

Navegação autônoma de cadeira de rodas motorizada com base nos segmentos de pisos táteis

Mateus de Oliveira Soares* João Pedro Juchum Chagas**
Raimundo Silvério Freire** Phillipe Cardorso Santos*
Stephanie Kamarry* Roberto da Silva Macena*

* Instituto Federal de Sergipe, SE, (e-mails:
mateus.soares068@academico.ifs.edu.br, phillipe.santos@ifs.edu.br,
stephanie.sousa@ifs.edu.br, roberto.macena@ifs.edu.br).

** Universidade Federal de Campina Grande, CG (e-mails:
joao.chagas@ee.ufcg.edu.br, rcsfreire@gmail.com)

Abstract: This work proposes the development and application of an autonomous navigation system for an electric wheelchair, based on tactile floor tracking. This approach is based on the installation pattern of tactile floors, a mandatory item in public buildings, which allows a simple and quick mapping of the environment, also being useful as natural landmarks for the development of an efficient localization system for the wheelchair. This localization system is performed through computer vision based on the color segmentation of tactile floors. The proposed system is also composed of a human-machine interface by voice commands, which allows the individual to choose the location of a known environment to which he wants to move. The proposed approach was implemented in an electric wheelchair and tested at the Federal Institute of Sergipe, Campus Estância, where autonomous movements could be performed between different locations correctly. For safety reasons, the tests were conducted with an empty chair, in other words, with nobody on board.

Resumo: Neste trabalho é desenvolvido o desenvolvimento e a aplicação de um sistema de navegação autônoma para cadeira de rodas motorizada, baseada no seguimento de pisos táteis. Essa abordagem tem como base o padrão de instalação dos pisos táteis, item obrigatório em prédios públicos, que permite um mapeamento do ambiente de maneira simples e rápida, servindo também como marcos naturais para o desenvolvimento de um sistema de localização eficiente para a cadeira de rodas. Esse sistema de localização é realizado através de visão computacional com base na segmentação por cor dos pisos táteis. O sistema desenvolvido ainda é composto por uma interface homem-máquina por comando de voz, que possibilita que o indivíduo escolha o local de um ambiente conhecido para o qual deseja se locomover. A abordagem proposta foi implementada em uma cadeira de rodas elétrica e testada no Instituto Federal de Sergipe, Campus Estância, sendo possível realizar movimentações entre locais distintos de forma correta. Por questões de segurança, os testes foram conduzidos com a cadeira vazia, ou seja, sem usuário a bordo.

Keywords: Autonomous Wheelchair, Natural landmarks, tactile floor, image processing, assistive technology

Palavras-chaves: Cadeira de rodas autônoma, marcos naturais, pisos táteis, processamento de imagens, tecnologia assistiva

1. INTRODUÇÃO

Muitas tarefas realizadas pelos seres humanos dependem de seus membros inferiores e superiores, mesmo as mais simples, como locomoção e comunicação. Quando qualquer desses membros é comprometido por algum tipo de deficiência, a vida em sociedade desse indivíduo pode ser agravada, afetando além da saúde física, a mental (Gonçalves, 2020).

Como alternativa, em muitos casos o indivíduo tenta contornar a deficiência motora utilizando equipamentos

auxiliares, como bengalas, muletas e em situações mais graves, o uso da cadeira de rodas. Porém em certas circunstâncias, a deficiência motora é ainda mais severa, de modo que além da dificuldade ou impossibilidade de caminhar, algumas pessoas também possuem limitações de movimentação ou força nos seus membros superiores, impossibilitando-as de utilizarem uma cadeira de rodas convencional (Santos et al., 2015). Para solucionar esse problema e possibilitar o usuário se locomover apenas através de comandos de um *joystick*, cadeiras de rodas motorizadas foram desenvolvidas.

*

Entretanto, operar uma cadeira de rodas motorizada pode ser uma tarefa difícil e exigente para muitos indivíduos. É comum que alguns usuários não tenham uma boa percepção do meio ambiente para reconhecer riscos ou até mesmo não consigam traduzir seus desejos de mobilidade em comandos de *joystick* para a cadeira (Miller and Slack, 1995).

Uma vez que para este tipo de usuário, fica inviável controlar a cadeira de rodas de maneira direta por um *joystick*, muitos autores buscaram soluções com desenvolvimento de cadeiras de rodas autônomas. Nesses casos, o usuário deve apenas indicar o seu destino e a cadeira deve levá-lo a ele. Para isso, dois fatores são muito importantes: uma interface de comunicação simples e o sistema de navegação eficiente.

A interface de comunicação deve ser simples, de modo que permita uma interação fácil do indivíduo com a cadeira. No trabalho proposto em (Hou et al., 2020), por exemplo, comandos de voz foram utilizados para o controle da cadeira. Já em (Choudhari et al., 2019), o controle é feito por eletrooculograma adquiridos através de eletrodos posicionados ao redor dos olhos do usuário. Em (Solea et al., 2019) e (Xu et al., 2017) são utilizados os movimentos da cabeça para controlar a cadeira através de técnicas de processamento de imagens.

Com relação ao sistema navegação, um ponto crucial é a localização da cadeira no ambiente. A maioria das abordagens utilizadas na área de navegação de cadeiras autônomas, utilizam diversos sensores dispostos na cadeira, que possibilitam sua localização. O sensor que geralmente é utilizado para estimar a posição da cadeira, é o *encoder*. Porém, esta estimativa é dada pela integral do movimento em função do tempo e isso acaba gerando um erro acumulativo que pode levá-la a uma colisão (Kamarry et al., 2012).

Nesse sentido, diversas abordagens têm sido propostas na tentativa de diminuir este erro. As principais, levam em consideração que o ambiente é conhecido a priori e utilizam pontos referenciais para sua localização. Esses pontos referenciais são chamados de *marcos*, podem ser classificados como artificiais ou naturais. No entanto, os *marcos* artificiais possuem o problema de serem inseridos no ambiente, como em (Cavanini et al., 2017), que fixou QR-codes no teto e (Alkhatib et al., 2019), que posicionou TAGs nas portas, para que através de sua detecção por uma câmera a cadeira pudesse se localizar.

Em contrapartida, os *marcos* naturais não precisam ser inseridos no ambiente, pois eles utilizam características intrínsecas do local em questão, como em (Khalilullah et al., 2018), onde imagens do trajeto são coletadas e após um pré-processamento, são inseridas no banco de dados para o treinamento da cadeira por meio do DBN (do inglês, *Deep Belief Network*).

Como meio de integração de pessoas com deficiências visuais, no Brasil foram sancionadas normas que obrigam a aplicação dos pisos táteis, ABNT NBR 9050 e ABNT NBR 16.537. Eles são utilizados para alertar quanto às mudanças de direção e presença de obstáculos, ajudando no direcionamento de trajetos e rotas para as pessoas cegas ou com capacidade de visão reduzida (Lima, 2014)

Apesar de serem desenvolvidos para ajudar pessoas com deficiência visual, os pisos táteis podem ser utilizados como ótimos marcos naturais para a navegação de uma cadeira de rodas, uma vez que, normalmente são distribuídos por todo o ambiente e ainda possuem padrões que indicam a existência de curvas, cruzamentos e até o fim de um determinado trecho. Dessa forma, eles podem ser vistos como um mapa topológico, que proporcionam uma navegação segura ao se locomover sobre eles.

Portanto, neste trabalho é desenvolvido o desenvolvimento de um sistema de navegação autônoma utilizando pisos táteis como marco natural. Para isso, um sistema de visão computacional foi desenvolvido com a capacidade de extrair as informações dos padrões de disposição dos pisos em tempo real, permitindo uma localização eficiente da cadeira de rodas no ambiente. O sistema foi integrado com uma interface de comunicação simples, por comando de voz, que possibilita que o indivíduo escolha o local de um ambiente conhecido para o qual deseja se locomover.

O sistema desenvolvido foi implementado em uma cadeira de rodas elétrica e testado no Instituto Federal de Sergipe, Campus Estância, sendo possível realizar movimentações entre locais distintos de forma correta. Por questões de segurança, os testes foram conduzidos com a cadeira vazia, ou seja, sem usuário.

2. PISOS TÁTEIS

De acordo com as normas NBR 9050 e 16.537 os pisos táteis são definidos como pisos caracterizados por textura e cor contrastantes em relação ao piso adjacente, destinado a constituir alerta ou linha-guia, servindo de orientação, principalmente, às pessoas com deficiência visual ou baixa visão.

Existem dois tipos de piso tátil, o direcional e o de alerta, apresentados nas Figuras 1a e 1b. respectivamente.

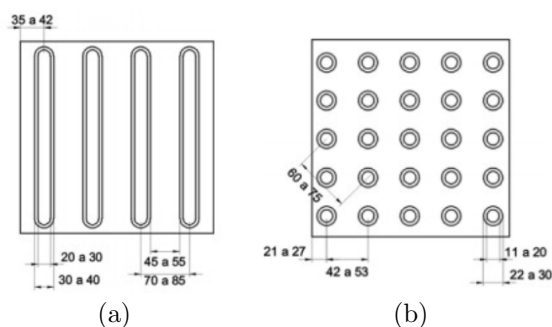


Figura 1. Tipos de piso tátil (a) direcional (b) piso de alerta.

Os pisos direcionais indicam a direção que pode ser seguida com segurança pelo usuário. Os pisos de alerta, por sua vez, servem de indicadores para diversas situações, como: indicação de perigo, como possíveis desníveis, degraus ou rampas; indicação de mudança de direção; e também como marcação de portas ou entradas de locais específicos como salas, banheiros, etc.

A instalação dos pisos também devem seguir o regulamento descrito na ABNT. Esse regulamento indica que havendo mudança de direção entre duas ou mais linhas de

sinalização tátil direcional, deve haver uma área de alerta indicando que existem alternativas de trajeto. Essas áreas de alerta devem ter dimensão proporcional à largura da sinalização tátil direcional, conforme a Figura 2.

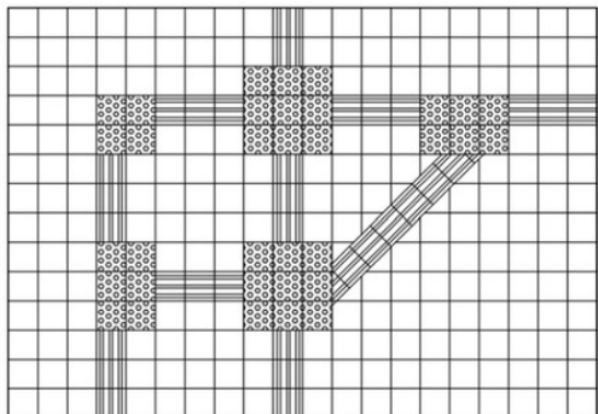


Figura 2. Exemplo do padrão de instalação dos pisos para identificação de possíveis mudança de direção (Angare, 2021).

A padronização de instalação é feita de tal maneira que um mapa do ambiente pode ser construído com base na disposição desses pisos e é justamente essa característica que permite o desenvolvimento da abordagem proposta neste trabalho, que é apresentada na próxima seção.

3. ABORDAGEM PROPOSTA

Neste trabalho foi desenvolvido um sistema de navegação, implementado à uma cadeira de rodas motorizada, capaz de levar o usuário de um ponto a outro de forma autônoma em um ambiente previamente conhecido e equipado com pisos táteis. De forma geral, o sistema pode ser dividido em cinco partes, o mapeamento, a interface homem-máquina *IHM*, o planejador de caminho, o sistema de visão computacional e os controladores. Essas etapas podem ser vistas no diagrama de blocos apresentado na Figura 3 e são abordadas com mais detalhes nas subseções seguintes.

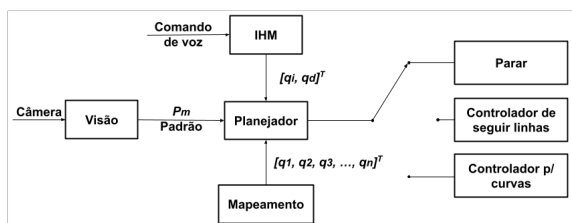


Figura 3. Diagrama de blocos do sistema desenvolvido

3.1 Mapeamento

A primeira etapa da abordagem proposta consiste no mapeamento do ambiente com base na disposição dos pisos táteis de forma simples. Uma vez que o padrão de instalação dos pisos carrega informações de direção, curvas, bifurcações e até a entrada e saída de locais específicos, neste trabalho é proposta a construção do mapa topológico do ambiente na forma de um grafo, no qual os pisos de alerta são representados por vértices e

armazenados em um vetor q , e os pisos direcionais pelas arestas. Dessa forma, utilizando como base a Figura 2, o mapa topológico seria dado pelo grafo apresentado na Figura 4, com vetor de vértices $[q_1, q_2, q_3, q_4, q_5]^T$.

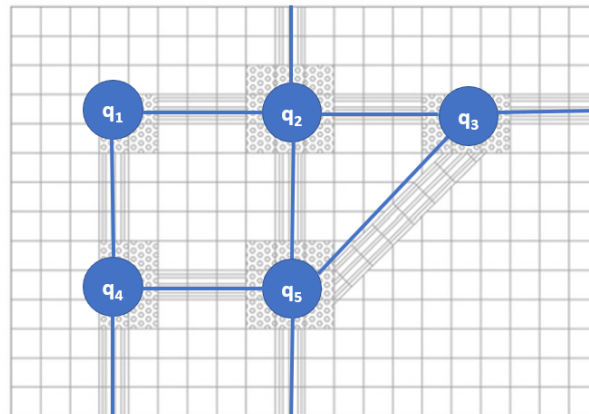


Figura 4. Exemplo do padrão de instalação dos pisos para identificação de possíveis mudança de direção.

É com base no mapa topológico, criado a partir da disposição dos pisos, que o sistema de navegação consegue movimentar a cadeira de um ponto à outro de maneira autônoma. Essa movimentação é feita de acordo com o desejo do usuário, que deve indicar o local onde ele se encontra e o local para o qual ele deseja se locomover. Essa indicação é feita por uma interface homem-máquina que é apresentada na próxima seção.

3.2 Interface homem-máquina (IHM)

A abordagem proposta neste trabalho tem como público alvo pessoas com limitações físicas severas. Dessa forma, a interação entre o sistema e o usuário foi desenvolvida com base em comando de voz. Para isso, foi utilizado o aplicativo de código aberto *Comando de Voz com Arduino V3*, um aplicativo simples que utiliza o reconhecer de voz do *Google*.

Na IHM desenvolvida, palavras foram predefinidas para representar todos os locais possíveis do ambiente, que são representados pelo vetor q previamente construído. Com isso, o usuário deve informar por comando de voz seu local de partida e então seu local de destino. Esses comandos são convertidos em um vetor $[q_i, q_d]^T$, em que q_i é o ponto inicial da trajetória e q_d o ponto de destino definido pelo usuário. Essas posições são então passadas para que o planejador defina as ações do robô.

Uma vez que foram definidos os pontos de partida e destino a navegação da cadeira é realizada sobre os pisos táteis. Isso é feito com base na detecção dos pisos e seus padrões pelo sistema de visão computacional, de modo que a cadeira possa ser localizada no ambiente durante todo o processo de navegação no ambiente. O sistema de visão computacional desenvolvido é apresentado na próxima seção.

3.3 Visão

As etapas do sistema de visão desenvolvido estão ilustradas no diagrama de blocos da Figura 5. Utilizando os pisos

táteis como marcos naturais, é possível obter informações úteis para localizar a cadeira no ambiente durante o percurso. Para isso, são realizadas etapas de calibração, segmentação dos pisos e extração de informações do histograma de densidade, valores esses que são utilizado na etapa de controle da cadeira. Esses passos são apresentados nas subseções seguintes.

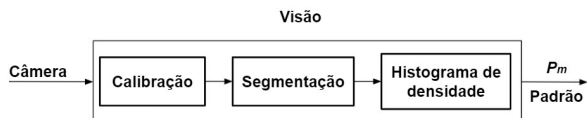


Figura 5. Diagrama de blocos do sistema de visão computacional

Captura das imagens e Calibração: O processo de calibração é feita de forma *offline* a partir de fotos dos pisos táteis tiradas previamente, considerando diferentes tipos de iluminação. Com base nessas imagens, deve-se realizar uma análise para determinação dos intervalos de valores dos pixels que representam os pisos no formato RGB. A partir desse processo, é possível definir os valores máximos (R_{max} , G_{max} e B_{max}) e mínimos (R_{min} , G_{min} e B_{min}) para cada um dos canais R, G e B, que representam o intervalo de intensidade aceitável para classificar o pixel como parte do piso tátil.

Segmentação do piso tátil A primeira etapa do processo de segmentação é a binarização da imagem, baseada nos limites definidos para detecção dos pisos. A partir disso, atribui-se o valor 1 para os pixels que estão compreendido nesse intervalo e 0 para os que não estão. Esse processo é descrito pela seguinte expressão:

$$P(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{se } R_{min} < R(x, y) < R_{max} \\ & \text{se } G_{min} < G(x, y) < G_{max} \\ & \text{se } B_{min} < B(x, y) < B_{max} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (1)$$

em que $P(x, y)$ é novo valor do respectivo pixel, $R(x, y)$, $G(x, y)$ e $B(x, y)$ são os valores do pixel nos canais R, G e B, e R_{max} , R_{min} , G_{max} , G_{min} , B_{max} e B_{min} são os valores de limiar definidos na etapa anterior.

O resultado da aplicação da expressão (1) é justamente uma imagem binária que representa o piso tátil, como pode ser visto na Figura 6.

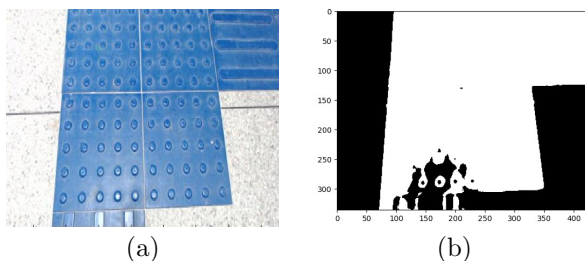


Figura 6. Imagem do piso tátil original (a) e imagem segmentada (b)

Histograma de densidade: A partir do resultado da etapa anterior, é calculado um histograma de densidade de pixels no sentido vertical da imagem binarizada, como apresentado na Figura 7. Uma vez que a altura da câmera é fixa e as dimensões do piso são conhecidas, uma análise na dispersão lateral desse histograma, permite identificar a existência de curvas, bifurcações e até encruzilhadas.

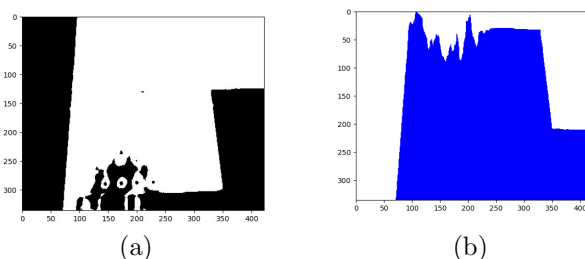


Figura 7. Imagem do piso tátil binarizada (a) e seu respectivo histograma (b)

Outro procedimento importante realizado com base no histograma, é o cálculo do ponto médio referente à largura do mesmo. Esse ponto indica o posicionamento da cadeira em relação ao piso, sendo utilizado para orientar a cadeira de maneira correta durante o processo de navegação.

As informações do ponto médio e do padrão de piso detectado, extraídos do histogramas, também são passadas para o planejador.

3.4 Planejador

Uma vez que o mapa topológico do ambiente é conhecido e o sistema de visão computacional implementado é capaz de identificar não só os pisos, mas também os padrões existentes, o planejamento da navegação da cadeira entre os pontos de partida e destino pode ser realizado com uma simples busca em grafo.

Neste trabalho, um algoritmo de busca em profundidade (Freitas et al., 2017) foi utilizado por questões de simplicidade e pelas características do local onde foram realizados os testes. Entretanto, é importante destacar que outros métodos de busca em grafo também podem ser utilizados.

A busca realizada a partir dos pontos de partida e destino escolhidos pelo usuário retorna a sequência de pontos que a cadeira deve passar para chegar ao local desejado. Essa sequência de pontos é executada passo a passo, sendo que quando a cadeira chega a um novo ponto, o sistema de visão detecta o padrão dos pisos de forma a saber se a cadeira está diante de uma possível curva, caso esteja, o algoritmo decide se realizará a curva ou não, essa decisão é baseada nos pontos de partida e destino e no mapeamento do ambiente. A localização da cadeira é atualizada dentro do grafo e um novo *setpoint* é definido para o sistema até que a cadeira complete toda a sequência de pontos planejada, chegando ao ponto de destino.

A grande vantagem da abordagem proposta é que seguir de um ponto à outro é uma tarefa simples. Pela características de instalação dos pisos, sair de um ponto à outro se resume a seguir a linha de pisos táteis que os conecta. Além disso, ao chegar nas bifurcações, controladores simples para executar curvas podem ser utilizados para que a cadeira seja

direcionada de forma correta para o próximo *setpoint*. Dessa forma, o planejador atua no sistema chaveando entre controladores simples de seguir linha e de realizar curvas. Os dois controladores utilizados neste trabalho são apresentados na próxima seção.

3.5 Sistema de controle

O sistema de controle foi desenvolvido com base no chaveamento entre dois controladores simples, um controlador de seguir linha e um controlador para realizar curvas.

Para o controlador de seguir linha, a velocidade linear foi mantida constante e com um valor baixo por questões de segurança, enquanto a velocidade angular com base na tangente hiperbólica do erro entre a orientação desejada e a orientação real da cadeira. Essa estimativa de erro é dada pelo cálculo do ponto médio dos pisos táteis realizado no sistema de visão em relação ao centro da imagem que é representado pelo parâmetro θ . Dessa forma, o controlador de seguir linha é representado pela seguinte equação

$$V = V_x \quad (2)$$

$$W = W_{max} \cdot \tanh(K_w \cdot \theta), \quad (3)$$

em que, V é a velocidade linear, V_x é a velocidade constante que a cadeira deve seguir, W representa a velocidade angular, W_{max} a velocidade angular máxima e $\tanh(K_w \cdot \theta)$ é utilizado para que o robô realize curvas de forma suave.

Quando a cadeira chega a uma curva ou bifurcação, o sistema de controle é chaveado para o controlador de curvas. Esse, por sua vez, utiliza uma velocidade linear igual zero e funciona apenas com velocidade angular contante W_x

$$V = 0 \quad (4)$$

$$W = W_x. \quad (5)$$

O giro da cadeira é executado até que a curva seja completada, ou seja, quando o sistema de visão volta a detectar o padrão de linha reta no sistema, podendo assim chavear novamente para o controlador de seguir linha.

Ao chegar ao ponto de destino, o controlador é chaveado para a posição de parada, na qual ambas velocidades linear e angular valem zero.

Uma vez definidos todas as etapas da abordagem proposta, o sistema foi implementado em uma cadeira de rodas motorizada e os testes realizados são apresentados na próxima seção.

4. RESULTADOS

O sistema de navegação desenvolvido neste trabalho foi aplicado em uma cadeira de rodas motorizada do modelo *Compact Freedom 13*, que foi adaptada para receber sinais de controle via Arduino, ao invés de sinais do *Joystick*. Os testes foram realizados com a cadeira vazia, ou seja,

sem que o usuário estivesse sentada sobre a mesma, por questões de segurança, uma vez que neste trabalho o foco é na metodologia de navegação baseada nos pisos táteis e um sistema de segurança com base em um sensoramento mais robusto ainda está sendo desenvolvido.

A cadeira foi equipada com um *notebook* com processador *Intel Core I7* e 8 GB de RAM, e uma *webcam* do tipo Logitech C920 Full HD 1080p, que grava vídeos à 30 *fps*. O sistema foi todo desenvolvido no *software Matlab R2010a*, com exceção da interface IHM que foi desenvolvida com base no aplicativo *Comando de Voz com Arduino V3*.

Neste trabalho, as imagens foram obtidas no modelo de cor RGB, sendo assim representadas por um conjunto de três matrizes que possuem um nível de intensidade de 8 bits, ou seja, os valores de cada pixel em cada canal variam de 0 à 255. Devido a alta resolução da câmera utilizada, foram feitas modificações a fim de otimizar o processamento de imagem. Ficou definido que, uma resolução de 432x320 pixels, é o suficiente para compreender todas as situações de disposição dos pisos táteis. Assim, a quantidade de ruídos, ou seja, detalhes que não são utilizados para localizar a cadeira, são filtrados. Tornando o sistema mais eficiente. Além disso, a taxa de *frames* por segundo foi reduzida para 10 *fps*, uma vez que a cadeira navegava com velocidades baixas por questões de segurança.

Os testes foram realizados no Instituto Federal de Sergipe, Campus Estância, local devidamente equipado com pisos táteis. Com base na planta baixa do local e na análise da disposição dos pisos no ambiente, o primeiro passo para a realização dos experimentos consistiu na criação no mapa topológico do ambiente que é apresentado na Figura 8.

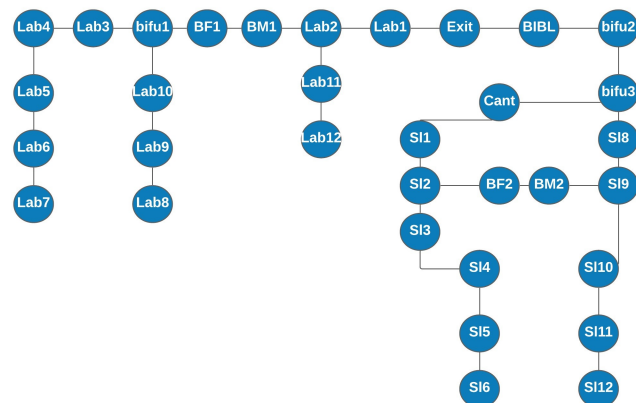


Figura 8. Grafo da localização das salas pelos pisos táteis

Com base nesse mapa topológico criado previamente, diversos testes foram realizados com o usuário da cadeira indicando, a partir do comando de voz, o local onde ele se encontrava e o local para o qual ele desejava se locomover. A partir desses comandos, o algoritmo de busca em profundidade era executado, gerando o percurso a ser seguido pela cadeira.

Diversos testes foram realizados, partindo de diferentes pontos iniciais, para diversos pontos de destino diferentes e a cadeira foi capaz de navegar de forma autônoma entre as posições desejadas corretamente e de maneira suave. Na Figura 9 é apresentada uma sequência de imagens da navegação da cadeira partindo do laboratório 10 para o

banheiro masculino. Esse trajeto pode ser visto no vídeo disponibilizado em <https://youtu.be/LDiNPc2XSj8>.

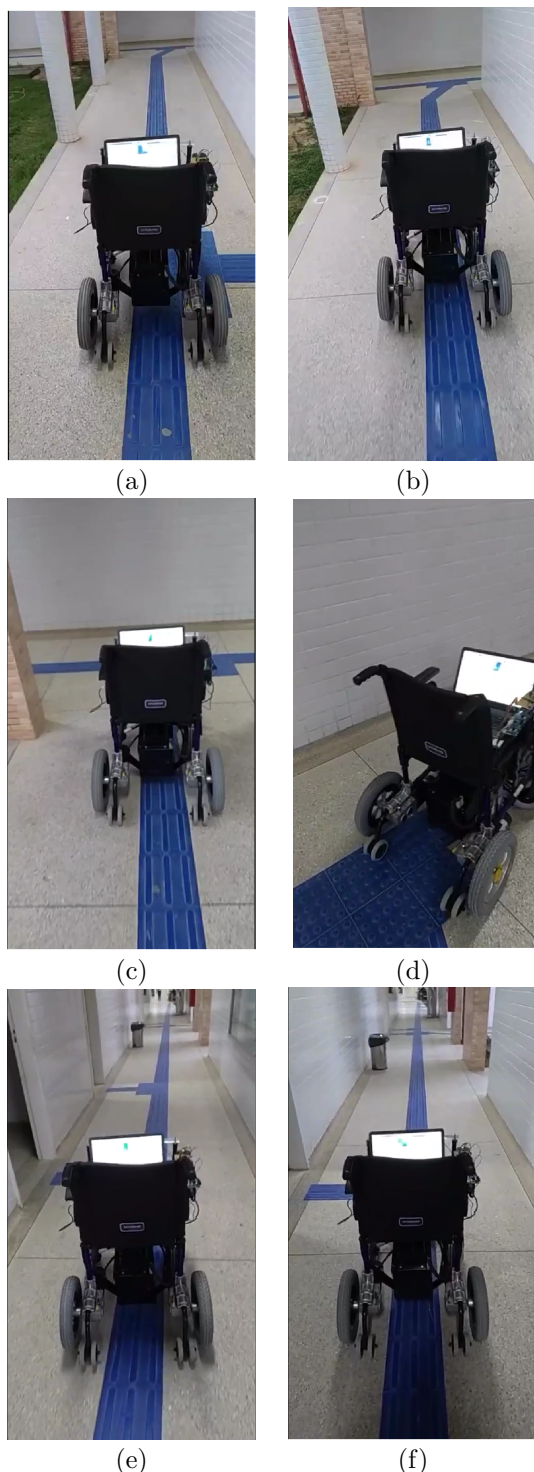


Figura 9. Sequência de imagens retiradas de um vídeo da cadeira executando a trajetória.

Durante os experimentos realizados, o sistema foi capaz de segmentar os pisos táteis a partir do vídeo captado em tempo real pela *webcam* e também classificá-los de acordo com os seus padrões em retas, bifurcações, curvas a direita e a esquerda. Na Figura 10 é apresentado o resultado da segmentação para dois padrões diferentes, o de linha reta e o de curva para direita.

Além segmentação do piso de forma correta, o sistema também foi capaz de definir o ponto médio da distribuição dos pisos na imagem, valor que é passado para que o sistema de controle possa orientar a cadeira de forma correta durante a navegação. O ponto médio calculado está representado pela cor amarela nas Figuras 10e e 10f.

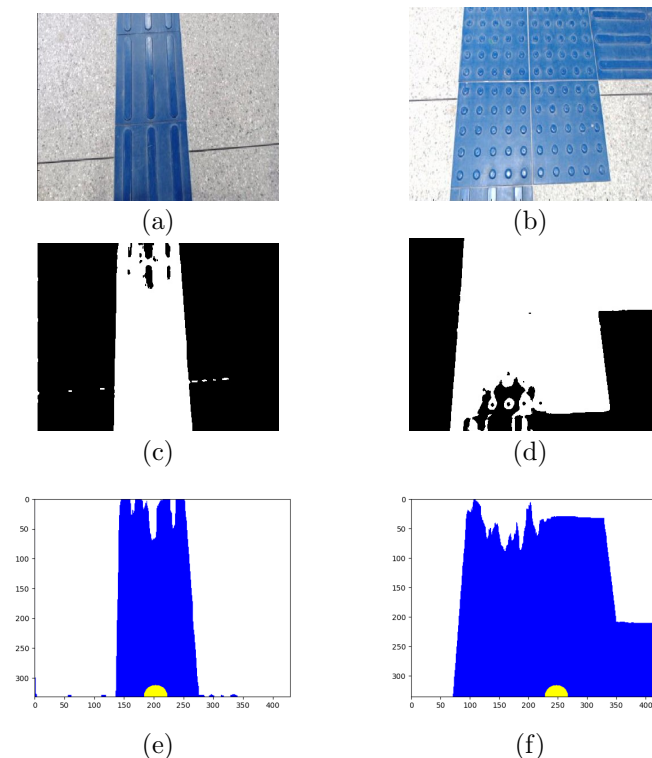


Figura 10. Piso tátil original (a) e (b). Piso tátil após processamento de imagem (c) e (d). Histograma de densidade da imagem binária (e) e (f)

Apesar da detecção correta dos pisos na maior parte do experimentos realizados, o sistema ainda possui limitações para mudanças bruscas de iluminação, que devem ser contornadas com aplicações de técnicas mais avançadas de segmentação ou até mesmo com um sistema de auto-calibração *online*.

No entanto, mesmo com essa limitação, os resultados obtidos destacam a capacidade da metodologia empregada para a navegação de uma cadeira de rodas autônoma, principalmente pelo fato da simplicidade de controladores que podem ser utilizados e também pelo fato de ser uma abordagem que não sofre com problemas de erros de odometria, uma vez que apenas os pisos táteis são utilizados como referência para navegação.

5. CONCLUSÕES

Neste artigo foi desenvolvido um sistema de navegação autônoma para uma cadeira de rodas motorizada, utilizando pisos táteis como marcos naturais, no qual o usuário precisa apenas indicar o local onde ele se encontra e o local para onde deseja se locomover através de comandos de voz.

A utilização dos pisos como marcos naturais foi realizada através de um sistema de visão computacional capaz de identificar os padrões de instalação dos pisos, extraindo

informações necessárias para localizar a cadeira no ambiente de maneira eficiente, sem a necessidade de calcular erros associados à movimentação da cadeira. O sistema ainda permite que controladores simples sejam utilizados no deslocamento da cadeira no ambiente.

A abordagem proposta foi testada em tempo real, utilizando diversos pontos de partida e de destino, com a cadeira se movimentando de forma correta em todos os testes. Por motivos de segurança, não foram realizados testes com pessoas a bordo da cadeira. Entretanto, os resultados obtidos demonstram a aplicabilidade do método a fim de possibilitar a navegação autônoma de uma cadeira de rodas em ambientes previamente conhecidos e com pisos táteis devidamente aplicados.

Em trabalhos futuros, pretende-se equipar a cadeira de rodas com sensores de segurança e testar o sistema com pessoas que possuem deficiência física severa. Além disso, pretende-se tornar o sistema de detecção de pisos táteis mais robusto.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao PRONEX/CNPQ pelo apoio financeiro que tornou possível a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Alkhatib, R., Swaidan, A., Marzouk, J., Sabbah, M., Berjaoui, S., and Diab, M.O. (2019). Smart autonomous wheelchair. In *2019 3rd International Conference on Bio-engineering for Smart Technologies (BioSMART)*, 1–5. IEEE.
- Angare (2021). [website] piso tátil: o que é e tudo o que você precisa saber. <https://www.angare.com/blog>.
- Cavanini, L., Cimini, G., Ferracuti, F., Freddi, A., Ippoliti, G., Monteriù, A., and Verdini, F. (2017). A qr-code localization system for mobile robots: Application to smart wheelchairs. In *2017 European Conference on Mobile Robots (ECMR)*, 1–6. IEEE.
- Choudhari, A.M., Porwal, P., Jonnalagedda, V., and Mériaudeau, F. (2019). An electrooculography based human machine interface for wheelchair control. *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, 39(3), 673–685.
- Freitas, P., Cardoso, V., Iacobelli, G., and Figueiredo, D. (2017). Desenvolvimento de um algoritmo de busca por vértices específicos em redes. In *Anais do XVI Workshop em Desempenho de Sistemas Computacionais e de Comunicação*. SBC.
- Gonçalves, E.R. (2020). *Implicações, experiências e representações da normalidade em pessoas com deficiência motora*. Ph.D. thesis.
- Hou, T.K. et al. (2020). Arduino based voice controlled wheelchair. In *Journal of Physics: Conference Series*, volume 1432, 012064. IOP Publishing.
- Kamarry, S., Molina, L., Montalvao Filho, J.R., Oliveira, E., and Carvalho, E.Á.N. (2012). Mapeamento utilizando análise de componentes principais.
- Khalilullah, K.I., Ota, S., Yasuda, T., and Jindai, M. (2018). Road area detection method based on dbnn for robot navigation using single camera in outdoor environments. *Industrial Robot: An International Journal*.
- Lima, Rodrigo, e.M.M. (2014). Reconhecimento de caminhos táteis com visão computacional em ambientes controlados.
- Miller, D.P. and Slack, M.G. (1995). Design and testing of a low-cost robotic wheelchair prototype. *Autonomous robots*, 2(1), 77–88.
- Santos, P.C., Carvalho, E.Á.N., Molina, L., and Freire, O. (2015). Developing intelligent wheelchairs for serious disabled people based on eye-blinking.
- Solea, R., Margarit, A., Cernega, D., and Serbencu, A. (2019). Head movement control of powered wheelchair. In *2019 23rd International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, 632–637. IEEE.
- Xu, G., Xu, L., Lv, C., and Zhu, B. (2017). An improved head pose estimation method for the robotic wheelchair interaction control. In *2017 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, 1589–1593. IEEE.