



图像特征匹配算法 研究及其应用

陈 珺 马佳义 刘文予 著



科学出版社

图像特征匹配算法研究及其应用

陈 琚 马佳义 刘文予 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

图像匹配是计算机视觉中基础而重要的问题。实践中,由于成像设备、拍摄时间、角度的不同,以及受图像中存在的噪声、遮挡、离群点、非线性形变等诸多因素的影响,求解图像匹配问题非常困难。本书分为两大部分:第一部分图像匹配算法的理论,从刚性图像匹配算法逐渐讲解到一些非刚性图像匹配算法,如基于分层混合模型的鲁棒点匹配算法、基于特征导引的图像匹配算法、基于稀疏点集与稠密流的图像匹配算法;第二部分图像匹配算法的应用,主要介绍在基于同类相似性的类别检索、机器人拓扑导航、视觉归巢等方面的应用及效果。让读者对图像匹配算法的理论和应用研究建立较为全面的认识。

本书可供电信、计算机等专业的本科生和研究生使用,也可供从事相关工作的研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

图像特征匹配算法研究及其应用 / 陈珺, 马佳义, 刘文予著. —北京: 科学出版社, 2019.10

ISBN 978-7-03-062343-0

I. ①图… II. ①陈… ②马… ③刘… III. ①图像处理—算法—研究 IV. ①TP391.413

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第202123号

责任编辑: 闫 陶 / 责任校对: 高 嵘
责任印制: 彭 超 / 封面设计: 莫彦峰

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

http://www.sciencep.com

武汉中科兴业印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年10月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2019年10月第一次印刷 印张: 10 1/4 插页: 6

字数: 200 000

定价: 85.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

视觉是人类获取外界信息的重要方式。计算机视觉是研究让机器如何“看”的科学，人工智能和智能制造是研究让机器如何去“做”的科学。要实现人工智能和智能制造，需要让计算机能像人类那样看懂世界，自主对外界情况做出正确的分析和判断。因此，计算机视觉是实现人工智能和智能制造的重要基础。图像匹配研究如何寻找并建立两幅图像间的对应关系，它是计算机视觉中许多问题解决的基础，是底层视觉通往高层视觉的关键。机器视觉中的许多问题，如计算机视觉的基础问题（图像检索、图像融合），工程领域的遥感测绘、环境与灾害监测，机器人领域的机器人导航、视觉归巢，安防领域的目标识别与跟踪等的解决都依赖于图像匹配的精度和效率。但是自然界中采集的图像由于受到图像形变、数据来源、数据退化等多种因素的影响，匹配算法性能受损，严重制约了其工程应用。因此，研究高普适性的匹配模型具有重要的理论意义和应用价值。

为了解决图像匹配的应用问题，本书将对图像匹配问题及相关的应用进行深入探讨，介绍一系列图像匹配算法，从理论和实验上对所介绍的算法进行分析与验证，同时将相关的算法用于完成图像检索、机器人导航、视觉归巢等任务。全书共9章，主要内容及各章节安排如下。

第1章对图像匹配的主要问题和相关概念进行描述、定义与分类，介绍解决图像匹配问题的基本框架和常用方法，分析未来的研究趋势。

第2章介绍一种基于空间关系一致性（CSR）的刚性点集匹配算法。在本章中首先形象地展示正确匹配图像对中存在的CSR、错误图像匹配对所呈现的空间关系不一致性，并针对正确匹配点集中存在的CSR进行建模、求解与收敛性分析，用单应和基础矩阵来估计图像间的变换关系，消除误匹配，最终得到图像间的刚性匹配模型，算法的时间复杂度为 $O(n)$ 。

第3章介绍基于CSR的非刚性点集匹配算法。利用第2章所展示的图像间的CSR进行建模，针对第2章刚性点集匹配算法在离群点比较高的情况下，变换空间复杂度增加，导致算法性能不好的问题，引入正则化理论来约束空间复杂度。通过不断迭代更新两幅图像间的对应关系和变换关系，最终消除误匹配，保留正确的匹配点。通过实验验证该方法在图像对中存在形变、噪声、离群点、旋转、遮挡等问题时的匹配效果，并进行统计分析，同时验证该方法的收敛性。该方法可以很容易扩展，以解决三维图像匹配问题。

第4章介绍一种基于分层混合模型的鲁棒点匹配算法。主要针对场景中多个独立的个体以不同的运动模型进行运动的情况，提出一种分层混合模型，对不同的运动模块分别进行建模来捕捉图像中存在的分层运动。通过引入混合系数，构造 K 个变换来解决分层运动的问题。同时，采用稀疏估计来进行快速求解，将算法的时间复杂度 $O(n^3)$ 、空间复杂度 $O(n^2)$ 降至 $O(n)$ ，可以在几乎不影响性能的情况下全面提高速度，降低数据存储需求。该方法不仅能够解决图像对中具有单一变换关系的问题，对于图像对中存在多种复杂关系的问题也能很好地解决。

第5章介绍一种基于特征导引的图像匹配算法，将部分稳定特征作为锚点进行导引匹配。针对图像质量差、图像中包含特征点数少的情况，将两组点集表征为服从高斯混合模型 (GMM) 的密度分布函数，每个 GMM 中心均由一个特征点的空间位置和局部表现特征来表征，拟合变换函数使两个点集最大限度地重合。该方法无须建立候选匹配集，采用 GMM 对匹配问题建模，可有效避免正确匹配的丢失；同时，通过设置锚点进行导引匹配，结合半监督的期望最大化算法可大大提升在数据严重退化下的图像匹配精度。

第6章介绍一种基于稀疏点集与稠密流的匹配算法，综合利用稠密像素算法和稀疏特征算法，取长补短。基于稠密像素的方法能够取得精确的非刚性匹配效果，但受场景尺度与方向变化影响大；而在基于稀疏特征的方法中，特征通常带有方向和尺度信息，可以适应尺度与方向变化，但无法得到精确的匹配效果。该算法建立一个数学模型将两者统一起来，使稀疏的特征匹配形成的流场在求解稠密像素的匹配流中扮演锚点的角色，并传输场景尺度与方向信息，从而得到精确的匹配结果。同时，采用流形正则化研究相应的空间变换约束，保证目标函数最优化问题的适定性。

第7章介绍基于同类相似性的类别检索。从本章开始接下来的三章均介绍图像匹配算法的应用。本章将所研究的图像匹配结果用于解决图像检索问题。通过得到的匹配结果计算图像间的相似度，可以得到一个关于数据集中所有图像两两间相似性关系的矩阵。提出一种基于同类相似性关系的算法，将图像两两间相似性的关系做成一幅全连接图，图中节点为每一幅图像，两节点间的连接系数为图像间的相似性度量。图像匹配计算的准确度直接影响到全连接图的质量，它是后面图像检索算法的基础。利用同类目标特征相似性间的传递，迭代更新全连接图，使同类目标的相似性不断加强，从而有效地提高检索精度。

第8章将图像匹配算法用于机器人拓扑导航。视觉导航是移动机器人智能化所需要具备的重要功能之一。针对自然条件下可能存在的大的明暗变化、运动模糊、重复纹理或遮挡给视觉导航带来的问题，利用卷积神经网络 (CNN) 特征比较两幅图像之间的相似性；采用图像清晰度度量去除关键帧中的模糊图像；采用

ORB 进行局部特征提取；采用向量场一致性（VFC）算法消除误匹配。通过匹配的方法找到最相似的关键帧，进而进行运动控制，切换新的关键帧，再次找到最相似的关键帧，重复这个过程，从而实现路径规划。该算法利用高效、高精度的图像匹配算法实现关键帧的精准定位，能够大大提升导航精度与效率。

第 9 章将图像匹配算法用于解决视觉归巢问题。提出一种基于稀疏运动流的鲁棒插值视觉归巢方法。基于平滑先验建模来寻找内点，采用插值运动流来确定全景图像的运动流的两个奇点——扩张焦点（FOE）和收缩焦点（FOC），使初始匹配中的所有内点和离群点都被正确区分，插值运动流、FOE 和 FOC 与实际运动流基本一致。该算法利用高效、高精度的图像匹配算法插值出稠密的向量场，在此基础上搜索出精确的归巢向量。

图像匹配是解决计算机视觉中许多技术问题的基础。本书探讨的基于特征的图像匹配算法将为图像特征匹配理论和应用提供一些切实有效的解决方案。相信通过更多研究者的共同努力，会有更多、更好的特征匹配算法被提出来，用于解决实际问题。

限于作者水平，书中疏漏在所难免，恳请读者不吝指正。

作 者

2019 年 5 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 图像匹配问题的定义和分类	1
1.2.1 图像匹配问题的定义	1
1.2.2 图像匹配方法的分类	3
1.3 图像匹配问题的基本框架	5
1.3.1 问题的数学描述	7
1.3.2 特征提取及描述	11
1.3.3 特征匹配	14
1.3.4 存在的问题及解决方案	17
1.3.5 研究趋势	19
第 2 章 基于空间关系一致性的刚性点集匹配算法	21
2.1 概述	21
2.2 图像初始特征点的提取与匹配	22
2.3 空间关系一致性算法	24
2.3.1 问题建模	24
2.3.2 问题求解	25
2.3.3 刚性变换估计	27
2.4 算法复杂度分析	30
2.5 实验结果及分析	30
2.5.1 实验配置	30
2.5.2 单应实验结果	31
2.5.3 基础矩阵实验	35
2.6 收敛性分析	36
2.7 相关算法分析	38
第 3 章 基于空间关系一致性的非刚性点集匹配算法	39
3.1 概述	39
3.2 点对应的建立	40
3.3 非刚性变换关系的估计	41

3.3.1	问题建模	41
3.3.2	问题求解	42
3.3.3	变换函数的估计	44
3.4	形状匹配算法分析	46
3.5	实验结果及分析	47
3.5.1	形状匹配结果	47
3.5.2	图像匹配结果	51
3.6	收敛性分析	60
3.7	相关算法分析	61
第4章	基于分层混合模型的鲁棒点匹配算法	63
4.1	概述	63
4.2	混合变换估计	64
4.2.1	问题建模	64
4.2.2	问题求解	65
4.3	快速算法	67
4.4	算法复杂度分析	68
4.5	分层非刚性点集匹配问题	69
4.6	实验结果及分析	70
第5章	基于特征导引的图像匹配算法	75
5.1	概述	75
5.2	特征导引算法	76
5.2.1	基于边缘图的特征提取	76
5.2.2	问题建模	77
5.2.3	问题求解	78
5.2.4	局部几何约束	80
5.2.5	几何形变估计	80
5.2.6	算法复杂度分析	82
5.2.7	算法参数说明	83
5.3	实验结果及分析	83
5.3.1	数据集和评估标准	84
5.3.2	多模态图像的结果	84
5.3.3	部分重叠图像的配准结果	87
5.3.4	部分重叠的多模态图像对的配准结果	90
第6章	基于稀疏点集与稠密流的匹配算法	93
6.1	概述	93

6.2 基于局部线性约束的稀疏点集匹配	93
6.3 基于 SIFT 流的稠密像素匹配	95
6.4 基于稀疏点集与稠密流的匹配模型构建和求解	96
6.4.1 问题建模	96
6.4.2 优化求解	96
6.4.3 实施细节	98
6.5 实验结果及分析	99
6.5.1 数据集和设置	99
6.5.2 定性实验	101
6.5.3 定量实验	103
第 7 章 基于同类相似性的类别检索	105
7.1 概述	105
7.2 算法思想描述	105
7.3 检索算法实现	107
7.3.1 图像间相似性度量	107
7.3.2 问题表述	107
7.3.3 图模型	109
7.3.4 扩展: 汇总和最大化相似性	110
7.3.5 计算复杂度	110
7.4 实验结果及分析	111
7.4.1 实验数据库	111
7.4.2 MPEG-7 形状数据库上对比结果	111
7.4.3 N-S 数据库上对比结果	113
7.4.4 AT&T 人脸数据库上对比结果	115
第 8 章 机器人拓扑导航	117
8.1 概述	117
8.2 拓扑建图和局部化	118
8.2.1 CNN 特征的图像比较	120
8.2.2 图像清晰度测量	121
8.2.3 ORB 特征提取	121
8.3 基于非刚体特征匹配的几何校验	122
8.3.1 基于图像对的向量场	122
8.3.2 VFC 算法表述	123
8.4 实验结果及分析	124
8.4.1 CNN 特征的图像相似性比较	125

8.4.2	清晰度度量	125
8.4.3	ORB 特征提取效率	126
8.4.4	VFC 的几何验证	127
8.4.5	拓扑导航	128
第 9 章	视觉归巢	130
9.1	概述	130
9.2	全景运动流的平滑先验	130
9.2.1	运动流的平滑性	130
9.2.2	平滑先验的验证	132
9.3	基于平滑先验的关键点匹配和视觉归巢	133
9.3.1	全景图像对诱导的运动流	133
9.3.2	基于平滑先验的内点检测公式化	135
9.3.3	基于平滑先验的内点检测实现	136
9.3.4	基于运动流的奇点进行视觉归巢	138
9.4	实验结果及分析	139
9.4.1	实验设置	139
9.4.2	实验结果	141
参考文献		143
附录 I	专用词汇中英文对照	150
附录 II	定理 4.1 的证明	152

第1章 绪 论

1.1 概 述

视觉是人类获取外界信息的重要方式。根据 Marr (1982) 的视觉理论, 计算机视觉有三个主要任务: 图像处理、图像分析和图像理解。因此, 计算机视觉是研究如何让计算机来“看”的科学, 也就是让计算机模仿人类对目标进行识别、跟踪、测量、分析和理解。人类对图像理解的本领并不是与生俱来的, 而是通过长期的生活经验积累得到的。同样地, 让计算机“理解”一幅图像内容, 在没有任何其他信息的情况下是不可能实现的。让计算机学会对图像进行识别、分析、理解, 往往需要将多幅图像信息进行综合比较学习得到。因此, 图像匹配成为计算机视觉中一个重要的问题, 它是许多实际应用问题解决的基础, 如人脸检测、图像检索、目标跟踪、行为识别、三维重建、土地监测、地质灾害预警、图像导航等。归纳起来, 以下一些场合都需要进行图像匹配。

(1) 具有相同属性的模式的匹配, 主要用于形状匹配、目标识别及图像检索。

(2) 多视角图像的匹配, 主要用于三维重建(深度/形状), 或者在视觉导航中模拟复杂的外界环境。

(3) 多模图像的匹配, 主要用于医学图像分析中 [如核磁共振成像 (nuclear magnetic resonance imaging, MRI)、计算机断层扫描 (computed tomography, CT)] 融合由不同的传感器、不同的拍摄时间, 或者不同的拍摄环境等获得的同一个场景的不同数据。

(4) 基于模型的跟踪与识别, 跟踪或识别序列图像中的指定模式, 主要应用于农业、油田或矿产开发、地质学、天文学及军事领域中。

1.2 图像匹配问题的定义和分类

1.2.1 图像匹配问题的定义

图像匹配指在两幅图像(如模板图像与目标图像)中寻找对应关系, 即将给定的两幅图像中相同或相似的内容对应起来。不同的实际问题, 对应的图像匹配问题也不相同。一方面, 对于包含重叠内容的多幅图像, 通过寻找图像间两两对应关系, 可以建立多幅图像间的对应关系, 从而解决图像中的融合、拼接、镶嵌

等问题。如图 1.1 所示, 其中图 1.1 (a) ~ (c) 为三幅同一场景、不同角度拍摄的图像。在这种情况下, 通常需要建立图像之间点与点的对应关系以解决后续的视觉与图像处理问题。另一方面, 对于包含具有相同属性目标的图像, 可以通过建立图像中物体间的对应关系, 解决图像中的目标识别、标注、检索等问题。如图 1.2 所示, 其中图 1.2 (a)、(b) 是同一匹马在不同背景 and 不同姿态下的图像, 图 1.2 (c) 是包含一只狗的图像。在这种情况下, 图像匹配的目标是识别出图 1.2 (a) 与 (b) 中的相同目标, 从而建立马与马的对应关系, 同时能辨别图 1.2 (c) 中包含的是不同目标。此外, 还有一种更为复杂的情况, 如图 1.3 所示, 图 1.3 (a)、(b) 同样是包含一匹马的图像, 图 1.3 (c) 是包含一只狗的图像。而此时图 1.3 (a) 和 (b) 中的马不再是同一匹马, 但是它们属于同一类物体。这种情况下, 图像匹配的目标是建立具有相同属性的目标之间的对应关系。此时, 对应关系不再是点与点之间的对应, 而是目标区域之间的对应。

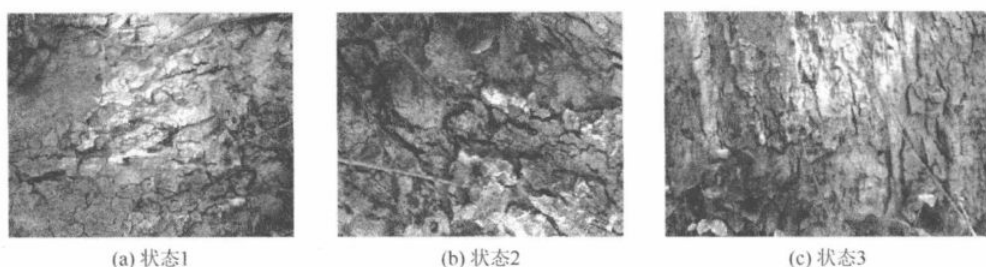


图 1.1 不同拍摄角度得到的三幅待匹配图像

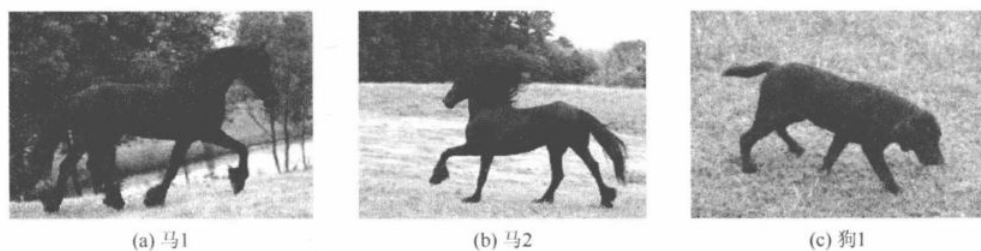


图 1.2 识别图像中的同一目标物体

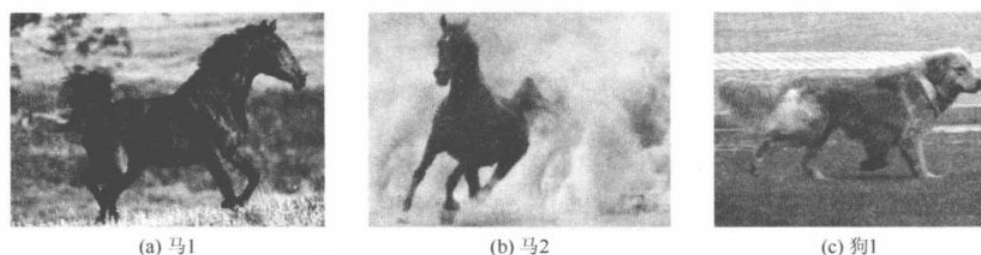


图 1.3 识别图像中的目标物体类型

在实际应用中,由于图像的分辨率、亮度、光照、拍摄时间、拍摄角度等的不同,以及图像中目标的位置、缩放、姿态等的不同,图像匹配问题变得非常复杂。如何在这些复杂的情况下,得到满意的匹配结果,是本书将要研究的主要问题。

1.2.2 图像匹配方法的分类

常用的图像匹配方法有基于变换域和基于特征匹配的图像匹配方法。基于变换域的图像匹配方法包括基于 Wang 等(2011)提出的傅里叶变换、Chuang 等(1996)提出的小波变换、Lazaridis 等(2006)提出的沃什变换等,这些方法在图像间存在刚性变换关系时可以取得比较好的匹配效果,但不适用于图像间存在非刚性变换的情况。实际中常遇到的情况是图像中包含非刚性物体,如图 1.2、图 1.3 的例子中需要匹配的目标都是非刚性的。

相比基于变换域的图像匹配方法,基于特征匹配的图像匹配方法使用更为广泛。一般来说,基于特征的图像匹配问题主要包含四个组成部分:特征检测、变换空间、匹配算法及相似性度量。特征检测给出了从图像中提取的用于匹配的特征描述子,针对不同情况的图像匹配,选择不同的特征描述子;变换空间指图像间建立对应关系的所有可能变换的集合;匹配算法考虑的是如何快速地寻找图像中对应的点集和模型参数;相似性度量主要用来衡量图像间匹配的精确度。这四个部分关注的问题不同,它们共同决定了图像匹配结果的优劣。

特征检测中提取的特征描述子可以是亮度、纹理等表现信息,也可以是形状类的结构信息。形状匹配属于图像匹配中比较特殊而重要的问题。例如,图 1.3(a)、(b)中的目标物体都是马,但它们并不是同一匹马,颜色、纹理特征虽然也可以为它们类别的判断提供支持,但此时更重要的是考虑它们的形状信息。相对于物体亮度、颜色和纹理这些底层视觉信息,形状是一种高层次的视觉信息,在图像的特征表达,特别是结构类物体图像中占有重要的位置,能够提供更大范围、更高层次的视觉信息。很多情况下,仅仅借助形状信息,人们就可以对物体进行识别。如图 1.4 所示,图 1.4(a)是一幅小熊图片,虽然这个图像上的小熊没有真实熊的颜色、纹理等表现特征,只有一个大致的形状轮廓,但人眼仍然可以识别出这是一只熊,因为它具备熊的形状特征;图 1.4(b)是从真实的熊身上截取的图片,它包含颜色、纹理等表现特征信息,但是仅凭这些,即使是人也很难判断出来图像表示的是什么物体。另外,微软亚洲研究院推出的 MindFinder 儿童益智软件,只需画出想要的物体的形状轮廓,该软件就能给出相应物体的图像。这也说明了相较于底层视觉信息,形状信息在目标识别过程中显得尤为重要,因此形状匹配是图像匹配与目标识别中的一个重要研究方向。

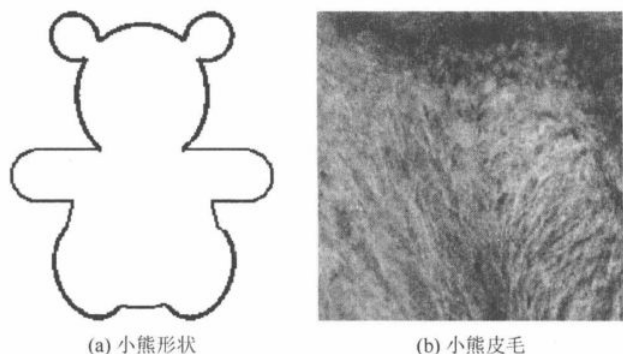


图 1.4 仅包含形状特征的小熊形状轮廓和仅包含颜色纹理的熊的皮毛

对于具有形状结构的物体的匹配问题，由于从形状中提取出来的轮廓点或关键点包含了物体的结构信息，形状匹配算法的研究成为图像匹配研究中一类比较特殊的问题。形状匹配是指按照一定的准则来衡量形状间的相似程度。形状匹配的算法主要分为两种情况。一种情况是计算某种变换下不变量的差值，如不变矩、傅里叶描述子、小波变换等。这类方法往往只考虑全局形状特征，丢失了很多重要的形状细节，其效果往往不能令人满意。如图 1.5 所示，图 1.5 (a)、(b) 为两个大象形状的图像，其中四肢、头、鼻子的姿态都不相同。在这种情况下，受肢体关节引起的非线性形变等因素的影响，基于不变量差值的算法难以达到满意效果。为了解决这个问题，近年来许多学者提出另一类基于局部特征的形状匹配方法。这类方法通过建立目标形状特征集和模板形状特征集之间的局部对应关系，使匹配误差最小，这个误差最小值就是形状间的距离，它可以反映形状的非相似度。

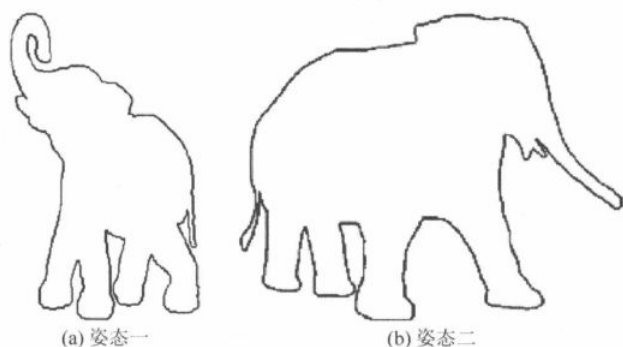


图 1.5 姿态不同的大象形状

由以上分析可以看到，由于自然图像和应用需求的千差万别，特征选择方法

也有很多。为了能够使所研究的算法更具通用性,本书希望采用一种特征描述子,让它适用于各种图像的特征检测。显然,高层特征很难满足这个要求,因此考虑由低层特征着手展开图像匹配研究工作。

图像匹配相似性用来度量参考图像(模板图像)和待匹配图像(目标图像)中提取的两个点集之间的相似性。利用相似性度量的结果,可以判断图像匹配算法的性能,进行形状分类等工作。一类常见的相似性度量是基于两幅图像中对应的匹配点的空间位置关系进行的;还有一类度量是基于匹配基元的某种不变特征描述子进行的,如形状相似性度量就可以采用直方图相似性来衡量。目前有许多形状距离度量方法。基于空间关系的方法是将图像中提取的关键点在变换模型下的空间关系定义为相似性度量,关键点间的空间关系用各种距离表示。基于特征相似性的方法首先用一组基于图像间几何变换不变的参数描述子描述两幅图像中提取的特征,然后利用不变描述子间的最小距离准则定义相似性度量,目前已有许多基于特征相似性度量的方法。

目前关于形状分类检索算法的研究主要分成两类:一类着重于研究设计好的形状描述子,如 Belongie 等(2002)提出的形状上下文(shape context, SC)和 Ling 等(2007)提出的基于内部距离的 SC 方法、Bai 等(2007)提出的基于离散曲线演化的形状匹配方法、Alajlan 等(2008)提出的基于三角形面积的多尺度表示方法等,大都关注对形状的描述方法;另一类是如何改进形状比较算法以获得更好的形状相似性度量,如 Xing 等(2002)的凸优化马氏距离法、Bar-Hillel 等(2003)的相关成分分析(relevant component analysis, RCA)、Athitsos 等(2004)提出的 BoostMap 等方法考虑如何寻找合适的距离度量。他们的关注点是如何设计形状描述子和改进形状比较方法以获得更好的形状相似性度量。在某些情况下,同类物体中的非线性形变、遮挡等因素会造成同类物体形状差别很大。此时,若采用的距离度量方法将度量重点放在形状的某些不重要的部分,而没有抓住某类形状描述的本质,即使是属于同类形状,它们的形状距离也可能会非常大,用这个结果来进行后面的分类检索工作,自然得不到好的效果。目前已发表的许多形状距离度量方法都存在这个问题。

1.3 图像匹配问题的基本框架

进行图像匹配的图像情况很多,如果研究其中比较特别的形状匹配物体,则主要的研究对象是结构类物体,如人、车、马等;如果是自然图像,则包含的物体可能有一些具有结构的物体,也可能包含一些不具有结构的物体,如草地、天空、水面等。对于不同的图像匹配需求,特征的选择也有所不同。提取图像特征时可以采用点、线段、曲线及区域等由低到高不同层次的紧凑的几何实体。一般

来说,特征表示的层次越高,提取出稳定、可靠的特征也越困难。同时,高层次的特征可以由一系列低层次的特征来表示,如线段可以离散化为一个点集。这里的“点”一般为从图像中采样得到的特征点或从形状轮廓中采样得到的边缘点的空间位置。基于点特征的图像匹配算法包括 Harris 等(1988)提出的基于角点特征的匹配算法、Grigorescu 等(2003)提出的基于距离标记形状点特征的匹配算法、Sebastian 等(2002)提出的基于奇点图的特征匹配算法、Lowe(2004)提出的基于尺度不变特征的匹配算法、Mikolajczyk 等(2001)提出的基于兴趣点的特征匹配算法及 Belongie 等(2002)针对形状匹配问题提出的 SC 算法;Canny(1986)提出基于边缘的特征匹配算法、Burns 等(1986)提出的基于直线特征的匹配方法及 Li 等(1995)提出的基于曲线特征的匹配算法;基于区域的图像匹配算法包括 Haber 等(2006)提出的基于区域灰度的图像匹配、Chui 等(2003)提出的基于区域梯度的图像匹配等方法。基于线特征的匹配算法比较适用于包含道路、河流、建筑物等具有明显线状特征的遥感图像匹配;而基于区域的图像匹配算法计算量大,对图像畸变非刚性变形等较为敏感。与之相比,点特征以其一般性和容易提取的特性而得到广泛应用。

由于拍摄角度及成像条件的不同,待匹配的图像之间会存在很大的差异。如图 1.1 所示的图像,人眼也需要仔细反复观察,才能找到两幅图像间的对应关系。这就使图像匹配成为一个复杂的问题。在图像匹配问题中,待匹配的图像间的变换可能是平移、旋转、缩放这些相对简单的刚性变换,也可能是一些模型未知的非刚性变换,采用点特征可以较为方便地估算图像的这些变换关系。本书主要研究基于点特征的匹配方法,并在此基础上开展图像匹配的研究。如图 1.6 所示。有了从图像中提取出的特征点,视觉分析领域中的很多问题就可以转化为一个点集匹配的问题,而点集匹配问题正是致力于寻找两个点集间的对应关系,以及求解点集之间潜在的空间变换关系,因此可以利用点集的空间变换关系和对应关系来寻找图像的匹配关系。

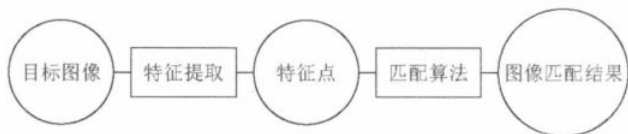


图 1.6 基于特征点的图像匹配算法框架

本书的工作关注点特征的匹配,具体来说,首先提取图像的点特征信息,然后设计通用的匹配算法以匹配提取的特征,从而建立图像间的对应关系。本书致力于研究较为通用的特征匹配算法,以建立提取的图像特征之间精确的对应关系,从而更好地解决图像匹配问题。

1.3.1 问题的数学描述

点匹配的目的是寻找两个点集间的对应关系和恢复一个点集到另一个点集的空间变换关系。这里点指的是特征，通常是在二维或三维图像上得到的兴趣点的位置信息。在实际应用中，点集匹配已成为计算机视觉、模式识别及医学图像分析等领域中一个非常基础同时也非常重要的问题。

点匹配问题可以表述成数学模型：给定两个点集 $X = \{x_i\}_{i=1}^n$ 和 $Y = \{y_j\}_{j=1}^m$ ，其中 X 表示可以移动的模板点集， Y 表示固定的目标点集，两个点集均可看成有限维实向量空间 \mathbf{R}^d 中的两个有限子集，这里两个集合的势不必相等（即两个集合的大小可以不同，因为两幅图像提取的特征点集数量不一定相同）。目标点集由模板点集经过某一变换 f 加上一些离群点和噪声组成，这里离群点和噪声统一用 ε 表示。匹配两个点集可以转化为求解一个从模板点集空间 \mathbf{R}^X 到目标点集空间 \mathbf{R}^Y 的变换 f 。两个点集的对应关系表示如下：

$$Y = f(X) + \varepsilon \quad (1.1)$$

图 1.7 为该数学模型的一个非刚性点集匹配示意图，其中两个点集分别采样于两个形状的轮廓点，研究目标是建立这两个点集间的对应关系，估计出一个变换 f ，将其中一个点集中的每个点正确映射到另一个点集中的相应点上。

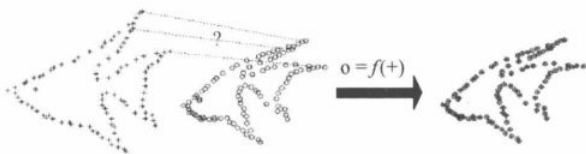


图 1.7 非刚性点集匹配示意图

图 1.7 中，给定两个点集，寻找点集间的对应关系，以及估计一个变换，使其将其中一个点集映射到另一个点集上。图 1.7 中 $o=f(+)$ 表示的是“+”代表的形状点集和“o”代表的形状点集间的变换关系。

这里存在两个耦合的未知变量需要求解，即点集 X 与 Y 之间的潜在的对应关系 P 和变换关系 f 。采用如下步骤进行求解。

第一步，根据少量已知的点集间的对应关系得到点集间的变换关系 f ；然后根据这个变换关系对模板点集进行变换。

第二步，比较变换后的点的坐标与目标点集中点的坐标，若满足 $\|f(x_i) - y_j\| \leq \varepsilon_0$ ，则判定 x_i 与 y_j 具有匹配关系。

第三步，根据找到的点集间点的对应关系更新变换关系。