



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, 22 de outubro 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	5
3 Especificação e montagem do protótipo	7
4 Desenvolvimento Teórico	9
5 Implementação dos algoritmos	11
6 Avaliação experimental	13
7 Resultados	15
8 Conclusão e Trabalhos Futuros	17
9 Referências	19
Apêndices	21
A Custo dos componentes utilizados	22

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.	22
---	--	----

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)).

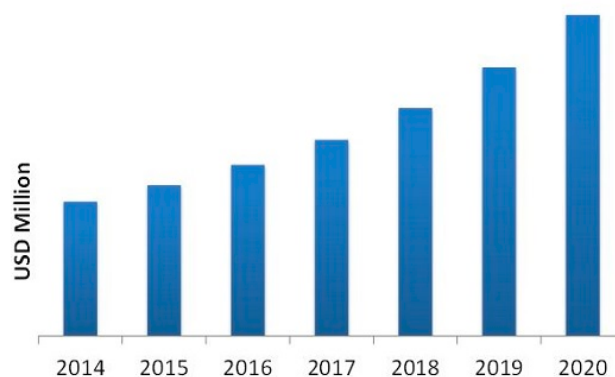


Figura 1: Projeção de crescimento do mercado de robótica móvel até 2020.

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.

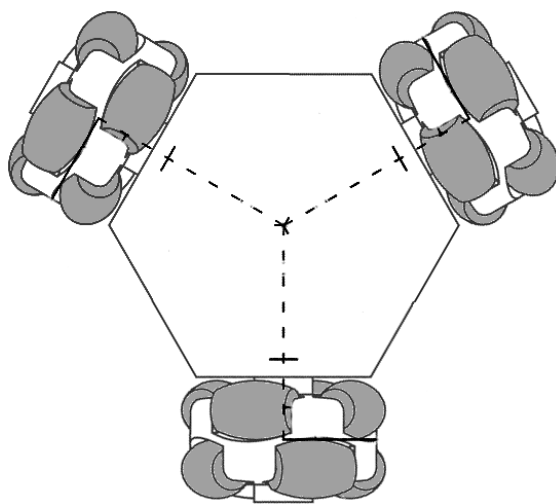


Figura 2: Diagrama de um robô móvel com três rodas omnidirecionais.

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

EM CONSTRUÇÃO

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

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

4 Desenvolvimento Teórico

DEVE TER EM TORNO DE DEZ PÁGINAS

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.

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

6 Avaliação experimental

7 Resultados

DEVE TER EM TORNO DE DEZ PAGINAS

8 Conclusão e Trabalhos Futuros

EM TORNO DE DUAS PAGINAS

9 Referências

- Campion, G., Bastin, G., Dandrea-Novet, 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.
- 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.
- 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.
- 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>
- 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.
- 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??)