

Protótipo Vestível de Substituição Sensorial para Representação de Informação Visual via Feedback Vibrotátil

Beatriz Gerogiannis Mendonça¹, Ana Carolyne Pereira de Souza¹,
Gustavo Teodoro Laureano¹

¹ Instituto de Informática, Universidade Federal de Goiás (UFG)

{beatrix_gerogiannis, anacarolyne}@discente.ufg.br
{gustavolaureano}@ufg.br

Abstract. *Visual impairment imposes significant challenges to mobility, potentially leading to accidents and major limitations in daily life. Recent tactile assistive technologies still struggle with low spatial resolution and sensory overload. This work presents the development of a wearable sensory remapping system designed to improve environmental perception through vibratory devices with haptic feedback. The proposed system translates visual depth information, captured by a 3D camera, into spatialized tactile feedback using a 2x3 array of vibratory actuators focused on the central and lower visual fields of the environment. The methodology involves a hardware and software architecture with multithreaded processing to ensure real-time operation, as well as an information summarization stage. The system converts distance data into three distinct vibration patterns, activated during transitions between predefined distance ranges to mitigate sensory overload. Technical validation in controlled scenarios demonstrated that the prototype performs well, showing high fidelity in spatial mapping, accurate activation of vibration patterns for static obstacles, and real-time response with no perceptible delay. The results indicate a successful proof of concept, validating the proposed approach as promising and enabling future user testing to assess its practical effectiveness.*

Resumo. *A deficiência visual impõe desafios significativos à movimentação, podendo causar acidentes e limitações importantes no dia-a-dia. As tecnologias assistivas tátteis mais recentes ainda sofrem com baixa resolução espacial e com sobrecarga sensorial. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de remapeamento sensorial vestível que visa melhorar a percepção do ambiente através de dispositivos vibratórios com feedback háptico. O sistema desenvolvido traduz informações visuais de profundidade, capturadas por uma câmera 3D, em um feedback tático espacializado por meio de uma malha 2x3 de atuadores vibratórios, focada nos campos visuais central e inferior do ambiente. A metodologia envolve uma arquitetura de hardware e software com processamento multithreaded para garantir a operação em tempo real, além de uma etapa de summarização da informação. O sistema converte distâncias em três padrões de vibração distintos, acionados na transição entre faixas de distância pré-definidas para mitigar a sobrecarga sensorial. A validação técnica em cenários controlados demonstrou que o protótipo responde bem aos cenários, apresentando alta fidelidade no mapeamento espacial, precisão na ativação dos*

padrões de vibração para obstáculos estáticos, e uma resposta em tempo real sem atrasos perceptíveis. Os resultados apontam para uma prova de conceito bem-sucedida, validando a abordagem como promissora e viabilizando testes com usuários finais para avaliar sua eficácia prática.

1. Introdução

O cenário da população com algum tipo de deficiência no Brasil, de acordo com o Censo de 2022, é notavelmente expressivo, uma vez que o país abriga cerca de 14,4 milhões de pessoas com algum tipo de deficiência. Destaca-se a alta prevalência da deficiência visual, a qual atinge cerca de 7,9 milhões de indivíduos [IBGE 2022]. A resposta legislativa a esse desafio social e demográfico foi estabelecido pela Lei nº 10.098/2000, que estabeleceu normas gerais e critérios básicos para a promoção da acessibilidade das pessoas com deficiência. Essa base legal foi solidificada e detalhada pelo Decreto nº 5.296/2004, que não apenas normatizou os direitos de mobilidade, mas também definiu as obrigações do Estado e da sociedade civil na eliminação de barreiras e na oferta de apoio adequado à inclusão:

VIII - tecnologia assistiva ou ajuda técnica: produtos, equipamentos, dispositivos, recursos, metodologias, estratégias, práticas e serviços que objetivem promover a funcionalidade, relacionada à atividade e à participação da pessoa com deficiência ou com mobilidade reduzida, visando à sua autonomia, independência, qualidade de vida e inclusão social.
[da República 2004]

Apesar do avanço legislativo no que tange ao acesso de Tecnologias Assistivas (TA), seu acesso ainda é marcado por desigualdades. Estima-se que cerca de 39 milhões de pessoas em todo o mundo conviva com cegueira irreversível [Bourne et al. 2017]; contudo, esse grupo ainda continua a enfrentar barreiras substanciais no acesso a TAs, comprometendo diretamente sua autonomia e inclusão social [Souza 2018].

Para endereçar essa lacuna, o desenvolvimento de Dispositivos de Substituição Sensorial (SSD) tem se mostrado uma solução promissora, traduzindo informações visuais para um sentido intacto como o tato ou a audição [Bach-y Rita and Kercel 2003]. O conceito de SSD é fundamentado na plasticidade cerebral, que permite ao usuário, com treinamento adequado, interpretar o estímulo tático ou sonoro não mais na pele, mas como perceptos espaciais externos, efetivamente aprendendo a “ver” através de um canal alternativo. A título de exemplo, o sistema *Wearable Navigation Device* [Chen et al. 2021] apresenta um dispositivo de navegação vestível avançado que utiliza o sistema SLAM Visual Semântico em tempo real. O foco se torna o mapeamento detalhado do ambiente e na identificação de objetos (como portas, cadeiras), não apenas na detecção de obstáculos brutos. Entretanto, o sistema opta pelo *feedback* sonoro, o que, embora emita informações mais complexas, pode interferir na percepção auditiva do usuário, sentido importante para a navegação de pessoas com deficiência visual.

Diante desse impasse, torna-se necessário a busca por outras formas de transmissão de informações, como, por exemplo, o sentido tático. Seguindo essa linha, diversas iniciativas tecnológicas já foram propostas. Exemplos notáveis incluem aprimoramentos à bengala tradicional, como a *Smart Stick* [Prema et al. 2022], a qual utiliza sensores

ultrassônicos e vibração para aumentar a detecção de obstáculos. No entanto, por utilizarem sensores simples, estes sistemas não mapeiam a geometria do ambiente, oferecendo apenas uma detecção unidimensional dos pontos próximos, sendo insuficiente para uma navegação confiável e informada. Apesar disso, outras propostas baseadas em percepção tátil como [Bouzit et al. 2004] e [Shah et al. 2006], validam a utilização do sentido tátil como um bom receptor de informações.

Outras propostas que utilizam o canal háptico, mas com câmeras 3D, como a luva *The Unfolding Space Glove* [Kilian et al. 2022] apresentam uma proposta central próxima a que será adotada neste trabalho, mas o formato de luva (vestível nas mãos) compromete a execução de tarefas cotidianas. Essa dificuldade motivou a escolha de uma localização alternativa e discreta: a região superior do braço (bíceps). Tal escolha é respaldada pela literatura em percepção vibrotátil, onde estudos como o de [Zahn and Khan 2022] demonstram que a capacidade de distinguir e localizar estímulos vibratórios é aprimorada nas proximidades de articulações (como cotovelos e pulsos), garantindo a eficácia do *feedback* sem comprometer a funcionalidade das mãos.

Apesar dos avanços na localização e no tipo de sensor, grande parte das soluções tátteis enfrenta duas limitações técnicas. Primeiramente, a maioria dos sistemas opera com baixa resolução ou de forma sequencial, sendo incapaz de representar a disposição espacial de múltiplos objetos simultaneamente. Em segundo lugar, a conversão direta de dados brutos de sensores em vibração frequentemente leva a uma “cacofonia tátil”, tornando o dispositivo menos eficaz. A literatura sobre percepção vibrotátil demonstra que a capacidade humana de distinguir entre estímulos é limitada, exigindo diferenças de amplitude ou frequência de pelo menos 20% a 30% para uma discriminação robusta [Choi and Kuchenbecker 2013]. Sinais contínuos e não estruturados podem facilmente sobrecarregar a capacidade perceptual e cognitiva do usuário, diminuindo a eficácia da transmissão de informação [Choi and Kuchenbecker 2013].

Sendo assim, a fim de endereçar as lacunas identificadas, como a necessidade de mapeamento de ambiente (câmera RGB-D), *feedback* tátil, localização prática e que minimize a sobrecarga sensorial, este artigo apresenta o desenvolvimento e a validação de um protótipo háptico vestível que converte informações de profundidade 3D em um *feedback* tátil espacializado. O sistema desenvolvido se diferencia por utilizar uma malha 2x3 de atuadores vibratórios para mapear diretamente os campos visuais central e inferior, permitindo a percepção simultânea de múltiplos pontos. Adicionalmente, implementa um algoritmo que ativa padrões de vibração distintos apenas na transição entre faixas de distância pré-definidas, uma abordagem projetada para mitigar a sobrecarga sensorial e promover uma interação mais intuitiva e em tempo real.

As principais contribuições deste trabalho residem no projeto e implementação de um novo dispositivo háptico vestível, composto por uma malha vibratória 2x3 otimizada para a representação espacial de dados tridimensionais nos campos de visão central e inferior. A operação deste dispositivo é sustentada por uma arquitetura de sistema com processamento *multithread* e *firmware* não-bloqueante, garantindo a integração em tempo real entre a captura de dados RGB-D (que captura cor e profundidade) e a interface tátil, além de preservar a correlação espacial entre a cena visual e o *feedback* percebido. Adicionalmente, o trabalho introduz um novo método de mapeamento visual-tátil que traduz o campo de profundidade 3D em um *feedback* espacializado, utilizando padrões de vi-

bração distintos e intuitivos para cada faixa de distância, de modo a mitigar a sobrecarga sensorial e aumentar a eficácia do sistema.

A estrutura deste artigo segue a seguinte organização: a Seção 2 detalha a metodologia empregada. Na Seção 3, são apresentados os resultados da validação técnica do protótipo. A Seção 4 discute as implicações e limitações desses resultados. Finalmente, a Seção 5 conclui o trabalho e aponta direções futuras.

2. Metodologia

Este trabalho seguiu um processo metodológico estruturado. Primeiramente, uma pesquisa bibliográfica foi conduzida para fundamentar o desenvolvimento. A fase de execução foi dividida no projeto digital do dispositivo, na montagem do protótipo físico e na implementação da interface de controle. Por fim, a etapa de validação compreendeu a definição de cenários de teste, a execução de experimentos práticos e as adaptações do protótipo. A sequência completa desta metodologia pode ser visualizada no fluxograma da Figura 1.

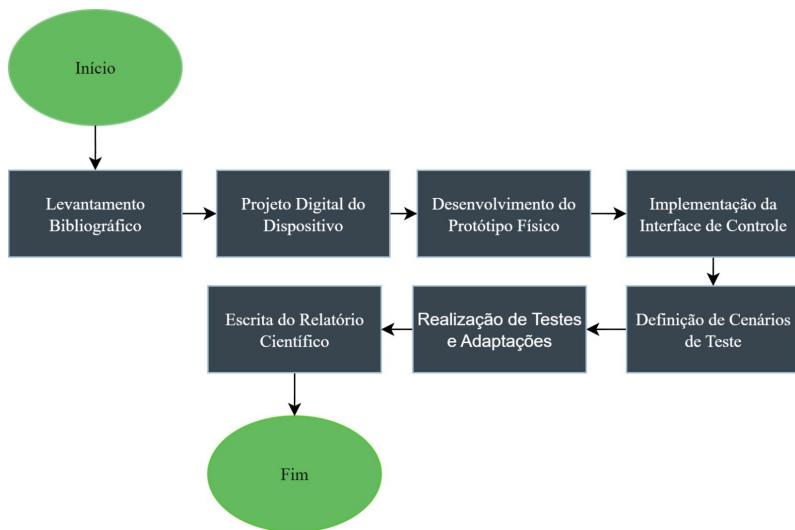


Figura 1: Fluxograma da metodologia adotada.

O desenvolvimento do protótipo foi estruturado em torno de uma arquitetura modular de hardware e software, projetada para garantir a tradução de dados visuais em *feedback* tático de forma precisa e em tempo real. A seguir, detalham-se os componentes do sistema e o algoritmo de mapeamento.

2.1. Arquitetura do Sistema

O sistema proposto foi concebido com uma arquitetura modular, composta por três componentes principais: o Módulo de Percepção Visual, a Unidade de Processamento Central, e o Módulo de *Feedback* Tátil. O fluxo de dados inicia-se com a captura de imagens e mapas de profundidade pela câmera *Intel RealSense D435i*. Estes dados são enviados a um computador hospedeiro, que atua como Unidade de Processamento. Para garantir a responsividade em tempo real, o software de processamento foi implementado em *Python* com uma arquitetura *multithreaded*. A *thread* principal é dedicada à captura e processamento dos frames, enquanto uma *thread* secundária gerencia a comunicação serial com

o microcontrolador de forma assíncrona. A saída do algoritmo é então transmitida para um *Arduino Uno*, que executa um *firmware* não-bloqueante para gerenciar a ativação dos atuadores.

2.2. Construção do Hardware

O Módulo de *Feedback Tátil* é composto por uma malha de tecido elástico adaptada para o braço, na qual foi fixada uma matriz 2x3 de atuadores do tipo ERM (Massa Rotativa Ex-cêntrica), totalizando seis atuadores. A escolha por atuadores ERM foi motivada por seu baixo custo, ampla disponibilidade e simplicidade de acionamento, características ideais para a fase de prototipagem. O espaçamento entre os centros dos atuadores foi definido em 3 cm, uma distância selecionada para garantir que os estímulos em pontos adjacentes pudessem ser claramente diferenciados pelo usuário. Cada atuador é acionado de forma independente por um circuito de acionamento com um transistor BJT, que funciona como uma chave para ligar e desligar o motor a partir dos sinais do microcontrolador, conforme a Figura 2.

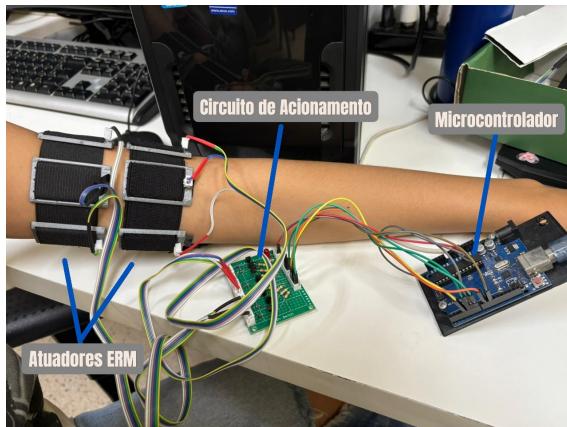


Figura 2: Visão geral do protótipo do dispositivo haptico. Componentes principais (da esquerda para a direita): a malha de atuadores, o circuito de acionamento e o microcontrolador Arduino UNO.

2.3. Algoritmo de Mapeamento Visual-Tátil

O núcleo do sistema é um algoritmo, implementado em Python com as bibliotecas *pyrealsense2*, *NumPy* e *OpenCV*, que traduz o campo de profundidade 3D em um *feedback* tátil intuitivo. Primeiramente, o campo de visão da câmera é discretizado em uma grade virtual de 3x3. Para otimizar o processamento e focar na informação mais relevante para a navegação terrestre, a linha superior dessa grade é intencionalmente ignorada, evitando a detecção de tetos ou objetos altos irrelevantes para o deslocamento imediato.

A cada quadro capturado, o algoritmo processa as seis regiões inferiores. Para cada uma delas, os dados de profundidade são isolados, pixels com distância inválida (zero) são filtrados e, por fim, calcula-se a distância média dos pontos válidos restantes. O resultado é um vetor com seis valores de distância em metros, um para cada região monitorada.

Esses seis valores são então formatados em uma única *string*, com as distâncias separadas por vírgulas (ex: “2,51, 1,45, 0,89 ,3,0, 1,21 ,0,95”), e enviados via comuni-

cação serial para o microcontrolador Arduino. É no *firmware* do microcontrolador que reside a lógica para mitigar a sobrecarga sensorial, ele monitora as distâncias recebidas e, ao detectar que um objeto cruzou o limiar de uma das faixas pré-definidas (“Longe”, “Média”, “Perto”), conforme detalhado na Tabela 1, ele aciona o padrão vibratório correspondente. Essa abordagem, onde a vibração é ativada apenas no evento de transição entre faixas, em vez de operar continuamente, permite uma percepção mais clara e menos cansativa para o usuário.

Tabela 1: Especificação dos padrões de vibração por faixa de distância.

Faixa de Distância	Nome do Padrão	Nº de Pulses	Intervalo
Longe (1,51m a 3m)	Pulso Duplo Lento	2	1000ms
Média (1,1m a 1,5m)	Batida de Coração Dupla	4	250ms
Perto (0,3m a 1m)	Tremor Rápido	8	50ms

3. Resultados Técnicos e Validação do Protótipo

Nesta seção, apresentamos os resultados da validação técnica do protótipo, focada em verificar a funcionalidade, a precisão e a responsividade do sistema em um ambiente controlado por meio de três cenários de teste específicos.

3.1. Configuração dos Testes

Os testes foram conduzidos em um ambiente interno para validar a integração e a funcionalidade do sistema de ponta a ponta. Foram utilizados objetos do cotidiano, especificamente caixas de papelão e uma cadeira, para simular obstáculos e passagens. O objetivo foi verificar se o sistema conseguia (1) detectar um obstáculo estático, (2) identificar um caminho livre entre dois obstáculos e (3) responder dinamicamente à aproximação de um objeto. A saída visual do programa em *Python*, que exibe a grade sobreposta à imagem da câmera, foi monitorada para confirmar a correspondência entre a cena, os cálculos de distância e o *feedback* tátil gerado.

3.2. Cenário 1: Detecção de Obstáculo Estático

Neste cenário, uma caixa de papelão foi posicionada no centro do campo de visão da câmera, a aproximadamente 1,2 metros de distância. O objetivo era validar se o sistema detectaria o obstáculo e ativar os atuadores corretos com o padrão de vibração correspondente.

Resultado: O sistema identificou corretamente o obstáculo principal, ativando os atuadores da coluna central (meio-centro e baixo-centro) com o padrão “Batida de Coração Dupla”, correspondente à faixa de distância “Média”. Simultaneamente, os atuadores das células inferiores laterais (baixo-esquerda e baixo-direita) foram ativados com o padrão “Pulso Duplo Lento”, indicativo da faixa “Longe”. Este resultado demonstra a capacidade do sistema de fornecer um *feedback* espacial graduado, não apenas alertando para o obstáculo principal, mas também informando que as passagens laterais, embora não totalmente livres, estão mais distantes.

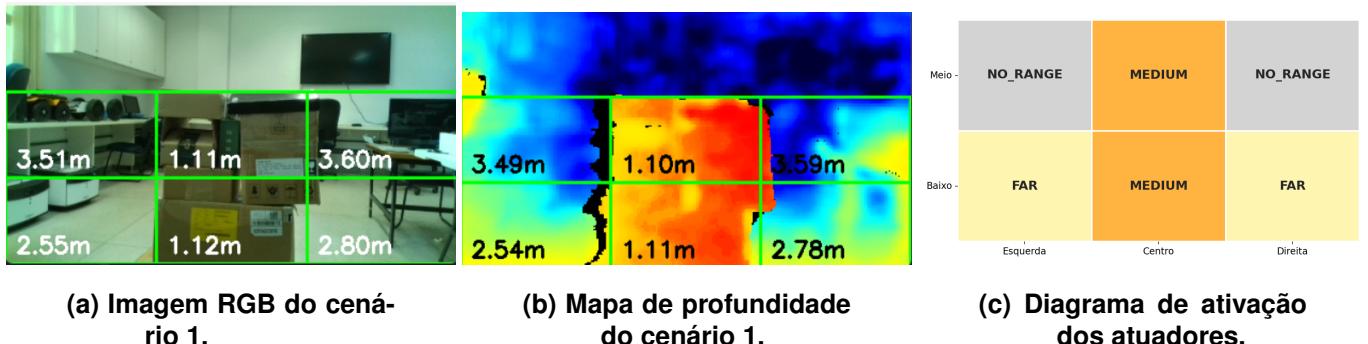


Figura 3: Representação visual e háptica do Cenário 1 (obstáculo estático central).

3.3. Cenário 2: Identificação de Caminho Livre

Para este teste, uma caixa e uma cadeira foram posicionadas nas laterais do campo de visão, a cerca de 2 metros de distância, deixando um corredor livre ao centro. O objetivo era verificar se o sistema conseguia representar essa passagem, ativando os atuadores laterais e mantendo os centrais desligados.

Resultado: O sistema ativou os atuadores das colunas da esquerda e da direita com o padrão “Tremor Rápido”, correspondente à faixa “Perto” (0,3m a 1m). Na coluna central, apenas o atuador inferior foi ativado com o padrão “Pulso Duplo Lento” (1,51 a 3m), sinalizando que, embora haja algo a distância, o caminho imediato está livre. A ausência de ativação nos demais atuadores centrais confirmou corretamente a inexistência de obstáculos próximos e a presença de um caminho seguro à frente.

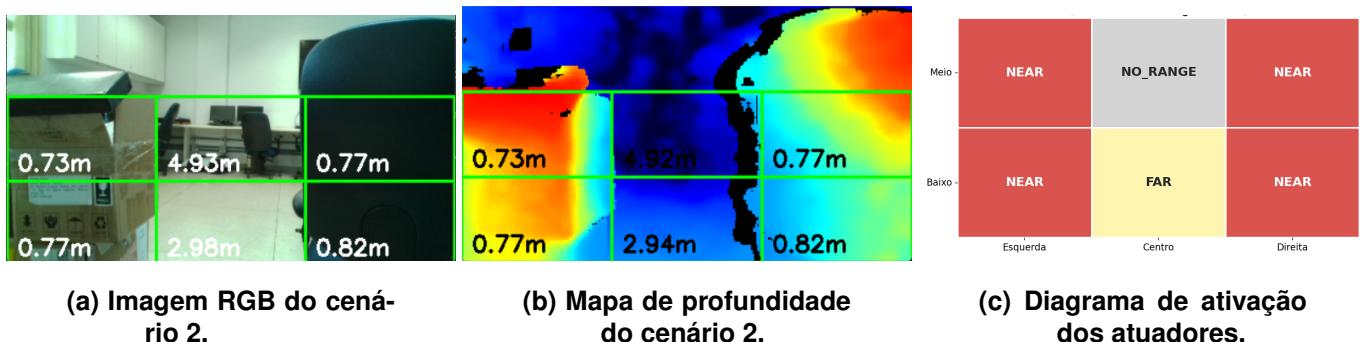


Figura 4: Representação visual e háptica do Cenário 2 (Obstáculos Estáticos Laterais).

3.4. Cenário 3: Resposta à Aproximação de Objeto

No último cenário, uma pessoa caminhou em direção à câmera, partindo de uma distância de aproximadamente 3 metros até chegar a menos de 1 metro. O objetivo era avaliar a capacidade do sistema de responder dinamicamente e de transicionar entre os diferentes padrões de vibração.

Resultado: A arquitetura *multithreaded* demonstrou sua eficácia, operando sem atrasos perceptíveis. Conforme a pessoa se aproximava, o sistema ativou os atuadores

centrais sequencialmente: primeiro com o padrão “Pulso Duplo Lento” (Longe), depois transicionando para “Batida de Coração Dupla” (Média) ao cruzar o limiar de 1,5m, e finalmente para “Tremor Rápido” (Perto) ao passar pelo limiar de 1m. A transição entre os padrões foi discreta e precisa, validando a lógica de ativação e o desempenho em tempo real do sistema.

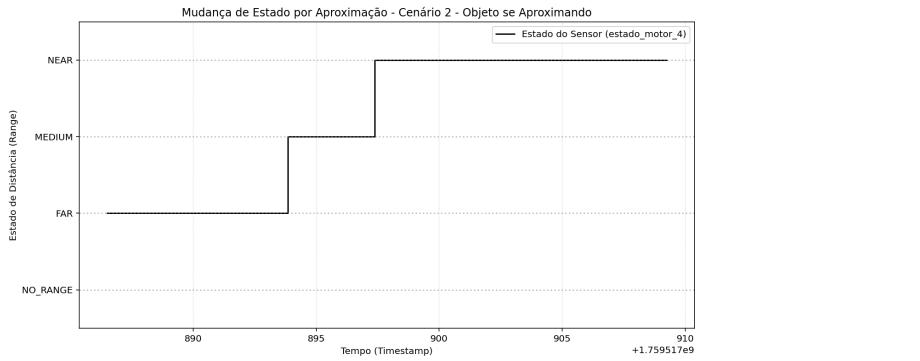


Figura 5: Transição dos padrões de vibração em tempo real conforme um objeto se aproxima da câmera, demonstrando a resposta dinâmica do sistema.

4. Discussão

Os resultados técnicos, validados através dos cenários de teste, confirmam que o protótipo desenvolvido é uma prova de conceito funcional e bem-sucedida. A arquitetura de hardware e software proposta foi capaz de traduzir, em tempo real, um campo de profundidade 3D em um mapa tátil espacializado, utilizando padrões de vibração distintos para codificar a distância. A principal inovação do sistema, sua capacidade de representar múltiplos pontos de interesse simultaneamente, foi efetivamente demonstrada, e a abordagem de acionar a vibração apenas na mudança de faixa de distância representa um avanço promissor para mitigar a sobrecarga sensorial, um desafio comum em tecnologias assistivas.

Ao posicionar este trabalho no contexto de outras tecnologias, é útil compará-lo com diferentes filosofias de design. Por um lado, sistemas como o *Unfolding Space Glove* [Kilian et al. 2022] também buscam mapear o ambiente tridimensional em um *feedback* haptico. Nesse sistema, uma luva equipada com uma câmera 3D e uma matriz de atuadores 3x3 na parte de trás da mão traduz a profundidade do espaço em estímulos vibratórios. Embora a abordagem seja semelhante em seu objetivo de criar um “mapa” tátil, ela exige que o usuário ocupe uma das mãos para escanear ativamente o ambiente. O nosso protótipo, ao ser posicionado no braço, oferece uma vantagem ergonômica significativa, deixando as mãos do usuário livres para outras tarefas essenciais, como usar uma bengala, abrir portas ou realizar exploração tátil de objetos próximos. Adicionalmente, enquanto muitos sistemas que mapeiam o ambiente podem gerar uma sobrecarga cognitiva, especialmente através de um *feedback* tátil contínuo e ininterrupto, nossa estratégia foi projetada para ser mais direta. O trabalho de [Zahn and Khan 2022], por exemplo, ilustra o desafio de um mapeamento constante: em seu sistema, a vibração não cessa enquanto um objeto permanece no alcance, e a complexidade aumenta quando múltiplos motores vibram ao mesmo tempo, causando uma “interferência” que derrubou a precisão

dos usuários de 98% para 70% na identificação de padrões. Em contraste, nossa abordagem baseada em eventos foi criada especificamente para evitar essa “cacofonia tátil”, fornecendo informações mais claras e pontuais.

Por outro lado, uma abordagem mais comum, exemplificada pelo *Smart Stick* [Prema et al. 2022], não tenta criar um mapa espacial detalhado para o usuário. Em vez disso, esses dispositivos funcionam como sistemas de alerta, utilizando sensores de menor resolução, como os ultrassônicos, para detectar a presença de um obstáculo à frente e sinalizá-lo com um alarme sonoro ou vibratório único. Essa filosofia prioriza a simplicidade em detrimento da riqueza de informação espacial. Em contraste, nosso sistema busca fornecer uma representação mais rica e análoga ao campo visual, permitindo que o usuário construa um modelo mental mais detalhado da geometria do ambiente, em vez de apenas reagir a alertas de colisão iminente.

Apesar da validação técnica bem-sucedida, é fundamental reconhecer que a presente avaliação se limitou ao funcionamento do protótipo em cenários controlados. A sua eficácia como ferramenta de auxílio à navegação e a sua usabilidade prática ainda não foram empiricamente validadas com usuários finais. A avaliação da carga cognitiva, da curva de aprendizado e da aceitação do dispositivo por parte de pessoas com deficiência visual é um passo crucial que permanece como trabalho futuro.

5. Conclusão e Trabalhos Futuros

Este artigo apresentou o desenvolvimento e a validação de um protótipo de substituição sensorial vestível (disponível publicamente em <https://github.com/Assistive-Robotics>) que endereça duas limitações críticas em tecnologias assistivas tátteis: a baixa resolução espacial e o risco de sobrecarga sensorial. Por meio de uma malha háptica 2x3 e um algoritmo de mapeamento direto, o sistema demonstrou ser capaz de fornecer uma representação espacial e em tempo real de múltiplos obstáculos. A estratégia de ativação de vibrações apenas em limiares de distância foi projetada para oferecer um *feedback* mais claro e intuitivo.

Os resultados da validação técnica confirmaram que o protótipo é uma prova de conceito bem-sucedida, exibindo alta fidelidade no mapeamento espacial e responsividade em tempo real. Conclui-se que a abordagem proposta é promissora para a criação de auxílios de navegação mais eficazes para pessoas com deficiência visual.

Como principal trabalho futuro, propõe-se a realização de uma avaliação experimental com participantes com deficiência visual. Tal estudo seria projetado para avaliar a eficácia do dispositivo em tarefas de navegação e detecção de obstáculos, além de coletar dados qualitativos sobre a experiência do usuário, a carga cognitiva e a curva de aprendizado.

Para iterações futuras, o projeto pode evoluir em diversas frentes técnicas. A principal evolução será a miniaturização e autonomia do sistema, migrando o processamento de um computador hospedeiro para uma plataforma embarcada, como um *Raspberry Pi* ou *Jetson Nano*, a fim de criar um dispositivo vestível totalmente autocontido e portátil. Adicionalmente, considera-se a expansão da matriz háptica para uma resolução maior, como 4x4, para proporcionar uma representação espacial mais detalhada. Por fim, uma evolução significativa seria a integração de inteligência artificial para reconhecimento se-

mântico de objetos, utilizando modelos de visão computacional como redes neurais convolucionais (e.g., YOLO) para detectar e classificar itens como portas e escadas. Isso permitiria ao sistema acionar padrões de vibração exclusivos para cada classe de objeto, enriquecendo o *feedback* para além da simples percepção de distância.

Referências

- [Bach-y Rita and Kercel 2003] Bach-y Rita, P. and Kercel, S. W. (2003). Sensory substitution and the human–machine interface. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(12):541–546.
- [Bourne et al. 2017] Bourne, R. R., Flaxman, S. R., Braithwaite, T., Cincinelli, M. V., Das, A., Jonas, J. B., Keeffe, J., Kempen, J., Leasher, J. L., Limburg, H., et al. (2017). Magnitude, temporal trends, and projections of the global prevalence of blindness and distance and near vision impairment: a systematic review and meta-analysis. *The Lancet Global Health*, 5(9):e888–e897.
- [Bouzit et al. 2004] Bouzit, M., Chaillou, C., Vilboux, T., and Khellaf, A. (2004). The tactile feedback navigation handle for the visually impaired. In *Proceedings of the IEEE Virtual Reality Conference*, pages 265–266, Chicago, USA.
- [Chen et al. 2021] Chen, Z., Liu, X., Kojima, M., Huang, Q., and Arai, T. (2021). A wearable navigation device for visually impaired people based on the real-time semantic visual slam system. *Sensors*, 21(4):1536.
- [Choi and Kuchenbecker 2013] Choi, S. and Kuchenbecker, K. J. (2013). Vibrotactile display: Perception, technology, and applications. *Proceedings of the IEEE*, 101(9):2093–2104.
- [da República 2004] da República, B. P. (2004). Decreto nº 5.296, de 2 de dezembro de 2004. https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/decreto/d5296.htm. Acesso em: 25 ago. 2025.
- [IBGE 2022] IBGE (2022). Censo 2022: Brasil tem 14,4 milhões de pessoas com deficiência. <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/43463-censo-2022-brasil-tem-14-4>. Acesso em: 25 ago. 2025.
- [Kilian et al. 2022] Kilian, J., Neugebauer, A., Scherffig, L., and Wahl, S. (2022). The Unfolding Space Glove: A Wearable Spatio-Visual to Haptic Sensory Substitution Device for Blind People. *Sensors*, 22(5).
- [Prema et al. 2022] Prema, S., Anand, J., Vanitha, P., Devi K., N., Yaseen, M. M., and C., R. (2022). Smart Stick Using Ultrasonic Sensors for Visually Impaired. In Hemanth, D. et al., editors, *Advances in Parallel Computing Algorithms, Tools and Paradigms*, pages 436–442. IOS Press.
- [Shah et al. 2006] Shah, C., Bouzit, M., Youssef, M., and Vasquez, L. (2006). Evaluation of ru-netra - tactile feedback navigation system for the visually impaired. In *2006 International Workshop on Virtual Rehabilitation*, pages 72–77.
- [Souza 2018] Souza, J. B. d. (2018). Cegueira, acessibilidade e inclusão: apontamentos de uma trajetória. *Psicologia: Ciência e Profissão*, 38:564–571.
- [Zahn and Khan 2022] Zahn, M. and Khan, A. A. (2022). Obstacle avoidance for blind people using a 3d camera and a haptic feedback sleeve. *arXiv preprint arXiv:2201.04453*.