

文章编号: 1001-4888(2013)04-0431-08

摄像测量在平台微小晃动量 测量中的应用方法研究^{*}

刘进博^{1,2}, 张小虎^{1,2}

(1. 国防科技大学 航天科学与工程学院, 湖南长沙 410073;

2. 国防科学技术大学 图像测量与视觉导航湖南省重点实验室, 湖南长沙 410073)

摘要: 平台在三维空间中的微小晃动反映到二维像平面上就是像点的变化。本文提出基于摄像测量学的小角度测量方法。通过固连在平台上的 CCD 像机对惯性空间中静态基准的实时观测, 解算得到由于平台微小晃动引起的像机姿态变化量; 利用固连关系得到平台的小角度变化量, 并通过静态和动态实验证明了该方法准确可行, 在 36' 晃动幅度下, 测量精度优于 5"。该方法在保证精度前提下, 可以降低系统硬件成本, 可用于修正车载式光学测量设备的平台晃动误差, 具有一定的理论研究意义和工程应用价值。

关键词: 摄像测量; 微小晃动; CCD 像机; 静态基准; 修正

中图分类号: TP391

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-12-140

0 引言

测量设备一般要求安装在稳定的基座平台上, 但是很多应用情况下(如海上测量船平台), 基座平台本身处于晃动或振动的环境中, 或者由于测量设备在测量过程中相对基座平台的运动, 使得平台产生位置、姿态的晃动, 从而成为不稳定平台。由于测量平台不稳定性的存在, 使得安装于其上的测量设备的测量结果引入了平台晃动引起的误差, 降低了仪器的测量精度。为了扩展光学测量设备在此种条件下的应用, 需要高精度地计算任意时刻不稳定平台在惯性空间的晃动量, 修正测量结果。

靶场光电经纬仪是较为典型的测量设备。光电经纬仪是获取飞行目标弹道数据和飞行状态的最基本的跟踪测量设备, 主要分为固定式经纬仪和车载式经纬仪。固定式经纬仪虽然精度高、可靠性强, 但由于其作用范围有限, 越来越难以满足现代武器机动性需求。车载式经纬仪弥补了固定式经纬仪机动性方面的不足, 采用机动布站、定点测量方式, 即首先利用载车将经纬仪运输到测量点位后, 展开测量工作。到达点位后, 经纬仪落于地基上, 再实施测量的情况称为“落地测量”, 而不落于地基、直接实施测量的情况称为“不落地测量”。然而车载式经纬仪在实际使用中存在问题, 如落地测量的准备时间较长, 不能满足实时性要求; 不落地测量虽然能够有效地保证靶场光学测量的灵活性并扩大测量区域, 但是由于没有固定基座, 加上载车可能停在各种路况的地面上, 在工作尤其是在高速跟踪测量状态下, 经纬仪质心容易与转轴不重合, 此时产生的偏心力矩会使测量平台发生摆动, 将使经纬仪的测角结果引入测量平台晃动引起的误差, 导致结果不能满足测量要求。一般情况下, 被测目标与经纬仪的距离至少是几千米, 经纬仪平台平移晃动量只是毫米量级, 所以平移晃动引起的测量误差可忽略不计; 经纬仪平台的姿态晃动量是测量误差产生的主要因素, 通常在 30' 以内, 因此经纬仪平台的晃动测量可以认为是小

^{*} 收稿日期: 2012-10-19; 修订日期: 2013-01-10

通讯作者: 刘进博(1988—), 男, 博士在读。主要研究方向: 运动摄像测量与视觉导航。E-mail: liujinbo2088@163.com

角度测量。

角度测量是几何计量技术的重要组成部分,可以分为静态测量和动态测量两种。静态测量的主要任务集中在如何提高测量精度和测量分辨力上,对于军事领域而言,则更注重动态测角的精度及稳定性,但是实现动态角度的高精度测量是测角技术领域的一个难点,也是国内外测角技术研究的一个热点^[1-5]。角度测量技术按照测量原理可以分为三大类:机械测角技术、电磁式测角技术和光学测角技术^[6-11]。机械式和电磁式测角技术起步较早,技术也已经非常成熟,如多齿分度台和圆磁栅,这些方法的主要缺点大多为手工测量,难以实现动态的自动化测量,测角精度受到限制。光学测角方法相比机械和电磁测角方法而言,具有更高的准确度,而且具有非接触和高灵敏度的特点,尤其是稳定的激光光源的发展使得动态实时测量成为可能,因此在高精度角度测试技术领域,各种光学测角技术不断涌现。近年来,基于计算机视觉技术的动态测角法迅速发展,主要是结合图像处理技术,通过图像特征提取计算被测角度及结构变化,该方法系统结构简单,可实现便携式和完全自动化动态测量,被测物体与测量系统的相对位置可任意改变,可对三维空间自由的角度变化进行实时测量^[12-14]。点结构光动态角度测量法是立体视觉检测技术在动态角度测量中的典型应用,该方法利用点阵激光器与 CMOS 相机构成测量系统,由三角测量原理可以计算出各光斑的三维空间坐标,拟合光斑确定的平面,通过此平面的法向量变化解算被测平面空间的姿态角变化,在 $\pm 20^\circ$ 范围内准确度为 0.2° 。

本文提出的基于摄像测量的动态角度检测方法是一种非接触式测量,通过固连在平台上的 CCD 像机对惯性空间中静态基准的实时观测,解算得到由于平台微小晃动引起的像机姿态变化量,利用固连关系得到平台的小角度变化量,从而实现在不改变和破坏被测目标表面结构情况下的高精度动态测量。

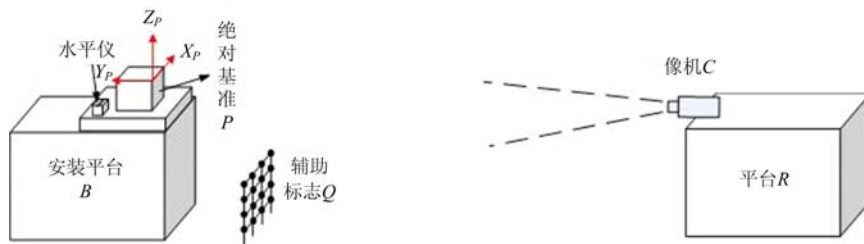


图 1 平台晃动量测量原理示意图

Fig. 1 Measurement for plat shaking

1 测量原理

1.1 平台晃动量测量基本原理

如图 1 所示,安装平台 B 与标志 P 固连,像机 C 与测量平台 R 固连。像机坐标系 C 到标志架本体坐标系的转换关系为 H_{CP} ,平台坐标系 R 到像机坐标系 C 的转换关系为 H_{RC} 。则:

$$\begin{cases} X_R = H_{RC} X_C \\ X_C = H_{CP} X_P \end{cases} \quad (1)$$

其中 X_R 表示任一点 M 在测量平台坐标系下的齐次坐标; X_C 表示 M 在像机坐标系下的齐次坐标; X_P 表示在标志架坐标系下的齐次坐标,对于初始时刻 t_0 :

$$X_{C_0} = H_{CP_0} X_P \quad (2)$$

$$\text{对于任意时刻:} \quad X_{C_t} = H_{CP_t} X_P \quad (3)$$

$$\text{则:} \quad X_{C_0} = H_{CP_0} H_{CP_t}^{-1} X_{C_t} \quad (4)$$

对于 t 时刻和初始时刻 M 在测量平台坐标系下的齐次坐标存在如下关系:

$$X_{R_t} = H_{RC} X_{C_t} = H_{RC} H_{CP_t} X_P = H_{RC} H_{CP_t} H_{CP_0}^{-1} H_{RC}^{-1} X_{R_0} \quad (5)$$

由于本文只关注平台的姿态变化,故式(5)可写为:

$$X_{R_t} = R_{RC} X_{C_t} = R_{RC} R_{CP_t} X_P = R_{RC} R_{CP_t} R_{CP_0}^{-1} R_{RC}^{-1} X_{R_0} \quad (6)$$

这样就建立了任意时刻测量平台坐标系与初始时刻测量平台坐标系的关系及任意时刻测量平台坐

标系与绝对基准 P 的姿态转换关系,进而可以分离得到测量平台在任意时刻的相对姿态变化量和绝对姿态变化量,但是在实际工程实践中,测量平台和像机的姿态转换关系是未知的,需要在测量之前进行标定。

1.2 单目测角法基本原理

单目测角法基本原理如图2所示,像机固连在平台上且像机坐标系与平台体坐标系重合, (α, β, γ) 为平台晃动后相对初始状态的角度变化量。

n 个合作标志在世界坐标系和像机坐标系中的坐标分别为 $P_i(X, Y, Z)$ 和 $p_i(X_c, Y_c, Z_c)$, 对应的归一化像点坐标为 $I_i(\tilde{x}, \tilde{y})$, 则共线方程可表示为:

$$Z_c \begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{y} \\ I \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ I \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中:

$$M = \begin{bmatrix} m_0 & m_1 & m_2 & m_3 \\ m_4 & m_5 & m_6 & m_7 \\ m_8 & m_9 & m_{10} & m_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x r_0 + C_x r_6 & F_x r_1 + C_x r_7 & F_x r_2 + C_x r_8 & F_x T_X + C_x T_Z \\ F_y r_3 + C_y r_6 & F_y r_4 + C_y r_7 & F_y r_5 + C_y r_8 & F_y T_Y + C_y T_Z \\ r_6 & r_7 & r_8 & T_Z \end{bmatrix} \quad (8)$$

对用投影矩阵的元素表达的成像共线方程进行整理,可以得到关于投影矩阵元素 $m_0 \sim m_{11}$ 的线性齐次方程组:

$$\begin{cases} X_i m_0 + Y_i m_1 + Z_i m_2 + m_3 - \tilde{x}_i X_i m_8 - \tilde{y}_i Y_i m_9 - \tilde{z}_i Z_i m_{10} - \tilde{x}_i m_{11} = 0 \\ X_i m_4 + Y_i m_5 + Z_i m_6 + m_7 - \tilde{y}_i X_i m_8 - \tilde{y}_i Y_i m_9 - \tilde{y}_i Z_i m_{10} - \tilde{y}_i m_{11} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

对比投影矩阵元素构成形式可知 $m_{11} = T_Z$, 它是世界坐标系原点在像机坐标系中的 Z_c 坐标。只要世界坐标系原点不在像机坐标系的 $X_c Y_c$ 平面内, 就有 $T_Z \neq 0$ 。通常测量目标都在像机前方, 故 $T_Z > 0$ 。用 m_{11} 除投影矩阵各元素, 并令 $s_i = m_i / m_{11}$ ($i = 0, \dots, 10$), 则可以得到关于 $s_0 \sim s_{10}$ 的线性方程组:

$$\begin{cases} X_i s_0 + Y_i s_1 + Z_i s_2 + s_3 - \tilde{x}_i X_i s_8 - \tilde{y}_i Y_i s_9 - \tilde{z}_i Z_i s_{10} = \tilde{x}_i \\ X_i s_4 + Y_i s_5 + Z_i s_6 + s_7 - \tilde{y}_i X_i s_8 - \tilde{y}_i Y_i s_9 - \tilde{y}_i Z_i s_{10} = \tilde{y}_i \end{cases} \quad (10)$$

当存在六个以上不共面标志点时就可线性求解方程组 $s_0 \sim s_{10}$ 。旋转矩阵 R 为单位正交阵, 则 $r_6^2 + r_7^2 + r_8^2 = 1$ 。根据投影矩阵各元素的构成, 有: $m_8^2 + m_9^2 + m_{10}^2 = 1$ 。则

$$\begin{cases} T_Z = m_{11} = \sqrt{\frac{1}{s_8^2 + s_9^2 + s_{10}^2}} \\ m_i = s_i m_{11} \end{cases} \quad (11)$$

根据投影矩阵的元素 m_8, m_9, m_{10} 的形式可以直接得到:

$$\begin{aligned} r_6 &= m_8, r_7 = m_9, r_8 = m_{10} \\ r_0 &= (m_0 - C_x r_6) / F_x, r_1 = (m_1 - C_x r_7) / F_x, r_2 = (m_2 - C_x r_8) / F_x \\ r_3 &= (m_4 - C_y r_6) / F_y, r_4 = (m_4 - C_y r_7) / F_y, r_5 = (m_5 - C_y r_8) / F_y \\ T_X &= (m_3 - C_x T_Z) / F_x, T_Y = (m_7 - C_y T_Z) / F_y \end{aligned}$$

进一步可以根据旋转矩阵 R 的组成形式分解出三个旋转角。例如 R 的欧拉旋转形式为 231, 则可按下式分解旋转角:

$$A_Y = \arctan \left[\frac{-r_6}{r_8} \right], A_Z = \arctan \left[\frac{r_1}{r_4} \right], A_X = \arctan \left[\frac{-r_7}{r_1 \sin A_Z + r_4 \cos A_Z} \right]$$

若以初始时刻 t_0 的姿态为基准, 则 (A_Y, A_Z, A_X) 为 t 时刻相对初始时刻的姿态变化量。

以物体空间共线误差作为目标函数, 即物点 P_i 在视线方向的投影应等于其本身(如图3)。物点在

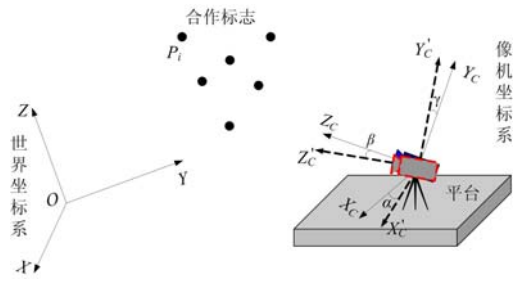


图2 单目测角法原理图

Fig. 2 Theory of monocular vision

像机坐标系中的坐标 p_i 可表示为:

$$p_i = RP_i + T \quad (i = 1, \dots, n) \quad (12)$$

其中 $R, T(T_x, T_y, T_z)$ 分别表示由世界坐标系向像机坐标系转换的旋转矩阵和平移向量。

假定由像机光心和像点确定的视线方向向量为 v_i , 则正交迭代算法的目标函数可表示为:

$$E(R, T) = \sum_{i=1}^n \|\vec{e}_i\|^2 = \sum_{i=1}^n \|RP_i + T - \hat{V}_i(RP_i + T)\|^2 = \sum_{i=1}^n \|(I - \hat{V}_i)(RP_i + T)\|^2 \quad (13)$$

式中 $\hat{V}_i = \frac{\vec{v}_i \vec{v}_i^T}{\vec{v}_i^T \vec{v}_i}$ 为视线投影矩阵。这样角度测量问题就转换为误差平方和最小化问题, 可以采用 SVD 方法进行迭代求解。

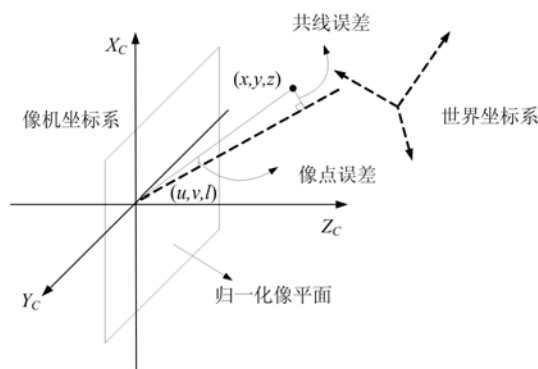


图 3 正交迭代法原理图

Fig. 3 Algorithm of OI

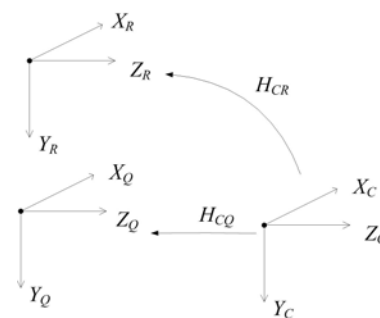


图 4 标校原理图

Fig. 4 Theory of emendation

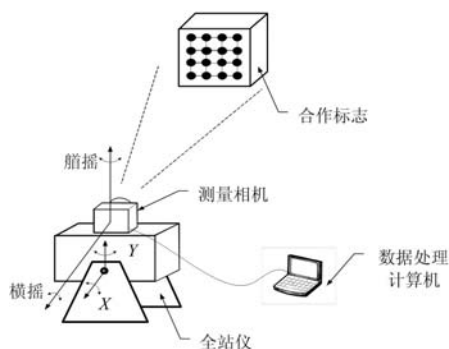
1.3 像机与测量平台标定方法

由于测量平台只能满足水平指北的条件不能提供任何测量信息, 必须引入辅助标志 Q , 坐标系转换关系如图 4 所示。

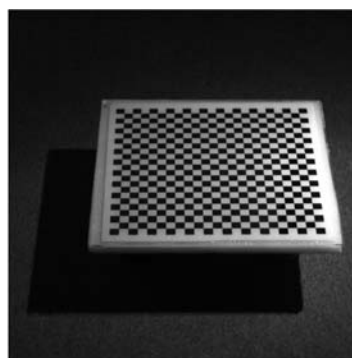
将辅助标志在标定前调平指北, 保证辅助坐标系与测量平台坐标系只相差一个位移量。则:

$$X_C = H_{CQ}X_R = H_{CR}X_R \quad (14)$$

H_{CQ} 为像机在该时刻外参, 这样就完成了测量平台坐标系和像机坐标系的标定过程。



(a) 基于全站仪精度验证实验布置方案



(b) 像机内参标定部分图像

图 5 静态实验布置方案及像机内参标定图像

Fig. 5 Collocation of Static Experiment

2 实验

2.1 静态实验

图 5 为基于全站仪的静态精度验证实验布置方案, 像机与全站仪固连, 距离合作标志 15m。全站仪

可以沿 X 轴和 Y 轴旋转。实验中采用高精度玻璃靶板进行像机内参标定,像点的亚像素定位方法为基于自适应模板的相关系数高斯拟合法,图像处理程序全部基于 MATLAB 2009a。

实验中,全站仪沿 X 轴和 Y 轴的转角(α, β)幅度分别为 $0 \sim 2.18'$ 和 $0 \sim 2.02'$ 。图 6 给出了实验测量的不同旋转位置的像机三轴姿态变化不同测量位置稳定后的实时测量误差,经统计图中所示误差标准差为 $(1.9'', 1.5'', 1.7'')$ 。

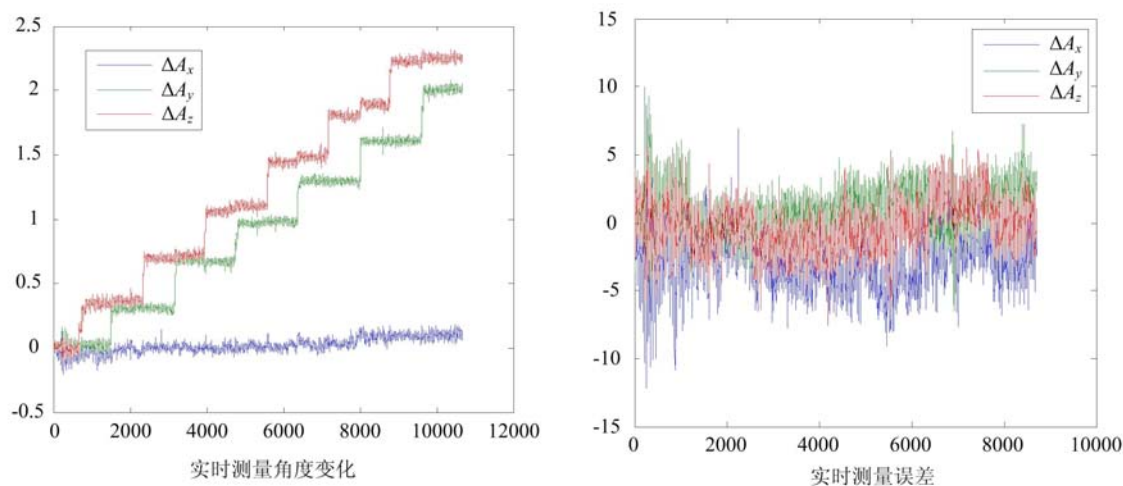


图 6 静态实验结果

Fig. 6 Results of static experiment

2.2 动态实验

图 7 为基于转台的精度验证实验方案,控制转台沿 Y 轴做周期性转动,像机距离合作标志约 5m。

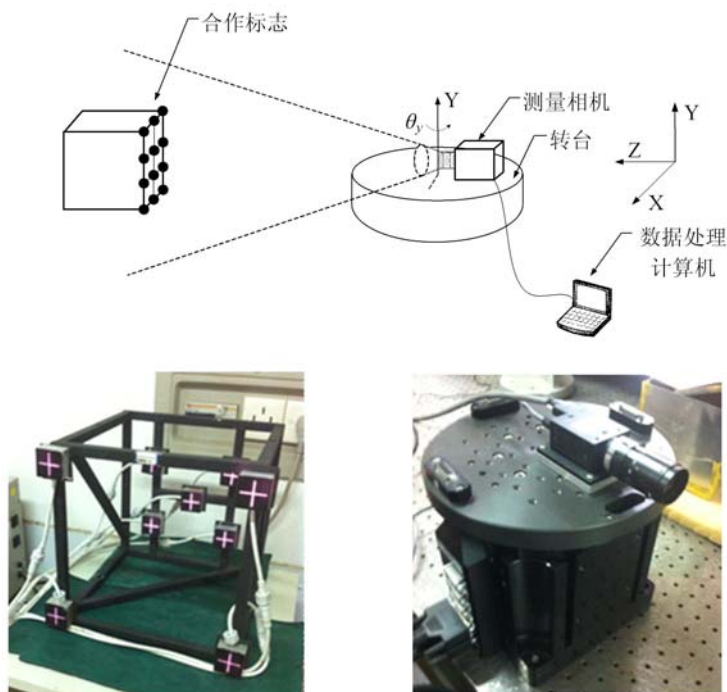


图 7 基于转台的动态精度验证实验布置方案及部分实物图像

Fig. 7 Collocation of dynamic experiment

利用高精度转台绕 Y 轴的转动,模拟动态条件下的平台晃动。假设转台绕 Y 轴的转角为 θ_y ,利用像机测量的 Y 轴方向的平台晃动角度 κ_b ,初始对齐后,满足 $\kappa_b = \theta_y$ 。实验中,控制转台按一定周期和幅度摆动,并以 1000Hz 的频率动态输出其转角数据 θ_y ,同时测量相机以 10Hz 的频率输出晃动角度 κ_b ;取

相同时刻的像机测量值 κ_i 与转台转角 θ_y 做比较,验证平台晃动摄像测量方法的动态精度。实验分两个部分:第一部分为平台不同晃动周期条件下的动态精度验证实验;第二部分为平台不同晃动幅度条件下的动态精度验证实验。

1) 不同周期验证实验

这一部分主要在不同晃动周期条件下,验证摄像测量方法的动态精度。实验中,模拟的平台晃动幅度为 $900''$,晃动周期分别为 200s、100s、50s 和 20s,实验结果见图 8 和表 1。实验结果表明,晃动周期的变化对摄像测量方法的动态精度没有明显的影响。

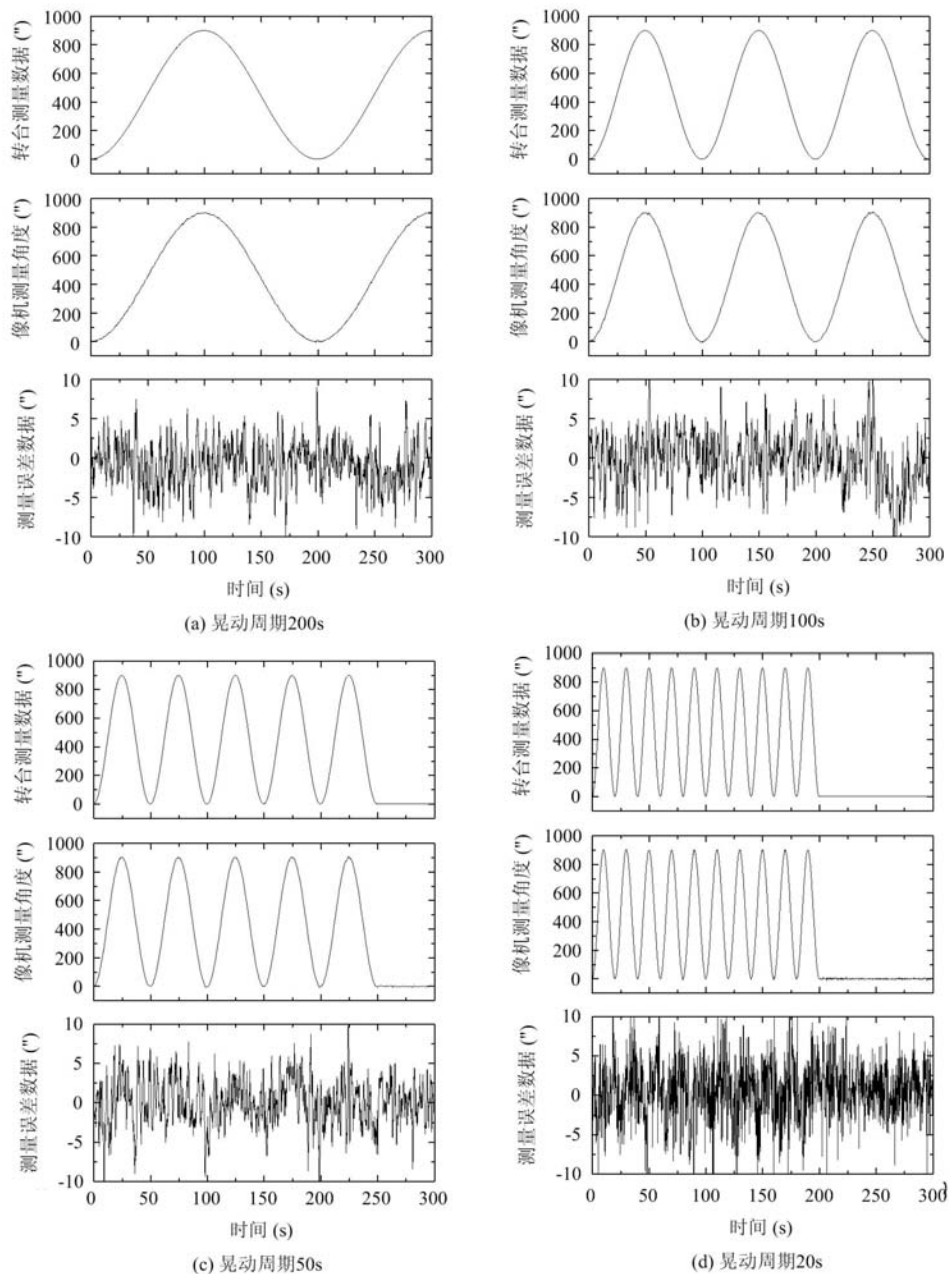


图 8 不同晃动周期精度验证实验

Fig. 8 Results for various period

表 1 不同晃动周期精度验证实验误差统计结果

Tab. 1 Results for various period				
周期	200s	100s	50s	20s
误差	3. 6"	3. 6"	3. 0"	4. 2"

表 2 不同晃动幅度条件下测量误差统计结果

Tab. 2 Results for various swing			
幅度	12′	24′	36′
误差	3. 6"	3. 9"	4. 4"

2) 不同晃动幅度下精度验证实验

这一部分主要在不同晃动幅度条件下,验证摄像测量方法动态精度。实验中,模拟的晃动周期为 100s,晃动幅度分别为 12′(720″)、24′(1440″)、36′(2160″),实验结果见图 9 和表 2。实验结果表明在晃动幅度 36′的条件下,系统动态测量精度优于 5″。

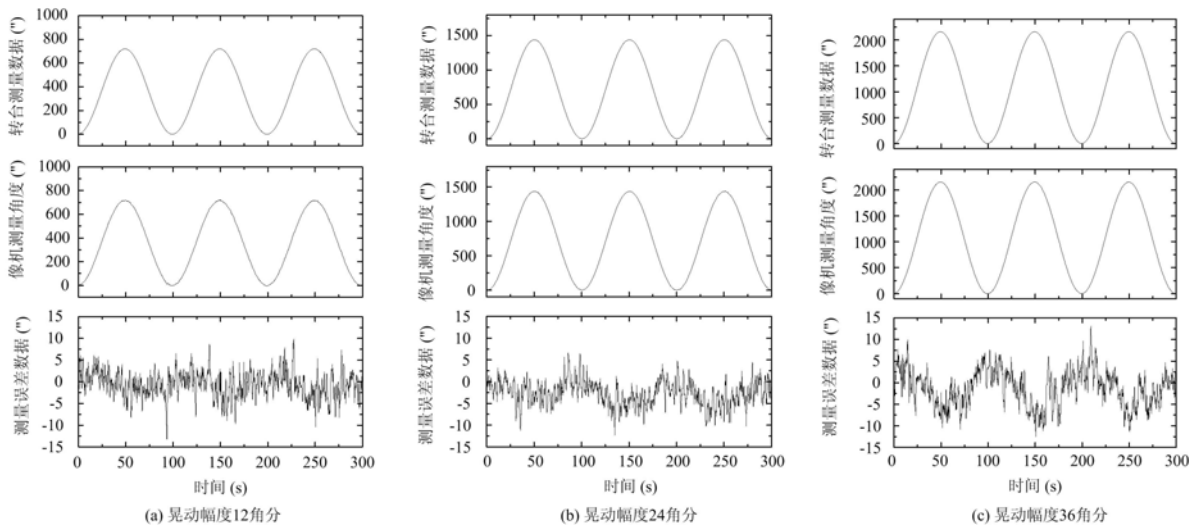


图 9 不同晃动幅度下精度验证实验
Fig. 9 Results for various swing

3 总结

本文针对车载式移动测量设备的平台晃动问题,提出了基于摄像测量原理的小角度晃动量测量方法,实验结果表明该方法正确可行,显示出其在车载移动光测领域中的应用前景。

1) 基于摄像测量的小角度测量方法设备简单,对环境要求有所降低,并且在一定程度上放大了小角度的测量范围,具有一定的研究意义和工程应用前景。

2) 该方法的精度主要取决于标志点的像点提取精度,本文利用高斯模板拟合,在特定条件下可以定位到亚像素级别。

3) 该方法的灵敏度主要由合作标志在整个像面上所占的比例大小决定,在同样的角度变化下,比例大的在像平面上反应较为明显。

后续工作展望:

- 1) 对于温差变化较大或空气密度不均匀导致的测量误差进行校正,提高其环境适应能力。
- 2) 基于摄像测量的平台晃动量测量方法还有完善空间,主要通过合理优化空间配置和检测定位方法提高测量精度。

参考文献:

[1] Beymer D, Flickner M. Eye gaze tracking using an accurate stereo head[C]. Presented at the IEEE Conference in CVPR03, 2003.

[2] Chen J, Ji Q. Probabilistic Gaze Estimation Without Active Personal Calibration[C]. Presented at the CVPR,

- 2011.
- [3] Chiu M. -H, Su D. -C. Angle measurement using total-internal-reflection heterodyne interferometry[J]. Optic Engineering, 1997, 36:5957—5963.
 - [4] Gueatrin E D, Eizenman M. General theory of remote gaze eatimation using the pupil center and corneal reflections [C]. in IEEE Transcations on Biomedical Engineering, 2008.
 - [5] 浦昭邦, 陶卫, 张琢. 角度测量的光学方法[J]. 光学技术, 2002, 28(2):168—171(PU Zhao-bang, TAO Wei, ZHANG Zhuo. Angle measurement with optical methods[J]. 2002, 28(2):168—171(in Chinese))
 - [6] Licht T R. A new laser based method for torsional vibration measurement[C]. in Givarseminarium Stenungsund, Sweden, 1993.
 - [7] Malacara D, Harris O. Interferometric measurement of angles[J]. Appl. Opt, 1974, 9:1646—1651.
 - [8] Shi P, Stijins E. New optical methods for measuring small-angle rotations[J]. Appl. Opt, 1988, 27:4342—4344.
 - [9] Torroba R, Tagliaferri A A. Precision small angle measurements with a digital Moire technique[C]. Optics Communications, 1998, 149:213—216.
 - [10] Rohlin J. An interferometer for precision angle measurements[J]. Appl. Opt, 1963, 2:762—763.
 - [11] 罗旭. 高精度小角度测量系统的研制[D]. 重庆大学硕士论文, 2005(Luo Xu. Research and Design of System for Small Angle Measurement with Super Precision[D]. Chongqing University, 2005(in Chinese))
 - [12] 李高勇. 用光传感器测量微小角位移的方法及装置的研究[D]. 东华大学硕士论文, 2007 (Li Gao-yong. Research on Method and Device of Small Angular Measurement Based on Optical Sensor[D]. Donghua University, 2007(in Chinese))
 - [13] 李立春, 于起峰, 雷志辉, 李健兵. 基于数字图像的高精度面内转角测量方法[J]. 光学学报, 2005, 25(4):491—496(Li Lichun, Yu Qifeng, Lei Zhihui, Li Jianbing. High-accuracy measurement of rotation angle based on image[J]. Appl. Opt, 2005, 25(4):491—496(in Chinese))
 - [14] 李向. 声光外差干涉精密动态角度测量系统[J]. 中国仪器仪表, 1995, 6:11—15.

On the Application Method of Videographic Measurement in the Platform Slight Shaking Measurement

LIU Jing-bo^{1,2}, ZHANG Xiao-hu^{1,2}

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

2. Hunan Key Laboratory of Videometrics and Vision Navigation, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: Platform slight shaking in 3-dimensional space can be reflected on a 2-dimensional image plane as image point change. A small angle measurement method is proposed in this paper, based on videographic measurement. For a CCD camera fixed on a platform, through real time observation of its slight shaking with respect to a static benchmark in inertial space, the camera pose change due to the platform slight shaking can be calculated. The platform slight shaking can be transformed into the camera small angle shaking based on the relation between platform and CCD camera. This method is verified by both static and dynamic experiment. When platform's shaking ranges from 0 to 36', the measuring precision is better than 5". This method can be used to modify the measurement error of vehicle-mounted optical measurement device due to the platform shaking.

Keywords: videographic measurment; slight shaking; CCD camera; static benchmark; modification