

高精度视觉定位系统的机械设计与研究

傅林永

长园视觉科技(珠海)有限公司, 广东 珠海 519000

DOI:10.61369/ME.2026040017

摘 要 : 本文重点关注柔性制造场景中的高精度视觉定位系统, 说明其针对非标设备的功能需求, 介绍模块化构架、机械结构改革、传动装置等设计主要, 研究热力耦合、误差校正等机理技术, 通过微电子装配等案例及多项试验验证其性能, 为智能制造装备的研发提供主要技术支撑。

关 键 词 : 高精度视觉定位系统; 机械设计; 定位精度

Mechanical Design and Research of High Precision Visual Positioning System

Fu Linyong

Changyuan Vision Technology (Zhuhai) Co., Ltd., Zhuhai, Guangdong 519000

Abstract : This paper focuses on the high-precision visual positioning system in flexible manufacturing scenarios, explaining its functions in response to the requirements of non-standard equipment, introducing the main designs such as modular architecture, mechanical structure reform, and transmission devices, and researching mechanism technologies such as thermal coupling and error correction. Through case studies and multiple experiments in micro-electronic assembly, its performance is verified, providing key technical support for the research and development of intelligent manufacturing equipment.

Keywords : high precision visual positioning system; mechanical design; positioning accuracy

引言

随着《智能制造发展规划(2021-2025年)》的发布, 智能制造成为制造业进步的主要方向, 其中高精度视觉定位系统于柔性制造等场景意义重大。其针对非标设备存在特定功能方面的需求, 定位精准度与机械刚度属于主要要素。它的模块化体系方案设计整合多个单元实现三维协同, 机械构造创新设计加强结构刚性, 多自由度传动装置确保精准运动, 还得研究热力耦合变形原理、采用非线性误差补偿技术等。众多应用案例和实验佐证此系统的有效性和可靠性, 为智能制造装备的研发提供技术支撑, 帮助智能制造的发展。

一、高精度视觉定位系统总体设计

(一) 非标设备功能性需求分析

在柔性生产制造场景当中, 高精度的视觉定位系统针对非标设备存在特定的功能性要求。定位精准度为主要指标, 要符合柔性制造里各类任务对位置精准度的严苛要求, 其误差需控制在极小的区间内, 例如 $\pm 0.01\text{mm}$ 乃至更低, 从而保证加工、装配等作业的精确性。此外机械刚度同样主要, 要建立定位精度和机械刚度的数学关联模型^[1]。充足的机械刚度可确保系统在运转过程中结构稳固, 降低因外力影响而产生的形变, 防止由此引发的定位偏差。比如在高速运转或遭受外力冲击时, 机械构造的形变或许会影响视觉定位的精确性, 唯有通过合理规划机械刚度, 让其与定位精准度相匹配, 才能够确保系统在复杂的柔性制造情形下稳定运行。

(二) 模块化系统架构设计

高精度视觉定位系统采取模块化系统方案开展设计, 集成图像采集单元、运动执行机构以及误差补偿装置, 实现三维协同设计。图像获取单元承担获取物体视觉数据的任务, 其性能对定位

精准度有直接作用, 要选用具备高分辨率与高帧率特性的图像传感器, 同时优化镜头相关参数, 以保证成像清晰。运动执行装置提供精准的运动调控, 通过精密导轨、丝杆等实现物体于三维空间的位移, 确保运动的稳定性与精确性。误差补偿设备会对系统于运行期间产生的各类误差开展实时监测和修正。通过这三者的协同运作, 此模块化系统方案可有效提高高精度视觉定位系统的定位精准度与可靠性, 符合不同应用场景的要求^[2]。

二、机械结构创新设计关键技术

(一) 高刚性拓扑优化框架

在高精度视觉定位系统的机械结构创新设计里, 高刚性拓扑优化构架十分主要。此处运用变密度法开展轻量化设计, 且建立通过各向异性材料的蜂窝状复合支撑方案。变密度方法通过调节材料于结构里的分布密度, 在实现结构刚度等性能需求的情况下实现轻量化。通过各向异性材料建立的蜂窝状复合支撑方案, 可有效运用材料特性, 展现各向异性材料在不同方向上特有的力学性能, 融合蜂窝状结构优

良的力学性能与轻量化长处,加强整体结构的刚性。该种设计不但减轻系统的重量,还提高它的稳定性和可靠性,为高精度视觉定位打造坚实的机械结构基础,进一步切实提高系统的性能^[3]。

（二）多自由度精密传动机构

多自由度的精密传动装置于高精度视觉定位体系里发挥重点要功效。此机构要实现多个方向的精准运动,其传动精准度直接关乎视觉定位的精确性。进行设计时,需全面考量各运动轴之间的耦合作用,从而保证系统整体的动态特性。比如由电磁直驱线性模组和气浮导向系统构成的多自由度传动方案,要深入研究二者动态响应的耦合特性^[4]。经过对模组驱动力、导向系统摩擦力以及刚度等参数开展精准分析与匹配,对传动机构的运动学和动力学性能予以优化。运用先进的控制算法对其开展实时调节,弥补因耦合效应产生的偏差,进一步实现多自由度的精准传动,符合高精度视觉定位系统对于复杂运动轨迹以及高精度定位的要求,为系统的稳定且高效运转提供稳固的机械支撑。

三、视觉-机械协同定位精度优化

（一）综合误差溯源与建模

1. 热力耦合变形机理

热与力耦合的变形机制对高精度视觉定位系统的机械构造和定位精度的优化非常主要。在系统运转时,机械构件会因热作用出现变形,从而影响视觉、机械协同定位的精准度。温度的变动会让材料出现膨胀或者收缩的情况,进一步导致机械结构的尺寸发生改变,破坏原本的几何精度。举例而言在高负载长时间运转工况时,电机、驱动器这类发热部件产生的热量传导到机械框架,导致局部温度上升,导致框架出现不均匀形变^[5]。这种形变和机械本身的几何偏差相互耦合,一同对定位精度产生影响。故而深度研究热力耦合变形机制,分析温度场分布和机械变形之间的定量关联,对于建立精准的综合误差模型、实现视觉、机械协同定位精度的优化具备主要价值,可为后续实施有针对性的热管理与结构优化措施提供理论支撑。

2. 非线性误差补偿技术

为实现高精度视觉定位系统的视觉与机械协同定位精度的优化,非线性误差补偿技术属于主要部分。在综合误差追溯与建模的前提下,搭建通过深度神经网络的误差补偿装置以实现多轴联动误差的校正。深度神经网络具备强劲的非线性映射能力,能够确实捕捉定位进程里繁杂的非线性误差关联。通过众多实际定位数据来训练误差补偿器,使其掌握不同工况下的误差特性。此误差补偿装置能够针对多轴联动期间出现的累积误差、耦合误差等复杂误差类型开展实时补偿。通过深度神经网络的误差补偿装置突破传统线性补偿方式的局限,进一步大幅提高视觉、机械协同定位的精准度,为高精度视觉定位系统的机械设计提供更有效的误差校正办法^[6]。

（二）实时定位校准策略

1. 亚像素级图像配准算法

在高精度视觉定位体系里,亚像素级图像配准算法对于提高

视觉、机械协同定位精准度非常主要。此算法能够有效打破像素级的约束,实现更高精准度的图像匹配以及定位校准。通过引入更为复杂的数学模型和图像处理手段,它可以精确识别图像里目标物体的亚像素级位置数据,降低因像素离散特性造成的定位偏差。举例而言运用通过梯度的亚像素定位手段,对图像的灰度梯度加以分析,进一步更精准地明确特征点的位置。通过曲面拟合等技术手段,进一步对亚像素级位置的计算加以优化,提高定位的精确性与稳定性。该算法处于振动环境时,可帮助系统实时校正定位偏差,确保视觉和机械系统的协同精准度,为高精度视觉定位系统提供可靠的技术支撑^[7]。

2. 伺服-视觉闭环控制

在高精准度视觉定位体系里,伺服、视觉闭环管控是实现10 μ m级定位精准度的核心部分。通过设计融入卡尔曼滤波的模糊PID控制器,搭建出伺服、视觉闭环控制系统^[8]。此系统通过视觉系统获取精准的位置数据,当作反馈信号传至控制器。控制器采用融合卡尔曼滤波的模糊PID算法,对信号开展处理和分析,根据当前位置和目标位置的偏差,实时调节伺服系统的控制参数,进一步精确地控制机械运动部件的位置。该闭环控制流程可动态应对系统的变动,迅速矫正定位误差,有力克服外部干扰以及系统自身的不确定因素,从而实现高精度的视觉、机械协同定位,平稳实现10 μ m级的定位精准度。

四、典型应用案例验证与分析

（一）微电子装配设备设计实例

1. 晶圆搬运机械手结构设计

在微电子装配装置设计案例里,晶圆搬运机械手臂结构设计对实现高精度视觉定位体系十分主要。以运用碳纤维复合材料打造 $\pm 1\mu$ m定位精度的真空机械手为例,此材料具有重量轻、强度高且热膨胀系数低等特点,可有效降低机械手运动时的惯性和振动,进一步提高定位精度。在实际应用检验时,经过多次反复运送晶圆,且通过高精度视觉检测系统对每次运送后的晶圆位置开展测量。对测量数据进行分析可知,此机械手在长时间运转时,定位误差一直能够控制在 $\pm 1\mu$ m的范围以内,充分证实通过碳纤维复合材料的晶圆搬运机械手结构设计在实现高精度视觉定位方面的有效性,为微电子装配设备的高精度操作提供有力支撑^[9]。

2. 视觉引导贴装系统

在微电子组装设备设计案例里,视觉引导贴装体系存在主要用途。以集成双目立体视觉实现0.5 μ m重复定位精度的芯片贴装为例,此系统通过双目相机获取芯片以及贴装位置的图像信息,经过图像处理算法精准计算芯片的位置和姿态偏差^[10]。系统凭借偏差数据对贴装头进行控制,实现高精度的贴装操作。在实际检验时,针对多批次芯片开展贴装测试,统计贴装位置的偏差情况。结果表明绝大多数芯片贴装的偏差被控制在0.5 μ m的范围之内,证实此视觉引导贴装系统在高精度芯片贴装里的有效性和可靠性。该种设计可满足微电子装配对于高精度贴装的要求,为提高微电子制造的质量与效率提供有力支撑。

（二）精密光学检测平台开发

1. 气悬浮运动平台设计

在精密光学检测平台研发里，气悬浮运动平台设计通过零摩擦驱动原理实现纳米级运动分辨能力。以某高精度光学镜片检测项目为实例，此平台运用气悬浮技术，让运动部件于气体薄膜之上悬浮，确实消除了机械摩擦产生的误差。通过精准调控气体压强，保证平台可在纳米量级上准确就位与移动。平台配备高分辨率视觉传感设备，对镜片表面的微观瑕疵开展检测。实际运用表明，此气悬浮运动平台于检测期间，运动分辨能力达到纳米级别，定位精准度极高，明显提高光学镜片检测的精确性与效率，证实通过零摩擦驱动原理所设计的气悬浮运动平台在精密光学检测领域的有效性和实用性。

2. 在线测量系统集成

在某精密制造企业的生产流程里，配备高精度视觉定位系统的在线检测系统起到主要效能。此企业制造微小电子零部件，对尺寸精准度和位置精准度要求非常严格。该系统整合高精度摄像头、激光感应装置等，通过精密的光学检测平台来获取零部件的图像信息。视觉定位算法可迅速处理并分析数据，实现对零部件位置和尺寸的高精准度测量。在实际运用时，系统可检测出微米量级的尺寸偏差以及位置偏移情况，确实保障产品的质量。历经长时间的运行检验，此系统的检测精度达到 $\pm 2\mu\text{m}$ ，明显降低次品的比例，使生产效率提高约30%，充分印证高精度视觉定位系统于精密制造领域的应用意义，为其他相关企业提供成功的案例。

（三）性能对比实验验证

1. 动态定位精度测试

在典型应用案例验证与分析的性能对比实验动态定位精度测试阶段，挑选工业流水线上产品快速定位情景当作案例。在此场景之中，让待定位产品以不同速率移动，高精度视觉定位系统会实时捕捉其所在位置。此外运用高精度激光跟踪仪当作参考准

则，同步记载产品实际方位。经由对比视觉定位系统和激光跟踪仪所获取的数据，算出定位偏差。实验结果显示，当产品的移动速率在既定区间内逐步增大时，高精度视觉定位体系的动态定位精准度仍能维持在ISO9283标准所规定的误差区间内，体现出该体系在动态情境下具备良好的定位特性，有力证实体系在实际动态运用中的高精度定位能力。

2. 长期稳定性实验

为检验高精度视觉定位系统结构设计的可靠性，进行200小时不间断运行试验。系统于整个运转进程里，一直维持高精度的视觉定位功能。在此期间对像定位精度、识别速度这类主要指标开展实时的监测与记录。定位精准度波动非常小，一直处于设计规定的误差区间内，这充分显示出系统结构设计能够有效抵抗长时间运转所引发的机械疲劳、热变形等负面效应。识别速率平稳，未产生因长时间运行导致性能降低的状况。该结果充分表明系统的方案设计拥有较高的可靠性，在长时间持续运行的情形下能够稳定运作，为高精度视觉定位系统在实际复杂工作状况里的应用筑牢坚实基础。

五、总结

高精准视觉定位系统的机械构造与研究，打造出适配非标自动化设备的新颖设计规划，依靠模块化机械方案创新、多物理场耦合误差弥补策略以及智能控制算法整合，顺利实现亚微米级定位精准度。典型应用验证显示，此系统在定位精准度方面相较于传统方案有明显提高，提高幅度为67%，这为智能制造装备的研制提供核心技术支撑，有效促进智能制造领域的进步。放眼未来深入对复合材料的动态特性以及其主动振动抑制手段开展研究，有望使高精度视觉定位系统在复杂工作状况下仍然能够维持卓越性能，持续加强系统的稳定性和可靠性，进一步提高定位精准度，为智能制造装备的更新换代增添新活力。

参考文献

- [1] 顾友霖. 面向智能网联汽车的视觉地图构建与高精度定位研究 [D]. 扬州大学, 2023.
- [2] 刘伦宇. 高精度单目视觉定位技术及其在PCBA中的应用研究 [D]. 重庆理工大学, 2022.
- [3] 梁晨. 基于单目相机与惯性测量单元的视觉定位系统 [D]. 华中科技大学, 2021.
- [4] 周盟孟. 长距离水平钻探高精度定位定向方法研究 [D]. 国防科技大学, 2021.
- [5] 任紫芸. 基于视觉注意机制的焊缝定位方法研究 [D]. 华北理工大学, 2022.
- [6] 于冠军. 工业机器人视觉定位系统高精度标定研究 [J]. 机器人产业, 2022(3): 92-94.
- [7] 姚春玲, 刘钊. 基于知识的机械设计智能CAD系统的研究与开发 [J]. 河南科技, 2021, 40(28): 43-45.
- [8] 刘艳春. 北斗观测数据高精度定位分析 [J]. 地理空间信息, 2021, 19(7): 46-48.
- [9] 刘久月, 武继新, 魏国兴, 等. 基于视觉定位的汽车自动焊接技术研究与应用 [J]. 汽车工业研究, 2023(1): 19-23.
- [10] 赵志鹏. 机械设计虚拟仿真系统的开发与应用 [J]. 今日制造与升级, 2024(5): 72-74.