

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2015.05.08

无人机机载载荷安装位姿实时测量系统设计

孙雨¹, 李宝安², 马骊群¹

(1. 中航工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095; 2. 北京航空航天大学 无人机研究所, 北京 100091)

摘要: 主要描述了一种快速 6 自由度测量系统的硬件及软件设计, 该测量系统能够对无人机遥测平台上机载载荷进行实时安装检测, 确保所有搭载的载荷都能实时调整到预定位置上。系统基于视觉测量原理, 利用固定式多目标光学靶的空间坐标将物体的空间位置姿态的变化反演出来, 实现物体的 6D 快速测量, 其中角度测量重复性为 0.05°, 位置测量重复性为 0.05 mm。

关键词: 机载载荷; 多目标; 单目视觉

中图分类号: TB92; TH71; V279

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2015)05-0035-05

Attitude Measurement System Design for UAV Airborne Loads

SUN Yu, LI Baoan, MA Liqun

(1. Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China; 2. Unmanned

Aircraft Design Institute, Beihang University, Beijing 100091, China)

Abstract: An efficient 6-dimension measurement system which apply to real-time attitude measurement of unmanned aerial vehicle telemetry platform assembling is introduced in this paper, including hardware and software designment. 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.

0 引言

随着机载平台在测绘、军事等领域的广泛应用, 无人机平台以其体积小、质量轻、机动性高、续航时间长等优点成为对地观测、遥感数据采集的重要手段。机载载荷是无人机的任务执行单元, 主要包括光电传感器(CCD 相机、红外相机、激光测距仪等)、合成孔径雷达(SAR)、惯性姿态测量器件(IMU)、位置控制单元(PCS)与全球定位系统(GPS), 其中 IMU 和 PCS 与 GPS 天线构成位置姿态测量系统(POS)。机载载荷的安装调整精度直接决定多种观测数据融合的精度, 即遥测结果的精度。然而, 目前国内对于外场环境下无人机机载载荷安装测量方法大多是传统的静态方法,

测量效率低下, 尚无合适的测量仪器能够适用于无人机外场环境下对机载载荷的位置、姿态进行快速在线测量。

为此, 本文提出了一种基于机器视觉原理的无人机机载载荷多目标测量系统, 该系统利用自主研发的固定式多目标光学靶通过主动视觉的方式实现对无人机机载载荷位姿的在线动态测量, 以保证机载载荷的安装精度, 提高无人机对地观测数据精度。

1 系统原理

本系统以摄像机透视投影模型为基本理论基础, 利用 POSIT 算法^[1]求解出光学目标靶所在空间坐标系相对于摄像机坐标系的旋转矩阵及平移向量, 进而得到光学目标靶的位置与姿态量。

有关摄像机透视投影模型国内外已经有大量文献可供参考^[2-6], 本文中不再做具体推导, 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 1), 设 $O_c X_c Y_c Z_c$ 为摄像机坐标系, $O_o X_o Y_o Z_o$ 为物体坐标系, $O_i xy$ 为像平面坐标系, $O_i uv$

收稿日期: 2015-05-29; 修回日期: 2015-08-24

基金项目: 航空科学基金资助项目(2012ZD51044)

作者简介: 孙雨(1988-), 女, 硕士研究生, 研究风向为视觉测量及大尺寸校准; 李宝安(1962-), 男, 教授, 博士, 研究方向为测试与计量技术; 马骊群(1965-), 女, 研究员, 博士, 主要从事几何量测试与校准技术研究工作。

为计算机图像坐标系, $O_c O_i$ 的距离为摄像机成像镜头的有效焦距 f 。需要说明的是, 以毫米为单位的像平面坐标系与以像素为单位的计算机图像坐标系满足以相机内参数为参数矩阵的转换关系, 详见文献[7], 文中为了便于直观地表达投影透视关系, 对于像平面中的投影点选用其像面坐标系的坐标值, 省略了描述转化成计算机像面坐标的步骤。

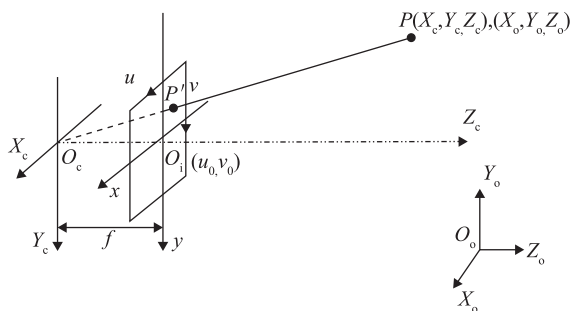


图1 针孔摄像机模型

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

$$R = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1^T \\ R_2^T \\ R_3^T \end{bmatrix}, T = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix}$$

由透视投影比例关系可得

$$x = \frac{f}{Z_c} X_c, y = \frac{f}{Z_c} Y_c \quad (1)$$

设物体坐标系中的一点为 $P(X_o, Y_o, Z_o)$, 则由摄像机透视投影模型, 可得

$$\begin{bmatrix} Z_c x \\ Z_c y \\ Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f X_c \\ f Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f R_1^T & f T_x \\ f R_2^T & f T_y \\ R_3^T & T_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_o \\ Y_o \\ Z_o \\ 1 \end{bmatrix}$$

两边同时除以 T_z , 得到

$$\begin{bmatrix} wx \\ wy \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s R_1^T & s T_x \\ s R_2^T & s T_y \\ R_3^T / T_z & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_o \\ Y_o \\ Z_o \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: w 为迭代系数, $w = Z_c / T_z$; $M = [X_o, Y_o, Z_o]^T$; $s = f / T_z$ 。

为便于线性计算, 将(2)式前两行转化成线性方程组形式, 得迭代方程为

$$\begin{cases} s X_o R_{11} + s Y_o R_{12} + s Z_o R_{13} + s T_x = wx \\ s X_o R_{21} + s Y_o R_{22} + s Z_o R_{23} + s T_y = wy \end{cases} \quad (3)$$

其中, 迭代系数

$$w = \frac{Z_c}{T_z} = \frac{R_3^T M}{T_z} + 1 \quad (4)$$

POSIT 算法的初始循环是假设目标上的所有点在摄像机光轴方向的同一深度, 即 $Z_c = T_z$, 则初始循环中迭代系数 $w_0 = 1$ 。

$$\begin{aligned} \text{令 } K_1 &= (sR_{11}, sR_{12}, sR_{13}, sT_x)^T \\ K_2 &= (sR_{21}, sR_{22}, sR_{23}, sT_y)^T \end{aligned}$$

方程组(3)中存在 8 个未知数, 现若已知目标上 4 个非共面点, 即可求出 K_1, K_2 中的 8 个未知量。则 sR_1, sR_2 模长可求, 由于 R_1, R_2 均为单位向量, 则有

$$s = \sqrt{|sR_1| \cdot |sR_2|}$$

摄像机焦距 f 为已知量, 则有

$$T_z = f/s$$

又由于 R 为正交矩阵, 则

$$R_3 = R_1 \times R_2$$

至此, 旋转矩阵 R 和平移向量 T 求出, 完成初始循环运算。

将初始循环所求的 R_3 及 T_z 值代入方程(4)中, 即可得到每个特征点新的迭代系数, 记为 w_i , 将其代入迭代方程组(3), 即可得到新的向量 K_1, K_2 , 进而得到新的旋转矩阵 R_i 和平移向量 T_i 。如此循环 4~5 次即可收敛到一个精确的位置姿态量。

2 系统设计

2.1 技术要求

根据无人机机载载荷平台的安装精度要求, 本系统的技术指标如下:

x, y, z 轴方向位置测量重复性: 0.05 mm;

角度测量重复性: 0.05°;

适用测量距离: 3~5 m。

2.2 系统组成

本系统由三大部分组成, 即 CCD 摄像机、光学目标靶和计算机图像处理系统, 见图 2。

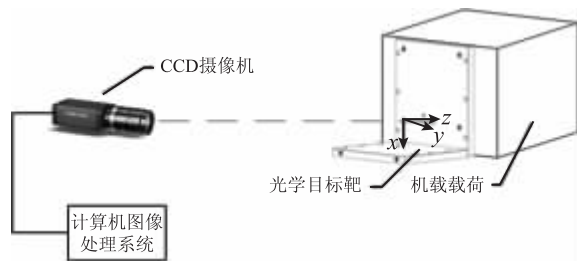


图2 系统组成示意图

需要指出的是,理论上无人机中的IMU是所有任务载荷的安装基准,无人机工作之前,需要将光电传感器零位、SAR雷达反射面法向以及其他机载载荷安装面调整到与IMU基准相对应的设计位置上。为了适应不同机载载荷外形结构、提高系统图像识别速度,本系统采用了自主设计的主动视觉立体目标光学靶作为统一测量目标,通过目标光学靶的位姿数据直接反应所固连的机载载荷的位置姿态。

2.3 系统硬件设计

光学目标靶(以下简称目标靶)是本系统硬件重要的组成部分,相较于其他主动视觉目标,该目标靶为L型空间立体结构,由于6个发光点为非共面位置关系,因此能够有效保证在摄像机光轴方向(z 轴方向)的测量精度。同时,为了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,从如下4个方面进行设计分析。

1) 目标点的数量

由前文系统原理部分可知,光学目标靶必须存在至少4个非共面点才能保证求解出正确的位姿值。此外,为了保证适当的冗余点个数,增加非共面点的个数并提高运算精度,系统采用了6个目标点。

2) 目标点的分布

目标点分布依据的原则是3点不共线、4点不共面、点的包络空间在平面和纵深方向比例一致。确保空间目标点在各个坐标方向上的不确定度水平一致。

若采用一般工业相机,在测量距离2~5 m范围内,相机的成像尺寸约为200 mm×200 mm,因此所设计的目标靶中目标点的间隔应大于成像尺寸的2/3,即目标点包络立体空间应不小于120 mm×120 mm×120 mm。结合前文目标点数量的选取原则,最终设计了L型立体光学目标靶,如图3所示。

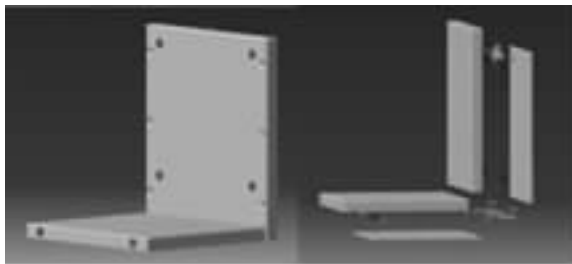


图3 L型立体光学目标靶

3) 目标点的感光及抗噪特性

理想的目标点应该明暗对比强烈,不同的视角下光斑形状变化小,受背景光干扰小。为配合系统选用的红外

CCD相机,系统选用了抗噪能力较强的红外LED发光点。

2.4 系统软件设计

系统软件主要功能包括如下4个方面:

1) 人机交互功能。为操作者提供简单快捷的工作界面,以提高操作效率。

2) 自动识别功能。图片中的亮点粗识别,提取出图片中6个亮点所在的 40×40 个像素格范围内坐标位置。

3) 光斑中心提取功能。基于上一步粗识别出的亮点位置进行精确中心位置计算。

4) 图像实时显示功能。实时显示光学目标靶的位置姿态数据,以作为动态调整的依据。

根据系统功能要求,本系统软件工作流程图见图4。

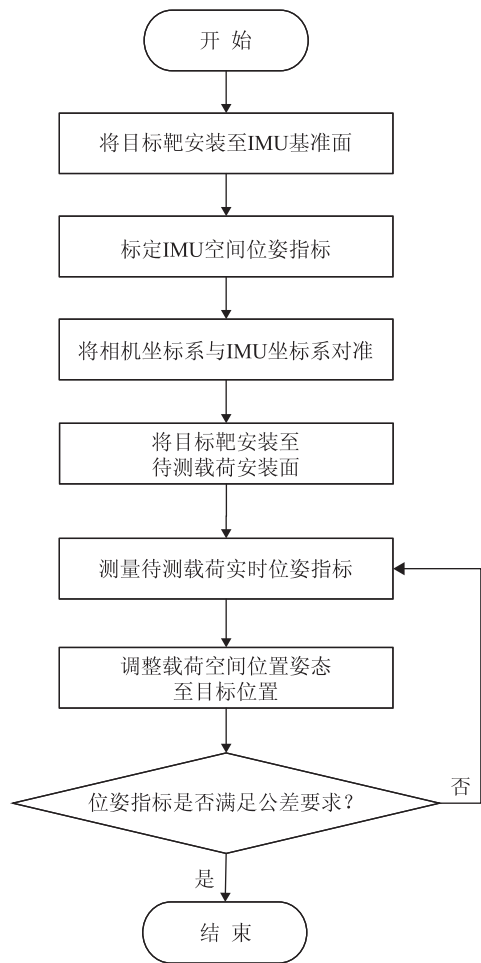


图4 系统流程图

3 光斑中心提取方法

3.1 精度仿真

根据前述机器视觉基本原理以及POSIT算法模型可知,摄像机经标定后,若已知其拍摄的单个物体上

多目标点的坐标值矩阵,即可求解出该物体相对于摄像机坐标系的空间位置与姿态关系。且该模型引入的位置及角度偏差具有规律性,可以通过标定比例系数以及数值补偿的方法进行修正。因此,影响本系统测量精度的主要问题就在于图像中光斑中心坐标值提取的重复性是否满足不确定度要求。

为得到系统所需要达到的光斑中心提取精度,进行了像素精度估计仿真实验,如图 5 所示。利用系统摄像机在距离目标靶 5 m 处采集正视的图像,取同一高度的两光斑中心附近一点的坐标值,其像素横坐标差值为 781 个像素格,实际间距为(160 ± 5) mm,则其像素当量为 0.2。

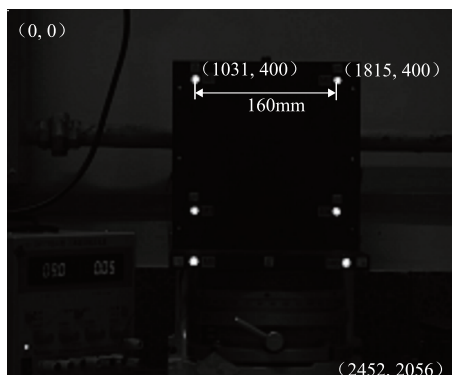


图 5 精度仿真实验

因此,若要保证沿 x 轴、 y 轴方向的位置测量重复性不大于 0.05 mm,则图像中心提取像素的重复性要不大于 0.25。

3.2 光斑处理

在理想情况下,摄像机应获取的是边缘清晰的圆形或椭圆形光斑,然而实际由于不能完全消除的光强、反射光及背景光干扰,常得到如图 6 所示的不理想光斑,该光斑存在光影及光芒。针对这两种常见噪声,提出如下处理方法。

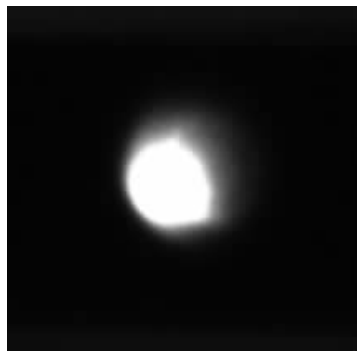


图 6 不理想光斑

3.2.1 光影处理

首先对图像进行阈值分割,选定最佳阈值参数。由于各光斑的光源、拍摄环境及光强相同,决定采用相同的阈值参数 I 对光斑进行阈值分割。以图 6 为例,经实验验证,当 $I=0.7$ 时,能够完整地表达原图中的高亮部分,并且又不包含过多无用轮廓,如图 7 所示,因此本文以 0.7 为阈值参数。

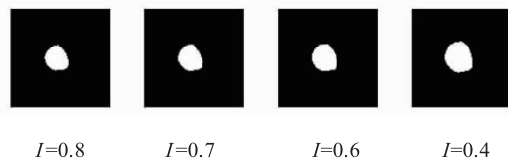


图 7 不同阈值参数分割结果

3.2.2 光芒处理

首先对二值图像进行边缘点的检测,对于得到的图像边缘进行椭圆拟合^[8]。

椭圆图像曲线的一般表达式为

$$f(\mathbf{a}, \mathbf{x}) = ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f = 0$$

其中, $\mathbf{a} = [a, b, c, d, e, f]$,

$$\mathbf{x} = [x^2, xy, y^2, x, y, 1]$$

引入约束 $|\mathbf{a}|^2 = 1$, 建立如下函数:

$$F(\mathbf{a}) = \sum_{i=1}^N f(\mathbf{a}, x_i)^2 + M (|\mathbf{a}|^2 - 1)^2$$

式中: M 为罚因子。利用牛顿-高斯法可以求解出 \mathbf{a} , 则精确中心点 (X_c, Y_c) 可求。即

$$X_c = \frac{2cd-be}{b^2-4ac}, Y_c = \frac{2ae-bd}{b^2-4ac} (b^2-4ac \neq 0)$$

拟合后的光斑中心提取位置如图 8 所示。



图 8 椭圆拟合及其中心

4 实验验证

系统关注的主要位置参数为 $x, y, z, \alpha, \beta, \gamma$, 按照技术指标要求, x 轴、 y 轴、 z 轴方向位置测量重复性要求不超过 0.05 mm, 角度 α, β, γ 的测量重复性不超过 0.05°。

重复性实验是验证系统计算结果一致性的重要途

径,在本系统中其重复性的高低直接反应了光斑中心提取的精密度。因此进行了9组与摄像机光轴呈不同夹角位置的重复性实验,角度值分别为 0° , $\pm 5^\circ$, $\pm 10^\circ$, $\pm 15^\circ$, $\pm 20^\circ$,每个位置拍取10张图片,并利用系统软件对光学目标靶相对于摄像机的位置姿态进行运算。根据重复性实验数据对其进行标准差计算,结果见表1。

表1 重复性实验标准差结果

角度/ $(^\circ)$	角度测量标准差/ $(^\circ)$			位置测量标准差/mm		
	α	β	γ	x	y	z
20	0.031	0.006	0.029	0.039	0.041	0.049
15	0.012	0.004	0.005	0.029	0.031	0.041
10	0.011	0.013	0.006	0.017	0.019	0.033
5	0.018	0.011	0.013	0.020	0.045	0.008
0	0.022	0.013	0.008	0.020	0.026	0.033
-5	0.006	0.011	0.011	0.032	0.037	0.046
-10	0.014	0.006	0.014	0.016	0.010	0.030
-15	0.006	0.015	0.015	0.027	0.031	0.043
-20	0.017	0.005	0.009	0.016	0.020	0.046

实验结果表明,位置坐标 x , y , z 测量重复性均不超过0.05 mm,姿态角 α , β , γ 的测量重复性均不超过 0.05° ,系统重复性良好,能够满足设计要求,同时反应了中心提取精度达到预期要求。所做实验验证了本文所研究的理论模型以及测量系统的有效性。

5 结束语

本文介绍了一种针对无人机平台的机载载荷安装调试位姿实时测量系统。该系统采用了自主研发的L型光学目标靶,提高了沿光轴方向的测量精度;提出

了一种高精度光学中心提取方法,能够有效去除光影和光芒的影响。该系统能够仅利用一台红外相机、一个光学目标靶及一台计算机完成整套测量任务,具备便携性能好、成本低等优势,具有良好的市场前景和应用价值。

经系统实验验证,该无人机机载载荷安装位姿实时测量系统的测试指标达到预期设计要求,成功实现了对目标载荷的在线6自由度测量,在现有视觉位姿测量基础上,进一步提高了测量精度,并实现了测量的实时性。

参考文献

- [1] Bradski G, Kaehler A. 学习OpenCV[M]. 北京:清华大学出版社,2009:449-450.
- [2] Zhang Z Y. A Flexible New Technique for Camera Calibration[J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [3] Fishler M A, Bblles R C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography[J]. CACM, 1981, 24(6): 381-395.
- [4] 孙佳星,何小妹,马骊群,等.双摄像机光笔式三维坐标测量系统研究[J].计测技术,2009,29(1):9-11.
- [5] 甘晓川,郝明钊,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.
- [6] 叶东,解邦福,刘博.一种基于共面特征点的单摄像机姿态测量方法研究[J].宇航计测技术,2009,29(6):1-6.
- [7] 张广军.机器视觉[M].北京:科学出版社,2004:84.
- [8] 汤晓华;李健;阮国威,等.电脑绣花机视频运动检测分析[J].控制工程,2009,16(S1):166-170.

新书《聚焦超级核能》锁定核辐射及其计量

本刊讯:2011年3月11日,日本大地震、海啸引发的核泄漏事件吸引了全世界对核安全的关注,人们不得不再次对核能的研发和利用进行全面的思考。为了让更多的读者了解核方面的知识和发展现状,了解核辐射的来源、特点、危害和防护,作者容超凡(国防科技工业电离辐射一级计量站原副站长)历时两年编著了《聚焦超级核能》一书,现已由北京出版社出版,全国新华书店经销。此书是北京市科技协会组织编写的系列科普丛书"科学家在做什么"中的一个分册,全书共4章,其中第3章详细介绍了核辐射的准确测量问题,从核辐射测量什么、核辐射与物质的相互作用、测量所用设备、测量仪器的检定和校准、测量结果的准确表述等方面做了通俗易懂的讲解,阅读这本书,对于从事计量测试技术的科研人员定能有所收获。

