

多像机非共视场的非合作飞行器位姿测量方法

苗锡奎^{1,2,3,4}, 朱 枫^{1,3,4}, 郝颖明^{1,3,4}

- (1. 中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院光电信息处理重点实验室, 辽宁 沈阳 110016;
4. 辽宁省图像理解与视觉计算重点实验室, 辽宁 沈阳 110016)

摘要:以空间非合作飞行器视觉位姿测量为背景, 针对近距离及超近距离情况下由于成像空间小、像机视场等限制, 位姿测量所用的视觉特征将不能在单像机中完整成像而无法完成定位的问题, 提出一种多像机非共视场的非合作飞行器位姿测量方法。首先将多个像机配置成非共视场的形式, 标定各个像机之间的位置关系; 然后利用多个像机对目标上的不同特征成像, 来自不同像机的底层信息既有冗余又有互补, 为位姿测量提供足够的视觉特征和几何特征; 最后结合像机之间的位置关系将各个像机中的特征信息进行融合, 进而以闭式解法计算目标位姿。实验结果验证了该方法的有效性以及在大目标近距离位姿测量应用中的优越性。

关键词: 位姿测量; 计算机视觉; 在轨服务; 非合作目标; 多像机非共视场

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)03-0709-07

Pose measurement method for non-cooperative space vehicle using multiple non-overlapping cameras

Miao Xikui^{1,2,3,4}, Zhu Feng^{1,3,4}, Hao Yingming^{1,3,4}

- (1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Key Laboratory of Optical-Electronics Information Processing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;
4. Key Laboratory of Image Understanding and Computer Vision, Liaoning Province, Shenyang 110016, China)

Abstract: Taking pose measurement of non-cooperative space vehicle as research background, a new pose measurement method using multiple cameras with non-overlapping or slightly overlapping views was proposed to solve the problem that monocular vision-based method can not complete the pose estimation in close and ultra-close range, because of the limitation of the imaging space and the field of view, a monocular camera can not observe all the visual features used for pose estimation. Firstly, multiple cameras were configured in non-overlapping form, and the rotations and translations between cameras were calibrated. Then different cameras photographed the different features on the target, the underlying information from different cameras were both redundant and complementary, which provided adequate

收稿日期: 2012-07-11; 修订日期: 2012-08-19

基金项目: 国家自然科学基金(51005229)

作者简介: 苗锡奎(1984-), 男, 博士生, 主要从事计算机视觉、视觉测量与导航、图像处理等方面的研究。Email: miaoxikui@sia.cn

导师简介: 朱枫(1962-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事计算机视觉、视觉测量与导航、模式识别等方面的研究。

Email: zhufeng@sia.cn

visual and geometric features for pose measurement. Finally, all the features information from different cameras were fused according to the relationship between cameras to calculate the pose in closed form solution. The experiment results demonstrate its effectiveness and superiority of the method for pose estimation for large target in close and ultra-close range.

Key words: pose measurement; computer vision; on-orbit servicing; non-cooperative target; multiple non-overlapping cameras

0 引言

空间开发与利用一直是人类不懈的追求,无论是卫星、飞船、飞行器、乃至空间站等都给人类带来了巨大的经济价值和军事价值。随着技术的进步,人类空间探索活动更加频繁。据参考文献[1]统计,全球每年大约平均发射 80~130 颗卫星,其中就有 7~13 颗卫星失效。例如北斗-1D、北斗-G2、美国导弹预警卫星 DSP-23、Eutelsat 公司发射的 W2M、W2A 卫星等。飞行器的损坏和失效会带来巨大的经济损失,造成了不良的国内、国际影响。因此不少国家正在开展空间机器人在轨服务系统^[2-5]的研究与设计,希望利用该机器人系统对失效飞行器进行在轨维修,如更换故障单元、燃料补给等。不但可以大大减少经济损失,还能极大提高国际声誉,增加经济效益和社会效益等。

在轨执行空间任务一般都会有自主接近和近距离及超近距离作业的需求,而位姿(两目标之间的相对位置和姿态)测量是实现自主接近和近距离作业的关键技术。基于视觉的方法是位姿测量重要的方法之一,尤其是在近距离及超近距离下,视觉传感器几乎是唯一可以使用的传感器。而现有的视觉位姿测量方法主要是针对合作目标^[6-8],即安装有专用视觉测量标志器的目标,而且标志器能在单像机或立体视觉像机中完整成像。对于没有安装测量标志器的非合作目标,只能利用目标上的自然特征,其测量难度远远大于合作目标位姿测量。使用视觉方法测量位姿信息的方法目前国内外的研究刚刚起步,研究理论和成果还相对比较薄弱。Inaba 等人^[9]提出了一种对非合作目标在轨识别与捕获的方法,假定目标的外形、尺寸及质量等都已知。DLR 正在开展的 DEOS^[10](德国轨道服务任务)将重点对非合作目标的接近与捕获技术进行研究。徐文福等人^[11]将非合作飞行器图像下载到地面,

利用人机交互的方式为追踪飞行器提供人工合作信息辅助完成特征提取与位姿解算。高学海等人^[12]基于单目手眼像机和激光测距仪,提出了一种尺寸未知的空间矩形平面的位姿测量算法。对于非合作目标,其上的自然特征分布往往不集中。在近距离及超近距离情况下,位姿测量所使用的视觉特征由于成像空间小而无法完整成像,当前位姿测量算法将会失效,而且也没有相关文献对其讨论。

鉴于此,文中针对大目标近距离单像机无法完成测量的情况,提出一种新的解决方法,即多像机非共视场的非合作飞行器位姿测量方法。利用非共视场的多个像机来获得目标上更多的视觉特征和几何特征。并将多个像机中的特征信息融合,推导了位姿参数的闭式解法。实验结果表明,该方法具有一定的鲁棒性和优越性。

1 多像机非共视场位姿测量系统

1.1 像机配置

单像机在近距离情况下,由于成像空间和视场的限制,位姿测量所用的视觉特征将不会在单像机图像平面上完整成像,而使定位失败。一个有效的途径是增加额外像机协同完成测量任务。然而当目标飞行器与追踪飞行器近距离接近时,由于空间限制与工程安装干涉的限制,多个像机很难做到完全共视场。即使能够完全共视场,如果视场内目标上不具有足够的视觉特征和几何特征仍不能完成位姿测量。因此各像机之间只能非完全共视场安装,利用多个非完全共视场的像机分别对不同的特征成像来获取更多的视觉特征和几何特征,组合完成位置与姿态的测量是工程实现的有效途径之一。如下图 1 所示的多像机非共视场位姿测量系统,像机组(包括手眼像机)中各像机非共视场安装,各像机分别对不同的特征(点特征、线特征)成像。

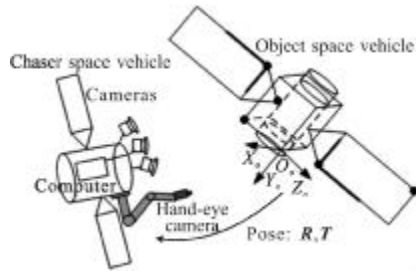


图 1 多像机非共视场非合作飞行器位姿测量系统

Fig.1 Pose measurement system for non-cooperative space vehicle using multiple non-overlapping cameras

1.2 目标识别与测量对象的选择

视觉位姿测量的两个主要步骤是特征提取和位姿解算,其中前者主要是根据目标的视觉特征信息进行特征选择与提取;后者主要是根据像机成像模型、目标成像参数及几何特征信息进行位姿解算。由此可见目标必需具有足够的视觉特征和几何特征,才能完成位姿测量。空间飞行器上虽然具有一些典型的部件,有的视觉特征已知,有的几何特征已知。但由于空间环境是一个条件恶劣的动态非结构化环境,而且视觉位姿测量也需要一些特定的约束,因此并不是每一个部件都可以作为视觉位姿测量的依据。由于飞行器上普遍具有两块矩形太阳能帆板部件,具有全局性和唯一性特征,而其可以提供足够的视觉特征和几何特征。因此文中以太阳能帆板为例,说明多像机非共视场位姿测量方法。

另外,多像机非共视场位姿测量系统所需要的像机数目主要取决于目标飞行器所能提供的特征,根据两矩形帆板部件所能提供的特征信息,该方法中只需配置“一静一动”双目非共视场像机即可协同完成位姿测量任务。具体配置方式如下:一台像机固定安装在追踪飞行器上,另一台像机安装在机械手上形成手眼像机,如图 2 所示。图中两个虚线圆表示两个像机的有效视场以及所能摄取到的目标特征。

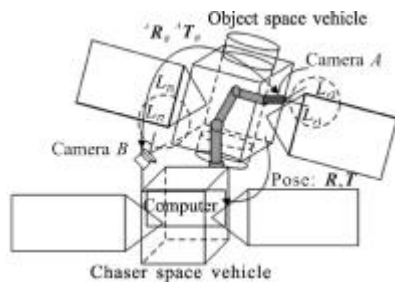


图 2 一静一动双目非共视场像机配置方式

Fig.2 Configuration of two non-overlapping cameras: one stationary camera and one hand-eye camera

2 近距离非合作飞行器相对位姿测量

目标飞行器上有两块协同动作且始终保持在一个平面上的矩形太阳能帆板,该方法正是针对两块帆板上互相垂直的两条边而设计,如图 3 所示。如何利用部分部件特征完成非合作飞行器位姿测量是该方法要解决的主要问题。

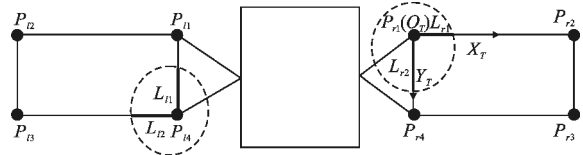


图 3 简化的飞行器模型与目标坐标系

Fig.3 Model of simplified space vehicle and object coordinate system

2.1 坐标系定义

为了叙述方便,首先建立 A 像机坐标系 Σ_A 、B 像机坐标系 Σ_B 、机械手坐标系 Σ_H 、目标坐标系 Σ_T ,分别定义如下。

A 像机坐标系 Σ_A 和 B 像机坐标系 Σ_B : 原点 O_A, O_B 位于小孔成像的针孔处, Z_A, Z_B 轴为像机的光轴,像机的像平面平行于 $X_A(X_B)$ 轴和 $Y_A(Y_B)$ 轴。

机械手坐标系 Σ_H : Z_H 轴与像机 A 的光轴 Z_A 相同, X_H 轴垂直于 Z_H 轴,方向由机械手指张开方向确定, Y_H 轴由右手螺旋法则确定。

目标坐标系 Σ_T : 以目标飞行器上手眼像机(A 像机)所观测到的右侧太阳能帆板部件 P_{r1} 点为原点建立坐标系, $P_{r1}P_{r2}$ 为 X_T 轴, $P_{r1}P_{r3}$ 为 Y_T 轴,按照右手螺旋法则确定 Z_T 轴(未画出),如图 3 所示。

初始时,机械手坐标系 Σ_H 与 A 像机坐标系 Σ_A 在地面精确标定,旋转矩阵 ${}^H R_A$ 和平移向量 ${}^H T_A$ 表示两者之间的刚体变换。机械手上像机 A 与固定像机 B 之间的位置关系精确标定,旋转矩阵 ${}^A R_{B0}$ 和平移向量 ${}^A T_{B0}$ 表示两个像机之间的初始位置关系。控制器能够根据 ${}^H R_A, {}^H T_A$ 与 ${}^A R_{B0}, {}^A T_{B0}$ 及机械手当前位置实时解算出像机 A 与固定像机 B 之间的位置关系 ${}^A R_B, {}^A T_B$ 。由于 A 像机坐标系 Σ_A 与机械手坐标系 Σ_H 之间的位置关系在执行任务过程中是不变的,为了描述方便,考虑的是目标坐标系 Σ_T 与 A 像机坐标系 Σ_A 之间的相对位置及相对姿态的测量。

2.2 特征提取

位姿解算的前提是首先要将目标上的特征提取

出来, 如上文所述该方法所利用的目标特征是两对相互垂直的边, 为此需要将直线特征提取出来。由于直线特征提取等已有诸多研究, 文中不做相应的研究, 详见参考文献[13-14]等。另外还可以使用天地交互的方式由地面操作人员提供人工合作信息辅助完成特征提取^[10], 在此仅考虑直线特征提取后的目标位姿解算。

2.3 多像机非共视场位姿解算方法

位姿解算的依据是帆板部件的几何特征约束, 其几何特征约束有: 两块矩形帆板始终共面且帆板的各条边及角点在目标飞行器上的位置已知。近距离执行空间任务时, **A** 像机的视场范围为目标飞行器右侧太阳能帆板上的虚线圆, **B** 像机的视场范围为目标飞行器左侧太阳能帆板上的虚线圆, 利用图像处理的方法可以将帆板上的四条直线 L_{r1} 和 L_{r2} , L_{l1} 和 L_{l2} 提取出来。图 4 所示为像机 **A**、**B** 对部分帆板部件成像效果图, 以图 4 为例介绍双目非共视场位姿测量方法。

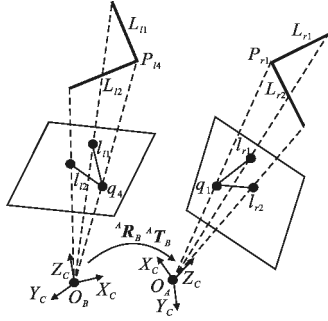


图 4 像机 **A**、**B** 对不同部位成像效果图

Fig.4 Images of two solar panels in camera **A** and **B**

设空间直线 L_i 在像机坐标系下的单位方向向量是 $V_i(A_i, B_i, C_i)$, 其在图像平面的投影为图像直线 l_i , 其直线方程为: $ax+by+c=0$ 。透视投影模型将空间直线 L_i , 图像直线 l_i 和像机光心约束在解析平面 S_i 上, 解析平面 S_i 的法向量 $N_i=(N_{i1}, N_{i2}, N_{i3})$ 可表示为: $N_i=[af, bf, c_i]^T$, f 是像机的焦距。

在 **B** 像机坐标系 Σ_B 下, 设太阳能帆板平面 π 的法向量为 $N_B(N_{B1}, N_{B2}, N_{B3})$, 左侧太阳能帆板上的直线 L_{l1}, L_{l2} 的方向向量为 $V_{l1}(A_{l1}, B_{l1}, C_{l1})$ 和 $V_{l2}(A_{l2}, B_{l2}, C_{l2})$, L_{l1}, L_{l2} 的解析平面 S_{l1} 与 S_{l2} 的法向量分别为 $N_{l1}=(N_{l11}, N_{l12}, N_{l13})$, $N_{l2}=(N_{l21}, N_{l22}, N_{l23})$, 则有:

$$\begin{cases} N_{li} \perp V_{li} \\ N_B \perp V_{li} \end{cases} \Rightarrow V_{li} = N_B \times N_{li}, i=1, 2$$

$$V_{li} = \begin{bmatrix} N_{B2} & N_{B3} \\ N_{l12} & N_{l13} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} N_{B3} & N_{B1} \\ N_{l13} & N_{l11} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} N_{B1} & N_{B2} \\ N_{l11} & N_{l12} \end{bmatrix}^T$$

$V_{li}=[(N_{B2}N_{li3}-N_{B3}N_{li2}), (N_{B3}N_{li1}-N_{B1}N_{li3}), (N_{B1}N_{li2}-N_{B2}N_{li1})]^T$ 式中: N_{li} 为已知量; $V_{li}(A_{li}, B_{li}, C_{li})$, $i=1, 2$ 可表示为含有未知量 $N_B(N_{B1}, N_{B2}, N_{B3})$ 的向量。至此 L_{l1}, L_{l2} 向量在 **B** 像机坐标系下的表达式求出。像机 **A** 与像机 **B** 之间的位置关系 ${}^A R_B, {}^A T_B$ 可以由机械手控制器实时给出, 故 $V_{l1}(A_{l1}, B_{l1}, C_{l1})$ 和 $V_{l2}(A_{l2}, B_{l2}, C_{l2})$ 通过 ${}^A R_B$ 可以转换到像机 **A** 坐标系下表示。

$$V_{l1}'(A_{l1}', B_{l1}', C_{l1}') = {}^A R_B V_{l1}(A_{l1}, B_{l1}, C_{l1})$$

$$V_{l2}'(A_{l2}', B_{l2}', C_{l2}') = {}^A R_B V_{l2}(A_{l2}, B_{l2}, C_{l2})$$

在 **A** 像机坐标系 Σ_A 下, 太阳能帆板平面 π 的法向量可表示为 $N_A(N_{A1}, N_{A2}, N_{A3})^T = {}^A R_B(N_{B1}, N_{B2}, N_{B3})^T$, 右侧太阳能帆板上的直线 L_{r1}, L_{r2} 的方向向量为 $V_{r1}(A_{r1}, B_{r1}, C_{r1})$ 和 $V_{r2}(A_{r2}, B_{r2}, C_{r2})$, L_{r1}, L_{r2} 的解析平面 S_{r1}, S_{r2} 法向量分别为 $N_{r1}(N_{r11}, N_{r12}, N_{r13})$, $N_{r2}(N_{r21}, N_{r22}, N_{r23})$, 利用上面相同的方法可以求得含有未知变量 $N_B(N_{B1}, N_{B2}, N_{B3})$ 的 $V_{r1}(A_{r1}, B_{r1}, C_{r1})$, $V_{r2}(A_{r2}, B_{r2}, C_{r2})$ 在 **A** 像机坐标系 Σ_A 下的表达式。

$$\begin{cases} N_{ri} \perp V_{ri} \\ N_A \perp V_{ri} \end{cases} \Rightarrow V_{ri} = N_A \times N_{ri}, i=1, 2$$

$$V_{ri} = \begin{bmatrix} N_{A2} & N_{A3} \\ N_{r12} & N_{r13} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} N_{A3} & N_{A1} \\ N_{r13} & N_{r11} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} N_{A1} & N_{A2} \\ N_{r11} & N_{r12} \end{bmatrix}^T$$

$$V_{ri}=[(N_{A2}N_{ri3}-N_{A3}N_{ri2}), (N_{A3}N_{ri1}-N_{A1}N_{ri3}), (N_{A1}N_{ri2}-N_{A2}N_{ri1})]^T$$

利用 $V_{r1}(A_{r1}, B_{r1}, C_{r1})$, $V_{r2}(A_{r2}, B_{r2}, C_{r2})$, $V_{l1}'(A_{l1}', B_{l1}', C_{l1}')$, $V_{l2}'(A_{l2}', B_{l2}', C_{l2}')$ 及其与解析平面法向量之间的关系可列出如下方程组(1), 求出 $N_B(N_{B1}, N_{B2}, N_{B3})$ 中包含的 3 个未知数 N_{B1}, N_{B2}, N_{B3} 。

$$\begin{cases} N_{r1} \cdot V_{l2}' = 0 \\ N_{r2} \cdot V_{l1}' = 0 \\ N_{l1}' \cdot V_{l2}' = 0 \\ N_{r2} \cdot V_{r1} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

在计算出 $N_B(N_{B1}, N_{B2}, N_{B3})$ 之后, 四条特征直线在 **A** 像机坐标系下的方向向量就可解算出来, 由于它们在目标坐标系下的方向向量已知, 利用旋动理论就可以计算出两坐标系之间的旋转矩阵 R 。

在 **B** 像机坐标系 Σ_B 下, 设太阳能帆板平面 π 的方程为 $N_{B1}x + N_{B2}y + N_{B3}z = d_1$, $P_{14}(x_{14}, y_{14}, z_{14})$ 点是由帆板平面 π , 解析平面 S_{l1}, S_{l2} 交点确定, 即:

$$\begin{cases} N_{B1} & N_{B2} & N_{B3} \\ N_{111} & N_{112} & N_{113} \\ N_{121} & N_{122} & N_{123} \end{cases} \begin{cases} x_{14} \\ y_{14} \\ z_{14} \end{cases} = \begin{cases} d_1 \\ 0 \\ 0 \end{cases} \quad \text{简记为 } M_1 \begin{cases} x_{14} \\ y_{14} \\ z_{14} \end{cases} = \begin{cases} d_1 \\ 0 \\ 0 \end{cases} \quad (2)$$

在 A 像机坐标系 Σ_A 下, 设太阳能帆板平面 π 的方程为 $N_{A1}x+N_{A2}y+N_{A3}z=d_2$, $P_{r1}(x_{r1}, y_{r1}, z_{r1})$ 点是由帆板平面 π , 解析平面 S_{r1}, S_{r2} 交点确定, 即:

$$\begin{cases} N_{A1} & N_{A2} & N_{A3} \\ N_{r11} & N_{r12} & N_{r13} \\ N_{r21} & N_{r22} & N_{r23} \end{cases} \begin{cases} x_{r1} \\ y_{r1} \\ z_{r1} \end{cases} = \begin{cases} d_2 \\ 0 \\ 0 \end{cases} \quad \text{简记为 } M_2 \begin{cases} x_{r1} \\ y_{r1} \\ z_{r1} \end{cases} = \begin{cases} d_2 \\ 0 \\ 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: M_1, M_2 中所有系数均已知; d_2 是未知数 d_1 关于 ${}^A R_B, {}^A T_B$ 的表达式, 两个方程中只有一个未知数, 从公式(2)可以得出 P_{14} 点的坐标, 然后将该坐标转换到 A 像机坐标系下 P_{14}' 。同理从公式(3)中可以计算出 P_{r1} 点在 A 像机坐标系下的坐标。 $P_{14}'P_{r1}$ 距离 d_3 已知, 有如下方程。由该方程可解算 d_1, d_2 , 求出 P_{14}' 和 P_{r1} 的坐标。

$$P_{14}'P_{r1}=d_3 \quad (4)$$

对于空间一点, 假设它在物体坐标系下的坐标为 P' , 在摄像机坐标系下的坐标为 P , 这一点从物体坐标系下经过旋转和平移变换到摄像机坐标系下为:

$$P=RP'+T \quad (5)$$

当旋转矩阵 R 确定后, 平移向量 $T(T_x, T_y, T_z)$ 可以通点 P_{14}' 或点 P_{r1} 由上式唯一确定。

3 验结果与分析

3.1 实验平台

为了验证文中方法的有效性和可行性, 建立了非合作飞行器视觉位姿测量仿真实验平台, 模拟位姿测量过程, 进行了大量的模拟实验。实验中非合作飞行器主体为 $2\text{m} \times 1.8\text{m} \times 1.6\text{m}$ 的立方体, 太阳能帆板矩形部分大小为 $2\text{m} \times 7\text{m}$, 该尺寸符合实际, 如图 5(a)所示。两虚拟像机 A、B 非共视场配置, 分别对左右两块部分帆板部件成像, 如下图 5(b)~(d)所示。两像机内参数完全相同, 其等效焦距 $f_u=f_v=1\ 600$ 、主点坐标 $(u_c, u_v)=(400, 300)$, 图像尺寸为 800×600 , 外参数不同, 且两像机之间位置关系固定不变。

姿态旋转矩阵用欧拉角表示, 旋转按 Z 轴、Y 轴、X 轴的次序, 旋转角度分别用 α, β, γ 表示, 平移向量用 $T(T_x, T_y, T_z)$ 表示。为度量位姿测量误差, 定义旋

转角误差 $(\Delta\alpha, \Delta\beta, \Delta\gamma) = (\alpha - \hat{\alpha}, \beta - \hat{\beta}, \gamma - \hat{\gamma})$ 和平移向量误差 $(\Delta T_x, \Delta T_y, \Delta T_z) = (T_x - \hat{T}_x, T_y - \hat{T}_y, T_z - \hat{T}_z)$, 其中 $\hat{\alpha}, \hat{\beta}, \hat{\gamma}$ 为欧拉角的估计值, \hat{T} 为 T 的估计值。为客观评价该方法的精度, 使实验结果更具有统计意义, 此节中的所有实验, 对每种参数条件运行 1 000 次, 然后取平均值作为实验结果。位姿计算结果见表 1, 其中旋转角单位为度, 平移向量单位为毫米。从表 1 可以看出, 文中方法是正确有效的。

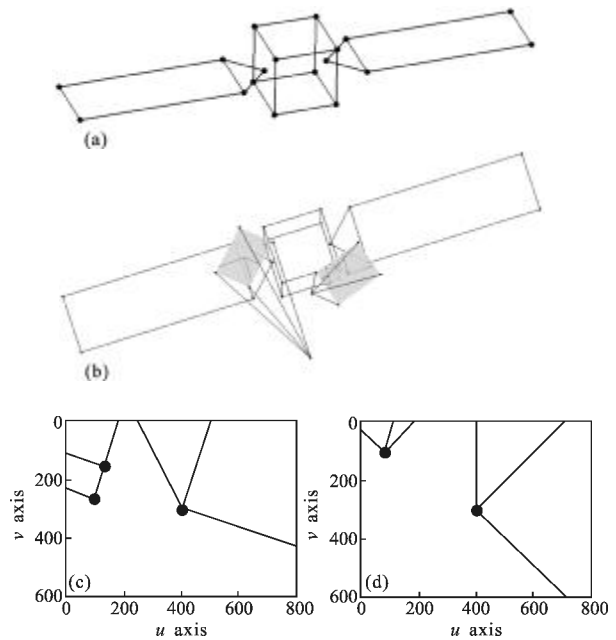


图 5 仿真中的目标飞行器模型和成像模型

Fig.5 Model of the space vehicle and images in simulation

表 1 位姿计算结果

Tab.1 Results of the pose

Parameter	Real value	Calculated value
$\alpha/(\circ)$	5	5.000
$\beta/(\circ)$	15	15.001
$\gamma/(\circ)$	20	19.998
T_x/mm	30	29.999
T_y/mm	-10	-10.001
T_z/mm	600	600.005

3.2 误差源分析

根据 2.3 小节位姿解的理论推导, 可知影响该方法位姿测量精度的主要因素如下。

像机参数标定误差: 特征点、特征线在图像上的成像参数依赖于像机参数, 而标定得到的参数必然

会含有误差,因此像机参数标定精度将影响最终位姿解算的精度。

直线提取误差:位姿解算的前提是要在图像中正确提取出特征直线,其提取精度影响位姿测量精度。

3.3 位姿误差的定量分析

特征直线在图像上的成像参数取决于像机参数,因此像机参数误差必然使图像中的直线含有误差。同样,直线提取算法中含有的误差也会使提取的直线含有误差。为模拟像机参数误差和直线提取误差,在像点上加入零均值且标准差为 σ 的高斯白噪声,然后用最小二乘直线拟合方法获取直线特征。

为全面定量分析影响该方法位姿测量精度的因素,实验中根据透视投影关系将目标飞行器以一定位姿投影到像平面上,其中三个欧拉角均匀分布在 $[-45^\circ, 45^\circ]$ 中,随机取值产生旋转矩阵 R , $T_x T_y$ 均匀分布在 $[-50\text{ mm}, 50\text{ mm}]$ 中, T_z 均匀分布在 $[500\text{ mm}, 1\ 000\text{ mm}]$ 中,随机取值产生平移向量 $T(T_x, T_y, T_z)$,并保证目标特征能够在图像上成像。如图6所示,给出了各位姿参数误差与噪声的关系。

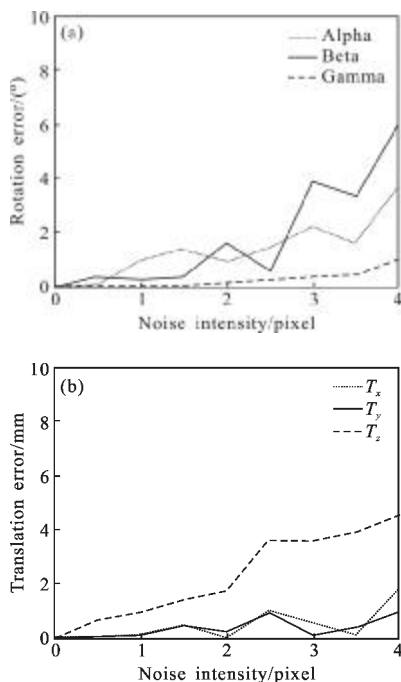


图 6 位姿估计误差噪声的关系

Fig.6 Pose estimation error as a function of noise

图中各误差量取绝对值,从图中可以看出,当不受噪声影响时,位姿参数误差为0,说明文中方法的计算过程是正确的。随着图像噪声强度的增加,各位

姿量的误差也逐渐变大。虽然误差曲线出现了振荡、不规整的情况,这主要是由于随机选取位姿和随机添加误差的有偏性造成的,但仍然可以看出误差随着噪声强度增加的变化趋势,即像机参数误差和直线提取误差越大,该方法的误差越大。

4 结 论

文中提出一种多像机非共视场的非合作飞行器位姿测量方法,可以有效解决近距离及超近距离下单像机无法完成位姿测量的问题。该方法既可以利用多视角得到目标更完整的信息,也可以利用目标上冗余信息,以换取测量系统对噪声的鲁棒性。实验结果表明,该方法是有用的,为大目标近距离视觉位姿测量提供了一个新的解决途径,对在轨执行空间任务具有重要的参考价值。实际上该方法还可扩展适应于任何特征点和特征线的非共视场位姿测量,如飞行器主体上的边和角点、帆板上的边和角点等。接下来的工作将侧重于进一步提高测量精度。另外,该方法在实际工程应用中的鲁棒性及性能评价还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Tafazoli M. A study of on-orbit spacecraft failures [J]. *Acta Astronautica*, 2009, 64(2/3): 195-205.
- [2] Cui Naigang, Wang Ping, Guo Jifeng, et al. A review of on-orbit servicing [J]. *Journal of Astronautics*, 2007, 28(4): 805-811. (in Chinese)
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): 805-811.
- [3] Hirzinger G, Landzettel K, Brunner B, et al. DLR's robotics technologies for on-orbit servicing [J]. *Advanced Robotics*, 2004, 18(2): 139-174.
- [4] Liang Bin, Xu Wenfu, Li Cheng, et al. The status and prospect of orbital servicing in the geostationary orbit [J]. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(1): 1-13. (in Chinese)
梁斌, 徐文福, 李成, 等. 地球静止轨道在轨服务技术研究现状与发展趋势 [J]. *宇航学报*, 2010, 31(1): 1-13.
- [5] Liang Bin, Li Cheng, Xue Lijun, et al. A Chinese small intelligent space robotic system for on-orbit servicing [C]// *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Beijing, China, 2006: 4603-4607.
- [6] Wang Baofeng, Li Guangyun, Chen Jihua, et al. Two

- methods of coded targets used in rendezvous and docking[J]. Journal of Astronautics, 2008, 29 (1): 162-166. (in Chinese)
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.
- [7] Zhang Qingjun, Hu Xiulin, Ye Bin, et al. A binocular vision-based relative position and attitude determination between spacecrafts[J]. Journal of Astronautics, 2008, 29 (1): 156-161. (in Chinese)
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.
- [8] Li Zhe, Su Xiuqin, Hao Wei. Pose estimation algorithm with line matching by utilizing quaternion[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(8): 2236-2240. (in Chinese)
李哲, 苏秀琴, 郝伟. 直线匹配的四元数位姿估计算法[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(8): 2236-2240.
- [9] 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.
- [10] Landzettel K. Technology satellite for demonstration and verification of space systems [EB/OL].http://www.dlr.de/rm-neu/en/desktopd-efault.aspx/tabid-3825/5963_read-8759. 2008/2012-03-11.
- [11] Xu Wenfu, Liang Bin, Li Cheng, et al. Autonomous rendezvous and robotic capturing of non-cooperative target in space[J]. Acta Astronautica, 2010, 28(5): 705-718.
- [12] Gao Xuehai, Xu Kejun, Zhang Han, et al. Position-pose measurement algorithm based on single camera and laser range-finder [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(8): 1479-1485. (in Chinese)
高学海, 徐科军, 张瀚, 等. 基于单目视觉和激光测距仪的位姿测量算法[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(8): 1479-1485.
- [13] Von Gioi R G, Jakubowicz J, Morel J M, et al. LSD: A fast line segment detector with a false detection control[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2010, 32(4): 722-732.
- [14] Akinlar C, Topal C. EDLines: a real-time line segment detector with a false detection control[J]. Pattern Recognition Letters, 2011, 32(13): 1633-1642.

下期预览

混合双包层高双折射光子晶体光纤的特性研究

李志全, 李莎, 郝锐, 李晓云, 郑文颖

(燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 提出了一种新型的混合双包层结构的光子晶体光纤。利用多极法对光纤基模的模场分布、双折射、限制损耗及色散特性等进行了数值模拟, 通过调节包层空气孔的孔径大小可以有效地控制光纤的双折射和限制损耗特性。结果发现, 新设计的光纤具有高双折射、低限制损耗特性, 光纤结构参数 $\Lambda=1.0\ \mu\text{m}$, $d_1=d_2=d_3=0.8\ \mu\text{m}$ 时, 该光纤在 C 波段($1.53\sim 1.565\ \mu\text{m}$)及 L 波段($1.57\sim 1.62\ \mu\text{m}$)呈现负色散及负色散斜率。在波长 $1.55\ \mu\text{m}$ 处, 双折射高达 10^{-2} , 限制损耗小于 $10^{-5}\ \text{dB/m}$ 。