

文章编号: 2095—0411 (2011) 03—0041—06

配置机械手的轮式移动机器人目标物体跟踪与抓取^{*}

张和平, 段锁林, 姜小娟

(常州大学 机器人研究所, 江苏 常州 213164)

摘要: 针对配置机械手的室内轮式移动机器人目标物体识别、跟踪和抓取问题, 采用一种目标物体识别和机器人定位的方法, 利用一种基于模糊控制的轮式移动机器人视觉伺服跟踪控制的方法。针对机器人目标识别跟踪及抓取过程中受环境条件变化的影响, 采用 HSI 颜色模型和基于阈值的区域分割的图像处理方法可以完成目标颜色物体的快速准确识别。基于云台摄像机角度信息的机器人小车目标定位方法和模糊控制理论, 设计了模糊跟踪控制器, 使机器人输出合适的线速度和角速度, 能够实现机器人目标跟踪, 使移动机器人趋近目标物体位置, 并完成机械手目标物体抓取任务。仿真和实时实验结果表明: 所设计的系统具有良好的目标物体识别、跟踪和准确抓取目标的能力。

关键词: 轮式自主移动机器人; 目标识别; 云台摄像机; 模糊控制; 目标抓取

中图分类号: TP 242.6

文献标识码: A

Target Object Tracking and Grasping of Wheeled Mobile Robot Equipped with the Manipulator

ZHANG He—ping, DUAN Suo—lin, JIANG Xiao—juan

(Institute of Robotics, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: For the problem of target object recognition, tracking and grabbing of wheeled mobile robot equipped with the manipulator, this paper adopted a object recognition and robot localization method, also used a wheeled mobile robot visual servo tracking control method based on fuzzy control. For the process of robot target tracking and grabbing, which is influenced by environmental change, the image processing method of HSI color model and the threshold—based segmentation are used so that the robot can rapidly recognize the target color object. According to the robot target positioning method based on the PTZ camera's angle information and fuzzy control theory, a fuzzy controller is designed to output the appropriate line speed and angle velocity, and realize the robot tracking target. At the same time the robot moves closely to the target object and grabs it. Simulation and real—time experimental results show that the designed system has a good ability to recognize, track and grab the target object accurately.

Key words: wheeled mobile robot; target recognition; PTZ camera; fuzzy control; target grabbing

智能机器人技术涉及计算机应用技术、自动控制、人工智能、传感器、运动控制等众多学科, 是

人工智能新的挑战问题。机器人已出现在工业、军事、服务业等应用领域。但是, 怎样使机器人更加

* 收稿日期: 2011—05—19

基金项目: 哈尔滨工业大学机器人技术与系统国家重点实验室开放基金重点项目支持 (SKLRS—2010—2D—09)

作者简介: 张和平 (1985—), 男, 江苏常州人, 硕士; 通讯联系人: 段锁林。

自主化和智能化以得到更广泛的应用领域是现代机器人研究面临的重大难题。

装配有机械臂的智能移动机器人能够顺次自主地完成一系列动作：选定目标、跟踪并趋近目标、机械臂伸展、夹手抓物、运动到指定位置、机械臂复位等。应用智能机器人可以帮助老年人和残疾人来完成他们日常生活中难以做到的一些操作，解决他们生活上的困难。而在工业生产和军事领域中，机器人小车完成抓取搬运任务，可以避免在恶劣和危险环境中人工作业的危险性。因此，装配机械臂的智能机器人的研究对机器人在工业、服务业、军事等领域的开发设计与应用具有重要的实用价值和实际意义。

模糊控制能够解决机器人系统的非完整性和不确定性问题。很多学者对基于模糊逻辑的跟踪问题进行了研究。文献 [1] 根据驾驶员驾车经验设计了以距离误差和预瞄角度误差为输入，角速度为输出的模糊控制器，实现了移动机器人准确的沿规划路径行驶。文献 [2] 设计的模糊控制系统能够完成在未知的环境条件下多机器人避障并实现目标的跟踪。文献 [3] 结合比例导航原理、人工引力场原理和非完整约束控制，研究设计了移动机器人的模糊进化学习策略，通过模糊进化学习来搜索最优控制参数和控制量，完成了移动机器人动态目标跟踪任务。本文主要研究移动机器人的目标轨迹跟踪问题，采用模糊逻辑控制机器人安全有效地跟踪预定义路径。

1 有机械臂的 DM-B2x0 机器人

装配有机械臂的 DM-B2x0 机器人如图 1 所示。笔记本电脑充当机器人的主控制器，主要作为智能控制层的载体，在其上运行机器人控制主程序，提供机器人决策、运动规划和视觉处理等，并将规划的驱动轮速度通过 RS232 串口传送给运动控制器。IDM240 高性能智能运动控制器和 Propeller 控制器则作为下层控制器，运用 PWM 控制策略来实现两个 MAXON 直流伺服电机的独立运动控制。全部由 AX-12 舵机驱动的一 5 连杆机械臂安装在机器人小车上，以“Eye-In-Hand”方式配置的 CCD 摄像机和机械手爪能完成人们期望的各种操作。

Sony CCD 两自由度云台摄像机得到的景物图像经过图像采集卡数字化后，存储到计算机中，对目标进行检测、识别及跟踪预测，并将相关目标物

体的位置和运动信息通过 RS232 串口传送给笔记本电脑上的决策系统，决策系统根据这些信息指导控制系统控制自主移动机器人跟踪运动到可抓取目标物体范围内，然后机械臂根据手眼定位系统提供的目标物体的方位信息通过机械臂关节控制器实现目标物体的定位抓取动作。

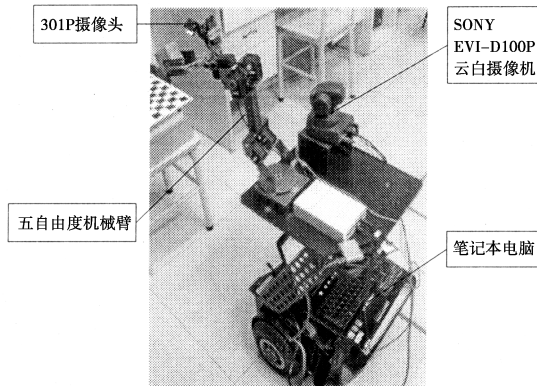


图 1 装配有机械臂的 DM-B2x0 机器人系统
Fig. 1 DM-B2x0 robot system equipped with the manipulator

2 基于颜色图像的目标识别算法

本设计采用 HSI 颜色空间模型进行图像处理，在识别目标之前，机器人在人的监督下进行颜色学习，得到像素属于的颜色值。相同颜色的邻近像素是属于同一区域的，本文采用文献 [4-5] 中所述的基于游程编码的连通区域标记方法，完成区域的形成过程。算法每次只处理相邻的两行，只需一次扫描图像就能完成所有连通区域的标记，从而大大提高了算法的计算速度。

在区域连通性标识的过程中，同时进行了各项特征的计算。区域特征主要包括色块的面积、重心等等。将游程的长度相加即可得到区域的面积 A ，区域的重心 (x, y) 可以通过下面的式子得到：

$$A = \sum_{i=1}^n l_i$$

$$x = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{l_i}{2} (2 \times x_{1i} + l_i - 1)}{A}$$

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \times l_i}{A}$$

其中， l_i 为每个游程的长度， x_{1i} 为每个游程的起始横坐标， y_i 是每个游程所在的纵坐标， n 是游程的数目。将每个颜色通道的所有区域按照面积从大到小排列，取出面积最大的进行显示。

3 机器人目标跟踪及控制方法

3.1 移动机器人目标定位

基于人类视觉特点并考虑到小车跟踪目标物体的视野范围与灵活性, 本文使用两自由度云台摄像机跟踪目标, 完成对 CCD 摄像头上下、左右两个自由度的八个方位(上、下、左、右、左上、右上、左下、右下)进行运动控制^[6]。上述内容已经实现了颜色目标的识别, 并获得了图像中目标重心坐标 (u_p, v_p) , 计算目标物体重心图像坐标与图像的中心坐标的偏差作为云台电机控制的输入, 控制云台跟踪物体的运动, 使目标物体始终处于视场的中央, 云台控制器控制摄像机云台的位置和速度, 实现目标物体跟踪, 并且将角度信息反馈给 PC 机, 基于云台的角度信息计算目标物体与移动机器人的相对位置如图 3 所示。



图 2 目标识别效果

Fig. 2 Effect of target recognition

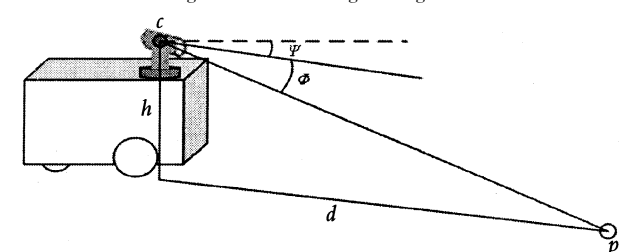


图 3 基于云台角度信息判断目标位置示意图

Fig. 3 Diagram of obtaining the target location based on PTZ angle information

图 3 中, 虚直线表示云台摄像头初始状态下的光轴方向, h 是摄像机中心与目标物体之间的高度差; 在跟踪到目标 p 时, 摄像机的光轴为 c_p , Φ 是云台摄像机的仰俯角, Ψ 是云台摄像机的横侧角。摄像机水平投影点与目标点的距离为: $d = h / \tan \Phi$ 。由于装配有云台摄像机的机器人机械几何结构固定不变, 可以通过几何关系得到机器人与目标点之间的相对位置, 这样, 实现了基于云台摄像机角度信息的目标定位。定位结果输入给模糊控制器, 控制机器人跟踪目标物体。

3.2 3 轮移动机器人模糊控制策略

目标跟踪控制结构如图 4 所示, 由云台摄像机

可感知目标物体, 将获取到的移动机器人位姿信息作为模糊控制器的输入。经模糊推理后, 输出线速度和角速度。通过速度运算得到左右轮的角速度, 并直接作为运动控制器的输入, IDM240 控制器通过调整 PWM 脉冲输出来控制电机运转, 同时, 装备在左右轮上的光电编码器检测角速度。

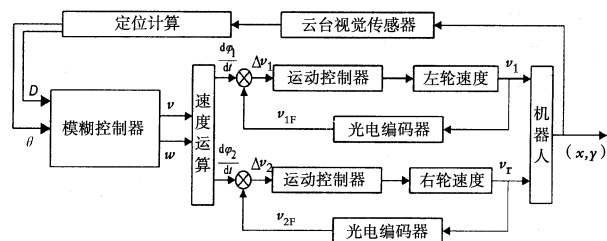


图 4 目标跟踪控制结构

Fig. 4 Target tracking control structure

考虑在世界坐标系中的目标点 $p(x_p, y_p)$ 。机器人的当前位姿由 x, y, β 确定, β 是机器人与 X_w 轴之间的夹角, 如图 5 所示。

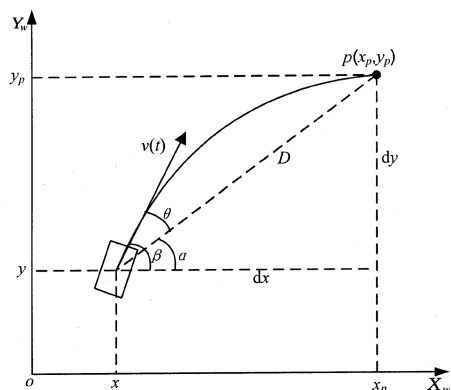


图 5 机器人目标跟踪示意图

Fig. 5 Diagram of robot target tracking

在设计一个模糊控制系统之前, 必须确定系统的输入输出参数。该设计中, 模糊控制器^[7]包括 4 个输入输出参数, 输入参数是 θ 和 D , θ 是当前机器人角度 β (机器人实际前进方向与横轴的夹角) 和期望角度 α (期望的机器人前进方向与横轴的夹角) 之差, D 是机器人的当前位置和目标点之间的距离, 输出参数是线速度 v 和角速度 w 。建立机器人和目标点位姿约束关系为:

$$\begin{aligned} dx &= x_p - x \\ dy &= y_p - y \\ \alpha &= \tan^{-1} (dy/dx) \end{aligned} \quad (2)$$

$$D = \sqrt{dx^2 + dy^2}$$

其中, θ 的取值范围为 $-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$ 。机器人应该向顺时针方向转动时, θ 为正值; 反之, 取负值。

角度 θ 的语言集为 {NB (负大), NM (负中), NS (负小), ZE (零), PS (正小), PM (正中), PB (正大)}。距离 D 的模糊语言集为 {VN (非常接近), N (接近), Z (适中), F (远), VF (非常远)}。线速度 v 的模糊语言集为 {VS (非常小), S (小), Z (适中), B (大), VB (非常大)}。角速度 ω 的语言集为 {NB (负大), NM (负中), NS (负小), Z (零), PS (正小), PM (正中), PB (正大)}。根据多次实验的经验确定这些语言变量的取值范围, 具体的值由隶属函数确定。

图 6 所示为距离参数 D 的隶属函数, 模糊集从右向左越来越窄, 这样可以在接近目标的时候给予机器人更高的灵敏度。最右侧采用开放的 S 型表示当输入距离达到上限时, 隶属函数的隶属度将取最大值 1。

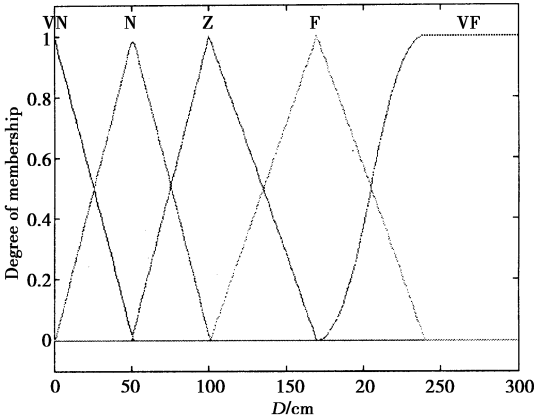


图 6 距离参数的隶属函数

Fig. 6 Membership function of the distance parameter

模糊规则是用以建立输入与输出一系列影射关系, 表达和存储这些关系的最好办法是使用 FAM (fuzzy associative memory) 矩阵, 其大小取决于模糊控制系统语言变量的个数。根据驾驶员开车经验, 在经过弯道时, 不仅需要很大的转弯角速度, 且线速度不宜太快, 速度太快会使车冲出道路, 导致翻车事故。为了使移动机器人能够在确定目标方位后, 平稳地过度到与目标偏角较小的方位, 设计了移动机器人目标跟踪模糊控制策略。该设计中有两个输入变量, 它们各有 5 个和 7 个模糊集, 可以形成一个二维的 FAM 矩阵, 共 35 条规则如表 1 所示。

表 1 模糊控制规则
Table 1 Fuzzy control rules

| D | θ | | | | | | |
|----|----------|-------|-------|------|-------|-------|-------|
| | NB | NM | NS | ZE | PS | PM | PB |
| VN | VS/PB | VS/PB | VS/PM | VS/Z | VS/NM | VS/NB | VS/NB |
| N | VS/PB | VS/PM | S/PM | S/Z | S/NM | VS/NM | VS/NB |
| Z | VS/PB | S/PM | Z/PS | Z/Z | Z/NS | S/NM | VS/NB |
| F | VS/PM | S/PM | Z/PS | B/Z | Z/NS | S/NM | VS/NM |
| VF | VS/PS | Z/PS | B/PS | VB/Z | B/NS | Z/NS | VS/NS |

例如 FAM 规则 (VN, PB: VS, NB), 对应 MIMO 系统, 用 IF-THEN 条件式来表述规则: IF $D=VN$ and $\theta=PB$ THEN $v=VS$ and $\omega=NB$ 以上规则表明, 如果机器人距目标点非常近而且角度相差很大时, 模糊控制器会输出很小的线速度, 以使移动机器人大幅度地右转的同时缓慢接近目标点

。模糊推理方法采用 Mamdani 推理方法, 如输入参数 D 为 10、 θ 为 1 时, 根据定义的隶属度函数, 距离 10 属于 VN 的隶属度为 0.8, 属于 N 的隶属度为 0.2, 角度 1 属于 PM 的隶属度为 0.72, 属于 PB 的隶属度为 0.38, 以触发的 FAM 规则 (VN, PM: VS, NB) 为例, 计算输出 v 属于 VS 和 ω 属于 NB 的隶属度为:

$$\min (\mu_D (10), \mu_\theta (1)) = \min (0.8, 0.72) = 0.72 \tag{3}$$

输出线速度为: $v=0.72VS$, 角速度为: $\omega=0.72NB$ 。其它的规则也这样计算, 最后, 采用 centroid 方法进行解模糊化计算:

$$v = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{\sum_{i=1}^n \min (\mu_{iD}, \mu_{i\theta})} \tag{4}$$
$$\omega = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i}{\sum_{i=1}^n \min (\mu_{iD}, \mu_{i\theta})}$$

式中, v_i, ω_i 为 FAM 矩阵的第 i 条规则的输出值, n 为 FAM 矩阵的大小。

4 目标物体抓取任务

对于 eye-in-hand 系统, 无论机械臂要完成什么样的任务, 关键是建立摄像机坐标系与机械臂基坐标之间的关系。定义机械臂的基坐标系 $O_A-X_A Y_A Z_A$ 和摄像机坐标系 $O_C-X_C Y_C Z_C$ 如图 7 所示, 手眼系统中的摄像头装配在末端夹手正上方。

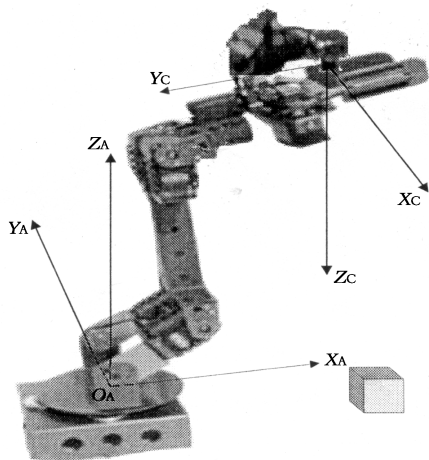


图7 机械臂基坐标系与摄像机坐标系的关系

Fig. 7 Relationship between the manipulator coordinate system and the camera coordinate system

目标物体抓取任务实现过程如下:

(1) 机器人运动到机械手可抓取目标位置停下, 机械臂伸展至如图7所示位姿, 此时, 使摄像头的光轴垂直水平工作台面上即 Z_A 轴 $\parallel Z_R$ 轴, 记录下机械臂正向运动学方程的解。

(2) 建立点 P 的图像像素坐标 (u, v) 与机械臂基坐标系下的坐标之间的关系^[7]:

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x & \gamma & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_R \\ Y_R \\ Z_R \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_1 \mathbf{M}_2 \mathbf{X}_R \quad (5)$$

其中: \mathbf{M}_1 为摄像机内参数, \mathbf{M}_2 为摄像机外参数。

根据上式可以获得目标点在机械臂基坐标系下的坐标。通过摄像机标定确定摄像机的内外参数, 本文采用张正友的基于平面靶标的摄像机标定方法^[8], 假设靶标平面位于世界坐标系的 xy 平面上, 即 $z=0$, 则有:

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix}^T = \mathbf{P} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}^T = [\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2, \mathbf{P}_4] \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

$$\mathbf{P} = \mathbf{A} [\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_3, \mathbf{t}]$$

靶标平面上的点与对应的图像点存在一个矩阵变换 \mathbf{H} :

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix}^T = \mathbf{H} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

$$\mathbf{H} = [\mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2, \mathbf{h}_4] = \lambda \mathbf{A} [\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{t}]$$

选取一幅图像上的多个点计算出单应矩阵 \mathbf{H} , \mathbf{H} 求解出后, 由旋转矩阵 \mathbf{R} 的正交性可得:

$$\mathbf{h}_1^T \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_2 = 0 \quad (8)$$

$$\mathbf{h}_1^T \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_1 = \mathbf{h}_2^T \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_2$$

再由绝对二次曲线在图像平面上的投影 $\mathbf{B} = \mathbf{A}^{-T}$

\mathbf{A}^{-1} , \mathbf{B} 是对称矩阵, 将其代入上式, 得到:

$$\mathbf{h}_1^T \mathbf{B} \mathbf{h}_2 = 0 \quad (9)$$

$$\mathbf{h}_1^T \mathbf{B} \mathbf{h}_1 = \mathbf{h}_2^T \mathbf{B} \mathbf{h}_2$$

拍摄 n 幅图像 ($n \geq 3$), 可求解出 \mathbf{B} , 求得 \mathbf{B} 之后, 利用 Cholesky 矩阵分解算法求解出 \mathbf{A}^{-1} , 求逆得到 \mathbf{A} , 再求出每幅图像的外参数:

$$\mathbf{r}_1 = \lambda \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_1, \quad \mathbf{r}_2 = \lambda \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_2, \quad \mathbf{r}_3 = \mathbf{r}_1 \times \mathbf{r}_2, \quad \mathbf{t} = \lambda \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_3 \quad (10)$$

(3) 确定目标点在机械臂基坐标下的位置之后, 要使机械手运动到目标位置, 需要调用机械臂运动学方程反解, 得到机械臂各个关节要达到的角度值, 并控制机械臂运动到该位姿, 实现目标物体的抓取任务。

5 仿真和实验结果及分析

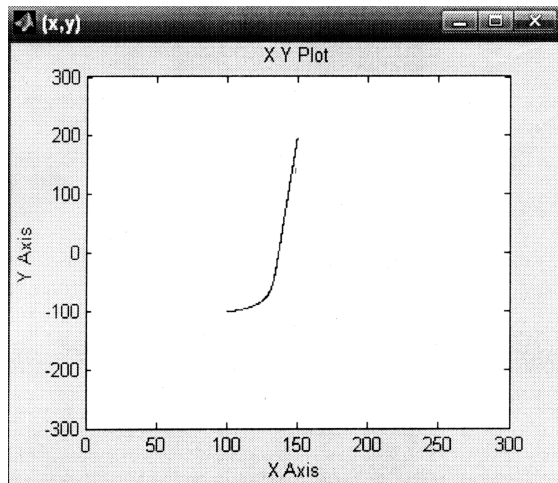
5.1 目标跟踪仿真

运用 MATLAB 中的 simulink 对目标跟踪的模糊控制过程进行仿真, 机器人的初始位姿为: $x = 100\text{cm}$ 、 $y = -100\text{cm}$ 、 $\beta = 0$; 目标物体位置: $x_p = 150\text{cm}$ 、 $y_p = 200\text{cm}$; 采样周期为 0.1s 。仿真结果如图8所示, 其中图8(a)是移动机器人跟踪目标物体的运动轨迹图, 开始目标物体在移动机器人偏左较远位置。移动机器人需要向左以较大的角速度较小的线速度转弯行驶, 从图8(b)中可以看出, 模糊控制器输出一个较大的角速度, 是机器人转向运动, 移动机器人在转弯过程中不断的对正目标物体。此时, 移动机器人的转弯半径也在不断的增大, 由转弯半径 $R = v/\omega$ 可得到 v 也不断增大, 直到角速度趋向于零时, 移动机器人的运动方向正对目标物体, 线速度在开始随着距离减小慢慢减小。这样不仅避免了移动机器人在转弯时线速度和角速度都过大使其翻倒, 更可以提高移动机器人跟踪目标物体的效率。

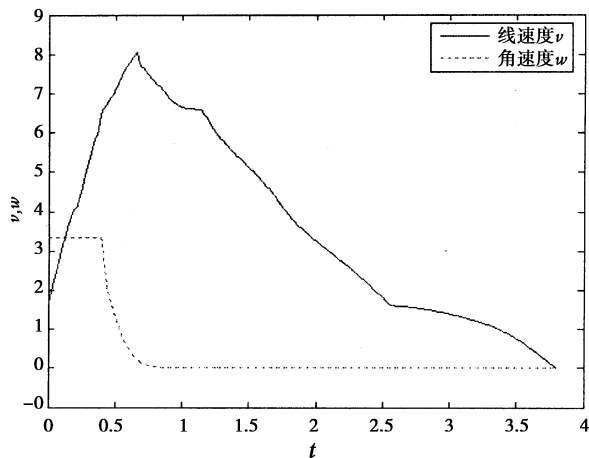
5.2 目标跟踪及抓取实验

实验场景选择在室内环境抓取橙色矩形小木块, 木块尺寸: $5\text{cm} \times 4.7\text{cm} \times 4.3\text{cm}$ 。木块放置工作台面上, 工作台面高度为 60cm 。机器人初始位置距离木块大约 210cm , 初始距离不能太远, 本文中的目标识别是通过判别色块区域面积的大小完成的, 因此移动机器人距离目标太远会导致目标物体在摄像机采集的图像中面积太小以至于视觉系统不能有效识别目标物体。多次实验表明, 移动机器

人与跟踪目标的有效距离大约 0.25—3.1m 为好。图 9 表明所设计的系统在移动机器人准确识别目标的前提下,可以有效地跟踪并抓取目标物体。但本设计使用的目标识别方法有时会受到光照强度的影响,导致目标物体的误识别,影响整个跟踪及抓取任务的正常进行,这将是下一步需要从识别算法角度研究的问题。



(a) 目标跟踪轨迹



(b) 模糊控制器的输出线速度和角速度

图 8 目标跟踪仿真试验结果

Fig. 8 Simulation results of target tracking

6 结 论

利用云台摄像机信息和所提出的模糊控制策略,配置机械手的移动机器人能够自主地在视觉硬

件的基础上实现目标的跟踪和抓取,使得移动机器人完成给定的任务。该项研究对移动机器人目标识别、跟踪和抓取的研究具有一定参考价值,对配置机械手的服务型机器人的智能化开发具有一定的实用价值和实际意义。本文的初步实验研究为后续的深入研究奠定了必要的基础,相关的进一步研究还在进行中。

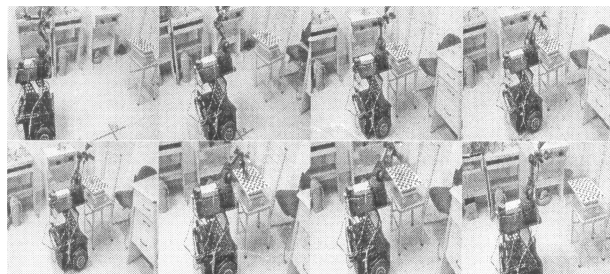


图 9 机器人目标跟踪及抓取

Fig. 9 Robot target tracking and grasping

参考文献:

- [1] 刘今越,李铁军,赵海文,等.基于模糊控制的移动机器人路径跟踪[J].河北工业大学学报,2009,38(6):6—9.
- [2] DAYAL R. PARHI navigation of mobile robots using a fuzzy logic controller [J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2005, 42: 253—273.
- [3] 余文勇,周祖德,陈幼平.基于模糊进化学习的移动机器人目标跟踪控制[J].武汉理工大学学报,2006,28(8):125—130.
- [4] 朱莹,洪炳熔,阮玉峰.全自主足球机器人快速目标识别与定位方法[J].哈尔滨工业大学学报,2003,35(9):1060—1063.
- [5] 汤思维,陈卫东,曹其新.移动机器人多目标彩色视觉跟踪系统[J].机器人,2003,25(1):10—17.
- [6] 薛长松,杨国胜,李志强.基于 DM642 的双 CCD 同步运动研究[J].计算机技术与自动化,2006,25(4):24—27.
- [7] 张广军.机器视觉[M].北京:科学出版社,2005.
- [8] Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transaction Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330—1334.
- [9] 张国良,曾静,柯熙政,等.模糊控制及其 Matlab 应用[M].西安:西安交通大学出版社,2002.