

航天验证器运动参数摄影测量方法

王洁^{1,2*}, 黄伟^{1,2}, 张剑勇^{1,2}, 张亚婧^{1,2}, 黎光宇^{1,2}, 竺梅芳^{1,2}¹ 北京空间机电研究所, 北京 100094;² 中国航天科技集团有限公司航天进入减速与着陆技术实验室, 北京 100094

摘要 针对大多数测量实施试验中测量条件的局限性, 提出一种基于双相机联合无同名点的双目视觉运动参数测量方法, 采用该方法计算位姿初值并采用全局正交迭代算法优化初值。该测量方法在实现过程中不需要同名点参与, 只需要两台相机的视场内有 6 个以上的目标合作标志点, 就可得到验证器在运动过程中的位置和姿态等参数。对航天器悬停、避障和着陆阶段进行试验, 将该测量方法与同一工况试验下基于同名点的双目位姿测量方法、基于正交迭代的单目位姿测量方法获取的结果和全站仪打点获得的默认真值进行对比, 得到姿态测量误差小于 0.5° , 位置测量误差小于 0.01 m 。

关键词 成像系统; 摄影测量; 非同名点; 双目视觉测量; 全局正交迭代; 位姿测量

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0311001

Motion Parameters of Space Validator Relay Videometrics Method

Wang Jie^{1,2*}, Huang Wei^{1,2}, Zhang Jianyong^{1,2}, Zhang Yajing^{1,2},
Li Guangyu^{1,2}, Zhu Meifang^{1,2}¹ Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China;² Laboratory of Aerospace Entry, Descent and Landing Technology, China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100094, China

Abstract Aiming at the limitation of the measurement conditions in most of the measurement implementation experiments, a method for measuring the binocular vision motion parameters based on dual cameras without points with the same name is proposed. The initial values of position and pose are calculated by the method, and the initial values are optimized by the global orthogonal iterative algorithm. The measurement method does not need the participation of the same name point in the realization process, but only needs more than 6 target cooperative mark points in the field of view of two cameras, so as to obtain the position and attitude parameters of the validator in the process of motion. The hovering, obstacle avoidance, and landing stage of the spacecraft are tested. The measurement method is compared with the binocular pose measurement method based on the same point, the monocular pose measurement method based on orthogonal iteration and the implied value of total station. The default value obtained by the station instrument is compared. The attitude measurement error is less than 0.5° , and the position measurement error is less than 0.01 m .

Key words imaging systems; videometrics; non homonymous point; binocular vision measurement; global orthogonal iteration; position and attitude measurement

OCIS codes 110.5200; 110.2960; 100.2000; 120.7250; 150.1135

收稿日期: 2020-08-12; 修回日期: 2020-09-04; 录用日期: 2020-09-15

基金项目: 国家重大建设专项、载人航天领域预先研究项目(020102)

* E-mail: wangjie93nn@126.com

1 引 言

开展深空探测对于科技进步和人类文明的发展具有显著的作用和意义^[1]。由于地外天体的环境与地球有着天壤之别,执行探测任务前,需开展试验以验证探测器在地外天体重力场的作用下是否可以顺利起飞和安全着陆。在地外探测器的悬停、避障及缓速下降阶段,需测量探测器的位置、速度和姿态等运动参数,可以确保探测器在平坦区域以安全的速度着陆^[2-3]。当探测器返回时,探测器可能会有一定的倾斜角度,为了保证垂直起飞,需对其起飞角度进行测量,为姿态控制系统提供输入参数^[4]。由于探测器不能接入额外的测量设备,因此需采用非接触的外测手段来测量探测器的运动参数。

摄影测量是一种非接触的测量方法,而且是近几十年迅速发展起来的新兴技术,其融合了摄影测量与计算机视觉等学科的理论和技术,可实现对物体的位置、尺寸、姿态及运动参数的精确测量,具有测量装置简单、测量成本低、精度高、自主性强和易于实现等诸多优点^[5]。摄影测量在保证测量精度的同时,不会对待测件的结构特征、载荷质量和运动特性带来干扰,广泛应用于航空航天、勘察测绘、交通运输、体育运动及军事等前沿科技领域。

摄影测量有多种分类方法,根据测量过程中使用的相机数目可分为单目视觉、双目视觉和多目视觉^[6]。单目视觉测量系统是使用一台内参数已标定的相机对目标进行测量,主要采用传统的透视 n 点算法来求解相对位姿^[7],测量系统具有结构简单以及对相机参数的标定和校准相对简单的优点,而且省去了双目视觉测量系统中立体匹配和现场校准等较复杂的步骤,但该系统对深度信息的恢复能力较弱,其主要用于解决空间结构已知的目标测量问题^[8],当目标的空间结构未知时,需采用双目视觉测量的方法计算位姿。双目视觉测量系统是使用两台相机同时对目标物体进行测量,先对两台相机的内参数和外参数进行标定,接着通过空间交会来获得目标上空间点的三维坐标。多目视觉测量系统是使用多台相机对目标物体进行测量,一般以双目视觉测量系统为基础,主要应用在一些视场较大或存在遮挡的场景,测量过程中需要在空间内布置多台相机,使相机的测量范围覆盖整个测量区域,或在目标和基准系之间放置多台相机以构成相机链路,多应用于三维重建和运动测量。

本文采用双目视觉的方法对运动目标的相对位

置姿态进行测量。传统的双目位姿测量方法^[9]是利用双相机交会的同名点并采用绝对定向的方法计算相对位姿,该方法需要两台相机的公共视场内至少有三个及以上的同名点,但这会导致待测目标的运动范围和姿态受限,当目标的运动范围太大时,可能导致相机的公共视场内同名点数量较少。为了解决上述问题,本文提出一种双相机联合无同名点位姿解算的方法,采用该方法测量航天验证器的坐标系相对于试验场坐标系的位姿和姿态,并对其进行试验验证。该测量方案的实施可验证航天器在地外天体以不同工况着陆的正确性,并验证飞船的制导、导航与控制(GNC)系统在下降着陆阶段识别并躲避障碍物,以及利用推进系统控制探测器平稳着陆的准确性,这可以有效保障航天器在着陆阶段的安全性和稳定性,该过程是航天器探测任务成功实施的重要环节之一。

2 基本原理

2.1 位姿测量方法及设计原理

摄影测量原理如图 1 所示。其中 $O_1-X_1Y_1Z_1$ 为相机 1 的坐标系, $O_2-X_2Y_2Z_2$ 为相机 2 的坐标系, $O_w-X_wY_wZ_w$ 为试验场的坐标系, $O_m-X_mY_mZ_m$ 为目标坐标系,即验证器的本体坐标系, R_{cw1} 和 T_{cw1} 分别为相机 1 的坐标系相对于试验场的旋转矩阵和平移向量, R_{cw2} 和 T_{cw2} 分别为相机 2 的坐标系相对于试验场的旋转矩阵和平移向量, P_i ($i=1,2,\dots,5$) 为目标合作标志点, $P_{i,j}$ ($i=1,2,\dots,5, j=1,2$) 为目标合作标志点 i 在相机 j 中的成像点。试验前,在航天验证器(待测目标)上布设目标合作标志点,两台测量相机布设在试验场的空地上。采用基于异面控制点的标定方法^[10]获得两台相机的内参数、像差系数、相对于试验场坐标系的外参数和光心位置坐标。

选择的相机成像模型为摄影测量常用的中心透视投影模型^[10],模型如图 2 所示。其中 $O_c-X_cY_cZ_c$ 为相机的坐标系, O_c 为相机光心, $I-xy$ 为图像的坐标系, π 为正片位置, π' 为反片位置, o 为图像主点, f 为相机的焦距, P 为物点, \tilde{p} 为点 P 的像点,点划线为光轴,虚线为点 P 成像的光线,所有成像光线都过光心,而且物点与像点和光心共线。物点 P 经过中心透视投影模型后得到像点 \tilde{p} 的图像坐标为 (\tilde{x}, \tilde{y}) 。当实际成像时,由于镜头畸变会产生像差,所以将像点 (\tilde{x}, \tilde{y}) 称为理想的像点。在相机的成像模型中,空间任意点 P 映射到相机平面内的像素点需经过不同的坐标系进行变换,主要有 $O_w-X_wY_wZ_w$ 、 $I-xy$ 以及 $O_c-X_cY_cZ_c$ 。

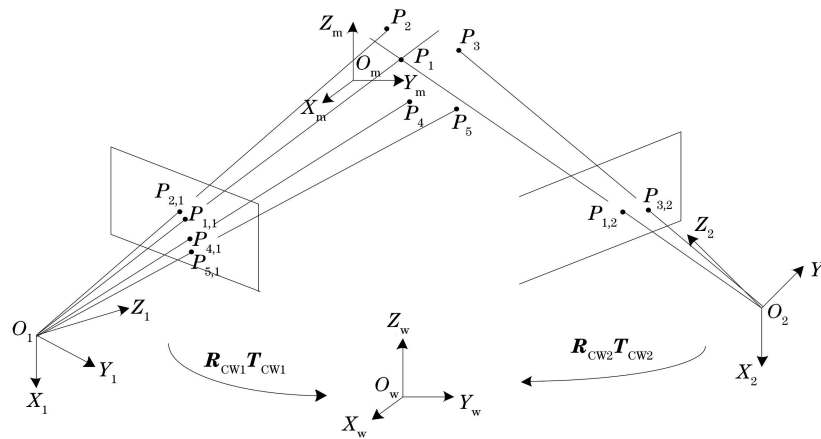


图 1 摄影测量的原理示意图
Fig. 1 Schematic of photogrammetry principle

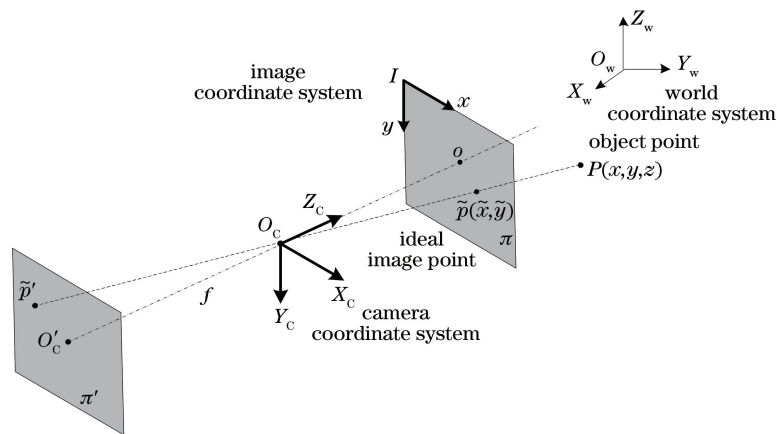


图 2 中心透视投影模型
Fig. 2 Central perspective projection model

航天验证器在运动过程中,采用双相机联合无同名点位姿解算的方法测量目标坐标系相对于试验场坐标系的位置及姿态,相对位姿测量系统的整体布局如图 3 所示。试验前,在验证器上布设异面目标合作标志点,要求两台相机可观测到 6 个以上的目标合作标志点。为了标定两台测量相机的内参数、外参数、相机光心位置坐标(相对于试验场坐标

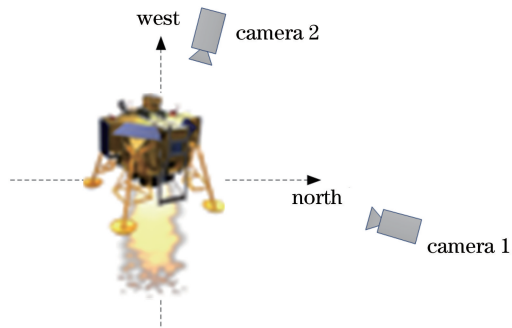


图 3 测量系统的整体布局
Fig. 3 Overall layout of measurement system

系)及像差系数,在试验场周围的塔架上布设若干个标定合作标志点,并通过全站仪打点和坐标转换来获得其在试验场坐标系下的三维坐标。试验过程中,将两台测量相机架设在试验场的空地上以调节其视场,使其可观测到标定合作标志点,以及航天验证器在整个运动过程中每一时刻均可观测到 6 个以上的目标合作标志点。试验实施过程中,通过无线同步控制器来触发两台测量相机,使其同步采集航天验证器运动过程的图像,采图完毕后按如下流程来解算航天验证器在运动过程中目标坐标系相对于试验场坐标系的相对位姿。

1) 根据标定合作标志点在试验场坐标系下的空间坐标并结合其在图像中的像点坐标,采用基于异面控制点的标定方法标定两台测量相机的内参数、外参数、相机光心位置坐标(相对于试验场坐标系)及像差系数。

2) 采用手动提点的方式提取目标合作标志点在首帧图像上的像点坐标。

3) 采用基于模板相关与光流法^[11]结合的跟踪方法跟踪后续每张图像中目标合作标志点的成像点,并获得其像点坐标。

4) 根据两台相机分别采集到的目标合作标志点的像点坐标,以及在目标坐标系下的三维坐标,结合步骤 1) 计算得到两台测量相机的内参数、外参数及像差系数,采用双相机联合无同名点位姿解算的方法解算得到相对位姿的初值,再对该值进行正交迭代优化,即可计算航天验证器在运动过程中相对于试验场坐标系的旋转和平移关系。

5) 采用欧拉角来表示坐标系的旋转关系,令 $O_m-X_m Y_m Z_m$ 先绕 Z 轴旋转 θ_z ,再绕当前的 X 轴旋转 θ_x ,最后绕当前的 Y 轴旋转 θ_y ,则旋转矩阵 $\mathbf{R}=\mathbf{R}_Y \mathbf{R}_X \mathbf{R}_Z$,其中 \mathbf{R}_X 、 \mathbf{R}_Y 和 \mathbf{R}_Z 分别由 θ_x 、 θ_y 和 θ_z 确定^[10]。

2.2 位姿估计与优化方法

试验采用的核心方法是双相机联合无同名点位姿解算方法,该方法是高精度测量航天验证器位置姿态的关键方法之一。根据空间点在目标坐标系和图像坐标系中的坐标,计算试验场坐标系和目标坐标系之间的位姿关系,具体求解思路和过程如下。

1) 试验场坐标系与相机坐标系之间的关系

试验场坐标系与相机坐标系的转换可分解为一次绕坐标原点的旋转和平移,采用欧拉角来表示坐标系的旋转关系。设空间点 P 在 $O_c-X_c Y_c Z_c$ 中的坐标为 (X_c, Y_c, Z_c) ,则该空间点在试验场坐标系中的坐标 (X, Y, Z) 与 (X_c, Y_c, Z_c) 之间的关系可以表示为

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \mathbf{R}_{wc} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \mathbf{T}_{wc} = \begin{bmatrix} r_{wc0} & r_{wc1} & r_{wc2} \\ r_{wc3} & r_{wc4} & r_{wc5} \\ r_{wc6} & r_{wc7} & r_{wc8} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: \mathbf{R}_{wc} 为试验场坐标系转换到相机坐标系的旋转矩阵,是一个 3×3 的单位正交矩阵; \mathbf{T}_{wc} 为平移向量,是试验场坐标系的原点在相机坐标系下的坐标。试验场坐标系经过上述旋转和平移操作后,可与相机坐标系重合。由于每个相机的外参数均标定在试验场坐标系中,因此(1)式的 \mathbf{R}_{wc} 和 \mathbf{T}_{wc} 为相机的外参数,可在标定过程中获得。

2) 相机坐标系与图像坐标系之间的关系

物点 P 在图像上对应的像点 \tilde{p} 的图像坐标为

(\tilde{x}, \tilde{y}) , 其与 (X_c, Y_c, Z_c) 之间的关系可表示为

$$\begin{cases} \frac{\tilde{x}}{f} = \frac{X_c}{Z_c} \\ \frac{\tilde{y}}{f} = \frac{Y_c}{Z_c} \end{cases} \quad (2)$$

根据物理坐标与像素坐标之间的关系可以得到

$$\begin{cases} \frac{\tilde{x} - C_x}{F_x} = \frac{X_c}{Z_c} \\ \frac{\tilde{y} - C_y}{F_y} = \frac{Y_c}{Z_c} \end{cases}, \quad (3)$$

式中: (C_x, C_y) 为主点; (F_x, F_y) 为等效焦距。 (F_x, F_y) 是 f 与像元的横、纵向尺寸 d_x 和 d_y 的比。

使用齐次坐标来表示像点与空间点之间的对应关系,则(3)式可改写为

$$Z_c \begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{y} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x X_c + C_x Z_c \\ F_y Y_c + C_y Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x & 0 & C_x & 0 \\ 0 & F_y & C_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

3) 图像坐标系与试验场坐标系之间的关系

试验场坐标系和相机坐标系之间的关系可表示为

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{wc} & \mathbf{T}_{wc} \\ \mathbf{0}^T & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

将(5)式代入(4)式,可得目标坐标系和图像坐标系之间的关系,表达式为

$$Z_c \begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{y} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x & 0 & C_x & 0 \\ 0 & F_y & C_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{wc} & \mathbf{T}_{wc} \\ \mathbf{0}^T & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

使用一个 3×4 的投影矩阵 \mathbf{M} 来描述中心透视投影的关系,可表示为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} F_x & 0 & C_x & 0 \\ 0 & F_y & C_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{wc} & \mathbf{T}_{wc} \\ \mathbf{0}^T & \mathbf{1} \end{bmatrix} \quad (7)$$

记比例系数 $\lambda \cong Z_c$, 代表物点到光心的连线在相机光轴方向上的投影长度,则 $\lambda \neq 0$ 。中心透视投影的关系可表示为

$$\lambda \begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{y} \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

将(7)式展开,可得到投影矩阵的各元素,即

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_0 & m_1 & m_2 & m_3 \\ m_4 & m_5 & m_6 & m_7 \\ m_8 & m_9 & m_{10} & m_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x r_{wc0} + C_x r_{wc6} & F_x r_{wc1} + C_x r_{wc7} & F_x r_{wc2} + C_x r_{wc8} & F_x T_{wcx} + C_x T_{wcz} \\ F_y r_{wc3} + C_y r_{wc6} & F_y r_{wc4} + C_y r_{wc7} & F_y r_{wc5} + C_y r_{wc8} & F_y T_{wcy} + C_y T_{wcz} \\ r_{wc6} & r_{wc7} & r_{wc8} & T_{wcz} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

将(9)式代入(8)式,消去 λ 可以得到物点、像点和光心三点关系的共线方程,表达式为

$$\begin{cases} \frac{\tilde{x} - C_x}{F_x} = \frac{r_{wc0}X + r_{wc1}Y + r_{wc2}Z + T_{wcx}}{r_{wc6}X + r_{wc7}Y + r_{wc8}Z + T_{wcz}} \\ \frac{\tilde{y} - C_y}{F_y} = \frac{r_{wc3}X + r_{wc4}Y + r_{wc5}Z + T_{wcy}}{r_{wc6}X + r_{wc7}Y + r_{wc8}Z + T_{wcz}} \end{cases}. \quad (10)$$

通过移项将(10)式转换为

$$\begin{bmatrix} r_{wc0} - r_{wc6} \frac{\tilde{x} - C_x}{F_x} & r_{wc1} - r_{wc7} \frac{\tilde{x} - C_x}{F_x} & r_{wc2} - r_{wc8} \frac{\tilde{x} - C_x}{F_x} \\ r_{wc3} - r_{wc6} \frac{\tilde{y} - C_y}{F_y} & r_{wc4} - r_{wc7} \frac{\tilde{y} - C_y}{F_y} & r_{wc5} - r_{wc8} \frac{\tilde{y} - C_y}{F_y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\tilde{x} - C_x}{F_x} T_{wcx} - T_{wcx} \\ \frac{\tilde{y} - C_y}{F_y} T_{wcy} - T_{wcy} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

令(11)式的已知量分别为 $A_x, B_x, C_x, D_x, A_y, B_y, C_y, D_y$, 则(11)式可表示为

$$\begin{bmatrix} A_x & B_x & C_x \\ A_y & B_y & C_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_x \\ D_y \end{bmatrix}. \quad (12)$$

由于目标合作标志点在目标坐标系中的坐标已知,则定义点 P 在目标坐标系中的坐标为 (X_m, Y_m, Z_m) 。整个运动过程中,将目标视为刚体,则点 P 在目标坐标系和试验场坐标系中的坐标关系可表示为

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \end{bmatrix} + \mathbf{T}, \quad (13)$$

式中: \mathbf{R} 为目标坐标系和试验场坐标系之间的旋转矩阵; \mathbf{T} 为平移向量。

将(13)式代入(12)式,可得

$$\begin{bmatrix} A_x & B_x & C_x \\ A_y & B_y & C_y \end{bmatrix} \left(\mathbf{R} \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \end{bmatrix} + \mathbf{T} \right) = \begin{bmatrix} D_x \\ D_y \end{bmatrix}. \quad (14)$$

(14)式共有与 \mathbf{R} 和 \mathbf{T} 对应的 12 个未知数,一个点可提供两个方程,因此 6 个点组成的满秩矩阵

即可求解 12 个未知数。由于(14)式为像点、物点和光心三点的共线方程,根据满秩的解算要求,由物点和其对应相机的光心形成的共线参数不呈线性相关,即由各参与运算的目标合作标志点和其对应相机光心的连线不能平行。试验过程中有两台相机参与测量,则只需要在两台相机视场中有 6 个目标合作标志点就可求解上述未知量,所提算法不需要同名点,因此可大大减少求解的条件。

使用欧拉角来表示相对姿态,则 $\mathbf{R} = \mathbf{R}_Y \mathbf{R}_X \mathbf{R}_Z$ 中各元素的表达式为

$$\begin{cases} r_0 = \cos \theta_Y \cos \theta_Z + \sin \theta_X \sin \theta_Y \sin \theta_Z \\ r_1 = \cos \theta_X \sin \theta_Z \\ r_2 = -\sin \theta_Y \cos \theta_Z + \sin \theta_X \cos \theta_Y \sin \theta_Z \\ r_3 = -\cos \theta_Y \sin \theta_Z + \sin \theta_X \sin \theta_Y \cos \theta_Z \\ r_4 = \cos \theta_Y \cos \theta_Z \\ r_5 = \sin \theta_Y \sin \theta_Z + \sin \theta_X \cos \theta_Y \cos \theta_Z \\ r_6 = \cos \theta_X \sin \theta_Y \\ r_7 = -\sin \theta_X \\ r_8 = \cos \theta_X \cos \theta_Y \end{cases}. \quad (15)$$

经过分解,即可获得相对姿态角度。得到位姿关系的初值 \mathbf{R} 和 \mathbf{T} 后,采用全局正交迭代算法对其进行优化,该优化算法是在 Lu 等^[12-14]提出的正交迭代(OI)算法的基础上进行优化和改进,下面对该算法进行简要介绍。

全局正交迭代算法使用正交投影模型^[15]来建立坐标系,如图 4 所示。

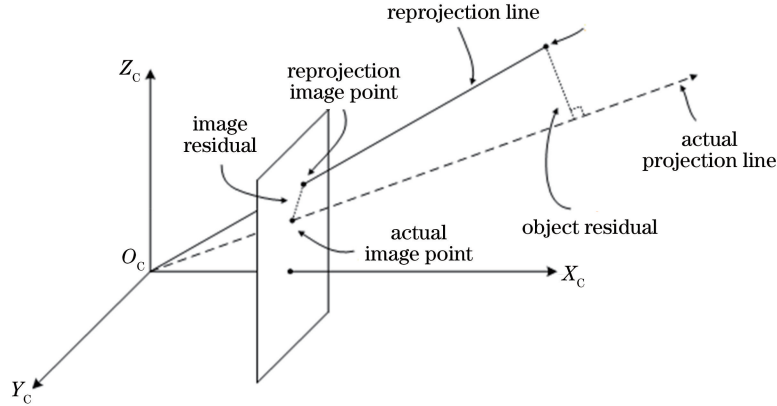


图 4 正交迭代算法的原理示意图

Fig. 4 Principle diagram of orthogonal iterative algorithm

$$\mathbf{q}_i = \mathbf{R} \times \mathbf{p}_i + \mathbf{T} - \mathbf{P}_{iC}, \quad (16)$$

式中: \mathbf{p}_i 为目标合作标志点 \mathbf{P}_i 在目标体坐标系中的坐标; \mathbf{P}_{iC} 为第 i 个目标合作标志点对应图像采集相机的光心在试验场坐标系中的坐标,该参数可标定相机参数来获得。 \mathbf{v}_i 可表示为

$$\mathbf{v}_i = \mathbf{R}_{cw} \begin{bmatrix} \tilde{x} - C_x & \tilde{y} - C_y \\ F_x & F_y \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (17)$$

采用全局正交迭代优化的方法对 \mathbf{v}_i 进行优化,可以得到

$$\mathbf{V}_i = \frac{\mathbf{v}_i \times \mathbf{v}_i^T}{\mathbf{v}_i^T \times \mathbf{v}_i}. \quad (18)$$

将物方残差定义为空间点与由重投影像点确定的实际投影直线之间的距离,将两台相机观测到的全部目标合作标志点的物方残差和作为系统的目标误差函数,则标志点 \mathbf{P}_i 的物方残差为

$$\mathbf{e}_i = (\mathbf{I} - \mathbf{V}_i) \mathbf{q}_i, \quad (19)$$

式中: \mathbf{I} 为单位矩阵。

姿态测量问题可转换为使误差平方和最小化的问题,物方残差和的目标函数^[6]为

$$E(\mathbf{R}, \mathbf{T}) = \sum_{i=1}^n \|\mathbf{e}_i\|^2 = \sum_{i=1}^n \|(\mathbf{I} - \mathbf{V}_i) \mathbf{q}_i\|^2. \quad (20)$$

(20)式是所有测量相机观测所有目标合作标志点的总共线性误差,目的是使所有单个测量相机的

由于两台相机的外参数均标定在试验场坐标系中,需要先把两台相机的数据转换到试验场坐标系中,再对其进行全局正交迭代优化。目标合作标志点 \mathbf{P}_i 在试验场坐标系中的坐标为 \mathbf{q}_i ,在归一化图像平面上得到像点的坐标为 \mathbf{v}_i 。在正交迭代算法中, \mathbf{q}_i 和 \mathbf{v}_i 的原点是相机的光心,求解过程中需将其转换到试验场坐标系中。 \mathbf{q}_i 可表示为

共线性误差和最小,这属于全局优化的过程。传统的正交迭代算法^[12-14]是使单个测量相机的共线性误差和最小。相比于传统的正交迭代算法,全局正交迭代优化算法得到的位姿优化计算结果更准确。

(20)式是在 \mathbf{R} 已知的情况下, \mathbf{T} 存在最优解,可表示为

$$\mathbf{T}(\mathbf{R}) = \frac{1}{n} \left(\mathbf{I} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbf{V}_i \right) \sum_{i=1}^n (\mathbf{V}_i - \mathbf{I}) \times (\mathbf{R} \times \mathbf{p}_i - \mathbf{P}_{iC}). \quad (21)$$

当迭代过程开始时,需要给出一个初始的 \mathbf{R} 以求出 \mathbf{T} 的最优解,再利用奇异值分解(SVD)法^[12]求解绝对定向问题的最优解以更新 \mathbf{R} ,从而不断迭代更新 \mathbf{R} 和 \mathbf{T} 。已知第 k 次迭代的 \mathbf{R}_k 和 \mathbf{T}_k 后,通过求解(22)式的绝对定向问题可获得第 $k+1$ 次迭代的 \mathbf{R}_{k+1} ,表达式为

$$\mathbf{R}_{k+1} = \underset{\mathbf{R}}{\operatorname{argmin}} \sum_{i=1}^n \|\mathbf{R} \times \mathbf{p}_i + \mathbf{T} - \mathbf{P}_{iC} - \mathbf{V}_i \mathbf{q}_{ik}\|, \quad (22)$$

式中: \mathbf{q}_{ik} 为第 k 次迭代后目标合作标志点在试验场坐标系中的坐标, $\mathbf{q}_{ik} = \mathbf{R}_k \times \mathbf{p}_i + \mathbf{T}_k - \mathbf{P}_{iC}$ 。

当目标函数或目标函数的相对变化量小到一定程度(收敛)时,或者迭代次数达到预设的上限时,停止迭代。当进行试验验证时,将迭代上限设置为 1000。通过对大量数据的处理分析发现,使用双相机联合无同名点方法求解的运动参数来获取初值,当进

行全局正交迭代优化时,迭代次数均在 100 以内。

3 试验实施

为了验证所提测量方法的可靠性,搭载的试验平台如图 5 和图 6 所示,使用该平台来模拟航天器起飞和着陆的运动过程。试验过程中,验证器在 $20\text{ m} \times 20\text{ m} \times 70\text{ m}$ 的范围内运动,试验场中共有 6 根塔架,塔架上分别固定悬挂系统,依靠该系统可悬吊被测模型并使其在空中保持固定姿态。悬挂系统主要由悬挂吊绳、提升单元、移动吊车和相应的伺服

控制系统组成。吊绳的一端使用一个万向节系统与航天验证器连接,连接点过验证器的质心并能为验证器提供俯仰、偏航和滚动自由度,吊绳的另一端与移动吊车的提升单元连接,提升单元通过伺服控制系统来驱动吊绳作向上或向下运动,并通过测力传感器和伺服控制单元来维持吊绳的拉力平衡,从而模拟地外天体的重力场。移动吊车能够在水平面上的两个维度方向运动,主要作用是通过吊绳上的角度传感器来跟踪探测器的位置变化,并始终位于探测器的正上方以保证吊绳垂直。

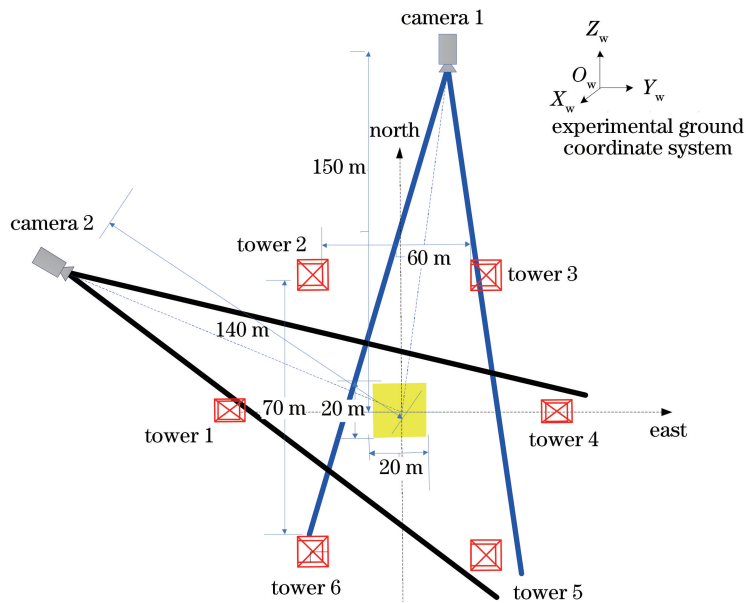


图 5 试验系统的俯视图

Fig. 5 Top view of test system

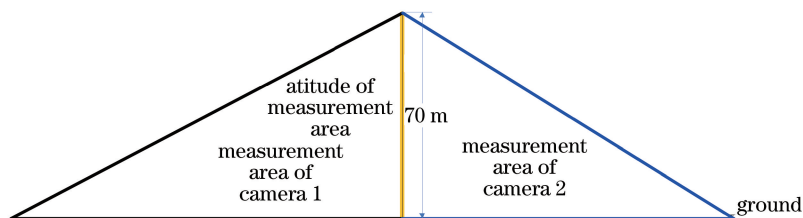


图 6 试验系统的侧视图

Fig. 6 Side view of test system

当试验开始时,通过塔架上的悬挂系统和 GNC 控制系统来控制航天验证器在不同工况下的着陆和起飞,从而模拟航天器在地外天体的着陆和起飞等运动过程。为了尽可能地提高测量精度,同时满足高精度标定相机参数的条件,两台相机的观测区域需要尽可能小,同时使相机观测到的标定控制点可满足基于异面控制点标定方法标定相机参数的标定条件,即单一相机视场内至少有三根柱子。为了验证所提测量算法的可靠性,当进行试验时,在同一试

验中同步实施基于同名点的双目位姿测量试验^[9],并将两种测量算法得到的试验结果进行对比。当试验实施时,将两台测量相机的交会角度设为约 90° ,这可以保证基于同名点的双目位姿测量算法测量结果的可靠性,且在整个试验实施过程中,两台相机的相对位置保持不变。经过测量,得到两台测量相机的摆放位置与航天验证器的最远距离约为 150 m 。

试验前,首先获得标定合作标志点在试验场坐标系中的三维坐标,然后采用基于异面控制点的相

机标定方法标定两台相机的内参数、外参数、光心位置坐标(相对于试验场坐标系)及像差系数。在验证器上布设若干个(大于 6 个)目标合作标志点,从而在航天验证器的整个运动过程中,保证有 6 个以上的目标合作标志点可被两台测量相机观测到。为了保证基于同名点的双目位姿测量方法的可实施性,在两台测量相机的公共视场内应始终有三个以上不共线的目标合作标志点。为了得到目标合作标志点在目标坐标系中的三维坐标,采用莱卡型号为 TCA2003 的全站仪(测量精度为 0.5", 测量距离为 150 m, 打点精度优于 3.6×10^{-4} m)来打点,可以获得目标合作标志点的坐标,以及验证器上三个以上不共线的坐标已知点在全站仪坐标系中的坐标,结合坐标已知点在目标坐标系中的坐标,通过坐标转换来获得目标合作标志点在目标坐标系中的三维坐标。试验开始后,通过同步控制器来提前同步控制两台相机采集图像,从而完整地拍摄航天验证器的整个运动过程。

为了验证所提测量方法的有效性,在同一试验条件下,在验证器的悬停时刻(静止时刻)同步实施双目视觉位姿测量试验。当单个相机视场内有 6 个以上的异面目标合作标志点时,可实施基于正交迭代的单目位姿测量试验。为了验证所提测量方法相

对于基于正交迭代的单目视觉位姿测量方法的优越性,在同一试验条件下,同步实施单目位姿测量试验。为了判断上述测量方法的测量精度,在同一试验工况下实施全站仪打点操作,该操作是采用全站仪打点法来获得目标合作标志点的三维坐标,并通过数据处理来获得不同工况下目标坐标系相对于试验场坐标系的相对位置姿态,该方法的测量精度主要取决于全站仪的测量精度。试验过程中,全站仪的打点精度优于 3.6×10^{-4} m, 测量精度相对较高,因此试验将全站仪打点法获得的测量结果默认为真值。为了保证测量试验的可实施性,航天验证器在悬停时刻应保证有 6 个以上的目标合作标志点可被其中一台测量相机观测到,且两台测量相机的公共视场内有三个以上不共线的目标合作标志点。

4 分析与讨论

获取试验数据后,采用所提测量方法处理数据,并采用传统的基于同名点的双目位姿测量方法处理同一运动工况的试验数据,对该试验工况采集到的 3000 个图像数据进行分析计算,将两种测量方法获得的位置测量值和姿态测量值作差,结果如图 7 所示。两种测量方法的相对位置和姿态测量结果相差的最大值如表 1 所示。

表 1 两种测量方法的结果最大差值

Table 1 Maximum difference between two measurements

Parameter	X /m	Y /m	Z /m	Relative displacement /m	Pitch angle /($^{\circ}$)	Yaw angle /($^{\circ}$)	Roll angle /($^{\circ}$)
Maximum difference	0.00817	0.00529	0.00523	0.00813	0.3557	0.3717	0.3188

从表 1 可以看到,与基于同名点的双目位姿测量方法相比,所提测量方法的位置测量相差最大值小于 0.1 m,姿态角测量相差最大值小于 0.5° ,验证所提测量方法的有效性。

在同一试验工况的条件下,选取验证器在不同悬停次数的图像数据进行分析计算,将所提测量方

法、基于同名点的双目位姿测量方法和基于正交迭代的单目位姿测量方法获取的结果分别与全站仪打点方法获取的结果作差,结果如图 8 所示。将上述三种测量方法与全站仪打点法获取的结果作差后获得的最大值如表 2 所示。

表 2 三种位姿测量方法与全站仪打点方法测量结果的最大差值

Table 2 Maximum difference of the measurement results between three pose measurement methods and total station dot method

Method	Proposed method	Binocular pose measurement based on homonymous points	Monocular visual pose measurement
X /m	0.0097	0.0094	0.0225
Y /m	0.0012	0.0012	0.0032
Z /m	0.0020	0.0029	0.0079
Relative displacement /m	0.0098	0.0095	0.0259
Pitch angle /($^{\circ}$)	0.0945	0.0973	0.3892
Yaw angle /($^{\circ}$)	0.3776	0.4403	1.6879
Roll angle /($^{\circ}$)	0.2336	0.2281	0.8118

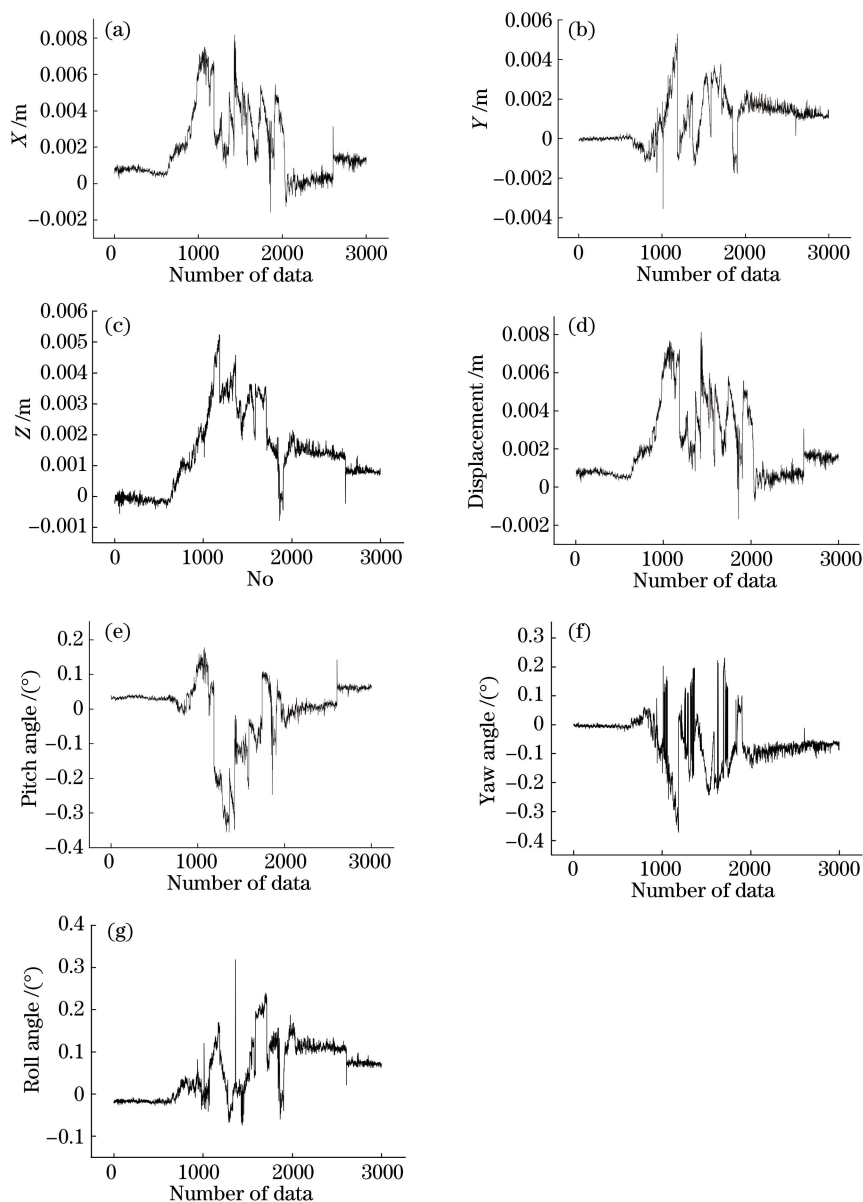


图 7 两种测量方法在不同情况下的相对位姿结果差值。(a) X 轴;(b) Y 轴;
(c) Z 轴;(d) 相对位移;(e) 俯仰角;(f) 偏航角;(g) 滚转角

Fig. 7 Difference of relative pose results of two methods under different conditions. (a) X-axis; (b) Y-axis;
(c) Z-axis; (d) relative displacement; (e) pitch angle; (f) yaw angle; (g) roll angle

从表 2 可以看到,将基于同名点的双目位姿测量方法的计算结果与全站仪打点获得的相对位姿结果作差,获得位置测量误差的最大值小于 0.1 m,姿态角测量误差的最大值小于 0.5°,验证所提测量方法相对于基于同名点的双目位姿测量方法的有效性;将所提测量方法与全站仪打点获得的相对位姿作差,获得位置测量误差的最大值小于 0.1 m,姿态测量误差的最大值小于 0.5°,且从图 8 可以看到,所提测量方法和基于控制点的双目位姿测量方法与全站仪打点获得结果相差较小,进一步验证所提测量方法的可靠性;将基于正交迭代的单目位姿测量方

法与全站仪打点获得的相对位姿结果作差,获得位置测量误差的最大值为 0.0259 m,姿态测量误差的最大值为 1.6879°,测量误差远大于所提测量方法获得的测量结果,验证所提测量方法相对于基于正交迭代的单目视觉位姿测量方法在精度优化方面的优越性。基于正交迭代的单目位姿测量方法在使用过程中要求单台测量相机的视场内有 6 个以上的异面目标合作标志点,当待测目标运动范围较大时,可能存在相机捕获目标合作标志点个数较少的情况。所提测量方法是使用两台测量相机来捕获目标信息,因此可从多个方位采集目标合作标志点,故应用

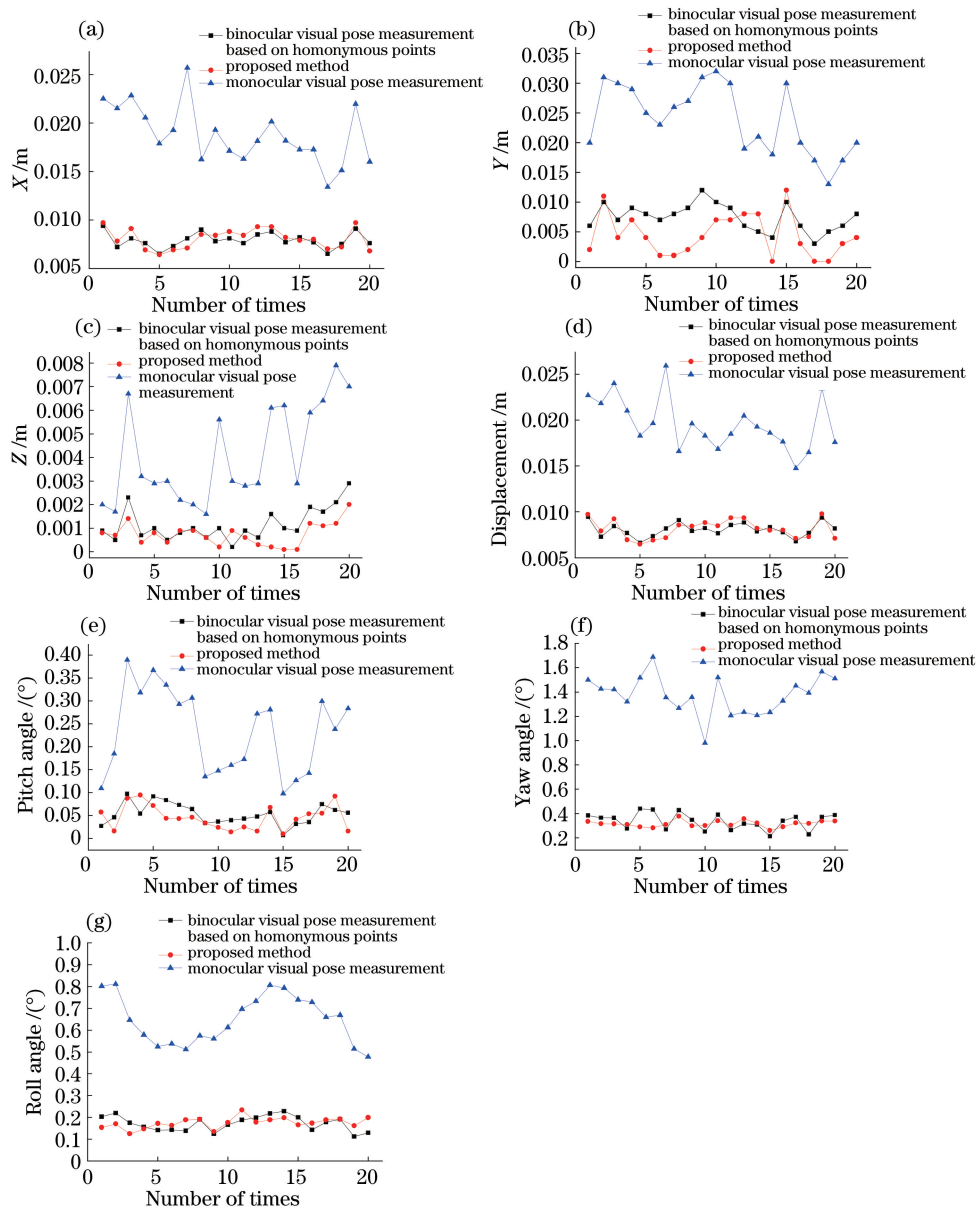


图 8 三种位姿测量方法的精度对比。(a) X 轴;(b) Y 轴;(c) Z 轴;(d) 相对位移;(e) 俯仰角;(f) 偏航角;(g) 滚转角

Fig. 8 Precision comparison of three pose measurement methods. (a) X-axis; (b) Y-axis; (c) Z-axis; (d) relative displacement; (e) pitch angle; (f) yaw angle; (g) roll angle

场景更广泛。

5 结 论

通过上述理论分析和试验验证,可得到所提的双相机联合无同名点位姿解算方法的真实有效,且具有较高的测量精度,在 150 m 的测量距离内,相对位置测量误差小于 0.01 m,相对姿态测量误差小于 0.5° ;当在不同相机视场内的目标合作标志点不是同名点以及成像点的总个数满足计算要求时,可采用所提方法来解算目标坐标系相对于世界坐标系的相对位姿;根据算法理论推导可知,所提的双相机联合无同名点位姿解算方法不局限于两台测量相

机,只要相机视场内总共有 6 个以上的目标合作标志点(目标点与光心的连线不平行)即可完成相对位姿的解算。

参 考 文 献

- [1] Ye P J, Peng J. Deep space exploration and its prospect in China [J]. Engineering Science, 2006, 8 (10): 13-18.
叶培建, 彭兢. 深空探测与我国深空探测展望 [J]. 中国工程科学, 2006, 8(10): 13-18.
- [2] Johnson A E, Huertas A, Werner R A, et al. Analysis of on-board hazard detection and avoidance for safe lunar landing [C] // 2008 IEEE Aerospace

- Conference, March 1-8, 2008, Big Sky, MT, USA. New York: IEEE, 2008: 9979878.
- [3] Johnson A E, Klumpp A R, Collier J B, et al. Lidar-based hazard avoidance for safe landing on Mars[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2002, 25(6): 1091-1099.
- [4] Liu J X, Ruan G W. Comparative analyses of the measurement schemes for the test of hang-staying, slow landing and obstacle-shunning of "CE" landing module[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2012(6): 34-37, 41.
刘建新, 阮国伟. "嫦娥"着陆器悬停、避障、缓降试验中的姿态和位置测量[J]. 航天制造技术, 2012(6): 34-37, 41.
- [5] Yin S B, Ren Y J, Liu T, et al. Review on application of machine vision in modern automobile manufacturing[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(8): 0815001.
尹仕斌, 任永杰, 刘涛, 等. 机器视觉技术在现代汽车制造中的应用综述[J]. 光学学报, 2018, 38(8): 0815001.
- [6] Ding S W, Zhang X H, Yu Q F, et al. Overview of non-contact 3D reconstruction measurement methods [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(7): 070003.
丁少闻, 张小虎, 于起峰, 等. 非接触式三维重建测量方法综述[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(7): 070003.
- [7] Zhu F, Yu F S, Wu Y M, et al. Analysis of attitude calibration precision of P4P camera[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(11): 1115005.
朱帆, 于芳苏, 吴易明, 等. P4P 法相机姿态标定精度分析[J]. 光学学报, 2018, 38(11): 1115005.
- [8] Qu Y P, Liu J Q, Hou W. Graphics design of cooperative targets on monocular vision high precision measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(13): 1315001.
屈也频, 刘坚强, 侯旺. 单目视觉高精度测量中的合作目标图形设计[J]. 光学学报, 2020, 40(13): 1315001.
- [9] Zhang Q J, Hu X L, Ye B, et al. Binocular vision-based relative position and attitude determination between spacecrafts [J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(1): 156-161.
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.
- [10] Yu Q F, Shang Y. Videometrics: principles and researches[M]. Beijing: Science Press, 2009: 26-31.
于起峰, 尚洋. 摄像测量学原理与应用研究[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 26-31.
- [11] Xiao J, Zhu S P, Huang H, et al. Object detecting and tracking algorithm based on optical flow [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2016, 37(6): 770-774.
肖军, 朱世鹏, 黄杭, 等. 基于光流法的运动目标检测与跟踪算法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2016, 37(6): 770-774.
- [12] Lu C P, Hager G D, Mjolsness E. Fast and globally convergent pose estimation from video images [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(6): 610-622.
- [13] Long G C. Researches on pose estimation problem for UAV vision-based landing guidance [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011.
龙古灿. 无人机视觉着陆引导中的位姿估计问题研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
- [14] Jiang G W. Study on pose relay videometrics method with camera-series and ship deformations measurement[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010.
姜广文. 像机链位姿传递摄像测量方法及船体变形测量研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
- [15] Li X, Long G C, Liu J B, et al. Accelerative orthogonal iteration algorithm for camera pose estimation [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 5(1): 0115004.
李鑫, 龙谷灿, 刘进博, 等. 相机位姿估计的加速正交迭代算法[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0115004.