

激光扫描测头在柔性三坐标测量机中的理论及应用研究

摘 要

柔性三坐标测量机以其结构小巧灵活、便于携带、适应范围广等特点，使得原有只能在实验室进行坐标测量的仪器，逐步走进了现场。以往的柔性三坐标测量机实现的是接触式测量，而对一些质软易碎的物体和一些尺寸很小的孔、槽、圆弧等工件来说，接触式测量的方法就难以实现。本文研究了一种非接触式测量的方法，在我们自主研制的柔性三坐标测量机上连接一款 FSL-60 型扫描测头，实现对物体的扫描测量，克服了原有的接触式测量方法的一些缺点，使得柔性三坐标测量机的测量范围变得更加广泛。

本论文中，通过对各种结构光的原理和方法的研究，以及对国内外非接触测头的发展现状的调查，最后选定了具有线结构光测量的 FSL-60 型扫描测头，其精度在 $\pm 0.045\text{mm}$ ，扫描速度在 19200 点 / 秒。首先，研究了扫描测头的内部结构和线结构光扫描测量系统，其次，当测头集成到柔性三坐标测量机上后，对其总体方案、机械连接部位、坐标转换等方面进行了设计。最后，研究了摄像机标定理论和整体标定理论。

通过实验证明，该扫描测头集成到我们自主研制的柔性三坐标测量机上后，可实现对物体的扫描测量，精度可达到 $\pm 0.15\text{mm}$ 。同时，结合 Geomagic Studio 软件，可实现对产品的逆向。

关键字：柔性三坐标测量机，扫描测头，非接触式测量，线结构光，坐标转换，标定

Theory and Application of Laser Scanning Probe in the Flexible Coordinate Measuring Machines

Abstract

Flexible Coordinate Measuring Machine was an equipment which can only its compact structure, flexibility and portability. Flexible coordinate measuring machine in the past to achieve is to contact the measurement, but for some soft fragile objects and some small holes, slots, circular workpiece, the contact measurement method can hardly be effective. This paper introduce a non-contact measurement method, we connect an FSL-60 scanning probe to the flexible coordinate measuring machine we independently developed, and it can be used to scanning and measuring the object. This method overcome some shortcomings of the original contact measurement methods, making Flexible Coordinate Measuring Machine more flexible.

In this paper, through the study of a variety of structured light principle and method, as well as the investigation of the development status of domestic and foreign non-contact probe. Finally we selected a line of structured light measurement of FSL-60-type scanning probe, its accuracy is $\pm 0.045\text{mm}$, scanning speed at 19200 points / sec. First, the study on the internal structure of the scanning probe and line structured light scanning measurement system, and secondly, we design its overall program, mechanical joints, coordinate transformation, after when the probe integrated into the flexible coordinate measuring machine. Finally, we study the theory of the camera calibration and the overall calibration.

Experiments show that the machine can scan and measure the objects when the scanning probe is integrated on our self-developed flexible coordinate measuring machines, its accuracy reach in $\pm 0.15\text{mm}$. At the same time, it combined with Geomagic Studio software we can reverse the product.

Keywords: flexible CMM, scanning probe, non-contact measurement, line structured light, coordinate conversion, calibration

插图清单

图 1-1 ScanMax 型测量机结构简图	2
图 1-2 一种多关节测量机示意图	2
图 1-3 测头分类图	2
图 1-4 TP2 测头结构图	3
图 1-5 点光源激光三角测量	4
图 1-6 线光源测量法原理图	5
图 1-7 面结构光测量法原理图	5
图 1-8 结构光法的测量原理图	5
图 1-9 测头半径补偿原理	6
图 2-1 线结构光方法示意图	9
图 2-2 国外线结构光测量产品	10
图 2-3 线结构光扫描测量原理示意图	11
图 2-4 摄像机透视变换示意图	12
图 2-5 线结构光传感器	14
图 2-6 FSL-60 型激光扫描测头	15
图 2-7 半导体激光器	15
图 2-8 CCD 图像采集原理	16
图 2-9 WAT-902B 型摄像机	16
图 2-10 日本 Computar 公司镜头	16
图 2-11 1394 卡	17
图 3-1 国外柔性三坐标测量机	18
图 3-2 自主研发的柔性三坐标测量机	19
图 3-3 总体方案图	20
图 3-4 连接图形	20
图 3-5 连接件示意图	20
图 3-6 测头硬件系统连接图	21
图 4-1 杆件长度和扭角	24
图 4-2 转动关节的参数 θ_n , d_n , l_n 和 α_n	24
图 4-3 柔性三坐标测量机各杆件坐标系转换	25
图 4-4 柔性三坐标测量机末端两种坐标示意图	26
图 4-5 带扫描测头的柔性三坐标测量机坐标系示意图	27
图 5-1 图像坐标系	29
图 5-2 摄像机坐标系与世界坐标系	30
图 5-3 小孔成像原理	31

图 5-4 标定平板.....36

图 5-5 标定界面.....37

图 5-6 标定进行界面37

图 5-7 正在计算界面图40

图 5-8 计算完成界面图40

图 5-9 实验整体图41

图 5-10 最终拟合图形42

图 5-11 精度比对图42

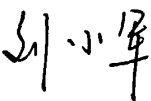
图 5-12 表面颜色对测量的影响曲线43

表 格 清 单

表 1-1 常用激光三角传感器的主要技术指标	5
表 4-1 柔性三坐标测量机转换矩阵参数表	25

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得合肥工业大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

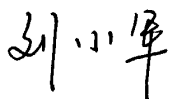
学位论文作者签名：


签字日期：2010年4月30日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解合肥工业大学有关保留、使用学位论文的规定，有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权合肥工业大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

(保密的学位论文在解密后适用本授权书)

学位论文作者签名：

导师签名：

签字日期：2010年4月30日

签字日期：2010年4月30日

学位论文作者毕业后去向：

工作单位：

电话：

通讯地址：

邮编：

致 谢

本论文是在导师胡鹏浩教授的悉心指导下完成的。三年来，无论在学习和生活上，胡老师都给予了我热心的关怀和帮助，孜孜不倦地指导我的学习和研究，并为我提供了良好的学习和研究环境。他严谨的治学作风、渊博的知识和丰富的实践经验使我终身受益。在此，我谨向他致以衷心的感谢和崇高的敬意。

在论文研究过程中，也得到了九江庐扬精密科技有限公司的管炳良总经理和费业泰老师、于连栋老师、胡毅老师的热情关心和帮助，为我的研究提供了机会，在此向他们表示诚挚的谢意。

硕士论文的最终完成，离不开我们实验室良好的科研环境和学习风气，离不开课题组同学的帮助、启发和互相激励，离不开大家共同营造的和谐氛围。在此，感谢实验室同学程文涛、于东浩等同学。同时，也要感谢同学余武志、李永杰等，感谢他们在我的生活和学习上给予的热情帮助。

尤其要感谢我的父母、爱人以及亲友在学习和生活上对我的理解和支持。多年来一直离不开父母给予我的教导，他们用辛勤的汗水养育我长大成人，是我生活和学习的最大动力。

向所有帮助过我的人致以诚挚的感谢和衷心的祝福！

最后，向参加论文评审和论文答辩的各位老师表示衷心的感谢！

刘小军

2010年4月20于合肥

第一章 绪 论

1.1 引言

自英国 Ferranti 公司发明了世界上第一台坐标测量机，三坐标测量技术已经历了 50 多年的发展，传统正交坐标测量机的发展越来越成熟，在设计、制造、标定、检验、误差修正、自动化与智能化等方面都达到了很高的技术水平并形成完善的理论体系，被广泛应用于机械制造、仪器制造、电子工业、汽车制造和航空工业等领域，享有“测量中心”的美誉，然而，随着生产与科学的不断发展，传统正交坐标测量机的局限性也逐渐显现出来。首先，大型模具、机器、飞机、汽车外壳等大或重的零部件不可能搬到坐标测量机上进行测量；其次，对于要求现场或在线测量的场合，传统正交坐标测量机也很难适应，不利于携带、搬迁，且对环境条件要求较苛刻；另外，在正交坐标系中实现测量，必须有实现直线运动的精密导轨和测量直线位移的光栅或感应同步器等类型的长度标尺，造价会随着量程的增加而急剧上升。在这种情况下，研究新型的坐标测试技术和仪器就显得非常必要，柔性三坐标测量机（又称关节式坐标测量机）应运而生^[1-3]。

柔性三坐标测量机的开发研制开始于上个世纪八十年代末，具有代表性的两种测量机为日本小坂研究院在 1986 年提出的关节式坐标测量机^[4]，以及由德国学者 Wlotze 在 1996 年提出的双关节 ScanMax 型坐标测量机^[5]。其中，ScanMax 型坐标测量机结构简单，可实现对工件的扫描测量，具有误差评定和误差修正的软件系统。该测量系统是基于非正交坐标系统，具有 Z 向的线位移导轨和标尺。该测量机在内部安装了两个精密关节和角度盘，从而可实现 X-Y 平面的测量。并且在末端安装了力传感器和三维模拟测头，因此可以快速地对工件进行扫描测量。该测量机的整个结构质量非常轻，而且可以忽略其惯性力，因此它是一种专门设计在车间环境内，通过手动操作来实现扫描测量的机器。两种测量机的结构简图分别如图 1-1 和图 1-2 所示。柔性三坐标测量机系统与工业机器人中的手臂相类似，一般由多个移动或旋转关节构成，可以在空间内形成一定的测量范围。该测量机与传统三坐标测量机相比，主要体现了以下几种优点：

（1）测量量程大。柔性三坐标测量机可根据实际测量要求选择不同的测量范围。目前，市场上销售的测量机的测量范围一般有 1.2m、1.8m、2.4m、3.0m，最大的还可以达到 4.2m。但不同测量范围的测量机，具有不同的测量精度。（2）重量轻。一般的柔性三坐标测量机的重量只有 10KG 左右，可以随意携带。而一台测量范围在 1m 的传统正交三坐标测量机其重量达吨级。（3）体积小。柔性三坐标测量机可以将关节臂折叠起来，入箱存放。（4）可以方便地在现场进行测量，甚至装在被测工件或机器上。这是由其便携性和定位方便的特点决定的。也是柔性三坐标测量机与传统正交三坐标

测量机相比的最大优势。(5) 具有六个自由度，理论上无测量死角，可提高精度。(6) 与正交系坐标测量机相比，柔性三坐标测量机价格仅为其几分之一。(7) 测量速度较正交系坐标机快，由于采用手工操作，无须考虑测量路径，因此具有更佳的灵活和快捷。由于以上的一些优点，使得该测量机在最近几年得到了快速的发展。

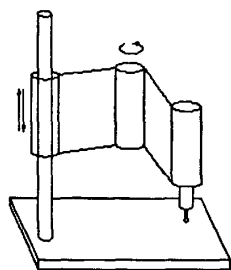


图 1-1 ScanMax 型测量机结构简图

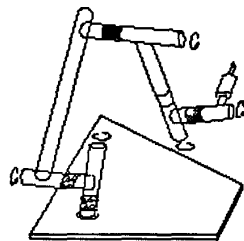


图 1-2 一种多关节测量机示意图

然而，柔性三坐标测量机主要是通过测量机末端安装的接触式测头来接触被测工件，经过测量机内部的传感器将触发信号转化为电信号，最终输出测量数据。因此，作为柔性三坐标测量机关键部位之一的测头，在整个系统中起着决定性作用，其自身精度也决定了测量机的整个精度。

1.2 测头的发展概述

早在 1920 年，由于电感测微仪的出现，测头也随之产生。而在 1950 年末，随着三坐标测量机的出现，使得测头快速地发展起来^[6]。到目前为止，市场上出现了各式各样的测头，其分类可见图 1-3。

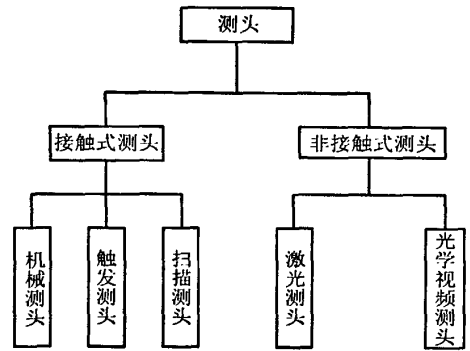


图 1-3 测头分类图

机械式测头是接触式测头中使用较早的一款测头，它主要是通过测头的测端对被测工件进行定位瞄准后与之接触，从而实现接触式测量。在这里，该测头又称为接触式硬测头。其特点是操作简单，纯手工操作，机械结构简单。但是它的精度不高，很难满足一些特别需要精密测量场合的要求。因此，该测头除了在个别场合的使用外，现今已很少出现。

触发式测头具有机械结构简单，操作方便，触发精度较高，以及制作成本低等优点，从而成为当今接触式测头中使用最广泛的一种测头。其主要应用在

传统的正交三坐标测量机中实现对物体的三维检测。而世界上第一个触发式测头是由英国 Renishaw 公司于 1972 年研制而成，图 1-4 为该公司在早期生产的一款触发式测头。该测头通过测头测端与被测物体接触时，产生的接触力由测杆传递至测头体内部的触发机构，当该力增大到足以克服内部弹簧的预压力时，触发机构的机械触点便脱离接触，进而发出触发信号。

由于触发式测头具有各向异性和预行程等误差，使得测量精度始终没有提高，其最高精度只能维持在零点几微米。而且，该测头使用在精密测量仪器上进行测量时，需要通过两点定线、三点定面和三点或四点定圆的方法，在被测表面上预先标定点来获得理想几何要素的尺寸大小。还有一个最大缺点就是该测头在测量时取点率较低，限制了测量速度，因此扫描测头的出现可以弥补这些缺点。

在前文所提到的双关节 ScanMax 型坐标测量机中使用的测头就为扫描测头，它可以对工件进行扫描测量。该类测头具有测量精度高，取点率较高和适用范围广等优点，其测量原理与触发式测头一样，都是使用测头测端去接触被测物体来连续测得接触位移，测头内的转换装置输出值与测杆的微小偏移量成正比，该比值与精密测量仪器的相应坐标值叠加起来后便可得到被测物体上点的精确坐标。由于该测头的机械结构复杂，而且制作成本比较高，使得生产该测头的厂家很少。

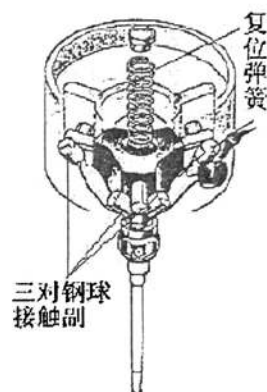


图 1-4 TP2 测头结构图

不管是触发式测头还是扫描式测头，其测量方法都是通过测头测端与被测工件接触，采集被测表面的轮廓点，进行数据处理后，从而获得被测工件的表面轮廓信息。但是由于该类测头测端有一定的大小，所以难以对一些尺寸小的孔，槽或圆弧进行测量，还有就是，该测头在测量时有一定的测量力，对一些质软易碎的工件进行测量，可能会导致此类工件的变形。基于这种情况下，非接触测头的研究就变得十分重要。其中，采用光学方法的非接触式测头可以弥补接触式测量的这些缺点，对工件实现非接触式测量。因此，非接触式测头成为当今研究的重点。

1.3 非接触式测量方法

由于接触式测量的诸多缺点，使得非接触式测量在现代工程领域得到了日益广泛的应用。非接触式测量仪器主要是运用某种与被测物体表面发生相互作用的物理现象，其中包括光、声、电磁等，来获取物体表面的三维坐标信息^[7]。在实际应用中，其中使用最广泛的非接触式测量方法采用的是应用光学原理，如激光三角法、结构光法以及工业 CT 法等。因为采用光学测量的方法，可以保证测头不接触被测物，从而可以对质软易碎的物体进行测量，而且，该方法的

测量速度较接触式测量方法来说要快得多，因此，越来越广泛地应用在现代工程领域中进行三维检测。

1.3.1 非接触式测量方法的分类

下面就测量原理、测量方法和应用范围，重点介绍三种常见的非接触式测量方法。

(一) 激光三角法

它是依据光学三角形测量原理，通过投射器和接收器之间的位置和角度关系来计算被测表面点的坐标数据。其基本原理是：利用具有一定几何形状的激光（如点、线、面光源），投射到被测工件表面上，形成的反射光点（光条）的像被安装在某一空间位置的图像传感器（如 CCD 摄像机）接收，根据光点（光条）在被测工件上成像的偏移量，以及与被测物体基平面、像点、像距等之间的关系，按照三角几何原理算出被测物体的空间坐标^[8-10]。

基于三角法的测量原理，如果投射到被测物体表面上光源形式的不同，我们可以将该测量方法分为点光源、线光源和面光源测量法。

(1) 点光源测量法 该测量法在进行测量时，每次测量一个点，测头按照事先给定的扫描平面和运动方向进行。逐点测量，最后可以扫描被测物体的整个轮廓。其中常用的点光源测量法有以下两种：直射式测量和斜射式测量，如图 1-5 中 (a) 和 (b) 所示。

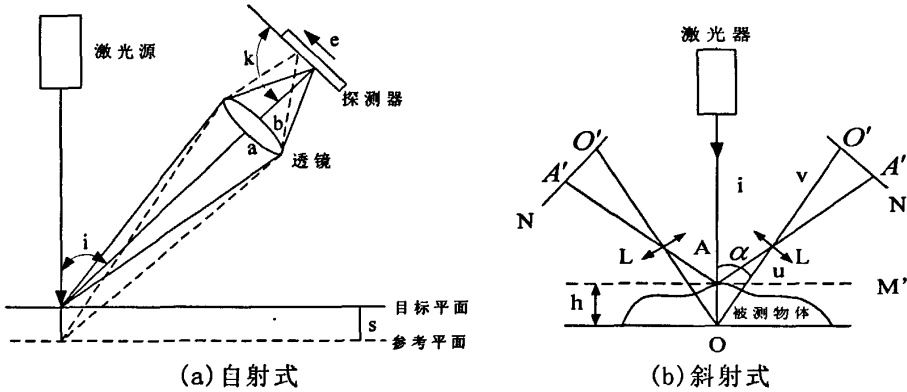


图 1-5 点光源激光三角测量

若目标平面相对于参考平面的高度为 s ，则两者在探测器上成像的位移为：

$$e = \frac{b s \sin i}{s \sin(i+k) a \sin k}$$

式中， a ， b 分别为透镜前、后焦距。

目前斜射式点光源的激光三角传感器有日本 Keyence 公司的 LD 系列，而直射式有 Renishaw 公司生产的 OP2、Keyence 公司生产的 LC 系列和 LB 系列等多种型号。下表列出了目前常用的点光源激光三角传感器的主要技术指标。其中，美国 MEDAR 公司生产的 2101 型及 Renishaw 公司生产的 OP2 型是专门

配置在三坐标测量机上用于测量物体三维形貌^[11]。

表 1-1 常用激光三角传感器的主要技术指标

厂家	型号	工作距离 (mm)	测量范围 (mm)	分辨率 (μm)	线性 (μm)
MEDAR	2101	25	± 2.5	2	15
KEYENCE	LC-2220	30	± 3	0.2	3
KEYENCE	LB72	40	± 10	2	$\pm 1\%$
RENISHAW	OP2	20	± 2	1	10
PANASONIC	3ALA75	75	± 25	50	$\pm 1\%$

(2) 线光源测量法 该测量方法的原理如图 1-6 所示。从投射器中发出的激光经过柱面镜后变成线光源，投射到物体表面。同时，相机接收从物体表面反射出的光，从而获得物体的三维信息。

该测量方法与点光源测量法相似，唯一不同的是，它每次测量的并非是一个点，而是由多个点组成的一条线。通过线扫描的方法来获取物体表面的三维轮廓信息。通常情况下，需要分成若干个区域测量，为了达到最佳的测量效果，测量的每个区域之间最好有一定的重合。

目前，该测量方法越来越多的用于在工业中对焊缝的视觉检测^[12]。

(3) 面光源测量法 该测量方法其原理同以上两种测量方法一样，都是基于激光三角法测量原理，如图 1-7 所示。由于投射到被测物体表面的为面光源，使得测量速度较前两种更快。

2 结构光法

该方法的测量原理如图 1-8 所示。它是利用投射器射出一定模式的的光源（如光栅）投到被测工件表面。一般来说，被测表面并不是平整的，具有一定的高低落差，使得该光栅影线发生变形。因此，利用安装在某处的两个 CCD 摄像机来获取不同角度的图像，通过调解该变形的的光栅影线，即可得到被测工件表面的整幅图像上像素的三维

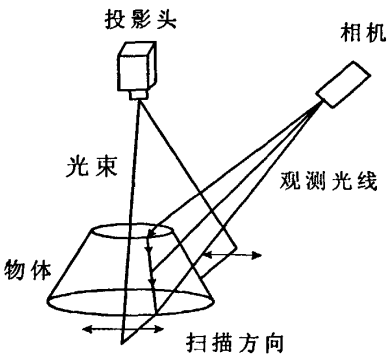


图 1-6 线光源测量法原理图

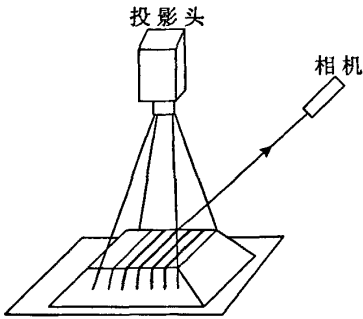


图 1-7 面结构光测量法原理图

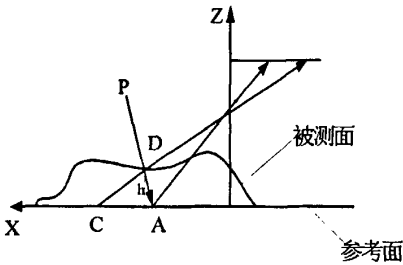


图 1-8 结构光法的测量原理图

坐标。

通过激光投射器发出不同形式的光源，我们同样可以把结构光法分为点结构光法，线结构光法和面结构光法。

结构光法的主要优点是测量范围大，测量速度快，是目前应用在现代工程领域中进行三维测量的最好方法之一。但是它的最大缺点是精度不高，而且易于受被测物体形状和色泽的影响。一般来说，只适合于表面曲率不大，较平坦的物体。以及对一些颜色较深（如黑色）的物体就很难进行测量，一般在该种物体表面涂上“反差增强剂”或喷漆处理，来减小误差^[13]。

3 工业 CT 法

该方法最早应用于医学诊断，利用射线成像的方法对人体进行检测。它最早出现在在 20 世纪 70 年代。通过不断地应用，后才推广到工业领域。它是以 X 射线的衰减系数为依据，对被测物体进行断层截面扫描，最后用数学方法经过计算机处理而重建断层截面图像，根据不同位置的断层图像来建立物体的三维信息。

1.3.2 非接触式测量方法的优缺点

任何一种测量方法，都有其自身的优点，同时也有其缺点。下面通过与接触式测量的比较，来体现出非接触式测量的优点。其主要有以下的优点：

(1) 在进行非接触测量时，由于测头不接触被测工件，因此，不必做测头的半径补偿。而在接触式测量中，硬测头直接接触被测工件，测得数据反映的是测头中心的位置。从测头中心到被测表面有一个半径长的距离。因此，为了获得准确的被测物体的表面信息，需做一个半径补偿。

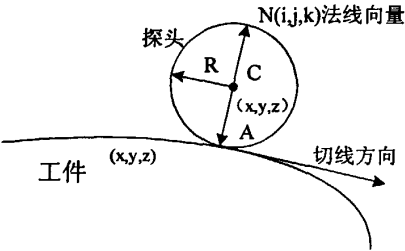


图 1-9 测头半径补偿原理

图 1-9 为半径补偿原理图。其补偿原理为：该测头与被测工件接触时，接触点为 A 点，而球心 C 点反映的才为当前测量的数据信息，要测得物体的真实外形，需做一个半径为 R 的补偿。因此，可能会导致误差修正的问题。

(2) 非接触测量采用的是扫描测量，速度非常快，不必像接触式触发测头那样逐点进行测量；

(3) 非接触式测头由于在测量过程中，不需要直接接触工件，因此可以对柔软和易碎的物体进行测量，以及对一些不可触摸的高精密工件可以测量。而在接触式测量中接触测头在测量时，测头测端与工件有一定的测量力，一般会导致特殊工件的变形或损坏，而且还带来测量误差。

然而，非接触式测量方法也有其自身的缺点。由于它使用的是光学测量的方法，因此受外界影响因素较多，如被测物体的形貌特征、辐射特性以及表面

反射情况都会影响测量结果。目前为止，非接触式测头的测量精度还不是很，还无法取代接触式测头在精密测量仪器中的位置。

在分析了非接触式测量的方法和其优缺点后，在本论文中，我们采用了具有线结构光扫描测量原理的非接触式测头集成到我们自主研制的柔性三坐标测量上进行实验，可实现对物体的激光扫描测量。

1.4 课题来源及研究意义

目前国内柔性三坐标测量机的市场，基本上还是被国外所控制。而国内的一些高校和研究院也有相关的研究，但是还未见到相应的产品出现。在我校，以费业泰老师为带头人，从 2003 年开始对柔性三坐标测量机进行研究，逐步形成了一支强大的研发团队。2007 年初第一台柔性三坐标测量机研制成功，并于同年 6 月通过叶声华院士主持的科技成果鉴定会与江西省科技厅组织的新产品鉴定会，一举填补了我国在这一领域的空白，成为世界上为数不多的柔性三坐标测量机的企业之一。随着柔性三坐标测量机在市场中的应用，反映出带有接触式测头的柔性三坐标测量机对一些特殊的工件无法进行测量，从而导致了柔性三坐标测量机的应用范围。

本课题内容选材于九江庐扬精密科技有限公司的研究项目。其具体内容是将我们自主研制的柔性三坐标测量机的接触式测头换成非接触式测头，实现对工件的扫描测量，使其测量范围更加广泛。

其研究的意义在于：（1）消除了接触式测头在测量中的测量力不易控制，以及测量过程中可能会引起工件的变形或带来测量误差等问题；（2）对质软易碎的工件可以测量；（3）可以实现对小尺寸工件上的孔、槽、圆弧等进行测量。（4）加快了测量速度，提高了工作效率。（5）可实现产品的逆向。

在本课题中，选配的非接触式测头为青岛海金公司的 FSL-60 型线结构光扫描测头，其精度在 $\pm 0.045\text{mm}$ ，扫描速度在 19200 点 / 秒。当非接触式测头集成到我们自主研制的柔性三坐标测量机上后，其总体精度拟控制在 $\pm 0.15\text{mm}$ 以内。

1.5 本论文的主要研究内容

本论文的主要研究内容如下：

（1）充分调研了国内外具有线结构光扫描测头的发展趋势和现状，通过比较选定青岛海金公司的 FSL-60 激光扫描测头用于在我们的实验中。

（2）研究了线结构光扫描测量系统，以及激光扫描测头中 CCD 摄像机的测量模型和坐标转换。

（3）对系统总体结构进行设计，以及连接件和软硬件连接方案的设计

（4）对激光扫描测头集成到柔性三坐标测量机上后，整体的坐标转换关系的研究。

(5)研究了激光扫描测头中的摄像机的标定理论和整体标定方法，以及通过实验的方法得出整体的测量精度。

1.6 本章小结

本章首先介绍了传统三坐标测量机的优缺点，从而引出了柔性三坐标测量机。其中介绍了柔性三坐标测量机中的重要部件—测头。介绍了测头的分类和各测头的应用场合。其次，介绍了非接触式测量方法的分类和优点。最后，提出了本课题的来源和研究意义，以及给出了本文的主要研究内容。

第二章 线结构光扫描测量系统

在各种视觉检测方法中，线结构光法是获取被测物体表面轮廓信息的常用的方法之一。具有非接触、测量速度快、数据量大等优点。因此，由线结构光构成的扫描测量系统在现代制造业中的应用日益广泛。

2.1 线结构光方法的概述

图 2-1 为线结构光方法示意图，由激光器发出的激光经过柱面镜后，形成一激光平面，投射到被测工件表面时，形成一激光亮条纹。而当工件表面有深度改变和间隙时，该条纹将受到这些因素的影响，从而使得测量中的条纹不连续或发生变形，其中，变形的程度与深度成正比。由线结构光构成的视觉传感器就是从这些变形的条纹图像信息中通过计算获得工件的表面三维信息。

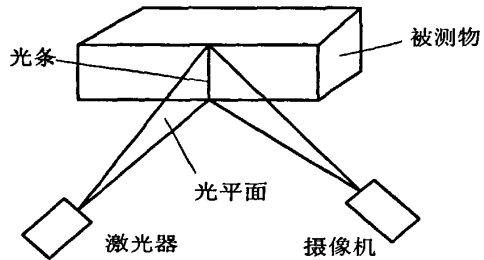


图 2-1 线结构光方法示意图

由线结构光构成的测量装置一般由两部分组成，一部分为由半导体激光器和柱面镜构成的线光源发生系统，二为由平面镜与线阵 CCD 摄像机组成的成像装置。该测量装置的基本原理为：半导体激光器发出的激光经柱面镜后变为线光源，投射出的光平面与被测物相交得到一光条线，而该光条线经另一光轴上的 CCD 摄像系统成像并转换为电信号，送到计算机系统中进行分析处理后得到所需的数据^[14-16]。

在上章所述的非接触式测量方法中，可以看出线结构光测量方法实际上是点结构光的扩展。与它不同的是点结构光测量方法在测量时，投射到物体表面的是单个光点，而线结构光测量方法投射到物体表面的是一系列光点，增加了被测物体的信息量，使得测量速度更快。因此，该测量方法延续了点结构光测量方法的测量原理，而且提高了测量速度，所以在现代工程领域得到了广泛应用。

2.2 线结构光扫描测量技术的国内外发展现状

2.2.1 国外发展现状

自70年代以来，国外研究人员就开始对线结构光扫描测量技术进行了研究。但是，直到80年代，该项技术才取得真正的成效。到目前为止，以德、日、美等国发展最为迅速。比较著名的产品有德国MAHR公司的MARVISION系列三维光学坐标测量机，该测量机适用于各种工件高精度三维测量，可选配接触式测

头、点激光、线激光、光纤、色敏（适用测量透明工件）各种传感器及彩色CCD图像处理系统；日本三丰公司的CNN视像测量系统QUICK VISION系列产品，其中ULTRA QV350-pro型针对微小物体扫描设计，扫描精度达到0.0003~0.001mm；英国雷尼绍公司的CYCLON 2,该扫描仪可实现激光测头和接触式测头优势互补,激光扫描精度为0.05mm,接触式测头扫描精度达0.02mm；美国FARO技术公司的便携式柔性关节臂测量机Laser ScanArm，该测量臂选配的测头可实现接触式测量和非接触式测量的合并使用，在进行非接触测量时，其精度达到0.035mm。各产品如图2-2所示。

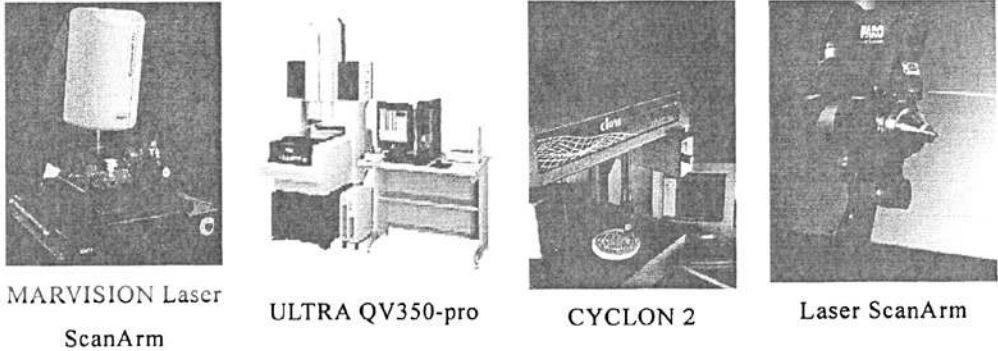


图 2-2 国外线结构光测量产品

2.2.2 国内发展现状

在我国，非接触测量技术的研究起步较晚，直到 90 年代末，该项技术才开始发展并且得到了迅速的推广。其研究主要集中在国内一些高校，如天津大学、北京航空航天大学、西安交通大学、清华大学、华中理工大学、浙江大学、哈尔滨工业大学等等。目前，个别专业公司也开展对非接触测量设备和软件的研究开发，并有了自己的产品，如北京荣创兴业科技发展有限公司的 VHL-10/20 系列三维激光扫描头，精度达到 0.05mm。还有青岛海金工贸有限公司生产的 FSL-60 型扫描测头，精度也能达到 0.045mm。总体来说我国非接触测量技术方面的研究和应用起步较晚，而大部分使用的线结构光扫描测头都是通过国外进口^[17]。

2.3 线结构光扫描测量原理和测量模型

2.3.1 线结构光扫描测量原理

在线结构光扫描测头中，由半导体激光器发出的激光，经过柱面镜后形成激光面，投射到被测物体表面，形成一光条，此时，通过 CCD 摄像机来接收来自物体表面的反射光，随着扫描方向的移动，物体表面深度的变化，反映为光条的间断或变形。由于光平面上的点与摄像机像平面上的点的投影成对应关系，因此可以计算出被测点的坐标值，从而获得被测物体的表面轮廓^[18]。该测头中 CCD 摄像机采集到的信息均为二维图像。如将这类测头集成到坐标测量机上，

实现对物体的三维扫描测量，需经过二维坐标向三维坐标的转换算法的计算。本内容将在本文第四章做详细介绍。

该测量方法具有测量速度快，测量范围广，可实现在线测量等优点，因此，在现代制造业的应用越来越广泛。

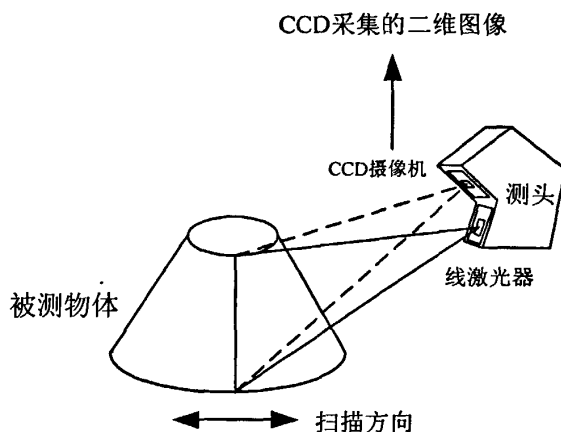


图 2-3 线结构光扫描测量原理示意图

2.3.2 线结构光扫描测量模型

激光视觉传感器是由结构光和 CCD 摄像机组成的一种测量装置。它的数学模型是激光视觉测量技术的核心内容，如果建立的模型越接近于实际，则模型参数就能够较准确地标定出来，从而可获得较高的测量精度。在这种视觉传感器中，CCD 摄像机是最重要的组成部分，也是该系统获得三维信息最直接的来源，可以通过建立摄像机像面坐标系与测量参考坐标系之间的关系，来建立传感器的模型。根据模型的参数选择，我们主要采用的建模方法是利用具有明确物理意义的几何结构参数，建立图像坐标系与测量参考坐标系之间的关系。其中这些结构参数包括光学中心、焦距、位置以及方向等。这种方法的模型参数一般可以分为摄像机内部参数和传感器结构参数两部分。该模型直观，可根据使用场合和要求达到不同的精度，从而建立不同复杂程度的数学模型^[11]。

2.3.2.1 摄像机理想透视变换模型

视觉传感器中，其主要功能元件是摄像机。从摄像机获取的图像信息中可以计算出被测物体的位置、形状等几何尺寸，图像上每一点的亮度反映了空间物体表面某点散射光的强度信息，而该点在图像上的位置与空间物体表面相应点的几何位置有关，这些位置的相互关系，由摄像机成像模型决定。摄像机的几何模型，即三维物体到二维图像的变换模型，一般定义为：

$$P = g(H)$$

式中, g 是三维物体 $P = (x, y, z)^T$ 到二维图像点 $H = (X, Y)^T$ 之间的不可逆变换函数。

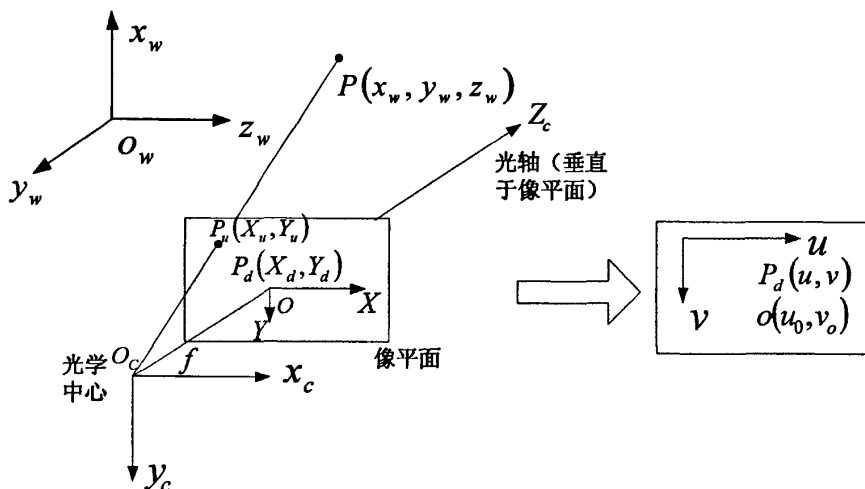


图 2-4 摄像机透视变换示意图

摄像机的透视成像通常可以近似地看做是一个针孔成像, 图 2-4 是摄像机透视变换示意图。图中 o_c 点为成像透视中心, $o_c z_c$ 为摄像机成像透视的光轴, 它与摄像机的像平面 (CCD 的感光面) 垂直, O 为光轴与像平面的交点, 它是像平面的光学中心, 但不一定是摄像机 CCD 的几何中心, 因为 CCD 阵列可能未对中。 O 和 o_c 间的距离为 f , 是摄像机的有效焦距。过 O 点作像平面坐标系 $O - XY$, 其 X 轴平行于像素横向阵列, Y 轴垂直于 X 轴, 使 $O - XY$ 成右手直角坐标系。过 o_c 点作摄像机坐标系 $o_c - x_c y_c z_c$, 使 x_c 轴和 y_c 轴平行于 X 轴和 Y 轴。如果摄像机无镜头畸变, 则空间一点 $P(x_w, y_w, z_w)$ 在像面上的成像点应为 $P_u(X_u, Y_u)$ 。由于镜头存在畸变, 实际像点却为 $P_d(X_d, Y_d)$ 。光学中心 O 点在计算机图像坐标系下的二维位置为 $O(u_0, v_0)$ 。实际像点 $P_d(X_d, Y_d)$ 在计算机图像坐标系下的坐标 $P_d(u, v)$, 即在帧存体中对应的像素位置。如果不考虑摄像机镜头畸变, 则有 $P_u(X_u, Y_u)$ 和 $P_d(X_d, Y_d)$ 重合。由空间三维坐标 (x_w, y_w, z_w) 到计算机图像的二维坐标 (u, v) 的摄像机理想变换模型可通过以下步骤求得。

(1) 物空间坐标系 (x_w, y_w, z_w) 与摄像机坐标系 (x_c, y_c, z_c) 的之间的坐标变换关系为:

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} + T \quad (4-1)$$

其中, $R = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix}$ 为旋转矩阵; $T = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}$ 为平移矢量,

R 和 T 决定了摄像机相对于物空间坐标系的方向和位置。

(2) 摄像机坐标系 (x_c, y_c, z_c) 与理想图像坐标系 (X_u, Y_u) 之间的投影变换关系为:

$$\begin{aligned} X_u &= f \frac{x_c}{z_c} & Y_u &= f \frac{y_c}{z_c} \\ \rho \begin{bmatrix} X_u \\ Y_u \\ 1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4-2)$$

(3) 考虑到透镜畸变, 理想图像坐标系 (X_u, Y_u) 与实际图像坐标系 (X_d, Y_d) 的之间的变换为:

$$\begin{bmatrix} X_d \\ Y_d \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1+kr_d^2 & 0 & 0 \\ 0 & 1+kr_d^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_u \\ Y_u \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4-3)$$

其中: $r^2 = X_u^2 + Y_u^2$, k 为透镜畸变系数。

(4) 实际图像坐标系 (X_d, Y_d) 与计算机图像坐标系 (u, v) 之间的变换为:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_x & 0 & u_0 \\ 0 & N_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_d \\ Y_d \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4-4)$$

其中, (u_0, v_0) 是计算机图像中心坐标, (N_x, N_y) 是图像平面单位距离对应的像素点数。

综合上述四个步骤, 化简得到物空间的三维坐标 (x_w, y_w, z_w) 与计算机图像坐标系 (u, v) 之间的变换模型为:

$$\lambda \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_x & 0 & u_0 \\ 0 & N_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1+kr_d^2 & 0 & 0 \\ 0 & 1+kr_d^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t_x \\ r_4 & r_5 & r_6 & t_y \\ r_7 & r_8 & r_9 & t_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4-5)$$

式中, λ 为比例因子, 且不为零。该式也可以写成以下表达式的形式

$$\begin{cases} X_d = s_x d_x (u - u_0) \\ Y_d = d_y (v - v_0) \\ f \frac{r_1 x_w + r_2 y_w + r_3 z_w + t_x}{r_7 x_w + r_8 y_w + r_9 z_w + t_z} = X_d (1 + k_1 r^2) \\ f \frac{r_4 x_w + r_5 y_w + r_6 z_w + t_y}{r_7 x_w + r_8 y_w + r_9 z_w + t_z} = Y_d (1 + k_1 r^2) \end{cases} \quad (4-6)$$

2.3.2.2 线结构光传感器的数学模型

线结构光传感器的光投射器在空间投射出一个光平面，此光平面通过摄像机建立与像平面的透视对应关系，其几何结构关系如图 2-5 所示。

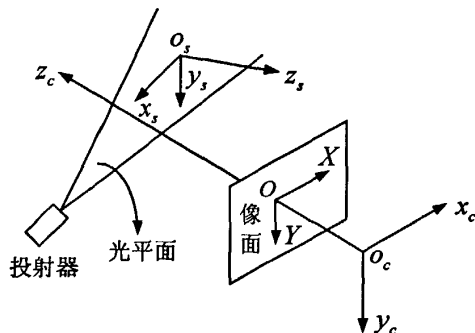


图 2-5 线结构光传感器

光平面和被测物体相截为一条平面曲线，曲线上的点即为被测对象。在光平面上以一点 o_s 为原点，建立传感器的测量参考坐标系 $o_s - x_s y_s z_s$ ，其中光平面为 $o_s - x_s y_s$ 。光平面在测量参考系下的方程为

$$Z_s = 0$$

将此式代入摄像机变换模型式 (4-6)，可得到线结构光传感器的数学模型表达式

$$\begin{cases} X_d = s_x d_x (u - u_0) \\ Y_d = d_y (v - v_0) \\ f \frac{r_1 x_s + r_2 y_s + r_3 z_s + t_x}{r_7 x_s + r_8 y_s + r_9 z_s + t_z} = X_d (1 + k_1 r^2) \\ f \frac{r_4 x_s + r_5 y_s + r_6 z_s + t_y}{r_7 x_s + r_8 y_s + r_9 z_s + t_z} = Y_d (1 + k_1 r^2) \end{cases}$$

传感器的结构参数为 $(r_1 \ r_4 \ r_7)^T$ ， $(r_2 \ r_5 \ r_8)^T$ 和 $(t_x \ t_y \ t_z)^T$ 。

式 (4-7) 表明光平面 $o_s - x_s y_s$ 与计算机图像平面 $u - v$ 成点对点的一一透视对应关系。只要已知 x_s 轴和 y_s 轴在摄像机坐标系 $o_c - x_c y_c z_c$ 中的方向矢量 $[r_1 \ r_4 \ r_7]^T$ 和 $[r_2 \ r_5 \ r_8]^T$ 以及平移矢量 $[t_x \ t_y \ t_z]^T$ ，就可由坐标值 (u, v) 求出 (x_s, y_s) 值，从而得到传感器的测量坐标 $(x_s, y_s, 0)$ 。由此可见，线结构光传感器只能完成光平面内点的二维测量。测量坐标系原点 o_s 在光平面上也是

人为设定的，因此可方便地求出传感器结构参数。

2.4 构成线结构光扫描测头的硬件设备

在本论文中，实验使用的是青岛海金公司生产的 FSL-60 型扫描测头^[19]，如图 2-6 所示。该扫描测头采用高精度、高分辨率的线结构光进行测量。具有较高的测量精度，适合测量中小尺寸的零件，能较好的保留被测物体的细微特征。其主要技术参数有：扫描速度为 19200 点/秒，测量精度可达到 $10\mu\text{m}$ ，测量宽度为 65mm，标准工作距离为 150mm，使用的激光等级为 II 级。

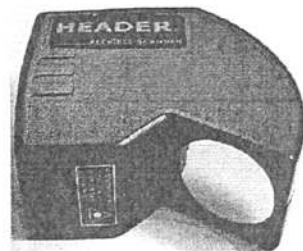


图 2-6 FSL-60 型激光扫描测头

该扫描测头在进行图形采集时，所需的硬件设备主要有激光源、镜头、CCD 摄像机以及 1394 卡。下面具体介绍各硬件设备。

2.4.1 激光源

由于激光具有高亮度、好的单色性和定向性以及具有相干性等优点，在国防、科研、工农业生产和医疗仪器等方面得到广泛的应用。该激光器又可以分为气体、固体、液体以及半导体激光器等。我们选用的 FSL-60 型激光扫描测头中使用的是半导体激光器作为发射光源，该激光器具有体积小、效率高，工作电压低，功率损耗小，驱动与调整都很方便等特点，因此，它被广泛应用在视觉传感器中。

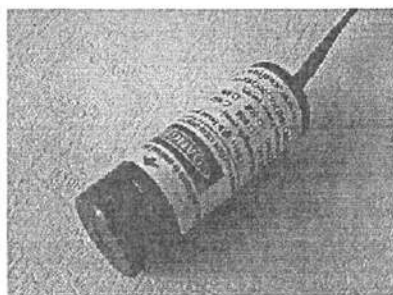


图 2-7 半导体激光器

本扫描测头中选用了上海斐波光电科技有限公司生产的半导体激光器，如图 2-7 所示。其波长为 780nm，出瞳功耗为 10mw，光学系统采用光学镀膜玻璃透镜制作，工作电压为 4.5V，外形尺寸为 10mm×30mm。该激光器均选用高品质的原装进口激光二极管，配以高性能的 APC、ACC 驱动电路和光学镀膜玻璃透镜组或优质塑透镜胶组成，具有高可靠性、高稳定性、抗干扰性强、一致性好、使用寿命长等特点。

2.4.2 CCD 摄像机

非接触三维测量方法中，CCD 是比较常见的图像采集装置，由一系列相邻的 MOS 存储单元组成，CCD 的基本功能是电荷的存储和电荷的转移^[20-21]。



图 2-8 CCD 图像采集原理

摄像机的工作过程如图2-8所示，当光源中的光照射到场景中的物体上后，物体所反射的光先由CCD接收并进行光电转换，所得到的电信号再经量化就可形成空间和幅度均离散化的灰度图。

本扫描测头使用的 CCD 摄像机是日本 Watec 公司生产的 WAT-902B 型摄像机，如图 2-9 所示。其主要技术参数有：CCD 尺寸为 1/2"、有效像素(K)为 C440K、同步系统为内同步、扫描系统为 2:1、分辨率为 768×576 像素。



图 2-9 WAT-902B 型摄像机

2.4.3 镜头

镜头的主要功能是收集被照物体反射光并将其聚焦于 CCD 上，其投影至 CCD 上的图像是倒立，摄像机电路具有将其反转功能，其成像原理与人眼相同。

1、镜头的分类

依据不同的形式，镜头可以有以下分类：

- (1) 依据焦距分类有固定焦距式、伸缩式、自动光圈或手动光圈等类型。
- (2) 依据焦距数字大小区分分类有标准镜头、广角镜头、望远镜头等类型。
- (3) 依据光圈分分类有固定光圈式(fixed iris)、手动光圈式(manual iris)、自动光圈式(auto iris)等类型。
- (4) 依据镜头伸缩调整方式分类有电动伸缩镜头、手动伸缩镜头等类型。

2、决定镜头品质因素

- (1) 采用镜片数目：多类型镜片组合，可减少色偏改善聚焦等问题，但会减少透光率。
- (2) 镜片透光率：好镜片透光率佳价格贵，差镜片较会阻挡光线通过。
- (3) 镀膜与研磨：镜片镀膜与研磨技术影响镜片品质。
- (4) 机械装置：镜头内部机械结构精密度，影响镜片移动精确度及可靠度，品质差机械结构，会产生调整误差及不一致性。



图 2-10 日本 Computar 公司镜头

本扫描测头中使用的镜头是日本 Computar 公司生产的 M0814-MP 型镜头，如图 2-10 所示。主要技术参数有：焦距为 8mm，F 值为 1:1.4，CCD 尺寸为

8.8mm×6.6mm，分辨率在中心处和边缘处超过 100 线/mm。其主要特点有：图像质量好、成像畸变小、图像的对比度小，适用于对图像质量要求较高的图像采集及工业自动化检测等行业应用领域。

2.4.4 1394 卡

本论文中使用的 1394 卡为映派专用笔记本 1394 卡，如图 2-11 所示。其产品主要特性有：(1) 采用 Agere（朗讯）专业 1394 控制芯片，完全符合 IEEE1394a 技术规范；(2) 标准 PCMCIA 接口，支持即插即用；(3) 数据传输速率高达 400Mbps；(4) 支持图像捕捉；(5) 实时录像预览，高质量的视频过滤和图像增强，可采集单帧图像制作照片；(6) 分辨率高达 720×576 像素。

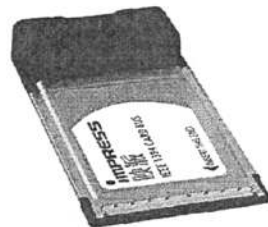


图 2-11 1394 卡

2.5 本章小结

在对点、线、面结构光的逐一研究后，本论文中使用的非接触式测头采用线结构光扫描的方法。本章首先通过对线结构光方法的阐述，介绍了线结构光扫描测量技术的国内外发展现状和 FSL-60 激光扫描测头内的元器件的型号和主要特性。重点研究了线结构光扫描测量原理和测量模型。

第三章 系统总体设计

激光扫描测头集成到柔性三坐标测量机上，包括硬件和软件的连接。连接的质量，不仅影响到测量机整体的美观，还影响到测量的精度。本章将重点介绍整体设计方案和各部件的设计。

3.1 设计方案

传统柔性三坐标测量机对物体实现接触式测量，但是，随着生产和科技的发展，这种接触式测量方法不能满足现有阶段的测量要求。因此，将激光扫描测头集成到柔性三坐标测量机上，可实现对物体的快速扫描。然而，在国外，著名的三家生产关节臂测量机的公司，美国 Cimcore、美国 FARO 和法国 ROMER 在近几年都已经实现对物体的非接触式测量，并且实现了接触式测头与激光扫描测头的合并使用^[22-23]，如图 3-1 所示。其中，Cimcore 公司生产的 INFINITE 2.0 SC 七轴柔性三坐标测量机，如图 3-1 (a)，该测量臂使用先进的 ScanWorks 非接触式激光扫描测头，将关节臂式测量机的灵活性与激光扫描测头的实时曲面检测能力完美的融于一体。该扫描测头的采样速度每秒钟高达 23040 点，测量精度可达 0.04mm(3 σ)，能够完美的解决大型复杂零件的检测要求，并生成逆向工程所需的高质量点云数据。图 1.2 (b) 所示的为 FARO 公司生产的七轴三维激光扫描测量臂 V3 系列，该扫描测头的测量精度为 0.035mm，测量速度可达到 19200 点/秒，适用于检测、逆向工程、快速成型和 3-D 建模等。最后，ROMER 公司生产的 INFINITE 2.0 系列的柔性三坐标测量机，配备不同原理的激光扫描对物体的扫描速度不同。图 3-1 (c) 中，测量机配置的是 Scan Shark V4ix 测头，采用线结构光扫描测量，测量精度可以达到 0.017mm，如果配置采用面结构光扫描的新型 V5 激光扫描测头，则测量速度可以快速提高，每秒采集的点可达到 458400 多个。



图 3-1 国外柔性三坐标测量机

通过研究国外产品的特性，综合我们自身研制的柔性三坐标测量机的特点，为我们自主研究的柔性三坐标测量机配备了国产的激光扫描测头，同样实现了

对物体的扫描测量，使得我们测量机的应用范围变得更加广泛。

在本论文中，选用的柔性三坐标测量机是我们九江庐扬公司生产的第四批次柔性关节臂，其主要技术特点有：①采用进口精密轴承，具有高质量、高性能和保证顶级的稳定性；②臂身采用航空碳纤维管，刚度好，重量轻、热稳定性高，可最大限度的减少温度对其测量精度的影响；③各关节处采用高分辨率、高精度的圆光栅，双光学译码器，可保证优良的精度及可靠性；④可支持各类测头，包括激光扫描测头。具体图形如图 3-2 所示。实验所用的激光扫描测头选用的是青岛海金公司的 FSL-60 型扫描测头，如图 2-6 所示，具体参数在第二章已述。在经过软硬件问题的处理，FSL-60 型激光扫描测头集成到柔性三坐标测量机上，可实现扫描测量。总体设计方案如图 3-3 所示。

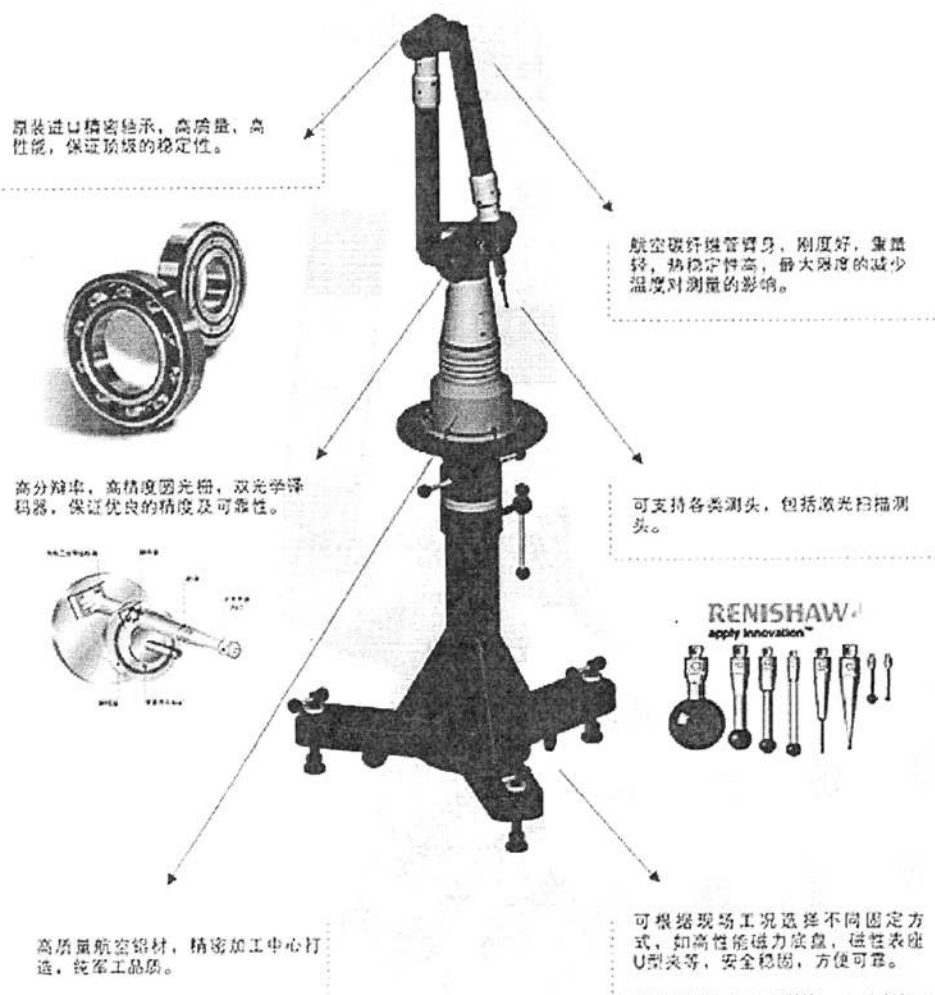


图 3-2 自主研发的柔性三坐标测量机

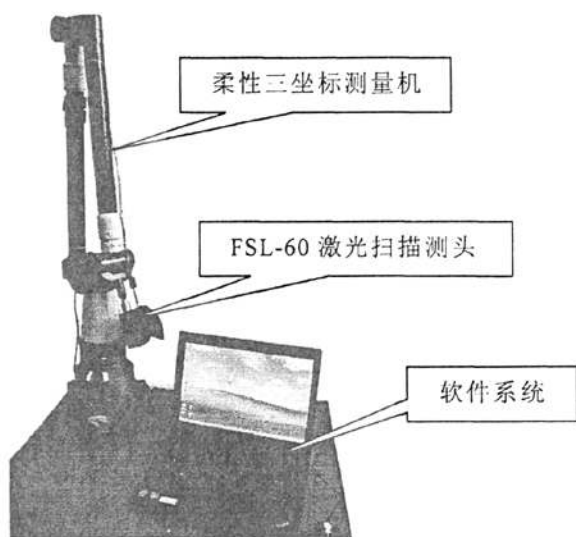


图 3-3 总体方案图

3.2 机械连接件的设计

当 FSL-60 型扫描测头集成到柔性三坐标测量机上时，为了完好定位，连接件的设计尤为重要。在考虑到各种因素的情况下，本研究中设计的连接件为一 M5 螺栓，采用铝制的材料，如图 3-4 所示。其主要优点有：外观好、质轻，可机加工性、物理和力学性能好，以及抗腐蚀性好。连接件一端通过 M5 的螺纹拧到测头座上，另一端用于连接扫描测头，并用两端的顶丝对扫描测头进行固定。中间的部位铣一个长为 12mm 的距离，可使用扳手将其拧紧，更加牢固地连接到测头座上。具体结构如图 3-5 所示。

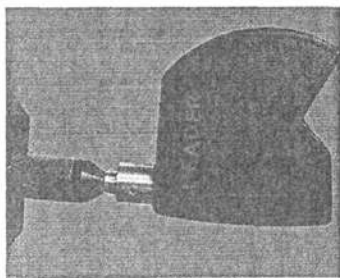


图 3-4 连接图形

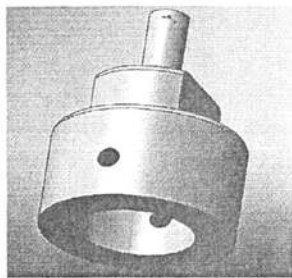


图 3-5 连接件示意图

3.3 测头硬件系统的连接

在进行完扫描测头与机架的连接后，必须保证测头的正面（印有 HEADER 字样的面）与关节臂的正方向一致，如图 3-6 所示。同时将 1394 卡插入到计算机中，使测头连接的另一端插入到 1394 卡的一个口中。但是为了保证 1394 卡的寿命，一般不能带电拔插。

将触发信号线一端插入到 1394 线的转接盒上，另一端与关节臂相连，一般

来说，棕色线为信号端，黑色为地线。通常，高电平输出+3.3V 的电压，若关节臂要求的输入触发电平为+5V，一般要拉至到 5V。

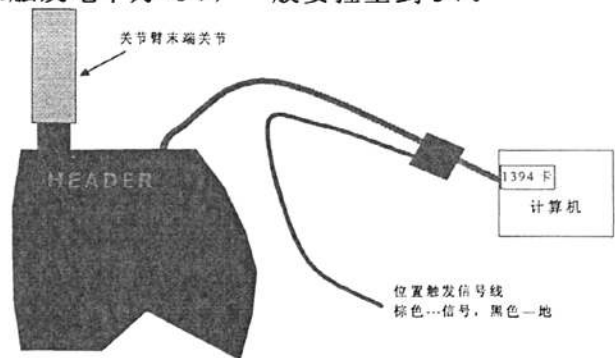
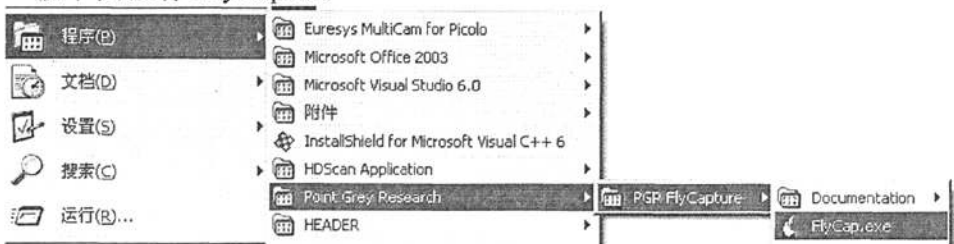


图 3-6 测头硬件系统连接图

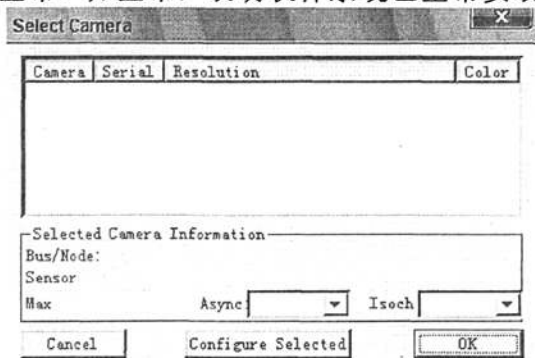
3.4 测头软件系统的连接

在硬件安装完毕后，先安装 1394 相机的驱动。安装正常后，即可在设备管理器中看到。

按下图运行 FlyCap.exe



结束后，会出现下面的界面，点“OK”进入图像显示界面，可测试相机安装及测头硬件是否正常。如正常，表明软件系统已正常安装。



3.5 通信接口关系

在我们进行的通信接口关系中，柔性三坐标测量机采用的是串口通信方式，而激光扫描测头使用的是 1394 总线方式通信，所以为了使二者能够更好的结合，应按照以下工作流程进行。

由于柔性三坐标测量机有六个旋转关节，而在每一个旋转关节都安装一个

角度编码器，用来记录各个关节的坐标信息。因此，首先激光扫描测头发出电路同步触发信号，来通知柔性三坐标测量机锁存各关节当前的角度信息，与此同时，激光扫描测头记录自身当前的坐标信息。

其次，电路系统通过串口将当前的角度信号发送到计算机软件，与此同时激光扫描测头将自身记录的坐标信息通过 1394 总线发送到它的驱动程序中；

最后，计算机软件接收到串口数据后进行计算得到当前的坐标值，同时调用激光非接触测头的驱动库，以获取扫描信息，并将两者综合，得到激光非接触测头扫描的数据在测量机坐标系下的坐标。

通过以上步骤，即可实现二者通信接口的关系。

3.6 本章小结

本章首先研究了国外一些柔性三坐标测量机的特点，通过对机械连接部位的设计、硬件系统的连接和通信接口关系的研究，我们成功地将 FSL-60 型扫描测头连接到我们自主研制的柔性三坐标测量机上，实现了对物体的扫描测量。因此，在进行完以上工作后，其重点主要是解决测量机在扫描测量过程中的坐标转换问题，以及核心技术—标定。以下两章将重点介绍这两个问题。

第四章 整体坐标转换关系

在解决好软、硬件连接后，本章将重点介绍作为关键技术之一的坐标转换关系。当扫描测头集成到测量机上后，必须先了解柔性三坐标测量机末端关节的坐标规定，从而才能实现整体的坐标转换^[24-26]。

4.1 柔性三坐标测量机的末端坐标的规定

将激光扫描测头集成到柔性三坐标测量机上后，要将扫描测头得到的光平面内的二维数据转换到测量机的三维坐标系中才能实现扫描测量。通常是将激光测头输出的二维坐标先转换到柔性三坐标测量机末端运动坐标系中。即以测量机最末端杆为 Z 轴，以末端关节为 X 或 Y 轴，建立坐标系，坐标原点通常在机械测头的末端。要求关节臂输出该坐标原点的三维坐标和三个轴的方向矢量。因此首先应该确定柔性三坐标测量机末端的坐标。在确定之前，先了解测量机的测量方程。

由于该测量机的机械结构与传统的机器人手臂极其相似，所以，我们可以借助与机器人操作手中成熟运用的 D-H 方法^[27]来建立测量方程。

4.1.1 齐次坐标变换

在齐次坐标中用一个四维的列向量表示三维空间中的一个点， $P = [x, y, z, w]^T$ 表示三维空间中的点 $p = (x/w, y/w, z/w)$ ；用形式如 $[x, y, z, 0]^T$ 的向量表示无限大的向量，并被用来表示方向，加上其他任一有限的向量都不会改变它的大小。用一个 4×4 的矩阵 H 表示一个空间变换，能够用来表示移动、转动、伸展和透视变换，空间中的一点 $u = [x, y, z, 1]^T$ 经过变换 H 后得到一个新的位置 $v = [x_1, y_1, z_1, 1]^T$ ；则可用下面的运算来表示变换的过程：

$$v = Hu$$

在 DH 方法中，由于变换不是正交方式，所以只会用到移动、转动变换，不会用到伸展和透视变换。定义移动变换 $Trans(a, b, c)$ 为点 A 沿向量 $ai + bj + ck$ 移动到 B 点的变换，则

$$Trans(a, b, c) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

同样分别定义绕 x, y, z 三轴转过角度 θ 的变换为 $Rot(x, \theta)$ 、 $Rot(y, \theta)$ 、 $Rot(z, \theta)$ ：

$$\begin{aligned} \text{Rot}(x, \theta) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \\ \text{Rot}(y, \theta) &= \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \\ \text{Rot}(z, \theta) &= \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{\circ} \end{aligned}$$

上面定义的变换是最基本的坐标变换，这样，一个复杂的齐次坐标变换就可以等效成这些基本变换的组合；虽然大多数这样的变换交换次序会得到不同的结果，但有些变换序列相互变换顺序不会影响最终的结果^[28]。

4.1.2 D-H 方法与坐标架

一般杆件可以用两个尺度来表征：公法线长度 l_n 和扭歪角 α_n ，它是在垂直于公法线平面中的两轴线之间的夹角，如图 4-1 图所示。通常每个关节轴线上连接着两个杆件。每根轴线有两根法线，对于每一构件各有一根，两根这样连接起来的杆件的相对位置用 d_n 表示。这是沿关节 n 轴线上两根法线之间的距离，而两根法线之间的夹角 θ_n 在垂直于轴线的平面内测量， d_n 和 θ_n 分别称为两杆件之间的距离和夹角，如图 4-2 所示。

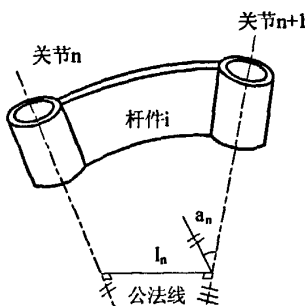


图 4-1 杆件长度和扭角

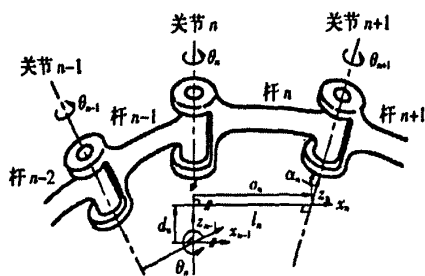


图 4-2 转动关节的参数 θ_n , d_n , l_n 和 α_n

按照图 4-2 所示把各坐标架指配给各个杆件，确定转动和移动建立起两相邻的坐标架 $n-1$ 、 n 之间的关系，绕 z_{n-1} 旋转 θ_n ，沿 z_{n-1} 移动 d_n ，沿旋转后的 x_{n-1} ，即 x_n 移动 l_n ，绕 x_n 旋转扭歪角 α_n 。

$$A_n = \text{Rot}(z, \theta_n) \text{Trans}(0, 0, d_n) \text{Trans}(l_n, 0, 0) \text{Rot}(x, \alpha_n)$$

对于旋转关节 θ_n 是关节变量，其余 α_n 、 l_n 、 d_n 均为结构参数。

表 4-1 给出了柔性三坐标测量机的变量和结构参数。图 4-3 所示柔性测量机一共由六个这样的关节连在一起的杆件构成，具有六个自由度，每杆一个，且能在其活动范围内有任意的位置和姿态，在末杆的末端没有关节，只有测头。如果在关节臂的每一个杆件上固联一个坐标架，利用齐次变换，就可以描述这些坐标架的相对位置与姿态。描述这一杆件和下一杆件之间关系的矩阵被 Denavit 称作 A 矩阵，它单纯是用来描述构件坐标系间相对移动和相对转动的齐次变换，在测量机的基座上世界坐标系 O ， A_1 描述第一杆在世界坐标系下的位置与姿态，用 A_2 描述第二杆件相对于第一杆的位置与姿态，依次类推，则最后一个坐标架在世界坐标中的位置和姿态可表示为^[29]：

$$T_6 = A_1 A_2 A_3 A_4 A_5 A_6$$

表 4-1 柔性三坐标测量机转换矩阵参数表

关节	变量 θ_i	零位 $\Delta\theta_i$	扭角 α_i	$\cos\alpha_i$	$\sin\alpha_i$	杆长 l_i	偏置 d_i
1	θ_1	$\Delta\theta_1$	$-\pi/2$	0	-1	0	d_1
2	θ_2	$\Delta\theta_2$	$\pi/2$	0	1	$-l_2$	0
3	θ_3	$\Delta\theta_3$	$-\pi/2$	0	-1	0	d_3
4	θ_4	$\Delta\theta_4$	$\pi/2$	0	1	$-l_4$	0
5	θ_5	$\Delta\theta_5$	$-\pi/2$	0	-1	0	d_5
6	θ_6	$\Delta\theta_6$	$\pi/2$	0	1	$-l_6$	0

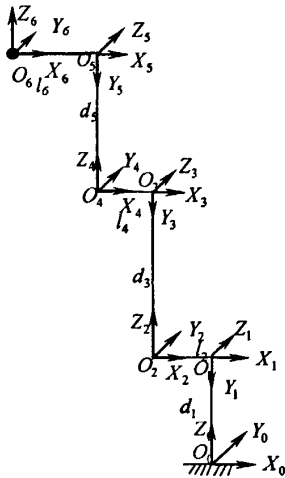


图 4-3 柔性三坐标测量机各杆件坐标系转换

根据表 4-1 可得到全部转换矩阵：

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & 0 & -\sin \theta_i & 0 \\ \sin \theta_i & 0 & \cos \theta_i & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad i=1, 3, 5$$

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & 0 & -\sin \theta_i & -l_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & 0 & \cos \theta_i & -l_i \sin \theta_i \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad i=1, 3, 5$$

测头在其坐标架 A_6 下的坐标为 $[0,0,0,1]^T$ 。因此，测头在世界坐标系下的坐标为：

$$[x, y, z, 1]^T = T_6 [0, 0, 0, 1]^T = \prod_{i=1}^6 A_i [0, 0, 0, 1]^T$$

4.1.3 末端坐标的两种规定

末端坐标架为最后一个坐标架，其 X 轴方向为测头延伸方向的反方向，即测头延伸的方向为 X 轴的负方向，其 Y 方向的正方向与最后一个关节的转动正方向（关节转动时传感器角度增加的方向）有关，可通过“右手定则（1）”确定：握右手，伸出右手拇指，使四指环绕的方向与关节转动的正方向保持一致，则右手拇指的方向为 Y 轴的正向。而坐标架的 Z 轴则由“右手定则（2）”确定，握右手，伸出右手拇指，使四指环绕的方向先通过 X 轴，过 90 度后再通过 Y 轴，则右手拇指的方向为 Z 轴的正向。坐标架的位置由齐次矩阵 A 的最后一列确定。

根据图 4-3 所示的各杆件的坐标系，可以知道接触式测头的末端的坐标可以表示为以下两种形式，图 4-4 所示。两种形式的规定，为在后面的整体坐标转换提供了依据。

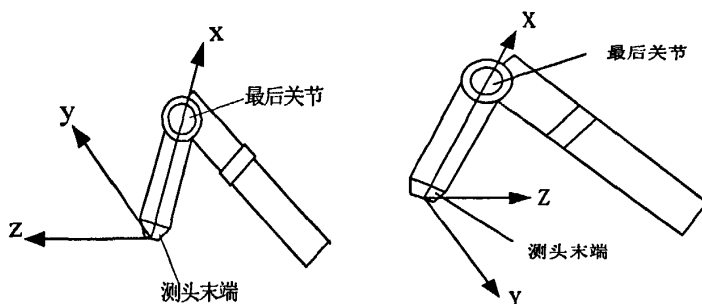


图 4-4 柔性三坐标测量机末端两种坐标示意图

4.2 整体坐标转换关系

在介绍整体坐标转换之前，首先了解计算机视觉中的常用坐标系。

规定好测头末端坐标后，把扫描测头集成到测量机上，坐标转换关系可由以下图 4-5 表示^[30]。

图中主要描述了关节臂坐标系、摄像机坐标系和标定体坐标系之间的关系。

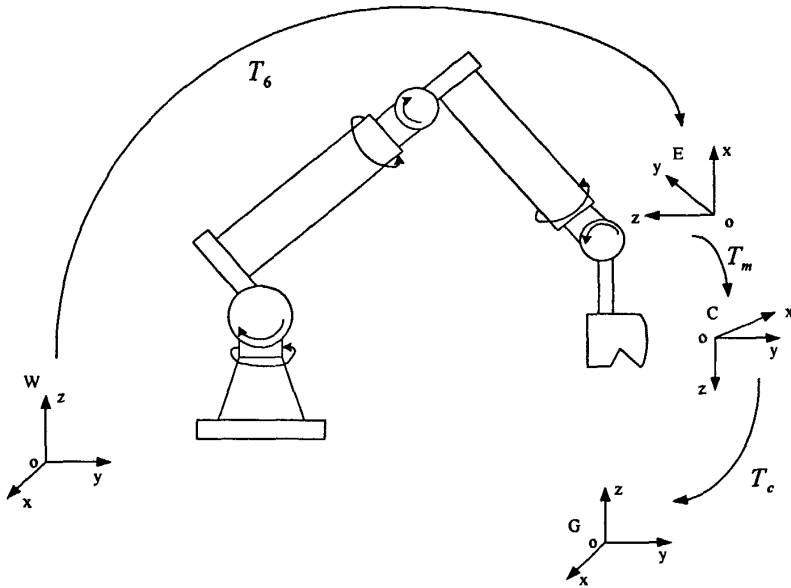


图 4-5 带扫描测头的柔性三坐标测量机坐标系示意图

其中，W—关节臂的世界坐标系；

E—关节臂末端坐标系；

C—摄像机坐标系；

G—标定体坐标系；

T_6 表示坐标系 W 到 E 之间的变换。

T_m 表示坐标系 E 到 C 之间的变换，它是摄像机相对于关节臂末端的外参数，是整体标定时需要求取的参数，我们将在第五章将作详细的介绍。

T_c 表示坐标系 C 到 G 之间的变换，它是摄像机相对于标定体的外参数，同样在第五章介绍。

T_g 表示坐标系 W 到 G 之间的变换。

由坐标变换公式：

$$T_g = T_6 T_m T_c$$

在上式中， $T_6 = A_1 A_2 A_3 A_4 A_5 A_6$ ，在上节中已经求解。而 T_m 和 T_c 在标定时求解完成。最后求的 T_g 。

4.3 本章小结

本章主要研究了整体的坐标转换关系。首先介绍了柔性三坐标测量机末端坐标架的规定，通过确定好末端坐标架后，可实现整体的坐标转换。

第五章 标定与实验

在上一章介绍完坐标转换关键技术后，另一个最关键的问题就是标定。选择一种正确的标定方法，将关系到系统的整体精度。本章主要介绍了摄像机的标定理论和激光扫描测头集成到柔性三坐标测量机的整体标定问题。

5.1 摄像机的标定

摄像机标定是指建立摄像机图像像素位置与场景点位置之间的关系，其途径是根据摄像机模型，由已知特征点的图像坐标和世界坐标求解摄像机的模型参数^[31-32]。

5.1.1 图像坐标系、摄像机坐标系与世界坐标系

摄像机采集的图像以标准电视信号的形式经高速图像采集系统变换为数字图像，并输入计算机^[33]。每幅数字图像在计算机内 $M \times N$ 数组， M 行 N 列的图像中的每一个元素（称为像素，pixel）的数值即为图像点的亮度（或称灰度）。如图 5-1 所示，在图像上定义直角坐标系 u, v ，每一像素的坐标 (u, v) 分别是该像素在数组中的列数与行数，所以， (u, v) 是以像素为单位的图像坐标系坐标。由于 (u, v) 只表示像素位于数组中的列数与行数，并没有用物理单位表示出该像素在图像中的位置，因此，需要再建立以物理单位（如 mm）表示的图像坐标系。该坐标系以图像内某一点 O_1 为原点， X 轴与 Y 轴分别与 u, v 轴平行，如图 5-1 所示。其中， (u, v) 表示以像素为单位的图像坐标系的坐标， (X, Y) 表示以 mm 为单位的图像坐标系的坐标。在 X, Y 坐标系中，原点 O_1 定义在摄像机光轴与图像平面的交点，该点一般位于图像中心处，但由于某些原因，也会有些偏离，若 O_1 在 u, v 坐标系中的坐标为 (u_0, v_0) ，每一个像素在 X 轴与 Y 轴方向上的物理尺寸为 dX, dY ，则图像中任意一个像素在两个坐标系下的坐标有如下关系：

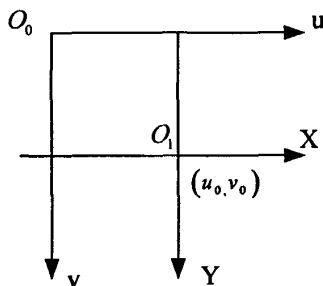


图 5-1 图像坐标系

$$\begin{cases} u = \frac{X}{dX} + u_0 \\ v = \frac{Y}{dY} + v_0 \end{cases} \quad (5-1)$$

为以后使用方便，用齐次坐标与矩阵形式将上式表示为：

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{dX} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dY} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5-2)$$

逆关系还可以写成：

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dX & 0 & -u_0 dX \\ 0 & dY & -v_0 dY \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5-3)$$

摄像机成像几何关系可由图 5-2 所示。其中 O 点称为摄像机光心， x 轴和 y 轴与图像的 X 轴与 Y 轴平行， z 轴为摄像机光轴，它与图像平面垂直。光轴与图像平面的交点，即为图像坐标系的原点，由点 O 与 x ， y ， z 轴组成的直角坐标系称为摄像机坐标系。 OO_1 为摄像机焦距。

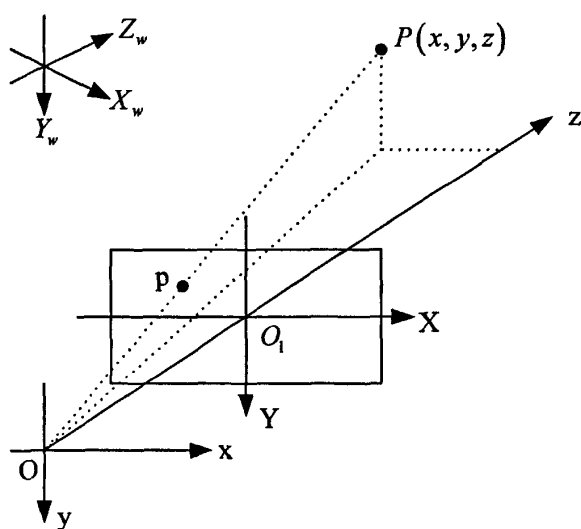


图 5-2 摄像机坐标系与世界坐标系

由于摄像机可安放在环境中的任何位置，在环境中选择一个基准坐标系来描述摄像机的位置，并用它描述环境中任何物体的位置，该坐标系成为世界坐标系。它由 X_w ， Y_w ， Z_w 轴组成。摄像机坐标系与世界坐标系之间的关系可以用旋转矩阵 R 与平移向量 t 来描述。因此，空间中某一点 P 在世界坐标系与摄像机坐标系下的齐次坐标如果分别是 $X_w = (X_w, Y_w, Z_w, 1)^T$ 与 $x = (x, y, z, 1)^T$ ，于是存在如下关系：

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = M_1 \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5-4)$$

其中, R 为 3×3 正交单位矩阵; t 为三维平移向量; $0 = (0, 0, 0)^T$; M_1 为 4×4 矩阵。

5.1.2 摄像机模型

5.1.2.1 小孔模型

所有景物通过摄像机光轴中心投射到成像平面上的摄像机模型, 称为小孔模型^[34-36]。摄像机光轴中心点, 是指摄像机镜头光心。如图 5-3 所示, O_c 为摄像机的光轴中心点, Π'_2 为摄像机的成像平面。成像平面上分布着感光器件, 将照射到该平面的光信号转变为电信号, 经过放大处理得到数字图像。由小孔成像原理可知, 物体在成像平面 Π'_2 上的像是倒实像。物体的像与原物体相比较, 比例缩小, 上下和左右方向相反。在将摄像机成像平面上的倒实像转换成数值图像时, 将图像进行了放大, 将图像的方向进行了转换, 使其与原物体的上下和左右方向相同。可以这样认为, 成像平面 Π'_2 等效成成像平面 Π_2 , 成像平面 Π_2 的正像到数字图像的转换等效成放大环节。

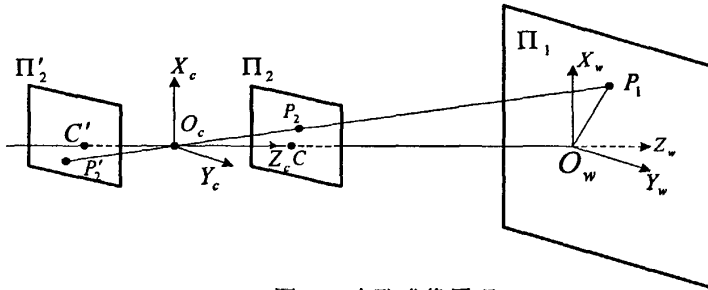


图 5-3 小孔成像原理

在摄像机的光轴中心建立坐标系, Z 轴方向平行于摄像机光轴, 并以从摄像机到景物的方向为正方向, X 轴方向取图像坐标沿水平增加的方向。在摄像机的笛卡尔空间, 设景物点 P_1 的坐标为 (x_1, y_1, z_1) , P_1 在成像平面 Π_2 的成像点 P_2 的坐标为 (x_2, y_2, z_2) , 则

$$\begin{cases} \frac{x_1}{z_1} = \frac{x_2}{z_2} = \frac{x_2}{f} \\ \frac{y_1}{z_1} = \frac{y_2}{z_2} = \frac{y_2}{f} \end{cases} \quad (5-5)$$

式中： f 是摄像机的焦距， $f = z_2$ 。

5.1.2.2 摄像机内参数模型

式 (5-5) 是笛卡尔空间的景物点与成像点之间的关系，摄像机的内参数模型描述的是景物点与图像点之间的关系。成像平面上的像经过放大处理得到的数字图像，成像平面上的成像点 (x_2, y_2) 转换成为图像点 (u, v) 。将光轴中心线在成像平面的交点的图像坐标记为 (u_0, v_0) ，则

$$\begin{cases} u - u_0 = \alpha_x x_2 \\ v - v_0 = \alpha_y y_2 \end{cases} \quad (5-6)$$

式中： α_x 和 α_y 分别为成像平面到图像平面在 X 轴和 Y 轴方向的放大系数。

将式 (5-5) 代入式 (5-6)，得

$$\begin{cases} u - u_0 = \alpha_x f \frac{x_1}{z_1} \\ v - v_0 = \alpha_y f \frac{y_1}{z_1} \end{cases} \quad (5-7)$$

将式 (5-7) 改写为矩阵形式，则有

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_x & 0 & u_0 \\ 0 & k_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1/z_1 \\ y_1/z_1 \\ 1 \end{bmatrix} = M_{in} \begin{bmatrix} x_1/z_1 \\ y_1/z_1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5-8)$$

式中： $k_x = \alpha_x f$ 是 X 轴方向的放大系数； $k_y = \alpha_y f$ 是 Y 轴方向的放大系数； M_{in} 称为内参数矩阵， (x_1, y_1, z_1) 是景物点在摄像机坐标系下的坐标。

在式 (5-8) 中，内参数矩阵 M_{in} 含有 4 个参数。因此，式 (5-8) 模型被称为摄像机的四参数模型^[37-38]。一般地，景物点在摄像机坐标系下的坐标用 (x_c, y_c, z_c) 表示，式 (5-8) 改写为是 (5-9)：

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_x & 0 & u_0 \\ 0 & k_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c/z_c \\ y_c/z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5-9)$$

如果不考虑放大系数 k_x 和 k_y 的差异，构成的摄像机内参数模型只有 3 个参数，称为摄像机的三参数模型，见式 (5-10)：

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k & 0 & u_0 \\ 0 & k & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c/z_c \\ y_c/z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5-10)$$

式中： k 是放大系数。

在考虑放大系数 k_x 与 k_y 的差异与耦合作用情况下，构成的摄像机内参数模型具有5个参数，称为摄像机的五参数模型，见式(5-11)：

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_x & k_s & u_0 \\ 0 & k_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c/z_c \\ y_c/z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5-11)$$

式中： k_s 是 X 轴方向与 Y 轴方向的耦合放大系数。

在上述3种内参数模型中，四参数模型较为常用。

5.1.2.3 摄像机外参数模型

摄像机的外参数模型，是景物坐标系在摄像机坐标中的描述。如图5-3所示，坐标系 $O_wX_wY_wZ_w$ 在坐标系 $O_cX_cY_cZ_c$ 中的表示，构成摄像机的外参数矩阵。

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & P \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = {}^cM_w \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5-12)$$

式中： (x_c, y_c, z_c) 表示景物点在摄像机坐标系 $O_cX_cY_cZ_c$ 中的坐标； (x_w, y_w, z_w) 是景物点在坐标系 $O_wX_wY_wZ_w$ 中的坐标； cM_w 是外参数矩阵； $n = [n_x \ n_y \ n_z]^T$ 是 X_w 轴在摄像机坐标系 $O_cX_cY_cZ_c$ 中的方向向量； $o = [o_x \ o_y \ o_z]^T$ 是 Y_w 轴在摄像机坐标系 $O_cX_cY_cZ_c$ 中的方向向量； $a = [a_x \ a_y \ a_z]^T$ 是 Z_w 轴在摄像机坐标系 $O_cX_cY_cZ_c$ 中的方向向量； $p = [p_x \ p_y \ p_z]^T$ 是 $O_wX_wY_wZ_w$ 的坐标原点在摄像机坐标系 $O_cX_cY_cZ_c$ 中的位置。

5.2 手眼标定

本论文中选用的扫描测头，在出厂时已标定。所以标定扫描测头不是本论文研究的重点，本论文研究的重点是，当扫描测头集成到柔性三坐标测量机上后的整体标定，在本论文中，我们把这种标定称为“手眼标定”。

摄像机标定时，虽然也可以获得摄像机的外参数，但这只是标定用的标定的坐标系相对于摄像机坐标系之间的变换关系。在某些应用中，还需要获得

摄像机与柔性三坐标测量机的坐标系之间的关系。这种关系的标定，又称为柔性三坐标测量机的手眼标定。对于 Eye-to-Hand 系统，手眼标定时求取的是摄像机坐标系相对于柔性三坐标测量机的世界坐标系的关系。一般地，Eye-to-Hand 系统先标定出摄像机相对于标定体的外参数，再标定柔性三坐标测量机的世界坐标系与标定体坐标系之间的关系，利用矩阵变换获得摄像机坐标系相对于柔性三坐标测量机的世界坐标系的关系。对于 Eye-in-Hand 系统，手眼标定时求取的是摄像机坐标系相对于柔性三坐标测量机末端坐标系的关系。通常，Eye-in-Hand 系统在柔性三坐标测量机末端不同位置和姿态下，对摄像机相对于标定体的外参数进行标定，根据摄像机相对于标定体的外参数和柔性三坐标测量机末端的位置和姿态，计算获得摄像机相对于柔性三坐标测量机末端的外参数^[34]。本章将重点介绍 Eye-in-Hand 系统的常规手眼标定方法。在第四章中我们只是介绍了基本的坐标转换关系，而在本章我们将详细研究标定问题，其中掺插了坐标转换问题。

柔性三坐标测量机坐标系、摄像机坐标系和标定体坐标系之间的关系，如图 4-5 所示。W 为柔性三坐标测量机的世界坐标系，E 为柔性三坐标测量机末端坐标系，C 为摄像机坐标系，G 为标定体坐标系。 T_6 表示坐标系 W 到 E 之间的变换， T_m 表示坐标系 E 到 C 之间的变换， T_c 表示坐标系 C 到 G 之间的变换， T_g 表示坐标系 W 到 G 之间的变换。 T_c 是摄像机相对于标定体的外参数。 T_m 是摄像机相对于柔性三坐标测量机末端的外参数，是手眼标定需要求取的参数。

由坐标系之间的变换关系，可以获得：

$$T_g = T_6 T_m T_c \quad (5-13)$$

在标定体固定的情况下，改变测量机的末端位姿，标定摄像机相对于标定体的外参数 T_c 。对于第 i 次和第 $i-1$ 次标定，由于 T_g 保持不变，由式 5-13 得

$$T_{6i} T_m T_{ci} = T_{6(i-1)} T_m T_{c(i-1)} \quad (5-14)$$

式中： T_{6i} 为第 i 次标定时的坐标系 W 到 E 之间的变换 T_6 ； T_{ci} 是第 i 次标定时的摄像机相对于标定体的外参数 T_c 。

式 5-14 经过整理，可以写为式 5-15：

$$T_{Li} = T_m T_{Ri} T_m^{-1} \quad (5-15)$$

式中： $T_{Li} = T_{6(i-1)}^{-1} T_{6i}$ ， $T_{Ri} = T_{c(i-1)}^{-1} T_{ci}$ 。

将 T_{Li} 、 T_{Ri} 和 T_m 表示为式 5-16 的形式：

$$\begin{cases} T_{Li} = \begin{bmatrix} R_{Li} & p_{Li} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ T_{Ri} = \begin{bmatrix} R_{Ri} & p_{Ri} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ T_m = \begin{bmatrix} R_m & p_m \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (5-16)$$

将式 5-16 代入式 5-15，得到

$$\begin{cases} R_{Li} = R_m R_{Ri} R_m^T \\ -p_m R_{Li} + R_m p_{Ri} + p_m = p_{Li} \end{cases} \quad (5-17)$$

R_{Li} 、 R_{Ri} 和 R_m 均为正交单位矩阵，因此， R_{Li} 和 R_{Ri} 为相似矩阵，具有相同的特征值。根据通用旋转变换，任意姿态可以由一个绕空间单位向量的旋转表示。于是， R_{Li} 和 R_{Ri} 可表示为：

$$\begin{cases} R_{Li} = Rot(k_{Li}, \theta_{Li}) = Q_{Li} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e^{j\theta_{Li}} & 0 \\ 0 & 0 & e^{-j\theta_{Li}} \end{bmatrix} Q_{Li}^{-1} \\ R_{Ri} = Rot(k_{Ri}, \theta_{Ri}) = Q_{Ri} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e^{j\theta_{Ri}} & 0 \\ 0 & 0 & e^{-j\theta_{Ri}} \end{bmatrix} Q_{Ri}^{-1} \end{cases} \quad (5-18)$$

式中： k_{Li} 是 R_{Li} 的通用旋转变换的转轴，也是 Q_{Li} 中特征值为 1 的特征向量； k_{Ri} 是 R_{Ri} 的通用旋转变换的转轴，也是 Q_{Ri} 中特征值为 1 的特征向量； θ_{Li} 是 R_{Li} 的通用旋转变换的转角， θ_{Ri} 是 R_{Ri} 的通用旋转变换的转角。

将式 5-18 代入到式 5-17 的第一个方程，可以得到如下关系：

$$\begin{cases} \theta_{Li} = \theta_{Ri} \\ k_{Li} = R_m k_{Ri} \end{cases} \quad (5-19)$$

式 5-19 中的第一个方程，可以用于校验外参数标定的精度，第二个方程用于求取摄像机相对于测量机末端的外参数。如果控制测量机的末端作两次运动，

通过 3 个位置的摄像机外参数标定，可以获得两组式 5-19 所示的方程。将两组式 5-19 方程中的第二个方程写为式 5-20。

$$\begin{cases} k_{L1} = R_m k_{R1} \\ k_{L2} = R_m k_{R2} \end{cases} \quad (5-20)$$

由于 R_m 同时将 k_{R1} 和 k_{R2} 转换为 k_{L1} 和 k_{L2} ，所以 R_m 也将 $k_{R1} \times k_{R2}$ 转换为 $k_{L1} \times k_{L2}$ 。将其关系写为矩阵形式，有

$$\begin{bmatrix} k_{L1} & k_{L2} & k_{L1} \times k_{L2} \end{bmatrix} = R_m \begin{bmatrix} k_{R1} & k_{R2} & k_{R1} \times k_{R2} \end{bmatrix} \quad (5-21)$$

由式 5-21，可求解出 R_m ，见式 5-22：

$$R_m = \begin{bmatrix} k_{L1} & k_{L2} & k_{L1} \times k_{L2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_{R1} & k_{R2} & k_{R1} \times k_{R2} \end{bmatrix}^{-1} \quad (5-22)$$

将 R_m 代入式 5-22 的第二个方程，利用最小二乘法可以求出 p_m 。由 R_m 和 p_m ，获得摄像机相对于柔性坐标测量机末端的外参数矩阵 T_m 。

5.3 实验标定方法

在进行完上节的标定理论的研究后，我们利用了一块约 250×250mm 的平板作为标定体，对整体做了标定实验^[39-40]。标定平板如图 5-4 所示。为了能达到更好的测量效果，此平板表面设计了一定的粗糙度，且颜色为灰白色。

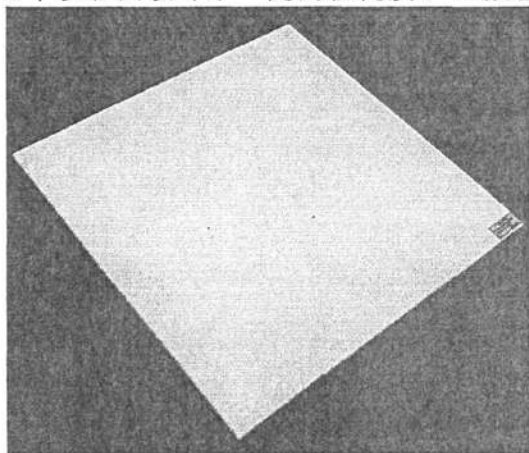


图 5-4 标定平板

首先我们设计了标定界面，如图 5-5 所示，图中左边显示出标定时的激光线（红线）和标准线（10 条），图右边显示了当前测头的坐标值和所要标定的次数。在进入到标定界面后，点击“开始”按钮，表明标定正在进行，如图 5-6 所示，在标定中，激光线与标准线只要大致平行就可以，不一定要基本重合。

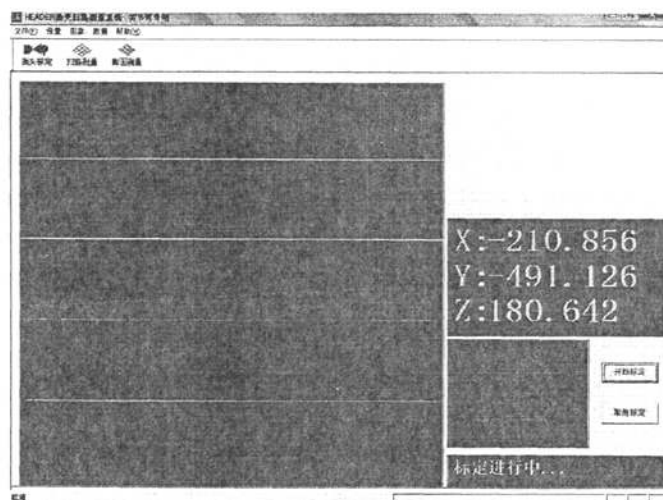


图 5-5 标定界面

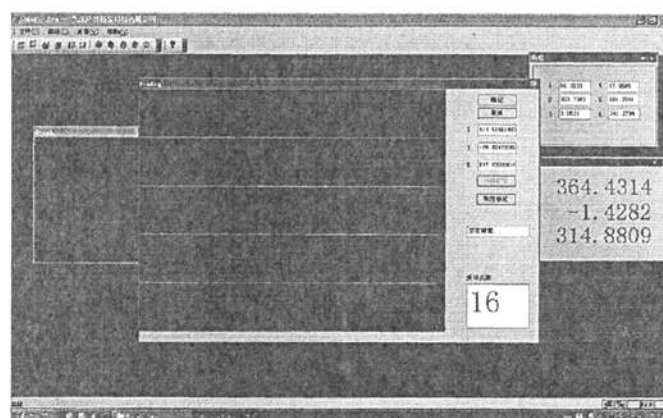
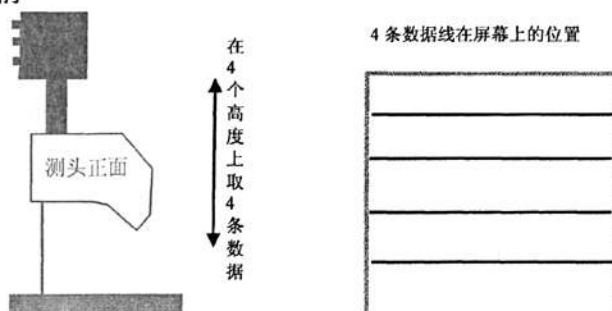


图 5-6 标定进行界面

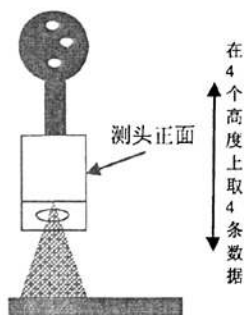
下面具体说明利用平板标定激光扫描测头的流程：

（一）使激光头朝下，测头正面分别朝向前、右、后、左四个方向，在每个方向下距离平面块远近距离不同取四条数据，共取 16 条数据。

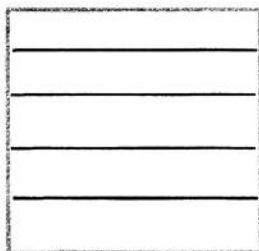
1. 测头正面朝前



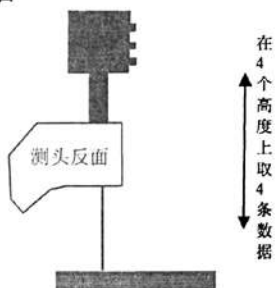
2. 测头正面朝左



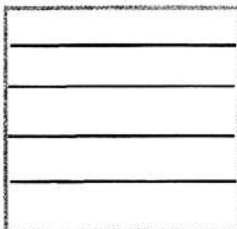
4 条数据线在屏幕上的位置



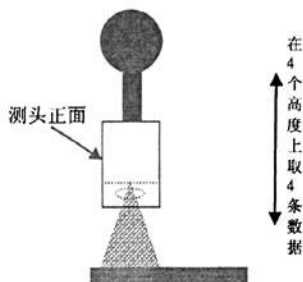
3. 测头正面朝后



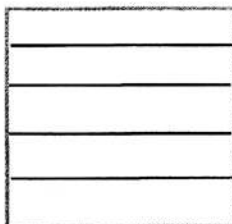
4 条数据线在屏幕上的位置



4. 测头正面朝右

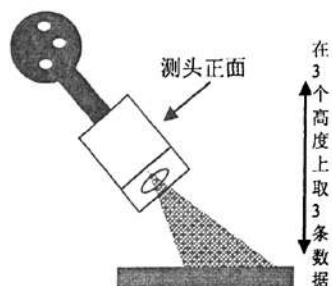


4 条数据线在屏幕上的位置

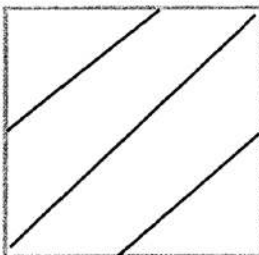


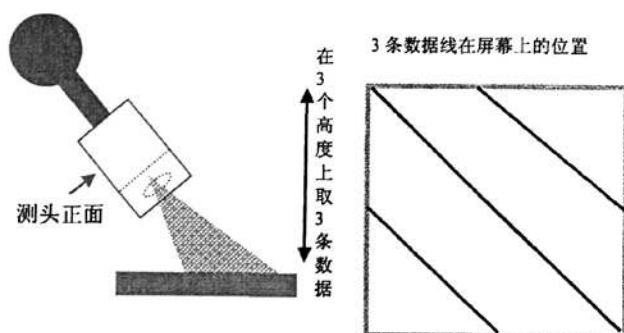
(二) 激光测头沿四个方向测量平面块，每个方向下调整距离远近不同取三条数据，然后将倒数第二个关节转 180° ，再取三条数据。每个方向取 6 条数据，四个方向共取 24 条数据。

1. 方向一：从左向右斜射

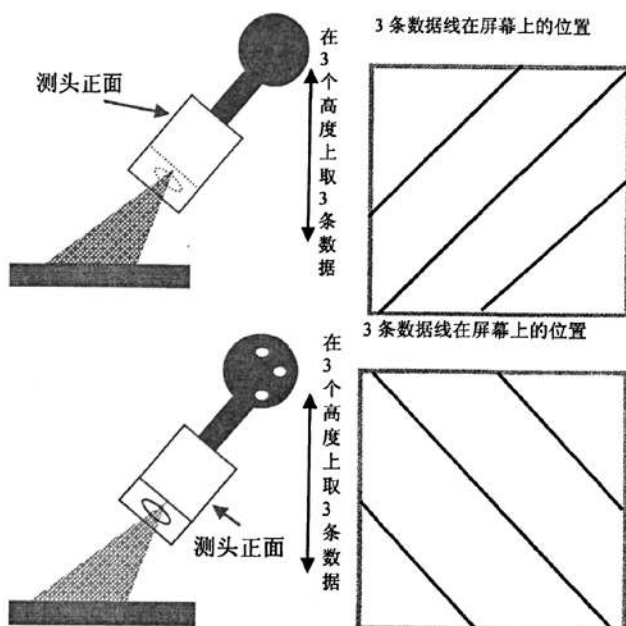


3 条数据线在屏幕上的位置





2. 方向二：从右向左斜射



同样，方向三为从前向后斜射，而方向四为从后向前斜射。

在平板上取完 40 条数据后，系统将自动进行计算，图 5-7，5-8 分别显示了正在计算界面和计算完成界面。计算完成后即可进行测量。

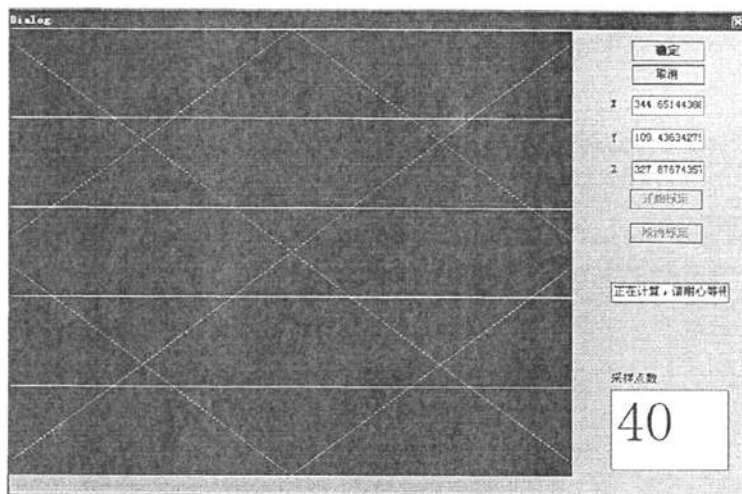


图 5-7 正在计算界面图

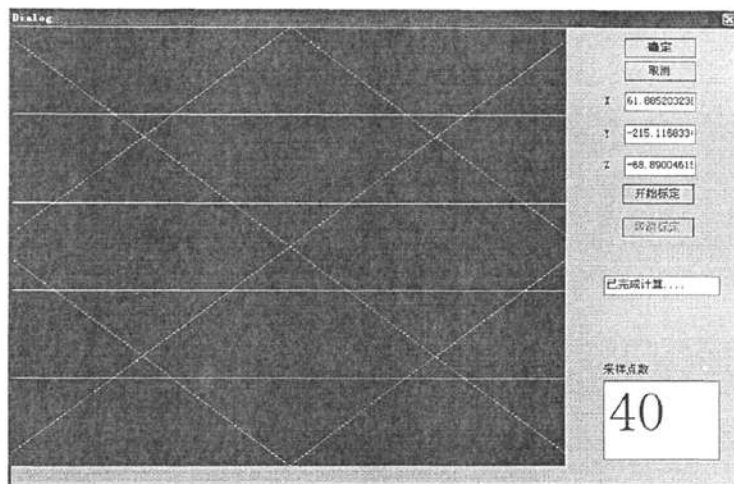


图 5-8 计算完成界面图

5.4 实验测量

在进行完上面的标定程序后，带有扫描测头的柔性三坐标测量机即可实现扫描测量，将所测数据整体在 Geomagic Studio 软件中拟合，形成图像。

5.4.1 Geomagic 软件介绍

Geomagic Studio是由美国Raindrop公司研发的逆向工程应用软件，它以先进的数学模型、曲面构造理论为基础，可轻易地从扫描所得的点云数据创建出完美的多边形模型和网格，并可自动转换为NURBS曲面。该软件提供了直接点构面的全新的构面方式，改变了传统的点——线——面的构面方式。该软件体现了数字外形重构(Digital Shape Reconstruction)技术发展的新趋势，也是除了Imageware以外应用最为广泛的逆向工程软件^[41]。

5.4.2 处理流程

在对某种物体测量前，应先对物体进行分析，了解被测物体的整体轮廓，掌握测量的先后次序。在分析好测量的先后次序后，可以利用激光扫描测量系统对其进行数据的采集。本实验中，在使用激光扫描测头在对石膏像扫描后，首先得到的是大量的点云。因此，在进行图像重构前，由于测得的数据是分块数据片，而且所测点内带有很多的噪声点和杂点，必须先进行数据的预处理，拼合数据块和去除这些坏点，否则会导致重构图形的质量。

然而，在测量过程中，对于一些大型工件，需要从不同的角度多次测量，从而产生分块数据片。还有就是，对一些复杂工件测量时存在盲区，因此，在整体测量完成后，需要对某些特殊区域进行补测。把这些由二次测量带来的数据同第一次的数据拼合在一起的方法，我们在此称为多视点云的对齐。

在我们的实验装置中，由于被测工件放置在台面上保持不动，并且测量机同时也固定在同一个台面上，这样可以在世界坐标系中来建立被测工件坐标和测量机坐标之间的关系。因此，无论测量机的关节臂在空间怎么运动，所测量的点云数据最终都可拼合在一块。一般来说，我们在处理多视点云对齐问题时，是通过先进行各部分的扫描，然后再拼合点云来重构物体的原型。

由于环境和人为因素的影响；常常会带来一些噪声点，同时，在测量过程中，由于人手的抖动，也会带来一些跳点，所以在建立模型之前，应该将这些无用点去除，减小误差。通常采用平滑滤波的方法来降低或消除这些负面影响。

测量所得到的数据难免会出现某些小片数据空缺，带来这种现象的原因，可能是被测工件的外形的特殊性所造成，因此，必须进行数据补缺。

5.4.3 实验

在实验中，我们实现了对一奥运福娃石膏像进行了扫描测量，实验方案如图5-9所示。

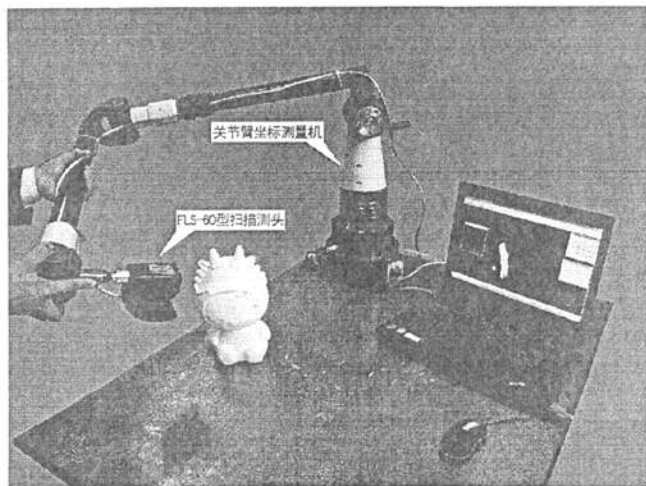


图 5-9 实验整体图

测量结束后，在 Geomagic Studio 软件中对所测数据进行处理，将处理结果进行曲线拟合，可以得到如图 5-10 所示的图形。

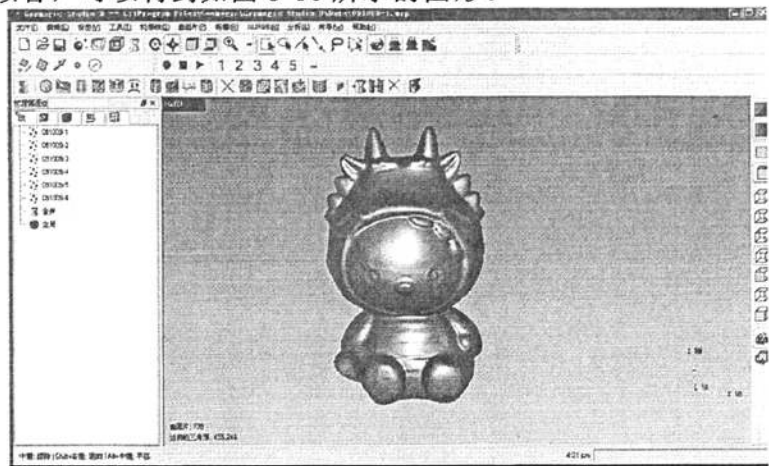


图 5-10 最终拟合图形

图形拟合出来后进行精度比对，可以得到：FSL-60 型扫描测头集成到我们自主研制的柔性三坐标测量机上后进行的扫描测量，精度基本上能达到 $\pm 0.15\text{mm}$ 左右。

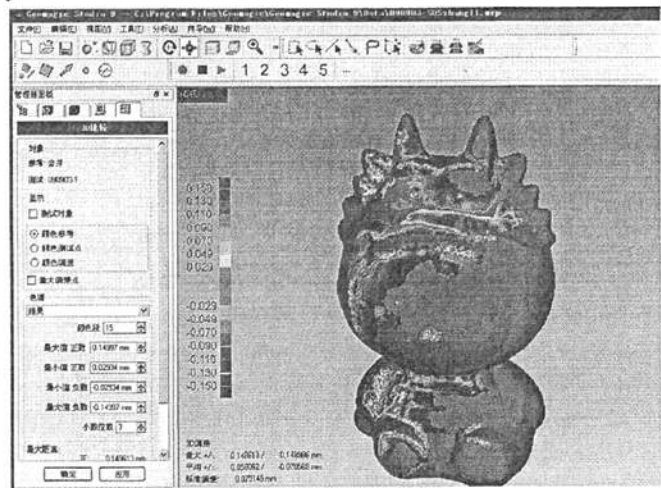


图 5-11 精度比对图

图 5-11 显示了最终的测量精度，图中各部分的颜色不同，分别显示了各部分的精度差异。红色代表所测部位效果最差，因此精度较低。而中间的绿色代表此处的测量效果最好，固然精度最好。

5.5 影响测量精度的因素

任何测量中，都会有一些因素直接影响测量精度，而在我们所做实验中影响被测物体精度的主要因素包括内部因素和外部因素^[42]。其内部因素主要是指激光扫描测头本身因素给测量精度带来的影响。主要有：①光学系统的像差，而构成光学系统像差又分为球差、慧差、畸变和场曲等，这些因素会使实际像点

与理想像点发生偏离。②光点的尺寸大小和形状，其中，光点的大小对 CCD 的影响最为严重，其解决的办法是采用能量集中的激光束进行测量；而光点的形状对 CCD 的影响较小，不同形状的光点对被测精度的影响不同。③其他的一些因素。如 CCD 检测电路的测量精度和噪声，以及整体电路和外界温度的影响。

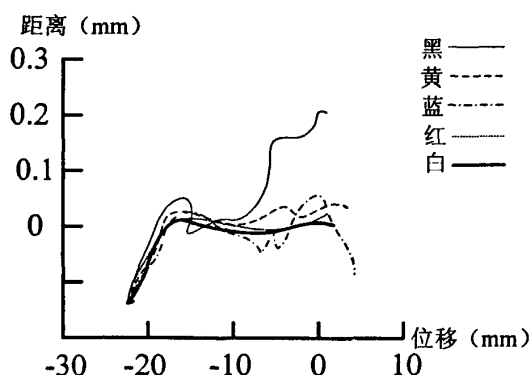


图 5-12 表面颜色对测量的影响曲线

外部因素主要包括：(1) 被测表面倾斜度给测量精度带来的影响，如表面的倾斜度越大，则测量误差就越大。(2) 被测表面光泽和粗糙度的影响，在实际测量中，如果被测表面过于光滑，则投射到表面的激光不容易发生漫反射，因此导致测量误差。如果被测表面太粗糙，又会造成某些区域产生丢光现象。(3) 被测表面颜色给测量精度带来的影响。我们通过实验的方法，在一块粗糙度均匀的平板上分别涂上黑、黄、蓝、红、白几种颜色，用线结构光扫描测头进行测量，可以得到：表面颜色不同，测量的影响曲线也不同。实验如图 5-12 所示。

由于这些因素在不同的实验中表现出不同的确定性。因此，我们在实际测量前，应该对这些因素进行标定，从而减小测量误差。

在消除以上两种误差因素后，当激光扫描测头集成到柔性三坐标测量机上用于扫描测量时，柔性三坐标测量机也有其本身误差，主要有：(1) 该测量机在结构形式上是一个串联开链系统，它是由几个杆件通过一系列的转动关节串联起来构成的，因此具有微小的误差有放大作用；(2) 柔性三坐标测量机在使用时是通过人手进行操作的，所以在使用时由于操作方式及测量力的不同，会引起测量机各运动部件之间发生微小形变，也会造成测量误差；(3) 柔性三坐标测量机是通过测量角度来获得三维信息的，所以角度测量系统的精度对测量机整体精度有很大的影响；(4) 圆光栅编码器的尺寸较大，集成度不高，刻线密度不高，无高的细分数字处理电路，因此会导致测角精度，从而影响整体测量机的精度；(5) 关节式坐标测量机的结构参数不能依靠加工和装配来保证，需要通过标定实验来进行参数识别，而参数识别的效果对测量机的精度也能产生较大影响。基于以上这些确定，同样是导致，柔性三坐标测量机非接触式测量系统精度的一些因素。因此，我们在研究激光扫描测量系统的同时，还将继续对原有测量机本身的误差进行分析和处理，继续探求一些新理论和新方法，力求将误差降到最小。

5.6 本章小结

本章重点介绍了标定问题，首先研究了摄像机的标定，介绍了摄像机的模型以及内外参数模型。以及研究了手眼标定理论；通过实验的方法，对一福娃进行扫描测量，拟合出模型轮廓图形；其次，通过精度分析，可以得到整体精度可达到 $\pm 0.15\text{mm}$ 左右。而且通过逆向软件 Geomagic Studio 可实现产品的逆向技术；最后，给出了影响测量精度的各种因素。

第六章 课题总结与展望

在本设计中，为了克服原有的接触式测量的一些弱点，在我们自制的柔性三坐标测量机上连接一款激光扫描测头，取代原有的接触式测头。使得现有的柔性三坐标测量机具有测量速度快，工作效率高，而且对一些质软的工件可以进行测量，以及对较小工件上的孔、槽、圆弧，可以进行测量等优点。使得测量范围更加广泛。结合 Geomagic Studio 软件，还可以实现产品的逆向。

论文主要完成了以下几个方面的工作：

1、充分调研了国内外非接触式测头的发展现状，分析了现有的非接触式测头的基本原理，以及基本设计方案和内部结构。最后选定了一款 FSL-60 型扫描测头。

2、研究了各种结构光的测量方法和测量原理，提出我们所选的非接触式测头必须为线结构光扫描测头。

3、研究了扫描测头集成到我们自主研制的柔性三坐标测量机上的总体设计。包括硬件的连接、通信接口关系、机械连接部位的设计，分别提出了相应的解决方案。

4、研究了扫描测头内的坐标转换关系，以及集成到柔性三坐标测量机上后的整体坐标转换关系，更好地解决了相互匹配问题。

5、研究了摄像机的内外参数模型和标定，以及手眼标定的理论方法，最后提出了我们实验中的手眼标定方法。

6、研究了 Geomagic Studio 逆向软件，对扫描的图像进行了曲线拟合，提出了带有扫描测头的柔性三坐标测量机的测量精度。

通过整个系统的最后标定，进行精度分析，可以得到：FSL-60 型扫描测头集成到我们自主研制的柔性三坐标测量机上后，其整体精度可以达到 $\pm 0.15\text{mm}$ 左右，充分说明了此扫描测头与柔性三坐标测量机的匹配的合理性。当然，本研究还需要进行继续的研究，主要包括：

1、进一步优化柔性三坐标测量机内的电路系统，使其在进行扫描测量时变得更加稳定，并且使整体测量精度更高。

2、合理设计柔性三坐标测量机，使其扫描测头现有的连接线进行内置连接，确保测量机外观更加美观。

3、通过匹配后，测量机可以达到理想的测量精度。充分研究扫描测头的内部结构，可以自主研制一款扫描测头进行联机实验。

参考文献

- [1] 张国雄.三坐标测量机, 天津: 天津大学出版社[M], 1999: 1-17
- [2] Bosch J.A.Coordinate Measuring Machines and Systems[M]. New York, USA: Marcel Decker Inc. 1995: 15-42
- [3] 张国雄, .三坐标测量机的发展趋势[J].中国机械工程, 11 (1-2), pp222-226, 2000
- [4] [日] 小美濃武久, ほガ.多關節型三次元測定機精度向上[J].精密工學會志, Vol.52(8), pp1300-1304, 1986
- [5] Werner Lotze.ScanMax - a novel 3D coordinate measuring machine for the shop-floor environment [J].Measurement,Vol.18 (1),pp 17~25,1996
- [6] 石照耀, 韦志会.精密测头技术的演变与发展趋势[J].工具技术, 第 41 卷, NO2, pp3-4, 2007
- [7] 王霄, 刘会霞, 梁佳洪.逆向工程技术及其应用[M].化学工业出版社, pp16-22,2004
- [8] 宋开臣,张国雄.激光三角法扫描测头特性的研究[J].中国机械工程, 11(4), pp385,
- [9] Zhang Hongwei,Zhang Guoxiong,Shi Ying,Zhao Xiaosong,Liu Zheng.Application of Optical Non-contact Probe on Measurement of Free-form Surfaces, Journal of Tianjin University, 2004, 37 (10): 343-344
- [10] 张文伟, 庄葆华, 刘迈, 王彦勋.飞机表面划痕非接触测量仪的研究[J].计量学报, 9 (4), pp264-265, 1998
- [11] 孙长库, 叶声华.激光测量技术[M], 天津大学出版社, pp129-134, 2001
- [12] 石玓, 汪海涛, 薛诚, 黄健康.采用激光线光源的焊接坡口间隙视觉检测[J].兰州理工大学学报, 35 (6), 2009
- [13] 史玉升, 李中伟, 钟凯, 王从军, 程俊廷.结构光三维测量技术在模具设计与制造过程中的应用[J].航空制造技术, 第 20 期, pp48-50, 2009
- [14] 许宁, 王宗义.结构光光条图像处理方法研究[D].哈尔滨工程大学硕士学位论文, 2007
- [15] 吴彰良, 卢荣胜, 宫能刚, 费业泰.结构光视觉传感器结构参数优化分析[J].传感技术学报, pp4, 2004
- [16] 张勇斌, 卢荣胜, 刘志健, 吴彰良.结构光视觉测量系统的标定方法[J].传感器世界, pp10,2003
- [17] 林娜, 马孜.激光视觉三维测量及其标定技术的研究[J]. 大连海事大学硕士学位论文, pp11-12, 2007.
- [18] 丁建军, 蒋庄德, 李兵, 郭俊杰, 陈磊.线结构光扫描测头误差分析与补偿

- 方法[J].西安交通大学学报, 42 (3), pp286-287, 2008
- [19] <http://www.headerscan.cn>
- [20] 许学勇.CCD 的工作原理及应用现状[J].广播电视技术, pp81-81, 1994
- [21] 周红平.CCD 图像传感器原理[J].信息技术, pp28, 2009
- [22] <http://www.cimcore.com>
- [23] <http://www.faro.com>
- [24] 尤燮媛, 刘京南, 余玲玲. 编码光三维重建中摄像机标定技术的应用[J]. 仪器仪表用户, 2007
- [25] 曹焕荣, 张明柱. 机器视觉中的摄像机标定技术研究[J]. 工具技术, pp104-106, 2008
- [26] 于晓洋, 张加海, 董秋玲. 结构光三维测量系统的建模与标定[J]. 研究与开发, 2007
- [27] J Denavit and R S Hartenberg, A kinematic notation for lower pair mechanisms based on matrices, ASME Journal of applied mechanics, pp215-221, 22(2), 1955
- [28] 汪平平, 费业泰, 林慎旺. 柔性三坐标测量臂精度的优化设计[J]. 应用科学学报, 24 (4), pp411-412, 2006
- [29] 汪平平, 费业泰, 林慎旺. 柔性三坐标测量臂的标定技术研究[J]. 西安交通大学学报, 40 (3), pp285-286, 2006
- [30] 任永杰, 郝继贵, 杨学友, 叶声华. 机器人柔性视觉检测系统现场标定技术[J]. 机器人. 31 (1), pp82-83, 2009
- [31] Fuqiang Zhou, Guangjun Zhang, Jie Jiang. Constructing feature points for calibrating a structured light vision sensor by viewing a plane from unknown orientations, Optics and Lasers in Engineering, 43, pp105-107, 2005
- [32] Chenggang Che, Jun Ni. Modeling and Calibration of a Structured-light Optical CMM via Skewed Frame Representation, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1996, Vol. 118
- [33] 张广军. 视觉测量[M]. 科学出版社, pp33-36, 2007
- [34] 马颂德, 张正友. 计算机视觉—计算理论与算法基础[M]. 北京: 科学出版社, 1997
- [35] 贾云得. 机器视觉[M]. 北京: 科学出版社, 2000
- [36] Corke P I. Visual control of robots: high-performance visual servoing [M], Research Studies Press Ltd, 1996
- [37] 章毓晋. 图像工程[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999
- [38] Sonka M, Hlavac V, Boyle R. Image processing, analysis and machine vision[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2002

- [39] 解则晓, 张成国.线结构光测头外参数的精确标定方法[J].机械工程学报, 41 (8), pp218-220, 2005
- [40] 程传景, 解则晓.线结构光视觉传感器的现场标定技术研究[D].硕士学位论文, pp27-38, 2006
- [41] 黄曼慧, 成思源.基于 Geomagic 的 CAD 模型重建技术研究[J].机床与液压, pp106-107, 36 (9), 2006
- [42] 解则晓, 张宏君, 张国雄.影响激光三角测头测量精度的因素及其补偿措施 [J].现代计量测试, pp24-25,1999

攻读硕士学位期间发表的论文

- [1] 刘小军, 胡鹏浩, 扫描测头中 CCD 摄像机测量模型和坐标转换, 工具技术, 已录用