Análise de Desempenho de Controladores de Formação baseados em Espaço Nulo

Valentim Ernandes-Neto* Mário Sarcinelli-Filho**
Alexandre Santos Brandão***

* Departamento de Informática, Universidade Federal de Viçosa, MG,
(e-mail: valentim.neto@ufv.br).

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

*** Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de
Viçosa, MG, (e-mail: alexandrebrandao82@gmail.com) .

Abstract: This work deals with the trajectory tracking of a homogeneous formation of three Pioneer 3-DX terrestrial robots. The proposed control system splits the formation in two partial formations of two robots each one, which are associated to virtual structures (a 3D straight line). The variables characterizing the robots and the formation can be treated as two spaces: formation space and robots space. Transformations from one of such spaces to the other allow characterizing the formation from the movement of the robots and vice versa. For validation, null-space controllers manage two conflicting priority tasks: trajectory tracking and formation shape maintenance. Finally, experimental results are used to analyze the performance of the controllers, when subject to different navigation priorities.

Resumo: Este trabalho trata do rastreamento de trajetória por uma formação homogênea de três robôs terrestres, modelo Pioneer 3-DX. O sistema de controle proposto divide a formação em duas formações parciais de dois robôs cada uma, cada uma associada a uma estrutura virtual (uma a linha reta 3D). A relação entre os robôs e a formação pode ser tratada como dois espaços distintos: espaço da formação e espaço dos robôs. Transformações de um desses espaços ao outro permitem caracterizar a formação a partir do movimento dos robôs e vice-versa. Para validação, controladores baseados em espaço nulo gerem duas tarefas de prioridades conflitantes: seguimento da trajetória e manutenção da estrutura da formação. Por fim, resultados experimentais são utilizados para analisar o desempenho dos controladores, quando sujeitos a distintas prioridades de navegação.

Keywords: Formation Control; Null-space; Performance analysis.

Palavras-chaves: Controle de Formação; Espaço-Nulo; Análise de Desempenho.

1. INTRODUÇÃO

Grupos de robôs trabalhando cooperativamente tem atraído a atenção de vários pesquisadores e centros de pesquisa. Afinal, um pelotão de agentes trabalhando cooperativamente pode realizar uma tarefa de maneira mais eficiente e mais rápida (Liu and Nejat, 2013). Em geral, vários robôs mais simples e mais baratos podem executar o mesmo trabalho de um único robô maior, mais especializado e mais caro, ou até uma tarefa que um único robô não pode realizar. Desta forma, além das vantagens já mencionadas, pode-se acrescentar a economia na aquisição e manutenção do robô especializado, e a garantia de que a tarefa continuará sendo realizada mesmo que um ou mais robôs membros do pelotão falhem (Mondada et al., 2005).

Nesse contexto surgiu o termo controle de formação, referindo-se ao controle coordenado de um grupo de robôs, também chamado de sistema multi-robôs. A formação de robôs pode ser classificada de diversas maneiras, levando

em conta os tipos de robôs (formações homogêneas ou heterogêneas), a estrutura associada ao pelotão (formações rígidas ou flexíveis), a distribuição do sistema de controle (centralizado ou descentralizado), etc.

Diversas abordagens para o controle de uma formação de robôs têm sido descritas na literatura, com uma extensa análise de suas características, aplicabilidade, vantagens e desvantagens. Uma delas, que é utilizada neste trabalho, é o controle baseado em estruturas virtuais (Tan and Lewis, 1996; Kitts and Mas, 2009), em que uma forma geométrica é associada ao pelotão. Por exemplo, em (Ren and Beard, 2004; Low, 2011; Pacheco et al., 2018) uma forma rígida define a configuração desejada dos robôs no espaço, que cooperam para minimizar os erros de forma e, em paralelo, para alcançar uma determinada trajetória ou pose de referência dada à formação. Rezaee and Abdollahi (2014), por sua vez, propõem um esquema robótico no qual os robôs são representados como cargas elétricas, de tal forma que as forças repulsivas criam a distância entre os agentes e assim mantêm a forma poligonal correspondente à estrutura. O movimento de cada robô para rastrear

* Suporte Financeiro: FAPEMIG, FAPES, CAPES e CNPq.

sua trajetória é relativo ao centro da formação, onde um agente virtual é introduzido como líder da formação. Outro aspecto é que tal estratégia pode ser implementada para estruturas fixas ou estruturas que variam ao longo do tempo, como em Low (2014) e Low (2016).

Em geral, para a formação cumprir uma tarefa, algumas tarefas parciais devem ser executadas. Na navegação em ambientes não estruturados, por exemplo, considera-se as tarefas parciais "posicionar a formação", "manter o formato da formação" e "desviar de obstáculos não previstos". Dependendo da situação, uma tarefa parcial tem prioridade maior que as demais, gerando um esquema de controle hierárquico. Por exemplo, se a formação deve ser rígida, será atribuída maior prioridade ao controle da forma da estrutura, seguida da evasão de obstáculos e do controle da posição da estrutura. Por outro lado, para uma formação flexível essa sequência de prioridades deve ser diferente, com maior prioridade para o desvio de obstáculos, o controle da posição da formação e o controle da forma da estrutura, respectivamente. Nesse sentido, o controle baseado em espaço nulo é altamente aplicável, por se tratar de uma técnica de controle capaz de dividir a tarefa principal, criando objetivos distintos, correspondentes a tarefas parciais conflitantes. Para resolver o conflito, uma ordem de prioridade é associada a cada um desses objetivos, definindo a ordem na qual as tarefas parciais conflitantes serão realizadas. Um sinal de controle correspondente a cada tarefa parcial é gerado, que são combinados em um único sinal de controle para cada robô da formação (Antonelli et al., 2010; Rosales et al., 2016).

O objetivo deste trabalho, ao propor um sistema que utiliza o controle baseado em espaço nulo, não é criar uma nova estratégia para guiar a formação. O interesse é avaliar a possibilidade de definir prioridades na execução de uma tarefa principal. Tais prioridades se referem, aqui, à forma e à posição da formação, muito relevantes quando a formação navega em ambiente livre, e que servirão de base para execução de tarefas mais complexas, com mais tarefas parciais incorporadas ao controlador. A motivação provém de aplicações em que é importante hierarquizar o controle de forma e posição. Por exemplo, numa tarefa de escolta, em que a formação deve ser rígida, prioriza-se a forma, para que a entidade a ser escoltada seja protegida pelos robôs da escolta. Numa tarefa de transporte de carga a prioridade também deve ser maior para o controle de forma que o de posição, para que o objeto transportado não caia. Já no mapeamento de uma grande área sabe-se que os robôs estão em formação mas não há preocupação quanto ao formato da mesma, ou seja, o principal interesse é o posicionamento para cobrir as áreas que ainda não foram mapeadas.

Para lidar com esses tópicos, a sequência deste artigo tem cinco seções, começando com a Seção 2, que descreve a formação abordada e as variáveis envolvidas. Na sequência, a Seção 3 discute alguns aspectos do controle baseado em espaço nulo, caracterizando as tarefas parciais de controle de forma e de posição, seguida pela Seção 4, que descreve detalhadamente a metodologia adotada para executar os experimentos com três configurações de controle. Continuando, a Seção 5 apresenta e analisa resultados obtidos nos experimentos de validação, e a Seção 6 destaca as principais conclusões do trabalho.

2. DESCREVENDO A FORMAÇÃO

Este trabalho lida com uma formação de três robôs móveis uniciclo, modelo Pioneer 3-DX, que será tratada como uma estrutura virtual composta por duas formações parciais, cada uma composta por dois robôs, como mostra a Figura 1. As variáveis referentes aos robôs estão indicadas pelos índices 1 e 2, para identificar a que robô elas se referem. Note-se que se considera que os veículos podem estar navegando em alturas diferentes, tornando a modelagem mais genérica.

Matematicamente, a formação é caracterizada por sua posição (x_F, y_F, z_F) , considerando o sistema global de coordenadas $\langle W \rangle$, e também por variáveis de forma, que caracterizam a sua aparência. A forma é dada pela distância ρ_F entre os dois robôs e pelos ângulos α_F e β_F , associados às projeções de ρ nos planos XZ e YZ , respectivamente.

Note-se, na Figura 1, que a posição da formação é idêntica à posição do robô R_1 , ou seja, $[x_F \ y_F \ z_F]^T = [x_1 \ y_1 \ z_1]^T$. Além disso, a partir da posição de R_1 é definido um novo sistema de coordenadas, representado em vermelho, sobre o qual se pode explicitar as variáveis de forma.

Um aspecto relevante é que esta formação em linha é genérica o suficiente para incluir dois robôs quaisquer, por exemplo dois veículos aéreos não tripulados (VANTs, do inglês *Unmanned Aerial Vehicle* - UAV). É possível também que se aplique em uma formação heterogênea, formada por um veículo terrestre não tripulado (VTNT, do inglês *Unmanned Ground Vehicle* - UGV) e um UAV, e até para controle de mais de uma formação, combinando diversas formações básicas em linha, associando os robôs conforme desejado, resultando em uma formação mais ampla com diversos agentes, como é o caso dos experimentos discutidos mais adiante (Neto et al., 2019).

Ainda conforme a Figura 1, os robôs serão denotados como R_1 e R_2 , índices estes que também individualizam as posições de cada robô. Para se referir às formações parciais de dois robôs que compõem a formação de três robôs tratada neste trabalho, usa-se F_A , que é a formação de dois robôs composta por R_1 e R_2 , e F_B , que é a formação composta por R_1 e R_3 .

Por meio de uma análise geométrica da Figura 1, é possível obter a relação de transformação f , que permite obter a caracterização da formação, definida por $\mathbf{q} = [x_F \ y_F \ z_F \ \rho_F \ \beta_F \ \alpha_F]^T$ a partir da posição $\mathbf{x} = [x_1 \ y_1 \ z_1 \ x_2 \ y_2 \ z_2]^T$ dos robôs. Tal transformação é de-

Figura 1. Caracterização da formação em linha composta por dois Pioneer 3-DX

notada por

$$\mathbf{q} = f(\mathbf{x}), \quad (1)$$

sendo $x_F = x_1$, $y_F = y_1$, $z_F = z_1$, $\rho_F = \sqrt{d_x^2 + d_y^2 + d_z^2}$, $\alpha_F = \sin^{-1}\left(\frac{d_x}{\rho_F}\right)$, e $\beta_F = \sin^{-1}\left(\frac{d_y}{\rho_F}\right)$, com $d_x = x_2 - x_1$, $d_y = y_2 - y_1$, e $d_z = z_2 - z_1$.

Por outro lado, a transformação inversa, que define as posições de cada robô em função das variáveis de formação, é expressa por

$$\mathbf{x} = f^{-1}(\mathbf{q}), \quad (2)$$

sendo $x_1 = x_F$, $y_1 = y_F$, $z_1 = z_F$, $x_2 = x_F + \rho_F \sin \alpha_F$, $y_2 = y_F + \rho_F \sin \beta_F$, e $z_2 = z_F + \rho_F \sqrt{1 - \sin^2 \alpha_F - \sin^2 \beta_F}$.

Analizando as equações acima pode-se concluir que uma vez conhecidas as posições dos dois robôs, a configuração atual da formação $\mathbf{q}$ pode ser determinada, e, eventualmente, comparada com uma configuração desejada $\mathbf{q}_d$. Desta forma, é possível calcular como cada robô precisa se comportar, usando estratégias de controle, para reduzir o erro de formação $\tilde{\mathbf{q}} = \mathbf{q}_d - \mathbf{q}$. Entretanto, para tarefas de seguimento de trajetória é necessário também explicitar a relação diferencial entre o espaço dos robôs e o espaço da formação. Isso é feito usando a matriz Jacobiana, obtida derivando (1) no tempo. Por conseguinte,

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}(\mathbf{x})\dot{\mathbf{x}}, \text{ com } \mathbf{J}(\mathbf{x}) = \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial \mathbf{x}} \in \mathcal{R}^{6 \times 6}. \quad (3)$$

3. O CONTROLE BASEADO EM ESPAÇO NULO

A abordagem de espaço nulo pode ser considerada como uma maneira analítica de implementar a arquitetura de subsunção, principalmente ao lidar com o controle coordenado de sistemas multi-robôs. Ela permite dividir uma dada tarefa em um conjunto de subtarefas, atribuindo-lhes diferentes prioridades, executando as subtarefas de menor prioridade somente quando não conflitam com as de maior prioridade (Antonelli et al., 2010; Rosales et al., 2016). Usando a abordagem de espaço nulo, uma certa sub tarefa recebe a prioridade mais baixa quando é projetada no espaço nulo da tarefa que tem a prioridade imediatamente acima. No caso de duas subtarefas, como é o caso aqui tratado, a sub tarefa de menor prioridade é projetada no espaço nulo da sub tarefa de prioridade mais alta. Quando a tarefa a ser realizada é dividida em três subtarefas, a tarefa de prioridade intermediária é projetada no espaço nulo da de maior prioridade, enquanto a de menor prioridade é projetada no espaço nulo da intermediária. Em todos os casos, o espaço nulo é associado à uma matriz jacobiana, como é detalhado em (Antonelli et al., 2010).

A matriz Jacobiana em (3) pode ser dividida em duas de dimensões 3×6 , $\mathbf{P}(\mathbf{x})$ e $\mathbf{F}(\mathbf{x})$, relacionadas, respectivamente, com a posição e a forma da formação, isto é, $\mathbf{J}(\mathbf{x}) = [\mathbf{P}(\mathbf{x}) \ \mathbf{F}(\mathbf{x})]^T$. Assim sendo, é possível implementar o controle baseado em espaço nulo, com prioridades diferentes para manter a forma e mover a formação.

A forma de atribuir menor prioridade a uma tarefa é projetá-la no espaço nulo da tarefa com maior prioridade. Considerando como tarefas manter a forma da formação e movê-la, isto significa que (Antonelli et al., 2010)

$$\mathbf{v}_r = \mathbf{v}_{fr} + (\mathbf{I}_{6 \times 6} - \mathbf{F}^\# \mathbf{F})\mathbf{v}_{pr}, \quad (4)$$

para dar maior prioridade a manter a forma, ou

$$\mathbf{v}_r = \mathbf{v}_{pr} + (\mathbf{I}_{6 \times 6} - \mathbf{P}^\# \mathbf{P})\mathbf{v}_{fr}, \quad (5)$$

para dar maior prioridade a controlar a posição da formação. Por sua vez, $\mathbf{v}_{fr} = \mathbf{F}^\#(\dot{\mathbf{q}}_d + \mathbf{K}_1 \tanh(\mathbf{L}_1 \tilde{\mathbf{q}}_p))$, e $\mathbf{v}_{pr} = \mathbf{P}^\#(\dot{\mathbf{q}}_d + \mathbf{K}_2 \tanh(\mathbf{L}_2 \tilde{\mathbf{q}}_p))$, onde $\mathbf{K}_i$ e $\mathbf{L}_i$, $i = 1, 2$ são matrizes de ganho diagonais positivas definidas, cujos elementos valem 30 e 0.1, respectivamente. O subíndice f é relativo à variáveis de forma e p denota variáveis de posição. Quando uma variável está acompanhada também do subíndice d é para atrelá-la aos valores que se deseja que ela assuma. Por sua vez, a variável $\mathbf{v}_r$ é a velocidade de referência para os robôs, obtida a partir da aplicação de alguma lei de controle à formação.

4. METODOLOGIA DO EXPERIMENTO

Esta seção descreve a maneira como foram realizados os experimentos que originaram os resultados da Seção 5.

4.1 A trajetória a ser seguida

A tarefa considerada neste trabalho consiste em um seguimento de trajetória por uma formação composta por três VTNTs. Esta formação é dividida em duas formações em linha, estrutura esta que foi modelada na Seção 2. Vale relembrar que a formação F_A é composta pelos robôs R_1 e R_2 , enquanto a formação F_B é composta pelos robôs R_1 e R_3 . A Figura 2 esboça este arranjo de uma formação composta por três Pioneer 3-DX, resultante da associação de duas formações em linha. A mesma referência de trajetória é dada às duas formações em linha, e é descrita pela curva

$$\begin{cases} x_{Fd} = \sin 4\pi t_p [m] \\ y_{Fd} = \sin 8\pi t_p [m] \\ z_{Fd} = 0.0 [m] \end{cases}, \quad (6)$$

onde t_p é parametrizado no tempo como

$$t_p(t) = 3 \left(\frac{t}{100} \right)^2 - 2 \left(\frac{t}{100} \right)^3, \quad 0 \leq t \leq 100 [s]. \quad (7)$$

A peculiaridade desta parametrização é variar a frequência associada à trajetória ao longo do tempo, de tal maneira que a referência de velocidade comece em zero e aumente

Figura 2. Caracterização da formação composta por três robôs Pioneer 3-DX.

gradualmente até atingir seu máximo aos 50[s]. A partir daí, a velocidade passa a diminuir, na mesma proporção, para que, ao fim dos 100[s], volte a zero. Associada à curva lemniscata de Bernoulli, esta abordagem permite excitar mais a dinâmica dos veículos, para melhor avaliar os controladores usados.

O que muda é a relação dos outros robôs com R_1 , dando formatos diferentes às formações. A forma de F_A é definida por $\rho_{Ad} = 1.0$ [m], $\alpha_{Ad} = \frac{\pi}{4}$ [rad] and $\beta_{Ad} = \frac{\pi}{4}$ [rad]. Já F_B , por sua vez, tem a forma caracterizada por $\rho_{Bd} = 1.0$ [m], $\alpha_B = \frac{\pi}{4}$ [rad] e $\beta_{Bd} = -\frac{\pi}{4}$ [rad].

4.2 Análise de Desempenho

O desempenho dos controladores propostos é medido de acordo com alguns índices de desempenho amplamente conhecidos na literatura. O primeiro é baseado na integral absoluta do erro, do inglês *Integral of the Absolute Error* (IAE), provendo a informação de como o erro se acumulou ao longo do tempo. Este índice é descrito por

$$IAE = \int_0^{t_f} \|\tilde{\mathbf{q}}\| dt, \quad (8)$$

e é calculado considerando o vetor contendo os erros das variáveis da formação, em relação ao subconjunto das variáveis de forma e ao subconjunto de variáveis de posição separadamente.

Além da análise do erro, é importante verificar o sinal de controle aplicado em cada robô, o que é feito por meio de uma integral absoluta dos sinais de controle, do inglês *Integral of Absolute Control Signal* (IACS), obtida por

$$IACS = \int_0^{t_f} \|\mathbf{u}\| dt. \quad (9)$$

Desta forma, é possível estimar a quantidade de sinal de controle enviada pelo controlador no transcorrer do tempo, dando pistas sobre o consumo de energia associado à tarefa a ser realizada. Neste caso, os sinais de controle enviados à cada Pioneer-3DX são considerados separadamente, para permitir inferir quanto de energia cada robô exige.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção se mostram os resultados experimentais obtidos com três controladores de formação, considerando um seguimento de trajetória por uma formação homogênea, composta por três robôs Pioneer 3-DX. A comunicação entre a unidade central e os robôs, que possuíam notebooks ligado a eles, se fez via Wi-Fi. Os dados de posição e orientação foram colhidos usando um sistema OptiTrack de captura de movimento, configurado com oito câmeras, integradas à unidade de controle central.

A proposta deste trabalho é definir duas subtarefas, organizadas de forma hierárquica de acordo com suas prioridades de execução, com a sub tarefa de prioridade mais baixa sendo executada apenas quando não está em conflito com a de maior prioridade. As duas subtarefas consistem em manter a forma da formação e levá-la a uma posição desejada variável no tempo.

Três casos são considerados: o primeiro usa o controlador proposto em Santos Rabelo et al. (2018), para o qual a tarefa de rastreamento de trajetória é considerada como um todo, sem prioridade de sub tarefa (SP - caso Sem Prioridade). Quanto aos outros dois casos, eles correspondem a dar a mais alta prioridade para a sub tarefa de levar a formação para uma posição desejada (caso PP - Prioridade de Posição) ou para manter a forma de formação (caso PF - Prioridade de Forma). O vídeo dos experimentos está disponível em <https://youtu.be/sL0Ihdh9WYo>.

É importante ressaltar que em todos os casos os ganhos dos controladores são os mesmos, assim como as posições e orientações iniciais dos robôs, o que é fundamental para uma análise comparativa de desempenho.

A tarefa principal consiste em rastrear uma trajetória lemniscata, definida em (6). Na Figura 3 é possível verificar o desempenho de cada uma das três abordagens de controlador para guiar a formação, em termos dos erros de posição e forma. Como esperado, o controlador PF tem desempenho inferior ao dos demais em relação aos erros de posição, enquanto os erros de forma do controlador PP são maiores que os demais. O erro $\tilde{y}_F$ para o caso PF é superior em termos de magnitude e número de oscilações, em comparação com $\tilde{x}_F$, devido às características intrínsecas da trajetória de referência, para a qual a frequência associada ao eixo y é duas vezes a associada ao eixo x .

As duas formações, F_A e F_B , têm resultados similares. Portanto, os comentários podem ser feitos em termos da formação geral, sem precisar citar especificidades de cada sub formação. Nesse sentido, o controlador SP teve ótimo desempenho, ficando próximo de PP com relação aos erros de posição, e de PF considerando os erros de forma. Portanto, no geral o controlador sem definição de prioridade teve os menores erros, sendo eficiente no controle da posição e da forma. Consequentemente, apenas em situações específicas onde manter a forma é preponderante o controlador PF deve ser usado. Já o controlador PP deve ser usado onde preservar a posição é preponderante, ou quando chegar à posição desejada mais rápido é importante.

O índice IAE, para os três controladores aqui abordados, é mostrado na Figura 4, enquanto o índice IACS está na Figura 4(b).

Na Figura 4(a) tem-se uma representação em forma de coluna do valor IAE para cada caso (SP, PF e PP). A parte azul de cada coluna representa a contribuição dos erros de posição, enquanto a parte laranja corresponde ao erro de forma. Observando essas colunas, pode-se perceber que os melhores desempenhos de posicionamento estão associados aos controladores PP e SP, enquanto o melhor desempenho para o erro de forma é o do controlador FP. No entanto, o melhor desempenho, considerando os erros de posição e forma juntos, é o do controlador SP.

O trajeto percorrido pela formação e pelos três agentes é mostrado na Figura 5. O traçado dos robôs é bem parecido, não havendo diferenças entre os diferentes robôs para um mesmo tipo de controlador, ou até mesmo se a análise é feita entre os diferentes controladores. Note que é difícil avaliar o quão melhor é uma estratégia em relação à outra apenas observando esta figura, razão pela qual se justifica o uso dos indicadores de desempenho.

(a) Erros referentes às variáveis de posição.

(b) Erros referentes às variáveis de forma.

Figura 3. Comportamento dos erros para os experimentos.

Portanto, a expectativa foi efetivamente cumprida: melhores resultados associados às variáveis de forma quando manter a forma da formação é a maior prioridade, e melhores resultados associados às variáveis de posição quando levar a formação para a posição desejada é a prioridade su-

perior. Para o caso SP o desempenho global, considerando os erros de forma e posição juntos, mostrou-se melhor. Avaliando separadamente as subtarefas, os resultados do controlador SP foram próximos aos do PF e PP para forma e posição, respectivamente.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho é feita uma análise de controladores de formação para rastreamento de trajetória, avaliando a possibilidade de definição de prioridades e hierarquia de tarefas. Foram analisadas três situações, a comum, em que não existem prioridades definidas, a prioridade de manter a forma e a prioridade de posicionamento, visando o cumprimento de uma tarefa principal. Esta tarefa pode ser o mapeamento de uma área, onde a prioridade é o posicionamento, ou uma tarefa de transporte de carga ou escolta, que exige priorização da forma.

Os resultados experimentais demonstram que nos três casos as formações seguiram de maneira amplamente satisfatória a trajetória de referência, mostrando que mesmo com as definições de prioridade o resultado geral é similar a um controlador convencional. Na navegação em ambiente não estruturado, com a presença de obstáculos, pode-se

(a) Integral absoluta do erro (IAE).

(b) Integral absoluta do sinal de controle (IACS).

Figura 4. Índices de desempenho.

concluir que diante destes distúrbios as subtarefas serão cumpridas, levando em conta uma hierarquia predefinida, que pode conter duas ou até mais prioridades.

O indicador de desempenho IAE mostra que o erro relativo às subtarefas secundárias é grande, mas que se minimiza o erro da que é prioritária. Já o indicador IACS permite dizer que o gasto energético é praticamente o mesmo, não importando se a prioridade é forma ou posição. É importante dizer que esta última conclusão é válida para navegação em ambiente plano e sem obstáculos, como aquele em que o experimento foi realizado.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, agência de fomento do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, à CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, agência de fomento à pós-graduação do Ministério da Educação, à FAPES - Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito

Santo, e à FAPEMIG - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais, pelo apoio a esta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Antonelli, G., Arrichiello, F., and Chiaverini, S. (2010). The nsb control: a behavior-based approach for multi-robot systems. *Paladyn*, 1(1), 48–56.
- Kitts, C.A. and Mas, I. (2009). Cluster space specification and control of mobile multirobot systems. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 14(2), 207–218.
- Liu, Y. and Nejat, G. (2013). Robotic urban search and rescue: A survey from the control perspective. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 72(2), 147–165.
- Low, C.B. (2011). A dynamic virtual structure formation control for fixed-wing uavs. In *9th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA)*, 627–632.
- Low, C.B. (2014). A flexible virtual structure formation keeping control design for nonholonomic mobile robots with low-level control systems, with experiments. In *2014 IEEE International Symposium on Intelligent Control (ISIC)*, 1576–1582.
- Low, C.B. (2016). An analysis on flexible formations of nonholonomic mobile robots: Motion planning and control perspectives. In *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 306–313.
- Mondada, F., Gambardella, L.M., Floreano, D., Nolfi, S., Deneuborg, J., and Dorigo, M. (2005). The cooperation of swarm-bots: physical interactions in collective robotics. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 12(2), 21–28.
- Neto, V.E., Sarcinelli-Filho, M., and Brandão, A.S. (2019). Trajectory-tracking of a heterogeneous formation using null space-based control. In *2019 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 187–195. doi:10.1109/ICUAS.2019.8798031.
- Pacheco, G.V., Fonseca, R.H.M., Neto, V.E., and Brandão, A.S. (2018). Control signal weighting for robot formation. In *2018 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 111–116.
- Ren, W. and Beard, R. (2004). Decentralized scheme for spacecraft formation flying via the virtual structure approach. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 27(1), 73–82.
- Rezaee, H. and Abdollahi, F. (2014). A decentralized cooperative control scheme with obstacle avoidance for a team of mobile robots. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(1), 347–354.
- Rosales, C., Leica, P., Sarcinelli-Filho, M., Scaglia, G., and Carelli, R. (2016). 3d formation control of autonomous vehicles based on null-space. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 84(1-4), 453–467.
- Santos Rabelo, M.F., Santos Brandão, A., and Sarcinelli-Filho, M. (2018). Centralized control for an heterogeneous line formation using virtual structure approach. In *2018 Latin American Robotic Symposium (LARS)*, 135–140. João Pessoa, PB, Brazil.
- Tan, K.H. and Lewis, M.A. (1996). Virtual structures for high-precision cooperative mobile robotic control. In *Proceedings of the 1996 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'96)*, volume 1, 132–139.

Figura 5. Trajeto percorrido pelos robôs nos três casos considerados.