MODELAGEM E CONTROLE DE UM DISPOSITIVO ROBÓTICO PARA INSPEÇÃO DE ROLOS DE TRANSPORTADORES DE CORREIAS

GABRIEL CARVALHO GARCIA^{*†}, MARCOS PAULO TORRE^{*†}, FILIPE ROCHA^{†‡}, JOÃO CARLOS MONTEIRO[‡], RAMON ROMANKEVICIUS COSTA[‡], FERNANDO LIZARRALDE[‡], ANDRÉ STANZANI FRANCA[§], FELIPE RIBEIRO DA FONSECA[§], GUSTAVO MEDEIROS FREITAS^{*}

> *Instituto Tecnológico Vale Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil

[†]Escola de Minas - Universidade Federal de Ouro Preto Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil

> [‡]Universidade Federal do Rio de Janeiro Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil

[§] Vale S.A. - Departamento de Engenharia e Desenvolvimento Vitória, Espírito Santo, Brasil

Emails: gabriel.garcia@ufop.edu.br, marcos.torre@itv.org, filipe.rocha@itv.org, jcmonteiro@poli.ufrj.br, ramon@coep.ufrj.br, fernando@coep.ufrj.br,

andre.franca@vale.com, felipe.ribeiro@vale.com, gustavo.medeiros.freitas@itv.org

Abstract— Belt conveyors (BCs) play an important role in the transportation of dry bulk material in different industries. Particularly, their use in mining processes is extensive and vital for the operation of this industry. Therefore, the inspection of its components, such as idlers rolls, is a fundamental task to guarantee the conveyor belt proper functioning. Aiming to present an effective solution to belt conveyors inspection, this paper proposes a robotic device composed by a mobile platform, a robotic arm and a set of sensors for inspection of idler rolls. The proposed system removes the operator from risk areas and provides more accurate information. Furthermore, implementation of the system does not require any modification of the existing BC structures. Based on the kinematic model of the mobile manipulator, we present a control strategy to command the robotic device considering its whole-body. We performed proof of concepts tests in real scenarios and the systems capabilities were confirmed in different operating conditions.

Keywords— Mining robotics, Mobile manipulators, Trajectory control, Service robots

Resumo— Os transportadores de correia (TCs) desempenham um papel importante no transporte de materiais em diferentes indústrias. Particularmente, a sua utilização em processos de mineração é extensa e vital para a operação desta indústria. Dessa forma, a inspeção dos componentes de transportadores de correia, como os rolos, é uma tarefa fundamental para garantir o correto funcionamento do equipamento. Visando apresentar uma solução efetiva para inspeção de transportadores de correias, este artigo propõe um dispositivo robótico composto por uma plataforma móvel, um braço manipulador e um conjunto de sensores para inspeção de rolos. O sistema proposto retira os operadores das áreas de risco e fornece informações mais precisas do estado do equipamento. Além disso, a implementação do sistema não exige nenhuma modificação da estrutura existente dos TCs. Baseado no modelo cinemático do manipulador móvel, é apresentada uma estratégia de controle para comandar o robô considerando seu corpo completo. Testes para prova de conceitos foram realizados em situações reais e as capacidades do sistema foram confirmadas em diferentes condições de operação.

Palavras-chave— Robôs para mineração, Manipuladores móveis, Controle de trajetória, Robôs de serviço

1 Introdução

Transportadores de correias (TCs) são um dos meios mais utilizados para transporte em larga escala de materiais a granel como minérios, carvão, cereais, aparas de madeira, areia, cascalho e rochas. A sua aplicação em processos de mineração é extensa, sendo que podem ser encontradas em todas as etapas da mineração, por exemplo, na extração da mina, nas etapas de beneficiamento na usina e no transporte entre pátios e navios no porto. Para exemplificar, a Vale, empresa multinacional no segmento de mineração, possui mais de 2.000 TCs, totalizando 1.000 km de extensão e aproximadamente 1,6 milhões de rolos.

Pelo seu extensivo uso, a correta manutenção

dos TCs se torna vital para o funcionamento pleno das indústrias das quais ela faz parte. Os rolos, por exemplo, são componentes importantes na estrutura de um transportador de correia, sendo encontrados em grandes quantidades ao longo de um mesmo trecho de um TC, sem que existam técnicas eficientes para seu monitoramento. Em um levantamento interno da Vale, foi apontado que entre 2014 e 2016, apenas nos portos de Ponta da Madeira e Tubarão, houveram mais de R\$ 2,7 milhões em perdas materiais causadas exclusivamente por incêndios gerados por super aquecimento de rolos defeituosos. Devido a essa importância e pelo papel fundamental desempenhado no processo produtivo, se faz necessário a realização de uma rotina de inspeção e manutenção constante nos componentes constituintes dos transportadores de correia.

Atualmente, essa inspeção acontece periodicamente de forma sensitiva, com operadores verificando os principais componentes dos transportadores de correias, utilizando a audição, visão e olfato para buscar falhas nos rolos. Esse método depende da experiência dos inspetores, de sua acuidade visual e auditiva e expõe os mesmos a várias adversidades naturais encontradas nos ambientes onde os TCs são normalmente instalados, como chuva, poeira, forte exposição ao sol, risco de acidentes com partes móveis, alto nível de ruído e necessidade de se percorrer longas distâncias. Diante desses problemas, que estão presentes mesmo nos casos mais simples de inspeção, deve-se buscar tecnologias que possam auxiliar nessa atividade, visando à elevação dos níveis de disponibilidade física e à preservação da saúde e segurança dos trabalhadores que executam as inspeções.

Na literatura são propostas diferentes soluções para o problema, que podem ser divididas em dois grupos se baseando no tipo de abordagem utilizada: o primeiro inclui as propostas com utilização de peças e sensores fixos ao longo dos TCs (Lodewijks et al., 2007; Yang, 2014); enquanto que o outro grupo apresenta as soluções que utilizam plataformas móveis com sensores acoplados e que se movimentam ao longo dos TCs (Lodewijks, 2004; Yang et al., 2016; Nascimento et al., 2017). Apesar de existir uma série de abordagens diferentes na literatura, é possível observar que não existe um sistema que se mostre como solução absoluta. Outro ponto a se notar é que resultados de testes em campo são escassos nos trabalhos avaliados, colocando em cheque o real funcionamento dos sistemas em aplicações nos severos ambientes dos TC.

Neste trabalho é proposto um dispositivo robótico para inspeção de rolos de TCs, composto por uma plataforma móvel, um braço manipulador, e um conjunto de sensores para a inspeção de rolos de correrias transportadoras. Este tipo de robô é conhecido como manipulador móvel e foi inicialmente descrito para aplicações em ambientes perigosos e insalubres, (Clark, 1961). Em (Yamamoto and Yun, 1992) é proposta a utilização de métodos de controle de manipuladores móveis buscando coordenar a manipulação e a locomoção de forma integrada. Com o mesmo objetivo, em (Seraji, 1993) é proposta a utilização de uma matriz Jacobiana aumentada para o controle de rovers embarcados com braços robóticos. Em (Salazar-Sangucho and Adorno, 2014) é utilizada álgebra de quatérnios duais para modelar a cinemática de um manipulador móvel.

Para controlar o dispositivo proposto, foi desenvolvida uma estratégia de controle cinemático baseada em sua matriz jacobiana considerando seu corpo completo. A estratégia de controle foi validada por simulações, e testes preliminares confirmaram as funcionalidades do sistema diante de diferentes condições de operação.

Este artigo esta organizado da seguinte forma: na Seção 2 é apresentado o sistema robótico, enquanto que na Seção 3 é descrito o procedimento de inspeção proposto. Na Seção 4 é apresentado o modelo cinemático direto e diferencial, uma estratégia de controle para o comando de corpo completo, e resultados em simulação. Na Seção 5 estão descritos os testes preliminares em campo, e na Seção 6 são discutidos os resultados e trabalhos futuros.

2 Dispositivo robótico proposto

Para permitir que o sistema utilize as mesmas estruturas laterais (decks) usadas pelos operadores durante a inspeção, é necessário que o robô possua boa capacidade de mobilidade. Sendo assim, o dispositivo robótico proposto é composto por uma plataforma móvel capaz de se locomover em diferentes terrenos, incluindo pavimento, terra, lama, grades metálicas e pisos cobertos com pelotas. O robô também deve ser capaz de superar obstáculos e subir e descer escadas com diferentes inclinações. São embarcados na plataforma móvel um braco robótico com 6 graus de liberdade, além de dispositivos de instrumentação, incluindo GPS e sensor inercial (IMU), scanner laser, câmera térmica e RGB, microfone e ponteira de toque onde será acoplado um sensor de vibração.



Figura 1: Esquema representativo da plataforma robótica e arranjo de sensores propostos.

2.1 Plataforma móvel

Visando atender os requisitos de locomoção supracitados, é proposta uma plataforma (Figura 1-a) baseada em robôs do tipo EOD (*Explosive Ordnance Disposal*), utilizados por militares para auxílio no desarmamento de artefatos explosivos. A plataforma se locomove por meio de esteiras laterais, acionadas individualmente por dois motores distintos, que segundo (Kang et al., 2003), fornecem mobilidade superior para plataformas robóticas que navegam em terrenos irregulares, quando comparados à plataformas que utilizam rodas. Esse mecanismo de locomoção permite que o robô se movimente para frente e para trás, em torno de seu próprio eixo e faça curvas.



Figura 2: Fluxo proposto para inspeção de rolos.

Dois pares de braços de alavanca rotacionais, posicionados nas extremidades do robô, são utilizados para transpor obstáculos e variar a altura da plataforma. Cada conjunto de alavancas é acionado individualmente, cuja rotação é efetuada por dois motores distintos. Esses conjuntos também são cobertos por esteiras, com acionamento solidário ao sistema de esteiras lateral.

2.2 Sensores e atuadores embarcados

Durante as operações de inspeção, o robô se locomove ao longo dos TCs, gravando os respectivos ruídos, medindo a temperatura dos rolos e tocando mancais e eixos de rolos visando medir vibrações nas estruturas inspecionadas.

O manipulador robótico de seis graus de liberdade embarcado na plataforma é responsável por carregar todos os sensores utilizados na inspeção e também por garantir o correto posicionamento dos mesmos.

O planejamento de trajetória do braço manipulador é realizado com base no mapa gerado por um *laser scanner* planar (LIDAR), que combinado com o movimento de rotação do punho do braço robótico, é capaz de realizar um mapeamento em nuvem de pontos tridimensional do ambiente.

A medição de temperatura se dá por meio de uma câmera térmica posicionada de modo que capture imagens de todos os rolos apoiados em um determinado cavalete. Como a plataforma percorre toda a extensão do transportador de correia, todos os rolos terão sua temperatura medida.

A medição de som é realizada com um microfone, para que esse sinal acústico seja comparado com padrões sonoros que possam indicar situações de rolos defeituosos.

A inspeção vibratória é efetuada por uma ponteira de toque, que contém um sensor de vibração em seu interior. Essa inspeção é viabilizada pelo movimento do braço robótico, que terá sua trajetória planejada de modo que a ponteira encoste fisicamente no cavalete, mancais ou eixos de rolos a serem avaliados.

Os sensores estão posicionados em um arranjo mecânico (Figura 1(b)) instalado no punho do manipulador robótico. Essa estrutura mantém os sensores tal que o braço robótico é capaz de facilmente posicioná-los para aquisição de dados em um ponto designado.

3 Inspeção de rolos

O principal problema enfrentado na inspeção de componentes de TCs, incluindo a correia, as polias e os rolos, é que eles estão em constante movimento. E como os rolos e as polias apenas podem ser avaliados enquanto estão rodando, é necessário que a medição realizada esteja focada em grandezas acústicas, de vibração e térmicas.

Para o monitoramento acústico e térmico, soluções como a câmera térmica e o microfone permitem que as medições sejam feitas sem necessidade de tocar as peças. Porém, para analisar a vibração do sistema é interessante que exista contato entre o sensor e a peça a ser estudada. Dada a importância de um funcionamento pleno do TC durante a inspeção, essa ação se torna crítica.

Levando em consideração as dificuldades impostas ao sistema, é proposto o seguinte fluxo, ilustrado na Figura 2, para a inspeção dos rolos:

1 - A plataforma se locomoverá ao lado do TC. Enquanto se movimenta, o braço se mantêm posicionado de forma a conseguir capturar a imagem dos rolos e gravar o áudio do ruído emitido de forma efetiva.

2 - Enquanto é realizada a captura das imagens e do som, as mesmas são analisadas por um especialista, em caso de teleoperação; ou por um sistema de processamento de sinais e imagem, para o caso de inspeção autônoma. Quando é detectado algum tipo de irregularidade como sinal acústico fora do padrão esperado ou temperatura acima do normal nos rolos, o robô é parado próximo ao ponto de interesse para realizar uma inspeção mais apurada.

3 - Durante essa segunda inspeção, aplicada a um rolo em específico, é necessária a realização do toque do sensor de vibração em alguns pontos da estrutura para analisar de forma mais completa a situação do rolo. Para realizar esse toque de forma segura, o braço se posiciona em frente à área de interesse e então o sensor *laser* planar é girado de forma a construir um mapa tridimensional que representa o espaço de trabalho para o braço robótico, constituído por uma seção do TC. 4 - Para o caso de um sistema teleoperado, o especialista seleciona os pontos utilizando uma interface que apresenta um mapa tridimensional e a imagem da câmera RGB, enquanto que para o sistema autônomo, seria utilizado uma câmera de profundidade em conjunto com processamento de imagens e nuvem de pontos para encontrar a localização espacial dos pontos a serem tocados. Uma vez que esses pontos estão selecionados, é realizado o toque do sensor utilizando um algoritmo de planejamento de trajetória com desvio de obstáculos para que não ocorra colisão com alguma parte do TC.

5 - Por fim, com os dados de temperatura, sinal acústico e vibração, o especialista ou um sistema para processamento dessas informações é capaz de diagnosticar a situação do rolo, e notificar diretamente no sistema da empresa se é necessário algum tipo de manutenção. Já realizada a inspeção o braço volta para a posição de inspeção ao longo da correia, calculando uma trajetória que evite o contato com qualquer obstáculo.

4 Controle e modelagem cinemática

O dispositivo robótico proposto é composto por uma base móvel e um manipulador, conjunto esse que é conhecido como um manipulador móvel. Ele deve realizar uma missão como se segue: mover ao longo do TC com o efetuador em uma orientação fixa, parar, tocar uma parte específica da estrutura, retornar a posição de monitoramento anterior e voltar a se mover. Nesta seção é apresentada a análise cinemática do sistema robótico proposto.

A base móvel é um veículo tracionado por esteiras com arquitetura *skid-steer*. Para simplificar o controle, a plataforma foi modelada como um robô móvel de tração diferencial, ignorando os efeitos de escorregamento e os braços de alavanca. Dessa forma, é possível representar a plataforma móvel como duas juntas prismáticas, que representam o deslocamento nos eixos x e y, e uma junta de rotação que caracteriza a guinada. O manipulador é composto por seis juntas de rotação. Na Figura 3 é apresentado o esquemático do manipulador móvel simplificado.

4.1 Cinemática direta

A cinemática direta fornece um mapeamento entre a pose das juntas e do efetuador $x = (p_{0p}, R_{0p})$, onde $p_{0p} \in \mathbb{R}^3$ dá a posição e $R_{0p} \in SO(3)$ é a matriz de rotação que representa a orientação do sistema de coordenadas do efetuador O_p com respeito ao sistema de coordenadas inercial O_0 .

O sistema robótico simplificado (Figura 3) possui nove graus de liberdade considerando o corpo completo da plataforma. A posição do efetuador é obtida pela Equação (1):



Figura 3: Esquemático do manipulador móvel simplificado.

$$(\vec{p}_{0p})_0 = \overbrace{(\vec{p}_{01})_0 + (\vec{p}_{12})_0 + (\vec{p}_{23})_0}^{\text{Plataforma móvel}} + \overbrace{(\vec{p}_{34})_0 + \dots + (\vec{p}_{8p})_0}^{\text{Manipulador}}$$
(1)

Da equação (1), a posição \vec{p}_{0p} é dada por:

 $(\vec{p}_{0p})_0 = D_1 \mathbf{x} + D_2 \mathbf{y} + R_{04} L_1 \mathbf{y} + R_{06} L_2 \mathbf{z} + R_{08} L_p \mathbf{z},$ (2)
onde $\mathbf{x} = [1, 0, 0]^{\mathrm{T}}, \ \mathbf{y} = [0, 1, 0]^{\mathrm{T}}, \ \mathbf{z} = [0, 0, 1]^{\mathrm{T}}.$ Perceba que $R_{0p} = R_{01} R_{12} \dots R_{78} R_{8p};$ a mesma
representação é válida para obter R_{04}, R_{06} e R_{08} na Equação (2).

4.2 Cinemática diferencial

A cinemática diferencial relaciona as velocidades linear e angular das juntas às velocidades do efetuador, por meio do mapeamento:

$$\dot{x} = J(\theta)\dot{\theta},\tag{3}$$

onde $J(\theta)$ é a matriz Jacobiana geométrica. A pose derivada $\dot{x} \in \mathbb{R}^6$ corresponde a velocidade linear \dot{p} e angular ω do efetuador em relação as velocidades das juntas $\dot{\theta}$.

A matriz Jacobiana $J_s(\theta_s) \in \mathbb{R}^{6 \times 9}$ que representa o manipulador móvel simplificado é definida como:

$$J_{s}(\theta_{s}) = \begin{bmatrix} (\vec{x}_{0})_{0} & (\vec{y}_{1})_{0} & (\vec{z}_{2})_{0} \times (\vec{p}_{2p})_{0} \dots & (\vec{z}_{8})_{0} \times (\vec{p}_{8p})_{0} \\ 0 & 0 & (\vec{z}_{2})_{0} & \dots & (\vec{z}_{8})_{0} \end{bmatrix}$$
(4)

onde $\dot{\theta}_s$ representa as velocidades das juntas:

$$\dot{\theta}_s = [\dot{d}_1, \dot{d}_2, \dot{\theta}_p, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3, \dot{\theta}_4, \dot{\theta}_5, \dot{\theta}_6]^T.$$
 (5)

O sistema real, na verdade, possui oito graus efetivos de liberdade, composto pelas duas esteiras e pelas seis juntas de rotação do braço, o que leva a:

$$\dot{\theta} = [\dot{\theta}_r, \dot{\theta}_l, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3, \dot{\theta}_4, \dot{\theta}_5, \dot{\theta}_6]^T, \tag{6}$$

onde $\dot{\theta}_r$ e $\dot{\theta}_l$ representam a velocidade de rotação da esteira direita e esquerda, e $\dot{\theta}_{1...6}$ são as velocidades das juntas do braço.

Buscando usar a matriz Jacobiana (4) na Equação (3), é necessário realizar uma conversão de $\dot{\theta}_s$ para $\dot{\theta}$.

A cinemática diferencial da plataforma móvel é dada por:

$$\begin{bmatrix} \dot{d}_1\\ \dot{d}_2\\ \dot{\theta}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R}{2}\cos(\theta_p) & \frac{R}{2}\cos(\theta_p)\\ \frac{R}{2}\sin(\theta_p) & \frac{R}{2}\sin(\theta_p)\\ \frac{R}{L} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_r\\ \dot{\theta}_l \end{bmatrix}, \quad (7)$$

onde L é a distância entre as rodas e R é o raio das esteiras.

A relação entre $\dot{\theta}_s$ e $\dot{\theta}$ é obtida, então, pela matriz $M \in \mathbb{R}^{9 \times 8}$, como:

$$\dot{\theta}_{s}^{(9\times1)} = \overbrace{\left(\begin{array}{ccccc} \frac{R}{2}\cos(\theta_{p}) & \frac{R}{2}\cos(\theta_{p}) & 0 & \dots & 0\\ \frac{R}{2}\sin(\theta_{p}) & \frac{R}{2}\sin(\theta_{p}) & 0 & \dots & 0\\ \frac{R}{L} & -\frac{R}{L} & 0 & \dots & 0\\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0\\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{array}\right)}^{(9\times8)} \dot{\theta}^{(8\times1)}.$$
(8)

Por fim, a cinemática diferencial de corpo completo do manipulador móvel é definida, em acordo com os oito graus efetivos de liberdade, por:

$$\dot{x}^{(6\times1)} = J_s(\theta)^{(6\times9)} M^{(9\times8)} \dot{\theta}^{(8\times1)} = J(\theta)^{(6\times8)} \dot{\theta}^{(8\times1)}.$$
(9)

4.3 Controle cinemático do manipulador móvel

O objetivo de controle é levar o efetuador da pose atual x_c para uma pose desejada variante no tempo $x_d(t)$:

$$x_c \to x_d(t), \qquad e = x_d(t) - x_c \to 0, \quad (10)$$

onde e é o erro da pose do efetuador. O erro da posição é calculado como $e_p = p_d(t) - p$. Enquanto que o erro da orientação e_o utiliza da representação em *unit-quaternion* e é calculado como:

$$e_o = \Delta \epsilon = \eta(\theta)\epsilon_d - \eta_d \epsilon(\theta) - S(\epsilon_d)\epsilon(\theta), \quad (11)$$

onde η_d , ϵ_d representam a parte escalar e vetorial da orientação desejada, e S é o operador antisimétrico (*skew-symmetric*).

Considerando o problema de cinemática diferencial onde a entrada de controle $u = \dot{\theta}$ e um sistema não redundante, isto é, onde $J(\theta)$ é uma matriz quadrada, é possível calcular as velocidades das juntas usando a inversa da matriz Jacobiana e uma lei de controle baseada em uma ação proporcional com *feed-forward*:

$$\dot{\theta} = u = J(\theta)^{-1}(\dot{x}_d + K \ e),$$
 (12)



Figura 4: Diagrama de blocos do controle cinemático do sistema.

onde K > 0 é a matriz de ganho positivo definido. A dinâmica do erro da pose é governada por $\dot{e} + K \ e = 0$, e a escolha de K > 0 garante a estabilidade exponencial do equilíbrio e = 0.

Entretanto, a redundância existente no sistema leva a uma matriz Jacobiana não quadrada (Equação 9). Então, a simples inversão desta matriz não é possível. A abordagem convencional para superar esse problema é a utilização da pseudo-inversa. Porém, a pseudo-inversa apenas pode ser computada quando a matriz Jacobiana possuir posto completo, o que não é válido em configurações singulares. Logo, é utilizada a inversa *Damped Least-Squares* (DLS), proposta em (Nakamura and Hanafusa, 1986). A DLS é definida como:

$$DLS(J) = J^T (JJ^T + \lambda I)^{-1}, \qquad (13)$$

onde λ é um fator de amortecimento que leva a conversão melhor condicionada de um ponto de vista numérico. λ é calculado como:

$$\lambda = \begin{cases} 0, & w \ge w_0 \\ \lambda_0 (1 - \frac{w}{w_0})^2, & w < w_0 \end{cases},$$
(14)

onde $w = \sqrt{det J(\theta) J^T(\theta)}$ é a manipulabilidade do sistema robótico, λ_0 define o comportamento da solução na vizinhança de uma singularidade e w_0 define os limites desta vizinhança.

A lei de controle final $u = \dot{\theta}$ para comandar as velocidades das juntas é dada por:

$$u = DLS(J(\theta))(\dot{x}_d + Ke).$$
(15)

A Figura 4 ilustra o diagrama de blocos que representa o algoritmo de controle definido pela Equação (15). A função $K_{base_móvel}$ representa a cinemática diferencial para o manipulador móvel como definido na Equação (7). Então, a sua saída é integrada para calcular a cinemática direta em corpo completo do manipulador móvel $(K_{corpo_completo})$ e a pose do efetuador. O manipulador móvel é simplificado como um integrador simples partindo do preceito que as juntas do robô são capazes de responder a qualquer velocidade imposta.

4.4 Simulação do controle de corpo completo

A estratégia de controle cinemático proposta é validada por meio de simulações utilizando SIMU- LINK e MATLAB. A simulação consiste em seguir uma trajetória que representa uma rotina de inspeção de um rolo: o robô inicia em uma configuração aleatória e se posiciona na configuração de monitoramento no segundo 140; em seguida, ele se move ao longo do TC no eixo x a 3,3 cm/s com orientação e posição em y e z fixas, entre 140s e 200s; então, o robô para e toca um rolo movendo o efetuador ao longo do eixo y a 1,6 cm/s com orientação e posição fixas no eixo x e z entre os segundos 200 e 250; por fim, o robô volta a posição de monitoramento e segue movendo-se ao longo do TC (250 a 300s). É importante notar que o sistema será utilizado a baixas velocidades, o que exime a necessidade da utilização de outra técnicas de controle como controle dinâmico.

Os movimentos do robô obtidos na simulação estão ilustrados na Figura 5, onde a linha preta representa a trajetória desejada. O erro entre a trajetória desejada e a executada, iniciando da posição inicial de monitoramento (140s), pode ser visto na Figura 6. Pode-se observar que o erro de orientação é menor que 0,1 graus e o erro de posição nunca excede 0,5 milimetros. Considerando que a tarefa mais crítica é a de tocar o eixo do rolo que possui 2 cm de diâmetro, o erro apresentado pode ser considerado aceitável. Na Figura 7 são apresentadas as velocidades das juntas durante a missão; é perceptível que o controle de corpo completo utiliza todas as juntas para realizar a tarefa de seguimento de trajetória.



Figura 5: Simulação do sistema realizando uma rotina de inspeção.



Figura 6: Erro obtido durante missão simulada.



Figura 7: Velocidade das juntas para missão simulada.

5 Implementação e testes

Buscando conhecer as dificuldades enfrentadas no campo pelos inspetores e realizar um teste de conceito para verificar a funcionalidade do dispositivo proposto, foi montado um protótipo formado pelos seguintes componentes:

Plataforma móvel - Foi utilizado o robô descrito na Seção 2. As dimensões da plataforma são: 48 cm de largura, 73 cm de comprimento, 25 cm de altura e 45 kg de peso.

Braço Robótico - O braço robótico utilizado foi o LWA 4P da fabricante SCHUNK, dada a sua praticidade de uso e possibilidade de embarcar na plataforma móvel;

Câmera Térmica e RGB - A FLIR AX8 é um dispositivo que possui uma câmera RGB e uma térmica no mesmo invólucro, com grau de proteção IP-67;

Lidar - O UTM-30LX, fabricado pela Hokuyo, é um *laser scan* planar com leitura de 270°;

Microfone - Foi utilizado um microfone convencional com leitura entre 20 a 20 kHz;

IMU + GPS - O Xsens Mti-G-710 é robusto e preciso. Possui sensores de inércia, acelerômetro, giroscópio e GPS em uma só unidade;

Ponteira de toque - Utilizada para simular o sensor de vibração.

Uma série de testes foram realizados em campo, expondo o robô a várias adversidades como: chuva, vento, poeira e alta insolação. Os testes foram realizados de maneira teleoperada seguindo o *workflow* proposto na seção 3. Foram realizados oito horas de testes em TCs de cinco ambientes diferentes, na sua maioria em funcionamento, no porto de Tubarão em Vitória, Brasil, durante quatro dias.

Devido a restrições de segurança dentro da área operacional, a estratégia cinemática de corpo completo para controlar o robô não pôde ser testada em campo. Dessa forma, foi utilizado um sistema para teleoperação implantado no *Robot Operating System* (ROS) (Quigley et al., 2009) para comandar o robô. A plataforma móvel foi controlada com a utilização de um joystick, enquanto que o manipulador foi controlado pelo *MoveIt*! (Chitta et al., 2012), um pacote do ROS. O *MoveIt*! utiliza o *Rapdly-Exploring Random Trees* (RRT) proposto em (LaValle and Kuffner Jr, 2001) em conjunto com o *Octomap* criado a



Figura 8: Plataforma móvel atravessando um trilho de trem, locomovendo-se em uma pilha de pelotas e escalando um lance de escadas.

partir da leitura realizada pelo *Lidar* para encontrar uma trajetória livre de colisões. Dessa forma, foi possível realizar o toque da ponteira de vibração e o posicionamento da plataforma sensorial nos pontos desejados.

Uma imagem composta de um modelo simplório da plataforma robótica ao lado de um mapa tridimensional de um trecho do TC gerado pelo *Octomap* durante operação em campo é mostrada na Figura 9. A medida que o braço robótico gira e o *laser* mapeia a superfície do TC, o modelo tridimensional é gerado na interface do *MoveIt!*, permitindo o posicionamento do manipulador robótico de maneira interativa nos pontos de interesse de inspeção.

Durante os testes o robô se mostrou eficiente em diversas situações como se locomover de forma bastante estável no barro, grama, pilhas de pelotas, e em grades metálicas (mesmo molhadas); subir e descer escadas de concreto e de grades de diferentes inclinações; ultrapassar obstáculos encontrados nos locais das inspeções como tocos, trilhos, pedras e outros materiais (Figura 8).

A análise dos dados obtidos durante a locomoção do dispositivo se mostrou efetiva, sendo possível ver com clareza a imagem térmica dos pontos de interesse dos rolos. Na Figura 9 é apresentada a análise termográfica realizada em uma lateral do transportador, onde podem-se ver dois rolos: o da esquerda em falha e o da direita em condições normais. Analisando o gráfico do sinal sonoro (Figura 9) também é possível notar a diferença entre um rolo em condição normal e um que apresentava falhas que apresenta um ruído com maior amplitude.

Além disso, foi possível realizar o toque da ponteira diversas vezes, tanto no cavalete do rolo como no seu eixo de rolamento. Cabe destacar que o eixo possui apenas 2 cm de diâmetro, e que a habilidade de tocá-lo é um dos diferenciais do projeto frente a outras soluções móveis como a utilização de veículos aéreos não tripulados (VANTs). Também foram realizados alguns procedimentos de inspeção na parte interna do TC, para se aproximar do rolo inferior.

Considerando os resultados obtidos nos testes de conceito, é possível afirmar que o dispositivo proposto tem plena capacidade de operar nos ambientes que lhe serão destinados. Além disso, a sua capacidade de sensoriamento pôde ser testada e comprovada.

Os testes de conceito foram fundamentais para verificar as dificuldades que serão enfrentadas no ambiente operacional do robô e para levantar uma significante quantidade de informação que irá auxiliar no desenvolvimento de uma nova versão do dispositivo. Os resultados obtidos indicam que o dispositivo possui capacidade de atuar no seu ambiente de operação. Também, suas capacidades sensitivas puderam ser validadas.

Os maiores problemas enfrentados durantes os testes em campo estão relacionados a operação do manipulador. A trajetória gerada pelo algoritmo do RRT não garante um caminho em linha reta entre o ponto inicial e ponto de toque, gerando movimentos inesperados do efetuador durante a medição de vibração. Esse comportamento indesejado reforça a utilização da estratégia de controle de corpo completo proposta, que realiza trajetórias simples e diretas que otimizam o processo de inspeção.

6 Conclusões

Este trabalho apresentou os desafios enfrentados na inspeção de rolos de transportadores de correias. Buscando solucionar esse problema, foi proposto a utilização de uma plataforma móvel acoplada de um braço robótico e um conjunto de sensores para realizar a inspeção de forma teleoperada ou autônoma.

O sistema proposto apresenta importantes vantagens comparados a inspeção convencional feita por operadores. A análise acústica e de vibração permite acompanhar a vida útil do rolos, o que possibilita a predição de falhas e a otimização das rotinas de manutenção. A inspeção de temperatura pode indicar um problema iminente como um incêndio e reportar a necessidade de um reparo urgente. Além disso, o sistema remove o operador de áreas de risco e sua implementação não requer nenhuma modificação ou instalação extra nas estruturas dos TCs.

Baseado no modelo cinemático do manipulador móvel, foi apresentada uma estratégia de controle e simulações onde o dispositivo robótico



Figura 9: Dados obtidos durante um rotina de inspeção. A figura apresenta a imagem térmica e o gráfico da resposta acústica de um rolo; uma imagem da interface do *MoveIt!*, composta por um mapa tridimensional do TC; e a ponteira de toque se aproximando ao eixo de um rolo.

é comandado considerando seu corpo completo. Testes de campo teleoperados permitiram verificar a aplicabilidade do dispositivo em diversas situações, assim como sua capacidade de realizar aquisição de dados e superar diferentes tipos de obstáculos encontrados no ambiente dos TCs.

O próximo passo desta pesquisa consiste na validação da estratégia de controle cinemático de corpo completo por meio de experimentos em campo. Para isso, deve ser considerado sua arquitetura *skid-steer* e os problemas de escorregamento associados a ela. Outro ponto a ser investigado na estratégia de controle é explorar a redundância cinemática do sistema para realização de tarefas secundárias, como desvio de obstáculos e otimização do consumo energético do robô. Estudos futuros também devem estar focados em algoritmos de processamento de sinais para detectar e classificar falhas automaticamente.

Referências

- Chitta, S., Sucan, I. and Cousins, S. (2012). Moveit![ros topics], *IEEE Robotics & Automation Magazine* 19(1): 18–19.
- Clark, J. W. (1961). Mobotry: The new art of remote handling, *IRE Transactions on Vehicular Communications* **10**(2): 12–24.
- Kang, S., Cho, C., Lee, J., Ryu, D., Park, C., Shin, K.-C. and Kim, M. (2003). Robhaz-dt2: Design and integration of passive double tracked mobile manipulator system for explosive ordnance disposal, Intelligent Robots and Systems, 2003. (IROS 2003). Proceedings. 2003 IEEE/RSJ International Conference on, Vol. 3, IEEE, pp. 2624–2629.
- LaValle, S. M. and Kuffner Jr, J. J. (2001). Randomized kinodynamic planning, *The International Journal of Robotics Research* 20(5): 378–400.
- Lodewijks, G. (2004). Strategies for automated maintenance of belt conveyor systems., Bulk Solids Handling 24(1): 16–22.
- Lodewijks, G., Duinkerken, M., de la Cruz, A. L. and Veeke, H. (2007). The application of rfid technology in belt conveyor systems, *Proceedings of BeltCon* 14: 1–17.
- Nakamura, Y. and Hanafusa, H. (1986). Inverse kinematic solutions with singularity robustness for

robot manipulator control, Journal of dynamic systems, measurement, and control **108**(3): 163–171.

- Nascimento, R., Carvalho, R., Delabrida, S., Bianchi, A. G. C., Oliveira, R. A. R. and Garcia, L. G. U. (2017). An integrated inspection system for belt conveyor rollers - advancing in an enterprise architecture, *Proceedings of the 19th International Conference on Enterprise Information Sys*tems - Volume 2: ICEIS,, INSTICC, SciTePress, pp. 190–200.
- Quigley, M., Conley, K., Gerkey, B., Faust, J., Foote, T., Leibs, J., Wheeler, R. and Ng, A. Y. (2009). Ros: an open-source robot operating system, *ICRA workshop on open source software*, Vol. 3, Kobe, p. 5.
- Salazar-Sangucho, F. R. and Adorno, B. V. (2014). Modelagem e controle de corpo completo usando quatérnios duais para um manipulador móvel, *Congresso Brasileiro de Automática Belo Hori*zonte, pp. 1544–1551.
- Seraji, H. (1993). An on-line approach to coordinated mobility and manipulation, *Robotics and Auto*mation, 1993. Proceedings., 1993 IEEE International Conference on, IEEE, pp. 28–35.
- Yamamoto, Y. and Yun, X. (1992). Coordinating locomotion and manipulation of a mobile manipulator, Decision and Control, 1992., Proceedings of the 31st IEEE Conference on, IEEE, pp. 2643– 2648.
- Yang, B. Y. (2014). Fibre optic conveyor monitoring system, MPhil Thesis, School of Mechanical and Mining Engineering, The University of Queensland.
- Yang, W., Zhang, X. and Ma, H. (2016). An inspection robot using infrared thermography for belt conveyor, Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI), 2016 13th International Conference on, IEEE, pp. 400–404.