

doi:10.3788/gzxb20174609.0912001

激光投影成像式运动目标位姿测量与误差分析

霍炬¹, 李云辉², 杨明²

(1 哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院 电气工程系, 哈尔滨 150001)

(2 哈尔滨工业大学 航天学院 控制与仿真中心, 哈尔滨 150080)

摘 要:为了实现室内运动目标位姿的高精度测量,建立了一套激光投影成像式位姿测量系统.该系统利用两两共线且交叉排列在同一平面上的点激光投射器作为合作目标捷联在运动目标上,通过与光斑接收幕墙的配合共同组成运动目标位姿测量基线放大系统,利用高速摄像机实时记录幕墙上投影光斑的位置,利用摄像机标定结果求解投影光斑的世界坐标,利用投影光斑之间构成的单位向量建立运动目标位姿解算模型.最后,根据测量原理推导了图像坐标提取、摄像机外部参数标定、光束直线度与目标位姿解算结果之间的误差传递函数.实验结果表明,当摄像机的视场范围为 14 000 mm×7 000 mm 时,测量系统的姿态角测量精度为 1'(1 σ),位置测量精度为 5 mm,且误差大小与目标位姿测量误差传递函数理论计算值一致,验证了本文提出的目标位姿测量方法与测量误差传递模型的准确性,能够满足目标位姿测量高精度的要求.

关键词:视觉测量;位姿测量;合作目标;激光投影;误差传递

中图分类号: TP394.1; TH691.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4213(2017)09-0912001-11

Measurement and Error Analysis of Moving Target Pose Based on Laser Projection Imaging

HUO Ju¹, LI Yun-hui², YANG Ming²

(1 School of Electrical Engineering & Automatic, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

(2 Control and Simulation Center, School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: In order to realize the high precision measurement of indoor moving target pose, a pose measurement system based on laser projection imaging was established. The system used pairwise collinear and crossover arranged on the same plane point laser projector as the cooperation target, the motion target pose measurement baseline amplification system was made up of cooperation target and laser projection point receiving curtain. Then, the high speed camera was used to real-time recording curtain projection light spot, and the world coordinates of projection spots were solved by the camera calibration results, the moving target pose calculation model was established using a unit vector that formed between projection spots. Finally, according to the measurement principle of target pose, the error transform function of image coordinate extraction, the external calibration parameters of camera and the beam straightness were deduced. The experimental results shows that when the cameras field-of-view is around 14 000 mm×7 000 mm, the attitude angle measuring accuracy of measurement system is 1'(1 σ), the position is 5mm, and the target pose measurement error transfer function calculation. To

基金项目:国家自然科学基金(No.61473100)资助

第一作者:霍炬(1977—),男,教授,博士,主要研究方向为视觉测量、半实物仿真. Email: torch@hit.edu.cn

通讯作者:杨明(1963—),男,教授,博士,主要研究方向为飞行器制导与控制、智能控制、复杂系统仿真实理论与方法. Email: myang@hit.edu.cn

收稿日期:2017-03-20; **录用日期:**2017-05-26

<http://www.photon.ac.cn>

verify the accuracy of the target pose measurement method proposed in this paper and the error transfer model, it can satisfy the target pose high precision requirements.

Key words: Vision measurement; Pose measurement; Cooperative target; Laser projection; Error propagation

OCIS Codes: 120.3940; 150.0155; 150.1488; 150.6910

0 引言

视觉测量作为一种非接触、精度高、速度快的位姿测量方法被广泛应用于刚体位姿的测量当中^[1-3].传统基于视觉的运动目标位姿测量系统通常是在运动目标上安装特征点作为合作目标,通过高速摄像机获取包含特征点的图像,然后计算特征点的3D坐标,进而解算出目标的姿态参数^[4-5].该类测量系统的测量精度与目标特征点基线的长度密切相关,但是特征点之间基线长度的增加又会降低目标姿态参数测量范围,同时,受限于目标本身的尺寸,即使目标在运动范围较小的情况下,其姿态参数的测量精度也远远不能达到相应的要求^[6-7].

针对位姿测量所面临的问题,国内外学者都进行了大量的研究.根据是否需要采用配合测量设备,可以分为两类:主动式测量方法与被动式测量方法.主动式测量方法是指需要主动设置配合测量设备,一般采用激光投射器、结构光投影成像的方法和基于靶标的方法^[8-11],通过将目标运动参数的测量转化为对合作目标的测量,从而规避测量现场的干扰,实现对目标运动的快速、精确与可靠的测量.但由于每一个测量任务对测量精度、测量范围要求不同,需要分别进行方案的设计,且被测目标本身尺寸相对较小,因此,难以应用在室内运动目标高精度测量中.被动式测量方法是指不需要设置配合测量设备,通过提取场景中自有的特征实现测量与分析的方法^[11-13],无需在目标上设置标志点或其他配合测量设施,因而系统实现简单,应用范围广,适合于某些不允许设置标志点或配合测量设备的场合(如航天器对接、空间碎片清理等),由于无法设置配合设备,因而目标的识别、位姿的求解算法复杂,测量精度与稳定性较差.这些对刚体位姿的测量方法虽然取得了较好的效果,但都有其应用的局限性,尤其是针对室内高动态、强干扰且尺寸受限运动目标位姿的高精度测量问题,还没有一种方法既能满足测量精度与测量范围要求,又能在复杂环境下具有较强的抗干扰能力.

本文根据室内运动目标的特点,建立了基于激光投影光斑的位姿测量模型,在此基础上推导了图像坐标提取、摄像机外部参数标定以及合作目标光束直线度与位姿结果之间的误差传递函数.通过仿真实验与现场实验验证系统测量原理的可行性与误差传递函数的准确性,该测量系统可为运动目标导航和制导设备试验评估提供有效的数据支撑.

1 激光投影成像式运动目标位姿测量

激光投影成像式运动目标位姿测量系统是在运动目标上安装特征点作为合作目标,通过高速摄像机获取包含特征点的图像,然后计算特征点的三维世界坐标,进而根据位姿解算模型求解目标的位姿.受运动目标尺寸大小的限制,合作目标特征点之间的测量基线受到制约,导致测量精度难以提高.为此本文设计了基于激光投影光斑的运动目标位姿测量系统.

1.1 位姿测量原理

激光投影成像式运动目标位姿测量系统见图1,主要由光斑接收平面、高速摄像机以及两两共线的四个激光器构成的合作目标组成.在测量过程中,将合作目标安装于运动目标上,利用两个光斑接收平面分别对激光器的光束投影特征光斑进行接收.通过高速摄像机记录目标运动过程中激光投影光斑在接收平面上位置的变化,然后对光斑序列图像进行分析以确定目标的位姿.该系统将对运动目标上固定特征点的测量转化为光束上任意一点的测量,突破了运动目标几何条件的限制,增长了特征点之间测量基线的长度,提高了测量精度.

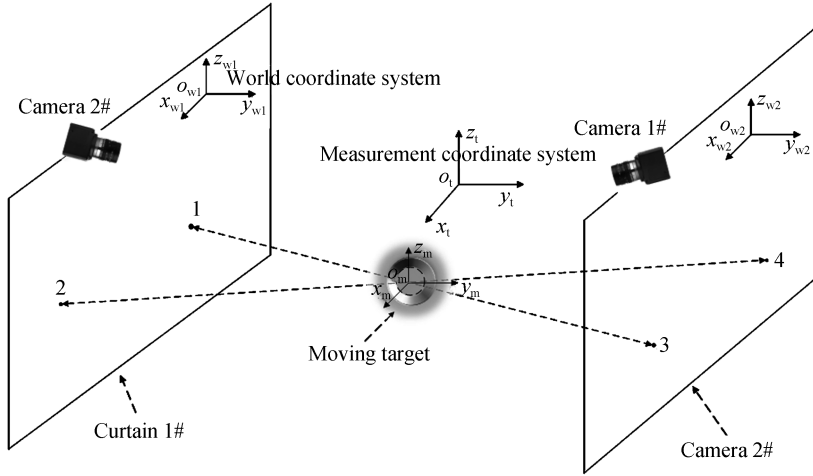


图1 激光投影成像式运动目标位姿测量示意图

Fig.1 Laser projection imaging system of moving target pose measurement schematic diagram

1.2 投影光斑世界坐标测量模型

投影光斑世界坐标的测量是通过摄像机对投影光斑图像进行记录,利用摄像机标定结果与投影平面约束对投影光斑世界坐标进行求解.它是刚体位姿解算的基础,设光斑图像坐标为 (u, v) ,世界坐标为 (X_w, Y_w, Z_w) ,摄像机的内部参数为矩阵 \mathbf{A} ,1号幕墙坐标系 XOY 平面与1号幕墙平面重合, Z 轴垂直于 XOY 平面,方向满足右手准则,2号幕墙坐标系的 XOY 平面与2号幕墙平面重合, Z 轴垂直于 XOY 平面,方向满足右手准则,将1号幕墙坐标系设为世界坐标系,1号摄像机坐标系与1号幕墙坐标系之间的转换关系为 $[R_{c1w1}, T_{w1c1}]$,2号摄像机坐标系与2号幕墙坐标系之间的转换关系为 $[R_{c2w2}, T_{w2c2}]$,则光斑图像坐标与世界坐标之间的关系可以表示为

$$\begin{cases} s \begin{pmatrix} u_j \\ v_j \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{A}_i \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{ciwk} & \mathbf{T}_{wkci} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} X_{wj} \\ Y_{wj} \\ Z_{wj} \\ 1 \end{pmatrix} \\ Z_{wi} = 0 \end{cases} \quad (i=1, \dots, n; j=1, \dots, m; k=1, 2) \quad (1)$$

式(1)中 s 为任意非零因子, n 表示摄像机个数, i 表示摄像机,摄像机的具体布局与编号如图1所示, m 表示摄像机记录的光斑数, j 表示光斑, k 表示光斑接收幕墙编号.

根据坐标系的建立步骤可进一步化简式(1)得

$$s \begin{pmatrix} u_j \\ v_j \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{A}_i \begin{bmatrix} \mathbf{r}_{1ik} & \mathbf{r}_{2ik} & \mathbf{t}_{ik} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} X_{wj} \\ Y_{wj} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (i=1, \dots, n; j=1, \dots, m; k=1, 2) \quad (2)$$

式(2)中, $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$ 为旋转矩阵的第1,2列, \mathbf{t} 表示平移向量.

根据图1所示,由摄像机透视投影成像模型可将1,2号光斑的世界坐标表示为

$$\begin{cases} X_{wi} = \frac{-fr_5 T_x + fr_2 T_y + y_{ui} r_8 T_x - y_{ui} T_z r_2 + r_5 y_{ui} T_z - T_y y_{ui} r_8}{-x_{ui} r_7 r_5 - r_1 y_{ui} r_8 + r_1 f r_5 + x_{ui} r_8 r_4 + r_2 y_{ui} r_7 - r_2 f r_4} \\ Y_{wi} = \frac{-x_{ui} r_7 T_y - r_1 y_{ui} T_z + r_1 f T_y + x_{ui} T_z r_4 + T_x y_{ui} r_7 - T_x f r_4}{-x_{ui} r_7 r_5 - r_1 y_{ui} r_8 + r_1 f r_5 + x_{ui} r_8 r_4 + r_2 y_{ui} r_7 - r_2 f r_4} \\ Z_{wi} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中, $i=1, 2$, $x_d = s^{-1} dx (u - u_0)$, $y_d = dy (v - v_0)$, $x_u = x_d [1 + k_1 (x_d^2 + y_d^2)^{1/2}]$, $y_u = y_d [1 + k_1 (x_d^2 + y_d^2)^{1/2}]$, f, d_x, d_y, u_0, v_0 为摄像机内参数, f 为摄像机焦距; d_x, d_y 为摄像机感光元件的横向和纵向间距; (u_0, v_0) 为摄像机主点在图像坐标系下的坐标, $r_1 \sim r_8$ 为摄像机坐标系与1号墙面坐标系(世界坐标系)之间的旋转矩阵元素, T_x, T_y, T_z 为摄像机坐标系与世界坐标系之间的平移矩阵元素,由摄像机标定确定.

同理,在 2 号幕墙坐标系下,计算 3,4 号光斑的世界坐标 $[X_{w2i}, Y_{w2i}, Z_{w2i}]$,并根据系统结构标定结果,可得到 3,4 号光斑的世界坐标为

$$\begin{bmatrix} X_{w1i} \\ Y_{w1i} \\ Z_{w1i} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_{w1w2} \begin{bmatrix} X_{w2i} \\ Y_{w2i} \\ Z_{w2i} \end{bmatrix} + \mathbf{T}_{w2w1} \quad (i=3,4) \quad (4)$$

式(4)中 $\mathbf{R}_{w1w2}, \mathbf{T}_{w1w2}$ 分别为 1 号与 2 号光斑接收幕墙之间的旋转、平移变换关系, i 为光斑编号。

1.3 目标位姿解算模型

设测量坐标系为 $O_t x_t y_t z_t$, 目标坐标系为 $O_m x_m y_m z_m$, 如图 1 所示, 则室内目标位姿测量问题可以简化为刚体目标位姿测量, 即求解目标坐标系与测量坐标系之间的转换关系 C_{mt} , 其中 C_{mt} 包括测量坐标系到目标坐标系之间的旋转矩阵与平移向量 R_{mt} 和 T_{mt} 。

设测量坐标系为世界坐标系, 利用上一节求得光斑世界坐标 $P_{wi} = (x_{wi}, y_{wi}, z_{wi})^T, i=1, 2, 3, 4$, 若已知光斑在目标体坐标系下坐标为 $P_{mi} = (x_{mi}, y_{mi}, z_{mi})^T$, 且不随目标运动而变化, 根据刚体旋动理论, 位姿求解模型为

$$P_{wi} = R_{wm} P_{mi} + T_{mw0} \quad (5)$$

定义 $\mathbf{A}_{wj} = (P_{w(j+2)} - P_{wj}) / |P_{w(j+2)} - P_{wj}| (j=1, 2)$, 显然 $|P_{w(j+2)} - P_{wj}| \neq 0$; 进一步定义 $\mathbf{B}_w = \frac{\mathbf{A}_{w1} \times \mathbf{A}_{w2}}{|\mathbf{A}_{w1} \times \mathbf{A}_{w2}|}$, 且 $|\mathbf{A}_{w1} \times \mathbf{A}_{w2}| \neq 0$, 因此可以构造一个新的矩阵 $\mathbf{D}_w^{[14]}$

$$\mathbf{D}_w = (\mathbf{A}_{w1}, \mathbf{A}_{w2}, \mathbf{B}_w) \quad (6)$$

对于目标坐标系, 相应的也可以构造一个矩阵 \mathbf{D}_m . 若规定则 \mathbf{R}_{wm} 为世界坐标系与目标坐标系之间的旋转变换矩阵, 则

$$\mathbf{D}_w = \mathbf{R}_{wm} \mathbf{D}_m \quad (7)$$

根据 \mathbf{D}_w 和 \mathbf{D}_m 的构造方式, 以及刚体上两向量不共线的条件可知: \mathbf{D}_w 和 \mathbf{D}_m 均满秩. 因此, 可以通过(8)式求取目标坐标系相对于测量坐标系之间的旋转矩阵 \mathbf{R}_{mw}

$$\mathbf{R}_{mw} = (\mathbf{D}_w \cdot \mathbf{D}_m^{-1})^{-1} \quad (8)$$

对于位置向量 \mathbf{T}_{mw0} , 可以分别取 P_1, P_3 特征点所在直线与 P_2, P_4 特征点所在直线的交点(若两直线异面则为二者公垂线的中点)在目标坐标系下的坐标 X_m 和在测量坐标系中的坐标 X_w , 根据式(1)可求得

$$\mathbf{T}_{mw0} = X_w - \mathbf{R}_{wm} X_m \quad (9)$$

最后, 根据测量坐标系与世界坐标系之间的转换关系可以解得 C_{mt}

$$\begin{cases} \mathbf{R}_{mt} = \mathbf{R}_{mw} \mathbf{R}_{wt} \\ \mathbf{T}_{tm0} = \mathbf{R}_{mw} \mathbf{T}_{tw} + \mathbf{T}_{wm} \end{cases} \quad (10)$$

式中 $\mathbf{R}_{wt}, \mathbf{T}_{tw}$ 为世界坐标系与测量坐标系之间的转换关系, 可通过三维测量设备标定得到。

由式(3)可知, 投影光斑世界坐标的测量误差主要来源于图像坐标、摄像机外部参数以及光束直线度, 并通过运动目标位姿解算原理将误差传递到最终的测量结果当中, 为了明确位姿解算中误差的传递过程, 给运动目标位姿测量误差的大小估计提供理论依据, 有必要对运动目标位姿测量误差进行分析。

2 目标位姿测量误差分析

根据基于激光投影特征点的位姿测量原理可知, 系统的误差主要有光斑中心定位误差、摄像机外部参数标定误差以及光束直线度, 这些误差因素是影响位姿测量精度的主要原因. 本文主要对误差因素分别进行分析。

2.1 光斑中心图像坐标提取误差

根据 1.2 节投影光斑世界坐标测量模型, 结合误差理论可知, 特征点三维坐标测量误差可表示为

$$\delta X_{wi} = \frac{\partial X_{wi}}{\partial u_i} \delta u_i + \frac{\partial X_{wi}}{\partial v_i} \delta v_i \quad (i=1, 2, 3, 4) \quad (11)$$

$$\delta Y_{wi} = \frac{\partial Y_{wi}}{\partial u_i} \delta u_i + \frac{\partial Y_{wi}}{\partial v_i} \delta v_i \quad (i=1, 2, 3, 4) \quad (12)$$

式中, $\delta u_i, \delta v_i$ 为图像坐标提取误差, i 表示不同特征点. 所以, 由式(11)、(12)可以得到特征点图像坐标与三维坐标之间的误差传递关系为

$$\delta \mathbf{W} = \mathbf{E}_{wP} \delta \mathbf{P} \quad (13)$$

其中

$$\mathbf{E}_{wP} = \begin{bmatrix} \frac{\partial X_{w1}}{\partial x_1} & \frac{\partial X_{w1}}{\partial y_1} & \dots & \frac{\partial X_{w1}}{\partial x_4} & \frac{\partial X_{w1}}{\partial y_4} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial Y_{w4}}{\partial x_1} & \frac{\partial Y_{w4}}{\partial y_1} & \dots & \frac{\partial Y_{w4}}{\partial x_4} & \frac{\partial Y_{w4}}{\partial y_4} \end{bmatrix}_{8 \times 8}$$

为图像坐标与世界坐标之间的误差传递模型.

$\delta \mathbf{P} = (\delta u_1, \delta v_1, \delta u_2, \delta v_2, \delta u_3, \delta v_3, \delta u_4, \delta v_4)^T$ 为图像坐标误差矢量.

$\delta \mathbf{W} = (\delta X_{w1}, \delta Y_{w1}, \delta X_{w2}, \delta Y_{w2}, \delta X_{w3}, \delta Y_{w3}, \delta X_{w4}, \delta Y_{w4})^T$ 为世界坐标测量误差矢量.

2.2 摄像机外部参数标定误差

摄像机标定分为内部参数标定与外部参数标定, 内参数主要包括焦距 f , 径向畸变系数 k_1 等, 外部参数主要包括相机与世界坐标旋转矩阵 $\mathbf{R}(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ 与平移向量 $\mathbf{T}(t_x, t_y, t_z)$. 因为内部参数可以事先利用高精度的标定设备进行预标定, 所以本文主要分析摄像机外参数标定对光斑三维坐标测量的误差. 在图像坐标误差一定的情况下, 将式(3)变换为 $f(\theta_x, \theta_y, \theta_z, t_x, t_y, t_z, X_w, Y_w, Z_w) = 0$ 的形式, 并分别对 X_w, Y_w 求微分得

$$\delta X_{wi} = \frac{\partial X_{wi}}{\partial \theta_x} \delta \theta_x + \frac{\partial X_{wi}}{\partial \theta_y} \delta \theta_y + \frac{\partial X_{wi}}{\partial \theta_z} \delta \theta_z + \frac{\partial X_{wi}}{\partial t_x} \delta t_x + \frac{\partial X_{wi}}{\partial t_y} \delta t_y + \frac{\partial X_{wi}}{\partial t_z} \delta t_z \quad (i=1,2,3,4) \quad (14)$$

$$\delta Y_{wi} = \frac{\partial Y_{wi}}{\partial \theta_x} \delta \theta_x + \frac{\partial Y_{wi}}{\partial \theta_y} \delta \theta_y + \frac{\partial Y_{wi}}{\partial \theta_z} \delta \theta_z + \frac{\partial Y_{wi}}{\partial t_x} \delta t_x + \frac{\partial Y_{wi}}{\partial t_y} \delta t_y + \frac{\partial Y_{wi}}{\partial t_z} \delta t_z \quad (i=1,2,3,4) \quad (15)$$

所以由式(14)、(15)可得摄像机外参数标定对特征点三维坐标的误差传递关系为

$$\delta \mathbf{W} = \mathbf{E}_{wA} \delta \mathbf{A} \quad (16)$$

其中

$\delta \mathbf{W} = (\delta X_{w1}, \delta Y_{w1}, \delta X_{w2}, \delta Y_{w2}, \delta X_{w3}, \delta Y_{w3}, \delta X_{w4}, \delta Y_{w4})^T$ 为特征点世界坐标误差矢量.

$\delta \mathbf{A} = (\delta \theta_x, \delta \theta_y, \delta \theta_z, \delta t_x, \delta t_y, \delta t_z)^T$ 为摄像机外部参数标定误差矢量.

$$\mathbf{E}_{wA} = \begin{bmatrix} \frac{\partial X_{w1}}{\partial \theta_x} & \frac{\partial X_{w1}}{\partial \theta_y} & \dots & \frac{\partial X_{w1}}{\partial t_x} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial Y_{w4}}{\partial \theta_x} & \frac{\partial Y_{w4}}{\partial \theta_y} & \dots & \frac{\partial Y_{w4}}{\partial t_x} \end{bmatrix}$$

为摄像机标定结果与世界坐标之间的误差传递模型.

2.3 合作目标几何误差模型

2.3.1 合作目标光束水平直线度问题描述

如图2所示, 理想情况下合作目标光束 OP_2 应与直线 OP'_4 重合, 受合作目标的制作精度影响, 在实际合作目标中光束 OP_4 与理想情况下光束 OP'_4 存在一个夹角 θ , 本文用 θ 的大小表示光束水平直线度.

2.3.2 光束水平直线度对光束投影特征点三维坐标测量的误差传递模型

如图2光束水平直线度问题描述所示, 设目标坐标系原点为合作目标光束交点 O , x, y 轴定义且坐标系满足右手法则, P_4 光斑的坐标为 (X_{w4}, Y_{w4}) , 理想光斑 P'_4 光斑的坐标为 (X'_{w4}, Y'_{w4}) , 合作目标初始安于水平装位置, 与光斑接收幕墙垂直, 且

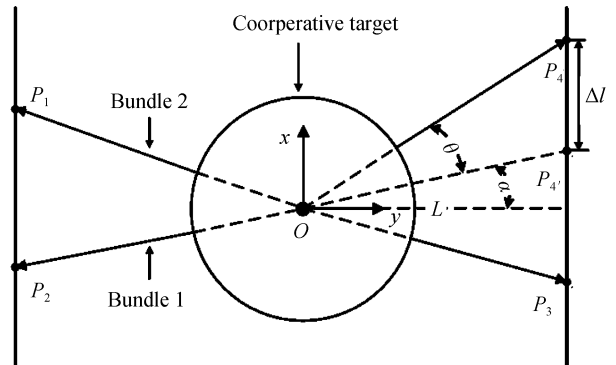


图2 光束水平直线度问题描述示意图

Fig.2 The bundle horizontal straightness problem description schematic diagram

合作目标与幕墙之间的距离为 L , 则 P_4 与 P'_4 之间的距离 Δl_1 可表示为

$$\Delta l_1 = L (\tan (\theta + \alpha + \beta) - \tan (\alpha + \beta)) \quad (17)$$

因此, 光束水平直线度误差与光束投影特征点三维坐标测量误差的传递模型表示为

$$\begin{bmatrix} X_{w4} \\ Y_{w4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta l_1 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X'_{w4} \\ Y'_{w4} \end{bmatrix} \quad (18)$$

式中 α 表示光束夹角, β 表示运动目标偏航角度, θ 表示光束水平直线度.

2.3.3 合作目标光束垂直直线度问题描述

如图 3 所示, 理想情况下合作目标所有光束都在同一平面 π 内, 由于受到合作目标制作精度的限制, 实际合作目标中可能出现光束不与其他光束所共面的情况, 如光束 OP_4 与其他光束所构成的平面 π 之间具有夹角 γ , 在本文中 γ 的大小表示光束之间垂直直线度.

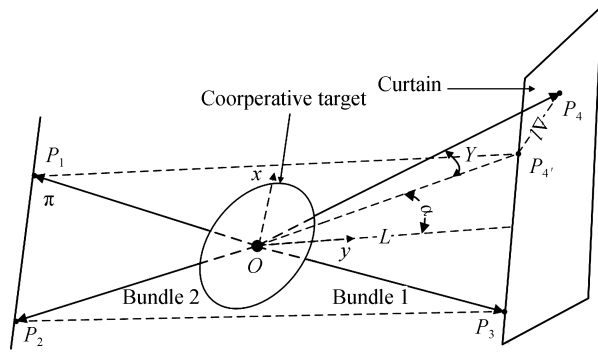


图 3 光束垂直直线度问题描述示意图

Fig.3 The bundle Vertical straightness problem description schematic diagram

2.3.4 光束垂直直线度对光束投影特征点三维坐标测量的误差传递模型

如图 3 光束垂直直线度问题描述所示, 设目标坐标系原点为合作目标光束交点 O , x 、 y 轴定义且坐标系满足右手法则, P_4 光斑的坐标为 (X_{w4}, Y_{w4}) , 理想光斑 P'_4 光斑的坐标为 (X'_{w4}, Y'_{w4}) , 合作目标初始安于水平装位置, 与光斑接收幕墙垂直, 且合作目标与幕墙之间的距离为 L , 则 P_4 与 P'_4 之间的距离 Δl_2 表示为

$$\Delta l_2 = L \frac{\tan (\gamma + \arctan (\cos \alpha + \tan \eta))}{\cos \alpha} \quad (19)$$

因此, 光束垂直直线度误差与光束投影特征点三维坐标测量误差的传递模型可以表示为

$$\begin{bmatrix} X_{w4} \\ Y_{w4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta l_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X'_{w4} \\ Y'_{w4} \end{bmatrix} \quad (20)$$

式中 α 表示光束夹角, γ 表示光束垂直直线度, η 表示运动目标滚转角度, X'_{w4}, Y'_{w4} 理想光斑世界坐标系下的坐标.

综合上述内容, 假设只有 P_4 光斑坐标存在误差, 则合作目标几何加工误差与光斑三维坐标之间的传递关系表示为

$$\delta \mathbf{W} = \mathbf{E}_{wG} \delta \mathbf{G} \quad (21)$$

其中 $\delta \mathbf{W} = (\delta X_{w1}, \delta X_{w2}, \delta X_{w3}, \delta X_{w4}, \delta Y_{w1}, \delta Y_{w2}, \delta Y_{w3}, \delta Y_{w4})^T$ 为特征点世界坐标误差矢量.

$\delta \mathbf{G} = (X'_{w4}, Y'_{w4})^T$, 为合作目标加工几何误差矢量.

$$\mathbf{E}_{wG} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 1 + L (\tan (\theta + \alpha + \beta) - \tan (\alpha + \beta)) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 + L \frac{\tan (\gamma + \arctan (\cos \alpha + \tan \eta))}{\cos \alpha} \end{bmatrix} \quad \text{为}$$

合作目标几何误差传递模型.

2.4 光斑三维坐标测量误差与位姿测量误差之间的传递模型

根据运动目标位姿解算原理可知,位姿参数只与四个光斑的三维坐标有关,因此可将式(8)和(9)表示为

$$f_i(x_p, y_p, z_p, \theta_x, \theta_y, \theta_z, X_1, Y_1, Z_1, X_2, Y_2, Z_2, X_3, Y_3, Z_3, X_4, Y_4, Z_4) = 0 \quad (22)$$

其中 $(x_p, y_p, z_p, \theta_x, \theta_y, \theta_z)$ 为运动目标位姿参数, $(X_1, Y_1, Z_1, X_2, Y_2, Z_2, X_3, Y_3, Z_3, X_4, Y_4, Z_4)$ 为光斑三维坐标, $i=1, \dots, 12$.

由于姿态测量误差只与世界坐标定位误差有关,因此,设 $(x'_p, y'_p, z'_p, \theta'_x, \theta'_y, \theta'_z)$ 是测量姿态的近似值, $(X'_1, Y'_1, Z'_1, X'_2, Y'_2, Z'_2, X'_3, Y'_3, Z'_3, X'_4, Y'_4, Z'_4)$ 为坐标测量近似值,因此有

$$f_i(x'_p, y'_p, z'_p, \theta'_x, \theta'_y, \theta'_z, X'_1, Y'_1, Z'_1, X'_2, Y'_2, Z'_2, X'_3, Y'_3, Z'_3, X'_4, Y'_4, Z'_4) = \delta f_i \quad (23)$$

对式(23)在 $(x_p, y_p, z_p, \theta_x, \theta_y, \theta_z, X_1, Y_1, Z_1, X_2, Y_2, Z_2, X_3, Y_3, Z_3, X_4, Y_4, Z_4)$ 处进行泰勒展开得

$$\frac{\partial f_i}{\partial x_p} \delta x_p + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial \theta_z} \delta \theta_z + \frac{\partial f_i}{\partial X_1} \delta X_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial Z_3} \delta Z_3 = \delta f_i \quad (24)$$

利用最小二乘法可求得

$$\delta \mathbf{q} = (\mathbf{J}_f^T \mathbf{J}_f)^{-1} \mathbf{J}_f^T \delta \mathbf{Q} \quad (25)$$

其中 \mathbf{J}_f 是式(22)的雅克比矩阵, $\delta \mathbf{q} = (\delta x_p, \delta y_p, \delta z_p, \delta \theta_x, \delta \theta_y, \delta \theta_z)$ 是位姿测量误差, $\delta \mathbf{Q} = (\delta X_1, \delta Y_1, \dots, \delta Y_4, \delta Z_4)$ 是光斑三维坐标测量误差.

令 $\mathbf{E}_p = (\mathbf{J}_f^T \mathbf{J}_f)^{-1} \mathbf{J}_f^T$,则三维坐标测量与位姿解算之间的误差传递模型可表示为

$$\delta \mathbf{q} = \mathbf{E}_p \delta \mathbf{Q} \quad (26)$$

令 \mathbf{E}_{w1} 为光斑图像坐标提取误差与三维坐标测量之间的误差传递矩阵, \mathbf{E}_{w2} 为摄像机外部参数标定误差与三维坐标测量之间的误差传递矩阵, \mathbf{E}_{w3} 为合作目标直线度误差与三维坐标之间的误差传递矩阵,则根据上述四小节分析,可将图像坐标提取精度与位姿解算之间的误差传递模型、摄像机外部参数标定精度与位姿解算之间误差传递模型以及合作目标光束直线度精度与位姿解算之间的误差传递模型表示为

$$\delta \mathbf{A}_i = \mathbf{E}_p \mathbf{E}_{w_i} \delta \mathbf{P} \quad (27)$$

其中, $\delta \mathbf{P}$ 为光斑三维坐标, $\delta \mathbf{A}_i = (\delta \mathbf{T}_{mw0i}, \delta \mathbf{R}_{mw_i})^T, i=1, 2, 3$.

在不考虑图像误差、摄像机外部参数标定误差与光束直线度之间耦合关系的前提下,可以得到基于激光投影特征点的刚体位姿测量系统误差传递矩阵为

$$\mathbf{E}_I = \mathbf{E}_p \mathbf{E}_{w1} + \mathbf{E}_p \mathbf{E}_{w2} + \mathbf{E}_p \mathbf{E}_{w3} \quad (28)$$

3 实验结果与分析

为了实现对本文提出的运动目标位姿高精度测量算法可行性、有效性与误差进行分析,本文通过仿真试验与实际测试试验进行验证.

3.1 仿真分析

仿真实验时,幕墙之间的距离设为 $L=20\ 000$ mm,两幕墙坐标系之间的变换关系为 $\mathbf{R}_{12}(0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$, $\mathbf{T}_{12}=(0, 0, 20\ 000)$,合作目标光束之间的夹角设为 $\theta=15^\circ$.假设目标坐标系原点为合作目标光束交点 $O=(7\ 000, 3\ 500, 10\ 000)$,定义目标坐标系的轴与两条直线的角平分线重合,且绕 z 的转动定义为俯仰角 θ_z ,绕 x 轴的转动定义为滚转角 θ_x ,绕 y 轴的转动定义为偏航角 θ_y ,世界坐标系与参考发射台之间的变化关系为 $\mathbf{R}_{1m0}(0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$, $\mathbf{T}_{1m0}=(7\ 000, 3\ 500, 10\ 000)$,合作目标激光投影光斑初始时刻的世界坐标如表1所示,运动目标尺寸大小为 $500 \times 500 \times 500$ mm,摄像机参数具体设置如表1所示,其中激光投影光斑理想图像坐标利用透视投影模型计算得到.数值仿真软件为Matlab 8.1.0.604.

表1 仿真试验中摄像机参数设置

Table 1 The camera parameter setting in the simulation experiment

Camera	f/mm	k_1	dx/mm	dy/mm	C_x/pixel	C_y/pixel	$A_x/(\text{^\circ})$	$A_y/(\text{^\circ})$	$A_z/(\text{^\circ})$	T/mm
Cam1	16	0.000 003	0.002 7	0.002 7	2 048	2 048	0	0	0	$[-7\ 000, -3\ 500, 0]$
Cam2	16	0.000 003	0.002 7	0.002 7	2 048	2 048	0	0	0	$[-7\ 000, -3\ 500, 20\ 000]$

为了验证本文提出的位姿解算方法的有效性,假设三维坐标提取误差为2 mm,目标运动为(俯仰,偏航,滚转) $= (30 \sin(0.2\pi t), 7.5 \sin(0.2\pi t), 10 \sin(0.2\pi t))$,分别利用基于立体视觉的直接线性求解法与本

文提出的算法(不考虑光束直线度问题)对空间运动目标位姿进行测量,其结果见表 2.

表 2 两种位姿测量方法测量结果最大误差比较

Table 2 The maximum error comparative table of the pose measurement method

Method	Roll $\theta_x/^\circ$	Yaw $\theta_y/^\circ$	Pitch $\theta_z/^\circ$	x/mm	y/mm	z/mm
Linear method	0.171 4	0.132 0	0.220 8	1.515 1	1.632 5	1.727 3
Proposed method	0.004 1	0.004 6	0.029 6	2.687 5	2.239 0	5.183 8

从表 2 可以得出:

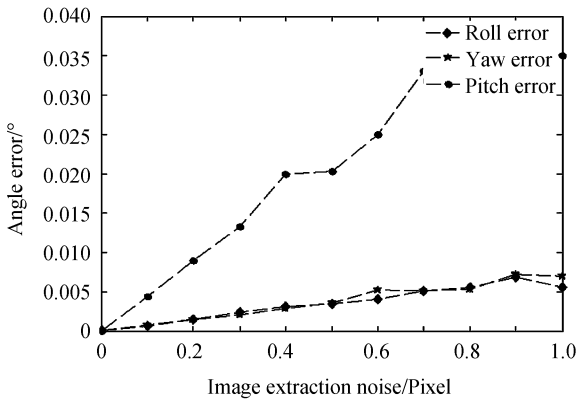
1) 本文方法姿态解算精度远高于基于立体视觉的直接线性方法,这主要是本文提出的方法的测量基线远大于运动目标尺寸;

2) 本文提出的方法俯仰角误差大于其它两个轴,这主要是因为俯仰角测量基线短于另外两个轴;

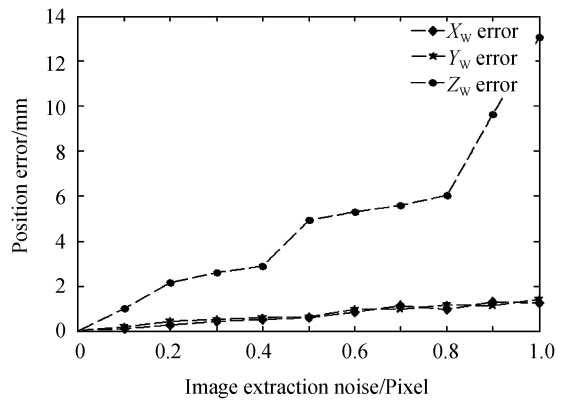
3) 位置解算误差略大于立体视觉方法,尤其是 z 轴方向,这一方面是因为光束投影空间范围较大,光斑世界坐标的绝对坐标值相差较大,导致两光束所在直线的交点坐标数值计算不稳定,其交点位置容易产生较大的偏移,另一方面根据位置解算原理可知, z 轴方向的位置解算误差与俯仰角解算误差相关,这也是本文提出方法的不足之处.

为了分析本文提出方法的误差,设目标的运动为(俯仰,偏航,滚转) $= (15\sin(0.2\pi t), 7.5\sin(0.2\pi t), 10\sin(0.2\pi t))$,激光投影特征光斑图像坐标提取误差服从均值为 0,方差为 0-1Pixel 的高斯分布噪声影响,摄像机外参数旋转角度误差等级设为均值为 0,方差在 $0\sim 0.1^\circ$,平移向量误差均值为 0,方差为 $0\sim 10$ mm,摄像机理想参数具体设置如表 1 所示,光束垂直直线度与水平直线度误差均值为 0,方差为 $0\sim 0.1^\circ$,利用蒙特卡罗法分别进行仿真,其结果如图 4 所示.在分析摄像机外部参数标定精度与位姿测量结果之间关系的时候,为了便于分析,运动目标只进行偏航运动.本文受篇幅限制,对于光束直线与位姿测量之间的误差关系本文只进行光束水平直线度且目标也只做偏航运动,其光束垂直直线度以及目标做滚转与俯仰运动时的分析可以采用类似的方法进行分析.分析光束直线度与位姿解算结果之间的关系时,其横坐标表示光束直线度,

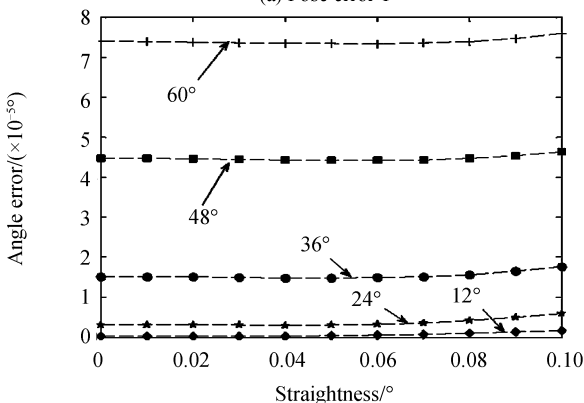
纵坐标表示 $\Delta A = \sqrt{\frac{\theta_x^2 + \theta_y^2 + \theta_z^2}{3}}$ 与 $\Delta P = \sqrt{\frac{x^2 + y^2 + z^2}{3}}$,不同的曲线表示目标做不同角度的运动.



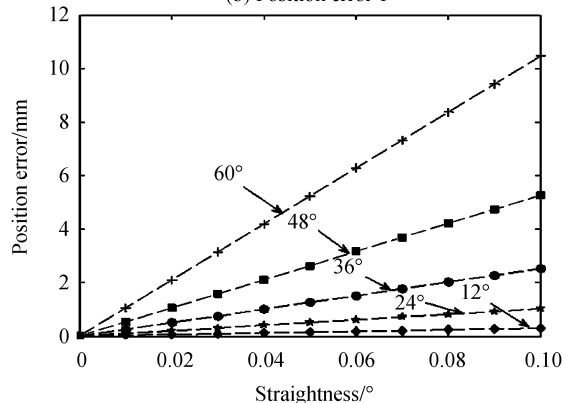
(a) Pose error 1



(b) Position error 1



(c) Pose error 2



(d) Position error 2

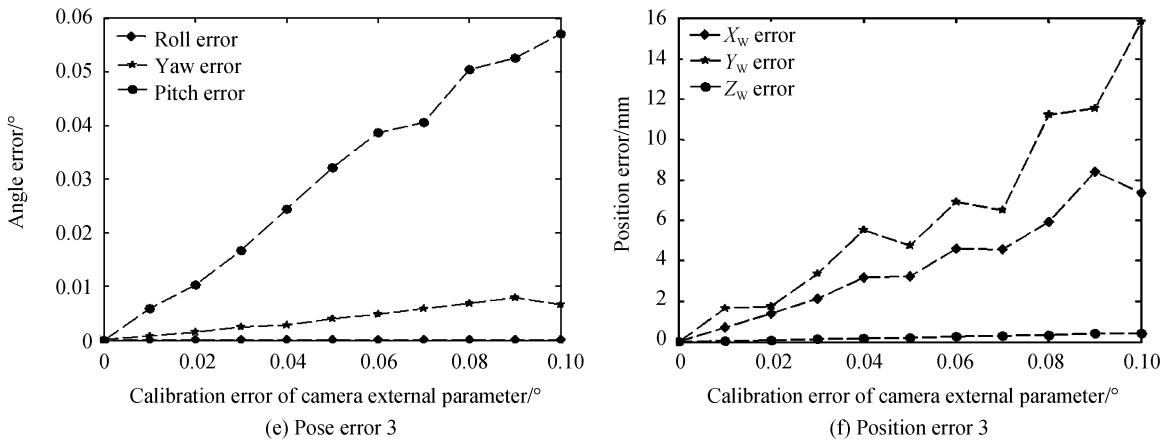


图4 运动目标位姿测量误差

Fig.4 The pose error of moving target measure

根据仿真结果可得

1)从图 4(a)、(b)可以看出姿态测量误差随光斑图像坐标提取误差的增大而增大,其中俯仰角相比于其它两个姿态角的误差更大,主要是因为俯仰角测量基线短于另外两个轴,位置测量误差与光斑图像坐标提取误差基本成正比,其中 z 轴方向的误差远大于其它两个方向的位置解算误差,其原因与位姿解算方法有效性验证相同;

2)从图 4(c)、(d)可以看出光束直线度对位姿测量结果随着运动角度的增大而增大.其中光束直线度对姿态的测量结果影响较小,在某些应用中可以忽略,但对位置的测量结果影响较大,这主要与光束交点解算原理有关,当目标只做偏航运动时,受直线度误差的影响,光斑运动速度将大于其他光斑,从而导致光束交点产生较大的误差.

3)由图 4(e)、(f)可知,摄像机外部参数标定对位姿测量结果都有较大的影响,尤其对于俯仰角的精度影响明显,值得注意的是摄像机外部参数标定对位置测量结果的影响中,对 x, y 轴的影响远大于 z 轴,这是因为两幕墙之间的距离远大于摄像机视场所对靶标大小.

为了分析本文提出的误差传递模型的正确性,设目标运动为(俯仰,偏航,滚转) $= (7.5^\circ, 10^\circ, 15^\circ)$ 的运动,激光投影特征光斑图像坐标提取误差服从均值为 0,方差为 1Pixel 的高斯分布噪声,摄像机外参数旋转角度误差等级设为均值为 0,方差在 0.01° ,摄像机理想参数具体设置如表 2 所示,光束垂直直线度与水平直线度为 0.02° .采用蒙特卡罗法仿真 1000 次的位姿测量误差的 RMS 统计结果以及根据第 2 节的误差传递函数的计算结果见表 3.

表 3 两种位姿测量误差 RMS 比较

Table 3 The maximum error comparative table of the pose measurement method

Method	Roll $\theta_x / ^\circ$	Yaw $\theta_y / ^\circ$	Pitch $\theta_z / ^\circ$	x / mm	y / mm	z / mm
Monte Carlo method	0.004 9	0.005 6	0.021 2	1.965 2	1.837 5	3.729 8
Proposed method	0.004 4	0.005 2	0.022 1	2.037 5	1.923 8	3.669 0

根据表 3 的结果可知,本文误差传递函数的计算值基本与仿真结果值基本一致,其位姿测量误差差别分布在 1.25% 与 4.49% 以内,验证了本文误差传递函数模型的正确性.产生误差的原因主要是因为建立误差传递模型时,忽略了高阶项,且由于 Mento Carlo 方法的位置解算误差与姿态测量精度相关,根据误差传递模型求得的位置结果与 Mento Carlo 方法之间存在较大的差别.

因此,可以利用本文提出的误差传递函数,根据光斑图像坐标提取误差、摄像机外部参数标定误差以及光束直线度对位姿测量结果进行在线补偿.

3.2 测试实验

对激光投影成像式位姿测量系统进行精度验证,并与误差分析结果进行比较.在实际测试试验中,系统采用 4 台 IO Industries 的 4M140-CXP 系列摄像机,分辨率为 $2\ 048 \text{ Pixel} \times 2\ 048 \text{ Pixel}$,像元大小为 $0.005\ 5 \text{ mm}$,两光斑接收幕墙之间的距离为 $20\ 000 \text{ mm}$,姿态角变化范围 $[-10^\circ, +10^\circ]$,姿态角运动规律为正弦曲线,采

样间隔为 10 ms, 采样时间为 10 s, 共获得 1 000 组实验数据. 实验中位置误差统计结果如图 5 所示.

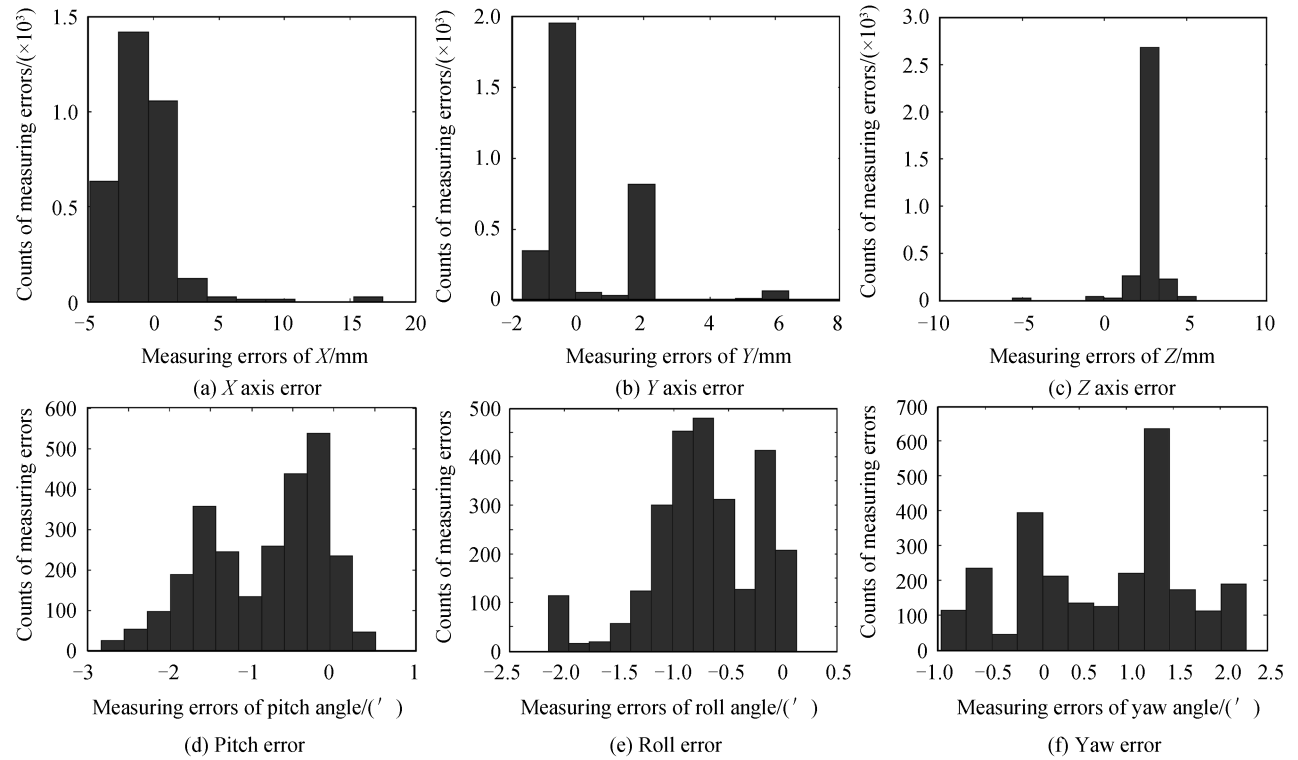


图 5 位姿测量误差统计

Fig.5 Error statistic of pose measurement

由图 5 可以看出:

1) 位置测量误差小于 5mm (1δ), 但相比仿真结果, 三个坐标轴方向的位置解算误差并不相符合, 根据位置解算原理并结合系统测量实验标定过程可知, 其原因是坐标系的标定精度低, 在位置解算时将目标的姿态运动耦合进位置测量结果中.

2) 滚转角与偏航角的测量精度为 $2'$, 且滚转与偏航误差分布分别向负方向与正方向偏移, 这是由系统坐标系标定误差导致.

3) 俯仰角的测量精度为 $3'$, 且误差大于其他两轴, 这是因为根据位姿测量原理, 两幕墙之间的距离大于两光斑之间的距离, 即俯仰轴测量基线小于偏航轴与滚转轴.

4 结论

为了实现对室内目标位姿的高精度测量, 建立了一种激光投影成像式视觉测量系统, 并对误差产生原因进行了分析. 根据目标位姿测量原理建立了光斑三维坐标测量模型与刚体位姿解算模型, 在此基础上给出了图像坐标提取误差、摄像机外部参数标定误差以及合作目标光束直线度与位姿测量误差之间的传递函数, 依据位姿解算模型与误差传递函数, 并结合数值仿真研究了各误差因素与位姿解算结果之间的关系与影响, 通过实际测试实验验证了目标位姿测量的可行性与误差分析的合理性. 此外, 可以利用误差传递模型作为误差反馈在线标定摄像机, 提高摄像机标定精度.

需要指出的是本文提出的目标位姿测量方法借助于激光投影成像的原理, 因此在测量现场不允许有遮挡物以及亮度较高(如灯光、火焰等)的其他物体, 否则会使测量结果不具有连续性或测量失败, 此外本文主要分析了图像坐标提取、摄像机外部参数标定与位姿解算误差之间的传递函数, 在试验过程中发现系统坐标系的标定精度对位姿解算也存在比较明显的影响, 接下来将重点分析系统坐标系标定误差对位姿解算结果的影响.

参考文献

- [1] ZHANG Li-min, ZHU Feng, HAO Ying-ming, *et al.* Pose measurement based on a circle and a non-coplanar feature point[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(11): 1112002.

- 张丽敏,朱枫,郝颖明,等.基于圆特征和异面点特征的位姿测量[J].光子学报,2015,44(11):1112002.
- [2] SUMMAN R, PIERCE S G, MACLEOD C N, *et al.* Spatial calibration of large volume photogrammetry based metrology systems[J]. *Measurement*, 2015, 68(2015): 189-200.
- [3] BAQERSAD J, POOZESH P, NIEZRECKI C, *et al.* Photogrammetry and optical methods in structural dynamics-A review[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, 86(2017): 17-34.
- [4] XU Wen-fu, LIANG Bin, LI Cheng, *et al.* The approach and simulation study of the relative pose measurement between space-crafts based on stereovision[J]. *Journal of Astronautics*, 2009, 30(4): 1421-1428.
徐文福,梁斌,李成,等.基于立体视觉的航天器相对位姿测量方法与仿真研究[J].宇航学报,2009,30(4):1421-1428.
- [5] WANG Xiang-jun, CAO Yu, ZHOU Kai. Methods of monocular pose measurement based on planar objects[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(1): 274-280.
王向军,曹雨,周凯.二维合作目标的单相机空间位姿测量方法[J].光学精密工程,2017,25(1):274-280.
- [6] DU Xiao-ping, ZHANG De-xian. Error analysis of method for the spacecraft state measure based on target feature[J]. *Journal of the Academy of Equipment command & Technology*, 2006, 17(5): 69-73.
杜小平,曾德贤.基于目标特征的航天器相对状态测量方法误差分析[J].装备指挥技术学院学报,2006,17(5):69-73.
- [7] SHANG Yang, YU Qi-feng. Vision-based disturbance-rejecting methods for space targets pose measurement[J]. *Journal of Astronautics*, 2008, 29(3): 938-944.
尚洋,于起峰.基于视觉的抗扰动测量空间目标位置姿态[J].宇航学报,2008,29(3):938-944.
- [8] LIU Wei, MA Xin, LI Xiao, *et al.* High-precision pose measurement method in wind tunnels based on laser-aided vision technology[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2015, 28(4): 1121-1130.
- [9] WANG Ying, ZHANG Guang-jun, CHEN Da-zhi. Tether insect motion parameters measurement system based on stereo vision[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2005, 26(6): 733-737.
王颖,张广军,陈大志.基于虚拟四目的立体视觉固定飞行昆虫运动参数测量系统[J].航空学报,2005,26(6):733-737.
- [10] YANG Ning, HUO Ju, YANG Ming. A method for attitude measurement of a test vehicle based on the tracking of vectors[J]. *Measurement Science and Technology*, 2015, 2015(26): 1-11.
- [11] RUAN Li-feng, WANG Geng, SHENG Huan-ye. 3D position and attitude measurement based on marking-points recognition[J]. *Computer Applications*, 2008, 28(11): 2855-2857.
阮利锋,王赓,盛焕焯.基于标志点识别的三维位姿测量方法[J].计算机应用,2008,28(11):2855-2857.
- [12] GAO Xue-hai, LIANG Bin, PAN Le, *et al.* Pose measurement of large non-cooperative target using line structured light vision[J]. *Journal of Astronautics*, 2012, 33(6): 728-735.
高学海,梁斌,潘乐,等.非合作大目标位姿测量的线结构光视觉方法[J].宇航学报,2012,33(6):728-735.
- [13] SEGAL S, CARMÍ A, GURFIL P. Vision-based relative state estimation to a failed non-cooperative spacecraft under modeling uncertainty[C]. *IEEE Aerospace Conference*, 2011: 1-7.
- [14] 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.
- [15] 马颂德,张正友.计算机视觉[M].北京:科学出版社,1988.
- [16] GUO Yu-bo, CHEN Gang, MA Hui-ping, *et al.* Researches on binocular vision pose measurement with selected feature points[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2016, 127(19): 8090-8095.