

集成逆向工程系统的误差分析与检测

汤红江, 马淑梅, 李爱平

TANG Hong-jiang, MA Shu-mei, LI Ai-ping

同济大学 现代制造技术研究所, 上海 200092

Institute of Advanced Manufacturing Technology, Tongji University, Shanghai 200092, China

E-mail: tanghongjiang0120@126.com

TANG Hong-jiang, MA Shu-mei, LI Ai-ping. Error analysis and inspection in integrated reverse engineering. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(25): 72-74.

Abstract: To satisfy the need of quick development and innovative design of products, the system of integrated reverse engineering that contains the error analysis and inspection is introduced. The error analysis can inspect and restore the whole system. In the base of this, two methods for the error analysis are advanced, and their models are simplified. At the same time, a model registration algorithm is introduced. Finally, two typical cases are given to show the processes of model registration of the two different projects.

Key words: integrated reverse engineering; error analysis; model registration

摘要: 针对当前企业产品快速开发和创新设计的要求, 构建了具有误差分析与检测功能的集成逆向工程系统框架。通过对所存在的误差进行分析, 以便对整个系统进行实时的闭环的检测和修复。在分析系统框架的基础上, 提出两个不同的误差求取方案并简化了相应的误差模型, 同时给出了模型配准算法。通过两个具体案例, 展示了不同方案的模型配准过程。

关键词: 集成逆向工程; 误差分析; 模型配准

DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2008.25.022 **文章编号:** 1002-8331(2008)25-0072-03 **文献标识码:** A **中图分类号:** TP391

随着新的逆向工程原理和技术的不断引入, 逆向工程已经成为联系新产品开发过程中各种先进技术的纽带, 在新产品开发过程中居于核心地位, 被广泛地应用于摩托车、汽车、飞机、家用电器、模具等产品的改型与创新设计, 成为消化、吸收先进技术、实现新产品快速开发的重要技术手段^[1]。

伴随着产品数字化设计与制造的迅速发展, 逆向工程(RE)与CAD、CAE、CAM、RP(Rapid Prototyping)、RT(Rapid Tooling)的关系日益紧密。为了满足并行设计和协同制造的要求, 一种集成各个功能模块的集成逆向工程系统越来越受到人们的重视。它通过实现不同功能模块间的数据共享和无缝(Seamlessly)连接, 来更经济、更快捷地对原型进行反求, 并在此基础上进行创新设计。

从原型经集成逆向工程系统最后得到产品, 在每个环节中, 误差都是不可避免地存在的。可见, 分析误差同时把检测得到的误差实时地反馈到重建模型中, 并根据实际情况做出适当地修改, 将有利于保证产品的质量和性能。

1 系统框架

根据上述要求, 构建了具有误差分析与检测功能的集成逆向工程系统框架, 如图1所示。

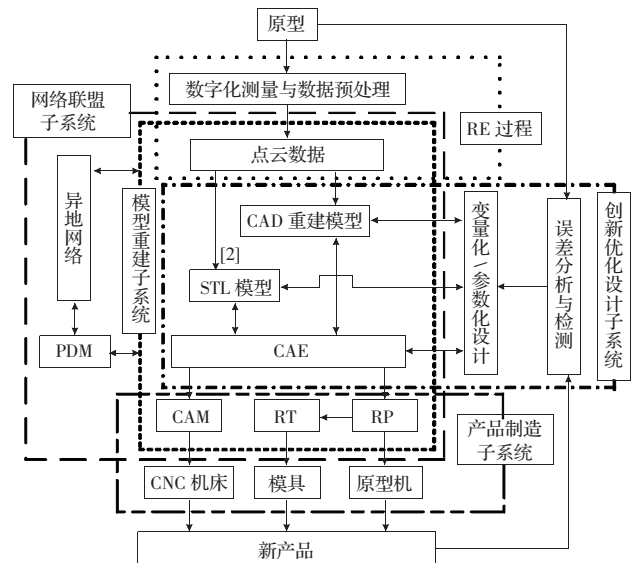


图1 集成逆向工程系统框架图

该系统框架除了具有一般意义上的RE技术、模型重建子系统、产品制造子系统外, 还包含了网络联盟子系统和创新优化设计子系统。网络联盟子系统能够通过网络, 利用PDM

基金项目: 上海市科学技术委员会科研计划项目(No.06DZ11302, No.06DZ22915)

作者简介: 汤红江(1982-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为逆向工程技术; 马淑梅(1967-), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为先进制造技术等; 李爱平(1951-), 女, 工学博士, 教授, 博士生导师, 同济大学现代制造技术研究所所长, 主要研究方向为数字化设计与制造。

收稿日期: 2007-12-11

修回日期: 2008-05-27

(Product Data Management)技术,使 CAD/CAE/CAM/RP/RT 有机地结合起来,并能进行异地交流和合作,从而实现企业、科研院所间的并行设计和协同制造。创新优化设计子系统是以参数化/变量化设计方法和误差分析与检测模块为核心的系统。参数化/变量化设计方法通过修改基于特征及约束的 CAD 重建模型来最终实现产品的创新设计。误差分析与检测则可以对整个系统进行实时地闭环地检测并对其进行修复,这将有利于保证产品的质量和性能。

基于这一闭环系统,进行新产品开发可有效地缩短产品研发周期,提高新产品的设计水平^[3]。

2 误差分析方案及简化模型

目前对于逆向工程中误差的研究大多集中在定性分析或定量求解各个具体过程的误差上^[4-5],这样既提高了问题的复杂程度,同时又没有达到求解整个过程的整体误差的目的。为解决这个问题,本文的误差分析思路是比较原型与产品之间的整体误差。

比较原型与产品之间的误差的原始方法,是用手工分别测量原型与产品对应的关键点,然后进行分析得出误差。这种方法有很多不足之处^[6]。

基于此,提出误差分析模型。在前期研究工作的基础上^[7],做了一些改进,具体分析过程如图 2 所示。

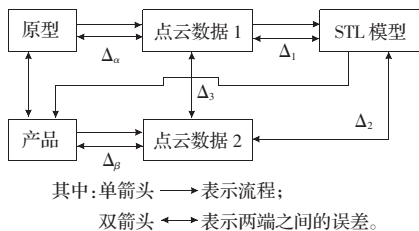


图 2 误差分析过程

由图 2 可以看出,有两个误差求取方案。

方案 1:把比较原型与产品之间的误差转化为比较原型的点云数据与原型的 STL 模型之间的误差 Δ_1 , 和对产品进行反求数字化测量后所得到的点云数据与原型的 STL 模型之间的误差 Δ_2 。这样就减少了对原型进行数据化测量得到原型点云数据所产生的测量误差 Δ_α , 而增加了对产品进行数字化测量得到产品点云数据时所产生的测量误差 Δ_β 。在系统使用精度相对较高的测量仪器的情况下,假设前后两次测量间的误差残差为 0,即有

$$\Delta_\alpha - \Delta_\beta \approx 0 \quad (1)$$

成立。那么就有

$$\Delta = \Delta_1 = \Delta_\alpha + \Delta_1 + \Delta_2 - \Delta_\beta \approx \Delta_1 + \Delta_2 + 0 = \Delta_1 + \Delta_2 \quad (2)$$

成立。

由图 2 可以看出,这两个误差实质上都是点云数据与 STL 模型之间的误差,进而可以得出误差分析模型,如图 3(a)所示。

方案 2:直接求取原型的点云数据与产品的点云数据之间的误差 Δ_3 。同样,这个方案也减少了误差 Δ_α ,而增加了误差 Δ_β 。在假设式(1)成立的前提下,则有

$$\Delta = \Delta_{11} = \Delta_\alpha + \Delta_3 - \Delta_\beta \approx \Delta_3 + 0 = \Delta_3 \quad (3)$$

成立。

由图 2 可以看出,这两个误差实质上都是点云数据与点

云数据之间的误差,进而可以得出误差分析模型,如图 3(b)所示。

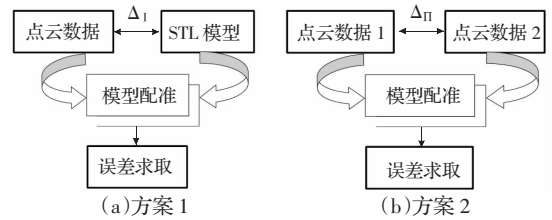


图 3 误差分析模型

对这两种方案的比较:

(1)两者的共同点:都忽略了前后两次测量间的误差残差,这在使用精度相对较高的测量仪器的系统中是允许的;

(2)两者的不同点

方案 1 采用了 $\Delta = \Delta_1 + \Delta_2$, 不但能够求出系统整体误差 Δ , 而且还分别求出了 Δ_1 和 Δ_2 , 这样在分析误差产生原因及后续提高系统精度时就都有了针对性; 但该方案由于要分别求出 Δ_1 和 Δ_2 才能求出整体误差 Δ , 计算较复杂和费时。

方案 2 则相反,由于是直接求出整体误差 Δ , 故计算就简单了很多; 但无法进一步地分析误差产生的原因及采取有针对性地提高系统精度的措施。

另外,由于产品的点云数据与原型的 STL 模型和产品的点云数据与原型的点云数据都不是在同一坐标系下得到的,因此这两种方案在求解具体误差之前都需要进行数据配准。如图 3(a)、(b)所示。

3 模型配准

如前所述,在误差求取之前需要进行源数据点集(点云数据)与目标数据点集(STL 模型或另一点云数据)的配准。

从数学上来讲,就是给定两个来自不同坐标系的源数据点集和目标数据点集,找出能够使它们进行匹配的空间变换。

将数据点集看成是一个刚体,那么源数据点集与目标数据点集之间的配准就是空间刚体移动,也就是空间两个刚体的坐标变换;这样,问题就归结为求解相应的变换矩阵,即旋转矩阵 R 和平移矢量 T 。

3.1 配准算法

目前常用的配准方法是 Besl 和 McKay 于 1992 年提出的 ICP(Iterative Closet Point)算法^[5,8]。该算法不但能够处理点集间的匹配问题,而且能够处理点集与三角面片(STL 模型)间的匹配问题。该算法是利用最小二乘(Least Squares)优化思想,计算 R 和 T 使得如下目标函数最小:

$$F(R, T) = \sum_{i=1}^N \| Q_i - (RP_i + T) \|^2 \quad (4)$$

式中, P_i 为源数据初始点集, Q_i 为目标数据点集中的 P_i 所对应的最近点集; R 和 T 分别是作用于点集 P_i 的 3×3 阶旋转矩阵和 3×1 阶平移矢量。

若设

$$\begin{cases} \bar{P} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i \\ \bar{Q} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Q_i \end{cases} \quad (5)$$

则有

$$\bar{Q} = R\bar{P} + T \quad (6)$$

并令

$$\begin{cases} P'_i = P_i - \bar{P} \\ Q'_i = Q_i - \bar{Q} \end{cases} \quad (7)$$

将式(5)~(7)代入到式(4)得

$$F(R, T) = \sum_{i=1}^N \|Q'_i - RP'_i\|^2 \quad (8)$$

利用SVD(Singular Value Decomposition)算法^[9]求解 R , 使得式(8)最小。

令

$$H = \sum_{i=1}^N P'_i Q'_i{}^T \quad (9)$$

对 3×3 阶矩阵 H 进行SVD计算:

$$H = UAV^T \quad (10)$$

最后求出旋转矩阵和平移矢量, 即:

$$\begin{cases} R = VU^T \\ T = \bar{Q} - R\bar{P} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Q_i - R \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i \end{cases} \quad (11)$$

3.2 配准步骤

具体步骤如下:

步骤 1 首先设定一阈值 τ , 且 $\tau > 0$ 。

步骤 2 在源数据点集中选择初始点集 P_{i1} 。

步骤 3 求取从初始点集 P_{i1} 到目标点集的最近点集 Q_{i1} , 两个点集之间的变换矩阵 R_1 和 T_1 根据式(11)得到。

步骤 4 利用式子 $P_{i2} = R_1 P_{i1} + T_1$, 得到第 1 次变换后的点集 P_{i2} , 然后再求取 P_{i2} 到目标数据点集的最近点集 Q_{i2} 。设第 j 次迭代求得的旋转矩阵为 R_j , 平移矢量为 T_j , 有 $P_{i(j+1)} = R_j P_{ij} + T_j$ 得 $P_{i(j+1)}$, 然后用点集 $P_{i(j+1)}$ 和其最近点 $Q_{i(j+1)}$ 来计算 R_{j+1} 和 T_{j+1} 。

步骤 5 重复步骤 4。直到满足如下迭代终止条件:

$$\begin{cases} d_k - d_{k+1} < \tau \\ d_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|Q_{ik} - P_{ik}\|^2 \end{cases} \quad (12)$$

式中, k 为迭代次数, d_k 为迭代 k 次后两点集的均方差。

3.3 配准迭代结果

经过以上反复变换, 直到终止迭代, 得到总的坐标变换。其旋转矩阵和平移矢量分别为

$$\begin{cases} R = \prod_{i=1}^k R_{k+1-i} \\ T = \sum_{j=1}^k \left(\prod_{i=j+1}^k R_{k+j+1-i} T_j \right) \end{cases} \quad (13)$$

式中, k 为迭代次数, 并规定: 若 $j+1 > k$, 则 $\prod_{i=j+1}^k R_{k+j+1-i} T_j = T_j$ 。

4 案例分析

图 4(a)~(d)和图 5(a)~(d)分别演示了两种方案的配准过程。点云数据^[10]是利用英国雷尼绍公司制造的 CYCLONE 高速数字化扫描机得到的。

图 4 演示的是方案 1 的配准过程。图 4(a)和图 4(b)分别是某“电话”上半部分的点云数据和 STL 模型, 图 4(c)是它们配准前的情况, 图 4(d)是它们配准后的情况。

图 5 演示的是方案 2 的配准过程。图 5(a)和图 5(b)分别是“老鼠”的两个不同的点云数据, 图 5(c)是它们配准前的情况, 图 5(d)则是两点云数据配准后的情况。

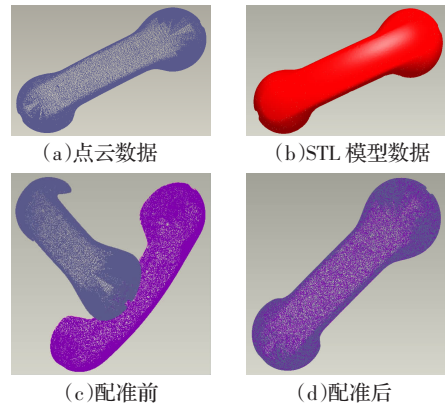


图 4 方案 1 演示实例

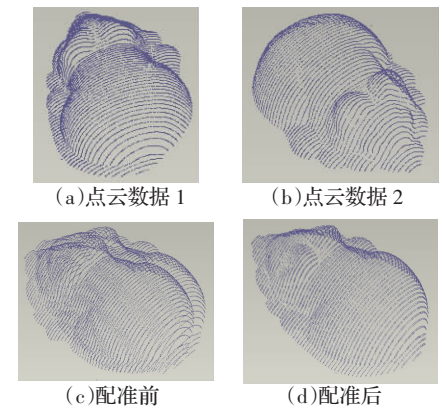


图 5 方案 2 演示实例

5 结束语

当今世界, 全球经济一体化进程不断加快, 企业之间的竞争也越来越激烈。本文构建的集成逆向工程技术系统能够满足当前企业产品快速开发和设计的要求, 从而能够为企业赢得市场的主动权和增强企业竞争力。本文在构建集成逆向工程系统的基础上, 进行了误差过程分析和误差模型的简化。通过误差分析, 能够实现对整个系统实时地闭环地检测和修复; 而模型配准是误差分析的前提条件和关键步骤, 否则谈论误差是没有任何意义的。

参考文献:

- [1] 柯映林. 反求工程 CAD 建模理论、方法和系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [2] Lee K H, Woo H. Direct Integration of Reverse Engineering and Rapid Prototyping[J]. Computers and Industrial Engineering, 2000, 38: 21-38.
- [3] Lee K H, Woo H. Use of Reverse Engineering Method for Rapid Product Development[J]. Computers and Industrial Engineering, 1998, 35: 21-24.
- [4] 张伟, 姜献峰, 马亚良, 等. 逆向工程误差剖析与质量控制[J]. 机电工程, 2001, 1: 14-16.
- [5] 金涛, 童水光, 颜永年. 逆向工程技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.

(下转 85 页)