

IDENTIFICAÇÃO AUTOMÁTICA DA SEQUÊNCIA DE FORMAÇÃO DOS TRIÂNGULOS NO ESQUEMA DE CONTROLE MULTICAMADAS APLICADO À NAVEGAÇÃO COOPERATIVA DE MULTI-ROBÔS

GABRIEL VIANA PACHECO*, ALEXANDRE SANTOS BRANDÃO*

**Núcleo de Especialização em Robótica, Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brasil*

Emails: gabriel.pacheco@ufv.br, alexandre.brandao@ufv.br

Abstract— This paper presents a strategy to guide a formation of multiple mobile robots in positioning and trajectory tracking tasks. The platoon of N -robots is divided into $N - 2$ triangular formations guided individually by the Multi-Layer Control Scheme (MLCS). The advantage of using the MLCS is to maintain the order of the Jacobian in $\mathbb{R}^{3 \times 3}$ regardless of the number of robots. This approach reduces the complexity of the problem of control, in computational terms. A limitation shown in previous studies using ECMC is the need to know the sequence of the triangular structure (direct or inverse) in the moment of definition of each triangular sub-formation. This paper proposes a strategy to define such a sequence by applying an approach from the analytic geometry, allowing to automate the definition of triangular sequences. The validation of the proposal is carried out through simulation results, which emphasize maintaining the formation stability during navigation.

Keywords— Cooperative navigation, Multi-Layer Control Scheme, Formation Sequence.

Resumo— Este trabalho apresenta uma estratégia para guiar uma formação de múltiplos robôs móveis em missões de posicionamento e rastreamento de trajetória. O pelotão de N -robôs é dividido em $N - 2$ formações triangulares que são guiadas individualmente pelo esquema de controle multicamadas (ECMC). A vantagem de utilizar o ECMC é manter a ordem do Jacobiano, que descreve a movimentação da formação, em $\mathbb{R}^{3 \times 3}$, independente do número de robôs. Tal abordagem diminui a complexidade do problema de controle, em termos computacionais. Uma limitação apresentada em trabalhos anteriores utilizando o ECMC é a necessidade de conhecer a sequência da estrutura triangular (direta ou inversa), na definição de cada subformação triangular. O presente trabalho propõe uma estratégia para definir tal sequência aplicando uma abordagem proveniente da geometria analítica, automatizando a definição das sequências triangulares. A validação da proposta é realizada através de resultados de simulação, os quais enfatizam a manutenção da estabilidade da formação durante a navegação.

Palavras-chave— Cooperação de robôs, Esquema de Controle Multicamadas, Sequência de formação.

1 Introdução

O interesse em pesquisa com robôs móveis tem crescido substancialmente nos últimos anos, especialmente no âmbito do controle de múltiplos agentes. A principal motivação para o crescimento dessa área de pesquisa é que um grupo de robôs pode ser mais eficiente para realizar uma determinada tarefa do que um único robô especializado. Algumas tarefas em que a implementação de múltiplos agentes pode ser vantajosa são a inspeção de grandes áreas (Stoeter et al., 2002), operações de busca e resgate (Chaves et al., 2014), transporte cooperativo de cargas (Costa et al., 2012; Chen et al., 2015) e inspeção em aplicações de segurança pública (Quintero et al., 2012).

Um mesmo problema de formação pode ser abordado de diversas maneiras. Apesar disso, a maioria das abordagens pode ser classificada entre as seguintes estratégias de navegação: líder-seguidor, estrutura virtual e navegação comportamental. Na estratégia de formação líder-seguidor, o robô denominado líder é responsável por guiar todos os outros robôs envolvidos na formação, denominados seguidores. Assim, o problema de formação se torna um problema de movimento relativo entre o líder e os seguidores. Já na estratégia estrutura virtual, os robôs devem seguir a traje-

tória mantendo uma formação geométrica rígida predefinida, que pode executar movimentos de rotação e translação no espaço. Na navegação comportamental, existe um conjunto de tarefas predefinidas para cada agente, sendo o sinal de controle final proveniente de uma ponderação de todos os comportamentos definidos.

A estratégia líder-seguidor é adotada em (Luo et al., 2013) com a finalidade de permitir o desvio de obstáculos de uma formação a partir da divisão da formação total e de um posterior reagrupamento. Uma estrutura virtual flexível é apresentada em (Low, 2014), na qual a configuração da formação é definida a partir de um conjunto de separações curvilíneas em relação ao líder virtual, permitindo uma melhor manobrabilidade da formação.

O problema de controle de formação também tem sido abordado a partir dos problemas de consenso, sendo estudados com base em uma combinação entre a teoria de grafos e a teoria de controle. Neste tipo de problema, um grupo de robôs que se comunicam mutuamente devem alcançar um objetivo comum determinado por consenso. Em (Olfati-Saber et al., 2007) é feito um estudo teórico dos algoritmos de consenso aplicados ao controle de formação, visando obter uma rápida concordância entre todos os agentes de uma

formação e possibilitando um aumento na performance de um pelotão auto-organizado.

Em termos de estrutura de controle, podem ser implementadas a estrutura centralizada e a descentralizada. No primeiro caso, há uma unidade concentradora de informação, que é responsável por reter todas as informações do grupo e por enviar os sinais de controle necessários para o estabelecimento da formação. Assim, o agente centralizador é responsável por guiar todos os robôs utilizando um único controlador. Já no segundo caso, não há a necessidade de uma unidade centralizadora, pois cada robô da formação é responsável por obter as informações necessárias sobre o ambiente e por gerar suas próprias ações de controle. No caso de uma estrutura virtual, o uso da estrutura centralizada apresenta algumas vantagens técnicas, como a menor necessidade de processamento *on-board* nos robôs e a possibilidade de obter uma solução ótima para o problema de controle, já que o agente centralizador possui as informações de todos os robôs.

O conceito *cluster space* aplicado nas estratégias líder-seguidor e estrutura virtual é desenvolvido em (Mas and Kitts, 2010), o qual pode ser aplicado tanto em uma estrutura centralizada quanto descentralizada. Nesse caso, o deslocamento da formação é definido a partir das variáveis do *cluster space*, tais como posição, orientação e forma.

Em (Kato et al., 2010) é proposta uma estratégia de controle denominada *Imaginary Equilateral Triangle* capaz de especificar a posição de cada robô em um grupo, considerando que a formação é composta por triângulos equiláteros. Já em (Rosales et al., 2011), uma estratégia de rastreamento de trajetória para uma formação é implementada considerando o modelo dinâmico de robôs não-holonômicos. A mudança da configuração de robôs e o rastreamento de diferentes trajetórias é realizado a partir da teoria de álgebra linear e de métodos numéricos.

Em trabalhos anteriores (Rampinelli et al., 2009) é apresentada a estratégia de estrutura virtual denominada esquema de controle multicamadas (ECMC), que é constituído por um grupo de módulos independentes que em sua totalidade realizam o controle de formação. A estratégia foi implementada para uma formação triangular (Brandão et al., 2009) e posteriormente foi estendida para N -robôs considerando a divisão dos robôs em formações triangulares (Rampinelli et al., 2010; Brandão et al., 2015). Cada estrutura triangular formada pelo ECMC apresenta uma sequência que é definida de acordo com a posição desejada dos robôs na formação. A definição da sequência triangular é essencial, já que para cada tipo de sequência (direta ou inversa) existe uma função de transformação das variáveis da formação para os robôs. Em tais trabalhos, a definição

dessa sequência era informada no início da rotina de forma manual.

Nesse contexto, o presente trabalho estende a utilização do esquema de controle multicamadas permitindo a identificação automática da sequência dos triângulos a serem guiados de acordo com a formação de N -robôs, objetivando a reorganização automática da formação durante uma missão. Este trabalho é dividido nas seguintes seções: Seção 2 descreve o ECMCs adotado para guiar três robôs terrestres e sua generalização para N -robôs, além da estratégia adotada para identificação das sequências de triângulos; Seção 3 apresenta resultados de simulação que validam o esquema de controle e a estratégia de classificação adotada. Por fim, Seção 4 destaca as principais conclusões do trabalho.

2 Esquema de Controle Multicamadas

Esta seção apresenta brevemente a estratégia centralizada utilizada para guiar a formação de robôs. O esquema de controle multicamadas é originalmente introduzido em (Rampinelli et al., 2009) e proposto em (Brandão et al., 2009) para guiar uma formação triangular de três robôs terrestres. A mesma estratégia é generalizada em (Rampinelli et al., 2010; Brandão et al., 2015) para uma configuração de N -robôs, considerando a formação de $N - 2$ triângulos. Neste trabalho, o objetivo é automatizar a identificação da sequência de formação de cada triângulo que compõe a formação.

O esquema de controle multicamadas possui três camadas principais: a camada de controle de formação, a camada dos robôs e a camada do planejador. A camada de controle de formação é responsável por enviar os sinais de controle aos robôs de forma a atingir suas posições desejadas. A camada dos robôs representa os próprios robôs e suas características cinemáticas e dinâmicas, além de suas estratégias de navegação individuais. Já a camada do planejador é responsável por definir as condições iniciais e as posições iniciais dos robôs na formação, além de gerar a trajetória a ser seguida.

A principal vantagem do ECMC é a sua independência entre camadas e módulos no sentido vertical e horizontal (Brandão et al., 2015), ou seja, o esquema pode ser utilizado excluindo ou incluindo algumas camadas. Por exemplo, em uma navegação reativa, a camada Planejador *Off-line* pode ser eliminada.

Cada formação triangular, mostrada na Figura 1, é descrita pela postura $\mathbf{P}_F = [x_F \ y_F \ \psi_F]^T$, onde $(x_F \ y_F)$ representa a posição do centroide da formação e ψ_F representa sua orientação em relação ao eixo x da referência global xy adotada. Além disso, a forma de cada estrutura triangular é definida por $\mathbf{S}_F = [p_F \ q_F \ \beta_F]^T$, que representa respectivamente a distância $\|R_1 - R_2\|$, a distân-

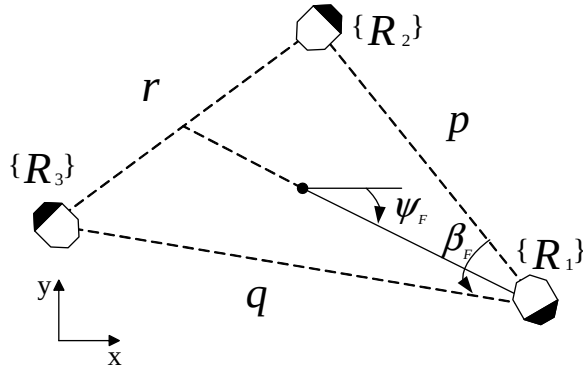


Figura 1: Variáveis de uma formação ABC.

cia $\|R_1 - R_3\|$, e o ângulo $\widehat{R_2 R_1 R_3}$. As sequências dos robôs podem ser diretas (sentido anti-horário) ou inversas (sentido horário). Tais sequências são denominadas sequências $R_1 R_2 R_3$ ou $R_1 R_3 R_2$, doravante chamadas de **ABC** ou **ACB**, respectivamente.

Para generalizar a implementação do ECMC para N -robôs é realizada a decomposição de um polígono de N vértices em $N-2$ triângulos. Dessa forma pode-se realizar o controle de formação de N -robôs utilizando as mesmas características definidas para três robôs, sendo cada formação triangular guiada individualmente pelo ECMC. Para obter a configuração dos triângulos é necessário classificar os robôs quanto ao índice (R_i , para $i = 1, \dots, n$). Depois disso, os triângulos são definidos de acordo com os índices dos robôs em sequência direta ($R_{j+1} R_j R_{j+2}$) sendo $j = 1, \dots, N-2$. Por fim, é necessário identificar a sequência de formação de cada um, uma vez que esta sequência está diretamente relacionada à atuação do controle de formação.

Nota 1 A principal vantagem de dividir o pelotão em formações triangulares é manter a ordem da matriz Jacobiano.

Nota 2 Em caso de falha de um ou mais robôs, é necessário identificar novamente a sequência dos triângulos formados, para que seja possível a reorganização da formação.

Para identificar a sequência do triângulo formado é proposta uma abordagem utilizando a geometria analítica. Considerando que cada formação triangular de índice j contém os robôs R_j , R_{j+1} e R_{j+2} , os vetores $\vec{a}$ e $\vec{b}$ são definidos da seguinte maneira:

$$\vec{a} = [(x_j - x_{j+1}) \ (y_j - y_{j+1}) \ 0] \quad (1)$$

$$\vec{b} = [(x_j - x_{j+2}) \ (y_j - y_{j+2}) \ 0] \quad (2)$$

A partir do produto vetorial resultante dos vetores $\vec{a}$ e $\vec{b}$, é possível definir o sentido de formação

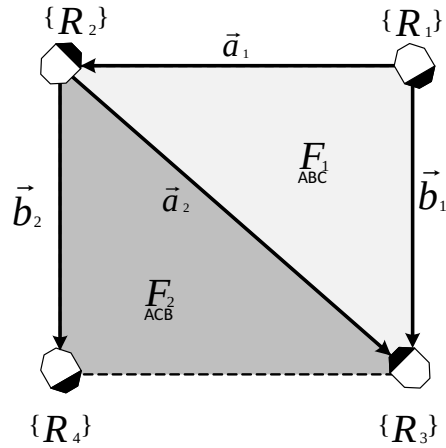


Figura 2: Formação com vetores de identificação de sequência ABC e ACB

de cada triângulo:

$$\vec{a} \times \vec{b} = [0 \ 0 \ \kappa], \quad (3)$$

em função do vetor na direção z , que indica sentido horário ou anti-horário. Neste caso, se o valor indicado em (3) for maior que zero ($\kappa > 0$), a formação triangular se encontra em sentido direto. Caso contrário ($\kappa < 0$), a formação triangular está em sentido inverso. A Figura 2 apresenta uma formação decomposta em dois triângulos nos quais são exibidos os vetores propostos $\vec{a}$ e $\vec{b}$. A região em cinza claro indica uma formação em sequência **ABC** (direta) e a região em cinza escuro indica uma formação em sequência **ACB** (inversa).

Aplicando a estratégia proposta é possível identificar a sequência dos triângulos que compõem a formação automaticamente. Além disso, a implementação dessa estratégia permite a redefinição da sequência de formação, caso uma formação perca sua sequência original, tornando o sistema mais robusto.

Nota 3 Essa estratégia pode também ser implementada para controle de formação no espaço Cartesiano 3D, levando-se em consideração a componente z do vetor gerado pela multiplicação vetorial dos três entes envolvidos na criação do plano.

Para validar a utilização estratégia de identificação das sequências dos triângulos em conjunto com o ECMC são realizadas algumas simulações, apresentadas na seção seguinte.

3 Resultados e discussões

Para validar a estratégia de identificação em conjunto com o ECMC é proposta inicialmente uma formação composta por 6 robôs móveis, os quais devem seguir a trajetória de uma lemniscata. Assim, as posições desejadas dos robôs na formação

são definidas pela matriz F_{Xd} , na qual cada coluna representa as posições $[x \ y]$ do robô R_i .

$$F_{Xd} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 & -1 & 1 & 0 \\ 1.5 & -0.5 & 0.5 & -0.5 & -0.5 & -1.5 \end{bmatrix}$$

A trajetória realizada pela lemniscata pode ser descrita de maneira genérica pelas duas equações apresentadas a seguir:

$$X(i) = F_{Xd}(:, i) + \sigma \begin{bmatrix} \sin \frac{2\pi t}{T} \\ \sin \frac{4\pi t}{T} \end{bmatrix} \quad (4)$$

sendo i o índice de um determinado robô e σ uma constante referente ao tamanho da lemniscata.

A Figura 3 apresenta a estrutura virtual proposta, as formações e suas respectivas sequências (indicadas pelas tonalidades de cinza). O vídeo referente à simulação realizada pode ser visto em <https://youtu.be/yqJThLizxWY>.

Como descrito na Seção 2, a formação F_i é composta pelos robôs R_i , R_{i+1} e R_{i+2} . Assim, para testar a funcionalidade do controle de formação, considerando a divisão da estrutura virtual em formações triangulares, é realizada a simulação do sistema na situação em que os robôs estão localizados em pontos, onde se faz necessária a sobreposição de triângulos. Para isso, a matriz F_{Xd} das posições desejadas dos robôs na formação é redefinida.

$$F_{Xd} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1.5 & -0.7 & -1.5 \\ 1.5 & -1.5 & 0 & -1.5 & 0 & -1.5 \end{bmatrix}$$

Com base nas posições desejadas dos robôs, é possível calcular o valor de κ de (3), mostrados na Tabela 1. A Figura 4 apresenta as subformações formadas pelo conjunto de robôs e a Figura 5 apresenta a trajetória percorrida pela formação. Note que para valores de $\kappa > 0$ a subformação possui sequência direta, e caso contrário, sequência inversa.

A Figura 6 apresenta os erros de formação para as quatro estruturas triangulares formadas.

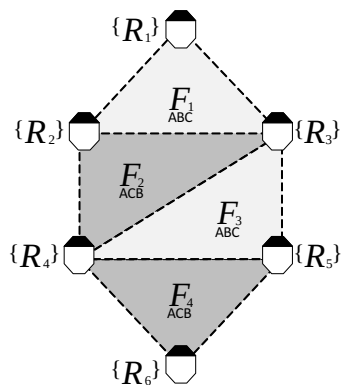


Figura 3: Formação com 6 robôs.

Tabela 1: Valores de κ para cada subformação da Figura 4.

Subformação	Robôs	κ
F_1	$R_2 \widehat{R_1} R_3$	2.1
F_2	$R_3 \widehat{R_2} R_4$	-2.25
F_3	$R_4 \widehat{R_3} R_5$	-2.1
F_4	$R_5 \widehat{R_4} R_6$	4.5

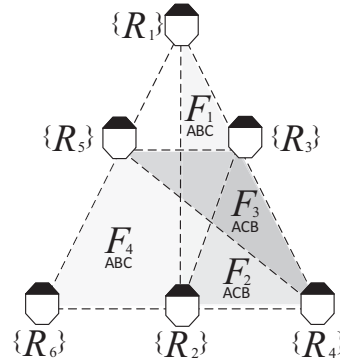


Figura 4: Formação com sobreposição triangular.

Note que o erro das variáveis possui comportamento assintótico, tendendo a zero com o decorrer da simulação. Tal comportamento evidencia a estabilidade e a eficácia da estratégia de controle proposta. O vídeo referente à simulação pode ser visualizado em https://youtu.be/1HM_UAG8wX4.

Na Figura 6, é possível verificar que os erros de forma, representado pelas arestas p e q , decrescem assintoticamente, alcançando valores inferiores a 50mm ao final do experimento. Os erros referentes ao ângulo da forma triangular é inferior a 2° , quando a formação atinge a situação de regime estacionário. No tocante ao erro de posição dos robôs durante a navegação, também se verificam valores inferiores a 50mm. Tais valores poderiam ser minimizados se uma estratégia de compensação dinâmica fosse aplicada na Camada dos Robôs. Afinal, somente o modelo cinemático dos robôs foi considerado durante a realização das simulações. Neste caso, é importante ressaltar que a inércia de movimento, consequentemente o tempo de resposta dos robôs a um sinal de controle, resulta em erros de seguimento de trajetória.

4 Conclusões

Este trabalho apresenta uma estratégia para guiar múltiplos veículos terrestres não tripulados (MVTNT) para tarefas de posicionamento e rastreamento de trajetória. Um pelotão de N robôs com uma formação estrutural definida é dividido em $N - 2$ formações triangulares, que são guiadas individualmente pelo esquema de controle multicamadas (ECMC). O trabalho incorpora no ECMC uma estratégia para definir a sequência de cada

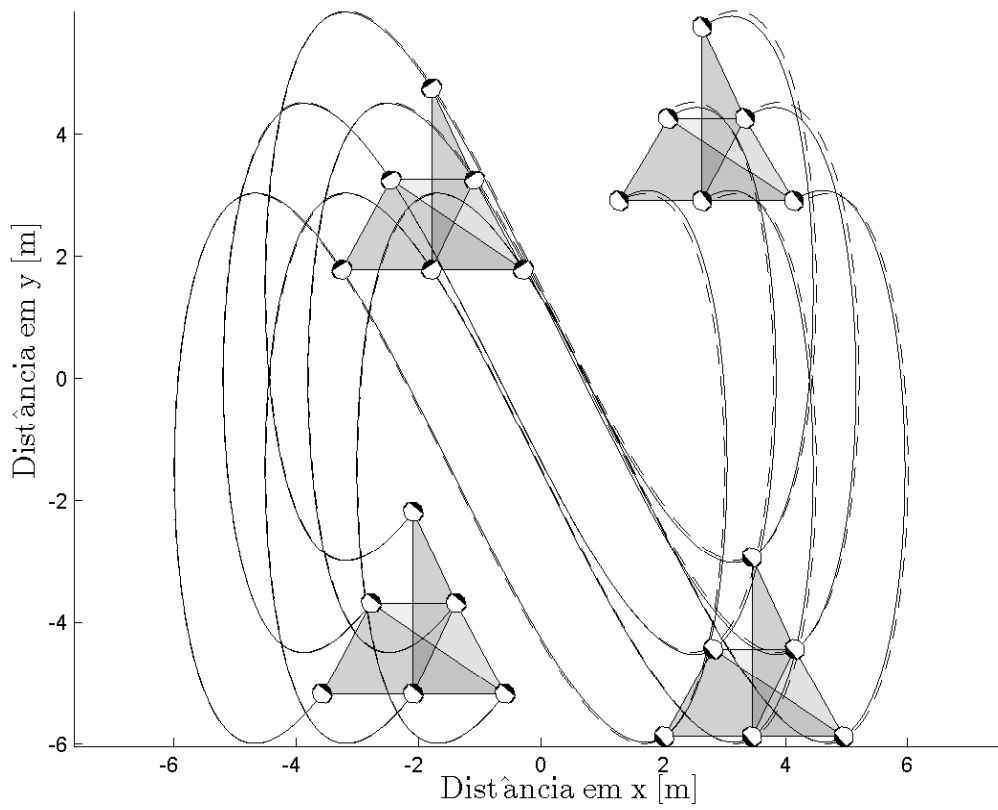


Figura 5: Trajetória realizada pela formação dos 20,03s aos 180,02s da simulação.

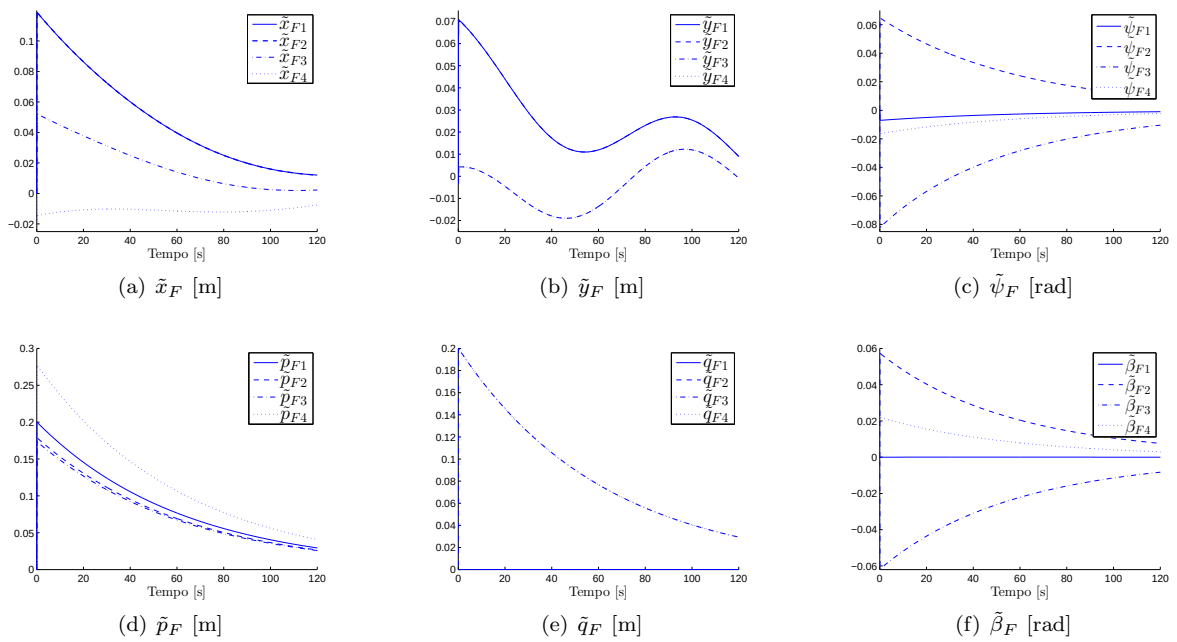


Figura 6: Erro das formações triangulares.

formação triangular. A validação da proposta é dada por resultados de simulação, através da sobreposição de triângulos e definição livre da posição dos robôs na formação.

Os próximos passos dessa pesquisa serão considerar situações de falha de um robô e realizar a reconfiguração dos triângulos, de forma a ocorrer uma adaptação automática das novas sequências triangulares. Na sequência, implementar uma estratégia de desvios de obstáculos, para verificar a robustez do esquema proposto em face a uma deformação plástica. Por fim, aplicar a técnica de identificação da sequência triangular em uma formação de múltiplos veículos aéreos não tripulados (MVANT), estendendo seu uso para o espaço 3D.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq, FAPEMIG e à FUNARBE pelo apoio financeiro e pelo suporte concedido para participação neste trabalho.

Referências

- Brandão, A. S., Rampinelli, V. T. L., Martins, F. N., Sarcinelli-Filho, M. and Carelli, R. (2015). The multilayer control scheme: A strategy to guide n-robots formations with obstacle avoidance, *J. of Control, Automation and Electrical Systems* **26**(3): 201–214.
- Brandão, A. S., Martins, F. N., Rampinelli, V. T. L., Sarcinelli-Filho, M., Bastos-Filho, T. F. and Carelli, R. (2009). A multi-layer control scheme for multi-robot formations with adaptative dynamic compensation, *Proc. of the 5th IEEE International Conference on Mechatronics*, IEEE, Málaga, Spain.
- Chaves, A. N., Cugnasca, P. S. and Jose, J. (2014). Adaptive search control applied to search and rescue operations using unmanned aerial vehicles (uavs), *Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina)* **12**(7): 1278–1283.
- Chen, J., Gauci, M., Li, W., Kolling, A. and Gros, R. (2015). Occlusion-based cooperative transport with a swarm of miniature mobile robots, *Robotics, IEEE Transactions on* **31**(2): 307–321.
- Costa, E. D., Shiroma, P. M. and Campos, M. F. (2012). Cooperative robotic exploration and transport of unknown objects, *Robotics Symposium and Latin American Robotics Symposium (SBR-LARS), 2012 Brazilian*, IEEE, pp. 56–61.
- Kato, T., Watanabe, K. and Maeyama, S. (2010). A formation method for heterogeneous multiple robots by specifying the relative position of each robot, *SICE Annual Conference 2010, Proceedings of*, IEEE, pp. 3274–3277.
- Low, C. B. (2014). A flexible virtual structure formation keeping control design for nonholonomic mobile robots with low-level control systems, with experiments, *Intelligent Control (ISIC), 2014 IEEE International Symposium on*, IEEE, pp. 1576–1582.
- Luo, D., Zhou, T. and Wu, S. (2013). Obstacle avoidance and formation regrouping strategy and control for uav formation flight, *Proceedings of the 10th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA)*, Hangzhou, China, pp. 1921–1926.
- Mas, I. and Kitts, C. (2010). Centralized and decentralized multi-robot control methods using the cluster space control framework, *Proceedings of the 2010 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Montreal, Canada, pp. 115–122.
- Olfati-Saber, R., Fax, A. and Murray, R. M. (2007). Consensus and cooperation in networked multi-agent systems, *Proceedings of the IEEE* **95**(1): 215–233.
- Quintero, M., Christian, G., Lopez, J., Bertel, R. et al. (2012). Intelligent exploration and surveillance algorithms for multi-agents robotics systems, *Informatica (CLEI), 2012 XXXVIII Conferencia Latinoamericana En*, IEEE, pp. 1–10.
- Rampinelli, V. T. L., Brandão, A. S., Martins, F. N., Sarcinelli-Filho, M. and Carelli, R. (2010). Embedding obstacle avoidance in the control of a flexible multi-robot formation, *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, IEEE, Bari, Italy.
- Rampinelli, V. T. L., Brandão, A. S., Martins, F. N., Sarcinelli-Filho, M. and Carelli, R. (2009). A multi-layer control scheme for multi-robot formations with obstacle avoidance, *Proceedings of the 14th International Conference on Advanced Robotics, ICAR'09*, IEEE, Munich, Germany.
- Rosales, A., Scaglia, G., Mut, V. and di Sciascio, F. (2011). Formation control and trajectory tracking of mobile robotic systems—a linear algebra approach, *Robotica* **29**(03): 335–349.
- Stoeter, S. A., Rybski, P. E., Stubbs, K. N., McMillen, C. P., Gini, M., Hougen, D. F. and Papanikolopoulos, N. (2002). A robot team for surveillance tasks: Design and architecture, *Robotics and Autonomous Systems* **40**(2): 173–183.