

文章编号: 0258-7025(2006)06-0743-05

## 目标运动闭环跟踪模拟系统

葛成良<sup>1,2</sup>, 范国滨<sup>2</sup>, 黄志伟<sup>2</sup>, 何忠武<sup>2</sup>, 李正东<sup>2</sup>, 刘志强<sup>2</sup>,  
吴剑涛<sup>2</sup>, 万敏<sup>2</sup>, 路大举<sup>2</sup>, 胡晓阳<sup>2</sup>, 张卫<sup>2</sup>, 梁正<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 电子科技大学物理电子学院, 四川 成都 610054; <sup>2</sup> 中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 提出了一种基于激光技术的、易于工程实现的目标运动模拟方法及实验装置, 并进行了实验验证。利用激光的高亮度、发散角小以及激光器体积小、质量轻等特点, 设计了针对小目标运动的实验模拟装置。通过多轴复合技术以及空间投影技术, 实现了角运动向小目标二维空间运动的转换; 运用多媒体定时器技术实现了对电机的内部闭环控制; 采用脉冲宽度调制(PWM)技术实现了对电机的速度控制, 提高了目标的仿真精度。小目标的运动速度可以达到 $10^\circ/\text{s}$ , 精度 $<0.1^\circ/\text{s}$ , 归一化标准偏差0.09。利用该装置实现了实验室内的目标运动闭环跟踪实验研究, 目标捕获跟踪系统的跟踪标准偏差为0.2 mrad。该系统可以作为目标捕获跟踪系统对二维运动目标的闭环实验研究的验证仿真平台。

**关键词** 激光技术; 目标; 系统仿真; 捕获跟踪

**中图分类号** TN 29 **文献标识码** A

## Simulated Close-Loop Target Tracking System

GE Cheng-liang<sup>1,2</sup>, FAN Guo-bin<sup>2</sup>, HUANG Zhi-wei<sup>2</sup>, HE Zhong-wu<sup>2</sup>,  
LI Zheng-dong<sup>2</sup>, LIU Zhi-qiang<sup>2</sup>, WU Jian-tao<sup>2</sup>, WAN Min<sup>2</sup>,  
LU Da-ju<sup>2</sup>, HU Xiao-yang<sup>2</sup>, ZHANG Wei<sup>2</sup>, LIANG Zheng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Physical Electronics, University of Electric and  
Scientific Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China

<sup>2</sup>Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

**Abstract** One target motion simulation method and experimental system were presented. The simulation system was constructed with the advantages of laser, such as high brightness, small divergency, small spot size. The transform from angle motion to two-dimensional (2D) space motion of small target was made with the technique of complex multi-axis and space projection. The inner close-loop control of motor was achieved by multimedia timer. The rolling speed was controlled with the technique of pulse width modulation (PWM). With these technique, the simulation precision was advanced. The moving velocity of simulation target was up to  $10^\circ/\text{s}$ . It's precision was about less than  $0.1^\circ/\text{s}$ . The normalized standard deviation was 0.09. The system was small and easy to accomplish in engineering. It can be used as the simulation platform to verify the target acquiring, tracking system for a moving target within 2D space. The tracking standard deviation of the tracking system was 0.2 mrad.

**Key words** laser technique; target; system simulation; acquiring and tracking

## 1 引言

对复杂场景条件下的弱小目标探测识别技术<sup>[1~3]</sup>一直是监视和报警技术的重要组成部分。当

目标距离较远时, 目标在光学系统中所成的像是小目标(点和斑点目标)形态, 而且目标的对比度比较低。小目标一般是指在像面(探测器)上所成的像只占一到几个像元的目标。小目标与面目标相比, 由

收稿日期: 2005-07-20; 收到修改稿日期: 2005-12-12

基金项目: 中国工程物理研究院预研基金(421010103)资助项目。

作者简介: 葛成良(1971—), 中国工程物理研究院博士研究生, 助理研究员, 主要从事光电工程方面的研究。E-mail: GCHL@263.net

于成像面积小、信号弱、信噪比低、背景复杂、具有一定的运动性,要检测识别小目标有一定的难度。与大目标相比,弱小目标与背景的对比度较低、边缘模糊,因而不宜用灰度统计和边缘检测的方法;弱小目标与背景相比要小得多,往往被强大的背景噪声所淹没,故频域信息也不是小目标的有效特征;尽管弱小目标较小,但又不能作为点目标来处理,实际得到的往往是大小不定的集合,因而固定的模板和算子很难有效检测不同尺寸的弱小目标;弱小目标的检测往往是在大面积背景中进行的,因而检测方法还必须具备简单快捷的特点,能够对图像进行实时的处理。

要设计比较完善的弱小目标的探测识别算法,需要大量的实验数据以及大量的实验验证。而在通常情况下,这些实验需要花费大量的人力、物力和资金,是难以在短时间内完成的。仿真技术<sup>[4~6]</sup>提供了切实有效的弱小目标探测识别算法的验证平台,以保证算法的有效性。对目标的仿真主要包括硬件仿真和计算机仿真,前者是基于实际系统的仿真,后者是基于软件算法的仿真。另外,将计算机仿真与硬件仿真相结合也是未来仿真技术的发展趋势。本文利用激光的高亮度、发散角小以及激光器体积小、质量轻等特点,设计了针对小目标运动的实验模拟装置。该系统结构简单、易于控制、花费少,并且是模块化的,所以也易于扩展和升级。

## 2 设计思想

目标的运动是三维空间的运动,但是目标在探测器视场内所成的像的运动是二维的。对第三维的运动可以通过判断目标在像平面的尺寸变化来进行。当目标像的尺寸变大时,目标接近探测系统;当目标像尺寸变小时,目标远离探测系统。对跟踪系统而言,跟踪机架主要作二维运动。因此,需要验证的是目标的二维运动跟踪能力。我们考虑采用二维运动平台来产生目标的二维运动。通常,探测器不能探测目标的距离,它所感知的目标运动实际上是目标的二维角速度,即俯仰运动和方位运动。目标在三维空间的运动轨迹  $f(x, y, z, t)$  经过光学成像系统的映射以后变成二维空间的运动轨迹  $f(x, y, t)$ , 如图 1 所示。因此,实际的模拟系统只需要模拟目标在探测器像平面的二维运动,就可以实现对空中飞行目标主要运动特性的模拟,从而可以验证目标捕获跟踪系统的捕获跟踪能力。当然,对于

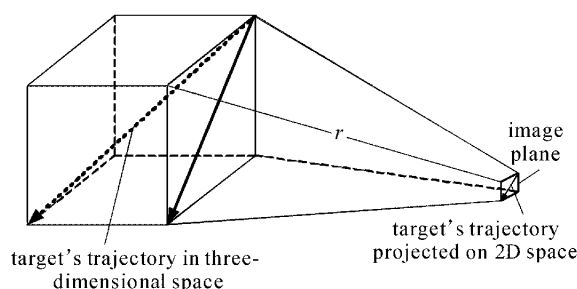


图 1 目标空间运动在二维空间的投影

Fig. 1 Projection of target trajectory on 2D space

型号级的系统验证,还是应该采用三维的目标运动模拟系统来实现,或者说,还需要进行实战检验。

目标捕获跟踪系统通常是二维的旋转系统,这相当于人的眼睛在作二维旋转运动。系统有两个旋转轴:方位旋转轴和俯仰旋转轴。目标的位置信息要转化为旋转轴的转角信息,旋转机构才能驱动探测器指向目标,从而实现对目标的捕获跟踪。假设目标的运动在  $x$  方向和  $y$  方向都是匀速运动,即

$$\begin{cases} v_x = \text{const.} \\ v_y = \text{const.} \end{cases}$$

另外,经过探测器光学系统的映射后可以消除径向距离的影响,所以也可以认为径向距离  $r = \text{const.}$ 。因此,目标的空间运动就可以转化为目标捕获跟踪系统的旋转运动  $\theta(x, y, t)$ 。对应的转换关系为

$$\begin{cases} \Delta x = v_x \Delta t \\ \Delta y = v_y \Delta t \end{cases}, \begin{cases} \Delta x = r \Delta \theta_x \\ \Delta y = r \Delta \theta_y \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \Delta x = \frac{v_x}{r} \Delta \theta_x \\ \Delta y = \frac{v_y}{r} \Delta \theta_y \end{cases}$$

如果目标在不同方向上的运动速度相等,则有

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = k \begin{pmatrix} \theta_x \\ \theta_y \end{pmatrix},$$

这样,便可以用二维旋转系统的旋转运动来线性模拟目标的二维空间运动。如果目标在不同方向上的速度有变化,则比例系数矩阵  $k$  就不是线性的,而变成  $(k_x, k_y)$ , 其中,  $k_x = v_x/r$ ,  $k_y = v_y/r$ 。根据系数矩阵,可以设计二维旋转系统的旋转运动,从而实现对目标空间运动的模拟。

对于目标沿探测系统视轴的运动可以通过系统软件来分析。设目标与视轴垂直方向上的投影尺寸为  $D$ , 沿视轴方向目标距离探测系统为  $r$ , 探测系统焦距为  $f$ , 目标在探测系统焦平面上所成像的尺寸为  $d$  (为了思路清晰,假定目标是正方形的)。

如图 2 所示,目标在  $t_1, t_2$  时刻距离探测系统的

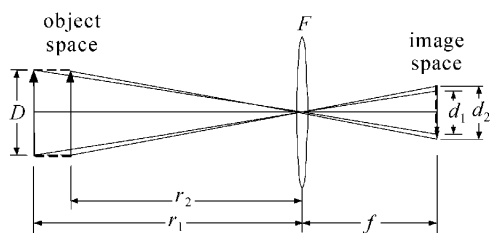


图 2 目标沿探测系统视轴的运动

Fig. 2 Target motion along line-of-sight of detector

距离为

$$\begin{cases} r_1 = D/(d_1/f) \\ r_2 = D/(d_2/f) \end{cases}$$

从而有  $\Delta r = r_2 - r_1 = \left(\frac{d_1 - d_2}{d_1 \cdot d_2}\right) \cdot D \cdot f$ ,

当  $\Delta r > 0$  时表示目标远离探测系统, 并且有  $d_1 > d_2$ ; 当  $\Delta r < 0$  时表示目标接近探测系统, 并且有  $d_1 < d_2$ 。因此, 探测系统就可以判断目标沿其视轴的运动方向。当目标的尺寸已知时, 就可以知道目标沿探测系统视轴的运动速度。

模拟装置的仿真对象是小目标的运动, 系统的设计体现了两个特点: 1) 小目标; 2) 小目标的二维运动。系统主要由二维旋转运动系统、激光器、计算机以及投影屏等子系统组成。激光器输出的激光光斑比较小, 光斑的直径通常会小于 5 mm, 在实验室的环境条件下, 激光光斑在探测器上所成像的尺寸一般也就只有  $10 \times 10$  像素, 所以很容易形成小目标而不需要其他的附加手段, 如减小目标尺寸、增加探测器视场等。另外, 由于激光器有很高的亮度, 很容易满足目标捕获跟踪系统的探测器对目标辐射功率的需求, 因此, 采用小型激光器来产生目标。

计算机是整个模拟装置的核心, 其产生目标的运动轨迹、控制激光器发出光束并控制二轴旋转平台产生二维小目标运动。二维旋转运动系统用来支撑激光器并产生目标的二维运动。投影屏是用来反射激光信号的。投影屏的设计应注意两点: 1) 要是漫反射体; 2) 能够反射激光。投影屏的表面可以是比较平整的表面或存在较大随机起伏的表面, 也可以特别设计成特定的表面以产生特定的目标运动。

### 3 系统设计

#### 3.1 设计要求

小目标运动模拟装置的技术指标要求为:

1) 小目标: 可见光波段, 目标成像大小  $< 10 \times 10$  像素; 2) 转动力矩:  $< 0.2 \text{ N} \cdot \text{m}$ ; 3) 二维运动: 俯仰  $0^\circ \sim 90^\circ$ ; 方位  $0^\circ \sim 360^\circ$ ; 4) 转动速度:  $10^\circ/\text{s}$ ; 5) 运动轨迹: 方位旋转、俯仰旋转, 二轴组合旋转, 用户设定的轨迹。

#### 3.2 系统框图

系统的设计框图如图 3 所示。图 3 的上半部分为设计的小目标运动模拟系统, 下半部分为待验证的目标捕获跟踪系统。计算机采用 ADLINK 公司生产的工控机。二轴旋转平台采用重庆均智公司生产的二维旋转平台系统, 它的每个轴都可以独立控制。其旋转平台的最大转速可以达到  $20^\circ/\text{s}$ , 最大负载 50 kg, 该参数足以满足我们的系统设计的要求。激光器采用相干公司的 Redflame 半导体激光器。其输出功率为 22 mW, 输出光斑为椭圆光斑, 发散角为  $1.1 \text{ mrad} \times 1.2 \text{ mrad}$ 。投影屏为普通的实验室墙面, 可以看作是朗伯体, 投影屏距离探测系统 5 m。

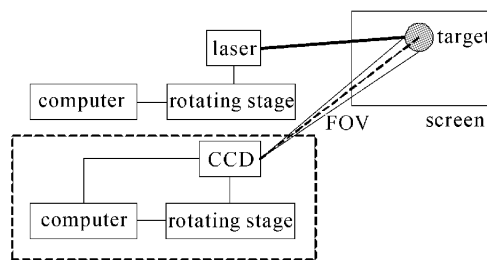


图 3 小目标运动模拟系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of motion simulation system of infrared small target

#### 3.3 系统控制流程

系统的控制流程如图 4 所示。系统的控制程序采用 Visual C++ 6.0 软件编制, 用户控制界面和参数设置界面如图 5 所示。系统首先进行初始化, 初始化完成后进行小目标运动模拟参数设置, 如运动轨迹、运动速度等。参数设置完成后, 就可以进行模拟了。模拟完成后, 系统会询问是否进行其他模拟, 如果需要进行模拟则返回到开始位置进行系统参数的设置, 否则就中止模拟并退出。

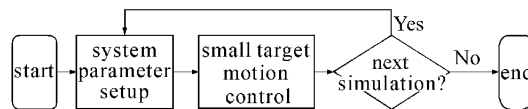


图 4 系统模拟的控制流程图

Fig. 4 Control flow of the simulation



图 5 目标运动闭环跟踪模拟系统控制用户界面

(a) 主用户界面;(b) 参数设置界面

Fig. 5 Graphic user interface of simulation system for close-loop target tracking

(a) main graphic user interface;

(b) graphic user interface of parameter setup

#### 4 小目标运动模拟实验

选取三种目标运动轨迹对系统进行了初步的实验验证。这三种轨迹分别是方位方向运动、俯仰方向运动和  $y = x$  直线运动。实验曲线如图 6 和图 7 所示。图 6 为只有一个方向的运动实验曲线,图中

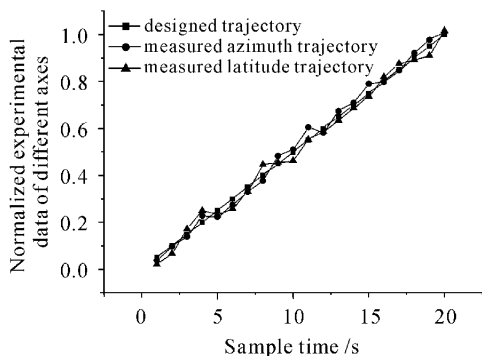


图 6 沿方位、俯仰轴作单一运动的实验曲线

Fig. 6 Experimental curves of small-target motion along azimuth and latitude axes respectively

的数据进行了归一化。图 7 为方位、俯仰方向作相同运动的实验曲线。系统的归一化标准偏差为 0.09。图 8 为投影屏上的激光光斑图像,(a)为粗糙表面投影屏的模拟小目标图像,(b)为相对平滑表面投影屏的模拟小目标图像。

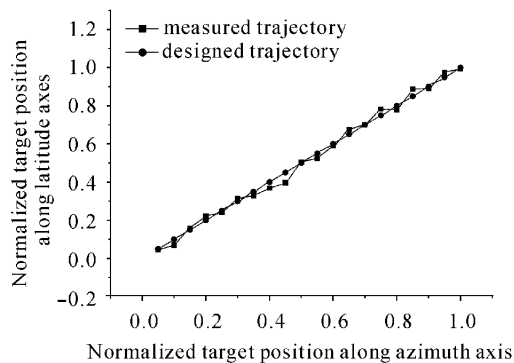


图 7 同时沿方位、俯仰轴运动的实验曲线

Fig. 7 Experimental curves of small-target motion along azimuth and latitude axes simultaneously

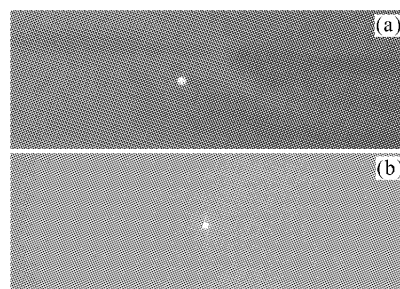


图 8 粗糙表面投影屏(a)和相对平滑表面投影屏(b)上的小目标

Fig. 8 Small target on the rough screen (a) and smooth screen (b)

#### 5 对目标捕获跟踪系统的验证

利用建立的小目标运动模拟系统对在研的目标捕获跟踪系统进行了实验验证。图 9 为实验的控制流程图示意图。计算机控制二维旋转运动系统进行二维旋转并带动其支撑的激光器,激光器辐射激光光束打到投影屏上就产生了作二维运动的小目标。目标捕获跟踪系统通过 CCD 对小目标进行成像,然后由高速图像处理器对采集到的目标图像进行处理,得到目标的位置信息,然后将这些信息通过 PCI 总线传递给计算机控制系统。计算机控制系统根据这些信息通过运动控制卡控制目标捕获跟踪系统的二维运动平台转动 CCD 系统使其保持对小目标的成像,从而实现对目标的跟踪。实验结果如图 10 所示。

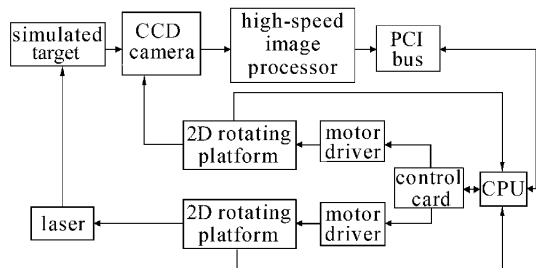


图9 闭环跟踪模拟验证实验控制流程

Fig. 9 Control flow chart of simulation validation of the close-loop tracking system

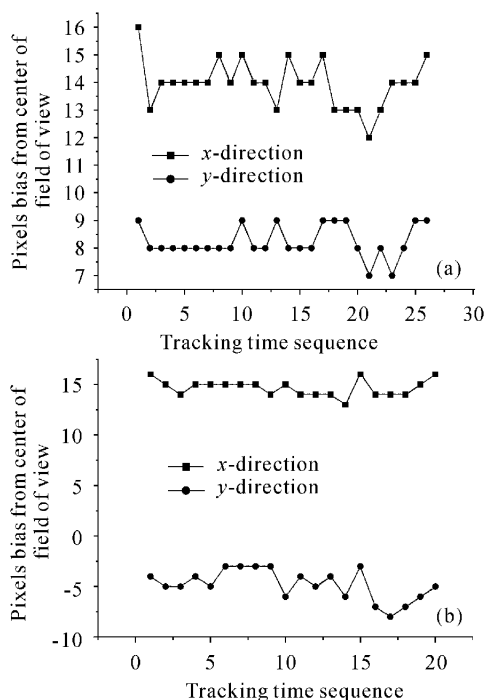
图10 对单一运动方向(a)和二维运动(b)目标的跟踪  
Fig. 10 Target tracking along single axis (a) and both axes (b)

图10(a)为当目标只作一维运动的跟踪实验结果,系统的跟踪偏差最大为3个像素。图10(b)为当目标作二维运动时的跟踪实验结果。实验结果表明,此时的跟踪误差较大,最大偏差达到了5个像素。其原因在于二维运动系统两个轴系相互间的干扰以及对目标轨迹进行二维分解运算时的误差。CCD焦平面像素分辨率为0.23 mrad。跟踪系统最大误差为1.15 mrad,标准差为0.20 mrad。结果表明跟踪系统的跟踪能力还需要进一步提高。

## 6 结 论

提出了一种基于激光技术的、易于工程实现的目标运动模拟方法及实验装置并进行了实验验证。利用激光的高亮度、发散角小以及激光器体积小、质量轻等特点,设计了针对小目标运动的实验模拟装置。通过多轴复合技术以及空间投影技术,实现了角运动向小目标二维空间运动的转换;运用多媒体定时器技术实现了对电机的内部闭环控制;采用脉冲宽度调制(PWM)技术实现了对电机的速度控制,提高了目标的仿真精度。小目标的运动速度可以达到 $10^\circ/\text{s}$ ,精度 $<0.1^\circ/\text{s}$ ,归一化标准偏差0.09。利用该装置实现了实验室内的目标运动闭环跟踪实验研究。实验结果表明,该系统能够模拟小目标的运动,而且结构简单,各子系统按照模块化设计,系统容易升级。该系统可以作为目标捕获跟踪系统对二维运动目标的闭环实验研究的验证仿真平台,目标捕获跟踪系统的跟踪标准偏差为0.2 mrad。该系统还可扩展到对可见光和其他波段目标的运动模拟,有很好的实用价值。

## 参 考 文 献

- Wang Hong, Jing Zhongliang, Li Jianxun. An image fusion approach based on object region [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(3):351~355  
王宏,敬忠良,李建勋.一种基于目标区域的图像融合新方法[J].*中国激光*,2005,**32**(3):351~355
- Yi Hengyu, Hu Xiaoyang, Zhang Kai *et al.*. Simplified recognition of 3D axes symmetric object [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(4):466~470  
易亨瑜,胡晓阳,张凯等.三维轴对称目标的简化识别[J].*中国激光*,2005,**32**(4):466~470
- Nie Shouping, Wang Ming, Liu Feng. Image segmentation algorithm study for low contrast image [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(1):89~91  
聂守平,王鸣,刘峰.低对比度图像分割算法研究[J].*中国激光*,2004,**31**(1):89~91
- Xu Zhengwei, Zhang Xiangdong, Wu Chengke. Areal-time infrared scene generator [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 1997, **16**(3):179~184  
徐正伟,张向东,吴成柯.实时红外场景产生器[J].*红外与毫米波学报*,1997,**16**(3):179~184
- Yu Weijie, Tu Hongming, Peng Qunsheng. Computer simulations of infrared image for high speed objects [J]. *Journal of System Simulation*, 2000,**12**(5):560~564  
于伟杰,涂红明,彭群生.高速运动物体的计算机红外成像仿真[J].*系统仿真学报*,2000,**12**(5):560~564
- Zhang Hongjun. Study on semi-physical simulation of infrared homing missile [J]. *Aerospace Shanghai*, 1998, **4**:30~33  
张宏俊.红外寻的制导系统半实物仿真技术研究[J].*上海航天*,1998,**4**:30~33