



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2404502

引用格式:高伟,闫亚东,韦明智,等.基于视觉的任意反射面速度干涉仪自动准直系统[J].科学技术与工程,2025,25(16):6797-6803.

Gao Wei, Yan Yadong, Wei Mingzhi, et al. VISAR automatic alignment system based on vision[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(16): 6797-6803.

自动化技术、计算机技术

基于视觉的任意反射面速度干涉仪自动准直系统

高伟, 闫亚东, 韦明智, 李奇, 庞放心

(中国科学院西安光学精密机械研究所先进光学仪器研究室, 西安 710119)

摘要 针对现有任意反射面速度干涉仪(velocity interferometer system for any reflector, VISAR)装置中依靠人工准直光路的现状,同时为满足未来对远程自动化控制的需求,提出一种新的光路自动准直的方法。该方法通过互补金属氧化物半导体(complementary metal oxide semiconductor, CMOS)间接测量并以光斑的像素偏差为系统输入,通过系数矩阵转换和离散模糊反馈控制方法快速消除误差。基于Windows的控制和自动化技术(the Windows control and automation technology, TwinCAT)中视觉和运动等模块,将各模块分别运行在不同的实时内核中,消除了视觉与运动控制模块间的通信环节,实现了快速实时的闭环控制。经过冲击波速度测量实验验证,该系统实现了远程“一键式”自动准直,可将准直时间缩短到2 s,准直精度为4.5 μm ,解决了现有装置人工调节效率不高的问题,提高了系统的精度和稳定性。

关键词 自动准直;任意反射面速度干涉仪(VISAR);基于Windows的控制和自动化技术(TwinCAT);二维镜架;模糊控制;图像处理

中图分类号 TP29; 文献标志码 A

VISAR Automatic Alignment System Based on Vision

GAO Wei, YAN Ya-dong, WEI Ming-zhi, LI Qi, PANG Fang-xin

(Advanced Optical Instrument Laboratory, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,
Chinese Academy of Science, Xi'an 710119, China)

[Abstract] In response to the current situation of relying on manual alignment of the optical path in existing velocity interferometer system for any reflector(VISAR) devices, and to meet the future demand for remote automated control, a new method for automatic alignment of the optical path was proposed. The complementary metal oxide semiconductor(CMOS) of this method was measured indirectly, and the pixel deviation of the light spot was used as a system input. Coefficient matrix transformation and discrete fuzzy feedback control methods were used to quickly eliminate the errors. Based on the modules such as vision and motion in the Windows control and automation technology(TwinCAT), each of which was run in a different real-time kernel, the communication link between the vision and motion control modules was eliminated, and fast real-time closed-loop control was realized. After the experimental verification of shock wave velocity measurement, the remote “one-button” automatic alignment was realized. The system can shorten the alignment time to 2 s and improve the alignment accuracy to 4.5 μm . The problem of inefficient manual adjustment of the existing device was solved, and the accuracy and stability of the system were improved.

[Keywords] automatic alignment; velocity interferometer system for any reflector(VISAR); the Windows control and automation technology(TwinCAT); two-dimensional frame; fuzzy control; image processing

在高功率激光装置中,诊断测量设备是评价测量物理参数的重要组成部分。任意反射面速度干涉仪系统是诊断冲击波作用下样品自由面速度剖面或离子速度剖面的主要技术,可将透明材料中的冲击波波阵面反射的信号光通过光学系统收集并传递至干涉系统,利用多普勒频移的原理对目标靶的冲击波速度进行测量分析^[1]。

在现有装置的任意反射面速度干涉仪(velocity interferometer system for any reflector, VISAR)系统,每次实验前需人工手动调节从注入系统到测量系统的光路准直部分,制约了整体装置的运行效率。此外,结构蠕变、机械振动以及现场温湿度、空气扰动等环境因素带来的光束漂移也使得测量精度无法保证。新一代高功率激光装置的光路长度和数

收稿日期:2024-06-17; 修订日期:2025-03-07

第一作者:高伟(1993—),男,汉族,山西吕梁人,硕士,工程师。研究方向:光电测量及自动化技术。E-mail:gaowei2@opt.ac.cn。

投稿网址:www.stae.com.cn

量成倍增加,设备的数量和系统复杂性也成倍增加,对远程化、自动化和规模化要求提出了更高的要求。因此,快速、精确地将靶室光束准直到测量系统成为制约现有装置高效运行和满足未来装置更高需求的重要因素。

美国 VISAR 系统的准直已实现远程电动调节^[2-3]。中国 VISAR 系统中的准直模块目前还未实现电动准直功能^[4],均采用人工调节的方式,每次调节时间在 1 h 以上,不仅费时,而且无法保证调节精度。中国其他现有的自动准直方法基本采用分束器或透镜将光束直接导入互补金属氧化物半导体 (complementary metal oxide semiconductor, CMOS) 等探测器靶面^[5-7]。该系统减少了分束镜等元件,将传感器直接观察透镜的光斑,可实现快速大量部署,简化了光路校准过程,降低了光路损耗。

常见的光电探测类设备主要包括:位置灵敏探测器 (position sensitive detector, PSD)、四象限光电探测器 (four-quadrant photodetector, QD)、电荷耦合器件 (charge-coupled device, CCD) 和 CMOS 等。PSD 是一种光电位置敏感器件,利用半导体横向光电效应实现定位,但其内部的结电容分布不均匀,边缘处线性度比较差,对于距离较远的目标,PSD 不能准确定位。QD 是一种光伏型半导体探测器件,由 4 个探测区域组合到为光电探测面,具有噪声小,探测灵敏度高,响应速度快,分辨率高的特点,但存在死区的限制及光斑漂移的影响。CMOS 和 CCD 都是通过图像信息获取目标的几何中心,CMOS 相较于 CCD 具有速度快,成本低等优势。通过将 CMOS 相机集成到基于 Windows 的控制和自动化技术 (the Windows control and automation technology, TwinCAT) 独有的实时内核视觉系统中,相较于 PSD 和 QD 所需的复杂信号处理系统,具有成本低、响应

迅速和系统耦合性高等优势。

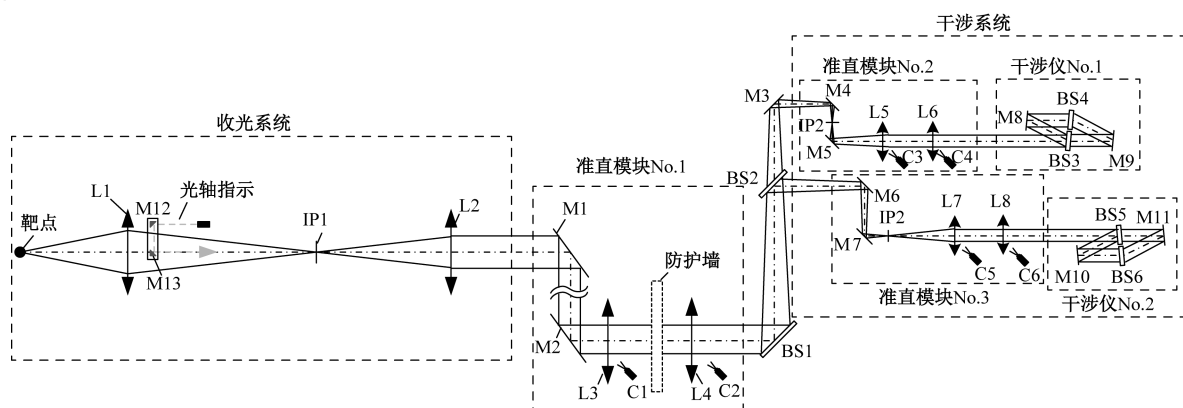
为满足现场实验装置快速准直和大规模系统集成的需求,适应远程集中控制的需求,设计一套可快速安装的自动准直系统并应用于 VISAR 系统中,该系统包括二维镜架、透镜、CMOS 和控制系统;建立间接测量探测光束实际坐标与目标坐标关系的模型,建立标定计算系数矩阵;结合模糊反馈控制的方法将视觉系统与运动控制系统内部耦合,缩短准直时间,提高准直精度,实现自动准直系统的模块化、自动化和集成化。

1 准直系统设计

1.1 VISAR 自动准直需求

在 VISAR 装置每次实验前,靶点位置和搭载平台的位姿均会发生微小变化,导致从靶室发出的光束到条纹相机等光电探测设备的光束发生微小变化,因此需通过光路转折将其准直到预定坐标并满足现场试验对快速和准确要求。随着靶室辐射剂量的不断增加,为满足远程自动化控制和改进传统以人工方式装调的要求,在现有 VISAR 装置的基础上设计电动镜架自动控制系统对光路进行远程调节。

VISAR 系统的光路结构如图 1 所示,包括前端的收光系统、后端的测量干涉系统及中间的自动准直系统。在实验前,从 Target 到 BS1 的光路会发生微小变化导致测量光路无法干涉,因此需要将 BS1 前发生变化的光路准直到之前标定过的光束位置。自动准直模块包括 3 个模块,共 6 个 CMOS 相机、3 组二维调节镜架和 3 组透镜。由于靶点发出的频移光出射高度与测量平台光轴高度的不同,并且靶球更换时光路会发生偏移,故需在防护墙两侧设计一套准直模块 No. 1,用来将光路准直到中心位置并导入干涉仪中。此外,干涉仪前端也包括两个准直



L1 ~ L8 为不同位置的透镜;M1 ~ M13 为不同位置的反射镜;IP1、IP2 分别为一次像面和二次像面;
BS1 ~ BS6 为不同位置的半透半反镜;C1 ~ C6 为不同位置的相机

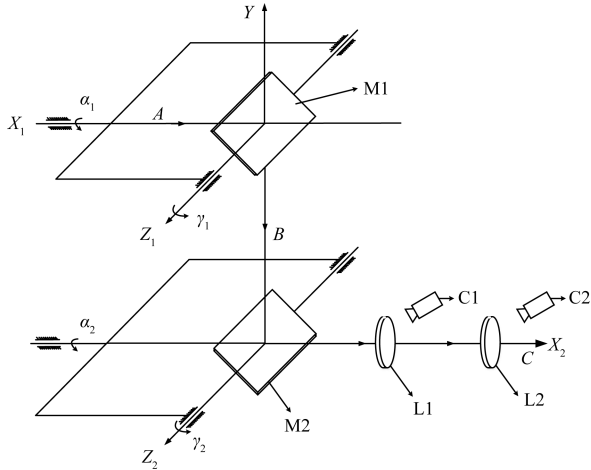
图 1 系统光路图

Fig. 1 System optical path

模块 No.2 和 No.3,其作用是将光束准直,在干涉模块中进行冲击波速度的测量。以准直模块 No.1 为例进行说明。

1.2 自动准直模型

一般的光电探测类设备通过分束镜使光束垂直进入传感器靶面,本系统设计了一种间接测量光束位置的方案,无需进行光路转折。将两个 CMOS 相机斜置于光路外侧,通过图像处理获取光束几何中心位置并对步进电机进行控制,自动准直模块的简化模型如图 2 所示。



M1、M2 为不同的反射镜;X₁、X₂、Z₁、Z₂、Y 为不同反射镜的坐标系;A、B、C 为光路的指示方向;α₁、α₂ 为不同反射镜绕 X 轴的旋转量;γ₁、γ₂ 为不同反射镜绕 Z 轴的旋转量;L1、L2 为不同的透镜;C1、C2 为不同的相机

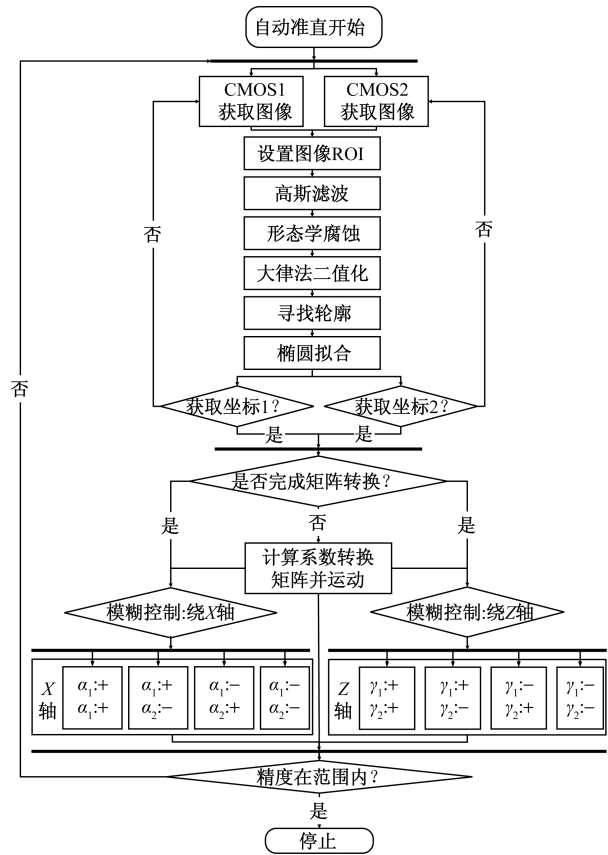
图 2 自动准直模型

Fig. 2 Automatic alignment model

图 2 中,该模块由一对二维电动可调反射镜 M1、M2、两个透镜 L1、L2 和两个 CMOS 相机 C1、C2 构成,透镜 L1、L2 设置于防护墙的两侧,相距较远以提高调节精度。首先最前端的基准指示光束经过 M1 和 M1 两个电动反射镜到达 L1、L2,C1、C2 通过实时监视光斑位置得到实际坐标相对于理论坐标中心的偏差值,通过反馈调节完成二维电动镜架的闭环控制,使光路穿过 L1 和 L2 的标定中心,根据“两点一线”原理达到光路自动准直的目的。

1.3 自动准直原理

自动准直模型以 CMOS 相机在线识别到的光斑作为唯一已经条件,其他包括入射光、反射镜偏角等参数均为未知条件。首先通过一系列图像处理获取光斑的标定坐标,然后通过系数矩阵转换和模糊反馈的方法控制步进电机使反射镜 M1 和 M2 分别绕 X 轴和 Z 轴转动,即调节图 3 中所示的变量 (α₁、α₂、γ₁、γ₂),最终使光束与 L1、L2 标定坐标重合,如图 3 所示。



α₁、α₂ 为不同反射镜绕 X 轴的旋转量;γ₁、γ₂ 为不同反射镜绕 Z 轴的旋转量;RIO(region of interest) 为感兴趣区域

图 3 自动准直流程

Fig. 3 Automatic alignment process

设 M1 反射镜绕 X 轴和 Z 轴的电机移动量分别为 u₁、v₁, M2 反射镜绕 X 轴和 Z 轴的电机移动量分别为 u₂、v₂, C1 相机中像素的偏移量为 Δx₁ 和 Δy₁, C2 相机中像素的偏移量为 Δx₂ 和 Δy₂, 解耦绕 X 轴和 Z 轴的电机移动量,分别计算各个电机对摆转和俯仰的影响系数,计算公式为

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \Delta y_1 \\ \Delta y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (1)$$

令 $A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix}$, 表示步进

电机移动量和图像像素偏移之间的系数矩阵,采用单独控制某一电机运动的方式对系数进行离线标定。例如,令 u₁ = 1, u₂ = 0, 可计算得 M1 反射镜绕 Y 轴转动对 C1 中横向偏移量的影响系数,其余参数类似。

在离线标定的基础上,根据像素偏差解算出各电机的移动量,即

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta y_1 \\ \Delta y_2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (2)$$

在不考虑非线性误差的情况下,可一步将光束近似准直到基准坐标附近。由于采用间接测量的方法,在Y轴和Z轴方向上,像素与实际坐标呈非线性关系且二者非线性度不同。此外,电机顶杆与镜架接触点滑移也会导致非线性关系,再加上调节过程中传感器、图像处理、电机细分和结构侧隙等导致的误差,准确的数学模型已无法建立,所以用模糊非线性控制方法将摆转和俯仰运动解耦且并行控制,在数轮迭代后将光束调整到精度范围内,最终到达目标位置^[8]。

根据像素误差的大小对电机步长进行自适应控制,建立双输入双输出模糊集,并采用离散型隶属度函数,模糊控制规则语句为

$$\begin{cases} \text{if } E_1 = A_i \text{ and } E_2 = B_i \\ \text{then } U_1 = C_i \text{ and } U_2 = D_i, \quad i = 1, 2 \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中: A_i, B_i 为像素的偏差值; C_i, D_i 为电机的运动量;以摆转方向为例,输入模糊集 E_1, E_2 为两相机像素坐标与目标坐标的偏差,包括负大(NB)、负中(NM)、负小(NS)、零(ZO)、正小(PS)、正中(PM)、正大(PB),即 $E_1 = \{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$, $E_2 = \{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ 。

根据实测经验将模糊集界限分为偏差 ± 10 pixel、 ± 3 pixel和 ± 1 pixel。当像素偏差绝对值大于10 pixel时,对应NB和PB;当偏差绝对值大于3 pixel小于10 pixel时,对应NM和PM;当偏差绝对值大于1 pixel小于3 pixel时,对应NS和PS,当偏差绝对值小于1 pixel,对应ZO。

输出模糊集 U_1 和 U_2 为反射镜M1和M2绕X轴转动时的电机位移,包括负大(NB)、负中(NM)、负小(NS)、零(ZO)、正小(PS)、正中(PM)、正大(PB), $U_1 = \{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$, $U_2 =$

$\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ 。模型建立的模糊规则如表1所示。

1.4 图像处理

视觉系统的主要功能是把CMOS相机获取到的数据进行图像处理,得到光斑几何标定坐标后通过偏差计算作为电机控制的输入。相机选用支持有源以太网(power over ethernet, POE)的大恒相机MER-503-20GM-P,该相机可提供500万像素($2\,448 \times 2\,048$),具有高分辨率、高清晰度、高精度、低噪声等特点,支持千兆网(gigabit ethernet, GigE)数据接口,可集成到TwinCAT视觉系统中。通过分核处理,自动准直模块可实现摆转和俯仰方向的并行计算,此外,系统中的多个自动准直模块可实现并行计算,大幅度提高准直的效率 and 速率,图像处理及闭环控制流程如图4所示。

视觉系统主要包括图像获取和图像处理,图像处理模块主要在完成杂质滤除的基础上对光斑进行椭圆拟合,进而得到标定坐标值,具体流程如下。

(1)首先对图像区域进行感兴趣区域(region of interest, ROI)设置,由于以透镜作为成像介质,针对不同探测角度、不同安装方式的透镜,以透镜边框以内的区域作为ROI,如图4(a)所示。

(2)用高斯滤波剔除高频噪声^[9]。在图4(b)中可见,视场内难免存在背景杂散光和两透镜反射光的相互干扰,通过形态学腐蚀和限制椭圆外接矩形边长的方法剔除干扰光斑,拟合大小与光束的直径相关^[10]。

(3)对图像进行大律法二值化处理^[11],遍历边界轮廓点并进行椭圆拟合,最终得到椭圆标定坐标值,如图4(c)所示。

椭圆拟合采用最小二乘法,将滤波二值化后的边界轮廓点作为输入数组,对于一般的椭圆方程有

$$Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F = 0 \quad (4)$$

式(4)中: A, B, C, D, E 为椭圆系数。

令 $\mathbf{W} = [A, B, C, D, E, F]^T$ 表示椭圆系数矢量, $\mathbf{X} = [x^2, xy, y^2, x, y, 1]^T$ 表示变量矢量,优化目标为

表1 模糊控制规则

Table 1 Fuzzy control rule

指标	NB		NM		NS		ZO		PS		PM		PB	
	U_1	U_2	U_1	U_2	U_1	U_2	U_1	U_2	U_1	U_2	U_1	U_2	U_1	U_2
NB	PB	ZO	PB	NB	PB	NB	ZO	NB	NS	NB	NM	NB	NB	NB
NM	PS	PM	PM	ZO	PS	NM	ZO	NM	NS	NM	NM	NM	NB	NM
NS	PS	PS	PM	PS	PS	ZO	ZO	NS	NS	NS	NM	NS	NB	NS
ZO	PS	PS	PM	PM	PS	PS	O	O	NS	NS	NM	NM	NB	NB
PS	PB	PS	PM	PS	PS	PS	ZO	PS	NS	ZO	NM	NS	NB	NS
PM	PB	PM	PM	PM	PS	PM	ZO	PM	NS	PM	NM	ZO	NB	NM
PB	PB	PB	PM	PB	PS	PB	ZO	PB	NS	PB	NM	PB	NB	ZO

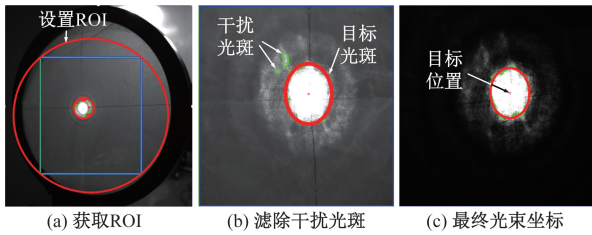


图4 图像试验效果图

Fig. 4 Image experiment effect image

$$\begin{cases} \min \|W^T X\|^2 = W^T X X^T W \\ W^T H W = 1 \text{ with } H = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中: H 为满足 $W^T H W = 1$ 的矩阵。

通过拉格朗日乘法[式(5)]转换为求解, 即

$$X X^T W = \lambda H W \quad (6)$$

式(6)中: λ 为拉格朗日乘法中的参数, 通过求解广义特征向量得到 W 。

2 自动准直实验

2.1 系统软硬件选型

传统的准直系统采用图像采集卡进行 A/D 转换, 或数字相机通过传输控制协议 (transmission control protocol, TCP) 等非实时通信方式连接至上位机, 然后利用 OpenCV 等视觉库进行图像处理, 再通过偏差计算对电机进行控制。然而, 该方案各模块耦合性差, 现场布线繁琐, 信号传输及系统抖动带来的不确定运算时间会导致图像和运动的非一致性, 影响了装置的准直效率。此外, 通过现场可编程逻辑门阵列 (field programmable gate array, FPGA) + 数字信号处理器 (digital signal processor, DSP) 的方式进行视觉与运动开发逐渐成为主流解决方案, 具有实时性高的特性, 但未来神光 III 装置的设备数量多、电磁屏蔽要求高, 该方案与现场其他硬件耦合度不高, 不具备系统性的组态功能, 导致开发周期长, 硬件成本高, 故仅适用于小型控制系统^[12]。

针对以上准直系统的不足, 为满足新一代远程集群控制的要求, 引入 TwinCAT 控制系统及内部视觉模块 Vision, 该系统支持多种现场设备的系统组态和图像处理算法, 可将 CMOS 相机的图像算法和电机控制各自运行在 TwinCAT 的实时内核中并直

接进行通信, 消除了图像系统与运动系统的延时, 达到高速实时的目的。此外, 使用 TwinCAT Vision, 在对图像处理逻辑控制时可使用与运动控制类似的 IEC 61131-3 PLC 编程语言进行开发, 可缩短开发周期, 降低成本。针对装置的系统性要求, 各方案的优缺点如表 2 所示。

基于 TwinCAT Vision 的自动准直系统控制架构如图 5 所示, CMOS 相机通过千兆以太网 GigE 连接并集成于视觉内核, 在完成图像处理获取到光束标定坐标值后, 将其作为 MATLAB/Simulink 任务的输入接口, 进行系数矩阵转换计算, 得到电机移动量, 然后将该值作为输出接口内部传输至运动控制 Motion 模块。Vision 和 MATLAB/Simulink 任务以 tmc 接口生成 TcCOM 模型的方式进行内部通信。以太网控制自动化技术 (ethernet for control automation technology, EtherCAT) 现场总线控制步进电机对二维镜架进行摆转和俯仰控制, 调节的结果实时反馈到视觉系统中再次调整控制, 直到满足精度要求为止^[13]。

为保证图像处理和电机控制的实时性, 将 TwinCAT 控制系统中的 PLC、Motion、Vision 和 MATLAB/Simulink 等任务分别运行在实时 CPU 内核中并行运行, 内核各个模块采用 ADS (automation device specification) 在不同设备和软件模块之间进行数据传输和消息路由, 可有效降低硬件成本, 简化系统结构, 提高系统稳定性, 如图 6 所示。EtherCAT 总

表 2 系统方案比较

Table 2 Comparison of system schemes

方案	实时性	系统耦合	准直精度	开发周期	开发费用
图像采集卡 + 上位机 + 电机	低	差	低	短	低
数字相机 + 上位机 + 电机	低	差	高	长	低
数字相机 + FPGA + DSP + 电机	高	一般	高	长	高
数字相机 + TwinCAT Vision + 电机	高	好	高	短	低

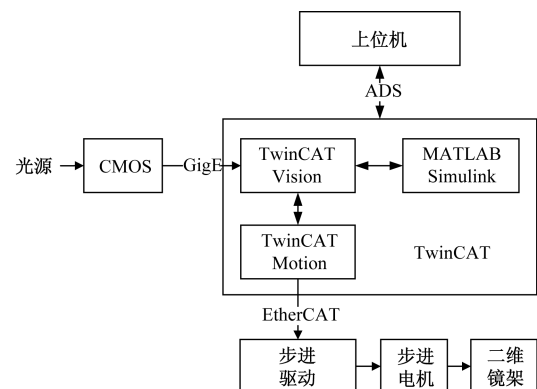


图5 自动准直系统控制架构

Fig. 5 Automatic alignment system control architecture

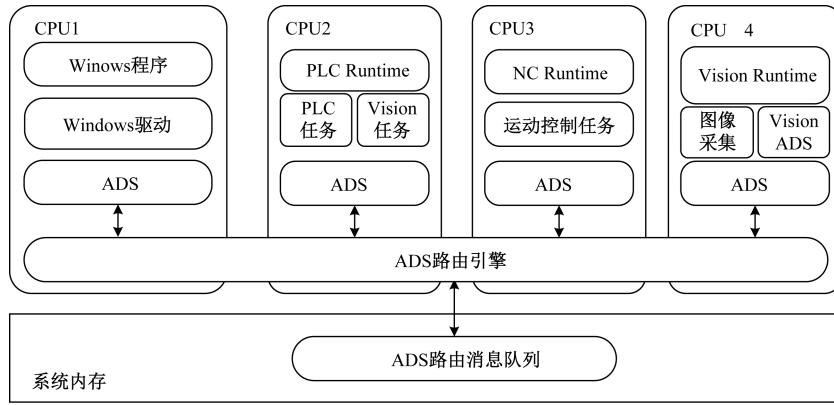


图6 多任务分核运行

Fig. 6 Multitask run in separate cores

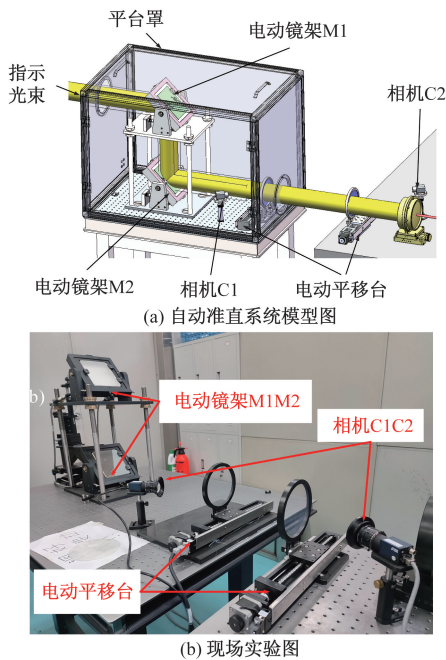


图7 实验装置图

Fig. 7 Experimental device image

线的毫秒级周期性实时数据交换和分布式时钟同步,减少了通信的延迟和抖动,从而确保大规模应用时对实时控制任务的高度响应性^[14]。此外,为提高系统的运行效率,可手动设置多种任务的优先级,增加低优先级任务的循环周期,增大高优先级任务内存分配。经实验证明,可大幅提高CPU利用率并防止数据溢出^[15]。

2.2 实验结果

实验采用的倍福C6920控制器支持四核i7处理器,可高效运行视觉和运动控制算法。自动准直模块内置于半封闭的罩壳内,仅预留入射光和出射光接口,大幅减小了目标背景和其他杂散光的干扰,有利于提高目标识别的准确性和鲁棒性。自动准直系统的模型和现场实验装置如图7所示。

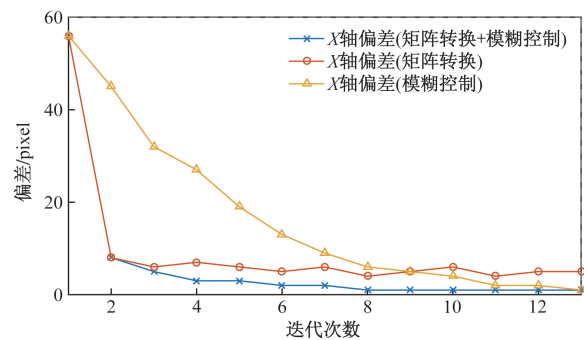


图8 准直误差曲线图

Fig. 8 Alignment error curve

进行3组对比实验,分别使用“系数矩阵+模糊控制”相结合的方法、仅使用“系数矩阵”方法和仅使用“模糊控制”方法。以相机图像X轴方向光斑偏差为测量目标,该变量随迭代次数的变化如图8所示。“系数矩阵+模糊控制”先计算系数矩阵控制电机逼近目标,再通过模糊控制方法逼近目标位置。由实验结果可以看出,“系数矩阵”方法可使误差大幅减小,但由于间接测量和电机顶杆接触点滑移等非线性因素,单独使用“系数矩阵”方法的收敛精度始终在4~6个pixel振荡,无法满足迭代精度要求。“模糊控制”方法的迭代次数相对较多导致收敛速度变慢。“系数矩阵+模糊控制”方法经若干次迭代后误差可快速收敛到1 pixel以内,如图8所示。通过标定对应的精度大小为4.5 μm,整个准直过程可在2 s以内完成,而现有人工肉眼准直不仅精度较低(一般在3个pixel以上,即准直误差在13.5 μm以上),而且速度较慢(通常在30 min以上)。由此可见,“系数矩阵+模糊控制”方法可大幅度提高准直精度和效率。

本自动准直系统以光斑图像作为输入,以椭圆圆心与标定坐标之差作为输出,消除了运动部件和结构带来的误差,故仅需考虑图像处理和迭代收敛

带来的误差。因标定坐标为随机位置,通过 10 次验证,图像处理与人工拾取的圆心误差在 1 ~ 2 pixel,加上实验论证的迭代误差 1 pixel,整个系统的测量不确定度在 2 ~ 3 pixel,即 9 ~ 13.5 μm 。

3 结论

针对现有 VISAR 装置中人工准直光路的现状,设计一套光路自动准直系统,得到以下结论。

(1)该系统在系数矩阵转换的基础上,利用模糊反馈控制算法消除非线性误差使光束准直,调节精度为 4.5 μm ,相对于过去人工调节的方法大大提高了精度和整体装置的运行效率。

(2)应用 TwinCAT 控制系统及其视觉模块,将 Vision、MATLAB/Simulink、Motion 和 PLC 运行在不同的实时内核中,消除了传统准直系统中通信造成的抖动和延时,加快收敛速度,可将原来人工调节的 1 h 以上缩短到 2 s 以内并实现远程“一键式”快速准直。

(3)该系统的原理及方法可应用到其他光束准直系统中,可满足未来 ICF 装置对远程自动化控制的需求。

参 考 文 献

- [1] 郑铠涛,李海艳,甘华权,等. 基于低秩约束和全变分正则化的 CUP-VISAR 压缩图像重构算法[J]. 强激光与粒子束, 2023, 35(7): 78-86.
Zheng Kaitao, Li Haiyan, Gan Huaquan, et al. CUP-VISAR image reconstruction based on low-rank prior and total-variation regularization[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2023, 35(7): 78-86.
- [2] Hao T T, Xu D, Qin F B. Image-based visual servoing for position alignment with orthogonal binocular vision[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 1-10.
- [3] Azzopardi G, Ricci G. Newmachine learning model application for the automatic LHC collimator beam-based alignment[J]. Solar Physics, 2002, 210(1/2): 193-211.
- [4] 闫亚东,韦明智,李奇,等. 激光聚变冲击波速度测量光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2021, 29(2): 259-266.
Yan Yadong, Wei Mingzhi, Li Qi, et al. Design of optical system for laser fusion shock velocity measurement[J]. Optics and Precision Engineering, 2021, 29(2): 259-266.
- [5] 宗楠,唐顺兴,郭亚晶. 基于双焦透镜的双踪远场自动准直[J]. 中国激光, 2024, 51(6): 102-107.
Zong Nan, Tang Shunxing, Guo Yajing. Dual-trace far-field automatic alignment based on bifocal lens[J]. Chinese Journal of Lasers, 2024, 51(6): 102-107.
- [6] Chen W H. Research on optical axis adjustment method of three-band optical system[C]//IEEE 7th Eurasian Conference on Educational Innovation(ECEI). Bangkok: IEEE, 2024: 10510816.
- [7] 黎淼,余柏汕,王玺,等. 基于全变分正则约束的二维冲击波速度场条纹重构技术[J]. 光学学报, 2023, 43(19): 162-170.
Li Miao, Yu Baishan, Wang Xi, et al. Fringe reconstruction technology of two-dimensional shock wave velocity field based on total variation regularization constraints[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(19): 162-170.
- [8] 张安,马少杰,丁立波,等. 基于模糊逻辑的引信检测机械手视觉定位方法[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2024, 48(1): 82-87.
Zhang An, Ma Shaojie, Ding Libo, et al. Visual positioning method of fuze detection manipulator based on fuzzy logic[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2024, 48(1): 82-87.
- [9] 郭嘉富,王拯洲,段亚轩,等. 基于双目标识别和准直数学模型改进的光路自动准直方法[J]. 光子学报, 2022, 51(11): 174-193.
Guo Jiafu, Wang Zhengzhou, Duan Yaxuan, et al. Anoptical path automatic alignment method based on dual-target recognition and improved alignment mathematical model[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(11): 174-193.
- [10] 郭文彬,曾沛颖,程宁波,等. 光路远场自动准直图像处理优化[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(10): 235-241.
Guo Wenbin, Zeng Peiying, Cheng Ningbo, et al. Image process optimization in laser beam far-field automatic alignment[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(10): 235-241.
- [11] 何文轩,王拯洲,魏际同,等. 基于 BLOB 区域和边缘特征分析的准直图像双光学目标识别方法[J]. 光子学报, 2024, 53(2): 250-272.
He Wenxuan, Wang Zhengzhou, Wei Jitong, et al. Dualoptical target recognition method for collimated images based on BLOB region and edge feature analysis[J]. Acta Photonica Sinica, 2024, 53(2): 250-272.
- [12] 刘泽勇. 基于视觉的激光自动准直系统设计与主动对位算法研究[D]. 广州:华南理工大学, 2023.
Liu Zeyong. Vision-based laser automatic collimation system design and active alignment algorithm research[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2023.
- [13] 刘甜甜. 多维视觉束靶耦合仪器误差补偿方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2023.
Liu Tiantian. Research on error compensation method of multi-dimensional visual beam-target coupling instrument[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2023.
- [14] Gong C X, Lin X Z, Pun E Y B. Multi-wavelength laser interferometer control system design[J]. Optics Communications, 2023, 169: 12769.
- [15] Pan N, Williams S P, Rehfeld S, et al. High-accuracy attitude angle measurement system using laser collimation[J]. Applied Optics, 2024, 63: 67-73.