

# 基于光测图像的空间目标的俯仰角 和偏航角的测量技术

罗宽<sup>1</sup>, 范蕾<sup>2</sup>, 高玉军<sup>2</sup>, 张晖<sup>1</sup>, 李清安<sup>2</sup>, 朱运东<sup>1</sup>

(1. 长春理工大学, 长春 130022; 2. 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘要: 基于经纬仪交会测量技术, 提出了一种光测图像处理间接求得空间远程轴对称目标的三维姿态俯仰角和偏航角的算法。文中论述了其测量方法和原理并建立了相应的数学模型, 对系统的测量精度进行了计算与仿真分析, 并给出了提高测量精度的方案, 结果表明如果进行合理的布站使用该方法就可以使测量精度优于 $1^\circ$ 。

关键词: 光学测量; 图像处理; 三维姿态; 光电经纬仪

中图分类号: TP206.1 文献标识码: A 文章编号: 1672 - 9870 (2007) 03 - 0012 - 03

## Measuring Technology on Elevation Angle and Yawing Angle of Space Target Based on Optical Measurement Method

LUO Kuan<sup>1</sup>, FAN Lei<sup>2</sup>, GAO Yujun<sup>2</sup>, ZHANG Hui<sup>1</sup>, LI Qing'an<sup>2</sup>, ZHU Yundong<sup>1</sup>

(1. Changchun University of Science and Technology, Changchun, 130022;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Changchun 130033)

Abstract: Based on the intersection of technology theodolite, this paper presents an algorithm for optical images to obtain indirectly axisymmetric space remote target 3D profile pitch and yaw angle. It creates a math model of intersected measuring system and the measuring precision of this method is analyzed in detail. Then it makes optimization design for structure parameters of intersected measuring system by computer simulation. The result proves that it may acquire the measuring accuracy less than  $1^\circ$  if the measuring stations are arranged correctly by this method.

Key words: optical measurement; image processing; 3D pose; photoelectric theodolite

空间动态目标跟踪测量是国内外测试技术领域重点研究的前沿方向。过去由于各种条件的限制, 通常是将目标作为质点处理, 难以获得反映飞行目标运动特征的三维姿态参数如俯仰角、偏航角等。

目前, 一般用遥测设备获得目标的俯仰、偏航等姿态信息。但高精度遥测造价高, 一旦发生故障, 姿态数据就可能无法获取。对一些复杂的目标背景信号, 遥测信号处理起来就会更有难度。由于光电经纬仪日新月异的技术进步, 可以使对空间目标的跟踪测量模式从“质点化”测量向具有空间三维几何结构的“立体化”目标测量方向发展。本文首先分析了影响目标的姿态测量精度的因素, 建立了相应

的数学模型, 然后对该数学模型进行了仿真计算, 给出了提高测量精度的方案。

### 1 测量方法与原理

对于导弹、火箭这类回转体目标, 要得到其三维姿态可以通过求解它的中轴线的方<sup>[1]</sup>。如图1所示, 测量时两台经纬仪的高速摄影机捕获目标, 此时, 目标分别成像于两台经纬仪的摄像机上, 摄像机采集目标视频信号后送至微机信号处理系统将视频信号转换为全数字信号进行图像处理, 从而实时提取出目标像的中轴线, 中轴线和两测量站的坐标原点分别形成一个平面, 求得这两个平面相交得

到的直线就唯一确定了目标在空间当中的姿态。

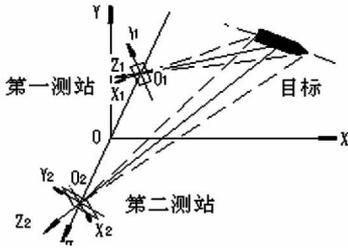


图 1 空间目标姿态测量系统原理图  
Fig.1 The principle of 3D pose measuring system of the space target

## 2 姿态测量系统数学模型及精度计算

光电经纬仪成像系统中, 大多采用透视投影模型, 它对应一个理想的针孔相机模型。图 2 为目标姿态测量系统的数学模型, 不失一般性, 以两测站的坐标系的连线的中点作为目标发射坐标系的原点  $O_F$ , 垂直于水平面指向天顶为发射坐标系的  $Y_F$  轴的正向,  $\overrightarrow{O_{h1}O_{h2}}$  为发射坐标系  $Z_F$  轴的正向,  $O_{h1}, O_{h2}$  分别是两测量坐标系的原点,  $X_F, Y_F, Z_F$  构成右手坐标系, 两测量坐标系的坐标轴分别和发射坐标系的坐标轴平行, 设  $O_{h1}$  和  $O_F$  的距离为  $l$ 。由成像原理可知, 目标轴线矢量  $\overrightarrow{AB}$  和它在第  $i$  测站靶面上的像  $\overrightarrow{A_i B_i}$  与其光学系统焦点  $O_{hi}$  在同一平面  $\Pi_i$  ( $i=0, 1, 2$  下同), 则两平面  $\Pi_1, \Pi_2$  的交线即为目标轴线的方向, 它决定了目标的俯仰角和偏航角。

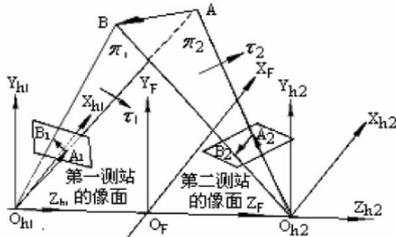


图 2 交会测量系统数学模型  
Fig.2 Mathematical model of intersected

在第  $i$  测站的摄像机坐标系下

$$\begin{aligned} \overrightarrow{A_i B_i} &= \{x_{Bi} - x_{Ai}, y_{Bi} - y_{Ai}, 0\} \\ \overrightarrow{O_{hi} A_i} &= \{x_{Ai} - x_{ohi}, y_{Ai} - y_{ohi}, f_i\} \end{aligned}$$

式中  $x_{Ai}, y_{Ai}, x_{Bi}, y_{Bi}, f_i$  分别是目标轴线矢量  $\overrightarrow{AB}$  的两个端点在第  $i$  测站像面上的坐标与其光学系统焦距。

由  $\overrightarrow{A_i B_i}$  和第  $i$  测站的坐标系原点  $O_{hi}$  形成的平面的法矢  $\vec{\tau}_i$  以及  $\vec{\tau}_i$  转换到发射坐标系下的矢量  $\tau_i$  :

$$\vec{\tau}_i = \overrightarrow{A_i B_i} \times \overrightarrow{O_{hi} A_i} \quad (1)$$

$$\tau_i = M_{mi} M_{xi} M_{yi} \tau_i' \quad (2)$$

其中

$$M_{xi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(-E_i) & -\sin(-E_i) & 0 \\ 0 & \sin(-E_i) & \cos(-E_i) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$M_{yi} = \begin{bmatrix} \cos(-A_i) & 0 & \sin(-A_i) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(-A_i) & 0 & \cos(-A_i) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$M_{mi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \pm l \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式中,  $A_i, E_i$  分别是第  $i$  测站的经纬仪的方位角和俯仰角,  $2l$  为两测站的距离。

$$\overrightarrow{AB} = \vec{\tau}_1 \times \vec{\tau}_2 = (l, m, n) \quad (3)$$

偏航角  $\Phi$  和俯仰角  $\Psi$  分别为:

$$\Phi = \arctan(n/l) \quad (4)$$

$$\Psi = \arctan(\sqrt{l^2 + n^2}/m) \quad (5)$$

两平面  $\Pi_1, \Pi_2$  的夹角  $\beta$  :

$$\beta = \arccos\left(\frac{|\vec{\tau}_1 \cdot \vec{\tau}_2|}{|\vec{\tau}_1| |\vec{\tau}_2|}\right) \quad (6)$$

由误差传递公式, 对 (4)、(5) 式中各参变量  $x_{Ai}, y_{Ai}, x_{Bi}, y_{Bi}, E_i, A_i, f_i$  取微分得到俯仰角和偏航角的标准偏差  $\sigma_{\Psi}, \sigma_{\Phi}$  :

$$\begin{aligned} \sigma_{\Psi}^2 &= \sum_{i=1}^2 \left(\frac{\partial \Psi}{\partial A_i}\right)^2 \times \sigma_{A_i}^2 + \sum_{i=1}^2 \left(\frac{\partial \Psi}{\partial E_i}\right)^2 \times \sigma_{E_i}^2 + \\ &\quad \left(\frac{\partial \Psi}{\partial x_{Ai}}\right)^2 \times \sigma_{x_{Ai}}^2 + \sum_{i=1}^2 \left(\frac{\partial \Psi}{\partial y_{Ai}}\right)^2 \times \sigma_{y_{Ai}}^2 + \\ &\quad \sum_{i=1}^2 \left(\frac{\partial \Psi}{\partial x_{Bi}}\right)^2 \times \sigma_{x_{Bi}}^2 + \sum_{i=1}^2 \left(\frac{\partial \Psi}{\partial y_{Bi}}\right)^2 \times \sigma_{y_{Bi}}^2 + \\ &\quad \sum_{i=1}^2 \left(\frac{\partial \Psi}{\partial f_i}\right)^2 \times \sigma_{f_i}^2 \quad (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\Phi}^2 &= \sum_{i=1}^2 \left(\frac{\partial \Phi}{\partial A_i}\right)^2 \times \sigma_{A_i}^2 + \sum_{i=1}^2 \left(\frac{\partial \Phi}{\partial E_i}\right)^2 \times \sigma_{E_i}^2 + \\ &\quad \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x_{Ai}}\right)^2 \times \sigma_{x_{Ai}}^2 + \sum_{i=1}^2 \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y_{Ai}}\right)^2 \times \sigma_{y_{Ai}}^2 + \\ &\quad \sum_{i=1}^2 \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x_{Bi}}\right)^2 \times \sigma_{x_{Bi}}^2 + \sum_{i=1}^2 \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y_{Bi}}\right)^2 \times \sigma_{y_{Bi}}^2 + \\ &\quad \sum_{i=1}^2 \left(\frac{\partial \Phi}{\partial f_i}\right)^2 \times \sigma_{f_i}^2 \quad (8) \end{aligned}$$

则： $\sigma_{总}^2 = \sigma_{俯}^2 + \sigma_{偏}^2$  (9)

其中误差分配如下(保精度计算)：

经纬仪指向精度(含调平误差) $\sigma_A$ 、 $\sigma_E$ 分别为5"；图像上目标特征点的提取精度 $\sigma_{x_0} = \sigma_{y_0} = \sigma_{x_{0i}} = \sigma_{y_{0i}} = 6\mu m$ ；焦距 $f = 3m$ ，焦距精度按0.1%计算，则取 $\sigma_f = 0.1rad$ ；

由以上数据可知， $\sigma_{总} = 2.42 \times 10^{-5} \times \sin E_i / \cos A_i$

### 3 仿真分析

为了能够研究精度分布规律而又不失一般性采用以下布站方案(单位 m)。

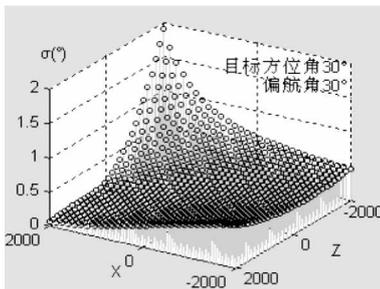


图3 目标方位角和偏航角同为30°时测量系统的精度分布

Fig.3 Precision distributing as elevation angle and azimuth angle of the target both are 30°

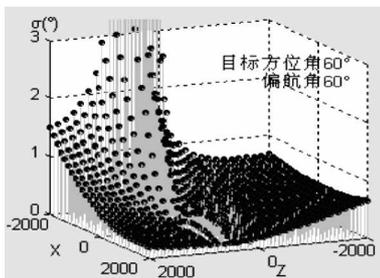


图4 目标方位角和偏航角同为60°时测量系统的精度分布

Fig.4 Precision distributing as elevation angle and azimuth angle of the object both are 60°

一站：(0, 0, +1000)；二站：(0, 0, -1000)；目标的坐标为：目标的高度y取2000；x, z的取值范围分别是-2000~2000，每隔100m取一个点，一共取1600个取样点。由于目标的偏航角和俯仰角对精度都有影响，为了研究位置的不同对测量精度的影响，不妨令目标的偏航角和俯仰角都为不变来观察各位置精度分布情况。图3和图4是偏航角和俯仰角都为30°和60°对1600个不同位置的目标进行精度计算的结果。

由图3和图4可以看出只要适当的安排布站系统的测量误差 $\sigma_{总} \leq 0.5^\circ$ 。图5和图6说明，和测量精度关系比较密切的是两个测量面的交会角的角度，如图所示当面面交会角在90°附近的测量精度

比较高，因此，可以按此规律考虑布站。

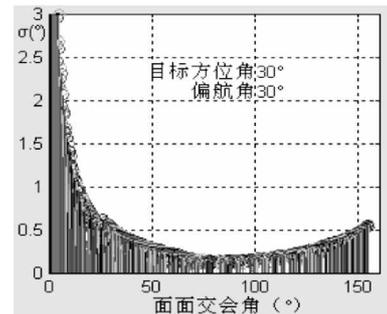


图5 面面交会角对测量精度的影响

Fig.5 Precision distributing with the intersected plane angle

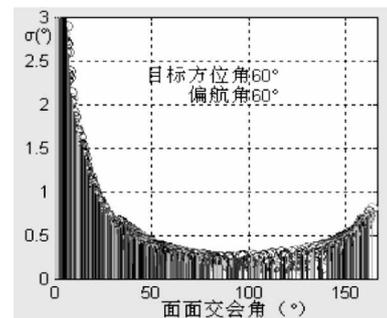


图6 面面交会角对测量精度的影响

Fig.6 Precision distributing with the intersected plane angle

### 4 结论

应用本文的方法，对飞行高度为4000m、直径300mm、长度为5000mm的目标，作用距离为6000m、目标俯仰角在±60°之间的目标的偏航角和俯仰角的测量精度 $\sigma_{方位}$ 、 $\sigma_{俯仰} \leq 1^\circ$ ，此精度远远优于观察望远镜对此类目标的测量精度。

由于间接测量误差传递的作用使得总体测量误差小于各单项误差，姿态测量的精度主要是受目标特征点提取误差的影响。光学系统的焦距误差对精度影响很小可以忽略，影响测量精度的主要因素是图像上中轴线提取的角度误差，由于经纬仪的精度一般为十几角秒以下，因此产生的空间中轴线角度误差量级不会超过角秒，这个误差完全可以忽略。

目标姿态测量的精度和夹轴线的面面交会角有关系，当面面交会角越趋近直角则测量精度也越高；

如果在目标表面做相应的特征标记点阵，通过交会测量该特征点阵的运动，计算出目标表面上其他点的运动方程，进而可以实时测量目标的各种姿态。

(下转第9页)

## (2) 功率稳定性

用与“功率大小”相同的方法可以得到

$$\tilde{R}_{12} = (0 \quad 0.9 \quad 0.1 \quad 0 \quad 0)$$

## (3) 功率消耗

用与“功率大小”相同的方法可以得到

$$\tilde{R}_{13} = (0 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0)$$

## 2.3.1.3 模糊综合评判

得到对高功率激光器输出功率能力的综合评判结果为

$$\tilde{R}_{13} = [0.4 \quad 0.3 \quad 0.3] \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.3 & 0.7 & 0 \\ 0 & 0.9 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = (0 \quad 0.57 \quad 0.15 \quad 0.28 \quad 0)$$

## 2.3.2 光束质量

这里采用国际上通用的光束质量因子  $M^2$  进行评价,用与“功率大小”相同的方法可以得到

$$\tilde{R}_2 = (0.1 \quad 0.3 \quad 0.6 \quad 0 \quad 0)$$

## 2.3.3 频率稳定性

用与“功率大小”相同的方法可以得到

$$\tilde{R}_3 = (0 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0)$$

## 2.4 二级模糊综合评判

对于高功率激光器来说,输出功率能力是主要的指标;光束质量也比较重要。所以根据以上分析,建立如下权重集为

$$A = (0.4 \quad 0.3 \quad 0.3)$$

将单因素评判结果组合为一个评判矩阵,所以

得到对该高功率激光器性能的综合评判结果为

$$\tilde{B} = \tilde{A} \cdot \tilde{R} = [0.4 \quad 0.3 \quad 0.3] \begin{bmatrix} 0 & 0.57 & 0.15 & 0.28 & 0 \\ 0.1 & 0.3 & 0.6 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = (0.03 \quad 0.618 \quad 0.24 \quad 0.112 \quad 0)$$

根据最大隶属度原则,从模糊评判综合评判结果可以看出,对该高功率激光器的综合评判结果为“好”。

## 3 结论

本文尝试用模糊综合评判的方法来对其的综合性能进行评判,在以实测数据为基础上进行,能够大大消除主观因素的影响,突出事物本身的客观性。文中的各个权重集可以通过成立专家组打分取平均值建立。

## 参考文献

- [1] 杨松林. 工程模糊论方法及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996.
- [2] 刘普寅, 吴孟达. 模糊理论及其应用[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1998.
- [3] 苏毅, 万敏. 高能激光系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [4] 王志云, 籍凤荣, 胡文华. 模糊综合评判在雷达性能评估中的应用. 现代雷达[J]. 2005(1): 13 - 15.
- [5] 王磊, 野学范. 模糊评判在舰艇作战系统效能评估中的应用. 舰船电子工程[J]. 2005(5): 17 - 19.

(上接第14页)

## 参考文献

- [1] 于起峰, 孙祥一. 用光测图像确定空间目标方向角和俯仰角的中轴线法[J]. 国防科技大学学报, 2000(2): 15 - 19.
- [2] 王庆有, 孙为珠. CCD应用技术[M]. 天津: 天津大学出版社, 1993: 1 - 5.

- [3] 李庆先. 电耦合器件(CCD)应用概述[J]. 仪表技术与传感器, 1991, 12(6): 12 - 14.
- [4] 毛英泰. 误差理论与精度分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982.
- [5] 王喜军, 王军, 杨会玲, 等. 基于多CCD拼接相机测角精度检测[J]. 长春理工大学学报, 2005, 28(4): 36 - 38.