

学校编码: 10384

分类号 \_\_\_\_\_ 密级 \_\_\_\_\_

学号: X2005182013

UDC \_\_\_\_\_

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

三坐标机柔性化测量系统关键技术研究

A Study on Flexible Measuring System Based on CMM

秦 玉 红

指导教师姓名: 黄元庆 教授

专 业 名 称: 仪 器 仪 表

论文提交日期: 2009 年 5 月

论文答辩时间: 2009 年 6 月

学位授予日期: 2009 年 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评 阅 人: \_\_\_\_\_

2009 年 5 月

## 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为( )课题(组)的研究成果,获得( )课题(组)经费或实验室的资助,在( )实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

## 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文(包括纸质版和电子版)，允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

(        ) 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，于  
年    月    日解密，解密后适用上述授权。

(        ) 2. 不保密，适用上述授权。

(请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。)

声明人(签名)：

年    月    日

## 摘 要

随着市场竞争的日益激烈，对产品提出了 T、Q、C、S 的要求，即时间更短、质量更好、成本更低、服务更优。综合产品设计、制造、检测等各个环节的质量自动控制系统成为发展的必然。其中，快速、精确的三维测量是制造过程中的重要环节，贯穿整个设计、开发、加工、检测与质量保证的过程。三坐标测量机（CMM）是制造业中的标准三维精密测量设备，广泛使用于航空航天、汽车、造船、装备制造及模具制造等领域。但目前在对工件表面进行测量与评价时，主要是靠人工编程操作获取被测工件表面的三维特征，这不仅需要大量的人工工作量，而且使得测量结果依赖于检测人员的经验和对工件检测原则的理解，其测量效率低，不能适应制造业快速发展的要求。

本课题从信息科学的角度出发，解决机械工程领域的应用问题。将三坐标测量机对三维信息获取的过程描述为一个基于多传感器融合的、分层的、闭环的结构。通过引入计算机视觉实现 CMM 测量的柔性化和智能化，提高 CMM 的测量速度，减少人工工作量，避免人工干预引起的测量结果离散性。

本文以柔性坐标测量系统的构成为主线，以多传感器融合为支撑，研究了多传感器物理集成、基于机器视觉的三维信息获取、CAD 模型信息获取和三维特征的识别与模型坐标拟合等方面的内容。主要工作包括：

1 多传感器集成：将 CMOS 与激光器通过夹具固定在三坐标测量机测座上，实现与接触式测头的多传感器集成系统，取代原来由单一传感器对被测零件三维信息的获取方式。

2 机器视觉获取三维信息：采用激光三角法（Laser Triangulation）、基于轮廓的重构（Shape from Silhouette）和立体视觉方法，使坐标测量机实现了非接触式三维测量。与机械测头相比，这些方法测量精度较低，但速度快，因此可以采用这些测量结果作为被测对象自动定位和智能测量的基础。

3 CAD 模型接口：用 Visual Basic 6.0 应用程序开发工具对 CAD 模型接口问题做出了解决方案，实现了从 CAD 模型中自动提取检测特征与公差要求。

4 特征识别与坐标拟合：根据零件三维信息的获取与图像处理，实现了

零件在图像坐标系中位置和方向的自动识别；利用各坐标系之间的转换关系，实现了零件在三坐标测量机机器坐标系中位置和方向的自动识别功能。

**关键词：**坐标测量机；传感器集成；柔性测量；

厦门大学博硕士论文摘要库

## Abstract

With the increasingly fierce competition of market, products are demanded with T, Q, C, S, which means shorter time, better quality, less cost and better service. Rapid acquisition of high-precision coordinate data from parts having complex geometry is one of the most important techniques in modern manufacturing process. Among many coordinate acquisition methods, Coordinate measuring machine are widely used in manufacturing industry, such as aero and space, vehicle, shipbuilding, equipment building and mould manufacturing. Coordinate measuring machines with mechanical touch probes have been well established which have resolution of the scale of  $0.5\mu\text{m}$ , but the measurement processing is time-consuming, and need a lot of manual work.

In this thesis, based on a 3D-Coordinate measuring machine with integrated vision and laser triangulation system, a novel flexible measuring system is presented. Some subjects in flexible coordinate measuring machine are investigated, including the sensor integration, the 3D information acquisition based on vision and laser scanning, the CAD model information acquisition, geometric character detecting and coordinate fitting. It has potential applications in manufacturing problems such as metrology, inspection, and reverse engineering. Main works in this thesis include:

- 1 The integration of mechanical probe of CMM and laser triangulation sensor and the vision system is studied. The mockup of the multi-sensor system is built and tested.

- 2 The 3D information acquisition based on vision and laser scanning is realized. 3D information of object is acquired by laser triangulation scanning, shape from silhouette, and stereo vision. Compared to mechanical probe, these methods can measure the object less accurate, but they are much faster. The result of these methods can be used in automatic position as the base of intelligent measurement path planning.

- 3 The CAD model information acquisition is realized by using the

SolidWorks API. A frame work of program is built by Visual Basic 6.0. The geometric character and tolerance information of object are extracted in this program.

4 A method of geometric character detecting and coordinate fitting is presented. In our stereo vision, only edges are matched to get 3d edges of the object. These 3D edge characters acquired by vision system can be used as the flag in coordinate fitting. The orientation and position of the object can be determined, which is also used as the basic of measurement path planning.

**Keywords:** Coordinate metrology; multiple-sensor integration; measurement automation

# 目录

<b>第 1 章 绪 论</b> .....	<b>1</b>
1.1 引言 .....	1
1.2 三坐标测量机的国内外研究现状.....	1
1.3 三坐标测量机智能化研究现状.....	2
1.4 机器视觉技术.....	3
1.5 本论文研究的内容和意义.....	4
1.5.1 本论文研究的内容 .....	4
1.5.2 本论文研究的意义 .....	5
1.6 论文章节安排.....	5
<b>第 2 章 柔性坐标测量系统</b> .....	<b>8</b>
2.1 柔性坐标测量系统的构成.....	8
2.1.1 检测计划模块 .....	8
2.1.2 多传感器集成的三坐标机模块 .....	9
2.1.3 智能信息集成模块 .....	10
2.2 柔性坐标测量系统在国内外的研究现状.....	11
2.3 本论文柔性坐标测量系统的构成.....	11
2.3.1 多传感器集成 .....	11
2.3.2 采用机器视觉获取三维信息 .....	12
2.3.3 CAD 模型接口.....	13
2.3.4 表面识别与拟合 .....	13
<b>第 3 章 柔性坐标测量系统的信息获取方法</b> .....	<b>14</b>
3.1 国内外自由曲面信息获取方法的研究现状.....	14
3.1.1 接触式测量 .....	15
3.1.2 非接触式测量 .....	15
3.2 本课题采用的机器视觉测量方法.....	19
3.2.1 轮廓重构测量 .....	19

3.2.2 计算机立体视觉测量 .....	21
3.2.3 激光三角法测量 .....	23
<b>第 4 章 三坐标测量机的多传感器集成 .....</b>	<b>26</b>
<b>4.1 多传感器集成系统与实现 .....</b>	<b>26</b>
4.1.1 主要组成仪器设备 .....	26
4.1.2 夹具设计与验证 .....	27
4.1.3 多传感器集成坐标机的精度验证 .....	30
<b>4.2 视觉测量及结果 .....</b>	<b>35</b>
4.2.1 轮廓重构测量及结果 .....	35
4.2.2 计算机立体视觉测量及结果 .....	36
<b>4.3 激光三角法测量及结果 .....</b>	<b>39</b>
<b>4.4 坐标机编程接口 .....</b>	<b>40</b>
<b>第 5 章 CAD 模型接口 .....</b>	<b>42</b>
<b>5.1 SOLIDWORKS 二次开发 .....</b>	<b>42</b>
5.1.1 SolidWorks 简介 .....	42
5.1.2 SolidWorks 二次开发的工具 .....	43
5.1.3 用 Visual Basic 6.0 开发 SolidWorks 的步骤 .....	44
<b>5.2 SOLIDWORKS API 简介 .....</b>	<b>45</b>
<b>5.3 CAD 零件几何信息的提取 .....</b>	<b>45</b>
5.3.1 获取 CAD 选择点的坐标值 .....	45
5.3.2 获得曲线的长度 .....	47
5.3.3 几何信息自动提取的程序实现 .....	47
<b>5.4 CAD 零件公差信息的提取 .....</b>	<b>51</b>
5.4.1 获取 CAD 所选的尺寸公差值 .....	51
5.4.2 公差信息自动提取的程序实现 .....	52
<b>第 6 章 坐标拟合 .....</b>	<b>54</b>
<b>6.1 关键技术 .....</b>	<b>54</b>

6.1.1 测点数据的预处理 .....	54
6.1.2 点云的分割与特征的提取 .....	55
6.1.3 坐标拟合 .....	58
<b>6.2 基于计算机视觉的零件三维特征提取 .....</b>	<b>59</b>
<b>6.3 基于计算机视觉的零件位姿自动识别 .....</b>	<b>60</b>
<b>第 7 章 总结与展望 .....</b>	<b>62</b>
7.1 论文总结 .....	62
7.2 论文展望 .....	63
<b>参考文献 .....</b>	<b>65</b>
<b>致 谢 .....</b>	<b>69</b>
<b>攻读硕士学位期间所完成的研究论文 .....</b>	<b>70</b>

厦门大学博硕士学位论文摘要库

# CONTENTS

<b>Chapter 1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
1.1	Introduction.....	1
1.2	State of arts of coordinate measuring machine.....	1
1.3	State of arts of intelligent coordinate measuring machine.....	2
1.4	Introduction to machine vision.....	3
1.5	Content and Purpose of this study.....	4
1.5.1	Content of this study.....	4
1.5.2	Purpose of this study.....	5
1.6	Arrangement of paper.....	5
<b>Chapter 2</b>	<b>Flexible coordinate measuring machine.....</b>	<b>8</b>
2.1	Construction of Flexible coordinate measuring machine.....	8
2.1.1	Measuring planning model.....	8
2.1.2	CMM model based on multi-sensor integration.....	9
2.1.3	Intelligent information model.....	10
2.2	State of arts of flexible coordinate measuring machine.....	11
2.3	Flexible coordinate measuring machine in this thesis.....	11
2.3.1	Multi-sensor integration.....	11
2.3.2	3D information acquisition by machine vision.....	12
2.3.3	Interface to CAD model.....	13
2.3.4	Surface fitting and identification.....	13
<b>Chapter 3</b>	<b>Information acquisition in flexible coordinate measuring machine</b>	<b>14</b>
3.1	State of arts of free surface measurement.....	14
3.1.1	Touched measurement.....	15
3.1.2	Untouched measurement.....	15
3.2	Measurement based on machine vision.....	19
3.2.1	Shape from silhouette.....	19

3.2.2	Shape from stereo vision.....	21
3.2.3	Laser triangulation.....	23
<b>Chapter 4</b>	<b>Multi-sensor integration in flexible coordinate</b>	
	<b>measuring machine .....</b>	<b>26</b>
<b>4.1</b>	<b>Implementation of multi-sensor integration .....</b>	<b>26</b>
4.1.1	Mock-up of multi-sensor integration CMM .....	26
4.1.2	Clamp design.....	27
4.1.3	Precision validation in multi-sensor integration CMM.....	30
<b>4.2</b>	<b>Result of machine vision measurement .....</b>	<b>35</b>
4.2.1	Result of shape from silhouette.....	35
4.2.2	Result of stereo vision.....	36
<b>4.3</b>	<b>Result of laser triangulation .....</b>	<b>39</b>
<b>4.4</b>	<b>Software interface to coordinate measuring machine.....</b>	<b>40</b>
<b>Chapter 5</b>	<b>Software interface to CAD model.....</b>	<b>42</b>
<b>5.1</b>	<b>Development based on SolidWorks.....</b>	<b>42</b>
5.1.1	Introduction to SolidWorks.....	42
5.1.2	Tools for development based on SolidWorks.....	43
5.1.3	Introduction to Visual Basic 6.0.....	44
<b>5.2</b>	<b>Introduction to SolidWorks API.....</b>	<b>45</b>
<b>5.3</b>	<b>Geometric information acquisition from CAD model.....</b>	<b>45</b>
5.3.1	Coordinate acquisition of points from CAD model.....	45
5.3.2	Length of curve acquisition from CAD model.....	47
5.3.3	Implementation of Geometric information acquisition.....	48
<b>5.4</b>	<b>Tolerance information acquisition from CAD model.....</b>	<b>51</b>
5.4.1	Tolerance acquisition from CAD.....	51
5.4.2	Tolerance information acquisition in SolidWorks .....	52
<b>Chapter 6</b>	<b>Coordinates fitting.....</b>	<b>54</b>
<b>6.1</b>	<b>Key technologies.....</b>	<b>55</b>
6.1.1	Pre-processing of point cloud.....	55

6.1.2	Segmentation and characters extraction of point cloud.....	55
6.1.3	Coordinates fitting.....	59
<b>6.2</b>	<b>Characters extraction based on machine vision.....</b>	<b>59</b>
<b>6.3</b>	<b>Pose estimation based on machine vision.....</b>	<b>60</b>
<b>Chapter 7</b>	<b>Conclusion and prospect.....</b>	<b>62</b>
7.1	Conclusion.....	62
7.2	Next works.....	63
<b>Reference.....</b>		<b>65</b>
<b>Acknowledgement.....</b>		<b>69</b>
<b>Papers Published.....</b>		<b>70</b>

厦门大学博硕士学位论文摘要

## 第 1 章 绪 论

### 1.1 引言

随着当今社会经济的快速发展,市场的竞争也日益激烈,人们使用有复杂几何形状与精度的产品需求也越来越大,以便于满足各种各样的功能与规范要求。于是对产品快速的设计能力、精密的制造工艺、完善的检测环节都将缺一不可,达到其尺寸与公差需求,满足不断变化的市场需要。

检测环节是保障产品质量的重要手段。传统的手工检测,由于主观因素大,效率低,出错率高,已经不能适应当今社会的产品质量要求。快速、精确的三维测量已成为产品生产制造过程中的重要环节,贯穿于整个设计、开发、加工、检测与质量保证的过程。三维测量也就是从拥有复杂几何形状的零件中快速获取高精度的三坐标数据,以评价其是否达到尺寸与公差需求,满足设计和使用需要。

三坐标测量机(CMM)是制造业中标准的三维精密测量设备,经过近几十年的发展已成为一种高效率的新型精密测量仪器<sup>[1]</sup>。它集精密机械、光学、电子、数控和计算机技术于一体,通用性强,测量精度高,是现代工业检测、质量控制和制造技术不可缺少的重要测量设备,在先进制造技术与科学研究中具有非常广泛的应用,其技术水平成为现代测量技术和制造技术水平的一个重要标志,与我们的日常生产与工作越来越息息相关。因此,对三坐标测量机理论与技术的应用也越来越成为相关人士研究的重点。

### 1.2 三坐标测量机的国内外研究现状

三坐标测量机的出现,标志着计量仪器从古典的手动方式向现代化自动测试技术过渡的一个里程碑。它不仅将人们从枯燥的手工劳动中解放出来,而且还解决了复杂形状表面轮廓尺寸的测量,提高了三维测量的精度,促进了自动化生产线的发展,大大地提高了测量效率。

世界上第一台测量机是在 1959 年由英国 Ferranti 公司制造的,迄今为止,三坐标测量机已经走过了近半个世纪的发展历程。国外三坐标测量机生产厂家较

多，系列品种很多。三坐标测量机在发达国家拥有量较高，但增长率逐年下降；发展中国家拥有量较低，但增长率不断提高。世界上生产测量机的厂商已超过 50 家，品种规格也已达 300 种以上。与国内三坐标测量机相比，国外三坐标机特点是：绝大多数机器总体布局为悬臂式，空间敞开性好；专项开发力量强，专用软件和附件较多，能满足更多用户的特殊需要；有较高的运算和控制功能，还有内部存储的许多可供开发的高级语言程序；绝大多数机器采用 Renishaw 公司（英国）的电测头，功能齐全，质量可靠；配有功能齐全的控制测量软件、专用和误差修正软件；机器的性能高度稳定可靠，使用寿命长；三坐标测量机与计算机工作站和数控机床联网；三坐标测量机技术近十多年来突飞猛进发展，特别是数控系统和测量软件每二三年便更新一代；系列品种齐全，标准化、通用化、系列化程度高<sup>[2]</sup>。

我国是 20 世纪 70 年代开始引进、研制三坐标测量机，到目前为止，也有了很大发展。现在已具有年产几百台各种型号三坐标测量机的能力。国内三坐标测量机虽然近十年来也有了较快的发展，但同国外相比，也还有一定差距，主要体现在：系列品种较少，标准化、通用化、系列化的程度低；新产品开发周期长，主要原因是元件和材料配套难；机加工周期长等；产品的稳定性较差，特别是电控系统，可靠性较差，故障率较高，寿命相对低；软件功能相对少些，特别是专用软件更少，与计算机工作站和数控机床联网问题，仅有极少数测量机刚刚起步，多数机器还没开始这项工作，有待进一步开发研究<sup>[2]</sup>。

### 1.3 三坐标测量机智能化研究现状

三坐标测量机作为一种通用性强、自动化程度高、精度高的测量设备，在工作时，它首先将各种几何元素的测量转化为这些几何元素上一些点集坐标位置的测量。在测得这些点的坐标位置后，再由软件按一定的评定准则算出这些几何元素的尺寸、形状、相对位置等。这一工作原理，使三坐标测量机具有很大的通用性与柔性。

随着制造系统的不断发展，人们对三坐标机提出更高的要求，因此三坐标测量机智能化检测问题便迫在眉睫，检测规划在智能测量机中所处的地位是至关重要的，它的好坏不仅决定测量机智能化的实现，也是提高检测效率的关键所在<sup>[3]</sup>。

三坐标测量机检测规划智能化就是研究坐标机测量过程的自动化、智能化。其主要实现手段就是利用零件模型信息和计算机内的知识库与决策库确定测量策略,以实现信息自动化和决策智能化,近几年,国内外相关的研究人员正在从测头及其方向的选择、测量点数的确定及其分布的选择、碰撞检查及碰撞规避、CAD文件特征识别系统、零件定义模型、零件位置自动识别系统、测量路径规划和优化系统、数据库系统、知识库系统、人机交互接口等这几个部分<sup>[4][5]</sup>进行了不同程度的研究,取得了相应的进展。

为了提高检测系统的柔性,零件位置自动识别系统是坐标测量机智能化的一个重要方面,它的主要功能是确定零件在工作台上的放置方式、位置和方向。目前解决这一问题的主要方法是将机器视觉与接触式测量结合起来,通过机器视觉主动地感知零件在工作台上的放置方式、位置和方向,作为检测过程自动化的基础。

## 1.4 机器视觉技术

机器视觉,又称计算机视觉,是指用计算机来实现类似于人眼的视觉功能,也就是用计算机来实现对三维物体的识别。机器视觉的实现是通过视觉传感器(即图像摄取装置,分 CMOS 和 CCD 两种)将被摄取目标转换成图像信号,传送给专用的图像处理系统,根据像素分布和亮度、颜色等信息,转变成数字图像信号;图像系统对这些信号进行各种运算来提取目标特征,进而根据判别的结果来控制现场的设备,最终得以实现定位、测量等目的。机器视觉系统从原理上分主要由三部分组成:图像的获取、图像的处理和分析、输出或显示;典型的机器视觉系统一般包括光源、光学系统、摄像机、图像采集卡、计算机等。

在国外,从二十世纪五十年代就提出机器视觉概念,二十世纪七十年代真正开始发展,九十年代后即进入高速发展阶段;在我国,真正开始起步是二十世纪八十年代,近几年由于中国成为全球的加工中心,许多先进的机器系统进入中国,机器视觉技术才得以加速发展<sup>[6]</sup>。

机器视觉技术的最大优点是与被观测对象无接触,因此,对观测与被观测者都不会产生任何损伤,十分安全可靠,这是其它传感方式无法比拟的,而且机器视觉技术的应用还能够提高生产的柔性和自动化程度,因此,它在工业、科学研

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士学位论文摘要库