni senza conoscerne i dettagli implementativi a livello di application framework (vedi figura 14). Le librerie principali sono:

- **Librerie Standard di (ANSI) C:** un implementazione BSD⁵ della libreria Standard di C (*libc*), ottimizzata per dispositivi basati sul sistema Linux. Alcuni esempi di servizi della libreria sono l'allocazione di memoria, la gestione dell'input/output ecc.
- **Librerie Media:** basate sulle OpenCORE [54] di PacketVideo⁶, versione open source della libreria CORETM della stessa compagnia. Queste librerie supportano la visualizzazione (playback) e la registrazione dei formati audio e video ed immagini statiche più popolari (MPEG4, H.264, MP3, AAC, AMR, JPG, e PNG).
- **Surface Manager:** gestisce l'accesso al sottosistema di visualizzazione e compone, in modo trasparente all'utente, la grafica 2D con quella 3D di applicazioni multiple.
- **LibWebCore:** un motore per un web browser, che può essere usato sia dal browser di Android che da una vista del web incorporata in un applicativo. LibWeb [55] è una libreria/toolkit per sviluppare applicazioni Web scritte in Perl.
- **SGL:** motore grafico 2D.
- **Librerie 3D:** un'implementazione basata sulle API di OpenGL⁷ [56]. Le librerie usano l'acceleratore grafico 3D, dove disponibile, e il rasterizzatore⁸ altamente ottimizzato per programmi 3D incluso nella distribuzione. OpenGL è un ambiente per sviluppare grafica sia 2D che 3D, interattiva e portabile.
- **FreeType** [57]: rendering di font con tecnologia bitmap e vettoriale
- **SQLite** un motore per un database relazionale potente e leggero a disposizione di tutte le applicazioni.
- **OpenSSL** [58]: è un insieme di strumenti Open Source che implementano il Secure Sockets Layer (SSL v2/v3) ed i protocolli Transport Layer Security (TLS v1) ed infine una libreria di crittografia generica di ottimo livello.

E.1.3 Tempo di esecuzione di Android: Dalvik

Il linguaggio Java [59], JDK⁹ Tools [60] e le librerie Java sono gratuite, mentre la Java Virtual Machine non lo è. Dato che questo andava contro la politica

⁵ Berkley Software Distribution e licenza Apache/MIT che a differenza della licenza GNU non obbliga sviluppatori a ridistribuire i loro codici alla comunità

⁶ PacketVideo è il membro fondatore Open Handset Alliance

⁷ Open Graphics Library

⁸ Trasformatore di un oggetto grafico dalla sua descrizione vettoriale in una descrizione visuale, vale a dire pixel o punti che possano essere visualizzati su uno schermo o stampati.

⁹ Java Development Kit

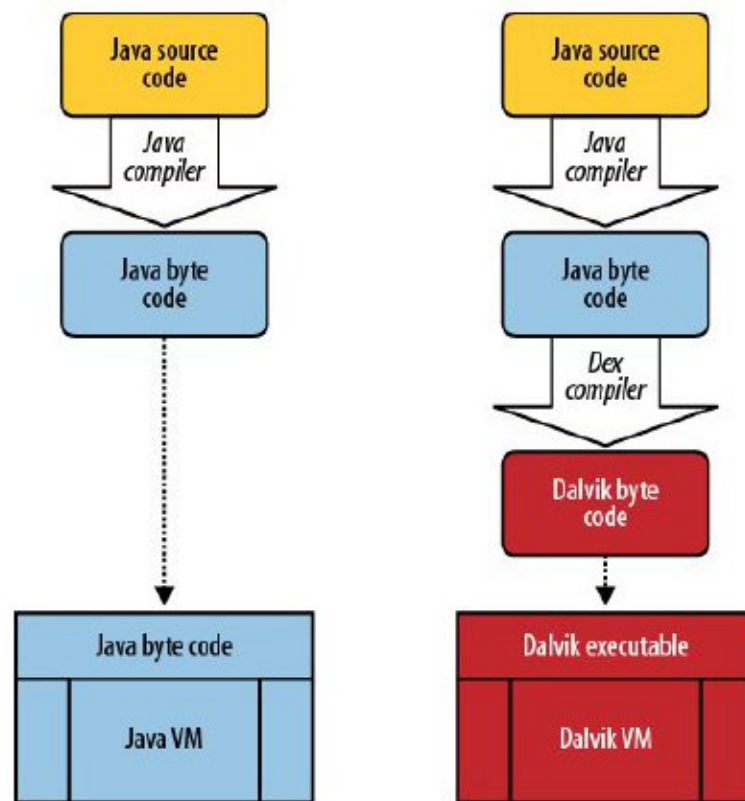


Figura 15.: Comparazione del processo di compilazione di un file Java in ambiente Android con quello classico. Immagine cortesia di [63]

del progetto, Google¹⁰ ha sviluppato una versione ex-novo della Java Virtual Machine, ad-hoc per Android¹¹. I problemi principali che il gruppo di sviluppo hanno affrontato sono quelli della durata della batteria e le risorse (memoria e ram) limitate.

Java e Android

Normalmente il codice Java viene compilato e poi il bytecode viene eseguito sulla JVM, sotto Android il bytecode viene ricompilato con il compilatore Dalvik (vedi sezione E.1.3) che produce un Dalvik-bytecode detto Dex, che viene eseguito dal Dalvik VM (vedi figura 15).

Il processo è automatizzato dall'IDE¹² (Eclipse o ANT [64]) che si usa. La distribuzione Java di Android non è standard: è una variante di Java Standard Edition, in cui le Java AWT e Swing sono state sostituite da Android UI¹³, appositamente ottimizzate per gli schermi e le schede grafiche di dimensioni ridotte dei dispositivi.

¹⁰ Dan Bernstein ed il team di sviluppo

¹¹ Fino al 2005, non vi erano alternative alla JVM della Sun, poi sono nate OpenJDK [61] e Apache Harmony [62]

¹² I Development Environment

¹³ User Interface

E.1.4 *Application Framework*

Questa è la parte della piattaforma che permette di sviluppare applicativi Android, fornendo servizi (sensori, posizionamento, telefonia, Wifi ecc) ed abbondante documentazione in merito.

E.1.5 *Applications*

Le applicazioni sono i programmi sviluppati dal mondo di sviluppatori Android. Questi possono essere sia già installati all'acquisto del dispositivo, sia scaricati dai mercati Android.

APK

Un applicazione Android è un singolo file, detto APK file. Questi ha tre componenti principali:

1. **Eseguibile Dalvik** Il codice Java compilato come descritto in figura (vedi figura 15).
2. **Risorse** Tutto ciò che è in un applicativo Android, ma non è codice Java: file XML, immagini, audio, video ecc.
3. **Librerie** In un applicativo possono essere incluse librerie di codice nativo, ad esempio in C/C++

E.1.6 *Struttura di un Android App*

Ogni applicativo per Android deve avere una determinata struttura di cartelle e file per funzionare. Il file più importante è l'AndroidManifest. Questo file funziona da collante e da indice per comprendere le componenti dell'applicativo. Contiene i permessi che ha come applicativo, di interagire con il resto del sistema operativo. Lavorando in ambiente di sviluppo Eclipse SDK TM, con il plugin per Android SDK Manager, la creazione di un nuovo progetto (Android Project), genera la struttura del programma:

- **src** : codice java
- **gen** : file auto generati per la gestione delle risorse
- **Android 2.2** (Libreria) : tutta la libreria di Android
- **assets**: risorse che non vengono auto indicizzate in R
- **bin**: file binario
- **AndroidManifest.xml**

E.2 LE COMPONENTI PRINCIPALI DI UN APPLICATIVO ANDROID

Lo sviluppo di programmi (Java) per applicativi Android è necessariamente vincolato dal fatto che l'interazione dell'utente avviene mediante lo schermo del dispositivo, la durata della batteria è limitata, la capacità computazionale è ridotta ecc. Gli sviluppatori di Android hanno creato un framework per sviluppare applicativi, che risolve la maggior parte dei problemi del programmatore. L'impostazione di base del framework è quella della programmazione ad eventi, con un meccanismo di callback (riferimento a un codice) asincrono. Le componenti principali sono:

1. **Activity**: un'attività è la logica che gestisce una schermata singola che l'utente vede. Gli applicativi hanno di solito molteplici activity che permettono all'utente di navigare l'applicativo secondo la sua logica,
2. **Intent**: messaggi asincroni inviati tra le componenti principali,
3. **Service**: logica dell'applicativo,
4. **Content Provider**: interfaccia per lo scambio di dati tra applicativi,
5. **Broadcast Receiver**: metodo per gestire chiamate a livello di sistema in modo asincrono,
6. **Application Context**: contesto in cui tutta l'applicazione esiste.

E.2.1 Activity

Ogni applicativo Android ha una *main activity*, che definisce la logica della schermata iniziale. Nell'ottica di ottimizzare le risorse del dispositivo, le activity sono state progettate in modo da consumare il minimo. Quando viene lanciata una activity, viene creato un processo Linux, viene allocato dello spazio per gli oggetti UI, costruire oggetti Java a partire dalle definizioni XML (inflation), posizionare oggetti sullo schermo. Per evitare di incorrere in questo costo ogni volta che si ricapita su una schermata, le activity sono state progettate per avere un ciclo di vita, gestito da un activity Manager. Quest'ultimo si occupa di creare, gestire e distruggere le activity, all'occorrenza. Ogni activity attraversa i seguenti stati (vedi figura 16):

1. **Starting**: l'activity non esiste in memoria. I metodi della classe Activity che permettono di gestire l'evento di creazione di una activity sono `onCreate()`, `onStart()` ed `onResume()` tutti per andare nello stato Running.
2. **Running**: l'activity è sullo schermo e l'utente ci sta interagendo. In ogni dato istante di tempo, può esistere solo un'activity in questo stato. Tra tutte le activity, quella nello stato Running ha la massima priorità per l'utilizzo delle risorse, per minimizzare i tempi di risposta all'utente. Il metodo per gestire l'evento è `onPause` per andare nello stato Paused.
3. **Paused**: l'activity è ancora visibile, ma l'utente non vi può interagire. Non è uno stato molto comune, perché date le dimensioni ridotte dello schermo, generalmente le activity occupano tutto lo schermo o niente. Ad esempio quando appare una dialog box su una schermata, la schermata è nello stato Paused. Tutte le activity attraversano questo stato nel momento in cui vengono fermate. Queste activity sono tra quelle a priorità più alta, perché sono ancora visibili, e la transizione ad un'altra activity deve essere compiuto in modo fluido. Le callback dello stato sono `onResume()` per tornare nello stato Running e `onStop()` per andare nello stato Stopped.
4. **Stopped**: un'activity si trova in questo stato se non è più visibile ma è ancora in memoria. Queste possono essere distrutte oppure tenute in memoria per essere ripristinate nello stato Running. La seconda operazione è molto meno costosa della creazione ex-novo di un'activity. Le callback di questo stato sono le stesse dello stato Starting ed il metodo `onDestroy()` per andare nello stato Destroyed.
5. **Destroyed**: l'activity viene rimossa dalla memoria, se l'Activity Manager decide che questa non verrà usata per abbastanza tempo da rendere più conveniente la ricreazione della stessa al suo trattenimento in memoria.

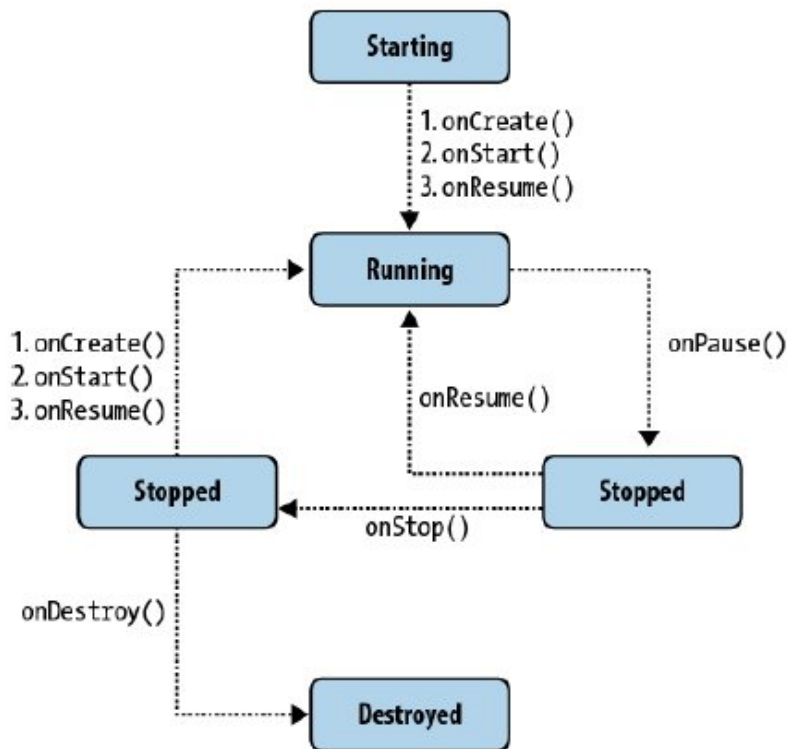


Figura 16.: Ciclo di vita di una Activity, cortesia di [63]

E.2.2 Intent

Le Intent possono essere viste, come dice il nome, delle intenzioni di creare Activity che un mittente comunica. Queste potrebbero essere usate da un'Activity per creare un'altra activity, oppure per far partire un servizio o per inviare un messaggio in broadcast. Questi possono essere espliciti se il mittente dichiara il ricevente, o impliciti se il mittente dichiara solo il tipo di ricevente. Nel secondo caso ci potrebbero essere dei riceventi in competizione per l'esecuzione del messaggio, ed il sistema lascia all'utente la scelta dell'esecutore.

E.2.3 Servizi

Questi non hanno un'interfaccia utente ed il loro ciclo di vita o esecuzione è trasparente a chi utilizza il sistema. Il ciclo di vita di un servizio è molto semplice: inizialmente il servizio viene creato, ed il suo primo stato è detto Starting. Da qui le callback da usare per intercettare la transizione in Running sono onCreate() ed onStart(). Dallo stato Running con la callback onDestroy() il servizio va nell'ultimo stato in cui si può trovare: Destroyed.

I service che sono particolarmente impegnativi dal punto di vista computazionale dovrebbero essere eseguiti su un proprio thread, eseguibile in background, e non quello della UI, in modo da non rallentare l'interfaccia grafica.

E.2.4 Content Provider

Android, per ragioni di sicurezza, esegue ogni applicativo nella propria 'sandbox' compartimento stagno, in modo da confinare i dati usati da un programma a

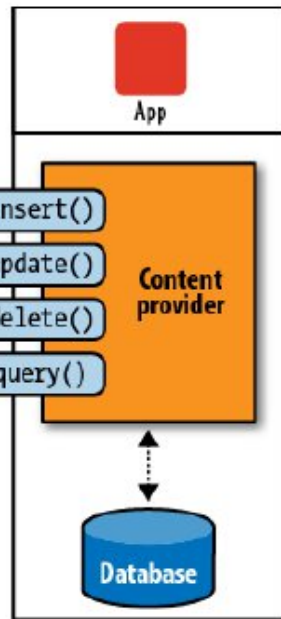


Figura 17.: CRUD di un Content Provider, cortesia di <http://developer.android.com>

quest'ultimo. Mediante gli Intent è possibile scambiare piccole quantità di dati tra applicativi diversi, la condivisione di quantità ingenti di dati persistenti viene fatta tramite i Content Provider. Per facilitare il compito questo componente aderisce all'interfaccia CRUD: il Content Provider è interfacciato ad una base di dati ed implementa i metodi `insert()`, `delete()`, `update()`, `query()`.

E.3 BROADCAST RECEIVER

Implementazione del pattern Observer (tipo particolare del protocollo Publish/Subscribe) in cui c'è un servizio di prenotazione su un certo evento. Un programma si registra al servizio e nel momento in cui viene lanciato l'evento per il quale si è registrato, il codice viene lanciato. Il sistema operativo lancia eventi in broadcast in continuazione: il sistema è stato avviato, la batteria è scarica, un sms è in arrivo ecc. Ciascuno di questi eventi scatena il lancio dei programmi registrati, o per usare il nome del pattern, i programmi che osservavano l'evento.

E.4 APPLICATION CONTEXT

Il contesto di un'applicativo Android è l'ambiente in cui i processi con tutte le componenti vengono eseguiti. Il ciclo di vita di un contesto parte con la sua creazione al lancio dell'applicativo, e termina nel momento in cui questi viene terminato. Per avere un riferimento al contesto è sufficiente chiamare `Context.getApplicationContext()` oppure `Activity.getApplication()`

E.5 INTERFACCIA UTENTI (UI)

[*TODO: Completare*] <http://developer.android.com/guide/topics/ui/index.html>

E.5.1 *Layout XML*

E.5.2 *Eventi di Input*

E.5.3 *Menu*

Per default ogni Activity ha un menu di opzioni o azioni, a cui l'utente può accedere premendo un tasto fisicamente disegnato sullo schermo.

E.5.4 *Barra delle Azioni*

E.5.5 *Dialoghi*

BIBLIOGRAFIA

- [1] *kinesiology*, 2011. [Online]. Available: <http://www.merriam-webster.com/dictionary/kinesiology> (Cited on page 7.)
- [2] S. J. Hall, *Basic Biomechanics*. McGraw-Hill, 2006. (Cited on page 7.)
- [3] (2011) kinematics. [Online]. Available: <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/318099/kinematics> (Cited on page 7.)
- [4] M. Hildebrand, "The quadrupedal gaits of vertebrates," *BioScience*, vol. 39, pp. 766–775, 1989. (Cited on page 9.)
- [5] W. E. Weber and E. H. Weber, *Mechanik der Menschlichen Gehwerkzeuge, The Mechanics of Human Motion*. Gottinger, Gottingen, 1836. (Cited on page 9.)
- [6] G. M. Lyons, R. T. Sinkjaer, J. H. Burridge, and D. J. Wilcox, "A review of portable fes-based neural orthosis for the correction of drop foot." *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 10, pp. 260–279, 2002. (Cited on pages 18 and 19.)
- [7] P. Strojnik, A. Kralj, and I. Ursic, "Programmed six-channel electrical stimulator for complex stimulation of leg muscles during walking," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. BME-26, pp. 112–116, 1979. (Cited on page 18.)
- [8] M. M. Skelly and H. J. Chizeck, "Real-time gait event detection for paraplegic fes walking," *IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, vol. 9, pp. 59–68, 2001. (Cited on pages 19 and 21.)
- [9] J. Nilsson, V. P. Stokes, and A. Thorstensson, "A new method to measure foot contact," *Journal of Biomechanics*, vol. 18, pp. 625–627, 1985. (Cited on page 19.)
- [10] G. M. L. A. Mansfield, "The use of accelerometry to detect heel contact events for use as a sensor in fes assisted walking," *Medical Engineering Physics*, vol. 25, pp. 879–885, 2003. (Cited on pages 19 and 20.)
- [11] Y. Shimada, S. Ando, T. Matsunaga, A. Misawa, T. Aizawa, T. Shirahata, and E. Itoi, "Clinical application of acceleration sensor to detect the swing phase of stroke gait in functional electrical stimulation," *The Tohoku Journal of Experimental Medicine*, vol. 207(3), pp. 197–202, 2005. (Cited on pages 19, 20, and 21.)
- [12] B. Coley, B. Najafi, A. Paraschiv-Ionescu, and K. Aminian, "Stair climbing detection during daily physical activity using a miniature gyroscope," *Gait & Posture*, vol. 22(4), pp. 287–294, 2005. (Cited on page 19.)
- [13] K. Tong and M. H. Granat, "A practical gait analysis system using gyroscopes," *Medical Engineering & Physics*, vol. 21(2), pp. 87–94, 1999. (Cited on page 19.)
- [14] S. Miyazaki, "Long-term unrestrained measurement of stride length and walking velocity utilizing a piezoelectric gyroscope," *IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering*, vol. 44(8), pp. 753–759, 1997. (Cited on page 19.)

- [15] K. Aminian, B. Najafi, C. Bula, P. F. Leyvraz, and P. Robert, "Spatio-temporal parameters of gait measured by an ambulatory system using miniature gyroscopes," *Journal of Biomechanics*, vol. 35(5), pp. 689–99, 2002. (Cited on pages 19 and 21.)
- [16] R. Williamson and B. J. Andrews, "Gait event detection for fes using accelerometers and supervised machine learning," *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, vol. 8(3), pp. 312 – 319, 2000. (Cited on pages 19, 20, and 21.)
- [17] R. E. Mayagoitia, A. V. Nene, and P. H. Veltink, "Accelerometer and rate gyroscope measurement of the kinematics: an inexpensive alternative to optical motion analysis systems," *Journal of Biomechanics*, vol. 35(4), pp. 537–542, 2002. (Cited on pages 19 and 20.)
- [18] I. P. Pappas, M. R. Popovic, T. Keller, V. Dietz, and M. Morari, "A reliable gait phase detection system," *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 9(2), pp. 113–125, 2001. (Cited on pages 19 and 26.)
- [19] —, "A reliable gyroscope-based gait-phase detection sensor embedded in a shoe insole," *Ieee Sensors Journal*, vol. 4(2), pp. 268–274, 2004. (Cited on pages 20 and 21.)
- [20] J. J. Kavanagh and H. B. Menz, "Accelerometry: a technique for quantifying movement patterns during walking," *Gait & Posture*, vol. 28(1), pp. 1–15, 2008. (Cited on page 20.)
- [21] J. R. W. Morris, "Accelerometry-a technique for the measurement of human body movements," *Journal of Biomechanics*, vol. 6(6), pp. 729–732, 1973. (Cited on page 20.)
- [22] A. T. Willemsen, J. A. van Alsté, and H. B. Boom, "Real-time gait assessment utilizing a new way of accelerometry," *Journal of Biomechanics*, vol. 23(8), pp. 859–863, 1990. (Cited on page 20.)
- [23] A. T. Willemsen, C. Frigo, and H. B. K. Boom, "Lower extremity angle measurement with accelerometers-error and sensitivity analysis," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 38(12), pp. 1186–1193, 1991. (Cited on page 20.)
- [24] M. D. Duric, S. Dosen, M. Popovic, and D. B. Popovic, "Sensors for assistive system for restoring of the walking," *Proceedings 52nd ETRAN Conference, Society for Electronics, Telecommunications, Computers, Automatic Control and Nuclear Engineering*, vol. 63(1), pp. 978–986, 2008. (Cited on page 20.)
- [25] K. Liu, T. Liu, K. Shibata, Y. Inoue, and R. Zheng, "Novel approach to ambulatory assessment of human segmental orientation on a wearable sensor system," *Journal of Biomechanics*, vol. 42(16), pp. 2747–1752, 2009. (Cited on page 20.)
- [26] M. D. Duric, "Automatic recognition of gait phases from accelerations of leg segments," *9th Symposium on Neural Network Applications in Electrical Engineering*, vol. 63(1), pp. 121–124, 2008. (Cited on page 20.)

- [27] H. Dejnabadi, B. M. Jolles, and K. Aminian, "A new approach to accurate measurement of uniaxial joint angles based on a combination of accelerometers and gyroscopes," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 52(8), pp. 1478–1484, 2005. (Cited on page 20.)
- [28] A. M. Sabatini, C. Martelloni, S. Scapellato, and F. Cavallo, "Assessment of walking features from foot inertial sensing," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 52, pp. 486–494, 2005. (Cited on pages 20 and 26.)
- [29] J. M. Jasiewicz, J. H. Allum, J. W. Middleton, A. Barriskill, P. Condie, B. Purcell, and R. C. Li, "Gait event detection using linear accelerometers or angular velocity transducers in able-bodied and spinal-cord injured individuals," *Gait & Posture*, vol. 24(4), pp. 502–509, 2006. (Cited on page 20.)
- [30] T. K. Lau H, "The reliability of using accelerometer and gyroscope for gait event identification on persons with dropped foot," *Gait & Posture*, vol. 27(2), pp. 248–257, 2008. (Cited on page 20.)
- [31] T. Liu, Y. Inouea, and K. Shibata, "Development of a wearable sensor system for quantitative gait analysis," *Measurement*, vol. 42(7), pp. 978–988, 2009. (Cited on page 20.)
- [32] G. Wu and Z. Ladin, "The study of kinematic transients in locomotion using the integrated kinematic sensor," *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, vol. 4(3), pp. 193–200, 1996. (Cited on page 20.)
- [33] P. H. Veltink, P. Slycke, J. Hemssems, R. Buschman, G. Bultstra, and H. Hermens, "Three dimensional inertial sensing of foot movements for automatic tuning of a two-channel implantable drop-foot stimulator," *Medical Engineering and Physics*, vol. 25(1), pp. 21–28, 2003. (Cited on page 20.)
- [34] R. Williamson and B. J. Andrews, "Sensor systems for lower limb functional electrical stimulation (fes) control," *Medical Engineering & Physics*, vol. 22(5), pp. 313–325, 2000. (Cited on pages 20 and 21.)
- [35] K. J. O'Donovan, R. Kamnik, D. T. O'Keeffe, and G. M. Lyons, "An inertial and magnetic sensor based technique for joint angle measurement," *Journal of Biomechanics*, vol. 40(12), pp. 2604–2611, 2007. (Cited on pages 20 and 21.)
- [36] S. W. Lee, K. Mase, and K. Kogure, "Detection of spatio-temporal gait parameters by using wearable motion sensors," *IEEE Engineering Medical Biol Soc.*, vol. 7, pp. 6836–6839, 2005. (Cited on page 21.)
- [37] M. Hanlon and R. Anderson, "Real-time gait event detection using wearable sensors," *Gait & Posture*, vol. 30(4), pp. 523–527, 2009. (Cited on page 21.)
- [38] C. M. O'Connor, S. K. Thorpe, M. J. O'Malley, and C. L. Vaughan, "Automatic detection of gait events using kinematic data," *Gait & Posture*, vol. 25(3), pp. 469–474, 2007. (Cited on page 21.)
- [39] C. A. Kirkwood, B. J. Andrews, and P. Mowforth, "Automatic detection of gait events: a case study using inductive learning techniques," *Journal of Biomedical Engineering*, vol. 11(6), pp. 511–516, 1989. (Cited on page 21.)
- [40] P. C. Sweeney, G. M. Lyons, and P. H. Veltink, "Finite state control of functional electrical stimulation for the rehabilitation of gait," *MEDICAL AND BIOLOGICAL ENGINEERING AND COMPUTING*, vol. 38(2), pp. 121–126. (Cited on page 21.)

- [41] T. Pfau, M. Ferrari, K. Parsons, and A. Wilson, "A hidden markov model-based stride segmentation technique applied to equine inertial sensor trunk movement data," *Journal of Biomechanics*, vol. 41, pp. 216–220, 2008. (Cited on page 25.)
- [42] J. Lester, T. Choudhury, and G. Borriello, "A practical approach to recognizing physical activities," *Pervasive Computing*, 2006. (Cited on page 25.)
- [43] V. M. Systems. (1989) Vicon, oxford uk. [Online]. Available: <http://www.vicon.com/products/system.html> (Cited on page 26.)
- [44] K. Murphy. (1998) Hidden markov model (hmm) toolbox for matlab. [Online]. Available: <http://www.cs.ubc.ca/~murphyk/Software/HMM/hmm.html> (Cited on page 29.)
- [45] X. R. Julien Blot, "Short-time viterbi for online hmm decoding : Evaluation on a real-time phone recognition task," *Acoustics, Speech and Signal Processing, 2008. ICASSP 2008. IEEE International Conference*, pp. 1–8, 4/4/2008. (Cited on pages 31, 63, and 64.)
- [46] L. R. Rabiner, "A tutorial on hidden markov models and selected applications in speech recognition," *PROCEEDINGS OF THE IEEE*, vol. 77, no. 2, pp. 257–287, 1989. (Cited on page 55.)
- [47] A. Seward, "Low latency incremental speech transcription in the synface project," *EUROSPEECH*, vol. 2003, pp. 1141–1145, 2003. (Cited on page 63.)
- [48] M. Ryyanen and A. Klapuri, "Automatic bass line transcription from streaming polyphonic audio," *ICASSP 2007*, vol. IV, pp. 1437–1440, 2007. (Cited on page 63.)
- [49] H. Ardö, K. Åström, and R. Berthilsson, "Real time viterbi optimization of hidden markov models for multi target tracking," *IEEE Workshop on Motion and Video Computing*, pp. 1–8, Feb-2007. (Cited on page 63.)
- [50] L. Baum, T. Petrie, G. Soules, and N. Weiss, "A maximization technique occurring in the statistical analysis of the probabilisti functions of markov chains," *The Annals of Mathematical Statistics*, vol. 41, pp. 164–171, 1970. (Cited on page 65.)
- [51] R. G. Douglas, *Classical Mechanics*. Cambridge University Press, 2006. (Cited on page 71.)
- [52] Google. (2011) Android developers. [Online]. Available: <http://developer.android.com> (Cited on page 79.)
- [53] I. Linux Kernel Organization. (2003) Linux kernel 2.6, 17/12/2003. [Online]. Available: <http://www.kernel.org/pub/linux/kernel/v2.6/> (Cited on page 79.)
- [54] P. V. Inc. (2007) Opencore. [Online]. Available: http://www.packetvideo.com/press_releases/11_05_2007.html (Cited on page 81.)
- [55] C. Kong. (2000) Libweb 0.02 a perl library/toolkit for building web applications. [Online]. Available: <http://cpan.uwinnipeg.ca/htdocs/LibWeb/> (Cited on page 81.)

- [56] OpenGL.org. (Release 4.2 August 2011) The industry's foundation for high performance graphics from games to virtual reality, mobile phones to supercomputers. [Online]. Available: <http://www.opengl.org/documentation> (Cited on page 81.)
- [57] D. Turner, R. Wilhelm, W. Lemberg, and the FreeType contributors. (Release 2.4.7 October 2011) The free type project. [Online]. Available: <http://www.freetype.org/> (Cited on page 81.)
- [58] E. A. Young, T. J. Hudson., and the OpenSSL community. (Release 2.4.7 October 2011) Cryptography and ssl/tls toolkit. [Online]. Available: <http://www.openssl.org/> (Cited on page 81.)
- [59] —. (Release 7 October 2011) Oracle. [Online]. Available: <http://www.java.com/> (Cited on page 81.)
- [60] O. Corporation. (Release October 2011) Oracle. [Online]. Available: <http://download.oracle.com/javase/1.5.0/docs/tooldocs/> (Cited on page 81.)
- [61] —. (Bylaws Release October 2011) Open source implementation of the java platform, standard edition and related projects. [Online]. Available: <http://openjdk.java.net/> (Cited on page 82.)
- [62] A. HarmonyTM. (Release 5.0, 2010) Open source java se. [Online]. Available: <http://openjdk.java.net/> (Cited on page 82.)
- [63] M. Gargenta, *Learning Android*. O'Reilly Media, 2011. (Cited on pages 82 and 85.)
- [64] A. S. Foundation. (Release 1.8.2 December 2010) The apache ant project. [Online]. Available: <http://ant.apache.org/> (Cited on page 82.)