HAL
open science

A Survey on Solid Reconstruction from Engineering Drawings

Jie-Hui Gong, Hui Zhang

To cite this version:

Jie-Hui Gong, Hui Zhang. A Survey on Solid Reconstruction from Engineering Drawings. Journal of Software, 2008. inria-00515509

HAL Id: inria-00515509
https://inria.hal.science/inria-00515509

Submitted on 7 Sep 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

基于工程图的三维重建研究*

龚洁晖[1,2+], 张 慧[2]

[1](清华大学 计算机科学与技术系,北京 100084)
[2](清华大学 软件学院,北京 100084)

A Survey on Solid Reconstruction from Engineering Drawings

GONG Jie-Hui[1, 2+], ZHANG Hui[2]

[1](Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)
[2](School of Software, Tsinghua University, Beijing 100084, China)
+ Corresponding author: Phn: +86-10-6279-5459, Fax: +86-10-6279-5460, E-mail: gongjh03@mails.tsinghua.edu.cn

Abstract: Solid reconstruction from engineering drawings is one of the efficient technologies to product solid models, which has become one of the important research topics in both computer graphics and artificial intelligence. The problem of solid reconstruction from engineering drawings is captured. The taxonomy for solid reconstruction techniques is presented with the typical algorithms reviewed. After comparing the application areas of the algorithms, the open research issues are analyzed. Finally, the future work in the research field is also pointed out.
Key words: Solid reconstruction; Orthographic views; Constructive solid geometry; Boundary representation

摘 要: 由二维工程图重建三维形体是一种快速的形体造型方法，已成为计算机图形学和人工智能领域的重要研究方向。立足于基于工程图的三维重建问题，分类总结了形体重建方法的研究成果，着重介绍了典型的重建算法。在比较了典型算法的适用范围的基础上，剖析了目前形体重建研究面临的问题。最后指出了基于工程图的三维重建算法进一步的研究方向。
关键词: 三维重建;三视图;构造的实体几何;边界表示
中图法分类号: TP391 **文献标识码**: A

计算机辅助设计（CAD）技术的发展已成为衡量制造业现代化水平的重要标志之一。利用计算机设计和构造空间形体是其中的一项重要内容，是建立产品数字模型的关键。空间形体的三维模型具有完整的几何和拓扑信息，方便提取成型特征，为下游的工艺分析、公差分析、有限元分析、干涉检查和数控编程等提供支持。另一方面，工程图是以二维视图表达三维形体的一种有效手段，是工程技术人员相互交流的专业语言，广泛应用于机械零件设计领域。自 Idesawa[1]于 70 年代初首次发表关于由三视图重建立体图的论文以来，基于工程图重建三维形体的研究受到计算机应用研究领域的普遍重视。

基于工程图的空间形体重建技术可以提供快速、便捷的几何建模工具，从而提高设计效率，缩短生产周期，降低产品设计和制造费用。三维重建技术是一个有着广泛应用前景的研究课题，其研究动因主要来自两

* Supported by the 973 Program of China under Grant No. 2004CB719404 (国家重点基础研究发展规划项目)
作者简介: 龚洁晖(1973－),女,湖北随州人,博士生,工程师,主要研究领域为计算机辅助设计,计算机图形学;张慧(1974－),女,博士,讲师,主要研究领域为计算机辅助设计,计算图形学

方面：（1）基于工程图重建三维形体是建立产品几何模型的重要手段，是实现工程图自动导入 CAD 系统的关键技术之一[2]。随着科技发展，知识不断积累，大量的产品设计以工程图样形式存在。而实际应用中大多数工程设计是在原有的设计基础上进行修改，既而完成改进型设计。如何利用和借鉴已有的工程图，快速更新设计，是一个亟待解决的问题。（2）模拟人类空间推理能力，实现零件的正投影视图的机器理解，将为计算机辅助设计提供一种新型的人机交互建模手段[3]。工程图表达简洁精练，结构紧凑，标注方便，符合工程技术人员的设计习惯。如何利用二维视图构造三维模型，提供更加人性化的计算机辅助设计工具，是目前一个热点话题。

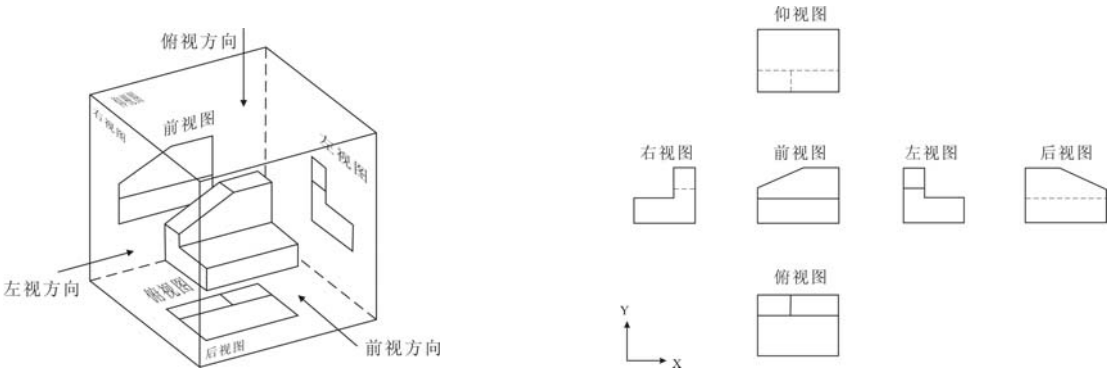
本文针对由工程图重建形体问题，对国内外在该领域的工作成果进行系统的综述，分析和比较典型算法的适用条件及优缺点，指出形体重建研究面临的问题以及未来的研究方向。目的在于更好地理解基于工程图的三维重建技术，为进一步研究提供参考。

1 基于工程图的三维重建

1.1 二维视图

用相互平行的投影线，在投影平面上绘出物体图形的方法称为平行投影法（parallel projection）。其中，投影方向垂直于投影面的平行投影称为正投影法（orthographic projection）。正投影法能够准确地表达物体的形状结构，而且度量性好，因此不包含复杂曲面的机械零件图主要是采用正投影法绘制。将零件向两个互相垂直或多个互相垂直的投影面上作正投影，就得到了形体的多面正投影。不失一般性，我们以第一角投影（first-angle orthographic projection）为例。第一角投影是将物体置于第一分角内并使其处于观察者与投影面之间而得到的多面正投影，如图 1(a)所示。将空间形体置于正六面体内，分别向基本投影面投射，即得到六个基本视图：前视图（front）、俯视图（top）、左视图（left）、仰视图（bottom）、右视图（right）和后视图（rear）。形体在每个投影面上的投射影像是由相应的投影方向的外轮廓包围的线划图。

绘制工程图必须将基本投影面及其上的投影按一定的规则展开到同一平面上。第一角投影中，图纸空间（XY-平面）中各基本视图的配置关系如图 1(b)所示。基本投影平面可以由一组相容的坐标平面来确定，例如，前视图定义在 zx-平面，顶视图定义在 xy-平面，左视图定义在 yz-平面。标准配置中，每个视图至少与一个视图相邻，相邻两视图的投影平面互相垂直且共享同一个坐标轴。各视图之间保持“长对正，高平齐，宽相等”的基本投影规律[4]。工程图的标准配置是推断各视图之间在三维空间中的相对位置关系的重要依据。不是所有的零件都需要画出六个基本视图，可根据形体的结构特点选择其中的几个视图。实际应用中，最常用的三视图组合为：前视图、俯视图和左视图。



(a) (b)

图 1 第一角投影的基本视图

1.2 三维模型

三维形体在计算机中通常采用线框模型、表面模型、构造实体几何模型和边界表示模型来表示[5]。

线框模型（wire-frame model）用顶点和边表示形体，其中的边可以是直线或者曲线。线框模型结构简单，易于存储，是在计算机图形学和 CAD/CAM 领域中最早用来表示形体的模型，并且至今仍在广泛应用。由于在工程图中就是用直线和曲线定义三维形体，因此对于熟悉机械制图的设计人员来说，线框模型直接、自然，非常适于概念设计阶段。但是，由于线框模型不能给出连续的几何信息，无法明确定义空间点与形体之间的关系，因此不适于多数下游的处理和分析。

表面模型（surface model）用面的集合表示形体，可以看作是在线框模型上增加了用有向边围成的形体表面（可以是二次面或样条面）。由于表面模型精确描述形体的外形，因此广泛应用于对成形要求严格的造型设计（如车身工艺面）和制造过程（如数控加工）。但是表面模型不包括面的拓扑信息，同样无法明确定义形体的空间体信息。

构造的实体几何表示方法（constructive solid geometry, CSG）通过一系列基元体的布尔运算（Boolean operations）组合表示形体。CSG 表示可以看作一棵有序的二叉树，其叶节点是体素，中间节点是正则的集合运算或刚体的几何变换，根节点就是组合及变换的最终结果。CSG 树的定义域取决于体素、正则集合运算和几何变换的类型，且形体的有效性由基本体素的有效性和几何运算的正则性而得到保证。因此，CSG 树能够提供足够信息以判断空间点与形体的位置关系。

边界表示方法（boundary representation, B-Rep）用一组面包围的封闭三维空间表示形体，形体的边界精确区分形体内外的空间点。B-Rep 表示可以看作一个图，其节点分别对应于形体边界上的面、环、边、顶点，节点之间的连接关系记录了几何元素的拓扑信息。由于显式表示形体的几何元素，且容易确定几何元素的连接关系，因此 B-Rep 模型可以表示多种类型的形体，且便于绘制及进行多种操作和运算。

1.3 问题描述

从图形学的角度看，基于二维视图重建三维模型是平行投影的逆过程，其关键问题是如何恢复形体的空间信息。三维重建是利用不同视图中点、边的坐标具有的对应相等关系，从二维视图信息中提取三维空间信息，恢复形体的空间体信息，构造对应的三维形体。二维视图是形体在正投影体系中的投射映像，投影积聚造成形体空间信息（维度、类型、数量等）的损失，使得这种映射关系并非一一对应。因此，由二维视图的几何和拓扑信息到三维形体的几何和拓扑信息的转换，很难找到一个严密的数学模型来约束。

从人工智能的角度看，基于工程图重建三维模型是一个模拟人类读图的过程，其关键问题是如何理解工程制图原则。三维重建是根据工程图的投影原理和制图规则，归纳启发式规则和推理策略，搜索满足二维视图约束条件的三维形体。工程图的表达方式灵活多样，工程语义具有隐含性、经验性和习惯性等特点，因此二维视图中蕴含的信息复杂多变，很难形成严谨的形式化知识描述。

因此，利用二维视图构造相应的三维形体是一个极具挑战性的科学问题。

2 基于工程图的三维重建方法

基于工程图的空间形体重建技术自二十世纪七十年代起步，发展至今已有三十年的历史，在此期间研究者进行了大量卓有成效的研究工作。二十世纪八十年代，一方面 CAD 工具软件仍处在发展初期，另一方面工程图样的底层识别处理（扫描图像矢量化、图层分离、符号识别等）尚有大量问题未解决[6,7]。因此，基于工程图的三维重建作为 CAD/CAM 的研究热点之一，只是建立了形体重建的基本流程，并未取得突破性的成果。Nagendra 和 Gujar[8]对 1973~1984 年发表的有关算法作了评述，在其基础上，王东泉[9]补充相关算法的评述，将时间轴延展到 1991 年。公茂凯等[10]根据不同识别策略对重建算法进行分类，并对近二十年的研究成果进行了较详细的综述。

二十世纪九十年代以来，随着计算机软硬件技术和相关学科的发展，由工程图重建三维形体的研究引起国内外众多研究机构的充分重视，取得了一些显著进展。根据采用的形体表示方法，已有的重建技术大致分为两类[11]：面向体（volume-oriented）的重建方法和面向线框（wireframe-oriented）的重建方法，如图 2 所示。

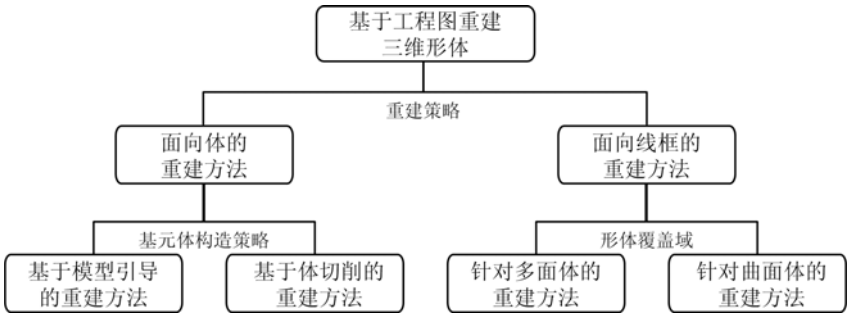


图 2 基于工程图的三维重建方法分类

2.1 面向体的重建方法

面向体的重建方法假设空间形体由一些基元体（primitive）构成，由二维视图构造相应的三维基元体，通过各种变换运算和布尔运算组合基元体，形成 CSG 表示的三维形体。面向体的重建方法的关键技术是视图中投影特征的识别和匹配方法。根据具体的构造基元体的策略，面向体的重建方法又可分为基于模型引导（pattern-guided）的重建方法和基于体切削（volume-cut）的重建方法。

2.1.1 基于模型引导的重建算法

基于模型引导的重建方法将体素的三维特征及其三视图投影特征定义为一系列的模式，构成描述基元体的模型。在重建过程中，首先对视图图形特征进行识别与提取，并按各种模型要求进行分类，然后运用结构模式识别技术，匹配不同模式，直接构造相应的三维基元体。

Aldefeld[12]首次提出基于模型引导的重建算法，采用启发式搜索策略在二维视图中识别基元体的特定模式：首先在一个视图中选定基环作为轮廓，然后在其他视图中搜索假定的等厚基元体的侧投影。该算法只能处理由平面和圆柱面构成的结构简单的等厚体，要求圆柱面的主轴必须平行于坐标轴，且剖面轮廓在视图中投影完整。Nagasamy 等[13]扩展 Aldefeld 的工作，提出一个基于知识系统的重建算法。利用人工智能的知识表达方法描述基元体的典型二维投影模式，并采用启发式搜索策略识别基元体。算法通过平移扫描操作和轴对称旋转操作构造基元体，因此能够产生包含平面、圆柱面、圆锥面和球面的三维形体。

为了弥补全自动算法缺陷，Aldefeld 等[14]又提出一个采用交互式结构模式识别技术的半自动重建算法。用户可采用交互方式从视图中识别基元体，指定集合运算组合形体，并可进行造型操作。为了识别结构较复杂的形体，用户需要添加辅助线，使基元体在视图中具有完整的投影。霍彬[15]也提出一个交互重建算法。用户借助数字化仪从工程图输入基元体的类型和 5 个几何参数，直接构造相应的三维基元体，并利用形体虚实性构造三维形体的 CSG 树。算法可以重建倾斜的基元体，且可以处理包含剖视和省略画法的工程图。

2.1.2 基于体切削的重建方法

基于体切削的重建方法是选择二维视图中的封闭环作为基（base），使用平移或旋转扫描操作构造基元体，通过对得到形体的交、并、差等空间布尔操作，使其投影视图逐渐逼近直到完全符合输入的二维视图。

Chen 等[16]提出的重建算法采用“各个击破”的策略。首先，将工程图分解成多个预先定义的子视图；然后，利用平移扫描操作和平面切割操作，构造对应于每一子视图的基元体；最后，根据基元体之间的包含关系，构造相应的 CSG 树表示的三维形体。由于子视图的类型限制，该算法只能处理平面和互相分离的圆柱面构成的形体，且要求圆柱面的主轴必须平行于坐标轴。

Shum 等[17]提出了基于拉伸求交的重建算法。针对不透明形体的六个正投影视图（不包含虚线），算法主要分为三步：（1）将六个视图分为三组，每一组中，一个视图作为母线（generatrix）视图，另一视图作为准线（directrix）视图；（2）母线视图的子区域根据准线逐渐拉伸，生成等厚的基元体，基元体的布尔并得到拉伸体；（3）每组生成的拉伸体的布尔交得到重建的形体。算法可重建多面体和垂直于坐标轴的圆柱体。随后，Shum 等[18]又提出改进算法，可由包含虚线的三视图重建形体。算法分为两个主要阶段：（1）每个视图的外

部轮廓沿法向方向拉伸，得到三个拉伸体（extrusion-solid），拉伸体的布尔交得到一个基体（basic-solid）；（2）对每个视图的内部元素进行检测，生成多余体（excess-solid），基体布尔减去多余体得到最终的空间形体。

Soni 等[19]提出针对轴对齐的旋转体的重建算法。其关键技术是从视图中识别对应于旋转体的匹配序列（onto-formation），分为四个步骤：（1）利用投影边的连通关系构造基环，并根据位置和线型对基环进行分类和合并；（2）根据视图之间的坐标对应关系，搜索邻接视图之间的基环匹配对（onto-matching）；（3）在匹配的基环构成的 n-分图中深度优先搜索匹配序列；（4）由匹配序列确定旋转操作的参数（旋转角度、旋转轴、轮廓），得到旋转基元体。每生成一个基元体，进行布尔并得到重建的形体，并通过反投影（back-projection）验证形体的有效性。Dimri 等[20]将 Soni 的算法拓展到基于剖视图的形体重建。根据制图规则，分析全剖视、半剖视和阶梯剖中边和环相对于标准视图的变化。考虑剖视图之间元素对应关系的缺失情况，提出匹配序列的扩展构造原则：（1）基环合并，以得到匹配序列；（2）连接虚线的基环作为分离的基环；（3）只需搜索包含分离基环的匹配对，即可构造匹配序列；（4）分离基环在剖视图中搜索匹配的投影边，以构造匹配序列。算法要求输入工程图只能包含一个剖视图，且必须按照标准视图配置。

Çiçek 等[21]提出基于特征识别的重建算法。在视图预处理过程中，投影图元被分为内实体（inner entities）和外实体（outer entities）。在此基础上，算法分为两个阶段：第一步，判断内实体是否满足机械特征在视图中的投影模式；再通过旋转或拉伸内实体，构造合理的机械特征体（feature primitive）。第二步，由每个视图的外实体构成的轮廓，沿法向方向扫描得到基体（basic primitive）；基体布尔减特征体，得到的形体布尔交就是最后的重建形体。算法只考虑基于面（face-based）的凹陷的机械特征，即通孔、盲孔和凹槽。

Lee 等[22]提出基于线索的面向体的算法，可以重建轴对齐的相互作用的旋转体。算法的基本思想是将视图中的圆弧元素作为轴对齐旋转体的投影线索，主要分为四步：（1）在一个视图中搜索线索；（2）在另外视图中搜索满足基本匹配类型的投影边；（3）对匹配的边进行旋转对称性测试以得到旋转操作的轮廓，并由缺失的对称边恢复出虚区域（virtual region）；（4）对轮廓的旋转操作得到完整的回转体，再布尔减由虚区域拉伸得到的子形体，得到最后的形体。该算法只适于重建由共轴的回转体组成的轴套类零件。

另外，Kargas 等[23]、Kitajima 等[24]、Tomiyama 等[25]、高玮等[26]、陆国栋等[27]、岳小莉等[28]也着重研究面向体的重建算法。

2.2 面向线框的重建方法

面向线框的重建方法提出最早，研究时间最长，算法最多。此类重建方法均采用自底向上、分层构造策略，依据视图中几何元素的投影对应关系和求解规则，直接由二维信息构造三维信息。算法大致分为两个关键阶段：（1）由二维视图元素生成三维线框模型；（2）在线框模型中搜索有效面环，决策求解得到形体的 B-Rep 模型。

由于投影重合和投影积聚，形体与其投影视图在点、边的层次上不具有一一对应关系。因此，一方面，在重建过程中会产生大量并不存在的顶点、边和面，可能生成满足投影关系却不满足形体拓扑关系的形体，即病态解（pathological case）。另一方面，重建过程也可能产生多个满足投影视图的形体，即多解问题。因此，面向线框的重建方法的关键问题是如何在处理过程中检测和删除假元（ghost elements），搜索有效解。

多面体与曲面体具有不同的投影特性。根据算法的适用范围，面向线框的重建方法又可分为针对多面体的重建方法和针对曲面体的重建方法。

2.2.1 针对多面体的重建方法

Markowsky 和 Wesley 扩展其早前的“fleshing out wire-frames”方法[29]为“fleshing out projections”方法[30]，建立了由三视图重建多面体的自底向上算法的形式化定义、定理和证明，第一次较好地解决了多解和病态解问题。在线框模型中搜索所有平面的基础上，该算法引入切边分割平面，再构造虚块（平面将空间分割成的无公共内点的三维封闭子空间），最后组合虚块生成所有符合输入视图的形体。算法在每一步都检测并删除假元，涉及大量的反投影和组合搜索，运算复杂度太高。Gujar 等[31]在 Markowsky 和 Wesley 的算法基础上，提出一个由候选面构造候选子体的详细算法。该算法利用平面法向和环边方向划分子空间得到候选子体，并

通过对候选子体的分类，减少搜索空间，从而加速有效形体的求解过程。Yan 等[32]基于 Markowsky 和 Wesley 的经典算法框架，给出的重建算法的目的是提高多面体的重建效率。在生成线框模型过程中，使用决策树技术加快三维直线边的生成速度；在构造面环时，合理地利用工程图中的深度信息减小搜索范围，加速求解过程，提高构造正确形体的效率。

Preiss[33]提出的针对多面体的重建算法，首先通过识别视图中对应于平面投影的环路来直接构造空间平面，然后再由视图中的虚线构造空间边，最后根据场景分析（scene analysis）方法将平面和空间边装配成最终形体。但是论文中并未给出场景分析算法的细节。

Horinchi 等[34]也提出一个多面体重建算法。在构造了线框模型中所有平面之后，该算法根据平面的邻接关系，应用全局的松弛算法（relaxation method）进行平面兼容的决策求解。由于松弛算法的收敛性问题还没有得到完全解决，因此无法保证算法的稳定性。

另外，Lafue[35]、Haralick 等[36]、Kim 等[37,38]、Nishihara[39]、Garza 等[40]、江涛等[41]也针对多面体提出了面向线框的重建算法。针对多面体的重建算法要求输入的二维视图中只能包含直线段，从而将许多常见的形体都排除在形体覆盖域之外。因此，这类算法的实用性受到极大的制约。

2.2.2　针对曲面体的重建方法

大部分的面向线框的重建方法集中探讨如何扩大算法的形体覆盖域和提高算法的处理效率。

Sakurai 等[42]扩展 Markowsky 和 Wesley 的算法，采用分类策略，对不同类型的顶点和边采用不同的重建方法。算法的形体覆盖域拓展到圆柱面、锥面、球面和环面，但要求二次曲面的主轴必须平行于坐标轴，且二次曲面相贯线投影必须为直线或圆弧。Lequette[43]改进 Sakurai 算法，根据若干决策规则由候选面直接生成三维形体，不需要构造和组合基元体，提高了形体重建的效率。

Preiss[44]对其早前的针对多面体的算法进行拓展，基于几何元素的一致约束关系网络，通过约束传播来搜索有效解。在层次化构造过程中，采用约束增长策略，只生成满足约束条件的几何元素，减少了算法的搜索空间。该算法可以重建由平面和圆柱面构成的形体，但限制圆柱面的主轴必须平行于坐标轴。

辜凯宁等[45]以 Markowsky 和 Wesley 算法为基础，借鉴 Aldefeld 的模式识别技术，首次部分解决两个圆柱面相贯的形体重建。该算法允许圆柱面的主轴平行于坐标平面，要求其截面垂直于该平面；并且允许满足一定条件的圆柱面相贯，能够处理相贯线投影为对称的高次曲线的情况。

Kim 等[46,47]提出的曲面体重建算法着重研究了候选面的决策求解。根据几何约束关系和人类认知规律，决策求解算法中引入启发式规则，降低了组合搜索的复杂度。但论文中只给出一个包含平面和圆柱面的简单实例，未对所利用知识的正确性和完备性给出严格的定义和证明，因此无法充分证明算法的有效性。

You 等[48]拓展 Yan 的方法，提出能够重建二次曲面体的算法。在线框模型中搜索面环过程中，利用工程图中的深度信息删去非法边和面，降低搜索空间；在决策求解过程中，采用分治（divide-and-conquer）策略删除线框模型中非共存面，构造流形体的体环。该算法可重建包含平面、圆柱面、圆锥面、球面的形体，但限制二次曲面的主轴必须平行于坐标轴。由于在重建过程中需要不断反投影以验证中间结果是否符合输入视图，算法的处理效率不高。

Masuda 等[49]将基于非流形拓扑的基于假设的真值维持系统（assumption-based truth maintenance system，ATMS）引入面向线框的重建算法。在构造的线框模型中搜索面环，生成三维形体的表面模型（surface model），再由面环之间的邻接关系构造单元模型（celluar model）。最后，借助布尔方程表示单元与投影之间的约束，利用 ATMS 推理单元的合理组合，生成最终的实体模型。

Shin 等[50]的研究目标是减少重建过程的处理时间。算法大致分为三个阶段：（1）继承 Sakurai 顶点分类的思想，进一步细分顶点和边的类；（2）针对不同类型的三维顶点和边，采用不同的构造方法，并在生成的线框模型中引入割点（三维边的交点）；（3）根据三维边的类型，构造三维表面，并引入割边（三维面的交线）构造子形体，通过反投影验证子形体的装配的有效性。该算法充分利用三维候选元素和二维图元之间的拓扑和投影关系，减少反复投影的次数，提高算法的处理速度。

Kuo[51]深入研究了二次曲面体的重建。首先，采用五点法生成三维二次曲线边，重建形体的线框模型，

可以处理视图中两点之间有多于一条投影边的情况。然后，在线框模型上应用最小内角（minimum-internal-angle）搜索算法，得到所有的候选面。最后，采用决策链（decision-chaining）方法检测和删除假元，基于 Moebius 准则确定面的方向，生成最后的形体。该算法可以处理病态和多解问题，但是，确定三个视图中曲线的匹配对应关系的处理过程复杂，需要较长的处理时间。

刘世霞等[52,53]基于 Idesawa 的经典算法框架，给出一个详细的二次曲面体的重建算法。算法分为三个步骤：（1）根据视图中投影元素类型确定三维边的类型，采用共轭直径（conjugate diameter）法生成不同类型的三维二次曲线边，构造线框模型；（2）采用最大转角（maximum turning angle）法在线框模型中搜索所有候选面；（3）根据流形体的拓扑特性，利用深度和拓扑信息，采用启发式搜索方法删除线框模型中的假元，得到有效的形体。

耿卫东等[54,55]从人类识图的分治判读策略中得到启发，提出一种混合重建算法。首先，借用面向体的分离子视图的思想，根据工程图图元将三维形体空间分割成一组“单元盒”，每个单元盒包含一个基元体。然后，基于分离的子视图，采用面向线框的方法重建每个单元盒包含的基元体的三维模型。最后，合并所有基元体，得到最终的三维形体。算法引入剖视图，辅助消除由标准视图确定基环和轨迹的不确定性。该算法分割三维形体空间时，不允许单元盒重叠，这就意味着无法处理二次曲面相交、相贯的情况。由于采用扫描操作重建基元体，因此算法只适用于非常有限的基元体类型。

Wang 等[56]提出“半线框模型”的概念。算法分为四个步骤：（1）由每个二维视图最外围的闭合环路构造基轮廓；（2）对视图的图元进行旋转、平移，分别变换到三个投影平面，以得到不完全的半线框模型；（3）对不同视图的基轮廓进行拉伸，再对三个拉伸形体进行求交操作，得到轮廓形体；（4）减去表示洞的圆柱体，得到最后的三维形体。该算法也是一个混合重建算法，通过半线框模型简化几何操作，加快处理速度。但是算法借用 AutoCAD 的基体布尔运算，严格限制重建算法的形体覆盖域。

龚洁晖等[57]提出基于特征识别的二次曲面体重建算法。研究了二次曲面在正交视图中的投影特性，提出视图高层信息的图表示法，并给出二次曲面投影特征的定义。该算法根据形体的二维视图，依次生成形体的不完整线框模型、混合线框模型和 B-rep 模型。由于采用基于线索的特征匹配技术，从二维视图直接识别、构造二次曲面特征。因此，算法无需在线框模型上组合搜索二次曲面，提高了任意位置的二次曲面体的重建效率；并且可以处理相交成高次曲线的二次曲面体，拓展了重建形体覆盖域。

另外，Yoshiura 等[58]、Senda 等[59]、Chen 等[60]、Tomiyama 等[61]、Ah-Soon 等[62]、Dori 等[63]、张爱军等[64,65]也针对曲面体提出面向线框的重建算法。

3 研究现状分析

3.1 形体重建算法比较

面向体的重建方法以 CSG 表示形体，数据结构简洁，易于管理和修改；对规则的曲面体的识别能力相对较高，总是生成一个有效解。表 1 总结了典型的面向体的重建算法，比较了输入工程图、重建形体的几何类型和拓扑复杂度、是否需要交互操作等方面的算法性能。面向体的重建算法需要匹配预定义的基元体模型，或识别用来拉伸或旋转扫描操作的基环。因此，基元体及其投影模式的预定义类型严格限定了形体覆盖域。目前，已有算法能够重建的形体非常有限，通常只适用于等厚体和回转体。虽然交互识别能够处理较复杂的视图，但实际上主要是依靠人来识别，识别的成功与否主要依赖于用户的知识和技巧，因此降低了算法的自动化程度。另一方面，面向体的重建方法需要大量而复杂的空间操作和计算，复杂情况下无法保证算法的处理效率。

面向线框的重建算法形体覆盖域较大，是解决复杂多面体相对较好的方法。随着研究的深入，面向线框的重建算法的识别速度和能够处理形体的复杂度有了较大提高，研究成果给出了比较实用的由工程图重建三维形体的方法。表 2 总结了典型的面向线框的重建算法，比较了输入工程图、重建形体的几何类型和拓扑复杂度等方面的算法性能。利用线框模型作为中间模型是面向线框的重建方法的一个显著特点。一方面，线框

模型无法给出连续的几何信息，对于曲面，不能明确定义点与形体之间的关系[5]；另一方面，投影过程中损失了形体的深度信息，仅仅利用视图中的二维元素生成的线框模型，必然包含大量的假元[1]。因此，面向线框的重建算法处理复杂拓扑结构的曲面体，需要应用穷举式或启发式搜索，花费大量的处理时间，且无法保证结果的有效性。

表 1 面向体的重建方法的比较

重建算法	输入工程图			表面类型				拓扑结构	交互
	二视图	三视图	剖视图	平面	圆柱面	圆锥面	球面	二次曲面相互作用	
Aldefeld[14]		√	√	√*	√*				√
Ho[15]	√	√	√	√	√	√	√		√
Chen[16]		√		√	√*				
Shum[18]		√		√	√*				
Soni[19]	√			√*	√*	√*	√		
Çiçek[21]		√	√	√	√*	√*			
Dimri[20]		√		√	√*				
Lee[22]	√			√*	√*	√*	√	√	

*平面的法向或二次曲面的主轴必须平行于坐标轴

表 2 面向线框的重建方法的比较

重建算法	输入工程图		视图元素			表面类型				拓扑结构
	三视图	剖视图	直线	二次曲线	高次曲线	平面	圆柱面	圆锥面	球面	二次曲面相互作用
Wesley[30]	√	√	√			√				
Sakurai[42]	√		√	√		√	√*	√*	√	
Gu[45]	√		√	√	√	√	√**			√
Yan[32]	√		√			√	√*			
You[48]	√		√	√		√	√*	√*	√	
Masuda[49]	√		√	√		√	√*			
Shin[50]	√		√	√		√	√*			
Kuo[51]	√		√	√		√	√*	√*	√	
Liu[53]	√		√	√		√	√	√		
Geng[55]	√	√	√	√		√	√*	√*		
Wang[56]	√		√	√		√	√*			
Gong[57]	√		√	√	√	√	√	√	√	√

*二次曲面的主轴必须平行于坐标轴

**二次曲面的主轴必须平行于坐标平面

3.2 亟待解决的问题

尽管国内外研究者提出了许多有价值的算法，但是由于一些具体问题仍未完全解决，大多数的研究成果尚停留在实验室阶段，距离实用阶段还比较遥远[66]。集中体现在以下几点：

1. 适用视图类型

大多数重建算法都要求输入完备的标准三视图，且只是针对工程图中几何图元的“纯几何”算法[2]。在实际工程应用中，由于机械零件的复杂多样性，相当大的一部分工程图都由剖视图构成。除了表示形体投影的几何元素外，视图中还包括表示工程语义的符号图元，例如表示中心轴的点划线和表示剖切区域的影线等。由于工程制图中剖视表达的规范具有很大的人为性、灵活性、经验性和模糊性，不利于计算机的识别、处理，这也是基于剖视图重建形体研究的难点所在。

2. 形体覆盖域

重建算法的形体覆盖域主要体现在空间形体的几何类型和拓扑结构两方面。现有算法在形体覆盖域上仍然存在较大局限性。目前的大多数算法要求输入视图的几何图元是直线段和二次曲线，并要求二次曲面的主轴平行于坐标轴，且不允许曲面切割和相贯。这些限制将大量具有曲面相交、相贯或具有非圆弧曲线投影的常见形体排除在外。由于曲面具有与投影方向相关的轮廓线，且曲面相贯产生高次交线，增加了投影视图的复杂度，因此给重建算法造成很大困难。

3. 重建效率

三维重建是一个由低维到高维的信息恢复过程，涉及大量的信息搜索、组合和筛选，重建速度受视图图元的类型和数量、信息搜索和组合策略的影响。面向体的重建方法通过空间布尔运算得到三维形体的 CSG 树，复杂情况下需要大量的空间操作和求交运算，无法保证算法的处理效率。面向线框重建方法在从低维到高维的分层构造过程中，都是先恢复几何信息，再由几何信息决定拓扑关系，重建过程会产生大量不属于三维形体的点、边和面（称为假元）。在复杂情况下，检测和删除这些假元需要穷举式的组合搜索和回退操作，是非常困难且非常耗时的过程。许多算法提出加快重建过程的方案，虽然在不同程度上加快算法的处理速度，但都未克服算法本身的局限性。

4 总结与展望

基于工程图的三维重建技术不仅具有理论意义，而且具有广泛的应用价值。为了推动基于工程图的形体重建技术的实用化，还需要做大量工作。可以从重建策略上考虑，综合运用相关领域的技术与方法，充分借鉴有经验的工程人员读图的思维过程，从而使重建技术在方法上有所突破。

1. 充分挖掘视图信息

实际工程图中采用剖视图、辅助视图和剖面图等多样的表达方法，需要借助大量符合制图规则的符号元素。视图中的几何信息是重建形体的基础，而符号信息则可辅助几何信息的识别和匹配。制图规则的知识描述是正确理解图形的关键所在，也是形体重建的前提。因此，需要深入剖析工程制图语义，充分揭示工程语义信息之间的内在逻辑关系及其表达功能，归纳领域知识的形式化的描述。以此为基础的算法，可扩展适用的视图类型，减少搜索空间和识别的复杂度。

2. 综合运用各种识别方法和重建策略

利用基元体的相交、相切、相接、截切等方式组合而成的复合形体复杂且丰富多彩。运用单一的识别方法难以有效地解决实际工程中视图的重建问题。而不同的重建策略各具特点：面向线框的重建策略处理复杂多面体较为成功，面向体的重建策略主要优势是对标准曲面体的识别能力较高。将两者结合起来运用于形体重建，有可能取得更好的重建效果。因此，需用研究各种识别方法和重建策略的有效结合方式，取长补短。灵活运用不同的识别方法，采用“各个击破”的策略，有针对性地处理不同类型的形体特征，从而提高识别能力、降低识别的复杂度。

3. 引入人工智能的研究方法

根据视觉认知理论，工程人员在理解视图的过程中，同时恢复形体的几何信息和拓扑信息，是一个渐近、迭代的信息综合处理过程。并且在通过一定训练后，其识图能力会得到大幅提高。基于工程视图的形体重建也应该采用类似人的理解过程的方法才最有可能达到实用的目标。因此，需要深入研究人类读图的内在机理，将识别过程进行合理分解，模拟有经验的工程人员的读图过程，使算法具有一定的并行处理能力、模糊推理能力和知识积累能力，从而提高计算机识别理解的针对性和可靠性。

References:

[1] Idesawa M. A system to generate a solid figure from three view. Bull.JSME., 1973, 16:216-225.

[2] Dori D, Tombre K. From engineering drawings to 3D CAD models: are we ready now? Computer-Aided Design, 1995, 27(4):243-254.

[3] Hubbard C, Kim YS. Geometric assistance for visual reasoning and construction of solids with curved surfaces from 2D orthographic views. Advances in Engineering Software, 2001, 32(1):21-35.

[4] 孙家广. 计算机图形学(第三版). 北京: 清华大学出版社, 1998. 393-412.

[5] 陈东祥. 机械制图及 CAD 基础. 北京: 机械工业出版社, 2004.

[6] Joseph SH, Pridmore TP. Knowledge-directed interpretation of mechanical engineering drawings. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(9):928-940.

[7] Kanungo T, Haralick RM, Dori D. Understanding engineering drawings: a survey. In: Proceedings of the First IARP Workshop on Graphics Recognition, 1995. 119-130.

[8] Nagendra IV, Gujar UG. 3-D objects from 2-D orthographic views – a survey. Computers and Graphics, 1988, 12(1):111-114.

[9] 王东泉. 由二维正投影重建三维实体算法的评述. 计算机应用与软件, 1995,12(1):55-60.

[10] 公茂凯, 高国安, 石淼. 由三视图构造三维实体方法的综述. 计算机研究与发展, 1992, 29(8):47-55.

[11] Wang W, Grinstein GG. A survey of 3D solid reconstruction from 2D projection line drawings. Computer Graphics Forum, 1993, 12(2):137-158.

[12] Aldefeld B. On automatic recognition of 3-D structures from 2-D representations. Computer-Aided Design, 1983, 15(2):59-64.

[13] Nagasamy V, Langrana NA. Reconstruction of three-dimensional objects using a knowledge-based environment. Engineering with Computers, 1991, 7(1):23-35.

[14] Aldefeld B, Richter H. Semiautomatic three-dimensional interpretation of line drawings. Computers and Graphics, 1984, 8(4):371-380.

[15] Ho B. Inputting constructive solid geometry representations directly from 2D orthographic engineering drawings. Computer-Aided Design, 1986, 18(3):147-155.

[16] Chen Z, Perng D. Automatic reconstruction of 3D solid objects from 2D orthographic views. Pattern Recognition, 1988, 21(5):439-449.

[17] Shum SSP, Lau WS, Yuen MMF, Yu KM. Solid reconstruction from orthographic opaque views using incremental extrusion. Computers and Graphics, 1997, 21(6):787-800.

[18] Shum SSP, Lau WS, Yuen MMF, Yu KM. Solid reconstruction from orthographic views using 2-stage extrusion. Computer-Aided Design, 2001, 33(1):91-102.

[19] Soni S, Gurumoorthy B. Handling solids of revolution in volume-based construction of solid models from orthographic views. Journal of Computing and Information Science in Engineering, 2003, 3:250-259.

[20] Dimri J, Gurumoorthy B. Handling sectional views in volume-based approach to automatically construct 3D solid from 2D views. Computer-Aided design, 2005, 37(5):484-495.

[21] Çiçek A, G¨ulesin M. Reconstruction of 3D models from 2D orthographic views using solid extrusion and revolution. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 152:291-298.

[22] Lee H, Han S. Reconstruction of 3D interacting solids of revolution from 2D orthographic views. Computer-Aided Design, 2005, 37(13):1388-1398.

[23] Kargas A, Cooley P, Richards THE. Interpretation of engineering drawings as solid models. Computer-Aided Engineering Journal, 1988, 5(2):67-78.

[24] Kitajima K, Yoshida M, Tasaka M. Reconstruction of CSG solid from a set of orthographic three views. In: Proceedings of IEEE International Conference on Systems Engineering, 1992. 220-224.

[25] Tomiyama K, Nakamura T, Koezuka T. Auxiliary lines in three view drawings for 3D shape reconstruction using CSG method. In: Proceedings of IEEE International Conference on Systems Engineering, 1992. 250-256.

[26] 高玮, 彭群生. 基于二维视图特征的三维重建. 计算机学报, 1999, 22(5):481-485.

[27] 陆国栋, 彭群生. 基于工程图样语义的基元关系识别研究. 计算机辅助设计与图形学学报, 2000, 12(9):700-704.

[28] 岳小莉, 陆国栋, 谭建荣,曹斌. 基于形体组合关系的基元体识别技术研究. 计算机学报, 2002, 25(6):618-623.

[29] Markowsky G, Wesley MA. Fleshing out wireframes. IBM Journal of Research and Development, 1980, 24(5):582-597.

[30] Wesley MA, Markowsky G. Fleshing out projections. IBM Journal of Research and Development, 1981, 25(6):934-953.

[31] Gujar UG, Nagendra IV. Construction of 3D solid objects from orthographic views. Computers and Graphics, 1989, 13(4):505-521.

[32] Yan QW, Chen CLP, Tang ZS. Efficient algorithm for the reconstruction of 3D objects from orthographic projections. Computer-Aided Design, 1994, 26(9):699-717.

[33] Preiss K. Algorithms for automatic conversion of a 3-view drawing of a plane-faced part to the 3-D representation. Computers in Industry, 1981, 2(2):133-139.

[34] Horinchi T, Toraichi K, Ohtaki Y, Yamamoto K, Yamada H. Restoring to a polyhedron from three orthographic views by relaxation matching method. In: Proceedings of IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing, 1993. 2:626-629.

[35] Lafue G. Recognition of three-dimensional objects from orthographic views. ACM/SIGGRAPH Computer Graphics, 1976, 10(2):103-108.

[36] Haralick RM, Queeney D. Understanding engineering drawings. Computer Graphics and Image Processing, 1982, 20(3):244-258.

[37] Kim CH, Inoue M, Nishihara S. Understanding three-view drawings based on heuristics. In: Proceedings of the 11th International Conference on Pattern Recognition, 1992. 514-517.

[38] Kim CH, Inoue M, Nichihara S. Heuristic understanding of three orthographic views. Journal of Information Processing, 1992, 15(4):510-518.

[39] Nishihara S. Understanding engineering drawings – an intelligent approach to solid modeling. In: Proceedings of International Conference on Expert Systems for Development, 1994. 321-324.

[40] Garza G, Pineda L. Synthesis of solid models of polyhedra from their orthogonal views using logical representations. Expert Systems with Applications, 1998, 14(1-2):91-108.

[41] 江涛, 陆国栋, 雷建兰, 来建良. 基于面域理解的多面体三维重建. 计算机辅助设计与图形学学报, 2000, 12(7):522-527.

[42] Sakurai H, Gosssard DC. Solid model input through orthographic views. ACM/SIGGRAPH Computer Graphics, 1983, 17(3):243-252.

[43] Lequette R. Automatic construction of curvilinear solids from wire-frame views. Computer-Aided Design, 1988, 20(4):171-180.

[44] Preiss K. Constructing the solid representation from engineering projections. Computers and Graphics, 1984, 8(4):381-389.

[45] Gu KN, Tang ZS, Sun JG. Reconstruction of 3D objects from orthographic projections. Computer Graphics Forum, 1986, 5(4):317-323.

[46] Kim CH, Tsuchida N, Inoue M, Nishihara S. Understanding three-view drawings of mechanical parts with curved shapes. In: Proceedings of IEEE International Conference on Systems Engineering, 1992. 238-241.

[47] Kim CW, Hong MW, Nishihara S. Reconstructing 3D models with algebraic curved surfaces from three-view drawings. In: Proceedings of the 13th International Conference on Pattern Recognition, 1996. 1:854-858.

[48] You CF, Yang SS. Reconstruction of curvilinear manifold objects from orthographic views. Computers and Graphics, 1996, 20(2):275-293.

[49] Masuda H, Numao M. A cell-based approach for generating solid objects form orthographic projections. Computer-Aided Design, 1997, 29(3):177-187.

[50] Shin BS, Shin YG. Fast 3D solid model reconstruction from orthographic views. Computer-Aided Design, 1998, 30(1):63-76.

[51] Kuo MH. Reconstruction of quadric surface solids from three-view engineering drawings. Computer-Aided Design, 1998, 30(7):517-527.

[52] 刘世霞, 胡事民, 汪国平, 孙家广. 基于三视图的三维形体重建技术. 计算机学报, 2000, 23(2):141-146.

[53] Liu SX, Hu SM, Chen YJ, Sun JG. Reconstruction of curved solids from engineering drawings. Computer-Aided Design, 2001, 33(14):1059-1072.

[54] 耿卫东, 张一旸, 王靖滨, 潘云鹤. 融合视觉认知的工程视图理解方法. 计算机学报, 2001, 24(5):536-543.

[55] Geng W, Wang J, Zhang Y. Embedding visual cognition in 3D reconstruction from multi-view engineering drawings. Computer-Aided Design, 2002, 34(4):321-336.

[56] Wang Z, Latif M. Reconstruction of a 3D solid model from orthographic projections. In: Proceedings of IEEE International Conference on Geometric Modeling and Graphics, 2003. 75-82.

[57] Gong JH, Zhang H, Zhang GF, Sun JG. Solid reconstruction using recognition of quadric surfaces from orthographic views. Computer-Aided Design, 2006, 38(8):821-835.

[58] Yoshiura H, Fujimura K, Kumii L. Top-down construction of 3-D mechanical object shapes from engineering drawing. IEEE Computer Magazine, 1984, 17(12):32-40.

[59] Senda T, Arimitsu Y. Automatic reconstruction of solid from a set of the orthographical three views. In: Proceedings of IEEE International Conference on Systems Engineering, 1992. 229-233.

[60] Chen Z, Perng DB. Fast reconstruction of 3D mechanical parts from 2D orthographic views with rules. International Journal of Computer Intergrated Manufacturing, 1992, 5(1):2-9.

[61] Tomiyama K, Nakaniwa K. Reconstruction of 3D solid model from three orthographic views – top-down approach. In: Selected Papers from the First International Workshop on Graphics Recognition, Algorithms and Applications, 1995. LNCS 1072:260-269.

[62] Ah-Soon C, Tombre K. A step towards reconstruction of 3-D CAD models from engineering drawings. In: Proceedings of the Third International Conference on Document Analysis and Recognition, 1995. 331-334.

[63] Dori D, Weiss M. A scheme for 3D object reconstruction from dimensioned orthographic views. Engineering Application of Artificial Intelligence, 1996, 9(1):53-64.

[64] 张爱军，诸昌铃，薛勇．基于三视图的曲面体重建技术．计算机研究与发展, 2002, 39(11):1423-1428.

[65] 张爱军，薛勇．基于工程图的二次曲面体重建．计算机研究与发展, 2004, 41(7):1207-1212.

[66] Tombre K. Analysis of engineering drawings: state of the art and challenges. In: Selected Papers from the Second International Workshop on Graphics Recognition, Algorithms and Systems, 1997. LNCS 1389:257-264.