

基于模糊趋近的移动机械臂目标抓取方法

焦继乐 曹志强 赵 鹏 谭 民

(中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室, 北京 100190)

摘要 提出了一种基于模糊趋近的移动机械臂目标抓取方法. 移动机械臂采用 Eye-in-Hand 方式的 CMOS 视觉系统, 视觉识别双十字的趋近指引标识, 将移动平台与其中中心点的连线方向和移动平台运动方向的夹角作为模糊控制器的输入, 设计双输入单输出模糊控制器, 通过对移动平台运动方向的调整实现移动机械臂对目标的趋近; 目标为双黑线环绕的红色圆柱, 当目标在机械臂的可操作范围内, 移动平台停止运动并基于逆向运动学求解机械臂各关节角, 进而实现目标抓取. 实验表明了所提方法的有效性.

关键词 移动机械臂; CMOS 摄像头; 视觉处理; 模糊控制; 目标趋近; 目标抓取

中图分类号 TP242 **文献标志码** A **文章编号** 1671-4512(2013)S1-0047-04

An object grasping method based on fuzzy approaching for a mobile manipulator

Jiao Jile Cao Zhiqiang Zhao Peng Tan Min

(State Key Laboratory of Management and Control for Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract An object grasping method based on fuzzy approaching for a mobile manipulator with an Eye-in-Hand CMOS (complementary metal-oxide-semiconductor transistor) camera was proposed. The approaching guidance identifier with double cross was recognized by the mobile manipulator, and the angle between the line from mobile platform to the center of the identifier and its heading direction were served as the inputs of fuzzy controller. A double input and single output fuzzy controller was designed to regulate the direction of the mobile platform for smooth approaching. When the object (a red cylinder with double black lines) was in the workspace of manipulator, the mobile platform stops and the object was grasped by the manipulator with its joint angles solved based on inverse kinematics. Experiments results show the validity of the proposed approach.

Key words mobile manipulator; CMOS camera; visual processing; fuzzy control; object approaching; object grasping

移动机械臂由移动机器人和机械臂两个子系统组成, 同时具有移动机器人的移动功能和机械臂的操作功能, 可以进行有效的操作, 适合代替人工作在各种危险的场合^[1].

传统的工业机器人大多采用示教-再现的控制方式运行, 能够很好地实现精确定位控制. 随着现实环境复杂动态非结构化程度的增加, 移动机械臂受到关注. 视觉传感器以其信息丰富、成本低

和易于使用等特征被应用于很多场合, 包括用于移动机械臂中^[2-3]. 根据视觉传感器安装位置的不同, 视觉系统可分为 Eye-in-Hand 配置和 Eye-to-Hand 配置. 视觉系统在工业领域已经得到了应用, 例如焊缝跟踪^[4]、生产线上工件的自动定位^[5]、精密装配^[6]等, 大大提高了机器人系统的作业性能.

移动机械臂从控制方式上可分为独立式控制

收稿日期 2013-07-10.

作者简介 焦继乐(1988-), 女, 博士研究生; 曹志强(通信作者), 副研究员, E-mail: zhiqiang.cao@ia.ac.cn.

基金项目 国家自然科学基金资助项目(61273352, 61175111, 61227804, 60805038).

和耦合式控制两种. 独立式控制方式忽略系统的动力学耦合, 将系统分为机械手和移动平台两个独立子系统分别进行设计. 通常情况下, 首先对移动平台进行规划, 使目标进入机械臂的工作区域, 而后再对机械臂进行规划实现操作作业. Liu 和 Lewis^[7] 分别设计了机械手和移动平台的控制器, 在外扰有界的情况下实现系统的渐近稳定; Sheng 等人^[8] 为机械手和移动平台分别设计一个神经网络控制器, 实现了移动机械手关节空间定位控制. 耦合式控制方式是整个移动机械臂系统看成一个整体设计控制器. Dong 等人^[9] 在考虑了动力学耦合的情况下设计了基于李雅普诺夫理论的鲁棒控制器; Tan 和 Xi^[10] 用非线性负反馈对移动机械手的动力学模型进行了线性化和解耦.

本研究移动机械臂采用 Eye-in-Hand 视觉系统, 相关信息送入模糊控制器, 用于调节移动平台的运动方向, 从而实现移动机械臂对目标的趋近. 在此基础上, 当机械臂认为双黑线环绕的红色圆柱目标在其可操作范围内时, 移动平台停止运动, 待机械臂规划完成后即实施抓取操作.

1 任务描述

移动机械臂目标抓取任务示意图如图 1 所示, 分为趋近和抓取操作两个阶段. 在趋近阶段, 移动机械臂在嵌入式视觉的引导下, 通过模糊控制器调整移动平台运动的方向; 当它距离目标较近时, 移动平台降速直行辅以机械臂姿态调整直至目标在机械臂的工作空间内. 在抓取操作阶段, 基于视觉提供的信息, 逆向运动学求解关节空间的运动并执行. 其中, 移动机械臂系统主要包括 CMOS 摄像头 OV9653、六自由度机械臂、嵌入式控制系统以及轮式移动平台等部分.

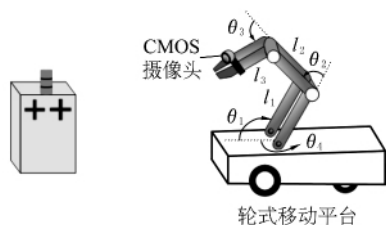


图 1 移动机械臂目标抓取示意图

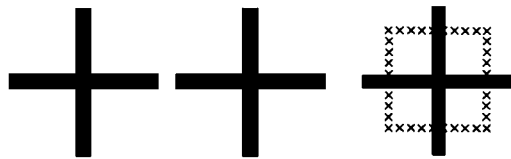
2 基于嵌入式视觉的目标信息提取

图像信息处理的准确性和鲁棒性对于视觉控制与操作具有重要的影响. 为了兼顾移动机械臂较远距离的趋近过程和近距离的抓取操作, 同时

考虑 CMOS 摄像头嵌入式视觉处理的实时性和测量精度, 设计了双十字的趋近指引标识, 并将目标用颜色标识进行标记.

2.1 双十字趋近指引标识的识别与信息提取

设计双十字的趋近指引标识如图 2(a) 所示, 首先提取各十字标的中心.



(a) 双十字标识

(b) 识别模板

图 2 双十字趋近指引标识及其识别模板

步骤 1 根据十字标的中心点亮度较暗和中心对称特征, 排除非目标点, 得到候选点集 Ω_{p1} ;

步骤 2 对 Ω_{p1} 中的任意点 p_c , 检测图 2(b) 所示的识别模板中标记为“×”的像素点, 根据点 p_c 的灰度值 $g(p_c)$ 和设定阈值 T_h 对模板进行二值化, 获取关于 p_c 的 0-1 模板数组 G_{p_c}

$$G_{p_c}(i) = \begin{cases} 0 & (g(\times_i) < g(p_c) + T_h); \\ 1 & (\text{其他}), \end{cases}$$

式中 $g(\times_i)$ 为第 i 个模板点 \times_i 的灰度值;

步骤 3 统计数组 G_{p_c} 中 0 和 1 的分布情况, 满足十字标的辐条数目为 4、各辐条宽度以及相邻两辐条的间隔均基本相等的特征, 则将该 p_c 视为目标点, 如此得到候选点集 Ω_{p2} ;

步骤 4 根据像素坐标对候选点集 Ω_{p2} 进行滤波, 并聚成两类, 用均值法得到各十字标的中心 (u_1, v_1) 和 (u_2, v_2) .

根据上述图像信息提取移动平台与趋近指引标识中心点的连线方向和移动平台运动方向的夹角 e , 并将其作为模糊控制的输入.

2.2 被抓取目标的识别与信息提取

所要抓取的目标为双黑线环绕的红色圆柱.

步骤 1 根据颜色特征提取图像的 ROI(region of interest) 区域, 获取 ROI 的中心点 (u_c, v_c) , 并将其作为目标的中心点;

步骤 2 在 ROI 区域内沿垂直环绕黑线的方向扫描, 计算得到两条环绕黑线的像素间距 d_{pixel} .

3 基于模糊控制的目标趋近

设计模糊控制器用于目标趋近过程中对移动平台运动方向的调整.

3.1 模糊控制器

采用双变量输入单变量输出的模糊控制器,

框图如图 3 所示. 模糊控制器的两个输入分别为夹角 e 和 e 的变化率 e_c , 输出为移动平台的偏转角度 u . k_e 和 k_{e_c} 为输入变量 e 和 e_c 的量化因子, k_u 为输出变量 u 的量化因子.

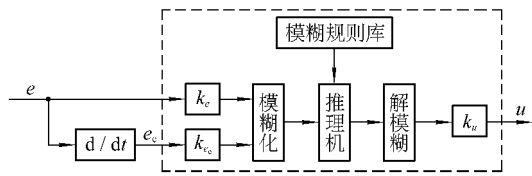


图 3 模糊控制器框图

e 的量化因子 $k_e = 1/e_{th}$, 其中 e_{th} 为 e 的量化阈值. 将 e 量化为论域 $[-1, 1]$ 中的值, 并按照一定的隶属度关系使之与模糊变量 E 的 7 个语言取值 $\{NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB\}$ 对应.

e_c 的量化因子 $k_{e_c} = 1/e_{cth}$, 其中 e_{cth} 为 e_c 的量化阈值. 将 e_c 量化为论域 $[-1, 1]$ 中的值, 并按照一定的隶属度关系使之与模糊变量 E_c 的 5 个语言取值 $\{NB, NS, Z, PS, PB\}$ 对应.

输出变量 u 为移动平台与目标之间的夹角, 以移动平台当前运动方向为基准, 左转为负. 比例因子定为 $k_u = 1/u_{th}$, 将 u 量化为论域 $[-1, 1]$ 中的值, 并按照一定的隶属度关系使该值与模糊变量 U 的 7 个语言取值 $\{NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB\}$ 对应.

根据模糊控制规则的设计原理, 结合对移动平台方向调整的控制经验, 总结了 35 条模糊控制规则, 如表 1 所示.

表 1 模糊控制规则表

E_c	E						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	Z	PS	PM
NS	NB	NM	NS	NS	Z	PS	PM
Z	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
PS	NM	NS	Z	Z	PS	PM	PB
PB	NS	NS	Z	PS	PS	PM	PB

采用重心法解模糊得到模糊控制器的输出为

$$u = \frac{\sum_{i=1}^m b_h \mu_i(E_j, E_{ck}, U_h, e, e_c)}{\sum_{i=1}^m \mu_i(E_j, E_{ck}, U_h, e, e_c)}, \quad (1)$$

式中: u 为模糊控制器的清晰化输出; m 为规则库中被激活的模糊规则个数; b_h 为模糊输出语言变量的隶属度函数中心; $\mu_i(E_j, E_{ck}, U_h, e, e_c)$ 为利用模糊推理计算得到的第 i 条模糊规则的隶属度值, $\mu_i(E_j, E_{ck}, U_h, e, e_c) = \mu_{E_j}(e) \wedge \mu_{E_{ck}}(e_c) \wedge \mu_{U_h}(u)$.

3.2 运动决策

得到模糊控制器输出的移动平台相对于趋近指引标识需要偏转的角度 u , 根据两驱轮式移动平台的运动学模型, 给出左右驱动轮的运动速度如下

$$\begin{cases} v_r = 2V_{avg}/(2 + k_{ue}u); \\ v_l = 2V_{avg} - v_r, \end{cases} \quad (2)$$

式中: v_l 和 v_r 分别为左右驱动轮的速度; V_{avg} 为移动平台的运动速度; k_{ue} 为比例系数.

4 基于逆运动学的机械臂目标抓取

摄像头识别采用颜色标记的目标, 若两条环绕黑线像素间距 $d_{pixel} > T_d$, 其中阈值 T_d 根据经验决定, 目标被认为在机械臂的工作空间内, 移动平台停止运动, 机械臂准备执行抓取操作.

如图 1 所示, 肩肘腕关节(俯仰)和腰关节分别为 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 和 θ_4 , 三个连杆的长度分别为 l_p ($p=1, 2, 3$), 摄像头相对于移动平台的位置可计算如下:

$$\begin{cases} X_{CR} = \left(\sum_{i=1}^3 l_i \sin \left(\sum_{k=1}^i \theta_k \right) \right) \sin \theta_4; \\ Y_{CR} = \left(\sum_{i=1}^3 l_i \sin \left(\sum_{k=1}^i \theta_k \right) \right) \cos \theta_4; \\ Z_{CR} = \sum_{i=1}^3 l_i \sin \left(\sum_{k=1}^i \theta_k \right). \end{cases} \quad (3)$$

根据视觉测量信息 d_{pixel} 、两环绕黑线的实际间距 D 和小孔成像模型 $D_{OC} = Df/d_{pixel}$ (f 为摄像头焦距), 确定目标相对于摄像头的位置 $[X_{OC}, Y_{OC}, Z_{OC}]$, $X_{OC} = D_{OC} \cos \theta_v \sin \theta_h$, $Y_{OC} = D_{OC} \cdot \cos \theta_v \cos \theta_h$, $Z_{OC} = D_{OC} \sin \theta_v$, 其中, $\theta_v = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 - \arctan((v_0 - v_c)/f)$ 为目标与摄像头连线的竖直偏差角, $\theta_h = \theta_4 + \arctan((u_0 - u_c)/f)$ 为目标与摄像头连线的水平偏差角, (u_0, v_0) 为光心的图像坐标.

进而得到目标相对于移动平台的位置, 即机械臂末端须要到达的位置 $X_{OR} = X_{OC} + X_{CR}$, $Y_{OR} = Y_{OC} + Y_{CR}$, $Z_{OR} = Z_{OC} + Z_{CR}$. 结合公式(3)和抓取时手爪关节水平约束 $\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 = 0$, 进行逆向运动学求解, 计算各关节角如下

$$\begin{cases} \theta_1 = \arccos \left[\frac{(l_1 + l_2 \cos \theta_2)A + l_2 B \sin \theta_2}{l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 \cos \theta_2} \right]; \\ \theta_2 = -\arccos \left[(A^2 + B^2 - l_1^2 - l_2^2)/(2l_1 l_2) \right]; \\ \theta_3 = -\theta_1 - \theta_2; \\ \theta_4 = \arctan 2(X_{OR}, Y_{OR}), \end{cases} \quad (4)$$

式中: $A=Y_{OR}/\cos \theta_4-l_3$; $B=Z_{OR}$.

5 实验

下面通过实验对移动机械臂的模糊控制趋近过程和抓取操作进行验证. 摄像头参数: $f=350$, $[u_0, v_0]=[160, 120]$, 移动机械臂参数: $l_1=9.7$ cm, $l_2=8.9$ cm, $l_3=9.55$ cm. 算法相关参数如下: $T_h=30$, $n=10$, $e_{th}=1.43$, $e_{cth}=5$, $u_{th}=1$, $V_{avg}=15$ cm/s, $k_{uc}=1$, $D=1.45$ cm, $T_d=45$.

图 4 给出了实验结果, 其中目标在趋近过程中会被拖动. 图 4(a) 中: 实线为移动机械臂的运

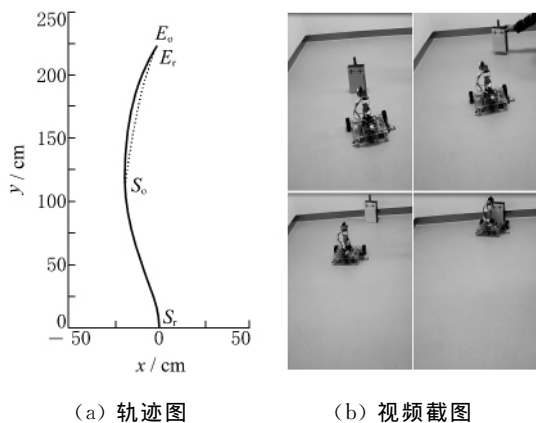


图 4 实验轨迹及视屏截图

动轨迹, S_r 和 E_r 分别为移动机械臂的起始位置和终止位置; 虚线表示目标的移动轨迹, 目标初始时位于 S_0 位置, 在移动机械臂的趋近过程中, 采用人工的方式逐渐移动目标至 E_0 位置. 可以看出: 移动机械臂顺利地完成了对目标的趋近与抓取, 从而验证了所提方法的有效性.

参 考 文 献

[1] 谭民, 徐德, 侯增广, 等. 先进机器人控制. 北京: 高

等教育出版社, 2007.

- [2] Wang Y, Lang H X, de Silva C W. A hybrid visual servo controller for robust grasping by wheeled mobile robot[J]. IEEE Transactions on Mechatronics, 2010, 15(5): 757-769.
- [3] Seelinger M, Yoder J D, Baumgartner E T, et al. High-precision visual control of mobile manipulators [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2002, 18(6): 957-965.
- [4] Fang Z J, Xu D, Tan M. A vision-based self-tuning fuzzy controller for fillet weld seam tracking [J]. IEEE Transactions on Mechatronics, 2011, 16(3): 540-550.
- [5] Sanz P J, Requena A, Inesta J M, et al. Grasping the not-so-obvious: vision-based object handling for industrial applications[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2005, 12(3): 44-52.
- [6] 江泽民, 徐德, 涂志国, 等. MEMS 装配显微图像分割与特征点提取[J]. 机器人, 2004, 26(5): 404-408.
- [7] Liu K, Lewis F L. Decentralized continuous robust controller for mobile robots[C]// International Conference on Robotics and Automation. Cincinnati: IEEE, 1990, 1822-1827.
- [8] Sheng L, Goldenberg A A. Neural-network control of mobile manipulators[J]. IEEE Trans Neural Networks, 2001, 12(5): 1121-1133.
- [9] Dong W J, Xu Y S, Wang Q. On tracking control of mobile manipulators[C]// International Conference on Robotics and Automation. San Francisco: IEEE, 2000, 3455-3460.
- [10] Tan J D, Xi N. Unified model approach for planning and control of mobile manipulators[C]// International Conference on Robotics and Automation. Seoul: IEEE, 2001, 3145-3152.