

文章编号:1001-2486(2006)05-0114-05

一种单像机对运动目标定位的新方法*

张小虎, 邱 慧, 周 剑, 尚 洋, 李立春, 于起峰

(国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要:运动目标的空间位置确定是光学测量的重要内容,具有十分广泛的工程应用背景。针对无目标距离信息和目标上已知控制点的单像机成像情况,通过假设目标服从某种运动规律,增加目标定位的约束信息,提出了一种单像机对运动目标定位的新方法:共线方程法。仿真计算证明了此方法的正确性和可行性。

关键词:单像机;目标定位;共线方程

中图分类号:TP391 **文献标识码:**A

A New Method for Moving Target Positioning under the Condition of Monocular Camera

ZHANG Xiao-hu, DI Hui, ZHOU Jian, SHANG Yang, LI Li-chun, YU Qi-feng

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

Abstract: Accurate estimation of moving target's position is a very important research area of optical measurement since it has to be performed in many applications. Under the condition that there are no range information of target and known points on the target, such an assumption is made that the target obeys a movement rule is made which adds extra information for target positioning. For moving target positioning under the condition of monocular camera, a new method, collinear equation method, is proposed. The correctness and feasibility of the method are proven by simulation data.

Key words: monocular camera; target positioning; collinear equation

运动目标的空间位置确定问题是摄影测量和计算机视觉领域最古老的问题之一,同时又是最关键最具挑战性的问题,具有十分广泛的工程应用背景,特别是在航天领域,可以用于对导弹等飞行目标的动态测量^[1]、交会对接相对运动参量测量^[2]、空间监视中的多目标跟踪^[3]、卫星编队飞行相对位置姿态测量^[4]等方面。

根据双目视觉基本原理^[5],要求至少两台像机对目标成像,才能实现对目标三维位置的交会测量。但是在很多应用场合,只能得到单像机成像的结果^[6]。在武器试验靶场,光学测量广泛应用于目标外弹道测量。目前靶场光学测量仍以地基测量站为主,但随着新型武器特别是巡航导弹的发展,由于其具有飞行高度低、航程远等特点,现有的地面光学测量点很难覆盖其航程^[7-8]。目前靶场测控飞机上已经安装了用于实况记录的单台摄像机,如果能利用其拍摄的目标图像实现对巡航导弹的定位,则可使光测方法在不增加地面测站的情况下,实现对大航程目标的跟踪测量,极大提高靶场试验能力。

现有的单像机目标定位方法主要有两种,一种是增加测距信息,例如光电经纬仪测角信息结合激光测距实现对目标单站定位^[9];另一种方法是利用目标上多个(三个以上)已知控制点,在得到其像点坐标以及对应关系后,通过迭代算法可以确定像机坐标系与空间坐标系间的相对位置姿态关系^[10-13],从而实现对目标的定位,即摄影测量、计算机视觉领域中所谓“PNP”问题(Perspective-N-Points: N点透视问题)^[10-11]。

但在测控飞机单台摄像机拍摄情况下,无法提供目标距离信息或目标上多个已知控制点,为此需要研究新的单像机运动目标定位方法。本文通过假设目标服从某种运动规律,增加目标定位的约束信息,

* 收稿日期:2006-06-10

作者简介:张小虎(1973—),男,副研究员,在职博士生。

提出了一种单相机运动目标定位新方法——共线方程法。

1 单相机对运动目标定位的新方法

1.1 问题描述

测控飞机单摄像机对运动目标问题可用图 1 表示, $C_1、C_2、C_3、C_4$ 分别为安装在测控飞机上的像机光心, $p_1、p_2、p_3、p_4$ 为对应时刻目标在像面上的像点, $P_1、P_2、P_3、P_4$ 分别为对应时刻目标空间位置。任一时刻 i , 光心与运动目标的连线角度定义如图 2 所示, $\alpha_i、\beta_i$ 分别为连线角度的航向角、偏航角。

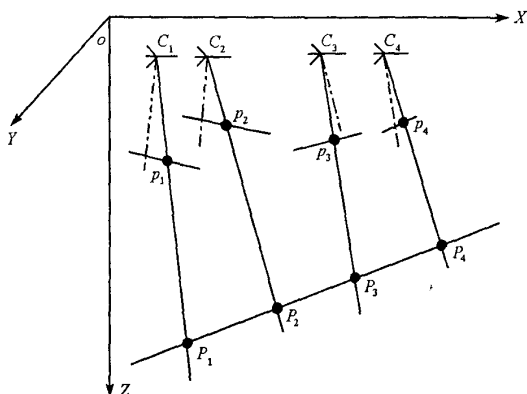


图 1 单相机运动目标定位问题描述
Fig.1 The depiction of the problem of moving target positioning using monocular camera

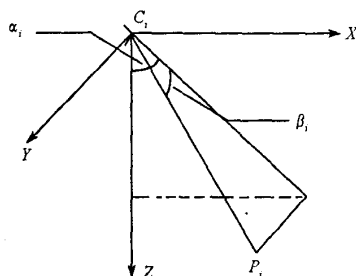


图 2 光心与运动目标的连线角度定义
Fig.2 The definition of the angle of the optical center and the target

安装在测控飞机平台上的摄像机对运动目标连续拍摄图像,测控飞机的空间位置可以通过 GPS 或自身惯性导航设备确定,而摄像机在平台上的安装位置固定,因而在任一时刻摄像机的光心坐标 C_i 是已知的;为了能跟踪拍摄到运动目标,摄像机光轴可以进行航向角、偏航角变化,航向角 α_i 、偏航角 β_i 可以采用测角装置进行测量,目标在图像平面上像点坐标 p_i 可以判读得到^[14],根据像点坐标和光轴的航向角、偏航角可以计算出摄像机光心与运动目标的连线角度^[5];运动目标的坐标位置 P_i 为未知量。综上所述,问题可简化为已知一系列摄像机的光心坐标以及光心与运动目标的连线角度的条件下,对目标的三维坐标进行定位。

1.2 共线方程法原理

从原理上讲,单相机对目标定位必然信息不足。基于某时刻的单幅图像,只能根据光心和像点连线确定目标的方位,无法得到距离信息,也就无法确定其空间位置;基于序列图像,由于目标在不同的时刻处于不同的位置,也无法用交会测量方法对其定位。为此本文通过假设目标服从某种运动规律,例如匀速或匀加速直线运动或更复杂的形式,则不同时刻目标点的位置除了要满足成像关系,还要满足运动规律,这样就为单相机目标定位增加一个约束信息,使单相机目标定位成为可能。根据这一思路,实现了一种单相机对运动目标定位的新方法——共线方程法。

共线方程法的基本原理是用一个参量方程表示目标运动轨迹,根据摄影测量的基本理论,像点、物点与光心共线,将目标运动方程代入共线方程,即可得到关于目标运动参量的线性方程组,进而解算出目标在各时刻的位置。

首先将目标的三维运动用参量方程表示如下:

$$\begin{cases} x_{wt} = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + \dots + a_n t^n \\ y_{wt} = b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + \dots + b_n t^n \\ z_{wt} = c_0 + c_1 t + c_2 t^2 + \dots + c_n t^n \end{cases} \quad (1)$$

其中 $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n, b_0, b_1, b_2, \dots, b_n, c_0, c_1, c_2, \dots, c_n$ 为待定参量, x_{wt}, y_{wt}, z_{wt} 为 t 时刻目标三维位置

坐标。用此参量方程可以灵活表达目标的三维运动规律。

根据摄影测量的基本理论,像点、物点与光心共线,可得到共线方程^[15]:

$$\begin{cases} (r_{31}X_i - fr_{11})x_{wt} + (r_{32}X_i - fr_{12})y_{wt} + (r_{33}X_i - fr_{13})z_{wt} = t_x - t_zX_i \\ (r_{31}Y_i - fr_{21})x_{wt} + (r_{32}Y_i - fr_{22})y_{wt} + (r_{33}Y_i - fr_{23})z_{wt} = t_y - t_zY_i \end{cases} \quad (2)$$

其中 x_{wt}, y_{wt}, z_{wt} 为 t 时刻目标三维位置坐标, X_i, Y_i 为 t 时刻目标的图像坐标, $r_{11}, r_{12}, \dots, r_{33}, t_x, t_y, t_z$ 可在图像上测量得到,是由像机光心坐标和光轴角度(航向和旁向角度)确定的像机外参量,焦距 f 是像机内参量,像机内外参量已知。将(2)式代入(1)式,得到关于 $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n, b_0, b_1, b_2, \dots, b_n, c_0, c_1, c_2, \dots, c_n$ 的线性方程组:

$$\begin{cases} (r_{31}X_i - fr_{11})(a_0 + a_1t + a_2t^2 + \dots + a_nt^n) + (r_{32}X_i - fr_{12})(b_0 + b_1t + b_2t^2 + \dots + b_nt^n) \\ \quad + (r_{33}X_i - fr_{13})(c_0 + c_1t + c_2t^2 + \dots + c_nt^n) = t_x - t_zX_i \\ (r_{31}Y_i - fr_{21})(a_0 + a_1t + a_2t^2 + \dots + a_nt^n) + (r_{32}Y_i - fr_{22})(b_0 + b_1t + b_2t^2 + \dots + b_nt^n) \\ \quad + (r_{33}Y_i - fr_{23})(c_0 + c_1t + c_2t^2 + \dots + c_nt^n) = t_y - t_zY_i \end{cases} \quad (3)$$

对应于每一时刻 t ,都可得到以上两个方程,根据运动模型选取的不同(参量 $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n, b_0, b_1, b_2, \dots, b_n, c_0, c_1, c_2, \dots, c_n$ 个数不同),取足够多时刻的数据即可对待定运动参量求解,从而对目标定位。例如取运动参量取为 $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2, c_0, c_1, c_2$ 9个待定量,需要最少5个时刻的数据,如果有更多时刻的数据,则可以进行最小二乘求解。

2 仿真数据及其分析

为了验证上述方法的正确性与可行性,用仿真数据对其进行了考核。首先以接近实际条件设定目标和测控飞机的运动规律,生成一组目标空间位置坐标和光心坐标,并计算出对应的光心与目标连线夹角理论值,考虑到实际情况下光心坐标、光心与目标连线夹角等参量都会存在误差,还需要对这些参量加入不同水平的噪声后,代入方程组(3)解算出目标空间位置坐标,与仿真条件设定的目标空间位置坐标进行比对,验证方法的正确性并统计其精度。

影响本方法的误差可以归为两类,即光心坐标误差、光心与目标连线角度误差。下面分别对其进行分析:

(1) 光心坐标误差

由于像机固定于测量平台上,像机相对于平台中心的位置不难精确获得,因此光心坐标误差主要来源于平台自身定位误差。目前平台主要采用GPS或惯导系统定位,精度一般可保证5m左右;如果采用差分GPS,则可保证0.5~1m的精度。

(2) 光心与目标连线角度误差

光心与目标连线角度误差主要取决于测角设备的误差以及目标图像坐标提取误差。目前在测控飞机平台上使用的测角设备的误差在1分左右,而目标图像坐标提取误差采用自动图像判读系统^[14]一般可控制在0.5像素,在成像器件像元尺寸为10 μ m,焦距为0.5m的条件下,图像坐标提取误差引起的角度误差2角秒,因此测角设备的误差是主要误差源。

仿真条件设定为:

(1) 测控飞机运动方程为

$$\begin{cases} x_{\alpha} = 170t + t^2 \\ y_{\alpha} = 0 \\ z_{\alpha} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

(2) 目标运动方程为

$$\begin{cases} x_{wt} = 803.85 + 195t \\ y_{wt} = 832.20 + 20t \\ z_{wt} = 3000.00 + 20t \end{cases} \quad (5)$$

由此不难得到 t 时刻光心与目标夹角。航向角理论值为 $\alpha_i = \arctan \frac{x_{ut} - x_{ct}}{z_{ut} - z_{ct}}$, 旁向角理论值为 $\beta_i = \arcsin \frac{y_{ut} - y_{ct}}{(x_{ut} - x_{ct})^2 + (y_{ut} - y_{ct})^2 + (z_{ut} - z_{ct})^2}^{\circ}$

在此条件下,取相邻两时刻的时间间隔为 0.1s,分别取历时为 24s、28s、...40s 等情况进行计算,解出目标运动参量后代入运动方程(1)得到每个时刻的坐标,与仿真条件中设定的坐标进行比较统计定位误差,对每种历时取值计算 100 次统计最终的定位误差。加入的角度噪声(航向和旁向角度噪声相同)以及光心坐标噪声服从零均值高斯分布。图 3 给出了历时 28s,初始航向、旁向倾角 15°,GPS 误差 0.5m,角度误差 30 角秒的仿真条件下,目标点的实际计算坐标与理想坐标的分布。

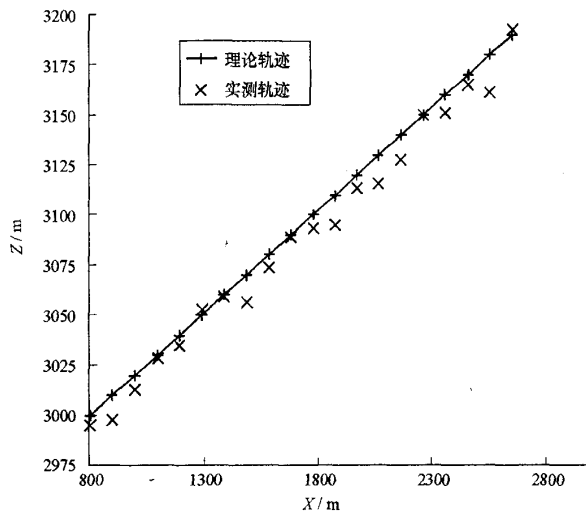


图 3 目标点的实际计算坐标与理想坐标的分布

Fig.3 The distribution of the calculated coordinates and the ideal coordinates of the target

将目标定位误差(均方差)与历时、角度噪声和光心坐标噪声的关系用曲线表示为如图 4、5 所示。

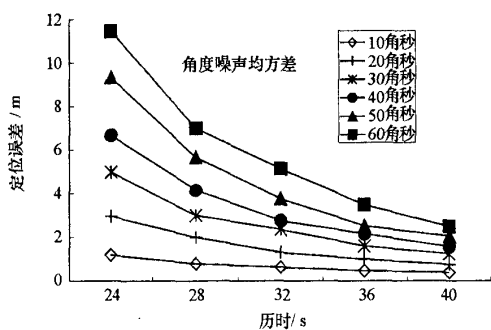


图 4 目标定位误差(均方差)与历时、角度噪声关系曲线(光心坐标噪声为零)

Fig.4 The relation curve of the positioning error and the lasting time and error of angle

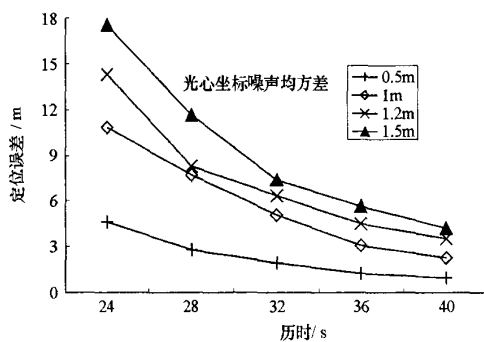


图 5 目标定位误差(均方差)与历时、光心坐标噪声关系曲线(角度噪声为零)

Fig.5 The relation curve of the positioning error and the lasting time and error of coordinate of optical center

由以上仿真结果可见:降低角度噪声和光心坐标噪声可提高目标定位精度,计算时采用的历时越长,则定位精度越高,但历时加长后,会破坏目标在小时间段内保持匀速直线运动这一假设的合理性,而且历时超过 30s 后,从图 4、5 可知对精度提高已不显著。仿真结果证明了方法的正确性,并且在考虑误差的情况下,定位精度达到了 10m 量级,可满足工程实用要求。

3 结论

提出并实现了一种单像机运动目标定位的新方法——共线方程法。仿真计算证明了此方法的正确性和可行性,在保证系统测角精度和光心坐标定位精度足够高的条件下,此方法可以给出工程上实用的目标定位结果。由于本文提出的方法无需目标距离信息或目标上已知控制点,在其它单像机成像场合也有较好的应用前景,例如在空间侦察与对抗任务中,己方卫星对目标的单目观察;在潜艇对海、空目标的观察工具潜望镜中得到的目标单目序列图像等。

参考文献:

- [1] 石培新. 巡航导弹飞行试验所使用的关键靶场设备[J]. 飞航导弹, 2000(3): 26-31.
- [2] 杜小平, 赵继广, 崔占忠, 等. 基于计算机视觉的航天器间相对状态测量系统[J]. 光学技术, 2003, 29(6): 664-666.
- [3] 樊祥. 光电攻击在反卫星侦察、预警方面的应用[J]. 航天电子对抗, 2000(4): 33-37.
- [4] 郑庆晖, 张育林. 编队飞行相对位置姿态测量算法及实验[J]. 国防科技大学学报, 2003, 25(2): 19-24.
- [5] 金为铤. 摄影测量学[M]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1996.
- [6] Lepetit V. Monocular Model-based 3D Tracking of Rigid Objects[M]. Now Publishers Inc., 2005.
- [7] 李洲. 测量飞机对巡航导弹的跟踪[J]. 飞航导弹, 2000(5): 51-56.
- [8] 高德平. 巡航导弹的试验与鉴定[J]. 飞航导弹, 1997(10): 9-17.
- [9] 刘利生. 外测数据事后处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- [10] Fischler M A, Bolles R C. Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography[C]. Communications of the ACM, 1981, 24(6): 381-395.
- [11] 汤建良. 透视 n 点定位 (PnP) 问题研究[D]. 中国科学院数学与系统科学研究院, 2003.
- [12] Horand R, Conio B, Leboulloux O. An Analytic Solution for the Perspective 4-Point Problem[C]. CVGIP, 1989, 47: 33-44.
- [13] 胡占义, 雷成, 吴福朝. 关于 P4P 问题的一点讨论[J]. 自动化学报, 2001, 27(6): 770-776.
- [14] 王颖, 张小虎. 视频图像记录判读系统[J]. 光学技术, 2003, 29(2).
- [15] 于起峰, 等. 基于图像的精密测量与运动测量[M]. 北京: 科学出版社, 2002.

(上接第 108 页)

参考文献:

- [1] 汤国安, 刘学军, 等. 数字高程模型及地学分析的原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [2] 戴博, 肖晓明, 蔡自兴. 移动机器人路径规划技术的研究现状与展望[J]. 控制工程, 2005, 12(3): 198-202.
- [3] Khatib O. Real-time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots[J]. The International Journal of Robotics Research, 1986, 5(1): 90-98.
- [4] Goldberg S B, Maimone M W, Matthies L. Stereo Vision and Rover Navigation Software for Planetary Exploration[C]. Proc. IEEE Aerospace Conference, Big Sky, USA, March 2002.
- [5] Urmsion C P, et al. Stereo Vision Based Navigation for Sun-synchronous Exploration[C]. Proc. of IEEE/RSJ Conference on Intelligent Robots and Systems, October 2002.
- [6] Singh S, et al. Recent Progress in Local and Global Traversability for Planetary Rovers[C]. Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Francisco, USA, April 2000.
- [7] Gennery D B. Traversability Analysis and Path Planning for a Planetary Rover[J]. Autonomous Robots, 1999.
- [8] Kelly A, Stentz A. Rough Terrain Autonomous Mobility-Part 1: A Theoretical Analysis of Requirements[J]. Autonomous Robots 5, 1998: 129-161.

