

Tuxiang Xulie Guangliu Jisuan
Jishu Jiqi Yingyong

图像序列光流计算 技术及其应用

陈震 等著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

图像序列光流计算技术 及其应用

陈 震 危水根 江少锋 孙开琼 著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

以往的计算机视觉或图像书籍对光流场计算技术及其应用所涉及的内容缺乏全面系统地阐述,且由于光流场计算技术及其应用等方面的新理论和新方法层出不穷,涉及这些新理论和新方法的书籍极少。因此迫切需要一本全面系统介绍光流场计算技术及其应用新理论和新方法的书籍。

本书系统地介绍项目团队近十年对光流场计算技术及其应用的研究成果,包括光流场研究现状、变分光流场计算技术、直线光流场计算技术、点光流场计算技术、激光和 CCD 数据分割中的光流场应用、直线光流场三维重建方法及其应用、运动目标检测与分割中的光流场应用等。

本书可供高等学校计算机及相关专业研究生参考,也可作为该领域相关研究人员或技术开发人员的学习参考用书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

图像序列光流计算技术及其应用 / 陈震等著. —北京:电子工业出版社, 2012.9
ISBN 978-7-121-18591-5

I. ①图… II. ①陈… III. ①图象光学处理 IV. ①TP391.41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 226582 号

策划编辑:秦绪军 徐蔷薇

责任编辑:贾晓峰

印 刷:涿州市京南印刷厂

装 订:涿州市京南印刷厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1 092 1/16 印张:14.25 字数:274 千字

印 次:2012 年 9 月第 1 次印刷

印 数:2 000 册 定价:49.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

前 言

图像序列光流计算及其三维重建技术是计算机视觉领域中的一个热点问题。自 1981 年 Horn 提出了图像序列光流计算理论后,国内外许多专家学者投入到该领域的研究中。近些年,随着计算机软硬件水平的不断发展,图像序列光流计算及其三维重建技术已在社会生产生活的各个领域显示出越来越重要的地位与作用,尤其是在工业、军事和医学等领域具有重要的现实意义,如工业机器人的视觉系统、无人机目标检测与导航系统、空间卫星照片的自动分析与跟踪系统及医学图像分析和诊断系统等。

本书主要阐述图像序列光流计算及其应用技术,重点在于光流计算方法和基于光流的三维重建理论和技术。

第 1 章是绪论,主要介绍光流的分类及基础知识。第 2 章介绍 Horn 和 Lucas 两种经典光流算法的基本原理及推导过程,并通过实验来分析它们各自的优缺点。

第 3 章重点阐述变分方法在光流计算中的应用,并提出两种先进的稠密光流算法,通过实验证明了这两种方法具有计算精度高、鲁棒性好等优点。第 4 章主要介绍利用点光流进行三维重建的方法和理论,分别给出了基于稀疏光流和稠密光流的三维重建模型。

第 5 章首先提出直线光流的概念,然后推导出直线光流的计算和三维重建模型,并利用数学理论证明了该模型的鲁棒性。第 6 章针对利用最小二乘法计算直线光流可能带来较大误差的缺点,分别使用不同的优化解法进行分析,并给出了实验对比结果。

第 7 章介绍光流计算在激光和 CCD 分割中的应用。第 8 章提出了一种基于光流与水平集算法相结合的运动目标检测与分割算法,与传统方法相比,该方法具有计算精度高、时间消耗少等优点。

第 9 章对本书内容进行概括和总结,并针对目前光流计算研究中存在的问题提出了一些研究方向及可能的解决方法。

本书的撰写始于 2010 年 9 月,当时本书的第一著者在清华大学自动化系从事访问学者研究,一方面在那里学习图像理解及计算机视觉领域最新的方法与理论,另一方面潜心构思本书的主体框架,并开始撰写本书的部分内容。为使内容上具有理论性、实用性和先进性,本书既介绍了图像序列光流计算领域的一些经典理论与算法,同时又汇集了作者及课题组成员近年来研究图像序列光流计算及其应用方面的最新理论与成果,相信本书可以为图像序列光流计算及应用领域的广大研究人员提供一些参考。

感谢南昌航空大学专项出版基金的资助；感谢课题组的危水根副教授、江少锋副教授和孙开琼博士等，他们为本书的完成和出版提供了大量的帮助；感谢硕士研究生许强、杨建伟、卓亮、简宏伟、袁猛、闫军、张聪炫、梅广辉、江頔、王凌、黄静等人为本书提供了大量的实验图片及数据等宝贵资料。

本书的出版得到国家自然科学基金、教育部科学技术研究重点项目、航空科学基金、江西省自然科学基金等项目的资助。没有这些资助，本书的研究及出版就无法顺利进行，在此向支持本书出版的机构致以诚挚的感谢。

由于作者水平有限，不足之处在所难免，欢迎读者批评指正。

陈震

2012 年春于南昌航空大学

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 光流计算研究的主要方向及研究现状	(2)
1.1.1 光流计算不适定问题的研究	(2)
1.1.2 光流计算的不连续性问题研究	(4)
1.1.3 直线光流计算技术的研究	(4)
1.1.4 由光流重建物体三维运动和结构的研究	(5)
1.2 运动场与光流场	(6)
1.3 彩色图像序列的光流计算	(8)
1.3.1 色彩灰度一致性方法	(8)
1.3.2 色彩自身一致性方法	(9)
本章小结	(11)
第 2 章 光流经典计算方法	(12)
2.1 引言	(12)
2.2 光流计算基本等式	(12)
2.3 Horn 算法	(13)
2.4 Lucas 算法	(17)
2.5 实验分析	(18)
2.5.1 误差测量	(18)
2.5.2 旋转材质球图像序列实验	(19)
2.5.3 Yosemite 图像序列实验	(20)
2.5.4 花园图像序列实验	(21)
2.5.5 Hamburg Taxi 图像序列实验	(23)
本章小结	(24)
第 3 章 基于变分方法的稠密光流计算技术	(25)
3.1 引言	(25)
3.2 变分计算技术基础知识	(25)
3.2.1 变分方法基本原理及扩散反应方程	(25)
3.2.2 最速下降法	(27)
3.3 应用于光流计算的变分方法	(28)
3.3.1 最小化能量泛函到非线性 PDE 的转换	(28)

3.3.2	能量泛函与扩散反应方程的广义表达	(29)
3.4	变分光流计算方法中的数据项和平滑项	(31)
3.4.1	光流计算中数据项守恒假设	(31)
3.4.2	光流计算中平滑项的物理学背景	(34)
3.4.3	结合图像扩散的各种平滑方法	(37)
3.5	图像光流联合驱动的变分光流计算方法	(41)
3.5.1	灰度守恒与梯度守恒相结合的数据项	(41)
3.5.2	基于图像、光流联合驱动扩散的平滑项	(43)
3.5.3	多分辨率分层细化策略	(45)
3.5.4	基于图像光流联合驱动的变分光流计算技术处理策略	(46)
3.5.5	实验分析	(50)
3.6	基于结构张量的变分光流场计算技术	(62)
3.6.1	基于结构张量守恒与灰度守恒相结合的数据项	(62)
3.6.2	各项异性扩散的平滑项	(63)
3.6.3	扩散反应方程	(65)
3.6.4	数值实现	(66)
3.6.5	实验分析	(67)
	本章小结	(72)
第4章	点光流三维重建技术	(73)
4.1	引言	(73)
4.2	基于稀疏光流场的三维重建技术	(73)
4.2.1	角点检测及跟踪	(73)
4.2.2	稀疏光流计算	(75)
4.2.3	光流运动模型	(76)
4.2.4	算例分析	(79)
4.3	基于稠密光流的三维重建技术	(81)
4.3.1	二维光流矢量与三维运动参数的关系	(81)
4.3.2	基于光流的三维运动参数的能量函数	(83)
4.3.3	三维运动参数能量泛函的求解	(84)
4.3.4	三维结构的恢复	(85)
4.3.5	二维图像光流的恢复	(86)
4.3.6	实验分析	(86)
	本章小结	(93)

第 5 章 直线光流计算及三维重建技术	(94)
5.1 引言	(94)
5.2 直线的表示、提取及跟踪匹配	(94)
5.2.1 直线的 2D 和 3D 表示原则	(95)
5.2.2 直线的 3D 表示	(95)
5.2.3 直线的 2D 表示	(100)
5.2.4 平面直线的提取	(101)
5.2.5 图像序列直线特征的跟踪匹配	(103)
5.2.6 实验分析	(105)
5.3 直线光流的定义和计算	(108)
5.3.1 图像直线与空间直线的关系	(108)
5.3.2 直线光流的定义和计算	(108)
5.3.3 直线光流三维重建模型	(109)
5.4 直线光流三维重建鲁棒性分析	(113)
5.4.1 理论基础	(113)
5.4.2 推导与论证	(114)
5.5 实验分析	(120)
5.5.1 直线模拟数据仿真实验	(120)
5.5.2 三角棱锥仿真实验	(123)
5.5.3 合成立方体运动实验	(126)
5.5.4 真实图像方盒旋转实验	(128)
5.5.5 机械零件旋转和平移实验	(129)
本章小结	(131)
第 6 章 基于优化算法的直线光流三维重建方法	(133)
6.1 引言	(133)
6.2 基于神经网络的直线光流三维重建	(133)
6.2.1 BP 网络神经元模型	(133)
6.2.2 前馈型神经网络结构	(134)
6.2.3 基于神经网络的直线光流模型	(134)
6.2.4 直线模拟数据仿真实验	(138)
6.3 基于遗传算法的直线光流三维重建	(139)
6.3.1 遗传算法简介	(139)
6.3.2 遗传算法原理	(140)
6.3.3 基于遗传算法的直线光流模型	(143)

6.3.4	直线模拟数据仿真实验	(144)
6.4	基于粒子群算法的直线光流三维重建	(146)
6.4.1	粒子群算法简介	(146)
6.4.2	粒子群算法原理	(146)
6.4.3	基于粒子群算法的直线光流模型	(147)
6.4.4	直线模拟数据仿真实验	(149)
6.5	基于蚁群算法的直线光流三维重建	(150)
6.5.1	蚁群算法简介	(150)
6.5.2	蚁群算法原理	(150)
6.5.3	基于蚁群算法的直线光流模型	(152)
6.5.4	直线模拟数据仿真实验	(154)
6.6	实验分析	(156)
6.6.1	三角棱锥仿真实验	(156)
6.6.2	真实立方体旋转实验	(157)
6.6.3	真实机械零件图像序列实验	(160)
6.6.4	室内电风扇图像序列实验	(162)
	本章小结	(165)
第7章	激光和 CCD 数据分割中的光流应用	(166)
7.1	引言	(166)
7.2	图像预处理	(167)
7.3	基于光流的运动目标的检测	(169)
7.3.1	基于光流的运动目标检测算法描述	(169)
7.3.2	实验分析	(170)
7.4	光流算法的改进	(173)
7.4.1	改进算法描述	(173)
7.4.2	改进算法实验分析	(176)
7.5	运动目标区域的抽取	(179)
7.5.1	图像区域分割合并算法简介	(179)
7.5.2	基于光流的区域分割合并算法	(180)
7.5.3	光流场区域分割合并实例	(183)
	本章小结	(185)
第8章	基于光流和水平集算法相结合的运动目标检测	(186)
8.1	引言	(186)
8.2	基于光流场的运动目标粗检	(187)

8.2.1	光流场的计算	(187)
8.2.2	数学形态学区域填充	(188)
8.3	基于水平集算法的运动目标细检	(189)
8.3.1	水平集算法原理	(189)
8.3.2	图像颜色模型选择	(191)
8.3.3	运动目标的提取	(193)
8.4	实验与分析	(194)
8.4.1	误差测量	(194)
8.4.2	合成图像序列实验	(195)
8.4.3	真实图像序列实验	(198)
	本章小结	(202)
第 9 章	总结与展望	(203)
	参考文献	(205)

第1章 绪论

随着计算机软、硬件水平的不断发展，利用计算机自动获取图像或目标的三维信息技术已在社会生产、生活的各个方面显现出越来越重要的地位和作用。基于计算机视觉的三维信息获取技术也称为视觉运动分析，该技术主要研究从图像序列中提取场景中目标物体结构、位置和运动信息的理论与方法，属于计算机中期视觉范畴。

视觉运动分析主要分为两种方法：基于特征（Feature）的方法和基于光流场（Optical Flow Field）的方法。基于特征的方法也称为离散处理方法，主要思想是对相邻时刻两帧或多帧图像序列进行诸如角点、直线或曲线等特征的抽取，建立特征对应关系，并根据这些对应特征计算三维物体的结构和运动；基于光流场的方法也称为连续处理方法。

当人的眼睛观察运动物体时，物体在人眼的视网膜上形成一系列连续变化的图像信息，这些连续变化的图像信息不断“流过”视网膜（即图像平面），好像一种光的“流”，故称之为光流。光流表达了图像的变化，由于它包含了场景中目标的运动信息，因此可被观察者用来确定目标的运动情况。从光流的定义可以看出，光流有如下三个要素：一是运动（即速度场），这是光流形成的必要条件；二是带光学特性的部位（如有灰度的像素点），它能携带信息；三是有成像投影（即从场景到图像平面），因而能被观察到。

光流计算是研究利用图像序列中像素强度信息的时域变化和相关性来确定各像素位置的“运动”，即研究图像灰度在时间上的变化与景象中物体结构及其运动的关系。光流计算研究在计算机视觉和图像处理等领域有非常重要的地位，涉及图像处理、人工智能和模式识别等学科，在航天、军事、工业、商业和医学等领域有着广泛的应用，如执行各种特殊任务的机器人视觉系统、基于运动分析的空间卫星跟踪系统、地空导弹火控系统、航天领域的自动飞行器着陆与智能控制系统、资源勘探、高清电视会议的动态图像传输、气象云图分析和预报、军事侦查中航空或卫星照片的自动分析系统、车辆无人驾驶、医学上器官异常的分析和诊断系统等。光流计算在工程应用上的巨大潜力及在人工智能和思维科学研究中的重要地位，使其成为当今计算机视觉研究领域中的热点之一，许多国家特别是发

达国家都很注重这方面的研究。虽然光流场在很多方面得到了应用,但缺乏有力的理论支持,特别是关于光流场计算的理论问题还存在着很多缺陷,也面临着巨大的挑战,主要表现在光流场计算的不适定问题、算法的鲁棒性问题及遮挡边界处的光流计算问题,因此理论研究具有重大的科学意义。若能尽快、切实地解决理论缺陷问题,应用领域将日益扩大,有利于光流场计算技术的发展。

1.1 光流计算研究的主要方向及研究现状

时变图像序列光流计算技术的研究大致有以下几个方向:①研究解决光流计算不适定问题的方法;②研究光流计算基本等式的不连续性问题;③研究直线光流等特征光流的计算技术;④研究由光流场重建物体三维运动和结构的理论与方法。

1.1.1 光流计算不适定问题的研究

1981年,Horn等人在相邻图像时间间隔很小,且图像中灰度变化也很小的前提下推导出灰度图像光流场计算的基本等式:

$$I_x u + I_y v + I_t = 0 \quad (1-1)$$

式(1-1)中 (u, v) 是时刻 t 时图像中某一像素点沿图像平面 X, Y 轴方向的速度矢量,即该点的光流矢量。式(1-1)中包含两个未知数,但只有一个方程,因此,式(1-1)的解有无穷多,显然这是一个不适定问题。Horn最早应用变分原理,通过添加全局平滑约束项,采用全局约束的方法解决了光流场计算的不适定问题。Lucas在处理不适定问题时假设在像素点邻域内速度相等,使用局部最小二乘法计算出稀疏光流场。

而后的20年里关于光流计算的新理论和新算法不断涌现,这些方法大概可以分为以下几种:微分法(Differential Methods),区域匹配法(Region-Based Matching),能量法(Energy-Based Methods),相位法(Phase-Based Methods)等。其中具有代表性的研究主要有:Nagel为了克服传统光流计算方法在运动边界计算的不准确,提出了有向平滑约束思想;Black和Anandan引入统计学中的统计函数降低溢出点干扰数据对光流计算的影响;Lauze提出由粗到精、多分辨率分层细化的方法,通过金字塔变换将原始图像序列分成不同分辨率的图层,解决图像中存在大位移运动时光流计算精度较差的问题,但是此方法不适用于计算非刚体运动中的形变较大部分;Kim等人利用加性因素和乘性因素来消除光照对光流计算的影响;Papenberg对变分模型中的数据项进行了总结和分类,并讨论了它们

的非线性形式,通过应用分层细化策略、光流计算变形技术得到了较为精确的计算结果;Barron 对前一阶段的代表性工作做了总结,并对各种算法的性能做了比较,结果表明,基于微分的光流计算方法总体性能最优,Jonathan 的系统评估测试也证实了这一结论。

此后的光流计算技术研究进展较为缓慢,主要是光流计算本身存在的一些难点和问题,如光流计算的可靠性问题、运动边界遮挡问题和复杂背景运动问题、光流计算效率的问题等。近些年,随着计算机硬件水平的不断提高,以及偏微分方程、张量分析等数学方法在图像分析中的不断渗透,光流计算技术在计算效率、计算精度和可靠性等方面取得了较大的进展。以 Weickert 为首的德国曼海姆大学计算机视觉研究中心针对复杂场景下点光流计算的鲁棒性、图像中存在剧烈光照变化时的点光流计算精度及光流计算效率等问题展开了大量的研究,取得了较多的研究成果,被认为是光流计算技术的重大突破。Roth 提出了场景中含有镜面等反射物体时的光流计算方法。Black 将空间统计理论和马尔可夫随机场引入到光流计算中。Brox 针对由粗到精、多分辨率分层细化策略计算非刚体运动的限制,将变分方法与匹配方法相结合解决了非刚体运动大位移光流计算问题。Baker 等人对现有的各种光流检测、分割方法进行了系统地比较与分析,提出了一整套客观的性能评价方法,并提供了标准的测试图像序列,为光流计算及基于光流的目标检测与分割等后续研究奠定了基础。

国内一些学者也非常关注图像序列光流计算理论与方法的研究。其中,复旦大学吴立德教授领导的课题组提出了光流计算的多通道方法,利用多通道技术将图像分割和光流计算相结合,使连续处理方法也能适用于多物体有遮挡的运动场景。陈震对时变图像光流计算方法和存在的问题进行了总结,并对研究前景指出了一些可能的方向。张建明提出了一种局部和全局相结合的方法,采用五点光流约束的局部方法结合全局方法,计算得到了既致密又有较好鲁棒性的光流。梁晓云等人设计了一种基于快速滤波器组的光流计算方法,采用解析小波的方法计算光流,该方法能较好地对运动物体进行光流估计。卢宗庆提出了一种基于图像梯度矢量场的双向广义动态图像模型的光流计算方法,在图像梯度场上进行光流估计以减弱光照变化带来的影响,将一个大的运动矢量分解为两个不同方向的子矢量进行估计,有助于减小估计误差,提高计算精度。关键、段惠等人在几何代数域内推导了光流约束方程的新形式,通过求解关于初值问题的热传导方程求解光流。随着神经动力学在计算机视觉中的不断深入,对光流场计算研究也产生了深远的影响,神经网络方法将成为光流技术的一个发展方向。

1.1.2 光流计算的不连续性问题研究

由于在光流计算基本等式的推导过程中使用了泰勒级数展开,这隐含了认为灰度变化及速度场的变化都是连续的假设,但在实际情况中,图像中的灰度变化及速度场都可能出现不连续性。例如,景物中各个独立的表面就使光流的速度场成为非连续的。另外,光流计算基本等式在出现这种不连续时是否仍然成立是一个值得讨论的问题。

这方面具有代表性的研究是由日本学者 Mukawa 提出的, Mukawa 考虑到光流场计算基本等式由于应用了泰勒级数展开,实际上是不连续的,故引入一个修正因子 q ,并使 $q = I(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t) - I(x, y, t)$,这样光流场计算基本等式就修正为

$$I_x u + I_y v + I_t + q = 0 \quad (1-2)$$

式(1-2)中,修正因子 q 可以由物体的运动和投影模型求出,这样就可以较好地解决光流计算基本等式的不连续问题。

很多情况下,由于灰度变化及速度场的变化都是不连续的,应用光流场计算基本等式,理论上只能求解位移变化小于 1 像素的连续两帧图像的光流。为了求得大位移情况下的光流, Alvarez 等人对光流场计算基本公式做了如下 3 方面的改进:①避免由不同图像中灰度和亮度条件引起的矛盾;②用一个逐步精确的线性刻度,以避免其收敛于不相关的局部最小值;③建立一个能量函数使其成为线性亮度变化下的不变量。经过改进, Alvarez 等人提出的方法可以计算超过 10 像素的位移,且效果极佳,准确率很高。

1.1.3 直线光流计算技术的研究

光流计算作为计算机视觉的重要组成部分,其主要作用是作为中间介质重建三维物体的运动和结构。基于点光流的三维重建方法在计算精度、计算效率和鲁棒性分析等方面已经进行了较充分的研究,也取得了一些较好的理论与方法。但由于该方法只是利用了图像中“像素点”这一最小度量单位,在很多领域还无法满足实际要求。直线是计算机视觉中最常用的一种特征信息,相对于单个像素点,直线特征的抽象层次更高,能够提供更多的拓扑结构信息。与曲线、平面等特征相比,直线更易于检测与匹配,计算的复杂度较低,且曲线可以由分段直线逐段表达,而平面则可以由直线组合表达,因此越来越多的研究人员关注基于直线光流的三维重建研究。针对某些场景下可供利用的直线数量较少的情况, Kollmann

提出了一种只需要利用三帧图像中的 2 条直线段就可以计算出摄像机运动的 6 个参数的方法。为了得到精确的三维运动参数, Mosaddegh 利用直线的光度守恒假设, 提出了一种基于直线邻域匹配的运动估计与三维重建方法, 提高了重建算法的精度。针对大规模场景的三维重建问题, Mirzaei 使用全局优化的方法, 首先利用图像序列中的对应直线特征估计旋转速度, 然后采用分步迭代的方法计算出对应的三维结构参数, 可以实现大规模场景的三维重建。针对不规则表面的重建问题, Liu 将分水岭算法引入基于直线的三维重建中, 以多条直线段来代替曲线, 设计了一种适合复杂表面刚体的重建方法。当可提供的图像序列数量较少时, Elqursh 设计了一种只需要两帧图像中的两条平行直线和一条正交直线就可以估计目标物体的运动参数并恢复其三维结构的新方法。

在基于直线光流的三维重建方法中, 图像序列中直线光流的检测、跟踪及匹配是十分重要的环节, 图像直线光流匹配的准确度和速度直接关系到整个三维重建算法的精度与效率。Lee 通过将直线段端点坐标作为直线的参数, 提出了一种基于离散 Hough 变化的直线检测方法, 有效地提高了直线检测的精度。Fernandes 针对直线检测效率较慢的问题, 给出了快速 Hough 直线检测方法。Rehbinder 提出了一种基于扩展卡尔曼滤波的直线跟踪算法, 改变了传统的人工匹配方法, 大大提高了直线匹配的正确率。He 使用全局方法对直线匹配进行约束, 通过重新定义直线段的几何描述, 设计出适合最小二乘法计算的匹配模型。这些方法对基于直线特征的三维重建算法提供了大量的帮助, 极大地促进了直线重建算法在计算精度、计算效率及鲁棒性等方面的提高。

1.1.4 由光流重建物体三维运动和结构的研究

三维场景中, 一个刚体上的 6 个运动参数是相同的。如果能得到来自刚体不同部分的光流信息, 就可以利用这些光流信息同时估计出三维运动的 6 个参数。其中最具代表性的研究是 Adiv 的全局光流三维重建技术, Adiv 把整个分析过程分为如下两大步: 将得到的光流场分成若干区域, 每个区域对应空间中一个平面的运动; 然后将分割出的彼此连接部分进一步编组, 使其对应单个的刚体目标, 进而通过假设, 估算出三维运动的参数与结构信息。其所提供的运动参数是旋转参数、平移运动的方向及空间表面的相对深度。在得到图像序列点光流的计算结果后, Nehab 使用图像深度守恒约束对连续几帧图像的点光流进行匹配, 然后求解出物体三维运动参数与结构, 有效地提高了重建算法的精度。针对重建算法的鲁棒性问题, Kolev 根据最大流-最小割原理提出了一种基于点光流的三维重建方法, 并分别提出三种不同的计算模型, 实验表明基于全局约束与局部约束相结合

的重建模型计算精度最高、鲁棒性最好。Newcombe 提出了一种基于近似邻域约束的光流场三维重建方法，可以快速计算出摄像机三维运动参数及图像中场景的相对深度坐标，解决了光流重建算法时间消耗较大的问题。Lee 在得到精确的点光流值后，使用概率分布的方法来判断目标物体重建时的边缘轮廓，该方法为图像中存在运动遮挡时的三维重建技术提供了可能的解决办法。

一般情况下，点光流三维重建方法都是先计算出图像序列的点光流值，然后选择合适的算法来重建目标物体三维结构与运动，而“光流计算”这一中间过程往往会给重建算法带来较大的时间消耗与计算误差。针对这一缺点，Mitiche 通过将图像中像素点光流与三维点的运动速度联系起来，构造出一个未知参数是三维运动速度的约束守恒公式，并使用最小描述长度原理对设计的光流场三维运动检测算法进行约束，可以较准确地估计目标物体的三维运动速度，但该方法只适合估计平移运动速度。Sekkati 在 Mitiche 的基础上通过引入正则化因子，构建了由光流直接求解运动速度的模型，并采用迭代的方法计算物体的运动速度。实验证明该方法在处理简单运动时具有较好的计算精度。Perriollat 使用距离守恒假设对点光流重建模型进行约束，并使用时空滤波对点光流进行平滑过滤，使得重建算法可以应用在非刚性物体的三维重建问题中。Srinivasan 用一种称之为“快速误差搜索技术”的方法，建立了一个包含旋转运动参数和深度信息等未知量的线性方程组，该方法不去求解该方程组的解，而去求得方程组的最小二乘误差，然后用求得的误差构造一个误差平面，从而得到三维物体的结构。Srinivasan 不仅从理论上证明了该方法的正确性，而且通过一系列实验，证明该方法的有效性和计算的高效性。他的方法大大推进了三维物体结构恢复的研究。

1.2 运动场与光流场

三维物体的实际运动在图像上的投影称为运动场，它是由图像中每个像素点的运动矢量总和构成。如图 1-1 所示，假设在时刻 t ，三维物体上的一点 p_0 相对于摄像机镜头以速度 v_0 在指定三维空间内运动，其在摄像机投影平面上的对应投影点 p_i 的速度为 v_i 。假设时间间隔为 δt ，那么点 p_0 运动了 $v_0 \delta t$ ，点 p_i 运动了 $v_i \delta t$ ，根据图中几何对应关系，速度 v_0 和 v_i 可表示为

$$v_i = \frac{dr_i}{dt}, \quad v_0 = \frac{dr_0}{dt} \quad (1-3)$$

式 (1-3) 中 r_0 和 r_i 具有如下关系

$$\frac{1}{f} r_i = \frac{1}{r_0 \cdot z} r_0 \quad (1-4)$$

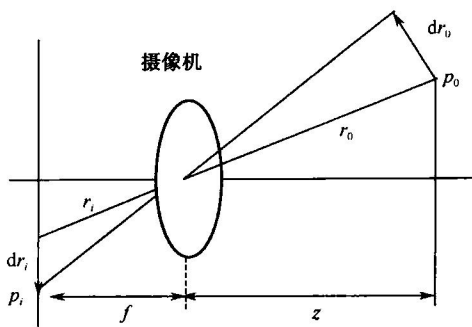


图 1-1 三维物体上一点运动的二维投影

式(1-4)中, f 为摄像机焦距, 即图像平面到光学中心的距离, z 表示 Z 轴的单位矢量, 上述公式只是说明了 3D 物体运动与 2D 图像平面投影的关系, 而在现实中更关心的是图像上亮度的变化, 以便获得更丰富的关于场景的信息。

一般情况下, 物体的运动在图像变化上表现为特定像素亮度属性的瞬间变化, 把像素的瞬时运动矢量定义为光流, 所有像素光流的集合便成为光流场。光流场表示为像素瞬时速度的矢量场, 因此光流场也被称为“视在二维速度场”。图 1-2 给出绕 Y 轴匀速逆时针转动的材质球及其对应的光流场。

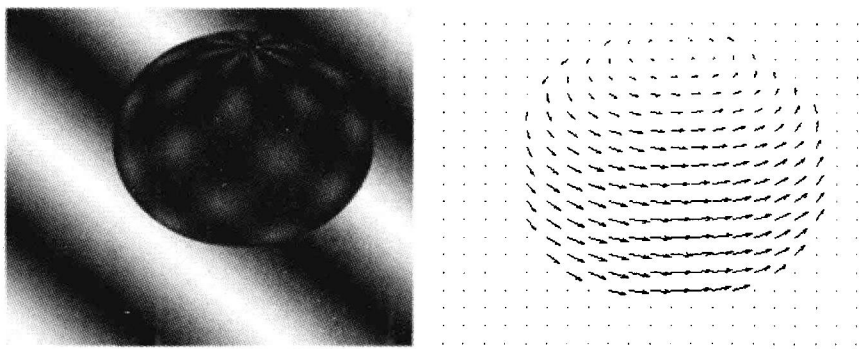


图 1-2 图像与其对应的光流场

从理论上分析, 光流场和运动场是相互对应的, 但在实际中并不是光流场就等于运动场。因为在图像中只能观测到光流场, 所以常常用光流场代表图像平面的二维速度矢量场。虽然光流场不能完全真实地描绘物体的运动情况, 但是光流场在绝大多数情况下不仅包含了被观察物体的运动信息, 还携带了丰富的 3D 结构信息, 可为计算机视觉后期工作提供大量的宝贵信息, 作为描述物体运动的工具之一, 光流场的研究受到了高度重视。