

DISPOSITIVO FLEXÍVEL ELETROSTATICAMENTE ACIONADO COM SENSOR DE FIBRA ÓPTICA INCORPORADO PARA MEDIÇÃO DE DESLOCAMENTO

Palavras-Chave: ÁGAR, ROBÓTICA FLEXÍVEL, SENSORIAMENTO ÓPTICO

Autores(as):

JÚLIA C. X. DE LIMA, FEM – UNICAMP

Prof^(a). Dr^(a). ERIC FUJIWARA(orientador(a)), FEM - UNICAMP

INTRODUÇÃO:

Robôs flexíveis são alternativas promissoras aos sistemas rígidos convencionais devido à sua leveza, flexibilidade e interação segura com humanos em ambientes não estruturados. Diversas estratégias de atuação foram exploradas, como sistemas pneumáticos inspirados em *kirigamis* a fim de obter uma deformação programável sem energia contínua [1] e dispositivos magnéticos que permitem aplicações em microescala em ambientes aquosos [2]. No entanto, essas soluções frequentemente requerem configurações complexas e materiais não-biodegradáveis, como elastômeros de silicone.

Esforços recentes no âmbito da robótica flexível para aplicações biomédicas têm enfatizado a incorporação de materiais biocompatíveis, desde corpos estruturais até componentes de atuação e sensoriamento [3]. O ágar, um hidrogel biodegradável de algas vermelhas, oferece flexibilidade, moldabilidade e propriedades ópticas e mecânicas ajustáveis, tornando-o adequado para dispositivos ecologicamente corretos [4].

Portanto, apresentamos uma estrutura flexível à base de ágar acionada por atração eletrostática e integrada a um sensor de fibra óptica. Uma fibra multimodo concatenada é incorporada ao ágar que detecta deformações por meio da análise do padrão de manchas, alavancando o comportamento eletrorresponsivo do ágar [5]. Essa abordagem sem contato introduz um novo sistema robótico flexível e biodegradável, diferentemente das estratégias pneumáticas [6] e térmicas [7] existentes.

METODOLOGIA:

A. PROJETO E FABRICAÇÃO DO SISTEMA

Um molde plástico composto por uma base cilíndrica (diâmetro e altura de 7 e 5 mm, respectivamente) conectado a uma haste cônica (20 mm de comprimento com diâmetros de base e ponta de 3,5 e 2 mm, respectivamente) compõe a geometria do dispositivo. Uma solução de 2% em peso de ágar e 60% em peso de glicerol em água destilada é aquecida por uma base térmica com agitação magnética para homogeneização. Após atingir o ponto de ebulição, o gel derretido é depositado à temperatura ambiente para colapsar as bolhas de ar. A solução esfria dentro do molde por ~15 min e se solidifica em um gel reforçado. Subsequentemente, uma sonda de fibra óptica concatenada, composta por uma seção monomodo de sílica (SMF) de 15 mm de comprimento (diâmetros de núcleo/casca de 9/125 μm , emendada entre guias de onda multimodo (MMF, índice de passo, diâmetros de 62,5/125 μm), perfura a base da estrutura macia. A SMF se alinha com o braço de ágar para recuperar deformações mecânicas com alta sensibilidade por meio da modulação do padrão de speckles[8].

B. MODELO MECÂNICO

O modelo mecânico assume a teoria da viga de *Euler-Bernoulli*, que descreve a flexão de uma estrutura sob ação de cargas transversais. O modelo assume um material homogêneo, isotrópico e linearmente elástico — o módulo de Young do ágar puro é $E \approx 10^4$ Pa [9], que está na mesma ordem de grandeza do ágar enriquecido com glicerol — e despreza os efeitos de deformação por cisalhamento devido à esbelteza da estrutura. A viga é modelada como um cilindro com comprimento L e diâmetro d resultando em um segundo momento de inércia $I = \pi d^4/64$.

Assumimos a haste presa em uma extremidade ($y = 0$) e submetida a uma carga pontual F aplicada transversalmente em sua extremidade livre ($y = L$). Sob essa condição de carga, a carga distribuída é $q(y) = 0$ ao longo da viga, exceto no ponto de aplicação da força.

A equação diferencial que descreve a deflexão transversal $w(y)$ ao longo do eixo da viga é $EI d^4 w(y)/dy^4 = q(y)$. Dadas as condições de contorno: (i) nenhum deslocamento na base fixada, $w(0) = 0$; (ii) nenhuma rotação na base fixada, $w'(0) = 0$; (iii) nenhum momento além da extremidade livre, $M(L) = 0$; e (iv) a força de cisalhamento é igual à carga aplicada na extremidade livre, $V(L) = F$. Para a carga aplicada F na extremidade livre, o deslocamento transversal máximo ocorre em $y = L$ e é dado por $\delta_{max} = FL^3/3EI$. Além disso, a curvatura máxima ocorre na base fixada ($y = 0$), onde o momento de flexão é máximo ($M = FL$), resultando em $\kappa_{max} = M/EI = FL/EI$. Este modelo analítico estima a deflexão e a curvatura máximas no cilindro de ágar sob cargas concentradas em sua extremidade. Esses modelos são essenciais em robótica flexível e estruturas flexíveis em microescala, onde deformações causadas por flexão são predominantes.

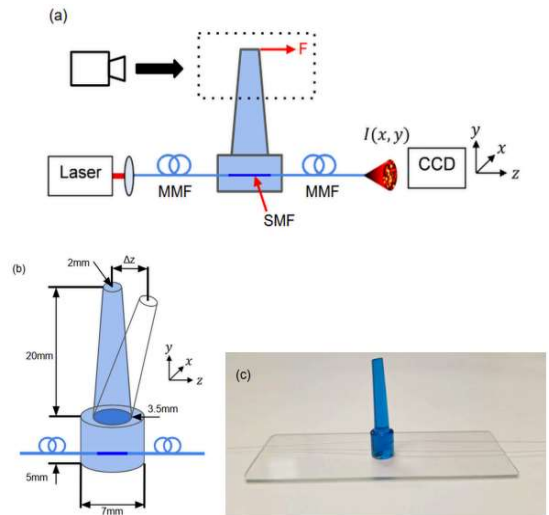


Figura 1 - Estrutura flexível de ágar com sensor de óptico. (a) Configuração experimental para rastreamento óptico e monitoramento de *specklegram* durante atuação eletrostática. (b) Esquema da estrutura flexível à base de ágar incorporando uma estrutura de fibra óptica concatenada. (c) Fotografia do dispositivo fabricado montado em uma lâmina de vidro.

C. CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL E ANÁLISE DE DADOS

A Figura 1(a) mostra a configuração experimental. Quando iluminada por um laser He-Ne (comprimento de onda de 633 nm, potência de 1 mW), a fibra multimodo gera um padrão de manchas característico resultante da interferência intermodal. Assim, a sonda de fibras concatenadas incorporada converte estímulos mecânicos aplicados ao dispositivo de ágar em variações ópticas por meio de acoplamento de modo e efeitos de interferência sensíveis à fase.

Uma haste de polietileno foi carregada eletrostaticamente por atrito, a partir de uma politriz operando a aproximadamente 31,41 rad/s por 30 s. A distância relativa entre a fonte carregada e a estrutura do ágar foi ajustada por um estágio micrométrico. Embora eletricamente neutro, o hidrogel de ágar torna-se polarizado quando exposto a campos eletrostáticos. Essa polarização induz uma redistribuição interna de cargas elétricas, resultando em uma força atrativa entre o gel e o corpo carregado. Estudos anteriores confirmam que mesmo campos eletrostáticos fracos podem alterar as propriedades físicas do gel, incluindo sua microestrutura [10].

Uma câmera CCD (resolução de 1024×768 pixels) adquire os speckles de saída a uma taxa de amostragem de 15 fps. A resposta mecânica foi quantificada por meio de correlação cruzada normalizada de média zero (ZNCC) entre os quadros de speckle adquiridos $I(x, y)$ e uma imagem de referência I_r . O valor de ZNCC diminui à medida que o speckle atual diverge do estado de referência, fornecendo uma medida confiável da modulação óptica induzida por estímulos mecânicos. Por fim, um sistema de rastreamento óptico com outra câmera (1920×1080 pixels, 30 fps) foi empregado como referência para medir os deslocamentos do braço

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

A Figura 2 mostra os perfis de deslocamento obtidos a partir do modelo analítico em comparação com os medidos por rastreamento óptico. Os resultados revelam concordância entre as avaliações teóricas e experimentais. No entanto, observa-se um ligeiro desvio no deslocamento estimado da ponta (erro absoluto máximo de $\sim 0,6$ mm). Dadas as pequenas deflexões dentro do regime linear do gel [9], essa discrepância pode ser atribuída à geometria cônica da estrutura macia, que difere da geometria cilíndrica idealizada assumida no modelo.

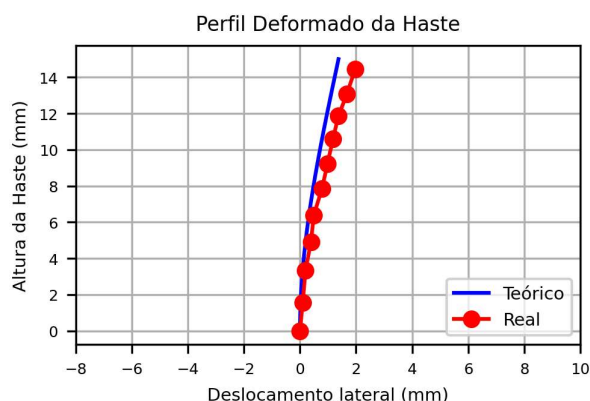


Figura 2- Comparação entre perfis de feixe teóricos e reais.

A Figura 3 mostra a resposta do sensor de fibra óptica aos deslocamentos Δz da estrutura flexível impostos pela sonda eletrostática. Observa-se uma relação linear ($R^2 \geq 0,97$) entre os valores de ZNCC (referenciados ao estado não perturbado) e os deslocamentos de entrada, resultando em uma sensibilidade absoluta $K = d(ZNCC)/d\Delta z = 0,06 \text{ mm}^{-1}$. A deformação da haste flexível se transduz em torção da sonda da fibra, modulando o padrão de manchas devido aos efeitos de acoplamento de modo induzidos por forças de cisalhamento, que alteram a distribuição dielétrica da

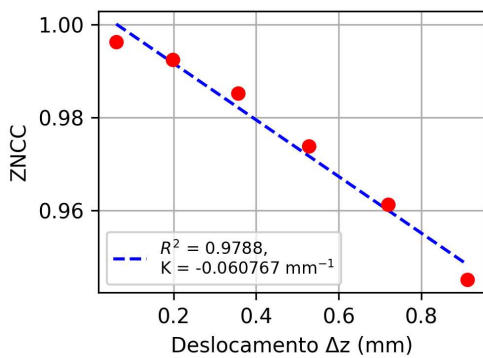


Figura 3 - ZNCC versus deslocamento do dispositivo pela variação da fonte eletrostática. A linha contínua é um ajuste de curva linear.

mm. Cada condição produz uma imagem específica de speckle, como mostrado na Figura 4(b). Assim, o coeficiente de correlação tende a 1 quando o estado atual da fibra corresponde à referência, permitindo a recuperação da direção com uma camada de votação. Por exemplo, definir o referencial como $\Delta z = -1$ leva a um $ZNCC \approx 1$ quando o dispositivo realiza um deslocamento negativo máximo, enquanto o ZNCC se torna mínimo para $\Delta z \geq 0$. Além disso, o ZNCC para $I_r = 0$ retém a informação de magnitude de acordo com a Figura 3. Ainda assim, é possível rastrear o movimento do dispositivo no espaço incorporando estados adicionais à tabela de calibração [8]. Classificadores de aprendizado de máquina também podem substituir a metodologia proposta para um mapeamento de estados da fibra mais abrangente.

fibra, promovendo a troca de energia entre os modos de propagação. Além disso, a fixação do sensor à base estática é menos obstrutiva do que a colocação dos elementos transdutores ao longo do braço móvel, como observado em extensômetros eletrônicos e ópticos.

A direção de deslocamento do dispositivo é discernível calculando-se o ZNCC para referências distintas I_r . A Figura 4(a) retrata a saída do sensor para três posições: deflexões neutras $\Delta z = 0$, negativas $\Delta z = -1$ mm e positivas $\Delta z = +1$

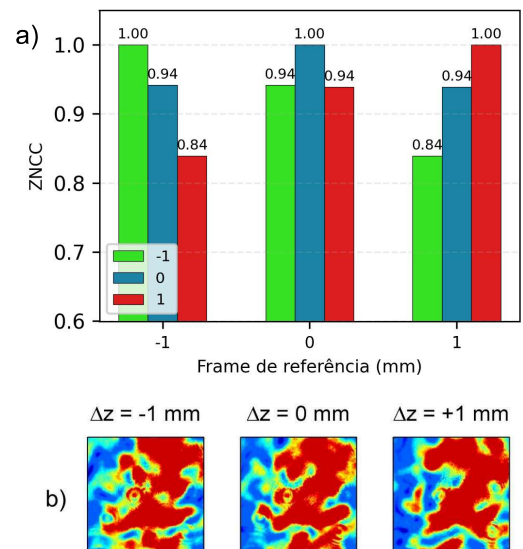


Figura 4 - a) Valores de ZNCC para cada direção de deslocamento em seus respectivos referenciais. b) Specklegramas correspondentes.

Por fim, para realizar uma demonstração de prova de conceito, foi realizado um teste para avaliar as capacidades de apreensão. Para este experimento, implementamos a configuração da Figura 5, na qual dois dispositivos à base de ágar foram posicionados em paralelo. Um objeto carregado foi

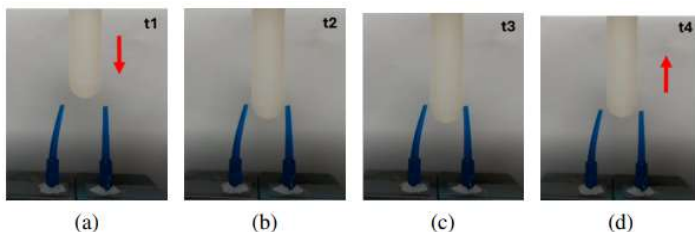


Figura 5 - Estruturas à base de ágar formando uma configuração de "garra": (t1, t2) o objeto carregado se move em direção à garra, (t3) o dispositivo agarra o objeto e (t4) retorna à posição inicial. As setas vermelhas indicam a direção da trajetória.

então abaixado incrementalmente, aproximando-se de ambas as estruturas simetricamente. Utilizando a mesma estrutura de modelagem descrita anteriormente pelo modelo de *Euler-Bernoulli*, onde a força aplicada pode ser estimada em aproximadamente 24. μN . Este movimento semelhante a uma pinça destaca seu potencial para aplicações de microatuação, como

interações delicadas com partículas ou organismos. Além disso, prevê-se explorar os estímulos eletrostáticos em válvulas para controlar a passagem de fluidos/partículas em sistemas microfluídicos, produzindo uma regulação precisa com um acionamento sem contato.

CONCLUSÕES:

Demonstra-se assim a viabilidade do uso de uma estrutura à base de ágar instrumentada com um sensor de fibra óptica para detecção de deslocamento sob excitação eletrostática. Uma forte correlação linear entre os valores de ZNCC e o deslocamento confirmou a consistência e a confiabilidade do método de detecção óptica baseado em speckle, que também suporta discriminação direcional. Por fim, um experimento de prova de conceito demonstrou a capacidade da estrutura de realizar uma ação de prensão com base em um estímulo externo. Trabalhos futuros irão refinar a geometria do dispositivo e explorar implementações funcionais em sistemas de micromanipulação, como pinças macias e dispositivos bioinspirados.

BIBLIOGRAFIA

- [1] SEDAL, A. *et al.* Design of deployable soft robots through plastic deformation of kirigami structures. *IEEE Robotics and Automation Letters*, v. 5, n. 2, p. 2272–2279, abr. 2020.
- [2] HUNTER, E. *et al.* Toward soft micro bio robots for cellular and chemical delivery. *IEEE Robotics and Automation Letters*, v. 3, n. 3, p. 1592–1599, jul. 2018.
- [3] HARTMANN, F.; BAUMGARTNER, M.; KALTENBRUNNER, M. Becoming sustainable, the new frontier in soft robotics. *Advanced Materials*, v. 33, n. 19, art. 2004413, maio 2021.
- [4] FUJIWARA, E.; OKU, H.; CORDEIRO, C. M. B. Recent developments in agar-based optical devices. *MRS Communications*, v. 14, p. 237–247, jun. 2024.
- [5] FUJIWARA, E.; ROSA, L. O.; OKU, H.; CORDEIRO, C. M. B. Agar-based optical sensors for electric current measurements. *Scientific Reports*, v. 13, art. 13517, 2023.
- [6] BANERJEE, H.; REN, H. Optimizing double-network hydrogel for biomedical soft robots. *Soft Robotics*, v. 4, p. 191–201, set. 2017.
- [7] DONG, Y. *et al.* Multi-stimuli-responsive programmable biomimetic actuator. *Nature Communications*, v. 10, p. 4087, 2019.
- [8] FUJIWARA, E. Optical fiber tactile sensor based on a biocompatible whisker-inspired transducer. *IEEE Sensors Journal*, v. 24, n. 20, p. 32229–32236, out. 2024.
- [9] ROSS, K. A.; SCANLON, M. G. Analysis of the elastic modulus of agar gel by indentation. *Journal of Texture Studies*, v. 30, n. 1, p. 17–27, jan. 1999.
- [10] DALVI, M.; HAMDAMI, N.; LE-BAIL, A. Effect of freezing under electrostatic field on selected properties of an agar gel. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, v. 42, p. 42–48, ago. 2017.