

文章编号: 1001-2486 (2000) 02-0015-05

用光测图像确定空间目标俯仰角和偏航角的中轴线法^{*}

于起峰, 孙祥一, 陈国军

(国防科技大学航天与材料工程学院 湖南 长沙 410073)

摘要: 提出了一种用电影经纬仪等光测设备获得的图像确定火箭等空间轴对称目标的俯仰角和偏航角的新方法——中轴线法; 并对此方法进行了误差分析。此方法利用了目标图像上的大量信息, 测量精度高。采用了间接的方法提取目标的中轴线, 避免了多相机目标匹配的问题。

关键词: 光学测量; 图象处理; 三维姿态

中图分类号: V412.42 **文献标识码:** A

A New Method of Measure the Pitching and Yaw of the Axes Symmetry Object through the Optical Image

YU Qi-feng, SUN Xiang-yi, CHEN Guo-jun

(College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. Of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: A new method for measurement of the pitching angle and yaw angle of an axes-symmetric object through the optical images is presented, and the accuracy of the method is analyzed. This method is highly accurate because a large amount of information of the object image is used. The difficulty of object matching among several images is avoided since the object's axis is measured in an indirect way.

Key words: optical measurement; image processing; 3D orientation

用电影经纬仪或高速摄影机拍摄火箭等目标的运动过程, 然后对拍摄获得的胶片进行分析处理, 得到目标的运动参数, 是目前靶场常用的一种外测方法。靶场一般配有多台经纬仪及胶片判读设备。但现有的分析处理方法只将火箭等目标作为点目标来测量, 只能获得目标的运动轨迹、速度、加速度等, 无法得到火箭的三维姿态参数——俯仰角、偏航角。然而火箭的三维姿态参数是反映火箭飞行状态的重要运动参数, 获得这些参数对分析火箭的运动状态, 以及气动参数辨识等有着重要的价值。

实际上, 若经纬仪拍摄的图像能观察到火箭的轮廓, 则它包含了火箭的姿态信息。因此通过适当的方法, 完全可以得到一定精度的三维姿态结果。最直接获得三维姿态参数的方法就是用测量点目标的方法, 同时测量火箭上的两个以上的点的位置, 如测量火箭首尾两点, 即可得到火箭轴线的空间位置, 进而得到火箭的俯仰角和偏航角。然而此方法用于测量火箭的三维姿态难以得到满意的结果。因为一般测量站点距火箭较远, 测量火箭上点目标的精度不是很高, 再通过两点得到直线的精度就更差。这种方法还要求两台经纬仪能同时拍摄到目标上的两个相同点, 否则得不到结果。

提高姿态参数测量精度的方法是直接测量火箭上的直线目标, 这是因为直线包含了大量的点信息。通过对大量点的拟合, 可以使直线的精度提高。然而要从不同的站点观测火箭上的同一直线是困难的。不同站点观察到的火箭的轮廓线并不是同一条直线。为此我们提出了通过多站光测图像确定火箭俯仰角和偏航角的“中轴线方法”。

1 中轴线法的基本原理

火箭的主体, 一般可以认为是轴对称的, 其对称轴也就是我们称的中轴线。

确定火箭俯仰角、偏航角的中轴线法的基本思想是: 通过经纬仪拍摄到能看清火箭轮廓的胶片; 将胶片图像数字化, 再用数字图像处理技术对其进行分析处理, 高精度地提取出火箭的两条直线轮廓边

* 收稿日期: 1999-06-08

作者简介: 于起峰 (1958-), 男, 国防科技大学教授。

界方程;计算出这两条直线的中心线方程,即为图像平面上火箭的中轴线的方程。这个中轴线方程与摄影系统的光心的空间坐标唯一确定了一个空间平面,空间中火箭的中轴线必然在此平面上。用两台经纬仪测量就能得到两个平面,这两个平面必然交于一条空间直线,这条直线就是火箭的空间中轴线。求得火箭的中轴线方程后,就能方便地得到火箭的俯仰角、偏航角。若用多台经纬仪测量就能得到多个平面,实际测量时由于存在误差,这些平面可能不交于同一直线。这时可用加权平均的方法确定俯仰角和偏航角。

中轴线法利用了面面交汇得空间直线的原理,而不是象原有光测方法利用线线交汇得到空间点位置,再首尾两点相连得姿态参数。中轴线法利用了目标图像上大量点的信息,因此它的精度比用首尾两点相连得到的三维姿态结果精度大大提高。

中轴线法利用了间接的方法测中轴线,它避免了多台经纬仪目标匹配的问题,甚至在多台经纬仪拍摄到的不是火箭的同一部分时,也能得到结果。

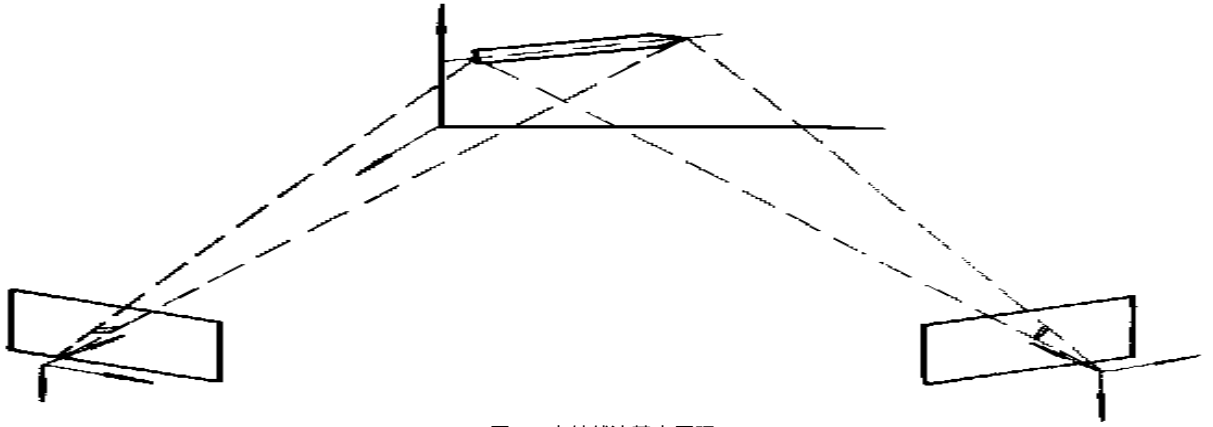


图1 中轴线法基本原理

Fig. 1 Basic principle of the axis method

1.1 提取中轴线

对于像火箭这样的目标,它的中轴线一般不能从图像上直接观察到。然而火箭的主体一般都是轴对称的圆柱体或圆锥体,因此可以通过间接的方法获得目标在图像上的中轴线方程。

当经纬仪拍摄到的胶片中火箭目标图像较大时,一般火箭的图像灰度与背景灰度有一定差别,因此在图像中,火箭边缘附近的灰度值有一个阶跃变化。据此,我们运用数字图像处理技术可以精确的提取出边缘的位置^[1]。

为了得到图像中火箭中轴线的位置,首先需要获得火箭两条直线轮廓的方程:

$$x \cos \alpha_1 + y \sin \alpha_1 - p_1 = 0$$

$$x \cos \alpha_2 + y \sin \alpha_2 - p_2 = 0$$

其中: α 为直线的法线与 x 轴的夹角; p 为直线到原点的距离

一般照相系统成像满足针孔模型,目标按透视投影在象平面上成像。这时两条直线轮廓与中轴线的关系比较复杂。但是,跟踪火箭这样的目标的经纬仪离目标的距离一般较远,焦距较长,透视投影可以近似看作平行投影,这时火箭的中轴线可以表示为两条直线轮廓的中心线,即:

$$x(\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2) + y(\sin \alpha_1 + \sin \alpha_2) - (p_1 + p_2) = 0$$

1.2 确定空间平面

从某一测站的经纬仪拍摄到的图像中获得火箭中轴线的方程后,与摄影系统光心一起可以唯一确定一个空间平面。假设已知:

摄影系统焦距为 f

像平面内中轴线方程为 $ax + by + c = 0$

如下定义测站坐标系:

原点位于摄影系统光心, X, Y 轴分别与象平面 X, Y 轴平行, Z 轴与主光轴平行。

这样在测站坐标系中, 待定平面的方程为:

$$ax + by + \frac{c}{f}z = 0$$

1.3 空间交汇求得俯仰角和偏航角

当从各测站的多台经纬仪拍摄的图像中提取出目标的中轴并得到相应的空间平面后, 即可进行空间交汇得到目标的中轴线的空间直线方程。

交汇前, 需要将各测站得到的空间平面方程转换的同一全局坐标系下。可取发射坐标系作为全局坐标系。根据发射坐标系与测站坐标系之间的关系, 可将方程进行转换。以两站交汇为例, 假设转换后得到如下两个方程:

$$A_1x + B_1y + C_1z + D_1 = 0$$

$$A_2x + B_2y + C_2z + D_2 = 0$$

这两个方程联立, 就是目标的空间直线方程。这条直线的三个方向数分别为

$$l = \frac{B_1 C_1}{B_2 C_2} \quad m = \frac{C_1 A_1}{C_2 A_2} \quad n = \frac{A_1 B_1}{A_2 B_2}$$

姿态角为

$$\text{俯仰角 } \varphi = \arctg \left[\frac{m}{\sqrt{l^2 + n^2}} \right]$$

$$\text{偏航角 } \psi = -\arctg \left[\frac{n}{l} \right]$$

2 中轴线法误差分析

2.1 确定中轴线的方法误差

在确定火箭俯仰角、偏航角的中轴线法中, 火箭主体的中轴线是以火箭两条直线轮廓边界的中线来代替的。当摄影系统满足平行投影关系时, 这样计算是没有误差的。

一般摄影系统成像满足针孔模型, 目标按透视投影在像平面上成像。这时两条直线轮廓与中轴线的关系比较复杂。不过跟踪火箭这样的目标的经纬仪离目标的距离一般较远, 焦距在 1m 以上, 视角一般不超过 1 度, 这种情况下透视投影可以近似看作平行投影。

这种近似带来的误差可通过图 2 分析。

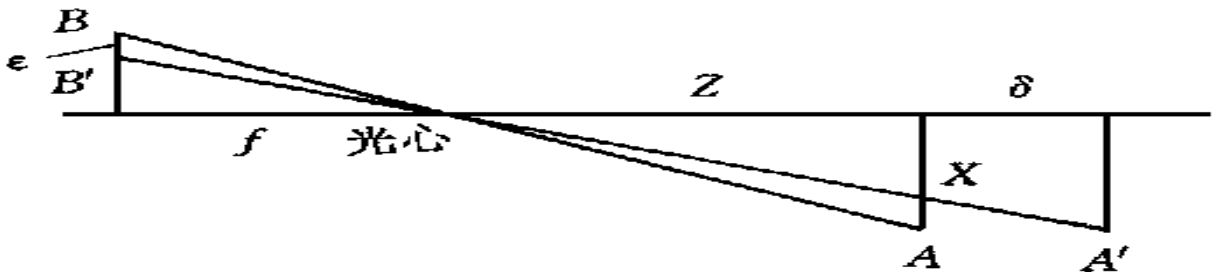


图 2 误差分析示意图

Fig. 2 Accuracy Analysis

图中两点 A, A' 距光轴均为 x , 距光心分别为 $z, z + \delta$ 。按平行投影关系, 它们的像 B, B' 两点距光轴的距离应相等。而按透视投影关系, 它们的像是不重合的。若能说明在测量火箭这种特定的情况下, 这两点的距离很小, 则可以近似看作平行投影。

按透视投影关系, B, B' 两点距光轴的距离分别为 $\frac{x}{z} f$ 和 $\frac{x}{z + \delta} f$ 其中 f 为摄影系统的焦距。这两点

的距离:

$$\epsilon = \frac{x-f}{z} - \frac{x-f}{z+\delta} = \frac{x-f}{z} \frac{\delta}{z+\delta}$$

由于目标到经纬仪的距离 z 通常是千米量级的, 目标大小 δ 通常是米量级的, 因此用平行投影关系代替透视投影关系所带来的误差在千分之一量级, 这个误差可以忽略。

2.2 目标轮廓边界提取的误差

目标轮廓边界提取采用亚像素技术逐个处理边界点, 然后用最小二乘法方法进行边界的直线拟合。按目前的图像处理技术, 达到 0.2 个亚像素的精度是比较容易的事。一般认为噪声引起的误差和计算截断误差是服从正态分布的随机误差, 而最小二乘法公认可以相当好地消除随机误差。更重要的是, 由于用许多点进行直线最小二乘拟合, 因而直线的斜率误差极小。而此直线斜率是确定三维姿态的最关键的因素。

斜率的误差可以大致估算如下: 假设直线轮廓边界上共有 30 个像素点, 这是中轴线法一般要求的, 假设两个端点的最大误差为正负 0.2 像素。以两个有最大误差的端点确定直线方程, 将产生最大可能的直线斜率误差, 其最大斜率误差角度为:

$$\delta_{\alpha} = \arctg \frac{0.2 \times 2}{30} = 0.76^{\circ}$$

如果用 30 点进行最小二乘法拟合, 其精度还可大幅度提高。

2.3 像平面上中轴线提取误差对姿态角的影响

为了便于研究像平面上中轴线的误差对结果的影响, 假设只有一台经纬仪有误差, 而另一台经纬仪所得结果无任何误差。

定义一个全局坐标系 $Oxyz$, 假设有误差的经纬仪的光心位于全局坐标系原点 O ; 无误差的经纬仪光心与目标中轴线所确定的平面, 与全局坐标系的 Oxy 平面平行。

中轴线在带误差像平面上的直线方程可写为:

$$x \cos \alpha + y \sin \alpha - p = 0$$

若方向和距离的测量误差分别为 δ_{α} 和 δ_p , 则带有误差的中轴线方程为

$$x \cos(\alpha + \delta_{\alpha}) + y \sin(\alpha + \delta_{\alpha}) - (p - \delta_p) = 0$$

为了讨论方便, 且不失一般性, 可假设 $\alpha = 0, p = 0$, 则中轴线方程变为

$$x \cos \delta_{\alpha} + y \sin \delta_{\alpha} - \delta_p = 0$$

设带误差经纬仪的光轴与全局坐标系的 Oxy 平面的夹角为 E , 称作高低角; 光轴在全局坐标系的 Oxy 平面上的投影与 Oz 轴的夹角为 A , 称作方位角。

将误差经纬仪的光心与目标中轴线所确定的平面转化到全局坐标系后, 再与无误差平面进行交会, 即可得到空间上中轴线方程。其角度误差可表示为:

$$\operatorname{tg} \delta_{\theta} = \frac{\sin \delta_{\alpha} \cos E + \frac{\delta_p}{f} \sin E}{\cos \delta_{\alpha} \cos A + \sin \delta_{\alpha} \sin E \sin A - \frac{\delta_p}{f} \cos E \sin A}$$

其中, δ_{θ} 为空间上中轴线的角度误差。

为了方便, 我们将像平面上中轴线的方向误差 δ_{α} 和距离误差 δ_p 分开讨论。

(1) 考虑方向误差 δ_{α}

设 $\delta_p = 0$, 则

$$\operatorname{tg} \delta_{\theta} = \frac{\sin \delta_{\alpha} \cos E}{\cos \delta_{\alpha} \cos A + \sin \delta_{\alpha} \sin E \sin A}$$

由于 $\sin \delta_{\alpha} \ll 1$, 故:

$$\operatorname{tg} \delta_{\theta} \approx \operatorname{tg} \delta_{\alpha} \frac{\cos E}{\cos A}$$

可以看出, 方位角 A 在正负 90 度附近时, 也就是两个交汇平面接近平行时, 上式分母 $\cos A$ 接近零。

这时交汇出的空间中轴线的角度误差 δ_θ 可能很大, 因此这种情况得不到好的交汇结果。

而方位角 A 在零度附近时, 也就是两个交汇平面接近垂直时, 上式分母接近 1, 这时 δ_θ 的量级不会超过 δ_α 的量级。前面已经说明, δ_α 很小, 因此, 由于 δ_α 引起的 δ_θ 的误差也很小, 因此这种情况得到的交汇结果较好。

一般地说, 当两个交汇平面的夹角大于 30 度时, 也就是方位角 A 不大于 60 度时, 上式分母 $\cos A$ 不小于 0.5。这种情况可以得到较好的交汇结果。

(2) 考虑距离误差 δ_p

设 $\delta_\alpha = 0$, 则

$$\operatorname{tg} \delta_\theta = \frac{\frac{\delta_p}{f} \sin E}{\cos A - \frac{\delta_p}{f} \cos E \sin A}$$

由于 $\delta_p/f \ll 1$, 故

$$\operatorname{tg} \delta_\theta \approx \frac{\delta_p}{f} \frac{\sin E}{\cos A}$$

从上式同样可以看出, 方位角 A 在零度附近时, 也就是两个交汇平面接近垂直时, 交汇结果较好。并且 δ_θ 的量级不会超过 $\frac{\delta_p}{f}$ 的量级。而 $\frac{\delta_p}{f}$ 正好可以理解为经纬仪的精度, 由于经纬仪的精度一般为十几角秒以下, 因此 δ_p 所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。

综合以上分析可以得出, 当两个交汇平面的夹角大于 30 度时, 确定火箭俯仰角、偏航角的中轴线法可以得到较好的交汇结果。

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, 而中轴线提取的位置误差, 也就是中轴线的平移, 对姿态测量精度的影响很小。

3 结束语

中轴线法已经成功地应用于工程实践中, 大大提高了靶场用光测手段测量火箭等目标的俯仰角、偏航角的精度。实践证明, 在图像质量中等的情况下, 此方法的精度优于 0.5 度。

此方法已通过技术鉴定, 并已获得国家发明专利 (专利号: 98123890.4)。

参考文献:

- [1] 马颂德, 张正友. 计算机视觉 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.