

空间光束实时捕获、跟踪实验与分析*

周亚霖 艾 勇 左 韬 鲍黎波

(武汉大学电子信息学院,湖北 武汉 430079)

摘 要 提出一种空间光束捕获、跟踪设计方案,在实验室条件下实现其主要功能,并对其定位精度和实时性进行了分析,结果表明:信标光定位处理的时间为 25ms,角度测量的相对误差为 1.3%,显示出良好性能.同时,为由理论分析到实际星载 PAT 系统提供试验依据.

关键词 空间光通信;跟踪;捕获;控制系统

中图分类号 TN929.1 **文献标识码** A

0 引言

在空间激光通信系统中是利用极窄的光束作为信息传输载体,光束辐射的发散角大约为几十 μRad ,它比微波通信辐射低 3~4 个数量级,所以光束的对准应该是首先应该解决的问题;特别是当空间激光通信系统安装在运动载体上,系统平台的运动和振动,以及通信过程中大气对激光链路的影响等都会造成激光光束偏离通信目标;因此,空间光束的瞄准、捕获、跟踪(PAT)技术就成为空间激光通信系统中一个关键的系统技术.它关系到空间光通信的成败.因而各国都对捕获、跟踪子系统研究方面投入了大量的人力,物力.其中欧空局的 SILEX 卫星,以及日本已实验成功的空-地激光链路都有了实际功能捕获、跟踪子系统^[1,2].国内研究机构和大专院校也都提出了一些方案,有的进行了实际系统研制与测试^[3].本文介绍了本实验室自行设计空间光束实时捕获、跟踪实验装置,提出了各个部分的设计方法,最终将系统集成起来进行试验.并对初步试验结果作了简要分析.

1 设计构想

空间光通信系统中由于光的长距离传输会产生很大的光能量损失,接收到的光信号往往十分微弱,此外背景光也将产生很强的干扰.背景光主要来集中在可见光部分,而红外和紫外部分能量则相对较小.因此可从两个方面减少背景辐射的干扰,一是选择峰值响应处于红外波段的 CCD 图像传感器,二是在 CCD 图像传感器前添加高质量的滤光器.

在存在背景辐射时,CCD 光功率信噪比 SNR 可以表示成

$$SNR = \frac{P_R/M}{P_{BK}/N} \quad (1)$$

而

$$\begin{cases} P_R = P_0 \eta_T \eta_R \eta_P (d_R/\alpha R)^2 \\ P_{BK} = (\pi/4)b(\pi(d_R/2)^2)N(\lambda)\theta^2 \end{cases} \quad (2)$$

将 P_R 、 P_{BK} 代入式(1)可得

$$SNR = \frac{N}{M} \frac{16P_0 \eta_T \eta_R \eta_P}{\pi^2 R^2 N(\lambda) b \alpha^2 \theta^2} \quad (3)$$

其中 P_R 为 CCD 接收到的信标光的功率, P_{BK} 为进入接收机的背景辐射功率, M 为信标光束在 CCD 上成像所对应的像素数目, N 为背景辐射源成像所对应的像素数目,一般情况下地球背景源对于 CCD 的张角远大于其视场,因此 N 等于 CCD 的像素总数目, P_0 为信标光发射功率, η_T 、 η_R 分别为信标发射光学系统和接收光学系统的传输效率, η_P 为信标光瞄准偏差引起的传输效率, R 为信标发射端和接收端之间的空间距离, $N(\lambda)$ 为地球背景辐射亮度, b 为滤光片的带宽, α 为信标光的发散角, θ 为 CCD 的视场角.

为了保证信标检测概率以及 CCD 上信标像斑质心计算的精度,对 CCD 的信噪比 SNR 有要求.为做到亚像素的位置分辨率,SNR 应该大于 7^[4].

在保证一定 SNR 的情况下,式(3)可以看成是 b 与 θ 的函数,即

$$b = \frac{N}{M} \frac{16P_0 \eta_T \eta_R \eta_P}{\pi^2 R^2 N(\lambda) SNR \alpha^2 \theta^2} \quad (4)$$

因此在选择滤光元件和 CCD 时应该在保证 $SNR > 7$ 的情况下在 b 与 θ 之间取得折中.

所要处理的图像是实时运动的光斑图像,目标为信标光光斑.成像跟踪^[5]是利用目标的图像特征对目标进行跟踪,采用全被动的方式,目前主要依据目标与背景在亮度、光谱、图像上的差别来获取目标的特征信息,其最大的优势在于:它可充分利用目标的图像信息完成目标跟踪,达到抗干扰精确定位和跟踪的目的.

本系统中所要处理的图像是实时运动的光斑图

*国家自然科学基金资助项目(10477014)
Tel: 027-87851454 Email: yyaallinnz@163.com
收稿日期: 2005-01-03

像,目标为信标光光斑,经过图像采集系统后的图像如图 1.

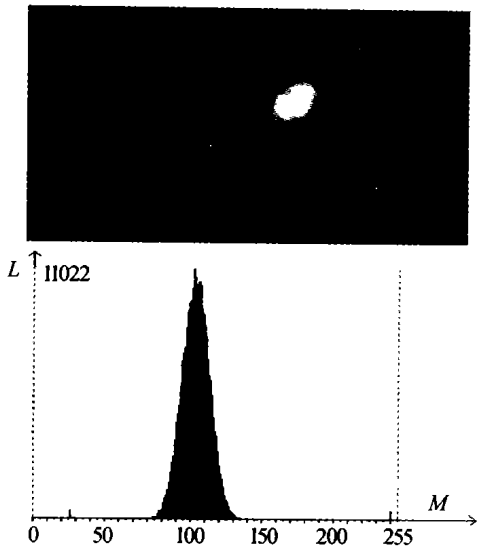


图 1 目标光斑的图像及其直方图
Fig. 1 Image and its histogram of light spot

根据目标的图像特征,我们采取以灰度为图像特征量进行搜索,搜索条件为

如果

$$f(i,j) \geq T + \Delta, f(i \pm \text{Width}/2, j \pm \text{Height}/2) < T \quad (5)$$

那么①形成目标区域,②判断目标如正确,③进入定位跟踪.

式中 $f(i,j)$ 为像素 (i,j) 的灰度值, T 为阈值, Width 和 Height 为计算窗口的尺寸.

首先进行栅格搜索法:即以步长为 Step 的栅格在图像上进行搜索,判断栅格上的某个像素是否为目标点,即粗搜索阶段;在粗搜索中一旦得到一个像素灰度大于粗搜索阈值的话,就以此像素为中心开一个窗口,在这个窗口内再以原采样率处理,此时实际上为目标区域形成阶段,即精搜索阶段.用此方

法,全场只需要搜索 $\text{Width} * \text{Height} / \text{Step}^2$ (图像的面积除以栅格的面积)次.系统中根据图像的大小使用了一个 3×3 pixel 的栅格窗口来实现对目标的粗搜索.在粗搜索中一旦发现某个像素 (i,j) 的灰度大于这时的粗搜索灰度阈值,以 (i,j) 为起始点,考察其邻域八个点,若 (i,j) 满足条件,且未被标记为目标点,则标记为目标点,将其压入堆栈,考察完毕后再将栈顶元素出栈,以其为中心重复操作,直至栈空.选择质心^[6]对远距离目标进行精确定位.若目标区域大小为 $N \times N$,则质心位置为

$$x_c = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_{i,j} f(i,j)}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N f(i,j)} \quad (6)$$

$$y_c = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N y_{i,j} f(i,j)}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N f(i,j)} \quad (7)$$

其中 $x_{i,j}$ 和 $y_{i,j}$ 分别为目标区域中像元 (i,j) 的横纵坐标, $f(i,j)$ 为像元 (i,j) 的灰度值.质心法充分反映了目标的能量分布状况.该方法在理想的情况下定位精度小于 0.05 个像素,且适用的光斑半径范围大^[7].

PAT 伺服控制系统^[8]以 DSP 芯片为控制核心,原理图如图 2.由输入量(包括位置和速度信号)和后面的单元组成按给定值操纵的开环控制,用于设定光学系统的初始点以及 CPU 的初始化等. PAT 伺服控制系统采用直流电动机—磁性编码器回路驱动复合轴在方位和俯仰方向运动,组成内反馈控制,从而实现位置和速度控制.外反馈控制则由光学传感器获取信标光信号相对于视场中心的位置,经过信号处理模块后得到角误差反馈信号,从而完成在信标光信号出现在光学传感器视场内以后通信两端的对准和跟踪.

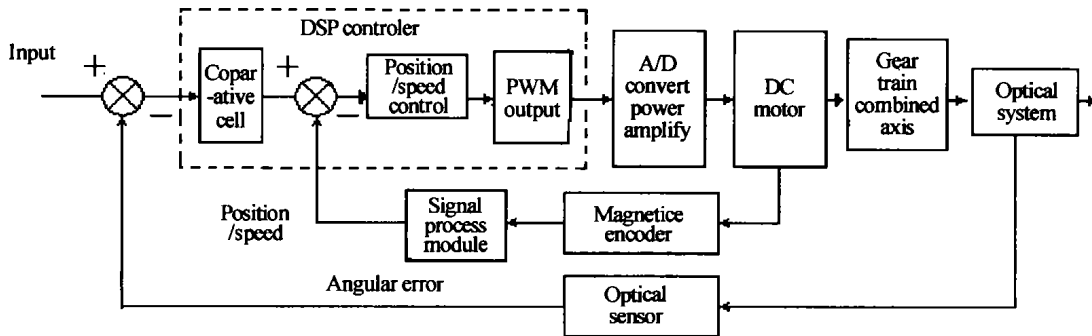


图 2 PAT 系统结构
Fig. 2 PAT system structure diagram

扫描过程的实现则是通过在 DSP 内部置入固定的扫描算法,CPU 不断地给直流电动机—磁性编码器回路提供给定值,实现开环和闭环相结合的控制.对直流电动机—磁性编码器回路,采用 PWM (基于脉宽调制)方式控制电机的转速,采用 I/O 端

口输出寄存器内容的方式实现扫描算法,采用磁性编码器检测转子位置、速度和转向,采用功率场效应管构成功率变换器.位置检测传感器将检测到的位置信号送至控制器,控制器将传来的信号进行数字滤波,再通过计算得到电机的实际转速,与外部给定

的转速进行比较. 如果给定速度大于电机的实际转速, 则速度调节器发出加速信号, PWM 波形的占空比增大, 功率器件的开通时间变长, 电机速度增高; 反之, 速度调节器发出减速信号, PWM 波形的占空比减小, 功率器件的开通时间变短, 电机速度降低. 同时, 可根据当前位置与拟定的位置比较来控制电机的转停和正反转.

2 试验系统及过程

试验设计的系统框图如图 3. 激光器发出激光, 经过滤光器件由光电耦合器件(CCD)接受. 视频信号经图像卡处理送入计算机. 计算机处理光斑图像产生光斑中心坐标. 坐标值再由串口送到数字信号处理(DSP)芯片. DSP 芯片根据坐标数值控制机械传动装置运动, 从而引起固定于其上的 CCD 位置和方向的变化, 完成对准.

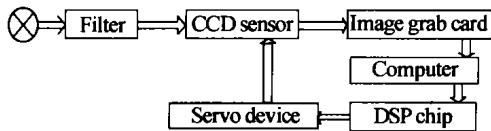


图 3 整体设计框图
Fig. 3 Holistic design diagram

2.1 计算机软机设计

本系统PC机上的图像处理模块是以VC++ 6.0 为编程平台, 基于文本视图结构程序.

采用 OKM60 视频采集卡自带 API 函数对采集卡进行初始化, 并生成 250 * 250 的灰度图像一帧, 存入缓存.

所有的针对该图像处理模块均在视图类中定义. 将缓存首地址传给图像处理模块, 得出光斑中心坐标(cx , cy). 再开始采下一帧图像. 同时, 将中心坐标传给串口通信模块.

考虑到本系统需较快的响应速度, 但其通信协议过程并不复杂的特点, 串口通信功能的实现并没有采取应用比较广泛 MSCComm 控件进行串口编程. 而是创建了 CSerialPortEx 类, 它是在 Remon Spekrijse 设计的 CSerialPort 类基础上设计的, 并增加了对二进制数据传输和块读写方式的支持和其他功能函数. 用其清晰的变量定义, 在创建 CSerialPort 类变量时对串口进行初始化. 考虑到时间响应性要求较高, 且信标光运动的连续性. 故采用单工, 八位数据位传输模式, 对精度稍有降低. 初始化命令如下

```
if(! mport. InitPort(this, 1, 19200, 'N', 8, 1))
    MessageBox("error");
```

再调用 vc++ 的底层 API 函数传送数据. 如下

```
* mport. m_szWriteBuffer=cx/2;
WriteFile ( mport. m _ hComm, mport. m _
szWriteBuffer, 1, 0, &mport. m_ov);
* mport. m_szWriteBuffer=cy/2;
WriteFile ( mport. m _ hComm, mport. m _
szWriteBuffer, 1, 0, &mport. m_ov);
```

同时, 在视图中绘出光斑位置, 可得一相应运动轨迹曲线.

2.2 伺服控制系统

以 TMS320LF2407ADSP 为控制芯片伺服系统包括: 改造后的全站仪, DSP 控制板, 功率变换驱动单元, 以及编码器反馈信号处理单元. 其中改造后的全站仪组成光学系统, 复合轴、以及机械传动系统等执行机构. 详情见参考文献[9].

2.3 试验过程

试验中采取波长 850 nm 的激光器, 固定于距 CCD 有 79 cm 能横向移动的光学支架上. CCD 为 800 * 600 的面阵型, 安装在改造后的全站仪顶上. 试验分为两部分.

1) 先打开激光器驱动电源和 CCD 电源, 使光斑落在 CCD 的视场内. 然后启动 PC 机内图像处理及串口通信程序, 使整个系统开始运转. 记下时间. 横向调节激光器位置及其角度. 到 16 秒中断程序. 用以观察系统的时间响应性.

2) 程序以单帧处理模式运行, 转动全站仪, 使方位角改变 0. 05°. 成像, 处理得出坐标. 如此 9 次. 用以分析系统的定位精度.

3 结果分析

试验中, 计算机 16 s 处理大约 400 帧图像, 生成光斑中心坐标 400 个. 程序处理一帧图像需 25 ms. 光斑中心坐标通过串口将数据传给 DSP 马达控制板, 数据传输速率为 19200 波特率, 即每秒可传 1200 个坐标, 传出一个二维坐标大约需 1 ms. 可见串口通信已能满足实时性要求.

跟踪马达运转的动作、将电动机的控制字存入存储器, 经由仿真软件 CC2000 导出^[10], Matlab 工具绘图^[8], 可以得到该电动机数字控制系统的动态响应曲线如图 4.

由图 4 可知, 将控制参数加以妥善的调整, 可以得到相当好的响应输出. 当所设置的位置移动量为 6000 时, 其稳定时间可以缩减到 16 ms 以内. 信标光定位处理的时间为 25 ms, 则其响应时间完全可以控制在 100 ms 以内. 对于精度和相应度要求更高的情况下, 可采用高精度细化算法^[11]和基于单片 FPGA 芯片高速亚像元边缘检测系统^[12, 13].

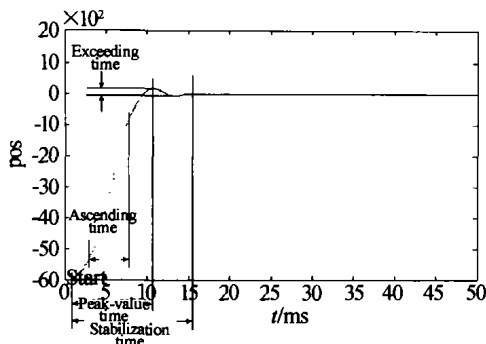


图 4 响应过程分析图

Fig. 4 Analytic diagram of responding process

实验中光源距 CCD 相机 79 cm, 采集的数据如

表 1.

表 1 采集光斑的中心坐标

采样次数	中心点横坐标(像素)	中心点纵坐标(像素)
1	122.50	125.51
2	128.93	125.19
3	135.64	124.79
4	132.66	126.00
5	139.61	124.61
6	146.12	125.32
7	153.12	124.50
8	159.98	125.69
9	166.79	125.85

为验证结果的正确性, 检验角度相对变化量. 横坐标平均变化 $\bar{\Delta}i=6.80$, 标准差为 0.21 个像素, 纵坐标平均变化 $\bar{\Delta}j=0.17$, 标准差为 0.03. 则

$$\Delta\theta_x = \arctan \frac{6.80 \times 6.5 \times 10^{-3}}{50} = 0.88 \text{ mrad} \quad (8)$$

$$\Delta\theta_y = \arctan \frac{0.17 \times 6.5 \times 10^{-3}}{50} = 0.02 \text{ mrad} \quad (9)$$

与全站仪转动角度相比, 水平角度变化量的测量值为 0.0504° , 角度测量的相对误差为 1.3%, 同时竖直方向有 0.02mrad 的随机抖动.

4 结论

本文提出一种空间光束捕获、跟踪设计方案, 并在实验室条件下实现其主要功能. 并对其定位精度和实时性进行了分析, 显示出良好性能. 这为由理论分析到实际星载 PAT 系统提供试验依据, 铺设过渡的桥梁.

参考文献

- 1 谢木军, 付承毓, 马佳光. 自由空间激光通信及其关键技术. 光电工程, 1999, 26(12): 23~28
Xie M J, Fu C Y, Ma J G. *Opto-electronic*, 1999, 26(12): 23~28
- 2 Ximetal S. Horizontal Link performance of the STRV2 laser experimemn ground terminals. *SPIE*, 1999, 3615: 11~22

- 3 蔡燕民, 陈刚, 童作人, 等. 155 Mb/s 大气传输光通信系统及其测试. 中国激光, 2000, 27(11): 1040~1044
Cai Y M, Chen G, Dong Z R, et al. *Chinese Journal of Lasers*, 2000, 27(11): 1040~1044
- 4 Willert C E, Gharib M. Digital particle image velocimetry. *Experiments in Fluids*, 1991, (10): 181~193
- 5 杨宜禾, 周维真. 成像跟踪技术导论. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1990. 53~89
Yang Y H, Zhou W Z. *Introduction of Image Tracking Technique*. Xi'an: Xi'an University Press, 1990. 53~89
- 6 詹玉书, 黄文虎, 聂文强, 等. 空间光通信的激光发射和接收技术及模拟实验. 半导体光电, 1999, 20(4): 281~284
Zhan Y S, Huang W H, Nie W Q, et al. *Semiconductor Optoelectronics*, 1999, 20(4): 281~284
- 7 周琳, 艾勇, 龚云华. 卫星激光通信中目标跟踪算法的改进. 红外与激光工程, 2004, 33(2): 185~188
Zhou L, Ai Y, Gong Y H. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(2): 185~188
- 8 孙未, 艾勇, 杨晋陵. 一种新型的大气传输光通信 APT 系统研究. 红外技术, 2003, 4(7): 42~44
Sun W, Ai Y, Yang J L. *Infrared Technology*, 2003, 4(7): 42~44
- 9 胡东利, 艾勇, 孙未. 基于 DSP 技术的卫星无线光通信 APT 系统. 光通信技术, 2004, 6(20): 7~10
Hu D L, Ai Y, Sun W. *Optical Communication Technology*, 2004, 6(20): 7~10
- 10 黄英哲, 董胜源. TMS320C240 原理与 C 语言控制应用实习. 中国水利水电出版社, 2003, 64~86, 327~378
Huang Y Z, Dong S Y. *Principle of TMS320C240 and Practice of Controlling Using C*. Chinese Water Resources Press, 2003: 64~86, 327~378
- 11 刘卫光, 周利华. 基于图象灰度分布的边缘中心定位算法. 光子学报, 2003, 32(9): 1122~1125
Liu W, Zhou L. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(9): 1122~1125
- 12 谷林, 胡晓东, 陈良益. 基于 FPGA 的线阵 CCD 亚像元边缘检测片上系统. 光子学报, 2004, 33(5): 617~621
Gu L, Hu X D, Chen L Y. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(5): 617~621
- 13 苏秀琴, 王飞, 刘文. 一种提高 CCD 目标测量数据处理速度的新方法. 光子学报, 2001, 30(7): 864~867
Su X Q, Wang F, Liu W. *Acta Photonica Sinica*, 2001, 30(7): 864~867

Experimentation of Real-time Acquisition and Tracking of Free Space Laser Beam and Analysis of the Result

Zhou Yalin, Ai Yong, Zuo Tao, Bao Libo

Wuhan University, College of Electronic Information, Hubei Wuhan 430079

Received date: 2005-01-03

Abstract A project of acquisition and tracking of free space laser beam is advanced. And its major function is realized in laboratory. Analyses of precision of location and responsibility is given out. The results present positioning time of beacon is less than 25 ms and the relative error of position precision is less than 1.3%. This conclusion could be of some values for design of practical PAT subsystem on satellite

Keywords Free space optics; Tracking; Acquisition; Control system

Zhou Yalin was born in 1974, in Wuhan, China. He received the Bachelor degree from a college now belongs to Wuhan University in 1998, then threw himself into work. At present he continued his education toward Master degree at FSO lab in the College of Electronic Information in Wuhan University. His research field currently is laser propagation, electronic engineer and image processing.

