

O Conceito da Sociedade de Robôs

Evidências Extraídas de *GridSLAM* Cooperativo em *Player/Stage*

Micael S. Couceiro*¹, N. M. Fonseca Ferreira¹, Rui Rocha²

¹Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Depart. Eng^a de Electrotécnica - Coimbra, Portugal

²Universidade de Coimbra, Instituto de Sistemas e Robótica (ISR) - Coimbra, Portugal

*Email: <mailto:micael@isec.pt>

RESUMO: *O presente artigo tem como objectivo principal apresentar as vantagens inerentes às sociedades biológicas fazendo alusão a equipas de múltiplos robôs cooperativos. O enquadramento histórico e levantamento do estado da arte é imprescindível para a implementação e análise de algoritmos de localização e mapeamento simultâneos (SLAM - Simultaneous Localization And Mapping) em Sistemas Robóticos Cooperativos (SRC).*

No estado actual do trabalho considera-se fundamental o desenvolvimento de ferramentas computacionais de simulação baseadas na cooperação de sistemas robóticos em ambientes não estruturados. Pretende-se assim desenvolver um ambiente de simulação utilizando a plataforma Player/Stage de robótica e sistemas sensoriais.

Este trabalho realiza uma análise científica dos estudos desenvolvidos na área e a implementação num ambiente de simulação do algoritmo GridSLAM aplicado aos SRC.

1. INTRODUÇÃO

À primeira vista ter múltiplos robôs a executarem uma tarefa ou um conjunto de tarefas em comum pode parecer mais problemático do que propriamente útil. Porque não utilizar um único robô mais complexo capaz de realizar todas essas tarefas?

A resposta encontra-se à nossa volta: na natureza. Grande parte dos trabalhos desenvolvidos na área dos sistemas robóticos cooperativos cita os sistemas biológicos como fonte de inspiração. O comportamento colectivo de formigas, abelhas, pássaros e outras sociedades similares fornecem fortes indícios de que os sistemas compostos por agentes simples conseguem desempenhar tarefas complexas no mundo real. A robustez e capacidade de adaptação dos sistemas biológicos representam uma motivação poderosa para replicar esses mecanismos, na tentativa de gerar sistemas de *software* e *hardware* com características comparáveis às dos sistemas biológicos. Essas e muitas outras razões serão abordadas neste trabalho evidenciando as vantagens dos sistemas robóticos cooperativos face a um único robô. Os Sistemas Robóticos Cooperativos (SRC) descrevem a situação em que um determinado grupo de robôs obtém um benefício global. Uma primeira questão fundamental na cooperação consiste em saber se os robôs devem ser idênticos (grupos homogéneos) ou diferentes (grupos heterogéneos) e se a eficiência deve entrar em consideração com o desempenho de todo o grupo ou apenas o de cada robô individualmente. Esse tipo de cooperação na robótica pode variar desde ter simplesmente dois robôs a executarem uma simples tarefa em conjunto (*e.g.*, dois braços industriais a manipularem um objecto de grandes dimensões) [Ferreira, 2006] até um grupo de agentes robóticos heterogénios capazes de se juntarem e formarem uma estrutura mais complexa [Fukuda *et al.*, 1989]. Mais recentemente alguns trabalhos têm vindo a focar o interesse nos sistemas robóticos cooperativos integrando técnicas de navegação e localização [Rocha, 2006] usufruindo dessa forma de todas as vantagens inerentes à cooperação entre robôs.

Um dos problemas mais desafiadores nos sistemas de navegação autónomos é a localização eficiente. Muitas aplicações na robótica, tais como busca e salvamento, vigilância,

exploração, entre outras, requerem a localização exacta em ambientes desconhecidos. Quando os robôs operam em mapas não estruturados, de forma a obter a localização exacta, é necessário criar e analisar o mapa do meio envolvente.

O problema da construção de mapas ao explorar ambientes desconhecidos é comumente referido como o problema dos sistemas de localização e mapeamento simultâneos (*SLAM - Simultaneous Localization And Mapping*) [Smith *et al*, 1990].

De forma a aumentar a precisão e a eficiência no mapeamento de grandes áreas, muitas vezes é necessário utilizar múltiplos robôs. Este processo é conhecido como multi-robô *SLAM* ou *SLAM Cooperativo* [Zho *et al*, 2006]. Apesar de melhorar a eficiência, a complexidade do algoritmo *SLAM* aumenta quando utilizado no contexto dos sistemas robóticos cooperativos para a construção de um único mapa da área a explorar.

Este artigo dedica-se inicialmente ao enquadramento histórico realçando o conceito de cooperação e vantagens na aplicabilidade dos sistemas robóticos. O problema do *SLAM* é abordado utilizando o filtro de partículas *Rao-Blackwellized* aplicado a múltiplos robôs [Howard, 2006] motivado pelas vantagens inerentes aos *SRG* em ambientes não estruturados na plataforma *Player/Stage*.

2. ESTADO DA ARTE

Inspirados pelos resultados da cooperação existentes nas diversas sociedades biológicas (*e.g.*, formigas, abelhas, plantas, homens), os investigadores têm depositado um grande empenho no desenvolvimento de robôs que sejam capazes de cooperar entre si e realizar tarefas em ambientes desconhecidos. Esta secção tem como objectivo evidenciar a importância da cooperação nas sociedades e realçar os estudos e trabalhos anteriormente desenvolvidos na área da robótica focando o interesse nos sistemas cooperativos e na localização e mapeamento simultâneos.

2.1. Enquadramento Histórico

“*O homem é um animal natural e, inevitavelmente, egoísta*” tem sido o começo de todo o discurso do capitalismo desde os seus primórdios reforçado pela noção poderosa e aparentemente científica da *sobrevivência do mais apto*. Charles Darwin, de certo modo, defendia isto naquilo que acabou por ser uma das obras mais importantes na história da ciência: *A Origem das Espécies* [Darwin, 1872]. A teoria da selecção natural defendida por Darwin concluiu que nem todos os organismos, ao nascerem, apresentam as mesmas condições de sobrevivência e que apenas sobrevivem os que têm melhores condições de se adaptarem ao meio envolvente. Dito de uma maneira menos complicada, Darwin acreditava que a evolução das espécies era tipo a *lei da selva*, onde sobrevivem e evoluem apenas os mais capacitados, enquanto que os menos aptos desaparecem ou têm maiores dificuldades em sobreviver. A teoria de Darwin foi aplicada sobretudo ao nível biológico mas, com o passar dos anos, acabou por ser aplicada também ao nível da competição económica e social.

De certa forma, isto não se encontra tão longe da realidade como os principais críticos do darwinismo tentaram provar pois o homem, tal como qualquer outro ser vivo, divide as suas necessidades de forma hierárquica. O psicólogo Abraham Maslow [Maslow, 1943] desenvolveu dentro de sua *Teoria da Motivação*, uma hierarquia das necessidades que o homem procura satisfazer. Estas necessidades representam-se em forma da *Pirâmide de Maslow* (Fig. 1).



Fig. 1. Pirâmide de Maslow adaptada de [Maslow, 1943].

Como se pode verificar, de acordo com o modelo anterior, o homem tem de satisfazer as suas necessidades fisiológicas e de segurança antes de entrar nos patamares das relações interpessoais e intergrupais. De certa forma isto faz algum sentido e acaba por se verificar uma determinada analogia na natureza. Os lobos caçam em alcateias de forma a obterem um melhor desempenho e conseguem assim arranjar alimento suficiente para o grupo. No entanto, se surgir algum imprevisto (*i.e.*, predadores mais eficientes ou em maior número) cada elemento da alcateia sente a necessidade de fugir e sobreviver. Um exemplo mais comum para nós (o homem) é o simples facto da necessidade que temos em nos alimentar e descansar de forma a podermos realizar as tarefas de que somos encarregues.

2.1.1. A Importância da Cooperação

Não desvalorizando as teorias de Darwin e Maslow existe provavelmente um factor que na altura não lhes ocorreu: a sobrevivência de um determinado membro da sociedade pode depender da cooperação com outros membros dessa ou até mesmo de outras sociedades.

O britânico Kevin Foster [Foster *et al*, 2007], que tem dado continuidade ao trabalho desenvolvido por William Hamilton, provou que existem casos de cooperação entre indivíduos que não encaixam no princípio básico de Darwin defendendo que o altruísmo é uma das formas que a natureza encontra para se valer a si mesma. Em Junho de 2008 Kevin Foster frisou, no Instituto de Patologia e Imunologia Molecular da Universidade do Porto, que a cooperação está em todo o lado: “Os genes juntaram-se nos genomas, as células trabalham juntas nos organismos multicelulares e os animais cooperam nas sociedades”.

Muitos outros exemplos na sociedade demonstram a importância da cooperação na natureza e como essa pode ser essencial.

Milhares de anos atrás, o rei Salomão, que era um estudioso dos assuntos da natureza, observou a humilde formiga e escreveu: “*Vai ter com a formiga, ó preguiçoso; vê os seus caminhos e torna-te sábio. Embora não tenha comandante, nem oficial ou governante, prepara o seu alimento no próprio verão; tem recolhido seus alimentos na própria colheita.*” [Dean, 1913]. Efectivamente as formigas são um exemplo perfeito de cooperação, diligência e ordem. Para além de trabalharem juntas e ajudarem-se umas às outras, as formigas parecem conseguir encontrar os caminhos (do ninho para uma fonte de comida e voltar ou simplesmente contornar um obstáculo) com relativa facilidade, apesar de serem praticamente cegas (Fig. 2). Diversos estudos descobriram que em muitos casos esta capacidade é o resultado da interacção por comunicação química entre formigas (por uma substância

chamada feromônio) e um fenômeno emergente causado pela presença de muitas formigas. Este é o conceito de estigmergia (traduzido da palavra mais conhecida e usualmente usada *stigmergy*) [Aras *et al*, 2004]. Este mecanismo é de tal forma eficiente que existem ferramentas computacionais que utilizam esse princípio como é o caso do princípio da heurística *Ant System* que simula o comportamento de um conjunto de formigas que cooperam para resolver um problema de otimização por meio de comunicações simples [Dorigo *et al*, 2004] e o caso do *Brood Sorting* (selecção em grupo) utilizado em enxames de robôs [Wilson *et al*, 2004].

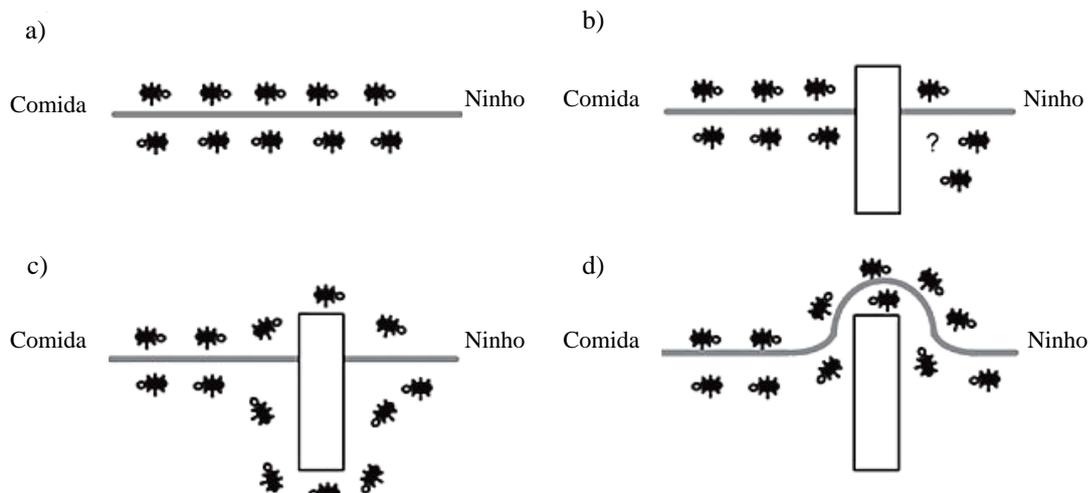


Fig. 2. Estigmergia entre formigas: a) as percorrerem um caminho de feromônio entre o ninho e a comida; b) um obstáculo interrompe o caminho; c) as formigas encontram dois caminhos distintos de forma a contornar o obstáculo; d) um novo caminho de feromônio é criado sobre o caminho mais curto em volta do obstáculo.

Algo similar a este princípio verifica-se em outros algoritmos de otimização como é o caso dos algoritmos genéticos, estratégias evolucionárias e o bem conhecido *PSO* (*Particle Swarm Optimization*) proposto inicialmente por Kennedy e Eberhart [Kennedy and Eberhart, 1995], tendo como fundamento o comportamento de organismos sociais tais como um bando de pássaros ou um cardume de peixes. Por cooperação e competição entre as potenciais soluções, o ótimo de problemas complexos pode ser alcançado mais rapidamente. No *PSO* cada indivíduo da população é denominado de partícula e a posição destes indivíduos é modificada com o tempo. Assim, as partículas navegam através do espaço de busca multidimensional. Durante o percurso, cada partícula ajusta a sua posição de acordo com a sua experiência e a dos demais membros da população, valendo-se de sua melhor posição e a melhor posição do grupo. Suponhamos o seguinte cenário: um grupo de pássaros está aleatoriamente à procura de comida numa determinada área em que só há um tipo de comida. No entanto, apesar de nenhum pássaro saber onde essa comida está, todos sabem a distância a que estão da comida em cada iteração. Então qual é a melhor estratégia para encontrar a comida? A mais eficiente é seguir o pássaro que está mais perto da comida. O *PSO* tem sido utilizado com sucesso num grande número de aplicações, tais como a robótica [Tang *et al*, 2005] [Pires *et al*, 2006] [Couceiro *et al*, 2009a] e os sistemas eléctricos [Alrashidi *et al*, 2006].

Outro bom exemplo de engenharia baseada na cooperação biológica reflecte-se no voo dos pelicanos. Os investigadores constataram que os pelicanos que voam em formação ganham impulso extra quando comparados com os que voam à frente, resultando numa redução de 15% nos batimentos cardíacos em comparação com seus batimentos quando voam sozinhos. De forma a validar esse conceito, um grupo de engenheiros preparou um avião-teste com equipamento electrónico que possibilitava ao piloto manter o avião a uma distância de 90

metros (com uma variação máxima de 30 centímetros) em relação ao avião que estava à frente. O avião sofreu assim uma resistência ao ar 20% inferior e consumiu menos 18% de combustível. Estas descobertas podem ser utilizadas em aviões militares ou civis mas também no conceito da robótica de forma a melhorar a dinâmica de aviões-robôs para supervisionar incêndios florestais [Dios *et al*, 2006] ou robôs biologicamente inspirados para espionagem [Couceiro *et al*, 2009b].

De facto, pode-se ver apoio mútuo em todos os níveis de vida, desde os micróbios até o homem, e entre espécies semelhantes e diferentes. No entanto, ao falar em cooperação referimos-nos na realidade a *Sistemas Cooperativos* e esses não podem ser vistos como a soma das contribuições de cada elemento do grupo (“*zero-sum game*”) mas sim como a intercepção de todas as contribuições (“*non-zero-sum game*”) (Colman, 1995).

O Modelo 3C adaptado de C.A. Ellis apresentado na Figura 3 [Ellis *et al*, 1991] ilustra um esquemático dos Sistemas Cooperativos.



Fig. 3. Modelo 3C adaptado de [Ellis *et al*, 1991].

A *cooperação* é uma das ferramentas indispensável para os Sistemas Cooperativos pois sem a colaboração entre os diversos membros de um determinado grupo ou sociedade os Sistemas Cooperativos não conseguem sobreviver. Por sua vez, para que a cooperação ocorra é imprescindível haver uma *comunicação* entre os participantes do grupo sendo que esta comunicação deve ser do interesse comum a todos os integrantes. A *coordenação* ganha cada vez mais ênfase nos Sistemas Cooperativos, uma vez que organiza o grupo para evitar que os esforços de comunicação e cooperação sejam perdidos e que as tarefas sejam realizadas na ordem correcta, no tempo correcto e cumprindo as restrições e objectivos.

Este e outros modelos similares relacionados com as dinâmicas e cooperação nos grupos tem vindo a ser estudado nas mais diversas áreas entre elas a informática [Borghoff *et al*, 2000] e [Fuks *et al*, 2003] e a robótica [Cao *et al*, 1997], [Jung, 1998] e [Rocha, 2006].

2.1.2. Robôs – O Nascer de uma Nova Sociedade

Após esta breve introdução do tema da cooperação nas sociedades biológicas, a questão que se coloca é: Faz sentido pensar que um conjunto de robôs possa representar um Sistema Cooperativo ou, ao mais alto nível, uma sociedade?

Dado o enquadramento deste trabalho a resposta só pode ser uma: Sim, faz sentido.

Relembrando a anterior definição dos Sistemas Cooperativos em que esses se baseiam na intercepção da contribuição de cada elemento (*i.e.*, robô), se tivermos um conjunto de robôs

cooperantes para executar uma determinada tarefa, esses *comunicam* entre si de forma a *coordenar* as suas acções e obter o resultado desejado. Este é o conceito de *SRC* (Sistemas Robóticos Cooperativos) que nos submete para um inúmero conjunto de vantagens intimamente relacionadas com as vantagens dos Sistemas Cooperativos nas outras sociedades e que podem ser descritas num factor essencial: o *tempo*.

O tempo é, sem qualquer dúvida, a grandeza mais relevante para todo o ser e a concepção do tempo tem sido discutida desde os primórdios até à actualidade. O tempo não pára e isso obriga a uma gestão cuidadosa desse mesmo. A perda de tempo é representada como um dos maiores temores da sociedade actual.

Uma das formas de contornar as limitações inerentes ao conceito do tempo é efectuar procedimentos paralelos (Fig. 4): se tivermos múltiplos robôs em vez de um só é possível actuar em vários locais ao mesmo tempo (distribuição espacial) e executar múltiplas tarefas ao mesmo tempo (distribuição temporal).



Fig. 4. Cooperação na robótica: a) Mapeamento 3D com dois robôs [Rocha *et al*, 2005]; b) Futebol robótico - *RoboCup Legged Robots League* [Velooso *et al*, 1998]; c) Perseguição de múltiplos alvos com múltiplos *UGV*'s e um *UAV* [Vidal *et al*, 2002]; d) Dois manipuladores robóticos a moverem um objecto [Takahashi *et al*, 2008].

No entanto, existem determinadas características que os robôs devem possuir de forma a pertencerem a um *SRC* [Rocha, 2006]:

- ✓ devem conseguir interagir com ambientes dinâmicos (e se possível não estruturados);
- ✓ devem conseguir reagir (situações pontuais) e tomar acções deliberativas (processamento comum);
- ✓ devem conseguir efectuar tarefas sem a supervisão do homem (autónomos);
- ✓ e por fim, podem possuir outras características menos comuns como é o caso de serem sociáveis e capazes de aprender.

Este último ponto submete-nos para o enquadramento dos *SRC* do ponto de vista de uma sociedade. A definição de sociedade é um grupo de indivíduos que vivem em conjunto, tendo um determinado tipo de organização e divisão de tarefas interagindo entre si. Todos os grupos

referidos anteriormente – os homens, as formigas, os lobos, os pássaros e até mesmo os robôs (no âmbito dos *SRC*) – compõem diferentes sociedades.

Este conceito de sociedade robótica e os robôs na nossa sociedade, apesar de já pertencer ao mundo dos livros de ficção de Isaac Asimov desde 1982 [Asimov, 1982], tem vindo a ganhar cada vez mais ênfase no mundo real e os roboticistas acreditam que a sociedade dos robôs deverá emergir ao longo dos próximos dez anos [Inovação Tecnológica, 2008]. Alguns trabalhos científicos têm vindo a dar especial atenção à cooperação entre os robôs e o homem (*HRI - Human-Robot Interaction*) sendo um exemplo disso a operação de salvamento na tragédia do *World Trade Center* em que se assistiu à interacção entre as equipas de salvamento humanas e robôs [Casper *et al*, 2003].

2.1.3. Cooperação em Ambientes Não Estruturados

Um dos grandes factores para os *SRC* convergirem para uma sociedade é a percepção que cada robô tem do ambiente envolvente. A navegação de robôs autónomos em ambientes complexos e dinâmicos requer um sistema de mapeamento e localização fiável e robusto.

Os sistemas robóticos reconhecem o ambiente em que se encontram por intermédio de sensores (odometria), e interagem nesse mesmo ambiente através de actuadores e outros dispositivos mecânicos. A característica mais marcante dos sistemas robóticos na actualidade é que esses operem cada vez mais em ambientes não estruturados, ou seja, ambientes que são intrinsecamente imprevisíveis. A grande variabilidade e incerteza de tais ambientes torna inviável a utilização directa dos dados fornecidos pelos sensores ou o uso de métodos determinísticos para estimar a trajectória do robô.

A robótica probabilística é uma nova abordagem à robótica que visa a incerteza na percepção e acção de um robô. Em [Thrun *et al*, 2005] é estudada a robótica probabilística representando explicitamente incerteza, utilizando a teoria do cálculo de teoria da probabilidade. A abordagem probabilística tem um impacto relevante para um problema da actualidade na robótica: a localização de um robô móvel.

Os algoritmos de localização e mapeamento simultâneos *SLAM* constituem uma abordagem probabilística que permite representar explicitamente a incerteza na estimação da posição e orientação (*i.e.*, pose) do robô no mapa. Apesar dos avanços recentes neste domínio científico, as soluções existentes apresentam ainda algumas limitações importantes que tornam complexa a sua aplicação em ambientes não estruturados ou de grandes dimensões (*e.g.*, cidades), no que respeita ao mapeamento e estimação da pose em 3D e à escalabilidade das soluções.

Mais recentemente têm surgido contribuições de forma a contornar os problemas inerentes aos algoritmos de *SLAM* usufruindo das vantagens dos *SRC*. A esta nova abordagem, uma extensão do *SLAM* para um único robô, baptizou-se de multi-robô *SLAM* ou *SLAM* Cooperativo [Zho *et al*, 2006].

A complexidade dos problemas associados aos algoritmos de *SLAM* têm vindo a ser alvo de um estudo aprofundado atraindo uma enorme atenção na literatura da robótica móvel focando diferentes abordagens e, até mesmo, entrando em consideração com determinadas características caóticas como é o caso da entropia [Rocha, 2006]. A entropia, abordada inicialmente por Shannon [Shannon, 1949] para as redes informáticas, relaciona-se com a variedade da informação acabando por entrar no campo da ciência do Caos [Gleick, 1987].

2.2. Trabalhos Desenvolvidos

Este trabalho segue uma corrente tecnológica avançada, em que foram consultados trabalhos de outros autores, assim como explorados conhecimentos nas mais diversas áreas científicas.

A robótica cooperativa começou a ser divulgada mais seriamente em 1997 por Y. Cao *et al*, (Cao *et al*, 1997). Nesse trabalho foi realizada uma análise crítica dos diversos trabalhos existentes até à data discutindo os problemas deixados em aberto e destacando as várias questões teóricas inerentes ao estudo da robótica cooperativa. Entre os vários trabalhos analisados nesse artigo foram evidenciados o *CEBOT* representado na Figura 5 que consistia numa arquitetura descentralizado e hierárquica inspirada pela organização celular de entidades biológicas [Fukuda *et al*, 1987] [Fukuda *et al*, 1989], o *GOFER* [Caloud *et al*, 1990] que era utilizado para estudar a resolução de problemas distribuídos por vários robôs móveis em ambientes interiores utilizando as técnicas de Inteligência Artificial (IA) tradicionais, o *ALLIANCE* desenvolvido por L.E. Parker [Parker, 1994a] [Parker, 1994b] com o objectivo em estudar a cooperação de robôs heterogêneos em equipas de pequenas a médias dimensões.

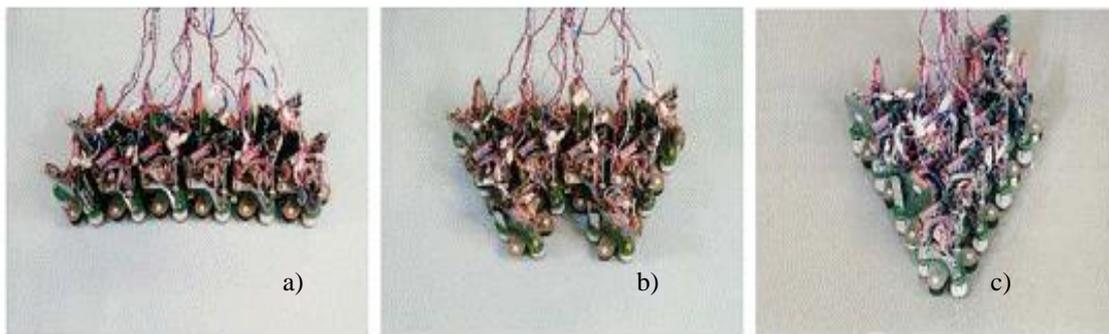


Fig. 5. *CEBOT* - Robôs que se configuram baseados na organização celular de entidades biológicas (sequência a-b-c).

Esta publicação de Y. Cao *et al*, referencia os cinco desafios essenciais que deveriam ser ultrapassados de forma a implementar sistemas robóticos cooperativos eficientes que podem ser resumidos da seguinte forma:

1. Definições e métricas robustas para as várias formas de cooperação;
2. Estudo mais extenso sobre os requisitos de informação necessários para a resolução de tarefas em grupo;
3. Conceitos de tolerância a falhas e dependência em sistemas cooperativos;
4. Implementação de algoritmos de controlo distribuídos de forma a executar as tarefas mais básicas de cooperação sem a necessidade de comunicar;
5. Sistemas de cooperação mais eficientes sem ser em situações competitivas (*e.g.*, futebol robótico).

Este trabalho facultou ainda uma contribuição relevante ao caracterizar três tipos distintos de interacção em sistemas cooperativos. A interacção por intermédio do meio envolvente é a mais simples e limitada em que o meio envolvente em si (ambiente) actua como meio de comunicação entre todos os agentes não havendo comunicação independente entre eles. A interacção por intermédio dos sistemas sensoriais em que cada agente utiliza as capacidades sensoriais para observar as acções dos outros agentes (desde que esses sejam visíveis no raio de alcance sensorial). E por último, a interacção por intermédio de comunicação sendo essa a mais abrangente e menos limitativa em que cada agente comunica com os outros agentes tendo consciência das suas acções.

A abordagem dos algoritmos de localização e planeamento simultâneo para um único robô começou a receber especial atenção em 1990 [Smith *et al*, 1990].

A maioria das soluções para o problema de *SLAM* são baseadas na implementação do filtro de Kalman estendido (*EKF* – *Extended Kalman Filter*), que correlaciona a estimativa da localização relativamente a diferente *landmarks* [Dissanayake *et al*, 2001] [Thrun *et al*, 2003].

Apesar do *EKF* ser uma das abordagens estudadas mais eficientes para a estimativa de mapas, em [Montemerlo *et al*, 2003] provaram que o *FastSLAM* obteve resultados substancialmente superiores aos obtidos pelo *EKF* com existência de erros de odometria. O algoritmo *FastSLAM* foi utilizado para a construção de mapas interiores em [Stachniss *et al*, 2004] e [Stachniss *et al*, 2005]. Utilizaram um algoritmo baseado em grelhas de ocupação de *FastSLAM* de forma a construir um mapa métrico do ambiente. Ao voltar as áreas anteriormente visitadas o robô reduz o erro de localização aprendendo assim os mapas de forma mais precisa.

Uma variante do *FastSLAM* foi proposta [Hahnel *et al*, 2003] combinando o filtro de partículas *Rao-Blackwellized* para amostras da trajetória do robô e um *EKF* para representar o mapa. É utilizado um modelo probabilístico dos erros residuais do processo de análise de correspondência para as etapas de reamostragem. Desta forma, o número de amostras necessário é bastante reduzido.

Tendo como base o algoritmo descrito em [Hahnel *et al*, 2003], o investigador Andrew Howard desenvolveu um algoritmo aplicado a sistemas de múltiplos robôs [Howard, 2006]. Este algoritmo utiliza um filtro de partículas para aproximar a distribuição de probabilidade posterior sobre possíveis mapas e acrescenta as observações de cada robô incrementalmente utilizando uma actualização Bayesiana, assumindo que a posição inicial de todos os robôs é conhecida. Por outras palavras, é preciso conhecer a posição inicial relativa de todos os robôs excepto um, sendo a posição desse robô escolhida arbitrariamente (como no caso do *SLAM* para um único robô).

Esta hipótese é muito limitativa na prática, pois implica que todos os robôs comecem a partir do mesmo local, ou que as posições iniciais de todos os robôs foram examinadas por alguns meios externos (*e.g.*, cameras, *GPS*).

No caso mais geral, a posição inicial dos robôs não deve ser conhecida à priori: os robôs podem ser colocados aleatoriamente. A solução abordada neste trabalho para este problema tem dois elementos importantes:

1. Assume-se que os robôs são capazes de detectar, identificar e medir a relação da posição dos outros robôs (quando os robôs estão próximos ou dentro do campo de visão, por exemplo). Tal elemento permite que os robôs fundam as suas informações para a criação do mapa global a partir do momento do primeiro encontro.
2. Generaliza-se o algoritmo do filtro de partículas de *SLAM* de tal forma que esse suporte actualizações temporais inversas. Essa generalização permite aos robôs incorporar observações que ocorreram antes do primeiro encontro, tratando essas observações como se tivessem vindo de robôs “virtuais” adicionais que navegam para trás no tempo.

De forma a perceber melhor o que foi anteriormente referenciado, considere-se o seguinte exemplo: Dois robôs estão a explorar um determinado ambiente sendo a posição inicial de cada um deles desconhecida e distante um do outro. Em determinado momento, os robôs encontram-se e medem a sua posição relativa. Nesse momento, constrói-se um filtro considerando que o robô 1 tem uma posição inicial (arbitrária) de zero e o robô 2 tem a posição relativa medida. As posteriores medições dos dois robôs são integradas no filtro e fundidas num único mapa. Ao mesmo tempo, outros dois robôs virtuais são adicionados ao filtro com as posições inicializadas com o valor das posições dos robôs reais quando esses se encontraram. As medições anteriores ao encontro que estavam registradas são integradas com o filtro em ordem temporal inversa, de modo a que estes robôs virtuais parecem estar a deslocar-se para trás no ambiente. Assim, o filtro combina incrementalmente a informação dos dados de ambos os robôs, gravados antes e depois do primeiro encontro, num único mapa. Este algoritmo tem uma série de características atraentes. Primeiro, é capaz de combinar todos os dados de todos os robôs num único mapa, sem saber a posição inicial dos robôs. Em

segundo, herda o tempo-delimitado e memória-delimitada do algoritmo para o caso de um único robô (os requisitos do *CPU* e da memória não aumentam consoante o comprimento das trajectórias efectuadas, como é o caso de alguns algoritmos [Howard, 2004] [Konolige *et al*, 2004]. Em terceiro e último, o algoritmo é rápido.

Colectivamente, essas características tornam o algoritmo altamente apropriado para aplicações *online* e *in-the-loop*, tais como exploração e pesquisa multi-robôs sendo que será utilizado no próximo capítulo numa aplicação *Player/Stage*.

O *Player / Stage* é uma ferramenta desenvolvida para sistemas de múltiplos robôs, sistemas robóticos distribuídos e redes de sensores. O *Player* é um servidor de dispositivos robóticos que providencia o controlo transparente de uma rede de robôs. O *Stage* é um simulador altamente configurável de robôs que suporta grandes populações. Estas ferramentas começaram a ser desenvolvidas em 1999 [Gerkey *et al*, 2003] e são hoje em dia alteradas e melhoradas por investigadores em todo o mundo oferecendo uma mais valia para a implementação de simulações baseadas em sistemas robóticos cooperativos.

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Apresenta-se nesta secção os resultados experimentais obtidos através do sistema simulado na plataforma *Player/Stage*.

Os robôs utilizados foram os *Pioneer II* com sistema de odometria e laser 2D (plano horizontal) com uma resolução de 1° e marcadores de retro-reflecção (para reconhecimento mútuo). O algoritmo básico para a integração dos dados do laser é simples: o robô mantém um mapa local gerado a partir dos varrimentos recentes do laser adicionando essa informação ao mapa global.

O ambiente que os robôs têm por objectivo em mapear pode ser visualizado na Fig.



Fig. 9. Ambiente em que os robôs se encontram com dimensões 16 m x 16 m.

O simulador implementado em *Player/Stage* permite visualizar a construção do mapa em tempo real utilizando a livraria *ncurses* que possibilita o controlo da posição do cursor. Apesar de ser uma aproximação de baixa resolução do mapeamento, este é guardado num ficheiro de texto no final da simulação e posteriormente analisado na ferramenta de cálculo *MatLab* que permitirá obter um modelo do mapa de alta resolução.

3.1. Um Robô

O algoritmo de *SLAM* para um único robô contém muitos elementos do algoritmo de localização padrão de *Monte Carlo* [Thrun *et al*, 2001]. O principal desafio reside em maximizar a velocidade de actualização de cada partícula, minimizando os correspondentes requisitos de armazenamento, de modo a que o filtro possa ser executado em tempo real com um número elevado de partículas. Como sempre, os requisitos de velocidade e de armazenamento tendem a estar em conflito sendo que a nossa implementação favorece a velocidade.

Para cada partícula, manteve-se uma grelha de ocupação completa com uma resolução de 0,5 m abrangendo uma área entre 2000 e 8000 m².

A etapa de actualização do filtro requer duas operações de *ray-tracing* na grelha de ocupação para cada partícula: uma para avaliar o modelo do sensor e outro para actualizar o mapa. Uma vez que estas operações têm um custo de processamento elevado discretizamos os varrimentos do laser usando apenas um varrimento a cada 0,50 m de distância percorrida. Estas aproximações melhoram a velocidade de processamento significativamente permitindo que a operação seja executada em tempo real.

A Figura 1 mostra um mapa típico gerado pelo algoritmo com um único robô. O tempo de processamento para este mapa é de 126 segundos num computador de 1.6GHz *Intel Centrino* utilizando 150 partículas.

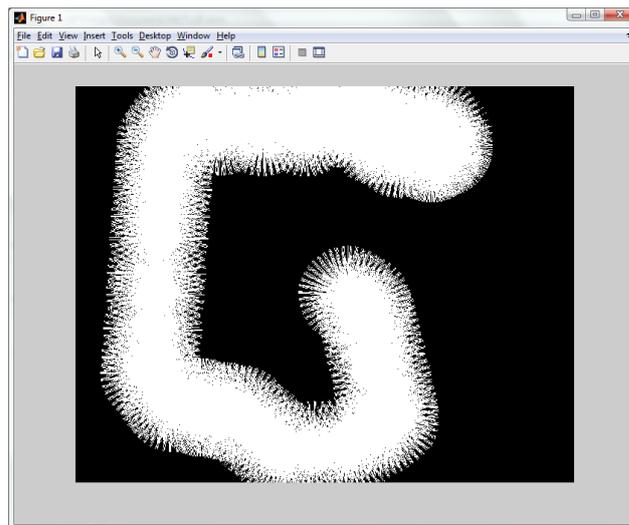


Figura 1. Mapa gerado utilizando o algoritmo com um único robô com uma resolução de 0.50 m.

3.2. Múltiplos Robôs

O algoritmo multi-robô *SLAM* tem uma grande semelhança com o algoritmo para um único robô descrito na secção anterior. Cada partícula armazena uma grelha de ocupação e um conjunto de posições estimadas: para uma equipa de n robôs, existem $2n$ estimativas, representando instâncias causais e acasuais de cada robô. O filtro não faz distinção entre essas duas instâncias, e instâncias acasuais são simplesmente tratadas como robôs adicionais que andam para trás.

Comparando com o algoritmo para um único robô, o algoritmo multi-robô é idêntico no que respeita aos requisitos de armazenamento (visto que todos os robôs partilham o mesmo mapa), e exige um esforço de processamento mais elevado visto ser $2n$ vezes.

Dois robôs foram colocados no mesmo ambiente em dois locais distantes a partir do qual se executou uma estratégia de exploração cooperativa. Pode-se facilmente perceber a sequência dos eventos desta experiência através da **Error! Reference source not found.** mostrando de

igual forma os resultados produzidos pelo algoritmo para múltiplos robôs numa missão de exploração autónoma.

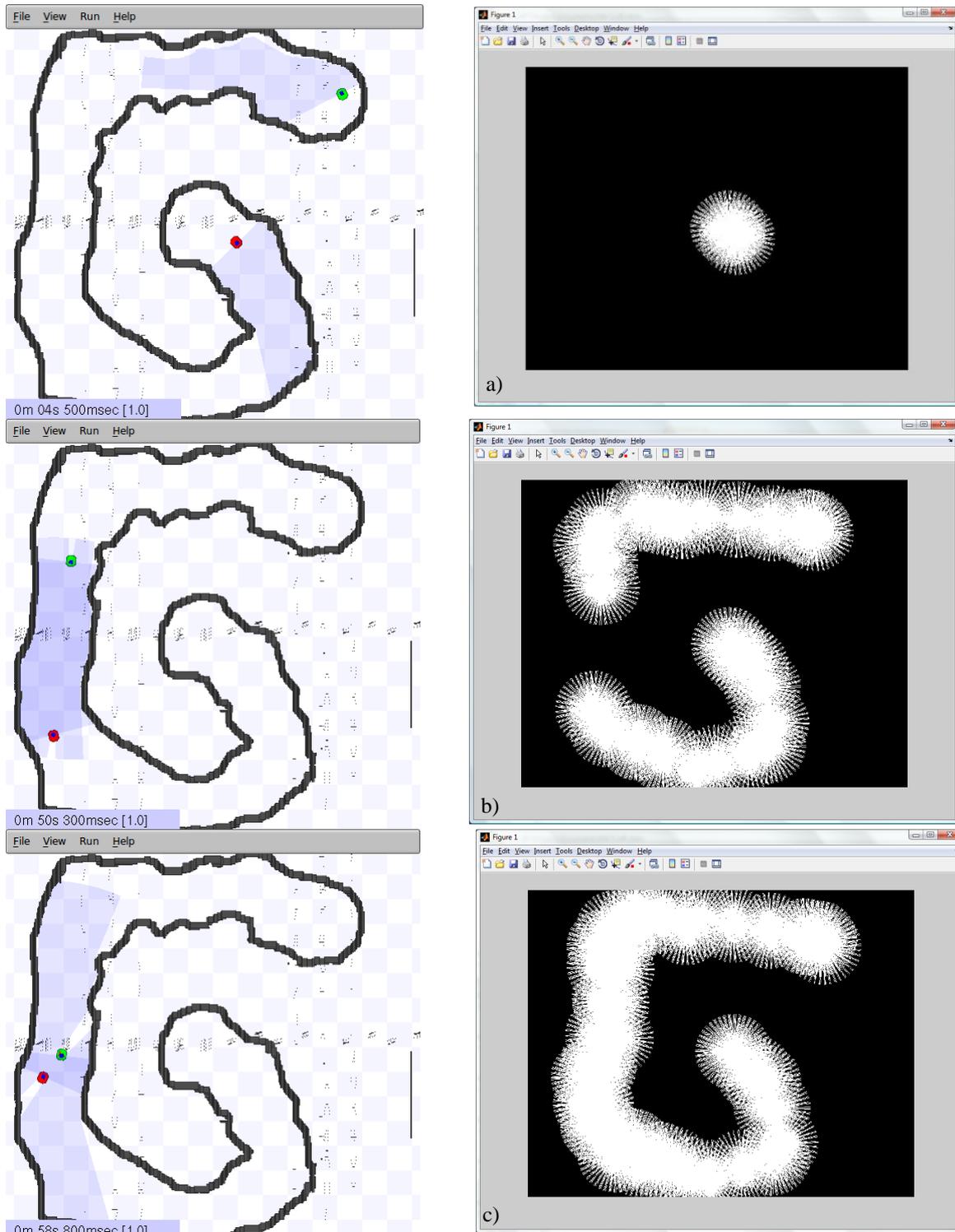


Fig. 11. Sequência de eventos no decorrer do mapeamento efectuado por dois robôs: a) Os robôs começam afastados – um em cada extremidade do cenário. O mapa global começa a ser gerado pelo robô 1 considerando a sua posição inicial zero; b) O robô 1 encontra e reconhece o robô 2 (devido aos retro-reflectores) no tempo $t = 54$ segundos utilizando e combinando a informação adquirida por esse último num só mapa global; c) No tempo $t = 62$ segundos é obtido o mapa combinado gerado utilizando o algoritmo com múltiplos robôs com uma resolução de 0,50 m.

No mapa final todas as principais características topológicas foram correctamente extraídas e a qualidade do mapa é elevada e uniforme. O tempo de processamento para este mapa é de 62 segundos num computador de 1.6GHz *Intel Centrino* utilizando 150 partículas.

4. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

Este trabalho teve como objectivo principal demonstrar as vantagens dos sistemas robóticos cooperativos aplicados aos algoritmos de localização e mapeamento simultâneos face a um único robô. As funcionalidades apresentadas que foram implementadas na plataforma *Player / Stage* obtiveram resultados positivos (62 segundos para a aplicação de múltiplos robôs vs 126 segundos para a aplicação com um único robô).

Conclui-se que uma das principais características deste algoritmo multi-robô *SLAM* é a facilidade com que pode ser implementado (após a implementação do algoritmo para um único robô). Os elementos básicos do algoritmo - modelos do sensor e de acção, grelhas de ocupação e *ray-tracing* - são facilmente adaptados a partir do algoritmo de localização de *Monte Carlo*.

Apesar de ser possível otimizar este algoritmo tal como é referido por [Howard, 2006], os resultados desta investigação demonstram que uma estratégia de exploração cooperativa é superior à exploração individual de um único robô.

Finalmente, verifica-se que a comparação anteriormente referenciada é limitada tendo em conta que esta se baseia na utilização de um único robô face a uma equipa de dois robôs. Deste modo, e como investigação futura, uma das abordagens possíveis seria realizar o mesmo conjunto de experiências (*i.e.*, no mesmo cenário) aumentando de forma progressiva o número de robôs para desta forma aferir uma função aproximada que determine o tempo de processamento para a execução dos mapas em função do número de robôs.

REREFÊNCIAS

A.H. Maslow. A Theory of Human Motivation. *Psychological Review*, 50(4):370-96, 1943.

Andrew Howard. Multi-robot mapping using manifold representations. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, New Orleans, Louisiana, pp. 4198–4203, Apr, 2004.

Andrew Howard. Multi-robot Simultaneous Localization and Mapping using Particle Filters. *Int. Journal of Robotics Research*, 25(12):1243-1256, 2006.

Andrew M. Colman. *Game Theory and its Applications in the Social and Biological Sciences*. 2nd Edition. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1995.

Brian P. Gerkey, Richard T. Vaughan and Andrew Howard. The Player/Stage Project: Tools for Multi-Robot and Distributed Sensor Systems. *Proceedings of the International Conference on Advanced Robotics (ICAR 2003)*. Coimbra, Portugal, June 30 - July 3, 2003.

C.A. Ellis, S.J. Gibbs and G.L. Rein. Groupware - Some Issues and Experiences. *Communications of the ACM* 34, (1), 38-58, 1991.

C.E. Shannon. *The Mathematical Theory of Communication*. University of Illinois Press, 1949.

Charles Darwin. *The Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life*. London, 24 November, 1872.

Cyrill Stachniss, Dirk Hahnel and Wolfram Burgard. Exploration with Active Loop-Closing for FastSLAM. *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 2004.

- Cyrrill Stachniss, Giorgio Grisetti and Wolfram Burgard. Recovering Particle Diversity in a Rao-Blackwellized Particle Filter for SLAM After Actively Closing Loops. Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 2005.
- D. Hahnel, W. Burgard and D. Fox. An efficient FastSLAM algorithm for generating maps of large-scale cyclic environments from raw laser range measurements. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Las Vegas, Nevada, U.S.A, Oct, 2003.
- D. Jung. An Architecture for Cooperation among Autonomous Agents. Ph.D. thesis, Dep. of Computer Science, University of Wollongong, Australia, 1998.
- E. J. Solteiro Pires, P. B. de Moura Oliveira, J. A. Tenreiro Machado and J. Boaventura Cunha. Particle Swarm Optimization versus Genetic Algorithm in Manipulator Trajectory Planning. 7th Portuguese Conference on Automatic Control, September 11-13, 2006.
- H. Fuks, A. B. Raposo, M. A. Gerosa, C. J. Pereira de Lucena. O Modelo de Colaboração 3C e a Engenharia de Groupware. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), 2003.
- Isaac Asimov. The Complete Robots: I, Robot. 1982.
- J. Casper and R. Murphy. Human-robot interaction during the robot-assisted urban search and rescue response at the World Trade Center. IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics – part B, 33(3):367-385, Jun, 2003.
- J. Kennedy and R. Eberhart. A new optimizer using particle swarm theory. Proceedings of the IEEE Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science, pp. 39-43. 1995.
- J. R. Martínez-de Dios, L. Merino, F. Caballero, A. Ollero and D. X. Viegas. Experimental Results of Automatic Fire Detection and Monitoring with UAVs. V International Conference on Forest Fire Research. 2006.
- J. Tang, J. Zhu and Z. Sun. A novel path panning approach based on appart and particle swarm optimization. Proceedings of the 2nd International Symposium on Neural Networks, LNCS 3498, pp. 253-258, 2005.
- James Gleick. Chaos: Making a New Science. Viking Penguin, 1987.
- K. Konolige, D. Fox and C. Ortiz. Centibots: Very large scale distributed robotic teams. 9th International Symposium on Experimental Robotics (ISER-04), Singapore, Jun, 2004.
- Kevin R. Foster and João B. Xavier. Cooperation: Bridging Ecology and Sociobiology. Current Biology 17: R319-R321, 2007.
- L. E. Parker. Heterogeneous Multi-Robot Cooperation. PhD thesis, MIT EECS Dept., February 1994.
- L. E. Parker. ALLIANCE: An Architecture for Fault Tolerant, Cooperative Control of Heterogeneous Mobile Robots. In IEEE/RSJ IROS, pages 776–783, 1994.
- M. R. Alrashidi and M. E. El-Hawary. A Survey of Particle Swarm Optimization Applications in Power System Operations. Electric Power Compon Syst. v34 i12. 1349-1357, 2006.
- M. Dissanayake, P. Newman, S. Clark, H. Durrant-Whyte, and M. Csorba. A solution to the simultaneous localization and map building (SLAM) problem. IEEE Trans. on Robotics and Automation, 17(3):229–241, 2001.
- M. Dorigo and T. Stützle. Ant Colony Optimization. MIT Press, Cambridge, MA, 2004.

- M. Montemerlo and S. Thrun. Simultaneous localization and mapping with unknown data association using FastSLAM. In Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), Taipei, Taiwan, 2003.
- M. Veloso, W. Uther, M. Fujita, M. Asada and H. Kitano. Playing soccer with legged robots. Proc. of IEEE/RSJ Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems (IROS'98), Victoria, Canada, Oct., 1998.
- M. Wilson, C. Melhuish, A. Sendova-Franks and S. Scholes. Algorithms for building annular structures with minimalist robots inspired by brood sorting in ant colonies. *Autonomous Robots*, 17(2-3):115-136, 2004.
- Matt Dean. Book of Proverbs. Catholic Encyclopedia. Adapted from Holman Bible Handbook on Proverbs, 1913.
- Micael S. Couceiro, Rui Mendes, N. M. Fonseca Ferreira and J. A. Tenreiro Machado. Control Optimization of a Robotic Bird. EWOMS '09, Lisbon, Portugal, June 4-6, 2009.
- Micael S. Couceiro, Carlos M. Figueiredo, N. M. Fonseca Ferreira and J. A. Tenreiro Machado. Biological Inspired Flying Robot. Proceedings of IDETC/CIE 2009 ASME 2009 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference August 30 - September 2, San Diego, 2009.
- N. M. Fonseca Ferreira. Sistemas Dinâmicos e Controlo de Robôs Cooperantes. The Phd thesis, in 5 of September, University of Trás-os-Montes e Alto Douro, 2006.
- P. Caloud, W. Choi, J.-C. Latombe, C. Le Pape and M. Yin. Indoor automation with many mobile Robots. In IEEE/RSJ IROS, pages 67–72, 1990.
- R. Smith, M. Self, and P. Cheeseman, Estimating Uncertain Spatial Relationships in Robotics. *Autonomous Robot Vehicles*, pp. 167–193, 1990.
- R. Rocha, J. Dias, and A. Carvalho. Cooperative Multi-Robot Systems: a study of Visionbased 3-D Mapping using Information Theory. *Robotics and Autonomous Systems*, 53(3–4), pages 282-311, Dec. 31, 2005.
- R. Takahashi, H. Ise, A. Konno, M. Uchiyama and D. Sato. Hybrid simulation of a dual-arm space robot colliding with a floating object. IEEE International Conference on Robotics and Automation. ICRA, 2008.
- R. Vidal, O. Shakernia, H. Kim, D. Shim and S. Sastry. Probabilistic pursuit-evasion games: theory, implementation, and experimental evaluation. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 18(5):662-669, Oct., 2002.
- Raghav Aras, Alain Dutech and François Charpillet. Stigmergy in Multi Agent Reinforcement Learning. Loria, Inst. Nat. de Recherche en Inf. et Autom., Nancy, France, 2004.
- Rui Rocha. Building Volumetric Maps with Cooperative Mobile Robots and Useful Information Sharing: a Distributed Control Approach based on Entropy. PhD thesis, Faculty of Engineering of University of Porto, Portugal, May, 2006.
- S. Thrun, D. Fox and W. Burgard. Robust Monte Carlo localization for mobile robots. *Artificial Intelligence Journal*, vol. 128, no. 1–2, pp. 99–141, 2001.
- S. Thrun, D. Hahnel, D. Ferguson, M. Montermelo, R. Riebwel, W. Burgard, C. Baker, Z. Omohundro, S. Thayer and W. Whittaker. A System for Volumetric Robotic Mapping of Underground Mines. In Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 2003.
- S. Thrun, W. Burgard, and D. Fox. *Probabilistic Robotics*. MIT Press, 2005.

Site Inovação Tecnológica. Robôs industriais têm três desafios para participar da sociedade robotizada. www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=robos-industriais-tem-tres-desafios-para-participar-da-sociedade-robotizada. 2008.

T. Fukuda and S. Nakagawa. A dynamically reconfigurable robotic system (concept of a system and optimal configurations). In International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, pages 588–95, 1987.

T. Fukuda, S. Nakagawa, Y. Kawauchi, and M. Buss. Structure Decision Method for Self Organizing Robots Based on Cell Structures - CEBOT. Proc. of IEEE Int'l on Robotics and Automation, pp. 695-700, 1989.

U.M. Borghoff and J.H. Schlichter. *Computer-Supported Cooperative Work: Introduction to Distributed Applications*. Springer, USA, 2000.

Xun S. Zhou and Stergios I. Roumeliotis. Multi-robot SLAM with Unknown Initial Correspondence: The Robot Rendezvous Case. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2006.

Y. Cao, A. Fukunaga and A. Kahng. Cooperative Mobile Robotics: Antecedents and Directions. *Autonomous Robots*, 4:1-23, 1997.