

文章编号 1004-924X(2009)07-1570-12

# 非合作航天器的相对位姿测量

徐文福, 刘 宇, 梁 斌, 李 成, 强文义

(哈尔滨工业大学 空间智能系统研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:**为了解决在轨维护和轨道垃圾清除中非合作目标的识别问题,提出了基于立体视觉的位姿(位置和姿态)测量方法。采用中值滤波器对原始图像进行平滑,去除星空背景干扰和其它噪声;将 Canny 边沿检测器用于对平滑后的图像进行检测,得到包含边沿信息的二值图像。然后,对该二值图像进行 Hough 变换,提取待识别对象的直线特征,并计算直线间的交点。最后,对所提取的左、右相机图像的点特征进行 3D 重构,得到各点在世界坐标系中的坐标,并据此建立目标坐标系,求出其相对于世界坐标系的位置和姿态。仿真结果表明,对于较远距离( $>2.5$  m),位置测量精度优于 40 mm,而近距离内( $<2.0$  m)优于 10 mm,相对姿态精度优于  $2^\circ$ ,基本满足对非合作目标进行跟踪、接近、绕飞等位姿测量要求。

**关键词:**非合作目标;立体视觉;位姿测量;交会对接

**中图分类号:**TP391.4;V448.22 **文献标识码:**A

## Measurement of relative poses between two non-cooperative spacecrafts

XU Wen-fu, LIU Yu, LIANG Bin, LI Cheng, QIANG Wen-yi

(*Institute of Space Intelligent System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*)

**Abstract:** A stereo vision-based method was proposed to measure the relative poses (position and attitude) between the two non-cooperative spacecrafts to solve the problem of the non-cooperative target recognition for the on-orbital maintenance and space debris removal. A median filter was used to smooth the original images by removing the disturbance of orbital background and other noises. The edges in the smoothed images were detected using the Canny edge detector to obtain the corresponding binary images. Then, the straight lines of the object to be recognized were extracted from the binary images through Hough transform, and the intersection points among these lines were determined. Finally, the feature points in the left and right images were reconstructed in 3D to obtain the coordinates of the object points in the world frame. Based on these points, the target frame was defined and the pose of the target with respect to the world frame was determined. Simulation results indicate that the position errors are lower than 40 mm in the farther distance ( $>2.5$  m) and 10 mm in the nearer distance ( $<2.0$  m), and the orientation errors are less than  $2^\circ$ , which satisfies the requirements of pose measurements during the tracking, approaching and flying round the non-cooperative target.

**Key words:** non-cooperative target; stereo vision; attitude measurement; rendezvous and docking

收稿日期:2008-07-25;修订日期:2008-10-20.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60805033, No. 60775049)

## 1 引言

卫星由于故障、完全失效或任务结束而被放弃后,停留在空间将成为太空垃圾,不但占用了宝贵的轨道资源,还可能危及其它航天器的安全。为了尽可能挽回损失或净化轨道环境,各国正在研究以卫星维修、生命延长及太空垃圾清除为目的的在轨服务技术<sup>[1]</sup>,即对故障卫星进行绕飞监测、跟踪接近、交会对接、在轨维修等操作。要实现这些目的,必须解决航天器间相对位姿的测量问题。最常用的是基于视觉的测量,目前已经开展的在轨演示实验中,近距离段均以之作为主要手段。如日本的 ETS-VII<sup>[2]</sup>、美国的轨道快车<sup>[3]</sup>等,追踪星上均安装了可见光相机,目标星上则安装了用于合作测量的发光标志器或角反射镜作为目标识别的特征点。我国在航天器相对位姿测量的研究中,也多采用了合作标志器<sup>[4-6]</sup>。然而,对于大多数已在轨服务的航天器和空间碎片,并没有预先安装合作标志器,且目标星与追踪星之间没有直接的信息交流,即目标是非合作的。因此,要实现真正的在轨服务,必须解决非合作目标的自主识别问题。

非合作目标的识别是一个世界性难题,已经引起了国内外研究者的重视。张世杰等提出了一种不采用合作光标情况下的位姿测量方法,但假设被识别目标的形状及几何尺寸为已知<sup>[7]</sup>。欧空局设计了地球静止轨道恢复器(Robotic Geostationary Orbit Restorer, ROGER),使用绳系飞网或飞爪,对轨道上的废弃卫星进行抓捕<sup>[8]</sup>,其中对目标的测量使用了激光测距、主动视觉等手段。Thienel等在NASA的资助下,针对哈勃太空望远镜的服务,提出了一种非线性的方法用于估计航天器的姿态,并进行跟踪控制,但采用了较多的先验知识<sup>[9]</sup>。Inaba等提出了一种对非合作目标在轨识别与捕获的方法,但假定目标的外形、尺寸及质量已知<sup>[10]</sup>。德国宇航局(DLR)在90年代初就开展了对非合作目标在轨服务的研究,在其ESS(Experimental Servicing Satellite)项目中,设计了针对非合作目标变轨发动机的抓捕机构及基于多传感器数据融合的识别算法<sup>[11]</sup>;目前DLR正在开展的TECSAS(Technology Satellite for Demonstration and Verification of Space Sys-

tems)项目<sup>[12]</sup>,将演示对航天器的接近和交会、绕飞监测、机器人捕获等实验。TECSAS采用了复杂的非合作目标识别算法,但由于受星载处理器计算能力的限制,该算法无法在星上自主完成,而是将采集的图像下载到地面,在地面操作员的直接参与下(人为判断搜索区域、锁定特征点等),由地面设备进行图像处理并计算目标位姿,再将测量结果上传到星上,星上控制器控制追踪星对目标进行跟踪、接近等操作。该方法受到传输时延、传输可靠度的影响较大,时延较大时整个系统将不稳定;而且由于需要操作人员的直接参与,其“自主”性不高。

本文提出了基于立体视觉的非合作目标自主识别与位姿测量方法,该方法不要求在目标星上安装用于辅助测量的发光标志器或角反射镜,也无需知道目标的几何尺寸,而是直接以航天器自身的部件作为识别对象,这些部件可以是帆板支架、天线支架、远地点发动机,也可以是星箭对接环等。为对相关算法进行验证,还建立了仿真系统,对非合作目标的跟踪、接近、相对位姿保持过程进行了闭环仿真。

## 2 非合作航天器的目标识别

### 2.1 系统组成

整个系统由一追踪星(Chaser)和目标星(Target)组成,如图1所示。

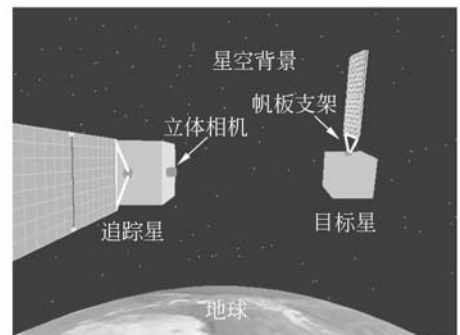


图1 航天器自主交会对接图示

Fig. 1 Illustration of automatic rendezvous docking

为方便讨论,定义如下坐标系:

(1)追踪星本体坐标系  $O_{b1} X_{b1} Y_{b1} Z_{b1}$ :原点位于星箭对接环中心,对地模式下  $O_{b1} X_{b1}$  轴指向飞行方向,  $O_{b1} Z_{b1}$  轴指向地心,  $O_{b1} Y_{b1}$  由右手定则确

定。

(2) 追踪星视觉测量坐标系  $O_m X_m Y_m Z_m$ : 原点在本地系中的坐标为  $[1.5 \text{ m}, 0, 0]$ , 其它各轴指向与追踪星本体坐标系相同。

(3) 目标星位姿测量参考坐标系  $O_t X_t Y_t Z_t$ : 原点位于目标星位姿测量参考点, 对地模式下  $O_t X_t$  轴指向飞行方向,  $O_t Z_t$  轴指向地心,  $O_t Y_t$  由右手定则确定。

## 2.2 空间非合作目标识别对象的选择

经过对各国已发射卫星进行大量的调研, 发现大多数卫星具有如下几种(对于一个具体的卫星, 可能只具有其中一种或同时具有多种)可供识别和抓捕的对象: (a) 航天器本身; (b) 太阳帆板; (c) 星箭对接环; (d) 远地点发动机; (e) 帆板支架或天线支架等。对于大航天器, 其外形尺寸、太阳帆板等都较大, 近距离下难以实现对整体的成像而影响目标识别算法的进行。而太阳帆板或对地通信天线支架一般是圆柱形或三角形, 尺寸也相对较小, 因此, 可作为目标识别与抓捕的对象。本文以太阳帆板支架为例, 说明对非合作航天器相对位姿的测量问题。

## 3 非合作航天器的相对位姿测量

### 3.1 相机投影模型

针孔模型 (pin-hole model) 是最常用的相机成像模型, 可表示为:

$$\lambda \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中,  $[X_w, Y_w, Z_w]^T$  为空间某点  $P$  在世界坐标系中的坐标,  $(u, v)$  是以像素为单位的图像坐标,  $C$  为相机的投影变换矩阵, 由其内外参数确定。在实际应用中, 有很多方法可用于标定矩阵  $C^{[13]}$ 。

### 3.2 基于立体视觉的非合作目标位姿测量

基于立体视觉的相对位姿测量算法流程如图 2 所示。

主要包括如下步骤:

(1) 图像采集: 利用两个相机对目标图像进行采集, 分别得到左相机图像和右相机图像。

(2) 图像滤波: 分别对左右相机图像进行滤

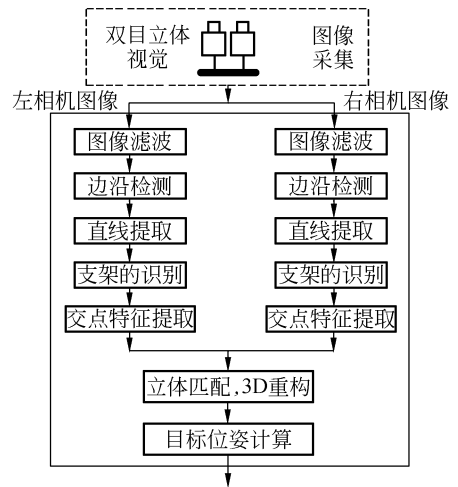


图 2 基于立体视觉的非合作航天器相对位姿测量算法流程

Fig. 2 Flowchart of relative pose measurement based on stereo vision

波, 以消除噪声干扰, 得到平滑的左右相机图像;

(3) 边沿检测: 对两幅图像分别进行边沿检测, 得到边沿特征信息;

(4) 直线提取: 对进行边沿检测后的图像进行直线提取, 得到包含三角形支架各直线在内的各条直线信息;

(5) 三角支架的识别: 从提取后的所有直线信息中, 识别对应于三角形帆板支架的 6 条直线;

(6) 交点特征的提取: 利用识别出来的三角形支架对应的 6 条直线, 计算出三角形的顶点;

(7) 立体匹配、3D 重构: 根据识别出的三角形支架各顶点分别在左、右相机中的 2D 信息, 进行各特征点的 3D 重构, 得到三角形支架各顶点在世界坐标系中的 3D 坐标;

(8) 目标位置、姿态测量: 根据 3D 重构的结果, 进一步构建抓捕对象坐标系, 并计算出其相对于世界坐标系 (追踪星测量坐标系) 的位置和姿态。

#### 3.2.1 平滑滤波

实际获得的图像一般都含有噪声, 本文采用中值滤波算法进行图像平滑。中值滤波是一种抑制噪声的非线性处理方法。对于给定的  $n$  个数值  $\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ , 将它们按大小顺序排列。当  $n$  为奇数时, 位于中间位置的那个数值称为这  $n$  个数值的中值。当  $n$  为偶数时, 位于中间位置的两个数值的平均值称为这  $n$  个数值的中值, 记作  $\text{med}$

$\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ 。图像经过中值滤波后,某像素的输出等于该像素领域中的各像素灰度的中值。中值滤波的方法运算简单,易于实现,而且能较好地保护边界。

### 3.2.2 边沿检测

边缘(edge)是指图像局部强度变化最显著的部分。边缘主要存在于目标与目标、目标与背景、区域与区域(包括不同色彩)之间,是图像分割、纹理特征和形状特征等图像分析的重要基础。本文采用 Canny 算法对图像进行边缘检测。Canny 边缘检测算法的步骤如下<sup>[14]</sup>:(1)用高斯滤波器平滑图像;(2)用一阶偏导的有限差分计算梯度的幅值和方向;(3)应用非极大值抑制梯度幅值;(4)用双阈值算法检测和连接边缘。

### 3.2.3 直线提取

在利用 Canny 算法检测出图像边沿后,再采用 Hough 变换提取直线<sup>[14]</sup>。Hough 变换的基本思想是利用点—线(点—直线或点—曲线)的对偶性,即图像空间  $x-y$  中的直线,经过 Hough 变换后成为参数空间的一点<sup>[15-16]</sup>。

Hough 变换算法的步骤如下:(1)适当地量化参数空间;(2)假定参数空间的每一个单元都是一个累加器,把累加器初始化为零;(3)对图像空间的每一点,在其所满足的参数方程对应的累加器上加 1;(4)累加器阵列的最大值对应模型的参数。

### 3.2.4 支架的识别与三边中位线交点的提取

如上所述,采用 Hough 变换后,可以提取出多条直线,包括目标卫星的轮廓、太阳电池阵列及太阳帆板支架。由于帆板支架有明显的特征,故以帆板支架为识别对象。从众多直线中识别出属于帆板支架的 6 条直线(三边,每边两条直线),是本文研究的关键。由于除了已知帆板支架是一三角形外,没有其他任何先验知识(包括三角形的边长、内角、各边的倾斜度等),因此,识别的难度可想而知。在此假定图像可通过遥测通道下传到地面,地面操作员根据该图像设置两个初始参考点  $p_{r_1}$ 、 $p_{r_2}$ (只需要设定一次),星载程序即可完成对帆板支架的自动识别,随即转入跟踪模式,以后能够自动根据图像,实时跟踪帆板支架所在的区域。参考点  $p_{r_1}$  为三角形内的任意一点,  $p_{r_2}$  为三角形外且位于太阳电池阵列上的任意一点,  $p_{r_1}$ 、 $p_{r_2}$  通过鼠标直接在遥测图像中选取,没有特别严格的

要求。

根据  $p_{r_1}$ 、 $p_{r_2}$ , 可从众多的直线中提取出属于三角形支架的 6 条直线,并进而计算支架各边中心线之间的交点,详细过程见 3.3.4。

### 3.2.5 基于立体视觉的 3D 重建

基于立体视觉的 3D 重建原理如图 3 所示,假定第  $i$  个特征点  $P_i$  在世界坐标系中的位置为  ${}^W P_i = [X_{w_i}, Y_{w_i}, Z_{w_i}]^T$ , 投影在左右相机的图像坐标分别为  $p_{L_i} = [u_{L_i}, v_{L_i}]$  和  $p_{R_i} = [u_{R_i}, v_{R_i}]^T$ 。

根据(1),对于左、右相机,有如下关系:

$$\begin{bmatrix} \lambda_L u_{L_i} \\ \lambda_L v_{L_i} \\ \lambda_L \end{bmatrix} = C_L \begin{bmatrix} X_{w_i} \\ Y_{w_i} \\ Z_{w_i} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 \\ \alpha_4 & \alpha_5 & \alpha_6 & \alpha_7 \\ \alpha_8 & \alpha_9 & \alpha_{10} & \alpha_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{w_i} \\ Y_{w_i} \\ Z_{w_i} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_R u_{R_i} \\ \lambda_R v_{R_i} \\ \lambda_R \end{bmatrix} = C_R \begin{bmatrix} X_{w_i} \\ Y_{w_i} \\ Z_{w_i} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \beta_1 & \beta_2 & \beta_3 \\ \beta_4 & \beta_5 & \beta_6 & \beta_7 \\ \beta_8 & \beta_9 & \beta_{10} & \beta_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{w_i} \\ Y_{w_i} \\ Z_{w_i} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

矩阵  $C_L$ 、 $C_R$  分别为左右相机的投影变换矩阵,  $\alpha_i$ 、 $\beta_i$  为对应的元素。

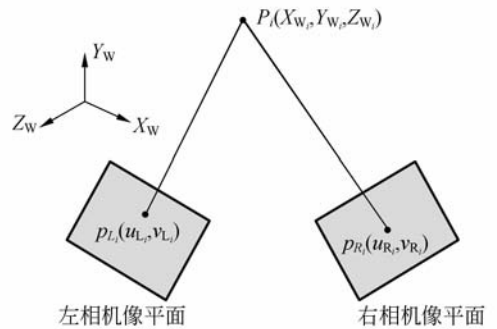


图3 立体视觉测量原理

Fig. 3 Concept of stereo vision

式(2)的第一行减去第三行乘  $u_{L_i}$ 、第二行减去第三行乘  $v_{L_i}$ , 并整理成矩阵的形式,得:

$$\begin{bmatrix} (1 - \alpha_8 u_{L_i}) & (\alpha_1 - \alpha_9 u_{L_i}) & (\alpha_2 - \alpha_{10} u_{L_i}) \\ (\alpha_4 - \alpha_8 u_{L_i}) & (\alpha_5 - \alpha_9 u_{L_i}) & (\alpha_6 - \alpha_{10} u_{L_i}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_{w_i} \\ Y_{w_i} \\ Z_{w_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\alpha_{11} u_{L_i} - \alpha_3) \\ (\alpha_{11} v_{L_i} - \alpha_7) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

类似的,对右相机:

$$\begin{bmatrix} (1-\beta_8 u_{R_i}) & (\beta_1-\beta_9 u_{R_i}) & (\beta_2-\beta_{10} u_{R_i}) \\ (\beta_4-\beta_8 v_{R_i}) & (\beta_5-\beta_9 v_{R_i}) & (\beta_6-\beta_{10} v_{R_i}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_{W_i} \\ Y_{W_i} \\ Z_{W_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\beta_{11} u_{R_i} - \beta_3) \\ (\beta_{11} v_{R_i} - \beta_7) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

将式(4)和式(5)组合在一起,有:

$$\begin{bmatrix} 1-\alpha_8 u_{L_i} & \alpha_1-\alpha_9 u_{L_i} & \alpha_2-\alpha_{10} u_{L_i} \\ \alpha_4-\alpha_8 v_{L_i} & \alpha_5-\alpha_9 v_{L_i} & \alpha_6-\alpha_{10} v_{L_i} \\ 1-\beta_8 u_{R_i} & \beta_1-\beta_9 u_{R_i} & \beta_2-\beta_{10} u_{R_i} \\ \beta_4-\beta_8 v_{R_i} & \beta_5-\beta_9 v_{R_i} & \beta_6-\beta_{10} v_{R_i} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_{W_i} \\ Y_{W_i} \\ Z_{W_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} u_{L_i} - \alpha_3 \\ \alpha_{11} v_{L_i} - \alpha_7 \\ \beta_{11} u_{R_i} - \beta_3 \\ \beta_{11} v_{R_i} - \beta_7 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

写成矩阵的形式:

$$\mathbf{K} \cdot {}^w \mathbf{P}_i = \mathbf{U}, \quad (7)$$

式(7)有 4 个方程、3 个未知数,为超越方程,可用最小二乘法进行求解:

$${}^w \mathbf{P}_i = (\mathbf{K}^T \mathbf{K})^{-1} \mathbf{K}^T \mathbf{U}, \quad (8)$$

上述过程即为基于立体视觉的 3D 重构过程,即利用两个相机对 3D 空间的点进行成像,并根据所提取的 2D 图像坐标,计算/重建该点的 3D 坐标。

### 3.2.6 相对位姿计算

当重构出各特征点的 3D 坐标  $P_1, P_2, P_3$  后,即可据此建立目标位姿测量参考坐标系  $O_i X_i Y_i Z_i$ ,并计算该坐标系相对于追踪星测量坐标系  $O_m X_m Y_m Z_m$  的位置和姿态,原理如图 4 所示。

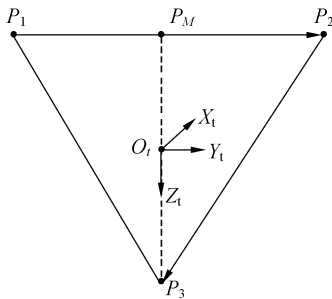


图 4 目标坐标系的建立

Fig. 4 Creation of target frame

首先,过  $P_3$  作  $P_1, P_2$  的垂线,垂足为  $P_M$ 。

直线  $P_1 P_2$  上的点  $P_M$  坐标可表示为:

$$P_M = P_1 + t \mathbf{s}, \quad (9)$$

$\mathbf{s}$  为直线的方向向量(单位矢量), $t$  为直线的参量。建立一个关于  $t$  最小值优化问题:

$$f(t) = \| P_3 - P_M \|^2 = \| P_3 - (P_1 + t \mathbf{s}) \|^2, \quad (10)$$

对式(10)进行化简,有:

$$\begin{aligned} f(t) &= \| P_3 - P_M \|^2 = \| P_3 - (P_1 + t \mathbf{s}) \|^2 = \\ &= \| (P_3 - P_1) - t \mathbf{s} \|^2 = \\ &= [(P_3 - P_1) - t \mathbf{s}] \cdot [(P_3 - P_1) - t \mathbf{s}] = \\ &= (P_3 - P_1) \cdot (P_3 - P_1) - 2(P_3 - P_1) \cdot t \mathbf{s} + \| \mathbf{s} \|^2 t^2, \end{aligned} \quad (11)$$

求垂足的问题转化为上述问题的极小值问题,由高等数学知识可知,获得极小值的必要条件:

$$\frac{\partial f(t)}{\partial t} = 2 \| \mathbf{s} \|^2 t - 2(P_3 - P_1) \cdot \mathbf{s} = 0, \quad (12)$$

根据式(12)可得,垂足  $P_M$  对应的参数为:

$$t^* = \frac{(P_3 - P_1) \cdot \mathbf{s}}{\| \mathbf{s} \|^2} = (P_3 - P_1) \cdot \mathbf{s}, \quad (13)$$

垂足  $P_M$  为:

$$P_M = P_1 + t^* \mathbf{s}, \quad (14)$$

定义原点为  $P_3 M$  的中点:

$$O_i = \frac{P_M + P_3}{2}, \quad (15)$$

$X$  轴( $\mathbf{n}$  矢量)为过原点且垂直于面  $P_1 P_2 P_3$  的单位矢量,可按下式计算:

$$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{P}_1 \mathbf{P}_2 \times \mathbf{P}_1 \mathbf{P}_3}{\| \mathbf{P}_1 \mathbf{P}_2 \times \mathbf{P}_1 \mathbf{P}_3 \|}, \quad (16)$$

$Z$  ( $\mathbf{a}$  矢量)轴为单位矢量:

$$\mathbf{a} = \frac{\mathbf{P}_M \mathbf{P}_3}{\| \mathbf{P}_M \mathbf{P}_3 \|}, \quad (17)$$

则  $Y$  轴( $\mathbf{o}$  矢量)可按式计算:

$$\mathbf{o} = \mathbf{a} \times \mathbf{n}, \quad (18)$$

最后得姿态变换矩阵:

$$\mathbf{A} = [\mathbf{n} \ \mathbf{o} \ \mathbf{a}], \quad (19)$$

根据姿态变换矩阵  $\mathbf{A}$  可计算相应的姿态角  $(\alpha, \beta, \gamma)$  (本文采用  $Z-Y-X$  欧拉角表示)。

## 3.3 基于立体视觉的非合作目标位姿测量实例

### 3.3.1 追踪星及目标星的几何尺寸

不失一般性,假设追踪星主体尺寸为  $1\ 500\ \text{mm} \times 1\ 500\ \text{mm} \times 1\ 500\ \text{mm}$ ;相机安装于追踪星  $+X$  面,两相机的安装点在坐标系  $O_m X_m Y_m Z_m$  中的位置为  $(0, 0, -180\ \text{mm})$  和  $(0, 0, 180\ \text{mm})$ ;

相机视场角均为  $36^\circ$ ,分辨率为  $512 \text{ 像素} \times 512 \text{ 像素}$ 。目标星主体为一  $1\,000 \text{ mm} \times 1\,000 \text{ mm} \times 1\,000 \text{ mm}$  的正方体。追踪星和目标星的详细几何尺寸分别如图 5 和图 6 所示。

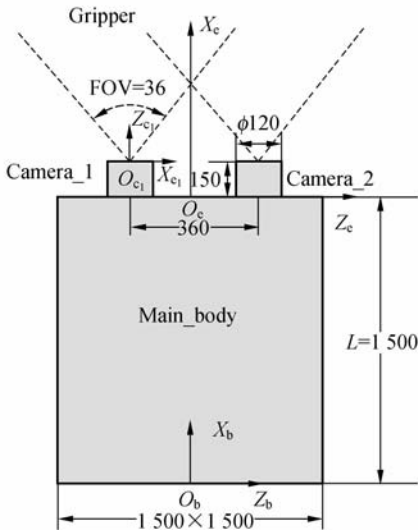


图 5 追踪星几何尺寸关系

Fig. 5 Geometry of chaser satellite

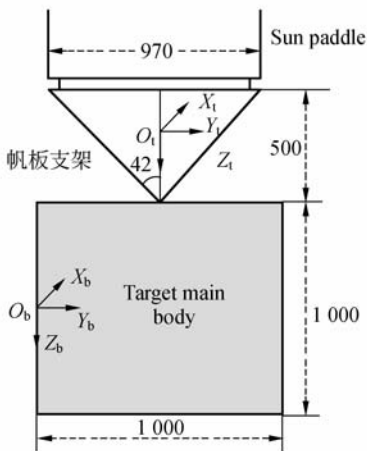


图 6 目标星几何尺寸关系

Fig. 6 Geometry of target satellite

### 3.3.2 模拟图像采集

图像采集是进行目标相对位姿测量的前提,为了从理论上验证相关算法的有效性,首先通过 OpenGL 建模,生成模拟的左、右相机图像。

在 OpenGL 中可通过设置透视投影来产生模拟的相机图像<sup>[17]</sup>。透视投影函数为:

void gluPerspective (GLdouble fovy, GLdouble aspect, GLdouble zNear, GLdouble

zFar);

上述函数创建一个对称透视视景体,参数 fovy 为视野在 X-Z 平面的角度,aspect 是投影平面宽度与高度的比率;zNear 和 zFar 分别是近、远裁剪面到视点的距离。

假设左右相机光心在  $O_m X_m Y_m Z_m$  中的位置为  $(150 \text{ mm}, 0, -180 \text{ mm})$  和  $(150 \text{ mm}, 0, 180 \text{ mm})$ ,且  $O_t X_t Y_t Z_t$  相对于  $O_m X_m Y_m Z_m$  的位置、姿态(理论值)分别为

$$\begin{cases} \mathbf{O}_t = [4\,729 \text{ mm} & 309 \text{ mm} & -586 \text{ mm}]^T \\ \boldsymbol{\Psi}_t = [5^\circ & 3^\circ & 12^\circ]^T \end{cases}, \quad (20)$$

通过 OpenGL 生成的模拟左右相机图像分别如图 7 和图 8 所示。

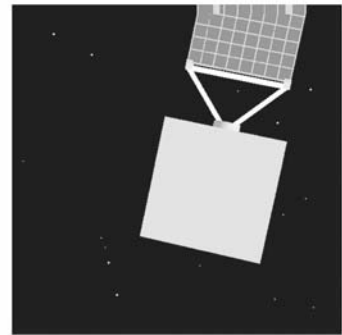


图 7 模拟左眼图像(含星空背景干扰)

Fig. 7 Simulated image of left eye camera(including stars in background)

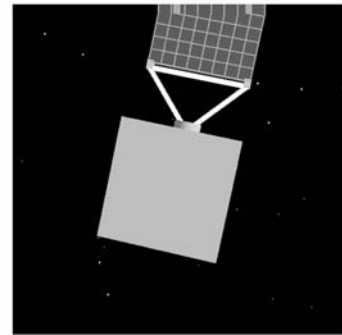


图 8 模拟右眼图像

Fig. 8 Simulated image of right eye camera

### 3.3.3 相机参数标定

上面给出的相机视场角、分辨率、光心位置等,是图形建模中使用的理论数据,而在实际中,需要采用标定算法标定出相关参数。在此,采用 3.3.2 的方法,生成模拟的标定图像,以标定上述

的虚拟相机参数。标定图像采用  $7 \times 7$  圆形光标阵列,通过设定不同的位置、指向,提取 21 幅图,然后采用最小二乘法标定相机的参数。左右相机的标定结果分别为:

$$C_L = \begin{bmatrix} 1.000\ 0 & 3.086\ 7 & -0.000\ 2 & 407.688\ 7 \\ 1.000\ 1 & 0.000\ 6 & 3.086\ 9 & -148.273\ 7 \\ 0.003\ 9 & 0.000\ 0 & -0.000\ 0 & -0.584\ 4 \end{bmatrix}, \quad (21)$$

$$C_R = \begin{bmatrix} 1.000\ 0 & 3.084\ 8 & -0.000\ 5 & -703.948\ 8 \\ 1.000\ 1 & -0.000\ 8 & 3.085\ 9 & -148.935\ 6 \\ 0.003\ 9 & -0.000\ 0 & -0.000\ 0 & -0.587\ 3 \end{bmatrix}, \quad (22)$$

3.3.4 图像处理及位姿测量过程

首先采用鼠标在原图上选定两个参考点,左、右相机图像中的两个参考点分别为

$$p_{r1-L} = [339, 146]^T, p_{r2-L} = [354, 70]^T, \quad (23)$$

$$p_{r1-R} = [275, 146]^T, p_{r2-R} = [291, 62]^T, \quad (24)$$

下面将以左相机为例,给出图像处理的详细过程。原始采集图像是含有星空背景的,如图 7 所示。经过中值滤波处理后,星空背景干扰被有效去除,如图 9 所示。对平滑后的图像采用 Canny 边沿检测器进行边沿检测,得到如图 10 所示的二值图像。采用 Hough 变换对二值图像进行直线提取,并根据  $p_{r1}$ 、 $p_{r2}$ ,可先确定帆板支架的两条顶边  $L_{T1}$  与  $L_{T2}$  (与线段  $p_{r1} p_{r2}$  相交,且交点离  $p_{r1}$  最近的两条直线即为  $L_{T1}$  与  $L_{T2}$ ,再根据已确定的  $L_{T1}$ 、 $L_{T2}$ ,确定帆板支架的两条左直线  $L_{L1}$ 、 $L_{L2}$ ,和两条右直线  $L_{R1}$ 、 $L_{R2}$ 。提取的结果如图 11 所示。

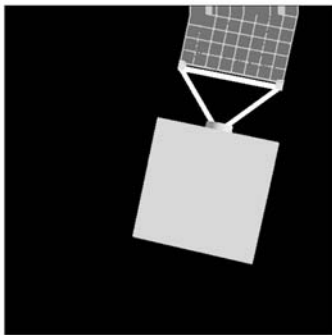


图 9 平滑滤波后的左相机图像(星空背景干扰已消除)  
Fig. 9 Left image after median filtering (stars in background are filtered)

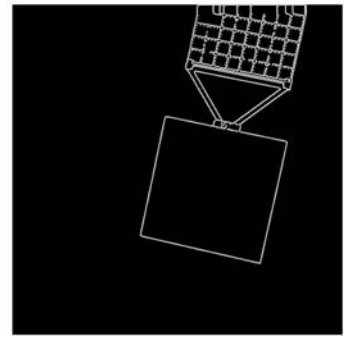


图 10 采用 Canny 滤波进行边沿检测后的左相机图像  
Fig. 10 Left image after Canny filtering

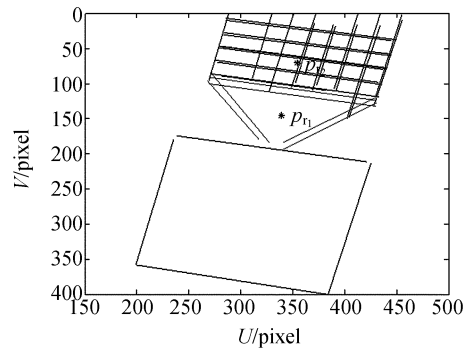


图 11 左相机图像中帆板支架的识别  
Fig. 11 Recognition of solar paddle's plank

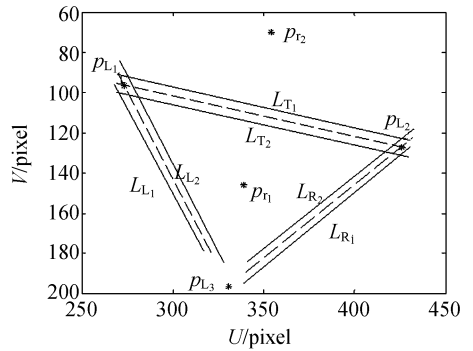


图 12 左相机图像中各边中心线三个交点的提取  
Fig. 12 Extracted results of three intersection points

确定出帆板支架的 6 条边后,进一步可确定 3 个特征点,该 3 点为帆板支架边中心线之间的两两交点。在左、右相机图像中提取的 3 点分别记为  $p_{L1}$ 、 $p_{L2}$ 、 $p_{L3}$  和  $p_{R1}$ 、 $p_{R2}$ 、 $p_{R3}$ 。提取的结果为(其中,左相机图像的提取结果如图 12 所示):

$$[p_{L1}, p_{L2}, p_{L3}] = \begin{bmatrix} 272.998\ 5 & 426.337\ 0 & 331.765\ 8 \\ 97.130\ 6 & 128.327\ 7 & 196.897\ 6 \end{bmatrix}, \quad (25)$$

$$[\hat{p}_{R_1}, \hat{p}_{R_2}, \hat{p}_{R_3}] = \begin{bmatrix} 211.317 1 & 363.220 2 & 269.820 3 \\ 97.398 9 & 128.303 9 & 196.717 5 \end{bmatrix}, \quad (26)$$

将式(25)、(26)代入式(8),进行 3D 重建,得到如下的结果:

$$[P_1, P_2, P_3] = \begin{bmatrix} 4.748 9 & 4.643 3 & 4.729 3 \\ -0.077 4 & 0.794 7 & 0.263 7 \\ -0.923 0 & -0.724 8 & -0.340 5 \end{bmatrix}, \quad (27)$$

根据上述 3D 重建的结果,构造目标坐标系,得到  $O_t X_t Y_t Z_t$  相对于  $O_m X_m Y_m Z_m$  的位置和姿态分别为:

$$\begin{cases} \hat{O}_t = [4\ 713.04\ \text{mm}, 311.22\ \text{mm}, -582.23\ \text{mm}]^T \\ \hat{\Psi}_t = [6.48^\circ\ 2.64^\circ\ 12.67^\circ]^T \end{cases}, \quad (28)$$

位置和姿态的测量误差为:

$$\begin{cases} O_t - \hat{O}_t = [15.97\ \text{mm}, -2.13\ \text{mm}, -3.94\ \text{mm}]^T \\ \Psi_t - \hat{\Psi}_t = [-1.48^\circ\ 0.36^\circ\ -0.67^\circ]^T \end{cases}. \quad (29)$$

## 4 仿真研究

### 4.1 仿真系统组成

为了对基于立体视觉的相对位姿测量、GNC 算法等进行仿真验证,本文在 VC 环境里建立了 3D 仿真系统,整个系统包括如下几个模块:基于立体视觉的相对位姿测量模块、追踪星 GNC 模块、目标星控制器模块、航天器动力学模块、航天器 3D 模型,以及双目相机成像与采集模块,如图 13 所示。

基于立体视觉的相对位姿测量模块的功能主要是根据左、右相机采集的图像,进行滤波、边缘检测、直线提取、立体匹配等,并进行相对位姿的测量,具体算法见第 3 节。

### 4.2 非合作航天器相对位姿测量的仿真

追踪星和目标星的几何尺寸如 3.3.1 所示。质量分别为  $m_1 = 1\ 500\ \text{kg}$  和  $m_2 = 1\ 000\ \text{kg}$ ,质心位于立方体的几何中心,转动惯量分别为:

$$I_c = \begin{bmatrix} 100 & -0.431 & -1.35 \\ -0.431 & 120 & 0.89 \\ -1.35 & 0.89 & 130 \end{bmatrix}, \quad (30)$$

$$I_t = \begin{bmatrix} 90 & -0.341 & -0.55 \\ -0.341 & 100 & 0.686\ 8 \\ -0.55 & 0.89 & 110 \end{bmatrix}, \quad (31)$$

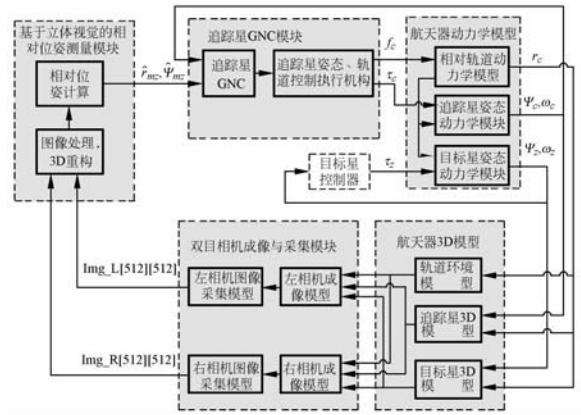


图 13 航天器交会对接仿真系统组成

Fig. 13 Structure of 3D simulation system for automatic rendezvous and docking

初始条件下(状态如图 14 所示),  $O_t X_t Y_t Z_t$  相对于  $O_m X_m Y_m Z_m$  的位置和姿态如式(20)所示。

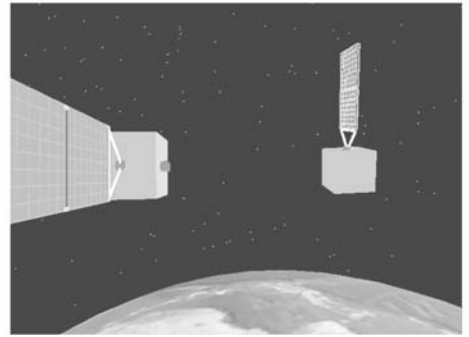


图 14 仿真初始条件

Fig. 14 Initial state of simulation

追踪星需要跟踪、接近目标星,并相对目标保持在相距 1.5 m 左右的距离,即期望位置和姿态为:

$$\begin{cases} O_{td} = [1\ 500\ \text{mm}\ 0\ \text{mm}\ 0\ \text{mm}]^T \\ \Psi_{td} = [0^\circ, 0^\circ, 0^\circ]^T \end{cases}. \quad (32)$$

追踪星根据测量数据,对目标进行跟踪、接近,并进行位置保持,仿真结束时位置保持的状态如图 15 所示,图 16 为跟踪接近过程中实际位姿与其测量值的关系;图 17 为测量误差,即真实值与测量值之差。

上述仿真结果表明,采用基于立体视觉的方法,能有效地识别非合作目标,并测量其相对于追踪星的位置和姿态。对于较远距离( $> 2.5\ \text{m}$ ),位置测量精度优于 40 mm,近距离处位置( $< 2.0\ \text{m}$ )精度优于 10 mm 左右,相对姿态精度优于  $2^\circ$ 。

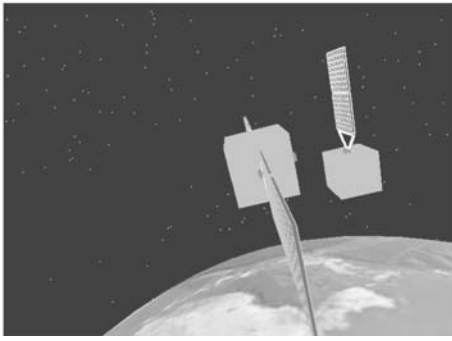


图 15 跟踪、接近目标并保持相距 1 500 mm 的位置

Fig. 15 Chaser tracking, approaching and initial states of simulation

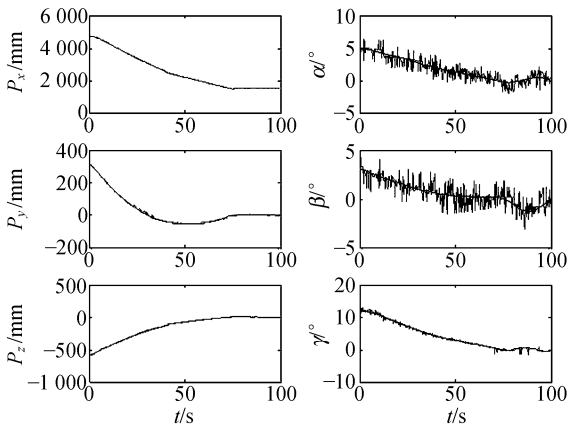


图 16 相对位姿、姿态跟踪情况

Fig. 16 Relative positions and attitudes during tracking

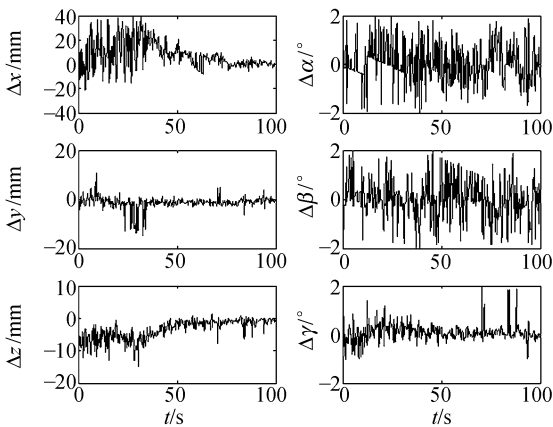


图 17 相对位姿、姿态测量误差

Fig. 17 Tracking errors of relative positions and attitudes during tracking

#### 4.3 误差分析与提高测量精度的策略

根据理论分析和仿真计算,可知影响该算法

测量精度的主要因素有:

1) Canny 算法、Hough 变换中相关参数的选择: Canny 算法和 Hough 变换是本文方法的两个关键步骤,每个算法都需要指定多个参数。对于 Canny 边沿检测器,需要给定高斯滤波的标准方差、低阈值和高阈值之间的比例以及高阈值占图像像素总数的比例等 3 个参数;而 Hough 变换,需要指定  $\rho, \theta$  的量化步长、最小线段长度、允许的最大间隔、直线检测循环次数等参数。不同参数的选择,会导致不同的运算速度、测量精度等。以 Hough 变换为例,  $\rho, \theta$  的步长取得越小,直线提取的精度越高,但算法的运算量成级数增长,实时性下降很大;

2) 图像处理时延引起的误差: 本文给出的是追踪星跟踪、接近非合作目标并进行位置保持整个过程中的测量精度,是一个“实时、动态、闭环”的测量过程,追踪星的 GNC 模块根据测量结果,产生追踪星的控制力、力矩,该控制力、力矩作用于系统的动力学模型,输出追踪星与目标星的位置、姿态。动力学仿真周期为 25 ms、测量数据输出频率为 4 Hz(每 250 ms 输出一次测量数据),加上图像处理需要的时间,从图像采集到输出数据之间需要 250~500 ms,此即相对位姿测量的时延,若相对运动速度为 80 mm/s,则测量时延产生的误差为 20~40 mm;

3) 相机参数标定精度引起的误差: 由式(8)可知,3D 重建依赖于相机的变换矩阵  $C$ ,该矩阵包含了相机的内、外参数,只能通过标定得出,因此标定精度直接影响了 3D 重建的精度,进而影响位姿测量精度;

4) 相对距离和姿态,两星相距越远,待识别区域所占的像素数越少,特征提取精度对位姿测量的精度影响越大;

5) 仿真图像生成: 本文仿真中用到的相机图像为采用计算机图形图像技术生成的虚拟图像,用 OpenGL 生成的图像有一到两个像素宽的过渡带(在图像边沿存在锯齿形图像),导致边沿检测会出现偏移,从而引入测量误差。

针对上述的主要误差源,未来的研究将考虑从以下几个方面提高精度:

1) 采用自适应的方法调整 Canny 算法、Hough 变换中的相关参数。设定参数调整的条件及相应的判据,然后根据图像采集和前期处理

的结果,实时、自主更新相关参数;

2) 提高图像处理算法的效率,减小时延,运动-立体双匹配约束将是一个好的选择<sup>[18]</sup>;

3) 进一步提高标定精度:目前采用的是线性标定方法,未来将研究高精度的非线性标定方法;

4) 采用可变焦相机,以兼顾不同距离下特征提取的精度。远距离时减小视场角,提高待识别区域所占图像比例,而近距离时可增大视场角,保证所观测目标位于相机视场内;

5) 建立实验系统,代替仿真系统。实验系统中采用实际的待识别目标和相机,以排除由于仿真图像生成过程中产生的图像误差。

## 5 结 论

非合作目标的识别与位姿测量,是开展对非合作目标的绕飞监测、跟踪接近、交会对接,以对其进行在轨服务(追踪星上带上操作臂后,可对目标进行部件更换、故障机构的展开等操作)的关键

前提,同时在轨道垃圾清除方面也起着重要作用。本文提出了基于立体视觉的非合作目标相对位姿的测量方法,并建立了仿真系统,对跟踪接近过程中的相关算法进行了仿真验证。仿真结果表明,对于较远距离( $>2.5\text{ m}$ ),位置测量精度优于 $40\text{ mm}$ ,而近距离内( $<2.0\text{ m}$ )优于 $10\text{ mm}$ ,相对姿态精度优于 $2^\circ$ ,基本满足对非合作目标进行跟踪、接近、绕飞等位姿测量要求。

文中还对测量误差进行了详细分析,认为误差源主要有5个方面:1)Canny 边沿检测、Hough 直线提取中关键参数的选择;2)图像处理时延;3)相机参数标定精度;4)不同的相对距离和姿态;5)虚拟图像生成的误差。未来的研究将侧重于进一步提高测量的精度和算法的实时性,包括采用参数的自适应调整,提高算法效率以减小处理时延,提高标定精度,采用可变焦相机等手段,同时建立实验系统,对非合作目标的识别进行实验研究。另外,为真实反映跟踪接近过程中星空背景的变化,将模拟星图的动态变化<sup>[19]</sup>。

## 参考文献:

[1] 崔乃刚,王平,郭继峰,等. 空间在轨服务技术发展综述[J]. 宇航学报, 2007,28(4):33-39.

CUI N G, WANG P, GUO J F, *et al.*. A review of on-orbit servicing[J]. *Journal of Astronautics*, 2007,28(4):33-39. (in Chinese)

[2] 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[J]. *International Journal of Robotics Research*, 2003,22(5):321-335.

[3] WILSON J R. Satellite hopes ride on orbital express [J]. *Aerospace America*, 2007,45(2):30-35.

[4] 王保丰,李广云,陈继华,等. 航天器交会对接中测量靶标的两种设计方法[J]. 宇航学报, 2008,29(1):162-166.

WANG B F, LI G Y, CHEN J H, *et al.*. Two methods of coded targets used in rendezvous and docking[J]. *Journal of Astronautics*, 2008,29(1): 162-166. (in Chinese)

[5] 张正忠,郝颖明,董再励,等. 基于 OpenGL 的交会

对接仿真系统[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2003,21(5):34-37.

ZHANG Z Z, HAO Y M, DONG Z L, *et al.*. Design and application of special carrier pose measurement semi-physical simulation system based on OpenGL[J]. *Journal of Jilin University (Information Science Edition)*, 2003, 21(5): 34-37. (in Chinese)

[6] 张庆君,胡修林,叶斌,等. 基于双目视觉的航天器间相对位置和姿态的测量方法[J]. 宇航学报, 2008,29(1):156-161.

ZHANG Q J, HU X L, YE B, *et al.*. A binocular vision-based relative position and attitude determination between spacecrafts[J]. *Journal of Astronautics*, 2008,29(1):156-161. (in Chinese)

[7] 张世杰,曹喜滨,陈闽. 非合作航天器间相对位姿的单目视觉确定算法[J]. 南京理工大学学报, 2006,30(5):564-568.

ZHANG S J, CAO X B, CHEN M. Monocular vision-based relative pose parameters determination for non-cooperative spacecrafts [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*,

- 2006,30(5):564-568. (in Chinese)
- [8] BISCHOF B, GMBH A. Roger - robotic geostationary orbit restorer[C]. *54th International Astronautical Congress of the International Astronautical Federation, Bremen, Germany, 2003; IAC-03-IAA. 5. 2. 08.*
- [9] THIENEL J K, VANEPOEL J M, SANNER R M. Accurate state estimation and tracking of a non-cooperative target vehicle [C]. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Keystone, CO, United States, 2006; 5511-5522.*
- [10] INABA N, ODA M, ASANO M. Rescuing a stranded satellite in space -experimental robotic capture of non-cooperative satellites[J]. *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, 2006,48(162):213-220.*
- [11] HIRZINGER G, LANDZETTEL K, BRUNNER B, et al.. DLR's robotics technologies for on-orbit servicing [J]. *Advanced Robotics, 2004, 18(2): 139 - 174.*
- [12] LANDZETTEL K. TEChnology SAteLLite for demonstration and verification of Space systems [C]. [http://www.dlr.de/rm-neu/en/desktop-default.aspx/tabid-3825/5963\\_read-8759/](http://www.dlr.de/rm-neu/en/desktop-default.aspx/tabid-3825/5963_read-8759/); 2008.
- [13] 邱茂林, 马颂德, 李毅. 计算机视觉中摄像机定标综述[J]. *自动化学报, 2000,26(1):43-55.*  
 QIU M L, MA S D, LI Y. Overview of camera calibration for computer vision[J]. *Acta Automatica Sinica, 2000,26(1):43-55.* (in Chinese)
- [14] 贾云得. 机器视觉[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- JIA Y D. *Computer Vision* [M]. Beijing: Science Press, 2000. (in Chinese)
- [15] 余家祥, 萧德云, 姜鲁东. 应用 Hough 变换的炮射航空摄像机外参数估计方法[J]. *光学精密工程, 2007,15(8):1269-1274.*  
 YU J X, XIAO D Y, JIANG L D. Exterior parameter estimation for aerial camera based on Hough transform [J]. *Opt. Precision Eng., 2007, 15(8): 1269-1274.* (in Chinese)
- [16] 崔继文, 谭久彬, 敖磊, 等. 约束抽样 Hough 变换的光纤端面精确定位[J]. *光学精密工程, 2007, 15(1):9-15.*  
 CUI J W, TAN J B, AO L, et al.. Precise location for optical fiber surface with sampling restraint Hough transformation[J]. *Opt. Precision Eng., 2007,15(1):9-15.* (in Chinese)
- [17] OPENGL A R B, SHREINER D, WOO M, et al.. *OpenGL(R) Programming Guide: The Official Guide to Learning OpenGL* [M]. 5th Edition, Addison-Wesley Professional, 2005.
- [18] 张春森. 三维运动分析中的运动-立体双匹配约束[J]. *光学精密工程, 2007,15(6):945-950.*  
 ZHANG C S. Motion-stereo double matching restriction in 3D movement analysis[J]. *Opt. Precision Eng., 2007, 15(6): 945-950.* (in Chinese)
- [19] 巩岩, 胡宜宁, 赵阳. 基于数字光处理技术的小型星模拟器设计[J]. *光学精密工程, 2007,15(11): 1698-1703.*  
 GONG Y, HU Y N, ZHAO Y. Design of a mini star simulator based on digital optical processing [J]. *Opt. Precision Eng., 2007, 15(11): 1698-1703.* (in Chinese)

#### 作者简介:



徐文福(1979—),男,博士,讲师,贵州安顺人,2004年于合肥工业大学获得硕士学位,2007年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事空间机器人规划与控制、图像处理、模式识别等方面的研究。E-mail: wfxu@robotsat.com



刘宇(1971—),男,博士后,副教授,2004年3月于哈尔滨工业大学获博士学位。2004年3月-2006年12月在哈尔滨工业大学深圳研究院空间技术发展研究中心做博士后研究,主要从事空间机器人的运动学规划、标定和控制以及空间机器人、机械设计、参数辨识、运动学标定等方面的研究。E-mail: yliu@robotsat.com



梁 斌(1968—),男,博士后,教授,博士生导师,1994年于清华大学获得博士学位。1994年12月~1997年5月在航天科技集团五院五〇二所博士后流动站做博士后研究,主要从事空间机器人、自动控制等方面的研究。E-mail: bliang@robotsat.com



强文义(1937—),男,教授,博士生导师,俄罗斯工程院外籍院士,1960年于哈尔滨工业大学获得学士学位,主要从事智能控制和智能机器人、复杂系统控制与决策等方面的研究。E-mail: wyqiang@hit.edu.cn



李 成(1972—),男,博士,1999年于合肥工业大学获工学博士学位,1999年9月至2001年11月在航天科技集团公司五院502所做博士后研究,2003年1月至2006年5月在哈尔滨工业大学做博士后研究工作,主要从事空间机器人、制导、导航与控制方面的研究。E-mail: cli@robotsat.com

## ●下期预告

# 基于 EPICS 的 SSRF-X 射线小角散射 实验站运动控制系统

刘 倩<sup>1,2</sup>,边风刚<sup>1</sup>,柳 义<sup>1</sup>,王 劼<sup>1</sup>,夏绍建<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 上海应用物理研究所,上海 201800;

2. 中国科学院 研究生院,北京 100049)

运动控制系统是上海光源(SSRF)X射线小角散射(SAXS)实验站建设的重要组成部分,其自动化程度、控制精度和系统的易操作性直接影响实验站各项功能的实现以及运行维护性能。SSRF-SAXS实验站运动控制系统通过对实验站的运动部件的远程精确控制来实现对光斑的准直调节和寻找最佳的散射实验样品放置位置,以满足不同用户的实验环境要求。该系统采用国际加速器控制界称为“标准模型”的分布式控制体系结构,应用 EPICS 软件实现了对实验站的 23 个运动部件的远程运动控制,被控设备包括两个四刀口单色光狭缝及其三维狭缝支撑平台、七维样品台和两个 Beam-Stop。运动测试结果表明:该系统最大的运动分辨率为  $20\ \mu\text{m}$ ,最小的运动分辨率为  $0.333\ 33\ \mu\text{m}$ ,运动误差约为 1%。测试结果满足小角散射实验站运动控制的要求,具有稳定性好,可重复性优和精度高的特点。目前该系统已经在 SSRF-SAXS 实验站调试运行中得到成功应用。