

Teleoperação por Gestos para Guiar um VANT em Tarefas de Transporte de Cargas

Felipe dos Anjos Rezende, Leonardo A. Fagundes-Júnior, Celso O. Barcellos, Alexandre S. Brandão

Resumo—As pesquisas em sensoriamento, baterias e processamento de imagens têm impulsionado os avanços em robótica aérea, permitindo a utilização desses veículos em diversas áreas. Dentre elas, está o transporte de cargas que é o foco principal deste trabalho, cujo objetivo consiste em utilizar gestos executados por um operador humano para controlar veículos aéreos não tripulados, os VANTs, dispensando a necessidade de um controle remoto. Para uma melhor explanação do desenvolvimento prático, a pesquisa foi dividida em quatro etapas. Inicialmente, foram utilizados marcadores reflexivos acoplados nas mãos do operador e um ponto de referência pré-determinado, que auxilia tanto na definição da área de atuação das mãos quanto no movimento dessa área em função dos movimentos do operador. Tais marcadores são captados por um sistema de rastreamento de movimento e os dados são processados pelo software *motive* da OptiTrack. Em seguida, esses dados são exportados para o *matlab*, onde são tratados e utilizados no controle do drone, o Bebop 2 da *parrot* Inc. Nas etapas seguintes, realiza-se o controle do VANT individualmente e, posteriormente, o controle do VANT transportando um eletroímã. Por fim, para melhorar a percepção de localização do VANT, disponibilizou-se a visão da câmera do VANT para oferecer um feedback visual ao operador, facilitando a tarefa de controle. Os testes experimentais realizados demonstram a capacidade do sistema de interação humano-robô para missões de coleta, transporte e entrega de pacotes.

Index Terms—VANTs, Gestos, Transporte de Carga, Interação Humano-Robô

I. INTRODUÇÃO

NO recorte dos últimos anos, pode-se averiguar uma crescente tendência na utilização de drones dentre as tarefas mais distintas. Isso se dá pelo aumento da qualidade tecnológica desenvolvida tanto em testes a campo, quanto no desenvolvimento de tecnologias de inteligência. Fato disso é uma maior utilização dos veículos aéreos não-tripulados (VANTs), mais especificamente a classe dos quadricópteros, em entrega de pacotes em áreas urbanas [1], rastreamento e aplicação de defensivos agrícolas [2], distribuição de suprimentos em zonas de conflitos [3] e no mapeamento e/ou exploração de áreas [4]–[7].

Superando adversidades e limitações físicas, os VANTs vêm ganhando espaço devido a sua facilidade de locomoção e alta adaptação ao ambiente em que os mesmos estão inseridos. A representatividade desse fato é a sua ampla atuação em cooperação com outros veículos aéreos, seja para execução de tarefas conjuntas [8]–[12] ou para shows de performances aéreas [13]. Por outro lado, sua interação com veículos terrestres também ganha espaço científico e industrial, assim como na interação autônoma, sem a necessidade da presença humana [14].

Paralelamente a esses avanços, há uma crescente preocupação com a integridade dos operadores e isto

vem chamando atenções em diferentes aspectos, obrigando a criação de protocolos mais seguros para essas interações [15], [16]. Neste contexto de interação humano-robô e com base nos trabalhos da literatura [17], [18], a presente pesquisa visa realizar uma teleoperação por meio de gestos, de um VANT tipo quadrotor, em tarefas de transporte de cargas. Mais especificamente, o veículo aéreo Bebop 2, da Parrot Inc, será controlado por um humano, de modo que a aeronave não necessitará conhecimento prévio do ambiente, para então realizar sua missão.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

A. Sensoriamento

Para a etapa de sensoriamento foram utilizados marcadores passivos de material reflexivo (ver esferas na Figura 1), que são captados por 15(quinze) câmeras de rastreamento infravermelho, localizadas em uma sala apropriada para os testes, proporcionando um ambiente controlado e fechado. Para realizar o rastreamento dos gestos, esses marcadores foram geometricamente espaçados em dois moldes impressos em 3D para representatividade das mãos do operador, de modo a não gerar ambiguidade quanto a orientação do objeto em relação aos leitores. Na Figura 1, pode-se observar o modelo produzido com a presença dos marcadores, formando figuras geométricas distintas. Isso permite a distinção dos padrões pelo software *motive* da OptiTrack.

B. Eletroímã

Segundo [19], existem dois métodos de acoplamento da carga ao drone: por cabo suspenso e acoplado direto ao robô. Apesar das questões relacionadas ao efeito pendular, o

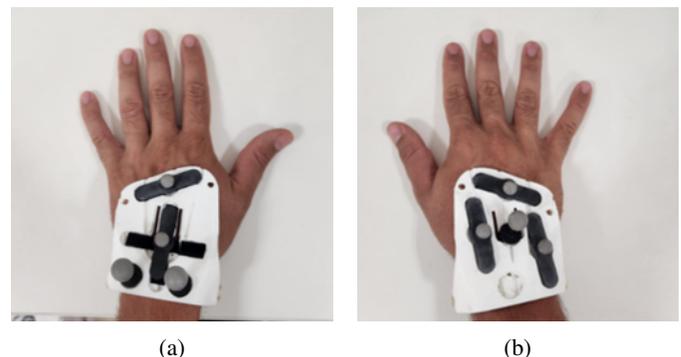


Figura 1: Moldes com impressão das respectivas mãos (a) esquerda e (b) direita.

transporte de carga por cabos foi escolhido neste trabalho para a realização da movimentação dos objetos.

Para uma melhor troca de informações, uma solução para a conexão entre o Bebop 2 e a carga é apresentada em [14]. Utilizando dois módulos de Arduino Nano, os autores propuseram a construção de uma placa transmissora de sinais e uma placa receptora. Deste modo, o *matlab* consegue enviar sinais de acionamento e desacionamento do eletroímã. A Figura 2 representa essas placas de circuito impresso, do inglês *Printed Circuit Board* (PCB), utilizadas para o envio do sinal. A PCB transmissora, localizada no computador, é responsável por transmitir os sinais, enquanto a PCB receptora, posicionada no drone, é encarregada de receber e acionar o eletroímã.

C. Gestos

Existem alguns gestos que comutam o estado de diferentes variáveis. Nesta seção serão exemplificados os gestos utilizados para a realização do experimento de transporte de carga entre plataformas. Os gestos utilizados para a realização das tarefas são ilustrados na Figura 6 e descritos a seguir:

Takeoff/Land: União próxima ao peito da mão direita e esquerda. Este gesto habilita a comutação de estado do drone: se estiver voando, aterrissa; caso contrário, inicia o voo.

Control On: A mão direita se aproxima da referência, mostrada na Figura 4, e se mantém, durante cinco segundos. Isto possibilita a ativação do controle manual pelo operador.

Joypad: Com o controle ativado é possível controlar a posição do Bebop apenas com o movimento da mão direita sobre a área virtual da Figura 4.

Control Off: Quando a mão direita difere da referência por um segundo, o controle é desligado; deixando assim o drone pairando no ar (*hovering*).

Actuator On: Ao apresentar uma aceleração positiva em y , a mão esquerda liga o eletroímã.

Actuator Off: Ao apresentar uma aceleração negativa em y , o eletroímã é desligado.

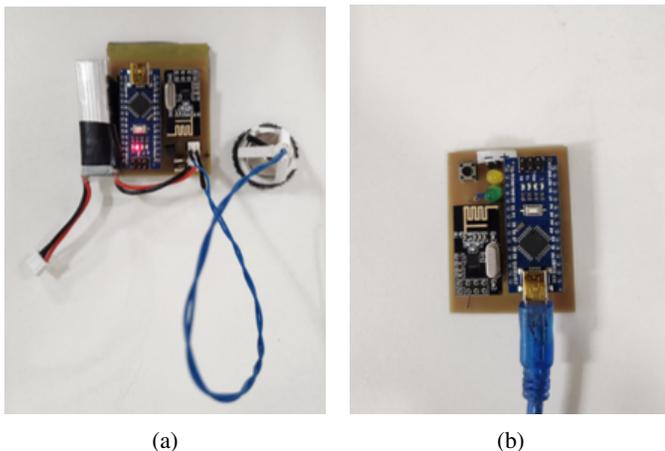


Figura 2: PCB (a) receptora e (b) transmissora.

D. Controle

Para a designação do controle utilizado, primeiro é necessário um entendimento das funcionalidades para o controle de um quadricóptero. Segundo [20] são necessários quatro sinais de controle para a movimentação de drone, são eles: propulsão na direção vertical e as devidas rotações denominadas rolagem, arfagem e guinada, que ocorrem nos eixos coordenados X , Y e Z , respectivamente. Como o drone não exerce força de propulsão nas direções X e Y , tal aeronave é considerada subatuada. Isso se dá porque existem menos sinais de controle (quatro) do que graus de liberdade (seis).

Neste trabalho, o comando relacionado à guinada (ψ) não será definido pelo operador para atuação da aeronave, assim utilizados os comandos de propulsão vertical (Z), a arfagem (θ) e a rolagem (ϕ).

Dado que a discretização dos computadores, o controle do drone é feito um tempo de amostragem (Δt) igual a 1/30 segundos, ou seja, uma frequência de amostragem igual a 30Hz, como utilizado por [21]. Tal frequência é suficiente para a leitura dos sensores e atuação no atuadores da aeronave.

Durante a realização do controle, fez-se necessário o cálculo de velocidades e acelerações tanto da mão do operador, quanto do drone Bebop. Utilizando a plataforma AuRoRa proposta por [22] e adaptada para o Bebop por [23], foi possível um melhor entendimento do cálculo das velocidades e, em seguida, convertendo esse aprendizado em uma classe semelhante para o cálculo para as mãos.

A criação dessa classe foi essencial, uma vez que o *motive* disponibiliza apenas as coordenadas do corpo rígido criado em relação a um referencial local, previamente disposto durante a calibração do mesmo. A Equação (1) representa o método utilizado para o cálculo de velocidade a partir da derivação no tempo discreto.

$$V(K) = \frac{X(K) - X(K-1)}{\Delta t}, \quad (1)$$

onde $X(K)$ é a posição atual, $X(K-1)$ é a posição durante a amostragem anterior e Δt , o tempo de amostragem. Seguindo a mesma linha de raciocínio é possível designar a aceleração discretizada,

$$A(K) = \frac{V(K) - V(K-1)}{\Delta t}, \quad (2)$$

que, em função das posições, é descrita por

$$A(K) = \frac{X(K) - 2X(K-1) + X(K-2)}{(\Delta t)^2}. \quad (3)$$

A Figura 3 apresenta o fluxograma de controle proposto. As classes carregadas são advindas da plataforma AuRoRa [22] e a classe **Mão Direita** foi criada para armazenar as informações de comando do operador. Para uma melhor exemplificação das classes do AuRoRa, podemos citar:

- JoyControl: realiza a conexão com o controle remoto Joystick para segurança;
- OptiTrack: habilita a leitura de informações com o sistema *motive*;
- Bebop: carrega as informações e canal de comunicação com o Bebop.

Algoritmo 1: Loop de Controle.

```

if tempo > tempo de amostragem then-
  Reinicia o temporizador de controle;
  Atualiza a leitura do OptiTrack;
  for cada objeto do OptiTrack do-
    if objeto = B then-
      Observa a posição do Bebop;
      if posição do Bebop > parede virtual then-
        Ganho cai exponencialmente na direção;
    else if objeto = RH then
      Calcula a média móvel dos valores de
      altura da mão direita;
      if média estiver próxima da Referência
      adotada then
        Atribui ao ponto o centro da área de
        atuação;
        Habilita o controle;
      if controle habilitado then
        if (altura da mão) – (altura do centro)
        > |distância| then
          Calcula essa diferença
          Atualiza Controle em Z
        Calcula o raio e o ângulo em relação ao
        centro
        Pelo ângulo, atualiza o Controle em X
        ou Y
        if média estiver muito longe do centro then
          Desabilita o controle
      else if objeto = LH then
        if Se houve uma velocidade positiva em Y
        then
          Liga o eletroímã;
        else if houve uma velocidade negativa em Y
        then
          Desliga o eletroímã;
    if o drone não está voando e teve sinal de comutação de
    estado then
      Take Off
    else if o drone está voando e teve sinal de comutação de
    estado then
      Land
      Atualiza o sinal de controle;
      Envia o sinal de controle;
      Atualiza a matriz de dados;

```

de controle em cada eixo ordenado X , Y e Z , foi utilizada a função tangente hiperbólica, dada por

$$C = K_1 \tanh(K_2 f), \quad (4)$$

para fins de saturação, tendo K_1 e K_2 como ganhos ajustáveis. O parâmetro f é uma divisão do raio atual sobre o raio máximo de ação, dada por

$$f = \frac{\|\vec{X}_{RH} - \vec{X}_C\|}{r}, \quad (5)$$

onde, X_C é as coordenadas do centro da área de trabalho, X_{RH} são as coordenadas de posição referentes à mão direita e r é raio de atuação da mão de controle. A Tabela I mostra os valores dos ganhos adotados para este trabalho, após a realização de testes com elevação empírica dos ganhos.

Tabela I: Ganhos da relacionados a saturação do controle

Eixo	K1	K2
X	0.5	6.62
Y	0.5	6.62
Z	0.15	10.6

Devidos cálculos de (4) e adotando uma prioridade do eixo z , a área de atuação da mão direita é ilustradas na Figura 4. A região em preto indica uma zona morta, na qual o sinal de controle enviado ao drone é igual a zero. Nesta região, o drone permanece em hovering, ou seja, voo pairado, compensando apenas a gravidade exercida sobre ele.

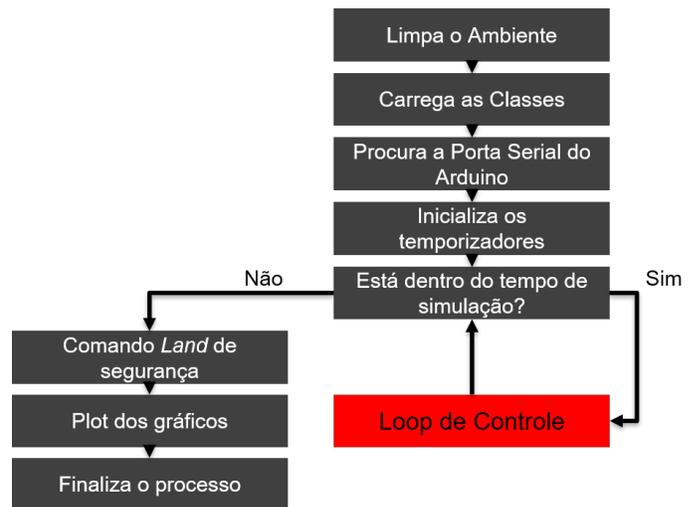


Figura 3: Fluxograma de controle proposto.

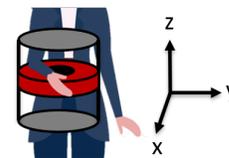


Figura 4: Cilindro representativo da região de controle.

Fazendo o enfoque apenas no laço de controle, destacado em vermelho na Figura 3, o Algoritmo 1 detalha a estratégia proposta. É importante salientar que para o cálculo dos sinais

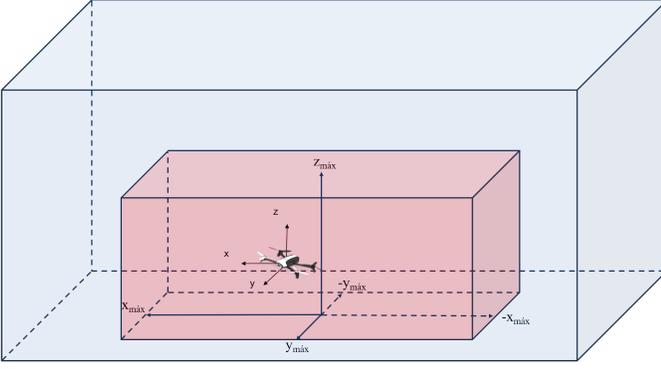


Figura 5: Parede virtual criada, com seus respectivos limites.

E. Localização do Operador

Para aprimorar a localização do operador, a câmera do Bebop foi empregada, destacando que a imagem capturada por esta câmera é transmitida diretamente ao usuário. Isso significa que não é imprescindível que o operador e o drone compartilhem o mesmo espaço físico. Em outras palavras, eles podem operar em ambientes distintos, desde que a distância máxima permitida pelos transmissores de sinal seja respeitada.

Durante o processo de execução, identificou-se a necessidade de um dispositivo que informasse ao operador quando os limites do ambiente controlado fossem alcançados. Para tal, foi desenvolvido um plasma virtual, que consiste essencialmente em um ganho que decresce exponencialmente quando o produto escalar do sinal de controle e a posição do robô possuem o mesmo sinal. Assim, caso

$$\begin{cases} C_{\star} \cdot \star \geq 0, & G = e^{-a_1 g} \\ C_{\star} \cdot \star < 0, & G = 1, \end{cases} \quad (6)$$

para $\star = x, y, z$. Note que G somente será ativado se $|x| > x_{max}$ ou $|y| > y_{max}$ ou $z > z_{max}$.

Graficamente, esta parede virtual é ilustrada na Figura 5, em vermelho está a região de operação do drone e em azul a região do plasma de atenuação.

F. Experimentos

A validação deste estudo envolveu a realização de dois experimentos, concebidos de forma progressiva para ilustrar os diferentes níveis de dificuldade associados à execução das tarefas propostas. O primeiro experimento abordou a operação por meio de controle gestual, com o objetivo de destacar o controle utilizado para a locomoção do Bebop, além de servir como uma demonstração prática da atuação do eletroímã no transporte de carga. Nessa configuração, o drone foi direcionado em direção à carga, executou o acoplamento magnético e realizou o transporte necessário antes de buscar uma base de aterrissagem.

No segundo experimento, a orientação do operador foi realizada exclusivamente através da câmera do Bebop. Nessa abordagem, a tarefa consistiu em transportar a carga, partindo da base inicial e depositando-a na plataforma de apoio. Posteriormente, a aeronave retornou à plataforma de partida. O principal propósito dessa tarefa é demonstrar ao observador a

viabilidade da pesquisa, destacando que o operador e o drone não precisam estar no mesmo ambiente para a execução das missões.

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para validar a pesquisa em questão, foram conduzidos dois experimentos, progressivamente elaborados para ilustrar diferentes níveis de dificuldade nas tarefas propostas. No primeiro ensaio, realizou-se uma operação com controle gestual, visando exemplificar o controle utilizado para a locomoção do Bebop e também como uma demonstração do funcionamento do eletroímã no transporte de carga. Nessa situação, o drone foi direcionado em direção à carga, efetuou o acoplamento magnético e transportou a carga antes de retornar em busca de uma base de aterrissagem.

No segundo experimento, o operador usou exclusivamente na câmera do Bebop para guiar o drone. Contudo, a tarefa consistiu em transportar a carga para a base de apoio e, posteriormente, retornar à plataforma de partida. O propósito principal dessa tarefa é evidenciar a viabilidade da pesquisa, uma vez que operador e drone não necessitam compartilhar o mesmo ambiente para a execução das missões.

O link <https://youtu.be/rwgPujGINIo> apresenta o vídeo dos experimentos. Vale destacar que o drone utilizado para a execução da tarefa não possui como característica principal a capacidade de transportar cargas elevadas. Portanto, optou-se por utilizar uma carga de 50 gramas para o experimento 1 e 90 gramas para o experimento 2. Considerando que a massa do Bebop é de 520 gramas e a massa do conjunto PCB e eletroímã é de 90 gramas, observa-se um aumento de 26,9% e 34,6% de sobrepeso em relação à massa do drone nos experimentos 1 e 2, respectivamente.

Para aprimorar a compreensão dos eventos ocorridos durante os experimentos, introduzimos cores nos gráficos que representam as posições X , Y e Z das mãos durante cada experimento específico (Figuras 8 e 12). Essas cores foram incorporadas para proporcionar uma representação visual mais clara. Os momentos de comutação do eletroímã são destacados em verde, enquanto os períodos de comutação do voo *Take off/Land* são destacados em laranja. As fases de voo com carga acoplada são destacadas em azul, enquanto as fases sem a presença da carga são representadas em roxo.

A Figura 7 mostra a posição da aeronave durante o experimento 1. Note que o experimento inicia-se com 10 segundos. Isso se dá pela presença de um *delay*, garantindo a possibilidade de execução com a presença apenas do operador. Observe que o intervalo entre 150 e 180 segundos é onde ocorre o transporte da carga. Note que o ponto de partida do drone, onde ocorre o *takeoff*, é diferente do ponto de chegada, onde acontece o *land*. Afinal, a posição tridimensional de partida e chegada são distintas. Isso ocorre porque o drone aterrissa no local onde a carga foi acoplada inicialmente.

Do mesmo modo, a Figura 8 representa a atuação tanto da mão esquerda, representada pela cor azul, como da mão direita, cor vermelha. Associando o gráfico da posição da mãos (Figura 8) com a do drone (Figura 7), pode-se perceber que o *Take Off* e *Land* ocorreram próximos a 20 e 220 segundos,

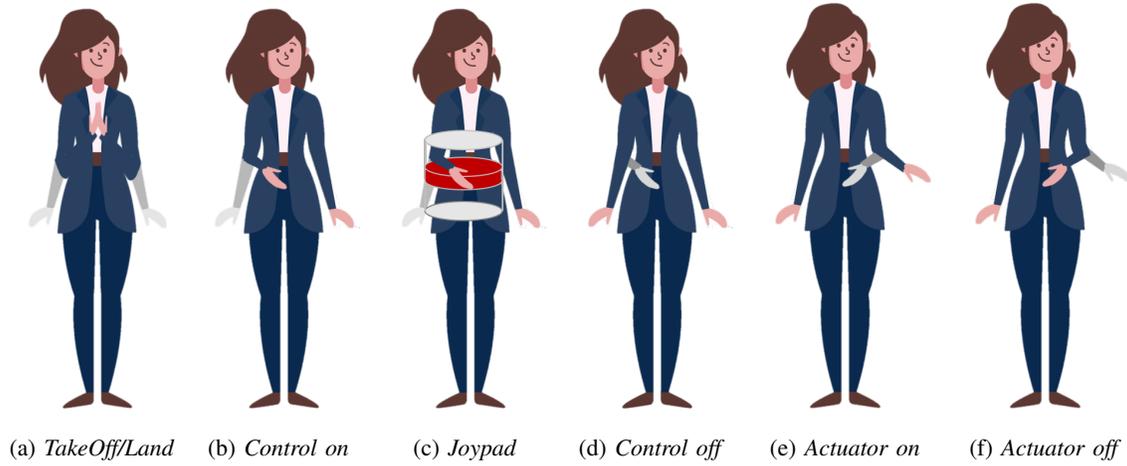


Figura 6: Gestos de execução do experimento.

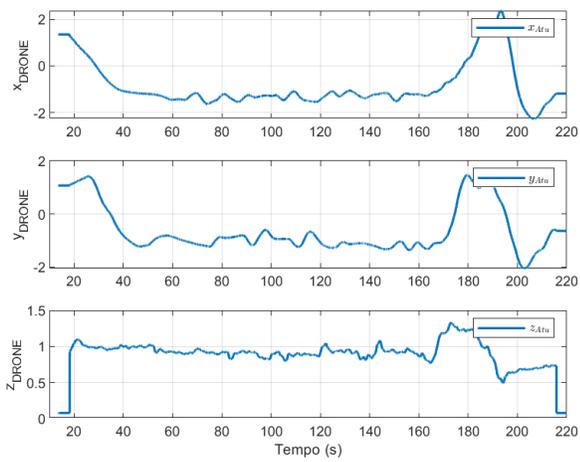


Figura 7: Posição do Bebop durante o experimento 1.

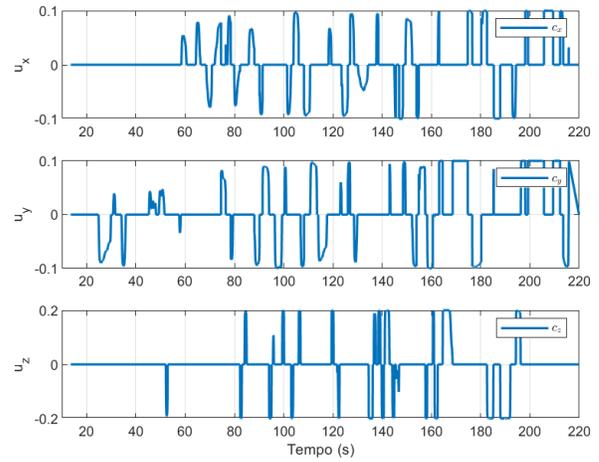


Figura 9: Sinais de controle utilizados no experimento 1.

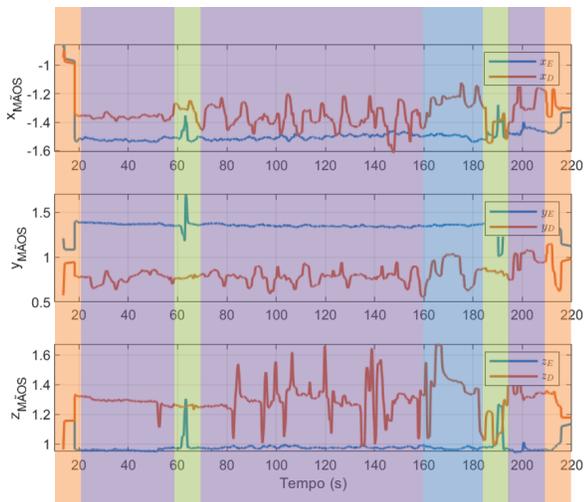


Figura 8: Posição da mãos durante o experimento 1, direita (vermelho) e esquerda (azul).

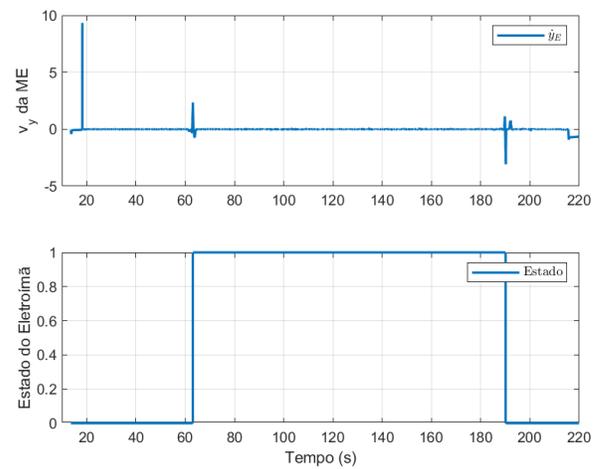


Figura 10: Velocidade da mão esquerda em y e estado do eletroímã no experimento 1.

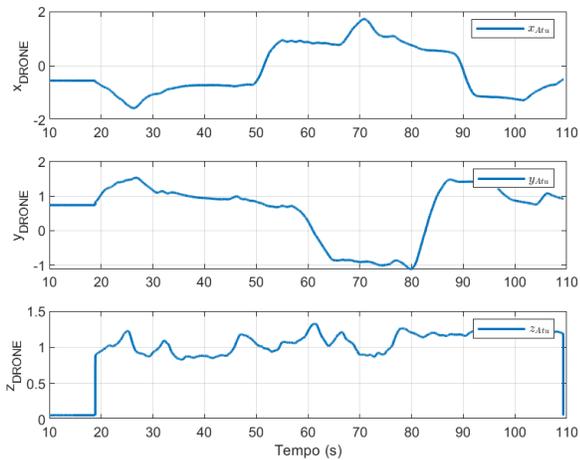


Figura 11: Posição do Bebop durante o experimento 2.

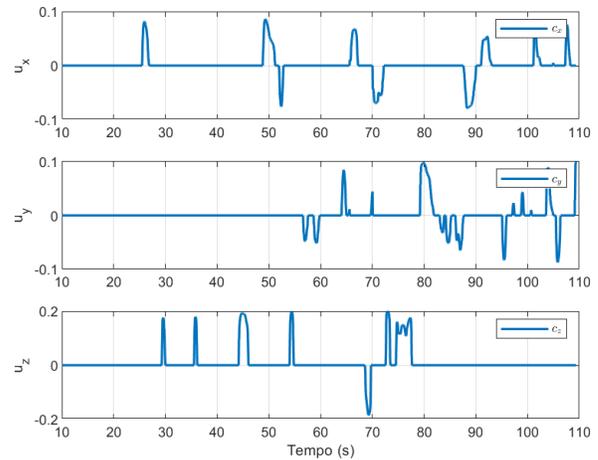


Figura 13: Sinais de controle utilizados no experimento 2.

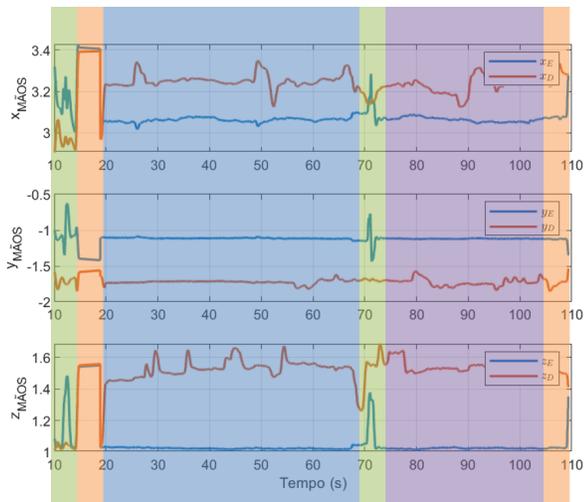


Figura 12: Posição da mãos durante o experimento 2, direita (vermelho) e esquerda (azul).

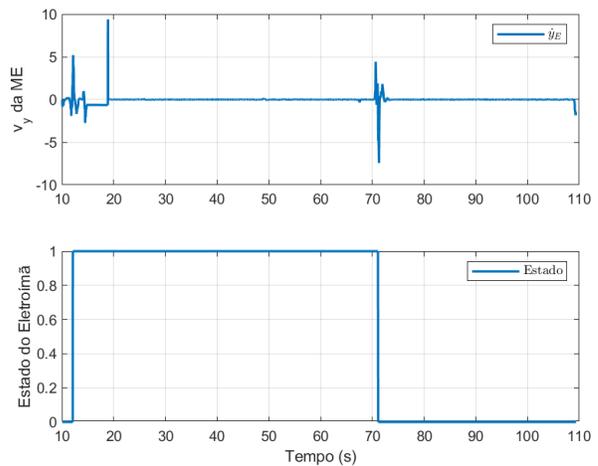


Figura 14: Velocidade da mão esquerda em y e estado do eletroímã no experimento 2.

respectivamente. Em outras palavras, os instantes que precedem e sucedem a decolagem e aterrissagem, respectivamente, são aqueles onde a altura do drone são próximas de zero.

O controle torna-se evidente na Figura 9, sendo possível observar o seu início por volta de 25 segundos. Nela, destaca-se o sinal de controle utilizado, onde C_x , C_y e C_z representam, respectivamente, os sinais referentes ao ângulo de arfagem, ângulo de rolagem e propulsão vertical. Observa-se os sinais de controle são enviados individualmente em cada direção, ou seja, não há multiplicidade dos comandos.

Por fim, a Figura 10 ilustra a funcionalidade do eletroímã acionado pela mão esquerda. Nela, é possível verificar os momentos em que o eletroímã é acionado, correspondendo ao pico de velocidade positiva, e o instante em que é desacionado, representando o pico de velocidade negativa. Tal ocorrência é observada nos instantes 60 e 180, respectivamente. Observação: Conforme evidenciado no vídeo do experimento, é perceptível um atraso entre a comutação do eletroímã para a posição "ligado" e o subsequente acoplamento da carga.

Essa situação decorre da complexidade na estabilização do drone na posição desejada.

De maneira semelhante, para o experimento 2, foram gerados os gráficos de posição do Bebop, posição das mãos, sinal de controle e atuação do eletroímã, conforme apresentado nas Figuras 11, 12, 13 e 14, respectivamente. Observa-se que, neste experimento, o tempo de execução foi menor, uma vez que não houve a necessidade de acoplamento com a carga após a decolagem (*take off*), pois a carga já estava previamente acoplada ao drone. Adicionalmente, o drone retorna para a plataforma de partida, fazendo com que os valores iniciais de X e Y se aproximem dos finais. É importante notar que o sinal de decolagem ocorre por volta de 15 segundos, enquanto o de aterrissagem ocorre em torno de 110 segundos. Além disso, a comutação para acoplar ocorre antes da decolagem, aproximadamente aos 20 segundos. Por outro lado, o sinal de desacoplamento ocorre próximo ao segundo 70.

Quando o drone se encontra distante da posição desejada, é empregado um sinal de controle mais elevado para alcançar

rapidamente o destino. À medida que se aproxima do ponto desejado, a fim de prevenir um sobressinal, ou seja, evitar que o drone ultrapasse a posição desejada, é enviado um sinal de controle no sentido oposto ao anterior para interromper o movimento. Uma vez em uma condição de quase repouso, um ajuste fino é realizado para atingir precisamente a posição de destino. Esta situação pode ser observada em ambos experimentos, nos picos de controle simultâneos em sentidos contrários (vide Figuras 9 e 13).

IV. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos nesta pesquisa estão em consonância com a teoria mencionada anteriormente, e eram esperados dada a crescente importância da interação humano-robô, especialmente no aumento da demanda pela utilização de VANTs em diversas atividades cotidianas. Essa tendência pode ser associada a uma maior similaridade com as interações gestuais comumente observadas entre seres humanos.

Outro aspecto de extrema relevância abordado nesta pesquisa está relacionado à referência do drone em comparação com a do operador. Esse fenômeno é evidenciado pela facilidade aumentada no manuseio de VANTs com atuação de câmeras, uma vez que, apesar da distorção em relação ao referencial global (expresso, nesta pesquisa, pelo referencial do *OptiTrack*), a teleoperação aproxima o referencial do operador ao do VANT. Esse alinhamento resulta não apenas em uma maior assimilação, mas também em uma melhoria na precisão do controle.

Outro aspecto relevante a ser destacado é a complexidade no acoplamento do eletroímã à carga. No prosseguimento desta linha de pesquisa, para trabalhos futuros, sugere-se a investigação da implementação de uma atenuação logarítmica no ganho do sinal de controle do Bebop quando a carga entra no campo de visão do operador. Essa abordagem visa facilitar o ajuste preciso de posição e, conseqüentemente, otimizar o acoplamento magnético da carga ao drone. Em termos simples, a proposta contempla a redução gradual dos valores de ganho à medida que o drone se aproxima da carga, podendo incorporar outro gesto para a comutação ou aplicar um processamento de imagem adequado para esse propósito. Essa inovação apresenta o potencial de aprimorar a eficiência e a precisão da teleoperação, proporcionando uma operação mais suave e intuitiva durante o procedimento de acoplamento magnético.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fapemig pelo suporte financeiro dado à realização deste projeto. Felipe Rezende também agradece a Universidade Federal de Viçosa, Brasil, e ao Núcleo de Especialização em Robótica (NERo) da UFV pelo suporte a sua participação neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] P. Kotaru, G. Wu, and K. Sreenath, "Differential-flatness and control of quadrotor (s) with a payload suspended through flexible cable (s)," in *2018 Indian Control Conference (ICC)*. IEEE, 2018, pp. 352–357.
- [2] S. Tang, V. Wüest, and V. Kumar, "Aggressive flight with suspended payloads using vision-based control," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 3, no. 2, pp. 1152–1159, 2018.
- [3] M. E. Guerrero, D. Mercado, R. Lozano, and C. García, "Passivity based control for a quadrotor uav transporting a cable-suspended payload with minimum swing," in *2015 54th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*. IEEE, 2015, pp. 6718–6723.
- [4] A. A. Ravankar, A. Ravankar, Y. Kobayashi, and T. Emaru, "Autonomous mapping and exploration with unmanned aerial vehicles using low cost sensors," *Multidisciplinary digital publishing institute proceedings*, vol. 4, no. 1, p. 44, 2018.
- [5] Z. Xu, D. Deng, and K. Shimada, "Autonomous uav exploration of dynamic environments via incremental sampling and probabilistic roadmap," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 6, no. 2, pp. 2729–2736, 2021.
- [6] N. Mahdoui, V. Frémont, and E. Natalizio, "Communicating multi-uav system for cooperative slam-based exploration," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 98, pp. 325–343, 2020.
- [7] F. Vanegas, K. J. Gaston, J. Roberts, and F. Gonzalez, "A framework for uav navigation and exploration in gps-denied environments," in *2019 IEEE Aerospace Conference*. IEEE, 2019, pp. 1–6.
- [8] M. Krizmancic, B. Arbanas, T. Petrovic, F. Petric, and S. Bogdan, "Cooperative aerial-ground multi-robot system for automated construction tasks," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 5, no. 2, pp. 798–805, 2020.
- [9] J. J. Roldán, M. A. Olivares-Méndez, J. del Cerro, and A. Barrientos, "Analyzing and improving multi-robot missions by using process mining," *Autonomous Robots*, vol. 42, no. 6, pp. 1187–1205, 2018.
- [10] J. J. Roldán, E. Peña-Tapia, P. Garcia-Aunon, J. Del Cerro, and A. Barrientos, "Bringing adaptive and immersive interfaces to real-world multi-robot scenarios: Application to surveillance and intervention in infrastructures," *Ieee Access*, vol. 7, pp. 86 319–86 335, 2019.
- [11] L. R. Salinas, J. Gimenez, C. Rosales, and D. C. Gandolfo, "Null-space-based path-following control for cooperative payload transport using multiple rotorcraft uavs," in *2018 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*. IEEE, 2018, pp. 631–638.
- [12] A. S. Brandão, V. T. L. Rampinelli, F. N. Martins, M. Sarcinelli-Filho, and R. Carelli, "The multilayer control scheme: A strategy to guide n-robots formations with obstacle avoidance," *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, vol. 26, no. 3, pp. 201–214, 2015.
- [13] R. Zhang, Y. Hu, K. Zhao, and S. Cao, "A novel dual quaternion based dynamic motion primitives for acrobatic flight," in *2021 5th International Conference on Robotics and Automation Sciences (ICRAS)*. IEEE, 2021, pp. 165–171.
- [14] C. O. Barcelos, L. A. Fagundes-Júnior, D. K. D. Villa, M. Sarcinelli-Filho, A. P. Silvatti, D. C. Gandolfo, and A. S. Brandão, "Robot formation performing a collaborative load transport and delivery task by using lifting electromagnets," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 2, p. 822, 2023.
- [15] M. A. Goodrich, A. C. Schultz *et al.*, "Human-robot interaction: a survey," *Foundations and Trends® in Human-Computer Interaction*, vol. 1, no. 3, pp. 203–275, 2008.
- [16] A. De Santis, B. Siciliano, A. De Luca, and A. Bicchi, "An atlas of physical human-robot interaction," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 43, no. 3, pp. 253–270, 2008.
- [17] A. S. Brandão and A. G. Caldeira, "Modeling and development of a spoken natural language interface for autonomous robot interaction," in *2018 Latin American Robotic Symposium, 2018 Brazilian Symposium on Robotics (SBR) and 2018 Workshop on Robotics in Education (WRE)*. IEEE, 2018, pp. 464–468.
- [18] Y. Lim, N. Pongsakornsathien, A. Gardi, R. Sabatini, T. Kistan, N. Ezer, and D. J. Bursch, "Adaptive human-robot interactions for multiple unmanned aerial vehicles," *Robotics*, vol. 10, no. 1, p. 12, 2021.
- [19] D. K. Villa, A. S. Brandao, and M. Sarcinelli-Filho, "A survey on load transportation using multirotor uavs," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 98, pp. 267–296, 2020.
- [20] A. S. Brandão, D. Gandolfo, M. Sarcinelli-Filho, and R. Carelli, "Pytol maneuvers guided by a high-level nonlinear controller applied to a rotorcraft machine," *European Journal of Control*, vol. 20, no. 4, pp. 172–179, 2014.
- [21] D. K. D. Villa, A. S. Brandão, R. Carelli, and M. Sarcinelli-Filho, "Cooperative load transportation with two quadrotors using adaptive control," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 129 148–129 160, 2021.
- [22] I. H. B. Pizetta, A. S. Brandao, and M. Sarcinelli-Filho, "A hardware-in-the-loop platform for rotary-wing unmanned aerial vehicles," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 84, pp. 725–743, 2016.

- [23] L. A. Fagundes-Junior, C. O. Barcelos, D. C. Gandolfo, and A. S. Brandão, "Bdp-uafly system: A platform for the robocup brazil open flying robot trial league," in *2023 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*. IEEE, 2023, pp. 1021–1028.