

摘要

微机电产品在各行业的应用比重越来越高，人们对产品性能要求提高。实现微小零件的装配，是微机电产品得以发布的核心技术。传统的微小件装配大多通过手工或半手工完成，自动化程度低，产品质量的稳定性难以保证。微小零件的显著特点是体积微小，要保证微小件的装配质量，需要借助显微放大仪器和高度集成化的微装配系统。然而，客户购买的微小件控制系统大部分是零散的，这增加了操作复杂性，甚至集成化决定了功能的实现。

为了解决微装配的系统集成度低，本文针对微小件的装配，依据微装配的功能需求和控制流程策略，采用了“三层架构”式软件体系结构，架构了微装配控制系统。将系统划分为宏/微运动台控制、图像采集、微夹持器控制、示教编程、相机标定与模式识别五个功能模块。论文就微小件的装配控制系统展开了研究。

首先，分析了微装配的现状，对机器视觉的应用和微装配的关键技术进行探讨。

其次，根据微小件装配对象，采用模块化方法将微装配控制系统分为五个子模块。对微装配控制系统的视觉布局方案、控制策略与解决方法进行深入分析。提出了“鼠标滚轮定点”装配策略，有效的提高了装配精度。

再次，分析了微装配控制系统各模块的功能实现和控制流程，给出了系统开发关键技术的解决方法；控制系统将示教编程引用到微装配系统中，分析了示教编程路径规划；针对机器视觉的开发，分析了相机标定与模式识别策略；基于宏运动台的控制，建立了软件控制评价函数。

最后，分析了控制系统的相机标定和视觉系统像素当量标定技术，对图像处理基本算法、视觉伺服控制技术、亚像素定位技术、模板匹配进行深入分析，提出了基于主动视觉和人工智能的像素当量标定方法。针对微小件装配系统，提出了像素当量标定误差模型，并推导了像素当量标定误差算法。根据微小件装配精度的要求，提出了形状匹配的装配精度测量方法。通过 7 个实验分析，证明了微小件装配控制系统的可行性。

本文针对微小件的控制系统进行研究，对各种关键技术进行深入分析，论文中提出的理论与算法对微装配控制系统的自动化具有深远意义。

关键词：微小件装配；形状匹配；相机标定；控制系统；亚像素

Abstract

Micro electromechanical products exert an increasing importance in the application of various industries and are stricter required of the product performance by people. To realize micro parts assembling is the core technology to release MEMS products. Manual or half handicraft methods are mostly adopted in traditional tiny pieces of assembly, which is low in automation degree and difficult to guarantee the product quality. Features of micro parts are small size, amplification instruments like microscope and highly integrated micro assembly system are needed to ensure the assembly quality of micro assembly system. However, tiny pieces customer buys are mostly scattered, which increases the operation complexity. The integration of products can even have a decisive role in the realization of the function.

To solve the problem of low micro assembly system integration, the present study is conducted on the basis of tiny pieces assembly, according to the function demand of tiny pieces assembly and strategy of control flow. The "three layer" software system structure is adopted to create a control system of microprocessor assembly. The system is divided into macro/micro motion station control, image acquisition, and micro gripper control, teaching programming, camera calibration and pattern recognition. The present paper focuses on the control system of assembly.

First, analysed the present situation of micro assembly, the application of machine vision and the key technology of micro assembly.

Second, modular method was adopted to divide micro assembly control system into five parts on the basis of the Tiny pieces of assembly object. A deep analysis was conducted about the visual layout scheme of the control system of micro assembly, control strategies and solutions. "The mouse wheel point" assembly strategy was put forward, effectively improving the assembly accuracy.

Third, function realization and control flow of the modules of control system of micro assembly was analyzed. Key technology solutions of the system development

was given. The control system involved teaching programming reference to analyze the path planning of teaching programming. The camera calibration and pattern recognition strategy were analyzed according to the development of machine vision. The software control evaluation function was established on the basis of control of macro dynamic motion table.

Finally, analysed the camera calibration of the control system and scale factor calibration techniques of visual system. The basic algorithm of image processing, visual servo control technology, the pixel location technology and template matching is analyzed and scale factor calibration method on the basis of active vision and artificial intelligence is put forward. The error calibration model of scale factor is put forward about the Tiny pieces of assembly system, and error calibration algorithm of scale factor is deduced. According to the accuracy requirement of the tiny pieces of assembly, the assembly accuracy measuring method of shape matching is brought forward. Analysis on seven experiments proves the feasibility of control system of tiny pieces of assembly.

The present study aims at the research of control system of tiny pieces, and conducts analysis on key technology. The theory and algorithm in the present thesis has far-reaching significance in automation of control system of micro assembly.

Key words: tiny pieces of assembly; shape-matching; camera calibration; control system; sub-pixel

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 课题背景及研究目的和意义	1
1.2 微装配的国内外研究概况	2
1.2.1 国外的研究现状	2
1.2.2 国内的研究现状	5
1.3 微装配技术研究	6
1.3.1 微装配的关键技术	7
1.3.2 机器视觉在微装配中的应用	8
1.4 本文主要的研究内容与方法	9
第 2 章 微小件装配系统的组成与功能实现	11
2.1 微装配系统的分析	11
2.1.1 微装配方案	12
2.1.2 微装配的视觉布局方案	13
2.1.3 微装配策略	14
2.2 微装配的总体设计	16
2.3 微装配的硬件组成	17
2.4 微装配的软件设计	18
2.5 本章小结	20
第 3 章 微装配的控制系统设计	21
3.1 宏/微运动台子模块	21
3.1.1 宏运动台软件设计	21
3.1.2 微运动台软件设计	25
3.2 图像采集子模块	26
3.3 微夹持器控制子模块	28
3.3.1 吸附式夹持器软件设计	28

3.3.2 钳式夹持器软件设计	30
3.4 示教编程子模块	30
3.4.1 示教编程软件设计	30
3.4.2 示教编程路径规划	32
3.5 相机标定与模式识别子模块	34
3.6 本章小结	36
第 4 章 视觉系统的标定	37
4.1 相机标定原理	37
4.1.1 工业相机成像模型	37
4.1.2 工业相机坐标转换	39
4.1.3 工业相机标定物	40
4.1.4 视觉系统的误差	42
4.2 相机标定算法	43
4.3 视觉系统像素当量的标定	45
4.4 标定实验及结果分析	51
4.4.1 工业相机的标定	51
4.4.2 像素当量的标定	53
4.5 本章小结	54
第 5 章 微小件的位姿识别与方法	55
5.1 数字图像处理概述	55
5.1.1 图像的数据类型	55
5.1.2 图像的颜色空间	57
5.1.3 图像处理的基本算法	58
5.2 基于视觉的控制	63
5.3 亚像素定位算法	65
5.4 模板匹配算法	67
5.4.1 基于灰度值的模板匹配	68
5.4.2 基于形状的模板匹配	70
5.4.3 基于神经网络和遗传算法的模板匹配	73

5.5 本章小结	74
第 6 章 微小件的装配与调试	75
6.1 宏运动台的定位精度测量	75
6.2 宏运动台的重复定位精度测量	76
6.3 微小件识别率的测量	78
6.4 噪声对微小件识别的影响	79
6.5 微小件的装配精度测量	82
6.6 本章小结	84
结 论	86
参考文献	88
攻读硕士学位期间发表的论文和获得的科研成果	97
致 谢	98

第 1 章 绪论

1.1 课题背景及研究目的和意义

随着高科技的发展，人们对市场的需求不断提高。MEMS 产品渗透着生活的各个角落，如手机、笔记本、相机等产品。在各种各样的产品中，有小批量的专用传感器，大批量的麦克风、CCD。对于小批量来说，从根本上看并不符合自动化生产成本效益，需要制作专用模具和制定稳定可靠的特殊工艺，过程复杂且耗时。为此，手工装配是一种有效可行的方案。然而，这些产品的尺寸通常为几毫米至几微米，人们对微观尺度上的把握变得困难。为解决这些问题通常需借助显微镜、镊子等仪器设备，同时要求操作人员具备高精度的肌肉运动定位能力。此外，人们对微小力的感觉能力明显比对尺寸的敏感能力差^[1]。介于时代需求和上述应用，微装配孕育而生。

微装配是实现 MEMS 器件组装的关键技术。微装配的特点是操作对象微小、能耗低，具有很高的定位精度和显微放大功能，同时具备较多的操作功能与自由度^[2]。MEMS 中对微尺寸的定义没有明确统一的界定，国内外比较认可的尺寸为 $1\mu\text{m}\sim 1000\mu\text{m}$ ^[3-4]。微装配主要完成几微米到几百微米，亚毫米级零件的装配作业^[5-6]。

微装配技术发展迅速，学科交叉性强，需掌握的知识面广。我国的微装配研究已历经 20 余载，在一些领域取得了研究性成果，但目前我国的微装配仍处于基础性阶段，与发达国家相比尚有较大差距。最为突出的是主要停留在实验室阶段、没有实现批量化、应用领域少。国外的微装配技术相比成熟许多，科学实验走向市场的比重高，形成了一定规模的批量化、行业化应用，能够实现某些原子级的生物遗传物质组装技术。但也面临一些难题，如神经网络、人工智能、数据挖掘、微操作机理、机器视觉、微观物理力学、微观热流性质等理论研究有待深入。实现真正意义上的微装配自动化，是从事微装配科研人员面临的机遇与挑战。

传统的微小零件装配多是由相关操作人员基于光学显微镜下手动完成，装配精度差、生产效率低、产品稳定性弱，对操作人员的专业技能要求较高，需耗费大量工时^[7-8]。商业化的微装配软件系统，迄今在国内未见相关报道。随着人们对

产品性能要求的提高，集成化的微装配系统是厂商和客户迫切需求的。客户购买的机器视觉产品和控制软件大部分是零散的，增加了操作的复杂性，甚至系统的集成化决定了功能的实现。对于不同企业的产品，通过厂家提供的二次开发包，方便的将其集成在一个开发平台。因此，微装配软件的集成化对实现微装配的自动化具有深远意义。

1.2 微装配的国内外研究概况

1.2.1 国外的研究现状

鉴于微装配技术的需求和广阔发展前景，国外以德国、日本、欧美在微装配系统的研究方面成果显著。美国明尼苏达大学与能源部 Sandia 国家实验室致力于微装配技术研究，并得到 DAPPA 和海军研究中心的大力支持。1997 年德国 DFG 成立了“混合微系统装配”的研究中心。其中，较早开展相关研究的著名机构有明尼苏达大学、德国 Karlsruhe 大学 IPR 研究所、日本名古屋大学微系统工程部、麻省 RLE 研究所等。其中，伊利诺斯州大学研发了遥控微装配系统，把视觉伺服和虚拟显微技术相结合；Karlsruhe 大学研发的 MINIMAN 系列微装配机器人，完成了直径 $\Phi 500 \mu\text{m}$ 齿轮的装配；东京工程大学在体式显微镜监控下，实现了直径 $\Phi 30 \mu\text{m}$ 的物体自动排列^[9]。下面是着重介绍近几年国外的微装配应用。

(1) 意大利热那亚大学研制的并联式微装配机器人如图 1.1 所示^[10]，该机器人的特点是，具有三轴线性运动自由度，有效工作空间为 $30 \times 30 \times 30\text{mm}$ ，速度为 5mm/s ，加速度为 5mm/s^2 ，减速度为 1.5mm/s^2 。并联机器人的每轴由一棱柱平面结构与齿轮线性驱动电动机和 10 片超弹性挠曲转动关节组成。采用挠性接头避免粘滑现象，定位精度达到 $0.5 \mu\text{m}$ ，制造成本低廉，零件发生疲劳损坏后可进行快速更换。

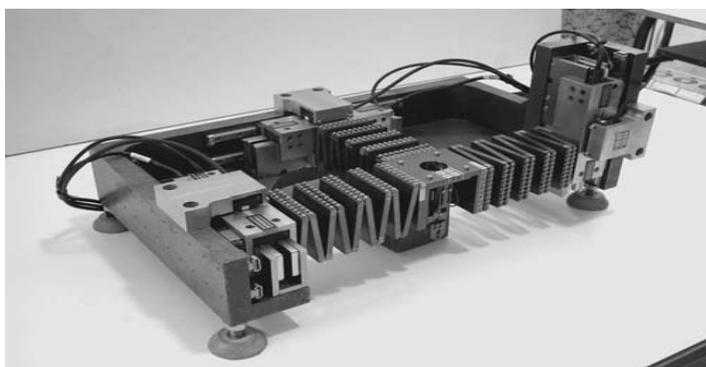


图 1.1 MiniPaR 并联微装配机器人

(2) 加拿大多伦多大学 Henry. Kar. Hang. Chu 博士论文提到并行操作微装配机械手如图 1.2 所示^[11]。该机械手采用钨探针并行微夹持器，系统具有 6 个自由度。运动工作台可沿 X、Y 和 Z 轴做线性移动，同时可围绕 α 轴做 360 度旋转。顶部结构允许钨探针沿 β 和 γ 轴旋转，钨探针的前端位于这两个轴之间的交叉点。共使用 6 个步进电机完成顶部工作台和钨探针的定位。线性移动精度可达 $0.2 \mu\text{m}$ ，旋转精度可达 0.072° 。

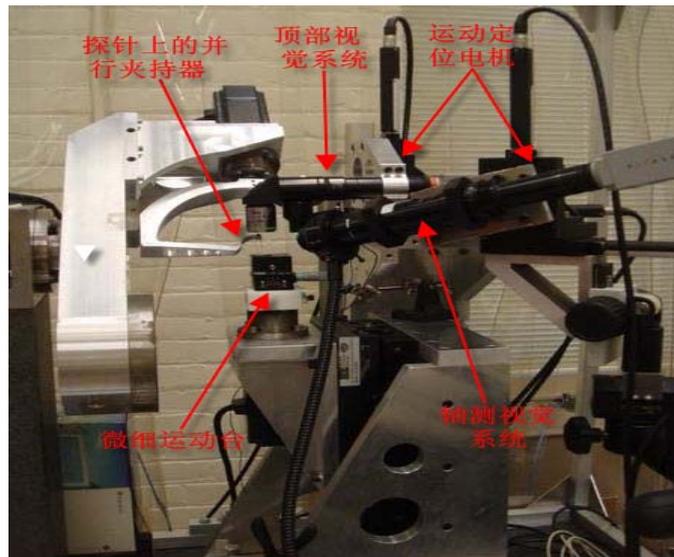


图 1.2 6 自由度并行机械手

(3) 意大利的 A. N. Das, P. Zhang 等人研制的微纳米装配机器人系统^[12]，如图 1.3 所示。该系统称命名为 μ^3 系统。 μ^3 系统由多尺度的宏观与微观装配系统组成。配备了体视显微镜视觉系统，能够实现 3nm 精确定位，内部使用扫描电子显微镜 (SEM) 完成纳米操纵。 μ^3 微装配系统，可以完成 2.5 维晶片的微细加工与装配。



图 1.3 μ^3 多尺度 ARRI 的微型装配工厂

(4) 德国不伦瑞克机床与生产技术研究所以 A. Burisch 等人研制的桌面工厂生

产线—帕尔乌斯新型机器人^[13]，如图 1.4 所示，旨在满足节约中小企业投资成本以适应微系统技术产品生产（如台式机组装）。机器人设计有丰富的用户功能和专业外观，外壳可以很好的保护内脏零件和机电组件。机器人采用并联臂驱动器，将真空发生器装置集成一体，内置四个功能丰富的微型功率放大器，支持更高的采样率和复杂的控制算法，保证了机器人的速度需求 and 安全性。Z 轴使用微型精密滚珠丝杆直接连接到伺服驱动器，与电机主轴（滚珠丝杠）直接耦合提供了良好的运动精度。传动链中的低摩擦轴承可以有效减小机器人内部结构的摩擦力矩。集成的两个低成本绝对角传感器，用于弥补微型齿轮的传动误差。该系统装配精度可达 $5.7 \mu\text{m}$ 。

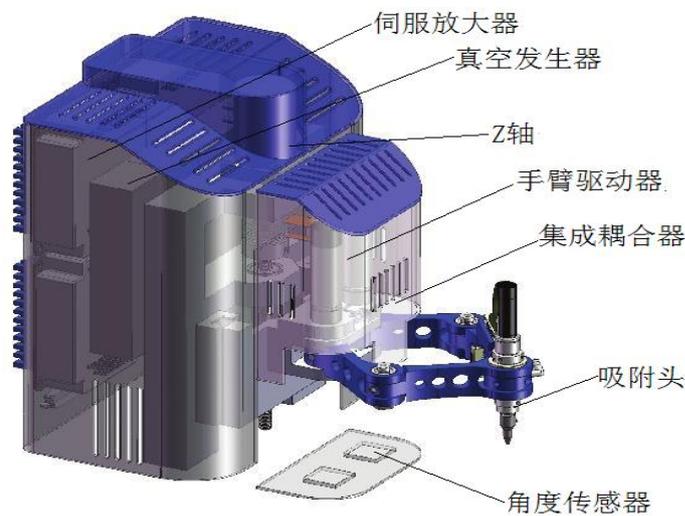


图 1.4 帕尔乌斯新型机器人

(5) 人们对“宏观”和“微观”产品之间的差异可以通过遥操作微装配系统实现^[1]。一个临场感系统不仅有装配站，更重要的是给人逼真的感觉，主要包括听觉、触觉和视觉。操作者发出如速度、方向、夹紧、释放等控制命令，传输到远距离操纵系统依次执行，同时并传回信息，例如：相机的视觉反馈和压力传感器的放大触觉反馈。因此，操作人员通过不同的反馈方式得到远程环境不同的装配情况。特别是触觉反馈常用来显示远程环境的接触碰撞，如抓起对象的时候。临场感系统一定程度弥补了人类对微力和微小件敏感能力弱的缺点，降低了装配风险，提高了装配精度。

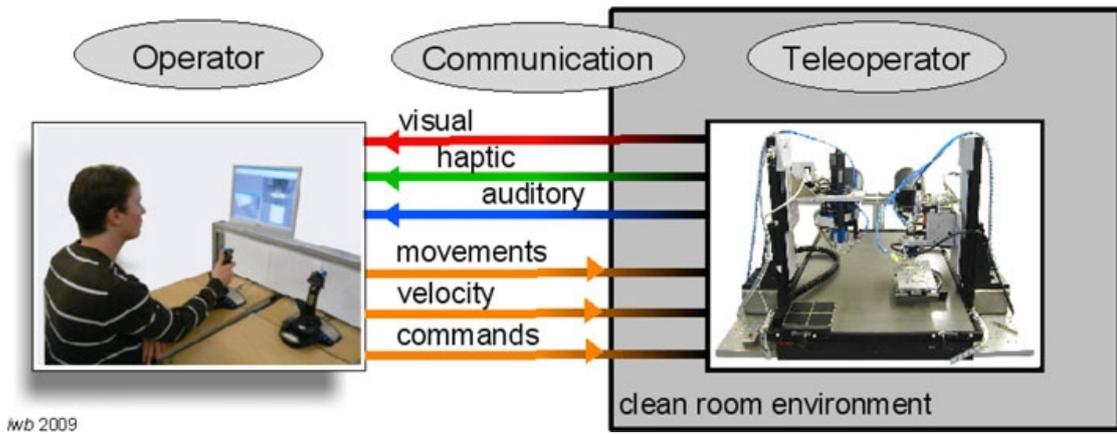


图 1.5 遥控操作临场感应微装配系统

1.2.2 国内的研究现状

我国的 MEMS 研发工作还处于起步阶段，陆续形成了专业性研发团队并取得了一些阶段性成果。要立足于 21 世纪 MEMS 的世界舞台并超越发达国家，还需付出更多的努力。在国家自然科学基金委、973、863 和国防科工委基金的资助下，我国从 20 世纪 90 年代开始也开展了相关研究，目前已成为微机械研究最为炽热的国家。针对生物操作和 MEMS 器件的组装、粘接、微焊接和立体观测等作业，开展精密定位技术、微夹持器、作业工具、显微立体视觉系统和智能控制等 MEMS 微装配关键技术研究。并在悬臂执行机构、传感器、微型泵、微型机械元件、立体微型结构、微装配等方面取得了可喜进步^[14]。

(1) 图 1.6 所示基于光学显微原理的微装配系统，由清华大学精密仪器系研制成功^[15-16]，该系统主要由显微立体视觉系统，精密承载工作台，控制驱动系统，以及左/右微夹持器系统组成。通过微孔/轴的三维装配，证明了微装配的可行性。



图 1.6 清华大学微孔/轴装配系统

(2) 哈尔滨工业大学的于丰源等人搭建了如图 1.7 所示的微小齿轮装配平台，该平台包括由压电马达驱动的 3 自由度工作台，带有 6 维力矩传感器的记忆合金微夹持器，及可自动调焦的监视系统，在力传感系统和监视系统的引导下完成无返回力矩钟表机构的装配^[17]。

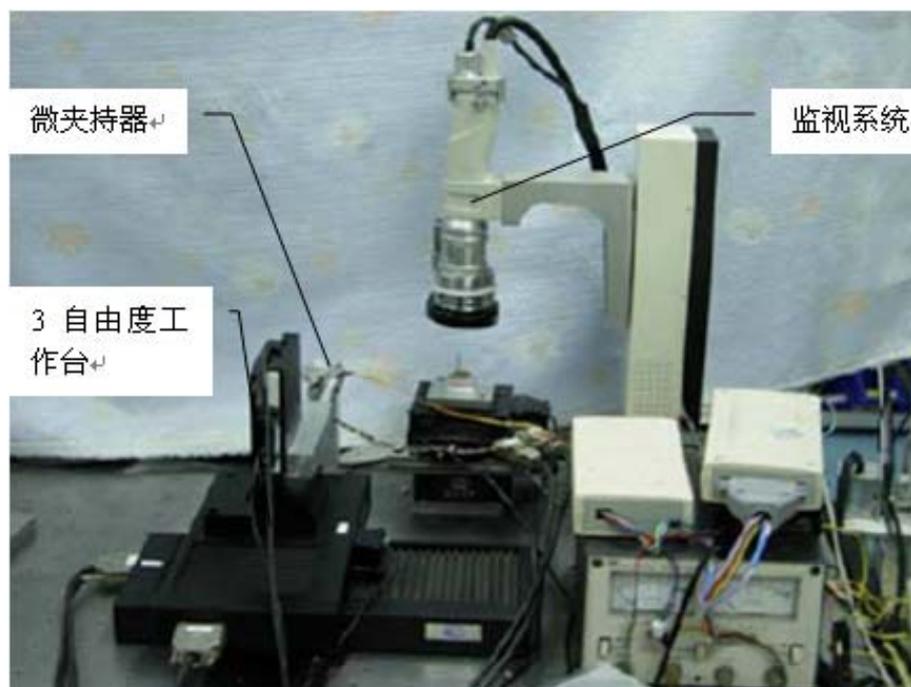


图 1.7 微小齿轮装配系统

此外，上海交通大学研制了以视觉信息来获取机器人位置、速度及零件外形尺寸等信息，以机器人核心建立了毫米级 MEMS 器件模拟装配系统，该微装配系统包括微型装配机器人和微型运输机器人。北京航空航天大学机器人所研制出面向生物工程的微操作系统，该系统主要由操作系统、控制系统和传感系统组成，操作者通过人机交互接口进行操作。厦门大学机电工程系实现了微/宏两种运动模式，利用磁悬浮技术搭建微装配系统运动平台。国内目前从事微装配技术研究的单位，还有北京大学、南开大学、大连理工大学、重庆大学、上海大学、浙江大学、上海冶金所电子部、东南大学、中科院长春光学精密机械研究所等，在微装配的关键技术、控制技术等领域取得了可喜的成果^[9,14]。

1.3 微装配技术研究

一套完整的微装配系统主要包括视觉系统、机械执行系统、微夹持系统、控制与驱动系统组成。微装配与微操作覆盖的技术包括显微视觉伺服、微机器人技术、微驱动、微夹持与定位、微力传感器、机器视觉与计算机图形学等技术，是

一个多学科交叉的研究领域^[18]。

1.3.1 微装配的关键技术

微装配研究历经几十年的发展，已取得了一些可喜的进步，介于微观装配与宏观装配存在较大差异，因而在微装配中尚有很多关键技术需要深入研究。目前微装配系统还存在以下技术难点：(1) ~ (4)^[19]，(5)共5个方面：

(1) 显微视觉调焦技术

微装配的特点是操作对象微小，零件多为亚毫米级，甚至达到微米级。通过显微视觉技术能够很好的观测装配对象，完成简单的相关装配操作。在微装配系统中，视场的交替变换是装配的需求，如需要观察零件的细部特征，此时给予一个很小的视场以满足高放大倍数的观察；当需要观测装配的总体情况时，又要求有一个大的视场。对于微装配空间无严格限制的场合，增加多个相机可以解决视场观察问题，不过增加了投资成本；对于一些装配空间有严格限制的场合，显微调焦能力可以为微装配提供很好的解决方案。然而，视场和放大倍数是一对矛盾体，这需要每个科技人员的共同努力。

(2) 机器视觉与传感器测量技术

在微装配过程中，为提高装配精度，使用了各种传感器检测技术完成零件的位姿和力觉检测。为了测量零件的位姿情况，将视觉传感器集成到视觉系统中，将采集到的图像传至上位机中，通过机器视觉的亚像素轮廓提取、神经网络、模板匹配等技术，实现零件的形状、位姿识别，最后将视觉定位信息传递给机械执行运动机构，完成零件的定位工作。除视觉检测外，使用应力传感器对微装配过程中的力进行实时反馈，以实现高精度的微装配。

(3) 精密运动平台技术

微装配的定位与操作，最终由机械运动系统来执行。运动控制技术是微装配的关键技术之一，机械系统不仅要有高的定位精度，还需有良好的动态响应性，以实现高效、精准的微装配定位。一般的微装配系统，装配工作平台和机械运动机构是连为一体的，运动机构在加速和减速（即启动和停止）阶段，机械振动会影响微小件在工作台上的位姿情况。因此，恰当的视觉系统和精密稳定的机械运动系统是微装配成功的关键。

(4) 微夹持技术

微夹持器是完成微装配的操作机构，其性能直接决定了微装配的成败。微夹持器的分类方法很多，根据驱动方式的不同，可将夹持器分为压电陶瓷驱动微夹持器、热变形驱动微夹持器、静电驱动微夹持器、电磁力驱动微夹持器和记忆合金驱动式微夹持器^[20]。

微装配的零件通常尺寸小、形状各异，对外界因素比较敏感。目前，针对不同材质、不同形状的零件常用的有夹钳式和真空吸附式两种微夹持器。钳式微夹持器主要对轴类或体积较大的零件的夹持，在夹持过程中较易实现夹持力的实时监控，但释放时受粘附力影响较大。吸附式夹持器可以完成对片状不规则零件的夹持操作，但夹持力不易控制。微夹持器的小尺寸带来了设计、制造、驱动和传感器集成的困惑，对微夹持技术的研究是微装配的一个研究重点。

(5) 系统的集成

系统的集成，这里所指的系统集成化主要侧重于硬件/软件控制系统的集成化，不包括 MEMS 组件的集成化。对于控制系统的集成有利于提高微装配的自动化和产品的稳定性。随着信息时代的发展，计算机在工业应用中的地位不断提升，将系统的集成看成是 MEMS 封装的重要技术不算过分。系统的集成需要跨越不同的开发平台、不同的硬件厂商、不同的仪器仪表、不同的通信接口等方面的困扰。系统集成在兼顾功能实现、效率和经济性的情况下，最核心的问题是找到一个平衡点：既要满足系统集成的安全性，又要满足系统的稳定性。

1.3.2 机器视觉在微装配中的应用

自然界的事物大部分可以表现为物理学、化学、生物学、天文学等属性的耦合，其中物理学属性包括力、热、声、光、电、磁等，是人们应用广泛且研究较为深入的自然规律。人类使用上述属性感知外界事物，主要通过视觉、听觉、触觉、味觉和嗅觉等感觉器官，其中人们最重要的感觉器官是视觉。据统计，人类了解外部世界有 80%以上是由视觉感知得到的信息^[21]，因其直观、便捷从而被广泛的使用。机器视觉是模仿生物视觉功能的科学与技术，赋予计算机具备“看”的能力，机器视觉不仅是人眼的延伸，也具备了人脑的部分功能，目的是改善机器视觉的自动化和智能化程度。

机器视觉的应用越来越广，它是一门涉及图像处理、人工智能、神经网络、矩阵分析等诸多领域的交叉学科^[22]。大多数程序员和计算机科学家已经意识到机

器视觉的重要作用，然而，机器视觉在多数行业的应用很少有人熟悉。例如，大多数人略微知道视觉技术被用在网络图像和视频方面，机器视觉可用于视频监控场合，很少人知道机器视觉在游戏界面方面的应用。机器视觉在大多数航空和街道地图图像（如 Google 的 Street View，中国的“北斗”、美国的 GPS、俄罗斯的“格洛纳斯”、欧盟的“伽利略”四大卫星导航系统）也使用了大量的机器视觉定标和图像拼接技术。另外，机器视觉在无人飞行器、安全监控、生物医学分析等方面的也有广泛深入的应用，可以说机器视觉几乎广泛地被用在工厂，绝大多数的大规模制造产品的流水生产线某个环节使用了机器视觉检测技术^[23]。在微装配中，机器视觉重点在于获取环境中物体的形状、尺寸、位置、姿态等信息，系统以计算机为控制中心，主要由光源、光学传感器、镜头、图像采集存储模块、图像处理软件、I/O 处理模块组成。机器视觉在微装配领域的应用越来越重要，成功案例很多，从近 4 年内微装配专利应用来看。例如，大连创达技术交易市场有限公司研制机器视觉微操作机器人^[24]，用于细胞、染色体等的显微操作，如细胞的分离、捡取、融合、显微注射，染色体的切割等；北京航空航天大学研制的秀丽隐杆线虫自动化筛选微操作装置^[25]，用于分拣并分类出线虫的幼虫、成虫、尸体等；厦门大学研制的微纳级显微操作装置^[26]，用于集成电路检测、贴片与封装、电子制造；南京理工大学研制的显微注射用单细胞微操作装置^[27]，用于实现自动化细胞显微注射，如人工受精等应用。

微装配视觉伺服控制是机器视觉在微装配中的应用，作为一种非接触的测量定位控制方法，与传统的微操作控制方法相比，无需接触装配零件、识别速度快、客观稳定、可视化的监视操作及定位精度高等优点。随着微操作及视觉伺服控制技术的发展，视觉伺服控制技术必将在未来的微操作中得到更为广泛的应用^[28]。基于本文构建的微装配机器视觉技术将在后面的章节给予详细介绍。

1.4 本文主要的研究内容与方法

本课题研究的主要目的是建立一套以视觉为基础的模式识别及示教编程微装配软件控制系统，实现微小件的精密拾取与装配。应用到的主要技术包括：精密宏/微运动台控制、压电陶瓷驱动控制、微夹持器控制、CMOS 相机图像采集、工业相机标定、微小零件的位姿识别与定位、微装配控制策略等技术。

为解决微小件的装配软件系统集成度低、操作复杂、开发周期长等缺点，这

里采用二次开发技术。应用 Visual C++ 6.0 作为开发工具，调用相关硬件的开发包，以 USB/并口/RS-232 为通信接口，快速实现基本的硬件通信，编制了人机界面，开发了适用的控制算法。结合 halcon 10 机器视觉算法库，开发微小件模式识别与相机标定算法。

论文的主要研究内容包括以下几点：

- 1) 了解微操作机理，研究微小件装配的实现方法；
- 2) 根据搭建的硬件系统，了解硬件系统的基本工作原理与常规故障排除方法。其中，硬件主要包括精密宏/微运动台、工业相机、工业镜头、LED 环形光源、压电陶瓷驱动电源、精密气动装置、高速数据采集卡、微夹持器(以吸附式为主)。
- 3) 研究宏/微运动台控制、视觉伺服控制、亚像素定位、模板匹配等技术；
- 4) 对已有的硬件系统，提出可行的相机标定方法，完成相机标定与图像校正；
- 5) 研究微小零件的位姿识别与定位技术，同时实现示教再现装配控制；
- 6) 完成微装配软件系统的构建与调试，提出可行的微装配控制策略，实现微小件的精密装配与控制。

第2章 微小件装配系统的组成与功能实现

一个典型的微装配系统，一般应包括硬件和软件系统。本章主要介绍基于视觉的微小件装配系统，该系统包括支持微小件装配所必备的总体硬件及软件系统。首先，根据给定的微小件装配对象，结合现有的硬件条件和需构建的软件系统，分析了微小件的精度情况、关键技术及控制策略。其次，根据搭建的硬件系统，分析了硬件系统的功能实现，硬件系统主要包括：三轴精密位移台（又称工件台）、二维微动工作台、气动夹持系统、气动动力源、数据采集卡、压电陶瓷驱动电源、微夹持器（以吸附式夹持为主，钳式夹持为辅）。最后，分析了软件的总体模块，其主要内容有：运动执行模块、图像采集模块、示教再现模块、数据采集卡模块、相机标定、模式识别模块。

2.1 微装配系统的分析

本文研究的微小件装配系统，主要针对图 2.1 所示的组件总装配图。组件共有 5 个零件组成，零件外形尺寸为 $900\mu\text{m}\sim 5000\mu\text{m}$ ，零件的材质为铝合金，零件均为平板类零件。最小直径尺寸为 $750\mu\text{m}$ ，最大直径尺寸为 $2000\mu\text{m}$ ，最小线性尺寸为 $900\mu\text{m}$ ，最大线性尺寸为 $5000\mu\text{m}$ ，最小圆角为 $25\mu\text{m}$ ，最大圆角为 $250\mu\text{m}$ ，板厚为 $300\mu\text{m}$ 。装配精度要求零件中心相对于孔位误差 $\leq 6\mu\text{m}$ ，角度误差 $\leq 0.05^\circ$ 。

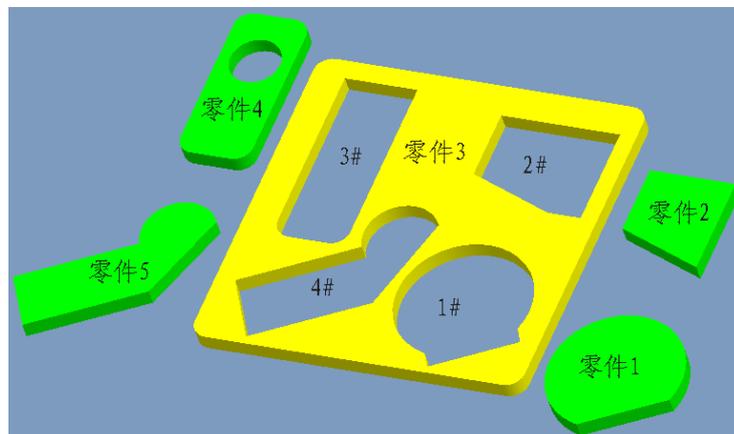


图 2.1 微小件总装配图

2.1.1 微装配方案

实现微小件的精密装配，可以采用手工装配、手动装配、示教装配及模式识别装配等方法。对于后三种装配方案，视觉系统的布局将影响装配功能的实现和装配精度。一个合理的视觉硬件布局，一方面可以给操作带来便利；另一方面，可以简化控制算法、装配过程、装配工艺，保证微小件的装配精度。

(1) 手工装配

传统的微小零件装配，多是借助操作者的手臂、镊子、光学显微镜等辅助工具完成。装配过程中人工的干预处于主导地位，零件的搬运、抓起、释放等操作由人工完成。因其投资小、灵活性高，对于精度要求不高的单件或小批量场合，是很好的解决方案。手工装配有诸多缺点，主要存在两个致命弱点：第一，对操作人员的专业技能要求较高，必须具备高精度的肌肉定位能力，很难做到人人都能操作；第二，操作人员的身体状况与情绪决定产品的性能，很难消除手臂微小的颤抖（据测算，一般人手的可控抖动量在 $50\ \mu\text{m}$ 左右，力感觉能力大约为 50mN ），无法保证装配产品的稳定性。

(2) 手动装配

手动装配是介于自动化装配和手工装配之间，是传统装配基础上发展起来的，装配过程可借助运动执行机械装置与控制软件，操作人员通过修改软件参数，实现微小件的装配。手动装配由原来的手工搬运、抓起、释放操作，转换为由机械系统来完成，在装配的若干环节中修改软件参数，点击鼠标或键盘完成零件的装配。人工干预的过程减少，一定程度上改善了装配精度，保证了产品质量稳定性。

(3) 示教装配

示教是将装配过程中搬运、抓起、释放操作等环节记忆存储起来，装配过程中只是简单地重复预先编程设定的动作。在工业生产中的装配机器人，一般采用示教或离线编程的方式对装配工任务进行路径规划和运动编程。对于，大批量的重复性装配任务，示教装配具备很好的应用前景。

(4) 模式识别装配

模式识别装配通过相机标定、形状匹配、亚像素轮廓提取等机器视觉算法，获取装配对象的形状、颜色、位姿等信息。机器视觉控制软件将图像信息反馈给机械系统，机械系统根据获取的形状、颜色、位姿信息和视觉系统像素当量，执

行相应的控制量，完成微小件的定位与装配。模式识别装配，灵活性好，可用于单件或批量化场合。

2.1.2 微装配的视觉布局方案

为了便于观察微小零件的装配，在单目视觉系统或多目视觉系统中，一般应布置一个或几个工业相机实时监控微夹持器实况。采用相机倾斜放置，可以很好的解决相机遮挡问题，对微夹持器实时的图像采集与监控，微夹持器的工作状态掌握的很直观。根据本文研究的装配对象和硬件条件，主要有以下几种单视场视觉布局方案(以吸附式微夹持为例)，图 2.2 所示为视觉硬件布局示意图。

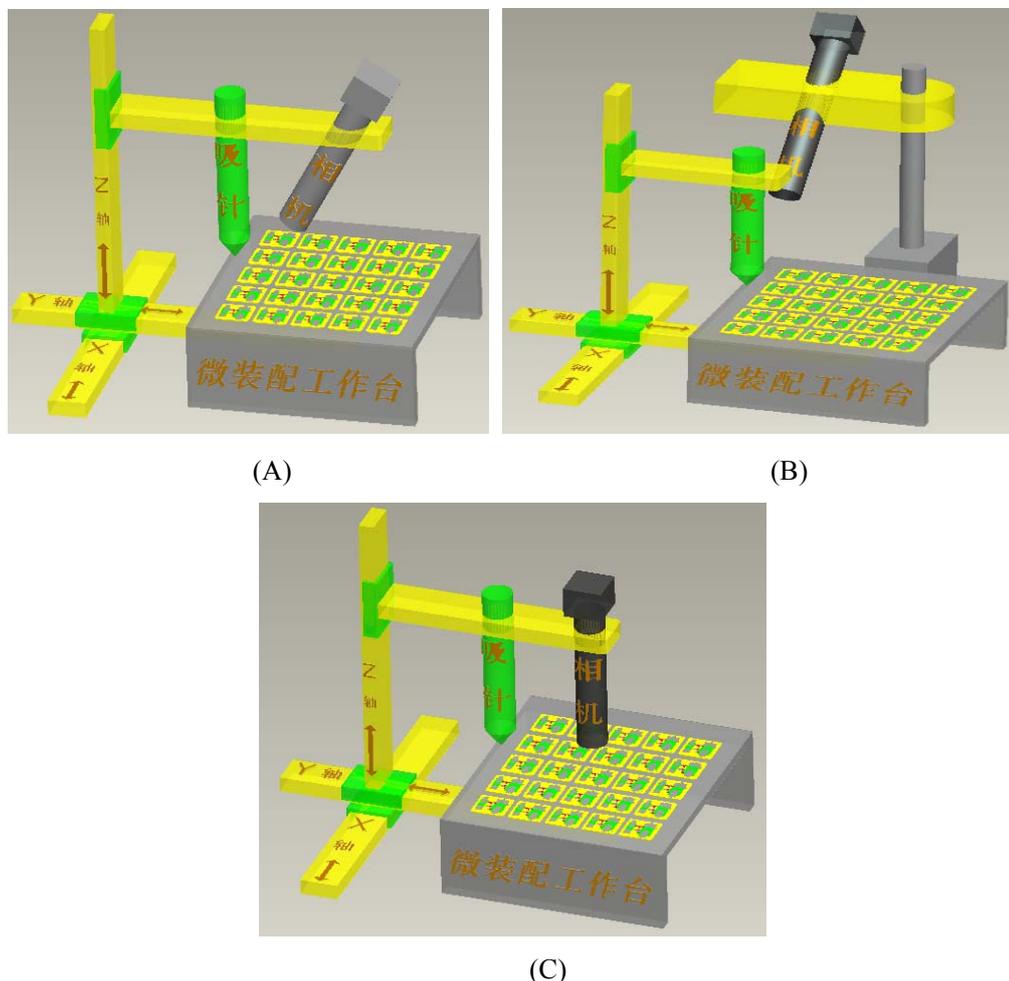


图 2.2 机器视觉硬件布局方案

方案 A，工业相机与吸附头相对静止，并可随机械系统运动，相机光轴与吸附头轴线成一定角度(夹角 $\leq 30^\circ$ 为宜)。相机与吸附头随机械系统运动，增加了视角范围和装配的自由度，进行微小件的装配不必局限于微装配工作台的某个小区域面积，机械系统在行程范围内定位的工作台面域均可作为装配区域，扩展了装

配柔性。因相机光轴与吸附头轴线成一定角度，所以不适宜环形光源照射，但适用于视觉伺服闭环控制。对于模式识别采集的图片，与实际工作平面存在一定仿射变换，相机本身存在变形，因而还应进行相机内外参数标定，一定程度上增加了视觉系统的标定难度。该系统适用于手动装配、示教装配、模式识别装配场合。

方案 B, 相机光轴与吸附头轴线成一定角度(夹角 $\leq 30^\circ$ 为宜), 相机固定不动, 吸附头可随机械系统运动, 基本性能与方案 A 类似。方案 B 与方案 A 的区别是, 工业相机轴线投射方向的小面积区域为装配区域, 该区域可完成吸附头的实况监控。当要改变装配区域, 可以移动工业相机到合适的位置, 即可调准装配区域。该系统适用于手动装配、示教装配、模式识别装配场合。

方案 C, 工业相机与吸附头相对静止, 并可随机械系统运动, 相机光轴与吸附头轴线平行, 相机无法观测到吸附头的实际装配工况。与方案 A 相比, 因相机光轴与吸附头轴线平行, 适宜环形光源照射, 但不适合视觉伺服闭环控制。相机的标定较为简单, 简化了视觉标定算法, 同时装配过程中可将相机主轴作为定位基准。另外, 因无法实时监控吸附头装配工况, 因而不适合手动装配。可适用于示教装配、模式识别装配场合。

综上所述, 对于单目视觉系统。采用方案 A、方案 B 有利于实时观测微操器工况, 可适合于视觉伺服闭环控制、手动装配、示教装配、模式识别装配场合。采用模式识别装配时, 需要标定相机的内外参数, 相机标定较为繁琐。同时, 相机光轴与吸附头轴线夹角应 $\leq 30^\circ$ 为宜, 装配过程中相机主轴不适宜做装配定位基准, 因而, 需在工作台面打上若干参考标志点(即 Mark 点)。采用方案 C, 不适合手动装配和视觉伺服闭环控制。适合于示教装配与模式识别装配场合, 无法实时观测微操器工况。因相机光轴与吸附头轴线平行, 相机标定较为简单, 最大的优势是装配过程中可将相机光轴作为定位基准, 对于单目模式识别装配是一种很好的方案, 这也是本文所采用的识别装配方案。

2.1.3 微装配策略

实现基于视觉的微装配控制系统, 可将控制信号依据功能与用途不同, 可将控制变量分为以下 4 种类:

(1) 信号量的控制: 在微装配的控制系统中, 需要控制不同的输入与输出信号, 数字量和模拟量信号, 如继电器、接近开关、电磁阀的控制、力觉反馈、气动压

力的调节。

(2) 运动轨迹的控制：运动控制包含了圆弧插补和线性直线插补。两种运动插补方式，为装配工艺提供了较为多元化的运动方式，可完成比较复杂的装配动作。

(3) 速度的控制：微装配软件系统，需要控制步进电机的加速、减速、匀速运动。加、减速度的控制，可以良好的缓解电机冲击，减少工作台振动；运动速度的控制可以节省空行程运动时间，保证了装配效率。

(4) 任务调度的控制：在装配过程中，基于不同的装配对象，装配工艺有所不同，装配对象决定了装配任务的调度、装配的流程、装配的顺序。装配任务的调度，有严格的要求，以吸附头对零件的装配为例，只有保证了吸附头先接触工作台，然后执行 Z 轴步进电机的停止。因而，任务的调度应符合装配的实际要求。

采用手动装配或者示教装配，对于非自动调焦视觉系统，当微夹持器将零件装配到孔位时，因工业相机视场仍然较大，无法很清晰的观测装配细部特征，因而，装配精度可能不高。为了提高非自动调焦视觉系统手动或示教装配精度，这里提出一种“鼠标滚轮定点”装配策略。在软件开发过程中，将鼠标滚轮定点大功能考虑到软件系统，当微操作器接近装配孔位时，借助滚轮的放大功能，将装配细节放大到合适的倍数，从而实现微装配的精密装配。“鼠标滚轮定点”装配策略，例如相机采集的 1280*1024 图片，当细部特征放大为原来的 8 倍，误差理论上为原误差的 1/8，有效的提高了装配精度，节省硬件投资，特别适合手动装配和示教装配场合。

采用模式识别装配，通过形状匹配获得装配零件的形状、位姿信息，匹配精度直接决定装配精度。然而，影响形状匹配的因素很多，主要有相机标定、轮廓提取、匹配算法、图像模板缩放、光源稳定性、图像背景、机械振动等因素。为了提高机器视觉匹配精度，主要有 6 个方法：(1) 采用亚像素轮廓提取与亚像素匹配算法，(2) 采用高精度的相机标定板，(3) 采集标定校正后的图像，尽可能采用 1:1 的零件图像制作模板，(4) 增加定位夹紧装置（如采用压电陶瓷吸附，磁性吸盘等），保证零件在装配前与装配后在装配台中位姿不受机械振动、粘附、静电等因素影响，(5) 设置适合的运动台步进电机加速度与减速度，适当减小机械振动，(6) 采用对比度高的单一背景的装配平台（如要突显金属零件特征，纯黑色背景是首先），简化控制算法的开发量，提高算法识别精度。

2.2 微装配的总体设计

一个完整的微装配系统由硬件和软件组成，硬件主要完成装配任务的定位、搬运、抓起、夹紧、释放。软件系统主要完成硬件参数的管理、分配与调度，负责将相关参数命令通过硬件接口发送给硬件执行。基于本文的微小件装配系统，这里将系统分为硬件层和软件层，硬件层包括底层硬件（含执行硬件）、逻辑控制硬件和控制平台硬件，软件层包括界面层、数据层、逻辑层。如图 2.3 所示为微装配系统硬件及软件架构组成。

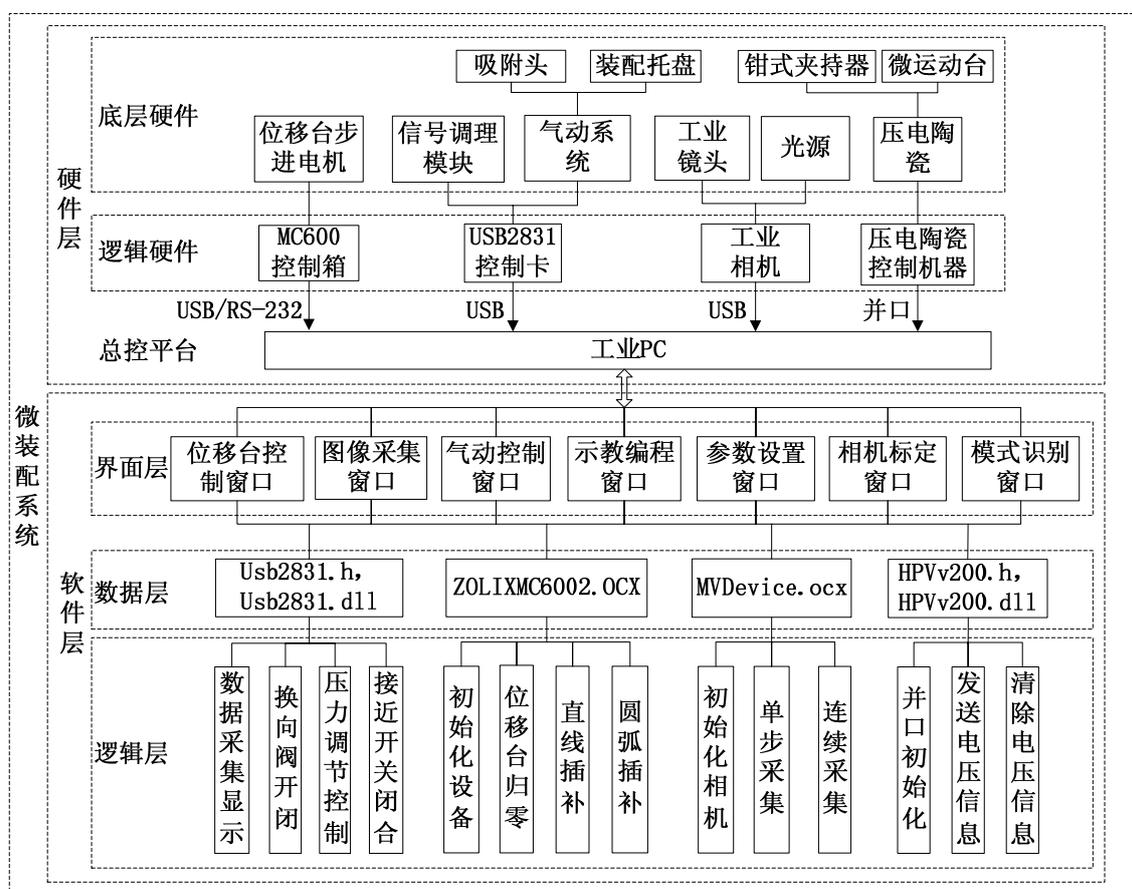


图 2.3 微装配系统的分层架构

- (1) 底层硬件：接受逻辑硬件下达的命令，执行指定装配动作，保证装配工艺的完成。
- (2) 逻辑硬件：接受软件层下达的命令，分配底层硬件的逻辑装配动作顺序。确保底层硬件执行顺序的可靠。
- (3) 总控制平台：监控微装配过程，管理界面层、数据层、逻辑层的调度，负责微装配的决策控制。

(4) 界面层：提供交互式的操作界面，处理整个系统中各类数据，是数据层和逻辑层的通信桥梁。

(5) 数据层：对界面层发出的输入/输出、通信数据操作，为界面层和逻辑层提供数据，告知逻辑层。

(6) 逻辑层：当界面层下达命令后，调用数据层的控制数据，将命令通知逻辑硬件。

2.3 微装配的硬件组成

微装配硬件系统主要用于微小零件的定位、搬运、抓起、夹紧、释放操作，更换夹持器，还可用于微小件的粘接、焊接、钻孔等工作。基于本文研究的微装配硬件系统主要包括：北京卓立汉光的三自由度精密电位移台和 MC600 控制箱，西安维视的 CMOS 面阵式工业相机，阿尔泰高速数据采集卡及信号调理模块，SMC 精密气动系统，奥突斯工贸有限公司生产的气泵，真空吸附头以及机械式夹持器组成。图 2.4 所示微装配系统的机械系统组成。

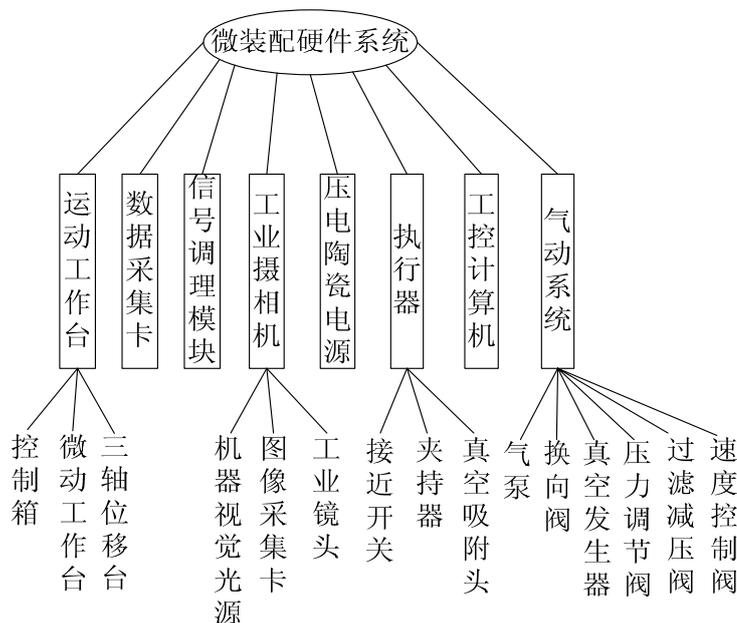


图 2.4 微装配硬件系统组成

必备的硬件是完成装配任务的前提，为了便于对整体微装配硬件的清晰直观了解。图 2.5 所示为基于微小件装配的硬件实物图。有关硬件的相关特性，见本文第 3 章有关章节。

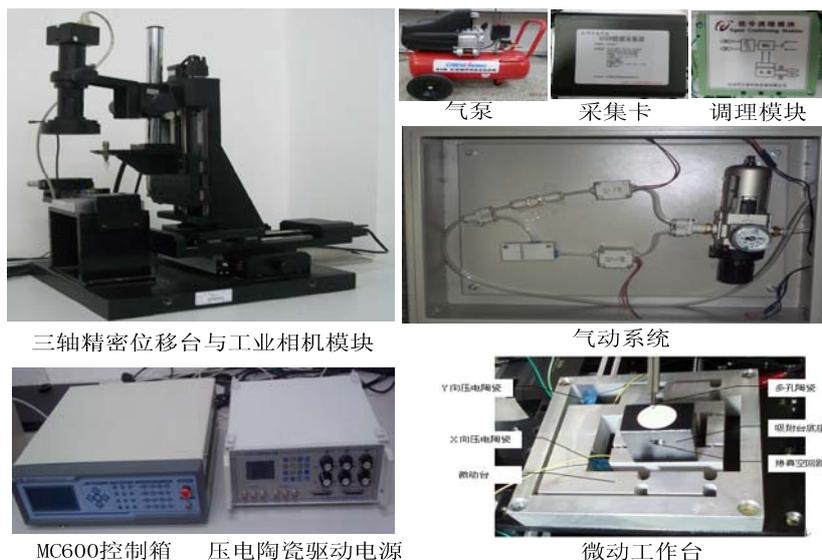


图 2.5 微装配硬件实物图

实现微小件的精密装配，硬件上要求工控制机的通信接口必须牢固稳定；工业相机光源不能出现抖动；机械结构紧凑、稳定可靠。另外，二次开发中，对微装配控制软件提出较高的要求，需要编制出执行效率高、实时性好的算法程序。

2.4 微装配的软件设计

微装配软件系统的构建，采用 Visual C++6.0 做为开发工具，应用模块化的软件开发方法。软件总体界面采用 1 行 2 列的界面布局，总体界面如图 2.6 和图 2.7 所示。图 2.6 所示界面用于手动装配或示教编程微装配场合。

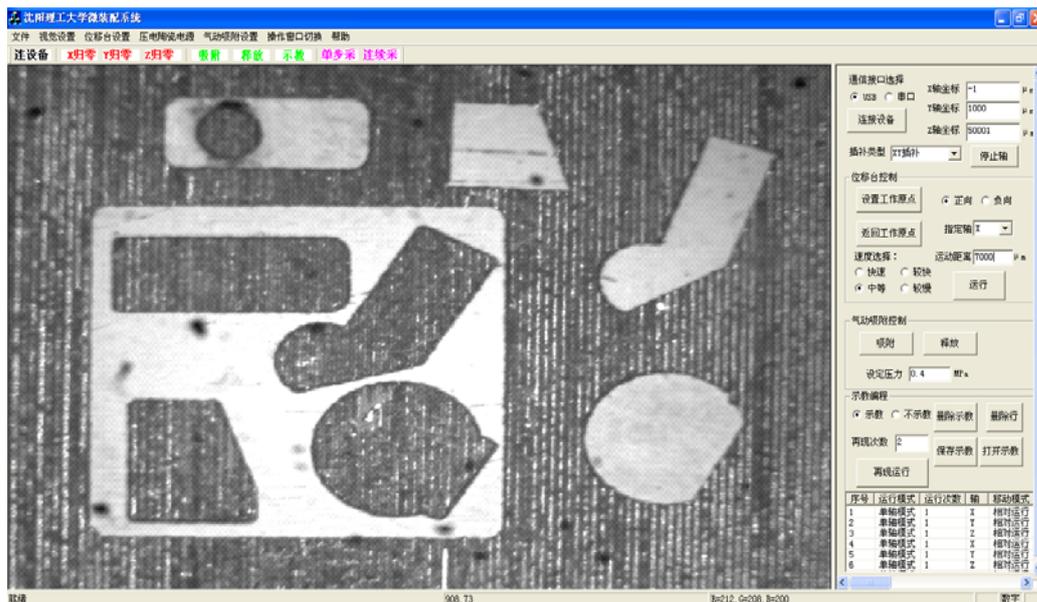


图 2.6 微装配手动装配与示教装配界面

点击图 2.6 所示界面，菜单栏的“操作窗口切换”选项，即可进入微装配模式识别装配界面。进行模式识别微装配，首先应完成工业相机的标定；其次通过相机参数校正图像的变形；再次采用模板匹配算法完成微小件的定位；最后结合标定的视觉像素当量，进而完成微小件的装配任务。总体界面如图 2.7 所示。

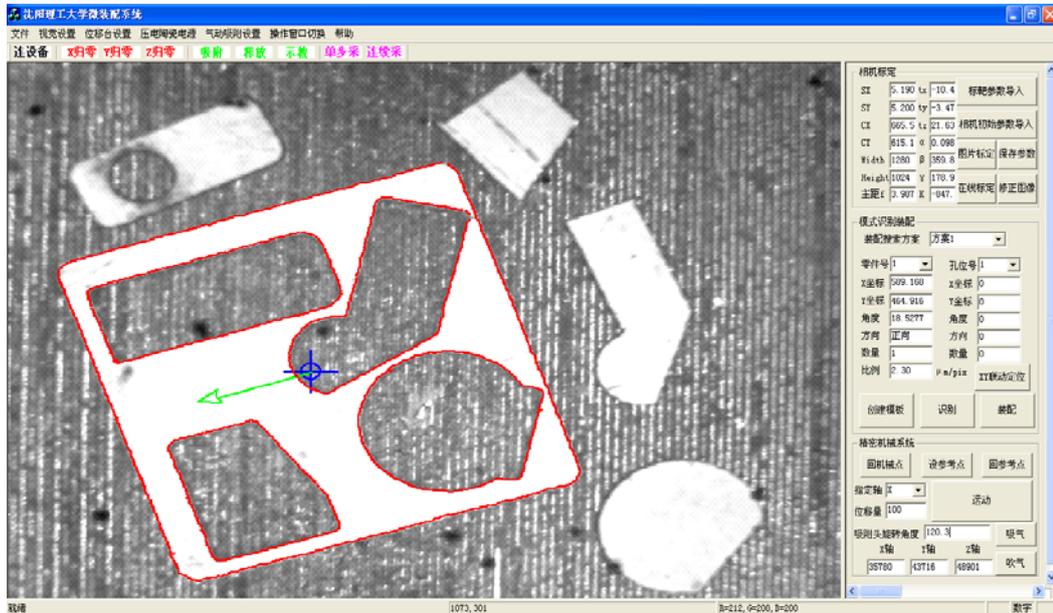
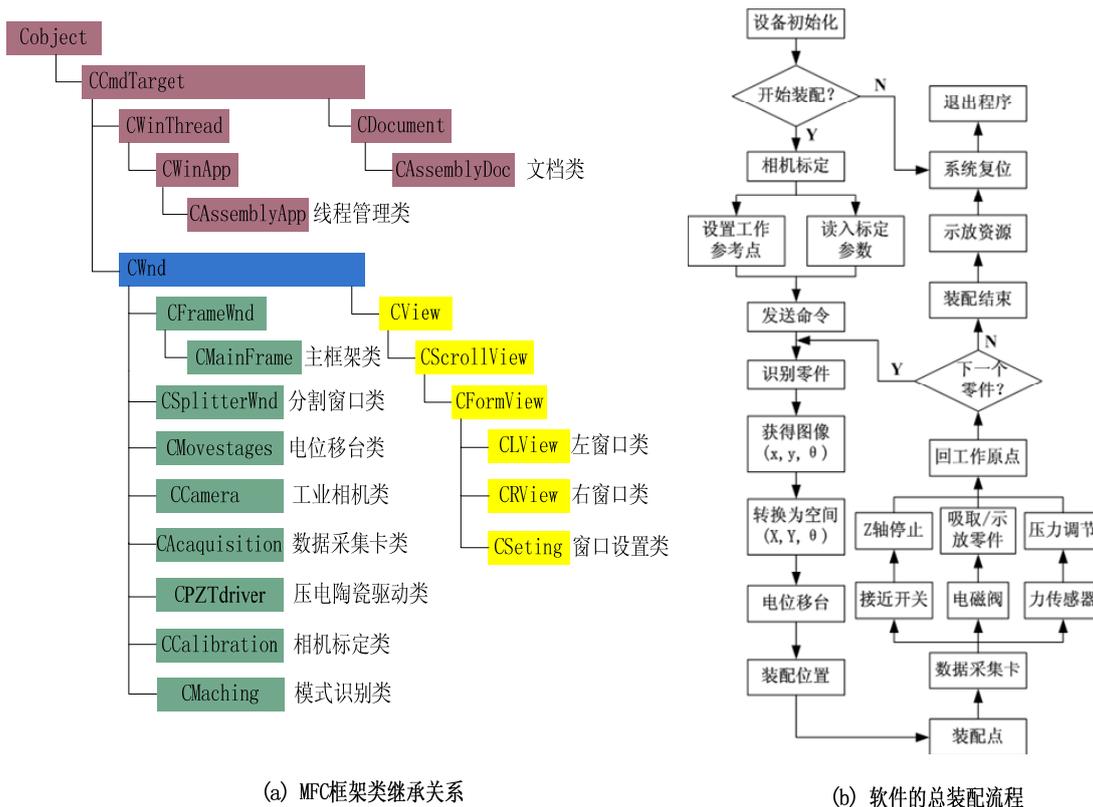


图 2.7 微装配机器视觉识别装配界面

采用模块化的软件设计方法，将软件结构分为：电位移台控制子模块、图像采集子模块、真空吸附子模块、示教编程子模块、相机标定与模式识别子模块组成。对于一个软件控制系统，分层模型的提出有助于各模块之间的通讯和移植，使复杂问题变得结构清晰、层次分明，可构造出结构清晰、适应性强的软件产品^[29-30]。这里将微装配系统软件层分为三个层，包括界面层、数据层、逻辑层。微装配软件系统的架构组成如图 2.3 所示。

根据软件的分层架构，建立了相关的 VC++ 类，以提高程序的可重用性，同时将管理数据和数据显示的程序代码分离出来，这符合 MFC 框架的 MCV 思想。微装配系统软件框架类的继承关系和总装配流程如图 2.8 所示。



(a) MFC框架类继承关系

(b) 软件的总装配流程

图 2.8 MFC 框架类继承关系和总装配流程

为使控制软件具有良好的程序响应，采用了多线程技术。如果用一个主线程来处理各模块的数据通信，那么主界面很可能被冻结。要使硬件的性能充分发挥就很困难了，无法获得最佳的使用率。在实际应用中，一般以主线程处理所有的用户输入和界面管理，让其保持中枢的地位，使用一个以上的辅助线程来进行耗时计算处理或端口通信^[31]。因此，基于视觉组建的微装配软件，这里应用了若干个线程，在线程的同步方面，采用临界区域法，保证了线程间的通信和数据共享。

2.5 本章小结

本章介绍了微装配的总体方案，采用分层思想将微装配系统分为硬件层和软件层。应用模块化的方法，分析了微装配的硬件和软件系统组成。针对 5 个微小件的装配，深入分析了视觉布局方案、控制策略与解决方法。提出了“鼠标滚轮定点”装配策略，有效的提高了装配精度，节省了硬件投资，适宜手动装配和示教装配场合。依据控制策略和技术难点，确立本文的微装配视觉方案为相机光轴与吸附头轴线平行布置（即方案 C）。

第3章 微装配的控制系统设计

3.1 宏/微运动台子模块

为实现微装配的高精密装配，需要运动平台具很高的定位精度，同时要实现不同零件之间的定位、搬运、抓起、夹紧、释放等操作，因而，微装配机器人应有足够的运动空间。为解决运动空间和高精度的矛盾，宏/微(有些文献称为“粗/细”定位)精密定位技术是一个很好的解决方法。大范围的粗定位由宏运动台来实现；高准确度、高灵敏度的精确定位由微运动台来完成。采用一个具备微动定位精度的宏运动台实现微小件的装配，成本投入是昂贵的，宏/微定位方案是一种较为经济的微装配定位方案。

3.1.1 宏运动台软件设计

基于微小件装配的精密位移台因其精度高、速度快、承载大、行程长等特点，广泛应用于生物医学、激光加工、精密测量、微装配等领域^[32]。对于大行程、高速位移台是集材料、精密机械、精密测量、自动控制等多项技术于一体的复杂系统。我国大行程位移台的研究一直处于落后状况，主要原因是我国的配套加工能力弱、机械装配水平有待提高^[32-33]。很多应用场合对位移台的精度要求较高，为此位移台可配备光栅尺等反馈装置，从而实现闭环控制。宏动运动台采用步进电机或伺服电机驱动，控制算法^[9]如图3.1所示。

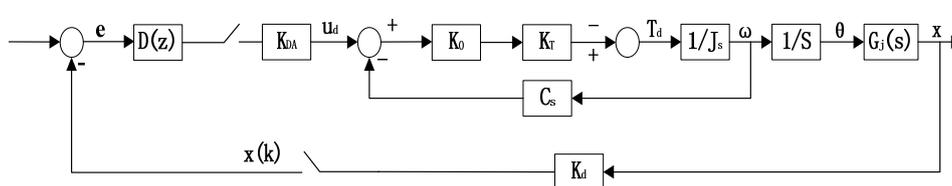


图 3.1 精密位移台信号流程图

可以得到开环传递函数：

$$G(s) = \frac{x(s)}{u_d(s)} * \frac{\frac{1}{C_s}}{s(\frac{J}{K_v K_T K_s} s + 1)} * \frac{K_0 \frac{P_h}{2\pi}}{J_0 s^2 + B_0 s + K_0} \quad (3-1)$$

本次设计的微装配系统采用北京卓立汉光有限公司生产的三轴精密电位移台，采用高精密滚珠丝杠驱动，超精密线性滑轨导向，以 42 系列步进电机驱动，配合厂家提供的 MC600 控制箱，可方便的实现闭环控制，重复定位精度 < 3 μm，闭环分辨率为 1 μm，具体参数见表 3.1、3.2 所示。一般的控制软件只采用 RS-232 通信，基于本研究的电位移台支持 USB 2.0 和 RS-232 通信方式，但无法实现两种通信接口的自动选择，操作界面繁琐。为了便于软件的操作，二次开发中解决了 USB 2.0 和 RS-232 通信接口的自动选择，也可指定连接类型，优化了操作界面，便于软件的集成。

表 3.1 KSA100-11-X 精密位移台参数

型号	KSA100-11-X
直线度 (μm)	<10
平行度 (μm)	<10
偏摆 (")	<15
俯仰 (")	<15
台面尺寸 (mm)	125X125
螺杆导程 (mm)	4
闭环分辨率 (μm)	1
开环分辨率 (μm)	2.5
最大速度 (mm/Sec)	40
重复定位精度 (μm)	<3
空回 (μm)	<5
步进电机	4.2M-1.8S
额定电流 (A)	1.7
中心负载 (Kg)	30

北京卓立汉光生产的 MC600 控制器，该控制器采用数字闭环 PID 控制，有点动和增量两种控制模式，具体控制参数见表 3.2。

表 3.2 MC600 控制器技术参数

型号	MC600-3B
控制轴数	3 轴步进电机
运动控制	32 位, 30MHzDSP 处理器 数字 PID 伺服控制 点动模式, 增量模式

输出触发	集电极开路输出
传感器	零位光电开关, 左右显微开关
通讯接口	RS-232, USB2.0
I/O	16 位可编程 TTL I/O
内存	512KB Flash Non-Volatile Firmware
显示面板	LCD 显示, 240X128
步进电机	闭环控制
控制	300KHz 脉冲频率

电位移台是实现微装配的定位和运动平台，是装配运动的机械支撑载体。位移台的精确定位，有利于装配执行器的精确定位。精确控制位移台，实质上是步进电机脉冲量的精确控制，调用开发包函数，可以控制电动机的初速度、加速度、减速度、细分数以及设置光栅分辨率。从而保证微装配的装配精度。图 3.2 所示为电位移台的控制流程。

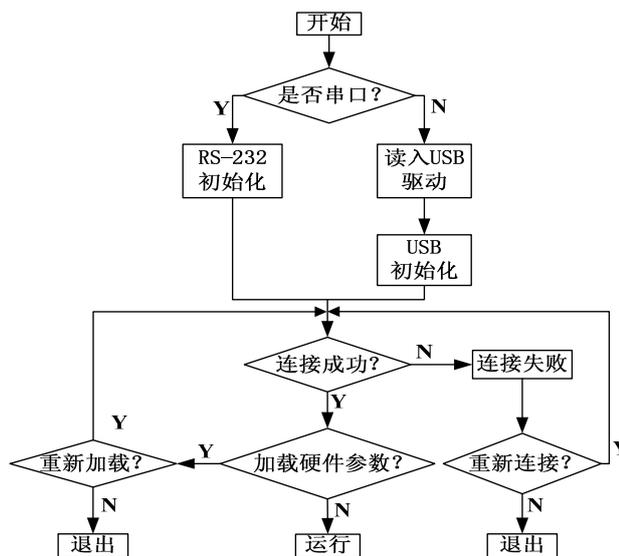


图 3.2 电位移台运行程序框图

实现图 3.2 的位移台连接 VC 程序算法有很多方法，这里示列出其中一种方法。程序代码如下所示：

```

if( * ) //端口为 USB

*****

// USB port C++ Code
MessageBox("USB 连接成功");

*****
    
```

```

else if( * ) //端口为串口

*****

// COM port C++ Code
MessageBox("串口连接成功");

*****

else MessageBox("连接失败");
    
```

为研究电位移台的软件控制性能，建立了控制评价函数，设电位移台的控制评价函数为

$$g(x,y,z,t) = [x \ y \ z] * \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} + k(t) \quad (3-2)$$

式中：

- x —— 通信接口类型，x=0 时，为串口；x=1 时，为 USB 接口；x=2 时，异常；
- y —— 设备连接状态，y=0 时，连接失败；y=1 时连接成功；
- z —— 参数检查，z=0 时，参数错误；z=1 时，参数正确；
- k(t) —— 硬件配置函数，硬件的配置信息与时间 t 有关。

由于 k(t) 硬件配置函数，对于给定的硬件系统，配置信息与时间的变化有一定的关系，但不会直接影响软件的控制性能。于是评价函数可简化为：

$$\bar{g}(x,y,z) = [x \ y \ z] * \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

根据 x、y、z 可能的取值，可以得到一个 3*12 的常数矩阵。

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

令 $A_j = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}$ ，j=1, 2, ..., 12 其中 A_j 为 A 矩阵的列向量。当 $A_j = A_1$ 或 A_8 时，控

制评价函数 $\bar{g}(x,y,z)$ 有最优解，此时电位移台得到了较好的控制。

3.1.2 微运动台软件设计

微动工作台(简称微动台)是微小件装配的关键设备,它为微小件的装配提供了一维、二维的运动定位。目前,国内外的微动台主要包括:柔性铰链微动台、气浮式微动台、滚珠丝杆微动台、滑动导轨微动台、磁悬浮式微动台^[34]。本文研究所采用的是二维柔性铰链式微动工作台,外型尺寸是 112mm×111.5mm×20mm,采用压电陶瓷及控制电源驱动,可实现 X、Y 轴约 10 μm 的工作行程,定位精度达到 0.7 μm,微动工作台实物如图 2.5 所示。

基于本文的压电陶瓷控制器,采用哈尔滨溶智纳芯科技生产的 RHVD-3C-200VD 型。控制器有三路输入/输出功能,每路电压输出从-15V 到 200V,电压控制方式可采用键盘输入、模拟信号输入、并口、波形控制等方式。控制器具有频率响应好、静态波纹低,可为压电陶瓷提供高分辨率、高稳定性的电压信号。表 3.3 为压电陶瓷驱动电源技术参数。

表 3.3 压电陶瓷驱动电源技术参数

型号	RHVD-3C-200VD
电压输出范围 (V)	-20—200
模拟输入电压 (V)	±5
峰值最小电流 (mA)	500
电压显示分辨率 (mV)	5
短路保护电流 (mA)	>500
动态频率 (KHz) 负载 2.2uF	2
电压稳定性 (F.S/24hours)	<0.1%
电源静态电压波纹 (mA)	≤10
电源阶跃响应 (ms)	2
电源电压要求 (V)	220±10%
电源频率要求 (Hz)	50±10%

压电陶瓷是锆钛酸铅压电陶瓷,钛酸铅和锆酸铅组成的多晶固溶体,英文缩写 PZT(P—铅, Z—锆, T—钛),经过极化处理后将电能转化为位移或将力转化为电能,这种性能就称为逆压电或压电效应^[35-36]。在国内,压电陶瓷 1mm 其伸缩变

化量大致为 $1 \mu\text{m}$ ，国外的压电陶瓷较为成熟， 1mm 压电陶瓷其伸缩量约为 $2 \mu\text{m}$ 。基于微小件装配的压电陶瓷驱动技术采用了逆压电效应，压电陶瓷在电学上可以等效为如下模型^[9]。

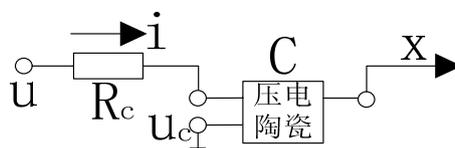


图 3.3 压电陶瓷电学模型

可以得到传递函数为：

$$G_c(s) = \frac{U_c(s)}{U(s)} = \frac{1}{R_c C_s + 1} \quad (3-4)$$

压电陶瓷具有许多优点：如位移分辨率高、无噪声、体积小、频响高、不发热、承载力大等，是一种理想的微位移定位元件，因而获得了广泛应用^[37]。同样，压电陶瓷面临一些需要深入的技术难题，迟滞、蠕变、非线性、老化等技术问题。

实现微动台的精确定位与自动控制，需要通过软件来实现。RHVD-3C-200VD 压电陶瓷控制器，提供了便捷的 PC 并口通信方式，控制器提供了常见功能的开发包函数。调用开发包函数，可以实现控制器的并口初始化、数据的清零、电压的输出。通过控制输出电压的变化，促使压电陶瓷的伸缩变化，从而导致微动工作台铰链的位移发生变化，最终实现微位移的精确定位。软件的开发，使得压电陶瓷控制技术，既方便又快捷，调用以下两个控制函数可以实现微动台的控制。

```
InitParallel(); // 并口的初始化与连接
```

```
SppOut(); // 控制器电压输出，全部输出为 0 时，即为控制器电源复位
```

3.2 图像采集子模块

基于本装配系统采用西安维视图像生产的 CMOS 面阵式工业相机，以 USB 接口通信，最大分辨率 1280×1024 ，配合微距镜头最小物理尺寸分辨率可达 $2.3 \mu\text{m}/\text{pixel}$ 。微小件图像采集系统包括 CMOS 光学传感器、镜头、光源，三者缺一不可。主要功能是图像的采集与监控、是模式识别的必备环节，为装配的决策与控制提供依据。在视觉的引导下，配合吸附头协同完成微小件的拾取、定位等装配动作。工业相机提供了丰富的开发函数，在 VC 集成开发环境中，调用开发包函数，方便的实现图像连续采集，输出窗口控制，图像分辨率设置，图像存储，

图像尺寸、亮度、增益、帧频、曝光时间等参数控制。表 3.4 为 CMOS 图像传感器技术参数。

表 3.4 CMOS 图像传感器技术参数

型号	MV-1300UM
最高分辨率	1280*1024
像素尺寸	5.2um*5.2um
帧率	15fps@1280*1024
光学尺寸	1/2"
水平光学分辨率	>850 TV lines
输出方式	USB2.0
信噪比	>50dB
动态范围	60dB
敏感度	2.1V@550nm/lux/s
曝光时间	50us-1s

图 3.4 所示为工业相机的软件控制流程（介于篇幅限制，这里不再列出程序代码）。

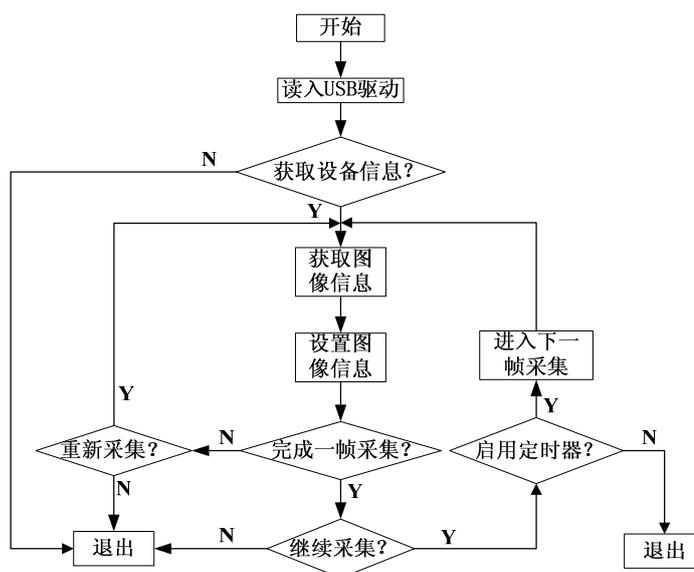


图 3.4 工业相机图像采集框图

CMOS 图像传感器接收到光信号，经过光电和数模转换为离散数字图像，最后经采集卡传输进电脑以数组方式存储。数组中的每一元素值就是像素点的亮度或灰度。若为彩色图像，则图像的像素亮度将由 R、G、B 三通道颜色表示亮度。

工业相机采集的图像与照明（辐射源）的强度、波长以及物体的反射、透射能力有关^[38]。微小零件 p 在时刻 t 的成像为：

$$G(p,t) = W\{i(p,t), o(p,t), \lambda(p,t)\} \quad (3-5)$$

式中, $i(p,t)$ 是照明强度入射函数, $o(p,t)$ 是物体反射、透射能力反射函数, $\lambda(p,t)$ 为照明的波长函数。三个函数共同决定了图像的主要度量特性: 光强度及色彩的时间和空间分布。工业检测中通常采用光强图像, 又称为灰度图像或黑白图像。一个二维光强函数可由照射和反射数学模型来描述^[38]。

$$G(x,y)=i(x,y)o(x,y) \quad (0 < i(x,y) < \infty, 0 < o(x,y) < 1) \quad (3-6)$$

其中, (x,y) 处的光强由反射环境光强这一外部因素的入射函数 $i(x,y)$ 和反射景物内在特性的反射函数 $o(x,y)$ 共同确定。如果照明 $i(x,y)$ 来自对象内部, 则 $o(x,y)$ 代表景物的透射特性。将连续光强函数离散化(数字化), 可以得到非连续的离散函数, 这样就可以便于计算机存储图像。数字化完成两个过程: 将图像空间离散化为像素点以及将图像光强值离散化为像素灰度。于是, 得到离散灰度函数 $g(x,y)$ 。

$$g(x,y) = \begin{bmatrix} g(0,0) & g(0,1) & \cdots & g(0,c-1) \\ g(1,0) & g(1,1) & \cdots & g(1,c-1) \\ \vdots & & & \vdots \\ g(r-1,0) & g(r-1,1) & \cdots & g(r-1,c-1) \end{bmatrix} \quad (3-7)$$

其中, $x=0, 1, \dots, c-1$; $y=0, 1, \dots, r-1$; $g(x,y) = \{0, 1, \dots, \max\}$ 为灰度值。

3.3 微夹持器控制子模块

微装配的夹持技术, 从微夹持器的机械结构分类, 主要包括钳式夹持器和吸附式夹持器两种。钳式夹持器有利于轴类、细长类、大体积零件的夹持操作, 在夹持过程中较容易实现夹持力的实时可控, 但释放时受粘附力影响较大。吸附式夹持器的优势是完成对片状、盘类、板类零件的夹持操作, 缺点是被吸附面是封闭的、夹持力不易控制, 对片状、盘类、板类微弹簧的装配无能为力。基于本文研究的微小件装配系统, 以吸附式夹持为主, 简要性的介绍钳式夹持技术。

3.3.1 吸附式夹持器软件设计

实现吸附式微小件的装配, 必备的硬件有气泵、气动系统、吸附头、管路, 硬件的控制可以通过单片机、PLC、控制板卡等控制, 技术难点在于软件控制、管理、任务调度。基于本装配系统采用的是阿尔泰科技公司生产的 USB2831 数据采集卡, 具有 12 位 AD 精度, 250KS/s 采样频率, 有 4 路模拟量输出、16 路模拟量输入, 带 DA、DIO 功能。数据采集卡在本系统中主要实现三个功能, 第一: 实现气动系统电磁阀的开闭, 控制吸附头和装配托盘, 保持其位姿不变; 第二: 进行

气动压力的调节，接受粘贴在吸附头上的应变片转变的反馈电信号，掌握吸附力的状态；第三：当吸附头与装配托盘接触时，接受限位开关的高电平信号，让竖直轴(Z轴)步进电机停止运动。控制算法如图 3.5 所示。

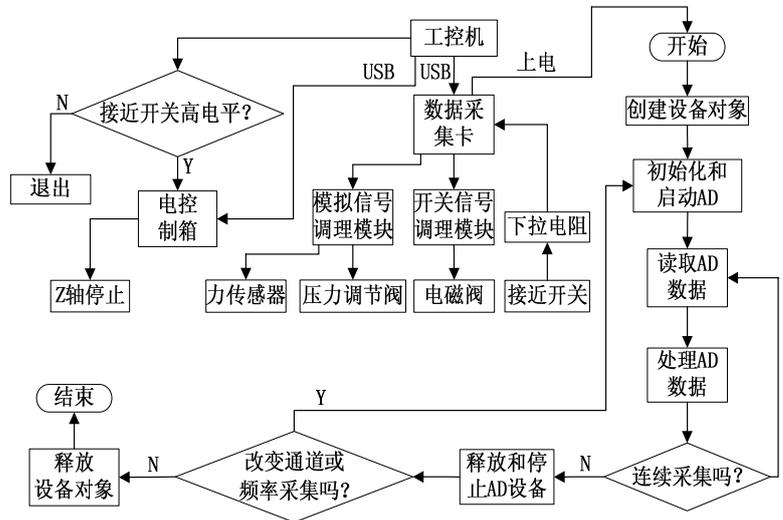


图 3.5 数据采集卡控制流程

吸附式夹持软件控制，主要关注以下几个重点：（1）数据采集卡的输入信号的采集；（2）数据采集卡的输出信号控制；（3）实时性是控制软件的基本要求，对于气动压力调节、吸附力反馈控制、磁距感应限位开关（机械式限位开关除外）等模拟量，一般采用多线程技术；（4）数据采集卡控制信号在软件中的内存申请、存储、初始化、释放要规范合理。

另外，吸附式夹持的控制，从软件和硬件方面看待。有两大难题：即吸附式夹持器的软着陆控制技术和力觉反馈控制技术。软着陆技术是将具备弹性缓冲装置(如橡胶头)集成在吸附头前端，以保证吸附头与零件平面贴合具备良好的密封性。对于刚性吸附头结构相对简单，高度方向较容易控制，但刚性吸附头不具备缓冲过渡位移，容易因零件表面粗糙度的不均衡或粗糙度差而发生微小件的拾取失败。刚性吸附头和软着陆吸附头在电子行业的贴片机上都有广泛应用，应根据实际要求合理选择。两种吸附头都需克服如在同一电路板装配不同厚度的微小件带来的视觉物距和缓冲力控制难的问题。力觉反馈控制，在钳式夹持器中较易实现，但在吸附式夹持器，力觉反馈很难做到准确的控制，目前的研究尚处于摸索阶段。

3.3.2 钳式夹持器软件设计

为解决轴类、细长类微小件的装配，钳式夹持器可对夹持力实时可控。图 3.6 所示为一种以柔性铰链为基础的二级位移放大机构的夹持器，压电陶瓷的伸长量为 $25\ \mu\text{m}$ ，单臂两级放大系数分别为 8 和 3，因该机构采用对称布置，由两个臂组成，因此总放大倍数为 $8*3*2=48$ 倍，夹持器的两个臂总张合量为 $100\sim 1100\ \mu\text{m}$ ，该夹持器由压电陶瓷及驱动电源控制^[39]。

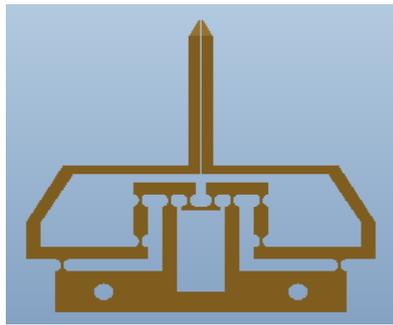


图 3.6 钳式夹持器外观

钳式夹持器张合量的控制，采用 RHVD-3C-200VD 压电陶瓷驱动电源。调用 `InitParallel()` 与 `SppOut()` 控制函数，即可快速实现夹持器的轴类零件的夹持控制。

3.4 示教编程子模块

3.4.1 示教编程软件设计

对于机器装配任务通常具有重复性，并且经常发生在已知的环境中，这些任务可以通过示教编程来完成。示教编程主要实现装配任务的路径规划和运动编程，装配过程中只是简单地重复预先编程设定的动作。基于 VC++6.0 开发的微装配软件系统，工业相机用于监控执行器的状况，实现可视化遥控示教。对机器的运动状态和位置掌握得很直观，便于对硬件进行控制。调用开发包指令，不仅可以完成机器示教常有的功能，还可实现较复杂的装配过程，减轻控制算法的开发量。

基于本套开发的装配软件系统，可以实现示教数据的保存、编辑、打开。在示教编程之前，用户需要设置示教参考点，也可将机械原点设置为示教参考点。微装配示教过程如图 3.7 所示。

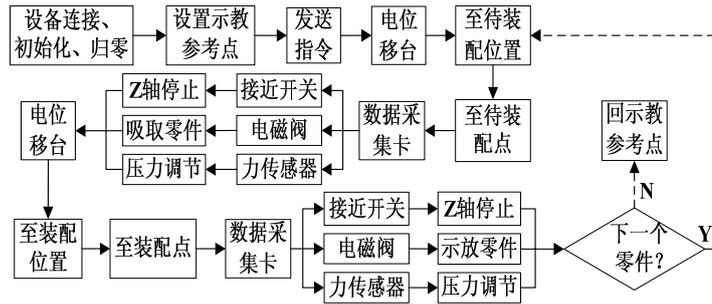


图 3.7 示教模块的工作过程

由于论文篇幅限制，这里以位移台的示教编程为例，C++算法实现代码如下所示：

```
//判断示教与不示教并执行操作
switch( * ) //分支选择条件
{
case IDC_RADIO1: //选择不示教选项
{
AfxMessageBox("没有选择示教选项");
*****
//Other C++ Code do something
*****
}
break;
case IDC_RADIO2: //选择示教选项
{
for(* ; * ; * ) 遍历所有 ClistCtrl 行为
*****
//开辟存储空间，用堆栈的方式取存数据
pCur = (pOperArg)malloc(sizeof(OperArg));
pCur2 = pCur;
pCur->pNext = NULL;
*****
pCur->Num = r; //示教的次数
```

```

pCur->pAxis = axis;          //运动的轴
pCur->pDirection = dir;     //轴运动方向
pCur->length = x;          //运动的距离
pCur->pSpeed;               //速度模块
//Other C++ Code do something
    }
    break;
default:
    break;
if ( * ) //判断示教次数和 ClistCtrl 遍历行为
    {
// 开启线程 1: 查询设备每次指令是否运动到位
AfxBeginThread(ThreadFunc1, (LPVOID)pCur);
// 开启线程 3: 示教数据的运行控制
AfxBeginThread(ThreadFunc3, (LPVOID)pCur);
    }

```

示教再现运动台一般为电动，可以装配不同形状特征的零件，用于单件或批量化装配；非示教型的运动台为手动或电控，一般多为单件装配，用于批量化装配时需耗费操作人员的大量工时，装配精度稳定性差。显然，示教型装配实用性好。

3.4.2 示教编程路径规划

图 3.8 所示示教任务，需完成围绕障碍物（可理解为轴和轴之间的干涉）走一圈，然后回到示教参考点 0（相当于机械原点）。图中数字符号 1, 2, 3, ..., 13 代表行走的步骤，选取逆时针为行走方向。为了简单起见，这里以 X、Y 轴平面行走路线为例说明，示教过程不考虑 Z 轴，一共列出 4 种示教行走路线。

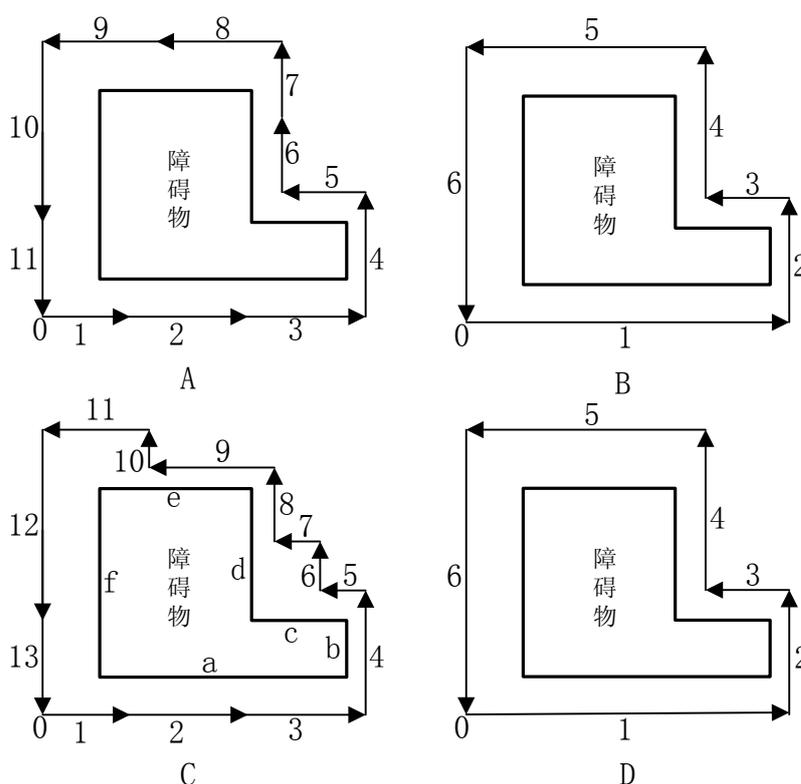


图 3.8 示教行走路线

其中图 B 为图 A 的优化路线，图 D 为图 C 的优化路线。

(1) 从图 A 到图 B 可以看出，路径规划中共线相连的多段路线可以合并为一条。如图 A 的路线 step1—→step2—→step3，可以合成图 B 的 step1；图 A 的路线 step6—→step7，可以合成图 B 的 step4；图 A 的路线 step8—→step9，可以合成图 B 的 step5；图 A 的路线 step10—→step11，可以合成图 B 的 step6。

(2) 从图 C 到图 D 可以看出，路径规划中不共线的多段路线，且多段线同处于障碍物一侧，如图 C 中的 step5、step7 同处于障碍物 d 右侧，可以合并为图 D 中的 step3；图 C 中的 step9、step11 同处于障碍物 e 上侧，可以合并为图 D 中的 step5；而图 C 中的 step6、step8 同处于障碍物 d 右侧，step10 则处于障碍物 e 上侧，step6、step8、step10 可以合并为图 D 中的 step4。

从上述的行走路线，可以得出示教路径的规划有以下 3 个简单规律：

- ①，路径规划中，共线相连的多段路线可以合并为一条；
- ②，路径规划中，不共线的同向矢量多段路线，且多段路线矢量同处于障碍物同侧可将多段路线合并为一条；
- ③，路径规划中，不共线处于障碍物两侧的同向多段矢量路线，若路径规划合并

的前一步没有进入障碍物，而不共线处于障碍物两侧的同向矢量多段路线的合并方向不是进入障碍物实体的方向，此时可将不共线的处于障碍物两侧的同向多段矢量路线全部合并为一条。

为完成微小件的视觉装配任务，将示教规划好的路线作为最终装配方案。该方案较适合批量化场合，对于重复性装配任务有一定的优势。在示教路径规划的过程中，可以考虑将空行程的路线电机速度设置的大些，这样可以满足装配效率。对于接近装配对象的路径段，可将电机速度设置的小些，这样可以减少必要的电机冲击与振动。结合“鼠标滚轮定点”装配策略，对于装配台具备保持微小件位姿不变的装置和精度较高的机械系统，可完成高精度的微小件装配任务。

3.5 相机标定与模式识别子模块

在宏观装配领域，无论是二维或三维空间的应用，视觉定位具有普遍性，视觉定位技术在宏观装配领域的应用比较成熟。在微装配领域，由于视场限制无法获得足够的目标零件三维信息，视觉定位技术的应用并不成熟。

对于大多数机器视觉厂商来讲，机器视觉软件的开发，一般采用 Visual C++ 开发平台结合第三方图像处理函数库，这既可以节省开发时间，又能保证程序高效性。在高校教学中用的较多的是 Matlab，商业上用的较多的是 Halcon、OpenCV、Evision、VisionPro、Sapera 等^[23]。如果完全只用 Visual C++ 进行图像识别软件的开发，这个工作将会是巨大的、低效率的，同时要求编程人员具备非常扎实的图像算法功底，另外编程人员必须具备很强的编程能力，一般来说很少厂商这么做。虽然单纯的 Visual C++ 编制的程序响应性好，但对实际零件的识别鲁棒性不能得到保证，程序的适应性很差，例如变化不同的识别对象，需要大面积的重新编制图像处理程序算法。

基于本文构建的微小件装配系统，以 Visual C++ 为开发平台，结合 halcon 机器视觉算法库。halcon 算法库是德国 MVtec 公司研制的影像处理软件，在欧盟及日本的工业界被公认为最佳效能的机器视觉算法库，深受机器视觉科研人员的喜爱。通过 halcon 编制相机标定及模式识别算法，将 halcon 测试好的算法导出 C++ 代码，最后将 C++ 代码加入到 Visual C++ 开发平台，编制软件处理界面，实现软件的集成。若要实现程序发布，完全摆脱 halcon 算法库，只需将 halcon 算法库相关接口文件、头文件、源文件拷贝到 VC 工作目录下，设置好 VC 相关参数，最

后通过打包软件，即可实现软件发布（如用 Opencv 算法库，方法类似）。图 3.9 所示为微装配视觉软件开发流程。

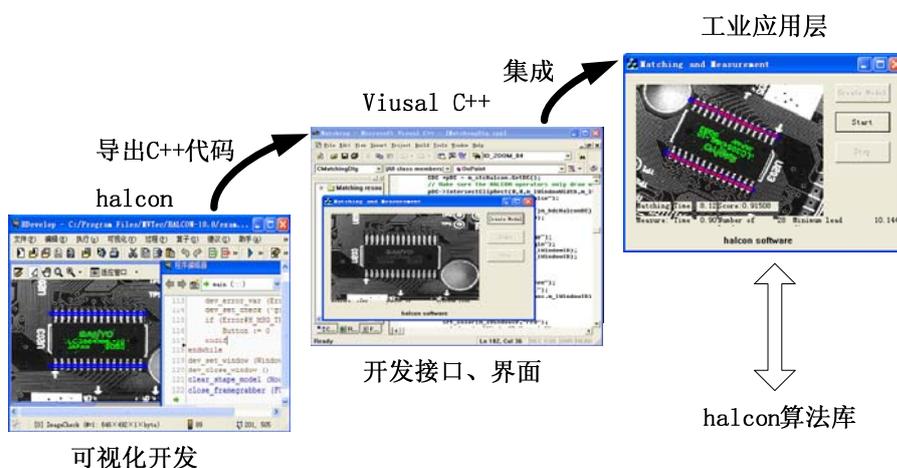


图 3.9 微装配视觉软件开发过程

相机标定和模式识别是实现机器视觉微装配的关键技术。相机标定是高精度微装配的前提，标定精度直接决定了识别精度，模式识别算法为微装配定位提供有效的解决方案。基于机器视觉的微小件装配系统，模式识别装配通过相机标定、形状匹配、亚像素轮廓提取等机器视觉算法，获取装配对象的形状、位姿信息。机器视觉控制软件将图像信息反馈给机械系统，机械系统根据获取的形状、位姿信息和像素当量，执行相应的控制量，完成微小件的定位与装配。由第二章可知，基于微小件的装配系统，采用的是图 2.2 的方案 C。因此，本文研究的相机标定主要是校正图片因镜头畸变带来的变形。图 3.10 相机标定流程，图 3.11 模式识别形状匹配流程。

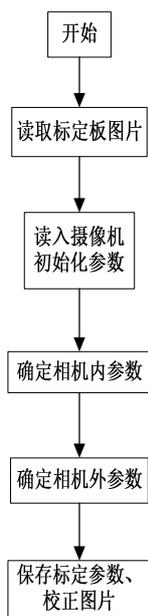


图 3.10 相机标定流程

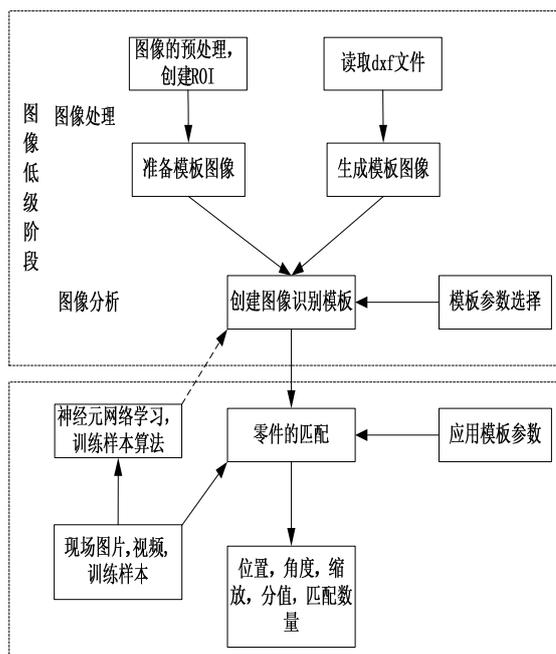


图 3.11 形状匹配流程

3.6 本章小结

本章介绍了微装配软件系统架构，软件系统分为宏/微运动台子模块、图像采集子模块、微夹持器控制子模块、示教编程子模块、相机标定与模式识别子模块。基于特定的装配任务和硬件技术，分析了各模块的控制流程，给出了软件开发关键技术的解决方法。将示教编程方法引入到微装配中，给出了示教编程程序算法，分析了示教编程路径规划方法。根据宏/微定位方案，分析了宏运动台和压电陶瓷控制技术，建立了电控位移评价函数，建立了相机标定和模式识别策略。

第4章 视觉系统的标定

4.1 相机标定原理

相机标定是视觉三维重建和精密识别测量的重要步骤之一^[40]。相机的标定就是确定相机内外参数及其物镜的光学畸变的过程，高精度的标定是确保模式识别装配的基础。摄像机内参数描述相机成像的几何特征，摄像机外参数描述相机相对于世界坐标系的方向和位置^[41]。在图像测量领域，相机标定也称为相机检定。比较经典的相机校验量测方法如恒星检校、试验场检校、光学实验室检校等已经比较完善，但大多数方法都需要专门的试验设备，且程序比较复杂^[42]。基于工业相机的微小件精密测量方法具有非接触、精度高、方便实用等优点，因此在工业自动化中被广泛应用。

4.1.1 工业相机成像模型

针孔成像模型又叫中心透视模型，是理想的投影成像模型^[43]。假设物体表面的反射光，经过“针孔”模型投射到像平面上，根据光的直线传播原理，此“针孔”就是光学投影中心（即光心），物点、光心和像点在一条直线上，满足直线方程^[43]。因小孔成像的透光量比较小，成像较慢，实际的相机的镜头一般由透镜组成。针孔模型是研究相机标定技术的基础，其计算方便、线性性好、运算速度快，能够简化研究方案。图4.1所示为带畸变的小孔成像模型。

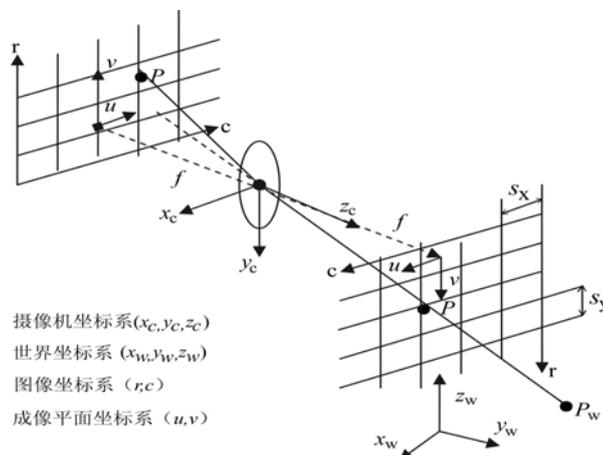


图 4.1 针孔相机成像模型

设图像上的某像素点的坐标为 (u, v) ，由针孔模型和透视光学，得到齐次坐标下 (x_w, y_w, z_w) 和 (u, v) 的空间几何关系为^[44]：

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f/s_x & 0 & x_0 & 0 \\ 0 & f/s_y & y_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = Q_1 Q_2 \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4-1)$$

其中， s 为比例因子， s_x 、 s_y 是 CMOS 的像元长度和宽度， f 为镜头的主距（有些文献叫焦距）， R 与 T 分别为旋转矩阵和平移向量，是从世界坐标系到相机坐标系的， M 是一个 3×4 的投影矩阵，也叫同形矩阵或单应性矩阵，它由相机的内部参数决定，相机相对于世界坐标系的外部参数（方位）决定了 Q_2 矩阵。

机器视觉系统如果采用无畸变的光学镜头。设相机的等效焦距 $f/s_x = f_u$ 、 $f/s_y = f_v$ ，相机主点为 (x_0, y_0) ，旋转矩阵为 (r_{ij}) ，光心偏移量为 (t_x, t_y, t_z) 。得到针孔成像模型表达式^[45]为：

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u & 0 & x_0 & 0 \\ 0 & f_v & y_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4-2)$$

如果采用空间共面控制线求取相机的内外参数，可以定义世界坐标系的 x_w, y_w 平面为控制线所在的空间平面，在此空间平面的物点 z_w 坐标为 0，因此针孔成像模型可简化为^[45]：

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u & 0 & x_0 \\ 0 & f_v & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ 1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4-3)$$

其中 M 为相机的投影矩阵又称同形矩阵或单应性矩阵，展开形式为

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u r_{11} + x_0 r_{31} & f_u r_{12} + x_0 r_{32} & f_u t_x + x_0 t_z \\ f_v r_{21} + y_0 r_{31} & f_v r_{22} + y_0 r_{32} & f_v t_y + y_0 t_z \\ r_{31} & r_{32} & t_z \end{bmatrix} \quad (4-4)$$

消去比例因子 s 则有:

$$\begin{cases} u = \frac{(m_{11}x_w + m_{12}y_w + m_{13})}{(m_{31}x_w + m_{32}y_w + m_{33})} = \frac{\bar{x}_w}{\bar{z}_w} \\ v = \frac{(m_{21}x_w + m_{22}y_w + m_{23})}{(m_{31}x_w + m_{32}y_w + m_{33})} = \frac{\bar{y}_w}{\bar{z}_w} \end{cases} \quad (4-5)$$

4.1.2 工业相机坐标转换

(1) 常用坐标系^[43, 50]

① 世界坐标系(WCS)

又称为全局坐标系,用 (x_w, y_w, z_w) 来描述。它是由用户自定义的坐标系,通常将被测物体与相机作为整体考虑的坐标系。为了使用方便,在微装配中以位移台或微夹持器的初始位置来定义世界坐标系,该坐标系是所有装配对准作业的基准。

② 图像坐标系(UWV)

图像坐标系是显示器显示的坐标系,是人们直观可见的坐标系,是机器视觉编程最重要的坐标系,单位为像素。图像坐标系是像平面经坐标转换的投影得到,用 (u, v) 来表示,单位为像素,一般定义图像的左上角为坐标原点,每一个像素的坐标分别是像素在存储数组中的行和列。

③ 相机坐标系(CCS)

相机坐标系表示为 (X, Y, Z) ,相机的投影中心为原点, X 和 Y 轴分别平行成像平面坐标系的 x 和 y 轴, z 轴与光轴重合且垂直于成像平面。相机的有效焦距 f 为光心到成像平面的距离。相机坐标系是为方便描述成像模型而定义的。

④ 成像平面坐标系(IPCS)

相机 CMOS 传感器形成了像平面坐标系,用 x_0y_0 表示,单位为 mm 。一般取成像平面与相机坐标系的 XY 平面平行, x 和 y 分别平行于 CMOS 阵列的行和列,且 x 和 y 分别平行 X 和 Y 轴。相机光轴与 CMOS 成像面的交点为图像主点坐标(即原点 0),一般 0 位于图像坐标系中心位置。

(2) 世界坐标系变换到相机坐标系

世界坐标系到相机坐标系的变换可以看成是刚体变换,在世界坐标系中的点 $P_w = (x_w, y_w, z_w)^T$ 在相机坐标系中的坐标为 $P_c = (x_c, y_c, z_c)^T$ 有如下关系^[46]:

$$P_c = RP_w + T \quad (4-6)$$

式中, $T = (t_x, t_y, t_z)^T$ 为一个平移向量, $R = (\alpha, \beta, \gamma)$ 是一个旋转矩阵, 该矩阵有多种表达方式, 如欧拉角、旋转向量, 四元数等^[50], 这里采用欧拉角表示, 欧拉角 α 、 β 、 γ 分别表示绕相机坐标系 x 、 y 、 z 轴的旋转角, 旋转矩阵由三个旋转角度确定。另外, R 和 T 组成的 $(\alpha, \beta, \gamma, t_x, t_y, t_z)$ 6 个参数称为相机外参数、外方位参数或相机位姿。

$$R(\alpha, \beta, \gamma) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-7)$$

将式(4-7)展开得到

$$R = \begin{bmatrix} \cos \gamma \cos \beta & \cos \gamma \sin \beta \sin \alpha - \sin \gamma \cos \alpha & \cos \gamma \sin \beta \cos \alpha + \sin \gamma \sin \alpha \\ \sin \gamma \cos \beta & \sin \gamma \sin \beta \sin \alpha + \cos \gamma \cos \alpha & \sin \gamma \sin \beta \cos \alpha - \cos \gamma \sin \alpha \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \beta & \cos \beta \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (4-8)$$

(3) 相机坐标系投影到成像平面坐标系

对于针孔相机模型而言, P_c 三维空间点的投影是透视投影, 可以表达为^[46]:

$$\begin{cases} \frac{u}{f} = \frac{x_c}{z_c} \\ \frac{v}{f} = \frac{y_c}{z_c} \end{cases} \quad \text{矩阵形式为:} \quad \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \frac{f}{z_c} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \end{bmatrix} \quad (4-9)$$

对于平行投影方式的远心相机模型, 因为远心镜头没有焦距 f 。则可以表达为:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \end{bmatrix} \quad (4-10)$$

4.1.3 工业相机标定物

传统摄像机标定方法主要是根据已知尺寸和形状的标定板(又称靶标)进行标定, 常用的有三维标定板和二维平面标定板^[40]。不同的标定模板适宜不同的标定算法和不同的使用场合(某些场合对标定板有限制)。理论上讲, 任何合适的表征物体均可用作相机标定, 实际使用中大多选取如棋盘格这样规则的模型^[47-48]。因平面棋盘制作容易, 算法处理更为简单, 倍受青睐, 而精确的三维标定物费用高、

加工难度大、制作烦琐、使用不方便。

如图 4.2 所示为三维标定物。采用三维标定板时，根据标定板特征点与图像点的对应关系直接求解相机参数，该方法标定精度略高于平面标定板^[40]，且可通过单张图片求取相机参数。平面标定板则无法提供如三维标定物在世界坐标系三个方向矢量矩阵，可通过移动或者倾斜放置模板的方法弥补不足^[49]，二维标定板在实际应用中广泛使用，唯一不足之处是需要采集多张多角度的图片。

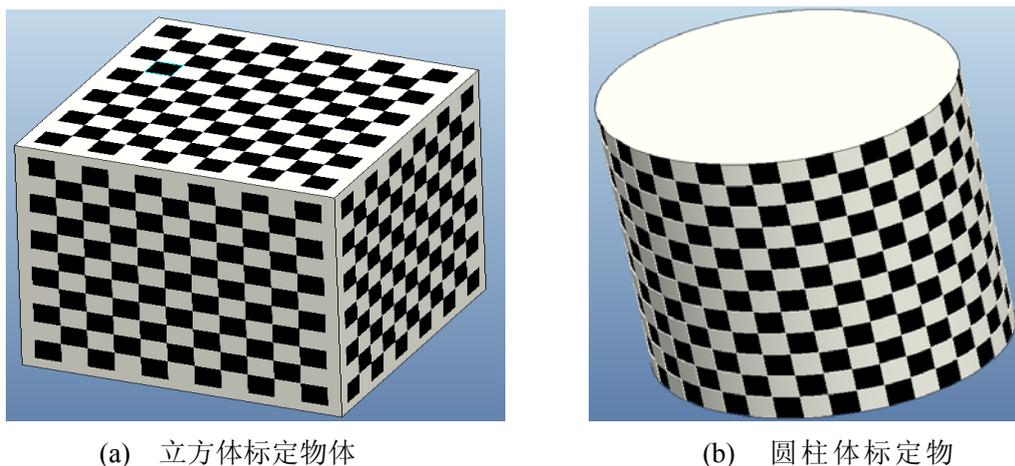


图 4.2 三维标定物

图 4.3 所示为二维标定物。在平面标定板中，图 4.3(a)同心圆环和图 4.3(b)经纬分布标定板有一定的使用范围，但因其对标定板的方向确定较为困难，角点抗干扰性不良。因此，使用起来有一定的局限性。图 4.3(c)为黑方格阵列棋盘式标定板，在 matlab 和 opencv 相机标定中使用广泛。在实际使用中，棋盘格使用奇偶维数的阵列布置标定板棋盘。奇偶不同的阵列使棋盘只有一个对称轴，可以很方便地确定棋盘方向。图 4.3(d)为黑实心阵列棋盘式标定板，世界著名的 halcon 算法库推荐使用的标定板。

图 4.3(d)与图 4.3(c)两种标定物对比，因实心圆对标定环境如光照、噪音等因素不敏感，而黑方格对外界标定环境的变化因素较为敏感，因此用黑实心圆作为标定物抵抗环境干扰能力强，具有较好的鲁棒性。另外，又因为圆的提取算法较黑方格的提取算法简单，通过亚像素拟合的过程较为简单，固黑实心圆标定板标定精度比黑方格标定板精度来的高。在标定相机的过程中，尽量保证标定模板与摄像机光轴垂直，这样可以简化模型、减少算法的复杂度，更能保证更高的标定精度。

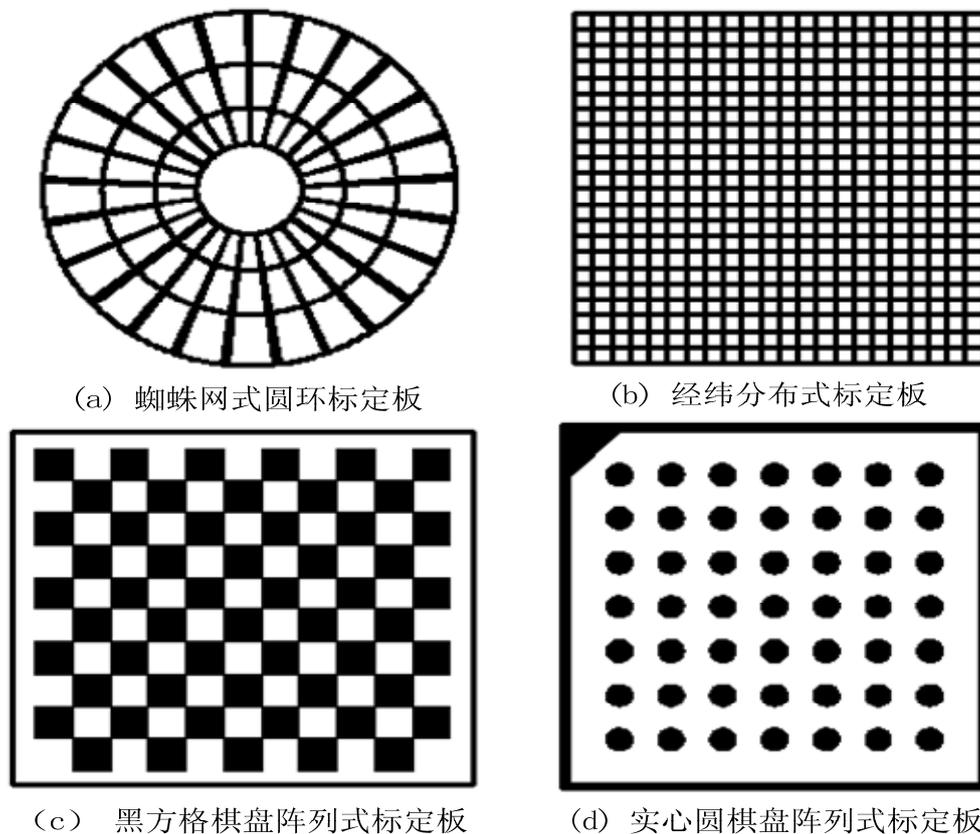


图 4.3 二维标定物

综合考虑,本论文是采用 Visual C++结合 halcon 算法库开发的机器视觉产品,因此选择实心圆棋盘阵列式标定板作为标定物。

4.1.4 视觉系统的误差

机器视觉系统的误差来源主要有几何畸变、各种噪声、大气抖动、算法精度等^[50]。机器视觉系统的几何畸变误差可分为:透镜像差(镜头畸变)、感光像元排列误差、透视误差^[51]。其中对视觉测量影响最大的是镜头畸变,使用广角镜头时误差更为明显。多种误差耦合而成了视觉系统的几何畸变误差,是一种典型的视觉系统误差,通常情况下是不变的,它是影响视觉测量最重要的因素之一^[50-51]。通过系统的标定可以将此误差消除或抑制。

视觉系统必须有镜头才能成像,但是任何镜头都有一定的孔径与视场,无法严格满足针孔成像模型。实际镜头成像与针孔模型成像之间的误差称为透镜误差。透镜误差可大致分为不对称和轴对称像差,不对称像差^[59]主要有偏心畸变、薄棱镜畸变,一般由镜头的制造与安装引起的误差;对称像差^[50]主要有球差、像散、彗差、畸变、场曲、倍率色差和位置色差。

对称畸变误差是最主要的镜头误差，根据系数的正负，分为枕形畸变和桶形畸变。相机的焦距变化对此畸变影响较大。由于共扼物放大率不为常数造成物体和图像之间失去了相似性产生的误差。实际镜头畸变的大小与镜头质量直接相关，通常镜头焦距越短，镜头畸变就越大。特别是短焦距的广角镜头，镜头畸变像差更大。一般来说，相机镜头边角处的畸变误差最大。如图 4.4(a)是理想图片，图 4.4(b)和图 4.4(c)分别为桶形畸变和枕形畸变图像。普通消费级数码相机的枕形失真率大约为 0.4%，桶形失真率可达到 1%。Weng 的实验表明，偏心畸变与薄棱镜畸变的误差和为枕形畸变与桶形畸变误差和的 $1/7 \sim 1/8$ ^[59]。大部分情况下，镜头的畸变可以近似为桶形畸变和枕形畸变。Clarke 指出，机器视觉系统要获得大于 1% 的像素精度，则应考虑镜头的偏心畸变^[69-70]。

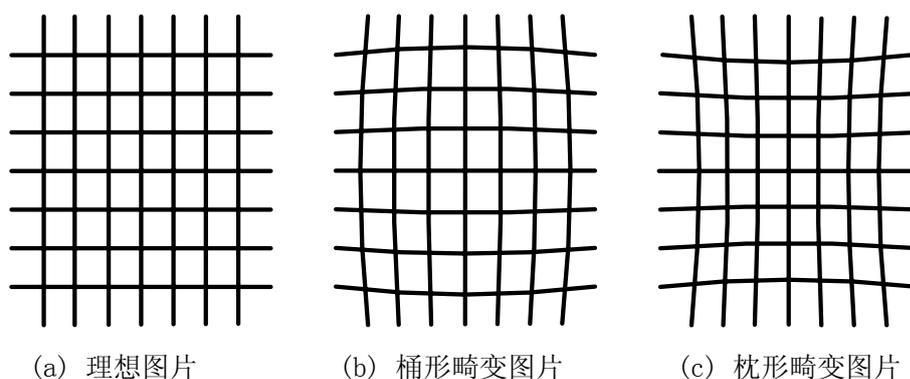


图 4.4 镜头的畸变

4.2 相机标定算法

相机标定是机器视觉领域的热点研究内容之一，已有一些成熟的算法，也诞生了许多新的算法。在机器视觉、三维重建、图像测量应用中，相机标定是最基本、最重要工作之一，也是相对复杂、困难的工作。相机成像模型并不是理想的透视模型，标定过程实质是建立起与现场接近的视觉模型，越接近实况获得的测量精度越高，以此同时，模型越复杂，标定的难度也越大^[42]。相机标定的精确性及算法的稳定性，对后期的测量准确与否起决定性作用。因此，相机标定是科研工作的重点内容，做好相机标定是后续工作的前提。

相机的标定算法是多样化的，但还没有一种方法适合任何场合。根据标定方式的不同，可将相机标定算法分为：传统标定方法、自标定方法和主动视觉标定方法^[52]。

(1) 传统相机标定方法

传统标定方法是利用已知标定物上的点、线、面特征，通过数学方法与图像处理技术，建立空间点和像素元之间的对应关系，求取相机的内参数、外参数及畸变量^[45,50]。传统标定方法的优点是标定精度很高，适合于不同的相机模型，是目前最为广泛使用的方法。缺点是标定过程复杂，需要精度高的标定物，相机模型不能发现变化（如果物距、相机姿态发生变化）。比较经典的传统标定方法有：直接线性变换解法（简称 DLT），直接非线性优化法，Tsai “两步法”等^[53-54]。

1) 直接线性变换解法

Abdel 和 Karara 于 1971 年首次提出^[55]直接线性变换解法（简称 DLT）。在不考虑像差的情况下，通过求解线性方程得到相机参数，线性求解简单、快速、方便。因未考虑镜头的非线性畸变像差，因而精度较差。为了提高算法的测量精度，Wong 和 Karara 提出了在线性求解的基础上进行非线性优化^[56-57]。虽然线性变换方法中包含非线性因素，学者们仍然愿意叫它为“DLT”求解算法。

2) 直接非线性优化法

直接非线性优化法，采用控制点与对应的图像点之间的关系为非线性关系，采用完全非线性迭代算法求取相机参数。算法的缺点是：光学成像模型复杂（参数多）、计算量大（程序耗时）、算法鲁棒性差、实时性不佳，相机标定的精度依赖于相机给定的初始值精度，当初始值误差较大，很难得到满意的标定结果。优点是：可覆盖各种类型的像差，若给定相机初始参数比较准确，可获得的非常高精度。

3) Tsai “两步法”

Tsai 于 1987 年在 SPIE 会议上提出了相机万能标定方法^[58]，即“两步法”标定算法。“两步法”中假定相机的镜头是轴对称径向畸变，利用径向一致约束建立方程，大部分参数采用线性求解，少部分参数用非线性优化或迭代方法求解，先求解相机的外参数，然后求解相机内参数和畸变量。优点是：算法稳定，精度较高，迭代求解参数少，大部分参数可线性求解，算法方便、快捷、适用，可将 DLT 算法的结果作初值。虽然其应用范围广泛，但因只考虑了相机的轴对称径向畸变，无法满足精度很高的场合。为了改善精度，Weng 提出了包括非轴对称像差的修正模型^[59]，其求解和标定过程与 Tsai 算法类似，迭代优化了求解线性参数和求解像差系数。

(2) 自主标定方法

自标定方法 (self-calibration) 于上世纪 90 年代初由 Faugeras、Luong、Maybank 等首次提出^[60]，通过采集多个方位的多幅图像，依靠“基础矩阵”约束图像对应点之间的关系，直接求解相机内外参数。估计约束“基础矩阵”通常有线性和非线性方法。常用的线性算法有 Longuet-Higgins 的八点算法^[61]，Harttley 改进的八点算法^[62]；常用的非线性算法^[63]有 M-估计法、最小中值法、六点综合算法、双对极约束算法。

有些学者将主动视觉标定方法也归类为自标定方法^[50, 52]。自标定方法不需要标定块，不需要初值，与相机内参数有关，与场景和相机的运动无关，算法灵活、方便，应用前景广阔。但自标定算法精度不高、鲁棒性差，只得到各参数之间的比例关系^[50]（相差一个像素当量）。在精度要求不是很高的场合有较多的应用，例如三维动画、虚拟现实、影像建模与绘制等场合^[60]。

自标定方法是通过绝对二次曲线 (absolute conic) 和绝对二次曲面 (absolute quadric) 建立数学模型，求解多元非线性方程。将绝对二次曲线（或其对偶）作为虚拟标定物，通过不同形式的约束方程求解其在所成像方程实现相机的标定。Faugeras 和 Manybank 通过给定三幅图像，由绝对二次曲线及构建的 Kruppa 方程^[64]标定相机的 5 个内参数。Harttley 对“基础矩阵”进行 SVD 分解，简化了 Kruppa 方程^[62]。绝对二次曲面由 Triggs 最先提出^[65]，算法与 Kruppa 方程的方法类似，均采用了欧氏变换下绝对二次曲线的不变性。由于无穷远平面和绝对二次曲线的所有信息为二次曲面包含，故算法优于绝对二次曲线标定方法。

(3) 主动视觉标定方法

主动视觉标定方法是利用相机做纯平移或旋转运动，根据已知的运动信息，求解相机的内外参数。在工业机器人手眼标定、头眼标定中有较广泛的应用。通过相机的运动信息线性求解模型参数，因而算法简单、鲁棒性较高。Hartley 提出^[66]了控制相机绕光心作纯旋转运动标定相机参数，缺点是实际环境中无法快速知道光心位置；比较经典的算法有：马颂德提出了三正交运动法^[67]，李华提出了基于平面单应矩阵和外极点的正交运动方法^[68]。

4.3 视觉系统像素当量的标定

基于微小件的装配系统，采用模式识别装配方法时，通过形状匹配等算法得

到识别对象的形状、位姿等信息。要实现微小件的装配，机械系统还需知道图像信息和实际物体的像素当量（也称为放大倍数或比例尺），结合图像信息和视觉系统像素当量，操作机械系统完成微小件的装配。因此，像素当量的标定在视觉系统中不容忽视，像素当量的精度，对微装配的装配精度有一定的影响。特别是对于开环模式识别装配系统，影响最大。

关于视觉系统的像素当量标定，很少看到相关文献较为深入的介绍。结合本文的研究工作和前期的实验探索。总体来说，视觉系统的像素当量标定主要分为以下几类：

（1）纯手工的标定

纯手工的标定方法，一般需要在成像区域放置尺寸可知的参照物体。参照物体可以是平整刻度尺（可采用激光打印）、量块、平整金属块、平整塑料块等。对于后三种标定物体，要求参照物的边框能够成像在图像视野内。采用刻度尺相对方便许多，通过读取刻度线得到实际物体尺寸。电脑显示屏的像素坐标可以通过一把或者多把像素尺寸量测得知，像素尺子可以是专门的插件也可以是自编制的软件。从而，每像素的尺寸为：物理尺寸/像素尺寸（单位应规范统一）。图 4.5 所示为像素尺子外观。

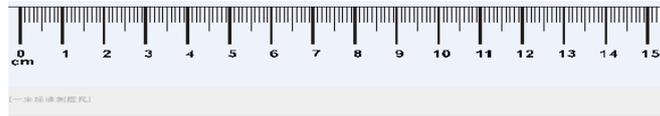


图 4.5 像素尺子

（2）图像处理标定

图像处理标定法，替代了操作者采用像素尺子读取显示器像素值的过程。对于图像处理标定，一样需要标定物体作为参照。有所区别的地方是，图像处理对标定参考物的要求，与纯手工标定方法具有相同要求。另外，尽可能做到标定参考物清洁、成像对比度高、便于算法提取、图像背景单一（纯黑色背景首先）。必须指出的是，量块、平整金属块、平整塑料块都不是最佳的标定参考物。打印的刻度尺，在金属背景下对比度不佳、算法较为复杂、精度不高，不适合做参考物体。综合考虑图 4.3(c) 和 (d) 所示的相机标定板是最佳标定参考物，由于黑实心圆抗干扰性强于黑色方格，这里初步选择图 4.3(d) 作为标定参考物。标定板上黑实心圆之间的距离是可知的，通过多次提取单张采集图片，分别算出距离最大的亚

像素圆心距，求取平均值得出视觉系统的像素当量。图 4.6 所示为测量示意图，其中图(a)为相机标定板测量图，图(b)为改进后的比例尺标定测量图。

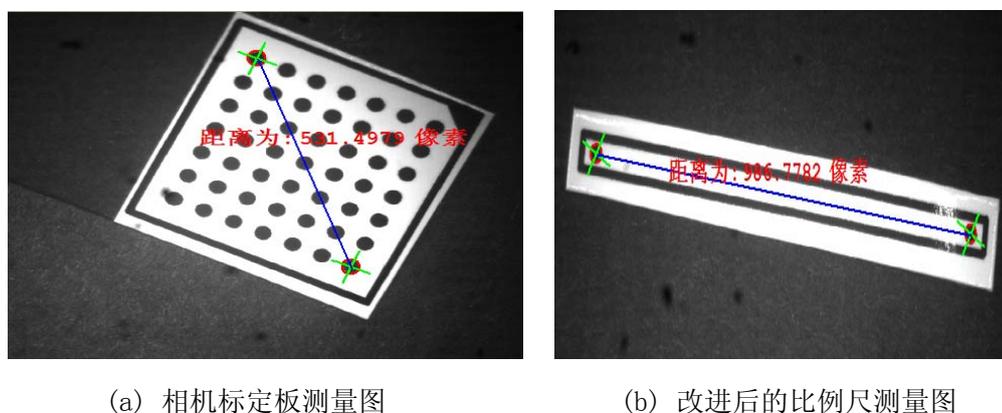


图 4.6 图像测量示意图

(3) 主动视觉的标定

基于主动视觉的像素当量标定方法，未见相关的文献和报道。这里提出了基于主动视觉的像素当量标定方法，补充主动视觉相机标定方法。在工业相机内外参数已标定的情况下，首先保证图像坐标系与机械运动系统(电控位移台)任意一轴平行，同时标定物始终处于视角范围内。依靠机械系统做可知的纯平移或者旋转运动，通过获取两次平面标定板的固定参考特征点像素坐标，即可快速求出视觉系统像素当量。求取像素坐标的方法主要有以下 2 种：①，通过视频流跟踪固定参考特征(如黑实心的圆心)，从而算出相同特征在不同时刻的像素值；②，分别提取初始时刻和末了时刻的图片，计算两张图片参考特征的亚像素坐标，像素坐标的差值即为运动的像素距离；③，采用图像融合技术将初始时刻和末了时刻的图片合并一体，通过亚像素轮廓定位，计算出亚像素圆心距，进而得出视觉系统像素当量。

(4) 人工智能标定方法

人工智能视觉系统像素当量标定方法，是一种全新的理论，至今为止未见报道。基于人工智能的标定方法，将神经网络、遗传算法、“最短路径”算法应用到视觉系统标定中，要求机械系统提供可知的移动或者旋转运动。主要原理是给系统一个足够小的初始像素当量，每次给系统一个多么小的等比增量 ΔX ，通过 1,2,3,..., N 次的尝试后，各次的像素当量分别为 $X_0, X_1, X_2, \dots, X_N$ (其中

$X_0 = \Delta X$), 最终一定可以找到一个合适的数值 X_N , 将比例 X_N 作为系统的放大倍数。其基本算法可表达为:

$$\begin{aligned}
 X_1 &= \Delta X + X_0 && 1 \text{ step} \\
 X_2 &= \Delta X + X_1 && 2 \text{ step} \\
 X_3 &= \Delta X + X_2 && 3 \text{ step} \\
 &\vdots && \\
 X_{N-1} &= \Delta X + X_{N-2} && N-1 \text{ step} \\
 X_N &= \Delta X + X_{N-1} && N \text{ step}
 \end{aligned} \tag{4-11}$$

尝试无数次的计算像素当量, 在实际的机器视觉应用中是不可行的, 更不可能这样做。为此, 需要解决的问题是: 如何快速找到一个最少的次数(即“最短路径”)的问题, 神经网络、遗传算法和最短路径算法对该方法有很好的理论支持。但神经网络和数据挖掘理论难度高, 加上作者对于该理论领域没有深入研究, 这里暂时不能给出完整的数学推导过程。该标定方法的缺点是, 算法计算量大, 对操作系统的开销大, 同时需要机械系统提供可知的运动; 优点是, 无需任何标定物, 几乎可用于机器人领域的各种场合, 应用潜力巨大。

上述四种方法, 手工标定方法简单、方便、快捷, 但精度较低; 图像处理标定方法, 标定过程较为复杂, 精度很高; 主动视觉的标定方法, 标定精度很高, 需要依靠机械系统提供可知的特殊运动, 不适用某些特殊场合, 但该方法自动化程度高, 特别适合搬运、装配机器人, 有一定的应用前景; 人工智能标定方法, 自动化程度最高, 标定精度很高, 应用面很广, 但需要较好的硬件配置和深入的理论研究。

在视觉系统像素当量的标定过程中, 物距的大小会影响视觉系统的放大倍数, 物距不同则放大倍数就不同。一般来讲, 标定板没有经过特殊加工, 其厚度不等于零件厚度, 因此, 当两者厚度相差较大时, 像素当量的标定会出现较大误差。在此, 这里对板厚带来的误差进行分析。

在视觉系统标定中, 标定板与镜头之间的物距, 零件和镜头之间的物距。两个物距之间相差一个厚度差 h 。如图 4.7 所示为一个假想的针孔成像模型, 图(a)为标定板比零件厚 h , 图(b)为零件比标定板厚 h , 其中 O 点为光心, 虚线代表标定板所处的视觉宽度, f 为物距, M 表示物体的长度, 零件的厚度为 t_1 , 标定板的厚度为 t_2 , ω 为光线与物体的夹角, Ω 为尺寸误差, $h = |t_1 - t_2|$ 。

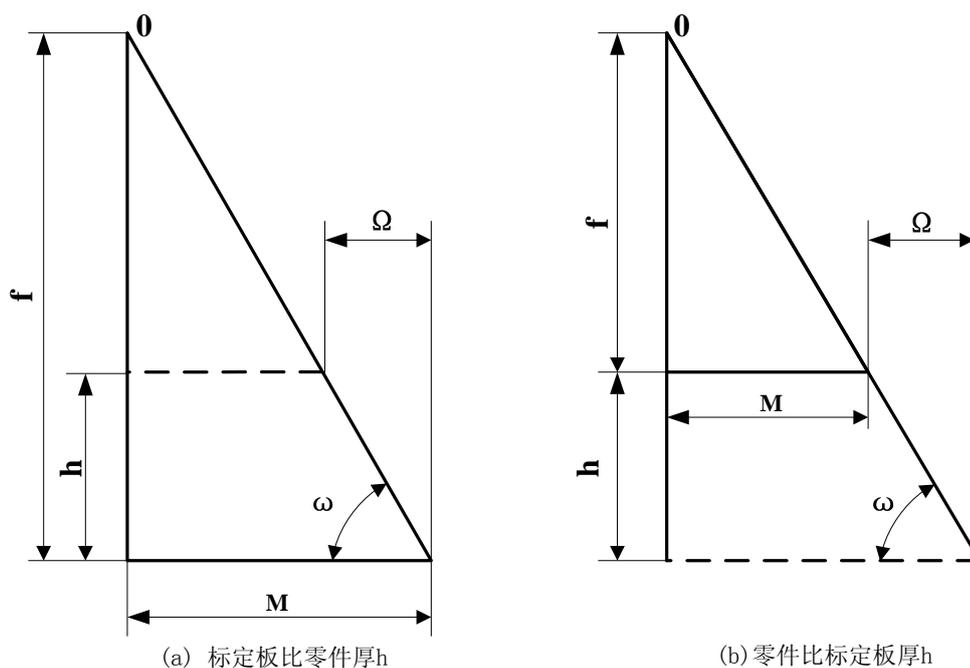


图 4.7 针孔成像模型

由图 4.7 几何关系，可知：

$$\cot \omega = \frac{M}{f} \Rightarrow \omega = \text{arc cot}\left(\frac{M}{f}\right) \quad (4-12)$$

$$\Omega = h \times \cot \omega \Rightarrow h \times \cot\left[\text{arc cot}\left(\frac{M}{f}\right)\right] = \frac{hM}{f} \quad (4-13)$$

因为 Ω 为 1/2 物体长度误差，于是边长总误差为：

$$\Delta = 2 \times \Omega = \frac{2hM}{f} \quad (4-14)$$

由式(4-14)可知，当厚度差 h 和零件尺寸 M 不变的情况下，物距 f 变大，标定误差 Δ 减小。在实际的视觉系统中，成像模型无法满足针孔模型。其模型如图 4.8 所示，图示参数意义与图 4.7 相同。

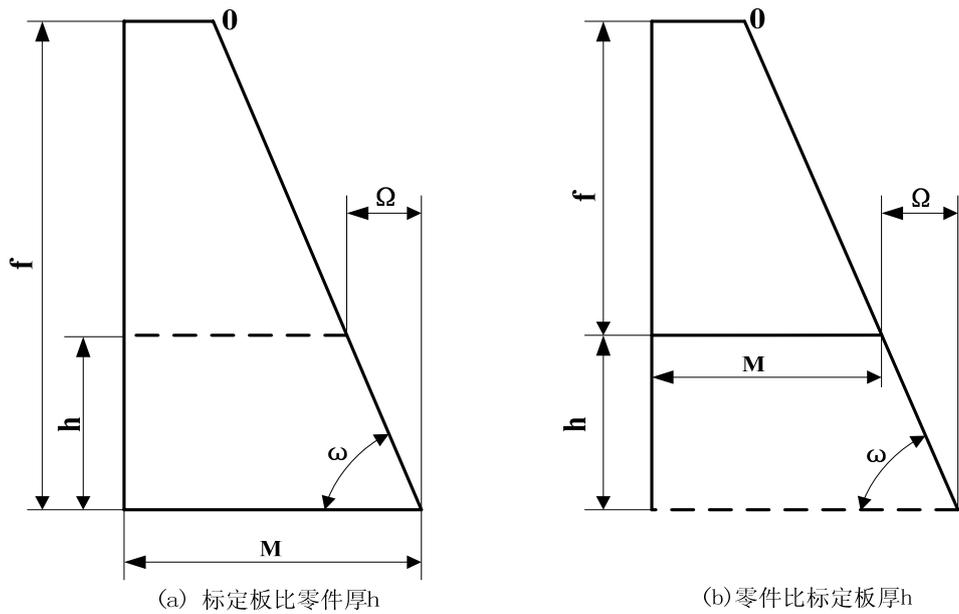


图 4.8 视觉成像模型

根据图 4.8 几何关系，可知：

$$\cot \omega = \frac{m}{f} \Rightarrow \omega = \arccot\left(\frac{m}{f}\right) \quad (4-15)$$

$$\Omega = h \times \cot \omega \Rightarrow h \times \cot\left[\arccot\left(\frac{m}{f}\right)\right] = \frac{hm}{f} \quad (4-16)$$

$$\bar{\Delta} = 2 \times \Omega = \frac{2hm}{f} \quad (4-17)$$

又因为 $m < M$ ，所以得到

$$\bar{\Delta} = \frac{2hm}{f} < \Delta = \frac{2hM}{f} \quad (4-18)$$

为了估算精度，设物距 $f=15\text{cm}=150000\ \mu\text{m}$ ， $t_1=0.3\text{mm}$ ， $t_2=0.4\text{mm}$ ，则 $h=0.1\text{mm}=100\ \mu\text{m}$ 。对于针孔成像模型有：

①装配零件最大尺寸为 10mm 时， $M=5\text{mm}=5000\ \mu\text{m}$ 。

得到，
$$\Delta = \frac{2hM}{f} = \frac{2 \times 100 \times 5000}{150000} = 6.67\ \mu\text{m}。$$

②装配零件最小尺寸为 0.5mm 时， $M=0.25\text{mm}=250\ \mu\text{m}$ 。

得到，
$$\Delta = \frac{2hM}{f} = \frac{2 \times 100 \times 250}{150000} = 0.33\ \mu\text{m}。$$

得到 $6.67 \mu\text{m}/10000 \mu\text{m}=0.667\%$ ， $0.33 \mu\text{m}/500 \mu\text{m}=0.660\%$ 。由式(4-18)可知，像素当量标定误差小于零件尺寸的 0.667% 。因而误差很小，可以忽略不计。需要指出的是，厚度误差除人工智能标定方法外，其他方法均有可能存在。若误差较大的情况下，可采用补偿机制。

4.4 标定实验及结果分析

4.4.1 工业相机的标定

工业相机的标定，目的是为了提_高机器视觉的测量精度。经过标定后的工业相机，可以达到亚像素精度。基于本文采用的是面阵式工业相机，像元尺寸为 $5.2 \mu\text{m}$ ，最大分辨率为 1280×1024 像素。这里采用实心圆棋盘阵列式标定板，现场采集20张图片，如图4.9所示。

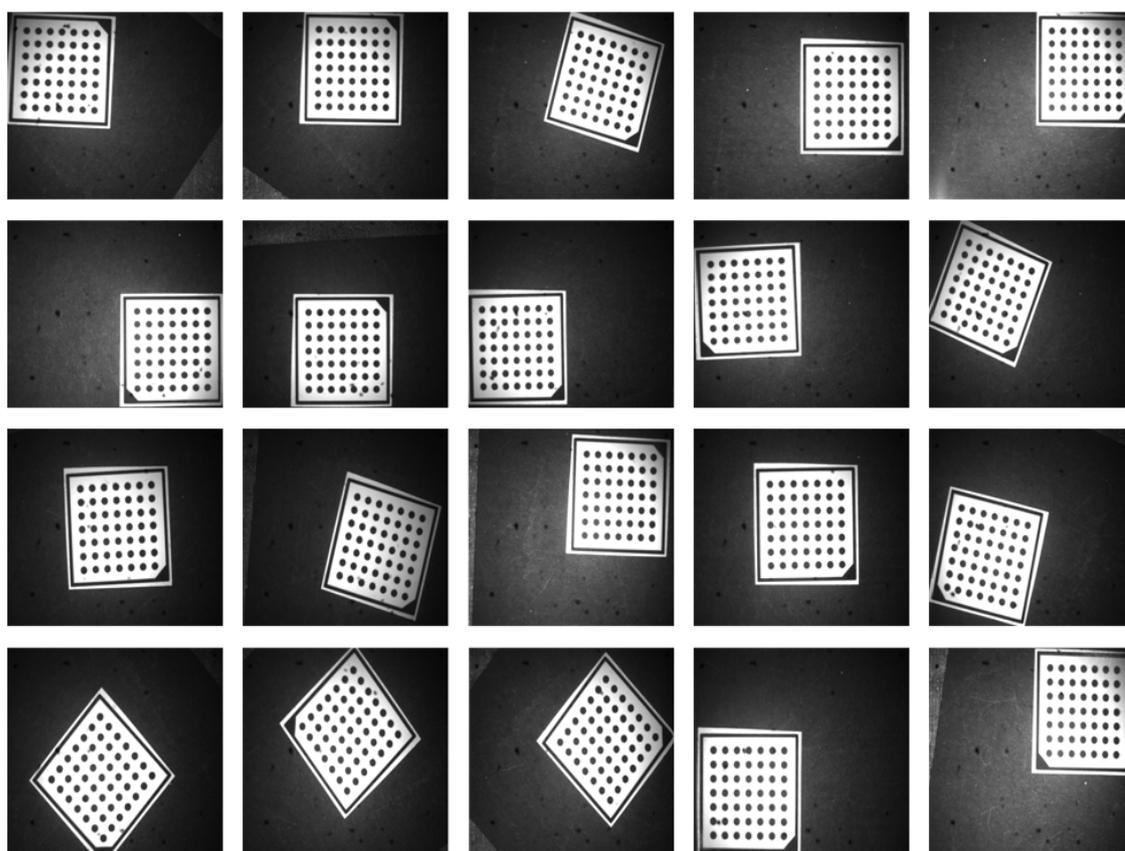


图 4.9 20 张不同位姿的标定图片

相机的标定及标定板的制作应注意几个问题：① 标定板尺寸最少应为图像幅面的20%，最好能超过25%；② 由于图像在角落的变形最大，在标定过程中要使得标定板能覆盖图像幅面的4个角落；③ 现场采集的图像质量不宜过曝光，否则

容易导致特征点提取无效，从而造成标定失败；④ 有条件的情况下，尽可能采用均衡光源，如垂直拍照物体时尽量采用条形光源(本文采用的是环形光源)，将条形光源布置于拍照台面四周；⑤ 标定过程中，采集的每张图片应使得标定板有不同的朝向和位姿；⑥ 标定板应该保证干净、平整(即平面度高)；⑦ 标定过程中，采集的图片不能小于10张，图片张数越多，标定精度越准确；⑧ 标定过程中采用的计量单位应规范统一，例如pixel、 μm 、mm、m等；⑨ 需要保证标定板和背景具有较好的对比度，推荐使用纯黑色背景(纯暗色的背景亦可)；⑩ 若需很高的标定精度，可向相关企业购买或定做非标准尺寸(标准尺寸价格为500~2000元不等，定做的标定板价格为1000~5000元不等)，对于自制的标定板应使用纸质韧性好，不易变形的纸张，可采用高级相纸打印。标定板对于其他因素也有一定的要求，如灰度值、基板等要求，一般情况下较容易满足，在此不予过多的分析。图4.10所示为工业相机的标定流程。



图4.10 相机的标定流程

采用上述的标定方法，通过提取 20 张图片，标定板处于不同的朝向和位姿。其中，表 4.1 所示为工业相机的内方位实验测量参数，表 4.2 所示为相机的外方位实验测量参数。

表 4.1 相机的内方位参数

图片张数	$S_x / \mu\text{m}$	$S_y / \mu\text{m}$	f / mm	$K / 1 / \text{m}^2$	C_x / pixel	C_y / pixel	平均误差/pixel
20	5.18854	5.2	97.5053	-770.859	583.777	596.471	0.210664

从表 4.1 中的数据 $K=-770.859$ ，可知镜头的变形为桶形畸变。若 $K>0$ ，则表示为枕形畸变。

表 4.2 相机的外方位参数

图片张数	t_x / mm	t_y / mm	t_z / mm	$\alpha / ^\circ$	$\beta / ^\circ$	γ / mm
20	6.94489	-5.77998	501.989	359.607	358.392	195.455

标定好的相机参数结果，可供后续工作的比例尺标定、亚像素定位、模板匹配使用。另外，对于本文采用的是相机垂直拍照零件的方案，当物距不变时(即Z轴的位移不改变)，相机内参数不变，由于相机在XY平面运动，因此，相机外参数

t_x 、 t_y 、 t_z 发生变化；当相机的物距改变时，相机的所有参数都需要重新标定。

4.4.2 像素当量的标定

视觉系统的像素当量标定，应在相机标定之后进行。本文采用的像素当量标定板为黑实心棋盘阵列式标定板的改进。为了保证比例尺具有较高的标定精度，现场采集 10 张图片，然后求取平均值作为视觉系统的像素当量。图 4.11 所示为本次实验采集的 10 张像素当量标定板图片。

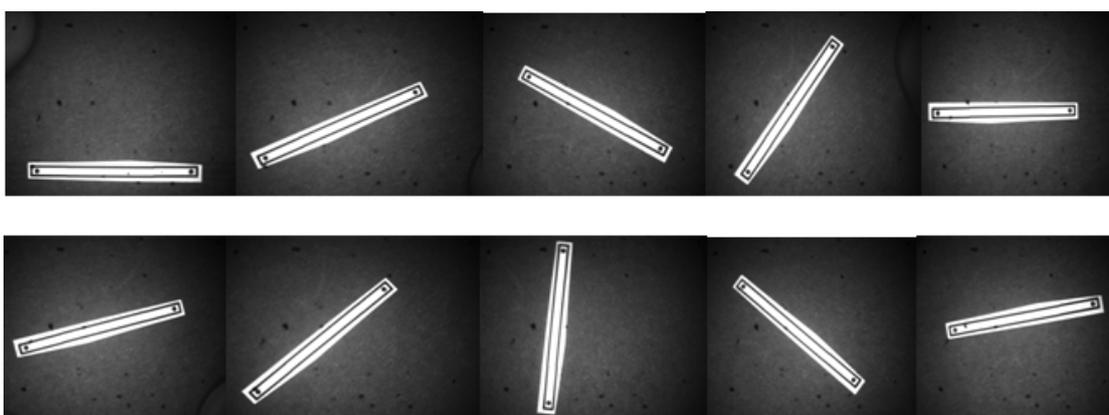


图 4.11 10 张比例尺采集图片

将采集的 10 张图片，通过全局阈值、腐蚀、膨胀、canny 亚像素边缘提取、曲线分割与拟合、圆心坐标排序(标签化)等算法。得到表 4.3 所示的像素当量测量数据。

表 4.3 像素当量标定参数

第几张图	像素距离 X (pixel)	误差 $ 856.76552 - X $
1	856.6505	0.11502
2	856.6964	0.06912
3	856.8688	0.10328
4	856.9312	0.16568
5	856.8613	0.09578
6	856.8211	0.05558
7	856.7417	0.02382
8	856.6609	0.10462
9	856.7180	0.04752
10	856.7053	0.06022
均值	856.76552	0.084064

为了更好的观察统计数据，将表 4.3 绘制为数据曲线。其中横坐标表示所采集的第几张图片，纵坐标表示像素距离相对于像素距平均值的绝对误差。如图 4.12

所示为像素当量平均误差曲线。

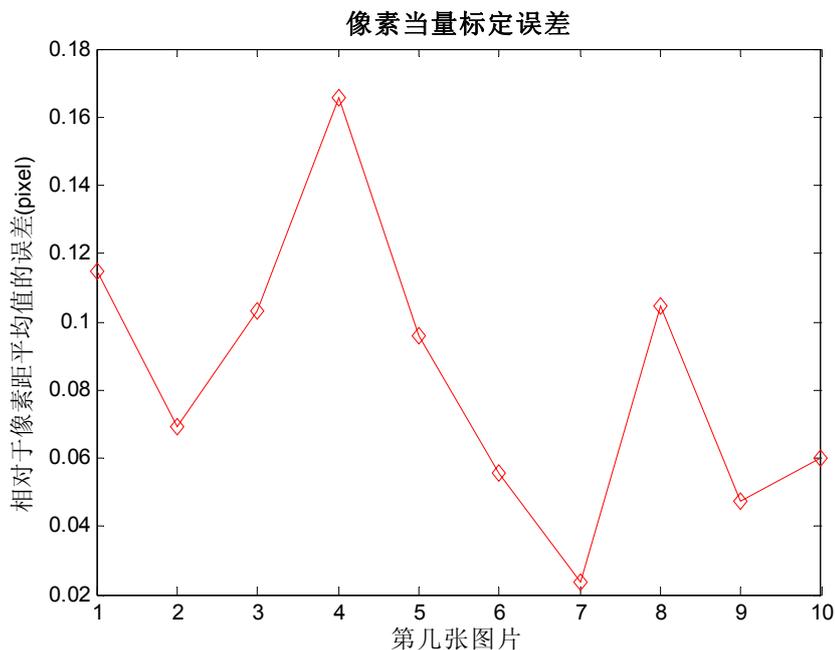


图 4.12 像素当量平均误差曲线

由表 4.3 和图 4.12 可知，像素当量的最大绝对误差出现在第 4 张图片，误差为 0.16568 pixel；最小绝对误差出现在第 7 张图片，误差为 0.02382 pixel；平均误差为 0.084064 pixel。因而，像素当量的综合误差应 <0.17 pixel。相当于算法提取的误差 0.02 pixel 的 8.5 倍。出现此误差的主要原因为：① 打印的标定板精度不高；② 标定板平行度不高，在标定过程中出现翘起(即标定板平面与工作台没有很好的平行贴合)。

4.5 本章小结

本章主要介绍了相机的标定原理、坐标转换及常用视觉坐标系。对相机的标定误差源和标定参考物做了简要介绍，系统的归纳、分析了常用的相机标定算法。对机器视觉系统像素当量的标定，进行深入的分析。提出了基于主动视觉和人工智能的像素当量标定方法，给出了像素当量标定误差的算法。通过相机标定和像素当量的标定，确定了工业相机的内外参数和视觉系统像素当量，对后期装配的进行与提高微小件的装配精度，具有深远的意义。

第 5 章 微小件的位姿识别与方法

5.1 数字图像处理概述

数字图像处理始于上世纪 50 年代，并于 10 年后成为一门独立学科。数字图像处理技术的发展及应用，不可同日而语，在各行业中发挥着重要作用。数字图像处理技术在工业自动化、机器人、微电子组装等行业的使用处于领先地位，为深入分析数字图像在微小件装配中的应用，这里介绍了图像处理的数据类型、颜色空间及基本算法。如图 5.1 所示为数字图像的基本应用。

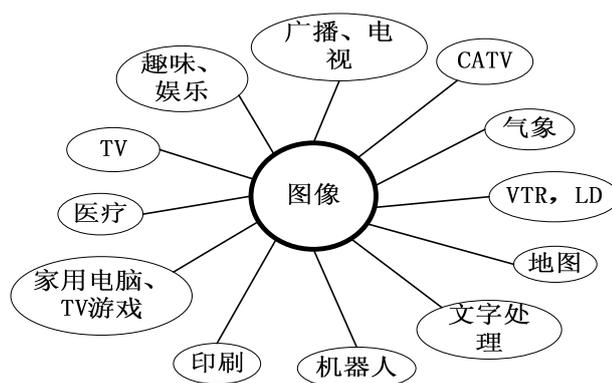


图 5.1 数字图像的应用

5.1.1 图像的数据类型

图像的基本数据类型主要有 4 种^[71-74]：二值图像、16 色图像、256 色图像、真彩色图像。分类依据主要是按计算机存储的原理来分，相对比较抽象，可以通过显示器的显示效果感受各种数据的区别。

(1) 二值图像

二值图像的像素值只由 0 和 1 组成，其中 0 表示纯黑色，1 表示纯白色。通常由 1 个二进制位在计算机上存储。其数据存储量小，有利于简化算法，提高计算机处理速度。二值图像在机器视觉检测中，应用广泛，主要用于轮廓提取、形状匹配等算法中^[75]。

(2) 16 色图像

16 色图像的像素值取值范围为 0~15。0~15 表示调色板中 16 种颜色的索引值，而不代表 16 种颜色。通常由 4 个二进制位在计算机上存储。由于只有 16 种颜色，常常处于一种尴尬状态，要表达完整的颜色信息又不如 256 色图像全面，要简化图形信息、提高算法效率又不如二值图像。应用场合很少，只在图标等少数场合有用到。

(3) 256 色图像^[71-74]

256 色图像的像素值取值范围为 0~255。0~255 表示调色板中 256 种颜色的索引值。通常由 8 个二进制位在计算机上存储。颜色信息较 16 位图像丰富许多，可以满足许多场合的使用需求。在机器视觉应用中常提到 256 灰度图像，256 灰度图像是特殊的 256 色图像。像素值的 0~255 代表灰度情况（注意：人对灰度的分辨能力一般为 20~60 级），0 表示全黑色，255 表示全白色，0 到 255 的变化表示由黑色到白色的过渡。256 灰度图像较 256 色图像少了颜色信息，在机器人视觉检测中应用广泛。常用于表面缺陷检测，如刮痕、裂缝、磨损等场合^[75]。由于灰度图像对光照的稳定性和均衡性较高，这是灰度图像在机器视觉检测中表现不足之处。

(4) 真彩色图像^[71-74]

真彩色图像没有调色板，其像素值直接表示具体颜色。通常真彩色图像的每个像素值由三个字节组成，分别表示 R、G、B 三个量的亮度值。组合在一起可以表示 $256 \times 256 \times 256 = 16777216$ 种颜色。真彩色表达的颜色范围远超过人所能分别的数量，由真彩色表示的数字图像在人的眼中，几乎和外界事物一样。因此，人们称其为真彩色图像。真彩色图像在医学检测、食品、纺织、家具、3D 检测中应用广泛^[74-75]。表 5.1 所示，为图像文件的基本类型及参数。

表 5.1 图像文件类型及参数^[71]

位数	1			4			8			24		
类型	黑白二值			16 色彩色			256 灰度			256 彩色		
位平面	1	1	1	1	4	1	1	1	1	1	1	3
	bw	wb	pal	pal	pal	bw	wb	pal	rgb	bgr	rgb	
bmp			*	*					*			*
tga						*			*			*
gif			*	*					*			
pcx			*		*				*			*
tif	*	*		*		*	*		*	*		

5.1.2 图像的颜色空间

图像的颜色空间主要分为 7 类^[71-74]：RGB 颜色空间、YUV 颜色空间、YIQ 颜色空间、HSV 颜色空间、HSI 颜色空间、GMY 颜色空间、Lab 颜色模型。主要为解决各行业内部、行业之间的应用，而统一制定的图像编码方法。

(1) RGB 颜色空间^[71-74]

RGB 颜色模式是工业界最基本颜色标准。其中 R-代表红 (Red)、G-代表绿 (Green)、B-代表蓝 (Blue)，每种颜色的亮度取值为 0~255。通过对 R、G、B 三个颜色通道的叠加组合，可以得到 $256 \times 256 \times 256 = 16777216$ 种颜色。几乎可以表达地球上任何一种颜色。

(2) YUV 颜色空间也称 $YCbCr$ 颜色模型^[71-74]

YUV 是欧洲电视系统采用的颜色编码方法。其中，Y、U、V 与英文缩写无关，Y 代表亮度，U、V 代表色差，表示蓝色分量和红色分量。YUV 颜色空间数据可用双精度表示，但存储时为 8 位无符号整型数据。Y 的取值范围是 16~235，而 U、V 的取值范围为 16~240。通用的 JPEG 图像压缩算法中，首先将图像颜色空间转换为 YUV 空间，再将 YUV 转换为 RGB，输入/输出均是 8 位无符号整型。其优点是亮度信号 Y 与色度信号 U、V 分离。没有 U、V 信号，只有 Y 信号则表示为黑白图像。欧洲各国采用的 YUV 颜色空间，正是为了满足彩色电视和黑白电视的兼容性采用的标准。

(3) YIQ 颜色空间也称 NTSC 颜色空间^[71-74]

YIQ 颜色模型是美国的电视系统编码方法。YIQ 编码方法与 YUV 类似。YIQ 颜色空间中，Y 为亮度（即灰度）、I 为色调、Q 为饱和度。I 和 Q 用于表示颜色信息。

(4) HSV 颜色空间也称 HSB 颜色空间^[71-74]

HSV 颜色空间是面向用户，艺术家们常用的颜色模式，是一种复合主观感觉的色彩空间。H、S、V 分别指的是色调(彩) (hue)（也称色相）、色饱和度(saturation)和明度(value)。

(5) HSI 颜色空间也称 HSL 或 HLS 颜色空间^[71-74]

HSI 颜色空间是美国色彩学家 H. A. Munseu (孟塞尔) 于 1915 年提出的。以色调/饱和度/强度三种基本特征量来感知颜色，常把色调与饱和度统称为色度，是

从人类的色视觉特性提出的。色调—Hue 表示颜色，其与光的波长有关，并用角度值表示。如红为 0° 、黄为 60° 、绿为 120° 、青为 180° 、蓝为 240° 、洋红为 300° 。饱和度—Saturation，表示光中掺杂白光的程度。采用百分数表示，白光越多饱和度越低，反之越高。强度—Intensity(也叫亮度、密度、灰度)，表示人眼感受到光的颜色强弱程度，与彩色光的能量大小有关。一般来说，人类视觉对亮度的觉察能力远强于对颜色浓淡的觉察力。

(6) GMY 颜色空间^[71-74]

GYM 彩色空间将物体分为发光和不发光物体，分别又称有源和无源物体。彩电与彩色显示器被认为是有源物体，由 RGB 颜色空间表示。GYM 主要是为满足印刷出版制定的标准，在彩色出版时，纸张属于无源物体。通过打印在纸张上的各种油墨能吸收各种特定光波，反射产生各种各样的彩印制品。油墨与颜料采用的是 CMY 颜色空间中青/洋红/黄三个基本色。印刷中油墨和颜料用得越多，颜色越黑(或越暗)，因而将 CMY 称为三减色，而 RGB 称为三加色。理论上讲，等量的 CMY 可以合成黑色，但实际上纯黑色是很难合成出来的，所以彩色印刷机和彩色打印机要提供专门的黑色油墨，被人们称为四色印刷，四色印刷的彩色模型为 CMYK 模型。

(7) Lab 颜色模型^[71-74]

Lab 颜色模型是 CIE(国际照明委员会)制定的编码方法。其与设备无关，弥补了 RGB 和 CMYK 颜色模型依赖设备设置颜色的不足；Lab 颜色空间几乎可以表达自然界的各种颜色。

5.1.3 图像处理的基本算法

图像处理是微小件模式识别装配的基础阶段，图像处理的可行性及处理精度，决定了识别装配的功能实现和定位精度。在机器视觉界，机器视觉又称为计算机视觉。然而，机器视觉、图像处理以及模式识别之间，没有明确的分界线。人们常说的图像预处理，其包含了各种基本算法，如二值化、噪声处理、图像增强、几何变换、阈值处理、形态学等算法，其概念较为含糊目前尚无定论，只要能自圆其说即可。本质上讲图像预处理是初级视觉的应用，而零件的识别则是高级视觉的应用。图 5.2 所示为机器视觉的一般流程。

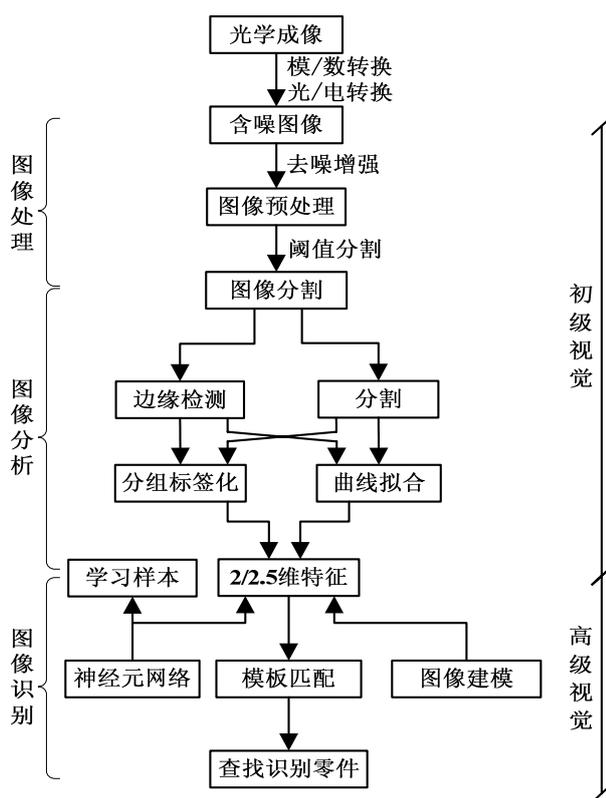


图 5.2 机器视觉的构建过程

图像处理的范围很广，算法也很多，很难通过某本专著或论文集，囊括所有的算法。基于本课题的主要任务是，采用机器视觉识别方法，实现微小零件的装配。图像处理算法按照功能分类，大体可以分为图像去噪增强算法、图像形态学算法、图像几何变换算法、图像分割与特征提取算法等 4 大类。前三种图像处理算法，输入与输出均为图像；最后一种算法是输入为图像，输出为区域、轮廓或特征量。

(1) 图像去噪增强算法

光学成像设备，经历了光/电转换、模/数转换等过程，最终将外界连续变化的信号转换为离散数字信号存储于计算机中。此时，得到的数字图像并非完美无缺。外界环境的光源、粉尘、抖动、振动、冲击、电源等因素，均会使得数字图像或多或少的存在噪声。图像去噪就是为了减少或消除某些影响功能实现的因素；而图像的增强是为了强化有用信息，弱化无用信息。

图像增强更像一个滤波器，滤除无用信息，保留并强化有用信息。需要注意的是，图像增强和去噪是相辅相成，较少的单纯使用去噪或增强算法，通常是增强和去噪同时进行，增强中有去噪，去噪中也有增强。图像增强算法可以分为空

间域和频率域两种算法。空间域算法主要将图像看二维矩形区域上的密集点，其支撑数学理论为矩阵数学；频率域算法是将数字图像看成二维信号，如将图像信息采用傅里叶变换、小波变换等表示，此时函数涉及到周期、频率、相位等基本概念，其支撑数学理论为复变函数和微积分。数字图像的压缩常常也是在频率域进行的。

空间域的图像增强算法主要有^[72-74]：高斯噪声、椒盐噪声、领域平均法(平滑)、中值平均法(平滑)、梯度锐化、掩模平滑、拉普拉斯变换等算法。频率域的图像增强算法主要有^[72-74]：小波变换、傅里叶变换、理想低通/高通滤波、巴特沃斯低通/高通滤波滤波。

(2) 图像形态学算法

图像形态学主要用于从图像中提取对表达和描绘区域形状用的图像分量。在图像分割结果中经常包含不想要的干扰信息，有用信息已经被干扰了。为此形态学是为调整分割后区域的形状以获取想要的信息。形态学的数学理论是集合论，通过布尔运算完成处理过程。常见的运算有并集、交集、差集、补集、平移、转置等，这些运算是腐蚀、膨胀、开/闭等处理算子的本质。图像形态学一般只能对二值图像和灰度图像进行处理。如要对彩色图像处理，就必须将彩色图像转换为二值图像或灰度图像。如图 5.3 所示为基本的集合计算。

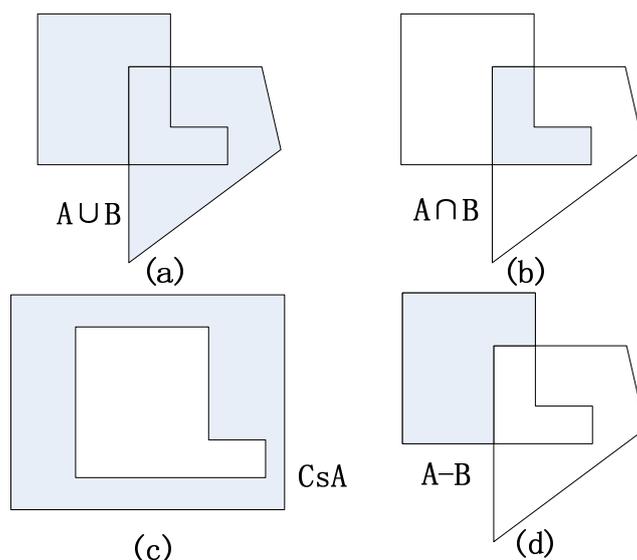


图 5.3 (a)集合 A 与集合 B 的并集；(b)集合 A 与集合 B 的交集；

(c)集合 A 在集合 S 的补集；(d)集合 A 与集合 B 的差集；

(3) 图像几何变换算法

在微小件的装配过程中，无法保证每个装配零件都处于相同的位置和姿态。为了实现检测对象的调准，需要进行平移、旋转、缩放、仿射变换等处理。例如，在进行模板匹配过程中，制作的零件模板其位置和姿态不变的，而装配的零件对象位置和姿态是随机的。当采集的模板图像与装配零件不同物距时，模板零件只有进行平移、旋转、缩放操作，才能和装配零件匹配成功。再者，工业相机的标定过程中需要确定相机在世界坐标的位姿，此时还需要进行仿射变换。仿射变换可以用如下公式表达^[72]：

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix}^T \bullet M = \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & 0 \\ m_{21} & m_{22} & 0 \\ m_{31} & m_{32} & 1 \end{bmatrix} \quad (5-1)$$

其中 (u, v) 为图像坐标系， M 为变换矩阵。该变化只要给 M 不同的取值，即可完成平移、旋转、缩放、剪切等操作。表 5.2 所示为 M 矩阵的取值情况。

5.2 仿射变换的类型

变换类型	仿射矩阵 M	坐标方程	说明
平移	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \delta_x & \delta_y & 1 \end{bmatrix}$	$x = u + \delta_x$ $y = v + \delta_y$	x 轴平移 δ_x ， y 轴平移 δ_y
旋转	$\begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$x = u \cos \theta - v \sin \theta$ $y = u \sin \theta + v \cos \theta$	整张图片旋转 θ 角
缩放	$\begin{bmatrix} s_x & 0 & 0 \\ 0 & s_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$x = s_x u$ $y = s_y v$	x 轴放大 s_x 倍， y 轴放大 s_y 倍
水平剪切	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \alpha & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$x = u + \alpha v$ $y = v$	x 剪切 α 量
垂直剪切	$\begin{bmatrix} 1 & \beta & 0 \\ \alpha & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$x = u$ $y = \beta u + v$	y 剪切 β 量

(4) 图像分割与特征提取算法

图像分割算法是以图像作为输入，返回一个或多个区域或轮廓作为输出，这

些区域或轮廓可以是像素级或者亚像素级的精度^[76]。图像分割是模式识别最重要的图像分析技术之一，它是将图像中具有特殊意义的感兴趣的区域划分开来，这些区域互不相交，每个区域满足不连续性（即灰度值）、相似性（如设置阈值）、纹理、颜色等属性准则^[74]。图像的不连续性分割是基于图像灰度亮度的突变（点、线、边缘等）来分割图像的，如针对图像的边缘有边缘提取、边界跟踪等算法。图像相似性分割是基于事先制定的准则将图像分割为相似区域，如阈值分割、区域生长等算法。

区域和轮廓是对分割结果的原始描述，当感兴趣的区域已被分割就应该停止再分割，分割后的区域可作为后期目标特征的提取。从区域或轮廓中提取一个或多个特征量进行测量，这些特征量称为特征，通常为实数^[76]。确定特征的过程称为特征提取。区域特征是能够从区域自身提取出来的特征^[76]，最基本的区域是指一个面域，由若干点或线或轮廓等元素围成的封闭领域。区域的轮廓长度即可认为是周长。而灰度值特征是根据区域内的灰度值来提取的^[76]。再者，轮廓特征是基于轮廓坐标^[76]。图像因被噪声所污染，有时图像上的边缘并不对应实际的物体边缘，边缘是不同的局部区域之间的分界线，而线是距离很小的一对边缘组成的^[42]。因此，线特征提取算法也称为边缘提取算法，有些文献把边缘提取算法称为边缘检测算法。总之，特征可以认为是点、线、面、边缘、轮廓等图像元素。

图像分割的算法和分类非常很多，具不完全统计至少一千种以上，几乎每年都有新的算法产生。有些算法可直接用于多数图像，一些则只用于特殊类别的图像，应具体情况具体分析。因而，没有一种适合所有图像的通用分割算法。对边缘和点的提取是图像处理的重点工作，下面介绍一些经典的边缘提取和点提取算法。

边缘是指图像局部亮度变化最显著的部分，主要存在于目标与目标、目标与背景、区域与区域之间，是图像提取纹理特征和形状特征的重要基础。经典的边缘提取算法大多是根据图像信噪比，利用边缘法向灰度变化明显的梯度极值特性，求取边缘提取的最优滤波器。经典的算法有^[42]Marr 和 Hildreth 提出的高斯-拉普拉斯算子（LOG 算子）、Canny 提出的 Canny 算子、Haralick 提出的局部曲面最小二乘拟合法，另外还有 Prewitt 算子、Roberts 算子、Sobel 算子、Laplace 算子、Kirsch 算子和 Hough 变换。其中 Canny 算子、LOG 算子和 Hough 变换能达到较好

的亚像素精度，其他算法一般为像素级精度的一阶微分算子。

特征点是机器视觉和图像测量中重要的数据之一。提取局部一阶导数最大或者二阶导数过零点来作为边缘点。点特征主要指角点、交点、圆点等明显点。机器视觉常用的点特征提取算子有^[42]Forstner 算子、Harris 算子、Sojka 算子(亚像素精度)和 Moravec 算子。

图像一般以灰度等级的形式表现的，其特征是由于景物的物理和几何特性使图像中局部区域的灰度产生明显变化而形成的，是图像灰度曲面不连续点^[42]。一般来说，特征存在的地方也就意味着该区域中有较大的信息量。边缘提取方法既要提取出灰度的不连续性，又要确定它们的精确位置。为了抑制无关的细节和噪声，通常需要对图像进行某种平滑运算，然而这样又会导致定位精度的降低。

5.2 基于视觉的控制

基于视觉的控制系统类型和种类很多，下面主要从工业相机的数量、相机的放置位置、控制结构及反馈信息的差别四个方面进行论述。

(1) 根据工业相机的数量不同，视觉伺服控制可分为单目视觉、双目视觉和多目视觉伺服系统^[77-78]。

单目视觉无法直接获得目标的三维信息及有效焦距(即深度信息)，通过相机的平移或者旋转可得到深度信息，相机的标定较为简单，系统鲁棒性好。单目视觉适合以 2D 位姿识别操作为主的工作场合。多目视觉可以直接得到目标丰富的三维信息，适合于一次性多工位的三维姿态识别操作场合，但相机标定较为繁琐，视觉伺服控制相对复杂，系统的鲁棒性难以保证。双目视觉是介于单目和多目之间，克服了两者的缺点，其特点是可以获得目标的三维信息，同时具备相对较好的系统稳定性，应用范围广泛。

(2) 根据相机放置位置的不同，视觉伺服控制可分为手眼系统(即相机与机械系统相对静止，并随机械系统运动)和相机固定系统^[77]。

手眼系统一般情况下，相机与操作手的相对位置是不变的。根据操作手和相机是否平行，可将手眼系统分为末端开环系统(即 EOL 系统)与末端闭环系统(即 ECL 系统)两类^[79,84]：①末端开环系统，无法实时观察到操器末端，可以观测到目标对象。操作手的定位精度，依赖于事先标定好的操作手与相机的相对位置精度，该系统较难实现闭环控制。②末端闭环系统，可以同时实时观察到操作手和目标对

象，操作手与相机的相对姿态的标定较难，同时，需要在硬件布置时恰到好处的计算好手眼夹角。该系统可以实现闭环控制，有较好的应用前景。固定放置的相机系统，可以观测到操作手和目标对象，由于视场大，很难得到准确的目标信息，同时机械系统在运动中可能出现遮挡现象。

(3)根据控制结构分类，视觉控制可分为开环与闭环控制^[80]。

开环控制系统，工业相机一次性获取目标对象的位姿信息，运动过程中出现的误差无法给予补偿。高精密应用场合，机械系统的精度要求较高，同时需要进行机械系统与相机的标定工作，该系统对操作系统的开销较小。闭环控制系统，工业相机用于目标对象的位姿获取和实时反馈，对操作系统的开销较大，系统实时性能较差。系统对相机和机械系统的标定误差能够给予一定的补偿。同时，运动过程中出现的误差也可以得到补偿。

(4)根据反馈信息的差别，视觉伺服分为基于位置(position-based , PBVS)的视觉伺服和基于图像(image-based , IBVS)的视觉伺服控制系统^[79]。

基于位置的伺服控制，依据输入的图象信息得到目标对象的位姿，由像素信息根据坐标转换关系将其转换为机械运动坐标，传递给操作手实施控制。伺服过程中，借助于提取的操作手图像位姿态信息与期望位姿进行比较，以机械运动坐标作为闭环反馈信息^[81]。如图 5.4 所示为控制流程。其优点是系统可以使用较多成熟的相关控制算法。该系统图像信息与与机操作手的控制是分开的，没有对图像信息直接控制，图像信息与操作手之间无互锁关系^[82-83]。因而，目标对象可能存在脱离相机视场而不被控制的风险。该系统的定位精度依赖于相机的标定精度、相机模型误差等因素。

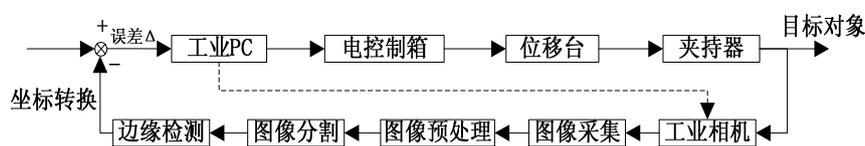


图5.4 基于位置的视觉伺服控制

基于图象伺服控制直接以图象特征作为反馈信息，伺服过程中将获取的图像特征与理想图像特征对比^[85]。如图 5.5 所示为控制流程。其优点是对相机标定误差与空间模型误差不敏感。缺点是^[77-80]：① 设计控制器困难，需要估计目标的深度信息；② 计算量大，需要实时计算图象特征变化量与运动机构位姿变化量之间的图象雅可比矩阵，并需计算逆矩阵进行位姿调整以获得期望图像；③ 跟踪过程

中，图像雅可比矩阵可能存在奇异值，相机位置可能收敛于局部最小点，而非理想值局部极小点；④ 构造的雅可比矩阵不具备平移和旋转的解耦性，因此系统鲁棒性和稳定性差。图像雅可比矩阵的计算是基于图像伺服控制的关键步骤，常见方法有^[77]：直接估计方法、深度估计方法、常数近似方法。直接估计方法在相机运动过程中直接估计数值解，不考虑图像雅可比。深度估计方法在每一个控制周期估计深度值，代入解析式求值，需要求出图像雅可比矩阵。该方法，计算量较大，但精度较高。常数近似方法是取理想图像特征下的图像雅可比矩阵，图像雅可比矩阵在整个视觉伺服过程中保持不变。该方法只能保证在目标位置的一个更小邻域内收敛。

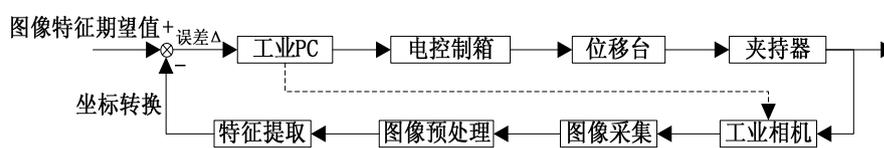


图5.5 基于图像的视觉伺服控制

为了改善基于图像和基于位置视觉伺服的性能，EMalis 提出了 2.5D 混合视觉伺服控制^[85]，如图 5.6 所示。混合伺服控制避免了图像雅可比矩阵的计算和深度信息的估计，可以设计解耦的控制律。混合视觉伺服控制的主要缺点是^[77-79]：① 需要在线实时计算图像间的单应性矩阵并对其分解，计算复杂且计算量大；② 伺服控制对图像噪声敏感。为了减少计算量，常采用线性最小二乘估计方法计算单应性矩阵。

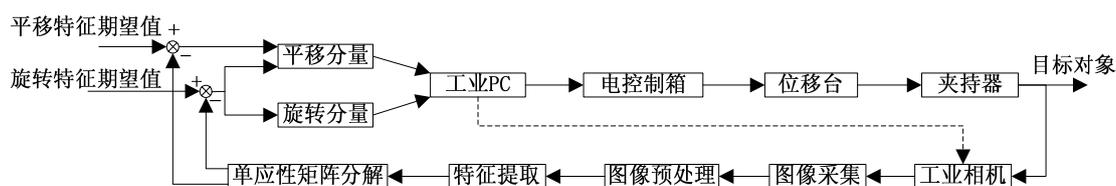


图5.6 混合视觉伺服控制

5.3 亚像素定位算法

机器视觉的大多数算法是基于像素级，若要提高机器视觉定位精度。有两种方法^[87]：①，提高成像系统分辨率；②，采用亚像素定位技术。提高成像系统的分辨率是最直接最有效的方法，然而通过提高硬件的分辨率改善测量精度，需要的投入成本是成倍增长的。为寻找有效方法，Hueckel 首次提出了亚像素技术^[88]。亚像素技术是为了满足视觉测量高于像素精度而采用的软件方法。例如，算法的

定位精度为 0.05 个像素，则相当于系统的定位精度是原系统定位精度为 1 像素的 20 倍。亚像素技术充分弥补硬件的不足，节省了硬件成本投入。因而受到广泛关注，成为机器视觉领域的研究热点。

亚像素定位技术应满足一定的特有条件，定位特征必须由一系列像素组成，无法对单个孤立的像素点采用亚像素定位。也就是说，定位特征应具有一定面积和灰度分布特性。定位特征分为^[50]几何特征、灰度分布特征、几何与灰度耦合特征。亚像素定位技术经历几十年的发展，应用越来越广泛。常见的亚像素算法主要有以下几类：

(1) 几何类方法，主要有^[89]灰度重心法与形心法。形心法一般借助图像中如圆、椭圆、矩形等规则特征，这些特征比较规则，容易从图像中提取相关信息。对于规则物体的亚像素定位，几何法很受欢迎。灰度重心法遵循形心法的基本规律，只是在图像边缘提取的过程中加权了灰度值，需要考虑图像的灰度变化，该方法对外界光源、抖动等因素要求较高。几何类方法，有一个明显的弱点，不适用于不规则图像特征。

(2) 矩估计方法，常见的算法有^[89]空间矩、灰度矩和 Zernike 正交矩^[90] (ZOM) 等。矩估计方法是使用最广泛应用最多的亚像素算法。矩估计方法是基于微分学，其抵抗噪声的能力强。其中空间矩可达 1/20 像素精度。

(3) 插值拟合法，主要有^[89]线性插值、多项式插值、样条插值。使用拟合法通常是目标的特性已知或假定其特性满足某种函数形式。通过对离散图像拟合为各种连续的函数形式，从而确定特征的相关信息。除了上述的亚像素算法，还有曲线拟合法、最小二乘估计法、匹配法、抖动技术等^[89]。

李自乐采用理想光条法^[87]分析了重心法、灰度矩法、插值法的定位与抗噪能力。在定位精度方面，重心法定位精度最高，灰度矩法次之，插值法误差最大。在算法抗噪能力方面，重心法的抗噪能力最好，灰度矩法次之，插值法抗噪能力最差。因此，对于规则图像特征的亚像素定位，尽可能采用重心法，少用插值法。对于不规则图像特征，常用矩估计方法。

亚像素边缘定位技术，通常需要经历边缘像素级初定位与亚像素细分定位两个阶段^[50]。边缘初定位，采用本文 5.1.3 节常规的像素级边缘定位算法得到像素级的精度；细分过程，从亚像素定位算法中选择合适的细分算法，最终结果返

回亚像素精度。具体来说，亚像素精度可以通过亚像素轮廓(边缘)提取与亚像素阈值分割获得。亚像素轮廓可以是封闭的也可以是开环的，多个开环的轮廓可以相交于一点，闭合的轮廓通常选择起点、终点、或其他特殊点来定位^[76]。图 5.7 所示为不同的亚像素轮廓。其中 1 轮廓是封闭的，2 为开环的单独轮廓，3、4、5 分别为开环轮廓并交于 p 点。

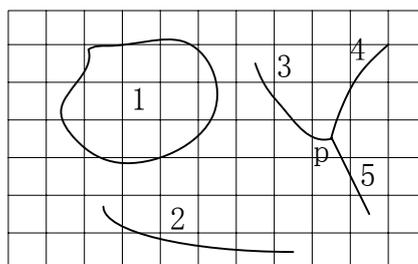


图 5.7 不同的亚像素轮廓

很显然，亚像素精度提取的结果不是一个区域，因为区域是像素精度。因此，亚像素精度轮廓是亚像素数据的表现形式。当两个相邻区域，一个区域阈值小于 $f(x, y)$ ，另一区域阈值大于 $f(x, y)$ ，则形成了轮廓。为了得到亚像素精度，通过插值等算法将数字化的离散轮廓表示为连续函数 $k(x, y)$ ，最后联立 $f(x, y)$ 和拟合函数 $k(x, y)$ 求解，即可得到亚像素精度。基于文本采用的 halcon 视觉算法库，定位精度一般可达 1/20 像素(其中， $2.3 \sim 10 \mu\text{m}/\text{pixel}$)，更好的能达到 1/50 像素。

5.4 模板匹配算法

前面的章节介绍了多种图像处理算法，将各种算法组合一起就可以实现零件特征位姿的搜索定位。理论上讲，使用各种技术就能完成所有零件特征的位姿定位，但要实现特殊零件的可靠模板匹配算法是很复杂的。对于一些识别零件常变化的场合，就应为新的零件开发新的匹配算法。

为了实现模板匹配，匹配过程中需要计算图像模板与图像特征之间的相似度。如果相似度很高，意味着匹配成功。相似度在这里是一个广泛的概念，在各种模板匹配中几乎都有相似度的定义。模板匹配主要用于两种场合，第一种场合是检测图片中是否存在某种零件，第二种情况是检测已存在零件的位姿和零件数量。在多数情况，我们已经知道了图像中的零件类型。这时候，通过模板匹配获得零

件的位姿情况，微操作器得到图像位姿信息完成目标零件的搬运、夹持、装配等动作。需要注意的是，在模板匹配过程中，装配对象不可能总处于同一位置和姿态，因而模板的匹配过程中需要引入平移和旋转矩阵。如果提取的模板和待匹配的零件处于不同的物距下，模板匹配过程还需要引入缩放矩阵，否则匹配失败。再者，假如相机和拍照平面存在一定的夹角(即不垂直)，这时模板匹配还需引入投影变换与仿射变换。下面主要介绍基于灰度值的模板匹配、基于形状的模板匹配和基于神经网络与遗传算法的匹配。

5.4.1 基于灰度值的模板匹配

基于灰度值的模板匹配是基于灰度值，计算模板与图像之间的相似度。实现模板匹配的过程是，移动模板在图像的每个位置计算其相似度 $s(r, c)$ ，如果相似度高，就认为模板匹配是有效的。因而，模板图像 $t(r, c)$ 的相似度 $s(r, c)$ 是一个函数，表达形式为：

$$s(r, c) = s(t(u, v), f(r+u, c+v)); \quad (u, v) \in T \quad (5-2)$$

式中， T 表示感兴趣区域； (u, v) 表示感兴趣区域的值域； $f(r+u, c+v)$ 表示当前位置的灰度值。

为了使上面的公式具体化，可以采用两种方法：第一种方法是计算模板与图像差值的绝对值(即 s_{ad} 法)；第二种方法是计算模板与图像差值的绝对值的平方(即 s_{sd} 法)。式(5-3)和(5-4)所示为所采用的算法。

$$s_{ad}(r, c) = \frac{1}{n} \sum_{(u, v) \in T} |t(u, c) - f(r+u, c+v)| \quad (5-3)$$

$$s_{sd}(r, c) = \frac{1}{n} \sum_{(u, v) \in T} |t(u, c) - f(r+u, c+v)|^2 \quad (5-4)$$

上式中， n 为模板感兴趣区域的点数，即 $n = |T|$ 。上式中 s_{ad} 或 s_{sd} 等于 0，表示模板匹配成功，大于 0 则说明匹配失败。上面两种算法与其说是相似度，倒不如称为不相似度更为恰当。上述两种算法具有较高的计算效率，在光源比较稳定可靠的情况下，两种方法具有较好的处理结果。但光源照射不均衡，且光源抖动明显时，两种算法都将得到一个较大的结果，匹配的结果是失败的。

理想的相似度应是不随光照的改变而变化。于是提出了一种归一化的相似度计算(NCC)。归一化定义的处理结果与 s_{ad} 、 s_{sd} 方法刚好相反, 绝对值越大说明匹配的效果越好, 归一化系数为 0 时, 说明匹配失败。

模板匹配过程中, 相似度的计算是非常耗时的工作。在模板很大的情况下, 计算效率慢是最大的瓶颈。为改善计算效率, 采用图像与模板多次缩小的策略, 建立起缩小后的数据与现场图像进行匹配, 通常图像经多次缩小 $2n$ 倍比直接缩 $2n$ 倍的效果要好(一般 $n=1, 2, 3, 4$), 这种搜索策略即为图像金字塔。图 5.8 所示为金字塔搜索策略所用的模型。

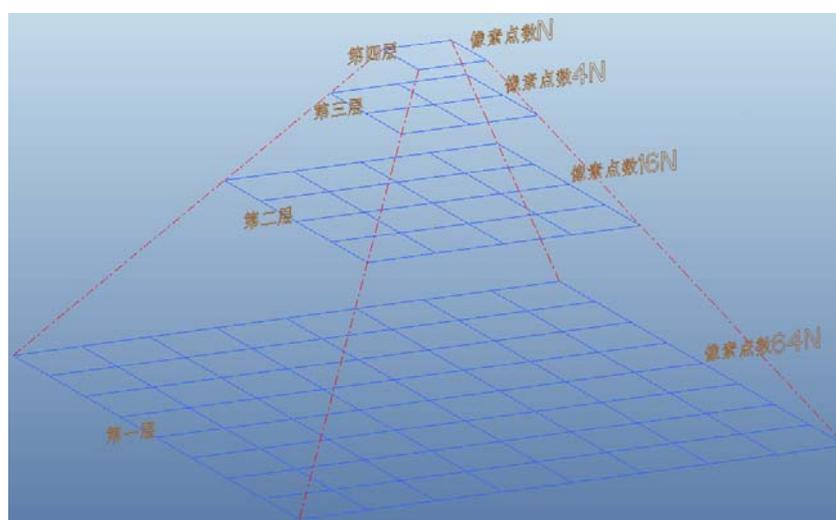


图 5.8 图像金字塔模型

计算效率是金字塔搜索最关注的问题之一, 因而使用没有频率响应的 2×2 均值滤波器来平滑图像, 求解 2×2 区域中所有像素的平均灰度值^[91]。因此, 建立图像金字塔采用均值滤波器是最好的选择。

在图像金字塔中, 底层的信息量最多, 图像分辨率大, 但计算效率低, 对于细微特征的搜索, 尽可能从金字塔底层开始。对于一个大的模板, 尽可能从金字塔的高层开始, 如果无法找到匹配特征, 将金字塔数据降低一级直到匹配成功。

图像金字塔是一种很有效的分层搜索策略。首先, 保证图像金字塔最高层零件特征清晰可辨, 计算出图像模板与搜索图像的适当层数。其次, 在金字塔最高层上一次性进行完整匹配。该搜索策略的优势是: 图像金字塔每增加一层, 模板的点数和图像点数变为原来的 $1/4$, 匹配效率加快了 16 倍。因而, n 层金字塔可以加速 16^{n-1} 倍(一般情况 $n \leq 8$)。图像金字塔的最高层数据可以追溯到其最底层数据。

从高层金字塔数据返回到低层的过程，只需要将匹配点的坐标乘 2 即可。如果一直到最低层，仍然无法匹配特征零件，匹配计算终止，匹配失败。

在金字塔匹配的过程中还需注意，由低层金字塔的像素映射到高层金字塔的过程，图像会发生亚像素级的偏移，使得高层金字塔数据的灰度值改变。因而，要保证良好的匹配效果，金字塔高层采用的阈值条件应比低层金字塔数据宽松。为了满足旋转的图像模板也能够通过金字塔搜索策略，寻找到成功的零件特征实例。在高层金字塔匹配过程中，将搜索旋转角度进行离散化^[92]，同时将所有可能的角度旋转考虑进来。

5.4.2 基于形状的模板匹配

当人们观察外界环境时，印象深刻的是事物的颜色、形状、空间关系等属性，其中形状是常用来表征事物的重要属性之一。机器视觉中，常用二值图像表示形状特征。为了便于描述、计算、节省存储，形状特征可以表示为^[93]：简化方式和编码方式，简化方式有：多项式、插值、样条(B样条，3/5次样条)、多边形逼近、特征点检测等；而编码方式有：链码、freeman码、游程码等。除了上述表示方式，形状特征还可以表示为点集、轮廓、骨架等^[94]。相比点集，轮廓含更多形状信息量，表达了物体边界的顺序关系。骨架又称为物体中轴，不但包含了物体各部分的拓扑连接关系，还包含了物体形状的几何特征。机器视觉中的形状特征必须具备区分性和抗噪性，有些场合还要求形状特征具备遮挡不变性。

根据微装配场合，可以将识别场景分为 3 种情况：① 工作台只有一个零件；② 工作台有多个零件，并需定位其中一个零件；③ 工作台有多种零件，所有零件都要定位。

第一种场合是比较简单的情况，若视觉光源稳定、工作背景单一，采用纯图像处理办法最高效，通过阈值处理将物体从图片中分割出来，然后采用特征提取算法计算出零件位置，最后通过拟合类算法及几何算法即可求出零件姿态。若视觉光源抖动厉害、工作背景较为复杂，这时只能采用形状匹配算法。

第二种场合相对复杂些，该场合如果采用单纯的图像处理方法，既繁琐又耗时。而模板匹配方法是最有效的解决办法。若视觉光源稳定、工作背景单一，可以采用基于灰度值的模板匹配方法；若视觉光源抖动厉害、工作背景较为复杂，形状匹配算法具有较好的鲁棒性，能够胜任较为复杂的场合。

第三种场合最复杂，除了使用模板匹配算法外，还需要兼顾程序的时效性和鲁棒性。多个零件同时高效的定位计算，势必加大操作系统的开销。为此，可以考虑并行技术，在软件开发过程中加入多线程技术。为了保证程序的安全性和鲁棒性，还需定制良好的数据共享、申请、存储机制。在光源不稳定、工作背景复杂的情况下，不建议使用基于灰度值的模板匹配算法，采用适应性良好的形状模板匹配算法。

在图像处理中，提取的边缘特征对光照因素最不敏感，也就是说光照的微小变化对边缘特征影响很小。因此，边缘特征常用在形状匹配算法中。使用边缘作为匹配特征，重点内容也是难点内容是如何确定一个合适的阈值分割边缘。阈值过大，会造成有用的特征信息丢失；阈值过小，势必将噪声中无关信息当成边缘特征。因此，阈值的选择不可能尽善尽美。阈值的确定只能通过多次尝试和算法开发人员的经验，只有这样才能找到一个鲁棒性和可靠性较好的阈值。

使用边缘匹配有以下几种方法，① 将原始的边缘作为匹配特征；② 将边缘分割成圆弧和直线等基本几何特征，匹配过程以基本几何特征为准；③ 将边缘上的突变点作为模板匹配特征。对于突变点的提取，无需提取边缘就可直接从图像中提取^[95-96]。

在边缘匹配类算法中，很大一部分采用的是原始边缘点作为匹配特征。其基本的匹配相似度量是计算图像边缘与之间模板边缘的均方边缘距离(SED)。SED 方法对光源变化不敏感，但对于有遮挡的场合容易出现匹配失败。Ballard 提出了一种广义 Hough 变换^[97]，该算法基于边缘像素点本身搜索目标物体。最早的 Hough 变换是在分割后的边缘中寻找直线的方法^[98-99]。经过改进的 Hough 变换可完成对圆、椭圆等特征的查找。广义 Hough 变换算法效率还是比较高的，但对于机器视觉工程应用还无法令人满意。文献[100]提出了一种分级的广义 Hough 变换。该算法以图像金字塔作为搜索策略，算法对存在遮挡、光照不稳定的情况下稳定性很好。

第二类算法是基于点、线、圆弧等基本几何特征，以几何特征为准的边缘匹配算法。该算法的依据是组合少数的几个几何特征，证明几何特征在图像中的位置。这种算法需要解决计算过程中指数级的复杂度问题。同时，要求提取的基本几何特征足够准确，若几何特征存在误差，匹配结果存在不可意料性。

第三类算法是以线段为几何基元，直接在图像中匹配几何基元本身^[101-103]。也有少量算法使用椭圆弧或圆弧^[104]。算法匹配过程中，需要全面的遍历搜索图形基元和模板之间对应关系。算法的时间消耗是难以让人接受的。

上述几种匹配方法，在实际使用中。该如何选择呢？若识别图像中只包含了明显的几个几何基元，使用几何匹配算法有一定优势。当识别图像包含大量的几何基元时，几何匹配算法不宜采用。如果识别图像的边缘点数不多，且包含大量小几何特征，可采用基于像素点的广义 Hough 变换。理论上讲，基于像素点的匹配可以表示任意形状的图像模板。但基于像素点的匹配对于只用少量基本几何特征组成的模板不太适用，另外基于像素点的匹配算法对于对比度低图像背景存在多纹路的场合，容易造成误识别。表 5.3 所示为基于本文所采用的 halcon 机器视觉算法库，形状匹配算法归纳。其中，算子 3 和 9 因其鲁棒性良好，是本文所采用的识别算法。它是基于点、线、圆弧等基本几何特征的形状匹配方法。

表 5.3 形状匹配算子特性^[105]

序号	模板	功能	是否支持缩放	匹配能力
1	create_shape_model	创建一个简单图像模板，支持平移和旋转	不支持	差
2	create_shape_model_xld	创建一个简单 XLD 轮廓模板，支持平移和旋转	不支持	差
3	create_scaled_shape_model	创建一个图像模板，支持平移和旋转	支持(行列缩放因子相同)	很好
4	create_scaled_shape_model_xld	创建一个 XLD 轮廓模板，支持平移和旋转	支持	很好
5	create_aniso_shape_model	创建一个图像模板，支持平移和旋转	支持(即各向异性，行列缩放因子可不同)	最强
6	create_aniso_shape_model_xld	创建一个 XLD 轮廓模板，支持平移和旋转	支持(即各向异性，行列缩放因子可不同)	最强
7	find_shape_model	搜索一个单一模板	不支持	差
8	find_shape_models	搜索多个单一模板	不支持	差
9	find_scaled_shape_model	搜索一个模板	支持(行列缩放因子相同)	很好
10	find_scaled_shape_models	搜索多个模板	支持(行列缩放因子相同)	很好

11	find_aniso_shape_model	搜索一个各向异性模板	支持（即各向异性，行列缩放因子可不同	最强
12	find_aniso_shape_models	搜索多个各向异性模板	支持（即各向异性，行列缩放因子可不同	最强
13	clear_shape_model	销毁模型资源	公用算子	公用算子

使用上述算子的过程中，需要注意的是，在实际应用中尽量多用算子 3，适当的使用算子 5，没有把握的情况下不使用算子 1 和 2。除上表中列出的算子外，halcon 还有例如变形模板的匹配、三维物体的匹配等算法。这些算法可以胜任复杂匹配场合，满足更为苛刻的工作环境需求。

5.4.3 基于神经网络和遗传算法的模板匹配

这一节简要的介绍一下较为前沿的神经网络和遗传算法匹配算法。神经网络和遗传算法的快速发展，借助其高效的优化搜索能力，在图像识别领域得到广泛的应用。它是模仿生物遗传进化和脑神经元网，建立起来的理论方法。具有高效的并行处理能力及一定的学习能力，是一类很好的搜索优化算法。神经网络可以通过环境学习增强自身的信息网，学习方式主要有：监督学习、非监督学习和强化学习^[106]。常见的神经网络主要有：BP 网络、Hopfield 网络、自组织网络、模糊神经网络、细胞神经网络等^[107]，其中 BP 网络和 Hopfield 网络在模式识别中应用最多。BP 网络采用监督性学习方式，即给定一定条件的输入，输出其对应结果，同时还可以调准输出误差。BP 神经网络算法简单、成熟、优化精确，但 BP 算法的不足是参数选择不合理易陷入局部极小值，收敛速度慢、容错性差、时效行不好。BP 网络在物体特征识别应用中，对于有遮挡的物体识别场合，容易得出错误结果，新样本的训练学习过程很耗时。为了改善算法，张良杰等^[108]采用三层 BP 网络引入 sobel 算子，达到了较好的定位精度和时效性，实现了图像匹配的自动选取。

Hopfield 网络是用来优化计算与联想记忆的动态网络。Ansari N 等人^[109]使用 Hopfield 网络与边缘关键点特征，解决了部分遮挡问题。由于 Hopfield 网络大小由物体及模型个数决定，对于新的模型需要重新训练网络。其在匹配过程有可能出现能量局部极小点，得到一个错误的识别结果。文献[110]用 Hopfield 神经

网络实现基本特征点的匹配，以概率松弛过程方法实现了二值化门限功能。

遗传算法由 Holland^[111]提出，模拟基因突变与生物进化机制，有较好的适应性、鲁棒性及并行计算能力，在三维匹配场合应用较多。漆远^[112]提出了快速指纹匹配算法，引入的遗传算法有效地提高了匹配速度；另外王静^[113]将遗传算法应用到三维匹配中，用于逆向工程求解；岳小莉^[114]将遗传算法应用到多层次模式匹配中，完成了常见规则基元体的三维重建。

神经网络与遗传算法的匹配，有很多成功的应用，也部分的证明了其可靠性。但其存在以下几个问题：① 没有实现全面完整的数学证明，尚未形成理论体系；② 无法实现特征带自动选取；③ 匹配识别对象局限于简单物体特征，如一些明显点、边缘特征，有时也用于仿真校验。因而，要实现神经网络和遗传算法图像匹配的广泛使用，还有很长的路要走。

5.5 本章小结

本章介绍了图像处理的数据类型及颜色空间属性，对常用的图像预处理算法进行了分析。根据视觉伺服技术的应用，介绍了微装配视觉控制技术、亚像素定位技术。针对模板匹配中基于灰度和基于形状的匹配算法，剖析了匹配原理和匹配搜索策略及关键技术，其中基于形状的匹配算法是本文所采用的匹配方法。本章内容是识别装配的重要技术，是保证识别装配顺利实施的前提。

第6章 微小件的装配与调试

6.1 宏运动台的定位精度测量

宏运动台是微小件装配最基础的运动执行机构，要想对整个机械系统的精度有较为直观的了解，就该对宏运动台的精度进行测量。宏运动台在生物医学、激光加工、精密测量领域具有广泛的使用。基于本文的宏运动台采用步进电机驱动，配备高精度的光栅尺作为反馈装置，构成闭环控制。闭环反馈装置有很多种，对于直线平移运动机构可采用光栅尺、激光干涉器作为反馈装置，对于需要做旋转运动的装置可采用旋转编码器作为反馈装置。常见的动力源主要有步进电机和伺服电机，同类层次的伺服电机较步进电机昂贵一些。

本次实验采用宏运动台自带的光栅尺，以光栅尺为基准进行闭环控制。对运动机构的定位精度进行测量。实验方法：从基准点（原点）开始，在全行程上的某一方向（单方向）上，以一定间隔（这里以均等距离1cm，选10个点，包括原点在内，尽可能均布在全行程范围）依次驱动宏运动台定位。分别实测在相应定位位置上的位移值（即从原点算起的移动距离），并和目标值（移动指令指示的理论距离）进行比较，计算出位移偏差，找出所有测量点中的最大和最小偏差值，并定义其差值为定位精度。如图6.1所示为测量示意图。

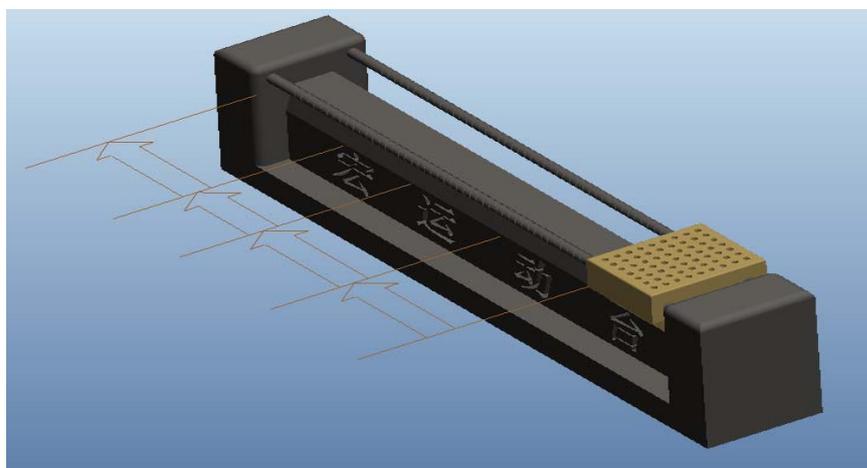


图 6.1 定位精度测量示意图

将宏运动台的定位误差测量数据，归纳整理。表 6.1 所示为定位精度测试数据。

表 6.1 宏运动台定位精度测量数据

校准长度(mm)	误差(μm)	校准长度(mm)	误差(μm)
10	0	60	0
20	0	70	0
30	0	80	0
40	0	90	-1
50	-1	100	-4

将表 6.1 绘制为数学曲线，如图 6.2 所示。

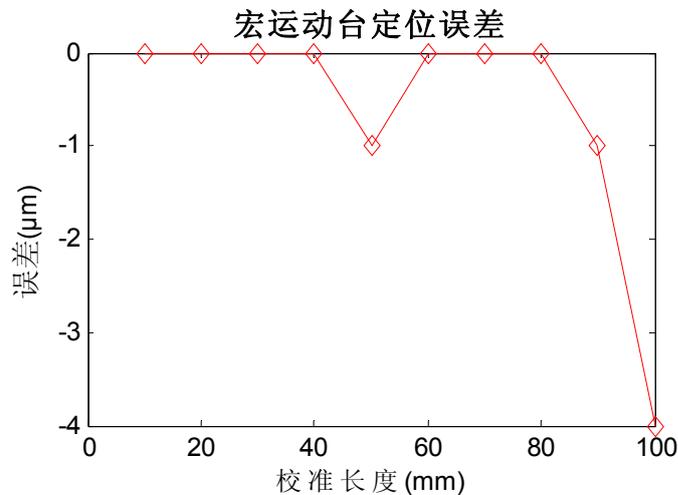


图 6.2 定位精度测量数学曲线

从图 6.2 可知，定位误差在-4 和 0 之间的直线震荡，因此宏运动台的的闭环定位精度为 $4\mu\text{m}$ 。宏运动台的定位精度，满足装配精度要求线性误差 $\leq 6\mu\text{m}$ 使用要求。

6.2 宏运动台的重复定位精度测量

重复定位精度一般指单向重复定位精度。实验方法：在宏运动台的 10 个位置（尽可能均布在全行程范围）上，分别从同一个方向定位 5 次。首先记录其停止位置（定位位置）的最大变化范围，然后定义以上 10 个位置中的最大变化值为重复定位精度，测量方法如图 6.3 所示。

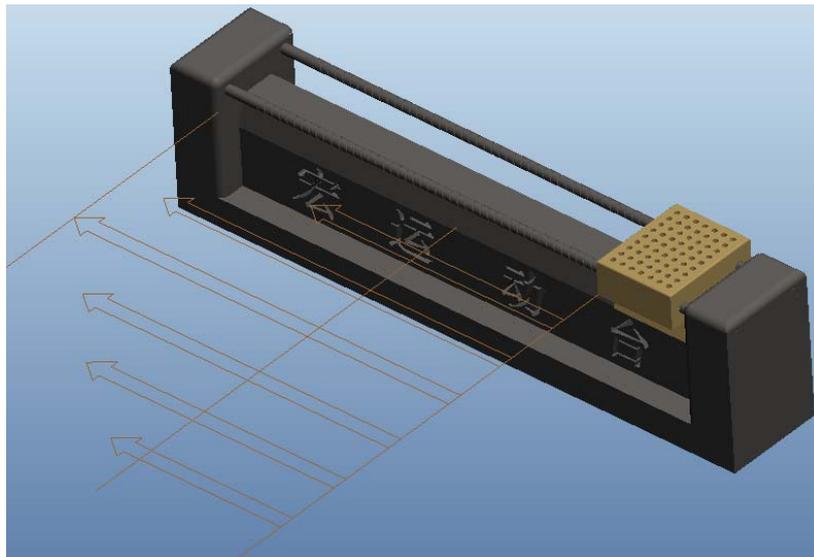


图 6.3 重复定位精度测量示意图

将宏运动台的重复定位误差测量数据归纳整理, 如表 6.2 所示。

表 6.2 宏运动台的重复定位精度测量数据

校准长度 (mm)	误差 (μm)	校准长度 (mm)	误差 (μm)
10	0	60	0
20	0	70	0
30	0	80	0
40	0	90	1
50	1	100	1

将表 6.2 绘制为数学曲线, 如图 6.2 所示。

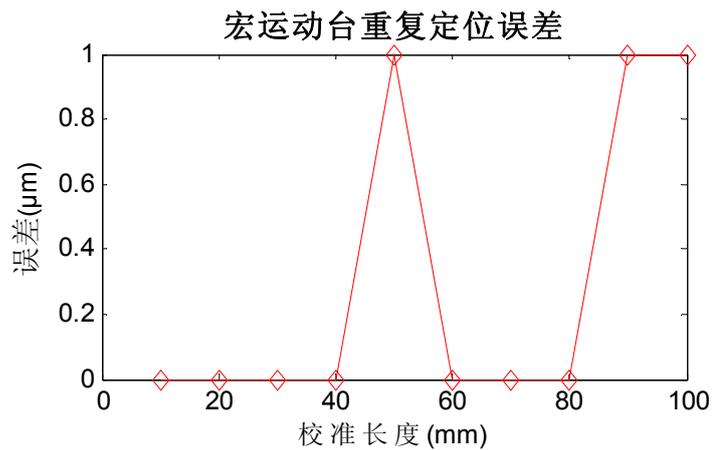


图 6.4 重复定位精度数学曲线

从图 6.4 可知, 重复定位误差误差在 0 和 1 之间的直线震荡, 因此宏运动台的闭环重复定位精度为 $1\ \mu\text{m}$ 。其精度高于定位精度, 完全可满足装配精度要求线性误差 $\leq 6\ \mu\text{m}$ 的使用要求。

6.3 微小件识别率的测量

这一小节主要分析微小件的识别测量，从现场采集 100 张图片作为样本测试。样本图片需覆盖相机在不同的光照强度，零件在不同位姿情况下所采集的图片。样本图片采集好后，选择其中的一张具有代表性的图片用来提取形状，制作识别模板。基于本文的微小件装配，需提取 9 个形状特征，包括 5 个零件的轮廓特征和 4 个装配孔位的零件特征。

经过长期的实验研究，总体来说图像模板的制作以下几条原则：① 因软件显示的图像和实际的物体存在 180° 的翻转，提取的图像模板应与实际测量要求相吻合。② 对于背景比较复杂的测量场合，即图像背景不是纯色的情况下，应选择图片用来制作形状模板，少采用或者不采用 CAD 文件制作模板，否则容易导致匹配失败，复杂场合的提取的形状特征并不是完整封闭的零件轮廓线，很可能是离散的局部形状特征。例如在放大倍数为 1 的情况下，特征中的 1mm 线段之间可能存在多处断开，将此特征作为实际 1mm 零件尺寸的约束条件。③ 用于制作形状模板的图像，应与实际测量环境相同的背景，不同背景下提取的形状特征，也就对应了不同的灰度值，而灰度值是进行模板匹配识别的重要参考参数之一，灰度值的不同必然带来形状匹配的失败；④ 应选择对比度高的图片用来制作模板，将需要识别的零件和对应安装孔位摆放为同一姿态，这有利于后期的微小件装配定向。图 6.5 所示为从 100 张图片中，抽取的其中 9 张识别图片，9 张图片所有零件同处于一个位姿情况，但光源的强度是不同的。由于本文篇幅所限，后续的测量图片不再列出。

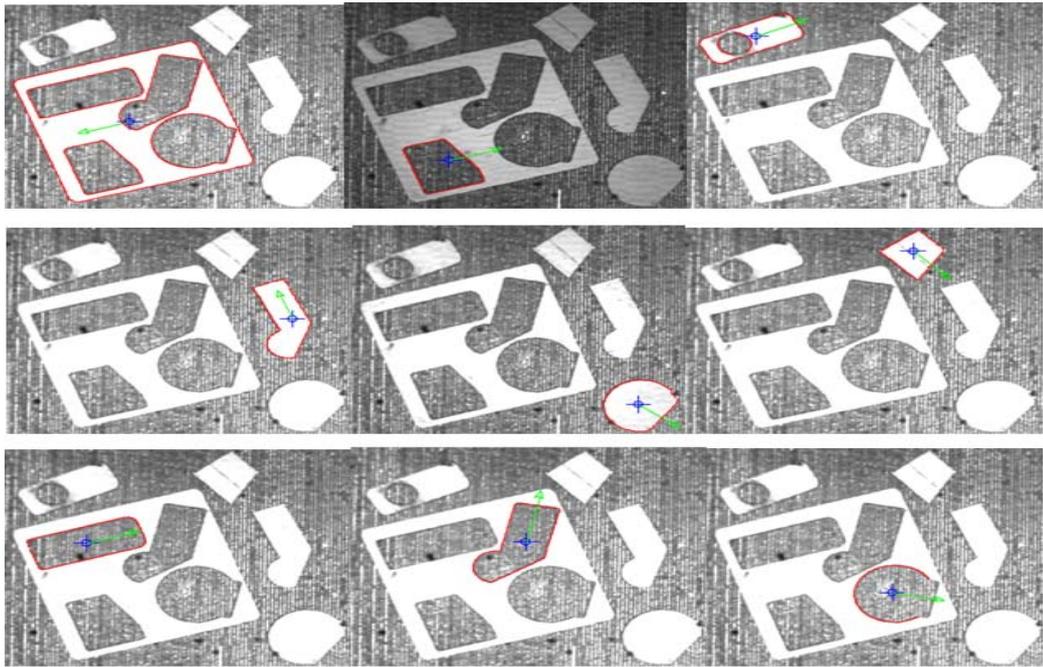


图 6.5 不同光照强度同一姿态各微小件识别图

将 100 张图片，共 9 个形状特征的识别结果整理归纳。如表 6.3 所示为实验测量结果。

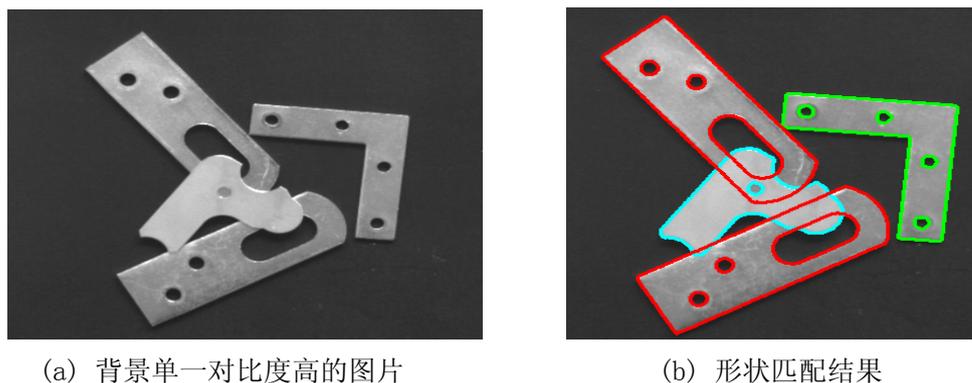
表 6.3 识别率测量数据

零件号	零件 1	零件 2	零件 3	零件 4	零件 5	轮廓 1	轮廓 2	轮廓 3	轮廓 4
匹配时间 (ms)	11.63	10.94	26.77	15.21	9.75	10.56	9.42	13.92	16.31
识别率(%)	98.29	100	100	100	97.63	96.82	100	100	98.87

从表 6.3 可知，形状匹配的成功率很高，识别率达到 96.82% 以上。平均匹配时间低于 26.77ms。完全可以满足微小件装配时效性的要求。

6.4 噪声对微小件识别的影响

接下来，讨论一下噪声对模板匹配的影响。为了得到更好的测量效果，采用对比度高，背景比较简单的图片作为测试对象，如图 6.6(a) 所示为测量对象，6.6(b) 为在理想状态下的测量结果。从形状匹配识别结果，可以很直观的看到每个零件都能很好的被识别。整个实验过程采用相同的一套识别算法，即识别程序的 VC++ 代码是相同的。



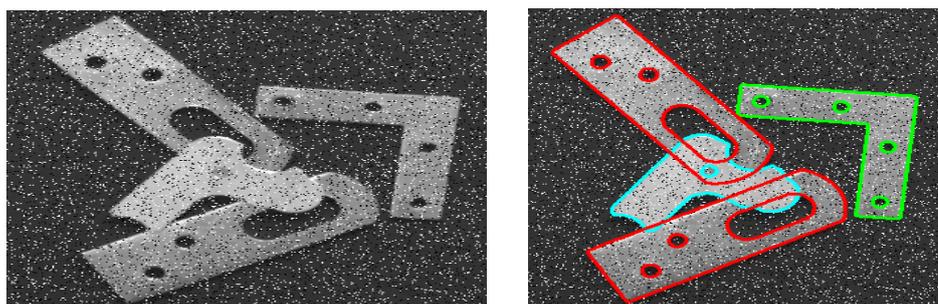
(a) 背景单一对比度高的图片

(b) 形状匹配结果

图 6.6 原始图片与识别结果

(1) 椒盐噪声对形状匹配的影响

在图 6.6(a) 的基础上加入一定比例的椒盐噪声，测试算法抗椒盐噪声的能力。图 6.7(a) 所示为加入 (5%, 5%) 椒盐噪声，第一个 5% 为白噪百分比，第二个 5% 为黑噪声的百分比。图 6.7(b) 所示为形状匹配结果，从中可以看出白黑椒盐噪声为 5% 时，图像识别算法仍能很好的完成匹配过程。



(a) 加入 (5%, 5%) 椒盐噪声

(b) 形状匹配结果

图 6.7 椒盐噪声小于 5% 的识别结果

进一步的加大噪声的比例，通过实验分析，得出：① 当白噪声和黑噪声均 $\leq 5\%$ 时，噪声对识别没有任何影响。② 当白黑噪声，其中之一 $> 5\%$ ，另一个 $\leq 5\%$ 时，出现某些零件无法识别，某些零件可以识别。③ 当白黑噪声都大于 5% ，且小于 20% 时，情况与②相似，出现某些零件无法识别，某些零件可被识别。④ 当白黑噪声有其中一个 $> 20\%$ 或白黑噪声均大于 $\geq 20\%$ 时，所有的零件都无法识别。其中，情况②与③类似，在噪声加入的过程中，识别效果具有一定的随机性，噪声比例与识别结果没有线性关系，例如当白噪声保持为 5% 时，黑噪声为 10% 时候，算法可以识别 2 个零件，当黑噪声为 11% 时，算法可识别 3 个零件，同理相反。这说明了噪声具有一定的随机性，同时总体趋势是噪声加大零件识别的概率减小。因而，噪声对识别具有随机性，总体趋势看具有一定的线性性。图 6.8 所示为白黑噪声

不同比例的识别情况。

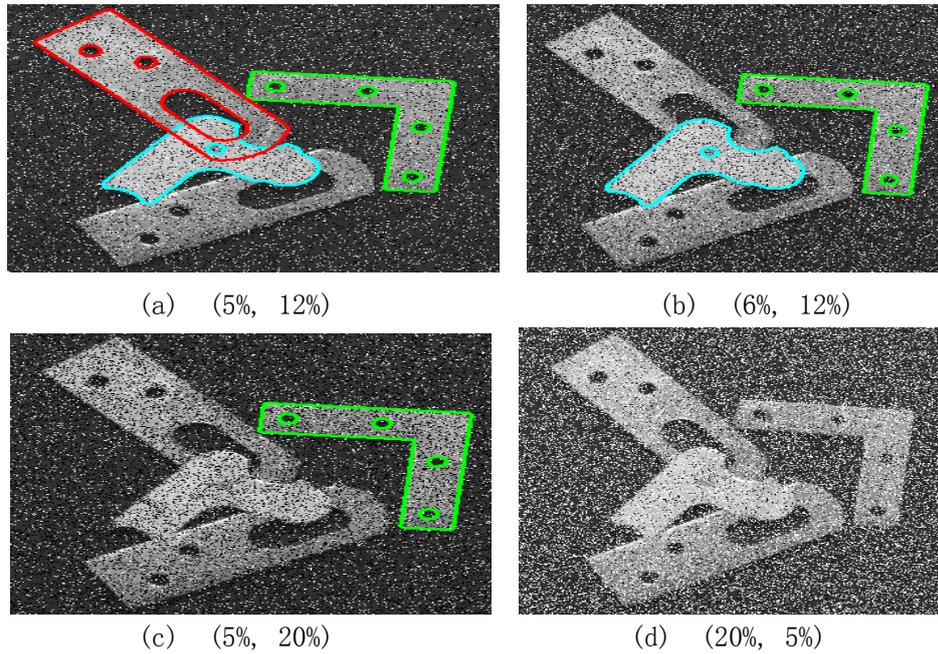


图 6.8 白黑噪声至少有一个>5%的识别结果

(2) 高斯噪声对形状匹配的影响

在图 6.6(a) 的基础上加入一定比例的高斯噪声，测试算法抗高斯噪声的能力。图 6.9(a) 所示为加入标准差为 50 的高斯噪声。图 6.9(b) 所示为形状匹配结果，从中可以看出标准差为 50 时，图像识别算法仍能很好的完成匹配过程。

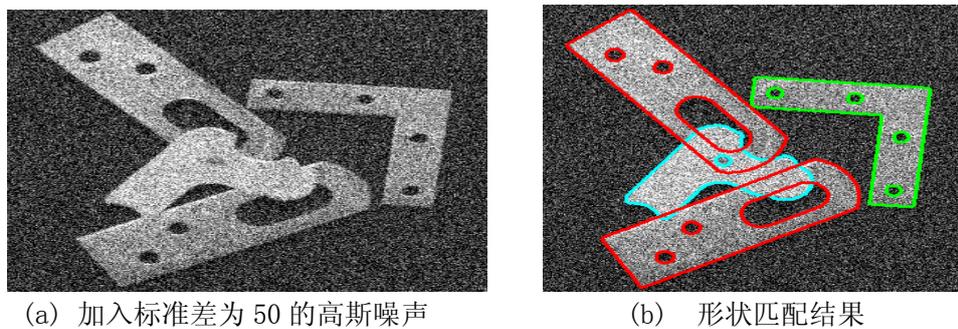


图 6.9 高斯噪声(取标准差 50)时的识别结果

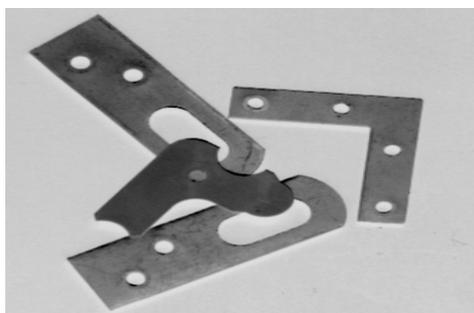
进一步的加大噪声的比例，通过实验分析，得出：① 当高斯噪声标准差 <60 时，形状匹配算法全部可以识别。② 当高斯噪声标准差 ≥ 60 时，所有零件都无法识别。③ 高斯噪声对形状匹配结果是以 60 为分段点的阶跃函数。图 6.10 所示为高斯噪声标准差为 60 时的识别结果。



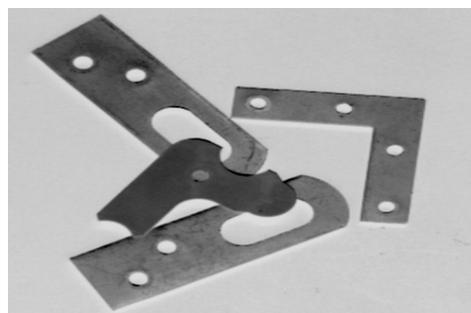
图 6.10 标准差为 60 时的识别结果

(3) 图像背景对形状匹配的影响

将图 6.6(a) 的进行反像处理，得到图 6.11(a) 所示。其中图 6.11(b) 为识别测量结果。



(a) 反像的图像



(b) 反像图像的形状匹配结果

图 6.11 图像反相后的识别结果

通过算法匹配测试，可知背景的变化对形状匹配最为敏感。背景的轻微变化，很可能导致算法失效，从而使得零件匹配失败。模板匹配算法对图像的背景有很大的依赖性。在实际的机器视觉测量中，尽可能做到采用对比度高的纯色背景，不到万不得已绝不更改测量工作台的背景。因而，要建立起一个通用的匹配算法是相当困难的，至少在目前现有的技术条件是很困难的。

6.5 微小件的装配精度测量

基于本文架构的微小件装配控制系统，针对由 5 个微小件组成的微组件，外形尺寸为 $900\ \mu\text{m} \sim 5000\ \mu\text{m}$ ，材质为铝合金，零件均为平板类零件。最小直径尺寸为 $750\ \mu\text{m}$ ，最大直径尺寸为 $2000\ \mu\text{m}$ ，最小线性尺寸为 $900\ \mu\text{m}$ ，最大线性尺寸为 $5000\ \mu\text{m}$ ，最小圆角为 $25\ \mu\text{m}$ ，最大圆角为 $250\ \mu\text{m}$ ，板厚为 $300\ \mu\text{m}$ 。装配精度要求零件中心相对于孔位误差 $\leq 6\ \mu\text{m}$ ，角度误差 $\leq 0.05^\circ$ 。根据零件的形状、表面特性、尺寸范围、形位精度设计装配工艺，以及装配吸附头的选择和更换方式。装配流程分为拾取、搬运、定位、对接、释放，操作者通过“键盘-鼠标”控制方式完成微小件的识别装配。图 6.12(a)、(b) 所示为两种不同的识别装配方法，图 6.12(c)

为装配完毕的微小组件，图 6.12(d)所示为组件的匹配结果。对于装配方法 1，优点是所有的定位一次性完成，装配效率高；缺点是系统鲁棒性不是很好，需要单独配置数据库存储定位参数，适用于工厂批量化场合。对于装配方法 2，优点是控制系统鲁棒性好，简单实用；缺点是装配效率较低，同时每定位完成一个特征，需要回到某一固定参考点，识别下一零件特征，适用于实验室及科研场合。本文采用装配方法 2。

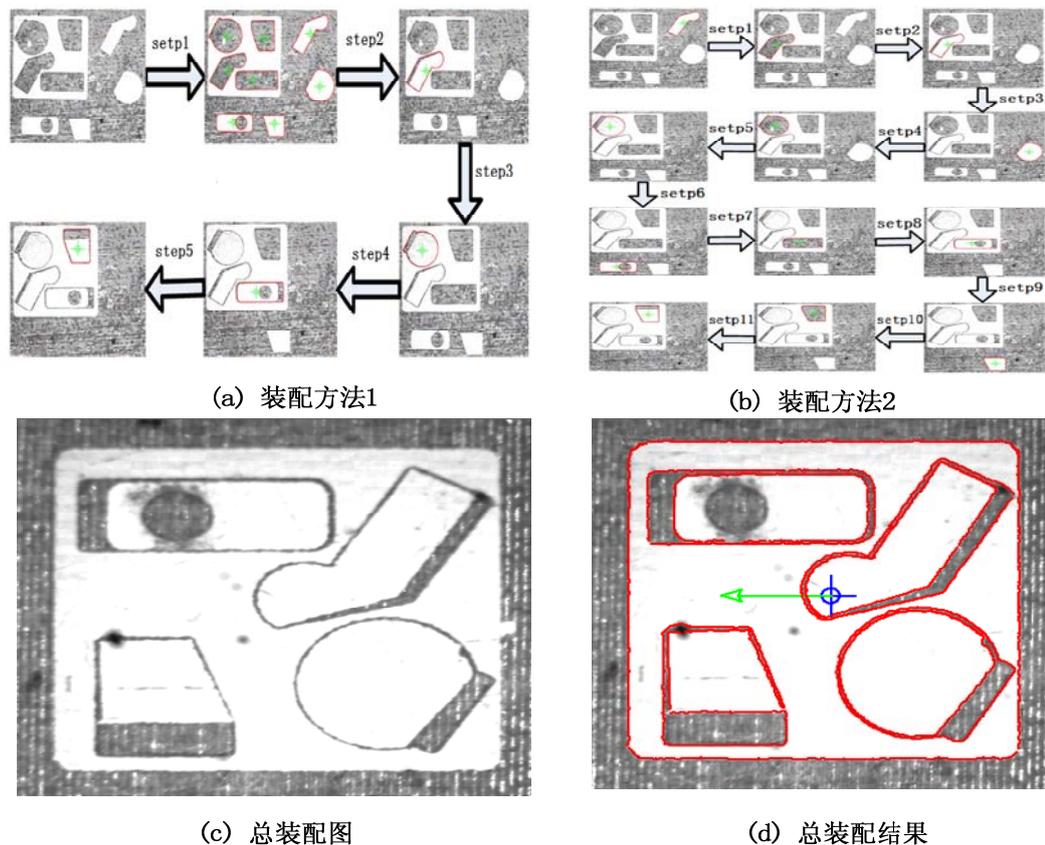


图 6.12 总装配图

对图 6.12(c)所示的微小组件，共进行 5 套的装配实验。待零件全部装配完毕后，将装配组件与标准样式的装配组件进行比对。对于装配精度的测量，这里提出一种形状匹配的新测量方法。在进行形状匹配测量过程中，形状匹配特征由标准样式组件所采集的图片制作，同时标准组件应与装配实际环境的物距相同。测量原理是，将标准组件中最大的零件对称中心作为坐标原点，其余 4 个小零件相对于坐标原点有一组的位姿矩阵，此矩阵即为标准参考数值。已装配好的零件，相对于标准模板也存在 4 组位姿矩阵，4 组矩阵与标准矩阵的差值即为装配的中心相对于孔位的误差，而角度的差值即为角度误差。将 5 套装配测量数据，经四舍

五入求取平均值，整理得到如表 6.4 所示的平均误差测量数据。

表 6.4 微装配精度测量数据

零件号	3 and 1	3 and 2	3 and 4	3 and 5
装配定位精度 (μm)	5.8	5.5	4.9	5.7
设计定位精度 (μm)	≤ 6.0	≤ 6.0	≤ 5.5	≤ 6.0
装配角度精度 ($^\circ$)	0.045	0.048	0.036	0.043
设计角度精度 ($^\circ$)	≤ 0.05	≤ 0.05	≤ 0.05	≤ 0.05

通过表 6.4 数据，可以看出。装配精度达到实际的精度要求，满足生产的使用需求。基于视觉的微装配控制系统，具有较强的实用性，其操作简单方便，控制系统具有较好的人机交互性和鲁棒性。有效的保证了微小件的装配精度。

微装配过程，可以把零件分为轴类零件和孔类零件。设微孔、轴特征点的空间位置向量为 \overline{H}_k 和 \overline{A}_z ，则装配应满足以下关系^[6]：

$$|\overline{H}_k - \overline{A}_z| \leq (r_k - r_z) \quad (6-1)$$

$$\sqrt{(x_k - x_z)^2 + (y_k - y_z)^2 + (z_k - z_z)^2} \leq (r_k - r_z) \quad (6-2)$$

式中， r_k 和 r_z 分别为微孔和微轴的半径。

根据微装配操作流程，装配前初始化过程保证微孔水平和微轴对心（即坐标系原点），此时

$$x_z = y_z = 0 \quad (6-3)$$

$$z_z = h; \quad z_k = 0 \quad (6-4)$$

将式(6-3)、(6-4)代入式(6-2)，整理得：

$$g(\Delta x_k, \Delta y_k) = \sqrt{(\Delta x_k)^2 + (\Delta y_k)^2} \leq \sqrt{(r_k - r_z)^2 - h^2} \quad (6-5)$$

式中， g 代表轴、孔装配之间的间隙。

6.6 本章小结

本章主要对前几章的内容进行实验分析，根据测量结果可知，宏动运动台的定位精度为 $4\mu\text{m}$ ，重复定位精度为 $1\mu\text{m}$ 。通过采集的 100 张样本图片，图片覆盖不同的光照强度，不同位姿的零件状态，形状匹配的识别率 $\geq 96.82\%$ ，形状匹配的平均时间 $\leq 26.77\text{ms}$ 。研究了噪声对形状匹配的影响，其中，椒盐噪声 $\leq (5\%, 5\%)$ 时，噪声对形状匹配算法无影响；当白黑噪声 $> 5\%$ 且 $< 20\%$ 时，部分零件无法识别；

白黑噪声 $>20\%$ 时，所有形状特征匹配失败。对于高斯噪声而言，高斯噪声对形状匹配的影响是以标准差 60 为分段点的阶跃函数，当高斯噪声标准差 <60 时，高斯噪声对形状匹配无影响；当高斯噪声 ≥ 60 时，所有形状特征匹配失败。对于反像的图像，对形状匹配影响最大，反像后的图像无全失去匹配能力。最后对由 5 个微小件组成的微组建测量，提出了模板匹配的装配误差测量方法。其中，最高装配定位精度达 $4.9\ \mu\text{m}$ ，最高角度误差为 0.036° ，证明了微小件装配控制系统架构的合理性。

结 论

基于本文架构的微装配控制系统，针对微小件装配对象，应用模块化的方法将微装配控制系统分为宏/微运动台控制、图像采集、微夹持器控制、示教编程、相机标定与模式识别五个子模块。将示教编程方法引入到微装配控制系统中，实现了微小零件复杂的装配过程。围绕控制系统的视觉布局方案、控制策略及解决方法，提出了“鼠标滚轮定点”装配策略。基于宏运动台的控制，建立了软件控制评价函数。分析了图像处理基本算法、相机标定、视觉伺服控制、亚像素定位、模板匹配等关键技术，提出了基于主动视觉和人工智能的像素当量标定方法。针对微小件装配系统，提出了像素当量标定误差模型，并推导了像素当量标定误差算法。根据微小件装配精度的要求，提出了形状匹配的装配精度测量方法。依据微装配的功能需求和控制流程策略，采用了“三层架构”式软件体系结构，实现了微装配控制系统。

通过本文的有关实验，主要实现了以下目的：

- (1) 由相机的标定实验，求出相机模型的内外参数 $[S_x S_y f K C_x C_y; t_x t_y t_z \alpha \beta \gamma]$ ，其中前 6 个参数为相机内参数，后 6 个参数为相机的外参数。同时，校正了畸变系数 $K=-770.859$ 带来的桶形变形。
- (2) 将椒盐噪声、高斯噪声、图像反像加入到识别测试中，实验得出通过反像的图像识别率为 0%。图像加入椒盐噪声 $\leq 5\%$ 时，识别率为 100%；当椒盐噪声 $>5\%$ 且 $<20\%$ 时，部分零件无法识别，并具有一定的随机性；当椒盐噪声 $>20\%$ 时，识别率为 0%。图像加入高斯噪声的标准差 <60 时，识别率为 100%；当高斯噪声的标准差 ≥ 60 时，识别率为 0%。
- (3) 根据形状匹配实验，可知微小件的识别率 $\geq 96.82\%$ ，匹配时间 $\leq 26.77\text{ms}$ 。
- (4) 通过宏运动工作台精度测量，其定位精度为 $4\mu\text{m}$ ，重复定位精度为 $1\mu\text{m}$ 。基于视觉的微小件装配控制系统，采用亚像素定位技术，定位误差为 0.05 像素(其中， $2.3\sim 10\mu\text{m}/\text{pixel}$)，其精度高于微运动台的定位精度 $0.7\mu\text{m}$ 。综合得知微小件装配系统的定位精度为 $0.7\mu\text{m}$ 。

(5) 针对 5 个平板微小件的装配, 提出了形状匹配的装配精度测量方法, 微组件的最高装配定位精度达 $4.9\ \mu\text{m}$, 最高角度误差为 0.036° , 证明了微装配控制系统的可行性。

对于后期的研究, 作者认为需要考虑以下几个方面:

(1) 本文主要侧重于已知的微小件和工作环境下的识别装配。介于建立通用算法的困难重重, 没有考虑到各种工作背景环境。可以预想将来的识别装配, 必将考虑随机的识别对象和工作背景环境(如工作背景由纯黑色变为带各种纹路的复杂场合), 同时软件的自定义模式朝向组态方式, 快速高效的实现软件自定义。

(2) 对于识别装配系统, 需要考虑无标定板的相机内外参数及像素当量自标定技术。遗憾的是作者水平有限, 没能给出文中提出的人工智能像素当量标定的数学证明。未来的识别装配场合, 会朝着无标定物的自主标定场合。通过机械运动机构的若干次运动, 快速准确的得知相机的内外参数及视觉系统的像素当量。从而完成三维重建、识别装配、目标攻击等任务。

(3) 对于吸附式夹持器的软着陆和力觉反馈控制技术, 本文只是给出简单的介绍, 并未进行深入研究。软着陆和力觉反馈控制技术必将是微装配关键技术的研究重点和亟待解决的难点。

(4) 未来的微小件装配硬件系统, 可能朝向通用化、可重构方向发展。通过机构的自主搭积木的方式快速重构, 即可完成各种对象和环境的装配、定位、测量需求。相信通过科研人员的努力, 科幻片中的变形金刚微小件装配系统不再是梦。

参考文献

- [1] Gunther Reinhart.Andrea Reiter. An investigation of haptic feedback effects in telepresent microassembly[J]. Springer, 2011, 5: 581-582.
- [2] 席文明, 姚斌, 王磊等.基于实体模型的虚拟微装配视觉伺服研究[J].机械工程学报,2005, 41(3): 59-60.
- [3] Cédric Clévy.Arnaud Hubert.Nicolas Chaillet. Flexible micro-assembly system equipped with an automated tool changer [J]. Springer-Verlag, 2008, 4: 59-60.
- [4] 叶坤, 滕霖, 杨卫民等.小型高精度重力计的微装配技术[J].航空精密制造技术, 2009, 45(3): 14-15.
- [5] 罗翔, 俞华开, 颜景平.微装配技术的进展和发展趋[J].仪器仪表学报, 2001, 22(3): 325-326.
- [6] 段瑞玲, 李庆祥, 李玉和.微装配技术的发展现状及关键技术[J].光学精密工程,2004, 12(3): 28-29, 185-188.
- [7] 程新宇.基于机器视觉的微小型零件精密装配研究[D].大连理工大学硕士学位论文,2008.
- [8] 黄翔, 黄心汉, 王敏.微装配机器人的控制软件设计[J].计算机与数字工程,2011, 256(2): 64-65.
- [9] 康晓洋, 田鸿昌, 李德昌.微装配与 MEMS 仿真导论[M].西安电子科技大学出版社, 2011.24-25.
- [10] Luca Bruzzone, Rezia M.Molfino. A novel parallel robot for current microassembly applications[J]. Emerald Group Publishing Limited, 2006, 26(4): 300-302.
- [11] Henry Kar Hang Chu. An Automated Micromanipulation System for 3D Parallel Microassembly[D]. University of Toronto, 2011.
- [12] Aditya N.Das. Automated 3D microassembly with precision adjusted hybrid supervisory controller[D]. University of Texas at Arlington, 2009.

- [13] A. Burisch, S. Deumlich, R. Degen, et al. Microassembly Following the Desktop Factory Concept[J]. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011, 10: 400-402.
- [14] 李玉和, 刘志峰.微系统自动化装配技术[M].电子工业出版社, 2008.2-3.
- [15] 李玉和.基于光学显微镜的微器件装配系统关键技术的研究[D].清华大学博士学位论文, 2001.
- [16] 段瑞玲, 李玉和, 李庆祥等.一种用于微器件装配的系统设计与研制[J].新技术新工艺, 2006, 5:30-33.
- [17] 于丰源.微小齿轮装配关键技术的研究[D].哈尔滨工业大学硕士学位论文, 2007.
- [18] 席文明, 姚斌.微装配与微操作[M].国防工业出版社, 2006. 9-10.
- [19] 罗翔, 沈洁, 颜景平.微装配的若干关键技术[J].电子机械工程, 2002, 18:35-37.
- [20] 王晓东, 刘冲, 王立鼎.微型夹钳的最新研究〔J〕.功能材料与器件学报, 2004 3:1-8
- [21] 罗宇华.计算机视觉[M].人民邮电出版社, 1990.
- [22] 章炜.机器视觉技术发展及其工业应用[J].红外, 2005, 27(2):11-17.
- [23] Bradski.G, Kaehler.A. 学习 OpenCV[M].清华大学出版社, 2009. 1-2,
- [24] 杜冲.一种显微视觉伺服控制的微操作机器人系统: 中国, ZL201010553551.2[P]. 2010-11-22.
- [25] 张融, 孙明磊, 吴钊等.秀丽隐杆线虫自动化筛选微操作装置: 中国, ZL200910238427.4[P]. 2009-11-20.
- [26] 席文明.一种自动化显微操作装置: 中国, ZL200910112251.8[P]. 2009-7-24.
- [27] 章维一, 侯丽雅, 田桂中.显微注射用单细胞微操作装置: 中国, ZL200810019091.8[P]. 2008-1-11.
- [28] 李玉和.基于机器视觉的宏/微双驱动微操作系统的研究[D].吉林大学硕士学位论文, 2006.
- [29] 王江哲, 周莹新, 艾波.电信软件设计中的分层、分离原则的研究[J].软件学报, 1998, 9(7): 542-543.
- [30] 钱少明.制造过程中的分布式检测系统模型及其应用系统分析[D].浙江大学硕士学位论文, 2004.

- [31] BEVERIDE J,WIENER R.Multithreading Applications in Win32[M]. Addison-Wesley Developers Press,1997:251-252.
- [32] 刘俊标, 薛虹, 顾文琪.微纳加工中的精密工件台技术[M]. 北京工业大学出版社, 2004.
- [33] 李蓓智, 杨永金, 杨建国等.精密微位移工作台的设计与性能分析[J].机械设计与研究, 2008, 24(4): 41-42.
- [34] 雷勇, 陈本永, 杨元兆等.纳米级微动工作台的研究现状及发展趋势[J].浙江理工大学学报,2006, 23(1): 72-73.
- [35] 李德选, 罗翔, 田梦倩, 颜景平.一种适用于微操作的驱动技术[J].机械设计, 2004.
- [36] 李德选.面向微细作业的微操作器的关键技术研究[D].东南大学硕士学位论文, 2006.
- [37] 杨雪锋, 李威, 王禹桥. 压电陶瓷致动器驱动电源的仿真及设计[J].电源技术.2009,(1):209-211.
- [38] 徐树奎.基于计算摄影的运动模糊图像清晰化技术研究[D]. 国防科学技术大学, 2011.
- [39] 张嘉易, 陈航, 郝永平. 基于柔性铰链的二级放大微夹持器的研究[J]. 机械设计, 2012, 29(3): 15-17.
- [40] 文伟力, 左春桢, 于建群等. 基于两个正交一维物体的单幅图像相机标定[J]. 光学学报, 2012, 32(1): 2-3.
- [41] 刘碧霞, 李绍滋, 郭锋等. 一种简单快速的相机标定新方法[J].计算机工程与科学, 2011, 33(1): 89-90.
- [42] 张永军.基于序列图像的视觉检测理论与方法[M].武汉大学出版社, 2008.8-9, 34-48.
- [43] 许红梅.用于微装配的显微视觉系统标定技术的研究[D].重庆大学硕士学位论文,2011.13-14.
- [44] 刘红坤, 王江安. 传统方法在水下相机标定应用中的研究[J].舰船电子工程, 2012, 212(2): 117-118.
- [45] 傅丹, 冯卫东, 于起峰等.一种摄像机自标定的线性方法[J].光电工程, 2008,

- 35(1): 72-73.
- [46] 陈艺峰.CMOS 摄像机标定实验研究[J].机电技术, 2011: 25-26.
- [47] Z.Zhang. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations. Proceedings of the 7th International Conference on ComputerVision, Corfu, September 1999: 666-673.
- [48] P.F.Sturm and S.J.Maybank. On Plane-based camera calibration:A general algorithm,singularities,applications.IEEE Conference on Computer Vision and Pattern ecognition,1999.
- [49] 魏敬强.基于双目立体视觉的工件识别定位与抓取系统研究[D].西安工大学硕士学位论文,2009.
- [50] 于起峰, 尚洋.摄像测量学原理与应用研究[M].科学出版社, 2009.16-18, 53-54, 82-83.
- [51] 文伟力, 左春桢, 于建群等. PMMA 微流控芯片微通道尺寸的检测[J].光学精密工程,2007, 15(2): 216-217.
- [52] 邱茂林, 马颂德, 李毅.计算机视觉中摄像机定标综述[J].自动化学报, 2000,26(11):43-55.
- [53] 冯文灏. 近景摄影测量:物体外形与运动状态的摄影法测定[M].武汉:武汉大学出版社,2002.
- [54] 张永军,张祖勋,张剑清.利用二维 DLT 及光束法平差进行数字摄像机标定 [J].武汉大学学报:信息科学版,2002,27(6):12-13.
- [55] Abdel-Aziz Y I, Karara H M. Direet linear transformation into object space coordinates in close-rang photogrammetry[C].Urbana:Proceedings of Symp Close-Range Photogrammetry 1971:1-18.
- [56] Wong K W.Mathematical foundation and digital analysis in closw-range photogrammetry[C].Photogrammetric Engineering and Remote Swnsing,1975(44): 1355-1373.
- [57] Karara H M.Handbook of close-range photogrammetry[M].America Society of Photogrammetry,1979.
- [58] Tsai R Y.A Versatile camera calibration gechniaque for high accuracy 3D

- machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lense[J].IEEE Journal of Robotics and Automation,1987,RA-3(4):323-344.
- [59] Weng Juyang.Camera calibtation with distortion models and accuracy evaluation[J].IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,1992,14(10):965-980.
- [60] 郑逢杰,余涛,袁国体等.相机几何标定方法综述[J].太原科技,2010,(2):73-74.
- [61] Longuet — Higgins H C. A computer algorithm for reconstructing a scence from two projections. Nature, 1981, 293(10):133 — 135.
- [62] Hartley Richard. Kruppa's equations derived from the fundamental matrix[J].IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1997, 19(2):133-135.
- [63] 陈泽志,吴成柯,刘勇.基础矩阵估计的加权归一化线性算法[J].软件学报,2001,12(03):420-421.
- [64] S.J.Maybank and O.D.Faugeras, A theory of Self-calibration of a Moving Camera[J], International Journal of Computer Vision,1992, 8(2):123-151.
- [65] Triggs B. Auto2calibration and absolute quadric[J].In:Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition,199:604-614.
- [66] Hartley Richard.Self-calibration of Stationary Cameras[J].International Journal of Computer Vision,1997,22(1):5-23.
- [67] [67] Ma S D.A Self-calibration Technique for Active Vision Systems[J].IEEE Trans. Robotics and Autom.1996,12(1):114-120.
- [68] 李华,胡占义.基于射影重建的线性摄像机自标定方法[J].软件学报,2002,13(12):2286-2287.
- [69] Clarke,T.A.Fryer,J.F.Wang,X. The Principal Point and CCD Cameras[J].Photogrammetric Record, 1998a, 16(92):293-312.
- [70] Clarke,T.A.Fryer,J.F.Wang,X. Extracting High Precision Information from CCD Images[C].Proc. ImechE Conf,Optical Methods and Data Processing for Heat and Fluid Flow, 1998b,311-320.

- [71] 冯伟兴, 唐墨, 贺波. Visual C++数字图像模式识别技术详解[M]. 机械工业出版社, 2011. 2-4, 117-118.
- [72] 冈萨雷斯. 数字图像处理(Matlab 版)[M]. 电子工业出版社, 2012. 151-160.
- [73] 张铮, 王艳平, 薛桂香. 数字图像处理与机器视觉—Visual C++与 Matlab 实现[M]. 人民邮电出版社, 2010. 236-264.
- [74] 谢凤英, 赵丹培. Visual C++数字图像处理[M]. 电子工业出版社, 2008. 3-7, 335-336.
- [75] 张文景, 张文渊, 苏键锋等. 计算机视觉检测技术及其在机械零件检测中的应用[J]. 上海交通大学学报, 1999, 33(5): 636-637.
- [76] Carsten S, Markus U, Christian W. 机器视觉算法与应用[M]. 清华大学出版社, 2008. 3-7, 95-96, 143-144, 162-163.
- [77] 王麟昆, 徐德, 谭民. 机器人视觉伺服研究发展[J]. 机器人. 2004, 26(3): 277-282.
- [78] 黎志刚, 段锁林, 赵建英等. 机器人视觉伺服控制及应用研究的现状[J]. 太原科技大学学报. 2007, 28(1): 24-28.
- [79] 钟金明, 徐刚, 张海波. 机器人视觉伺服系统的研究与发展[J]. 现代制造工程. 2005, (8): 8-9.
- [80] 赵清杰, 连广宇, 孙增圻. 机器人视觉伺服研究综述[J]. 控制与决策. 2001, 16(6): 850-851.
- [81] TAYLOR G, KLEEMAN L. Hybrid position based visual servoing with online calibration for a humanoid robot[C], Proc of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Sandai, Japan, 2004: 686-691.
- [82] 林靖, 陈辉堂, 王月娟等. 机器人视觉伺服研究综述[J]. 控制理论与应用. 2000, 17(4): 850-851.
- [83] 林靖, 陈辉堂, 王月娟等. 机器人视觉伺服系统结构及实现[J]. 制造业自动化. 2005, 27(12): 40-41.
- [84] S Hutchinson, G Hager, P Corke. A tutorial introduction to visual servo control[J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 1996, 12(5): 651 — 670.
- [85] 林靖, 陈辉堂, 王月娟等. 机器人视觉伺服系统的研究[J]. 控制理论与应用. 2000, 17(4): 477-478.

- [86] E Malis, F Chaumette, S Boudet. 2-1/2-D visual servoing[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1999, 15(2): 238-250.
- [87] 李自乐. 圆弧状边缘的亚像素定位方法研究[J]. 光机电信息. 2010, 27(11): 36-40.
- [88] Hueckel M F. A local visual operator which recognizes edges and lines[J]. JACM, 1971, 18: 113-125.
- [89] 李自乐. 物体形状检测的亚像素细分算法综述[J]. 计算机与数字工程. 2011, 265: 17-19.
- [90] Ghosal S, Mehrotra R. Orthogonal moment operators for subpixel edge detection[J]. Pattern Recognition, 1993, 26(2): 295-306.
- [91] S.LANSER, W.ECKSTEIN. A modification of Deriche's approach to edge detection. In 11th International Conference on Pattern Recognition, vol.III, 1992. 633-637.
- [92] C.STEGER. Subpixel-precise of lines and edges. In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol.XXXIII, part B3, 2000, 141-156.
- [93] 丁险峰, 吴洪, 张宏江等. 形状匹配综述[J]. 自动化学报, 2001, 27(5): 679-680.
- [94] 周瑜, 刘俊涛, 白翔等. 形状匹配方法研究与展望[J]. 自动化学报, 2012, 38(6): 891-892.
- [95] R.M.HARALICK, L.G.SHAPIRO. Computer and Robot Vision, Vol.I[M]. Addison-Wesley, Reading, MA, 1992
- [96] U.RAMER. An iterative procedure for the polygonal approximation of plane curves[J]. Computer Graphics and Image Processing, 1972, 1: 244-256.
- [97] S.LANSER. Modellbasierte Lokalisation gestützt auf monokulare Videobilder[D]. Forschungsund Lehrinheit Informatik IX, Technische Universität München. Shaker Verlag, Aachen, 1997.
- [98] P.L.ROSIN, G.A.W.WEST. Nonparametric segmentation of curves into various representations[C]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1995, 17(12): 1140-1153.
- [99] P.J.HUBER. Robust Statistics[M]. John Wiley & Sons, New York, 1981.

- [100] F.MOSTELLER,J.W.TUKEY.Data Analysis and Regression[M]. Addison-Wesley, Reading, MA, 1977.
- [101] R.HARTLEY,A.ZISSERMAN.Multiple View Geometry in Computer Vision.Cambridge University Press,Cambridge,2nd edition,2000
- [102] M.A.FISCHLER,R.C.BOLLES.Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography[J]. Communications of ACM,1981,24(6):381-395.
- [103] S.H.JOSEPH. Unbiased least squares fitting of circular arcs[J]. Computer Vision, Graphics,and Image Processing:Graphical Models and Image Processing, 1994, 56(5):424-432.
- [104] S.J.AHN, W.RAUH, H.J.WARNECKE. Least-squares orthogonal distances fitting of circle,sphere, ellipse,hyperbola, and parabola[J].Pattern Recognition, 2001,34(12):2283-2303.
- [105] MVte.Solution Guide II-B Matching(HALCON 10.0), October 2010.
- [106] Maron O.Learning from ambiguity[D].Department of Electrical Engineering and Computer Science, MIT, 1998.
- [107] 许锋, 卢建刚, 孙优贤.神经网络在图像处理中的应用[J],信息与控制, 2003, 32(4):344-347.
- [108] 张良杰, 汪文秉.航空雷达目标的极化分集特征的实时提取与自动目标识别的ANN技术[J], 电子学报, 1994, 22(4): 113 — 115.
- [109] Ansari N,Li K. Landmark-based Shape Recognition by a Modified Hopfield Neural Netowrk[J]. Pattern Recognition,1993, 26: 531-542
- [110] Sang N etc.Relaxation matching by the Hopfield neural network[C]. Proc of SPIE, 1996, 2664:182-190.
- [111] Holland J H. Adaptation in Natural and Artificial Systems[D]. Ann Arbor. University of Michigan Press. 1975.
- [112] 漆远, 田捷, 邓翔. 基于遗传算法的指纹图匹配算法及应用[J], 软件学报, 2000, 11(4):488-493.
- [113] 王静, 张树生, 孙宏伟等. 基于神经网络与遗传算法的图像轮廓序列匹配技

术[J], 计算机工程与应用, 2002, 05:38-40.

- [114] 岳小莉, 陆国栋, 谭建荣. 基于多层次模式匹配的三维重建方法研究[J], 模式识别与人工智能, 2000, 13(3):320-325.