采用带范围约束描述符的机械三维模型加工特征识别

Seungeun Lim[1], [a]Changmo Yeo[1], [b]何发智[2], [c]Jinwon Lee[3], [d †]Duhwan Mun[1], [e*]

[1] 高丽大学机械工程学院，韩国首尔 02841[2]武汉大学计算机科学学院，中国武汉 430072[3] 江陵原州国立大学工业与管理工程系，韩国江原道 26403

[a]seungeunlim@korea.ac.kr，[b]ycm2420@korea.ac.kr，[c]fzhe@whu.edu.cn，[d]jwlee@gwnu.ac.kr，[e]dhmun@korea.ac.kr

†共同通讯作者

* 通讯作者，电话：+82-2-3290-3359，传真：+82-2-3290-5950

摘要

在加工特征识别中，对三维计算机辅助设计模型中生成的几何元素进行识别。这项技术用于可制造性评估、工艺规划和刀具路径生成。本文提出一种利用描述符识别 16 种加工特征的方法，这类描述符常用于基于形状的零件检索研究。针对每种特征类型选取一个基面，并用描述符表示基面的最小值、最大值，和相等条件。此外，还计算从目标面提取的描述符与从基面提取的描述符在这三个条件上的相似度。若相似度大于或等于阈值，则将目标面判定为该特征的基面。采用所提方法对两个测试案例进行了加工特征识别测试，并成功识别出测试案例中包含的所有加工特征。此外，通过一项补充测试确认，本文所提方法的特征识别性能优于最新的人工神经网络。

关键词：边界表示模型、《计算机辅助设计》制造、特征描述符、加工特征识别、范围约束

1. 引言

加工特征是指制造零件时使用机床切削所形成的特定形状。典型形状包括孔、口袋、槽和圆角。加工特征识别是指从零件的三维计算机辅助设计（CAD）模型中识别特征。它应用于多种场景，包括可制造性评估、工艺规划和刀具路径生成。

现代具有代表性的加工特征识别方法包括基于图的方法、体分解方法和基于提示的方法。传统的基于算法的方法由于识别算法复杂而耗时。此外，对于复杂或相交特征，其识别成功率显著偏低。

在先前的一项研究中，我们使用描述符改善了传统基于算法的方法在基于形状的识别中的不足 [1]。基于描述符的方法为每个特征定义一个基面，并通过描述符表达基面的属性、基面与相邻面的关系以及相邻面的属性。随后，通过计算特征基面与待比较目标面之间描述符的相似度来识别特征。由于在计算相似度之前会对构成描述符的各项进行量化，因此基于描述符的方法能够快速识别特征。 此外，由于该方法通过应用概率概念来计算相似度，因此即使特征之间发生干涉，也能保持稳健。

然而，先前研究提出的使用描述符的特征识别方法存在以下局限。首先，该方法会误识别封闭口袋等特定加工特征。此外，该方法无法识别圆角和倒角。因此，特征识别准确率较低，必须另行应用基于规则的识别方法。

本研究通过将范围约束的概念应用于描述符，定义了信息表达能力更强的改进型描述符。此外，我们提出了一种基于增强型描述符的特征识别方法。此前研究开发的描述符侧重于特征基面的最小值约束。然而，改进型描述符还考虑了特征基面的最大值和相等条件。

本研究的主要贡献如下：我们提出了采用范围约束的描述符概念，并据此建立了加工特征识别方法。通过使用改进型描述符进行相似度比较，两个测试案例中的所有目标特征均得以识别。与此前基于描述符的方法相比，这些特征提高了特征识别率。此外，在一项额外测试中，本研究提出的方法表现出优于最新人工神经网络的特征识别性能。

本文组织结构如下。第2节回顾特征识别相关研究。第3节讨论应用了范围约束的描述符。第4节介绍特征识别方法。第5节讨论测试案例中已识别特征的实验结果。最后，第6节给出结论并展望未来研究。

2. 相关研究

文献中已对从三维 CAD 模型中识别加工特征进行了深入研究。典型的特征识别方法包括基于图的方法、体分解、基于提示的方法、基于相似度的方法、混合方法以及基于深度学习的方法。

基于图的方法将整体形状中面与边之间的关系表示为图结构，然后分析子图是否与特定特征模式匹配，以此识别特征。Joshi 和 Chang [2] 利用编码面间邻接关系的属性邻接图（AAG）识别加工特征。此外，他们还提出了一种用于识别图中各组成部分的启发式方法。然而，该方法无法识别相交部分的特征，例如 T 形槽。Chuang 和 Henderson [3] 提出了一种方法：从边界表示形式的实体模型中构建形状图（顶点-边图），定义区域形状模式，并识别加工特征模式。使用顶点-边（V-E）图的优势在于易于确定模式。然而，由于该方法仅使用 V-E 图，因此只能识别简单互连的面形状模式，能力有限。Gavankar 和 Henderson [4]证明，边界表示模型的边-面图中的凸起和凹陷

由双连通分量构成，并提出了一种分离此类连接关系的方法。这种图论方法具有特征识别效率高的优点，而且易于添加新的待识别特征。然而，它存在一些问题，例如无法应用于盲孔，以及在两侧或更多侧面开口的口袋。

体积分解法将复杂形状的体分解为简单形状的体，然后从这些简单形状的体中识别加工特征[5]。体积剖分方法又可细分为凸分解和基于单元的分解等具体方法。

凸分解法将复杂形状的体分解为凸包和差分体积，从而生成简单形状的体。Tang 和 Woo [6]尝试使用交替体积和（ASV）技术识别特征，但该方法的缺点是，针对某些特定形状，分解过程无法收敛。Kim [7]提出将交替体积和与分区结合，以克服传统 ASV 的缺陷，并通过识别独特的体形状来识别特征。凸包分解方法能够很好地识别特征，甚至能够识别基于图和基于提示的方法无法识别的相交特征。然而，该方法无法处理圆角等曲面形状。 为解决这一问题，凸包分解方法通常会预先去除圆角。

基于单元的分解方法会先将形状分解为简单单元，再通过组合这些单元构成最大体积，从而识别特征。Kim 和 Mun [8]提出了顺序和重复体积分解方法，例如圆角-倒角分解、环绕分解、体积分割分解和非重叠最大体积分解。这些方法的优点是能够显著减少单元数量，并且比最大体积分解更快地完成体分解。Sakurai 和 Dave [9] 提出了一种方法，通过扩展物体表面，将形状分解为形状简单的最小单元，再通过组合这些最小单元构成最大体积。该方法的优点是能够轻松识别出许多体积。Woo [10] 提出了一种比传统基于单元的分解方法更快的替代方法。在这种方法中，实体输入的最大体积

模型是一个没有任何凹边的大型简单体积。这种基于单元的方法的优点是，即使特征相交也能使用，与凸包分解方法相同；并且与凸包分解方法不同，即使包含二次曲面，也能识别特征。然而，基于单元的分解方法的缺点是，评估复杂形状时具有较高的时间复杂度。

基于提示的方法假设边界表示模型中留有随机几何或拓扑痕迹。因此，该方法不是查找特征的完整模式，而是通过对随机几何或拓扑痕迹（即提示）进行几何推理来识别特征。基于提示的方法存在一些局限：它无法识别尚未预先定义的规则，而且必须为每种特征分别定义识别规则。Vandenbrande 和 Requicha [11] 开发了一种基于体积交集函数的算法，将总体积分解为满足严格制造条件的多个体积后，从预定义的槽、孔和口袋的表面中搜索提示。Regli[12] 开发了一种算法，通过模型中的边和顶点信息，而非面，来探索提示。Han 和 Requicha [13] 提出了一种用于识别槽、口袋等加工特征的识别算法。他们开发了 增量特征查找器，对 Vandenbrande 和 Requicha [11]的面向对象特征查找器（OOFF）进行了扩展。Li等人 [14] 提出了一种基于提示的可重用形状特征识别方法。该方法利用建模操作过程中顶点、边和面上出现的形状变化或提示，获取形状的广义属性，以便进行通用特征识别。随后，利用广义特征属性识别通用特征和交互特征。Verma, A. 和 S. Rajotia [15] 提出了一种针对具有任意交互特征的 2.5D零件的基于提示的加工特征识别系统。该系统使用各种算法为孔、直线槽、圆形槽、有底型腔和无底型腔生成提示。 Ranjan等人 [16] 提出了一种通过将虚拟射线投射到虚拟曲面上来获取 2.5D 加工零件轮廓的方法。他们根据对边界和射线长度的分析结果所获得的面和体积信息来识别特征。然而，该方法仅考虑平面和圆柱面等正交特征，不考虑沉孔和沉头孔等特征。

相似性　基于基数的方法通过检查预设阈值来识别特征　　g

随机特征 S_1 与预定义特征 S_2这两种形状之间的相似度。Hong 等人 [17]首先通过选择合适的零件，对机器零件的整体形状及其细节形状进行了比较。此外，他们提出通过多分辨率建模简化零件，即添加或移除某些部分。然而，这种方法的缺点是，除非能够恰当地简化零件，否则无法准确比较整体形状。Ohbuchi 和 Furuya [18] 以及 Liu 等人 [19] 提出了一种基于多视图，通过比较由三维模型生成的图像中的形状相似度来进行识别的方法。Sánchez-Cruz 和 Bribiesca [20]提出了一种通过将三维模型转换为体素形式来测量相似度的方法。然而，对于机动车零件等不规则物体，该方法难以提取一系列特征及其关键元素。Yeo 等人 [1] 为加工特征定义了基面及相应的描述符。他们通过测量边界表示形式的输入三维 CAD 模型中各个面所对应的描述符与预定义描述符之间的相似度来识别特征。Zehtaban 等人 [21] 提出了一个框架，用于搜索与输入 CAD 模型相似的模型。该框架使用基于 Opitz 编码系统所得特征的相似性检索模块。Opitz 编码系统是一种应用于计算机辅助制造（CAM）中零件分类的技术方法，包含几何、拓扑、尺寸、材料、孔、成形等信息。

混合方法结合多种特征识别方法来识别特征。Sunil 等人 [22] 提出了一种混合（基于图和基于规则）方法，用于从边界表示模型中识别交互加工特征。此外，他们还提出了一种基于启发式提示的图提取方法，无需识别虚拟连接即可轻松识别 n 面交互特征。Guo 等人 [23] 提出了另一种混合（基于图和基于规则）方法，并提出加权属性邻接矩阵（WAAM）模型来表示边界表示模型的数据结构。

近年来，为弥补传统算法的不足，人们开展了基于深度学习的三维模型分类与分割研究。Jian 等人 [24] 提出了一种改进的新型蝙蝠算法（NBA），并将其与基于图的方法相结合，利用反向传播算法为训练时间较长的现有神经网络提供补充。改进后的 NBA 能够提取由相似特征构成的复合特征，而这

是传统 AAG 方法无法实现的。Zhang 等人 [25] 提出了一种名为 PointwiseNet 的新型网络，将低层几何信息与高层语义信息相结合。PointwiseNet 的优势在于能够抵御输入噪声，且端到端参数较少。Lee 等人 [26] 提出了一种三维编码器-解码器网络，用于重新生成包含加工特征的三维体素。Zhang 等人 [27] 提出了一种新框架，利用名为 FeatureNet 的三维卷积神经网络学习加工特征的函数，并准确识别了 24 种加工特征。Shi 等人 [28] 提出了一种基于多截面视图（MSV）表示的特征识别深度学习框架，称为 MSVNet。Peddireddy 等人 [29] 自动合成特征数据和合成机械零件，用于训练神经网络。此外，他们还提出了一种结合三维卷积神经网络与迁移学习来识别加工过程的方法。然而，基于体素的表示往往会丢失模型精细部位的信息，因此对这些部位的识别准确率较低。Yeo 等人 [30] 提出了一种特征识别方法，将从加工特征中提取的描述符作为输入来构建深度神经网络。与基于算法的方法相比，基于深度学习的方法具有更高的识别速度和性能，但其缺点是需要预先准备充足的训练数据。

Kim 等人 [31] 提出了一种基于深度学习的系统，用于检索管道组件目录。该系统将点云分割后，使用多视图卷积神经网络（MVCNN）和 PointNet 识别管道组件。
MVCNN 将三维对象的关注重点转换为二维图像的关注重点。PointNet 对点云数据进行分类和细分。Colligan 等人 [32] 提出了一种分层边界表示图，用于编码边界表示数据。分层边界表示图能够表示边界表示模型的几何和拓扑，并使边界表示模型能够作为神经网络的输入。此外，他们还推出了 MFCAD++[33]，其中包含非平面加工特征，且其 CAD 模型比先前的 MFCAD 更复杂。Shi 等人 [34] 提出了 SSDNet，该网络使用一种名为单次多框检测器（SSD）的目标检测算法进行特征分割和识别。
SSDNet 以视图图像为输入，并预测该视图方向上所有特征的类型和三维位置。随后，将从不同视图方向获得的三维边界框组合起来，形成最终结果。表 1 将所提方法与先前研究进行了比较。

传统的基于算法的加工特征识别研究针对边界表示模型，这是因为许多现代三维 CAD 系统采用边界表示模型来表示形状。然而，近年来大量报道的基于人工神经网络的研究大多使用体素模型，因为体素模型的数据结构简单，易于通过人工神经网络处理。近年来，少数研究（如 [32] ）尝试使用边界表示模型进行加工特征识别。

表 1. 所提方法与先前研究的比较

类别	相关论文	特征	与我们方法的比较
基于图	Gavankar 和 Henderson [4]	- 无法识别盲孔和口袋 - 支持多面体实体	- 考虑了各种孔，例如沉孔和 沉头孔 - 支持多面体实体和曲面实体
体积 分解	Sakurai 和 Dave [9]	- 表面仅限于平面和圆柱面	- 处理平面、圆柱面等各种表面， 圆锥面等。 - 使用描述符快速识别特征
	Woo [10]	- 处理时的时间复杂度增加 复杂形状	
基于提示	Li等人 [14]	- 分解原始形状后进行特征识别	- 不进行分解的特征识别 - 圆角和倒角识别 - 考虑锥孔和沉孔
	Verma 和 Rajotia [15]	- 未能识别圆角和倒角	
	Ranjan等人 [16]	- 仅限平面和圆柱面 - 不包含沉孔和沉头孔	
基于相似度	Sánchez-Cruz 和 Bribiesca [20]	- 从中提取特征和基本元素存在困难 不规则特征	- 可以提取不规则特征中每个面的描述符 - 高准确率和召回率
	Zehtaban 等人 [21]	- 低准确率和召回率	
混合	Sunil 等人 [22]	- 不将岛屿视为加工特征	- 将岛屿视为加工特征 - 使用包含复杂且相互作用特征的测试案例
	Guo等人 [23]	- 缺乏包含复杂且相互作用特征等内容的测试案例	
基于深度学习的 方法	Peddireddy 等人 [29]	- 无法处理相对于三维模型而言较小的特征	- 不受特征相对于三维模型的尺寸影响 - 无需额外信息即可识别加工特征 方向信息 - 处理每个面上存在多个加工特征的情况 的三维模型
	Colligan 等人 [32]	- 在缺少特定 方向信息时，难以确定视图方向	
	Shi 等人 [34]	- 处理每个面上各存在一个加工特征的 三维模型	

3. 用于加工特征识别的描述符

3.1. 待识别的目标加工特征

为定义目标加工特征，作出以下两项假设。首先，加工类型设定为铣削、钻削和车削。其次，加工方法设定为2.5D。在这两项假设下，确定了16种特征类型，如表2所示：五种与孔相关的特征、两种与槽相关的特征、三种与口袋相关的特征、两种与岛相关的特征、两种与圆角相关的特征，以及两种与倒角相关的特征。

表2. 使用描述符进行识别的加工特征

Type	子类型	描述
孔	- 简单孔 - 锪孔 - 锪孔 - 沉头孔 - Taper 孔	从毛坯材料中去除的圆形封闭体积。 孔的直径可能会发生变化，这种变化可由 锥度或台阶表示。
槽	- 简单槽 - 无底槽	从毛坯材料中去除的体积。这种去除 由方形 U 形轮廓沿 直线扫掠而成。
口袋	- 封闭口袋 - 开放型腔 - 无底型腔	从毛坯材料中去除的体积。该去除部分 由一个平面底面和平面侧 面表示。
岛	- 封闭岛屿 - 开放岛屿	包含在一个口袋的底面内的凸出体积 。
圆角	- 内圆角 - 外圆角	沿一串圆角边从 毛坯材料中去除的体积。
倒角	- 内倒角 - 外倒角	沿一串倒角边从 毛坯材料。

3.2. 加工特征基准面确定

上一节讨论的加工特征所确定的底面如图1所示。底面是指在构成加工特征的多个面中，最能代表加工特征特性的面。此外，与底面相关的面类型包括平面、圆锥面、球面、圆柱面、

以及环面。本研究不涉及对 2.5D 以上加工中底面形状为自由曲面的加工特征进行识别。

这里，加工特征的特征包括加工类型、加工形状和加工参数。对于孔，基面取决于两种或多种不同旋转形状的组合。对于由单一旋转形状构成的简单孔和锥孔，选择孔的圆柱面或圆锥面作为基面。对于由两种或多种不同旋转形状构成的沉孔、沉头孔和锪孔，选择圆柱面以外的面作为基面。对于槽和口袋，根据是否存在底面，选择底面或侧面作为基面。对于岛，选择底面作为基面。对于圆角和倒角，选择圆柱面或平面作为基面。

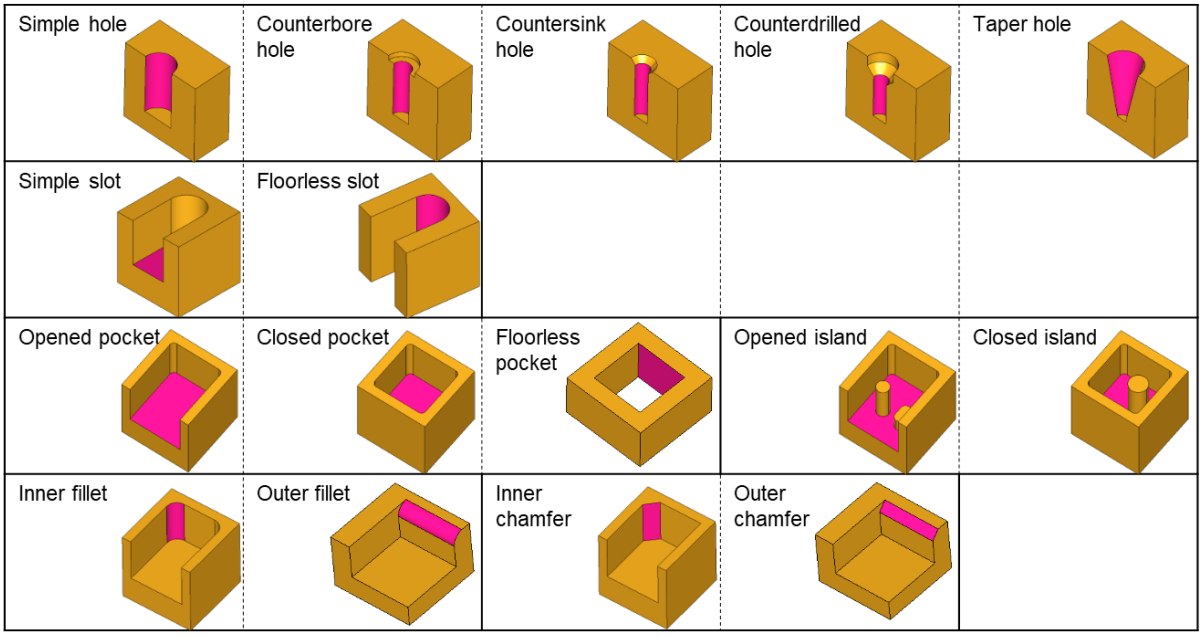


图1. 用于识别加工特征的基面

3.3 描述符的定义

3.3.1 描述符的概念

构成边界表示模型的每个面都包含自身的信息、构成该面的边的信息、构成这些边的顶点的信息，以及相邻面的信息。面信息

包括面类型（例如平面、圆柱面、环面等）、法向量和环信息（例如内环、外环）。边信息包括线类型（例如直线类型、曲线类型）和长度，顶点则包含坐标信息。此外，还可以识别与相邻面的关系。关系信息包括目标面与相邻面之间的夹角、凸性和连续性。

描述符是一种数据结构，用于表示目标面的信息以及与相邻拓扑元素之间关系的信息。如图2所示，描述符表示的信息项包括目标面、外环、内环和辅助信息。目标面信息包括面类型、曲率、面加工、圆角加工和倒角加工。外环和内环信息包括凸性、连续性、平行轴、 以及基面与相邻面之间的夹角（锐角、钝角和直角）。辅助信息包括相邻面之间的平行信息、同轴匹配信息和面干涉信息。

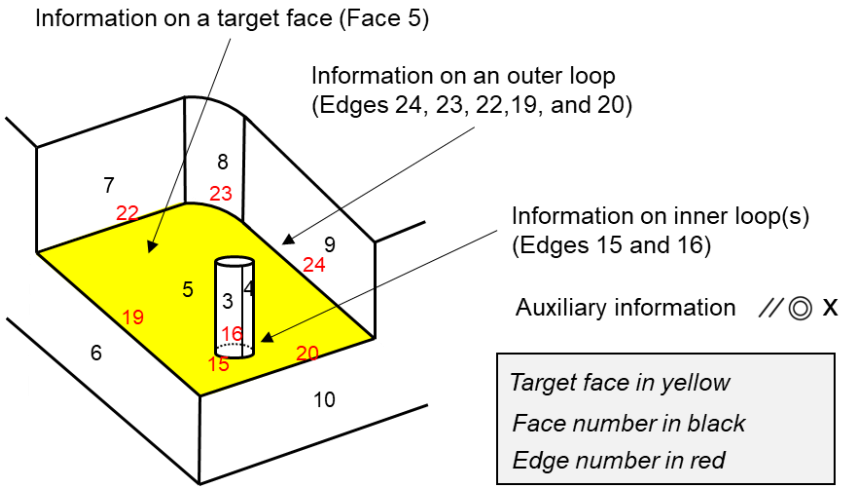


图2. 特征描述符的概念。

即使具有相同的特征[35]，边界表示模型也可以用不同的几何元素表示。尤其是，根据三维CAD系统的不同，圆柱形可能表示为一个圆柱面，也可能表示为两个半圆柱面。因此，在定义描述符时，我们会考虑描述符能否对应同一形状的不同表达。如果难以对应其他表达，我们就定义多种描述符，以适应

特征表示。本研究定义了基面为圆柱面的加工特征的多种描述符（例如，简单孔的描述符）。此外，如果基面可以是圆角或倒角等不同类型，也会定义多种描述符。

3.3.2. 描述符的组成部分

构成描述符的信息详情如下。目标面信息包括面类型项、曲率项、面加工项、圆角加工项和倒角加工项。面类型项分为平面、圆柱形、圆锥形、球形和环面形，分别表示为 PLAN、CYLI、CONI、SPHE 和 TORO。如果无法指定面类型，则表示为 ANY。曲率项根据面的曲率（凸、平坦和凹）进行分类，分别表示为正、平坦和负。面加工项用于区分槽和口袋。对于面加工项，考虑与相应面的外环接触的相邻面中彼此平行的一对面（F_1 和 F_2），确定F_1 和F_2 的宽度，再将其与用户输入值进行比较。如果结果大于用户输入值，则表示为“较长”；如果小于，则表示为“较短”。此外，如果某个面没有平行面，则表示为“较长”。圆角加工项用于将圆角与其他特征区分开来。倒角加工项用于将倒角与其他特征区分开来。对于这两项，取目标面中的最小宽度，并与用户输入值进行比较。如果宽度大于用户输入值，则表示为“较长”；如果小于，则表示为“较短”。如果目标面的类型为旋转面，例如圆柱形、球形或环面形，则该值用作目标面的半径。

描述符的环信息包括外环和内环信息。环信息由凸性项、连续性项、平行项、锐角项、直角项，和钝角项组成。各项的表达格式如下：

$$face\ type\ F_t \mid convexity\ C\text{:}\ number\ of\ faces\ N \tag{1}$$

这可解释为“在该环中，目标面具有 N 个相邻面，其面类型为 Ft，且凸性为 C。”凸性项指目标面与相邻面之间的凸性，可按图3所示计算。若F_a 和F_b 分别为目标面和相邻面，

则通过计算F_a ($\overrightarrow{n_a}$)的法向量与F_b ($\overrightarrow{n_b}$)的法向量的叉积，得到方向向量 $\overrightarrow{d_r}$ 。然后，计算 $\overrightarrow{d_c}$ 与 $\overrightarrow{d_r}$（F_a 中与 F_b接触的共边）的点积。如果计算结果为正，则为凸；如果结果为负，则为凹。计算凸性后，如式（1）所示，通过添加面类型和面数来表示凸性项。连续性项表示目标面与相邻面之间的连续性。这里将连续性区分为 C0 连续性和其他连续性。此外，连续性项仅针对连续性不是 C0 的相邻面表示。平行轴项表示目标面的基向量 V_1 是否与相邻面的基向量 V_2 平行。如果目标面是旋转面，则基向量为轴向量；如果不是旋转面，则基向量为面中心处的法向量。锐角、垂直和钝角项指由目标面的基向量 V_1 与相邻面的基向量 V_2 所形成的角度。其表达式如下：

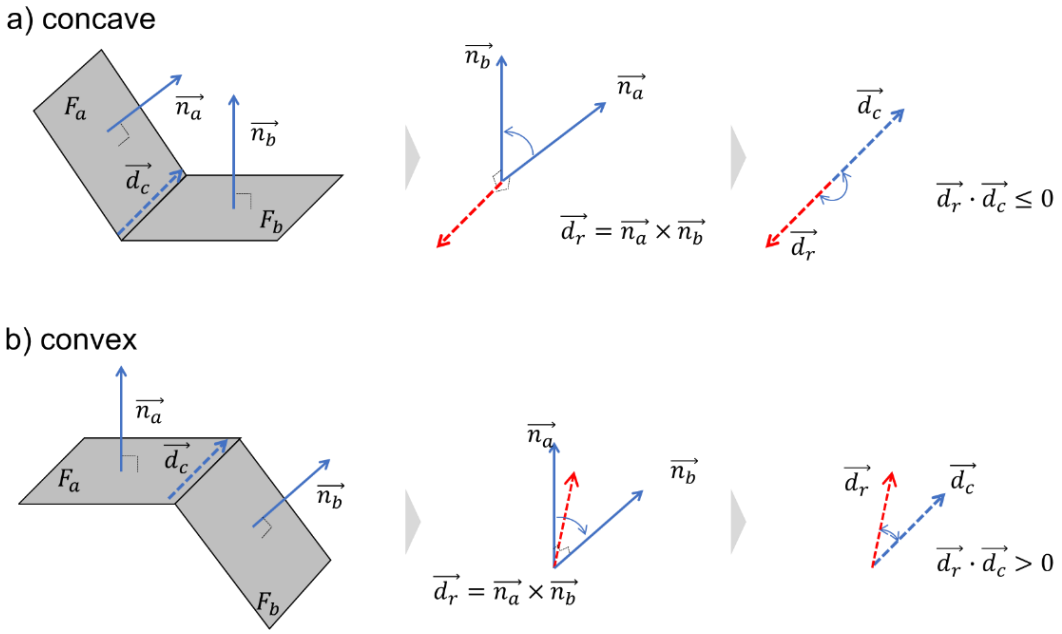


图3. 凸性的计算。

辅助信息包括平行项、同轴项和干涉项。平行项用于表示与目标面的外环接触的相邻面是否彼此平行。如果有一对相邻面彼此平行，则表示为“真”或“假”；否则表示为“假”。同轴项用于表示与目标面的外环接触的相邻面 F1 和与内环接触的相邻面

F2 是否为具有相同轴的旋转面。如果是，则表示为“真”；否则表示为“假”。干涉项用于表示目标面的法向上是否存在其他面。通过检查沿法向投射的射线是否与其他面相交来获取此信息。如果相交，则表示为“真”；否则表示为“假”。上述描述符项汇总于表3中。

表3. 构成描述符的信息项

描述符项		说明	表达式
	$D_{f_facetype}$	基面类型	平面、圆柱面、圆锥面, SPHE, 或环面
	$D_{f_curvature}$	基面曲率	正、负或 FLAT
	$D_{f_facemachning}$	与基面相邻的两个平行面之间的宽度等级 位于外环中。它用于 用于区分槽与其他加工特征。	较长或较短
	$D_{f_filletmachining}$	基面宽度的等级。用于 用于区分圆角与其他加工特征。	较长或较短
	$D_{f_c时amfermac时ining}$	基面宽度的等级。用于 区分倒角与其他加工 特征。	较长或较短
	$D_{ol_convexity}$	基面与相邻面之间的凸性 外环中的面	面类型 | 凸性：计数
	$D_{ol_continuity}$	基面与以下对象之间高于 c0 的连续性 外环中的相邻面	面类型 | 凸性：计数
	$D_{ol_parallel}$	基面的基向量（v_1）之间的平行性 相邻面的面与基向量（v_2） 在外环中	面类型 | 凸性：计数
	$D_{ol_perpendicular}$	以下对象的基向量（v_1）之间的垂直性： 基面与外环中相邻面的基向量（v_2） 在外环中	面类型 | 凸性：计数
	D_{ol_acute}	基面基向量（v_1）与基面 及外环中相邻面的基向量（v_2）之间的 外环	面类型 | 凸性：计数

	D_{ol_obtuse}	基面基向量（v_1）与 外环中相邻面基向量（v_2）之间的钝角 位于外环中	面类型 | 凸性：计数
	$D_{il_convexity}$	基面与相邻面之间的凸性 内环中的面	面类型 | 凸性：计数
	$D_{il_continuity}$	基面与面之间的连续性高于 c0 内环中相邻面的连续性高于 c0	面类型 | 凸性：计数
	$D_{il_parallel}$	基面基向量（v_1）与 面基向量（v_2）以及内环中相邻面的基向量之间的平行性 外环	面类型 | 凸性：计数
	$D_{il_perpendicular}$	基向量（v_1）与下列对象的垂直性 基面及相邻面的基向量（v_2） 内环中	面类型 | 凸性：计数
	D_{il_acute}	基面的基向量（v_1）与 相邻面基向量（v_2）之间的锐角，位于 内环	面类型 | 凸性：计数
	D_{il_obtuse}	基面的基向量（v_1）与 相邻面基向量（v_2）之间的钝角 在内环中	面类型 | 凸性：计数
	$D_{ax_parallel}$	外环中相邻面之间的平行性	真或假
	$D_{ax_coaxial}$	外环中的一个相邻面与 内环中的一个相邻面之间的同轴度	真或假
	$D_{ax_interference}$	模型中其他面造成的基面干涉 的模型	真或假

3.3.3 范围约束的考虑

将特征基面描述符与目标面描述符进行比较时，需要对每个描述符项进行比较。通过检查每个描述符项的值，可以得到三种情况，如图4所示。第一种情况是描述符值必须介于下界和上界之间，如图4中的D_i所示。第二种情况是描述符必须具有特定值，如图4中的D_j所示。第三种情况是描述符必须具有高于或低于某个特定值的值，如图4中的D_k所示。

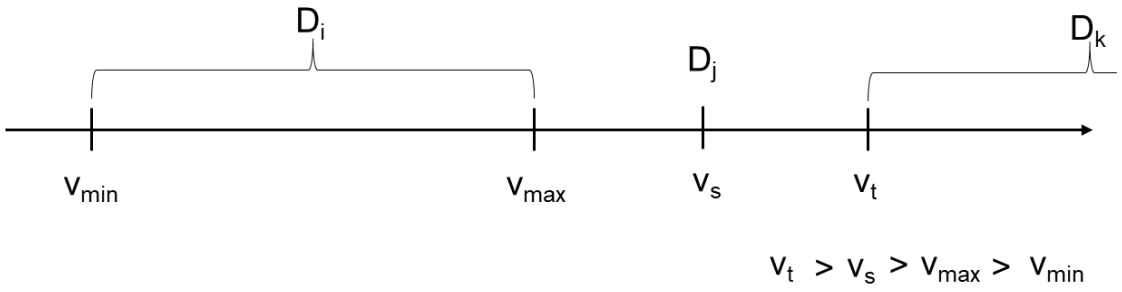


图4. 每个描述符项的可能取值范围

综合考虑上述三种情况，可以为特征基面描述符的每个描述符项定义范围约束，即最小值、最大值和相等约束。为此，对表3中定义的描述符进行扩展，如图5所示，以体现特征基面的三种范围约束。这里，最小值和最大值约束分别指描述符的每个项可以具有的下界和上界。此外，相等约束是指每个描述符项必须具有的值。目标面和辅助面的描述符项具有与相等约束相对应的值。此外，外环和内环的描述符项具有分别与最小值和最大值约束相对应的值。在特征基面描述符上应用范围约束来识别加工特征的方法将在第4节中进行说明。

Descriptor of a general face	
Descriptor item	**Value**
$D_{f_facetype}$	PLAN
$D_{f_curvature}$	FLAT
⋮	⋮
$D_{ol_convexity}$	CYLI | CONCAVE : 2 PLAN | CONVEX : 1
⋮	⋮
$D_{il_convexity}$	CYLI | CONVEX : 2
$D_{il_perpendicular}$	CYLI | CONVEX : 2
⋮	⋮
$D_{ax_coaxial}$	TRUE

Extension

Descriptor for the base face of a machining feature			
Descriptor item	**Minimum**	**Maximum**	**Equal**
$D_{f_facetype}$	-	-	PLAN
$D_{f_curvature}$	-	-	FLAT
⋮	⋮	⋮	⋮
$D_{ol_convexity}$	ANY | CONCAVE : 1	-	-
⋮	⋮	⋮	⋮
$D_{il_convexity}$	CYLI | CONVEX : 1	ANY | CONCAVE : 0	-
$D_{il_perpendicular}$	CYLI | CONVEX : 1	-	-
⋮	⋮	⋮	⋮
$D_{ax_coaxial}$	-	-	TRUE

图5. 扩展描述符，以考虑加工特征基面的范围约束

4. 加工特征识别方法

4.1 加工特征识别过程

使用描述符进行加工特征识别的过程如图6所示。首先，分析输入的边界表示模型，获取构成模型的各个面的几何和拓扑信息。然后，选择图2中预先定义的一种加工特征子类型，并使用相应特征基面的描述符识别特征。接着，选择输入模型中的一个面，并根据所选面生成描述符。生成的描述符遵循表3中的格式。根据用户输入的加工条件信息，如果输入值大于所选面的宽度（或一对相邻平行面之间的距离），则在描述符项 $D_{f_facemachning}$、$D_{f_filletmachining}$ 和 $D_{f_chamfermachining}$ 中写入“较长”；否则写入“较短”。根据所选面生成描述符后，计算所选目标面的描述符与基面的特征描述符之间的相似度。如果相似度大于或等于阈值，则将所选面判定为相应特征的基面。两个描述符之间相似度计算的详情见第4.2节。对特定特征的识别在所有面均完成相似度计算后结束。随后，使用相同方法识别列表中定义的其他加工特征。最后，输出加工特征识别结果。

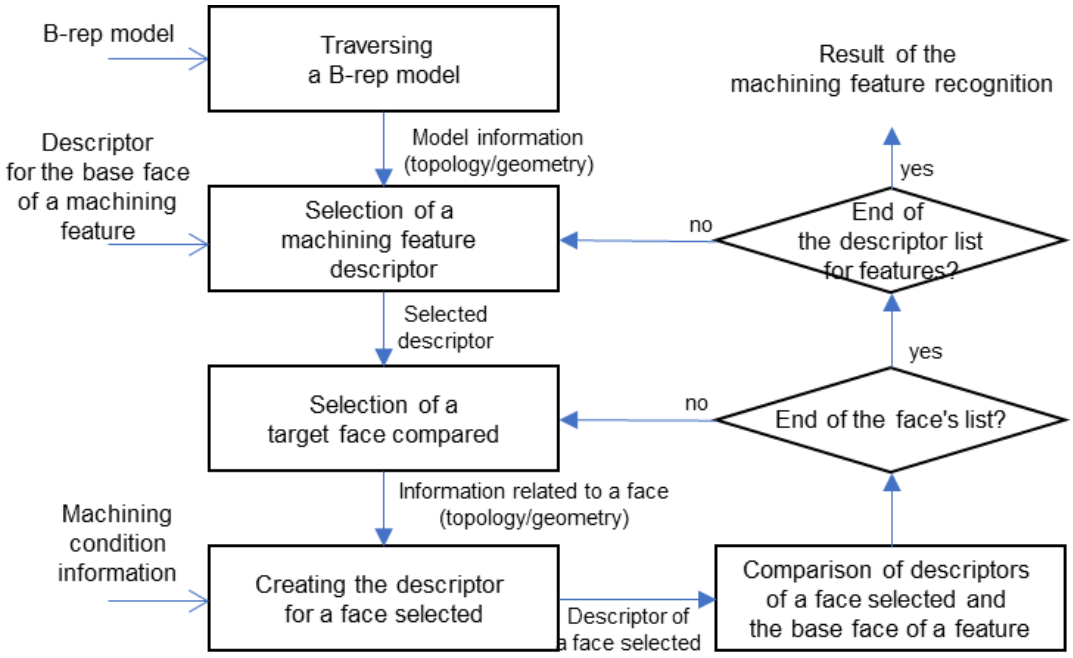


图 6. 加工特征识别流程

4.2 基于范围约束描述符的特征识别

图7展示了比较各描述符相似度的过程。首先，在选择要比较相似度的描述符项后，从目标面提取描述符项值。然后，计算三个范围约束最小值、最大值和相等对应的相似度值（$A_{k,min}$、 $A_{k,max}$、 $A_{k,equal}$）。计算每个范围约束的相似度值后，将它们相乘，以获得每个描述符项的相似度值 S_k。对所有描述符项重复此过程。计算出每个描述符项的相似度值后，将每个项的相似度值乘以权重并相加，以获得描述符的相似度值（R）。最后，将描述符的相似度值与阈值进行比较，以确定目标面是否对应于特定特征的描述符。

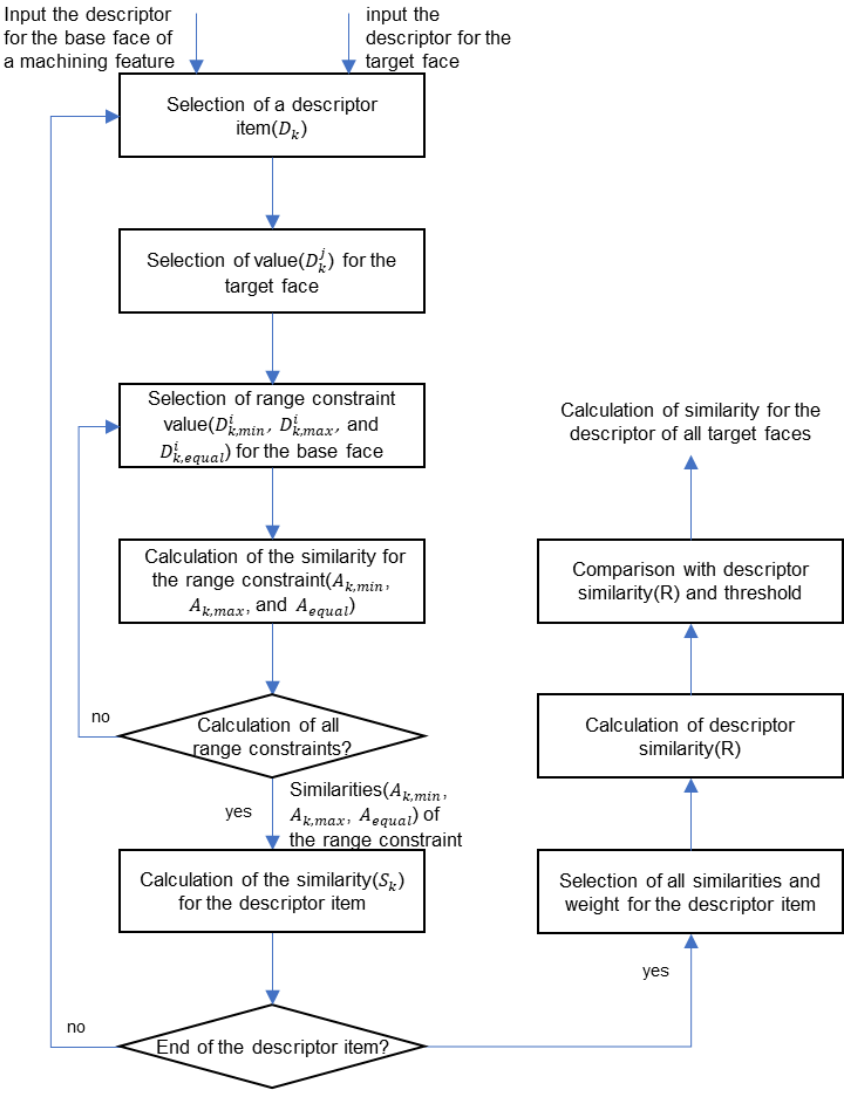


图7. 各描述符的相似度比较流程

假设特征基准面为 F^i，要进行比较的目标面为 F^j，且每个面的描述符项D_k 的值分别表示为 D_k^i 和 D_k^j，其中k是第3.3.2节中所述的描述符项名称。此外，根据最小值、最大值和相等这三个约束，基面的描述符项 D_k^i 再次细分为 $D_{k,min}^i$、 $D_{k,max}^i$ 和 $D_{k,equal}^i$ 。

为了计算两个面（F^i, F^j）的相似度，首先根据最小值、最大值和相等约束（$A_{k,min}$, $A_{k,max}$, $A_{k,equal}$），计算每个描述符项的相似度，如表4所示。然后，如公式（2）所示，将 $A_{k,min}$、 $A_{k,max}$和 $A_{k,equal}$相乘，计算每个描述符项的相似度 S_k 。

表4。 针对每个相似度项 D，考虑范围约束的相似度比较 **k**

Type	定义	数学表达式
最小值	如果 D_k^j 大于或等于 D_k^i结果为 1。否则，结果为 0。	$A_{k,min,} = \begin{cases} 1 & (D_{k,min}^i \le D_k^j) \\ 0,,,,,,(D_{k,min}^i > D_k^j) \\ 1\,(D_{k,min}^i,is,not,specified) \end{cases}$
最大值	如果 D_k^j 小于或等于 D_k^i结果为 1。否则，结果为 0。	$A_{k,max} = \begin{cases} 1 & (D_{k,max}^i \ge D_k^j) \\ 0\ ,,,,(D_{k,max}^i < D_k^j) \\ 1\,(D_{k,max}^i,is,not,specified) \end{cases}$
相等	如果 D_k^j 与 D_k^i相同，结果为 1。否则，结果为 0。	$A_{k,equal} = \begin{cases} 1 & (D_{k,equal}^i = D_k^j) \\ 0\ ,,,,(D_{k,equal}^i \ne D_k^j) \\ 1\,(D_{k,equal}^i,is,not,specified) \end{cases}$

$$S_k = A_{k,min} * A_{k,max} * A_{k,equal} \quad (2)$$

计算描述符项 D 的相似度 $S_{k\ k}$ 时，两个面 (F^i, F^j) 的最终相似度 R 按照公式 (3) 计算。为计算最终相似度 R，需要确定每个描述符项的权重。所有权重之和为 1，如公式 (4) 所示。每个权重的默认值均相同。

$$R = \sum_{S_k \in I, W_k \in J} S_k * W_k \quad \text{(3)}$$

$$\sum_{W_k \in J} W_k = 1 \quad \text{(4)}$$

其中，

$$I = \left\{ \begin{matrix} W_{f_facetype}, W_{f_curvature}, W_{f_facemachining}, W_{f_filletmachining}, W_{f_chamfermachining}, \\ W_{ol_convexity}, W_{ol_continuity}, W_{ol_parallel}, W_{ol_perpendicular}, W_{ol_acute}, W_{ol_obtuse}, \\ W_{il_convexity}, W_{il_continuity}, W_{il_parallel}, W_{il_perpendicular}, W_{il_acute}, W_{il_obtuse}, \\ W_{ax_parallel}, W_{ax_coaxial}, W_{ax_interference} \end{matrix} \right\},$$

$$J = \left\{ \begin{matrix} S_{f_facetype}, S_{f_curvature}, S_{f_facemachining}, S_{f_filletmachining}, S_{f_chamfermachining}, \\ S_{ol_convexity}, S_{ol_continuity}, S_{ol_parallel}, S_{ol_perpendicular}, S_{ol_acute}, S_{ol_obtuse}, \\ S_{il_convexity}, S_{il_continuity}, S_{il_parallel}, S_{il_perpendicular}, S_{il_acute}, S_{il_obtuse}, \\ S_{ax_parallel}, S_{ax_coaxial}, S_{ax_interference} \end{matrix} \right\}$$

计算每个描述符项的相似度时，需要确定描述符项值之间的大小关系。计算方法如下。比较特征基准面 F^i 和目标面 F^j 时，描述符项值分别表示为 $F_t^i|C^i\colon N^i$、$F_t^j|C^j\colon N^j$。此时，描述符项的大小关系按如下方式计算。首先，当面类型和凸性相同时，根据每个描述符项值所包含的面数确定两个描述符项值之间的大小关系。 换言之，当两个描述符项值的面类型（F_t）和凸性（C）相同时，会比较面数 N^i 和 N^j。比较方法如公式（5）所示。其次，当基面的描述符项值的面类型（F_t^i）为 ANY 时，目标面的描述符项值所包含的面数 N^j，是目标面的描述符项值中凸性（C_k^j）与相应描述符项值的凸性（C^i）相同的面的总数（N_k^j）。

$$\begin{gathered} F_t^i\left|C^i\colon N^i \text{ is less than } F_t^j\right|C^j\colon N^j,\ if\ N^i < N^j, \\ F_t^i\left|C^i\colon N^i \text{ is greater than } F_t^j\right|C^j\colon N^j,\ if\ N^i > N^j \\ F_t^i\left|C^i\colon N^i \text{ equals to } F_t^j\right|C^j\colon N^j,\ if\ N^i = N^j \end{gathered} \quad (5)$$

whe重新，F_t^i =、F_t^j和，，C^i =、C^j 对应两个描述项值 ，$F_t^i|C^i\colon N^i$，以及$F_t^j|C^j\colon N\ j$

$$N^j = \sum N_k^j \; for\ all\ fact\ type\ k \tag{6}$$

其中 $F_t^i = ANY$ 和 $C_k^j = C^i$ 对应两个描述项值，$F_t^i|C^i$：N^i，以及，$F_k^j|C_k^j$：N_k^j

如果最终相似度 R 大于或等于预设阈值，则认为目标面 F^j是某个特定加工特征的基面。如果某个加工特征的基面描述符中没有特定描述符项的值，则在相似度计算中排除该描述符项。因此，对公式（5）进行调整，使排除相应项后其余项的权重之和为 1。

图8展示了将待比较目标面的描述符 D^j 与锪孔基面的描述符 D^i 进行比较的过程，以识别三维 CAD 模型中包含的锪孔基面。锪孔的描述符中，最小值、最大值和相等约束分别只有 3、1 和 3 个描述符项。因此，如上所述，相似度计算中仅使用七个描述符项。

在面信息的描述符项中，图8(a)中特征基面的 $D^i_{f_facetype,equal}$ F^i 为 PLAN，而图8(b)中目标面 $D^j_{f_facetype,equal}$ F^j 为 PLAN。由于两个描述符的值相同，根据表4，相似度 $A_{f_facetype,equal}$ 为 1。然而，$D^i_{f_facetype,min}$ 和 $D^i_{f_facetype,max}$ 均未给出值。因此，根据表4，$A_{f_facetype,min}$ 和 $A_{f_facetype,max}$ 均为 1。最后，根据公式（2），描述符项 $D_{f_facetype}$ 的相似度 $S_{f_facetype}$ 为 1。同理，计算描述符项 $D_{f_curvature}$ 后，相似度 $S_{f_curvature}$为 1

在 循环信息的描述符项中，图8(a)中的基面 F^i 的 $D^i_{ol_convexity,min}$ 为 ANY |凹：1。此外，图8(b)中的目标面 F^j 的 $D^j_{ol_convexity}$ 为圆柱面 | 凹：2 和平面 | 凸：1。根据上述描述符项大小关系的比较方法，结果为 $D^i_{ol_convexity,min}$、$< D^j_{ol_convexity}$。因此，根据表4，相似度 $A_{ol_convexity,min}$ 为 1。然而，$D^i_{ol_convexity,max}$ 和 $D^i_{ol_convexity,equal}$ 没有给出值。因此，$A_{ol_convexity,max}$

根据表4， $A_{ol_convexity,equal}$ 和 $S_{ol_convexity}$ 为 1。最后，根据公式（2），描述符项 $D_{ol_convexity}$ 的相似度 $S_{ol_convexity}$ 为 1。以相同方式计算描述符项 $D_{il_convexity}$ 和 $D_{il_perpendicular}$，相似度 $S_{il_convexity}$ 和$S_{il_perpendicular}$ 为 1

最后，在辅助信息的描述符项中，图8(a)中，特征基准面 F^i 的 $D^i_{ax_coaxial,equal}$ 为真。此外，图8(b)中，目标面 F^j 的 $D^j_{ax\ coaxial}$ 为真。由于这两个描述符具有相同的值，根据表4，相似度$A_{f_facetype,equal}$ 为1。但是，未为$D^i_{ax_coaxial,min}$ 和 $D^i_{ax_coaxial,max}$ 赋值。因此，根据表4，$A_{ax_coaxial,min}$ 和 $A_{ax_coaxial,max}$ 为1。最后，根据公式（2），描述符项 $D_{ax\ coaxial}$ 的相似度 $S_{ax\ coaxial}$ 为1。完成每个约束的相似度计算后，如图8(c)所示，图8(d)计算了每个描述符项的相似度 S_k 。然后，通过将权重应用于每个描述符项的相似度 S_k，计算最终相似度R。

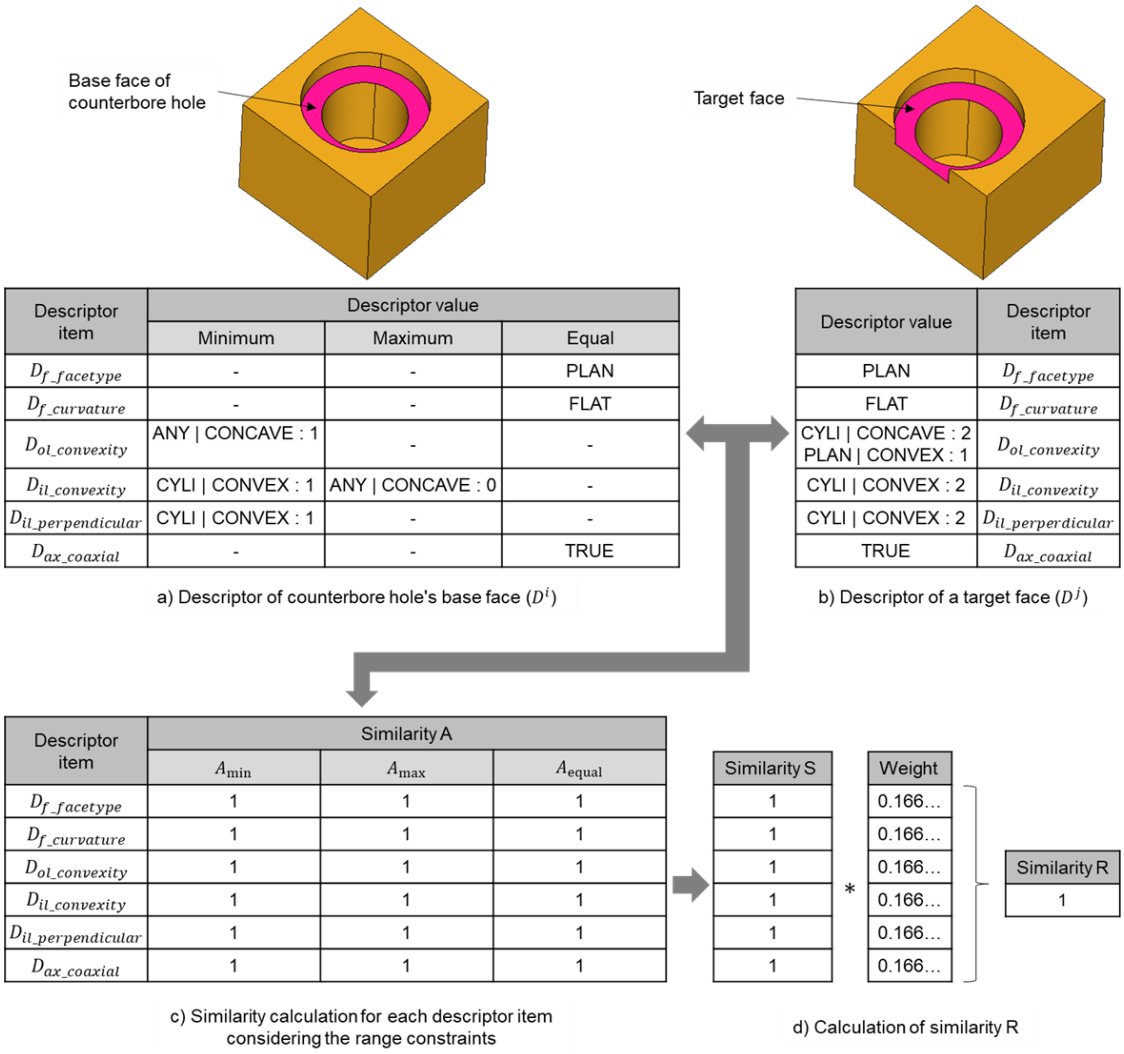


图 8. 目标面与锪孔基面的描述符之间的相似度比较

4.3. 处理描述为多个特征组合的复合特征 s

要正确识别表示为多个特征集合的复合特征，必须将优先级的概念应用于上述识别过程。本研究包含三种复合特征类型：锪孔、锪孔和沉头孔。如图9所示，沉头孔是一种复合特征，由简单孔和锥孔组合而成。如果通过比较基于描述符的相似性来识别特征，则简单孔、锥孔和沉头孔会同时被识别。为解决这一问题，我们优先识别复合特征，再识别其他一般特征。

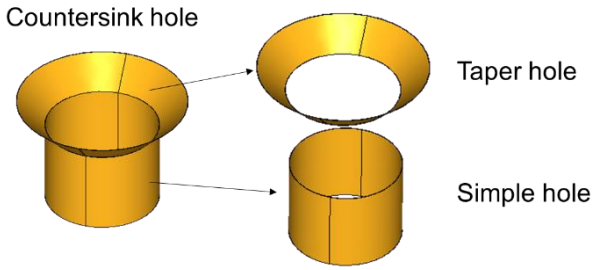


图9. 由其他特征组合表示的复合特征

5. 实现与结果

5.1. 加工特征识别系统和识别性能评估

如图1所示，为验证使用所提出的描述符识别加工特征的识别性能，我们实现了一个原型系统。该原型系统使用 C++ 编程语言开发。集成开发环境采用 Visual Studio 2019，图形用户界面（GUI）则使用微软基础类库实现。形状建模内核采用 Open CASCADE 7.3.0 [36] 。

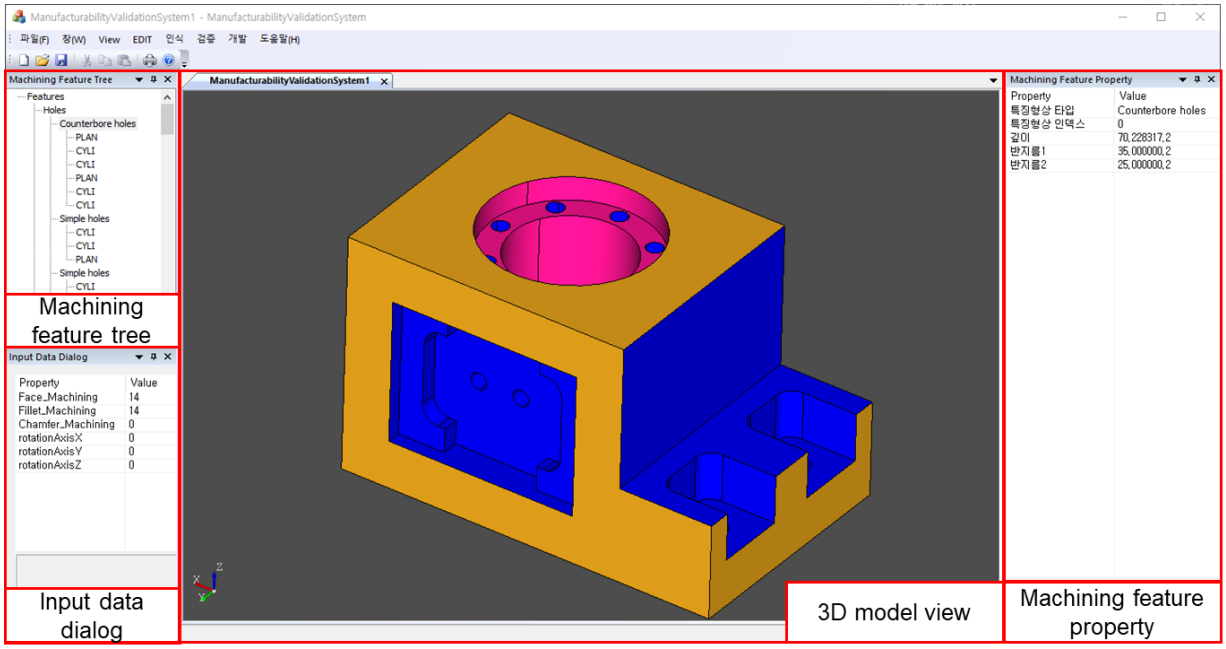
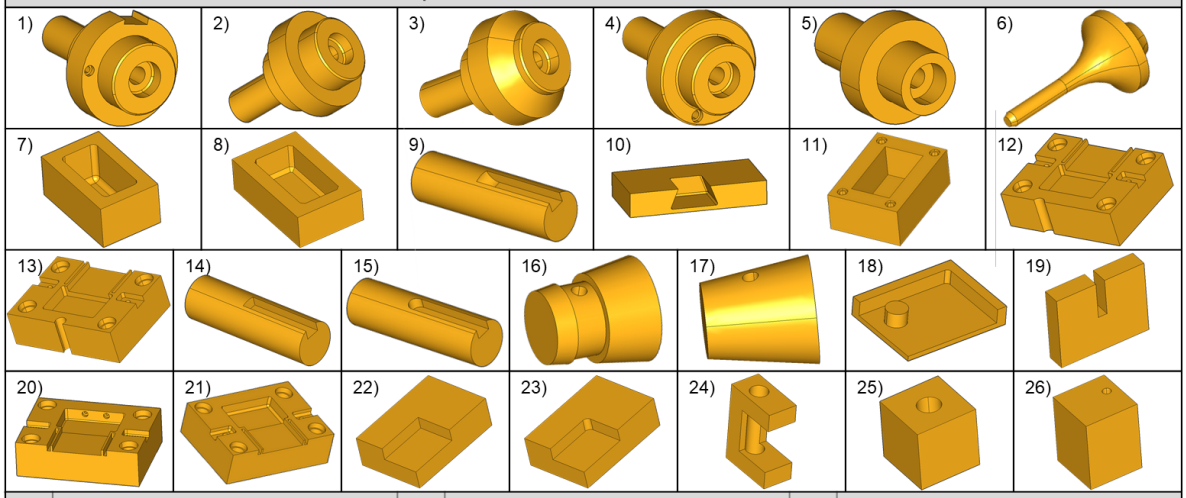


图10. 实验中使用的原型系统

使用已实现的原型系统测试加工特征识别时，相似度比较的权重值均匀划分。此外，用于确定加工特征的相似度 R 阈值设为 1。

加工特征识别测试所用的测试案例汇总于图11。测试用例1参考 H 公司 [37] 的 DFMPro 解决方案中使用的三维 CAD 模型创建。此外，测试用例2参考了相关特征识别研究中使用的三维 CAD 模型创建 [38-42]。使用所提出的基于描述符的识别方法，两个测试案例中的所有加工特征均成功识别。相比之下，先前的研究未能识别特定加工特征，即测试用例1的模型编号8和12，以及测试用例2的模型编号1、7、10和12中包含的倒角、简单孔、封闭口袋和无底型腔。

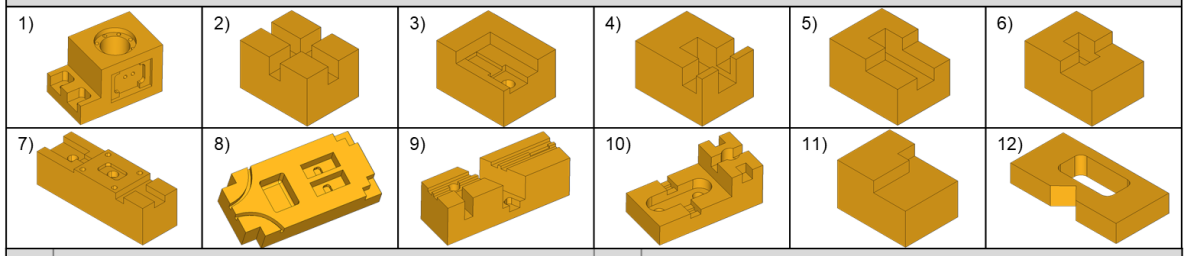
B-rep 3D CAD models of test case one



No	List of machining feature	No	List of machining feature	No	List of machining feature
1	counterbore hole, simple slot, fillet, chamfer	12	simple hole, counterbore hole, simple slot, closed pocket, opened pocket, fillet	20	simple hole, counterbore hole, simple slot, closed pocket, opened pocket, fillet
2	counterbore hole, chamfer				
3	counterbore hole, chamfer	13	simple hole, counterbore hole, simple slot, closed pocket, opened pocket, fillet	21	simple hole, counterbore hole, simple slot, closed pocket, opened pocket, fillet
4	counterbore hole, fillet, chamfer				
5	counterbore hole				
6	chamfer	14	simple slot	22	opened pocket
7	closed pocket, fillet	15	simple slot	23	opened pocket, fillet
8	closed pocket, chamfer	16	simple hole	24	simple hole, opened pocket
9	simple slot	17	simple hole	25	simple hole
10	opened pocket, fillet	18	opened island, opened pocket	26	simple hole
11	counterbore hole, closed pocket	19	simple slot		

a) Machining features in test case one

B-rep 3D CAD models of test case two

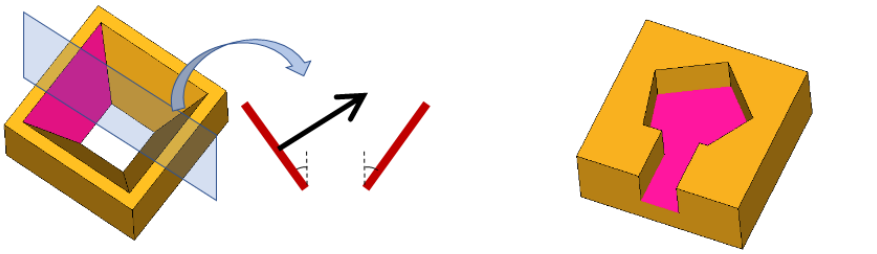


No	List of machining feature	No	List of machining feature
1	simple hole, counterbore hole, closed pocket, opened pocket, fillet	7	simple hole, counterbore hole, simple slot, closed pocket, opened pocket
2	simple slot	8	simple hole, simple slot, closed pocket, opened pocket
3	simple hole, simple slot, opened pocket	9	simple hole, simple slot, opened pocket, fillet
4	simple slot	10	simple hole, simple slot, closed pocket, opened pocket
5	simple slot, opened pocket	11	opened pocket
6	closed pocket, opened pocket	12	floorless pocket, opened pocket

b) Machining features in test case two

图11. 两个测试案例的加工特征识别实验

所提方法正确识别了测试案例 1 和 2 中包含的所有加工特征。然而，图12中的两个 CAD 模型所包含的特征未能正确识别。图12(a)是一个底面倾斜陡峭的无底型腔，图12(b)则是两个特征之间发生干涉，导致两个底面合并为一个面的情况。为识别无底型腔，我们将描述符项 $D_{ax_interference}$ 的值定义为“真”。这表示从底面的中心沿法向量方向投射射线时，会出现一个相交面。然而，在图12(a)中，由于底面的倾斜度相对较大，底面射线没有与任何面相交。因此，图12(a)中的特征被误识别为开放型腔。在图12(b)中，简单槽与封闭口袋发生干涉，导致两个特征的底面合并为一个面。因此，相似度是针对合并后的面计算的。在这种情况下，两个特征必须分别识别，或识别为开放型腔，但它们被误识别为简单槽。



a) Floorless pocket having a steep base face

b) Base faces merged into one

图12. 误识别的加工特征

5.2. 与分层 CADN 的特征识别性能比较 et

本研究将所提方法的识别性能与最新的人工神经网络进行比较，以验证所提方法的优越性。我们选用 Hierarchical CADNet(adj) 进行性能比较。Hierarchical CADNet 以边界表示模型作为输入模型。由于这一特点，可以使用相同的测试案例比较识别性能。与 FeatrueNet、MSVNet 和 PointNet 等其他加工特征识别模型相比，Hierarchical CADNet 报告了最高的准确率和单面准确率++。因此，我们比较了本研究所提方法与 Hierarchical CADNet 的性能。

为比较本研究所提方法与 Hierarchical CADNet 的性能，我们从 MFCAD++ 数据集 [33] 中选取了 40 个模型，并将其定义为测试案例3，如图13所示。这些模型用于验证加工特征识别性能。作为测试案例3选取的模型，是 MFCAD++ 数据集中测试模型列表文件顶部列出的 40 个模型。

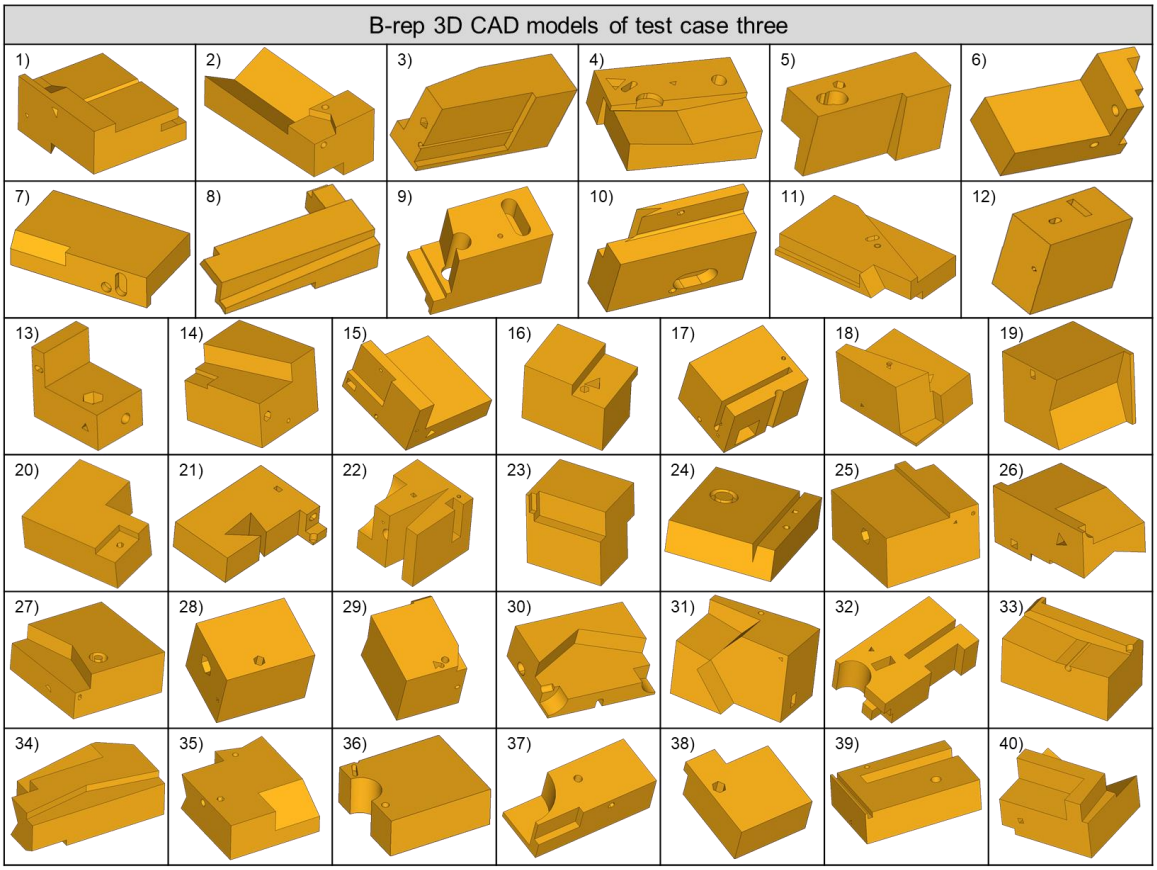


图13. 测试案例3中的加工特征

测试案例4是通过排除部分模型，或更改测试案例 1 和 2 中模型的某些特征而定义的。测试案例 1 和 2 中的部分模型采用旋转毛坯，但 Hierarchical CADNet 不支持这种类型的毛坯。因此，这类模型被从测试案例 1 和 2 中排除。此外，测试案例 1 和 2 中还包含具有 Hierarchical CADNet 不支持的加工特征的模型，例如开放岛屿和锪孔。因此，如果三维模型中有沉孔，就将其替换为简单孔。另外，如果三维模型中有开放岛屿，则将其从测试案例中排除。按上述方式准备的测试案例4[43], 如图14所示。

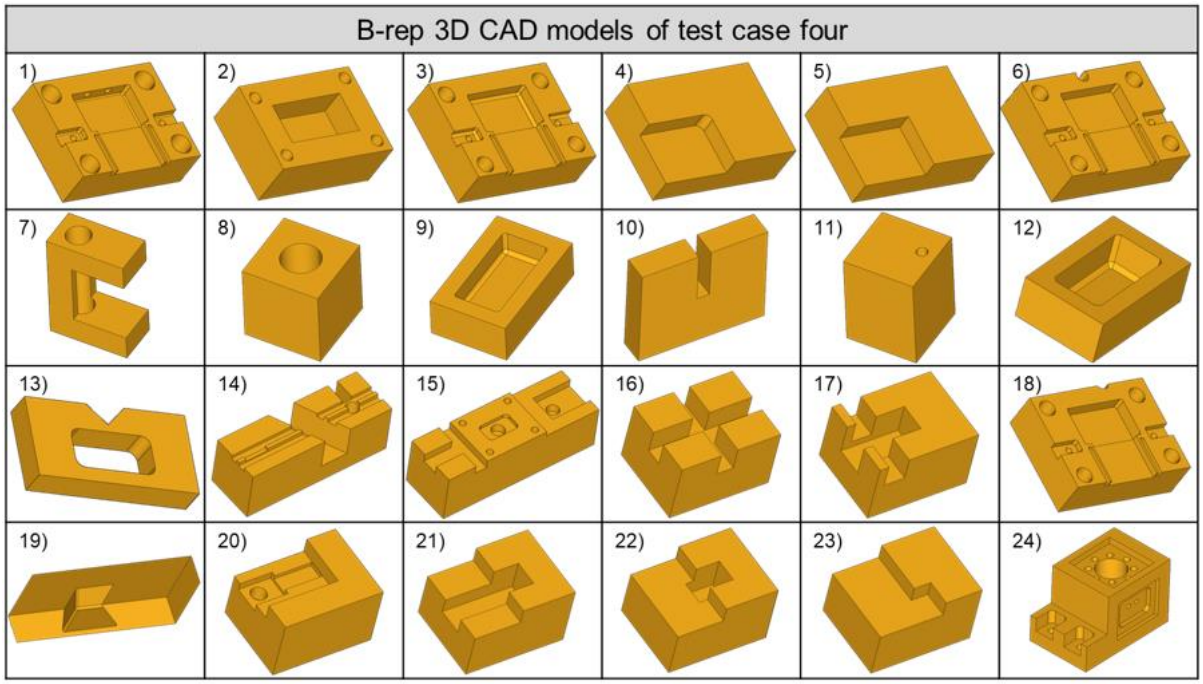
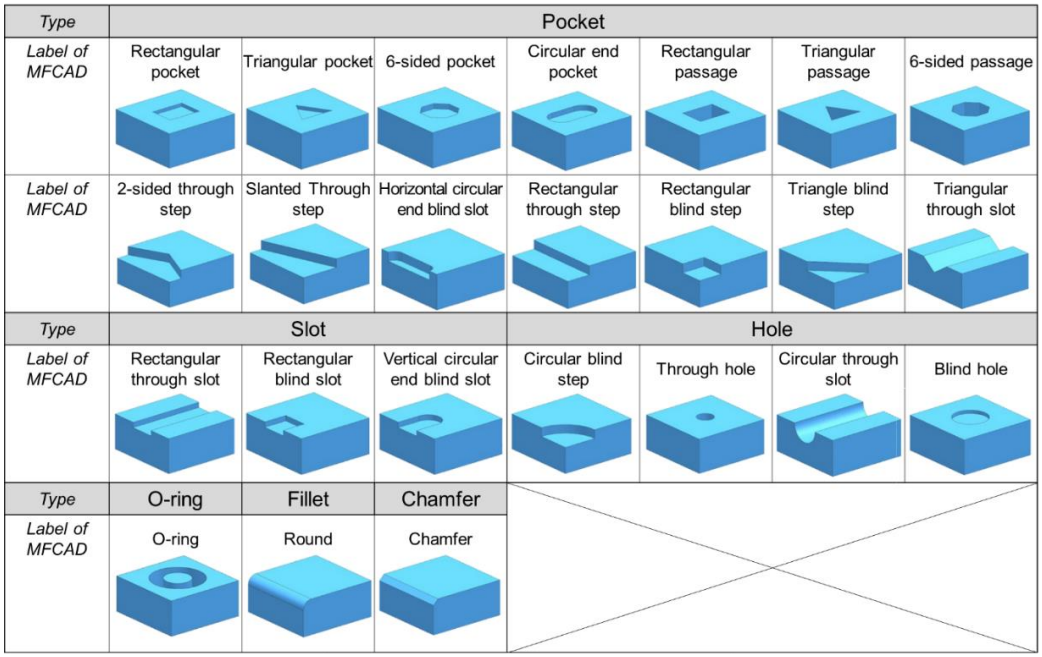
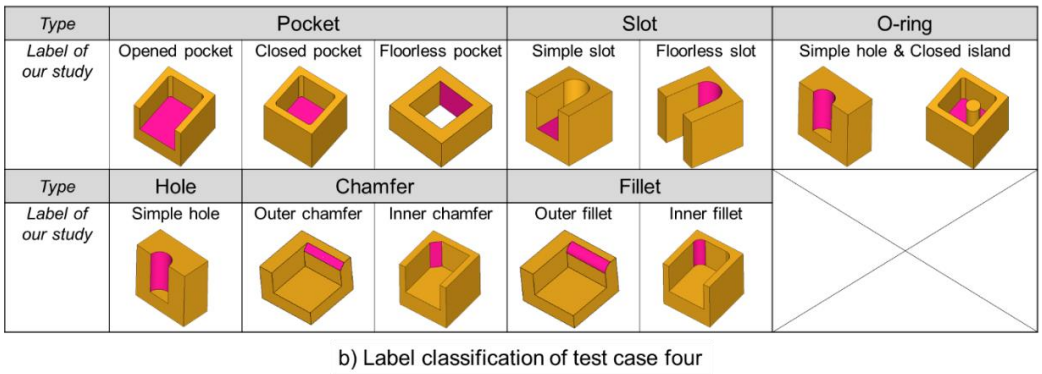


图14. 测试案例4中的加工特征

本研究的特征分类与 MFCAD++ 的分类不同。因此，即使基面相同，也可能需要对槽和口袋等特征进行不同的分类。因此，在这两种情况下，识别部分加工特征都需要采用新的成功判定标准：一是在应用本研究提出的方法时识别测试案例3，二是在应用 Hierarchical CADNet 时识别测试案例4。考虑到这些情况，测试案例3和4中的加工特征被重新分类为口袋类型、槽类型、O形圈类型、孔类型、倒角类型和圆角类型。重新分类结果如图15所示。



a) Label classification of test case three



b) Label classification of test case four

图15. 测试案例3和4的标签分类

在重新分类加工特征后，本文所提方法和 Hierarchical CADNet 在识别测试案例3和4时，对槽/口袋、圆角和 O形圈的识别标准定义如下。首先，根据本文的特征分类方法（即特征宽度是否与刀具宽度相匹配），将图16(a)中的基面 A 和 B 分别分类为口袋和槽。然而，由于分类标准不同，使用 Hierarchical CADNet 识别各基面时，两个基面均被识别为槽类型。因此，将测试案例4应用于 Hierarchical CADNet 时，若图16(a)中的基面 A 被识别为槽类型标签 矩形通槽，则判定为识别成功。

接下来，圆角类型和倒角类型的识别成功标准定义如下。被分类为圆角类型的面（如图16(a)中的基面 C）可以包含在其他特征中。因此，在本文所提方法中，相应的面会被重复识别为圆角类型和其他加工特征。然而，Hierarchical CADNet 只会将该面识别为一种加工特征。因此，将测试案例3和4应用于 Hierarchical CADNet 时，若相应的面被识别为圆角类型，或被识别为以圆角为相邻面的特征类型，则判定为识别成功。此外，将测试案例3和4应用于所提方法时，若相应的面同时被识别为圆角类型，以及以圆角为相邻面的特征类型，则判定为识别成功。若待识别的加工特征为倒角类型，也采用相同的方法。

最后，O形圈类型识别成功的判据定义如下。图16(b)中的加工特征D在MFCAD++中被分类为O形圈。然而，在所提方法中，对应特征被分类为由简单孔和封闭岛屿组成的复合特征。因此，在将测试案例3应用于本文提出的方法时，如果对应特征被识别为由简单孔和封闭岛屿组成的复合特征，则判定识别成功。

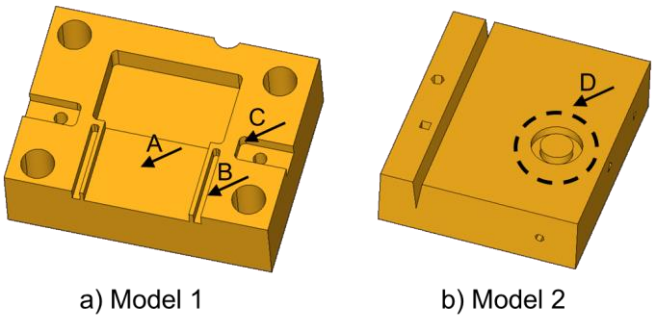


图16. 所提方法与Hierarchical CADNet分类结果不同的面

加工特征识别的性能按如下方式进行定量计算。首先，根据针对测试模型的识别实验结果构建多分类混淆矩阵。然后，根据该混淆矩阵计算精确率、召回率、准确率和F1分数。精确率是“构成特定加工特征的真实面（*TP*）”与“所有被分类为构成特定加工

特征的面（*TP+FP*）”之比。精确率的定义见公式（7）。召回率是“构成特定加工特征的真实面（*TP*）”与“实际构成特定加工特征的面（*TP+FN*）”之比。召回率的定义见公式（8）。准确率是“正确构成特定加工特征的面（*TP+TN*）”与“构成三维模型的所有面（*TP+TN+FP+FN*）”之比。准确率的定义见公式（9）。其中， T、F、P和N分别表示真、假、正和负。F1分数是调和平均数，其特点是不易受数据偏差影响，因此采用该指标。F1分数的定义见公式（10）。

$$Precision = TP/(TP + FP) \tag{7}$$

$$Recall = TP/(TP + FN) \tag{8}$$

$$Accuracy = (TP + TN)/(TP + TN + FP + FN) \tag{9}$$

$$F1\ Score = 2 \times (Precision \times Recall)/(Precision + Recall) \tag{10}$$

通过使用测试案例3和4对所提方法与 Hierarchical CADNet 进行性能比较实验，确定了构成特征的各个面的分类结果是否正确。首先，将识别过程中的真实分类值与预测分类值进行比较，并据此创建多分类混淆矩阵。然后，根据该混淆矩阵计算精确率、召回率、准确率和 F1分数。如表5所示，所提方法在精确率、召回率、准确率和 F1分数等所有评估指标上均优于 Hierarchical CADNet。

表5. 所提方法与 Hierarchical CADNet 在测试案例3和4中的识别性能

标签	Data	精确率	召回率	准确率	F1分数
我们的方法	测试案例3	0.9023	0.9676	0.9403	0.9338
	测试案例4	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
分层 CADNet	测试案例3	0.8751	0.8415	0.9301	0.8579
	测试案例4	0.6040	0.4099	0.4321	0.4884

图17展示了将所提方法应用于测试案例3时出现识别失败的情况。第一种情况下，如图17(a)所示，倒角的宽度大于口袋的宽度。我们使用描述符项 倒角加工对槽、口袋和

倒角进行分类，这意味着槽或口袋的宽度应大于倒角的宽度。然而，由于图17(a)中的倒角宽度大于口袋宽度，因此无法正确识别该口袋。下一种情况下，如图17(b)所示，口袋的宽度小于槽的宽度。我们使用描述符项面加工对槽和口袋进行分类，这意味着口袋的宽度应大于槽的宽度。然而，由于图17(b)中的口袋宽度小于槽宽，因此无法正确识别该口袋。

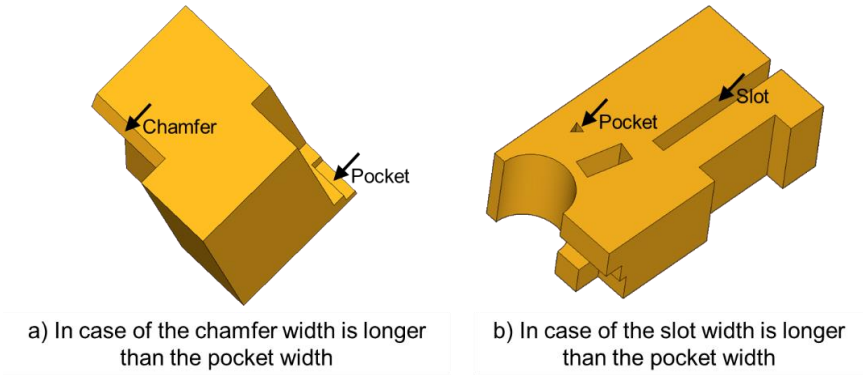


图17. 将测试案例3应用于我们的方法时的失败案例

图18展示了将 Hierarchical CADNet 应用于测试案例4时出现识别失败的情况。第一种情况下，如图18(a)所示，一个由两个半圆柱面构成的简单孔被误识别。Hierarchical CADNet 无法识别由两个半圆柱面构成的孔，因为 MFCAD++ 数据集中的所有孔都仅由一个圆柱面构成。第二种情况下，图18(b)中的圆角在多个圆角中被误识别。

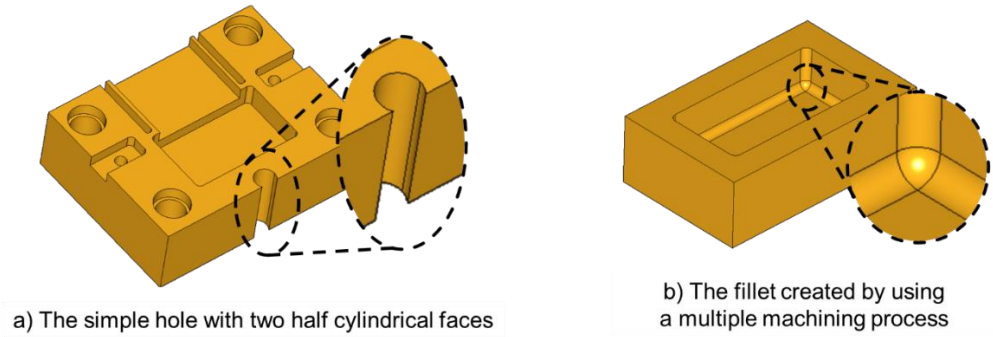


图18. 将测试案例4应用于 Hierarchical CADNet 时的失败案例

5.3. 使用 Hierarchical CADNet 比较对毛坯和复合特征的响应能力

我们进行了额外实验，以比较所提方法和 Hierarchical CADNet 对毛坯或复合特征变化的响应能力。实验步骤如下。

首先，对回转毛坯进行了识别实验，如图19(a)所示。本文所提方法不仅能够识别长方体，也能够识别回转毛坯。然而，Hierarchical CADNet 无法识别回转毛坯，也无法识别回转毛坯中的加工特征。通过这些结果，我们证实，当毛坯形状发生变化时，基于深度学习的方法必须进行额外训练。

如图19(b)所示，在对由两个简单孔组合而成的锪孔进行识别实验时，如果没有针对锪孔的描述符，所提方法会将锪孔识别为两个简单孔。然而，Hierarchical CADNet 将锪孔误识别为完全不同的加工特征。通过这些结果，我们证实，识别由特征组合而成的特征时，必须根据该特征额外创建一个新标签。

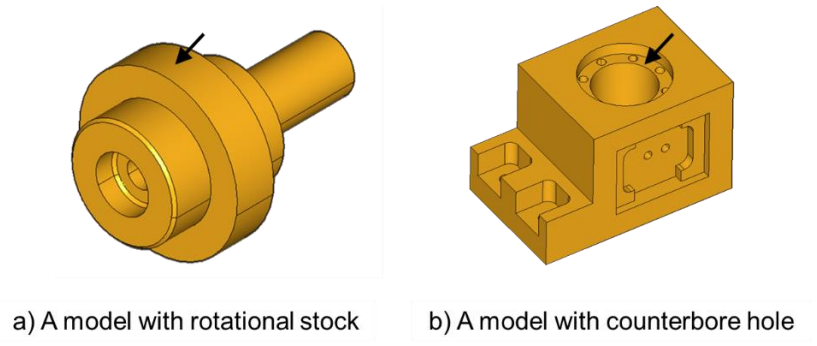


图19. 用于比较所提方法与 Hierarchical CADNet 的其他测试模型

6. 结论

在本研究中，我们提出了一种加工特征识别方法，该方法运用范围约束的概念比较特征描述符的相似度，包括最小值、最大值和相等约束。最小值和最大值约束分别指每个描述符项可取值的下界和上界

。此外，相等约束指每个描述符项必须具有的值。原型系统实现后，我们针对两个测试案例进行了特征识别测试。改进后的描述符支持识别16种加工特征。结果表明，识别性能显著提升；两个测试案例中包含的所有加工特征均成功识别。此外，通过比较两种方法，我们确认本研究所提方法的识别性能优于最新的人工神经网络。实验还证实，所提方法能够很好地响应包含未加工余量或特征的三维模型。

未来，我们计划扩大所涵盖的特征类型，以识别由多个特征组合而成的功能零件三维形状，以及一般加工特征。此外，我们将修订并改进本研究提出的描述符，以解决图12所述的误识别问题。除此之外，我们还将开展研究，将所提出的描述符应用于卷积神经网络和循环神经网络等人工深度神经网络，以识别加工特征。

伦理批准

本稿件此前未曾全部或部分发表，也未在其他地方宣讲，目前亦未在其他期刊审稿。

参与同意

不适用

发表同意

不适用

作者贡献

Seungeun Lim：方法论、数据整理、软件、撰写——初稿。**ChangmoYeo**：数据整理、软件、撰写——初稿。**何发智**：资源、撰写——审阅与编辑。**Jinwon Lee**：方法论、验证、调查、撰写——审阅与编辑。**Duhwan Mun**：监督、概念化、方法论、撰写——审阅与编辑、经费。

致谢

本研究获韩国政府（MSIT）资助的韩国国家研究基金会（NRF）基础科学研究计划 [No. NRF- 2022R1A2C2005879] 、韩国政府（MOTIE）资助的碳减排模型关联数字工程设计技术开发计划 [No. RS-2022-00143813] ，以及韩国政府（MSIT）资助的信息通信技术规划与评估研究院（IITP）项目经费 [No.2022-0-00969]支持。

利益冲突

作者声明，在本文的研究、撰写和发表方面不存在任何潜在利益冲突。

数据和材料的可用性

不适用

参考文献

[1] C. Yeo、S. Cheon、D. Mun，基于描述符的加工特征识别在零件可制造性评估中的应用，《国际计算机集成制造期刊》34 (2021) 1196-1222。https://doi.org/10.1080/0951192X.2021.1963483.[2] S. Joshi、T.-C. Chang，基于图的启发式方法：从三维实体模型中识别加工特征，《计算机辅助设计》20 (1988) 58-66。https://doi.org/10.1016/0010- 4485(88)90050-4.[3] S. Chuang、M.R. Henderson，利用顶点分类和顶点-边图进行三维形状模式识别，《计算机辅助设计》22 (1990) 377-387。https://doi.org/10.1016/0010-4485(90)90088-T.[4] P. Gavankar、M.R. Henderson，从边界表示中基于图提取凸起和凹陷，《计算机辅助设计》22 (1990) 442-450。https://doi.org/10.1016/0010-4485(90)90109-P.[5] B.C. Kim、D. Mun，用于修改边界表示模型的逐步体积划分，《国际先进制造技术杂志》75 (2014) 1393-1403。https://doi.org/10.1007/s00170-014-6210-z。

[6] K. Tang、T. Woo，交替体积和的算法问题。第1部分：数据结构与差分运算，《计算机辅助设计》23 (1991) 357-366。https://doi.org/10.1016/0010-4485(91)90029-V.[7] Y.S. Kim，利用凸分解识别形状特征，《计算机辅助设计》24 (1992) 461-476。https://doi.org/10.1016/0010-4485(92)90027-8.[8] B.C. Kim、D. Mun，通过最大限度减少体积重叠的增强型体积划分识别设计特征，《机械科学与技术杂志》29 (2015) 5289-5298。https://doi.org/10.1007/s12206-015-1131-9.[9] H. Sakurai、P. Dave，体积划分与特征识别，第II部分：曲面对象，《计算机辅助设计》28 (1996) 519-537。https://doi.org/10.1016/0010-4485(95)00067-4.[10] Y. Woo，快速的基于单元的分解及其在实体建模中的应用，《计算机辅助设计》35 (2003) 969-977。https://doi.org/10.1016/S0010-4485(02)00144-6.[11] J.H. Vandenbrande、A.A. Requicha，利用空间推理自动识别实体模型中的可加工特征，《IEEE模式分析与机器智能汇刊》15 (1993) 1269-1285。https://doi.org/10.1109/34.250845.[12] W.C. Regli III，基于实体模型识别特征的几何算法，载于马里兰大学帕克分校，1995年。[13] J. Han、A.A. Requicha，从CAD模型中识别特征，《IEEE计算机图形学与应用》18 (1998) 80-94。https://doi.org/10.1109/38.656791.[14] H. Li、Y. Huang、Y. Sun、L. Chen，基于提示的三维边界表示模型通用形状特征识别，《先进机械工程》7 (2015) https://doi.org/10.1177/1687814015582082.[15] A. Verma、S. Rajotia，面向2.5D零件的基于提示的加工特征识别系统，《国际生产研究杂志》46 (2008) 1515-1537。https://doi.org/10.1080/00207540600919373.[16] R. Ranjan、N. Kumar、R.K. Pandey、M. Tiwari，利用二维特征模式从实体模型中自动识别加工特征，《国际先进制造技术杂志》26 (2005) 861-869。https://doi.org/10.1007/s00170-003-2059-2.[17] T. Hong、K. Lee、S. Kim，机械零件相似度比较及现有设计的再利用，《计算机辅助设计》38 (2006) 973-984。https://doi.org/10.1016/j.cad.2006.05.004.[18] R. Ohbuchi、T. Furuya，用于从部分视图三维模型检索三维模型的尺度加权稠密视觉特征袋，载于：2009年IEEE第12届计算机国际会议

视觉研讨会，ICCV研讨会，IEEE，2009，第63-70页。
https://doi.org/10.1109/ICCVW.2009.5457716.[19] Y.-J. Liu, X. Luo, A. Joneja, C.-X. Ma, X.-L. Fu, D. Song，基于用户自适应草图的三维 CAD 模型检索，《IEEE自动化科学与工程汇刊》，10 (2013) 783-795。
https://doi.org/10.1109/TASE.2012.2228481.[20] H. Sánchez-Cruz, E. Bribiesca，用于衡量形状差异度的三维对象最优变换方法，《图像与视觉计算》，21 (2003) 1027-1036。https://doi.org/10.1016/S0262-8856(03)00119-7.[21] L. Zehtaban, O. Elazhary, D. Roller，CAD模型相似性识别框架，《计算机设计与工程杂志》，3 (2016) 274-285。https://doi.org/10.1016/j.jcde.2016.04.002.[22] V. Sunil, R. Agarwal, S. Pande，采用混合式（基于图和规则）技术，从棱柱形机加工零件的边界表示CAD模型中识别交互特征的方法，《Computers in Industry》，61 (2010) 686-701。https://doi.org/10.1016/j.compind.2010.03.011.[23] L. Guo, M. Zhou, Y. Lu, T. Yang, F. Yang，一种基于规则与图的混合式三维特征识别方法，《国际计算机集成制造杂志》，34 (2021) 257-281。
https://doi.org/10.1080/0951192X.2020.1858507.[24] C. Jian, M. Li, K. Qiu, M. Zhang，一种改进的新型蝙蝠算法 STEP 设计意图特征识别方法，《未来一代计算机系统》，88 (2018) 357-362。https://doi.org/10.1016/j.future.2018.05.033.[25] D. Zhang, F. He, Z. Tu, L. Zou, Y. Chen，面向三维点云的逐点几何与语义学习网络，《集成计算机辅助工程》，27 (2020) 57-75。https://doi.org/10.3233/ICA-190608.[26] H. Lee, J. Lee, H. Kim, D. Mun，用于重建包含机械零件加工特征的三维 CAD 模型的基于深度学习的重建数据集与方法，《计算设计与工程杂志》，9 (2022) 114-127。https://doi.org/10.1093/jcde/qwab072.[27] Z. Zhang, P. Jaiswal, R. Rai, FeatureNet：基于三维卷积神经网络的加工特征识别，《计算机辅助设计》，101 (2018) 12-22。https://doi.org/10.1016/j.cad.2018.03.006.[28] P. Shi, Q. Qi, Y. Qin, P.J. Scott, X. Jiang，一种利用多剖视图表示的新型基于学习的特征识别方法，《智能制造杂志》，31 (2020) 1291-1309。https://doi.org/10.1007/s10845-020-01533-w。

[29] D. Peddireddy, X. Fu, H. Wang, B.G. Joung, V. Aggarwal, J.W. Sutherland, M.B.-G. Jun，一种基于深度学习、从CAD数据识别传统加工工艺的方法，《Procedia Manufacturing》，48 (2020) 915-925。https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.05.130.[30] C. Yeo, B.C. Kim, S. Cheon, J. Lee, D. Mun，基于深度神经网络的加工特征识别，以支持与三维CAD系统的紧密集成，《Scientific Reports》，11 (2021) 1-20。https://doi.org/10.1038/s41598-021-01313-3.[31] H. Kim, C. Yeo, I.D. Lee, D. Mun，用于工厂三维CAD模型重建的管道组件目录深度学习检索，《Computers in Industry》，123 (2020) 103320。https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103320.[32] A.R. Colligan, T.T. Robinson, D.C. Nolan, Y. Hua, W. Cao，Hierarchical CADNet：从边界表示中学习以识别加工特征，《Computer-Aided Design》，147 (2022) 103226。https://doi.org/10.1016/j.cad.2022.103226.[数据集] [33] R.T. Colligan AR, Nolan DC, Hua Y, Cao W.，MFCAD++ 数据集，2022。https://doi.org/10.17034/d1fec5a0-8c10-4630-b02e-b92dc81df823[34] P. Shi, Q. Qi, Y. Qin, P.J. Scott, X. Jiang，通过单次多框检测器进行相交加工特征定位与识别，《IEEE工业信息学汇刊》，17 (2020) 3292-3302。https://doi.org/10.1109/TII.2020.3030620.[35] S. Gerbino，CAD系统间互操作性工具，载于：第三届ADM—第十五届INGEGRAF国际会议《工程设计演进的工具与方法》论文集，2003。[36] OpenCASCADE，Open Cascade技术。http://www.opencascade.com（访问于2022年5月1日）。[37] DFMPro。HCL Technologies Ltd. https://dfmpro.com（访问于2022年5月1日）。[38] M.K. Gupta, A.K. Swain, P.K. Jain，一种用于评估具有正交特征的棱柱形零件可制造性、识别交互特征的新方法，《国际先进制造技术杂志》，105 (2019) 343-373。https://doi.org/10.1007/s00170-019-04073-7[39] J. Han, M. Pratt, W.C. Regli，基于实体模型的制造特征识别：现状报告，《IEEE机器人与自动化汇刊》，16 (2000) 782-796。https://doi.org/10.1109/70.897789[40] F. Ning, Y. Shi, M. Cai, W. Xu, X. Zhang，基于加工过程与深度学习方法的制造成本估算，《制造系统期刊》，56 (2020) 11-22。https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.04.011

[41] Q. Wang, X. Yu, 《基于本体的自动特征识别框架》, 《工业中的计算机》65 (2014) 1041-1052. https://doi.org/10.1016/j.compind.2014.04.004[42] Y. Zhang, X. Luo, B. Zhang, S. Zhang, 《加工特征自动识别的语义方法》, 《国际先进制造技术杂志》89 (2017) 417-437. https://doi.org/10.1007/s00170-016-9056-8[数据集] [43] S. Lim, C. Yeo, D. Mun, 用于基于描述符的加工特征识别的三维 CAD 模型数据集, 2022. https://www.dhmun.net/home/Research_数据。