

复杂曲面加工检测中的精确定位方法*

徐金亭^{1,2} 孙玉文³ 刘伟军¹

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所先进制造技术重点实验室 沈阳 110016;

2. 中国科学院研究生院 北京 100049;

3. 大连理工大学机械工程学院 大连 116024)

摘要: 测量数据的精确定位是实现复杂曲面加工检测的关键, 针对其在初始变换估计和最近点计算等方面存在的问题, 提出一种快速、精确的定位方法。该方法以曲面的曲率为联系特征, 建立起满足角度、距离约束的对应关系, 能够实现测量数据的初始定位, 从而为后续迭代算法向全局最优收敛提供一个良好的初始变换。进而以 Bernstein 多项式算术运算为基础, 给出一种新的最近点计算方法, 能够克服传统方法需要给定初始迭代点的不足。最后利用基于最小二乘的迭代算法完成测量数据定位的精确调整, 达到全局最优的目标。试验结果显示, 所提出的方法快速、可靠, 并且具有良好的定位精度。

关键词: 精度检测 初始定位 最近点 精确定位

中图分类号: TP391

0 前言

随着生产的发展, 在与制造业密切相关的航空航天、汽车、造船以及模具等工业领域, 复杂曲面零件得到了越来越广泛的应用, 对高精度的设计、制造以及检测提出了更为严格的要求, 也成为人们日益关注的研究热点^[1-5]。与具有规则几何形状的零件相比, 复杂曲面零件缺乏清晰定义的几何特征, 无法用有限的参数给出精确的定义, 因而加工精度的检测变得更为复杂。在基于 CAD 模型的复杂曲面加工精度检测中, 受测量设备的限制, 工件常常需要离线检测, 这时加工坐标系和检测坐标系很难统一, 因而实现测量数据与模型曲面之间的最优定位就成为进行加工质量评价的前提和关键问题。

目前, 对测量数据定位问题的研究已经比较深入, 其中以 BESL 等^[6]所提出的迭代最近点(ICP)算法最为流行, 并以此为基础发展出了一系列迭代定位算法^[7-9]。此类定位算法具有良好的定位精度但是算法的运行速度以及向全局最优的收敛性却在一定程度上依赖于给定的初始变换估计以及在迭代过程中对初始变换估计的改进。此外, 在计算点到曲面的最近点时, 通常采用的方法是数值迭代法^[3-4]。此类方法虽然可以达到很高的计算精度, 但是对初始值的要求却比较苛刻, 需要额外的操作对初始迭代点进行处理, 这就造成了计算结果对初始迭代点的依赖, 而且在处理复杂曲面的大量测量点时

也比较费时。为此, 本文针对测量数据定位在初始变换估计和最近点计算等方面存在的问题展开论述, 给出了以曲率为联系特征的初始定位方法, 成功解决了影响迭代定位算法运行速度以及收敛性的初始变换估计问题。进而提出了一种新的最近点计算方法, 将计算最近点的抽象代数运算转化成了直观明了的曲面与参数平面的几何求交问题, 从而有效地克服了传统计算方法需要给定初始迭代点的不足。在此基础之上, 利用改进的迭代算法快速、准确地完成了测量数据的精确定位。

1 基于曲率特征的初始定位

在无法预知测量数据与模型曲面之间对应联系的前提下, 测量数据的初始定位旨在为后续迭代定位算法向全局最优收敛提供一个良好的初始变换。由于曲率能够反映曲面的局部微分特征, 而且仅仅依赖于曲面的几何形状而与曲面的参数以及描述方法无关, 更重要的是它们是刚体变换不变量。因此, 可以通过快速的提取曲面的高斯曲率、平均曲率等不变特征以建立待匹配曲面之间的对应关系^[10], 完成测量数据的初始定位。

1.1 曲率特征匹配

一般而言, 三对不共线的匹配点就可以方便快速地确定测量数据与模型曲面之间的初始坐标变换。因此, 可以在测量数据中选取不共线的三点 s_1 、 s_2 和 s_3 作为种子点, 以其高斯曲率 $K(s_i)$ 、平均曲率 $H(s_i)$ 为特征搜索模型曲面, 建立测量数据与模型曲面之间的对应关系。为此, 根据试验情况, 建

* 国家自然科学基金资助项目(50405044)。20060718 收到初稿, 20070122 收到修改稿

立如下约束条件以比较二者之间的高斯曲率和平均曲率

$$\left| \frac{K(s_i) - K(p_j)}{K(s_i)} \right| \leq \varepsilon_k \quad (1)$$

$$\left| \frac{H(s_i) - H(p_j)}{H(s_i)} \right| \leq \varepsilon_h \quad (2)$$

式中, p_j 为模型点集中一点; ε_k , ε_h 为给定高斯曲率误差和平均曲率误差。

由于计算误差以及具有相似曲率特征点的存在, 单纯的特征匹配可能会产生多重对应联系从而降低曲面匹配的效率甚至会造成误匹配。为此, 以种子点的法线之间的夹角以及相互之间的距离关系建立如下的三角约束条件, 进一步精炼测量数据与模型曲面间的对应关系, 剔出坏点匹配。

法线之间的夹角约束条件

$$\left| \frac{\text{ang}(s) - \text{ang}(m)}{\text{ang}(s)} \right| \leq \varepsilon_{\text{ang}} \quad (3)$$

距离约束条件

$$\left| \frac{\text{dist}(s) - \text{dist}(m)}{\text{dist}(s)} \right| \leq \varepsilon_{\text{dist}} \quad (4)$$

式中, $\text{ang}(s)$, $\text{dist}(s)$ 为种子点 s_1 、 s_2 和 s_3 法线之间的夹角以及相互之间的距离; $\text{ang}(m)$, $\text{dist}(m)$ 为目标点 m_1 、 m_2 和 m_3 法线之间的夹角以及相互之间的距离; ε_{ang} , $\varepsilon_{\text{dist}}$ 分别为给定的角度误差和距离误差。

经上述处理, 得到与种子三元组 (s_1, s_2, s_3) 对应的目标三元组 $\{(m_{1k}, m_{2k}, m_{3k}): k=1, \dots, n_k\}$ 。进而在对应三元组之间生成旋转平移变换列表 $\{(R_k, t_k): k=1, \dots, n_k\}$ 。然后选取使最小距离目标函数取得最小值的坐标变换为最佳坐标变换。

1.2 最小距离目标函数

设 $P = (p_1, \dots, p_m)$ 为曲面测量点集, $Q = r(u, v)$ 为模型曲面, 则点 $R_k p_i + t_k$ 到 Q 的最近距离为

$$d_{\min}(p_i, Q) = \min\{d(R_k p_i + t_k, q_j), \forall q_j \in Q\} \quad (5)$$

式中, $d(p, q)$ 为点 p 、 q 之间的距离函数。于是, 测量点集 P 到模型曲面 Q 的最小距离目标函数为

$$F = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m d_{\min}(p_i, Q) \quad (6)$$

在旋转平移变换列表 $\{(R_k, t_k): k=1, \dots, n_k\}$ 中选取使最小距离目标函数 F 取得最小值的坐标变换为最佳坐标变换 T_0 , 完成测量数据的初始定位。

2 点到参数曲面最近点的计算

在计算点到曲面的最近点时, 通常采用的方法是数值迭代法。此类方法可以达到很高的计算精度, 但是对初始值的要求却比较苛刻, 如果初始点选择不当, 迭代过程可能会陷入局部极值甚至根本无法收敛。为了解决这一问题, 提出了一种新的最近点计算方法, 通过 Bernstein 多项式算术运算^[11]建立起点到曲面法向投影点的计算模型, 进而利用基于四叉树递归分解的搜索策略, 寻找测量点到模型表面上的最近点。

2.1 点到曲面法向投影点的计算模型

为了论述的方便, 假设模型曲面由 Bezier 参数曲面形式给出

$$r(u, v) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n b_{i,j} B_{i,m}(u) B_{j,n}(v) \quad (7)$$

式中, $b_{i,j}$ 为 Bezier 曲面 $r(u, v)$ 的控制顶点。

假设点 $r(u_0, v_0)$ 为测量点 p_0 在表面上的最近点, 则连接两点之间的连线必与曲面在 (u_0, v_0) 处的法线共线, 也就是说, 点 $r(u_0, v_0)$ 是 p_0 在表面上的法向投影点。据此, 构造如下矢量方程求解点到表面上的法向投影点。即

$$(r(u, v) - p) \times n(u, v) = 0 \quad (8)$$

为了避免繁琐的迭代计算, 本文将充分利用德卡特里奥算法和 Bezier 曲面的凸包性质进行求解。为此, 通过 Bernstein 多项式算术运算, 将方程(8)的左侧表达式转化为如下的一张 Bezier 曲面

$$s(u, v) = \sum_{i=0}^{3m-1} \sum_{j=0}^{3n-1} e_{i,j} B_{i,3m-1}(u) B_{j,3n-1}(v) \quad (9)$$

式中, $e_{i,j} = [e_{i,j}^x, e_{i,j}^y, e_{i,j}^z]^T$ 为 Bezier 曲面 $s(u, v)$ 的控制顶点。可以看到, 方程 $s(u, v) = 0$ 等价于如下的 Bernstein 多项式方程组

$$\begin{cases} s^x(u, v) = \sum_{i=0}^{3m-1} \sum_{j=0}^{3n-1} e_{i,j}^x B_{i,3m-1}(u) B_{j,3n-1}(v) = 0 \\ s^y(u, v) = \sum_{i=0}^{3m-1} \sum_{j=0}^{3n-1} e_{i,j}^y B_{i,3m-1}(u) B_{j,3n-1}(v) = 0 \\ s^z(u, v) = \sum_{i=0}^{3m-1} \sum_{j=0}^{3n-1} e_{i,j}^z B_{i,3m-1}(u) B_{j,3n-1}(v) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

为了得到更为直观的计算模型, 利用 Bernstein 多项式的线性精度性质^[12], 可将多项式方程组式(10)在 u - v 参数区域上的图形表示为如下所示的三张

Bezier 曲面

$$\begin{cases} s^x(u, v) = \sum_{i=0}^{3m-1} \sum_{j=0}^{3n-1} e_{i,j}^x B_{i,3m-1}(u) B_{j,3n-1}(v) \\ s^y(u, v) = \sum_{i=0}^{3m-1} \sum_{j=0}^{3n-1} e_{i,j}^y B_{i,3m-1}(u) B_{j,3n-1}(v) \\ s^z(u, v) = \sum_{i=0}^{3m-1} \sum_{j=0}^{3n-1} e_{i,j}^z B_{i,3m-1}(u) B_{j,3n-1}(v) \end{cases} \quad (11)$$

式中

$$\begin{aligned} e_{i,j}^x &= [i/(3m-1) \quad j/(3n-1) \quad e_{i,j}^x]^T \\ e_{i,j}^y &= [i/(3m-1) \quad j/(3n-1) \quad e_{i,j}^y]^T \\ e_{i,j}^z &= [i/(3m-1) \quad j/(3n-1) \quad e_{i,j}^z]^T \end{aligned}$$

分别为方程式(11)中三张 Bezier 曲面的控制顶点。

由此可以看到, 方程式(8)的成立意味着三张曲面同时与 $u-v$ 参数平面相交, 法向投影点所对应的 u, v 参数值就存在于三张曲面与参数平面相交的重合区域。这样, 点到曲面最近点的计算首先被转化为求解方程式(8)的根的问题, 进而又将抽象的求解过程转化为直观的曲面与参数平面的几何求交。

2.2 基于四叉树递归分解的搜索策略

采用 $u-v$ 参数区域上的递归四叉树分解搜索模型曲面, 寻找测量点在模型曲面上的法向投影点。首先, 利用德卡斯特里奥算法在参数平面的中间点 $(u/2, v/2)$ 处将曲面分割为四个子曲面片, 然后对每一张子曲面片再进行四叉分割, 依次递归。对于四叉树的第 n 层而言, 最多有 4^n 个节点, 每个节点所对应的参数平面四边形区域的尺寸为 $2^{-n}r \leq u \leq 2^{-n}(r+1)$, $2^{-n}s \leq v \leq 2^{-n}(s+1)$, 其中 $r, s \in \{r, s | 0 \leq r, s \leq 4^{n-1}, r \in \mathbb{Z}, s \in \mathbb{Z}\}$ 。四叉树分解的深度依赖于给定的计算精度。图 1 为四叉树分解示意图。

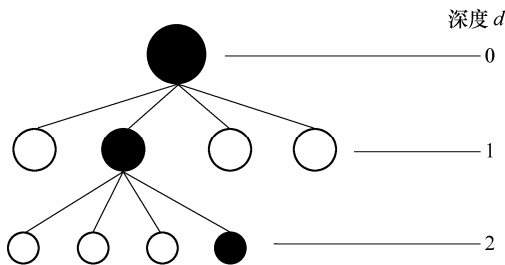


图 1 四叉树分解示意图(黑色表示存在最近点区域)

基于递归四叉树分解算法的基本搜索策略是, 确定方程式(11)中三张 Bezier 曲面的凸包是否与参数平面相交, 从而判断四叉树节点所描述的参数区域中是否存在使方程式(8)成立的根。具体过程如下, 首先在参数区域上分别检查 Bernstein 多项式

s^x 、 s^y 和 s^z 系数的符号, 如果对每一个多项式而言系数均为异号, 则该区域所对应的四叉树节点被标记为可能存在最近点区域, 否则标记为无最近点区域。在可能存在最近点的区域对曲面进行四叉分割, 然后对每一张子曲面片重复上述检测分割过程, 直至子区域的尺寸小于给定的计算精度 ϵ_{tree} , 即 $2^{-n} \leq \epsilon_{tree}$, 则分割算法停止。然后遍历四叉树的第 n 层, 找到所有可能含有最近点的区域, 通过计算比较得到点到参数曲面的最近点, 即法向投影点 $q_n = r(u_n, v_n)$ 。图 2 给出了在最近点计算过程中 $u-v$ 参数平面和模型曲面的分割过程示意图。该方法充分利用了德卡斯特里奥算法和曲面的凸包性质, 因此非常适用于求解点到 Bezier 曲面和 B 样条曲面的最近点问题。

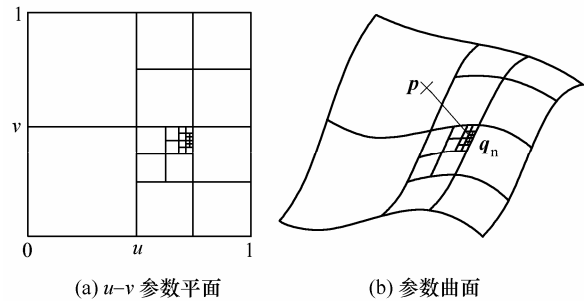


图 2 四叉树递归分解

3 测量数据定位的精确调整

测量数据的精确定位可以被描述为求解测量数据到模型曲面距离的平方和相对于刚体变换六个参数的极小值问题。因此, 可以根据最小二乘原理构造如下的目标函数

$$F(T) = \sum_{i=1}^n \|T p_i - q_i\|^2 \quad (12)$$

式中, p_i 为实际测量点, q_i 为 $T p_i$ 在模型表面上的最近点, T 为由绕坐标轴的三个旋转量 α 、 β 、 γ 和沿坐标轴的三个平移量构成的刚体变换矩阵。

目前所提出的优化上述目标函数的迭代方法, 如 ICP 算法、Menq 算法等大都采用了轮换变量法对迭代过程进行优化处理, 该方法可以在保证定位精度的同时加快迭代过程向全局最优的收敛速度, 特别适用于复杂曲面的定位问题^[7], 因此本文也将采用该方法。具体的优化过程如下, 首先利用提出的初始定位算法得到一个良好的初始变换估计 T_0 , 并将其作为迭代过程的初始值以代替原来算法中对初始变换的猜测。进而计算点 $T_0 p_i$ 在模型表面上的最近点作为初始目标点。然后利用轮换变量法进行

迭代优化。在每一次迭代,都计算目标函数 F_k , 同时检查迭代终止准则

$$1 - \frac{F_{k+1}}{F_k} \leq \varepsilon_{\text{iterative}} \quad (13)$$

式中, $\varepsilon_{\text{iterative}}$ 为给定计算精度。如果终止准则成立,则,结束迭代,得到最优定位变换 T_{op} ; 否则迭代继续进行。经过上述优化处理,就实现了测量数据与模型曲面之间的精确定位。

4 试验结果

为验证本文所提定位方法的有效性,采用具有典型复杂曲面的工件进行了仿真试验。曲面的测量数据如图 3 所示。在测量数据中选取不共线三点 s_1 、 s_2 和 s_3 作为种子点。曲率、夹角以及距离约束误差分别取为 $\varepsilon_k = 0.03$ 、 $\varepsilon_{\text{ang}} = 0.03$ 和 $\varepsilon_{\text{dist}} = 0.02$ 。完成曲率匹配后,三个种子点的对应点的数据统计如表 1 所示。从表 1 中可以看到,对每一种子点而言均有多个对应点,由此可组合得到 $C_{112}^1 C_2^1 C_{10}^1 = 2\ 240$ 个目标三元组,显然其中存在错误的对应联系。进一步利用夹角以及距离三角约束精炼目标三元组,数据统计如表 2 所示。应用夹角约束后对应三元组数降为 13 个,进而再通过距离约束剔出 5 个错误的目标三元组。然后在种子三元组与 8 个目标三元组之间生成旋转平移变换列表 $\{(R_k, t_k): k=1, \dots, 8\}$ 。选取使最小距离目标函数式(6)取得最小值的变换矩阵为初始坐标变换估计,完成测量数据的初始定位,数据统计如表 3 所示。从表 3 中可以看到初始变换估计 T_0 已经十分接近精确定位的坐标变换矩阵,从而为后续迭代算法向全局最优收敛奠定了基础。初始定位算法运行时间为 208 s (CPU 1.8 GHz,

内存 1 G)。

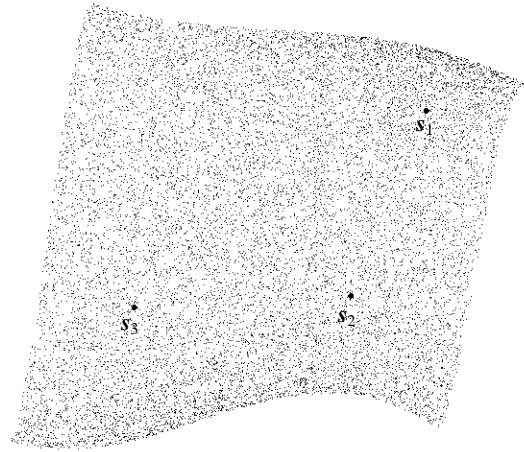


图 3 离散点集与种子点

表 1 曲率匹配的数据统计

种子点	s_1	s_2	s_3
对应点数	112	2	10

表 2 三角约束匹配的数据统计

三角约束	夹角约束	距离约束
目标三元组数	13	8

从散乱点集中提 600 个点作为曲面检测时的测量点,利用初始定位给出的坐标变换 T_0 作为精确定位算法的初始变换估计。计算最近点时,递归四叉树的分解精度 $\varepsilon_{\text{tree}} = 0.000\ 1$,迭代算法的收敛精度 $\varepsilon_{\text{iterative}} = 0.000\ 1$ 。在此精度之下,所提精确定位算法耗时 182 s,经过 43 次迭代收敛于全局最优变换 T_{op} ,测量数据到模型曲面的平均距离误差为 0.007 16 mm。数据统计如表 3 所示,图 4 为测量数据精确定位的示意图。

表 3 测量数据初始定位和精确定位的试验结果

	初始定位	精确定位
旋转矩阵 R	$\begin{bmatrix} 0.662 & 94 & -0.280 & 07 & 0.694 & 32 \\ 0.384 & 41 & 0.923 & 15 & 0.005 & 33 \\ -0.642 & 45 & 0.263 & 37 & 0.719 & 65 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.663 & 41 & -0.279 & 45 & 0.694 & 11 \\ 0.383 & 02 & 0.923 & 72 & 0.005 & 81 \\ -0.642 & 79 & 0.262 & 00 & 0.719 & 85 \end{bmatrix}$
平移矢量 t	(13.193, -14.175 8, -3.917 2)	(13.211 8, -14.114 3, -3.903 1)
平均距离误差 e/mm	0.326 52	0.007 16
执行时间 t/s	208	182
迭代次数		43

5 结论

(1) 基于曲率特征的定位算法可以快速地完成测量数据的初始定位,为后续测量数据精确定位向全局最优收敛提供一个良好的初始变换,从而减小了迭代算法的搜索空间,成功解决了影响迭代定位

算法运行速度以及收敛性的初始变换估计问题。

(2) 基于四叉树递归分解的最近点计算方法,将计算最近点的抽象的代数运算转化成为直观明了的曲面与参数平面的求交问题,有效地克服了传统数值求解方法需要给定初始迭代点的不足,非常适用于求解点到 Bezier 和 B 样条曲面的最近点问题。

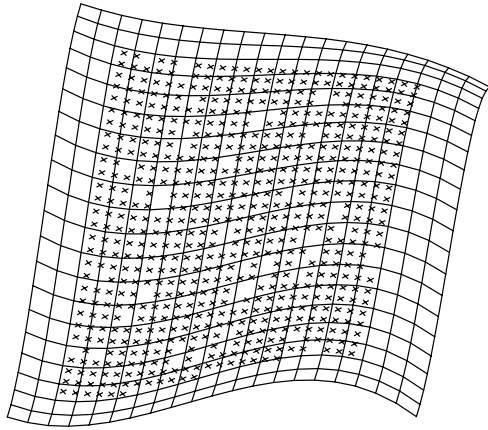


图4 测量点的精确定位

(3) 试验结果证实, 所提初始定位算法和精确定位算法的结合可以快速、准确地实现测量数据与模型曲面之间的精确定位, 从而为复杂曲面的加工精度检测打下了基础。

参 考 文 献

- [1] 孙玉文, 刘健, 刘伟军. 面向快速成形的复杂曲面重建技术研究[J]. 机械工程学报, 2001, 37(9): 62-66.
- [2] 严思杰, 周云飞, 彭芳瑜, 等. 大型复杂曲面加工工件定位问题研究[J]. 中国机械工程, 2003, 14(9): 737-740.
- [3] 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.
- [4] 高国军, 陈康宁, 林志航, 等. 检测自由曲面时精确定位方法的研究[J]. 机械科学与技术, 1997, 16(1): 140-143.
- [5] LI Y D, GU P H. Inspection of free-form shaped parts[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2005, 21: 421-430.
- [6] BESL P J, MCKAY N D. A method for registration of 3D shapes[J]. IEEE Trans. Pattern Analysis Machine Intelligence, 1992, 14(2): 239-256.
- [7] LI Z X, GOU J B, CHU Y X. Geometric algorithms for workpiece localization[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1998, 14(6): 864-878.
- [8] FAN K C, TSAI T H. Optimal shape error analysis of the matching image for a free-form surface[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2001, 17: 215-222.
- [9] ZHU L M, XIONG Z H, XIONG Y L. A distance function based approach for localization and profile error evaluation of complex surface[J]. Transaction of ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2004, 126(3): 542-554.
- [10] KO H K, MAEKAWA T M, PATRIKALAKIS N M. An algorithm for optimal free-form object matching[J]. Computer-Aided Design, 2003, 35(10): 913-923.
- [11] BERCHTOLD J, BOWYER A. Robust arithmetic for multivariate Bernstein-form polynomials[J]. Computer-Aided Design, 2000, 32(11): 681-689.
- [12] 施法中. 计算机辅助几何设计与非均匀有理B样条[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1994.

OPTIMAL LOCALIZATION OF FREE-FORM SHAPED PARTS IN PRECISION INSPECTION

XU Jinting^{1,2} SUN Yuwen³ LIU Weijun¹

(1. Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Science, Shenyang 110016;
2. Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049;
3. School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024)

Abstract: Optimal localization of free-form shaped parts is a key issue in precision inspection. Aiming at the problems on estimate of the initial transformation and the calculation of closest points, an effective and exact localization method is presented. First, this method establishes the corresponding relationships between two free-form surfaces with constraints of angle and distance by means of the surface features of the Gaussian curvature and the mean curvature. Then the rough localization is realized. Using the robust arithmetic for multivariate Bernstein-form polynomials, a novel algorithm to calculate closest point is proposed. An improved iterative algorithm is used in the exact adjustment of localization to ensure the global optimization. Experiment results demonstrate the feasibility of the proposed method.

Key words: Precision inspection Rough localization

Closest points Exact localization

作者简介: 徐金亭, 男, 1980年出生, 博士研究生。主要研究方向为数字化设计和制造、计算机视觉, 发表论文2篇。

E-mail: xujt@sia.cn