

自由曲面配准技术*

Matching Technology of Free-Form Surface

沈阳航空工业学院航空宇航工程学院 曲学军 刘 春

[摘要] 讨论了自由曲面形状误差检测方法,研究了自由曲面配准技术。采用简单的方法定义测量数据与自由曲面的中心坐标系,并使用主轴法进行预配准,为后续精确配准提供了可靠的初值,避免常规方法易陷入局部最优解的问题。提出了曲面精确配准的迭代优化方法,该方法通过修改目标函数以及适当选取偏差阈值,有效降低局部大误差点对配准结果产生的影响。实验结果表明文中算法的有效性。

关键词: 自由曲面 数字化检测 曲面配准

[ABSTRACT] Error testing of free-form surface is discussed, and surface matching is studied in detail. First, center coordinate system of data points and free-form surface are defined by simplified method, and the pre-matching by using principal axes method is proposed, which can provide reliable initial matching result to avoid converging to local minimum of general methods. Then, accurate surface matching method based on iterative optimizing is presented, which can reduce the influence of local high distort points efficiently by modifying target function and selecting deviation bound. The results show the efficiency of this method.

Keywords: Free-form surface Digital testing Surface matching

自由曲面的尺寸形状误差用轮廓度表示^[1]。在工程实践中,根据测量方式的不同,对曲面轮廓度的要求表现为两种形式^[2]:一种是有基准要求的,称为“独立轮廓度公差”;另一种是没有基准要求的,称为“关联轮廓度公差”。对于有基准要求的轮廓度,因测量坐标系与模型坐标系的对应关系已知,首先将测量坐标系和模型坐标系变换成一致,再求出测量数据到曲面模型的距离即可。而对于实际应用中经常出现的无基准要求的轮廓度,由于没有统一的位置基准,其误差评价采用如下方法:(1)采用合理的测量规划对产品表面进行数据采集,建立数据模型;(2)消除测量坐标

系与CAD模型坐标系之间的差异,并通过计算测量点到CAD模型之间的距离来进行精度评价。

上述方法的关键与难点在于如何消除测量坐标系与CAD模型坐标系之间的差异,即自由曲面配准。本文以自由曲面为研究对象对自由曲面配准技术进行了研究,提出了改进方法并得出相应的结论。

1 自由曲面配准方案

对于自由曲线、曲面的配准,最近点迭代法(ICP)^[2]最为常用。该方法重复进行“确定对应关系-计算刚体坐标变换”的过程,直到满足某个收敛准则为止。ICP算法存在以下不足^[3]:(1)ICP法只保证收敛于均方距离尺度意义下的局部最小值,只有提供足够靠近全局极小值的刚体变换初值,才能获得曲面配准的全局最优解;(2)当制造件表面存在局部缺陷或测量数据的局部测量误差较大时,由于该方法的目标函数中包含的是所有数据点误差的平方项,造成局部大误差所占的比重过大,使得配准后放大了大部分区域的误差,压缩了局部缺陷处的误差,从而降低了配准精度,如图1所示。

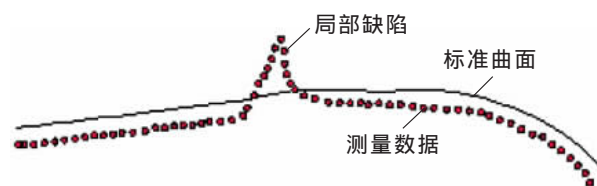


图1 局部大误差对配准结果产生的影响

Fig.1 Influence of local big error on matching result

主轴法作为归一化和识别三维物体的实用方法已被广泛采用^[4-5],其基本思想是:一旦计算得到了匹配对象的特征(中心、主轴),便把2个匹配对象的质心都移到坐标系的原点,旋转其中一个匹配对象,使其主轴与另外一个重合,然后就能容易地判断出两者的匹配程度了。用主轴法匹配物体虽然稳定、可靠、算法简单,但自由曲面的主轴难以精确求解,因此不能直接用于精确配准。

* 航空科学基金项目(2007ZD54004)。

为克服上述两种算法的不足,提出以下自由曲面配准方案:

(1)根据空间物体主轴的力学概念,在合理的简化基础上计算空间点集与自由曲面的主轴与中心坐标系,并使用主轴法进行归一化处理,以求解接近全局最优的初始配准结果;

(2)利用初始配准结果,使用 ICP 法进行精确配准,从而避免了 ICP 法易陷入局部最优值的问题;

(3)如果制造件表面存在局部缺陷或数据的局部测量误差较大,则构造新的目标函数,并使用非线性最小二乘技术进行精确配准,以减小局部大误差对配准结果的影响。

2 自由曲面预配准

由于根据主轴的数学定义精确计算自由曲面的主轴十分困难,故对算法进行了适当的简化以给出接近全局最优的初始配准结果。

2.1 自由曲面的中心矩

从 B 样条曲面上提取采样点,并使用采样点的各阶矩与中心矩作为曲面的各阶矩与中心矩的近似。设空间点集 \mathbf{P} 由 $m+1$ 个数据点 $(x_i, y_i, z_i)^T$ 组成,取各数据点的质量相同,则 \mathbf{P} 的 $p+q+r$ 阶中心矩定义为:

$$\mu_{ijk}(\mathbf{P}) = \sum_{i=0}^m (x_i - x_c)^p \cdot (y_i - y_c)^q \cdot (z_i - z_c)^r, \quad (1)$$

式中, $p, q, r=0, 1, \dots, (x_c, y_c, z_c)^T$ 为该点集的质心。

表示曲面的点集的提取方法如下:(1)计算 B 样条曲面的最小包围盒;(2)交互确定小正方体栅格的尺寸 d ,利用 d 将该包围盒划分成 $m \times n \times l$ 个小正方体栅格;(3)判断每个栅格与曲面是否有交,如有则将该栅格中心点在曲面上的投影点加入到点集中。

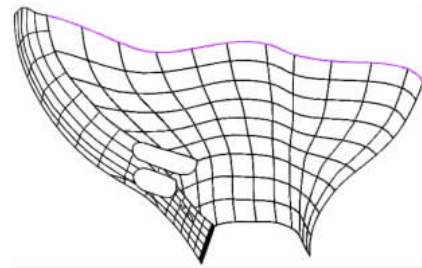
使用上述方法确定的点集在曲面上近似于均匀分布,因此点集的各阶矩中心矩可较为精确地表示曲面的各阶中心矩。对于组合曲面,可以将其包围盒取为各组成曲面包围盒的并集。图 2 显示了利用上述方法在蒙皮类零件的表面上提取的采样点集。

2.2 空间点集与自由曲面的主轴

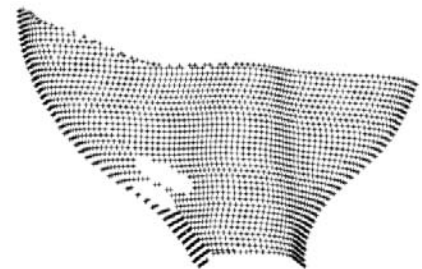
空间物体的惯性矩阵定义为

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{yx} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -I_{zx} & -I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

设 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 是惯性矩阵的 3 个实特征值,为不失一般性,设 $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$, 对应的特征向量分别为 $\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2$



(a)蒙皮类零件 CAD 模型



(b)提取到的采样数据

图 2 使用采样点集表示自由曲面

Fig.2 Reflection of free-form surfaces using sample points

和 \mathbf{V}_3 , 则将这 3 个特征向量称为三维物体的一组主轴。

数据点集的主轴计算方法是:首先计算点集的各阶中心矩,然后代入式(2)求解惯性矩阵 \mathbf{I} ,再求解 \mathbf{I} 的 3 个特征向量并按降序排列,得到的 3 个向量 $\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2$ 和 \mathbf{V}_3 就是点集的 3 个主轴。曲面主轴计算方法是:按前述方法提取近似表示该曲面的数据点集,计算点集的主轴并将其作为曲面的主轴。

2.3 主轴的唯一性判别

坐标原点在物体的质心 $C=(x_c, y_c, z_c)^T$ 且坐标轴由物体的主轴 $\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2$ 和 \mathbf{V}_3 定义的坐标系称为物体中心坐标系。物体的中心坐标系不随物体位置的变化而变化,故可使用此坐标系归一化物体的取向,如图 3 所示。由于物体的主轴只是特征矩阵的 3 个特征向

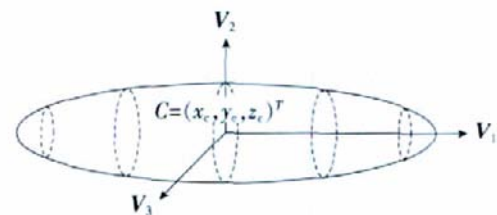


图 3 三维物体对象中心坐标系

Fig.3 Object center coordinate system of three dimension body

量,数学上计算出的主轴既没有规定顺序,也没有规定方向,因此主轴的选择有 $P_3^3 \cdot C_2^1 \cdot C_2^1 \cdot C_2^1 = 48$ 种之多,为得到正确的归一化结果,还需解决主轴的多义性问题^[6]。利用2.2节中特征值排序方法来确定主轴的顺序,只能解决主轴的顺序多义性问题。由特征值的求解过程可知,对象中心坐标系的坐标轴的选取有以下8种选择: $\{\pm V_1, \pm V_2, \pm V_3\}$,这就是主轴的取向多义性问题。

一种解决方法是采用特征点^[7](数据点集中距质心最远的点)来判断主轴的取向,但当不存在这样的特征点时,以 V_1 为例,当沿 V_1 与 $-V_1$ 方向距质心 $(x_c, y_c, z_c)^T$ 最远的两点距离近似相等时,使用该方法并不可靠。为此作者使用如下算法归一化主轴的取向:

(1)首先规定对象中心坐标系必须满足右手规则,即: $V_3 = V_1 \times V_2$;

(2)确定通过点集的质心,法矢取为 V_1 的平面;

(3)沿 V_1 和 $-V_1$ 方向计算数据点集中各点距步骤(2)确定的平面的距离之和(非距离平方之和),取大者对应的方向矢量作为 V_1 ;

(4)对 V_2 执行与步骤(2)与(3)相似的操作,以确定 V_2 。

使用上述算法计算得到的测量数据与曲面的主轴如图4所示。

2.4 主轴法预配准步骤

使用主轴法配准数据点集与空间自由曲面的算法如下:

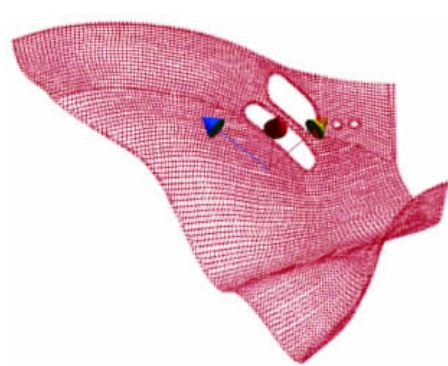
(1)根据2.1节中的方法在曲面上提取采样点集,作为曲面的近似表示;

(2)根据2.3节中的方法计算两个点集的质心与主轴并进行归一化处理,从而建立测量数据与曲面的对象中心坐标系;

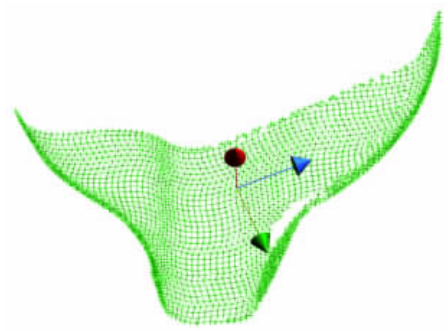
(3)将测量数据变换到曲面的中心坐标系中。

由于曲面的中心坐标系是近似的,采用上述算法所以得到的配准结果也是近似的,但却可以为后续的精配准提供可靠的初始结果。

组合曲面与测量数据的预配准结果如图5所示:(a)为根据前述方法计算得到的测量数据与曲面采样数据的主轴;(b)为根据本节中的方法进行预配准后的测量数据与曲面以及它们的主轴,其中原始曲面以线框形式显示。从图中可以看出,虽然两组数据的主轴已经重合,但曲面与测量数据之间仍有较大的配准



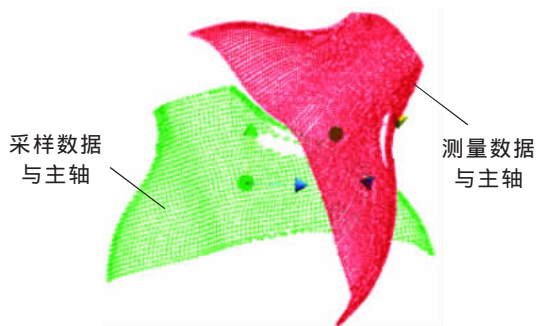
(a) 测量数据的主轴



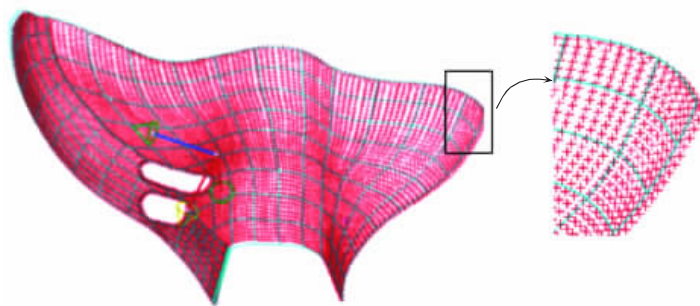
(b) 曲面采样点集的主轴

图4 测量数据与曲面的主轴

Fig.4 Principal axes of measuring data and surfaces



(a) 测量数据、采样数据及它们的主轴



(b) 预配准后的曲面与测量数据及它们的主轴

图5 自由曲面的预配准示例

Fig.5 Example of free-form surface pre-matching

误差存在(见图 5(b)中右侧的放大图),其原因在于:
(1)根据 2.3 节定义的曲面主轴是近似的;(2)测量数据的分布不均与测量误差的存在导致测量数据不能精确表示曲面的几何性质。经主轴法预配准后测量数据的平均配准误差(测量数据到曲面的距离均值)为 0.725mm,最大配准误差为 2.193mm。

3 自由曲面的精确配准

目前广泛使用的曲面精确配准方法是 ICP 算法,但当测量数据中包含大的误差点或待比较曲面上存在大的变形区域时,使用该法进行配准效果并不好。为达到最佳的配准结果,作者采用基于优化技术的曲面迭代配准技术来减弱局部大缺陷的影响,具体措施如下:(1)构造新的目标函数,以减弱大误差点对总体匹配结果的影响;(2)在每次迭代配准后,对数据偏差的分布进行统计分析,根据预定准则设定某一偏差阈值,认为误差超出该阈值的点为误差点并将该点滤除,这样在每次匹配优化步骤中将不包含这样的点。

3.1 目标函数的构造

在 ICP 算法的目标函数中,各数据点对目标函数的影响与其至曲面距离的平方成正比,因此,偏差大的数据点对目标函数的影响很大,是造成配准误差的主要原因。为此,作者将目标函数修改为:

$$f^k(\mathbf{R}, \mathbf{T}) = \sum_{i=0}^N \|p_i - q_i^k\|^r = \sum_{i=0}^N \|\mathbf{R}p_i + \mathbf{T} - q_i^k\|^r, \quad (3)$$

式中, k 为配准过程的迭代次数, \mathbf{T} 表示三维平移向量, \mathbf{R} 为 3×3 阶旋转变换矩阵, p_i 为 $N+1$ 个测量点, q_i 为 p_i 的对应点(最近点), r 为一个指定的实数。一个数据点对该目标函数的影响程度取决于其与曲面的距离的 r 次方。如果 r 小于 2,则大变形点对目标函数的影响就比由最小二乘法构造的目标函数要小,故适当减少 r 的数值会降低误差点产生的配准误差,其代价是会导致算法的收敛速度降低。

3.2 偏差阈值的计算

偏差阈值用于确定 P 中的大误差点,对于误差超出该阈值的数据点将作为大误差点滤除,不参加下次配准计算。因此该值的设定应取决于每次配准后测量点的误差分布,并使 P 中绝大多数点的误差应落在其范围内。第 k 次配准迭代中偏差阈值 ε_F 设置方法是:

首先计算 P 的平均配准误差 $\bar{\Delta} = \frac{1}{m+1} \sum_{i=0}^m \|p_i - q_i^k\|$, 然后根据预置的因子 σ 确定偏差阈值 ε_F :

$$\varepsilon_F = \sigma \cdot \bar{\Delta}. \quad (4)$$

3.3 算法概述

主轴法与迭代优化算法相结合实现自由曲面精确配准的步骤如下:

(1)首先应用主轴法进行初始配准,将测量数据 P 变换到近似全局最优位置,以保证优化算法具有理想的初值,置初始迭代次数 $k=0$;

(2)计算点集 P 在曲面 S 上的对应点集 Q^k ;

(3)计算 P 中各点相对 S 的偏差值 $d_i, i=0, 1, \dots, m$, 并按式 4 计算偏差阈值 ε_F 。将偏差值大于此阈值的数据点置为大误差点;

(4)求解以式(3)为目标函数的优化问题,其中参与计算的点不包含大误差点,得到刚体变换矩阵 \mathbf{R}^k 与平移向量 \mathbf{T}^k ;

(5)变换 P , 即令 $p_i = \mathbf{R}^k p_i + \mathbf{T}^k, i=0, 1, \dots, m$;

(6)令 $D^{k+1} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m d_i$, 用于评估配准精度;

(7)置 $k=k+1$, 执行步骤 2, 直到前后两次配准过程的配准精度不再改善为止, 即 $|D^{k+1} - D^k| < \varepsilon_{ICP}$ 。

使用该算法进行曲面配准的结果如图 6 所示,算法中幂次 r 取为 0.8, 偏差因子 σ 取为 5。从位于该图右侧的放大图中可以看出,与 ICP 法相比,配准结果已得到明显的改善。经该优化算法精确配准后的平均配准误差为 0.022 8mm, 最大配准误差为 1.726mm。与 ICP 法相比,平均配准误差显著降低,而最大配准误差则有所增大,因此经本方法配准后的大多数数据点将更加靠近曲面,而少量的大误差点将远离曲面。

采用上述算法进行曲面匹配,实质上是降低了大误差点对目标函数的影响,但不能消除这种影响。另外在每次迭代中都要求解非线性优化问题,且由于目标函数对数据点偏差不敏感,因此与 ICP 法相比算法收敛速度有所降低。目标函数中幂次 r 的取值是影响算法效率的关键因素,在保证配准精度的情况下其取

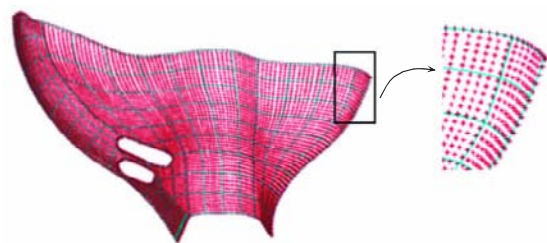


图 6 使用优化算法配准后的曲面与测量数据
Fig.6 Surfaces and measuring data matched with optimized algorithm

