第 37 卷 第 14 期
Vol.37 No.14

计 算 机 工 程
Computer Engineering

2011 年 7 月
July 2011

·人工智能及识别技术· 文章编号：1000—3428(2011)14—0175—03 文献标识码：A 中图分类号：TP391

基于模糊控制的移动机器人视觉反馈跟踪

孙 妍，王朝立，杨亚民

(上海理工大学光电信息与计算机工程学院，上海 200093)

摘 要：探讨视觉空间下非完整移动机器人的跟踪问题。在不校准摄像机视觉参数的前提下，提出一种利用视觉反馈信息设计非完整移动机器人轨迹跟踪的模糊控制方法。其模糊控制使用 Mamdani 推理机，包含 if-then 规则和重心法，对线速度和角速度进行控制。仿真结果证明了该方法的有效性。

关键词：跟踪；模糊控制；移动机器人；Mamdani 模型；视觉反馈

Visual Feedback Tracking of Mobile Robot Based on Fuzzy Control

SUN Yan, WANG Chao-li, YANG Ya-min

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

【Abstract】This paper investigates the visual servoing tracking problem of nonholonomic mobile robots. The fuzzy logic control approach is exploited to design a tracking controller for nonholonomic mobile robots with uncalibrated visual parameters. Its fuzzy logic control part is built by using Mamdani inference system including if-then rules and the centroid of area method as its deffuzification strategy. The outputs of the system are linear velocities and angular velocities. The effectiveness of the method is illustrated in the simulation study.

【Key words】tracking; fuzzy control; mobile robot; Mamdani model; visual feedback

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2011.14.058

1 概述

非完整移动机器人跟踪问题近年来日益受到国内外控制界的关注，特别是非完整移动机器人的轨迹跟踪问题。在移动机器人的实际应用中，存在一些不能满足理想的限制条件，如运动学模型和力学的局限性、噪声等不确定因素，因此，提出了模糊控制。

模糊控制具有以下的优势：(1)模糊控制可以控制不精确的运动模型，可以容纳不确定的输入变量，不需要控制系统精确的数学模型，并能产生光滑的控制输出量。(2)移动机器人是一个时延、非线性不稳定系统，而模糊控制器可以完成输入空间到输出空间的非线性映射。(3)模糊逻辑控制最近已被证明在移动机器人控制中的有效性。

文献[1]提出用模糊控制器解决非线性系统。文献[2]提出了以模糊方法为基础的在未知环境下移动机器人的导航。文献[3-4]分别应用模糊控制算法对非完整移动机器人进行跟踪，文献[3]只考虑了角速度的控制问题，线速度是不变的；文献[4]对线速度和角速度的控制规则分别设置，但没有考虑它们之间的互相影响。

视觉伺服反馈在机械手的控制中得到了成功的应用，因为视觉传感器有独特的优点：可以模拟人的眼睛，可以进行非接触量测等。然而，视觉反馈信息需要通过摄像机视觉参数的校调才能够使用，需要耗费大量的时间，有时甚至无法实现[5]。本文主要探讨如何不校调参数就能控制机器人运动的问题。利用 Lyapunov 和 Backstepping 技术设计的基于不校准视觉伺服反馈的非完整机器人的镇定和跟踪问题已有不少研究[6]，但这些研究对参数要求苛刻，而且控制器结构复杂。

本文在改进以往模糊控制技术[3-6]的基础上，提出了不校调参数下非完整控制机器人的视觉反馈跟踪控制器设计方法，包括视觉伺服反馈下的移动机器人模型及模糊控制器的设计。

2 问题的提出

2.1 系统配置

在视觉空间下的移动机器人如图 1 所示。假设一个摄像头固定安装在天花板上，图像平面与任务平面平行但位于 2 个不同的坐标系内。这里有 3 个坐标系，即惯性坐标系 *X-Y-Z*、摄像机坐标系 *x-y-z* 和图像坐标系 *u-O-v*。假设摄像机坐标平面与图像坐标平面相同。

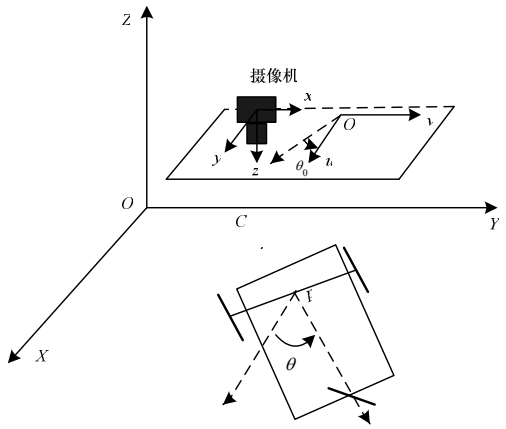

图 1 视觉空间下的非完整移动机器人

在图 1 中，*C* 是摄像机光轴功能 *X-Y* 平面之间的交叉点，其坐标相对于 *X-Y* 平面坐标系下的坐标为(p_x, p_y)，摄像机坐

基金项目：国家自然科学基金资助项目(60874002)；上海市教委重点科技创新基金资助项目(09ZZ158)；上海市重点学科基金资助项目(S30501)；上海市研究生创新基金资助项目(JWCXSL1002)

作者简介：孙 妍(1986－)，女，硕士，主研方向：智能控制，视觉控制；王朝立，教授；杨亚民，硕士

收稿日期：2010-12-20 **E-mail：**sunyan6730@163.com

标系的原点相对图像坐标系的坐标，为(O_{c1},O_{c2})，移动机器人的质心在惯性坐标系下的坐标是 (x,y)。假定 x_m、y_m 是 x、y 在图像坐标系下的坐标。由针孔成像模型得出：

$$\begin{bmatrix} x_m \\ y_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & 0 \\ 0 & a_2 \end{bmatrix} \boldsymbol{R} \left[\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \end{bmatrix} \right] + \begin{bmatrix} O_{c1} \\ O_{c2} \end{bmatrix} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{R} = \begin{bmatrix} \cos\theta_0 & \sin\theta_0 \\ -\sin\theta_0 & \cos\theta_0 \end{bmatrix} \tag{2}$$

其中，参数 a_1、a_2 表示像素分别在 x 轴和 y 轴方向上的物理尺度常数；θ_0 为任务空间 x 轴正向与图像空间 u 轴正向之间的夹角。系数 z 通常称为深度，f 为摄像机的焦距。

2.2 问题的说明

假设移动机器人质心和几何中心点是相同的，其非完整约束条件定义为：

$$\dot{x}\sin\theta - \dot{y}\cos\theta = 0 \tag{3}$$

从上述约束条件可以推导出其在图像坐标系下的运动学模型为：

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{y}_i \\ \dot{\theta}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_i\alpha_1\cos(\theta-\theta_0) \\ v_i\alpha_2\sin(\theta-\theta_0) \\ w_i \end{bmatrix} \tag{4}$$

其中，x_i、y_i、θ_i 分别为在图像坐标系下的非完整移动机器人位姿；v_i、w_i 分别表示移动机器人实际的线速度和角速度。

在系统仿真过程中需要求解式(4)得出各个时刻移动机器人的位置，假设采样周期为 t_0，通过摄像机可得各个时刻下移动机器人在图像空间下的位置 x_i、y_i、θ_i。

为了探讨该系统的跟踪问题，参考轨迹是给定的：

$$\begin{cases} x_r(k+1) = x_r(k) + v_r(k)\times t_0 \times \cos\left(\theta_r(k)\right) \\ y_r(k+1) = y_r(k) + v_r(k)\times t_0 \times \cos\left(\theta_r(k)\right) \\ \theta_r(k+1) = \theta_r(k) + w_r \times t_0 \end{cases} \tag{5}$$

其中，x_r、y_r、θ_r 分别为给定的非完整移动机器人理想轨迹的位姿；v_r、w_r 分别表示给定移动机器人的线速度和角速度。其跟踪方向角误差方程为：

$$e_\theta(k) = \theta_i(k) - \theta_r(k) \tag{6}$$

移动机器人实际的轨迹点到理想轨迹点切线的距离为：

$$e_d(k) = \frac{\begin{vmatrix} x_i(k) & y_i(k) & 1 \\ x_i(k-1) & y_i(k-1) & 1 \\ x_r(k) & y_r(k) & 1 \end{vmatrix}}{\sqrt{\left(x_i(k)-x_r(k)\right)^2 + \left(y_i(k)-y_r(k)\right)^2}} \tag{7}$$

移动机器人实际轨迹点到理想轨迹点的位置误差 $e_l(k)$ 的值近似等于 $e_d(k)$。

3 模糊控制器

模糊逻辑方法最初由 LA.Zadeh 和 S.Assilian 提出，已成为人类知识的经验推理方法，在控制过程中用于处理不确定性的系统。现在，模糊逻辑正在成为控制工程的热点。模糊逻辑控制器具有设计简单、易于实施、鲁棒性好的特点，能用于全局视觉下的自主移动机器人导航。对于该移动机器人的运动控制问题，主要是控制其角速度和线速度，前者完成移动机器人的转向控制，后者实现其前进速度的控制。基于视觉的移动机器人的运动控制行为与汽车驾驶行为相似。因此，模仿人工驾驶行为实现机器人的运动控制是控制器设计的一种比较简单、有效的途径。

根据人工驾驶的思想，移动机器人转向与其在所跟踪曲线的所在侧(左侧和右侧)及驾驶角误差有关，移动机器人的速度与其实际轨迹点离所跟踪的理想轨迹点的距离有关。当 $e_d(k)<0$ 时，$p_r(k)$ 在 $p_i(k)$ 切线的右侧；当 $e_d(k)>0$ 时，$p_r(k)$ 在 $p_i(k)$ 切线的左侧；当 $e_d(k)=0$ 时，$p_r(k)$ 在 $p_i(k)$ 切线上。其角度误差和位置误差分别控制其角速度和线速度。当角度误差较大时，主要快速控制角速度，其线速度应控制在一定范围内；而当实际轨迹点落后于理想轨迹点时，应加大移动机器人的线速度。

当实际轨迹点位于所跟踪理想轨迹曲线不同侧面，其角度误差和位置误差对其角速度和线速度有不同的控制规则。移动机器人的跟踪控制结构见图 2。因此，通过模糊化、规则推理和去模糊化的模糊控制器基本上有 2 个输入 (e_d,e_θ) 和 2 个输出 (v,w)，$e=[e_d,e_\theta]$，$u=[v,w]$。

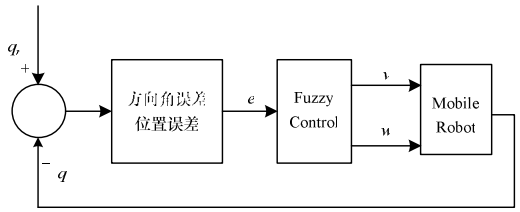

图 2 模糊控制原理

3.1 模糊化

模糊化过程由输入值映射到一个输出值在 0~1 的模糊语言变量。模糊化过程采用三角形隶属函数，其 e_d 模糊化为{负大，负中，负小，负微，零，正微，正小，正中，正大}，分别表示为{NL,NM,NS,NU,Z,PU,PS,PM,PL}，论域为[−6 6]。当 e_θ 范围为[$-\pi/2,\pi/2$]时，其模糊化为{负大，负中，负小，负微，零，正微，正小，正中，正大}，分别表示为{NL,NM,NS,NU,Z,PU,PS,PM,PL}，论域取[$-\pi/2,\pi/2$]。当 e_θ 范围为[$\pi/2,\pi$]时，其模糊化为{小，中，大}，分别表示为{PS,PM,PL}，论域取[$\pi/2,\pi$]。当 e_θ 范围为[$-\pi/2,-\pi$]时，其模糊化为{大，中，小}，分别表示为{NL,PM,NS}，论域取[$-\pi/2,-\pi$]。w 模糊化为{负大，负中，负小，负微，零，正微，正小，正中，正大}，分别表示为{NL,NM,NS,NU,Z,PU,PS,PM,PL}，论域取[−6, 6](逆时针为正)。v 模糊化为{小，中，大}，分别表示为{L,M,H}，论域取[0, 4]。

3.2 模糊规则

模糊规则基于模糊控制的输入和输出之间的模糊逻辑关系。在控制系统中，其使用的推理机采用近似推理。所用到的关系逻辑是“与”和“或”。控制规则的定义是基于专家知识、经验和实验测试得到的。其用到的模糊推理方法采用取大-取小(MAX-MIN)法，其所用的 if-then 控制规则为：

L_{ij} : if E is A_i and EC is B_j

then U is C_{ij} ; $i,j=1,2,\mathrm{L}\ ,N$

其中，语言变量 E 和 EC 代表其输入变量的模糊语言变量值；语言变量 U 代表其输出变量的模糊语言变量值。

当 $-\pi \leqslant e_\theta(k) \leqslant -\pi/2$、$-\pi/2 \leqslant e_\theta(k) \leqslant \pi/2$ 和 $\pi/2 \leqslant e_\theta(k) \leqslant \pi$ 时，本文的模糊规则推理分别如表 1~表 3 所示。

表 1 模糊规则表 1

$w(k)\backslash v(k)$		$e_d(k)$								
		NL	NM	NS	NU	Z	PU	PS	PM	PL
$e_\theta(k)$	NS	NL\ H	NL\H	NM\M	NS\M	NU\L	NL\L	NL\L	NL\L	NL\L
	NM	NL\H	NL\M	NL\M	NL\M	NL\M	NL\L	NL\L	NL\L	NL\L
	NL	NL\M	NL\M	NL\L	NL\L	NL\L	NL\L	NL\L	NL\L	NL\L

表 2 模糊规则表 2

$w(k)\backslash v(k)$	$e_d(k)$								
	NL	NM	NS	NU	Z	PU	PS	PM	PL
NL	NL\H	NL\M	NL\M	NL\M	NL\L	NL\L	NL\L	NL\L	NL\L
NM	NL\H	NL\M	NM\M	NM\M	NM\L	NL\L	NL\L	NL\L	NL\L
NS	NL\H	NM\M	NS\M	NS\M	NS\L	NL\L	NL\L	NL\L	NL\L
NU	NM\H	NS\H	NU\M	NU\M	NU\L	NM\L	NL\L	NL\L	NL\L
$e_\theta(k)$ Z	Z\H	Z\H	Z\M	Z\M	Z\L	Z\M	Z\M	Z\H	Z\H
PU	PL\L	PL\L	PL\L	PM\L	PU\L	PU\M	PU\M	PS\H	PM\H
PS	PL\L	PL\L	PL\L	PL\L	PS\L	PS\M	PS\M	PM\M	PL\H
PM	PL\L	PL\L	PL\L	PL\L	PM\L	PM\M	PM\M	PL\M	PL\H
PL	PL\L	PL\L	PL\L	PL\L	PL\L	PL\M	PL\M	PL\M	PL\H

表 3 模糊规则表 3

$w(k)\backslash v(k)$	$e_d(k)$								
	NL	NM	NS	NU	Z	PU	PS	PM	PL
PS	PL\L	PL\L	PL\L	PL\L	PU\L	PS\M	PM\M	PL\H	PL\H
$e_\theta(k)$ PM	PL\L	PL\L	PL\L	PL\L	PL\L	PL\M	PL\M	PL\M	PL\H
PL	PL\L	PL\L	PL\L	PL\L	PL\L	PL\L	PL\L	PL\M	PL\M

3.3 去模糊化

通过模糊推理得到的结果是一个模糊集或隶属函数，在模糊集，采取了相对最好的推理代表了该进程的单值模糊集的解决方案被称为模糊决策。解模糊决策有不同的方法，使用不同的方法得到的结果是不同的。本文在解模糊过程中采用重心法，面积质心方法则用于实现清晰化：

$$u = \sum_{i=1}^{n} \mu(u_i) u_i / \sum_{i=1}^{n} \mu(u_i) \tag{8}$$

其中，变量 u_i 是其隶属函数的最大值。

4 仿真实验及结果

为验证模糊控制方法的有效性，基于 Matlab 对算法进行仿真研究。首先设定其跟踪的轨迹，进行仿真控制实验，以观察控制效果和适当调整各隶属函数的宽度等参数。在实验过程中，由于模糊规则是根据一些经验定义的，因此只有根据实验结果反复修改才能得出最有效的规则。各个输入变量的隶属函数参数也对其跟踪控制有影响，通过实验结果进行调整，得出最优的隶属函数参数。最后，进行模糊控制仿真。

(1)直线轨迹跟踪：起始点 $[-1,0,0]$，$\alpha_1 = \alpha_2 = 1$，$\theta_0 = 0$，$v_r = 2$，$w_r = 0$，$t_0 = 0.01$，轨迹跟踪仿真结果如图 3 所示。

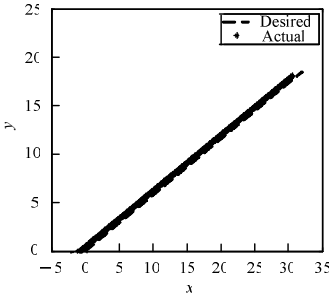

图 3 直线轨迹跟踪控制仿真

(2)曲线轨迹跟踪：起始点 $[-1,0,0]$，$\alpha_1 = \alpha_2 = 1$，$\theta_0 = 0$，$v_r = 2$，$w_r = 0.3$，$t_0 = 0.01$，轨迹跟踪仿真结果如图 4 所示。

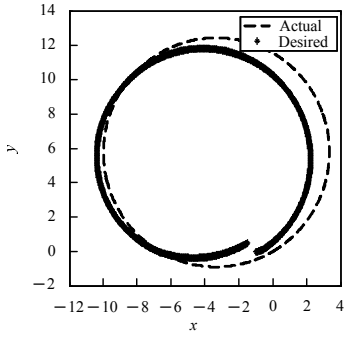

图 4 曲线轨迹跟踪控制仿真

5 结束语

本文提出了一种基于视觉空间位置的模糊控制器，对视觉空间下的非完整移动机器人进行轨迹跟踪。由于其模糊控制的特点，因此不需要校准的摄像机参数，具有普遍性。最后进行仿真实验，进一步验证该模糊控制器的性能。实验结果表明了该算法的有效性，在实际中能平稳和快速反应，但是由于模糊控制本身的局限性，曲线跟踪上存在一定的误差，因此只适用于对稳态精度要求不高的控制系统，这些问题有待进一步的研究。

参考文献

[1] Mamdani E H, Assilian S. Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant[J]. Proceedings of IEE, 1974, 121(12): 1585-1588.

[2] Gaosos J, Rosetti A. Uncertainty Representation for Mobile Robots: Perception, Modeling and Navigation in Unknown Environments[J]. Fuzzy Sets and System, 1999, 107(1): 1-24.

[3] 邹细勇, 徐 德, 李子印. 非完整移动机器人路径跟踪的模糊控制[J]. 控制与决策, 2008, 23(6): 655-659.

[4] 王建中, 齐伟伟. 基于一种新误差模型的移动机器人模糊控制[J]. 北京理工大学学报, 2006, 26(3): 244-247.

[5] Chen Jian, Warren E, Dawson D, et al. Homography-based Visual Servo Tracking Control of a Wheeled Mobile Robot[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2006, 22(2): 406-415.

[6] Wang Chaoli, Liang Zhenying, Du Jiaming, et al. Robust Stabilization of Nonholonomic Moving Robots with Uncalibrated Visual Parameters[C]//Proceedings of 2009 American Control Conference. St. Louis, USA: [s. n.], 2009: 1347-1352.

编辑 张正兴

(上接第 174 页)

参考文献

[1] 中国计算机科学技术工作委员会. 中国计算机科学技术发展报告 2005[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 215-232.

[2] 赵春宇. 鲁棒性的与文本无关的开集说话人辨识方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006.

[3] 哈尔滨工程大学. 一种集内说话人识别方法: 中国, 101552004[P]. 2009-10-07.

[4] Brew A, Cunningham P. Combining Cohort and UBM Models in Open Set Speaker Identification[C]//Proc. of the 7th International Workshop on Content-based Multimedia Indexing. [S. l.]: IEEE Computer Society, 2009:

[5] 刘明辉, 黄中伟, 戴蓓蒨, 等. 用于 SVM 话者模型训练的冒认者话者选取[J]. 计算机工程, 2009, 35(16): 4-6.

[6] 周 元. 文本无关的说话人确认系统的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.

编辑 顾逸斐