

Resumo

Esta tese aborda o problema da partilha eficiente de informação no seio de um sistema robótico composto por vários robôs móveis, os quais são programados para obter um comportamento cooperante no contexto da construção de mapas volumétricos de ambientes desconhecidos. Mais especificamente, são abordados os assuntos seguintes: representação de um mapa probabilístico e sua construção incremental, através da exploração eficiente do ambiente baseada na maximização do ganho de informação; controlo distribuído de equipas de robôs móveis cooperantes, baseado num critério de utilidade da informação; e coordenação da exploração, com o objectivo de se evitarem a aquisição de informação sensorial redundante e a interferência entre robôs.

Os robôs têm sido desenvolvidos essencialmente para ajudar ou substituir pessoas em tarefas que sejam repetitivas ou desempenhadas em ambientes perigosos. Muitas destas tarefas, particularmente aquelas que são intrinsecamente distribuídas e complexas, requerem a utilização de uma equipa de vários robôs móveis cooperantes — um sistema de múltiplos robôs cooperantes (SMRC) — de forma a torná-las viáveis nalguns casos ou, noutros casos, de forma a obter um desempenho melhor do que com um único robô.

Apesar de apresentar vantagens potenciais relacionadas com distribuição espacial, simultaneidade, decomposição de problemas complexos, robustez, fiabilidade e custo, um SMRC requer que cada robô mantenha um nível de conhecimento suficientemente completo e consistente, acerca da missão atribuída à equipa em que se encontre integrado e acerca dos outros robôs da equipa, para que a cooperação entre os robôs se torne efectiva. O principal desafio prende-se com o facto da informação estar dispersa e pelo facto de cada robô possuir apenas um conhecimento incompleto, e muitas vezes inconsistente, acerca do ambiente. A partilha eficiente de informação através de comunicação inter-robôs é, portanto, crucial para a existência de cooperação.

A construção de mapas é de facto um domínio de aplicação relevante para a robótica. Por um lado, em muitos outros domínios de aplicação em que o mapa não é o fim em si mesmo (ex. busca e salvamento, vigilância, exploração planetária, etc.), cada robô precisa habitualmente de manter um mapa que sirva de suporte à navegação segura e eficiente através do ambiente. Por outro lado, os robôs podem substituir as pessoas na obtenção de mapas detalhados, tais como: mapas fastidiosos de ambientes interiores (ex. edifícios); mapas de infra-estruturas enterradas no solo (ex. condutas de gás, cabos eléctricos, linhas de comunicação, etc.), para se evitar a sua danificação durante trabalhos de construção civil; ou mapas detalhados de ambientes perigosos (ex. explorações mineiras abandonadas, instalações nucleares, etc.), que sirvam de suporte à sua monitorização ou manutenção.

As contribuições da tese incluem um modelo probabilístico de representação compacta de mapas volumétricos, baseado em grelhas, que permite modelizar explicitamente a incerteza

através do conceito de entropia. Também é formulado um método de exploração *frontier-based* usando entropia, segundo o qual cada robô utiliza o seu mapa actual para seleccionar uma nova pose de exploração que maximize o ganho de informação.

Estes métodos probabilísticos servem de base ao desenvolvimento de uma arquitectura distribuída para a construção de mapas volumétricos com equipas de robôs móveis cooperantes, pela qual cada robô partilha altruisticamente com os outros robôs da equipa as medidas de distância mais úteis. Esta partilha de informação é baseada na definição formal de uma medida de utilidade de informação, desenvolvida a partir dos conceitos de entropia e informação mútua, segundo a qual a informação sensorial é tanto mais útil quanto mais contribui para melhorar o mapa do robô. A arquitectura distribuída é ainda dotada de um mecanismo para coordenar as acções de exploração levadas a cabo pelos diferentes robôs, melhorando assim o desempenho global da equipa.

Os métodos propostos foram implementados em robôs móveis, dotados de comunicação sem fios e de um sistema de visão binocular utilizado para medir distâncias. Os robôs foram usados para levar a cabo um conjunto de experiências num ambiente físico, que demonstraram a validade dos métodos e a melhoria de desempenho proporcionada pela cooperação entre robôs. Os resultados obtidos com os robôs móveis foram complementados com a realização de numerosas simulações em computador, que demonstraram a utilização daqueles métodos em equipas de diversos tamanhos.

Abstract

This thesis addresses the problem of how to share efficiently information within a robotic system comprised of several mobile robots, which are programmed to exhibit cooperative behavior in the context of building volumetric maps of unknown environments. More specifically, it addresses the following issues: representing a probabilistic map and improving it through efficient exploration, based on information gain maximization; distributed control of teams of cooperative mobile robots, based on an information utility criteria; and coordinated exploration, aiming at avoiding redundant sensory information and robots' interference.

Robots have been developed essentially to help or substitute humans in tasks which are either repetitive or dangerous. For many of these tasks, especially those that are intrinsically distributed and complex, a team of several cooperative mobile robots — a cooperative multi-robot system (MRS) — is required to either make viable the mission accomplishment or, at least, accomplish the mission with better performance than a single mobile robot.

In spite of potential advantages related with space distribution, time distribution, complex problems decomposition, robustness, reliability and cost, a MRS requires that each robot maintains a sufficient and consistent level of awareness about the mission assigned to the team and about its teammates, in order to attain effective cooperation. The main challenge is that information is distributed and thus each robot has only partial and, sometimes, inconsistent knowledge about the environment. Sharing efficiently information via communication is thus crucial for robots' cooperation.

Building maps is indeed a relevant robotics' application domain. Firstly, in many other application domains than building maps (e.g. search and rescue, surveillance, planetary exploration, etc.), a robot usually needs a map to support safe and efficient navigation based on a world model. Secondly, robots may substitute humans on building detailed models, such as: fastidious maps of indoor environments (e.g. buildings); maps of buried utilities (e.g. gas pipes, power or communication lines, etc.), in order to avoid getting too close to them in construction activities; or detailed maps of hazardous environments (e.g. abandoned underground mines, nuclear facilities, etc.), in order to support monitoring or maintenance procedures.

The contributions of this thesis include a compact grid-based probabilistic representation model of a volumetric map, which allows to explicitly model uncertainty through the entropy concept. A frontier-based exploration method is also formulated using entropy, so that each robot uses its current map to select a new exploration viewpoint with maximum information gain.

This probabilistic framework is used to devise a distributed architecture model for building volumetric maps with teams of cooperative mobile robots, whereby each robot is altruistically committed to share useful measurements with its teammates. The information sharing is based on the formal definition of a measure of information utility, developed upon the concepts of entropy and mutual information, whereby sensory data is as useful as it contributes to improve the robot's map. The distributed architecture is further refined with a mechanism to coordinate the exploration actions of different robots, thus improving the team's performance.

The proposed methods were implemented in mobile robots, equipped with wireless communication and a stereo-vision system providing range measurements. These robots were used to carry out a set of experiments in a physical environment, which successfully validated the proposed framework and demonstrated the performance improvement yielded by the robots' cooperation. The results obtained with mobile robots were complemented with extensive computer simulations, which demonstrated those methods with varying team sizes.