文章编号:1000-8152(2007)04-0535-06

双轮移动机器人安全目标追踪与自动避障算法

李保国,张春熹

(北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院,北京100083)

摘要:设计了双轮移动机器人安全目标追踪算法和双回路的追踪与避障控制方案.内层控制回路是目标追踪的控制律,用来指导机器人追踪到指定目标并保持一定的安全距离,而且兼顾了机器人在运行速度上的限制和追踪的时间效率,其控制的渐近稳定性用Lyapunov函数法进行了证明.当遇到障碍物时,外层控制回路根据超声传感器的信息和阻抗控制的概念产生阻抗虚拟力,将期望目标调整到虚拟位置,使机器人能够自动转向以避开障碍物.仿真研究和实验结果证明了追踪算法的有效性和避障方法的可行性.

关键词:移动机器人;目标追踪;避障;阻抗控制

中图分类号: TP242.6 文献标识码: A

Safe target-tracking algorithm with obstacle avoidance for unicycle mobile robots

LI Bao-guo, ZHANG Chun-xi

(School of Instrument Science and Optoelectronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Aeronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: A safe target-tracking and obstacle avoidance control system for unicycle mobile robots is proposed in this paper. The control system consists of two nested loops. Target-tracking law in the inner loop controls the robot to track the predetermined target by reducing the posture error to zero and its stability is analyzed by using Lyapunov function method. The tracking law also takes into account the velocity limit of the robot and tracking time efficiency. When any obstacle is detected, the external loop provides a modification on the target position based on the impedance control concept and the robot-obstacle distance measured by eight ultrasonic sensors. Simulation studies and experiments show that the tracking law is more general and practical than other methods and the control system can prevent the robot from obstacle collision.

Key words: mobile robot; target tracking; obstacle avoidance; impedance control

1 引言(Introduction)

近些年来,轮式移动机器人的控制问题一直是 研究者们所关注的热点.已有的控制方法和控制 器主要用于解决两类问题:位姿镇定^[1~3]和跟踪问 题^[4~6],而对于轮式移动机器人目标追踪问题的研 究却极少^[7].虽然静止目标的追踪问题也属于位姿 镇定的范畴,但对运动目标的追踪是镇定算法和跟 踪算法都无法解决的.

双轮移动机器人是研究和应用最为广泛的轮式 移动机器人,它有两个独立的主动轮,主动轮的差 动产生机器人的运动.本文研究的是双轮移动机器 人的安全目标追踪问题,用来指导机器人以一定的 安全距离追踪到指定目标并自动躲避遇到的障碍 物.文[7]设计了一个双轮移动机器人的目标追踪控 制器,不过,其中还有两个明显的不足之处:首先,它 的控制律没有考虑移动机器人的速度限制问题;其 次,当机器人遇到正前方有障碍物的情形时,其避障 方法就会失效.

本文首先设计了移动机器人安全目标追踪的控制算法,考虑了移动机器人实际运动速度的限制以 及追踪的时间效率问题,然后设计了基于超声信息 的自动避障双回路控制方案,并进行了仿真研究和 实验验证.

2 问题描述(Problem statement)

双轮移动机器人目标追踪问题的图解描述如 图1所示.点O代表被追踪的目标,点M表示机器人 当前的位置,v是机器人上M点的线速度,ω是机器 人的角速度.

收稿日期: 2006-04-27; 收修改稿日期: 2006-07-17.

基金项目: 国家"211"工程项目(BHA211-2-5).





移动机器人的运动学方程为
$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos \theta, \\ \dot{y} = v \sin \theta, \\ \dot{\theta} = \omega. \end{cases}$$
(1)

其中(x,y,θ)是机器人的位姿.机器人相对于目标的 位姿还可以用极坐标的形式表示(图1),r表示机器人 当前位置与目标的距离, *o*是机器人的朝向和目标方 向的角度差, r_d是指定的目标跟踪安全距离, 点P是 当前时刻机器人的期望位置.记机器人与期望位置 的距离误差为 $\tilde{r} = r - r_d$,则机器人位姿误差方程为

$$\begin{cases} \tilde{r} = -v\cos\phi, \\ \dot{\phi} = \omega + \frac{v}{\tilde{r} + r_d}\sin\phi. \end{cases}$$
⁽²⁾

需要注意的是,期望位置P不是固定不变的,而 是不断变化的.机器人运动的时候,点P会在以目标 为圆心,安全距离为半径的圆上移动.

许多情况下,移动机器人工作于未知的环境 中,只能通过传感器系统探测与障碍物的距离,因 此,机器人的安全目标追踪问题应该包括两个方面 的内容.首先,问题的核心是要设计合适的控制律指 导机器人能够以平滑地速度追踪到目标并保持一定 的安全距离,也就是要使极坐标参数(r, φ)逐渐减小 到(0,0).为了具有更好的实用性和通用性,控制律还 应该考虑到机器人运动速度的限制并能够兼顾追踪 的时间效率.另外,基于距离信息的避障策略要能够 嵌套到追踪算法当中,这样机器人才能具有自动躲 避障碍物的能力.本文利用阻抗控制的概念和双回 路的控制方案来解决移动机器人的安全目标追踪与 自动避障问题.

3 目标追踪算法(Target tracking algorithm)

考虑追踪的安全距离和机器人运动速度的限 制,控制律的设计过程如下:

首先,选择Lyapunov候选函数为

$$V = \frac{1}{2}\tilde{r}^2 + \frac{1}{2}\phi^2.$$
 (3)

$$\dot{\vec{V}} = \tilde{r}(-v\cos\phi) + \phi(\omega + \frac{v}{\tilde{r} + r_d}\sin\phi) = \dot{V}_1 + \dot{V}_1.$$
(4)

取线速度v具有如下的形式:

$$v = u \cdot S(\tilde{r}) \cdot \cos\phi. \tag{5}$$

其中: $u = v_{\text{max}}$ 是移动机器人能够达到的最大线速 度,S形函数 $S(\tilde{r})$ 的定义为

$$y = \begin{cases} -1, & \tilde{r} < -c, \\ \left(\frac{\tilde{r}+c}{c}\right)^2 - 1, & -c < \tilde{r} \leqslant 0, \\ 1 - \left(\frac{\tilde{r}-c}{c}\right)^2, & 0 < \tilde{r} \leqslant c, \\ 1, & \tilde{r} > c. \end{cases}$$
(6)

c是待设计的正常数. 将v代入式(4)的第1项(\dot{V}_1), 得

$$\dot{V}_1 = -u \cdot \tilde{r} \cdot S(\tilde{r}) \cdot \cos^2 \phi. \tag{7}$$

从式(6)显见, 当 $\tilde{r} \neq 0$ 时, $\tilde{r} \in S(\tilde{r})$ 始终保持同 号,因此,对于任意的 \tilde{r} ,有 $\tilde{r}S(\tilde{r}) \ge 0$ 成立.又因为 $u > 0, \cos^2 \phi \ge 0$, 所以 $\dot{V}_1 \le 0$.

再将式(5)带入式(4)的第2项(V₂),可得

$$\dot{V}_2 = \phi \cdot (\omega + \frac{u \cdot S(\tilde{r}) \cdot \cos \phi}{\tilde{r} + r_d} \sin \phi).$$
(8)

将移动机器人的转动速度设计为

$$\omega = -k\phi - \omega + \frac{u \cdot S(r) \cdot \cos \phi}{\tilde{r} + r_d} \sin \phi.$$
 (9)

其中k > 0. 由式(9), 可得

$$|\omega| \leqslant k\pi + 0.5 \cdot v_{\max}/r_d = |\omega|_{\max}.$$

其中|ω|max是允许的机器人的最大转动速度,则

$$0 < k \leq |\omega|_{\max} - 0.5 \cdot v_{\max}/r_d.$$

将式(9)带入式(8),得

$$\dot{V}_2 = -k\phi^2 \leqslant 0$$

由于 $\dot{V}_1 \leq 0$ 和 $\dot{V}_2 \leq 0$,因此, Lyapunov候选函数 的一阶导数

$$\dot{V} = \dot{V}_1 + \dot{V}_2 \leqslant 0.$$

而且,只有当 $\tilde{r} = 0$ 且 $\phi = 0$ 时,才有 $\dot{V} = 0$,所以, \dot{V} 是负定的.这也就意味着误差变量(\tilde{r}, ϕ)能够渐近 稳定于(0,0),追踪控制的目的能够得以实现.

控制律中,函数S(r)的参数c决定了机器人减速 的距离. 当距离期望位置较远($\tilde{r} > c$)时, $S(\tilde{r}) =$ 1, 机器人以尽量快的速度向目标运动. 当接近期望 $\dot{U}(\tilde{r} < c)$ 时, $S(\tilde{r}) < 1$, 机器人逐渐减速, 以避免因 突然停车而发生打滑或倾覆.因此,合适的参数既保

第24卷

证了追踪的安全性,又兼顾了追踪的时间效率.当追踪静止目标时,根据机器人的加速度要求和式(6)可以计算得到所需的最小减速距离.

式(5)和式(9)的控制律也同样适用于追踪运动目标,只要任意时刻目标的位置是已知的或者能够被机器人实时地探测到.

移动机器人逐渐接近运动目标时的情形如图2所 示.由于此时φ→0,因此,可以认为机器人与目标沿 同一条直线运动.在S函数的作用下,机器人与期望 位置P的距离为a时(A点)开始减速.到达B点时,机 器人速度与目标的运动速度相同,机器人与目标保 持当前的距离并跟随目标.根据式(6)对S函数的定 义和各参考点的位置关系,可得

$$v_{\max}(1 - \frac{|AB|^2}{a^2}) = v_T.$$

其中: v_T是目标的运动速度, a是设定的减速距离. 求 解|AB|, 得

$$|AB| = a\sqrt{1 - v_T/v_{\max}}$$

因此,

 $\hat{r}_d = r_d + a - |AB| = r_d + a(1 - \sqrt{1 - v_T/v_{\max}}).$

也就是说,当目标运动时,机器人跟踪的实际安全距 离比指定值增大了.如果仍然要求机器人以指定的 安全距离跟踪目标,只需用

$$\hat{r}_d = r_d - a(1 - \sqrt{1 - v_T/v_{\text{max}}}).$$
 (10)

代替控制律中的 r_d 即可.显然, $v_T \rightarrow 0$ 时, $\hat{r}_d \rightarrow r_d$. 安全距离圆



图 2 机器人逼近运动目标时的情形 Fig. 2 Mobile robot is approaching a moving target 4 基于阻抗控制的避障方法(Obstacle avoid-

ance based on impedance control)

4.1 障碍物距离探测系统(Distance sensorial system)

超声传感器是移动机器人最常用的外部环境探测传感器,它能为机器人提供被探测到的障碍物的距离信息.本文中的移动机器人通过八个超声传感器探测前进道路上的障碍物,传感器的布局如图3所示.8个超声传感器呈圆弧状安装在机器人的前面,相邻两个传感器的安装角度差约为25°.

当超声传感器探测到障碍物时(图3),障碍物的 距离d_i可以通过计算声波在空气中的传播时间得 到. 但是,由于声波发射角的存在,障碍物的确切方 位是无法得知的.为了简便,本文用超声传感器相对 于机器人正方向的安装角θ_i作为障碍物的角度估计.



图 3 移动机器人外形与超声传感器布置

Fig. 3 Mobile robot and sensors' configuration

4.2 基于阻抗控制概念的避障策略(Avoidance based on impedance control concept)

当机器人探测到前进道路上有障碍物时,利用阻抗控制^[8,9]的概念,将所追踪的目标调整到一个虚拟的位置,从而使机器人能够避开遇到的障碍物.

阻抗控制需要实时地反馈机器人和环境之间的 作用力.移动机器人与障碍物之间的相互作用通过 虚拟力f(t)表示,其大小是机器人和障碍物距离d的 函数,方向指向机器人(图4).



图 4 移动机器人与障碍间的虚拟力

Fig. 4 Fictitious force between robot and obstacle

因为阻抗控制考虑的是移动机器人运动方向上的作用力,所以f(t)在机器人运动方向上的径向分量 $f_t(t)$ 被用来确定目标调整角度的大小,与机器人运动方向垂直的切向分量 $f_r(t)$ 则被用来确定目标调整的方向(顺时针或逆时针),即

$$\psi = \gamma(t) \operatorname{sgn}(f_r(t)).$$
 (11)

其中 $\gamma(t)$ 是一个和 $f_t(t)$ 相关的辅助变量. 当 $f_t(t)$ 趋 于零时, $\gamma(t)$ 也相应地趋于零. 记 $X_d = [x_d \ y_d]$ 是当 前期望的目标位置, 调整后的目标位置 $X_r = [x_r \ y_r]$ 通过将 X_d 旋转角度 ψ 而得到.

4.3 阻抗控制算法(Impedance control algorithm)

虚拟力*f*(*t*)大小的定义采用文[10]的线性函数的 形式,即

$$f(t) = a - b(d(t) - d_{\min}).$$
 (12)

其中: a,b是正的常数且满足 $a - b(d_{\text{max}} - d_{\text{min}} = 0. d_{\text{max}} \pi d_{\text{min}}$ 分别是超声传感器能够探测到的最大 和最小距离, d(t)是t时刻超声传感器探测到的障碍 物距离, 显然 $d_{\text{max}} \ge d(t) \ge d_{\text{min}}$.

期望的阻抗关系定义为线性的动力学关系[8]

$$Z(p) = Bp + k, \ p = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}.$$
 (13)

其中B和K是正的常数,分别表示移动机器人与障碍物相互作用的阻尼系数和弹性系数.那么,辅助变量 $\gamma(t)$ 的定义就是

$$\gamma(t) = Z^{-1}(p)f_t(t).$$
 (14)

将 $\gamma(t)$ 带入式(11), 计算得到目标点相对于机器人 中心的旋转角度 ψ . 新的目标点的位置 X_r 通过 X_d 旋 转 ψ 得到



障碍物距离机器人越近, 虚拟力也就越大, 目标调整的角度也越大, 以使机器人能够避开障碍物. 当机器人远离障碍物时, 虚拟力逐渐变为零, 同时 $f(t) \rightarrow 0, \gamma \rightarrow 0, \psi \rightarrow 0, 使得X_r \rightarrow X_d$, 运动控制闭环得以实现.

4.4 双回路控制系统(Two-loop control system)

双回路闭环控制系统(图5)的内层是目标追踪算法,使机器人的位姿误差逐渐减小到零.当机器人探测到障碍物时,外层回路根据超声传感器的信息对目标进行调整,使机器人能够躲避障碍物.从笛卡尔坐标到极坐标的变换如式(16)所示:

$$\begin{cases} \tilde{r} = \sqrt{(x_r - x_c)^2 + (y_r - y_c)^2}, \\ \phi = \theta - \arctan 2[(y_r - y_c), (x_r - x_c)]. \end{cases}$$
(16)

式中各个变量的定义见图1和图4.



图 5 移动机器人目标追踪与避障控制框图

Fig. 5 Diagram of mobile robot traget tracking and obstacle avoidance

5 仿真研究(Simulation studies)

为了考察目标追踪算法的性能和控制系统的可行性,采用移动机器人仿真软件MobotSim进行 仿真计算与研究.

仿真1 追踪控制律仿真验证.

假设目标以0.1 m/s的速度从(2 m,3 m)匀速向右运动,移动机器人从(1 m,1 m)处以0.2 m/s的速度开始追踪目标,追踪的安全距离和减速距离都设定为0.5 m. 据式(10),以 $\hat{r}_d = 0.354$ 带入式(5)和(9)中,追踪的轨迹和距离变化曲线如图6和图7所示. 仿真结果说明控制律也适用于追踪动态目标.









Fig. 7 Curves of robot-target distance and robot velocity

仿真2 追踪避障与算法比较.

文[7]的追踪算法没有考虑移动机器人运动速 度的限制,因而缺乏实用性. 文[8]在位姿镇定控制 算法中采用双曲正切函数使控制量不超过机器人 的速度限制. 不过, tanh(x)函数计算较复杂,而且 不容易调整参数以满足高效追踪的要求. 与以上 二者相比,本文的算法采用简单的自定义的S函数 限制了控制量,通过调整S函数的参数c,还可以方 便的设定机器人减速的距离,使机器人在距离期 望较远时始终保持高的运行速度,因此,本文的算 法具有更高的追踪效率.

采用图5的双回路控制策略,不失一般性,以 图8所示的障碍物环境为例,分别用文[7]和本文 的追踪控制算法以及文[8]的控制量限制方法进 行目标追踪与避障的仿真. 假设移动机器人的最 大速度为0.2 m/s. 最大转动速度为0.8 rad/s. 安全距 离r_d = 0.5 m, 取式(9)中的k = 0.2.3种算法的追踪 与避障轨迹验证了避障策略的可行性和双回路控 制系统的有效性. 仿真追踪的速度一时间曲线如 图9所示.显而易见,文[7]的算法虽然用的时间最 少(35.5s), 但控制量非常大, 并且速度的变化也非 常剧烈,在现实中,机器人是无法达到的.文[8]的 方法能够满足机器人运动速度的限制,但在距离 目标很远时就开始减速,降低了追踪的效率,用 去了更多的时间(76.3 s). 本文的算法设置S函数的 参数c = 0.5, 使移动机器人在离期望位置0.5 m时 才开始减速,而距离大于0.5m时,始终以尽可能 快的速度运动,从而比文[8]的方法用了较少的时 间(62.9s),提高了追踪的效率.









Fig. 9 Velocity curves of three tracking algorithm

6 实验(Experiments)

实验采用北航第七研究室研制的移动机器人 实验平台.8个Polaroid超声传感器呈圆弧状安装 在机器人的前面,用以探测前进道路上的障碍 物.一块专用的DSP控制着超声系统的工作并通 过CAN总线将数据传送到主控计算机PC104中.主 控机融合了码盘和光纤陀螺的信息来确定机器人 的位置,并根据追踪算法的计算结果控制机器人 运动. 实验时,移动机器人的初始位姿为(0,0,90°), 目标位于(3m,6m)处,安全距离设为0.5m,限定移 动机器人的最大线速度为0.2m/s,最大转动速度 为0.8rad/s,式(9)中的k = 0.2,减速距离r_d=0.5m. 在移动机器人的路径上随意放置几个纸箱充当障 碍物,超声传感器的探测距离是0.2m~0.8m.阻抗 控制的阻尼系数和弹性系数分别取为0.02N·s/rad 和3N/rad.为了实验方便,假定目标是静止的.移 动机器人安全追踪与避障的轨迹及速度和角速度 曲线分别绘制于图10和图11中.



Fig. 10 Obstacle avoidance experiment result





设置不同的障碍物情形,移动机器人都能够成 功地避开遇到的障碍物并追踪到目标,并且其运 行速度都不超过规定的限制,从而充分验证了本 文所设计的追踪算法的正确性和避障策略的有 效性.

7 结论(Conclusion)

本文设计了双轮移动机器人安全目标追踪的 渐近稳定算法,不仅考虑了移动机器人速度的限 制,还兼顾了追踪的时间效率.双回路的控制系统 和基于阻抗控制概念的目标调整策略将避障的功 能与追踪算法结合起来,使算法具有更好的实用 性和通用性.这对于其他的控制算法与避障功能 相结合的问题也具有很好的借鉴意义.阻抗虚拟 力是根据传感器系统提供的机器人和障碍物之间 的距离进行计算的,这不仅适用于超声传感器系 统,也适用于其他距离传感器系统,如激光扫描仪.

参考文献(References):

- KIM Doh-Hyun, OHJun-Ho. Globally asymptotically stable tracking control of mobile robots[C] // Proc of IEEE Int Confon Control Applications. New York: IEEE Press, 1998: 1297 – 1301.
- [2] LEE Sungon, YOUM Y, CHUNG Wank-yun. Control of car-like mobile robots for posture stabilization[C] // Proc of IEEE Int Conf on Intelligent Robotics and Systems. New York: IEEE Press, 1999: 1745 – 1749.
- [3] PEI Xinzhe, LIU Zhiyuan, PEI Run. Practical stabilization of wheeled mobile robots based on control Lyapunov function[C] // Proc of IEEE Int Conf on Control Applications. New York: IEEE Press, 2002: 345 – 349.
- [4] SAMSON C, AIT-ABDERRAHIM K. Feedback control of a nonholonomic wheeled cart in Cartesian space[C] // Proc of

IEEE Int Conf on Robotics and Automation. New York: IEEE Press, 1991: 1136 – 1141.

- [5] KANAYAMA Y, KIMURA Y, MIYAZAKI F, et al. A stable tracking control method for an autonomous mobile robot[C] // Proc of IEEE Int Conf on Robotics and Automation. New York: IEEE Press, 1990: 384 – 389.
- [6] ANDREA-NOVEL B, CAMPION G, BSATIN G. Control of nonholonomic wheeled mobile robots by state feedback linearization[J]. *Int J of Robotics Research*, 1995, 14(6): 543 – 559.
- [7] LEE Sung-on, CHO Young-jo, MYUNG Hwang-bo, et al. A stable target-tracking control for unicycle mobile robots[C] //Proc of IEEE Int Conf on Intelligent Robotics and Systems. New York: IEEE Press, 2000: 1822 – 1827.
- [8] CARELLI R, SECCHI H, MUT V. Algorithms for stable control of mobile robots with obstacle avoidance[J]. *Latin American Applied Research*, 1999, 29(3/4): 191 – 196.
- [9] CARELLI R, FREIRE E O. Corridor navigation and wall-following stable control for sonar-based mobile robots[J]. *Robotics and Au*tonomous Systems, 2003, 4(5): 235 – 247.
- [10] BORENSTEIN J, KOREN Y. The vector field histogram-fast obstacle avoidance for mobile robots[J]. *IEEE Trans on Robotics and Automation*, 1991, 7(3): 278 – 288.

作者简介:

李保国 (1977—), 男, 博士, 目前研究方向为智能移动机器人

技术、惯性导航技术, E-mail: ghlab@buaa.edu.cn;

张春熹 (1965—), 男, 教授, 目前研究方向为惯性导航技术, E-mail: zchunxi@ hotmail.com.