

## **EVITAMENTO DE COLISÃO DE ROBÔS ATRAVÉS DO MÉTODO DAS RESTRIÇÕES CINEMÁTICAS**

**Carlos Rodrigues Rocha, carlos.rocha@riogrande.ifrs.edu.br<sup>1</sup>**  
**Altamir Dias, altamir@emc.ufsc.br<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Federal de Santa Catarina - Departamento de Engenharia Mecânica, Caixa Postal 476 - Campus Universitário - Trindade 88040-900 - Florianópolis(SC) - Brasil

**Resumo.** *No planejamento do movimento de robôs, o evitamento de colisão é um requisito de grande importância. Este é um campo de pesquisas bastante ativo, em particular para a robótica móvel. O evitamento de obstáculos também assume relevância em várias situações de uso de robôs manipuladores, como a execução de tarefas envolvendo múltiplos manipuladores ou que em espaços de trabalho confinados/incertos. O método das restrições cinemáticas é uma abordagem que pode ser empregada em estratégias de evitamento de colisões. Usado para a análise do movimento de cadeias cinemáticas abertas e fechadas, este método permite definir restrições e movimentos a estas. Para o evitamento de colisão, usa-se o método para explorar a redundância cinemática do manipulador de forma que este execute a tarefa enquanto satisfaz o objetivo complementar de desviar dos obstáculos. Trabalhos anteriores apresentam exemplos do uso desta técnica em tarefas executadas em espaços de trabalho confinados conhecidos/modelados, bem como em espaços incertos onde faz-se uso de sensores para o monitoramento da proximidade dos obstáculos. Este artigo visa apresentar a aplicação do método das restrições cinemáticas em estratégias de evitamento de colisão. Além do uso em robôs manipuladores, será desenvolvido o caso de sistemas veículo-manipulador. Exemplos de uso são apresentados.*

**Palavras-chave:** *evitamento de colisão, método das restrições cinemáticas, redundância, teoria dos helicoides*

### **1. INTRODUÇÃO**

Robôs são cada vez mais empregados em aplicações onde o seu espaço de trabalho não é planejado para operação livre de obstáculos. Existem várias aplicações de campo, domésticas e mesmo industriais onde o robô atua em um espaço compartilhado com objetos e seres vivos que não são relacionados com a tarefa a ser executada, o que exige a adoção de estratégias de evitamento de colisão no planejamento do movimento.

Essa é uma preocupação comum na robótica móvel que também é cada vez mais considerada em robôs manipuladores, e particularmente em sistemas veículo-manipulador. Estes têm crescente interesse por diversos setores de atividade, uma vez que aliam a capacidade de manipulação de ferramentas e objetos com a mobilidade para se deslocar de um sítio de operação a outro. Graças a essa mobilidade, pode-se considerar que o espaço de trabalho destes é bem maior que os de um manipulador equivalente com base fixa. Além disso, é possível levar as operações de manipulação à locais inóspitos como o vácuo do espaço ou o meio subaquático.

Para que um robô execute completamente o movimento especificado por uma tarefa ao mesmo tempo em que satisfaz objetivos complementares como o evitamento de colisão, é necessário que o mesmo tenha mobilidade adicional. Esta é provida pela redundância cinemática, a qual torna a cinemática inversa do robô um problema de infinitas soluções. A literatura apresenta diversas abordagens para a solução deste problema explorando a destreza adicional dos robôs redundantes. O método das restrições cinemáticas é uma delas.

Este método baseia-se na teoria dos helicoides, e estabelece que os objetivos complementares podem ser definidos como restrições ao movimento de uma cadeia cinemática redundante. Além de seu uso em manipuladores, o método pode ser aplicado a sistemas veículo-manipuladores, através da representação do movimento do veículo por uma cadeia cinemática virtual. Dessa maneira, obtém-se uma cadeia final veículo-manipulador inerentemente redundante.

Este trabalho trata da aplicação do método das restrições cinemáticas em estratégias de evitamento de colisão. Além de apresentar o uso do referido método em manipuladores redundantes, cuja análise já foi feita em trabalhos anteriores, neste texto estende-se a abordagem para o caso dos sistemas veículo-manipulador.

Na seção seguinte, serão apresentados os fundamentos da teoria dos helicoides e ferramentas nela baseadas para análise de cadeias cinemáticas. A seguir descreve-se o método das restrições cinemáticas e seu uso para a resolução do

movimento de robôs manipuladores é exemplificado. Após, é feita uma discussão sobre como utilizar este método no caso de sistemas veículo-manipulador em situações de evitamento de obstáculos, utilizando um exemplo no ambiente subaquático para ilustrar o seu desenvolvimento.

## 2. FUNDAMENTOS DA ANÁLISE CINEMÁTICA POR HELICOIDES

Esta seção apresenta brevemente os fundamentos teóricos e métodos das ferramentas de análise cinemática empregadas neste trabalho. A *teoria dos helicoides*, o *método de Davies* e o conceito de *cadeias cinemáticas virtuais* formam a base do método das restrições cinemáticas.

### 2.1 Teoria dos Helicoides

A teoria dos helicoides é uma ferramenta usada para a análise cinemática e estática de corpos rígidos e mecanismos. Suas origens remontam aos estudos de Mozzi(1763) e Chasles(1830), sendo sistematizada por Ball em 1900. Posteriormente, Hunt, Phillips, Roth e Tsai, entre outros, empregaram a teoria no estudo de mecanismos (Ceccarelli (2000); Dai (2006); Hunt (2000)).

Um *helicóide* (ou *screw* em inglês) é um ente geométrico que representa simultaneamente quantidades rotacionais e translacionais. Ele é composto por um *eixo* sobre o qual ambas as quantidades são definidas e um *passo* escalar que relaciona translação e rotação (Hunt (2000)). Segundo Dai (2006), a teoria dos helicoides associa significado físico a entes puramente geométricos ao usar *heligiros* (*twists* em inglês) para representar velocidades angulares/lineares e *heliforças* (*wrenches* em inglês) para representar forças/torques.

Uma notação bastante usada para representar helicoides baseia-se nas coordenadas de Plücker. Como mostra a Fig. (1a), o vetor  $\mathbf{S}$  e seu momento geométrico  $\mathbf{s}_0 \times \mathbf{S}$  definem o eixo ao redor do qual ocorre a rotação. A translação, paralela ao eixo, é igual a  $h\mathbf{S}$  e é adicionada ao momento geométrico. O passo  $h$  relaciona as grandezas da rotação e da translação. Empregando o unitário  $\mathbf{s}$  do vetor  $\mathbf{S}$ , obtém-se um *helicóide normalizado* puramente geométrico. Este desenvolvimento resulta na Eq. (1).

$$\mathcal{S} = \begin{bmatrix} \mathbf{S} \\ \mathbf{s}_0 \times \mathbf{S} + h\mathbf{S} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{s} \\ \mathbf{s}_0 \times \mathbf{s} + h\mathbf{s} \end{bmatrix} \Psi = \hat{\mathcal{S}} \Psi \quad (1)$$

onde  $\mathcal{S}$  é o helicóide,  $\hat{\mathcal{S}}$  é o helicóide normalizado e  $\Psi$  é a magnitude do helicóide.

Existem dois casos particulares na definição de helicoides: apenas rotação e apenas translação. No primeiro caso, tem-se  $h = 0$ , e seu helicóide normalizado é igual a  $\hat{\mathcal{S}} = [\mathbf{s}; \mathbf{s}_0 \times \mathbf{s}]^T$ . Para translação pura, assume-se que  $h = \infty$ , e o helicóide normalizado é definido como  $\hat{\mathcal{S}} = [\mathbf{0}; \mathbf{s}]^T$ .

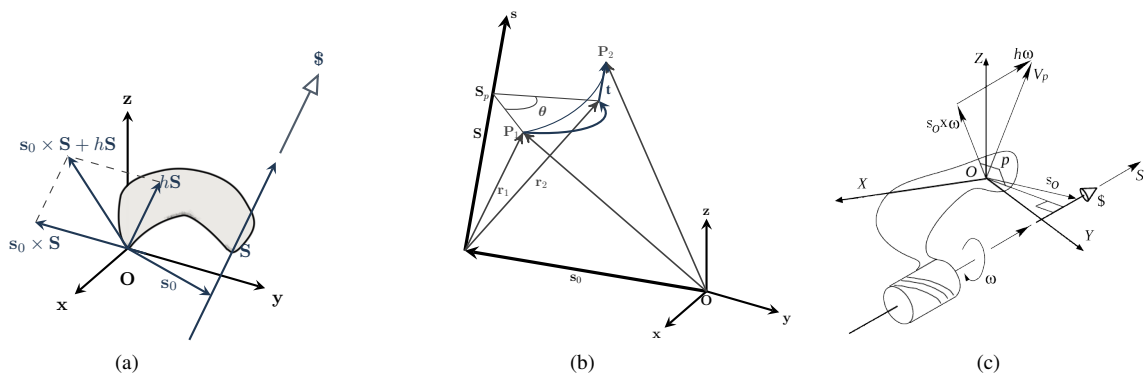


Figura 1: Helicoides: (a)definição geométrica; (b)deslocamento helicoidal; (c)componentes de um heligiro

#### 2.1.1 Cinemática de posição

Segundo o Teorema de Chasles, o deslocamento geral de um corpo rígido no espaço pode ser expresso por uma rotação ao redor de um eixo e por uma translação paralela a este eixo (Dai (2006); Simas (2008)). Este conceito resulta em um método para a descrição da postura de uma cadeia cinemática similar à largamente adotada notação Denavit-Hartenberg.

A postura de um corpo rígido no espaço é definida por *parâmetros de Rodrigues*, que são ilustrados na Fig. (1b). Nesta, considera-se que um ponto  $\mathbf{P}$  move-se de uma posição  $\mathbf{P}_1$  para uma posição  $\mathbf{P}_2$ . O helicóide normalizado, o

ângulo de rotação  $\theta$  e a translação  $t$  paralela definem a matriz de transformação homogênea  $\mathbf{A}$ , cuja dedução pode ser encontrada em Tsai (1999).

Em uma cadeia cinemática, a postura de um elo  $e$  relativa a um elo  $b$  é definida pelos *sucessivos deslocamentos helicoidais* exercidos pelas juntas da subcadeia entre esses dois elos. O deslocamento total resultante é obtido pela pré-multiplicação das matrizes de transformação homogênea  ${}^{i-1}\mathbf{A}_i$ , que definem o deslocamento do elo  $i$  em relação ao elo  $i - 1$ , como na Eq. (2).

$${}^b\mathbf{A}_e = {}^b\mathbf{A}_1^{-1}\mathbf{A}_2 \cdots {}^{n-1}\mathbf{A}_n {}^n\mathbf{A}_e \quad (2)$$

A representação por helicoides é sempre relativa a um sistema de coordenadas de referência, o qual pode ser escolhido de forma a se obter uma simplificação da definição dos helicoides do sistema ou se analisar uma característica particular do problema. Os parâmetros dos helicoides são determinados em relação a uma *configuração de referência* da cadeia cinemática (Simas *et al.* (2008)).

### 2.1.2 Cinemática diferencial

O teorema de Mozzi afirma que o movimento instantâneo de um corpo rígido pode ser decomposto em uma rotação diferencial  $\omega$  ao redor de um eixo e uma translação diferencial  $h\omega$  paralela a ele. Este movimento é denominado *heligiro*, definido como  $\mathcal{S} = (\omega; \mathbf{v}_p)^T$ , como mostra a Fig. (1c). Nela,  $\omega$  é a velocidade angular do corpo e  $\mathbf{v}_p$  é a velocidade linear de um ponto instantaneamente coincidente com  $\mathbf{O}$  (origem do referencial adotado) que se move com o corpo.

Um heligiro também pode ser expresso por um helicoide normalizado multiplicado por uma grandeza, como  $\mathcal{S} = \hat{\mathcal{S}}\dot{q}$ , onde  $\dot{q}$  é a referida grandeza. No caso geral,  $\dot{q} = \|\omega\| = \omega$ . Para uma translação pura,  $\dot{q} = \|\mathbf{v}_p\| = v_p$ .

Em uma cadeia cinemática, o movimento instantâneo de um elo  $e$  em relação a um elo  $b$  é obtido pelo somatório dos heligiros das juntas entre estes elos, como na Eq. (3),

$$\mathcal{S}_e = \begin{bmatrix} \omega_e \\ \mathbf{v}_{pe} \end{bmatrix} = \sum_{i=b+1}^e \hat{\mathcal{S}}_i \dot{q}_i = \mathbf{J}\dot{\mathbf{q}} \quad (3)$$

onde  $\hat{\mathcal{S}}_i \dot{q}_i$  é a velocidade do elo  $i$  relativa ao elo  $i - 1$ ,  $\mathbf{J}$  é o *Jacobiano* que relaciona a velocidade do elo  $e$  com as velocidades das juntas e  $\dot{\mathbf{q}} = [\dot{q}_{b+1} \cdots \dot{q}_e]^T$  contém as magnitudes das velocidades (Tsai (1999); Hunt (2000); Campos *et al.* (2005)).

Na Equação (3), todos os heligiros devem ser definidos em relação a um mesmo referencial. Pode ser necessário, por vezes, trabalhar com um referencial diferente do usado na definição dos heligiros. Nesse caso, deve-se realizar a transformação  ${}^i\mathbf{T}_j$  entre os sistemas de referência definida na Eq. (4). Nesta transformação do referencial  $j$  para o referencial  $i$ ,  $\mathcal{S}({}^i\mathbf{p}_j)$  é o operador matriz antissimétrica do vetor posição da origem de  $j$ , expressa no referencial de  $i$ .

$${}^i\mathbf{T}_j = \begin{bmatrix} {}^i\mathbf{R}_j & 0 \\ \mathcal{S}({}^i\mathbf{p}_j) {}^i\mathbf{R}_j & {}^i\mathbf{R}_j \end{bmatrix} \quad (4)$$

Em uma cadeia cinemática, os heligiros podem ser determinados usando as transformações homogêneas resultantes da aplicação do método dos helicoides sucessivos para determinação da cinemática de posição (Simas (2008)). Para tanto, antes de determinar o heligiro de uma junta  $i$ , seus respectivos vetores  $\mathbf{s}_0$  e  $\mathbf{s}$  são transformados pela matriz  ${}^b\mathbf{A}_i$ . Outra maneira de se obter os heligiros da cadeia é calculá-los em uma posição de referência, cada qual de acordo com o referencial próprio de cada junta, e posteriormente aplicar a cada um a transformação de helicoides  ${}^b\mathbf{T}_i$  (Santos (2006)).

### 2.2 Método de Davies

A fim de analisar a cinemática diferencial de cadeias fechadas, Davies adaptou a lei de circulação de Kirchhoff (Campos (2004)). Davies estabelece que “a soma algébrica das velocidade relativas dos pares cinemáticos de uma cadeia cinemática fechada é igual a zero” (Davies (1981)):

$$\sum_{i=1}^n \mathcal{S}_i = \sum_{i=1}^n \hat{\mathcal{S}}_i \dot{q}_i = \mathbf{N}\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{0} \quad (5)$$

A Equação (5) relaciona as velocidades das juntas da cadeia cinemática (Simas *et al.* (2008)). A *matriz de rede*  $\mathbf{N}$  é formada pelos helicoides normalizados. Esta *equação de restrição* pode ser particionada em dois conjuntos, denominados

*primário*, cujas velocidades são conhecidas e *secundário*, cujas velocidades se deseja determinar. Assim, determinam-se as magnitudes das velocidades secundárias através da Eq. (6),

$$\dot{\mathbf{q}}_s = -\mathbf{N}_s^{-1} \mathbf{N}_p \dot{\mathbf{q}}_p \quad (6)$$

onde  $\mathbf{N} = [\mathbf{N}_p | \mathbf{N}_s]$  e  $\dot{\mathbf{q}} = [\dot{\mathbf{q}}_p^T | \dot{\mathbf{q}}_s^T]^T$  e os subscritos  $p$  e  $s$  correspondem às partições primárias e secundárias, respectivamente. A velocidade das juntas secundárias é determinada se  $\mathbf{N}_s$  for inversível, do contrário, o sistema estará em uma singularidade. Embora  $\mathbf{N}_s$  deva ser quadrada para que ocorra a inversão, em alguns casos o número de variáveis secundárias se torna maior que a dimensão do espaço de trabalho, o que faz com que ela se torne retangular. A pseudoinversa pode ser aplicada nessas situações (Simas (2008)).

A equação de restrição pode ser difícil de se obter, dependendo da complexidade da cadeia cinemática. A teoria dos grafos é usada para sistematizar e simplificar esse processo. O *grafo de movimento* é usado para representar uma cadeia cinemática, onde cada vértice corresponde a um elo da cadeia, enquanto cada aresta corresponde a uma junta de um grau de liberdade<sup>1</sup>. A análise de cadeias cinemática e mecanismos usando grafos é apresentada em detalhes em Tsai (1999).

### 2.3 Cadeias Cinemáticas Virtuais

O uso de cadeias virtuais para a análise cinemática foi sistematizado em Campos (2004). Estas podem ser usadas para monitorar o comportamento de cadeias cinemáticas reais ou para impor movimentos e restrições a elas.

Em cadeias abertas, características de manipuladores seriais, pode-se empregar cadeias virtuais para definir o movimento desejado para o efetuador final e ao mesmo tempo fechar a cadeia, permitindo o uso do método de Davies para resolver a sua cinemática inversa. Em cadeias fechadas, as cadeias virtuais adicionam malhas que permitem analisar movimentos específicos, bem como impor restrições adicionais (Campos *et al.* (2005)). Estas podem ser usadas para explorar a mobilidade adicional em cadeias cinematicamente redundantes, de forma a cumprir sua tarefa enquanto observa algum objetivo secundário, como o evitamento de obstáculos (Rocha *et al.* (2009a)).

As cadeias virtuais são formadas por elos e juntas, como uma cadeia real, tendo as seguintes propriedades: a) são cadeias abertas; b) os helicoides normalizados de suas juntas são linearmente independentes; c) eles não podem modificar a mobilidade da cadeia real. Como consequência, a mobilidade de uma cadeia virtual é igual à ordem do sistema de helicoides  $\lambda$ .

No caso planar ( $\lambda = 3$ ), cadeias PPR e RPR são comumente usadas. Cadeias PPPS são empregadas para o caso espacial ( $\lambda = 6$ ). Estas cadeias são representadas na Fig. (2).

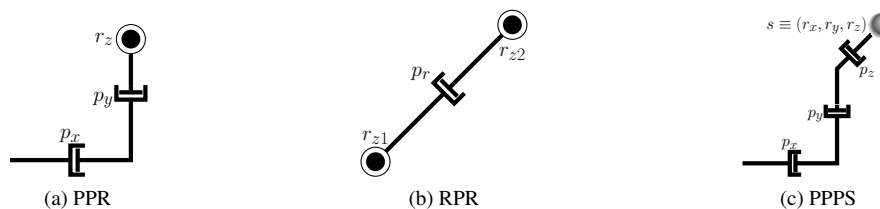


Figura 2: Cadeias virtuais comumente empregadas

### 3. MÉTODO DAS RESTRIÇÕES CINEMÁTICAS

O método das restrições cinemáticas foi proposto por Santos para resolver a cinemática diferencial inversa de sistemas veículo-manipulador subaquáticos, os quais são intrinsecamente redundantes (Santos (2006); Santos *et al.* (2006)). Este método emprega cadeias cinemáticas virtuais para impor o movimento ou restrição desejados a determinados elos da cadeia cinemática. Assim, além da execução da tarefa, procura-se atender a objetivos complementares. A aplicação do método pode ser resumida nas seguintes etapas:

- Inserir cadeias virtuais para impor os movimentos e restrições;
- Inserir cadeias virtuais para monitorar os movimentos desejados;
- Definir os conjuntos de variáveis primárias e secundárias;
- Usar o método de Davies para resolver as velocidades secundárias;
- Integrar as velocidades para obter as posições.

<sup>1</sup>No caso de uma junta com  $n$  graus de liberdade, substitui-se esta por uma subcadeia composta por  $n$  juntas de um grau de liberdade.

As variáveis primárias correspondem àquelas que impõem movimentos e restrições à cadeia cinemática, enquanto as variáveis secundárias são usualmente associadas às juntas que serão atuadas para realizar o movimento. Nessa definição, deve-se obter uma matriz  $N_s$  inversível para possibilitar a resolução da Eq. (6). Na proposta de Santos *et al.* (2006),  $N_s$  deve ser quadrada, o que se conseguia através da adição de restrições ao movimento. Porém, caso não seja possível definir restrições suficientes para tornar  $N_s$  quadrada, utiliza-se a operação pseudoinversa para resolver a cinemática inversa (Simas (2008)).

Em relação aos métodos comumente encontrados na literatura para a resolução de redundância (como os analisados em Chiaverini *et al.* (2008)), o método das restrições cinemáticas apresenta como vantagens não ter inconsistências dimensionais e conservar o movimento (Santos *et al.* (2006);Guenther *et al.* (2008);Simas (2008)).

A etapa de integração das velocidades obtidas é realizada para se obter a cinemática inversa de posição. Como o Jacobiano desses sistemas costuma ser complexo, dificultando a obtenção de uma solução analítica, métodos numéricos são usualmente empregados. Esses métodos, porém, acumulam erros numéricos, resultando em erros de postura em cadeias abertas e na abertura de cadeias fechadas. Um método de integração numérica com minimização de erro foi desenvolvido para a resolução desse problema. Para tanto, ele utiliza o conceito de *cadeias virtuais de erro* para monitorar e manter o erro dentro de tolerâncias admissíveis. O método é descrito e analisado em Simas *et al.* (2009).

Para ilustrar a aplicação do método em manipuladores redundantes, será analisado o caso de um manipulador planar com quatro juntas de rotação, que deve executar um movimento com uma restrição de espaço. Neste exemplo, como mostra a Fig. (3a), o elo 2 pode colidir com uma parede no espaço de trabalho. Uma cadeia virtual PPR representa essa restrição, enquanto outra cadeia PPR representa a imposição de movimento desejada para o efetuador final. O grafo de movimento correspondente a esse caso é mostrado na Fig. (3b).

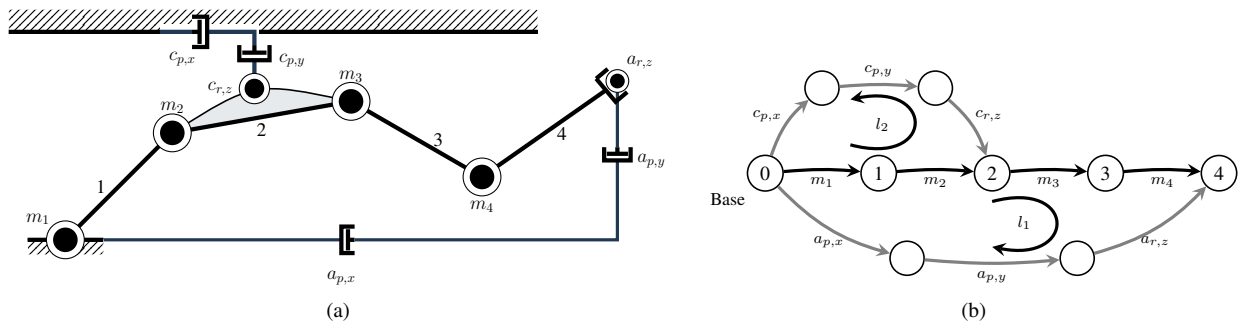


Figura 3: Manipulador planar 4R: (a)cadeia cinemática; (b)grafo de movimento

A matriz de rede correspondente a esse grafo assume a forma da Eq. (7). Considerando o evitamento do obstáculo, definem-se como primárias as variáveis das juntas da cadeia de imposição de movimento do efetuador final  $a$  e a variável da junta  $c_{p,y}$ . As secundárias correspondem às juntas da cadeia  $m$  do manipulador e às juntas  $c_{p,x}$  e  $c_{r,z}$  da cadeia de evitamento de colisão, estas últimas escolhidas para que a matriz  $N_s$  seja quadrada, uma vez que a restrição é na direção vertical, e possibilitar a sua inversão. As matrizes  $N_p$  e  $N_s$  são mostradas nas Eq. (8) e (9), respectivamente.

$$N = \begin{bmatrix} \hat{\$}_{m,1} & \hat{\$}_{m,2} & \hat{\$}_{m,3} & \hat{\$}_{m,4} & -\hat{\$}_{a,px} & -\hat{\$}_{a,py} & \hat{\$}_{a,rz} & 0 & 0 & 0 \\ \hat{\$}_{m,1} & \hat{\$}_{m,2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\hat{\$}_{c,px} & -\hat{\$}_{c,py} & -\hat{\$}_{c,rz} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$N_p = \begin{bmatrix} -\hat{\$}_{a,px} & -\hat{\$}_{a,py} & \hat{\$}_{a,rz} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\hat{\$}_{c,py} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$N_s = \begin{bmatrix} \hat{\$}_{m,1} & \hat{\$}_{m,2} & \hat{\$}_{m,3} & \hat{\$}_{m,4} & 0 & 0 \\ \hat{\$}_{m,1} & \hat{\$}_{m,2} & 0 & 0 & -\hat{\$}_{c,px} & -\hat{\$}_{c,rz} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Para facilitar o entendimento da obtenção do grafo de movimento e das matrizes  $N_p$  e  $N_s$ , foram omitidas as cadeias virtuais de erro. Porém, elas são importantes para a resolução da cinemática inversa de posição empregando simulação numérica. Resultados de simulações de tarefas baseadas nesse exemplo, considerando o uso das referidas cadeias de erro, são apresentadas em outros trabalhos publicados (Rocha *et al.* (2009a);Rocha *et al.* (2009b)).

#### 4. APLICAÇÕES EM SISTEMAS VEÍCULO-MANIPULADOR

O estado de velocidades de um robô móvel pode ser descrito por um heligi, definido para um ponto dele instantaneamente coincidente com a origem de um referencial, como ilustra a Fig. (4a) para um veículo subaquático autônomo (ou

AUV, do inglês *autonomous underwater vehicle*) (Santos *et al.* (2006)). Para tanto, assume-se o veículo autônomo como um corpo rígido.

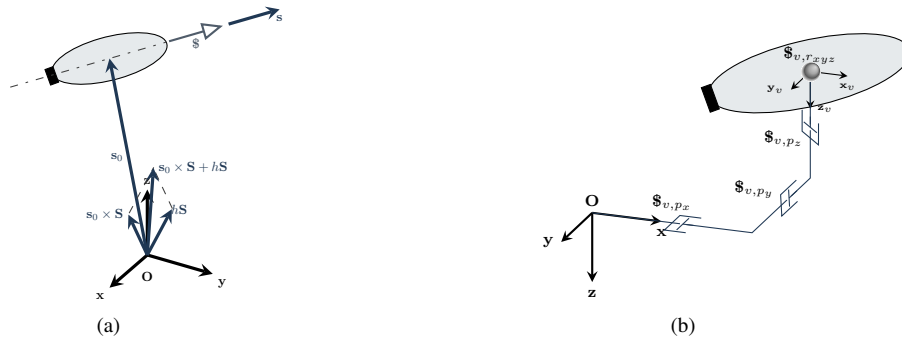


Figura 4: Descrição do movimento do robô móvel através de helicoides: (a)heligiro do veículo; (b)cadeia cinemática equivalente ao movimento do veículo

O heligiro  $\mathcal{S}_v$  representa a velocidade do robô, e pode ser descrito pelas coordenadas de Plücker como na Eq. (10), onde  $\omega_v$  e  $\mathbf{v}_{p,v}$  são as velocidades angular e linear do veículo autônomo, respectivamente.

$$\mathcal{S}_v = \begin{bmatrix} \omega_v \\ \mathbf{v}_{p,v} \end{bmatrix} = \hat{\mathcal{S}}_v \dot{q}_v = \begin{bmatrix} \mathbf{s} \\ \mathbf{s}_0 \times \mathbf{s} + h\mathbf{s} \end{bmatrix} \dot{q}_v \quad (10)$$

Segundo alguns autores, pode-se fazer uma analogia do movimento de um robô móvel em relação a um referencial com o de um robô manipulador com base fixa neste referencial (Waldron and Schmie德勒 (2008); Featherstone (2008)). Neste caso, o movimento do veículo é considerado como imposto por uma junta de seis graus de liberdade, que por sua vez pode ser decomposta em uma cadeia cinemática contendo seis juntas de um grau de liberdade, como na Fig. (4b) (Santos *et al.* (2006)). Sua velocidade, então, é composta pelas velocidades de cada junta, representada pelos seus heligiros segundo um referencial comum, como na Eq. (11), onde  $\mathbf{J}_v$  é o Jacobiano formado pelos heligiros normalizados das juntas e  $\dot{q}_v$  é o seu vetor de velocidades.

$$\mathcal{S}_v = \sum_{i=1}^6 \mathcal{S}_{v,i} = \mathbf{J}_v \dot{q}_v \quad (11)$$

Para um sistema veículo-manipulador, pode-se usar a mesma formulação, considerando o efetuador final como o elo a ter o movimento imposto e combinando a cadeia cinemática virtual do veículo com a cadeia cinemática do manipulador, desde que os heligiros de ambas as cadeias estejam definidos segundo um mesmo referencial. Usando o método das restrições cinemáticas para resolução de tarefas especificadas para o efetuador final, define-se uma cadeia virtual de imposição de seu movimento. A Figura (5) ilustra a cadeia cinemática resultante para um veículo-manipulador subaquático e o grafo de movimento correspondente. A Equação (12) é obtida a partir deste grafo de movimento.

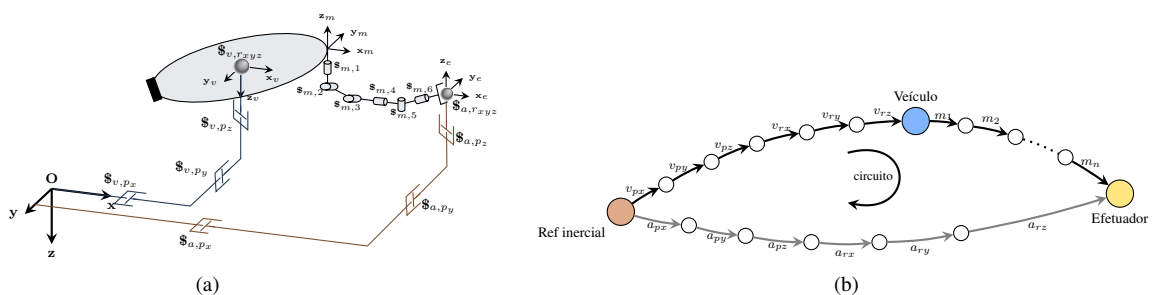


Figura 5: Aplicação do método das restrições cinemáticas em um UVMS: (a)cadeia cinemática total do UVMS; (b)grafo de movimento correspondente

$$\mathbf{N}\dot{q} = \hat{\mathcal{S}}_v \dot{q}_v + \hat{\mathcal{S}}_m \dot{q}_m - \hat{\mathcal{S}}_a \dot{q}_a = \mathbf{0} \quad (12)$$

Para a solução da cinemática inversa desse sistema, devem-se definir as variáveis primárias e secundárias. As variáveis da cadeia virtual de movimento do efetuador final  $a$  são consideradas primárias, uma vez que seus valores são conhecidos.

As variáveis da cadeia do manipulador  $m$  são consideradas secundárias, pois são as que se deseja conhecer. As variáveis da cadeia do veículo  $v$  podem ser primárias ou secundárias, dependendo do tipo de movimento desejado para o sistema.

Considerando as variáveis da cadeia  $v$  como secundárias, a matriz  $N_s$  resultante não é quadrada, o que leva à aplicação da operação pseudoinversa para a resolução da cinemática inversa, como na Eq. (13). Esse particionamento de variáveis levaria a movimentos do manipulador e do veículo, o que pode ser indesejado em muitos casos.

$$\dot{\mathbf{q}}_s = -\mathbf{N}_s^\dagger \mathbf{N}_p \dot{\mathbf{q}}_p \quad (13)$$

Pode-se definir as variáveis da cadeia  $v$  como primárias, para tanto assumindo alguma restrição ao movimento do veículo. Se o manipulador tiver a mobilidade igual à dimensão do sistema de helicoides, a matriz  $N_s$  passa a ser quadrada, e a solução da cinemática inversa é dada pela Eq. (6), como o método das restrições cinemáticas específica. No exemplo em questão, é comum para o veículo, durante operações de manipulação, ficar estacionário em uma determinada posição. Assim, pode-se definir essa restrição ao movimento.

Existem situações em que ambas as soluções podem ser necessárias para a solução da tarefa. Santos (2006) propôs um modelo híbrido baseado em estados, onde o particionamento adotado para a solução da cinemática inversa seria definido de acordo com a necessidade do veículo se mover. O estado normal seria o que mantém o veículo estacionário, enquanto a ocorrência de eventos como proximidade de singularidades ou limites de juntas do manipulador mudariam o estado para o de movimento conjunto manipulador-veículo até o término do evento.

No caso de evitamento de colisão do sistema veículo-manipulador, adota-se o mesmo procedimento de representar a proximidade do obstáculo por uma cadeia virtual empregado no exemplo anterior para um manipulador apenas. O desenvolvimento da equação de restrição será ilustrado por um exemplo de um sistema veículo-manipulador atuando no plano, cujo grafo de movimento é apresentado na Fig (6). Nele, o sistema é formado por um manipulador de três graus de liberdade vinculado a um veículo que se move no plano. A cadeia virtual  $c$  representa a proximidade de colisão com o elo 2 do manipulador, enquanto a cadeia virtual  $a$  impõe o movimento a ser executado pelo efetuator final.

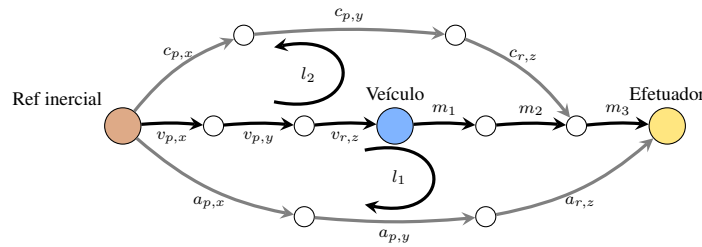


Figura 6: Grafo de movimento de um sistema veículo-manipulador considerando evitamento de obstáculo

A Equação (14) descreve a matriz de rede do sistema. No particionamento desta matriz considera-se que as variáveis das juntas  $c_{p,x}$ ,  $c_{p,y}$  e  $c_{r,z}$  são primárias, representando a restrição do obstáculo. As variáveis da cadeia  $a$  também são consideradas primárias, uma vez que impõem o movimento do efetuator final. Como variáveis secundárias tem-se as da cadeia  $v$  do veículo e as da cadeia  $m$  do manipulador. As matrizes  $N_p$  e  $N_s$  assumem a forma descrita nas Eq. (15) e (16).

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} \hat{\$}_{v,px} & \hat{\$}_{v,py} & \hat{\$}_{v,rz} & \hat{\$}_{m,1} & \hat{\$}_{m,2} & \hat{\$}_{m,3} & -\hat{\$}_{a,px} & -\hat{\$}_{a,py} & \hat{\$}_{a,rz} & 0 & 0 & 0 \\ \hat{\$}_{v,px} & \hat{\$}_{v,py} & \hat{\$}_{v,rz} & \hat{\$}_{m,1} & \hat{\$}_{m,2} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\hat{\$}_{c,px} & -\hat{\$}_{c,py} & -\hat{\$}_{c,rz} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\mathbf{N}_p = \begin{bmatrix} -\hat{\$}_{a,px} & -\hat{\$}_{a,py} & \hat{\$}_{a,rz} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\hat{\$}_{c,px} & -\hat{\$}_{c,py} & -\hat{\$}_{c,rz} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\mathbf{N}_s = \begin{bmatrix} \hat{\$}_{v,px} & \hat{\$}_{v,py} & \hat{\$}_{v,rz} & \hat{\$}_{m,1} & \hat{\$}_{m,2} & \hat{\$}_{m,3} \\ \hat{\$}_{v,px} & \hat{\$}_{v,py} & \hat{\$}_{v,rz} & \hat{\$}_{m,1} & \hat{\$}_{m,2} & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Como  $N_s$  é quadrada, é possível resolver o sistema através da Eq. (6). Não havendo singularidades, serão obtidas as velocidades secundárias. O movimento se dará tanto no manipulador quanto no veículo.

O sistema veículo-manipulador pode operar em um espaço onde eventualmente existirão obstáculos, ou seja, que em boa parte do tempo o planejamento de movimentos não precisará considerar o evitamento destes. Essa situação pode ser tratada com a mesma abordagem híbrida por estados, onde um dos estados é o de operação livre, enquanto o outro é o

de evitamento de obstáculos. No primeiro estado, adota-se um modelo cinemático sem considerar a cadeia de colisão, análogo ao do grafo da Fig. (5b). No segundo, adota-se um modelo cinemático com a cadeia virtual entre o obstáculo e o elo (ou veículo) onde há possibilidade de colisão.

A mudança entre o primeiro e o segundo estado é disparada por um evento de proximidade de colisão, gerado de duas possíveis maneiras, uma para situações de espaço de trabalho completamente conhecido e outra para casos em que o ambiente de trabalho é incerto. Na primeira situação, pode-se utilizar a cadeia de obstáculos para monitorar a proximidade entre elo e obstáculo, no estado de operação livre, uma vez que o ambiente é completamente modelado (Fontan (2007)). Na segunda situação, deve-se utilizar sensores para monitorar a aproximação de um elo do manipulador ou do veículo com um obstáculo, disparando o evento de iminência de colisão quando detectada a entrada deste na região de *aura sensitiva*. Considera-se, para este caso, que os sensores consigam identificar com precisão a posição relativa entre o obstáculo e o sistema veículo-manipulador para que se possa definir a cadeia virtual de colisão e monitorar quando o sistema poderá voltar ao estado de operação livre (Rocha *et al.* (2009b)).

Um problema associado à adoção de um modelo híbrido baseado em estados é o fato do mesmo produzir discontinuidades no movimento. Este é um problema em estudos, com algumas abordagens já discutidas na literatura (Santos (2006);Fontan (2007)). Outro caso a ser estudado nesta abordagem é a questão de evitamento de colisão com mais de um obstáculo simultaneamente, bem como quais são as cadeias virtuais mais adequadas para determinadas geometrias de obstáculos (Rocha *et al.* (2009b)).

## 5. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou a aplicação do método das restrições cinemáticas em estratégias de evitamento de colisão. O método é baseado na teoria dos helicoides e ferramentas dela derivadas, visando atender objetivos complementares à execução das tarefas especificadas através do aproveitamento da mobilidade adicional característica de cadeias cinemáticas redundantes. Um desses possíveis objetivos é o evitamento de obstáculos. Fez-se uma explanação sobre o método e seus fundamentos teóricos, exemplificando seu uso para um manipulador, que já foi objeto de trabalhos anteriores. A extensão do método para o uso em sistemas veículo-manipulador foi discutida, sendo apresentado um exemplo de uso para o caso subaquático, sendo esta a contribuição deste artigo. Foram observados pontos a serem estudados para o uso da abordagem híbrida proposta, como a descontinuidade de movimentos e o caso de evitamento de múltiplos obstáculos, os quais serão objetos de pesquisas posteriores. Em trabalhos futuros serão analisados os aspectos de implementação deste modelo em sistemas veículo-manipuladores subaquáticos.

## 6. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente apoiado pela Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

## 7. REFERÊNCIAS

- Campos, A., 2004. *Cinemática Diferencial de Manipuladores Empregando Cadeias Virtuais*. Ph.D. thesis, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Campos, A., Guenther, R. and Martins, D., 2005. “Differential kinematics of serial manipulators using virtual chains”. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 27, No. 4, pp. 345–356. doi: 10.1590/S1678-58782005000400002.
- Ceccarelli, M., 2000. “Screw axis defined by giulio mozzi in 1763 and early studies on helicoidal motion”. *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 35, No. 6, pp. 761–770. doi:10.1016/S0094-114X(99)00046-4.
- Chiaverini, S., Oriolo, G. and Walker, I., 2008. *Kinematically Redundant Manipulators*, cap. 11, pp. 245–268. In Siciliano and Khatib (2008). doi:10.1007/978-3-540-30301-5-12.
- Dai, J., 2006. “An historical review of the theoretical development of rigid body displacements from Rodrigues parameters to the finite twist”. *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 41, No. 1, pp. 41–52. doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2005.04.004.
- Davies, T.H., 1981. “Kirchhoff’s circulation law applied to multi-loop kinematic chains”. *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 16, No. 3, pp. 171–183.
- Featherstone, R., 2008. *Rigid Body Dynamics Algorithms*. Springer-Verlag, New York, 2nd edition.
- Fontan, D., 2007. *Implementação da Cinemática Inversa de Robôs Redundantes Operando em Ambientes Confinados no Projeto Roboturb*. Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica - UFSC, Florianópolis.
- Guenther, R., Simas, H., da Cruz, D. and Martins, D., 2008. “A new integration method for differential inverse kinematics of closed-chain robots”. In *ACBM Symposium Series In Mechatronics*, ACBM, Rio de Janeiro, Brasil, Vol. 3 of *ACBM Symposium Series*, pp. 225–235.
- Hunt, K., 2000. “Don’t cross-thread the screw”. In *A Symposium Commemorating The Legacy, Works and Life of Sir*



- Robert Stawell Ball Upon the 100th Anniversary of A Treatise on The Theory of Screws*. University of Cambridge - Trinity College, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, pp. 1–37.
- Rocha, C.R., Simas, Martins, D. and Dias, A., 2009a. “A new approach for collision avoidance of manipulators operating in unstructured and time-varying environments”. In *Proceedings of the 20th International Congress of Mechanical Engineering - COBEM 2009*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Gramado.
- Rocha, C.R., Simas, Martins, D. and Dias, A., 2009b. “Obstacle and collision avoidance in unstructured and time-varying environments: A screw theory approach for manipulators”. In *Proceedings of the 19th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing*. Teesside University, Gemini, Middlesbrough, pp. 436–443.
- Santos, C.H.F., 2006. *Movimento Coordenado de Sistemas Veículo-Manipulador Submarinos Utilizando Técnicas de Inteligência Artificial e Sistemas Híbridos*. Ph.D. thesis, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Santos, C.H.F.d., Guenther, R., Martins, D. and De Pieri, E.R., 2006. “Virtual kinematic chains to solve the underwater vehicle-manipulator systems redundancy”. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 28, pp. 354 – 361. ISSN 1678-5878. doi:10.1590/S1678-58782006000300014.
- Siciliano, B. and Khatib, O., 2008. *Springer Handbook of Robotics*. Springer, Heidelberg.
- Simas, H., da Cruz, D., Guenther, R. and Martins, D., 2008. “A collision avoidance method using assur virtual chains”. In *ACBM Symposium Series In Mechatronics*, ACBM, Rio de Janeiro, Brasil, Vol. 3 of *ACBM Symposium Series*, pp. 316–325.
- Simas, H., Guenther, R., da Cruz, D.F.M. and Martins, D., 2009. “A new method to solve robot inverse kinematics using assur virtual chains”. *Robotica*, Vol. Forthcoming, pp. 1–10. doi:10.1017/S0263574709005426.
- Simas, H., 2008. *Planejamento de Trajetórias e Evitamento de Colisão em Tarefas de Manipuladores Redundantes Operando em Ambientes Confinados*. Ph.D. thesis, Departamento de Engenharia Mecânica - UFSC, Florianópolis.
- Tsai, L.W., 1999. *Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators*. Wiley-Interscience, New York.
- Waldron, K. and Schmiedeler, J., 2008. *Kinematics*, cap. 01, pp. 9–34. In Siciliano and Khatib (2008). doi:10.1007/978-3-540-30301-5-12.

## 8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

# COLLISION AVOIDANCE OF ROBOT USING THE KINEMATIC CONSTRAINTS METHOD

Carlos Rodrigues Rocha, [carlos.rocha@riogrande.ifrs.edu.br](mailto:carlos.rocha@riogrande.ifrs.edu.br)<sup>1</sup>  
Altamir Dias, [altamir@emc.ufsc.br](mailto:altamir@emc.ufsc.br)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal University of Santa Catarina - Mechanical Engineering Department, Caixa Postal 476 - Campus Universitário - Trindade 88040-900 - Florianópolis(SC) - Brazil

**Abstract.** *Collision avoidance is an important requisite in robot motion planning. It is a very active research field, particularly in mobile robotics. Obstacle avoidance is also relevant in several cases where manipulator robots are employed, such as the use of multiple manipulators or the execution of tasks in confined/uncertain environments. The kinematic constraints method is an approach which can be employed in collision avoidance strategies. This method is used for motion analysis of open and closed kinematic chains, where it allows to define motions and constraints to them. In collision avoidance, the method is used to explore the kinematic redundancy of the manipulator in order to execute the task assigned to it while satisfying the complementary objective of obstacle deviation. Previous work presented examples of use of this technique where tasks were executed in known/modeled confined workspaces and in uncertain environments. This paper aims to analyze the use of the kinematic constraints method in collision avoidance strategies. The use of this method in vehicle-manipulator systems is developed, following the use for robotic manipulators. Examples of use of the method are presented.*

**Keywords:** *collision avoidance, redundancy, screw theory, kinematic constraints method*

## 9. RESPONSABILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.