

· 光电系统与 设计 ·

## 镜反射式弹丸追踪摄影技术研究

宋玉贵, 孙 帅

(西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710032)

**摘 要:**在高速摄像机前放置一面镜子,按照弹丸的运动规律和成像关系转动反射镜,可以获得弹丸的飞行过程.为了保证系统的实时性,在跟踪前由计算机根据系统各项参数解算控制序列,保存在存储单元中.实时跟踪过程中由跟踪控制器按照控制序列控制转镜,完成跟踪摄影.系统能达到在整个跟踪过程中,弹丸像大小适宜,不超出成像区域,增大视场角和跟踪范围的目的.

**关键词:**转镜;弹丸;跟踪摄影

**中图分类号:**TJ012.3<sup>+</sup>6

**文献标识码:**A

**文章编号:**1673-1255(2010)04-0005-04

## Study of Projectile Photograph Tracked by Mirror in Trajectory

SONG Yu-gui, SUN Shuai

(Xi'an Industrial University, Electro-Optic-Engineering Institute, Xian 710032, China)

**Abstract:**Placing a mirror in front of the high-speed camera, turning it according to the discipline of moving projectile and relationship of imaging, the flying procedure of the projectile can be acquired. To ensure the real-time quality of this system, the control data can be calculated before real test start, and saved into memory cell. During the tracking in real time, the tracking control unit is used to dominate the mirror to complete the follower-photograph. Finally, this system can follow the whole process, the image of projectile is suitable for reaching the purpose of magnify the follower scope.

**Key words:**mirror; projectile; follower-photograph

使用高速摄影机测试弹药,常采用固定高速摄影机的方法来测量弹丸的飞行情况和各项参数.为了拍摄更多的弹丸运动轨迹,文中利用旋转反射转镜来实现对弹丸进行实时跟踪摄影,能够在不牺牲弹丸的解析度的情况下增大视场角.不需要额外的探测手段,拍摄成本较低.该方案是在高速摄像机前方放置一面可旋转的镜子,由外部信号控制触发开始跟踪,当弹丸飞行进入跟踪用转镜的拍摄范围后,电机按照预估转动规律转动转镜,使得摄像机跟踪拍摄到弹丸的飞行过程.此方法需要首先根据弹丸的外弹道方程估算出弹丸的运动规律,继而控制电机带动转镜,按照对应关系以一定精度进行跟踪,从

而达到跟踪摄影的目的<sup>[1-3]</sup>.

### 1 系统组成及工作过程

完成随动摄影主要需要以下设备:远程控制计算机、测速天幕靶、跟踪控制器、高速摄像机、转镜等.

系统工作过程:(1)在远程控制计算机上运行控制软件,输入当前环境下的各项参数包括弹丸性能、环境参数、设备性能等参数.由这些参数确定设备布置范围,参照软件提示放置各设备.(2)放置好设备后由控制软件计算出转镜的控制序列,对其优化后,

收稿日期:2010-07-22

基金项目:陕西省教育厅基金项目(03CJ31)

作者简介:宋玉贵(1970-),男,河南人,副教授,主要从事光电测量方面的研究.

发送到跟踪控制器,保存在其内存中。(3)启动系统,进入实测状态.炮弹激发后,弹丸经过测速天幕靶,触发跟踪控制器开始工作,以测得的速度为基准,从控制序列中选取控制曲线,驱动转镜进行跟踪。(4)跟踪结束后,由控制软件从高速摄像机中读取拍摄的图片,回放查看跟踪过程。

## 2 跟踪算法研究

使用转镜来获取弹丸的运动过程,首先要建立弹丸的外弹道方程,解算出转镜的控制数据,按照对应关系以一定精度控制电机转动转镜,从而达到跟踪摄影的目的。

### 2.1 弹丸外弹道运动模型<sup>[6]</sup>

弹丸在飞行中受到的作用力主要是地球的作用力和空气动力.在本系统中跟踪距离相对于弹丸运动轨迹较短,弹丸在竖直方向的下降幅度不明显,可以忽略重力在跟踪过程对弹丸的作用.又由于射角为零,攻角很小,因此做一下假设:从炮口到跟踪结束这段过程中弹丸只受空气动力的作用,弹丸运动轨迹为直线,并且与地平面平行。

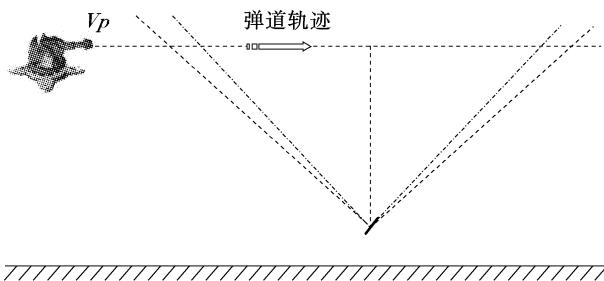


图1 弹丸在跟踪过程中的运动模型

根据假设可知,弹丸在此过程中作变加速直线运动如图1,弹丸在飞行过程中受到的空气阻力为  $F = \xi V^2$ ,其中,  $V$  为弹体质心相对于空气的速度。

由弹丸的动力学方程得到不同初速的子弹在不同时刻的飞行速度.对速度进行积分得到已知初速度下,弹丸到达弹道轨迹上任一点时刻的方程。

$$t = \frac{1}{\xi} (e^{\xi S(t) + \ln(m/V_p)} - m/V_p) \quad (1)$$

其中,  $S$  为弹体最大横截面面积.用  $V_p$  表示弹丸的炮口速度,根据弹丸与转镜在跟踪过程的成像关系如图2解算转镜的控制规律。

得到转镜角度和角速度公式

图2 弹丸与转镜成像关系

$$a(t) = 45 + \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{s(t)}{H}\right) \quad (2)$$

$$\omega(t) = \frac{V(t) \cos^2 a}{2H} \quad (3)$$

### 2.2 设备布置

实验设备的布置必须考虑系统跟踪摄影的要求,否则系统就无法完整跟踪弹丸运动过程,或者弹丸超出了拍摄范围,成像不清晰。

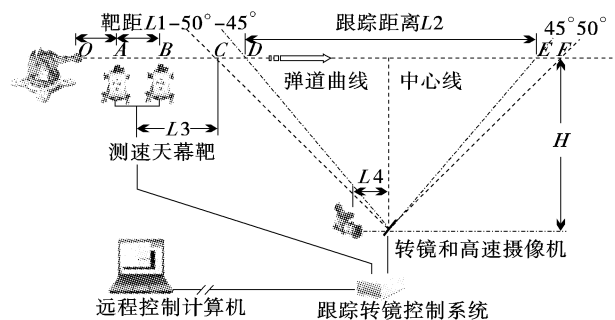


图3 系统设备布置图

#### (1) 天幕靶

对于靶1来说,如果离枪口太近,枪口火光、枪口冲击波、弹头波和碎片等都会可能导致启动靶误触发,通常启动靶至炮口的安全距离( $OA$ )至少应定为20 m.靶距决定了测量弹丸速度的精度,这个距离( $AB$ )至少应为5 m。

#### (2) 等待启动段( $L3$ )

天幕靶测速系统测得的速度值为弹丸经过两靶中心位置的瞬时值.系统在弹丸经过靶1时启动,经过  $C$  点时开始转动转镜.若  $L3$  距离太短,则弹丸早已飞出转镜跟踪范围而转镜尚未启动.若  $L3$  距离太长,虽然能保证随动跟踪,但是增大了系统的误差,降低了系统跟踪精度.因此等待启动段距离的确定非常重要,是弹道跟踪镜系统能否实现同步跟踪的关键。

#### (3) 转镜距弹道的垂直距离( $H$ )

转镜距弹道的垂直距离决定了弹丸像的大小. 首先要确保弹丸在跟踪过程中成像大小符合系统成像要求, 根据指标要求和系统成像关系解算  $H$  的设置范围. 另外还要考虑到摄像机的积分性能和电机在初始跟踪阶段 ( $CD$  段) 的转动性能, 保证电机能够在此阶段完成转镜转动与弹丸运动匹配的过程, 跟踪过程成清晰的像.

### 2.3 重要参数解算

#### (1) 最大速度离散值

此系统是基于速度预估的开环系统, 因此为了保证系统控制的实时性、精确性, 在实时跟踪前将弹丸各临近速度下的控制数据保存在跟踪控制器的存储单元中. 由于存储单元容量的限制和系统控制精度要求, 离散速度的值不能太大或太小. 离散速度间隔值越小, 则控制序列增多, 增加了系统的响应时间、浪费时间与存储空间, 并且对提高跟踪精度作用不大. 离散速度间隔值取得较大, 则可能导致以某些速度飞行的弹丸将无法完整跟踪, 因此最大速度离散值的计算很有意义.

#### (2) 转镜初始跟踪段研究<sup>[5]</sup>

开始实时跟踪时, 跟踪转镜处于准备位置上, 保持静止状态. 确保实现同步跟踪、CCD 成像清晰的关键是: 跟踪转镜能够在计划的时间与空间内旋转达到预定的角位置时, 同时保持预定的速度, 也就是目标飞入视场时 ( $D$  点), 跟踪转镜达到了的起始跟踪位置以及与弹丸相匹配角速度, 只有保证转镜能够达到这两项指标, 转镜才能开始进行实时跟踪, 在以后的运动中与目标保持跟踪状态. 因此需要对初始跟踪阶段 ( $CD$  段) 建立转镜运动模型, 解算转镜控制规律.

### 2.4 控制序列优化

由于电机在转动过程中受温度、工作时间、速度和自身的非线性动态性能等因素影响, 并不一定能达到理想值, 致使转镜不能够精确跟踪目标. 所以在正式跟踪前需要对控制序列进行优化. 系统采用了多次试车、逐次逼近的策略, 要求更多的准备时间来优化跟踪的控制序列. 比较理想的运动曲线与实际的运动曲线, 根据评判标准对误差进行分析, 得出优化方案, 对此环境下的控制序列进行优化, 使电机转动逼近理论运动规律, 使误差在跟踪精度范围内, 避免图像中目标像模糊, 甚至目标逃逸出拍摄范围.

## 3 控制软件开发

根据系统工作的功能需求, 将控制软件分为以下几个模块:

(1) 系统布设模块: 记录环境参数、设备性能参数, 根据参数设定规范以向导的方式设定设备布置方案;

(2) 控制序列解算模块: 根据系统配置和模型方程, 解算弹道方程, 解算转镜的控制序列;

(3) 优化控制模块: 根据系统指标建立系统优化方案, 优化控制序列, 减小转镜控制误差, 将其控制在跟踪精度内;

(4) 通讯模块: 完成上位机软件与跟踪控制器间的通讯功能, 能够传输和接收各类数据, 此模块需要制定通讯协议;

(5) 数据保存与查看模块的功能是存储与显示各类数据和回放跟踪过程.

## 4 转镜跟踪控制器

转镜跟踪控制器以 ARM 开发平台为核心, 完成以下功能:

(1) 速度测试: 当弹丸进入天幕靶测速系统时, 两个天幕靶会分别给出两个触发信号, 通过 ARM 微处理器的计时单元, 测量出两个触发信号的时间间隔, 靶距已知, 从而测得弹丸速度.

(2) 温度采集控制: 系统设置两路数字式温度传感器, 该传感器可以直接将温度信号变成数字信号输送到转镜控制器. 用来研究电机温度变化对控制曲线的影响.

(3) 转镜限位控制: 限位是为了防止转镜的转动超出一定的区间, 从而需要控制转镜的运动范围, 可以在合适的位置加装限位关电开关, 当转镜发生超限时, 开关状态会及时发出告警.

(4) 图像采集控制: 弹丸跟踪摄影的目的就是对采集到的图像进行各种姿态性能的分析<sup>[4]</sup>. 基于 ARM 的图像采集功能, 对拍摄的图像进行实时采集, 再通过千兆网络接口传输给计算机做下一步处理.

(5) 通信控制: 控制转镜不仅需从上位机获取控制序列, 而且在跟踪过程中需要跟伺服驱动器进行控制, 返回跟踪过程中转镜的运动曲线和电机的温度等参数. 根据传输的数据类型和速率的不同, 需要

选择不同的通信接口,完成跟踪过程中数据的传输和设备的控制。

(6)数据存储管理:完成一次实验,跟踪控制器需要从上位机读取转镜的控制序列,保存在 ARM 存储单元.在跟踪过程中从存储单元读取数据,保存采集到的控制数据和温度数据。

## 5 结 束 语

通过对镜反射式弹丸追踪摄影技术的研究,建立了跟踪过程的弹道方程,得到了转镜的控制规律和重要参数的设置.根据系统功能要求开发的控制软件和研制的转镜跟踪控制器,能够完成对弹丸运动过程的跟踪摄影.能够获取弹丸在跟踪区域的运动过程。

采用镜反射式弹丸追踪摄影技术,不需要额外的探测手段,拍摄成本较低.解决了固定高速摄像机

拍摄运动弹丸距离短等一系列问题,能够在不牺牲弹丸的解析度的情况下增大视场角.可以跟踪拍摄炮弹、穿甲弹、火箭弹等高速飞行的弹丸。

## 参考文献

- [1] 崔彦平,林玉池.运动目标姿态与速度测量的理论及实验研究[D].天津:天津大学精密仪器与光电子工程学院,2006.
- [2] 朱新宏,张永生.某武器外弹道飞行姿态测试方法探讨[J].测试技术学报,1993,12(3).
- [3] 苏增立,高晰,王建军,等.高速摄像系统及其在靶场中的应用分析[J].飞行器测控学报,2003,22(3).
- [4] 杨夏.高速图像实时存储系统研制及目标三维姿态的光测研究[D].长沙:国防科学技术大学,2002.
- [5] 于纪言,王晓鸣,李文彬.基于测量预估高速弹丸随动摄影方法研究[J].探测与控制学报,2006,28(3).
- [6] 徐明友.现代外弹道学[M].北京:兵器工业出版社,1999.

(上接第 4 页)

步靠近太阳位置,天空背景光谱亮度逐渐变强,且变化速度加快;中午时刻的光谱亮度最强,上午和下午时刻的光谱亮度相当.西北戈壁地区的天空背景光谱分布与理论背景光谱分布有一定的区别,分布相对来说变化缓慢,600~900 nm 光谱波段背景亮度所占的比重区别较大,且随着方位角、天顶角的改变分布变化较小.在天空背景为  $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{Sr}^{-1}$  条件下,从 SNR 模式出发,采用光谱滤波技术,理论光谱分布下 600~900 nm 滤波方式光电系统的探测能力可得到约 0.5 等星提高;但该地区相同滤波方式光电系统的探测能力只得到约 0.1 等星提高.下一步对该地区进行全年 12 个月内多次测量,进行全天空背景光谱亮度数据库建模技术研究,可以根据不同的应用需求进行任意时刻和任意位置的天空背景光谱亮度值输出。

## 参考文献

- [1] 万敏,苏毅,杨锐,等.提高白天观测星体信噪比的方法

研究[J].强激光与粒子束,2003,15(12):1151-1154.

- [2] Rork E W, Lin S S, Yakutjs A J. Ground-based electro-optical detection of artificial satellites in daylight from reflected sunlight. AD-A 117 413[R],1982.
- [3] He C, Zhu Q X. A study of technology for detection of nonluminous artificial satellites in daylight[R]. USA: Air Force Research Laboratory,1996.
- [4] Lelièvre M, Lévesque M P, Buteau S. Measurement of artificial-satellite spectra with a small telescope[R]. Canada:Defence R&D Canada, 2007.
- [5] 王伟国.空间目标白天光电探测技术研究[D].长春:长春光学精密机械与物理研究所,2005:22-23.
- [6] Pierre Y Bely. The Design and Construction of Large Optical Telescopes[M]. New York: Springer-Verlag, 2003: 25-28.
- [7] 谭碧涛,景春元,张新,等.光电系统对空间目标成像仿真技术研究[J].计算机仿真,2009(6):240-243.

欢迎网上投稿 [www.gdjsyy.com](http://www.gdjsyy.com)