

利用单影像解析飞机姿态参数

惠广裕, 吉宁, 张建花
(中国飞行试验研究院, 西安 710089)

摘要: 利用单幅影像测量飞机的空间位置和姿态参数在飞行试验中有着广泛的应用。在经典摄影测量共线方程的基础上,提出了一种新的基于单幅影像求解位置和姿态参数的方法。该方法回避了机身标志点在机体坐标系与世界坐标系中的“对应”性问题,利用“架桥”——摄影坐标系,使问题转化为机身标志点的像点坐标与机体坐标的对应运算关系。试验结果表明,此算法正确有效,在一些不适合安装多台摄像机的场合有着无法比拟的优势,不但节省了人力和物力,还提高了工作效率。

关键词: 飞行试验; 共线方程; 姿态参数; 单幅影像; 摄影测量

中图分类号: V271.4; P232 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2013)02-0053-04

Resolving Plane Pose Parameters with Single Image

HUI Guangyu, JI Ning, ZHANG Jianhua
(Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

Abstract: It is widely used in flight test for measuring position and attitude using a single plane image. A new method for solving orientation and position based on a single image is proposed, which is on the basis of the classical photogrammetric collinearity equation. “Bridging”, the photography coordinate system, was used in the method to avoid the “corresponding” problem of the feature points between the body coordinate system and world coordinate system, and translate the problem into the corresponding operations relationship for the feature points between the body coordinates and image coordinates. The results show that the method is correct and effective, and has incomparable advantages in some situations where it is not suitable for installing more cameras.

Key words: flight test; collinearity equation; attitude; single image; photogrammetry

0 引言

飞机在空中的三维姿态(俯仰角、偏航角和滚转角)是反映飞行状态的重要运动参量,三维姿态测量对试验鉴定、事故分析、工业设计等有着重要的参考。目前测量飞机运动姿态的方法有两种:一种是在飞机上加装陀螺仪、惯导、GPS接收器等传感测量设备,该方法叫做飞机姿态的内测;另外,对不允许在飞机上安装传感设备的场合,可以利用光电设备对飞机进行高速跟踪并摄取影像,然后依据影像资料和摄像设备的姿态确定飞机在各摄像时刻的姿态,该方法叫做飞机姿态的外测法。外测法是内测法的有效补充,由于这种方法不直接接触飞机,其适应范围更为广泛。

随着数字摄影设备的大量出现,影像测量技术在飞行试验中得到了越来越广泛的应用^[1]。然而,在设备数量不足或设备安装空间狭小等条件限制下,往往无法通过两台或更多台影像测量设备同时测量飞机,采用空间交会方法得到飞机的运动参数^[2]。因此,如何利用单台设备获得的单影像测出飞机的姿态参数显得尤为重要^[3]。

本文在阐述姿态测量原理的基础上,建立了姿态求解数学模型,并利用摄影测量经典公式——共线方程对数学模型进行优化,得到容易求解的扩展数学模型。基于该模型,测试验证了其有效性,结果分析表明,当飞机上有3个以上的特征标志点时,通过对标志点判读计算,能够得到飞机相对于计算坐标系的姿态参数,并可取得与双摄像机交会相当的精度。

1 共线方程

为对影像进行解析处理,必须建立影像、地面目标

收稿日期:2011-06-15 修回日期:2012-02-20

基金项目:航空科学基金项目(2010ZD30)

作者简介:惠广裕(1984—),男,河南南阳人,硕士,工程师,研究方向为光电测量技术。

和投影中心的数学模型。在理想情况下,像点、投影中心、物点位于同一条直线上,将以三点共线为基础建立起来描述这三点共线的数学表达式称为共线条件方程式^[4]。共线方程表达示意如图 1 所示。

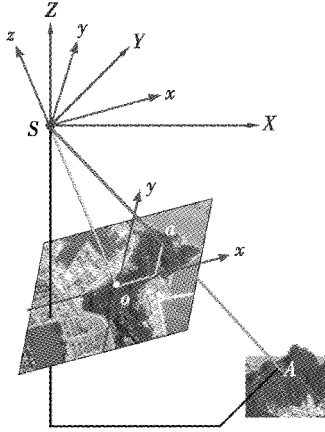


图 1 共线方程表达示意图

Fig. 1 Sketch map of collinearity equation

图中, S, a, A 三点共线,则在计算坐标系 ($S-XYZ$) 或摄影坐标系 ($S-xyz$) 中,线段 SA, Sa 构成了两个向量 S_{SA} 和 S_{Sa} ,由于两个向量共有同一个端点 S ,且 S, a, A 三点共线,则有如下方程。

1) 共线条件方程——向量表达式为

$$S_{SA} = \lambda S_{Sa} \quad (1)$$

式中, λ 为比例系数,是一非零常数。

2) 用目标点计算坐标表示像点坐标的共线条件方程为

$$\begin{cases} x - x_0 = -f \frac{a_1(X' - X_s) + b_1(Y' - Y_s) + c_1(Z' - Z_s)}{a_3(X' - X_s) + b_3(Y' - Y_s) + c_3(Z' - Z_s)} \\ y - y_0 = -f \frac{a_2(X' - X_s) + b_2(Y' - Y_s) + c_2(Z' - Z_s)}{a_3(X' - X_s) + b_3(Y' - Y_s) + c_3(Z' - Z_s)} \end{cases} \quad (2)$$

式中: (x, y) 为像点的像平面坐标; (x_0, y_0, f) 为影像的内方位元素,即投影中心对像片的相对位置参数; (X_s, Y_s, Z_s) 为摄站点的计算坐标; (X', Y', Z') 为标志点的计算坐标^[5]。

2 姿态测量原理

2.1 常用坐标系规定

为了计算飞机的姿态运动参数,常用到摄影坐标系、计算坐标系和机体坐标系,如图 2 所示。

摄影坐标系 (X_c, Y_c, Z_c) 以摄像机的光心 O_c 为原点, X_c 轴、 Z_c 轴分别平行于 CCD 平面的两条垂直边^[6],且采取前投影模型, Y_c 轴为摄像机的光轴,测量时,摄像机安装于跑道旁观测位置。

计算坐标系 (X_w, Y_w, Z_w) 也称为全局坐标系,是用户需要基准坐标系,一般来说,三维物体都用世界坐标

系来表达。

机体坐标系 (X_j, Y_j, Z_j) 基于飞机机体建立,原点与飞机质心重合, Y_j 轴与飞机纵轴一致指向飞机前方, X_j 轴垂直于飞机对称面并指向左方, Z_j 轴在飞机对称面内并垂直纵轴而指向上方。在飞机上需要布置一些明显的标志点,它可以根据飞机的实际情况设定。

在建立机体坐标系时,要选择运动过程中形状不会发生改变、或变形量远小于摄像机分辨率的刚性表面上。刚性表面上的标志点在机体坐标系下进行了精确的标定,标志点采用四象限黑白圆形标志。

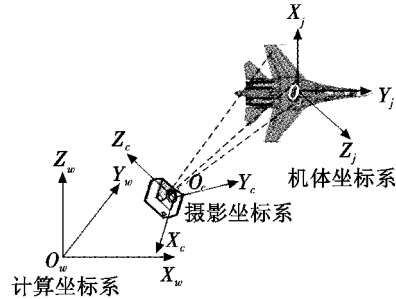


图 2 3 种常用坐标系相互关系

Fig. 2 Relationship of 3 kinds of common coordinate systems

2.2 姿态角测量数学模型

单台摄像机测量姿态不同于多台摄像机测量。由于无法获得物体上关键点的三维坐标,因此需要借助其他一些条件才能实现姿态测量。一般要在飞机上布设 4 个以上的标志点,并在地面精确测量这些点的坐标,将这些坐标换算到机体坐标系中,通过计算机体坐标系与世界坐标系之间的旋转角,得出飞机的姿态角^[7]。

对于飞机刚性标志点的测量,首先需要建立机体坐标系。由于飞机上每个标志点相对于世界坐标系是运动变化的,相对于机体是静止的,因此,如果能够得到机体坐标系与世界坐标系之间的相对运动参数,就可以得到飞机的姿态角。

机体坐标系与世界坐标系之间的转换属于空间直角坐标系转换的范畴,因此可以用空间六参数对其进行表达,其中,包括 3 个坐标平移参数 dX, dY, dZ , 3 个角度旋转参数 α, β, χ 。

首先,建立机体坐标系与世界坐标系的关系式为

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} dX \\ dY \\ dZ \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $[X, Y, Z]^T$ 为标志点的机体坐标系坐标; $[X', Y', Z']^T$ 为标志点的世界坐标系坐标; α, β, χ 分别为世界

坐标系 Z_w 轴在 $X_j - Z_j$ 坐标面上的投影与 Z_j 的夹角, Z_w 轴与 $X_j - Z_j$ 坐标面的夹角, Y_j 轴在 $X_w - Y_w$ 坐标平面投影与 Y_w 轴夹角, 统称角度旋转参数; $[dX, dY, dZ]^T$ 为机体坐标系原点在世界坐标系中的坐标值, 即坐标平移量参数。 $[dX, dY, dZ]$ 和 α, β, χ 就是需要求解的姿态参数, 此方程具有 6 个独立的参数, 至少需要两个坐标系中 3 个公共点参与计算。但是, 单台摄像机无法获得标志点的世界坐标系坐标, 因此无法用式(3)直接求解, 而要采用间接的方法。利用摄影坐标系与世界坐标系之间的关系, 用摄影坐标系像点坐标值表示标志点的世界坐标, 寻找突破。

3 变量替换法优化求解

摄影测量中的共线方程描述世界坐标与摄影坐标的关系, 它再现了摄影测量的整个过程。

为方便推导公式, 将式(3)变形为

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 & m_1 & n_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 \\ l_3 & m_3 & n_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} dX \\ dY \\ dZ \end{bmatrix} \quad (4)$$

将式(4)代入式(2)整理得到

$$\begin{cases} x - x_0 = -f \frac{A}{B} \\ y - y_0 = -f \frac{C}{B} \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$A = [A_1 \ A_2 \ A_3 \ a_1 \ b_1 \ c_1] [X \ Y \ Z \ dX \ dY \ dZ]^T - [a_1 \ b_1 \ c_1] [X_s \ Y_s \ Z_s]^T \quad (6)$$

$$B = [A_4 \ A_5 \ A_6 \ a_3 \ b_3 \ c_3] [X \ Y \ Z \ dX \ dY \ dZ]^T - [a_3 \ b_3 \ c_3] [X_s \ Y_s \ Z_s]^T \quad (7)$$

$$C = [A_7 \ A_8 \ A_9 \ a_2 \ b_2 \ c_2] [X \ Y \ Z \ dX \ dY \ dZ]^T - [a_2 \ b_2 \ c_2] [X_s \ Y_s \ Z_s]^T \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} A_1 & A_2 & A_3 \\ A_4 & A_5 & A_6 \\ A_7 & A_8 & A_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_1 & m_1 & n_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 \\ l_3 & m_3 & n_3 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} l_1 & m_1 & n_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 \\ l_3 & m_3 & n_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \cdot$$

$$\begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \chi & -\sin \chi & 0 \\ \sin \chi & \cos \chi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

关系表达式(5)是在共线方程式(2)的基础上, 运用变量替代算法(标志点机体坐标 (X, Y, Z) 替换了其世界坐标值 (X', Y', Z')), 使标志点的摄影坐标 (x, y) 与机体坐标 (X, Y, Z) 产生关联, 实现姿态参数计算。

通过式(5)解算, 可得到飞机的姿态参数 α, β, χ 。由于式(5)是关于 α, β, χ 的非线性函数, 因此在解算时, 通过对 α, β, χ 进行求导, 对其进行线性化, 通过最小二乘迭代法得到, 因其线性化过程繁杂, 此处略去。表达式中有 6 个未知参数, 因此至少需要 3 个标志点才可得到结果, 标志点越多, 得到的结果精度就越高^[8]。

4 检测试验

为了验证算法, 采用两台 1024×1024 分辨率的摄像机进行精度试验, 摄像机与目标平均距离为 5 m, 选用 14 mm 焦距的 Nikon 镜头。在实验室布设了 12 个控制点(包含目标体上的 6 个标志点), 用于计算两台摄像机的外方位元素 $(X_s, Y_s, Z_s, \phi, \omega, \kappa)$ 。目标体上布设 6 个标志点 $M_1 \sim M_6$, 并对目标建立坐标系^[9]。

1) 试验中用 Leica TPS1101 全站仪精确标定所有控制点 $C_{01} \sim C_{12}$ 的坐标, 作真值对待。

2) 精确标定目标体上标志点在目标体坐标系中的坐标值^[10]。

3) 在不同位置用两台摄像机对目标进行两次试验, 一次采用 3 个标志点解算姿态参数, 另一次采用 6 个标志点解算姿态参数, 试验结果如表 1 和表 2 所示。

由表 1、表 2 可以看出, 单影像计算的精度与双影像交会的精度基本上接近, 较高于双像交会; 其次, 单像和双像在 X 轴方向的精度要低于 Y 轴, Z 轴方向的精度, X 轴的相对精度约 1/600, Y 轴、Z 轴方向相对精度约 1/1500, 如果采用长焦距的镜头, 并用两台全站仪加权测量控制点, 将可以得到更高的精度。表 1 表明, 只有 3 个标志点时, 依然可以得到较好的结果。

表 1 采用 3 个标志点全站仪与影像解析结果对照表

Table 1 Total station and image analysis results using three sign points

点名	全站仪测量值	双影像交会	单影像测量
M_1	(3.502, -0.682, -0.403)	(3.494, -0.682, -0.407)	(3.517, -0.677, -0.404)
M_2	(3.427, -1.071, -0.351)	(3.409, -1.07, -0.353)	(3.440, -1.065, -0.350)
M_3	(3.350, -1.459, -0.485)	(3.350, -1.462, -0.483)	(3.379, -1.458, -0.480)
最大误差值		0.019, 0.003, 0.004	0.029, 0.006, 0.005
平均误差值		-0.009, -0.002, -0.002	0.018, 0.004, 0.002
标准差		0.010, 0.001, 0.003	0.009, 0.002, 0.003

表 2 采用 6 个标志点全站仪与影像解析结果对照表
Table 2 Total station and image analysis result using six sign points

点名	全站仪测量值	双影像交会	单影像测量
M_1	(3.502, -0.682, -0.403)	(3.494, -0.682, -0.407)	(3.517, -0.677, -0.404)
M_2	(3.427, -1.071, -0.351)	(3.409, -1.07, -0.353)	(3.440, -1.065, -0.350)
M_3	(3.350, -1.459, -0.485)	(3.350, -1.462, -0.483)	(3.379, -1.458, -0.480)
M_4	(3.397, -0.696, -0.297)	(3.398, -0.699, -0.297)	(3.399, -0.698, -0.293)
M_5	(3.379, -1.095, -0.374)	(3.366, -1.098, -0.373)	(3.372, -1.097, -0.368)
M_6	(3.411, -1.510, -0.347)	(3.386, -1.514, -0.347)	(3.399, -1.512, -0.343)
最大误差值		0.019,0.003,0.004	0.029,0.006,0.005
平均误差值		-0.009, -0.002, -0.002	0.018,0.004,0.002
标准差		0.010,0.001,0.003	0.009,0.002,0.003

5 误差分析

本算法在实际飞行试验测试中引起误差的因素分析如下。

1) 飞机上标志点的标定精度。通过全站仪对标志点标定而引起的系统误差与偶然误差,可以通过两台全站仪的加权测量实现较好的标定结果。

2) 影像判读精度。标志点的影像坐标是通过影像的判读得到的,它的精度决定了最终结果精度的高低,是误差的主要来源。因此,利用数字图像处理技术、亚像素判读技术可以实现较高的判读精度^[11]。

3) 像机的检校精度。像机的内外方位元素作为已知数值参与计算,其精度对测量结果有很大的影响。因此,需要对外方位元素尤其是角元素进行精确测定^[12]。

4) 飞机上标志点的空间分布和飞机在摄像机上成的影像大小也影响着测量精度。标志点应该尽量分散,均匀分布,飞机的成像尽量较大。

6 结论

本文基于单台数字摄像机拍摄的飞机影像,从摄影坐标系、机体坐标系和世界坐标系的关系入手,求解飞机的飞行姿态。在已知量与未知量的关系建立后,采用变量替换法对求解关系式进行优化,使机体坐标系与世界坐标系间的转化问题变为摄影坐标系与机体坐标系间的转化,便于姿态参数的求解。验证试验结果表明,该算法的精度与双像交会的精度基本相当,由于测试平台易于搭建,在以后的飞行试验中有着广泛的应用,目前主要应用在飞行武器投放的姿态测试中,已取得了很好的效果。

参考文献

- [1] 贾浩正. 基于影像的飞行器姿态角测量技术研究[D]. 西安:西北工业大学,2004.
- [2] 苏国中. 基于光电经纬仪影像的飞机姿态测量方法研究[D]. 武汉:武汉大学,2005.
- [3] 王学文,周健,朱江山,等. 利用光测胶片实现目标三维姿态测量的精度分析[J]. 长春理工大学学报,2005, 28(4):39-42.
- [4] 张剑清,潘励,王树根. 摄影测量学[M]. 武汉:武汉大学出版社,2003.
- [5] 冯文灏. 近景摄影测量的控制[J]. 武汉测绘科技大学学报,2000,25(5):453-458.
- [6] 冯文灏. 近景摄影测量——物体外形与运动状态的摄影法测定[M]. 武汉:武汉大学出版社,2002:87-116.
- [7] 唐自力,马彩文,刘波,等. 单站光测图像确定空间目标三维姿态[J]. 光子学报,2004,33(12):1480-1485.
- [8] 张剑清,胡安文. 多基线摄影测量前方交会方法及精度分析[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2007, 32(10):847-851.
- [9] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. International Journal of Computer Vision, 2004(7):122-135.
- [10] 王莉,朱仁江,戴特力. 三维测量中的照相机单机定标原理和实验研究[J]. 重庆师范大学学报,2005, 22(3):90-93.
- [11] 王锋,曹剑中,周仁魁,等. 飞行目标姿态测量中的图像处理[J]. 光子学报,2006,35(11):1781-1783.
- [12] 蔡伟柯,文贡坚,习飞. 一种基于模型的单相机姿态估计方法[J]. 中国图象图形学报,2008,13(3):513-518.