

Modelagem e Controle PID de Robos Móveis Aplicados a Categoria *Very Small Size* de Futebol de Robôs

Lucas L. R. da Silva¹, Paulo F. F. Rocha¹, André L. C. Ottoni¹, João C. N. Bittencourt¹

¹Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas (CETEC)
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB)
R. Rui Barbosa, Cruz das Almas - BA, 44380-000 - Brasil

Abstract. *Robotics is a branch increasingly present in our daily life, whether in homes or the service and industrial sectors. To develop new solutions in robotics, some competitions have been created over the years, like the robot soccer competitions of RoboCup created in 1997. Very Small Size is one of the RoboCup categories in which each team must develop three differential drive mobile robots. One of the main challenges related to the development of these robots is their control. In this regard, this work aims to model and apply the PID control technique for mobile robots of the Very Small Size category in a simulated environment. Two different strategies were proposed: the first strategy prioritizes the shortest path traveled to an objective point, and the other prioritizes the positioning of the robot when reaching this point. Both approaches are promising for application in a competitive environment.*

Resumo. *A robótica é uma área cada vez mais presente no cotidiano da sociedade, tanto nas residências quanto nos setores de serviços e industriais. Para impulsionar o desenvolvimento desta área e criar novas soluções, algumas competições foram criadas ao longo dos anos, como o futebol de robôs da RoboCup, criado no ano de 1997, que engloba categorias de robôs simulados e robôs móveis. Uma das categorias de robôs móveis é a Very Small Size, em que cada equipe deve desenvolver três robôs móveis do tipo diferencial. Um dos principais problemas relacionados ao desenvolvimento destes robôs é o controle dos mesmos. Neste sentido, o presente trabalho tem como objetivo a modelagem e aplicação da técnica de controle PID para robôs móveis da categoria Very Small Size em ambiente simulado. Foram propostas duas estratégias diferentes, uma priorizando o menor caminho percorrido a um ponto objetivo e outra priorizando o posicionamento do robô ao chegar neste ponto. Ambas abordagens são promissoras para aplicação em ambiente competitivo.*

1. Introdução

A robótica é uma ciência que estuda as tecnologias associadas à construção e concepção de robôs. Sendo uma área multidisciplinar da engenharia [Romero et al. 2014]. Tendo uma grande abrangência de aplicações em diferentes áreas desde a medicina, produção industrial e até mesmo em ambientes domésticos [Romero et al. 2014].

Através da robótica surge um novo conceito, a robótica móvel. Sendo robôs capazes de realizar tarefas e de se moverem em ambientes dinâmicos sem a necessidade de

alguém para direcioná-los. Para que isso aconteça, os robôs devem adquirir conhecimento sobre o ambiente, tomar decisões, localizar-se e se deslocar em meio a um conjunto de trajetórias [Heinen 2002].

O futebol de robôs é um desafio da robótica móvel reconhecido mundialmente e amplamente discutido em fóruns científicos [Akin et al. 2013]. A primeira iniciativa no sentido do futebol de robôs foi proposta na década de 1990 como forma de incentivar pesquisas e experimentos no ambiente acadêmico na temática de robótica autônoma multiagente [Hoopes et al. 2003].

Nos torneios de futebol de robôs, além dos jogos, as equipes apresentam trabalhos onde descrevem suas experiências, possibilitando assim o desenvolvimento tecnológico e o intercâmbio de ideias. Incentivando pesquisas e experimentos no ambiente acadêmico na temática da robótica através de desafios e problemas onde várias tecnologias e metodologias são combinadas a fim de obter melhores resultados.

Os campeonatos de futebol de robôs são divididos em categorias, de acordo com a estrutura e tamanho do robô, tipo de locomoção (rodas ou humanoides) e ambiente (real ou simulado). A categoria *Very Small Size (VSS)*, a qual será utilizada como referência para o desenvolvimento deste estudo, tem como configuração uma partida de futebol de robôs composta por dois times, com cada time possuindo três robôs. Esses robôs atuam de forma autônoma, ou seja, sem interação humana durante as partidas.

Para o presente projeto, tem-se como objetivo a modelagem matemática e desenvolvimento de um controlador PID, de forma simulada, para um robô diferencial da categoria *Very Small Size (VSS)*. Aplicando um sistema de controle capaz de fazer com que um robô diferencial se locomova de um ponto para outro da melhor forma possível, usando suas velocidades linear e angular como variáveis de controle.

2. Fundamentação teórica

Esta seção apresenta alguns conceitos fundamentais de modelagem robôs diferenciais e de controle que foram utilizados neste trabalho.

2.1. Controle e Modelagem Matemática de Robôs Móveis

Um sistema de controle pode ser definido como um conjunto de componentes físicos conectados ou relacionados de maneira a comandar, dirigir ou regular a si mesmo ou a outros sistemas. Para isso, é necessário realizar a modelagem matemática da planta, seguida do projeto do controlador.

Para obter um controlador que funcione bem e da forma esperada o seu projeto deve passar pela modelagem matemática das variáveis controladas dos robôs para que haja uma relação mais eficiente entre maior desempenho e menor complexidade [Romero et al. 2014]. Os modelos matemáticos são divididos em:

Cinemático: descreve o movimento do robô ignorando a influência da massa sobre o mesmo, de modo que o robô é tratado como um ponto no espaço.

Dinâmico: estuda o movimento do robô, considerando grandezas como massa, momento de inércia e torque. Em projetos em que se requer altas velocidades ou transporte de cargas pesadas, o modelo dinâmico é o mais apropriado para ser aplicado.

A solução do problema de controle pode ser abordada considerando apenas o modelo cinemático, apenas o modelo dinâmico ou ambos os modelos, cinemático e dinâmico [Romero et al. 2014]. Especificamente na categoria de futebol de robôs dotados de rodas, como a *Very Small Size*, cujos movimentos são no plano bidimensional e os robôs são leves, é predominantemente adotado o modelo cinemático para o projeto de controladores [Andreotti et al. 2016]. Entretanto, existem trabalhos na literatura que adotam os modelos cinemático e dinâmico [Abiyev et al. 2017]

Tendo como base a modelagem cinemática e as características de um robô móvel na categoria *Very Small Size* para futebol de robôs, o dispositivo utilizado neste trabalho é o robô diferencial. Sendo um robô que possui duas rodas motorizadas que funcionam de maneira independente e mais um roda, chamada roda boba, não motorizada e que funciona para dar sustentação ao mecanismo.

A representação espacial do robô no mundo bidimensional será um vetor de posição P que conta com as suas coordenadas. Esta representação, em coordenadas cartesianas, é dada por:

$$P = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

em que x a posição do robô no eixo- x , y a posição do robô no eixo- y e θ o ângulo de orientação do robô, todos relativos ao seu referencial inercial.

Para modelagem cinemática, identifica-se os parâmetros necessários para aplicação de controle. No caso de um robô diferencial, as velocidades linear v e angular w são os parâmetros controlados a partir da representação espacial, descrita anteriormente, do robô.

A partir da decomposição vetorial é possível converter as velocidades descritas pelo par (v,w) no referencial global. O modelo cinemático é descrito por:

$$\dot{P} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Portanto, o modelo cinemático para o robô diferencial relativo ao referencial global é não-linear. A Figura 1 mostra um robô móvel diferencial no plano cartesiano de coordenadas e suas variáveis de controle.

No modelo de controle em malha aberta os comandos inseridos ao robô não são verificados. Neste caso, espera-se que no final do processo os parâmetros de controle (velocidades linear e angular) apresentem o comportamento desejado. Porém devido ao dinamismo de uma partida de futebol de robôs é fundamental que os robôs diferenciais reajam a perturbações externas, já que estes robôs terão diferentes trajetórias e consequentemente valores distintos de velocidades durante todo o processo. Tornando então ideal a utilização de um sistema de controle em malha fechada, com esse sistema pode-se utilizar as informações de posição e velocidades para calcular os erros e corrigir o movimento do robô, garantindo com mais precisão o seguimento de sua trajetória.

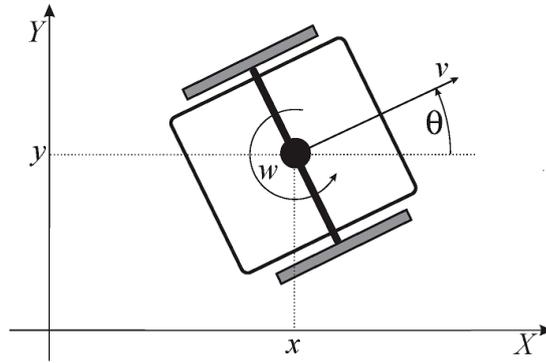


Figura 1. Robô diferencial no plano bidimensional [Guechi et al. 2019].

Neste sentido, uma possibilidade é fazer a transformação do modelo cinemático em malha aberta e cartesiano para um modelo cinemático em malha fechada e polar, podendo então trabalhar com parâmetros que utilizam comprimento e ângulo como coordenadas polares em um plano bidimensional. Conhecendo a posição inicial do robô (referencial inercial) e posição objetiva do mesmo (referencial objetivo), pode-se então calcular os erros e em seguida trabalhar uma maneira de eliminá-los para que o robô se movimente da maneira desejada.

Os parâmetros utilizados para que a transformação polar se suceda são a distância euclidiana ρ_t , o ângulo de direcionamento α_t e a diferença angular β_t entre a posição inicial e a posição objetiva do robô em função do tempo t , respectivamente,

$$\rho_t = \sqrt{(\Delta x_t)^2 + (\Delta y_t)^2} \quad (3)$$

$$\alpha_t = \gamma_t - \theta_{R,t} \quad (4)$$

$$\beta_t = \theta_G - \gamma_t \quad (5)$$

em que γ_t sendo a diferença angular entre a posição do robô de referência e o ponto objetivo, o $\theta_{R,t}$ sendo ângulo de orientação do robô referencial, e θ_G sendo ângulo de orientação do robô objetivo.

Calculando através da derivada temporal é possível saber as velocidades dos parâmetros ρ_t , α_t e β_t . O novo modelo cinemático em malha fechada é descrito por:

$$\begin{bmatrix} \dot{\rho}_t \\ \dot{\alpha}_t \\ \dot{\beta}_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos(\alpha_t) & 0 \\ \frac{\sin(\alpha_t)}{\rho} & -1 \\ -\frac{\sin(\alpha_t)}{\rho} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix}. \quad (6)$$

2.2. Controlador PID

O controlador tem como função manter a variável de controle o mais próximo de um valor previamente determinado, de modo que quando houver um distúrbio no sistema o controlador deve agir para retornar a variável controlada ao valor desejado. O sistema de

controle será feito através da comparação entre o valor do estado atual e o valor do estado desejado.

A técnica de controle mais popular entre as equipes de futebol de robô é o do tipo PID [Dadalto et al. 2016, Lopes et al. 2018], no qual o ajuste do erro (diferença entre estado desejado e estado atual da variável controlada) é feito de forma proporcional (P), integral (I) e/ou derivativa (D) [Ogata 2011]. O sinal de saída $u(t)$ do controlador PID é dado por:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t), \quad (7)$$

Em que, K_p , K_i e K_d são as constantes dos ganhos proporcional, integrativo e derivativo, respectivamente, e $e(t)$ corresponde ao erro.

3. Metodologia

Para o desenvolvimento do projeto, foram feitos estudos bibliográficos referentes a temas como o futebol de robôs, modelagem cinemática de um robô diferencial e a lei de controle do tipo PID, a fim de compreender os principais conceitos do problema proposto.

Infelizmente não seria possível a realização de aplicação de testes com um robô físico, já que houve a impossibilidade do uso de laboratório devido a pandemia. Dessa forma, a melhor solução foi a de encontrar um ambiente simulado em que pudesse ser realizado esses testes da forma mais real possível, e com isso sanar alguns problemas na execução prática dos conhecimentos obtidos até então. Através do software MATLAB, foi possível desenvolver uma plataforma de simulação e análise de tarefas de controle de um robô diferencial.

Durante todo o processo de incrementação de conhecimento para realização dos testes, foram feitas plotagens de um cenário que visualmente se assemelha ao máximo com um ambiente real de testes. Foi ambientalizado, além de um robô diferencial, um campo que pudesse delimitar o espaço que o robô teria numa competição de futebol de robôs. Também houve uma preocupação para a simulação do movimento deste robô, de forma a ser mais fiel possível ao seu movimento no mundo real. A Figura 2 mostra o ambiente simulado desenvolvido para testes de controle do robô diferencial.

As linhas mais grossas em preto, simulam as demarcações limites de um campo de futebol da categoria *Very Small Size*. O sólido representado em vermelho é o robô diferencial que se movimenta em sua trajetória global, referente a linha verde, o robô diferencial deixa um rastro do movimento que é realizado ao longo do tempo, o rastro é representado pela linha em azul. Além disso, o sólido em amarelo representa o ponto objetivo local para o robô, demonstrando também a angulação em que o mesmo deverá chegar naquele ponto. Na parte superior, são mostrados os valores de velocidades linear e angular, e os parâmetros do controlador ao longo do tempo.

O primeiro passo foi criar um vetor de posição inicial do robô, referente a Equação 1, os valores colocados para cada coordenada x e y , e para o ângulo do robô determinam em qual local do espaço e de que forma o robô começa seu movimento. Um segundo vetor foi criado, este com a função de definir o caminho que o robô irá seguir, contendo objetivos locais em sua trajetória. Este vetor de caminho também deve ser proporcional a

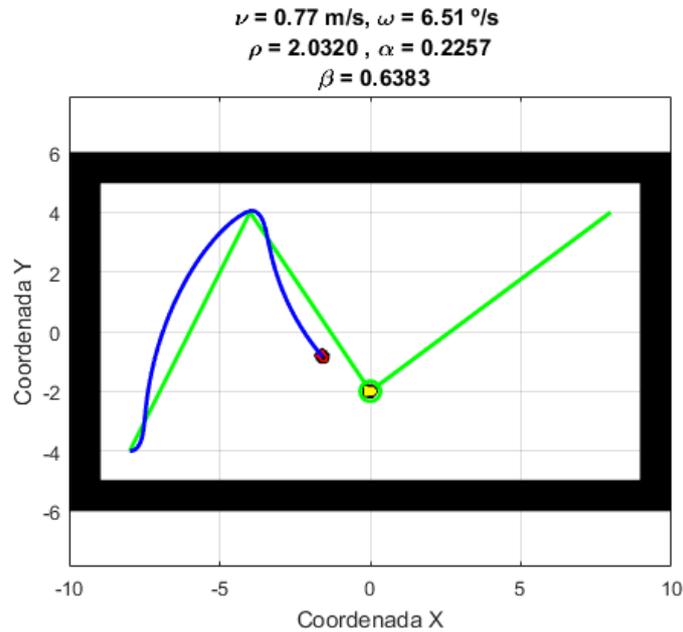


Figura 2. Ambiente simulado do projeto.

Equação 1, possuindo pontos de suas coordenadas x e y , e o ângulo desejado para que o robô chegue em cada local.

A sintonia do controlador PID foi feita na extração de dados experimentais, seguindo procedimentos adotados pela prática do sistema de controle utilizando o método empírico de Ziegler–Nichols como critério de estabilidade. [Ribeiro et al. 2016].

Para este procedimento, o ganho integrativo K_i e o ganho derivativo K_d foram eliminados, valores iguais a zero, tornando assim apenas em um controlador proporcional. Em seguida, para um determinado caminho foram realizados experimentos com valores diferentes do ganho proporcional K_p para observar o comportamento do robô. Se o robô não seguia o caminho proposto de forma adequada, o valor do ganho proporcional era aumentado, se o robô oscilava muito durante o caminho, o valor do ganho proporcional era diminuído. Até chegar em um valor ideal, como sendo um ganho crítico K_c .

Com dT sendo definido, como o intervalo de tempo entre um instante e outro a ser considerado na simulação, e encontrando o período crítico P_c do processo, dividindo a quantidade de oscilações pelo tempo total de simulação do caminho, foi possível calcular um conjunto de valores K_p , K_i , e K_d por meio da tabela de Ziegler-Nichols mostrada na Tabela 1.

Para o planejamento em malha fechada os erros serão calculados entre a posição do ponto objetivo e a posição que o robô se encontra. E por meio desses erros, os cálculos dos parâmetros da malha fechada são feitos, de acordo com a Equação 3, Equação 4 e Equação 5.

Para implementação do controle PID, de acordo com a Equação 7, é necessário a realização dos cálculos da integral e da derivada dos parâmetros do controlador. A forma utilizada computacionalmente para estes cálculos foi a de trabalhar com definições simples. Sendo a integral a soma de cada contribuição de valores do parâmetro conforme

Tabela 1. Método de Ziegler-Nichols [Ribeiro et al. 2016].

Tipo de controle	K_p	K_i	K_d
<i>P</i>	$0,50K_c$	0	0
<i>PI</i>	$0,45K_c$	$1.2K_p dT/P_c$	0
<i>PD</i>	$0,80K_c$	0	$K_p P_c/(8dT)$
<i>PID</i>	$0,60K_c$	$2K_p dT/P_c$	$K_p P_c/(8dT)$

o tempo passa. E a derivada é a diferença entre o valor do parâmetro atual e o valor imediatamente anterior conforme o tempo passa. E então, a lei de controle PID é aplicada na velocidade angular do robô diferencial, e a velocidade linear do robô é definida como máxima e constante.

Por fim, as velocidades são decompostas nos eixos x e y do ambiente simulado e é calculado às contribuições de velocidades para cada uma das componentes da posição do robô, de acordo com a Equação 2. Para atualização da posição P atual do robô, foi feita a soma de contribuição de cada componente de posição do robô diferencial.

4. Resultados e Discussão

Os testes foram realizados em um mesmo trajeto e com o robô possuindo velocidade linear constante no valor de 0,77 m/s, visando apenas encontrar o melhor valor de ganho proporcional K_p que geraria o ganho crítico K_c para formulação dos outros ganhos, como mostrado na Tabela 1.

Mesmo encontrando os valores de ganhos ideais para o caminho a ser seguido pelo robô, foram analisadas duas maneiras diferentes de se acompanhar o movimento do robô através da sua Lei de Controle. No intuito de verificar a performance quanto à precisão e velocidade de resposta das duas maneiras diferentes, e com isso testar o projeto desenvolvido a fim de encontrar uma solução mais adequada de movimento para um robô diferencial participante da competição de futebol de robôs da categoria *Very Small Size*.

A primeira maneira foi com o uso dos dois parâmetros de controle para velocidade angular do robô, o parâmetro α_t e β_t , Equação 4 e 5 respectivamente. Na Figura 3 é mostrado a variação da velocidade angular do robô em relação ao tempo deste caso.

Ainda considerando os parâmetros α_t e β_t , na Figura 4 é mostrada a comparação entre o melhor caminho (com menor distância) a ser seguido pelo robô e o caminho percorrido pelo mesmo usando.

A outra maneira avaliada, foi utilizando apenas o parâmetro α_t , Equação 4, para controle da velocidade angular do robô. Também foram gerados os gráficos da velocidade angular do robô em relação ao tempo (Figura 5) e a comparação entre a trajetória percorrida pelo robô controlado e o menor trajeto entre os pontos (Figura 6).

Comparando as duas maneiras, é possível perceber que os erros da trajetória no uso apenas do parâmetro α_t , Figura 6, são menores do que se utilizado os dois parâmetros

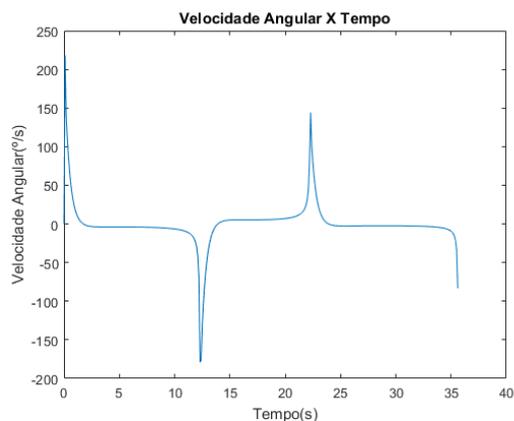


Figura 3. Velocidade angular em função do tempo considerando os parâmetros α_t e β_t .

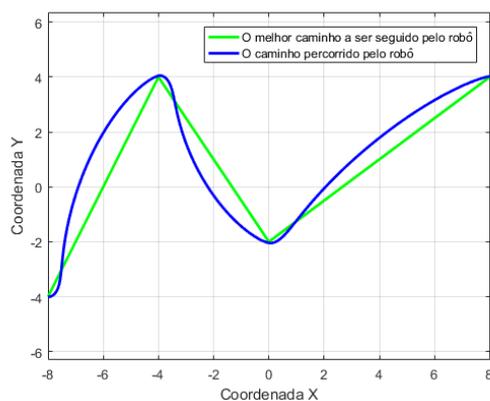


Figura 4. Trajetória desenvolvida pelo robô (em azul) utilizando os parâmetros α_t e β_t na estratégia de controle comparada a menor trajetória entre os pontos objetivos (em verde).

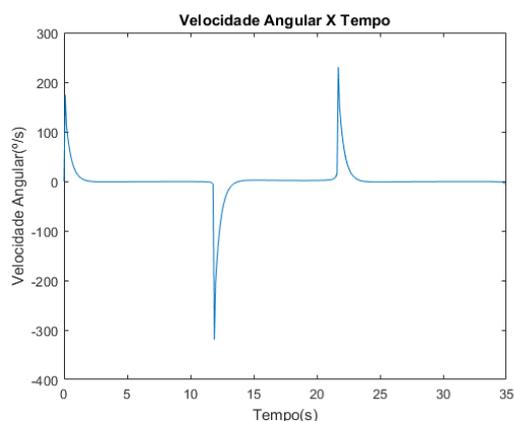


Figura 5. Velocidade angular em função do tempo considerando apenas o parâmetro α_t .

α_t e β_t , Figura 4. Isso se deve ao fato de que o parâmetro β_t se preocupa com a forma com que o robô chegará ao seu ponto objetivo, fazendo com que o robô chegue a cada

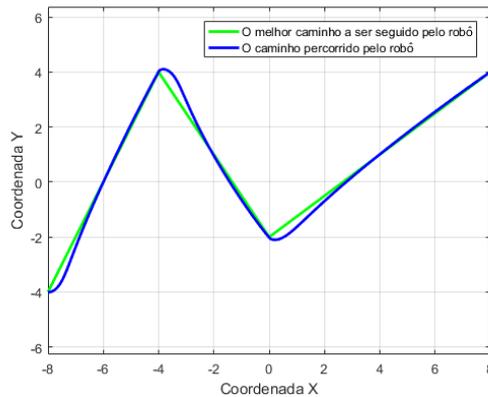


Figura 6. Trajetória desenvolvida pelo robô (em azul) utilizando apenas o parâmetro α_t na estratégia de controle comparada a menor trajetória entre os pontos objetivos (em verde).

ponto objetivo na posição de ângulo desejado pelo controlador. Retirando este parâmetro β_t , a única preocupação do controlador, através do parâmetro α_t , é a de chegar no ponto objetivo, sem se preocupar com a forma com que o robô chegará ao objetivo.

Outra diferença perceptível entre as duas maneiras, está nos gráficos gerados de velocidades angulares de cada uma. Observe que as velocidades angulares são maiores no ponto de partida e nos pontos objetivos devido a necessidade de rotação do robô. Entretanto, a velocidade angular possui picos de valores menores utilizando os dois parâmetros α_t e β_t (Figura 3) do que utilizando apenas o parâmetro α_t (Figura 5). Demonstrando que as curvas executadas pelo robô diferencial ao longo do caminho são feitas de maneiras mais bruscas na segunda maneira (parâmetro α_t) do que na primeira maneira (parâmetro α_t e β_t).

5. Conclusão

Neste trabalho foram estudadas duas maneiras diferentes de aplicar controle PID em robôs diferenciais com modelagem cinemática em malha fechada e polar. Na primeira usando as informações do ângulo de direcionamento, α_t , e da diferença angular entre a posição inicial e final do robô, β_t , e depois usando apenas o parâmetro α_t . Na finalidade do futebol de robôs, cada maneira usada pode contribuir para uma estratégia de jogo distinta. Pode-se ter um robô que chegue pelo menor caminho até o objetivo, mesmo sem garantir o direcionamento de chegada, se for usado apenas o parâmetro α_t . Como também, pode-se ter uma estratégia em que o robô percorra um caminho mais longo, porém chegando ao ponto objetivo com uma pose bem definida, usando os dois parâmetros.

De qualquer forma, o robô foi capaz de seguir o trajeto de forma muito sólida, eventualmente até com pouca diferença entre o menor caminho a ser seguido e o caminho efetivamente percorrido pelo robô, e sempre chegando aos pontos objetivos.

Desse modo, o modelo cinemático comprovou ser aplicável no controle de robôs da categoria *Very Small Size*, pelo menos para o ambiente simulado. É provável que ajustes do modelo na aplicação em robôs reais sejam necessários devido a influência dos outros sistemas que trabalham em conjunto com o controle, como a visão computacional e os sistemas eletrônico e mecânico.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Universidade Federal do Recôncavo da Bahia pelo apoio financeiro através do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica e Tecnológica, PIBIC/UFRB.

Referências

- Abiyev, R. H., Günsel, I. S., Akkaya, N., Aytac, E., Çağman, A., and Abizada, S. (2017). Fuzzy control of omnidirectional robot. *Procedia Computer Science*, 120:608–616.
- Akin, H. L., Ito, N., Jacoff, A., Kleiner, A., Pellenz, J., and Visser, A. (2013). Robocup rescue robot and simulation leagues. *AI magazine*, 34(1):78–78.
- Andreoti, S. E., Menezes, T. A., and Bordon, M. E. (2016). Controle de trajetória de um robô móvel com traço diferencial usando lógica nebulosa. *Mostra Nacional de Robótica (MNR)*.
- Dadalto, A. P., Tabchoury, G. A., Fonseca, G. A., Amitay, H. A., Miyamoto, H. K., de Melo, L. A., Junior, M. M., Coelho, M. d. C., Stringhini, P. H. F., Grego, P., et al. (2016). Um projeto de futebol de robôs autônomos baseado na categoria iee very small size soccer da competição brasileira de robótica.
- Guechi, E.-H., Belharet, K., and Blažič, S. (2019). Tracking control for wheeled mobile robot based on delayed sensor measurements. *Sensors*, 19(23):5177.
- Heinen, F. J. (2002). Sistema de controle híbrido para robôs móveis autônomos.
- Hoopes, D., Davis, T., Norman, K., and Helps, R. (2003). An autonomous mobile robot development platform for teaching a graduate level mechatronics course. In *33rd Annual Frontiers in Education, 2003. FIE 2003.*, volume 2, pages F4E–17. IEEE.
- Lopes, A., Mirahy, B., Barros, D., Moreira, E., do Nascimento, J., and Loures, V. (2018). Itandroids small size team description paper 2018.
- Ogata, K. (2011). Engenharia de controle moderno, 3ª.
- Ribeiro, T. J. B., Kashiwagi, M., Asato, O. L., de Souza, R. A., and Junior, W. R. G. (2016). Controlador pid aplicado a robótica móvel.
- Romero, R. A., Prestes, E., Osório, F., and Wolf, D. (2014). Robótica móvel. *Sao Paulo: LTC*.