

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2020 年 6 月 18 日 (18.06.2020)



(10) 国际公布号
WO 2020/118970 A1

(51) 国际专利分类号:
G01B 11/24 (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2019/080138

(22) 国际申请日: 2019 年 3 月 28 日 (28.03.2019)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
201811505485.4 2018 年 12 月 10 日 (10.12.2018) CN

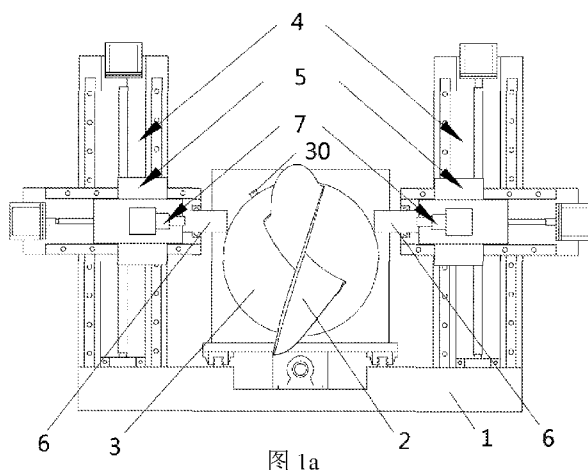
(71) 申请人: 华东理工大学(EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) [CN/CN]; 中国上海市徐汇区梅陇路 130 号, Shanghai 200237 (CN)。

(72) 发明人: 张显程(ZHANG, Xiancheng); 中国上海市徐汇区梅陇路 130 号, Shanghai 200237 (CN)。刘爽(LIU, Shuang); 中国上海市徐汇区梅陇路 130 号, Shanghai 200237 (CN)。姚树磊(YAO, Shulei); 中国上海市徐汇区梅陇路 130 号, Shanghai 200237 (CN)。朱旭旻(ZHU, Xumin); 中国上海市徐汇区梅陇路 130 号, Shanghai 200237 (CN)。张开明(ZHANG, Kaiming); 中国上海市徐汇区梅陇路 130 号, Shanghai 200237 (CN)。刘怡心(LIU, Yixin); 中国上海市徐汇区梅陇路 130 号, Shanghai 200237 (CN)。贾云飞(JIA, Yunfei); 中国上海市徐汇区梅陇路 130 号, Shanghai 200237 (CN)。涂善东(TU, Shandong); 中国上海市徐汇区梅陇路 130 号, Shanghai 200237 (CN)。

(74) 代理人: 上海智信专利代理有限公司(SHANGHAI ZHI XIN PATENT AGENT LTD.); 中国上海市

(54) Title: ON-MACHINE INSPECTION AND COMPENSATION METHOD EMPLOYING POINT CLOUDS AND APPLIED TO COMPLEX SURFACE PROCESSING

(54) 发明名称: 一种复杂表面加工的在机点云检测及补偿方法



(57) Abstract: An on-machine inspection and compensation method employing point clouds and applied to complex surface processing. The method comprises: step S1, mounting an inspection and scanning actuator on an ultrasonic rolling machine tool; step S2, scanning a processed workpiece (2) by means of the scanning actuator so as to obtain workpiece point cloud data in an inspection-device coordinate system, and converting the workpiece point cloud data in the inspection-device coordinate system into workpiece point cloud data in a machine-tool coordinate system; step S3, processing the workpiece point cloud data in the machine-tool coordinate system; and step S4, according to theoretical design data of the processed workpiece (2) and the processed workpiece point cloud data in the machine-tool coordinate system, obtaining a workpiece shape error feature, and performing compensation for the workpiece shape error feature.

(57) 摘要: 一种复杂表面加工的在机点云检测及补偿方法, 其包括: 步骤S1, 在超声滚压机床上安装一检测扫描执行机构; 步骤S2, 利用所述扫描执行机构对所述被加工工件(2)进行扫描, 以获得检测设备坐标系下的工件点云数据, 并将该检测设备坐标系下的工件点云数据转换为机床坐标系下的工件点云数据; 步骤S3, 对所述机床坐标系下的工件点云数据进行数据处理; 步骤S4, 根据所述被加工工件(2)的理论设计数据以及经过数据处理的所述机床坐标系下的工件点云数据, 获得工件形状误差特征, 并对该工件形状误差特征进行补偿。

徐汇区斜土路 1223 号之俊大厦 26 楼,
Shanghai 200032 (CN)。

(81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

根据细则 4.17 的声明:

- 关于申请人有权申请并被授予专利 (细则 4.17(ii))
- 发明人资格 (细则 4.17(iv))

本国际公布:

- 包括国际检索报告 (条约第 21 条 (3))。
- 包括经修改的权利要求 (条约第 19 条 (1))。

一种复杂表面加工的在机点云检测及补偿方法

技术领域

本发明涉及一种复杂表面加工的在机点云检测及补偿方法。

背景技术

在复杂曲面工件表面，例如飞机发动机叶片表面的强化过程中，研究发现，经超声滚压机床强化加工的叶片区域与所规划的加工区域之间存在一定的偏差，这是由于叶片加工成型的形状尺寸误差、机床综合误差及卡盘安装误差，导致了叶片的实际形状位置与规划时采用的模型形状位置存在差异。因此，在表面强化的过程中，基于复杂曲面设计模型所规划的加工轨迹往往会造成加工误差，即所强化复杂曲面区域与目标区域之间存在误差。这就需要人工调节参数，修正加工轨迹，从而补偿加工误差。然而，由于每个复杂曲面工件的误差各不相同，这通常需要在实际加工中暂停设备，进行补偿参数的调节，大大降低了加工效率，增加了制造成本。而且人工调节要求经验高，难度大，精度控制难度高。

为此，现有技术中通常采用常规检测设备（例如，三坐标测量机、自动绘图测量仪等）对工件复杂曲面型面进行测量，即，通过检测设备获取复杂曲面型面上离散点的坐标数据实现其型面的评定。基于上述常规检测设备，现有的复杂曲面工件的测量方法主要包括：标准样板法、自动绘图测量法、光学投影测量法、坐标测量法和电感测量法等，其中：标准样板法是一种定性的测量方法，只能凭借经验判断零件是否合格，无法给出工件实际误差的大小；自动绘图测量法的测量精度虽然较标准样板法高，但是仍然无法满足高精度叶片检测的需要，且自动绘图测量仪体积庞大、操作不便，因此应用范围有限；光学投影测量法则一般用于定性检测，通过观察实际叶型与理论叶型的符合程度直接判断叶片是否合格，但是在通过读取坐标值进行定量测量时，效率比较低下，且其受自身显示屏限制，测量范围有限，同时其受工件表面反射能力影响较大，测量精度较低；坐标测量法作为一种通用的点测量设备，造价高、测量过程繁琐、测量效率较低、需要二次开发测量软件、对环境要求高；电感测量法则由于属于非完全轮廓检测，使得测量结果不是十分可靠，有误判的可能性，并且对不同工件需要配备相应的支架装置和标

准工件，增加了测量成本和时间。

近几年，光学测量技术的发展为复杂曲面型面测量提供了新的测量方法，人们可以利用先进的复杂曲面形状检测设备，例如金属表面缺陷检测仪；三维扫描仪（包括激光三维扫描仪、结构光三维扫描仪，实现对工件表面的精确检测与误差评估。基于上述先进的检测设备，新的测量方法主要包括：机器视觉测量法、四坐标激光测量法和激光扫描测量法等，这些测量方法的优点在于测量速度快、范围大、效率高。

然而，上述的这些现有的和改进的检测方法通常都要求将工件安装在检测台上，这就造成了二次装卸带来的误差。

为了能够在加工过程中进行检测和补偿误差，必须将检测与加工进行集成，成为“加工-集成”系统。因此，针对加工中心的在机检测也得到了广泛的应用。国外很多公司对这个方面进行了研究，并针对各种不同的制造设备，研制出符合各自需要的在机检测系统。例如，英国 Reni Shaw 公司专门开发的安装在加工中心的各类测头和对应的软件，可以实现对刀、刀具破损检测、工件误差检测等功能；德国 Kapp 公司磨齿机的在机齿轮测量装置；著名的齿轮机床制造商格里森公司及克林格贝尔公司则将齿轮检测中心与加工机床相连，实现了齿轮的 CAD / CAM / CAI 的闭环制造；英国 Delcam 公司的通用检测系统 Power INSPECT 可以实现在机检测和脱机检测。国内学者也相继开展了在机检测技术方面的探索和研究工作。相关的研究主要包括：机床的误差综合建模，误差参数测量及辨识，工件检测路径自动规划，以及针对不同误差源的补偿技术。然而，现有的误差补偿方法，如基于反变形误差多次补偿方法，具有误差补偿效率低下等缺点。

在机检测设备的研发可选择接触式的检测探头或者基于光学原理的非接触式检测探头，其中，接触式的检测探头直接与待测物体接触，触发测头传感器发送测量信号，接收传感器接收信号，确定测头当前球心坐标，经过测头半径补偿和误差补偿最终计算出该点的坐标值，其具有精度高、环境适应性强的特点，但存在检测效率低、检测成本高的缺点；非接触式的检测探头则利用光学等物理特性来反求物体的形貌信息，相比接触式的检测方法，具有扫描速度快的特点，能获取被测工件的整体轮廓，且能测量表面较软的工件，精度较高，可达 0.01mm 精度，但同时也容易受到工件表面反射特性（如曲率、颜色、粗糙程度等）的影响。

针对航空薄壁叶片这类自由曲面，通常需多次反复测量，导致测量点云规模达十万/百万级；更为严重的是，受工业现场温度差、灰尘颗粒、微小振动等因素影响，测量点云存在固有缺陷（残余噪音、体外孔洞、层叠区域、密度差异等）。由此带来的大规模测量点云数据处理则成为复杂曲面检测的关键问题之一，如精简、光顺、拼合和重构等几何操作；具体来说，由于航空叶片前后缘区域壁厚不足2毫米，常规精简或光顺过程容易丢失前后缘数据；由于叶片点云本身为非均匀分布，在精简过程中要在点云分布稀疏区域适当保留稀疏点云，否则会造成空洞；另外还要避免过光顺导致的丢失叶缘高曲率特征。

因此，为了提高复杂曲面工件表面强化加工效率与精度，需要研发一种可以在复杂曲面工件在机加工工位进行的快速高效的检测技术，以及高效补偿表面强化误差的方法。

发明内容

为了解决上述现有技术存在的问题，本发明旨在提供一种复杂表面加工的在机点云检测及补偿方法，以在超声滚压强化加工过程中，高效快速地在机检测及补偿误差。

本发明所述的一种复杂表面加工的在机点云检测及补偿方法，其包括以下步骤：

步骤 S1，在超声滚压机床上安装一检测扫描执行机构，其中，所述超声滚压机床包括：一卡盘以及两个分别安装在所述卡盘左右两侧的加工头；所述检测扫描执行机构包括：两个分别安装在所述加工头上的检测扫描器；

步骤 S2，利用所述扫描执行机构对安装在所述卡盘上的被加工工件进行扫描，以获得检测设备坐标系下的工件点云数据，并将该检测设备坐标系下的工件点云数据转换为机床坐标系下的工件点云数据；

步骤 S3，对所述机床坐标系下的工件点云数据进行数据处理；

步骤 S4，根据所述被加工工件的理论设计数据以及经过数据处理的所述机床坐标系下的工件点云数据，获得工件形状误差特征，并对该工件形状误差特征进行补偿；

其中，所述步骤 S3 包括：

步骤 S31，采用主体点云聚类提取法去除机床坐标系下的工件点云数据中

的体外噪声点，以获取叶片模型原始点云数据；

步骤 S32，利用统计离群点法去除叶片模型原始点云数据中的原始数据噪声点，以获取降噪后的点云数据；

步骤 S33，采用考虑曲率的包围盒法对降噪后的点云数据进行精简和光顺。

在上述的复杂表面加工的在机点云检测及补偿方法中，所述步骤 S31 包括：

将机床坐标系下的工件点云数据按照密度大小进行聚类，其中密度最大的点云集合为叶片的主体点云数据，记为 MP ，密度小的点云集合记为 OP_i ，根据以下公式计算 OP_i 到 MP 的距离，若该距离超过一设定阈值 D_τ ，则表示 OP_i 为待删除的所述体外噪声点；

$$Dist(OP_i, MP) = \|OP_i - MP\|。$$

在上述的复杂表面加工的在机点云检测及补偿方法中，所述步骤 S32 包括：

根据以下公式计算所述叶片模型原始点云数据中各个点 P_i 到邻域 M 内所有点的平均距离 $d_{mid}(P_i)$ ，若 $d_{min}(P_i) > D_{mid}$ ，则点 P_i 被定义为离群点，最后将离群点删除，其中， D_{mid} 为模型的全局平均距离；

$$d_{mid}(P_i) = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \|P_i - M_j\|，$$

其中， k 表示点 P_i 的邻域 M 中的点云数目， M_j 表示邻域 M 中第 j 个点。

在上述的复杂表面加工的在机点云检测及补偿方法中，所述步骤 S33 包括：把所述降噪后的点云数据放入到一个长方体中，根据预设的精简率的大小将该长方体均匀分割成等边的立方体，对于每个立方体选取距离该立方体中心最近的点云数据作为特征点，并且对于所述降噪后的点云数据中曲率大于 0.33 的区域，缩小所述立方体的边长，以增大其密度。

在上述的复杂表面加工的在机点云检测及补偿方法中，所述步骤 S33 还包括：利用二次曲面拟合法计算所述降噪后的点云数据的曲率。

在上述的复杂表面加工的在机点云检测及补偿方法中，所述工件形状误差特征包括：所述被加工工件的每层截面在 X 轴和 Y 轴上的实际位置数据与所述被加工工件的每层截面在 X 轴和 Y 轴上的设计位置数据之间在 X 方向和 Y 方向上的最大偏差值，所述步骤 S4 包括：采用力反馈补偿法，对所述在 X

方向上的最大偏差值进行补偿，以及通过增加或减少所述加工头在 Y 方向上的轨迹偏移量，对所述在 Y 方向上的最大偏差值进行补偿。

在上述的复杂表面加工的在机点云检测及补偿方法中，所述超声滚压机床还包括：一床身底座，所述卡盘可绕 Z 轴旋转并可沿 Z 轴移动地安装在所述床身底座上。

在上述的复杂表面加工的在机点云检测及补偿方法中，所述检测扫描执行机构还包括：两个安装在所述床身底座上并对称分布在所述被加工工件左右两侧的 Y 轴升降移动工作台以及两个分别安装在所述 Y 轴升降移动工作台上的 X 轴左右移动工作台。

在上述的复杂表面加工的在机点云检测及补偿方法中，所述检测扫描器为激光扫描器。

由于采用了上述的技术解决方案，本发明为了避免复杂曲面工件在检测中二次装卸带来的检测误差，增加检测的效率，利用非接触式检测技术在复杂曲面工件表面强化过程中进行工件的在机检测，即，在复杂曲面工件加工工位对工件曲面表面进行扫描，快速获取复杂曲面形状数据，并通过大规模点云处理技术，获得该复杂曲面形状位置的综合误差，通过分析点云数据模型与设计模型之间差异的特征，得到基于力反馈与位置补偿器的误差补偿方案（即，向机床子带的位置补偿器输出补偿参数），进行轨迹误差补偿，从而提高了复杂曲面表面强化加工的精度和效率。

附图说明

图 1a 是本发明一种复杂表面加工的在机点云检测及补偿方法中检测扫描执行机构安装在超声滚压机床上的结构示意图；

图 1b 是本发明中加工工件、卡盘、加工头和检测扫描器的结构简图，其中示出了卡盘和检测扫描器的 X、Y、Z 轴运动方向；

图 2 是本发明中检测设备坐标系与机床坐标系的示意图；

图 3 是本发明中原始点云数据的示意图；

图 4 是本发明中经过步骤 S3 处理后的点云数据的示意图

图 5 是本发明中叶片某一加工截面的 X-Y 平面上的误差特征分析示意图；

图 6 是本发明中采用力反馈补偿法补偿 X 方向上的误差的示意图。

具体实施方式

下面结合附图，给出本发明的较佳实施例，并予以详细描述。

本发明，即一种复杂表面加工的在机点云检测及补偿方法，包括以下步骤：

步骤 S1，在超声滚压机床上安装检测扫描执行机构，其中，

如图 1a、1b 所示，超声滚压机床包括：安装在床身底座 1 上并供被加工工件 2 安装于其上的卡盘 3，其中，卡盘 3 可绕 Z 轴旋转并可在床身底座 1 上沿 Z 轴移动，被加工工件 2 的末端安装在卡盘 3 的一侧端面上，即，通过卡盘 3 可带动被加工工件 1 绕 Z 轴旋转以及沿 Z 轴方向进给；

扫描执行机构包括：两个安装在床身底座 1 上并对称分布在被加工工件 2 左右两侧的 Y 轴升降移动工作台 4、两个分别安装在 Y 轴升降移动工作台 4 上的 X 轴左右移动工作台 5、两个分别安装在 X 轴左右移动工作台 5 上的加工头 6（加工头 6 为超声滚压机床的固有部件）以及两个分别安装在加工头 6 上的检测扫描器 7，即，通过 Y 轴升降移动工作台 4 和 X 轴左右移动工作台 5 可带动检测扫描器 7 沿 Y 轴方向上下移动以及沿 X 轴方向左右移动；

在本实施例中，被加工工件 1 为飞机发动机叶片（发动机叶片种类繁多，其叶型多呈空间自由曲面状；本发明适用于双圆弧、多圆弧或 S 叶型等类型叶片，且最大叶身长度为 1200mm）；由于叶片表面反光的影响问题，通过分析比较激光扫描器与结构光扫描器对复杂曲面工件扫描生成的点云效果，综合扫描器成本、尺寸以及扫描器要求，最终选取激光扫描器作为检测扫描器 7 以用于叶片点云获取，具体来说，结构光扫描器是通过拍照的方式提取物体表面三维数据，而激光扫描器是通过线扫描提取物体表面三维数据，对于复杂曲面工件，尤其是航空发动机叶片，其金属表面光泽且反光，会严重影响结构光扫描器获取点云的效果，而用激光扫描器可以避免这一问题，而且激光扫描器获得的点云比结构光扫描器获取的点云精度高，即，获取点云数据的质量高，另外，激光扫描器比结构光扫描器更加便携，可以在操作现场进行任何角度的无死角扫描；在本实施例中，激光扫描器的尺寸约在 20mm*30mm*10，并且其工作特点是：固定式全自动扫描，效率高，精度高，且分辨率高。

步骤 S2，利用扫描执行机构，即利用检测扫描器沿 Y 轴方向的上下移动

以及沿 X 轴方向的左右移动，并结合卡盘 3 在 Z 轴方向上的进给和绕 Z 轴的旋转，对被加工工件 2 进行扫描，以获得检测设备坐标系下的工件点云数据，并将该检测设备坐标系下的工件点云数据转换为机床坐标系下的工件点云数据；

具体来说，由于检测设备坐标系与机床坐标系不同，需要进行坐标系转换，并进行参数标定（参数标定是对安装检测机构及每一次装夹待加工件后，相对机床绝对坐标系进行定位，标定的旋转角度信息将保证检测开始时处于真实零点位置）。

如图 2 所示，根据公式（1）可将检测设备坐标系转换为机床坐标系：

$$P_e = {}^j_i R P_j$$

$$P_i = P_e + {}^{oj}_i P = {}^j_i R P_j + {}^{oj}_i P \quad (1),$$

其中， P_i 表示机床坐标系， P_j 表示检测设备坐标系， ${}^{oj}_i P$ 表示检测设备坐标系与机床坐标系的原点三轴的相对平移位置， ${}^j_i R$ 为旋转矩阵，表示检测设备坐标系相对初始位置旋转量， p_j 表示已知点 P 在检测设备坐标系下的坐标的转置（ p_j 是指通过检测扫描器获得的点云数据，将 p_j 代入公式（1）即可获得机床坐标系下已知点 P 的坐标，这是因为机床需要基于自己的坐标系发出控制指令，故需将基于检测设备坐标系得到的数据转换为机床可用参数）。

由公式（1）可以看出，坐标系转换其实是先旋转后平移，图 2 中的 X_e 、 Y_e 、 Z_e 轴即表示将点云数据先进行旋转后的坐标系。

由于卡盘 3 的形状为圆形，位置固定，因此，先利用扫描执行机构对卡盘 3 进行扫描检测，并利用获取到的卡盘的点云数据进行卡盘旋转的角度信息的标定；在本实施例中，由于卡盘 3 为圆形，无法识别旋转信息，因此在卡盘 3 的边缘安装一个凸起的标定零件 30，使得扫描生成的点云数据中可以判断卡盘的旋转信息，以配合标定。

步骤 S3，对机床坐标系下的工件点云数据进行数据处理，包括：

步骤 S31，采用主体点云聚类提取法去除机床坐标系下的工件点云数据中的体外大片噪声点，以获取叶片模型原始点云数据；

步骤 S32，利用统计离群点法去除叶片模型原始点云数据中的原始数据噪声点，以获取降噪后的点云数据；

步骤 S33，采用考虑曲率的包围盒法对降噪后的点云数据进行精简和光顺；

具体来说,将通过步骤 S2 获得的原始的机床坐标系下的工件点云数据记为原始点云数据 $P_i = \{x_i, y_i, z_i\}$ 。由于受测量设备的精度、扫描速度、被测量零件的表面质量以及外界环境等因素的影响,不可避免地在点云数据中引入噪声点。这些噪声点的存在,将直接影响被测工件的精度。因此必须对上述原始点云数据 P_i 进行去噪处理。

首先,需要对原始点云数据 P_i 进行粗处理,采用主体点云聚类提取的方法获取叶片模型原始点云数据,去除体外大片噪声点。

如图 3 所示,当叶片点云模型体外非连接噪声点较多时,引入主体点云聚类提取法,首先将点云按照密度大小进行聚类,其中密度最大的点云集合便是叶片的主体点云数据,记为 MP ,密度较小的集合记为 OP_i ,根据公式(2)计算 OP_i 到 MP 的距离,若距离超过设定阈值 D_τ ,则表示 OP_i 是可以删除的体外非连接噪声点;

$$Dist(OP_i, MP) = \|OP_i - MP\| \quad (2)。$$

然后,进行精处理,利用统计离群点法彻底去除原始数据噪声点,即,运用统计学的方法对每个点的邻域进行分析,包括:首先根据公式(3)计算该点 P_i 到邻域 M 内所有点的平均距离 $d_{mid}(P_i)$,模型的全局平均距离 D_{mid} 符合高斯分布 $D \sim N(\mu, \sigma^2)$,其特征由均值 μ 和标准差 σ 决定。若 $d_{min}(P_i) > D_{mid}$,则 P_i 点被定义为离群点,最后将离群点删除;

$$d_{mid}(P_i) = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \|P_i - M_j\| \quad (3),$$

其中, k 表示点 P_i 的邻域 M 中的点云数目, M_j 表示邻域 M 中第 j 个点。

最后,进行精简和光顺的目的在于:在保持工件曲率特征的前提下,去除冗余数据并使点云数据更加平滑。为此,本发明引入考虑曲率特征的包围盒法,该包围盒法的思想是把降噪后的点云数据放入到一个长方体中,根据精简率的大小将长方体均匀分割成等边小立方体,对于每个立方体选取距离立方体中心最近的点云数据作为特征点。但是这种方法在曲率较大 ($K > 0.33$) 的点云数据中,易导致特征丢失,尤其对于航空叶片叶缘高曲率处。因此本发明考虑曲率特征,对于曲率较大的区域缩小立方体边长,增大其密度。利用二次曲面拟合法计算曲率,即,首先根据公式(4)对点云中任意一点 P_i 的 K 个临近点拟合二次曲面 $f(x, y)$,通过计算 $f(x, y)$ 的主曲率及主方向确定

P_i 的曲率; 根据微分几何知识求解二次曲面一阶偏导和二阶偏导, 分别是: f_x , f_y , f_{xx} , f_{xy} , f_{yy} ; 则点 P_i 的平均曲率 K_{P_i} 可由公式 (5) 求得;

$$f(x, y) = ax^2 + bxy + cy^2 \quad (4),$$

$$K_{P_i} = \frac{f_x f_x f_{yy} - 2f_x f_y f_{xy} + f_y f_y f_{xx}}{2(f_x f_x f_{yy} - f_x^2 f_y^2)} \cdot \vec{n} \quad (5),$$

其中 $\vec{n}$ 是点 P_i 的单位法向量, 计算如下:

$$\vec{n} = \frac{f_x \times f_y}{|f_x \times f_y|}$$

经过上述步骤 3 后的点云数据可如图 4 所示, 从图 4 可以看出, 处理后的点云数据仍能有效保持叶片的关键特征, 尤其是对于表面强化加工最重要的叶缘特征。

步骤 S4, 根据被加工工件理论设计数据以及经过数据处理的机床坐标系下的工件点云数据, 获得工件形状误差特征, 并对该工件形状误差特征进行补偿;

具体来说, 以飞机叶片为例, 其强化加工并非改变叶片尺寸或型面, 也不能纠正误差, 因此, 叶片强化加工中的误差主要是指叶片理论上的位置与在机床上的实际位置之间的误差, 前者根据叶片设计模型获得, 后者根据在线检测点云数据经处理后获得, 然后, 可以分析获得以上所述误差。典型的误差如图 5 所示, 图中为 X-Y 平面中叶片某一截面的示意图, 其中圆形代表卡盘 3 的位置, 其可反映机床中心位置, 箭头代表叶片两侧的加工头 6, 实线表示根据叶片设计模型所在的截面位置, 而虚线则表示实际的叶片截面位置。由图 5 可见, 在某一个加工截面上, 由于机床及叶片的制造误差, 截面可能同时存在 X 方向、Y 方向以及旋转方向的误差, 并且截面形状尺寸也会有所不同。对于叶片的超声滚压强化而言, 在每一个加工截面上, 需要两侧同时加工, 并加工到指定的截面区域。图 5 上所示的各种误差最终将导致以下结果: 一方面是造成左右两侧加工头 6 与叶片截面接触位置错误, 另一方面是造成两侧加工头 6 在 Y 方向上上端超出叶片截面区域, 下端无法达到最下端位置。

因此, 本发明分析经过数据处理的机床坐标系下的工件点云数据 (即,

被加工工件 2 的每层截面在 X 轴和 Y 轴上的实际位置数据) 与被加工工件理论设计数据(即, 被加工工件 2 的每层截面在 X 轴和 Y 轴上的设计位置数据) 之间在 X 方向和 Y 方向上的最大偏差值, 作为误差特征, 并且对于在 X 方向上的误差采用力反馈补偿法进行误差补偿, 对于在 Y 方向上的误差采用增加轨迹偏差值(在本发明实例中, 实际轨迹是指实际需要加工的轨迹(即扫描及处理出来的点云构成的数据), 而理论轨迹是指三维模型给出的数据, 此处的轨迹偏差值是指赋予机床的一个调整值, 增加这个值即可使机床从理论轨迹走向实际轨迹) 的方法(即, 在强化加工时通过调整超声滚压强化加工轨迹, 增加或减少加工头 6 在 Y 方向上的轨迹偏移量) 进行误差补偿。具体来说, 由于 X 方向上的误差造成两侧加工头 6 与工件表面的预压力不同(当加工头 6 顶在工件表面时会产生预压力), 利用安装在加工头 6 上的力传感器可以根据预压力的实时变化调整加工头 6 内部弹簧的伸缩量, 从而调整加工头 6 与工件表面的预压力使之恒定, 进而达到补偿 X 方向上误差的效果; 例如图 6 所示, 图 6 中实线表示叶片表面的实际位置, 虚线表示叶片表面的理论位置, 加工时, 需要将按理论值走虚线的加工头 6, 调整到实际叶片的实线位置, 图 6 中 a 示意为加工头 6 按理论虚线加工, 所以脱离加工表面, 为预压力偏小, b 示意为经补偿后加工头 6 的位置, 已贴合实际叶片表面, c 示意为经补偿后继续加工, 加工头 6 能始终贴合叶片, 此位置若不补偿, 则会预压力过大。另外, 根据实际的加工要求和经验, 工件在 Z 轴旋转方向上的误差影响较小, 当然, 也可采用增加轨迹偏差值的方法进行 Z 方向上的误差补偿。需要注意的是, 本发明在检测扫描时停止强化加工, 通过分析扫描获得的点云数据经处理后的模型和工件设计模型, 来调整强化加工的轨迹, 进而达到误差补偿的目的。

综上所述, 本发明所提出的在机检测的设计方案能够根据超声滚压机床的结构特点进行设计, 简化了扫描执行机构的设计难度; 经综合分析比较几种不同的扫描器, 所选用的激光扫描器具有点云获取效果好, 成本低, 外形尺寸适当等优点; 所提出的设备标定方法简单实用, 具有很强的可行性; 所提出的大规模复杂曲面点云的处理方法是准确获得曲面误差和后期补偿的关键, 根据复杂曲面表面强化的特点, 从最终结果上对误差进行了特征分析, 简化了特征分析难度; 所提出的误差补偿方案符合复杂曲面表面强化加工中

的实际情况。该复杂曲面工件表面强化加工的在机检测方法运用先进的非接触式快速形状检测技术，相比常规的检测方法，具有在机免拆装，速度快，精度高的特点，具有很强的技术先进性和创新性。同时，本发明中所研究的复杂曲面大规模点云处理技术，相比于一般工件的点云处理问题更具挑战性；主要体现在表面形状不规则，形状曲率变化大的特点，且要求精度高，计算量大。因此，具有较高的研究难度。另外，所提出的主体点云聚类提取、统计离群点法去噪、考虑曲率的包围盒法进行精简和光顺，具有鲜明的特色。

以上所述的，仅为本发明的较佳实施例，并非用以限定本发明的范围，本发明的上述实施例还可以做出各种变化。凡是依据本发明申请的权利要求书及说明书内容所作的简单、等效变化与修饰，皆落入本发明专利的权利要求保护范围。本发明未详尽描述的均为常规技术内容。

权 利 要 求 书

1、一种复杂表面加工的在机点云检测及补偿方法，其特征在于，所述方法包括以下步骤：

步骤 S1，在超声滚压机床上安装一检测扫描执行机构，其中，所述超声滚压机床包括：一卡盘以及两个分别安装在所述卡盘左右两侧的加工头；所述检测扫描执行机构包括：两个分别安装在所述加工头上的检测扫描器；

步骤 S2，利用所述扫描执行机构对安装在所述卡盘上的被加工工件进行扫描，以获得检测设备坐标系下的工件点云数据，并将该检测设备坐标系下的工件点云数据转换为机床坐标系下的工件点云数据；

步骤 S3，对所述机床坐标系下的工件点云数据进行数据处理；

步骤 S4，根据所述被加工工件的理论设计数据以及经过数据处理的所述机床坐标系下的工件点云数据，获得工件形状误差特征，并对该工件形状误差特征进行补偿；

其中，所述步骤 S3 包括：

步骤 S31，采用主体点云聚类提取法去除机床坐标系下的工件点云数据中的体外噪声点，以获取叶片模型原始点云数据；

步骤 S32，利用统计离群点法去除叶片模型原始点云数据中的原始数据噪声点，以获取降噪后的点云数据；

步骤 S33，采用考虑曲率的包围盒法对降噪后的点云数据进行精简和光顺。

2、根据权利要求 1 所述的复杂表面加工的在机点云检测及补偿方法，其特征在于，所述步骤 S31 包括：

将机床坐标系下的工件点云数据按照密度大小进行聚类，其中密度最大的点云集合为叶片的主体点云数据，记为 MP ，密度小的点云集合记为 OP_i ，根据以下公式计算 OP_i 到 MP 的距离，若该距离超过一设定阈值 D_τ ，则表示 OP_i 为待删除的所述体外噪声点；

$$Dist(OP_i, MP) = \|OP_i - MP\|。$$

3、根据权利要求 1 所述的复杂表面加工的在机点云检测及补偿方法，其特征在于，所述步骤 S32 包括：

根据以下公式计算所述叶片模型原始点云数据中各个点 P_i 到邻域 M 内所有点的平均距离 $d_{mid}(P_i)$ ，若 $d_{min}(P_i) > D_{mid}$ ，则点 P_i 被定义为离群点，最后

将离群点删除，其中， D_{mid} 为模型的全局平均距离；

$$d_{mid}(P_i) = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \|P_i - M_j\|,$$

其中， k 表示点 P_i 的邻域 M 中的点云数目， M_j 表示邻域 M 中第 j 个点。

4、根据权利要求1所述的复杂表面加工的在机点云检测及补偿方法，其特征在于，所述步骤S33包括：把所述降噪后的点云数据放入到一个长方体中，根据预设的精简率的大小将该长方体均匀分割成等边的立方体，对于每个立方体选取距离该立方体中心最近的点云数据作为特征点，并且对于所述降噪后的点云数据中曲率大于0.33的区域，缩小所述立方体的边长，以增大其密度。

5、根据权利要求4所述的复杂表面加工的在机点云检测及补偿方法，其特征在于，所述步骤S33还包括：利用二次曲面拟合法计算所述降噪后的点云数据的曲率。

6、根据权利要求1所述的复杂表面加工的在机点云检测及补偿方法，其特征在于，所述工件形状误差特征包括：所述被加工工件的每层截面在X轴和Y轴上的实际位置数据与所述被加工工件的每层截面在X轴和Y轴上的设计位置数据之间在X方向和Y方向上的最大偏差值，所述步骤S4包括：采用力反馈补偿法，对所述在X方向上的最大偏差值进行补偿，以及通过增加或减少所述加工头在Y方向上的轨迹偏移量，对所述在Y方向上的最大偏差值进行补偿。

7、根据权利要求1所述的复杂表面加工的在机点云检测及补偿方法，其特征在于，所述超声滚压机床还包括：一床身底座，所述卡盘可绕Z轴旋转并可沿Z轴移动地安装在所述床身底座上。

8、根据权利要求7所述的复杂表面加工的在机点云检测及补偿方法，其特征在于，所述检测扫描执行机构还包括：两个安装在所述床身底座上并对称分布在所述被加工工件左右两侧的Y轴升降移动工作台以及两个分别安装在所述Y轴升降移动工作台上的X轴左右移动工作台。

9、根据权利要求1所述的复杂表面加工的在机点云检测及补偿方法，其特征在于，所述检测扫描器为激光扫描器。

经修改的权利要求

国际局收到日：2019年12月30日(30.12.2019)

1、一种复杂表面加工的在机点云检测及补偿方法，其特征在于，所述方法包括以下步骤：

步骤 S1，在超声滚压机床上安装一检测扫描执行机构，其中，所述超声滚压机床包括：一卡盘以及两个分别安装在所述卡盘左右两侧的加工头；所述检测扫描执行机构包括：两个分别安装在所述加工头上的检测扫描器；所述超声滚压机床还包括：一床身底座，所述卡盘可绕 Z 轴旋转并可沿 Z 轴移动地安装在所述床身底座上；所述检测扫描执行机构还包括：两个安装在所述床身底座上并对称分布在所述被加工工件左右两侧的 Y 轴升降移动工作台以及两个分别安装在所述 Y 轴升降移动工作台上的 X 轴左右移动工作台；

步骤 S2，利用所述扫描执行机构对安装在所述卡盘上的被加工工件进行扫描，以获得检测设备坐标系下的工件点云数据，并将该检测设备坐标系下的工件点云数据转换为机床坐标系下的工件点云数据；

步骤 S3，对所述机床坐标系下的工件点云数据进行数据处理；

步骤 S4，根据所述被加工工件的理论设计数据以及经过数据处理的所述机床坐标系下的工件点云数据，获得工件形状误差特征，并对该工件形状误差特征进行补偿；

其中，所述步骤 S3 包括：

步骤 S31，采用主体点云聚类提取法去除机床坐标系下的工件点云数据中的体外噪声点，以获取叶片模型原始点云数据；

步骤 S32，利用统计离群点法去除叶片模型原始点云数据中的原始数据噪声点，以获取降噪后的点云数据；

步骤 S33，采用考虑曲率的包围盒法对降噪后的点云数据进行精简和光顺；

所述步骤 S31 包括：

将机床坐标系下的工件点云数据按照密度大小进行聚类，其中密度最大的点云集合为叶片的主体点云数据，记为 MP ，密度小的点云集合记为 OP_i ，根据以下公式计算 OP_i 到 MP 的距离，若该距离超过一设定阈值 D_τ ，则表示 OP_i 为待删除的所述体外噪声点；

$$Dist(OP_i, MP) = \|OP_i - MP\|;$$

所述工件形状误差特征包括：所述被加工工件的每层截面在 X 轴和 Y 轴

上的实际位置数据与所述被加工工件的每层截面在 X 轴和 Y 轴上的设计位置数据之间在 X 方向和 Y 方向上的最大偏差值, 所述步骤 S4 包括: 采用力反馈补偿法, 对所述在 X 方向上的最大偏差值进行补偿, 以及通过增加或减少所述加工头在 Y 方向上的轨迹偏移量, 对所述在 Y 方向上的最大偏差值进行补偿, 使加工头从理论轨迹走向实际轨迹。

2、根据权利要求 1 所述的复杂表面加工的在机点云检测及补偿方法, 其特征在于, 所述步骤 S32 包括:

根据以下公式计算所述叶片模型原始点云数据中各个点 P_i 到邻域 M 内所有点的平均距离 $d_{mid}(P_i)$, 若 $d_{min}(P_i) > D_{mid}$, 则点 P_i 被定义为离群点, 最后将离群点删除, 其中, D_{mid} 为模型的全局平均距离;

$$d_{mid}(P_i) = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \|P_i - M_j\|,$$

其中, k 表示点 P_i 的邻域 M 中的点云数目, M_j 表示邻域 M 中第 j 个点。

3、根据权利要求 1 所述的复杂表面加工的在机点云检测及补偿方法, 其特征在于, 所述步骤 S33 包括: 把所述降噪后的点云数据放入到一个长方体中, 根据预设的精简率的大小将该长方体均匀分割成等边的立方体, 对于每个立方体选取距离该立方体中心最近的点云数据作为特征点, 并且对于所述降噪后的点云数据中曲率大于 0.33 的区域, 缩小所述立方体的边长, 以增大其密度。

4、根据权利要求 3 所述的复杂表面加工的在机点云检测及补偿方法, 其特征在于, 所述步骤 S33 还包括: 利用二次曲面拟合法计算所述降噪后的点云数据的曲率。

5、根据权利要求 1 所述的复杂表面加工的在机点云检测及补偿方法, 其特征在于, 所述检测扫描器为激光扫描器。

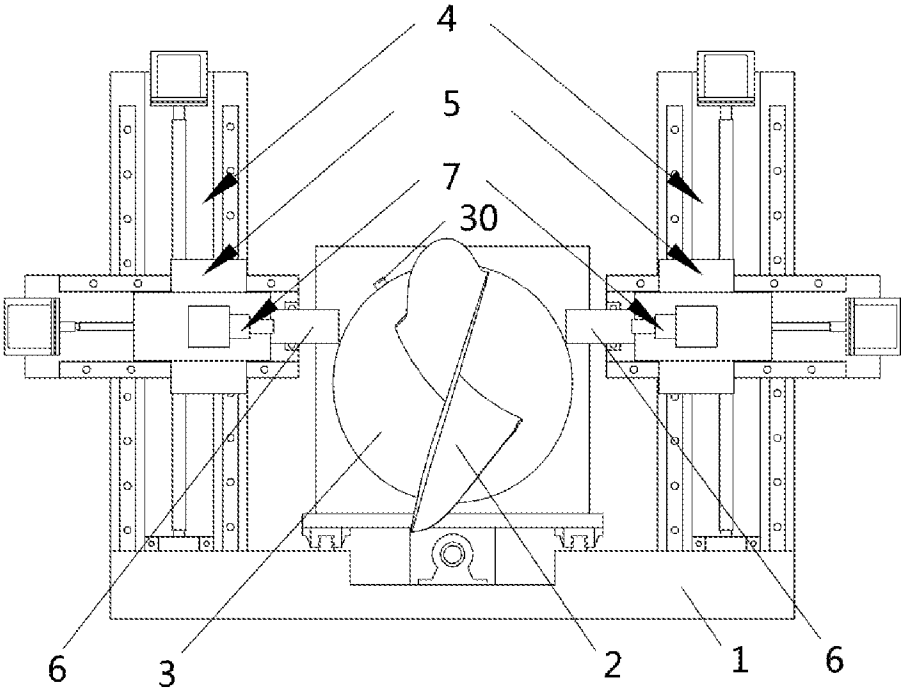


图 1a

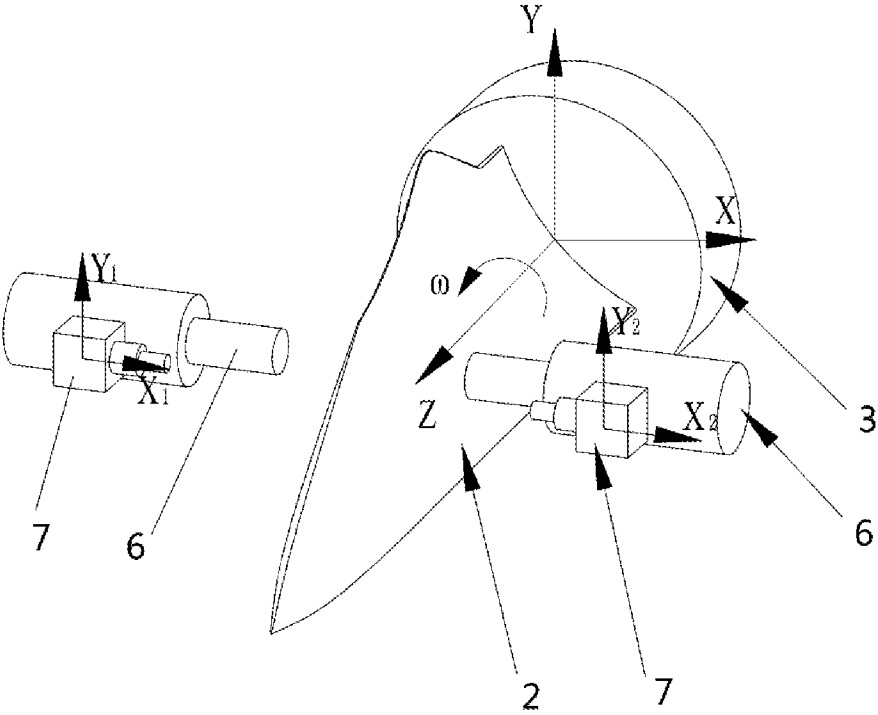


图 1b

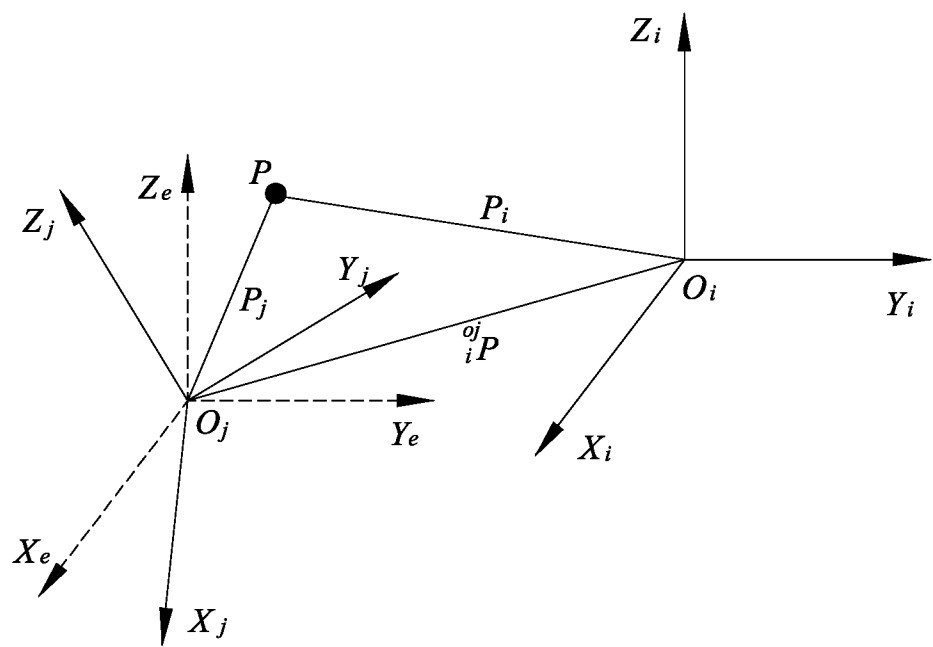


图 2

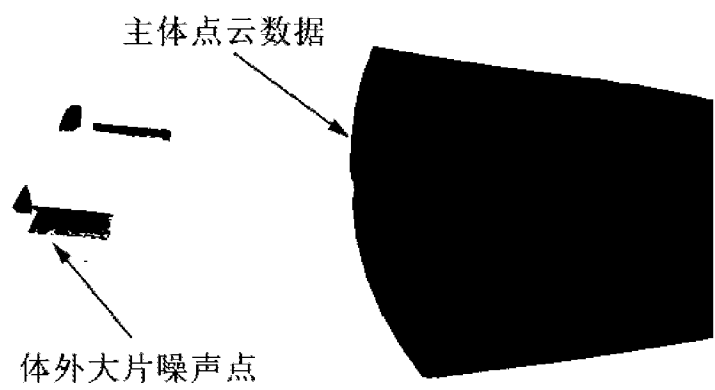


图 3

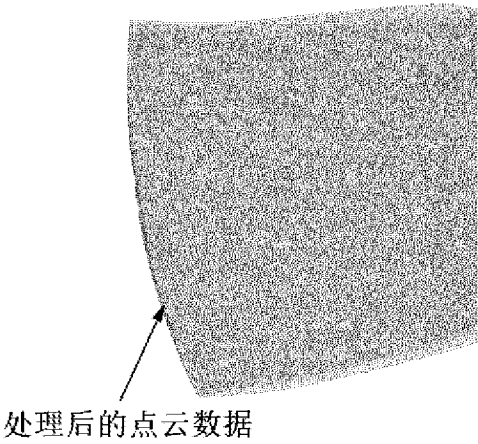


图 4

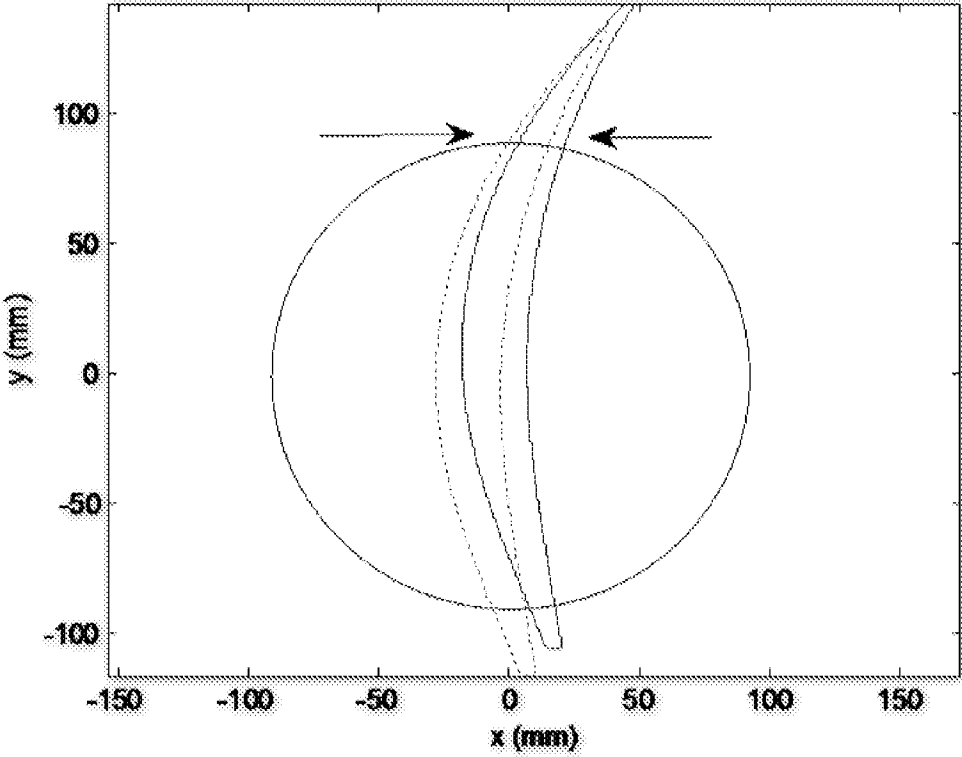


图 5

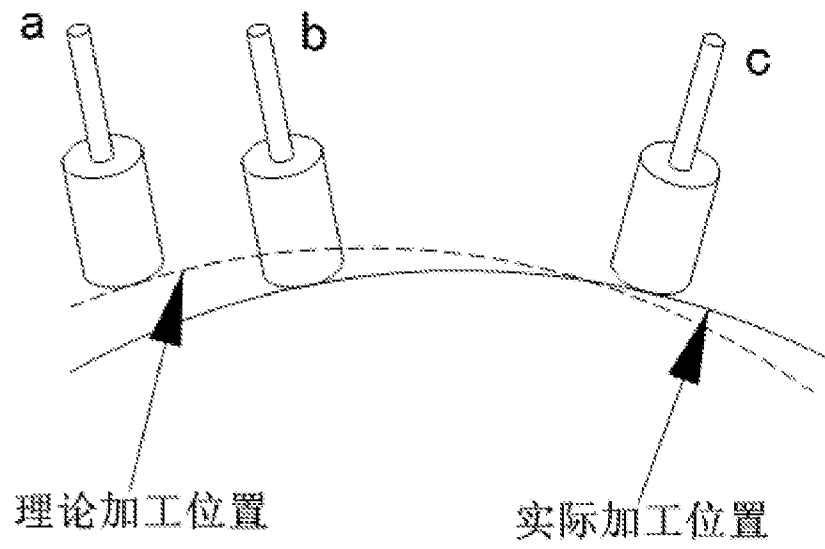


图 6

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2019/080138

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01B 11/24(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G01B 11

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNABS; CNTXT; CNKI; VEN; ustxt; wotxt; eptxt: 光学, 扫描, 叶片, 误差, 补偿, 点云, 坐标, 变换, 转换, 噪声, point, cloud, aviat+, error, blade, scan+, coordinate?, noise, filt+

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 109489580 A (EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) 19 March 2019 (2019-03-19) claims 1-9	1-9
X	CN 107246849 A (XI'AN CHISHINE OPTOELECTRONICS TECHNOLOGY CO., LTD.) 13 October 2017 (2017-10-13) description, paragraphs [0021]-[0093], and figure 1	1-9
A	CN 104392488 A (FUZHOU UNIVERSITY) 04 March 2015 (2015-03-04) entire document	1-9
A	CN 103630085 A (GUANGDONG UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 12 March 2014 (2014-03-12) entire document	1-9
A	CN 105737762 A (CIVIL AVIATION FLIGHT UNIVERSITY OF CHINA) 06 July 2016 (2016-07-06) entire document	1-9
A	CN 105157609 A (DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 16 December 2015 (2015-12-16) entire document	1-9



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

20 June 2019

Date of mailing of the international search report

27 June 2019

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing
100088
China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2019/080138**C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT**

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	WO 2016020175 A1 (WALTER MASCHINENBAU GMBH) 11 February 2016 (2016-02-11) entire document	1-9
A	US 2010079769 A1 (GENERAL ELECTRIC CO.) 01 April 2010 (2010-04-01) entire document	1-9

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2019/080138

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	109489580	A	19 March 2019	None			
CN	107246849	A	13 October 2017	None			
CN	104392488	A	04 March 2015	None			
CN	103630085	A	12 March 2014	CN	103630085	B	10 November 2017
CN	105737762	A	06 July 2016	CN	105737762	B	16 March 2018
CN	105157609	A	16 December 2015	CN	105157609	B	01 August 2017
WO	2016020175	A1	11 February 2016	DE	102014111240	A1	11 February 2016
				TW	201616256	A	01 May 2016
US	2010079769	A1	01 April 2010	US	7924439	B2	12 April 2011

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2019/080138

A. 主题的分类

G01B 11/24 (2006.01) i

按照国际专利分类 (IPC) 或者同时按照国家分类和 IPC 两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献 (标明分类系统和分类号)

G01B 11

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库 (数据库的名称, 和使用的检索词 (如使用))

CNABS; CNTXT; CNKI; VEN; ustxt; wotxt; eptxt: 光学, 扫描, 叶片, 误差, 补偿, 点云, 坐标, 变换, 转换, 噪声, point, cloud, aviat+, error, blade, scan+, coordinate?, noise, filt+

C. 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
PX	CN 109489580 A (华东理工大学) 2019年 3月 19日 (2019 - 03 - 19) 权利要求1-9	1-9
X	CN 107246849 A (西安知象光电科技有限公司) 2017年 10月 13日 (2017 - 10 - 13) 说明书第[0021]-[0093]行及附图1	1-9
A	CN 104392488 A (福州大学) 2015年 3月 4日 (2015 - 03 - 04) 全文	1-9
A	CN 103630085 A (广州工业大学) 2014年 3月 12日 (2014 - 03 - 12) 全文	1-9
A	CN 105737762 A (中国民用航空飞行学院) 2016年 7月 6日 (2016 - 07 - 06) 全文	1-9
A	CN 105157609 A (大连理工大学) 2015年 12月 16日 (2015 - 12 - 16) 全文	1-9
A	WO 2016020175 A1 (MASCHBAU GMBH WALTER) 2016年 2月 11日 (2016 - 02 - 11) 全文	1-9
A	US 2010079769 A1 (GENERAL ELECTRIC CO) 2010年 4月 1日 (2010 - 04 - 01) 全文	1-9

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。☒ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2019年 6月 20日

国际检索报告邮寄日期

2019年 6月 27日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中国国家知识产权局 (ISA/CN)

中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088

传真号 (86-10) 62019451

受权官员

董晶

电话号码 (86-10) 62085212

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2019/080138

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN	109489580	A	2019年 3月 19日	无	
CN	107246849	A	2017年 10月 13日	无	
CN	104392488	A	2015年 3月 4日	无	
CN	103630085	A	2014年 3月 12日	CN 103630085	B 2017年 11月 10日
CN	105737762	A	2016年 7月 6日	CN 105737762	B 2018年 3月 16日
CN	105157609	A	2015年 12月 16日	CN 105157609	B 2017年 8月 1日
WO	2016020175	A1	2016年 2月 11日	DE 102014111240	A1 2016年 2月 11日
				TW 201616256	A 2016年 5月 1日
US	2010079769	A1	2010年 4月 1日	US 7924439	B2 2011年 4月 12日