

文章编号 1004-924X(2016)01-0187-08

双目标跟踪的三维信息非线性变结构控制

李 焱^{1*}, 张恩东², 周俊鹏¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 长春工业大学 电气与电子工程学院, 吉林 长春 130012)

摘要:采用传统的单 Bang-Bang 控制的光电设备进行精定位时,系统放大倍数为无穷大,所以系统不易稳定。本文分析了单 Bang-Bang 控制的不足,提出了一种变结构最优控制方法。该方法在粗跟踪时用 Bang-Bang 控制,在进入小偏差范围内切换为线性控制。在线性控制时,根据不同调节器的不同特点,提出了红外一阶捕获,红外二阶跟踪的策略,并同时给出了 Bang-Bang 控制和线性控制的切换准则,红外一阶捕获和红外二阶跟踪的切换准则。实验显示,采用提出的方法光电设备的 90°双目标定位能力在 2.3 s 左右,比传统方法缩短了近 1 s,快速性大大提高。另外,利用激光测距机可以给出舷角相差 90°的双目标三维信息数据率为 0.45 Hz,提高了双目标时系统的光电对抗能力。

关键词:双目标跟踪;快速定位;Bang-Bang 控制;变结构控制;三维信息

中图分类号:TJ810.37;TP273 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162401.0187

Variable structure control for three-dimensional information of double targets

LI Yan^{1*}, ZHANG En-dong², ZHOU Jun-peng¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *School of Electrical and Electronic Engineering,
Changchun University of Technology, Changchun 130012, China)*

* *Corresponding author, E-mail: liy211@163.com*

Abstract: When traditional Bang-Bang control in optoelectronic equipment is used in fine position of double-targets, the system is difficult to be stabilized because of its amplifying coefficient in infinity. This paper analyzes shortages of the Bang-Bang control, and proposes a kind of variable structure control, namely the coarse tracking algorithm based on the Bang-Bang control. It uses Bang-Bang control in the coarse tracking and switches it into linear control in a small deviation range. In the linear control, the strategies of infrared first-order capturing and infrared second-order tracking are proposed depending on characteristics of different regulators, and switching guidelines for the Bang-Bang control and linear control, and the infrared first-order capturing and infrared second-order tracking are given. The experiments show the proposed method makes the photoelectric equipment

收稿日期:2015-05-15;修订日期:2015-07-17.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2006aa701410);中国科学院知识创新工程领域前沿项目

spend around 2.3 s in 90° back and forth position, which is shorter nearly 1 s than that of traditional method. Meanwhile, the laser rangefinder gives the rate of three-dimensional information to be 0.45 Hz, and it improves the optoelectric countmeasuring ability of the system for double targets.

Key words: double target control; fast positioning; Bang-Bang control; variable structure control; three-dimensional information

1 引言

近年来,人们越来越多地将双目标能力作为光电设备的重要指标,因此对光电设备大角度快速定位的要求越来越高。传统的大角度快速定位控制方式是 Bang-Bang 控制,但是单 Bang-Bang 控制用于光电设备精定位时系统不易稳定,极易产生抖振现象。文献[1]利用相平面法描述了非线性 Bang-Bang 控制定位时系统产生的不稳定现象,针对雷达的大角度失调,引入双模控制^[1-2],但在线性控制时没有给出具体的捕获跟踪策略,实验结果也不尽人意,没有达到快速性和稳定性的最优结合。严格来讲,小位置偏差控制策略^[3]与变结构控制策略具有一定的相似性,但这种小位置偏差控制策略针对的仅仅是步进电机,不具有广泛性,且没有在光电设备中加以应用。受雷达引导偏差过大可使舰载光电设备迅速跟踪来袭目标的启发,文献[4-5]提出了一种半自动搜索与红外跟踪相结合的控制方式。跟踪时速度回路和位置回路分别采用二阶调节器进行调节,且取得了良好的跟踪效果。文献[6]利用廉价编码盘,基于 Bang-Bang 控制给出了一种最优控制策略,该方法节省了成本,但是定位精度比较低。

本文提出的变结构控制,与传统的单 Bang-Bang 控制和双模控制不同。其粗跟踪采用 Bang-Bang 控制^[7-8],以保证调转快速性,在进入小偏差范围后,切换为线性控制,并且在线性控制^[9-12]时,根据不同调节器的不同特点,提出了红外一阶捕获,红外二阶跟踪的策略。另外,本文还给出了不同阶段的切换标准。

2 变结构控制的控制方法

光电设备双目标能力的工作示意图如图 1 所示。

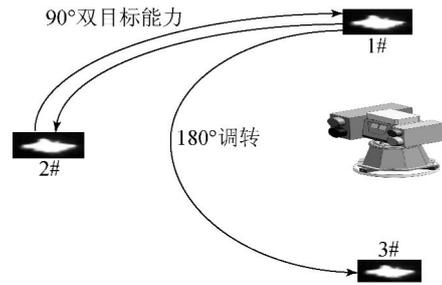


图 1 双目标能力工作示意图

Fig. 1 Double targets working scheme

Bang-Bang 控制是最优控制中一个极小值原理的特例。它为从一个边界值切换到另一个边界值的目标函数 $J(u) = \int_0^{t_f} dt = t_f$, 应使 t_f 最小^[1]。

本文首先分析了 Bang-Bang 控制的原理和不足,在此基础上提出了一种变结构控制,其原理图如图 2 所示。

由图 2 可知描述系统误差的动态方程为:

$$T\theta + \dot{\theta} = -Ku \quad (1)$$

Bang-Bang 控制时,应用状态空间法对图 2 所示变量进行解析,可得到以下切换方程:

$$\theta = -T\dot{\theta} - TKu \ln \left[1 - \frac{\dot{\theta}}{Ku} \right] \quad (2)$$

系统开环控制,且 $\theta_0 = \dot{\theta}_0 = 0$, T 为速度回路的等效时间常数。

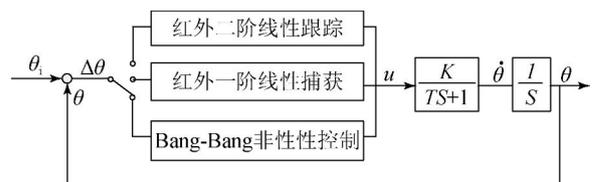


图 2 变结构控制原理图

Fig. 2 Schematic of variable structure control

由 Bang-Bang 控制的状态可知,最具有意义的是 u 正负变化时的切换线:

$$u = +1 \text{ 时,}$$

$$\theta = -T\dot{\theta} - TK \ln \left[1 - \frac{1}{K} \dot{\theta} \right], \quad (3)$$

$u = -1$ 时,

$$\theta = -T\dot{\theta} + TK \ln \left[1 + \frac{1}{K} \dot{\theta} \right]. \quad (4)$$

分析式(3)、(4),注意到切换线是 $u = +1$ 时 $\dot{\theta} < 0$, $u = -1$ 时 $\dot{\theta} > 0$,切换方式可写成:

$$\theta = -T\dot{\theta} + TK \ln \left[1 + \frac{1}{K} |\dot{\theta}| \right] \text{sgn} \dot{\theta}, \quad (5)$$

其中:

$$\text{sgn} \dot{\theta} = \begin{cases} +1, \dot{\theta} > 0 \\ 0, \dot{\theta} = 0 \\ -1, \dot{\theta} < 0 \end{cases}. \quad (6)$$

采用开环 Bang-Bang 控制时,关键是控制 u 的切换点的取值,但在工程中,开环控制很难使系统精确到达标定点,所以本系统采用闭环控制.对于 $\Delta\theta = \theta_i - \theta$,设 $\theta_i = 0$,则 $\Delta\theta = -\theta$,将 $\Delta\theta = -\theta$ 带入式(5)可得:

$$\Delta\theta = T\dot{\theta} - TK \ln \left[1 + \frac{1}{K} |\dot{\theta}| \right] \text{sgn} \dot{\theta}. \quad (7)$$

式(7)是闭环控制下的切换方程,可是由于系统采样周期 T_i 的存在,所以 u 的切换总是滞后.要想减小切换延迟,首先要提高采样频率,但是采样频率是有限制的,所以考虑对 u 的切换进行补偿,理论上讲,位置上的最大滞后距离为:

$$\Delta\theta_d = \dot{\theta}_{\max} T_i, \quad (8)$$

考虑了采样滞后补偿后的闭环控制下的切换方程为:

$$\Delta\theta = T\dot{\theta} - TK \ln \left[1 + \frac{1}{K} |\dot{\theta}| \right] \text{sgn} \dot{\theta} - \Delta\theta_d, \quad (9)$$

即当 $\Delta\theta$ 和 $\dot{\theta}$ 满足式(9)时,切换 u 的取值,其物理概念是明确的.

如果快速定位时系统采用单 Bang-Bang 控制,理论上可以使定位时间短,但是根据切换方程(3)可得:

$$\lim_{\dot{\theta} \rightarrow 0, \theta \rightarrow 0} \frac{d\dot{\theta}}{d\theta} = \lim_{\dot{\theta} \rightarrow 0, \theta \rightarrow 0} \frac{1}{T} \left[\frac{K}{\dot{\theta}} - 1 \right] \rightarrow \infty. \quad (10)$$

由式(10)可知,系统定位进入小偏差,接近定位点时,系统等效增益接近无穷大,所以系统很难准确定位到标定位置,系统不易稳定.

上述分析再次证明非线性 Bang-Bang 控制容易产生不稳定现象,长时间的震荡会造成机械磨损,增加控制误差.为了克服这一问题,本文结

合光电设备的跟踪模式提出了变结构控制.

Bang-Bang 最佳控制时 $\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}$ 曲线如图 3 所示.由图 3 可知,Bang-Bang 控制分为 3 部分:最大加速度加速段 ($u = +1$ 时),恒速段 ($u = 0$ 时)和最大负加速度减速段 ($u = -1$ 时).图 3 所示是 Bang-Bang 控制的一个周期,大角度定位时,速率呈梯形状,小角度定位时,速率呈三角形.快速定位第一阶段要求电机以最大加速度 $\ddot{\theta}_{\max}$ 加速,加速时间为 T_1 ,对于大角度定位, t_1 后则进入第二阶段恒速 $\dot{\theta}_{\max}$ 阶段,恒速时间为 T_2 ,之后进入第三阶段,第三阶段要求电机以最大负加速度 $-\ddot{\theta}_{\max}$ 减速,减速时间为 T_3 , t_3 之后进入线性控制,所以 Bang-Bang 控制时间即为 t_3 .

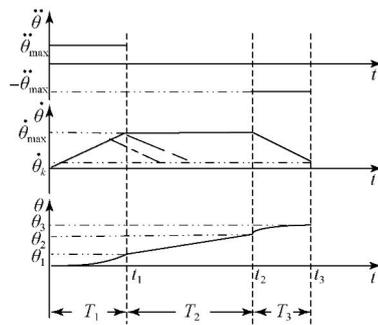


图 3 Bang-Bang 最佳控制时 $\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}$ 曲线

Fig. 3 Curves of $\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}$ for optimal Bang-Bang control

Bang-Bang 控制时,加速期、恒速期、减速期系统走过的距离分别为:

$$\begin{cases} \theta_1 = \frac{1}{2} \ddot{\theta}_{\max} T_1^2 \\ \theta_2 = \theta_1 + \dot{\theta}_{\max} T_2 \\ \theta_3 = \theta_1 + \theta_2 + \frac{\dot{\theta}_{\max}^2 - \dot{\theta}_k^2}{2\ddot{\theta}_{\max}} \end{cases}. \quad (11)$$

由此可知,电机的选取很重要,但是电机的速度、加速度裕量都是有限制的.对于快速定位伺服系统来说,求取精确的 $\ddot{\theta}_{\max}$ 和 $\dot{\theta}_{\max}$ 非常重要,它们的值会直接影响到系统最后快速定位的时间和精度.本文利用嵌入式 PC104 作为核心处理器,在程序中对 ark 进行赋值,ark 即为速度偏差码值.由实验可知,ark 在给定 2009 时,电机可达到速度最大值,通过实验数据得到 $\ddot{\theta}_{\max}$ 和 $\dot{\theta}_{\max}$,数据处理后的结果如图 4 所示.本系统的方位旋变量纲为 $15.33 \text{ code} \cdot \text{s}/(^{\circ})$,采样周期为 400 Hz,由图 4 可得电机的最大转速为 21.8

r/min, 即 $\dot{\theta}_{\max} = 131 (^{\circ})/s$, $\ddot{\theta}_{\max} = 850 (^{\circ})/s^2$ 。此方法简单方便, 测得的 $\dot{\theta}_{\max}$ 和 $\ddot{\theta}_{\max}$ 可信度高。

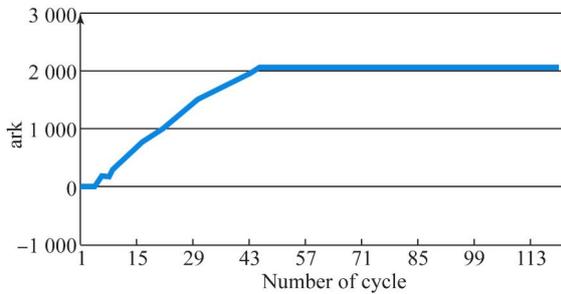


图 4 ark=1 900 时电机加速曲线

Fig. 4 Acceleration curve of motor with ark=1 900

t_3 之后进入红外一阶线性捕获阶段, 为了使快速定位伺服系统快速跟踪信号, 对于速度回路, 从减小低速干扰误差的角度考虑, 要尽量增大带宽和增益, 但受系统机械谐振频率的限制, 带宽也不能无止境增大。位置回路设计要兼顾速度, 还要考虑加速度下系统的稳态和动态性能指标。鉴于二阶校正具有系统带宽大, 跟踪控制信号能力强的特点, 所以本文采用红外二阶校正方法来跟踪目标。另外, 鉴于一阶校正时阶跃响应超调小的特点, 所以本文用其捕获目标。在采样周期中, 先计算 $\Delta\theta = \theta_i - \theta$ 和 $\dot{\theta}$, 根据 $\Delta\theta$ 和 $\dot{\theta}$ 的大小决定变结构控制的转换点, 再进入对应的控制模式。通过以上分析, 本文给出 Bang-Bang 控制切入到线性控制时的可行转换原则:

(1) 位置误差转换准则

位置误差 $\Delta\theta \geq \Delta\theta_L$ 时, 进行开关转换, 可根据位置回路校正输出的饱和值 U_s 求得 $\Delta\theta_L = U_s / P$, 其中 P 为位置校正环节的比例放大倍数。

(2) 速度转换准则

误差准则可能会使系统过早地进行 Bang-Bang 控制和线性控制的转换, 其间可能会发生多次 Bang-Bang 控制和线性控制间的相互转换, 所以转换时还要对 $\dot{\theta}$ 限速, 以保证 $\dot{\theta}$ 转化为线性控制后, 系统不再发生 Bang-Bang 控制和线性控制的转换。

假设选定 Bang-Bang 控制切入到线性控制时的 $\Delta\theta = \Delta\theta_L$, 那么根据工程经验有, 红外一阶捕获切入到红外二阶跟踪的转换准则为: $\Delta\theta_2 \approx$

$$\frac{1}{3} \Delta\theta_L。$$

3 变结构伺服系统的数字化实现

3.1 控制方法

快速定位伺服系统是一个位置跟随系统, 采用速度和位置双闭环控制模式, 由方位和俯仰两套相互独立子系统构成, 除方位系统需要正割补偿外, 两个子系统的结构形式相同, 通常来说, 方位角的定位角度要比俯仰角的定位角度大, 耗费时间长, 所以本文重点研究方位电机。光电设备快速定位伺服系统原理图如图 5 所示。红外一阶捕获时 $G_{P1}(S)$ 为一阶调节器, 红外二阶跟踪时 $G_{P2}(S)$ 为二阶调节器, 跟踪时, 为了保证跟踪精度, 往往还要加前馈环节, 加速度补偿环节等。

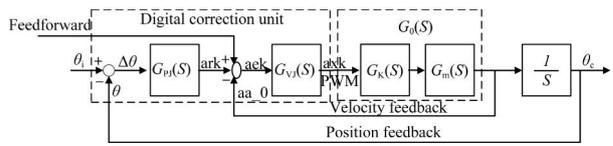


图 5 光电设备快速定位伺服系统原理图

Fig. 5 Diagram of fast positioning servo system based on photoelectric equipment

快速定位系统 $G_0(s)$ 为等效电机及负载传递函数, $G_k(s)$ 代表功率放大环节, 是一个比例环节, $G_m(s)$ 代表不考虑高频谐振时的跟踪架及电机环节。

一阶跟踪模式时, 位置校正环节的数学模型

$$\text{为 } G_{P1}(S) = \frac{K_{P1}(T_{2p}S + 1)}{(T_{1p}S + 1)}, \text{ 速度校正环节的数学}$$

$$\text{模型为 } G_{V1}(S) = \frac{K_V(T_{V2}S + 1)(T_{V3}S + 1)}{(T_{V1}S + 1)(T_{V4}S + 1)}; \text{ 二阶}$$

跟踪模式时, 位置校正环节的数学模型为 $G_{P2}(S)$

$$= \frac{K_P(T_{P2}S + 1)(T_{P3}S + 1)}{(T_{P1}S + 1)(T_{P4}S + 1)}。$$

通过 MATLAB 和 ORIGIN 拟合等仿真软件可求得各个校正环节的参数。经过仿真实验可得, 方位子系统一阶跟踪模式时, 位置校正环节为

$$G_{P1}(S) = \frac{0.6(S + 1.0)}{(S + 0.1594)}, \text{ 速度校正环节为 } G_{V1}(S)$$

$$= \frac{500(S + 83.06)(S + 8.2)}{(S + 80.96)(S + 0.0349)}, \text{ 二阶跟踪模式时位置}$$

校正环节为 $G_{pj}(S) = \frac{1.440(S+2.5)(S+22.19)}{(S+28.17)(S+0.0413)}$ 。

图 6 是位置回路闭环后的 Bode 图,闭环带宽 $\omega_{bp} = 29.2 \text{ rad/s}$ 。

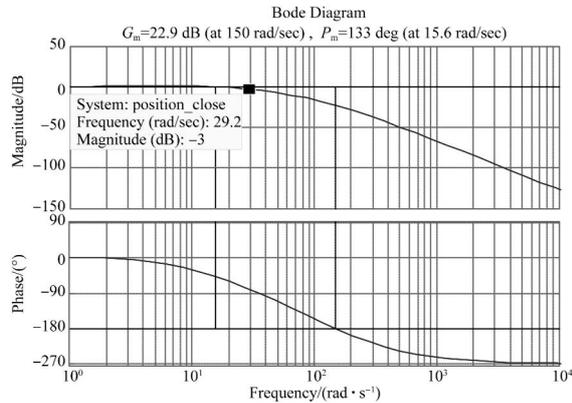


图 6 位置回路闭环波特图

Fig. 6 Bode diagram of position loop

3.2 硬件构成

图 7 是快速定位伺服系统的硬件原理图。本系统利用 PC104 总线的嵌入式计算机作为核心处理器,译码电路采用 Altera 公司的 CPLD,其编程语言为 Verilog,由 TL16C754 接收和发送子函数数据,利用双线性变换进行离散化处理,采用 19 位高精度旋转变压器所测速度作为反馈值,激光测距系统采用 $1.06 \mu\text{m}$ 波长的光源。红外系统采用一套像元数为 640×512 的中波红外焦平面探测器组件^[13],光学系统的视场均为 $3^\circ \times 2.4^\circ$,可实现跟踪功能。电机的控制方式采用双极 PWM 功率驱动方式,此种驱动方式可以产生零位震颤效应,在系统低速或定位时,可以有效消除负载的静摩擦^[5]。

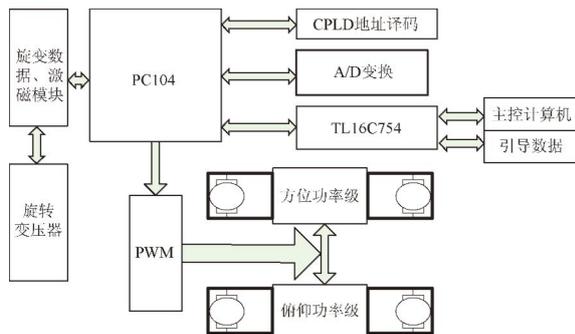


图 7 伺服系统硬件原理图

Fig. 7 Diagram of hardware for servo system

4 测量与实验结果

图 8 和图 9 分别是目标从 Bang-Bang 控制切换到线性控制后,捕获和跟踪实物的模拟图像。

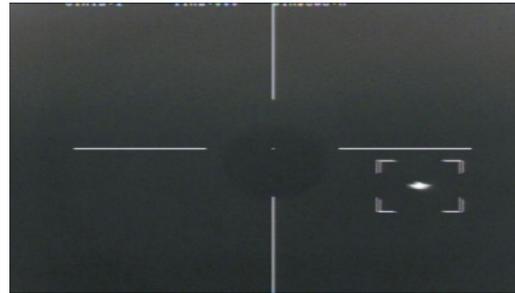


图 8 目标红外一阶线性捕获阶段

Fig. 8 Infrared linear capture stage



图 9 目标红外二阶线性跟踪阶段

Fig. 9 Infrared linear tracking stage

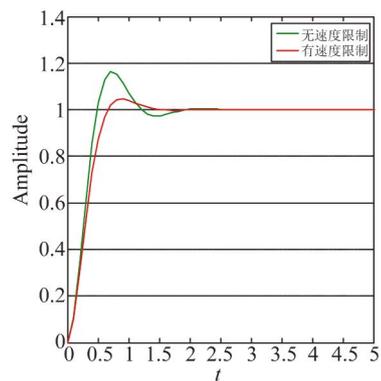


图 10 捕获阶段有无速度限制的系统阶跃响应

Fig. 10 Step response of capture phase with/without speed limitation

Bang-Bang 控制和线性控制的速度转换准则要求对 $\dot{\theta}$ 限速。根据实际工程和的差异理论模型的理论值,在其附近进行参数试验,最终选定 $\dot{\theta}_m = 3 \text{ rad/s}$,图 10 为所设的两种系统状态下的系统阶

跃响应,一种状态为红外一阶捕获阶段,不对 $\dot{\theta}$ 限速;另一种状态为红外一阶捕获阶段,对 $\dot{\theta}$ 限速。从图 10 可以看出对 $\dot{\theta}$ 限速后,超调量和调节时间均明显降低,限速后,虽然调节时间仍然不够短,但是超调量的减小保证了红外跟踪环节的顺利进行。

系统要求双目标 90° 往返定位时间不能超过 3 s;大角度失调时, 180° 定位时间不超过 2.5 s。根据位置速度切换原则,可以确定 Bang-Bang 控制切换到红外一阶捕获阶段的 θ ,转二阶调节器后,开启激光测距机,为了保证反馈信息的准确性,保持采样 4 帧,根据所求得 $\ddot{\theta}_{\max}$ 和 $\dot{\theta}_{\max}$,可得 Bang-Bang 控制用时 t_3 。利用输入速度信号和输出速度信号的实验数据得到 Bang-Bang 控制的速度响应特性曲线,如图 11 所示。由图 11 可知,虽然对系统进行了采样滞后补偿,但是由于方位速度回路带宽有一定的限度,所以并不能完全复现输入的速度信号,因此必然存在某种平滑和滞后作用,所用调转时间要比理论值大些。

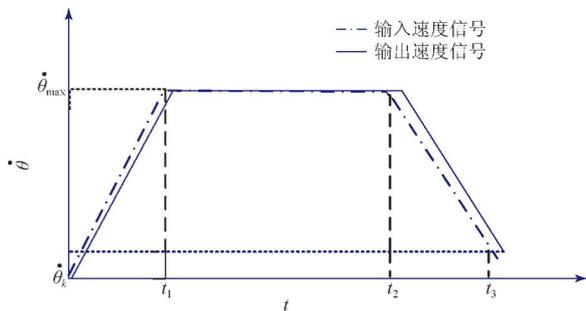


图 11 Bang-Bang 控制的速度响应特性

Fig. 11 Speed response feature of Bang-Bang control

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
1	设备状态	1帧号	2帧号	3帧号	4帧号	5帧号	6帧号	7帧号	8帧号	9帧号	10帧号	11帧号	12帧号	13帧号	14帧号	15帧号	16帧号	17帧号	18帧号	19帧号	20帧号	21帧号	22帧号	23帧号
2	工作正常	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	工作正常	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	工作正常	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	工作正常	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	工作正常	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	工作正常	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	工作正常	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	工作正常	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	工作正常	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	工作正常	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	工作正常	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	工作正常	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	工作正常	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	工作正常	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	工作正常	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	工作正常	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	工作正常	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	工作正常	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	工作正常	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	工作正常	10030	44.9121	44.9035	1.07	-0.06	622230	32769	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	工作正常	10030	45.0089	44.978	3.01	-0.12	622162	32769	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	工作正常	10030	45.0275	44.978	-1.08	0.01	622175	32769	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	工作正常	10030	44.9198	44.978	-1.6	0.03	622437	32769	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

图 12 变结构控制录取报文图

Fig. 12 Tracking record of variable structure control

图 12 是变结构控制时 90° 双目标的一部分录取报文,从报文图中可获得光电设备的三维信息。

对本系统典型角度的双目标能力和单次调转能力进行统计,结果如表 1 所示。

表 1 典型定位角度所用的实际时间

Tab. 1 Actual consuming times of typical location angles

	三维信息 数据率/Hz	激光测距机 反馈距离信息
单 180° 调转	0.53	有效
单 90° 调转	0.83	有效
单 60° 调转	1.11	有效
90° 双目标	0.45	有效
60° 双目标	0.50	有效
30° 双目标	0.77	有效

5 结 论

本文针对单 Bang-Bang 控制在精确定位时不易稳定等不足,提出了一种变结构控制方法,即粗跟踪用 Bang-Bang 控制,在进入小偏差范围内切换为线性控制,并且在线性控制时,根据不同调节器的不同特点,提出了“红外一阶捕获,红外二阶跟踪”的策略,同时给出了 Bang-Bang 控制和线性控制的切换准则以及红外一阶捕获切换为红外二阶跟踪的转换准则。在实验中取得了良好的效果,使光电设备 90° 双目标能力在 2.3 s 左右, 180° 调转用时在 1.9 s 左右,比传统方法缩短了近 1 s,快速性大大提高。利用激光测距机可以得到舷角相差 90° 双目标的三维信息数据率为 0.45 Hz。本文提出的控制策略已在某工程中得到应用,具有很高的实用价值。

参考文献:

- [1] 周永清. 雷达伺服快速定位 Bang-Bang 控制的数字实现[J]. 系统工程与电子技术, 1989(5):41-47.
ZHOU Y Q. Digital realization of Bang-Bang control of Radar servo fast positioning [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 1989(5):41-47. (in Chinese)
- [2] 谢慕君, 葛文奇. 快速定位系统最佳转换点的确定[J]. 光学精密工程, 1997, 5(4):53-57.
XIE M J, GE W Q. Confirmation of optimal transformation point in fast positioning system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1997, 5(4):53-57. (in Chinese)
- [3] 李汉. 一种步进电机快速准确定位系统的设计及其分析[J]. 微电机, 2012, 45(9):91-95.
LI H. Design and analysis of a rapid and precise positioning system of stepper motor[J]. *MICROMOTORS*, 2012, 45(9):91-95. (in Chinese)
- [4] 李焱, 曹立华, 王弟男. 惯导平台下舰载光电搜索跟踪系统的控制[J]. 光学精密工程, 2011, 19(5):1126-1133.
LI Y, CAO L H, WANG D N. Controlling of ship-borne optoelectronic searching and tracking system based on inertial navigation platform[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(5):1126-1133. (in Chinese)
- [5] 彭淑萍, 陈涛, 刘廷霞, 等. 激光发射系统快速反射镜的光线反射过程[J]. 光学精密工程, 2015, 23(2):379-386.
PENG SH P, CHEN T, LIU T X, et al.. Reflection process of fast-steering of mirror of laser launching system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(2):379-386. (in Chinese)
- [6] 张寅孩, 张仲超. 用 Bang-Bang 控制策略实现快速定位最优系统[J]. 电力电子技术, 2003, 37(1):22-24.
ZHANG Y H, ZHANG ZH CH. A high-performance high-speed position orientation optimum system with low-cost based on Bang-Bang controller [J]. *Power Electronics*, 2003, 37(1):22-24. (in Chinese)
- [7] BEERER M J. *Adaptive Filter Techniques for Optical Beam Jitter Control and Target Tracking* [D]. Monterey, CA, :Naval Postgraduate School, 2008:15-33.
- [8] 颜佳, 吴敏渊. 遮挡环境下采用在线 Boosting 的目标跟踪[J]. 光学精密工程, 2012, 20(2):439-446.
YAN J, WU M Y. On-line boosting based target tracking under occlusion [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(2):439-446. (in Chinese)
- [9] 程国扬, 曾佳福. 快速定位伺服系统的控制器设计[J]. 电机与控制学报, 2009.
CHENG G Y, ZENG J F. Controller design for fast positioning servo systems [J]. *Electric Machines and Control*, 2009. (in Chinese)
- [10] 孙麟治, 李鸣鸣, 程维明. 精密定位技术研究[J]. 光学精密工程, 2005, 13(增):69-75.
SUN L ZH, LI M M, CHENG W M. Study on precision positioning technique [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(Supp.):69-75. (in Chinese)
- [11] 孙鸽, 马冬梅, 张海涛. 干涉仪器传递函数的检测方法[J]. 中国光学, 2014, 7(1):137-143.
SUN G, MA D M, ZHANG H T. Interferometer instrument transfer function testing method [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(1):137-143. (in Chinese)
- [12] VAZQUEZ A, BARRADO E, OLIAS. Theoretical study and implementation of a high dynamic performance, high efficiency and low voltage hybrid power supply[C]. *IEEE 32nd Annual Power Electronics Specialists Conference, Jun. 17-21, 2001, Vancouver, Canada*, 2001, 3:1517-1522.
- [13] 骆守俊, 夏寅辉, 杨宁宁, 等. 扫描型长波红外连续变焦光学系统[J]. 中国光学, 2015, 8(1):107-113.
LUO SH J, XIA Y H, YANG N N, et al.. Long-wavelength infrared continuous zoom scanning optical system [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(1):107-113. (in Chinese)
- [14] 陈娟. 数字化光电跟踪系统定位极限环的研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2003.
CHEN J. *Study on the Limit Positioning Cycle in the Digital Electronic Tracking System* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2003. (in Chinese)
- [15] 周俊鹏, 李焱, 王一卉, 等. 舰载光电伺服设备的系统辨识研究[J]. 液晶与显示, 2014, 29(5):74-79.

ZHOU J P, LI Y, WANG Y H, *et al.*. Ship board photoelectric equipment servo system iden-

tification [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2014, 29(5): 74-79. (in Chinese)

作者简介:



李焱(1980—),男,吉林长春人,博士,副研究员,2003年于吉林大学获得学士学位,2010年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位,主要从事电子学设计、动机座光电系统伺服控制、舰载光电对抗设备总体设计等研究。E-mail:liy211@163.com



张恩东(1989—),男,山东潍坊人,硕士研究生,2013年于济南大学获得学士学位,主要从事电力电子与电气传动、舰载光电设备伺服控制、快速定位伺服控制等技术的研究。E-mail: zhang_en_dong@163.com