

Controle de robô para serviços de inspeção industrial utilizando campos vetoriais artificiais variantes no tempo

Arthur H. D. Nunes* Álvaro R. Araújo* Maria L. A. Alves*
Adriano M. C. Rezende* Isabela B. Silva*
Luciano C. A. Pimenta*

* Escola de Engenharia, UFMG
Av. Pres. Antônio Carlos, 6627, Pampulha
Belo Horizonte - MG, 31270-901 (e-mails: arthurhdn7@hotmail.com,
alvimdlcd3@gmail.com, ma.luizalves@gmail.com,
adrianomcr18@gmail.com, ibragab13@gmail.com,
lucpim@cpdee.ufmg.br)

Abstract: This paper presents an artificial vector field application in the control of robots for inspection services (ROSI) over a time varying closed curve, in which the time variation is proposed to deal with unknown bounded obstacles, in a simulated environment, using state of art tools in robotics development. ROSI is a robot developed by the Vale Institute of Technology (ITV) to inspect belt conveyors (TCs), while performing other tasks. The TCs are used to ore transportation for Vale mining company, and they require constant inspection in many ways. However, there are thousands of kilometers of TCs extension in arid terrains, what hampers manual inspection and raise the price of fixed sensor installation and maintenance. Thus, one of the best alternatives to deal with that is to use autonomous robotic platforms.

Resumo: Este artigo trata da aplicação do método de campos vetoriais artificiais para controle de robôs para serviços de inspeção (ROSI) ao redor de uma curva fechada variante no tempo, em que a variação no tempo proposta tem o objetivo de possibilitar o desvio de obstáculos desconhecidos e limitados, em ambiente simulado, usando ferramentas estado da arte no desenvolvimento da robótica. O ROSI é um robô desenvolvido pelo Instituto Tecnológico Vale (ITV) com o objetivo de inspecionar transportadores de correia (TCs), cumprindo algumas tarefas. Os TCs são usados para o transporte de minério pela mineradora Vale e necessitam de vistoria constante. No entanto, são milhares de quilômetros de extensão em terreno árido, o que dificulta a inspeção por trabalhadores e encarece a instalação de sensores. Desta forma, uma das melhores alternativas para o problema é a utilização de plataformas robóticas autônomas.

Keywords: Inspection Services, Vector Fields, Obstacle Avoidance, Autonomous Robots, Simulation.

Palavras-chaves: Serviços de Inspeção, Campos Vetoriais, Desvio de Obstáculos, Robôs Autônomos, Simulação.

1. INTRODUÇÃO

Os transportadores de correia (TCs) são essenciais na indústria para transporte de minério e outros materiais. Por conseguinte, é fundamental que eles sejam frequentemente inspecionados para o sucesso de sua aplicação. Para

tal, uma das melhores estratégias é o uso de plataformas robóticas móveis, Garcia et al. (2019).

Diante disso, o Instituto Tecnológico Vale (ITV) e a Sociedade Brasileira de Automática (SBA) promoveram o ROSI Challenge, ocorrido no XIV Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, uma competição na qual as equipes tinham que programar o robô para serviços de inspeção (ROSI), desenvolvido em Garcia et al. (2019), para que ele executasse suas tarefas autonomamente. O presente artigo é inspirado na equipe AAI Robotics, classificada em terceiro lugar com a solução proposta por eles disponível em github.com/ara1557/aai_robotics. Já o simulador, desenvolvido pelos organizadores, está disponível em github.com/filRocha/rosiChallenge-sbai2019 para fins de pesquisa e de educação. Este, trata-se de um cenário criado no V-REP (atualmente chamado de CoppeliaSim)

¹ Esse trabalho foi parcialmente financiado pelo Programa Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia (INCT) - Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia para Sistemas Autônomos Cooperativos (IN-SAC). Sob as concessões do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) 465755/2014-3, da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) 2014/50851-0. Este trabalho também foi apoiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) (Código de financiamento 88887.136349/2017-00) e CNPq (número de concessão 311063/2017-9).

com integração ao ROS. Essas ferramentas e bibliotecas são o estado da arte no desenvolvimento da robótica para aplicações industriais, como validado pela literatura, Mirkhanzadeh et al. (2017), Ergur and Ozkan (2014). O cenário utilizado neste trabalho simula comunicações com os sensores e imperfeições no terreno, tornando a simulação mais próxima de uma situação real.

O robô desenvolvido é composto por um manipulador em uma base móvel. Além disso, possui sensores embarcados para coletar dados durante a inspeção. Os métodos de coleta de dados estão fora do escopo deste trabalho, que foca na movimentação do robô ao redor do TC. Na Fig. 1 é mostrado, à esquerda, um modelo do robô usado em simulação e, à direita, um protótipo real. As especificações do robô estão disponíveis no regulamento da competição em sbai2019.com.br/rosi-challenge e seu desenvolvimento em Garcia et al. (2019).

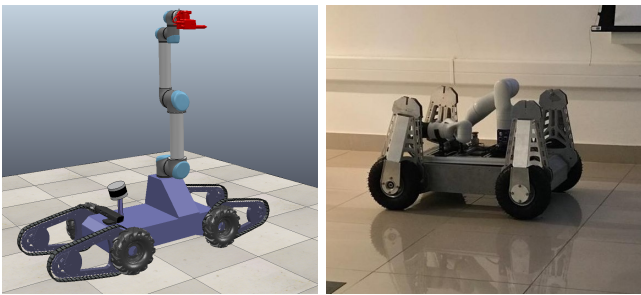


Figura 1. Modelo ROSI no VREP à esquerda, e à direita um protótipo real.

Esse tipo de robô autônomo também é conhecido como a nova geração. Pode ser usado para exploração de cavernas, túneis e superfícies e é tema de outros desafios de robótica, além do ROSI Challenge, Magazín (2019).

Para que o robô se movimente de maneira adequada e realize as tarefas desejadas é necessária a utilização de métodos de planejamento de movimento e controle. Em Gonçalves et al. (2010c), é proposta uma metodologia de campos vetoriais artificiais para seguir uma curva fechada. Curva essa, definida pela interseção de $n - 1$ superfícies imersas no espaço de dimensão n , para tarefas de monitoramento. Já em Gonçalves et al. (2010a), os mesmos autores estendem o método para curvas variantes no tempo. Esses campos já são bem validados na literatura, Gonçalves et al. (2010b). As soluções através de campos vetoriais possuem baixo custo computacional e, por serem métodos de circuito fechado e por possuírem controladores de caminhos ao invés de trajetórias, possuem robustez a pequenos erros de localização e atuação, Pereira et al. (2016).

Neste trabalho, este método de controle baseado em campos vetoriais artificiais para curvas variantes no tempo é adaptado para tratar o problema de inspeção autônoma de transportadores de correia com desvio de obstáculos. O objetivo aqui é fazer com que o robô possa circular em torno do transportador com a finalidade de realizar a inspeção e desviar de eventuais obstáculos não conhecidos previamente que possam ser encontrados no momento da realização da tarefa. Em geral, o desvio de obstáculos a partir de campos vetoriais é realizado com a criação de

dois campos potenciais, o primeiro, um campo potencial atraente ao redor do alvo, e o segundo, um campo repulsivo cercado os obstáculos. Toma-se como fluxo o negativo do gradiente da soma desses dois potenciais citados. O grande problema dessa abordagem é a formação de zonas de equilíbrio locais que podem prender o robô antes de atingir seu objetivo, Spong et al. (2005), Masoud and Bayoumi (1993).

Há também outros métodos validados na literatura para lidar com obstáculos. Como os algoritmos Bug mostrados em Choset et al. (2005). Eles foram implementados em Wang et al. (2013) para solucionar os problemas de mínimos locais dos campos potenciais artificiais. No entanto, a principal diferença entre o desvio de obstáculo desses métodos para o desvio que deve ser feito neste trabalho é a tarefa. Para eles, é suposto que o robô deve partir de uma configuração inicial $q_{initial}$ para uma outra q_{goal} , fazendo com que unam movimento até o alvo com circulação de obstáculo. Por outro lado, no presente trabalho, não há uma configuração q_{goal} e não se deve circular obstáculos, porque já há uma curva fechada a ser circulada para que a inspeção seja executada. Sendo assim, não se deve fazer a união citada.

Em suma, para a solução do problema proposto, é desejada uma curva fechada variante no tempo em torno do objeto a se inspecionar. Além disso, a variação no tempo deve ser condicionada pela existência ou não de um obstáculo próximo, detectado por sensores embarcados.

Este artigo está organizado da seguinte forma: na próxima seção é apresentada a definição do caso estudado e explicando a tarefa a ser cumprida. Em seguida, na Seção 3 é revisto o método de campos vetoriais, depois disso, é discutida a solução proposta, mostrando a curva utilizada e como a variação no tempo foi condicionada para que fosse possível desviar de obstáculos, completando a inspeção industrial em questão. Na Seção 4, os experimentos e os resultados são explanados a fim de validar o estudo com dados e comprovações. Logo depois, na Seção 5, são apresentadas conclusões.

2. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

O problema abordado é o da inspeção: o robô deve circular continuamente um TC, podendo fazer algumas pausas nesta rotina principal para o cumprimento de tarefas secundárias, como o toque em um cavalete usando o manipulador ou o uso das esteiras para subir uma escada. Estas tarefas secundárias estão fora do escopo deste trabalho. Enquanto circula o TC, o robô deve filmá-lo mantendo uma distância máxima de quatro metros da lateral. Também deve ser capaz de desviar de obstáculos inicialmente desconhecidos e com dimensões limitadas. É assumido que as coordenadas geográficas da borda do TC a ser inspecionado são dados do problema. Neste caso o TC modelado é um corpo rígido com longa extensão alinhado com o eixo \hat{x} no sistema de coordenadas de referencia, fixo no plano considerado. A inspeção é realizada por um robô terrestre ao longo do plano, desta forma, ele se move apenas nos eixos \hat{x} e \hat{y} , como mostra a Fig. 2. Nesta figura também é definido o robô como um objeto circular de diâmetro d_{robo} , incluindo uma margem de segurança, e um sistema de coordenadas móvel \hat{x}_b , \hat{y}_b , e \hat{z}_b rigidamente preso ao

centro deste círculo. A tarefa de inspeção consiste na cir-

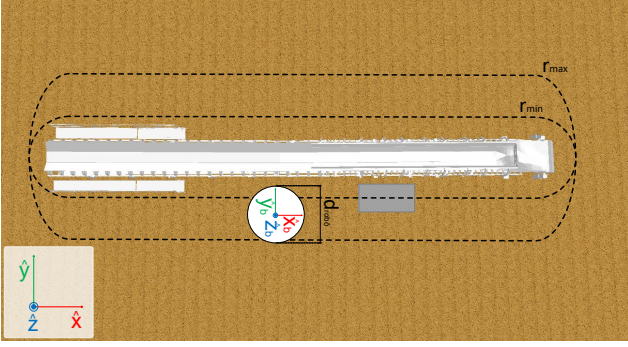


Figura 2. Esboço do TC disposto ao longo do eixo \hat{x} com estimativas de r_{min} e r_{max} e esboço do modelo físico do robô. Esta figura está fora de escala.

culação do TC. Dessa forma, o problema que será tratado aqui é como circular uma curva alvo fechada previamente definida.

Já para o desvio dos obstáculos, é usada variação no tempo do formato da curva alvo. Como o TC está disposto ao longo de \hat{x} , então será suposto um trajeto inicial retilíneo ao longo deste eixo, assim os obstáculos devem ser evitados por movimentos no eixo \hat{y} , logo, apenas a escala da curva neste eixo deve variar com o tempo. A ideia pode ser estendida para os casos em que o TC não está ao longo do eixo \hat{x} , por meio de deslocamentos e rotações realizando transformações homogêneas, Spong et al. (2005).

Além disso, define-se r_y como o alongamento da curva ao longo do eixo \hat{y} . A curva ideal para inspeção é a que possui $r_y = r_{min}$, deste modo o robô realizará a tarefa o mais próximo do TC. Essa curva poderá ser alongada de modo que $r_{min} \leq r_y \leq r_{max}$, em que $r_y = r_{max}$ não deve exceder 4m de distância da lateral do TC. Desta forma, assume-se um sensor com alcance maior ou igual a 4m.

Para que a curva seja factível, os obstáculos devem possuir uma extensão $d_{obstaculo}^i \leq R - d_{robo}$, em que $d_{obstaculo}^i$ é definido pela equação (1), na qual $\mathcal{O} \subset \mathcal{W}$ são os pontos da área de trabalho, \mathcal{W} , em que há um obstáculo e $\mathcal{O}_i \subset \mathcal{O}$ diz respeito ao obstáculo i . As coordenadas do robô no referencial do mundo são indicadas por $\mathbf{p} = [x, y]^T$ e \mathbf{q} é um ponto pertencente ao conjunto dos obstáculos.

$$d_{obstaculo}^i = \max_{\mathbf{p}, \mathbf{q} \in \mathcal{O}_i} \|\mathbf{p} - \mathbf{q}\|. \quad (1)$$

Assume-se que $\mathcal{T} \not\subset \mathcal{W}$, sendo \mathcal{T} os pontos pertencentes ao TC. Assume-se também o seguinte modelo cinemático de robô com tração diferencial:

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

3. SOLUÇÃO PROPOSTA

3.1 Controle Utilizando Campos Vetoriais Artificiais

Para problemas bidimensionais invariantes no tempo a curva \mathcal{C} é definida como $\mathcal{C} = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : \alpha(x, y) = 0\}$, em que $\alpha(x, y) : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ determina a curva de maneira implícita.

Em seguida, o campo vetorial $\mathbf{g}(x, y) = [g_x \ g_y]^T$ é calculado a partir de $\alpha(x, y)$, como mostra a equação (3):

$$\mathbf{g} = G(\alpha) \frac{\nabla \alpha}{\|\nabla \alpha\|} + H(\alpha) \frac{\nabla_H \alpha}{\|\nabla \alpha\|}, \quad (3)$$

onde: (i) $G(\alpha) : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, é qualquer função que pode ser obtida como a derivada de uma função negativa definida diferenciável, tal que a derivada se anule somente na origem; (ii) $\nabla \alpha(x, y) = \left[\frac{\partial \alpha}{\partial x} \ \frac{\partial \alpha}{\partial y} \right]^T$ é o gradiente de $\alpha(x, y)$; (iii) $H(\alpha) : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, contínua, tal que $H(0)$ é não nulo. $H(0)$ determinará se a curva será percorrida no sentido positivo ou negativo; (iv) $\nabla_H \alpha(x, y) = \left[-\frac{\partial \alpha}{\partial y} \ \frac{\partial \alpha}{\partial x} \right]^T$ é o Campo Hamiltoniano de $\alpha(x, y)$.

Nesse trabalho utiliza-se $G(\alpha)$ e $H(\alpha)$ como nas equações (4) a fim de normalizar o campo \mathbf{g} .

$$G(\alpha) = -\frac{2}{\pi} \text{atan}(\alpha), \quad (4a)$$

$$H(\alpha) = \pm \sqrt{1 - G(\alpha)^2}. \quad (4b)$$

Em seguida, para curvas variantes no tempo, o campo vetorial necessita de mais um termo. Enquanto o primeiro e o segundo são responsáveis por garantir a convergência e circulação da curva, respectivamente, o terceiro termo, \mathbf{p} , é responsável por garantir a convergência quando há variação no tempo. Ele é dado pela equação (5).

$$\mathbf{p} = -\mathbf{M}^{-1} \mathbf{a}, \quad (5)$$

onde, para o caso bidimensional \mathbf{M} e \mathbf{a} são definidos segundo as equações (6):

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \nabla \alpha^T \\ \nabla_H \alpha^T \end{bmatrix}, \quad (6a)$$

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \alpha}{\partial t} \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (6b)$$

Dessa forma o campo final é dado por (7):

$$\mathbf{f} = \mathbf{g} + \mathbf{p}. \quad (7)$$

Para mais detalhes sobre o campo vetorial utilizado ver Gonçalves et al. (2010c) e Gonçalves et al. (2010a).

Após o cálculo da velocidade de referência do robô dado por $\mathbf{f}(x, y, t) = [f_x \ f_y]^T$, são calculadas a velocidade linear v e a velocidade angular ω . Elas são fornecidas segundo uma linearização por realimentação de estados estática, Siciliano et al. (2010), dada pela equação (8), na qual $c_d > 0$ é a distância entre o centro de massa e o ponto de referência a ser controlado.

$$\begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\frac{\sin(\theta)}{c_d} & \frac{\cos(\theta)}{c_d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \end{bmatrix}. \quad (8)$$

3.2 Curva de Inspeção

Deseja-se uma curva que atenda o trajeto a ser percorrido na inspeção e possua equações simples. Para inspecionar um TC deve-se estar a no máximo quatro metros de distância de suas laterais, assim, será possível realizar

melhores coletas de dados. Para isso, é desejável percorrer um trajeto aproximadamente reto ao longo de \hat{x} . Então foi proposta a curva *RaceTrack* Choset et al. (2005) ($\alpha(x, y, t) = 0$), a qual a superfície será definida em seqüência.

Antes de prosseguir com as definições da superfície, são definidos $\bar{x}(x)$ e $\bar{y}(y, t)$, expressas pelas equações (9):

$$\bar{x}(x) = \frac{x - c_x}{r_x}, \quad \bar{y}(y, t) = \frac{y - c_y}{r_y(t)}, \quad (9)$$

essa é uma mudança de variáveis conveniente, de forma a termos $\alpha(\bar{x}, \bar{y})$. Nas equações c_x e c_y descrevem o deslocamento da curva em \hat{x} e \hat{y} a fim de centralizá-la com o TC. Ao passo que r_x e $r_y(t)$ descrevem o alongamento nestes eixos. O último será responsável pelo desvio de obstáculos devido à sua dependência do tempo. Esta, por sua vez, será discutida posteriormente.

Agora, a *RaceTrack* é definida pela equação (10):

$$\alpha(\bar{x}, \bar{y}) = \begin{cases} \bar{y} - 1, & -1 \leq \bar{x} \leq 1, \bar{y} > 0 \\ -\bar{y} - 1, & -1 \leq \bar{x} \leq 1, \bar{y} \leq 0 \\ (\bar{x} + 1)^2 + \bar{y}^2 - 1, & \bar{x} < -1 \\ (\bar{x} - 1)^2 + \bar{y}^2 - 1, & \bar{x} > 1 \end{cases}. \quad (10)$$

A Fig. 3 mostra a curva abordada, em função de seus parâmetros \bar{x} e \bar{y} , isto é, em sua forma padrão.

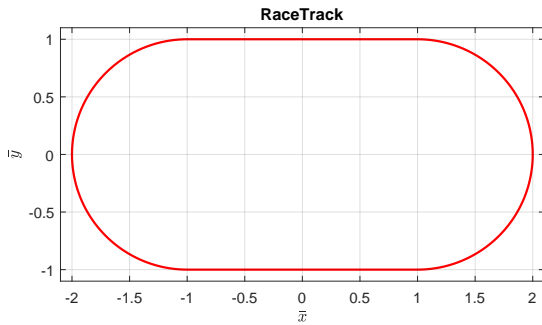


Figura 3. Curva *RaceTrack*.

3.3 Desvio de Obstáculos

Para o desvio de obstáculos deve-se condicionar r_y a uma variação no tempo. Para isso, é proposta uma variação composta por segmentos de retas com coeficientes de inclinação a_k , em que k denota o índice de cada um. Portanto, a equação (11) mostra a expressão de $r_y(t)$ para o segmento k :

$$r_y(t) = a_k(t - t_k) + b_k, \quad (11)$$

onde t_k é o instante de tempo em que a reta muda de $k - 1$ para k e $b_k = r_y(t_k)$. O evento que determina a mudança dos parâmetros de r_y , e portanto o incremento de k , é a detecção do início e do fim de um obstáculo. Nota-se que a existência dos termos t_k e b_k servem apenas para garantir a continuidade de $r_y(t)$. A ideia é garantir que $\dot{r}_y(t) = a_k$, que será calculado adiante.

Em seguida, inspirado em Choset et al. (2005), define-se um sensor para detecção de obstáculos como um objeto centrado no robô que emite feixes de laser em direções dadas por um ângulo θ , ângulo de abertura $\theta_{abertura} \geq \pi$ rad e alcance R . Este sensor é capaz de fornecer a distância

Euclidiana $\rho(\theta)$ entre o robô e o objeto ao longo de uma direção indicada pelo ângulo θ se o objeto estiver no raio de detecção do sensor.

O campo vetorial que fornece os sinais de velocidade de referência do robô é formado pela soma de três termos, em que a soma dos dois primeiros é sempre um vetor unitário dado pelas equações (3) e (4). Desta forma, quando a curva for estática, o robô se moverá com velocidade de módulo constante, denotada \mathbf{v}_c . Quando houver variação no tempo, \mathbf{v}_c será acrescida de uma componente para compensar a variação no tempo, denotada como $\mathbf{v}_t = \mathbf{p}$ (7).

A velocidade \mathbf{v}_t é a terceira parcela do campo vetorial, que por sua vez, tem módulo diretamente proporcional a $\dot{r}_y(t) = a_k$, devido às equações (6) e (11). A velocidade de compensação é expressa segundo a equação (12), obtida substituindo as equações (6) na equação (5) e calculando $\frac{\partial \alpha}{\partial t}(x, y, t)$:

$$\mathbf{v}_t = -a_k \frac{\partial \alpha}{\partial r_y} \frac{\nabla \alpha}{\|\nabla \alpha\|^2}. \quad (12)$$

Denote d_x a menor distância em \hat{x} entre o obstáculo e o robô, $d_x = \min_{\mathbf{q} \in \mathcal{O}} \|\mathbf{q}_x - x\|$, em que \mathbf{q}_x é o valor em \hat{x} do ponto \mathbf{q} no referencial do mundo e x o valor da posição do robô neste mesmo eixo referencial. Se a curva fosse invariante no tempo e o robô já tivesse convergido, ele levaria pelo menos um tempo t_* para colidir com o obstáculo em que $t_* = \frac{d_x}{\|\mathbf{v}_c\|}$. Logo, a velocidade de compensação \mathbf{v}_t será perpendicular a \mathbf{v}_c e seu módulo deve ser suficiente para o robô percorrer uma distância d_f adequada para o desvio do obstáculo neste tempo t_* . A direção já é satisfeita pelas relações de (3), (5) e (6). Basta, portanto, garantir o módulo pelo coeficiente a_k .

Para isso, denote como \mathbf{o}_i o i -ésimo ponto de descontinuidade na função $\rho(\theta)$. Entre dois pontos de descontinuidade, haverá uma possível rota de passagem ou haverá um contorno de um obstáculo. A Fig. 4 ilustra um exemplo.

O robô irá convergir para a curva de r_{min} caso não haja obstáculo no caminho planejado até ela. Caso contrário, ele deverá desviar alongando a curva através do cálculo do coeficiente a_k para aumentar r_y . Ou seja, assumindo a escolha do campo para circulação no sentido anti-horário, desvios são sempre pela direita do robô. No caso do robô estar em algum $r_y > r_{min}$ e identificar um obstáculo que não está no caminho planejado até a curva de $r_y = r_{min}$, este obstáculo será ignorado, não caracterizando diretamente desvio pela esquerda, apesar de se assemelhar com um, já que r_y de referência do robô é o r_{min} .

Finalmente, a_k pode ser calculado como: (i) 0, se $r_y = r_{min}$ e não há obstáculo no caminho planejado ou se $r_y > r_{min}$ e não há obstáculo à frente do robô e há obstáculos no caminho planejado até r_{min} ; (ii) $-a_*$, se $r_y > r_{min}$ e não há obstáculo no caminho planejado até r_{min} , em que a_* é um valor estipulado para a convergência para a curva mais interior; (iii) $(-\frac{\partial \alpha}{\partial r_y})^{-1} \|\nabla \alpha\| \frac{d_f}{t_*}$, se há obstáculo à frente do robô no caminho planejado, em que $d_f = y_{O1} - y + \frac{d_{robo}}{2}$, sendo y_{O1} o valor da posição do ponto de descontinuidade \mathbf{o}_1 (o mais a direita) em \hat{y} e y o valor da posição do robô neste mesmo eixo. A Fig. 4 ilustra a situação de desvio, (iii).

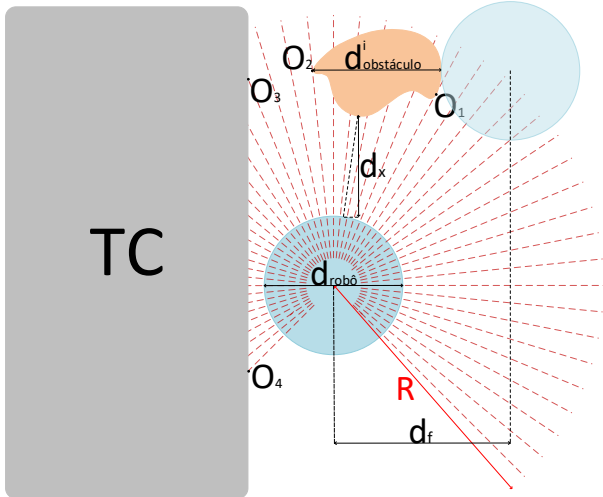


Figura 4. Esquemático da situação (iii) de detecção de obstáculo. Nesta figura, O_1, O_2, O_3, O_4 são pontos de descontinuidade, d_{robo} é o diâmetro do robô, $d_{obstaculo}^1$ é a extensão do obstáculo 1, d_x é a menor distância entre o robô e o obstáculo 1 e d_f é a distância que o robô deve se mover para realizar a manobra de desvio.

4. EXPERIMENTOS E RESULTADOS

Experimentos foram feitos utilizando o simulador disponibilizado pela competição, com algumas modificações de terreno e obstáculos para criar diferentes situações, Fig. 5. Os resultados dos experimentos foram exportados para o Matlab, onde foram analisados. Um vídeo está disponível em youtu.be/EVmyj21dx88, nele há alguns experimentos que facilitam a visualização e interpretação dos dados coletados.

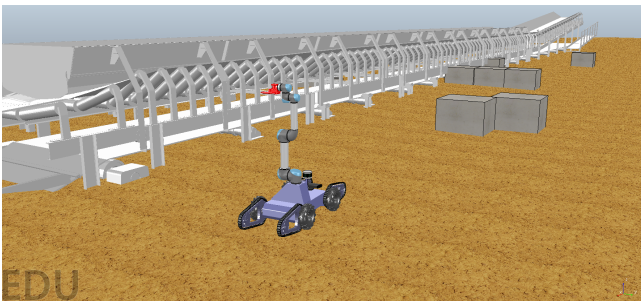


Figura 5. Ambiente de simulação.

O uso da curva RaceTrack se justifica pois ao longo do percurso na lateral do TC o caminho planejado era reto, fazendo com que os desvios e variações no tempo fossem mais simples e a distância do robô até a borda do TC fosse mantida constante quando não havia obstáculos.

Foi simulado o sensor Velodyne, um sensor laser 3D e rotacional (com 2π radianos de abertura). Seus dados foram interpretados como bidimensionais e sua abertura limitada a $\frac{3\pi}{4}$ radianos para compatibilidade e simplificação do problema. Como o TC não é um obstáculo a ser desviado, seus pontos de descontinuidade foram desconsiderados, assim como a detecção de partes do robô.

Nos experimentos pode-se observar a variação de $r_y(t)$ para se desviar de obstáculos. A Fig. 6 mostra um exemplo no qual o robô desviou de um obstáculo (pela direita) alongando a curva e ignorou outro obstáculo que não estava em seu caminho (pela esquerda).

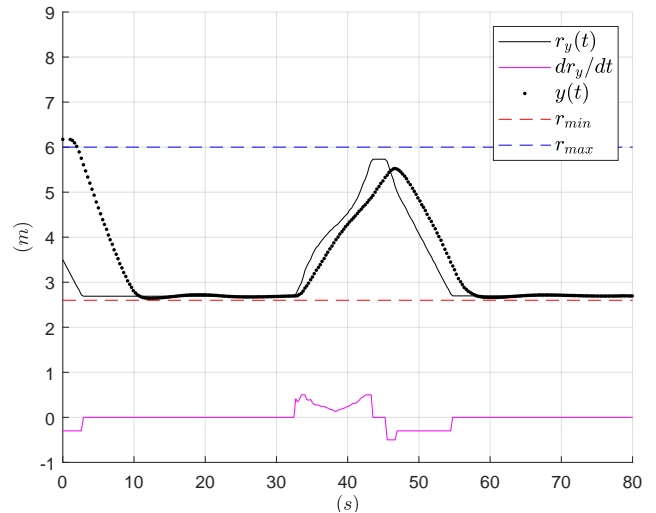


Figura 6. Evolução de $y(t)$ em pontilhado e variação de $r_y(t)$ em linha contínua.

Por fim, os obstáculos foram desviados enquanto que o TC foi continuamente circulado, mantendo uma distância ideal para o cumprimento das tarefas. Todo o caminho percorrido pelo robô neste experimento é mostrada na Fig. 7. Notou-se que mesmo que a velocidade de compensação de variação no tempo v_t pudesse crescer indefinidamente, para altos valores de a_k o robô atingia sua capacidade máxima e não conseguia mais acompanhar a variação da curva. Devendo, portanto, evitar que v_c seja próxima da velocidade máxima do robô.

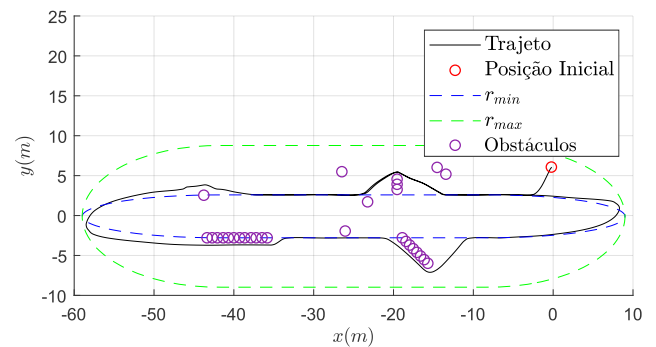


Figura 7. Caminho percorrido pelo robô circulando a curva enquanto desvia de obstáculos.

A Fig. 8 compara os estados x , y e θ do robô em dois diferentes experimentos, um com o campo estático, isto é, sem obstáculos, e outro com o campo variante no tempo. Por meio da comparação é possível estimar quais segmentos do trajeto do segundo campo tinham o objetivo de desviar de obstáculos. Além disso, a Fig. 9 mostra os sinais de velocidade de referência do robô, fornecidos pelos campos. É evidente que a orientação do vetor velocidade

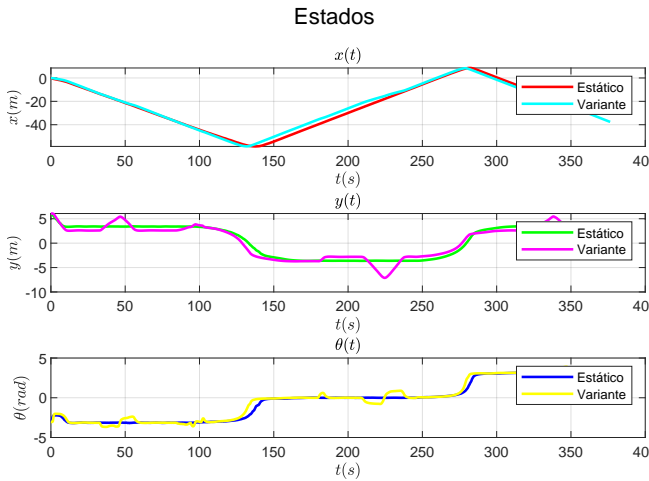


Figura 8. Comparação entre os estados (x, y, θ) do robô em um campo estático e em outro variante.

de referência na Fig. 9 é a mesma direção da orientação do robô na Fig. 8, devido ao modelo uniciclo apresentado na equação (2). Observa-se que nos trajetos de desvio, o campo deixa de ser unitário, justamente pelo acréscimo do terceiro termo, \mathbf{p} e os instantes em que foram feitos desvios, por sua vez, podem ser identificados nos trechos em que a curva variante se difere da curva estática na Fig. 9 e na Fig. 8. A localização dos obstáculos, por sua vez, pode ser visualizada na Fig. 7.

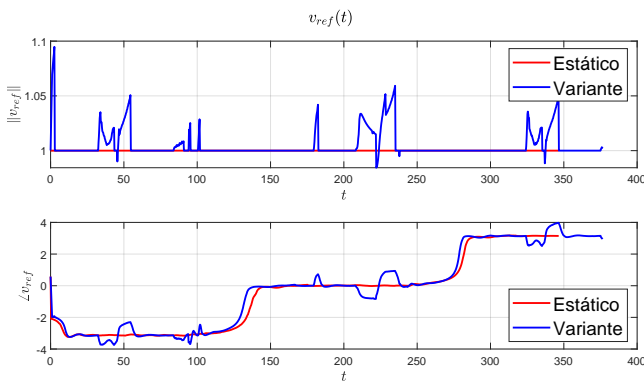


Figura 9. Comparação entre as velocidades de referência do robô dadas por um campo estático e por outro variante.

5. CONCLUSÃO

A busca por métodos de inspeção de Transportadores de Correia deu origem ao presente trabalho, que disserta sobre o método de campos vetoriais artificiais variantes no tempo para controlar um robô que realiza serviços de inspeção, desviando de obstáculos limitados de forma autônoma.

No método abordado, define-se uma curva de inspeção, a qual o robô deve seguir e, caso surja obstáculos, identificados pelo sensoriamento, a curva é ampliada ou reduzida para realizar o desvio. O método foi validado através de simulações realísticas.

Observa-se que no momento dos desvios o módulo da velocidade aumenta. No entanto, uma das vantagens do planejamento de caminho é a flexibilidade ao se escolher a velocidade de seguimento. Neste trabalho ela é normalizada apenas no caso estático, isto é, sem desvio. É interessante propor em trabalhos futuros uma estratégia que busque normalizar o campo mesmo com a adição do termo de variação do tempo. O tratamento de possíveis pontos de singularidade também é deixado pra trabalhos futuros. Observa-se também que uma limitação da metodologia proposta é o tamanho dos obstáculos.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Ministério da Educação (MEC), à Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), à Escola de Engenharia UFMG e ao Programa de Educação Tutorial da Engenharia Elétrica (PETEE) por fomentar este projeto.

Agradecemos também ao XIV Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente por promover junto à Vale e ao ITV o ROSI Challenge, disponibilizando o simulador para fins de pesquisa e de educação.

REFERÊNCIAS

- Choset, H.M., Hutchinson, S., Lynch, K.M., Kantor, G., Burgard, W., Kavraki, L.E., and Thrun, S. (2005). *Principles of robot motion: theory, algorithms, and implementation*. MIT press.
- Ergur, S. and Ozkan, M. (2014). Trajectory planning of industrial robots for 3-D visualization a ROS-based simulation framework. In *2014 IEEE International Symposium on Robotics and Manufacturing Automation (ROMA)*, 206–211. IEEE.
- Garcia, G., Rocha, F., Torre, M., Serrantola, W., Lizarralde, F., Franca, A., Pessin, G., and Freitas, G. (2019). ROSI: A Novel Robotic Method for Belt Conveyor Structures Inspection. In *2019 19th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*, 326–331. doi: 10.1109/ICAR46387.2019.8981561.
- Gonçalves, V.M., Pimenta, L.C., Maia, C.A., Dutra, B.C., and Pereira, G.A. (2010a). Vector fields for robot navigation along time-varying curves in n -dimensions. *IEEE Transactions on Robotics*, 26(4), 647–659.
- Gonçalves, V.M., Pimenta, L.C., Maia, C.A., Pereira, G.A., Dutra, B.C., Michael, N., Fink, J., and Kumar, V. (2010b). Circulation of curves using vector fields: actual robot experiments in 2D and 3D workspaces. In *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1136–1141. IEEE.
- Gonçalves, V., Pimenta, L., Maia, C., and Pereira, G. (2010c). Navegação de robôs móveis utilizando curvas implícitas. *Controle & Automação*, 21(1), 43–57.
- Magazin, S. (2019). Next generation robots: Autonomous subsurface explorers. siamagazin.com/next-generation-robots-autonomous-subsurface-explorers/. Acessado em 19 Abril 2020.
- Masoud, A.A. and Bayoumi, M.M. (1993). Robot navigation using the vector potential approach. In *[1993] Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 805–811 vol.1. doi:10.1109/ROBOT.1993.292076.

- Mirkhanzadeh, B., Shao, C., Shakeri, A., Sato, T., Razo-Razo, M., Tacca, M., Fumagalli, A., and Yamanaka, N. (2017). A two-layer network Orchestrator offering trustworthy connectivity to a ROS-industrial application. In *2017 19th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, 1–4. IEEE.
- Pereira, G.A.S., Choudhury, S., and Scherer, S. (2016). A framework for optimal repairing of vector field-based motion plans. In *2016 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 261–266. doi: 10.1109/ICUAS.2016.7502525.
- Siciliano, B., Sciavicco, L., Villani, L., and Oriolo, G. (2010). *Robotics: modelling, planning and control*. Springer Science & Business Media.
- Spong, M.W., Hutchinson, S., Vidyasagar, M., et al. (2005). *Robot modeling and control*. Wiley.
- Wang, M., Su, Z., Tu, D., and Lu, X. (2013). A hybrid algorithm based on Artificial Potential Field and BUG for path planning of mobile robot. In *Proceedings of 2013 2nd International Conference on Measurement, Information and Control*, volume 2, 1393–1398. IEEE.