

## 利用单站光测图像确定回转体目标三维姿态

王 超<sup>1,2,3</sup>, 张涯辉<sup>1,2</sup>, 何培龙<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;  
2. 中国科学院光束控制重点实验室, 四川 成都 610209; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 为了实现回转体目标姿态的测量, 基于光电经纬仪的单站测量布站灵活, 不受测站地理条件的限制, 而且避免了图像的立体匹配, 具有较高的应用价值。文中充分利用空间目标的几何先验知识, 在用光电经纬仪单站空间余弦姿态测量方法来获得目标姿态参数的基础上, 进行了进一步的完善和改进, 降低了该算法对图像质量的要求, 增加了算法的实用性。模拟实验结果表明, 该方法姿态角测量误差小于  $0.5^\circ$ , 结果稳定, 能够满足回转体目标空间三维姿态的高精度测量的要求。

**关键词:** 姿态测量; 单目测姿; 光电经纬仪; 回转体

中图分类号: TP391; V556 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2013)09-2515-04

## Determination of rotary object's 3D pose from mono-view

Wang Chao<sup>1,2,3</sup>, Zhang Yahui<sup>1,2</sup>, He Peilong<sup>1,2</sup>

(1. The Institute of Optics and Electronics, The Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;  
2. Key Laboratory of Beam Control, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;  
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In order to realize the rotary object pose measurement, single-station measurement based on photoelectric theodolite with flexible station placement, without station geographical restrictions, and the stereo matching image has a high application value. The measuring method and the principle of attitude angle were introduced. Taking full advantage of the knowledge of space-objects figuration, on the basis of the photoelectric theodolite single station space cosine attitude measurement method to obtain the target attitude parameters, through the further development and improvement, the requirements of this algorithm on image quality was reduced and the applicability of the algorithm was increased. Compared with other methods of measurement, the simulation experiments demonstrate that the pose measuring method is less than  $0.5^\circ$  accuracy, the measuring result is stable. It can satisfy the need of high accurate measurement of spatial 3D pose measurement of rotary object with very good practicability.

**Key words:** pose measurement; mono-view; photoelectric theodolite; rotary object

收稿日期: 2013-01-07; 修订日期: 2013-02-10

作者简介: 王超(1986-), 男, 硕士生, 主要从事信息获取与处理方面的研究。Email: chao\_0506@163.com

导师简介: 何培龙(1965), 男, 副研究员, 硕士, 光电跟踪测量系统与设备总体技术。Email: hepeilong@ioe.ac.cn

## 0 引言

三维姿态是反映目标在空中飞行状态的重要参数,其精确测量对试验分析、事故鉴定、训练评估、飞控系统检验以及进一步优化系统设计等有重要的应用价值。现阶段姿态测量的方法主要有:在目标上安装高精度的惯性导航设备的内测方法和采用光学图像的外测方法。但是常用的光测方法仅将飞行目标作为质点目标来处理<sup>[1]</sup>,只获得目标的运动轨迹,速度和加速度已经不能满足现阶段的需求,因此还必须测量目标在飞行过程中的三维姿态。但是有时只有一个站点的经纬仪(摄像机)记录有清晰可用的目标图像,而其他站点的目标图像不可用或根本没有捕捉到目标。因此,研究用单站图像确定目标的三维姿态具有重要的实际应用价值<sup>[2-7]</sup>。

对于姿态角测量的方法,已有很多的文章论述,如参考文献[8]利用两站或多站图像获得目标三维姿态的中轴线方法,但要求至少有两站以上的目标图像,并涉及到立体匹配;参考文献[9]利用广义点反馈迭代的最小二乘方法和模拟影像与真实影像匹配的目标姿态跟踪求解方案,这种方法都需要建立模型库,操作比较复杂;还有一种是运用光电经纬仪单站空间余弦姿态测量方法来计算姿态角<sup>[10]</sup>,此方法原理简单、测量准确度高,但是必须要精确提取目标头部和尾部的特征点,这就对图像质量要求很高。因此文章对此方法进行了进一步的研究,降低了算法对图像质量的要求,提高了实用性。

## 1 坐标系介绍与姿态角定义

图 1 所示坐标系 $X_w Y_w Z_w$ 为大地坐标系,表示测站以及目标所处于地球的位置。坐标系 $XYZ$ 为测量坐标系,原点 $O$ 在经纬仪的光心, $X$ 轴指向正东, $Y$ 轴指向正北, $Z$ 轴指向天顶构成右手坐标系。图像坐标系 $l-uv$ 是以图像左上角点 $l$ 为原点,以像素为坐标单位的直角坐标系, $u, v$ 分别表示该像素在数字图像中的列数和行数。 $xyz$ 坐标系为载体坐标系,是目标运动过程中所使用的坐标系, $y$ 轴和目标中轴线方向重合。把目标在水平面上的投影与正北方向的夹角定义为偏航角 $\theta$ ,顺时针方向为正;把目标与水平面的夹角定义为俯仰角 $\varphi$ ,向上为正;目标绕载体坐标系 $y$ 轴的旋转角度定义为横滚角 $\psi$ ,逆时针方向为正。

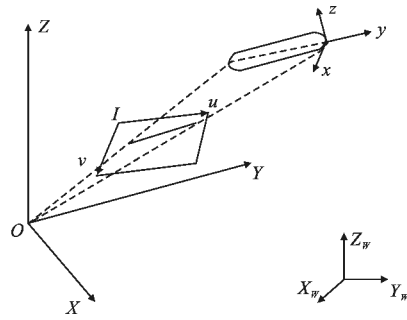


图 1 坐标系的设定

Fig.1 Definition of reference frame

## 2 姿态角的测量方法与原理

利用单站获得飞机姿态参数,首先获得二维图像目标轴线上两个特征点的参数,在已知目标的实际尺寸及距离时,利用余弦定理,在空间推得两个特征点的空间坐标<sup>[11]</sup>。原理流程图如图 2 所示。

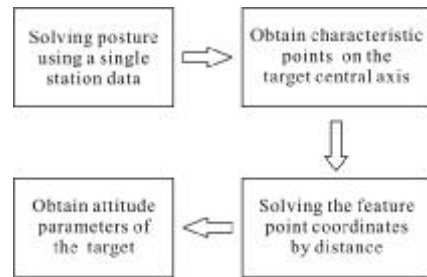


图 2 原理流程图

Fig.2 Principle chart

### 2.1 单站确定空间目标的位置公式

经纬仪在单站有激光测距提供的距离信息情况下<sup>[12]</sup>,利用二维图像判读获得的脱靶量及编码器信息,得到特征点的 $A, E$ 值,利用公式(1)获得特征点空中位置坐标。

$$\begin{cases} X=X_0+R\sin A\cos E \\ Y=Y_0+R\cos A\cos E \\ Z=Z_0+R\sin E \end{cases} \quad (1)$$

式中: $(X_0, Y_0, Z_0)$ 为该测站在发射坐标系中的站址坐标; $R$ 为经纬仪到目标的斜距; $A, E$ 为目标的方位角、高低角。

### 2.2 偏航角和俯仰角的计算

用图像处理的方法,高精度地提取目标中轴线或目标图像上任意一条与中轴线平行的直线,确定其与两侧边缘的交点,交点所在位置分别为目标头部位置 $N_1$ 及尾部位置 $N_2$ 。在单站图像上利用编码器值及目标脱靶量可获得 $N_1$ 和 $N_2$ 的方位角及高低

角。如图 3 所示,  $N_1, N_2$  方位角、高低角分别为  $(A_1, E_1)$ 、 $(A_2, E_2)$ ,  $L$  为已知飞机的头尾轴线长度,  $L=N_1N_2$ ,  $R_1$  为经纬仪上光心到目标底部中心点  $O_1$  的距离信息,  $OO_1=R_1$ ,  $O_1N_1$  为目标底部半径  $r$ , 计算  $R_2$  的值,  $R_2=ON_2$ 。设  $ON_1=R_3$ ,  $\alpha=\angle O_1ON_1$ ,  $\beta=\angle N_1ON_2$ 。

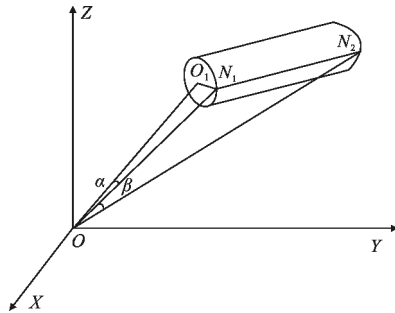


图 3 特征点空间位置

Fig.3 Space position of character dot

利用余弦定理在三角形  $\triangle N_1ON_2$  中计算:

$$r^2=R_1^2+R_3^2-2\times R_1\times R_3\times \cos\alpha \quad (2)$$

可求得  $R_3$  的一元二次方程为:

$$R_3^2-2\times R_1\times \cos\alpha\times R_3+R_1^2-r^2=0 \quad (3)$$

由上式解得:

(1) 所选取的点  $N_1$  处于它与摄像机光心  $O$  的连线与底部圆的交点  $p_1$  处, 如图 4 所示, 则

$$R_3=\frac{-b-\sqrt{b^2-4ac}}{2a} \quad (4)$$

式中:  $a=1$ ;  $b=-2R_1\cos\alpha$ ;  $c=R_1^2-r^2$ 。

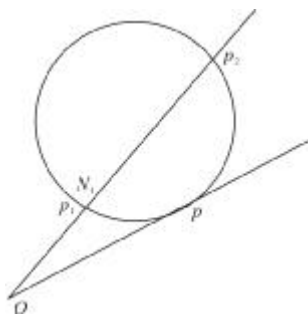


图 4 光心到特征点距离计算原理图

Fig.4 Figure of calculating distance between focus of optics and mark of object

(2) 所选取的点  $N_1$  处于它与摄像机光心  $O$  的连线与底部圆的交点  $p_2$  处, 则:

$$R_3=\frac{-b+\sqrt{b^2-4ac}}{2a} \quad (5)$$

(3) 所选取的点  $N_1$  处于它与摄像机光心  $O$  的连

线与底部圆的交点  $p$  处, 即与圆只有一个交点, 则公式(2)和公式(3)相等, 即都实用。

同理, 再利用余弦定理在三角形  $\triangle N_1ON_2$  中计算  $R_2$ 。

$$L^2=R_2^2+R_3^2-2\times R_2\times R_3\times \cos\beta \quad (6)$$

得  $R_2$  的一元二次方程为:

$$R_2^2-2\times R_3\times \cos\beta\times R_2+R_3^2-L^2=0 \quad (7)$$

可得:

$$R_2=\frac{-b\pm\sqrt{b^2-4ac}}{2a} \quad (8)$$

式中:  $a=1$ ;  $b=-2R_3\cos\beta$ ;  $c=R_3^2-L^2$ 。

此时的  $R_2$  会有两个值, 这时应结合  $R_1, R_3$  的值判断, 根据实际情况选用  $R_2$ 。

当  $R_2, R_3$  已知时, 利用公式(1)可获得特征点  $N_1$  和  $N_2$  的坐标值。设两个特征点坐标分别为  $(x_1, y_1, z_1)$ ,  $(x_2, y_2, z_2)$ 。由于直线  $N_1N_2$  与中心轴线平行, 所以其单位矢量与中心轴线单位矢量相等, 则空间中轴线的偏航角和俯仰角分别为:

$$\theta=\arctan((x_1-x_2)/(y_1-y_2))$$

$$\phi=\arctan((z_1-z_2)/\sqrt{(x_1-x_2)^2+(y_1-y_2)^2}) \quad (9)$$

### 3 模拟实验与误差分析

为验证算法的有效性, 利用 3D-MAX 仿真软件建立相机成像模型, 并生成模型的投影图像, 见图 5。相机焦距为 100 mm, 横向视野为  $20.408^\circ$ , 纵向视野为  $15.306^\circ$ , 图像尺寸: 640×480pixel, 目标长度为 60 m, 底部半径为 15 m, 相机位置坐标为 (0, 10 m, 25 m), 圆柱目标底部圆心坐标为 (60 m, 300 m, 0)。



图 5 回转体目标图像

Fig.5 Image of rotary object

任意选取 5 条与目标中轴线平行的直线, 求出与上下边缘的交点, 用文中的计算模型得到各自测量的姿态角, 测量的姿态角和真实值如表 1 所示。

表 1 结果比对数据

Tab.1 Contrast data

Measured value/(°)		Real value/(°)	
Yaw angle	Pitch angle	Yaw angle	Pitch angle
44.692 8	33.361 1	45.000 0	33.000 0
45.067 4	33.214 2	45.000 0	33.000 0
44.859 4	33.409 1	45.000 0	33.000 0
44.643 8	33.413 0	45.000 0	33.000 0
45.056 2	33.136 9	45.000 0	33.000 0

从表中数据可以看出, 测量得到的姿态角差值均在  $0.5^\circ$  范围内, 具有较高的测量精度。如果当目标和测站的距离远远大于目标的长度时 (在合理的成像范围之内), 那么中轴线与物体上下边缘的任意一组交点, 都可以等效为与物体的长度, 则这样就可以不局限于仅能提取目标物体上与目标中轴线平行的直线, 从而增加了取点的范围, 更降低了对图像质量的要求, 进一步增加了此方法的实用性。

从测量算法与原理分析, 该姿态测量方法中影响姿态测量精度的主要因素为: (1) 摄像机的光学成像系统的误差、测量系统的标定误差。摄像机光学系统的加工误差、装配误差与摄像机镜头光学畸变的存在会带来误差。摄像机的标定精度会给投影矩阵的计算带来直接影响。(2) 图像处理产生的误差。摄像机像面轴线提取精度直接决定了姿态角的测量精度。而目标在像面成像大小对轴线提取精度有直接影响。目标成像大, 像面轴线提取精度高; 反之, 则像面轴线提取精度低。焦距  $f$  对测量精度的影响也主要表现在其对目标成像大小的影响。在目标大小和测量距离一定的情况下, 焦距越大, 目标成像越大, 所以在摄像机景深和有效视野满足测量要求的情况下, 尽可能采用较大的焦距。由于是对运动物体的姿态进行测量, 所以必须选择合适的高速摄像机。

## 4 结 论

文中以回旋体目标为例, 对利用经纬仪单站加距离信息时获得目标姿态的方法进行了研究。实验数据表明, 此方法可以满足目前对于姿态要求的需求, 但是姿态解算准确度主要还是取决于前期目标边缘的提取, 直线检测以及角点提取的准确度。因此在以后实际应用中, 还应注意选取适当方法, 确保提取到准确的特征点坐标, 提高目标姿态解算准确度。由于单站测量还具有测量布站灵活等优点, 可以近距离布站, 因此其在靶场测量领域也具有重大的意

义。所以这一方法不仅可以提高测量数据的精度, 提高光测设备使用效能, 而且为运动目标的姿态测量提供一种简便快速的方式。

## 参考文献:

- [1] Boris Jutzi, Richard Gabler, Klaus Jaeger. Stereo vision for small targets in IR images sequences [J]. *Signal and Data Processing of Small Targets*, 2001, 4473: 361-370.
- [2] Duarte R O, Martins-Fiho L S, Knop G F T. A fault-tolerant attitude determination system based on COTS devices [J]. *IEEE Computer Society*, 2008, 8(14): 85-90.
- [3] Wang Hongbo, Zhuang Zhongzhi, Zhang Qingtai. Study on recognition of aircraft status based on dynamic infrared images [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, 32(1): 8-12. (in Chinese)
- [4] Tang Zili, Ma Caiwen, Liu Bo. A approach of determination of object's 3D pose from mono-view [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(12): 1480-1485. (in Chinese)
- [5] Cui Yanping, Lin Yuchi, Huang Yinguo. Study on spatial 3D pose measurement of rotary object [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2007, 1(20): 146-149. (in Chinese)
- [6] Lu Junyun, Li Qinghui, Jiang Hua. Measure method of the attitude of UAV based on the optical image [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(1): 102-105. (in Chinese)
- [7] Jiang Jie, Wang Haoyu, Zhang Guangjun, et al. Optical system design for large FOV attitude angle sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 31(1): 68-72. (in Chinese)
- [8] Yu Qifeng, Sun Xiangyi, Chen Guojun. A new method of measure the pitching and yaw of the axes symmetry object through the optical image[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2000, 22(2): 15-19. (in Chinese)
- [9] Zhan Zuxun, Su Guozhong, Zhang Jianqing. Airplane pose measurement from image sequences [J]. *Geometrics and Information Science of Wuhan University*, 2004, 29 (4): 287-281. (in Chinese)
- [10] Wang Xiaoming, Qiao Yanfeng, Song Liwei, et al. Measurement of three-dimensional attitude by single optoelectrical and radar integration instrument [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 9(19): 1779-1786. (in Chinese)
- [11] Zhao Lirong, Liu Yuhuan, Zhu Wei, et al. Optics and precision engineering measurement of aircraft attitude by spatial cosine relationship in single-station and planes to intersection in multi-station of electro-optical theodolite [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 11(17): 567-571. (in Chinese)
- [12] He Zhaocai. *Optical Measurement System*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. (in Chinese)