



Sistemas de Automação Industrial

1ºSemestre de 2006/2007

Integração de sensores na plataforma “Rasteirinho”

Nelson Ramos n.º 52373

Marco Barbosa n.º52423

Índice

1.	Introdução	3
2.	Plataforma Rasteirinho.....	3
3.	Odometria	3
3.1.	Princípios gerais e cálculos da odometria.....	3
4.	Acelerómetro.....	4
4.1.	Descrição de Características e Princípio de Funcionamento	4
4.2.	Montagem do Sensor no Rasteirinho.....	4
4.3.	Dados Experimentais e Problemas Encontrados.....	6
5.	Bússola.....	7
5.1.	Descrição de Características e Princípio de Funcionamento	7
5.2.	Montagem do Sensor no Rasteirinho.....	7
	Filtro passa-baixo.....	8
	Amostragem do PWM	8
5.3.	Dados Experimentais e Problemas Encontrados.....	10
6.	Testes de mobilidade.....	12
6.1.	Controlo de orientação.....	12
6.2.	Figuras geométricas usando bússola.....	13
6.3.	Bumper usando o acelerómetro	13
6.4.	Odometria usando acelerómetro e bússola	13
7.	Aplicação de testes.....	14
7.1.	Controlo e monitorização da actuação dos motores	15
7.2.	Activação do acelerómetro e visualização de odometria.....	15
7.3.	Activação da bússola com interface analógica (sinal PWM filtrado).....	15
7.4.	Activação da bússola com interface digital (sinal PWM adquirido directamente)	15
7.5.	Comandos de actuação directa nos motores	15
7.6.	Activação do detector de colisões.....	16
7.7.	Activação e controlo do seguimento de direcção	16
7.8.	Activação e controlo do seguimento de figuras geométricas.....	16
8.	Conclusões	17
9.	Bibliografia	18
10.	Anexos	19
10.1.	Escolha da bússola	19
	Bússola Analógica Dinsmore 1525.....	19
	Bússola Analógica Pewatron	19
	Bússola digital Vector 2X (também conhecida por V2X)	19
	Hitachi HM55B Compass	20
	CMPS03 – Robot Compass Module	20

1. Introdução

Este trabalho tem como objectivo integrar na plataforma rasteirinho dois novos tipos de sensores:

- Acelerómetro
- Bússola electrónica

Com a introdução destes dois sensores e fusão dos dados obtidos a partir de ambos pretende-se dotar o Rasteirinho com capacidades de odometria.

2. Plataforma Rasteirinho

O Rasteirinho consiste numa plataforma robótica móvel com uma configuração de tracção diferencial e que foi construído tendo como objectivo o seu baixo custo.

A solução de ligação a sensores e actuadores que tem é baseada na placa de aquisição de dados NI USB-6008 (Low-Cost Multifunction DAQ for USB)

3. Odometria

3.1. *Princípios gerais e cálculos da odometria*

A odometria é um dos métodos mais utilizados para estimar a posição de um robô, principalmente devido à facilidade de implementar, baixo custo e taxas de amostragem bastante elevadas.

A ideia fundamental da odometria é a integração de informação incremental do movimento ao longo do tempo, o qual envolve uma inevitável acumulação de erros. A acumulação de erros de orientação causa grandes erros na estimação da posição, os quais vão aumentando com a distância percorrida pelo robô. Apesar destas limitações, muitos investigadores concordam que a odometria é uma parte importante do sistema de navegação de um robô, e que se deve usar juntamente com medidas de posição absolutas para proporcionar uma estimativa de posição mais aproximada da realidade.

O cálculo da odometria pode ser feito recorrendo a vários tipos de sensores. Neste trabalho foram utilizados um acelerómetro de 2 eixos e uma bússola electrónica.

O cálculo da odometria é feito com as seguintes expressões:

$\vec{x}_{\text{Mundo}} = \vec{x}_0 + \int_0^t \vec{a}(t)_{\text{Mundo}} dt$, o que no caso discreto se traduz em

$$\vec{x}_{\text{Mundo}} = \vec{x}_0 + \sum_{i=0}^t \left(\left(\sum_{j=0}^i \vec{a}_{j \text{ Mundo}} \times t_a \right) \times t_a \right), \text{ com } t_a \text{ sendo o período de amostragem.}$$

Com $\vec{x}_{\text{Mundo}} = (x_{\text{Mundo}}, y_{\text{Mundo}}, \theta_{\text{Mundo}})$ temos:

$$\theta_{\text{Mundo}} = \theta_{\text{Bússola}}$$

$$x_{\text{Mundo}}(t) = x_{\text{Mundo}}(t-1) + \Delta x_{\text{Robot}} \times \cos(\theta_{\text{Mundo}}) - \Delta y_{\text{Robot}} \times \sin(\theta_{\text{Mundo}})$$

$$y_{\text{Mundo}}(t) = y_{\text{Mundo}}(t-1) + \Delta x_{\text{Robot}} \times \sin(\theta_{\text{Mundo}}) + \Delta y_{\text{Robot}} \times \cos(\theta_{\text{Mundo}})$$

onde

$$\Delta x_{\text{Robot}}(t) = a_{x \text{ Robot}}(t) \times t_a^2 + v_{x \text{ Robot}}(t-1) \times t_a$$

$$\Delta y_{\text{Robot}}(t) = a_{y \text{ Robot}}(t) \times t_a^2 + v_{y \text{ Robot}}(t-1) \times t_a$$

4. Acelerómetro

4.1. Descrição de Características e Princípio de Funcionamento

Um acelerómetro é um dispositivo que mede a aceleração do seu próprio movimento, portanto caso esteja fixo a um robô mede a aceleração instantânea deste.

O acelerómetro que usámos foi o ADXL202 que mede a aceleração em dois eixos a 90° entre si no intervalo de [-2g; +2g]. Há duas interfaces possíveis: PWM por cada eixo, ou saída analógica por cada eixo. Decidimos utilizar as saídas analógicas visto que a interface actualmente implementada entre o rasteirinho e o PC é feita através de um conversor A/D da National Instruments.

4.2. Montagem do Sensor no Rasteirinho

A placa de circuito impresso com o acelerómetro é alimentada a 5V a partir do DAQ, e cada saída analógica do acelerómetro é ligada directamente a uma entrada analógica do DAQ. Na figura 1 pode observar-se os referenciais que adoptámos.

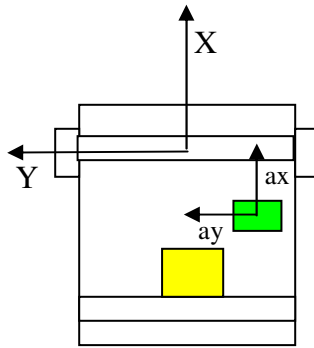


Fig.1 Referencial do Robô (X, Y)
Referencial do acelerômetro (ax, ay)

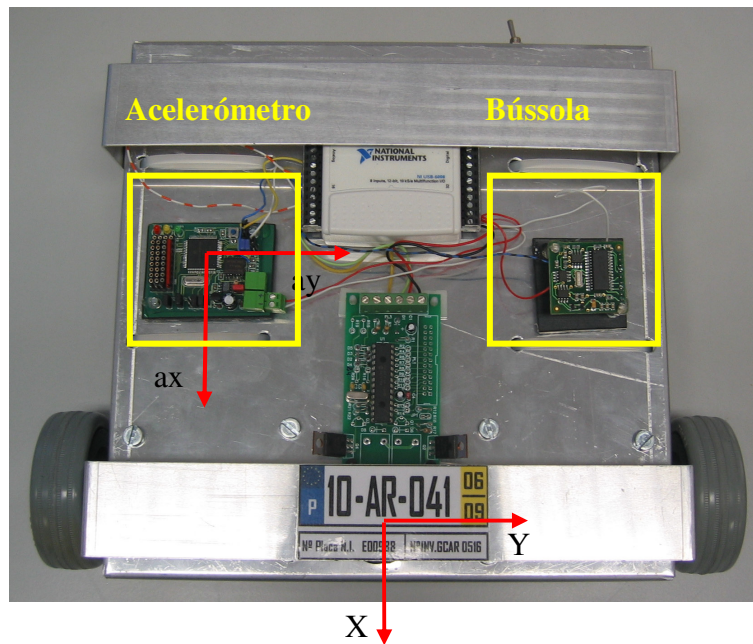


Fig. 2 – Localização dos sensores e referenciais

A correspondência entre as entradas do DAQ a que estão ligadas as saídas analógicas do sensor e o referencial convencionado é dada por $a_x = -a_{i_2}$ e $a_y = a_{i_3}$ (fio amarelo liga ao a_{i_2} ; fio azul liga ao a_{i_3}).

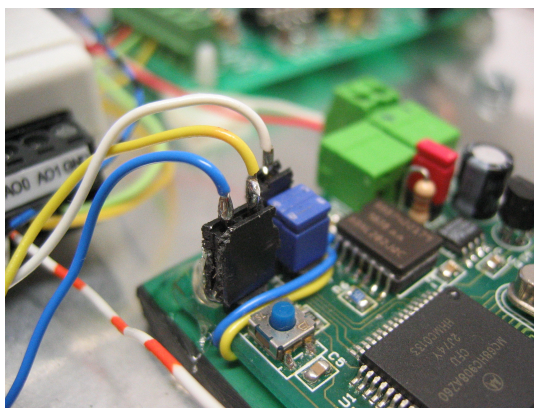


Fig. 3 – Identificação dos fios do acelerómetro

4.3. *Dados Experimentais e Problemas Encontrados*

As obtenções de dados das saídas analógicas do acelerómetro foram fáceis, usando as entradas analógicas do NI-DAQ. No entanto os valores que observámos não corresponderam ao esperado. Estando o robô em repouso e fazendo uma leitura de 50.000 amostras consecutivas obtemos os seguintes histogramas de distribuição dos dados:

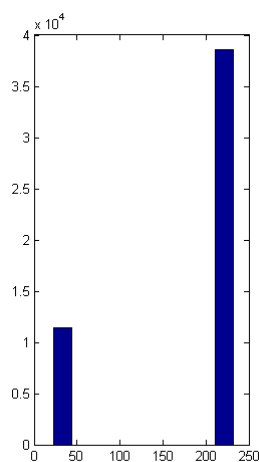


Fig. 4 -Histograma dados eixo X

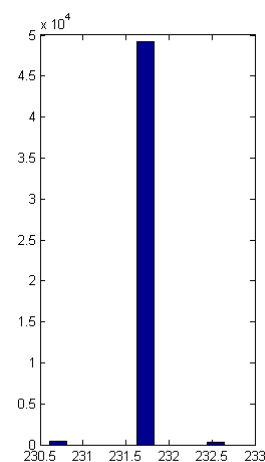


Fig. 5 -Histograma dados eixo Y

Como é visível, existe uma anomalia na distribuição dos dados. Enquanto que no caso do eixo Y os dados distribuem-se de uma forma gaussiana com uma variância muito baixa (a

existência de apenas 3 valores diferentes registados deve-se à discretização que é feita pelo conversor A/D do NI-DAQ), no caso do eixo X existe um valor que se repete com grande frequência (mais de 20% das amostras), totalmente diferente do valor mais observado. Não conseguimos descobrir qual a razão por detrás desta anomalia. O facto de os dados apresentarem este erro impediu-nos de usar o acelerómetro para efeitos de odometria do Rasteirinho.

5. Bússola

5.1. *Descrição de Características e Princípio de Funcionamento*

A bússola electrónica pode ser utilizado como auxiliar de navegação visto que fornece o ângulo que um eixo predefinido da bússola faz com o eixo alinhado com o campo magnético da Terra.

Utilizando uma calibração podemos definir o nosso próprio referencial do mundo e conhecer em cada instante qual a orientação do robot no mundo.

A bússola utilizada para este trabalho foi a CMPS03 que possui duas interfaces: protocolo específico de comunicação utilizando o meio físico I2C e PWM. Esta bússola não tem nenhuma saída analógica que possa ser ligada directamente ao DAQ.

A taxa máxima de actualização é 9,8 Hz com precisão de 0.1°.

5.2. *Montagem do Sensor no Rasteirinho*

Devido às restrições de interface tanto da bússola quanto do DAQ tivemos implementar duas soluções não convencionais.

A primeira solução experimentada consistiu na filtragem do PWM com um filtro passa-baixo com produto RC de 0.5 s ($R = 10k$, $C = 50 \mu F$) de forma a converter o sinal PWM para um sinal analógico que pode ser ligado directamente a uma entrada analógica do DAQ.

A segunda solução consistia em estar a amostrar a um ritmo constante e alto a saída de PWM da bússola e decodificar este sinal por software.

Filtro passa-baixo

O filtro RC foi dimensionado de modo a ter uma constante de tempo de 0,5s de modo a ser razoavelmente maior ao período de maior duração do nosso sinal (0,1s) e tendo um tempo de resposta minimamente razoável. Sendo assim, temos:

$$RC = 0,5s$$

$$R = 10^5 \Omega \Rightarrow 10^5 C = 5 \cdot 10^{-1} \Leftrightarrow C = 5 \cdot 10^{-6} F$$

Com estes dados, realizámos a seguinte montagem:

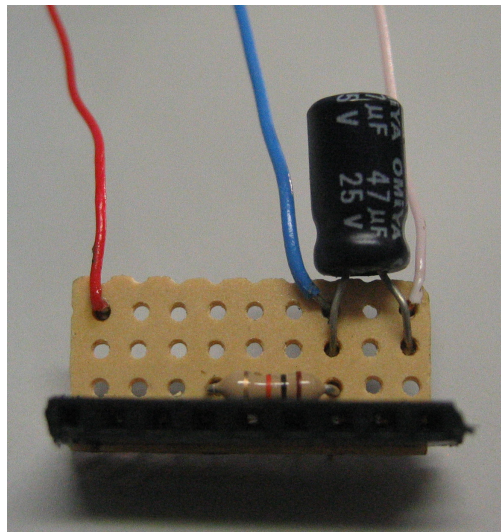


Fig. 6 – Filtro passa-baixo na interface da bússola

Amostragem do PWM

O PWM que a bússola fornece codifica o ângulo de 0° a 359,9°. Um ciclo do PWM é composto por um pulso a high dinâmico (consoante o ângulo) seguido de um pulso fixo a low de 65mS. A largura do pulso a high varia entre 1ms (0°) e 36.99mS. A resolução máxima da bússola é de 0,1° o que provoca variações de 10uS na largura do pulso a high.

Na seguinte figura, podemos ver o sinal PWM obtido pelo NI-DAQ, amostrado a uma frequência de 10kHz:

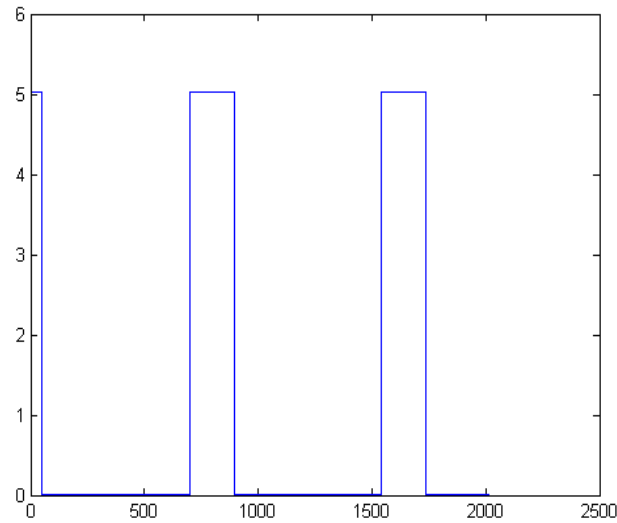


Fig. 7 – Sinal PWM à saída da bússola electrónica

Como o DAQ que o rasteirinho possui apenas consegue fazer amostragens a 10kHz, a resolução máxima que se consegue é de 1°. Apesar deste sinal ser digital, utilizou-se uma entrada analógica para adquirir o sinal, pois as entradas digitais não permitem a amostragem a um ritmo de 10kHz.

A expressão que nos dá o ângulo em função do tempo em que o sinal PWM se encontra a high é dada por:

$$\theta = 10 \times t_{\text{High}} \times 10^3 - 10 \quad (\theta \text{ em graus, } t_{\text{High}} \text{ em segundos}).$$

5.3. *Dados Experimentais e Problemas Encontrados*

Para a montagem com o filtro passa-baixo fizemos uma aquisição de 50.000 amostras, com o robô parado, do sinal à saída do filtro, o que resultou no histograma seguinte:

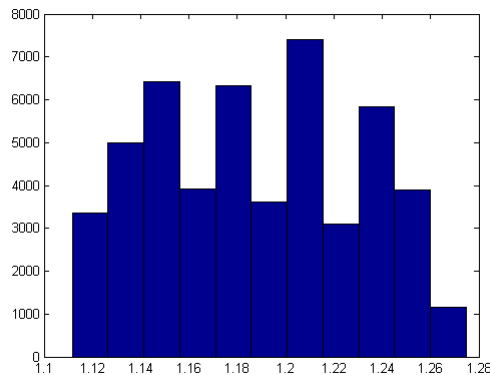


Fig. 8 – Histograma do sinal PWM filtrado da bússola

É de notar a grande variância e distribuição irregular do sinal obtido desta forma. A variação entre o valor mínimo (1,11) e o valor máximo (1,27) convertido para graus dá uma variação entre 175° e 212° , ou seja, uma amplitude de variação de 37° . Consideramos que este é um erro demasiado grande para a informação dada por este sensor ser útil. Não testámos com filtros RC com uma constante de tempo maior (o que poderia diminuir este erro) pois esta montagem já foi dimensionada com uma constante de tempo bastante alta, no limite do que é útil para utilizar o sensor para uma qualquer tarefa.

Para a montagem com a amostragem do PWM fizemos também um histograma dos dados gerados pela rotina que, dada a amostragem feita ao sinal PWM, devolvia a direcção medida pela bússola. Isso resultou no histograma seguinte:

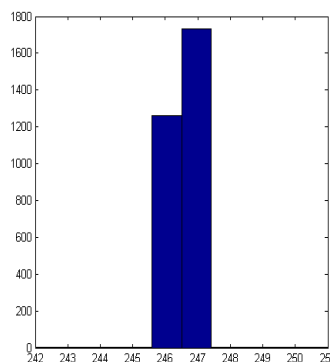


Fig. 9 – Histograma da amostragem do sinal PWM com o Robô parado.

Como se vê, deste modo obtém-se um histograma com uma menor dispersão dos valores (há apenas uma oscilação entre 2 valores na resolução máxima que podemos obter no o NI-DAQ). Com esta montagem temos também uma frequência de actualização da leitura do sensor suficientemente alta para ser útil numa tarefa robótica.

Com estes resultados, optámos por usar a montagem com recurso à amostragem do sinal PWM para realizar uma tarefa robótica (controlo de orientação).

6. Testes de mobilidade

Foram efectuados os seguintes testes:

6.1. Controlo de orientação

Neste algoritmo utilizámos apenas a bússola como sensor de controlo. Quando o algoritmo arranca guarda o valor da bússola nesse momento e tenta seguir sempre essa direcção. Implementámos um controlador PD (Proporcional com Derivativo) para o controlo da direcção que o robot segue.

Durante a execução do algoritmo pode-se alterar a direcção que o robot deve seguir.

Os resultados foram bastante bons depois de afinados os ganhos do controlador tendo em conta um problema estrutural que verificámos: o robot rasteirinho tem 4 fontes de campo magnético fortes (dois motores e duas baterias), sendo duas delas com intensidade dinâmica (motores), o que resulta em desvios do campo magnético ao qual a bússola está sujeita, em relação ao campo magnético terrestre. O campo magnético variável provocado pelos motores faz com que o robot tenha um comportamento por vezes instável. Estes campos tornam-se desprezáveis se a bússola for colocada 50cm acima do robot. Efectuamos estes testes com uma bússola magnética manual, como se pode ver na figura 9.

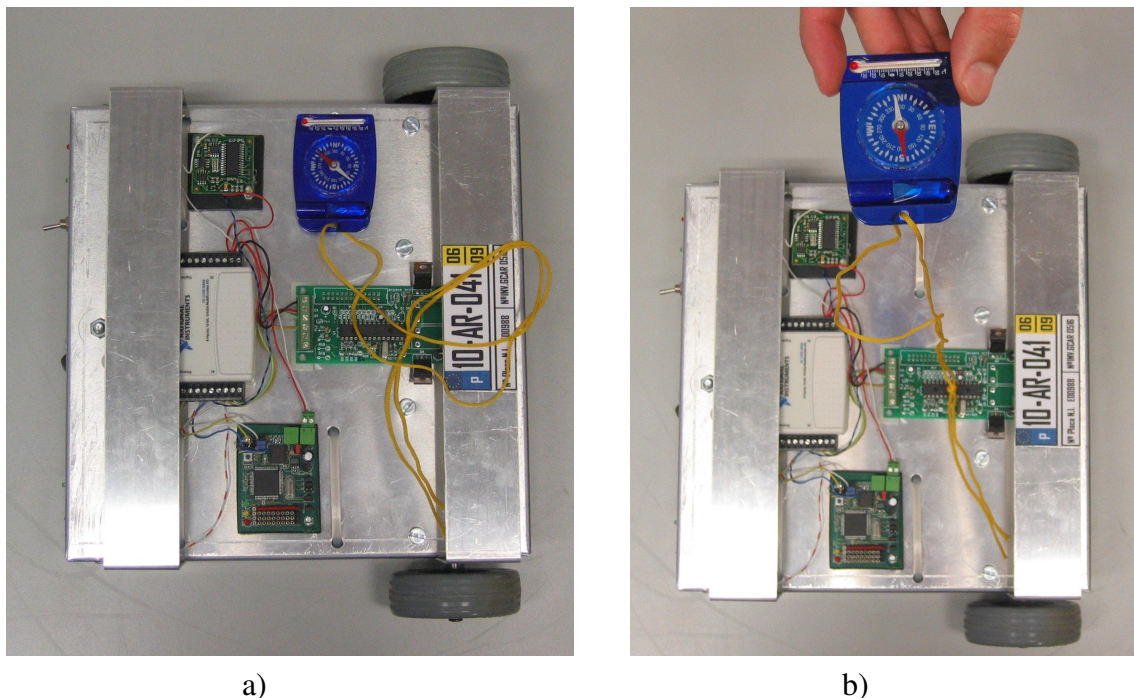


Fig. 10 – Alteração do campo magnético provocado pelo Rasteirinho
a) Bússola em cima do rasteirinho
b) Bússola 50 cm acima do rasteirinho

Posteriormente, colocámos a bússola 50cm acima do rasteirinho e os resultados melhoraram bastante em locais onde não há campos magnéticos fortes. Efectuámos os testes numa área com 9 metros de comprimento e 5 de largura, e verificamos que o robô percorria os 9 metros quase sempre em linha recta, chegando ao fim com um erro muito reduzido (5 a 15°).

6.2. *Figuras geométricas usando bússola*

Este algoritmo consiste em utilizar o algoritmo anterior mas, após um determinado intervalo de tempo, são feitos incrementos à referência seguida. Pode ser especificado o número de lados da figura e o tempo (em segundos) que o robô vai tentar seguir cada referência. Após o intervalo de tempo especificado, a direcção de referência é

incrementada em $\frac{360}{\text{número de lados da figura}}$ graus.

6.3. *Bumper usando o acelerómetro*

Com este teste verificamos que o acelerómetro pode ser usado com bastante fiabilidade para detectar colisões.

O comportamento que implementamos caso o bumper seja activado foi parar instantaneamente o robot, bem como a respectiva indicação na interface de utilizador.

Este comportamento limita-se a observar os módulos das acelerações obtidas nas duas direcções e, caso algum destes módulos ultrapasse um certo limiar, é considerado que uma colisão ocorreu.

6.4. *Odometria usando acelerómetro e bússola*

Este algoritmo não chegou a ficar completo, ou seja, não fundimos a informação do acelerómetro com a bússola porque chegamos à conclusão que este acelerómetro tem bastante ruído sem média nula. Com o robot parado e depois de fazer uma calibração do acelerómetro, a dupla integração adiciona muitos erros à odometria. Em conjunto com o Prof. Carlos Carneira concluímos que seria impossível apresentar resultados satisfatórios com este acelerómetro. No entanto a funcionalidade está implementada na interface e pode ser utilizada para comprovar os nossos resultados.

7. Aplicação de testes

Para a realização de todos os testes efectuados, construiu-se uma aplicação que implementa a leitura dos sensores, actuação nos motores e os vários comportamentos descritos neste relatório.

Esta aplicação foi construída em C# e serviu-se das rotinas da National Instruments para aceder ao NI-DAQ.

A interface está dividida em várias secções, identificadas na seguinte figura:

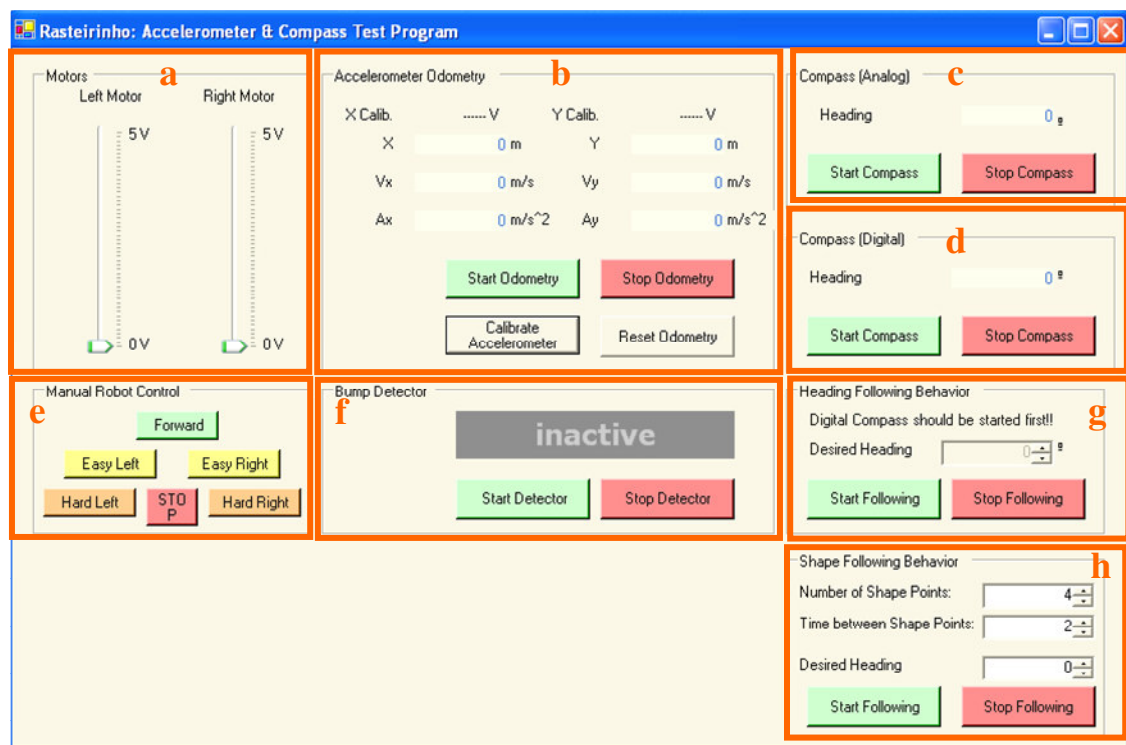


Fig. 11 – Interface da aplicação de testes dividida nas seguintes zonas:

- a) Controlo e monitorização da actuação nos motores
- b) Activação do acelerómetro e visualização de odometria
- c) Activação da bússola com a interface analógica (sinal PWM filtrado)
- d) Activação da bússola com a interface digital (sinal PWM adquirido directamente)
- e) Comandos de actuação directa nos motores
- f) Activação do detector de colisões
- g) Activação e controlo do seguimento de direcção
- h) Activação e controlo do seguimento de formas geométricas

Com esta interface é possível realizar as operações descritas nas seguintes subsecções:

7.1. *Controlo e monitorização da actuação dos motores*

Usando os sliders da zona descrita na fig. 11a, é possível controlar directamente a actuação de cada motor. Quando a aplicação estiver a executar um comportamento autónomo, estes sliders mostrarão a actuação que está a ser exercida nos motores pelo comportamento que está a correr.

7.2. *Activação do acelerómetro e visualização de odometria*

Na zona descrita na fig. 11b, pode-se observar os valores calculados da odometria usando apenas como base o acelerómetro. Antes de activar a odometria deve-se efectuar uma calibração usando o botão “Calibrate Accelerometer” para esse efeito. Ao carregar neste botão, surgirá uma nova janela onde se poderá iniciar o procedimento de calibração e observar as estatísticas resultantes desta.

7.3. *Activação da bússola com interface analógica (sinal PWM filtrado)*

Na secção identificada pela fig. 11c, poder-se-á observar as medições da bússola, lidas usando a interface analógica (para tal, deverá estar instalado o filtro passa-baixo à saída do sinal PWM da bússola).

7.4. *Activação da bússola com interface digital (sinal PWM adquirido directamente)*

Recorrendo à área descrita na fig. 11d, é possível observar as medições da bússola, obtidas através do processamento do sinal PWM adquirido directamente a partir da bússola.

7.5. *Comandos de actuação directa nos motores*

Os comandos de actuação directa servem de atalho à secção de controlo individual de motores e encontram-se na zona identificada na fig. 11e

7.6. *Activação do detector de colisões*

Na secção identificada pela fig. 11f é possível activar o sensor de colisões. Para esta secção funcionar correctamente, é necessário estar activado o acelerómetro (tendo sido previamente calibrado) usando a zona identificada pela fig. 11b. Uma vez activado o detector de colisões, este mostrará um mensagem de “OK” quando não tiverem sido detectadas colisões e uma mensagem de “BUMP!!” quando uma colisão tiver sido detectada.

7.7. *Activação e controlo do seguimento de direcção*

Na zona descrita na fig. 11g é possível activar e controlar o seguimento de direcção. Para tal é necessário ter activado previamente a aquisição de dados da bússola via processamento do sinal PWM, o que pode ser realizada na zona da fig. 11d. Uma vez activado este comportamento, o robô irá adquirir a sua direcção actual e ir-se-á mover tentando manter esta direcção. Esta direcção que o robô tenta seguir pode ser modificada utilizando o controlo up/down que existe nesta secção.

7.8. *Activação e controlo do seguimento de figuras geométricas*

Na secção descrita na fig. 11h é possível activar e definir parâmetros do seguimento de figuras geométricas. Antes de activar este algoritmo, dever-se-á activar previamente a aquisição de dados da bússola via processamento do sinal PWM, o que pode ser realizado na zona da fig. 11d. O utilizador pode definir o número de vértices da figura e o tempo entre cada vértice nos controlos up/down respectivos existentes na secção da fig. 11h.

8. Conclusões

Os resultados deste projecto não foram os esperados inicialmente, visto que a componente da odometria fornecida pelo acelerómetro tinha erros inacceptáveis para se ter alguma precisão na localização.

Para fazer odometria com acelerómetro, tem que se escolher um que tenha muito pouco ruído mas sobretudo que tenha média nula num conjunto reduzido de amostras.

É essencial que o acelerómetro tenha 3 eixos (e não 2 como o que foi utilizado) para que se possa ter em conta os declives do terreno.

Tendo em conta a bússola e o acelerómetro utilizados e os dados que estes nos forneciam, as aplicações que podiam ser realizadas de um modo minimamente correctas foram um sensor de colisões e o seguimento de referências de orientação. Ambas as aplicações foram implementadas e testadas com relativo sucesso tendo em conta as limitações de hardware do robô.

Concluimos que, para controlar correctamente esta plataforma, será necessário implementar um esquema de odometria ligado directamente às rodas do robô e com uma taxa de amostragem suficiente alta. O controlo com o tipo de sensores que foram utilizados neste trabalho está condenado ao fracasso pois a taxa de amostragem é relativamente baixa e os dados chegam com alguma latência (devido, para além da latência do sensor, ao caminho que estes têm que percorrer: Sensor → NI-DAQ → USB → PC → Aplicação). Adicionalmente, como estes sensores dão informação em referenciais diferentes dos da actuação, é necessário efectuar transformações (cinemáticas e entre referencias) para chegar a um valor final a enviar para os actuadores, o que pode resultar na acumulação de ruído no sistema.

Recomendamos, assim, que em trabalhos futuros sejam implementados sensores que meçam directamente a rotação das rodas e que o controlo do robô e a odometria sejam efectuados por hardware dedicado (de modo a evitar a passagem de dados pelo NI-DAQ). Deste modo, conseguir-se-ia um *loop* de controlo de baixo nível bastante rápido e preciso, sobre o qual se poderia efectuar outro tipo de controlo mais orientado à tarefa.

9. Bibliografia

[1] Navigating Mobile Robots: Sensors and Techniques

J. Borenstein, H. R. Everett, and L. Feng

A. K. Peters, Ltd., Wellesley, MA

[2] PID Tuning: http://www.seattlerobotics.org/encoder/200108/using_a_pid.html

10. Anexos

10.1. *Escolha da bússola*

Uma parte do nosso projecto consistiu no estudo de mercado das bússolas electrónicas. Analisámos as seguintes bússolas:

Bússola Analógica Dinsmore 1525

Devolve duas tensões: seno e co-seno do ângulo feito com o campo magnético da Terra.

Não escolhemos esta bússola por ser difícil de encontrar no mercado europeu e porque o tempo de reacção é bastante baixo, visto que demora 2,5 segundos a estabilizar para variações de 90°.

Especificações em: <http://www.dinsmoresensors.com/1525spec.htm>

Bússola Analógica Pewatron

Esta bússola é idêntica à anterior (Dinsmore 1525). As vantagens relativamente à anterior são: existe no mercado europeu e o tempo de reacção é de cerca de 0.5 a 1 segundo para variações de 90°.

Não escolhemos esta bússola porque tinha que vir da Suíça e o tempo de reacção é baixo para as tarefas que tínhamos em mente (odometria ou seguimento de direcção)

Especificações em: <http://www.pewatron.com/GB/default.htm> (procurar por “Kompass”)

Bússola digital Vector 2X (também conhecida por V2X)

A taxa de refrescamento é de 2.5Hz na resolução mais alta e 5Hz na resolução mais baixa.

Os dados são comunicados pelo protocolo SPI a 3v.

Não escolhemos esta bússola porque com o DAQ não é possível extrair os dados.

Especificações:

<https://www.pnicorp.com/downloadResource/c40c/manuals/4/Vector2XManual.pdf>

Hitachi HM55B Compass

Bússola com Interface série e 6 bits de resolução (64 resoluções possíveis)

A taxa de refrescamento é de cerca de 25 Hz.

Não escolhemos esta bússola porque com o DAQ não temos forma de extrair os dados, além de que a resolução não é das melhores.

Especificações: <http://www.robotstore.com/download/Compassdocumentation.pdf>

CMPS03 – Robot Compass Module

Esta bússola foi desenhada a pensar em aplicações robóticas. Tem uma taxa de refrescamento de 10Hz a 15Hz (consoante o ângulo medido). Este módulo proporciona uma interface por I2C e por PWM com uma resolução de 0.1°.

Escolhemos esta bússola porque tem uma boa taxa de refrescamento (além de que com a interface disponibilizada passa dos 0° aos 359.99° logo no ciclo seguinte, sem a existência de posições intermédias). Não podemos utilizar a interface I2C com o DAQ, no entanto fazendo uma amostragem do PWM conseguimos retirar os dados com uma resolução de 1°.

Especificações: <http://www.robot-electronics.co.uk/htm/cmps3doc.shtml>