

采用四象限探测器的智能跟踪定位算法

司栋森^{1,2}, 李增智¹, 王晓旭²

(1. 西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安; 2. 西安电子科技大学计算机学院, 710071, 西安)

摘要: 为了提高跟踪定位系统的跟踪精度与响应速度, 提出了一种增益可调的快速跟踪定位 (GAFT) 算法, 以实现对目标的快速定位及在信号较弱时的精确定位. 该算法首先根据目标在四象限探测器上光斑成像的大小、位置与输出信号间的关系, 确定光斑在探测器上的线性变化区间, 并在此区间上得到光斑移动与信号变化的对应关系, 再实时采集光斑在 4 个象限上的信号之和, 作为目标光斑信号强度, 然后计算光斑信号强度的变化率, 采用自适应学习的方法得到信号强度的变化趋势, 根据该趋势对信号增益进行动态调整, 从而提高信号的分辨率和跟踪精度. 实验数据表明, GAFT 算法在线性工作区间中通过改变光斑半径及调整光斑的信号强度等措施, 可以将跟踪精度提高到 0.049 7 mm.

关键词: 智能; 跟踪; 四象限探测器; 定位

中图分类号: TP211.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)04-0013-05

An Intelligent Tracking Algorithm Using Four-Quadrant Detector

SI Dongsan^{1,2}, LI Zengzhi¹, WANG Xiaoxu²

(1. School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Computer Science & Technology, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: A gain adjustable fast tracking (GAFT) algorithm is proposed to improve the tracking precision and reaction speed in tracking systems. The algorithm can quickly locate the position of the goal, and realize the precise tracking under the weaker signal. The GAFT determines the linear change interval of the goal in the sensor from the relation among the flare imaging size of the goal in four-quadrant detector, location and output signal. Then, the relation between mobile goal and output signal change within the linear change interval can be established. The sum of the four-quadrant detector output signals is real-time counted, and is regarded as a target flare signal strength. The change rate of the flare signal strength is then calculated. Then, the adaptive learning method is used to get the change tendency of the signal, and to realize the dynamic adjustment of signal gain so that the tracking precision can be improved when signal is weaker. Experimental results show that the GAFT increases the tracking precision to 0.0497 mm by changing the radius of goal, adjusting flare of signal intensity and other measures in linear intervals.

Keywords: intelligence; tracking; four quadrant detector; position

运动目标跟踪是视频监控、导弹末段制导、车辆及飞机的辅助驾驶等领域的关键技术, 对跟踪精度与响应时间的研究是目标跟踪算法研究的重要问

题^[1-2]. 运动目标的跟踪算法通常有基于运动模型算法^[3]、基于区域辨识算法^[4]及基于特征的算法^[5]等.

阳光跟踪定位方法主要有:光敏电阻法^[6]、光伏电池法^[7]和四象限探测器法^[8-9]几种。前2种方法存在2个问题:一是感光范围有限,大于一定的照度时会饱和,低于一定照度时则没响应;另一个问题是该元件输出特性的线性度较差,不适合测量连续量。采用四象限探测器的方法使用定位传感器(position sensitive detector, PSD)来检测目标的位置。PSD利用半导体光伏效应原理,具有很高的检测精度,分辨率可以达到 $1\text{ }\mu\text{m}$,响应时间 $0.8\text{ }\mu\text{s}$,可用于设计高精度、自适应的快速智能定位系统,应用于需要精密定位的激光准直、测角、自动跟踪等精密测量系统中。文献[8-9]中采用了PSD器件,但是没有考虑集光信号强度变化对测量精度的影响,当控制系统背景环境出现变化或者在信号较弱的情况下,会使检测信号的精度变差,导致系统跟踪精度下降。本文提出了一种增益可调的快速跟踪定位(gain adjustable fast tracking, GAFT)算法,改进了计算模型,实现了对目标的快速定位以及在弱信号情况下的高精度跟踪。

1 智能跟踪定位系统算法设计

PSD四象限探测器是一种光电探测器,其感光面按照 x 、 y 轴被分为4个部分,等同于直角坐标系中的4个象限^[10]。当激光束成像于探测器的光敏面上时,形成一个光斑,如图1所示。光斑在探测器的4个象限中被分成4个部分,面积分别表示为 S_I 、 S_{II} 、 S_{III} 、 S_{IV} ,这4块光斑在探测器表面分别产生的阻抗电流为 I_I 、 I_{II} 、 I_{III} 、 I_{IV} ,此时 I_i 与 S_i ($i \in I、II、III、IV$)的面积成正比,因此可以根据电流的大小计算出光斑在坐标系中的位置。

假定光斑的中心相对于探测器中心在 x 和 y 方向的偏移量分别为 Δx 和 Δy ,当激光光斑中心对准探测器时,圆形光斑中心与四象限探测器的中心重合,即 $\Delta x = \Delta y = 0$ (如图1a),这时 $S_I = S_{II} = S_{III} = S_{IV}$,即4个象限中的光斑面积相同,所对应的4

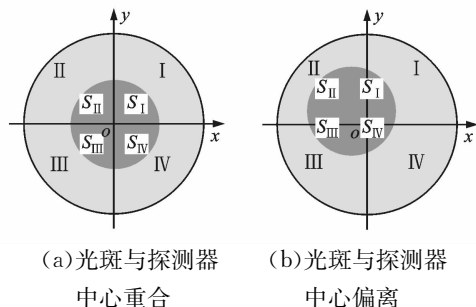


图1 光斑位置与各象限照射面积的关系

个象限产生的阻抗电流相等,即 $I_I = I_{II} = I_{III} = I_{IV}$,各个象限产生的转换电压也相等,即 $V_I = V_{II} = V_{III} = V_{IV}$ 。

当激光光斑中心偏离探测器中心时(如图1b),光斑的偏移将改变光斑在4个象限上的投影面积 S_i ,光斑的偏移量 Δx 和 Δy 与光斑在4个象限上的投影面积差成正比,即与探测器4个象限的输出电流差成正比。由于电流经过放大电路转换成电压,因此激光光斑中心的偏移距离可表示为

$$\Delta x = k \frac{S_I + S_{IV} - S_{II} - S_{III}}{S_I + S_{II} + S_{III} + S_{IV}} = k \frac{V_I + V_{IV} - V_{II} - V_{III}}{V_I + V_{II} + V_{III} + V_{IV}} \quad (1)$$

$$\Delta y = k \frac{S_I + S_{II} - S_{III} - S_{IV}}{S_I + S_{II} + S_{III} + S_{IV}} = k \frac{V_I + V_{II} - V_{III} - V_{IV}}{V_I + V_{II} + V_{III} + V_{IV}} \quad (2)$$

式中: V_I 、 V_{II} 、 V_{III} 、 V_{IV} 为四象限探测器各象限输出的光电流信号转换成的电压信号; k 是一个可调节系数,用于将式(1)、式(2)结果转换成光斑距离中心的偏移距离。

当光斑在四象限探测器上移动时, Δx 、 Δy 的变化曲线如图2所示。当激光光斑的中心处在 x 轴的A点时,光斑没有照在探测器上, x 轴上的输出电压 $V_x = 0$;当光斑的中心处在 x 轴的AB段时,光斑面积逐步变大, V_x 值逐步变大;当光斑的中心到达B点时,光斑面积最大, V_x 等于负最大值;在BC段,光斑在II、III象限的面积不变, V_x 等于负最大;当光斑的中心点处在CD段时,光斑逐步从II、III象限进入I、IV象限, V_x 值从负最大变化到正最大;光斑在DE、EF段同样依此变化。同理,也可得到光斑在 y 轴上相同的变化曲线。

在图2中,当光斑在CD区间移动时,输出信号

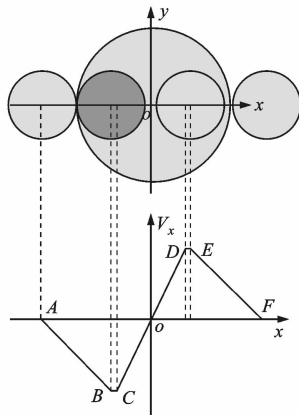


图2 光斑的位置变化曲线

与光斑位置成线性关系,因此可利用这个区间实现物体的快速跟踪,使跟踪过程一次到位.此时,输出信号的幅度与光斑大小有关:光斑越大,信号幅度越大,CD 的斜率也越大,这时光斑在坐标原点周围的细微移动就会引起较大的信号变化,系统的检测精度就越高.但是,如果光斑过大,可能会使得感光面上单位面积光强变化的梯度变小,会降低探测器感应的灵敏度,因此必须根据实际系统的光强范围调整一个合理的光斑尺寸.

2 智能跟踪定位系统的原理与算法

2.1 智能跟踪定位系统原理

根据上述 PSD 检测器的工作原理,通过检测探测器在 4 个象限的输出电压可算出光斑在探测器上的位置偏差 Δx 、 Δy . 实时采集偏差值,控制系统的瞄准角度,并通过修正该偏差值,可以得到一个高精度自适应智能定位系统,其原理如图 3 所示.

该系统探测器的 4 个象限所得的光电流信号经过电流电压转换、电压差分放大后被送入模数转换器,得到 4 个象限的输出电压 V_I 、 V_{II} 、 V_{III} 、 V_{IV} ,采用式(1)、式(2)得到光斑的偏差值 Δx 、 Δy ,根据偏差值控制 x 、 y 轴的步进电机的转动方向与步长,实现对目标物体的实时定位跟踪控制. 为了直观反映系统的工作状态,系统将这些采集值及控制值送到液晶显示器实时显示,并且通过串口送到 PC 机上显示、存储.

控制电路由 C8051F020CPU、信号放大电路、信号采集电路、步进电机驱动、步进电机、LCD 显示、按键、时钟、存储器、串口通信电路及其他传动装置组成.

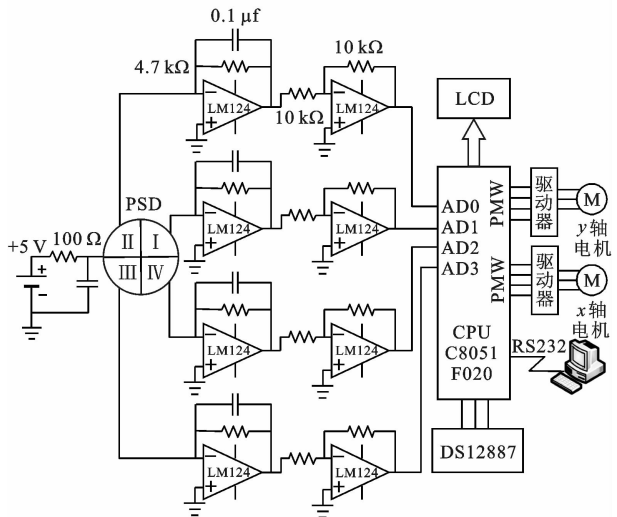


图 3 智能跟踪定位系统原理框图

在图 3 中,由于 PSD 器件的光电流很小,必须经过上面放大电路,进入模数转换(AD)通道的电压值在 0~2.5 V,放大器选择 LM124,采用 ± 5 V 供电,如果需要更高的电压范围及更高的变化精度,可以采用 ± 12 V 供电,并且调节放大器的电阻. 系统中 AD 采用 CPU 中自带的 12 位高速 AD,其模拟输入通道包括 8 输入模拟多路复用器和 12 位标准二进制逐次逼近式 AD 转换器. 对于 12 位精度,转换需要 50 个机器周期,即 25 μ s.

在 PC 机的主界面上,四象限的电压值、电机调整值可被显示出来,也可以显示激光光斑在传感器上的位置,如图 4 所示.

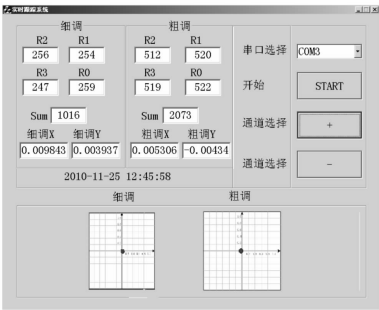


图 4 主监控界面图

2.2 GAFT 智能跟踪定位算法设计

当光斑位于图 2 中的 CD 段时,传感器工作在线性放大区,激光光斑中心的偏移距离 Δx 、 Δy 与跟踪电机的调整步长值 S_x 、 S_y 成正比,因此可调整式(1)、式(2)中的 k 值直接得到跟踪电机调整的步长值 S_x 、 S_y ,使跟踪过程一步到位,实现快速跟踪. 调节公式如下

$$S_x = k' \Delta x = k' \frac{V_I + V_{IV} - V_{II} - V_{III}}{V_I + V_{II} + V_{III} + V_{IV}} \tag{3}$$

$$S_y = k' \Delta y = k' \frac{V_I + V_{II} - V_{III} - V_{IV}}{V_I + V_{II} + V_{III} + V_{IV}} \tag{4}$$

式中: k' 为与控制电机相关的常数. GAFT 跟踪定位控制算法如图 5 所示.

当被测信号的强度较强时,系统的测量精度往往容易达到要求,而当被测信号较弱时,由于背景噪声、AD 分辨率等因素的影响,很难达到需要的控制精度,因此在算法中增加智能增益计算模块、中位值滤波计算模块、通道误差计算模块来提高系统精度,它们的设计在 2.3 节中详述.

2.3 GAFT 算法主要模块实现

采用智能增益计算模块通过智能学习方法自适

```
Channel_error(); //通道误差计算模块
Count_Gain(); //智能增益计算模块
Read_illumination (illumination); //计算照度光强
While(illumination>66) //当光强 小于30 lx, 不调整
{
    Read_AD(); //读4个通道的AD值
    Count_Gain(); //智能增益计算模块
    Fliter_AD (); //中位值平均滤波模块
    CountXY(); //计算光斑位置偏移量, Sx, Sy
    While (abs(Sx)>0.04)//Sx是算出的x轴调整距离
    {
        While (Sx<-0.04)
        {
            motor_run_forward(Sx); //控制x轴正向跟踪
        }
        While (Sx>0.04)
        {
            motor_run_reverse(Sx); //控制x轴反向跟踪
        }
    }
    While(abs(Sy)>0.04 //Sy是算出的y轴调整距离
    {
        While(Sy<-0.04)
        {
            Motor_run_forward(Sy); //控制y轴正向跟踪
        }
        While(Sy>0.04)
        {
            motor_run_reverse(Sy); //控制y轴反向跟踪
        }
    }
}
```

图 5 GAFT 自动跟踪定位控制算法

应地调整信号增益,从而提高测量精度. 当被测信号较弱时, V_x 较小, V_x 在 4 个象限的分辨率很低,系统精度变低. 为了提高信号测量精度,本文采用智能学习的方法来判定信号的强度,并根据当前信号强度值的变化量预测下一个信号强度的范围,据此动态调整各通道的信号增益,以提高信号精度.

采用智能学习方法自适应调整信号增益的算法如下. 由于 4 个象限输出信号量之和 V_N 反映了信号的强度,假定 V_N 、 V_{N-1} 、 V_{N+1} 分别是四象限探测器测到的信号强度当前值、上一次计算值及下一次的预测值. 为了提高测量精度,当信号强度较弱时,增大信号增益,使 AD 对信号的区分度增大. 当信号较强时,减小信号增益,使信号不超出 AD 的输入范围 $V_{\max}$. 在每次调整增益前系统进行一次动态学习过程,计算出 V_N 及变化量 ΔV ,据此预测 V_{N+1} 的值,实现信号的智能调节,从而适应信号强度变化带来的影响,提高系统测量精度. 动态学习过程算法流程如图 6 所示.

本文采用中位值滤波计算模块抑制工频干扰. 在信号较弱时,工频辐射干扰将对精度产生很大影响. 为了滤除工频干扰信号对系统的影响,本文采用中位值平均滤波算法:每 1 ms 采集一个点,对每个

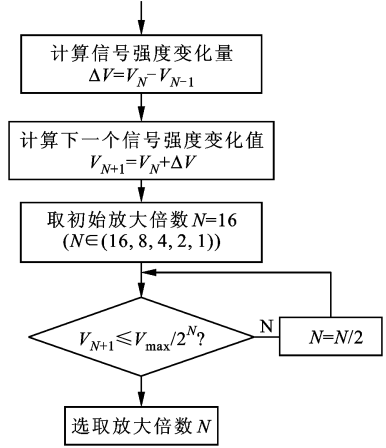


图 6 按照信号强度动态调节增益学习的算法流程

通道的 100 个采样数据采用中位值平均滤波算法排序,去掉其中的 20 个最大值、20 个最小值,对剩下的 60 个点进行算术平均,从而有效滤除采集过程中工频干扰及脉冲突变型干扰信号,使计算结果更加准确. 其中,采样周期是可调参数:为了提高系统信号的稳定性则可以适当加大采样周期;若要提高系统的灵敏度则可以减小采样周期.

另外采用通道误差计算模块消除各模拟量通道的固有误差对系统精度带来的影响. 在有多通道的信号采集系统中,各通道间的固有误差影响不同通道的信号测量精度,可通过硬件和软件的方法来消除通道间的固有误差. 在软件方面,通过误差修正模块采用标准信号源对各路传感器信号进行软件校正,保存校正结果作为修正差. 在硬件方面,采用同一套放大电路放大 4 路信号,消除各通道间的误差,将 4 路传感器输出接入模拟多路开关,其输出用同一套放大电路对各路信号进行放大,这样就消除了各路信号的固有误差.

除了以上几个关键模块之外,系统中 AD 的参考电压也影响着系统的测量精度,由于 AD 变换是基于其参考电压来进行的,参考电压的精度对系统的控制精度有直接影响. 在本设计中采用 12 位 AD,参考电压选 2.5 V,每一位 AD 值代表电压

$$V_{\text{bit}} = \frac{2.5V}{4096} = 0.6 \text{ mV} \tag{5}$$

因此,为了提高测量精度,必须采用高精度的基准参考电压电路,本设计采用精度为 0.5 mV 的 CAT8900 电路,以满足对变换精度的要求.

通过以上方法,可以在被测信号强度较弱时大大提高系统的测量精度,从而提高系统的跟踪性能.

3 测试结果及分析

对本文提出的 GAFT 算法的实验在一个精密位移测试平台上进行. 将 PSD 探测器固定在底板上,将激光发射器固定在位移测试平台上,让激光的光斑照射在 PSD 探测器上,通过移动位移测试平台改变激光发射器的光斑在 PSD 表面的像斑位置,通过实验测定光斑移动的距离与 PSD 探测器输出电流的关系,也能测试光斑的大小与输出电压的关系,验证 PSD 器件和信号处理电路的性能与质量,确保后续定位控制工作的精确可靠.

表 1 列出了光斑偏移距离 Δx 与输出电压 V_x 之间的实验数据.

表 1 各种光斑下输出电压及跟踪误差分析

$\Delta x/\text{mm}$	V_x/V		
	$r=5\text{ mm}$	$r=4\text{ mm}$	$r=3\text{ mm}$
-5	-4.612	-4.592	-4.566
-4	-4.605	-4.585	-4.172
-3	-4.617	-3.922	-3.390
-2	-3.592	-2.811	-2.378
-1	-1.915	-1.458	-1.216
-0	0.012	0.017	0.102
1	1.928	1.468	1.263
2	3.589	2.735	2.378
3	4.620	3.936	3.390
4	4.593	4.602	4.221
5	4.613	4.613	4.589
$\Delta_{\max}/\text{mm}$	-0.091	0.079	-0.049 7
V_x 相对误差/%	1.9	1.7	1.08

注: r 为光斑的半径; $\Delta_{\max}$ 表示每种光斑下在线性区内信号电压与拟合曲线标准电压误差最大值.

从表 1 中可以看出,随着光斑变小,测量精度将随之提高.

4 结 论

(1)光斑的大小会影响传感器输出信号的幅度. 输出信号的幅度太小,会降低光斑在中心点周围的分辨能力,从而影响系统的测量精度.

(2)光斑在线性区时,通过式(3)、式(4)直接得到控制电机的步长数,使控制一步到位,实现快速跟踪定位.

(3)信号强度太大会使传感器输出饱和,信号强度太小会使传感器输出幅度太低,影响测量精度. 可通过动态学习方法调节信号增益,使传感器信号满足输入要求.

(4)采用中位值平均滤波算法,有效滤除工频干扰及脉冲突变型干扰信号,提高跟踪精度.

(5)采用各模拟量通道的一致性设计方法,可以消除各通道在系统设计中的固有误差.

参考文献:

[1] 元向辉,韩崇昭,段战胜,等. 基于期望极大化算法的转弯机动目标跟踪[J]. 西安交通大学学报,2006, 40(2): 147-151.
YUAN Xianghui, HAN Chongzhao, DUAN Zhansheng, et al. Maneuvering target tracking with coordinated turn motion based on expectation maximization algorithm [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(2): 147-151.

[2] YU Feng, HE Ye. Improvement of positioning algorithm for four quadrant optoelectronic detection system [J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(4): 493-497.

[3] YUAN Zhiguo, QUE Peiwen, HUANG Zuoying. Design of a kind of automatic solar tracking equipment [J]. Instrumentation Devices, 2007, 22(2):30-33.

[4] 贾静平,张飞舟,柴艳妹. 基于支持矢量机和信任域的目标跟踪算法 [J]. 北京大学学报:自然科学版,2008, 44(5):67-73.
JIA Jingping, ZHANG Feizhou, CHAI Yanmei. Object tracking by using SVM and trust region method through scale space [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2008, 44(5):67-73.

[5] 孙斌 黄神治. 移动背景下运动目标检测与跟踪技术研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2011, 25(3):206-210.
SUN Bin, HUANG Shen zhi. Target detection and tracking under moving background [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2011, 25(3):206-210.

[6] SUN Feng, HUANG Kairen, ZHANG Xinizhu. Measurement of laser spot radius on quadrant photodiode [J]. Optics&Optoelectronic Technology, 2010, 8(1):55-59.

[7] YANG Cui, ZOU Jian, LIU Dezhi. Positioning error analysis of four quadrant detector [J]. Transducer and Micro System Technologies, 2009, 28(5):49-51.

[8] 余峰,何烨,李松,等. 四象限光电检测系统的定位算法研究及改进 [J]. 应用光学, 2008, 29(4):493-497.

- YU Feng, HE Ye, LI Song, et al. Improvement of positioning algorithm for four quadrant optoelectronic detection system [J]. Journal of Applied Optics, 2009, 29(4): 493-497.
- [9] DANG Liping, TANG Shugang, ZHOU Zhou. Characteristic analysis and optimization of quadrant detector output signal [J]. Opto-Electronic Engineering, 2010, 37(1): 16-20.
- [10] 张志峰, 余涛, 苏展, 等. 象光斑和四象限探测器象限面积大小关系的理论研究 [J]. 光子技术, 2005(3): 128-130.
- ZHANG Zhifeng, YU Tao, SU Zhan, et al. Like flare and four quadrant detector area size of the relationship between the theory research [J]. Photonic Technology, 2005(3): 128-130.

(编辑 刘杨)