空间非合作目标特征提取与运动测量方法

胡海东*, 杜航, 王殿佑, 黄璐, 谢心如, 魏春岭

北京控制工程研究所, 北京 100094

*联系人, E-mail: haidong_2005@163.com

收稿日期: 2020-12-21; 接受日期: 2021-05-07; 网络出版日期: 2021-11-25

国家自然科学基金(编号: 61690210, 61690215)和科技创新2030-“新一代人工智能”重大项目(编号: 2018AAA0102702)资助

摘要 在轨服务空间目标通常具有“非合作”特性, 难以提取其特征并测量运动状态, 针对这一问题, 本文提出了一种空间非合作目标特征提取与运动测量方法. 首先, 对双目相机采集的目标图像进行阈值分割, 将目标对接环区域与背景环境分割开来, 采用Canny算子方法来检测星箭对接环边缘; 其次, 通过对目标边缘外形特点分析, 采用Hough变换来提取十字支架直线特征, 采用最小二乘法来拟合星箭对接环轮廓; 再次, 采用“平行等效投影”结合“极线对准”的方法, 实现汇聚式双目视觉的左右相机图像匹配; 最后, 通过对星箭对接环和十字支架特征点进行三维重建, 获取星箭对接环相对位置, 采用双矢量定姿方法来确定星箭对接环相对姿态. 地面仿真试验表明, 该算法能够有效测量星箭对接环相对位置和姿态, 在距目标1.5 m处, 相对位置精度优于15 mm, 相对姿态精度优于 1.12° . 本文的研究能够实现非合作目标对接环相对位置和姿态的精确测量, 为空间非合作目标抓捕、维修、加注、模块更换、轨道转移等在轨服务任务提供测量基础和重要支撑, 具有重要实际应用价值.

关键词 空间非合作目标, 特征提取, 运动测量

PACS: 42.30.Sy, 06.30.Gv, 60.60.Sx

1 引言

太空中有大量航天器在轨运行, 承担着通信、气象、探测和导航等任务, 这些航天器与我们生活密切相关, 对人类社会进步和科技发展起着重要作用. 航天器经过长时间运行, 其器件容易老化并发生故障, 同时, 随着技术的进步, 在轨航天器的关键部件也需要升级换代, 目前只能通过发射新的航天器, 替代旧的故障航天器来实现上述目标. 这会导致航天成本大幅增加, 降低航天器的使用寿命, 同时旧卫星上有多

个部件可以正常运行, 却不得不放弃掉, 也造成了巨大的浪费.

针对这一问题, 需要开展航天器在轨服务和维护研究, 通过空间机器人对故障航天器进行在轨维修和模块更换, 实现航天器的故障修复和模块升级. 同时, 空间机器人也可以对航天器开展在轨加注、在轨组装等任务. 航天器在轨服务和维护可以有效延长在轨航天器的使用寿命, 降低航天发射和运行成本, 对航天事业发展具有重要意义^[1].

在轨维修任务中, 空间机器人为了完成对目标航

引用格式: 胡海东, 杜航, 王殿佑, 等. 空间非合作目标特征提取与运动测量方法. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2022, 52: 214513
Hu H D, Du H, Wang D Y, et al. Feature-extraction and motion-measurement method for noncooperative space targets (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2022, 52: 214513, doi: [10.1360/SSPMA-2020-0471](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0471)

天器的接近操作、模块更换、在轨加注等任务^[2], 必须先确保能够正确识别空间待维修航天器, 并精确确定其运动状态. 而轨道上的绝大多数待维修航天器都是无应答、无标识、无配合甚至没有任何先验信息的“非合作目标”, 因此, 获取非合作目标的相对运动状态, 是空间机器人在轨维修的前提和基础.

目前, 空间机器人对目标航天器进行识别主要采用视觉测量的方法, 通过光学相机和激光扫描等视觉敏感器, 获取目标航天器操作部件的表面纹理、几何外形等信息, 通过对这些信息进行特征提取, 并与模型库进行比对来识别目标, 测量目标航天器的相对运动状态, 为接近控制与抓捕操作提供测量信息.

对非合作目标的相对测量方法主要有基于单目视觉的测量方法、基于激光点云视觉的测量方法和基于双目视觉的测量方法.

在基于单目视觉的测量研究中, 文献[3]提出了一种基于POSIT和SIFT匹配的单目相对测量方法, 根据已有的目标外形结构信息, 采用手动标识对目标参考图像的二维图像特征点进行标识, 结合POSIT方法对参考图像中的目标进行位姿解算, 然后, 采用SIFT特征提取方法提取参考图像目标特征点和待求解图像的目标特征点, 并进行特征点匹配, 获取待求解图像上特征点在目标本体坐标系的位置, 进而应用POSIT方法解算出待求解图像中目标的相对位姿, 文献[4-7]也采用了类似的方法来实现非合作目标的单目视觉测量. 但是, 基于单目视觉测量具有一定的局限性, 必须已知目标的外形结构信息(如目标帆板尺寸、星箭对接环半径等)才能进行解算, 而在实际空间应用中, 并不知道目标的外形结构或者目标外形发生了改变, 这都导致单目测量的应有范围较小. 文献[8]基于单目视觉对非合作目标固有特征进行提取, 再采用扩展卡尔曼滤波方法实现了对非合作目标相对位置、姿态等运动状态确定.

文献[9]研究了基于激光扫描仪的识别算法. 首先给出一种简单的非合作航天器相对姿态确定算法, 得到通用的坐标转换矩阵表示的相对姿态, 并由激光扫描仪的信息得到相对位置. 然后采用最小二乘法, 得到对接环外端框所成图像的椭圆参数. 根据相对位姿和椭圆参数, 提出对接环识别算法. 文献[10]针对非合作航天器的对接环识别问题, 研究了基于激光扫描仪的识别算法, 通过激光扫描仪来获取目标的相对位置.

以上方法主要通过激光扫描仪结合对目标进行测量. 激光扫描仪会增加目标测量的成本, 同时, 空间目标表面有比较光滑的部件, 激光照射到这些光滑部件时, 会发生镜面反射, 呈现出“飞点”现象, 导致激光接收器无法接收到反射回来的信号, 激光扫描仪会认为这些空间点的距离是无限远, 容易导致误测量.

为了解决单目测量要求已知目标外形结构信息和激光的“飞点”问题, 许多学者采用双目视觉来对非合作目标进行测量. 文献[11]采用平行双目相机配置, 通过对图像特征点进行匹配与跟踪, 并利用视差法原理可实现对目标特征点的三维跟踪, 进而获得目标特征点在各时刻的三维坐标, 实现目标表面模型重构. 文献[12]采用平行双目对矩形和圆形目标进行识别与测量, 采用目标边缘提取和双目视差方法进行双目立体匹配, 实现对目标位姿的相对测量. 文献[13]建立了平行双目相机系统精度分析模型, 分析了双目测量位姿解算误差. 文献[14]采用双目视觉方法对航天器星箭对接环法线方向和位置进行了相对测量, 并研究了基于太阳能帆板的空间目标相对位姿测量方法. 文献[15]采用平行双目视觉和直线特征交点重建方法, 实现了对非合作目标太阳帆板三角架的特征提取和测量. 文献[16]采用平行双目来识别非合作目标表面特征点, 采用导航滤波方法实现目标姿态、角速度等的估计.

目前的双目视觉研究都集中于平行双目立体视觉的研究, 平行双目由于左右相机都在同一个平面上, 容易实现左右相机的立体匹配, 重建目标表面三维点云信息, 这也是平行双目相机被广泛采用的原因. 但是平行双目视觉有其固有的缺陷: 其视场角较小, 导致其并不适用于对空间目标的测量. 原因主要有两点: 首先, 由于空间服务机器人在接近故障航天器的过程中, 采用推力器进行连续位置控制和姿态调整, 导致服务机器人平台姿态一直处于低频晃动状态, 空间目标在相机视场中一直在不断移动, 容易移出平行双目相机的小视场. 其次, 为了能够抓捕故障航天器, 要求服务机器人尽可能地接近故障航天器, 与故障航天器距离越近, 越容易实现机械臂对目标的抓捕, 平行双目视觉由于其视场角较小, 导致服务机器人不能接近故障航天器到非常近的距离, 这为抓捕操作增加了困难. 汇聚式双目视觉采用左右相机呈一定内凑角的配置方式, 增加了双目相机的视场角, 能够实现对移动

目标的跟踪抵近和近距离测量. 汇聚式双目视觉最大的困难在于其左右相机立体匹配难于实现. 由于左右相机不是平行配置, 导致其拍摄的图像在纹理和拍摄角度上都相差较大, 采用传统的视差法、SIFT等双目立体匹配方法, 无法实现左右相机的立体匹配.

本文提出了一种新的空间非合作目标特征提取与运动测量方法, 通过汇聚式双目光学相机观测提取卫星对接环外形轮廓, 采用平行投影的方式将提取的轮廓投影到等效平行相机平面上, 采用极线对准的方式实现左右相机中目标轮廓的立体匹配, 重建目标轮廓的三维坐标, 实现对目标的相对测量.

2 对接环模型与算法结构

火箭对接环的特征提取与测量主要是基于双目相机来提取对接环的外形特征, 并获取对接环的相对位置和姿态信息. 火箭对接环主要呈圆形构造, 用于火箭与卫星的对接和分离, 火箭对接环内安装有十字支架和轨控推力器, 图1为卫星表面火箭对接环模型.

本文基于这一对接环构造开展研究, 提出了一种基于双目视觉的卫星对接环特征提取与测量方法. 该方法通过对火箭对接环的外形边缘特征进行提取和识别, 来获取火箭对接环与双目相机之间的相对位姿关系, 为卫星接近控制提供导航信息.

火箭对接环特征提取与测量算法主要包括: 背景阈值分割、Canny边缘检测、Hough变换直线检测、椭圆外形最小二乘拟合、双目立体匹配、三维重建和位姿解算. 具体流程如图2所示.

图 1 (网络版彩图) 火箭对接环模型

Figure 1 (Color online) Model of satellite-rocket docking ring.

图 2 卫星对接环特征提取与运动测量流程图

Figure 2 Pipeline of feature recognition and motion measurement of satellite docking ring.

3 基于双目的对接环特征提取与测量

3.1 阈值分割

阈值分割用于将目标对接环区域与背景环境分割开来, 缩小目标特征提取和识别范围, 降低识别难度. 阈值分割具体是将所有灰度值小于(或大于)某一阈值的像素均归属于目标, 而灰度值大于等于(或小于等于)该阈值的像素组成背景. 设输入图像信号为 $f(m,n)$, 输出信号为 $g(m,n)$, 则二者之间存在下列关系:

$$g(m,n) = \begin{cases} I_1 & 0 \leq f(m,n) \leq S, \\ I_2 & S \leq f(m,n) \leq f_{\max}, \end{cases} \quad (1)$$

其中 I_1 和 I_2 为两任意值, 但是 $I_1 \neq I_2$ (通常取 $I_1=0$ 及 $I_2=1$), 而 S 为所取的光强门限值(即阈值). 根据空间光照环境, 可以人工选取适当的 S 值, 则输出图像中正好代表目标物, 而具有 I_2 值的像素恰恰代表背景, 或者与此相反. 本文采用人工指定阈值 S 的方法对图像进行阈值分割, 阈值分割结果如图3所示.

3.2 Canny边缘检测

在对接环图像被模糊平滑后, 需要对目标图像进行边缘提取, 获取对接环边缘轮廓, 为后续外形特征提取提供输入, 具体步骤包括高斯平滑、梯度计算、非极大值抑制和双门限检测^[17].

3.2.1 高斯平滑

在通过阈值分割将对接环区域分割出来后, 由于相机拍摄目标图像带有噪声, 导致目标图像灰度分布较为跳跃不连续, 不利于后续的边缘提取和特征提取算法的实现, 因此需要对目标图像进行平滑处理, 通常采用高斯滤波器进行图像平滑.

3.2.2 计算梯度

设 $p_x(i, j)$ 和 $p_y(i, j)$ 分别为 x 和 y 方向上的一阶偏导数, 此时, 像素的梯度幅值和方向分别为^[17]

$$\begin{cases} M(i, j) = \sqrt{P_x(i, j)^2 + P_y(i, j)^2}, \\ \theta(i, j) = \arctan(P_x(i, j) / P_y(i, j)). \end{cases} \quad (2)$$

对梯度幅值应用非极大值抑制, 其过程为找出图像梯度中的局部极大值点, 把其他非局部极大值点置零以得到细化的边缘.

3.2.3 双阈值确定

对经过非极大值抑制处理后的图像进行双阈值化处理, 消除虚假边缘并连接断续边缘. 即通过人工给定的高阈值系数和图像的直方图, 计算高阈值, 然后, 通过人工给定的低阈值系数, 计算低阈值. 再用高阈值与经过非极大值抑制后的图像进行比较, 记录边缘点. 对所有的边缘点, 在8邻域内迭代寻找大于低阈值的点, 并标记为边缘点, 检测的边缘点集合构成目标边缘. 图4为采用Canny算子进行目标边缘检测的结果.

3.3 Hough变换检测直线

Hough变换的基本思想是利用图像域与参数域的点与线的对偶原理, 设直线方程为^[18]

$$y = kx + b. \quad (3)$$

同一条直线上的点 (x_0, y_0) , (x_1, y_1) , ..., (x_n, y_n) 可以确定唯一的 k, b , 将图像上离散的点的坐标作为已知

图 3 阈值分割

Figure 3 Threshold segmentation.

图 4 Canny边缘检测

Figure 4 Canny edge detection.

量求未知量 k, b , 所以直角坐标系下的直线 $y = kx + b$ 在参数空间表示为点 (k, b) , 然而, 该方法不适用于不存在斜率的直线, 因而将参数空间坐标表示为极坐标下的 $\rho = x \cos \theta + y \sin \theta$, ρ 为原点到直线的距离, θ 为直线与 x 轴的夹角. 图像域中的一个 (x_0, y_0) , 在极坐标下变换为一条正弦曲线, 同一条直线上的点在极坐标空间下正弦曲线的交点即为要求的 k, b . 在实际应用中, 通常将参数空间离散化成一个累加器阵列 $A(\rho, \theta)$, 按照极坐标方程, 将图像空间中的每一点 (x, y) 映射到参数空间对应的一系列累加器中, 将对应的累加器加1. 如果图像空间中存在一条直线, 则参数空间中有一个对

应的累加器出现局部最大值. 通过检测这个局部最大值即可确定与该直线对应的一对 (ρ, θ) 参数, 从而检测出直线. 本文采用Hough变换来检测十字支架的直线边缘, 获取水平支架直线 OX 和垂直支架直线 OY .

3.4 目标轮廓椭圆拟合

火箭对接环外形为圆形, 由于双目相机呈一定内凑角对称安装, 相机不是正对接环拍照, 相机镜头平面与对接环平面之间有一定角度, 因此, 圆形对接环在相机图像中呈现椭圆形状. 采用Canny边缘提取方法获得的火箭对接环边缘具有锯齿状的不规则分布, 因此, 要对火箭对接环边缘进行椭圆拟合, 减少提取对接环轮廓与理论成像轮廓之间的误差. 椭圆拟合主要采用基于最小二乘的椭圆拟合方法, 椭圆方程为

$$Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + 1 = 0, \quad (4)$$

需要采用最小二乘方法来估计椭圆参数 A, B, C, D 和 E , 椭圆拟合结果如图5所示, 绿色线为对接环拟合曲线.

在左右相机图像中, 水平支架直线 OX 与拟合后的对接环轮廓(绿色线)相交于 X 点, 垂直支架直线 OY 与拟合后的对接环轮廓(绿色线)相交于 Y 点. 根据二维空间的椭圆方程和直线方程, 可以分别求出左右相机图像中 X 和 Y 点的像素坐标.

3.5 双目立体匹配与三维重建

为了重建对接环圆形边缘的特征点三维坐标, 需要采用双目立体匹配方法来确定每一个特征点在左相机和右相机图像内对应的同名像点.

3.5.1 汇聚式双目等效平行投影

对于汇聚式双目视觉系统, 由于双目相机是不平行配置, 相互之间呈一定内凑角, 难以直接进行双目匹配, 因此, 采用数学平行双目投影的方法, 将汇聚式双目相机等效投影到一对虚拟的平行像平面^[19], 如图6所示. 在图6中, A, B 分别为汇聚式双目相机的左相机和右相机成像平面, 两个成像平面不平行, 左右相对分布, A', B' 为 A, B 平面的数学等效成像平面, A', B' 两个平面都在一个平面上, 其中, 直线 PO_l, PO_r 与平面 A, B 分别相交于点 p_l, p_r , 直线 PO_l 在平面 A 上投影为直线 l_l , 直线 PO_r 在平面 B 上投影为直线 l_r , 直线 l_l, l_r 和平面 A', B' 分别相交于点 p'_l, p'_r , 则点 p'_l, p'_r 为点 p_l, p_r 在数学等效成

图 5 (网络版彩图)对接环边缘拟合

Figure 5 (Color online) Edge fitting of docking ring.

图 6 汇聚式左右相机图像平行等效投影

Figure 6 Parallel equivalent projection of left and right images in convergence camera.

像平面 A', B' 上的投影, 则有直线 $p'_l p'_r$ 平行与左右相机光心连线 $O_l O_r$, 这个性质可以用于对汇聚式双目相机同名特征点的匹配, 具体见3.5.2节.

3.5.2 左右相机图像立体匹配

分别对左右相机中对接环轮廓图像进行拟合和等效投影之后, 需要对等效投影后左右相机图像进行匹配, 等效投影后的左右相机图像具有极限对准效应,

空间中的三维点在左右相机中的像点在同一条水平直线上. 假设点 P_1 , P_3 是左相机图像中对接环上的两个点, 其在图像中的坐标为 (x_1, y_1) , (x_3, y_3) ; P_2 , P_4 是右相机图像中对接环上的两个点, 其在图像中的坐标为 (x_2, y_2) , (x_4, y_4) , 且 P_1 , P_2 , P_3 , P_4 在同一条极线上, 即有

$$\begin{cases} x_1 < x_3, \\ x_2 < x_4, \\ y_1 = y_2 = y_3 = y_4. \end{cases} \quad (5)$$

左相机图像中水平支架直线与对接环右侧相交于 X_l , 垂直支架直线与对接环下侧相交于 Y_l , 右相机图像中水平支架直线与对接环右侧相交于 X_r , 垂直支架直线与对接环下侧相交于 Y_r , 如图7所示.

由于 P_1 , P_2 , P_3 , P_4 在同一条极线上, 且 $x_1 < x_3$, $x_2 < x_4$, 则可以确定 P_1 , P_2 是一对同名点, 对应对接环上同一个三维点, 而 P_3 , P_4 是另一对同名点, 同时对应对接环上另一个三维点. 根据十字支架与对接环轮廓相交几何特性, 并且 X_l , X_r 都在右侧对接环, Y_l , Y_r 都在下侧对接环, 可以确定 X_l , X_r 为匹配同名点, 对应空间三维点 X , 可以确定 Y_l , Y_r 为匹配同名点, 对应空间三维点 Y .

3.5.3 双目三维重建

设 $P(X, Y, Z)$ 为对接环上一个点的空间三维坐标, $P_1(x_1, y_1, f)$ 和 $P_2(x_2, y_2, f)$ 为该点在左相机和右相机对应的像点, 如图8所示^[9].

$P(X, Y, Z)$ 可以用式(6)和(7)来计算, 即

$$\begin{cases} x_1 = -f \frac{X}{Z}, \\ x_2 = -f \frac{X+B}{Z}, \end{cases} \quad (6)$$

于是,

$$\begin{cases} Z = \frac{fB}{x_1 - x_2} = \frac{fB}{d}, \\ d = x_1 - x_2, \end{cases} \quad (7)$$

其中, d 为双目相机视差, B 为双目相机光心之间的距离, 从上式可以解算 $P(X, Y, Z)$ 的三维坐标.

根据式(6)和(7), 对左右相机中按3.4节的方法拟合的对接环轮廓进行三维重建(3.5节), 获得拟合后的对接环轮廓上所有点的空间三维坐标. 由于 X_l , X_r 为一组匹配同名点, Y_l , Y_r 为一组匹配同名点, 可以根据式

图7 (网络版彩图)双目立体匹配示意图

Figure 7 (Color online) Binocular stereo matching.

图8 (网络版彩图)双目三维重建示意图

Figure 8 (Color online) The scheme of binocular 3D reconstruction.

(6)和(7)计算对应的空间点 X 和 Y 的三维坐标.

3.6 位姿解算

在双目相机坐标系下, 对接环中心位置三维坐标可以表示为 $O(O_1, O_2, O_3)$, 十字支架水平方向与对接环轮廓右侧的交点三维坐标可以表示为 $X(X_1, X_2, X_3)$, 十字支架垂直方向与对接环轮廓下侧交点三维坐标可以表示为 $Y(Y_1, Y_2, Y_3)$.

在非合作目标本体坐标系下, 对接环中心位置坐标可以表示为 $O'(O'_1, O'_2, O'_3)$, 十字支架水平方向与对接环轮廓的交点坐标可以表示为 $X'(X'_1, X'_2, X'_3)$, 十字支架垂直方向与对接环轮廓交点坐标可以表示为 $Y'(Y'_1, Y'_2, Y'_3)$, 如图9所示.

按照式(6)和(7)获得拟合后的对接环轮廓上所有点的空间三维坐标, 双目相机坐标系下对接环中心点 $O(O_1, O_2, O_3)$ 为对接环轮廓所有点空间三维坐标的平均值, 点 $X(X_1, X_2, X_3)$, $Y(Y_1, Y_2, Y_3)$ 按照式(6)和(7)求取其三维坐标. 在非合作目标本体坐标系下, 点

图 9 (网络版彩图)位姿解算示意图

Figure 9 (Color online) The scheme of solving the position and pose.

$O'(O'_1, O'_2, O'_3)$, $X'(X'_1, X'_2, X'_3)$, $Y'(Y'_1, Y'_2, Y'_3)$ 的三维坐标可以根据目标本身的结构模型来获取.

相对位置计算: 目标相对位置为双目相机坐标系下对接环中心点 $O(O_1, O_2, O_3)$ 的三维坐标.

相对姿态计算: 双目相机坐标系下向量 $\mathbf{OX}$, $\mathbf{OY}$ 目标本体坐标系下向量 $\mathbf{O'X'}$, $\mathbf{O'Y'}$, 可以表示为

$$\begin{cases} \mathbf{OX} = \{X_1 - O_1, X_2 - O_2, X_3 - O_3\}, \\ \mathbf{OY} = \{Y_1 - O_1, Y_2 - O_2, Y_3 - O_3\}, \\ \mathbf{O'X'} = \{X'_1 - O'_1, X'_2 - O'_2, X'_3 - O'_3\}, \\ \mathbf{O'Y'} = \{Y'_1 - O'_1, Y'_2 - O'_2, Y'_3 - O'_3\}. \end{cases} \quad (8)$$

设 C_c^b 为双目相机坐标系到对接环本体坐标系的姿态转换矩阵, 则有

$$[\mathbf{O'A'}, \mathbf{O'B'}, \mathbf{O'A' \times O'B'}] = C_c^b [\mathbf{OA}, \mathbf{OB}, \mathbf{OA \times OB}]. \quad (9)$$

4 试验验证

为了验证基于双目的卫星对接环特征提取与运动测量算法精度, 搭建了卫星对接环相对测量试验验证系统.

4.1 试验系统组成

试验系统由追踪气浮台、目标气浮台、双目相机、对接环模型、地面监控系统和图像处理系统构

成. 其中, 双目相机安装在追踪气浮台上, 对接环模型安装在目标气浮台上. 双目相机系统由两个 Delsa 工业相机组成, 相机像素大小为 2048×2048 , 像元尺寸为 $5.5 \mu\text{m}$, 镜头选择 KOWA 工业镜头, 焦距为 15 mm , 双目相机视场角 53° .

4.2 地面试验验证

在试验过程中, 带有双目相机的追踪气浮台在距离目标对接环 7 m 位置向目标气浮台接近, 直到接近目标 2 m 位置. 在接近过程中, 连续提取目标边缘特征, 测量目标的相对位置与姿态. 图 10 为左右相机拍摄的原始图像, 图 11 为对左右相机图像中对接环识别和测量结果. 其中, 绿色线表示对接环边缘拟合结果, O 点为对接环中心(即对接环本体坐标系原点), 红色、蓝色和黄色箭头分别代表对接环本体坐标系 X , Y 和 Z 轴指向, X 轴指向右, Y 轴指向下, Z 轴指向前.

从距目标 $1.5 \sim 7 \text{ m}$ 距离内, 选取 10 个采样点 [1.494 m ,

图 10 左右相机原始图像. (a) 左相机原始图; (b) 右相机原始图像

Figure 10 Raw images by left camera and right camera. (a) Raw image by left camera; (b) raw image by right camera.

图 11 (网络版彩图)左(a), 右(b)相机对接环的识别与测量
Figure 11 (Color online) The images of recognition and measurement of docking ring by (a) left camera and (b) right camera.

2.059 m, 2.818 m, 3.481 m, 4.081 m, 5.070 m, 5.473 m, 5.815 m, 6.564 m, 6.913 m], 采用双目相机测量目标的相对位置和姿态, 试验结果如图12和13所示. 图12为测量的相对位置误差, 图13为测量的相对姿态误差.

从图12和13中可以看出, 目标相对位置、姿态精度随着目标与相机之间的相对距离增加而增大, 在目标与相机距离为1.5–7 m范围内, 目标相对位置测量精度优于45 mm, 目标相对姿态测量精度优于3.5°. 在1.5 m距离时, 相对位置测量精度为15 mm, 相对姿态测量精度为1.12°. 通过双目视觉系统的引导, 成功实现了服务机器人对空间目标的接近控制, 并完成了对空间目标的抓捕.

文献[14]对星箭对接环目标进行了地面试验验证, 在目标0.44 m左右的距离, 测得星箭对接环的法线和圆心相对位置矢量与实测值为

法线计算值: $r_{lz} = [0.1278, 0.0781, 0.9887]^T$,

法线实测值: $r'_{lz} = [0.1305, 0.08, 0.9882]^T$,

图 12 相对位置测量精度

Figure 12 Measurement precision of relative position.

图 13 相对姿态测量精度

Figure 13 Measurement precision of relative pose.

位置计算值: $t_l = [72.2, 21.72, 436.5]^T \text{mm}$,

位置实测值: $t'_l = [70.0, 22.0, 430.0]^T \text{mm}$.

从法线测量结果可以解算出姿态测量精度为1.17°, 位置测量精度为6.87 mm, 本文算法在距目标1.5 m距离处, 姿态测量精度为1.12°, 位置测量精度为15 mm. 由于位姿测量误差一般是随距离呈线性变化的, 因此, 本文实际测量精度要优于文献[14]中的算法精度, 本文的研究工作进一步提高了双目视觉对空间目标的相对测量能力.

在1.5–7 m距离内, 对算法的实时性进行了测试, 利用计算机内部计时器记录每次测量数据更新的时间和频率, 结果如下.

如图14所示, 在2561次测量周期内进行了算法运行时间测试, 平均算法运行时间为0.26724 s, 算法输出平均更新频率为3.74 Hz.

5 结论

本文针对在轨服务任务中空间目标相对测量问题, 描述了一种在轨服务空间目标特征提取与状态测量方法. 首先, 设计了空间目标特征提取与状态测量算法流程; 其次, 对双目相机采集的目标图像进行阈值分割, 将目标对接环区域与背景环境分割开来, 采用Canny算子方法来检测星箭对接环边缘, 通过对目标边缘外形特点分析, 采用Hough变换来提取十字支架直线特征, 采用最小二乘法来拟合星箭对接环轮廓; 再次, 采用基于等效平行投影和极限对准方法实现汇聚式双目视觉立体匹配, 获取左右相机的同名点对; 最后, 通过对提取的特征点进行三维重建, 确定星箭

图 14 (网络版彩图)算法运行时间统计

Figure 14 (Color online) The statistics of the algorithm's operation time.

对接环相对位置, 采用双矢量定姿方法来确定星箭对接环相对姿态. 地面全物理试验显示, 在距目标 1.5 m 距离时, 相对位置测量精度为 15 mm, 相对姿态测量精度为 1.12° . 本文的研究工作可以有效解决汇聚式双目相机对空间目标的特征提取和相对测量问题, 大大增加了双目视觉的视场角, 可以实现对空间移动目标的

超近距离识别、测量和跟踪, 为我国在轨服务任务实施提供理论和方法支持.

未来将进一步开展空间太阳杂光环境下的目标稳定识别与相对测量方法研究, 使基于双目视觉的空间目标特征识别与相对测量方法能够适应空间光照环境, 具备未来在轨应用的能力.

参考文献

- 1 Wang J Q. The development and application prospect of satellite orbit service system (in Chinese). *Inter Space*, 2006, 4: 23–26 [王景泉. 卫星轨道服务系统的发展与应用前景. *国际太空*, 2006, 4: 23–26]
- 2 Wu Q. The revolutionary technology to improve the survivability of the satellites by on-orbit service and fractionated spacecrafts (in Chinese). *Modern Military*, 2008, 7: 26–30 [吴勤. 在轨服务与分离模块航天器提升卫星生存能力的革命性技术. *现代军事*, 2008, 7: 26–30]
- 3 Ren Y Q. Research on Pose Estimation Methods of Non-Cooperative Space Objects Towards Space Grapple Application (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. 21–30 [任宇琪. 面向空间非合作目标捕获的位姿测量方法研究. 博士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015. 21–30]
- 4 Hong Y Z. Research on Pose Estimation for Space Non-cooperative Targets Based on Monocular Vision (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017. 57–94 [洪裕珍. 空间非合作目标的单目视觉姿态测量技术研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院大学, 2017. 57–94]
- 5 Li Y F, Wang S C, Yang D F, et al. Aerial relative measurement based on monocular reconstruction for non-cooperation target (in Chinese). *Chin Space Sci Technol*, 2016, 36: 48–56 [李永飞, 王仕成, 杨东方, 等. 基于单目三维重构的空间非合作目标相对测量. *中国空间科学技术*, 2016, 36: 48–56]
- 6 Zhao L J. Research on Mono-vision Pose Measurement Based on Features of Target (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014. 53–83 [赵连军. 基于目标特征的单目视觉位置姿态测量技术研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院大学, 2014. 53–83]
- 7 Hao G T, Du X P. Relative attitude estimation for space non-cooperative targets based on sequence of monocular images (in Chinese). *Aerospace Control*, 2014, 32: 60–67 [郝刚涛, 杜小平. 基于单目视觉图像序列的空间非合作目标相对姿态估计. *航天控制*, 2014, 32: 60–67]
- 8 Guo X C, Meng Z J, Huang P F. State estimation of a non cooperative target satellite using monocular vision (in Chinese). *J Astron*, 2019, 40: 1243–1250 [郭新程, 孟中杰, 黄攀峰. 采用单目视觉的非合作目标星状态估计. *宇航学报*, 2019, 40: 1243–1250]
- 9 Zhai K, Li Z, Chen X L, et al. Study on recognition method for non-cooperative spacecraft docking ring (in Chinese). *Aerospace Control*, 2013, 31: 76–82 [翟坤, 李志, 陈新龙, 等. 非合作航天器对接环识别算法研究. *航天控制*, 2013, 31: 76–82]
- 10 Liu Z H. Research on Matching Algorithm for Stereo Vision (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2011. 19–21 [刘志花. 面向立体视觉的匹配算法研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院研究生院, 2011. 19–21]
- 11 Yu Z H. Research on Motion Estimation Based on Binocular Vision and 3D Reconstruction for Non-cooperative Targets (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. 22–42 [于占海. 面向非合作目标的双目视觉运动估计及三维重构方法研究. 硕士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017. 22–42]
- 12 Cai H. Experiment Research of Non-cooperative Space Target Relative Measurement Based on Binocular Vision (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015. 28–80 [蔡晗. 基于双目视觉的非合作目标相对测量实验研究. 硕士学位论文. 北京: 北京理工大学, 2015. 28–80]
- 13 Zhi S. Research on the Error Theory of Binocular Vision Measurement System on Non-cooperative Target (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014. 19–39 [支帅. 非合作目标双目视觉测量系统误差理论研究. 硕士学位论文. 北京: 中国科学院大学, 2014. 19–39]
- 14 Li Y P, Zhao C H, Wang L. Relative position and attitude estimation of non-cooperative spacecraft based on geometric features (in Chinese). *Aerospace Control Appl*, 2015, 41: 8–13 [李宜鹏, 赵春晖, 王立. 基于几何特征的非合作目标相对位置和姿态估计. *空间控制技术与应用*,

2015, 41: 8–13]

- 15 Lin T T, Jiang S, Li R H. Non-cooperative target pose measurement and ground verification based on visual features (in Chinese). *J Dalian Jiaotong Univ*, 2020, 41: 34–40 [林婷婷, 江晟, 李荣华. 非合作目标视觉位姿测量与地面验证方法. *大连交通大学学报*, 2020, 41: 34–40]
- 16 Hu Q Y, Wang D Y. Relative navigation and identification of inertia parameters of non cooperative space target based on stereo vision (in Chinese). *J Astron*, 2020, 41: 1410–1417 [胡启阳, 王大轶. 采用双目视觉的非合作空间目标相对导航与惯性参数辨识方法. *宇航学报*, 2020, 41: 1410–1417]
- 17 Huang J L, Xiong J, Zou T B. Self-adaptive image edge detection method based on canny (in Chinese). *Computer Eng Appl*, 2011, 47: 219–221 [黄剑玲, 熊艰, 邹腾博. 一种基于Canny的自适应图像边缘提取方法. *计算机工程与应用*, 2011, 47: 219–221]
- 18 Yan H R, Yang M S. Line extraction based on improved Hough transform (in Chinese). *Infrared Technol*, 2015, 37: 970–975 [闫怀仁, 杨慕升. 基于改进的Hough变换的直线提取算法. *红外技术*, 2015, 37: 970–975]
- 19 Gary B, Adrian K. *Learning OpenCV*. Cambridge: O’ Relly Media, 2008. 418–419

Feature-extraction and motion-measurement method for non-cooperative space targets

HU HaiDong^{*}, DU Hang, WANG DianYou, HUANG Lu, XIE XinRu & WEI ChunLing

Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100094, China

Space targets served on the orbit have a noncooperative characteristic. Thus, it is difficult to extract their features and measure their motions. To resolve this problem, a feature-extraction and motion-measurement method for noncooperative space targets is proposed in this paper. First, threshold segmentation is performed with the images captured using the binocular camera to separate the satellite-rocket docking ring section from the surrounding background. Additionally, the Canny operator method is used to detect the edge of the satellite-rocket docking ring. Based on the analysis of the characteristic of the edge’s shape, Hough transformation is employed to extract the line feature of the cross. The contour of the satellite-rocket docking ring is fitted using the least square method. Furthermore, the parallel equivalent projection and the epipolar line alignment methods are used to match the images of the left and right cameras in the convergence binocular vision. Finally, the relative position of the satellite-rocket docking ring is obtained through a three-dimensional reconstruction of the feature points on the satellite-rocket docking ring and cross. Additionally, the dual-vector pose-determination method is employed to obtain the relative pose of the satellite-rocket docking ring. The ground simulation test shows that this algorithm can measure the relative position and pose of the satellite-rocket docking ring effectively. At a distance of 1.5 m from the target, the precision of the relative position is 15 mm, and that of the relative pose is 1.12°. This research can achieve an accurate measurement of the relative position and pose of the noncooperative target’s docking ring, providing the measurement basis and important support for on-orbit service missions, such as the grasping, repairing, refueling, and module replacement of noncooperative space targets; thus, it has important practical application value.

space non-cooperative target, feature extraction, motion measurement

PACS: 42.30.Sy, 06.30.Gv, 60.60.Sx

doi: [10.1360/SSPMA-2020-0471](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0471)