

Localização Cooperativa, Descentralizada e Baseada em Marcos Dinâmicos em Enxames de Robôs Móveis

Anderson Grandi Pires^{1,2}, Luiz Chaimowicz²

¹ Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG
Leopoldina - Minas Gerais, Brasil

² Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG
Belo Horizonte - Minas Gerais, Brasil
anderson@leopoldina.cefetmg.br, chaimo@dcc.ufmg.br

Resumo Neste artigo apresentamos os resultados preliminares de um método de localização cooperativa em que parte dos robôs no enxame atuam como marcos dinâmicos. A utilização de grandes grupos de robôs amplia a disponibilidade de fontes de informação de localização no ambiente. Este trabalho explora a utilização dessas informações de localização e a identificação dos aspectos relevantes para a localização cooperativa em enxames de robôs, com o propósito de desenvolver uma técnica de localização com pouca ou nenhuma dependência de sistemas de posicionamento global. Experimentos simulados e validação com robôs reais serão utilizados para este fim. Resultados preliminares baseados em experimentos simulados sugerem que o método pode ser bastante promissor.

Palavras-chave: Cooperação, Enxame de Robôs, Localização Baseada em Marcos, Localização Cooperativa, Sistemas Multirrobôs.

1 Introdução

O problema de Localização é um questão central na robótica, pois a execução de muitas tarefas exige informações precisas de localização. Diversos métodos utilizam ou supõem informações globais de localização. Entretanto, essas informações nem sempre estão disponíveis, o que restringe a aplicação desses métodos. No âmbito de sistemas multirrobôs, técnicas de Localização Cooperativa utilizam a troca de informação entre os robôs para ajustar as crenças dos mesmos. A troca de informação ocorre quando os robôs se encontram, de modo que os encontros constituem a melhor forma de aprimorar a precisão da localização.

Diversos aspectos da Localização Cooperativa têm sido explorados na literatura, tais como: tipos de dados sensoriais utilizados (distância, orientação e direção relativas); estratégias de movimentação; e complexidade computacional para processar a estimativa conjunta. No entanto, a aplicação dessa técnica a grandes grupos de robôs e a respectiva análise dos aspectos relevantes a serem considerados nesse novo contexto ainda é pouco explorada. A identificação desses

aspectos se apresenta como um problema relevante, uma vez que as informações de localização podem estar geograficamente distribuídas no grupo. Além disso, a redundância existente em sistemas compostos por grandes grupos de robôs traz consigo a possibilidade de se utilizar parte do grupo como provedores de localização (marcos), sem necessariamente comprometer o desempenho do sistema.

Neste trabalho pretendemos identificar estratégias de coordenação aplicadas a enxames que privilegiem a qualidade da informação de localização. Utilizando parte do enxame de robôs como marcos dinâmicos no auxílio à localização dos demais robôs, esperamos prover um sistema de localização com pouca ou nenhuma dependência de sistemas de posicionamento global. Experimentos simulados e validação com robôs reais serão empregados neste trabalho. Por meio dos mesmos, pretendemos investigar o impacto na localização resultante ao se executar, de formas distintas, alguns aspectos relacionados ao processo de estimativa da localização, tais como: estratégias de movimentação dos robôs; fusão sensorial de informações proprioceptivas e exteroceptivas; disseminação de informações de pose; topologia do grupo; e percentual de robôs atuando como marcos.

2 Fundamentação Teórica e Trabalhos Relacionados

2.1 Embasamento Teórico

O conhecimento da posição e orientação (pose) de um robô é essencial para muitas tarefas na área da robótica, dentre elas mapeamento [1] e planejamento de movimentação [2]. Na robótica móvel, a questão pertinente à determinação da pose de um robô é comumente referenciada como problema de Localização [3]. Normalmente, a localização é estabelecida com base em um conhecimento prévio do ambiente, que pode estar disponível na forma de um mapa. Com o auxílio de sensores exteroceptivos, que adquirem informações à partir do meio, o robô obtém informações e busca estabelecer uma associação dessas informações com aquelas contidas no mapa, de modo a determinar sua possível localização.

Uma vez conhecida a pose, novas poses relativas àquela anteriormente estabelecida podem ser obtidas por intermédio do acompanhamento do deslocamento efetuado pelo robô. Esse procedimento é comumente denominado de rastreamento de posição (*position tracking*). Técnicas de *dead reckoning*, tais como odometria, têm sido amplamente utilizadas para esse fim. O princípio dessas técnicas consiste no emprego de sensores proprioceptivos, que medem os parâmetros internos ao sistema, para estimar uma nova pose por meio da mensuração do deslocamento efetuado pelo robô. A incerteza inerente à utilização de sensores reais acarreta erros que acumulam com o tempo, principalmente quando o robô percorre longas distâncias.

Técnicas de Localização de Monte Carlo e filtros probabilísticos [4] têm sido amplamente utilizados com o propósito de reduzir o erro acumulado, por meio da observação de marcos (*landmarks*) dispostos no ambiente. Tais marcos possuem localização conhecida em um mapa, o que viabiliza ajustar a crença que o robô possui com relação à sua pose atual. Apesar dos métodos baseados na observação

de marcos terem o potencial de reduzir o erro acumulado pela odometria, tais métodos pressupõem um conhecimento prévio de um mapa do ambiente e da respectiva localização dos marcos nesse mapa. No entanto, essas informações nem sempre estão disponíveis, o que restringe a utilização desses métodos na exploração de áreas desconhecidas e ambientes não previamente estruturados.

Sistemas de Posicionamento Global (GPS, do inglês *Global Positioning Systems*) têm sido utilizados para prover informações absolutas de localização [5]. Esses sistemas possuem a característica de não acumularem erro com o tempo, todavia o processo de mensuração utilizado é sujeito à incerteza e ruído. Assim, a precisão das informações de localização obtidas pode limitar o seu uso em algumas situações. GPS também possuem limitações com respeito à sua utilização em ambientes internos e nas proximidades de grandes edificações. Com vistas a superar essas limitações, sistemas de localização global para ambientes internos, doravante denominados iGPS (do inglês, *indoor Global Positioning Systems*), têm sido desenvolvidos. Tais sistemas utilizam câmeras dispostas sobre uma determinada área de trabalho e fazem uso de técnicas de visão computacional para estimar a pose de marcos geométricos [6]. A precisão desses sistemas é superior devido ao fato de serem utilizados em ambientes altamente controlados. No entanto, os mesmos são normalmente confeccionados sob medida para utilização em locais específicos, o que compromete consideravelmente a sua portabilidade.

Inúmeras pesquisas têm explorado as potencialidades de se utilizar grupos de robôs para solucionar os mais diferentes tipos de tarefas [7]. Dentre as vantagens de se utilizar sistemas multirrobôs tem-se a melhoria no desempenho e a possibilidade de divisão da tarefa entre os membros do grupo, de modo a maximizar a utilização dos recursos disponíveis. Além disso, algumas tarefas que exigem o uso de um robô complexo e oneroso têm a possibilidade de serem executadas com grupos de robôs mais simples. No âmbito de sistemas multirrobôs, o problema de localização ganha uma nova dimensão, passando a considerar as características coletiva e colaborativa do grupo. As informações de localização de cada membro do grupo tornam-se relevantes para o ajuste da qualidade da localização conjunta. Tem-se, então, uma estimativa de localização global que visa minimizar os erros locais associados a cada componente do sistema. Esse tipo de localização tem sido comumente denominado Localização Cooperativa.

O termo *Swarm Robotics* [8] tem sido empregado para referenciar pesquisas que utilizam dezenas, centenas e até milhares de robôs. Nesse contexto, os robôs consistem em entidades autônomas, homogêneas e com poder de processamento e comunicação limitados. Devido à limitação das capacidades individuais dos robôs faz-se necessário coordenar o enxame de modo a se obter êxito na execução de tarefas mais complexas. No entanto, o problema de coordenar adequadamente um grande grupo de robôs pressupõe a utilização de alguma informação de localização. Diversos trabalhos utilizam ou supõem a disponibilidade de algum sistema de localização global, tais como GPS ou iGPS. Devido às restrições desses sistemas, o desenvolvimento de técnicas de localização cooperativa para enxames de robôs torna-se uma tarefa importante quando não se dispõe de um sistema de localização global ou quando a disponibilidade de tal sistema é intermitente.

Enxames de robôs possuem a característica de serem altamente redundantes. Tal característica é vista como uma das vantagens de se utilizar grandes grupos de robôs, pois maximiza as chances de se completar uma determinada tarefa, além de aumentar a robustez do sistema. Em decorrência dessa grande redundância, parte do enxame pode ser utilizada em tarefas de apoio sem, necessariamente, comprometer o desempenho do grupo. Com isso, o próprio grupo cria facilidades para a execução da tarefa fim para o qual foi projetado. A utilização de parte dos componentes de um enxame como marcos dinâmicos viabiliza o estabelecimento de um sistema de localização que tenha pouca ou nenhuma dependência de sistemas de posicionamento global. Além disso, sistemas de posicionamento baseado em marcos dinâmicos são potencialmente adequados para utilização em ambientes desconhecidos e não previamente estruturados.

A breve revisão de literatura apresentada a seguir tem ênfase nas técnicas de localização cooperativa aplicadas a sistemas multirrobôs, nos quais não se tem um conhecimento prévio (mapa) do ambiente. Apesar dos trabalhos revisados não enfatizarem enxames de robôs, alguns problemas identificados podem ser solucionados quando se tem grandes grupos de robôs atuando conjuntamente.

2.2 Trabalhos Relacionados

O primeiro trabalho a relatar o uso de robôs móveis como marcos dinâmicos para executar localização cooperativa é [9]. O método proposto é baseado na divisão de um grupo de robôs em dois. Um dos grupos, cuja pose inicial é conhecida, mantém-se estacionário servindo como marco enquanto o outro grupo se movimenta. Após alcançar uma condição pré-estabelecida, o grupo em movimento para e utiliza o outro para se localizar. Esse procedimento é efetuado por meio de medidas exteroceptivas tomadas à partir dos robôs que, naquele momento, atuam como marcos. Após a localização dos robôs que estavam em movimento, os mesmos se tornam potenciais fontes de informação de localização, permanecendo inertes. Tem-se, então, a troca de papel entre os grupos, de modo que aqueles robôs que inicialmente estavam parados possam entrar em movimento.

Algumas extensões desse método e a respectiva aplicação em ambientes reais são apresentadas em [10] e [11]. Esses trabalhos utilizam três robôs para executar a tarefa de localização cooperativa. Um dos robôs, denominado mestre, executa o controle centralizado de toda a tarefa cooperativa. Esse robô é o único que possui sensores exteroceptivos capazes de mensurar informações de localização de robôs dispostos em sua vizinhança. Desse modo, o controle de movimentação do grupo é estabelecido pelo mestre que ora utiliza sua própria informação de localização para localizar os demais robôs e ora utiliza a informação de localização dos demais para se localizar. Nesses trabalhos o acúmulo de erro é consideravelmente menor do que técnicas de *dead reckoning*. Contudo, algumas limitações podem ser observadas, tais como: baixa robustez a falhas devido ao controle centralizado; desempenho limitado em decorrência da paralisação dos robôs durante a localização; e impossibilidade de uma real troca de papel entre os grupos devido à heterogeneidade de *hardware* e *software* dos robôs.

Um método de localização cooperativa mais geral é apresentado em [12] e consiste em estimar a localização dos membros de um grupo de robôs por meio da aplicação de técnicas de filtragem probabilística. Nesse trabalho, os robôs partem de uma pose conhecida e utilizam a odometria para estimar novas poses. Um filtro de Kalman centralizado é utilizado para efetuar a estimativa conjunta das poses. Uma versão descentralizada desse método executa a etapa de predição do filtro de Kalman independentemente em cada robô, enquanto que a etapa de correção é executada após a troca de informações entre os robôs no momento em que esses se encontram. Assim, tem-se a troca das informações de crença dos robôs envolvidos e a consequente geração de novas estimativas de localização.

Os métodos de localização cooperativa descritos anteriormente estimam a localização de um robô com base na mensuração de distâncias e direções relativas de robôs dispostos na vizinhança. Os resultados apresentados em [13] e [14], por exemplo, mostram que o tipo de medida utilizada pode influenciar significativamente a precisão das estimativas de localização. Nesses trabalhos, as informações de odometria foram fundidas com informações de distância, orientação e direção relativas, sendo as informações de direção relativa mais relevantes para a melhoria da localização. Apesar desses trabalhos terem avaliado a utilização de diferentes tipos de medida, o emprego de um número limitado de robôs não destacou a necessidade de se estabelecer um critério para a seleção das informações de localização disponíveis na vizinhança de um robô tentando se localizar.

Outro fator relevante para a precisão das informações de localização é a estratégia de movimentação utilizada. Em [10] são utilizados experimentos simulados com o objetivo de identificar posições relativas entre os membros do grupo, de modo a maximizar a precisão da localização. O controle centralizado de um robô mestre e dois robôs escravos é utilizado e três potenciais estratégias são identificadas. Em [14] são apresentadas duas estratégias de movimentação em experimentos simulados com 6 robôs, sendo uma formação determinística e uma variação aleatória dessa formação. Diferentemente da estratégia utilizada no trabalho [12] em que os robôs atuam de maneira independente e ajustam suas crenças quando se encontram, os trabalhos [10] e [14] apresentam estratégias de movimentação que visam manter a coesão do grupo. Embora essa estratégia maximize a ocorrência de encontros, esses trabalhos fazem uso de um controle centralizado, o que compromete a escalabilidade e a robustez desses métodos.

A localização cooperativa tem apresentado resultados satisfatórios em sistemas multirrobôs, no entanto a utilização de um número pequeno de robôs impõe algumas restrições com relação ao desempenho e à robustez do sistema. Na localização cooperativa, os encontros entre os robôs desempenham um papel essencial no ajuste de suas crenças. Consequentemente, a frequência com que os encontros ocorrem pode influenciar diretamente o resultado da localização. Desse modo, a metodologia apresentada a seguir contempla a ampliação do número de robôs e a adequada coordenação dos mesmos com vistas a aumentar a ocorrência desses encontros. Além disso, tal metodologia considera alguns aspectos relevantes que surgem quando se deseja localizar cooperativamente e de forma descentralizada um enxame de robôs.

3 Metodologia Proposta

Diversos aspectos devem ser analisados quando se deseja localizar cooperativamente um enxame de robôs devido ao fato de se ter informações de localização mais abundantes e distribuídas nas diversas regiões do grupo. A metodologia adotada neste trabalho explora alguns desses aspectos com vistas a prover um mecanismo de localização independente de sistemas de posicionamento global e que leve em consideração o desempenho do sistema e a qualidade da localização final. Os aspectos inicialmente identificados como mais relevantes compreendem a estratégia descentralizada de coordenação da movimentação do grupo, a identificação e seleção de potenciais informações de localização para fusão sensorial, a topologia do grupo e o percentual de robôs atuando como marcos.

A movimentação do grupo é coordenada de forma descentralizada e tem o propósito de manter a coesão do mesmo, com o intuito de intensificar a ocorrência de encontros entre os robôs. O enxame é coordenado com vistas a alcançar regiões do ambiente de modo que pontos específicos estejam presentes nas regiões visitadas. Desse modo, evitamos os problemas advindos da disputa por espaço físico que surgem quando os robôs são instruídos a visitar um mesmo ponto no ambiente. A direção de movimentação é sugerida por algum membro do grupo que, naquele momento, atua como líder. O líder dissemina tal direção para sua vizinhança e os robôs marcos replicam tal informação. Desse modo, os marcos atuam como estações repetidoras de informação de direção e disseminam em cascata a direção de movimentação para as mais diversas regiões do grupo. A estratégia descentralizada para eleição do líder encontra-se em desenvolvimento. Pretendemos prover uma estratégia de mudança dinâmica de liderança de uma forma geral, de modo a ser aplicada à execução de diversos tipos de tarefa.

Dois tipos de movimentação têm sido explorados: intermitente e contínua. Independentemente ao tipo de movimentação adotada, uma parte do grupo atua como marcos dinâmicos. Tal parte não é fixa, mudando continuamente durante a execução de uma tarefa. Na movimentação intermitente, a parte do grupo que atua como marco permanece imóvel enquanto outros robôs se localizam. Na movimentação contínua os robôs marcos permanecem em movimento durante o processo de localização. A incerteza acumulada pela movimentação dos robôs tem sido o principal critério que temos utilizado para definir os momentos mais adequados para se efetuar a localização de um robô. Apesar de ocorrer a paralisação de parte do grupo durante a movimentação intermitente, a existência de um grande número de robôs contribui para manter o desempenho do sistema.

A comunicação é estabelecida de forma indireta, de modo que uma mesma informação possa ser capturada por diversos robôs e em pontos distintos do grupo, favorecendo a escalabilidade do método. As informações disseminadas por cada robô marco compreendem sua crença (pose e matriz de covariância) e a direção a ser seguida (caso disponível). A coesão do grupo proporciona uma maior ocorrência de informações de localização na vizinhança dos robôs. No entanto, a existência de várias fontes de informação exige uma seleção das informações a serem utilizadas, de modo a estabelecer uma boa relação entre o desempenho do processo de localização e a qualidade da localização. Atualmente estamos ana-

lisando a seleção de informações com base nas distâncias entre robôs e marcos, além das incertezas associadas a essas informações. Com essa seleção é possível estabelecer uma estimativa de localização de um robô, sob o ponto de vista dos marcos. Operadores estatísticos [15], compatíveis com a filtragem de Kalman, são utilizados para efetuar a fusão dessa estimativa com a crença do robô, de modo a gerar uma nova estimativa de localização do robô.

A topologia do grupo e o percentual de robôs atuando como marcos compreendem aspectos a serem explorados neste trabalho, porém os mesmos ainda não foram avaliados. Uma instância da metodologia proposta considerando algumas simplificações é apresentada a seguir.

4 Instância da Metodologia e Resultados Preliminares

De forma a investigar o potencial dessa metodologia, uma instância inicial simplificada foi desenvolvida. Nessa instância é suposto que cada robô possui: (1) uma bússola que provê sua orientação com base em um único sistema de coordenadas global; (2) sensores proprioceptivos para mensurar o deslocamento efetuado a cada iteração; e (3) sensores exteroceptivos que o possibilita medir suas respectivas distâncias e orientações relativas a robôs atuando como marcos, com um erro aditivo baseado em uma distribuição normal. É suposto ainda que pelo menos um robô do enxame possui uma estimativa inicial de sua localização.

Nessa instância foi adotada a estratégia de movimentação intermitente. Cada robô percorre uma distância pré-definida antes de efetuar uma nova localização. Um mesmo robô foi utilizado como líder e alvos foram estabelecidos em posições conhecidas pelo líder, de modo a instruí-lo a seguir um percurso. Esse procedimento permite analisar a coesão do movimento do enxame e a coerência das direções publicadas pelo líder e replicadas pelos marcos. Com isso, faz-se possível verificar se a estratégia de disseminação de informações utilizada é suficiente para localizar robôs nas diversas regiões do grupo. A estratégia de seleção das informações de localização disponíveis na vizinhança foi feita de modo simplificado, utilizando o marco com menor distância euclidiana do robô tentando se localizar.

O comportamento de cada robô é descrito pela máquina de estados finitos da Figura 1. Inicialmente, uma estimativa de pose é estabelecida para cada robô, à partir da informação de localização de pelo menos um membro do grupo. Com isso os robôs se credenciam a atuar como marcos (estado MC) e permanecem imóveis por um período de tempo aleatório antes de tentarem transitar para o estado *Explorando* (EX). A verificação da existência de marcos ou de robôs tentando se localizar na vizinhança definem as condições para a transição de estados $MC \rightarrow EX$ de um robô. Essas condições visam garantir a existência de robôs disseminando informações nas diversas regiões do grupo, além de contribuir para que as mudanças de estado de cada robô ocorreram em momentos distintos.

Um robô no estado EX explora o ambiente utilizando informações de odometria. Ao atingir a distância pré-estabelecida ocorre a transição para o estado *Localizando* (LC). Nesse estado o robô permanece parado, utiliza seu sensor vir-

tual circular para localizar robôs marcos na vizinhança e usa a informação de localização do marco mais próximo para se localizar. O critério utilizado para selecionar o mais próximo é baseado no fato da incerteza associada ao processo de mensuração exteroceptiva ser proporcional à distância robô-marco. Após ajustar sua crença, um robô se torna um potencial marco no grupo e passa a disseminar sua localização para a vizinhança, utilizando um mecanismo de comunicação.

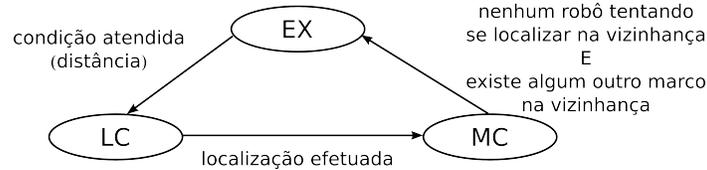


Figura 1. Máquina de estados finitos representando o comportamento e a dinâmica de mudanças de estados dos robôs.

Para esta instância da metodologia foi desenvolvido um mecanismo de comunicação baseado no modelo cliente/servidor. O protocolo implementado viabiliza a troca de informações da pose, matriz de covariância, destino (direção), estado e identificador de cada robô. A comunicação entre os robôs é indireta, pois a cada robô está associado um cliente que tem a capacidade de se comunicar com o servidor. A troca de informações é restrita à vizinhança dos robôs por meio da definição de um sensor virtual com alcance limitado. Além disso, a troca de informações clientes/servidor é assíncrona e não coordenada.

A Figura 2 apresenta uma instância dos experimentos que foram executados utilizando o simulador Player/Stage³ e modelos de robôs diferenciais e-puck⁴ com 7,5 cm de diâmetro. O ambiente simulado possui 5 m² e os alvos ‘X’ representam locais do ambiente que o robô líder deverá alcançar. As cores dos robôs indicam o comportamento (estado) que os mesmos estão executando: ciano (LC); verde (MC); e amarela ou cinza (EX), sendo amarela a cor que identifica o robô líder.

Apesar das suposições feitas neste trabalho serem ainda muito fortes, os experimentos preliminares indicam que o mecanismo proposto pode ser bastante promissor. O erro simulado associado à odometria consiste em um percentual de 5% em relação às velocidades linear (v_x) e angular (w). O alcance do sensor virtual foi limitado a um raio de 60 cm à partir do centro do robô. À estimativa de distância foi incorporado um erro aditivo baseado em uma distribuição normal $N(0; \sigma^2)$, sendo utilizado um percentual de 10% da distância real entre o robô explorador e um robô marco para o desvio padrão (σ). A fusão das informações

³ The Player Project. Disponível em: <http://playerstage.sourceforge.net/>. Acessado em: 25 de julho de 2012.

⁴ The e-puck education robot page. Disponível em: <http://www.e-puck.org>. Acessado em: 25 de julho de 2012.

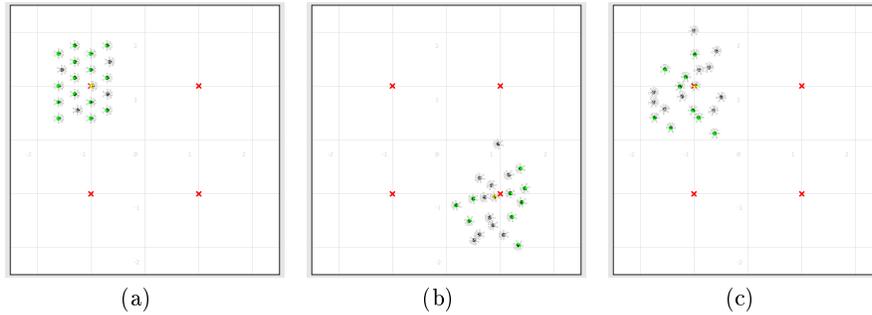


Figura 2. *Snapshots* do ambiente de simulação. Alvos a serem alcançados pelo robô líder estão indicados por um ‘X’. Em (a) tem-se o ponto de partida; em (b) um momento durante a exploração; e em (c) tem-se a posição final após a execução do percurso.

proprioceptivas e exteroceptivas é efetuada com base em uma média ponderada pelas variâncias dessas informações (compatível com o filtro de Kalman).

Nos experimentos apresentados na Figura 2, o robô líder percorreu uma distância aproximada de $7,54\text{ m}$. O erro médio absoluto utilizando odometria foi de aproximadamente 17 cm (erro médio relativo: $2,25\%$ da distância percorrida), enquanto que o valor máximo de erro absoluto detectado durante o percurso foi de aproximadamente 38 cm . A utilização do método proposto gerou um erro médio absoluto de aproximadamente 1 cm (erro médio relativo: $0,13\%$), sendo que o valor máximo de erro absoluto nesse método foi de aproximadamente $3,3\text{ cm}$. Apesar desses resultados ainda não serem válidos estatisticamente, a incorporação de técnicas estatísticas e métodos de projeto e análise de experimentos compreende uma das tarefas a serem incorporadas neste trabalho.

5 Conclusões

Este trabalho apresentou um método de localização cooperativa em enxames de robôs. Nesse método parte do grupo atua como marcos dinâmicos e as estimativas de localização geradas para cada robô são independentes de um sistema de posicionamento global. Uma instância inicial da metodologia proposta foi implementada em simulação. Nessa instância, algumas etapas do método foram simplificadas, porém os resultados preliminares se mostraram satisfatórios e servem de indicativo para expressar o potencial do método.

O mecanismo de comunicação estabelecido faz uso de uma entidade central, o que compromete a robustez do método. Estamos investigando formas de tratar a disseminação de informações utilizando comunicação *broadcast*, porém sem comprometer a escalabilidade do método. A utilização de um único robô líder e a definição de pontos específicos no ambiente a serem visitados implica em um conhecimento global. Técnicas de eleição descentralizada da liderança estão sendo investigadas com o intuito de eliminar a necessidade desse conhecimento,

de modo a viabilizar a troca de liderança durante a execução do método e de acordo com a tarefa a ser executada. Para auxiliar um robô que venha a se perder do grupo estamos propondo o uso de *timeouts* na tarefa de identificação de marcos, além do registro das últimas ações executadas, a fim de identificar regiões mais prováveis onde o enxame possa estar. Pretendemos, ainda, avaliar se o percentual de robôs atuando como marcos e a distribuição geográfica desses marcos no enxame contribuem para a qualidade da localização.

Agradecimentos Agradecemos à FAPEMIG, à CAPES e ao CNPq pelo suporte financeiro.

Referências

1. Thrun, S.: Robotic Mapping: A Survey. In: Exploring Artificial Intelligence in the New Millenium. Morgan Kaufmann (August 2002) 1–36
2. LaValle, S.M.: Planning Algorithms. Cambridge University Press, New York (2006)
3. Borenstein, J., Everett, H.R., Feng, L., Wehe, D.: Mobile Robot Positioning — Sensors and Techniques. Journal of Robotic Systems **14**(4) (1997) 231–249
4. Thrun, S., Burgard, W., Fox, D.: Probabilistic Robotics. Intelligent robotics and autonomous agents. The MIT Press (August 2005)
5. Parkinson, B.W., Spilker Jr., J.J., eds.: Global Positioning Systems: Theory and Applications. Volume I. American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc., USA (1996)
6. Michael, N., Fink, J., Kumar, V.: Experimental Testbed for Large Multirobot Teams. IEEE Robot. Automat. Mag. **15**(1) (march 2008) 53–61
7. Cao, Y.U., Fukunaga, A.S., Kahng, A.B.: Cooperative Mobile Robotics: Antecedents and Directions. Autonomous Robots **4**(1) (1997) 7–27
8. Sahin, E., Girgin, S., Bayindir, L., Turgut, A.E.: Swarm Robotics. In: Swarm Intelligence. Natural Computing Series. Springer (2008) 87–100
9. Kurazume, R., Nagata, S., Hirose, S.: Cooperative Positioning with Multiple Robots. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. (1994) 1250–1257
10. Kurazume, R., Hirose, S.: Study on Cooperative Positioning System – Optimum Moving Strategies for CPS-III. In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'98). Volume 4. (1998) 2896–2903
11. Kurazume, R., Tobata, Y., Iwashita, Y., Hasegawa, T.: 3D laser measurement system for large scale architectures using multiple mobile robots. In: Proc. of Sixth Int. Conf. on 3-D Digital Imaging and Modeling. (August 2007) 91–98
12. Roumeliotis, S.I., Bekey, G.A.: Collective Localization: A distributed Kalman filter approach to localization of groups of mobile robots. In: Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation. Volume 3. (2000) 2958–2965
13. Martinelli, A., Pont, F., Siegwart, R.: Multi-Robot Localization Using Relative Observations. In: Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation. (2005) 2797–2802
14. Rekleitis, I.M., Dudek, G., Milios, E.E.: Multi-Robot Cooperative Localization: A Study of Trade-offs Between Efficiency and Accuracy. In: Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots and Systems. Volume 3. (2002) 2690–2695
15. Smith, R.C., Cheeseman, P.: On the representation and estimation of spatial uncertainty. International Journal of Robotics Research **4** (1986) 56–68