

基于反射的规划方法*

李永成 张 钺

(清华大学计算机科学与技术系, 北京 100084)

摘要 本文针对机器人在实际环境中执行任务时所面临的不确定性和实时性提出了一种基于反射的规划方法. 该方法在较好地利用全局信息的基础上, 充分发挥出机器人自身的能动的反射作用. 我们首先讨论该方法的基本原理, 然后着重讨论它在移动机器人规划和导航中的应用.

关键词 基于反射的规划, 反射方式, 声纳划分线, 势场法.

有关机器人运动规划方面的工作大致经历了两个阶段. 一是理想模型阶段, 在这个阶段中, 人们往往假设环境信息知道得很精确, 且静止不变, 机器人本身的控制也很准确, 不存在误差. 由于问题得到了简化, 人们相应地提出了各种各样的算法. 第二阶段是实际模型阶段, 即以真实环境为背景, 该阶段的两大特点是考虑到实时性(urgency)和不确定性, 以往的许多算法由于耗时较多, 距实用尚有一段距离, 因而研究一种快速实时的, 又具有鲁棒性的方法就显得尤为重要.

针对该问题, 目前世界上存在着两大流派, 一是自上而下, 一是自下而上. 所谓自上而下是指在传统规划理论的基础上, 考虑到不确定性和实时性, 将机器人的感知、反射等活动吸收到规划过程中^[1-3]. 以 Brooks 为代表的自下而上流派主张以考虑机器人的基本反射活动为主, 在机器人与复杂环境的相互作用中体现出机器智能, 这类方法往往又被称作为基于行为(behavior-based)的研究方法^[4-6].

由于考虑到不确定性和实时性的规划问题是一个 NP 问题^[7], 因而前述的种种方法仅仅是针对问题的不同侧面提出了自己的设想, 距离真正地解决问题还相差很远. 本文我们提出一个新的想法, 即以机器人在相应实际环境中的反射能力(reactive ability)为出发点进行规划(这里反射指的是机器人用特定的传感器感知环境并以特定方式作出反应, 因而决定反射的两个基本要素就为传感器和反应方式). 下面我们简要概述一下该方法的基本特征:

- 分析机器人在实际环境中的各种反射方式
- 根据已知的环境模型进行全局规划
- 由机器人的反射能力来确定机器人的运动方案

在第 1 节中我们给出该方法的基本原理, 第 2 节我们讨论该方法在移动机器人规划导

* 本文 1991-12-16 收到, 1992-05-12 定稿

作者李永成, 28 岁, 博士生, 主要研究领域为运动规划, 机器人学习, 感知一行为理论等. 张钺, 59 岁, 教授, 主要研究领域为人工智能, 计算机应用.

本文通讯联系人: 李永成, 北京 100084, 清华大学计算机科学与技术系

航中的应用,最后给出一个例子予以说明.

1 基本原理

1.1 基本方法的描述

给定一个机器人系统以及所要完成的任务,我们可以用一个五元组来表示一个规划 $\langle C_I, C_G, W, IG, RD \rangle$, 其中各项含义如下

C_I : 机器人初始状态 C_G : 机器人目标状态 W : 环境模型

IG : 中间目标状态集 RD : 反射方式集

根据这样一个规划,机器人实际执行任务的过程就变为

$$IG_i \xrightarrow{reaction(i)} IG_{i+1}$$

其中 $1 \leq i \leq N-1, IG_1 = C_I, IG_N = C_G$. 若状态 P 在环境 W 中能够通过反射 RD_k 变换到状态 P' , 则我们记

$$RD_k(P) \rightarrow P'$$

这里 $1 \leq k \leq M, k$ 为机器人的反射方式标注, M 为其反射方式的总个数. 我们把所有满足上式的状态 P 的集合记为 $D(p', RD_k)$. 由此, 我们可得下面的引理.

引理 1. 对一个规划 $\langle C_I, C_G, W, IG, RD \rangle$, 机器人能够从初始状态 C_I 到达目标状态 C_G , 当且仅当

$$IG_k \in D(IG_{k+1}, RD_k)$$

对所有的 $k: 1 \leq k \leq N-1$, 及某个 $l_k: 1 \leq l_k \leq M$ 均成立.

一般地说, 当我们给出一个规划之后, 我们应对该规划进行评估, 由于针对某个任务往往存在着许多种规划结果, 我们应能够通过选择合适的策略使最后的规划达到最优或相对较优. 通常层次越低(即感知方式较简单, 因而感知信息也相对较少)的反射方式其反应速度也越快, 因此我们应尽可能多地选择低层次的反射方式.

设 $E_i(IG_i, RD_k)$ 表示机器人以方式 k 到达中间目标 IG_i 的时间消耗估计, 则我们应选择合适的规划, 使其总消耗

$$\epsilon_{plan} = \sum_{i=2}^n E_i(IG_i, RD_{k_i}) \quad (1 \leq k_i \leq M)$$

达到最小.

为了防止突发事件使得机器人在执行过程中陷入死循环或误操作之中, 针对其每一次执行, 我们还要设置一个时间约束参数, 一旦机器人的执行时间越界, 则宣告该次执行失败. 我们可用下式来表示一次执行过程

$$reaction(IG_i, IG_{i+1}, RD_{k_i}, T_i)$$

其中 T_i 为该次执行过程的时间约束.

1.2 失败检测及克服

机器人在实际环境中执行任务时由于意外会导致失败, 此时我们应对失败的场景进行分析, 并提出一些启发式的克服方法.

首先让我们对反射方式 RD 进行一下分析, 若对任意的状态 P , 有

$$D(P, RD_i) \subseteq D(P, RD_j)$$

则记 $RD_i \ll RD_j$, 即反射方式 RD_j 的层次比 RD_i 要高.

如果 $RD_i \ll RD_j$ 与 $RD_j \ll RD_i$ 均不满足, 则称 RD_i 与 RD_j 属于同一层次, 记 $RD_i \sim RD_j$. 于是, 我们可对 $\{RD_i\}$ 进行排序, 使得 RD_1, RD_2, \dots, RD_M 满足

$$\text{若 } RD_i \ll RD_j, \text{ 则 } i < j.$$

机器人一次执行 $reaction(IG_i, IG_{i+1}, RD_k, T_i)$ 失败后可能出现两种情况: (1) 不知道原因; (2) 经判断 IG_{i+1} 不可达.

当出现情况(2)时, 我们可选择下一个中间目标, 执行

$$reaction(\cdot, IG_{i+2}, RD_{k+1}, T'_{i+2})$$

其中 \cdot 表示当前状态, T'_{i+2} 为重新估计的时间约束参数.

当出现情况(1)时, 我们可选择 RD_l , 使 $l > k$, 即通过选择高层次的感知反应方式来把自己从局部失败中解救出来, 这样做可能会消耗很多时间, 但为了完成预定的任务, 我们不得不采用这种策略.

1.3 算法

下面我们给出该方法的算法, 首先对一些符号予以说明. 令 S^+ 表示状态集合 S 的闭包, S^- 表示 S 的最大开子集, $A \setminus B$ 表示状态集合 A 与 B 之差. 我们用 $PLAN-1$ 表示一个由状态组成的序列, $dist(P_1, P_3, PLAN-1) > dist(P_2, P_3, PLAN-1)$ 表示状态 P_1, P_2, P_3 均在 $PLAN-1$ 中, 且从 P_1 到 P_3 在 $PLAN-1$ 中要经过状态 P_2 . 下面为算法的具体描述, 这里反射方式集是已经排好序的.

(1) 采用传统的方法先规划出从 C_I 到 C_G 的一个可行状态序列 $PLAN-1$, 设 $k=1, IG_1 = C_G$.

(2) FOR $i=1$ TO M

{计算 $S=D(IG_k, RD_i)$;

IF $C_I \in S$ THEN GOTO (4)

ELSE {计算 $P = \{S^+ \setminus S^-\} \cap PLAN-1$;

IF $dist(P, C_I, PLAN-1) < dist(IG_k, C_I, PLAN-1)$

THEN $\{k=k+1; IG_k=P; \text{GOTO (2)}\}$

}

}

(3) 宣告规划失败, 退出.

(4) 令 $N=k$, 并将 IG_1, IG_2, \dots, IG_N 的下标倒置一下, 变为 $IG_N, IG_{N-1}, \dots, IG_1$.

(5) FOR $i=1$ TO N

{计算中间目标 IG_i 的识别条件 $RC(IG_i)$;

估算时间约束条件 T_i }

(6) 给出一个可执行规划

$$PLAN = \{IG_i, IG_{i+1}, RD_k, T_i, RC(IG_{i+1}) \mid i = 1, \dots, N-1; 1 \leq k \leq M\}$$

2 移动机器人的规划导航

前面我们抽象地讨论了基于反射的规划方法,下面来研究一下它在移动机器人的运动规划和导航中的应用.传统的机器人规划导航办法一般有轨迹跟踪法、势场法、视觉导航等,其中重点考虑到鲁棒性和实时性的还不多,而这正是近年来人们研究的一个热点.我们的出发点就在于把全局规划跟机器人的反射活动结合起来,充分利用全局信息来保证完成任务,同时也发挥出机器人在环境中的适应能力,提高整体系统的实时性和鲁棒性.

2.1 系统描述

我们这里所要讨论的移动机器人为矩形的小车,环境由一系列已知的凸多边形障碍组成,机器人的传感器有里程计、声纳和视觉.一般地,里程计可使机器人了解自己的方位,并确定下一步前进的方向,但由于它无法与环境交互,我们在此就不把它作为机器人的一种反射传感器,主要用它来识别目标.声纳的主要作用是检测和躲避障碍,在适当的机制引导下,它也可用来导航(如可采用势场法^[8]来进行导航).视觉是一种功能很强的传感器,它既可以用来导航,也可以进行目标识别,但由于它的时间消耗非常大,在实际环境中尚难于实用,一般地,我们可用它来作为识别目标的一种辅助手段.在此,我们将主要采用声纳进行导航,问题的关键就在于分析基于声纳势场法导航的反射方式跟环境交互的一些性质.由上节所述,重点就在于如何计算 $D(G, Sonar)$.

2.2 声纳区分

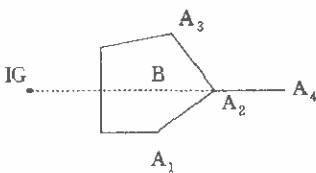


图1

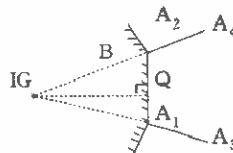


图2

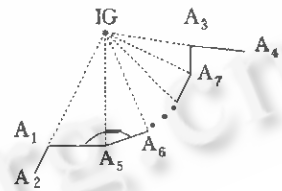


图3

如图 1 所示, IG 表示机器人要到达的中间目标, B 表示障碍, IG 在 A_2A_4 的延长线上, 其中 A_2 若满足下列条件:

- (1) A_2 在 B 的边界上
- (2) $\angle A_4A_2A_1 > \pi/2$ 并且 $\angle A_4A_2A_3 > \pi/2$

则我们称射线 A_2A_4 为障碍 B 关于 IG 的 S_- 划分线, 容易看出当机器人位于 S_- 划分线的某一侧向 IG 运动时, 若以声纳势场法作为其反射方式, 则机器人的运动轨迹必与该 S_- 划分线不交.

下面我们进一步讨论 S_- 划分线. 在图 2 中, A_1, A_2 同时满足前述的条件, 则此时障碍 B 关于 IG 的 S_- 划分线就由 A_1A_3 和 A_2A_4 共同组成. 自然, S_- 划分线也可能由多条射线组成. 当机器人初始位置位于 $A_3A_1A_2A_4$ 之内时, 机器人向 IG 的运动最后将趋于势场平衡点 Q . 当机器人初始位置位于 $A_3A_1A_2A_4$ 之外时, 机器人的运动将趋于 IG , 无论何种情况, 机器人的运动轨迹均与 S_- 划分线不交.

引理 2. 组成 S_- 划分线的两相邻射线之间必存在一势场平衡点.

证明: 设 A_1A_2, A_3A_4 为组成 S_- 划分线的两条相邻射线(图 3), 即 $\angle A_2A_1A_5 > \pi/2$, 所以 $\angle IGA_1A_5 < \pi/2$, 若 $\angle IGA_5A_1 \leq \pi/2$, 则从 IG 引向 A_1A_5 的垂线必定与 A_1A_5 相交, 则势场平衡点存在. 如果 $\angle IGA_5A_1 > \pi/2$, 因为多边形障碍为凸多边形, 所以 $\angle A_1A_5A_6 < \pi$, 因而 $\angle IGA_5A_6 < \pi/2$.

以上类推, 若均不存在势场平衡点, 则有 $\angle IGA_7A_3 > \pi/2$. 因为 A_3A_4 为 S_- 划分线, 所以 $\angle A_4A_3A_7 > \pi/2$, 因而 $\angle IGA_3A_7 < \pi/2$, 则 IGA_3 和 IGA_7 之间存在一势场平衡点.

采用类似的方法, 我们可得下述结论:

引理 3. 在势场平衡点两侧必存在组成 S_- 划分线的两条射线.

由此我们可看到, S_- 划分线将机器人的运动区域划分为许多子区域, 在每个子区域内机器人不是运动到目标点, 便是运动到势场平衡点, 我们将这样的一些子区域称为势场声纳区, 简称声纳区.

由引理 2, 3, 我们很容易得到下面的定理.

定理 1. 任给机器人一初始位置 P , P 不在 S_- 划分线上, 机器人以声纳为传感器, 势场法为导航机制向着目标运动的轨迹必定与 S_- 划分线不交.

上述定理从另一个角度说明了如果机器人的初始位置与所要到达的目标位于同一声纳区内时, 在声纳势场法导航下, 机器人一定能够运动到目标点. 由此我们可以看出这种规划方法的两个基本出发点:

(1) 相邻的中间目标必须位于同一声纳区内.

(2) 只要满足条件(1), 就应尽量少地选择中间目标, 更多地发挥机器人的反射本领.

根据以上的讨论, 我们可给出移动机器人规划导航中相应的基于反射的规划算法.

2.3 算法

(1) 采用 GVD 方法^[9]先规划出一条全局可行路径 $PATH$.

(2) 计算所有障碍关于目标点的 S_- 划分线, 并求出这些 S_- 划分线与 $PATH$ 的交点, 求出这些点沿 $PATH$ 距目标点最近的一点 P (P 有可能不存在).

(3) 若 P 不存在, 则规划结束.

(4) 将 P 沿 $PATH$ 向目标点移动距离 ϵ , 将该点作为新的目标点, 转(2). 距离 ϵ 可参考已知模型误差和机器人控制误差的大小来定.

至此, 我们已求出了中间目标集 $\{IG_i\}$, 只要我们再给出时间约束 T_i 及相应 IG_i 的识别条件, 则规划完成.

2.4 实例

下面我们用一个例子来说明上述算法. 障碍环境如图 4 所示, 机器人初始位置为 C_1 , 目标位置为 C_6 , 图中阴影部分为障碍, 虚线表示障碍关于目标点的 S_- 划分线, $PATH$ 为采用 GVD 方法规划出的一条可行路径. 从图 4 中我们可看出应选 IG_2 作为第一个中间目标.

在图 5 中, 我们以 IG_2 作为新的目标, 求出所有的 S_- 划分线, 由于这些 S_- 划分线均与 $PATH(IG_2-C_1)$ 一段不交, 则我们无须再选择新的中间目标点了.

3 总结

下面我们对移动机器人规划导航的几种方法进行一下比较.

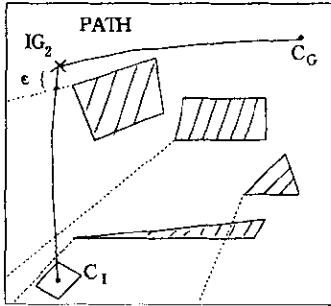


图4

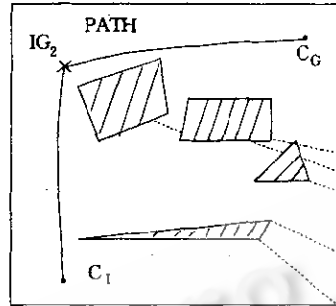


图5

(1) 势场法: 简单, 实时, 具有较强的鲁棒性. 缺点是容易陷入平衡状态, 若对此进行人工干预, 则运动可能误入歧途, 该方法没有利用已知的全局信息, 因而能否到达目标无法得到保证, 一般地它多用于机器人的局部导航.

(2) 轨迹跟踪法: 让机器人沿着预定的轨迹运动, 该方法显得不够灵活, 且效率不高, 在环境模型及机器人控制存在误差时鲁棒性较差. 但它事先利用了全局信息来进行规划, 因而总能使机器人在通往目标的道路上运动.

(3) 视觉导航: 可靠性强, 但速度慢, 效率低.

基于反射的规划方法首先利用了全局信息, 因而可靠性很高; 同时它又利用了机器人的基本反射能力, 因而鲁棒性和效率都很高. 目前针对这类“Reactive Planning”的研究还是较多的, 我们这里所提出的方法就在于它把环境与机器人的反射能力综合在一起考虑、分析, 使得机器人的各种能力在相应环境中得到最佳的发挥, 从而提高了机器人系统的整体性能.

参考文献

- 1 Martin N G, Allen J F. Combining reactive and strategic planning through decomposition abstraction. Proc. of Workshop on Innovative Approaches to Planning, Scheduling and Control (WIAPSC), California, Nov. 1990:137-143.
- 2 Mitchell T M. Becoming increasingly reactive. Proc. of WIAPSC-90, 1990:459-467.
- 3 Howe A E, Cohen P R. Responding to environmental change. Proc. of WIAPSC-90, 1990:85-92.
- 4 Brooks R. A robust layered control system for a mobile robot. IEEE J. Rob. & Aut., 1986, RA-2(1):14-22.
- 5 Kaelbling L P, Rosenschein S J. Action and planning in embedded agents. Robotics and Autonomous System, 6(1, 2):35-48.
- 6 Brooks R. Intelligence without reason. IJCAI 1991, 1991:569-595.
- 7 John F Canny. The complexity of robot motion planning. The MIT Press, 1988.
- 8 Khatib O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. Proc. of 1985 IEEE Int. Conf. on Rob. and Aut., 1985:500-504.
- 9 O Takahashi, R J Schilling. Motion planning in a plane using generalized voronoi diagrams. IEEE Trans. on Robotics and Automation, 1985, 5(2):143-150.

REACTION-BASED PLANNING

Li Yongcheng and Zhang Bo

(Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract In this paper, a reaction-based planning method is presented for robot to carry out the task in a real world in the presence of uncertainty and in need of urgency. The method uses the global information to guide the robot's local reaction. The basic principle and the application of the method to the planning and navigation of mobile robot are discussed.

Key words Reaction-based planning, reaction mode, sonar-partition line, potential field method.

中国计算机学会 1994、1995 年国际学术活动计划

会议名称	时间	地点	主办单位	联系人
HKICC(GZ)	10.3-10.4	广州	CCF HKCS	王介生 2565533-818
ICA'94 展览会	10.6-10.10	上海	CCF SCS B/I	徐桂珍 3726055
国际软件测试和软件可靠性研讨会	10.18-10.20	北京	IEEE SE 专委 CCF 容错专委	闵应骅 2565533-836
The 19th Computer Software & Applications Conference 第 19 届国际计算机软件及应用会议	1995.10	北京	IEEE CS CCF	朱明远 6756956 Fax. 4919213
ICYCS'95 第四届国际青年计算机学术会议	1995.8	北京	CCF 主办 智能中心承办	白硕 2565533-162
第四届 CAD & CG 国际学术会议	1995.10	武汉	CCF 主办 华中理工大学 (430074) 承办	华中理工大学 机一系 刘健