

MODELAGEM E CONTROLE DE CORPO COMPLETO USANDO QUATÉRNIOS DUAIS PARA UM MANIPULADOR MÓVEL

FREDY ROLANDO SALAZAR-SANGUCHO*, BRUNO VILHENA ADORNO*

*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Minas Gerais
Av. Antônio Carlos 6627, Belo Horizonte, MG 31270-010 Brasil

fsalazar@ufmg.br, adorno@ufmg.br

Resumo— Este trabalho visa implementar uma técnica de modelagem e controle de corpo completo para um manipulador móvel composto por um robô manipulador acoplado a um robô móvel não holonômico de tração diferencial. Esta técnica baseia-se na álgebra de quatérnios duais para encontrar os modelos cinemáticos direto e diferencial da cadeia serialmente acoplada. Além disso, um controlador cinemático — no qual a referência é dada pelo quatérnio dual representando a pose do efetuador — produz o movimento do robô e utiliza o Jacobiano do corpo completo para gerar simultaneamente o sinal de controle de todos os graus de liberdade. Esta implementação é avaliada por meio de experimentos que demonstram a validade da técnica de modelagem e controle de corpo completo.

Palavras-chave— Modelagem e controle de corpo completo, manipulador móvel, quatérnios duais, modelo cinemático direto, modelo cinemático diferencial, controlador cinemático.

1 Introdução

Nos últimos anos muitas pesquisas envolvendo robótica têm se concentrado em trabalhos que caracterizam a chamada robótica de assistência. De fato, recentemente houve um aumento considerável no desenvolvimento de robôs móveis e humanoides capazes de interagir com humanos e também capazes de ajudar pessoas que possuem necessidades especiais, como pessoas muito idosas ou que tenham algum tipo de deficiência (Mast et al., 2012). Robôs assistentes têm ganhado bastante relevância nos cenários ou ambientes que envolvem o contato com humanos (Kemp et al., 2007) e dessa maneira muitos trabalhos recentes visam melhorar esses tipos de robôs. Por exemplo, alguns trabalhos levam em consideração a implementação de uma aparência antropomórfica (Spexard et al., 2007), enquanto outros se focam no controle simultâneo de vários graus de liberdade (Nishiwaki et al., 2005; Gienger et al., 2006; Sentis & Khatib, 2006; Nagasaka et al., 2010; Dietrich et al., 2011; Dalibard et al., 2013; Saab et al., 2013), manipulação cooperativa (Adorno et al., 2014) e interação humano-robô tanto no nível físico (De Santis et al., 2008) quanto no cognitivo (Breazeal, 2003). Nessa perspectiva, espera-se que em um futuro próximo robôs e humanos compartilhem espaços comuns e trabalhem de forma cooperativa.

Com o objetivo de fazer com que os robôs interajam com os humanos de forma mais natural, é desejável que os movimentos dos robôs sejam fluidos e que envolvam a estrutura completa do robô. Diferentes trabalhos nesta área foram desenvolvidos e aplicados em manipuladores móveis e robôs humanoides. Nishiwaki et al. (2005) propuseram um método de controle de corpo inteiro realizando movimentos que mantêm a pose e o equilíbrio automaticamente. Este método foi aplicado ao robô humanoide H7 das Indústrias Kawada em par-

ceria com a Universidade de Tokyo. Sentis & Khatib (2006) apresentam uma estrutura de controle de corpo inteiro que utiliza o modelo dinâmico do robô e que leva em consideração múltiplas tarefas com diferentes prioridades de execução, permitindo assim controlar múltiplas tarefas enquanto as limitações físicas e cinemáticas do robô são respeitadas. Basicamente três níveis de prioridade são utilizados e referem-se às limitações físicas do robô, à execução de tarefas e ao controle da postura do robô. Este controle foi aplicado ao robô humanoide ASIMO da Honda. Gienger et al. (2006) apresentam um algoritmo de movimento de corpo inteiro para permitir intervalos de deslocamento no espaço de trabalho. Analogamente ao movimento no espaço nulo proposto inicialmente por Liegeois (1977), os intervalos de deslocamento são explorados para satisfazer simultaneamente uma ou várias funções de custo e este algoritmo foi avaliado no robô humanoide ASIMO. Nagasaka et al. (2010) propõem uma estrutura de controle para um robô composto por dois manipuladores e uma base móvel. Este pode coordenar todas as forças conjuntas para alcançar diversos objetivos de movimento, como posição, velocidade, aceleração, força e impedância em qualquer parte do corpo. Adorno (2011) apresentou um método de controle cinemático, que é uma extensão do Espaço Dual de Cooperação (EDC) proposto por Adorno et al. (2010), e que leva em consideração o movimento do corpo inteiro para a realização de manipulações bimanuais realizadas por um robô composto por uma base móvel não holonômica, um dorso com um grau de liberdade e dois braços. A manipulação é descrita em termos de duas variáveis: a variável relativa, que representa a relação entre as poses dos dois efetuadores (garras) do robô, e a variável absoluta, que representa a pose do objeto que está sendo manipulado. A ideia de sistemas cinemáticos acoplados serialmente, os quais são representados por

quatérnios duais, foi introduzida a fim de descrever as variáveis absolutas em termos de todos os graus de liberdade que estão presentes no sistema cinemático completo. Este método foi avaliado mediante simulação. Park, H. Andy Lee (2013) propuseram um método de controle de equilíbrio de robôs humanoides baseada no EDC. O método fornece uma maneira eficiente para a estabilização do corpo inteiro por meio da modificação da posição horizontal da cintura gerada pelo movimento coordenado de ambas as pernas. Este método baseado no EDC prevê a possibilidade de gerar uma grande biblioteca de movimentos de corpo inteiro para robôs humanoides e foi validado por meio de simulações, que incluem casos que mostraram um robô humanoide HOAP-2 andando em um terreno plano e subindo escadas. Dietrich et al. (2011) apresentam um controlador de corpo inteiro baseado na impedância mecânica do sistema para fornecer uma interface entre o espaço da tarefa (do inglês *task-space*) e algoritmos de planejamento de nível superior. Ao utilizar uma única matriz Jacobiana para todo o sistema, exceto para as mãos, um comportamento sincronizado é alcançado. Este controlador foi avaliado no humanoide móvel Justin. Dalibard et al. (2013) propuseram um método geral para o planejamento de movimentos de corpo inteiro que facilita uma marcha livre de colisão em robôs humanoides. Este algoritmo de planejamento considera modelos exatos do robô e seu ambiente e é usado para resolver problemas de navegação e manipulação. O método foi aplicado em um robô humanoide HRP-2.

Todos os trabalhos supracitados apresentam técnicas que permitem integrar movimentos simultâneos de subsistemas que compõem um corpo inteiro por meio do controle de todos os graus de liberdade disponíveis do robô. Essas técnicas são particularmente úteis para a geração de movimento de sistemas altamente redundantes, como humanoides e manipuladores móveis.

A contribuição principal deste artigo consiste na implementação da técnica de modelagem e controle de corpo completo proposta por Adorno (2011). Esta técnica baseia-se na álgebra de quatérnios duais para encontrar o modelo cinemático direto e o modelo cinemático diferencial direto da cadeia serialmente acoplada, que neste trabalho é composta por um manipulador acoplado a um robô móvel não holonômico. Além disso, um controlador cinemático — no qual a referência é dada pelo quatérnio dual representando a pose do efetuador — produz o movimento do robô e utiliza o Jacobiano do corpo completo para gerar *simultaneamente* o sinal de controle de todos os graus de liberdade.

O artigo está organizado da seguinte forma: na seção 2 é feita uma revisão de quatérnios duais e seu uso na representação de movimentos rígidos; a seção 3 apresenta os modelos cinemáticos direto

e diferencial direto do robô manipulador, da base móvel não holonômica e do sistema serialmente acoplado que representa o corpo completo do manipulador móvel; na seção 4 apresenta-se uma revisão do controle cinemático usado para gerar o movimento simultâneo de todos os graus de liberdade do corpo completo; na seção 5 apresenta-se os resultados dos experimentos realizados com um manipulador móvel real e, por último, a seção 6 encerra o artigo com as discussões finais e conclusões.

2 Fundamentos matemáticos

Os quatérnios duais fornecem uma forma conveniente para representações de sistemas robóticos. Entre as vantagens do uso dos quatérnios duais pode-se ressaltar a representação compacta e direta de movimentos rígidos e transformações homogêneas. Mais especificamente, eles descrevem simultaneamente posições e orientações usando apenas oito parâmetros e desempenham o mesmo papel das matrizes de transformação homogêneas, onde o movimento rígido completo é descrito por um único objeto matemático. (Adorno, 2011).

Os quatérnios foram introduzidos por Hamilton no século XIX, e podem ser considerados como uma extensão dos números complexos, onde as três componentes imaginárias \hat{i} , \hat{j} , \hat{k} (também chamadas unidades quaterniônicas) são usadas e possuem as seguintes propriedades (Kuipers, 2002):

$$\hat{i}^2 = \hat{j}^2 = \hat{k}^2 = \hat{i}\hat{j}\hat{k} = -1$$

O quatérnio \mathbf{h} inclui uma componente real e uma componente imaginária envolvendo as três unidades imaginárias, ou seja, $\mathbf{h} = a + b\hat{i} + c\hat{j} + d\hat{k}$, onde $a, b, c, d \in \mathbb{R}$. Uma rotação \mathbf{r} , composta pelo ângulo de rotação ϕ em torno do eixo $\mathbf{n} = n_x\hat{i} + n_y\hat{j} + n_z\hat{k}$, é dada pelo quatérnio unitário $\mathbf{r} = \cos(\phi/2) + \sin(\phi/2)\mathbf{n}$. Uma translação \mathbf{p} é representada por um quatérnio puro, ou seja, um quatérnio cuja parte real é igual a zero. Logo, $\mathbf{p} = p_x\hat{i} + p_y\hat{j} + p_z\hat{k}$.

O quatérnio dual unitário $\underline{\mathbf{x}} = \mathbf{r} + \varepsilon(1/2)\mathbf{pr}$ representa um movimento rígido composto por uma translação \mathbf{p} seguida de uma rotação \mathbf{r} , onde ε é uma unidade dual de Clifford que obedece $\varepsilon \neq 0$ e $\varepsilon^2 = 0$ (Selig, 2005). Assim, $\underline{\mathbf{x}}$ representa a pose de um corpo rígido no espaço dos quatérnios duais unitários.

O operador vec realiza o mapeamento injetor $\text{vec} : \mathcal{H} \rightarrow \mathbb{R}^8$, ou seja, $\text{vec } \underline{\mathbf{x}} = [x_1 \dots x_8]^T$, onde $\underline{\mathbf{x}} = x_1 + x_2\hat{i} + x_3\hat{j} + x_4\hat{k} + \varepsilon(x_5 + x_6\hat{i} + x_7\hat{j} + x_8\hat{k})$ e \mathcal{H} representa o conjunto dos quatérnios duais.

Os operadores de Hamilton são as matrizes $\overset{+}{\mathbf{H}}(\cdot)$ e $\overset{-}{\mathbf{H}}(\cdot)$ que satisfazem (Adorno, 2011):

$$\text{vec}(\underline{\mathbf{x}}\underline{\mathbf{y}}) = \overset{+}{\mathbf{H}}(\underline{\mathbf{x}})\text{vec } \underline{\mathbf{y}} = \overset{-}{\mathbf{H}}(\underline{\mathbf{y}})\text{vec } \underline{\mathbf{x}}.$$

3 Modelos cinemáticos direto e diferencial direto para o corpo completo

Podemos considerar vários sistemas que podem ser descritos por movimentos rígidos, por exemplo: robôs manipuladores, bases móveis, robôs voadores, etc.

Quando utilizado para representar o modelo cinemático direto de um robô manipulador, o quatérnio dual \underline{x} é uma função da posição angular das juntas do robô, ou seja, $\underline{x} = \underline{f}(\theta)$, onde θ é o vetor n -dimensional que representa as juntas do robô e \underline{f} é a função que faz o mapeamento entre o espaço toroidal das juntas e o quatérnio dual que representa a pose do efetuador do robô (Adorno, 2011).

De maneira geral, o modelo cinemático diferencial do robô manipulador é dado por $\text{vec } \dot{\underline{x}} = \mathbf{J}\dot{\theta}$, onde \mathbf{J} é a matriz Jacobiana analítica que pode ser encontrada algebricamente (Adorno, 2011).

Quando utilizado para representar o modelo cinemático direto de uma base móvel, o quatérnio dual \underline{x} é uma função das coordenadas cartesianas (x, y) e do ângulo ϕ da base móvel. Dessa forma $\underline{x} = \underline{f}(x, y, \phi)$ (Adorno, 2011).

Os modelos cinemáticos diretos e diferenciais do robô manipulador e da base móvel são diferentes e cada um é descrito por funções do tipo $\underline{x}_i = \underline{f}_i(\theta_i)$, com $i = \{0, 1\}$, que correspondem à base móvel e ao manipulador, respectivamente. Como estes sistemas são acoplados serialmente, alterações no estado de sistemas cinemáticos anteriores causam variações em todo o resto da cadeia cinemática. Conseqüentemente, a variação do último sistema na cadeia será uma função da variação de todos os sistemas anteriores.

3.1 Modelo cinemático do robô manipulador

O robô manipulador usado neste trabalho é o AX18 Smart Robot Arm (CrustCrawler Robotics, Arizona, USA) que tem cinco graus de liberdade e um efetuador final.

Para se obter o modelo cinemático do robô manipulador usa-se uma abordagem já bem estabelecida que consiste em usar os parâmetros de Denavit-Hartenberg (DH). Os quatro parâmetros DH são associados a uma convenção padrão que estabelece a relação entre dois elos sucessivos dentro de uma cadeia cinemática serial. Utilizando-se a representação em quatérnios duais, primeiramente aplica-se uma rotação θ_i em torno do eixo z (i.e., $\mathbf{r}_{\theta_i} = \cos(\theta_i/2) + \sin(\theta_i/2)\hat{k}$), seguida de uma translação d_i ao longo do eixo z (i.e., $\underline{p}_{d_i} = 1 + \varepsilon(d_i/2)\hat{k}$), de uma translação a_i ao longo do eixo x (i.e., $\underline{p}_{a_i} = 1 + \varepsilon(a_i/2)\hat{i}$) e, finalmente, de uma rotação α_i em torno do eixo x (i.e., $\mathbf{r}_{\alpha_i} = \cos(\alpha_i/2) + \sin(\alpha_i/2)\hat{i}$). A transfor-

Tabela 1: Parâmetros D-H do manipulador robótico AX18 (Lana et al., 2013).

Elo	d (m)	θ (rad)	a (m)	α (rad)
L_1	0.167	0	0	$-\pi/2$
L_2	0	0	0.159	0
L_3	0	$-\pi/2$	0	$-\pi/2$
V^*	0.0815	0	0.02225	0
L_4	0.041	$-\pi/2$	0	$-\pi/2$
L_5	0	0	0	0

V^* Elo virtual: Este não representa uma ligação física do robô

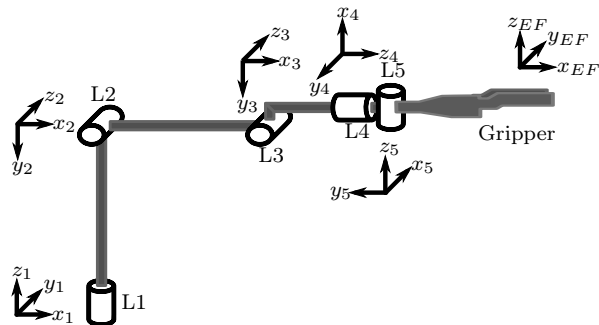


Figura 1: Sistemas de referência atribuídos ao robô manipulador AX18, a fim de obter os parâmetros DH (Lana et al., 2013).

mação entre dois elos é dada por (Adorno, 2011)

$$\underline{x}_{L_i} = \mathbf{r}_{\theta_i} \underline{p}_{d_i} \underline{p}_{a_i} \mathbf{r}_{\alpha_i}, \quad (1)$$

Dado um robô específico, \underline{x}_{L_i} é função de θ_i para uma junta rotativa e função de d_i para uma junta prismática, pois o restante dos parâmetros são constantes. No caso específico do robô manipulador usado neste trabalho, os parâmetros DH são apresentados na tabela 1. O efetuador é representado pelo quatérnio dual

$$\underline{x}_G = \mathbf{r}_G + \frac{1}{2} \varepsilon \mathbf{p}_G \mathbf{r}_G, \quad (2)$$

onde $\mathbf{p}_G = -0.17\hat{k}$ e $\mathbf{r}_G = \cos(\pi/4) - \sin(\pi/4)\hat{k}$ (Lana et al., 2013). Usando (1), (2) e os parâmetros DH da tabela 1, o modelo cinemático direto é dado por

$$\underline{x}_E = \underline{f}(\theta_{\text{braço}}) = \underline{x}_{L_1} \underline{x}_{L_2} \underline{x}_{L_3} \underline{x}_{V^*} \underline{x}_{L_4} \underline{x}_{L_5} \underline{x}_G, \quad (3)$$

onde $\theta_{\text{braço}}$ é o vetor contendo as variáveis das juntas do robô.

O modelo cinemático diferencial direto pode ser encontrado por meio da derivada da equação (3), ou seja, $\text{vec } \dot{\underline{x}}_E = \mathbf{J}_{\text{braço}} \dot{\theta}_{\text{braço}}$, onde a matriz Jacobiana $\mathbf{J}_{\text{braço}} \in \mathbb{R}^{8 \times 5}$ é obtida algebricamente utilizando-se a metodologia proposta por Adorno (2011).

3.2 Modelo cinemático da base móvel não-holonômica

Neste trabalho, utiliza-se uma base móvel não-holonômica iRobot Create™ que tem três graus

de liberdade. Este robô tem o modelo cinemático de um unicycle, ou seja, possui duas rodas com acionamento independente acopladas a um eixo comum e uma roda livre.

Para se obter o modelo cinemático da base móvel não-holonômica primeiro considera-se uma base móvel holonômica. Esta pode ser parametrizada por $\theta_{xy\phi} = [x, y, \phi]^T$, onde x, y são as coordenadas cartesianas e ϕ é o ângulo da base com respeito a um sistema de coordenadas inercial. Usando a representação em quatérnios duais proposta por Adorno (2011), a posição no plano é $\mathbf{p}_{base} = \hat{i}x + \hat{j}y$, a orientação é $\mathbf{r}_{base} = \cos(\phi/2) + \hat{k} \sin(\phi/2)$, de forma que o quatérnio dual unitário resultante é dado por

$$\underline{\mathbf{x}}_{base} = \mathbf{r}_{base} + \varepsilon \frac{1}{2} \mathbf{p}_{base} \mathbf{r}_{base}. \quad (4)$$

Expandindo-se a equação (4), obtém-se

$$\begin{aligned} \underline{\mathbf{x}}_{base} = & \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) + \hat{k} \sin\left(\frac{\phi}{2}\right) \\ & + \varepsilon \frac{1}{2} \left[\hat{i} \left(x \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) + y \sin\left(\frac{\phi}{2}\right) \right) \right. \\ & \left. + \hat{j} \left(-x \sin\left(\frac{\phi}{2}\right) + y \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) \right) \right]. \end{aligned}$$

A derivada no tempo de $\underline{\mathbf{x}}_{base}$ fornece a relação entre a derivada do quatérnio dual e os parâmetros do robô móvel holonômico, isto é,

$$\text{vec } \dot{\underline{\mathbf{x}}}_{base} = \mathbf{J}_{hol} \dot{\theta}_{xy\phi} \quad (5)$$

onde $\mathbf{J}_{hol} = (a_{ij}) \in \mathbb{R}^{8 \times 3}$ e todos os elementos a_{ij} são iguais a zero, com exceção dos elementos seguintes:

$$\begin{aligned} a_{13} = -a_{62} = a_{71} = & -\frac{1}{2} \sin(\phi/2) \\ a_{43} = a_{61} = a_{72} = & \frac{1}{2} \cos(\phi/2) \\ a_{63} = \frac{1}{4} [& -x \sin(\phi/2) + y \cos(\phi/2)] \\ a_{73} = \frac{1}{4} [& -x \sin(\phi/2) - y \cos(\phi/2)]. \end{aligned}$$

A equação (5) não leva em consideração as restrições holonômicas da base móvel. A relação a seguir deve ser usada para impor as restrições não-holonômicas (Adorno, 2011):

$$\dot{\theta}_{xy\phi} = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{r}{2} \cos \phi & \frac{r}{2} \cos \phi \\ \frac{r}{2} \sin \phi & \frac{r}{2} \sin \phi \\ \frac{r}{2b} & -\frac{r}{2b} \end{bmatrix}}_{\mathbf{J}_{restrições}} \underbrace{\begin{bmatrix} \omega_r \\ \omega_l \end{bmatrix}}_{\dot{\theta}_{rodas}}, \quad (6)$$

onde ω_r e ω_l são as velocidades angulares da roda direita e esquerda respectivamente, r é o raio das rodas e b é a distância entre elas. Substituindo a equação (6) em (5) podemos obter a equação da cinemática diferencial direta da base móvel não holonômica:

$$\text{vec } \dot{\underline{\mathbf{x}}}_{base} = \mathbf{J}_{hol} \mathbf{J}_{restrições} \dot{\theta}_{rodas} = \mathbf{J}_{nhol} \dot{\theta}_{rodas}.$$



Figura 2: Manipulador móvel utilizado neste trabalho.

3.3 Representação do modelo cinemático serialmente acoplado

Seja um robô manipulador serial fixado no topo de uma base móvel não-holonômica, como ilustrado na figura 2. A configuração do efetador final em relação a um sistema global de referência será uma função tanto da posição das articulações do robô manipulador e a configuração da base móvel.

Frequentemente, as diferentes partes de um sistema robótico complexo são modelados separadamente. Por exemplo, na modelagem de um robô humanoide, pode-se dividi-lo em pernas, tronco, braços e cabeça, sendo cada parte considerada como um subsistema. Depois que cada subsistema é modelado separadamente, o objetivo é encontrar o modelo completo considerando-se a interação de todos os subsistemas individuais (Adorno, 2011). O mesmo princípio é aplicável ao caso de um manipulador móvel.

A seguir será apresentada uma metodologia sistemática e direta, proposta por Adorno (2011), a fim de se obter modelos cinemáticos da cadeia cinemática completa a partir de sistemas serialmente acoplados. No caso do robô manipulador fixado na parte superior de uma base móvel, esta integração irá permitir a descrição do manipulador móvel como uma entidade única. Além disso, mesmo se mais sistemas sejam adicionados em série, estes podem ser adicionados à descrição final de maneira bem direta utilizando-se a mesma metodologia.

Dado um sistema cinemático serial, este é composto por um conjunto de k subsistemas acoplados, cada um descrito pelas transformações rígidas $\underline{\mathbf{x}}_1, \underline{\mathbf{x}}_2, \dots, \underline{\mathbf{x}}_k$. Acoplando esses subsistemas serialmente, tem-se que $\underline{\mathbf{x}}_k^0 = \underline{\mathbf{x}}_1^0 \underline{\mathbf{x}}_2^1 \dots \underline{\mathbf{x}}_k^{k-1}$, onde $\underline{\mathbf{x}}_{i+1}^i$ representa a pose do $(i+1)$ -ésimo subsistema com respeito ao i -ésimo subsistema. Dessa maneira, $\underline{\mathbf{x}}_k^0$ corresponde à transformação do último sistema \mathcal{F}_k com respeito ao sistema base \mathcal{F}_0

e a derivada primeira é dada por (Adorno, 2011)

$$\text{vec } \underline{\dot{\mathbf{x}}}_k^0 = \sum_{i=0}^{k-1} \overset{+}{\mathbf{H}}(\mathbf{x}_i^0) \bar{\mathbf{H}}(\mathbf{x}_k^{i+1}) \text{vec } \underline{\dot{\mathbf{x}}}_{i+1}^i, \quad (7)$$

onde $\overset{+}{\mathbf{H}}(\mathbf{x}_i^0) = \bar{\mathbf{H}}(\mathbf{x}_i^0) = \mathbf{I}_8$.

Usando a equação (7), o modelo cinemático diferencial do manipulador móvel completo é facilmente obtido, pois a base móvel e o manipulador estão ligados serialmente. Mais especificamente, $\text{vec } \underline{\dot{\mathbf{x}}}_E^0 = \mathbf{J}_{\underline{\mathbf{x}}_E^0} \bar{\Theta}$, onde $\bar{\Theta}^T = [\dot{\theta}_{\text{braço}}^T \quad \dot{\theta}_{\text{rodas}}^T]$ e $\dot{\theta}_{\text{braço}}$ refere-se às velocidades das juntas do robô manipulador e $\dot{\theta}_{\text{rodas}}$ corresponde às velocidades das rodas da base móvel não holonômica.

A equação (7) pode ser reescrita em função dos Jacobianos do manipulador e da base móvel. Mais especificamente, considera-se o caso em que k subsistemas estão serialmente acoplados. Como cada subsistema intermediário tem um modelo cinemático diferencial dado por $\text{vec } \underline{\dot{\mathbf{x}}}_{i+1}^i = \mathbf{J}_{\underline{\mathbf{x}}_{i+1}^i} \bar{\theta}_{i+1}^i$, logo

$$\begin{aligned} \text{vec } \underline{\dot{\mathbf{x}}}_k^0 &= \sum_{i=0}^{k-1} \overset{+}{\mathbf{H}}(\mathbf{x}_i^0) \bar{\mathbf{H}}(\mathbf{x}_k^{i+1}) \text{vec } \underline{\dot{\mathbf{x}}}_{i+1}^i \\ &= \sum_{i=0}^{k-1} \mathbf{L}_{i+1} \bar{\theta}_{i+1}^i, \end{aligned} \quad (8)$$

com $\mathbf{L}_{i+1} = \overset{+}{\mathbf{H}}(\mathbf{x}_i^0) \bar{\mathbf{H}}(\mathbf{x}_k^{i+1}) \mathbf{J}_{\underline{\mathbf{x}}_{i+1}^i}$.

Analisando-se a equação (8), nota-se que as matrizes \mathbf{L}_{i+1} compõem o Jacobiano do sistema completo, ou seja, $\mathbf{J}_{\underline{\mathbf{x}}_k^0} = [\mathbf{L}_1 \quad \dots \quad \mathbf{L}_k]$ e $\bar{\Theta} = [\theta_1^T \quad \dots \quad \theta_k^T]^T$. Consequentemente, $\text{vec } \underline{\dot{\mathbf{x}}}_k^0 = \mathbf{J}_{\underline{\mathbf{x}}_k^0} \bar{\Theta}$.

Considerando o manipulador móvel da figura 2 composto por dois subsistemas (i.e., robô manipulador e base móvel), logo $k = 2$ e as matrizes \mathbf{L}_1 e \mathbf{L}_2 são dadas pela equação (8) e mostradas na tabela 2.

Tabela 2: Matrizes \mathbf{L}_1 e \mathbf{L}_2 que compõem o Jacobiano completo do robô.

i	\mathbf{L}_{i+1}	$\overset{+}{\mathbf{H}}(\mathbf{x}_i^0)$	$\bar{\mathbf{H}}(\mathbf{x}_k^{i+1})$	$\mathbf{J}_{\underline{\mathbf{x}}_{i+1}^i}$	$\bar{\theta}_{i+1}^i$
0	\mathbf{L}_1	\mathbf{I}_8	$\bar{\mathbf{H}}(\mathbf{x}_E^1)$	\mathbf{J}_{nhol}	$\dot{\theta}_{\text{rodas}}$
1	\mathbf{L}_2	$\overset{+}{\mathbf{H}}(\mathbf{x}_1^0)$	\mathbf{I}_8	$\mathbf{J}_{\text{braço}}$	$\dot{\theta}_{\text{braço}}$

4 Controle cinemático de corpo completo

A lei discreta de controle cinemático usada para controlar a cinemática e gerar o movimento do robô é dada por

$$\Theta[t] = \Theta[t-1] + \mathbf{J}_{\underline{\mathbf{x}}_k^0}^\dagger \mathbf{K} \text{vec}(\underline{\mathbf{x}}_d - \underline{\mathbf{x}}_m), \quad (9)$$

onde $\Theta[t]$ é a configuração do sistema completo (posição angular das juntas do manipulador e das rodas da base móvel) no t -ésimo instante discreto de tempo, $\mathbf{K} \in \mathbb{R}^{8 \times 8}$ é uma matriz positiva definida, e $\underline{\mathbf{x}}_d$ e $\underline{\mathbf{x}}_m$ são os valores desejado e medido da pose do efetuador, respectivamente. A matriz $\mathbf{J}_{\underline{\mathbf{x}}_k^0}^\dagger \triangleq \mathbf{J}_{\underline{\mathbf{x}}_k^0}^T (\mathbf{J}_{\underline{\mathbf{x}}_k^0} \mathbf{J}_{\underline{\mathbf{x}}_k^0}^T + \lambda^2 \mathbf{I})^{-1}$ é a inversa amortecida da matriz Jacobiana $\mathbf{J}_{\underline{\mathbf{x}}_k^0} \in \mathbb{R}^{8 \times 7}$ do sistema completo (Chiaverini, 1997) e λ é o fator de amortecimento. A inversa amortecida é uma metodologia bastante conhecida adotada para evitar singularidades cinemáticas. Basicamente o objetivo do controlador é fazer com que a pose atual $\underline{\mathbf{x}}_m$ do efetuador convirja para a pose desejada $\underline{\mathbf{x}}_d$, ou seja $(\underline{\mathbf{x}}_d - \underline{\mathbf{x}}_m) \rightarrow 0$ para $t \rightarrow \infty$. É importante ressaltar que, como a referência do controlador é dada por quatérnios duais, a posição e orientação do efetuador são controladas simultaneamente de maneira acoplada. Uma desvantagem deste controlador é o fato dele não levar em consideração a dinâmica do robô. Dessa maneira, ele possui bom desempenho apenas para acelerações moderadas e uma rigidez estrutural adequada do robô.

5 Resultados

Os métodos apresentados nas seções 3 e 4 foram validados mediante experimentos em um manipulador móvel real, mostrado na figura 2. O algoritmo foi implementado no software Matlab[®] em conjunto com a biblioteca DQ_Robotics Toolbox,¹ a biblioteca de interface com o robô manipulador AX18 desenvolvida por Lana et al. (2013) e a biblioteca de interface com o robô iRobot Create disponibilizada pelo próprio fabricante.

A tarefa do robô foi definida em duas sub-tarefas da seguinte maneira: 1) Dada a configuração inicial do manipulador móvel mostrada na figura 3a, o objetivo é pegar uma garrafa que está inicialmente fora do alcance do manipulador e 2) Em seguida levá-la e colocá-la dentro de uma caixa. Tanto a pose da garrafa (pose desejada 1) quanto a da caixa na qual ela deve ser depositada (pose desejada 2) foram escolhidas arbitrariamente e são conhecidas a priori, sendo constantes ao longo de todo o experimento. A configuração inicial do manipulador móvel também foi escolhida arbitrariamente, e assume-se que o sistema de coordenadas inercial global encontra-se alinhado com o sistema de coordenadas da base móvel no instante $t = 0$. A matriz de ganho do controlador cinemático foi escolhida empiricamente como $\mathbf{K} = 0,04\mathbf{I}_8$ de maneira a gerar um comportamento suave, mas com tempo de resposta rápido o suficiente para a execução da tarefa. A sequência completa da manipulação encontra-se na figura 3. É importante ressaltar que a manipulação fina de objetos está fora do

¹<http://dqrobotics.sourceforge.net/>

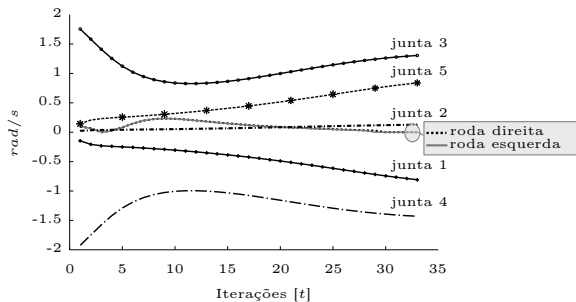


Figura 4: Atuação de todas as variáveis de controle do manipulador móvel.

escopo deste artigo, pois o efetuator do robô consiste apenas em uma pinça. Porém, este efetuator é suficiente para pegar uma garrafa comum.

É importante ressaltar que a referência para o controlador é apenas a pose desejada do efetuator. O controlador cinemático é responsável por gerar o sinal de controle para todos os graus de liberdade *simultaneamente*, como mostra a figura 4. Este comportamento é desejável por simplificar a definição da tarefa, pois o projetista não precisa definir trajetórias separadamente para o braço e para a base móvel. Alternativamente, um sistema de mais alto nível, como um sistema de visão computacional, poderia estimar a pose da garrafa e então definir a pose do efetuator desejada para que a manipulação ocorresse. Uma outra vantagem de se utilizar um algoritmo de controle de corpo completo é que o movimento do robô tende a ficar mais natural e fluido, pois toda a cadeia cinemática trabalha para a realização da tarefa. Além disso, como o sistema completo se torna altamente redundante, formalismos de controle hierárquico de tarefas podem explorar essa redundância para realizar tarefas secundárias no espaço nulo da tarefa principal (Liegeois, 1977; Chiaverini, 1997).

A figura 5 mostra a convergência da pose do efetuator para a pose final desejada para a sub-tarefa de pegar a garrafa. É importante notar que o controlador usado, dado pela equação (9), tem bom desempenho apenas localmente devido às restrições não holonômicas do sistema impostas pela base móvel. Isso significa que para situações nas quais a pose desejada encontra-se fora do espaço de trabalho do manipulador, mas que requeiram um movimento mais acentuado da base móvel (e.g., rotação de 90 graus), a pose final não vai convergir para a pose desejada, porém será estabilizada, resultando em um erro em regime permanente.

6 Conclusão

Este artigo apresentou uma técnica de modelagem e controle de corpo completo para um manipulador móvel composto por um robô manipulador acoplado a um robô móvel não holonômico de

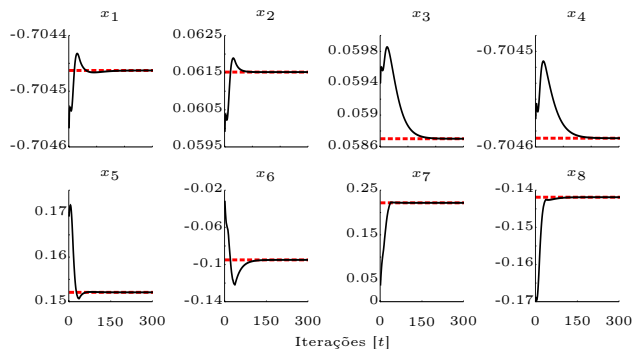


Figura 5: Coeficientes do quatérnio dual desejado (curva *tracejada*) e coeficientes do quatérnio dual medido (curva *sólida*) para a sub-tarefa de pegar a garrafa.

tração diferencial. Esta técnica baseia-se na álgebra de quatérnios duais para encontrar os modelos cinemáticos direto e diferencial da cadeia serialmente acoplada. Foi mostrado como o controlador cinemático implementado — no qual a referência é dada pelo quatérnio dual representando a pose do efetuator — produz o movimento do robô e utiliza o Jacobiano do corpo completo para gerar *simultaneamente* o sinal de controle tanto do manipulador e da base móvel.

Resultados experimentais demonstraram o bom desempenho do controle cinemático de corpo completo para as condições analisadas. No entanto, como a base móvel tem restrições não-holonômicas, a lei de controle utilizada tem uma convergência local. Consequentemente, o controlador não vai convergir (porém vai estabilizar) sempre que a referência desejada esteja fora do espaço de trabalho do manipulador e, ao mesmo tempo, exija movimentos que violem as restrições não holonômicas da base móvel. Porém, se as restrições não holonômicas não forem violadas, o controlador vai convergir mesmo que a pose desejada esteja fora do espaço de trabalho do manipulador, pois um movimento de corpo completo será realizado. Dessa maneira, os próximos desenvolvimentos se focarão no estudo e implementação de controladores de corpo completo que tenham uma zona de convergência mais ampla, se possível global, para manipuladores móveis com restrições não-holonômicas.

Trabalhos futuros também serão concentrados na integração de um sistema de visão computacional com o algoritmo de controle cinemático de corpo completo. Assim, o sistema de visão computacional será responsável por passar as referências desejadas para o controlador cinemático de corpo completo em função do objeto a ser manipulado.

Agradecimentos

Este trabalho recebeu suporte financeiro da Secretaria Nacional de Educación Superior, Ciencia,

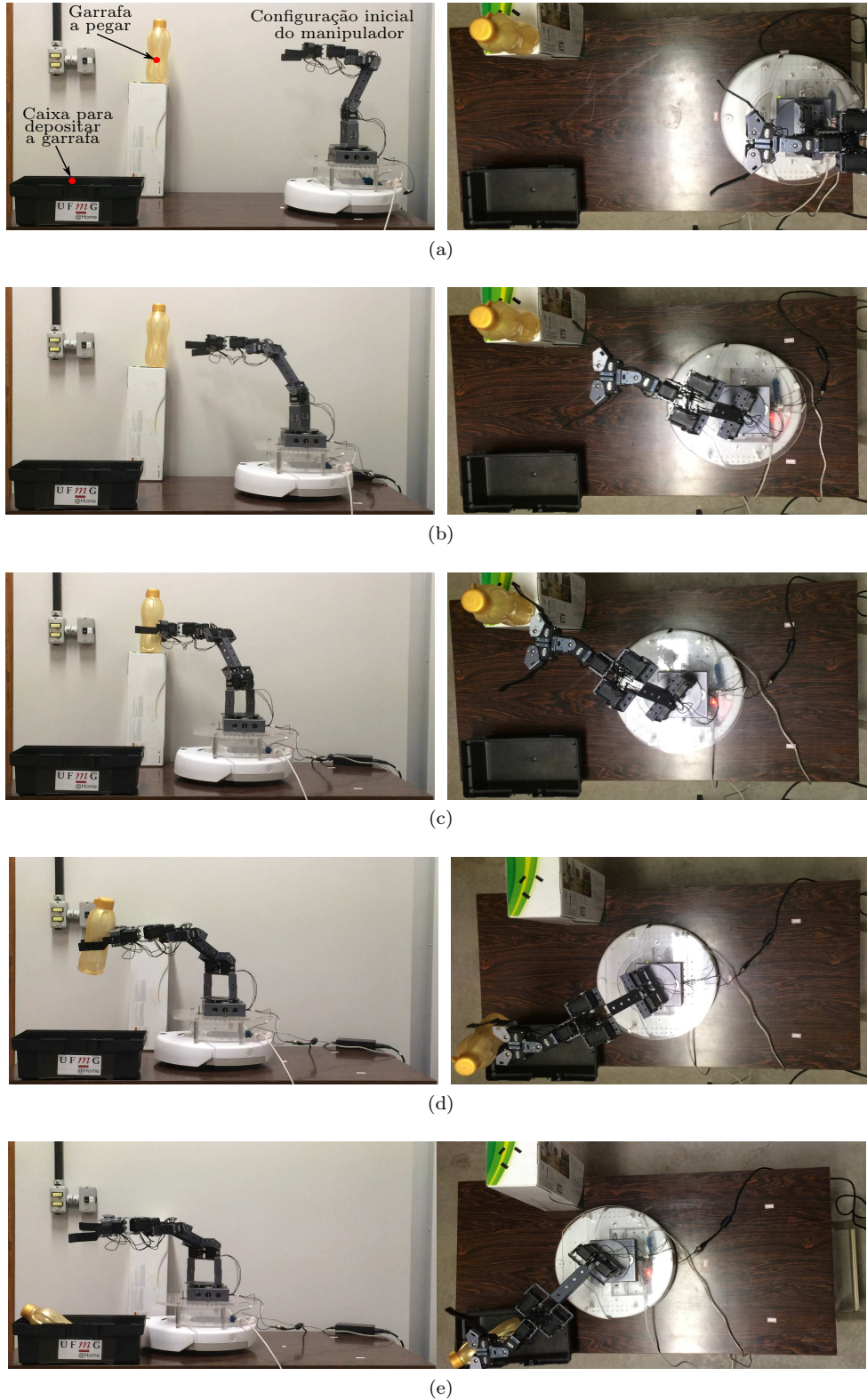


Figura 3: Experimento de controle do corpo completo de um manipulador móvel. As imagens à *esquerda* mostram a visão lateral do experimento, enquanto as imagens à *direita* mostram a visão de topo: (a) configuração inicial do sistema, (b) o robô realiza um movimento de corpo completo para se aproximar da garrafa, (c) o robô pega a garrafa, (d) leva-a até a segunda pose desejada e (e) a solta dentro da caixa.

Tecnología e Innovación (SENESCYT) do Equador e das agências brasileiras CAPES, CNPq e Fapemig.

Referências

- Adorno, B. V. (2011). *Two-arm manipulation: from manipulators to enhanced human-robot collaboration [Contribution à la manipulation à deux bras : des manipulateurs à la collaboration homme-robot]*. PhD thesis.
- Adorno, B. V., Bó, a. P. L., & Fraisse, P. (2014). Kinematic modeling and control for human-robot cooperation considering different interaction roles. *Robotica*, (February), 1–18.
- Adorno, B. V., Fraisse, P., & Druon, S. (2010). Dual position control strategies using the cooperative dual task-space framework. In *2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (pp. 3955–3960). Taipei: IEEE.
- Breazeal, C. (2003). Toward sociable robots. *Robotics and Autonomous Systems*, 42(3-4), 167–175.
- Chiaverini, S. (1997). Singularity-robust task-priority redundancy resolution for real-time kinematic control of robot manipulators. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 13(3).
- Dalibard, S., El Khoury, A., Lamiriaux, F., Nakhaei, A., Taix, M., & Laumond, J.-P. (2013). Dynamic walking and whole-body motion planning for humanoid robots: an integrated approach. *The International Journal of Robotics Research*, 32(9-10), 1089–1103.
- De Santis, A., Siciliano, B., De Luca, A., & Bicchi, A. (2008). An atlas of physical human-robot interaction. *Mechanism and Machine Theory*, 43(3), 253–270.
- Dietrich, a., Wimbock, T., & Albu-Schaffer, A. (2011). Dynamic whole-body mobile manipulation with a torque controlled humanoid robot via impedance control laws. *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, (pp. 3199–3206).
- Gienger, M., Janben, H., & Goerick, C. (2006). Exploiting Task Intervals for Whole Body Robot Control. *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, (pp. 2484–2490).
- Kemp, C., Edsinger, A., & Torres-Jara, E. (2007). Challenges for robot manipulation in human environments [Grand Challenges of Robotics]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 14(1).
- Kuipers, J. B. (2002). *Quaternions and rotation sequences: A primer with applications to orbits, aerospace and virtual reality*. Princeton University Press.
- Lana, E. P., Adorno, B. V., & Tierra-Criollo, C. J. (2013). Assistance Task Using a Manipulator Robot and User Kinematics Feedback. *Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI)*, (pp. 1–6).
- Liegeois, A. (1977). Automatic Supervisory Control of the Configuration and Behavior of Multi-body Mechanisms. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 7(12), 868–871.
- Mast, M., Burmester, M., Kruger, K., Fatikow, S., Arbeiter, G., Graf, B., Kronreif, G., Pignini, L., Facal, D., & Qiu, R. (2012). User-Centered Design of a Dynamic-Autonomy Remote Interaction Concept for Manipulation-Capable Robots to Assist Elderly People in the Home. *Journal of Human-Robot Interaction*, 1(1), 96–118.
- Nagasaka, K., Kawanami, Y., Shimizu, S., Kito, T., Tsuboi, T., Miyamoto, A., Fukushima, T., & Shimomura, H. (2010). Whole-body cooperative force control for a two-armed and two-wheeled mobile robot using Generalized Inverse Dynamics and Idealized Joint Units. *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (pp. 3377–3383).
- Nishiwaki, K., Kagami, S., & Inoue, H. (2005). Object manipulation by hand using whole-body motion coordination. *2005 IEEE International Conference*, (July), 1778–1783.
- Park, H. Andy Lee, C. S. G. (2013). Cooperative-Dual-Task-Space-based whole-body motion balancing for humanoid robots. *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (pp. 4797–4802).
- Saab, L., Ramos, O. E., Keith, F., Mansard, N., Soueres, P., & Fourquet, J.-Y. (2013). Dynamic Whole-Body Motion Generation Under Rigid Contacts and Other Unilateral Constraints. *IEEE Transactions on Robotics*, 29(2), 346–362.
- Selig, J. M. (2005). *Geometric fundamentals of robotics*. Springer-Verlag Inc.
- Sentis, L. & Khatib, O. (2006). A whole-body control framework for humanoids operating in human environments. *2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006.*, (May), 2641–2648.
- Spexard, T., Hanheide, M., & Sagerer, G. (2007). Human-Oriented Interaction With an Anthropomorphic Robot. *IEEE Transactions on Robotics*, 23(5).