

# Controle com Restrição de Manipulador Móvel para Tarefas de Inspeção em Ambiente Industrial<sup>\*</sup>

Igor Novais<sup>\*</sup> Fernando Coutinho<sup>\*</sup> Fernando Lizarralde<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> Programa de Engenharia Elétrica - COPPE  
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil.

**Abstract:** Many practical industrial applications performed by robotic manipulators demand movement limitation in order to avoid any structural damage and/or collisions. This paper presents a kinematic control scheme for end-effector motion of a redundant mobile manipulator with a constrained robotic chain. The proposed kinematic control is based on the Constrained Jacobian. The main advantage of the proposed approach is that it provides full task space motion while guarantees that a point of the kinematic chain avoids any lateral motion using a conventional operational space control scheme. Experimental results are presented considering a redundant manipulator mounted on a mobile robot developed for industrial plant inspections. These results show the viability of the proposed planning and control schemes.

**Resumo:** Muitas aplicações industriais práticas de manipuladores robóticos requerem restrição de movimento a fim de evitar danos estruturais e/ou colisões. Neste artigo apresentamos um esquema de controle cinemático de pose do efetuador de um manipulador robótico móvel redundante com restrição na cadeia cinemática. O controle cinemático proposto é baseado no Jacobiano Restrito. A principal vantagem da abordagem proposta é que ela permite o controle completo da pose do efetuador enquanto garante que um ponto da cadeia cinemática evita qualquer movimento lateral utilizando um esquema convencional de controle no espaço operacional. Resultados experimentais são apresentados considerando manipulador redundante acoplado a um robô móvel desenvolvido para inspeção de plantas industriais. Estes resultados mostram a viabilidade do esquema de controle proposto.

*Keywords:* Robotic Manipulators; Robot Kinematics; Manipulator Jacobian; Redundant Manipulators; Kinematic Constraints.

*Palavras-chaves:* Manipuladores Robóticos; Cinemática Robótica; Jacobiano do Manipulador; Manipuladores Redundantes; Restrições Cinemáticas.

## 1. INTRODUÇÃO

A teleoperação robótica é utilizada em uma vasta gama de aplicações, tais como cirurgia assistida por robô e robótica espacial. As aplicações industriais também podem se beneficiar de robôs teleoperados, uma vez que é muito comum que o operador humano não possa acessar alguns locais de instalações industriais ou que seja recomendada que dada tarefa seja executada por uma máquina devido aos riscos operacionais envolvidos. (Lichiardopol, 2007; Aschenbrenner et al., 2015).

Para aplicações industriais com manipuladores que exigem que parte da cadeia cinemática do manipulador seja inserida através de uma cavidade, os movimentos do manipulador devem ser restringidos a fim de evitar algum dano estrutural por colisão.

Uma aplicação particular de um manipulador inserido através de uma cavidade estreita é o procedimento de

inspeção de sistemas de correias transportadoras. Essas correias são essenciais para o transporte de carga nas indústrias de mineração e consistem em uma correia sobre rolos instalada numa estrutura fixa (Rocha et al., 2021). Tais estruturas requerem inspeções constantes, tradicionalmente executadas por operadores humanos. Um esquema de uma correia transportadora juntamente a uma imagem de técnicos realizando a inspeção dos rolos de uma correia transportadora é apresentado na figura 1.

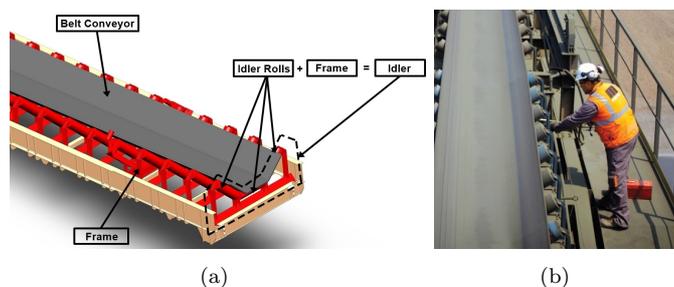


Figura 1. Correia transportadora e atividade e inspeção

Os rolos são componentes sensíveis e um dos seus problemas mais comuns é o desgaste dos rolamentos, que geram

<sup>\*</sup> Este trabalho foi financiado em parte pela VALE S.A. e Instituto Tecnológico Vale, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e 88887.136349/2017-00, FAPERJ e CNPq.

ruídos anormais, aumento da temperatura e, finalmente, o bloqueio dos rolos (Rezaei et al., 2011), por essa razão, estes requerem uma inspeção permanente e uma manutenção constante.

Para a tarefa de inspeção da correia transportadora, é crucial limitar um ponto da cadeia cinemática do robô para evitar a colisão, uma vez que parte do robô é inserido entre a estrutura do transportador para obter imagens detalhadas e verificar a temperatura ou a vibração dos rolos. Alguns exemplos de um manipulador móvel que inspeciona uma correia transportadora são mostrados na figura 2. No caso desta aplicação, o toque do robô no sistema transportador não só causaria danos estruturais, mas também ativaria os sensores de toque do transportador, interrompendo toda a linha de produção.

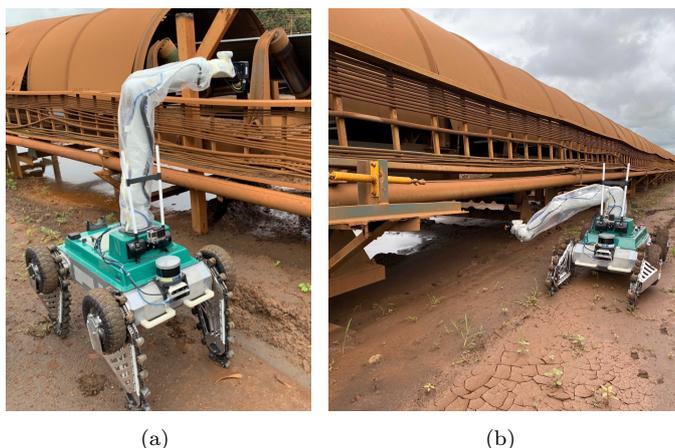


Figura 2. Exemplo de inspeção em ambiente confinado

Ao inserir parte da cadeia cinemática do robô em ambiente fechado, dependendo das geometria da entrada, técnicas para evitar obstáculos, tais como o campo potencial artificial (Khatib, 1986; Zhao and Lv, 2020) ou gridmap (Barraquand and Latombe, 1991) poderiam ser usadas. Particularmente, para a maioria das técnicas de desvio de obstáculos é necessário um planejamento de trajetória, o que torna impossível em aplicações teleoperadas. Outro problema das abordagens existentes é a necessidade de ter cada obstáculo mapeado com precisão para executar a tarefa, o que, para um manipulador móvel que viaja através de um terreno dinâmico, pode ser incerto.

O principal objetivo de controle da maioria das tarefas teleoperadas com manipuladores é a obtenção de um comportamento desejado no efetuador. Assim, exige-se uma metodologia que permita que a lei de controle seja formulada no sistema de coordenadas do efetuador e, ao mesmo tempo, satisfaça as restrições cinemáticas impostas pela tarefa em questão. Este requisito é semelhante aos utilizados para a Cirurgia Robótica Assistida Minimamente Invasiva (RAMIS) enquanto se trata de um Centro de Movimento Remoto programável (RCM) (Funda et al., 1996; Li et al., 2005).

Em Locke and Patel (2007), o controle cinemático de um robô foi utilizado para determinar o posicionamento ótimo da RCM utilizando um jacobiano estendido com um algoritmo baseado em prioridade de tarefas. Azimian et al. (2010) também utiliza uma formulação baseada em prioridade de tarefas para definir uma tarefa secundária

que restrinja os movimentos dos últimos elos da cadeia cinemática. O movimento do efetuador é calculado com o jacobiano do manipulador enquanto é utilizado o espaço nulo para garantir a restrição localizada no ponto de inserção da cadeia cinemática. Uma arquitetura para controlar o movimento do efetuador considerando uma RCM móvel com uma representação mínima do jacobiano estendido foi apresentada em Sadeghian et al. (2019).

Neste artigo apresentamos um esquema de controle cinemático baseado no chamado Jacobiano Restrito. O controle cinemático mapeia as velocidades das juntas para as velocidades do efetuador, garantindo que a solução encontrada respeite as restrições impostas à cadeia cinemática. Uma abordagem semelhante à descrita neste artigo foi apresentada em Pham et al. (2014) e Coutinho et al. (2014), onde ambas fazem uso do jacobiano restrito para restringir os movimentos no ponto de inserção em uma cirurgia robotizada.

Esta abordagem é particularmente útil quando o operador deseja controlar o efetuador através de um dispositivo háptico sem se preocupar com uma possível colisão. Mostramos, através de resultados experimentais, que fomos capazes de controlar o efetuador e, ao mesmo tempo, restringir o movimento no ponto de inserção quando se utiliza um manipulador redundante acoplado a um veículo articulado de esteira capaz de proporcionar graus de liberdade extras à cadeia cinemática.

O resto do artigo está estruturado da seguinte forma: A Seção 2 descreve o problema em estudo, bem como a configuração experimental utilizada, a Seção 3 apresenta o jacobiano restrito e a lei de controle utilizada e a Seção 4 apresenta os resultados. Finalmente, a Seção 5 resume as contribuições deste trabalho e aponta direções futuras de pesquisa.

## 2. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA E VISÃO GERAL DO SISTEMA

O sistema discutido neste artigo consiste em um manipulador robótico móvel redundante, para o qual queremos controlar o efetuador com o objetivo de inspecionar um ambiente fechado através de uma cavidade. A abordagem proposta consiste em restringir o movimento do manipulador em um ponto na cadeia cinemática, denotado de ponto de inserção. Na figura 3 o sistema de coordenadas do ponto de inserção é designada como  $\mathcal{F}_r$  e os sistemas de coordenadas das juntas antes e depois do ponto de inserção na cadeia são denotadas por  $\mathcal{F}_a$  e  $\mathcal{F}_b$ , respectivamente. O sistema de coordenadas do efetuador é designado por  $\mathcal{F}_e$ .

Queremos controlar as velocidades no ponto de inserção, ou seja, as variáveis de velocidade no sistema de coordenadas  $\mathcal{F}_r$ . Isso é ilustrado na figura 3 para um movimento lateral em  $\mathcal{F}_r$ , mas esse pode ser generalizado.

Denotaremos as variáveis de velocidade como  $V_{ij}^S$  e  $V_{ij}^B$  para diferenciar se estão escritas no espaço (com respeito ao sistema de coordenadas  $\mathcal{F}_i$ ) ou em coordenadas do corpo (com respeito ao sistema de coordenadas  $\mathcal{F}_j$ ) (Murray et al., 1994).

O mapeamento de  $\mathcal{F}_j$  para  $\mathcal{F}_i$  é dado pela transformação homogênea  $g_{ij}$  que descreve a posição e orientação de  $\mathcal{F}_j$

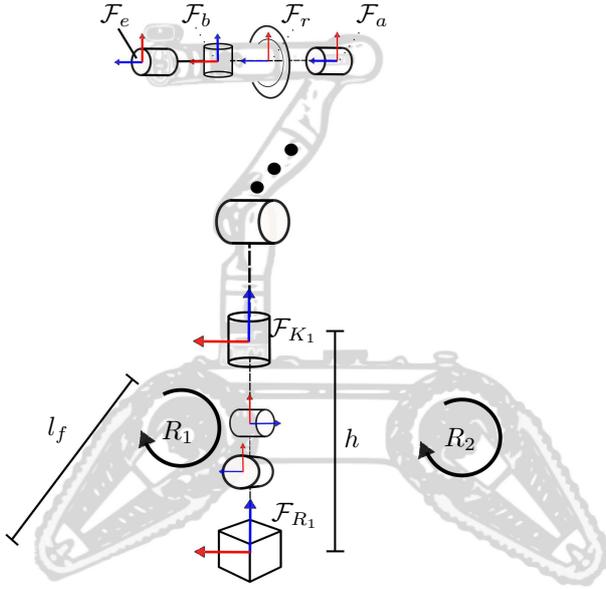


Figura 3. O manipulador móvel e alguns sistemas de coordenadas relevantes em relação a  $\mathcal{F}_i$ . Definimos as velocidades de  $\mathcal{F}_i$  relativa à base  $\mathcal{F}_0$  como

$$\hat{V}_{0i}^S = \dot{g}_{0i} g_{0i}^{-1} = \begin{bmatrix} \omega_{0i}^S \times v_{0i}^S \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

onde  $\omega_{0i}^S$  e  $v_{0i}^S$  são as velocidades angulares e lineares de  $\mathcal{F}_i$  em relação a  $\mathcal{F}_0$  representadas em  $\mathcal{F}_0$ . Essas velocidades também podem ser representadas em  $\mathcal{F}_i$  como em (Murray et al., 1994)

$$\hat{V}_{0i}^B = g_{0i}^{-1} \dot{g}_{0i} = \begin{bmatrix} \omega_{0i}^B \times v_{0i}^B \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

onde  $\omega_{0i}^B$  e  $v_{0i}^B$  são as velocidades angulares e lineares de  $\mathcal{F}_i$  em relação a  $\mathcal{F}_0$  representadas em  $\mathcal{F}_i$ . As velocidades no corpo e na base são relacionadas pela transformação adjunta,  $\hat{V}_{0i}^S = Ad_{g_{0i}} \hat{V}_{0i}^B$ . A matriz adjunta  $Ad_{g_{0i}}$  é definida por:

$$Ad_{g_{0i}} = \begin{bmatrix} R_{0i} p_{0i} \times R_{0i} \\ 0 \\ R_{0i} \end{bmatrix} \quad (3)$$

onde  $p_{0i}$  é a posição e  $R_{0i}$  é a matriz de rotação de  $\mathcal{F}_i$  em relação a  $\mathcal{F}_0$ .

Neste artigo consideramos um manipulador redundante acoplado a um veículo articulado de esteira (AAT) que adiciona graus de liberdade ao sistema e possibilita a execução de tarefas respeitando as restrições impostas à cadeia cinemática do robô.

### 2.1 Manipulador móvel

Neste artigo é considerada a cadeia cinemática completa composta por um manipulador redundante 7DOF (graus de liberdade) Kinova gen3 acoplado à ROSI (figura 4), uma plataforma móvel articulada projetada para inspeção industrial ao ar livre (Rocha et al., 2021).

O robô móvel tem um sistema de locomoção híbrido, utilizando rodas para reduzir o consumo de energia enquanto

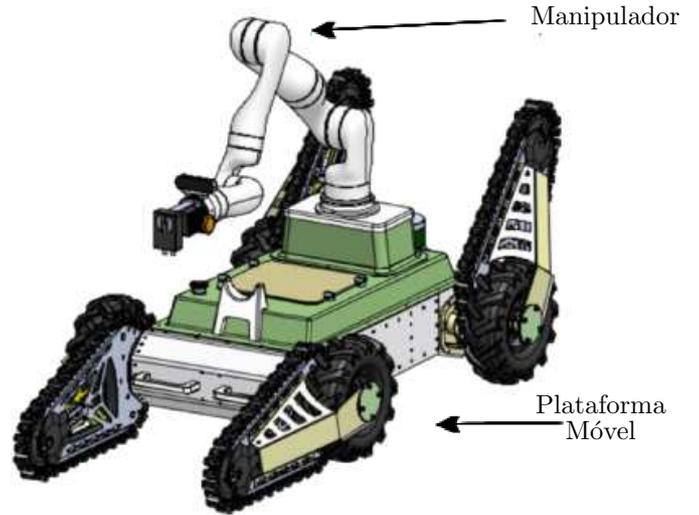


Figura 4. Plataforma móvel ROSI com manipulador de 7DoF

cobre longas distâncias, e também quatro elos articulados chamados de flippers com esteiras para navegar em terrenos irregulares e permitir a subida de escadas.

Embora cada flipper possa se mover independentemente, pode-se configura-los para que seus movimentos sejam sincronizados. Assim, os flippers podem mover a plataforma linearmente no eixo vertical (assemelhando-se a uma junta prismática) e realizar rotações em roll e pitch (modeladas como duas juntas de rotação), como mostrado na figura 3.

O framework de software da plataforma ROSI foi desenvolvido com ROS Melodic Morenia em Linux Ubuntu 18.04. Os pacotes de ROS desenvolvidos em C++ permitem telemetria e teleoperação através de comandos de alto nível. Como limitação mecânica, a velocidade de seus flippers pode chegar a 45°/s com um payload de até 15kg.

O Kinova gen3 é um manipulador compacto de 7DoF, pesando 8,2 kg e com um payload de 4 kg (Kinova, 2022), o que o torna próprio para as aplicações da ROSI. O fabricante do robô Kinova fornece um pacote ROS totalmente funcional para comunicação com o robô, permitindo a leitura dos estados e o envio de comando de velocidade para as juntas. O sistema de comunicação da ROSI é composto por um switch Ethernet e um ponto de acesso sem fio, o que permite a comunicação tanto da ROSI como do Kinova gen3 a um *rosmaster* em outro computador conectado à mesma Rede Local (LAN).

### 2.2 Flippers como Junta Prismática

A altura  $h$  representada na figura 3 é função dos ângulos dos flippers e dos seus comprimentos  $l_f$ . Considerando que todos os flippers possuem o mesmo ângulo  $\alpha$  e que esse ângulo é mantido entre 0° e 90°, temos

$$h = l_f \cos(\alpha) \quad (4)$$

Logo, para o controle cinemático, os flippers podem atuar como uma junta prismática e o sinal de controle para os

flippers em função do sinal de controle da junta prismática equivalente pode ser derivado da equação (4):

$$\dot{h} = -l_f \sin(\alpha) \dot{\alpha} \quad (5)$$

Como os flippers devem se manter em ângulos entre  $0^\circ$  e  $90^\circ$ , para os testes realizados, definiu-se um ângulo inicial  $\alpha = 45^\circ$ . Essa abordagem assume que não há deslizamento das esteiras.

### 3. CONTROLE CINEMÁTICO COM RESTRIÇÃO

Os sistemas robóticos teleoperados permitem a extensão da capacidade de detecção e manipulação de um operador humano. Quando a cadeia cinemática do robô está parcialmente inserida em uma cavidade, esta atividade acaba se tornando árdua e cansativa, pois o operador deve controlar o efetuador do manipulador enquanto considera também o risco de colisão do corpo do robô. Este trabalho propõem uma solução deste problema derivando a cinemática do manipulador de forma a controlar a velocidade em dois pontos da cadeia cinemática. Primeiro, nos concentramos na cinemática do ponto de inserção, onde o movimento lateral deve assumir velocidade nula. Isto é semelhante à abordagem apresentada em Coutinho et al. (2014). A partir daí, formulamos o problema de controle cinemático reescrevendo o jacobiano em função de um novo conjunto de variáveis de velocidade que não interferem na restrição imposta.

As velocidades no ponto de inserção  $V_{0r}^B$  podem ser escritas em função da velocidade na junta anterior à restrição  $V_{0a}^B$ . Essa relação é dada pela transformação adjunta  $Ad_{g_{ra}}$  (Murray et al., 1994):

$$V_{0r}^B = Ad_{g_{ra}} V_{0a}^B = \begin{bmatrix} R_{ra} & p_{ra} \times R_{ra} \\ 0 & R_{ra} \end{bmatrix} V_{0a}^B \quad (6)$$

onde  $R_{ra} \in \mathbb{SO}(3)$  é a matriz de rotação entre os 2 sistemas de coordenadas e  $p_{ra}$  a posição de  $\mathcal{F}_r$  em relação a  $\mathcal{F}_a$ . A velocidade em  $\mathcal{F}_a$  pode ser encontrada com o jacobiano  $J_{0a}^B \in \mathbb{R}^{6 \times m}$ , onde  $m$  é o número e juntas antes da restrição:

$$V_{0a}^B = J_{0a}^B(\theta_{1a}) \dot{\theta}_{1a} \quad (7)$$

onde  $\theta_{1a} \in \mathbb{R}^m$  são as posições das juntas anteriores à restrição e  $\dot{\theta}_{1a} \in \mathbb{R}^m$  são as velocidades dessas juntas. Portanto, a partir da equação (6), a velocidade em  $\mathcal{F}_r$  é dada por:

$$V_{0r}^B = Ad_{g_{ra}} J_{0a}^B(\theta_{1a}) \dot{\theta}_{1a} = J_{0r}^B(\theta_{1a}) \dot{\theta}_{1a} \quad (8)$$

A velocidade do efetuador é definida de forma similar a (7), mas representada no sistema de coordenadas da base:

$$V_{0e}^S = J_{0e}^S(\theta) \dot{\theta} \quad (9)$$

onde  $\theta \in \mathbb{R}^n$  são as posições das juntas do manipulador,  $n$  é o número de graus de liberdade do robô e  $J_{0e}^S(\theta) \in \mathbb{R}^{6 \times n}$  é o jacobiano representado na base.

De forma geral, uma restrição na cadeia cinemática é escrita como:

$$H V_{0r}^B = 0 \quad (10)$$

onde  $H \in \mathbb{R}^{r \times 6}$  é a matriz que define os eixos onde os movimentos são restringidos e  $r$  é a dimensão da restrição. Substituindo (8) em (10), temos:

$$H Ad_{g_{ra}} J_{0a}^B(\theta_{1a}) \dot{\theta}_{1a} = 0 \quad (11)$$

Considerando o espaço nulo de  $\Lambda = H Ad_{g_{ra}}$ , temos que:

$$\dot{\theta}_{1a} = J_{0a}^{B \dagger} \Lambda^\# \bar{v} \quad (12)$$

onde  $\Lambda^\# \in \mathbb{R}^{6 \times (6-r)}$  é a matriz que gera espaço nulo de  $H Ad_{g_{ra}}$  e  $6-r$  é a nulidade de  $H Ad_{g_{ra}}$ . O operador  $\dagger$  denota a pseudo-inversa a direita de Moore-Penrose, portanto assume-se que  $J_{0a}^B$  tem posto completo e que  $J_{0a}^{B \dagger} J_{0a}^B$  é inversível.

Considerando que o manipulador é inserido por um buraco, a restrição se dá em 2 graus de liberdade no ponto de inserção  $\mathcal{F}_r$ , o que significa que o elo que cruza o ponto de inserção não pode se mover em duas direções. Se essas direções forem os eixos  $x$  e  $y$ ,  $H$  é definida como:

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Pela definição da restrição em (11) e pela transformação adjunta em (6), assumindo que não há rotação entre os sistemas de coordenadas  $\mathcal{F}_a$  e  $\mathcal{F}_r$ , como a distancia entre eles é conhecida e dada por  $p_{ra} = [0 \ 0 \ -l_a]^T$ , temos que

$$\Lambda = H Ad_{g_{ra}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -l_a & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l_a & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Nesse caso, uma solução trivial para a matriz de espaço nulo  $\Lambda^\#$  definida em (17) é

$$\Lambda^\# = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{l_a} & 0 & 0 \\ \frac{1}{l_a} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

Considerando  $\theta = [\theta_{1a} \ \theta_{bn}]^T$ , com  $\theta_{bn}$  sendo as juntas após o ponto de inserção, reescrevemos (9) como

$$V_{0e}^S = [J_{0e_1}^S(\theta_{0e}) \ J_{0e_2}^S(\theta_{bn})] \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{1a} \\ \dot{\theta}_{bn} \end{bmatrix} \quad (16)$$

Substituindo (12) em (16) temos que

$$V_{0e}^S = \underbrace{\begin{bmatrix} J_{0e_1}^S(\theta_{0e}) & J_{0a}^{B \dagger} \Lambda^\# & J_{0e_2}^S(\theta_{bn}) \end{bmatrix}}_{J_r} \begin{bmatrix} \bar{v} \\ \dot{\theta}_{bn} \end{bmatrix} \quad (17)$$

onde  $J_r \in \mathbb{R}^{(n-r) \times 6}$  é denominado *Jacobiano Restrito*.

Podemos portanto calcular  $\dot{\theta}$  a partir da velocidade desejada do efetuador  ${}^dV_{0e}^S$  pela seguinte relação:

$$\nu = \begin{bmatrix} \bar{v} \\ \dot{\theta}_{bn} \end{bmatrix} = J_r^\dagger {}^dV_{0e}^S \quad (18)$$

Substituindo (12) em (17) tem-se o sistema a ser controlado respeitando as restrições de velocidade

$$V_{0e}^S = J_r \begin{bmatrix} J_{0a}^{B \dagger} \Lambda^\# & 0_{m \times (n-m)} \\ 0_{(n-m) \times (6-r)} & I_{(n-m) \times (n-m)} \end{bmatrix}^\dagger u, \quad (19)$$

para um sinal de controle  $u = \dot{\theta}$ . Supondo que o jacobiano restrito  $J_r$  não é singular, o sinal de controle de velocidade das juntas é dado por

$$u = \begin{bmatrix} J_{0a}^{B \dagger} \Lambda^\# & 0_{m \times (n-m)} \\ 0_{(n-m) \times (6-r)} & I_{(n-m) \times (n-m)} \end{bmatrix} J_r^\dagger \bar{u} \quad (20)$$

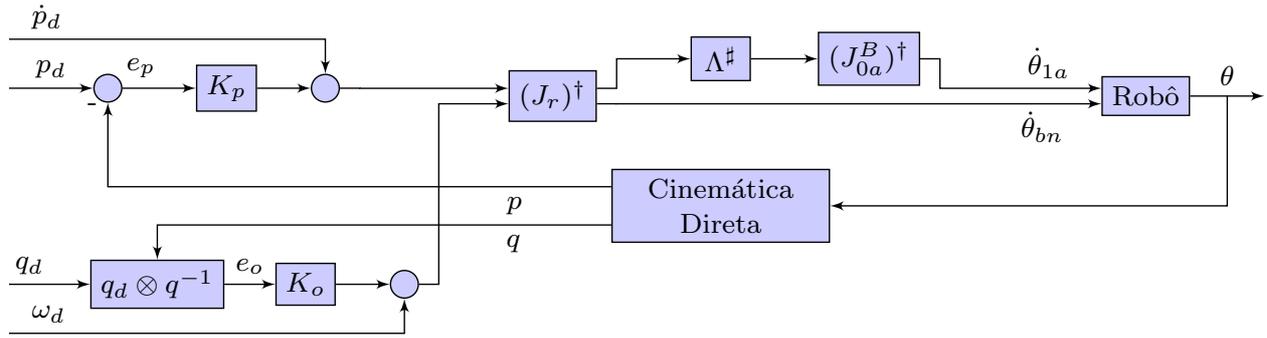


Figura 5. Diagrama de blocos do controle cinemático restrito

onde  $\bar{u} = [\bar{u}_p \ \bar{u}_o]^\top$  e  $\bar{u}_p$  e  $\bar{u}_o$  são os sinais de controle cartesiano para posição e orientação respectivamente.

O valor de  $\bar{u}$  pode ser definido de forma que se controle a pose do manipulador. Primeiro, considera-se o problema do controle de posição de um manipulador. Assume-se que o objetivo do projeto de controle é encontrar uma lei de controle  $\bar{u}_p(t)$  que garanta que a posição  $p$  do efetuador siga uma trajetória desejada  $p_d(t)$ . O objetivo de controle pode ser descrito como: (i)  $p \rightarrow p_d(t)$ ; (ii)  $e_p = p_d(t) - p \rightarrow 0$ , onde  $e_p \in \mathbb{R}^3$  é o erro de posição. Portanto, usando uma lei de controle proporcional com feedforward, temos:

$$\bar{u}_p = \dot{p}_d + K_p e_p, \quad K_p = K_p^\top > 0, \quad (21)$$

onde  $\dot{p}_d \in \mathbb{R}^3$  é a velocidade linear desejada e  $K_p \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  é a matriz de ganho de posição. A dinâmica do erro de posição é dada por  $\dot{e}_p + K_p e_p = 0$  o que implica que  $e_p(t) \rightarrow 0$  quando  $t \rightarrow \infty$ .

Agora, considera-se o problema de controle de orientação de um manipulador. Assume-se que o objetivo do projeto de controle é encontrar uma lei de controle  $\bar{u}_o(t)$  que garante que a orientação  $R$  do efetuador siga uma orientação desejada  $R_d(t)$ . O objetivo de controle pode ser descrito como: (i)  $R \rightarrow R_d(t)$ ; (ii)  $R_q = R^\top R_d(t) \rightarrow I$ , onde  $R_q \in \mathbb{SO}(3)$  é a matriz de erro de orientação no sistema de coordenadas  $\mathcal{F}_e$ . Note que, a partir de  $R_d(t) = (R_{be})_d$  e  $R = R_{be}$ , tem-se que  $R_q = R_{be}^\top (R_{be})_d$ .

Considera-se  $e_q = [e_{qs} \ e_{qv}^\top]^\top$  como a representação por quatérnio unitário de  $R_q$  de forma que  $e_q = q^{-1} \otimes q_d(t)$ , onde  $q$  e  $q_d(t)$  são as representações em quatérnios unitários de  $R$  e  $R_d(t)$  respectivamente, e que  $\otimes$  é o operador de produto de quatérnios. Note que,  $e_q = [1 \ 0^\top]^\top$  se e somente se  $R$  e  $R_d$  estão alinhadas. Portanto, usando uma lei de controle proporcional com feedforward

$$\bar{u}_o = w_d + K_o e_{qv}, \quad K_o = K_o^\top > 0, \quad (22)$$

onde  $w_d \in \mathbb{R}^3$  é a velocidade angular desejada e  $K_o \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  é a matriz de ganho de orientação, o ponto de equilíbrio  $(e_{qs}, e_{qv}) = (\pm 1, 0)$  é quase globalmente assintoticamente estável (Leite et al., 2009).

Um diagrama de blocos com a lei de controle proposta é apresentado na figura 5.

#### 4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para validar o controle com restrição proposto, definiu-se uma trajetória desejada simples: um deslocamento no eixo  $x$  e regulação nos demais eixos de posição e orientação:

$$x_d(t) = x_0 + 0.05 \sin(\pi t/20)$$

$$y_d(t) = y_0$$

$$z_d(t) = z_0$$

$$R_d(t) = R_0$$

onde  $x_0, y_0, z_0$  e  $R_0$ , são, respectivamente, as posições iniciais em  $x, y$  e  $z$  e a matriz de orientação inicial.

Como todos os tópicos ROS da plataforma móvel ROSI operam a uma frequência de 40 hz e essa frequência é grande suficiente (introduz pouco atraso) para realizar o controle da trajetória proposta, essa foi a frequência da malha de controle no teste realizado. Detalhes da implementação em MATLAB e da representação do manipulador pelos parâmetros de Denavit-Hartenberg podem ser encontrados em Novais (2022).

O erro de posição é apresentado na figura 6, onde nota-se que, nos 3 eixos, após convergir, esse se manteve em 0 com uma precisão de 0.4 mm. O erro de orientação, representado em ângulos de euler ZYZ é apresentado na figura 7, onde nota-se que o erro de orientação se manteve menor que  $0.01^\circ$  em todos os eixos. Esse baixo erro na orientação é justificado pela trajetória que possui orientação fixa.

As velocidades laterais  $V_x$  e  $V_y$ , no ponto de restrição são apresentadas na figura 8. A trajetória realizada exigiria normalmente movimentos no eixo  $x$  do sistema de coordenada  $F_r$ , porém, nota-se que as velocidades no ponto de inserção mantiveram-se ao redor de 0 com uma precisão de 4mm/s.

Nas figuras 9 e 10 os sinais de controle das juntas do manipulador e dos flippers da plataforma móvel são apresentados. O sinal de controle é o mesmo para todos os flippers e mantém-se abaixo do valor máximo descrito nas especificações da plataforma.

#### 5. CONCLUSÃO

Este artigo aplicou um algoritmo de controle que soluciona o problema de movimento restrito de um manipulador robótico a partir da definição de um jacobiano restrito

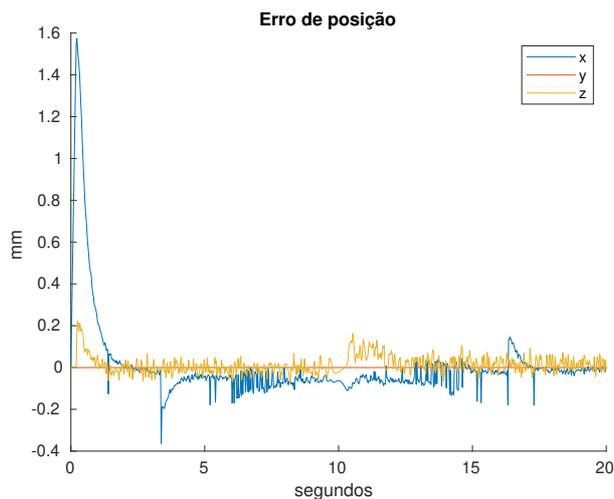


Figura 6. Erro de posição (mm)

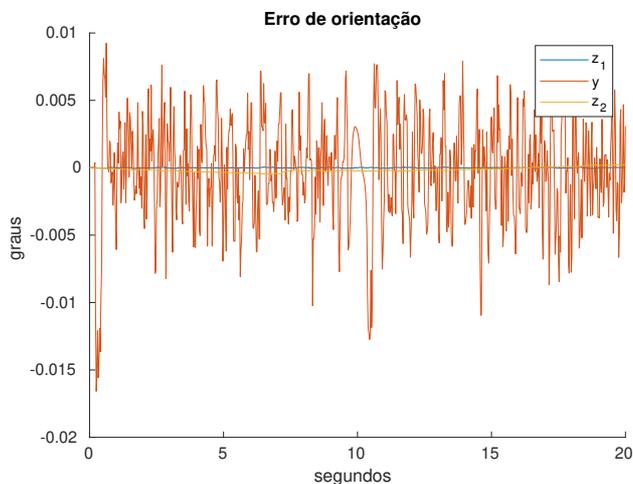


Figura 7. Erro de orientação em ângulos de euler ZYZ (graus)

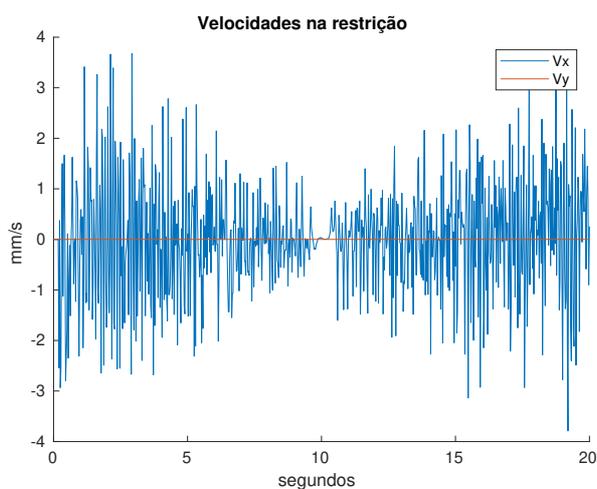


Figura 8. Velocidades no ponto de restrição (mm/s)

em um manipulador móvel de 8 graus de liberdade para atividades de inspeção em ambientes fechados. Um dos graus de liberdade do sistema provém do movimento

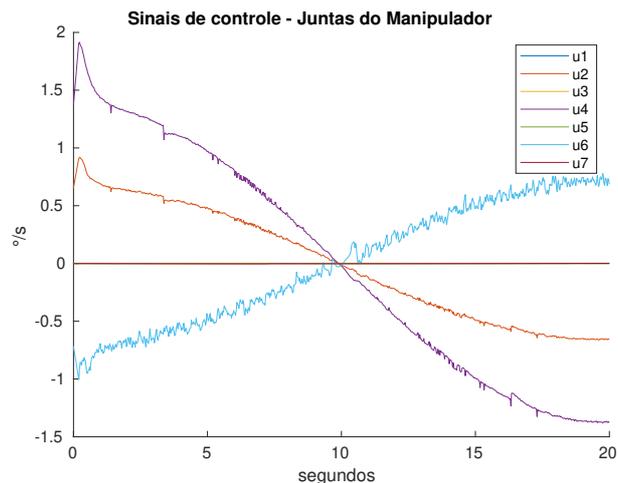


Figura 9. Sinais de controle das juntas do manipulador ( $^{\circ}/s$ )

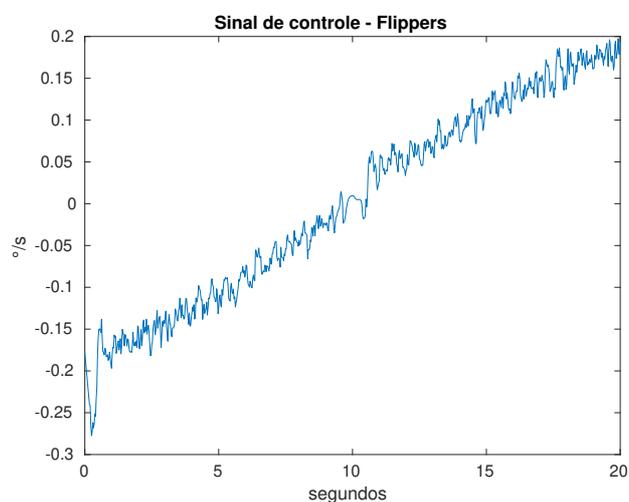


Figura 10. Sinal de controle dos Flippers ( $^{\circ}/s$ )

coordenado dos flippers da plataforma móvel, emulando uma junta prismática. Os resultados obtidos demonstram que a abordagem possui bom desempenho, uma vez que a trajetória proposta foi seguida com precisão suficiente para tarefas de inspeção (erros lineares e angulares menores que  $0.5mm$  e  $0.02^{\circ}$ ), enquanto o ponto de inserção não realiza movimento lateral (velocidade máxima de  $4mm/s$  e média nula).

Em trabalhos futuros pretende-se utilizar os flippers da plataforma móvel para adicionar mais 2 graus de liberdade à cadeia cinemática, de forma a totalizar 10 graus de liberdade e permitir uma restrição de maior dimensão, por exemplo, impedindo também a rotação em 2 eixos.

## REFERÊNCIAS

- Aschenbrenner, D., Fritscher, M., Sittner, F., Krauß, M., and Schilling, K. (2015). Teleoperation of an industrial robot in an active production line. *IFAC-PapersOnLine*, 48(10), 159–164. 2nd IFAC Conference on Embedded Systems, Computer Intelligence and Telematics CES-CIT 2015.

- Azimian, H., Patel, R.V., and Naish, M.D. (2010). On constrained manipulation in robotics-assisted minimally invasive surgery. In *Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob), 2010 3rd IEEE RAS and EMBS International Conference on*, 650–655.
- Barraquand, J. and Latombe, J.C. (1991). Robot motion planning: A distributed representation approach. *The International Journal of Robotics Research*, 10(6), 628–649.
- Coutinho, F., Pham, C.D., From, P., and Lizarralde, F. (2014). Analytical approach to control constrained manipulators in the operational space (in portuguese)espaço operacional de manipuladores com restrição cinemática. In *Proceeding of the XX Brazilian Control Conference (CBA)*.
- Funda, J., Taylor, R.H., Eldridge, B., Gomory, S., and Gruben, K. (1996). Constrained cartesian motion control for teleoperated surgical robots. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, 12(3), 453–465.
- Khatib, O. (1986). Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. *Int. J. Robot. Res.*, 5(1), 90–98.
- Kinova, R. (2022). *User Guide - KINOVA Gen3 Ultra lightweight robot*. Kinova.
- Leite, A., Lizarralde, F., and Hsu, L. (2009). Hybrid adaptive vision-force control for robot manipulators interacting with unknown surfaces. *The International Journal of Robotics Research*, 28(7), 911–926.
- Li, M., Kapoor, A., and Taylor, R.H. (2005). A constrained optimization approach to virtual fixtures. In *Intelligent Robots and Systems, 2005. (IROS 2005). 2005 IEEE/RSJ International Conference on*, 1408–1413.
- Lichiardopol, S. (2007). *A survey on teleoperation*. DCT rapporten. Technische Universiteit Eindhoven. DCT 2007.155.
- Locke, R.C.O. and Patel, R.V. (2007). Optimal remote center-of-motion location for robotics-assisted minimally-invasive surgery. In *Robotics and Automation, 2007 IEEE International Conference on*, 1900–1905.
- Murray, R.M., Li, Z., and Sastry, S.S. (1994). *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
- Novais, I. (2022). Controle de um manipulador robótico para tarefas de inspeção de transportadores de correias. Monografia (Bacharel em Engenharia de Controle e Automação), UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro), Rio de Janeiro, Brasil.
- Pham, C.D., Coutinho, F., Lizarralde, F., Hsu, L., and From, P.J. (2014). An analytical approach to operational space control of robotic manipulators with kinematic constraints. *IFAC Proceedings Volumes*, 47(3), 8509–8515. 19th IFAC World Congress.
- Rezaei, A., Dadouche, A., Wickramasinghe, V., and Dmochowski, W. (2011). A comparison study between acoustic sensors for bearing fault detection under different speed and load using a variety of signal processing techniques. *Tribology Transactions*, 54, 179–186.
- Rocha, F., Garcia, G., Pereira, R., Faria, H., Silva, T., Andrade, R., Barbosa, E., Santos, A., da Cruz, E., Andrade, W., Serrantola, W., Moura, L., Azpúrua, H., Franca, A., Pessin, G., Freitas, G., Costa, R., and Lizarralde, F. (2021). ROSI: a robotic system for harsh outdoor industrial inspection - system design and applications. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 103.
- Sadeghian, H., Zokaei, F., and Hadian Jazi, S. (2019). Constrained kinematic control in minimally invasive robotic surgery subject to remote center of motion constraint. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 95.
- Zhao, M. and Lv, X. (2020). Improved manipulator obstacle avoidance path planning based on potential field method. *Journal of Robotics*, 2020, 1–12.