基于视觉的机械臂空间目标抓取策略研究

李宇飞*, 高朝辉, 申麟

中国运载火箭技术研究院研究发展中心, 北京 100076

* E-mail: 39149245@qq.com

收稿日期: 2014-09-09; 接受日期: 2014-11-04

摘要 空间非合作目标的探测和抓取是空间机械臂的重要应用目标, 为了解决空间目标的位姿测量和捕获问题, 本文深入分析了机械臂特性和目标特性, 在建立机械臂、相机和目标运动关系的基础上, 基于立体视觉实现了对空间目标的位姿测量, 控制机械臂进行抓取预定位. 考虑立体相机的测量误差和机械臂的控制精度因素, 在抓取末阶段采用单目相机, 基于图像的视觉伺服策略控制机械臂进行精确位姿调整对目标进行抓取. 通过机械臂对空间目标的抓取实验验证了该抓取策略的有效性.

关键词

非合作目标
空间机械臂
立体视觉
视觉伺服

1 引言

目前, 世界各国发射了各式各样的航天器, 如卫星、航天飞机、空间站以及太空探测器等^[1,2], 同时产生了大量的空间碎片和太空垃圾, 对这些航天器的在轨维护和空间碎片回收就成为必不可少的工作. 空间机械臂是完成此任务的重要工具, 不仅可节约新航天器的发射成本, 亦可提高航天器的工作能力和效率. 报废的航天器以及一些太空碎片在空中飘浮, 给处于正常运行的航天器造成很大威胁, 利用空间机械臂将其回收使其脱离轨道, 可有效地保护航天器, 具有重要的应用价值. 其中抓取空间目标是空间机械臂在执行各种任务当中非常关键的环节, 它涉及到空间机械臂的运动学、动力学、轨迹与碰撞前构型规划、碰撞及控制等方面的问题^[3,4]. 国内目前在这方面的研究与发达国家还有一定的差距, 而我国高速发展的航天事业也急需这方面的研究成果.

与此同时, 为了模拟空间机械臂的运动状况和验证其相关关键技术, 也出现了多种地面模拟平

台^[5,6]. 国内外学者也对机械臂的空间目标跟踪和抓取的目标探测、路径规划和运动控制进行了相关研究^[7,8]. 本文对采用双目视觉下的机械臂抓取系统研究, 可以对非合作目标在复杂背景下的双目视觉算法、多自由度机械臂操作及其相关技术进行验证, 为空间机械臂目标抓取作业提供理论基础, 具有重要的研究意义.

2 目标抓取系统数学模型

2.1 机械臂运动学模型

该机械臂采用串联型手臂结构(图 1), 分为转动、摆动、摆动、转动、摆动和转动关节, 共有六个自由度, 全部关节皆为转动型关节. 关节型机械臂的特点是结构紧凑, 所占空间体积小, 相对的工作空间较大, 是机械臂使用最多的一种结构, 可以到达工作空间的任一位置和姿态. 机械臂的运动学模型包括正运动学和逆运动学模型, 其中正运动学采用 DH 方法进

引用格式: 李宇飞, 高朝辉, 申麟. 基于视觉的机械臂空间目标抓取策略研究. 中国科学: 技术科学, 2015, 45: 31–35

Li Y F, Gao Z H, Shen L. Study of vision-based space target capturing strategy for manipulators (in Chinese). Sci Sin Tech, 2015, 45: 31–35, doi: 10.1360/N092014-00320

行计算. 机械臂相邻两连杆之间的变换矩阵为

$${}^{i-1}T_i = \text{Rot}(Z, \theta_i) \text{Trans}(Z, d_i) \text{Trans}(X, a_i) \text{Rot}(X, \alpha_i), (1)$$

其中, ${}^{i-1}T_i$ 为关节 i 到关节 $i-1$ 的转换矩阵. 这样可得到机械臂手爪到机械臂坐标系的位姿矩阵

$$T = {}^1T_0 {}^2T_1 {}^3T_2 {}^4T_3 {}^5T_4 {}^6T_5 {}^7T_6. (2)$$

对于机械臂的逆运动学, 本文采用几何法和解析法相结合的方法进行求解. 机械臂的前三个关节采用几何投影的方法得到, 后三个关节根据矩阵对应元素相等的原则用解析法得到, 这里不再赘述.

2.2 抓取系统空间位姿关系

抓取系统如图 1 所示, 其中, (x_0, y_0, z_0) 为基础坐标系, 建立在机械臂的安装基座上; (x_1, y_1, z_1) 为机械臂坐标系, 建立在机械臂的第 1 关节上; (x_h, y_h, z_h) 为机械臂的末端手爪坐标系, 建立在机械臂的手爪上; (x_s, y_s, z_s) 为相机坐标系, 建立在双目相机的左相机上.

机械臂进行目标抓取作业, 必须标定或者确定以下几个坐标系的相互转换矩阵:

1) 机械臂和基础坐标系转换矩阵 T_{01} : 由于机械臂的安装基座是严格按照机械尺寸加工和装配的, 该矩阵可根据安装图得到.

2) 相机坐标系和基础坐标系转换矩阵 T_{0s} : 由于相机的安装尺寸不确定, 况且相机的光心是不能确定的, 该矩阵必须经过标定得到.

图 1 目标抓取系统示意图

3) 机械臂手爪坐标系和机械臂坐标系转换矩阵 T_{h1} : 该矩阵可根据机械臂的安装尺寸得到.

系统其他的坐标变换可根据以上 3 个坐标转换矩阵得到.

3 目标位姿的立体相机测量

3.1 立体视觉算法流程

采用立体视觉测量目标物体的空间位置和姿态, 视觉处理算法的具体流程描述如下:

- 1) 从左右相机中分别捕捉当前两帧图像;
 - 2) 在“块视差计算”单元模块中, 系统矫正捕捉的左右相机畸变图像; 将校正左右相机的中心使其对齐到同一条图像水平线上, 然后结合块匹配技术 Block Matching, 粗略计算左右图像的视差图;
 - 3) 利用视差图初始计算目标物体的三维景深, 并反演到二维图像平面上, 给出目标物体在左右图像中的估计范围;
 - 4) 在左右图像的估计范围中提取目标轮廓特征, 开始目标椭圆特征的轮廓跟踪:
 - (1) 采用 LMS 提取轮廓代表的椭圆参数特征;
 - (2) 基于椭圆参数, 在水平方向上寻找左右椭圆的对应点(精确到亚像素级);
 - (3) 计算对应点的视差;
 - (4) 根据视差进一步得到目标圆的三维边界点云的空间分布情况;
 - (5) 采用 RanSac 算法拟合点云对应的平面, 计算平面法向量及点云中心位置.
- 存储数据点云重心及平面法向量数值, 跟踪计数器递增 1, 返回到第 4 步, 当达到给定级数值阈值下, 即可得到目标在相机坐标系下的位姿(图 2).

3.2 基础坐标系下的目标空间位姿计算

在双目相机得到目标的位置和姿态后, 必须转化到基础坐标系下的位姿数据, 机械臂才能进行目标抓取. 设相机和基础坐标系的转换矩阵为 $T_{0s} = [R_c, T_c]$, 其中 R_c 为旋转矩阵, T_c 为平移矩阵. $[R_t, T_t]$ 为双目相机测得的目标位置和姿态, 其中 T_t 为目标的位置向量, R_t 为目标的姿态法向量. 那么可以得到目标在基础坐标系下的位姿

$$[R, T] = [R_c, T_c][R_t, T_t]. (3)$$

图 2 (网络版彩图)目标的圆边界三维分布图

其中 T 为目标的位置向量, R 为目标的姿态法向量. R 作为姿态法向量不能用于机械臂的操作指令, 需要转化成目标的姿态角度. 这里采用等效轴角度坐标表示法进行姿态角度计算如图 3 所示.

基础坐标系首先绕等效轴 K 旋转 θ , 然后绕 Z 轴旋转 α 即可得到目标的姿态矩阵 R_o :

$$[R_o] = \text{rot}(K, \theta) \text{rot}(Z, \alpha) = \begin{bmatrix} k_x k_x v \theta + \cos \theta & k_x k_y v \theta - k_z \sin \theta & k_x k_z v \theta + k_y \sin \theta \\ k_x k_y v \theta + k_z \sin \theta & k_y k_y v \theta + \cos \theta & k_y k_z v \theta - k_x \sin \theta \\ k_x k_z v \theta - k_y \sin \theta & k_y k_z v \theta + k_x \sin \theta & k_z k_z v \theta + \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中, $v \theta = 1 - \cos \theta$, $[k_x, k_y, k_z]$ 为旋转轴的 3 个分量, 可以根据 R_o 求得. 这样可得到目标在基础坐标系的姿态矩阵.

4 基于手眼相机的手爪抓取策略

通过分析和实验, 采用立体视觉对目标进行位姿测量的误差较大. 而对于空间目标的抓取, 其要求的位置和姿态测量精度要满足手爪范围和机械臂的运动精度要求. 只采用双目相机难以满足要求, 因此本文采用双目+单目的目标抓取策略.

图 3 目标姿态计算坐标系简图

单目视觉算法可采用基于位置和图像的两视觉伺服算法. 相比而言, 基于图像的视觉伺服算法更具有优势, 它不依赖于单目相机的内部参数和外部参数标定结果. 这里采用无标定基于图像的位置姿态调整算法进行手爪位姿调整, 进行目标抓取. 相机安装在手爪的固定位置, 随着手爪末端的轨迹运动, 目标在图像平面内是一椭圆(图 4). 其中, 椭圆角度倾角 θ 与当前图像平面机械臂手爪的 X 轴旋转角度决定, 椭圆的中心位置 (x_0, y_0) 与当前图像平面机械臂手爪的 Y 轴方位决定.

基于图像的机械臂位姿控制策略如图 5 所示. 在空间的圆调整可首先在平面内绕 X' 轴旋转到零角度平面, 然后沿手爪的 Y 轴移动到平面中心, 然后绕

图 4 (网络版彩图)手眼相机及目标图像

图5 基于图像的机械臂位姿控制策略

Y' 轴旋转转到零角度平面, 然后沿手爪的 X 轴移动到平面中心, 这样可以使图像平面完全对正目标, 完成机械臂的位置和姿态调整, 从而可进行目标抓取。

5 实验

5.1 实验系统介绍

该实验系统采用图6的设计方案, 共包括双目视觉系统、六自由度机械臂、手爪系统和目标模拟系统4部分。其中双目 CCD 相机测量目标的位置和姿态,

图6 (网络版彩图)实验系统总体设计方案

图7 立体视觉系统的距离检测精度

图8 (网络版彩图)目标抓取实验

机械臂系统进行手爪定位, 手爪系统包括位置检测和目标抓取部分, 目标模拟系统包括安装支架和目标。

5.2 实验结果

图7给出了立体视觉系统的测距精度, 可以看出在 1 m 范围内, 以 640×480 分辨率的立体视觉系统的深度检测误差能够控制在 1 cm 以内, 可以满足机械臂抓取的粗定位要求。

机械臂对空间目标的抓取实验包括2个方面。首先机械臂运动到初始位置, 开启立体相机对目标进行位姿检测; 然后在目标停止运动后, 机械臂运动到目标的抓取位置, 开启单目相机, 完成机械臂对目标的抓取, 抓取实验如图8所示。

在实验中, 设定目标始终处于立体相机的视场内。可以看出机械臂能够抓取到目标, 满足抓取精度要求, 从而验证了机械臂算法、双目视觉算法和手眼姿态调整算法的正确性。

6 结论

本文针对机械臂对空间非合作目标的抓取技术进行了研究, 包括机械臂算法、双目视觉算法和单目视觉算法。采用双目+单目的视觉抓取策略, 能够保证机械臂抓取到空间目标, 验证了该方法的有效性, 对空间机械臂的非合作目标探测和抓取有重要的借鉴意义。

参考文献

- 1 Yoshida K. Engineering test satellite VII flight experiments for space robot dynamics and control: theories on laboratory test beds ten years ago, now in orbit. *Int J Robot Res*, 2003, 22: 321–335
- 2 Whelan D A, Adler E A, Wilson S B, et al. DARPA Orbital Express program: Effecting a revolution in space-based systems. In: *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*. Vol 4136. SPIE, 2000. 48–56
- 3 于登云, 孙京, 马兴瑞. 空间机械臂技术及发展建议. *航天器工程*, 2007, 16: 1–9
- 4 从佩超, 孙兆伟. 空间机械臂捕获空间目标分析. *上海航天*, 2009, 4: 4–9
- 5 徐文福, 李成, 梁斌. 空间机器人捕获运动目标的协调规划与控制方法. *自动化学报*, 2009, 35: 1216–1225
- 6 史士财, 吴剑威, 崔平远. 空间机械臂全局反作用优化及其地面实验研究. *机器人*, 2009, 31: 242–248
- 7 Ge L Z, Zhao L J. Target tracking algorithm using finite-time convergence smooth second-order sliding mode controller for mobile robots. *Chin J Mech Eng*, 2011, 24: 414–419
- 8 谢箭. 不确定性空间机器人轨迹规划及智能控制方法研究. 博士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009. 10

Study of vision-based space target capturing strategy for manipulators

LI YuFei, GAO ZhaoHui & SHEN Lin

Research Center, China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China

Space non-cooperative target measuring and capturing is an important apply objective for space manipulators. To resolve the position-pose measure and capturing problem, the characters of manipulator and target are analyzed. Considering the motion relation of manipulator, camera and target, the manipulator is controlled to arrive at pre-position for capturing based on space target position using stereo vision. Because of camera measure error and manipulator control precision single camera is used at the end capturing stage. The position and pose of manipulator can be adjusted accurately by vision-based servo method. The effectiveness of the capturing strategy is verified by the space target capturing experiment results for manipulator.

non-cooperative target, space manipulator, stereo vision, vision servo

doi: 10.1360/N092014-00320