

几何不变性及其在 3D 物体识别中的应用

陈 柘 赵荣椿

(西北工业大学计算机科学与工程系, 西安 710072)

摘 要 三维物体识别是计算机视觉研究的重要内容之一,它要求从 3D 物体的 2D 图象中识别和定位物体. 由于物体成像时会受到观察视角、摄像机参数的影响,因此使得同一物体在不同观察视角、不同摄像机参数等条件下所得到的图象存在差异. 但由于几何不变性方法可以有效地消除这种差异带给 3D 物体识别的不利影响,所以,近 20 年来这种方法受到了广泛的关注和研究. 为使人们了解该领域的研究现状,以对该领域的研究有所启发,首先讨论了基于几何不变性的 3D 物体识别方法的研究内容,包括研究的几何框架和其不变性以及几何不变性在 3D 物体识别中的主要应用;其次,总结性地评述了该领域的研究现状;最后,提出了研究的发展方向.

关键词 模式识别(520·2040) 几何不变性 3D 物体识别 计算机视觉

中图法分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2003)09-0993-08

Geometric Invariance and Its Applications to 3D Object Recognition

CHEN Zhe, ZHAO Rong-chun

(Dept. of Computer Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

Abstract 3D object recognition, which requires recognition and localization of the 3D object from 2D images, is one of the main research fields of computer vision. It is well known that the appearance of an object varies with the viewpoint and the intrinsic parameters of a camera, which makes the recognition more difficult. By geometric invariance refer to the unchanged property of the shape of an object under special space transformation. Because projective invariance between 3D object and its 2D image could overcome the problem caused by viewpoint, calibration and feature correspondence effectively, it has been attracting more and more attention and research efforts over the last 20 years. For more comprehension to this field, firstly, the main research contents of the invariance-based 3D object recognition is discussed, including geometry frames and their invariance, as well as the way to apply the geometric invariance. Secondly, a commentarial review of this field is given to show the last evolution of it. Although many kinds of useful projective invariance have been derived so far, the sorts of 3D object to which they could be used are still very limited. So there are some needs to develop more powerful invariance for the 3D object recognition. Finally, in the last part of this paper, the future researches in this field are proposed.

Keywords Geometric invariance, 3D object recognition, Computer vision

0 引 言

众所周知,3D 物体识别是计算机视觉研究的一项重要内容,由于其在军事、工业等社会诸多行业中具有潜在的、巨大的应用价值,半个世纪以来受到各国视觉研究者的广泛关注,并提出了众多的理论和方法^[1],其中基于几何不变性的 3D 物体识别方法有助于消除由于观察视角、摄像机参数等因素而带

给物体识别的不利影响^[2],所以研究几何不变性的提取方法及其如何将其应用到 3D 物体识别中,已成为目前 3D 物体识别方法研究的热点问题.

大家知道,一般情况下,3D 物体的成像会随着观察视角、摄像机参数的变化而变化.理论上讲,一个 3D 物体的观察视点可在一个球面上变化,若再考虑到摄像机参数的影响,则描述一个 3D 物体到 2D 平面的变换需要用 3×4 的矩阵来表示^[3],其中可独立变化的参数有 11 个,也就是说,对于一

基金项目:国家自然科学基金项目(60141002);国家“十五”国防预研项目(413160103)

收稿日期:2002-09-28;改回日期:2003-04-07

幅图象,要想识别其中的物体,就得在高达11维的空间中搜索3D物体与图象间的匹配.这在实际运用中近乎不可行.

几何不变性是指物体形状经过几何变换后保持不变的性质^[2],例如,在欧氏空间中,任意两点间的距离经过平移、旋转变换后是不变的.人们对这种几何不变性的研究有着悠久的历史,如根据Klein的思想^[4],几何学本质上就是研究几何不变性的科学,所以可以说,对几何不变性的研究始终伴随着几何学的发展,即从早期研究的 n 次多项式的代数不变量^[5]及一般参数化曲线和表面的不变量^[6],到现今的基于李群变换的不变量^[7],几何不变性的研究一直处在发展阶段.

相比而言,几何不变性在3D物体识别中应用的历史却很短暂,因为在物体识别研究的早期,人们关注的仅是2D物体的识别,即识别图象中物体的形状、轮廓等,其所使用的不变量有Fourier描绘子^[8]、向量矩^[9]及2D仿射和射影变换下的基本不变量,如直线上4点的交比^[10]等.随着研究的深入,人们才逐渐将注意力集中在3D物体的识别上,并首先将基本几何不变量应用于空间中近似平面的物体^[2],如工业垫片等;进而将物体的识别种类拓展至规则物体^[11]和任意形状的物体^[12].这期间,寻找在3D物体和其2D图象中同时存在射影不变性的3D特殊结构又成为一个研究重点^[13-16].

利用3D物体的不变性,对3D物体进行识别的研究,是当前计算机视觉研究的一个热点和难点.为了促进人们对于这一重要研究领域的认识 and 关注,本文将讨论几何不变性方法的研究内容,包括研究的几何框架和其不变性以及几何不变性在3D物体识别中的主要应用,并在对该领域的研究现状进行总结评述的基础上,提出未来研究的发展方向.

1 几何框架及其不变性

从计算机视觉研究的角度上讲,研究几何框架的目的是为了给表达物体的空间几何结构、反映物体的成像变换提供数学描述.基于几何框架下的不变性提供了物体在该几何框架下经受变换时的不变属性,而这种属性则有助于人们解决计算机视觉研究中的某些问题.

1.1 几何框架及变换

目前,在计算机视觉研究中使用的几何框架有欧

氏几何、相似几何、仿射几何和射影几何4种.为简略起见,其各自定义见相关几何论著^[10].这4种框架呈一种层次化结构,即依次由特殊向一般演化^[17].

在以上4种几何框架中,物体所能经受的变换分别是欧氏变换、相似变换、仿射变换和射影变换.其中,欧氏变换是一种刚体变换,包括物体的旋转和平移变换;相似变换在欧氏变换的基础上,加入了均匀尺度变换;仿射变换在相似变换的基础上,又加入了非均匀尺度变换和剪切(Shearing)变换;射影变换则在仿射变换的基础上又引入了透视变换.

射影变换在几何中定义为有限次中心射影的积,一般可用如下代数方程表示:

$$ky = Tx \quad (1)$$

即

$$k \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{1,1} & t_{1,2} & \cdots & t_{1,n} & t_{1,n+1} \\ t_{2,1} & t_{2,2} & \cdots & t_{2,n} & t_{2,n+1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ t_{n,1} & t_{n,2} & \cdots & t_{n,n} & t_{n,n+1} \\ t_{n+1,1} & t_{n+1,2} & \cdots & t_{n+1,n} & t_{n+1,n+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, $x = (x_1, x_2, \dots, x_n, 1)^T$, $y = (y_1, y_2, \dots, y_n, 1)^T$ 分别表示变换前后点的齐次坐标,而 T 则为一 $(n+1) \times (n+1)$ 维的矩阵, k 为一标量.引入 k 的目的是为了使点的齐次坐标中最后一项为1,因为这样便于非齐次坐标向齐次坐标转换.在射影变换中,若能使无穷远点仍变换为无穷远点,则变换就成为仿射变换.对 n 维仿射变换,有如下表示式

$$k \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{1,1} & t_{1,2} & \cdots & t_{1,n} & t_{1,n+1} \\ t_{2,1} & t_{2,2} & \cdots & t_{2,n} & t_{2,n+1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ t_{n,1} & t_{n,2} & \cdots & t_{n,n} & t_{n,n+1} \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & t_{n+1,n+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

1.2 几何不变性

几何不变性是指几何实体在数学变换下保持不变的性质.一般地讲,几何不变性包括几何不变量和几何不变关系.前者可用一个代数数量表示,如射影变换下直线上4点的交比;而后者则是变换前后某种不变关系的定性说明,如物体上点的共线性,直线的相交性等.

几何不变量的一般定义如下^[2]:

设 G 为某一变换群(例如欧氏变换群), g 为其中的元素(例如一平移), $f(x, p)$ 是空间 S (例如欧氏空间)中的一个几何形体,其中, x, p 分别代表坐标矢量和参数矢量, $I(p)$ 是关于 $f(x, p)$, 且仅与参数

矢量 p 有关的代数量, 当 g 作用于 $f(x, p)$ 时, 有

$$g: f(x, p) \rightarrow f(\hat{x}, \hat{p}) \quad (f(\hat{x}, \hat{p}) \in S) \quad (4)$$

$\hat{x}, \hat{p}$ 分别为变换后的坐标矢量和参数矢量; 同时 $I(\hat{p})$ 是关于 $f(\hat{x}, \hat{p})$, 且仅与参数矢量 $\hat{p}$ 有关的代数量, 如果存在

$$I(p) = h(g)I(\hat{p}) \quad (5)$$

则表明 $I(p)$ 是几何形体 $f(x, p)$ 在该变换群下的不变量, 其中 $h(g)$ 是仅与 g 有关, 而与坐标矢量和参数矢量无关的量. 如果 $h(g)$ 等于 1, 则称 $I(p)$ 为绝对不变量.

在研究各种几何框架及变换下的不变量或不变关系时, 有以下基本结论^[18]:

- (1) 射影变换保持直线性、直线与直线的相交性以及直线上点列的交比不变性;
- (2) 仿射变换除具有以上不变性外, 还保持直线与直线的平行性及直线上点列的简比不变性;
- (3) 欧氏变换除具有仿射不变性外, 还可保持两条相交直线的夹角不变性及任意两点的距离不变性(如表 1 所示).

表 1 各种变换下的几何不变性

几何不变性	射影变换	仿射变换	相似变换	欧氏变换
交比	✓	✓	✓	✓
相交性	✓	✓	✓	✓
简比	×	✓	✓	✓
平行性	×	✓	✓	✓
长度比	×	×	✓	✓
夹角	×	×	✓	✓
长度	×	×	×	✓

在实际应用中, 用于求解不变量的几何元素有多种, 例如, 在射影变换中直线上 4 点的交比、共点的 4 条直线间的交比都是基本的不变量^[10]; 另外, 由共面 5 条直线、共面的 5 个点、两条二次曲线等都可求得不同形式的不变量^[2, 19]. 对于三维射影变换, 变换矩阵中独立的参数为 15 个, 这些参数可用物体上的 5 个点及其变换后的对应点的坐标表示. 如果将变换后的 5 点坐标作为射影坐标的基, 则第 6 个点的坐标在变换前后将不发生变化. 有关 6 个点的不变量还有类似交比的形式^[20].

2 几何不变性在 3D 物体识别中的主要应用

几何不变性在 3D 物体识别中的应用主要集中在 3D 物体的表达和模型库索引两个方面.

2.1 3D 物体的表达

在基于模型的 3D 物体识别方法中, 识别是通过将可能的物体模型特征与图象中待识别的物体特征进行比对来实现的. 这个识别过程一般包括搜索可能的物体模型(产生假设)和验证假设模型两个主要的步骤. 由此可见, 物体的表达应当具有以下特点^[12]: ①能从计算效率上有效地支持以上两个步骤; ②能表示广泛种类的物体, 且对每一种物体的表达具有唯一性; ③便于直接通过图象数据来构造模型.

在现有的 3D 物体表达方法中, 有以物体表面为中心的表述方法, 如边界表述法、格网法等^[1], 有以物体体积为描述对象的表述方法, 如体素法、体基元法、广义柱面法等^[1]. 这些方法均要求明确的欧氏表达, 即要求在欧氏空间能准确描述物体的 3D 几何结构, 这些方法的优点是物体表达与视点无关, 但需已知物体的结构或能由图象准确重构 3D 物体; 还有用物体在不同观察视角下的图象表达物体的特征视图法、形态图法等^[1], 这些方法虽无需知道物体的 3D 结构, 但表达与观察视角有关, 通常其要求的特征视图或形态图的数量较大.

几何不变性给人们提供了另一种物体的表达方法. 这类方法是由物体的几何形状出发, 首先计算其所具有的几何不变性, 再由这些几何不变性构成一个矢量空间, 并将物体用该空间中的矢量来表示, 即将物体的表达从欧氏空间转换到一个抽象的几何不变性空间. 在现有的应用中, Weiss 等用单幅图象识别 3D 物体时, 是用由空间 6 点计算出的 3 种不变量来构成一个 3D 的不变量空间. 对于一个 3D 物体, 可计算出若干组不变量, 并可将其表示为三维不变量空间中的一个点集. 识别时, 可通过由图象中计算得到的“不变射线”在 3D 不变量空间的汇聚情况来判别物体的种类^[21]; 而 Vijayakumar 使用不变曲线表达物体, 则完全摆脱了对物体 3D 几何信息的要求^[12]; Umasuthan 在基于拟合表面参数的表达方法中, 是用高阶代数方程中某些参数具备的代数不变特性来表达 3D 物体的曲面片^[22].

2.2 模型库的索引

在基于模型的识别方法中, 必须解决的问题之一是, 针对某一场景的图象, 必须首先利用一定的技术从模型库中找出最有可能与场景中物体匹配的模型来, 即需先对模型库中的模型进行一次粗选, 以便最大可能地将不匹配的模型淘汰掉.

如何有效地缩小检索空间是降低计算复杂度的

一个关键问题.人们提出的一些方法,如解释树法^[22,23],姿态聚类法^[24]等,这些方法均是通过利用模型特征与物体特征之间的局部几何约束来减少搜索的对象.虽然这些方法在数据库中模型数量较少时有好的搜索效率,但对于大型数据库的搜索效率并不理想.

几何不变性与哈希表的结合是提高检索效率的有效途径之一,其原因在于几何不变性是物体所经受变换的不变性质,且由于对它的计算不依赖于观察视点和摄像机参数,因此具有作为索引函数的良好条件;而哈希表法的作用是用索引函数直接定位数据库中的某一记录,它的优点之一是事先为每一个模型均建立了索引值,然后查找时,只要对比由图象中计算得到的特征值与每个模型的索引值,便可找到可能出现的模型.这样,由于省去了在查找时要求的物体特征与模型特征间的匹配计算,从而大大提高了检索速度.这种方法在实践中,已有多个成功的应用^[2,25~27].

尽管有可能出现多个模型产生同样的索引值,但较其他方法而言,这种方法还是极大地提高了检索速度^[28].如果所使用的不变特征是全局的,那么检索结果就可直接确定图象中物体的种类;如果所使用的不变特征是局部的,则这种方法将有助于遮

挡条件下的物体识别.

2.3 几何不变性应用的一般步骤

综上所述,用几何不变性来实现3D物体识别,一般遵循以下步骤:

(1) 建模

预先对待识别物体建立模型库,并在模型库中记录模型的种类编号及物体表达参数,并用由三维模型中计算出的几何不变量来建立数据库的索引表.

(2) 模型检索

由输入图象计算物体的几何不变量,再由得到的几何不变量访问数据库索引表,进而寻找可能的匹配模型.由于一般情况下,由物体及其图象中计算得到的不变量可能有多,所以检索时,需要先对索引表中的每一项进行投票,然后当某一模型的得票数超过一定阈值时,即可认为该模型为可能的匹配模型.

(3) 模型验证

首先由模型与图象间部分特征的对应关系来计算3D模型到2D图象的投影变换,再将3D模型投射到2D图象中,并计算该视点下模型投影与输入图象中物体的匹配程度,如果大于一定的值(如80%),则认为输入图象中的物体已被识别.

以上过程可用图1说明.

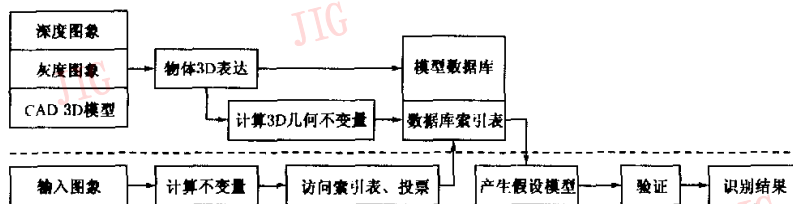


图1 基于几何不变性的3D物体识别方法一般步骤流程图

3 几何不变性在3D物体识别中应用的研究现状

近20年来,有关几何不变性的应用不断涌现,但在应用中,人们关注的焦点问题均是寻找什么样的几何不变性及如何计算.在此,本文想就这些问题和应用中的一些特点作一讨论,以便使人们了解该领域的研究现状.

3.1 应用的几何框架及其不变量

在计算机视觉中,由于经过人眼或摄像机镜头的

物体成像过程需要用物体的投影变换来描述,即用3D到2D的射影变换群来提供几何框架,所以需要进一步研究3D物体在投影变换下保持不变的性质.

投影变换一般包括平行投影(正交投影)变换和中心投影(透视投影)变换^[29].前者的投影射线相互平行,而后的投影射线均由一个公共点投射(如图2所示).由于这个公共点类似于人眼或摄像机镜头,所以一般用透视投影变换来研究物体的成像最为合适,但在观察点与物体间的距离远远大于物体的形状尺寸时,可用平行投影变换来近似透视投影变换^[30].

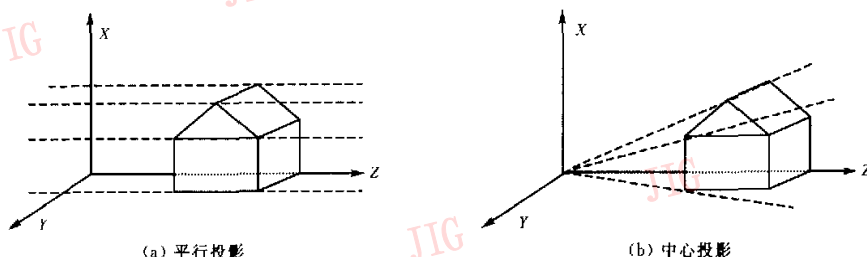


图2 投影示意图

从物体成像时所使用的成像模型上分,可将现有的应用分为基于仿射不变性的应用和基于透视不变性的应用两类。

3.1.1 基于仿射不变性的3D物体识别

从数量上讲,这是目前最为广泛的一类应用。一般在弱透视投影假设下,即当物体尺寸远远小于物体与摄像机间的距离时,摄像机模型可用物体的仿射变换表示。这时,3D物体被近似当作2D物体来处理,而且同一物体之间的不同成像是由一个2D的仿射变换决定的。

如果有同一物体的两幅图象, x 为其中一幅图象中物体上的一点,那么其在另一幅图象上的对应点 $\hat{x}$ 的位置可用下面的方程表示

$$\hat{x} = Ax + b \quad (6)$$

其中, A 是一个 2×2 的非奇异矩阵, b 为一个平移矢量。在这种条件下,通常是将物体的一幅图象直接作为模型。这样,物体的识别问题便由通过物体的2D图象来识别3D物体转化为通过2D图象来识别3D空间的2D物体的问题。

通常,这种应用只适合表面平直的物体。在应用中用到的仿射不变量有多种,如Arbter等对傅立叶描绘子进行了扩展^[31],其提出的方法是对参数化边界进行傅立叶变换,并对傅立叶系数进行正则化处理,以消除仿射变换和边界起点对这些系数的影响,从而使其具有平移、旋转、尺度和剪切不变性。

Lamdan用图象中任意非共线3点组成仿射坐标系,同时利用其他点在该坐标系下的坐标,在仿射变换后不变的性质来识别物体^[32]。这种方法允许通过未知视点的单幅灰度图象来识别物体,且允许物体间存在相互遮挡。其识别过程分为离线处理和在线处理,即由离线处理建立模型表达,由在线处理完成模型索引和匹配。

Weiss研究了代数不变量和微分不变量^[19],其中代数不变量由平面直线、曲线的代数表达式系数

推得,而微分不变量则由对这些几何元素求导数确定,在其提出的代数不变量中,有关于任意3点、共线3点、任意4点、一条二次曲线和两条二次直线的不变量等等。

另外,Tsai还使用直线在仿射变换下所具有的不变量来识别3D空间中的2D物体^[33]。这些应用的共同特点是要求能够容易地从待识别的物体中找到可利用的几何特征,例如,直线、二次曲线等。

3.1.2 基于透视不变性的3D物体识别

由于在大多数情况下3D物体的成像过程需要用透视变换来描述,所以研究用透视图象来构造3D结构的透视不变量对于3D物体识别有重要的意义,这也是近几年不变量在计算机视觉中应用的研究热点。

目前,由2D透视图象求取3D结构的不变量有以下两条途径:

(1) 在已知图象间的对极几何约束或是已知点的对应关系的条件下,可由多幅图象来求取3D透视不变量。

如果已知图象间的对极几何约束,可先利用一些方法确定极线上一些点的对应关系,再由这些对应关系来求取物体中一些点的三维信息,最后由从图象中恢复出的三维点来求取三维不变量。一般可由两幅图象和7个点来求取3个3D透视不变量^[27,34~36]。

如果知道图象中点的对应关系,则可由未标定的3幅图象中对应的6对点来计算出3个不变量^[3,37]。

这些方法的核心是先利用2D图象点与3D点的对应关系来建立成像方程,再通过消去摄像机参数来求取不变量。在一般情况下中,由于点的对应关系是未知的,因此求解这种关系是一个非常复杂的问题。

(2) 由单幅透视图象求取透视不变量

这是目前求取几何不变量中最困难的一个问题,原因在于,Burns等已经证明,在无任何约束的条件下,从3D物体的单幅透视图象中无法计算不变量^[38,39],但人们发现,如果物体形状能满足一定的约束条件,仍然可以由它们的二维图象计算出不变量来。

Zisserman等和Basri等都对于具有哪些条件下的物体存在不变量进行了讨论,并指出对于具有重复结构、旋转对称、管状表面及多面体等类似物体,可由单幅图象计算其3D不变量^[20,40]。这种方法由于利用了图象中点的对称关系,因此可将物体识别问题转化为第1种途径中的情况。

Zhu等提出了一种相邻两平面共6点构成的特殊结构,并从中计算不变量^[13](其提出的结构如图3所示)。这种不变量具有类似交比的形式,不过,该交比中的各个分量是三角形的面积。

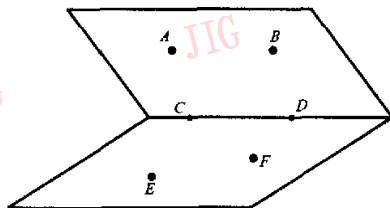


图3 文献[13]提出的空间6点结构

同时,在不变量难以计算的情况下,可以在3D点与2D点之间寻找不变关系。Roh等提出了一种6点结构^[14],其中有4点共面,另两个点不在前4点构成的平面内(如图4所示)。Roh等利用这种结构求得了一种3D物体点及其2D平面点之间的不变关系,并利用这种不变关系构造了模型库索引,但由于对模型进行检索时,不变关系较不变量需要处理更多的组合关系,所以其用于检索时的效率不是很高。

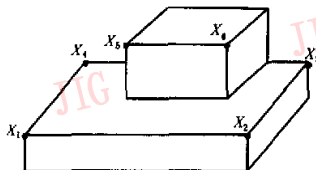


图4 文献[14]提出的空间6点结构

除以上提到的点结构以外,Sugimoto与Song等还分别提出了空间某些线结构所具有的透视不变量^[15,16]。Sugimoto利用求行列式比的方法从3个平面中的6条直线推导出一个透视不变量(其提出的结构如图5所示)。

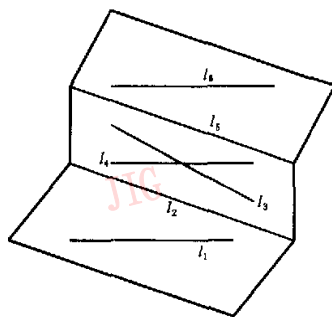
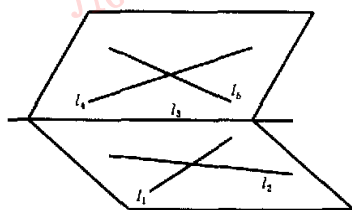
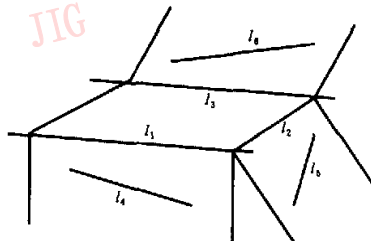


图5 文献[15]提出的空间线结构

Song等在此基础上,利用类似的方法进一步得到了相邻两平面5条直线和4平面6条直线所具有的透视不变量,(其提出的结构如图6所示)。



(a) 相邻两平面共5条直线结构



(b) 四平面共6条直线结构

图6 文献[16]提出的两种空间线结构

以上方法的最大优势在于,在物体识别时,不要求物体3D特征与2D特征间的对应关系。

3.2 基于几何不变性的3D物体识别应用的特点

除了所使用的几何框架及其相应的几何不变性有所区别外,各种应用还有以下几个特点:

(1) 应用中使用的物体种类

从目前应用所处理的物体种类来看,多为平直物体和规则物体(如多面体、或由简单物体组成的物体),而利用弯曲物体或任意形状的物体计算不变量的应用仍比较少见。这主要是由于受到不变量计算对物体形状有一定约束限制的缘故。

(2) 对图象噪声及背景的要求

由于图象中的噪声会影响物体特征的提取,进而会影响到不变性的计算,因此,现有应用一般较适合在低噪声及简单背景环境下的物体识别。

(3) 几何不变性与其他种类不变性的结合使用

对于一般物体而言,呈现出的视觉信息不仅仅是几何信息,还有诸如颜色、纹理、光强度等物理信息。尽管几何信息对于物体识别的决定作用很强,但如果能将物理特征的不变性与几何不变性有效地结合起来,无疑会有助于提高物体识别的效率、可靠性和稳定性。Alferez 等将几何不变性与光度不变性相结合用于识别,既消除了观察视角变化对识别的影响,也消除了光源变化对识别的影响^[41]。

4 结束语

本文对几何不变性的基本理论及其在 3D 物体识别中的主要应用进行了论述,并讨论了几何不变性在 3D 物体识别中的研究现状。综上所述,一方面,几何不变性有诱人的应用前景,但另一方面,其应用还存在诸多障碍。如何利用几何不变性解决复杂背景、物体间存在遮挡、含噪等环境下的 3D 复杂物体识别仍是一个困难的问题。

在该领域有以下工作值得深入研究:(1)目前的许多几何不变性的应用,仍然需要利用物体的 3D 几何模型来求取不变量和做假设验证,由于对复杂的物体建立 3D 几何模型的难度和工作量非常大,所以有必要研究适合几何不变性应用的由 2D 图象进行物体建模和假设验证的方法;(2)目前提出的 3D 点和 2D 点间具有透视不变关系的几何结构较适合规则物体的识别,有必要进一步研究适合任意形状物体的具有透视不变关系的 3D 几何结构;(3)开展将几何不变性的应用推广到感知组织中的研究,将有助于物体特征的提取与组织;(4)几何不变性结合物体其他物理特征不变性的研究目前还较少见,能否融合图象中的多种信息,以便在复杂背景下识别物体值得尝试和研究。

参 考 文 献

- Paul J B, Ramesh C J. Three-dimensional object recognition[J]. Computing Surveys, 1985, 17(1):75~145.
- Forsyth D A, Mundy J L, Zisserman A *et al.* Invariant descriptors for 3-D object recognition and pose [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1991, 13(10):971~991.
- Quan L. Invarinats of six points from three uncalibrated images [A]. In: Proceedings of European Conference on Computer Vision[C]. Stockholm, Sweden, 1994:459~470.
- Klein F. Entwicklung der mathematik [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1926.
- Salmon G. A treatise on higher plane curves [M]. Dublin: Hodges, 1879.
- Lane E P. Projective differential geometry of curves and surfaces [M]. Chicago, Illinois USA: University of Chicago Press, 1932.
- Duda R O, Hart P E. Pattern recognition and scene analysis [M]. New York: Wiley, 1973.
- Persoon E, Fu K S. Shape discrimination using Fourier descriptors [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1977, 7(3):170~179.
- Hu M K. Visual pattern recognition by moment invariant [J]. Institute of Radio Engineers Transactions on Information Theory, 1962, 8(2):179~187.
- 梅向明,刘增贤,门树意. 高等几何[M]. 北京:高等教育出版社, 1988.
- Rothwell C A, Forsyth D A, Zisserman A *et al.* Extracting projective structure from single perspective views of 3D point sets [A]. In: Proceedings of the 4th International Conference on Computer Vision[C]. Berlin, Germany, 1993:573~582.
- Vijayakumar B, Kriegman D, Ponce J. Invariant-based recognition of complex curved 3D objects from image contours [J]. Computer Vision and Image Understanding, 1998, 72(3):287~303.
- Zhu Y, Seneviratne L D, Earles S W E. A new structure of invariant for 3D point sets from a single view [A]. In: Proceedings of 12th International Conference on Robotics and Automation[C]. Nagoya, Japan, 1995:1726~1731.
- Roh K S, Kweon I S. 3-D object recognition using a new invariant relationship by single-view [J]. Pattern Recognition, 2000, 33(5):741~754.
- Sugimoto A. Geometric invariant of noncoplanar lines in a single view [A]. In: Proceedings of International Conference on Pattern Recognition[C]. Jerusalem, Israel, 1994.
- Song B S, Lee K M, Lee S U. Model-based object recognition using geometric invariants of points and lines [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2001, 84(3):361~383.
- Faugeras O. Stratification of three-dimensional vision: projective, affine, and metric representation [J]. Journal of the Optical Society of America A, 1995, 12(3):465~484.
- 马颂德,张正友. 计算机视觉—计算理论与算法基础[M]. 北京:科学出版社,1998.
- Weiss I. Geometric invariants and object recognition [J]. International Journal of Computer Vision, 1993, 10(3):207~231.
- Zisserman A, Zisserman A, Forsyth D A *et al.* 3D object recognition using invariance [J]. Artificial Intelligence, 1995, 78(1-2):239~288.

- 21 Weiss I, Ray M. Model-based recognition of 3D objects from single image [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2001, 23(2):116~128.
- 22 Umasuthan M, Wallace A M. Model indexing and object recognition using 3D viewpoint invariance [J]. *Pattern Recognition*, 1997, 30(9):1415~1434.
- 23 Grimson W E L, Lozano-Pencz T. Localizing overlapping parts by searching the interpretation tree [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1987, 9(4):469~482.
- 24 Stockman G C. Object recognition and localization via pose clustering [J]. *Computer Vision Graphics and Image Processing*, 1987, 40(3):361~387.
- 25 Lamdan Y, Schwartz J T, Wolfson H J. Objects recognition by affine invariant matching [A]. In: *Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition [C]*. Ann Arbor, MI, USA, 1988:335~344.
- 26 Nielsen L, Sparr G. Projective area-invariants as an extension of the cross-ratio [J]. *Computer Vision Graphics and Image Processing: Image Understanding*, 1991, 54(1):145~159.
- 27 Hartley R I. Projective Reconstruction and Invariants from Multiple Images [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1994, 16(10):1036~1041.
- 28 Rothwell C A, Zisserman A, Mundy J L *et al.* Efficient model library access by projectively invariant indexing functions [A]. In: *Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition [C]*. Champaign, Illinois, USA, 1992:109~114.
- 29 Barnard S T. Interpreting perspective images [J]. *Artificial Intelligence*, 1983, 21(1-2):435~462.
- 30 Cheng Y. Analysis of affine invariants as approximate perspective invariants [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 1996, 63(2):197~207.
- 31 Arbter K, Snyder W E, Burkhardt H *et al.* Application of affine-invariant Fourier descriptors recognition of 3-D objects [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1990, 12(7):640~647.
- 32 Lamdan Y, Schwartz J T. Affine invariant model-based object recognition [J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1990, 6(5):578~589.
- 33 Tsai F C D. Geometric hashing with line features [J]. *Pattern Recognition*, 1994, 27(3):377~389.
- 34 Barrett E B, Gheen G, Payton P. Representation of three-dimensional object structure as cross-ratios of determinants of stereo image points [A]. In: Mundy J L, Zisserman A, Forsyth D (Eds.). *Application of invariance in computer vision [C]*. Berlin: Springer-Verlag, 1993:47~68.
- 35 Fauseras O. What can be seen in three dimensions with an uncalibrated stereo rig? [A]. In: *Proceedings of European Conference on Computer Vision [C]*. Santa Margherita, Italy, 1992:563~578.
- 36 Zisserman A, Maybank S J. A case against epipolar geometry [A]. In: Mundy J L, Zisserman A, Forsyth D (Eds.). *Applications of Invariance in Computer Vision [C]*. Berlin: Springer-Verlag, 1993:69~88.
- 37 Quan L. Invariants of six points and projective reconstruction from three uncalibrated images [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1995, 17(1):34~46.
- 38 Burns J B, Weiss R S, Riseman E M. The non-existence of general-case view-invariants [A]. In: Mundy J L, Zisserman A (Eds.). *Geometric Invariance in Computer Vision [C]*. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 1992.
- 39 Moses Y, Ullma S. Limitations of model-based recognition systems [A]. In: *Proceedings of European Conference on Computer Vision [C]*. Santa Margherita, Italy, 1992:820~828.
- 40 Basri R, Moses Y. When is it possible to identify 3D objects from single image using class constraints? [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1999, 33(2):95~116.
- 41 Alferez R, Wang Y F. Geometric and illumination invariants for object recognition [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1999, 21(6):505~535.



陈 栢 1969年生, 1996年获西安电子科技大学信号与信息处理专业硕士学位, 现为西北工业大学计算机科学与工程学院博士研究生。主要研究领域为图象处理、模式识别与计算机视觉。



赵荣椿 1960年毕业于解放军军事工程学院, 现任西北工业大学信号处理研究所所长、博士生导师。研究领域为信号、图象处理、模式识别与计算机视觉。已发表论文90余篇、著作5部。