

Arquitetura de Navegação Baseada em Fusão Sensorial e Controle Fuzzy Adaptativo para o Cão-guia Robô Lysa

Nedinalva Sellin^{1,3}, All Jordan Schulz³, Pablo Viana², Gustavo Almeida¹

¹Instituto Federal do Espírito Santo (IFES)

²Universidade Federal de Alagoas (UFAL)

³Vixsystem

Abstract. *Autonomous navigation for assistive robots presents critical safety and reliability challenges, particularly when the user is visually impaired. This work presents the navigation architecture of the Lysa robot-guide, focused on resilience and the mitigation of localization failures. The proposed solution integrates ROS and implements a sensor fusion system based on the EKF, incorporating visual-inertial odometry data and absolute orientation. Experimental results, obtained through a three-level validation methodology (simulation, bench testing, and field trials), demonstrate a reduction in cumulative odometry error and increased robustness and operational safety of the system.*

Resumo. *A navegação autônoma de robôs assistivos apresenta desafios críticos de segurança e confiabilidade, especialmente quando o utilizador é uma pessoa com deficiência visual. Este trabalho apresenta a arquitetura de navegação do robô-guia Lysa, focada na resiliência e na mitigação de falhas de localização. A solução proposta integra o ROS e implementa um sistema de fusão sensorial baseado no EKF, integrando dados de odometria visual-inercial e orientação absoluta. Os resultados experimentais, obtidos através de uma metodologia de validação em três níveis (simulação, bancada e campo), demonstram uma redução no erro acumulado de odometria e uma maior robustez e segurança operacional do sistema.*

1. Introdução

A mobilidade assistiva representa um dos pilares fundamentais para a promoção da autonomia e inclusão social. Para pessoas com deficiência visual, o deslocamento em ambientes dinâmicos impõe desafios severos de segurança, exigindo sistemas que não apenas identifiquem obstáculos, mas que garantam uma localização precisa e resiliente a falhas provocadas pelo meio externo que inserem interferências e reduzem a confiabilidade das leituras [Cohav et al. 2025].

Embora avanços recentes em robótica móvel e visão computacional tenham impulsionado o desenvolvimento de tecnologias assistivas, a confiabilidade desses sistemas em tempo real permanece um gargalo crítico. Soluções baseadas em fontes únicas de dados são suscetíveis a oclusões, ruídos ambientais e derivas (drift) de odometria, o que pode comprometer a integridade física do usuário em cenários de uso contínuo [Liu et al. 2022]. Nesse contexto, a robustez na estimativa de estado do robô torna-se um requisito de segurança obrigatório.

A integração de múltiplas fontes de percepção, através de algoritmos de fusão sensorial, surge como uma estratégia para mitigar incertezas e garantir a disponibilidade do sistema de navegação mesmo diante da falha parcial de componentes individuais [Stavriniadis et al. 2025]. Este trabalho propõe uma arquitetura de navegação para o robô-guia Lysa baseada em uma infraestrutura de software utilizando o Robot Operating System (ROS). O núcleo da solução reside em um sistema de fusão sensorial que emprega o Filtro de Kalman Estendido (EKF) para integrar dados de odometria visual inercial em conjunto com uma Unidade de Medida Inercial (IMU) 9 eixos. Sobre essa base de dados estimada, propõe-se a implementação de um controlador baseado em lógica fuzzy para o acionamento dos motores, permitindo que o robô lide com as incertezas inerentes ao deslocamento humano e responda com suavidade aos obstáculos.

2. Trabalhos Relacionados

O desenvolvimento de sistemas assistivos vai além do desafio técnico, envolvendo a percepção social e as preferências funcionais do usuário. Investigações relatadas em [Cohav et al. 2025] destacam que as preferências de design, estética e a interface de comunicação são cruciais para a integração social e a eficácia do auxílio na mobilidade de usuários com deficiência visual. O estudo reforça que o sucesso na adoção de tecnologias assistivas depende de uma abordagem centrada no usuário, validando a necessidade de arquiteturas que priorizem a segurança e a previsibilidade de movimento.

Publicações recentes em robótica assistiva e navegação autônoma enfatizam a integração de múltiplos sensores e em algoritmos de decisão inteligentes para garantir a segurança do usuário. A resiliência de sistemas de navegação em ambientes complexos e sem sinal de GPS (Global Positioning System) é um tema central em sistemas críticos. Em [Liu et al. 2022] é proposto um sistema integrado para voos autônomos em larga escala utilizando Localização e Mapeamento Simultâneos (SLAM) semântico baseado em dados LiDAR. O trabalho enfatiza a importância de mecanismos de compensação de deriva em tempo real para manter a estabilidade do controle em ambientes não estruturados. Essa abordagem corrobora a escolha de sistemas de fusão sensorial, como o EKF, para mitigar falhas em sensores individuais e garantir a integridade da localização.

O uso de controladores baseados em lógica fuzzy é amplamente documentado como uma estratégia eficaz para lidar com incertezas e imprecisões sensoriais. Em [Stavriniadis et al. 2025] e [Benaicha et al. 2025] são apresentadas arquiteturas de controle fuzzy duais, focadas tanto no alcance de metas quanto no desvio dinâmico de obstáculos, permitindo transições suaves de comportamento através de blocos de fusão de decisão.

Adicionalmente, estudos como os de [Omrane et al. 2016] e [Aouf et al. 2019] demonstram a implementação de controladores fuzzy únicos para rastreamento de trajetória em ambientes internos (indoor), utilizando sensores de infravermelho e ultrassom para medição de distância. Em ambientes de armazenamento automatizado, [Riman and Abi-Char 2023] reforçam a eficiência de subsistemas fuzzy combinados para a busca do caminho mais curto com prevenção de colisões. Em consonância com esses trabalhos, apresentamos a evolução do sistema de navegação do robô Lysa para um controle adaptativo que minimize movimentos bruscos, aumentando o conforto e a confiança do usuário assistido.

3. Arquitetura Proposta

A arquitetura de hardware e software do robô Lysa foi concebida sob uma abordagem modular e distribuída, utilizando o ecossistema ROS para gerenciar a comunicação entre processos. O núcleo de processamento é composto por duas unidades computacionais interligadas por ethernet, permitindo a segregação de tarefas críticas do sistema.

3.1. Configuração do Sistema

O sistema integra um LiDAR para detecção de obstáculos e mapeamento, uma câmera de rastreamento baseada em SLAM Visual (V-SLAM) com IMU, cujos dados são fundidos com as imagens para gerar a odometria. O uso de duas placas de computação embarcada viabiliza uma divisão estratégica de recursos, minimizando latências e evitando gargalos no processamento de sensores de alta frequência (Figura 1-b). A placa principal, designada para controle e navegação, é responsável por executar os algoritmos de mapeamento, Localização de Monte Carlo Adaptativo (AMCL), navegação, além de realizar a comunicação de baixo nível com os drivers de potência dos motores. A unidade auxiliar, designada para processamento de algoritmos críticos, é responsável pela fusão dos dados através do EKF. Esta unidade processa os dados da câmera de rastreamento (Intel t265) e a IMU. Esta mesma unidade computacional efetua o processamento dos mapas em malhas de custo para o planejador global Dijkstra.

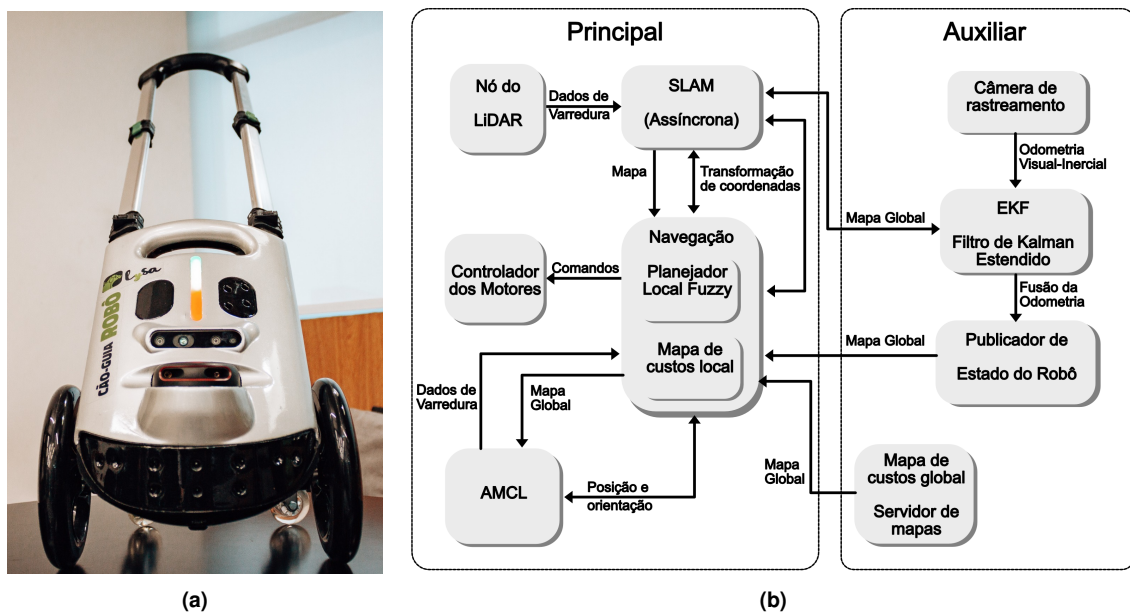


Figure 1. Arquitetura de sistema do cão-guia robô Lysa

O isolamento desses processos promove o balanceamento de carga, garantindo que o processamento intensivo de visão ou nuvens de pontos não comprometa o determinismo do controle dos motores nem degrade a precisão da localização em tempo real. A comunicação entre as duas placas utiliza o protocolo DDS (Data Distribution Service) nativo do ROS, via conexão Ethernet Gigabit. Uma placa controladora de motores dedicada recebe comandos de velocidade e com feedback dos encoders realiza um controle PID (Proporcional, Integral, Derivative) para movimentação.

3.2. Controle Fuzzy Adaptativo

O controle de movimento do robô emprega a lógica fuzzy para refinar o planejamento local, adotando como entrada o desvio lateral da rota (Figura 2-a), distância frontal ao alvo (Figura 2-b), confiança da percepção visual (Figura 2-c) e velocidade atual (Figura 2-d).

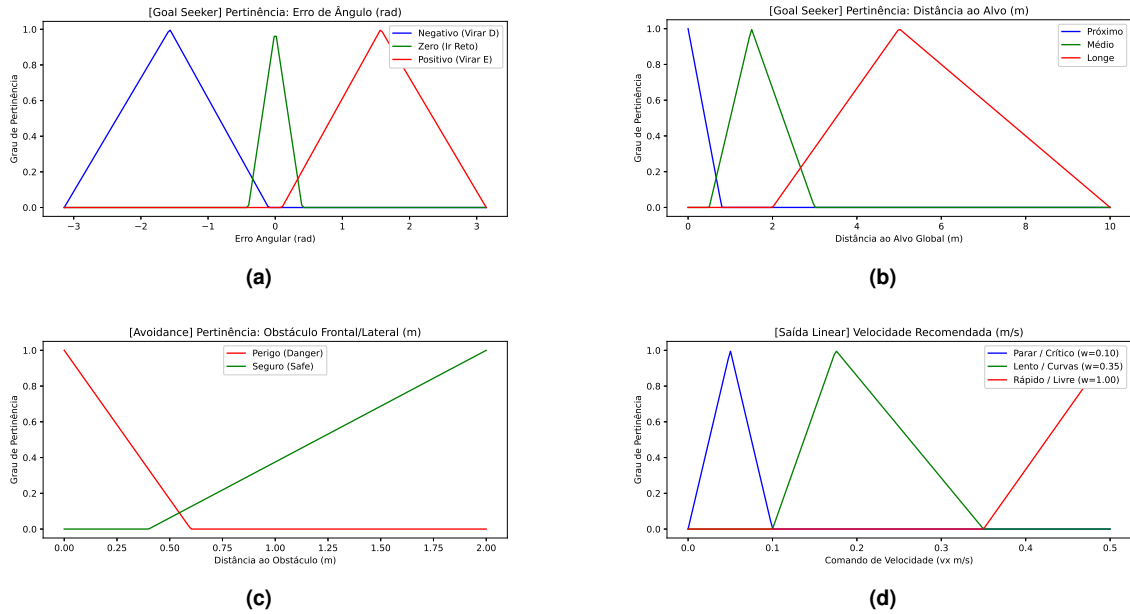


Figure 2. Funções de pertinência do controlador fuzzy adaptativo

O movimento do robô é regido pelo modelo cinemático (Equação 1):

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (1)$$

onde x e y são as coordenadas e θ é a orientação do robô em relação a referência no mapa situacional. O estado de pose é função da velocidade linear v e da velocidade angular w .

4. Resultados e Validação

A arquitetura de software e os algoritmos de decisão foram validados através de ferramentas de simulação computacional (JupyterLab e Gazebo). Nesta etapa, o foco principal foi a calibração das funções do controlador e a análise de decisão.

Table 1. Dashboard de Benchmark: Comparativo Fuzzy vs. DWA

Métrica	Controlador Fuzzy	Algoritmo DWA
Tempo de Execução (s)	95,7	116,0
Distância Percorrida (m)	15,70	16,64

A etapa de simulação permitiu realizar um benchmark comparativo entre o controlador Fuzzy proposto e o planejador local nativo do ROS, o Dynamic Window Approach (DWA). A análise baseou-se em métricas de desempenho essenciais, especificamente o tempo de execução e a eficiência da distância percorrida.

Os testes de bancada focaram na integridade da comunicação entre as placas e na resposta do subsistema de potência. Os testes de campo foram realizados em ambiente interno controlado com trajetórias curtas para verificar a integração entre os módulos do sistema e a estabilidade da navegação. Os resultados demonstraram que a fusão de dados LiDAR com a odometria visual permitiu uma navegação resiliente mesmo em superfícies de baixo atrito, onde a deriva dos encoders seria crítico.

5. Conclusão

Este trabalho apresentou uma arquitetura de navegação assistiva para o cão-guia robô Lysa, proposta para oferecer resiliência e segurança em cenários de mobilidade para pessoas com deficiência visual. A fusão sensorial via EKF mitigou incertezas e reduziu o erro acumulado de localização, enquanto o controle adaptativo Fuzzy proporcionou respostas de velocidade mais suaves e estáveis para o robô. A metodologia de validação em três níveis confirmou que a arquitetura proposta não apenas melhora a precisão da estimativa de estado, mas também eleva a disponibilidade do sistema diante de interrupções sensoriais intermitentes. Como trabalhos futuros, a evolução desta arquitetura prevê a expansão das capacidades do sistema para a navegação em ambientes externos, o que demandará a implementação de algoritmos de percepção visual sob condições variáveis de iluminação, deslocamento em rampas e a integração de sistemas de posicionamento global.

References

- Aouf, A., Boussaid, L., and Sakly, A. (2019). Same fuzzy logic controller for two-wheeled mobile robot navigation in strange environments. *Journal of Robotics*, 2019:1–11.
- Benaicha, I., Nechadi, E., Oussama, B., and Essounbouli, N. (2025). An improved fuzzy logic controller for mobile robots navigation in unknown environments. *Journal of Field Robotics*, 43:257–278.
- Cohav, A. L., Gong, A. X., Kim, J. T., Zeagler, C., Ha, S., and Walker, B. N. (2025). Do looks matter? exploring functional and aesthetic design preferences for a robotic guide dog. In *2025 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 1951–1957.
- Liu, X., Nardari, G. V., Cladera, F., Tao, Y., Zhou, A., Donnelly, T., Qu, C., Chen, S. W., Romero, R. A. F., Taylor, C. J., and Kumar, V. (2022). Large-scale autonomous flight with real-time semantic slam under dense forest canopy. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 7(2):5512–5519.
- Omrane, H., Masmoudi, M. S., and Masmoudi, M. (2016). Fuzzy logic based control for autonomous mobile robot navigation. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2016(1):9548482.
- Riman, C. F. and Abi-Char, P. E. (2023). Fuzzy Logic Control for Mobile Robot Navigation in Automated Storage. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 12(5):313–323.
- Stavriniadis, S., Zacharia, P., and Xidias, E. (2025). A fuzzy control strategy for multi-goal autonomous robot navigation. *Sensors*, 25(2).