

文章编号: 1001-0920(2004)06-0707-04

基于行为的轮式移动机器人导航控制

李磊^{1,2}, 曹志强¹, 侯增广¹, 谭民¹

(1. 中国科学院自动化研究所复杂系统与智能科学重点实验室,
北京 100080; 2. 中国科学院软件研究所, 北京 100080)

摘要: 介绍了一种轮式移动机器人 CASIA-I 及其运动机构, 针对该运动机构给出了机器人的运动方程和基于行为的导航控制算法, 并根据该算法进行了软件仿真和实物实验. 实验结果表明, 该导航控制算法是一种有效的导航算法.

关键词: 移动机器人; 运动机构; 导航控制

中图分类号: TP24 **文献标识码:** A

Behavior-based navigation control of wheeled mobile robot

LI Lei^{1,2}, CAO Zhi-qiang¹, HOU Zeng-guang¹, TAN Min¹

(1. Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China; 2. Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China. Correspondent: LI Lei, E-mail: lilei@compsys.ia.ac.cn)

Abstract: A wheeled mobile robot CASIA-I and its locomotion system are introduced. To the locomotion system, the kinematics equation and behavior-based navigation control algorithm are constructed. Software simulation and experiment are conducted according to the proposed algorithm. Experiment results show the effectiveness of the navigation algorithm.

Key words: mobile robot; locomotion system; navigation control

1 引言

实时避障和导航技术是反映移动机器人自主能力的关键技术之一. 许多研究人员对该项技术做了大量研究工作, 较为有效的方法是势场法^[1]. 势场法算法简单且反应速度快, 但存在局部极小和在狭窄通道中摆动等缺陷.

本文介绍了自行设计开发的室内自主移动机器人 CASIA-I. 该机器人配有一个超声环和两个红外环, 用于避障和导航. 此外, 该机器人的运动机构能迅速地改变方向, 可在狭窄的空间实现快速的自由移动和绕自身质心的零半径自转. 本文针对势场法的缺陷, 提出一种基于行为的导航控制算法, 并根据

该算法进行了软件仿真和实物实验.

2 运动机构

移动机器人 CASIA-I 的底盘装有两个伺服主驱动轮, 在两个主驱动轮轴线的中垂线上各装有一个平衡轮. 主驱动轮上集成有直流无刷伺服电机、光电轴编码器、轴编码轮轮毂和驱动轮轮毂, 平衡轮配有直流无刷伺服导向电机. 由于机器人自转时平衡轮方向与机器人运动方向会出现正交, 施加于自由旋转的平衡轮上的摩擦力将阻碍其运动, 进而导致定位误差. 为此, 在两平衡轮上分别安装了直流无刷伺服电机, 当正交力加载到平衡轮时, 平衡轮上的电机将作出响应, 使平衡轮适当转动, 以摆脱机构的死

收稿日期: 2003-06-02; 修回日期: 2003-10-25.

基金项目: 国家“863”计划项目(2001AA422340, 2002AA423160).

作者简介: 李磊(1975—), 男, 山西闻喜人, 博士后, 从事机器人控制、机器人视觉等研究; 谭民(1962—), 男, 广东新会人, 研究员, 博士生导师, 博士, 从事智能机器人技术、先进制造技术等研究.

锁状态. 光电编码器及其轮毂用于推测航法, 它能使机器人确定自身的相对位置. CASIA-I 轮系的布置情况如图 1 所示. 该布置方法可使机器人前进、后退、转弯和原地自转.

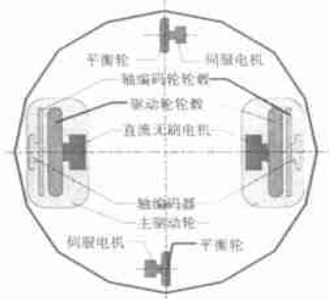


图 1 CASIA-I 轮系结构

3 运动学模型与导航控制

3.1 运动学模型

由文献[2,3]的分析可知: 机器人的平衡轮只起支撑作用, 它既不掌舵也不产生推进力, 在求解 2-DOF 轮式移动机器人的运动学方程时可以忽略, 其个数不会影响运动学方程. 于是得出具有两同轴驱动轮和与之正交的两平衡轮的移动机器人 CASIA-I 的运动学方程

$$p = \begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{y}(t) \\ \dot{\theta}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} q. \quad (1)$$

其中

$$p = [x(t) \quad y(t) \quad \theta(t)]^T, \\ q = [v(t) \quad \omega(t)]^T,$$

$v(t)$ 和 $\omega(t)$ 分别为 t 时刻移动机器人的线速度和角速度, 在运动学模型中二者是控制输入; $x(t)$ 和 $y(t)$ 为 t 时刻移动机器人的位置, 由其两个驱动轮的轴中点 C 的坐标表示; $\theta(t)$ 为 t 时刻的方向角, 由机器人前进方向与 X 轴夹角来表示. 两套直流伺服系统驱动两个驱动轮, 提供需要的转速或力矩, 分别控制两个驱动轮的不同速度或力矩, 便可使机器人按所要求的方向和速度移动.

3.2 导航控制

机器人导航控制由 follow-wall, avoid-obstacle 和 move-to-goal 3 个行为模块构成包容式结构, 如图 2 所示, 其中 s 表示抑制. 不同的行为模块根据传感器的输入决定其行为的输出, 并且高层行为抑制低层行为. follow-wall 行为使机器人摆脱死锁, avoid-obstacle 行为使机器人避开环境中的静态障碍, move-to-goal 行为使机器人奔向目标. 本文的导

航方法是由上述 3 个行为规划控制输入向量 q .

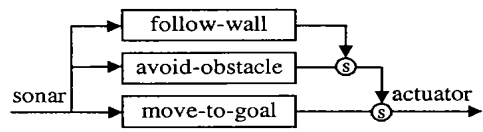


图 2 CASIA-I 控制结构

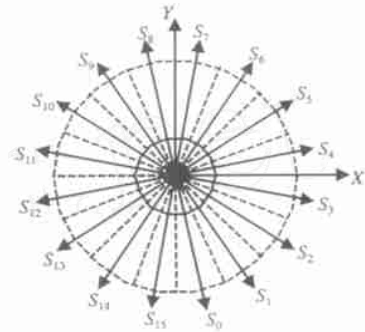


图 3 CASIA-I 超声布置

机器人导航采用机器人四周均匀分布的 16 个超声传感器, 表示为 $S_0 \sim S_{15}$, S_i 的输出为 R_i , 如图 3 所示. 当各超声相对于机器人当前运动方向的角度确定后, 便可确定机器人各方向上是否有障碍物及其与该障碍物的距离. 如果 S_i 在其所对应的方向上没有探测到障碍物, 则 $R_i = -1$; 如果 S_i 对应的方向上存在障碍物, 则 $R_i > 0$. 以 l 和 r 表示机器人当前位置上左右两边障碍物的逼近程度. 当左边障碍物更接近机器人时, 机器人右转; 当右边障碍物更接近机器人时, 机器人左转. l 和 r 的值可确定如下:

$$l = \frac{1}{i=8} \frac{|\cos \theta_i|}{R_i + R_0}, \quad r = \frac{1}{i=3} \frac{|\cos \theta_i|}{R_i + R_0}, \quad (2)$$

$$\theta_i = (2k + 1) \frac{\pi}{32}, \quad k = 0, 1, \dots, 15. \quad (3)$$

其中: θ_i 为第 i 个超声在机器人局部坐标系中的方向角, $\cos \theta_i$ 为第 i 个超声探测到的障碍物对当前机器人的影响权系数. 当 S_i 的输出大于 0 时, R_i 就是 S_i 的输出; 当 S_i 的输出小于 0 时, R_i 为超声的探测范围. 为防止 l 和 r 趋于无穷大, 取 R_0 为一裕量. 超声 S_0, S_1, S_2 指向机器人后方, 对于机器人躲避静态障碍的影响不大, 故求 r 时不考虑 3 个传感器的读数; 同理, 求 l 时不考虑 S_{13}, S_{14}, S_{15} 的读数.

设 I_{min} 用于表示高层行为不抑制其低层行为. 当传感器没有探测到障碍物时, avoid-obstacle 行为不被激活, 超声最大探测范围 $R_{range} > R_i$. 设 I_{max} 用于判断障碍物是否离机器人很近. 当障碍物离机器人很近时, 机器人停止以避免碰撞. 假设机器人的最大速度为 v_{max} , 采样周期为 t , 机器人距任何静态

障碍物的距离都不小于其最大步长 $v_{max} t$. 则 I_{min} 和 I_{max} 可分别表示为

$$\begin{cases} I_{min} = \frac{1}{\sum_{i=3}^7 \frac{|\cos \theta_i|}{R_{range} + R_0}} = \\ \frac{1}{\sum_{i=8}^{12} \frac{|\cos \theta_i|}{R_{range} + R_0}}, \\ I_{max} = \frac{1}{v_{max} t + R_0}. \end{cases} \quad (4)$$

3.2.1 导航行为转换条件

follow-wall 行为的激活条件(A)为

$$\begin{aligned} & (l > I_{max} \quad r > I_{max}) \\ & (\theta > \pi/2 \quad R_{11} > 0 \quad R_{12} > 0) \\ & (\theta < -\pi/2 \quad R_3 > 0 \quad R_4 > 0). \end{aligned} \quad (5)$$

当目标点在机器人的前半周,且超声 S_7 和 S_8 所指方向没有障碍物时, follow-wall 行为结束. 因此 follow-wall 行为的退出条件(B)为

$$\left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \right] \quad R_7 < 0 \quad R_8 < 0, \quad (6)$$

为机器人当前运动方向与机器人和目标点连线之间的角度,可通过计算左右两驱动轮转动的圈数差来求得. 激活条件和退出条件为布尔型变量,取 1 时为真. 定义布尔型变量

$$C = \begin{cases} 1, A = 1; \\ 0, B = 1. \end{cases} \quad (7)$$

于是, follow-wall 行为的有效条件为 $A \wedge C$; avoid-obstacle 行为的有效条件为 $\bigwedge_{i=3}^{12} R_i > 0 \quad \bar{A}$

\bar{C} ; move-to-goal 行为的有效条件为 $\bigwedge_{i=3}^{12} R_i = 1$.

3.2.2 follow wall 行为

follow-wall 行为使机器人只有在局部环境信息的条件下,才能摆脱局部极小所引起的死锁. 该行为被激活后,机器人沿着障碍物的边界运动. 以机器人当前位置 R 为原点,当前运动方向为 X 轴,建立极坐标系如图 4 所示.

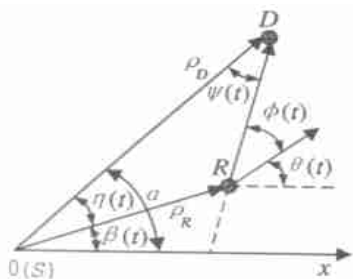


图 4 move-to-goal 极坐标系

设 j 表示机器人下一步的 5 个可能运动方向, $0 \leq j \leq 4$, $R_j(j, f_w(j))$ 为机器人拟运动的下一步位置, $f_w(j)$ 为机器人拟旋转的角度, $P(R_i, \theta_i)$ 为超声传感器探测弧中心线的坐标. 则机器人下一步可行的运动方向应满足

$$D_{f_w(j)} = \min_{i=0}^{15} (D_{ij}) \quad D_0, \quad (8)$$

$$D_{ij} = \sqrt{R_j^2 + (v_{max} t)^2 - 2 R_j (v_{max} t) \cos(f_w(j) - \theta_i)}. \quad (9)$$

其中

$$f_w(j) = -\frac{\pi}{12} + j \frac{\pi}{24}, j = 0, 1, \dots, 4.$$

所求的 $f_w(j)$ 应在满足上式的条件下,使得 $D_{f_w(j)}$ 最小,记为 $f_w(m)$. 于是

$$D(f_w(m)) = \min_j D(f_w(j)). \quad (10)$$

当没有合适的 $f_w(j)$ 时,机器人原地右转 ω . 因此, follow-wall 行为规划的控制输入为

$$\begin{aligned} v_{f_w}(t) &= \begin{cases} v_{max}, \exists \min_{i=0}^{15} (D_{ij}) \leq D_0; \\ 0, \text{其他}. \end{cases} \\ f_w(t) &= \begin{cases} f_w(m) / t, \exists \min_{i=0}^{15} (D_{ij}) \leq D_0; \\ -\omega / t, \text{其他}. \end{cases} \end{aligned} \quad (11)$$

其中 D_0 为一裕量,以确保机器人与障碍物保持一定的距离.

3.2.3 avoid-obstacle 行为

机器人正前方的障碍物对机器人的影响最大,因此 avoid-obstacle 行为的输出须满足避开正前方障碍物的要求,其控制输入为

$$v_{ao}(t) = v_{max}; \quad (13)$$

$$\omega(t) = \begin{cases} \omega / t, l < r; \\ -\omega / t, l > r. \end{cases} \quad (14)$$

其中 ω 是一个确定值,表示机器人在一步中转动的角度.

3.2.4 move-to-goal 行为

当机器人未探测到障碍物时, move-to-goal 行为被激活. 以其起始点 S 为极点 O , X 轴为极轴,建立极坐标系如图 5 所示.

机器人当前位置 R 为 $(R, \theta(t))$, $0 \leq \theta(t) < 2\pi$; 目标点 D 坐标为 (D, θ_D) , $0 \leq \theta_D < 2\pi$; 当前位置与目标点的距离为 $|RD|$; 期望转向角为 $\theta(t)$. 由于受最大角速度 ω_{max} 的限制, move-to-goal 行为规划

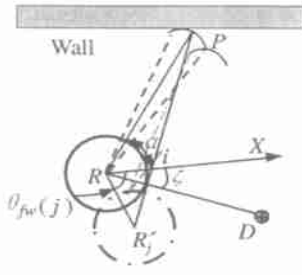


图 5 follow wall 极坐标系

的控制输入为

$$v_{mfg}(t) = \begin{cases} v_{max}, & |RD| > v_{max} t; \\ |RD| / t, & |RD| < v_{max} t. \end{cases} \quad (15)$$

其中 v_{max} 为机器人最大直线运动速度,且有

$$mfg(t) = \begin{cases} max, & (t) < max; \\ (t), & (t) > max; \end{cases}$$

$$(t) = (t) / t;$$

$$(t) = \begin{cases} (t), & (t) \in [0, 2); \\ (t) + 2, & (t) \in [-2, 0); \\ (t) + 4, & (t) \in [-3, -2); \\ (t) - 2, & (t) \in [2, 3); \end{cases}$$

$$(t) = (-1)^k (t) + (t);$$

$$k = \begin{cases} 0, & (t) \in [0,) \cup [-2,]; \\ 1, & (t) \in [-, 0] \cup [2,]; \end{cases}$$

$$(t) = arccos \frac{D - R \cos(t)}{\sqrt{D^2 + R^2 - 2DR \cos(t)}};$$

$$(t) = \begin{cases} -(t), & (t) \in [0,]; \\ (t) - , & (t) \in [, 0]; \\ (t) - + 2, & (t) \in [, 2]; \\ -(t) + 2, & (t) \in [-2, -]. \end{cases}$$

根据式(2)~(15),机器人可在复杂环境中规划出一条无碰撞的较优路径.上述3种导航行为均存在良好的稳定性^[3].

4 实时导航仿真与实验

导航仿真实验环境是模拟实验室的一段走廊,如图6所示.给定起始点S和目标点G的距离为2m,在两点之间放置两个长方形静态障碍物,取 $R_{range} = 0.3m$,走廊宽为2m,障碍物之间的水平距离



图 6 走廊中障碍环境下的机器人导航

为1m,两障碍物宽度均为0.8m,机器人直径为0.45m.

机器人首先进入 *move to goal* 行为.当其探测到障碍物1时,*avoid obstacle* 行为随之被激活,机器人向左前方运动以避开障碍物.当机器人运动到M1位置时,*move to goal* 行为又被激活.在M1位置与M2位置之间,机器人的 *move to goal* 行为,*avoid obstacle* 行为和 *follow-wall* 行为之间频繁地进行行为切换.当机器人运动到M2位置时,探测到障碍物2,*avoid obstacle* 行为被激活,以避开障碍物2.当机器人运动到M3位置时,*move to goal* 行为被激活,机器人奔向目标G.

5 结论

本文基于行为的导航控制算法,将机器人所处的环境分为左右两部分,根据左右两边障碍物对机器人的逼近程度来决定机器人左转或右转.与势场法相比,该算法简洁,易于实现.本文设计了基于16个超声传感器的移动机器人导航控制算法,并对该算法进行了仿真和场景实验.仿真和实验结果表明,该导航控制算法是一种有效的导航算法.

参考文献(References):

[1] Guy Campion, Georges Bastin, Andrea Novel D, et al. Structural properties and classification of kinematics and dynamic models of wheeled mobile robots[J]. *IEEE Trans on Robotics and Automation*, 1996, 12, (1): 47-62.

[2] Gregory Dudek, Michael Jenkin. *Computational Principles of Mobile Robotics* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.

[3] Khatib O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots[J]. *Int J Robotics Research*, 1986, 5 (1): 90-98.