

ARQUITETURA DE CONTROLE DE POSIÇÃO DE UM MANIPULADOR MOLE ATUADO POR TENDÃO BASEADO NA ABORDAGEM DE CURVATURA CONSTANTE (PCC)

João Victor Almeida¹; Lucas Cruz da Silva²

¹ Bolsista; Centro de Competências em Robótica e Sistemas Autônomos; joao.almeidaa@fbter.org.br

² Centro Universitário SENAI CIMATEC; Salvador - BA; lucas.cs@fieb.org.br

RESUMO

A robótica mole foca em dispositivos ou manipuladores construídos com materiais flexíveis, proporcionando maior destreza e adaptação ao ambiente. Robôs moles são ideais para explorar espaços confinados devido à sua capacidade de deformação. O controle com base em modelo dinâmico é aplicado com base na abordagem *Piecewise Constant Curvature* (PCC) para controle de posição de manipuladores, simplificando a modelagem ao assumir uma curvatura constante. Este trabalho enfatiza a promissora aplicação do PCC, apesar das limitações, para o controle preciso de manipuladores moles atuados por tendões, detalhando a arquitetura de controle. O uso combinado de controle *feedforward/feedback* com o PCC mostra potencial para superar perturbações, destacando a viabilidade dessa abordagem simplificada e fácil implementação.

PALAVRAS-CHAVE: Robótica mole; Controle de posição; Curvatura constante.

1. INTRODUÇÃO

Robótica mole é uma área voltada para dispositivos ou manipuladores robóticos construídos com materiais flexíveis e complacentes. Este design proporciona uma maior destreza e adaptação na interação com o ambiente. Desta forma, robôs moles se mostram ideais para explorar e inspecionar locais confinados. Devido a sua capacidade de se deformar, estes robôs apresentam virtualmente infinitos graus de liberdade, o que implica em uma modelagem complexa e difícil de se ter um controle com base em modelo.¹ Modelo dinâmico é uma representação matemática do sistema que descreve o movimento do corpo considerando as forças que atuam sobre ele e como afetam seu movimento.² Uma das abordagens mais utilizadas na literatura é o PCC (*Piecewise Constant Curvature*).³⁻⁴ Esta abordagem descreve o comportamento do manipulador de maneira mais simplificada, ao assumir que o manipulador se deforma seguindo uma curvatura constante, desconsiderando outros tipos de deformação elástica, como torção, compressão, tração e cisalhamento. Desta forma, o objetivo deste trabalho é fazer uma revisão bibliográfica sobre controle de posição de um manipulador atuado por tendão com base no modelo dinâmico do PCC.

2. METODOLOGIA

Este trabalho foi realizado através de uma revisão bibliográfica abrangente sobre o tema de controle dinâmico de manipuladores moles com base no PCC. A pesquisa foi realizada no período de novembro/2023 a dezembro/2023 em bases de pesquisa como IEEE Xplore e Web of Science utilizando a combinação de palavras-chave com operadores booleanos: "(PCC OR *Piecewise Constant Curvature*) AND (Soft Robots OR *Soft Robotics*) AND (*Dynamic Control*)". Obteve-se 41 resultados dos quais 7 foram relevantes para o tema abordado.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo de curvatura constante (PCC) é uma abordagem que descreve a deformação do manipulador como um arco de curvatura constante. Desta forma, o manipulador mole pode ser descrito como um manipulador rígido equivalente com juntas virtuais (duas rotacionais e uma prismática).³ Isto torna a modelagem mais simples, visto que pode ser estabelecida uma relação entre o manipulador mole e o rígido equivalente a partir de modelos geométricos.⁵ O modelo dinâmico do PCC pode ser derivado da equação de Lagrange para o modelo rígido com a inclusão da rigidez do material e o amortecimento.⁶ Desta forma, o modelo dinâmico utilizado para modelar o controle pode ser visto na eq. (1):

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) + D(q)\dot{q} + K(q) = A(q)f_{act} \quad (1)$$

Onde M é a matriz de inércia, C é a Coriolis, D é o amortecimento, G representa o efeito da gravidade, K é o coeficiente de rigidez do material e $A(q)f_{act}$ é o mapeamento dos torques do atuador. O vetor q

descreve a configuração do manipulador relacionado às variáveis de junta θ , rotação no eixo X , e Φ , rotação no eixo Z . Pode-se utilizar a equação anterior para determinar o sistema do controlador com *feedback* através da eq. (2):

$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + K(q) + D(q)\dot{q} + K_p(\bar{q} - q) + K_d(\dot{\bar{q}} - \dot{q}) \quad (2)$$

Onde τ é o torque do atuador, K_p e K_d são os ganhos proporcional e derivativo do controlador, \dot{q} é a taxa de variação do vetor de configuração, \bar{q} é a configuração desejada e $\dot{\bar{q}}$, $\ddot{\bar{q}}$ são suas derivações.

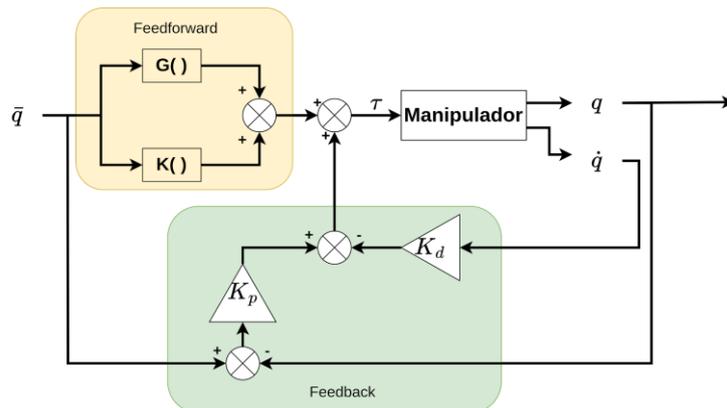
Considerando uma condição quase-estática, onde a taxa de variação $\dot{\bar{q}} = 0$, o modelo do controlador pode ser descrito através da eq. (3):

$$\tau = G(q) + K(q) + K_p(\bar{q} - q) - K_d\dot{q} \quad (3)$$

Este controlador recebe a entrada da configuração desejada do manipulador (juntas virtuais θ e Φ) e ajusta o sinal de controle para atingir essa configuração. Assim, é possível utilizar dois tipos de controle: *Feedforward*, que prevê e compensa preventivamente distúrbios conhecidos no sistema; e *Feedback*, que incorpora uma malha fechada para corrigir erros causados por fatores externos e perturbações não previstas, comparando o estado atual do sistema com o desejado e gerando um sinal de correção.⁷

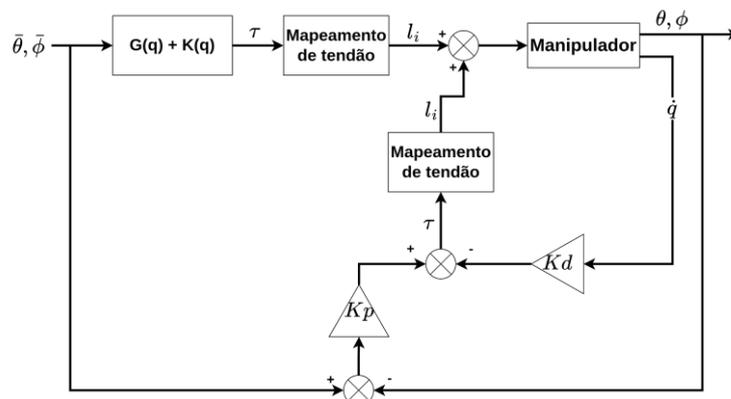
Esta arquitetura, vista na Figura 1, utiliza o campo gravitacional G e a rigidez K do modelo dinâmico para antecipar o comportamento do sistema, que se soma à realimentação do controlador Proporcional-Derivativo (PD).

Figura 1: Arquitetura de controle *Feedforward/Feedback*



Porém, este modelo é genérico para qualquer tipo de atuador. O sistema de atuação do manipulador mole por meio tendões utiliza o comprimento de tendão puxado como entrada ($l_{tendão}$). Os tendões são fixados nas seções do manipulador e quando são puxados geram um torque que faz o manipulador deformar em θ e Φ , como descrito na Figura 3. A relação entre as variáveis do atuador e a configuração do manipulador (θ e Φ) é específica para cada atuador⁸, sendo necessário uma etapa de mapeamento entre o comprimento dos tendões e o controlador, representado na Figura 2.

Figura 2: Arquitetura de controle para acionamento por tendões

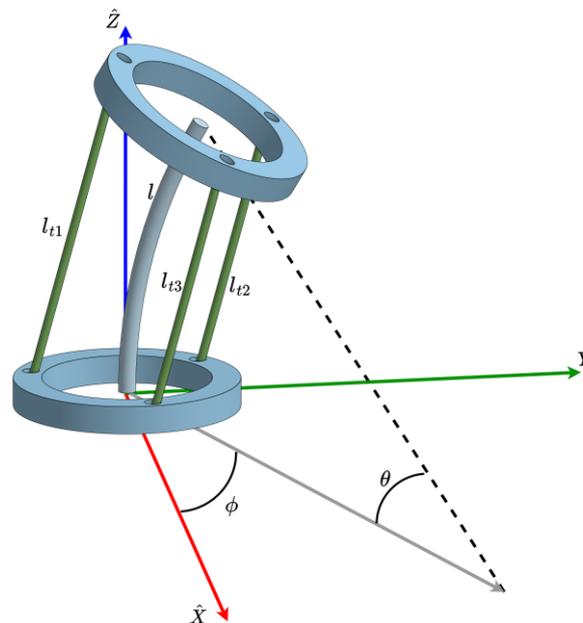


Para um sistema atuado por tendão,⁹ esta relação pode ser estabelecida através da seguinte eq. (4):

$$l = l_{tk} + \theta d \cos(\sigma_k - \varphi) \quad (4)$$

Onde, l é o comprimento do arco do manipulador, l_{tk} é o comprimento do tendão (para o tendão representado por k), d é a distância do tendão k até o centro, e σ_k é o ângulo em que o tendão está posicionado no disco.

Figura 3: Variáveis de configuração do manipulador atuado por tendões



4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A revisão bibliográfica demonstrou que o modelo de curvatura constante é bastante promissor para o controle de posição de manipuladores moles, principalmente por ser uma abordagem simplificada e de fácil implementação para controladores baseados em modelos. Apesar das limitações deste modelo, o uso de um controlador *feedforward/feedback* em conjunto com o PCC demonstra um potencial para um controle preciso e robusto, mesmo na presença de perturbações.

5. REFERÊNCIAS

- ¹ PIQUÉ, Francesco et al. **Controlling soft robotic arms using continual learning**. 2022.
- ² CRAIG, John J. **Introduction to robotics: mechanics and control**. Upper Saddle River, NJ: Pearson, 2018.
- ³ HANNAN, M. W; WALKER, I. D. **Novel kinematics for continuum robots**. 2000.
- ⁴ JONES, Bryan A.; WALKER, Ian D. **Kinematics for multisection continuum robots**. 2006
- ⁵ DELLA SANTINA, Cosimo et al. **Dynamic control of soft robots interacting with the environment**. 2018.
- ⁶ KATZSCHMANN, Robert K. et al. **Dynamic motion control of multi-segment soft robots using piecewise constant curvature matched with an augmented rigid body model**. 2019.
- ⁷ OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de controle moderno**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011.
- ⁸ WEBSTER III, Robert J.; JONES, Bryan A. **Design and kinematic modeling of constante curvature continuum robots: A review**. 2010.
- ⁹ RAO, Priyanka et al. **How to model tendon-driven continuum robots and benchmark modelling performance**. 2021.