

立体测量中的相机晃动影响及其修正

邬琳红^{1,2} 刘进博^{1,2} 张小虎^{1,2} 王刚^{1,2} 孙聪^{1,2}

¹国防科学技术大学航天科学与工程学院, 湖南长沙 410073

²图像测量与视觉导航湖南省重点实验室, 湖南长沙 410073

摘要 分析了立体测量中的相机微小晃动,包括相机平移、旋转晃动及其复合形式对测量误差的影响,并提出一种基于摄像测量原理的相机晃动修正方法,利用场景中的控制点,通过位姿估计解算相机的位置姿态,进而修正测量误差。仿真结果表明,在微小晃动下,相机平移、旋转晃动幅度的增加分别使测量误差呈线性、二次曲线增长;近距离测量时,合理布置4个控制点,物方重投影误差小于1 mm,并且随着控制点数的增加,误差逐渐降到0.55 mm以下。仿真实验验证了该方法的可靠性,其可应用于不稳定平台立体测量中,并降低相机晃动对测量精度的影响。

关键词 机器视觉; 相机晃动影响; 位姿估计; 测量误差修正

中图分类号 P234.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.101504

Effects and Correction of Camera Shaking in Stereo Measurement

Wu Linhong^{1,2} Liu Jinbo^{1,2} Zhang Xiaohu^{1,2} Wang Gang^{1,2} Sun Cong^{1,2}

¹ College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

² Key Laboratory of Hunan Province on Videometrics and Vision Navigation, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract The measurement error influenced by the camera tiny shaking including translation, rotation and the combination in the stereo measurement are analyzed. The correction method of camera shaking based on the theory of photogrammetry is proposed, using control points in scene and the measurement error by calculating the camera pose with corrected pose estimation. Simulation results show that, with the tiny shaking, the camera translation makes the measurement errors increase linearly, while the rotation makes the errors grow quadratically. The re-projection error in the object space is less than 1 mm with short distance measurement and proper arrangement of four control points, and it gradually falls below 0.55 mm with the increase of control points number. Simulation experiment verifies the reliability of the correction method, and this method can be used in stereo measurement on an unstable platform to reduce the effect of camera shake.

Key words machine vision; influence of camera shaking; pose estimation; measurement error correction

OCIS codes 150.0155; 140.1488; 120.6085

1 引言

立体测量技术以其非接触、高精度、方便快速等优点,广泛应用于诸多领域中,例如三维重建、工业检测、机器人自导引和航空航天飞行器姿态检测等。立体测量通过使用2个或多个相机,实时拍摄被测物体的图像,并经过立体相机标定、特征提取、立体图像对校正、特征匹配等步骤,计算被测物体的三维数据^[1-5]。在大部分立体测量应用中,整个测量过程必须严格保持相机位置姿态不变,否则会导致事先标定好的相机位姿参数与实际值不一致,对测量精度造成很大影响。然而,在某些测量环境下,无法满足这些要求,如机翼变形测

收稿日期: 2016-06-06; **收到修改稿日期:** 2016-06-22; **网络出版日期:** 2016-09-23

基金项目: 国家自然科学基金(11272347,11072263,11472302)

作者简介: 邬琳红(1991—),女,硕士研究生,主要从事计算机视觉方面的研究。E-mail: 384396471@qq.com

导师简介: 张小虎(1973—),男,博士,研究员,主要从事计算机视觉方面的研究。

E-mail: zhx1302@hotmail.com(通信联系人)

量^[6-7]、大型结构变形测量^[8]、导弹发射以及着靶姿态测量^[9]等,由于气流扰动、结构沉降和激振力作用,会产生一定的振动,相应地引起相机微小的晃动。由于相机像距远小于物距,因此晃动引起的相机位置姿态参数的微小改变将对实验精度产生不可忽略的影响。

目前修正相机晃动影响的主要方法是利用陀螺仪或其他传感器和伺服机构来测量相机安装平台的晃动量,并在测量结果中进行消除。该方法需使用额外的测量设备,且精度较低。因此,如何在振动环境中进行高精度的立体测量,仍需深入研究。

本文提出了一种基于摄像测量原理的相机晃动修正方法,在测量环境中,合理布置若干控制点,那么在每一测量时刻,都可借助场景中的控制点,通过位姿估计解算相机实际的位置姿态,从而计算出被测物体更为准确的三维数据,修正相机晃动带来的测量误差。相比于传统方法,其成本低廉,只需额外增加一些合作标志,且操作简单、精度较高,适用于振动环境下的立体测量。

2 基本原理

2.1 测量误差分析

在摄影测量学领域,中心透视投影模型是常用的成像模型。双目立体测量的原理如图 1 所示,其由两台相机在合适的位置以一定的角度对准被测物体进行拍摄,则被测物体的信息将出现在两张图像上,例如某点 P 在图像上的位置分别为 p_1 、 p_2 ,那么通过图像上的信息,即 p_1 、 p_2 的坐标,以及相机自身的参数,如相机的焦距、像主点、光心的世界坐标和相机姿态等,便可以逆向求解 P 点的世界坐标。

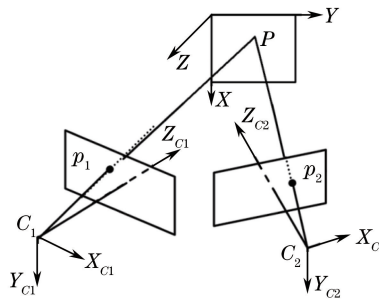


图 1 立体测量原理

Fig. 1 Principle of stereo-measurement

图像上每一个点对应一组共线方程^[10]

$$\begin{cases} \frac{\tilde{x} - C_x}{F_x} = \frac{r_0(X - X_0) + r_1(Y - Y_0) + r_2(Z - Z_0)}{r_6(X - X_0) + r_7(Y - Y_0) + r_8(Z - Z_0)} \\ \frac{\tilde{y} - C_y}{F_y} = \frac{r_3(X - X_0) + r_4(Y - Y_0) + r_5(Z - Z_0)}{r_6(X - X_0) + r_7(Y - Y_0) + r_8(Z - Z_0)} \end{cases}, \quad (1)$$

式中 C_x 、 C_y 为像主点坐标, F_x 、 F_y 为等效焦距, $r_0 \sim r_8$ 分别为旋转矩阵中的 9 个元素, X_0 、 Y_0 、 Z_0 为相机光心在世界坐标中的位置, \tilde{x} 、 \tilde{y} 为像点坐标, X 、 Y 、 Z 为世界坐标。

若有一组同名点对应,即在不同的相机内外参数下得到同一个空间点的另一组共线方程,除了空间坐标不变,其他参数分别用符号“'”表示,则两幅图像上的同名点对应 4 个方程

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 \\ \mathbf{A}_2 \end{bmatrix} \cdot [X, Y, Z]^T = \begin{cases} \mathbf{A}_1 \cdot [X_0, Y_0, Z_0]^T \\ \mathbf{A}_2 \cdot [X'_0, Y'_0, Z'_0]^T \end{cases}, \quad (2)$$

$$\text{式中 } \mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} (\tilde{x} - C_x)r_6 - F_x r_0 & (\tilde{x} - C_x)r_7 - F_x r_1 & (\tilde{x} - C_x)r_8 - F_x r_2 \\ (\tilde{y} - C_y)r_6 - F_y r_3 & (\tilde{y} - C_y)r_7 - F_y r_4 & (\tilde{y} - C_y)r_8 - F_y r_5 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} (\tilde{x}' - C'_x)r'_6 - F'_x r'_0(\tilde{x}' - C'_x)r'_7 - F'_x r'_1(\tilde{x}' - C'_x)r'_8 - F'_x r'_2 \\ (\tilde{y}' - C'_y)r'_6 - F'_y r'_3(\tilde{y}' - C'_y)r'_7 - F'_y r'_4(\tilde{y}' - C'_y)r'_8 - F'_y r'_5 \end{bmatrix}.$$

(2)式左右同乘系数矩阵的转置求解超静定方程组

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 \\ \mathbf{A}_2 \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 \\ \mathbf{A}_2 \end{bmatrix} \cdot [X, Y, Z]^T = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 \\ \mathbf{A}_2 \end{bmatrix}^T \cdot \left\{ \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 \cdot [X_0, Y_0, Z_0]^T \\ \mathbf{A}_2 \cdot [X'_0, Y'_0, Z'_0]^T \end{bmatrix} \right\}, \quad (3)$$

那么,方程组的最小二乘解可以表示为

$$[X, Y, Z]^T = \left\{ \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 \\ \mathbf{A}_2 \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 \\ \mathbf{A}_2 \end{bmatrix} \right\}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 \\ \mathbf{A}_2 \end{bmatrix}^T \cdot \left\{ \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 \cdot [X_0, Y_0, Z_0]^T \\ \mathbf{A}_2 \cdot [X'_0, Y'_0, Z'_0]^T \end{bmatrix} \right\}. \quad (4)$$

1) 相机平移晃动对测量精度的影响

由(4)式可知,若相机只存在平移晃动,则等式的右端为 X_0, Y_0, Z_0 和 X'_0, Y'_0, Z'_0 的线性组合,那么 $\frac{\partial X}{\partial X_0}$,

$\frac{\partial Y}{\partial X_0}, \frac{\partial Z}{\partial X_0}, \frac{\partial X}{\partial Y_0}, \frac{\partial Y}{\partial Y_0}, \frac{\partial Z}{\partial Y_0}, \frac{\partial X}{\partial Z_0}, \frac{\partial Y}{\partial Z_0}, \frac{\partial Z}{\partial Z_0}$ 均为常数,即测量误差随平移晃动幅度的改变呈线性变化,系数由相机内外参数和像点坐标确定。

2) 相机旋转晃动对测量精度的影响

在刚体进行纯旋转变换时,可以直接用旋转向量 $\mathbf{e} = \theta (e_1, e_2, e_3)^T$ 表示,以单位向量 $(e_1, e_2, e_3)^T$ 所在方向为旋转轴,逆时针旋转 θ 角,即可一次完成旋转变换。那么旋转矩阵可表示为

$$\mathbf{R}(\mathbf{e}, \theta) = (1 - \cos \theta) \begin{bmatrix} e_1^2 & e_1 e_2 & e_1 e_3 \\ e_1 e_2 & e_2^2 & e_2 e_3 \\ e_1 e_3 & e_2 e_3 & e_3^2 \end{bmatrix} + \cos \theta \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \sin \theta \begin{bmatrix} 0 & -e_3 & e_2 \\ e_3 & 0 & -e_1 \\ -e_2 & e_1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

若相机只存在旋转晃动,根据旋转向量 \mathbf{e} 定义的旋转矩阵 \mathbf{R} ,当固定旋转轴后, \mathbf{R} 中变量只有 θ 。并且由于相机作微小晃动,因此 $\theta \approx 0$,那么 $\sin \theta \approx 0, \cos \theta \approx 1$,并且只考虑单个相机旋转的情形。则(3)式可简化为

$$\begin{bmatrix} f_1 & f_2 & f_3 \\ f_4 & f_5 & f_6 \\ f_7 & f_8 & f_9 \end{bmatrix} \cdot [X, Y, Z]^T = \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中 f_i 和 g_i 均为 θ 的二次函数,那么, X, Y, Z 为 θ 的二次函数。

2.2 测量误差修正

相机晃动引起的测量误差需通过修正位姿参数来消除。已知像机内参数以及三维/二维特征点匹配关系的情况下,采用位姿估计^[11-16]的方法确定世界系到相机系的转换关系。

位姿估计的基本思想为:由三维空间与图像平面之间的一一对应关系来求解外参数矩阵。(1)式写成矩阵的齐次形式^[17]为

$$\mathbf{x} = \mathbf{KR} [\mathbf{I} | -\mathbf{X}_0] \mathbf{X}, \quad (7)$$

式中 $\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}$ 为像点的齐次坐标, $\mathbf{X} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$ 为空间点在世界系中的齐次坐标, $\mathbf{X}_0 = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix}$ 为相机光心在世界

系中的非齐次坐标。 \mathbf{K} 为元素值已知的相机内参数矩阵, \mathbf{R} 为相机坐标系在世界系中的姿态,且为单位正交阵, \mathbf{I} 为三阶单位阵。记 $\mathbf{P} = \mathbf{R} [\mathbf{I} | -\mathbf{X}_0]$ 为相机的位置姿态矩阵,有 6 个自由度,3 个用于定位,3 个用于定向。一组对应点产生 2 个约束方程,因此最少需要 3 组对应才能确定相机的外参数。为了避免方程的多解性,至少需要 4 组对应。

将 4 组及以上的数据代入(8)式,因 \mathbf{R} 为正交矩阵, \mathbf{P} 值可唯一确定。

$$\mathbf{K}^{-1} \mathbf{x}_i = \mathbf{P} \mathbf{X}_i, i = 1, 2, 3, 4, \dots. \quad (8)$$

3 实 验

3.1 仿真测量误差受相机晃动的影响

1) 相机内参数的设定如表 1 所示。

表 1 相机内参数

Table 1 Camera intrinsic parameter

	(F_x, F_y)	(C_x, C_y)
Left camera	(4581.849, 4580.543)	(1034.658, 533.974)
Right camera	(4597.184, 4593.882)	(1027.393, 537.249)

2) 相机外参数的设定如表 2 所示。

表 2 相机外参数

Table 2 Camera external parameter

	e	T / mm
Left camera	(1.4733, 1.2907, -0.7116)	(-0.9851, 1.3590, -0.0406)
Right camera	(1.8091, 0.6235, -0.3035)	(0.9174, 1.6178, -0.1669)

实验中所求得的世界系转换到相机系的位姿参数 T 为世界系原点在相机系中的坐标。因此 X_0 (光心的世界坐标) 需要通过转换得到, 即

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \mathbf{T}, \quad (9)$$

取(9)式左边为 0, 即相机系下的原点, 其世界坐标为 $X_0 = -\mathbf{R}^T \mathbf{T}$ 。

3) 15 个待测点空间坐标的设定如表 3 所示。

表 3 待测点世界坐标

Table 3 World coordinates of points

Point	X / mm	Y / mm	Z / mm
P_1	-2115.8	1351.4	597.9
P_2	-2093.7	1336.6	558.0
P_3	-2086.4	1352.1	524.2
P_4	-2105.3	1326.5	523.4
P_5	-2088.1	1333.0	500.2
P_6	-2074.3	1348.8	488.5
P_7	-2106.8	1306.3	476.9
P_8	-2119.2	1284.6	462.7
P_9	-2051.8	1371.5	470.2
P_{10}	-2080.2	1330.8	455.0
P_{11}	-2125.0	1266.3	439.8
P_{12}	-2028.3	1386.8	445.5
P_{13}	-2101.8	1297.7	418.7
P_{14}	-2074.0	1327.3	422.1
P_{15}	-2048.9	1363.2	416.3

4) 噪声的设置。对控制点和待测点的图像坐标加上 $\sigma=0.2$ 的高斯噪声作为提点误差, 控制点世界坐标加上 $\sigma=0.2$ 的高斯噪声作为测点误差。

由左相机晃动引起的待测点平均测量误差如图 2~3 所示。

3.2 仿真测量误差的修正

在被测物周围设置若干控制点, 使用位姿估计的方法修正相机位姿参数。仿真实验中, 保持之前的实验条件不变, 布置若干控制点。一般情况下, 内插的精度高于外插的精度, 因此, 控制点的布置可以较为均匀地覆盖待测点所在的区域, 分布形式如图 4 所示。

对每次选取的控制点仿真 1000 次, 得到仿真结果, 测量精度随控制点个数增加的变化如图 5 所示。

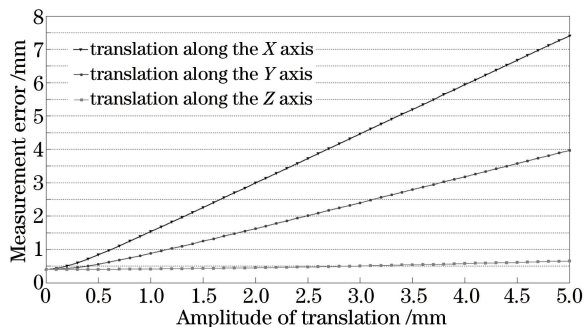


图 2 测量误差与相机平移晃动幅度的关系

Fig. 2 Relationship between measurement error and the amplitude of camera translation

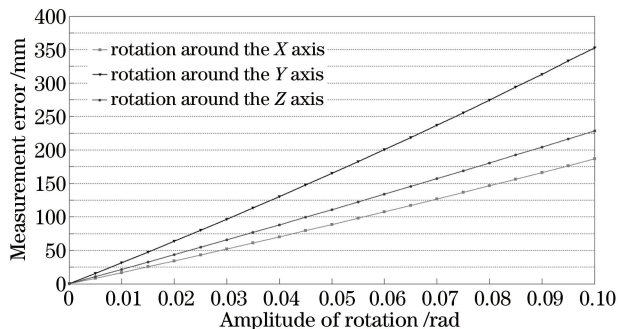


图 3 测量误差与相机旋转晃动幅度的关系

Fig. 3 Relationship between measurement error and the amplitude of camera rotation

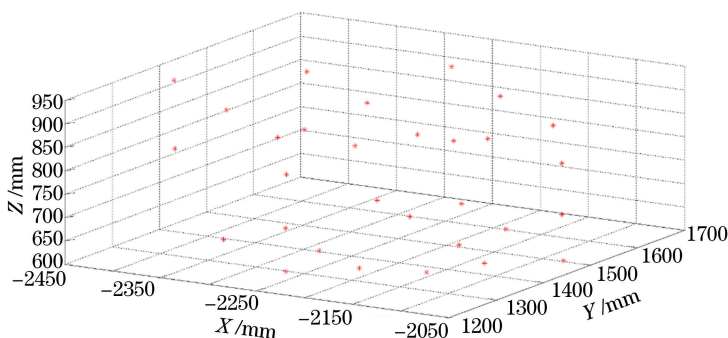


图 4 控制点的分布形式

Fig. 4 Distribution of control points

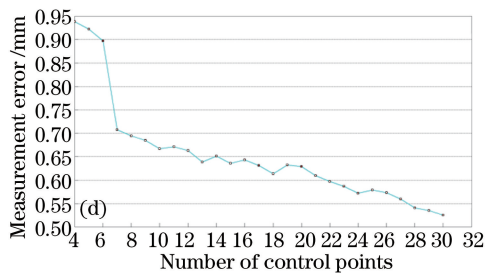
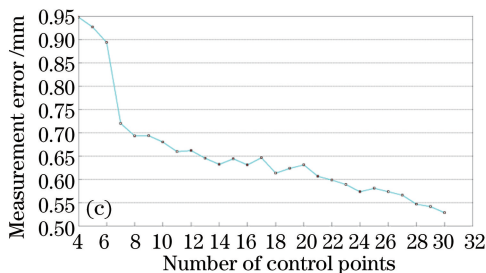
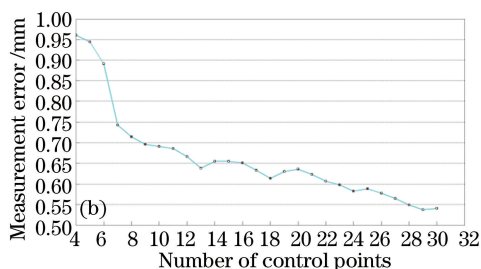
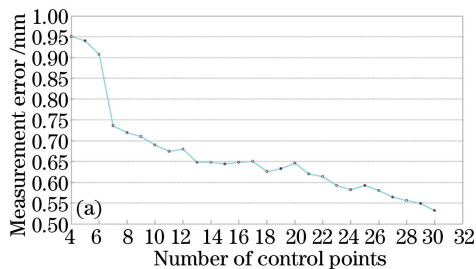


图 5 测量误差修正结果随控制点个数增加的变化。(a)左相机平移晃动 5 mm;(b)左右相机同时平移晃动 5 mm;
(c)左相机旋转晃动 0.1 rad;(d)左右相机同时旋转晃动 0.1 rad

Fig. 5 Measurement error versus the number of control points. (a) Translating left camera by 5 mm;
(b) translating both left and right cameras by 5 mm; (c) rotating left camera by 0.1 rad;
(b) rotating both left and right cameras by 0.1 rad

3.3 实验验证

用2个高速摄像机同时拍摄图6所示的场景,拍摄距离在3 m左右,长方体标志架各边长在0.3 m左右,飞机模型机身方向长约0.15 m。相机的内外参数已在拍摄前标定好,即相机内参数已知,相机外参数的初始值也已确定。模型中所有合作标志的世界坐标事先都用全站仪测好。以架子上的合作标志作为控制点,飞机模型上的合作标志作为待测点。拍摄过程中对相机制造随机晃动,挑选一对图像通过立体测量的方法求解待测点坐标,经过相机的位姿参数校正后,测量结果如图7所示。

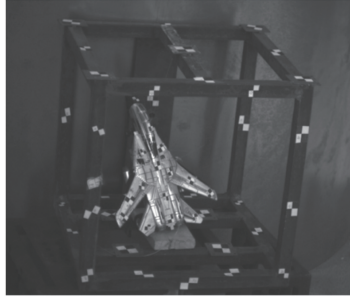


图6 实验场景

Fig. 6 Experimental scene

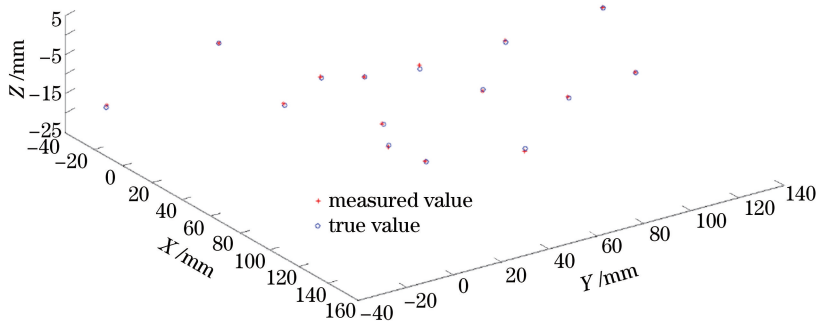


图7 位姿参数修正后的测量结果与真值的比较

Fig. 7 Comparison between measurement and the true value with the corrected pose parameters

4 实验结果分析

由图2可知,测量误差随各轴平移晃动幅度的增加都呈线性增长,在X轴方向变化最显著,当晃动量为5 mm时,测量误差接近7.5 mm;在Z轴方向影响最小,测量误差基本来自噪声的干扰。相机的旋转晃动带来的测量误差较大,在较小的晃动幅度下,变化曲线的曲率不大,基本呈线性变化,比例系数较大。在仿真条件下,绕Y轴方向晃动测量误差最大,当晃动量为0.1 rad时,误差超过350 mm。

对于平移晃动,Z轴方向为相机深度方向,光心在该方向的移动对景物图像坐标的影响较不明显,因此Z轴的平移晃动对测量误差的影响最小;而在XY平面内,光心的移动对景物成像的像点位置偏差较大,因此,测量误差较大。对于旋转晃动,相机姿态的微小改变会导致测量结果随距离成倍地放大,因此微小的旋转晃动传递到远远大于像距的物方空间,会引起较大的测量误差。

由图5可知,先利用控制点对相机进行位姿矫正,再进行交会测量,可以显著地减小测量误差;当有足够多的控制点时,可将平移引起的误差从7.5 mm减小至0.55 mm以下,将旋转引起的误差从350 mm减小至0.55 mm以下。

图7的结果表明,若相机位姿参数经过修正后,测量的结果与真值能很好地吻合,验证了仿真结果的正确性。因此,在振动环境中,合理布置若干控制点,用每次拍摄得的图像重新对相机位姿求解,便可以有效地降低振动对立体测量的干扰。

5 结 论

立体测量过程中,相机的微小晃动会给测量结果带来很大误差,尤其是旋转晃动,将显著影响测量精度。使用位姿估计的方法对相机位姿参数进行矫正可以有效消除相机晃动带来的影响,使测量误差能够降低至0.55 mm以下,其精度高,对实验的干扰小,更方便快捷。

平移晃动对测量误差的影响是线性的,而旋转晃动对测量误差的影响是晃动幅度的二次函数,在微小的晃动下,函数曲线曲率不大,基本为线性,但比例系数较大。另外,合作标志提点噪声的干扰是本文实验精度无法提高的主要原因,若能制作出高精度并且具有很好的反射特性的合作标志,将对精度的提高有很大帮助。

参 考 文 献

- Cui Hongxia, Wang Hongyan, Liu Jiaqi, *et al.* Calibration and quantitative evaluation for a low-cost stereo-camera system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(2): 021503.
崔红霞, 王鸿雁, 刘佳琪, 等. 一种低成本立体摄像机系统的标定和定量评价[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(2): 021503.
- Li Mingjin, Xiong Xianming, Zhang Shaobing. A novel method of camera calibration based on OpenCV[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, 46(12): 99-102.
李明金, 熊显名, 张绍兵. 一种基于 OpenCV 的摄像机标定新方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, 46(12): 99-102.
- Lai Hanxuan, Zhang Zhengyu, Zhu Long, *et al.* Nonlinear distortion correction of camera based on linear characteristic [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(2): 021502.
赖瀚轩, 张征宇, 朱 龙, 等. 基于直线特征的摄像机非线性畸变自校正[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(2): 021502.
- Zhu Jigui, Zou Jian, Lin Jiarui, *et al.* Error-compensation algorithm with high-accuracy for photographic image processing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(9): 0912004.
郝继贵, 邹 剑, 林嘉睿, 等. 摄影测量图像处理的高精度误差补偿法[J]. *光学学报*, 2012, 32(9): 0912004.
- Long Changyu, Zhu Jigui, Guo Yin, *et al.* Study on close-range photogrammetry based on non-parameteric measurement model[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(12): 1215004.
隆昌宇, 郝继贵, 郭 寅, 等. 基于非参数测量模型的摄影测量方法研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(12): 1215004.
- Zhang Zhengyu, Huang Xuhui, Yin Jiang, *et al.* Progress of videogrammetric measurement techniques for high speed wind tunnel test[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2015, 29(2): 1-7.
张征宇, 黄叙辉, 尹 疆, 等. 高速风洞试验中的视频测量技术进展[J]. *实验流体力学*, 2015, 29(2): 1-7.
- Zhang Zhengyu, Yu Bo, Huang Shijie, *et al.* Videogrammetric measurement of attack angle and its precision investigation in wind tunnel tests[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2013, 27(1): 88-91.
张征宇, 喻 波, 黄诗捷, 等. 风洞试验中模型迎角的视频测量及精度研究[J]. *实验流体力学*, 2013, 27(1): 88-91.
- Yu Qifeng, Shang Yang, Fu Sihua, *et al.* Development of videometrics for large-scale structural deformation and topography measurement[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2011, 26(5): 479-490.
于起峰, 尚 洋, 伏思华, 等. 大型结构变形及形貌摄像测量技术研究进展[J]. *实验力学*, 2011, 26(5): 479-490.
- Zhang Yuan, Wang Zhiqian, Qiao Yanfeng, *et al.* Attitude measurement method research for missile launch[J]. *Chinese Journal of Optic*, 2015, 8(6): 997-1003.
张 原, 王志乾, 乔彦峰, 等. 导弹发射姿态测量方法研究[J]. *中国光学*, 2015, 8(6): 997-1003.
- Yu Qifeng, Shang Yang. Videometrics: Principles and researches[M]. Beijing: Science Press, 2009: 25-31.
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: 25-31.
- Sharma V, Barnum P C. Camera pose estimation: US9237340[P]. 2016-1-12.
- Li Xin, Long Gucan, Liu Jinbo, *et al.* Accelerative orthogonal iteration algorithm for camera pose estimation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(1): 0115004.
李 鑫, 龙古灿, 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.
- Xu Yunxi, Jiang Yunliang, Chen Fang. A generalized orthogonal iterative algorithm for pose estimation of multiple camera systems[J]. *Acta Optical Sinica*, 2009, 29(1): 72-77.
许允喜, 蒋云良, 陈 方. 多摄像机系统位姿估计的广义正交迭代算法[J]. *光学学报*, 2009, 29(1): 72-77.

- 14 Yang Ahua, Li Xuejun, Liu Tao, *et al.* A robust method for camera pose estimation[J]. Journal of Equipment Academy, 2014, 25(1): 88-94.
杨阿华, 李学军, 刘 涛, 等. 一种相机位姿鲁棒估计方法[J]. 装备学院学报, 2014, 25(1): 88-94.
- 15 Li Xin, Zhang Yueqiang, Liu Jinbo, *et al.* A direct least squares method for camera pose estimation based on straight line segment correspondences[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(6): 0615003.
李 鑫, 张跃强, 刘进博, 等. 基于直线段对应的相机位姿估计直接最小二乘法[J]. 光学学报, 2015, 35(6): 0615003.
- 16 Hartley R, Zisserman A. Multiple view geometry in computer vision[M]. Cambridge: Cambridge University Press, Second Edition, 2004.