

·光电系统与amp;设计·

## 弹道跟踪转镜成像研究

孙 帅, 宋玉贵

(西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710032)

**摘 要:** 运动目标姿态与速度是靶场测量的重要内容, 使用跟踪转镜解决了固定高速摄像机拍摄弹丸轨迹较短的状况. 根据弹丸的运动规律和成像关系转化为转镜的转动规律, 使得拍摄系统工作时偏心量时刻为零. 另外还要考虑到电机和系统成像要求等. 系统最终能达到在整个跟踪过程中, 弹丸成像长度占 CCD 像面长度的  $1/5 \sim 3/5$ , 弹丸成像不超出 CCD 像面区域, 跟踪视场角度达到  $90^\circ$ .

**关键词:** 转镜; 跟踪; 虚拟视窗

中图分类号: TJ012.3

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2010)05-0003-03

## Study on the Image Tracked by Mirror in Trajectory

SUN Shuai, SONG Yu-gui

(Xi'an Technological University, School of Opto-electric Engineering, Xi'an 710032, China)

**Abstract:** The speed and posture of moving targets are an important matter in range measurement, using mirror to solve the problem of short trajectory tracked by the fixed high-speed camera. According to the moving discipline of projectile and relationship of imaging, the moving discipline of the mirror can be got, and so the eccentricity moment of the camera is zero any time. In addition there is another concern of motor and system request to be considered. Finally this system can get a whole procedure of the flying projectile, the length of image is in the rang of  $1/5$  to  $3/5$  of the CCD length, the angle of tracking area can reach to  $90^\circ$ .

**Key words:** moving mirror; track; virtual window

运动目标姿态与速度是靶场测量的重要内容, 是评定系统性能的重要技术指标, 也是提高制导精度的重要依据. 获得这些参数对于分析和评价空间目标运动特性, 以及进行故障分析与进一步优化系统设计, 提高武器的效能及命中精度具有重要意义<sup>[1]</sup>. 利用高速摄影机可以跟踪拍摄炮弹、穿甲弹、火箭弹等高速飞行的弹丸, 它不仅能定性地观察飞行中弹丸的外部特征, 如发动机点火、弹托飞离、翼张开等情况, 也可以定量地测量飞行中弹丸的外弹道参数, 如攻角、转速、速度等<sup>[2]</sup>.

在测试弹药中使用高速摄影机, 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, 不得不采取增大

视场角的方法进行拍摄, 增大视场角就需要远距离拍摄, 弹丸图像变小, 牺牲弹丸的解析度, 对弹丸的滚转、章动、尾翼张开、脉冲点火等过程无法进行记录<sup>[2-3]</sup>.

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.

收稿日期: 2010-07-22

作者简介: 孙帅(1984-), 男, 硕士研究生, 主要从事高能激光技术的研究.

## 1 弹丸成像研究

### 1.1 弹丸外弹道运动模型

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. 在系统中跟踪距离相对于弹丸运动轨迹较短, 弹丸在垂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.

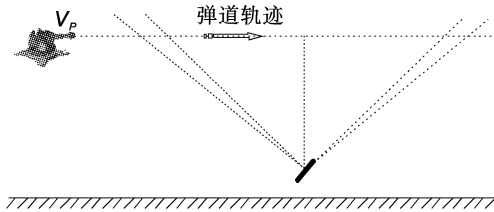


图 1 弹丸在跟踪过程中的运动模型

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  $F = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_{x0}(\frac{v}{c_s})$ , 其中,  $\rho$  为空气密度;  $V$  为弹体质心相对于空气的速度;  $S$  为弹体最大横截面积;  $C_{x0}(\frac{v}{c_s})$  为空气阻力系数,  $v/c_s$  是马赫数,  $c_s$  是声速, 用  $V_p$  表示弹丸的炮口速度.

$$\text{由动力学方程: } ma = f, a = dv/dt \quad (1)$$

$$\text{令 } \frac{1}{2} \rho S C_{x0}(\frac{v}{c_s}) = \xi \quad (2)$$

可得到不同初速的子弹在不同时刻的飞行速度.

在固定时间内对速度积分可以得到弹丸在任意时刻的位置

$$\int_0^t \frac{m}{\xi t + m/V_p} dt = S(t) \quad (3)$$

对式(3)进行化简得到

$$t = \frac{1}{\xi} (e^{\frac{\xi}{m} S(t) + \ln(m/V_p)} - m/V_p) \quad (4)$$

由此得到已知初速度下, 弹丸在弹道轨迹上任一点的时刻.

### 1.2 转镜角度随时间变化的规律

系统成像要求在跟踪过程中弹丸的偏心量时刻

为 0, 偏心量即弹丸像中心点与 CCD 像面中心的差值. 根据图 2 可得成像关系, 转镜相对于 X 轴随时间变化角度的变化规律

$$a(t) = 90 - \left( \frac{90 - \arctan \frac{s(t)}{H}}{2} \right) + \arctan \left( \frac{s(t)}{H} \right) = 45 + \frac{1}{2} \arctan \left( \frac{s(t)}{H} \right) \quad (5)$$

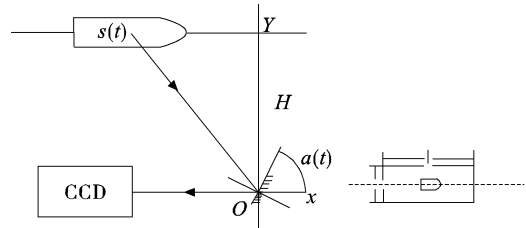


图 2 转镜角度与弹丸运动规律的关系

### 1.3 转镜角速度随时间变化的规律

在跟踪过程中, 转镜要与弹丸的运动匹配才能保证跟踪过程中成像清晰. 所以要求转镜的角速度变化对应弹丸的运动规律.

图 3 为转镜控制原理图, 靶 1、靶 2 分别是测试子弹飞行速度的光幕靶或者天幕靶,  $V_p$  是子弹进入转镜视场时的速度,  $H$  是转镜到子弹轨道的垂直距离,  $T_0$  是子弹飞到靶距中心的时刻, 假设这个时候子弹的速度是  $V_0$ ,  $AO$  与转镜中心到子弹飞行轴垂直方向的角度是  $a$ ,  $AO$  方向的速度是  $\omega_{AO}$ , 则得到  $\omega_{AO}$  与时间的关系

$$\omega_{AO} = \frac{V_p \cos^2 a(t)}{H} = \frac{da(t)}{dt} \quad (6)$$

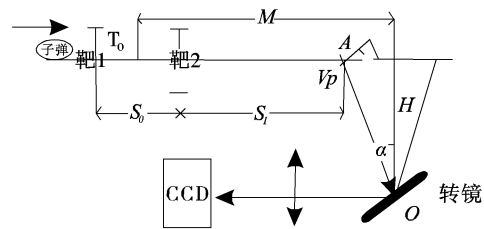


图 3 转镜控制原理图

为了使子弹在 CCD 上所成的像保持相对静止, 当  $AO$  向着视场中心位置移动  $\theta$  时, 根据反射定律可知, 转镜的旋转角度是  $\frac{1}{2} \theta$ , 那么转镜的转动角速度为

$$\omega = \frac{V_p(t) \cos^2 a}{2H} \quad (7)$$

## 2 重要参数设置对成像的影响

### 2.1 转镜距弹道的垂直距离

图 4 为系统设备布置图,假设镜头焦距为  $f$ ,弹丸长度为  $d$ ,弹丸在 CCD 像面上的成像长度为  $l$ ,CCD 像面长度为  $L$ .弹丸不超出 CCD 光敏面,根据成像关系知

$$\frac{f}{l} = \frac{L_4 + H}{d} \quad (8)$$

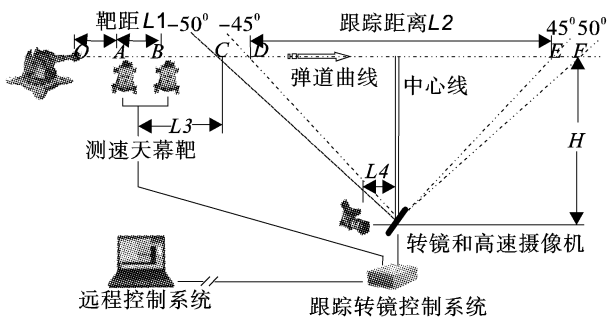


图 4 系统设备布置图

由于在跟踪过程中弹丸的像由小变大,在转镜垂直弹道轨迹时最大,然后再由大变小.为了达到系统规定的在跟踪过程中,弹丸长度占 CCD 光敏面长度的  $1/5 \sim 3/5$ ,所以要求在开始跟踪点弹丸的像长度不超过敏面长度的  $1/5$ ,在转镜垂直弹道处弹丸的像长度不超过敏面长度的  $3/5$ .由此关系得到满足成像要求的转镜位置布设范围为

$$\frac{5f}{3L}d - L_4 < H < \frac{5f}{L}d - L_4 \quad (9)$$

### 2.2 最大速度离散值

系统工作过程如下:确定好系统各参数,由上位机预估各速度下转镜的控制数据,这些速度和对应的控制数据组成了控制序列.在开始跟踪前将控制序列发送到转镜跟踪控制器保存到硬盘中.

弹丸出膛后,由天幕靶测得弹丸速度并发送给转镜跟踪控制器,此时由跟踪控制器从控制序列中选择最接近所测速度的控制数据,来控制伺服电机驱动器,驱动电机带动转镜实时跟踪弹丸.控制序列是一系列离散值,并不是连续的.

速度离散值小,则控制序列相应的增多,使硬盘的存储量加大,最重要的是影响系统整体的响应时间.因为当天幕靶测得弹丸的飞行速度时,要求系统

在很短的时间内进行比较选出最接近被测得的速度转镜控制数据,如果存储的曲线过多,则比较选择的时间会加长,会浪费时间与存储空间,并且对提高跟踪精度作用不大.速度离散值取得较大,则可能导致无法完整跟踪某些速度飞行的弹丸全过程,因此速度曲线最大离散间隔的计算很有意义.

## 3 成像误差控制

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.比较要求达到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.

### 3.1 角度误差上限

在实际转动过程中,如果电机转动角度比理论值大,转镜转动将超前弹丸飞行轨迹.根据系统指标,电机转动引起的误差使弹丸尾部不超出成像区域的  $1/5$  位置便可以接受.设  $D$  为弹丸长度, $L_4$  为转镜中心到摄像头的距离, $L$  为通光孔径.根据图 5 所示关系图,计算出转镜角度误差上限随时间变化公式.

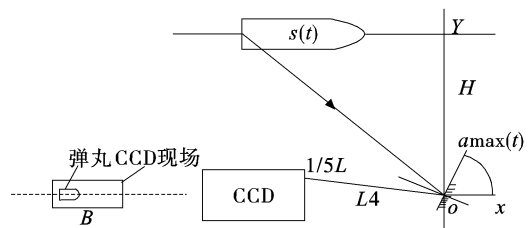


图 5 转镜角度误差上限图

### 3.2 角度误差下限

在实际转动过程中,如果电机转动角度比理论值小,转镜转动将滞后弹丸飞行轨迹.根据系统指标,电机转动引起的误差使弹丸尾部不超出成像区域的  $4/5$  位置便可以接受.设  $D$  为弹丸长度, $L_4$  为转镜与镜头的距离, $L$  为通光孔径.根据图 6 所示关系,计算出转镜角度误差下限随时间变化公式.

(下转第 28 页)

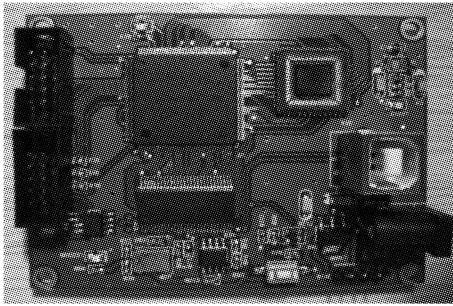


图 8 高速视频采集系统电路板

通过高速模拟试验,设计的系统完全满足设计指标要求.能够实现高速视频的采集.

## 5 结 论

设计了高速视频采集系统,采用 FPGA 完成对 CMOS 芯片采集部分的控制、数据缓存及传送接口控制,运用 verilog 语言实现高帧频数据的 FIFO 缓存,且不丢失数据.合理布线,设计系统数字硬件电路时,降低布局的毛刺和噪声.当光线饱和或不足时,依据光通量和 CMOS 给定的参数,手动适当调

整镜头的光圈.具有体积小,速度高,实时性好的特点.

## 参考文献

- [1] Nicolas Blanc. CCD versus CMOS - has CCD imaging come to an end[J]. Photogrammetric Week, 2002: 131 - 137.
- [2] 林凡,吴孙桃,郭东辉. CMOS 图像传感器技术及其研究[J]. 半导体技术, 2006(12): 40 - 44.
- [3] 余国华,冯启明. 基于 CMOS 图像传感器的视频采集系统设计[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2004, 28(1): 145 - 147.
- [4] OV5620 Color CMOS QSXGA (2592X1944) Camera Chip Censer datasheet.
- [5] 李洪伟,袁斯华. 基于 Quartus II 的 FPGA/CPLD 设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [6] Cypress Semiconductor Corporation. EZ - USB Manual Technical Reference, 2004.
- [7] 侯舒志,姚素英,周津,等. CMOS 图像传感器时序控制方法研究与实现[J]. 固体电子学研究与进展, 2007, 27(1): 119 - 122.

(上接第 5 页)

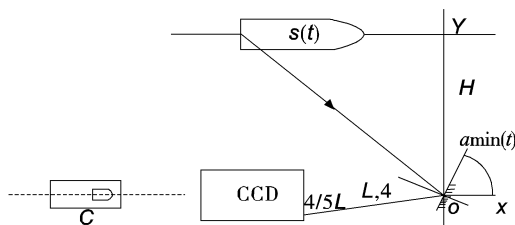


图 6 转镜角度误差下限图

## 4 结 论

通过对转镜跟踪弹丸成像的研究,得到了系统使用的弹道模型,满足系统要求下转镜的控制数据,并可对跟踪拍摄误差进行校正.

## 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与实验研究[D]. 天津: 天津大学精密仪器与光电子工程学

院, 2006.

- [2] 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).
- [3] 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).
- [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.
- [7] Maccormick J, M accormick F. Stochastic algorithms for visual tracking[M]. London: Springer - Verlag Press, 2003.
- [8] Collies R. A system for video Surveillance and monitoring: VSAM final report[R]. Carnegie Mellon University, Technical Report: CMU - RI - TR - 00 - 12, 2000.