

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



FEUP

Plataforma para desenvolvimento de jogos sérios multi-jogador baseados na localização

André da Silva Pinto

Mestrado Integrado em Engenharia Informática e Computação

Orientador: António Fernando Vasconcelos Cunha Castro Coelho (Professor Auxiliar)

21 de Junho de 2011

Plataforma para desenvolvimento de jogos sérios multi-jogador baseados na localização

André da Silva Pinto

Mestrado Integrado em Engenharia Informática e Computação

Aprovado em provas públicas pelo júri:

Presidente: Sérgio Sobral Nunes (Professor Auxiliar)

Vogal Externo: Jorge Gustavo Pereira Bastos Rocha (Professor Auxiliar)

Orientador: António Fernando Vasconcelos Cunha Castro Coelho (Professor Auxiliar)

12 de Julho de 2011

Resumo

Um jogo sério diferencia-se dos demais pela sua orientação pedagógica e por os seus objectivos irem para além do entretenimento puro. Com a massificação dos *smartphones* e das tecnologias de posicionamento e orientação que com eles prosperam, abre-se um espaço atractivo para os serviços baseados na localização. Os jogos sérios constituem um dos sectores que pode beneficiar com esta evolução.

O problema da localização está no entanto limitado pela impossibilidade de utilização do GPS em recintos fechados. Durante esta dissertação, foram estudados diversos métodos que procuram reduzir ou eliminar esta limitação. Dentre eles, o Pedestrian Dead Reckoning (PDR) foi o escolhido para ser implementado e testado.

O trabalho desenvolvido no âmbito deste tema resultou na aplicação de diversas soluções para problemas tão diferentes como: a detecção de interferências magnéticas, a identificação do movimento dum passo no sinal da aceleração, a correcção de *offsets* e *drift* dos sensores usados, o isolamento da componente da aceleração gravítica através da utilização de filtros, o recurso à informação retirada das plantas de edifícios para melhorar os resultados da localização em recintos fechados, a integração dos dados do GPS com as estimativas de movimento do PDR, ou a estimativa do deslocamento através da combinação de diversas características dos sinais da aceleração.

Cada uma das soluções apresentadas para estes problemas é devidamente fundamentada no presente documento, onde a literatura científica que serve de base às decisões tomadas é analisada atentamente. Desta forma é relativamente fácil utilizar o conteúdo desta dissertação como ponto de partida para estudos futuros.

Fora da área da localização, foram estudadas as melhores formas de garantir uma comunicação capaz de assegurar a fluidez da experiência dum jogo móvel, com todas as restrições que essa mobilidade implica ao nível da rede.

A plataforma proposta procura constituir uma base de trabalho sólida e suficientemente genérica para ser aplicada, não só no âmbito dos jogos sérios, mas também em diversos outros contextos onde a localização ubíqua é importante.

Abstract

A serious game differs from the other games because of its pedagogical orientation along with its quest for more than only pure entertainment. With the popularization of smartphones and their embedded location and orientation technologies, new opportunities for location based services were created. Serious games are one of the sectors that can benefit from this evolution.

However, the location problem is limited by the poor indoor signal reception of GPS. During the realization of this thesis various methods that try to mitigate those limitations were studied. Pedestrian Dead Reckoning (PDR) was chosen among them to be implemented and tested.

The work developed within the scope of this subject resulted in the application of several solutions for many kinds of problems like: magnetic disturbances detection, step detection, sensor's offset and drift correction, gravity filtering from the accelerometer's signal, the use of building plants for indoor location improvement, GPS data integration with PDR estimates or the use of multiple parameters for the step length estimation.

Each one of the presented solutions for these problems is properly supported in this document and the scientific literature on which it is based upon is carefully analyzed. This makes it relatively easy to use this dissertation as a starting point for future deeper studies.

Apart from the location area, different ways of granting a capable communication were also studied. Especially the ones that are able to provide a seamless experience to the user of a mobile game, considering the limitations on network communication that it encloses.

The proposed platform tries to create a solid and generic base for future work on this or other related fields of study.

Agradecimentos

Ao meu orientador, Prof. António Coelho, pelo seu apoio e incentivo durante a realização da dissertação, pela ajuda na revisão do trabalho aqui registado e por me ter dado a oportunidade de estudar uma área tão entusiasmante como esta.

Ao Hugo Machado, pela sua disponibilidade constante em responder às diversas questões que lhe fui colocando e pela sua preciosa ajuda em diversos momentos da realização da tese, especialmente aquando da escrita desta dissertação.

Aos amigos que criei na faculdade, e com os quais partilhei grandes momentos ao longo dos últimos 5 anos.

À minha família, pela compreensão e apoio ininterrupto que demonstraram e continuam a demonstrar, e, em especial, ao meu irmão pela sua ajuda na revisão deste documento.



André da Silva Pinto

*“Doubt is not a pleasant condition,
but certainty is absurd.”*

Voltaire

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento e Motivação	1
1.2	Descrição do Problema	2
1.3	Objectivos	3
1.4	Trabalho Relacionado	3
1.5	Estrutura do Documento	4
2	Revisão Bibliográfica	5
2.1	Jogos de Computador	5
2.1.1	Jogos Sérios	6
2.1.2	Jogos baseados em localização	8
2.2	Localização	11
2.2.1	Indoor	11
2.2.1.1	Pedestrian Dead Reckoning	11
2.2.1.2	Rádio frequência	18
2.2.1.3	Análise de imagem	22
2.2.1.4	Outros	25
2.2.1.5	Conclusões	25
2.2.2	Outdoor	27
2.2.2.1	GNSS	27
2.2.2.2	Outros	32
2.2.2.3	Conclusões	33
2.3	Comunicação	34
2.3.1	Tecnologias	34
2.3.1.1	WWAN	35
2.3.1.2	WLAN	36
3	Metodologia	37
3.1	Localização	38
3.1.1	Pedestrian Dead Reckoning	38
3.1.1.1	Orientação	39
3.1.1.2	Detecção de passos	49
3.1.1.3	Estimativa do comprimento do passo	58
3.1.2	GNSS	65
3.1.3	Filtro de partículas	67
3.1.3.1	Filtro Bayesiano recursivo	67
3.1.3.2	Filtro de partículas genérico	68

CONTEÚDO

3.1.3.3	Filtro de partículas no contexto do PDR	70
3.1.3.4	Map filtering	72
3.1.3.5	Incorporação dos valores do GPS	73
3.1.3.6	Problemas e melhoramentos	74
3.2	Comunicação	78
3.2.1	Protocolo: UDP vs TCP	78
3.2.2	Sincronismo	79
3.3	Síntese	81
4	Implementação	83
4.1	Protótipo do jogo sério	83
4.2	Configuração	84
4.3	Arquitectura	85
4.4	Ambiente do jogador/cliente	87
4.4.1	IMU	87
4.4.2	Mapas	88
4.4.3	Outras bibliotecas utilizadas	88
4.5	Servidor e comunicação cliente-servidor	89
4.6	Testes	89
4.6.1	Percurso 1 - linha recta	90
4.6.2	Percurso 2 - mudança de direcção	91
4.6.3	Análise de resultados	92
5	Conclusões e Trabalho Futuro	95
	Referências	99

Lista de Figuras

2.1	Método de detecção de passos [SKS01]	14
2.2	Função densidade de probabilidade condicional durante um deslocamento rectilíneo [FHG02]	17
2.3	Função densidade de probabilidade condicional durante um deslocamento rectilíneo [FHG02]	18
2.4	Condições NLOS com atenuações e reflexões de sinal [WLS ⁺ 07]	21
2.5	Influência da existência de obstáculos no cálculo da posição através da estimativa dos emissores mais próximos [NLLP04]	21
2.6	Constelação de satélites GPS [ZS06]	28
2.7	Um exemplo dum DGNSS [BHW07]	30
2.8	Cobertura geográfica dos sistemas SBAS [Stu]	31
2.9	Um exemplo dum A-GNSS [BHW07]	32
2.10	Evolução das taxas de transferência de dados e da suporte à mobilidade (imagem retirada de [Ste07] e posteriormente modificada)	36
3.1	Convenção de eixos da IMU	40
3.2	Convenção de ângulos entre os dois referenciais (e - <i>Earth</i> /Terra, b - <i>body</i> /IMU) [PB09]	41
3.3	Interferências dos objectos ferromagnéticos no campo magnético [Roe06].	47
3.4	Acelerações por eixo e norma total	50
3.5	Figura ilustrativa da evolução dos valores da aceleração ao longo do movimento da perna durante o passo	50
3.6	Estados do sinal da aceleração na detecção de um passo	51
3.7	Máquina de estados para a detecção do passo	51
3.8	Novo máximo relativo na fase descendente da aceleração - dedos do pé oposto saem do chão	53
3.9	Aplicação de um filtro de Bessel de segunda ordem com <i>cutoff</i> aos 1.5 Hz sobre a aceleração em xx	55
3.10	Evolução do peso da diferença face à média anterior de acordo com o delta	56
3.11	Adaptação do valor da componente da gravidade à rotação da IMU	57
3.12	Evolução do mínimo da aceleração horizontal à medida que o tamanho do passo aumenta	59
3.13	Integração rectangular [Sli04]	60
3.14	Evolução do valor do integral duplo da aceleração no eixo dos xx à medida que o tamanho do passo aumenta	61
3.15	Evolução do valor do integral duplo da aceleração no eixo dos zz à medida que o tamanho do passo aumenta	61

LISTA DE FIGURAS

3.16	Evolução do valor do integral duplo da norma da aceleração total à medida que o tamanho do passo aumenta	61
3.17	Regressão linear simples [Inc11h]	62
3.18	Regressão linear múltipla a duas dimensões [TM11]	62
3.19	Circuito de calibração do tamanho do passo	64
3.20	Estimativas de comprimento do passo para o percurso do circuito de calibração após a definição dos pesos	64
3.21	<i>Datum</i> WGS84 [Pas04]	66
3.22	Execução dum iteração dum filtro de partículas Sampling Importance Resampling (SIR) [ECR05]	71
3.23	Expansão das partículas do filtro após um passo [AKWT10]	72
3.24	Filtro de partículas restrito pela informação do mapa [WKP07]	72
3.25	Eliminação de partículas que traduzem movimentos impossíveis como o atravessamento de paredes [Bea09]	73
3.26	Caso de perda de representatividade causado por erros de localização e limitações no processo de <i>resampling</i> (imagem retirada de [Bea09] e posteriormente editada)	75
3.27	CSW e o algoritmo de <i>resampling</i> [FJ10]	76
3.28	Uma situação de perda de sincronia causada pela latência elevada [PW02]	80
4.1	Informação útil sobre o POI mostrada aquando da aproximação do jogador	84
4.2	Classificação das equipas num dado momento	84
4.3	Uma visão de alto nível da arquitectura da implementação utilizada	86
4.4	Objectivo final do sistema em estudo	86
4.5	Diagrama de interacção da perspectiva do cliente com as operações mais importantes	87
4.6	Percurso em linha recta com os dados originais	90
4.7	Percurso em linha recta com detecção de interferências	90
4.8	Percurso em linha recta com detecção de interferências e filtro de partículas simples	90
4.9	Percurso em linha recta com detecção de interferências e filtro de partículas com ER	90
4.10	Percurso com mudança de direcção com os dados originais	91
4.11	Percurso com mudança de direcção com detecção de interferências	91
4.12	Percurso com mudança de direcção com detecção de interferências e filtro de partículas simples	92
4.13	Percurso com mudança de direcção com detecção de interferências e filtro de partículas com ER	92

Lista de Tabelas

2.1	Comparação sumária dos métodos abordados durante a secção 2.2.1 [LDBL07] [JTSC10] [HK10]	26
3.1	Coefficientes aproximados resultantes da realização dum processo de calibração	64
3.2	Mensagens mais relevantes do protocolo NMEA [Ass11c]	66

LISTA DE TABELAS

Abreviaturas e Símbolos

2G	Second Generation
3G	Third Generation
4G	Fourth Generation
A-GNSS	Assisted Global Navigation Satellite System
AHRS	Attitude and Heading Reference System
AoA	Angle of Arrival
CDMA2000	Code division multiple access 2000
CSW	Cumulative Sum of the Weights
DCM	Direction Cosine Matrix
DGNSS	Differential Global Navigation Satellite System
DoD	Department of Defense (United States)
DOP	Dilution of Precision
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay System
ER	Exquisite Resampling
ESA	European Space Agency
FPS	First Person Shooter
FTDI	Future Technology Devices International
GLONASS	GLOBAL NAVIGATION Satellite System
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
ICAO	International Civil Aviation Organization
IIR	Infinite Impulse Response
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IMAGE	Industrial Management Game
IMU	Inertial Measurement Unit
INS	Inertial Navigation Systems
HSDPA	High-Speed Downlink Packet Access
HSPA+	Evolved High-Speed Packet Access
HSUPA	High-Speed Uplink Packet Access
LAN	Local Area Network
LBS	Location Based Services
LTE	Long-Term Evolution
MHE	Moving Horizon Estimation
MSAS	Multi-functional Satellite Augmentation System
NLOS	Non-Line-Of-Sight
NMEA	National Marine Electronics Association
PI	Proportional plus Integral

ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

pdf	Probability Density Function
PDR	Pedestrian Dead Reckoning
PESC	Projectar, Empreender e Saber Concretizar
POI	Point of Interest
PPS	Precision Positioning Service
RFID	Radio-Frequency IDentification
RPG	Role-Playing Game
RSS	Received Signal Strength
SA	Selective Availability
SBAS	Satellite Based Augmentation System
SIFT	Scale-Invariant Feature Transform
SIR	Sample Importance Resampling
SMC	Sequential Monte Carlo methods
SPS	Standard Positioning Service
ToF	Time of Flight
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UWB	Ultra-WideBand
WAAS	Wide Area Augmentation System
WAN	Wide Area Network
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network
WWAN	Wireless Wide Area Network

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento e Motivação

Um jogo é um desafio. Mais do que as regras ou as suas características técnicas, os jogos são desafios colocados a quem os procura. Um jogo sério diferencia-se dos demais jogos pelo facto dos seus desafios irem para além do entretenimento *per se*. Não deixando de lado a componente lúdica, estes jogos tendem a orientar o jogador para a realização ou aprendizagem de tarefas e conceitos que não estão presentes na maioria dos restantes. Uma das razões principais para o sucesso destes métodos didácticos prende-se com o aproveitamento para fins educacionais dessa componente desafiadora inerente a qualquer tipo de jogo.

”Pense no que é necessário para aprender um jogo comparado com o que é preciso fazer na escola. Jogar bem requer os mesmos tipos de aprendizagem, estudo, compreensão, e prática que são necessários para qualquer actividade educacional” (tradução livre [Nor93])

Estendendo ainda mais esta comparação com o ambiente escolar, podemos encontrar outras mais valias. A utilização de uma abordagem centrada no utilizador (aluno/aprendiz), contraria o método tradicional de ensino, onde domina a monopolização por parte do professor do conteúdo, forma e ritmo de aprendizagem de todos os seus alunos. Com a introdução dos jogos sérios são proporcionados assim níveis superiores de liberdade pedagógica na educação.

A presente dissertação procura explorar o conceito dos jogos sérios dentro da plataforma emergente da computação móvel. Com a crescente evolução nas capacidades tecnológicas apresentadas pelos *smartphones* e a vulgarização do acesso sem fios à Internet, foram criadas as condições necessárias para a abertura de novas oportunidades nesta área

de negócio. Aplicações como a referida neste documento, pretendem tirar proveito destas inovações de forma a proporcionarem ao utilizador um elevado nível de interactividade. É em concordância com esta perspectiva que se procura apostar na criação duma forte interligação entre o espaço físico e o virtual, tirando partido de algumas das técnicas mais recentes na área da localização em recintos fechados. Pretende-se desta forma contribuir para a criação duma experiência útil, agradável, intuitiva e relevante tendo como base o *location awareness*.

O projecto é desenvolvido em paralelo com um projecto do Programa Doutoral em Média Digitais do programa UTAustin|Portugal intitulado "*Collaborative Environment Integrating Augmented Reality and Augmented Virtuality*". O objectivo principal desse projecto passa pela utilização da realidade virtual e aumentada de forma a criar um ambiente colaborativo que proporcione tele-presença e tele-trabalho entre utilizadores virtuais e reais. Os utilizadores interagem sobre uma plataforma que recria o mundo real, sendo que as posições dos utilizadores reais são transportadas para essa plataforma, onde coabitam com os *avatars* dos utilizadores virtuais. Inicialmente, o protótipo incidirá apenas sobre uma zona limitada (FEUP), e utilizará um dispositivo móvel para a visualização de utilizadores virtuais sobrepostos no ambiente real. Por sua vez, os utilizadores virtuais, poderão utilizar uma aplicação ao estilo do popular *Second Life* para representarem a interacção na qual participam.

1.2 Descrição do Problema

Embora já tenham sido efectuados grandes avanços nas área da localização geográfica, a sua aplicação aos recintos fechados continua a sofrer importantes limitações. Tendo já sido elaborados bastantes estudos nesta temática, começam a surgir alguns métodos interessantes como: contagem dos passos através da utilização combinada de sensores de aceleração e orientação, mapeamento e utilização da intensidade de sinal das redes *wi-fi*, identificação de características naturais ou marcas fiduciais através de processamento de imagem... No entanto, cada um destes métodos apresenta limitações particulares que os impedem de se afirmarem definitivamente como uma solução válida para uso comercial (à semelhança do que acontece actualmente com o GPS no caso do *outdoor*).

Abordando o problema pela perspectiva da comunicação, que está invariavelmente presente em qualquer aplicação em rede, verificamos que é preciso levar em conta os mecanismos de sincronização necessários à realização da interacção típica de um jogo multi-jogador. Estes tornam-se ainda mais proeminentes quando estamos a falar de aplicações que pretendem ser executadas em plataformas com acessibilidade limitada e condicionada pela estrutura de comunicações do local, como é o caso dos *smartphones*. Perante estas restrições é necessário compreender e analisar os requisitos comunicacionais da aplicação

de forma a escolher o protocolo e o esquema de comunicação que melhor se adaptam às limitações impostas pela rede.

No caso da necessidade de utilização de informação em tempo real, é preciso ter em conta que as alterações locais efectuadas pelo utilizador não são propagadas imediatamente para todos os nós da rede, podendo tal desfasamento causar diversos tipos de consequências indesejáveis para a fiabilidade do sistema. Este problema já foi largamente abordado anteriormente em situações semelhantes, como a determinação da posição de elementos móveis em jogos em rede. No âmbito desta tese foram estudadas técnicas de compensação de atraso, como é o caso do *dead reckoning*. Esta técnica é descrita em maior detalhe nos próximos capítulos, embora não tenha sido necessário implementá-la no protótipo desenvolvido.

1.3 Objectivos

O objectivo principal desta dissertação passou pelo estudo e desenvolvimento de uma plataforma cliente-servidor para a localização *indoor* e *outdoor*, que possa ser facilmente usada no contexto de aplicações *location aware*. Como ilustração da utilidade da plataforma, foi implementado um protótipo dum jogo sério bastante simplista baseado no posicionamento dos jogadores numa determinada área do *campus* da FEUP.

No âmbito deste objectivo principal podem-se identificar ainda os objectivos específicos:

- Elaboração dum relatório do estado da arte ao nível da tecnologia;
- Estudo de formas de redução do atraso introduzido pelas comunicações de dados sem fios;
- Investigação de técnicas de localização *indoor* e *outdoor* bem como os problemas existentes em cada uma delas;
- Desenvolvimento dum solução de localização para o problema em questão;
- Criação dum protótipo das aplicações cliente e servidor que permita comunicar e fornecer a informação necessária ao jogo;
- Implementação um protocolo de comunicação entre cliente e servidor;
- Teste e avaliação do protótipo.

1.4 Trabalho Relacionado

Na área da localização recorrendo à utilização de passos, destacam-se a patente de 1996 [LJ96] que dá uma primeira abordagem bastante completa sobre esta problemática;

e [SKS01] visto que também está orientado para os dispositivos *handheld*. Uma utilização prática dos mapas para melhorar os resultados da localização é abordada em [FHG02] embora esta seja feita no contexto do posicionamento de veículos. Ainda quanto ao uso da informação dos mapas, mas também enquadrado nos métodos de localização que utilizam WLAN temos por exemplo o [WLS⁺07]. Os sistemas de localização por satélite são bem abordados, embora que de forma isolada, em [HC08]. Foram também consultadas diversas *surveys* que se mostraram bastante úteis na sintetização dos aspectos mais importantes da larga oferta de métodos nesta área, algumas delas são [LDBL07] [HK10]. Passando agora para o domínio da comunicação, [PSMT08], apesar de ser um artigo bastante abrangente, que não se fica apenas tecnologias de comunicação, este partilha uma boa parte das preocupações a ter na implementação dum sistema do mesmo tipo do da presente tese. Por sua vez, o relatório [MSS04] apresenta uma sintetização bastante útil da literatura existente sobre a utilização dos jogos na aprendizagem. [NPM01] também aborda a temática dos jogos baseados em localização e apresenta uma boa linha orientador para o seu desenvolvimento. O projecto ARQuake [TCD⁺02] embora já relativamente antigo (2002), também aborda a utilização da orientação e posição reais no contexto dum jogo.

1.5 Estrutura do Documento

O presente documento está dividido em cinco capítulos: Introdução, Revisão Bibliográfica, Metodologia, Implementação e Conclusões e Trabalho Futuro. O presente capítulo procura fornecer uma visão geral do tema. Contém uma apresentação do contexto e do problema numa forma sintética, bem como a indicação da direcção que se deu à dissertação. Na Revisão Bibliográfica, é descrito o estado da arte para cada uma das áreas relacionadas com o tema da dissertação, e são apresentadas diversas alternativas de solução para cada um dos problemas encontrados. De seguida, no capítulo da Metodologia, é abordada, numa forma mais teórica, a solução encontrada e o trabalho desenvolvido durante a realização da dissertação. Nesta secção são apresentadas as devidas fundamentações teóricas dos métodos abordados e, sempre que necessário, são mostrados os exemplos empíricos que serviram de base às decisões tomadas. No capítulo seguinte, Implementação, é descrito o protótipo implementado durante a realização da dissertação e identificam-se as questões técnicas mais importantes que caracterizam o sistema proposto. No final são analisados os resultados de alguns dos testes efectuados. Por fim, no último capítulo, são referidas possíveis aplicações concretas desta solução e apontadas algumas direcções base para o trabalho que possa vir a ser desenvolvido no futuro.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Ao longo do presente capítulo será abordado o estado da arte de cada uma das áreas relacionadas com o tema da presente dissertação. A primeira secção é reservada aos jogos sérios, suas aplicações e potencialidades. Através duma análise de alto nível serão identificados alguns dos exemplos de aplicações que poderiam utilizar a plataforma aqui descrita como uma forma de aumentarem os seus níveis de interactividade e imersão. O tema da segunda secção é a análise da vertente de localização onde serão abordados os métodos mais recentes tanto na área *indoor* como *outdoor*. Será contudo dado mais relevância à vertente *indoor* dado ser esta a principal componente da realização do jogo sério proposto na dissertação e, ao mesmo tempo, a área que levanta mais problemas científicos. Por fim, na última secção, serão revistas as diversas tecnologias de comunicação disponíveis para os dispositivos móveis. Será descrita a organização básica da aplicação cliente servidor e apontadas possíveis soluções para os problemas típicos duma aplicação deste tipo. Durante toda esta análise serão apresentadas e discutidas diversas alternativas dando privilégio aquelas que serão, à partida, mais indicadas para uma utilização final de acordo com os requisitos da tese.

2.1 Jogos de Computador

A definição de jogo de vídeo ou de computador (termos que anteriormente tinham significados diferentes mas que agora se aglutinaram com a crescente similaridade entre consolas e computadores pessoais), tem as suas raízes no próprio conceito de jogo. Dempsey *et al.* define um jogo como sendo:

”...um conjunto de actividades envolvendo um ou mais jogadores. Possui objectivos, restrições, recompensas e consequências. Um jogo é guiado por

regras e artificial em alguns aspectos. Finalmente, um jogo envolve uma componente de competição, mesmo que essa competição seja consigo próprio.” (tradução livre [Dem96])

Prensky vai mais longe e adiciona o factor diversão à própria definição [Pre04]. No geral, é tipicamente aceite a noção de jogo enquanto actividade orientada, desafiante e competitiva, que proporciona diversão. Muito antes do surgimento dos primeiros computadores já o ser humano manifestava o seu interesse por jogos, sendo que o aparecimento das novas tecnologias abriu portas a novos tipos de experiências e a níveis de imersão impensáveis até então.

Pela análise dos 6 elementos estruturais apontados por Prensky para classificar um jogo de computador envolvente [Pre04], reparamos que, a nível conceptual, não existe grande distinção para com a noção genérica de jogo. No entanto, tudo o resto é marcado por fortes diferenças. As diversas categorias de jogos mostram isso mesmo:

- simulação desportiva
- acção
- puzzles
- plataformas
- *shooters*
- RPG (Role-Playing Games)
- outros géneros de simulação
- estratégia

Actualmente já existe uma parte considerável de jogos que não se restringem a uma única categoria, sendo antes transversais a várias delas e capazes de fornecer ao jogador a possibilidade de escolher o tipo de experiência que prefere ter "dentro do jogo".

De acordo com o estudo [Fed06] 50% dos americanos jogam regularmente, e em média um adulto gasta à volta de 7 horas e meia por semana a jogar. A indústria dos jogos de vídeo é já a maior indústria mundial de entretenimento movimentando 10,5 mil milhões de dólares nos Estados Unidos em 2009 [Ass11a], superando Hollywood e a indústria de venda de música, apesar de ser consideravelmente mais recente do que essas duas.

2.1.1 Jogos Sérios

Conforme foi referido no capítulo introdutório, os jogos sérios são um segmento particular e em franco crescimento no mercado dos vídeo jogos representando um mercado

global de 1,8 mil milhões de dólares em 2008 [Der07]. Com diversos exemplos de sucesso, os jogos sérios são usados diariamente por milhões de pessoas para aprender conceitos através duma actividade de entretenimento. Mas de que forma pode um jogo contribuir para o aumento do conhecimento sobre determinada área? Para respondermos a esta pergunta teremos primeiro de introduzir o conceito de "*meaningful play*", característica base indispensável para que a actividade de aprendizagem seja possível. Segundo Salen e Zimmerman em [SZ03], este conceito baseia-se na relação estreita e perceptível das acções e consequências dentro do jogo que são correctamente integradas no seu contexto alargado. Esta visão já havia sido suportada em [Squ03], onde, para além da experiência útil/significativa, o autor aponta a existência de diferentes níveis de dificuldade, a presença do factor surpresa e o apelo às emoções como factores centrais para a criação dum jogo educacional de qualidade. É fácil de compreender que é no explorar das relações causa-efeito referidas anteriormente que se vai centrar a aprendizagem orientada do jogador. Caso estas estejam correctamente mapeadas e integradas num ambiente que incentiva a aprendizagem, então existe espaço para os jogos sérios cumprirem os seus objectivos.

Assim como a criação de desafios está inerente a qualquer jogo, também a competitividade e a motivação para ser proficiente existem naturalmente no ser humano. A quantidade de tempo dedicado aos jogos de vídeo por grande parte da sociedade actual é apenas um comprovativo desta necessidade de aperfeiçoamento. A ideia por trás dos jogos sérios centra-se em aproveitar esta motivação proporcionada pelos jogos, para potenciar a proficiência dos jogadores em áreas específicas. Quanto mais correctos e fidedignos forem os modelos usados no jogo, mais real e útil será essa aprendizagem.

Se analisarmos parte dos padrões de comportamento dos utilizadores que nasceram já na era da informação, encontramos algumas tendências interessantes tendo em vista a percepção da adequabilidade dos jogos sérios às necessidades de aprendizagem actuais. Segundo [Der07] e [Pre04] algumas delas são:

- Preferência pela utilização de diversos meios multimédia;
- Estabelecimento de múltiplas relações não lineares entre assuntos;
- Interacção com grandes grupos;
- Aprendizagem "na hora";
- Preferência pelos papéis activos em relação aos passivos;
- Recompensa e satisfação imediata.

Ao contrário do modelo educativo tradicional, os jogos sérios apresentam-se como uma resposta muito mais adequada a este tipo de exigências. Através dos jogos sérios os estudantes podem envolver-se numa actividade de aprendizagem activa, onde estes

vivenciam os problemas em vez de os lerem num manual. O conceito de "aprender fazendo" torna-se mais abrangente e são dados incentivos à compreensão efectiva das dinâmicas do problema, contrariando a abordagem repetitiva e baseada na memorização.

Contudo, a produtividade dos jogos sérios é ainda vista com muita desconfiança por grande parte da sociedade. Tal já deixou de acontecer há algum tempo com grandes instituições e organizações mundiais. Na realidade, o termo *Jogos Sérios*, foi criado pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos (DoD) para se referir aos jogos de guerra. A sua importância é de tal forma reconhecida por esta instituição que o DoD é responsável pelo desenvolvimento dum dos mais populares FPS (First Person Shooter), o *America's Army* [Arm11], que é utilizado como ferramenta de recruta. Mas os exemplos não se ficam por aqui. Grande parte do treino dos empregados da cadeia de comida rápida McDonalds, é já feito com recurso aos jogos sérios. Estes são também utilizados por várias instituições de ensino superior para a realização de tarefas específicas. A possibilidade de controlo das variáveis do ambiente, como o tempo, a quantidade de condicionantes intervenientes nos resultados ou a possibilidade de experimentar ideias sem os riscos associados à realização real das mesmas, tornam este tipo de aplicações bastante atraente para quem procura soluções de simulação. O IMAGE, projecto PESC/Lidera para a realização, na FEUP, dum jogo de gestão, é um bom exemplo dessa tendência.

2.1.2 Jogos baseados em localização

A característica principal dos jogos baseados em localização assenta na interactividade do jogador com o espaço físico envolvente. Por oposição aos jogos tradicionais, em que o utilizador se encontra estático em frente ao computador, neste tipo de jogos baseados em localização o jogador é convidado a deslocar-se no mundo real, utilizando o seu movimento como meio principal de *input*.

Como qualquer serviço *location-aware*, também os jogos baseados em localização estão a suscitar o interesse de muitos investigadores e empresas. Em 2009 o promissor mercado dos serviços baseados em localização (Location Based Services - LBS) era estimado em 2,2 mil milhões de dólares [CP09], e previam-se fortes possibilidades de crescimento durante os próximos anos.

Dadas as suas características de portabilidade, localização e processamento, os *smartphones* constituem a plataforma natural para este tipo de jogos.

Existem 3 categorias principais de jogos baseados em localização:

- **móveis:** apenas dependem da localização para garantir a proximidade dos jogadores.
- **location aware:** a posição dos jogadores é efectivamente utilizada durante o jogo.

- **spatially aware**: o jogo interage e facilita a interacção com características do ambiente (e.g. edifícios, ruas...) para além da simples localização dos jogadores.

Acrescente-se que um jogo *spatially aware* é também *location aware* e um *location aware* é por sua vez um jogo móvel [NPM01].

Conforme é normalmente discutido nas conferências dedicadas a estas temáticas, a criação de jogos baseados em localização introduz algumas características e preocupações adicionais [NPM01] [RMCE06]:

- a movimentação torna-se um factor essencial;
- a maioria dos jogos não pode ser "facilmente consumido", necessitando das acções constantes dos jogadores para se tornar atractivo;
- tipicamente são necessários vários jogadores para que a actividade faça sentido;
- os atrasos na obtenção da localização, tanto do próprio jogador como dos restantes, podem afectar bastante a experiência obtida;
- a comunicação entre utilizadores não deve recorrer às mensagens de texto visto a sua utilização absorve grande parte da atenção do jogador;
- dado que este tipo de jogos detém menos controlo sobre as acções do jogador, a lógica de jogo pode ser mais facilmente ludibriada;
- a mecânica de jogo poderá ter de considerar não apenas objectos virtuais mas também reais;
- dado grande parte do *input* ser fornecido através de acções e deslocamentos físicos, é necessário adaptar a dificuldade de jogo às capacidades físicas do jogador.

Existem diversas dinâmicas interessantes que se podem obter com a utilização da informação da posição. Alguns tipos de jogos dentro deste grupo são:

- **Corridas**: em que o jogador que chegar primeiro a determinada localização vence.
- **Perseguições**: um jogador, o fugitivo, move-se de forma a evitar ser apanhado, no entanto vai deixando pistas que podem ser usadas pelos restantes para o encontrarem.
- **Exploração/Caça ao tesouro**: procura de objectos ou locais escondidos seguindo pistas sugeridas pelo jogo (podem até ser utilizados para, por exemplo, promover locais com interesse turístico).
- **Domínio de território**: contagem do número de vezes que um jogador sinaliza a sua presença num determinado espaço, atribuindo privilégios especiais a quem tiver maior número de presenças.

Revisão Bibliográfica

- **Estratégia:** Colocação estratégica de objectos de jogo ao longo de localizações específicas de forma a controlar ou vencer os adversários.
- **RPG (mais) reais:** Utilização de componentes do espaço real para finalidades específicas do jogo, dando-lhes significados novos e enquadrando-as no papel que o jogador desempenha.

Obviamente que uma aplicação deste género levanta determinados requisitos, principalmente ao nível da localização e da comunicação, áreas que serão abordadas nos próximos capítulos.

2.2 Localização

O problema da localização divide-se na realidade em dois subproblemas com características próprias: a localização em espaço aberto (*outdoor*), que, graças à localização via satélite, possui há já vários anos uma solução popular e global; e a localização em espaços fechados (*indoor*), com condicionantes bastante diferentes do *outdoor*, e onde proliferam diversos métodos sem, no entanto, existir um que domine o conceito para todos os casos de utilização desejados. De seguida são abordados estes dois casos individualmente.

2.2.1 Indoor

Diversos métodos de localização *indoor* têm vindo a ser estudados, com resultados, custos e contextos bastante diferentes entre si. Nesta secção serão abordados alguns destes através duma descrição breve da sua metodologia e uma análise das suas potencialidades e pontos fracos. Apesar de pretender dar uma visão alargada da abrangência de cada um dos métodos, esta análise irá incidir principalmente nos factores que podem levar cada uma das diferentes abordagens a poder ser utilizada no contexto do tema da presente dissertação. A taxonomia utilizada na categorização das soluções segue, em parte, a estabelecida em [JTSC10].

2.2.1.1 Pedestrian Dead Reckoning

Baseado nos populares Inertial Navigation Systems (INS), usados inicialmente para fins militares (e.g. mísseis guiados, submarinos ou aviação), o Pedestrian Dead Reckoning (PDR) constitui uma importante solução para o problema da localização *indoor*.

A base principal desta categoria de métodos de localização *indoor* assenta na estimação acumulada do deslocamento (norma e direcção) do sujeito ou objecto (neste caso o utilizador do sistema) para, conseqüentemente, calcular a sua posição actual. A precisão obtida varia bastante de acordo com diversos factores: o trajecto, as características físicas dos passos do sujeito, a precisão dos sensores utilizados, variáveis do ambiente como a existência ou não de interferências magnéticas, o local onde o utilizador leva o dispositivo de medição e o tipo de modelos implementados para cada uma das tarefas abordadas de seguida. Por esta mesma razão, na literatura existente não são encontrados muitos dados absolutos para esta métrica, no entanto, está reportado um erro inferior a 5% da distância percorrida [BH06].

I Contextualização - Sensores

As estimativas deste método só são possíveis graças à utilização de sensores como acelerómetros, giroscópios e bússolas/magnetómetros. Nos parágrafos seguintes cada um deles será brevemente introduzido ao leitor.

i Acelerómetro

Os acelerómetros medem a aceleração própria, ou seja, a aceleração relativamente ao seu referencial inercial, que não é necessariamente igual à aceleração do dispositivo no espaço. A aceleração própria pode ser vista como a aceleração dum corpo em relação a um observador em queda livre [Incl1k], e é semelhante à ideia de peso que um corpo sentiria no interior do acelerómetro. Por uma questão de simplicidade, ao longo do presente documento o termo genérico "aceleração" será usado para referências à aceleração própria.

Um acelerómetro é capaz de determinar a magnitude e a orientação dessa aceleração, sem, no entanto, ter em conta a orientação do objecto. Sistemas de 3 eixos estão presentes em grande parte dos *smartphones* actuais. Numa das suas utilizações mais comuns estes sensores aproveitam a presença da força gravítica da Terra para identificarem a orientação dos dispositivos em relação ao plano horizontal, permitindo assim a realização de funcionalidades populares como a alternância entre o modo de ecrã horizontal e vertical nos *smartphones*. Estes dispositivos têm normalmente associados erros de *offset* e de escala/sensibilidade.

ii Giroscópio Electrónico

Os giroscópios electrónicos, por sua vez, medem a velocidade angular, podendo esta ser posteriormente usada para calcular a orientação do objecto em qualquer momento. Estes instrumentos incluem habitualmente alguns erros de calibração, como o *offset* e o *drift*. O *offset*, ou *bias*, é um desfasamento constante que corresponde ao valor reportado pelo giroscópio em repouso, por sua vez, o *drift* é originário do acumular de erros de precisão ao longo da medição. Ambos estes erros podem ser largamente corrigidos com a utilização simultânea de outros sensores que não estejam sujeitos ao mesmo tipo de problemas (ex.: acelerómetros, magnetómetros, GPS...). Acrescente-se ainda que as medições dos giroscópios podem ser afectadas por condições do ambiente, como por exemplo a temperatura. Embora ainda menos populares que os acelerómetros, já existem alguns dispositivos móveis que incluem estes sensores (ex.: iPhone 4).

iii Bússola/Magnetómetro

Este célebre instrumento de navegação, é usado para determinar a direcção relativa aos pólos magnéticos terrestres. No entanto, a sua precisão pode ser afectada pela proximidade a outros campos magnéticos ou metais ferrosos. Para além disso, após uma perturbação, como a provocada por um movimento brusco, este sensor demora algum tempo até estabilizar novamente a sua orientação. Actualmente já podemos encontrar bússolas facilmente em vários dispositivos móveis. A orientação do campo magnético

pode ser também determinada recorrendo a magnetómetros de 2 ou 3 eixos. Estes sensores, para além da direcção do campo magnético dominante, medem ainda a intensidade da força resultante do campo magnético. O terceiro eixo é tradicionalmente usado para efectuar a compensação do desalinhamento das medidas dos outros dois sensores quando o dispositivo não se encontra numa posição horizontal (*tilt compensation*).

II Metodologia

Primeiramente, este tipo de métodos necessita duma posição inicial obtida através dum método alternativo (tipicamente o GPS), para que possa posteriormente calcular a posição actual a partir da estimativa do deslocamento efectuado. Obtida esta posição, o algoritmo pode ser dividido em três tarefas principais:

- detecção de passos,
- estimativa do comprimento do passo,
- determinação da direcção do deslocamento.

i Detecção de passos

O problema da detecção de um passo, tem vindo a ser estudado por diversos autores, no entanto, nem todos esses estudos têm o acelerómetro localizado em zonas normalmente atribuídas a *smartphones* (tipicamente na mão), sendo usados outros posicionamentos, como, por exemplo, os pés [KJHP04]. Com a crescente massificação do uso de *smartphones* e, conseqüentemente, dos acelerómetros, espera-se que diverso trabalho científico venha a ser desenvolvido nesta área. Visto que a localização do dispositivo tem um papel importante na detecção de variações de medições dos acelerómetros, está ainda por verificar a eficácia da aplicação ao contexto dos dispositivos *handheld*, de algumas das técnicas descritas em artigos científicos direccionados para outros tipos de dispositivos.

Contudo, existem ainda vários trabalhos que se focam no problema específico dos dispositivos *handheld* [SKS01]. A técnica mais elementar baseia-se no algoritmo proposto por uma patente de 1996 [LJ96]. Esse algoritmo consiste na identificação do máximo do sinal do acelerómetro dentro dum intervalo fixo de tempo (Figura 2.1). Restrições adicionais, como valor mínimo para que esse máximo possa ser considerado um passo, e intervalo mínimo de tempo entre passos consecutivos, pretendem filtrar possíveis falsos positivos. Estudos posteriores [LGM⁺00] sugerem algumas ideias para o melhoramento dos seus resultados, através da utilização de processos de pré-processamento do sinal. Existem ainda autores que apontam a análise da aceleração em vários eixos como solução possível para determinar a ocorrência dum passo [Lad00].

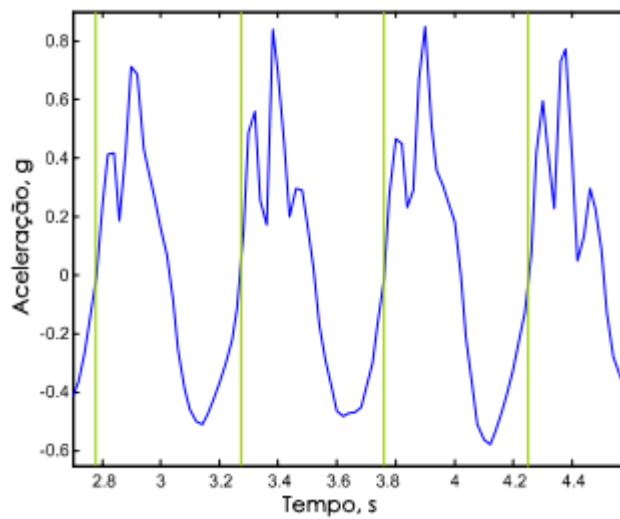


Figura 2.1: Método de detecção de passos [SKS01]

ii *Estimativa do comprimento do passo*

As diversas técnicas de estimativa do comprimento do passo, dividem-se em duas categorias principais: as que procuram encontrar uma constante que minimize os erros da estimativa, e as que procuram adaptar essa estimativa aos valores que recebem dos sensores.

Dentro das soluções que utilizam constantes podem-se destacar duas bastante utilizadas em contextos similares ao da presente dissertação:

- a utilização de fórmulas que procuram traduzir a distância do passo com base na altura da pessoa, (e.g. $f(\text{altura}) = K * \text{altura}$, com $K = 0.415$ ou $K = 0.413$, consoante o sujeito seja homem ou mulher) [Aus09],
- a estimativa do comprimento do passo através da divisão do deslocamento (calculado por exemplo por auxílio do GPS) pelo número de passos detectados.

No entanto, existem diversos factores que podem influenciar o comprimento do passo para além da altura e sexo da pessoa. Alguns destes factores são:

- a inclinação do plano onde o sujeito se desloca,
- o ritmo de passada do utilizador,
- as situações de subida ou descida de escadas,
- a realização de mudanças de direcção.

Pelo que é desejável a utilização duma metodologia mais facilmente adaptável aos diferentes cenários possíveis. Existem diversas propostas para dar resposta a este problema:

- Utilização dum rede neuronal treinada para traduzir a relação entre as variações dos acelerómetros e o comprimento do passo [BHW] [ARJS95] [SYCY03],
- Adaptação dum valor médio pré-configurado/calculado ao ritmo do caminhar do utilizador [LJ96] (e.g. maior ritmo implica normalmente maior comprimento de passo),
- Implementação de filtros de Kalman como apresentado em [GM99] [Lad00],
- Cálculo do integral do duplo da aceleração [Kir] [AGLA06],
- Combinação de um ou mais valores relativos à medição de diferentes características do movimento sem realizar o cálculo do integral [SLPH10] [MK] [KJHP04] [AGLA06],
- Utilização do cálculo do integral duplo da aceleração em conjunto com informação sobre o tipo de movimento [SKS01].

iii Determinação da direcção do deslocamento

De forma a colmatar reciprocamente os erros da bússola/magnetómetro e do giroscópio referidos anteriormente, foi proposto em [LM02] e [KLJS96] um sistema que combina os dados obtidos pelos dois sensores através da utilização de um filtro de Kalman. Esta solução melhora consideravelmente a fiabilidade dos resultados em comparação com a utilização individual da bússola ou do giroscópio.

Outros métodos, como o apresentado em [PB09], combinam os dados de acelerómetros, giroscópios e magnetómetros para posteriormente integrarem numericamente uma matriz de direcções de cossenos. Sendo bastante populares no aeromodelismo pela capacidade de calcular de forma optimizada as rotações Eulerianas do avião (*roll*, *pitch* e *yaw*), estes métodos podem ser igualmente úteis no contexto do PDR.

III Variantes

i Utilização de plantas dos edifícios

A utilização de plantas dos edifícios é proposta por vários autores como medida adicional de correcção ou limitação de eventuais erros criados por este tipo de INS. O conceito em si assemelha-se ao que já é actualmente feito, por exemplo, nos sistemas de navegação automóvel com a utilização dos mapas digitais das estradas [OLS06]. As plantas dos edifícios estão normalmente disponíveis em diversos casos pelo que o único pré-processamento necessário seria a sua conversão para o formato suportado pelo sistema de localização. De acordo com a pesquisa feita, não existe nenhum formato standard de

representação de plantas de edifícios para esta função específica, sendo que diversas soluções são apresentadas em [WLS⁺07]. A combinação da utilização da planta de edifícios com o sistema de localização inercial pode ser feita de diversas formas:

- simples introdução de restrições como a impossibilidade do atravessamento de paredes e outras heurísticas [HHTF01]
- criação de um grafo representativo dos trajectos principais que possa traduzir eficazmente o posicionamento do sujeito [PAC10]
- utilização de algoritmos específicos para a estimativa condicionada do estado dum sistema:
 - filtros de Kalman
 - variantes de filtros de Kalman para distribuições não-Gaussianas/não-lineares como é o caso do Unscented Kalman Filter [LTH09]
 - filtros de partículas [MK]
 - variantes de filtros de partículas (como a introdução de restrições de Voronoi [EMN05])
 - Moving Horizon Estimation (MHE [HGMT07])

Estes últimos métodos, mais refinados, baseiam-se na representação da posição do sujeito através da utilização dum função densidade de probabilidade condicional (Conditional Probability Density Function - pdf). A cada momento esta função traduz a probabilidade do sujeito se encontrar em determinado ponto. Com a introdução da informação dada pelas plantas dos edifícios é possível restringir a abrangência dessa função. Este comportamento é ilustrado de forma superior em [FHG02], no seguinte exemplo:

- Considere-se que um carro se desloca ao longo dum trajecto linear durante algum tempo, acumulando naturalmente alguma incerteza ao longo do percurso. Esta incerteza seria causada pela possibilidade de erros na estimativa da velocidade e direcção do veículo, ou, no nosso caso, pela detecção, tamanho e orientação dos passos do sujeito. A pdf deste exemplo poderia ser então dada pela figura 2.2.
- Imagine-se agora que o veículo efectua uma viragem à direita. Tendo o sistema conhecimento do traçado da rede rodoviária, ou, no nosso caso, da planta do edifício, este será capaz de rejeitar diversas possibilidades improváveis ou impossíveis. Por exemplo, todas as estimativas que apontavam para a localização do veículo numa área onde fosse impossível realizar uma viragem à direita podem ser descartadas. Concluimos então que esta informação extra serve para diminuir a incerteza da pdf, como pode ser observado na figura 2.3.

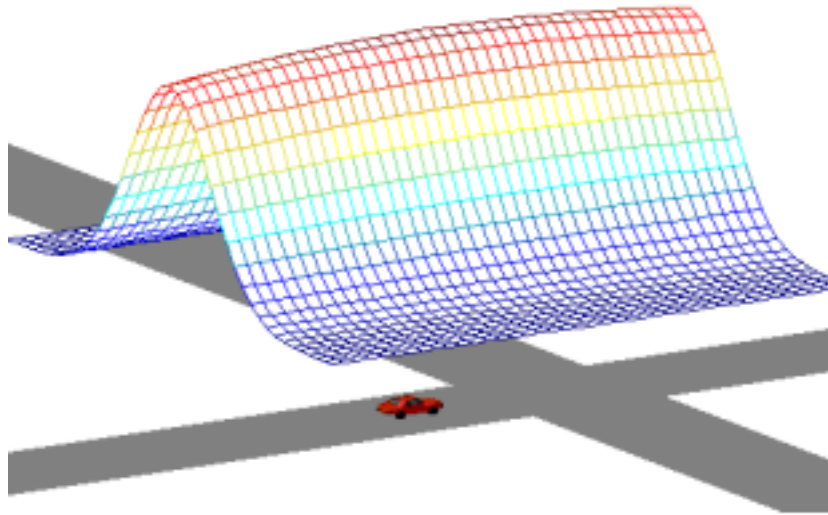


Figura 2.2: Função densidade de probabilidade condicional durante um deslocamento rectilíneo [FHG02]

Muito do trabalho desenvolvido nesta variante é também aplicável a outros sistemas de localização *indoor*, como, por exemplo, os que usam WLAN, sendo que alguns dos artigos referenciados estão até direccionados para esse método e não para o PDR. No entanto, devido ao facto do PDR ser um sistema que acumula erro ao longo da sua utilização, a utilização destes métodos de correcção assume ainda uma maior importância.

IV Vantagens

- Não existe necessidade de alteração do espaço.
- É um método adaptável a um leque abrangente de contextos.
- As suas variantes (como a utilização da planta do edifício) aproveitam informação tipicamente já existente.
- Existe já um considerável leque de investigação com diversas abordagens diferentes.

V Desvantagens

- Existência de erro acumulado.
- Impossibilidade de determinação de alguns passos (e.g. o uso de elevadores).
- Complexidade de alguns dos conceitos usados para gerir incertezas (e.g. filtros de Kalman).
- Diferente posicionamento dos dispositivos podem afectar algumas das abordagens.

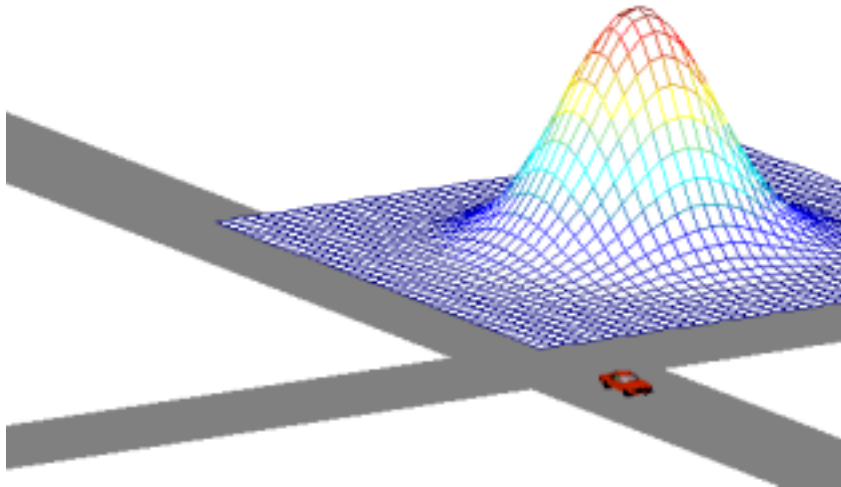


Figura 2.3: Função densidade de probabilidade condicional durante um deslocamento rectilíneo [FHG02]

- Volatilidade do sistema face a interferências magnéticas.

2.2.1.2 Rádio frequência

Esta família de métodos de localização *indoor* utiliza uma ou mais propriedades das ondas electromagnéticas para identificar o posicionamento do sujeito. Das tecnologias que se enquadram neste grupo, a mais comum e já largamente estudada é a WLAN (IEEE 802.11), mas novas aproximações têm sido feitas com recurso ao Bluetooth, à banda ultralarga (Ultra-wideband - UWB) ou ao RFID. Dependendo da tecnologia usada, é possível alcançar precisão na ordem dos 2, 3 metros com estes métodos [HK10] [JTSC10] [LDBL07] [WLS⁺07]. Para determinar a orientação do sujeito devem ser usados instrumentos auxiliares como a bússola ou o giroscópio. Existem duas divisões principais dentro destes sistemas: as que são baseadas em mapeamentos prévios dos espaços (*fingerprints*) e as que não recorrem a esse tipo de abordagem. Acrescente-se que estes sistemas podem também beneficiar da utilização das plantas do edifício como pode ser verificado em [WLS⁺07] e [EMN05].

I Soluções baseadas em mapeamento prévio

A abordagem utilizada nestes casos passa pela divisão do processo em duas fases: *offline* e *online*.

i Offline

Neste primeiro momento é feito um mapeamento da difusão da tecnologia usada no edifício. Nesta fase são registados, em cada um dos pontos do espaço relevantes para o problema, os valores de cada uma das métricas a usar durante a fase posterior. Os valores destas métricas são proporcionais à distância a cada um dos equipamentos de difusão de sinal (e.g. *access points*). As métricas mais comuns são: o ângulo de chegada (Angle of Arrival - AoA), a potência de sinal (Received Signal Strength - RSS) e o tempo que o sinal demora a chegar ao receptor (Time of Flight - ToF). Realizadas estas medições, é criado um mapa com a distribuição dos valores da(s) métrica(s) usada(s) e as correspondentes informações de posicionamento. Será este mapa (tipicamente designado na literatura por *radio map*), que servirá de termo de comparação para a segunda fase do processo de localização.

ii Online

Nesta segunda fase (conhecida como fase *online*), um equipamento com capacidade para medir a(s) métrica(s) usada(s) é utilizado para determinar os valores da(s) mesma(s) no local onde se encontra. As medições são então comparadas com o *fingerprint* obtido durante a primeira fase com o objectivo de aproximar a posição do objecto. Este processo pode ser obtido de diferentes formas, sendo as duas mais comuns a aproximação para o valor mais próximo guardado no *radio map* e a combinação geométrica ponderada de vários pontos próximos num método bastante semelhante ao da triangulação. Estudos recentes têm avançado novas abordagens que usam o reconhecimento de padrões para realizar esta função [LDBL07]. Também aqui, o filtro de Kalman e o de partículas podem ser usados [EMN05].

iii Problemas

O problema principal prende-se com a imprevisibilidade do meio (e.g. pessoas ou objectos que atenuam ou reflectem o sinal), o que pode fazer com que as medições efectuadas durante a construção do *radio map* apontem para posicionamentos errados em algumas situações particulares. Existem estudos que avaliam o impacto da importância de diferentes condições do ambiente na precisão das soluções apresentadas. Alguns destes estudos apontam ainda soluções adaptativas como a utilização de diferentes *radio maps* para diferentes condições do ambiente (e.g. portas abertas ou portas fechadas), como podendo melhorar a precisão em cerca de 2,6 metros face ao método tradicional não adaptativo [CCC+05].

II Soluções sem mapeamento prévio

Este tipo de soluções dispensa a construção do *radio map* realizada na primeira fase dos métodos referidos acima, baseando-se unicamente na triangulação do sinal oriundo de emissores cuja localização é conhecida. Não havendo uma referência empírica por onde guiar a comparação, os problemas de reflexão e atenuação não se limitam apenas às circunstâncias específicas do ambiente durante a fase *online*. A própria estrutura imóvel do edifício (como a existência de paredes ou outros obstáculos) é responsável por criar uma situação de incerteza designada na literatura por Non-Line-Of-Sight (NLOS). Estas condições traduzem basicamente a possibilidade do sinal recebido pelo sujeito não provir directamente do emissor (*line-of-sight*), mas de uma reflexão do mesmo, ou ter já sido atenuado durante o seu trajecto ao atravessar um obstáculo. Esta incerteza dificulta obviamente o cálculo da posição do objecto.

III Variantes

De forma a minorar os efeitos da NLOS, é preferida a utilização de tecnologias como a UWB que, por utilizar impulsos de curta duração diminui a quantidade de reflexões existentes no meio [VB07].

No caso do uso da Radio-Frequency Identification (RFID) na localização *indoor*, grande parte dos mesmos princípios da gama de soluções apresentada na secção anterior continuam a ser aplicados, no entanto, estes métodos são limitados pela reduzida abrangência das *tags* passivas, sendo que a utilização das *tags* activas trariam custos adicionais (monetários e computacionais) [NLLP04]. Nestas soluções é necessária ainda a realização duma fase de calibração de forma melhorar as garantias de fiabilidade das medições [HVBW01].

É sugerida também a utilização conjunta de diferentes destas tecnologias de forma a melhorar os resultados obtidos [EMN05].

Do ponto de vista do aproveitamento das infraestruturas existentes, podemos concluir que, tirando o caso da WLAN cuja tecnologia já está estabelecida em muitos dos edifícios, todas as outras soluções implicariam a adição duma nova rede de radio frequência.

IV Vantagens

- Utiliza uma infraestrutura tipicamente existente em grande parte dos edifícios (no caso da WLAN).
- Bastante trabalho científico já realizado e algumas implementações comerciais efectuadas (WLAN - Skyhook para o caso do *outdoor*).

V Desvantagens

- Problemas com reflexões e atenuações de sinal (NLOS - *vide* figura 2.4).

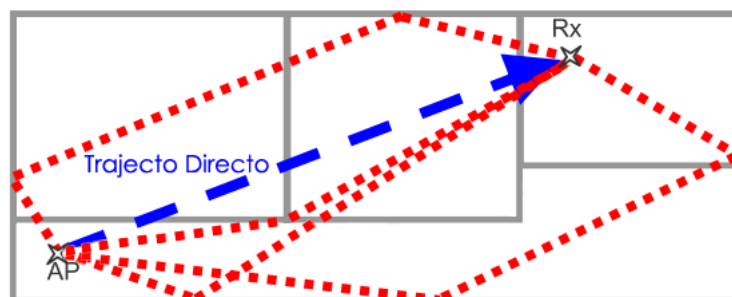


Figura 2.4: Condições NLOS com atenuações e reflexões de sinal [WLS⁺07]

- Uma disposição dos emissores que não tenha em linha de conta as condicionantes físicas do espaço pode influenciar negativamente o cálculo do posicionamento como se pode ver na figura 2.5 (isto é especialmente verdade para as soluções sem mapeamento prévio).

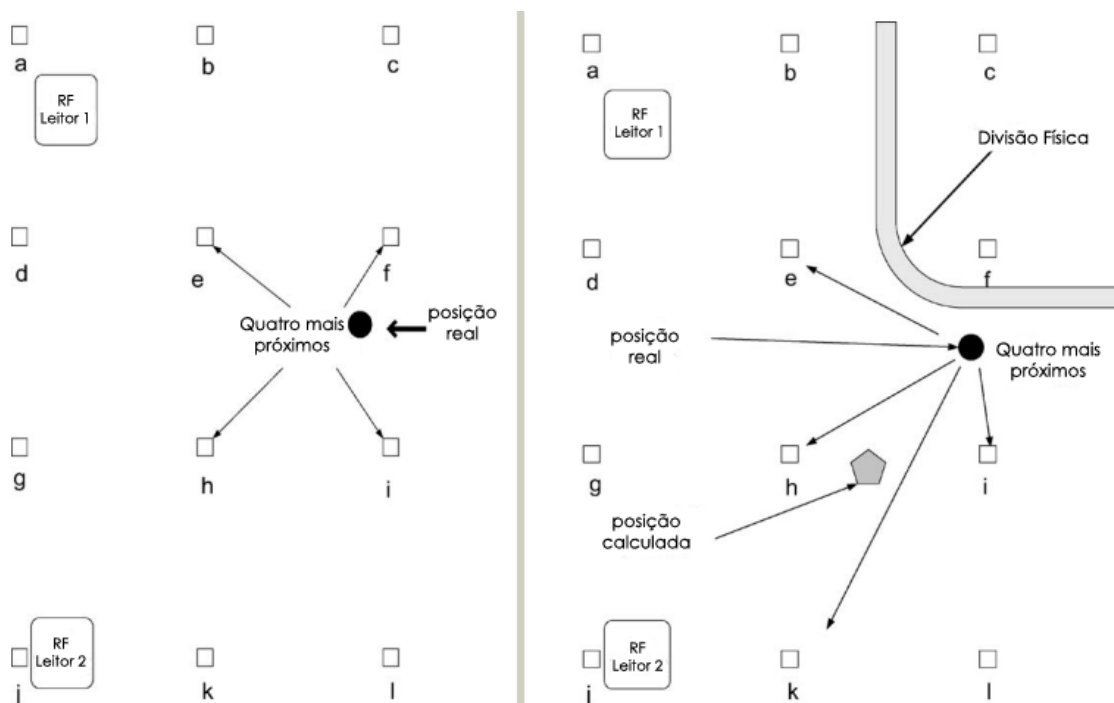


Figura 2.5: Influência da existência de obstáculos no cálculo da posição através da estimativa dos emissores mais próximos [NLLP04]

- Necessidade de alteração do espaço com a introdução de novas redes de radio frequência (para os casos em que a tecnologia adoptada não está ainda implementada).
- Fraca popularização da maior parte das tecnologias (excepto WLAN) para o uso em dispositivos móveis.
- Restrições existentes à propagação de ondas de rádio frequência em certos locais (e.g. hospitais).
- Possíveis conflitos entre bandas de frequência do espectro.

2.2.1.3 Análise de imagem

A utilização da análise de imagem pretende, à semelhança do que é feito pelo ser humano, identificar a sua posição através do estudo visual do espaço à sua volta, usando como referência características do ambiente (naturais ou artificiais) que nos são conhecidas. Dependendo da abordagem escolhida e das condições do ambiente (iluminação, oclusões...), este tipo de soluções pode fornecer precisões na ordem dos centímetros [HK10].

I Metodologia

Os métodos que envolvem análise de imagem dividem-se em dois grupos principais: os que procuram identificar e acompanhar o movimento de determinadas características naturais da imagem ao longo do deslocamento do sujeito e daí tirarem conclusões sobre o seu posicionamento; e os que utilizam a simples leitura de marcas fiduciais, introduzidas propositadamente no ambiente, que têm associadas uma localização específica.

i Reconhecimento de características naturais

Neste tipo de métodos é realizada a análise das componentes naturais duma imagem (com recurso a câmaras tradicionais ou omnidireccionais). Ao contrário do que acontece, por exemplo, com a utilização das marcas fiduciais, neste caso não existe a necessidade de introduzir objectos artificiais para ajudar no posicionamento do sujeito. Dentro deste leque de soluções temos ainda dois casos distintos: aqueles em que a câmara é móvel sendo tipicamente levada pelo sujeito, e os casos em que as câmaras têm posição fixa.

Ambos os métodos seguem normalmente um paradigma bem definido composto por 4 fases [AHC05]:

- aquisição da imagem a partir da posição do sujeito,
- segmentação da imagem e extracção de características,

- correspondência da imagem obtida à representação do espaço guardada em memória,
- computação da posição e orientação da câmara que deu origem à imagem.

O processo aplicado na localização através do uso da câmara móvel passa, à semelhança do que acontece com o *fingerprinting* nos métodos de rádio frequência, por uma abordagem dividida em duas fase distintas. A primeira consiste na identificação das diferentes características do espaço (e.g. através da Scale-invariant feature transform - SIFT [KHYA10]) para posterior mapeamento da representação visual destas à sua localização. Esta estrutura é então guardada juntamente com a posição e orientação da câmara usada aquando da captura da imagem.

Na fase posterior, as imagens obtidas através da câmara, são comparadas com as armazenadas durante a primeira fase do método. Durante esta fase são aplicadas transformações sobre as imagens de modo a testar diferentes possibilidades de orientação, posição ou iluminação da imagem até que seja encontrada uma correspondência significativa entre as componentes de cada uma das imagens. Neste processo podem ser usadas diversas abordagens desde o Straight-line Matching [AHC05] ao método do vizinho mais próximo [KHYA10]. Características como a cor ou a forma das componentes são usadas durante o fase de *tracking*.

Este tipo de métodos tem sido também usado em soluções híbridas como forma de complementar a informação obtida através doutras técnicas como em [ALJ⁺99].

Alguns estudos apontam o uso de duas câmaras como responsável pelo melhoramento considerável da precisão do sistema [KKH05].

Embora grande parte da investigação científica realizada até agora seja preponderantemente direccionada para o ambiente robótico, é de esperar que os processos descritos para esse fim possam ser facilmente adaptados à utilização da presente tese.

No caso das câmaras fixas, existem algumas soluções já implementadas, como a do projecto Easy Living da Microsoft [KHM⁺00]. No entanto dado esse produto não ser directamente orientado para o tipo de utilização pretendida e os seus custos serem bastante elevados, não será analisado nesta dissertação.

ii Marcas fiduciais

Um problema relativamente diferente é o relacionado com a detecção de marcas fiduciais. Marcas fiduciais são imagens artificiais adicionadas ao ambiente de forma a facilitar a localização do sujeito através da identificação de padrões de mais fácil análise do que as características naturais da imagem.

Uma marca fiducial para ser eficiente deve seguir determinadas regras conforme é explicado em [OXM02]:

- suportar uma determinação inequívoca da orientação e posição relativa da câmara que capturou a imagem,
- não favorecer uma orientação em relação a outra,
- não ser facilmente confundida com outra marca fiducial do mesmo conjunto,
- ser facilmente identificada por algoritmos rápidos e simples,
- ser detectável ao longo dum largo intervalo de captura.

Cada uma destas imagens fiduciais deve conter um identificador único que pode ser utilizado para encontrar a posição da imagem após estar ter sido colocada no ambiente.

No caso mais simples, em que apenas se procura utilizar as marcas fiduciais nas proximidades, o sistema pode simplesmente obter a posição do sujeito através de simples adições à posição da marca fiducial. No entanto, quando se pretende utilizar esta tecnologia para uma identificação mais próxima daquela discutida na secção anterior, o mesmo tipo de transformações será necessário de forma a conseguir obter o *offset* posicional e a orientação da câmara em relação à posição inicial da imagem identificada.

II Vantagens

- Utilização de tecnologias existentes actualmente nos dispositivos móveis (câmara).
- Elevada precisão.
- Ausência de necessidade de alteração do ambiente (no caso do reconhecimento de características naturais).

III Desvantagens

- Dificuldades com a imprevisibilidade do ambiente (e.g. oclusão temporária).
- Influência das condições de iluminação na qualidade dos resultados.
- Complexidade.
- Necessidade de alteração do ambiente (no caso das marcas fiduciais).
- Necessidade de deslocamento até à marca fiducial (no caso destas serem utilizadas apenas para *close-range*).

2.2.1.4 Outros

Para além dos métodos abordados, existem ainda outros dentro do contexto da localização *indoor* que, pelas suas características, não são tão indicados para o problema em questão. Exemplos desses métodos são:

- a utilização de emissores infra-vermelhos em espaços equipados com sensores desta tecnologia [WFG92];
- os diversos métodos de localização baseados em ultra-sons com e sem a utilização conjunta de rádio-frequências [PCB00] [HHS⁺99] [HH06], ou até como sistema secundários para soluções híbridas juntamente com métodos como o PDR [FMHG08] ou os baseados em rádio frequências [Bri05].

Estes métodos apresentam precisões bastante elevadas na ordem dos centímetros, no entanto o seu alcance é reduzido, implicam a alteração do espaço e os resultados são altamente voláteis face à existência de ruído e ecos (ultra-sons) e variações das condições do ambiente condições de NLOS (infra-vermelhos e ultra-sons). A sua utilidade para a presente dissertação também é condicionada por utilizarem tecnologias tipicamente não disponíveis nos dispositivos móveis actuais.

2.2.1.5 Conclusões

Ao longo da secção 2.2.1 foram apresentados diversos métodos indicados para a resolução do problema da localização *indoor*. Ao analisarmos a tabela 2.1, que contém o sumário das características principais de cada método, podemos reparar que, apesar de cada proposta de solução ter as suas particularidades, não existe nenhuma que se destaque claramente em relação às restantes. A escolha do melhor método está assim largamente influenciada pelos requisitos e circunstâncias de cada caso.

Método	Precisão	Vantagens	Desvantagens
PDR	>95% do trajecto	adaptável; não necessita de alteração do espaço	erro acumulado; precisão dependente de diversos factores
WLAN	2-3 m	Aproveita uma arquitectura já existente	problemas em lidar com NLOS; o método com <i>fingerprinting</i> necessita de mapeamento prévio do espaço
RFID	1-3 m	Baixo custo	curto alcance; NLOS; mapeamento prévio para o <i>fingerprinting</i>
Análise Imagem (Caract. Nat.)	na ordem dos cm	orientação e localização precisas; sem necessidade de alteração do ambiente	complexo; vulnerável a alterações do ambiente
Marcas Fiduciais	na ordem dos cm	orientação e localização precisas; mais simples que a análise das características naturais	necessidade de alteração do espaço envolvente; vulnerável às condições do ambiente

Tabela 2.1: Comparação sumária dos métodos abordados durante a secção 2.2.1 [LDBL07] [JTSC10] [HK10]

2.2.2 Outdoor

O problema da localização em espaços abertos é claramente dominado actualmente pelos sistemas de localização baseados em satélites (Global Navigation Satellite Systems - GNSS), e, mais precisamente, pelo Global Positioning System (GPS) americano.

2.2.2.1 GNSS

Um GNSS é descrito pela Organização Internacional de Aviação Civil (International Civil Aviation Organization - ICAO) como:

”um sistema global de determinação de posição e tempo que inclui uma ou mais constelações de satélites, receptores aéreos e um sistema de monitorização de integridade, aumentado quando necessário para apoiar a performance de navegação exigida para a operação” (tradução livre [kn:07])

Idealizados inicialmente tendo em vista fins militares, os GNSS são actualmente usados massivamente para inúmeros fins civis. A precisão civil fornecida pelos GNSS é, por norma, inferior à disponibilizada para fins militares, no entanto, tal facto não impediu que a Comissão Europeia previsse que esta indústria representasse 140 mil milhões de euros em 2015.

Tipicamente os GNSS são constituídos por 3 segmentos diferentes:

- os satélites,
- o controlo e monitorização feito em terra,
- e o receptor do utilizador.

Nestes sistemas a posição é medida em 3 grandezas: latitude, longitude e altitude.

A presente secção abordará as soluções existentes, dando especial destaque ao GPS visto ser este, de momento, o único GNSS totalmente funcional.

I GPS

O GPS (também conhecido como NAVSTAR GPS) é um GNSS desenvolvido pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos que iniciou o seu funcionamento integral em 1995. Consiste numa constelação de 24 satélites, em 6 órbitas aproximadamente circulares, a uma altitude de aproximadamente 20 mil quilómetros. Em cada uma das órbitas estão colocados 4 satélites igualmente espaçados entre si, com uma inclinação de 55 graus relativamente ao Equador (*vide* Figura 2.6). Esta disposição permite que, em cada momento, no mínimo 4 satélites estejam visíveis em qualquer ponto da Terra (obviamente exceptuando os casos em que o sinal é afectado por factores externos) [ZS06].

Cada satélite transmite continuamente mensagens que incluem:

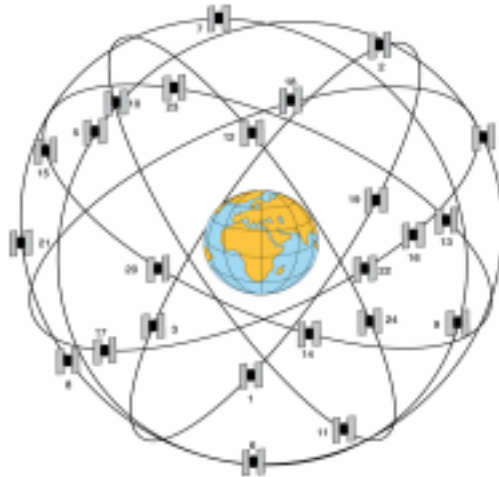


Figura 2.6: Constelação de satélites GPS [ZS06]

- o tempo a que a mensagem foi enviada,
- informação precisa sobre a órbita do satélite,
- informação genérica sobre a estado e órbitas de todos os satélites.

Em terra, o receptor calcula a distância ao satélite usando o intervalo de tempo desde a transmissão da mensagem pelo satélite até à altura em que o receptor a recebeu. Realizar o mesmo procedimento para, pelo menos, outros 2 satélites, permite a utilização da trilateração para a computação da posição. No entanto, o GPS necessita dum quarto satélite para reduzir o erro posicional causado pelos erros de precisão do seu relógio interno. Mesmo imprecisões mínimas podem originar erros significativos visto que os sinais são transmitidos à velocidade da luz para a Terra (um erro de um microssegundo no tempo do relógio origina um erro posicional de 300 metros). No GPS o segmento de controlo é responsável pela sincronização dos relógios atómicos dos satélites, o que é feito com uma precisão de poucos nanossegundos [Inc11g].

Este sistema de localização, que opera em duas frequências específicas: 1575,42 MHz e 1227,60 MHz (respectivamente designadas na literatura de L1 e L2), oferece dois modos de operação distintos:

- Standard Positioning Service (SPS)
- Precision Positioning Service (PPS)

O primeiro (SPS) é o tipo de serviço usado para fins civis e o que mais interessa no âmbito da presente dissertação. Possui uma precisão horizontal média de 10 metros, sendo que no pior caso se garante um erro igual ou inferior a 22 metros com 95% de confiança. No caso da altitude (precisão vertical) este erro pode chegar aos 77 metros [ZS06]. Na

realidade, os relatórios de análise da performance do SPS elaborados pela Federal Aviation Administration dos Estados Unidos reportam precisões reais inferiores a 3 e 5 metros (horizontal e vertical) com 95% de confiança [kn:01]. Por sua vez, o PPS é usado para fins militares e possui níveis de precisão mais elevados.

No caso do SPS, inicialmente a precisão do sinal era propositadamente deteriorada pelos Estados Unidos através dum método designado por Selective Availability (SA). Antes do SA ser removido no ano 2000, a precisão horizontal para civis não ultrapassava os 100 metros (95% de confiança) [LB00].

II Outros

Para além do consagrado GPS, a Rússia também possui um sistema de localização por satélite que se encontrou totalmente funcional em meados dos anos 90. Este projecto, chamado Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema (GLONASS), foi no entanto abandonado devido ao colapso da economia russa. Em 2001 e 2003 o governo russo comprometeu-se a reactivar o seu sistema de navegação e, neste momento, o GLONASS já garante a cobertura total do território russo, sendo que ainda não se encontra totalmente operacional.

A União Europeia, por sua vez, está conjuntamente com a Agência Espacial Europeia (ESA) a desenvolver o Galileo. Projectado para se tornar operacional em 2013, esta data já foi adiada para 2014. Ao contrário do GPS e do GLONASS, o Galileo é desenvolvido com o objectivo principal do uso civil e comercial, sendo que a sua precisão horizontal no serviço aberto pode atingir os 4 metros. Este sistema é também desenvolvido de forma a suportar a utilização combinada com o GPS de forma a melhor aproveitar os satélites das diferentes constelações [HC08].

À semelhança do GPS, tanto o Galileo como o GLONASS, têm um serviço civil de livre utilização.

Para além destes GNSS estão ainda a ser desenvolvidos: o Compass chinês, o Quasi Zenith Satellite System japonês e o Indian Regional Navigation Satellite System indiano, sendo que os dois últimos são apenas sistemas regionais.

III Variantes

Existem vários sistemas secundários para melhorar a qualidade de serviço dos GNSS e mais precisamente do GPS. Os mais populares são o DGNSS e o A-GNSS.

i DGNSS

Na navegação através de Differential GNSS (DGNSS) é utilizada uma referência conhecida que mede os erros do sistema de GNSS básico e posteriormente propaga essas

medições aos receptores comuns da vizinhança. Essa informação é depois utilizada para corrigir o posicionamento do utilizador (Figura 2.7).

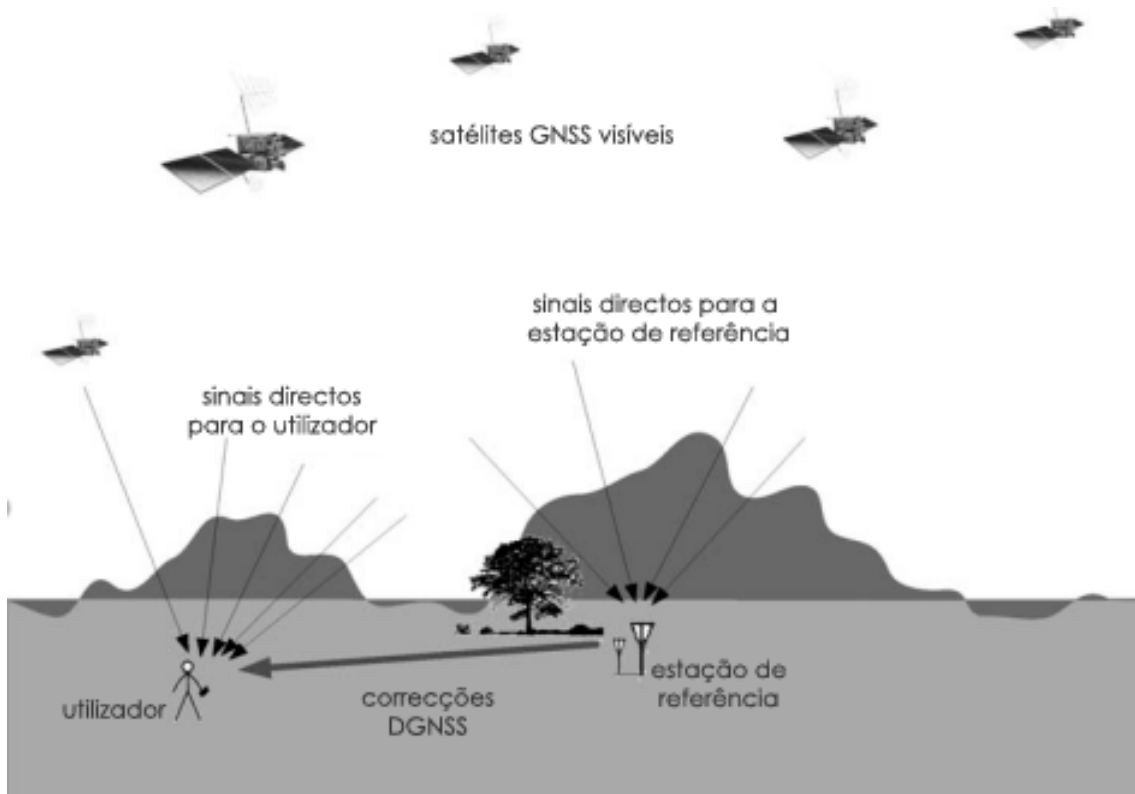


Figura 2.7: Um exemplo dum DGNSS [BHWW07]

Um caso especial dos DGNSS é um SBAS (Satellite Based Augmentation System). Estes sistemas diferem dos típicos DGNSS em dois aspectos fundamentais [Kow09] [Stu]:

- O primeiro prende-se com o tipo de comunicação que é estabelecida com o utilizador. Enquanto que no caso dos DGNSS tradicionais esta é efectuada através de emissores terrestres, no caso dos SBAS essa comunicação é efectuada a partir de satélites adicionais, o que faz com que os receptores não necessitem de possuir outros mecanismos de recepção (*longwave*) para além dos que usam para capturar o sinal de satélite normal.
- A outra diferença está relacionada com o tipo de correcção que é prestada. Nos DGNSS normais a correcção é enviada pela estação local e contém informação sobre as diferenças que se verificam entre o posicionamento do GNSS e a posição correcta da estação. Estes erros são depois fornecidos ao utilizador para que sejam aplicados ao cálculo da sua própria posição. Como os erros medidos estão normalmente relacionados com circunstâncias atmosféricas específicas duma determinada zona, as correcções só são válidas até uma determinada distância da estação (50 –

200 Km). Já nos SBAS, os dados de todas as estações terrestres são combinados numa unidade central de processamento onde servem de base para a criação dum mapa regional de correcções. Este mapa é então emitido para os satélites do sistema que o enviam posteriormente para os receptores GNSS.

Actualmente existem 3 sistemas deste género disponíveis em zonas geográficas específicas: WAAS (Wide Area Augmentation System) nos Estados Unidos, EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay System) na Europa e MSAS (Multi-functional Satellite Augmentation System) no Japão (Figura 2.8).

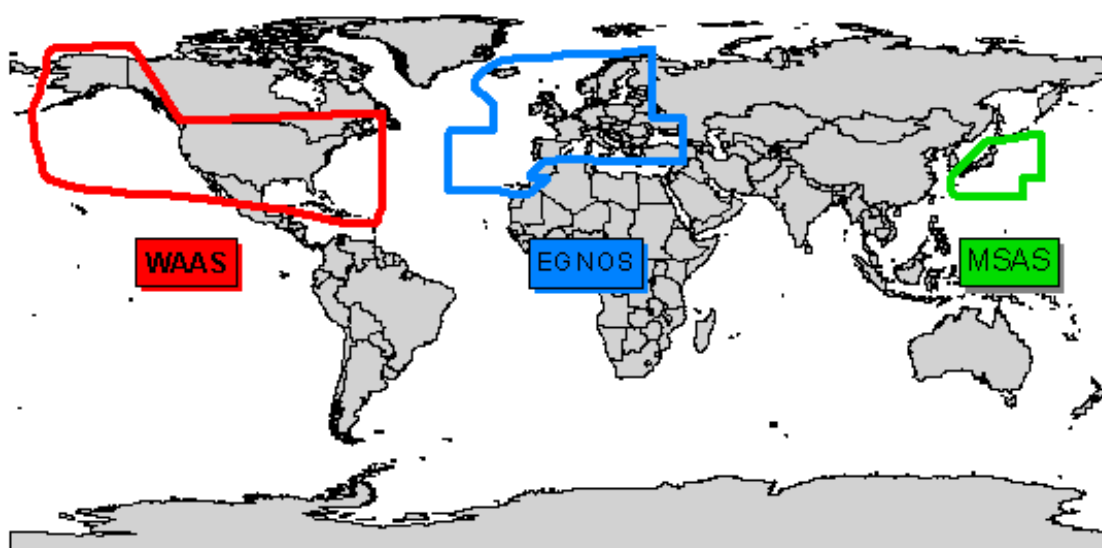


Figura 2.8: Cobertura geográfica dos sistemas SBAS [Stu]

ii A-GNSS

Assisted GNSS (A-GNSS) é actualmente uma das variantes mais comuns nos GNSS (especialmente no GPS). Podendo ser considerado um *superset* dos DGNSS, esta variante utiliza informação duma rede de comunicações auxiliar (como o Wi-Fi) para, à semelhança do que acontece com o DGNSS, ajudar na correcção dos erros do sistema de GNSS básico. No entanto, neste caso, a ajuda obtida pode conter informação mais elementar, como a órbita ou informação de estado dum determinado satélite. Desta forma, a relativa lentidão de recepção dessa mesma informação através da leitura do sinal modulado do satélite, pode ser ultrapassada. Esta técnica tem sido aproveitada para melhorar o processo de localização em dispositivos como os *smartphones* e receptores GPS para navegação automóvel. Os melhoramentos são especialmente notórios na rapidez do estabelecimento da posição inicial do dispositivo (*fix*) [BHW07] (Figura 2.9).

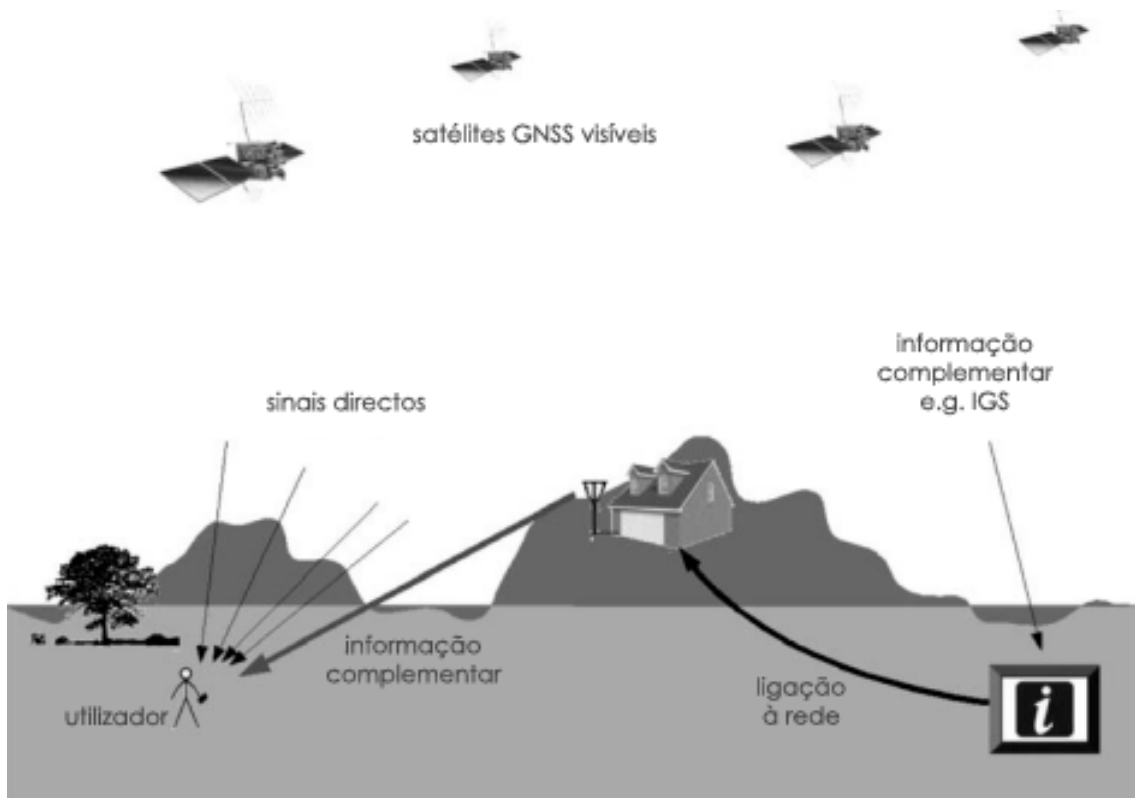


Figura 2.9: Um exemplo dum A-GNSS [BHW07]

IV Vantagens

- Ubíquo.
- Popularizado.
- Elevadas precisões na grande maioria dos cenários *outdoor*.
- Existem vários projectos de expansão e melhoramento em desenvolvimento.

V Desvantagens

- Utilização eficiente requer *line-of-sight* entre o receptor e os satélites.
- Vulnerável à reflexão e atenuação do sinal causada por obstáculos naturais ou artificiais (montanhas ou prédios altos).
- Não operacional no caso do *indoor*.

2.2.2.2 Outros

Para além dos GNSS, métodos como o uso do WLAN em utilização conjunta com o GPS, ou até mesmo análise de imagem e INS [ABB⁺01], podem ser também aplicados

no exterior, no entanto, na maioria dos casos os GNSS fornecem um serviço de melhor qualidade. A solução WLAN+GNSS tem se tornado relativamente popular visto aumentar consideravelmente a rapidez na obtenção da primeira localização, tanto em relação ao GPS normal como ao A-GPS, quando usado em grandes cidades [[Incl 1a](#)]

2.2.2.3 Conclusões

Com a preponderância dos GPS e a aposta clara na sua modernização e expansão, o problema da localização *outdoor* parece ter encontrado uma solução estável, popular e precisa. Espera-se que a introdução dos novos GNSS, venha confirmar ainda mais a supremacia das soluções baseadas em posicionamento via satélite.

2.3 Comunicação

Um sistema do género do que tem vindo a ser apresentado ao longo do presente documento, levanta necessidades específicas de comunicação. Apesar de não ser o caso do protótipo implementado, uma grande parte dos jogos actuais necessitam a cada instante de ter informação temporal relativamente precisa. Dependendo do nível de intercomunicação entre jogadores que o jogo proporcione, pode ainda ser necessário considerar o peso da comunicação jogador-jogador. O mesmo acontece quanto à quantidade de informação sobre a mecânica de jogo que tem de ser comunicada aos utilizadores (e.g. alterações às condições de jogos que tenham de ser aplicadas a todos os elementos da mesma forma). A dimensão de cada um destes requisitos está bastante dependente do jogo em si, sendo que os jogos *multiplayer* baseados em localização têm normalmente algumas especificidades exigentes (e.g. comunicação da posição de cada utilizador em cada momento), que foram tidos em consideração na escolha da componente comunicacional da dissertação.

Adicionalmente, para além da quantidade de tráfego a transmitir, factores como os atrasos de comunicação, são também capazes de influenciar negativamente a experiência do jogador. Em redes móveis de menor qualidade, estas considerações ganham ainda maior relevo. Para as situações mais exigentes deve-se pois procurar formas de diminuir os efeitos da latência, como o recurso ao *dead reckoning* ou ao *rollback* [Mau00]. Ainda assim, uma das medidas que deve ser tomada sempre que possível é a racionalização e limitação da comunicação de forma a assegurar uma maior escalabilidade da solução.

Após esta descrição inicial dos traços gerais que devem guiar a construção duma solução comunicacional que responda às necessidades da plataforma, são de seguida abordadas as tecnologias mais populares que podem ser usadas neste contexto. A presente secção termina com a análise das técnicas existentes para a resolução de alguns dos problemas principais levantados pela criação e utilização deste sistema.

2.3.1 Tecnologias

A qualidade da ligação sem fios é determinante para a fluidez e coerência da maior parte dos jogos baseados em localização. A capacidade da tecnologia de comunicação usada pode pois influenciar o tipo de aplicações suportadas. Em [PSMT08] são referidas várias dessas tecnologias, e identificados os principais requisitos necessários para garantir um sistema estável:

- velocidade de transferência de dados suficiente,
- baixa latência,
- suporte robusto à mobilidade.

De seguida são caracterizadas algumas das principais tecnologias existentes nesta área, levando em linha de conta as características apresentadas em cima. Estas tecnologias encontram-se distribuídas de acordo com o seu alcance geográfico.

2.3.1.1 WWAN

Uma Wide Area Network (WAN) é um tipo de rede informática que cobre um área bastante alargada de espaço, tipicamente de alcance metropolitano, regional ou nacional. As Wireless WAN (WWAN) são WAN que utilizam comunicação sem fios para transmitir os seus dados. Este tipo de redes são as mais indicadas para aplicações que necessitem de acesso à Internet em larga escala (e.g. dentro dum país). Existem diversos standards dentro das WWAN, sendo que estes são tipicamente aglomerados em gerações. As duas últimas gerações são descritas de seguida (tecnologias inferiores a 3G não são aconselháveis para aplicações que utilizem realidade aumentada [PSMT08]).

I 4G

A quarta geração (4G) de *standards* de tecnologias de acesso sem fios, permitem velocidades de download até 100 Mbit/s em contextos de elevada mobilidade, ou 1 Gbit/s para situações em que existe pouca ou nenhuma mobilidade [Uni]. Os valores de latência são de 50 milissegundos para estabelecer a ligação e 5 milissegundos depois disso (tempos apenas num sentido) [Kre08]. Existem 2 tecnologias que se candidataram aos standards 4G sendo estas a Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX) e a Long-Term Evolution (LTE). Ambas as versões ainda estão aquém dos níveis exigidos pelo standard, mas prevêem que tal patamar venha a ser atingido ainda neste ano [Inc11c]. Estas tecnologias encontram-se ainda na fase de implementação, não estando ainda disponíveis na maioria dos países (como é o caso de Portugal).

II 3G

A terceira geração (3G), por sua vez, já é largamente suportada pelas redes de comunicações móveis e pelos seus dispositivos (e.g. *smartphones*). Dada a existência de consideráveis diferenças de performance dentro das tecnologias que cumprem este *standard*, foram criadas subcategorias à margem da designação oficial. Assim temos várias tecnologias, sendo as principais o UMTS e o CDMA2000 nos níveis de 3G mais básicos e o HSDPA, o HSUPA e finalmente o HSPA+ para níveis de performance mais elevados (normalmente designados por 3.5G ou 3.75G) [Ste07]. O *standard* 3G por si define apenas um mínimo de velocidade de 200 Kbit/s, no entanto algumas das tecnologias mais avançadas dentro do 3G podem atingir (em teoria) os 56 Mbit/s (este é o caso da última versão do HSPA+) [Inc11b]. Ao nível da latência nas redes avançadas de 3G, estas chegam demorar algumas centenas de milissegundos a estabelecer a ligação, e cerca de 50

milissegundos no processo normal de transmissão de pacotes de dados (tempos apenas num sentido) [Kre08].

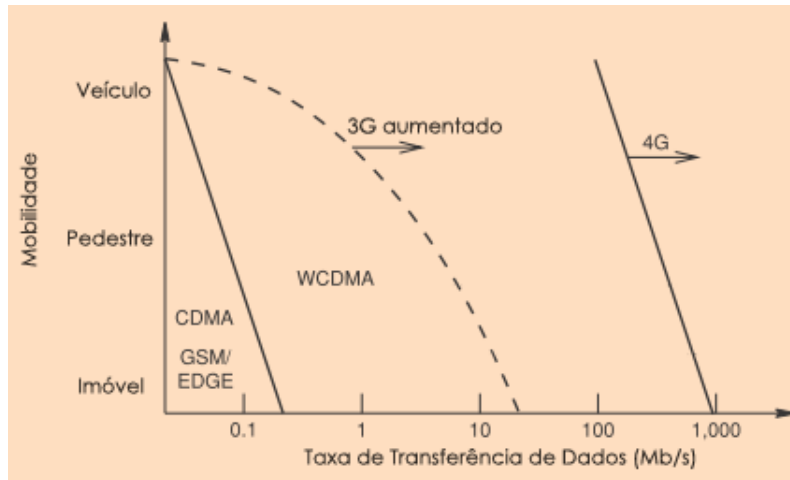


Figura 2.10: Evolução das taxas de transferência de dados e da suporte à mobilidade (imagem retirada de [Ste07] e posteriormente modificada)

2.3.1.2 WLAN

As Local Area Networks (LANs) são redes informáticas com abrangência limitada a uma casa ou escritório. Assentam nos standards 802.11a/b/g/n cujas velocidades de transferência, nas versões mais recentes de cada uma das normas, podem ir dos 11 Mbit/s máximos da norma b até aos 600 Mbit/s da norma n. A norma mais comum (a g) tem uma velocidade máxima de 54 Mbit/s. Simples testes efectuados numa rede com norma g resultaram em latências na ordem dos 15 ms ao estabelecer a conexão e 3 ms no período depois deste. Este tipo de soluções apresenta-se como a uma opção viável para aplicações móveis orientadas a espaços reduzidos, ou seja, aproximadamente o mesmo conjunto de espaços do WLAN (casa, escritórios, faculdades...).

Capítulo 3

Metodologia

Esta secção destina-se a abordar, dum ponto de vista mais teórico, os diversos aspectos relacionados com as técnicas de comunicação e de localização *indoor* e *outdoor* que foram implementadas no presente estudo.

Na construção dum jogo multi-jogador baseado na localização física do jogador existem duas tarefas que se destacam:

- a obtenção da localização do sujeito em qualquer contexto (*indoor* ou *outdoor*),
- o estabelecimento da comunicação necessária entre jogadores e entre o jogador e o servidor.

A componente de localização combina diversos métodos e tecnologias de forma a obter um posicionamento correcto. Este posicionamento é o factor principal pelo qual o jogador realiza acções no ambiente de jogo. No entanto, para que o jogo possa ter o carácter ubíquo desejado, é necessário resolver diversas questões diferentes. Cada uma delas é apresentada, juntamente com a respectiva solução implementada, na secção 3.1.

Por sua vez a comunicação enfrenta problemas específicos dum utilização móvel que devem ser tidos em consideração na criação dum plataforma deste tipo. A abordagem escolhida e as razões por trás dessa escolha são apresentadas na secção 3.2.

3.1 Localização

Conforme foi concluído no capítulo anterior, um módulo de localização ubíquo eficaz não pode estar unicamente dependente duma tecnologia. Para cada uma das duas situações identificadas anteriormente (*indoor* e *outdoor*), foi escolhida uma tecnologia que nos pareceu ser capaz de dar uma resposta adequada ao problema em causa. Estas tecnologias foram: o Pedestrian Dead Reckoning para os recintos fechados, e o GPS para os espaços abertos.

Ao longo desta secção ambas as soluções são apresentadas e explicadas detalhadamente, sendo que a abordagem usada para o problema *indoor* é apresentada e detalhada na secção 3.1.1, enquanto que a utilização do GPS é revista na secção 3.1.2.

Tendo como objectivo o melhoramento da solução de localização *indoor* oferecida pelo PDR, foi introduzido também o recurso às plantas dos edifícios (como referido em [Utilização de plantas dos edifícios](#) na secção 2.2.1.1). O método escolhido para efectuar esta integração foi o Filtro de Partículas, que é detalhadamente descrito na secção 3.1.3.

Durante o desenvolvimento da solução foi possível identificar a utilidade do uso combinado do PDR e do GPS, integrados no método do Filtro de Partículas, para o caso da localização em espaços abertos. A forma como foi expandida a utilização do PDR de forma a complementar o GPS em situações *outdoor* pode ser encontrada na secção 3.1.3.5.

3.1.1 Pedestrian Dead Reckoning

Assim como no capítulo relativo à análise do estado da arte, também aqui a descrição da solução de Pedestrian Dead Reckoning encontrada é dividida nas suas três sub-tarefas principais: determinação da orientação, detecção de passos e estimativa do comprimento do passo.

A sequência de passos apresentada nesta secção, possibilita obter informação suficiente para aplicar a função de transição inercial. Considerando que x_{i-1} e y_{i-1} são as coordenadas da localização do sujeito no instante de tempo $i - 1$, dT o tamanho do passo dado e ψ o ângulo que a orientação do deslocamento faz com o Norte geográfico, a função de transição de estado mais simplista é então dada por:

$$x_i = x_{i-1} + dT \sin(\psi) \quad (3.1)$$

$$y_i = y_{i-1} + dT \cos(\psi) \quad (3.2)$$

O que define a base dum sistema de Pedestrian Dead Reckoning. O trabalho realizado ao longo das subsecções seguintes tem todo como objectivo o melhoramento dos resultados obtidos pela aplicação destas equações.

3.1.1.1 Orientação

A orientação do utilizador da plataforma é determinada pela orientação da IMU. Desta forma espera-se que esta aponte sempre na direcção do deslocamento do sujeito. Se teoricamente a direcção da norma do magnetómetro ou o processamento dos dados dos giroscópios servirem por si só para calcular a orientação do dispositivo, os erros de precisão (constantes, pontuais ou acumulados) destas componentes aliados ao elevado grau de liberdade da sua utilização (rotações, inclinações...), levam a que se recorra por diversas vezes a métodos mais elaborados. De seguida são apresentados alguns dos conceitos teóricos implementados para melhorar este aspecto da aplicação.

I Direction Cosine Matrix

Para descrever a orientação da IMU ao longo da utilização do programa, a aplicação baseia-se no algoritmo de Direction Cosine Matrix (DCM) descrito em [PB09], que é por sua vez baseado no trabalho de Mahony *et al.* [MCH06]. Uma DCM é uma forma de representação matricial de rotações, que não possui singularidades, ao contrário dos ângulos de Euler. Numa DCM, cada posição da matriz representa o cosseno do ângulo entre um vector unitário dum referencial e do outro. No nosso caso, esses ângulos representam as rotações necessárias para a passagem do referencial da Terra para o da IMU, traduzindo assim a orientação do dispositivo (Equação 3.3). Como qualquer outra matriz de rotações, a multiplicação da DCM por um vector, permite a conversão das coordenadas desse vector dum referencial para o outro (no nosso caso, do referencial da IMU para o da Terra). Esta conversão mantém a ortogonalidade e a norma dos vectores.

$$R = \begin{bmatrix} r_{xx} & r_{xy} & r_{xz} \\ r_{yx} & r_{yy} & r_{yz} \\ r_{zx} & r_{zy} & r_{zz} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

DCM - cada posição é o cosseno do ângulo entre um eixo do referencial Terra e outro eixo do referencial IMU $r_{terra,imu}$ [PB09]

Por traduzir rotações tridimensionais a nossa DCM tem 9 elementos (matriz 3x3), sendo que apenas 3 deles são independentes. A ortogonalidade implica uma série de restrições sobre os valores da matriz (como a perpendicularidade de linhas e colunas) que devem ser garantidas apesar de possíveis erros numéricos que aconteçam ao longo do cálculo das rotações. Cada rotação produz uma matriz anti-simétrica dado que os ângulos abaixo da diagonal são os ângulos acima da diagonal medidos no sentido oposto. Assim sendo, para obter a rotação inversa, responsável pela conversão de coordenadas no sentido oposto, basta trocar os papéis dos dois referenciais, ou seja, calcular a transposta ($A^{-1} = A^T$).

i Eixos, ângulos e convenções

A orientação dum corpo sólido é normalmente representada pelos ângulos de Euler (*yaw*, *pitch*, *roll*) das rotações correspondentes em relação à orientação de referência. Diversas convenções são utilizadas na literatura sendo esta a utilizada neste trabalho:

Eixos (figura 3.1):

- *x*: na direcção da ligação com a FTDI (Future Technology Devices International) Breakout Board
- *y*: apontando para a direita
- *z*: apontando para baixo

Ângulos (figura 3.2):

- *yaw*(ψ): no sentido horário
- *pitch*(θ): elevação da frente da IMU (limite positivo do eixo *x*)
- *roll*(ϕ): lado direito da IMU para baixo

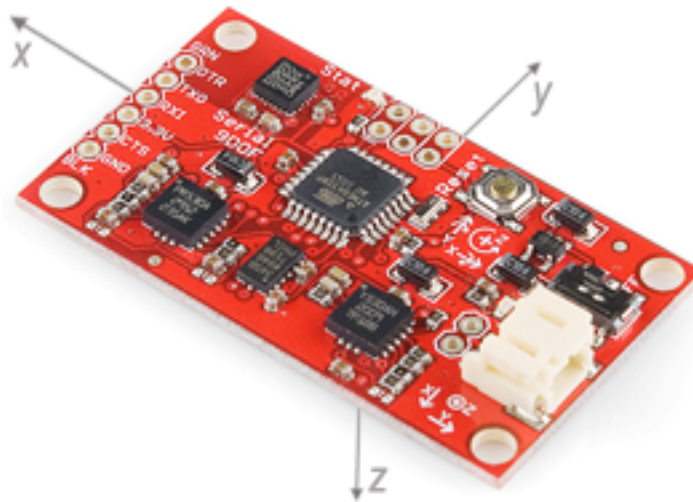


Figura 3.1: Convenção de eixos da IMU

ii Matriz de rotação e ângulos de Euler

Com base nas convenções descritas anteriormente, é possível descrever os elementos da matriz de rotação com base nos ângulos de Euler:

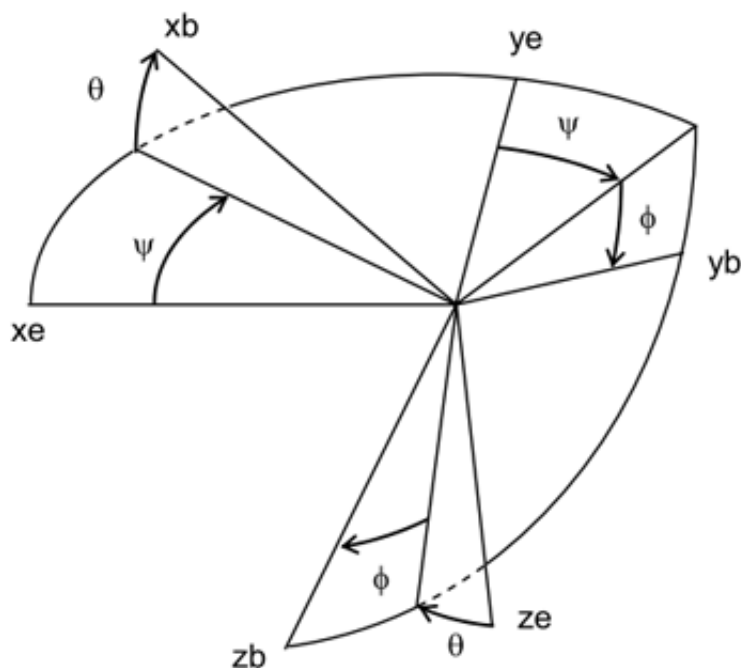


Figura 3.2: Convenção de ângulos entre os dois referenciais (*e* - Earth/Terra, *b* - body/IMU) [PB09]

$$R = \begin{bmatrix} \cos\theta \cos\psi & \sin\phi \sin\theta \cos\psi - \cos\phi \sin\psi & \cos\phi \sin\theta \cos\psi + \sin\phi \sin\psi \\ \cos\theta \sin\psi & \sin\phi \sin\theta \sin\psi + \cos\phi \cos\psi & \cos\phi \sin\theta \sin\psi - \sin\phi \cos\psi \\ -\sin\theta & \sin\phi \cos\theta & \cos\phi \cos\theta \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

DCM descrita com base em ângulos de Euler [PB09]

Os ângulos de Euler podem também ser calculados a partir da DCM da seguinte forma:

$$\theta = -\arcsin(r_{zx}) \quad (3.5)$$

$$\phi = \arctan 2(r_{zy}, r_{zz}) \quad (3.6)$$

$$\psi = \arctan 2(r_{yx}, r_{xx}) \quad (3.7)$$

II Integração

O problema da integração das mudanças de direcção na actualização da DCM, começa por ser resolvido através da utilização dos valores dos giroscópios. Como foi referido anteriormente, estes instrumentos sofrem de vários problemas de precisão (*drift, offset...*), que tornam uma solução que se baseie unicamente neles completamente inútil após algum tempo de utilização. Inicialmente será apresentado o método base, sem ter em linha de conta esses erros, sendo que posteriormente são apresentadas as soluções para contrariar o problema.

Como não estamos a utilizar giroscópios mecânicos mas sim electrónicos, temos apenas acesso à velocidade angular das rotações. Dado que as rotações finitas em eixos distintos não são comutativas, a utilização da simples integração da velocidade angular pode provocar erros no cálculo da orientação da IMU. Assim sendo, outras técnicas, como a proposta em [PB09], abordam a mesma questão, do ponto de vista da cinemática da rotação, aproveitando a teoria por trás das rotações infinitesimais [oC] [Inc].

A variação de orientação dum vector em rotação, $\frac{dr(t)}{dt}$, é dada pela expressão [PB09] [Bar97]:

$$\frac{dr(t)}{dt} = \vec{\omega}(t) \times \vec{r}(t) \quad (3.8)$$

com $\vec{\omega}$ a ser o vector com as velocidades angulares, e \vec{r} a orientação do corpo rígido.

Se soubermos as condições iniciais, podemos calcular a orientação do corpo para o instante de tempo seguinte através da integração numérica da equação 3.8. No entanto para que este método funcione, os dois vectores, $\vec{\omega}$ e \vec{r} , têm de estar no mesmo referencial. Como os valores de velocidade angular obtidos pelos giroscópios estão no referencial da IMU e o objectivo é determinar a orientação desta no referencial da Terra, é necessário primeiro converter os valores de velocidade angular para o referencial da Terra. Felizmente, graças à simetria das rotações, uma rotação da IMU é equivalente à rotação oposta de igual valor absoluto no referencial da Terra. Algebricamente esta conversão pode ser obtida através da multiplicação por -1 dos valores do giroscópio, ou através da inversão da ordem do produto vectorial \times , aproveitando assim o carácter anti-comutativo da operação. Neste caso foi escolhida a última abordagem, dando assim origem as seguintes equações:

$$\vec{r}_{terra}(t + dt) = \vec{r}_{terra}(t) + \vec{r}_{terra}(t) \times \vec{d\theta}(t) \quad (3.9)$$

$$\vec{d\theta}(t) = \vec{\omega}(t)dt \quad (3.10)$$

Aplicando a equação 3.9 a cada uma das linhas da DCM, e decompondo o produto vectorial nos seus factores, obtemos a equação seguinte na forma matricial:

$$R(t + dt) = R(t) \begin{bmatrix} 1 & -d\theta_z & d\theta_y \\ d\theta_z & 1 & -d\theta_x \\ -d\theta_y & d\theta_x & 1 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$d\theta_x = \omega_x dt \quad (3.12)$$

$$d\theta_y = \omega_y dt \quad (3.13)$$

$$d\theta_z = \omega_z dt \quad (3.14)$$

onde os termos na diagonal representam o primeiro termo na equação 3.9 e os restantes o produto vectorial.

III Renormalização

Para garantir a ortogonalidade referida anteriormente é necessário corrigir os erros numéricos que advêm do processo de integração supra descrito. Este processo designa-se por renormalização e permite manter a representatividade da DCM ao longo da execução.

De acordo com as propriedades de ortogonalidade, as linhas da matriz R devem ser perpendiculares entre elas, o que implica que o produto interno dos seus vectores tem de ser 0, $\vec{r}_x \cdot \vec{r}_y = \vec{r}_x \cdot \vec{r}_z = \vec{r}_y \cdot \vec{r}_z = 0$. Da mesma propriedade decorre também que os vectores compostos pelos elementos de cada linha têm de ter norma unitária, assim, $\|\vec{r}_x\| = \|\vec{r}_y\| = \|\vec{r}_z\| = 1$. São estas duas propriedades que vão ser garantidas durante o processo de renormalização.

Inicialmente, é calculado o erro existente nas duas primeiras linhas da matriz através da determinação do valor do produto interno entre elas. Obtido esse valor, a correcção é efectuada através do método sugerido em [PB09], que se baseia na realização de operações simples e de baixo custo computacional para distribuir a correcção do erro de forma equalitária pelas linhas. A terceira e última linha, que deve ser também perpendicular a cada uma das duas primeiras, é obtida através do cálculo do produto externo da primeira e segunda linhas, o que garante a ortogonalidade.

$$erro = \vec{X} \cdot \vec{Y} \quad (3.15)$$

$$X_{ortogonal} = X - \frac{erro}{2}Y \quad (3.16)$$

$$Y_{ortogonal} = Y - \frac{erro}{2}X \quad (3.17)$$

$$Z_{ortogonal} = \vec{X}_{ortogonal} \times \vec{Y}_{ortogonal} \quad (3.18)$$

A segunda propriedade (norma unitária), é normalmente garantida através da divisão dos valores dos vectores pela sua norma. No entanto, a obtenção da norma dum vector é uma operação que implica o cálculo de uma raiz quadrada, o que é uma operação bastante complexa do ponto de vista computacional, especialmente tendo em conta o facto da solução ser implementada num processador bastante limitado (ATmega328 8MHz). Se considerarmos que a norma do vector de cada linha ($\|\vec{L}\|$) nunca será muito diferente de 1, podemos diminuir os custos computacionais da renormalização, através da aproximação dos efeitos desta operação pelo recurso a uma expansão de Taylor [PB09]:

$$L_{normalizada} = \frac{1}{2}(3 - \vec{L}_{ortogonal} \cdot \vec{L}_{ortogonal})L_{ortogonal} \quad (3.19)$$

IV Correções

Havendo descrito o algoritmo base, serão agora apresentadas as duas técnicas de correcção dos erros produzidos pelos giroscópios que incorporam os outros dois sensores. Estas técnicas são especialmente importantes para corrigir o erro acumulado pelos giroscópios (*drift*), pois recorrem a sensores que não sofrem desse problema.

Tanto os dados obtidos pelo acelerómetro como pelo magnetómetro são incorporados no cálculo da orientação da IMU através da sua introdução num *feedback loop* negativo que altera os valores da velocidade angular obtidos pelos giroscópios (ω_g).

$$\omega(t) = \omega_g(t) + \omega_c(t) \quad (3.20)$$

O termo de correcção (ω_c) é o resultado da aplicação dum mecanismo de controlo do tipo Proportional plus Integral (PI), à soma ponderada dos erros acumulados. Este mecanismo é constituído por duas componentes: proporcional, ω_p , e integral, ω_i , sendo que a componente proporcional é simplesmente o resultado da multiplicação do erro detectado por uma constante, enquanto que o integral toma em consideração o espaço de tempo que durou o erro e os erros anteriores acumulados até então. As equações que se seguem traduzem o método PI. Os factores que aparecem a multiplicar os diversos ω são pesos que representam a rapidez com que o erro é corrigido, e estão intimamente ligados à confiança nos sensores auxiliares (acelerómetro e magnetómetro).

$$\omega_p = K_{pa}\omega_{ca} + K_{pm}\omega_{cm} \quad (3.21)$$

$$\omega_i = \omega_i + (K_{ia}\omega_{ca} + K_{im}\omega_{cm})dt \quad (3.22)$$

$$\omega_c = \omega_p + \omega_i \quad (3.23)$$

As variáveis ω_{ca} e ω_{cm} , referem-se, respectivamente, às correcções calculadas a partir dos dados do acelerómetro e do magnetómetro. Estas não afectam a "suavidade" do movimento, que continua a ser garantida pelos giroscópios, mas funcionam antes como garantias da qualidade da orientação numa utilização minimamente prolongada no tempo.

i O papel do acelerómetro

O acelerómetro, como é um sensor capaz de calcular certos aspectos da orientação sem provocar *drift* (ainda que com várias limitações), é aproveitado para corrigir os erros dos giroscópios na determinação dos ângulos de *pitch* e de *roll*.

Considerando que a força dominante presente nos valores registados pelo acelerómetro é a gravidade, é calculado o desfasamento entre o vector composto por estes e o eixo dos zz do referencial da Terra calculado a partir da DCM. Este último vector corresponde à última linha da matriz R (Z), ou seja, à projecção do eixo dos zz terrestre nos eixos

do referencial da IMU, eixos esses onde também são medidos os valores do acelerómetro. O desfasamento é na prática aproximadamente igual à magnitude do produto externo entre os dois vectores (que é geometricamente igual à área do paralelogramo definido pelos dois vectores). Como estamos interessados no valor simétrico para adicionar aos valores dos giroscópios, e assim corrigir o desfasamento, aproveita-se, mais uma vez, a anti-comutatividade da operação, invertendo a ordem dos vectores:

$$\vec{a} = (a_x, a_y, a_z) \quad (3.24)$$

$$\omega_{ca} = \vec{Z} \times \vec{a} \quad (3.25)$$

Os factores K_{pa} e K_{ia} , vêm o seu valor adaptado de acordo com a plausibilidade dos valores fornecidos pelos acelerómetros identificarem correctamente a aceleração gravítica. Esta adaptação é obtida através da seguinte expressão:

$$K_a = \max(\min(0, 1 - 2|1 - \|\vec{a}\|), 1) \quad (3.26)$$

K_a é depois multiplicado por uma constante associada ao acelerómetro e à componente do mecanismo de controlo PI (com constantes diferentes conforme a componente à qual vai ser adicionado o valor), obtendo-se assim K_{pa} e K_{ia} .

ii O papel do magnetómetro

O magnetómetro da IMU é por sua vez usado para corrigir o $yaw(\psi)$ calculado pelos giroscópios. Também nesta correcção é utilizado o produto externo (neste caso a duas dimensões) entre dois vectores como medida de erro.

Um dos vectores envolvidos no cálculo do desfasamento é a projecção do vector da força magnética identificado pelo magnetómetro no plano xy da Terra (*vide* [Compensação de Inclinação](#) nesta secção). Considera-se que a força magnética dominante medida pelo magnetómetro corresponde ao Norte magnético da Terra (*vide* [Interferências electromagnéticas](#) nesta secção). Como o Norte magnético é diferente do Norte geográfico, o ângulo obtido pelo magnetómetro, ψ_m , é posteriormente corrigido tendo em conta a declinação magnética, dm , que na FEUP é de aproximadamente 3,25° Oeste [OA].

O outro vector é composto pela projecção dos eixos x e y terrestres no eixo dos xx da IMU, o que resulta igualmente na obtenção dum vector representativo da orientação da IMU no plano xy terrestre. Podemos desta forma calcular o desfasamento entre as duas estimativas:

$$ang = \psi_m + dm \quad (3.27)$$

$$m_x = \cos(ang) \quad (3.28)$$

$$m_y = \sin(ang) \quad (3.29)$$

$$m_{cor} = r_{xx}m_y - r_{yx}m_x \quad (3.30)$$

Finalmente, a correcção é passada para o referencial da IMU, através da multiplicação de m_{cor} , pela última linha da DCM (Z):

$$\omega_{cm} = m_{cor}Z \quad (3.31)$$

Neste caso, os factores K_{pm} e K_{im} , mantêm-se constantes sendo os seus valores determinados experimentalmente antes. Existe no entanto, o caso especial da detecção de interferências magnéticas (*vide* [Interferências electromagnéticas](#) nesta secção), que na prática equivale a diminuir a confiança no magnetómetro para 0.

V Compensação de Inclinação

Os valores, m_x , m_y e m_z , recebidos do magnetómetro estão associados ao referencial da IMU, no entanto, durante a utilização da aplicação, a IMU pode não estar alinhada com a Terra o que impossibilitaria o cálculo do ângulo *yaw* se os dados do magnetómetro fossem utilizados directamente.

Para corrigir este problema é necessário calcular a projecção do vector da força magnética no plano xy terrestre, e usá-lo como referência do eixo dos xx terrestre visto ser esse o significado de Norte nesse referencial. Essa projecção funciona como uma compensação da inclinação da IMU (mais conhecida pelo seu nome inglês *tilt compensation*), que torna possível a utilização do valor do magnetómetro em situações em que os planos xy da IMU e da Terra não estão alinhados. Na prática, a compensação da inclinação significa a anulação das rotações *pitch* e *roll* no vector fornecido pelo magnetómetro, o que pode ser obtido através das multiplicação da matriz R , com *yaw* (ψ) = 0, pela matriz-coluna com os elementos do magnetómetro. Para esta operação foi utilizada a matriz de rotações com ângulos de Euler (*vide* figura 3.4):

$$M_c = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\phi\sin\theta & \cos\phi\sin\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ -\sin\theta & \sin\phi\cos\theta & \cos\phi\cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

Para calcular a orientação apenas são necessários os valores compensados nos eixos x e y , no entanto, o cálculo do valor z também foi incluído pois pode ser útil para a utilização de alguns métodos de detecção de interferências magnéticas, como é o caso do

cálculo do ângulo de *dip* [KK03]. Só é possível realizar correctamente (*i.e.* sem estimativas como em [SYCY03]) a compensação da inclinação com o recurso a magnetómetros de três eixos. O terceiro eixo, embora não seja usado directamente, garante a obtenção tridimensional do vector da força magnética e o seu valor pode depois ser projectado num dos outros eixos para compensar as rotações *pitch* e *roll*.

Após estas operações é possível calcular o ângulo *yaw* (ψ), fazendo uso da popular função $\arctan 2$. Porém, como os nossos referenciais têm os eixos x e y trocados, é ainda necessário inverter o sinal de m_{cy} :

$$\psi_m = \arctan 2(-m_{cy}, m_{cx}) \quad (3.33)$$

VI Interferências electromagnéticas

O ambiente *indoor* é especialmente sujeito a diversas fontes de interferências electromagnéticas. Para além do típico material electrónico e eléctrico, também os objectos ferromagnéticos exercem uma deformação sobre o campo magnético registado pelo magnetómetro, como é ilustrado na figura 3.3. Estes últimos objectos são responsáveis por uma quantidade elevada de interferências na zona escolhida para a implementação do protótipo da presente dissertação, o bloco IV do edifício B da FEUP, destacando-se as regiões próximas dos pilares cilíndricos da estrutura do edifício. Com interferências registadas superiores a 100° , tornou-se claro que, para possibilitar a utilização da informação do magnetómetro, seria necessário encontrar forma de identificar automaticamente a existência de perturbações no campo magnético.

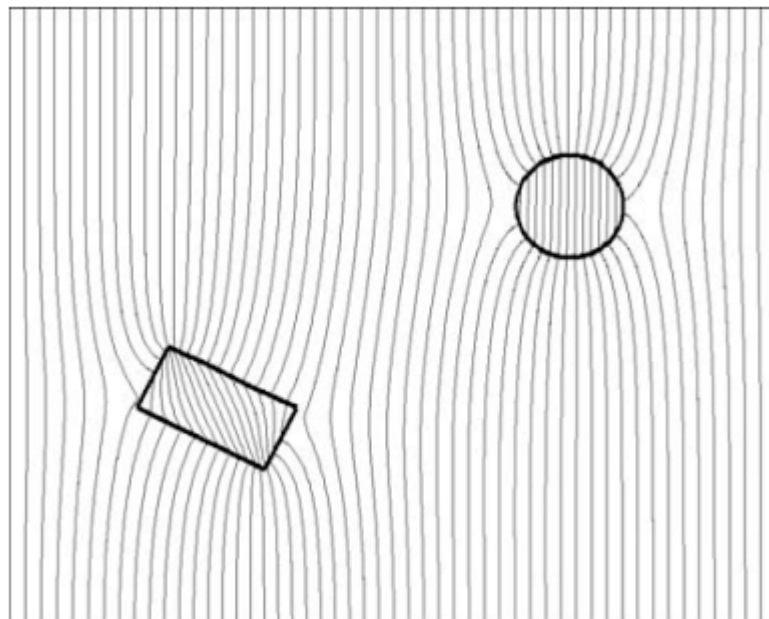


Figura 3.3: Interferências dos objectos ferromagnéticos no campo magnético [Roe06].

Foram estudadas diversas técnicas de detecção de interferências como a análise da relação entre as rotações registadas pelo magnetómetro e as registadas pelos giroscópios [LGM01], e o cálculo do ângulo de *dip* [KK03]. Contudo, devido à sua simplicidade e portabilidade, foi implementada uma abordagem diferente, que se baseia na estabilidade da magnitude do campo magnético na área normalmente coberta por uma navegação pedestre [LM02] [LvSS⁺02]. Desta forma, podem ser classificadas como interferências todas as alterações importantes à estabilidade desse valor.

São classificadas como alterações importantes todos aqueles que se encontram fora dum intervalo de confiança, definido inicialmente em cada execução, durante uma fase de calibração. Durante essa fase é calculado o intervalo de confiança para os valores da magnitude da força magnética no local, sendo guardados o seu valor máximo e mínimo. O intervalo definido por estes valores é depois expandido por uma constante C para dar origem ao intervalo de confiança.

$$min_m = \frac{1}{C} \min (\|\vec{m}\|^2) \quad (3.34)$$

$$max_m = C \max (\|\vec{m}\|^2) \quad (3.35)$$

Após ser detectada uma interferência magnética, os valores do magnetómetro são descartados para o cálculo da orientação durante N iterações ($N = 15$ na implementação actual, ou seja, 1,5 segundos - o magnetómetro fornece dados à frequência de 10Hz), sendo que este intervalo vai sendo prolongado se o valor do quadrado da magnitude, $\|\vec{m}\|^2$, continuar a não satisfazer a condição $min_m \leq \|\vec{m}\|^2 \leq max_m$.

Nesta fase, enquanto as perturbações magnéticas estão presentes, a aplicação continua a ser capaz de reagir às mudanças de direcção no plano xy terrestre, contudo, nesta situação o ângulo *yaw* é apenas calculado com base na informação dos giroscópios. Estes dispositivos deixam de ter a ajuda do magnetómetro para corrigirem o seu *drift*, todavia, para intervalos relativamente curtos (que são o caso típico das interferências magnéticas quando se está em movimento), o desfasamento acumulado é suficientemente pequeno para não deteriorar a experiência de utilização.

Esta foi a solução escolhida para a implementação pois tem custos computacionais reduzidos, pode usar directamente os valores do magnetómetro sem a compensação de inclinação, não recorre ao uso de nenhuma função trigonométrica, não necessita de conhecer previamente nenhum valor relativo à localização geográfica (ao contrário do que acontece com o ângulo de *dip*), mede directamente as interferências magnéticas sem necessitar de efectuar cálculos relativos (ao contrário do estudo da relação magnetómetro-giroscópios) e apresenta resultados bastante satisfatórios na maior parte dos locais sujeitos a interferências.

3.1.1.2 Detecção de passos

Ao contrário dos artigos referidos no estado da arte (*vide* [Detecção de passos](#) na secção 2.2.1.1), o algoritmo utilizado pela implementação em discussão não se limita a procurar um máximo ou um *zero-crossing* no sinal da magnitude da aceleração (total ou individual/por eixo). Tal deve-se em parte à diferente localização do acelerómetro, e à acrescida liberdade de utilização, tanto no seu posicionamento, como nos movimentos que este regista. A aplicação dum método demasiado simples nestes casos de uso, resultaria na obtenção de inúmeros falsos-positivos.

Deste modo, optou-se por desenvolver uma detecção mais rigorosa que traduzisse melhor a dinâmica dum passo humano. A abordagem baseou-se na criação duma máquina de estados finita, em que cada estado representa uma fase da evolução da aceleração e, conseqüentemente, da mecânica do passo.

De acordo com as experiências efectuadas, chegou-se à conclusão que, num dispositivo *handheld*, a maior parte (e também aquela que é mais facilmente identificável) do movimento associado a um passo, é recebida no eixo dos *zz* como se pode ver pela figura 3.4. Foi também experimentada a utilização do valor da magnitude dos 3 eixos da aceleração, sendo que essa abordagem tinha o problema de juntar o ruído de todos os sensores, e não fornecer informação quanto ao sentido da aceleração nos casos em que ela é negativa. A escolha recaiu então na utilização do valor da aceleração no eixo dos *zz* terrestre para servir de *input* à máquina de estados. Este valor é obtido independentemente da orientação da IMU através do mesmo método usado para a compensação da inclinação dos valores do magnetómetro (*vide* [Compensação de Inclinação](#) na secção 3.1.1.1).

Analisando a mecânica dum passo humano e a evolução do valor da aceleração própria em *xx* que os movimentos originam, é possível identificar os pontos chave que marcam cada um dos estados e caracterizam a locomoção (Figura 3.5).

Assim sendo, e tendo também em atenção o estudo das características do sinal da aceleração no eixo dos *zz* (Figura 3.6) foram definidos 4 estados: *IDLE*, *ACC UP*, *ACC DOWN* e *STOPPING*, cada um com as suas próprias condições para realizar a transição para o estado seguinte. Para que um passo seja detectado, a sequência de valores do sinal tem de ultrapassar com sucesso todos os estados (Figura 3.7).

De seguida são detalhadas as características e condições de transição de cada estado.

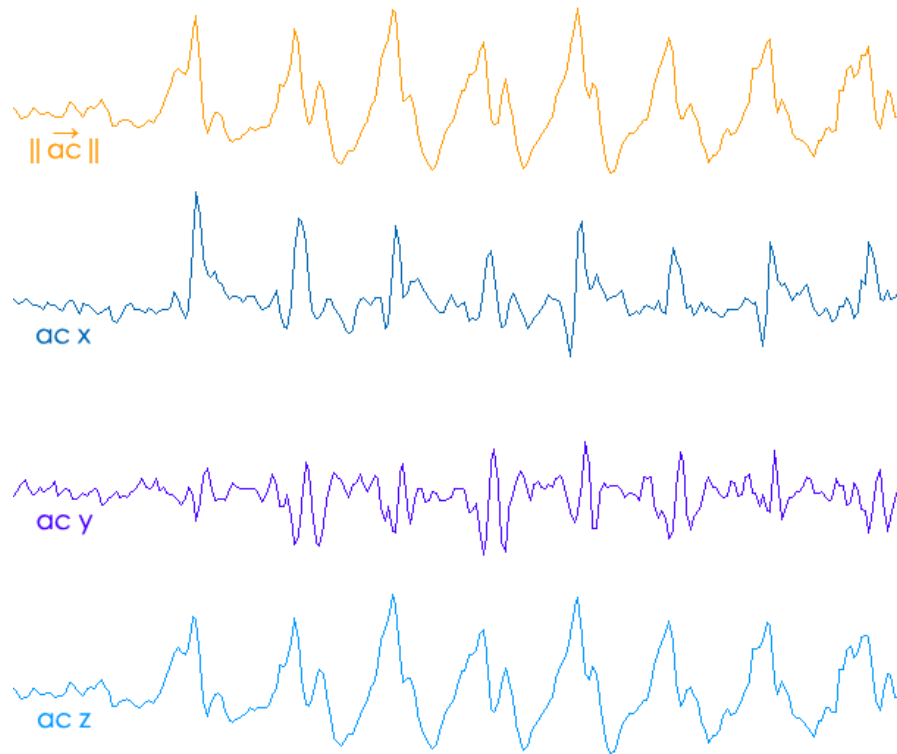


Figura 3.4: Acelerações por eixo e norma total

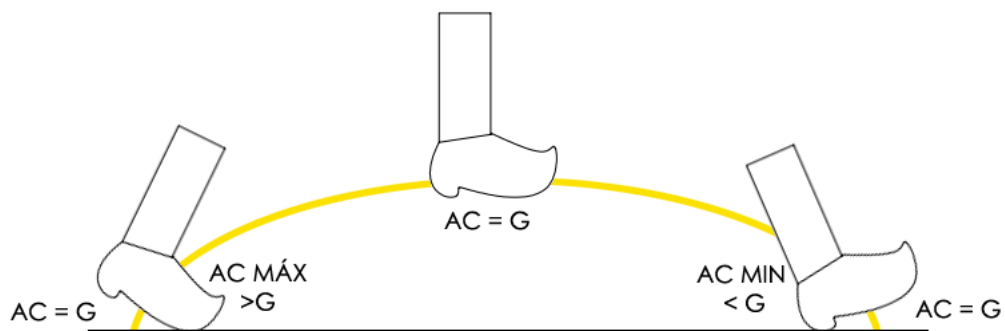


Figura 3.5: Figura ilustrativa da evolução dos valores da aceleração ao longo do movimento da perna durante o passo

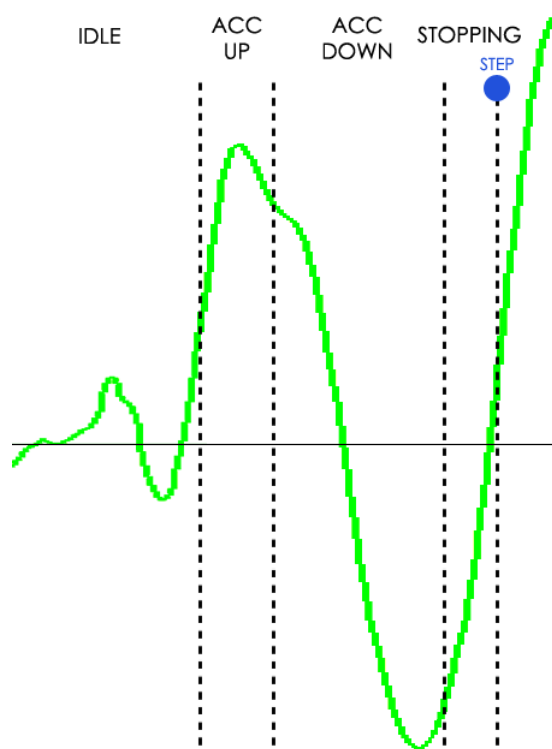


Figura 3.6: Estados do sinal da aceleração na detecção de um passo

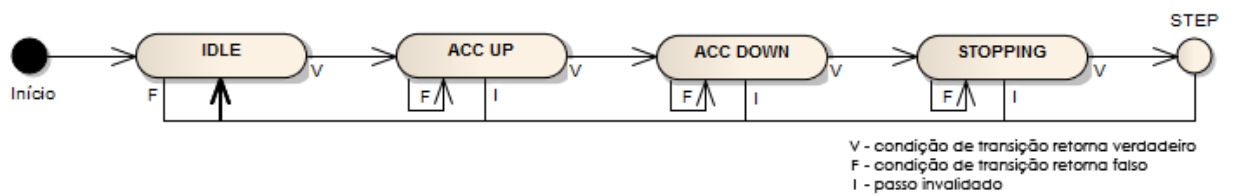


Figura 3.7: Máquina de estados para a detecção do passo

I IDLE

i Descrição

Este é o estado de inactividade da detecção de passos. É o primeiro estado a ser atribuído aquando do início da aplicação, e é também para ele que são transitadas as execuções tanto após a realização dum passo com sucesso, como após o falhanço dum passo durante o processo de identificação.

ii Condições de Transição

- o valor da aceleração estar $MIN_{wake}m/s^2$ acima do valor da gravidade, de forma a garantir a existência dum impulso inicial forte (típico dum passo) e não apenas um movimento ascendente insignificante, e,
- não se ter iniciado o último passo detectado com sucesso há menos de dT segundos, visto que um passo tem uma duração mínima considerável (normalmente maior que 0.4 segundos).

iii Acções de Transição

- define t_0 , tempo de início do passo.

II ACC UP

i Descrição

Fase correspondente ao impulso inicial de locomoção que dá início ao movimento ascendente da IMU. Inicia-se com o aumento da aceleração e termina com o início do decréscimo dos seus valores.

ii Condições de Transição

- os últimos N samples apresentarem uma ordem decrescente correspondente ao início do movimento de diminuição da aceleração, garantindo assim que apenas movimentos minimamente consistentes são considerados, e,
- o máximo da aceleração obtido durante este estado estar $MIN_{up}m/s^2$ acima do valor da gravidade, o que equivale ao método que apenas utiliza um simples *threshold*.

iii Acções de Transição

- define t_1 , tempo de início da diminuição da aceleração.

III ACC DOWN

i Descrição

Estado que vai desde o final do movimento de impulsão até ao fim do movimento decrescente da aceleração.

Existe a possibilidade de durante este estado ocorrer ainda um outro máximo, local ou absoluto do sinal (Figura 3.8), que pode corresponder tanto ao impulso originado pelo levantamento do chão dos dedos do pé mais recuado [AGLA06], como à segunda parte do contacto do pé mais avançado com o chão, sendo a primeira correspondente ao contacto do calcanhar e a segunda ao da palma do pé [Lad00]. Este máximo, a ocorrer, não deve estar demasiado longe do fim do estado anterior, e, caso se trate dum máximo absoluto, deve originar uma correcção dos limites do estado anterior de forma a incluí-lo. Os valores referentes a esta ocorrência são descartados no que diz respeito à verificação da condição de transição.

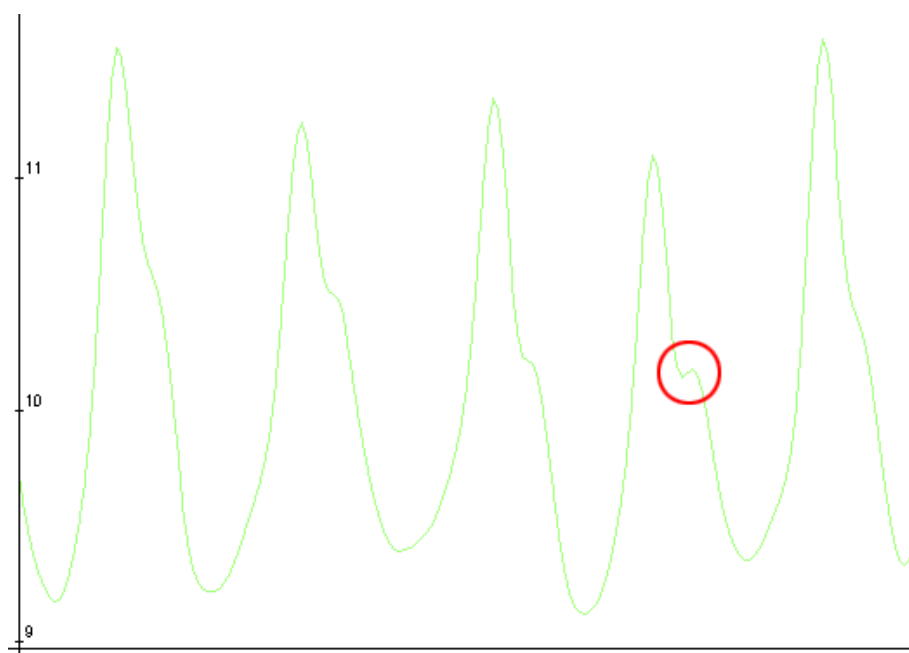


Figura 3.8: Novo máximo relativo na fase descendente da aceleração - dedos do pé oposto saem do chão

ii Condições de Transição

- os últimos N *samples* apresentarem uma ordem crescente correspondente ao início do movimento de aumento da aceleração (pelas mesmas razões que as apresentadas em *ACC UP*) e,
- o mínimo da aceleração obtido durante este estado estar $MIN_{down} m/s^2$ abaixo do valor da gravidade (pelas mesmas razões que as apresentadas em *ACC UP*).

iii Acções de Transição

- define t_2 , tempo de início do aumento da aceleração.

IV STOPPING

i Descrição

Este é o estado final que se inicia com o aumento da aceleração e termina com a passagem do valor da gravidade. Essa acção caracteriza o fim do ciclo do passo.

ii Condições de Transição

- o valor da aceleração ultrapassar o valor da gravidade, o que define a estabilização do valor da aceleração (fim da passada) ou o começo do passo seguinte.

iii Acções de Transição

- define t_3 , tempo de fim do passo,
- determina a detecção do passo.

Em adição às condições referidas, todos os estados verificam que o tempo máximo para a realização dum passo e para a realização de uma das fases (estado) não é ultrapassado. Este tipo de abordagem, para além do normal uso de *thresholds*, garante que apenas movimentos monótonos (ou aproximadamente monótonos, ou seja, que não tenham monotonia oposta no *buffer*) em cada estado (à excepção do caso único no *ACC DOWN*) são interpretados como passos, e que só alterações minimamente consistentes de monotonia implicam uma alteração de estado.

V Filtros

Os sinais que provêm de sensores electrónicos como os acelerómetros (ou magnetómetros e giroscópicos) têm tipicamente um nível significativo de ruído e pequenas alterações que são irrelevantes para o contexto desta aplicação, podendo até dificultar, ou mesmo impossibilitar, o processo de detecção de passos. Devido a estas dificuldades, é necessário filtrar as frequências mais elevadas do sinal, onde se encontram a maior parte das perturbações. No entanto, há que manter um compromisso de representatividade das variações da aceleração, de modo a que estas possam ser usadas tanto para a detecção de passos, como para a estimativa dos seus comprimentos.

De acordo com [VA11] e [Gra00], a frequência normal e natural do tremor das mãos situa-se entre os 6 e os 25 Hertz. O *low-pass filter* implementado tem a frequência de *cutoff* de 1.5 Hz pelo que é capaz de eliminar a grande maioria destes tremores. Optou-se

pela utilização dum filtro de Bessel [Inc11d] criado interactivamente a partir de [Fis99]. Um filtro de Bessel é um filtro linear com resposta de impulso infinita (IIR - Infinite Impulse Response). Foi o escolhido para esta dissertação pois apresenta uma resposta de fase linear e, dentre os outros filtros que foram testados, como o apresentado em [Inc11i], foi o que registou os resultados mais convincentes.

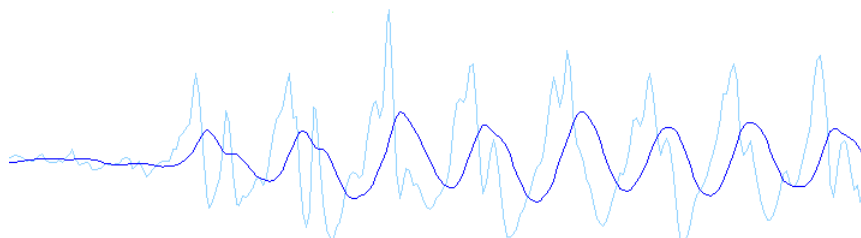


Figura 3.9: Aplicação de um filtro de Bessel de segunda ordem com *cutoff* aos 1.5 Hz sobre a aceleração em *xx*

VI Offsets e determinação da componente da gravidade

Como foi referido anteriormente no estado da arte (*vide* [Acelerómetro](#) na secção 2.2.1.1), os acelerómetros possuem normalmente vários tipos de erro. Os erros de *offset* podem ser em parte resolvidos através do cálculo do desvio em relação ao zero (ou à aceleração gravítica no caso do eixo dos *zz*) com a IMU em repouso durante uma fase inicial de calibração. No entanto, os erros de sensibilidade necessitam de um processo mais elaborado para que possam ser compensados.

Um desses processos pode passar por medir uma aceleração conhecida (como por exemplo a gravítica) em todos os eixos e em ambos os sentidos do eixo. Se o erro de *offset* estiver bem estimado, então o valor de aceleração obtido, ac_o , deverá ser aproximadamente igual em ambos os sentidos do eixo. Nestas condições é possível encontrar uma constante K , tal que $G = Kac_o$ em ambos os sentidos do eixo. Tal valor obtém-se através da simples reescrita da expressão anterior, originando $K = \frac{G}{ac_o}$.

O processo, embora seja de possível automatização parcial, necessita da intervenção do utilizador para ir rodando a IMU, o que introduziria uma nova fase de calibração. Para além disso este método carece de alguma precisão para poder determinar os resultados com fiabilidade, pelo que estes poderiam facilmente ter de ser corrigidos pelo utilizador. Durante a elaboração da aplicação desta dissertação tal processo foi realizado "manualmente" para o acelerómetro usado, tendo a compensação de sensibilidade introduzida reduzido consideravelmente as diferenças de medições entre eixos. Porém, para evitar a necessidade de realização desta operação por parte de todos os utilizadores, foi desenvolvida uma compensação adicional para o caso de uso mais crítico das medições do acelerómetro, ou seja, a adaptação do valor da gravidade.

Num ambiente em que os valores da aceleração de cada eixo estão desfasados entre si, o valor da gravidade não pode ser constante para todos eles, sob pena de deteriorar gravemente diferentes aspectos da aplicação. Um destes casos é o algoritmo de detecção de passos que depende em vários aspectos do valor da aceleração gravítica.

Foi então necessário desenvolver um método de aproximação do valor da aceleração gravítica para o eixo que a mede em cada momento. Aproveitando o carácter estável desta aceleração, foi criado o seguinte algoritmo:

Algoritmo 1 Actualização da componente da gravidade

$[G] = \text{CalcGravidade}[ac, \{buf_i\}_{i=1}^N]$

$$m = \frac{\sum_{i=1}^N buf_i}{N}$$

$$d = |ac - m|$$

$$buf[\text{oldest}] = m + \exp(-d)d$$

if $d < K$ **then**

$$G = Qm + (1 - Q)G$$

end if

No contexto do algoritmo 1, K é uma constante que representa a diferença, d , máxima para que o valor da gravidade, G , seja actualizado. Por sua vez, Q é o factor representativo do peso dos novos valores no *low-pass filter*. m é a média dos elementos que compõem o *buffer* buf , e d a diferença entre esta e o valor actual da aceleração, ac . A existência do *buffer* serve como referência para a zona de estabilidade actual e como resistência a mudanças efémeras de aceleração que não traduzem uma mudança de eixo. Ao ser utilizada a função exponencial para pesar as novas adições ao *array* de acelerações da forma apresentada no algoritmo, assegura-se que as alterações mais profundas demoram algum tempo a ser adoptadas, adicionando assim mais um factor em prol da estabilidade (Figura 3.10).

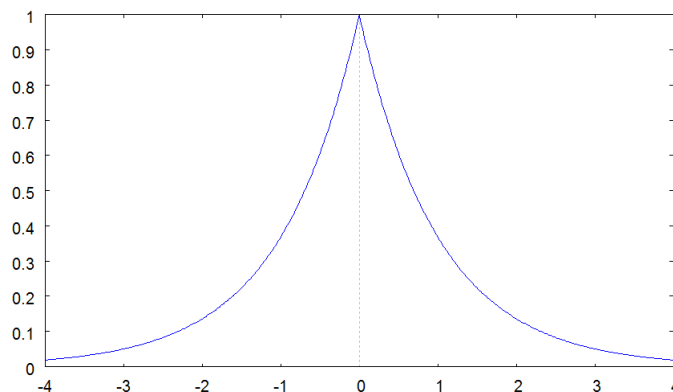


Figura 3.10: Evolução do peso da diferença face à média anterior de acordo com o delta

Por fim, a introdução do filtro *low-pass* na actualização do valor da aceleração gravítica, e a condição deste só ser actualizado quando a última aceleração recebida está

dentro dum intervalo de estabilidade, reafirmam a garantia de robustez da estimativa face a pequenas alterações temporárias.

Apesar de todos estes mecanismos de estabilidade, pode verificar-se na figura 3.11, que a estimativa da componente da aceleração gravítica (a verde) na magnitude do vector da aceleração no eixo dos zz (a azul), acompanha correctamente as alterações causadas pela mudança de eixo vertical da IMU, compensando assim os erros de sensibilidade entre os diferentes eixos do acelerómetro.

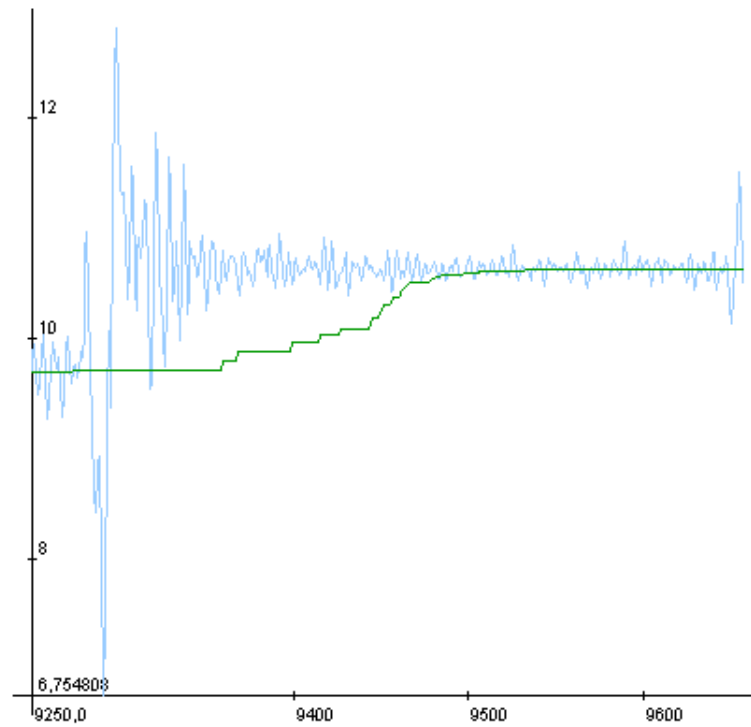


Figura 3.11: Adaptação do valor da componente da gravidade à rotação da IMU

3.1.1.3 Estimativa do comprimento do passo

Em [SKS01], a abordagem proposta por Jani *et al.* usa o cálculo do integral duplo da norma da aceleração, em combinação com informação diversa que caracteriza o movimento. Segundo os seus autores, esta solução produz melhores resultados do que a utilização mais comum dos filtros de Kalman.

A solução implementada para resolver este problema do PDR é também baseada na combinação dos métodos de cálculo do integral, com a utilização de outras medições de características do movimento. A configuração desta combinação é definida através da utilização de regressão linear múltipla (como em [MK] e [SLPH10]) para calcular, durante uma fase prévia de calibração, os pesos, w , de 4 características do movimento (sendo uma delas o integral) mais um factor constante cujo valor $v = 1$.

O tamanho do passo, dP , é então dado pela expressão:

$$dP = \sum_{i=1}^5 w_i \cdot v_i \quad (3.36)$$

As secções seguintes abordarão a escolha dessas características, o processo de integração e a fase de calibração.

I Factores e razões da sua escolha

As características escolhidas para servirem de *input* à estimativa do comprimento do passo desempenham um papel bastante importante na capacidade do sistema se adaptar a situações distintas. No caso da implementação em discussão, estas variáveis são:

- o resultado do cálculo numérico do integral duplo da norma da aceleração total sem a componente da gravidade,
- a amplitude máxima ($max_{acz} - min_{acz}$) da aceleração vertical (eixo dos zz),
- o mínimo da aceleração ântero-posterior (eixo dos xx),
- a estimativa da frequência do passo (calculada com base na diferença de tempo entre o fim do passo anterior e o actual).

Cada uma delas é calculada para o intervalo de tempo a que corresponde o passo.

A escolha destes parâmetros deveu-se sobretudo à noção da dinâmica que se foi criando à medida que se efectuavam experiências com diversos tipos de movimento e se observavam as respectivas reacções nos valores da aceleração. Como os padrões de locomoção mudam de sujeito para sujeito, um dos factores pode ser influente para o tamanho do passo de uma pessoa, mas não o ser para outra. O processo de escolha foi por isso

também baseado nas referências encontradas na literatura a variáveis intimamente relacionadas para o tamanho do passo [Sca11] [MK] [KJHP04] [SLPH10] [BH06] [SKS01] [ARJS95] [Lad00].

Para o caso da amplitude e da frequência, é possível facilmente comprovar o vasto leque de soluções referenciadas que as utilizam como características relevantes no processo de estimativa do comprimento do passo. Já a utilização do mínimo da aceleração horizontal é mais incomum, no entanto a sua relevância foi comprovada nas experiências realizadas como ilustra a proporcionalidade inversa presente num desses testes (Figura 3.12).

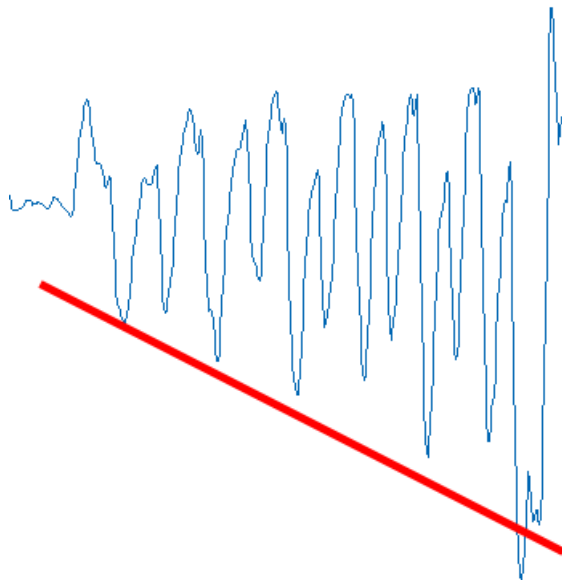


Figura 3.12: Evolução do mínimo da aceleração horizontal à medida que o tamanho do passo aumenta

II Integração

De acordo com as regras da cinemática, o integral simples do valor da aceleração ao longo do tempo resulta na velocidade. Por sua vez, o integral da velocidade representa o deslocamento do corpo. Para calcular o parâmetro do integral referido anteriormente, foi utilizado o método da integração rectangular. Este método de resolução numérica aproxima o valor do integral pela soma das áreas de rectângulos (Figura 3.13). A altura destes é igual ao valor da variável a integrar naquele "momento"(tendo obviamente em conta a frequência de actualização) e a largura corresponde ao período de tempo entre o *sample* anterior e o actual.

Após cada estimativa de tamanho do passo, o valor do integral é novamente colocado a zero, para desta forma minimizar os efeitos da acumulação a longo prazo dos erros numéricos e desvios nos sensores. Dado que a grande maioria dos deslocamentos associados

a um passo são feitos com velocidades positivas, foi também introduzida uma limitação nos valores da velocidade, sendo estes obrigatoriamente ≥ 0 . Desta forma minimizam-se os efeitos que possíveis erros de precisão possam ter no cálculo do deslocamento. Esta solução obteve uma maior representatividade da evolução do tamanho do passo do que a utilização directa da norma, calculada já com a subtracção da gravidade ao eixo dos zz (o que impede automaticamente a ocorrência de velocidades negativas).

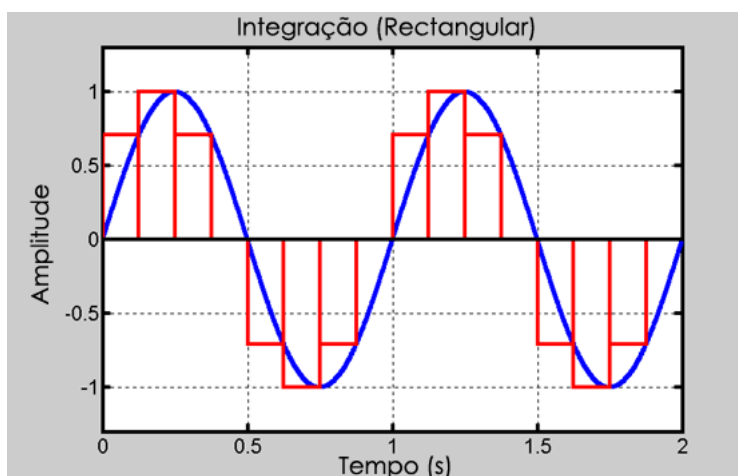


Figura 3.13: Integração rectangular [Sli04]

A opção pela utilização da diferença entre o integral duplo da norma da aceleração total e a componente da gravidade, e não pelo da aceleração vertical ou ântero-posterior (eixo dos xx ou zz), baseou-se nos resultados obtidos pela experimentação. Recorrendo ao método numérico referido anteriormente, foram calculados os valores dos integrais duplos das acelerações no eixo dos xx e no eixo dos zz , bem como do valor da norma da aceleração total (a aceleração lateral - eixo dos yy - não foi testada visto que é normalmente desconsiderada para este tipo de movimento devido a registar poucas variações significativas), enquanto que se aumentava gradualmente o tamanho dos passos dados pelo sujeito de teste. O objectivo estabelecido foi encontrar a variável que melhor traduzia essa evolução. Como se pode concluir pela análise das figuras 3.14, 3.15 e 3.16, as duas melhores opções são a utilização do valor no eixo dos zz ou a utilização da norma total. Seguindo a maioria dos artigos referenciados e os resultados obtidos pela experiência a longo prazo com ambas as variáveis, optou-se pela segunda opção.

III Regressão linear múltipla

A regressão linear múltipla é a aplicação dos conceitos da regressão linear a mais do que uma variável independente, ou seja, constitui a procura da melhor equação linear possível para traduzir as relações existentes entre os dados recebidos. Esta abordagem é

Metodologia

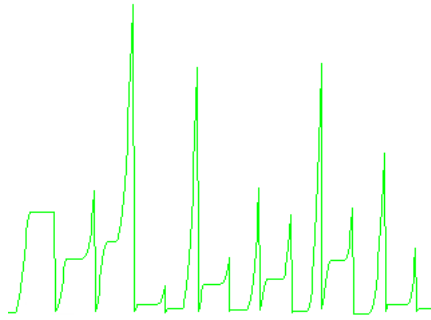


Figura 3.14: Evolução do valor do integral duplo da aceleração no eixo dos xx à medida que o tamanho do passo aumenta

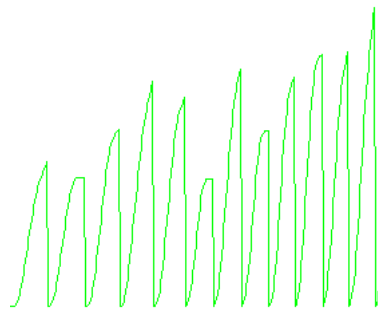


Figura 3.15: Evolução do valor do integral duplo da aceleração no eixo dos zz à medida que o tamanho do passo aumenta

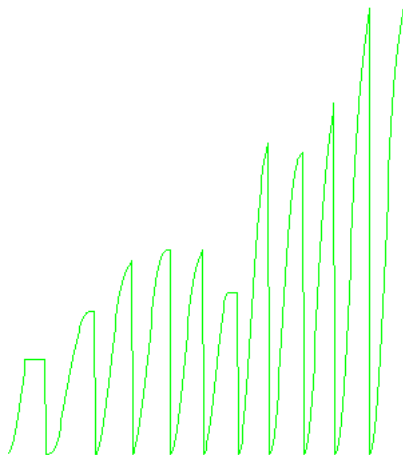


Figura 3.16: Evolução do valor do integral duplo da norma da aceleração total à medida que o tamanho do passo aumenta

normalmente usada para resolver problemas representados por sistemas sobredeterminados, isto é, sistemas com número de equações maior que o número de incógnitas. Com 5 variáveis (4 características do movimento + 1 termo constante/erro) e 14 equações provenientes da fase de calibração (Figura 3.19), este é caso da implementação em análise.

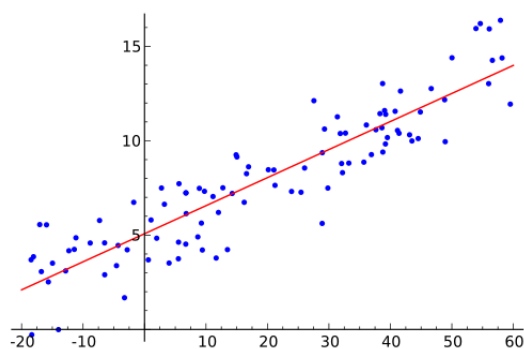


Figura 3.17: Regressão linear simples [Inc11h]

Enquanto que na regressão linear simples se procura ajustar uma recta aos dados existentes (Figura 3.17), na regressão linear múltipla faz-se o mesmo com planos, espaços ou hiperespaços (Figura 3.18). No nosso caso tal é feito com um hiperespaço de dimensão 5.

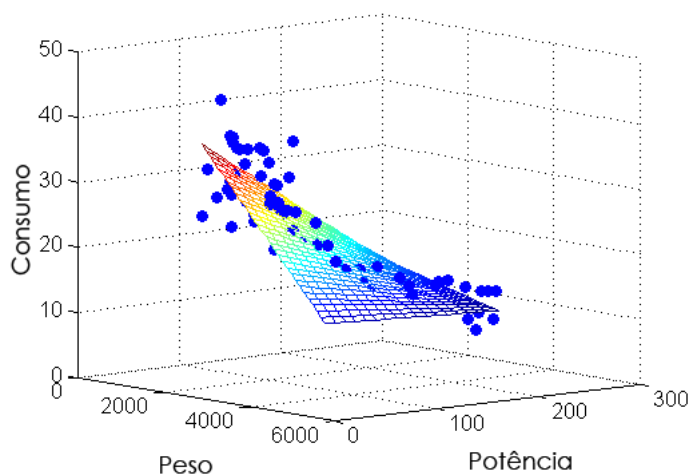


Figura 3.18: Regressão linear múltipla a duas dimensões [TM11]

A regressão múltipla é bastante útil na compreensão da influência e dinâmica de cada variável no sistema em estudo, e usa-se frequentemente para extrapolar relações genéricas a partir de dados empíricos [McD09]. Apesar de também ter servido na fase de selecção inicial para testar a relevância de algumas variáveis, a regressão múltipla é usada na aplicação em análise para criar um modelo generalizável do tamanho do passo a partir dos dados da calibração. Esse modelo é depois aplicado a novos *inputs* esperando-se que as relações apreendidas durante a calibração sejam suficientes para originar uma boa estimativa. Estas relações são obviamente limitadas pela linearidade do problema e não devem ser usadas para modelar sistemas não-lineares. No nosso caso as variáveis escolhidas possuem fortes relações de linearidade com a estimativa a obter, pelo que a sua aplicação é válida [SLPH10] [MK].

O método mais comum de regressão linear é o dos mínimos quadrados. Esta técnica

minimiza R^2 , o quadrado da diferença entre os valores experimentais e a sua aproximação linear respectiva (residuais) (Equação 3.37 [WF08]). Quando os residuais das diferentes variáveis têm todos o mesmo peso, estamos perante o método dos mínimos quadrados ordinários. Esta é a situação da implementação em discussão.

$$R^2 = \sum_{j=1}^M (y_j - f(x))^2 \quad (3.37)$$

$$f(x) = \sum_{i=1}^N c_i x_{i,j} \quad (3.38)$$

Se com uma variável independente se podem obter as equações de minimização da função numa forma relativamente compreensível utilizando cálculo diferencial e igualando a derivada da variável independente a 0 [Wei], num problema com mais dimensões é necessário calcular o gradiente da equação e tal abordagem torna-se demasiado fastidiosa. É portanto normal tratar este problema através da álgebra linear, utilizando notação matricial e a projecção geométrica dos valores empíricos no espaço coluna das soluções possíveis do problema [Str01] [Str93] [Wie] [WF08]. Ambas as abordagens chegam no fim às mesmas equações, sendo que, na notação matricial, os coeficientes representados pela matriz coluna C , podem ser calculados através da expressão 3.39, em que X é a matriz com os valores das variáveis independentes e Y a matriz coluna com os valores da variável dependente para cada uma das equações de X .

$$C = (X^T X)^{-1} (X^T Y) \quad (3.39)$$

Na aplicação correspondente ao trabalho relatado neste documento foi implementado o algoritmo presente em [WF08].

IV Processo de Calibração

A obtenção dos valores de Y usados durante o processo de regressão linear múltipla é efectuada através dum fase de calibração inicial em que a pessoa percorre um circuito previamente definido com distâncias de passos específicas. Esse circuito pode ser observado na figura 3.19. Os passos marcados com asterisco (*) não são considerados para o cálculo da regressão. Isto acontece porque o primeiro passo da locomoção tem um tipo de movimento especial que não deve ser estimado em conjunto com os restantes.

Para a configuração especificada anteriormente, o processo de calibração com um sujeito de teste masculino de 1,78 metros de altura, originou os seguintes resultados:

Após efectuado o processo de calibração, foram verificadas as estimativas por diversas vezes. Na figura 3.20 pode-se ver uma dessas experiências onde o sujeito de teste percorre

Metodologia

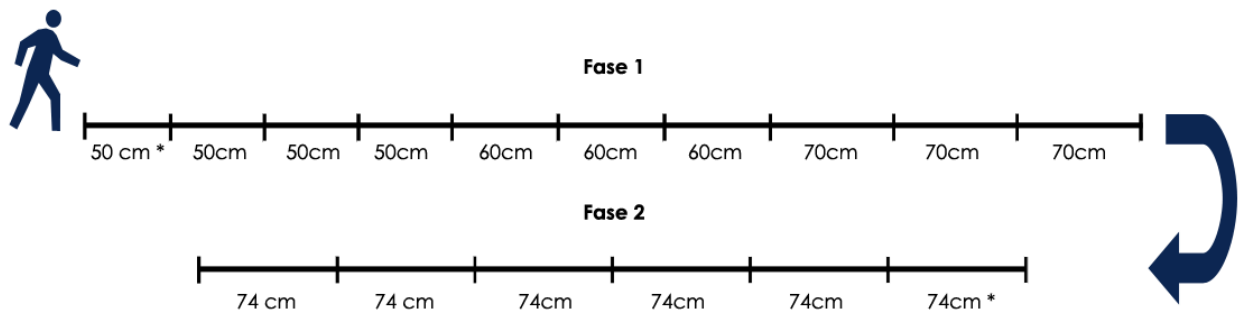


Figura 3.19: Circuito de calibração do tamanho do passo

Variável	Coefficiente
Integral	1.3587
Amplitude Z	0.0157
Mínimo X	-0.0874
Frequência	0.2077
Constante	-0.0145

Tabela 3.1: Coeficientes aproximados resultantes da realização dum processo de calibração

novamente o circuito de calibração, desta feita já com a estimativa calibrada. A recta horizontal ($y = 0.74$ cm) presente na imagem representa o valor médio do passo para um sujeito masculino de 1,78 metros de altura [Aus09].

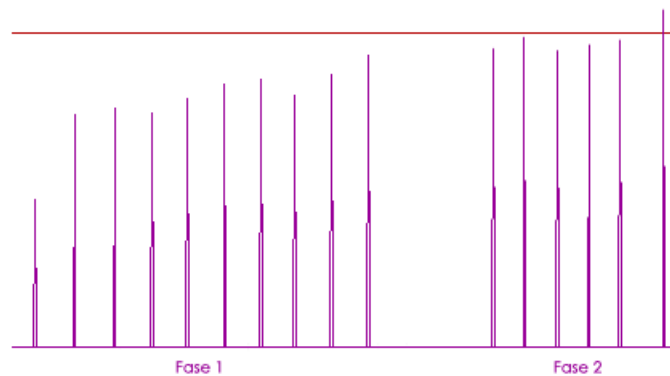


Figura 3.20: Estimativas de comprimento do passo para o percurso do circuito de calibração após a definição dos pesos

3.1.2 GNSS

Como foi referido anteriormente, a componente *outdoor* da dissertação, é assegurada pelo popular GPS, embora possa ser generalizada para qualquer outro GNSS. A ideia é utilizar as valências de soluções diferentes para garantir um sistema de posicionamento mais ubíquo, preciso e estável. Já existem várias soluções a combinar os valores do GPS com outros dados, sejam eles provenientes dum sistema PDR ou doutros métodos (como, por exemplo, a análise de imagem) [SGC06] [KSOK] [KWR06] [MC08].

A própria utilização individual do GPS tem os seus desafios. Assim como outros dispositivos de comum utilização naval, também o GPS possui uma interface de comunicação criada e mantida pela National Marine Electronics Association (NMEA) americana. A especificação conhecida pelo mesmo nome e formalmente designada NMEA 0183 [Inc11j], é o protocolo de comunicação mais comum entre o receptor GPS e outros dispositivos electrónicos (como o computador por exemplo). Este *standard*, embora sendo proprietário e estando à venda no site da NMEA [Ass11b], tem as suas instruções detalhadamente documentadas publicamente [Bad11] [Ass11c] graças à utilização de *reverse-engineering* a partir de fontes públicas, o que permitiu a criação legal de diversas ferramentas de interface NMEA.

O formato base da mensagem tem a seguinte estrutura [Inc11j]:

- carácter inicial \$,
- seguem-se 5 caracteres compostos pela identificação do emissor (2 caracteres: GP para GPS e GL para o GLONASS) e o tipo de mensagem (3 caracteres),
- utilização da vírgula (,) como separador de campos,
- a indisponibilidade dum valor dum campo é identificada com um valor nulo do tipo 123.,456,
- se for utilizado um mecanismo de *checksums* (obrigatório em alguns tipos de mensagens) este é separado dos restantes dados da mensagem por um asterisco (*), colocado imediatamente a seguir ao último carácter do último campo
- o valor da *checksum*, a existir, aparece imediatamente a seguir ao * e é constituído por 2 dígitos calculados a partir da aplicação da operação *XOR* a todos os caracteres entre o \$ e o *,
- o fim da mensagem é identificado pela sequência de caracteres CR LF.

De seguida apresentam-se algumas das mensagens mais importantes do protocolo:

O GPS utiliza o sistema de coordenadas geocêntricas [Ku]. Para representar o posicionamento a quase totalidade de receptores GPS recorre ao *datum* WGS84.

Tipo	Conteúdo
GGA	localização 3D, Dilution of Precision (DOP) horizontal, <i>timestamp</i> e qualidade do <i>fix</i> , número de satélites seguidos...
GSA	DOP horizontal e vertical, tipo de <i>fix</i> e demais informação sobre precisão
RMC	mensagem que resume os parâmetros essenciais do GPS: localização 2D, <i>speed over ground</i> , variação magnética, data e hora do <i>fix</i> ...

Tabela 3.2: Mensagens mais relevantes do protocolo NMEA [Ass11c]

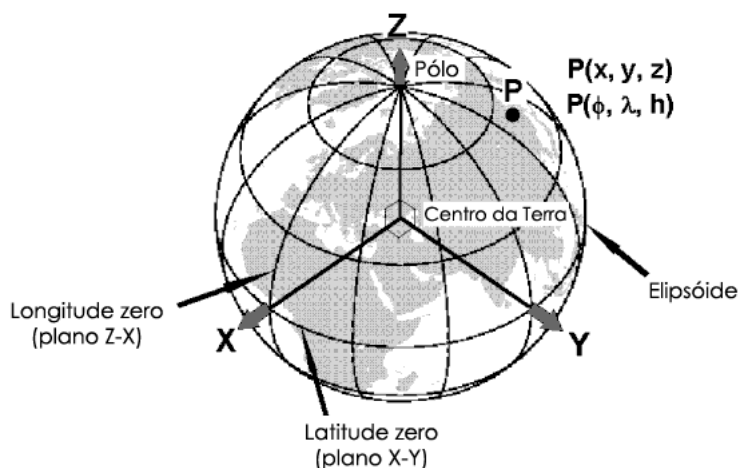


Figura 3.21: Datum WGS84 [Pas04]

Na implementação desta dissertação foi utilizada uma API que efectua o *parsing* e processamento das mensagens NMEA recebidas do receptor de GPS, facilitando assim o acesso à informação necessária para o uso deste método de localização (mais informação quanto à utilização da API no capítulo 4).

Mais sobre o papel que o GPS desempenha no sistema de localização desta dissertação pode ser visto na secção 3.1.3.5.

3.1.3 Filtro de partículas

Um filtro de partículas é uma técnica usada para implementar um filtro Bayesiano recursivo através de métodos sequenciais de Monte Carlo (Sequential Monte Carlo methods - SMC) [AMGC01] [Ho05]. Este tipo de técnicas é usado normalmente para estimar estados de sistemas que são modificados ao longo do tempo através de informação com ruído.

Ao contrário dos filtros de Kalman tradicionais, que só devem ser aplicados a estimativas lineares e Gaussianas [AMGC01], estes métodos podem ser aplicados a quaisquer modelos de transição de estado e de medida [Pir05]. No entanto, os filtros de Kalman, por funcionarem num leque mais restrito de problemas, oferecem garantidamente uma solução óptima para problemas de *tracking* não lineares, enquanto que os filtros de partículas, à semelhança dos outros métodos mais genéricos, calculam apenas uma solução sub-óptima [AMGC01]. A principal vantagem dos filtros de partículas em relação aos filtros de Kalman simples é que, os primeiros mantêm sempre um leque alargado de possibilidades válidas, o que torna facilmente possível a correcção de erros criados por decisões tomadas anteriormente; tal não acontece com os filtros de Kalman que representam o estado actual apenas como uma distribuição Gaussiana.

3.1.3.1 Filtro Bayesiano recursivo

Na abordagem Bayesiana que serve de base tanto para o filtro de Kalman como para o de partículas, é utilizada uma função densidade de probabilidade (pdf) para descrever o estado do sistema. Esta pdf é construída com base em toda a informação recebida e vai sendo alterada durante os ciclos de predição e actualização que compõem a filtragem Bayesiana recursiva. Cada uma destas fases é de seguida abordada resumidamente [SG05] [AMGC01].

I Fase de predição

Numa implementação típica duma filtragem Bayesiana, o estado do sistema no instante de tempo imediatamente a seguir é estimado, durante a fase de predição (com recurso a uma pdf), tendo como base o seu modelo de dinâmica e a introdução de ruído:

$$x_k = f_{k-1}(x_{k-1}, v_{k-1}), k > 0 \quad (3.40)$$

Esta transformação constitui um processo de Markov de primeira ordem e define a probabilidade de transição $p(x_k|x_{k-1})$, que, para $k > 0$, é utilizada em conjunto com a pdf *a posteriori* do estado imediatamente anterior, $p(x_{k-1}|Z_{k-1})$, de forma a calcular a

pdf *a priori* para o estado actual, $p(x_k|Z_k)$. Esta operação utiliza a equação de Chapman-Kolmogorov [Incl1e]:

$$p(x_k|Z_k) = \int p(x_k|x_{k-1})p(x_{k-1}|Z_{k-1})dx_{k-1} \quad (3.41)$$

Para $k = 0$, $p(x_k|Z_k) = p(x_k)$.

II Fase de actualização

Da mesma forma, para as medições efectuadas na fase de actualização combinam-se os valores recebidos nesta iteração, que fazem parte do vector do estado do sistema, x_k , com uma nova (e independente) componente de ruído, w_k , obtendo-se o vector de medições, z_k :

$$z_k = h_k(x_k, w_k), k > 0 \quad (3.42)$$

Esta operação define também o modelo probabilístico do termo de plausibilidade (*likelihood*), $p(z_k|x_k)$, que é usado juntamente com um factor de normalização, $p(z_k|Z_{k-1})$, para corrigir a pdf prevista na fase anterior:

$$p(x_k|Z_k) = \frac{p(z_k|x_k)p(x_k|Z_{k-1})}{p(z_k|Z_{k-1})} \quad (3.43)$$

o que traduz a aplicação do teorema de Bayes [DW01]. O factor de normalização é calculado a partir de uma nova aplicação da equação de Chapman-Kolmogorov:

$$p(z_k|Z_{k-1}) = \int p(z_k|x_k)p(x_k|Z_{k-1})dx_k \quad (3.44)$$

3.1.3.2 Filtro de partículas genérico

O modelo do filtro Bayesiano apresentado em cima é, para a maior parte dos casos (exceptuando por exemplo as situações em que o filtro de Kalman pode ser usado), apenas uma definição teórica sem aplicação prática possível, uma vez que as equações 3.41 e 3.43 raramente têm uma resolução analítica. É esta mesma impossibilidade que leva às diferenças referidas no início da secção 3.1.3 e abre caminho para a aplicação de métodos sub-óptimos e genéricos, dos quais se destaca o filtro de partículas.

A ideia base por trás deste método é a aproximação das pdf contínuas por um conjunto discreto de *samples/partículas* cuja distribuição seja fiel à pdf original. Para as pdf *a priori*

e a posterior essa aproximação pode ser representada da seguinte forma [SG05]:

$$p(x_k|Z_{k-1}) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta(x_k - x_k^i) \quad (3.45)$$

$$p(x_k|Z_k) \approx \sum_{i=1}^N w_k^i \delta(x_k - x_k^i) \quad (3.46)$$

onde a equação 3.46 tem já em consideração os pesos, w_k^i , associados a cada partícula, x_k^i , com $i \in [1, N]$. No limite, para $N = \infty$, a aproximação representa a pdf original na integra.

Uma das implementações mais básicas de um filtro de partículas foi introduzida em 1993 com o nome de *bootstrap filter* [GSS93] e é conhecida actualmente como Sampling Importance Resampling (SIR). A sua base é fundamentalmente a adaptação dos conceitos de Bayes descritos anteriormente, à natureza discreta dos filtros de partículas.

Num filtro SIR, a fase de predição é responsável pela aplicação do modelo do sistema a todas as partículas existentes, numa forma em tudo semelhante ao que é realizado na equação 3.40. Este processo resulta na divergência individual de cada uma das partículas através da introdução de mais uma iteração sujeita a ruído.

Quando é recebida uma nova medição e se dá início à fase de actualização, o algoritmo itera sobre todas as partículas e computa um novo peso, $\tilde{w}_k^i = p(z_k|x_k^i)$. Este peso avalia a plausibilidade dos valores das partículas gerados na fase de predição, face à nova medição recebida. Posteriormente todos os pesos são normalizados de forma a que a sua soma total seja a unidade.

O factor novo deste algoritmo realiza-se no final desse processo, com a criação dum novo conjunto de partículas através duma técnica de *resampling*. Se todas as partículas se mantivessem sempre ao longo das iterações, ao fim de pouco tempo chegaríamos a uma situação onde apenas um número muito reduzido de partículas traduziria a quase a totalidade da pdf, enquanto que a larga maioria dos restantes elementos teria pesos insignificantes. Este fenómeno designa-se de degeneração e implica a perda de representatividade da pdf. A utilização de *resampling* visa combater este problema.

Na função de *resampling*, a probabilidade duma partícula ser escolhida para pertencer ao conjunto de elementos que vai passar para a iteração seguinte do algoritmo, é igual ao seu peso normalizado, w_k^i , sendo que cada partícula pode ser escolhida mais do que uma vez. A função gera assim um novo conjunto de N partículas, com $N = \#$ partículas inicial. Este método de *resampling* faz com que uma partícula com um peso elevado seja muito mais facilmente seleccionada do que uma que tem peso diminuto. No limite, uma partícula com peso 0 nunca será seleccionada e uma com peso 1 será escolhida por N vezes. Pode-se concluir então que a pdf é agora representada, não pelo peso das partículas do sistema (que passa agora a ser uniforme), mas pela distribuição destas ao longo do mesmo.

No algoritmo 2 está descrita uma versão (sem a parte de *resampling* que vai ser ainda

otimizada de seguida) em pseudo-código do filtro SIR. Pode-se ainda analisar graficamente a evolução do algoritmo durante uma iteração na figura 3.22.

Algoritmo 2 Sampling Importance Resampling (SIR)

$[\{x_k^i, w_k^i\}_{i=1}^N] = SIR[\{x_{k-1}^i, w_{k-1}^i\}_{i=1}^N, z_k]$

$t = 0$

for $i = 1 : N$ **do**

Aplicar modelo: $x_k^i = f_{k-1}(x_{k-1}, v_{k-1})$

Calcular: $\tilde{w}_k^i = p(z_k | x_k^i)$

$t = t + \tilde{w}_k^i$

end for

for $i = 1 : N$ **do**

Normalizar $w_k^i = \frac{\tilde{w}_k^i}{t}$

end for

$w_k = \text{RESAMPLE}(w_k)$

3.1.3.3 Filtro de partículas no contexto do PDR

Embora estes métodos sejam mais vulgarmente utilizados nas soluções WLAN como em [WKP07], os filtros de partículas são perfeitamente generalizáveis para situações como o PDR. No entanto é necessário adaptar a sua configuração ao contexto de um sistema inercial.

Considerando que a actualização dum sistema PDR é dada pelas equações 3.1 e 3.2 e que as medições obtidas se relacionam directamente com as variáveis independentes pertencem a essas equações, designadamente: o tamanho do passo, dt , e a orientação deste, ψ ; é razoável introduzir a geração de ruído, v , nestas duas variáveis.

$$\tilde{dT} = dT + v_k^{dT} \quad (3.47)$$

$$\tilde{\psi} = \psi + v_k^{\psi} \quad (3.48)$$

$$x_k = x_{k-1} + \tilde{dT} \sin(\tilde{\psi}) \quad (3.49)$$

$$y_k = y_{k-1} + \tilde{dT} \cos(\tilde{\psi}) \quad (3.50)$$

Estas equações formam a função responsável pela actualização do modelo do sistema x_k para cada partícula. v_k^{dT} e v_k^{ψ} representam valores aleatórios obtidos, no nosso caso, a partir duma distribuição normal com $\bar{v}_k = 0$ e $\sigma = C_e$. C_e toma o valor duma constante intimamente relacionada com a confiança no valor da variável e (tamanho do passo ou orientação).

A aplicação das equações referidas em cima leva à evolução da distribuição de partículas em cada passo para que estas representem a incerteza do movimento. O tipo de "abertura" da distribuição é definido pelos factores de confiança C_e . No caso da figura 3.23

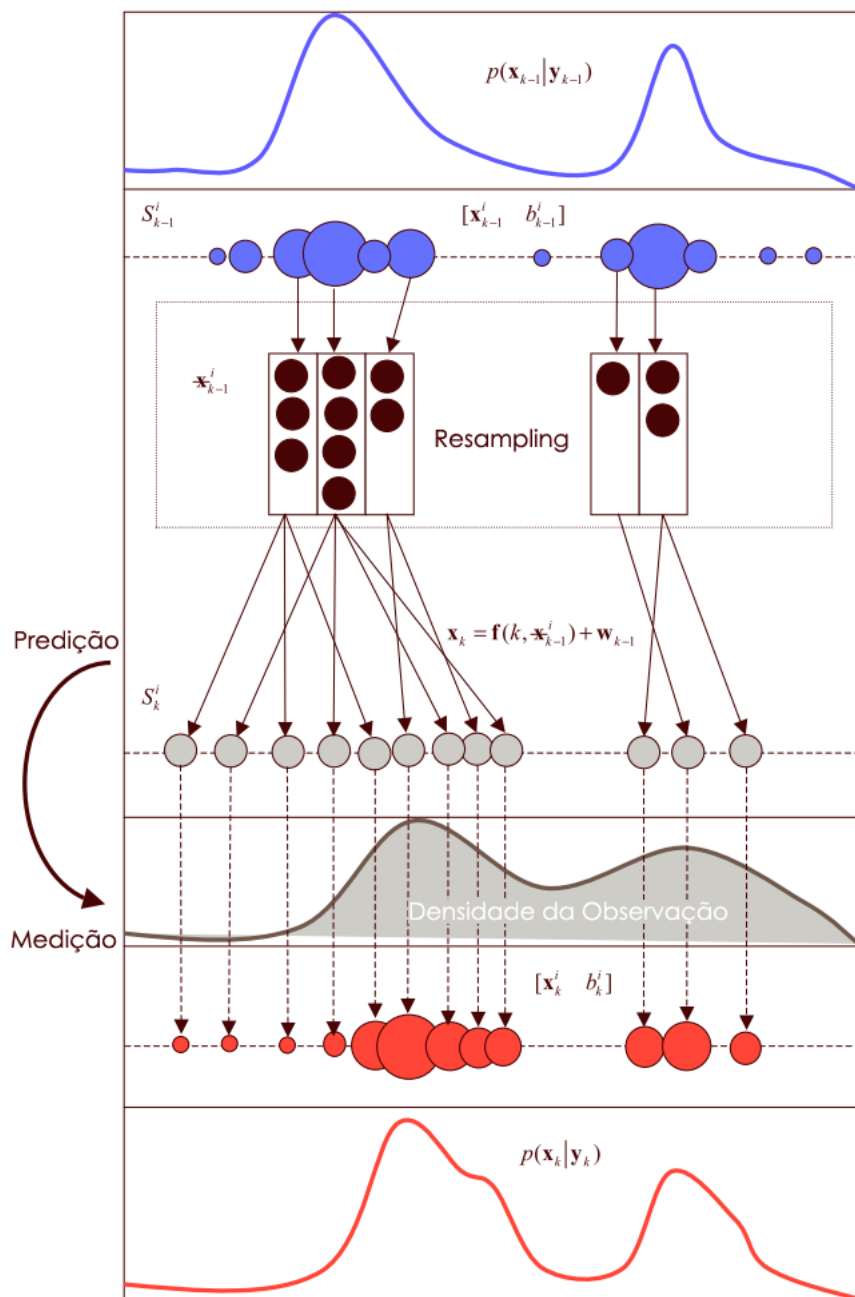


Figura 3.22: Execução dum iteração dum filtro de partículas Sampling Importance Resampling (SIR) [ECR05]

pode-se perceber que o factor de desconfiança na orientação, C_ψ é superior ao factor de incerteza no cálculo do tamanho do passo C_{dT} .

Os pesos de cada uma das partículas são calculados tendo como base funções de plausibilidade e a dimensão dos erros introduzidos.

$$w_k^i = w_k^{i-1} p_{dT} \left(\tilde{dT}_k^i - dT_k^i \right) p_\psi \left(\tilde{\psi}_k^i - \psi_k^i \right) \quad (3.51)$$

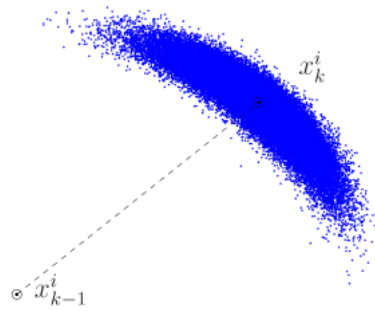


Figura 3.23: Expansão das partículas do filtro após um passo [AKWT10]

Na implementação actual as duas funções, p_{dT} e p_{ψ} , são definidas pela função de Gauss [Inc11f] e afectadas por constantes que avaliam a confiança em cada uma das estimativas (à semelhança de C_e). No entanto, como estamos a utilizar filtros de partículas, outro tipo de funções pode ser utilizado para representar a plausibilidade da medição. Outros factores podem também ser tidos em consideração como por exemplo a distância à partícula de referência.

No contexto da dissertação, como convém garantir que pelo menos uma das partículas usa directamente os valores calculados (ou seja, sem introduzir erros), foi adicionada uma partícula de referência (PR) no sistema. Esta é uma partícula especial, que tem garantidamente $v_k^{dT} = v_k^{\psi} = 0$, não tem peso associado e não entra no processo de *resampling*. É a única responsável pelo posicionamento efectivo do sujeito na aplicação e só é substituída quando se torna inválida (*vide* secção 3.1.3.4).

3.1.3.4 Map filtering

O *map filtering* constitui a aplicação do conceito dos filtros de partículas à navegação espacial restringida por um mapa.

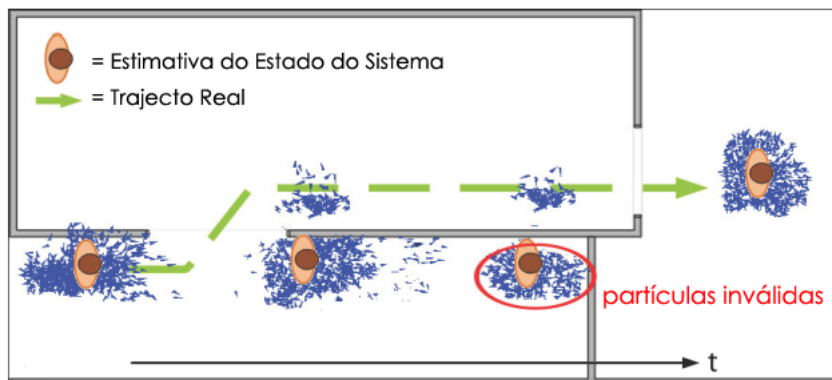


Figura 3.24: Filtro de partículas restrito pela informação do mapa [WKP07]

A utilização da ajuda de plantas de edifícios é extremamente útil no contexto dum sistema inercial pois permite corrigir muitos dos erros que vão sendo acumulados ao longo dum percurso. Como foi referido em [Utilização de plantas dos edifícios](#) na secção 2.2.1.1, a informação que o mapa fornece afecta bastante a pdf do posicionamento do sujeito. As diferenças entre as figuras 2.2 e 2.3 ilustram bem estes efeitos.

Os filtros de partículas, como métodos que procuram estimar a pdf contínua, também são capazes de integrar a informação do mapa de forma a adicionarem restrições sobre os movimentos realizados pelas suas partículas. A forma como o fazem é extremamente simples: atribuindo peso 0 às partículas que efectuam um movimento fisicamente impossível como passar uma parede. Desta forma estas não serão seleccionadas durante a fase de *re-sampling*, dando assim prioridade a outras estimativas mais prováveis. No caso especial da partícula invalidada ser a partícula de referência apresentada na secção 3.1.3.3, esta é substituída na sua função pela partícula de maior peso dentre todas as outras partículas.

Embora simples, esta informação permite grandes melhorias nos resultados que se notam principalmente em utilizações longas dos sistemas PDR. Se não tivessem acesso a nenhuma informação absoluta que restringisse as possibilidades de movimento e/ou posicionamento, as soluções inerciais tornar-se-iam inevitavelmente inúteis a longo prazo por melhor que fosse o sistema implementado. Com a introdução da informação dos mapas, o "intervalo de validade" das estimativas criadas por uma solução como o PDR é largamente aumentado, podendo até deixar de ser uma questão relevante se a utilização do sistema for sempre efectuada em locais com várias restrições de movimento.

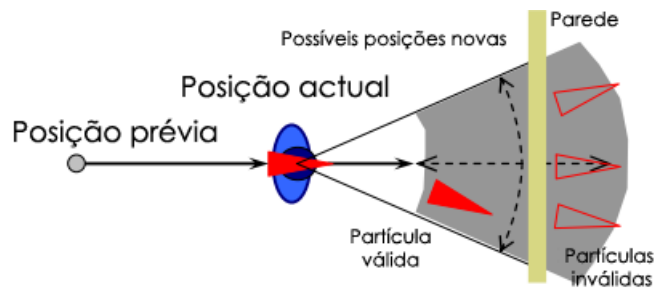


Figura 3.25: Eliminação de partículas que traduzem movimentos impossíveis como o atravessamento de paredes [Bea09]

3.1.3.5 Incorporação dos valores do GPS

Dada a grande liberdade e abertura dos filtros de partículas à introdução de novas variáveis e restrições, é relativamente fácil incluir dados do GPS nas estimativas de posicionamento dadas pelo sistema [KWR06] [MC08]. Para tal basta actualizar a função de atribuição de pesos às partículas (Equação 3.52) de forma a incluir os dados do GPS:

$$w_k^i = w_k^{i-1} p_{dT} \left(\tilde{dT}_k^i - dT_k^i \right) p_{\psi} \left(\tilde{\psi}_k^i - \psi_k^i \right) p_{gps} \left(x_k^i, gps_k \right) \quad (3.52)$$

A implementação de p_{gps} pode ser definida pela distância entre a posição da partícula e a posição reportada pelo GPS juntamente com um factor de confiança na medição GPS (influenciada pela qualidade do sinal). Deve-se ter em atenção que a solução GPS e o PDR trabalham em sistemas de coordenadas diferentes. Enquanto que o primeiro usa coordenadas geográficas, o segundo utiliza um referencial cartesiano. Para calcular a distância entre as duas medições, primeiramente é necessário converter as posições dum sistema de coordenadas para outro.

Com esta adição, deixa de fazer sentido a utilização duma partícula de referência, podendo o estado do sistema ser dado pela partícula com maior peso ou pelo centro médio ponderado da população de partículas.

Como o sinal de GPS não está disponível dentro de recintos fechados, a sua contribuição limita-se ao espaço *outdoor*. Ainda assim, a sua utilização contribui para melhorar consideravelmente a qualidade das estimativas, compensando de certa forma, a normal escassez de mapas que restrinjam o movimento da mesma forma que acontece na solução *indoor*. Vista pela perspectiva oposta, a introdução do filtro de partículas contribui para o aumento da sensibilidade e estabilidade do GPS em zonas abertas, para além de naturalmente expandir o espaço de localização ao *indoor*.

3.1.3.6 Problemas e melhoramentos

Apesar da técnica de *resampling* diminuir o problema causado pela degeneração das partículas, a sua utilização em todas as iterações do algoritmo, provoca outro fenómeno prejudicial para a representatividade do filtro, o empobrecimento dos *samples*. Este efeito negativo ocorre devido ao uso repetido das mesmas partículas (as mais prováveis) para gerar novos conjuntos de elementos. Uma partícula divergente terá poucas hipóteses de "sobreviver" a várias iterações de *resampling* pelo que terá pouco tempo para constituir uma alternativa verdadeiramente diferente das mais prováveis. Numa situação como esta, a diversidade das partículas, necessária para aproximar correctamente a pdf, fica seriamente ameaçada.

A solução passa por realizar uma nova amostragem apenas quando necessário, isto é, quando se começar a verificar um nível de degeneração elevado. A medida normalmente usada nestes casos é obtida através do cálculo do *Effective Sample Size*, N_{ef} , que no contexto dos filtros de partículas é estimado pela seguinte expressão [EMN05] [SG05] [AMGC01]:

$$\hat{N}_{ef} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N (w_k^i)^2} \quad (3.53)$$

com $N \in [1, N]$. Um valor de N baixo significa que existe degeneração da estimativa e que se deve proceder a uma reamostragem. Nos casos em que não é efectuado *resampling*, o

peso da partícula, w_k^i , é mantido inalterado e actualizado na iteração seguinte da função de *likelihood*, $\tilde{w} = w_{k-1}^i + (z_k | x_k^i)$.

Apesar da adição deste controlo melhorar substancialmente a qualidade e representatividade do conjunto de partículas, ainda é possível o sistema incorrer em situações de empobrecimento dos *samples*. Tal é especialmente verdade no caso da navegação *indoor*.



Figura 3.26: Caso de perda de representatividade causado por erros de localização e limitações no processo de *resampling* (imagem retirada de [Bea09] e posteriormente editada)

Um desses problemas de empobrecimento de *samples* pode levar à situação ilustrada pela figura 3.26.

Imagine-se que ocorre uma falha relativamente grave no sistema de localização (e.g. uma má leitura num dos sensores ou por exemplo 2 ou 3 passos seguidos que não foram identificados) enquanto o utilizador está a sair duma divisão. Considere-se ainda que essa falha faz com que todas as partículas do filtro se mantenham na divisão anterior e que, após sair da divisão o utilizador se desloca para uma zona que impede qualquer tipo de transição entre a divisão anterior e aquela em que o utilizador realmente está. Neste caso, à medida que o sujeito continua o seu percurso, é provável que as partículas que ficaram na outra divisão comecem a encontrar obstáculos e, conseqüentemente, a serem invalidadas. Eventualmente, chegará a altura de efectuar um novo *resampling*. No entanto, como este *resampling* é feito utilizando directamente as partículas existentes, os erros cometidos anteriormente nunca mais serão corrigidos, contrariando uma das principais vantagens dos filtros de partículas face às outras abordagens. Ao fim de pouco tempo, todo o sistema deixará de ter qualquer tipo de representatividade.

Para contrariar este empobrecimento existem já algumas abordagens na literatura internacional [OG08] [ZCY⁺10] [FJ10]. A optimização proposta por Xiaoyan Fu *et al.* em [FJ10] foi considerada a mais indicada para o contexto desta dissertação, pelo que foi esse o método implementado. O algoritmo apresentado, denominado Exquisite Resampling (ER), visa substituir unicamente a função de *resampling*, introduzindo optimizações específicas para alguns pontos fracos dos filtros de partículas mais comuns. A descrição

textual do algoritmo foi usada para desenvolver uma implementação melhorada em relação àquela que é proposta no artigo através de pseudocódigo. A ideia inicial foi no entanto mantida na sua integridade. O algoritmo 3 contém esta mesma versão melhorada.

Em linhas gerais, o algoritmo percorre uma "linha imaginária" sobre os pesos acumulados, designada normalmente por CSW (Cumulative Sum of the Weights) (Figura 3.27), começando num ponto aleatório, u_1 (que pode ser visto como uma "parede"), entre 0 e $1/N$, com N a ser o número de partículas. Após encontrar o primeiro valor com peso acumulado que supera o valor de u_1 , ou seja, que "atravessa a parede", o algoritmo processa a informação que recolheu e adiciona $1/N$ a u_1 passando assim para a "parede" seguinte, u_2 . O processo é repetido sucessivamente até todas as N paredes terem sido "atravessadas".

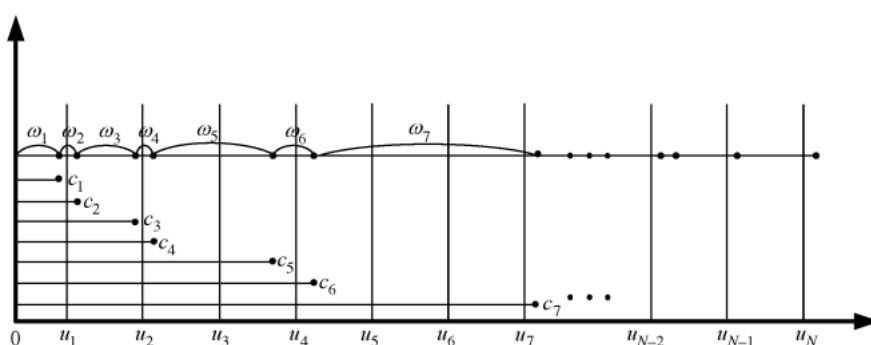


Figura 3.27: CSW e o algoritmo de *resampling* [FJ10]

No caso base, em que temos 1 partícula entre duas paredes consecutivas, o ER funciona do mesmo modo que a versão mais simples de *resampling*, adicionando a partícula ao conjunto de partículas a manter. Contudo, ao longo desta iteração, são identificados 2 outros tipos de situações que merecem atenção especial do algoritmo e constituem as principais diferenças em relação às abordagens tradicionais:

- existência de partículas entre aquelas que atravessam 2 paredes consecutivas,
- uma partícula atravessa mais que 1 parede.

Na primeira situação, o ER mantém a partícula com o máximo peso dentro das que se encontram naquela condição e descarta as demais. No algoritmo 3 esta é a funcionalidade de *MaxP*.

Para o segundo caso o algoritmo vai utilizar a partícula identificada, w_k^i , para gerar m novas partículas, em que m é o número de paredes pelas quais a partícula passou. Mantendo 1 partícula igual à original (ou 2 no caso do número de paredes ultrapassadas ser par) as restantes $m - 1$ (ou $m - 2$) são criadas a partir da aplicação de métodos de Quasi-Monte Carlo. Na implementação em discussão, como o PDR usa coordenadas polares (tamanho do passo, dP) e *yaw* ψ), dividiu-se o domínio de ψ e manteve-se uma geração aleatória no tamanho do passo:

$$\psi(w_k^j) = j \frac{2\pi}{m-1} \quad (3.54)$$

$$dP \sim U[T, H] \quad (3.55)$$

com $U[T, H]$ a representar a geração de um número aleatório entre as constantes T e H . É desta forma adaptado o conceito unidimensional da utilização de Quasi-Monte Carlo apresentado no artigo (função *Gen*).

Se durante este processo ocorrem simultaneamente as duas situações referidas em cima, aplica-se a segunda abordagem à partícula que atravessa as várias paredes e eliminam-se todas as outras partículas no intervalo da primeira situação.

Algoritmo 3 Exquisite Resampling (ER) revisto

```

 $[X_k, W_k] = ER[\{x_k^i, w_k^i\}_{i=1}^N]$ 
   $i = 1, m = 0$ 
  Inicializar o peso acumulado:  $cw = w_k^i$ 
  Gerar primeiro ponto aleatoriamente:  $u_1 \sim U[0, 1/N]$ 
   $[X_k, W_k] = []$ 
  for  $j = 1 : N$  do
    Mover ao longo da CSW:  $u_j = u_1 + (j - 1)/N$ 
     $l = i$ 
    while  $u_j > cw$  do
       $i = i + 1$ 
       $cw = cw + w_k^i$ 
    end while
    if  $u_j + 1/N > cw$  then
      if  $i - l = 1$  then
         $[X_k, W_k] = [[X_k, W_k]; [x_k^i, w_k^i]]$ 
      else if  $i - l > 1$  then
         $[X_k, W_k] = [[X_k, W_k]; MaxP[w_k^{l+1}, \dots, w_k^i]]$ 
      else
        if  $l = 1$  then
           $[X_k, W_k] = [[X_k, W_k]; [x_k^i, w_k^i]]$ 
        else if  $m > 0$  then
           $m = m + 1$ 
           $[X_k, W_k] = [[X_k, W_k]; Gen[x_k^i, w_k^i, m]]$ 
           $m = 0$ 
        end if
      end if
    end if
  else
     $m = m + 1$ 
  end if
end for

```

3.2 Comunicação

As condicionantes relacionadas com os tipos de redes comunicacionais referidas no capítulo do estado da arte, levaram à procura de soluções eficientes, não apenas a pensar no protótipo implementado (que tem necessidades comunicacionais muito reduzidas), mas também para os cenários mais comuns da utilização de jogos sérios baseados em localização.

Em [WJS09] e [CHHL06] são experimentadas e avaliadas diversas tecnologias e protocolos utilizados na comunicação de dados de jogos em rede. Uma noção que fica patente em ambos os artigos é a estreita relação entre as exigências comunicacionais e o tipo de jogo. Um FPS, ou qualquer outro jogo multi-jogador, em tempo real, com uma forte componente de colisões, é tendencialmente muito mais exigente do ponto de vista comunicacional do que um jogo de estratégia [WJS09]. Embora seja incomum actualmente a utilização dum FPS baseado em localização para dispositivos móveis, a ideia base é claramente válida e aplicável ao contexto dos *smartphones*.

Ao criar uma plataforma para jogos sérios, não é possível predizer o tipo de jogos que serão utilizados, pelo que possíveis optimizações específicas dum determinado tipo de jogo e dum determinado tipo de exigências, não foram consideradas. Contudo, o que foi efectivamente considerado em vários casos, foi a optimização dos cenários mais exigentes e das condições mais difíceis.

Muitas dessas situações difíceis são exponenciadas pelas características das redes móveis, tradicionalmente mais frágeis e lentas do que as redes tradicionais, o que leva mais facilmente à perda de pacotes e latência na comunicação.

Dois exemplos das decisões que são influenciadas por essas mesmas dificuldades são a escolha do protocolo e a opção pelo tipo de garantia de sincronismo utilizada. Esta secção explica como foram estudadas essas duas questões.

3.2.1 Protocolo: UDP vs TCP

A escolha do protocolo, sendo uma das decisões comunicacionais mais relevantes na criação de qualquer jogo em rede, assume contornos especiais quando realizada no contexto das redes móveis.

Como vantagens face ao UDP, o protocolo TCP assegura a garantia de entrega e a preservação da ordem das mensagens para além de possuir mecanismos de detecção de erros. No entanto tais vantagens têm um custo.

Se tomarmos em linha de conta as propriedades de cada um dos protocolos vemos que, a primeira das consequências referidas em cima, ou seja, a perda de pacotes, pode levar a elevados custos funcionais no caso da adopção dum protocolo TCP.

A garantia de entrega das mensagens tem um preço que pode ser demasiado caro para as condições duma rede móvel. Esta propriedade do TCP é assegurada pela implementação dum método designado por Positive Acknowledgment (ack). Este processo determina que um pacote apenas é considerado entregue quando o emissor recebe como resposta um ack. Caso o ack não seja recebido num determinado espaço de tempo, o pacote é reenviado. Em [CHHL06] os acks representam 38% do número total de pacotes trocados, mesmo utilizando optimizações que juntam a resposta a várias recepções num único ack.

A estes custos de tráfego acresce a sequencialidade do envio, dado que o emissor apenas envia o pacote seguinte depois de reconhecida a recepção da mensagem anterior pela parte do destinatário. Por fim, o tamanho do *header* dum pacote TCP/IP é bastante maior do que o dum pacote UDP (20 bytes vs 8 bytes [Dif]), totalizando 46% da totalidade da largura de banda em [CHHL06]. Isto faz com que não seja surpreendente encontrar as soluções UDP claramente à frente das TCP em todas as redes móveis testadas em [WJS09].

Avaliando as vantagens e desvantagens da adopção de cada um dos protocolos tendo em conta as condicionantes da rede, torna-se necessário decidir o que é mais importante num jogo sério baseado na localização. Uma das principais vantagens do TCP é, como foi referido, a garantia de entrega das mensagens, no entanto, no contexto dum jogo, e em especial, no contexto dum jogo baseado em localização, a importância dum pacote individual é tipicamente menor do que a fluidez da experiência proporcionada ao utilizador. Em todo o caso, se esse pacote contivesse informação sobre o posicionamento actual dum jogador em movimento, seria até preferível descartar o reenvio do pacote em prol do envio de informação mais recente.

Conclui-se que o TCP não é um protocolo indicado para serviços que privilegiam a rapidez em detrimento da fiabilidade, e que, mediante o contexto da aplicação, é preferível utilizar UDP.

3.2.2 Sincronismo

Na maior parte dos jogos em rede realizados em tempo real, os jogadores e o sistema necessitam de estar sincronizados para que sejam evitadas inconsistências entre as representações do estado do jogo de cada um. Com uma latência elevada, assegurar esta condição torna-se bastante difícil, podendo colocar em causa a honestidade do jogo e arruinar assim a experiência dos seus jogadores. As primeiras medidas que devem ser tomadas quando se depara com este problema devem ir no sentido de minimizar as dependências de informação e racionalizar a comunicação. Se tal não for suficiente, e considerando que a melhoria da *performance* do meio de comunicação/rede está fora do nosso alcance, torna-se então necessário encontrar técnicas que minimizem os efeitos negativos destas situações.

Na imagem 3.28 pode-se ver uma situação típica onde problemas de sincronismo entre o jogador A e o jogador B levam a uma situação de inconsistência: para o jogador A, o carro A terminou em primeiro, enquanto que para o jogador B, o primeiro carro a "cortar a meta" foi o B.

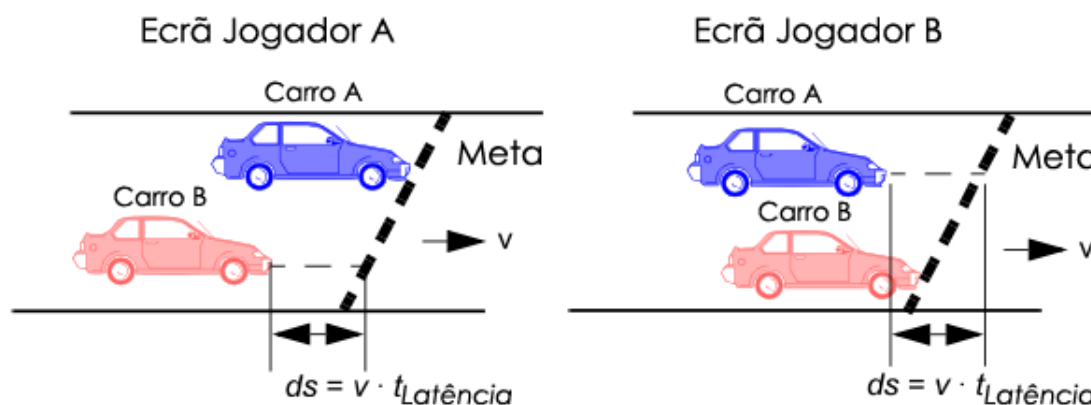


Figura 3.28: Uma situação de perda de sincronia causada pela latência elevada [PW02]

Uma das técnicas que tem vindo a ser usada para colmatar esta dificuldade chama-se *dead reckoning*. Em linhas gerais, um sistema de *dead reckoning* baseia-se na utilização da última informação sobre o movimento de um objecto particular para tentar prever a posição actual desse objecto quando essa informação (ainda) não está disponível [PW02]. Como durante esta fase de prolongamento do último movimento final conhecido podem ter ocorrido mudanças na deslocação dos objectos, este método normalmente introduz algum erro que, no caso dos videojogos, varia conforme o tipo de jogo e o consequente grau de previsibilidade dos movimentos dos objectos. Quando finalmente a nova informação é recebida, a posição é corrigida para eliminar os erros de estimativa criados pelo ignorar das variações intermédias realizadas desde a última comunicação.

Outra técnica apontada normalmente para resolver situações de inconsistência como a verificada na figura 3.28, designa-se por *rollback*. Esta abordagem baseia-se na reversão do jogo para um estado consistente e comum a ambos os jogadores. Do ponto de vista da coerência do jogo, esta abordagem é ainda mais correcta do que aquela que é apresentada pelo *dead reckoning*, pois não mantém estados fictícios através de estimativas. A simplicidade da estimativa do movimento por parte do *dead-reckoning* não garante a consistência do estado do jogo após toda a informação ter sido trocada, como pode ser comprovado pelos casos exemplo apresentados em [Mau00]. No entanto, o método de *rollback*, embora seja bastante popular nas redes tradicionais, não tem a eficiência necessária em ambientes com elevada latência como é o caso dos dispositivos móveis [WJS09]. É assim preferível utilizar a abordagem mais simples, mas também mais eficaz e computacionalmente mais leve, proposta pelo *dead reckoning*, mesmo que compreendendo as falhas do método em

alcançar a consistência em certas situações específicas.

3.3 Síntese

Ao longo deste capítulo foram abordadas as diferentes técnicas utilizadas para realizar os objectivos propostos na secção 1.3.

O PDR serviu como base para a localização *indoor* e como melhoramento da localização *outdoor* que se baseia na utilização dum GNSS (neste caso o GPS). O filtro de partículas restringe a evolução do sistema, e consequentemente da localização, às trajetórias possíveis tendo em conta a planta dos edifícios. Foi também usado para integrar as medições do PDR com as do GPS na solução para espaços abertos.

As condicionantes das redes móveis foram estudadas e serviram de fundamento para a tomada de várias decisões, como a escolha do protocolo UDP, ou a preferência pela técnica de *dead reckoning* como método para minorar os efeitos da latência no jogo.

Os fundamentos de cada um dos conceitos e de todas as técnicas que serviram de suporte à sua realização, foram explicadas ao nível de detalhe que se considerou apropriado para a compreensão da sua metodologia e do seu papel na presente dissertação.

Metodologia

Capítulo 4

Implementação

Capítulo dedicado à descrição prática do protótipo do jogo sério, das responsabilidades das aplicações cliente e servidor, e correspondente comunicação entre ambas. São também apresentados diversos testes efectuados para aferir a qualidade do sistema e descritas as componentes de *software* e *hardware* utilizadas.

4.1 Protótipo do jogo sério

O protótipo do jogo sério implementado para demonstrar as funcionalidade principais da plataforma, baseia-se num conceito presencial, bastante semelhante ao dos *check-ins*.

Em cada execução, o jogo selecciona aleatoriamente uma série de pontos de interesse (Points of Interest - POI) que é identificada visualmente no mapa. Os jogadores, aos quais estão atribuídas equipas específicas, têm de se dirigir fisicamente a esses locais para que consigam arrecadar pontos para a sua equipa. Desta forma, e seguindo a orientação dum jogo sério, incentiva-se a exploração e descoberta dos locais onde o jogo decorre (no caso do protótipo o bloco IV do edifício B da FEUP), ao mesmo tempo que são fornecidas pequenas descrições, e informações úteis (e.g. identificador da sala, lotação do auditório...) sobre os POI.

Embora bastante simplista, este protótipo, para além de explorar as valências técnicas da plataforma, introduz diversos conceitos interessantes como a navegação pedestre, a utilização de cooperação nos sistemas de *check-in* e a descoberta orientada dum espaço físico. A exploração mais aprofundada destas componentes na criação de jogos baseados em localização, pode originar experiências inovadoras e altamente atractivas.

Implementação

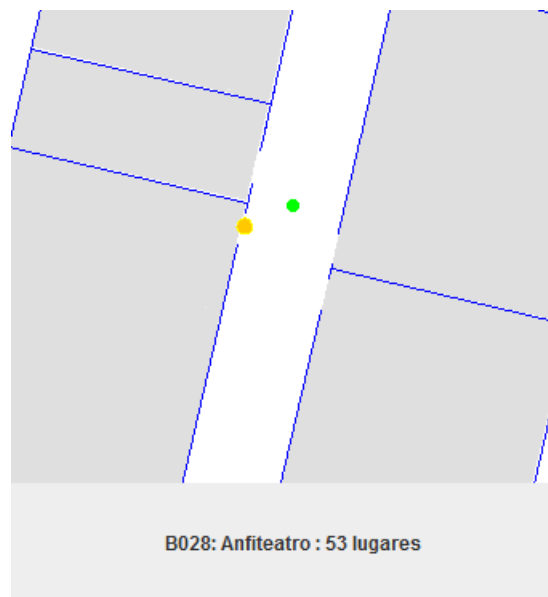


Figura 4.1: Informação útil sobre o POI mostrada aquando da aproximação do jogador



Figura 4.2: Classificação das equipas num dado momento

4.2 Configuração

O módulo de localização da presente solução divide-se em quatro componentes principais: a IMU (Inertial Measurement Unit), o receptor de GPS, a aplicação cliente desenvolvida em *Java* e o servidor *Postgis* da planta do edifício. As três primeiras, corresponderiam no futuro a uma solução integrada para *smartphone*, no entanto, no ambiente da dissertação, foi utilizada a configuração IMU + GPS + *laptop*.

A IMU utilizada foi a Sparkfun Razor IMU 9 Degrees of Freedom (SEN-09623 [Ele11]), composta por:

- um giroscópio de um eixo,

- um giroscópio de dois eixos,
- um acelerómetro de três eixos,
- um magnetómetro de três eixos.

Por sua vez o receptor de GPS utilizado foi o GlobalSat BT-338, com:

- conectividade Bluetooth até 10 metros,
- precisão horizontal documentada até 10 metros,
- *datum* WGS-84,
- protocolo NMEA 0183 com envio de mensagens GGA (1s), GSA (1s), GSV(5s) e RMC(1s).

A aplicação fica completa com a adição da aplicação servidor, também desenvolvida em *Java*. Esta aplicação é responsável por todas as tarefas de sincronização, gestão e coordenação da vertente comunicacional do jogo.

Esta configuração foi escolhida em detrimento da utilização directa dum *smartphone* por duas razões principais. A primeira tem a ver com as vantagens tecnológicas que apresentava na altura (início da dissertação) face aos *smartphones* de última geração. Actualmente algumas das vantagens (como a presença de giroscópios) já foram mitigadas com o lançamento de novos modelos. A segunda reside na maior facilidade de desenvolvimento numa plataforma assente num computador portátil, em relação a outra onde esse papel é assumido por um dispositivo móvel.

No entanto esta opção trouxe também algumas dificuldades acrescidas, como a necessidade de interacção de mais baixo nível com os sensores do *hardware*, sendo que estas foram largamente compensadas pelas duas vantagens referidas anteriormente.

Ao longo do desenvolvimento foi procurado assegurar a compatibilidade da aplicação com o ambiente móvel para garantir que uma futura migração decorra da forma mais directa possível. De resto, esta ambição acaba por ser apoiada pela constante evolução do *software* e *hardware* destes dispositivos.

4.3 Arquitectura

A figura 4.3 apresenta uma visão de alto nível da solução implementada. No diagrama as aplicações cliente, representativas dos terminais dos jogadores, acedem através da rede (e.g. Internet ou mesmo LAN, dependendo da abrangência do jogo) à aplicação servidor e ao servidor de mapas (base de dados PostGIS). Esta comunicação é efectuada utilizando as tecnologias disponíveis no local (e.g. WLAN, 3G ou 4G). Como o papel do servidor no protótipo é apenas o de ir mantendo a pontuação do jogo, não foi necessário recorrer

Implementação

a uma outra base de dados. No entanto esta foi incluída no diagrama de forma a exemplificar o esquema que poderia ser adoptado por uma aplicação um pouco mais exigente do ponto de vista dos dados a tratar/armazenar. Quanto ao servidor de mapas/plantas, este é usado tanto para a aplicação de restrições ao filtro de partículas, como para serem renderizados na janela do jogo. Quando possível, parte destes devem ser descarregados para o computador/*smartphone* do jogador no início do jogo de forma a diminuir o atraso na actualização dos movimentos e os custos de comunicação com o servidor.

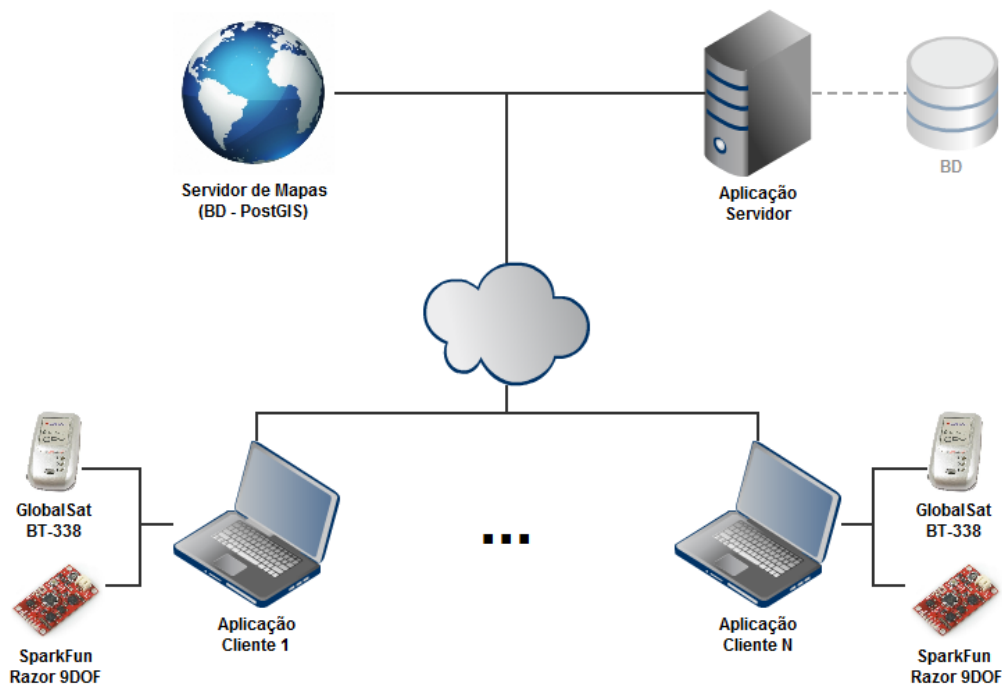


Figura 4.3: Uma visão de alto nível da arquitectura da implementação utilizada

No futuro, espera-se substituir a utilização da IMU + portátil, por um *smartphone* com as mesmas funcionalidades.



Figura 4.4: Objectivo final do sistema em estudo

4.4 Ambiente do jogador/cliente

O ambiente do cliente comporta a aplicação cliente, o receptor GPS e a IMU. De seguida são abordadas as questões principais relacionadas com este ambiente.

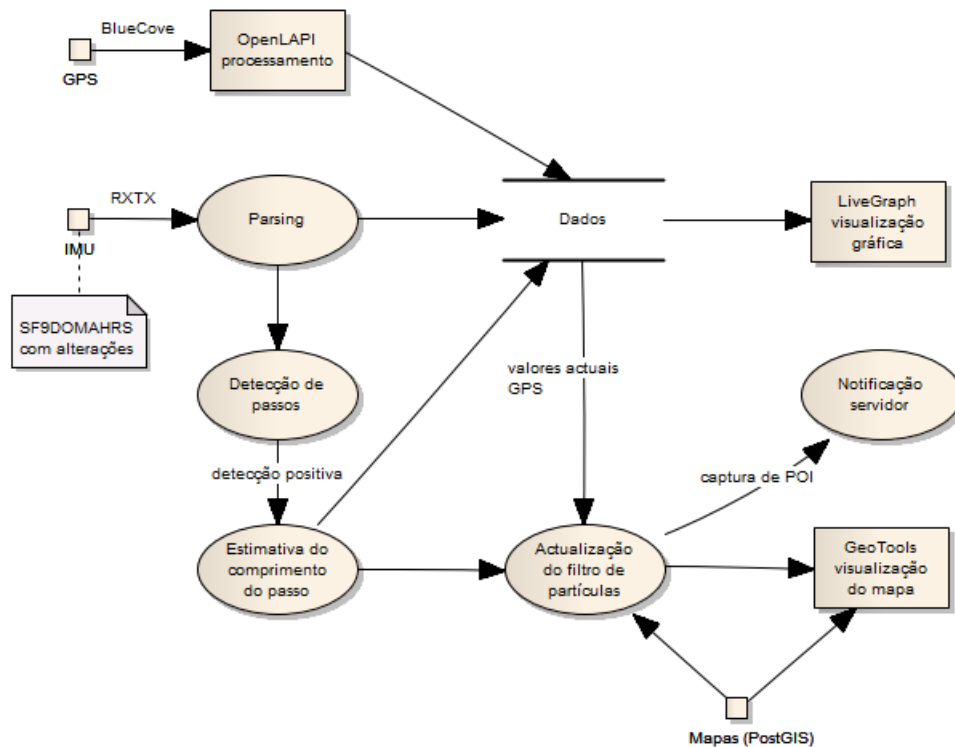


Figura 4.5: Diagrama de interacção da perspectiva do cliente com as operações mais importantes

4.4.1 IMU

O *firmware* original incluído na IMU, apenas fornecia os valores *raw* dos sensores que a placa contém. Existe, no entanto, na própria página oficial do produto uma ligação para um projecto [kn:11a] que visa dotar a IMU duma solução de orientação AHRS (Attitude and Heading Reference System) eficaz baseada no algoritmo DCM apresentado em [Direction Cosine Matrix](#) na secção 3.1.1.1. Este projecto é baseado na adaptação dum outro, o ArduIMU [kn:11c], à placa da SparkFun.

Com a aplicação deste *firmware* a IMU passa a enviar para o computador já os ângulos Eulerianos. O código foi usado como base para a determinação da orientação do sujeito, tendo sido editado para se adaptar às necessidades dum sistema PDR. Dentro das alterações efectuadas destacam-se a adição da detecção de interferências magnéticas, a expansão da técnica de compensação de inclinação para as 3 dimensões e para os valores

Implementação

dos acelerómetros, a adição dum factor de escala às correcções aplicadas aos acelerómetros, e a alteração do *output* de forma a este incluir outras variáveis importantes para o algoritmo de PDR, tendo agora o seguinte formato:

```
!roll, pitch, yaw, deltaT, acX, acY, acZ
```

A comunicação entre a IMU e a aplicação cliente é estabelecida através da FTDI Basic Breakout que cria uma porta de série virtual para o efeito. Esta placa é conectada a uma porta USB do portátil (através da sua porta USB mini-B) e aos 6 pinos da IMU. Para a leitura dos dados da porta de série, a aplicação cliente faz uso da biblioteca RXTX [kn:11h].

Inicialmente foi tentada a utilização duma Arduino Mega, baseada no microcontrolador ATmega 1280, como plataforma intermédia de comunicação e processamento dos dados da IMU. Embora tenha sido possível estabelecer algumas comunicações com sucesso, a plataforma não se verificou estável o suficiente para ser usada neste contexto, sendo pois substituída pela actual.

4.4.2 Mapas

Para que se pudesse utilizar a informação da planta da FEUP na solução de localização em análise, foi necessário efectuar a edição das plantas para remover objectos desnecessários do ficheiro AutoCAD. De seguida as plantas foram importadas para o ArcGIS, onde foram rodadas de forma a coincidirem com a sua orientação geográfica efectiva. Esta operação foi efectuada através do mapeamento de alguns dos seus pontos mais característicos em imagens de satélite. Foram também adicionados os POI e a informação que lhes está associada, informação essa que é posteriormente usada no jogo.

Após a realização destas operações, as *layers* do projecto do ArcGIS foram exportadas para *shapefiles*, que seriam depois importadas para o seu destino final, uma base de dados do PostGIS.

Na aplicação cliente a leitura dos mapas da base de dados é realizada a partir da biblioteca GeoTools [kn:11e]. Esta biblioteca inclui inúmeras ferramentas úteis para o manuseamento de dados geoespaciais. A gestão da renderização do mapa e das *layers* presentes nele, é feita utilizando também conceitos definidos pelo GeoTools. As pesquisas sobre a base de dados geográfica (como a detecção de intersecções do movimento de 1000 partículas com as paredes do mapa) são igualmente melhoradas com o uso de estruturas optimizadas para o efeito, como é o caso das árvores R.

4.4.3 Outras bibliotecas utilizadas

A comunicação com o receptor GPS é efectuada através de Bluetooth, recorrendo à biblioteca BlueCove [kn:11d] que fornece uma implementação para a especificação JSR-82 do *Java*.

Essa especificação é utilizada por outra biblioteca, OpenLAPI [kn:11g], para processar os dados provenientes do receptor GPS e assim obter os dados de posicionamento e precisão necessários para a aplicação.

Para a representação gráfica do *input* recebido na porta de série e do valor de outras variáveis importantes no contexto do sistema, é utilizada uma biblioteca otimizada para a geração de gráficos em tempo real, LiveGraph [kn:11f].

4.5 Servidor e comunicação cliente-servidor

No contexto do protótipo implementado, o papel do servidor é bastante minimalista, limitando-se à gestão da pontuação de cada uma das equipas: processando mensagens de actualização que lhe possam ser enviadas e respondendo a pedidos de classificação. Por esta mesma razão não foi necessária a implementação no protótipo de qualquer tipo de técnica de minimização dos efeitos negativos da latência (*e.g. dead reckoning*).

A comunicação entre a aplicação cliente e a aplicação servidor é garantida pela implementação das classes de cliente e servidor da *framework* Apache MINA [kn:11b]. As mensagens trocadas entre as aplicações são enviadas sobre o protocolo UDP em formato de texto, com codificação UTF-8 para garantir a versatilidade da plataforma.

4.6 Testes

Para avaliar a qualidade da solução proposta como um todo, foram realizados alguns testes à plataforma no bloco IV do edifício B. Como foi referido anteriormente, todo o edifício regista fortes interferências magnéticas, sendo até difícil encontrar em algumas zonas um local livre de perturbações para realizar a calibração inicial do intervalo de confiança do magnetómetro. Estas condições são por um lado benéficas para a demonstração da capacidade do sistema reagir a situações adversas, mas também podem ser responsáveis pela introdução de erros, caso ocorram interferências durante a fase de calibração.

Nesta secção são disponibilizados graficamente os resultados da realização de dois percursos diferentes com 4 configurações distintas cada.

O primeiro percurso realizou-se andando em linha recta ao longo duma secção do corredor principal do edifício B da FEUP, rodando 180° (em movimento) e retornando ao mesmo local. Com esta experiência pretendia-se avaliar todas as componentes base do sistema PDR (determinação da orientação, detecção de passos e estimativa do seu comprimento), bem como a influência da técnica de detecção de interferências magnéticas.

A segunda trajectória contém um percurso inicial em linha recta ao longo do corredor principal do edifício B, seguido duma rotação de 90° à direita para um dos corredores perpendiculares ao anterior. Esse corredor é percorrido durante algum tempo em linha recta, sendo efectuado de seguida o trajecto oposto até à chegada ao local de partida.

Neste teste, para além das valências avaliadas na experiência anterior, pretendeu-se medir o desempenho do filtro de partículas na eliminação de trajetórias impossibilitadas pelas características do local (paredes).

4.6.1 Percurso 1 - linha recta

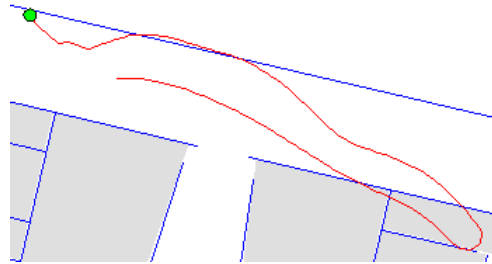


Figura 4.6: Percurso em linha recta com os dados originais

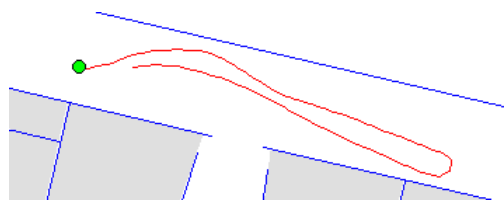


Figura 4.7: Percurso em linha recta com detecção de interferências

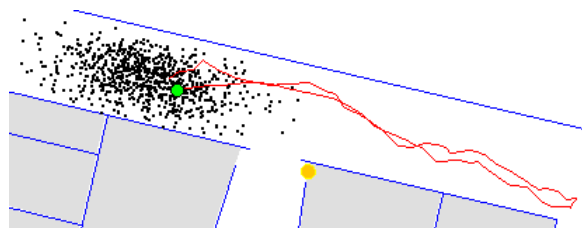


Figura 4.8: Percurso em linha recta com detecção de interferências e filtro de partículas simples

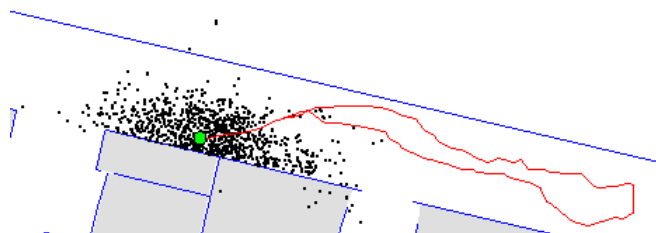


Figura 4.9: Percurso em linha recta com detecção de interferências e filtro de partículas com ER

4.6.2 Percurso 2 - mudança de direcção

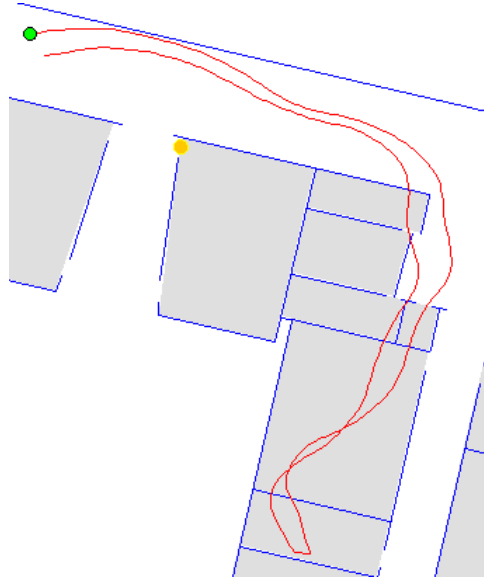


Figura 4.10: Percurso com mudança de direcção com os dados originais

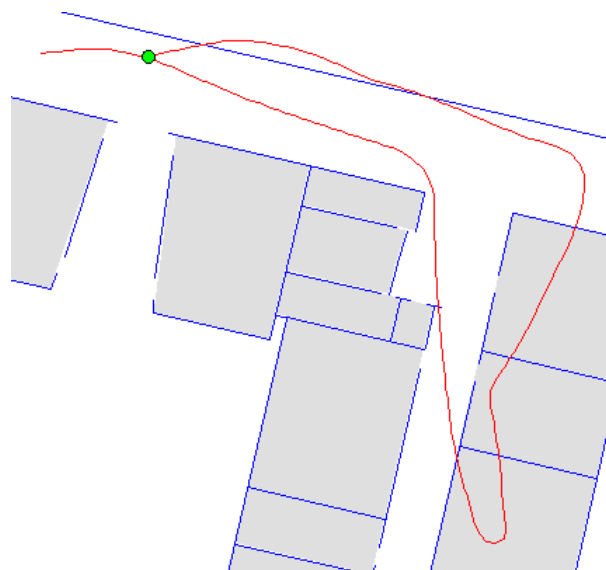


Figura 4.11: Percurso com mudança de direcção com detecção de interferências

Implementação

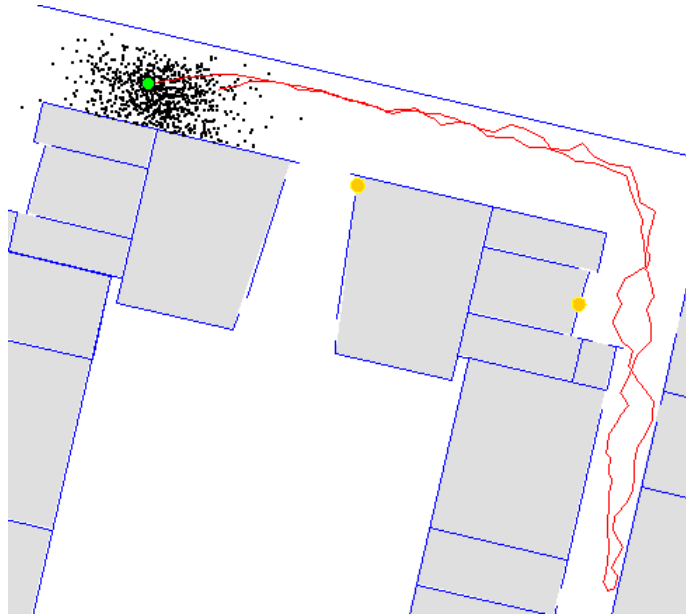


Figura 4.12: Percurso com mudança de direção com detecção de interferências e filtro de partículas simples

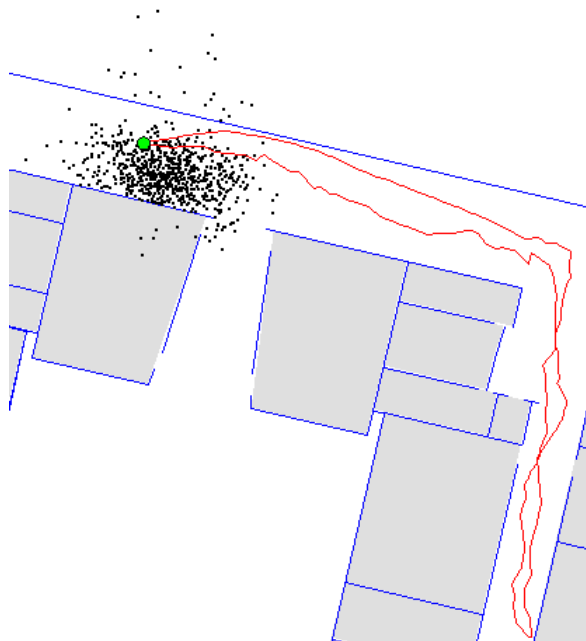


Figura 4.13: Percurso com mudança de direção com detecção de interferências e filtro de partículas com ER

4.6.3 Análise de resultados

Os resultados obtidos traduzem uma evolução qualitativa particularmente significativa com a introdução do filtro de partículas. A otimização acrescentada pelo ER não teve

aqui grande visibilidade dado ser mais orientada a utilizações longas, ou casos muito específicos como o referido na secção 3.1.3.6. São no entanto visíveis os efeitos da utilização deste algoritmo de *resampling* nas figuras 4.9 e 4.13. Analisando a distribuição das partículas nessas experiências, pode-se reparar que, ao contrário do que acontece nos testes realizados com o algoritmo de reamostragem simples, existem já algumas partículas em zonas que seriam teoricamente inacessíveis se a aproximação do filtro à pdf do estado do sistema fosse totalmente representativa. Desta forma é garantida uma representação mais abrangente da posição, englobando possíveis erros que são descartados pela abordagem tradicional.

A aplicação do método de identificação das interferências magnéticas porém, apesar de remover grande parte das perturbações, não foi capaz de, por si só, garantir a correcta orientação do dispositivo. Tal facto pode dever-se a vários factores: a ocorrência de pequenas interferências durante a fase de calibração, a desadequação de algumas das constantes utilizadas na determinação do intervalo de confiança, ou a incapacidade do método em identificar todas as interferências por si só (e.g. existência de interferências que não afectam consideravelmente o norma da força magnética total, mas são ainda assim capazes de influenciar a orientação).

Implementação

Capítulo 5

Conclusões e Trabalho Futuro

Ao longo da elaboração desta dissertação foram encontrados vários problemas de áreas distintas, cujas soluções apresentadas neste documento, vão desde o processamento de sinal até à implementação da teoria de Bayes. A grande maioria destes problemas tem sido alvo de intensa actividade científica, o que tem originado um aumento assinalável da quantidade e qualidade das soluções existentes, em especial na área da localização *indoor*. Esta evolução, em conjunto com aquela que também é verificada na área do *hardware* e com a galopante massificação da utilização de *smartphones*, pode muito em breve levar a que esta área, até agora tipicamente académica, atinja a "maturidade científica" e seja transportada para o mercado dos serviços baseados em localização [Won].

Por outro lado, no caso do *outdoor*, os GNSS – e mais concretamente o GPS – apresentam-se claramente como as soluções de referência. Prevê-se que esta situação se mantenha no futuro, dado que estão a ser realizados esforços significativos no sentido de modernizar e expandir as constelações existentes.

A junção das duas componentes de localização com a criação duma plataforma de localização ubíqua, tem um nível de aplicabilidade extremamente vasto e vários casos de uso podem ser equacionados. Dentro destes podem-se destacar alguns:

- navegação *indoor* em espaços públicos como: museus, aeroportos ou centros comerciais;
- conjugação com técnicas de realidade aumentada para fundir o virtual com o real duma forma mais imersiva;
- melhoramento da precisão fina do GPS e suavização das alterações de posição detectadas por este sistema;

Conclusões e Trabalho Futuro

- criação de novos serviços de publicidade *location based* com informação de proximidade a respeito de possíveis promoções ou informações relevantes para o utilizador;
- jogos (sérios ou de entretenimento puro);
- ajuda na navegação de pessoas com deficiência visual [MK];
- utilização da navegação em situações de emergência [Bea06];
- utilização militar [LvSS⁺02].

Na duração relativamente curta da dissertação, foi possível construir uma solução que implementa vários métodos do estado da arte mais recente. A solução final apresenta resultados motivadores em condições bastante adversas (*vide Testes*) e fornece uma boa base para a criação de jogos sérios e outros produtos e serviços baseados em localização ubíqua. Existem, no entanto, diversas funcionalidades que podem ser adicionadas ao trabalho já realizado e que comportariam um melhoramento da sua qualidade:

- expandir para 3 dimensões a navegação em recintos fechados, com a possível adição dum barómetro como em [SKS01] e a expansão dos mapas utilizados para considerarem também a altura,
- remover a necessidade de utilização dum determinado tipo de circuito de calibração na adaptação dos pesos das características do movimento à pessoa,
- padronizar a localização alterando o sistema de coordenadas de cartesiano para geográfico global,
- melhoramento do algoritmo de detecção de interferências (por exemplo, combinando-o com a informação sobre o ângulo de *dip*),
- incluir a detecção de marcas fiduciais para os casos onde a precisão é mais crítica,
- integrar o reconhecimento de características naturais da imagem na localização *in-door*,
- adicionar mais informação relevante ao mapa e fornecer novos serviços de posicionamento como a navegação (para além do simples posicionamento actual),
- implementar um visualizador de realidade aumentada,
- migrar a aplicação para um *smartphone* que possua todos os sensores necessários,
- implementar e testar outros métodos de estimativa do comprimento do passo como o uso de redes neuronais,

Conclusões e Trabalho Futuro

- utilizar o acelerómetro para obter mais informação sobre a direcção de cada passo e assim minimizar o erro associado a passos laterais,
- desenvolver um jogo mais exigente do ponto de vista comunicacional que permitisse uma maior interacção entre jogadores,
- criar uma ligação complementar cliente-servidor baseada em TCP que possa ser usada para a comunicação mais crítica e ocasional, limitando assim a ligação UDP às mensagens mais frequentes, o que possibilitaria inclusive a fácil introdução de codificações comunicacionalmente mais eficientes que o UTF-8 sem a perda da generalidade da plataforma.

Pode-se pois concluir que, apesar do trabalho já desenvolvido e dos resultados alcançados, a margem de progressão é elevada e o futuro auspicioso para os projectos que se venham a desenvolver nesta área.

Conclusões e Trabalho Futuro

Referências

- [ABB⁺01] Ronald Azuma, Yohan Baillot, Reinhold Behringer, Steven Feiner, Simon Julier e Blair MacIntyre. Recent advances in augmented reality. *IEEE Comput. Graph. Appl.*, 21:34–47, November 2001.
- [AGLA06] D. Alvarez, R.C. Gonzalez, A. Lopez e J.C. Alvarez. Comparison of step length estimators from wearable accelerometer devices. In *Engineering in Medicine and Biology Society, 2006. EMBS '06. 28th Annual International Conference of the IEEE*, pages 5964 –5967, 30 2006-sept. 3 2006.
- [AHC05] Omar Ait Aider, Philippe Hoppenot e Etienne Colle. A model-based method for indoor mobile robot localization using monocular vision and straight-line correspondences. *Robotics and Autonomous Systems*, 52(2-3):229 – 246, 2005.
- [AKWT10] C. Ascher, C. Kessler, M. Wankerl e G.F. Trommer. Dual imu indoor navigation with particle filter based map-matching on a smartphone. In *Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 2010 International Conference on*, pages 1 –5, sept. 2010.
- [ALJ⁺99] Ronald Azuma, Jong Weon Lee, Bolan Jiang, Jun Park, Suyu You e Ulrich Neumann. Tracking in unprepared environments for augmented reality systems. *Computers & Graphics*, 23(6):787 – 793, 1999.
- [AMGC01] Sanjeev Arulampalam, Simon Maskell, Neil Gordon e Tim Clapp. A tutorial on particle filters for on-line non-linear/non-gaussian bayesian tracking. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 50:174–188, 2001.
- [ARJS95] K. Aminian, P. Robert, E. Jequier e Y. Schutz. Estimation of speed and incline of walking using neural network. *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, 44(3):743 –746, jun 1995.
- [Arm11] United States Army. America’s army, 2011. <http://www.americasarmy.com>, acedido em 10 Fev 2011.
- [Ass11a] Entertainment Software Association. Industry facts, 2011. <http://www.theesa.com/facts/index.asp>, acedido em 10 Fev 2011.
- [Ass11b] National Marine Electronics Association. Nmea 0183, 2011. <http://www.nmea.org/store/index.asp?show=cprd&cid=8>, acedido em 20 Fev 2011.

REFERÊNCIAS

- [Ass11c] National Marine Electronics Association. Nmea data, 2011. <http://www.gpsinformation.org/dale/nmea.htm>, acessado em 20 Fev 2011.
- [Aus09] Pedometers Australia. Measure step length, 2009. <http://www.pedometersaustralia.com/g/13868/measure-step-length.html>, acessado em 22 Mar 2011.
- [Bad11] Glenn Baddeley. Gps - nmea sentence information, 2011. <http://home.mira.net/~gnb/gps/nmea.html>, acessado em 20 Fev 2011.
- [Bar97] David Baraff. An introduction to physically based modeling: Rigid body simulation i - unconstrained rigid body dynamics. 1997.
- [Bea06] Stéphane Beauregard. A helmet-mounted pedestrian dead reckoning system. *Applied Wearable Computing (IFAWC), 2006 3rd International Forum on*, pages 1 –11, march 2006.
- [Bea09] Stéphane Beauregard. *Infrastructureless Pedestrian Positioning*. PhD thesis, Faculty of Mathematics and Informatics - University of Bremen, 2009.
- [BH06] Stéphane Beauregard e Harald Haas. Pedestrian dead reckoning: A basis for personal positioning. WPNC'06, 2006.
- [BHW] S. Beauregard, Haas e Wpnc. Pedestrian dead reckoning: A basis for personal positioning.
- [BHWW07] Herbert Lichtenegger Bernhard Hofmann-Wellenhof e Elmar Wasle. *GNSS - Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*. Springer, 2007.
- [Bri05] Tim; Lyon Geoff; Pradhan Salil Brignone, Cyril; Connors. Smartlocus: an autonomous, self-assembling sensor network for indoor asset and systems management. 2005.
- [CCC+05] Yi-Chao Chen, Ji-Rung Chiang, Hao-hua Chu, Polly Huang e Arvin Wen Tsui. Sensor-assisted wi-fi indoor location system for adapting to environmental dynamics. In *Proceedings of the 8th ACM international symposium on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems, MSWiM '05*, pages 118–125, New York, NY, USA, 2005. ACM.
- [CHHL06] Kuan-Ta Chen, Chun-Ying Huang, Polly Huang e Chin-Laung Lei. An empirical evaluation of tcp performance in online games. In *Proceedings of the 2006 ACM SIGCHI international conference on Advances in computer entertainment technology, ACE '06*, New York, NY, USA, 2006. ACM.
- [CP09] Holly Stevens Christy Pettey. Gartner says consumer location-based services market will more than double in 2009, 2009. <http://www.gartner.com/it/page.jsp?id=1059812>, acessado em 10 Fev 2011.
- [Dem96] John V Dempsey. Instructional Applications of Computer Games. Research/technical, University of South Alabama, 1996. 13p.; Paper presented at the Annual Meeting of the American Educational Research Association, New York, NY – April 8–12, 1996.

REFERÊNCIAS

- [Der07] Anne Derryberry. Serious games: Online games for learning. 2007. White Paper.
- [Dif] Diffen. Tcp vs udp.
- [DW01] Hugh Durrant-Whyte. Multi sensor data fusion, 2001.
- [ECR05] Daniel Zaldivar Erik Cuevas e Raul Rojas. Particle filter in vision tracking. Technical report, Freie Universität Berlin, 2005.
- [Ele11] SparkFun Electronics. 9 degrees of freedom - razor imu - ahrs compatible, 2011. <http://www.sparkfun.com/products/9623>, acedido em 17 Jun 2011.
- [EMN05] F. Evennou, F. Marx e E. Novakov. Map-aided indoor mobile positioning system using particle filter. In *Wireless Communications and Networking Conference, 2005 IEEE*, volume 4, pages 2490 – 2494 Vol. 4, 2005.
- [Fed06] Federation of American Scientists. *Summit on Educational Games: Harnessing the power of video games for learning*, October 2006.
- [FHG02] Urban Forssell, P. Hall e Fredrik Gustafsson. Novel map-aided positioning system. In *Proc. of FISITA, Helsinki*, Jun 2002.
- [Fis99] Tony Fisher. Interactive digital filter design, 1999. <http://www-users.cs.york.ac.uk/~fisher/mkfilter/>, acedido em 7 Mai 2011.
- [FJ10] Xiaoyan Fu e Yingmin Jia. An improvement on resampling algorithm of particle filters. *Signal Processing, IEEE Transactions on*, 58(10):5414 – 5420, oct. 2010.
- [FMHG08] Carl Fischer, Kavitha Muthukrishnan, Mike Hazas e Hans Gellersen. Ultrasound-aided pedestrian dead reckoning for indoor navigation. In *Proceedings of the first ACM international workshop on Mobile entity localization and tracking in GPS-less environments, MELT '08*, pages 31–36, New York, NY, USA, 2008. ACM.
- [GM99] V. Gabaglio e B. Merminod. Real-Time calibration of Length of Steps with GPS and accelerometers. In *Global Navigation Satellite System, GNSS, Genova, Italy*, volume 2, pages 599–605, 1999.
- [Gra00] Brian Barkley Graham. Using an accelerometer sensor to measure human hand motion, 2000.
- [GSS93] N.J. Gordon, D.J. Salmond e A.F.M. Smith. Novel approach to nonlinear/non-gaussian bayesian state estimation. *Radar and Signal Processing, IEE Proceedings F*, 140(2):107 –113, apr 1993.
- [HC08] C.J. Hegarty e E. Chatre. Evolution of the global navigation satellitesystem (gnss). *Proceedings of the IEEE*, 96(12):1902 –1917, 2008.
- [HGMT07] Gabriel M. Hoffmann, Dimitry Gorinevsky, Robert W. Mah e Claire J. Tomlin. Fault tolerant relative navigation using inertial and relative sensors, 2007.

REFERÊNCIAS

- [HH06] M. Hazas e A. Hopper. Broadband ultrasonic location systems for improved indoor positioning. *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, 5(5):536 – 547, May 2006.
- [HHS⁺99] Andy Harter, Andy Hopper, Pete Steggles, Andy Ward e Paul Webster. The anatomy of a context-aware application. In *Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking, MobiCom '99*, pages 59–68, New York, NY, USA, 1999. ACM.
- [HHTF01] Tobias Höllerer, Drexel Hallaway, Navdeep Tinna e Steven Feiner. Steps toward accommodating variable position tracking accuracy in a mobile augmented reality system. In *In Proc. AIMS'01*, pages 31–37, 2001.
- [HK10] Shuang Hua Yang Hakan Koyuncu. A survey of indoor positioning and object locating systems, 2010.
- [Ho05] Chin Keong Ho. Short introduction to particle filter, 2005.
- [HVBW01] Jeffrey Hightower, Chris Vakili, Gaetano Borriello e Roy Want. Design and calibration of the spoton ad-hoc location sensing system. Technical report, 2001.
- [Inc] Wolfram Research Inc. Infinitesimal rotation. <http://mathworld.wolfram.com/InfinitesimalRotation.html>, acessado em 20 Mai 2011.
- [Inc11a] Skyhook Inc. Core engine performance, 2011. <http://www.skyhookwireless.com/howitworks/performance.php>, acessado em 7 Jan 2011.
- [Inc11b] Wikimedia Foundation Inc. 3g, 2011. <http://en.wikipedia.org/wiki/3G>, acessado em 10 Fev 2011.
- [Inc11c] Wikimedia Foundation Inc. 4g, 2011. <http://en.wikipedia.org/wiki/4G>, acessado em 10 Fev 2011.
- [Inc11d] Wikimedia Foundation Inc. Bessel filter, 2011. http://en.wikipedia.org/wiki/Bessel_filter, acessado em 7 Mai 2011.
- [Inc11e] Wikimedia Foundation Inc. Chapman–kolmogorov equation, 2011. http://en.wikipedia.org/wiki/Chapman%E2%80%9393Kolmogorov_equation, acessado em 17 Jun 2011.
- [Inc11f] Wikimedia Foundation Inc. Gaussian function, 2011. http://en.wikipedia.org/wiki/Gaussian_function, acessado em 23 Mai 2011.
- [Inc11g] Wikimedia Foundation Inc. Global positioning system, 2011. http://en.wikipedia.org/wiki/Global_Positioning_System, acessado em 5 Jan 2011.

REFERÊNCIAS

- [Inc11h] Wikimedia Foundation Inc. Linear regression, 2011. http://en.wikipedia.org/wiki/Linear_regression, acessado em 13 Mai 2011.
- [Inc11i] Wikimedia Foundation Inc. Low-pass filter, 2011. http://en.wikipedia.org/wiki/Low-pass_filter#Algorithmic_implementation, acessado em 7 Mai 2011.
- [Inc11j] Wikimedia Foundation Inc. Nmea 0183, 2011. http://en.wikipedia.org/wiki/NMEA_0183, acessado em 20 Fev 2011.
- [Inc11k] Wikimedia Foundation Inc. Proper acceleration, 2011. http://en.wikipedia.org/wiki/Proper_acceleration, acessado em 10 Jun 2011.
- [JTSC10] Tiago H. Falk Jorge Torres-Solis e Tom Chau. A review of indoor localization technologies: towards navigational assistance for topographical disorientation. 2010.
- [KHM⁺00] John Krumm, Steve Harris, Brian Meyers, Barry Brumitt, Michael Hale e Steve Shafer. Multi-camera multi-person tracking for easyliving. pages 3–10, 2000.
- [KHYA10] Hisato Kawaji, Koki Hatada, Toshihiko Yamasaki e Kiyoharu Aizawa. Image-based indoor positioning system: fast image matching using omnidirectional panoramic images. In *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Multimodal pervasive video analysis*, MPVA '10, pages 1–4, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [Kir] Chris Kirtley. Combination of a gyro sensor and accelerometer for stride length measurement.
- [KJHP04] Jeong Won Kim, Han Jin Jang, Dong-Hwan Hwang e Chansik Park. A step, stride and heading determination for the pedestrian navigation system. 2004.
- [KK03] M. Kouroggi e T. Kurata. A method of personal positioning based on sensor data fusion of wearable camera and self-contained sensors. In *Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, MFI2003. Proceedings of IEEE International Conference on*, pages 287 – 292, july-1 aug. 2003.
- [KKH05] Gab-Hoe Kim, Jong-Sung Kim e Ki-Sang Hong. Vision-based simultaneous localization and mapping with two cameras. In *Intelligent Robots and Systems, 2005. (IROS 2005). 2005 IEEE/RSJ International Conference on*, pages 1671 – 1676, 2005.
- [KLJS96] Jinwon Kim, Jang-Gyu Lee, Gyu-In Jee e Tae-Kyung Sung. Compensation of gyroscope errors and gps/dr integration. In *Position Location and Navigation Symposium, 1996., IEEE 1996*, pages 464 –470, April 1996.
- [kn:01] Global positioning system (gps) standard positioning service (sps) performance analysis report. Technical report, William J. Hughes Technical Center, 2001.

REFERÊNCIAS

- [kn:07] International standards and recommended practices - annex 10 to the convention on international civil aviation, volume 1, 2007.
- [kn:11a] Ahrs for sparkfun's 9dof razor imu, 2011. <http://code.google.com/p/sf9domahrs/>, acessado em 25 Mai 2011.
- [kn:11b] Apache mina, 2011. <http://mina.apache.org/>, acessado em 22 Feb 2011.
- [kn:11c] Arduino based imu & ahrs, 2011. <http://code.google.com/p/ardu-imu/>, acessado em 25 Mai 2011.
- [kn:11d] Bluecove, 2011. <http://bluecove.org/>, acessado em 7 Mar 2011.
- [kn:11e] Geotools, 2011. <http://www.geotools.org/>, acessado em 30 Abril 2011.
- [kn:11f] Livegraph, 2011. <http://www.live-graph.org/>, acessado em 24 Feb 2011.
- [kn:11g] Openlapi, 2011. <http://code.google.com/p/openlapi/>, acessado em 7 Mar 2011.
- [kn:11h] Rxtx wiki, 2011. http://rxtx.qbang.org/wiki/index.php/Main_Page, acessado em 20 Feb 2011.
- [Kow09] Kowoma. Waas and egnos, 2009. http://www.kowoma.de/en/gps/waas_egn timer .htm, acessado em 17 Junho 2011.
- [Kre08] B. Krenik. 4g wireless technology: When will it happen? what does it offer? In *Solid-State Circuits Conference, 2008. A-SSCC '08. IEEE Asian*, pages 141–144, 2008.
- [KSOK] Masakatsu Kouroggi, Nobuchika Sakata, Takashi Okuma e Takeshi Kurata. Indoor/outdoor pedestrian navigation with an embedded gps/rfid/self-contained sensor system. In *Proceedings of the 16th International conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT 2006*, pages 1310–1321.
- [Ku] Andrew Ku. Global positioning system (gps). http://services.eng.uts.edu.au/~kumbes/ra/Wireless_Networks/GPS/anderwku/gps.htm, acessado em 15 Jun 2011.
- [KWR06] Michael Angermann Kai Wendlandt, Mohammed Khider e Patrick Robertson. Continuous location and direction estimation with multiple sensors using particle filtering, 2006.
- [Lad00] Q. Ladetto. On foot navigation: continuous step calibration using both complementary recursive prediction and adaptive Kalman filtering. In *ION GPS 2000, Salt Lake City, Utah, USA*, 2000.
- [LB00] Wolfgang Lechner e Stefan Baumann. Global navigation satellite systems. *Computers and Electronics in Agriculture*, 25(1-2):67 – 85, 2000.

REFERÊNCIAS

- [LDBL07] Hui Liu, H. Darabi, P. Banerjee e Jing Liu. Survey of wireless indoor positioning techniques and systems. *Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on*, 37(6):1067–1080, 2007.
- [LGM⁺00] Q. Ladetto, V. Gabaglio, B. Merminod, Ph e Y. Schutz. Human Walking Analysis Assisted by DGPS. 2000.
- [LGM01] Q. Ladetto, V. Gabaglio e B. Merminod. Combining Gyroscopes, Magnetic Compass and GPS for Pedestrian Navigation. In *International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation (KIS), Banff, Canada*, pages 205–212, 2001.
- [LJ96] Robert W. Levi e Thomas Judd. Dead reckoning navigational system using accelerometer to measure foot impacts. December 1996. U.S. Patent Number 5,583,776.
- [LM02] Q. Ladetto e B. Merminod. Digital Magnetic Compass and Gyroscope Integration for Pedestrian Navigation. In *9th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, Saint Petersburg, Russia*, 2002.
- [LTH09] Kang Li, Han-Shue Tan e J.K. Hedrick. Map-aided gps/ins localization using a low-order constrained unscented kalman filter. In *Decision and Control, 2009 held jointly with the 2009 28th Chinese Control Conference. CDC/CCC 2009. Proceedings of the 48th IEEE Conference on*, pages 4607–4612, 2009.
- [LvSS⁺02] Q. Ladetto, J. van Seeters, S. Sokolowski, Z. Sagan e B. Merminod. Digital Magnetic Compass and Gyroscope for Dismounted Soldier Position & Navigation. In *Military Capabilities enabled by Advances in Navigation Sensors, Sensors & Electronics Technology Panel, NATO-RTO meetings, Istanbul, Turkey*, 2002.
- [Mau00] Martin Mauve. How to keep a dead man from shooting. In *Proceedings of the 7th International Workshop on Interactive Distributed Multimedia Systems and Telecommunication Services, IDMS '00*, pages 199–204, London, UK, 2000. Springer-Verlag.
- [MC08] I. Miller e M. Campbell. Particle filtering for map-aided localization in sparse gps environments. In *Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on*, pages 1834–1841, may 2008.
- [McD09] John H. McDonald. *Handbook of Biological Statistics*. Sparky House Publishing, Baltimore, Maryland, USA, second edition, September 2009.
- [MCH06] Robert Mahony, Sung-Han Cha e Tarek Hamel. A coupled estimation and control analysis for attitude stabilisation of mini aerial vehicles. November 2006.
- [MK] Yoshinari Kameda Jun Ishikawa Kyota Aoki Takeshi Kurata Masa-katsu Kouroggi, Tomoya Ishikawa. Pedestrian dead reckoning and its applications.

REFERÊNCIAS

- [MSS04] Alice Mitchell e Carol Savill-Smith. The use of computer and video games for learning - a review of the literature. Technical report, Learning and Skills Development Agency, 2004.
- [NLLP04] Lionel M. Ni, Yunhao Liu, Yiu Cho Lau e Abhishek P. Patil. Landmarc: Indoor location sensing using active rfid. *Wireless Networks*, 10:701–710, 2004. 10.1023/B:WINE.0000044029.06344.dd.
- [Nor93] D. Norman. *Things that make us smart: Defending human attributes in the age of the machine*. Perseus Books, 1993.
- [NPM01] Daniela Nicklas, Christoph Pfisterer e Bernhard Mitschang. *Towards Location-based Games*. In Alfred, Wan H. Man, Wong Wai e Cyril T. Ning, editors, *Proceedings of the International Conference on Applications and Development of Computer Games in the 21st Century: ADCOG 21; Hong-kong Special Administrative Region, China, November 22-23 2001*, pages 61–67. Universität Stuttgart : Sonderforschungsbereich SFB 627 (Nexus: Umgebungsmodelle für mobile kontextbezogene Systeme), Hong Kong: Division of Computer Studies, City University of Hong kong, Hong Kong SAR, China, November 2001.
- [OA] National Geophysical Data Center National Oceanic e Atmospheric Administration. Estimated value of magnetic declination. <http://www.ngdc.noaa.gov/geomagmodels/struts/calcDeclination>, acedido em 10 Abr 2011.
- [oC] University of Connecticut. Infinitesimal rotations. <http://web.uconn.edu/~ch351vc/pdfs/infrot.pdf>, acedido em 20 Mai 2011.
- [OG08] U. Orguner e F. Gustafsson. Risk-sensitive particle filters for mitigating sample impoverishment. *Signal Processing, IEEE Transactions on*, 56(10):5001–5012, oct. 2008.
- [OLS06] Dragan Obradovic, Henning Lenz e Markus Schupfner. Fusion of map and sensor data in a modern car navigation system. *The Journal of VLSI Signal Processing*, 45:111–122, 2006. 10.1007/s11265-006-9775-4.
- [OXM02] C.B. Owen, Fan Xiao e P. Middlin. What is the best fiducial? In *Augmented Reality Toolkit, The First IEEE International Workshop*, 2002.
- [PAC10] Paulo Pombinho, Ana Paula Afonso e Maria Beatriz Carmo. Indoor positioning using a mobile phone with an integrated accelerometer and digital compass. In *2º INForum - Simpósio de Informática*, September 2010.
- [Pas04] GPS Passion. Gps altitude: wgs84 / msl / geodetic corrections, 2004. http://www.gpspassion.com/forumsen/topic.asp?TOPIC_ID=10915, acedido em 15 Jun 2011.
- [PB09] William Premerlani e Paul Bizard. Direction cosine matrix imu: Theory. 2009.

REFERÊNCIAS

- [PCB00] Nissanka B. Priyantha, Anit Chakraborty e Hari Balakrishnan. The cricket location-support system. In *Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking, MobiCom '00*, pages 32–43, New York, NY, USA, 2000. ACM.
- [Pir05] Gabriel Pires. Filtros de partículas: Localização de um robô móvel. Technical report, Instituto de Sistemas e Robótica - DEEC - Universidade de Coimbra, 2005.
- [Pre04] Marc Prensky. *Digital Game-Based Learning*. McGraw-Hill, August 2004.
- [PSMT08] George Papagiannakis, Gurminder Singh e Nadia Magnenat-Thalmann. A survey of mobile and wireless technologies for augmented reality systems. *Comput. Animat. Virtual Worlds*, 19:3–22, February 2008.
- [PW02] Lothar Pantel e Lars C. Wolf. On the suitability of dead reckoning schemes for games. In *Proceedings of the 1st workshop on Network and system support for games, NetGames '02*, pages 79–84, New York, NY, USA, 2002. ACM.
- [RMCE06] Omer Rashid, Ian Mullins, Paul Coulton e Reuben Edwards. Extending cyberspace: location based games using cellular phones. *Phones, ACM Computers in Entertainment, Vol 4, Issue*, page 2006, 2006.
- [Roe06] Daniel Roetenberg. *Inertial and Magnetic Sensing of Human Motion*. PhD thesis, Universiteit Twente, 2006.
- [Sca11] Jim Scarlett. Enhancing the performance of pedometers using a single accelerometer, 2011. <http://www.analog.com/library/analogdialogue/archives/41-03/pedometer.html>, acedido em 15 Mai 2011.
- [SG05] David Salmond e Neil Gordon. An introduction to particle filters, 2005.
- [SGC06] G. Lachapelle S. Godha e M. E. Cannon. Integrated gps/ins system for pedestrian navigation in a signal degraded environment, 2006.
- [SKS01] Jari Syrjärinne, Jani Käppi e Jukka Saarinen. Mems-imu based pedestrian navigator for handheld devices. 2001.
- [Sli04] Lance D Slifka. An accelerometer based approach to measuring displacement of a vehicle body, 2004.
- [SLPH10] S. H. Shin, M. S. Lee, C. G. Park e Hyun Su Hong. Pedestrian dead reckoning system with phone location awareness algorithm. In *Position Location and Navigation Symposium (PLANS), 2010 IEEE/ION*, pages 97–101, may 2010.
- [Squ03] Kurt Squire. Video games in education. *International Journal of Intelligent Simulations and Gaming*, 2:49–62, 2003.
- [Ste07] Michael Steer. Beyond 3g. *Microwave Magazine, IEEE*, 8(1):76–82, 2007.

REFERÊNCIAS

- [Str93] Gilbert Strang. The fundamental theorem of linear algebra. *The American Mathematical Monthly*, 100(9):848–855, 1993.
- [Str01] Gilbert Strang. Applications to linear estimation: least squares. video, 2001. <http://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/45136/18-085Fall-2005/OcwWeb/Mathematics/18-085Fall-2005/VideoLectures/index.htm>, acessado em 13 Mai 2011.
- [Stu] Environmental Studies. Egnos and waas = modern dgps satellite systems. http://www.environmental-studies.de/Precision_Farming/EGNOS_WAAS__E/3E.html, acessado em 17 Junho 2011.
- [SYCY03] Chan Gook Park Seong Yun Cho e Hwa Young Yim. Sensor fusion and error compensation algorithm. 2003.
- [SZ03] Katie Salen e Eric Zimmerman. *Rules of play : game design fundamentals*. MIT Press, October 2003.
- [TCD⁺02] Bruce Thomas, Ben Close, John Donoghue, John Squires, Phillip De Bondi e Wayne Piekarski. First person indoor/outdoor augmented reality application: Arquake. *Personal Ubiquitous Comput.*, 6:75–86, January 2002.
- [TM11] Inc The MathWorks. Multiple linear regression, 2011. <http://www.mathworks.com/help/toolbox/stats/regress.html>, acessado em 16 Jun 2011.
- [Uni] International Telecommunication Union. Itu global standard for international mobile telecommunications 'imt-advanced'. <http://www.itu.int/ITU-R/index.asp?category=information&rlink=imt-advanced&lang=en>, acessado em 10 Fev 2011.
- [VA11] Kalyana C. Veluvolu e Wei Tech Ang. Estimation of physiological tremor from accelerometers for real-time applications. 2011.
- [VB07] S. Venkatesh e R.M. Buehrer. Non-line-of-sight identification in ultra-wideband systems based on received signal statistics. *Microwaves, Antennas Propagation, IET*, 1(6):1120–1130, 2007.
- [Wei] Eric W. Weisstein. Least squares fitting. <http://mathworld.wolfram.com/LeastSquaresFitting.html>, acessado em 13 Mai 2011.
- [WF08] Jr. Walt Fair. An algorithm for weighted linear regression, 2008. <http://www.codeproject.com/KB/recipes/LinReg.aspx>, acessado em 13 Mai 2011.
- [WFG92] Roy Want, Veronica Falcao e Jon Gibbons. The active badge location system. *ACM Transactions on Information Systems*, 10:91–102, 1992.
- [Wie] Elmer G. Wiens. Linear algebra: Systems of linear equations. <http://www.egwald.ca/linearalgebra/linearequations.php>, acessado em 13 Mai 2011.

REFERÊNCIAS

- [WJS09] Alf Inge Wang, Martin Jarrett e Eivind Sorteberg. Experiences from implementing a mobile multiplayer real-time game for wireless networks with high latency. *Int. J. Comput. Games Technol.*, 2009:6:1–6:14, January 2009.
- [WKP07] Widyawan, M. Klepal e D. Pesch. A bayesian approach for rf-based indoor localisation. In *Wireless Communication Systems, 2007. ISWCS 2007. 4th International Symposium on*, pages 133 –137, oct. 2007.
- [WLS⁺07] Hui Wang, Henning Lenz, Andrei Szabo, Joachim Bamberger e Uwe Hanebeck. Enhancing the map usage for indoor location-aware systems. In Julie Jacko, editor, *Human-Computer Interaction. Interaction Platforms and Techniques*, volume 4551 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 151–160. Springer Berlin / Heidelberg, 2007.
- [Won] Kevin Wong. Navteq’s destination maps provide mobile guidance through malls, outer reaches of your mind. <http://www.engadget.com>, acessado em 22 Mar 2011.
- [ZCY⁺10] Gong-Yuan ZHANG, Yong-Mei CHENG, Feng YANG, Quan PAN e Yan LIANG. Design of an adaptive particle filter based on variance reduction technique. *Acta Automatica Sinica*, 36:1020–1024, 2010.
- [ZS06] A.S. Zaidi e M.R. Suddle. Global navigation satellite systems: A survey. In *Advances in Space Technologies, 2006 International Conference on*, pages 84 –87, 2006.