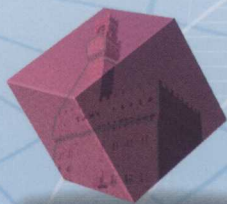
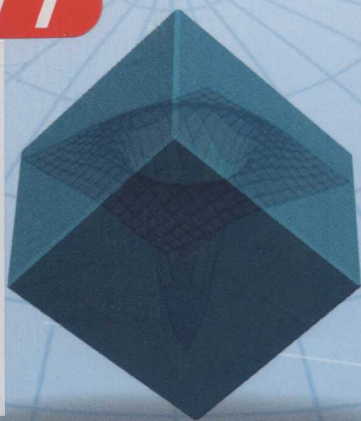


图像局部不变性 特征及其匹配问题 研究与应用

Research and Application of
Local Invariant Image Features and
Matching Problems

杨化超 著



测绘出版社

014931970

TN911.73
93

江苏高校优势学科建设工程

图像局部不变性特征及其 匹配问题研究与应用

Research and Application of Local Invariant
Image Features and Matching Problems

杨化超 著



测绘出版社



北航

C1719988

TN911.73

P3

078180410

©中国矿业大学环境与测绘学院 2013
所有权利(含信息网络传播权)保留,未经许可,不得以任何方式使用。

内容简介

本书是作者总结近几年的研究成果撰写而成的,主要内容是局部不变性特征在宽基线、大倾角立体影像中的匹配问题及应用研究。特征匹配过程主要通过两种途径来实现:一种是基于局部不变性特征提取与描述的匹配方法,另一种是基于几何变换模型的方法,各有使用条件和限制。本书在充分融合上述两种方法完成宽基线立体影像匹配的基础上,还系统提出了基于核线几何和单应约束的提高匹配点数量和可靠性的若干策略和方法。

本书可供遥感、摄影测量专业技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

图像局部不变性特征及其匹配问题研究与应用/杨化超著. —北京:测绘出版社, 2013. 12
ISBN 978-7-5030-3321-6

I. ①图… II. ①杨… III. ①图像处理—研究 IV. ①TP391.41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 307187 号

责任编辑	巩岩	封面设计	李伟	责任校对	董玉珍	责任印制	喻迅
出版发行	测绘出版社			电 话	010—83543956(发行部)		
地 址	北京市西城区三里河路 50 号				010—68531609(门市部)		
邮政编码	100045				010—68531363(编辑部)		
电子信箱	smp@sinomaps.com			网 址	www.chinasmp.com		
印 刷	三河市世纪兴源印刷有限公司			经 销	新华书店		
成品规格	169mm×239mm						
印 张	9.25			字 数	182 千字		
版 次	2013 年 12 月第 1 版			印 次	2013 年 12 月第 1 次印刷		
印 数	0001—1200			定 价	34.00 元		

书 号 ISBN 978-7-5030-3321-6/P·697

本书如有印装质量问题,请与我社联系调换。

前 言

第1章 绪论

图像特征提取与匹配是图像分析、模式识别及计算机视觉等领域的一个重要研究内容,它是众多问题的研究基础。由于目标所在的图像之间大部分都存在旋转、视点、尺度、光照、模糊等变换,因此如何提取图像的稳定特征成了相关领域的研究重点。近年来,以尺度不变特征变换(scale-invariant feature transform, SIFT)为代表的新一代局部不变性特征提取算法,针对图像平移、旋转、尺度、光照及视点等变换具有不变性,已经在图像配准、图像拼接、物体识别、目标跟踪、数字水印及图像检索等方面得到了广泛的应用。基于局部不变性特征的匹配方法的关键为特征提取(包括特征检测与特征描述)和特征匹配。

特征检测与匹配是数字摄影测量与计算机视觉中的一个基本问题,在三维重建、目标识别、增强现实及图像检索等领域中都有很重要的研究和应用价值。然而,这一问题目前并没有被很好地解决,尤其是宽基线图像序列的特征匹配。该问题的难点是,在通常不知道场景和图像任何先验知识的情况下,要求对相应特征点进行自动检测和匹配,而图像之间较大的透视畸变使得人们很难自动矫正相应特征点邻域窗口的局部形状。此外,宽基线导致的图像之间亮度变化使得该问题变得更加复杂。图像之间的匹配关系描述了场景空间点相对于相机的运动关系,这种匹配约束既包含相机运动信息,也包含场景结构信息。

本书是按照特征提取、特征匹配及应用为线索组织编写的。本书深入分析了局部不变特征相关理论基础,研究了已有的一些局部不变性特征提取及匹配方法,针对这些方法存在的问题进行了相应的改进,并将改进后的新方法应用到了图像配准、摄影测量三维重建等领域。

本书的出版得到江苏高校优势学科建设工程(测绘科学与技术)及国家自然科学基金(41001312、41371438)项目资助;此外,书中参考了他人的研究成果,在此一并表示感谢。

由于学识和时间所限,书中难免存在不妥之处,敬请广大读者批评指正。

1.1 算法概述	111
1.2 基于局部不变性特征的多阶段匹配	113
1.3 顾及特征提取重采样的多阶段准密集匹配	122
1.4 面向复杂场景的多阶段准密集匹配	130
第2章 绪论与展望	134
参考文献	135

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 特征提取	1
1.2 特征匹配	4
1.3 本书主要内容	10
第 2 章 影像匹配基础理论与方法	12
2.1 常用的影像匹配测度及最小二乘影像匹配	12
2.2 立体像对的像方几何约束	20
第 3 章 物方点三维空间坐标获取	27
3.1 数字摄影测量常用坐标系	27
3.2 像点坐标的畸变误差模型	28
3.3 光束法平差算法	30
3.4 光束法平差外方位元素初始值的确定方法	34
第 4 章 尺度不变特征检测	43
4.1 常用的角点检测方法	43
4.2 图像尺度空间理论	52
4.3 尺度不变特征检测	58
第 5 章 图像局部特征描述与匹配	68
5.1 SIFT 特征描述符	68
5.2 SURF 特征描述符	71
5.3 SIFT 特征描述符的扩展	73
5.4 K-D 树匹配	74
第 6 章 尺度不变特征的投影不变匹配	80
6.1 基于仿射不变特征提取与描述的匹配方法评述	80
6.2 基于 SIFT 和投影变换模型的最小二乘匹配	88
第 7 章 基于 SIFT 的宽基线立体影像准密集匹配	111
7.1 算法概述	111
7.2 基于局部单应约束的准密集匹配	113
7.3 顾及特征提取重复率的多阶段准密集匹配	122
7.4 面向复杂场景的多阶段准密集匹配	130
第 8 章 结论与展望	134
参考文献	135

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Feature Extraction	1
1.2 Feature Matching	4
1.3 Main Contents	10
Chapter 2 Fundamental Theory and Method for Image Matching	12
2.1 Conventional Image Matching Measure and Least Squares Image Matching	12
2.2 Geometrical Constraints of Image Space for Stereo Image Pairs	20
Chapter 3 Acquisition of Spatial Coordinates of Objective Space	27
3.1 Common Used Coordinate System for Digital Photogrammetry	27
3.2 Distortion Error Model for Image Point Coordinates	28
3.3 Bundle Adjustment	30
3.4 Determination Method of Exterior Orientation Elements for Bundle Adjustment	34
Chapter 4 Scale Invariant Feature Detection	43
4.1 Common Methods for Angular Point Detection	43
4.2 Image Scale Space Theory	52
4.3 Scale Invariant Feature Detecting	58
Chapter 5 Description and Matching of Image Local Features	68
5.1 SIFT Feature Descriptor	68
5.2 SURF Feature Descriptor	71
5.3 Extension of SIFT Descriptor	73
5.4 K-D Tree Matching	74
Chapter 6 Projective Invariant Matching of Scale Invariant Features	80
6.1 Evaluation of Existing Algorithms	80
6.2 Least Squares Matching Based on SIFT and Projective Transformation Model	88
Chapter 7 Quasi-dense Matching for Wide Base-line Image Pairs Based on SIFT	111
7.1 Introduction	11
7.2 Matching Propagation Based on Local Homography Constraint	113
7.3 Multi-stage Quasi-dense Matching Considering Repeatability of Feature Extraction	122
7.4 Multi-stage Quasi-dense Matching for Complex Scenes	130
Chapter 8 Prospects	134
References	135

第1章 绪论

影像匹配是通过一定的匹配算法在两幅或多幅影像之间识别同名点的过程。最初的影像匹配是利用相关技术实现的,因而也有人称影像匹配为影像相关。它是图像融合、目标识别、目标变化检测、计算机视觉等问题中的一个重要前期步骤,在遥感、数字摄影测量、计算机视觉、地图学及军事应用等多个领域都有着广泛的应用。

由于原始像片中的灰度信息可转换为电子、光学或数字等形式的信号,因而可构成电子相关、光学相关或数字相关等不同的相关方式;由于影像相关可运用于多个领域中,因而其匹配的对象也是多种多样的,如卫星遥感影像、航空摄影影像、近景摄影影像等,这些原始数据往往都不是理想的数据源,因此要针对各种特点选择合适的算法进行匹配。一般来说,无论是电子相关、光学相关还是数字相关,所匹配的对象虽有不同,但其理论基础都是相同的。

特征检测与匹配是数字摄影测量与计算机视觉中的一个基本问题,在三维重建、目标识别、增强现实及图像检索等领域中都有很重要的研究和应用价值。然而这一问题目前并没有被很好地解决,尤其是宽基线图像序列的特征匹配。该问题的难点就是在不知道场景和图像任何先验知识的情况下,要求对相应特征进行自动检测和匹配,而图像之间较大的透视畸变使得人们很难自动矫正相应特征邻域窗口的局部形状(邓宝松,2006)。此外,宽基线导致的图像之间亮度变化使得该问题变得更加复杂。图像之间的匹配关系描述了场景空间点相对于相机的运动关系,这种匹配约束既包含相机运动信息,也包含场景结构信息。一般来说,影像匹配问题主要包括两大步骤,即特征提取与匹配。特征提取就是选择何种特征类型及检测方法以获得图像中的待匹配特征集,常用的特征类型包括点、线及区域特征。特征匹配研究的是选择何种匹配方法和相似性度量来建立特征集之间的一一对应关系。这种匹配关系的建立也是后续场景分析、目标识别等应用的必要条件。

1.1 特征提取

1.1.1 特征点检测

特征点作为图像的局部特性,是最常用也是相对简单的匹配基元,这主要是因为它能够直接为多视点几何关系和相机参数的求解提供足够而可靠的约束条件,其可靠性来自于特征点在不同的几何变换(成像过程)下均能保持良好的几何稳定

性。此外,由于特征点的数量一定小于图像像素数目的量级,这使得其计算复杂度一般不受场景复杂性的制约,甚至可以应用到很多具有实时性要求的场合中。

特征点是图像平面内亮度沿不同方向(二维)上变化均较大的局部极值点(Schmid et al, 1998)。如图像边缘的“L”“T”和“Y”形连接等都是特征点,而从更广的意义上讲,边缘端点、纹理点,甚至响应足够强的独立噪声点也可认为是特征点。从信息论的角度讲,特征点应该比其他的图像点具有更大的信息量。特征点作为图像中的局部低层特性,其较小的邻域窗口可以作为基于亮度相关性图像匹配方法的特征窗口。这使得它们能够对图像的几何、亮度变化及场景的相互遮挡具有很好的鲁棒性,因此非常适合作为图像匹配的基元。

现有的特征点检测方法大致可以分为以下三类(邓宝松, 2006):

第一类是基于图像边缘和图像分割的结果,寻找边缘曲线上的拐点,以及两条或多条局部边缘曲线的交点作为特征点。这种方法在早期的研究中存在了很长时间。例如, Mokhatrian 等(1998)首先用平面曲线的拐点作为特征点,后来又在多尺度框架下给出曲率尺度空间(curvature scale space, CSS)的表示方法,即通过曲线在更大尺度空间中的表示来增强特征点定位的精度和算法的鲁棒性; Medioni 等(1987)首先用 B 样条曲线拟合边缘曲线,然后根据样条曲线的系数确定曲线上曲率最大的点作为特征点; Horaud 等(1990)首先从图像的边缘中得到直线,然后将这些直线分组,将分组后直线的交点作为特征点; Lin 等(1998)用形态学方法从边缘点中抽取凸点或者凹点作为特征点。但是,基于边缘的特征点检测方法极大地依赖于边缘的提取结果,而边缘提取本身就是一个没有被很好解决的问题,特别是几乎所有的边缘检测算法在其拐点处均会出现定位误差,这主要是由于在拐点处图像沿 x 和 y 方向上的梯度方向很难直接确定。

第二类是基于特征模板(参数模型)的特征点检测方法,即将所有的待检测特征点邻域窗口与某种类型的含参数特征模板进行比较,通过自适应参数调整增大二者的相关程度,如果相似度大于某一阈值则认为窗口中心是特征点。这种方法的好处是能达到很高的定位精度(Rohr, 1992),但对于每一个模板都要不断地改变参数以适应可能出现的各种情况,计算复杂度较大。此外,这类方法一般只针对特定类型的特征点,如边缘的“L”和“T”形连接点,因为很难甚至不可能考虑到所有可能的特征模板。

第三类是基于图像亮度本身的自相关性(auto-correlation)来检测特征点的存在与否,这种方法也是目前研究和应用最为广泛的(Moravec, 1977; Canny, 1986; Harris et al, 1988; Förstner, 1994; Smith et al, 1997; Schmid et al, 1998)。Moravec(1977)最先提出了图像亮度的自相关函数,该函数计算待检测图像窗口与其四个相邻窗口之间亮度的差值,如果四个差值中最小的仍大于某一阈值,那么就认为该窗口中心为特征点。然而,由于像素是离散的,这种方法只能在图像的行

方向和列方向上计算亮度的差值。Harris 等(1988)通过解析方法由自相关函数转化成的自相关矩阵克服了这一弊端,该矩阵虽然是由图像的离散一阶导数形成的,但是却具有连续性。还有一些方法是基于上述算法经过演化和改进而形成的,例如 Cottier 仅在边缘点上计算自相关矩阵(Schmid et al,1998),而边缘检测和自相关矩阵中用到的导数通过 Canny 算子得到(Canny, 1986)。Förstner(1994)同样基于自相关矩阵将图像点分为特征点、边缘点和区域点,而其分类的阈值是通过统计方法自动生成的,同时在一定程度上解决了算法的定位精度问题。这类方法在特征点检测结果上具有较好的效果,能够涵盖产生特征点的各种情况,但由于难以自动选择图像窗口的尺度,其定位性能一般都比较差。

1.1.2 图像局部不变性特征提取及其性质

所谓的图像局部特征是相对于全局特征来讲的,二者的最大区别就是特征抽取的空间范围不同。全局特征是从整个图像中抽取的特征,而局部特征则是从图像局部区域中抽取的特征。在图像检索领域,许多全局特征,如颜色直方图,常被用来描述图像的内容。只要人们感兴趣的是整个图像,而不是图像中某个局部图像,这种颜色直方图就具有非常好的检索性能(王永明 等, 2010)。

依局部特征的定义可知,1.1.1 节中所述的特征点检测结果皆属于局部特征。然而,现有的特征点检测算法大多不能自适应调整特征点检测窗口的大小和形状,从而难以自适应精确定位特征点的位置。常用的解决方法有两种:一种是采用多尺度的检测框架,即在多个尺度空间内选择最佳定位结果;另一种是通过迭代自适应地调整检测窗口的形状和大小,从而精确定位特征点。

基于上述两种思路,近年来计算机视觉界的研究者们致力于图像局部不变性特征的研究与应用,取得了具有较高参考价值的理论和应用研究成果。这些局部不变性特征主要包括局部尺度不变特征和局部仿射不变特征。

Lindeberg(1998a)系统地提出了信号的尺度空间理论。为了分析图像中各个局部特征的尺度,图像需要经过一系列平滑,这样就得到了一系列的平滑图像,即图像的尺度空间。直观上讲,尺度空间理论对应于图像的缩放变换,通过改变尺度参数,得到对同一物体的不同缩放比例,实现尺度不变性。借助尺度的概念,Mikolajczyk 等(2004)提出了 Harris-Laplacian 检测算子。Harris-Laplacian 检测算子将 Harris 角点检测算子与高斯尺度空间相结合,利用 Lindeberg 提出的通过迭代估计尺度不变性邻域的思想,使角点特征增加了尺度不变性。Lowe(2004)提出了高效的尺度不变特征变换(scale-invariant feature transform, SIFT)局部特征,它是局部特征研究过程中里程碑式的工作。Lowe 利用金字塔和高斯核滤波差分来快速求解拉普拉斯空间中的极值点,加快了特征提取的速度。SIFT 特征对图像旋转、尺度变换具有完全的不变性,对仿射变换也具有一定程度的不变性。

Bay 等(2008)沿着 Lowe 的思路,提出了快速鲁棒特征(speeded up robust features, SURF)局部特征,通过将积分图像和哈尔(Haar)小波相结合, SURF 进一步提高了特征的提取速度。

为进一步提高局部特征对图像间仿射变形的适应性, Mikolajczyk 等(2004)在 Harris-Laplacian 尺度不变特征算子的基础上提出了 Harris-Affine、Hessian-Affine 检测算子。Harris-Affine、Hessian-Affine 检测算子能自动检测仿射变换下的图像特征,所提取的特征具有仿射不变性。另一具有代表性的仿射不变特征检测算子是 Matas 等(2002)提出的最大稳定极值区域(maximally stable extremal regions, MSER)的检测方法。该方法将分水岭的思想用于检测图像中灰度最稳定的局部区域,然后对检测区域进行尺度和旋转的归一化,最后得到的局部特征具有严格意义上的仿射不变性。

一般而言,一个好的局部特征应具有如下性质(王永明 等, 2010):

(1)可重复性和独特性。同一个物体或场景在不同的视角下,两幅图像中的对应特征越多越好,也即意味着可以获得更多的匹配。此外,特征的幅值模式需要呈现多样性,包含足够的信息量,这样的特征才具有更好的可区分性,有利于匹配识别。

(2)局部性和多量性。特征应该是局部的,从而减少被遮挡的可能性,并且允许用简单的模型来近似两幅图像间的几何和成像变形。此外,检测到的特征数目一定要多,即使是小的物体上也要有足够的特征。特征的密集度能在一定程度上反映图像的内容。

(3)准确性和高效性。好的特征应该能够被精确定位。这里的定位不仅指特征在图像中的空间位置,还包括该特征的尺度等。此外,特征检测的时间效率越高越好,以便应用于有实时要求的场合。

1.2 特征匹配

1.2.1 影像匹配的一般分类

图像特征匹配是计算机视觉和数字摄像测量中一个基础性的课题,具有十分重要的地位。特征匹配的一般过程是确定同一场景目标在不同图像上的对应关系,并完成同名特征的定位。由于不同图像的成像视角、光照条件、噪声干扰等成像条件的差别,图像特征匹配极富挑战性,目前仍然是图像分析领域的一个研究热点,每年都有大量的研究文献出现。

根据待匹配图像是否将成像的相对几何关系用于匹配的辅助引导,将图像特征匹配分为两类:第一类匹配为基于目标成像基本属性约束的特征匹配;第二类为

基于成像几何关系约束的特征匹配。

第一类匹配不用图像间的相对几何关系做引导,仅依赖目标的成像基本属性进行匹配,主要是基于图像特征本身的光度、色彩、几何形状、投影成像模型等条件,这一类匹配应用最广、难度更大。第二类匹配具有待匹配图像成像之间的相对几何关系,可以利用相对几何关系确定的单应矩阵、基础矩阵、先验视差等辅助条件引导特征匹配,使自动匹配具有更高的鲁棒性和可靠性。

1. 基于目标成像基本属性约束的匹配

基于目标成像基本属性约束的匹配属于第一类匹配,其主要的约束条件有光度计量约束、色度计量约束、目标几何形状约束、唯一性约束及成像模型约束等。光度计量约束是应用最广的约束。一般情况下,待匹配图像间的成像距离、角度变化不大,成像物体表面没有剧烈变化,同名物点在不同图像上具有相似的强度分布,立体视觉中的相关匹配大多应用了这一个限制。色度计量约束表示目标成像的色彩属性关系,同名点在不同图像上具有相似的颜色强度,这是视觉匹配的一个重要约束条件。目标几何形状约束是针对目标几何结构在不同成像上的关系而言,不同图像上同名目标的几何点、线、角度等几何元素之间的分布关系一致。当两个特征来自于同一个空间目标,它们具有相似的边缘方向、边缘强度分布时,两者匹配;反之,它们通常不匹配。这类匹配目标的共同属性称为目标几何形状约束,对于待匹配图像,多数满足此条件。唯一性约束是指一个图上一个特征点对在对应图上的同名匹配点不超过一个点。

对于第一类匹配,目前存在多种匹配方法,总的来说,可以分为两类:基于区域的匹配方法和基于特征的匹配方法(赵建伟等,2002;李立春,2009)。

基于区域的匹配方法包括灰度相关算法、相位相关算法等多种算法。这类算法一般不需要对图像进行复杂的预处理,使用简便。匹配中图像的像素点阵直接参与运算。灰度相关算法参与匹配的是图像的灰度强度点阵,相位相关算法参与匹配的是图像的二维快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)强度点阵。采用的相似性度量有归一化互相关、互相关系数等,以及由此引申得到的其他匹配测度。根据应用中对匹配速度的要求,产生了各种快速算法,如变分辨率相关算法、序贯相似性检测算法等。基于区域的匹配方法适应性较广,对场景图像质量要求不高,可在低信噪比条件下稳定工作,能适应较复杂场景结构的目标和背景条件。但这类方法存在对目标形状变化、光照条件变化、遮挡及背景变化等条件适应能力不足的问题。

基于特征的匹配方法先对待匹配图像进行预处理,完成高层特征提取和描述,再通过特征描述间的匹配实现图像匹配。通过特征空间和相似性度量的选择,可以减弱或消除成像畸变对匹配性能的影响。常用的特征匹配算法有基于边缘特征的匹配、基于区域特征的匹配、基于点特征的匹配、基于高层模型特征的匹配等。

基于边缘特征的匹配直接利用边缘图像进行相关计算相似测度,可以排除源图像灰度变化的影响,但是几何畸变的适应能力不强。将边界点作为特征点通过 Hausdorff 距离作为匹配测度,具有较好的鲁棒性。对边缘进行链码描述,通过链码相关进行匹配的方法,对几何畸变具有一定的适应能力(Wong, 1978; Dai et al, 1997; Mount et al, 1999)。

基于区域的匹配方法是在图像区域分割的基础上进行匹配。矩不变量是常用的区域特征描述,其他特征描述还有特定区域的质心、主轴等参数。该算法的缺点是区域提取的一致性不容易保证。基于点特征描述的匹配方法是利用兴趣点的相对关系进行匹配。常用的方法是松弛匹配算法,依据特征点集中所有点的信息及点之间相互关系的信息,通过迭代消除匹配的奇异性,使相似度达到最大(桑农等, 1998; 张迁等, 2003)。该方法需要保证适当的点数目。基于高层模型特征的匹配方法是在点、区域、边缘特征的基础上建立图像的高层描述,如图、树、文等高层描述,通过这些高层描述的匹配来实现图像匹配。这类方法能够反映图像的本质结构和特征,消除各类畸变,但是其难度在于高层描述难以建立。

基于特征的匹配方法对图像各种非本质变化(如旋转、缩放和光照强度变化等)不敏感,一般速度较快,但是问题在于较难保证自动、稳定、一致性的特征提取,特征提取过程也可能损失图像信息。

当然,上述匹配测度和方法只是确定一对特征相互匹配的必要条件,因为一对亮度相似度很大的特征并不一定对应着同一场景空间目标,如场景中可能存在一些具有局部自相似性(self-similar)的表面结构等,此时就需要用其他的约束准则来去除这种可能的错误匹配,由此引出第二类匹配问题,即基于成像几何关系约束的匹配。

2. 基于成像几何关系约束的匹配

在立体视觉、序列图像处理、摄像测量等领域,以待匹配图像成像之间的相对几何关系为已知条件下的特征匹配,是一种常见的匹配任务,在测量定位、目标跟踪等方面具有广泛应用。从实现方法来看,这类图像特征的匹配过程是先在一个图像上确定特征点,在另外图像上搜索其对应点的过程,第一幅图上的特征点是根据实际测量任务的需要而选择的。特征匹配常在图像间相对几何关系确定后进行,而成像间的相对几何关系作为重要的约束条件,辅助完成特征点的自动匹配。

在成像过程中,由于噪声、光照变化、遮挡和透视畸变等因素的影响,空间点投影到不同摄像(相)机图像平面上所形成对应点的特性可能不同。同一幅图中的一个特征点或者一个小区域图像,在另一幅图像上可能有多个相似的候选匹配。因此,在成像辐射强度约束、颜色约束、形状约束、连续性约束、视差约束等目标成像基本属性约束外,如果能增加图像之间的相对几何关系作为匹配辅助判据,则可以大大增加匹配的稳定性。在相对几何关系已知的情况下,可利用的特征匹配约束

包括极线约束、单应约束等条件。

以点特征为例,极线约束是在待匹配图像间实现相对几何关系弱标定条件下,即对极几何关系已知条件下的一个最基本的同名点搜索约束条件。对极约束关系可以简单地描述为:一幅图像上的任一特征点,它在另一幅图像上的同名匹配点一定位于由这个特征点和对极几何约束所决定的一条对极线上。由此可见,根据极线约束,搜索同名点就可以从二维的整个图像空间变为沿着一维的对极线进行,显著减小了搜索范围。在实际应用中,由于受场景中诸多因素的影响,如光照条件、景物几何形状和物理特性、噪声干扰、畸变、遮挡及摄像机特性等,单一的对极约束并不能准确地确定匹配点所在范围。大量文献的研究中通过引入多个与场景有关的约束,来解决匹配在对极线上的不确定性问题(Eric et al, 1985; Hoff et al, 1989; Koschan, 1993; Sun, 2002)。

二维平面单应(homography)反映了平面场景在多视图像之间的对应关系,主要用于平面场景和近似平面场景成像的特征点匹配。根据单应的形成条件,属于平面场景的特征点在不同的图像上是一一对应关系。因此,在图像匹配中基于单应条件可以直接预测待匹配特征点的同名点位置,这种应用单应预测匹配点的方法称为单应约束的匹配。这种匹配相对于二维或者一维的图像搜索可以大大提高匹配效率。单应约束在图像配准中占有非常重要的地位,诸多文献对单应在同名特征点匹配中的应用进行了研究(Negahdaripour et al, 2005; Su et al, 2007)。总之,由于特征点匹配的应用条件千变万化,图像特点各不相同,目前仍没有一种可以应对各种条件的匹配算法,必须根据图像自身特点和应用条件,研究开发相应的匹配算法。

1.2.2 不同几何层次上的匹配策略

特征匹配是数字摄影测量与计算机视觉领域最困难的工作之一。由于成像过程中丢失了“高程”信息,影像匹配实际上是计算机视觉中的一个病态问题,一般情况下很难直接求解(袁修孝等, 2009)。如果没有任何先验知识,特征匹配只能从图像的亮度相似性入手。然而,由于物体表面大多不是理想的光滑表面,同一空间点在不同图像上投影点的亮度并不完全相同;反之,具有相同亮度值的图像点未必对应同一空间点。此外,由于景物空间中复杂的遮挡关系,图像上相邻的像素点在三维空间中的对应点常常不在连续的场景表面上。最重要的是,由于不同视点图像之间存在几何上的透视畸变,同一场景表面在不同图像上成像点的相对位置关系常常发生较大变化,这使得传统的基于窗口的匹配策略无法直接计算特征之间的相似性度量。

目前,短基线图像的特征点匹配或视频序列的跟踪已经取得了令人满意的结果(Tang et al, 2002; Luillier et al, 2005; 华顺刚等, 2007; Zhu et al, 2007; 王昕

等, 2008; 陈方 等, 2009; 袁修孝 等, 2009), 这类问题一般可直接基于固定大小邻域窗口的相似性度量进行匹配或跟踪, 而宽基线图像的特征匹配则是目前研究的难点和热点。图 1.1 所示为摄影测量中常用的两种摄影方式, 即正直摄影和倾斜摄影, 计算机视觉界又分别称为短基线 (short base line) 摄影和宽基线 (wide baseline) 摄影。其中, P_1 、 P_2 为左右影像构成的立体像对; 两摄影站 (或透镜中心) S_1 、 S_2 之间的连线称为摄影基线; S_1o_1 、 S_2o_2 为摄影主光轴; a_1 、 a_2 为同名像点; A 为其物方交会点。显然, 对源于测量学前方交会原理的摄影测量技术而言, 相比于正直摄影, 倾斜摄影具有良好的几何构形条件和定位精度优势 (张祖勋 等, 2007)。然而, 在倾斜摄影模式下, 由于相机的较大平移或伴随着旋转, 使得同一空间目标在立体像对上的方向、尺度及表面光亮度发生变化, 即图像间较大的透视畸变导致无法直接建立相应特征点邻域窗口之间的相似性度量关系, 从而给影像匹配带来了困难。

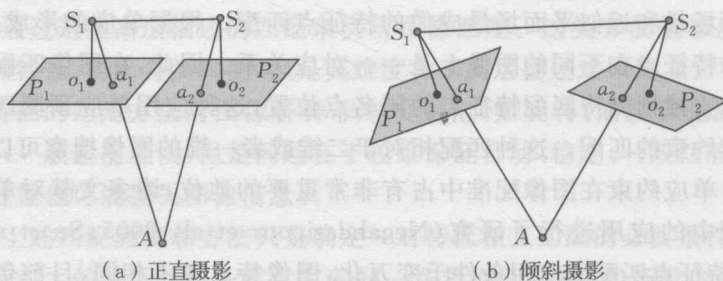


图 1.1 正直摄影和倾斜摄影示意

目前的特征匹配过程主要通过两种途径来实现。第一种途径是分别在每幅图像中检测具有某种几何不变性的特征, 然后将其变换到规范条件下, 用多维向量进行表示和描述, 称为不变性描述符 (invariant descriptor), 匹配时通过多维向量间的距离来衡量特征的相似度 (Mikolajczyk et al, 2005a; Mikolajczyk et al, 2005b; 李晓明 等, 2006; Yao et al, 2007; 李芳芳 等, 2009; Li et al, 2009a; Li et al, 2009b; Morel et al, 2009)。另一种途径是依据给定的几何变换模型, 直接通过迭代将一幅图像上的邻域窗口变换到另一幅图像上与其相应邻域窗口完全一致的形状, 即对其中一个邻域窗口进行矫正, 最后用矫正后两邻域窗口的相关性进行最终判断。

实际上这两种途径的本质是一样的, 都要通过假定的变换模型矫正相应邻域窗口之间的透视畸变。一般来讲, 第一种途径适用于图像数据库的检索、识别及非精确匹配, 而如果需要相对应的特征进行精确对应和定位, 一般还需要将匹配结果作为初值进一步通过第二种途径迭代求精。

在没有任何先验信息的条件下, 进行特征匹配都是先假定相应邻域窗口间的几何变换模型, 进一步估计模型参数, 从而实现相应邻域窗口之间的透视畸变矫

正。依据几何变换的层次,变换模型可分为:相似变换(4个自由度)、仿射变换(6个自由度)和射影变换(8个自由度),如图 1.2 所示。

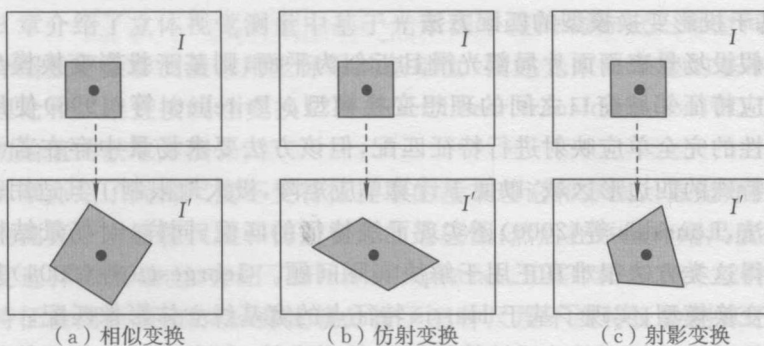


图 1.2 几何变形类别

1. 基于相似变换模型的匹配方法

最早的直接匹配方法假定相应邻域窗口间仅是纯平移运动,而直接基于固定大小窗口的亮度相似性进行匹配。由于没有考虑几何畸变,这种方法只适用于短基线或由相机纯侧移所产生的图像序列中,而且定位精度不高。后来研究人员将其扩展为允许图像间的旋转和比例放缩, Schmid 等(1997)考虑了相应邻域窗口间的旋转变换,提出具有旋转不变性(rotation invariant)的特征检测和匹配方法,由于考虑的模型相对简单,这种方法仅适用于图像之间透视畸变不大的情形。Dufournaud 等(2000)将变换模型扩展到允许有较大比例变化的情况下,实现了不同分辨率图像之间的精确匹配,被称为具有比例不变性(scale invariant)的特征检测和匹配方法。实际上,这些方法均可归类于具有相似不变性的特征检测和匹配方法,即用相似变换来近似相应邻域窗口之间的透视畸变。

2. 基于仿射变换模型的匹配方法

随着图像间基线的增大,相似变换已不能胜任宽基线图像匹配的要求,因此又相继提出具有仿射不变性的特征检测和匹配方法,即用仿射变换来近似单应映射,这也是目前图像匹配的研究热点。Mikolajczyk 等(2004)通过对特征邻域窗口内二阶矩矩阵的规范化给出具有仿射不变性的特征点检测和表示方法,并用仿射自适应的 Harris 算子定位特征。类似的,利用二阶矩矩阵的研究也比较多。这一类方法都利用了二阶矩矩阵的不变性,但这一假设对任意图像来说并不总是适用的。为了确定特征区域的大小, Schaffalitzky 等(2002)借鉴 Mikolajczyk 的方法,计算邻域窗口在比例空间中的局部极值;而 Tuytelaars 等(2004)则依据场景中的特殊结构检测图像中具有仿射不变性的特征区域——局部边缘的交点,即角点的邻域和亮度一致的局部区域。这些方法的定位精度较低,一般还需要迭代求精。Shi 等(1994)直接通过基于仿射变换模型的迭代方法解决了视频序列图像中的特征点

精确跟踪问题,而 Xiao 等(2003)、邓宝松等(2007)在此基础上用两阶段方法解决了宽基线图像的匹配问题并达到了较高精度。

3. 基于投影变换模型的匹配方法

如果假设场景表面面片局部光滑且近似为平面,则基于投影变换模型的匹配方法是相应特征邻域窗口之间的理想变换模型。Pritchett 等(1998)使用了具有射影不变性的完全单应映射进行特征匹配,但该方法要求场景中存在若干平面型结构且有特殊的四边形区域,以便于计算单应矩阵,极大地限制了其适用范围。用类似的方法,Lourakis 等(2000)还实现了线特征的匹配,同样,对场景结构性的特殊要求使得这类方法很难真正用于解决实际问题。Georgescu 等(2004)基于八参数的投影变换模型,实现了基于 Harris 特征点的宽基线立体影像匹配。

图像的匹配从侧面反映了计算机视觉的逆向性,即在未知几何变换及场景结构的前提下估计二维图像平面中的变换参数。然而,也正是由于特征的局部性使得以上这些几何变换模型能够很好地相互近似,而众多的特征使得这种较小的、分布均匀的近似误差可以被抵消和忽略。当然,也正是这些误差使得鲁棒性估计在计算机视觉中变得异常重要。

1.3 本书主要内容

本书是结合著者近几年的研究成果撰写而成的,主要内容是局部不变性特征在宽基线、大倾角立体影像中的匹配问题及应用研究。

前已述及,目前的特征匹配过程主要通过两种途径来实现:一种是基于局部不变性特征提取与描述的匹配方法,另一种是基于几何变换模型的方法。虽然这两种方法本质上是一致的。但研究表明,基于几何变换模型的匹配方法较基于局部不变性特征提取的匹配方法而言,具有较高的匹配精度和匹配可靠性。遗憾的是,基于几何变换模型的匹配方法需要准确估计特征邻域窗口间的几何变换参数。对于宽基线立体影像而言,在缺乏影像先验信息情况下,这是一件困难的工作。然而,如能结合局部不变性特征检测结果提供的若干关键参数信息,获得特征邻域窗口间的初始变换参数,然后再进一步迭代求精,则可为解决上述难题提供一个可行的思路。这也是本书的核心内容所在,即充分融合上述两种方法来完成宽基线立体影像的匹配。基于上述思路,本书还系统提出了基于核线几何和单应约束的提高匹配点数量和可靠性的若干策略和方法。

本书各章节安排及主要内容如下:

第1章介绍了关于特征提取与匹配的研究现状和进展以及特征匹配的一般分类,指出宽基线立体影像匹配是目前的研究热点和难点。

第2章简要介绍了本书后续章节用到的特征匹配基本理论和方法,包括常用

的影像匹配测度、最小二乘匹配、立体匹配的成像几何约束(包括核线几何和单应映射约束)及其鲁棒估计算法。

第3章介绍了立体视觉测量中基于光束法平差的物方点三维空间坐标的获取。在介绍数字摄影测量常用坐标系的基础上,阐述光束法平差的基本原理及基于灭点理论和二维直接线性变换(2D direct linear transformation, 2D-DLT)的平差参数初始值的获取方法。

第4章介绍了局部尺度不变特征提取的基本理论和方法。首先分析了常用的特征点检测算子对影像尺度和仿射变形的适应性;然后在系统介绍尺度空间理论、自动尺度选择的基础上,介绍了 Harris-Laplacian、SIFT 和 SURF 三种常用的尺度不变特征检测原理和方法,并比较分析了三种尺度不变特征检测算子对影像几何变形的适应性。

第5章简要介绍了目前局部不变特征的描述方法,包括 SIFT 特征描述符、SURF 特征描述符及基于 SIFT 特征描述符的若干改进算法。

第6章在分析仿射不变特征提取及匹配缺陷的基础上,提出了一种基于 SIFT 的最小二乘匹配算法。算法首先基于特征点的空间分布和信息熵选取一定数量的最优 SIFT 特征点集,并采用基于奇异值分解(singular value decomposition, SVD)的 SIFT 特征匹配、基于 SIFT 特征尺度和方位信息的自适应归一化互相关(normalized cross correlation, NCC)匹配,获得精度较高的初始匹配点,用于立体像对的基本矩阵和单应矩阵估计。然后,在对极几何和单应映射的双重约束下,基于自适应 NCC 及距离加权的多尺度最小二乘匹配算法进行扩展匹配,并保留匹配定位精度较高的原始 SIFT 特征点对。算法综合应用了基于积分影像的 NCC 快速计算、金字塔影像匹配等方法 and 策略。最后,选取了实际的宽基线序列立体影像进行试验,并同原始的 SIFT 特征匹配算法、基于 SVD 的 SIFT 算法进行了综合对比分析。

第7章以第5章的算法为基础,提出了分别面向平面场景和复杂场景的多阶段准密集匹配算法。这些算法都通过上述最小二乘匹配提供初始种子点,并有针对性、逐次递进地设计了三个算法:①基于局部单应约束的匹配传播算法及其在影像配准中的应用;②在局部单应约束的匹配传播算法基础上,设计了一套基于 SIFT 的顾及特征提取重复率的宽基线立体影像多阶段准密集匹配算法;③将提出的多阶段准密集匹配算法扩展到具有较大深度变化的复杂场景。

第8章对本书的内容进行了总结,并给出了进一步研究的工作方向。