

# 测量数据和区域精度加权的模型配准方法\*

谭高山<sup>1,2</sup> 刘胜兰<sup>1</sup> 张丽艳<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016; 2. 安徽工业大学数理科学与工程学院, 马鞍山 243002)

**摘要:** 模型配准广泛应用于零件加工定位及精度检测。使用光学扫描技术获得的三维点云数据疏密程度与曲面的曲率有关, 每个测量点所代表的测量面积不同, 因此在模型配准时每个测量点应具有不同作用。另外, 由于设计要求和制造工艺等的影响, 零件表面各区域的精度存在差异, 故配准时要考虑这种区域精度差异以保证高精度区域的配准效果。提出一种基于测量数据疏密和区域精度的加权模型配准算法, 通过复合权因子控制不同数据在配准中的作用, 得到更加符合工程实况的配准结果。仿真和实测数据实验结果证明, 对精度存在差异和曲率变化较大的曲面所提配准算法比最近点迭代算法更加实用和有效。

**关键词:** 模型配准 几何精度 权因子

**中图分类号:** TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)07-0354-05

## Registration Method Based on Composite Weighting Parameters of Measured Data and Regional Accuracy

Tan Gaoshan<sup>1,2</sup> Liu Shenglan<sup>1</sup> Zhang Liyan<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

2. School of Mathematics and Physics, Anhui University of Technology, Maanshan 243002, China)

**Abstract:** Model registration is widely used in localization and inspection of parts. It remains a challenging problem in some situations. The density of the measured points of the parts depended on the surface curvature in 3D optical scan measurement technology. The local surface in small curvature was to enable more accurate representation with comparatively sparse measured points. Thus the area authorized by each point was different. So each point should be endowed with different status in registration progress. In addition, for a complex part with multiple free form surfaces, different precision requirements were often specified to different regional surfaces in design, and manufacturing process might make the precision difference in regions. Without consideration of the difference, the existing registration methods were prone to obtain the result which balanced the surface error. In the case, the error of the surface with high precision became larger than the physical truth, and the error of low precision regions turned out to be just the opposite. Based on the two aspects, a registration method based on composite weighting parameters of measured point area and regional geometric accuracy was proposed. Composite weighting parameters were constituted by estimating regional precision iteratively and calculating the area of the Voronoi diagram of each measured points. They controlled the influence of different data on the registration. As a result, the registration conformed more to the real engineering. Both theoretical and experimental results verified the efficiency and availability.

**Key words:** Model registration Geometric accuracy Weighting parameter

收稿日期: 2015-04-09 修回日期: 2015-05-16

\* 江苏省研究生培养创新工程资助项目(KYLX-0309)、航空科学基金资助项目(20131625)和民机专项科研资助项目(MJ-G-2011-24)

作者简介: 谭高山, 博士生, 安徽工业大学讲师, 主要从事数字化设计与检测研究, E-mail: tangaoshan2006@ahut.edu.cn

通讯作者: 张丽艳, 教授, 博士生导师, 主要从事数字化设计与制造、柔性三维测量和CAD/CAM研究, E-mail: zhangly@nuaa.edu.cn

## 引言

随着光电技术的不断发展,以光学扫描为代表的快速获取零件表面大量点云的测量方法成为近年来三维数据获取新手段。根据测量点云数据来分析零件表面误差已大量应用在加工定位和精度评价中。测量数据在测量坐标系下获得,而理论数据在设计坐标系内,需要将两者统一到同一坐标系下才能进行误差分析。因此测量数据与理论模型的配准是进行误差分析的关键技术。

应用最为广泛的配准方法是 ICP 方法(迭代最近点)<sup>[1-2]</sup>,该方法是三维数据配准的基石,最小化了测量点到理论曲面对应的距离平方和,是基于最小二乘准则的配准。由于数据点质量不同,研究人员在参与配准数据点选取<sup>[3-6]</sup>、点对剔除<sup>[7-12]</sup>和点对质量加权<sup>[5-6]</sup>等方面进行了相关研究。一些基于其他准则的配准方法求解效率不理想,文献[13]对此进行了研究。

最小二乘准则具有均衡误差的特性,因此对大误差数据非常敏感,制造误差较大的点会使整个配准结果受到不利的影响。文献[14]采用欧氏群的齐次空间理论对精度不同的多特征进行依次定位的模型配准;文献[15]通过配准约束分析理论和标准正交基投影实现按精度高低的依次配准,本质上是基准配准。这些配准方法过分强调高精度数据在配准中的地位,可能导致低精度数据不能满足配准要求。通过控制大偏差点对配准结果的干扰,可增强配准模型的可靠性<sup>[16-18]</sup>。文献[16]用高斯混合模型表示具有显著噪声和外点的测量数据配准问题,用连续函数表示大量离散点的集合,计算量较大。用核函数<sup>[17]</sup>和稳健函数<sup>[18-19]</sup>替代距离函数进行配准同样存在计算量大和求解困难,文献[19]给出了稳健函数配准的线性近似求解,对精度可能造成一定影响。

配准问题中,误差分布事先并不知道。本文通过预估当前区域误差,并以权因子的形式参与配准,体现其在配准中的地位。

一般数据量越大,配准结果越精确,但是数据分布对配准结果影响比较大<sup>[20]</sup>,以光学扫描为代表的测量方法获得的点云测量数据,常用三角网格来进行组织,对于平面等曲率变化较小的曲面,采用少量的网格就能将其描述清楚且可以达到比较高的精度,而曲率变化大的表面则需要密集的网格表示。数据点的这种疏密变化对最小二乘模型配准结果会产生影响。本文对此进行研究,并采取三角网格顶点面积加权的方法来消除数据疏密对配准结果的影

响。综合考虑以上两种因素,利用测量点面积和区域几何精度构造复合因子,使两种因素以权的形式体现其对配准结果的影响。

## 1 加权最小二乘配准理论

### 1.1 数学模型

最小二乘配准数学模型为

$$\min_{\mathbf{R} \in \mathbf{R}^{3 \times 3}, \mathbf{T} \in \mathbf{R}^3} f(\mathbf{R}, \mathbf{T}) = \sum_{i=1}^n d_i^2(\mathbf{R}, \mathbf{T}) \quad (1)$$

式中  $d_i(\mathbf{R}, \mathbf{T}) = \|\mathbf{R}\mathbf{P}_i + \mathbf{T} - \mathbf{Q}_i\|$  为对应距离,  $\mathbf{P}_i \in \mathbf{R}^3$  为测量数据点,  $\mathbf{Q}_i \in \mathbf{R}^3$  是理论模型  $P_i$  的对应点,  $n$  为测量数据点个数。  $\mathbf{R} \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$  为旋转矩阵,  $\mathbf{T} \in \mathbf{R}^3$  为平移向量,二者组成空间坐标变换,配准问题即求解空间变换使得两数据模型相对位姿满足要求。

在式(1)求解过程中,每个测量数据点具有相同的地位。对于数据点非均匀分布情况,当某曲面上的点较稀疏时,由于点的数量少,该曲面对配准产生的作用也就小,容易引起该曲面配准情况变差,因此需要对这些稀疏点赋予相对大的权因子以增大其对配准的影响。另外,不同区域曲面的精度不同,精度高的曲面在配准中应优先考虑,这些曲面区域同样需要一个相对大的权因子以体现其在配准中的优先地位。因此,本文的复合加权数学模型可表示为

$$\min_{\mathbf{R} \in \mathbf{R}^{3 \times 3}, \mathbf{T} \in \mathbf{R}^3} f(\mathbf{R}, \mathbf{T}) = \sum_{i=1}^n \omega_i d_i^2(\mathbf{R}, \mathbf{T}) \quad (2)$$

式中  $\omega_i$ ——测点面积和几何精度构成的复合权因子

### 1.2 复合权因子计算

#### 1.2.1 数据疏密影响权因子

测量数据是用德国 GOM 公司的 ATOS<sup>®</sup> II - 400 和 Tritop<sup>®</sup> 光学测量设备获得的三角网格,三角网格模型中的点、边、三角面具有一定的拓扑关系。图 1 所示是某一钣金零件的测量模型,可以很清楚地看到该零件中平面区域顶点数据量较少,而零件中折弯、凹陷和边界回弹部分网格数据顶点较多。这种数据点分布方法不但能够很好地描述零件,而且可以避免大量冗余点对数据处理带来的负担。但是最小二乘配准最小化点对距离平方和,稀疏区域点个数少,这就导致其对配准的影响变小。另外,稀疏区

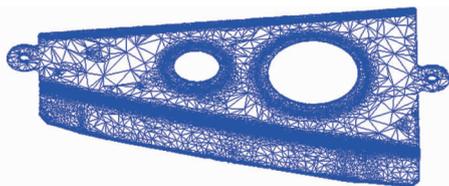


图 1 某钣金零件的测量数据

Fig. 1 Measurement data of a sheet metal part

域数据点曲率小,其精度一般较曲率较大的稠密区域点更高,在配准中应该具有更高的地位。基于以上原因用测点(即三角网格顶点)所代表的区域面积构造该点配准权值,即  $\omega_i = A_{\text{Voronoi}}(P_i)$ 。

本文采用 Voronoi 图所构成的多边形面积近似表示三角网格顶点所代表的面积。Voronoi 图是由连接边的垂直平分线组成的连续多边形,对于中间点  $P_i$ ,如图 2a 所示,查找以  $P_i$  为顶点的三角形,分别记为  $f_i (i=1, 2, \dots, 6)$ ,计算出所有三角形的外心  $v_i (i=1, 2, \dots, 6)$ ,再依次连接这些外心构成的多边形,即为由  $P_i$  构成的 Voronoi 图。对于边界点,如图 2b 所示,边  $e_1$  和  $e_2$  只被一个三角形使用,先计算这两个单边的中点  $u_1, u_2$ ,依次连接  $u_1, v_1, v_2, u_2, P_i, u_1$  得到的多边形即为由边界顶点构成的 Voronoi 图。

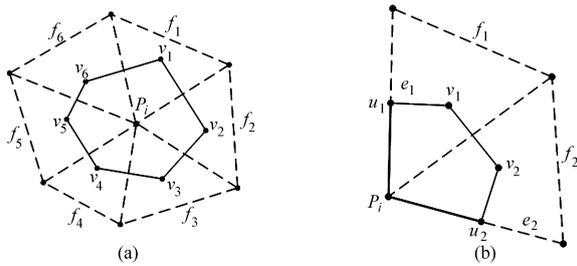


图2 三角网格的 Voronoi 多边形

Fig. 2 Voronoi polygons of triangular mesh vertex

(a) 内点 (b) 边界点

下面以某一仿真模型为例说明面积加权的有效性。图 3a 为理论模型,由一个半圆柱面和一个平面组成。将半圆柱面向内偏置很小的距离,均匀网格化再加一定的噪声模拟真实测量数据中零件本身的制造误差;然后将平面网格进行简化,减少平面部分顶点数,而半圆柱数据保持不变,用以模拟实际光学扫描测量数据中的密度不均情况,如图 3b 所示。对其进行 ICP 配准,结果如图 3c 所示,容易看出,半圆柱部分的测量数据均匀地分布在理论模型上下两侧,配准效果很好,而平面部分的测量数据基本位于理论模型的上侧,出现这样的结果是因为圆柱点云数据量大,在配准时这部分数据配准效果明显。显然这样的结果与实际情况不符。事实上平面数据没有扰动,理论上误差为零,而半圆柱面向内偏置且加了扰动,配准后测量曲面应位于理论平面内侧。采用数据疏密影响权因子加权配准后得到如图 3d 所示结果,平面部分测量数据比较均匀地分布在理论模型的两侧,半圆柱测量数据位于理论数据内部,配准结果与理论分析基本一致。可见采用本文面积加权算法可以解决由网格密度不均引起的配准偏差问题,测量数据面积加权配准有效。

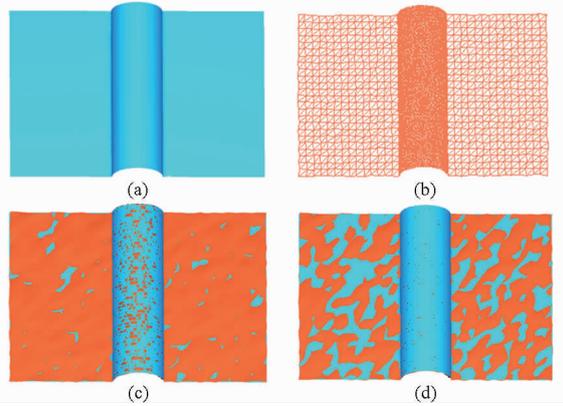


图3 仿真模型数据疏密加权配准

Fig. 3 Weighting registration of density on artificial data

(a) 理论模型 (b) 网格模型 (c) ICP 配准 (d) 加权配准

### 1.2.2 区域几何精度影响权因子

零件各部分几何精度不同对配准结果影响不同,因此对高精度区域数据点应赋予更大的权值,使其配准精度也更高。这里有两个问题:如何确定各曲面区域的精度;如何依精度给定具体的权值。

精度是指零件表面的实际尺寸、形状、位置等几何参数与理想几何参数的符合程度,本文用均方差  $\mu$  表示区域几何精度。一般  $\mu$  越小,精度越高。为了更精确地得到各区域的均方差,首先进行 ICP 模型配准,然后估计  $\mu$ ,加权配准后,再进行  $\mu$  值估计,逐步迭代逼近  $\mu$  值,并最终得到利用  $\mu$  构造的加权最小二乘配准结果。 $\mu$  值越小,该区域精度越高,则在配准中权应该越大。函数  $y = e^{-x}$  常用来反映这种变化关系,它具有急剧递减性特征,故配准模型中取区域精度影响权因子为  $e^{-\mu}$ 。

利用文献[15]中依次配准仿真数据,以边长为 100 mm 的立方体中的 3 个相互垂直的平面为例进行区域精度加权配准仿真实验。图 4a 为理论模型,图 4b 为在 3 个面  $F_1, F_2, F_3$  上加上从小到大不同程度的噪声后的模型,用来模拟实际测量数据中各区域有着从高到低的精度。对测量数据与理论模型进行 ICP 配准,结果如图 4c 所示,采用区域精度加权最小二乘配准算法,配准结果如图 4d 所示,由图 4c 可见精度低的  $F_3$  区域使  $F_1$  和  $F_2$  产生偏离,  $F_1$  和  $F_2$  配准精度低。图 4d 可以看出加权后  $F_1$  区域配准精度得到了改善。与依次配准相比,高精度区域权值并没有保证其绝对优先,因此该区域精度达不到依次配准的结果。但依次配准只强调精度差异性,强调高精度曲面的决定优先权,而忽视了差异程度的量,这类方法能处理的差异区域通常不超过 3 个。区域几何精度加权方法可以处理模型中的精度差异程度,对差异区域的数目没有限制,且只需一次配准。

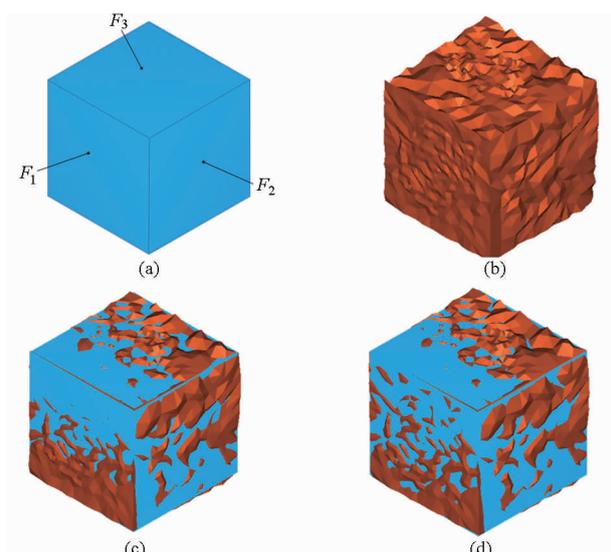


图 4 仿真模型区域精度加权配准

Fig. 4 Weighting registration of region precision

- (a) 理论模型 (b) 测量数据
- (c) ICP 配准 (d) 加权配准

## 2 基于复合权因子的加权最小二乘配准

首先按照上述权值计算方法计算出每个顶点的权因子,由于数据疏密影响因子  $\omega_i^{(1)}$  仅与模型网格结构有关,可以事先计算,并定义为曲面属性,配准过程中保持其数值不变。区域精度影响因子  $\omega_i^{(2)}$  与迭代过程有关,每次配准迭代前都要通过预估当前区域精度来计算区域精度影响因子。同时考虑这两种加权方式,加权最小二乘配准模型(式(2))可表示为

$$\min_{\mathbf{R} \in \mathbf{R}^3 \times 3, \mathbf{T} \in \mathbf{R}^3} f(\mathbf{R}, \mathbf{T}) = \sum_i^m \omega_i^{(2)} \left( \sum_{j=1}^{l_i} \omega_i^{(1)} d_i^2(\mathbf{R}, \mathbf{T}) \right) \quad (3)$$

式中  $m$ ——精度不同曲面的区域个数

$l_i$ ——区域数据点个数

基于复合化权因子的最小二乘配准算法步骤如下:

(1) 计算测量点  $P_i (i = 1, 2, \dots, n)$  对应  $\omega_i^{(1)}$ , 并进行 ICP 初始配准。

(2) 初始化旋转阵  $\mathbf{R}$  为单位阵, 平移向量  $\mathbf{T}$  为零向量, 置迭代次数  $k = 0$ , 最大迭代次数为  $k_{\max}$ ,  $\mathbf{R}$  和  $\mathbf{T}$  的停止条件为  $\varepsilon_R, \varepsilon_T$ 。

(3) 对于测量点  $P_i (i = 1, 2, \dots, n)$ , 找到理论模型上对应的点  $Q_i$ , 计算  $Q_i$  所在区域的权因子  $\omega_i^{(2)}$ 。

(4) 用加权四元素法迭代求解模型(式(3)), 得最优解  $\mathbf{R}_k, \mathbf{T}_k$ 。

(5) 变换测量数据点  $P_i (i = 1, 2, \dots, n)$  到新位置, 并且更新  $\mathbf{R}$  和  $\mathbf{T}$ 。

$$\begin{cases} P_i = \mathbf{R}_k P_i \\ \mathbf{R} = \mathbf{R}_k \mathbf{R} \\ \mathbf{T} = \mathbf{R}_k \mathbf{T} + \mathbf{T}_k \end{cases} \quad (4)$$

(6) 如果  $\mathbf{R}_k$  和  $\mathbf{T}_k$  满足停止条件  $\varepsilon_R, \varepsilon_T$ , 或者迭代次数达到  $k_{\max}$ , 停止迭代。否则  $k = k + 1$ , 转步骤(3)继续。 $\mathbf{R}_k$  和  $\mathbf{T}_k$  停止条件表示为

$$\begin{cases} \sqrt{\alpha_k^2 + \beta_k^2 + \gamma_k^2} \leq \varepsilon_R \\ \|\mathbf{T}_k\| \leq \varepsilon_T \end{cases} \quad (5)$$

式中  $\alpha_k, \beta_k, \gamma_k$  分别为变换矩阵  $\mathbf{R}_k$  对应 3 个坐标方向的旋转角,  $\varepsilon_R$  和  $\varepsilon_T$  为允许误差, 设置变量收敛条件和最大迭代次数条件, 加强了算法稳定性和鲁棒性。

## 3 钣金件配准实验

通过实测钣金件配准进一步说明复合加权配准算法的有效性。飞机制造中钣金零件测量数据疏密差距较大, 且区域几何精度差别明显, 非常适合本算法应用情形。图 5a、5b 分别是两钣金件理论模型, 钣金加工工艺造成精度从高到底分别为  $F_1, F_2$  和  $F_3$ 。图 5c(5e)、图 5d(5f) 分别是 ICP 配准和综合考虑测量数据疏密以及 3 个区域加工精度差异的复合加权配准结果。比较图 5c 和图 5d 的钣金件 1 配准结果, 可以看出本文算法精度较高的  $F_1$  曲面配准精度得到了改善, 而精度最差的面  $F_3$  做出了让步, 面  $F_2$  误差略微变大, 具体数据如表 1 所示。面  $F_1$  均方差保持未变, 但平均误差降低; 面  $F_2$  和面  $F_3$  误差稍微变大。

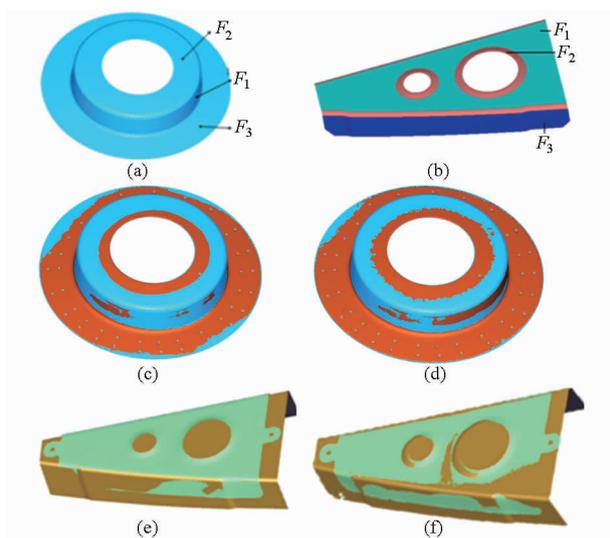


图 5 钣金件复合加权配准

Fig. 5 Composite weighting registration on sheet metal parts

- (a) 钣金件 1 (b) 钣金件 2
- (c) 钣金件 1 的 ICP 配准 (d) 钣金件 1 的加权配准
- (e) 钣金件 2 的 ICP 配准 (f) 钣金件 2 的加权配准

表1 钣金件1配准误差比较

Tab.1 Comparison of errors on sheet metal part 1

区域	mm			
	ICP 配准		复合加权配准	
	平均误差	均方差	平均误差	均方差
$F_1$	0.164	0.135	0.146	0.135
$F_2$	0.193	0.151	0.201	0.172
$F_3$	0.173	0.152	0.182	0.156

比较图 5e 和图 5f 的钣金件 2 配准结果,可以看出本文算法中精度较高的  $F_1$  曲面配准结果明显变好,  $F_2$  曲面精度也有改善,具体数据如表 2 所示。面  $F_1$  均方差和平均误差均变小,精度得到改善;面  $F_2$  平均误差变大,但均方差变小,面  $F_3$  误差明显变大。

表2 钣金件2配准误差比较

Tab.2 Comparison of errors on sheet metal part 2

区域	mm			
	ICP 配准		复合加权配准	
	平均误差	均方差	平均误差	均方差
$F_1$	0.305	0.098	0.132	0.075
$F_2$	0.645	0.310	0.862	0.304
$F_3$	0.067	0.056	0.271	0.103

通过两钣金件配准实验,发现本文配准方法能够改善高精度区域配准精度,同时低精度区域配准误差相应也会变大,这与零件实际精度情况相符,因而本文基于测量数据疏密和区域精度差异的加权配准方法更具实用性。

## 4 结束语

通过综合考虑测量数据点疏密程度和区域精度对配准结果的影响,利用网格顶点 Voronoi 多边形面积和预估区域几何精度的负指数函数构造复合权因子,建立加权最小二乘配准模型。该算法不仅在不增加数据量的前提下消除了测量三角网格数据点分布不均引起的配准偏移,而且有效地控制了低精度数据对配准结果的影响程度,得到了更加符合工程实际的配准结果。由于面积权因子可事先计算得到,其计算时间可以忽略。本文所用加权四元素法的计算量与四元素法一样,只是每步迭代配准求解加权最小二乘模型前需要计算区域几何精度,故所提算法的效率理论上略低于经典 ICP 配准算法,事实上,由于几何精度计算量相对较小,所提算法计算效率与 ICP 算法相当。

## 参 考 文 献

- Chen Y, Medioni G. Object modeling by registration of multiple range images[J]. Image and Vision Computing, 1992, 10(3): 145 - 155.
- Besl P, McKay N D. A method for registration of 3-D shapes [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2): 239 - 256.
- Menq C H, Yau H T, Lai G Y. Automated precision measurement of surface profile in CAD-directed inspection [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1992, 8(2): 268 - 278.
- Simon D A. Fast and accurate shape-based registration[D]. Pittsburgh, Pennsylvania: Carnegie Mellon University, 1996.
- Zinsser T, Schnidt H, Niermann J. A refined ICP algorithm for robust 3-D correspondences estimation [C] // Proceedings of International Conference on Image Processing, 2003: 695 - 698.
- 程云勇, 张定华, 卜昆, 等. 涡轮叶片形状检测中的模型配准控制点集选取[J]. 机械工程学报, 2009, 45(11): 240 - 246. Cheng Yunyong, Zhang Dinghua, Bu Kun, et al. Model registration control point set selection for turbine blade shape inspection [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(11): 240 - 246. (in Chinese)
- Zhang Z Y. Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces [J]. International Journal of Computer Vision, 1994, 13(2): 119 - 152.
- Chetverikov D, Svirko D, Stepanov D. The trimmed iterative closest point algorithm [C] // Kende P. Proceedings of 16th International Conference on Pattern Recognition, 2002: 545 - 548.
- Stewart C V, Tsai C L, Roysam B. The dual bootstrap iterative closest point algorithm with application to retinal image registration [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2003, 22(11): 1379 - 1394.
- Chetverikov D, Stepanov D, Krsek P. Robust Euclidean alignment of 3D point sets: the trimmed iterative closest point algorithm [J]. Image and Vision Computing, 2005, 23(3): 299 - 309.
- Hauser D L, Taylor D L. Optimal alignment of geometric models for comparison [C] // Proceedings of the First Conference on Visualization in Biomedical Computing, 1990: 426 - 431.
- Godin G, Rioux M, Baribeau R. Three-dimensional registration using range and intensity information [C] // Sabry F El-Hakim. Proc. SPIE, Videometrics IIIV, 1994, 2350: 279 - 290.
- 谭高山, 张丽艳. 基于最大熵原理的复杂曲面位姿配准技术[J]. 农业机械学报, 2014, 45(7): 300 - 305. Tan Gaoshan, Zhang Liyan. Pose registration technology based on the maximum-entropy principle for complex surfaces [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(7): 300 - 305. (in Chinese)

- Guo Zhijun, Zhou Zhili, Tong Jin, et al. A 2-D finite element analysis for cutting performance of a parabolic curved cutting surface[J]. Journal of Luoyang Institute of Technology, 2002, 23(4): 1-4. (in Chinese)
- 14 Guo Zhijun, Zhou Zhili, Zhang Yi, et al. Bionic optimization research of soil cultivating component design[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2009, 52(4): 955-965.
- 15 郭志军,周德义,周志立. 几种不同触土曲面耕作部件的力学性能仿真研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(15): 71-75.  
Guo Zhijun, Zhou Deyi, Zhou Zhili. Simulation research on mechanical performances of several kinds of cultivating components with different soil-engaging surfaces[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(15): 71-75. (in Chinese)
- 16 郭志军,孙政伟,张毅,等. 推土铲切削性能的二维有限元分析[J]. 拖拉机与农用运输车, 2006, 33(6): 30-33.  
Guo Zhijun, Sun Zhengwei, Zhang Yi, et al. Two-dimensional FEA on bulldozing shovel[J]. Tractor & Farm Transporter, 2006, 33(6): 30-33. (in Chinese)
- 17 杨俊杰. 相似理论与结构模型试验[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2005.
- 18 郭志军,杜干,周志立,等. 土壤耕作部件宏观触土曲面减阻性能研究现状分析[J]. 农业机械学报, 2011, 42(6): 47-52.  
Guo Zhijun, Du Gan, Zhou Zhili, et al. Actuality analysis of resistance-reducing properties on soil cultivating components with different macroscopic soil-engaging surfaces[J]. Transactions of the Chinese Society Agricultural Machinery, 2011, 42(6): 47-52. (in Chinese)
- 19 任露泉. 试验优化设计与分析[M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 2001.

(上接第 358 页)

- 14 陈善勇,李圣怡,戴一帆. 考虑特征差异的多特征工件依次定位[J]. 机械工程学报, 2003, 39(7): 13-17.  
Chen Shanyong, Li Shengyi, Dai Yifan. Multi-feature workpiece in order localization considering the differences between features [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(7): 13-17. (in Chinese)
- 15 刘胜兰,张丽艳,王晓飞. 一种考虑区域精度差异的模型配准方法[J]. 机械工程学报, 2013, 49(13): 139-144.  
Liu Shenglan, Zhang Liyan, Wang Xiaofei. A shape registration method considering the regional difference in precision [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(13): 139-144. (in Chinese)
- 16 Bing J, Baba C V. Robust point set registration using Gaussian mixture models[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33(8): 1633-1646.
- 17 Tsin Y, Kanade T. A correlation-based approach to robust point set registration[C]//Proceedings of 8th European Conference on Computer Vision, 2004: 558-569.
- 18 Bergstrom P, Edlund O. Robust registration of point sets using iteratively reweighted least squares[J]. Computational Optimization and Applications, 2014, 58(3): 543-561.
- 19 谭高山,张丽艳,刘胜兰,等. 基于 M-估计的线性化稳健配准算法研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 360-364.  
Tan Gaoshan, Zhang Liyan, Liu Shenglan, et al. A robust linearized registration algorithm based on M-estimation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4): 360-364. (in Chinese)
- 20 刘胜兰,罗志光,谭高山,等. 飞机复杂装配部件三维数字化综合测量与评估方法研究[J]. 航空学报, 2013, 34(2): 409-418.  
Liu Shenglan, Luo Zhiguang, Tan Gaoshan, et al. Research on 3D measurement and quality evaluation for complex aircraft assembly[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(2): 409-418. (in Chinese)