

空中目标运动参数实时测量系统*

关棒磊,曹毓,杨夏,周朗明,张小虎

(国防科技大学 航天科学与工程学院,湖南 长沙 410073)

摘要:为了实现对飞机等远距离空中目标运动参数的实时测量,设计了目标自动跟踪测量系统,并对该系统的硬、软件组成及关键技术进行了研究。组建验证样机,进行软件框架设计及功能模块分析,通过实测实验详细测试了系统的工作性能。静态验证实验结果表明:测距结果稳定在1mm以内,方位测量结果稳定在5°以内。动态验证实验结果表明:对运动目标的实时测距误差为2mm,实时测距频率为5Hz;方位测量误差为0.05°,姿态测量误差维持在0.2°以内,方位和姿态实时测量频率均为20Hz。因此,系统满足空中目标运动参数稳定可靠、高精度的自动实时测量需求。

关键词:摄像测量;激光测量;运动目标;远距离;测量系统

中图分类号:TP873 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2014)06-053-07

Real-time measurement system for motion parameters of aerial target

GUAN Banglei, CAO Yu, YANG Xia, ZHOU Langming, ZHANG Xiaohu

(College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: An automatic tracking measurement system was designed to achieve real-time measurement for motion parameters of long-range air targets, such as aircraft. Hardware, software and key technologies were described in this system. The prototype was made and tested, the software structure design and corresponding functional modules were analyzed. Multiple experiments are presented to testify the working performance of the system. The static verification experiment indicates that the ranging results are stable within 1mm and the azimuth measurement results are stable within 5°. And the dynamic verification experiment indicates that the ranging error of moving target is 2 mm, the ranging frequency is 5Hz, the azimuth measurement error is 0.05°, and the posture measurement error is maintained at a level less than 0.2°, the real-time measurement frequency of azimuth and posture are 20Hz. From the above analysis, the system can provide a stable, reliable and high precision automatic real-time measurement when testing motion parameters of aerial target.

Key words: video measurement; laser measurement; moving target; remote measurement; measurement system

在飞机着舰训练、靶场目标观测等大型试验中,需要实时采集运动目标信息,并处理得到所需要的目标运动轨迹等特性参数。受目标运动轨迹不可预知、外形尺寸较大及其他原因的影响,非接触的运动参数测量方法目前使用较为广泛^[1-2]。

非接触测量方法主要有以下两种:1)利用电视、激光等手段对运动目标进行自动跟踪测量,测量精度较高,如光电经纬仪^[3]、电视望远镜^[4]等。2)使用视觉测量方法实现目标运动参数的测量,其具有近距离条件下精度高、速度较快等优点,目前在某些领域得到具体的应用,如无人机视觉引导助降^[5]、飞行器姿态测量^[6]及靶场目标三维姿态分析^[7]等。

在测量远距离目标运动参数时,单独采用以

上方法不仅需要一系列复杂且昂贵的硬件和电路,还需要精密的装配和测试^[8]。本文结合两类方法的各自优势,设计出一套容易实现、对硬件要求不高、精度速度满足要求的空中目标运动参数实时测量系统。

1 空中目标运动参数实时测量系统的构成及其工作原理

1.1 系统的硬件构成

空中目标运动参数实时测量系统主要负责0.2~10km范围内目标位置、方位和姿态等参数的实时测量。图1为系统结构图,该系统主要由二维电动转台、激光测距机、摄像机和工业控制计

* 收稿日期:2014-05-27

基金项目:国家重点基础研究发展计划资助项目(2013CB733100)

作者简介:关棒磊(1991—),男,湖北潜江人,博士研究生,E-mail: banglei0909@126.com;

杨夏(通信作者),男,副研究员,博士,E-mail: mr_honson@163.com

算机组成。激光测距机和姿态像机均安装在二维电动转台上,方位像机安装在平台上,其中方位像机为大视场像机,用于测量目标的方位,姿态像机为小视场像机,用于测量目标的姿态。

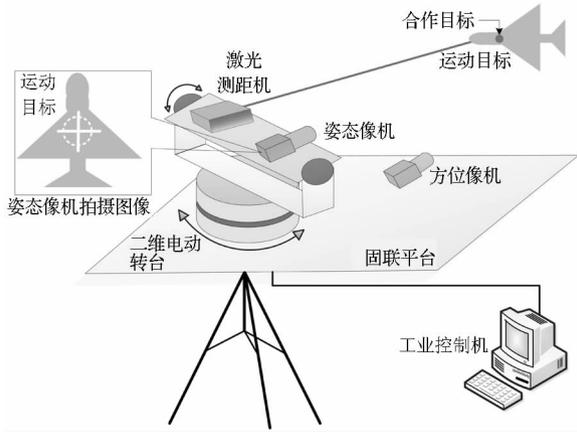


图 1 空中目标运动参数实时测量系统结构图
Fig. 1 Structure of real-time measurement system for motion parameters of aerial target

1.2 系统的工作原理

系统工作流程如图 2 所示。首先方位像机自动识别位于待测运动目标上的合作目标并计算出其方位偏差(脱靶量),控制计算机驱动二维转台运动,补偿该方位偏差;姿态像机随即捕获空中目标,求解目标姿态;与此同时,激光测距机按照固定频率测量目标的距离。另外,通过姿态像机获得的图像还用于进一步高精度计算目标的图像脱靶量,并实时校正二维转台的指向,形成闭环控制,从而实现对目标的稳定跟踪。

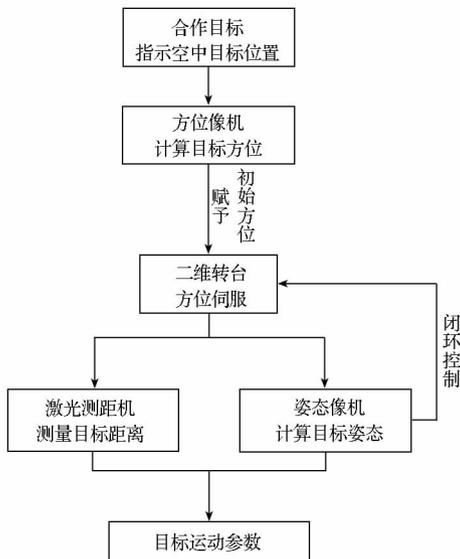


图 2 系统工作流程图
Fig. 2 Flow chart of system function

2 空中目标运动参数实时测量系统的关键算法

2.1 合作目标在图像中的提取与定位

系统中采用在待测运动目标上加装高亮度红外合作标志灯的方式来实现目标的准确定位,红外灯波长为 850nm。为克服强烈日光条件下的杂散光干扰和便于红外灯在图像中的准确定位,在方位像机镜头前加装相应波长的窄带滤光片,只让合作标志灯发出的红外光通过,效果如图 3 所示。

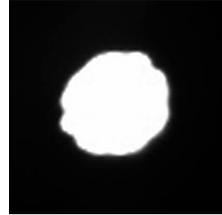


图 3 红外标志灯在方位像机中的成像效果
Fig. 3 Infrared mark light's image in azimuth camera

从图 3 中可见,合作目标成像较为符合高斯形的灰度分布,因此采用高斯形光斑匹配可较好地实现目标精确定位。然而在实际使用中发现,单一的点光源亮度有限,合作目标在一定距离以外的成像亮度小,在图像上难以提取定位,因此需要将多个点光源组合在一起使用,其成像效果如图 4 所示。此时采用高斯形光斑匹配很容易误定位到组合灯组中的点光源个体。

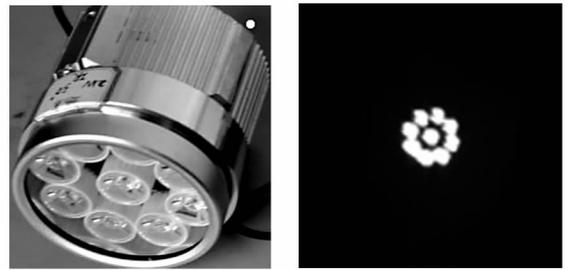


图 4 组合灯组的成像效果
Fig. 4 Combination lamp's image in azimuth camera

针对以上问题,系统组合采用“灰度投影 + 质心提取 + 模板匹配”的方式解决组合灯组条件下合作目标的高精度定位问题,算法性能稳定,运算速度满足目标实时提取定位需求。具体如下:

首先,获得合作目标在图像中的大致坐标。将图像沿着水平和垂直两个方向进行灰度投影,其投影公式为:

$$G_{hor}(i) = \sum_j G_k(i, j) \quad (1)$$

$$G_{ver}(j) = \sum_i G_k(i, j) \quad (2)$$

式(1)、式(2)中 $G_{khor}(i)$ 和 $G_{kver}(j)$ 分别为第 k 帧图像中第 i 行和第 j 列的灰度投影; $G_k(i, j)$ 为第 k 帧图像 (i, j) 位置处的灰度值。进一步,定位合作目标的初始像素坐标 (x, y) :

$$G_{kver}(j) \Big|_{j=x} = \max_j(G_{kver}(j)) \quad (3)$$

$$G_{khor}(i) \Big|_{i=y} = \max_i(G_{khor}(i)) \quad (4)$$

图5为图4中组合灯组图像水平和垂直方向的灰度投影曲线,曲线的峰值点分别对应合作目标图像在水平和垂直方向上的初始像素坐标值。

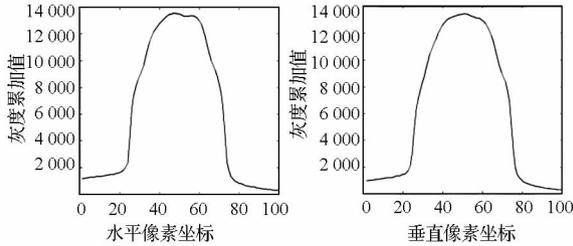


图5 组合灯组图像水平和垂直方向的灰度投影曲线
Fig. 5 Gray projection curves of combination lamp's image in the horizontal and vertical directions

然后,以合作目标初始像素坐标 (x, y) 为中心,采用区域生长方法获得合作目标的成像范围,在此范围内使用模板匹配的方法进行精确定位。为获得更快的定位速度和提高定位稳健性,该步骤也可辅助使用灰度质心法,获得亚像素级的灰度质心坐标。该方法得到的定位精度与选择的计算步长有关:步长选取越小,精度越高,但耗时越长。实验测试结果表明,步长为 0.01 像素时,灰度质心法定位结果的静态标准差约 0.03 像素,选择更小的步长对提高精度无益。因此结合作目标的实际情况,合理地选择步长,兼顾定位精度和实时性能。

2.2 运动目标的轨迹预测和跟踪

为确保系统的实时性,系统采用 Singer 模型的 Kalman 滤波预测红外标志灯的运动轨迹,仅根据当前时刻目标的位置信息构建基于 Singer 模型的 Kalman 预测方程,对图像中目标位置进行估计,然后在预测点的极小范围内实现对合作目标的高精度定位,并提前控制转台转向。根据 Singer 模型,目标位置信息的 Kalman 状态方程和测量方程如下^[9-10] :

$$\begin{cases} X(t + \Delta t) = \Phi(\Delta t, a_u, a_v)X(t) + \zeta(t) \\ Z(t + \Delta t) = HX(t + \Delta t) + v(t) \end{cases} \quad (5)$$

其中, $\zeta(t)$ 和 $v(t)$ 分别表示过程噪声和测量噪声, a_u 和 a_v 分别表示 x 和 y 方向的机动时间常数的倒数,滤波状态 $X(t)$ 、状态转移矩阵 $\Phi(\Delta t)$,

a_u, a_v) 和观测矩阵 H 分别如下所示:

$$X(t) = [u(t) \quad \dot{u}(t) \quad \ddot{u}(t) \quad v(t) \quad \dot{v}(t) \quad \ddot{v}(t)]^T \quad (6)$$

$$\Phi(\Delta t, a_u, a_v) = \begin{bmatrix} \Psi(\Delta t, a_u) & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \Psi(\Delta t, a_v) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式(7)中

$$\Psi(\Delta t, a_u) = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t & \frac{1}{a_u^2}(-1 + a_u \Delta t + e^{-a_u \Delta t})^2 \\ 0 & 1 & \frac{1}{a_u}(1 - e^{-a_u \Delta t})^2 \\ 0 & 0 & e^{-a_u \Delta t} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\Psi(\Delta t, a_v) = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t & \frac{1}{a_v^2}(-1 + a_v \Delta t + e^{-a_v \Delta t})^2 \\ 0 & 1 & \frac{1}{a_v}(1 - e^{-a_v \Delta t})^2 \\ 0 & 0 & e^{-a_v \Delta t} \end{bmatrix} \quad (10)$$

根据式(5),目标位置估计的 Kalman 滤波算法为:

$$\begin{cases} X^-(t + \Delta t) = \Phi X(t) \\ P_{t+\Delta t}^- = \Phi P_t \Phi^T + Q(t) \\ K_{t+\Delta t} = P_{t+\Delta t}^- H^T [HP_{t+\Delta t}^- H^T + R_e]^{-1} \\ X(t + \Delta t) = X^-(t + \Delta t) + K_{t+\Delta t} [Z(t + \Delta t) - HX^-(t + \Delta t)] \\ P_{t+\Delta t} = [I_{2 \times 2} - K_{t+\Delta t} H] P_{t+\Delta t}^- \end{cases} \quad (11)$$

其中, $Q(t)$, R_e 和 P 分别为过程噪声、测量噪声和估计误差的协方差矩阵; K 为 Kalman 滤波增益矩阵。

系统通过 Singer 模型的 Kalman 滤波预估下一时刻目标位置,结合合作目标精确提取定位,实现运动目标跟踪。在对目标实施连续跟踪的过程中,由于障碍物遮挡等原因可能会导致目标在图像中暂时丢失。根据目标消失时间的长短,采用相应算法以达到稳定跟踪的目的。若目标消失后短时间内随即重现(可能是飞鸟遮挡光路所致),为保证出现后的光斑为目标本身,可利用消失前的光斑图像作为模板进行模板匹配,在达到一定置信度后对其实施跟踪;若目标消失时间过长(可能是云层遮挡或航向偏离所致),目标光斑的灰度形状可能发生较大变化,则采用“灰度投影 + 质心提取 + 模板匹配”的方法重新确认目标。

2.3 运动目标距离、方位和姿态的测量

系统工作前,对系统进行快速标定,保证激光测距机光束、姿态像机主光轴和方位像机主光轴大致平行。系统对目标跟踪测量时,激光测距机按照固定频率测量目标的距离,根据目标相邻时刻的距离测量值可进一步计算速度、加速度等参数。

方位像机对目标进行实时方位测量时,已知其图像分辨率、镜头焦距 F 和传感器像元尺寸 (d_x, d_y) 。设获得的合作目标 T 在第 k 帧图像中的坐标为 (x_k, y_k) ,令图像中心 (C_x, C_y) 为方位角度的零点,则可依据式(12)算得其对应的方位角 θ_h^k 和俯仰角 θ_v^k 。

$$\begin{cases} \theta_h^k = \arctan\left(\frac{d_x \times (x_k - C_x)}{F}\right) \\ \theta_v^k = \arctan\left(\frac{d_y \times (y_k - C_y)}{F}\right) \end{cases} \quad (12)$$

系统通过单像机测量目标姿态,须事先标定初始时刻摄像机的内外参数;跟踪测量时,根据转台的转动角度和两者的固联关系,实时更新摄像机的外参数。系统首先采用相关法自动提取 4 个以上目标特征点的图像坐标;然后根据运动目标的已知模型和摄像机的内外参数,采用正交迭代算法解算目标姿态^[11]。运动目标姿态参数的解算流程如图 6 所示。

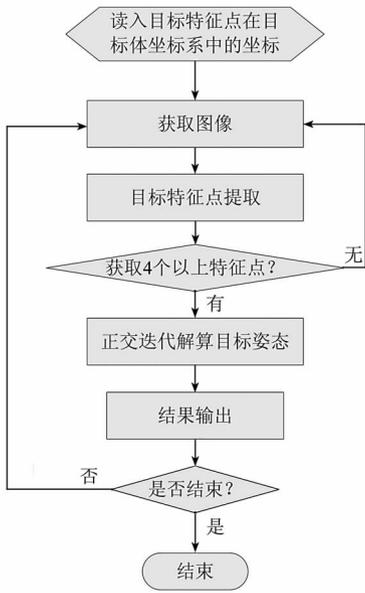


图 6 目标姿态参数解算流程

Fig. 6 Flow chart of solving target's posture parameters

3 系统测量实验与结果

3.1 实验的系统硬件及软件组成

空中目标运动参数实时测量验证系统主要由

激光测距机、摄像机、两轴精密转台和计算机组成。摄像机均为 PointGREY 公司的 GrassHopper 数字摄像机,最大分辨率为 2448pixel × 2048pixel,像机镜头采用 Kowa 公司的定焦镜头,其中方位像机镜头焦距为 50mm,姿态像机镜头焦距为 100mm;激光测距机为 Dimetix 公司的 DLS - B15 型激光测距机,最大测距为 200m,最小测距为 0.2m,测距精度为 1.5mm;两轴转台为 FLIR 公司的 PTU - D48E 型二维电动转台,转角精度为 0.003°;计算机为 ADLINK 公司的工业控制计算机,内存为 3.00GB,CPU 频率为 2.66GHz。



图 7 验证系统实物图

Fig. 7 The image of the prototype system

目标的距离数据由载于二维转台上的激光测距机测量得到,采用相位式激光测距,最大测量频率为 5Hz,而系统中两台摄像机均工作在 20Hz 的帧频下,由于硬件条件的限制,导致距离数据采样率不足。此外,考虑到二维转台的转角精度为 0.003°,在本系统硬件配置条件下,该转角对应的像素偏移约 0.3 像素,因此灰度质心法的步长设定为 0.2 像素较为适宜,这样可兼顾定位精度和实时性能。

系统首先控制方位像机和姿态像机在目标运动过程中不间断地同步拍摄目标,并通过二维电动转台实现对运动目标的跟踪锁定,期间激光测距机以固定频率对目标实施测距;然后将拍摄得到的图像和测距数据经千兆网络传送至系统进行实时图像分析、数据处理与显示,获得目标的多维运动参数,为用户提供数据支撑。系统软件的工作界面如图 8 所示。系统软件的模块化组成如图 9 所示。

其中各模块的功能如下。

硬件控制模块:主要实现像机的采集、传输、存储图像控制,像机间的切换,激光测距机的连续测量等;

硬件标定模块:用于像机和激光测距机等设备相关参数的标校;

图像分析模块:用于对运动目标进行自动检

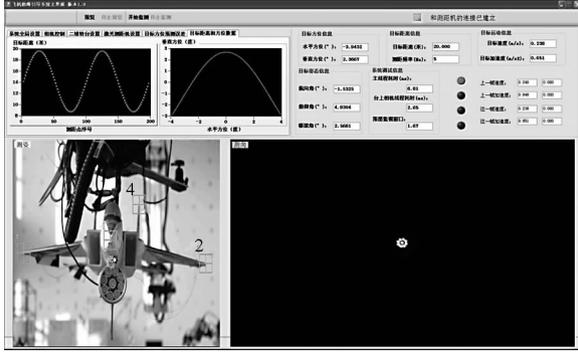


图 8 系统软件工作界面

Fig. 8 The working interface of system software

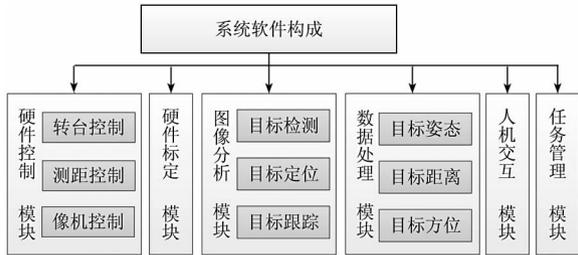


图 9 系统的软件构成

Fig. 9 The software composition block diagram of the system

测、识别和跟踪;

数据处理模块:用于实时计算目标的各项运动参数,包括距离、方位、姿态等,并给出目标运动轨迹;

人机交互模块:用于实时显示目标图像及目标运动状态等;

任务管理模块:用于管理相关的测量数据,便于随时查看和分析。

3.2 系统静态测量稳定性测试

为验证系统在目标静止状态下方位和距离测量的稳定性,进行了静态实验,合作目标静止不动,放置位置距离系统约 22m。

1) 静态测距稳定性测试

为保证最佳的测距精度,系统开机后让测距机预先工作约半分钟。静态实验中系统以 5Hz 频率共采集到距离数据 1621 个,其分布曲线如图 10 所示。该组数据的均值为 22.107 3m,标准差为 0.354mm,测量结果与均值的最大误差为 0.9mm。

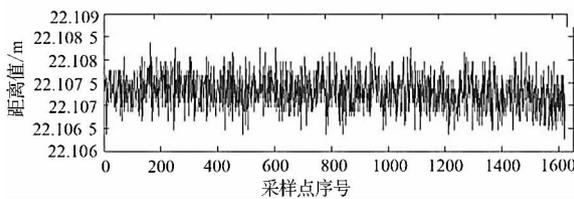


图 10 静止目标的距离测量曲线

Fig. 10 The distance measurement curve of static target

由以上初步测试结果可见,该型测距机(Dimetix 公司 DLS - B15)所标称的 1.5mm 测距精度是可信的。

2) 静态方位解算稳定性测试

系统以 20Hz 频率共采集到合作目标方位数据 12 767 对(含方位角和俯仰角)。目标的方位角分布曲线如图 11 所示,该组数据的均值为 0.401°,标准差为 0.916",测量结果与均值的最大误差为 3.838"。

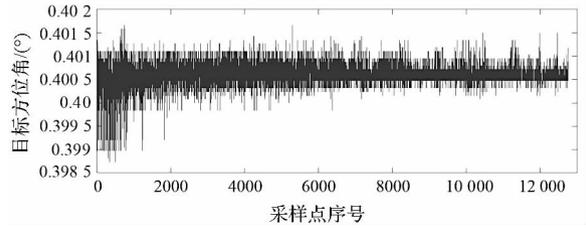


图 11 静止目标的方位角测量曲线

Fig. 11 The azimuth angle measurement curve of static target

目标的俯仰角分布曲线如图 12 所示,该组数据的均值为 -1.812°,标准差为 0.839",测量结果与均值的最大误差为 2.328"。

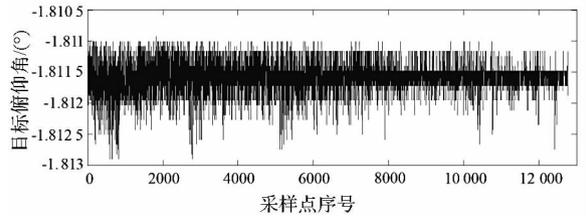


图 12 静止目标的俯仰角测量曲线

Fig. 12 The elevation angle measurement curve of static target

由上述结果可见,静态短距离条件下,系统对目标的距离测量结果稳定在 1mm 以内,而方位测量结果稳定在 5"以内。

3.3 系统动态测量性能验证实验

为进一步测试系统的跟踪性能和动态测量精度,将目标固定在六自由度大型桁车上,在目标移动过程中对其实施不间断地跟踪测量。目标实际运动参数通过双目视觉测量确定,将系统的测量结果与双目视觉的测量结果进行对比,结果如下。

1) 测距实验

控制桁车前后移动,首先向靠近系统的方向移动约 6m,然后沿原路返回约 5m。目标前后移动可保证其距离在测量过程中发生较大变化,主要用于测试系统的距离动态测量精度。为准确论证动态测距的精度,系统快速标定后,在初始激光光斑处安装平面靶标,确定目标姿态变化时,激光测距机始终测量目标固联的平面靶标。实验中系统测量的目标距离变化曲线如图 13 所示。

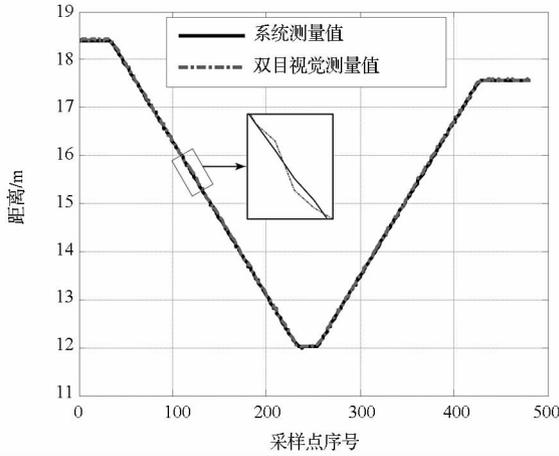


图 13 运动目标距离测量曲线

Fig. 13 The distance measurement curve of moving target

图 13 中系统距离测量结果与双目测量结果的趋势一致,测距误差的标准差为 2mm,说明系统的测距精度较高。同时从图 13 中可以发现,目标的距离变化是线性的,这与控制桁车基本是匀速地前后运动的实际情况吻合较好。

2) 测向实验

目标前后运动的过程中,其方位也随之改变,而且来回地往复运动导致方位变化也呈现出明显的 V 字形,图 14 和图 15 分别为目标的方位角和俯仰角变化曲线。对比双目视觉的方位测量结果,两者的趋势大体一致,但系统的方位测量结果更平滑、稳定,其中方位角和俯仰角误差的标准差均为 0.05° 。

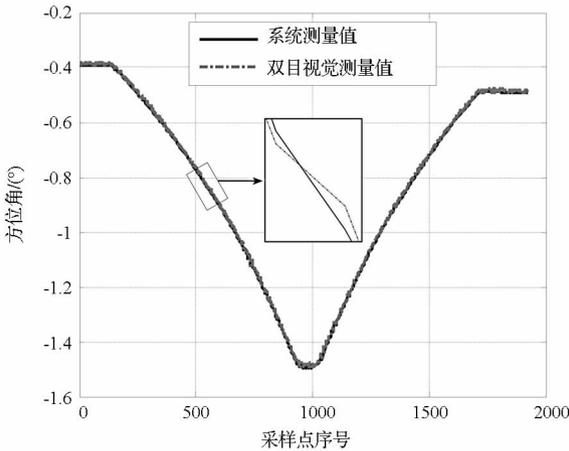


图 14 运动目标方位角测量曲线

Fig. 14 The azimuth angle measurement curve of moving target

3) 测姿实验

通过桁车控制目标在三个自由度上同时进行姿态变化,目标向前运动时偏航方向变化约 10° ,俯仰方向变化约 7° ,翻滚方向变化约 5° ;目标向后运动时沿反方向恢复至初始姿态。系统自动识别提取目标各特征点的图像坐标,如图 16 所示。

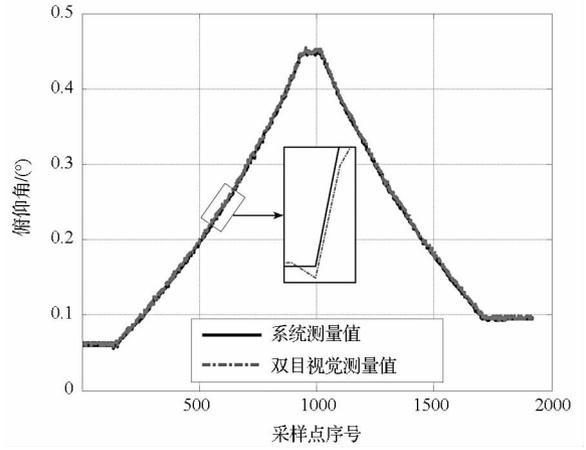


图 15 运动目标俯仰角测量曲线

Fig. 15 The elevation angle measurement curve of moving target

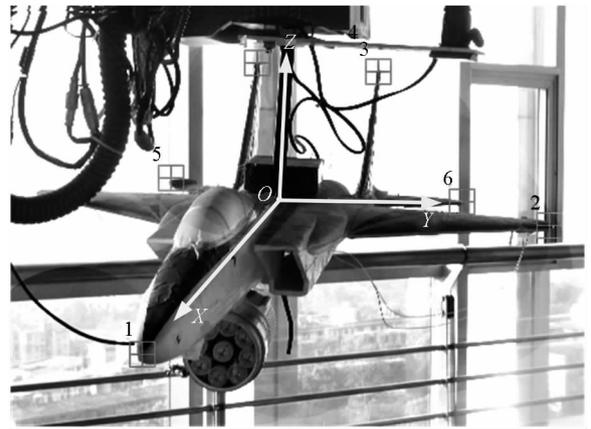


图 16 目标体坐标系定义及特征点提取情况

Fig. 16 The coordinates of target body and the extraction of feature points

通过正交迭代实时解算目标姿态,图 17 为实验中目标姿态的变化曲线,不难发现,系统测姿结果和双目测姿结果趋势基本一致,偏航、俯仰方向误差的标准差均为 0.1° ,翻滚方向误差的标准差为 0.2° 。

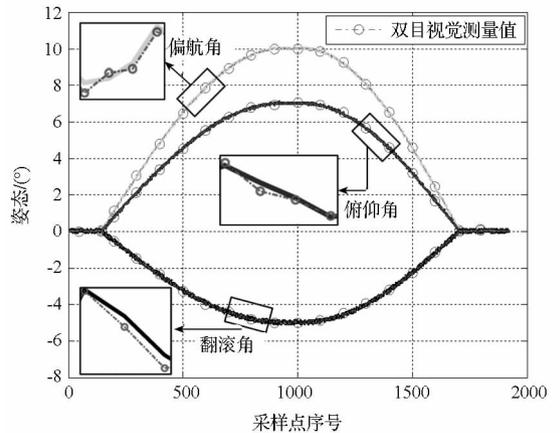


图 17 运动目标姿态测量曲线

Fig. 17 The pose measurement curve of moving target

3.4 实验结果讨论

实验中通过双目视觉测量确定目标的实际运动参数,双目视觉在近距离条件下精度较高^[12],其距离精度为0.5mm,角度精度为0.02°,因此把双目视觉的测量结果作为目标运动参数的真值较为合理。静态、动态实验证明该系统具有较高精度和较强稳定性。对于静止目标,测量结果稳定,无明显偏差;对于运动目标,跟踪测量情况良好,满足实时性要求,测量结果与实际运动情况吻合较好。

影响系统测量精度的因素主要有激光测距机的测距精度、转台的转角精度、红外标志灯的定位精度以及目标特征点的提取精度等。实验中距离测量频率为5Hz,而方位和姿态测量频率可达20Hz,针对验证系统中距离数据采样率不足的问题,实验后期可以通过插值的方式将距离数据采样率补齐至20Hz。

在实际应用中,空中目标运动参数测量系统主要负责0.2~10km远距离空中目标运动参数的实时测量,相比原理样机,需要选用大量程、高性能的设备。其中两维电动转台选用负载能力更强、转动精度更高的转台,便于运动目标的稳定跟踪测量;激光测距机选用脉冲式激光测距机,测程长,测距精度优于 $0.05\text{m} + 0.1\%D$ (D 为距离,单位:m);方位像机选用长波红外像机,便于运动目标的准确定位,保证目标方位测量精度;姿态像机采用电动三可变镜头,通过调节焦距、光圈和对焦,使运动目标成像清晰且在图像中占据较大视场范围,便于运动目标特征点的提取,保证姿态测量精度。

4 结论

本文根据空中目标自动实时跟踪测量的需求,设计了一套空中目标运动参数测量系统,用于远距离运动目标的参数测量。实验表明,该系统可以快速、方便、简单地获得目标的运动参数,其中距离测量误差小于2mm,方位测量误差小于0.05°,姿态测量误差小于0.2°。受限于空中目标运动参数实时测量验证系统中设备性能,主要在近距离条件下对原理样机进行了测试,而对于实际系统是否能够很好地完成远距离运动目标的测量任务,还需要进行大量的场外验证实验,以确保系统的工程实用性。

参考文献 (References)

[1] Sharp C S, Shakernia O, Sastry S S. A vision system for landing an unmanned aerial vehicle[C]//Proceedings of IEEE

International Conference on Robotics and Automation, 2001, 2: 1720 - 1727.

[2] Hou H L, Li H. Measurement of vehicle three dimension coordinate with photoelectrical theodolite and error analysis[J]. Opto-Electronic Engineering, 2002, 3: 4 - 8.

[3] 王宗友,徐智勇. 单台光电经纬仪对目标稳定跟踪的研究[J]. 光电工程, 2003, 30(2): 11 - 15.

WANG Zongyou, XU Zhiyong. Study on stable tracking target with single photo-electric theodolite[J]. Opto-Electronic Engineering, 2003, 30(2): 11 - 15. (in Chinese)

[4] Wang A K, Xu H B, Yang J F, et al. Application of visible video zoom system in the television-guided system[J]. Journal of Projectiles Rockets, Missiles and Guidance, 2010, 30(3): 41 - 43.

[5] 张小苗,尚洋,雷志辉,等. 一种基于单幅跑道图像的无人机降落姿态测量新方法[J]. 国防科技大学学报, 2008, 30(1): 19 - 25.

ZHANG Xiaomiao, SHANG Yang, LEI Zhihui, et al. Landing position and attitude measurement of UAV using runway image[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2008, 30(1): 19 - 25. (in Chinese)

[6] 李沛,罗武胜,李冠章. 一种基于双目视觉原理的飞机尾旋运动姿态测量方法[J]. 国防科技大学学报, 2008, 30(2): 107 - 112.

LI Pei, LUO Wusheng, LI Guanzhang. Spin attitude measure based on stereo vision[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2008, 30(2): 107 - 112. (in Chinese)

[7] 于起峰,孙祥一,陈国军. 用光测图像确定空间目标俯仰角和偏航角的中轴线法[J]. 国防科技大学学报, 2000, 22(2): 15 - 19.

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)

[8] 张晓玲,林玉池,赵美蓉,等. 远距离运动物体三维轮廓测量的研究[J]. 光电工程, 2006, 33(2): 20 - 24.

ZHANG Xiaoling, LIN Yuchi, ZHAO Meirong, et al. Study on 3D profile measurement of dynamic object in long range[J]. Opto-Electronic Engineering, 2006, 33(2): 20 - 24. (in Chinese)

[9] Singer R A. Estimating optimal tracking filter performance for manned maneuvering targets [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1970, AES - 6(4): 473 - 483.

[10] 刘海波. 基于星敏感器的无陀螺角速度测量新方法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2012.

LIU Haibo. Research on novel approach for gyro-free angular rate measurement based on star tracker [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012. (in Chinese)

[11] Lu C P, Hager G D, Mjolsness E. Fast and globally convergent pose estimation from video images [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(6): 610 - 622.

[12] 刘佳音,王忠立,贾云得. 一种双目立体视觉系统的误差分析方法[J]. 光学技术, 2003, 29(3): 354 - 357, 360.

LIU Jiayin, WANG Zhongli, JIA Yunde. Error analysis of binocular stereo vision system[J]. Optical Techniques, 2003, 29(3): 354 - 357, 360. (in Chinese)