



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
TRABALHO DE CONCLUSÃO EM ENGENHARIA DE
CONTROLE E AUTOMAÇÃO



Desenvolvimento de plataforma robótica omnidirecional

Autor: Emílio Dolgener Cantú

Orientador: Eduardo Perondi

Porto Alegre, 10 de novembro de 2017

Sumário

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract	vii
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xi
Lista de Abreviaturas e Siglas	xii
Lista de Símbolos	xiii
1 Introdução	1
2 Revisão Bibliográfica	5
2.1 Fundamentação Teórica	5
2.2 Estado da Arte	7
3 Especificação e montagem do protótipo	9
4 Desenvolvimento Teórico	11
5 Implementação dos algoritmos	13
6 Avaliação experimental	15
7 Resultados	17
8 Conclusão e Trabalhos Futuros	19
9 Referências	21
Apêndices	25
A Custo dos componentes utilizados	26

Agradecimentos

Agradeço a todo mundo que ajudou.

Resumo

O presente trabalho apresenta a implementação de uma base robótica omnidirecional holonômica, utilizando 3 omniwheels. Foram implementados um sistema de controle e um método de odometria em malha aberta. Os resultados foram xxxx.

Abstract

This work shows the implementation of a holonomic omnidirectional robotic platform, using 3 omniwheels. Were also implemented a control system and a method for open loop odometry. As a result, xxxx.

Lista de Figuras

1	Projeção de crescimento do mercado de robótica móvel até 2020.	1
2	Diagrama de um robô móvel com três rodas omnidirecionais.	2
3	Desenho de uma roda omnidirecional.	3

Lista de Tabelas

1	Custo dos componentes utilizados no projeto.	26
---	--	----

1 Introdução

O interesse na área da robótica se dá pela multi-disciplinaridade do tema, que abrange um espectro de conhecimentos que vai desde mecânica estrutural até a aplicação de teorias de controle sofisticadas. A área ainda se estende por eletrônica, elétrica, computação e até mesmo psicologia. Assim, considera-se que esta área é bastante adequada a um trabalho de conclusão de um curso igualmente abrangente, que é a Engenharia de Controle e Automação.

Em aplicações industriais, a maioria dos robôs utilizados são manipuladores, que realizam tarefas repetitivas – como soldagem ou montagem de peças – com precisão e rapidez adequados a cada aplicação. Estes robôs, no entanto, são em geral fixos, e daí surge o estudo da robótica móvel: como um robô pode se mover sem supervisão e interagir com o mundo real? (Siegwart et al. (2011)) Além do interesse acadêmico, existe um significativo interesse comercial, visto que o mercado de robôs móveis, que estava em torno de 4,5 bilhões de dólares americanos em 2014, tende a duplicar até 2020 (Markets and Markets (2015)).

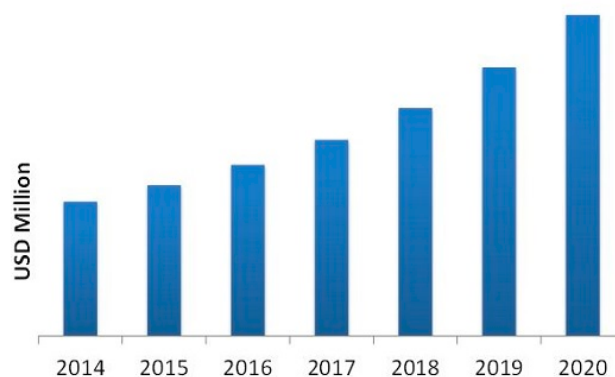


Figura 1: Projeção de crescimento do mercado de robótica móvel até 2020.

Fonte: Markets and Markets (2015)

Segundo Lynch and Park (2017), robôs móveis são divididos em robôs não-holonômicos e robôs omnidirecionais, com diferenças significativas em planejamento de trajetória, controle e modelagem dos dois tipos de robô. Diante da natureza do presente trabalho de conclusão de curso, o escopo foi definido no âmbito dos robôs holonômicos omnidirecionais, que se destacam comercialmente pela habilidade de realizar transporte de cargas pequenas em espaços confinados – como corredores de hospital e depósitos de armazenamento que buscam o aumento da capacidade sem perder agilidade logística nem aumentar o espaço necessário nas instalações. Academicamente, o controle de rodas omnidirecionais apresenta diversos problemas interessantes, vários dos quais serão descritos ao longo do presente trabalho. O desenvolvimento de uma plataforma robótica omnidirecional holonômica se torna útil para futuras aplicações em diversas áreas de investigação em robótica, controle e automação.

O presente trabalho consiste no desenvolvimento (tanto teórico quanto experimental) de uma plataforma robótica que possa se movimentar de maneira autônoma em qualquer direção do plano sem necessidade de reorientação – apresentando holonomicidade. Após uma avaliação na bibliografia sobre os tipos de robôs factíveis de serem construídos no tempo previsto com os recursos financeiros disponíveis, optou-se pela seguinte configuração. A plataforma considerada mais adequada utiliza 3 *omniwheels*, cada uma acionada por um motor elétrico dedicado, conforme o modelo mostrado na Figura 2. Como as rodas são montadas de maneira fixa no chassi, este tipo de robô ainda oferece a vantagem de ser construído com uma estrutura mecânica mais simples, como mencionado por Siciliano and Khatib (2016). As rodas omnidirecionais utilizadas podem ser vistas em detalhe na Figura 3. O sistema de movimentação é controlado por software processado em um computador embarcado a partir dos sinais fornecidos por sensores inerciais e de odometria.

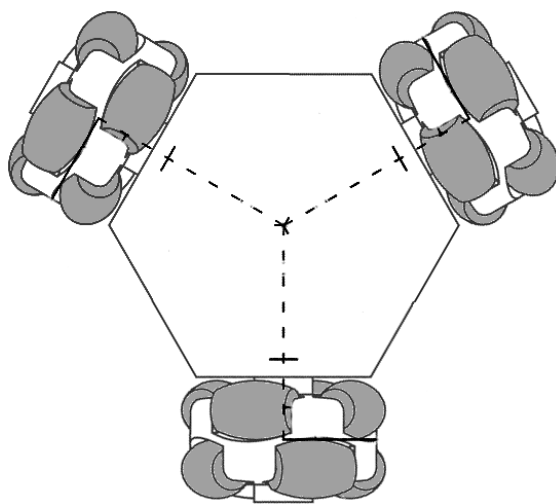


Figura 2: Diagrama de um robô móvel com três rodas omnidirecionais.

Fonte: adaptado de Ritter (2016)

Este trabalho tem como **objetivo geral** projetar, construir, colocar em operação e testar uma plataforma robótica omnidirecional de baixo custo, mas com características semelhantes às dos sistemas comerciais. Para atingir esse objetivo, se devem alcançar os seguintes **objetivos específicos**:

- Modelagem do robô;
- Especificação e construção de um protótipo;
- Implantação de um algoritmo de controle;
- Implantação de instrumentação e algoritmo de localização;
- Realizar experimentos de seguimento de trajetórias e analisar os resultados obtidos.

O trabalho está organizado da seguinte maneira:

- Na Seção 2, é apresentada a revisão bibliográfica, versando sobre robótica móvel, técnicas de



Figura 3: Desenho de uma roda omnidirecional.

Fonte: adaptado de Nexus (2016)

controle utilizadas na área e um breve resumo sobre métodos de localização, além de uma exposição dos trabalhos mais recentes envolvendo robôs omnidirecionais;

- Na Seção 3, especificação do hardware, estrutura mecânica e montagem do protótipo;
- Na Seção 4, é apresentado o desenvolvimento teórico da modelagem do robô e dos algoritmos de controle e localização;
- Na Seção 5 são implementados os algoritmos descritos na seção anterior;
- Na Seção 6, é desenvolvido e realizado um experimento para avaliar o desempenho do robô projetado;
- Por fim, na Seção 7, serão apresentados as análises e discussões sobre os resultados dos experimentos, a conclusão sobre o trabalho como um todo e algumas propostas para futuros trabalhos.

Além do descrito, o trabalho ainda contém os seguintes apêndices:

- Apêndice A, da descrição dos custos do projeto;
- o q mais vier.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Fundamentação Teórica

Para que se possa compreender o comportamento de um robô e desenvolver aplicações, é necessário obter o modelo de tal robô. Para robôs móveis, em contraste com braços robóticos, por exemplo, há um nível de complexidade adicional na estimação da posição do robô, visto que a plataforma móvel não possui nenhuma extremidade fixa em um ponto conhecido. No caso do robô omnidirecional com 3 rodas, se deseja obter um **modelo cinemático** que relacione as velocidades de cada roda à posição do robô no ambiente. Para robôs móveis em geral, primeiro se deve analisar as restrições de movimento adicionadas ao sistema por cada roda. Ao se utilizar rodas omnidirecionais, tais restrições não existem, simplificando a obtenção da cinemática direta do TOMR. Tal análise é demonstrada por diversos autores, como Siegwart et al. (2011), por exemplo, e será utilizada nas próximas seções. Ainda de acordo com os autores, conforme a velocidade de operação aumenta, se torna importante realizar a análise dos efeitos dinâmicos do sistema – massa e força – durante a implantação. A **modelagem dinâmica** do robô em questão ainda é discutida, variando conforme a aplicação desejada. VERIFICAR ESSA ÚLTIMA INFO.

Siegwart et al. (2011): seguimento de trajetória: malha aberta (3.6.1); Feedback (3.6.2) do livro: It is very similar to the controllers presented in [39, 100]. Others can be found in [8, 52, 53, 137]. Controle com uma matriz de ganhos K para o espaço de estados. Estável e tal. Comentam sobre camadas: planejamento -> decisão -> controlador em tempo real -> hardware.

Lynch and Park (2017): Controle realimentado em robôs omnidirecionais é relativamente simples, visto que sempre há um conjunto de velocidades para as rodas que ocasiona numa certa velocidade (translacional e rotacional) para o robô, \dot{q} . Linearmente controlável se **kalman rank condition satisfied** -> **VERIFICAR ISSO AQUI (13.3.2)**. Definição de controlabilidade logo depois, e tenho q entender melhor. Posso dizer q o TOMR é controlável?

Siciliano and Khatib (2016): Capítulo 8, torque computado. Vou precisar?

Spong et al. (2005): Capítulo 8.2, PD CONTROL REVISITED

Lynch and Park (2017): Odometry is the process of estimating the chassis configuration q from wheel motions, essentially integrating the wheel velocities. Since wheel rotation sensing is available on all mobile robots, odometry is cheap and convenient. Estimation errors tend to accumulate over time, though, due to unexpected slipping and skidding of the wheels and due to numerical integration error. Therefore, it is common to supplement odometry with other position sensors, like GPS, visual recognition of landmarks, ultrasonic beacons, laser or ultrasonic range sensing, etc. Those sensing modalities have their own measurement uncertainty, but errors do not accumulate over time. As a result, odometry generally gives superior results on short time scales, but the odometric estimates should either (a) be periodically corrected by other sensing modalities or, preferably, (b) integrated with other sensing modalities in an estimation framework based on a Kalman filter,

particle filter, or similar.

Siegwart et al. (2011): manipuladores robóticos podem ter sua posição medida diretamente, pois possuem uma parte fixa ao ambiente, enquanto robôs móveis devem ter sua posição inerentemente estimada, gerando erros, etc. Após obter os dados do ambiente, se deve fazer a **localização** do robô no ambiente. Sucesso em navegação necessita de **percepção** (a leitura dos sensores em si), **localização**, **cognição** (decidir agir de acordo com o esperado) e **controle da movimentação**, quando se aplica a ação desejada. Destas áreas, localização é uma das que mais vem sendo estudada. Diversas limitações surgem: ruídos dos sensores, ruídos dos atuadores, aliasing (?)... Odometria utilizando encoders, e dead-reckoning (definir) utilizando sensores de direção adicionais, necessitam de integrações, que acumulam erros. Assim o ideal é atualizar a posição de acordo com outros sensores de tempos em tempos, em relação a marcadores absolutos de posição no ambiente (landmarks). Mais detalhes nas fontes de erro na pg 185. Começa considerando ambientes cheios de objetos, para detectar a distância das paredes, e fala de lugares abertos como se fosse um problema. Talvez não seja bem localização o que eu tô fazendo. Markov: probabilidade sobre a posição. Kalman: fusão dos dados dos sensores (e é mais eficiente que Markov Chains). Filtro de Kalman é um método matemático que produz uma estimativa ótima do estado de um sistema baseado no conhecimento deste sistema e dos sensores utilizados, incluindo erros de medição e incertezas dos modelos

Siciliano and Khatib (2016): Capítulo 35, Sensor Data Fusion

Siegwart et al. (2011): Para implementar, além das propriedades cinemáticas apresentadas, restrições dinâmicas devem ser inseridas nos modelos quando se aumentam as velocidades envolvidas. Para realizar a motorização, se deve entender do controle utilizado (pg 81).

Siciliano and Khatib (2016): Capítulo 12, Arquitetura de sistemas robóticos.

Craig (2017): pg 350, chapter 12 -> linguagens de programação para robótica

O **Raspberry Pi** é um *single board computer*, que utiliza a arquitetura ARM em seu processador, ideal para dispositivos alimentados por baterias por consumir pouca energia e gerar pouco calor. O processador possui quatro núcleos, e um *clock* de 1,2 GHz – poder computacional equivalente há um computador de mesa comum. O RPi utiliza um sistema operacional GNU/Linux, e *software* deve ser desenvolvido para ser executado nesta plataforma. Há ainda 40 pinos de GPIO que podem ser utilizados para conectar sensores, atuadores e diversos componentes, e suporte nativo a I2C (Upton and Halfacree (2014)).

Para a comunicação dos periféricos com este computador, é necessário utilizar algum protocolo de comunicação. O protocolo **Inter-Integrated Circuit, ou Circuito Inter-Integrado**, é geralmente utilizado em robôs, com um grande suporte tanto pela RPi (Upton and Halfacree (2014)) quanto pelos componentes em geral utilizados (Invensense (2013) e a bússola e o arduino se eu usar). Com este protocolo, descrito em Semiconductors (2000), dados podem ser transmitidos a 100 Kbps – ou 400 Kbps quando utilizado o *fast mode*. São utilizados duas linhas bidirecionais no barramento: SDA para os dados e SCL para os sinais de *clock*. O número de dispositivos conectados

ao barramento só depende do limite de capacitância descrito na especificação. Resistores de *pull-up* são necessários para manter a linha em estado lógico alto quando não utilizada, porém estes resistores estão presentes internamente no *Raspberry Pi*, por exemplo.

ARDUINO? TEMPO REAL? PATH PLANNING e TRAJETÓRIA? INCLUIR A FUNDAMENTAÇÃO DE CADA SENSOR?

2.2 Estado da Arte

A grande maioria dos robôs construídos com *omniwheels* utiliza 3 rodas em uma configuração triangular simétrica – como apresentado na Figura 2 –, a exemplo de Ritter (2016), Samani et al. (2007), Williams et al. (2002) e Indiveri (2009), entre outros. Alguns autores, como Krinkin et al. (2015) e Rojas and Förster (2006) utilizam 4 rodas, sendo que este último desenvolveu algoritmos para que o robô continuasse operando mesmo que um dos motores deixe de funcionar. Em diversos trabalhos existe uma preocupação em relação a possíveis derrapagens das rodas ao aumentar a velocidade de operação. Williams et al. (2002) apresentam um estudo sobre os coeficientes de atrito de rodas omnidirecionais em diversas superfícies e um modelo dinâmico que leva tal efeito em consideração.

Há muitas técnicas de **controle** desenvolvidas para estes sistemas. Assim, é possível que cada autor utilize a que mais convenha às suas necessidades específicas. Ritter (2016) utiliza um controlador PID para cada roda, com parâmetros escolhidos empiricamente. Por sua vez, o robô torna-se difícil de controlar com velocidades acima de 1 m/s, segundo resultados de simulações. Samani et al. (2007) utilizam 3 PID, para controlar posição e orientação do robô. Em contraste, Rojas and Förster (2006) e Indiveri (2009) também utilizam PID, porém para o controle de individual de cada motor, utilizando apenas o modelo cinemático do sistema. Indiveri (2009) também sugere estratégias para evitar saturação dos atuadores.

Tanto Treesatayapun (2011) quanto Oubbati et al. (2005) utilizam redes neurais para ajustar parâmetros dos controladores, sendo que no primeiro se tem uma estrutura de controle baseada em redes neurais enquanto que no segundo se utilizam as redes para calcular os parâmetros de 5 controladores PID, melhorando o desempenho mesmo levando em consideração de não-linearidades nos modelos dinâmicos utilizados. Oubbati et al. (2005) ainda mencionam que os resultados obtidos não foram os melhores possíveis, devido à dificuldade de se coletar dados de treinamento para as redes.

A maioria das implementações de robôs móveis hoje em dia combinam diversas técnicas de **localização e odometria** para implantar a realimentação necessária aos sistemas de controle. Ginzburg and Nokleby (2013) propõem um sistema de localização para robô omnidirecional baseado em odometria (localização relativa) e triangulação ativa de sensores no ambiente (localização absoluta), com fusão de dados para obter o resultado final. Rojas and Förster (2006) utilizam a leitura dos *encoders* das rodas e uma câmera externa, enquanto que Garcia-Saura (2015) utilizam apenas um giroscópio e um sensor de distância. Röhrig et al. (2010), por outro lado, utilizam medições de distância utilizando sensores laser em AGV.

Carrasco and da Silva (2016) mostram que é possível executar um algoritmo de determinação de atitude a partir de uma IMU utilizando TRIAD, filtros de Kalman, covariância de Allen e a plataforma Arduino UNO, com razoável precisão. Park et al. (1996) também analisam fusão de dados utilizando um filtro de Kalman indireto para realizar *dead-reckoning* a partir da leitura de *encoders* e um giroscópio. Métodos de localização também são desenvolvidos em outras áreas, como relata Jimenez et al. (2009), que implementam três métodos de localização baseados em INS para trajetórias de pedestres, concluindo que os resultados podem ser melhorados quando há mais qualidade na detecção da orientação. Steinhoff and Schiele (2010) obtiveram resultados similares na mesma área.

Dos trabalhos mencionados, poucos entram em detalhes quanto ao *hardware* utilizado. Oubbati et al. (2005) utilizam um computador embarcado de 2,6 GHz, uma grande evolução em relação a Feng et al. (1989), que utilizavam um computador Motorola 68000 com aproximadamente um milésimo da capacidade computacional daquele. Takemura et al. (2007) e Loh et al. (2003) utilizam computadores externos, envolvendo atrasos na comunicação entre tais computadores e o robô. Carrasco and da Silva (2016) apresentam um sistema que implementa um filtro de Kalman em um microprocessador Arduino UNO, uma alternativa de baixo custo. Diversos trabalhos mais recentes, como Krinkin et al. (2015), utilizam especificamente o computador embarcado **Raspberry Pi** para o processamento e um **Arduino** para a interface com sensores e atuadores – solução esta também adotada neste trabalho.

3 Especificação e montagem do protótipo

SEÇÃO EM CONSTRUÇÃO

Para o projeto, foi realizada a compra dos componentes no Apêndice A (COMO CITAR APÊNDICES??)

Apesar da falta de redundância, robôs omnidirecionais com 3 rodas são utilizados com mais frequência por serem mais simples de se implementar, apresentarem custo mais baixo, e

Siegwart et al. (2011), pg 97: sensores.

4 Desenvolvimento Teórico

SEÇÃO EM CONSTRUÇÃO

MODELAGEM: Siegwart et al. (2011): considera omnidirecional uma coisa e holonômico outra. 3.2.1: dois sistemas de coordenadas, com 3 variáveis de interesse (x, y, θ), e as matrizes de transformação de um para outro. Toda modelagem tá na pg 33. Spong et al. (2005) fala sobre o espaço de estados, pg 16 do pdf. DEVE TER EM TORNO DE DEZ PÁGINAS

No caso de um robô omnidirecional com 3 rodas, Siegwart et al. (2011): considera omnidirecional uma coisa e holonômico outra. 3.2.1: dois sistemas de coordenadas, com 3 variáveis de interesse (x, y, θ), e as matrizes de transformação de um para outro. Rodas omnidirecionais garantem que não haja nenhuma restrição de movimento ao robô. Mobilidade: $\delta_m = 3$ (manipula diretamente os 3 graus de liberdade pela mudança da velocidade das rodas). Dirigibilidade: número de atributos controláveis para que se mude a direção do robô. $\delta_s = 0$. Manobrabilidade: $\delta_M = \delta_m + \delta_s = 3$. Differential Degrees of Freedom sempre igual a δ_m (graus de liberdade no velocity space $\dot{\theta}$). Como tem 3 DOF e 3 DDOF, é holonômico. A omnidirectional robot is a holonomic robot with DDOF = 3. Só cinemática é meio teórico. Para implementar, além das propriedades cinemáticas apresentadas, restrições dinâmicas devem ser inseridas nos modelos quando se aumentam as velocidades envolvidas.

PARK: pg 468

Foram escolhidas rodas suecas de 90 graus para permitir o uso de apenas 3 rodas, gerando economia de atuadores, peso reduzido, menor custo total, etc.

CONTROLE: Rojas and Förster (2006): Sugerem que utilizar um controlador para cada roda é melhor do que para cada grau de liberdade. No nosso caso, é tranquilo pois temos apenas 3 rodas, mantendo o mesmo número de controladores. Devido à realimentação externa lenta, utilizam um preditor no robô. Não entram em detalhes. motores: <https://www.banggood.com/6V-210RPM-Encoder-Motor-DC-Gear-Motor-with-Mounting-Bracket-and-Wheel-p-1044064.html?p=970719369296201312SGmaint.te>

ODOMETRIA: Samani et al. (2007): Descrevem fórmulas para odometria, e dizem que se isso não for muito bom, nem adianta ter um controlador massa. Utilizam três rodas passivas com os encoders, para evitar problemas. Solução a meio enjambrada.

Siegwart et al. (2011): 5.6.3.1 Introduction to Kalman filter theory

A **modelagem cinemática** do TOMR, conforme desenvolvida por Campion et al. (1996) e na forma utilizada por Samani et al. (2007), é dada por

$$\begin{pmatrix} \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \\ \dot{\phi}_3 \end{pmatrix} = \frac{1}{r} \begin{pmatrix} -\sin(\theta) & \cos(\theta) & R \\ -\sin(\frac{\pi}{3} - \theta) & -\cos(\frac{\pi}{3} - \theta) & R \\ \sin(\frac{\pi}{3} + \theta) & -\cos(\frac{\pi}{3} + \theta) & R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Diversos autores utilizam variações da mesma modelagem (Rojas and Förster (2006), Ritter (2016),

Pin and Killough (1994), entre outros). Ritter (2016) ainda implementa dois sistemas de coordenadas: um absoluto, do mundo, e outro centrado no robô, ambos rotacionados em relação um ao outro por θ . Na Equação 1, quando $\theta = 0$, temos as cinemáticas direta e inversa que pode ser utilizada para o controle das juntas, dadas por

$$\begin{pmatrix} \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \\ \dot{\phi}_3 \end{pmatrix} = \frac{1}{r} \begin{pmatrix} -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} & R \\ 0 & -1 & R \\ \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} & R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega \end{pmatrix} \quad (2)$$

e con

$$\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega \end{pmatrix} = \frac{r}{3R} \begin{pmatrix} -\frac{3R}{\sqrt{3}} & 0 & \frac{3R}{\sqrt{3}} \\ R & -2R & R \\ 1 & 1 & R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \\ \dot{\phi}_3 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Como pela classificação de Campion et al. (1996) um TOMR é caracterizado na categoria (3,0), o modelo cinemático da Equação 1 é controlável, estável e descreve a posição, orientação e suas derivadas de forma suficiente. O modelo cinemático da Equação 1 também é utilizado por Rojas and Förster (2006) e Ritter (2016), Loh et al. (2003) mostra que um TOMR não possui singularidades a partir da mesma modelagem (VERIFICAR).

Modelagens dinâmicas também podem ser utilizadas, relacionando o comportamento do robô não às velocidades das suas rodas, mas sim ao torque aplicado a cada uma pelos motores. No entanto, no caso do TOMR, se podem utilizar as velocidades das rodas como entradas, desde que haja um *loop* de controle que garanta tais velocidades durante o acionamento (CITAR AS NOTAS DE AULA DO WALTER??? control.pdf).

5 Implementação dos algoritmos

SEÇÃO EM CONSTRUÇÃO

6 Avaliação experimental

SEÇÃO EM CONSTRUÇÃO

7 Resultados

DEVE TER EM TORNO DE DEZ PAGINAS

8 Conclusão e Trabalhos Futuros

O trabalho apresentado neste relatório parcial conta com a introdução, revisão bibliográfica do estado da arte, revisão bibliográfica da fundamentação teórica (incompleta) e alguns comentários a respeito da modelagem que será utilizada. Todo o hardware já foi adquirido, e as próximas do trabalho são:

- fabricação do chassi do protótipo;
- finalização da revisão bibliográfica;
- modelagem do sistema;
- projeto e implantação dos controladores e métodos de odometria;
- montagem;
- experimentos e avaliações dos mesmos;
- adequação de detalhes do formato do trabalho, para que se enquadre ao modelo.

A escrita do trabalho é realizada em paralelo ao desenvolvimento do mesmo, para melhor controle e documentação do projeto.

9 Referências

- Campion, G., Bastin, G., Dandrea-Novel, B., 1996. Structural properties and classification of kinematic and dynamic models of wheeled mobile robots. *IEEE transactions on robotics and automation* 12 (1), 47–62.
- Carrasco, M. M., da Silva, A. L., 2016. Attitude determination for low cost imu and processor board using the methods of triad, kalman filter and allan variance. *Revista Brasileira de Iniciação Científica* 3 (2), 26–41.
- Craig, J., 2017. *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*. Pearson.
URL <https://books.google.com.br/books?id=JblZuwAACAAJ>
- Feng, D., Friedman, M. B., Krogh, B. H., 1989. The servo-control system for an omnidirectional mobile robot. In: *Robotics and Automation, 1989. Proceedings., 1989 IEEE International Conference on*. IEEE, pp. 1566–1571.
- Garcia-Saura, C., 2015. Self-calibration of a differential wheeled robot using only a gyroscope and a distance sensor. *arXiv preprint arXiv:1509.02154*.
- Ginzburg, S., Nokleby, S., 2013. Indoor localization of an omni-directional wheeled mobile robot. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*. Canada 37, 1043–1056.
- Indiveri, G., 2009. Swedish wheeled omnidirectional mobile robots: Kinematics analysis and control (1), 164–171.
- Invensense, 2013. *Mpu6050. Revisão 3.4*.
URL https://store.invensense.com/datasheets/invensense/MPU-6050_DataSheet_V3%204.pdf
- Jimenez, A. R., Seco, F., Prieto, C., Guevara, J., 2009. A comparison of pedestrian dead-reckoning algorithms using a low-cost mems imu. In: *Intelligent Signal Processing, 2009. WISP 2009. IEEE International Symposium on*. IEEE, pp. 37–42.
- Krinkin, K., Stotskaya, E., Stotskiy, Y., 2015. Design and implementation raspberry pi-based omni-wheel mobile robot. In: *Artificial Intelligence and Natural Language and Information Extraction, Social Media and Web Search FRUCT Conference (AINL-ISMW FRUCT), 2015*. IEEE, pp. 39–45.
- Loh, W., Low, K. H., Leow, Y., 2003. Mechatronics design and kinematic modelling of a singularityless omni-directional wheeled mobile robot. In: *Robotics and Automation, 2003. Proceedings. ICRA'03. IEEE International Conference on*. Vol. 3. IEEE, pp. 3237–3242.
- Lynch, K., Park, F., 2017. *Modern Robotics: Mechanics, Planning, and Control*. Cambridge

University Press.

URL <https://books.google.com.br/books?id=86G0nQAACAAJ>

Markets, Markets, 2015. Mobile robots market by environment (aerial, ground, and marine), component (hardware and software), application (professional service and personal service), and geography (north america, europe, asia-pacific, and the row) - global forecast to 2020. <http://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/mobile-robots-market-43703276.html>, acessado em 27/09/2017.

Nexus, 2016. 58mm plastic omniwheel. Acessado em 8/10/2017.

URL <http://www.nexusrobot.com/product/58mm-plastic-omni-wheel-for-lego-nxt-and-servo-motor-14135.html>

Oubbati, M., Schanz, M., Buchheim, T., Levi, P., 2005. Velocity control of an omnidirectional robocup player with recurrent neural networks. In: RoboCup. Springer, pp. 691–701.

Park, K., Chung, D., Chung, H., Lee, J. G., 1996. Dead reckoning navigation of a mobile robot using an indirect kalman filter. In: Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, 1996. IEEE/SICE/RSJ International Conference on. IEEE, pp. 132–138.

Pin, F. G., Killough, S. M., 1994. A new family of omnidirectional and holonomic wheeled platforms for mobile robots. IEEE transactions on robotics and automation 10 (4), 480–489.

Ritter, G. A., 2016. Modelo genérico de plataforma robótica omnidirecional em código aberto. Ph.D. thesis, UNISC, Santa Cruz do Sul, RS, trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia de Computação.

Röhrig, C., Heß, D., Kirsch, C., Künemund, F., 2010. Localization of an omnidirectional transport robot using ieee 802.15. 4a ranging and laser range finder. In: Intelligent Robots and Systems (IROS), 2010 IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, pp. 3798–3803.

Rojas, R., Förster, A. G., 2006. Holonomic control of a robot with an omnidirectional drive. KI-Künstliche Intelligenz 20 (2), 12–17.

Samani, H. A., Abdollahi, A., Ostadi, H., DaneshPanah, M., 2007. Comprehensive omni-directional soccer player robots. International Journal of Advanced Robotic Systems.

Semiconductors, P., 2000. The i2c-bus specification. Philips Semiconductors 9397 (750), 00954.

Siciliano, B., Khatib, O., 2016. Springer handbook of robotics. Springer.

Siegwart, R., Nourbakhsh, I., Scaramuzza, D., 2011. Introduction to Autonomous Mobile Robots. Intelligent robotics and autonomous agents. MIT Press.

URL <https://books.google.com.br/books?id=4of6AQAAQBAJ>

Spong, M., Hutchinson, S., Vidyasagar, M., 2005. Robot Modeling and Control. Wiley.

URL <https://books.google.com.br/books?id=wGapQAAACAAJ>

- Steinhoff, U., Schiele, B., 2010. Dead reckoning from the pocket-an experimental study. In: *Pervasive Computing and Communications (PerCom)*, 2010 IEEE International Conference on. IEEE, pp. 162–170.
- Takemura, Y., Sanada, A., Ichinose, T., Nakano, Y., Nassiraei, A. A., Azeura, K., Kitazumi, Y., Ogawa, Y., Godler, I., Ishii, K., et al., 2007. Development of “hibikino-musashi” omni-directional mobile robot. In: *International Congress Series*. Vol. 1301. Elsevier, pp. 201–205.
- Treesatayapun, C., 2011. A discrete-time stable controller for an omni-directional mobile robot based on an approximated model. *Control Engineering Practice* 19 (2), 194–203.
- Upton, E., Halfacree, G., 2014. *Raspberry Pi user guide*. John Wiley & Sons.
- Williams, R. L., Carter, B. E., Gallina, P., Rosati, G., 2002. Dynamic model with slip for wheeled omnidirectional robots. *IEEE transactions on Robotics and Automation* 18 (3), 285–293.

Apêndices

A Custo dos componentes utilizados

Há no mercado uma variada gama de componentes a serem utilizados em projetos robóticos. Para o projeto em questão, se utilizaram componentes que mostrassem um preço de mercado competitivo e grande disponibilidade. Dessa forma, se pode manter o projeto viável, mesmo que por vezes sacrificando um possível incremento de desempenho que se daria ao utilizar um componente mais robusto, por exemplo.

Na Tabela 1 se pode ver a lista de componentes adquirida e os respectivos custos. Nota-se que no caso das 3 rodas há – integrado ao valor apresentado – as taxas de importação e conversão de moedas, visto que esses componentes foram importados dos Estados Unidos. Também é importante mencionar que o chassi foi produzido sem custo BLABLABLAB LAMECC.

Tabela 1: Custo dos componentes utilizados no projeto.

Item:	Valor por unidade:	Quantidade:	Valor total:
Omniwheel	6	3	R\$ 130,00
Motor c/ encoder	R\$ 119,00	3	R\$ 357,00
Driver	R\$ 15,00	2	R\$ 30,00
Raspberry Pi	R\$ 148,00	1	R\$ 148,00
microSD 16GB	R\$ 34,00	1	R\$ 34,00
Arduino Mega	R\$ 40,00	1	R\$ 40,00
IMU MPU6050	R\$ 9,00	1	R\$ 9,00
Magnetômetro HMC5883	R\$ 12,80	1	R\$ 12,80 main.tex
Chassi	R\$ 5,00	1	R\$ 5,00
Bateria	R\$ 100,00	1	R\$ 100,00
Reguladores de Tensão	R\$ 4,98	4	R\$ 19,96
Diversos	R\$ 30,00	X	R\$ 30,00
Custo Total:			R\$ 924,76

Numa escala de preços em robótica, se percebe que (COMPARAR OS PREÇOS DE OUTROS PROTÓTIPOS??)