DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.04.004

基于等参变换的车身有限元模型自由变形设计*

刘明增 李宝军 王长生 胡 平

(大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室,大连116024)

【摘要】 为了提高车身设计的效率,提出了一种车身有限元模型自由变形设计方法。首先,生成的车身有限 元模型是由空间六面体、五面体和四面体单元组成的控制参数体;然后,建立有限元模型和控制参数体的等参变换 关系,而后通过对控制参数体的形状改变来驱动有限元模型的变体设计。通过给出的等参变换及其逆变换关系, 算法避免了已有自由变形算法的局部坐标参数化的计算费时问题。通过对某车身有限元模型的数值模拟测试,验 证了算法的可用性和有效性。

关键词:车身设计 有限元模型 自由变形 等参变换 中图分类号:TH122;0241.82 文献标识码:A 文章编号:1000-1298(2012)04-0015-05

Free Form Deformation Design for Auto-body Finite Element Model Based on Isoparametric Transformation

Liu Mingzeng Li Baojun Wang Changsheng Hu Ping

(State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract

To improve the efficiency of auto-body design, an algorithm of morphing design for auto-body based on free form deformation and isoparametric transformation was proposed. In this algorithm, the control finite element model (FEM) model was consisted of a collection of polyhedral elements, such as hexahedron, pentahedron and tetrahedron. Then the correspondence of isoparametric transformation between FEM model and control parametric volume was established, and the deformation of control parametric volume was propagated to the embedding FEM model. The algorithm avoided the problem of computational cost of the parameterization of local coordinates through the given isoparametric transformation and its inverse transformation. From the numerical simulation on FEM model of an auto-body, the validity and efficiency of proposed algorithm were verified.

Key words Auto-body design, Finite element model, Free form deformation, Isoparametric transformation

引言

针对基于自由变形技术的机械零部件快速设计问题,国内外学者做了相应的工作^[1-6]。Huang^[1] 等对车身覆盖件 CAD 模型的保特征自由变形技术 进行了研究。Chen^[2]等针对车身的实验设计 (design of experiment)提出了一种在已有模型基础 上生成一组修正的 CAE 模型流程框架。自由变形 技术在工业零件的外形优化设计中也得到了应 用^[3-4]。针对凸多面体类型的控制参数体, Mizuno^[5]等引入了重心坐标参数化方法。Huang^[6] 等给出一种基于四面体类型控制参数体的自由变形

收稿日期: 2011-07-20 修回日期: 2011-09-01

^{*}国家自然科学基金重点资助项目(10932003、u0935004)、国家重大基础研究发展计划(973计划)资助项目(2010CB832700)和中央高校 基本科研业务费专项资金资助项目

作者简介:刘明增,博士生,主要从事计算机辅助设计与图形学及车身 CAD/CAE 集成研究, E-mail: mingzengliu@ gmail. com

通讯作者: 胡平,教授,博士生导师,主要从事车身设计与制造技术研究, E-mail: pinghu@ dlut. edu. cn

技术,该方法需要求解一个稀疏线性方程组。在基 于样条控制参数体(Bernstein、B-Spline 或 NURBS 体)^[1-4]的自由变形技术中,对待变形物体的点坐标 局部参数化计算时,通常需要一个迭代的求解过程, 这往往是相当费时的,尤其是对大规模的有限元网 格模型。而对于大规模稀疏线性方程组的求解,亦 然。尽管上述方法都可以很好地保证变形后物体的 光滑性,但在满足一定光滑性需求的前提下,更希望 能够缩短模型改形所需的计算时间。为避免上述问 题,提高车身设计效率,缩短研发周期,本文提出一 种基于等参变换的自由变形方法。

1 自由变形

数学上,自由变形^[7]是一个 \mathbf{R}^3 到 \mathbf{R}^3 的映射,即

 $X_{\rm FFD} = \sum_{i}^{l} \sum_{j}^{m} \sum_{k}^{n} B_{i}(u) B_{j}(v) B_{k}(w) P_{ijk}$ (1)

式中 (*u*,*v*,*w*)——待变形物体上任意点(*x*,*y*,*z*) 相对于控制参数体的局部坐标

X_{FFD}——变形后的物体坐标

P_{iik}——控制参数体的控制顶点

 $l_m_n - x_y_z$ 方向上控制顶点的数目

 $B_i \ B_i \ B_i \ w$ 方向的基函数

通过方程(1)将控制参数体的变形传递到待变 形物体上(计算变形后物体上相应点的新位置)。 该方法具有两大优势:首先,对待变形物体进行整体 或局部形状修改时突破了传统方法的局限性;其次, 它无关于待变形物体的表示形式和拓扑结构,便于 集成到现有的造型软件系统中。在变形过程中,基 函数可以有多种不同的选择,比如,Bernstein 多项 式、B-Spline 基函数或者 NURBS 基函数等。由于是 体变形,采用三方向上的张量积形式的基函数,因此 要求控制参数体是标准的平行六面体或者拓扑上是 六面体,如图1所示。



2 等参变换的自由变形方法

汽车车身是复杂的、不规则的结构,采用通常的 正则体网格,显然将无法满足变形后精度的控制。 所以,本文考虑采用不规则的六面体(长方体)、五 面体(三棱柱)和四面体混合的控制参数体模式,如 图2所示。



图 2 三维控制参数体包围的车身有限元模型 Fig. 2 FEM model of auto-body with 3-D control parametric volume

2.1 算法流程

由于自由变形技术的无关于待变形物体的表示 形式和拓扑结构的特性,使得要考虑的车身有限元 模型可以包含一维线单元、二维面单元和三维实体 单元。

等参变换自由变形实现步骤如下:首先,构造控制参数体,定位导入车身有限元模型到某标准视图, 比如,*XOZ*视图(侧视图),由用户手动或者自动的沿着模型的外围轮廓线生成控制参数体(六面体、 五面体),如图2所示。其次,计算有限元模型每个 节点相对于初始控制参数体单元的局部坐标(*u*,*v*, *w*);接着,对原有控制参数体进行编辑,即修改其几 何。最后,用编辑过的控制参数体来驱动有限元模 型的形状变形。等参变换自由变形工作流程如图3 所示。



图 3 等参变换自由变形流程 Fig. 3 Flow chart of isoparametric FFD

2.2 等参局部坐标计算

根据生成的控制参数体的单元类型,可把自由 变形局部坐标的计算分成3类:六面体、五面体和四 面体。

(1) 六面体

首先,考虑扫掠型六面体:即该六面体单元是由

一平面四边形单元沿着其所在平面的法向扫掠而得 到,其中上述平面四边形单元是位于或平行于某个 标准平面(设为 XY 平面)的凸四边形,如图 4 所示。





Fig. 4 Transformation of sweep-type hexahedral element

$$\begin{cases} x(\xi,\eta) = \sum_{i=1}^{4} N_i(\xi,\eta) x_i \\ y(\xi,\eta) = \sum_{i=1}^{4} N_i(\xi,\eta) y_i \end{cases}$$
(2)

其中

$$N_i(\xi,\eta) = \frac{1}{4}(1+\xi_i\xi)(1+\eta_i\eta) \quad (i=1,2,3,4)$$

当四边形单元 K 是凸四边形时, 方程(2)的雅可比 行列式 $J(\xi, \eta)$ 恒正, 方程(2) 的逆变换函数, 即 $\xi(x,y)$ 、 $\eta(x,y)$,存在且易知是无理函数。对于四 边形单元 K 中的任何一点 (x_p, y_p) ,文献[9~10]给 出了局部坐标的 (ξ_{μ}, η_{μ}) 的解析表示算法。而对于 Z 方向分量 ζ_{a} 需要进行一维情形的重心坐标计算。

其次,考虑位于空间的任意凸六面体单元。利 用 Serendipity 六面体单元进行等参变换,类似上述 情形,基函数^[8]为

$$N_i(\xi,\eta,\zeta) = \frac{1}{8} (1+\xi_i\xi) (1+\eta_i\eta) (1+\zeta_i\zeta)$$

$$(-1 \leq \xi, \eta, \zeta \leq 1, i = 1, 2, \dots, 8)$$

式中 $\xi_i = \pm 1$, $\eta_i = \pm 1$, 等参自由变 形的坐标更新为

$$\begin{cases} x(\xi,\eta,\zeta) = \sum_{i=1}^{8} x_i N_i(\xi,\eta,\zeta) \\ y(\xi,\eta,\zeta) = \sum_{i=1}^{8} y_i N_i(\xi,\eta,\zeta) \\ z(\xi,\eta,\zeta) = \sum_{i=1}^{8} z_i N_i(\xi,\eta,\zeta) \end{cases}$$
(3)

通过文献[10]中给出方程(3)的逆变换函数, 故对凸六面体单元中的任意一点(x_p,y_p,z_p)的局部 坐标(ξ_p , η_p , ζ_p)可直接计算得到。

(2) 五面体

首先,考虑扫掠型五面体:即该五面体单元是由 一平面三角形单元沿着其所在平面的法向扫掠而得 到,其中,上述平面三角形单元是位于或平行于某个 标准平面(设为 XY 平面)。对于此类型的五面体单 元中的任意一点 (x_n, y_n, z_n) 的局部坐标 (ξ_n, η_n, ζ_n) 的计算可如平面四边形情形分为2部分:分量(ξ_{n} , η_{n})的计算可通过(x_{n}, y_{n})相应于上述平面三角形的 面积坐标得到,如图 5a 所示,而分量 ζ_a 的计算只需 通过计算沿着 Z 方向的一维重心坐标即可。

其次,对于空间任意五面体单元类型,如图 5b 所示,为了简化计算可以把其拆分成3个相应的四 面体单元,如图 5c~5e 所示。

(3) 四面体

为了使得构造的控制参数体尽可能贴合需变形 的有限元模型,在控制参数体中可能会出现四面体 单元。类似于平面三角形的处理,可以引进其相应 的体积坐标^[8],如图 5f 所示,单元内任一点 P 的体 积坐标为

$$L_{1} = \frac{\text{vol}(P234)}{\text{vol}(1\ 234)} \quad L_{2} = \frac{\text{vol}(P341)}{\text{vol}(1\ 234)}$$
$$L_{3} = \frac{\text{vol}(P412)}{\text{vol}(1\ 234)} \quad L_{4} = \frac{\text{vol}(P123)}{\text{vol}(1\ 234)}$$



$$N_i = L_i$$
 (i = 1, 2, 3, 4) (4)

则由方程(3)可得四面体的坐标更新后为

$$V_i^{\text{new}} = \sum_{i=1}^{4} L_i V_i \tag{5}$$

式中 V^{new}——四面体的顶点坐标

V.——待更新节点的坐标

上述讨论了构成控制参数体的各种类型单元的 处理方法。如对要处理的模型进行特殊的视图处 理,将可简化局部坐标的计算。比如,对给定的整车 模型,定位输入模型为正侧视图,在该模型中平面 (该中平面可位于或平行于某个标准平面, 设 XZ 平 面)上首先生成平面参数体网格,而后沿 Y 方向拉 伸可以包围模型的宽度,则可知得到的控制参数体 单元类型仅为扫掠型的六面体和五面体。

2.3 模型的光顺处理

上述采用的单元基函数实际上均为一次线性函数,因而仅能保证控制参数体变形后的连续性,当变形较大的时候控制参数体会出现尖棱的情况,从而影响有限元模型的变形效果。为了避免这种情况,可以对控制参数体进行局部加细,同时该操作也可增加对模型的局部控制性。本文对变形后的模型部分采用均匀权的 Laplacian 算子^[11]进行光滑,即

$$V_{ci}^{\text{new}} = V_{ci} - \frac{1}{d_i} \sum_{i \in E_i} V_i \tag{6}$$

式中 E_i ——与第 i 个节点相邻的节点索引集合 d_i —— E_i 中元素的个数

 V_{ci} 、 V_j ——第i个和第j个节点坐标

3 数值模拟实例

本算法已集成到自主开发的 DCiP 软件系统的 Morpher 功能的网格变体模块。为了验证本文算法 的可用性和有效性,对某车身有限元模型进行快速 改形设计测试。表1给出了该测试模型的相关的数 据信息及测试所用时间。

表 1	测试有限元模型相关数据
lab. 1	Data of FEM model for testing

节点 数/个	三角形 单元/个	四边形 单元/个	预处 理/s	变体/s	光顺/s
80 370	4 522	71 369	37.1	0.2	0.1

图 6 和图 7 分别为变形前的某车身有限元模型 及其相应的控制参数体,由于选用了该车身的正侧 视的视图,使得生成的参数体单元类型,均为扫掠型 的六面体和五面体。可以注意车身模型后侧的油箱 口用六面体单元包围。



图 6 某车身变形前的 FEM 模型及控制参数体 Fig. 6 FEM model and control parametric volume of auto-body before deformation

图 8 和图 9 显示了变形后的模型及相应的控制 参数体。通过对控制参数体形状的改变驱动车身模 型的变形且实现了较好的光滑过渡。图 10 对比了 车身变形前、后的局部细节保持性质。观察可知变 形前、后的 B 柱控制参数体单元(图 7、图 9)没有变 化,使得车身模型 B 柱部分保持不变,如图 10a、10b 所示。由于包含车身模型后部油箱口的控制参数体



图 7 图 6 所示车身模型变形前的控制参数体 Fig. 7 Control parametric volume of auto-body model before deformation illustrated in Fig. 6

单元(图7、图9矩形、椭圆标记处)在变形前、后保 持几何形状,使得变形后结果如图10c、10d所示。 可知车身尾部控制参数体单元(图7、图9椭圆标记 处)前后变形较大,显然,将会导致变形后控制参数 体单元内的节点密度过大,进而影响模型网格的单 元质量。



图 8 图 6 所示车身变形后的 CAE 模型及控制参数体 Fig. 8 CAE model and control parametric volume of auto-body after deformation in Fig. 6



图 9 图 6 车身模型变形后的控制参数体 Fig. 9 Control parametric volume of auto-body model after deformation illustrated in Fig. 6



(a) 变形前 B 柱(b) 变形后 B 柱(c) 变形前油箱口(d) 变形后油箱口

表 2 ~ 5 为在 Hypermesh 9.0 评测下有限元模型的单元质量检测结果,分别是单元长宽比、单元歪斜度、单元雅可比和单元翘曲度。从表 2 ~ 5 测试结

果可得,相比于 DEP/MeshWorks 的变形结果模型, 本文方法得到的结果较好地改善了变形后的网格单 元质量。同时,变形后的结果均一定程度上增加了 不合格单元的比例,但相比于 DEP/MeshWorks 的变 形结果,本文方法却明显有所降低,如表 2、表 4 和 表 5 所示。表 3 所示虽然增加了不合格单元的比例 但是改善了单元质量的最差值。

表 2 模型单元的长宽比 Tab. 2 Aspect ratio of model elements

模型	不合格 阈值	不合格 数/个	不合格 率/%	最差值	质量因子
Origin	5.0	743	1.0	29.1	3 154. 1
MeshWorks	5.0	1 503	2.0	87.6	7 309. 1
IFFD	5.0	1 247	1.6	45.4	5 444. 1

注: Origin 表示初始有限元网格模型; MeshWorks 表示由 DEP/ MeshWorks软件变形后的结果模型; IFFD 表示由本文方法得到的结果。

表 3 模型单元的歪斜度 Tab. 3 Skew of model elements

模型	不合格 阈值	不合格 数/个	不合格 率/%	最差值	质量因子
Origin	40.0	2 831	3.7	85.5	12 129. 1
MeshWorks	40.0	3 385	4.5	90.0	16 248. 1
IFFD	40.0	4 116	5.4	85.9	18 435. 1

4 结论

(1) 无关于有限元模型的单元类型, 可以是一

表 4 模型单元的雅可比 Tab.4 Jacobian of model elements

模型	不合格 阈值	不合格 数/个	不合格 率/%	最差值	质量因子
Origin	0.6	1 074	1.4	0.3	2 775.1
MeshWorks	0.6	1 379	1.8	- 0. 6	6 016. 1
IFFD	0.6	1 109	1.5	0.3	2 873.1

表 5 模型单元的翘曲度 Tab.5 Warpage of model elements

模型	不合格 阈值	不合格 数/个	不合格 率/%	最差值	质量因子
Origin	15.0	133	0.2	53.8	401.0
MeshWorks	15.0	4 074	5.4	180.0	38 466. 1
IFFD	15.0	249	0.3	95.5	1 087.0

维线单元、二维面单元和三维体单元。

(2)相比于以往的方法,构造的控制参数体更 灵活,可以达到对模型更精细的控制,并且利用局部 坐标及模型更新坐标的解析表达式,使得计算效率 大大提高。

(3)通过对控制参数体的加细和变粗可以达到 对模型的精细控制和特征保持,这对模型局部特征 的处理较有优势。

(4)通过本文的算法流程图可知,可以很方便 地实现本算法的批处理或者把该算法改成并行计算 的框架,进一步提升该算法的工作效率。

参考文献

- 1 Huang Q, Li B J, Liu M Z, et al. Feature-preserved morphing method for panel design [J]. Mathematical and Computer Modelling, 2010, 51(11~12): 1417~1420.
- 2 Chen Y F, Stewart P, Marsan A, et al. A mesh feature paradigm for rapid generation of CAE-based design of experiments data[C] // Proceedings of DETC'02, ASME 2002 Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, 2002: 647 ~ 653.
- 3 Samareh J A. Aerodynamic shape optimization based on free-form deformation [C] // 10th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference, 2004: 1~13.
- 4 Lassila T, Rozza G. Parametric free-form shape design with PDE models and reduced basis method[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2010, 199(23 ~ 24):1583 ~ 1592.
- 5 Mizuno G, Date H, Kanai S, et al. Parametric deformation of mesh models for efficient CAE [C] // SICE-ICASE International Joint Conference, 2006:5562 ~ 5566.
- 6 Huang J, Chen L, Liu X G, et al. Efficient mesh deformation using tetrahedron control mesh [J]. Computer Aided Geometric Design, 2009, 26(6):617 ~ 628.
- 7 Sederberg T W, Parry S R. Free-form deformation of solid geometric models [J]. Computer Graphics, 1986, 20(4): 151~160.
- 8 王勖成. 有限单元法[M]. 北京:清华大学出版社, 2003.
- 9 Hua C Y. An inverse transformation for quadrilateral isoparametric elements: analysis and application [J]. Finite Elements in Analysis and Design, 1990, 7(2): 159 ~ 166.
- 10 朱以文,李伟,蔡元奇.基于解析性质的等参有限元逆变换高效算法[J].武汉大学学报:工学版,2002,35(2):62~65.
 Zhu Yiwen, Li Wei, Cai Yuanqi. An efficient inverse isoparametric mapping in FEM based on analytical character [J].
 Engineering Journal of Wuhan University, 2002, 35(2):62~65. (in Chinese)
- 11 Sorkine O, Cohen-Or D, Lipman Y, et al. Laplacian surface editing [C] // Proceedings of the 2004 Eurographics/ACM SIGGRAPH Symposium on Geometry Processing, 2004: 175 ~ 184.