

大范围视觉伺服方法在空间机器人上的应用

张国亮, 王捷, 刘宏

(哈尔滨工业大学机器人技术与系统国家重点实验室, 150080, 哈尔滨)

摘要: 为了克服人工维护卫星危险性高及成本昂贵等种种弊端,采用在卫星主体上安装一个空间机械臂、臂的末端安装单目摄像机的方法,无需远程遥控操作控制,即可利用手眼视觉控制机械臂完成卫星的自我维护. 在传统的基于位置的视觉伺服(PBVS)与基于图像的视觉伺服(IBVS)基础上,提出一种复合视觉伺服控制方法,通过在线估计目标的深度和旋转姿态来选择 PBVS 和 IBVS 控制器. 该方法既具有两种伺服方法各自的优点,又保证了图像空间与笛卡尔空间轨迹的可控性. 大范围运动(尤其是涉及到旋转伺服)时选择 PBVS 控制器,小范围运动时则使用 IBVS 控制器,从而实现了空间机器人的大范围完全自主视觉伺服控制. 针对空间环境的特殊性,设计并实现了一种合作目标识别方法,确保了伺服系统能够在复杂的环境下快速稳定地提取伺服特征. 实验结果表明,该方法在进行大范围视觉伺服时,伺服定位准确,对采样和标定误差具有鲁棒性.

关键词: 空间机器人;视觉伺服;目标识别;伺服控制

中图分类号: TP242.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)01-0085-05

Wide Range Visual Servo Method Applied to Space Robot

ZHANG Guoliang, WANG Jie, LIU Hong

(State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: To overcome the high risk and cost of manned satellite servicing, a space robot arm is fixed on satellite body and a monocular camera is mounted on the arm to realize vision based satellite self servicing instead of teleoperation. A new hybrid switching visual servo control is proposed following on-line calculation of object depth and pose to select PBVS or IBVS. By integrating some advantages of both methods, the trajectories of image and Cartesian space are controllable simultaneously. For wide range servo movement, especially rotation movement, PBVS is adopted, and for short distance servo movement IBVS is adopted. Thus, space robot of auto visual servo is realized in wide range. Taking account of space environment, cooperative object recognition has been designed and implemented. Therefore, servo features can be obtained quickly and stably in complex circumstances. Simulation and real experimental results demonstrate this approach is positioning accurate and robust for the measurements and the calibration errors as dealing with wide range visual servo.

Keywords: space robot; visual servo; object recognition; servo control

利用空间机器人代替宇航员对卫星进行维护,可以有效地解决人工维护卫星风险性大和成本高的问题.但是,传统的空间机器人技术都是采用遥控操作方法实现的,其通讯时延直接影响了系统的透明性

和稳定性^[1].因此,如何减小和克服时延对空间机器人操作的影响,成为空间机器人控制中的关键性问题.视觉伺服方法由于能够切断遥控操作通讯时延,使空间机器人具有自主操作的能力,因此受到了国内

外学者的广泛关注. 目前, 各种视觉伺服方法在空间机器人上已有一些成功的应用, 如文献[2]在地面模型化的场景内, 利用视觉信息实现了基于视觉行为的自由漂浮卫星的捕获, 文献[3]在 6~7 s 的时延条件下, 依靠视觉和力觉辅助信息, 完成了在 ETS-VII 卫星上的直接双向遥操作实验.

考虑到空间环境和任务的特殊性, 本文在卫星主体上安装一个空间机械臂, 将单目摄像机安装在机械臂的末端, 利用手眼视觉控制机械臂完成卫星的自我维护, 无需远程遥操作控制, 利用视觉信息, 通过一种复合视觉伺服控制方法, 在空间机器人地面模拟平台上实现了大范围伺服控制.

1 问题的提出

依据误差控制信号的不同, 机器人视觉伺服可分为基于位置的视觉伺服(PBVS)和基于图像的视觉伺服(IBVS). PBVS 由于能够在笛卡尔空间产生一个梯度控制率, 因此该方法在笛卡尔空间的路径是最短的, 能较好地处理大范围的运动. 但是, 这种方法对于标定误差不具有鲁棒性, 因此受标定误差影响较大, 而且 PBVS 需要实现从二维空间到三维空间的估计, 由于误差的因素, 物体相对于摄像机的估计很难做到精确, 这在执行较精细的任务时是不可行的. 与 PBVS 相比, IBVS 方法的优点是计算量小, 且对标定和图像噪声鲁棒. 对于 IBVS 方法, 图像空间虽然能保证最短路径, 但是由于缺乏笛卡尔空间的直接控制, 在处理大范围或旋转伺服时, 会发生诸如摄像机退化的笛卡尔轨迹偏移现象^[4], 而且在大范围伺服运动时, 由于识别物体在视场范围内可用像素很少, 较小的采样误差就会造成很大的伺服偏移.

两种视觉伺服方法各具特点, 却都有不足, 因此, 如何实现稳定的高精度大范围视觉伺服成为目前机器人视觉伺服领域的难题. 最近, 一些学者将控制领域中的复合动态系统方法引入视觉伺服系统, 较好地实现了伺服性能上的平衡. 这种方法通过一定的切换决策准则建立一个监督控制器, 在多个连续的子系统间进行切换, 每一个子系统只负责完成有限的任务. 例如, Hutchinson 等人^[5]采用系统工程领域中的多属性通用分析方法进行了子控制器的选择, 但是这种方法需要首先离线对系统参数进行预估, 并不适合于完全实时操作的场合. Chesi^[6]则将摄像机运动的各个旋量全部分解, 分别建立了移动、旋转、沿光轴退化的子控制器, 但是这需要频繁

地在多个控制器之间进行切换, 可能会导致整个系统不稳定, 且收敛时间很长. 考虑到空间机器人要求稳定精确地操作, 本文提出一种根据在线估计的目标深度和旋转姿态来选择 PBVS 和 IBVS 控制器的方法: 大范围运动(尤其是涉及到旋转伺服)时选择 PBVS 控制器, 小范围运动时则使用 IBVS 控制器, 从而实现了空间机器人的大范围完全自主视觉伺服控制.

2 目标识别

目标物体识别是计算机视觉领域中最早研究的内容, 也是难点之一. 一般而言, 摄像机内部参数的变化、位姿的改变甚至光照的细微变动都可能对识别造成困难. 因此, 为实现在复杂环境中鲁棒和惟一地提取伺服特征, 本文设计并实现了一种合作目标识别方法. 图 1 显示了该识别算法的管道数据流程.

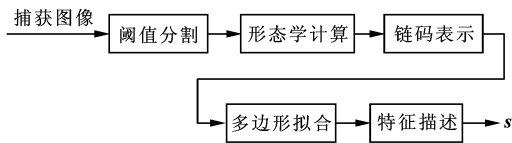


图1 目标识别流程

对于摄像机采集到的每幅图像, 首先进行阈值分割, 将灰度图像转换为二值图像, 再将转化后的二值图像进行形态学处理, 可得到物体的边缘图像, 如图 2 所示. 然后, 用链码对分割出的边缘进行编码表示, 从而使计算机能够充分利用所获得的分割结果.

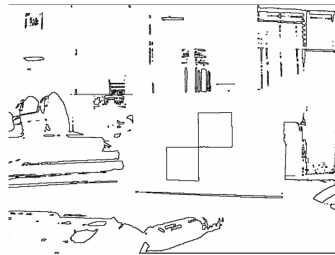


图2 图像边缘提取结果

链码的特点是利用一系列具有特定长度和方向的相连的直线段来表示目标的边界, 它可以大大减少边界所需的数据量. 由于传统的链码表示不具备边缘旋转不变性, 为解决这个问题, 本文采用链码的一阶差分来重新构造链码序列, 这相当于对链码进行旋转归一化. 得到轮廓的链码表达后, 应用形状匹配的方法对链码表示的轮廓进行分析, 从而最终找出合作目标. 为简化输出数据的处理, 本文采用多边

形拟合的形状匹配方法,也就是用一系列轮廓点组成的多边形去近似地逼近原始轮廓数据点列.采用 Douglas 等人^[7]提出的 DP 算法进行多边形拟合,当拟合出的多边形满足如下 3 个条件时,即认为这个多边形为所需要识别的合作目标:①多边形为平行四边形;②多边形的面积满足一定的大小;③在满足以上 2 个条件的多边形中,有 2 个多边形的顶点间的距离在 12 像素以内,且这 2 个多边形的面积几乎相等.

找到合作目标后,多边形的顶点即为所求的伺服控制点.图 3 为在一个复杂环境内的特征提取结果,图中棋盘格为合作目标,标签上用数字标示的点即为提取出的伺服控制点.

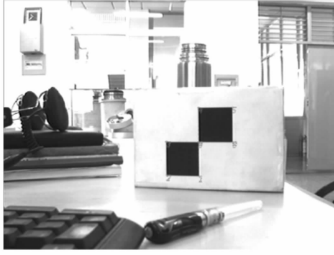


图 3 图像特征提取结果

3 视觉伺服控制

3.1 PBVS 位姿估计

为估计出合作目标相对于相机的位姿,需要预先对视觉系统进行标定,本文使用 Tsai 提出的基于 RAC 的摄像机内参数标定方法^[8]和 Shiu 提出的手眼标定方法^[9].取得标定结果后,将世界坐标系的原点定在合作目标的“0”点上, x 轴和 y 轴建立在合作目标所在的平面上, z 轴垂直于合作目标平面.这样便可知合作目标上 7 个控制点在世界坐标系中的坐标 $(x_0, \dots, x_6)$ 及其对应的图像点在像平面中的坐标 $(u_0, \dots, u_6)$,摄像机内参数矩阵 $\mathbf{K}$ 由标定方法获得,因此可以计算出合作目标相对于摄像机坐标系的姿态和位置 $[\mathbf{R} \ \mathbf{T}]$,其中 $\mathbf{R}$ 是旋转矩阵,表示合作目标的姿态, $\mathbf{T}$ 是平移矢量,表示合作目标的位置.

由于世界坐标系原点定在合作目标的“0”点,此时深度 z 为 0, $[\mathbf{R} \ \mathbf{T}]$ 可由下式经数值计算获得

$$\mathbf{s} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = [\mathbf{r}_1 \ \mathbf{r}_2 \ \mathbf{t}] \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$ 为 $\mathbf{R}$ 的第 1 列和第 2 列分量; x, y, u, v 为已知量.因为有 7 个控制点,利用直接线性变换(DLT)方法可以得到一组初始解,然后利用最小二

乘法进行数值优化,即可得到期望的数值解 $[\mathbf{R} \ \mathbf{T}]$.

3.2 IBVS 伺服控制

IBVS 的控制目标是使选择的图像特征值 $\mathbf{s}$ 最终到达期望的特征值 $\mathbf{s}^*$.在本文中, $\mathbf{s}$ 由提取到的伺服控制点组成, $\mathbf{s}^*$ 根据离线学习提取.为实现从期望的图像特征变换到期望的摄像机运动的映射,需要建立图像雅可比矩阵 $\mathbf{J}_s$,

$$\dot{\mathbf{s}} = \frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \mathbf{r}} \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \mathbf{J}_s \mathbf{T} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{T} = d\mathbf{r}/dt$ 表示摄像机的速度旋量; $\dot{\mathbf{s}}$ 表示图像特征速度.在单位焦距长度下,利用经典的小孔透射模型, $\mathbf{J}_s$ 可以直接表示成下式

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1/z & 0 & x/z & xy & -(1+x^2) & y \\ 0 & -1/z & y/z & 1+y^2 & -xy & -x \end{bmatrix} \mathbf{T} \quad (3)$$

式中: x, y 表示图像特征点 $\mathbf{s}$ 的坐标; z 表示特征点到相机坐标系的深度.

为了克服图像噪声以及深度估计误差的影响,利用冗余特征对图像雅可比矩阵进行重构.取 m 个特征点对式(3)进行叠加,建立扩展图像雅可比矩阵

$$\mathbf{J}_{ms} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_s(x_1, y_1, z_1) \\ \vdots \\ \mathbf{J}_s(x_m, y_m, z_m) \end{bmatrix} \quad (4)$$

通过结合控制算法 f 以及 $\mathbf{J}_{ms}$ 的广义伪逆矩阵 $\mathbf{J}_{ms}^+$,可以最终确定摄像机的速度

$$\mathbf{T} = f(\mathbf{J}_{ms}^+(\mathbf{s} - \mathbf{s}^*)) \quad (5)$$

3.3 复合切换视觉伺服控制

如图 4 所示,本文将 PBVS 位姿估计中获得的目標深度和旋转姿态作为动态切换 PBVS 和 IBVS 控制器的准则.由于 PBVS 控制的运动范围很大,在空间机器人关节空间进行了 3 次多项式规划,以此保证运动的平稳性.为保证 IBVS 控制器的精度及稳定性,首先对识别的特征进行敏感性校正,然后再通过一个 PI 控制器计算摄像机的速度. IBVS 视觉伺服控制框图如图 5 所示.

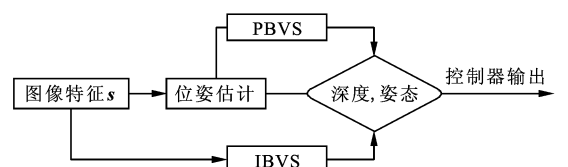


图 4 复合切换视觉伺服控制框图

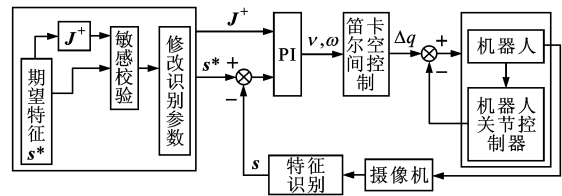


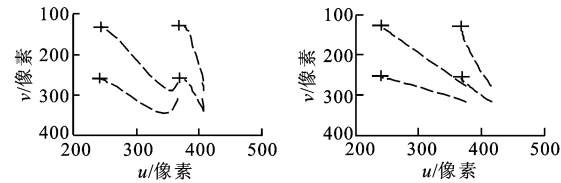
图 5 IBVS 视觉伺服控制框图

4 仿真和实验

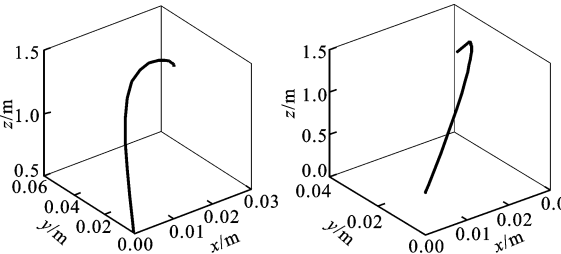
为比较经典 IBVS、PBVS 控制方法和本文提出的复合控制方法的性能,首先利用 Matlab 对这 3 种方法进行仿真实验. 视觉系统参数:视场范围为 726×576 像素;焦距为 8 mm;图像特征为边长 40 mm 的正方形的顶点;物体相对于相机的深度为 1 000 mm. 为了与真实的机器人视觉系统一致,分别加入了 2 像素的图像采样误差、2 mm 的深度误差和 3% 的摄像机内参数标定误差. 实验目标:摄像机从初始位姿 $[0\text{ mm}, 0\text{ mm}, 500\text{ mm}; 0\text{ rad}, 0\text{ rad}, 0\text{ rad}]$ 伺服运动到期望位姿 $[25\text{ mm}, 30\text{ mm}, 1\,200\text{ mm}; 0\text{ rad}, 0\text{ rad}, 0\text{ rad}]$.

图 6~图 8 分别表示 IBVS、PBVS 及本文方法在图像空间以及笛卡尔空间的运动轨迹,其中图像空间的期望特征点以“+”表示. 表 1 表示 3 种方法与理想情况下在笛卡尔空间的定位结果. 从图中可以看出:由于伺服范围很大,IBVS 方法在伺服初始阶段图像空间的实际可用像素很少,因此图像空间轨迹没有按照理想的直线轨迹运动,而是出现了一定程度的扭曲,这直接导致了笛卡尔空间轨迹的改变(见图 7a),使 IBVS 的笛卡尔空间轨迹出现了很大的冗余运动. PBVS 方法虽然在图像空间能够呈现近似直线的运动(见图 7b),在笛卡尔空间也没有过多的冗余运动,但是该方法受估计误差和标定误差的影响较大,最终的定位精度较差. 如图 8 所示,本文提出的复合切换控制方法在图像空间以及笛卡尔空间均呈现近似直线运动,即运动路径最短,且由表 1 中的数据可以看出,该方法较之 IBVS 和 PBVS 方法的定位精度有明显提高.

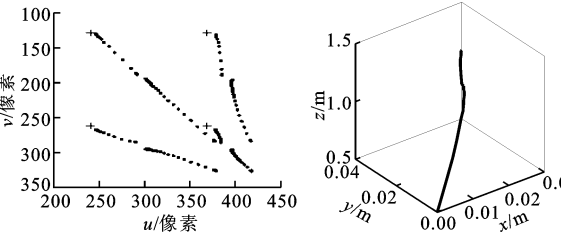
应当指出,由于仿真实验中加入的标定误差比较大,且伺服运动主要集中在深度方向上,所以 3 种方法在深度方向的定位均不十分理想,虽然 IBVS 和本文提出的方法对于采样和标定噪声具有一定的抑制能力,但是最终只能伺服定位到目标附近位置,因此为确保足够的伺服精度,需要将标定误差控制在 1% 以内.



(a)IBVS 的轨迹 (b)PBVS 的轨迹
图 6 IBVS 和 PBVS 的图像空间轨迹



(a)IBVS 的轨迹 (b)PBVS 的轨迹
图 7 IBVS 和 PBVS 的笛卡尔空间轨迹



(a)图像空间轨迹 (b)笛卡尔空间轨迹
图 8 复合控制的图像空间和笛卡尔空间轨迹

表 1 笛卡尔空间定位结果

方法	定位结果
理想情况	(25 mm, 30 mm, 1 200 mm; 0 rad, 0 rad, 0 rad)
IBVS	(25.9 mm, 41 mm, 1 210.4 mm; 0 rad, 0 rad, 0 rad)
PBVS	(20.7 mm, 23.9 mm, 1 087.4 mm; 0 rad, 0 rad, 0 rad)
复合控制	(26.2 mm, 33.4 mm, 1 205.0 mm; 0 rad, 0 rad, 0 rad)

根据本文提出的方法,利用哈尔滨工业大学中德空间机器人技术联合实验室研制的卫星自维护系统空间机械臂,进行了探针插入实验. 该机械臂具有可折叠构型,配合单目手眼视觉,可确保大范围的视觉伺服. 视觉系统参数与仿真实验的定义相同,探针直径为 6 mm,长为 200 mm,工件孔径为 8 mm,初始时刻探针尖端距工件 803.6 mm,工件距相机 1 050 mm,探针相对于工件的 X 轴的姿态为 4° . 图 9 分别显示了探针在初始、接近和插入时刻的位置.

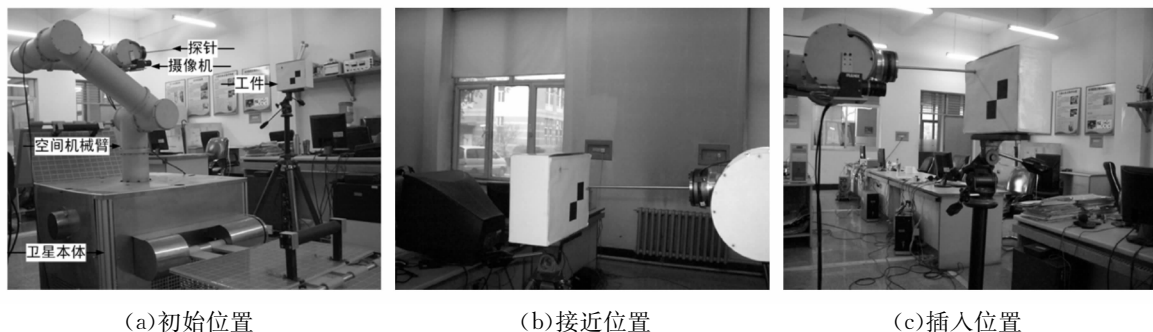


图9 空间机械臂探针插入过程

从图中可以看出,采用本文方法实现了空间机器人的大范围精密视觉伺服。

5 结 论

本文基于合作目标识别方法,采用一种综合IBVS和PBVS方法各自优点的复合伺服控制策略,在空间机器人地面模拟平台上实现了较为精密的大范围自主视觉伺服控制。实验结果表明,大范围的视觉伺服方法解决了传统的遥操作方式受时延影响的问题,扩展了卫星自维护空间机器人的自主操作空间,增加了系统的灵活性,最大限度地提高了星载空间机器人的性能。

参考文献:

- [1] LAWRENCE D A. Stability and transparency in bilateral teleoperation [J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 1993, 9(10): 624-637.
- [2] LIU M, Jasiobedzki P. Behavior based visual servo controller for satellite capture [C]//Proceedings of the 7th ESA Workshop on Advance Space Technologies for Robotics and Automation. Noordwijk, The Netherlands: European Space Technology Committee, 2002: 119-126.
- [3] ODA M. ETS-VII: achievements, troubles and future [C]//Proceedings of the 6th International Symposium on Artificial Intelligence and Robotics & Automation in Space. Quebec, Canada: Canadian Space Agency, 2001: 18-22.

- [4] CHAUMETTE F. Potential problems of stability and convergence in image-based and position-based visual servoing [C]//Proceedings of the Conference of Visual and Control. New York, USA: Springer-Verlag, 1998: 66-78.
- [5] GANS N R, HUCHINSON S A. Multi-attribute utility analysis in choice of a vision-based root controller [C] // Proceedings of 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. New York, USA: IEEE Inc. , 2004: 355-362.
- [6] CHESI G, HASHIMOTO K, PRATTICIZZO D, et al. Keeping features in the field of view in eye-in-hand visual servoing: a switching approach [J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 2004, 20(10): 534-549.
- [7] DOUGLAS D, PEUKER T. Algorithm for reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature [J]. Cartographer, 1973, 10(2): 112-122.
- [8] TSAI R, LENZ R. A new technique for fully autonomous and efficient 3D robotics hand/eye calibration [J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 1989, 5(3): 345-359.
- [9] SHIU Y C, AHMAD S. Calibration of wrist-mounted robotic sensors by solving homogeneous transform equations of the form $AX=XB$ [J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 1989, 5(1): 16-27.

(编辑 葛赵青)