

Avaliação de um Modelo Tolerante a Falhas para Atuação Tática de Grupos Robóticos Utilizando Algoritmos Genéticos

Gustavo Pessin¹, Fernando Osório¹

¹Universidade de São Paulo (USP)
Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação (ICMC)
Av. do Trabalhador São-Carlense, 400 – C.P. 668 – 13.560-970 – São Carlos, SP
pessin@icmc.usp.br, fosorio@icmc.usp.br

Abstract. The main goal of this paper is to describe the evaluation of a fault-tolerant model for tactic operations of mobile robotic groups. The coordinated action of the group is planned with Genetic Algorithms (GA) and aims to act on environmental disaster scenarios (such as forest fire). The evaluations has been conducted in a virtual reality environment, which has been described in [1]. Initially, we evaluate several parameters in the AG, seeking to obtain the set that would accomplish the more efficient evolution. Then we simulate failures in robots operations in order to evaluate the strategy reorganization. The simulation's results¹ showed that with an adequate set of parameters is possible to get satisfactory strategic positions to coordinate and to reorganize the robotic group in case of robot failures. Furthermore, this GA solution can be applied on similar activities.

1 Introdução

A constante evolução proporcionada pelas pesquisas em robótica móvel tem desenvolvido robôs cada vez mais eficientes para diversas funções. Estudos sobre formas de controle das complexidades motoras são realizados em diversos centros de pesquisa ao redor do mundo, englobando estudos sobre posicionamento de sensores e atuadores, navegação e localização, além de diversos outros requisitos relacionados ao hardware robótico, como demonstram [2], [3]. O desenvolvimento de algoritmos especializados, constituídos de sistemas baseados em regras e de autômatos usados para coordenar estes conjuntos físicos em um ambiente dinâmico é um desafio extremamente complexo [4]. Um dos objetivos primordiais do uso de sistemas robóticos é de que estes podem auxiliar em tarefas essencialmente perigosas aos seres humanos, como limpeza de resíduos nucleares, limpeza de acidentes químicos, combate de incêndios florestais, ou mesmo atuar em construção civil, agricultura, exploração de ambientes hostis, segurança e missões críticas. Existem diversas áreas onde a habilidade de um único agente robótico não é suficiente ou eficiente para a realização de uma tarefa, assim, em diversas atividades o que aparenta ser ideal é a aplicação de sistemas multi-robóticos. Sistemas multi-robóticos são sistemas onde robôs autônomos trabalham cooperativamente a fim de cumprir uma

¹ Código-fonte e vídeos disponíveis em <http://pessin.googlepages.com/robomheiros>

missão, podendo existir interação entre os robôs ou não [5]. São sistemas extremamente dependentes de técnicas de controle. No que diz respeito à aplicabilidade de robôs autônomos, o trabalho com grupos robóticos pode adicionar mobilidade, flexibilidade e robustez de uma nova maneira e a uma nova gama de aplicações [6].

No trabalho [7] apresentamos um AG responsável pela formação de grupos robóticos para atuação em combate de incêndios florestais; o modelo proposto não apresentava possibilidade de reorganização em caso de falha em algum robô. Neste artigo apresentamos as alterações para que a operação de combate de incêndio seja realizada de forma satisfatória mesmo com falhas nos robôs. Considerando que um dos aspectos fundamentais da reorganização é a rapidez na geração das novas coordenadas de posicionamento, fizemos um estudo detalhado de diversos parâmetros a fim de chegar ao conjunto mais eficiente para o modelo proposto; em seguida, simulamos operações de falhas nos robôs a fim de reorganizar a estratégia de atuação. Neste artigo, apresentamos na Seção 2 conceitos e aplicações de robótica móvel. Na Seção 3 apresentamos conceitos e aplicações de Algoritmos Genéticos. Na Seção 4 apresentamos o simulador, o cromossomo e o *fitness* utilizados e na Seção 5 descrevemos detalhadamente os experimentos e resultados.

2 Robótica móvel

O trabalho em grupo depende que individualmente os robôs tenham capacidades bem desenvolvidas, podendo contar inclusive com robôs com capacidades distintas (sistema heterogêneo). Diversos trabalhos atuais demonstram o uso de robótica móvel (sistema individual) em operações hostis, como o robô de atuação em auxílio em resgate *Raposa* [8] e o robô *SACI* [9] projetado para atuar em combate de incêndios. Os protótipos militares *Boeing X-45* [10] e o *nEUROn* [11] que, sob supervisão humana em terra (sem nenhum piloto embarcado), estão sendo testados para missões de combate. Além disso, existem robôs para atuação em ambientes aquáticos, exploração espacial, de cavernas e vulcões, e até para uso doméstico. Existem também competições [12], [13] que põem à prova pequenos robôs móveis autônomos que têm missões como encontrar e apagar uma vela.

Grupos de robôs devem ser formados por robôs capazes de atuar efetivamente em tarefas, assim, é de vital importância o conhecimento em controle robótico. Trabalhos descrevendo controle inteligente de navegação robótica podem ser vistos em [14], [15]. Nos anos de 2004 e 2005 ocorreu o *DARPA Grand Challenge* [16], uma competição com o objetivo de construir um veículo completamente autônomo capaz de completar um longo trecho em estradas de terra em um tempo limitado. Em 2007 foi alterado o foco da competição, renomeada para *DARPA Urban Challenge*, tendo como novos objetivos a criação de um veículo capaz de se auto-dirigir no tráfego urbano, e de realizar tarefas como ultrapassagem, estacionamento e negociação em interseções. Percebem-se tendências a estudos de cooperação e de interação múltipla. Trabalhos em grupo adicionam grandes possibilidades na solução de tarefas, mas trazem consigo uma série de questões a serem resolvidas, principalmente em termos de colaboração e cooperação. Trabalho abordando formação de grupos como os [17], [18] utilizam regras pré-programadas nos agentes para realizar a formação. Os trabalhos [6], [19] exploram técnicas para realizar trabalhos com coletivos robóticos, usadas principalmente com a finalidade de aplicação do

conceito de auto-organização e otimização coletiva, porém não é explorada divisão de tarefas. Os trabalhos descritos demonstram que a aplicação de robótica móvel em controle de incidentes é um tópico ativo e importante de pesquisa e desenvolvimento. As diversas competições nesta área também demonstram que ainda não existe uma solução definitiva ou mais adequada ao problema, e que este é um tema de pesquisa em aberto. A literatura consultada ainda não apresenta uma forma consensual para a formação e atuação de grupos robóticos; ainda existe pouca autonomia e robustez a situações não previstas.

3 Algoritmos genéticos

Algoritmos Genéticos (AG) [20], [21] são técnicas de otimização que empregam estratégia de busca paralela e estruturada, embora aleatória, direcionada a busca de pontos de aptidão [22]. Permitem a realização de busca multi-critério em um espaço multi-dimensional. São técnicas classificadas como não supervisionadas, dado que não necessitam de nenhuma base de informação de antemão. Os AGs utilizam procedimentos iterativos que simulam o processo de evolução de uma população de possíveis soluções de um determinado problema. O processo de evolução é aleatório, porém guiado por um mecanismo de seleção baseado na aptidão de estruturas individuais. A cada iteração do algoritmo (uma geração), um novo conjunto de estruturas é criado através da troca de informações (bits ou blocos) entre estruturas selecionadas da geração anterior. O resultado tende a ser um aumento da aptidão de indivíduos ao meio. Um AG é estruturado de forma que as informações referentes a um determinado sistema possam ser codificadas de maneira análoga a cromossomos biológicos, como uma seqüência de valores, onde usualmente cada fragmento da seqüência representa uma variável.

Em se tratando de aplicações, [23] utiliza um AG para evoluir satisfatoriamente a direção, o sentido e o tempo de acionamento de motores de um braço robótico. Em [24], um modelo de AG evolui satisfatoriamente valores de força e tempo de aplicação das forças para realizar o caminhar robótico. O trabalho [25] apresenta um modelo de AG para evoluir a forma como um único robô móvel explora um ambiente desconhecido. Estes trabalhos apresentam resultados satisfatórios para ambientes estáticos; [26] descreve uma possível solução para o problema de operação em ambientes dinâmicos, onde um robô realiza navegação utilizando um AG, o robô é munido de sensores de obstáculos e quando identifica uma possível colisão, ele pára e reativa o módulo de planejamento usando o AG, desta maneira o sistema se torna de possível uso em ambientes dinâmicos.

4 Formação de grupos

Para que seja possível uma implementação física real, as avaliações que propomos devem ser projetadas, desenvolvidas e testadas anteriormente em ambientes de simulação realísticos. A simulação de sistemas robóticos é especialmente necessária para robôs caros, grandes, ou frágeis [4], sendo uma ferramenta extremamente poderosa para agilizar o ciclo de desenvolvimento de sistemas robóticos eliminando

desperdício. Avaliamos diversos simuladores, onde a descrição dos motivos da escolha pelo desenvolvimento de um novo simulador pode ser vista em [1]. O simulador foi desenvolvido em linguagem C++. Uma versão 2D foi desenvolvida com a biblioteca SDL [27] e uma versão 3D foi desenvolvida para suportar robôs fisicamente simulados em terrenos irregulares usando OSG [28] (saída gráfica 3D), ODE [29] (realismo físico da morfologia robótica e da colisão entre os objetos presentes no ambiente) e *Demeter* [30] (terreno irregular). O simulador deveria ser capaz de reproduzir algum tipo de desastre para atuação do grupo de robôs. O desastre proposto foi o de incêndio florestal. Assim, o esquadrão de robôs tem a finalidade de extinguir o incêndio florestal, atuando através da criação de um aceiro em torno do incêndio. A Fig. 4(a) apresenta esta operação. A descrição detalhada deste simulador pode ser vista em [1]. O estudo dos modelos de florestas e resíduos florestais é de grande importância para o aprimoramento dos modelos de simulação a serem implementados em ambientes virtuais [31].

A aplicação do AG para formação do grupo foi realizada com a biblioteca de programação *Galib* [32]. É realizada a busca pela otimização das posições de atuação do grupo de robôs de combate a incêndios, especificadamente: (i) Posição inicial no combate, para cada robô do time (ponto de início da criação de aceiro); (ii) Posição final no combate de cada robô do time (ponto final da criação de aceiro). Estas posições são enviadas (mensagens de comando) para ativar as unidades de combate. Para realizar a simulação, são necessários: (i) Conhecer a quantidade robôs disponíveis; (ii) Conhecer a velocidade de operação dos robôs; (iii) Saber a posição inicial dos robôs; (iv) Possuir capacidade de simular a propagação de incêndio. Para simular a propagação de incêndio são necessários: (i) Obter a coordenada inicial do incêndio; (ii) Obter o sentido do vento; (iii) Obter a direção do vento; (iv) Obter uma cópia simplificada do mapa (terreno e vegetação). Este conjunto de informações proposto pode ser totalmente obtido através de sensores. Na estrutura do cromossomo proposto (Tab. 1) a posição final de um robô é a posição inicial do próximo. O tipo de atuação proposto (criação de aceiro) necessita que cada robô inicie sua operação exatamente na posição onde o robô anterior terminou a sua atuação. As posições de atuação são calculadas aplicando no cromossomo as seguintes equações: $x_f = x_a + r_i \cdot \cos(a_i)$ e $y_f = y_a + r_i \cdot \sin(a_i)$. Onde (x_f, y_f) é a coordenada da posição final dos robôs, (x_a, y_a) é a coordenada da posição inicial do incêndio, r_i é o raio (gene 5 a 9) e a_i é o ângulo (gene 0 a 4). O raio e ângulo são específicos para cada operação de cada robô (coordenada inicial e final de criação de aceiro).

Tabela 1. Estrutura do cromossomo proposto (grupo de três robôs).

Gene	Função	Valor Mínimo	Valor Máximo
0	Posição inicial do robô 0	0,0°	360,0°
1	Posição final do robô 0 e inicial do robô 1	0,0°	360,0°
2	Posição final do robô 1 e inicial do robô 2	0,0°	360,0°
3	Posição final do robô 2	0,0°	360,0°
4	Raio inicial do robô 0	10,0m	100,0m
5	Raio final do robô 0 e inicial do robô 1	10,0m	100,0m
6	Raio final do robô 1 e inicial do robô 2	10,0m	100,0m
7	Raio final do robô 2	10,0m	100,0m

O AG tem sua otimização guiada pela função *fitness*. No nosso modelo, a função tem relação com a área de vegetação salva do fogo e com a taxa de utilização dos robôs. O *fitness* desenvolvido acumula os seguintes valores: (i) Total de área queimada: busca minimizar a área queimada; (ii) Total de área com aceiro: busca minimizar a área de trabalho dos robôs, evitando que sejam criados aceiros em áreas onde o fogo não atingiria; (iii) Erro médio absoluto: busca minimizar a diferença entre a média geral de aceiros úteis em relação ao aceiro útil de cada indivíduo, assim, o tamanho das áreas de trabalho tende a se equalizar. Otimizar o *fitness*, no nosso caso, é minimizar o seu valor; quanto menor o *fitness* final, menos vegetação foi queimada, menos aceiro foi criado, e menor é a diferença entre o tamanho dos aceiros.

5 Experimentos e resultados

5.1 Avaliação de parâmetros

Considerando que um dos aspectos mais importantes na reorganização é a velocidade de convergência, realizamos uma bateria de testes para verificar qual o melhor conjunto de parâmetros para o AG proposto. A lista completa das variações de parâmetros é apresentada na Tab. 2. Para verificar qual o melhor conjunto de parâmetros, fixamos as características climáticas da simulação do incêndio, bem como as posições iniciais dos robôs. Foram executadas 10 simulações com cada conjunto de parâmetros, totalizando 160 simulações e foram realizadas observações visuais em 20% dos resultados a fim de verificar quais os *fitness* ideais para o combate ao incêndio. A Fig. 1 apresenta o resultado visual de algumas simulações.

As Fig. 1(a) e 1(b) apresentam seqüências de uma simulação com *fitness* de 3.800 unidades; o fogo é contido porém o aceiro é pouco otimizado. A Fig. 1(c) apresenta *fitness* de 3.480 unidades e a Fig. 1(d) apresenta *fitness* de 2.643 unidades. Estas duas últimas figuras apresentam operações visualmente eficientes, porém, em termos matemáticos, a análise do cromossomo apresenta que na Fig. 1(c) temos desvio padrão sobre a média das áreas de atuação de 6,05 graus e 2,37 unidades de raio e na Fig. 1(d) temos desvio padrão sobre a média das áreas de atuação de 3,38 graus e 0,23 unidades de raio. As duas formações apagaram o incêndio, porém na Fig. 1(d) temos uma área de trabalho mais igualitária entre os robôs. Assim, a partir das observações visuais, definimos como aceitáveis para este experimento os *fitness* inferiores a 3.500 unidades, sendo ideais os *fitness* abaixo de 3.000 unidades. Dos testes iniciais realizados (Tab. 2) os únicos que apresentaram pelo menos, 30% das soluções com *fitness* abaixo de 3.000 unidades foram D, E, I, K e M. Nenhuma configuração apresentou mais de 50% de soluções com *fitness* abaixo de 3.500 unidades. Assim, uma nova bateria de simulações foi executada, considerando as 5 variações que apresentaram os melhores resultados porém com aumento no número de indivíduos (de 100 para 150) e no número de gerações (de 500 para 700).

O resultado desta segunda bateria de experimentos é apresentado na Tab. 3 onde podemos ver que a experiência I foi a única que permitiu obter 100% dos resultados finais com *fitness* abaixo de 3.500 unidades. Assim, as experiências com reorganização usam os parâmetros da experiência I (*crossover* de dois pontos,

Tabela 2. Lista das variações de parâmetros avaliados no AG.

Experiência	Seleção	Crossover	Tipo de mutação	Taxa de mutação
A	Torneio	Dois pontos	Uniforme	10,00%
B	Torneio	Dois pontos	Uniforme	50,00%
C	Torneio	Dois pontos	Gaussiana	10,00%
D	Torneio	Dois pontos	Gaussiana	50,00%
E	Torneio	Um ponto	Uniforme	10,00%
F	Torneio	Um ponto	Uniforme	50,00%
G	Torneio	Um ponto	Gaussiana	10,00%
H	Torneio	Um ponto	Gaussiana	50,00%
I	Estocástico	Dois pontos	Uniforme	10,00%
J	Estocástico	Dois pontos	Uniforme	50,00%
K	Estocástico	Dois pontos	Gaussiana	10,00%
L	Estocástico	Dois pontos	Gaussiana	50,00%
M	Estocástico	Um ponto	Uniforme	10,00%
N	Estocástico	Um ponto	Uniforme	50,00%
O	Estocástico	Um ponto	Gaussiana	10,00%
P	Estocástico	Um ponto	Gaussiana	50,00%

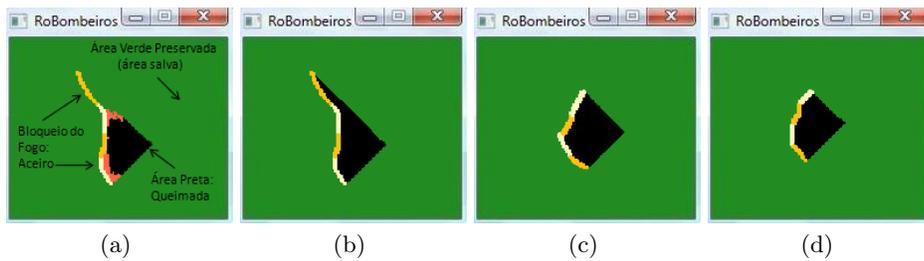


Figura 1. (a) e (b) Seqüências de uma simulação com *fitness* final de 3.800 unidades; o fogo é contido porém o aço é pouco otimizado. (c) Simulação com *fitness* final de 3.480 unidades. (d) Simulação com *fitness* final de 2.643 unidades.

mutação uniforme, taxa de mutação de 10% e método de seleção por amostragem estocástica).

Tabela 3. Resultados da segunda bateria de simulações.

Exp	<i>Fitness</i> final < 3.000	<i>Fitness</i> final < 3.500	Média	Desvio
D	50%	80%	3.103,0	514,1
E	70%	80%	3.139,6	699,4
I	60%	100%	3.036,7	249,1
K	40%	40%	3.764,7	1.049,8
M	50%	90%	2.961,6	413,9

A seleção por amostragem estocástica (*Stochastic Remainder Sampling Selector*) é feita em duas etapas, inicialmente uma nova população é preenchida com base no valor resultante da divisão do *fitness* de cada indivíduo pelo *fitness* médio da população; valores maiores que 1 são inseridos e as posições restantes são ocupadas com base no valor após a casa decimal, após, os indivíduos são selecionados através de seleção randômica [33]. A seleção por torneio (*GATournamentSelector*)

usa o método da roleta para obter n indivíduos e seleciona o que possui o melhor *fitness*. Na *GAlib*, o método de torneio implementado é de torneio de dois.

5.2 Reorganização

As unidades robóticas simuladas são equipadas com capacidade de envio de mensagens. Na simulação da operação tática, configuramos um tempo de troca de mensagens entre os robôs e o agente coordenador (responsável pela evolução com o AG). Os robôs devem enviar mensagens com um certo *delay* para que o coordenador saiba de possíveis atrasos ou de falha completa de operação. Assim, ao identificar um problema, o agente coordenador pode agir de duas formas: (i) reorganizar completamente o grupo desconsiderando um dos integrantes ou (ii) enviar novas unidades robóticas. Realizamos simulações com as duas formas. A reorganização pode ser feita através do GA exatamente da mesma forma como foi feita a primeira organização, porém considerando possíveis modificações no ambiente causadas pelos robôs. Devido ao tempo para a evolução ser consideravelmente longo, propomos uma heurística a fim de agilizar a reorganização. Nesta heurística, propomos um conjunto de indivíduos novos com base no melhor indivíduo obtido pela primeira evolução. O uso de regras específicas não é viável devido a propagação do fogo ser muito sensível a condições climáticas, como velocidade e orientação do vento. A heurística proposta cria uma população inicial com base no melhor indivíduo obtido pela primeira evolução. Na reorganização de 4 para 3 robôs, são obtidos os pontos iniciais e finais do aceiro e são calculadas as novas posições considerando a divisão da tarefa entre os três robôs, além disso, são inseridos outros indivíduos considerando acréscimo no ângulo e no raio da operação, este aumento é feito em 2%, 4%, 8%, 12%, 16%, 24%, 32%, 40%, totalizando 81 indivíduos que são usados como população inicial. Para dois agentes é usado o mesmo método com pequenas variações: considerando que existe falha em apenas um fragmento do aceiro, os novos indivíduos são gerados com base nos pontos iniciais e finais previstos da operação do robô que apresentou falha (e não no aceiro completo). Além disso, para novos dois robôs, o ponto de início de incêndio passa a ser considerado o ponto médio de onde ocorreu a falha (e não o ponto original). A Fig. 2 apresenta cenas com reorganização, podemos ver que na primeira geração, a heurística proposta já é capaz de combater o incêndio. A evolução, mesmo usando heurística, é importante pois permite que o aceiro seja finamente ajustado às variações de vegetação.

O gráfico de evolução do *fitness* da reorganização para 3 robôs de combate pode ser visto na Fig. 3, apresentando a média de 10 simulações (com os parâmetros da experiência I). A simulação da propagação do fogo considerou vento no sentido Leste-Oeste (270°) com velocidades 7km/h; e velocidade de navegação dos robôs de 35km/h, sendo os robôs posicionados em uma base com distância de 2km do ponto inicial do incêndio. O gráfico mostra que o uso da heurística permite obter, já na população inicial, um indivíduo bastante apto a atuar no combate ao incêndio. A Fig. 4 apresenta a aplicação do resultado satisfatório da evolução no protótipo 3D. Podemos ver que os robôs bombeiros cercam perfeitamente o fogo, bem como criam os aceiros de forma satisfatória. O gráfico para reorganização usando mais dois robôs apresentou curvas semelhantes ao gráfico com reorganização para 3.

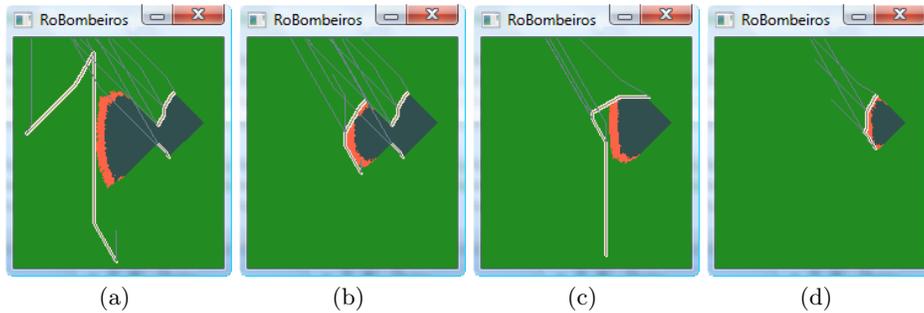


Figura 2. (a) e (b) Reorganização com envio de mais dois robôs. (a) Melhor indivíduo após primeira geração sem heurística e (b) Melhor indivíduo após primeira geração com heurística. (c) e (d) Reorganização para 3 robôs. (c) Melhor indivíduo após primeira geração sem heurística e (d) Melhor indivíduo após primeira geração com heurística.

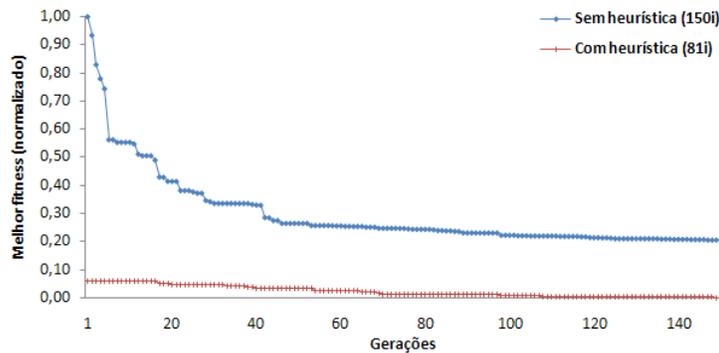


Figura 3. Evolução do *fitness* de acordo com o número de gerações (reorganização para 3 robôs de combate, com e sem heurística).

Mais detalhes podem ser vistos em [7]. Para a navegação, os robôs usam Redes Neurais Artificiais detalhadas em [31].

6 Trabalhos futuros

Três abordagens são vislumbradas como trabalhos futuros: (i) um estudo sobre uso de heurísticas para agilizar a convergência na primeira evolução; (ii) estudos de outras técnicas de formação de grupos como modelos baseado em enxames [6], [19] e *Market-based Approaches* [34]; (iii) a sofisticação do modelo de simulação de incêndio e de atuação robótica, bem como a possível adaptação para atuação em outras áreas de segurança e defesa, agricultura e preservação ambiental. Após a avaliação das novas abordagens, o sistema deve ser construído utilizando robôs reais.



Figura 4. (a) Resultado satisfatório do AG: quatro robôs móveis criando o aceiro. (b) Cena da navegação com desvio de obstáculos.

7 Conclusões

O objetivo deste artigo foi detalhar a avaliação de um modelo tolerante a falhas para atuação tática de grupos robóticos. A atuação coordenada de um grupo de robôs é planejada com o uso de Algoritmos Genéticos (AGs) e visa agir no combate a um desastre ambiental do tipo incêndio florestal. Inicialmente, avaliamos diversos parâmetros no AG buscando obter o conjunto que permitisse realizar a evolução da forma mais eficiente; em seguida, simulamos operações de falhas em unidades robóticas a fim de reorganizar a estratégia de atuação. Os resultados das simulações demonstram que com técnicas adequadas é possível obter posições satisfatórias para atuação de combate a incêndios bem como para a reorganização do grupo robótico em caso de falhas em algum de seus integrantes. Esta solução é possível de aplicação em outras atividades táticas similares (*e.g.* táticas militares).

8 Agradecimentos

Agradecemos a CAPES pelo apoio financeiro através de bolsa de estudo e ao CNPq e FAPESP pelo financiamento ao INCT-SEC, processos 573963/2008-8 e 08/57870-9.

Referências

1. Pessin, G., Osório, F.S., Musse, S.R., Nonnenmacher, V., Ferreira, S.S.: Desenvolvimento de um ambiente para simulação de robótica móvel em Áreas florestais. In: VI Simpósio de Informática da Região Centro do RS (SIRC-RS'07). (2007)
2. Dudek, G., Jenkin, M.: Computational Principles of Mobile Robotics. The MIT Press, Cambridge, London, UK (2000)
3. Bekey, G.A.: Autonomous Robots: From Biological Inspiration to Implementation and Control. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, USA (2005)

4. Go, J., Browning, B., Veloso, M.: Accurate and flexible simulation for dynamic, vision-centric robots. In: Proceedings of 3th AAMAS, New York (2004)
5. Osagie, P.: Distributed control for networked autonomous vehicles. Master's thesis, KTH CSC, Royal Institute of Technology, Sweden (2006)
6. Mondada, F., Gambardella, L.M., Floreano, D., Dorigo, M.: The cooperation of swarm-bots: Physical interactions in collective robotics. *IEEE Robotics and Automation Magazine* **12** (2005) 21–28
7. Pessin, G., Osório, F.: Algoritmos genéticos aplicados à formação e atuação de grupos robóticos. In: VII Encontro Nacional de Inteligência Artificial (ENIA), Bento Gonçalves, RS, SBC (2009) 1019–1028
8. IdMind: Projecto raposa, <http://raposa.idmind.pt> (2007)
9. Macedo, A.R.M., Macedo, A.R.L., Duarte, J.B.F.: Robótica aplicada ao combate a incidentes. *Revista TN Petróleo* (53) (2007) 108–113
10. Boeing: Company website, www.boeing.com (2007)
11. Dassault: Company website, www.dassault-aviation.com (2007)
12. Trinity: Firefighting robot contest, www.trincoll.edu/events/robot (2007)
13. PennState: Mobile robotics program, www.ecsel.psu.edu (2007)
14. Costa, E.R., Gomes, M.L., Bianchi, R.A.C.: Um mini robô móvel seguidor de pistas guiado por visão local. In: Anais do VI SBAI. (2003) 710–715
15. Zhao, Y., Collins, E.G.: Robust automatic parallel parking in tight spaces via fuzzy logic. *Robotics and Autonomous Systems* **51** (2005) 111–127
16. Darpa: Grand challenge webpage, www.darpa.mil/grandchallenge (2007)
17. Yamaguchi, H.: Adaptive formation control for distributed autonomous mobile robotgroups. In: IEEE Conference on Robotics and Automation. (1997)
18. Balch, T., Arkin, R.C.: Behavior-based formation control for multi-robot teams. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* **14**(6) (1998) 926–939
19. Dorigo, M., Trianni, V., Sahin, E., Gro, R., Labella, T., Baldassarre, G., Nolfi, S., De-neubourg, J., Mondada, F., Floreano, D., Gambardella, L.: Evolving self-organizing behaviors for a swarm-bot. *Autonomous Robots* **17** (2004) 223–245
20. Holland, J.: *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. The University of Michigan Press, Ann Arbor, Michigan, USA (1975)
21. Mitchell, M.: *An Introduction to Genetic Algorithms*. The MIT Press (1996)
22. Carvalho, A.C.F., Braga, A.P., Ludermir, T.B.: *Computação Evolutiva*. In: *Sistemas Inteligentes: Fundamentos e Aplicações*. Manole (2003) 225–248
23. Gonzalez, J.A., Marengoni, M.: Controle baseado em algoritmo genético para um braço robótico móvel. In: Anais do VII SBAI. (2005)
24. Heinen, M.R.: Controle inteligente do caminhar de robôs móveis simulados. Master's thesis, Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos) (2007)
25. Zhou, Y.: An area exploration strategy evolved by genetic algorithm. Master's thesis, University of Georgia (2005)
26. Burchardt, H., Salomon, R.: Implementation of path planning using g.a. on mobile robots. In: IEEE Congress on Evolutionary Computation. (2006)
27. Sdl: Simple directmedia layer website, www.libsdl.org (2007)
28. OSG: Open scene graph community, <http://www.openscenegraph.com> (2007)
29. Smith, R.: Open dynamics engine website, www.ode.org (2007)
30. Demeter: Demeter terrain engine, www.tbgssoftware.com (2007)
31. Pessin, G.: Evolução de estratégias e controle inteligente em sistemas multi-robóticos robustos. Master's thesis, Universidade do Vale do Rio dos Sinos (2008)
32. Wall, M.: Genetic algorithms library, <http://lancet.mit.edu/ga> (2007)
33. Michalewicz, Z.: *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*. Springer-Verlag, New York, USA (1996)
34. Dias, M.B., Zlot, R., Kalra, N., Stentz, A.: Market-based multirobot coordination: A survey and analysis. *Proceedings of the IEEE* **94** (2006) 1257–1270