

考虑半径补偿的三坐标测量数据精确配准方法*

Accurate Registration Method Considering Radius Compensation for CMM Data

西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室 索瑞 卜昆 程云勇

[摘要] 叶片模型的配准定位是叶片形状检测分析的一个核心环节,针对涡轮叶片的三坐标测量数据在基于迭代最近点的配准定位中与 CAD 模型表面点的配准关系不对应的问题,提出一种考虑半径补偿的精确配准方法。在求取配准点集的过程当中考虑到半径补偿,使得测量点集与待配准点集之间的关系相对应,进而获取更高的配准精度。进行基于仿真数据的配准试验及对比,给出了基于实测数据的应用与分析,验证了该方法的精确性与实用性。结果表明,考虑半径补偿的三坐标测量数据精确配准方法是可行的。

关键词: 半径补偿 三坐标测量数据 精确配准

[ABSTRACT] Model registration is a key technique for turbine blade shape inspection. In order to solve the problem that registration relation based on the iterative closest point method between CMM data of turbine blade and points on the CAD model surface doesn't correspond, one kind of model accurate registration method considering radius compensation is brought forward. It makes measured points and point set prepared to align correspond to each other by taking radius compensation into account when calculating the alignment point set, so as to obtain higher accuracy during the registration. Experiments based on simulation data are performed and application example is shown to verify the precision and practicability of this method. The feasibility of the discussed method is verified by the experimental results.

Keywords: Radius compensation CMM data Accurate registration

涡轮叶片是航空发动机的关键零件之一,要求具有很高的几何尺寸精度,需要进行严格的几何形状检测与分析。叶片模型的配准定位是叶片形状检测分析的一个核心环节。只有保证模型配准定位的可靠性,才能保证叶片成形精度分析结果的可靠性。在零件的几何检测中,

常用的配准定位方法可分为基于标记、特征和表面点集三类方法^[1]。最近点迭代算法^[2](ICP、SVD-ICP)属于第三类方法,在含有自由曲面的零件中广泛应用。本课题讨论的叶片配准技术即是以 SVD-ICP 算法为基础。

传统的最近点迭代方法对三坐标测量数据进行配准定位计算时,测量数据直接在 CAD 模型表面求取最近点集,测量点集作为初始点集与求得的最近点集构成配准的对应点集进行迭代变换。由于三坐标测量机测头的影响,当它对涡轮叶片进行测量时,实际得到的数据并不是测头所触及表面点的坐标,而是叶片表面向外偏置一个测头半径的曲面上点的坐标。因此,配准定位计算中测量模型与 CAD 模型表面点的对应关系实际上是不匹配的。在这种情况下,配准计算所得到的结果必然不准确。综上所述,为了解决传统方法配准点集不对应,追求配准结果更加精确同时,本课题针对涡轮叶片的三坐标测量数据,提出考虑半径补偿的精确配准方法。

1 半径补偿

测量模型与 CAD 模型使用 SVD-ICP 算法进行配准计算时,测量点集要在 CAD 模型上求取最近点集。由于三坐标测量设备测头的固有属性,测量点集与测头触及表面向外偏置一个测头半径 r 的曲面上的点构成配准对应关系,因此考虑在测量点集求取对应的配准点集时,对每个测量点 P_i 求取的最近点 Q_i 沿法矢方向向外进行半径补偿,如图 1 所示。补偿后的点 Q'_i 作为相应的配准点:

$$Q'_i = Q_i + r \cdot \vec{n} \quad (1)$$

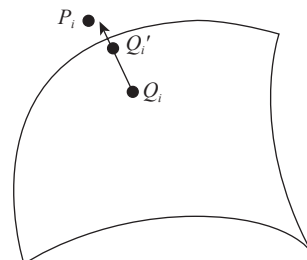


图1 最近点的半径补偿

Fig.1 Radius compensation based on iterative closest point

* 航空科学基金项目(2008ZE53042)资助。

使用 UG/Open API 函数可以方便地求取 CAD 模型

曲面上点的法矢,主要过程可分为以下3步:

(1) 通过遍历并设定相应条件获取相关 face 的标识;

(2) 输入 face 标识,用函数 UF_MODL_ask_face_parm 获取 CAD 模型曲面上点的参数 u, v ;

(3) 输入曲面点的参数 u, v ,用函数 UF_MODL_ask_face_props 获取曲面上点的法矢。

需要说明的是通过 UG/Open API 计算得到的曲面点法矢的方向均是由 CAD 模型内指向外,因此不需要对法矢的方向进行判断和调整。

2 考虑半径补偿的精确配准方法

2.1 算法与原理概述

配准问题^[3]本质上是多参数优化问题,其实质就是要找到对应性关系,通过找到数据之间的对应关系,从而得到两个模型之间的变换关系。SVD-ICP 算法^[4-5]就是将奇异值分解和最近点迭代算法相结合来求解配准目标函数。该算法的实质就是找到一个旋转矩阵 R 和一个平移矢量 T ,使目标函数式(2)值最小:

$$E = \sum_{i=1}^N \|Q_i - (RP_i + T)\|^2, \quad (2)$$

其中, P_i 为初始点集, Q_i 为 P_i 的最邻近点集。计算 2 个点集的质心和每一点相对于质心的位移:

$$P' = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i, Q' = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Q_i; \quad (3)$$

$$P'_i = P_i - P', Q'_i = Q_i - Q'.$$

$$\text{令: } H = \sum_{i=1}^N Q'_i P_i'^T, \quad (4)$$

对矩阵 H 进行奇异值分解,可得:

$$H = U\Lambda V^T. \quad (5)$$

按式(6)可得旋转矩阵 R 与平移向量 T :

$$R = VU^T, T = Q' - RP'. \quad (6)$$

2.2 考虑半径补偿的精确配准

对于考虑半径补偿的三坐标测量数据配准,基于 SVD-ICP 算法的目标函数可改写为:

$$E' = \sum_{i=1}^N \|(Q_i + n_i \cdot r) - (RP_i + T)\|^2. \quad (7)$$

基于 SVD-ICP 算法的精确配准过程可描述如下:

(1) 对每个测量点 P_i ,在 CAD 模型上求最近点 Q_i ;

(2) 计算每个最近点 Q_i 的法矢,并在法矢方向上对 Q_i 向外偏置一个测头半径得到 Q'_i ;

(3) 求取从点集 $\{P_i\}$ 变换到 $\{Q'_i\}$ 的旋转矩阵 R 和平移矢量 T ,并通过计算得到旋转矩阵 R 和平移矢量 T 对点集 $\{P_i\}$ 进行变换;

(4) 重复第(1)步,直至满足迭代终止条件式(8),

$$\|d_k - d_{k+1}\| < \varepsilon$$

$$d_k = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \|Q'_{jk} - P'_{jk}\|^2, \quad (8)$$

其中 d_k 是均方误差, k 是迭代次数。

如果需要计算经过 k 次迭代后的总旋转矩阵 R'_{k+1} 与平移矢量 T'_{k+1} ,记首次配准变换得到的旋转矩阵与平移矢量为 R_i 和 T_i ,那么经过 k 次迭代所得的总旋转矩阵与总平移矢量由式(9)求得:

$$R'_{k+1} = R_{k+1} R'_k, T'_{k+1} = R_{k+1} T'_k + T_{k+1}, k=1, 2, 3, \dots, n. \quad (9)$$

3 结果与分析

本课题选用复杂曲面的涡轮叶片模型进行仿真试验与应用实例分析。

3.1 仿真试验

在叶片的 CAD 模型的叶身与缘板上均匀选取较高密度的 4000 个候选点,将每个点在各自法矢方向向外偏置一个测头半径并绕 Z 轴顺时针旋转 5° 后的点集作为仿真测量数据,如图 2 所示。仿真参数的设置见表 1。

对叶片的仿真测量数据与 CAD 模型使用考虑半径补偿的精确配准方法进行配准定位,并与未考虑半径补偿的传统 SVD-ICP 配准方法进行比较可以看出,传统 SVD-ICP 配准后缘板附近的点紧贴缘板,而考虑半径补偿的精确配准后缘板附近的点均与缘板保持约 1 个测

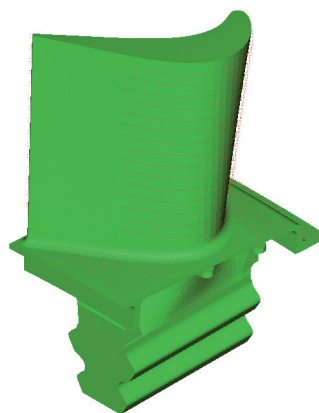


图2 仿真数据

Fig.2 Simulation data

表1 配准仿真试验参数设置

平移距离	旋转角度
$(x, y, z)/mm$	$(\alpha, \beta, \gamma)/(^{\circ})$
(0, 0, 0)	(0, 0, 5)

头半径 0.5mm 的距离,与实测缘板上点的方位一致。

图 3、4 给出的是 2 种方法迭代的过程图,其中横坐标表示迭代次数,纵坐标分别表示旋转角度与平移

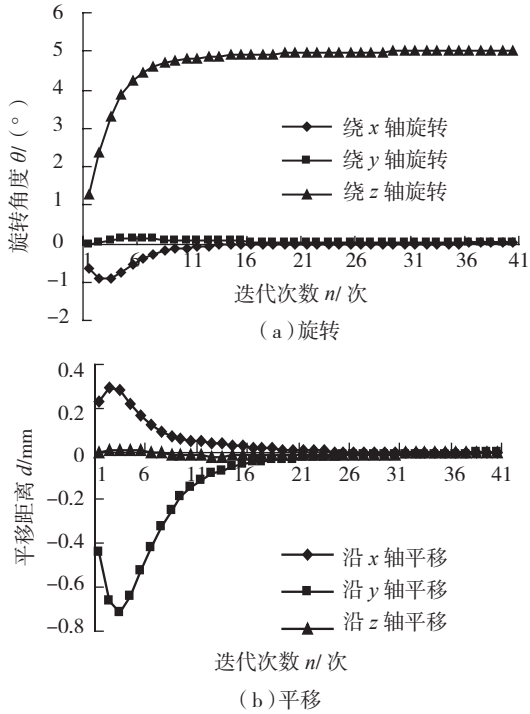


图3 考虑半径补偿的精确配准过程
Fig.3 Process of accurate registration method considering radius compensation

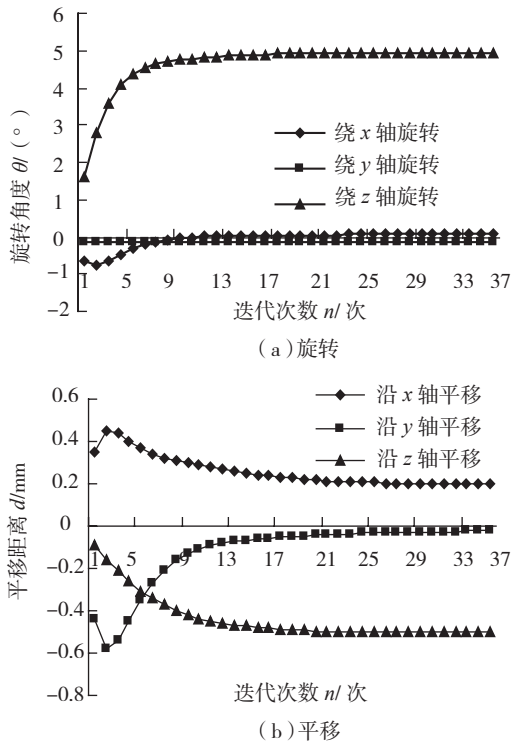


图4 传统SVD-ICP配准过程
Fig.4 Process of traditional SVD-ICP method

距离。从图中可以看出 2 种方法除了沿 z 轴平移的过程有较大差异外,其他过程都比较相近并趋近于理论

表2 2种配准方法配准结果对比

方法	平移距离 $(x, y, z)/\text{mm}$	旋转角度 $(\alpha, \beta, \gamma)/(^{\circ})$
	$(0, 0, 0)$	$(0, 0, 0.05)$
考虑半径补偿精确配准	$(0.0012, -0.0097, -0.0023)$	$(-0.0087, 0.0377, 5.0010)$
传统 SVD-ICP 配准	$(0.1945, -0.0243, -0.5061)$	$(0.0723, -0.1199, -4.9486)$

值;传统的 SVD-ICP 配准方法沿 z 轴平移逐渐趋近于 -0.5mm,而考虑半径补偿的配准方法逐渐趋于零,与理论值一致,从而验证了考虑半径补偿配准方法的合理性与可靠性。从表 2 可以看出,平移精度前者可以达到 0.001,而后者只有 0.1;旋转精度前者可达到 0.01,后者只有 0.1。由此可见,考虑半径补偿的配准方法相比传统 SVD-ICP 配准方法在精度上有了很大的提高。

有了精确配准的方法就可以准确地计算铸件相对于 CAD 模型的三维偏差。将涡轮叶片三坐标测量的真实数据与 CAD 模型进行精确配准后计算三维偏差。根据计算的结果可以清楚地得知叶片的哪个部位相对 CAD 模型偏移较大,进而采取相应的措施对叶片精确控形。

4 结论

针对三坐标测量数据与 CAD 模型表面点配准关系不对应的问题,本课题提出了考虑半径补偿的精确配准方法。通过基于仿真数据与 CAD 模型的配准试验,验证了该方法的合理性与精确性;给出了具体的应用及分析,证明了本课题所提出的考虑半径补偿的三坐标测量数据精确配准方法具有很高的可靠性与很强的实用性,为高精度零件的检测与分析提供了有力的保障。

参考文献

- [1] 刘晶. 叶片数字化检测中的模型配准技术及应用研究 [D]. 西安:西北工业大学,2006.
- [2] Besl P J, Makay N D. A method of registration of 3D shape. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2):239-255.
- [3] 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. 中国机械工程, 2003, 14(9): 737-740.
- [4] Michel A, Frank P. An algorithmic overview of surface registration techniques for medical imaging. Medical Image Analysis, 2000, 4(3):201-217.
- [5] 刘晶, 张定华, 毛海鹏, 等. 基于 SVD-ICP 算法配准 CT 切片重构模型与 CAD 模型. 计算机工程与应用, 2004, 2:195-196.

(责编 三丰)