

文章编号: 1002-0446(2005)03-0215-05

# 一种 5 自由度视觉伺服机器人的跟踪控制研究\*

汪建华<sup>1, 2</sup>, 赵晓光<sup>1</sup>, 谭民<sup>1</sup>

(1. 中国科学院自动化研究所复杂系统与智能科学实验室, 北京 100080; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 提出了一种基于图像的视觉伺服机器人系统的结构, 以及该系统跟踪平面运动目标的算法. 该系统有 5 个自由度, 包括一个 3 自由度的机器人和一个 2 自由度的手腕, 手腕安装在机器人末端, 而摄像机安装在手腕末端. 由于具有较小的运动惯量, 手腕可快速旋转, 以实现运动目标的跟踪. 而在需要时, 3 自由度的机器人可将摄像机移动到适当的位置, 对目标进行更为仔细的观察. 该系统实现了对运动目标的跟踪. 此外, 还提出了提高系统性能的方法, 实验证实这些方法是有效的.

**关键词:** 机器人; 视觉伺服; 主动视觉跟踪

**中图分类号:** TP24 **文献标识码:** B

## Research on Tracking Control of a 5-DOF Visual Servo Robot

WANG Jian-hua<sup>1, 2</sup>, ZHAO Xiao-guang<sup>1</sup>, TAN Min<sup>1</sup>

(1. Laboratory of Complex Systems and Intelligence Science, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** This paper introduces the architecture of an image-based visual servo robot system and the algorithm implemented to track a target with planar motion. This robot system has 5 degrees of freedom, which consists of a robot with 3 DOFs and a 2-DOF wrist attached to the end of the robot. And, a camera is fixed on the end of the wrist. With low inertia, the wrist rotates quickly to track the target, while the 3-DOF robot moves the camera to an appropriate position to take a close look at the target when needed. The system tracks the target successfully. Furthermore, this paper proposes some approaches to improve the system performance, and the experiments verify them.

**Keywords:** robot; visual servo; active visual tracking

### 1 引言 (Introduction)

随着计算机视觉和视觉传感器硬件的发展, 机器人视觉系统, 尤其是视觉伺服系统的研究逐渐成为热点. 针对机器人手-眼系统, 研究了视觉伺服的控制策略和实现方法<sup>[1-4]</sup>. 文[1]介绍了使用模糊控制方法实现机器人视觉伺服的原理. 文[2]研究了机器人抓取物体时, 采用立体视觉确定物体位置和姿态的方法. 文[3]提出了一种基于“任务函数”的方法, 实现机器人轮廓的视觉伺服跟踪, 并通过实验验证了提出方法的有效性. 文[4]提出一种 2.5D 视觉伺服方法, 该方法不同于传统的基于位置和基于图像的视觉伺服, 而是基于摄像机从当前位姿运动到期望位姿的局部位移估计设计控制率, 实现视觉伺服. 文[5~7]研究了视觉跟踪问题. 文[5]设计了一

种高速摄像和图像处理传感器, 该传感器克服了视觉系统采样速率低、处理时间长的缺点, 实现了机器人模仿人击打棒球的过程. 文[6]给出了在不标定摄像机的情况下, 使用拟牛顿方法实现对固定图像跟踪的方法. 文[7]研究了使用预测控制算法控制摄像机旋转、倾斜和调整焦距, 跟踪公路上行驶的汽车.

本文给出一个基于 5 自由度机器人的主动视觉系统, 该系统使用标准的摄像机和图像采集卡, 在摄像机无标定的情况下, 可以实现对运动目标的快速跟踪.

### 2 系统结构 (System structure)

系统结构为摄像机移动平台, 如图 1 所示. 机器

\* 基金项目: 国家 863 计划资助项目 (2002AA421170).

收稿日期: 2004 - 08 - 26

人系统由一个 3 自由度的直角坐标系机器人 (1 号轴、2 号轴、3 号轴) 和一个 2 自由度 (4 号轴旋转和 5 号轴俯仰) 的旋转手腕组成, 摄像机安装于手腕末端. 手腕的转动惯量较小, 用于控制摄像机实现快速

的目标跟踪, 而 3 自由度机器人则可在需要时将摄像机移动到合适的位置, 以对目标进行更为仔细的观测. 跟踪系统由视觉单元、控制单元和执行单元 3 部分组成.

图 1 系统结构  
Fig. 1 System structure

视觉单元由 CCD 摄像机、图像卡、高性能 PC 机和局域网构成, 其功能是实时获取目标的位置信息, 并通过局域网提供给主控计算机. 摄像机每秒采集图像 25 帧, 图像采用  $320 \times 240$  像素格式, 图像处理采用并行方式进行, 在采集图像的同时完成对目标的识别并得出目标质心在图像平面的坐标值<sup>[8]</sup>.

控制单元由主控计算机和运动控制卡构成, 其功能是将实时获得的位置信息和设定的控制目标进行对比, 按照给定算法, 生成对 4 号轴和 5 号轴的位置和速度控制指令. 控制指令可以实时刷新而不必等到上一个指令完成.

执行单元由伺服放大器、交流伺服电机、减速器以及配电组件等构成, 其功能是执行上述控制指令, 完成对摄像机的操纵, 实现对目标的跟踪.

### 3 跟踪控制 (Tracking control)

跟踪系统的控制目标是: 根据图像处理获取的目标质心在图像平面中的位置  $(u_2, v_2)$ , 实时调整 4 号轴的角度  $\theta_2$  和 5 号轴的角度  $\alpha_2$ , 将目标置于图像平面的中央位置  $(u_0, v_0)$ , 即:  $e = \| \underline{f} - \underline{f}_0 \|_2 =$

图 2 跟踪系统的控制框图  $\sqrt{(u_2 - u_0)^2 + (v_2 - v_0)^2} \rightarrow 0$ , 如图 2 所示.

Fig. 2 Block diagram of the tracking control system

#### 3.1 运动规划

如图 1 所示, 目标在摄像机正下方平面内运动, 具有两个自由度. 安装在手腕末端的摄像机由两个轴操纵, 也具有两个自由度. 运动规划就是要将目标

在图像平面内沿  $u, v$  两个方向的运动分解为手腕两个轴的运动. 如图 3(a) (俯视图) 所示, 两个轴相互垂直, 其中 4 号轴垂直于运动平面, 5 号轴平行于运动平面, 且和图像平面坐标系的  $u$  坐标轴同向.

图 3 跟踪系统视图

Fig. 3 Views of the tracking system

如图 3(b),当目标在图像平面内沿  $v$  方向运动时,可以采用 5 号轴的旋转来跟踪.

设当前目标在  $v$  方向的图像坐标为  $v_2$ ,为使图像平面  $v$  方向的中心点对准目标,摄像机相对当前位置  $\theta_2$  所需要旋转的角度为  $\Delta\theta$ (单位:rad),则:

$$\Delta\theta = \tan^{-1} \left| \frac{(v_2 - v_0) \times h_{FOV}}{p_v \times h} + \tan\theta_2 \right| - \theta_2 \quad (1)$$

式中,  $h_{FOV}$  为摄像机视野高度,对应于图像平面的  $v$  方向,  $p_v$  为图像平面  $v$  方向的总像素数.

由于图像处理可以在图像采集周期内完成,所以每个图像坐标信息的平均输出间隔时间为  $T_s = 40 \times 10^{-3}$  s,据此,可以推算出目标的大致运动速度为

$v \dot{l}_5$  (单位: mm/s), 其式为:

$$v \dot{l}_5 = \frac{(v_2 - v_0) h_{FOV} / p_v + h(\tan\theta_2 - \tan\theta_1)}{T_s} \quad (2)$$

由 (2) 式得到对应的摄像机跟踪运动的角速度  $\omega_5$  (单位: rad/s):

$$\omega_5 = v \dot{l}_5 \cos^2 \theta_2 / h \quad (3)$$

如图 4 所示,当目标沿图像平面  $u$  方向运动时,除了 4 号轴要旋转  $\Delta\alpha$  以使目标位于图像平面的  $u$  方向的中心位置外,5 号轴必须进行相应的旋转,以弥补由 4 号轴旋转而带来的目标在  $v$  方向的像素偏移  $\Delta v$ ,从而使目标位于图像平面  $v$  方向的中心点.

图 4 目标沿  $u$  方向运动时,4 号、5 号轴的运动规划

Fig. 4 Motion planning of axis No. 4 and axis No. 5 when the target moving in the direction of  $u$

设目标当前图像坐标信息为  $u_2$ ,为使图像平面  $u$  方向中心点对准目标,摄像机相对当前位置  $\alpha_2$  所需要运动的角度为  $\Delta\alpha$  (单位:rad),则:

$$\Delta\alpha = \tan^{-1} \left| \frac{(u_2 - u_0) w_{FOV}}{p_u} / (h \tan\theta_2) \right| \quad (4)$$

式中的  $w_{FOV}$  为摄像机视野宽度,对应于图像平

面的  $u$  方向,  $p_u$  为图像平面方向的总像素数.

摄像机跟踪运动的角  $u$  速度为  $\omega_4$  (rad/s):

$$\omega_4 = \frac{\tan^{-1} \left| \frac{(u_2 - u_0) w_{FOV}}{p_u} / (h \tan \theta_2) \right| - \tan^{-1} \left| \frac{(u_1 - u_0) w_{FOV}}{p_u} / (h \tan \theta_1) \right| + \alpha_2 - \alpha_1}{T_s} \quad (5)$$

由 4 号轴旋转而带来的目标在  $v$  方向的像素偏移  $\Delta v$  为:

$$\Delta v = \left| \sqrt{(h \tan \theta_2)^2 + \left| \frac{(u_2 - u_0) w_{FOV}}{p_u} \right|^2} - h \tan \theta_2 \right| p_v / h_{FOV} \quad (6)$$

用  $v_2 = v_1 + \Delta v$  代入式 (1) 和式 (3) 求取 5 号轴运动的角度和速度.

### 3.2 跟踪效果

图 5 显示了当目标静止、质心偏离图像中心点时系统的跟踪过程. 目标初始位置为  $u = 274, v = 51$ , 图像平面的中心点坐标为  $u_0 = 160, v_0 = 120$ , 因此, 图像初始误差为  $\Delta u = 114, \Delta v = -69$ , 目标距离中心点的直线位置误差为  $e = 133.3$ . 系统在第 19 个采样周期后达到稳定,  $e = 5.66 < 133.3 \times 5\%$ , 也就是说, 系统的调节时间为  $19 \times 40 = 760\text{ms}$ , 即  $0.76\text{s}$ . 由图 5 可以看出,  $u$  方向的控制存在超调 (超调量为  $20.2\%$ ) 和一次振荡,  $v$  方向的控制存在超调 (超调量为  $31.9\%$ ), 但无振荡.

Fig. 5 Tracking performance when the target is static

图 6 显示了目标处于运动状态时系统的跟踪过程. 当  $e \neq 0$  时, 手腕的两轴不断调整, 直至  $e \rightarrow 0$ .

机  
器  
人  
编  
辑  
部

图 6 目标运动时的跟踪效果

Fig. 6 Tracking performance when the target is moving

(a) 采取  $\Delta \alpha = 0.75 \times \Delta \alpha$  的跟踪效果

(b) 采取  $\Delta \alpha = 0.75 \times \alpha, \Delta \theta = 0.85 \times \Delta \theta$  的跟踪效果

图 7 参数调整时系统的跟踪效果

Fig. 7 Tracking performance when parameters are adjusted

## 4 跟踪品质的提高 (Tracking performance enhancement)

### 4.1 消除振荡和减小超调量

从上述控制结果可以看出,  $u$  方向的振荡和  $v$  方向的超调量是需要解决的问题. 对于这两个问题, 可以用减小增益  $K$  的方法来解决. 图 7(a) 为取  $\Delta \alpha =$

$0.75 \times \Delta\alpha$  的跟踪结果. 不难看出,  $u$  方向的振荡几乎完全消除,  $v$  方向的超调量降为 25.7%, 调节时间降为 0.52s. 图 7(b) 为取  $\Delta\theta = 0.85 \times \Delta\theta$  的跟踪结果.  $v$  方向的超调量下降为 12.7%, 但调节时间有所延长, 为 0.64s.

#### 4.2 图像坐标跳动的处理

目标静止时, 在图像处理正常的情况下, 输出的坐标  $(u, v)$  变化一般在  $\pm 2$  个像素以内. 由于系统作为跟踪系统, 其反应速度很快,  $\pm 2$  个像素的快速跳动会导致系统较高频率的抖动, 影响系统的使用安全. 为解决此问题, 我们在平衡点处设置了一个长和宽各为 5 个像素的死区, 在快速性损失较小的情况下, 有效地解决了抖动问题.

图像坐标还有另外一种范围更大的跳动, 是指当目标从一处运动到另一处停止时, 由于光照变化等原因, 目标质心坐标值会发生较大的波动, 一般为 10~20 个像素. 这种波动会导致轴的小范围内的周期性振荡, 见图 8. 当目标静止时质心坐标值跳动导致轴的振荡

Fig. 8 The axis's oscillation induced by the coordinate swing of the centroid when the target is static

图 9 滤波后轴保持静止

Fig. 9 The axis keeps stationary after filtering

为解决该问题, 我们采用了一种滤波方法. 该方法以当前时刻的图像平面坐标值和前 3 个时刻的图像平面坐标值的平均值替代当前坐标值, 和图像中心坐标进行比较, 作为判断目标是否移动出死区的

依据. 而当目标移动出死区后, 则仍利用当前坐标值对跟踪所需的转角和速度进行计算. 以 4 号轴为例: 以  $\bar{u} = (u_3 + u_4 + u_1 + u_2) / 4$  和  $u_0$  进行比较, 如果超出死区边界, 则按式 (4)、(5) 求取控制指令, 效果如图 8. 很明显, 滤波后的像素值变化较为平缓, 均落在以  $u_0 = 160 \pm 5$  区域内, 系统不再振荡. 采用进一步夸大死区的方法也可以解决该问题, 但这会使系统对真实的目标运动的响应大大延迟, 而上述滤波方法则能兼顾二者.

## 5 结论 (Conclusion)

本文介绍了一种视觉伺服机器人系统的结构, 提出了一种跟踪算法, 实现了对平面运动目标的跟踪, 并对提高跟踪品质问题进行了讨论. 该跟踪系统能实现对运动速度不大于 0.3 m/s 的目标进行实时跟踪. 下一步的工作将在提高最大跟踪速度; 解决当目标离开摄像机视野时所应采取的方式, 以及当监控范围进一步扩大, 5 个轴必须同时用于视觉跟踪时所应采用的协调策略等方面开展研究.

## 参考文献 (References)

- [1] Suh H, Kim T W, Heu S, et al. Visual servoing by a fuzzy reasoning method[A]. Proceedings of the IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems[C]. Osaka, Japan: IEEE, 1991, vol. 1. 111 - 116.
- [2] Maru N, Kase H, Yamada S, et al. Manipulator control by visual servoing with the stereo vision[A]. Proceedings of the 1993 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System[C]. Yokohama, Japan: IEEE, 1993, vol. 3. 1866 - 1870.
- [3] Maniere E C, Couvignou P, Khosla P K. Robotic contour following based on visual servoing[A]. Proceedings of the 1993 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System[C]. Yokohama, Japan: IEEE, 1993, vol. 2. 716 - 722.
- [4] Malis E, Chaumette F, Boudet S.  $2^{1/2}$  D visual servoing[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1999, 15(2): 238 - 250.
- [5] Senoo T, Namiki A, Ishikawa M. High-speed batting using a multi-jointed manipulator[A]. Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. New Orleans, LA: IEEE, 2004. 1191 - 1196.
- [6] Piepmeyer J A, McMurray G V, Lipkin H. Uncalibrated dynamic visual servoing[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2004, 20(1): 143 - 147.
- [7] Cindy X, Collange F, et al. Object tracking with a pan-tilt-zoom camera: application to car driving assistance[A]. Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. Seoul, Korea: IEEE, 2001, vol. 2. 1653 - 1658.
- [8] 杜欣. 五自由度视觉平台伺服控制研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2004.

## 作者简介:

汪建华 (1974-), 男, 博士生. 研究领域: 机器人控制.

赵晓光 (1970-), 女, 博士, 副研究员. 研究领域: 机器人控制, 图像处理.

谭民 (1962-), 男, 博导, 研究员. 研究领域: 机器人控制, 系统可靠性理论及其应用, 故障诊断与容错技术.