

文章编号: 1003-501X(2008)12-0001-04

基于最小二乘估计的多站交会方法

吴能伟^{1,2}, 陈 涛¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 在多台电视经纬仪组成的测量网络中, 为了提高目标的捕获、跟踪能力, 减少交会模型切换带来的引导数据的波动, 提出一种基于最小二乘估计的多站交会方法。该方法根据电视经纬仪实时跟踪被测目标时的几何关系, 利用电视经纬仪的站点位置和实时获得的目标测角信息, 对于每台电视经纬仪都构造两个垂直相交于其测量方向线的平面, 再用最小二乘原理估计被测目标的空间坐标。在两台电视经纬仪实时交会时, 异面交会是该方法的特例, 于是证明该方法是有效的。仿真试验结果表明, 与异面交会法相比, 此方法产生的引导数据平滑、无波动, 二者的定位误差均小于 0.18 m, 能满足电视经纬仪多站交会定位的要求。

关键词: 电视经纬仪; 异面交会; 最小二乘原理; 实时引导

中图分类号: TH761.1, V556.5

文献标志码: A

Multi-station Intersection Method Based on the Least Square Estimation

WU Neng-wei^{1,2}, CHEN Tao¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: In order to improve the ability for capturing and tracking the space flying object and to decrease the fluctuation of the real-time guide data with the intersection model switching, an intersection approach for multiple stations based on the least square estimation is put forward in the measurement network composed of two or more TV theodolites. According to the real-time geometrical relationship between the measured object and the TV theodolites, the proposed method makes use of TV theodolites position and their real-time angle information of the measured object to construct two perpendicular planes for every theodolite, which are intersectant at the measure direction line. The coordinates of the measured object is estimated by the least square principle. During the period of two theodolites taking part in real-time intersection calculation, the nonplanar intersection method is the special case of this method, so this intersection method is very effective. The simulation results show that compared with the nonplanar intersection method, the real-time guide data produced by this method is smooth and unfluctuating, the position error of the two methods is less 0.18 m, and the method can meet the needs for the multi-station TV theodolites intersection.

Key words: TV theodolite; nonplanar intersection; least square principle; real-time guide

1 引言

电视经纬仪作为近年来迅速发展起来的一种非接触的无源被动测量技术^[1], 因其具有测量精度高、直观性强、性能稳定可靠、不受“黑障区”和地面杂波干扰影响等优点, 常用于空间动目标的航迹测量、目标外形测量、光度及光谱测量^[2]。但它只能得到空间目标的二维坐标信息, 所以为了获得目标的三维坐标, 常以交会方式测量被试目标的空中位置^[3-4]。

随着精确制导、远程打击等高技术兵器武器的出现, 要实现捕获、跟踪和测量此类目标, 不仅对单台电视经纬仪提出了更高的要求, 同时也提出了多台电视经纬仪的综合布站联合进行测量的要求。由于四台

收稿日期: 2008-04-25; 收到修改稿日期: 2008-08-07

作者简介: 吴能伟(1976-), 男(汉族), 湖南邵阳人, 助理研究员, 博士, 主要研究光电设备的数据处理。E-mail: wunwei@sohu.com

以上电视经纬仪对目标位置估计性能改善不大^[5], 常用 3 台或 4 台电视经纬仪组网跟踪, 然后用异面交会法^[6]进行两两交会, 再将所得的多组数据按照交会精度选优^[7]或融合原则^[8]进行处理, 从而形成一个比单台电视经纬仪能力更大、稳定性更好、效率更高的光电测量系统。

上述的数据处理方法虽然提供了丰富的数据来源, 但是计算比较复杂, 而且不能进行多站交会, 也就不能利用电视经纬仪的冗余信息提高定位精度。文献[9]建立以目标球面坐标为参数的非线性方程组, 将其线性化后再选取适当的初始值, 然后根据精度要求用迭代算法解得目标的坐标。该方法虽然避免交会模型的切换, 但是面临以下问题: 初始值选择好坏直接影响迭代的收敛速度, 不同的精度要求导致迭代次数不固定, 球面坐标变换到直角坐标带来的计算误差。所以该方法不能满足经纬仪间的实时交会的计算要求。

鉴于上述问题, 对电视经纬仪跟踪测量目标时的空间几何关系进行深入分析, 利用经纬仪的测角信息, 依靠经纬仪的站点坐标构造以目标直角坐标为参数的多个垂直相交的平面, 再采用最小二乘原理直接解算被测目标的空间坐标。经过实际使用, 该方法能稳定、有效地获得目标的位置信息, 与异面交会法相比, 二者的定位误差小于 0.18 m。此方法不仅适用于目标跟踪的实时引导^[10], 同样也可以用于经纬仪的事后处理, 因此具有重要的现实意义。

2 交会原理

2.1 角度测量

电视经纬仪一般由数字式电子经纬仪和固体 CCD 摄像系统组成, 在测量过程中, 前者提供 CCD 摄像机视轴指向的方位角和高低角; 后者摄取目标的图像, 将光信号转换成视频信号, 经模数转换及视频图像处理, 获得目标的空间角度值。

角度测量是指电视经纬仪 n 通过目标在 CCD 像面上的坐标值 (x_{tn}, y_{tn}) , 结合电子经纬仪提供的 CCD 电视经纬仪视轴的方位角和高低角坐标 $(\alpha_{0n}, \lambda_{0n})$, 求出目标的方位角和高低角坐标 (α_n, λ_n) , 与角度测量有关的公式为^[11]

$$\Delta\alpha_n = \arctan\left(\frac{x_{tn}}{f \cos \lambda_{0n} - y_{tn} \sin \lambda_{0n}}\right) \quad (1)$$

$$\lambda_n = \arctan\left[\frac{(f \cos \lambda_{0n} + y_{tn} \sin \lambda_{0n}) \cos \Delta\alpha_n}{f \cos \lambda_{0n} - y_{tn} \sin \lambda_{0n}}\right] \quad (2)$$

$$\alpha_n = \alpha_{0n} + \Delta\alpha_n \quad (3)$$

其中 f 为电视经纬仪的光学系统的焦距。

2.2 多面最小二乘交会法

为了简化多面交会法的推导过程, 不妨以两台电视经纬仪间的交会为基础进行推导, 然后推广到多台电视经纬仪中去, 假设电视经纬仪 $n(n=1, 2)$ 位于 $O_n(x_n, y_n, z_n)$, 则方向向量 $\mathbf{O}_1\mathbf{O}_2 = (x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2 - z_1)$, 测量时可实时获得目标 M 的方位角、高低角为 (α_n, λ_n) , 于是容易求得 O_nM_n 的方向向量分别为 $\mathbf{I}_n = (\cos \alpha_n, \tan \lambda_n, \sin \alpha_n)$ 。

如图 1, 经过直线 O_1M_1 、 O_1O_2 构造平面 $O_1M_1O_2$, 易知平面 $O_1M_1O_2$ 的法向量为 $\mathbf{K}_1 = \mathbf{O}_1\mathbf{M}_1 \times \mathbf{O}_1\mathbf{O}_2$, 即:

$$\mathbf{K}_1 = \begin{vmatrix} i & j & k \\ \cos \alpha_1 & \tan \lambda_1 & \sin \alpha_1 \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \end{vmatrix} \quad (4)$$

为了简化后面的计算, 通常将 \mathbf{K}_1 单位化得到 (A_1, B_1, C_1) , 又因为 O_1 在平面 $O_1M_1O_2$ 内, 则平面 $O_1M_1O_2$ 的方程为

$$A_1x + B_1y + C_1z = D_1, \quad D_1 = A_1x_1 + B_1y_1 + C_1z_1 \quad (5)$$

再以法向量 \mathbf{K}_1 和向量 $\mathbf{O}_1\mathbf{O}_2$ 构造一个与平面 $O_1M_1O_2$ 垂直的平面 O_1M_1P , 同上可知, 平面 O_1M_1P 的法向量 $\mathbf{K}_2 = \mathbf{K}_1 \times \mathbf{O}_1\mathbf{M}_1$, 进行单位化后得到 (A_2, B_2, C_2) , 又因为 O_1 在平面 O_1M_1P 内, 则平面 O_1M_1P 的方程为

$$A_2x + B_2y + C_2z = D_2, \quad D_2 = A_2x_1 + B_2y_1 + C_2z_1 \quad (6)$$

同理, 经过 O_2 点构建两个相交且相互垂直的平面 $O_2M_2O_1$ 和 O_2M_2Q , 于是得到一组关于目标位置的平面方程组:

$$\begin{cases} A_1x + B_1y + C_1z = D_1 \\ A_2x + B_2y + C_2z = D_2 \\ A_3x + B_3y + C_3z = D_3 \\ A_4x + B_4y + C_4z = D_4 \end{cases} \quad (7)$$

设 $\mathbf{P} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 & C_1 \\ A_2 & B_2 & C_2 \\ A_3 & B_3 & C_3 \\ A_4 & B_4 & C_4 \end{bmatrix}$, $\mathbf{W} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$, $\mathbf{D} = \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ D_4 \end{bmatrix}$, 于是式(7)改写为

$\mathbf{PW} = \mathbf{Q}$, 利用最小二乘估计原理^[9, 12], 得到关于目标坐标的唯一解 $\mathbf{W} = (\mathbf{P}^T \mathbf{P})^{-1} \mathbf{P}^T \mathbf{Q}$ 。

如图 1 所示, 若由目标 M 向四个平面分别作垂线, 则 M_1M_2 的长度可由四条垂线长度的平方和求得, 不难看出, 异面交会法是面最小二乘交会法的特例。

当有多个经纬仪跟踪同一目标时, 可以依据上述方法构造相应的平面方程, 反映到式(7), 只是 \mathbf{P} 、 \mathbf{Q} 矩阵增大, 即所利用的测量信息增多, 有利于提高定位精度和实时跟踪捕获能力。

3 试验结果及分析

在某型飞行目标测量任务中, 四台电视经纬仪通过微波组网进行目标的跟踪测量, 目标在电视经纬仪的测量空域内为全被动惯性飞行(即目标没有机动性), 分站利用 PC 机以 20 Hz 的频率采集经纬仪的编码器数据, 通过微波传送到融合中心。融合中心基于 Windows xp 平台用 Visual C++ 6.0 编制程序分别用异面交会法和多面最小二乘交会法进行实时交会, 将二者的交会结果进行比较。

用异面交会法将电视经纬仪 1、2 的实测数据经有效判决后进行计算得到如图 2 所示的曲线(以目标 M 的 X 坐标为例), 用多面最小二乘交会法将所有跟踪有效的电视经纬仪的实测数据经有效判决后进行计算可以得到如图 3 的曲线, 二者的交会计算所得目标的位置值的误差曲线见图 4。

对比图 2 和图 3, 不难看出, 异面交会法所得的数据后半段比多面最小二乘交会法稀疏, 经过事后分析得知经纬仪 1、2 实时跟踪时有丢失目标的现象, 此时若用异面交会法处理必须切换到其他经纬仪的交会数据, 这样容易引起实时交会数据波动, 不利于经纬仪的实时引导。

而多面最小二乘法可以利用其他电视经纬仪的测量信息进行交会, 不存在交会数据的切换, 可以避免交会数据的波动。由图 4 可知, 采用异面交会法和多面最小二乘交会法所得的目标交会数据的误差均小于 0.18 m, 完全可以达到与异面交会法相同的引导效果, 而且不需要频繁切换引导数据源, 具有很好的通用性和实时性。

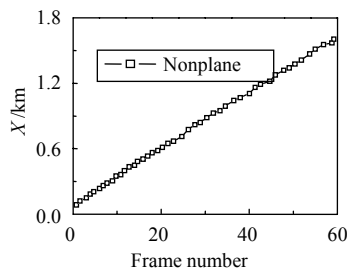


图 2 异面交会法曲线

Fig.2 Curve of the non-plane method

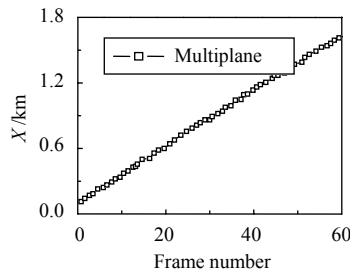


图 3 多面交会法曲线

Fig.3 Curve of the multi-plane method

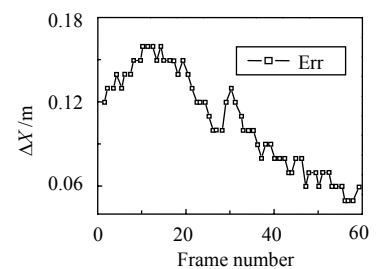


图 4 异面交会法与多面交会法的误差图

Fig.4 Error between the nonplane and multi-plane method

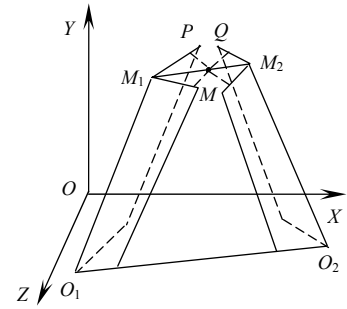


图 1 多面最小二乘交会法

Fig.1 Least square intersection method of multiple planes

结束语

在多台电视经纬仪组网协同测量系统中,为综合利用多台经纬仪的测量信息获取目标的实时位置信息,便于经纬仪的实时引导和试验的后续决策,根据经纬仪实时跟踪目标时的空间几何关系,通过构造多个平面用最小二乘估计方法获取目标的位置信息。结果表明,多面最小二乘交会法和异面交会法的定位误差均小于 0.18 m,因此多面最小二乘交会法不仅适用于目标跟踪的实时引导,同样也可以用于经纬仪的事后处理,具有重要的现实意义。

参考文献:

- [1] Torrieri D J. Statical Theory of Passive Location Systems [J]. **IEEE Trans. on AES**, 1984, **20**(2): 183-198.
- [2] 林秀权. 导弹卫星测控系统工程(上、下)[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996.
LIN Xiu-quan. **Measure and Control Systems Engineering for Missile and Satellite** [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1996.
- [3] 何照才, 胡保安. 光学测量系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
HE Zhao-cai, HU Bao-an. **Optical Measurement System** [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002.
- [4] 刘利生. 外弹道测量数据处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
LIU Li-sheng. **Post-flight Data Processing of Trajectory Measurement** [M]. Beijing: Defence Industry Publishing House, 2000.
- [5] 贾涛, 吴能伟, 陈涛. 光电经纬仪组网测量位置估计的 Cramer-Rao 限[J]. 光电工程, 2005, **32**(7): 4-6, 18.
JIA Tao, WU Neng-wei, CHEN Tao. Cramer-Rao Lower Bounds of Position Estimation in a Photoelectric Theodolite-based Network [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2005, **32**(7): 4-6, 18.
- [6] 吴能伟, 陈涛. 光电经纬仪实时引导的实现[J]. 光子学报, 2007, **36**(10): 1965-1968.
WU Neng-Wei, CHEN Tao. Development of Photoelectric Theodolite Real-time Guide [J]. **Acta Photonica Sinica**, 2007, **36**(10): 1965-1968.
- [7] 周绍光, 熊仁生, 吴圣雄. 交会法测量多弹道方法研究[J]. 测绘学报, 1997, **26**(3): 213-220.
ZHOU Shao-guang, XIONG Ren-sheng, WU Sheng-xiong. Research on the Method of Multiple Trajectories by Intersection [J]. **Acta Geodaetica et Cartographica Sinica**, 1997, **26**(3): 213-220.
- [8] 张玲霞, 马彩文, 陈明, 等. 靶场光电经纬仪多台交会测量数据的一种处理方法[J]. 测绘学报, 2003, **32**(2): 139-142.
ZHANG Ling-xia, MA Cai-wen, CHEN Ming, *et al.* A Data Processing Method on Trajectory Measurement by Intersection in Shooting Range [J]. **Acta Geodaetica et Cartographica Sinica**, 2003, **32**(2): 139-142.
- [9] 闫守峰, 吕凤海, 柳重堪. 基于最小二乘估计的电视经纬仪交会测量算法[J]. 北京航空航天大学学报, 1998, **24**(5): 588-591.
YAN Shou-feng, LÜ Feng-hai, LIU Zhong-kan. Algorithm of Movie Transit Intersection Survey via the Least Square Estimation [J]. **Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics**, 1998, **24**(5): 588-591.
- [10] 梁雁冰, 康磊. 光电经纬仪外引导的实现方法[J]. 光子学报, 2002, **31**(1): 114-116.
LIANG Yan-bing, KANG Lei. The Implement Method of External Guide for Photric Theodolite[J]. **Acta Photonica Sinica**, 2002, **31**(1): 114-116.
- [11] 郝广军, 李林, 黄一帆, 等. 交会测量中具有自适应权因子的最优无偏方法[J]. 光学学报, 2003, **23**(11): 1389-1393.
GAO Guang-jun, LI Lin, HUANG Yi-fan, *et al.* Optimal Unbiased Method with Adaptive Weights in Crossing Measurement [J]. **Acta Optica Sinica**, 2003, **23**(11): 1389-1393.
- [12] 曹正文, 赵健, 高宝建. 基于加权最小二乘法的红外多站定位的研究[J]. 光子学报, 2005, **34**(7): 1001-1004.
CAO Zheng-wen, ZHAO Jian, GAO Bao-jian. The Research of Location about the Infrared Multi-sites System Based on the Weighted Least Square Method [J]. **Acta Photonica Sinica**, 2005, **34**(7): 1001-1004.