

光学视觉传感

刘巽亮 编著

中国科学技术出版社

光学视觉传感

刘巽亮 编著

中国科学技术出版社

• 北京 •

图书在版编目(CIP)数据

光学视觉传感/刘巽亮编著. —北京:中国科学技术出版社,1998.6

ISBN 7-5046-1500-5/TN·14

I. 光… II. 刘… III. 光电传感器:视觉传感器
IV. TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 21904 号

中国科学技术出版社出版

北京海淀区白石桥路 32 号 邮政编码:100081

— 电话:62179148 62173865

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京市金顺印刷厂印刷

开本:850 毫米×1168 毫米/32 印张:11.5 字数:299 千字

1998 年 9 月第 1 版 1998 年 9 月第 1 次印刷

印数:1—2 000 册 定价:20.00 元

(凡购买本社的图书,如有缺页、倒页、
脱页者,本社发行部负责调换)

内 容 简 介

本书以获取客观景物的三维视觉信息为主线,论述光学视觉传感的理论、方法、技术和应用。全书共九章,第一至四章为基础部分,包括:成像计算基础、二维图像和要素图的提取等;第五、六章论述主动三维视觉传感技术及其数据处理方法;第七、八章讨论被动视觉传感的理论和算法实现;第九章为系统内、外部参数的定标技术。

本书内容力图构成一个相对独立的体系,使读者掌握有关视觉信息的感知、度量、识别和应用等方面较为完整的知识。书中的实例反映本领域国内外的最新技术和研究动向。

本书可供从事光电检测、三维形态测量、机器视觉和计算机应用的工程技术人员及科学研究人员参考,也可作为上述领域高等学校相应专业的研究生或高年级本科生的教学参考书。

前 言

本书定名为《光学视觉传感》，其用意是想从工程意义上来界定本书所论述的技术范围，而不是指科学意义上的严格定义。就字面上讲，光学视觉传感可以理解为：用光学的方法来感知客观世界的视觉信息。这个理解包含三方面的内容：一是要得到某一定对象的视觉信息；二是要有方法和装置来感知视觉信息，这种感知应该 是非接触式的；三是运用的技术手段主要是光学，当然包含有电子学和与之相关的计算机应用学等技术在內。

视觉信息有丰富的内容。从广义上说，凡是“所看到的”都属于这一范畴之內。以自然景物为例，视觉信息应该包括如下内容：场景中“有”些什么，它们都“是”什么，它们的色彩特征，它们各自的外形以及处于空间的姿态，各个对象（物体）之间在空间的相互位置关系，离观察点的远近，对象相对于观察点是运动的或是静止的，运动速度的估算，等等。在工业应用中，场景中的对象比较简单，往往还需要视觉信息提供对象精确的三维尺寸和局部细节的描述，以及相对于观察点的位置和取向等。

与其他信息相比，视觉信息有两个特点：整体性和立体性。整体性是指它所提供的信息不只局限于某个或某几个局部参量，而是对被观察对象的整体描述（Volume Description）。显然，要得到整体信息，视觉系统的输入信息源必然是被观察对象的图像。有了好的输入图像，通过对图像的处理、计算和分析，就能得到高质量的整体视觉信息。立体性指的是视觉信息所提供的几何参数应该是三维的，这样才能反映客观对象的三维特征。从几何意义上讲，输入图像是二维的。如何从二维图像中提取对象的三维信息，这是视觉系统的核心问题，也是本书所讨论的重点内容。

在工程上，研究视觉技术和装置的学科称之为机器视觉。机器视觉的目标是让机器具有类似于人眼的功能，对它“所看到的”景

物能测量、识别、判断、推理以至决策。机器视觉涉及许多方面的内容,包括:场景照明、图像获取、图像特征提取、三维信息的恢复、对象的识别、符号标记与模式分类、场景分析与理解,以及判断与决策等。笔者采用“视觉传感”这个名词,意在指明本书所包含的内容与机器视觉含义上的联系与区别。毫无疑问,本书是讨论视觉技术与其装置的,但是论述的侧重面有所不同,相应地所针对的应用领域也不尽相同。书中对视觉技术中有关场景照明、图像获取、图像特征的提取以及三维信息的检出和恢复等方面的问题,作了较详尽的讨论和分析,而较少涉及或基本上不涉及有关景物的认知、分析和理解方面的内容。所以,本书主要是解决对外界景物的感知,通过转换而得到有用的视觉信息。我们将这一范围内的技术称之为视觉传感。视觉传感所能提供的是根据应用要求特定的视觉信息,或者说是部分的、类似于视觉的信息,而不是通用意义上的整体三维视觉信息。读者如果了解或掌握机器视觉的总体技术,还需要阅读相关书目或专题论著。

全书共分九章。第一章既是引子,也是视觉传感中一些共同性问题的介绍,诸如:视觉技术理论与实践的现状,场景的照明技术,输入图像的量化和图像的早期处理等。这些问题游离于后续各章的技术范围之外,而又是不可或缺的经常要考虑的问题,所以一并归于这一章中。第二、三、四章可以视作基础篇,为投影成像在计算机中的运算提供了方便的计算工具(第二章),也为提取三维视觉信息做好了图像处理的基础工作。在第三、四章中讨论的仍然是二维图像的处理问题,但其内容集中在边缘和区域特征的提取方面,它们是得到三维信息的先行处理技术。第五、六、七、八章是本书的主要内容,以获得三维视觉信息为主线,分别讨论了主动视觉传感和被动视觉传感的理论、方法、算法和装置。这些内容基本上反映了当前光学视觉传感的技术水平和动向。最后一章是视觉传感装置实用化所必须的系统定标技术。

光学视觉传感是随着机器视觉一起发展起来的高新技术之

07515

一。自 80 年代以来,视觉传感有着长足的进展,满足各种应用要求的视觉传感装置不断涌现,技术上的新思路、新方法和新算法也层出不穷,要拥有大量的资料和丰富的经验才能把握住该领域的现状、动向和趋势。作者虽已涉足这个领域十多年,也有着一定的教学实践、科学研究、资料积累的经历,但在编著本书的过程中仍然深深感到有功底不深、涉猎不广之处。因此,无论在本书内容的选择和安排上,还是在具体内容的阐述中,都还存在许多值得推敲和需要改正的地方,恳切希望读者给予指正。

编者

1998 年 3 月于北京

目 录

第一章 光学视觉传感	(1)
1.1 视觉与视觉传感	(2)
1.2 视觉计算理论	(7)
1.3 光学视觉传感的输入图像.....	(12)
1.4 输入图像的几何校正与平滑滤波.....	(29)
第二章 投影成像的计算基础	(36)
2.1 成像面上点和直线的归一化矢量.....	(37)
2.2 像面上的点和直线的计算	(42)
2.3 像面上点和直线的映射——空间正交性.....	(45)
2.4 像面上点和直线的映射——相机坐标变换.....	(52)
2.5 线段的交比及其不变性.....	(55)
第三章 二值图像及其几何特性的度量	(64)
3.1 从灰度图像到二值图像.....	(64)
3.2 单物体二值图像几何特征的度量.....	(69)
3.3 离散二值图像的结构特征及多物体的标记方法	(78)
3.4 二值图像的拓扑特征及其度量.....	(82)
第四章 图像素描特征的提取——边缘与区域	(86)
4.1 多面体图像的边缘及其类别.....	(87)
4.2 用一阶微分算子探测边缘点.....	(89)
4.3 用二阶微分算子探测边缘点.....	(96)
4.4 用边缘模型拟合方法探测边缘.....	(99)
4.5 边缘的连接与边界的提取	(101)
4.6 区域特征的提取	(115)

第五章	距离信息的光电感知方法	(126)
5.1	距离图像与距离成像传感器	(127)
5.2	距离传感器的工作参数	(131)
5.3	飞点时间法测距(TOF)	(134)
5.4	主动式光学三角法测距	(151)
5.5	莫尔等高条纹法测距	(173)
5.6	全息干涉术测距	(181)
5.7	获得距离信息各种方法的比较	(190)
第六章	距离图像数据处理及其三维表达	(193)
6.1	距离图像的数据结构和边缘点	(193)
6.2	从距离图像数据中提取物体的边缘点	(196)
6.3	基于线条图像基础上的场景分析	(203)
6.4	三维边缘点的连接方法	(208)
6.5	距离图像地形性特征的提取	(211)
6.6	距离图像数据的三维结构表达	(223)
第七章	体视视觉传感	(239)
7.1	体视视觉的几种工作模式及其几何关系	(240)
7.2	体视视觉中的极线、极点和视差	(248)
7.3	像素对应点匹配的一般性问题	(254)
7.4	用相关技术寻求对应点	(257)
7.5	特征匹配与松弛算法	(263)
7.6	平面物体对应点和对应线的寻求方法	(268)
7.7	三相机系统解决匹配问题	(271)
第八章	单相机感知物体形状和姿态	(277)
8.1	双向反射分布函数(BRDF)	(278)
8.2	反射图与图像辐照度方程	(281)
8.3	光度体视法	(289)
8.4	由单幅图像的明暗分布提取外形信息	(291)
8.5	由物表面上的几何信息提取外形	(300)

8.6 由运动推算物体的三维外形	(311)
第九章 视觉传感和测量中的定标技术	(320)
9.1 定标的基本问题和算法	(321)
9.2 通用高精度的相机标定技术	(330)
9.3 用灭影点、灭影线的特性进行相机标定	(343)
参考文献	(356)

第一章 光学视觉传感

光学视觉传感是用光学、电子学和计算机应用学等方法实现对客观三维世界的感知、度量或识别的应用技术。类似于人类的视觉效果,光学视觉传感所提供的信息,不仅是客观世界的局部参量,而且是对观察对象的整体描述,描述的内容包括形状、尺寸、距离和运动速度,等等。

根据应用要求的不同,光学视觉传感装置可以是一个相对独立的系统,也可以是机器视觉大系统中一个重要的子系统。作为相对独立的系统,光学视觉传感可以完成对物体的面形描述,三维尺寸的度量和形状、取向的识别等工作,在工业检测与监控,三维非接触式测量和视觉测量等方面有着广泛的应用需求。作为机器视觉的子系统,光学视觉传感装置完成许多视觉低层次和中层次处理的工作,它的输出是高层次视觉处理(模式分类与识别,场景分析等)的主要依据。任何机器视觉系统,都要求有一个设计良好的、输出信息丰富的光学视觉传感装置。所以,在机器视觉的研究、应用日益发展和深入的今天,光学视觉传感技术的研究和装置的应用也有着宽阔的前景。

本章首先从视觉层次的范畴来界定本书的研究内容 and 应用领域。然后,就视觉的一般性问题作一概述,这些问题包括视觉理论、视觉的可计算性和机器模拟视觉的难点等。这里所述的一般性问题,就其重要性来说,涉及到视觉技术的总体问题。迄今为止,对这些问题的解决还不够完整和成熟。在这个范围内对某个问题的突破,会带动整个视觉技术的进步,因此,必须给予足够的重视。在本章的后面,扼要地说明了视觉传感中图像获取的一些基本知识和处理方法。这些方法对获得一幅高质量的图像是十分有用的。一

个成功的工业视觉系统主要依赖于两个方面:高质量图像的获取和图像分析的算法技巧,而前者往往影响更大。所以,图像获取始终是视觉传感技术中一个重要的、共同性的问题。

1.1 视觉与视觉传感

1.1.1 人类视觉与机器视觉

视觉是个古老的研究课题。人类视觉是包括眼睛、视网膜、神经节、视交叉、外侧膝状体和大脑的视觉区在内的一个完整系统,如图 1-1 所示。许多年来,人们从生物学、解剖学、神经学入手,结合视觉生理学和视觉心理学等学科,对视觉的敏感性、色彩、分辨率和反应速度等方面作了许多研究,对视觉的生理机制和功能有了一定的认识,这些认识可以粗略地描述如下

- 人眼对外界事物的感知相当于一个光学成像系统,视网膜处于成像面位置;

- 视网膜上的杆状细胞和锥体细胞是感受光信息的敏感元。锥体细胞在高照度水平下起作用,能感知颜色,且敏感性高。杆状细胞的作用与锥体细胞互补,即在低照度水平下起作用,不能感知颜色,也不能提供精细的物像;

- 杆状细胞和锥体细胞将光信息转换为神经信号,神经信号经由大、小两种类型的神经节细胞加工后,通过视交叉传到外侧膝状体;

- 外侧膝状体由空间上分开的两种大小不同类型的神经元组

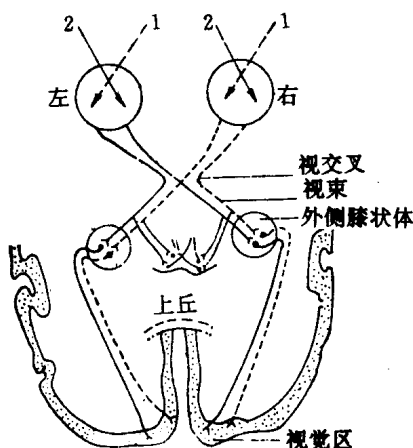


图 1-1 人类视觉系统

成,其中小神经元细胞接受来自小神经节细胞传来的神经信号;大神经元细胞接受来自大神经节细胞传来的神经信号;

- 由外侧膝状体出来的信号被传入大脑皮层的视觉区。视觉区对神经信号的加工可以看作四个并行系统:一个是处理色彩的,一个是处理运动的,一个是与颜色密切相关的形状处理系统,另一个则是与颜色无关的形状处理系统;

- 大脑皮层内各并行区相互作用进行视觉信息的合成,最终形成统一的视觉感知。

人们对视觉的认识,为机器视觉的发展提供了依据。机器视觉是用机器来模拟人类的视觉功能,对人类视觉的认识越清楚,就越有可能用机器来模拟。但是,迄今为止人们对视觉的认识是很有限的,特别是人类视觉对景物的认知过程,如何识别对象,如何认识对象,如何分析场景中各个对象间的关系……,知之甚少。所以,机器视觉还远不能达到模拟人类视觉功能的程度。

尽管如此,随着计算机技术、数字图像处理、计算机图形学和人工智能等学科的发展,人们仍然从易到难,从简单到复杂,研制了许多有局部视觉功能的系统。这些系统在工业应用中起着很大的作用。对人类视觉机理通用性理论研究的不断深入和机器视觉应用系统的日益完善,形成了一门崭新的学科,称之为计算机视觉或机器视觉。

图 1-2 为常见的机器视觉系统的各个主要部分及它们之间的关系。三维世界在一定的照明条件下被成像系统接收而得到图像。正像人们所熟知的,在当今技术条件下,成像后得到的是景物的二维图像,景物的深度和不可见部分的信息被丢失了。但是,二维图像的灰度分布中还是隐含着景物的某些三维信息,例如取向、形状等,可以通过一定的算法,将这些局部三维信息提取出来。图像处理和特征提取部分的功能是滤除图像中的噪声和把图像中的重要信息表达清楚,按照对人类视觉的认识,这里的重要信息是指图像中强度变化剧烈处的位置及其分布,或者是有规则的图案。在大多

数工业应用的视觉系统中,这一过程所提取的特征是边缘、区域或纹理。特征提取后所得到的是要素图,或者说是对对象的素描图,它大致描述了景物的轮廓。素描图结合照明和成像的特定条件,运用三维信息恢复的算法,可以在以观察者(相机)为中心的坐标系中,得到可见表面的三维信息,这些信息包括:表面上各点离观察者(相机)的距离,各点的法向以及它们的不连续点等等,由这些三维信息构成的图像称之为 2.5 维图。2.5 维图像经过分类与模式识别,可以识别出场景中存在的物体。机器视觉处理到这个步骤,其输出的信息已不再是图像形式的信息,而是某些表示物体类别或关系的符号,这些符号在场景分析过程中进行运算、推理或决策,最终给出描述场景中各物体类别及其相互关系的结果,以指令、显示等方式通过执行机构完成应用任务。

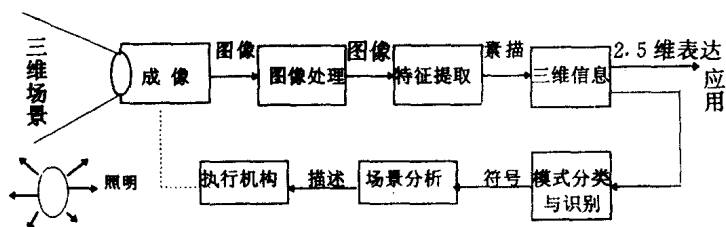


图 1-2 机器视觉系统的一般组成

1.1.2 视觉传感

视觉传感是视觉中感知视觉信息的一个部分。视觉传感给出的信息极大地影响着视觉中、后期处理的过程和结果。所以,一个合理的视觉传感装置是构成良好视觉系统的基础。

按照人们对“视觉”和“传感”含义的理解,如何科学地从视觉系统中来定义“视觉传感”所应该包含的内容,不是这里所论及的重点。在本书的范围内,以图 1-2 为基础,把光学视觉传感技术界定在从照明条件开始到 2.5 维图像的获得范围内。根据这个界定,光学视觉传感研究的是以观察者(相机)为中心,获取客观世界三

维信息的技术,所采用的方法涉及光学、光电技术、电子学、图像处理和计算机应用等各个方面。光学视觉传感装置的输出可以作为视觉系统后续处理所必需的信息源,也可以作为感知信息,实现对物体的三维描述和度量,满足一些特定的工业应用要求。在系统的模块化技术中,光学视觉传感装置不失为一个重要的、独立的模块,起着视觉信息获取、感知和度量的作用。

图 1-3 为光学视觉传感系统的一般组成。此框图在内容上的展开,大致可勾划出本书基本内容的框架。

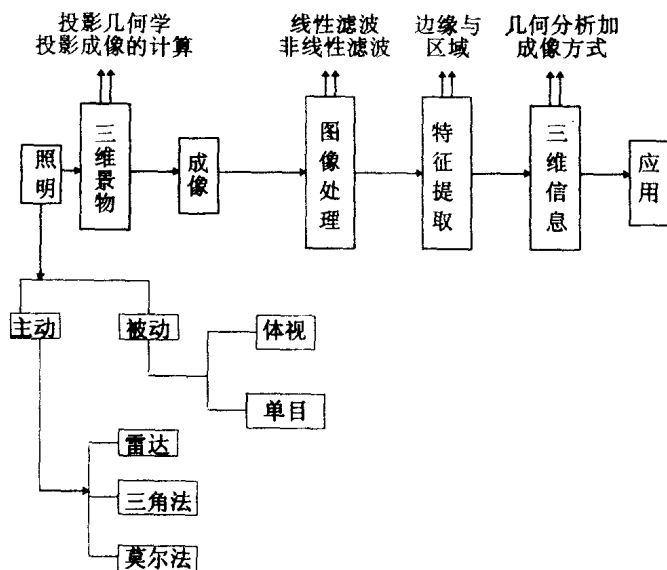


图 1-3 光学视觉传感的组成及相关内容

“照明”是图像构成的一个重要因素,照明条件和方式的不同直接关系到提取三维信息的原理和方法。被动光照和主动光照是两类不同方式的照明。被动光照通常指的是自然环境下阳光对物体的照明,或人工扩展光源对物体的照明,这种照明条件主要影响图像的灰度对比度,包括物体与背景的对比度和物体各部分之间的对比度。自然光照一般对比度较差,人工光源照明可以按需要调

整对比度的强弱。被动光照条件下的视觉感知又称作被动视觉,被动视觉获取三维信息的方法通常是体视方式、光度体视法,或从明暗度分布提取外形的方法等等。本书第七、第八两章,将讨论这些问题并给出解决的方法。主动光照是指用精心设计的特定光束对物体照明,这种照明方式使相机获得的图像中直接隐含有对像物的三维信息。主动光照条件下的视觉感知又称作主动视觉。由于光学方法的多样性,主动视觉获取三维信息的原理和方法也呈现较大的多样性和灵活性。按光学原理来分,较为常用的有飞点时间法(TOF)、几何三角法、莫尔(Moiré)法、全息相干法、聚焦法等等。本书第五章将对这些常用方法的原理进行分析,并列举一些最近的主动视觉传感装置实例。

“成像”环节是视觉传感的感受部分,也是直接维系三维景物与二维图像之间关系的环节。透视投影方程和投影几何学仍然是分析成像关系的基础。但是,纯几何学上直角坐标系中的运算常常给计算机运算带来某些不方便,如数据溢出、误差偏大等。本书第二章建立起一套以齐次坐标系表示图像中的点、线及其相互关系为基础的数学工具,作为视觉传感中投影成像的计算基础。投影几何学中的定理、公式在齐次坐标系中重新表达后,既克服了原有计算上的缺点,又能较明确地反映出二维图像与三维物体之间的某些对应关系,很适合于对视觉信息的计算和分析。特别是在视觉信息的中、低层次处理过程中,上述计算工具是图像分析所必不可少的。

框图中的图像处理和特征提取环节主要是讨论寻求边缘、区域和纹理特征的不同提取方法。就图像而言,有二值图像、灰度图像和距离图像。二值图像最简单,但完全失去了三维信息的可能来源,所得到的只是物体与背景间的外轮廓。对于灰度图像,可以利用基于灰度突变基础上的多种边缘探测算子,进行图像处理,得到边缘或区域图像(素描描述)。这里,由于噪声的存在,在选择探测算子时,必须考虑到对图像的平滑滤波作用。距离图像的特征提

取方法以距离的变化或相邻区域间距离的关系作为判据,得到三维的素描或地形性特征的描述。上述内容在第三、第四和第六章中都将有较详细的讨论。

框图的最后是视觉传感系统的综合结果,利用前面提及的技术,得到以相机(观察者)为中心的三维信息来满足特定的应用要求。为了得到精度较高的三维信息,除了算法上的考虑之外,还必须对系统的几何和结构参数进行标定,包括相机的内外部参数,照射光源的内、外部参数,以及它们与物坐标系间的相互位置关系等等。标定技术使视觉传感系统建立在一个准确的系统参数基础之上,或者说,只有经过定标后的系统参数才能在算法中参与运算,得到可以实际使用的三维信息。从这个意义上来看,标定技术也是视觉传感技术中的一个基础性技术,所以,在第九章中专门讨论各种标定方法。这样,也就把本书的内容构成了一个较为完整的体系。

1.2 视觉计算理论

视觉计算理论是要建立一个计算模型,它能真实地反映视觉进行的过程和所具备的功能。所以,一个完整的理论应该建立在对视觉的机理和信息传递过程有透彻了解的基础之上。前已述及,人类对视觉的知识知之甚少,尤其是人类视觉中对客观世界的“理解”层次,涉及视觉心理等复杂的精神活动。更难以用某种模型加以描述。因此,人类视觉计算理论的创立看来为时尚早。

这里讨论的视觉计算理论是指用机器(光学装置、电子装置、计算机等)来实现部分视觉功能,或类似于人类视觉效果所应遵循的计算模型。在这方面最有代表性的就是英籍科学家 D. Marr 70 年代中后期所创立的视觉计算理论。Marr 计算理论一出现,就得到视觉领域研究工作者的普遍重视并很快为大多数研究者所接受。在这一理论框架下,自 80 年代以来,机器视觉的算法研究和硬