



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 101804521 B

(45) 授权公告日 2014. 08. 20

(21) 申请号 201010146577. 5

(22) 申请日 2010. 04. 15

(73) 专利权人 中国电子科技集团公司第四十五研究所

地址 065201 河北省三河市燕郊经济开发区
海油大街 20 号

(72) 发明人 孟凡辉 许志伟

(74) 专利代理机构 石家庄新世纪专利商标事务
所有限公司 13100

代理人 张贰群

(51) Int. Cl.

B23K 26/70 (2014. 01)

(56) 对比文件

CN 101513693 A, 2009. 08. 26, 摘要、说明书
第 2 页第 13 段 - 第 5 页第 2 段, 附图 1-2.

CN 201046554 Y, 2008. 04. 16, 全文.

CN 101431126 A, 2009. 05. 13, 全文.

US 2002125222 A1, 2002. 09. 12, 全文.

赵毅等. 振镜扫描系统的枕形畸变校正
算法. 《中国激光》. 2003, 第 30 卷 (第 03
期), 216-218.

张伯珩等. 光电位置传感器在转角精密定
位中的作用. 《光子学报》. 2001, 第 30 卷 (第 4
期), 505-507.

审查员 何丹超

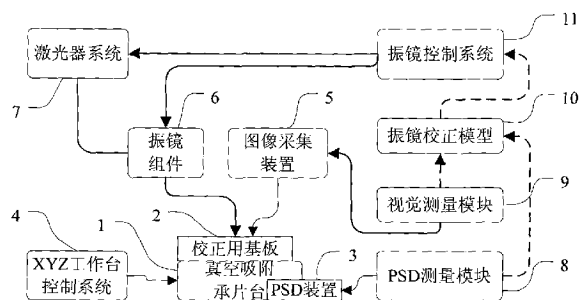
权利要求书2页 说明书10页 附图6页

(54) 发明名称

一种振镜系统校正装置的校正方法

(57) 摘要

本发明提供了一种振镜系统校正装置的校正方法, 涉及激光精密加工设备技术领域。所述校正方法主要包括模型更新需求判定、校准样本数据采集、单应变换模型计算、振镜扫描畸变模型计算、非线性补偿计算优化 (1005)、模型作用 (1006) 和加工数据输入几大步骤; 利用所述振镜系统校正装置, 可以 PSD 数据采集方法或 CCD 数据采集方法完成振镜校正前所必需的校准样本数据采集步骤, 进而实现振镜校正模型包括单应变换和振镜扫描畸变两个模型的建立、更新和作用; 模型作用, 即实时校正过程基于“非线性补偿”策略, 以抵消振镜扫描畸变量的影响, 从而可以减小和抑制振镜扫描系统的综合误差。



1. 一种振镜系统校正装置的校正方法,其特征在于:所述校正方法借助振镜系统校正装置来完成,所述振镜系统校正装置设有真空吸附承片台(1),设有承片台基座(103),真空吸附承片台设有承片台基板(105)和承片台外框(101),承片台外框(101)中间为蜂窝板(102),校正用基板(2)吸附放置在蜂窝板(102)上,蜂窝板(102)的真空腔通过弹簧软管与吸尘器连接;用以测量振镜系统激光实际输出光斑中心位置的PSD传感器(38)装于真空吸附承片台(1)上;校正用基板(2)上方设有CCD图像采集装置(5),CCD图像采集装置(5)由LED环形照明光源(53)、4X放大物镜(52)和CCD图像传感器(51)组成,4X放大物镜(52)的上端与CCD图像传感器(51)连接,下端连接LED环形照明光源(53),设有光强调节模块和图像采集板卡;

所述校正方法主要包括模型更新需求判定(1001)、校准样本数据采集(1002)、单应变换模型计算(1003)、振镜扫描畸变模型计算(1004)、非线性补偿计算优化(1005)、模型作用(1006)和加工数据输入(1007)几大步骤;利用所述振镜系统校正装置,可以PSD数据采集方法或CCD数据采集方法完成振镜校正前所必需的校准样本数据采集步骤(1002),进而实现振镜校正模型包括单应变换和振镜扫描畸变两个模型的建立、更新和作用;模型作用,即实时校正过程基于“非线性补偿”策略,以抵消振镜扫描畸变量的影响,从而可以减小和抑制振镜扫描系统的综合误差。

2. 根据权利要求1所述的一种振镜系统校正装置的校正方法,其特征在于所述的PSD数据采集方法,步骤如下:将振镜扫描范围划分为均匀分布栅格点,将振镜驱动至各栅格点位置,通过如权利要求1所述的真空吸附承片台(1),改变PSD装置(3)的感光位置,利用PSD测量模块(8),可以获取激光聚焦光斑中心位置,从而可以确定振镜系统输出实际位置;所有栅格点的振镜指令位置和实际定位位置数据对均被记录。

3. 根据权利要求1所述的一种振镜系统校正装置的校正方法,其特征在于所述的CCD数据采集方法,步骤如下:将振镜扫描范围划分为 $9 \sim 121$ 个均匀分布栅格点,通过试加工,在如权利要求1所述的校正用基板(2)上栅格点附近形成测试圆孔阵列,直径 d 取值范围为 $0.1\text{mm} \sim 0.3\text{mm}$;基于如权利要求1所述的CCD图像采集装置(5),捕获校正用基板(2)上形成的测试圆孔图像;依据捕获到的测试圆孔图像,视觉测量模块(9)进行测试圆孔自动识别,并确定其位置信息,从而可以确定振镜系统输出实际位置;所有栅格点的振镜指令位置和实际定位位置数据对均被记录;这一过程无需人工干预。

4. 根据权利要求3所述的一种振镜系统校正装置的校正方法,其特征在于所述的视觉测量算法模块(9)内部的圆孔自动识别,其算法流程为:算法以输入图像步骤(900)开始,依次经过阈值分割步骤(901)、边缘提取步骤(902)、膨胀运算步骤(903)、连通区域标记步骤(904)、亚像素边缘提取步骤(905)、轮廓分割步骤(906)、选择微圆弧基元子集步骤(907)、同心圆合并操作步骤(908)、圆弧拟合步骤(909)和圆弧筛选步骤(910),从而完成圆孔自动识别和圆孔位置、半径信息提取;其中活跃着两个工作线程,即图像采集线程(92)和运动控制线程(94),二者之间通过共享存储区(93)的一些全局标志变量、事件对象完成时序、动作上的协调配合。

5. 根据权利要求1所述的一种振镜系统校正装置的校正方法,其特征在于所述的振镜校正模型的建立、更新和作用过程如下:

a、模型的建立:振镜校正模型包括两个部分,即单应变换模型和振镜扫描畸变模型;

将振镜偏转指令位置 (u, v) 与目标位置 (x, y) 间映射关系建模为单应变换模型 ; 基于少量先验信息, 将振镜扫描畸变量 (D_x, D_y) 和理想目标位置 (x, y) 间的非线性映射关系建模为二元 4 阶多项式曲面模型 ; 这两个模型的实用之处在于便于模型的数值计算和迭代更新 ; 首先, 基于少量观测数据, 计算确定单应变换模型的单应矩阵 ; 在此基础上, 基于 PSD 数据采集方法获取大容量观测样本数据, 利用最小二乘估计 (LSE, Least Squares Estimation) 方法, 进行二元多项式系数参数辨识, 获取较为精确的振镜畸变模型参数初始估计值, 提高以后每次模型更新迭代计算时参数估计值的收敛速度 ;

b、模型的更新 : 每隔 6~8 小时, 基于 CCD 数据采集方法采集 25~121 组新数据 ; 基于新一批样本数据, 利用递推最小二乘估计 (RLSE, Recursive Least Squares Estimation) 方法, 进行振镜扫描畸变模型二元多项式系数参数的微量修正, 并通过引入遗忘因子 λ^2 , 使得振镜扫描畸变模型对振镜系统温度波动因素具有较好的动态跟踪能力 ;

c、模型的作用 : 对于数控程序要求定位目标位置 (x, y) , 依据两个模型计算振镜偏转指令位置 (u, v) ; 首先, 以目标位置 (x, y) 作为输入, 依据振镜扫描畸变模型, 计算振镜扫描畸变估计量 $(\delta x, \delta y)$, 再以经过“非线性补偿”后的期望值 $(x - \delta x, y - \delta y)$ 作为输入, 依据单应变换模型计算振镜偏转指令位置 (u, v) ; 另外, 基于校正查询表 (LUT, Lookup Table) 技术和双线性曲面内插补算法进行振镜扫描畸变量估计算法优化, 进一步提高振镜实时校正计算运行效率, 从而提高振镜高速扫描加工能力。

6. 根据权利要求 1 所述的一种振镜系统校正装置的校正方法, 其特征在于所述的校正用基板 (2) 由生瓷材料制成, 为低温共烧陶瓷 (LTCC) 基板或高温共烧陶瓷 (HTCC) 基板。

7. 根据权利要求 1 所述的一种振镜系统校正装置的校正方法, 其特征在于所述的 PSD 传感器 (38) 为横向光电效应型传感器, 固定在真空吸附承片台 (1) 上的安装架 (31) 上, 安装架 (31) 通过支座 (32) 与 PSD 传感器 (38) 的内螺纹接口连接, 内部放置两片滤光片 (36、37), 形成二级光学过滤器, 上用压盖 (33) 压紧。

8. 根据权利要求 1 所述的一种振镜系统校正装置的校正方法, 其特征在于所述的 PSD 传感器 (38), 其接收激光功率范围在 $10 \mu w$ 至 $10mw$ 之间, 其上覆盖光学过滤器, 使得激光经过衰减后, 处于其最佳接收功率范围 $1 \sim 3mw$ 。

一种振镜系统校正装置的校正方法

技术领域

[0001] 本发明涉及激光精密加工设备技术领域,尤其市一种激光精密加工设备中的振镜系统的校正装置。

背景技术

[0002] 当前,激光加工(包括激光打标、钻孔和切割等)技术在半导体芯片、微电子电路及混合集成电路封装领域已经得到了广泛应用。因惯量小、加减速极快、加工速率可高达12m/s,振镜系统通常被作为核心组件集成到激光加工装备中。然而,日新月异的高密度封装、高密度互连技术(HDI)对整机精度也提出了更高的要求(整机精度优于 $\pm 15\mu\text{m}$)。通常,振镜系统的引入会带来各种误差,使机器设计者难于应对。振镜扫描系统的配置中,偏转角和平面坐标之间存在着固有的非线性映射关系,加之光学组件的制造误差、光路系统的装调误差,会给系统带来“枕形畸变”、“桶形畸变”和“枕桶形复合畸变”等静态误差;电子传输线路中的残留噪声、模拟电压漂移也会带来系统和随机的动态误差;8小时连续工作条件下,因温度漂移常常会对系统造成累积高达60 μm 的蠕变误差。这些因振镜系统而带来的非线性综合误差,较难于消除,常常影响了系统的集成和构建效率。迫切需要一种有效且高效的提高振镜系统精度的装置和方法。

[0003] 通常,减小和抑制振镜系统这些综合误差的对策采取的是基于某种数学模型进行定期(6~8小时)校正的机制,这套机制主要包括模型的建立、更新和作用。其中建模过程中,需要模型尽量能反映振镜系统配置主导参数的影响,不能过于简单,否则会影响系统精度;模型的更新过程中,通常需要实行试加工,然后进行数据测量,继而基于观测数据计算目标位置与振镜偏转指令角度间的映射关系。数据采集对模型更新过程的执行效率有着极大影响,传统的数据采集方式是手工对位测量,或利用3D图像测量仪离线自动测量。这种人工或离线测量方式,一方面会带来更多的主观性测量误差,另一方面是效率极低;而模型作用过程中,校正算法的优化程度,直接影响了振镜系统实时校正计算运行时效率,从而会影响激光扫描加工效率,又决定了模型需要以实用为准则,不可以太复杂。

发明内容

[0004] 本发明的目的是提供一种振镜系统校正装置及其校正方法,旨在解决现有的振镜系统校正低效的问题,利用本发明,可以有效抑制振镜系统精度漂移,提高振镜系统校正模型更新时效率和实时校正计算运行时效率,可提高设备自动化程度,减轻操作者的劳动强度,大大提高设备的加工精度、产品质量和生产效率;其结构简单,原理、方法独特。特别适合在激光精密加工设备上应用。

[0005] 本发明装置的主要技术方案是:一种振镜系统校正装置,其特征在于具有以下机械结构:设有真空吸附承片台,真空吸附承片台设有承片台基座、承片台基板和承片台外框,承片台外框中间为蜂窝板,校正用基板吸附放置在蜂窝板上,蜂窝板的真空腔通过弹簧软管与吸尘器连接;用以测量振镜系统激光实际输出光斑中心位置的PSD传感器装于真空

吸附承片台上 ;校正用基板上方设有 CCD 图像采集装置, CCD 图像采集装置由 LED 环形照明光源、4X 放大物镜和 CCD (Charged Coupled Device, 电荷耦合器件) 图像传感器组成, 4X 放大物镜、的上端与 CCD 图像传感器连接, 下端连接 LED 环形照明光源, 设有光强调节模块和图像采集板卡 ;设有机器视觉算法模块。

[0006] 所述的校正用基板由生瓷材料制成较好, 可为低温共烧陶瓷 (LTCC) 基板或高温共烧陶瓷 (HTCC) 基板。

[0007] 所述的承片台外框与承片台基板、之间设有密封带 —— 聚氨酯圆皮带较好。

[0008] 所述的 PSD 传感器可为横向光电效应型传感器, 固定在真空吸附承片台上的安装架上, 安装架通过支座与 PSD 传感器的内螺纹接口连接, 内部放置两片滤光片, 形成二级光学过滤器, 上用压盖、压紧。

[0009] 本发明校正方法的主要技术方案是 : 利用上述装置, 其特征在于通过真空吸附承片台, 改变 PSD 装置的感光位置 ; 用 PSD 传感器, 将振镜扫描范围划分为均匀分布栅格点, 将振镜驱动至各栅格点位置, 利用 PSD 测量模块, 获取激光聚焦光斑中心位置, 确定振镜系统输出的激光光斑的实际位置 ; 由校正用基板, 在其上形成测试圆孔 ; 用 CCD 图像采集装置, 捕获校正用基板上形成的测试圆孔图像 ; 用机器视觉算法模块, 据采集到的图像, 自动识别圆孔并确定位置信息, 确定振镜系统输出实际位置 ; 以 PSD 数据采集或 CCD 数据采集两种方式进行上述数据样本采集, 进而实现振镜校正实施模型的建立、更新和作用。

[0010] 所述的用 PSD 横向光电效应型传感器时, 其接收激光功率范围在 $10\mu w$ 至 $10mw$ 之间, 处于 $1\sim 3mw$ 范围较好, 其上覆盖光学过滤器, 使得激光经过衰减后, 处于其接收功率范围。

[0011] 所述的机器视觉算法模块内部圆孔自动识别的算法流程为 : 算法以输入图像步骤开始, 依次经过阈值分割步骤、边缘提取步骤、膨胀运算步骤、连通区域标记步骤、亚像素边缘提取步骤、轮廓分割步骤、选择微圆弧基元子集步骤、同心圆合并操作步骤、圆弧拟合步骤和圆弧筛选步骤, 从而完成圆孔自动识别和圆孔位置、半径信息提取 ; 其中活跃着两个工作线程, 即图像采集线程和运动控制线程, 二者之间通过共享存储区的一些全局标志变量、事件对象完成时序、动作上的协调配合。

[0012] 所述的模型为配备 $f-\theta$ 透镜的振镜系统, 将振镜定位目标位置 (x, y) 和振镜偏转指令位置 (u, v) 间的非线性映射关系为二元 4 阶多项式曲面模型 ; 模型初始化时, 基于 PSD 数据采集方法获取大容量观测样本数据, 利用最小二乘估计方法, 进行二元多项式因数参数辨识, 获取较为精确的模型参数初始估计值, 提高以后每次模型参数估计值迭代更新时的收敛速度 ; 每隔 6~8 小时, 基于 CCD 数据采集方法采集 25~121 组新数据 ; 基于新一批样本数据, 利用递推最小二乘估计方法, 进行二元多项式因数参数的微量修正, 并通过引入遗忘因子 λ^2 , 使得模型对振镜系统温度波动等因素具有较好的动态跟踪能力 ; 将振镜驱动指令控制量分为线性和非线性补偿两个部分, 对非线性部分基于校正查询表技术和双线性内插补算法进行校正算法优化, 提高振镜实时校正计算运行效率, 从而提高振镜高速扫描加工能力。

[0013] 所述的 PSD 数据采集或 CCD 数据采集两种方式的数据采集方法的步骤为 :

[0014] a、PSD 数据采集方法 :

[0015] (1) 校准 PSD 装置, 包括 PSD 传感器坐标方向和坐标零点校准, 使得 PSD 传感器坐

标轴平行于振镜组件中振镜扫描坐标轴, 承片台 1 处于某位置 (x_0, y_0) 且振镜处于位置点 $(0, 0)$ 时, PSD 测量模块测量结果亦为 $(0, 0)$;

[0016] (2) 振镜控制系统产生指令驱动振镜将激光定位至某一栅格点 (i, j) 位置 $(i * P, j * P)$, 然后 XYZ 工作台控制系统驱动真空吸附承片台 (PSD 传感器附着于承片台) 定位至理想位置 $(x_i, y_j) = (x_0 + i * P, y_0 + j * P)$;

[0017] (3) PSD 测量模块 9 测量激光光斑中心位置, 此读数为振镜实际定位误差 $(\Delta a, \Delta b)$, 则 $(i * P + \Delta a, j * P + \Delta b)$ 即作为振镜指令位置 $(i * P, j * P)$ 相对应的实际定位位置被存储;

[0018] (4) 重复执行第 (2) 步骤, 直至所有栅格点 (i, j) 的指令位置和实际定位位置数据对均被记录。

[0019] b、CCD 数据采集方法, 也可称为试加工方法, 步骤如下:

[0020] (1) 校准 CCD 图像传感器, 包括坐标方向和相机偏移校准, 使得 CCD 图像传感器坐标轴平行于振镜坐标轴。振镜中心和 CCD 成像中心并不同轴, 其偏移值可以如下方式求出: 放置一校正用基板于真空吸附承片台上, 驱动工作台至某一位置 (x_1, y_1) , 然后控制振镜在位置 $(0, 0)$ 处加工圆孔 (直径 $0.1\text{mm} < d < 0.3\text{mm}$), 再驱动工作台至某位置 (x_2, y_2) 使圆孔图像恰处于图像中心, 则相机偏移即为 $(\Delta x, \Delta y) = (x_1 - x_2, y_1 - y_2)$;

[0021] (2) 驱动工作台至某一位置 (x_0, y_0) , 控制振镜在 $A\text{mm} \times A\text{mm}$ 范围内加工出 $n \times n$ 个均匀对称分布的圆孔 (直径 $0.1\text{mm} < d < 0.3\text{mm}$);

[0022] (3) 驱动工作台定位至位置 $(x_0 + \Delta x, y_0 + \Delta y)$, 此时阵列中心圆孔应处于图像中心;

[0023] (4) 开始视觉测量, 则此时进入工作循环, 完成后, 所有 $n \times n$ 个栅格点的指令位置和实际定位位置数据对均被记录。

[0024] 所述的振镜系统校正装置的校正方法, 其特征在于所述的实施模型主要包括:

[0025] a、模型的建立: 基于少量先验信息, 将数控程序要求定位目标位置 (x, y) 和振镜偏转指令位置 (u, v) 间的非线性映射关系建模为二元 4 阶多项式曲面模型, 这种模型实用之处在于便于模型的数值计算和更新。在此基础上, 基于 PSD 数据采集方法获取大容量观测样本数据, 利用最小二乘估计 (LSE, Least Squares Estimation) 方法, 进行二元多项式因数参数辨识, 从而完成模型初始化。大容量观测样本数据将保证能够获取较为精确的模型参数初始估计值, 加快模型更新时参数估计值的收敛速度;

[0026] b、模型的更新: 每隔 6~8 小时, 基于 CCD 数据采集方法采集 25~121 组新数据。基于新一批样本数据, 利用递推最小二乘估计 (RLSE, Recursive Least Squares Estimation) 方法, 进行二元多项式因数参数的微量修正, 并通过引入遗忘因子 λ^2 , 使得模型对振镜系统温度波动等因素具有较好的动态跟踪能力;

[0027] c、模型的作用: 将振镜驱动指令控制量分为线性和非线性补偿两个部分。对非线性部分基于校正查询表 (LUT, Lookup Table) 技术和双线性曲面内插补算法进行校正算法优化, 进一步提高振镜实时校正计算运行效率, 从而提高振镜高速扫描加工能力。

[0028] 本发明的积极效果是: 可以有效解决现有技术中存在的问题, 解决现有的振镜系统校正低效的问题, 利用本发明, 可以有效抑制振镜系统精度漂移, 提高振镜系统校正模型更新时效率和实时校正计算运行效率, 可提高设备自动化程度, 减轻操作者的劳动强度,

大大提高设备的加工精度、产品质量和生产效率 ;且其结构简单,原理、方法独特。特别适合在激光精密加工设备应用。

[0029] 以下结合附图及实施例作详述,但不作为对本发明的限定。

附图说明

[0030] 图 1 是本发明实施例提供的振镜系统校正装置的模块构成示意图。

[0031] 图 2 是本发明实施例提供的真空吸附承片台部分剖切立体图。

[0032] 图 3 是本发明实施例提供的 PSD 装置半剖图。

[0033] 图 4 是本发明实施例提供的振镜组件立体图。

[0034] 图 5 是本发明实施例提供的图像采集装置立体图。

[0035] 图 6 是本发明实施例提供的视觉测量模块的软件流程图。

[0036] 图 7 是本发明实施例提供的视觉测量模块内部圆孔自动识别算法流程图。

[0037] 图 8 是本发明实施例提供的振镜扫描范围数据采集栅格点示意图。

[0038] 图 9 是本发明实施例提供的振镜校正方法的实施模型示意图。

[0039] 图中各符号含义:真空吸附承片台 1,承片台外框 101,蜂窝板 102,承片台基座 103、聚氨酯圆皮带 104、承片台基板 105;校正用基板 2,栅格点 21;PSD (Position Sense Detector 位置敏感探测器) 装置 3,安装架 31,支座 32,压盖 33,防护镜片 34,垫圈 35,滤光片 36、37, PSD 传感器 38;XYZ 工作台控制系统 4;图像采集装置 5, CCD (Charged Coupled Device, 电荷耦合器件) 图像传感器 51, 4X 放大物镜 52, LED 环形照明光源 53;振镜组件 6, 振镜 61, 连接板 62, $f-\theta$ 透镜 63;PSD 测量模块 8, (机器) 视觉测量模块 9, 图像采集线程 92, 运动控制线程 94, 共享存储区 93, 输入图像步骤 900, 阈值分割步骤 901、边缘提取步骤 902、膨胀运算步骤 903、区域标记步骤 904、亚像素边缘提取步骤 905、轮廓分割步骤 906、微圆弧基元子集步骤 907、同心圆合并操作步骤 908、圆弧拟合步骤 909, 圆弧筛选步骤 910, 振镜校正模型 10, 模型初始化 1001、模型更新 1002、模型作用 1003、模型存储、读取 1004 工作模块, 模型数据 1005, 阐述模型建立 1001、模型更新 1002, 模型作用 1003 三个功能模块;振镜控制系统 11。

具体实施方式

[0040] 此处所描述的具体实施例仅用以解释本发明,并不适于限定本发明。

[0041] 本实施例中,如图 1 所示,振镜校正装置包括:

[0042] 真空吸附承片台 1,如图 2 所示, PSD 装置 3 附着其上,并可以完成校正用基板 2 的吸附固定。由承片台基座 103、承片台基板 105、承片台外框 101、蜂窝板 102 和聚氨酯圆皮带 104 形成真空腔,真空腔通过弹簧软管与吸尘器连接;校正用基板 2 放置在蜂窝板 102 上。加工过程中产生的小型残渣通过蜂窝板 102 上的芯孔、承片台基板 105 过孔与承片台基座 103 空腔进入吸尘器。聚氨酯圆皮带 104 安装于承片台外框 101 与承片台基板 105 之间起密封作用;

[0043] 校正用基板 2,用以在其上形成测试圆孔,据此图像采集装置 5 和视觉测量模块 9, 可以确定圆孔位置误差;作为一个实施例,可以是低温共烧陶瓷 (LTCC) 基板,或高温共烧陶瓷 (HTCC) 基板;

[0044] PSD(Position Sense Detector,位敏探测器)装置3和PSD测量模块8,用以测量激光光斑中心位置,从而可以确定振镜输出位置误差;图3为该装置的结构图,包括用于和真空吸附承片台1相连接的安装架31,PSD传感器38固定在安装架上,支座32与传感器的内螺纹接口连接,内部放置两片滤光片36、37,形成二级光学过滤器,选定两滤光片过滤百分比分别为3%和1%,入射光功率大于1mW可保证PSD传感器的高校正精度。两个镜片叠放在一起,用压盖33压紧,中间的垫圈35起隔离缓冲作用,安装于压盖顶层的防护镜片34起保持滤光片和传感器洁净的作用。设滤光片前的激光束功率为P,PSD传感器接收到的功率 $P_1 = P \times 3\% \times 1\%$ 。以横向光电效应型PSD传感器为例,要求 P_1 在 $10\mu W$ 至 $10mW$ 之间。横向光电效应型PSD传感器的 P_1 以小于 $1\sim 3mW$ 效果为佳;

[0045] 振镜组件6,通过振镜控制系统11控制实现在校正用基板2上加工。组件结构如图4所示,包括振镜61、连接板62和 $f-\theta$ 透镜63;

[0046] 图像采集系统,包括图像采集装置5、光强调节模块及采集板卡。如图5所示,图像采集装置5由LED环形照明光源53、4X放大物镜52和CCD(Charged Coupled Device,电荷耦合器件)图像传感器51组成;4X放大物镜上端与CCD图像传感器螺纹连接,下端连接环形照明光源,通过光强调节模块改变照明亮度;

[0047] 视觉测量模块9,包括机器视觉算法用以自动检测出圆孔位置信息;

[0048] 振镜校正模型10,振镜系统装调完毕后,基于观测数据进行振镜校正模型的建立、存储、更新和作用,具体过程如图9所示。

[0049] 通过以上装置,可以PSD数据采集或CCD数据采集两种方式完成模型初始化或模型更新前的数据采集。如图8所示,设定振镜校正范围为 $A\text{ mm} \times A\text{ mm}$,将于扫描范围内均匀 $n \times n$ 个栅格点21处执行数据采集过程,栅格点间距为 $P = A/(n-1)\text{ mm}$ 。理想情形如图8(a)所示,然而由于振镜扫描误差的存在,其测量数据位置总具有如图8(b)所示的一定程度的畸变。下面分别阐述两种数据采集方法的具体实施步骤。

[0050] 1、PSD数据采集方法。具体步骤如下:(1)校准PSD装置3,包括PSD传感器38坐标方向和坐标零点校准,使得PSD传感器38坐标轴平行于振镜组件6中振镜61扫描坐标轴,承片台1处于某位置 (x_0, y_0) 且振镜61处于位置点 $(0, 0)$ 时,PSD测量模块9测量结果亦为 $(0, 0)$;(2)振镜控制系统11产生指令驱动振镜61将激光定位至某一栅格点 (i, j) 位置 $(i \times P, j \times P)$,然后XYZ工作台控制系统4驱动真空吸附承片台1(PSD传感器38附着于承片台1)定位至理想位置 $(x_i, y_j) = (x_0 + i \times P, y_0 + j \times P)$;(3)PSD测量模块9测量激光光斑中心位置,此读数为振镜实际定位误差 $(\Delta a, \Delta b)$,则 $(i \times P + \Delta a, j \times P + \Delta b)$ 即作为振镜指令位置 $(i \times P, j \times P)$ 相对应的实际定位位置被存储;(4)重复执行第(2)步骤,直至所有栅格点 (i, j) 的指令位置和实际定位位置数据对均被记录。

[0051] 2、CCD数据采集方法,也可称为试加工方法,具体步骤如下:(1)校准CCD图像传感器51,包括坐标方向和相机偏移校准,使得CCD图像传感器51坐标轴平行于振镜61坐标轴。振镜中心和CCD成像中心并不同轴,其偏移值可以如下方式求出:放置一校正用基板2于真空吸附承片台1上,驱动工作台至某一位置 (x_1, y_1) ,然后控制振镜在位置 $(0, 0)$ 处加工圆孔(直径 $0.1\text{ mm} < d < 0.3\text{ mm}$),再驱动工作台至某位置 (x_2, y_2) 使圆孔图像恰处于图像中心,则相机偏移即为 $(\Delta x, \Delta y) = (x_1 - x_2, y_1 - y_2)$;(2)驱动工作台至某一位置 (x_0, y_0) ,控制振镜在 $A\text{ mm} \times A\text{ mm}$ 范围内加工出 $n \times n$ 个均匀对称分布的圆孔(直径 $0.1\text{ mm} < d < 0.3\text{ mm}$);

(3) 驱动工作台定位至位置 $(x_0 + \Delta x, y_0 + \Delta y)$, 此时阵列中心圆孔应处于图像中心; (4) 开始视觉测量, 则此时进入如图 6 所示工作循环, 完成后, 所有 $n \times n$ 个栅格点的指令位置和实际定位位置数据对均被记录。

[0052] 图 6 示意了视觉测量模块 9 的软件流程图, 其中时活跃着两个工作线程, 即图像采集线程 92 和运动控制线程 94, 二者之间通过共享存储区 93 的一些全局标志变量、事件对象完成时序、动作上的协调配合。

[0053] 图 7 示意了视觉测量软件模块 9 内部圆孔自动识别的算法流程图。算法以输入图像步骤 900 开始, 依次经过阈值分割步骤 901、边缘提取步骤 902、膨胀运算步骤 903、连通区域标记步骤 904、亚像素边缘提取步骤 905、轮廓分割步骤 906、选择微圆弧基元子集步骤 907、同心圆合并操作步骤 908、圆弧拟合步骤 909 和圆弧筛选步骤 910, 从而完成圆孔自动识别和圆孔位置、半径信息提取。

[0054] 最后, 阐述本发明提供的校正方法, 即自振镜系统装调完毕后校正模型建立、更新和作用的一整套机制。这套校正机制的实施模型如图 9 所示意, 主要包括模型初始化 1001、模型更新 1002、模型作用 1003、模型存储、读取 1004 四个工作模块, 它们均与模型数据 1005 发生交互。以下这种阐述模型建立 1001、模型更新 1002 和模型作用 1003 三个功能模块。

[0055] 图像采集系统, 包括环形照明光源及光强调节模块、放大物镜和 CCD (Charged Coupled Device, 电荷耦合器件) 图像传感器及采集板卡, 和机器视觉算法模块配合, 可以确定振镜系统输出实际位置。

[0056] 机器视觉算法模块, 用以自动识别圆孔, 并确定位置和半径信息。

[0057] 通过以上装置, 可以 PSD 数据采集或 CCD 数据采集两种方式完成模型建立或模型更新前所需的数据采集步骤。

[0058] 另外, 本发明提供了相应的校正方法, 包括自振镜系统装调完毕后校正模型建立、更新和作用的一整套机制, 其实施模型主要包括:

[0059] 1、模型的建立。对于平场透镜, 无穷远物体 (平行光) 经透镜成像在焦平面上, 其理想像高 h 与入射角度 θ 的正切成正比, 即 $h = f * \tan \theta$ 。这种透镜用于振镜扫描系统时, 由于理想像高和扫描角度不成线性关系, 因此以等角速率偏转的入射光束在焦平面上的扫描速率并不是常数, 这点通常不能适应复杂的激光加工工艺需求。而 $f-\theta$ 透镜本身具备一定的负畸变 (桶形畸变), 成像时实际像高比几何光学确定的理想像高小, 对应的畸变量 $\Delta h = f (\tan \theta - \theta)$, 相应的像高为 $h = f * \theta$, 因而可以实现等速率扫描, 在实际中得到了广泛应用。这种线性扫描模型也将大大简化控制系统设计, 本模型假定使用这种 $f-\theta$ 透镜。

[0060] 然而, $f-\theta$ 透镜本身存在着制造误差, 光学装调过程中也会带来误差, 因而实际模型仍存在着一定程度的非线性效应。一般地, 振镜偏转角度较小, 不超过 $\pm 20^\circ$ 。基于以上先验信息, 依据 *Taylor* 级数展开理论, 考虑到高阶小项, 我们直接将目标位置 (x, y) 和振镜偏转指令位置 (u, v) 间的映射关系建模为如式 (1) 所示的二元 p 次 (也称 $(p+1)$ 阶) 多项式模型。这样建模过程就转化为参数辨识问题。

[0061]

$$\begin{aligned}
 u &= u(x, y; \theta) \\
 &= h^T \theta \\
 &= [1 \ x \ y \ x^2 \ xy \ y^2 \ \dots \ y^p] [c_1 \ c_2 \ \dots \ c_n]^T
 \end{aligned}
 \quad \text{---(1)}$$

[0062] 其中 u 为第一振镜偏转角,

[0063] x, y 为扫描像场笛卡尔坐标,

[0064] $h^T = [1 \ x \ y \ x^2 \ xy \ y^2 \ \dots \ y^p]$ 为观测行向量,

[0065] $\theta [c_1 \ c_2 \ \dots \ c_n]^T$ 为参数向量, 其维数为 $n = (p+1)(p+2)/2$ 。

[0066] 当 $\theta [0 \ c \ 0 \ \dots \ 0]^T$ 时, 式 (2) 即简化为我们理想中的线性系统 $u = cx$ 。

[0067] 基于式 (1), 可以通过观测多组数据, 求得二元 p 次多项式因数估计值。设有 m 组采集数据 $(u_1, x_1, y_1) \sim (u_m, x_m, y_m)$, 可得到 m 个方程, 写成矩阵形式有:

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} u_1 \\ u_1 \\ \vdots \\ u_m \end{bmatrix}_{m \times 1} &= \begin{bmatrix} 1_1 & x_1 & y_1 & x_1^2 & x_1 y_1 & y_1^2 & \dots & y_1^p \\ 1_2 & x_2 & y_2 & x_2^2 & x_2 y_2 & y_2^2 & \dots & y_2^p \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1_m & x_m & y_m & x_m^2 & x_m y_m & y_m^2 & \dots & y_m^p \end{bmatrix}_{m \times n} \begin{bmatrix} c_1 \\ c_1 \\ \vdots \\ c_n \end{bmatrix}_{n \times 1}
 \end{aligned}
 \quad \text{---(2)}$$

[0069] 记响应向量 $b = [u_1 \ u_2 \ \dots \ u_m]^T$, 式 (2) 中间矩阵记为观测矩阵 H , 则有:

$$H\theta = b \quad \text{---(3)}$$

[0071] 其中 $H \in R^{m \times n}$, $\theta \in R^{n \times 1}$, $b \in R^{m \times 1}$

[0072] 一般地, 为使拟合的模型更精确, 总是增加观测样本容量, 使得 $m \gg n$ 。当 $m > n$ 时, 式 (3) 为未知数为 θ 的超定线性方程组, 式 (3) 无解, 此时更有意义的是转而寻求式 (3) 的最小二乘解, 即使得式 (4) 中的残差向量 ε 在欧几里德范数意义下取得最小值。

$$\theta = \varepsilon, \quad \text{---(4)}$$

[0074] ε 的实际意义为观测噪声或模型不精确 (比如未建模动态因素) 引起的误差。

[0075] 评价函数 $J = ||\varepsilon||^2 = ||H\theta - b||^2 = (H\theta - b)^T (H\theta - b)$,

$$\text{[0076] 令 } \frac{\partial J(\theta)}{\partial \theta} = 0, \text{ 得到式 (3) 的正则方程 } H^T H \theta = H^T b, \quad \text{---(5)}$$

[0077] 其解为 $\theta = (H^T H)^{-1} H^T b$, 即为式 (3) 的最小二乘解。

[0078] 此处, 设 $\text{Rank}(H) = n$, 并不失一般性, 因总可以通过控制数据采集过程和增加数据观测点, 使得观测矩阵 H 列满秩。此时方阵 $H^T H$ 非奇异, 其逆矩阵存在, 为对称正定方阵。

[0079] 同样, 有 $\theta_v = (H^T H)^{-1} H^T b_v$ 。 θ_u 和 θ_v 完全确定了目标位置 (x, y) 和振镜偏转指令位置 (u, v) 间的映射关系, 因而被作为模型参数存储至振镜控制系统。对于数控程序输入

目标位置 $(x0, y0)$, 振镜控制系统将会依据 $u=h^T \theta_u$ 和 $v=h^T \theta_v$ 映射关系计算输出位置, 从而驱动第一振镜和第二振镜至位置 $(u0, v0)=(h_{x\theta_u, y\theta_u}^T \theta_u, h_{x\theta_v, y\theta_v}^T \theta_v)$ 。

[0080] 一般地, 选取 $k \geq 2$, 因观测数据本身存在误差, 更大的 k 值增加的高阶项变得毫无意义, 且数值计算越不稳定, 作为一个实施例, k 取为 3, 则共有 10 个未知参数待定。模型建立时的初始参数决定了以后模型更新时参数的收敛速度, 为计算出较为精确的 θ_u 和 θ_v 初始估计值, 我们在振镜使用最佳温湿度等环境条件下, 通过上述的 PSD 数据采集方法, 在覆盖振镜扫描范围内采集 3600 组数据, 这需要花费约两小时的时间。

[0081] 2、模型的更新。振镜系统受温度变化影响较大, 可以看作一个缓慢时变系统, 因而需要对模型定期更新。对于二元 3 次多项式拟合, 需要至少 10 个采集点, 才能求得多项式因数估计值。上述对于观测矩阵 H 列满秩的要求过于严格, 在正规方程组对称正定系数矩阵求逆计算中也可能出现病态, 一种较好的算法是采取下述的基于递推最小二乘估计 (RLSE, Recursive Least Squares Estimation) 方法, 即可避免矩阵求逆计算中矩阵奇异的情形, 从而可以使得数值计算更趋稳定。这样带来的一个额外好处是, 无需进行很多次数数据采集, 也可以完成模型更新。

[0082] 设新采集了一组数据 (u, x, y) , 与原先的采集数据联立形成新的方程组:

$$[0083] \quad \begin{bmatrix} H_0 \\ h^T \end{bmatrix} \theta = \begin{bmatrix} b_0 \\ u \end{bmatrix},$$

$$[0084] \quad \text{记 } H = \begin{bmatrix} H_0 \\ h^T \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} b_0 \\ u \end{bmatrix}, \quad P_0 = (H_0^T H_0)^{-1},$$

$$[0085] \quad \text{则 } \theta = (H^T H)^{-1} H^T b$$

$$[0086] \quad = (H_0^T H_0 + h h^T)^{-1} (H_0^T b_0 + h u)$$

[0087] 利用矩阵求逆引理可知,

$$[0088] \quad \begin{aligned} (H_0^T H_0 + h h^T)^{-1} &= (P_0^{-1} + h h^T)^{-1} \\ &= P_0 - P_0 h h^T P_0 (I + h^T P_0 h)^{-1}, \end{aligned}$$

[0089] 故有,

$$[0090] \quad \begin{aligned} \theta &= P_0 H_0^T b_0 + P_0 h (I + h^T P_0 h)^{-1} (u - h^T P_0 H_0^T b_0) \\ &= \theta_0 + L (u - h^T \theta_0) \end{aligned} \quad \text{--- (6)}$$

$$P = (H^T H)^{-1} = (I_{n \times n} - L h^T) P_0$$

[0091] 其中为单位矩阵, $L = P_0 h (I + h^T P_0 h)^{-1}$ 。

[0092] 更一般地, 设同一批次新采集了 k 组数据 $b_i = [u_{m+i} u_{m+2} \cdots u_{m+k}]^T$, 新观测矩阵记为 H_i , 式 (6) 可推广为式 (7)。

$$\begin{aligned}
 \hat{\theta} &= P_0 H_0^T b_0 + P_0 H_1^T (I_{k \times k} + H_1 P_0 H_1^T)^{-1} (b_1 - H_1 P_0 H_0^T b_0) \\
 [0093] \quad &= \hat{\theta}_0 + L(b_1 - H_1 \hat{\theta}_0) \\
 P &= (H^T H)^{-1} = (I_{n \times n} - L H_1) P_0
 \end{aligned}
 \quad \text{---(7)}$$

[0094] 其中 I 为单位矩阵, $L = P_0 H_1^T (I_{k \times k} + H_1 P_0 H_1^T)^{-1}$ 。

[0095] 显然, 新采集的样本数据更可靠, 为强调其所提供的重要信息, 防止新的小容量样本数据“淹没”于旧的大容量样本数据之中, 将评价函数中引入加权项, 旧的一批 m 组观测数据其权重为 λ^2 ($0 \leq \lambda \leq 1$), 对新采集的一批 k 组数据其权重为 1。也即联立方程组式 (3) 变为:

[0096]

$$\begin{bmatrix} \lambda H_0 \\ H_1 \end{bmatrix} \theta = \begin{bmatrix} \lambda b_0 \\ b_1 \end{bmatrix}$$

[0097] 此时评价函数变为:

$$J = \varepsilon^T W \varepsilon = \lambda^2 (H_0 \theta - b_0)^T (H_0 \theta - b_0) + (H_1 \theta - b_1)^T (H_1 \theta - b_1)$$

[0099] 其中对角方阵

$$W = \text{diag}(\lambda_1^2, \lambda_2^2, \dots, \lambda_m^2, \lambda_{m+1}^2, \dots, \lambda_{m+k}^2), \quad \lambda_1^2 = \lambda_2^2 = \dots = \lambda_m^2 = \lambda^2,$$

$$\lambda_{m+1}^2 = \lambda_{m+2}^2 = \dots = \lambda_{m+k}^2 = 1.$$

[0102] 此时更新模型变为:

$$\begin{aligned}
 \hat{\theta} &= P_0 H_0^T b_0 + P_0 H_1^T (\lambda^2 I_{k \times k} + H_1 P_0 H_1^T)^{-1} (b_1 - H_1 P_0 H_0^T b_0) \\
 [0103] \quad &= \hat{\theta}_0 + L(b_1 - H_1 \hat{\theta}_0) \\
 P &= (H^T H)^{-1} = \frac{1}{\lambda^2} (I_{n \times n} - L H_1) P_0
 \end{aligned}
 \quad \text{---(8)}$$

[0104] 其中 $P_0 = (H_0^T H_0)^{-1}$, $L = P_0 H_1^T (\lambda^2 I_{k \times k} + H_1 P_0 H_1^T)^{-1}$ 。

[0105] 依据式 (8), 模型通过初始大容量数据样本 H_0 和 b_0 , 计算出较优的初始条件 $P = P_0 = (H_0^T H_0)^{-1}$ 、 $\theta = \theta_0 = P_0 H_0^T b_0$, 以后即可利用新一批小容量采集样本数据 H_1 和 b_1 , 对模型进行持续更新。并通过引入遗忘因子 λ^2 , 使得模型对振镜系统温度波动等因素具有较好的动态跟踪能力。 λ^2 较小时, 模型参数估计值波动较大, λ^2 较大时, 模型参数变化趋向平缓, 最佳的取值需要在实际应用中试验确定。作为一个实施例, 取 $\lambda^2 = 0.2$, 每隔 6~8 小时, 就利用上述的 CCD 数据采集方法采集 25~121 组新数据, 对模型进行更新, 每次模型更新大约需要花费 1~3 分钟的时间。

[0106] 3、模型的作用。依据上述方法, 当数控程序要求定位至目标位置

[0107] (x_0, y_0) 时, 振镜控制系统需驱动两振镜至位置 $u = c_1 + c_2 x_0 + c_3 y_0 + \dots + c_7 x_0^3 + c_8 x_0^2 y_0 + c_9 x_0 y_0^2 + c_{10} y_0^3$

[0108] 和 $v = d_1 + d_2 x_0 + d_3 y_0 + \dots + d_7 x_0^3 + d_8 x_0^2 y_0 + d_9 x_0 y_0^2 + d_{10} y_0^3$, 可见其计算复杂度为 $O(N)$ 。在扫

描加工一段线段时,校正计算不仅施加于线段两端点,为保证内点精度,每一微步都需要执行这种计算。典型的振镜扫描控制系统其伺服周期为 $10\mu s$,当以 $100\text{mm}/s$ 速率扫描时,其微步长度为 $1\mu m$,当以 $1\text{m}/s$ 速率扫描时,其微步长度为 $10\mu m$ 。所以,在以 $100\text{mm}/s$ 速率扫描时,即便加工 1mm 矢量线段,控制器内部也需要进行 1000 次校正计算,这种计算开销对于 DSP 控制器的固件设计而言是相当大的挑战。为此,我们将振镜驱动指令控制量分为线性 ($u^*=k_u x$, $v^*=k_v y$) 和非线性补偿 ($\Delta u=u-u^*$, $\Delta v=v-v^*$) 两个部分,这也将避免参数估计值波动过大。对非线性部分基于校正查询表 (LUT, Lookup Table) 和双线性内插补算法进行算法优化,以提高振镜实时校正计算运行时效率。具体作法是:(1)、将整个扫描区域划分为 65×65 个均匀栅格点,在最大扫描范围为近 70mm 的振镜系统中,栅格间距为 1mm ; (2)、依据校正算法,计算 65×65 个栅格点非线性补偿量,生成 65×65 个校正表项,并以校正表文件的形式存储和加载; (3)、实时扫描过程中,在每一伺服周期中断处理函数内,执行判断当前位置 (x, y) 处于如图 8 示意的哪一个矩形栅格 22 ($\bar{i}=\lfloor x+32 \rfloor, \bar{j}=\lfloor y+32 \rfloor$), 然后依据式 (9) 所描述的双线性曲面内插算法计算补偿量,则总控制量为 $u=k_u x+\Delta u$, $v=k_v y+\Delta v$ 。在栅格间距为 1mm 划分时, x_i 、 y_i 均为整数,且 $\bar{x}_i - x_i$ 、 $\bar{y}_j - y_j$ 均为 1,此时计算得以进一步简化。为提高内插精度,可将补偿值单位提高至 16 倍。

$$[\Delta u \quad \Delta v] = \begin{bmatrix} (1-s)(1-t) & s(1-t) & t(1-s) & st \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_{\bar{i}\bar{j}} & \Delta v_{\bar{i}\bar{j}} \\ \Delta u_{i\bar{j}} & \Delta v_{i\bar{j}} \\ \Delta u_{i\bar{j}} & \Delta v_{i\bar{j}} \\ \Delta u_{i\bar{j}} & \Delta v_{i\bar{j}} \end{bmatrix}$$

[0109]

其中 $\bar{i}=i+1$, $\bar{j}=j+1$,

$s=(x-x_i)/(x_{\bar{i}}-x_i)$, $t=(y-y_j)/(y_{\bar{j}}-y_j)$, $0 \leq s, t \leq 1$ 。

——(9)

[0110] 利用上述校正方法,我们将一配备了 100mm 焦距的远心 $f-\theta$ 透镜的振镜组件在 $42\text{mm} \times 42\text{mm}$ 扫描区域内校正到了理想的 $5 \sim 10\mu m$ 精度范围,有效性在实际应用中得到了验证。

[0111] 以上所述仅为本发明的较佳实施例而已,并不用以限制本发明,凡在本发明的精神和原则之内所作的任何修改、等同替换和改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

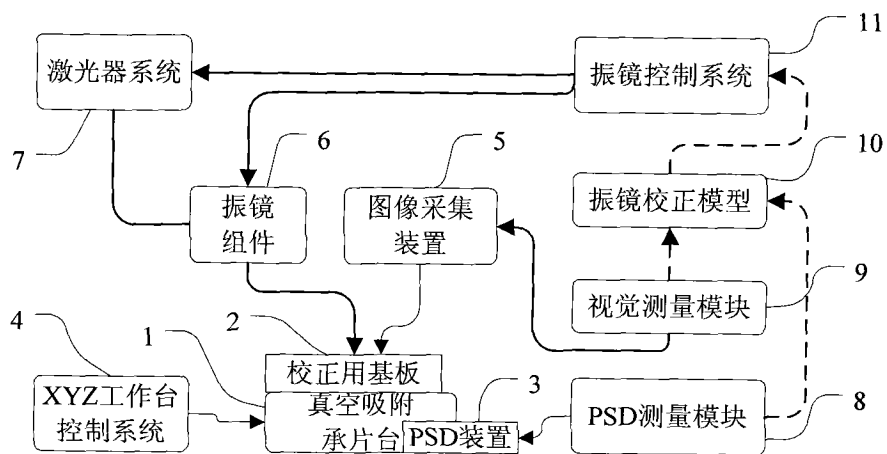


图 1

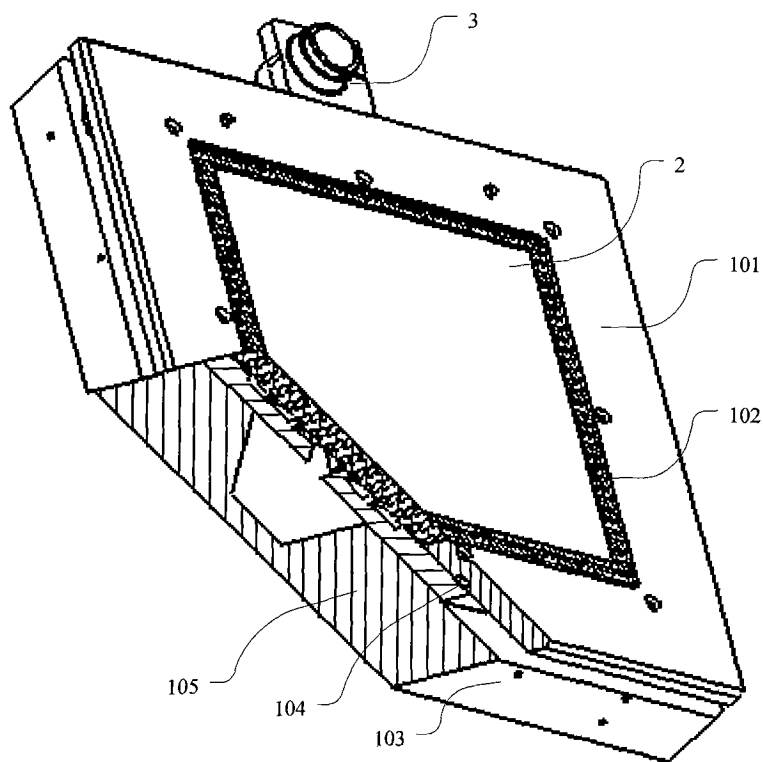


图 2

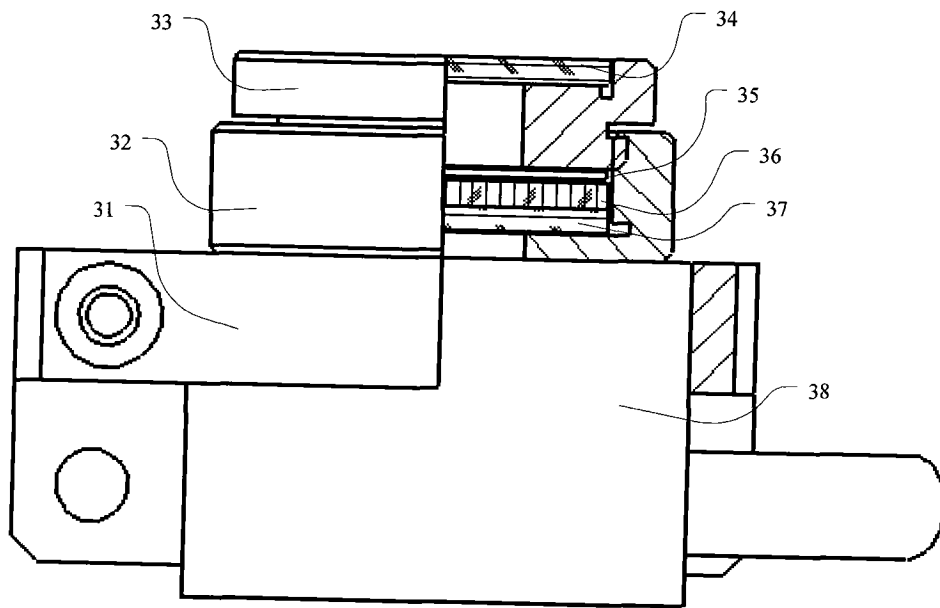


图 3

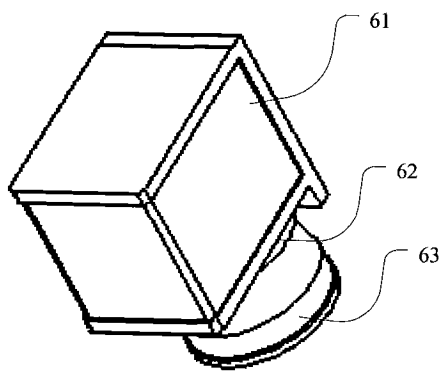


图 4

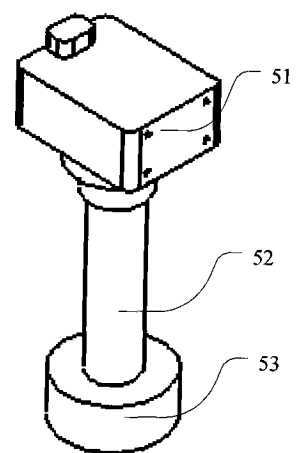


图 5

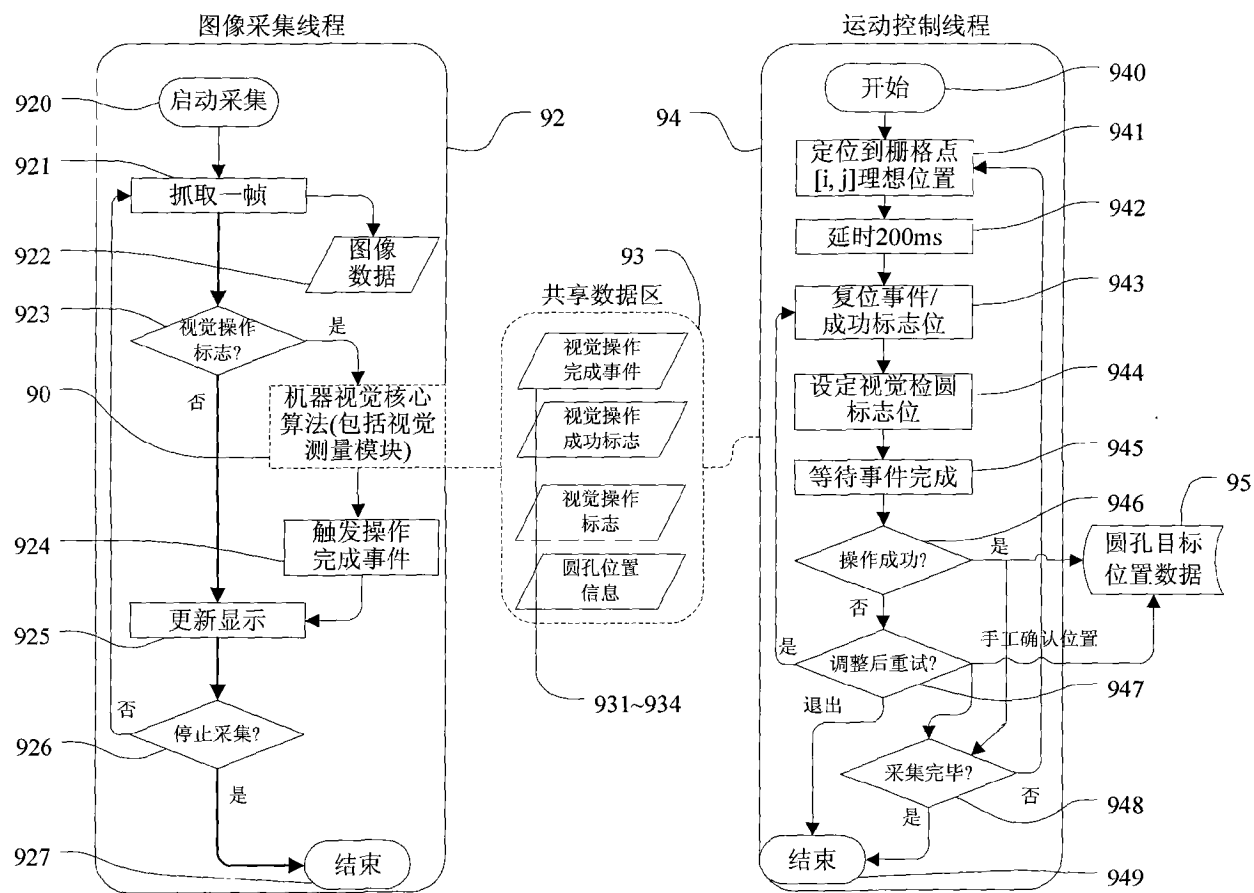


图6

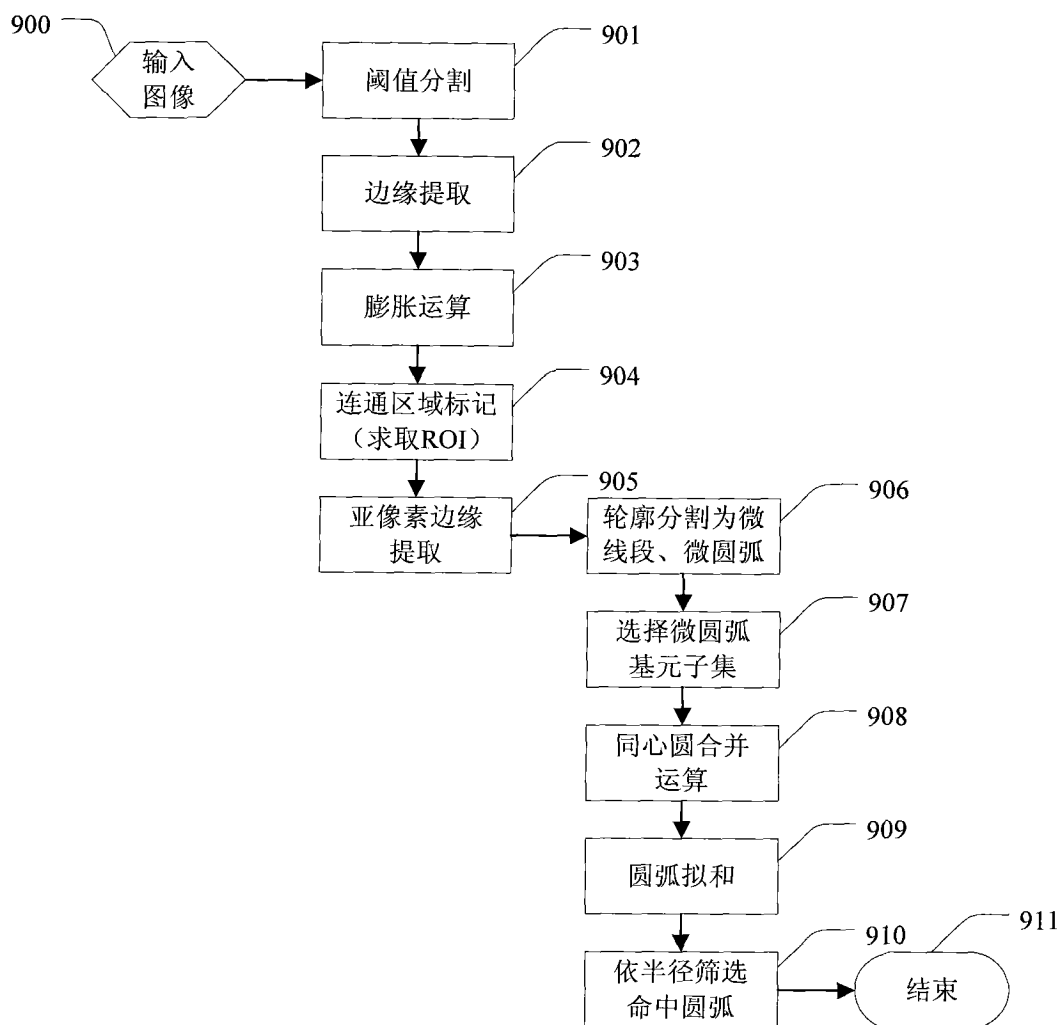


图 7

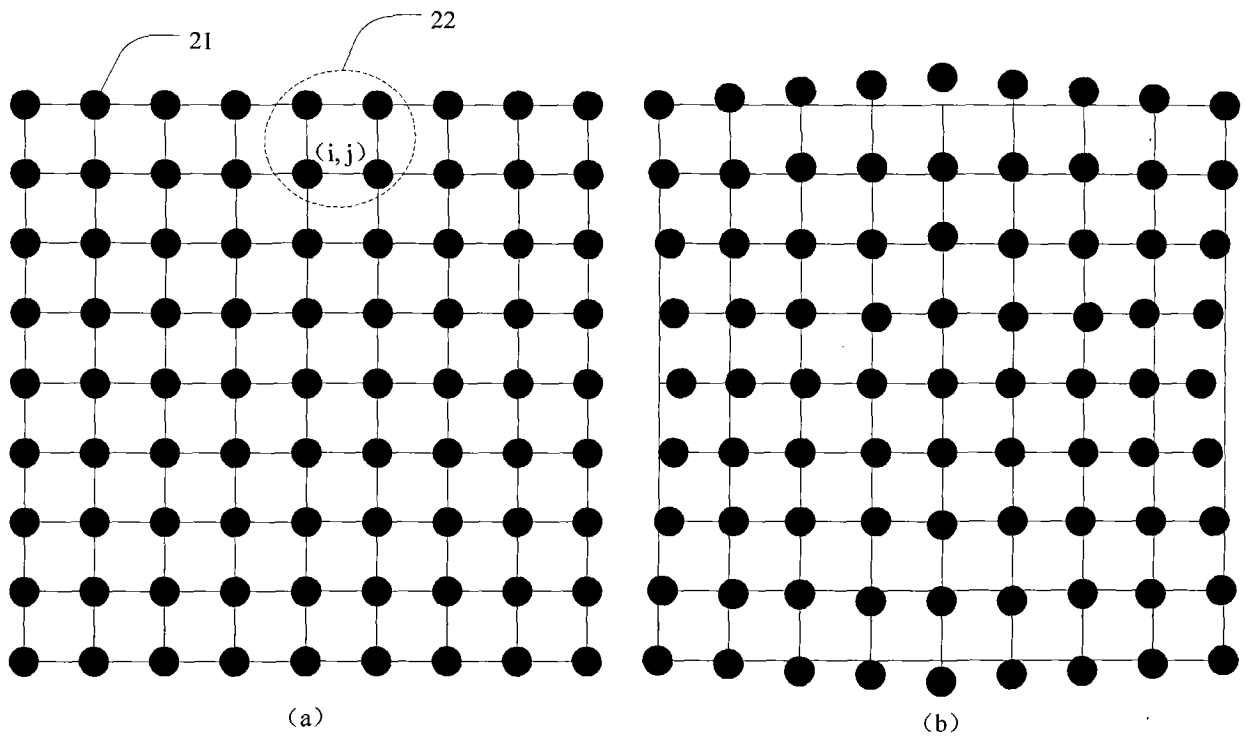


图 8

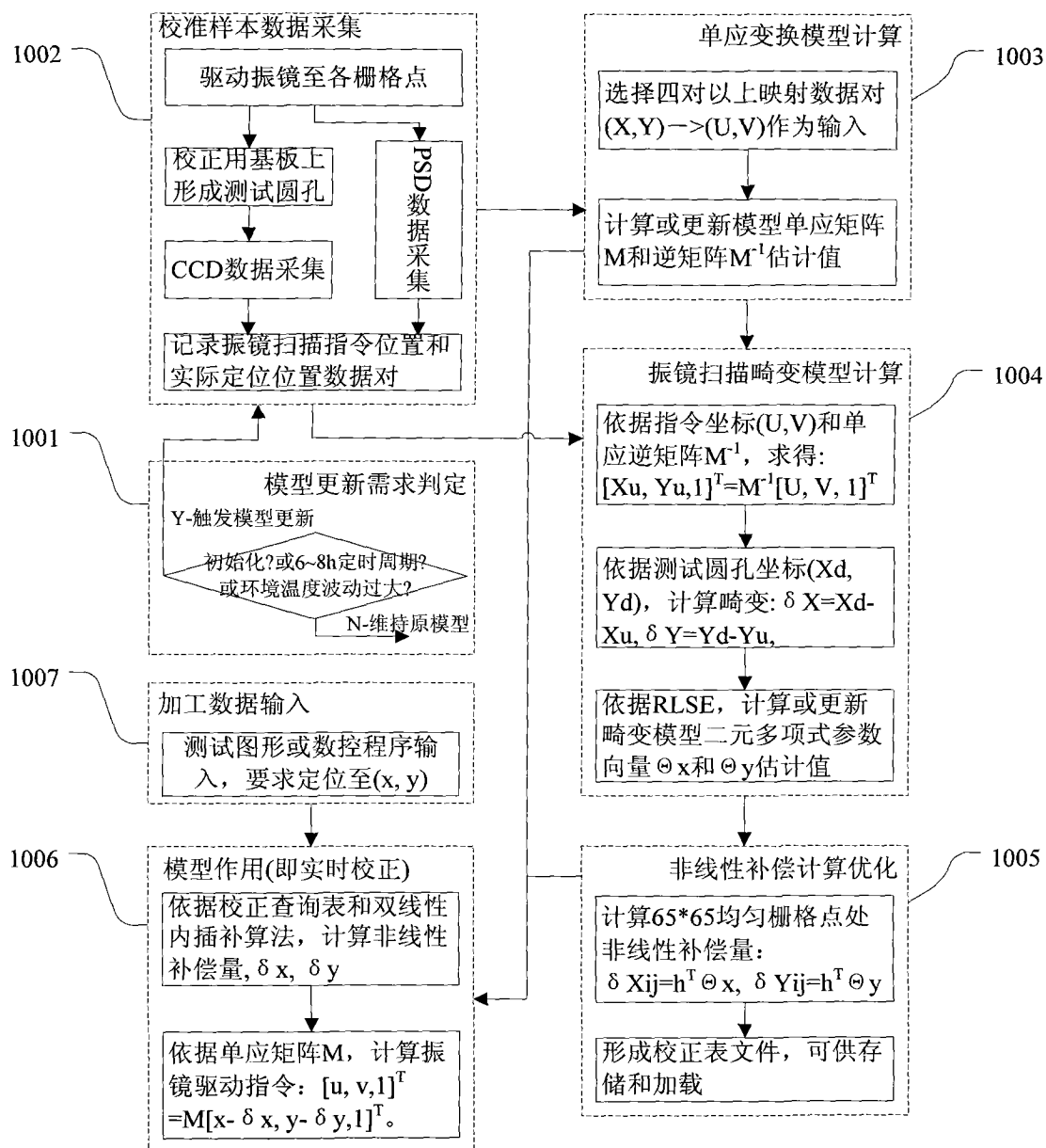


图 9