

USO DE HIERARQUIAS NO CONTROLE DE ENXAMES ROBÓTICOS

VINICIUS GRACIANO SANTOS*, LUIZ CHAIMOWICZ*

**Laboratório de Visão e Robótica (VeRLab)
Universidade Federal de Minas Gerais
Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil*

Emails: vgs@dcc.ufmg.br, chaimo@dcc.ufmg.br

Abstract— A robotic swarm consists of a system formed by multiple robots that usually work cooperatively to perform a certain task. One important research topic in this area is navigation. Traditional approaches use planners that exploit the individual configuration space of each agent, generally causing problems in group behavior, such as lack of consistency and traffic congestions. This paper aims to formulate a hierarchical abstraction that controls the swarm, defining a geometric formation of known properties that allows automated control of group consistency. Thus, it is possible to solve the path planning problem from the exploitation of its configuration space, which is independent of the number of robots. We perform simulated and real experiments in order to evaluate the proposed approach. Results show that the abstraction is effective to define the group formation as well as increase its coherence during navigation.

Keywords— robotic swarms, centralized coordination, artificial potential fields, configuration space, robotics, artificial intelligence.

Resumo— Um enxame robótico consiste em um sistema formado por múltiplos robôs que normalmente trabalham de forma cooperativa para realizarem uma determinada tarefa. Um dos importantes tópicos de pesquisa nessa área é a navegação. Abordagens tradicionais utilizam planejadores que exploram individualmente o espaço de configurações de cada agente, gerando problemas para o comportamento do grupo, como falta de coerência e congestões de tráfego. Este trabalho propõe a formulação de uma abstração que sirva de controle para o enxame, de forma a agrupá-lo hierarquicamente, definindo uma formação geométrica de propriedades conhecidas e automatizando o controle da coerência do grupo. Dessa maneira, será possível utilizá-la para resolver o problema do planejamento de caminhos a partir da exploração do seu espaço de configurações, que é independente do número de robôs. Experimentos reais e simulados foram realizados com o intuito de avaliar o método proposto. Os resultados mostram que a abstração é eficaz para definir a formação do grupo e aumentar a sua coerência durante a navegação.

Palavras-chave— enxames robóticos, coordenação centralizada, campos potenciais artificiais, espaço de configurações, robótica, inteligência artificial.

1 Introdução

Com o avanço da tecnologia na área de robótica móvel e da capacidade de comunicação e computação embutida em um único robô, o uso de grandes grupos de agentes tem recebido muita atenção em anos recentes. Muitas vezes inspirados na biologia, tais sistemas propõem a utilização de um enxame de agentes simples para executar tarefas complexas, como a exploração e o mapeamento de ambientes desconhecidos, a transportação de grandes objetos, manipulação distribuída e também no auxílio em cenários de resgate.

Não somente limitado à robótica, o estudo de algoritmos para o controle de enxames também possui um grande impacto em outras áreas como realidade virtual, jogos digitais e simulações de multidões. Normalmente, os ambientes criados nessas aplicações são povoados por entidades que devem comportar-se como um grupo coerente em vez de indivíduos únicos. Por exemplo, dado o modelo virtual de um prédio, é desejável simular o comportamento de uma multidão evacuando o local em caso de incêndios ou outros tipos de emergência.

Um problema comum na maioria dessas tarefas é a navegação. Como a dimensão do espaço

de configurações aumenta exponencialmente com o número de agentes, o uso de algoritmos tradicionais para resolver o problema do planejamento de caminhos torna-se muito caro, mesmo para um número pequeno de robôs. Possíveis soluções incluem planejar separadamente um caminho para cada agente, considerando-se apenas o espaço de configurações individual, ou definir campos vetoriais globais para controlar o enxame como um todo. Tais soluções geralmente levam a conflitos nas trajetórias dos robôs, que devem ser resolvidos. Um exemplo é a congestão de tráfego, que geralmente ocorre quando um grande número de robôs movimentam-se para uma mesma região do ambiente durante o mesmo intervalo de tempo.

Nos últimos anos, novas abordagens tentam modelar o enxame através de estruturas virtuais que reduzem a dimensionalidade do problema de controle (Belta and Kumar, 2004). De forma geral, tais estruturas definem regras de formação para os agentes de modo a agrupá-los hierarquicamente, introduzindo um novo nível de abstração para o controle do enxame, pois apenas a estrutura virtual precisa ser explicitamente controlada.

Este trabalho propõe a formulação de uma abstração modelada a partir de campos potenciais artificiais para o controle de um enxame de agen-

tes. A abstração permite o controle do enxame a partir de um conjunto de parâmetros que definem a pose e a forma do grupo no espaço de trabalho. Dessa maneira, será possível utilizá-la para resolver o problema do planejamento de caminhos de forma mais eficiente, também automatizando o controle da coerência do grupo durante a sua locomoção.

A principal justificativa da pesquisa é que o número de graus de liberdade do sistema cresce linearmente com o número de agentes. Por esse motivo, a aplicação de um planejador que explore o produto cartesiano dos espaços de configurações de cada robô torna-se muito caro. Também, a solução encontrada aplicando-se um planejador individualmente sobre os agentes pode acarretar em problemas para o comportamento do grupo. Logo, o uso de uma abstração que represente o enxame com um nível reduzido de graus de liberdade pode tornar viável a exploração desse novo espaço de configurações.

O artigo está organizado como se segue: a Seção 2 discute alguns trabalhos relacionados na área; a Seção 3 apresenta a metodologia utilizada para definir a abstração, assim como uma proposta de um controlador hierárquico. Resultados experimentais em ambientes simulados e reais são mostrados na Seção 4, enquanto a Seção 5 apresenta as conclusões e diretrizes para trabalhos futuros.

2 Trabalhos Relacionados

Um dos primeiros algoritmos desenvolvidos para controlar o movimento de um enxame de agentes foi proposto em (Reynolds, 1987) com o objetivo de gerar um padrão de movimento realístico para a simulação de um bando de pássaros, conhecidos como *birds*. De forma resumida, interações locais entre agentes dentro de uma mesma área de vizinhança definem um comportamento emergente para todo o bando. Tais interações podem ser modeladas como um caso especial do método dos campos potenciais sociais (Reif and Wang, 1999), que utiliza uma técnica de descida do gradiente para gerar forças virtuais que levam os agentes ao seu objetivo enquanto desviam localmente de obstáculos.

Uma diferente abordagem considera o grupo como uma entidade única, modelando-o a partir de uma *estrutura virtual*. O movimento desejado é comandado à estrutura, que controla implicitamente o enxame robótico. Os trabalhos apresentados em (Tan and Lewis, 1996) e (Egerstedt and Hu, 2001) definem controladores que convergem e mantêm um grupo de robôs em uma formação rígida de acordo com uma estrutura conhecida. Entretanto, tais métodos não são escaláveis para grandes enxames e as relações geométricas entre os robôs dificultam alterações na formação durante o

movimento.

Estruturas deformáveis foram utilizadas em (Kamphuis and Overmars, 2004a) e (Barnes et al., 2009) junto com o método dos campos potenciais para agrupar e controlar o enxame. O primeiro utiliza um *Mapa de Rotas Probabilístico (Probabilistic Roadmap)* (Choset et al., 2005) para planejar um caminho que possibilite a navegação da estrutura em um ambiente com obstáculos, enquanto o segundo apresenta controladores que convergem o enxame em uma região elíptica conhecida, utilizada para escoltar um comboio de veículos terrestres. Outros trabalhos consideraram um conjunto de estruturas para aumentar a coesão do grupo e facilitar o planejamento de caminhos: em (Li and Chou, 2003) por exemplo, uma árvore hierárquica cujos nós representam esferas de controle foi utilizada para navegar “multidões” de robôs em ambientes com obstáculos e em (Kamphuis and Overmars, 2004b) o caminho planejado para um único agente é expandido para formar um corredor auxiliar utilizando-se o espaço livre pelo caminho. Ajustando-se as características desse corredor é possível controlar de forma desejada um enxame que navega através dele.

Baseado no mapeamento do espaço de configurações do enxame para uma *variedade* de menor dimensão, que é independente do número de robôs, uma abstração formal foi desenvolvida em (Belta and Kumar, 2004) que permite o controle da pose e do formato de um time de robôs localizados em um plano. Tal trabalho foi estendido em (Michael et al., 2006), para considerar enxames tridimensionais, e em (Hou et al., 2009) um modelo dinâmico de controle foi proposto para abstrações similares. Com base em (Belta and Kumar, 2004), um mecanismo de cooperação entre múltiplos veículos terrestres e aéreos não tripulados foi desenvolvido (Chaimowicz and Kumar, 2004). Nesse artigo, os veículos aéreos são responsáveis por estimar a configuração dos agentes terrestres e também por enviar mensagens de controle baseadas na abstração. Além disso, comportamentos de junção e separação dos grupos também foram estudados, visto que tais manobras podem ser necessárias para navegar-se em um ambiente com obstáculos.

O presente trabalho propõe utilizar os conceitos do paradigma hierárquico para definir uma abstração intuitiva modelada através do uso de campos potenciais artificiais, uma técnica amplamente utilizada na navegação de enxames robóticos.

3 Metodologia

Seguindo a arquitetura hierárquica mostrada em (Chaimowicz and Kumar, 2004), define-se um conjunto de robôs completamente atuados com modelo dinâmico $\dot{\mathbf{q}}_i = \mathbf{v}_i$, $\dot{\mathbf{v}}_i = \mathbf{u}_i$, sendo $\mathbf{q}_i =$

$[x_i, y_i]^T$ a pose do robô i , \mathbf{v}_i a sua velocidade e \mathbf{u}_i sua entrada de controle. Tais robôs são agrupados de acordo com uma abstração modelada através de um par (g, s) que compreende a pose e a forma do grupo, respectivamente. Como apenas são considerados robôs cujo espaço de configurações pode ser representado em \mathbb{R}^2 , então $g \in SE(2)$. Assim, a abstração a é definida por:

$$\begin{aligned} a &= (g, s) \\ g &= (\mu_x, \mu_y, \theta) \\ s &= (s_1, s_2). \end{aligned} \quad (1)$$

Tal abstração pode ser vista como uma elipse definida implicitamente por $c(x, y) = 0$, centrada em (μ_x, μ_y) , com orientação θ e eixos principais dados por s_1 e s_2 .

Um grupo é definido como o conjunto dos robôs que respeitam a restrição $c(\mathbf{q}_i) < 0$. Portanto, a curva $c(x, y) = 0$ pode ser vista como uma borda que limita e define um grupo. Com o intuito de simplificar as próximas equações, considere que \mathbf{q}_i é dado em relação ao eixo de referência ortonormal definido pelos componentes de g .

Deseja-se criar um campo vetorial que sirva de controle para os agentes, de forma que um robô i será agrupado se $c(\mathbf{q}_i) < 0$ e repelido no caso contrário. Para definir-se um campo potencial cujo gradiente possui tais características, considere a seguinte função:

$$\phi(\mathbf{q}_i, a) = \|\mathbf{q}_i\| \left(1 - \frac{s_1 s_2}{\sqrt{(x_i s_2)^2 + (y_i s_1)^2}} \right) \quad (2)$$

A equação (2) mapeia \mathbf{q}_i para a sua distância radial com relação à curva $c(x, y) = 0$, não sendo definida quando o robô encontra-se na origem. Logo, a função

$$U(\mathbf{q}_i, a) = \begin{cases} 0, & \text{se } x_i = 0 \wedge y_i = 0 \\ e^{-\gamma \phi^2(\mathbf{q}_i, a)}, & \text{se } x_i \neq 0 \vee y_i \neq 0 \end{cases} \quad (3)$$

produz um campo potencial cujo máximo está localizado na curva $c(x, y) = 0$, formando uma superfície similar a uma bacia, com γ sendo inversamente proporcional a espessura de sua parede, como exposto na Figura 1. Assim, a seguinte lei de controle é proposta:

$$\mathbf{u}_i = -k_1 \nabla U(\mathbf{q}_i, a) - k_2 \dot{\mathbf{q}}_i + \sum_{j \in N_i} F_r(\mathbf{q}_i, \mathbf{q}_j). \quad (4)$$

As constantes k_1 e k_2 são positivas. O primeiro termo é a força responsável por agrupar os agentes que estão dentro do grupo e repelir aqueles que não estão; o segundo termo é uma força dissipativa de energia, usada para melhorar a estabilidade; e o último representa forças locais de repulsão, que previnem colisões entre os robôs em uma determinada vizinhança. O conjunto N_i consiste em cada robô k que está a um certo limite δ

de distância do robô i . F_r é normalmente definida em termos de δ e $\|\mathbf{q}_i - \mathbf{q}_k\|$ (Choset et al., 2005).

A lei de controle apresentada em (4) permite que robôs individuais sejam controlados de acordo com o estado abstrato a . Dessa maneira, ao definir-se controladores para os parâmetros g e s , uma hierarquia é especificada em que os robôs são implicitamente controlados pela abstração de alto nível. Por exemplo, simples controladores lineares podem ser utilizados para esse propósito, considerando-se um modelo cinemático para o controle da abstração:

$$\begin{aligned} \dot{\mu}_x &= k_3(\mu_x^* - \mu_x), \\ \dot{\mu}_y &= k_4(\mu_y^* - \mu_y), \\ \dot{s}_1 &= k_5(s_1^* - s_1), \\ \dot{s}_2 &= k_6(s_2^* - s_2), \\ \dot{\theta} &= k_7(\theta^* - \theta), \end{aligned} \quad (5)$$

com o símbolo sobrescrito $*$ denotando o valor desejado para o parâmetro.

Para um grande número de robôs, o uso da abstração como entrada para um planejador de caminhos é interessante, já que seu espaço de configurações será $\mathbb{R}^4 \times S^1$, que é independente do número de robôs. Também, como a curva $c(x, y) = 0$ pode ser representada tanto de modo discreto quanto contínuo, qualquer algoritmo de planejamento que opere em ambas as representações pode ser aplicado sobre o grupo, resultando no controle implícito de todos os seus robôs.

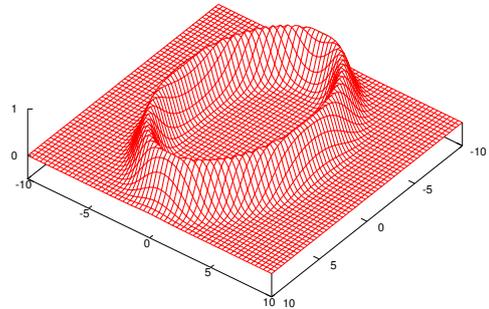


Figura 1: Campo potencial artificial com $\gamma = 1$, $s_1 = 5$ e $s_2 = 8$.

4 Experimentos

Uma série de simulações e experimentos reais foram executados com o intuito de estudar a viabilidade da abstração proposta. A implementação foi feita utilizando-se a plataforma *Player/Stage* (Gerkey et al., 2003), um arcabouço de controle e simulação de robôs muito utilizado na comunidade científica. Os agentes virtuais foram baseados no modelo P2DX, um robô diferencial equipado com *lasers* para a estimação da distância a obstáculos. Os experimentos reais foram conduzidos com um conjunto de robôs *e-puck* (Mondada

et al., 2009), um pequeno robô diferencial equipado com oito sensores infravermelho para sensoriamento de proximidade, com uma interface *blue-tooth* que permite a comunicação local entre robôs, assim como o controle através de um computador remoto. Além disso, um processador *dsPIC* é responsável pelo processamento local.

Para controlar os robôs diferenciais, a velocidade do grupo ($\dot{\mu}_x, \dot{\mu}_y$) foi adicionada como um novo termo em (4), com o objetivo de alinhá-los mais facilmente com a direção do movimento. O novo controlador foi adaptado para considerar as restrições não-holonômicas de acordo com (De Luca and Oriolo, 1994).

4.1 Simulações

Três diferentes tipos de experimentos foram executados: agrupamento, navegação sem obstáculos e navegação com obstáculos. O primeiro consiste em um ambiente contendo robôs espalhados de acordo com uma distribuição normal (Figura 3(a)) e os componentes de s passam por transformações de modo a agrupar os agentes em diferentes formações elípticas, como mostrado nas Figuras 3(c) a 3(f).

No experimento de navegação sem obstáculos, os robôs são posicionados em uma área predefinida do espaço de trabalho e a configuração inicial da abstração é calculada de acordo com (Belta and Kumar, 2004). Um caminho é então especificado manualmente através de *waypoints*. A Figura 4 exemplifica tais experimentos, apresentando um grupo de 40 robôs movimentando-se implicitamente de acordo com os controladores da abstração, que levam o grupo a seguir um caminho definido por um arco de círculo.

A Figura 5 mostra um grupo de robôs navegando por um ambiente contendo obstáculos. Para efetuar-se o planejamento, a técnica do Mapa de Rotas Probabilístico (Choset et al., 2005) foi empregada. Como o sistema Player/Stage permite acesso a um mapa do espaço de trabalho através de uma grade com resolução fixa, um processo de amostragem de células foi escolhido para determinar a interseção da curva $c(x, y) = 0$ com os obstáculos do ambiente.

Como pode ser visto, em todos os três experimentos os resultados mostraram que a abstração permite controlar o enxame de forma eficaz. Além disso, a movimentação dos robôs mostrou-se suave com relação as mudanças dos parâmetros abstratos. Tais resultados indicam que a abordagem pode ser viável para controlar um grande número de robôs.

4.2 Robôs Reais

Experimentos reais são importantes para demonstrar a viabilidade do algoritmo em situações em

que as incertezas causadas por erros de sensoria-mento e atuação podem ter grande influência sobre os resultados. Tais experimentos foram conduzidos em laboratório, utilizando-se um arcabouço de experimentação para enxames robóticos desenvolvido no Laboratório de Visão e Robótica (VeR-Lab) da UFMG (Garcia and Chaimowicz, 2009). O arcabouço é composto por doze robôs *e-puck* (Figura 2), que comunicam-se remotamente com uma máquina hospedeira do sistema *Player*, e um conjunto de câmeras que localizam marcos fiduci-ais acoplados a cada robô com o objetivo de estimar a sua configuração.



Figura 2: Doze robôs *e-puck* pertencentes ao arcabouço de experimentação do VeRLab.

Como o *e-puck* não foi projetado para atingir velocidades altas, por simplicidade, um modelo cinemático $\mathbf{q}_i = \mathbf{u}_i$ foi utilizado em vez do modelo dinâmico proposto. Em conformidade, o termo dissipativo de (4) foi removido. Também, como os seus sensores infravermelho possuem um alcance pequeno, um sensor virtual foi implementado com base no sistema de localização citado.

Os resultados do experimento de agrupamento são mostrados na Figura 6 e indicam que é possível utilizar a abstração proposta para controlar enxames reais de forma simples e intuitiva. Por motivos de espaço, apenas esse experimento foi transposto para um ambiente real.

4.3 Discussão

Assim como em (Belta and Kumar, 2004) e (Chaimowicz and Kumar, 2004), algumas suposições foram feitas a respeito das informações disponíveis para os robôs. Foi considerado que o robô i tem acesso ao estado abstrato a e que sua pose \mathbf{q}_i no referencial do grupo é conhecida. Tais informações podem ser obtidas, por exemplo, através do uso de um ou mais robôs aéreos que controlam a abstração, formando uma hierarquia de três níveis, como proposto em (Chaimowicz and Kumar, 2004).

Uma das principais vantagens da abordagem hierárquica é a possibilidade de obter determinados comportamentos para o enxame apenas através da alteração do estado abstrato a . Ou seja, é possível definir controladores simples como em (5) para controlar um grande número de robôs. Tais parâmetros também poderiam ser controlados por um operador humano através de alguma interface remota.

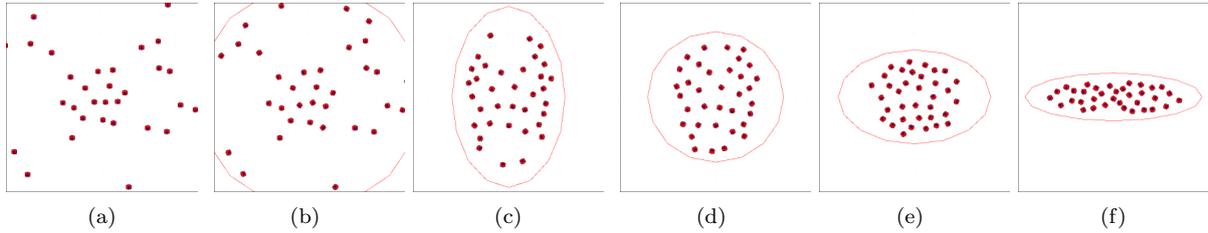


Figura 3: Execução do experimento de agrupamento em simulação. O polígono que circula o grupo representa a curva definida pela abstração.

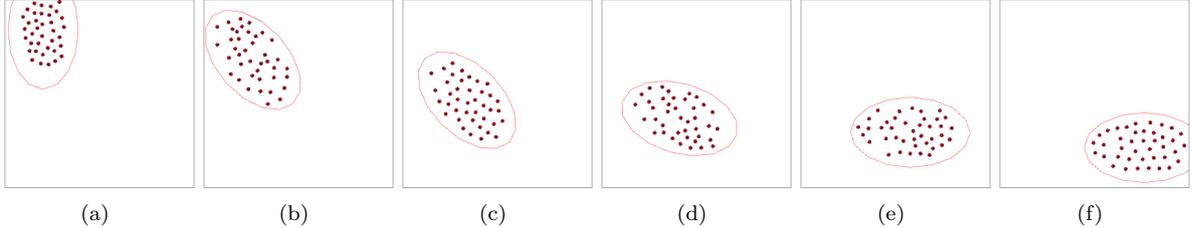


Figura 4: Navegação do enxame em um ambiente sem obstáculos.

Ao utilizar-se a técnica dos campos potenciais artificiais para a definição da abstração, uma grande desvantagem é a necessidade do ajuste cuidadoso das constantes. Seus valores devem ser escolhidos de forma que as elipses virtuais respeitem as restrições de velocidade dos robôs. Além disso, as constantes k_1 e γ devem ser ajustadas de acordo com a força de repulsão entre os agentes, de forma que o somatório de F_r pelo conjunto N_i não leve o robô i a deixar o grupo. Também é importante tratar os pontos de descontinuidade da função $\phi(\mathbf{q}_i, a)$, que explicitamente define a forma do grupo. Um fato interessante é que tal função pode ser modificada para considerar outros tipos de estruturas, como retângulos ou triângulos.

Ao considerar-se as restrições não-holonômicas para robôs diferenciais, as elipses devem diminuir sua velocidade ou até mesmo parar quando um robô encontra-se muito perto da borda do grupo, permitindo que o agente tenha tempo suficiente para manobrar (um comportamento similar é visto em (Kamphuis and Overmars, 2004a)). Entretanto, tal abordagem pode fazer o sistema entrar em *deadlock* se as forças repulsivas entre os robôs os levarem a expandir totalmente dentro da elipse. Além do mais, em cenários reais, erros na precisão de medidas podem acarretar em problemas quando um robô está muito próximo da borda.

5 Conclusões

Nesse trabalho foi proposta uma abstração de alto nível para controlar um enxame robótico, modelada através da técnica dos campos potenciais artificiais. Desse modo, uma hierarquia é definida em que agentes individuais são controlados implicitamente através dos parâmetros da

abstração. Resultados em simulação na plataforma *Player/Stage* e também em um ambiente real utilizando-se dez robôs *e-puck* foram apresentados para demonstrar a viabilidade da abordagem.

Os resultados mostraram que a abstração é capaz de definir uma formação elíptica para o grupo, assim como manter a coerência do mesmo durante a navegação. Além disso, o espaço de configurações definido pela abstração mostrou-se independente do número de robôs, diminuindo o caráter exponencial do espaço de busca original e permitindo o uso de planejadores de caminho baseados em amostragem de configurações.

Existem diversas possibilidades para trabalhos futuros. Experimentos considerando-se diferentes formas para os grupos, assim como utilizando-se robôs aéreos para completar a hierarquia, seriam uma adição interessante. Por fim, a abstração também permite o uso de regras de controle de tráfego para diminuir congestionamentos durante a navegação de grupos distintos, como é apresentado em (Santos and Chaimowicz, 2011). Explorando essas e outras características será possível expandir as possibilidades de controle utilizando-se esse novo paradigma hierárquico para enxames robóticos.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao CNPq e a FAPEMIG pelo suporte ao trabalho.

Referências

- Barnes, L., Fields, M. and Valavanis, K. (2009). Swarm formation control utilizing elliptical surfaces and limiting functions, *IEEE Trans.*

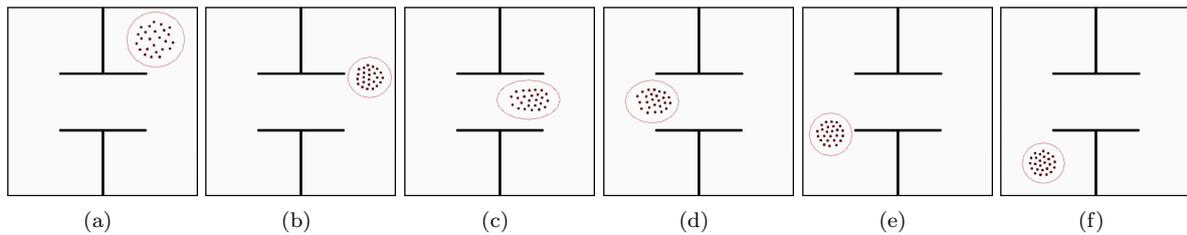


Figura 5: Navegação do enxame em um ambiente com obstáculos.

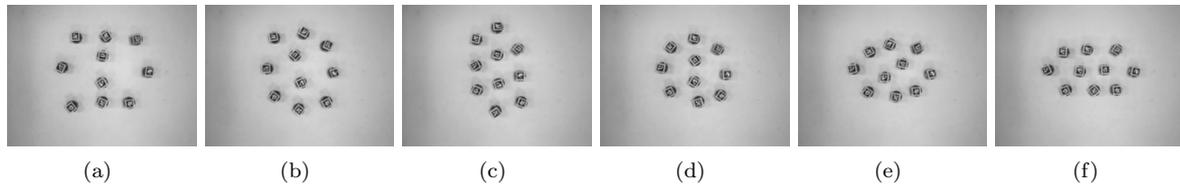


Figura 6: Execução do experimento de agrupamento real.

- on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics* **39**(6): 1434–1445.
- Belta, C. and Kumar, V. (2004). Abstraction and control for groups of robots, *IEEE Trans. on Robotics* **20**(5): 865–875.
- Chaimowicz, L. and Kumar, V. (2004). Aerial shepherds: Coordination among uavs and swarms of robots, *DARS*.
- Choset, H., Lynch, K. M., Hutchinson, S., Kantor, G. A., Burgard, W., Kavraki, L. E. and Thrun, S. (2005). *Principles of Robot Motion: Theory, Algorithms, and Implementations*, MIT Press.
- De Luca, A. and Oriolo, G. (1994). Local incremental planning for nonholonomic mobile robots, *ICRA*, Vol. 1, pp. 104–110.
- Egerstedt, M. and Hu, X. (2001). Formation constrained multi-agent control, *IEEE Trans. on Robotics and Automation* **17**(6): 947–951.
- Garcia, R. and Chaimowicz, L. (2009). Uma infraestrutura para experimentação com enxames de robôs, *SBAI*.
- Gerkey, B. P., Vaughan, R. T. and Howard, A. (2003). The player/stage project: Tools for multi-robot and distributed sensor systems, *ICAR*, pp. 317–323.
- Hou, S., Cheah, C. and Slotine, J. (2009). Dynamic region following formation control for a swarm of robots, *ICRA*, pp. 1929–1934.
- Kamphuis, A. and Overmars, M. (2004a). Motion planning for coherent groups of entities, *ICRA*, Vol. 4, pp. 3815–3822.
- Kamphuis, A. and Overmars, M. H. (2004b). Finding paths for coherent groups using clearance, *Proc. of the ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*, pp. 19–28.
- Li, T.-Y. and Chou, H.-C. (2003). Motion planning for a crowd of robots, *ICRA*, Vol. 3, pp. 4215–4221.
- Michael, N., Belta, C. and Kumar, V. (2006). Controlling three dimensional swarms of robots, *ICRA*, pp. 964–969.
- Mondada, F., Bonani, M., Raemy, X., Pugh, J., Cianci, C., Klapotocz, A., Magnenat, S., Zufferey, J.-C., Floreano, D. and Martinoli, A. (2009). The e-puck, a robot designed for education in engineering, *Proc. of the 9th Conf. on Autonomous Robot Systems and Competitions*, Vol. 1, pp. 59–65.
- Reif, J. H. and Wang, H. (1999). Social potential fields: A distributed behavioral control for autonomous robots, *Robotics and Autonomous Systems* **27**(3): 171–194.
- Reynolds, C. W. (1987). Flocks, herds, and schools: A distributed behavioral model, *Computer Graphics*, pp. 25–34.
- Santos, V. G. and Chaimowicz, L. (2011). Hierarchical congestion control for robotic swarms, *IROS*.
- Tan, K.-H. and Lewis, M. (1996). Virtual structures for high-precision cooperative mobile robotic control, *IROS*, Vol. 1, pp. 132–139.