

PLANEJAMENTO DE TRAJETÓRIA PARA UM ROBÔ MÓVEL USANDO IMAGENS CAPTURADAS POR UM VANT: CONCEITOS E RESULTADOS PRELIMINARES

FABRICIO BORTOLINI DE SÁ*, MARINO FRANK CYPRIANO*, FELIPPE MENDONÇA DE QUEIROZ*,
RAQUEL FRIZERA VASSALLO*, FLÁVIO GARCIA PEREIRA†, ANSELMO FRIZERA NETO*

**Departamento de Engenharia Elétrica - Universidade Federal do Espírito Santo - UFES. Av.
Fernando Ferrari, 514, Goiabeiras, Vitória, ES, Brasil. CEP 29075-910.*

†*Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo - IFES - Campus Serra -
Rodovia ES-010, km 6,5 - Manguinhos - Serra, ES - Brasil. CEP 29173-087.*

Emails: fabricio.sa@ufes.br, marino@ele.ufes.br, mendonca.felippe@gmail.com,
raquel@ele.ufes.br, flavio.garcia@ifes.edu.br, anselmo@ele.ufes.br

Abstract— This paper presents the preliminary results for a cooperation between a drone and a terrestrial robot based on non-linear controllers and image processing. The idea is to implement a system that allows the terrestrial robot to navigate on a map, known *a priori*, and to avoid obstacles, recalculating the route whenever the drone or the terrestrial robot identifies an obstruction on the robot's path. The main advantage that we get through the cooperation with an UAV (Unmanned Aerial Vehicle) is to optimize the navigation time of the terrestrial robot by using the images captured by the drone. Such cooperation allows early detection of problems and landmarks on the robot's route. As a first step, in this article we present the controllers designed for the aerial and terrestrial robots, as well as the strategy adopted to calculate and define the best route for robot navigation.

Keywords— Mobile Robots, Path Controlling, Unmanned Aerial Vehicles, Airplane control.

Resumo— Este trabalho apresenta os resultados preliminares para uma proposta de cooperação entre um robô aéreo e um robô terrestre baseada em técnicas de controle não linear e processamento de imagens. A ideia é implementar um sistema que permita ao robô terrestre a navegação por um mapa previamente conhecido sendo capaz de desviar de obstáculos, e de recalcular a rota quando o robô aéreo, ou mesmo o terrestre, identificar uma obstrução no caminho. A vantagem que se pretende obter através da cooperação com um VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado) é a otimização do tempo de navegação do robô terrestre no mapa ao se utilizar as imagens capturadas pelo robô aéreo. Essa cooperação permitirá a detecção precoce de adversidades e *landmarks* na rota do veículo terrestre. Como etapa inicial deste projeto, neste artigo são apresentados os controladores projetados para ambos robôs assim como a estratégia adotada para o cálculo e escolha da melhor rota de navegação.

Palavras-chave— Robôs Móveis, Controlador de Caminho, Veículos aéreos não tripulados, Controle de aeronaves.

1 Introdução

Há mais de quinze anos, o tema de cooperação de robôs para a realização de tarefas em conjunto tem sido abordado com grande interesse nas pesquisas de robótica. Os primeiros trabalhos envolviam poucos robôs e, à medida que os avanços tecnológicos e barateamento de produtos eletrônicos permitiram, surgiram trabalhos envolvendo um maior número de agentes ou mesmo enxames de robôs (Parker, 2000).

A maioria dos trabalhos utilizavam grupos de robôs terrestres para tarefas de mapeamento e exploração (Burgard et al., 2005), vigilância e monitoramento (Marjovi et al., 2009), transporte cooperativo de cargas (Yamashita et al., 2000; Bai and Wen, 2010) e deslocamento em formação (Desai et al., 2001; Raghuwaiya et al., 2011).

Atualmente, a fabricação e a comercialização de VANTs (Veículos Aéreos Não Tripulados), a baixo custo, tem possibilitado a extensão dos trabalhos de robótica cooperativa para grupos de robôs aéreos e a utilização de grupos híbridos,

envolvendo robôs aéreos e terrestres para a execução de tarefas.

Grupos de robôs aéreos têm sido usados em tarefas como mapeamento e exploração (Bryson and Sukkarieh, 2007; Artieda et al., 2009; Heng et al., 2011), controle de formação (Turpin et al., 2012), detecção e monitoramento de incêndios florestais (Ollero et al., 2005) e até mesmo transporte de cargas (Mellinger et al., 2010).

A utilização de robôs aéreos em cooperação com robôs terrestres pode trazer uma série de vantagens quando comparada às soluções que usam apenas um tipo deles. Uma dessas vantagens é que os robôs aéreos possuem um grande campo de visão, podendo capturar imagens com diferentes alcances visuais à medida que variam sua altura. Além disso, podem inspecionar mais rapidamente grandes áreas e visualizar regiões que normalmente não são alcançadas pelos robôs terrestres. Entretanto, não são capazes de localizar e realizar medidas com grande precisão devido a limitações em suas imagens e altura. Por outro lado, os robôs terrestres podem se aproximar de alvos de interesse, obter informações

mais detalhadas, além de interagir diretamente com objetos do ambiente.

Em (Yu et al., 2001), robôs aéreos e terrestres são empregados para planejar trajetórias e rastrear alvos móveis cooperativamente. Já em (Garzón et al., 2013), um robô terrestre e um robô aéreo cooperam e compartilham dados sensoriais para explorar, mapear e navegar em um ambiente desconhecido. Outros exemplos de utilização de robôs aéreos e terrestres para mapeamento e exploração podem ser vistos em (How et al., 2009; Kim et al., 2010).

Existem ainda as aplicações de exploração e resgate como em (Michael et al., 2012) no qual pesquisadores usam um quadricóptero e um robô terrestre para explorar os três andares de um prédio após um desastre. A ideia é mostrar que, além de ser viável aplicar esse tipo de cooperação nas situações de desastre, quando se usam os dois robôs conjuntamente, obtém-se vantagens que superam o uso de cada um separadamente nesse tipo de tarefa.

Também em (Longo et al., 2007), um grupo de robôs é usado para ajudar na vigilância e nos momentos de crises em ambientes industriais e regiões vulcânicas, por exemplo, no caso de vazamento de substâncias tóxicas, explosões em indústrias petroquímicas e situações de riscos de explosões vulcânicas. Robôs aéreos são usados para uma primeira inspeção da área, para estimar a gravidade da situação e para coordenar o trabalho dos robôs terrestres. Estes, por sua vez, fazem o trabalho de aproximação, de medidas e de atuações no local atingido, além de carregarem robôs escaladores para serem liberados perto de prédios para a inspeção de superfícies verticais.

Além de mapeamento, exploração e resgate, esse tipo de cooperação pode ser aplicado em atividades agrícolas e monitoramento de áreas florestais ou urbanas, usando robôs aéreos para orientar a movimentação e atuação de robôs terrestres.

Dentro desse contexto de cooperação entre robôs aéreos e terrestres, o objetivo deste trabalho consiste em aplicar técnicas de controle e visão computacional, baseadas nas informações de odometria, GPS e imagens capturadas por câmeras instaladas em um VANT e em um veículo terrestre, para navegação de robôs em um mapa previamente conhecido. A partir da realimentação visual obtida com a câmera a bordo de um robô aéreo, amplia-se a capacidade de navegação do robô terrestre, ao mesmo tempo que se mapeiam os obstáculos unindo-se a informação da câmera com o sistema de posicionamento do robô em terra. A utilização da câmera acoplada ao VANT facilita a detecção de obstáculos presentes na rota de navegação do robô, o tipo do terreno a ser atravessado e a presença de obstruções ou não, sinalizando uma mudança de rota.

A Figura 1 ilustra um exemplo de navegação em cooperação entre um robô aéreo e um terrestre, assim como se pretende desenvolver nesse trabalho. A ideia é implementar um sistema que permita ao robô terrestre a navegação pelo mapa sendo capaz de desviar de obstáculos, e de recalcular a rota quando o robô aéreo, ou mesmo o terrestre, identificar uma obstrução no caminho.

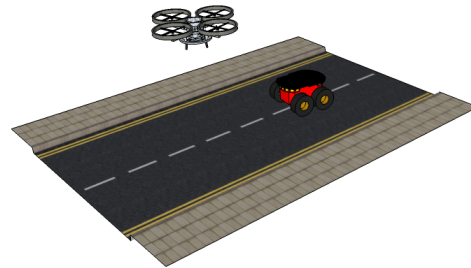


Figura 1: Ilustração dos robôs aéreo e terrestre navegando em cooperação.

Como primeiro passo, é necessário desenvolver os controladores e estratégia de navegação para cada um dos robôs separadamente. Dessa forma, neste artigo são apresentados os controladores projetados para ambos robôs assim como a estratégia adotada para o cálculo e escolha da melhor rota de navegação. Vale ressaltar que neste artigo ainda não serão abordadas as etapas de processamento de imagens necessárias para este projeto.

O restante deste artigo está organizado como: a Seção 2 apresenta a metodologia utilizada para calcular e recalculas as rotas livres. A Seção 3 identifica os métodos e controladores desenvolvidos para permitir que o robô terrestre navegue com segurança até o seu destino, enquanto a Seção 4 mostra o modelo estimado do VANT e o método utilizado para navegação aérea. Em sequência, na Seção 5, são apresentados os resultados das simulações realizadas, e na Seção 6 as conclusões e as propostas de trabalhos futuros.

2 Planejamento da Trajetória

Desde os anos 1980, os problemas de planejamento de movimento para robôs móveis tornaram-se um importante tópico de pesquisa que atraíram a atenção de muitos pesquisadores, os quais trabalharam extensivamente para obter métodos eficientes para resolver esses problemas (Garrido et al., 2006).

Existem diversos métodos para determinação de caminho em robótica móvel. Esse problema tem sido investigado e um grande número de abordagens heurísticas e não-heurísticas envolvendo movimento em duas ou três dimensões podem ser consideradas (Lumelsky

and Stepanov, 1986). Algumas das aplicações mais comuns utilizadas para planejamento de trajetória são *Roadmap* como Grafo de Visibilidade, Grafo de Voronoi (Bhattacharya and Gavrilova, 2007; Mohammadi and Hazar, 2009) e *Silhouette*; Decomposição em Células como Decomposição Exata, Decomposição Aproximada e Decomposição Hierárquica. Além dessas, também são utilizados alguns métodos mais modernos como Algoritmos Genéticos (Gao et al., 2005; Sariff and Buniyamin, 2010), Redes Neurais (Bin et al., 2004) e Otimização de Colônia de Formigas (Bell and McMullen, 2004; Brand et al., 2010; Gigras and Gupta, 2012).

Neste trabalho, parte-se do princípio que o mapa onde os robôs navegarão é previamente conhecido. A construção do mapa foi realizada de forma topológica utilizando-se somente nós, identificados por *landmarks*, conectados por caminhos, conforme Figura 2. No mapa ilustrado, por exemplo, o nó número 1 apresenta ligação somente com os nós 2 e 4. Para cada um desses possíveis caminhos é atribuído um custo, que a princípio é diretamente proporcional à distância entre os nós em questão. Em relação aos outros pontos do mapa, o ponto 1 apresenta custo infinito. Posteriormente pretende-se agregar mais custos aos caminhos, por exemplo, informações de trânsito e condições físicas de estradas.

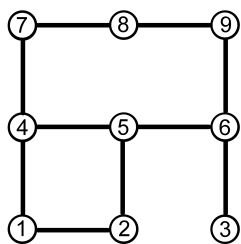


Figura 2: Exemplo de mapa utilizado no trabalho.

Uma das intenções deste projeto é futuramente extrapolar a estratégia de cooperação e navegação para mapas de cidades e estradas obtidos via satélite com a identificação de ruas, estradas e endereços de destinos desejados. Assim, conhecendo-se o mapa, a posição inicial e o destino desejado, poder-se-á definir a rota de melhor custo-benefício e, durante a navegação, esse trajeto ser atualizado conforme a adversidades do caminho (trânsito intenso, manutenção nas vias, manifestações e acidentes).

Neste trabalho, para calcular o caminho de menor custo, é utilizado o Algoritmo de Dijkstra (Dijkstra, 1959). O robô conhece a sua localização inicial e, ao receber o destino desejado, o algoritmo determina o caminho de menor custo para realização da navegação. Caso ocorra a detecção de obstáculos terrestres, tanto por parte do robô aéreo quanto por parte do robô terrestre, que impossibilitem a passagem pela rota que está

sendo seguida, o programa encaminha o robô para o último nó pelo qual passou e recalcula uma nova rota a partir daquele ponto.

3 Navegação do Robô Terrestre

O objetivo principal do robô terrestre é alcançar uma posição em um mapa, passando por pontos determinados pelo cálculo da trajetória. Para realizar a navegação, foi implementado um controlador não linear de posição final com desvio de obstáculos. O controlador recebe como ponto de origem as coordenadas do nó onde o veículo se encontra, e como destino as coordenadas da próxima *landmark* da rota definida pelo Algoritmo de Dijkstra, até que o objetivo final seja alcançado. A Figura 3 mostra o robô terrestre com velocidade linear v , velocidade angular ω e ângulo de orientação φ a uma distância ρ do seu destino.

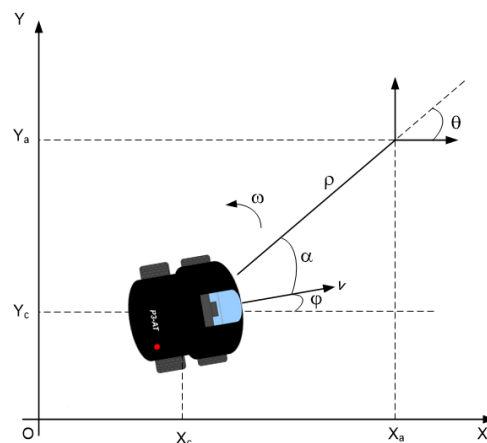


Figura 3: Controlador de posição do robô terrestre.

O controlador de posição não linear projetado para controlar as suas velocidades é baseado em (Secchi, 1998) e apresentado na Equação 1.

$$\begin{cases} v = k_v \tanh(\rho) \cos(\alpha) \\ \omega = k_\omega \alpha + \frac{k_v \tanh(\rho) \sin(\alpha) \cos(\alpha)}{\rho} \end{cases}, \quad (1)$$

onde k_v e k_ω são ganhos positivos para ajustes do controlador.

Os obstáculos são identificados por um laser que faz uma varredura de 180°. Quando um feixe detecta um obstáculo, o algoritmo desloca o destino da navegação temporariamente, até que o obstáculo seja ultrapassado. Caso exista um obstáculo que impossibilite a passagem do robô por aquele caminho, uma nova rota é determinada.

Apesar do robô terrestre ser capaz de realizar a tarefa de navegação independente das informações provenientes do VANT, a cooperação com o robô aéreo permitirá a detecção prévia de adversidades e *landmarks* na rota do veículo terrestre. Dessa forma, as informações visuais aéreas poderão ser utilizadas

para agilizar a navegação do robô terrestre, avisando da necessidade de um recálculo de rota ou confirmando a aproximação do robô a *landmarks* presentes no caminho.

Será implementado um algoritmo para identificação das *landmarks*, baseado nas imagens capturadas pela câmera do robô terrestre. Isso permitirá não só a confirmação da localização do robô mas também a correção dos erros de odometria acumulados durante o caminho. Para diminuir o custo do processamento durante a navegação do veículo, as imagens só serão processadas quando o robô se aproximar de um nó.

4 Navegação do Robô Aéreo

O objetivo principal do robô aéreo é a identificação de obstruções no caminho por onde passará o veículo terrestre. Dessa forma, assim como o robô terrestre, o aéreo necessita de um controlador para navegar entre os nós do mapa e de um algoritmo de detecção de obstruções utilizando imagens provenientes de uma câmera instalada no mesmo.

Foram propostos três controladores para o robô aéreo. Os dois primeiros são controladores de posição final, que têm a finalidade de guiar o robô entre os pontos fornecidos pelo planejamento de trajetória. Porém, para os casos em que o VANT alcança o ponto mas não consegue encontrar a *landmark*, foi projetado um controlador de caminho, para que o veículo aéreo percorra uma circunferência em busca da marcação.

O modelo utilizado como VANT foi o Ar.Drone, fabricado pela Parrot. Para desenvolver um controlador para esse robô foi necessário modelar o seu sistema. O modelo já possui um controle interno que controla os seus ângulos de *pitch*, *roll* e *yaw* e a sua velocidade vertical. A técnica utiliza um modelo simplificado do quadricóptero onde são considerados somente o *yaw* e as velocidades como variáveis de estado (Krajník et al., 2011).

Após a realização de experimentos para determinação do modelo *speed-pitch* foram projetados os controladores de posição final e de caminho. Para simplificar o controle do VANT, foi feita a consideração de que ele sempre navega em um único plano de altura.

4.1 Controlador de Posição Final

Foram projetados dois controladores de posição final. O primeiro trata o veículo aéreo como um robô não holonômico, desconsiderando portanto deslocamentos laterais. A Figura 4 mostra um VANT com velocidade linear v , velocidade angular ω e ângulo de orientação igual a ψ .

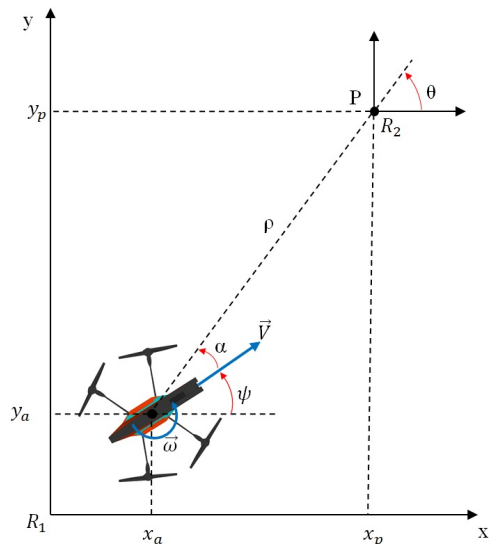


Figura 4: Controlador de posição do modelo não holonômico.

Considerando θ a orientação final, α o erro de orientação e ρ o erro de distância, foi projetado o controlador da Equação 2.

$$\begin{cases} v = k_v \tanh(k_\rho \cdot \rho) \cos(\alpha) \\ \omega = k_\omega \tanh(k_\alpha) - \frac{k_v \tanh(k_\rho \cdot \rho) \cos(\alpha) \sin(\alpha)}{\rho}, \end{cases} \quad (2)$$

onde k_ω , k_v , k_ρ , k_α são ganhos positivos para ajustes do controlador.

O segundo controlador considera um robô holonômico. Dessa maneira o deslocamento do VANT é feito por uma soma vetorial das velocidades frontal e lateral. Na Figura 5 são destacadas as velocidades v_x e v_y do modelo.

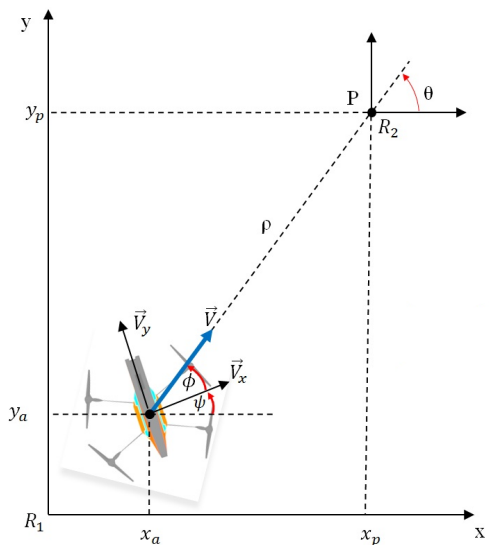


Figura 5: Controlador de posição do modelo holonômico.

A Equação 3 mostra o controlador não linear

para as velocidades v_x e v_y , e a orientação final θ .

$$\begin{cases} v_x = k_v \tanh(k_\rho \cdot \rho) \cos(\phi) \\ v_y = k_v \tanh(k_\rho \cdot \rho) \sin(\phi) \\ \theta = \arctan\left(\frac{y_p - y_a}{x_p - x_a}\right), \end{cases} \quad (3)$$

onde k_v e k_ρ são ganhos positivos para ajustes do controlador, e (x_a, y_a) e (x_p, y_p) são coordenadas cartesianas dos pontos inicial e final, respectivamente.

4.2 Controlador de Caminho

O controlador de caminho foi projetado para permitir que o robô siga um caminho com velocidade tangencial e orientação constantes, conforme apresentado na Figura 6.

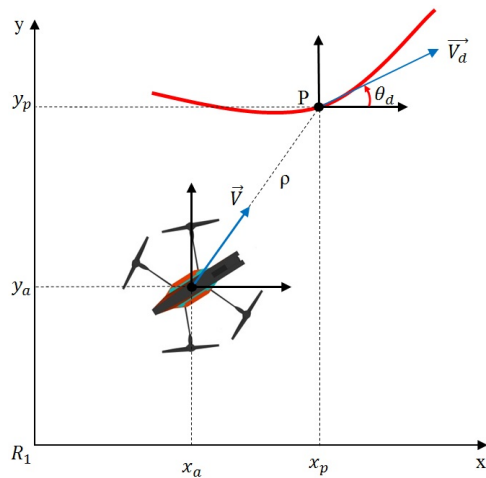


Figura 6: Controlador de caminho.

A Equação 4 determina as velocidades v_x e v_y do VANT em função dos erros de posição e da velocidade e ângulos desejados.

$$\begin{cases} v_x = v_d \cos(\theta_d) + k_{x_1} \tanh(k_{x_2} \cdot erro_x) \\ v_y = v_d \sin(\theta_d) + k_{y_1} \tanh(k_{y_2} \cdot erro_y) \\ erro_x = x_p - x_a \\ erro_y = y_p - y_a, \end{cases} \quad (4)$$

onde v_d é a velocidade tangencial desejada, θ é o ângulo desejado, k_{x_1} , k_{x_2} , k_{y_1} e k_{y_2} são ganhos positivos para ajustes do controlador e (x_a, y_a) e (x_p, y_p) são coordenadas cartesianas dos pontos inicial e final, respectivamente.

5 Simulação

Para testar os algoritmos desenvolvidos tanto para o robô aéreo quanto para o terrestre foram realizadas simulações. Inicialmente são apresentados os resultados para o cálculo de rota e o controlador do veículo terrestre, e logo a seguir, os testes dos controladores do robô aéreo.

5.1 Robô Terrestre

Para simular o robô terrestre, foi desenvolvido um ambiente gráfico de simulação. Na Figura 7, pode-se observar o mapa utilizado. Em seu interior estão destacados os nós (círculos) e os caminhos (linhas que interligam os círculos) utilizados nos algoritmos de determinação de rota e navegação.

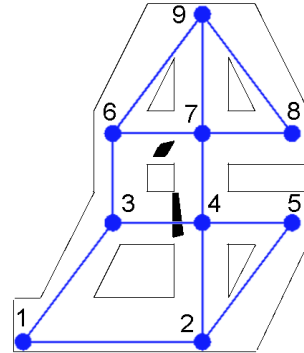


Figura 7: Mapa utilizado nas simulações.

A Figura 8 apresenta o resultado de um teste de navegação no mapa. O círculo maior, de cor cinza, destaca o objetivo a ser alcançado pelo robô. Como pode ser visto na Figura 8-(a), a rota de menor custo é formada pelos caminhos 1-3 e 3-4. Ainda na mesma figura, é destacado o momento no qual o robô detecta uma obstrução da rota entre o trecho 3-4.

Após a identificação do bloqueio, o robô retorna ao nó 3 e recalcula uma nova rota de menor custo, desconsiderando o caminho 3-4. Conforme apresentado na Figura 8 (b), a nova rota é formada pelos caminhos 3-6, 6-7 e 7-4. Pode-se observar também que o veículo realizou um desvio de obstáculo entre os pontos 6-7.

Completando a simulação, a Figura 8 (c) mostra o robô terrestre atingindo o ponto final.

5.2 Robô Aéreo

O primeiro controlador simulado foi o de posição final, que considera um modelo não-holonômico de movimento. A Figura 9 (a) mostra o caminho percorrido pelo robô, com origem no ponto (0 m, 0 m) e destino no ponto (10 m, 10 m). O erro de posição apresentado na Figura 9 (b) tende a zero. As Figuras 9 (c) e 9 (d) apresentam as velocidades angular e linear, respectivamente. Na segunda simulação, foi testado o controlador para o modelo de movimento holonômico, considerando os mesmos pontos de origem e destino anterior. A Figura 10 (a) apresenta o caminho percorrido pelo robô.

A Figura 10 (b) mostra que o erro tende a zero, enquanto as Figuras 10 (c) e (d) apresentam o comportamento das velocidades nos eixos x e y

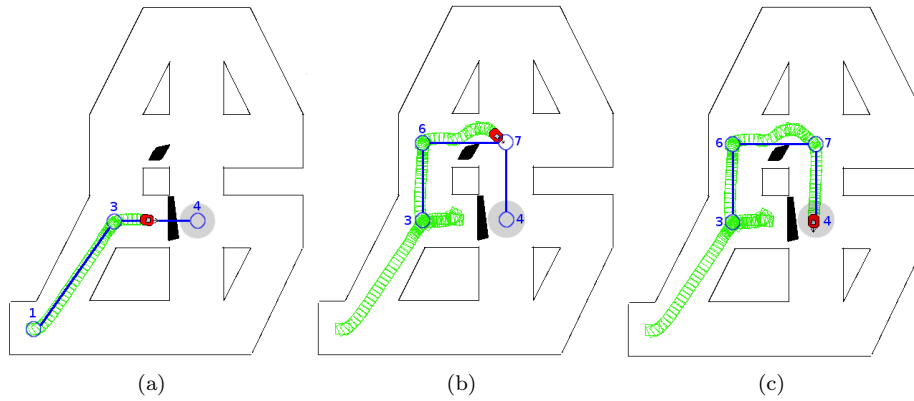


Figura 8: Simulação do robô terrestre: Identificação de obstrução (a), desvio de obstáculo (b) e destino alcançado (c).

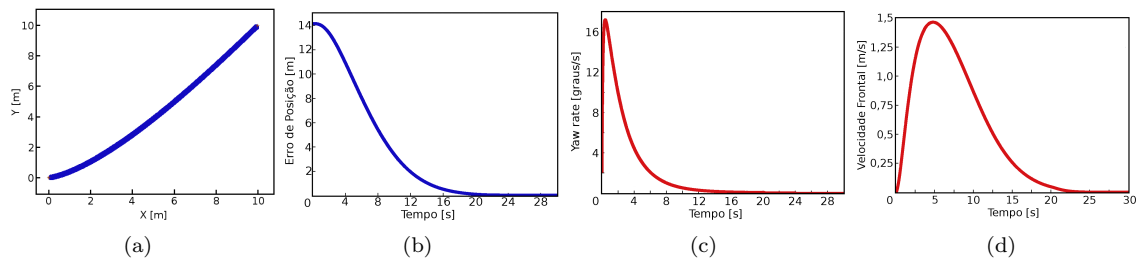


Figura 9: Caminho percorrido (a), erro de posição (b), velocidade angular (c) e velocidade linear (d).

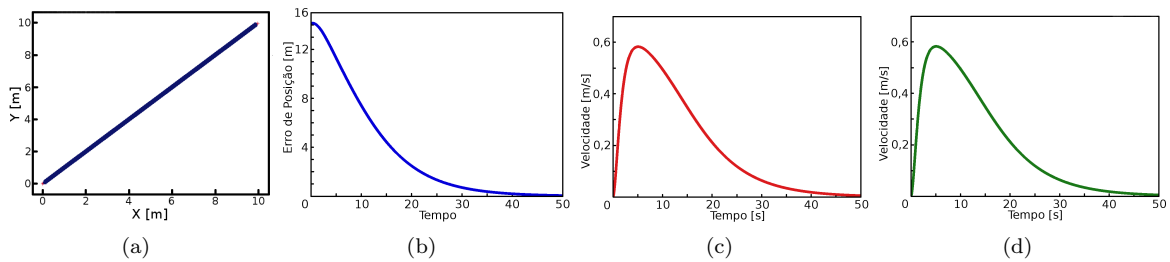


Figura 10: Caminho percorrido (a), erro de posição (b), velocidade angular (c) e velocidade linear (d).

durante o caminho. Como o destino está a um ângulo de 45° , as duas velocidades são idênticas.

A última simulação utiliza o controlador de caminho para o seguimento de uma circunferência de raio 10 m. A Figura 11 (a) apresenta a circunferência desejada em linha contínua, e o caminho realizado pelo robô em linha tracejada. O erro de posição é apresentado na Figura 11 (b) e as velocidades frontal, linha de maior espessura, e lateral, linha de menor espessura, são apresentadas na Figura 11 (c).

6 Conclusões

Este trabalho apresenta uma proposta de cooperação entre um robô aéreo e um robô terrestre baseada em técnicas de controle não linear e em processamento de imagens. A ideia é navegar em um mapa conhecido por ambos robôs, utilizando as imagens capturadas pelo VANT para otimizar o tempo de navegação do

robô terrestre quando são identificados obstáculos intransponíveis pelo mesmo.

Conforme mencionado anteriormente, neste artigo foram apresentados apenas os controladores e a estratégia de definição de rotas para os robôs envolvidos nessa tarefa de cooperação, o que representa a primeira etapa em direção à navegação conjunta.

O controlador com desvio de obstáculos proposto para o robô terrestre e a técnica utilizada para cálculo e recálculo de rotas foram simulados e apresentaram resultados satisfatórios.

O VANT foi modelado de forma simplificada considerando-se apenas o ângulo de yaw e as velocidades como variáveis de estado. Foram desenvolvidos três controladores para a navegação do robô aéreo, dois de posição final e um de caminho, com o objetivo de atender às diferentes necessidades de navegação do veículo. Todos foram simulados e também apresentaram resultados satisfatórios.

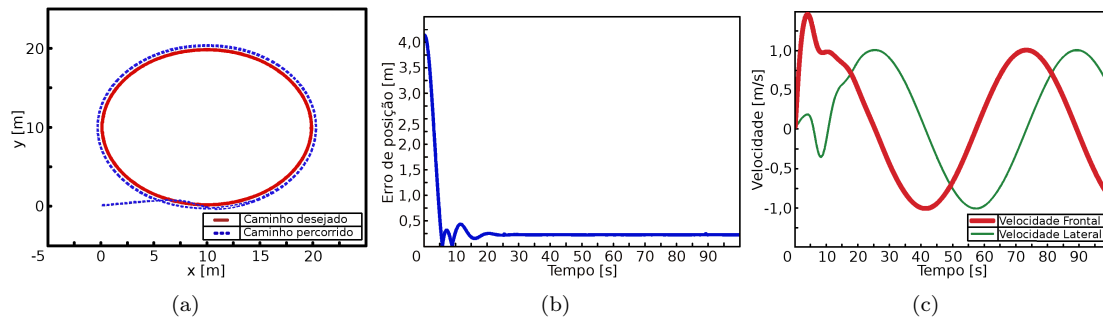


Figura 11: Variação da velocidade linear (a) e variação da velocidade angular.

O próximo passo será a inclusão do processamento de imagens em ambos os robôs para a realização da navegação em cooperação. O veículo terrestre terá de processar as imagens para detectar as *landmarks* durante o caminho, enquanto o VANT, além da detecção dessas marcas, também utilizará as imagens para detectar obstáculos terrestres.

Uma vez que se obtenha sucesso nos experimentos preliminares, a intenção será a realização de um experimento real com os robôs aéreo e terrestre em um ambiente amplo e *outdoor* onde poderão ser validados os controladores e testada a eficácia da estratégia de cooperação proposta.

Agradecimentos

À FAPES pelo apoio financeiro através do projeto N° 54693209/2011 e ao CNPQ pela bolsa de Mestrado cedida ao Fabricio Bortolini de Sá.

Referências

- Artieda, J., Sebastian, J. M., Campoy, P., Correa, J. F., Mondragón, I. F., Martínez, C. and Olivares, M. (2009). Visual 3-d slam from uavs, *J. Intell. Robotics Syst.* **55**(4-5): 299–321.
- Bai, H. and Wen, J. T. (2010). Cooperative load transport: A formation-control perspective., *IEEE Transactions on Robotics* **26**(4): 742–750.
- Bell, J. E. and McMullen, P. R. (2004). Ant colony optimization techniques for the vehicle routing problem, *Advanced Engineering Informatics* **18**(1): 41 – 48.
- Bhattacharya, P. and Gavrilova, M. (2007). Voronoi diagram in optimal path planning, *Voronoi Diagrams in Science and Engineering, 2007. ISVD '07. 4th International Symposium on*, pp. 38–47.
- Bin, N., Xiong, C., Zhang, L. and Wendong, X. (2004). Recurrent neural network for robot path planning., in K.-M. Liew, H. Shen, S. See, W. Cai, P. Fan and S. Horiguchi (eds), *PDCAT*, Vol. 3320 of *Lecture Notes in Computer Science*, Springer, pp. 188–191.
- Brand, M., Masuda, M., Wehner, N. and Yu, X.-H. (2010). Ant colony optimization algorithm for robot path planning, *Computer Design and Applications (ICCD), 2010 International Conference on*, Vol. 3, pp. V3–436–V3–440.
- Bryson, M. and Sukkarieh, S. (2007). Cooperative localisation and mapping for multiple uavs in unknown environments, *Aerospace Conference, 2007 IEEE*, pp. 1–12.
- Burgard, W., Moors, M., Stachniss, C. and Schneider, F. (2005). Coordinated multi-robot exploration, *IEEE Transactions on Robotics* **21**(3): 376–378.
- Desai, J. P., Ostrowski, J. P. and Kumar, V. (2001). Modeling and control of formations of nonholonomic mobile robots., *IEEE T. Robotics and Automation* **17**(6): 905–908.
- Dijkstra, E. W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs, *NUMERISCHE MATHEMATIK* **1**(1): 269–271.
- Gao, X.-G., Fu, X.-W. and Chen, D.-Q. (2005). A genetic-algorithm-based approach to uav path planning problem, *Proceedings of the 5th WSEAS International Conference on Simulation, Modelling and Optimization, SMO'05*, World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS), Stevens Point, Wisconsin, USA, pp. 523–527.
- Garrido, S., Moreno, L., Abderrahim, M. and Monar, F. M. (2006). Path planning for mobile robot navigation using voronoi diagram and fast marching, *IROS*, pp. 2376–2381.
- Garzón, M., ao Valente DavidZapata, J. and Barrientos, A. (2013). An aerial-ground robotic system for navigation and obstacle

- mapping in large outdoor areas, *Sensors* **13**(1): 1247–1267.
- Gigras, Y. and Gupta, K. (2012). Artificial intelligence in robot path planning, *International Journal of Soft Computing and Engineering* **2**: 471–474.
- Heng, L., Lee, G. H., Fraundorfer, F. and Pollefeys, M. (2011). Real-time photo-realistic 3d mapping for micro aerial vehicles., *IROS*, IEEE, pp. 4012–4019.
- How, J. P., Fraser, C., Kulling, K. C., Bertuccelli, L. F., Toupet, O., Brunet, L., Bachrach, A. and Roy, N. (2009). Increasing autonomy of uavs, *Robotics and Automation Magazine*, *IEEE* **16**(2): 43–51.
- Kim, B., Kaess, M., Fletcher, L., Leonard, J. J., Bachrach, A., Roy, N. and Teller, S. J. (2010). Multiple relative pose graphs for robust cooperative mapping., *ICRA*, IEEE, pp. 3185–3192.
- Krajn k, T., Von sek, V., Fiser, D. and Faigl, J. (2011). Ar-drone as a platform for robotic research and education., in D. Obdrz lek and A. Gottscheber (eds), *Eurobot Conference*, Vol. 161 of *Communications in Computer and Information Science*, Springer, pp. 172–186.
- Longo, D., Melita, D., Muscato, G. and Sessa, S. (2007). A mixed terrestrial aerial robotic platform for volcanic and industrial surveillance, *2007 IEEE International Workshop on Safety, Security*.
- Lumelsky, V. J. and Stepanov, A. (1986). Dynamic path planning for a mobile automaton with limited information on the environment, *Automatic Control, IEEE Transactions on* **31**(11): 1058–1063.
- Marjovi, A., Nunes, J. G., Marques, L. and de Almeida, A. T. (2009). Multi-robot exploration and fire searching., *IROS*, IEEE, pp. 1929–1934.
- Mellinger, D., Shomin, M., Michael, N. and Kumar, V. (2010). Cooperative grasping and transport using multiple quadrotors., in A. Martinoli, F. Mondada, N. Correll, G. Mermoud, M. Egerstedt, M. A. Hsieh, L. E. Parker and K. St y (eds), *DARS*, Vol. 83 of *Springer Tracts in Advanced Robotics*, Springer, pp. 545–558.
- Michael, N., Shen, S., Mohta, K., Mulgaonkar, Y., Kumar, V., Nagatani, K., Okada, Y., Kiribayashi, S., Otake, K., Yoshida, K., Ohno, K., Takeuchi, E. and Tadokoro, S. (2012). Collaborative mapping of an earthquake-damaged building via ground and aerial robots., *J. Field Robotics* **29**(5): 832–841.
- Mohammadi, S. and Hazar, N. (2009). A voronoi-based reactive approach for mobile robot navigation, in H. Sarbazi-Azad, B. Parhami, S.-G. Miremadi and S. Hessabi (eds), *Advances in Computer Science and Engineering*, Vol. 6 of *Communications in Computer and Information Science*, Springer Berlin Heidelberg, pp. 901–904.
- Ollero, A., Lacroix, S., Merino, L., Gancet, J., Wiklund, J., Remuss, V., Perez, I. V., Guti rrez, L. G., Viegas, D. X., Benitez, M. A. G., Mallet, A., Alami, R., Chatila, R., Hommel, G., Lechuga, F. J. C., Arrue, B. C., Ferruz, J., de Dios, J. R. M. and Caballero, F. (2005). Multiple eyes in the skies: architecture and perception issues in the comets unmanned air vehicles project., *IEEE Robot. Automat. Mag.* **12**(2): 46–57.
- Parker, L. E. (2000). Current state of the art in distributed robot systems, in L. E. Parker, G. Bekey and J. Barhen (eds), *Distributed Autonomous Robotic Systems 4*, Vol. 2606/2003, Springer, pp. 3–12.
- Raghuwaiya, K. S., Singh, S. and Vanualailai, J. (2011). Formation control of mobile robots, **5**(12): 1689 – 1694.
- Sariff, N. B. and Buniyamin, N. (2010). Genetic algorithm versus ant colony optimization algorithm - comparison of performances in robot path planning application., in J. Filipe, J. Andrade-Cetto and J.-L. Ferrier (eds), *ICINCO (1)*, INSTICC Press, pp. 125–132.
- Secchi, H. A. (1998). *Control de veh culos autoguiados con realimentaci n sensorial*, Master’s thesis, Facultad de Ingenier a de la Universidad Nacional de San Juan, San Juan - Argentina.
- Turpin, M., Michael, N. and Kumar, V. (2012). Trajectory design and control for aggressive formation flight with quadrotors., *Auton. Robots* **33**(1-2): 143–156.
- Yamashita, A., Fukuchi, M., Ota, J., Arai, T. and Asama, H. (2000). Motion planning for cooperative transportation of a large object by multiple mobile robots in a 3d environment., *ICRA*, IEEE, pp. 3144–3151.
- Yu, H., Beard, R., Argyle, M. and Chamberlain, C. (2001). Probabilistic path planning for cooperative target tracking using aerial and ground vehicles, *American Control Conference (ACC)*, San Francisco, CA, pp. 4673 – 4678.