

引用格式: LI Bao-an, GAN Xiachuan, MA Liqun. Attitude measurement system design for UAV airborne loads [J]. Aeronautical Science & Technology, 2016, 27(04): 74-78. 李宝安, 甘晓川, 马骊群. 一种无人机载荷安装位姿测量系统的实现[J]. 航空科学技术, 2016, 27(04): 74-78.

1.2 系统软件

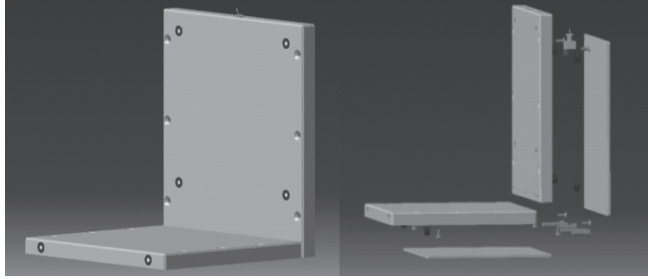


图2 L型固定式主动光学靶标
Fig.2 L-Type fixed active optical target

系统软件主要功能包括如下4个方面：

- (1) 人机交互功；
- (2) 自动识别功能；
- (3) 光斑中心提取功能；
- (4) 图像实时显示功能。

根据系统功能要求,本系统软件工作流程图如图3所示。

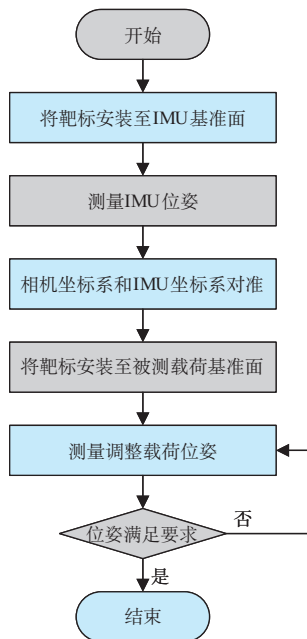


图3 系统流程图
Fig.3 System flowchart

2 测量原理

本系统以相机的透视投影模型为基本理论基础,利用POSIT算法^[2]求解出光学靶标所在空间坐标系相对于摄像机坐标系的旋转矩阵 R 及平移矩阵 T ,进而得到光学靶标的位置量和姿态量。

2.1 成像模型

有关相机透视投影模型国内外已经有大量文献可供参

考^[3-6],本文不再做具体推导,对算法所涉及的公式直接引用。为便于描述,对常用坐标系进行了如下定义(见图4),设 $O_c X_c Y_c Z_c$ 为相机坐标系, O_{xy} 为像平面坐标系, O_{uvw} 为计算机图像坐标系, $O_c O_i$ 的距离为相机成像镜头的有效焦距 f 。

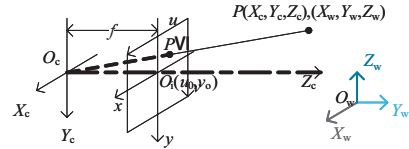


图4 针孔相机模型
Fig.4 Pin model of camera

待求的位姿数据中包括物体坐标系相对于相机坐标系的旋转矩阵 R 和平移向量 T 。其中：

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \end{bmatrix}, \quad T = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} r_{11} &= \cos \beta \cos \gamma, & r_{21} &= \cos \beta \sin \gamma, \\ r_{31} &= -\sin \beta, \\ r_{12} &= \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma, \\ r_{22} &= \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma, \\ r_{32} &= \sin \alpha \cos \beta, \\ r_{13} &= \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma, \\ r_{23} &= \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma, \\ r_{33} &= \cos \alpha \cos \beta \end{aligned}$$

2.2 内参数校准

相机校准所要解决的问题就是建立物体的世界坐标与相机内图像的像平面坐标的转换关系。在此实质上将相机校准问题转换为求两平面——相机成像平面和目标平面之间的透视投影关系,即旋转矩阵。相机校准的作用就是一旦确立了这种关系,只要知道了相机内图像的像平面坐标,就可以知道物体的世界坐标。反之,知道物体的世界坐标也就知道它在相机内图像的像平面坐标。

相机内参数校准方法有多种,其中使用标准板的方法,校准过程操作简易,能获得比较满意的结果。本文中的标准板使用了 9×8 的棋盘板图样来校准相机的内参数。详细的过程可参见文献[6,7]。图5为用于校准相机内参数的图像之一。

2.3 位姿解算

POSIT(Pose from Orthography and Scaling with Iteration)是1992年首次提出的用于计算三维物体姿态的一种算法^[2]。其中的位置信息 T 和姿态信息 R 由6个参数描述。

算法分两部分：

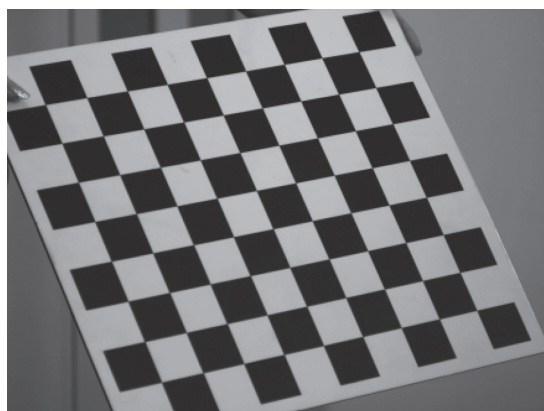


图5 校准相机的棋盘板
Fig.5 Chessboard of camera calibration

(1) 带有比例系数的正交投影变换 (Scale Orthogonal Projection, SOP), 根据线性方程组求出旋转矩阵和平移向量;

(2) 由得出的旋转矩阵和平移向量系数, 更新比例系数, 再由比例系数更新原有的点, 进行迭代。

2.4 角度计算

采用式(1)可从旋转矩阵 R 即可求解出物体坐标系分别绕 x 轴、 y 轴和 z 轴各自的旋转角度 α 、 β 和 γ ^[8]。

$$\begin{cases} \alpha = \tan^{-1}\left(\frac{r_{32}}{r_{33}}\right) \\ \beta = \tan^{-1}\left(\frac{-r_{31}}{\sqrt{r_{11}^2 + r_{21}^2}}\right) \\ \gamma = \tan^{-1}\left(\frac{r_{21}}{r_{11}}\right) \end{cases} \quad (1)$$

物体在空间的相对位置变动 $T' = [\Delta x, \Delta y, \Delta z]^T$ 是物体坐标系 $O_w X_w Y_w Z_w$ 原点移到相机坐标系 $O_c X_c Y_c Z_c$ 的相对变化量, 因此可由前面所求的平移矩阵 T 的反向量得到, 即:

$$T' = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -t_x \\ -t_y \\ -t_z \end{bmatrix}$$

2.5 靶标点中心提取

中心提取采用加权灰度重心算法。这种识别光斑重心位置的算法, 通过在特征点拾取过程中提取的特征点坐标和确定的圆域, 就可以利用灰度重心算法进行中心点的优化计算。

加权灰度重心算法的数学原理如式(2)所示:

$$\begin{cases} \bar{x} = \frac{\sum_i \sum_j x_i f^2(x_i, y_j)}{\sum_i \sum_j f^2(x_i, y_j)} \\ \bar{y} = \frac{\sum_i \sum_j y_j f^2(x_i, y_j)}{\sum_i \sum_j f^2(x_i, y_j)} \end{cases} \quad (2)$$

其中: $(\bar{x}, \bar{y})$ 为灰度重心坐标, $f(x_i, y_j)$ 为某个像素点的灰度值。

3 测量试验

为了测试系统的测量精度, 分别进行了相机内参数校准试验, 角度和位置的测量精度试验和重复性试验。

3.1 相机内参数校准

在1m, 3m, 5m三个距离分别校准相机, 内参数中焦距为 50.546 ± 0.05 mm, 像素重投影误差0.1个像素。校准结果如表1所示。

表1 相机焦距校准结果

Table 1 The camera focal length calibration results

距离	焦距/mm	重投影误差/像素
1m	50.598	0.089
3m	50.498	0.084
5m	50.543	0.094
平均	50.546	0.089
峰-峰	0.100	0.1

3.2 角度和位置标准偏差

在不同角度条件下, 分别测量了角度测量的标准偏差和位置测量的标准偏差, 结果如图6、图7所示。

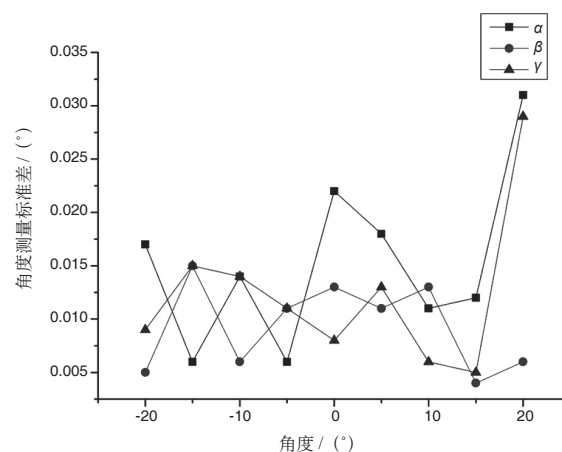


图6 角度重复性曲线

Fig.6 Curve of angle repeatability

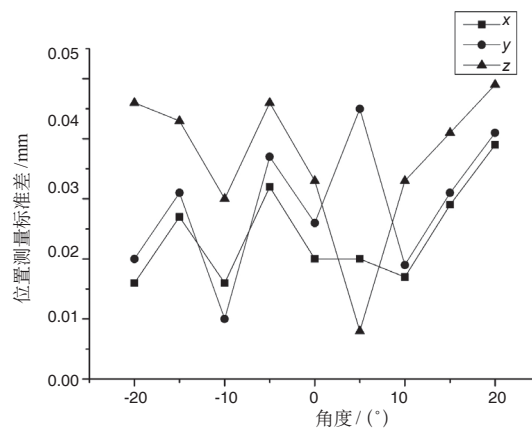


图7 位置重复性曲线

Fig.7 Curve of location repeatability

实验结果表明,在 $\pm 20^\circ$ 范围内,位置坐标 x , y , z 测量重复性为 0.05mm ,姿态角 α , β , γ 的测量重复性为 0.03° ,系统重复性良好。

3.3 角度和位置偏差

在距离靶标 3m 距离处,使用多齿分度台作为标准器,验证 β 角的测量偏差,结果如图8所示。

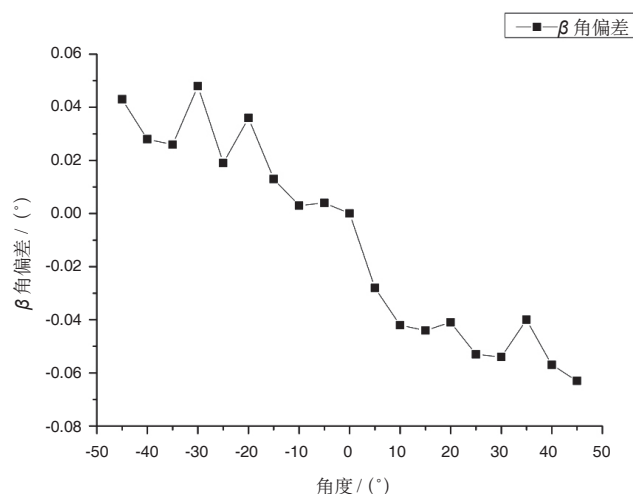


图8 β 角度测量偏差曲线
Fig.8 Measured deviation of β

分别在距离靶标 3m 和 5m 处对 x 轴和 z 轴的位置测量偏差进行试验,试验结果如图9所示。 x 轴和 z 轴位置测量误差均不超过 0.2mm , x 轴方向精度略优于 z 轴。

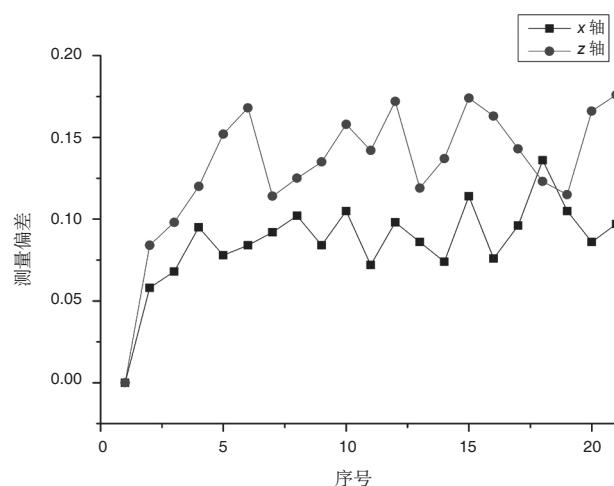


图9 x 轴和 z 轴测量偏差曲线
Fig.9 Measured deviation of x -axis and z -axis

4 结论

本研究基于单目视觉测量原理,结合POSIT算法,采用了固定式主动光学靶标实现了一种无人机载荷的快速测量

方法。具备目标点数量合适、抗噪性能好、结构稳定、便于安装等特点。通过一系列的试验,对平面靶标校准相机内参数的精度,角度和位置测量的标准偏差,角度和位置测量的偏差分别进行了验证。试验结果表明该系统经测量能力满足测量需要。

AST

参考文献

- [1] 晏磊,朱良勇,赵端求,等.无人机观测载荷地面验证技术综述[C]//2013中国无人机系统峰会论文集.北京:航空工业出版社,2013:483-486.
YAN Lei, ZHU Liangyong, ZHAO Duanqiu, et al. Review of UAV observation load ground verification technology[C]//Papers from China Unmanned Aircraft Systems Summit 2013. Beijing:Aviation Industry Press, 2013: 483-486.(in Chinese)
- [2] 徐锐,吴恒友,赵天鹏.无人机遥感载荷验证场精密测量研究[J].测绘与空间地理信息,2012,35(04):31-33,37.
XU Rui, WU Hengyou, ZHAO Tianpeng. Research on precision survey of unmanned aerial vehicle remote sensing in validation field[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2012,35(04):31-33,37. (in Chinese)
- [3] Gary Bradski, Adrian Kaebler. 学习OpenCV [M]. 北京:清华大学出版社,2009.
Gary Bradski, Adrian Kaebler. Learning OpenCV[M].Beijing: Tsinghua University Press,2009. (in Chinese)
- [4] 马颂德,张正友. 计算机视觉:计算理论和算法基础[M]. 北京:科学出版社,1998.
MA Songde, ZHANG Zhengyou. Computer vision: computing theory and algorithm foundation[M]. Beijing: Science Press,1998. (in Chinese)
- [5] 张广军. 机器视觉[M]. 北京: 科学出版社, 2004:84.
ZHANG Guangjun. Machine vision[M]. Beijing: Science Press, 2004: 84. (in Chinese)
- [6] 马骊群,曹铁泽,王继虎,等. 大尺寸坐标测量技术在大型部件装配应用中的若干问题[J]. 计测技术,2013, 33(2): 7-11.
MA Liqun, CAO Tieze, WANG Jihu, et al. Discussion on inspecting the assembling components by using large volume metrology instruments[J]. Metrology & Measurement Technology, 2013, 33(2): 7-11. (in Chinese)
- [7] 甘晓川,赫明钊,叶孝佑. 数字近景摄影测量中相机内参数校准[J]. 计量学报, 2012, 33(5): 391-394.
GAN Xiaochuan, HE Mingzhao, YE Xiaoyou. The calibration

of camera intrinsic parameters in digital close-range photogrammetry[J]. Acta Metrologica Sinica, 2012, 33(5): 391-394. (in Chinese)

- [8] Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.

- [9] 甘晓川, 孙安斌, 叶欣, 等. 一种非接触单相机角度测量方法[J]. 计量技术, 2014(11): 7-11.

GAN Xiaochuan, SUN Anbin, YE Xin, et al. A non-contact

single camera angle measurement method [J]. Measurement Technique, 2014(11): 7-11. (in Chinese)

作者简介

李宝安(1962—) 男, 博士, 副教授。主要研究方向: 测试计量技术, 无人机测试技术。

Tel: 010-82317400

E-mail: superlba@163.com

Attitude Measurement System Design for UAV Airborne Loads

LI Bao-an^{1,*}, GAN Xiachuan², MA Liqun²

1. Beihang University, Beijing 100191, China

2. Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China

Abstract: An efficient 6-dimension measurement system which apply to real-time attitude measurement of unmanned aerial vehicle telemetry platform assembling was introduced in this paper, including hardware and software design. The system is based on machine vision principle, and invert variation of attitude through a multiple target to achieve airborne loads' 6-dimension measurement. Angle measurement uncertainty is 0.05° , position measurement uncertainty is 0.05° .

Key Words: airborne load; multiple targets; mono-vision; UAV; attitude measurement system

Received: 2016-03-30; Accepted: 2016-04-01

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China(2012ZD51044)

*Corresponding author. Tel. : 010-82317400 E-mail: superlba@163.com