

ESTUDO EM CONTROLE DE FORMAÇÃO DE VTNTS UTILIZANDO ESTRATÉGIAS DE CONSENSO

THAIS BENTO DA SILVA*, KEVIN BRAATHEN DE CARVALHO*, ALEXANDRE SANTOS BRANDÃO*

**Núcleo de Especialização em Robótica (NERO)*

Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Viçosa - UFV, Viçosa-MG, Brazil

Emails: thais.bento@ufv.br, kevin.carvalho@ufv.br, alexandre.brandao@ufv.br

Abstract— This paper presents the formation control of unmanned ground vehicles (UGV) in trajectory tracking tasks using consensus strategy. Initially, the consensus navigation theory is presented, including information sharing structure among UGVs. Then the formation control using the virtual structure method to establish the desired formation is discussed. Communication loss effects among agents and robot failure during navigation are also discussed. Simulation results validate the solution for the formation of control.

Keywords— Unmanned ground vehicles, Consensus Strategy, Formation Control.

Resumo— Este trabalho apresenta o estudo sobre controle de formação de veículos terrestres não tripulados (VTNTs) em tarefas de seguimento de trajetória utilizando estratégia de consenso. Inicialmente, é apresentada a teoria de navegação por consenso, incluindo a estrutura de compartilhamento de informação entre os VTNTs. Em seguida, o controle de formação empregando o método de estrutura virtual para estabelecer a formação desejada é apresentado. Efeitos de perda de comunicação entre agentes e falha de um robô durante navegação também são discutidos. Resultados de simulação validam a solução para o controle de formação.

Palavras-chave— Veículos Terrestres Não Tripulados, Estratégia de Consenso, Controle de Formação

1 Introdução

Navegação cooperativa tem atraído o foco de pesquisas na área de robótica na tentativa de entender e reproduzir comportamentos sociais encontrados na natureza (Daneshfar and Bevrani, 2009). A principal razão é a vantagem de um sistema de múltiplos agentes em relação a um agente único. Atualmente, as aplicações têm sido desenvolvido através de uma formação de veículos terrestres e aéreos não tripulados (VTNT ou VANT), ou combinação de ambos, para a realização de missões de missões de busca e resgate, escolta e objetivos militares.

No que tange o controle da navegação em grupo, destaca-se as estruturas centralizada e descentralizada. A primeira delas possui uma unidade central responsável por enviar os sinais de controle ao grupo. Em contraste, na segunda, cada robô é autônomo em suas decisões.

Sobre a estrutura da formação, a literatura atual discute estratégia líder-seguidor, estruturas virtuais e navegação por consenso.

Na estrutura líder-seguidor, tem-se vários agentes posicionados em relação a um agente principal. Esta abordagem comumente é implementada de forma descentralizada, afinal os seguidores devem identificar e seguir o líder. Como visto em (Brandao et al., 2013), essa estratégia é utilizada para o controle de formação de um VTNT e um VANT de forma que o segundo sempre siga o primeiro, tendo aplicações em missões de posicionamento e seguimento de trajetória. Importante mencionar que a não garantia de comunicação entre os agentes torna suscetível a falha na execução da tarefa.

Na estrutura virtual, os agentes devem estabelecer uma forma geométrica predefinida e navegar segundo tal configuração como feito em (Gava et al., 2007). Pode ser visto a aplicação desse método em veículos terrestres com intuito de manter a formação fixa mesmo sob diferentes perturbações em (Abbaspour et al., 2013). Em (Mehrjerdi et al., 2011) encontra-se a utilização de estrutura virtual com três robôs em situações de seguimento de trajetória utilizando da técnica de Lyapunov aliada com teoria de grafos.

Na abordagem por consenso, os trabalhos inicialmente se basearam na solução do problema de *rendezvous* (da Silva et al., 2015), cujo foco é a definição conjunta de um ponto de encontro entre os agentes, a ser alcançado no mesmo instante de tempo. Em (Hu and Lin, 2010), pode-se encontrar a aplicação de consenso em um sistema de múltiplos agentes com dinâmica de segundo grau e atraso e tempo. É proposto em (Savino et al., 2016) uma abordagem de consenso com topologia variável com intuito de minimizar falhas de comunicação.

Este artigo aborda o estudo em controle de formação de VTNTs (Veículos Terrestres Não Tripulados) utilizando estratégias de consenso. Os agentes tomam as decisões conjuntamente através da informação distribuída segundo um grafo orientado. A formação é composta por um número fixo de robôs. A topologia de comunicação adotada é invariável, porém suscetível a falha de comunicação entre os agentes. A validação da proposta é demonstrada por simulação em tarefas de seguimento de trajetória.

Para descrever o objeto de estudo, a Seção 2 descreve os fundamentos do controle por consenso.

Em seguida, a Seção 3 apresenta a estratégia de controle de formação adotada, a qual considera uma estrutura virtual. O modelo do robô Pioneer e a estratégia de controle para alcançar a posição desejada na formação são apresentados na Seção 4. Na sequência, a Seção 5 apresenta os resultados e discussões do trabalho. Por fim, a Seção 6 encerra o artigo com as considerações finais e aponta propostas para trabalhos futuros.

2 A Navegação baseada em Consenso

Em termos de robótica, uma navegação baseada em consenso visa solucionar o problema de *rendezvous*, onde os robôs devem concordar sobre um ponto de encontro e alcançá-lo conjuntamente, no menor tempo possível. Ao longo das iterações, tais agentes trocam informações entre si e atualizam as suas, de forma que as tornem coerentes com as demais. O ponto de encontro irá variar conforme a estrutura de comunicação adotada e as condições iniciais dos *estados da informação* x_i dos agentes. Neste trabalho, $\mathbf{X} = [x \ y]^T$ representa a posição dos robôs no plano Cartesiano.

Nesta abordagem, a estrutura (topologia) de comunicação intra-veículos   representada na forma de um grafo, onde os nós representam os agentes e as arestas são os canais de comunicação. Um grafo ainda pode ser classificado como direcionado (ou não direcionado) e conectado (ou não conectado). Em um grafo direcionado, as arestas são unidirecionais, enquanto os não direcionados possuem arestas bidirecionais. Ele é dito conectado, quando existe pelo menos um caminho interligando um n  a outro; do contrário, ele é dito não conectado.

Para que a estratégia de navegação baseada em consenso seja funcional, uma condição essencial   a existência de pelo menos uma árvore de extensão orientada. Em outras palavras, segundo (Ren et al., 2007), durante a navegação, deve haver pelo menos um veículo que envie informação direta ou indiretamente para todos os outros veículos.

Definição 2.1 ( rvore orientada)

  um grafo orientado em que cada n  tem um n  pai, com exceção do n  raiz, que não tem pai e possui um caminho orientado para todos os outros nós.

Um grafo é descrito por $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$, matematicamente, sendo que $\mathcal{V}$ representa o conjunto dos n nós e $\mathcal{E}$ o conjunto das arestas. Ele também pode ser representado na forma matricial através da matriz de adjacência e da matriz Laplaciana.

Definição 2.2 (Matriz de Adjacência)

$\mathcal{A} = [a_{ij}]$ é uma matriz simétrica, cujos elementos são definidos como: $[a_{ij}] = 0$, se $i = j$ ou

não existir uma aresta conectando o n  v_j ao v_i ; $[a_{ij}] = 1$, se o n  v_i recebe informação do n  v_j .

Definição 2.3 (Matriz Laplaciana)

$\mathcal{L} = [l_{ij}]$ é composta por l_{ij} elementos do grafo orientado, tal que $l_{ii} = \sum_{j=1}^n a_{ij}$ e $l_{ij} = -a_{ij}$.

Definição 2.4 (Condição de Consenso)

O consenso entre os agentes é atingido, quando

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|\xi_j(t) - \xi_i(t)\| = 0, \text{ com } \begin{cases} i = 1, \dots, n \\ j = 1, \dots, n, \end{cases}$$

É alcançada, dado que $\xi(t)$ é o estado de informação durante a navegação.

No presente trabalho, $\xi_i = \mathbf{X}_i$ representa o estado de informação do i -ésimo robô. A formulação de deslocamento do agentes   descrita como um modelo de primeira ordem dado por

$$\dot{\mathbf{X}}_i(t) = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n a_{ij}(\mathbf{X}_j(t) - \mathbf{X}_i(t)), i = 1, \dots, n, \quad (1)$$

onde $\mathbf{X}_i(t)$ e $\dot{\mathbf{X}}_i(t)$ representam, respectivamente, a posição e a velocidade do i -ésimo agente. Em adição, a_{ij} é a entrada da matriz de adjacência referente a aresta que interliga o i - ao j -ésimo agente. Em suma, o algoritmo consiste em atualizar as informações de estados de um agente, em função das informações dos demais, a fim de convergirem conjuntamente para uma posição comum em um instante de tempo também comum.

Vale ressaltar que não   necessário que todos os a_{ij} não nulos tenham o mesmo valor. Valores diferentes indicam ponderações diferentes das informações recebidas de cada fonte. Para este trabalho, adotou-se o mesmo fator de ponderação unitário, cuja representação na Matriz Laplaciana é dada por

$$L_f = \begin{bmatrix} 3 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 3 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 3 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & 3 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Note que L_f representa um grafo de comunicação fortemente conectado(em que todos se comunicam), como ilustrado na Figura 1.

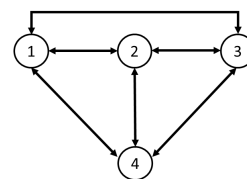


Figura 1: Grafo de comunicação.

3 Controle de Formação com Seguimento de Trajetória

Neste trabalho, diferentemente de (da Silva et al., 2015), o consenso será dado quando os agentes alcançarem conjuntamente e seguirem cooperativamente uma formação predefinida. Em outras palavras, o consenso será alcançado quando o erro do posição de todos os agentes for nulo, simultaneamente, em determinado instante.

A abordagem por *estrutura virtual* apresentada em (Ren and Beard, 2008) é aqui utilizada. O líder virtual é definido a partir do centro da formação $\mathbf{x}_c$. A posição desejada a ser atingida pelos agentes é dada por $\mathbf{x}_{di} = \mathbf{x}_c + \mathbf{x}_{fi}$, onde $\mathbf{x}_{fi}$ é a distância do i -ésimo agente ao centro da formação. A Figura 2 ilustra a *estrutura virtual* utilizada neste trabalho e a posição a ser ocupada por cada agente.

Adotando a formulação de consenso apresentada em (2), porém agregando a velocidade relativa entre os agentes, tem-se

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\mathbf{x}}}_i(t) = & \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \alpha a_{ij} [\tilde{\mathbf{x}}_j(t) - \tilde{\mathbf{x}}_i(t)] + \\ & + \beta a_{ij} [\dot{\tilde{\mathbf{x}}}_j(t) - \dot{\tilde{\mathbf{x}}}_i(t)], \text{ com } i = 1, \dots, n, \end{aligned} \quad (3)$$

onde $\tilde{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{x}_d(t) - \mathbf{x}(t)$ e $\dot{\tilde{\mathbf{x}}}(t) = \dot{\mathbf{x}}_d(t) - \dot{\mathbf{x}}(t)$. Nesta formulação, α e β são fatores de ponderação da posição e da velocidade dos robôs, respectivamente. Em outras palavras, o termo ponderado por α realiza o consenso da posição, enquanto o termo em β penaliza a variação na velocidade, suavizando a trajetória.

4 O Modelo e Controlador aplicado ao Robô Pioneer

Nesta seção, utilizou-se um simulador no software Matlab, a fim de realizar o controle de formação

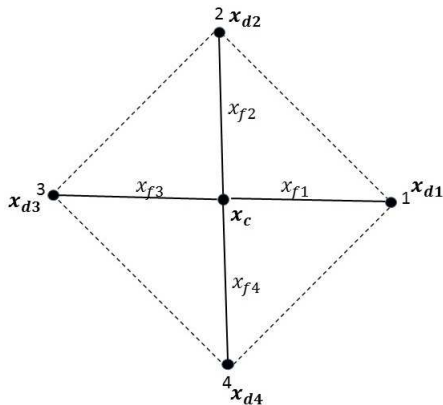


Figura 2: Estrutura virtual utilizada para realizar o consenso de formação.

por consenso, para o seguimento de trajetória de uma estrutura fixa com quatro veículos terrestres Pioneer modelo P3DX. O modelo cinemático do Pioneer é dado por

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi & -a \sin \psi \\ \sin \psi & a \cos \psi \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ \omega \end{bmatrix} = \mathbf{K} \mathbf{u}, \quad (4)$$

onde $\mathbf{x} = [x, y]^T$ determina sua posição, no plano Cartesiano, e ψ sua orientação. $\mathbf{u} = [u, \omega]^T$ indica os sinais de controle (velocidade linear e angular, respectivamente). Para alcançar uma posição desejada, desconsiderando a orientação final, os sinais de controle podem ser definidos como

$$\mathbf{u} = \mathbf{K}^{-1}[\dot{\tilde{\mathbf{x}}}_d + \kappa_1 \tanh(\kappa_2 \tilde{\mathbf{x}})], \quad (5)$$

onde κ_1 e κ_2 são matrizes de ganho definida positiva (Toibero et al., 2011). O controlador apresentado deve ser aplicado a cada i -ésimo robô.

5 Resultados e Discussão

Esta seção visa realizar um estudo dos resultados obtidos em momentos distintos para o controle de formação. Primeiramente, é proposta uma trajetória senoidal para o grupo de veículos com ocorrência de falha do robô 4 no intervalo entre 40 e 60 segundos. Uma nova falha é atribuída no intervalo entre 80 e 90 segundos, para os robôs 1 e 3. Os resultados da simulação podem ser vistos no link <http://goo.gl/zdhUis>. A trajetória é descrita por $x = \frac{2\pi t}{60} - 6.5$, $y = 4.5 \sin \frac{2\pi t}{60}$. A posição inicial dos robôs adotada é mostrada na Tabela 1.

Tabela 1: Posição Inicial dos Agentes em metros(m) para trajetória senoidal.

	Veículo			
	# 1	# 2	# 3	# 4
x_o	-7	-7	-7	-7
y_o	1	2	-1	-2

A topologia de comunicação adotada é fortemente conectada, conforme visto na Figura 1. A estrutura virtual é definida por

$$\mathbf{x}_f = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix},$$

onde i indica coluna referente as coordenadas do i -ésimo agente em relação a $\mathbf{x}_c$.

Para a realização das simulações, adotou-se a matriz Laplaciana 2 de acordo com a topologia de comunicação da Figura 1. Em adição, para o controle de formação por seguimento de referência utilizando o consenso, expresso em (3), adotou-se $\alpha = 1$ e $\beta = 0.1$.

Através da Figura 3, que fornece o erro de posição dos robôs em relação ao centroide da formação,   possível notar que no tempo $t = 15s$ o consenso foi alcançado já que os erros de todos os agentes são nulos. Porém, durante o período de ausência do robô 4, os outros agentes tendem a convergir para um novo ponto de consenso, tomando como fixa a posição do robô est tico, já que este não envia nem recebe informação dos estados vizinhos. Portanto, verifica-se que durante o intervalo de falha, o erro de posição dos robôs varia. Quando a comunicação   reestabelecida e o veículo retorna a comunicação, os demais robôs atualizam suas informações de acordo com toda a equipe e, no instante $t = 70s$, o consenso é alcançado e assim permanece até que os robôs 1 e 3 também perdem a comunicação com o grupo. Assim como no caso anterior, os veículos tentam convergir para um novo ponto de encontro e, por ser dois robôs est ticos, o desvio de erro é mais acentuado. Ao retornar a comunicação, no tempo $t = 95s$, o consenso é novamente alcançado e permanece até o fim da tarefa.

A fim de validar a estratégia para uma nova trajetória é proposto um percurso em forma de círculo com a falha do robô 4 que pode ser visto pela simulação no link <http://goo.gl/DybgWe>. Assim como na estratégia do percurso anterior, o controle de formação é realizado através do consenso e na ausência de um dos robôs os demais continuam a troca de informações tentando recalcular um novo

ponto em comum até que o veículo reestabelece a comunicação e eles retornam a trajetória desejada. Portanto, o algoritmo proposto nesse trabalho pode ser validado independente do tipo de percurso adotado.

6 Considerações Finais

Uma estratégia de controle cooperativo de VTNTs baseada em consenso é estudada, a fim de realizar o controle de formação dos veículos percorrendo uma trajetória através do conceito de estrutura virtual. Uma análise do efeito da perda de comunicação   também abordada. Os resultados da simulação validam a proposta uma vez que os veículos mant m a formação durante todo o percurso, exceto no momento de falha em que os robôs est ticos param de enviar informações para os demais e os robôs ativos procuram um novo ponto em comum para todos. Ao restabelecer a comunicação entre os robôs, o consenso é novamente alcançado, levando os erros de posições a zero no decorrer da execução da tarefa.

Além disso, este trabalho apresenta a flexibilidade de ser implementado para diferentes trajetórias como exemplo são analisadas as trajetórias senoidal e circular. Portanto, ele apresenta a vantagem de se utilizar a estratégia de consenso para situações em que ocorrem falhas de comunicação pois a tarefa pode ser alcançada após o retorno do membro antes est tico o que não é visto em outras estratégias de controle.

A sequência desse trabalho prevê a experimentação do sistema aqui validado por simulação e uma análise sobre atrasos de comunicação também será abordada.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e a FUNARBE pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa, bem como   UFV e à FAPEMIG, por viabilizarem a participação neste trabalho.

Referências

- Abbaspour, A., Moosavian, S. A. A. and Alipour, K. (2013). A virtual structure-based approach to formation control of cooperative wheeled mobile robots, *matrix* **2**: 2b.
- Brandao, A. S., Pizetta, I. H., Sarcinelli Filho, M. and Carelli, R. (2013). Controle líder-seguidor de uma formação vant-vtnt, *XI S mpo sio Brasileiro de Automação Inteligente, SBAI, Fortaleza: [sn]*.

da Silva, T. B., e Silva, M. V. M. S. and Brandão, A. S. (2015). Consensus-based navigation of

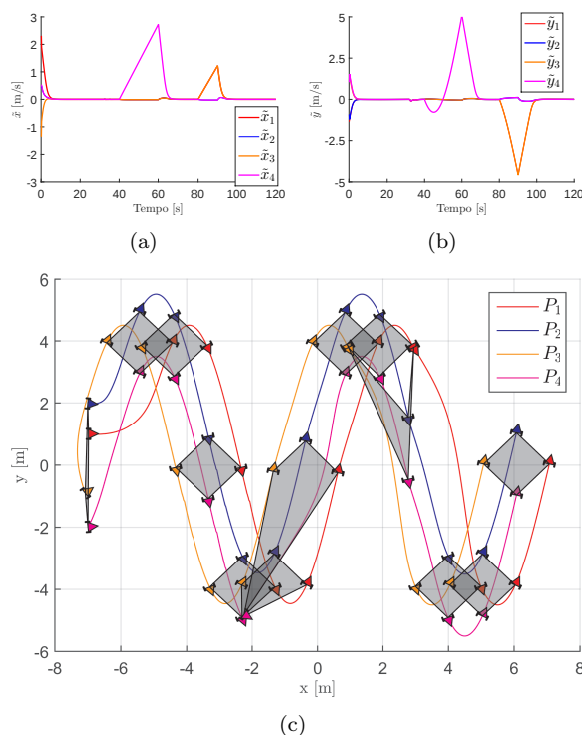


Figura 3: Erro de posição dos veículos para uma trajetória senoidal com uma falha de comunicação entre os robôs.

- a uav formation, *2015 Workshop on Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems (RED-UAS)*, pp. 219–224.
- Daneshfar, F. and Bevrani, H. (2009). Multi-agent systems in control engineering: a survey, *Journal of Control Science and Engineering* **2009**: 5.
- Gava, C. C., Vassallo, R. F., Roberti, F., Carelli, R. and Bastos-Filho, T. F. (2007). Nonlinear control techniques and omnidirectional vision for team formation on cooperative robotics, *Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, IEEE, pp. 2409–2414.
- Hu, J. and Lin, Y. (2010). Consensus control for multi-agent systems with double-integrator dynamics and time delays, *IET control theory & applications* **4**(1): 109–118.
- Mehrjerdi, H., Ghommam, J. and Saad, M. (2011). Nonlinear coordination control for a group of mobile robots using a virtual structure, *Mechatronics* **21**(7): 1147–1155.
- Ren, W. and Beard, R. W. (2008). Overview of consensus algorithms in cooperative control, *Distributed Consensus in Multi-vehicle Cooperative Control: Theory and Applications* pp. 3–22.
- Ren, W., Beard, R. W. and Atkins, E. M. (2007). Information consensus in multivehicle cooperative control, *IEEE Control systems magazine* **2**(27): 71–82.
- Savino, H. J., dos Santos, C. R., Souza, F. O., Pimenta, L. C., de Oliveira, M. and Palhares, R. M. (2016). Conditions for consensus of multi-agent systems with time-delays and uncertain switching topology, *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* **63**(2): 1258–1267.
- Toibero, J. M., Roberti, F., Carelli, R. and Fiorini, P. (2011). Switching control approach for stable navigation of mobile robots in unknown environments, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* **27**(3): 558–568.