

基于单幅线条图的三维立体重建方法综述

郑金鑫 汤 帆 王勇涛

(北京大学计算机科学技术研究所 北京 100080)

摘 要 从单幅线条图重建物体的三维立体结构是机器视觉领域的一个重要问题。它的应用范围包括基于手工绘制的立体设计与创作、将现有的工程线框模型图转换为三维模型、基于自然图像的三维建模、图像理解和检索等。从不同的角度对现有的相关方法进行了分类,并重点从所用算法分类的角度回顾了现有的相关方法。最后总结了基于幅线条图的三维立体重建方法的现状和不足,指出了未来的研究发展方向。

关键词 线条图,三维重建

中图法分类号 TP391 文献标识码 A

Survey on 3D Reconstruction from Single Line Drawings

ZHENG Jin-xin TANG Zhi WANG Yong-tao

(Institute of Computer Science and Technology, Peking University, Beijing 100080, China)

Abstract Reconstructing the three-dimensional structure of an object from single line drawings is an important issue in the field of machine vision. Its applications include three-dimensional design and hand drawing based creation, conversion of existing engineering drawings to solid models, single natural image based 3D reconstruction, image understanding and retrieval. This paper presented our taxonomy of the existing methods, and reviewed the relevant methods according to the types of algorithms they use. Finally, we concluded the achievements and drawbacks of the existing methods of 3D reconstruction from single line drawings, and pointed out some future directions of research.

Keywords Line drawing, 3D reconstruction

1 引言

人类的感知系统能够从单幅二维图像中获得一个物体的三维立体结构信息,如何利用计算机模拟这一能力是机器视觉领域的一个重点和难点问题。近年来,基于单幅线条图的三维立体重建成为研究的热点,它的应用范围包括基于手工绘制的立体设计与创作、将现有的工程线框模型图转换为三维模型、基于自然图像的三维建模、图像理解和检索等。线条图是三维物体的轮廓在二维平面上的投影。虽然人们可以较轻松地由物体的二维投影获知其三维结构,但对于计算机来说,这却不是一个容易解决的问题。

“线条图”是一种人造的二维图形,它能够以清晰直观的方式描述物体的结构。不同于一般的自然图像,线条图的结构往往由点、线构成,具有清晰的几何结构,并不具有一般自然图像中的纹理信息。线条图存在于人们日常接触的各种信息中,如书刊、报纸、网页、电子文档等。人们常见的线条图包括手绘图形、工程制图、CAD 制图、教材插图,等等。

用线条图表示三维立体是在平面视觉中较常用的方法。一些平面的信息载体如教材、普通电子文档等因受载体本身的限制而无法准确地表达三维立体的结构,因此它们使用线条图来表示三维立体的某一个视角所形成的二维图形。人类的视觉系统对这类用二维线条图表示的三维立体有较强的理

解能力,一般来说,只要视角选择得当,单幅线条图就足以表示三维立体的整体结构,并很容易被人类理解。

线条图是三维立体的轮廓在二维平面上的投影。按照投影方式的不同,我们把线条图分为两种:透视投影和平行投影。其中透视投影是用中心投影法将形体投射到投影面上而获得的一种较为接近视觉效果的面面投影图,它具有消失感、距离感,在自然图像中比较常见;而平行投影是沿着相互平行的投影线投射到平面上形成的投影图,它具有保持直线平行关系等特性,比较常见于工程制图、手绘图形等。本文主要讨论基于平行投影的线条图进行三维立体重建的方法。

线条图实际上是一个含有顶点和边的连通图(非连通图可以划分为连通子图分别进行处理)。对线条图进行三维重建的算法一般需要一个把图形转换为顶点二维坐标和连接边集合的预处理。一些算法直接把二维坐标点和它们之间的连接关系作为输入。对于顶点之间的连接边,可以是直线段,也可以是曲线。对于图形上相互交叉的边,它们的交叉点只是两条三维空间线段投射到平面上的重叠,一般不作为顶点,边与边总是相交于它们的端点处。

如图 1 所示,一个立方体平行投影到二维平面上,其各个顶点的二维坐标 (x, y) 得以保留,缺失了第三维的深度坐标。在计算机中重建这个立方体的三维结构,就是仅借助各顶点的二维坐标,还原它们的第三维坐标。这个还原的结果可以

到稿日期:2013-05-15 返修日期:2013-06-21 本文受北京市自然科学基金项目(4132033)资助。

郑金鑫(1984—),男,博士生,主要研究方向为网络内容信息抽取与模式识别,E-mail:zhengjinxin@pku.edu.cn;汤帆男,博士,研究员,博士生导师;王勇涛男,博士,助理研究员。

有无穷多种,但一定有一种是和人类的直接视觉感知相符合的,这是人们最可接受的还原结果。例如图 1 中 $\{z_1\}$ 、 $\{z_3\}$ 都不是一个好的还原,而 $\{z_2\}$ 是基本符合人类感知的好的还原。三维立体重建的任务就是要找到这个最佳的还原结果。

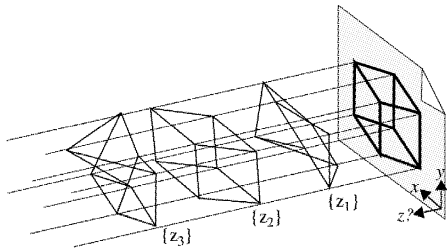


图 1 平行投影存在无数的还原结果

2 基于单幅线条图的三维立体重建方法分类

过去 20 年,出现了大量基于单幅线条图的三维立体重建方法的研究。这些研究采用的方法、适用对象、应用场景都不尽相同。本文从不同的角度对这些方法进行分类。

按用户参与方式分类,可分为全自动的方法和交互式的方法。全自动的方法的用户预先一般不用设置或只设置少量的初始参数,输入单幅线条图,算法就可以自动完成从二维坐标信息重建三维立体的过程并输出结果,计算过程中不需要用户进行参数调整;而交互式的方法在进行重建的过程中,则需要交互式地让用户调整一些参数,以消除计算过程中可能遇到的多义性问题,从而得到用户期望的结果。全自动的方法更接近于传统意义上的“重建”,而需要用户干预的方法则更接近“设计”,后者经常见于基于手绘的三维设计系统中^[1,2]。尽管如此,这两种方法还是有交叉与相似之处。

按输入数据的精确程度进行分类,可分为对精确二维坐标线条图、非精确线条图、手绘图形进行重建的方法。较早期的方法只能处理精确线条图^[3]。后来的方法一般对顶点坐标偏移、直线段弯曲、断裂等误差具有一定的容忍度。而对于手绘图形进行重建的方法对容错能力的要求最高^[2]。手绘图形本身就无法保证精确,不同的用户的绘制习惯也各不相同。一些交互式的方法对用户的绘制顺序有一定的要求,而大部分方法能够较好地处理任意方式的绘制图形。

按隐藏面是否可见的分类,可分为隐藏面可见、隐藏面不可见两种方法。所谓隐藏面就是一个不透明物体的“背面”,在真实的世界中,物体背面是不可见的。但很多线条图也包含了物体背面的轮廓,实际上使物体变成一个透明的框架结构。大部分的重建算法处理的是这种隐藏面可见的线条图。一些教材类的文档习惯把立体背面的线条用虚线标记,但三维重建的算法一般不需要对这些隐藏面的线条加以区分;另一些算法可以处理立体的隐藏面不可见的线条图,这些方法通常运用物体的对称性等规则对物体的隐藏面进行推测。

按物体的表面类型,可以分为重建平面立体和曲面立体的方法。若一个物体的表面都是由平面构成的,则它所投射出的平面线条图将只含有直线。目前大部分的方法都是围绕平面立体的重建问题开展研究的;若一个物体含有曲面,则问题比只有平面的情况复杂得多。这类问题的处理对象往往是同时由平面和曲面构成的物体,因此相应的算法要同时具备处理两者的能力。对曲面立体的三维重建问题仍然是一个研究的难点,目前相应的方法也比较少,种类相对单一。

按重建方法采用的算法分类,有基于规则优化、基于几何

假设、基于分治策略等方法。这些方法之间并不是互斥关系,而是从其算法偏向的类型加以区分。基于规则是早期大部分方法所采用的,它们将三维立体定义为几何物体,并用一些几何规则对其加以约束,以在求解空间中寻求最佳的结果。常用的规则有平面规则^[4]、MSDA 规则^[8]、MSDSM 规则^[23]、MEAD 规则^[24]等。求解优化函数一般是这类方法的最终步骤;基于几何假设的方法首先假设其所处理的三维立体遵循一定的要求,如含有立方角点^[13]、有空间对称性^[16,17]等。在假设的基础上,它们对整个物体的点和边坐标进行推测,最终得到立体重建结果。这种方法中不一定包含优化求解步骤,一般计算复杂度相对较低,但其假设条件通常较苛刻,只适用于一些特殊的图形;近年出现的一些方法^[19-22]采用了分治的策略来解决一些复杂的三维立体重建问题,它们先将复杂的图形划分为尽量简单的基本部分,然后应用一些规则来进行优化求解,最后将各个部分求得的结果组合起来得到整个重建的结果。

3 从线条图中识别平面的方法

基于规则的三维重建方法所常用的一个规则是所谓“平面规则”:在二维线条图中,由多条边围成的平面多边形在还原后的三维空间中也要保持成一平面。也就是在还原后,平面多边形的顶点须在一个平面上。这是一个显而易见的规则,但是,由于在二维线条图上,由直线段所围成的多边形有很多,其中哪些才是真正的平面多边形,这是一个需要解决的问题。实际上,一些三维重建方法的第一个步骤就是在线条图中寻找由多边形所围成的平面(以下简称平面)。在本节中,将对从线条图中识别平面的方法进行回顾。

Shpitalni 和 Lipson^[6]提出了一种可以有效地从线条图中识别平面的方法。其首先规定了如下一些定义(见图 2):

v :线条图中的顶点;

e :线条图中的边;

$d(v)$:顶点 v 的度,表示交于 v 的线段数量;

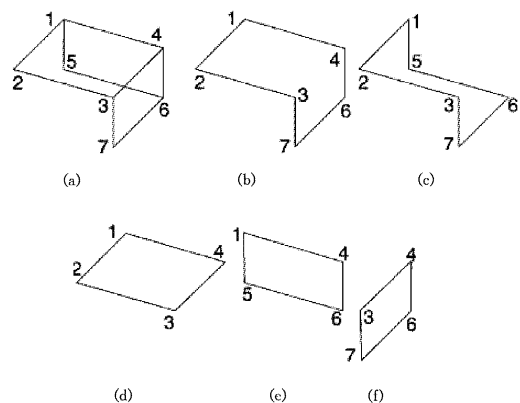
$R(v)$:顶点 v 的阶,表示穿过 v 点的平面数量;

$R(e)$:边 e 的阶,表示以 e 为边的平面数量;

回路:线条图中的闭合多边形;

无自交叉回路:在一回路中没有相互交叉的边,也称为潜在平面;

最小潜在平面:一个潜在平面,且其不相邻两顶点间无边。



(a) 一个线条图;(b)–(f)线条图中的无自交叉回路,其中(c)–(f)是最小潜在平面

图 2

下面的算法基于他们观察到的一个事实:两个平面在立体空间中相邻,当且仅当它们的所有公共边是共线的。这一事实被称为平面相邻法则。算法首先找出线条图中的所有回路,并从中去除自交叉的和不相邻顶点间有连线的,得到一个最小潜在平面集;接着应用4个等式和不等式计算所有顶点和边的阶的上限, $R^+(e), R^+(v)$;然后使用A*算法^[25]求取如下问题的解。

$$x = \operatorname{argmin}\{\sum[R^+(e) - R(e)] + \sum[R^+(v) - R(v)]\} \quad (1)$$

$$\text{subject to: } R(e) \leq R^+(e), \forall e; R(v) \leq R^+(v), \forall v$$

式中, x 是最小潜在平面的子集的选取方案,其中的平面必须满足平面相邻法则。可以看出,这个算法的目标是在每个顶点和边都不超过其阶的上限的条件下,使所有顶点和边的阶之和达到最小。

Liu和Lee^[7]为解决同样的问题,提出了一种基于最大权团的寻找线条图中平面的方法。令 $w(i)$ 表示平面 i 的边数, x 为最小潜在平面集的子集,算法求解的目标为:

$$x = \operatorname{argmax}[\sum w(i)], i \in x \quad (2)$$

式中, x 中的两个平面若有公共边,则这些边必须共线。Liu和Lee的研究表明,他们的方法所得出的结果与Shpitalni和Lipson的方法是等价的。但由于无需计算每个顶点和边的阶的上限,因此他们的方法比Shpitalni和Lipson的方法能获得更高的计算效率。

尽管上述方法可以有效识别线条图中的平面,但其计算复杂度与线条图中的边的数量成指数关系^[8]。因此,对于含有许多平面的线条图,上述方法无法在合理的时间内完成计算。为此,Liu和Tang^[9]提出了一种基于遗传算法^[26]的方法来解决这一问题。他们的方法可以达到边数量的线性复杂度,从而大大提高了计算效率。

Liu等^[10]针对在折叠多面体(Manifold)中识别平面提出了一种方法。折叠多面体是一种常见的三维立体。该方法先从线条图中寻找闭合的回路,然后从中寻找平面。它利用了折叠多面体的性质:一条边总有且只有两个相邻的面,以及其他的一些折叠多面体特有的性质,以去掉闭合回路中非平面的情况。论文还给出了处理折叠多面体中含有曲线或曲面的方法。

4 基于单幅线条图的三维立体重建方法

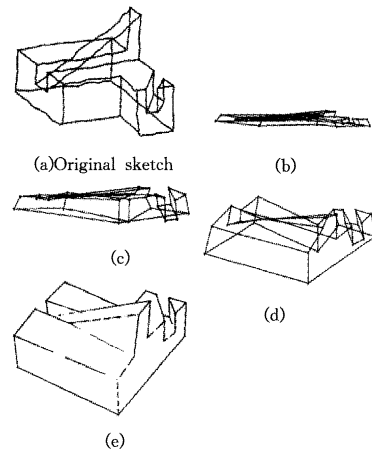
4.1 基于规则优化的方法

Marill^[3]最早提出了使用MSDA规则来进行基于单幅线条图的三维立体重建。MSDA(minimum standard deviation of angles)是基于心理学总结出的一条规则,其含义是一个三维立体中所有直线段构成的夹角应尽量相似。Marill的方法把线条图的顶点二维坐标以及顶点之间的直线连接作为输入,然后计算线条图中每两条相遇边的夹角,并采用一种简单的Hill-climbing^[27]的方法来寻找最优解,以使得这些夹角的方差极小。这种方法过于简单,以致于对一些图形的优化函数往往陷入局部极值,而无法得到最优解。并且作者也没有证明为何应用MSDA规则能够取得好的效果。但是Marill提出的MSDA规则却被后来的很多方法所采用,具有重要意义。

Leclerc和Fischler^[4]针对Marill的方法不能保证线条图的三维平面性质的缺点进行了改进。他们对MSDA规则的合理性进行了讨论,并在使用MSDA规则的基础上,增加了

保持平面的规则,即先从线条图中识别平面多边形,然后在目标优化函数中加入了一项,要求这些平面多边形的顶点在三维空间中处于同一平面上。他们对优化函数的求解使用了一种梯度下降^[29]的方法,通常能够获得比Hill-climbing更优的效果。

Lipson和Shpitalni^[5]同样使用了基于优化的方法来求解三维重建问题。不过他们使用的规则除了MSDA规则和保持平面规则外,还添加了一些额外的规则,如平行线规则(在线条图中平行的线条应在三维中平行)、竖直线规则(在线条图中垂直于 x 轴的线条在三维中保持垂直于水平面),等等,共达12种规则。目标优化函数是由这些规则的量化形式直接相加得到的。对于目标函数的优化求解,作者比较了布伦特最小化算法^[28]、共轭梯度算法^[29]、遗传算法,并最终采用了第一种算法,以达到效果和速率的平衡。作者还使用了角度分布图来加速目标函数的收敛。这个方法能够处理不精确的线条图,并且还能处理含有柱面的线条图,亦即将柱面转化为几个平面的组合。但它的的一个比较明显的缺点是使用的约束规则太多,计算复杂度大大增加,对于一些复杂的图形计算时间太长。图3是一个较复杂的手绘线条图的重建过程,重建这一图形需要127秒的时间。



(a) 输入线条图;(b)~(d) 重建过程;(e) 重建结果

图3 Lipson和Shpitalni的重建方法过程

Masry等^[12]提出了一种用交互式的、基于直线的角度分布直方图来对手绘线条图进行重建的方法。该方法先建立全局的直线段角度(斜率)分布图和每个顶点的局部角度分布图,并选择一个顶点,其角度分布图与全局角度分布图最为相似,将其作为原点,并假设原点处有3条相互垂直的边作为坐标轴。然后从原点开始,建立基于角度的最大生成树,沿着这棵树逐步求出与树直接相连的顶点的坐标。求解的方法使用了Levenberg-Marquardt算法^[30]。该方法还给出了一种重建手绘曲线的方法,如图4所示,假设曲线是一条平面曲线,重建的目标是找到曲线最可能存在的三维平面。这个三维平面应过曲线的两个端点所连成的直线,并且在二维平面上的投影应完全覆盖曲线。

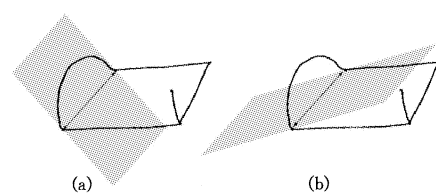


图4 Masry等的手绘曲线重建

前面提到的方法都能较好地处理一些简单图形。但当图形较为复杂时,由于变量数量增多,这些方法的非线性目标优化函数很容易陷入局部极值而非最优解。Liu 等^[11]提出了一种基于平面参数的优化方法,即使处理复杂图形时,变量的维度仍然可以维持在线性范围内。此方法中用于构造目标优化函数的未知变量不再直接是三维物体顶点的深度坐标,而是物体的每个平面的参数。这样就将问题的求解空间转化为一个维度大为降低的线性零空间^[31]。论文证明了这个零空间的维度与重建三维立体所需的最少顶点数量相等。由于一个线条图一般并不是精确的,因此使用 SVD 分解^[32]适当地增加了这个零空间的维度,从而在保持算法高效率的同时,获得一定的鲁棒性。由于该方法的优化参数是物体的平面参数,因此无需再使用保持平面的规则,除此之外,仅使用了 MSDA 规则来构造目标优化函数。目标函数的求解用 hill-climbing 方法、quasi-Newton 算法^[33]、遗传算法均能取得良好效果。

Tian 等^[35]提出了一种交互式的对手绘线条图进行三维重建的方法。该方法从另一种思路来降低目标函数求解空间的维度:首先基于手绘图形的一个性质——其中的某些线条是平行的,因此把它们按照二维平面上的斜率划分成平行线组,每一组内的线条斜率都是相近的,然后基于手绘图形的第二个性质——平行线组在二维平面上的长度与它们的端点的深度坐标差之比保持定值,即:

$$\frac{z_1 - z_2}{|L|} = \Delta_i \quad (3)$$

式中, z_1, z_2 是线段两顶点的深度坐标, $|L|$ 是线段在二维平面上的长度, Δ_i 是与平行线组相关的未知参数。将其改写成如下线性形式:

$$z_1 - z_2 - \Delta_i |L| = 0 \quad (4)$$

并对图形中的所有直线段都写出此等式,排列在一起,就形成了一个线性方程组:

$$Px = 0 \quad (5)$$

式中, $x = [\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_k, z_2, \dots, z_n]^T$ (去掉 z_1 因为可以把它固定为 0), P 称为平行矩阵。

然后对 P 进行 SVD 分解,得到一个零空间 P_{null} , 设其维度为 p , 则可设一个 p 维向量 s , 使

$$x = P_{null} \cdot s \quad (6)$$

注意 x 中包含了各个顶点的深度坐标 z 。 s 的维度与平行线组的数量有关, 它通常比顶点的数量小得多, 例如: 对于一个立方体, 其顶点的数量是 8, 而平行线组的数量是 3。对 z 的求解转化成了对 s 的求解, 从而降低了求解空间的维度。目标优化函数仍然基于 MSDA 规则来进行构造。

4.2 基于几何假设的方法

Lee 和 Fang^[13]提出的基于立方角点进行三维重建的方法是一种典型的基于假设的方法。该方法假设其处理的线条图至少含有一个立方角点(有 3 条边相交于此顶点且两两互相垂直), 这个顶点可由用户选定或自动识别出来。先设这个立方角点为原点, 则与其直接相连的 3 个顶点坐标可用 Perkins 公式^[14]计算得出。于是已知的 4 个顶点坐标可共同确定它们所在的 3 个平面的参数, 进而在这 3 个平面上的所有其他顶点的坐标也可以求得。然后重复此过程, 可得出所有平面的参数, 从而得出所有顶点的坐标。论文证明了对于一个所有顶点的度均等于 3 的线条图来说, 该方法总可以从任

意给定的立方角点开始推算出所有平面的参数和所有顶点的坐标。可以看到该方法没有用到优化目标函数, 其计算复杂度与待重建的物体平面数量成线性关系, 是一种颇为高效的方法。但是对于含有非 3 度顶点的线条图, 该方法不能保证求得所有顶点的坐标, 因此其局限性较大。作者后来又提出了一种改进的方法^[15], 即先用立方角点方法对线条图进行一个初步的估计, 然后在此基础上再用基于优化的方法完成重建的任务。作者指出这种混合式的方法其效率比单纯的基于优化的方法的更高。

Cao 等^[16]对隐藏面不可见的线条图提出了一种重建的方法, 它不仅可以重建物体的可见面, 同时可以重建出物体的隐藏面。该方法基于对称和尽量简单化的心理学原理对隐藏面的立体拓补结构进行推测, 并且使用了基于参数优化的方法来重建整个三维立体。

Cordier 等^[17]提出了一个从手绘线条图重建对称三维立体的方法。该方法能自动识别手绘曲线图中的三维对称关系, 然后利用三维对称点坐标和对称平面的法向量的关系^[18]计算各个点的深度坐标。它的一个主要局限是过于依赖手绘图形的笔触和连接来判断对称关系。

4.3 基于分治策略的方法

Chen 和 Liu 等^[19,20]针对之前的方法不能较好地处理复杂物体的重建问题提出了一种基于分治思想的方法。他们先找出一个复杂的多面折叠体的内平面: 仅有边可见的平面, 如图 5 中的灰色的平面; 然后沿着内平面把这些物体拆分成一个个较为简单的物体, 用传统的基于规则和优化的方法对每一个物体分别进行重建; 最后把重建的结果组合起来。Xue 等^[21]提出了一种类似的方法, 不过他们拆分物体的方法是用一个叫做对象分割的方法进行的。

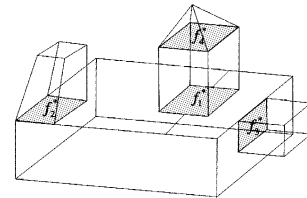


图 5 内平面示意

Xue 等^[22]又提出了一种基于分治和识别的方法来解决复杂物体的重建问题。他们同样使用了文献[20]的方法把一个物体通过内平面拆分成多个简单的基本部分, 然后对每一个基本部分, 从一个事先建立好的包含 72 个三维立体模型的数据库中寻找匹配的模型。匹配的方法是物体与模型之间具有同构的关系: 顶点数量相同且顶点之间的连接关系相同。然后在各个部分和与其匹配的模型上建立一个无向图模型(也称马尔科夫随机场模型)^[34]。假设各个部分只与其直接相邻的部分相关, 并且每个部分都是其对应的模型通过平移-旋转的变换得到的, 以及选定模型尽量简单的先验假设, 基于这些假设, 构造出一个目标优化函数。通过求解这个优化函数获得各个部分顶点的深度坐标。最后把相邻部分的公共顶点坐标取均值, 把各部分的重建结果组合起来。

4.4 小结

上述方法分别从基于规则优化、基于几何假设、基于分治策略的角度进行单幅线条图的三维立体重建。这些方法分类之间并没有一个明确的界限, 基于规则的方法往往也或多或少地采用了某些几何假设, 基于分治的方法通常也需要依据

一定的规则来构造目标优化函数。但是它们适用的处理对象还是有所区别的:基于规则的方法比较适用于一些简单的线条图,基于假设的方法适用于一些有特定限制的线条图,基于分治的方法则适用于一些较为复杂的线条图。较多的研究专注于解决只含有直线和平面的线条图重建问题。而对于含有曲线和曲面的线条图,现有方法还较少,一般的方法都是先把这类线条图中的曲线去掉或转化为直线,应用对直线的线条图的重建方法后,再考虑曲线的还原。同时,对于复杂物体的三维重建,现有的基于分治的方法虽已达到较好的效果,但其适用范围、计算效率仍有待提高。

结束语 从单幅线条图重建物体的三维立体结构是机器视觉领域的一个重要研究课题。本文回顾了基于单幅线条图的三维立体重建的理论和方法,从不同的角度对相关方法进行了分类。现有的方法可以有效地对一些简单或复杂的线条图进行三维立体重建,并取得一定的效果,但是,现有的基于单幅线条图的三维立体重建方法还存在着下面一些不足:

(1)复杂物体的重建成功率还不够高。对于一些简单的物体,现有方法已经可以达到很好的效果。但对于越是复杂的物体,现有方法越是显得力不从心。尽管已经有研究采用了分治的策略来解决这类问题,但其仅限于折叠多面体等特殊类型的物体,对于任意复杂物体的重建方法仍然比较缺乏。

(2)重建算法效率不高。除了一些基于假设的确定性方法以外,几乎所有的方法都采用了基于优化的方法。目标优化函数本身是一个多变量(与顶点或边的数量线性相关)、高阶的多项式函数,对于这类函数的优化求解,除了非常高的计算复杂度以外,现有的优化方法还很容易陷入局部极值,无法求得最优解。

(3)含有曲线、曲面的线条图的有效重建方法较少。现有大多方法都针对仅含有直线和平面的线条图进行处理,对于一些含有曲线和曲面的图形,现有方法还比较初级和单一,这也极大地制约了手绘图形的重建问题的进展。

(4)处理问题的方法比较简单,没有考虑上下文的语义信息。现有的方法几乎都是对输入的线条图单独进行处理,并没有考虑其获取的环境和上下文信息。但大量的线条图是存在于互联网和文档中的,其上下文的语义对重建线条图应有辅助作用。但目前还没有应用这一特点的研究进展。

随着3D显示技术的不断发展和完善,3D内容的匮乏日渐成为一个突出的问题。如果能从大量的二维图像中获得三维信息,将极大地丰富现有的3D内容。三维建模本身就是机器视觉领域的热点问题,而从线条图进行三维立体重建是三维建模的一个基本问题,其发展对机器视觉的整体发展具有重要的意义。

参 考 文 献

[1] Piquer A, Contero M, Naya F. A survey on geometrical reconstruction as a core technology to sketch-based modeling[J]. *Computers & Graphics*, 2005, 29(6): 892-904

[2] Olsen L, Samavati F F, Sousa M C, et al. Sketch-based modeling: A survey[J]. *Computers & Graphics*, 2009, 33(1): 85-103

[3] Marill T. Emulating the human interpretation of line-drawings as three-dimensional objects[J]. *International Journal of Computer Vision*, 1991, 6(2): 147-161

[4] Leclerc Y G, Fischler M A. An optimization-based approach to the interpretation of single line drawings as 3D wire frames[J].

International Journal of Computer Vision, 1992, 9(2): 113-136

[5] Lipson H, Shpitalni M. Optimization-based reconstruction of a 3D object from a single freehand line drawing[J]. *Computer-Aided Design*, 1996, 28(8): 651-663

[6] Shpitalni M, Lipson H. Identification of faces in a 2D line drawing projection of a wireframe object[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1996, 18(10): 1000-1012

[7] Liu J, Lee Y T. Graph-based method for face identification from a single 2D line drawing[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2001, 23(10): 1106-1119

[8] Reingold E M, Nievergelt J, Deo N. *Combinatorial Algorithms: Theory and Practices*[M]. Prentice-Hall, 1977

[9] Liu J, Tang X. Evolutionary search for faces from line drawings[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2005, 27(6): 861-872

[10] Liu J, Lee Y T, Cham W K. Identifying faces in a 2D line drawing representing a manifold object[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, 24(12): 1579-1593

[11] Liu J, Cao L, Li Z, et al. Plane-based optimization for 3D object reconstruction from single line drawings[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2008, 30(2): 315-327

[12] Masry M, Kang D, Lipson H. A freehand sketching interface for progressive construction of 3D objects[J]. *Computers & Graphics*, 2005, 29(4): 563-575

[13] Lee Y T, Fang F. 3D reconstruction of polyhedral objects from single parallel projections using cubic corner[J]. *Computer-Aided Design*, 2011, 43(8): 1025-1034

[14] Perkins D. Cubic corners[R]. Quarterly progress report 89. MIT Research Laboratory of Electronics, 1968: 207-214

[15] Lee Y T, Fang F. A new hybrid method for 3D object recovery from 2D drawings and its validation against the cubic corner method and the optimisation-based method[J]. *Computer-Aided Design*, 2012, 44(11): 1090-1102

[16] Cao L, Liu J, Tang X. What the back of the object looks like: 3D reconstruction from line drawings without hidden lines[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2008, 30(3): 507-517

[17] Cordier F, Seo H, Melkemi M, et al. Inferring mirror symmetric 3D shapes from sketches[J]. *Computer-Aided Design*, 2012, 45(2): 301-311

[18] Cordier F, Seo H, Park J, et al. Sketching of mirror-symmetric shapes[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2011, 17(11): 1650-1662

[19] Chen Y, Liu J, Tang X. A divide-and-conquer approach to 3D object reconstruction from line drawings[C]// *Computer Vision, 2007. ICCV 2007. IEEE 11th International Conference on. IEEE*, 2007: 1-8

[20] Liu J, Chen Y, Tang X. Decomposition of complex line drawings with hidden lines for 3D planar-faced manifold object reconstruction[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, 33(1): 3-15

[21] Xue T, Liu J, Tang X. Object cut: Complex 3d object reconstruction through line drawing separation[C]// *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2010 IEEE Conference on. IEEE*, 2010: 1149-1156

(下转第 79 页)

传播仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2012, 24(1): 189-195

- [9] Kiss I Z, Green D M, Kao R R. The effect of network mixing patterns on epidemic dynamics and the efficacy of disease contact tracing [J]. *Journal of The Royal Society Interface*, 2008, 5: 791-799
- [10] Sloot P, Ivanov S. Stochastic simulation of HIV population dynamics through complex network modeling [J]. *International Journal of Computer Mathematics*, 2007, 85(8): 1175-1187
- [11] 臧春鹏, 王宁. 抗病毒治疗在阻断艾滋病传播流行中的作用[J]. *中华临床医师杂志: 电子版*, 2011, 5(8): 2343-2346
- [12] 王俊杰. 动力学模型在我国艾滋病五类高危人群传播规律分析中的应用[D]. 北京: 中国疾病预防控制中心, 2011: 1-129
- [13] Granich R M, Glikli C F. Universal voluntary HIV testing with immediate antiretroviral therapy as a strategy for elimination of HIV transmission: a mathematical model [J]. *The Lancet*, 2008, 313: 48-57
- [14] Ergün G. Human sexual contact network as a bipartite graph [J]. *Physical A*, 2002, 308(1): 483-488
- [15] 温罗生, 杨小帆, 钟将. 在二部无标度网上的两性疾病传播[J]. *物理学报*, 2008, 57(8): 4794-4799
- [16] Moslonka-Lefebvre M, Bonhoeffer S, Alizon S. Weighting for sex acts to understand the spread of STI on networks [J]. *Journal of Theoretical Biology*, 2012, 311(21): 46-53
- [17] Gilbert N. *Agent-based models*[M]. SAGE Publications, Incorporated, 2007
- [18] Bender E, Canfield E. The asymptotic number of labeled graphs with given degree sequences [J]. *Combinatorial Theory, Series A*, 1978, 24: 296-307
- [19] Baggaley R F, White R G, Boily M-C. HIV Transmission Risk Through Anal Intercourse: Systematic Review, Meta-Analysis and Implications for HIV Prevention [J]. *International Journal of Epidemiology*, 2010, 39(4): 1048-1063
- [20] Graw F, Leitner T, Ribeiro R M. Agent-based and phylogenetic analyses reveal how HIV-1 moves between risk groups; Injecting drug users sustain the heterosexual epidemic in Latvia [J]. *Epidemics*, 2012, 4(2): 104-116
- [21] Leclerc P M, Matthews A P, Garenne M L. Fitting the HIV Epidemic in Zambia: A Two-Sex Micro-Simulation Model [J]. *PLoS ONE*, 2009, 4(5): e5439
- [22] Giovanna Merli M, Hertog S, Wang B, et al. Modelling the spread of HIV/AIDS in China: the role of sexual transmission [J]. *Popul Stud (Camb)*, 2006, 60(1): 1-22
- [23] 臧春鹏, 王宁. 抗病毒治疗对艾滋病传播流行的影响[D]. 北京: 中国疾病预防控制中心, 2011: 1-115
- [24] Anderson R M, Medley G. Epidemiology of HIV infection and AIDS: incubation and infectious periods [J]. *Survival and vertical transmission, AIDS*, 1988, 2(1): 57-63
- [25] Wilensky U. NetLogo [OL]. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL, 1999
- [26] 王岚, 王璐, 丁正伟, 等. 中国 1995-2009 年艾滋病哨点监测主要人群艾滋病病毒感染流行趋势分析[J]. *中华流行病学*, 2011, 32(1): 20-24
- [27] Medley G F, Anderson R M, Stoneburner R, et al. Incubation period of AIDS in patients infected via blood transfusion [J]. *Nature*, 1987, 328(6132): 719-721
- [28] Rothenberg R, Woelfel M, Stoneburner R, et al. Survival with the acquired immunodeficiency syndrome. Experience with 5833 cases in New York City [J]. *New England Journal of Medicine*, 1987, 317(21): 1297-1302
- [29] vieira I T, Cheng R C H, Harper P R, et al. Small world network models of the dynamics of HIV infection [J]. *Annals of Operations Research*, 2010, 178(1): 173-200
- [30] Bershteyn A, Klein D J, Wenger E, et al. Description of the EMOD-HIV Model v0. 7[M]. 2012
- [31] High-risk behaviours and HIV/syphilis prevalence among men who have sex with men in Beijing[Z]. China CDC, 2008

(上接第 47 页)

- [22] Xue T, Liu J, Tang X. Example-based 3D object reconstruction from line drawings[C]//*Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2012 IEEE Conference on. IEEE, 2012: 302-309
- [23] Brown E, Wang P. 3D Object Recovery from 2D Images; A New Approach[J]. *SPIE Proc. Robotics and Computer Vision*, 1996, 2904: 138-145
- [24] Shoji K, Kato K, Toyama F. 3-D interpretation of single line drawings based on entropy minimization principle[C]//*Computer Vision and Pattern Recognition*, 2001. CVPR 2001. Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on. IEEE, 2001, 2: 90-95
- [25] Rich E, Knight K. *Artificial Intelligence* [M]. McGraw-Hill, 1991
- [26] Melanie M. *An introduction to genetic algorithms* [M]. Cambridge, Massachusetts London, England, Fifth printing, 1999
- [27] Russell S J, Norvig P. *Artificial intelligence: a modern approach (2nd ed.)*[M]. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 2003
- [28] Brent R P. *Algorithms for minimization without derivatives* [M]. Courier Dover Publications, 1973
- [29] Polak E. *Computational methods in optimization: a unified approach*[M]. Academic press, 1971
- [30] Marquardt D W. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters[J]. *Journal of the Society for Industrial & Applied Mathematics*, 1963, 11(2): 431-441
- [31] Axler S. *Linear algebra done right*[M]. Springer, 1997
- [32] Trefethen L N, Bau III D. *Numerical linear algebra*[M]. Society for Industrial and Applied Mathematics, 1997
- [33] Press W H, Teukolsky S A, Vetterling W T, et al. *Numerical recipes in C ++: the art of scientific computing* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2009
- [34] Kindermann R, Snell J L. *Markov random fields and their applications* [M]. Providence, RI: American Mathematical Society, 1980
- [35] Tian C, Masry M, Lipson H. Physical sketching; Reconstruction and analysis of 3D objects from freehand sketches[J]. *Computer-Aided Design*, 2009, 41(3): 147-158