## 1.2 国内外研究现状和发展趋势

### 1.2.1 测量数据与名义模型间的精确配准方法

针对复杂零件修复时,为实现测量数据与名义模型的重合,从而为后续的零件损伤区域识别､实际模型的重构､加工质量评价等提供依据的刚性配准研究,最早起源于对机器视觉领域的几何重构､三维物体识别的研究｡1978年,Nadas[1]对离散点集间的刚性配准问题进行了研究,基于奇异值分解(Singular ValueDecomposition)提出了求解不同点集之间最优刚性变换的Nadas公式｡但作者未给出公式的推导过程,而且对协方差矩阵H的定义也不正确｡Hanson[2]和Arun[3]分别对文献[1]中的公式做了改进,并给出了合理证明｡与此同时,Horn[4]提出了计算待配准点云之间刚性变换的四元数法,给出了配准过程中旋转矩阵的计算方法｡在这些工作基础之上,Besl[5,6]针对计算机视觉领域的复杂曲线曲面全局配准和局部配准问题,于1992年提出了迭代最近点(Iterative Closest Point,简称为ICP)算法｡目前该方法应用范围广,己经成为最经典的刚性配准算法｡ICP算法以被测物体表面数据到曲面的距离平方和为目标函数,通过点到曲面模型的最近点为对应关系,然后利用四元数法对目标函数进行优化,从而求解出待配准点云和曲面之间的最优配准,但是该方法为了确保配准过程中全局最优收敛,有必要给出良好的初始配准变换｡在此基础上,人们对ICP算法进行了许多有益的改进以提高它的运行速度和收敛性｡Sharp[7]将曲面的内在几何属性如高斯曲率､平均曲率及运动不变量加入迭代最近点算法之中,把某一个点的几何属性和运动不变量当作该点的特征,然后与空间位置共同计算在被测点云与曲面配准过程中｡该方法明显地提高了迭代最近点算法的效率和全局最优值收敛性｡然而,迭代匹配的精度在很大程度上依旧依赖于初始配准和在计算过程中的算法改进,当初始配准足以接近全局最小的初始值时才能够得到刚性配准的全局最优解｡

在无法预知测量数据与模型曲面之间任何联系的条件下,确定两者之间的联系是精确配准环节的重要步骤｡在理论上,任何能够唯一标识曲面点的几何特征都可被用于构造不同测量数据或模型曲面间的对应关系,Chua和Jarvis[8]利用主曲率和Darboux标架确定被测物体表面数据与待配准曲面间的联系,实现没有任何预先知道对应关系时的待配准点云与曲面间的刚性配准｡受该工作的启发,Ko[9]提出了脐点匹配法,该方法通过求解曲面上的脐点确定被测物体点云与待配准模型间的对应关系｡之后,他们又讨论了KH匹配法[10],从测量数据中任选不在一条线上的三个点,计算这三个点处的曲率,然后利用区间投影多面体方法获得参数曲面上对应点｡该方法运用于点云和三维曲面或两个曲面之间的全局刚性配准和局部刚性配准｡基于微分几何特征的配准方法能够很好地处理没有预先关联时的曲面刚性配准问题,但是有关曲面法线和曲率的求解容易受测量噪声的影响,使配准准确度基本上与被测物体表面数据与其几何特征精度相关｡为了解决这一问题,学者们研究了新的曲面表达形式｡Chua和Jarvis[11]讨论了一种新的点描述形式即点标(Point Signature),并基于点标描述方法,研究了一种比较简单的点与点之间的匹配策略｡此后,面标[12]､旋量图[13]及有向脚标[14]先后被提出用于测量数据间配准｡

真正将曲面配准理论引入工程实际应用领域是从Menp等人[15,16]的工作开始的｡他们通过被测零件表面点云与其名义模型之间的最优刚性匹配,确定了复杂曲面加工精度检测数学模型,然后以该模型为标准评价被加工零件表面质量,给出了定义测量灵敏度的方法,讨论了检测精度和可靠性如何受测量点采样位置和个数的作用,研究了评价自由曲面几何误差和尺寸误差的统一最小二乘法｡朱利民､熊有伦等人[17]给出了点到曲面距离函数的定义,并讨论了该函数关于曲面运动的微分性质｡基于此,给出了曲面匹配和加工表面质量检测的数学公式｡无基准寻位加工是曲面配准理论在数控加工中的另一个关键运用｡香港科技大学的Li等人[18,19]进一步研究了无基准寻位加工,针对被测零件表面数据如何影响工件定位运动,分工件定位为几类,然后给出了不同定位时的计算方法｡随后,在复杂曲面配准及工件定位研究的基础上,学者们讨论了基于约束的复杂曲面刚性匹配,并且运用在毛坯加工余量分布问题中｡Chatelain和Fotain[20]以被加工表面关键度为依据,对每个表面确定不一样的优先顺序,然后通过惩罚函数计算出被测零件表面数据与待配准模型之间的变换,得到优化的加工余量分布｡在国内,Shen等人[21]为了优化复杂毛坯加工余量分布,给出了毛坯与名义模型之间的最优匹配方法｡该方法降低了毛坯的堆焊量,从而对生产效率有明显的改善｡华中科技大学的严思杰博士[22]研究了被测物体表面数据与待配准模型之间的初始匹配和精确匹配问题,建立了精确匹配中最小二乘目标函数,然后以毛坯上每个点处留有加工余量为约束条件计算目标函数,给出了大尺寸复杂零件的加工余量求解方法｡最近,Li[23]和Sacharow[24]等人将曲面的刚性配准与曲线曲面的自由变形相结合,提出了非刚性配准的概念,并将其成功地应用于变形零件实际模型曲面的重构和基于冲压回弹补偿的冲压模具修正的刀具路径设计｡然而,如何精确地控制逐点变化,实现曲线曲面的光顺变形却没有进行深入讨论｡

### 1.2.2 损伤零件的逆向重构方法

近年来,复杂曲面模型重构研究主要集中于对测量数据的曲面逼近｡Sarkar和Menq[25]提出一种对规则测量数据的最小二乘逼近方法,其基本原理是通过最小化测量数据到目标曲面的误差来求出目标曲面｡而对于散乱数据的曲面重构,Ma和Kruth[26]的工作则更具代表性,首先,围绕边界建立初始曲面,然后把型值点映射到该曲面上,同时利用投影点所在位置计算对应的参数值,最后进行散乱数据的曲面拟合｡此类基面投影法突破了传统参数化方法的限制,很好地解决了散乱点数据的参数化问题｡为了解决形状较为复杂的散乱数据曲面拟合,在Li[27]所提出的自适应散乱点压缩和网格生成方法基础上,来新民[28]先把点云压缩至NURBS曲面重构能够接受的拓扑矩形阵列,然后进行NURBS曲面拟合就可得到比较光顺的曲面｡Bradley和Vicker[29]则用Shepard插值构造插值于测量数据的初始基面并在曲面上构造拓扑矩形网格,交互定义特征线,然后利用矩形网格数据构造目标曲面｡之后他们又提出重构NURBS曲面的正交截面法[30]｡2001年,Piegl和Tiller[31]对初始曲面的构造和数散乱数据的参数化进行了以下总结:对简单的曲面而言,投影基面可以通过双线性Coons曲面构造,但不能提供反映曲面变化的中间参数的变化细节;若采用双线性三次Coons曲面则可增加中间数据,但是因其自身的性质,也存在一些难以克服的缺点｡当逼近曲面较复杂时,可采用张量积B样条曲面作为逼近基面｡目前曲面构造技术发展迅速,其中最广泛应用的是最小二乘拟合算法｡数据点参数化作为曲面构造中的重要环节,通常采用以平面､柱面､Coons曲面为基面的参数化策略,但是这些简单曲面无法完整地表达复杂曲面的几何信息,导致参数化结果不符合设计要求,适合矩形域数据,当曲面不具有清晰的边界或者测量点云不完备时,曲面构造难度加大。

应该注意的是,复杂曲面零件损伤形式的多样性和损伤区域形状的复杂性,经常导致上述常用的重构方法很难建立起修复加工所要求的实际模型,因此,学者们围绕损伤零件模型的逆向重构进行了深入研究,提出了直接修复模型重构方法和基于参考模型的修复模型重构方法｡第一类方法是直接对缺损三角网格模型和缺损点云数据进行重构｡三角网格曲面模型孔洞修复可采用如唐杰[32]､Leong[34,34]和Liepa[35]等人提出的直接连接孔洞边界连方式填补缺损部分｡但由于未考虑到周边信息,修复后的网格曲面光顺性和连续性较差,达不到修复加工的精度要求｡熊邦书等人在对破洞区域的修复中引入了RBF神经网络模型,充分考虑了孔洞边界和其邻域之间的联系｡虽然修复区域和原有区域之间的连接性方面有所提高,但他并未考虑到缺损区域的形状特征｡为了使修复模型能够更为逼近物体真实表面,研究人员开始考虑利用未损伤部位的几何信息对缺损区域插入点､补三角面片的方式来实现修复模型的构造｡西北大学的成欣[36]提出了对孔洞区域插入离散点的方法来填补缺损部位｡Jun[37]等人利用待修复边界的法矢量,将边界点投影到指定的参考平面上,在平面内插入离散点并三角剖分｡张丽艳等人[38]先提取孔洞边界,再对孔洞区域形成的多边形进行三角剖分,然后再进行网格细分､光顺｡高健等人[39-41]针对叶片的修复,选择利用逆向设计软件在叶片裂口处补三角片后再对整个网格细分的措施｡另外,有学者提出直接对点云数据缺损部位进行修复｡Sharf和邱泽阳等人[42-44]根据周围离散点建立曲面,然后对拟合曲面进行采样后获取缺损区域的点,然而所重构曲面是否能够精确逼近原始曲面并没有进行详细讨论｡

直接对损伤物体三角网格或点云数据建立修复模型的方式通常会涉及较大规模的数值计算,而且当损伤区域比较复杂时,很难准确地恢复损伤部位的原始几何特征｡为解决这一问题,研究人员提出可将己有的名义模型作为修复重构的参考模型｡美国洛杉矶医学中心Pearl[45]和日本大阪大学的Maeda[46]通过建立参考模型数据库,并以此分别实现了缺损骨头和牙齿的修复｡在国内,大连理工大学的宋卫卫[47]建立以健康人的股骨头近端模型为样本的数据库,在数据库中搜索到与缺损股骨头相匹配的模型从而完成坏死股骨头修复｡上海交通大学的孙进[48]研究了对称特征和非对称特征颜面损伤修复方法,其中缺损区域为对称特征的鼻子､耳朵等时可利用阵列､镜像方法进行修复,而非对称缺损形状修复则采取从数据库中搜索相似几何特征的方法来实现人脸赝复体的构造｡在机械零件的修复中利用参考模型进行损伤零件修复还处于起步阶段｡新加坡制造研究中心Ng等人[49]提出了采用中弧线和解释向量的方法建立叶片完整轮廓和不完整轮廓之间的几何关系,从而实现对磨损叶片叶尖部位的修复｡针对损伤叶片,浙江大学郑建明等人[50]通过叶片名义模型与测量点云之间的对比研宄确定了损伤叶片的修复区域,并三角化修复区域的测量数据,以此为模型依据对零件损伤区域进行修复｡Li和Ni[51]提出了通过名义模型与测量数据之间的非刚性配准来实现叶片轮廓重构的方法,避免了传统曲面拟合过程的数据处理,参数化及节点矢量相容性处理等操作｡对于直叶片的修复,Bremer等人[52,53]在测量焊道以下两个截层数据后曲线拟合并对拟合曲线进行拉伸操作,以建立叶片的修复模型｡针对具有复杂形状的叶片,提出通过名义模型和实际叶片测量数据的最佳配准策略进行重构,但没有给出详细的实施过程｡到目前为止,从测量数据到名义模型的重构方法己经有较多成熟算法,但在损伤零件测量数据到实际模型的逆向重构中,还有许多关键问题需要处理,无论是表面损伤或变形区域重构的精度还是损伤区域与完整区域过渡的光顺性都需要进一步深入研究｡

# 参考文献

[1]Nadas A. Least squares and,maximum likelihood estimates of rigid motion [M]. IBM Thomas J. Watson Research Division,1978.

[2]Hanson R.J., Norris M.J. Analysis of Measurements Based on the Singular Value Decomposition[M]. Society for Industrial and Applied Mathematics, 1981.

[3]Arun K S . Least-Squares Fitting of Two 3-D Point Sets[J]. IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell, 1987, 9.

[4]Horn, Berthold, K,等. Closed-form solution of absolute orientation using orthonormal matrices[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1988.

[5] Besl P J , Jain R C . Segmentation through variable-order surface fitting[J]. IEEE Trans Pattern Analysis & Machine Intelligence, 1988, 10(2):167-192.

[6] Besl P J , Mckay H D . A method for registration of 3-D shapes[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 1992, 14(2):239-256.

[7] Sharp G C , Lee S W , Wehe D K . ICP Registration using Invariant Features[J]. IEEE Trans Pami, 2002, 24(1):90-102.

[8] Chua C S , Jarvis R . 3D free-form surface registration and object recognition[J]. International Journal of Computer Vision, 1996, 17(1):77-99.

[9]Ko K.H., Maekawa　T., Patrikalakis N.M., et al. Shape intrinsic properties for free-form object matching[J].Journal of computing and information science in engineering,2003,3(4):325-333.

[10] Ko K H , Maekawa T , Patrikalakis N M . An algorithm for optimal free-form object matching[J]. Computer-Aided Design, 2003, 35(10):913-923.

[11] Chua C S , Jarvis R . Point Signatures: A New Representation for 3D Object Recognition[J]. International Journal of Computer Vision, 1997, 25(1):63-85.

[12] Yamany S M , Farag A A . Surface signatures: an orientation independent free-form surface representation scheme for the purpose of objects registration and matching[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2002, 24(8):0-1120.

[13] Johnson A E , Hebert M . Using spin images for efficient object recognition in cluttered 3D scenes[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2002, 21(5):433-449.

[14] Barequet G , Sharir M . Partial surface matching by using directed footprints[J]. Computational Geometry, 1996, 12(1-2).

[15]Menq C H , Yau H T , Lai G Y . Automated precision measurement of surface profile in CAD-directed inspection[J]. IEEE Transactions on Robotics & Automation, 1992, 8(2):268-278.

[16]Yau H T , Menq C H . A unified least-squares approach to the evaluation of geometric errors using discrete measurement data[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1996, 36(11):1269-1290.

[17]Zhu L M , Xiong Z H , Ding H , et al. A Distance Function Based Approach for Localization and Profile Error Evaluation of Complex Surface[J]. Journal of Manufacturing ence & Engineering, 2004, 126(3):542-554.

[18]Li X , Yeung M , Li Z . An algebraic algorithm for workpiece localization[C]// IEEE International Conference on Robotics & Automation. IEEE, 1996.

[19]Li Z , Gou J , Chu Y . Geometric algorithms for workpiece localization[J]. Robotics & Automation IEEE Transactions on, 1998, 14(6):864-878.

[20] Chatelain J F , Fortin C . A balancing technique for optimal blank part machining[J]. Precision Engineering, 2001, 25(1):13-23.

[21]Shen B , Huang G Q , Mak K L , et al. A best-fitting algorithm for optimal location of large-scale blanks with free-form surfaces[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 139(1-3):310-314.

[22]严思杰, 周云飞, 彭芳瑜,等. 大型复杂曲面零件加工余量均布优化问题研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2002(10):35-37.

[23] Li Y , Ni J . Constraints Based Nonrigid Registration for 2D Blade Profile Reconstruction in Reverse Engineering[J]. Journal of Computing & Information ence in Engineering, 2009, 9(3):296-297.

[24]Biermann D , Sacharow A , Surmann T , et al. Direct free-form deformation of NC programs for surface reconstruction and form-error compensation[J]. Production Engineering, 2010, 4(5):501-507.

[25]Sarkar B , Menq C H . Smooth-surface approximation and reverse engineering[J]. Computer Aided Design, 1991, 23(9):623-628.

[26] Ma W , Kruth J P . Parameterization of randomly measured points for least squares fitting of B-spline curves and surfaces[J]. Computer-Aided Design, 1995, 27(9):663-675.

[27] Li S Z . Adaptive sampling and mesh generation[J]. Computer Aided Design, 1995, 27( 3):235–240.

[28] 来新民. 基于计算机视觉的自由曲面逆向工程关键技术的研究[D]. 1997.

[29] Bradley, C, Vickers, G. W, Tlusty, J. Automated Rapid Prototyping Utilizing Laser Scanning and Free-Form Machining[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 1992, 41(1):437-440.

[30]Milroy M J , Bradley C , Vickers G W . Automated laser scanning based on orthogonal cross sections[J]. Machine Vision and Applications, 1996, 9(3):106-118.

[31]Piegl L A , Tiller W . Parametrization for surface fitting in reverse engineering[J]. Computer-Aided Design, 2001, 33(8):593-603.

[32]唐杰, 周来水, 周儒荣. STL文件修补算法研究[J]. 机械科学与技术, 2000, 019(004):677.

[33]Leong K F , Chua C K , Ng Y M . A study of stereolithography file errors and repair. Part 1. Generic solution[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1996, 12(6):407-414.

[34] Leong K F , Chua C K , Ng Y M . A study of stereolithography file errors and repair. Part 2. Special cases[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1996, 12(6):415-422.

[35] Liepa P . Filling Holes in Meshes[C]// First Eurographics Symposium on Geometry Processing, Aachen, Germany, June 23-25, 2003. Eurographics Association, 2003.

[36] 成欣. 三维曲面破洞修复技术研究[D]. 西北大学, 2006.

[37] Jun Y . A piecewise hole filling algorithm in reverse engineering[J]. Computer-Aided Design, 2005, 37(2):263-270.

[38] 张丽艳, 周儒荣, 周来水. 三角网格模型孔洞修补算法研究[J]. 应用科学学报, 2002, 020(003):221-224.

[39]Yilmaz O , Gindy N , Gao J . A repair and overhaul methodology for aeroengine components[J]. Robotics & Computer Integrated Manufacturing, 2010, 26(2):190-201.

[40]Gao J , Chen X , Zheng D , et al. Adaptive restoration of complex geometry parts through reverse engineering application[J]. Advances in Engineering Software, 2006, 37(9):592-600.

[41]Gao J , Chen X , Yilmaz O , et al. An integrated adaptive repair solution for complex aerospace components through geometry reconstruction[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 36(11-12):1170-1179.

[42]SHARF,A. Context-based surface comletion[J]. Acm Transactions on Graphics, 2004, 23:878-887.

[43]Chalmoviansk P , Bert Jüttler. Filling Holes in Point Clouds[J]. 2003.

[44]邱泽阳, 宋晓宇, 张定华. 离散数据中的孔洞修补[J]. 图学学报, 2004(04):85-89.

[45]Pearl M L , Kurutz S , Robertson D D , et al. Geometric analysis of selected press fit prosthetic systems for proximal humeral replacement[J]. Journal of Orthopaedic Research, 2010, 20(2):192-197.

[46]Maeda Y , Minoura M , Tsutsumi S , et al. A CAD/CAM system for removable denture. Part I: Fabrication of complete dentures.[J]. Int.j.prosthodont, 1994, 7(1):17.

[47]宋卫卫. 股骨头修复建模关键技术研究[D]. 大连理工大学.

[48]孙进. 非完备几何特征测量数据建模及其在颜面缺损修复中的应用研究[D]. 上海交通大学, 2012.

[49]Ng, B TsongJye, Lin, WenJong Lin WenJong, Chen, Xiaoqi Chen Xiaoqi,等. Intelligent system for turbine blade overhaul using robust profile re-construction algorithm[C]// Control, Automation, Robotics & Vision Conference, Icarcv. IEEE, 2004.

[50]Zheng J , Li Z , Chen X . Worn area modeling for automating the repair of turbine blades[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 29(9-10):1062-1067.

Li Y , Ni J . Constraints Based Nonrigid Registration for 2D Blade Profile Reconstruction in [51]Reverse Engineering[J]. Journal of Computing & Information ence in Engineering, 2009, 9(3):296-297.

[52]Claus Bremer. Automated Repair and Overhaul of Aero-Engine and Industrial Gas Turbine Components[C]// Asme Turbo Expo: Power for Land, Sea, & Air. 2005.

[53]C Bremer, T Kosche. Automated Repair and Overhaul System for Aero Turbine Engine Components[J]. Aeronautics Days, 2006.