Integração de Veículos Autônomos: Estimativa de Posição 3D Através de Algoritmos Bioinspirados em Ambiente Controlado

Wolmar Araujo Neto, † **Vinícius Pacheco Bacheti,** †
Leonardo Rocha Olivi, * **Daniel Khede Dourado Villa** †
Mario Sarcinelli-Filho, †

* *Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora, MG, Brasil*
† *Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil, (e-mail: mario.sarcinelli@ufes.br)*

Abstract: This article explores integrating the LBBA (Leader-Based Bat Algorithm), a Digital Compass, and robot cooperation to enhance drone localization in autonomous missions. It demonstrates that a ground robot's global localization can precisely locate drones in known environments. The study significantly contributes to improving the precision and safety of autonomous drone operations, crucial for applications like monitoring and rescue. The results show that combining 2D terrestrial localization with aerial interaction creates an efficient and reliable system, paving the way for UAV innovations.

Resumo: Este artigo explora a integração do LBBA (Algoritmo de Morcegos Baseado em Líderes), de uma Bússola Digital e da cooperação entre robôs para melhorar a localização de drones em missões autônomas. Demonstra que a localização global de um robô terrestre pode localizar drones com precisão em ambientes conhecidos. O estudo contribui significativamente para melhorar a precisão e a segurança das operações de drones autônomos, essenciais para aplicações como monitoramento e resgate. Os resultados mostram que a combinação da localização terrestre 2D com a interação aérea cria um sistema eficiente e confiável, abrindo caminho para inovações em UAVs.

Keywords: Robot Cooperation; Autonomous drones; Camera Sensors; Control Strategies; Global localization.

Palavras-chaves: Cooperação Robótica; Drones autônomos; Sensores de câmera; Estratégias de Controle; Localização global.

1. INTRODUÇÃO

A evolução dos veículos não tripulados (UGVs e UAVs) trouxe novos desafios em navegação e controle. A localização precisa melhora significativamente essas técnicas de navegação, mas tecnologias como LIDAR exigem poder computacional substancial, limitando sua aplicabilidade em plataformas robóticas. Atualmente, o LAB-AIR, Laboratório de Automação Inteligente e Robótica, pertencente ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil, possui expertise em controle de robôs, já tendo produzido diversos artigos neste tema (Sarcinelli-Filho and Carelli, 2023a; Villa et al., 2023; Bertolani et al., 2023; Bacheti et al., 2021).

Porém, semelhante a muitos outros grupos de pesquisa em todo o mundo, atualmente é utilizado um sistema de captura de movimento para prover a realimentação de posição e orientação de um único robô ou um grupo de robôs. Visando aplicações do mundo real, onde apenas sensores de bordo estão disponíveis para obter a localização dos veículos, o objetivo principal deste artigo é propor um esquema seguro de Localização Simultânea para estimar a pose do robô. Aqui consideramos robôs móveis terrestres equipados com um sensor LIDAR planar, uma unidade de medição inercial (IMU) e uma câmera acoplada no robô aéreo, aplicando um esquema de fusão de sensores aos dados fornecidos por estes dois robôs. O sistema projetado é validado através de simulações e experimentos, buscando demonstrar uma estimação confiável de posição do drone.

⋆ Este trabalho foi financiado pela FAPES e pelo CNPq.

2. TRABALHOS RELACIONADOS E CONTRIBUIÇÃO

A busca por métodos de localização é um tema recorrente e essencial aos pesquisadores que trabalham com robôs móveis. Uma localização adequada é um dos requisitos primários para garantir um bom desempenho em missões de navegação robótica, e é obtida pela estimativa de pose probabilística relativa à posição conhecida disponível de alguns objetos de interesse (pontos de referência). Em alguns casos, são utilizadas bordas verticais no ambiente (Atiya and Hager, 1993), ou características são obtidas através de um mapa definido e conhecido, utilizando

correspondências para a localização do robô (Thrun, 2002; Choset, 2005; Woo et al., 2006).

A localização usando robôs aéreos e terrestres é uma estratégia que pode ser usada tanto em aplicações internas quanto externas. A localização colaborativa é um caminho seguido na literatura que toma a posição relativa aproximada entre robôs como uma estimativa inicial e combina informações de ambos os robôs para obter uma estimativa de posição confiável (Xu et al., 2020).

A filtragem de dados para obter um melhor desempenho de localização nem sempre se limita aos mapas. Quando se deseja localizar objetos em imagens, é necessário trabalhar o conjunto de informações para realizar com eficiência o algoritmo de localização. Wu et al. (2014) demonstram em seu trabalho como essas técnicas podem ser utilizadas, para prever e atualizar as posições dos veículos em câmeras de vigilância, demonstrando a robustez de algoritmos, como PF (filtros de partículas) aplicados à localização através de visão computacional.

O uso de câmeras tem auxiliado abordagens de mapeamento 3D. Algoritmos como PF foram substituídos por modelos gaussianos mais complexos em um mapa de grades, obtendo resultados mais precisos em determinadas situações (Turnowicz and Cheng, 2014; ur Rehman et al., 2023; Mehta and Sharma, 2018; Sier et al., 2023; Karaked et al., 2022). Um ambiente esparso (pontos de referência dispersos ou escassos), por exemplo, poderia significar um custo considerável para um algoritmo FastSlam tradicional (Montemerlo et al., 2002), onde cada partícula é uma amostra de um caminho, e o EKF (Filtro de Kalman Estendido) é apenas um estimador característico.

Araujo Neto et al. (2019) propuseram usar um algoritmo bioinspirado baseado no comportamento de colônias de morcegos (LBBA) para minimizar erros de odometria, o que corrigiu a localização de um robô móvel durante a missão. O Algoritmo Bat (Yang, 2014) foi comparado a outros algoritmos da literatura devido à necessidade de substituir o filtro de partículas como algoritmo de localização dada sua complexidade computacional exponencial. A fusão de sensores visa otimizar a localização do robô, como pode ser observado em (Gao et al., 2020). Na literatura, algoritmos bioinspirados têm demonstrado resultados promissores para localização de robôs terrestres, e este artigo tem como objetivo aplicá-los a VANTs.

3. METODOLOGIA

3.1 Formulação do Problema

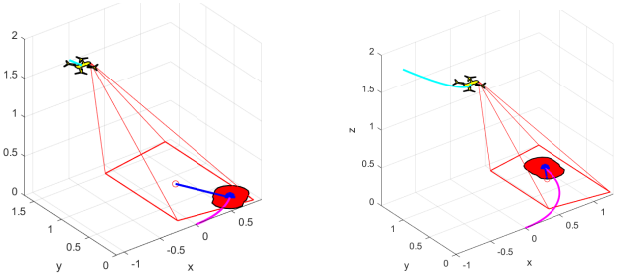
Este artigo explora uma abordagem colaborativa entre um drone e um robô terrestre em um ambiente mapeado. Equipado com uma câmera, o drone rastreia autonomamente o robô, que realiza uma tarefa de posicionamento para atingir um objetivo. A câmera obtém a distância entre o drone e a base terrestre, proporcionando uma compreensão tridimensional do ambiente, conforme a Figura 1. A integração dessas tecnologias visa explorar a eficácia da colaboração entre drones e robôs terrestres para estimar uma posição 3D a partir de um mapa 2D.

As pesquisas envolvendo múltiplos robôs são conduzidas com o objetivo de aplicações práticas em exploração autônoma, busca e salvamento, gestão de estoques de armazéns, atividades agrícolas, etc. Em tais aplicações a localização precisa é crucial para permitir o controle dos robôs, além de garantir a integridade do equipamento (Zhu et al., 2023; ur Rehman et al., 2023). No contexto deste artigo, o robô terrestre Pioneer 3-DX (doravante referenciado como P3-DX) está equipado com um sensor LIDAR, que será usado para auxiliar na localização de ambos os robôs. Este sensor é de suma importância em robótica e sistemas autônomos, levando a propostas inovadoras como sistemas LIDAR multimodais. Nestes sistemas, os sensores LIDAR funcionam de forma semelhante às câmeras, fornecendo imagens panorâmicas que codificam profundidade, refletividade ou luz infravermelha próxima, além de nuvens de pontos (Sier et al., 2023).

A proposta de localização 3D surge unindo a capacidade de localização 2D do robô P3-DX num mapa previamente conhecido com o conhecimento da distância (altura) do drone ao robô terrestre. Ao longo da missão, o VANT rastreia a plataforma terrestre P3-DX, realizando assim um rastreamento de trajetória (Sarcinelli-Filho and Carelli, 2023b), como apresentado na Figura 1(a), permanecendo diretamente acima dela e mantendo sua altura em relação a um alvo nele instalado (Figura 1(b)). Ao integrar leituras LIDAR, informações de orientação (fornecidas por uma bússola digital, por exemplo, ou mesmo outro dispositivo ou sistema de detecção) e o valor da altitude do drone em relação ao robô P3-DX, torna-se viável determinar a posição do VANT em um ambiente 3D familiar, sem depender de um sistema de captura de movimento, como o Optitrack. Entretanto, neste trabalho é utilizada a instalação do sistema de captura de movimento Optitrack, para fornecer um *ground truth* para a localização obtida e fornecer a orientação do P3-DX, uma vez que este não possui bússola digital a bordo.

A Figura 2 apresenta, de forma simulada, como ocorre a detecção do alvo por meio da câmera acoplada ao VANT. O trapézio mostrado representa o frame de varredura da câmara a bordo do VANT onde se encontra o alvo. Identificado o alvo na imagem, o algoritmo busca mantê-lo no centro do frame em questão, reduzindo a zero a linha azul, que indica a distância do centro do frame ao centro do alvo. Começa, então, o controle do drone de modo que o robô terrestre seja seguido.

O pacote Whycon, do ROS, foi utilizado para a detecção visual de marcadores, fornecendo uma estimativa precisa da posição do alvo em tempo real, fundamental para o controle do drone durante os experimentos. As medições



(a) Detecção do robô terrestre (b) Perseguição do alvo

Figura 1. Simulação da proposta líder-seguidor.

de altura do drone foram realizadas utilizando uma câmera embutida, cuja confiabilidade foi avaliada em condições controladas. Apesar da instabilidade típica desses sensores, o pacote de visão utilizado garantiu precisão adequada, e a trajetória de referência do P3DX foi definida por uma série de pontos-alvo, interpolados para criar uma rota contínua. O controle foi baseado em um algoritmo de seguimento de trajetória, ajustando a posição do drone para manter a formação com o robô terrestre.

3.2 A Arena Experimental

A seguir se descreve a configuração da arena utilizada para executar o experimento para validar o algoritmo proposto. A arena envolve quatro itens principais, a saber, o robô terrestre, a plataforma diferencial Pioneer 3-DX, o VANT adotado, o quadrimotor Parrot Bebop 2, o sistema de captura de movimento OptiTrack, neste caso adotando as câmeras Optitrack Prime 13, e o sistema operacional de robôs (ROS), usado para prover a comunicação computador de controle-robôs, realizada via canal de wi-fi.

As câmeras OptiTrack Prime 13 são de alta precisão (*full* HD), configuradas para obter imagens na taxa de 180 quadros por segundo (podem capturar até 240 quadros por segundo). Elas foram empregadas para comparar a posição real (*ground truth*) dos robôs com a posição calculada pelo algoritmo, e também para obter a orientação do robô terrestre. Elas possuem lentes que permitem a captura de movimentos com alta fidelidade, tornando-as ideais para ambientes controlados, onde é necessário um registro detalhado do movimento. Doze delas são dispostas ao redor do ambiente de teste, para capturar dados de posição e orientação dos robôs.

O quadrimotor Parrot Bebop 2 é um drone pequeno e leve, de estrutura robusta, equipado com uma câmera frontal com lente olho de peixe, que permite capturar imagens e vídeos de alta qualidade (*full HD*). Possui capacidade de voo estável, e é facilmente controlado, sendo um excelente candidato para filmagens aéreas e coleta de dados em experimentos. Já o robô móvel diferencial Pioneer 3-DX é uma plataforma diferencial conhecida, aqui equipada com um Sensor LIDAR Slamtec RPLIDAR-A2M12 com detecção de 360 graus do ambiente circundante, essencial para mapeamento e medições precisas de distância. A nuvem de pontos coletada por tal sensor tem 1600 pontos por 360° de varredura, cada um correspondendo a uma distância no intervalo de 0.2 m e 12 m, para objetos brancos, e entre 0.2 m e 10 m, para objetos pretos. Neste trabalho, entretanto, apenas a varredura frontal, correspondente a 180°, é considerada, o que corresponde a uma nuvem de 800 pontos. Porém, como a arena experimental não possui distâncias superiores a 10 m, a cor dos objetos não é significativa. Quanto à atualização da varredura, ela é realizada a uma taxa de 10 Hz.

A arena experimental também está equipada com dois computadores, um WINDOWS 10 e outro LINUX Ubuntu 20.04. O primeiro é adotado para rodar o software Motive, integrante do sistema de captura de movimento OptiTrack, que processa as imagens coletadas e fornece a posição e orientação do objeto que está sendo monitorado, além de rodar o *script* MATLAB® correspondente ao sistema proposto. Quanto ao computador LINUX, ele estabelece uma rede ROS que permite a comunicação entre o computador de controle e os veículos, que é baseada em um canal wi-fi ad-hoc criado por um roteador incluído na arena experimental, que não tem acesso à web (Figura 3).

4. RESULTADOS

Nesta seção são apresentados resultados simulados e experimentais, visando validar a proposta até então discutida. Em todos os cenários, o robô P3-DX se move pela arena de testes, enquanto o VANT voa acima dele, mantendo uma posição diretamente acima da base móvel durante toda a missão. Portanto, os dois veículos navegam como um sistema multirrobôs líder-seguidor (Sarcinelli-Filho, 2023), com o robô líder, o P3-DX, buscando um determinado ponto alvo. Assim, o seguidor rastreia o líder, mantendo uma posição relativa a ele, definida como $x_f = x_l$, $y_f = y_l$, e $z_f = z_l + h$, onde h é uma distância especificada e os subscritos f e l representam o seguidor e o líder, respectivamente. Para garantir que o quadrimotor mantenha a posição correta em relação ao líder, um marcador visual (um alvo) é instalado no topo do líder (ver Figura 4), que pode ser percebido visualmente pelo VANT, e cujo centro de gravidade nas imagens define a posição do líder, referência para o VANT. O objetivo é estimar a posição do drone no espaço, utilizando apenas os sensores proprioceptivos e exteroceptivos dos robôs.

O P3-DX, equipado com sensor LIDAR, coleta medições de distância em um mapa predefinido. Utilizando o algoritmo proposto, sua posição 2D é estimada. Graças ao alvo instalado no P3-DX, o VANT calcula sua distância

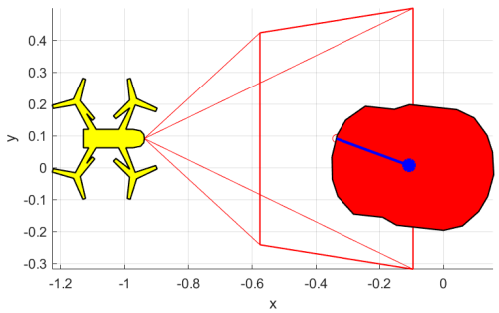


Figura 2. Visão superior de detecção do VTNT pelo VANT.

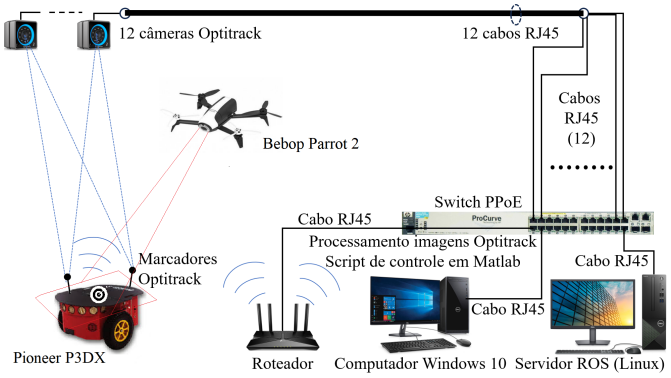


Figura 3. Diagrama de blocos mostrando a arquitetura do sistema.

(na direção Z) a ele (e, portanto, ao solo), permitindo-lhe seguir o robô de forma consistente durante o cumprimento da missão. Tal missão consistem em movimentar-se com segurança e autonomia pelo laboratório, de forma a preservar a integridade dos equipamentos. Para isso, são utilizadas como obstáculos placas de EVA (Etileno Vinil Acetato), um material macio que pode ser montado em diversos formatos, e nas laterais são instaladas redes de proteção, para segurança do pessoal presente no laboratório.

O VANT precisa decolar e conseguir identificar, através da imagem fornecida por sua câmera, a plataforma P3-DX, que tem o alvo em seu topo. Ao localizar o alvo com sucesso, ele deverá se mover para alinhar-se à base móvel, iniciando a missão por todo o laboratório. Para identificar visualmente o alvo, foi utilizado o pacote Whycon Krajník et al. (2014), disponível para ROS. Isto fornece os valores de distância nos eixos XYZ, e somente após a obtenção desses valores é possível controlar o drone para ficar logo acima do robô terrestre.

A Figura 4 apresenta um instantâneo parcial da arena de testes, mostrando as câmeras Optitrack, as redes de proteção, o robô P3-DX, o quadrimotor Bebop 2 e a imagem obtida pelo pacote Whycon. A janela do computador Linux mostra o espaço visual no qual é possível localizar o alvo a aproximadamente um metro e meio de distância vertical. Os valores em vermelho representam as distâncias calculadas e utilizadas para realizar o controle da formação líder-seguidor Sarcinelli-Filho and Carelli (2023b); Sarcinelli-Filho (2023); dos Santos Cardoso et al. (2023).

Após identificar a posição relativa do VANT em relação ao alvo, a missão pode começar. Primeiramente, o VTNT está localizado globalmente no mapa ambiental usando o algoritmo de otimização LBBA. Esta estratégia consiste em localizá-lo no mundo real, utilizando informações sensoriais (medidas de distância do sensor LIDAR) e comparando-as com medições estimadas, obtidas através de um mapa conhecido e o mais próximo possível do ambiente real. Ter a posição XY é crucial para o sucesso da missão, pois o P3-DX atuará como guia ao longo do percurso previamente definido. Cabe ao VANT seguir o líder e localizar-se no espaço cartesiano (coordenadas XYZ), fundindo as informações de seus sensores (bússola digital, câmera) com as informações calculadas pelo algoritmo de localização. Observa-se que o robô P3-DX usado não possui bússola, mas sua orientação está disponível, dada pelo sistema Optitrack, que emula a bússola.

Controlar múltiplos robôs representa um cenário desafiador e, ao mesmo tempo, amplamente aplicável na indústria. O cenário apresentado neste artigo poderia exemplificar dois robôs desempenhando funções de vigilância patrimonial, interna ou externa, fiscalização de instalações industriais, como armazéns ou grandes fábricas, e ainda em cenários onde é necessária uma inspeção visual em condições que possam comprometer a saúde humana, como em instalações com materiais radioativos ou substâncias nocivas à saúde e ao bem-estar humanos, como cenários de pandemia. Na missão proposta para testar localização e controle autônomos, são identificadas três torres de obstáculos, que podem simular, por exemplo, prateleiras de um armazém. Os robôs devem percorrer um caminho contornando esses obstáculos para poder realizar curvas abertas e fechadas, mantendo a formação líder-seguidor. A representação gráfica deste experimento pode ser vista na Figura 5, na qual a rota percorrida pelo drone é representada pela linha azul, enquanto as colunas cinza representam os obstáculos presentes no ambiente de navegação.

Já a Figura 6 mostra as rotas planejadas e percorridas pelo VANT e pelo robô terrestre. A rota planejada para o P3-DX é definida pela interpolação de segmentos de linha entre pontos de referência definidos no mapa 2D previamente conhecido. Quanto ao Bebop 2, sua rota planejada é aquela seguida pela plataforma terrestre, líder que ele rastreia. Como se pode ver, os dois veículos partilham percursos semelhantes em vários pontos (iniciando sua missão nas posições indicados pelas setas). Isto sugere que em muitos pontos a formação líder-seguidor seguiu a rota planeada com um elevado grau de precisão. Contudo, também existem áreas onde a linha azul diverge de forma significativa da linha vermelha, indicando que, em determinados instantes, especialmente em curvas acentuadas, o VANT desviou-se da rota planeada. Contudo, tal desvio não comprometeu a integridade dos veículos nem o cumprimento da missão.

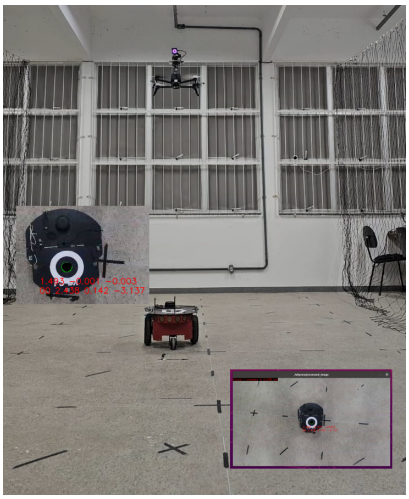


Figura 4. Capturando a distância do VANT ao VTNT.

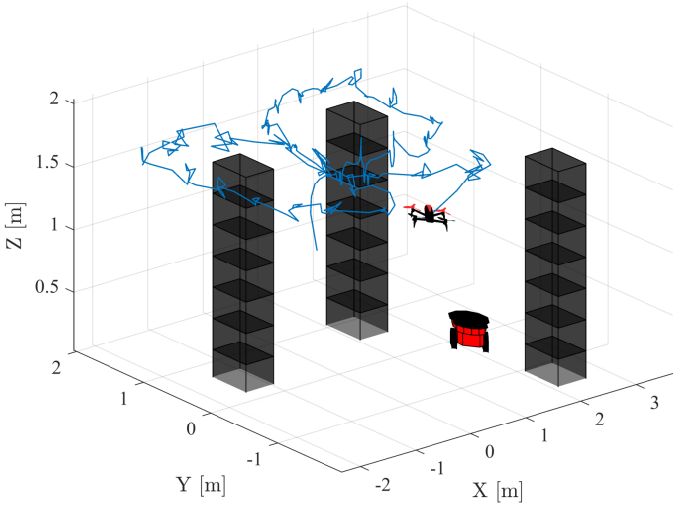


Figura 5. Representação gráfica da missão realizada pelo VANT.

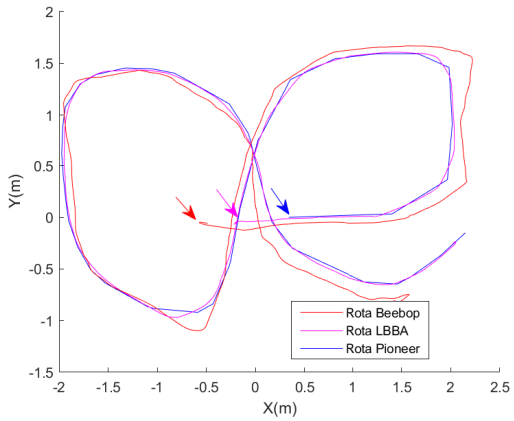


Figura 6. Comparando as rotas planejadas e reais dos veículos.

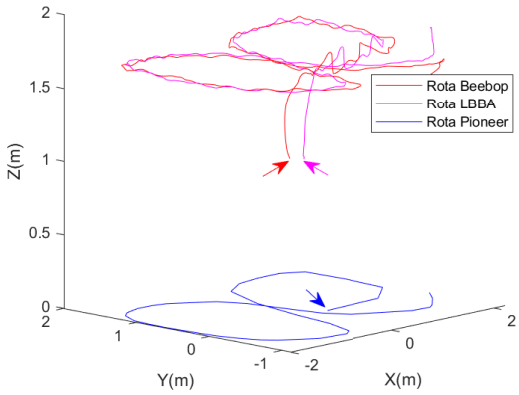


Figura 7. Análise de rota considerando o eixo Z.

O movimento oscilatório do VANT, perceptível em seu percurso conforme ilustrado na Figura 7, ocorre devido à técnica de controle utilizada neste experimento. Como o VANT reage ao movimento do VTNT, o controle visa estabilizar a posição relativa do robô aéreo em relação ao robô terrestre, com base no alvo presente neste último. Maiores dificuldades são observadas em curvas muito estreitas, como pode ser observado nos resultados apresentados. Embora não comprometa a integridade do equipamento, torna-se necessário desenvolver estratégias que garantam maior estabilidade em experimentos realizados em ambientes menos controlados.

Em caso de oscilação significativa ou perda do alvo, o VANT é colocado em modo *standby* e estabilizado no ar, retornando à missão somente quando conseguir visualizar novamente o VTNT. Essa abordagem garante a segurança do equipamento e permite que a missão continue, mesmo em um cenário em que o robô possa ser sequestrado, por exemplo. O fato de ambos os robôs trabalharem juntos auxilia em situações de localizações malsucedidas em cenários ambíguos pelo algoritmo de localização LBBA, fornecendo estratégias de localização e reforçando a confirmação de posição. Isso permite identificar se houve falha na localização dos algoritmos ou alguma interferência externa, como patinagem de rodas, inclinação do piso, sequestro de robôs, ventos fortes, entre outros.

Um vídeo do experimento está disponível no link `https://youtu.be/iLpwuE7_4jU`. A missão apenas se inicia após a execução do procedimento de localização global via o algoritmo LBBA, para obter as primeiras informações sobre a posição do robô terrestre. Depois disso, é adotada a estratégia de localização local ao longo de todo o experimento. Completando a análise do experimento, a Figura 8 fornece valores associados ao desempenho do sistema de localização proposto, no que diz respeito à posição do VANT no ambiente 3D. Quanto à taxa de acerto, a posição retornada pelo algoritmo proposto é comparada com o resultado fornecido pelo sistema de captura de movimento Optitrack, utilizado como *ground truth*. O erro de localização está sendo considerado como tolerável com o valor menor que 500 mm, , fato este ocorrendo em 87,24% do tempo ao longo da missão, sendo os erros significativos mais evidentes quando os robôs precisam realizar curvas fechadas ao longo de seu deslocamento.

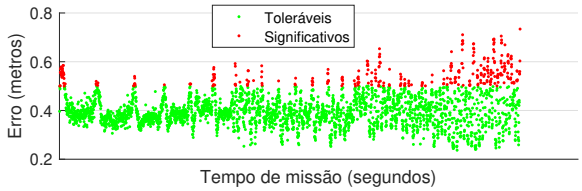


Figura 8. Desempenho do método de localização proposto.

O VTNT é capaz de se localizar no ambiente bidimensional (XY) através de leituras LIDAR, que são comparadas com as estimativas de posição do LBBA em um mapa conhecido. Por outro lado, o VANT obtém sua posição no espaço tridimensional (XYZ) através da fusão de sensores. É importante destacar que, neste estudo, o controle do Bebop 2 é realizado de forma a manter o alvo no centro da imagem de sua câmera e seguir a orientação do robô P3-DX durante toda a missão. Portanto, em alguns momentos de alta aceleração e curvas fechadas é esperado que o desempenho de localização do VANT piore, o que explica a degradação da taxa de acerto mostrada na tabela.

O número de morcegos utilizados para localização global inicial foi de 3.000 partículas, apresentando alta precisão de localização 2D do P3-DX. Garantindo que o VTNT esteja localizado globalmente e que o VANT esteja observando o alvo, a missão começa ao longo do laboratório, e o número de partículas para a localização local enquanto os robôs se movem foi reduzido para 50 partículas ($1,6\%$ da quantidade de partículas iniciais), buscando manter a frequência de boas localizações ao longo do experimento e diminuir o número de cálculos do algoritmo.

5. CONCLUSÃO

É proposto um método para localizar um VANT no espaço 3D utilizando dados sensoriais de um sensor LIDAR 2D a bordo de um robô terrestre em formação com o VANT e informações de altitude fornecidas por uma câmera no VANT, em relação a um marcador no robô terrestre. A proposta, baseada no algoritmo LBBA, permite localizar o veículo terrestre em um mapa 2D conhecido e, ao fundir esses dados com as informações de altitude do VANT, obter

a localização 3D deste último. Resultados experimentais indicam que a metodologia é eficiente e não interfere na tarefa cooperativa dos robôs. Portanto, ao navegar em formação, é possível fundir dados sensoriais dos veículos para melhorar sua localização no ambiente, crucial para um controle eficaz. Inicialmente, considera-se um ambiente conhecido para validar o algoritmo; futuros trabalhos devem explorar adaptações para ambientes desconhecidos, incluindo a construção de mapas e a gestão de incertezas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico e à FAPES - Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo, por financiarem este trabalho. W. Araujo Neto também agradece à FAPES, pela bolsa de pós-doutorado a ele outorgada, e V. P. Bacheti agradece ao CNPq pela bolsa de Doutorado a ele outorgada.

REFERÊNCIAS

Araujo Neto, W., Pinto, M.F., Marcato, A.L.M., da Silva, I.C., and Fernandes, D.A. (2019). Mobile robot localization based on the novel leader-based bat algorithm. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 30, 337–346.

Atiya, S. and Hager, G.D. (1993). Real time vision based robot localization. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 9(6), 785–800.

Bacheti, V.P., Brandão, A.S., and Sarcinelli-Filho, M. (2021). A path-following controller for a uav-ugv formation performing the final step of last-mile-delivery. *IEEE Access*, 9, 142218–142231.

Bertolani, D.N., Bacheti, V.P., Brandão, A.S., Carelli, R., and Sarcinelli-Filho, M. (2023). Controlling a multi-articulated robot in backward movement using an adaptive controller. *Mechatronics*, 92, 102967.

Choset, H.M. (2005). *Principles of robot motion: theory, algorithms, and implementation.* MIT Press, Cambridge, MA, USA.

dos Santos Cardoso, E., Bacheti, V.P., and Sarcinelli-Filho, M. (2023). Package delivery based on the leader-follower control paradigm for multirobot systems. In *2023 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 775–781. doi:10.1109/ICUAS57906.2023.10156608.

Gao, Y., Wang, F., Li, J., and Liu, Y. (2020). Localization of mobile robot based on multi-sensor fusion. In *2020 Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*, 4367–4372. IEEE.

Karaked, P., Saengphet, W., and Tantrairatn, S. (2022). Multi-sensor fusion with extended kalman filter for indoor localization system of multirotor uav. In *2022 19th International Joint Conference on Computer Science and Software Engineering (JCSSE)*, 1–5. IEEE.

Krajník, T., Nitsche, M., Faigl, J., Vaněk, P., Saska, M., Přeučil, L., Duckett, T., and Mejail, M. (2014). A practical multirobot localization system. *Journal of Intelligent & Robotic Systems.* doi:10.1007/s10846-014-0041-x. URL `http://dx.doi.org/10.1007/s10846-014-0041-x`.

Mehta, M. and Sharma, D. (2018). Automated landing, take-off and surveillance by uav using computer vision. *Take-off and Surveillance by UAV using Computer Vision (April 24, 2018).*

Montemerlo, M., Thrun, S., Koller, D., and Wegbreit, B. (2002). Fastslam: A factored solution to the simultaneous localization and mapping problem. In *Eighteenth National Conference on Artificial Intelligence*, 593–598. American Association for Artificial Intelligence, USA.

Sarcinelli-Filho, M. (2023). *Controle de sistemas multirrobos.* Blucher, São Paulo, Brazil.

Sarcinelli-Filho, M. and Carelli, R. (2023a). *Control of Ground and Aerial Robots.* Springer, Cham, Switzerland.

Sarcinelli-Filho, M. and Carelli, R. (2023b). *Control of Ground and Aerial Robots*, chapter Motion Control, 41–97. Springer International Publishing, Cham, Switzerland. doi:10.1007/978-3-031-23088-2_4.

Sier, H., Yu, X., Catalano, I., Queralta, J.P., Zou, Z., and Westerlund, T. (2023). Uav tracking with lidar as a camera sensor in gnss-denied environments. In *2023 International Conference on Localization and GNSS (ICL-GNSS)*, 1–7. IEEE.

Thrun, S. (2002). Particle filters in robotics. In *Proceedings of the Eighteenth conference on Uncertainty in artificial intelligence*, 511–518. Morgan Kaufmann Publishers Inc.

Turnowicz, M.R. and Cheng, Y. (2014). Gaussian mixture model based high dimensional slam utilizing sparse grid quadrature. In *American Control Conference (ACC), 2014*, 1102–1107. IEEE.

ur Rehman, U., Iqbal, T., Hussain, S., Cheema, M.J.M., Iqbal, F., and Basit, A. (2023). Drone and robotics roadmap for agriculture crops in pakistan: A review. *Environmental Sciences Proceedings*, 23(1), 39.

Villa, D.K., Brandão, A.S., and Sarcinelli-Filho, M. (2023). Adaptive sliding mode control applied to quadrotors-a practical comparative study. *Journal of the Franklin Institute*, 360(16), 11578–11599.

Woo, J., Kim, Y.J., Lee, J.o., and Lim, M.T. (2006). Localization of mobile robot using particle filter. In *SICE-ICASE, 2006. International Joint Conference*, 3031–3034. IEEE.

Wu, B.F., Kao, C.C., Jen, C.L., Li, Y.F., Chen, Y.H., and Juang, J.H. (2014). A relative-discriminative-histogram-of-oriented-gradients-based particle filter approach to vehicle occlusion handling and tracking. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(8), 4228–4237.

Xu, X., Chen, Z., Guo, J., Wang, Y., Wang, Y., and Xiong, R. (2020). Collaborative localization of aerial and ground mobile robots through orthomosaic map. In *2020 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR)*, 122–127. IEEE.

Yang, X.S. (2014). Chapter 10 - bat algorithms. In X.S. Yang (ed.), *Nature-Inspired Optimization Algorithms*, 141–154. Elsevier, Oxford. doi:10.1016/B978-0-12-416743-8.00010-5. URL `https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124167438000105`.

Zhu, F., Ren, Y., Kong, F., Wu, H., Liang, S., Chen, N., Xu, W., and Zhang, F. (2023). Swarm-lio: Decentralized swarm lidar-inertial odometry. In *2023 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 3254–3260. IEEE.