

船舶弯板完工检测精度分析软件设计实现

摘要

船舶弯板的完工检测是其出厂前质量评估的必要环节，对保证弯板的成型质量起到了重要作用。目前，船厂普遍采用制作繁琐、效率低下的实体靠模检测方法来进行完工检测，不符合绿色化、自动化的新时代造船需求。因此，为了更加准确的评估船舶弯板的加工完成情况，需要结合三维视觉测量技术开发出符合加工实际的船舶弯板完工检测精度分析系统。

本文针对这一需求，基于曲面重建与点云配准算法，在船舶弯板的三维点云模型基础上，通过分析理论点云数据与检测点云数据在不同维度上的误差值，以计算出船舶弯板的最终加工精度。

本文具体完成的工作有：（1）对船舶弯板的点云数据进行曲面重建；（2）基于弯板检测数据与理论数据的三维点云输入，结合点云配准技术进行曲面匹配；（3）根据设定的误差计算维度，对匹配完成的曲面进行误差计算；（4）构建精度分析报表，从不同维度对弯板的加工精度进行评估。

本课题最终实现了包含曲面匹配与曲面误差计算功能的完工检测精度分析软件。本文通过实验对系统原型进行了验证，实验证明本文提出的方法和原型不仅极大地提高了船舶弯板成形检测的效率，并且针对点云模型分析方法拥有更高的适用性，对今后完工检测精度分析系统的有一定的参考价值。

关键词：成形检测，点云，精度分析，三维可视化

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF PROJECT FOR ANALYZING THE ACCURACY OF SHIP BENDING PLATE

ABSTRACT

The completion detection of ship bending plate is a necessary step for quality assessment, which plays an important role in ensuring the quality of bending plate. At present, most shipyards use the cumbersome and inefficient physical profiling detection method for completion detection, which does not meet the needs of shipbuilding in the new era. Therefore, in order to more accurately evaluate the processing accuracy of ship bending, it is necessary to develop a project for analyzing the accuracy of ship bending plate in line with the processing reality combined with three-dimensional vision measurement technology.

Based on surface reconstruction and point cloud registration algorithm, this paper calculates the final machining accuracy of ship bending by analyzing the error values of theoretical point cloud data and detection point cloud data in different dimensions on the basis of the three-dimensional point cloud model of ship bending.

The specific work of this paper includes: (1) Surface reconstruction of point cloud data of ship bending; (2) Based on the three-dimensional point cloud input of bending detection data and theoretical data, combined with point cloud registration technology for surface matching; (3) According to the set error calculation dimension, calculate the error of the matched surface; (4) construct the report to evaluate the accuracy of bending plate from different dimensions.

In this subject, the project for analyzing the accuracy of ship bending plate is finally realized, including the functions of surface matching and offset calculation. In this paper, the system prototype is verified by experiments. The experiments show that the method and prototype proposed in this paper not only greatly improve the efficiency of ship bending forming detection test, but also have higher applicability by the analysis method for point cloud model, which has a certain reference value for the development of completion detection accuracy analysis system in the future.

Key words: the forming test, point cloud, precision analysis, 3D visualization

目 录

第一章	绪论	1
1.1	研究背景	1
1.2	研究现状	1
1.2.1	曲面重建技术	1
1.2.2	曲面配准技术	2
1.3	研究意义	2
1.4	研究内容	2
1.5	本文组织结构	3
1.6	本章小结	3
第二章	需求分析及系统框架	4
2.1	业务场景描述	4
2.2	功能性需求分析	5
2.3	非功能性需求分析	6
2.4	系统架构设计	6
2.5	本章小结	7
第三章	船舶弯板检测精度分析实现过程	8
3.1	完工精度分析流程	8
3.2	曲面重建	9
3.2.1	前提	9
3.2.2	曲面重建	10
3.3	曲面匹配	11
3.3.1	中心线提取	11
3.3.2	移动矩阵获取	12
3.3.3	曲面移动	13
3.4	曲面误差计算	13
3.4.1	取特征点	13
3.4.2	计算对应点	13
3.4.3	计算误差值	14
3.5	本章小结	14
第四章	原型展示及实验验证	15
4.1	系统实现及部署	15
4.2	界面展示	15
4.2.1	弯板检测数据选择	16
4.2.2	曲面匹配	16
4.2.3	曲面偏差计算结果	17
4.2.4	报表导出	17
4.3	实验验证	18
4.3.1	数据集	18



4.3.2	评价标准.....	20
4.3.3	实验结果.....	20
4.3.4	实验讨论.....	24
4.4	本章小结.....	25
第五章	结论.....	26
5.1	工作总结.....	26
5.2	研究展望.....	26
参考文献.....		27
谢辞		29

第一章 绪论

1.1 研究背景

随着我国科技实力的不断进步，船舶产业也进入了高速发展的时代，在2021年我国造船完工量全球份额为47.6%，居全球首位^[1]。在船舶的加工生产过程中，船舶外板的加工质量会对船舶的整体质量产生重要的影响。不论是哪一种船型的船体外板，都包含了大量的大型弯板，其加工主要使用两种方法：水火弯板和冷弯加工，而不论使用哪一种方式加工后的船体弯板，都需要经过成形检测后才能够出厂。

对于成形检测，现在大多使用实体靠模检测技术，即根据船舶弯板的曲度、大小等信息制作出相应的样箱，然后将弯板放置其上，观察样箱与弯板之间是否有缝隙。这种检验方法虽然简单直观，但存在制作繁琐、个人经验与技能水平要求高、自动化程度低下等不足。因此，在三维图像处理技术不断涌现与发展的背景下，例如线激光多目立体视觉等技术已运用在船舶弯板的快速、精确成形检测研究之中^[2]，加工后的弯板能够被转换为三维点云模型与船舶弯板的原始理论数据进行比对。为了提升三维点云模型的比对效果，更加准确的评估船舶弯板的加工完成情况，需要开发出符合加工实际的船舶弯板完工检测精度分析系统。

本课题将以船舶弯板的理论与检测点云模型作为数据输入，首先对数据进行预处理，结合ICP（Iterative Closest Point，迭代最近点）算法完成两曲面的配准操作，然后通过弯板的不同维度进行加工误差的分析，计算出弯板的整体加工进度，并且为技术人员提供完工检测分析报表，最终搭建一个完整的船舶弯板完工检测精度分析系统。

1.2 研究现状

本课题需要实现船舶弯板完工检测精度分析系统，根据弯板的三维点云模型重建出曲面后进行理论曲面与检测曲面的匹配，完成加工精度的分析。因此本节将从点云配准技术和曲面重建技术两方面来阐述研究现状。

1.2.1 曲面重建技术

曲面重建技术的本质是将点云模型转换为具有几何拓扑关系的曲面模型，使得模型更加接近于真实曲面。目前广泛使用的方法主要可以分为两类：三角划分与基于隐式函数的重构方法。

三角划分在曲面重建算法研究的早期是主流方法。在其中使用较为广泛的是Delaunay Refinement算法^[3]，该算法对点云模型进行三角剖分，以剖分出的众多三角形集合作为重建出的曲面，而之后又有许多学者对其进行改进。在1995年Ruppert对Delaunay Refinement算法进行了改进，使得剖分出的三角形最小角大于20.7度^[4]；在此基础上，2001年Rivara等人进一步优化，使得最小角的最小值不小于30度^[5]，极大地提升了曲面重建的效果。除此之外，Power Crust算法也得到了广泛的应用^[6]。Power Crust在三角划分的基础上，能够生成有密封性的模型，且在从密到稀的点云模型中重建以及在模型细节的保留上都表现良好。

除了采用三角划分的方式，基于隐式函数的重构方法也得到了发展。其中具有代表性的是基于泊松方程的曲面重建算法^[7]。泊松方程是应用领域非常广的偏微分方程，在曲面

重建过程中,通过求解泊松方程来取得点云模型所描述的表面信息代表的隐式方程,并且通过对该方程进行等值面提取,从而得到具有几何信息的表面模型。该曲面重建技术优点突出,不仅具有封闭特征,并且有良好的几何表面特性与细节特性。

1.2.2 曲面配准技术

曲面配准是曲面精度分析的重要步骤之一。曲面配准是通过求解移动矩阵与旋转矩阵来变换待配准曲面的空间位置信息,达到将位置不同、姿态不同的三维曲面数据集统一到同一个坐标系下的目的。在完成了曲面配准过程后,两个曲面贴合对齐,相对位置偏差减小,为后续的曲面精度分析奠定了基础。而点云模型的配准与曲面配准的思路基本相同。

国内外学者首先提出了一些有效的曲面配准方法。目前最经典的点云配准算法即为1992年Besl等人提出的ICP (Iterative Closest Point, 迭代最近点) 算法^[8]。ICP算法是基于EM (Expectation-maximization algorithm) 思想的方法,采用交替迭代法优化得到最优值,多用于三维空间内点云配准,不仅适用于平面场景,还适用于曲线和曲面等场景。Radu等人提出了一种被称为PFH (Point Feature Histograms, 点特征直方图) 的算法^[9],它估计法线之间的相互关系来描述几何特征。之后有人在PFH的基础上提出一种效率更高的配准算法,被称为FPFH (Fast Point Feature Histograms, 快速点特征直方图)^[10],其简化了点领域内点之间的相关信息,降低了PFH的计算复杂度。除此之外,S Barnea等人根据地面激光扫描数据的特点,即每一个采样点的位置保持不变,提出了ICPIF (Iterative Closest Points using Invariant Features) 算法^[11],这种算法与硬件环境相结合,可以处理点云与扫描场景更为复杂的情况。

在曲面配准算法的评估标准中,配准的精度与效率是最为重要的两个方面,因此国内的学者在ICP算法的基础,对这两方面进行了改进。在ICP算法的基础上,戴静兰等人引进额外的曲率信息,加上K-D树的使用,使得搜索最近邻点的过程更加高效,降低了ICP算法所用的时间^[12]。严剑锋等人提出了一个提高配准精度的方法^[13],先根据特征点的点对进行粗配准,在此基础上再使用ICP算法进行精细配准。

简而言之,现有的曲面重建技术有多个发展方向,在众多领域被广泛应用。从重建效率与质量来看,现有的技术能够较好地完成曲面重建,与实际曲面的误差能够控制在接受范围内,并保留重要的细节特性,达到一定的平滑度。现有的点云配准技术可以很好的对不同大小、不同点云密度的曲面进行配准,对于完工检测精度分析系统来说,可以很好的完成三维点云曲面的匹配,为之后的误差分析打下基础。

1.3 研究意义

随着各个国家的造船业竞争越来越激烈^[14],低效率、高费用的纯手工操作已很难满足船舶生产发展的需要。因此,船舶弯板加工的自动化是目前迫切需要实现并且投入生产实际的目标,而弯板完工检测工作作为加工过程中的重要组成部分,其自动化对于提高弯板成形精度以及加工效率、降低对技术人员实际经验的依赖度有着重要的作用。所以,以传统加工方式积累的经验作为基础,在三维视觉技术已逐步被引入到船舶弯板的成形检测工作中的背景下,开发一款使用简单、精度较高并且便于可视化与统计的完工检测精度分析软件,具有一定的实际价值与意义。

1.4 研究内容

本项目将为造船厂的船舶弯板完工检测精度分析提供完整解决方案,对输入的曲面点云信息进行比对,自动进行误差计算与分析,最终自动生成加工进度的报表。

本文研究项目实现的内容主要包括:

- (1) 提供船舶弯板检测数据的查看、搜索与选择功能。
- (2) 根据弯板检测数据与理论数据的三维点云输入，结合点云配准技术进行曲面的匹配。
- (3) 根据设定的误差计算维度，对匹配完成的曲面进行取点以及误差计算。
- (4) 构建报表，包括弯板基础信息、误差可视化、不同维读误差的表格显示以及弯板整体加工进度等信息。
- (5) 完善系统，建立一个完整的完工精测精度分析软件。在整个完工检测精度分析过程中，船舶弯板的匹配、比对以及误差计算达到自动执行的标准，不需要用户进行手动调整。

1.5 本文组织结构

本文将分为五个章节进行展开阐述。其主要内容如下：

第一章，绪论。主要包括了船舶弯板完工检测精度分析软件的研究背景、国内外的点云配准技术和曲面重建技术的研究现状、研究意义、研究内容和本文的组织结构。

第二章，需求分析及系统框架。根据船舶弯板完工检测的业务场景和使用精度分析软件后的业务场景，分析了软件的功能性需求和非功能性需求，并对系统的整体框架进行了说明。

第三章，系统详细设计与核心方法。这部分在需求分析的基础上，对数据模型设计进行了详细地阐述，并且根据系统框架阐述了整个软件系统中主要流程的各个算法实现和技术细节。

第四章，原型展示与实验验证。本章根据原型软件的界面依次展示了实现效果，之后生成模拟数据，通过实验验证了本课题提出的完工检测精度分析方法的有效性，后对实验结果进行了分析讨论并提出了今后的改进方向。

第五章，结论。本章总结了船舶弯板完工精度分析软件的全部工作和重点贡献，并对未来的改进和研究方向做出了展望。

1.6 本章小结

本章主要对船舶弯板完工检测精度分析软件的项目背景以及项目意义做出了介绍，然后分别从点云配准技术、曲面重建技术两个方面介绍了国内外研究现状，明确了本软件的研究意义和研究内容，并简要介绍了本文的组织结构。

第二章 需求分析及系统框架

本章将分析船舶弯板完工检测精度分析软件的需求并提出系统框架设计。从业务场景出发，进行功能性需求和非功能性需求分析，设计出本软件系统的框架结构。

2.1 业务场景描述

在现有的弯板完工检测过程中，多是通过手工测量的方式进行处理，如图2-1所示。在加工某一类型的弯板时，操作人员首先根据该弯板的设计数据制作样板或是样箱。当测量人员拿到检测完成的弯板之后，会将其放置在制作好的样箱上，通过肉眼或是测量工具观察样箱与弯板之间是否有缝隙，进而由测量人员根据经验判断该弯板是否符合加工要求。在判断完成后，若是弯板符合加工要求，则结束加工流程；若是弯板不符合加工要求，则由测量人员手工记录弯板加工失败的相关情况。

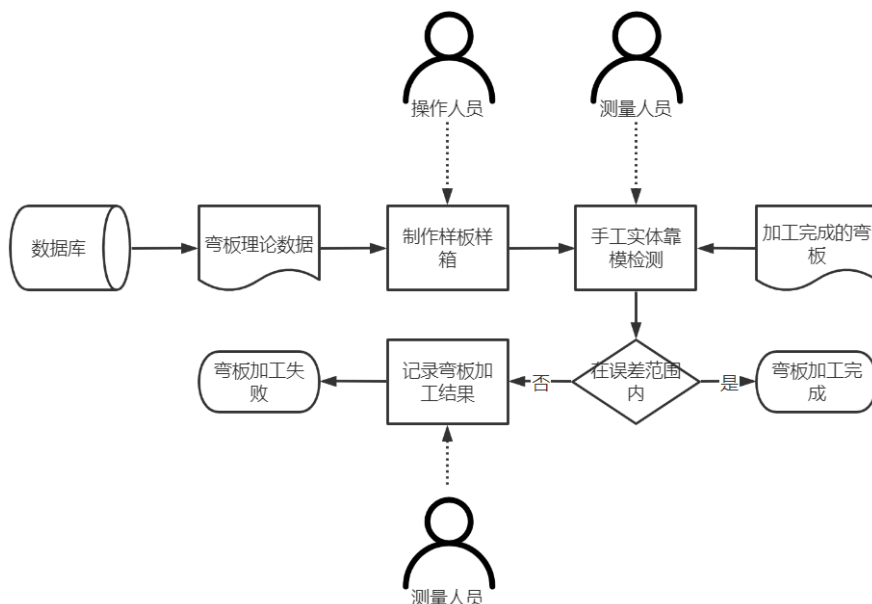


图2-1 现有业务场景

整个业务流程存在诸多问题。对于实体靠模检测来说，不仅有样箱制作繁琐、操作难度大等问题，测量人员的主观影响因素也不容忽视，能否准确并且高效的判断出一张弯板是否符合加工要求对测量人员的要求极高，需要长期的经验积累；对于船舶弯板加工结果的记录来说，现在主要依赖测量人员的手工记录，由于没有专业的检测仪器，只能记录加工时间、人员以及加工是否符合要求等简单的信息，不仅不利于收集和管理，并且对弯板加工的改进不能起到很好的参考作用。

整个完工检测业务流程过于依赖人力，检测的效率与稳定性不能得到保证。因此，我们对该业务流程进行自动化的改进。

改进后的业务场景如图2-2所示。不再使用手工实体靠模检测，也就不再需要操作人员的参与。将通过三维视觉技术得到的船舶弯板三维点云检测数据作为输入，在进行了预处理之后与弯板的原始理论数据进行比对。此时测量人员可以对弯板误差的几个维度权值进行调整，以达到对弯板加工进度更精确的评估效果。在完成了曲面比对与参数设置之后，

软件对船舶弯板数据进行自动的误差计算，根据设定好的参数计算出弯板的加工进度，并存入数据库中。在软件的可视化界面上预览了加工结果之后，测量人员可以选择将其生成报表并导出，作为系统统计的数据与之后加工改进的数据依据。

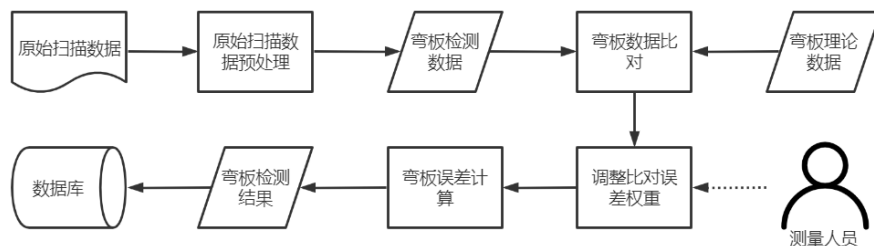


图2-2 基于船舶弯板完工精度分析系统的业务场景

2.2 功能性需求分析

根据船舶弯板完工检测精度分析系统的应用业务场景，我们分析了系统的功能性需求，并通过用例图对系统的功能性需求做出详细的说明，如图2-3所示。

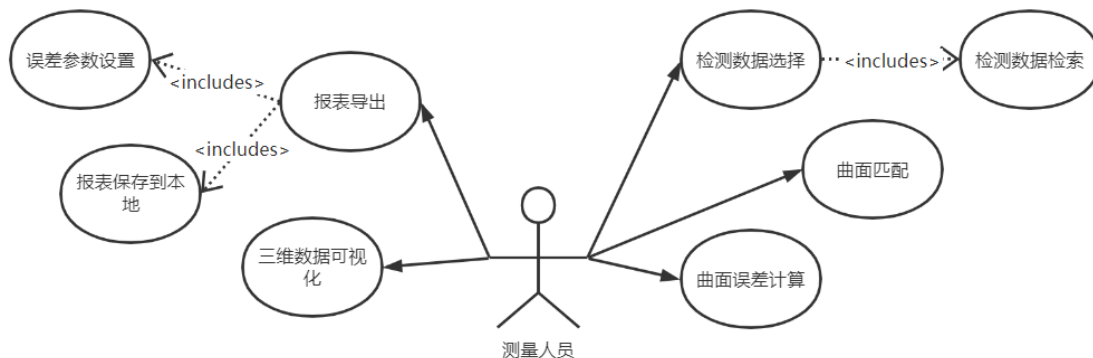


图2-3 船舶弯板完工检测精度分析软件用例图

系统的功能性需求主要为检测数据选择、曲面匹配、曲面误差计算、报表导出以及三维数据可视化。用户在软件界面上选择要进行完工检测精度分析的某一条检测数据后，系统会根据选择的数据进行曲面匹配，然后对匹配完成的曲面数据进行误差计算。在误差计算完成后，用户可以选择将误差数据导出为报表并保存到本地。同时，系统会将每个步骤的结果进行三维可视化提供给用户。对于用例图中的各个用例，在表2-1中进行详细说明。

表2-1 船舶弯板完工检测精度分析系统用例说明

用例名称	用例说明
检测数据选择	从数据库提取检测数据列表，用户可以进行选择要进行进一步精度分析的某一条检测数据。
检测数据检索	用户输入检索条件，系统根据条件在大量检测曲面数据中快速定位满足检索条件的相关数据并且显示在界面上，供用户进一步选择。
曲面匹配	系统根据检测点云数据与原始理论点云数据进行曲面的匹配，得到相应的平移与旋转矩阵后将检测数据进行转换，使其与理论数据处于同一坐标系下。
曲面误差计算	系统在完成匹配的曲面基础上，在两曲面上获取几组点对并计算点对之间的误差，储存起来作为曲面误差的数据。
报表导出	系统提供报表生成，根据计算完成的曲面误差，自动生成误差报表。
误差参数设置	用户设置各个维度的误差权重，并根据权重值重新计算报表数据与船舶弯板加工进度。
报表保存到本地	将已完成生成的误差报表以不同的文件格式保存到本地。
三维数据可视化	对曲面点云数据、两曲面匹配结果以及曲面误差计算结果进行三维可视化。

2.3 非功能性需求分析

根据业务场景的描述，在非功能性需求的方面主要考虑的是精度分析的效率以及软件的可扩展性。

根据船舶加工的实际生产要求，船舶弯板完工检测精度分析流程的处理最长时间为60秒，且包含了三维可视图像的生成。其次，船舶弯板的类型众多，在完工检测时确定弯板的类型可以更准确地定位弯板的特征点、误差权值等信息，有助于提高精度分析的精确度，所以三维视觉自动识别模块以及船舶弯板分类模块的添加为完工检测精度分析系统的未来发展方向，因此系统的可扩展性是重要的非功能性需求。

2.4 系统架构设计

在系统的架构设计中使用MVC（Model-View-Control）设计模式，如图2-4所示。

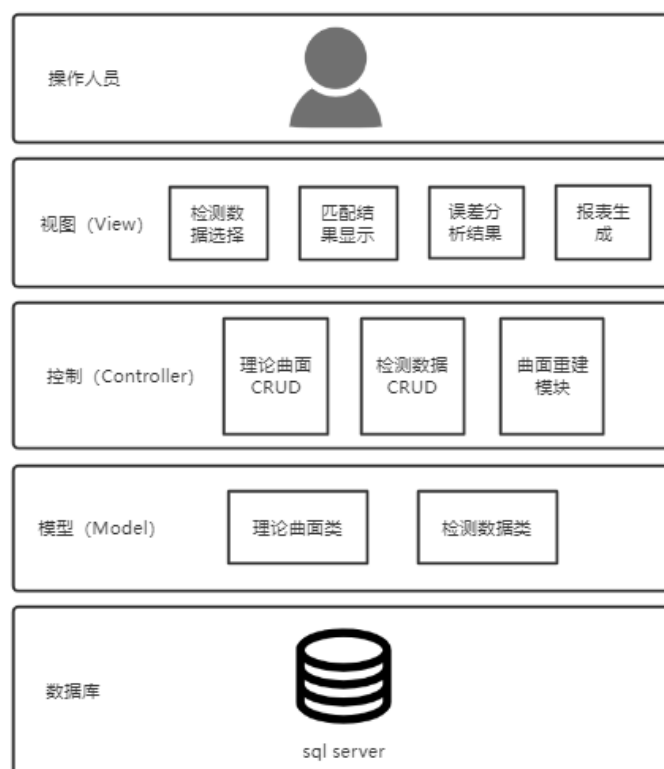


图2-4 完工检测精度分析软件系统架构图

模型层（Model）主要定义了本文系统需要使用的基础数据。在完工检测精度分析系统中主要定义了理论曲面类与检测数据类两个数据模型，数据库的存储使用的是Microsoft SQL Server，能够被部署在服务器上并满足我们对数据的操作要求。

控制层（Control）主要用于完成系统的业务逻辑。在本系统中控制层主要包括两部分，一部分是对数据库的控制类，进行数据库中理论数据的读取，检测数据的读取、检索与更新等操作；一部分是算法的具体实现类，比如本系统中的曲面重建功能。

展示层（View）与用户进行交互，并进行软件必要流程的展示。完工检测精度分析系统的展示层主要使用.NET Framework框架进行搭建，满足用户对界面展示的要求，并且保持不同界面的风格简约一致。

展示层使用.net framework框架中的winform界面进行搭建。控制层将几个模块分别封装为C#类，在类中对数据库中的字段进行修改或者调用Python脚本。而模型层使用了OR映射框架，与服务器上的数据库连接，可以通过对数据模型的修改进而更新数据库。因此，系

统执行时的流程可以描述为，当用户在展示层进行操作时，winform界面上的控件获取参数，调用控制层中类的公共函数并传入参数，之后函数调用Python脚本或是对模型层的数据模型进行修改，最后对数据库进行更新，则完成了用户操作的响应流程。

2.5 本章小结

本章主要分析了系统所涉及的现有的船舶弯板完工检测业务场景，与使用系统后的业务场景。从业务场景出发，本章提出了系统的功能性和非功能性需求，并通过用例图的方式对功能性需求做出详细的阐述，以及提出了对系统精度分析的效率以及软件的可扩展性两方面的非功能性需求。从系统的需求出发，基于应用场景和需求分析，本章提出了此系统整体框架和架构设计。

第三章 船舶弯板检测精度分析实现过程

本章首先阐述了船舶弯板完工检测精度分析的基本流程，然后根据流程设计出了数据模型，之后围绕完工检测精度分析方法展开讨论，包括船舶弯板理论数据与检测数据的曲面重建、弯板理论曲面与检测曲面的匹配算法，最后介绍了根据理论曲板中心线点、边界线点以及肋位线点进行误差计算的方法。

3.1 完工精度分析流程

船舶弯板精度分析的基本流程如图3-1所示。船舶弯板检测精度分析首先从数据库中提取出弯板的检测数据与理论数据，通过曲面重建将两点云数据转变为曲面数据。然后，对弯板的理论曲面与检测曲面进行曲面匹配，可以得到匹配后的弯板检测曲面，以及理论曲面的中心线点集，与从理论曲面计算出的肋位线点集以及数据库中提取的边界线点集一起，进行弯板的误差计算，最后将计算出的结果存入数据库中。

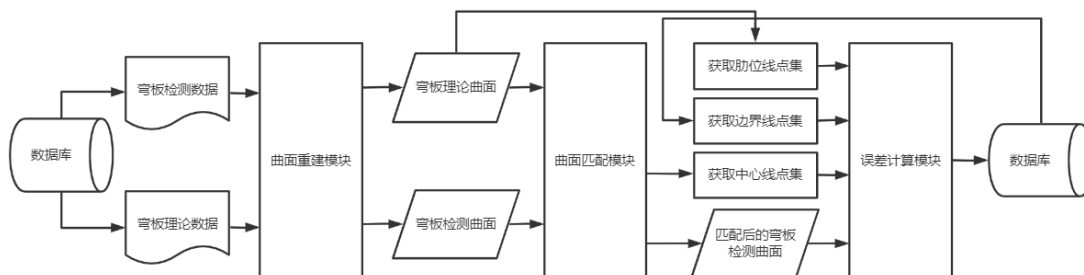


图3-1 船舶弯板检测精度分析的基本流程

在精度分析流程中，数据库中的数据模型是根据弯板数据与加工流程需求进行设计，如图3-2所示。

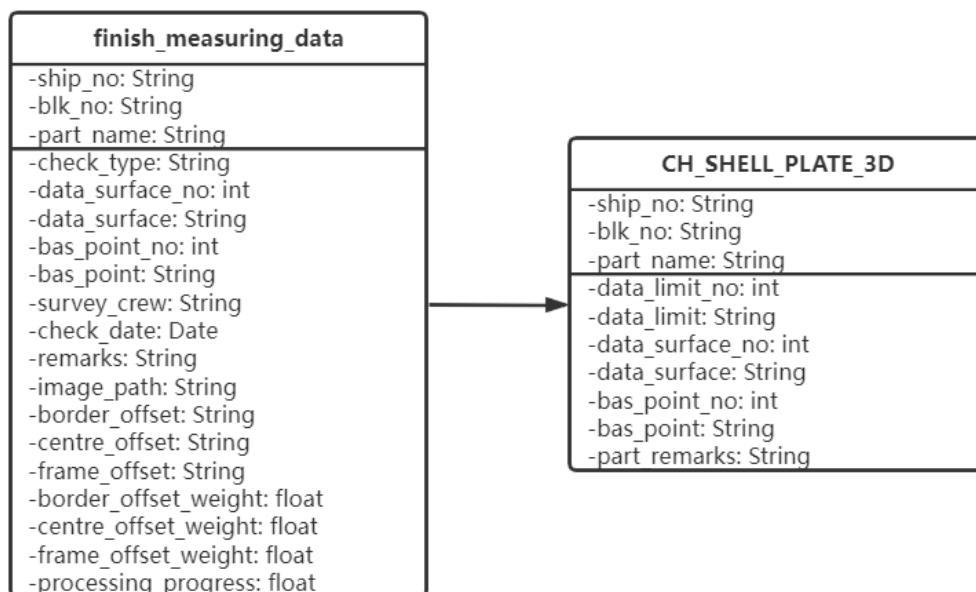


图3-2 完工检测精度分析软件数据结构设计图

由于理论点云数据是从CAD曲面模型中直接导出的,包含了曲面表面与边界上的点坐标信息,所以我们使用data_limit_no属性保存理论曲板边界点的点总数、data_limit属性保存理论曲板边界点的三维坐标值,因此在误差计算时边界线的点集可以直接从数据库中读取;而data_surface_no属性保存理论曲板表面点云数据的点总数、data_surface属性保存理论曲板表面点云的三维坐标数据,为曲面重建提供了数据基础。而检测点云数据是从智能检测装置中获取的,只包含曲面表面的点坐标信息,因此我们也使用data_surface_no属性保存弯板表面点云数据的点总数、data_surface属性保存弯板表面点云的三维坐标数据,主要用于曲面重建。

除此之外,我们也为精度分析的结果设计了字段。其中, image_path保存船舶弯板误差的整体可视化图片信息,使用Base64编码进行储存; border_offset属性保存每一个弯板边界点的误差值; centre_offset属性保存弯板中心线上每一个点的误差值; frame_offset属性保存弯板肋位线上每一个点的误差值; border_offset_weight、centre_offset_weight、frame_offset_weight三个属性分别保存了边界误差、中心线误差以及肋位线误差的权值; processing_progress属性保存了最终计算出的船舶弯板加工进度。这些数据不仅保存了精度分析的结果,并且可以直接生成分析报表,便于技术人员对已经完成的弯板精度分析数据进行二次导出。

在船舶弯板精度分析基本流程中,曲面重建模块、曲面匹配模块以及误差计算模块的方法将分别在3.2、3.3以及3.4节进行介绍。

3.2 曲面重建

3.2.1 前提

(1) 曲面重建的必要性

点云模型本身不包括空间拓扑信息,因此它虽然能在很大程度上描述目标表面的集合形貌,但是无法给技术人员提供真实的立体感受。除此之外,点云模型中的点具有随机性和不规则性,也就是说当我们想要获取如中心线、边界线上等特定位置的点,点云模型本身不一定存在满足要求的点,并且点云模型也不能为计算特征点在检测点云数据中的映射等三维数据处理过程提供有效的数据结构技术。因此基于船舶弯板CAD设计数据与智能检测设备采集的点云数据,建立满足精度分析要求以及人眼感官的目标三维网格模型,实现点云数据的曲面重建,是船舶弯板完工检测精度分析的重要步骤。

(2) 基于泊松方程的曲面重建

基于泊松方程的曲面重建是一种隐式曲面重建方法,主要使用的是指示函数。指示函数指明了模型的内外区域,在模型内部函数值为1,外部函数值为0。在三维空间中,指示函数 $\varphi(x,y,z)$ 上任意一点的法矢为: $\varphi_x(x,y,z)\vec{i} + \varphi_y(x,y,z)\vec{j} + \varphi_z(x,y,z)\vec{k}$,而指示函数表示的曲面上任意一点的梯度为 $\varphi_x(x,y,z)\vec{i} + \varphi_y(x,y,z)\vec{j} + \varphi_z(x,y,z)\vec{k}$,与指示函数的法矢相同,因此可知,指示函数的梯度等同于指示函数所表示的模型表面的内法线,如图3-3所示。由泊松表面重建的示意图可知,该重建的基本流程是根据有向点集(从点云模型中提取)得到指示函数的梯度,进而计算出指示函数,最后完成模型表面的输出。

基于泊松方程的曲面重建有很多优点,不仅曲面重建的效果比较平滑,具有良好的几何表面特性和细节特性,而且重建出的模型具有封闭特征,在点集稠密或是稀疏的位置都能较好地重建。

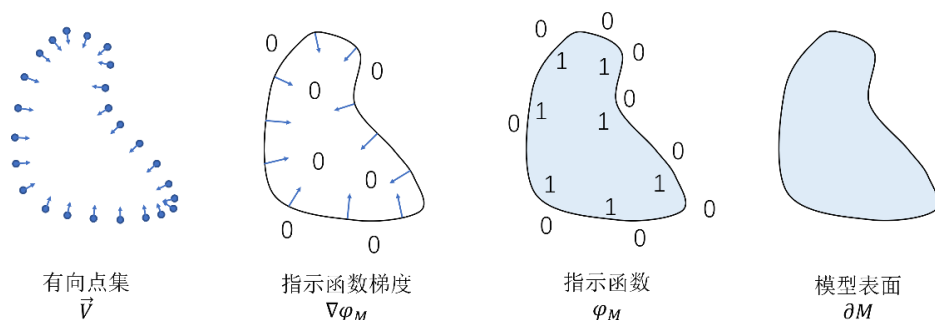


图3-3 二维泊松表面重建示意图

3.2.2 曲面重建

(1) 点云法向量估计

由于我们采用的是基于泊松方程的曲面重建方法，该方法的基本要求为点云模型中的每一个点都包含了法向量数据，而船舶弯板的检测数据中只包括了点云的坐标信息，因此首先需要从点云数据集中近似推断曲面法线。

点云法向量估计的主要实现思路是根据点P的领域内的N个点拟合一个平面，而平面过N点的重心，则平面的法线方向即为点的法向量^[15]。由于法向量的方向具有随机性，所以设定N点重心点到点P形成的向量与法向量点乘的正负来决定法向量的正负。对点云模型中的每一个点重复上述过程，则完成了点云的法向量估计。

(2) 泊松曲面重建

使用Open3D进行船舶弯板检测点云数据与理论点云数据的泊松曲面重建，图3-4展示了一个曲面的泊松曲面重建结果，可以得到曲面重建出的所有点坐标以及拟合出的三角形信息（包括每一个三角形顶点的id），并且得到重建曲面的点密度。

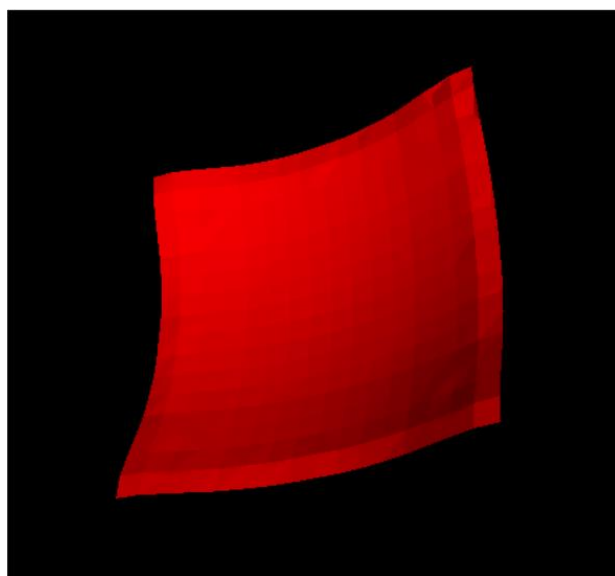


图3-4 基于泊松方程的曲面重建效果图

(3) 重建曲面修正

基于泊松方程的曲面重建的优点在于曲面的重建精度高，并且对点云数据稀疏或是丢失的位置有修补作用，但是该方法的缺点在于单片的点云数据重建有可能外推到其他区域，进而产生冗余的曲面，消耗了更多的计算资源。当曲面重建只用于可视化的目的时，对坐标区域的外推并不会造成很大的影响，但是完工检测精度分析需要在曲面上选取对应点，增加的区域会干扰其选择，进而影响精度分析的准确性，因此在完成泊松曲面重建之后，我们需要将外推的区域截取掉。

由于点云数据并不包含边界信息，所以采用点云数据的包围盒范围作为重建曲面修正的标准。进行修正时，获取原点云数据的包围盒，以包围盒的范围进行过滤，对曲面重建出的每一个三角形进行判断，若是三角形的三个点都位于包围盒之外，则将该三角形切除，若是有一个顶点位于包围盒内，则将该三角形保留。最终使重建出的曲面与原点云完美匹配。

3.3 曲面匹配

在本节中我们将具体阐述如何对检测与理论曲面进行匹配，主要通过三个步骤来完成曲面匹配的工作：

(1) 中心线提取：根据OBB包围盒获取中心线所在平面的信息，并且与重建出的曲面相交，提取出交线（中心线）的点集；

(2) 移动矩阵获取：以两曲面的中心线点作为控制点，根据ICP点云配准算法计算出检测曲面相对于理论曲面的移动矩阵；

(3) 曲面移动：根据计算出的移动矩阵，将检测曲面移动至与理论曲面处于同一坐标系下。

3.3.1 中心线提取

根据船舶生产的实际要求，我们使用检测与理论曲面的中心线点作为控制点进行曲面匹配。由于三维点云数据只保存了点的坐标值，并不包含曲面的位置与姿态信息，所以需要使用OBB包围盒对中心线的位置进行计算。

OBB包围盒（Oriented Bounding Box）是包围数据对象的最小长方体^[16]，它具有很好的紧致性，能够很好地描述对象的位置与姿态信息，故我们使用它来获取曲面的中心线位置。

(1) 确定OBB包围盒

使用vtk的vtkOBBTree类确定曲面的OBB包围盒，包围盒的生成情况如图3-5所示。可以看出包围盒准确地贴合点云，其顶点与边界能够很好地反映点云的状态。

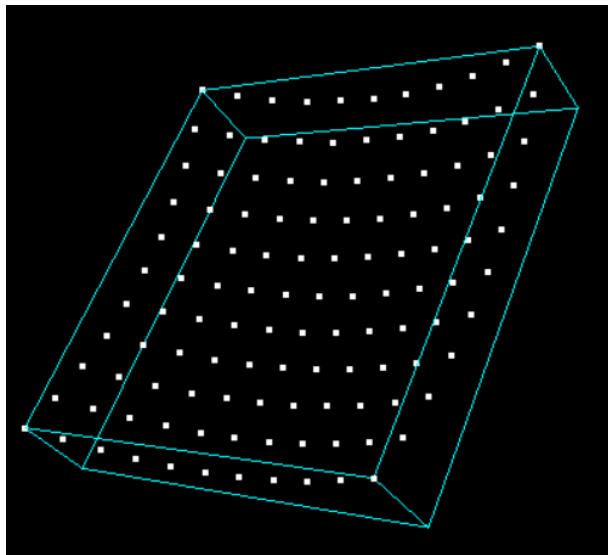


图3-5 OBB包围盒

(2) 获取中心线

根据计算出的OBB包围盒信息，我们可以确定包围盒的一个顶点corner，以及从顶点corner延伸出去的长宽高向量（参考图3-6中的max、mid、min，三个向量根据长度进行排序，max向量最长，而min向量最短）。要确定一个平面，需要平面上的一个点坐标以及平

面的法向量。如图3-6所示在中心线平面1上的其中一个点即为corner坐标加上长边向量（max）的一半，而平面1的法向量即为长边向量（max），即可确定中心线平面1；同理通过corner坐标与短边向量（mid）可确定中心线平面2。

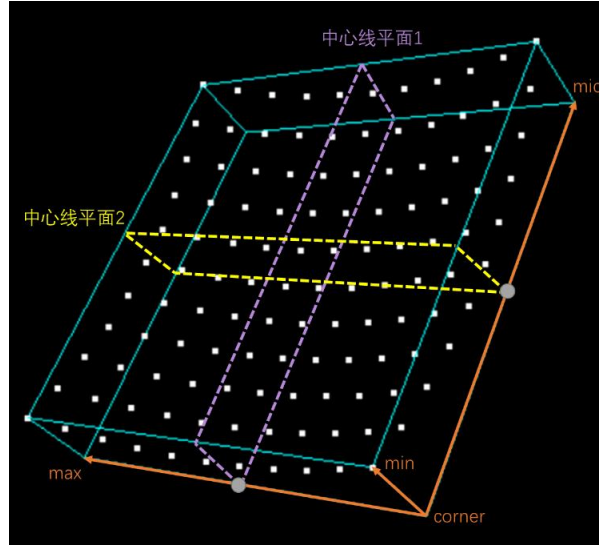


图3-6 中心线定位示意图

根据已确定的两个中心线平面，分别与重建出的曲面进行相交，得到两条交线。由于交线是以折线的形式被计算出来，所以为了提取交线中的点，我们分析折线的拓扑信息，将折线中的每一段直线提取出来并储存直线的端点，最终获得两个互相垂直的中心线点集。在船舶弯板的加工要求中，两条中心线上的点皆作为曲面配准的控制点，所以我们将两个点集相加，得到最终的控制点集。

3.3.2 移动矩阵获取

该阶段使用ICP（Iterative Closest Point，迭代最近点）算法进行曲面配准^[8]，最终计算出检测曲面相对于理论曲面的移动矩阵。

在曲面配准过程中，我们定义理论曲面的中心线点云为目标点云 $P = \{p_i | p_i^3 \in R, i = 1, 2, \dots, n_p\}$ ，检测曲面的中心线点云为源点云 $Q = \{q_i | q_i^3 \in R, i = 1, 2, \dots, n_q\}$ ，旋转矩阵为 R （ 3×3 型矩阵），平移矩阵为 T （ 3×1 型矩阵）。配准的目的是寻找一个 R 和 T ，使得误差函数的值最小，误差函数采用如下3-1公式计算。

$$E = \sum_i^n \|q'_i - (Rp_i + T)\|^2 \quad (3-1)$$

公式中的 q'_i 是在理论曲面上，距离检测曲面点云中 p_i 最近的点。

曲面配准的详细步骤如下：

- (1) 在循环开始之前，求出目标点云的初始最近点对集 $(p_i, q_i^1) (i = 1, 2, \dots, n_p)$ ，初始化旋转矩阵 R_0 为单位阵 E ，平移矩阵 T_0 为零矩阵，并且计算初始误差函数值：

$$E_0 = \sum_i^{n_p} \|q_i^0 - (R_0 p_i + T_0)\|^2;$$

- (2) 循环开始：

- a) 根据最近点对集 $(p_i, q_i^k) (i = 1, 2, \dots, n_p)$ 计算得到 R_k 、 T_k （此时 $k = k + 1$ ），并对旋转矩阵与平移矩阵进行更新： $R_k = R_k \times R_{(k-1)}$ ， $T_k = R_k \times T_{(k-1)} + T_k$ ；

- b) 更新最近点对集：计算目标点云中的每一个点 p_i ，在根据更新的旋转矩阵与平移矩阵进行修改后的源点云的最近点 q_i^k ；
- c) 计算新的误差函数值： $E_k = \sum_i^{n_p} \|q_i^k - p_i^k\|^2 = \sum_i^{n_p} \|q_i^k - (R_k p_i + T_k)\|^2$ ；
- d) 如果 $1 - E_k/E_{(k-1)} \leq e$ (e 为给定的阈值)，则 R_k 、 T_k 为最终配准结果，循环结束；如果 $1 - E_k/E_{(k-1)} > e$ ，就返回a)步，继续执行循环，直到满足阈值。

通过上述的ICP算法，对船舶弯板理论曲面与检测曲面进行配准，获取到检测曲面相对于理论曲面的旋转与平移矩阵。对于弯曲程度不同的船舶弯板，这种方法虽然配准时间复杂度非常高，但是能够确保两曲面的中心线准确重合。

3.3.3 曲面移动

对于三维点云模型，模型的平移与旋转等价于模型中每一个点都进行相应的平移与旋转。定义船舶弯板检测曲面点云数据为 $P = \{p_i | p_i^3 \in R, i = 1, 2, \dots, n_p\}$ ，根据计算出的旋转矩阵 R 与平移矩阵 T ，移动之后的新点云为 $P' = \{p'_i | p'_i = R p_i + T, p_i \in P\}$ 。

得到船舶弯板理论曲面点云数据与转换后的检测曲面点云数据，完成了该阶段曲面配准的工作。

3.4 曲面误差计算

根据船舶弯板的加工要求，弯板的中心点、边界点以及肋位线上的点对弯板的曲面精度影响程度最大，所以在曲面的误差计算阶段，分别对上述三个维度的误差进行计算，而计算的步骤分为三步，取特征点、计算对应点与计算误差值。

3.4.1 取特征点

在这一过程中我们需要在理论曲面上选取要进行误差计算的点集。

(1) 中心线的点集

在曲面匹配的阶段，我们使用OBB包围盒确定了两条中心线的位置与点集。而在曲面误差计算中，我们选取与长边平行的中心线点集作为特征点，所以根据之前计算的结果直接提取与 \max 向量的中心线平面所截取的中心线点集。

(2) 边界点

由于船舶弯板的理论数据是由CAD曲面模型直接导出的点云数据，不仅包含了每一个点的坐标数据，也包含了曲面边界上所有点的坐标信息，所以边界点可以直接从数据库中读取。

(3) 肋位线的点集

对于船舶弯板的安装，在设计之初船舶本体上就根据船型与弯板大小等信息设置了肋骨，用以将弯板焊装在上面，而肋位线就是弯板与肋骨的相交线^[17]。因此，肋位线位置上的加工准确程度极大地影响了弯板的最终安装效果，在精度分析时有重要的地位。

肋位线的位置包含在船舶弯板的理论数据之中，但是只包含了肋位面的剖切位置，并不包含每一条肋位线的点集，因此我们需要对根据剖切位置将肋位线的点集提取出来。提取的思路与中心线点的提取思路一致，我们根据剖切位置生成用于截取的几个平面，之后获取这几个平面与重建出的理论曲面的交线，分析交线的拓扑结构进而提取出几条交线的点集，最后储存起来用于误差值的计算。

3.4.2 计算对应点

在这一阶段中，我们根据特征点在检测曲面上选取对应点。但是当船舶弯板理论数据与检测数据进行了配准之后，会产生一定的平移与旋转，所以空间采样位置并不能保持一致，导致对于某一个特征点，直接沿着法向量的方向不一定能找到对应点。

伪代码3-1: 对应点计算

输入: 特征点 P , 理论曲面OBB包围盒的顶点 $corner$, 三边向量 min , mid , max 以及检测曲面 S

输出: 对应点 Q

- 1: 过点 P , 以 min 向量为方向定义一条直线 l
- 2: 将 l 与检测曲面 S 相交, 获取交点集 I
- 3: 如果交点集 I 的大小为0:
- 4: 将点 P 投影到向量 mid , max 所在平面, 得到投影点 P'
- 5: 计算理论曲面OBB包围盒底面中心点 C 的坐标为 $corner + 0.5 * mid + 0.5 * max$
- 6: do:
- 7: 定义向量 $P'C = P' - C$
- 8: 计算 $P'C$ 在向量 mid , max 的投影 p_{mid} , p_{max}
- 9: 如果 $abs(p_{mid}) \geq abs(p_{max})$:
- 10: 对点 P' 在向量 $sign(p_{mid}) * mid$ 方向进行微小位移
- 11: 如果 $abs(p_{mid}) \leq abs(p_{max})$:
- 12: 对点 P' 在向量 $sign(p_{max}) * max$ 方向进行微小位移
- 13: 过点 P' , 以 min 向量为方向定义一条直线 l
- 14: 将 l 与检测曲面 S 相交, 获取交点集 I
- 15: while 交点集 I 的大小为0
- 16: 返回交点集中的第一个交点 Q

为了解决这个问题, 我们对检测点云数据进行泊松曲面重建, 用以与直线进行相交, 该算法的实现如伪代码3-1所示。针对每一个特征点, 我们定义一条经过它的直线, 直线的方向为曲面的法线方向, 即理论曲面OBB包围盒中的 min 向量的方向, 让这条直线与检测曲面进行相交, 并获取交点的坐标位置, 储存起来作为该特征点的对应点。

3.4.3 计算误差值

对于特征点 $P(x_p, y_p, z_p)$ 以及它的对应点 $Q(x_q, y_q, z_q)$, 由于点云数据在三维坐标空间中被定义, 所以我们使用欧氏距离 $\sqrt{(x_p - x_q)^2 + (y_p - y_q)^2 + (z_p - z_q)^2}$ 计算出该特征点的误差绝对值。对于误差值正负的判断, 由于点云在空间中位置的不确定性, 我们使用理论曲面法向量, 也就是理论曲面OBB包围盒中的 min 向量作为基准。设置误差向量为 $(x_q - x_p, y_q - y_p, z_q - z_p)$, 将其与 min 向量求点积, 以点积的正负值作为该特征点误差的正负值。根据上述误差绝对值与正负值的计算规则, 最终计算出每一个特征点的误差值, 为完工检测精度分析提供了数据源。

3.5 本章小结

本章阐述了船舶弯板完工检测精度分析软件的数据模型设计和精度分析的整体方法, 展开描述了点云数据的输入格式以及数据模型的设计; 曲面重建的必要性和方法; 曲面匹配的流程和方法; 曲面误差计算的方法。通过本章的过程, 我们从三维点云数据的输入, 获取到曲面误差的信息并储存下来。

第四章 原型展示及实验验证

本章利用前文所阐述的系统框架与核心方法，建立了一个原型系统，为完工检测精度分析过程提供了交互与可视化界面。之后，我们将会通过实验，以三维点云模型为实验数据，对该原型系统进行功能性测试，保证其可靠性和可用性。

4.1 系统实现及部署

根据船舶弯板加工环境的要求，此系统将会部署到服务器上，而服务器通过交换机与各硬件系统建立物理通讯联系，并且基于安全保密的目的，网络拓扑均为有线方式，不采用无线通讯。系统部署架构图如图4-1所示，本系统由可视化交互界面、后端与服务器端构成。

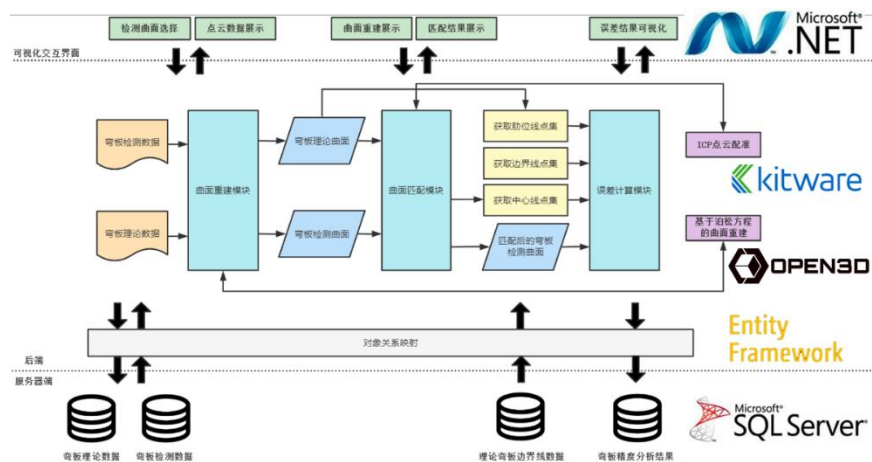


图4-1 系统部署架构图

可视化交互界面使用.NET Framework框架进行开发，完成了窗口。由于系统的三维可视化包含了点云模型展示、曲面拟合展示与模型的颜色映射，所以选择3D可视化工具包VTK（The Visualization Toolkit）在.NET中的封装程序包Activiz.NET.x64来完成数据的可视化，读取点云模型或是重建完成的曲面数据进行三维可视化，同时提供了基本的鼠标交互功能。

后端分为两部分，数据库数据管理模块使用了OR映射工具Entity Framework，能够根据数据库的变化及时对系统中的数据模型进行更新。在算法部分中，曲面重建模块使用了Python的第三方工具Open3D，以点云数据为输入，而曲面顶点与拟合三角面片为输出，并且为了在.NET Framework框架中调用Python文件，我们使用Python.NET工具包，在C#框架中搭建Python环境进行三维数据的操作与修改；而点云配准模块我们依旧使用VTK完成，以源模型与目标模型作为输入，而匹配的移动矩阵为输出。

数据库使用SQL Server，部署在服务器上，便于不同的系统进行调用。其中弯板理论数据只用于读取，而弯板检测数据除了读取点云数据外，还会对误差信息进行修改。

4.2 界面展示

根据需求分析和系统的详细设计，最终完成了弯板检测数据选择、曲面匹配、曲面偏差计算以及报表导出四个功能模块，实现了一个完整的船舶弯板完工检测精度分析软件。

4.2.1 弯板检测数据选择

如图4-2所示，技术人员首先进行弯板检测数据的选择。系统从数据库中获取弯板的检测数据列表，为了技术人员能够快速定位要进行完工检测精度分析的弯板，提供了检测数据搜索功能，可以通过船号、零件号、分段号以及测量日期单独或是联合搜索。当用户通过鼠标点击选择某一弯板数据时，检索其对应的理论弯板信息并显示在理论数据列表中。同时检测曲板中的点云数据会展示在界面上，提供一定的交互操作，其中按住鼠标左键拖动为旋转、按住鼠标中键拖动为移动、按住鼠标右键为缩放。除此之外，若在数据库中已经储存了报表的信息，则提供查看报表的按钮，直接预览生成的报表。当曲板选择完成之后，点击确认按钮就可以进入到曲面匹配的展示界面。

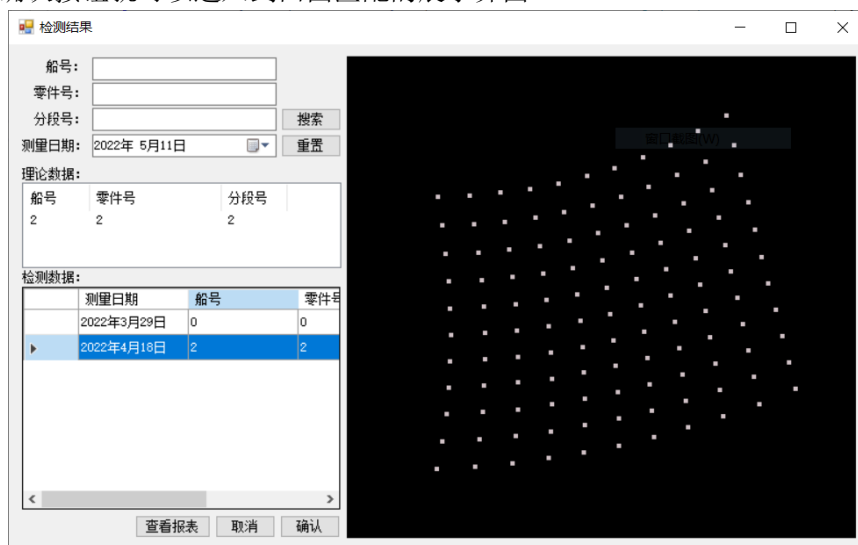


图4-2 弯板检测数据选择界面

4.2.2 曲面匹配

曲面匹配的展示界面如图4-3所示。界面左边显示了理论曲板与检测曲板的相关信息，包含了船舶弯板的船号、零件号、点云总数量、提取出的中心线点数、检测时间以肋位数。而在界面右边显示了检测曲面与理论曲面的匹配效果，其中褐色为理论曲面，浅粉色为检测曲面，技术人员可以直观地判断曲面匹配的效果。点击确认按钮之后就会进入到曲面偏差计算结果的展示界面。

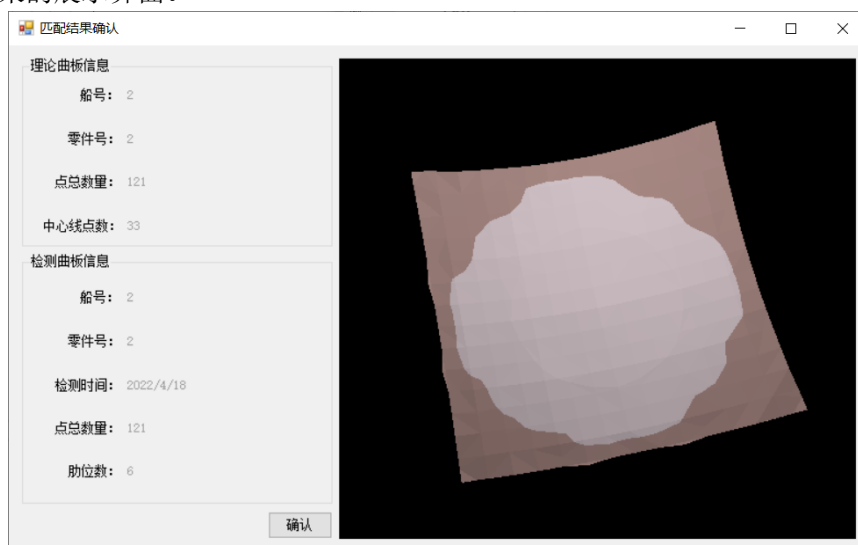


图4-3 曲面匹配界面

4.2.3 曲面偏差计算结果

曲面偏差计算结果的展示界面如图4-4所示。界面左方列出了进行精度分析的船舶弯板信息以及检测结果，包括边界误差、中心线误差以及肋位误差，并且提供权值修改的功能，使得技术人员能够设定不同维度误差对弯板加工精度的影响程度。界面的右上方为三维可视化的部分，根据曲面上不同位置的偏差对曲面颜色进行调整，而不同颜色所代表的的偏差值以标尺的形式显示在曲面的右边，达到弯板加工精度可视化的效果。同时，列出几条肋位线上的误差值，以列表的形式展示，使用白色曲线在三维可视图中标记出相应的位置。

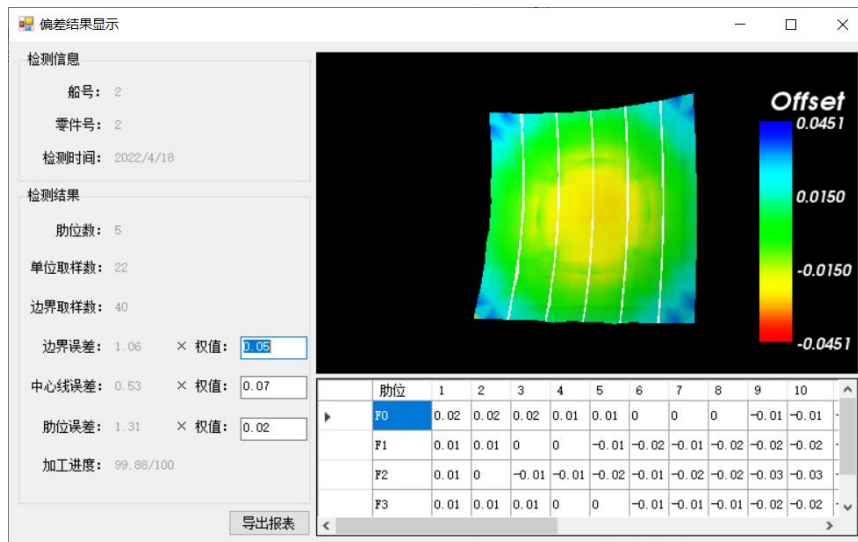


图4-4 曲面偏差计算结果界面

4.2.4 报表导出

根据完工检测精度分析的结果导出的报表示意图如图4-5所示。其中报表包括的信息如下：

- (1) 检测弯板的船号、零件号、检测日期与检测人员信息；
- (2) 检测曲面偏差的可视图，该图与上一个曲面偏差计算结果界面上的三维可视效果相同，技术人员可以通过对偏差计算结果界面上进行修改进而改变报表中的数据；
- (3) 检测曲面中轴线上的误差值，并且以曲线图的性质展示出来；
- (4) 检测曲面肋位线上的误差值；
- (5) 检测曲面边界线上的误差值；
- (6) 检测曲面的完工检测结果。

除此之外，为了方便技术人员对完工检测结果的归档与分析，报表可以被保存为PDF、Excel与Word三种格式的文件。

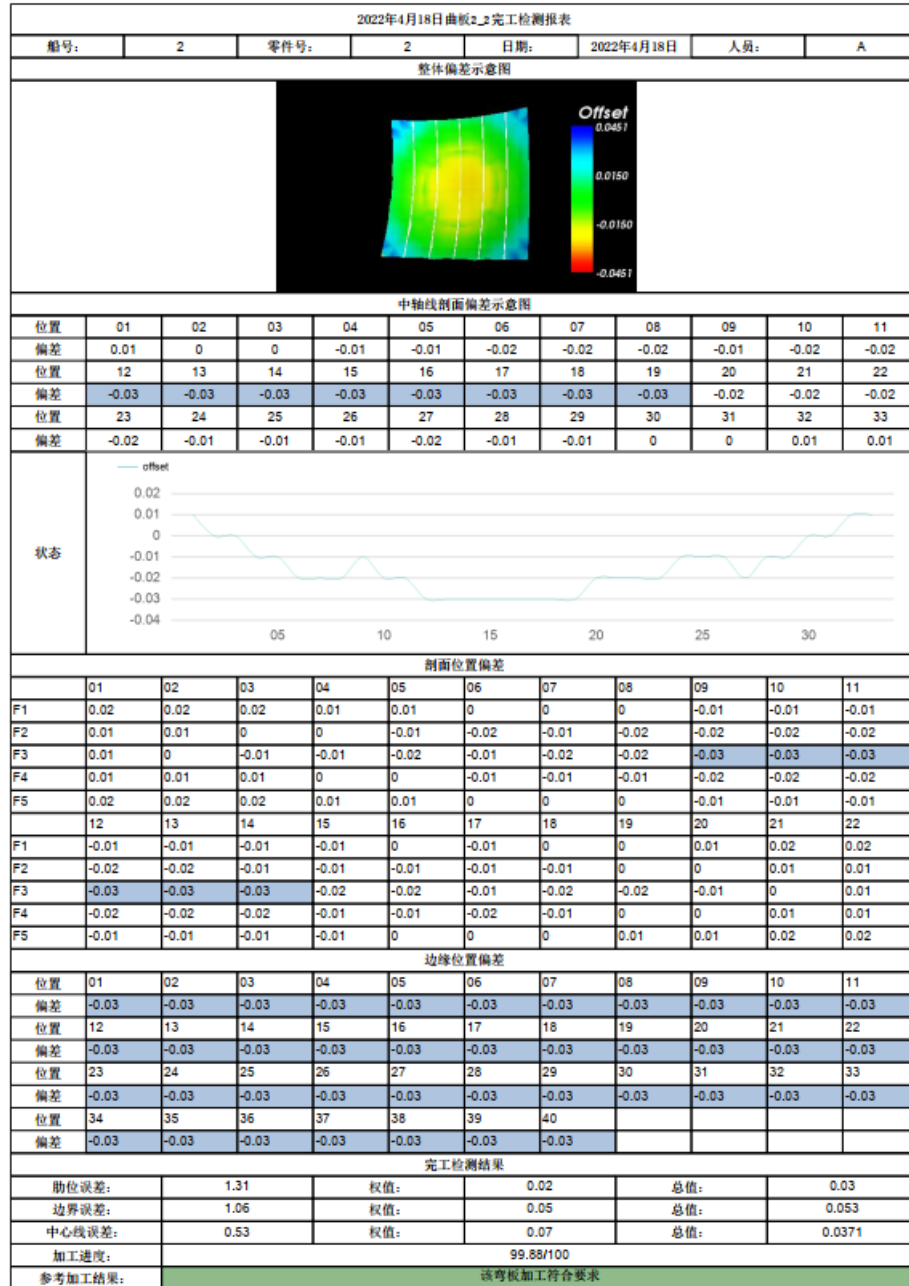


图4-5 导出的报表示意图

4.3 实验验证

4.3.1 数据集

为了在有限的数据集中获取较好的验证效果，我们根据船体外板的基本版型分类^[18]以及船舶加工的实际数据，提取出四种曲面表达式，并根据其形状生成理论点云数据与检测点云数据。

(1) 曲面种类

常见的船舶外板曲面有四种，分别为双曲板、单曲版、鞍形板和帆形板，其一般表达式如表4-1所示。其中双曲板在y轴方向没有曲度，而在x方向上有一道弧度的转折，从上凹转变为上凸，形状如同一个波浪线；而单曲板在y轴方向依旧没有曲度，而在x方向上也保持同一弧度方向，没有转折；鞍形板在x轴与y轴方向上有数值相同，但是正负相反的弧度，

所以形状如同马鞍；帆形板在x轴与y轴方向上有数值相同，正负也相同的弧度，形状如同帆船上的帆。可以知道，这四种曲板种类不同，x轴与y轴方向上的弧度状态也不同，可以为实验验证提供多样化的数据。

表4-1 四类船舶弯板曲面的一半表达式与模拟曲面方程

曲板类型	模拟曲面方程	一般表达式
双曲板	理论曲面 $\frac{x^3}{200^3} + \frac{x^2}{200^2} + \frac{y}{200} = z$	$\frac{x^3}{R^3} + \frac{x^2}{R^2} + \frac{y}{R} = z$
	检测曲面 $\frac{x^3}{250^3} + \frac{x^2}{250^2} + \frac{y}{250} = z$	
单曲板	理论曲面 $(2000^2 - x^2)^{0.5} = z$	$(R^2 - x^2)^{0.5} = z$
	检测曲面 $(2200^2 - x^2)^{0.5} + 300 = z$	
鞍形板	理论曲面 $\frac{x^2}{6000} - \frac{y^2}{6000} = z$	$x^2/R - y^2/R = z$
	检测曲面 $\frac{x^2}{5000} - \frac{y^2}{5000} + 300 = z$	
帆形板	理论曲面 $\frac{x^2}{6000} + \frac{y^2}{2500} = z$	$x^2/R + y^2/r = z$
	检测曲面 $\frac{x^2}{5000} + \frac{y^2}{2500} + 500 = z$	

(2) 理论点云数据

为了更好的可视化效果，参考船舶弯板的一般大小，船板尺寸统一设定为3200mm * 1600mm。在理论点云数据生成时，为了方便数据生成，选择以xy平面为标准，在其上进行均匀取点。在x轴上取点时，从-1600到1600中，均匀选取17个值，而在y轴上取点时，从-800到800中，均匀选取9个值，所以组合起来一个曲面点云数据中有 $17 \times 9 = 153$ 个点。

我们使用的模拟理论曲面方程如表4-1所示，在一般表达式的基础上选择了合适的取值。四类船舶弯板的点云生成效果如图4-6所示，从点云可视化的效果可以看出，生成的模拟曲面与这四类曲面的本身描述相符，可以用于实验计算。

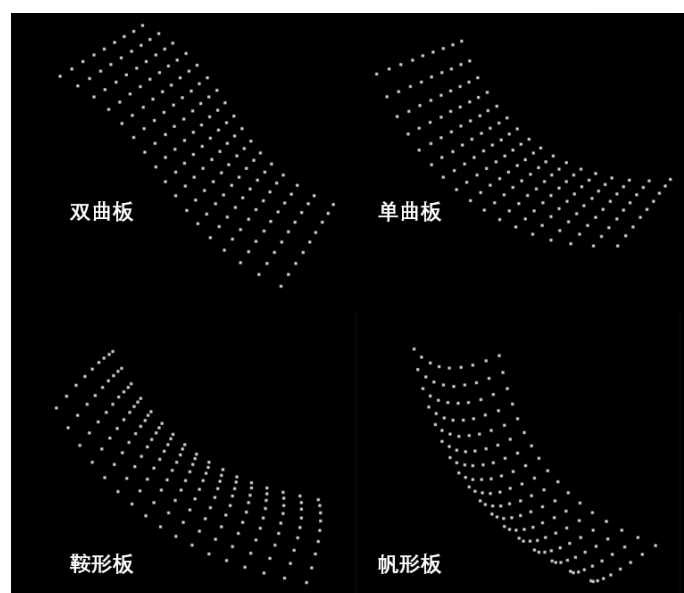


图4-6 各类船舶弯板的点云效果

(2) 检测点云数据

检测点云数据的生成在曲板类型保持不变的情况下，进行曲板弯曲度的变化并且伴随一定的位移，我们使用的模拟检测曲面方程如表4-1所示，可以看出在理论曲面方程的基础上参数取值进行了变化，并且其中三类曲板还在z轴方向进行了位移。我们同样使用3200mm*1600mm的尺寸参数与153的点云数量。理论点云数据与检测点云数据的对比如图4-7所示，其中红色点云为检测数据，白色点云为理论数据。

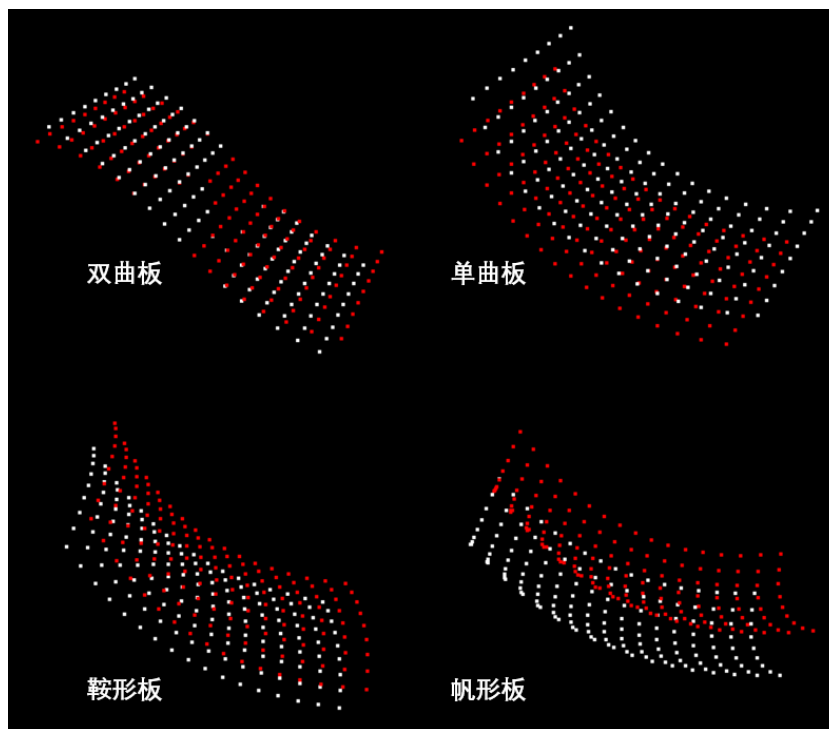


图4-7 理论点云数据与检测点云数据对比图

4.3.2 评价标准

在曲面配准问题中，我们通常使用匹配后两曲面的相似度测度来评估配准的效果，而常用的测度指标有豪斯多夫距离（Hausdorff Distance, HD）^[19]、倒角距离（Chamfer Distance, CD）^[20]、陆地移动距离（Earth Mover's Distance, EMD）^[21]等。在本系统的实验中，我们选择倒角距离作为相似度的测度指标。假设给定的两个待评估的点集为 S_1 与 S_2 ，它们之间的倒角距离如公式4-1所示。

$$d_{(CD)}(S_1, S_2) = \frac{1}{S_1} \sum_{x \in S_1} \min_{y \in S_2} \|x - y\|_2^2 + \frac{1}{S_2} \sum_{y \in S_2} \min_{x \in S_1} \|y - x\|_2^2 \quad (4-1)$$

其中公式中的第一项代表点集 S_1 中任意一点 x 到点集 S_2 的最小距离之和，而第二项则代表点集 S_2 中任意一点 y 到点集 S_1 的最小距离之和。倒角距离越大，则说明待评估的两点云区别越大；倒角距离越小，则说明待评估的两点云区别越小。

对于误差数据生成结果的评估，我们通过误差数据的可视化进行直观的观察。

4.3.3 实验结果

(1) 曲面匹配

我们随机选取了上述四种曲面的一次匹配结果，如图4-8所示，其中褐色为理论曲面，浅粉色为检测曲面。通过曲面匹配的三维可视化展示，可以知道曲面匹配的大致位置与方向皆是准确的。由于曲面配准采用了迭代逼近的思路，所以每一次曲面匹配的结果都存在一定的波动，因此在进行实验分析时，需要进行一定的平均值处理，所以我们使用随机五

次迭代配准的结果并求取平均值，得到最终的平移矩阵与旋转矩阵。之后我们计算出理论曲面与检测曲面移动之前的倒角距离与移动之后的倒角距离，对比之后评估曲面匹配效果。

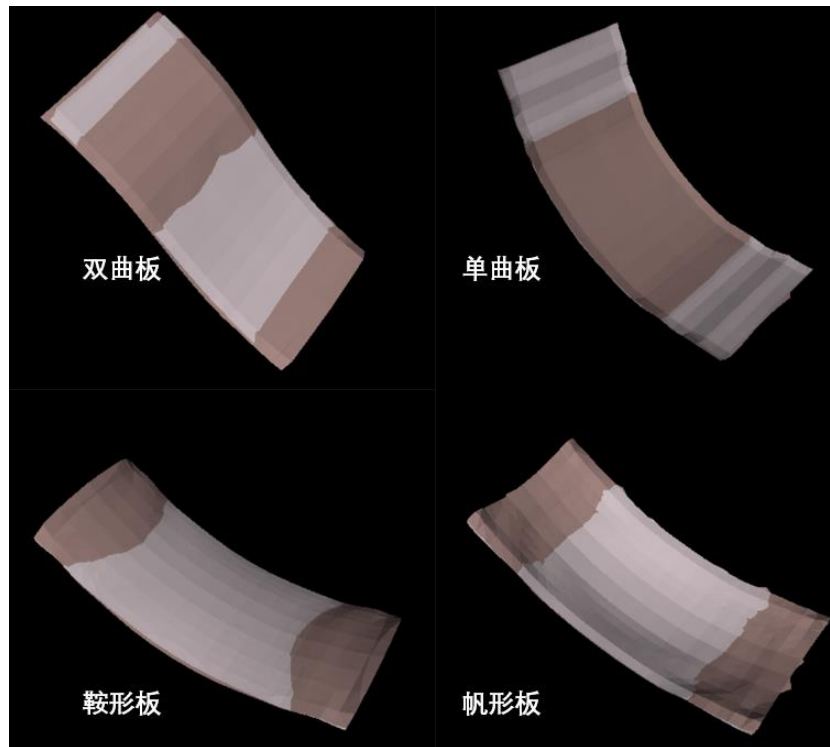


图4-8 不同曲面的匹配结果图

双曲板的五次配准结果如表4-2所示。

表4-2 双曲板五次曲面配准的结果

配准序号	旋转矩阵	平移矩阵	配准时间
1	$\begin{pmatrix} 1.00 & -0.00 & 0.09 \\ 0.00 & 1.00 & 0.00 \\ -0.09 & -0.00 & 1.00 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -17.40 \\ 0.00 \\ -11.80 \end{pmatrix}$	0.08s
2	$\begin{pmatrix} 1.00 & -0.00 & 0.09 \\ 0.00 & 1.00 & -0.00 \\ -0.09 & 0.00 & 1.00 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -16.88 \\ 0.53 \\ -12.53 \end{pmatrix}$	0.01s
3	$\begin{pmatrix} 1.00 & -0.00 & 0.09 \\ 0.00 & 1.00 & -0.00 \\ -0.09 & 0.00 & 1.00 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -22.31 \\ 0.58 \\ -13.26 \end{pmatrix}$	0.05s
4	$\begin{pmatrix} 1.00 & 0.00 & 0.09 \\ -0.00 & 1.00 & 0.00 \\ -0.09 & -0.00 & 1.00 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -24.40 \\ -0.18 \\ -13.75 \end{pmatrix}$	0.06s
5	$\begin{pmatrix} 1.00 & -0.00 & 0.09 \\ 0.00 & 1.00 & -0.00 \\ -0.09 & 0.00 & 1.00 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -16.86 \\ 0.56 \\ -11.67 \end{pmatrix}$	0.07s
平均值	$\begin{pmatrix} 1.00 & -0.00 & 0.09 \\ 0.00 & 1.00 & -0.00 \\ -0.09 & 0.00 & 1.00 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -19.57 \\ 0.30 \\ -12.60 \end{pmatrix}$	0.054s

通过计算，我们可以得出对于设置的双曲板曲面方程，计算出的旋转矩阵为

$$\begin{pmatrix} 1.00 & -0.00 & 0.09 \\ 0.00 & 1.00 & -0.00 \\ -0.09 & 0.00 & 1.00 \end{pmatrix}, \text{ 而平移矩阵为 } \begin{pmatrix} -19.57 \\ 0.30 \\ -12.60 \end{pmatrix}.$$

单曲板的五次配准结果如表4-3所示。

表4-3 单曲板五次曲面配准的结果

配准序号	旋转矩阵	平移矩阵	配准时间
1	$\begin{pmatrix} 1.00 & 0.00 & 0.00 \\ -0.00 & 1.00 & -0.00 \\ -0.00 & 0.00 & 1.00 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 2.93 \\ 8.70 \\ -527.15 \end{pmatrix}$	0.01s
2	$\begin{pmatrix} 1.00 & 0.00 & 0.00 \\ -0.00 & 1.00 & 0.00 \\ -0.00 & -0.00 & 1.00 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.80 \\ 2.17 \\ -527.46 \end{pmatrix}$	0.02s
3	$\begin{pmatrix} 1.00 & 0.00 & -0.01 \\ -0.00 & 1.00 & -0.00 \\ 0.01 & 0.00 & 1.00 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 2.38 \\ 14.39 \\ -526.81 \end{pmatrix}$	0.03s
4	$\begin{pmatrix} 1.00 & -0.00 & -0.01 \\ 0.00 & 1.00 & -0.00 \\ 0.01 & 0.00 & 1.00 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 5.83 \\ 3.53 \\ -526.54 \end{pmatrix}$	0.05s
5	$\begin{pmatrix} 1.00 & -0.00 & -0.01 \\ 0.00 & 1.00 & 0.00 \\ 0.01 & -0.00 & 1.00 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 4.25 \\ 1.12 \\ -526.83 \end{pmatrix}$	0.06s
平均值	$\begin{pmatrix} 1.00 & 0.00 & -0.006 \\ 0.00 & 1.00 & 0.00 \\ 0.006 & 0.00 & 1.00 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 3.238 \\ 5.982 \\ -526.958 \end{pmatrix}$	0.034s

通过计算，我们可以得出对于设置的单曲板曲面方程，计算出的旋转矩阵为

$$\begin{pmatrix} 1.00 & 0.00 & -0.006 \\ 0.00 & 1.00 & 0.00 \\ 0.006 & 0.00 & 1.00 \end{pmatrix}, \text{ 而平移矩阵为 } \begin{pmatrix} 3.238 \\ 5.982 \\ -526.958 \end{pmatrix}.$$

鞍形板的五次配准结果如表4-4所示。

表4-4 鞍形板五次曲面配准的结果

配准序号	旋转矩阵	平移矩阵	配准时间
1	$\begin{pmatrix} 1.00 & 0.00 & 0.00 \\ -0.00 & 1.00 & -0.00 \\ -0.00 & 0.00 & 1.00 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -4.17 \\ -1.00 \\ -322.46 \end{pmatrix}$	0.05s
2	$\begin{pmatrix} 1.00 & 0.00 & -0.00 \\ -0.00 & 1.00 & 0.00 \\ -0.00 & -0.00 & 1.00 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 7.24 \\ -1.13 \\ -322.33 \end{pmatrix}$	0.11s
3	$\begin{pmatrix} 1.00 & 0.00 & -0.00 \\ -0.00 & 1.00 & -0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 1.00 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 2.48 \\ 0.54 \\ -322.55 \end{pmatrix}$	0.12s
4	$\begin{pmatrix} 1.00 & 0.00 & 0.00 \\ -0.00 & 1.00 & -0.00 \\ -0.00 & 0.00 & 1.00 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -2.62 \\ 0.71 \\ -322.43 \end{pmatrix}$	0.13s
5	$\begin{pmatrix} 1.00 & -0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 1.00 & -0.00 \\ -0.00 & 0.00 & 1.00 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -6.12 \\ -0.42 \\ -322.22 \end{pmatrix}$	0.13s
平均值	$\begin{pmatrix} 1.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 1.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 1.00 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -0.638 \\ -0.26 \\ -322.398 \end{pmatrix}$	0.108s

通过计算，我们可以得出对于设置的鞍形板曲面方程，计算出的旋转矩阵为

$$\begin{pmatrix} 1.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 1.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 1.00 \end{pmatrix}, \text{ 而平移矩阵为 } \begin{pmatrix} -0.638 \\ -0.26 \\ -322.398 \end{pmatrix}.$$

帆形板的五次配准结果如表4-5所示。

表4-5 帆形板五次曲面配准的结果

配准序号	旋转矩阵	平移矩阵	配准时间
1	$\begin{pmatrix} 1.00 & 0.00 & -0.00 \\ -0.00 & 1.00 & -0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 1.00 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 3.24 \\ 0.92 \\ -530.45 \end{pmatrix}$	0.02s
2	$\begin{pmatrix} 1.00 & -0.00 & 0.00 \\ -0.00 & 1.00 & -0.00 \\ -0.00 & 0.00 & 1.00 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -6.98 \\ 2.91 \\ -529.91 \end{pmatrix}$	0.05s
3	$\begin{pmatrix} 1.00 & 0.00 & 0.00 \\ -0.00 & 1.00 & -0.00 \\ -0.00 & 0.00 & 1.00 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -3.81 \\ 3.08 \\ -529.36 \end{pmatrix}$	0.06s
4	$\begin{pmatrix} 1.00 & 0.00 & -0.00 \\ -0.00 & 1.00 & -0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 1.00 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 3.31 \\ 0.69 \\ -529.76 \end{pmatrix}$	0.07s
5	$\begin{pmatrix} 1.00 & 0.00 & 0.00 \\ -0.00 & 1.00 & -0.00 \\ -0.00 & 0.00 & 1.00 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -1.79 \\ 0.47 \\ -529.40 \end{pmatrix}$	0.13s
平均值	$\begin{pmatrix} 1.00 & 0.00 & 0.00 \\ -0.00 & 1.00 & -0.00 \\ -0.00 & 0.00 & 1.00 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -1.206 \\ 1.614 \\ -529.776 \end{pmatrix}$	0.066s

通过计算，我们可以得出对于设置的帆形板曲面方程，计算出的旋转矩阵为

$$\begin{pmatrix} 1.00 & 0.00 & 0.00 \\ -0.00 & 1.00 & -0.00 \\ -0.00 & 0.00 & 1.00 \end{pmatrix}, \text{ 而平移矩阵为 } \begin{pmatrix} -1.206 \\ 1.614 \\ -529.776 \end{pmatrix}.$$

(5) 最终配准误差分析

我们通过计算出的旋转矩阵与平移矩阵，对船舶弯板的检测数据进行变换，得到移动后的曲面数据，之后分别计算理论点云数据与检测点云数据的倒角距离，以及理论点云数据与移动后的监测点云数据的倒角距离。最终计算结果如下表4-6所示。

表4-6 四种曲板匹配前后的倒角距离

曲板类型	匹配前倒角距离	匹配后倒角距离
双曲板	22170.1	14194.9
单曲版	163077.3	10789.27
鞍形板	147448	9750.21
帆形板	149311	7493.86

(2) 误差数据计算

四种曲面的误差数据三维可视化如图4-9所示，可以看出肋位线的位置正确，误差的位置和正负信息与图4-8中的匹配结果相对应，在可视化图中可以直观清晰地看出曲板的加工情况。

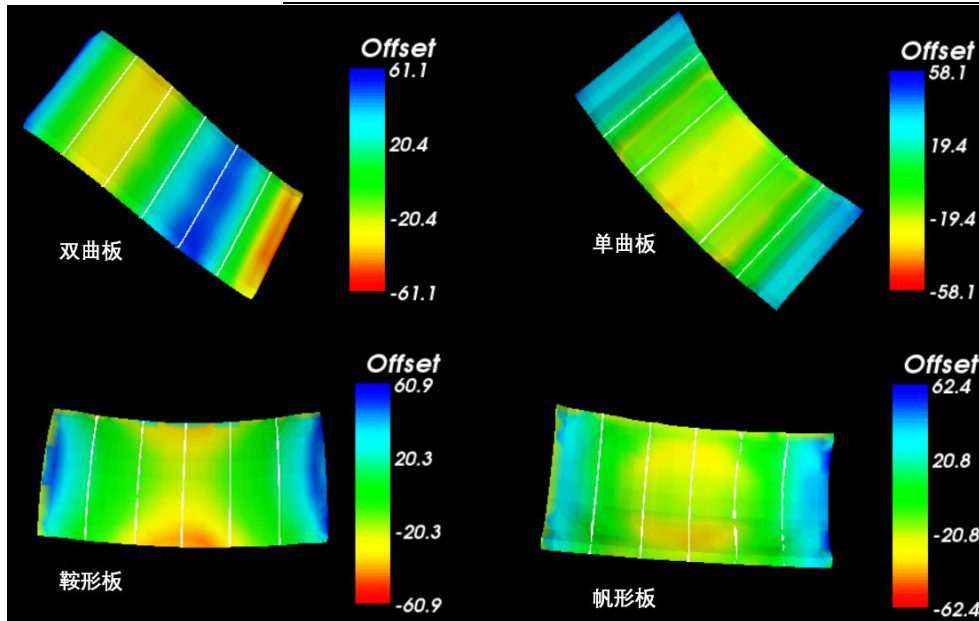


图4-9 不同曲面的误差数据三维可视化

4.3.4 实验讨论

本文所讨论的船舶弯板完工检测精度分析方法中的曲面重建方法验证结果如表4-7所示。

表4-7 四种曲板曲面重建结果分析

曲板类型	曲面方程	旋转矩阵	平移矩阵	倒角距离 改进率
双曲板	理论曲面 $\frac{x^3}{200^3} + \frac{x^2}{200^2} + \frac{y}{200} = z$	$\begin{pmatrix} 1.00 & -0.00 & 0.09 \\ 0.00 & 1.00 & -0.00 \\ -0.09 & 0.00 & 1.00 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -19.57 \\ 0.30 \\ -12.60 \end{pmatrix}$	35.97%
	检测曲面 $\frac{x^3}{250^3} + \frac{x^2}{250^2} + \frac{y}{250} = z$			
单曲板	理论曲面 $(2000^2 - x^2)^{0.5} = z$	$\begin{pmatrix} 1.00 & 0.00 & -0.006 \\ 0.00 & 1.00 & 0.00 \\ 0.006 & 0.00 & 1.00 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 3.238 \\ 5.982 \\ -526.958 \end{pmatrix}$	93.38%
	检测曲面 $(2200^2 - x^2)^{0.5} + 300 = z$			
鞍形板	理论曲面 $\frac{x^2}{6000} - \frac{y^2}{6000} = z$	$\begin{pmatrix} 1.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 1.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 1.00 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -0.638 \\ -0.26 \\ -322.398 \end{pmatrix}$	93.39%
	检测曲面 $\frac{x^2}{5000} - \frac{y^2}{5000} + 300 = z$			
帆形板	理论曲面 $\frac{x^2}{6000} + \frac{y^2}{2500} = z$	$\begin{pmatrix} 1.00 & 0.00 & 0.00 \\ -0.00 & 1.00 & -0.00 \\ -0.00 & 0.00 & 1.00 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -1.206 \\ 1.614 \\ -529.776 \end{pmatrix}$	94.98%
	检测曲面 $\frac{x^2}{5000} + \frac{y^2}{2500} + 500 = z$			

从计算出的结果可知，在匹配之后倒角距离的减小较为明显，可以得出本软件原型的曲面匹配效果比较可观。而在四种曲板里，由于双曲板的模拟数据在位置上并没有太大的变动，主要进行了一定的旋转，所以倒角距离的改善程度不如其他三类曲板明显。除此之外，曲面匹配的时间能够控制在0.5s以内，符合软件的非功能性需求。

本系统的船舶弯板完工检测精度分析方法实现较为完整，能够得到有一定可靠性的分析数据。但在曲面重建的过程中，因为原点云数据中并不包含法线信息，而自动生成的法线并不完全准确，有一定的误差，导致了重建出的曲面有一定的偏差值，特别是在接近边界位置，曲面的变形问题更加明显。

在弯板数据的误差数据计算中，通过欧氏距离计算出的误差值与正负值较为准确，与输入的点云数据相对应。但是理论曲面边界点会出现找不到对应点的情况，采用了选取检测曲面上最近点来计算误差值的方法，虽然能够反映边界误差的情况，但是会出现三维可视图中表达不够准确的问题，如鞍形板与帆形板的边界上都出现了突兀的色块，影响了技术人员对弯板加工精度的判断。

4.4 本章小结

本章主要展示了船舶弯板完工检测精度分析软件原型中的系统部署情况，并展示了系统原型的重要界面效果，然后对软件中的曲面匹配与误差数据计算两个重要模块的效果进行了评估。我们根据船舶弯板分类与船舶加工的实际数据，模拟生成了四类弯板数据，并且确定了评价标准，使用模拟数据集对完工检测精度分析的效果进行了评估，最终对实验结果进行了讨论。从实验的结果来看，本文提出的精度分析方法是有效的，具有一定的准确性与可用性，可以在实际的船舶加工生产流程中发挥作用。当然，由于我们的测试数据比较少，对船舶弯板加工过程中的各种状态考虑较少，所以我们的方法还存在着局限性，在曲面重建、误差计算等方面还需要进一步的测试与改进。

第五章 结论

5.1 工作总结

本文研究的内容是船舶弯板完工检测精度分析软件的设计实现，目的在于提高船舶三维弯板完工检测的效率与精度。首先，本文分析了本课题希望解决的问题，即在目前船舶弯板成形检测中由于检测方法的限制导致了效率的低下与人力物力的浪费，之后介绍了目前国内外学者在研究点云配准和曲面重建等领域的研究现状，说明了目前三维可视化技术的成熟度以及运用到完工检测方法上的可行性确定了本文的研究内容。接下来分析了在完工检测精度分析过程中存在的需求，提出了系统的框架设计。具体地，本文完成了一下工作内容：

(1) 实现了基于泊松曲面重建的曲面匹配功能：将理论点云数据与检测点云数据进行泊松曲面重建，并根据OBB包围盒确定两曲面的中心线，最终以中心线上的点作为控制点，使用ICP算法进行曲面匹配，为曲面误差计算打下基础。

(2) 实现了曲面的误差计算模块：以理论曲面为基准，根据其上的特征点在检测曲面上获取对应点，以两点之间的欧氏距离作为特征点的误差值，并提供最终的加工误差结果三维可视化。

(3) 实现了包含完整完工检测精度分析流程并提供可视化交互界面的系统：系统的输入是理论与检测的三维点云数据，提供了完工检测中间过程的数据查看与三维可视化，并为用户提供了最终的精度分析结果的导出与储存。

5.2 研究展望

随着船舶加工技术与三维可视化技术的不断发展，对于船舶弯板的加工要求会不断提高，成形检测的方法与研究继续推进，本文提出的船舶弯板完工检测精度分析软件也有很多可以提升的方面。

在曲面重建方面，以后需要改进算法，避免当曲面不规则时出现偏差问题，如边界错误或是出现缺角等问题；除此之外，需要为点云数据生成更加准确的法向量已获得更平滑且准确的曲面重建效果。

在曲面配准方面，以后需要采用更加通用的中心线提取方法，当船舶曲板形状不规则时也能获取到准确的中心线。

在投入使用之前，需要为企业提供功能扩展的接口，使得技术人员可以更方便地进行三维视觉自动识别模块和船舶弯板分类模块等新功能的添加。

参考文献

- [1] 谢予,孙崇波,阴晴.中国船舶工业 2021 年发展回顾与未来展望[J].世界海运,2022,45(2):1-6
- [2] 赵顺顺,郭志飞,李品,王霄,刘会霞,朱元超.基于线激光多目立体视觉的船舶曲板成形在位检测与自动调形系统开发[J].工具技术,2020,54(06):72-76.
- [3] L.Paul Chew.Guaranteed-quality Delaunay meshing in 3D.In Proceedings of the 13th ACM Symposium on Computational Geometry,pages 391-393,Nice,France,1997.
- [4] Ruppert J . A Delaunay Refinement Algorithm for Quality 2-Dimensional Mesh Generation[J]. Journal of Algorithms, 1995, 18(3):548-585.
- [5] Rivara M C , Hitschfeld N , Simpson B . Terminal-edges Delaunay (small-angle based) algorithm for the quality triangulation problem[J]. Computer-Aided Design, 2001, 33(3):263-277.
- [6] Dou Z , Xin S , Xu R , et al. Top-Down Shape Abstraction Based on Greedy Pole Selection[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2020, PP(99):1-1.
- [7] 孙殿柱, 郭洪帅, 李延瑞,等. 基于局部泊松曲面重建的点云刚性配准方法[J]. 机械工程学报, 2018(15):9.
- [8] 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.
- [9] Rusu R B , Marton Z C , Blodow N , et al. Persistent Point Feature Histograms for 3D Point Clouds. 2008.
- [10] Rusu R B , Blodow N , Beetz M . Fast Point Feature Histograms (FPFH) for 3D registration[C]// IEEE International Conference on Robotics & Automation. IEEE, 2009.
- [11] Barnea S , Filin S . Keypoint based autonomous registration of terrestrial laser point-clouds[J]. Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2008, 63(1):19-35.
- [12] 戴静兰,陈志杨,叶修梓.ICP 算法在点云配准中的应用[J].中国图象图形学报,2007(03):517-521.
- [13] 严剑锋,邓喀中.基于特征点提取和匹配的点云配准算法[J].测绘通报,2013(09):62-65.
- [14] 谢予.世界造船业 2019 年回顾与未来展望[J].世界海运,2020,43(04):1-6.DOI:10.16176/j.cnki.21-1284.2020.04.001.
- [15] 李玉娇. 点云法向量估计研究[D]. 大连理工大学, 2020.
- [16] Appathurai K , Anandkumar M . Comparative Analysis of BB x, OBB x, POBB x and SOBB x Indexing Methods of Spatial Databases[J]. International Journal of Control Theory and Applications, 2017, 10(11):133-145.
- [17] 朱元超. 基于线结构光三维视觉的船舶曲板肋位线便携式检测系统开发[D].江苏大学,2021.DOI:10.27170/d.cnki.gjsuu.2021.000438.
- [18] 魏雷,张阳.船舶曲板加工上下料方法研究[J].船舶物资与市场,2021(01):71-72.DOI:10.19727/j.cnki.cbwzysc.2021.01.030.
- [19] Yilin, Chen, Fazhi, et al. A local start search algorithm to compute exact Hausdorff Distance for arbitrary point sets[J]. Pattern Recognition, 2017.

- [20] Sander R M . Multivariate Gaussian Generative Models and Chamfer Distance for Point Cloud Object Detection. 2020.
- [21] Kranstauber B , Smolla M , Safi K . Similarity in spatial utilization distributions measured by the earth mover's distance[J]. Methods in Ecology and Evolution, 2017, 8(2).

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF PROJECT FOR ANALYZING THE ACCURACY OF SHIP BENDING PLATE

With the continuous progress of China's scientific and technological strength, the shipbuilding industry has entered an era of rapid development. In 2021, the global share of China's shipbuilding completion is 47.6%, ranking first in the world. In the process of ship production, the processing quality of ship hull plate will have an important impact on the overall quality of the ship. No matter which ship type, the hull plate contains a great quantity of large bending plates. Its processing mainly uses two methods: line heat forming and cold bending. No matter which method is used, the hull plate needs to pass the forming inspection before it can be delivered.

For the forming inspection, most shipyards now use the solid profiling detection technology, that is, the sample box is made according to the curvature, size and other information of the ship bending plate, and then the bending plate is placed on it to observe whether there is a gap between them. Although this test method is simple and intuitive, it has some shortcomings such as cumbersome production, high requirements for personal experience and skill level, low degree of automation and so on. Therefore, under the background of the continuous emergence and development of three-dimensional image processing technology, such as line laser multi-lens stereovision and other technologies has been applied to the research of rapid and accurate forming inspection of ship bending plate. The processed bending can be transformed into three-dimensional point cloud model for comparison with the original theoretical data of ship bending. In order to improve the comparison effect of three-dimensional point cloud model and more accurately evaluate the processing completion of ship bending, it is necessary to develop a project for analyzing the accuracy of ship bending plate in line with the actual processing.

This paper first introduces the existing business scenario of ship bending forming inspection and the business scenario after using the software, and then focuses on the functional requirements. In terms of non-functional requirements, the efficiency of accuracy analysis and the extensibility of software are mainly considered. Finally, the system framework and data model are designed according to the results of requirement analysis.

Then, the implementation process of the software's completion detection accuracy analysis method is described, which includes three steps: surface reconstruction, surface registration and surface error calculation.

The points in the point cloud model are random and irregular. For example, there may not be enough points at specific positions such as the center line and boundary line for analysis. For the feature points in the theoretical point cloud data of ship bending, there may not exist corresponding points at the same position on the detected point cloud data. Therefore, we use the point cloud data to reconstruct the Poisson surface, so that we can take points at specific positions according to the requirements. Poisson surface reconstruction algorithm is based on normal vector, while the

detection data of ship bending only includes the coordinate information of the point cloud, so it is necessary to approximately infer the surface normal vector from the data set of point cloud first. Open3d is used for normal vector estimation and Poisson surface reconstruction of ship bending point cloud data. The Poisson surface reconstruction results of a surface, which can obtain all the point coordinates reconstructed by the surface and the fitted triangle information (including the vertex ID of each triangle), and obtain the point density of the reconstructed surface. Poisson surface reconstruction will also reconstruct triangles in the low-density area of point cloud, and may be extended to other areas, that is, the reconstructed surface may have a larger range than the original point cloud area. When the surface reconstruction is only used for the purpose of visualization, the extension will not have a great impact, but the completion detection accuracy analysis needs to select the corresponding points on the surface, and the extended area will interfere with the selection of the corresponding points, thus affecting the accuracy of the analysis. Therefore, after the Poisson surface reconstruction is completed, the extended area needs to be corrected. During correction, select the bounding box for the point cloud data and filter the surface according to the range of the bounding box. If the triangle in the reconstructed surface is outside the bounding box, remove it, and finally make the reconstructed surface perfectly register the origin cloud.

According to the actual requirements of ship production, the centerline points of the detection and theoretical surface are used as the control points for surface registration. Because the 3D point cloud data only contains the coordinate value of the point and does not contain the position and attitude information of the surface, it is necessary to use the OBB bounding box to calculate the position of the centerline. Using `vtkOBBDTree` class of VTK to determine the OBB bounding box of the surface, we can get the coordinates of one vertex of the bounding box, the vector from the vertex to three adjacent points and the size of the bounding box. According to the information of OBB bounding box, we can determine the plane on which the surface centerline exists. According to the determined two centerline planes, intersect with the surface reconstructed by the point cloud, obtain the points on the two intersection lines, and splice them together as the standard points of surface registration.

ICP algorithm was used to register the theoretical surface and the detection surface, and the rotation and translation matrix of the detection surface relative to the theoretical surface were obtained. For ship bending with different bending degrees, this method can ensure that the center lines of the two surfaces coincide accurately, although the registration time complexity is very high.

According to the processing requirements of ship bending, the center point, boundary point and points on frame line of the bending have the greatest impact on the surface accuracy of the bending. Therefore, in the surface error calculation stage, the errors of the above three dimensions are calculated respectively. Firstly, the point set to calculate the error is selected on the theoretical surface. In the stage of surface registration, the center points have been determined by the position of OBB bounding box, the plane where the center line is located and the intersection line between the plane and the theoretical surface; The theoretical data of ship bending is the point cloud data directly derived from CAD surface model, which contains the coordinate information of points on the surface and surface boundary, so the boundary points can be read directly from the database; The point on the frame line is determined by taking the intersection of the plane and the theoretical surface according to the calculation rules of the frame position. Then select the corresponding points of feature points on the detection surface. On the basis that the theoretical surface and the detection surface have been registered, the corresponding point on the detection surface falls in the normal

direction of the feature point. Therefore, we define a normal line passing through the feature point, and the intersection of this line and the detection surface is the required corresponding point. Finally, the error value of feature points and their corresponding points is calculated.

Finally, we build a complete prototype software system. The system consists of visible and interactive interface, backend and server. The visible and interactive interface uses the .NET Framework to develop. Because the 3D visualization of the system includes point cloud model display, surface registration result display and color mapping of the model, the 3D Visualization Toolkit (VTK) is selected to provide data visualization and basic mouse interaction functions. The backend is divided into two parts. The database data management module uses the OR mapping tool Entity Framework, which can update the data model in the system in time according to the changes of the database, while the algorithm part uses Open3D, a third-party tool of Python. The database uses SQL Server and is deployed on the server, which is convenient for different systems to call.

In order to verify the efficiency of the prototype system, we use the simulation data. In order to obtain better verification effect in the limited data set, we extract four surface expressions according to the basic version classification of hull outer plate and the actual data of ship processing, and generate theoretical point cloud data and detection point cloud data according to its shape, in which the number of points of each point cloud data is 153. There are four kinds of common ship outer plate surfaces, namely hyperbolic plate, single curved plate, saddle plate and sail plate. The size of ship plate is uniformly set as 3200mm * 1600mm. When generating the theoretical point cloud data, in order to facilitate the data generation, select the XY plane as the standard and take points evenly on it. The generation of detection point cloud data changes the bending degree of the curved plate with random displacement when the type of curved plate remains unchanged. Similarly, the size parameter of 3200mm * 1600mm and the number of point clouds of 153 are used.

We register four kinds of surfaces respectively. Through the three-dimensional visual display of surface registration, we can know that the position and direction of surface registration are accurate approximately. We compare the theoretical moving matrix with the actual moving matrix. The calculation of the moving matrix is accurate, the deviation ratio is controlled within 5%, and the registration time is ideal, which is kept within 0.5 seconds. Therefore, the ICP algorithm based on the centerline can meet our functional requirements. When the error calculation experiment is carried out, the position of the frame line is correct, and the position and plus-minus information of the error correspond to the registration results. The processing situation of the bending plate can be seen intuitively and clearly in the visual diagram.

There are some problems to be improved in this software. On the one hand, the reconstructed surface has deviation, especially near the border line, the deformation of the surface is more obvious. On the other hand, when calculating the error, the corresponding point of the theoretical surface boundary point will not exist. The method of selecting the nearest point on the detection surface to calculate the error value is adopted, which can reflect the boundary error, but the expression in the three-dimensional visual diagram will be inaccurate. For example, abrupt color patches appear on the boundary of saddle plate and sail plate, which affects the technicians' judgment on the bending accuracy.