

空间光学微位移促动器的定位测控研究

张雅琳¹, 梁凤超¹, 王 淳¹, 何海燕¹, 孙伟健²

(1. 北京空间机电研究所, 北京 100094; 2. 中国资源卫星应用中心, 北京 100094)

摘要:为解决大口径空间光学镜面在轨组装技术的高精度定位需求,设计了一种微位移促动器,并对单促动器和多促动器六自由度平台分别进行了定位测控研究;通过建立单促动器的运动学方程、多促动器六自由度平台的运动学方程,解决了微位移促动器的高精度定位问题;搭建了实验硬件系统,编写了软件控制程序,对单促动器分别进行了小步长测试和大步长测试,并对多促动器六自由度平台进行了定位测试;实验结果表明,设计的微位移促动器达到了行程 25 mm 的情况下,定位精度误差小于 20 nm 的指标要求;多促动器六自由度平台的定位精度达到了单向平移重复精度误差小于 30 nm,角度精度误差小于 0.02 μrad 的设计指标。

关键词: 微位移促动器; 六自由度并联平台; 定位; 测控

Research on Positioning Measurement and Control of Space Optical Micro-displacement Actuator

Zhang Yalin¹, Liang Fengchao¹, Wang Chun¹, He Haiyan¹, Sun Weijian²

(1. Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China;

2. China Centre For Resources Satellite Data and Application, Beijing 100094, China)

Abstract: In order to meet the high-precision positioning requirements of the large aperture space optical mirror-on-orbit assembly technology, a micro-displacement actuator was designed, and the single-actuator and multi-actuator six-degree-of-freedom platforms were respectively studied for positioning measurement and control. By establishing the kinematics equation of single actuator and the kinematics equation of multi-actuator six-degree-of-freedom platform, the high-precision positioning of micro-displacement actuators is solved. An experimental hardware system was set up, a software control program was accomplished, a small step test and a large step test were performed on a single actuator, and a positioning test was performed on a multi-actuator six-degree-of-freedom platform. The experimental results show that the designed micro-displacement actuator has reached the requirement of positioning accuracy error less than 20 nm at a stroke of 25 mm. The multi-actuator six-degree-of-freedom platform meets the design requirements that the unidirectional translation repeat accuracy error is less than 30nm and the angular accuracy error is less than 0.02 μrad .

Keywords: micro-displacement actuator; six-degree-of-freedom; positioning; measurement and control

0 引言

提高分辨率是空间光学遥感技术日益迫切的需求^[1-2],因此拥有长焦距、大口径的光学遥感器成为空间光学遥感技术蓬勃发展的重要领域。针对大口径空间光学相机,采用整体式主镜的方式渐渐难以实现,而由分块镜拼接构成的可在轨组装^[3-7]、可展开机构式的主镜被越来越广泛的应用,而每个分块镜一般由多个微位移促动器组成的并联机构进行支撑和调节^[8-13],从而实现分块镜位置和姿态的改变。每组并联机构的促动器都具有运动学复杂、动力学交联耦合性强等技术难点,针对该难点支撑调节分块镜的并联机构的驱动和运动控制方法随即成为大口径光学技术的关键技术之一。

微位移促动器从分类上主要根据驱动元件和结构形式

两方面。从驱动元件上可分为电机、压电陶瓷驱动器^[14]、磁致伸缩驱动器等。压电陶瓷微位移促动器和磁致伸缩驱动器的最小分辨率相比电机方式更高,但分别存在着微位移行程短、重复定位精度较差等缺点。而基于电机的微位移促动器可达到大于 25 mm 的有效行程和 1 μm 的步进精度,并且经济适用、技术成熟、精度稳定并且输出线性,更适合高可靠性、行程大、精度高的航天应用需求。

从结构形式上微位移促动器主动分为尺蠖式、位移缩放式、宏/微动叠加式等。尺蠖式微位移促动器^[15]的驱动元件一般为压电陶瓷、磁控形状记忆合金、磁致伸缩材料等。尺蠖式微位移促动器利用“箱位—驱动—箱位”的运动方式积累驱动元件的单步微量位移,达到连续的步进的精密位移输出的效果,实现了大行程范围内的高精度定位。位移缩放式微位移促动器的驱动元件主要有电机和压电陶瓷等,电机作为驱动元件时,有分辨率方面的限制,一般采用精密的位移缩放机构,如精密丝杠、液压缩放机构等来进行弥补。压电陶瓷作为驱动器时,位移分辨率高但有效

收稿日期: 2020-03-20; 修回日期: 2020-05-06。

作者简介: 张雅琳(1985-),女,北京人,工程师,主要从事光学机构控制技术方向的研究。

行程小,一般采用柔性铰链等机构来进行行程方面的扩展,而柔性铰链机构虽然运动灵敏且平稳但存在负载能力弱、抗冲击能力差等缺点。宏/微动叠加式微位移促动器^[16]可以实现精密大行程位移输出,将精密大行程驱动分为宏动和微动两部分。同样可以实现较大行程范围内的高精度定位精度。压电陶瓷、磁控形状记忆合金等驱动元件需要保持持续加电,而空间光学遥感器在轨时可能存在重新加电的操作,因此还是选用电机作为主要驱动元件。

为了掌握和实践空间光学镜面在轨组装技术和微位移促动器技术,我所研制了宏/微动叠加式的微位移促动器,并且宏动部分和微动部分可以由同一个步进电机驱动。作用在空间光学的镜面支持平台的促动器呈六自由度的并联耦合构型,因此本文分别对单促动器和多促动器六自由度并联运动平台的运动模型进行数学建模。搭建了微位移促动器的地面测控平台,并对单促动器和多促动器六自由度平台分别进行了定位测试。本文为后续高精度空间相机主镜、次镜空间展开、空间组装的控制平台设计提供了指导。

1 单促动器运动学建模

1.1 单促动器机构模型

单促动器结构如图 1 所示。

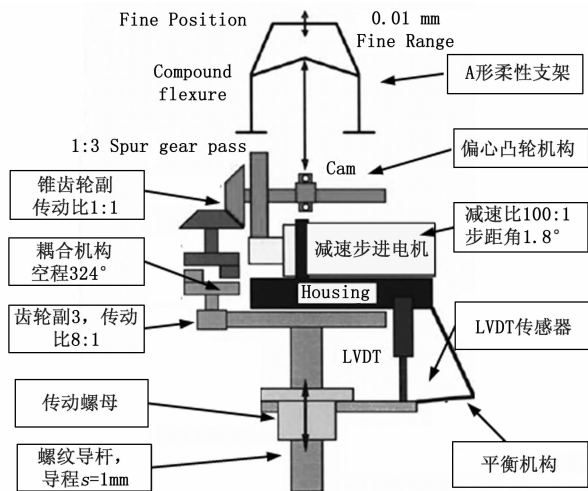


图 1 促动器传动系统

促动器采用步进电机驱动的宏/微叠加式位移促动器,主要由 A 形架精调机构、齿轮电机、宏/微离合器、宏动驱动轴等部分组成,所有元件直接固定在主支撑上。该促动器的主要驱动机构是齿轮马达,其驱动器是步进电机。步进电机的步进角为 1.8° ,通过与一个传动比 $100:1$ 的行星齿轮减速箱组合成齿轮马达。工作时,齿轮马达通过一个 $3:1$ 的直齿轮输出转矩给凸轮轴,凸轮轴再通过偏心轴来驱动 A 形架精调机构。凸轮轴由两个简支轴承支撑,简支轴承通过预紧使得轴总是远离齿轮末端。这是一级传动到凸轮轴,之后是二级耦合。通过一对传动比 $1:1$ 的斜齿轮将上级传动的方向改变 90° ,斜齿轮与一个转动耦合机构相连,该耦合机构主要通过一个 324° 空程转动实现,使得

精调时不至于将力矩传递至粗调机构(通过合适的分配,确保 324° 内完成精调),实现了一个齿轮马达同时驱动精/粗调整的功能。耦合机构的两端均由预紧轴承对支撑。最后是三级传动至粗调机构,通过一个传动比 $8:1$ 的直齿轮对,驱动直线螺杆直线进给,实现粗调整功能。直线螺杆的一端由直线轴承支撑,一端与螺纹套配合。此外,整个机构还包括摩擦制动、转矩平衡、LVDT 位置传感、干摩擦薄膜润滑等。综上所述,单促动器的调整策略如图 2 所示。

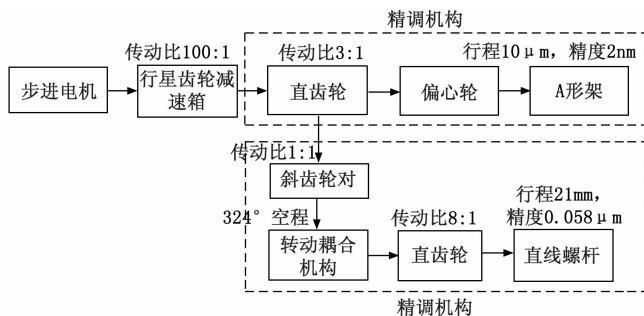


图 2 促动器调整示意图

1.2 单促动器运动学数学建模

促动器传动系采用宏微两级调整策略,利用一个转换装置实现由同一个步进电机驱动完成粗调 ($\mu\text{m}\sim\text{mm}$ 级)、精调 (nm 级) 功能。

单促动器总位移:

$$Y = A \times y_1 + B \times y_2$$

其中: Y 为单促动器总位移, mm ; y_1 为粗调实际完成的位移, mm ; y_2 为精调完成的位移; 粗调段: $A=1, B=1$; 精调段: $A=0, B=1$ 。

粗调段运动学方程:

$$y_1 P = \text{INT} \left(\frac{\text{INT} \left(\frac{Y - D \times y_{2\text{disturb}1} - E \times y_{2\text{disturb}2}}{L_{rr}} \right) \times L_{rr}}{PE \times Pa0} \right) \times Pa0 + C \times \sum_{i=0}^3 P_{Err_Gr(i)} + P_{KC} \quad (1)$$

PE 为粗调段脉冲当量, Pulse Equivalent, 单位: mm/pulse ; $\sum_{i=0}^3 P_{Err_Gr(i)}$ 为电机反转时, 齿轮副 0~3 的回程误差, retrace error, 单位: 脉冲数; C 为回程误差开关, 回程时 $C=1$, 同向运动 $C=0$; $y_{2\text{disturb}1}$ 为杆向收缩方向运动, 空程造成的精调扰动, 单位: mm ; $y_{2\text{disturb}2}$ 为杆向伸长方向运动, 空程造成的精调扰动, 单位: mm ; $D=1, E=0$ 为杆向收缩方向运动; $D=0, E=1$ 为杆向伸长方向运动; P_{KC} 为拨齿当前位置运动到拨齿接触位置需要走的角度, 单位: 脉冲数, 理论值为 54 000 脉冲, 现在的实测值为 49 800 脉冲; $\text{INT}(\cdot)$ 为取整运算; L_{rr} 为 LVDT 位移传感器的分辨率, Resolution Rate, $0.1\mu\text{m}$; $Pa0$ 为精调段线性段中点横坐标角度, 换算相对于起点的成脉冲数。

粗调段脉冲当量:

$$PE = \frac{Lead}{P_{motor} \times Gr_1 \times Gr_2 \times Gr_3} \quad (2)$$

其中: $Lead$ 为丝杠导程, 单位: mm; P_{motor} 为电机一圈的脉冲数, 单位: 脉冲数; Gr_1 为齿轮副 1 传动比, Gr_2 为齿轮副 2 传动比, 1; Gr_3 为齿轮副 3 传动比, 8。

电机每转脉冲数 P_{motor} :

$$P_{motor} = \frac{360^\circ}{\alpha} \times m \times Gr_0 \quad (3)$$

其中: α 为步进电机步距角, 单位: $^\circ$; m 为步进电机细分分数; Gr_0 为电机行星齿轮副传动比, 100: 1;

粗调实际位移理论值 y_1 , 为有效脉冲数与脉冲当量的积:

$$y_1 = (y_1 P - C \times P_{Err_Gr0-3} + P_{KC}) \times PE \quad (4)$$

精调控制脉冲数 $y_2 P$:

$$y_2 P = INT(g^{-1}(Y - y_1)) - Pa0 + C \times \sum_{i=0}^2 P_{Err_Gr(i)} \quad (5)$$

实际的精调位移 y_2 :

$$y_2 = g(y_2 P - C \times \sum_{i=0}^2 P_{Err_Gr(i)} + Pa0) - g(Pa0) \quad (6)$$

其中: $y_2 = g(x)$ 为精调的位移曲线理论方程, x 为凸轮角度转化的电机脉冲数; $x = g^{-1}(y_2)$ 为精调的位移曲线理论方程的反函数, y_2 为精调曲线纵坐标; $C \times \sum_{i=0}^2 P_{Err_Gr(i)}$ 为电机反转 $C=1$, 否则 $C=0$; 精调引入的回程误差, 涉及到齿轮副 0-2;

由式 (1) ~ (6) 可以推导出式 (7) ~ (9), 至此完成了单促动器运动学方程的数学建模。

单促动器的位移由粗调位移 y_1 与精调位移 y_2 组成, 其表达式为:

$$Y = A \times y_1 + B \times y_2 \quad (7)$$

粗调 y_1 的运动学方程为:

$$y_1 = \left[INT \left(\frac{INT \left(\frac{Y - D \times y_{2,disurb1} - E \times y_{2,disurb2}}{L_r} \right) \times L_r}{\left(\frac{360^\circ}{\alpha} \times m \times Gr_0 \times Gr_1 \times Gr_2 \times Gr_3 \right) \times Pa0} \right) \times \right. \\ \left. Pa0 + C \times \sum_{i=0}^3 P_{Err_Gr(i)} + P_{KC} - C \times P_{Err_Gr0-3} + P_{KC} \right] \times \left(\frac{Lead}{\left(\frac{360^\circ}{\alpha} \times m \times Gr_0 \times Gr_1 \times Gr_2 \times Gr_3 \right)} \right) \quad (8)$$

精调 y_2 的运动学方程为:

$$y_2 = g(INT(g^{-1}(Y - y_1)) - Pa0) - g(Pa0) \quad (9)$$

2 多促动器六自由度平台运动学建模

2.1 多促动器六自由度平台机构模型

多促动器六自由度平台如图 3 所示。

六个促动器两两一对, 通过六个柔性铰链共同支撑一块分块镜 (动平台), 促动器再通过六个柔性铰链与定平台相连。在镜子中间的促动器, 是调整镜面曲率的运动机构, 它的一端与镜面相连, 另一端连接 6 根拉杆, 拉杆分别与分块镜的六角相连, 这样, 可通过控制中间促动器的精密伸缩运动实现镜面曲率调整。

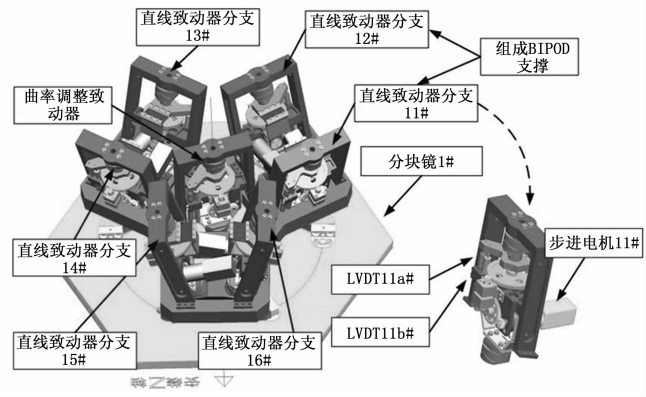


图3 分块镜位姿/曲率调整机构示意图

2.2 多促动器六自由度平台运动学数学模型

多促动器六自由度平台是典型的 6-SPS 构型的 Stewart 六自由度并联机构。当已知并联机构的主动件的位置, 求解并联机构的末端件的位置, 称为并联机构的运动学正解; 反之, 若已知并联机构末端件的位置, 求解并联机构的主动件的位置, 称为并联机构的运动学反解。六自由度并联机构的正解可用于工作空间分析、误差分析、对运动平台的位姿进行监控; 反解用于运动控制、速度及加速度分析、对六自由度并联机构进行标定。

2.2.1 六自由度并联机构的位置反解

动平台的位姿用广义坐标向量 q 表示, 其中 $q = [q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6]^T$, $[q_1, q_2, q_3]^T$ 表示运动平台中心在惯性坐标系中的坐标向量, $[q_4, q_5, q_6]^T$ 表示运动平台在惯性坐标系中的姿态角即欧拉角。这 6 个参数就确定了动平台的空间位姿。由旋转矩阵的性质可以得到最终旋转变换矩阵为:

$${}^A_B R = R(x, U) \cdot R(y, V) \cdot R(z, W) = \begin{bmatrix} cVcW & -sVsW & sV \\ sUsVcW + cUsW & -sUsVsW + cUcW & -cVsU \\ -cUsVcW + sUsW & cUsVsW + sUcW & cUcV \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中, $cU = \cos U, cV = \cos V, cW = \cos W, sU = \sin U, sV = \sin V, sW = \sin W$ 。动平台姿态广义坐标系 $q = [x, y, z, U, V, W]^T$ 时, 各支杆的长度为:

$$l_i = |l_i| = \sqrt{l_i^T \cdot l_i} \quad (11)$$

式中, l_i 为单促动器支杆矢量, $|l_i|$ 为杆长, $i = 1, 2, \dots, 6$ 。

2.2.2 六自由度并联机构的位置正解

相对于六自由度并联机构的位置反解, 正解比较复杂。以下为利用 Newton-Raphson 法进行正解的求解方法。定义目标向量函数来描述促动器伸缩长度的估计值和实际值 (测量值) $\bar{l}_i$ 之间, 即:

$$f = \begin{bmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1^2 - \bar{l}_1^2 \\ \vdots \\ l_6^2 - \bar{l}_6^2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Newton-Raphson 法以目标向量函数取极小值为目标, 求解六自由度并联机构位姿向量 P 的步骤如下: 1) 测量 $\bar{l}_i$,

选取动平台的位姿初值 P ; 2) 基于 P 并利用式(2) 计算 l ; 形成向量函数 f ; 3) 如果 $P^T P < \epsilon_1$ 成立, 则 P 为所求的位姿, 否则, 进行下一步; 4) 计算雅克比矩阵 $J = \frac{\partial f}{\partial P}$; 5) 利用 $J\delta P = -f$ 来计算位姿修正值 δP ; 6) 如果 $\delta P^T \delta P < \epsilon_2$ 成立, 则 P 为所求的位姿, 否则, 进行下一步; 7) 计算 $P = P + \delta P$, 并转到步骤 2)。

步骤 5 中的雅克比矩阵的计算公式如下:

$$\begin{cases} J_{i,1} = 2l_{ix} \\ J_{i,2} = 2l_{iy} \\ J_{i,3} = 2l_{iz} \\ J_{i,4} = 2(p_{a_{iy}} l_i^T R_{col3} - p_{a_{iz}} l_i^T R_{col2}) \\ J_{i,5} = 2 \left(R_{row3} p_{a_i} (l_{ix} \cos \theta_z + l_{iy} \sin \theta_z) \right. \\ \left. - l_{iz} (p_{a_{ix}} \cos \theta_y + p_{a_{iy}} \sin \theta_y \sin \theta_x + p_{a_{iz}} \sin \theta_y \cos \theta_x) \right) \\ J_{i,6} = 2(l_{iy} R_{row3} p_{a_i} - l_{ix} R_{row2} p_{a_i}) \end{cases} \quad (13)$$

式中, $l_i = [l_{ix} \ l_{iy} \ l_{iz}]^T$ 为第 i 个支杆的坐标向量; p_{a_i} 为运动平台上第 i 个铰点在 $o-xyz$ 坐标系下的坐标向量; $p_{a_{ix}}, p_{a_{iy}}, p_{a_{iz}}$ 分别为 p_{a_i} 在 $o-xyz$ 坐标系下的坐标分量;

$$R_{col2} = [J_x \ J_y \ J_z]^T; R_{col3} = [K_x \ K_y \ K_z]^T; R_{row1} = [I_x \ J_x \ K_x]; R_{row2} = [I_y \ J_y \ K_y]; R_{row3} = [I_z \ J_z \ K_z];$$

六自由度并联机构一般在中位附近运动, 因此将正解的初值可设为运动平台中位时的位姿以保证求解方法的收敛性。该方法可求出唯一可行解。

3 促动器地面测控系统设计

3.1 控制策略

设计指标为单个微位移促动器总行程为 25 mm, 定位精度误差小于 20 nm。多促动器六自由度平台的定位精度设计指标为单向平移重复精度误差小于 30 nm, 角度精度误差小于 $0.02 \mu\text{rad}$ 。

在并联机构中, 各支杆存在耦合关系。因此需要根据并联机构的运动学模型设计、配置控制硬件和软件, 从而实现并联机构各轴的同步运动, 使动平台实现所需求的运动轨迹。本文设计的并联定位平台的控制系统采用“PC+运动控制器”的形式。

六自由度并联机构采用基于铰点空间的控制。即分别设计各个单通道控制器, 即分别控制六个直线促动器完成各自

既定动作来控制动平台位姿。多促动器的六自由度平台的控制框图如图 4 所示。首先确定目标轨迹, 然后根据运动学逆解计算出每个促动器需要改变的长度值 Δl_i , 并将其输入到各自的 PID 控制器, 每个促动器绑定直线位移传感器测量促动器实时长度反馈给控制器实现促动器长度的位置闭环控制。

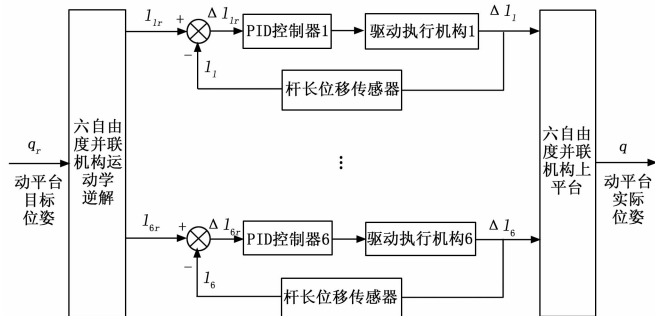


图 4 并联机构铰点空间 PID 控制原理

3.2 上位机控制软件设计

控制软件设计及开发是实现分块镜促动器位姿/曲率调整的核心技术。促动器的控制软件是一个多任务处理控制软件, 由于控制硬件采用“PC+运动控制卡”的主从分布式结构体系, 在控制软件设计时, 依据了软件工程的思想进行了总体设计, 软件结构采用前后台型结构形式, 按实时性将控制系统需要完成的各种任务分别由 PC 和 PXI-7358 管理执行。

除了实现控制算法, 上位机控制软件还实现了人机交互、数据存储、机构寻零和电机驱动等多个功能模块。

4 实验验证

4.1 实验系统硬件

促动器测控系统采用“PC+运动控制卡”结构, NI 公司的机箱+控制器作为上位机, 运动控制卡 PXI-7358 作为位置控制器和速度控制器, 电器伺服部分采用步进电机。控制系统逻辑结构图如图 5 所示。

4.2 上位机软件

本文设计的上位机软件采用 VC++ 开发平台, 并基于 MFC 框架编程实现。上位机软件采用面向对象的设计方法, 以数据为中心, 类作为表现数据的工具是划分程序的基本单位, 函数是面向对象设计中类的接口。在设计过程中, 类封装了数据, 类的成员函数作为其对外的接口, 抽象地描

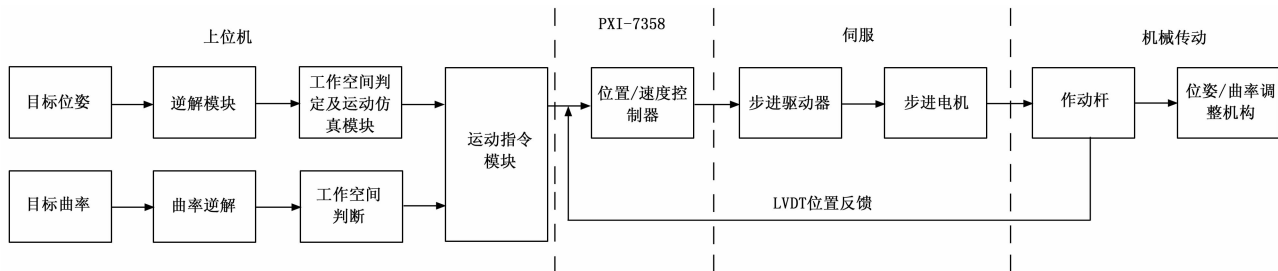


图 5 控制逻辑结构

述了类。面向对象的设计方法具体由基于 MFC 框架并采用多文档软件架构形式编程实现。以 CMainFrame 类为程序主躯干和神经枢纽, 和各 CDialog 类建立的指令窗口、遥测窗口以及数据总线进行数据交换。指令类数据以指令数据格式进行通信, 而总线接收到的遥测数据以事件方式触发遥测界面线程, 进行数据更新显示。而实时数据、历史数据则以 CView 类进行曲线绘制。上位机界面如图 6 所示。

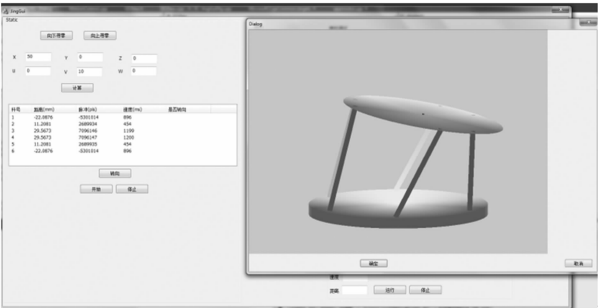


图 6 上位机软件

该界面可对单促动器、多促动器六自由度平台进行驱动和控制, 并进行实时的三维仿真。

4.3 微位移促动器测控系统实验

系统设计指标为六自由度平台定位精度不大于 30 nm。搭建好硬件平台和软件平台后, 在光学隔振平台上, 利用高精度双频激光干涉仪 ZLM800 (位移测量分辨率为 1.25 nm), 在超洁净实验室内对微位移促动器和测控系统进行测试。

将系统组装好后, 对单杆促动器进行小步长测试实验。如图 7 所示, 运行指令 50 步, 运行次数 10 次, 平均步长 208 nm, 标准偏差为 12.903 nm。

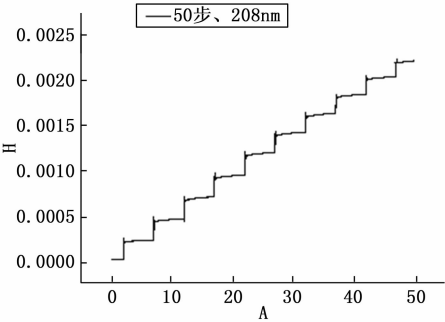


图 7 单促动器小步长测试

然后对单促动器进行大步长测试, 如图 8 所示, 运行指令 500 步, 运行次数 10 次, 平均步长 2.08 μm , 标准偏差为 15.573 nm。

最后对六自由度平台进行定位测试, 将各促动器恢复到中位, 设置上平台走半径为 5 μm 的圆周轨迹, 平台在 x 轴、 y 轴和 z 轴的误差如图 9 所示。

x 轴方向平均误差 0.022 μm , y 轴方向平均误差为 0.022 μm , z 轴方向平均误差为 0.001 μm 。各姿态角误差如图 10 所示。

U 旋转角平均误差为 0.012 μrad , V 旋转角平均误差为

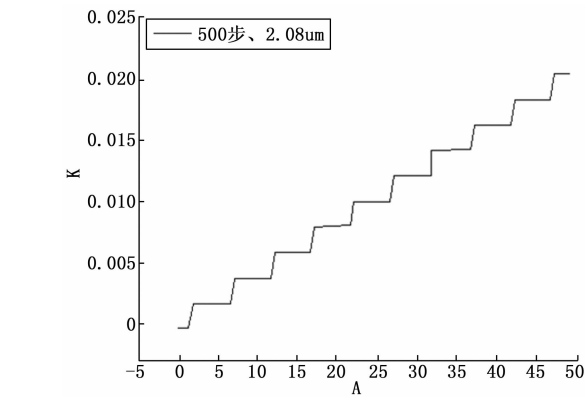


图 8 单促动器大步长测试

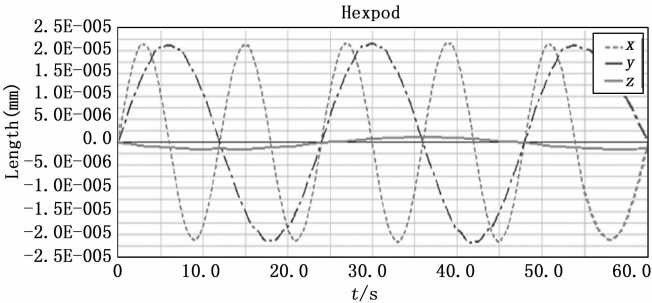


图 9 移动方向误差曲线

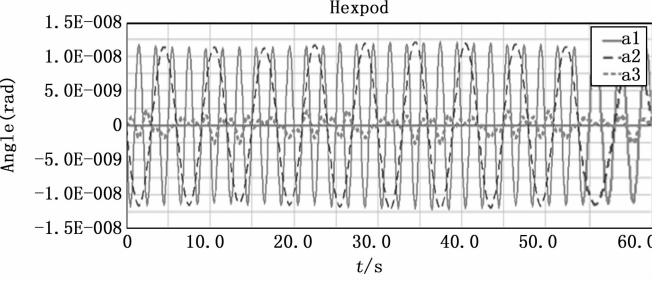


图 10 旋转方向误差曲线

0.012 μrad , W 旋转角平均误差为 0.002 μrad 。实验证明, 单促动器及多促动器六自由度平台的定位精度满足设计指标。

5 结束语

为满足大口径空间光学镜面在轨组装的高精度定位需求, 本文设计并研制了一种宏/微动叠加式的微位移促动器, 并搭建了单促动器和多促动器六自由度平台的地面测控系统, 对该种促动器的高精度定位进行了测试。本文建立了单促动器运动模型、多促动器六自由度平台的运动模型, 搭建了促动器的地面测控系统。实现了单促动器和多促动器六自由度平台的控制策略, 编写了软件控制程序。在实验验证部分, 对单促动器分别进行小步长测试和大步长测试, 小步长测试误差为 12.903 nm, 大步长测试误差为 15.573 nm。然后对多促动器六自由度平台进行了定位测试, 测试结果表明单促动器和多促动器六自由度平台的定位精度均满足设计要求。该微位移促动器及多促动器六自

由度平台的设计、研制和测试对后续高精度空间相机主镜、次镜空间展开、空间组装的控制平台设计具有重要意义。

参考文献:

- [1] 徐 琰. 利用二元光学技术设计轻量化光学遥感系统 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.
- [2] 罗 格, 卫 征. 航天遥感与中国空间信息产业发展 [J]. 航天返回与遥感, 2018, 39 (4): 10-17.
- [3] Mohan S, Miller D W. Operational impact of mass property update for on-orbit assembly [A]. SpaceOps 2006 conference [C]. AIAA 2006-5658: 1-10.
- [4] Lillie C. On-orbit assembly and servicing for future space observatories [A]. Space 2006 [C]. AIAA2006-7251: 1-12.
- [5] 郭继锋, 王 平, 崔乃刚. 空间在轨装配任务规划 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- [6] 蔡远文, 郭 会, 李 岩. 航天器在轨组装技术进展 [J]. 兵工自动化, 2009, 28 (10): 6-8.
- [7] 芦 瑶. 空间在轨装配技术发展历程研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [8] McBride D, Hudek J S, Panteleev S. Repairing stress induced cracks in the Keck primary mirror segments [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 844421.

(上接第 120 页)

由表 2 可知: 采用所设计系统的超声诊断结果与图像分割结果一致, 在 0.8 bpp 嵌入率下超声诊断平均值为 88.6%, 在 1.0 bpp 嵌入率下超声诊断平均值为 77.1%; 而使用传统系统与图像分割结果相差较大, 在 0.8 bpp 嵌入率下超声诊断平均值为 63.7%, 在 1.0 bpp 嵌入率下超声诊断平均值为 47.9%。说明所设计系统超声诊断功能具有一定的准确性。由此可知, 基于边缘检测的图像分割的超声诊断机器人控制系统设计是具有合理性的。

5 结束语

超声诊断机器人控制系统在进行设计时最为重要的研究之一就是图像分割, 传统的图像分割算法效率很低, 而且检测效果也不尽人意, 因此提出基于边缘检测的图像分割的超声诊断机器人控制系统设计。实验结果证明该系统对超声图像的分割效果较好, 且诊断结果较为准确。该技术的应用, 使得超声诊断机器人控制系统得以实现。但该系统仍存在一些不足之处, 接下来的工作中还是要对下面两个方面做出研究与努力。

1) 在图像分割算法的基础上, 提出了超声诊断机器人控制系统的设计, 该设计是建立在边缘检测的图像分割的技术上, 即使系统的诊断功能得到了非常显著的提高, 但诊断效率因为正弦函数被引入到隶属度函数中而变得不是很高, 所以要做出更进一步研究, 为了提高该算法计算效率, 需要更加简便有效的隶属度函数。

2) 在缺陷图像的模糊边缘分割算法中, 因为缺陷检测系统都不相同, 所检测的目标也都不同, 而图像分割技术虽然可以将背景中的小缺陷分割出来, 但是还不能精准定

- [9] Stepp L M, Huang E, Cho M K. Gemini primary mirror support system [J]. Proceedings of SPIE, 1994, 223-238.
- [10] Neufeld C, Bennett V, Sarnik A, et al. Development of an active optical system for the SOAR telescope [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 1052-1060.
- [11] Neufeld C, Zolcinski—Couet M C, Keane M, et al. The active primary mirror assembly for the SOAR telescope [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 870-880.
- [12] Warden R M. Cryogenic Nano-Actuator for JwsT [A]. Proceedings of the 3dh Aerospace Mechanisms Symposium [C]. Hampton: Langley Research Center 2006: 239-252.
- [13] Neill D, Hileman E. LSST telescope primary/tertiary mirror cell assembly [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7733.
- [14] Han J. M. T. A. Adriaens, Willem L. de Koning and Reinder Banning. Modeling Piezoelectric Actuators [J]. Transactions on Mechatronics, 2010, 5 (4): 331-341.
- [15] Bizzigotti R A. Electromechanical Translational Apparatus [P]. U. S. Patent 3902085, 1975.
- [16] Bai Q S, Liang Y C, Cheng K, et al. Design and analysis of a novel large aperture grating device and its experimental validation [J]. Proc-55-IMEchE Part B: J Engineering Manufacture, 2013, 227 (9): 1349-1359.

位缺陷定位位置, 且不能得到广泛的应用, 因此需要对该算法的准确性和应用领域做更加深层的研究。

参考文献:

- [1] 刘丽霞, 李宝文, 王阳萍, 等. 改进 Canny 边缘检测的遥感影像分割 [J]. 计算机工程与应用, 2019, 6 (12): 54-58.
- [2] 王小鹏, 文昊天, 王 伟, 等. 形态学边缘检测和区域生长相结合的遥感图像水体分割 [J]. 测绘科学技术学报, 2019, 7 (2): 149-154.
- [3] 刘晓刚, 闫红方, 张 荣. 基于形态学多尺度多结构的熔池图像边缘检测 [J]. 热加工工艺, 2019, 4 (5): 216-219.
- [4] 王 飞, 靳向煜. 基于边缘检测的原棉杂质图像识别方法适用性分析 [J]. 现代纺织技术, 2019, 5 (5): 39-43.
- [5] 刘明纲. 基于高斯混合模型和 NSCT 的图像边缘检测方法 [J]. 科技通报, 2018, 5 (8): 108-112.
- [6] 王 涛, 郭金亮. 基于图像处理的机器人精确抓取的设计与实现 [J]. 制造技术与机床, 2018, 5 (12): 47-51.
- [7] 吉咸阳, 徐 宁, 杨 庚, 等. 光缆表面缺陷视觉在线高速检测算法研究 [J]. 高技术通讯, 2019, 29 (8): 808-815.
- [8] 樊佩琦, 吴 诚, 杨瑞宇, 等. 一种基于 BRISK 改进的 SURF 红外图像拼接方法 [J]. 红外技术, 2018, 40 (1): 27-33.
- [9] 柯 洁. 基于数学形态学和灰度矩的高温亚像素边缘检测 [J]. 工具技术, 2019, 53 (3): 132-136.
- [10] 毛 峡, 石天朋. 光伏热斑图像有效区域分割算法研究 [J]. 太阳能学报, 2018, 7 (5): 1270-1276.
- [11] 李 莉, 王绪国. 局部二值模式耦合双阈值 LM 优化的火焰图像边缘检测算法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 9 (6): 9-17.
- [12] 王明文, 唐东明, 于耀程, 等. 手指静脉图像鲁棒边缘检测算法 [J]. 计算机应用研究, 2018, 4 (1): 296-299.