Sistema Integrado de Navegação Robusta para um Robot Móvel

Emanuel A. Oliveira

Conteúdo

Lista de Figuras

Resumo

Como foi referido em [1], pretende-se neste trabalho o desenvolvimento de um sistema de navegação baseado em *dead-reckoning* usando odómetros e um giroscópio. O uso de tais sensores tem sido criticado por existir um crescimento não limitado do erro de posicionamento. No entanto, o *dead-reckoning* para além de apfresentar o menor custo é por vezes o único sistema possível de ser utilizado. O *dead-reckoning* pode também ser conjugado com outros métodos de navegação de modo a aumentar a precisão ou diminuir o uso de outros sistemas que envolvam um processamento de dados mais complexo. Pode-se desta forma concluir que o *dead-reckoning* deverá, sempre que possível, fazer parte de um sistema de navegação.

No âmbito deste projecto, os odómetros e o giroscópio são os sensores usados no sistema de *dead-reckoning*. Assim, é de vital importância o conhecimento das principais fontes de erro inerentes a este tipo de sensores.

Neste relatório serão estudados os erros associados aos odómetros e giroscópio e apresentadas formas de os quantificar e compensar.

Parte I

Odometria

Capítulo 1

Erros sistemáticos e erros aleatórios

1.1 Introdução

De uma forma geral, os erros em robótica mvel podem ser divididos em dois grandes grupos: erros sistemáticos e erros aleatórios ou não-sistemáticos. Nas secções seguintes serão abordados estes dois grupos de erros.

1.2 Erros sistemáticos

São considerados erros sistemáticos os erros que, inerentes ao sistema, apresentam um valor previsível e constante. Desta forma, o valor lido é desviado do valor real de uma forma também constante e previsível.

No caso de um robot com duas rodas motrizes e controlo diferencial, são várias as fontes de erros sistemáticos [2]:

- Incerteza no contacto entre as rodas e o chão, devido ao contacto não pontual;
- Diâmetro diferente das rodas;
- Diâmetro da(s) rodas diferente do valor nominal;
- Desalinhamento das rodas;
- Resolução limitada dos odómetros;
- Taxa de amostragem aos odómetros finita.

Segundo Borenstein [2] os erros sistemáticos mais relevantes são os associados à incerteza no contacto entre a roda e o chão e os erros associados ao diferente diâmetro das rodas.

Baseado neste pressuposto foi desenvolvido por Borenstein [2] um método de medição e correcção dos erros sistemáticos, que será apresentado no caítulo 3.

1.3 Erros não-sistemáticos

Este tipo de erros distingue-se do anterior, devido à não previsibilidade, dado que são resultado da interacção do robot com características imprevisíveis do ambiente onde se desloca, como por exemplo:

- Piso irregular;

- Escorregamento das rodas (devido a chão escorregadio, rápida aceleração ou travagem, viragem rápida ou ao contacto não pontual com o chão).

Devido à não previsibilidade, estes erros tornam-se bastante difíceis de corrigir. É neste contexto que o giroscópio a aplicar neste trabalho tomará vital importância. Espera-se com este dispositivo medir a ocorrência de erros não-sistemáticos, para dessa forma corrigir a trajectória do robot.

Capítulo 2

Erros sistemáticos em robótica móvel

Dadas as características apresentadas pelos erros sistemáticos, torna-se bastante importante conhecer a sua influência na navegação de um robot.

Como já foi referido na secção 1, são dois os tipos de erros sistemáticos que assumem um papel mais preponderante nos erros de posição de um robot. Eles são:

- Incerteza na distância entre rodas (devido ao contacto não pontual entre as rodas e o chão);
- Diâmetro diferente das rodas.

Antes de iniciar o estudo sobre a influência destes dois tipos de erros no comportamento do robot, será analisado o caso ideal. Nesta situação as rodas possuem diâmetros iguais e o contacto entre as rodas e o chão e feito num ponto conhecido. Por facilitar a análise, será considerado que este contacto pontual é centrado na largura das rodas.

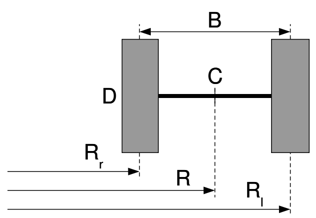

Figura 2.1: Cinemática para um robot ideal

Na imposição de um movimento ao robot é necessário escolher as velocidades a aplicar a cada uma das rodas. O controlo da velocidade de robot é feito analisando as velocidades angulares das rodas. A partir da velocidade angular é determinada a velocidade linear de cada roda da seguinte forma:

$$V_\omega = \omega \frac{D}{2} \tag{2.1}$$

onde,
V_w - velocidade linear da roda
ω_w - velocidade angular da roda
D - diâmetro da roda

Quando se pretende que o robot descreva uma trajectória curva, são impostas velocidades diferentes às rodas, consoante o raio de curvatura e velocidade angular da trajectória. Estas duas grandezas relacionam-se com as velocidades lineares das rodas do seguinte modo:

$$\begin{cases} V_l = \omega(R - B/2) \\ V_r = \omega(R + B/2) \end{cases} \tag{2.2}$$

onde,
V_r - velocidade linear da roda direita
V_l - velocidade linear da roda esquerda
ω - velocidade angular do robot
R - raio da curvatura
B - distância entre rodas

Adicionando e subtraindo ambas expressões, obtém-se:

$$V = \frac{V_r + V_l}{2} \tag{2.3}$$

$$\omega = \frac{V_r - V_l}{B} \tag{2.4}$$

onde,
V - velocidade linear do ponto C (ver figura 2.1)

Das expressões 2.3 e 2.4, podemos escrever que:

$$R = \frac{V_r + V_l}{V_r - V_l} \frac{B}{2} \tag{2.5}$$

É baseado nas expressões atrás deduzidas que são impostas velocidades às rodas, levando o robot a descrever a trajectória desejada.

No entanto, duas considerações foram feitas:

a) Os diâmetros das rodas são iguais e conhecidos pelo que as velocidades lineares V_r e V_l, são também conhecidas, isto para uma dada velocidade angular das rodas;

b) A distância entre rodas, ou seja, a distância entre os pontos de contacto entre as rodas e o chão, é conhecida e igual a B.

A seguir serão analisadas quais as consequências da incerteza em relação ao ponto de contacto entre as rodas e o chão e da diferença de diâmetros das mesmas.

2.1 Incerteza do contacto entre as rodas e o chão

Na definição das velocidades a impor às rodas do robot para este efectuar uma dada trajectória, um dado deverá ser conhecido previamente: a distância entre rodas.

Esta distância é determinada admitindo um contacto pontual entre as rodas e o chão, contacto esse feito no ponto central da largura da roda (distância B na figura 2.2).

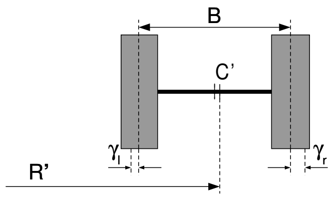

Figura 2.2: Incerteza no contacto entre as rodas e o chão

Para além do contacto entre rodas e o chão não ser pontual, problemas tais como irregularidades no chão ou nas rodas podem influenciar a distância entre rodas B.

Quando o robot descreve um percurso recto, as diferenças no ponto de contacto entre a roda e o chão não influenciam a trajectória. O problema coloca-se quando o robot curva.

Considere-se γ_l e γ_r (ver figura 2.2) a distância entre o ponto central da largura da roda e o ponto de contacto entre a roda e o chão, para as rodas esquerda e direita, respectivamente.

Adaptando as expressões 2.2, temos:

$$\begin{cases} V_l = \omega(R - B/2 - \gamma_l) \\ V_r = \omega(R + B/2 + \gamma_r) \end{cases} \tag{2.6}$$

Adicionando e subtraindo ambas expressões, obtém-se:

$$\omega = \frac{V_r - V_l}{B + \gamma_r + \gamma_l} \tag{2.7}$$

$$V = \frac{V_r + V_l}{2} = \omega R' \tag{2.8}$$

onde,

$$R' = R + \frac{\gamma_r - \gamma_l}{2} \tag{2.9}$$

A partir das expressões 2.7 e 2.8 duas observações podem ser feitas:

- Quando são impostas velocidades às rodas de igual módulo mas simétricas, de forma a o robot rodar em torno do seu próprio eixo, o ponto central das duas rodas descreve uma circunferência de raio $R' = (\gamma_l - \gamma_r)/2$ (ver figura 2.3);
- A velocidade angular é afectada pelo factor $(\gamma_l + \gamma_r)$ de acordo com a expressão 2.7;

No Apêndice A, são apresentadas um conjunto de funções e *scripts* desenvolvidos em *Octave*[1], afim de ilustrar o efeito dos tipos de erros aqui estudados.

Na figura 2.3, pode-se ver o deslocamento do ponto central entre as rodas quando o robot executa uma rotação de 360° sobre o seu próprio eixo.

Na figura 2.4 são apresentados os percursos para o caso em que $\gamma_l \neq \gamma_r$ (figura 2.4.A) e $\gamma_l = \gamma_r$ (figura 2.4.B).

Pode-se verificar que caso $\gamma_l = \gamma_r$, depois do percurso curvilíneo, não existe erro de orientação, pois a distância entre as rodas manteve-se. Este facto é bastante importante e será novamente abordado na apresentação do método de medição de erros sistemáticos (secção 4).

[1] http://www.che.wisc.edu/octave/

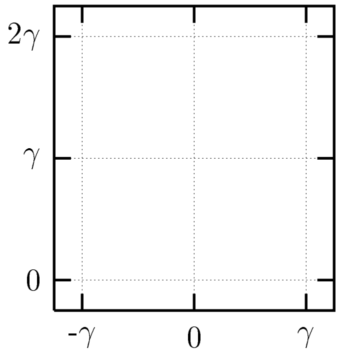

Figura 2.3: Deslocamento do ponto central entre as rodas para $\gamma_l = \gamma_r = \gamma$

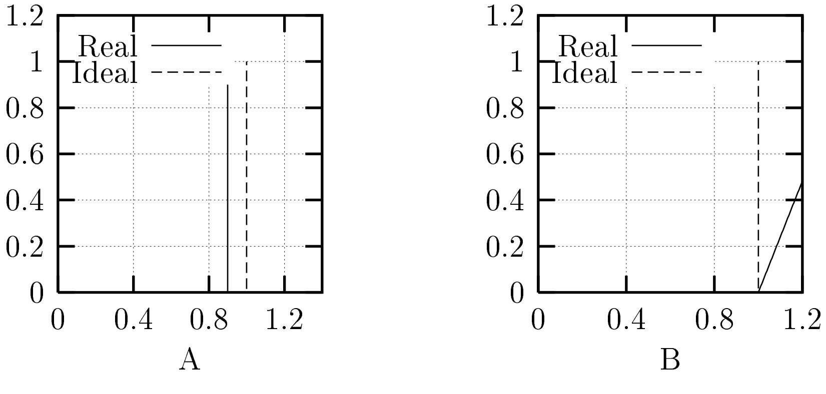

Figura 2.4: Influência do erro de incerteza no contacto entre as rodas e o chão (A:$\gamma_l = -\gamma_r$ / B:$\gamma_l = \gamma_r$)

2.2 Diâmetro diferente das rodas

A diferença dos diâmetros das rodas afecta o movimento, quer este se trate de um percurso recto, curvilíneo ou rotação sobre o próprio eixo. Assim, vamos dividir a análise da influência deste erro em duas partes: influência do diferente diâmetro das rodas na rotação e influência do diâmetro diferente das rodas num percurso recto.

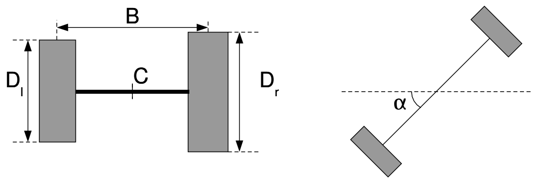

Figura 2.5: Diâmetro diferente das rodas

2.2.1 Influência do diâmetro diferente das rodas na rotação

Vamos nesta secção analisar a influência da diferença dos diâmetros das rodas no rotação do robot sobre o ponto central entre a rodas.

Admitindo que é imposto, a ambas as rodas, uma velocidade angular ω_w, durante um tempo fixo t_0, no caso ideal, ou seja, quando $D_l = D_r = D$, a distância P percorrida por cada uma das rodas é dada por:

$$P = \omega_w \frac{D}{2} t_0 \tag{2.10}$$

Assumindo que $R_l = R_r = B/2$, pode-se escrever:

$$\alpha = \frac{2P}{B} = \frac{\omega_w D t_0}{B} \tag{2.11}$$

onde α corresponde ao ângulo descrito pelo robot.

Para o caso em que $D_l \neq D_r$ pode-se afirmar que o ângulo descrito por cada uma das rodas é igual (α'), sendo as distâncias percorridas diferentes e dadas por:

$$\begin{cases} P_l = \omega_w \dfrac{D_l}{2} t_0 \\ \\ P_r = \omega_w \dfrac{D_r}{2} t_0 \end{cases} \tag{2.12}$$

Adicinando ambas expressões e sabendo que $R_l+R_r = B$, pode-se escrever que:

$$\alpha' = \frac{\omega_w(D_l + D_r)t_0}{2B} \tag{2.13}$$

Dividindo a expressão (2.13) por (2.11), resulta que:

$$\alpha' = \frac{D_l + D_r}{2}\frac{1}{D}\alpha \tag{2.14}$$

Reescrevendo a expressão (2.14), tem-se:

$$\alpha' = \frac{\frac{D_l + D_r}{2}}{D}\alpha = \frac{D_{avg}}{D}\alpha \tag{2.15}$$

Desta expressão duas observações poderão ser feitas:

- Não existem erros de orientação quando o valor médio dos diâmetros das rodas é igual ao valor nominal;
- O erro de orientação depende do valor médio dos diâmetros das rodas. Para $D_{avg} > D$ ou $D_{avg} < D$ a rotação efectiva será, respectivamente, maior ou menor que a rotação esperada.

2.2.2 Influência do diâmetro diferente das rodas num percurso recto

Nesta secção será apenas analisado o caso do percurso recto, pois para além de no percurso curvilíneo o efeito do diâmetro diferente das rodas se fazer sentir do mesmo modo, no caso de um percurso recto esse efeito é mais notado.

Na figura 6 apresenta a diferença das trajectórias com e sem a presença do erro associado à diferença nos diâmetros das rodas.

Sabendo que as velocidades lineares de cada uma das rodas são dadas pelas expressões

$$\begin{cases} V_l = \dfrac{\omega_w D_l}{2} \\ V_r = \dfrac{\omega_w D_r}{2} \end{cases} \tag{2.16}$$

onde,
ω_w - velocidade angular das rodas

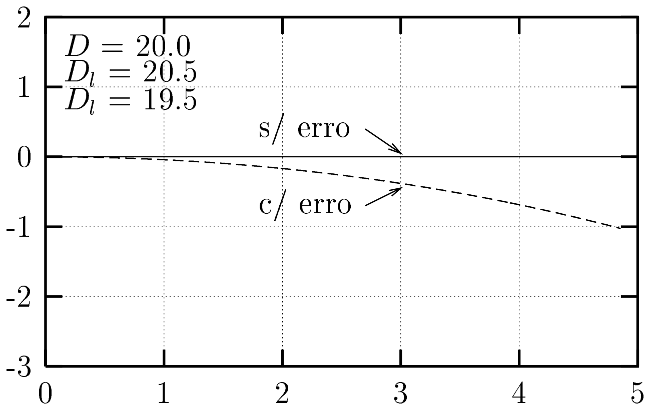

Figura 2.6: Trajecto devido ao diferente diâmetro das rodas

D_l - diâmetro da roda esquerda
D_r - diâmetro da roda direita

Das expressões (2.5) e (2.16) podemos escrever que o raio de curvatura do trajecto é dado por:

$$R = \frac{D_r + D_l}{D_r - D_l}\frac{B}{2} \tag{2.17}$$

Designando por E_d a razão dos diâmetros das rodas (D_r/D_l), a expressão (2.5) poderá ser escrita da seguinte forma:

$$R = \frac{E_d + 1}{E_d - 1}\frac{B}{2} \tag{2.18}$$

Determinando a razão entre os diâmetros, a partir da expressão (2.17), obtém-se:

$$E_D = \frac{D_r}{D_l} = \frac{2R + B}{2R - B} \tag{2.19}$$

Atentemos para a figura 2.7. Na posição final, o robot apresentará uma orientação igual à variação angular entre as posições final e inicial.

Atendendo a este facto e considerando a expressão (2.4), podemos escrever que:

$$\omega = \frac{\omega_w}{2B}\left(D_r - D_l\right) \tag{2.20}$$

Assim, as seguintes observações podem ser feitas relativamente à influência do diâmetro diferente das rodas.

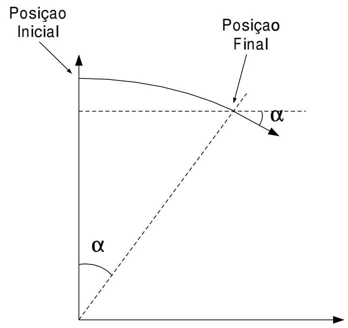

Figura 2.7: Variação do erro de orientação com a diferença do diâmetros das rodas

- O erro de posição é mais significativo na direcção perpendicular ao trajecto desejado do que na sua direcção, dado que é uma trajectória circular cujo raio é dado pelas expressões (2.17) ou (2.18);
- O erro de orientação é proporcional ao factor $(D_l - Dr)$ (ver expressão (2.20));

Capítulo 3

Método de medição e correcção de erros sistemáticos

O método a seguir apresentado foi proposto por J. Borenstein [2]. Este método de medição e correcção dos erros sistemáticos destina-se a atenuar os erros devido ao diâmetro diferente das rodas e à incerteza relativa ao ponto de contacto entre as rodas e o piso.

Uma vez que se pretende analisar os erros inerentes à incerteza no contacto entre as rodas e o chão e ao diâmetro diferente das rodas, ter-se-á que escolher o percurso mais adequado à medição destes erros.

Tal como foi referido nas secções 2.1 e 2.2, o diâmetro diferente das rodas influencia o percurso recto e a incerteza no contacto das rodas com o chão só influencia a rotação ou o curvar. Assim, o percurso terá que ser constituído por zonas de deslocamento recto e zonas de deslocamento curvo de modo a isolar cada um dos erros e analisar a sua influência no trajecto.

O método apresentado por J. Borenstein consiste em levar o robot a fazer um percurso quadrado, quer no sentido dos ponteiros do relógio (CW - *clockwise*), quer no sentido contrário (CCW - *counter-clockwise*), como ilustra a figura 3.1..

Neste método são comparadas as posições inicial (x_i, y_i, θ_i) e final (x_f, y_f, θ_f), posições essas obtidas medindo as distâncias x e y à parede de referência (ver figura 3.1).

A necessidade da medida dos erros nas direcções CW e CCW torna-se importante pois a existência de dois tipos de erros poderia levar a que num sentido se anulassem, não sendo dessa forma verificadas quaisquer diferenças entre a posição inicial e final.

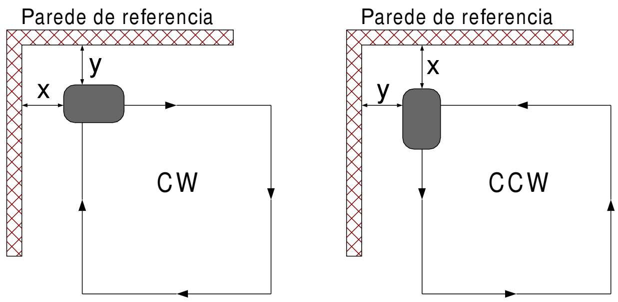

Figura 3.1: Percursos para medição dos erros sistemáticos

3.1 Influência da incerteza do contacto entre as rodas e o chão

Neste método foi considerando que a incerteza no contacto entre as rodas e o chão apresenta o mesmo valor para ambas as rodas, pelo que o centro de rotação do robot não é alterado, variando apenas a distância entre rodas. Assim, o erro associado à incerteza no contacto entre as rodas e o chão será referido, ao longo da descrição deste método, como a incerteza na distância entre rodas.

Na figura 3.2 são ilustrados os trajectos realizados pelo robot na presença do erro associado à incerteza na distância entre rodas.

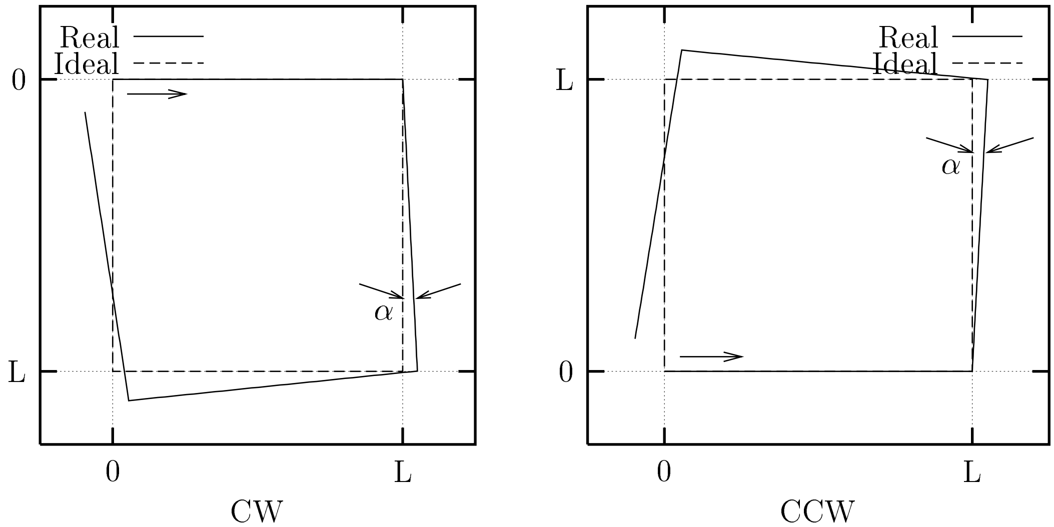

Figura 3.2: Trajecto devido ao erro relacionado com a incerteza na distância entre rodas

Aí se poderá verificar que o robot descreve trajectos rectos (como seria de esperar) mas nas rotações sobre o seu próprio eixo apresenta um erro α, pelo que a sua posição final será afectada do seguinte erro[1]:

$$\begin{cases} \varepsilon_b x_{cw} = -2L\alpha \\ \varepsilon_b y_{cw} = -2L\alpha \end{cases} \tag{3.1}$$

$$\begin{cases} \varepsilon_b x_{ccw} = -2L\alpha \\ \varepsilon_b y_{ccw} = 2L\alpha \end{cases} \tag{3.2}$$

[1] Ver apêndice B.

3.2 Influência do diferente diâmetro das rodas

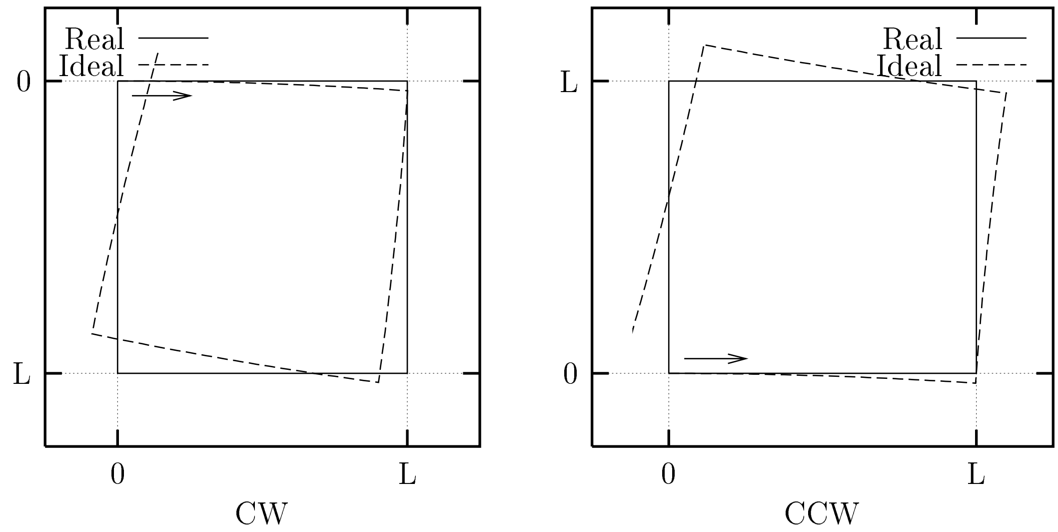

Figura 3.3: Trajecto devido ao diâmetro diferente das rodas

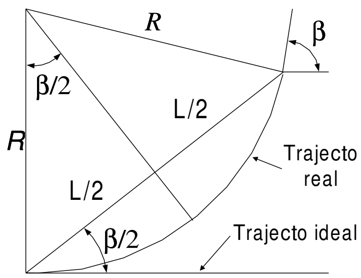

Figura 3.4: Relações geométricas para o cálculo do raio de curvatura

Tendo em atenção a figura 3.3, pode-se verificar que na zonas rectas do trajecto o robot descreve uma trajectória curva. Assim, considerando o mesmo percurso curvo para cada um dos trajectos rectos desejados, os erros na posição final, nos sentidos CW e CCW, serão dados por[2]:

$$\begin{cases} \varepsilon_d x_{cw} = -2L\beta \\ \varepsilon_d y_{cw} = -2L\beta \end{cases} \tag{3.3}$$

[2]Ver apêndice B.

$$\begin{cases} \varepsilon_d x_{ccw} = 2L\beta \\ \varepsilon_d y_{ccw} = -2L\beta \end{cases} \tag{3.4}$$

3.3 Correcção dos erros sistemáticos

Sobrepondo os efeitos dos dois tipos de erros referidos, temos que na direcção x o erro total é dado, para ambas as direcções, por:

$$\begin{cases} \varepsilon x_{cw} = -2L\alpha - 2L\beta = -2L(\alpha + \beta) \\ \varepsilon x_{ccw} = -2L\alpha + 2L\beta = -2L(\alpha - \beta) \end{cases} \tag{3.5}$$

3.3.1 Diâmetros das rodas

Subtraindo as expressões 3.5, resulta que:

$$\varepsilon x_{cw} - \varepsilon x_{ccw} = -4L\beta \Leftrightarrow \beta = \frac{\varepsilon x_{cw} - \varepsilon x_{ccw}}{-4L} \tag{3.6}$$

Obtido o valor de β, este relaciona-se com o raio da curvatura da forma apresentada na expressão (3.7) obtida a partir das relações geométricas apresentadas na figura 3.4.

$$R = \frac{L/2}{sin(\beta/2)} \tag{3.7}$$

Determinado o valor de R, utiliza-se a expressão (2.19) afim de se obter a razão entre os diâmetros das rodas E_d.

Combinando a expressão (2.19) com a expressão do diâmetro médio das rodas

$$D_{avg} = \frac{D_r + D_l}{2} \tag{3.8}$$

Obtém-se os factores de correcção a aplicar ao diâmetro de cada uma das rodas.

$$\begin{cases} D_l = \dfrac{2}{E_d + 1} D_{avg} \\ \\ D_r = \dfrac{2}{1/E_d + 1} D_{avg} \end{cases} \tag{3.9}$$

3.3.2 Distância entre rodas

De modo análogo, adicionando as expressões (3.5), tem-se que:

$$\varepsilon x_{cw} + \varepsilon x_{ccw} = -4L\alpha \Leftrightarrow \alpha = \frac{\varepsilon x_{cw} + \varepsilon x_{ccw}}{-4L} \tag{3.10}$$

Atentando para a expressão anterior e tendo em conta que o valor da rotação do robot é inversamente proporcional à distância entre rodas B (ver expressão (2.4)), podemos dizer que:

$$\frac{B_{real}}{90^\circ} = \frac{B}{90^\circ - \alpha} \Leftrightarrow B_{real} = \frac{\pi/2}{\pi/2 - \alpha} B \tag{3.11}$$

Assim, tem-se que a distância entre as rodas terá que ser afectada de um factor

$$E_b = \frac{\pi/2}{\pi/2 - \alpha} \tag{3.12}$$

Capítulo 4

Resultados

Depois de realizadas experiências de acordo com o método apresentado no capítulo anterior, obteve-se os dados apresentados na tabela 4.1.

X_{real}	Y_{real}	$Theta_{real}$	X_{odom}	Y_{odom}	$Theta_{odom}$
260.0	-167.5	11.6	325.0	-312.0	16.0
240.0	-132.5	14.4	337.0	-256.0	19.0
250.0	-115.0	11.2	320.0	-240.0	16.0
330.0	-207.5	15.9	377.0	-313.0	20.0
165.0	-190.0	11.3	229.0	-303.0	13.0

Tabela 4.1: Posição final após o percurso de teste

Na tabela 4.1 é possível comparar a posição real do robot no fim do trajecto com a posição indicada pela odometria.

A partir dos dados da tabela 4.1 e como mostra a figura 4.1, o erro do sistema de odometria é significativamente inferior ao erro cometido pelo robot.

Figura 4.1: Erros de posição

Pode-se desta forma afirmar que os erros de posição são resultado da lenta velocidade de resposta do robot.

Capítulo 5

Conclusões

Nesta primerira parte foi apresentado um método de medição e correcção de erros sistemáticos para um robot com duas rodas motrizes e controlo diferencial.

Foi analisada a influência de cada uma das duas fontes de erros mais significativas em ambientes *indoor*: incerteza associada ao contacto entre as rods e o chão e o diâmetro diferente das rodas.

Usando o método apresentado foi possível concluir que o tempo de resposta do robot é também um factor preponderante na precisão do movimento. Para o robot usado neste projecto, o tempo de resposta é a fonte principal de erro de posicionamento.

Por forma a melhorar o tempo de resposta do robot, apenas uma melhoria no *hardware* poderá trazer melhores resultados no que diz respeito ao desempenho do robot.

Parte II

Giroscópios

Capítulo 6

Introdução

Como foi referido na parte I, os erros sistemáticos de odometria devem-se essencialmente ao escorregamento das rodas ou à irregularidade do piso.

A existência de um sensor imune a este tipo de "interferências" deverá melhorar significativamente o sistema de *dead-reckoning*.

Com este propósito foi adquirido um giroscópio. Este dispositivo fornece informação relativamente à velocidade angular. O giroscópio adquirido (Autogyro da KVH Industries, Inc[3]) é baseado em fibra óptica e pertence ao grupo dos Interferómetros de Fibra Óptica em Malha Aberta[4].

A análise das fontes de erro inerentes aos giroscópios e a forma de os compensar foi apresentada em [4] e [5], respectivamente. Assim, as secções seguintes apenas abordarão os resultados e as conclusões desses dois trabalhos.

Capítulo 7

Fontes de erro e especificações dos giroscópios

7.1 Fontes de erro

Idealmente existe uma relação linear entre a velocidade de rotação e a variação da frequência ou a variação de fase consoante se trate de um giroscópio com cavidade ressoante ou interferométrico, respectivamente. Desta forma têm-se relações com a seguinte forma:

$$\Delta f = k\omega \qquad ou \qquad \Delta\phi = k\omega \tag{7.1}$$

No entanto, são várias as fontes de erro dos giroscópios, da quais se destacam as seguintes [6]:

- Ruído térmico;
- Acoplamento deficiente entre a fonte de luz e o meio de propagação;
- Espalhamento da luz no zona de acoplamento entre a fonte e o meio de propagação;
- Espalhamento da luz meio de propagação.

No caso dos giroscópios que fazem uso do laser, poderão ser referidos três tipos de erro adicionais [6], que se enumeram a seguir, e que tornam as expressões (7.1) não válidas:

- Δf não nulo para ω=0
- Trancamento na frequência;
- Não-linearidades na relação entre Δf e ω.

7.2 Principais especificações

Para além das especificações que indicam as condições de funcionamento do giroscópio, em termos de temperatura ou humidade, existem limitações dos mesmos em termos de resolução e de valores máximos aos quais são sensíveis. Como consequência dos erros referidos na secção anterior, existe duas de especificações que devem ser tidas em atenção afim de avaliar a qualidade do giroscópio - *Random walk* e *Drift rate*.

O *random walk* refere-se à componente aleatória presente na saída do giroscópio devido a ruído térmico e "*shot noise*" no fotodetector [4]. Por outro lado, o *drift rate* corresponde à componente sistemática do ruído e traduz-se numa rotação aparente do girsocópio quando este está em repouso. Estes dois tipos de erros são claramente visíveis na figura 7.1, que mostra um conjunto de amostras obtido com o giroscópio em repouso.

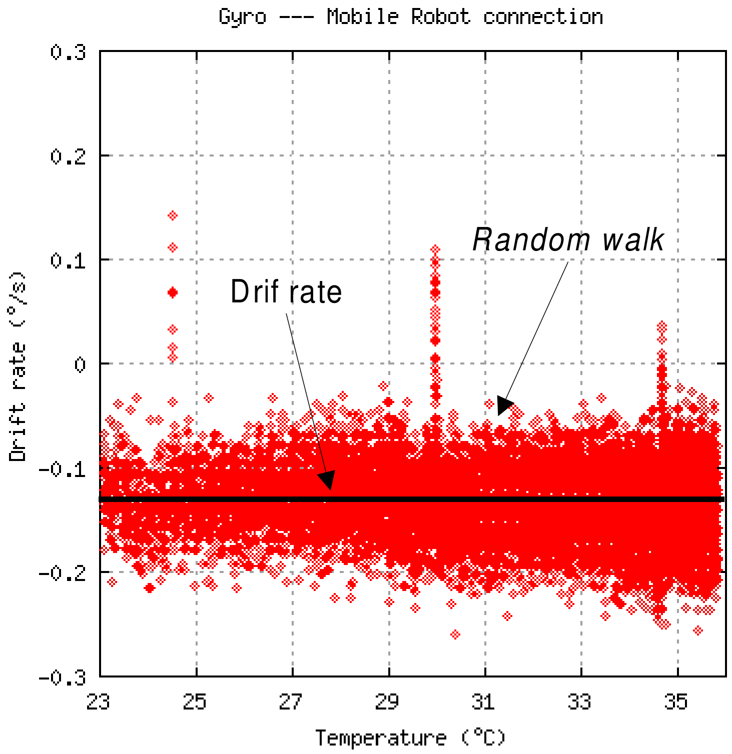

Figura 7.1: Saída do giroscópio

7.3 Especificações do Autogyro

Alimentação	12V
Consumo	3W
Saída	16 bits, RS-232, 9600 bps, 10 valores/seg
Velocidade de rotação (max)	$\pm$ 100 °/sec
Drift rate (compensado)	5–10 °/h
Angle random walk (ruído)	20 °/hr/$\sqrt{h}$
Linearidade do factor de escala	<0.5% rms (temperatura constante) <1% rms (toda a gama de temperatura)

Tabela 7.1: Especificações do Autogyro

Capítulo 8

Análise do desempenho

Em [5] é apresentado todo trabalalho relacionado com a análise e calibração do giroscópio Autogyro.

Verificou-se que o sinal de saída do giroscópio apresentava um *drift rate* significativo (ver figura 7.1). A velocidade de rotação era afectada de um erro dependente da temperatura, que se reflectia na orientação determinda a partir da velocidade angular do giroscópio (ver figura 8.1).

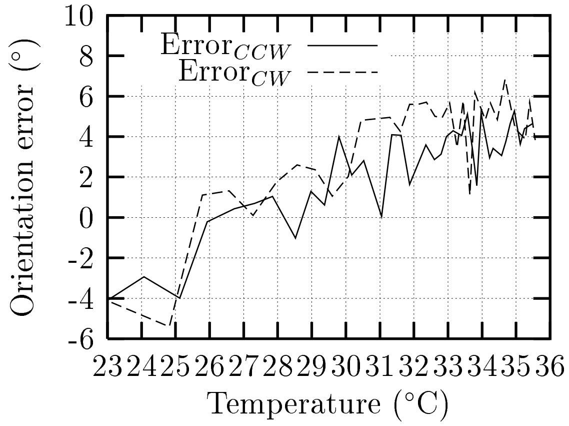

Figura 8.1: Erro de orientação sem correcção

Parte III

Instalação de Novos Sensores no Robuter II

Capítulo 9

Introdução

Tendo como objectivo final o desenvolvimento de um sistema de navegação robusto para o robot móvel Robuter II[?], foi necessário melhorar os métodos de navegação em ambientes de piso irregular e em passagens estreitas.

Para tal foi necessário melhorar a precepção do deslocamento em piso irregular e ultrapassar a limitação dos sensores ultrasónicos relativamente à mínima distância mensurável, que é de 14cm, para o sensores instalados na plataforma Robuter II.

Com foi referido em [1], os giroscópios assumem um papel importante nos algorítmos de *dead-reckoning* quando o deslocamento é feito em piso irregular onde a odómetria é ineficiente.

Para tal foi adquirido o giroscópio de fibra óptica *Autogyro* da KVH Industries, Inc.[3]. Dos diversos fabricantes de giroscópios de fibra óptica [4] foi escolhida a KVH por apresentar um giroscópio com interface RS-232, com especificações aceitáveis para esta aplicação e com o menor preço. A análise deste dispositivo foi abordada em [1].

Para solucionar o problema associado com a limitação dos sensores ultrasónicos, que toma principal relevância na navagação em passagens estreitas optou-se pela instalação de dois sensores ultrasónicos na unidade Pan-Tilt existente no robot. Uma vez que a unidade Pan-Tilt está a mais de 20cm da zona periférica do robot, é possível medir distâncias imediatamente a seguir ao limite do robot. Embora esta solução apresente um custo consideravelmente inferior ao sistema de medição laser, mostrou-se ineficiente, dado que os tempos de leitura são elevados, impossibilitando o robot de se movimentar a uma velociade superior a 1cm/s. Esta análise será feita na secção seguinte.

O sistema de medição laser embora apresente um preço elevado quando comparado com os sensores ultrsónicos, possui um resolução angular quatro vezes superior. Para além do referido, e dada a sua elevada velocidade de leitura, permite a conjugação com sistema de aquisição de imagem permitindo o desenvolvimento de outros métodos e algorítmos de navegação.

Capítulo 10

Especificações

10.1 Sensores ultrasónicos

As especificacções aqui apresentadas são indicadas pela Polaroid[7], fabricante dos sensores ultrasónicos instalados no robot. Na tabela 1 são indicadas as características mais importantes deste tipo de sensor.

Na figura 10.1 é mostrado o diagrama de radiação. Note-se que o cone de emissão apresenta uma abertura angular com cerca de 20°.

Em anexo B são apresentadas as especificações detalhadas do sensor ultrasónico.

Alcance	0.15 a 10.7m
Resolução	$\pm 1\%$ ao longo de toda a gama
Abertura angular do feixe	17°
Condições de funcionamento Temperatura Humidade	 0° a 60°C 5% a 95%

Tabela 10.1: Especificações dos sensores ultrasónicos

10.2 Giroscópio

O giroscópio instalado foi o Autogyro da KVH (ver figura 10.2). Um aspecto importante que levou à escolha deste giroscópio foi por possuir interface RS-232 que permite uma fácil ligação ao robot sem necessidade de qualquer electrónica adicional. A tabela 10.2 mostra as especificações fornecidas pela KVH.

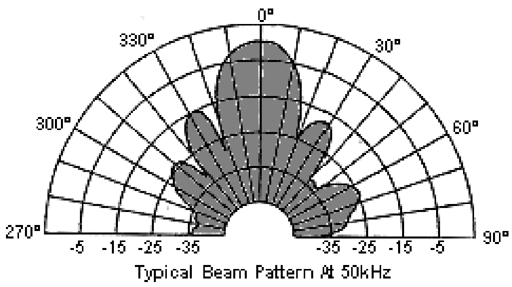

Figura 10.1: Diagrama de radiação dos sensores ultrasónicos.

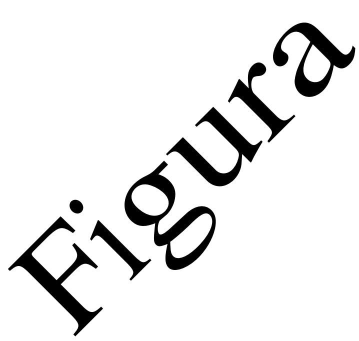

Figura 10.2: Autogyro da KVH.

Outra característica importante do Autogyro é possuir um sensor de temperatura interno, cuja informação está disponível em conjunto com a informação angular fornecida pelo girocópio. Esta característica permitiu calibrar o giroscópio que apresentava um erro de orientação para além do especificado [5].

Embora não explorada neste trabalho, outra característica é a possibilidade de inserir na trama de informação, dados relativos a um GPS ou um odómetro.

10.3 Sistema de medição laser

A necessidade de instalação de um sistema de medição laser resultou das limitações dos sensores ultrasónicos relativamente a velocidade e precisão de

Alimentação	12V
Consumo	3W
Saída	16 bits, RS-232, 9600 bps, 10 valores/seg
Velocidade de rotação (max)	± 100 °/sec
Drift rate (compensado)	5–10 °/h
Angle random walk (ruído)	20 °/hr/$\sqrt{}$h
Linearidade do factor de escala	<0.5% rms (temperatura constante) <1% rms (toda a gama de temperatura)

Tabela 10.2: Especificações do Autogyro

leitura dos sensores ultrasónicos instalados na unidade Pan & Tilt.

De seguida são indicadas as principais características do sistema medição laser.

Alcance	80m (máx)
Resolução angular	0,25°/0,5°/1° (selecionável)
Tempo de resposta	53ms/26ms/13ms
Interface	RS-232/RS-422 (selecionável)
Velocidade de transmissão	9,6/19,2/38,4/500Kbp
Alimentação	24Vdc ± 15%, 1,8A (máx)

Tabela 10.3: Especificações do sistema de medição laser

No apêndice D é apresentado o protocolo de comunicação com o sistema de medição laser. Note-se desde já algumas dificuldades no processamento das tramas de informação. A existência de apenas um *byte* de sincronismo (com elevada probabilidade de coincidir com um *byte* de informação) e o facto da trama de informação apresentar um comprimento variável, implicam um algorítmo de processamento de trama mais sofisticado, tendo como principal consequência um aumento do tempo de processamento.

Capítulo 11

Instalação dos sensores ultrasónicos

O atravessamento de passagens estreitas foi a motivação para a instalação de dois sensores ultrasónicos na unidade Pan-Tilt.

Afim de melhorar o tempo de leitura e porque no atravessamento de passagens estreitas só é necessário um varrimento de 180°, os sensores foram montados perpendicularmente entre si, como mostra a figura 11.1.

Com esta configuração se os sensores estiverem no mesmo nodo, ou seja, são disparados simultaneamente, verifica-se a existência de *cross-talk*[1]. Por esta razão os sensores foram ligados em nodos diferentes (sensor 1 no nodo 7 e sensor 2 no nodo 8), permitindo desta forma que sejam disparados separadamente.

Apesar dos sensores ultrasónicos seram disparados separadamente verificou-se ainda um grande número de medidas erradas. Este problema foi resolvido ligando à massa o suporte metálico de suporte dos sensores ultrasónicos. A figura 11.2 mostra as ligações entre as placas de controlo do sensores ultrasónicos e o robot.

No apêndice D é indicada a configuração do número do nodo nas placas de controlo.

[1]Interferência entre dois ou mais sensores reultado da leitura de um sinal originado por outro sensor

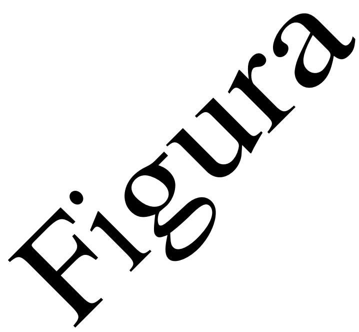

Figura 11.1: Montagem dos sensores ultrasónicos na unidade Pan-Tilt.

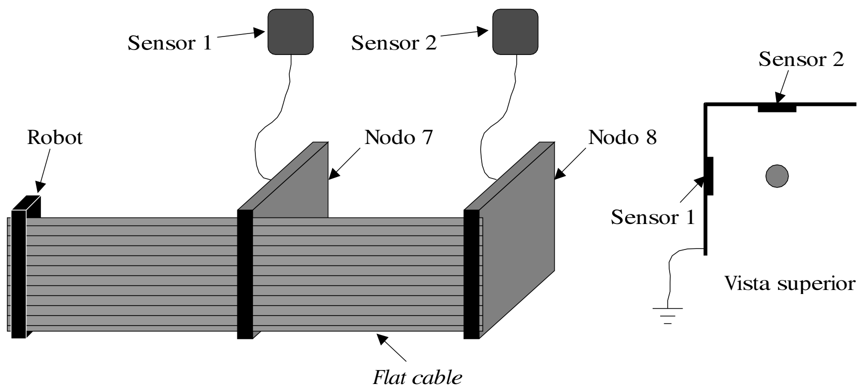

Figura 11.2: Ligações dos sensores ultrasónicos da unidade Pan-Tilt.

Capítulo 12

Instalação do giroscópio

O único aspecto em ter em conta na instalção do giroscópio foi que o eixo de sensibilidade[1] estivesse perpendicular ao solo.

O ponto de fixação do giroscópio ao robot é definido apenas pela limitações de espaço, não sendo necessário que o mesmo esteja centrado com o centro de rotaçãodo robot [4].

A figura 12.1 mostra a aplicação do giroscópio no robot. As ligações electricas são ilustradas na figura 12.2, sendo apresentada no apêndice A a cablagem referente a estas ligações.

Figura

Figura 12.1: Aplicação do giroscópio no robot.

[1] Também chamado eixo de entrada (*input axis*). Corresponde ao eixo cuja rotação em trono do qual leva ao sinal de saída máximo.

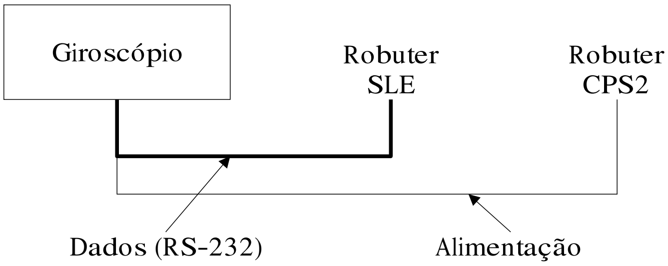

Figura 12.2: Ligações eléctricas do giroscópio.

Capítulo 13

Instalação do sistema de medição laser

Sendo desejável que o sistema de medição laser fosse instalado no centro de rotação do robot, tal não foi possível por aí se encontrar a unidade Pan-Tilt. Assim, como se pode verificar pela figura 13.1, o sistema de medição laser foi instalado na frente da unidade Pan-Tilt.

Note-se que a estrutura do robot foi alterada de modo a se instalar o laser. Esta alteração implicou a concepção de seis pinos de suporte, cujas dimensões são apresentadas no apêndice E.

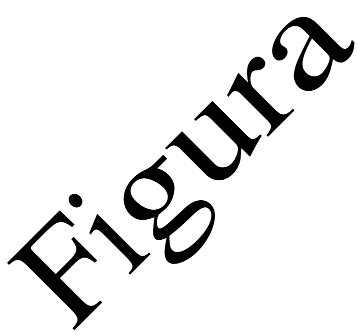

Figura 13.1: Montagem do sistema de medição laser.

A figura 13.2 esquematiza as ligações eléctricas do sistema de medição laser.

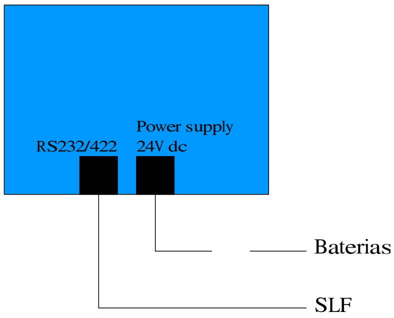

Figura 13.2: Ligações eléctricas do sistema de medição laser.

Capítulo 14

GyroTest - Programa de teste do giroscópio

Durante a fase incial de testes com o giroscópio foi desenvolvida uma aplicação em DOS afim de testar o funcionamento do giroscópio, e permitir a gravação dos dados por ele fornecidos.

Na figura 14.1 é mostrada a janela inicial da aplicação. Aí é possível verificar as seguintes opções:

- Auto zero
- Clear angle
- Save data
- Auto save data

De seguida será feita uma descrição de cada uma destas opções.

14.1 Auto zero

Quando o giroscópio está em repouso apresenta um sinal à saída não nulo [1]. Uma forma de atenuar a influência deste valor é calcular a sua média ao longo de um intervalo de tempo e subtrair aos valores seguintes essa média [5].

A opção *Auto zero* tem por finalidade o cálculo da média e a correcção da velocidade angular a partir da média calculada (ver figura 14.2).

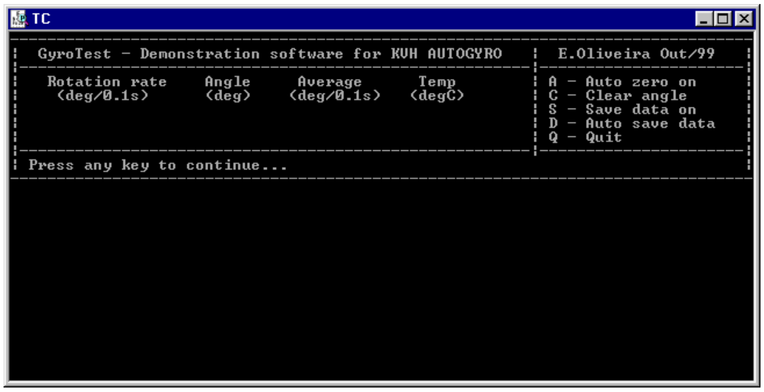

Figura 14.1: Janela inicial da aplicação *GyroTest*.

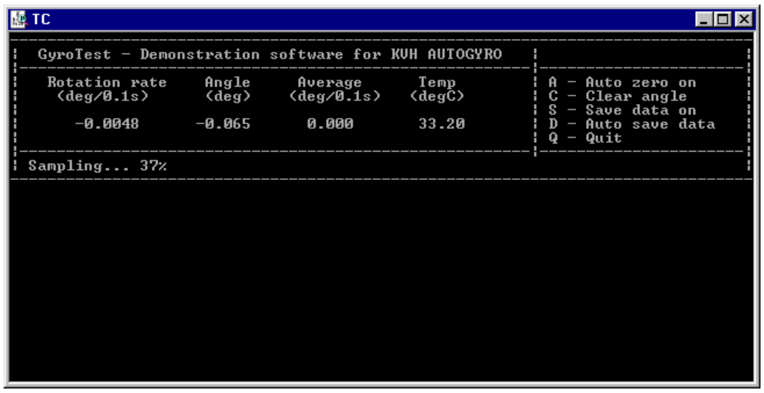

Figura 14.2: Cálculo da média no início da função *Auto zero*.

14.2 Clear angle

Dado que o valor fornecido pelo giroscópio é uma velocidade angular, é necessário integrar esses valores afim de se obter a orientação. A função *Clear angle* coloca a 0 o valor da orientação.

14.3 Save data

Esta opção permite a gravação num ficheiro dos dados fornecidos pelo giroscópio. Cada linha no ficheiro corresponde a uma amostra forncedia pelo giroscópio. O formato da linha de dados é o seguinte.

`<velocidade de rotação> <ângulo> <temperatura>`

Imediatamente antes do iníco da gravação dos dados, é pedido ao utilizador o nome do ficheiro (ver figura 14.3). Esse ficheiro terá a extensão `KVH`.

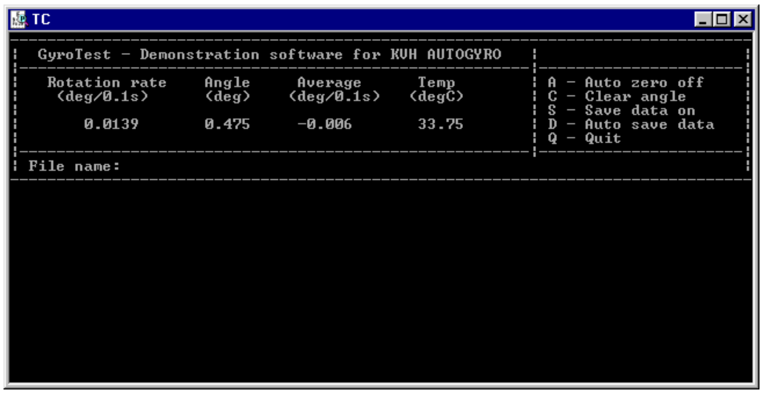

Figura 14.3: Pedido do nome do ficheiro para gravação de dados.

Com esta opção a gravação é interropida por ordem do utilizador.

Afim de assinalar a gravação de dados, é indicado no canto superior direito `Saving...` (figura 14.4).

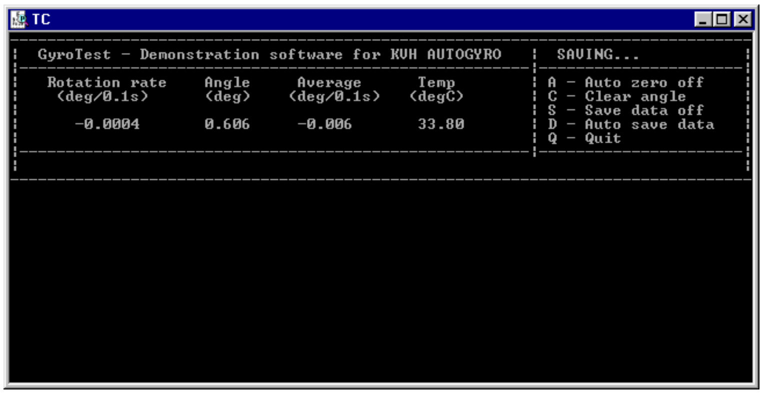

Figura 14.4: Gravação de dados.

14.4 Auto save data

Esta opção é semelhante à anterior, mas permite que a duração da gravação seja pré-determinada.

O período de gravação é definido pelo número de amostras que é introduzido pelo utilizador (ver figura 14.5). O período de gravação pode ser determinado tendo em conta que o intervalo de tempo entre duas amostras consecutivas é de 100ms.

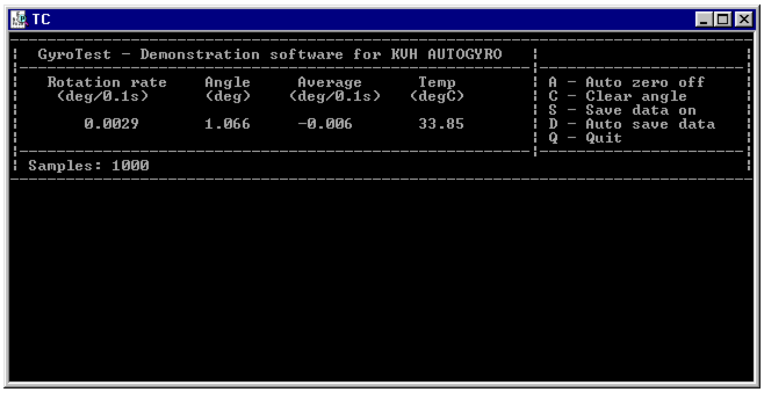

Figura 14.5: Definição do número de amostras a gravar.

À semelhança da opção Save data, também nesta opção é indicado ao utilizador o decorrer da gravação pela visualização de `Saving + ...` no canto superior direito (ver figura 14.6).

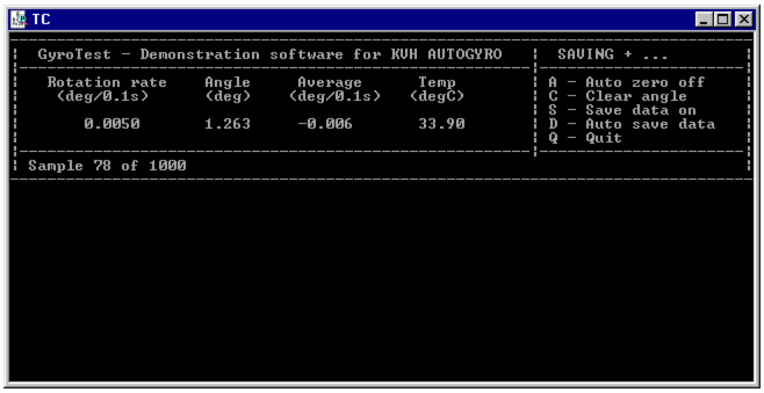

Figura 14.6: Gravação de dados durante um período pré-determinado.

Parte IV

Integração do giroscópio

Capítulo 15

Introdução

Ao contrário do que acontece em ambientes *indoor*, em ambientes *outdoor* a principal fonte de erros de posicionamento é a irregularidade do piso que poderá ter afectar significativamente a odometria.

Para além da própria irregularidade do piso se traduzir num precurso com características diferentes das inicialmente previstas, problemas como a patinagem ou derrapagem das rodas implicam inevitavelmente erros significativos na odometria.

É neste contexto que o giroscópio assume um papel preponderante factor correctivo do sistema de odometria.

Com este propósito, e tal como já foi referido no 12, foi instalado um giroscópio a bordo do robot. Esta parte vai abordar a metodologia usada afim de conjugar os dados do giroscópio com os dados odométricos por forma a se conseguir um sistema robusto de odometria.

Capítulo 16

O algorítmo de controlo

A forma mais eficiente de controlar o robot em piso irregulares é actuando na sua velocidade angular. Problemas como buracos no chão ou patinagem das rodas são inevitavelmente detectados pelo giroscópio pois a velocidade angular por ele indicada não corresponderá à medida pelos odómetros.

Desta forma, foi usada a velocidade angular fornecida pelo giroscópio para afectar a velocidade imposta ao robot de modo a este cumprir a velocidade desejada. O algorítmo usado é ilustrado na figura **??**.

Capítulo 17

Resultados obtidos

Capítulo 18

Conclusões

Parte V

Atravessamento de passagens estreitas

Capítulo 19

Introdução

O atravessamento de passagens estreitas é de extrema importância quando se pretende navegar em ambiêntes *indoor*. Portas e corredores existem em todos os edifícios. Quando as suas dimensões são pouco maiores que as do robot, a navegação recorrendo aos sensores ultrasónicos é ineficiente e por vezes desaconselhada.

Com os sensores ultrasónicos instalados no robot não é possível a medição de distências inferiores a 15cm. Dado que o robot apresenta uma largura de 70cm, não é possível o atravessamento com segurança de passagens de largura inferior a 1m.

Por forma a eliminar esta limitação, foram instalados na unidade *Pan & Tilt* existente no robot dois sensores ultrasónicos, que estando mais afastados da periferia do robot, possibilitavam a medição de distância em torno dessa periferia.

Por os sensores ultrasónicos instalados na unidade *Pan & Tilt* se revelarem ineficientes, foi posteriormente instalado um sistema de medição laser. Este sistema por possuir uma melhor precisão e uma maior velocidade de actualização dos dados mostrou-se ser o indicado para o atravessamento de passagens estritas.

Capítulo 20

Melhoramento da percepção: sensores ultrasónicos

A fim de ultrapassar a impossibilidade de medição de distância próximas (inferores a 15cm) da periferia do robot, forma instalados dois sensores ultrasónicos na unidade *Pan & Tilt*. Por estarem afastados da periferia, com tais sensores possibilitam a medição de distância próximas da periferia. Com os sensores instalados na unidade *Pan & Tilt* consegue-se um varimento de 360^{circ}.

20.1 Análise do desempenho

A figura **??** mostra uma varrimento obtido com os sensores ultrasónicos quando o robot se encontrava diante de duas caixas, simulando uma passagem estreita.

Para além da velocidade de varrimento ser baixa (180^{circ} em 2 segundos), a abertura angular e os lóbolos secundários (ver Capítulo 10) do cone de emisão dos sensores ultrasónicos degradavem significativamente a qualidade dos dados obtidos. Como mostra a figura **??**, as características dos sensores ultrasónicos não são adequadas a este tipo de aplicação.

Capítulo 21

Melhoramento da percepção: sistema de medição laser

21.1 Análise do desempenho

Capítulo 22

Algoritmo de navegação em passagens estreitas

Capítulo 23

Resultados

Capítulo 24

Conclusões

Parte VI

MPL - Mission Planing Language: uma linguagem para planeamento de missões

Capítulo 25

Introdução

Capítulo 26

Caracteríticas da linguagem *MPL*

26.1 Estrutura

26.2 Funções básicas

26.3 Gestor de movimentos

26.4 Limitações

Capítulo 27

Gestor de movimentos

Capítulo 28

Funcões de movimento

28.1 Move

28.2 Movp

28.3 Movc

28.4 Setp

28.5 Cros

28.6 Stop

Capítulo 29

Condições de movimento

29.1 Distância

29.2 Ângulo

29.3 Dados ultrasónicos

Capítulo 30

Operadores lógicos

Capítulo 31

Exemplos

31.1 Paralelismo

31.2 Atravessamento de passagens estreitas

Parte VII

Software

Capítulo 32

Estrutura

32.1 Modularidade

32.2 Comunicação entre módulos

32.3 Adicionar/remover módulos

32.4 *Debug*

Capítulo 33

Módulos básicos de navegação

33.1 Executor de movimentos

33.2 Emergências

33.3 Gestor de comunicações

33.4 Gestor dos sensores ultrasónicos

33.5 Sistema de *dead-reckoning*

33.6 Módulo de funções genéricas

33.7 *Kernel*

Parte VIII

Apêndices

Apêndice A

Scripts em Octave

A.1 makepath.m

A.2 getv.m

A.3 psim.m

Bibliografia

[1] Oliveira, E., 1999, "Sensores para *Dead-reckoning* - Parte 1", Relatório interno, Secção Autónoma de Engenharia Mecânica, Junho 1999.

[2] Borenstein, J., 1996, "Measurement and Correction of Systematic Odometry Errors in Mobile Robots", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 12, No. 5, Outubro 1996.

[3] KVH Industries, Inc., Middletown, RI02842, E.U.A., http://www.kvh.pt.

[4] Oliveira, E., Santos V., 2000, "Giroscópios Ópticos: princípios de funcionamento e especificações", Revista Robótica, Novembro 2000.

[5] Oliveira, E., Santos, V., 2000, "Fibre Optics Gyroscope Evaluation and Calibration with a Mobile Robot", Proceedings of the 8th International Sympsium on Intelligent Robotic Systems, Reading, Inglaterra, Julho 2000, pp. 281–286.

[6] W. W. Chow et al., "The Ring Laser Gyro", Reviews of Modern Physics, Vol. 57, No. 1, Janeiro 1985, pp. 61-104.

[7] Polaroid Corporation, http://www.polaroid-oem.com.