

# 机载光电平台相对角位移测量系统设计

王子辰<sup>1,2</sup> 戴明<sup>1</sup> 李刚<sup>1</sup> 汪永阳<sup>1,2</sup> 宋悦铭<sup>1</sup> 高玉军<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所中国科学院航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033)  
<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要** 为了解决机载光电平台与载机间存在相对角位移造成目标定位精度下降问题,设计了一种机载光电平台相对角位移实时测量系统。对现阶段使用的机载光电平台目标定位精度不高的原因以及基于改进的多控制点相机在线标定与姿态测量等理论进行研究。分析了机载光电平台目标定位误差的主要原因;对基于单目视觉理论的机载光电平台相对角位移测量方案进行研究,并以相机标定理论为原型给出了相对角位移测量的数学模型;结合多控制点立体靶标并使用随机并行梯度下降算法(SPGD)与直接线性变换方法(DLT),给出了三步法求解机载光电平台相对角位移的方法;使用设计的方法对机载光电平台相对角位移进行了测量,给出了实验与仿真结果。实验结果表明:设计的机载光电平台相对角位移测量方法精度优于 $0.092^\circ$ ,单次测量平均耗时小于 $0.54\text{ ms}$ ,完全满足现阶段机载光电平台相对角位移测量的精度与实时性等相关要求。

**关键词** 测量;相对角位移;并行梯度下降算法;直接线性变换;机载光电平台;目标定位

**中图分类号** TP394.1; TH691.9 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0908007

## Apparatus Design for Surveying Relative Angular Translation of Airborne Optoelectronic Platform

Wang Zichen<sup>1,2</sup> Dai Ming<sup>1</sup> Li Gang<sup>1</sup> Wang Yongyang<sup>1,2</sup> Song Yueming<sup>1</sup> Gao Yujun<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)  
<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** In order to resolve the problem of target orientation precision descent that is caused by relative angular translation between optoelectronic (OE) platform and aircraft, a measurement system is proposed to survey this angular movement. The reason of target orientation descent of present airborne OE platform is analyzed and both attitude measurement and camera calibration algorithm based on multiple control points on system are involved. Primary reason which conducts target orientation descent is introduced. Using monocular vision, angular translation measurement method is proposed, and mathematical model is set up based on camera calibration. Then, three-step method used for surveying relative angular translation is established by stochastic parallel gradient descent (SPGD) and direct linear transformation (DLT) with multiple control points. Both simulative and experimental results are achieved. The experiments show that the precision of measuring relative angular translation method is smaller than  $0.092^\circ$  and  $0.54\text{ ms}$  is consumed by a single measurement. It can satisfy the requirements of relative angular translation between aircraft and OE platform precisely and timely.

**Key words** measurement; relative angular translation; parallel gradient descent algorithm; direct linear transform; airborne optoelectronic platform; target orientation

**OCIS codes** 120.3930; 150.1488; 220.4830

收稿日期: 2013-03-25; 收到修改稿日期: 2013-05-10

基金项目: 国家 973 计划(2009CB7240012A)、装备预先研究(402040203)、中国科学院航空光学成像与测量重点实验室开放基金(Y2HC1SR123)

作者简介: 王子辰(1985—),男,博士研究生,主要从事机载光电平台测量与误差分析方面的研究。

E-mail: wzichen@126.com

导师简介: 戴明(1965—),男,研究员,博士生导师,主要从事机载光电平台测量与总体设计方面的研究。

E-mail: daim@vip.126.com

## 1 引 言

无人机载光电平台作为优秀的空中侦察、探测系统,在地质探测、灾害预报、军事侦察及打击毁伤效果评估等诸多领域发挥着重要的作用。机载光电平台目标精确定位是无人机能否实现察打一体化的关键。国外使用的光电平台内部集成惯性测量单元(IMU),平台稳定精度与目标定位精确很高<sup>[1]</sup>。由于技术原因,国内的机载光电平台多数并未安装IMU,而是结合载机的全球定位系统(GPS)、惯性导航系统(INS)数据通过坐标变换解算目标的地理位置,实现目标定位。为了解决载机振动引起的像质下降问题,光电平台安装时平台与载机间使用阻尼减振器连接。由于减振器的存在,载机飞行时侧风、气流等诸多因素使平台与载机间产生不超过 $\pm 5^\circ$ 的相对角位移,造成目标定位精度下降。王家琪等<sup>[2-3]</sup>对机载光电平台目标定位进行过深入的研究。针对阻尼减振器的缺陷,Raffin等<sup>[4-5]</sup>设计了一种无角位移减振器,但是装置笨重,机载条件下很难工程化实现。刘晶红等<sup>[6]</sup>提出了光电平台自主定位技术,避免了相对角位移引起的目标定位精度下降问题。现阶段机载光电平台目标定位精度分析时忽略了载机与平台间的相对角位移或将其等效,定位精度很难提高。由于航空光电平台使用环境复杂,国内极少开展机载光电平台相对角位移测量的相关研究,工程中存在的问题也未得到有效解决<sup>[7]</sup>。

类似的相对角位移测量相关研究大致分为机械测量法<sup>[8]</sup>、光学测量法<sup>[9-10]</sup>与摄影学测量法<sup>[11-12]</sup>。多年以来,国内外的学者针对基于特征点的相对位姿测量(PnP问题)开展了广泛的研究<sup>[13-15]</sup>。研究PnP问题时,测量相机内外参数须事先标定,且测量环境恒定。但机载环境下受外界因素的干扰,用于姿态测量的相机内外参数随时可能变化。因此,基于传统的PnP问题设计一种相机在线标定与相对角位移测量系统是提高当前机载光电平台目标定位精度的当务之急。

本文分析了机载光电平台相对角位移的特点,巧妙地建立坐标系,并根据摄影测量学与相机标定的基本原理构建了机载光电平台相对角位移的测量模型;通过特征控制像点亚像素定位结合随机并行梯度下降法(SPGD)与直接线性变换(DLT)等三步法实现测量相机实时在线标定与相对角位移求解;最后,通过理论仿真与实验,验证了测量方案的有效性与其可行性。

## 2 相对角位移对目标定位精度影响

建立如图1所示的坐标系。其中, $G(G_1, G_2, G_3)$ 为全球坐标系, $A(A_1, A_2, A_3)$ 为飞机坐标系, $C(C_1, C_2, C_3)$ 为平台坐标系, $T$ 为目标位置, $P(a, \lambda, h)$ 为载机所处位置;由于载机与平台之间的相对角位移是这里的研究重点,故其余辅助坐标系并未逐一列出。

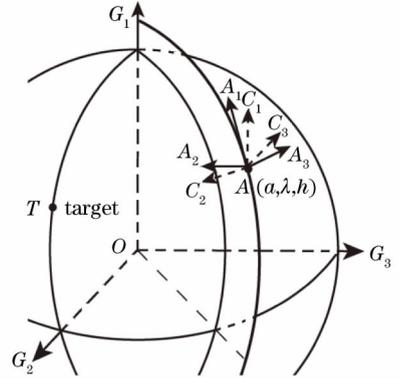


图1 机载光电平台目标定位示意图

Fig. 1 Block diagram of image measuring system

当平台坐标系与载机坐标系重合时,由载机全球坐标  $P(a, \lambda, h)$  得到的目标全球坐标  $T(a_T, \lambda_T, h_T)$  满足

$$(a_T, \lambda_T, h_T) = \mathbf{M}_1 \mathbf{M}_2 \cdots \mathbf{M}_j (a, \lambda, h), \quad (1)$$

式中  $\mathbf{M}_1, \mathbf{M}_2, \dots, \mathbf{M}_j$  为各坐标系之间对应的变换矩阵。工程安装时采用的阻尼减振器使  $A(A_1, A_2, A_3)$  与  $C(C_1, C_2, C_3)$  存在相对角位移,因此,(1)式存在误差。目前的方法是使用等效简谐运动替代减振器引起的平台与载机坐标系间相对三轴姿态角变化,即

$$\begin{cases} \theta_{CA} = \theta_M \sin(\omega t + \alpha) \\ \varphi_{CA} = \varphi_M \sin(\omega t + \alpha), \\ \psi_{CA} = \psi_M \sin(\omega t + \alpha) \end{cases}, \quad (2)$$

式中  $\theta_M, \varphi_M, \psi_M$  是各方向上最大角位移,  $\omega t + \alpha$  为相位且与飞机的振动主频相关,需要根据实际的机型测定(实际测定某型直升机  $\omega$  为  $150 \text{ rad/s}$ );上述测定  $\omega$  过程耗时费力,且同种机型也会产生个体差异。将等效的简谐振动(2)式代入(1)式,化简为

$$(a_T, \lambda_T, h_T) = \mathbf{M}_1 \mathbf{M}_2 \cdots \mathbf{M}_k (a, \lambda, h), \quad (3)$$

且  $k = j + 3$ 。(3)式相对(1)式增加了载机与平台相对角位移的三个矩阵  $\mathbf{M}_{j-1}, \mathbf{M}_j$  与  $\mathbf{M}_{j+1}$ 。平台工作时受载机姿态、侧风、气流等很多不确定因素的影响十分频繁,使用(2)式的简谐振动对其角位移等效实际是不科学的,产生了光电平台目标定位误差。因此,实时测量平台与载机间的相对角位移并计算出

转移矩阵  $M'_{i-1}$ 、 $M'_i$  与  $M'_{i+1}$  以替代(3)式中的  $M_{i-1}$ 、 $M_i$  与  $M_{i+1}$  修正目标定位公式是十分必要的。

### 3 基于摄影测量学的平台角位移测量

#### 3.1 摄影测量原理

当不存在镜头畸变等因素时,理想针孔模型下点目标的成像如图 2 所示。

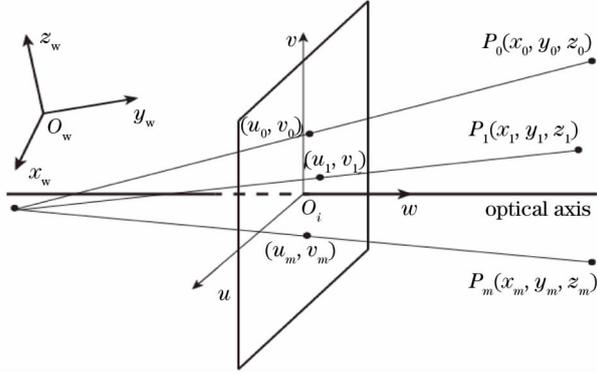


图 2 摄影测量学中的针孔模型示意图

Fig. 2 Pin hole sketch of photogrammetry

假定目标特征控制点在全局坐标系中坐标为  $C_w(X, Y, Z)^T$ , 其像点坐标为  $C_i(u, v, 1)^T$ 。待标定相机姿态参数对应的旋转与位移分别用矩阵  $R$  与  $T$  表示,且

$$R = \begin{bmatrix} r'_{11} \\ r'_{12} \\ r'_{13} \\ r'_{21} \\ r'_{22} \\ r'_{23} \\ r'_{31} \\ r'_{32} \\ r'_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}, \quad T = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix}. \quad (4)$$

则物像间满足集总参数形式的物像投影关系

$$\begin{cases} u = \frac{l_0 X + l_1 Y + l_2 Z + l_3}{l_8 X + l_9 Y + l_{10} Z + l_{11}} \\ v = \frac{l_4 X + l_5 Y + l_6 Z + l_7}{l_8 X + l_9 Y + l_{10} Z + l_{11}} \end{cases}, \quad (5)$$

式中  $l_0, l_1, \dots, l_{11}$  包含了无畸变条件下的相机内参数  $u_0, v_0, f_u, f_v$  与外参数  $T_x, T_y, T_z, \alpha, \beta, \gamma$ 。

在高精度的测量中,还须考虑畸变因素对测量结果的影响。Tsai<sup>[16]</sup>的两步标定方法是镜头畸变校正的成功模型,即首先选取超过 6 个标定控制点,通过 DLT 方法求解其线性参数,再利用畸变参数建立非线性方程,通过迭代优化求解其非线性参数。

#### 3.2 机载光电平台相对角位移测量单目测量相机标定方法

##### 3.2.1 摄像机的高精度标定

由于非理想成像模型的存在,通过(5)式得到的系数  $l_0, l_1, \dots, l_{11}$  可建立特征控制点的反投影理想像点  $(u', v')$ 。由于镜头畸变等因素造成实际像点

$(u, v)$  与理想像点  $(u', v')$  之间的误差  $(\delta u, \delta v)$  满足

$$\begin{cases} \delta u = u - u' \\ \delta v = v - v' \end{cases}. \quad (6)$$

Tsai<sup>[16]</sup>在研究中发现镜头的畸变由径向与切向畸变构成,且径向畸变的影响要远大于切向畸变;其畸变可表示为

$$\begin{cases} \delta u = u_d(k_0 r^2 + k_1 r^4 + \dots) + 2p_1 u_d v_d + p_2(r^2 + 2u_d^2) \\ \delta v = v_d(k_0 r^2 + k_1 r^4 + \dots) + p_1(r^2 + 2v_d^2) + 2p_2 u_d v_d \end{cases}, \quad (7)$$

式中  $u_d = (u' - u_0)/f_x$ ,  $v_d = (v' - v_0)/f_y$ ,  $r^2 = (u - u_0)^2 + (v - v_0)^2$ ,  $k_0, k_1, \dots, p_1, p_2$  为镜头畸变系数且标定时二阶径向畸变已基本可以满足标定要求。通过基本控制点的 Levenberg-Marquardt (LM)或 Newton-Raphson (NR) 优化算法,即可完成相机的内外参数以及镜头畸变参数的标定。

##### 3.2.2 随机并行梯度下降法的摄像机标定

Vorontsov 等<sup>[17]</sup>首次将随机并行梯度下降法应用于自适应光学成像中;蒋鹏志等<sup>[18-19]</sup>将随机并行梯度算法引入到光学测量系统中,取得了令人满意的结果。随机并行梯度下降法具有收敛速度快迭代次数少等特点,广泛应用于各种多变量求解方程中。

假定多元目标函数  $F = F(u_1, u_2, \dots, u_n)$ , 加入任意变量的随机扰动后系统函数增量定义为  $\delta F$ :

$$\delta F = F(u_1 + \delta u_1, u_2 + \delta u_2, \dots, u_n + \delta u_n) - F. \quad (8)$$

对(8)式进行泰勒展开并考虑任意变量的扰动结果,得

$$\delta F \delta u_i = \frac{\partial F}{\partial u_i} (\delta u_i)^2 + \varphi_i, \quad (9)$$

式中

$$\varphi_i = \sum_{j \neq i}^N \frac{\partial F}{\partial u_j} \delta u_j \delta u_i + \frac{1}{2} \sum_{j,i}^N \frac{\partial^2 F}{\partial u_j \partial u_i} \delta u_j \delta u_i \delta u_i + \dots. \quad (10)$$

假定函数  $F$  中的任意变量的扰动  $\delta u_j$  均满足均值为 0, 方差为  $\sigma^2$  相等的统计独立变量且  $\delta u_j$  的概率密度分布关于均值对称, 则其奇数阶中心矩与统计独立随机变量均满足  $\langle (\delta u_j)^3 \rangle = \langle \delta u_i \delta u_j \delta u_k \rangle = 0$ 。同时,对于(10)式中变量及函数的统计平均值依然成立

$$\langle \varphi_i \rangle = \sum_{j \neq i}^N \frac{\partial F}{\partial u_j} \langle \delta u_j \delta u_i \rangle + \frac{1}{2} \sum_{j,i}^N \left( \frac{\partial^2 F}{\partial u_j \partial u_i} \right)_i \langle \delta u_i \delta u_j \delta u_i \rangle + \dots = O(\sigma^4). \quad (11)$$

因此,随机变量  $\{\delta F \delta u_i / \sigma^2\}$  可作为  $F$  的梯度分量  $\{\partial F / \partial u_j\}$  的随机估计,其精度为  $O(\sigma^2)$ 。将随机梯度分量的表达式  $\{\delta F \delta u_j / \sigma^2\}$  代入梯度下降法公式

$$u_j^{(n+1)} = u_j^{(n)} - \gamma_n \left. \frac{\partial F}{\partial u_j} \right|_{u_j = u_j^{(n)}} \quad (12)$$

取第  $n$  步迭代步长  $\gamma_n = \gamma$ ,得到随机并行梯度下降算法的迭代公式

$$u_j^{(n+1)} = u_j^{(n)} - \mu \delta F^{(n)} \delta u_j^{(n)}, \quad (13)$$

式中  $j = 1, 2, \dots, N; n = 0, 1, \dots; \mu = \gamma / \sigma^2$  为迭代步长。则两步迭代间目标函数变化量满足

$$\begin{aligned} \Delta F &= F[u^{(n+1)}] - F[u^{(n)}] \approx \sum_{i=1}^N \frac{\partial F}{\partial u_i} (-\mu \delta F \delta u_i) = \\ &= -\mu \sum_{i=1}^N \frac{\partial F}{\partial u_i} \left[ \frac{\partial F}{\partial u_i} (\delta u_i)^2 + \varphi_i \right] \approx \\ &= -\mu \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial F}{\partial u_i} \delta u_i \right)^2 - \mu \sum_{i, j \neq i}^N \frac{\partial F}{\partial u_i} \frac{\partial F}{\partial u_j} \delta u_i \delta u_j + \dots \end{aligned} \quad (14)$$

(14)式的统计平均值满足

$$\langle \Delta F \rangle = -\mu \sigma^2 \sum_{i=1}^N \frac{\partial F}{\partial u_i} + O(\mu \sigma^4). \quad (15)$$

上述分析表明,只要加入随机扰动量的方差很小,  $\langle \Delta F \rangle$  是单调的,且  $\mu > 0$  为目标函数的最小化过程,  $\mu < 0$  为目标函数的最大化过程。因此在统计意义上算法是收敛的。

随机并行梯度下降法提供了一种目标函数极值求解方法,收敛速度较传统的迭代方法有很大的提高。将其应用于机载光电平台相对角位移测量系统中摄像机的实时在线标定是可行的,其过程如下:

1) 使用 DLT 结合(5)式设置控制像点初始坐标  $(u, v)$ , 目标函数  $F$  为所有控制像点偏差量的均值。

2) 设定控制像点初值坐标  $(u, v)$  以及迭代步长。

3) 产生目标函数自变量随机扰动  $(\delta u, \delta v)$ , 并分别以加入正负向扰动后的自变量值  $(u + \delta u, v + \delta v)$  与  $(u - \delta u, v - \delta v)$  更新 1) 中的初值坐标。

4) 计算 2) 中自变量加入正负向扰动后得到的目标评价函数  $F_+$  与  $F_-$ 。评价函数  $F_+$  与  $F_-$  由加入正负方向扰动后通过(5)~(7)式求解各个控制像点偏差与均值得到。

5) 计算评价函数  $F_+ + F_-$  是否满足迭代结束条件。若不满足结束条件,使用

$$\begin{cases} u' = u - \gamma(F_+ - F_-) \delta u \\ v' = v - \gamma(F_+ - F_-) \delta v \end{cases} \quad (16)$$

更新控制点坐标  $(u, v)$  回到 2); 否则迭代结束,输出结果并计算参数。

### 3.3 机载光电平台相对角位移测量方法

经典的 PnP 问题是通过精确标定的相机及待测物体上相对位置与坐标已知的若干特征控制点进行目标姿态求解的过程。当控制点数目  $n < 3$  时, PnP 问题无解; 当  $3 \leq n \leq 5$  时, PnP 问题是非线性的, 姿态求解有多重解且姿态参数对特征点图像坐标误差极为敏感; 当  $n > 5$  时, PnP 问题转化为经典的 DLT 问题, 此时的  $(\mathbf{R}, \mathbf{T})$  可以线性唯一求解。

实验室条件下的目标姿态测量使用的摄像机需事先精确标定。机载光电平台不可能具有实验室条件下稳定的标定空间与测量环境, 且摄像机内外参数易受载机飞行、平台装调等各种不利因素影响而发生变化, 因此, 必须实现系统的在线标定与实时测量。基于单目视觉的机载光电平台相对角位移测量系统, 测量前应保证控制点坐标系与载机坐标系平行, 摄像机与平台刚性连接并使摄像机坐标系统与平台坐标系统平行。如果设定载机坐标系为基准, 即控制点坐标全局坐标不变, 光电平台沿三轴方向的相对角位移  $\theta, \varphi$  与  $\psi$  隐含于在线标定的摄像机外参数矩阵  $\mathbf{R}'$  的各元素  $r_{11}, r_{12}, \dots, r_{33}$  中。

使用 3.2.2 节所述的在线标定后的相机非线性畸变参数  $k_1, k_2, p_1, p_2$ , 结合(5)~(7)式建立多控制点的理想相机成像模型

$$\begin{cases} u + \delta u = \frac{l_0 X + l_1 Y + l_2 Z + l_3}{l_8 X + l_9 Y + l_{10} Z + l_{11}} \\ v + \delta v = \frac{l_4 X + l_5 Y + l_6 Z + l_7}{l_8 X + l_9 Y + l_{10} Z + l_{11}} \end{cases} \quad (17)$$

(17) 式中, 将  $l_0, l_1, \dots, l_{11}$  看作待定参数, 使用 DLT 方法并根据理想模型下控制点及其像点坐标建立超定方程, 使用最小二乘法求解相机外参数。由于相机坐标系与平台坐标系平行, 此时相机的旋转矩阵即为载机与平台间的相对角位移。

由于误差的存在, 实际测得摄像机旋转矩阵  $\mathbf{R}'$  并不满足理想情况下的正交归一化条件

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^3 r_{1i}^2 = \sum_{i=1}^3 r_{2i}^2 = \sum_{i=1}^3 r_{3i}^2 = 1 \\ \mathbf{r}_3 = \mathbf{r}_1 \times \mathbf{r}_2 \end{cases} \quad (18)$$

Zhang<sup>[20]</sup> 使用非奇异值分解的方法减小系统误差对摄像机外方位的影响, 即  $\mathbf{R}' = \mathbf{URG}$ 。将(3)式中转移矩阵  $\mathbf{M}'_{i-1}, \mathbf{M}'_i$  与  $\mathbf{M}'_{i+1}$  用载机平台间的相对欧拉角表示为

$$\mathbf{M}'_{i-1}\mathbf{M}'_i\mathbf{M}'_{i+1} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \varphi \cos \psi - \sin \varphi \sin \psi & -\cos \theta \cos \varphi \sin \psi - \sin \varphi \cos \psi & \sin \theta \cos \varphi \\ \cos \theta \sin \varphi \cos \psi - \cos \varphi \sin \psi & -\cos \theta \sin \varphi \sin \psi - \cos \varphi \sin \psi & \sin \theta \sin \varphi \\ -\sin \theta \cos \psi & \sin \theta \sin \psi & \cos \theta \end{bmatrix}. \quad (19)$$

当平台坐标系与相机坐标系重合且载机坐标系与靶标控制点坐标系平行时,取  $\mathbf{M}'_{i-1}\mathbf{M}'_i\mathbf{M}'_{i+1} = \mathbf{R}$ , 则  $\theta, \varphi$  与  $\psi$  即为所求解的载机与平台的相对欧拉角。实际工程应用时,当机载光电平台应用于目标定位时亦可以不求解相对角位移,将正交矩阵  $\mathbf{R}$  替代目标定位公式(3)式中的  $\mathbf{M}'_{i-1}\mathbf{M}'_i\mathbf{M}'_{i+1}$  即可。

## 4 测量实验与结果

### 4.1 机载光电平台相对角位移测量装置

结合中国科学院航空光学成像与测量重点实验室开放课题,实验包括某型号机载光电平台、面阵 Pulnix 相机(TM1402CL,像素为 1000 pixel×1000 pixel,像素尺寸为 5 μm)、AVENIR 35 mm 镜头、空间立体靶标与三维精确控制转台。实验前,通过标校的方式保证相机坐标系与平台坐标系平行,并认为靶标控制点坐标系即为载机坐标系。实验装置如图 3 所示。



图 3 实验装置

Fig. 3 Experimental apparatus

### 4.2 测量装置相机在线标定与测量

通过适当地增加控制点的数量可以一定程度上提高测量精度,但同时还应保证相对角位移测量的实时性。图 4 和图 5 给出了基于随机并行梯度下降的两步法与 Tsai 使用的两步法在不同控制点数目下的测量精度与速度仿真结果。可以看出,用于在线标定时两种方法精度基本相当,而基于随机并行梯度下降的两步标定方法要比 Tsai 的方法快 2 倍以上。

为了进一步验证这里设计的机载光电平台相对姿态测量系统实验精度,选定靶标上 16 个空间控制点,使用三轴转台对测量精度进行验证。其中,三轴转台精度优于 7",回转精度优于 2",带宽为 5 Hz。

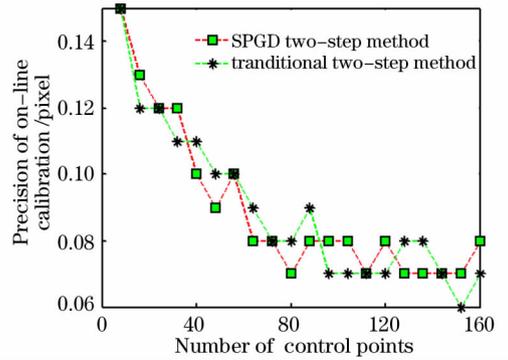


图 4 两种相机在线标定方法精度对比

Fig. 4 Contrast of precision using two calibration methods separately

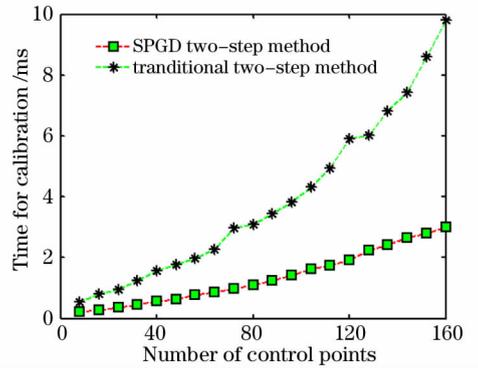


图 5 两种相机在线标定方法速度对比

Fig. 5 Contrast of speed using two calibration methods separately

使用所提的三步法实现相机在线标定与相对角位移求解,测得单次测量耗时小于 0.54 ms,满足实时性要求。

在 ±5° 范围内由三维转台精确给出方位、俯仰与横滚任意方向上的相对角位移。选取 10 次测量结果的实际值与测量值,如表 1 所示,其平均测量均方根误差小于 0.092°。

实际上,旋翼式无人机的飞行速度远低于音速(假定其飞行速度为 100 m/s),机载光电平台相对角位移动态测量过程中(0.54 ms)载机位置坐标  $P(a, \lambda, h)$  的变化不超过 6 cm,完全可以忽略;另外,光电平台目标定位是多载荷协调工作的过程,论文设计的相对角位移测量系统的带宽远高于平台内激光测距机的重复频率与 GPS 机的数据更新速率,相对角位移测量系统满足设计要求。

表 1 相对姿态角测量结果

Table 1 Measurement results of relative angular translation

No.	Standard angle / (°)			Measured angle / (°)		
	$\theta$	$\varphi$	$\psi$	$\theta$	$\varphi$	$\psi$
1	5.000	5.000	5.000	5.092	5.038	4.886
2	5.000	3.000	0.000	5.101	2.912	0.104
3	5.000	0.000	3.000	4.922	0.084	3.101
4	3.000	5.000	0.000	3.074	4.913	0.112
5	3.000	0.000	5.000	3.095	0.089	4.898
6	0.000	3.000	5.000	0.098	2.912	5.091
7	-5.000	-5.000	-5.000	-5.098	-5.100	-4.912
8	-5.000	-3.000	0.000	-5.079	-3.097	0.094
9	-3.000	-5.000	0.000	-2.918	-5.094	-0.109
10	-3.000	0.000	-5.000	-3.063	-0.098	-5.107

## 5 结 论

本文根据机载光电平台的研究现状,分析并指出机载光电平台目标定位过程中精度不高很大程度上是载机与平台间的相对角位移造成的,并设计了一种三步法实现载机与平台间相对角位移的实时测量。运用基于随机并行梯度下降的理论实现测量,用相机二步法在线标定,结合载机坐标系内特征控制点与在线标定后的相机内外参数,使用基于最小二乘法的直接线性变换得到理想相机模型下的相对角位移,并通过实验验证了上述三步法测量的可行性。实验结果表明:设定空间 16 个控制点,在线标定及相对角位移解算时间小于 0.54 ms,完全满足在线测量实时性要求;静态条件下,在 $\pm 5^\circ$ 范围内测得三轴相对欧拉角位移均方根误差优于 $0.092^\circ$ ,达到测量系统设计的精度要求。

## 参 考 文 献

- 1 WESCAM. About L-3 WESCAM[OL]. <http://www.wescam.com>. [2013-6-24].
- 2 Wang Jiaqi, Jin Guang, Yan Changxiang. Orientation error analysis of airborne opto-electric tracking and measuring device [J]. Optics and Precision Engineering, 2005, 13(2): 105-115. 王家琪,金光,颜昌翔. 机载光电跟踪测量设备的目标定位误差分析[J]. 光学精密工程, 2005, 13(2): 105-115.
- 3 Sun Hui, Zhang Shumei. Computation model and error budget for image motion of aerial imaging system [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(11): 2492-2499. 孙辉,张淑梅. 机载成像系统像移计算模型与误差分析[J]. 光学精密工程, 2012, 20(11): 2492-2499.
- 4 Philippe A Raffin, Robert N Martin, Yau-De Huang, et al.. CFRP platform and hexapod mount for array of microwave background anisotropy[C]. SPIE, 2004, 5495: 159-167.
- 5 Zhang Bao, Jia Ping, Huang Meng, et al.. Design of irrotational isolator for imaging system on moving vehicles [J]. Optical Technique, 2003, 29(4): 464-467.

- 张葆,贾平,黄猛,等. 动载体成像系统底座无角位移减振器的设计[J]. 光学技术, 2003, 29(4): 464-467.
- 6 Liu Jinghong, Sun Hui, Zhang Bao, et al.. Target self-determination orientation based on aerial photoelectric imaging platform[J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(8): 1305-1310. 刘晶红,孙辉,张葆,等. 航空光电平台的目标自主定位[J]. 光学精密工程, 2007, 15(8): 1305-1310.
- 7 Jia Ping, Zhang Bao. Critical technologies and their development for airborne opto-electronic reconnaissance platforms[J]. Optics and Precision Engineering, 2003, 11(1): 82-88. 贾平,张葆. 航空光电平台关键技术及其发展[J]. 光学精密工程, 2003, 11(1): 82-88.
- 8 Rong-Fong Fung, Wang-Chi Lin. System identification of a novel 6 DOF precision positioning table[J]. Sensors and Actuators A, 2009, 150(2): 286-295.
- 9 Zhe Li, Zhengliang Ding, Yuan Feng. Close-range optical measurement of aircraft's 3D attitude and accuracy evaluation[J]. Chin Opt Lett, 2008, 6(8): 564-567.
- 10 Ghazanfar Hussain, Masroor Ikram. Measurement of angle and axis of rotation in a carousel interferometer: a detailed analysis [J]. Appl Opt, 2010, 49(6): 1025-1031.
- 11 Peng Wang, Xu Xiao, Zimiao Zhang, et al.. Study of position and orientation measurement method with monocular vision system[J]. Chin Opt Lett, 2010, 8(1): 55-58.
- 12 Chao Zhichao, Fu Sihua, Jiang Guangwen, et al.. Mono camera and laser rangefinding sensor position pose measurement system [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(3): 0312001. 晁志超,伏思华,姜广文,等. 单目摄像机-激光测距传感器位姿测量系统[J]. 光学学报, 2011, 31(3): 0312001.
- 13 Long Quan, Zhongdan Lan. Linear N-point camera pose determination[J]. IEEE Trans Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1999, 21(8): 774-780.
- 14 Hu Zhanyi, Lei Cheng, Wu Fuchao. A short note on P4P problem[J]. Acta Automatica Sinica, 2001, 27(6): 770-776. 胡占义,雷成,吴福朝. 关于 P4P 问题的一点讨论[J]. 自动化学报, 2001, 27(6): 770-776.
- 15 Chen Peng, Hu Guangda, Liu Xiaojun. Camera pose estimation based on virtual control points[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(11): 1108003. 陈鹏,胡广大,刘晓军. 基于虚拟控制点的相机姿态测量算法[J]. 中国激光, 2012, 39(11): 1108003.
- 16 R Y Tsai. A versatile camera calibration technique for high accuracy 3D machine vision metrology using off the shelf TV

- cameras and lenses[J]. IEEE Trans Robotics and Automation, 1987, 3(4): 323–344.
- 17 M A Vorontsov, G W Carhart, J C Ricklin. Adaptive phase-distortion correction based on parallel gradient-descent optimization[J]. Opt Lett, 1997, 22(12): 907–909.
- 18 Jiang Pengzhi, Ma Haotong, Yuan Lingfeng, *et al.*. Shaped beam of arbitrary size with adaptive optics based on stochastic parallel gradient descent algorithm[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(12): 1202008.
- 蒋鹏志,马浩统,袁凌峰,等. 基于平行梯度下降算法的自适应任意口径光束整形[J]. 中国激光, 2011, 38(12): 1202008.
- 19 Zhaohui Qi, Longxu Xiao, Sihua Fu, *et al.*. Two-step camera calibration method based on the SPGD algorithm[J]. Appl Opt, 2012, 51(26): 6421–6428.
- 20 Zhengyou Zhang. Camera calibration with one-dimensional objects [J]. IEEE Trans Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2004, 26(7): 892–899.

栏目编辑：何卓铭