

三维环境下的自由曲面误差评定系统研究*

刘 峥, 孙 波

(西安工业大学机电工程学院, 西安 710032)

摘要: 为了提升误差评定系统的效果, 针对三坐标测量机的测量方式, 基于 OpenGL 开发了三维环境下的自由曲面误差评定系统。根据三坐标测量机的特点进行了自由曲面测量点的三维球测头半径补偿, 采用双三次 B 样条进行曲面的反求。针对点到自由曲面距离的计算问题, 依据点与面片的匹配关系在叠代判断中加入参数越界的判断条件以提高效率。评定结果采用报表与三维显示相配合的方式, 使结果更直观、方便。采用三维图形开发技术构建三维环境的误差评定系统, 提升了逆向工程配套软件系统的灵活性与直观性, 满足了用户需求。

关键词: 误差评定; 三维模型; 三坐标测量机; 自由曲面; OpenGL

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)05-1818-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.05.057

Research on 3D error evaluating system for freeform surface

LIU Zheng, SUN Bo

(School of Mechatronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China)

Abstract: Based on OpenGL technology, this paper developed the 3D freeform surface error evaluating system for coordinate measuring machine to improve the efficiency. According to the characteristics of coordinate measuring machine, it performed the compensation procedure for the radius of probe ball. In addition, it reconstructed the corresponding B-spline surfaces with the point group. On the basis of matching relationships between the points and surface patches, it improved the calculating efficiency of point-to-surface distance by the judgment of parameters out of range. It is more intuitive and convenient for the results to combine the data report and 3D model. Constructing the 3D error evaluating environment improves the flexibility of the reverse engineering system and makes it more visually oriented to meet the requirements of users.

Key words: error evaluation; 3D model; coordinate measuring machine; freeform surface; OpenGL

0 引言

逆向工程首先要实现测量曲面的数字化, 利用一定的测量设备和方法获取待测曲面的表面点数据, 对原型的测量数据进行误差分析与处理后才能导入 CAD 系统中完成模型重构、优化设计。三坐标测量机(CMM)是应用最为广泛的接触式测量设备, 是一种精度高、重复性好的可靠的三维数字化手段。它可以在一次装夹的情况下完成曲面几何元素的测量工作, 并借助配套软件完成对所测元素尺寸的计算与误差分析^[1]。三坐标测量机利用测头采集信号, 测针沿曲面表面逐点运动, 通过传感器传到与之相连的计算机记录空间三维点的坐标, 再通过一系列运算与分析求得所需结果^[2]。坐标测量机适用于复杂曲面的反求和质量检测, 成为现代化产品设计与检验的重要手段。同时, 该领域的进一步研究也符合计算机集成制造技术对数控测量方式智能化、集成化的要求, 具有重要的理论意义和广阔的应用前景。

逆向工程的一个关键点就是合理地处理未知模型的“点云”数据, 以便用于曲面模型的重构, 进而导入商用 CAD 系统来完成曲面模型的调控, 并生成 NC 加工代码。在这些数据处理环节中, 曲面的轮廓度误差评定是非常重要的一个方面, 也是研究的热点和难点。如果坐标系不统一会造成系统误差, 这

种情况下可以采用自由曲面匹配的方法先消除系统误差^[3]。轮廓度误差评定涉及多个环节, 目前在求点面距离的算法^[4]、曲面匹配^[5]以及评测方法的优化^[6,7]方面都已有了一些研究。很多情况下曲面的误差评定主要依靠设备配套商用辅助系统来完成, 而这种配套商用软件的算法和功能未必满足用户的特定需求。因此, 如何根据需要自主开发误差评定以及数据处理系统具有重要意义。尤其对于自由曲面而言, 如何使三维环境与测量数据处理有效融合, 以使误差评定过程和结果更加直观, 仍有待进一步研究的必要。

1 系统框架

曲面误差评定系统将曲面的拟合、数据点法矢的计算、轮廓度误差等信息通过构造三维环境加以显示, 将数据与三维模型相结合, 使评价过程与结果更加直观。系统(图1)主要由六个模块构成, 分别是应用程序框架、误差评定模块、曲线、面形状调控、文件管理模块、图形显示模块和数据库模块。

应用程序框架处理文档和视图的关系以及系统文件与内部数据结构的转换。系统采用了 MFC 6.0 的多文档、多视图机制, 可从不同的角度观察同一个模型的信息。视图是显示模块显示三维模型的窗口, 其三维环境基于 OpenGL 开发。各功能的协调和调用都是由应用程序框架控制的, 并且提供导航面

收稿日期: 2011-10-21; **修回日期:** 2011-11-27 **基金项目:** 陕西省科学技术研究发展计划资助项目(2011K07-11); 陕西省教育厅科研计划资助项目(11JK0864); 西安工业大学校长科研基金资助项目(XAGDXJJ1007)

作者简介: 刘峥(1977-), 男, 陕西西安人, 博士, 主要研究方向为机械 CAD/CAM、微器件 CAD (z_liumail@sohu.com); 孙波(1963-), 女, 硕士, 教授, 主要研究方向为机械 CAPP。

板为用户设计重要步骤提供导航。

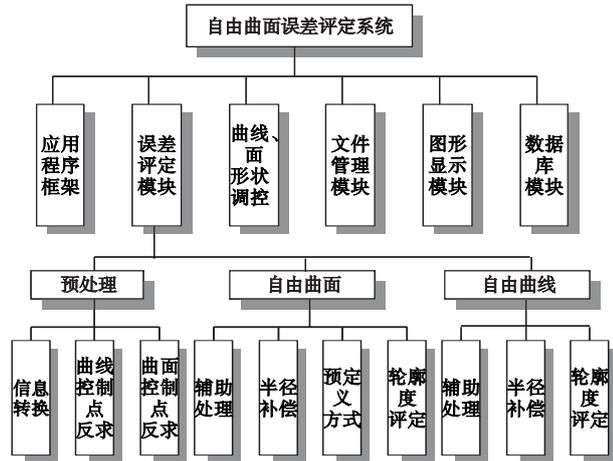


图1 系统框架

误差评定模块包含预处理和自由曲面两部分。预处理部分对读入系统的点阵信息进行处理。在该步里信息由文件中的数据类型转换为对象的内部表示类型,并且完成曲线、曲面的控制点反求。自由曲面模块由辅助处理、半径补偿、预定义方式和轮廓度评定几部分组成。辅助处理主要做各类矩阵的赋值,优化问题的过程编制,各点处切矢、法矢计算等。

曲线、面的调控模块提供对自由曲线、自由曲面的形状调控功能,是根据用户对控制点的调整来完成的。文件管理模块输入部分处理坐标文本文件并完成行列划分,输出部分包括自定义文件和 CSV 格式报表文件,可以用 Microsoft Excel 编辑。误差统计报表采用 Seagate Crystal Reports 制作。为了与商用 CAD 系统进行信息交换,本系统提供 STEP 格式文件交换接口。

2 主要流程

面轮廓度公差带是包络一系列直径为公差值 t 的球的两包络面间的区域,诸球的球心应位于理想轮廓面上。被测要素为一曲面,公差带形状为两等距曲面。此两等距曲面是由一系列直径为公差带值、球心位于理想曲面上的若干球形成的两包络面,公差值为两等距曲面间的距离。如果理论曲面表达式已知,则情况比较简单;如果理论曲面的表达式未知,仅知道曲面上的一系列离散点,且这些理论与测量点不是一一对应的,则情况比较复杂。按轮廓度方式进行误差评定的主要流程如图 2 所示。

3 测头补偿

接触式三坐标测量机的测头为球形,实际测得的数据是测头球心的坐标,而被测点应为测头与被测表面的接触点,所以应将测头球心的轨迹转换为接触点的轨迹。当测头在被测表面移动时,测头球心和接触点的连线(公法线)始终垂直于接触点表面,且长度为测头半径 r ,所以形成的测头中心轨迹曲面是实际曲面的等距曲面。坐标测量机测得的测头球心离散点坐标数据作为型值点,经均匀双三次 B 样条拟合成曲面。

对于均匀双三次 B 样条曲面,表达式为

$$P(u, v) = UMQM^T V^T \quad (1)$$

令偏导数为零可求得切向矢量,进而可以得到在型值点 $P_{(i,j)}$ 处的单位法向矢量 $N_{(i,j)}$ 。

$$N_{(i,j)} = \frac{P_{(i,j)}^u \times P_{(i,j)}^v}{|P_{(i,j)}^u \times P_{(i,j)}^v|} \quad (2)$$

该矢量即为该点的测头半径补偿方向。设 P 为测头与测

量表面的实际接触点, P^* 为测头中心点(待补偿量),有

$$P_{(i,j)} = P_{(i,j)}^* \pm rN_{(i,j)} \quad (3)$$

其中: r 为测头半径,“ \pm ”号由补偿方向确定。曲面和曲线在补偿方向上不同,曲线进行测头半径补偿时涉及二阶导数,因此存在二阶导数变号的问题;曲面进行测头半径补偿时仅涉及一阶偏导数,也就是说方向可能都正确也可能都相反,因为按右手定则确定,故与 u, v 方向的定义有关。当然也可用自由曲线关于补偿方向的判断方法,但繁琐。系统直接提供各点单位法向矢量的显示功能,如果补偿方向与所求法向相同则取“+”号,反之则取“-”号。

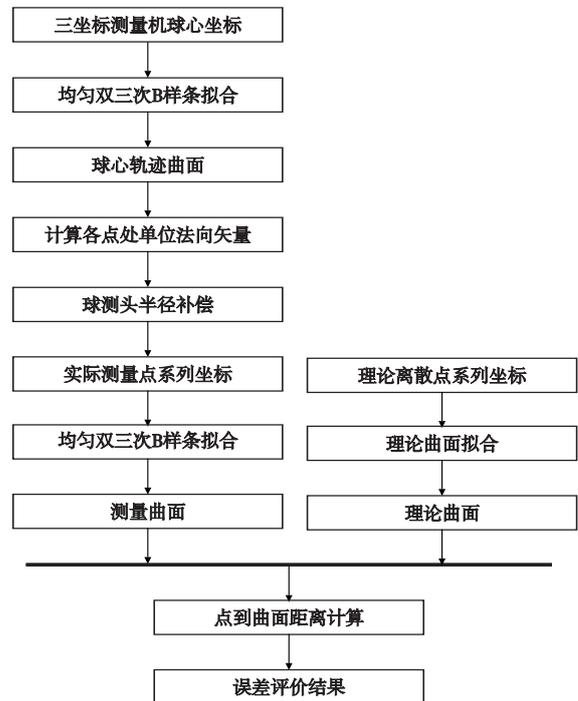


图2 轮廓度误差评定流程

4 测量点到理论曲面的距离计算

计算测量点到理论曲面的距离是自由曲面轮廓度误差评定中的关键步骤。本文针对双三次 B 样条曲面的性质,对涉及到的二维优化问题的算法进行了优化。对自由曲面进行轮廓度评定时,一个很大的难点在于如何提高点到自由曲面距离计算的效率。自由曲面的曲面片表达式不同,使得在计算点到自由曲面距离时存在点与曲面片的匹配问题,采用数值解法时导致运算量很大。首先,按两点间距离式表示距离,转换为二维优化问题:

$$\min d(u, v) = \| P - P^* \| \quad (4)$$

其中: P 为某一测量点; P^* 为理论曲面上当前作匹配的曲面片上一点,是 u, v 的矢函数。

二维优化问题可以采用最速下降法求解,然而普通的最速下降法先精确计算出垂足,再判断该结果的取舍,效率太低。当点与匹配曲面片相距较远时,会浪费大量的计算。本文将最速下降法与自由曲面的具体情况相结合,在迭代的判断中加入参数越界的判断条件,从而大大加快迭代速度。自由曲面进行参数变换后,迭代过程中当参数超出描绘曲面片边界时,应尽早判断并舍去。本文采用最速下降法每步迭代中还包括一维优化求最优步长,更应尽早判断出对于当前曲面片有无必要继续运算精确求出垂足。如果很快判断出与该曲面片将要求出的距离不符合条件,停止运算,则可节省大量时间。判断所求距离是否符合条件是以参数域进行判断,算法的特点在于不是事后判断,而

是迭代时作判断,并作为终止迭代的条件之一。

在进行迭代的过程中,如果所求点在某一步迭代后参数越界,此时就可以判断匹配失败,终止迭代,并进行下一个曲面片的匹配。首先,由于是取梯度方向,距测量点越远的曲面片参数越界越快,有时甚至迭代一次就已越界,即越是最后肯定舍去的结果消耗时间越短。其次,控制灵活,可以自己决定对迭代几次后越界的结果加以舍去,因为当 P^* 恰好在边界附近时,参数可能在迭代时出现反复。允许的最低参数越界迭代次数越高则越精确,但费时越长。最后,点与曲面片的匹配和距离计算一次完成,即如果参数始终未越界,则一直迭代直到精确计算出距离。算法的流程如图 3 所示。

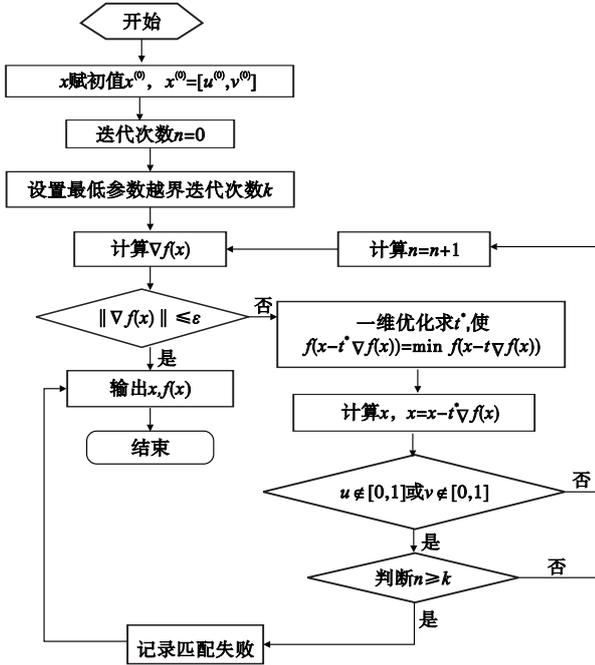


图 3 点到理论曲面距离计算流程

图 3 中, $x = [u, v]^T$, $\nabla f(x) = \left[\frac{\partial d}{\partial u}, \frac{\partial d}{\partial v} \right]^T$, ϵ 为误差界。实际操作中,可以根据曲面的具体情况采取 $\|\nabla f(x)\| \leq \epsilon$ 、 $\Delta x \leq \epsilon$ 或 $\Delta d \leq \epsilon$ 的判别方案。此流程进行一次是对一个测量点进行一张曲面片的匹配,如果有 $i \times j$ 个测量点、 $m \times n$ 张曲面片,则要进行 $i \times j \times m \times n$ 次运算,每次运算是包含一维优化求步长的二维优化问题,每次迭代都涉及矩阵运算。可见,在数据量较大的情况下,对点面距离计算的优化是非常必要的。图 4 给出了点到测量曲面距离的显示情况,系统中几个“视”分别显示了在抛物面和球面上取若干型值点后拟和曲面,然后在曲面一侧取若干点完成距离计算。

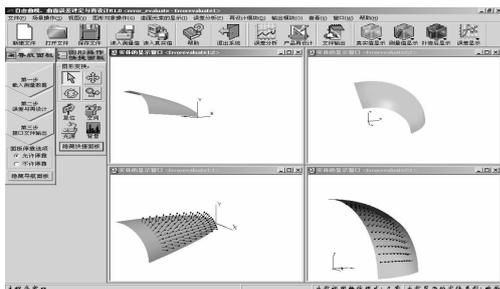


图 4 系统中点到理论曲面距离的显示

5 评定误差

误差评定的操作为了节省空间主要放在一个属性单内完成。该属性单包含多个属性页,每个属性页对应一类功能,包

括理论值、测量值、半径补偿、误差评定、最小二乘评定结果等。图 5 显示了轮廓度误差评定的情况,在左边的属性单内设置迭代次数下限、二维优化允许误差、一维优化允许误差、迭代次数等属性后,即可进行轮廓度误差评定;下面的状态栏显示评定进度百分比,正在判断的点、面,进行迭代的次数和交点坐标等信息。如果用户要终止评定按“Esc”键。由评定结果构造出与理论曲面相距最大误差的两等距曲面公差带三维模型。考虑到测量时基准要素与理想要素的偏差,系统提供最小二乘法的轮廓度误差评定方式,以及预定义方式下的误差评定方法。如果针对已知的离散理想点系列测得一一对应的实测点数据,由于数据不密或精度不高等原因不必进行数据拟合,则系统提供预定义方式下近似的误差评定方法,即以点间距离在法线上投影作为误差评定依据。轮廓度误差的三维显示中,颜色较深的是理论曲面,两张颜色较浅的曲面是轮廓度误差。误差结果统计报表基于 Crystal Reports 开发。在系统中点击误差数据的序号,可以在三维曲面上定位并突出显示对应的点。这种将三维环境与误差评定相结合的方式,可以很容易在三维模型上发现并突出误差所对应的点,并进一步有针对性地进行曲面调控。



图 5 误差评定与结果显示

6 结束语

本文基于 OpenGL 图形接口开发出三维的曲面轮廓度误差评定系统,实现了误差评定与三维模型显示相结合的模式。在提高直观性的同时,也为企业根据自身需求开发相应功能的逆向工程软件系统进行了探索。三维显示环境是基本框架,而误差评定方法是可扩展的模块。下一步将引入新的误差评定方法,完善系统的评定功能。

参考文献:

- [1] 李大鹏, 崔洋. 三坐标测量机在逆向工程的应用[J]. 机械设计与制造, 2007(7): 72-74.
- [2] 张新, 许英朝. 光学自由曲面的检测方法[J]. 中国光学与应用光学, 2008, 1(1): 92-99.
- [3] 高栋, 孔令豹, 姚英学, 等. 光学自由曲面形状误差评定算法的研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(10): 1630-1635.
- [4] 戴能云, 廖平, 王建录, 等. 基于 MATLAB 的复杂曲面形状误差评定[J]. 测控技术, 2010, 29(6): 95-101.
- [5] 卢军, 于源, 王小椿. 自由曲面测量中曲面匹配的建模及算法分析[J]. 机械科学与技术, 2001, 20(3): 19-20.
- [6] 杨恒亮, 屠大维, 吴仍茂. 一种复杂二次曲面轮廓度评定方法[J]. 机械科学与技术, 2008, 27(9): 1155-1158.
- [7] 刘玉君, 朱秀莉, 纪卓尚, 等. 船体外板曲面形状误差评定方法分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2008, 27(5): 635-638.