

ADAPTAÇÃO DE UM AUTOMODELO PARA APLICAÇÕES DE ROBÓTICA MÓVEL NA AGRICULTURA¹

ADALBERTO I. S. OLIVEIRA*, MARCOS G. PRADO†, ANTONIO C. LEITE*

*Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro,
Departamento de Engenharia Elétrica,
CEP: 22451-900, Rio de Janeiro RJ, Brasil.

†Faculdade Independente do Nordeste,
Departamento de Engenharia de Computação,
CEP: 45055-030, Vitória da Conquista BA, Brasil.

adalberto@ele.puc-rio.br, marcosprado@fainor.com.br, antonio@ele.puc-rio.br

Abstract— In this work, we present the methodology used for the technological adaptation of a commercial car-like vehicle model to be applied to basic and advanced research in agricultural robotics. The mathematical model of the vehicle is based on a simple kinematic bicycle model, whereas the control algorithm is suitably designed using a kinematics-based approach. A basic idea is to adapt the control law developed for the unicycle and, according to some kinematic constraints, apply it to the bicycle. To verify and validate the modeling and control approaches presented here, computer simulations are performed on Rviz, the 3D visualization tool for ROS. Experimental results are included to illustrate the effectiveness and feasibility of the proposed methodology.

Keywords— Autonomous Vehicles, Robot Kinematics, Agricultural Robotics, Systems Integration

Resumo— Neste trabalho, apresenta-se uma metodologia para a adaptação tecnológica de um automodelo comercial para pesquisas básicas e avançadas na área de robótica agrícola. A modelagem matemática do veículo é baseada em um modelo cinemático simples do tipo bicicleta, enquanto que o algoritmo de controle é projetado a partir de uma abordagem cinemática. Uma ideia básica consiste em adaptar a lei de controle desenvolvida para o modelo do unicycle e, de acordo com algumas restrições cinemáticas, aplicá-la para o bicicleta. Simulações computacionais em Rviz, o ambiente de visualização 3D da plataforma ROS, são realizadas para verificar e validar as abordagens de modelagem e controle apresentadas. Resultados experimentais são incluídos para ilustrar a eficiência e a viabilidade da metodologia proposta.

Palavras-chave— Veículos Autônomos, Modelagem Cinemática, Robótica Agrícola, Integração de Sistemas

1 Introdução

Atualmente, a agricultura é um setor da economia que demanda tecnologias de áreas diversificadas tais como, integração de sensores, sistemas embarcados, processamento de imagem, e sistemas de comunicação (Edan, 2007). Desde as primeiras ferramentas utilizadas pelo homem primitivo até os implementos agrícolas dos dias atuais, os avanços tecnológicos têm contribuído para o aumento da produção de alimentos e, em um futuro próximo, também para a redução do consumo de água, fertilizantes e pesticidas, diminuindo os impactos ambientais no ecossistema. Alguns exemplos são o desenvolvimento de grãos transgênicos, resistentes às pragas e pesticidas e com produtividade superior aos convencionais (Edan, 2007), bem como tratores completamente autônomos, capazes de realizar tarefas como plantio, pulverização e colheita (Noguchi et al., 2001).

Além do uso em tarefas agrícolas de grande porte, os robôs têm se inserido no contexto da agricultura de precisão em atividades que empregam equipamentos de menor porte (Billingsley

et al., 2008). Dessa forma, tarefas como monitoramento de culturas, controle de pragas, colheita de frutas e fenotipagem de plantas, que requerem a coleta de amostras do solo e a captura de imagens, podem ser realizadas por pequenos robôs, sejam eles autônomos ou remotamente controlados, terrestres ou aéreos (Hernández et al., 2012; Puri et al., 2017).

Seguindo essa tendência, diversos protótipos de robôs móveis agrícolas tem sido desenvolvidos para executar uma ampla variedade de tarefas, considerando os inúmeros desafios encontrados no campo (Bechar and Vigneault, 2016). Em geral, esses mecanismos possuem soluções inteligentes e inovadoras baseadas em redes de sensores, sistemas de navegação autônoma ou semi-autônoma para desvio de obstáculos (Tangerino et al., 2011; Freitas et al., 2012), estruturas mecânicas modulares para reconfiguração cinemática *in-situ* (Freitas et al., 2009; Grimstad and From, 2017), sistemas de gerenciamento de energia, bem como sofisticados sistemas de controle. Contudo, a maioria desses mecanismos são desenvolvidos de maneira *ad-hoc* para realizar tarefas específicas, e possuem custos de construção, manutenção e logística de transporte elevados. Como um exemplo de soluções de baixo custo, pode-se citar a plataforma de teste para pesquisa e expe-

¹Esta pesquisa foi parcialmente financiada pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), através da concessão de uma Bolsa de Mestrado ao primeiro autor.

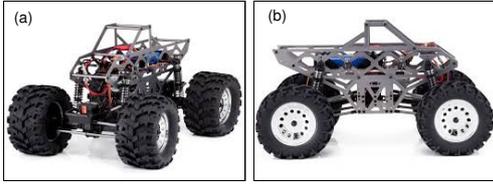


Figura 1: Estrutura original do Automodelo Ground Pounder (Redcat Racing): (a) vista em perspectiva; (b) vista lateral.

rimentação composta por múltiplos veículos cooperativos do tipo TXT-1 Monster Truck (Tamiya Inc.) apresentada em Cruz et al. (2007) para executar tarefas de vigilância em ambientes externos.

O presente trabalho descreve os procedimentos de adaptação do automodelo comercial Ground Pounder 1:10 RC Monstertruck (Fig. 1), produzido pela empresa Redcat Racing¹ para aplicações em robótica móvel. Em contraste com o desenvolvimento apresentado em Kouros and Petrou (2017), onde o mesmo equipamento foi utilizado para o mapeamento de ambientes internos (*indoor*), o presente trabalho utiliza as características de veículo fora de estrada apresentadas pelo modelo (e.g., sistema de suspensão independente e configurável, tração 4x4 nas rodas) para aplicações em ambientes externos (*outdoor*). Estas características tornam o modelo propício para atividades em ambientes hostis, tais como os ambientes agrícolas, considerando-se as condições adversas de clima e terreno que podem ser encontradas no campo e nas plantações em geral (e.g., calor excessivo, umidade elevada, solo arenoso, lama, etc.). Neste sentido, sua aplicação pode ser direcionada para atividades de inspeção e monitoramento de culturas, detecção de pragas e doenças nas lavouras, coleta de amostras de solos, entre outras (Billingsley et al., 2008).

O objetivo geral deste trabalho é apresentar a adaptação tecnológica de um automodelo comercial para o uso em pesquisas, básica e avançada, na área de robótica agrícola. Os objetivos específicos são: (i) desenvolver a modelagem matemática do veículo para projetar leis de controle que atendam às demandas das tarefas de interesse; (ii) projetar e construir os dispositivos eletrônicos para o controle computacional do equipamento; (iii) desenvolver os programas para a integração dos dispositivos físicos com o controle computacional; (iv) realizar testes experimentais em um ambiente controlado para avaliar, qualitativamente e quantitativamente, o desempenho do sistema robótico proposto. Em seguida, pretende-se validar o seu funcionamento em um ambiente externo, de terreno irregular e coberto por vegetação.

A escolha do modelo Redcat Ground Pounder deve-se ao fato de que, além de possuir baixo custo e características desejáveis de veículo fora

de estrada, o equipamento é um modelo em escala reduzida, permitindo o uso da similaridade dinâmica para validação de projetos em maior escala. Além disso, modelos em escala propiciam a redução de custos de manutenção e de logística de transporte durante a realização de ensaios experimentais, bem como minimizam os riscos de acidentes.

2 Modelagem Cinemática e Controle

Nesta seção, apresenta-se a modelagem cinemática bem como o algoritmo de controle utilizado para comandar a posição e a orientação do sistema robótico proposto.

2.1 Modelo do Biciclo

O automodelo utilizado possui uma estrutura cinemática denominada *car-like*. Nele, as rodas traseira são fixas e possuem movimento apenas no sentido longitudinal em relação ao solo (x, y), enquanto que as rodas dianteira podem rotacionar no eixo perpendicular ao plano de contato (Siciliano et al., 2009). Dessa forma, sem perda de generalidade, a estrutura do veículo pode ser representada pelo modelo cinemático do biciclo, como visto na Figura 2.

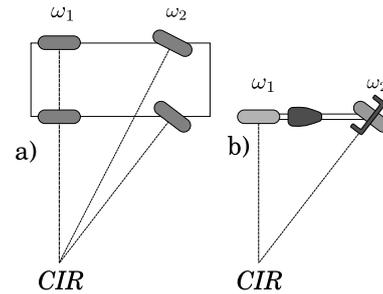


Figura 2: Centro Instantâneo de Rotação (CIR) e rodas ω_1 e ω_2 : (a) Modelo tipo *car-like* de quatro rodas com geometria Ackerman. (b) Modelo biciclo .

As restrições cinemáticas em um robô móvel estão relacionadas à contribuição que cada roda proporciona para o movimento, seja em função do seu tipo (e.g., padrão, castor, sueca) ou de seu posicionamento em relação ao centro de massa do veículo. Para cada roda padrão, que não apresenta deslocamentos laterais ou deslizamento, existe uma linha perpendicular em que não existe movimento. O encontro do prolongamento dessas linhas em cada roda define um ponto em torno do qual o veículo descreve uma trajetória circular, denominado Centro Instantâneo de Rotação (CIR). Como pode ser visto na Figura 2, os modelos Ackerman e do biciclo possuem apenas uma solução para o CIR, tornando-os cinematicamente equivalentes (Siegwart et al., 2011).

De acordo com o modelo do biciclo apresentado na Figura 3 (Siciliano et al., 2009), considera-

¹<http://www.redcatracing.com/>

se $q \in \mathbb{R}^4$ o vetor de coordenadas generalizadas definido por $q = [x \ y \ \theta \ \phi]^\top$, em que $(x, y) \in \mathbb{R}^2$ é a coordenada Cartesiana da posição do ponto de contato da roda traseira com o solo, $\theta \in \mathbb{R}$ é a orientação do veículo em relação ao eixo \vec{x} , $\phi \in \mathbb{R}$ o ângulo de esterçamento da roda dianteira, $\ell \in \mathbb{R}$ é a distância entre as rodas.

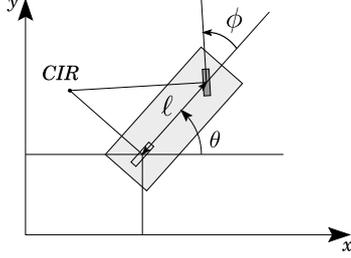


Figura 3: Coordenadas generalizadas e o centro de rotação instantâneo (CIR) de um biciclo.

Dessa forma, o movimento de um veículo com a configuração de biciclo está sujeito a duas restrições de rolamento puro, uma para cada roda. Então, as restrições não-holonômicas de Pfaffian (Siciliano et al., 2009) são dadas por:

$$0 = \dot{x} \sin(\theta + \phi) - \dot{y} \cos(\theta + \phi) - \ell \dot{\theta} \cos(\phi), \quad (1)$$

$$0 = \dot{x} \sin(\theta) - \dot{y} \cos(\theta), \quad (2)$$

em que (1) e (2) referem-se à restrição da roda direcional e da roda traseira respectivamente. O modelo diferencial cinemático do biciclo, com tração na roda traseira, pode ser expresso por:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \\ \tan(\phi)/\ell \\ 0 \end{bmatrix} v + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \omega, \quad (3)$$

ou em uma forma mais compacta como:

$$\dot{q} = g_1 v + g_2 \omega, \quad (4)$$

em que g_1 e g_2 são dois campos vetoriais de entrada (Siciliano et al., 2009) e $(v, \omega) \in \mathbb{R}^2$ é o sinal de controle a ser projetado, sendo $v \in \mathbb{R}$ a velocidade de condução da roda traseira e $\omega \in \mathbb{R}$ a velocidade de esterçamento da direção.

2.2 Analogia entre o Biciclo e o Uniciclo

Considere o modelo diferencial cinemático do uniciclo (Siciliano et al., 2009):

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \\ 0 \end{bmatrix} v^* + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \omega^*, \quad (5)$$

onde $v^* \in \mathbb{R}$ e $\omega^* \in \mathbb{R}$ são respectivamente as velocidades linear e angular do uniciclo. Comparando (3) e (5), é possível perceber a similaridade entre os modelos de ambos os veículos. Portanto, uma

lei de controle desenvolvida para o uniciclo pode ser utilizada para o biciclo, desde que sejam consideradas as restrições existentes no modelo. Intuitivamente, a primeira restrição a ser considerada é que a roda dianteira nunca deve estar ortogonal à roda traseira. Em geral, para um veículo de quatro rodas, isso é garantido pela sua estrutura mecânica, que limita fisicamente o ângulo máximo de movimentação (Francis and Maggiore, 2016).

A ideia chave é mostrar que o uniciclo pode ser considerado como um subsistema do biciclo. Por isso, assumindo que o ângulo de esterçamento é controlado através de uma malha interna de alto ganho, os comportamentos do biciclo e do uniciclo tornam-se aproximadamente equivalentes. Então, a partir de (5), considere a seguinte função não-linear $f(\cdot)$ com duas entradas e uma saída *i.e.* $(\phi, v) \mapsto \bar{\omega}$, tal que:

$$\bar{\omega}(t) := f(v, \phi) = (v/\ell) \tan(\phi). \quad (6)$$

A partir de (6), é possível definir a seguinte função não-linear $g(\cdot)$ com duas entradas e um saída, *i.e.* $(v^*, \omega^*) \mapsto \bar{\phi}$, tal que:

$$\bar{\phi}(t) := g(v^*, \omega^*) = \tan^{-1}(\ell \omega^*, v^*), \quad (7)$$

onde assume-se que v^* e ω^* são sinais contínuos e arbitrários, e $\bar{\phi}$ é um sinal limitado. Então, define-se a seguinte lei de controle para o ângulo de esterçamento do biciclo:

$$\omega := K [\bar{\phi}(t) - \phi(t)], \quad K > 0. \quad (8)$$

Para um valor do ganho K muito elevando (*i.e.*, $K \gg 1$) tem-se que $\bar{\phi}(t) \approx \phi(t)$ e consequentemente, a partir de (6) e (7) obtém-se $\bar{\omega}(t) \approx \omega(t)$. Portanto, garantindo um alto ganho em torno da dinâmica do ângulo de esterçamento, conclui-se que as leis de controle projetadas para o uniciclo (v^*, ω^*) podem ser utilizadas para controlar o biciclo usando as seguintes relações de velocidade:

$$v = v^*, \quad \omega = K [\tan^{-1}(\ell \omega^*, v^*) - \phi], \quad (9)$$

que satisfazem as seguintes condições: (i) $K \gg 1$; (ii) $v^*(t) > 0$; (iii) $\omega^*(t)/v^*(t) \in \mathcal{L}_\infty$. Para os casos em que deseja-se uma velocidade linear igual a zero, deve-se garantir que a velocidade angular do uniciclo tenda mais rapidamente para zero que a velocidade linear (Francis and Maggiore, 2016).

2.3 Algoritmo de Regulação de Posição

Nesta seção, considera-se que o objetivo de controle seja alcançar uma posição desejada, definida no espaço Cartesiano, $(x_d, y_d) \in \mathbb{R}^2$ a partir da posição inicial do robô $(x_0, y_0) \in \mathbb{R}^2$. A ação realizada pelo sistema de controle é denominada de regulação Cartesiana parcial. Nesta tarefa, o robô se desloca de uma posição inicial para uma posição final, sem que seja necessário especificar a sua orientação final (Siciliano et al., 2009).

A distância entre o ponto de origem e o ponto de destino, denominada de erro de posição $e_p \in \mathbb{R}^2$, é dada por $e_p = [(x_d - x_0) \ (y_d - y_0)]^T$. É possível propor uma lei de controle em que a velocidade linear do veículo é proporcional à distância que deseja-se percorrer. Desta forma, para realizar o deslocamento de um ponto arbitrário (x, y) no espaço Cartesiano para a origem do sistema de coordenadas inercial, utiliza-se as seguintes leis de controle (Siciliano et al., 2009):

$$v^* = -k_1 [x \cos(\theta) + y \sin(\theta)], \quad (10)$$

$$\omega^* = k_2 [\tan^{-1}(y, x) - \theta + \pi], \quad (11)$$

onde k_1 e k_2 são constantes de ganho positivas, v^* e ω^* são respectivamente as velocidades linear e angular do uniciclo. Note que, como a posição desejada no espaço Cartesiano é a origem, tem-se que o erro de posição e_p é definido simplesmente por $e_p := [-x \ -y]^T$.

Para verificar a estabilidade e a convergência da lei de regulação de posição é proposta a seguinte função candidata de Lyapunov:

$$2V(x, y) = x^2 + y^2. \quad (12)$$

Esta função de energia é positiva e semidefinida na origem para qualquer valor de θ . Derivando (12) com respeito ao tempo t e aplicando a equação de movimento do uniciclo (5) e as leis de controle (10) e (11), obtém-se:

$$\dot{V}(x, y) = -k_1 [x \cos(\theta) + y \sin(\theta)]^2. \quad (13)$$

Como (13) é negativa semidefinida na origem, i.e. $\dot{V} \leq 0$, é possível garantir que o erro de posição e_p tenda à zero conforme o tempo t tende para infinito, para qualquer configuração inicial. Como V é uma função definida positiva com derivada não-positiva tem-se que $V \in \mathcal{L}_\infty$, implicando que $x, y \in \mathcal{L}_\infty$ e, portanto, $e_p \in \mathcal{L}_\infty$. Então, o estado de equilíbrio e_p é uniformemente estável. Uma vez que $V > 0$ e $\dot{V} \leq 0$ tem-se que $\lim_{t \rightarrow \infty} V(x(t), y(t)) = V_\infty \geq 0$ existe. A partir de \dot{V} tem-se que $\int_0^\infty \dot{V}(\tau) d\tau = V_0 - V_\infty \geq 0$ onde $V_0 = V(x(0), y(0))$ que implica em $x, y \in \mathcal{L}_2$ e, portanto, $e_p \in \mathcal{L}_2$. Como $\theta \in \mathcal{L}_\infty$ e $x, y \in \mathcal{L}_\infty$ implica que $v^*, \omega^* \in \mathcal{L}_\infty$ e, consequentemente, conclui-se que $\dot{x}, \dot{y}, \dot{e}_p \in \mathcal{L}_\infty$. Portanto, usando o Lema de Barbalat (Siciliano et al., 2009) e sabendo que $e_p \in \mathcal{L}_2$ e $\dot{e}_p \in \mathcal{L}_\infty$, implica que $\lim_{t \rightarrow \infty} e_p(t) = 0$. ■

3 Descrição do Sistema Robótico

Nesta seção, são apresentadas as etapas de desenvolvimento do sistema robótico, que consistem na construção do protótipo de um robô móvel ou veículo, de uma interface eletrônica e dos programas computacionais utilizados para implementação da estratégia de controle proposta. O protótipo apresentado é o resultado da adaptação tecnológica

do automodelo Ground Pounder 1:10 RC Monstertruck (Fig. 1) da Redcat Racing¹. Sua estrutura mecânica possui as seguintes dimensões: 336,5 mm de largura, 457,2 mm de comprimento e 260,4 mm de altura, com 4 (quatro) rodas com diâmetro de 149,2 mm por 82,6 mm de largura da banda de rodagem. Em sua configuração original, o equipamento possui 2 (dois) servomotores para esterçamento das rodas direcionais dianteiras e traseiras, alimentados por tensão de 5V DC, e 1 (um) motor elétrico de corrente contínua para propulsão, alimentado por tensão de 12V DC. O circuito eletrônico original permite o controle de velocidade do motor e fornece alimentação de 5V DC ao receptor de rádio e aos servomotores. Os comandos são enviados por sinal de rádio, permitindo ao usuário controlar a velocidade linear e o ângulo de direção do veículo.

3.1 Projeto de Hardware

O projeto de *hardware* diz respeito ao desenvolvimento do controlador eletrônico do veículo, o acoplamento de sensores e atuadores, e as adaptações físicas na estrutura mecânica do veículo para atender às especificações desejadas.

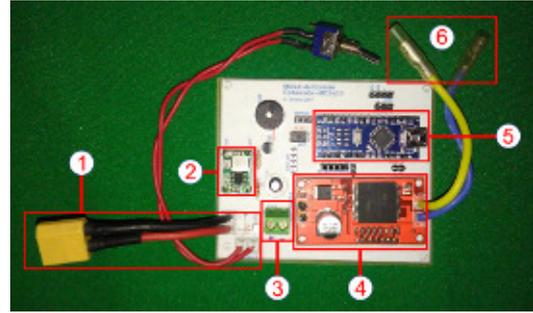


Figura 4: Vista superior do Módulo de Controle Embarcado (MCE): (1) Conector de bateria; (2) Regulador de tensão; (3) Conector auxiliar 12V; (4) Ponte H; (5) Microcontrolador; (6) Conector do motor.

O controlador original foi substituído por um Módulo de Controle Embarcado (MCE) projetado *ad hoc* para o sistema (Fig. 4). O MCE tem como base um microcontrolador Atmel ATmega328, que realiza a leitura dos sensores embarcados e envia comandos para os atuadores. Essa placa é responsável pela alimentação dos dispositivos conectados a ela e pelo interfaceamento entre esses periféricos e o computador embarcado, através de uma conexão serial RS-232. Na versão atual, o veículo está equipado com os seguintes sensores: (i) *encoder* relativo de 400 pulsos por revolução para medição do deslocamento e velocidades; (ii) potenciômetro linear acoplado ao eixo do servomotor de esterçamento para medição do ângulo da direção; (iii) unidade de medida inercial modelo MPU-6050.

¹<http://www.redcatracing.com/>

Para permitir que o sistema utilize algoritmos de controle mais avançados foi utilizada uma placa Raspberry PI² versão 3, denominada computador embarcado ou mini-microcomputador. Essa placa contém um processador *ARMv8 Cortex-A5* que opera com *clock* de *1,4GHz*, possui *1GB* de memória SDRAM bem como interface de rede Gigabit Ethernet e sem fio (*Wi-Fi*). Nessa placa estão instalados o sistema operacional Ubuntu Mate 16 e o *framework* Robot Operating System (ROS), na versão Kinetic Kame. Dessa forma, é possível que o robô se comunique com outros dispositivos conectados à sua rede, como outros robôs, sensores, câmeras ou sistemas de teleoperação. O *layout* final do veículo com um câmera RGB-D (Microsoft Kinect) acoplada é apresentado na Figura 5.



Figura 5: Vista em perspectiva do protótipo: (1) MS Kinect; (2) Sensor do ângulo da direção; (3) Fonte 5V DC e (4) Placa Raspberry PI; (5) MCU; (6) Monitor.

3.2 Projeto de Software

O projeto de *software* consiste do desenvolvimento do *firmware* de controle do MCE, em linguagem de programação C, e dos programas utilizados no computador embarcado e no computador remoto, em linguagem de programação *Python*.

O *framework* ROS é uma estrutura lógica que fornece suporte ao desenvolvimento de programas para controle de robôs, e é responsável pelo gerenciamento do sistema e pela comunicação entre os processos em execução. A opção por essa plataforma deve-se à vasta biblioteca de programas e serviços (ou nós) disponível e de licença livre, possibilidade de uso de diversas linguagens de programação, rápida curva de aprendizagem e a distribuição de processos em rede, dentre outros (Joseph, 2015). A Figura 6 ilustra a arquitetura física e lógica do sistema. Neste contexto, existem os seguintes nós em execução no computador embarcado e em um computador remoto:

Controle: executado dentro do computador embarcado, este nó é responsável pela comunicação entre o MCE e o ROS. Este *driver* solicita os dados de telemetria do veículo, define a velocidade e

envia comandos para incremento/decremento do ângulo da direção. Suas funções englobam ainda o cálculo do ângulo de esterçamento com base na leitura do sensor de direção, o controle desse ângulo, geração da odometria e do referencial para as transformações do sistema de coordenadas.

Driver do Kinect: responsável pela geração das publicações do sensor Kinect embarcado no veículo. Este *driver*, denominado de Freenect³, foi desenvolvido por terceiros e possui licença livre.

Comando: nó responsável pelo controle de alto nível, sendo executado no computador remoto. Este nó recebe as coordenadas do destino desejado e, com base nas leis de controle escolhida, envia os valores de velocidade linear e ângulo de esterçamento para o nó de controle. Todos os dados de controle são armazenados em um arquivo de texto.

Envio de destino: este nó, que é executado a partir do computador remoto, utiliza como base um arquivo de texto contendo as coordenadas que deverão ser visitas pelo veículo (*view points*), o que lhe confere grande flexibilidade de aplicação. Cada vez que o robô chega ao destino desejado, a coordenada seguinte é enviada até que a lista seja finalizada. Neste momento o nó é finalizado.

Registro de imagem: este nó foi desenvolvido apenas para fins de teste de validação. Ele é executado a partir do computador remoto e coleta dados gerados pelo sensor Kinect em cada coordenada visitada. Neste caso, uma imagem é armazenada e um arquivo de *log* é gerado com o nome da imagem, data e a coordenada real onde o dado foi coletado.

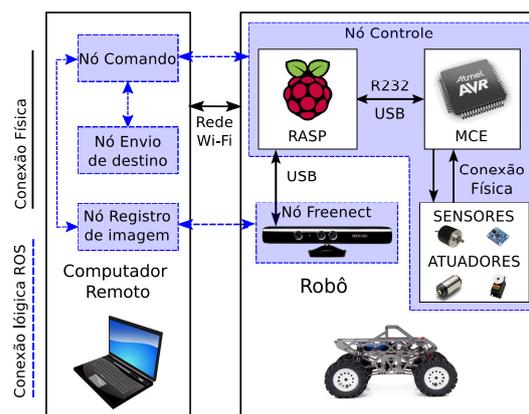


Figura 6: Esquema infográfico do sistema robótico.

4 Verificação e Validação

Nesta seção, descreve-se o ambiente de simulação e a configuração experimental utilizada para verificar e validar o sistema robótico desenvolvido.

²<https://www.raspberrypi.org/>

³<http://wiki.ros.org/libfreenect>

Além disso, apresenta-se resultados experimentais preliminares para ilustrar o desempenho e a viabilidade da metodologia proposta.

4.1 Testes em Ambiente de Simulação

Para a realização de simulações computacionais foi utilizado o ambiente de visualização Rviz (Fig. 7). Esse programa é uma ferramenta de visualização tridimensional do *framework* ROS que permite analisar em tempo real o comportamento do robô e acompanhar os seus movimentos. O uso dessa ferramenta possibilita a animação gráfica dos dados coletados por sensores e a visualização da resposta do robô aos comandos enviados, assim como permite o envio de comandos através de publicações de tópicos.



Figura 7: Ambiente de visualização Rviz e visão do veículo no ambiente *outdoor*: (1) Projeção tridimensional do ambiente; (2) Imagem da câmera do Kinect.

No teste em ambiente simulado, o robô deve se deslocar a partir da sua posição inicial até os pontos de interesse, previamente definidos, formando uma trajetória retangular. As coordenadas de destino foram $(0,0)$, $(8,0)$, $(8,-4)$, $(-4,0)$, $(0,0)$, e 3 (três) voltas não-contínuas foram realizadas. O objetivo deste teste foi verificar o comportamento geral dos sistemas mecânico e eletrônico, bem como a troca de informação entre os módulos, a geração de dados de telemetria e o desempenho do controlador proposto, onde os seguintes valores foram adotados para os ganhos de controle: $k_1=0,2$ e $k_2=0,6$. Devido às características estruturais do veículo, definiu-se a distância de $0,35\text{ m}$, entre a posição real do veículo e o posição desejada, como a região válida de chegada nas coordenadas de destino final (critério de chegada).

Durante os testes realizados no ambiente Rviz foram coletados dados de telemetria gerados a partir dos *encoders*, tais como deslocamento, direção e velocidade das rodas. Para isso, o veículo foi posicionado sobre uma plataforma, permitindo a ação de todos os seus atuadores e sensores, enquanto o seu movimento era emulado no ambiente Rviz. A partir desses dados foi possível analisar graficamente o comportamento do robô, seus movimentos e outras curvas de resposta para a estratégia de controle proposta utilizando o ambiente MATLAB (The MathWorks, Inc.). Conforme ilustrado na Figura 8, as coordenadas de destino foram alcançadas para todos os pontos da rota, a

partir de dados de telemetria. A análise dos resultados ilustrados nas Figuras 9 e 10 revela que o erro de posição tende para zero conforme o veículo se aproxima das coordenadas de destino, assim como ocorre com os sinais de controle de velocidade linear e angular ilustrados na Figura 11.

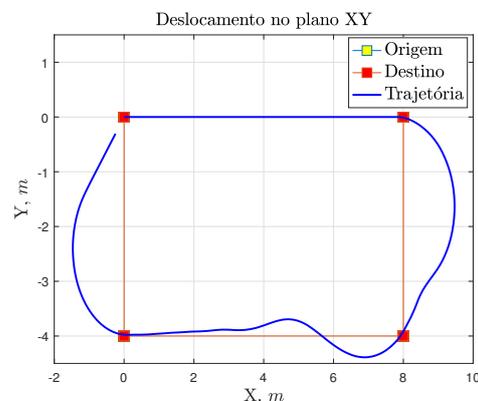


Figura 8: Simulação - trajetória do veículo.

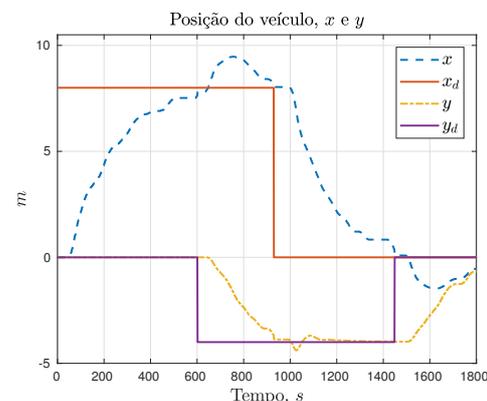


Figura 9: Simulação - posição atual e desejada.

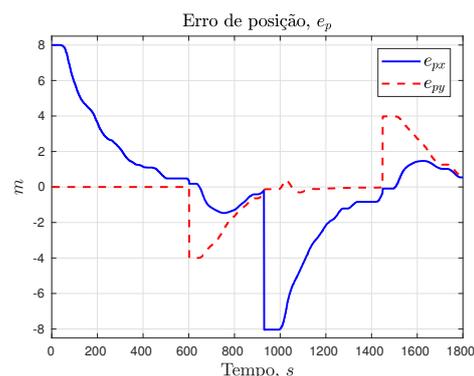


Figura 10: Simulação - erro de posição.

4.2 Testes experimentais

No teste experimental, em ambiente real, o veículo deve partir da origem $(0,0)$ e chegar até as coordenadas de destino $(7,-3)$, e este percurso será repetido por 3 (três) vezes. Essas coordenadas de

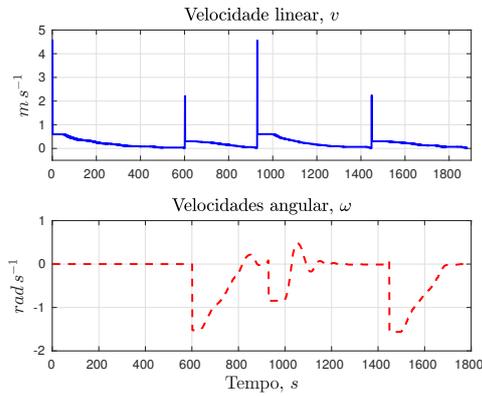


Figura 11: Simulação - sinais de controle.

destino foram escolhidas por questões de limitação física no ambiente de teste. Então, foram realizadas 3 (três) voltas, onde o sistema é reiniciado no início de cada volta. Os demais parâmetros de validação permaneceram inalterados em relação aos testes em ambiente simulado, incluindo o critério de chegada. A Figura 12 ilustra o deslocamento do veículo no ambiente Rviz, enquanto que a Figura 13 apresenta a trajetória obtida no ambiente MATLAB a partir dos dados de telemetria coletados durante o experimento.

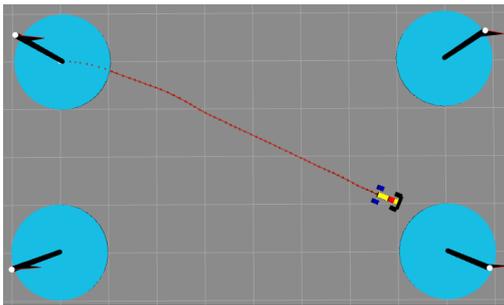


Figura 12: Experimento - visualização no RVIZ da trajetória descrita pelo veículo. A área de cada célula corresponde a 1 m^2 .

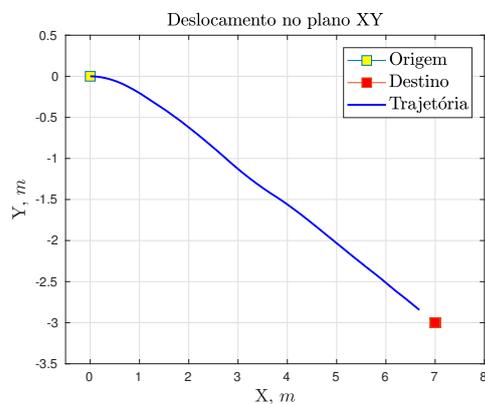


Figura 13: Experimento - trajetória do veículo.

O comportamento observado durante os testes experimentais foi similar ao apresentado nos testes em ambiente simulado. O veículo foi capaz

de se deslocar da origem do sistema de coordenadas inercial até as coordenadas de destino desejada de maneira satisfatória conforme ilustrado nas Figuras 13 e 14. O erro de posição, ilustrado na Figura 15, converge para zero a medida que o veículo se aproxima das coordenadas de destino (Fig. 14). Esse comportamento de convergência para zero também ocorre com os sinais de controle de velocidade linear e angular ilustrados na Figura 16.

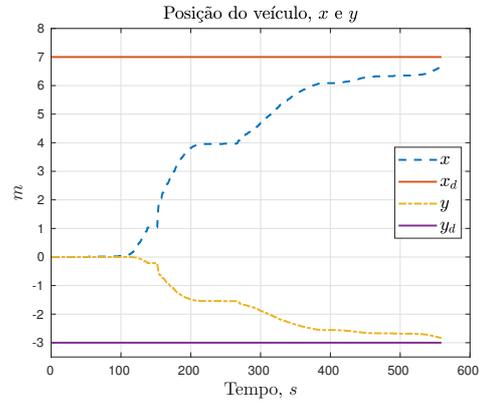


Figura 14: Experimento - posições atual e desejada.

5 Conclusões e Perspectivas

Neste trabalho foi apresentada a adaptação tecnológica de um automodelo Ground Pounder (Redcat Racing) para aplicações em robótica agrícola. Utilizou-se uma metodologia de controle baseada no modelo cinemático do unicyclo, a partir de uma simplificação do modelo cinemático do bicicleta. Foram construídos os dispositivos eletrônicos que possibilitaram a integração entre os diversos sensores e os programas computacionais desenvolvidos para o controle do veículo.

O uso do *framework* ROS permitiu uma rápida integração dos diversos sensores atualmente embarcados, bem como garantiu a compatibilidade com outros sensores (e.g., GPS, *range finder*, sensor solar, etc.) que poderão futuramente ser incorporados ao sistema. A partir dos testes, realizados em ambiente simulado e real, foi possível validar o funcionamento dos dispositivos eletrônicos, dos programas desenvolvidos e da estratégia de controle proposta. Dessa forma, o automodelo adaptado se apresenta como uma ferramenta promissora para aplicações de robótica móvel em ambientes *outdoor* (e.g., ambientes agrícolas).

Como trabalhos futuros, pretende-se melhorar o sensoriamento do ângulo de esterçamento do veículo, a fim de considerar também o problema de controle de orientação. Pretende-se ainda considerar o modelo completo do bicicleta para implementar novas estratégias de controle como, por exemplo, controle cooperativo para utilizar diversos automodelos simultaneamente a fim de realizar uma dada tarefa agrícola (e.g., mapeamento

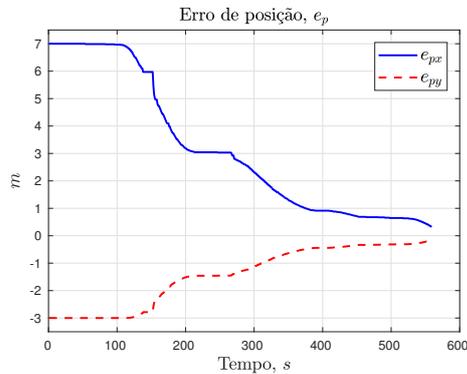


Figura 15: Experimento - erro de posição.

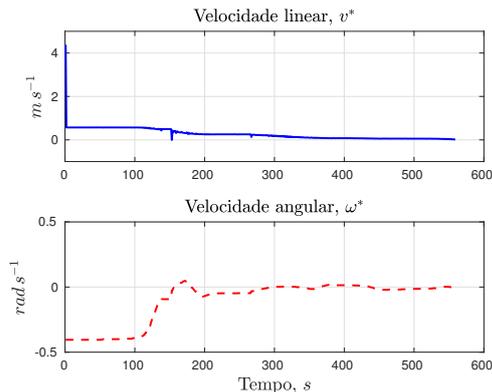


Figura 16: Experimento - sinais de controle.

de plantas invasoras e da produção), e controle robusto para lidar com incertezas nos parâmetros do veículo e do terreno.

Referências

- Bechar, A. and Vigneault, C. (2016). Agricultural Robots for Field Operations: Concepts and Components, *Biosystems Engineering* **149**: 94–111.
- Billingsley, J., Visal, A. and Dunn, M. (2008). Robotics in Agriculture and Forestry, in B. Siciliano and O. Khatib (eds), *Springer Handbook of Robotics*, Springer Berlin-Heidelberg, pp. 1065–1077.
- Cruz, D., McClintock, J., Perteet, B., Orqueda, O. A. A., Cao, Y. and Fierro, R. (2007). Decentralized Cooperative Control - A Multi-vehicle Platform for Research in Networked Embedded Systems, *IEEE Control Systems Magazine* **27**(3): 58–78.
- Edan, Y. (2007). Food and Agriculture Robotics, in S. Y. Nof (ed.), *Handbook of Industrial Robotics*, John Wiley & Sons, Inc., pp. 1143–1155.
- Francis, B. A. and Maggiore, M. (2016). *Flocking and Rendezvous in Distributed Robotics*, Springer International Publishing.
- Freitas, G. M., Hamner, B., Bergerman, M. and Singh, S. (2012). A Practical Obstacle Detection System for Autonomous Orchard Vehicles, *Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vilamoura, Portugal, pp. 3391–3398.
- Freitas, G. M., Lizarralde, F., Hsu, L. and dos Reis, N. R. S. (2009). Kinematic Reconfigurability of Mobile Robots on Irregular Terrains, *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Kobe, Japan, pp. 1340–1345.
- Grimstad, L. and From, P. J. (2017). Thorvald II - a Modular and Re-configurable Agricultural Robot, *Proc. of the 20th IFAC World Congress*, Toulouse, France, pp. 4588–4593.
- Hernández, J. D., Sanz, D., Barrientos, J., Valente, J., Del Cerro, J. and Barrientos, A. (2012). Non Invasive Moisture Measurement in Agricultural Fields using a Rolling Spherical Robot, *Proc. of the First International Conference on Robotics and Associated High-technologies and Equipment for Agriculture*, Pisa, Italy, pp. 229–234.
- Joseph, L. (2015). *Mastering ROS for Robotics Programming*, Packt Publishing, Ltd.
- Kouros, G. and Petrou, L. (2017). PANDORA Monstertruck: A 4WS4WD Car-like Robot for Autonomous Exploration in Unknown Environments, *Proc. of the 12th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, Siem Reap, Cambodia, pp. 974–979.
- Noguchi, N., Zhang, Q., Han, S. and Reid, J. F. (2001). Autonomous Agricultural Tractor with an Intelligent Navigation System, *Proc. of the 4th IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles*, Sapporo, Japan, pp. 197–202.
- Puri, V., Nayyar, A. and Raja, L. (2017). Agriculture Drones: A Modern Breakthrough in Precision Agriculture, *Journal of Statistics and Management Systems* **20**(4): 507–518.
- Siciliano, B., Sciavicco, L., Villani, L. and Oriolo, G. (2009). *Robotics: Modelling, Planning and Control*, Springer-Verlag London.
- Siegwart, R., Nourbakhsh, I. R. and Scaramuzza, D. (2011). *Introduction to Autonomous Mobile Robots*, 2nd edn, MIT Press (MA).
- Tangerino, G. T., Godoy, E. P., Tabile, R. A., Sanches, R. M., Inamasu, R. Y. and Porto, A. J. V. (2011). Controle de Esterçamento de Robô Agrícola Móvel de Quatro Rodas Guiáveis, *Proc. of the X SBAI - Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*, São João del-Rei, MG, pp. 797–802.