



SEGREGAÇÃO DE ENXAMES DE ROBÔS HETEROGÊNEOS DO TIPO INTEGRADOR SIMPLES EM MÚLTIPLOS GRUPOS USANDO ABSTRAÇÕES

EDSON B. F. FILHO*, LUCIANO C. A. PIMENTA*

*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais
Av. Antônio Carlos, 6627, 31270-010, Belo Horizonte, MG, Brasil.

Emails: edsonbffilho@ufmg.com, lucpim@cpdee.ufmg.br

Abstract— This article proposes a control strategy to reach segregation in robot swarms using abstractions. It's considered the single integrator robot model in the two dimensional case. The approach is based on abstractions created to represent each group of robots and a controller inspired by artificial potential functions to segregate the groups. A convergence proof is presented and a collision avoidance strategy is also proposed. Experiments with real robots are also shown.

Keywords— Robot swarms, segregation, multiagent systems

Resumo— Este artigo propõe uma estratégia de controle para obter a segregação em enxames de robôs com uso de abstrações. É considerado o modelo de robôs do tipo integrador simples para o caso de duas dimensões. A abordagem é baseada em abstrações criadas para representar cada grupo e em um controlador inspirado em funções potenciais artificiais para segregar os grupos. A prova de convergência é mostrada e uma estratégia de controle para evitar colisões também é proposta. Também são apresentados experimentos com robôs reais.

Palavras-chave— Enxames de robôs, segregação, sistemas multi-agente.

1 Introdução

Robótica de enxames é uma área nova se comparada com robótica para um único robô móvel e manipuladores robóticos. Estes sistemas têm como principal característica, o uso de vários agentes simples para executar tarefas que seriam mais difíceis ou impossíveis de serem executadas por apenas um destes agentes. Existem diversas vantagens em projetar um sistema deste tipo, como a tolerância a falhas individuais, por existirem diversos agentes redundantes em sua construção (Trianni, 2008) e também a flexibilidade na solução de diferentes problemas.

Para executar uma tarefa, uma série de objetivos menores precisam ser alcançados. Um destes objetivos pode ser a segregação de robôs heterogêneos, em que grupos menores homogêneos devem ser formados a partir de um grupo maior heterogêneo e estes grupos menores devem segregar-se. Para resolver o problema de segregação em enxames de robôs devem-se formular leis de controle individuais para fazer com que todos os robôs de um mesmo tipo agrupem-se enquanto mantém distância dos outros grupos.

Diferente de outros trabalhos na literatura, este artigo propõe uma técnica distribuída, para vários grupos, além de provar formalmente que o sistema converge para a segregação. Esta proposta consiste especialmente em acoplar duas ideias: abstrações e campos potenciais artificiais. São formadas abstrações simples para cada grupo como proposto em Belta and Kumar (2003). É usada a média da posição de todos os robôs de um grupo e a matriz de covariância do mesmo para representar este grupo. A função potencial inicialmente apresentada em Olfati-Saber (2006)

é utilizada para que ocorra a segregação dos grupos de robôs que agora são representados por suas abstrações. Além disso, é proposta uma estratégia para se evitar colisões entre robôs de um mesmo grupo e de grupos diferentes. Experimentos com robôs *e-pucks* também são apresentados.

Poucos trabalhos relacionados ao problema de segregação em enxames de robôs são encontrados na literatura. Os estudos mais relevantes sobre a resolução deste problema são apresentados em Groß et al. (2009), em Kumar et al. (2010), e em Santos et al. (2014).

Groß et al. (2009) utiliza comportamentos reativos em um algoritmo inspirado na física que explica como partículas tendem a se segregar com base na granulometria das partículas, efeito conhecido como *Brazilian Nut Effect*. Em Chen et al. (2012) é mostrada a implementação deste algoritmo em robôs *e-puck*.

Kumar et al. (2010) apresenta uma função de potencial baseada no modelo de adesão diferencial de células biológicas. É mostrada a prova de convergência assintótica para a segregação de enxames com apenas dois grupos de robôs. Cada robô necessita de informações sobre o estado de todos os outros robôs do sistema, porém não é necessário uma unidade central que controle todos os robôs.

Santos et al. (2014) estende o trabalho de Kumar et al. (2010) propondo uma nova função potencial artificial para mais de dois grupos, porém não é provada a convergência.

Em Santos et al. (2014) e Kumar et al. (2010) são considerados agentes do tipo duplo integrador e todo robô necessita de informações de posição de todos os outros robôs do sistema em todo ins-

tante. Neste trabalho, os robôs considerados são do tipo integrador simples e podem haver situações em que não são necessárias informações de todos os outros robôs do sistema. Além disso, pela primeira vez, é apresentada uma prova de convergência para múltiplos grupos e ainda experimentos com robôs reais.

2 Metodologia

Considere N robôs holonômicos movendo livremente em um plano com a posição de cada robô dada pelo vetor $\mathbf{q}_j^i = [x_j^i, y_j^i]^T$, $i = 1, 2, \dots, N_j$. Estes N robôs pertencem a um grupo dentre M grupos possíveis. O índice j indica a qual grupo o robô pertence, $j = 1, 2, \dots, M$ e N_j indica o número de robôs do grupo j .

Cada robô é do tipo integrador simples, atuado diretamente em velocidade:

$$\dot{\mathbf{q}}_j^i = \mathbf{u}_j^i, \quad (1)$$

em que \mathbf{u}_j^i é a entrada de controle. O espaço de configurações do sistema cresce proporcionalmente ao número de robôs: $Q = \mathbb{R}^{2N}$.

2.1 Abstrações

Belta and Kumar (2003) apresentam pela primeira vez o controle de um grande número de robôs por meio de uma abstração, mapeando o espaço de configurações dos robôs para uma variedade de dimensão menor. Neste trabalho, definimos uma abstração como a apresentada em Belta and Kumar (2003) para representar um grupo. Cada abstração utiliza como variáveis a média das posições dos robôs do grupo e uma variável dependente da matriz de covariância das posições dos robôs deste grupo que dá a ideia da dispersão do grupo. A média da posição de cada grupo é dada por:

$$\boldsymbol{\mu}_j = \begin{bmatrix} \mu_j^x \\ \mu_j^y \end{bmatrix} = \frac{1}{N_j} \sum_{i=1}^{N_j} \mathbf{q}_j^i, \quad (2)$$

em que $j = 1, 2, \dots, M$ e N_j é o número de robôs do grupo j . Neste artigo, faz-se cada abstração simétrica, dada por um círculo. A terceira variável de cada abstração é dada por:

$$\sigma_j = \frac{1}{N_j} \sum_{i=1}^{N_j} [(x_j^i - \mu_j^x)^2 + (y_j^i - \mu_j^y)^2], \quad (3)$$

e reflete a dispersão dos robôs em relação à média. A partir destas variáveis tem-se o mapeamento:

$$\phi_j : Q \rightarrow G \equiv \mathbb{R}^3, \quad (4)$$

a dimensão da variedade topológica G não é dependente da quantidade de robôs do grupo.

As variáveis de cada abstração são então definidas pelo vetor:

$$\phi_j(q) = [\mu_j^x, \mu_j^y, \sigma_j]^T. \quad (5)$$

As variáveis da abstração definem um círculo que contém todos os robôs do grupo. O centro do mesmo é dado pela média das posições de todos os robôs do mesmo grupo e o raio dado por $\sqrt{N_j \sigma_j}$. Note que $\|\mathbf{q}_i - \boldsymbol{\mu}_j\|^2 \leq \sum_{i=1}^{N_j} \|\mathbf{q}_i - \boldsymbol{\mu}_j\|^2 = N_j \sigma_j \Rightarrow \|\mathbf{q}_i - \boldsymbol{\mu}_j\| \leq \sqrt{N_j \sigma_j}$. Isto significa que, por construção, todos os robôs associados com a abstração ϕ_j sempre permanecem dentro de sua abstração. Outras forma de abstrações são possíveis, como apresentado em Belta and Kumar (2004).

Agora que as abstrações foram apresentadas, pode-se definir o problema de segregação.

Definição do problema: *Sejam N robôs de M tipos com dinâmica dada por (1), derive leis de controle individuais para cada robô que façam com que cada abstração ϕ_j associada a estes robôs convirja para um estado em que:*

$$\bigcap_{j=\{1, \dots, M\}} \phi_j = \emptyset. \quad (6)$$

Isto significa que no estado dito segregado, os robôs de um mesmo tipo estarão agrupados enquanto estarão separados dos robôs de outros tipos.

Para propor leis de controle individuais, deve-se relacionar o movimento da abstração com o movimento dos robôs. Assim, diferenciando a equação (5), tem-se:

$$\dot{\phi}_j = d\phi_j \dot{\mathbf{q}}_j \quad (7)$$

em que $\dot{\mathbf{q}}_j = [\dot{x}_j^1, \dot{y}_j^1, \dots, \dot{x}_j^{N_j}, \dot{y}_j^{N_j}]$. Com base nas equações (2), (3) e (5) pode-se obter $d\phi_j$:

$$d\phi_j = \frac{1}{N_j} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 2(x_j^1 - \mu_j^x) \\ 0 & 1 & 2(y_j^1 - \mu_j^y) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & 2(x_j^{N_j} - \mu_j^x) \\ 0 & 1 & 2(y_j^{N_j} - \mu_j^y) \end{bmatrix}^T. \quad (8)$$

Para obter as leis de controle individuais, propõe-se:

$$\mathbf{u}_j = d\phi_j^T (d\phi_j d\phi_j^T)^{-1} \tilde{\mathbf{u}}_j + \mathcal{N} \hat{\mathbf{u}}_j, \quad (9)$$

em que \mathbf{u}_j é dado por $\mathbf{u}_j = [u_j^1, \dots, u_j^{N_j}]$ e \mathcal{N} é tal que $d\phi_j \mathcal{N} = 0$. Conforme será mostrado adiante este segundo termo será usado para tratar colisões entre robôs. A variável $\tilde{\mathbf{u}}_j$ é dada por:

$$\tilde{\mathbf{u}}_j = [k_\mu \mathbf{U}_j^\mu \quad k_\sigma \mathbf{U}_j^\sigma]^T, \quad (10)$$

em que k_μ e k_σ são ganhos positivos. Desta forma, como $\dot{\mathbf{q}}_j = \mathbf{u}_j$ de acordo com (1), ao substituir (9) em (7) tem-se que a evolução da abstração será governada por:

$$\dot{\phi}_j = \tilde{\mathbf{u}}_j. \quad (11)$$

2.2 Função de potencial artificial

Esta seção apresenta a função de potencial proposta em Olfati-Saber (2006). A lei de controle a ser apresentada na próxima subseção será baseada no gradiente desta função.

No contexto original, esta função de potencial foi aplicada diretamente em um grupo de robôs para que estes navegassem enquanto se mantinham agrupados. Neste trabalho, esta função será aplicada para mover os centros das abstrações dos grupos de robôs. Antes de apresentar a função de potencial, é necessária a definição de um mapeamento não negativo da norma para que a função de potencial seja diferenciável em todos os pontos. Este mapeamento é chamado de σ -norm:

$$\|z\|_\sigma = \frac{1}{\epsilon} [\sqrt{1 + \epsilon \|z\|^2} - 1], \quad (12)$$

em que ϵ é um parâmetro que funciona como um ganho e permanece fixo neste artigo. Agora pode-se apresentar a função de potencial artificial:

$$V(\boldsymbol{\mu}) = \frac{1}{2} \sum_i \sum_{j \neq i} \psi_\alpha(\|\boldsymbol{\mu}_j - \boldsymbol{\mu}_i\|_\sigma), \quad (13)$$

em que:

$$\psi_\alpha(z) = \int_{d_\alpha}^z \gamma_\alpha(s) ds, \quad (14)$$

$$\gamma_\alpha = \rho_h(z/r_\alpha) \frac{c(z - d_\alpha)}{\sqrt{1 + (z - d_\alpha)^2}}, \quad (15)$$

onde c é uma constante. A função $\rho_h(z)$ é chamada de função *bump* e varia suavemente entre 1 e 0:

$$\rho_h(z) = \begin{cases} 1, & z \in [0, h] \\ \frac{1}{2} \left[1 + \cos\left(\pi \left(\frac{z-h}{1-h}\right)\right) \right], & z \in [h, 1] \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (16)$$

Os parâmetros r_α e d_α definem o *finite cut-off* $r_\alpha = \|r\|_\sigma$ e o mínimo global de ψ_α , $d_\alpha = \|d\|_\sigma$, respectivamente. Usando a função de potencial artificial são obtidas forças artificiais a partir do gradiente:

$$\mathbf{F}_i = -\nabla_{\boldsymbol{\mu}_i} V(\boldsymbol{\mu}) = \sum_{j \in B_i} \gamma_\alpha(\|\boldsymbol{\mu}_i - \boldsymbol{\mu}_j\|) \mathbf{n}_{ij}, \quad (17)$$

em que,

$$\mathbf{n}_{ij} = (\boldsymbol{\mu}_j - \boldsymbol{\mu}_i) / \sqrt{(1 + \|\boldsymbol{\mu}_i - \boldsymbol{\mu}_j\|)^2}. \quad (18)$$

O parâmetro c atua como um ganho, enquanto o parâmetro h modifica a suavidade da força. Para dois agentes quaisquer, a força de atração/repulsão será zero quando estiverem à distância desejada d e quando a distância entre eles for maior que r . Se $d < r < 2d$, todo mínimo local desta função de potencial implica na formação de α -lattices (Olfati-Saber, 2006). Formações α -lattices são estruturas em forma de treliça em que

cada um de seus vértices está a uma mesma distância d de todos os outros vértices pertencentes a sua vizinhança. Estas formações devem satisfazer o conjunto de restrições algébricas dadas por:

$$\|\boldsymbol{\mu}_i - \boldsymbol{\mu}_j\| = d \quad \forall j \in B_i, \quad (19)$$

B_i é o conjunto de vizinhos do grupo i . Estes vizinhos são os grupos cujo os centros de suas abstrações estão a uma distância menor do que r do centro da abstração do grupo i .

2.3 Leis de controle

Agora, pode-se propor U_j^μ e U_j^σ de forma a obter as leis de controle para cada robô. Para separar os centros das abstrações, formando α -lattices, faz-se:

$$U_j^\mu = \mathbf{F}_j, \quad (20)$$

em que \mathbf{F}_j são as forças artificiais definidas na seção 2.2. Assim, no mínimo desta função potencial, cada abstração terá seu centro em um vértice do α -lattice.

Para controlar o tamanho de cada abstração, iremos propor um controlador U_j^σ de forma que cada abstração convirja para o tamanho desejado. Iremos também definir o tamanho desejado σ_j^{des} para que quando cada abstração atingir este tamanho, o sistema esteja segregado, de acordo com a nossa definição. Sabemos que o raio de cada abstração é dado por $R_j = \sqrt{N_j \sigma_j}$. Assim, deve-se especificar o σ_j^{des} de forma que o raio R_j de cada abstração seja menor que metade da distância d que é o tamanho de cada aresta do α -lattice. Sendo assim:

$$\sigma_j^{des} \leq \frac{d^2}{4N_j}. \quad (21)$$

Agora, pode-se propor U_j^σ :

$$U_j^\sigma = k_\sigma (\sigma_j^{des} - \sigma_j). \quad (22)$$

Isto faz com que o tamanho de cada abstração convirja para o tamanho desejado σ_j^{des} . Também é o objetivo deste trabalho tratar o problema de colisões entre robôs. Para que o evitamento de colisões não interfira na convergência das abstrações, será considerado o controle no espaço nulo de $d\phi_j$. Este é o termo referente à matriz \mathcal{N} apontado em (10).

Em Michael et al. (2007) é usada uma estratégia parecida, também no espaço nulo de $d\phi_j$, porém usando agrupamentos entre três robôs para evitar as colisões. Neste trabalho estes agrupamentos não são necessários.

Para este sistema o espaço nulo de $d\phi_j$ é gerado por:

$$\text{null}(d\phi_j) = (I - d\phi_j^T (d\phi_j d\phi_j^T)^{-1} d\phi_j) \hat{\mathbf{u}}_j = \mathcal{N} \hat{\mathbf{u}}_j. \quad (23)$$

Este termo do controlador só será ativado quando

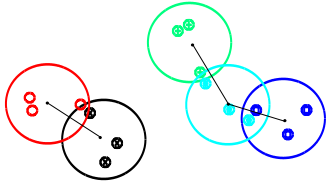


Figura 1: Robôs em iminência de colisão.

for detectada uma colisão iminente:

$$\left\| \mathbf{q}_k^i - \mathbf{q}_l^j \right\| < 2R_b + \delta, \quad (24)$$

em que os índices i e j indicam a quais grupos estes robôs pertencem, e os índices k e l indicam quais dos robôs está em iminente colisão. Neste artigo, são considerados robôs circulares de raio R_b . Um pequeno fator de segurança δ é adicionado para efeitos práticos. Então, as leis de controle individuais em situações de colisão iminente para um grupo são determinadas a partir de:

$$\mathbf{u}_j = d\phi_j^T (d\phi_j d\phi_j^T)^{-1} \tilde{\mathbf{u}}_j + \mathcal{N} \hat{\mathbf{u}}_j \quad (25)$$

O vetor $\hat{\mathbf{u}}_j$ é escolhido para garantir que não haverá uma colisão. Para que a interferência da estratégia proposta nos estados dos robôs seja energeticamente eficiente, $\hat{\mathbf{u}}_j$ é minimizado. Define-se o problema de otimização:

$$\min \sum_{j \in \Omega_p} \|\hat{\mathbf{u}}_j\|^2 \quad (26)$$

Sujeito a: $(\mathbf{u}_k^i - \mathbf{u}_l^j)^T (\mathbf{q}_k^i - \mathbf{q}_l^j) \geq 0$, para qualquer $\mathbf{q}_k^i - \mathbf{q}_l^j$ satisfazendo (24). O conjunto Ω_p é o conjunto de grupos nos quais existem robôs em iminente colisão, sendo que o índice p é dado pelo número de componentes conexos no grafo de colisões (ver figura (1)). Neste grafo cada abstração é um nó e existe aresta entre nós que contenham colisões iminentes entre robôs dos grupos.

A figura (1) mostra uma situação em que o grafo possui dois componentes conexos ($p = [1, 2]$), nesta situação, há dois problemas de otimização independentes, um com dois grupos envolvidos e outro com três grupos envolvidos.

Em cada problema de otimização, na função objetivo são considerados todos os grupos em que há robôs envolvidos na colisão iminente, e são considerados todos os outros robôs destes grupos. Para cada par de robôs envolvidos é adicionada uma nova restrição.

2.4 Análise do controlador

Nesta seção apresentamos a análise formal do controlador proposto.

Teorema 1 *Aplicando a lei de controle individual dada por (10), (20), (22) e (25) em N robôs com*

dinâmica dada por (1) divididos em M grupos e assumindo que as colisões são resolvidas de acordo com (26) e que não há situações em que todos os robôs do mesmo grupo estão em um mesmo ponto ao mesmo tempo e o sistema não começa em um ponto de sela ou máximo global de $V(\boldsymbol{\mu})$, o sistema irá convergir para um estado no qual todos os robôs de um mesmo grupo estão agrupados enquanto estão separados de robôs de outros grupos, i.e., o problema definido na seção 2.1 será resolvido.

Prova: A prova da convergência é feita em duas partes. Primeiro deve-se provar que o sistema de malha fechada de cada abstração, converge para o tamanho desejado (σ_j^{des}). Depois deve-se provar que os grupos se afastam o suficiente.

Para a prova de convergência, faz-se três suposições:

1. O sistema não começa em um ponto de sela ou um máximo local de $V(\boldsymbol{\mu})$ (Olfati-Saber, 2006).
2. Não há situações em que todos os robôs de um mesmo grupo estão em um mesmo ponto.
3. Todas as colisões podem ser resolvidas, i.e., o problema de minimização (26), sempre tem solução viável.

Sabemos que $\det(d\phi_j d\phi_j^T) = \frac{2\sigma_j}{(N_j)^3}$, e com a suposição 2 sabemos que $\sigma_j \neq 0$, assim $d\phi_j d\phi_j^T$, sempre terá inversa e o movimento das abstrações será dado por (11), além disso, como o controlador de evitamento de colisões opera no espaço nulo de $d\phi$ tem-se que a evolução das abstrações não será alterada por esta componente. A suposição 3 apenas garante que a evolução das abstrações não será perturbada pela ocorrência de colisões entre robôs, de tal forma que um possa impedir o movimento do outro.

Para a primeira parte da prova, sabe-se que para qualquer valor positivo de k_σ a dinâmica dada por $\dot{\sigma}_j = k_\sigma(\sigma_j^{des} - \sigma_j)$ sempre fará σ_j convergir exponencialmente para σ_j^{des} (Slotine et al., 1991). Sabemos pela seção 2.1 que todos os robôs associados com uma abstração sempre permanecem dentro da mesma.

Para a segunda parte da prova considere,

$$W = V(\boldsymbol{\mu}), \quad (27)$$

onde $\boldsymbol{\mu} = [\boldsymbol{\mu}_1^T, \boldsymbol{\mu}_2^T, \dots, \boldsymbol{\mu}_M^T]^T$. Calculando \dot{W} :

$$\dot{W} = \nabla V^T \dot{\boldsymbol{\mu}}. \quad (28)$$

Porém, conforme definido

$$\dot{\boldsymbol{\mu}} = -\nabla V. \quad (29)$$

Logo,

$$\dot{W} = -\|\nabla V\|^2 \leq 0. \quad (30)$$

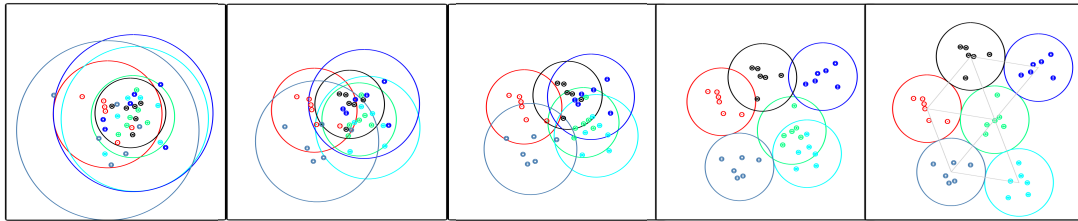


Figura 2: Sequência de quadros de uma simulação.

Figura 3: Sequência de quadros do experimento com robôs *e-puck*.

Por outro lado, tem-se que $W \geq 0$, ou seja, W é limitado inferiormente. Além disso, \dot{W} é limitado, o que permite concluir que \dot{W} é uniformemente contínuo.

Portanto, utilizando o *Lema de Barbalat* (Lema 4.3 em Slotine et al. (1991)) conclui-se que $\dot{W} \rightarrow 0$ quando $t \rightarrow \infty$. Como $\dot{W} = 0$ implica em $\nabla V = 0$ e assumindo a suposição 1 como verdadeira, isto só ocorre se os grupos estiverem a uma distância maior que r (*finite cut-off* da função de potencial) ou se estiverem numa formação tipo α -lattice a uma distância d (ponto onde ocorre o mínimo de $V(\mu)$, veja Olfati-Saber (2006)). Ou seja, o sistema converge para uma situação em que as abstrações estarão a uma distância maior ou igual a d .

Como as abstrações atingem um tamanho especificado respeitando (21), então o problema de segregação como definido na seção 2.1 é resolvido. \square

3 Experimentos e Simulações

Primeiramente foram feitas simulações no MATLAB (MathWorks, 2014) para estudar a viabilidade do método proposto e em seguida o método foi implementado em robôs reais. Um vídeo com os experimentos pode ser encontrado em https://youtu.be/BH5Hk_NVNxc.

No instante inicial todos os robôs estão parados e distribuídos uniformemente. Não há colisões, nem robôs em iminente colisão neste primeiro instante.

Nos dois experimentos faz-se $\sigma_j^{des} = \frac{d^2}{4N} + \Delta$, para todos os grupos, sendo Δ um número pequeno que garante que a inequação (21) seja satisfeita. A segregação é atingida quando todas as abstrações convergem para seu tamanho desejado ($\sigma_j = \sigma_j^{des}$) e o α -lattice é formado, ou seja, não há mais forças artificiais aplicadas sobre estas abs-

trações. Isto garante que não há nenhum robô “invadindo” outra abstração.

3.1 Simulações

Uma simulação exaltando os aspectos qualitativos da proposta em ambiente MATLAB é mostrada na figura 2. Neste exemplo são usados 6 grupos com 6 robôs em cada grupo. Pode-se observar que os sistema atinge a segregação.

Cada robô é modelado como um círculo e é usado o modelo cinemático da equação (1). O tamanho de cada abstração é mostrado (círculos maiores). Cada abstração é identificada por uma cor, seus robôs por esta cor e uma forma específica. A solução do problema de minimização em (26) é obtido com ajuda da função *fmincon* do MATLAB. No último quadro da figura 2 também é destacado o α -lattice.

3.2 Experimentos com robôs reais

Um experimento com 9 robôs *e-puck* (Mondada et al., 2009) também é apresentado. Foi utilizada a plataforma experimental descrita em Garcia (2009), que possui uma câmera para localização dos robôs *e-puck* através de *tags* colocadas em cima dos mesmos. Os 9 robôs são divididos em 3 grupos com 3 robôs em cada um dos grupos. Os robôs utilizados são do tipo *differential drive* e é usada a linearização por realimentação de estados (Pimenta et al., 2013) para que possa ser possível usar a estratégia proposta em robôs deste tipo. Os robôs são modelados como sendo um quadrado inscrito em um círculo de raio igual a metade do diâmetro do quadrado. Para efeito da metodologia proposta o tamanho dos robôs é considerado como sendo o tamanho dos círculos. Quadros deste experimento são mostrados na figura 3.

4 Conclusão e trabalhos futuros

Neste trabalho foi proposto um controlador que segregava grupos de robôs heterogêneos usando abstrações. A prova de convergência para segregação foi mostrada. Esta proposta foi baseada no uso de abstrações para representar cada grupo de robôs e em uma função de potencial artificial. Foi proposta uma estratégia para evitar colisões dentro do controlador para segregação proposto com uso do espaço nulo.

Os experimentos mostrados na seção 3 validam a estratégia proposta para solução do problema de segregação em enxames de robôs. Tanto nas simulações quanto nos experimentos com robôs reais, pode-se perceber por uma análise visual que a segregação foi atingida com sucesso. Em todas as simulações e experimentos realizados não foi observada nenhuma situação em que alguma das suposições usadas na prova do teorema 1 não fossem verdadeiras e a segregação não fosse atingida, não importando o número de robôs do sistema.

Do conhecimento destes autores, este trabalho é o primeiro a resolver este problema que pode não precisar de informações globais o tempo todo em que a prova de convergência é mostrada. Na estratégia proposta, cada robô não precisa de nenhuma informação sobre os robôs que estão longe, fora de sua vizinhança B_i .

Outra contribuição interessante é a estratégia para evitar colisões mantendo o estado das abstrações, não importando o número de robôs envolvidos nas colisões. Ainda existem muitas melhorias que podem ser exploradas. Por exemplo, estratégias em que ainda menos informações sejam necessárias para cada robô. Outra melhoria seria um controlador usando como modelo robôs de segunda ordem.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com o apoio financeiro da CAPES, CNPq, Fapemig e Finep.

Referências

- Belta, C. and Kumar, V. (2003). Towards abstraction and control for large groups of robots., *Control Problems in Robotics, STAR 4*: 169-182 .
- Belta, C. and Kumar, V. (2004). Abstraction and control for groups of robots., *IEEE Transactions on Robotics*, 20(5): 865-875 .
- Chen, J., Gauci, M., Price, M. J. and Groß, R. (2012). Segregation in swarms of e-puck robots based on the brazil nut effect., *Proceedings of the 11th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, vol. 1: 163-170 .
- Garcia, R. e Chaimowicz, L. (2009). Uma infraestrutura para experimentação com enxames de robôs., *Anais do IX Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI)* .
- Groß, R., Magnenat, S. and Mondada, F. (2009). Segregation in swarms of mobile robots based on the brazil nut effect., *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. pp. 4349-4356 .
- Kumar, M., Garg, D. and Kumar, V. (2010). Segregation of heterogeneous units in a swarm of robotic agents., *IEEE Transactions on Automatic Control*, 55(3): 743-748 .
- MathWorks (2014). *version 8.3.0.532 (R2014a)*., The MathWorks Inc., Natick, Massachusetts.
- Michael, N., Fink, J. and Kumar, V. (2007). Controlling a team of ground robots via an aerial robot., *Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 965-970 .
- 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., *Proceedings of the 9th conference on autonomous robot systems and competitions*, vol. 1: pp. 59-65 .
- Olfati-Saber, R. (2006). Flocking for multi-agent dynamic systems: Algorithms and theory., *IEEE Transactions on Automatic Control*, 51(3): 401-420 .
- Pimenta, L., Pereira, G., Michael, N., Mesquita, R., Bosque, M., Chaimowicz, L. and Kumar, V. (2013). Swarm coordination based on smoothed particle hydrodynamics technique., *IEEE Transactions on Robotics*, 29(2): 383-399 .
- Santos, V., Pimenta, L. and Chaimowicz, L. (2014). Segregation of multiple heterogeneous units in a robotic swarm., *IEEE International Conference on Robotics & Automation 2014 (ICRA)*, pp. 1112-1117 .
- Slotine, J.-J. E., Li, W. and others. (1991). *Applied nonlinear control*., Vol. 60, Prentice-Hall Englewood Cliffs, NJ.
- Trianni, V. (2008). *Evolutionary Swarm Robotics: Evolving Self-organising Behaviours in Groups of Autonomous Robots*. Berlin, Germany: Springer-Verlag, vol. 108.