

文章编号:1000-582X(2010)06-001-05

# 应用拓扑投影不变原理的空间图形轮廓提取方法

阎春平,王宾宾,覃斌,刘飞

(重庆大学机械传动国家重点实验室,重庆 400044)

**摘要:**根据拓扑投影不变原理,将空间图形轮廓提取问题转化到二维投影平面中进行处理,提出了一种法向量动态合成法自动确定投影平面。引入空间封闭轮廓变形参数对空间封闭轮廓的有效性进行判断,并给出了相应的计算方法,在此基础上建立了空间图形轮廓提取的数学模型,基于该模型构造了空间图形轮廓提取方法。实际应用表明该方法稳定可靠,实用性好。

**关键词:**空间图形;图形轮廓提取;矢量动态合成;computer aided design;拓扑

**中图分类号:** TP391

**文献标志码:** A

## Extraction method for spatial graph contour based on topological projection invariance principle

YAN Chun-ping, WANG Bin-bin, QIN Bin, LIU Fei

(State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

**Abstract:** According to the principle of topological projection invariance, the spatial graph contour extraction problem is processed in two-dimensional projection plane. In order to automatically determine the projection plane, a method of normal vector dynamic composition is put forward. In addition, deformation parameter is introduced to validate the effectiveness of spatial closed contour, and the corresponding calculation method is given. The mathematical model of spatial graph contour extraction is established and the extraction method based on the model is constructed. The practical application verifies the stability and practicality effectiveness of the method.

**Key words:** spatial graph; graph contour extraction; vector dynamic composition; CAD; topology

图形轮廓提取是图形处理的重要内容,其提取的封闭轮廓信息对于零件装配图绘制过程中图形自动消隐、图形特征识别和剖面区域轮廓提取等,都具有十分重要的意义<sup>[1-5]</sup>。为实现图形轮廓信息的有效提取,国内外专家学者进行了大量研究,归纳起来主要有 4 种方法:1) 基于角度判别的轮廓提取方法<sup>[6]</sup>。沿路径搜索到分支节点处,通过计算候选路径与当前路径所成角度大小进行路径选择;2) 基于拓扑映射的轮廓提取方法<sup>[7]</sup>。根据拓扑映射原理,

圆周上路径交点位置分布序与交点在射线上映射点的位置分布序具有拓扑不变性,通过比较映射点的坐标大小确定下一条路径;3) 基于矢量积的轮廓提取方法<sup>[8]</sup>。对路径进行归一化处理,将角度计算转化为向量叉乘计算,通过矢量积的比较确定下一条路径;4) 基于斜率的轮廓提取方法<sup>[9]</sup>。将角度大小问题转化为斜率大小问题,求线段中点转化为加法和移位运算来实现路径选择。上述图形轮廓提取方法利用节点的二维坐标信息进行运算,适合于求解

收稿日期:2010-01-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50975299)

作者简介:阎春平(1973-),男,重庆大学机械工程学院副教授、博士,主要从事网络化制造与制造系统工程、企业信息化等方向研究,(Tel) 13983229681;(E-mail) ycp@cqu.edu.cn。

平面图形轮廓问题, 现有研究缺乏对空间图形轮廓求解方法的描述。基于拓扑投影不变原理, 将空间图形轮廓提取问题转化到二维投影平面中进行处理, 以实现空间图形轮廓的有效提取。

## 1 空间图形拓扑投影

### 1.1 拓扑投影不变原理

图形具有几何特征和拓扑特征, 几何特征是指图形的位置、大小、朝向等性质, 拓扑特征则是指图形在发生变形时构成图形的各个点之间保持不变的性质, 如连通性、封闭性等<sup>[10-13]</sup>。连通性最终归结为节点和路径之间的连接关系, 封闭性则归结为路径沿时针走向顺序连通构造定向封闭特征, 图形的连通性和封闭性是进行图形轮廓提取的基础。

路径选择是图形轮廓提取的关键步骤, 在进行路径选择时需要计算每条候选路径的特征值, 以通过特征值比较确定路径沿时针方向的位置分布序, 从而选择目标路径<sup>[6-9]</sup>, 对于空间图形路径特征值求解缺乏统一基准, 无法根据特征值大小进行路径选择, 需要将空间视图转化为平面视图, 投影运算作为图形视图变换的重要手段, 能从图形指定关系的属性集合中选取部分属性组成同类的一个新关系, 能有效的简化图形运算<sup>[14-15]</sup>。投影形成的平面视图具有拓扑不变性, 设图形路径集合  $E(e_1, e_2, \dots, e_n)$  上的关系  $L$  是一个  $n+1$  元组,  $L = (e_1, e_2, \dots, e_n, G(L))$ , 其中  $G(L)$  是笛卡尔积  $e_1 \times \dots \times e_n$  的子集, 称为  $L$  的关系图,  $g_{i1}, g_{i2}, \dots, g_{ij} (i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, \dots, n)$  为  $G(L)$  的第  $i1, i2, \dots, ij$  个属性,  $t_{i1}, t_{i2}, \dots, t_{ij}$  为对应属性值, 设  $g_{ij}$  为路径关联关系时,  $t_{ij} \in \{0, 1\}$ , 1 表示两路径相关, 0 表示不相关,  $g_{ij}$  为几何位置关系时,  $t_{ij} \in K \{k_1, k_2, \dots, k_n\}$ ,  $K$  为路径特征值集合, 将根据特征值大小形成路径沿时针方向的位置分布序。在投影面  $R$  内,  $\text{projection}(G(L)) = G^R(L)$  表示投影形成新的关系图,  $G^R(L)$  表示新的路径关联关系图,  $t_{ij} = t_{ij}^{R-P} \in \{0, 1\}$ , 路径的关联关系与原图一致, 使得空间图形在各个投影面内所形成平面图形的连通性和封闭性保持不变;  $G^R(L)$  表示新的路径几何位置关系图,  $t_{ij} = t_{ij}^{R-T}$ , 按特征值  $t_{ij}^{R-T}$  大小形成候选路径序列  $\{e_1^i, e_2^i, \dots, e_s^i\}$ , 表示第  $i$  条初始路径对应的  $s$  条候选路径的有序集合, 集合路径排列顺序与路径选择沿时针走向依次拾取路径的顺序相符合, 使得空间图形在各个投影面内所形成平面图形的候选路径沿时针方向的位置分布序不变。空间图形投影会出现重影, 即同一  $t_{ij}^{R-T}$  在几何位置关系图  $G^R(L)$  中对应多条路径, 但其中  $t_{ij}^{R-P} = 1$  的路径只有一条, 已有路径选择方法仍然适用。由

上可知, 基于拓扑投影不变原理将空间图形轮廓提取转化到二维投影平面中进行处理, 形成二维视图的连通性、封闭性及路径时针位置分布序不变, 能有效保证提取轮廓的正确性。

### 1.2 投影面自动确定

基于拓扑投影不变原理对空间图形进行视图转换是进行空间图形轮廓提取的前提条件, 在投影面内形成的二维视图需要正确计算路径的特征值, 当某条路径垂直于投影面使路径投影聚焦为一点时, 将使路径特征值无法计算, 为避免这种情况, 提出一种法向量动态合成法自动确定空间图形轮廓提取的投影平面, 该方法利用关联路径组成平面的法向量迭代求和确定出投影平面的法向量。如图 1 所示, 建立路径矢量集合  $E(e_1, e_2, \dots, e_n)$ , 任意拾取路径矢量  $e_i (i=1, 2, \dots, n)$ , 通过关联关系图  $G_p(L)$  找到路径  $e_i$  的关联路径  $e_j^i (j=1, 2, \dots, s)$ , 两路径矢量组成平面的法向量由矢量叉乘得到  $n_k = e_i \times e_j^i (k=1, 2, \dots)$ 。拾取路径  $e_1$ , 计算法向量  $n_1 = e_1 \times e_2$ , 然后逐一拾取路径  $e_i (i=1, 2, \dots, n)$ , 作叉乘运算  $m_i = e_i \times n_1$ , 如果  $m_i$  为零向量, 则路径  $e_i$  垂直于以  $n_1$  为法向量的投影面, 将继续拾取  $e_i$  计算新的法向量  $n_{k+1} = e_i \times e_j^i, m_3 = e_3 \cdot n_1 = 0$ , 获得路径  $e_3$  的关联路径  $e_4$ , 求得  $n_2 = e_3 \times e_4$ , 计算矢量和  $n_{k+2} = n_k + n_{k+1}$ , 则  $n_3 = n_1 + n_2$ , 再次拾取路径  $e_i (i=1, 2, \dots, n)$ , 判断  $m_i = e_i \cdot n_{k+2}$  是否为零向量,  $m_i \neq 0$  则  $n_{k+2}$  为投影平面法向量, 否则找到  $m_i = 0$  的路径  $e_i$  求得  $n_{k+3}$  重复上述矢量运算, 直到没有路径矢量与法向量平行, 图中为最终投影面  $\beta$  的法向量。

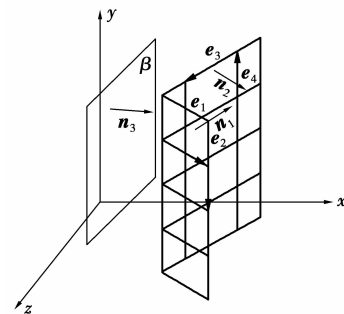


图 1 自动确定投影面

通过上述矢量动态合成可以自动确定出投影平面的法向量, 选取不同的路径可以得到不同的投影平面, 形成二维视图的拓扑投影不变性表现为: 1) 路径间的关联关系不变; 2) 路径沿时针方向的位置分布序不变。这两点保证了平面图形轮廓提取方法仍适用于空间图形投影得到的二维视图。

## 2 空间图形轮廓提取

### 2.1 空间封闭轮廓形状控制参数

空间封闭轮廓往往由多个面域组成,工程实际需要根据空间封闭轮廓的变形信息对其合法性进行判断,引入空间封闭轮廓变形参数  $k$  对空间封闭轮廓的变形程度进行度量,当  $k$  大于预设空间封闭轮廓变形阈值则认为空间封闭轮廓无效。

采用面域轮换的方法求出顶点到对应基准面的最大距离作为空间封闭轮廓变形参数值,图形  $G(T, E)$ ,  $T$  是分支节点集,  $E$  是路径集,  $P_{sd}$  表示从源节点  $s$  到目的节点  $d$  的路径组成的空间封闭轮廓集合, 设空间封闭轮廓  $p \in P_{sd}$ , 由  $m$  个面域组成, 包含  $r$  个顶点, 以面域  $A^i (i=1, 2, \dots, m)$  为基准面, 分别求出各个封闭轮廓顶点到该平面的距离  $d_j^i (j=1, 2, \dots, r)$ , 表示第  $j$  个顶点到第  $i$  个面域的距离, 每个面域可形成距离集合  $D^i (d_1^i, d_2^i, \dots, d_r^i) (i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, r)$ , 求最大距离  $d_{\max}^i = \max\{d_j^i | d_j^i \in D^i\}$ 。以此获得各个组成面域的最大距离  $d_{\max}^i$ , 形成最大距离集合  $D (d_{\max}^1, d_{\max}^2, \dots, d_{\max}^m)$ , 空间封闭轮廓变形参数  $k = \max\{d_{\max}^i | d_{\max}^i \in D\}$ , 若  $k \leq K_{\text{标}}$  则判定空间封闭轮廓  $p$  有效, 否则空间封闭轮廓  $p$  无效,  $K_{\text{标}}$  为预设空间封闭轮廓变形阈值, 面域  $A^i$  为空间封闭轮廓  $p$  变形参数极值的参考平面,  $i = \{i | d_{\max}^i = k, d_{\max}^i \in D\}$ 。图 2-(a) 中  $P(abcdefgh)$  为待识别的空间封闭轮廓, 由三个面域  $A_{abgh}$ 、 $A_{bcfg}$ 、 $A_{cdef}$  组成, 虚线  $l_{bg}$ 、 $l_{cf}$  为面域的相交线, 图 2(b)、(c)、(d) 中分别求出封闭轮廓顶点到各个面域的距离集合  $\{h_j^i\}$  ( $i=1, 2, 3, j=1, 2, 3, 4$ ), 处于面域  $A^i$  上的顶点的垂直距离  $h_j^i=0$ , 可忽略不计, 最后获得 3 个面域的最大距离  $h_{\max}^i$ , 形成集合  $D = \{h_{\max}^1, h_{\max}^2, h_{\max}^3\}$ ,  $k = \max\{h_{\max}^1, h_{\max}^2, h_{\max}^3\} = h_{\max}^1$ , 面域  $A_{abgh}$  为变形参数极值参考平面, 设  $K_{\text{标}} \geq k$  则空间封闭轮廓  $P(abcdefgh)$  有效, 向基准面  $A_{abgh}$  投影可获得投影平面轮廓  $P^T(abc_T d_T e_T f_T g_T h)$ , 即图 2(b) 中的  $P^T(abc_T d_T e_T f_T g_T h)$ 。

### 2.2 空间图形轮廓提取数学模型

基于投影形成的新的路径几何位置关系图  $G_T^R(L)$  进行路径选择, 提取空间封闭轮廓  $p \in P_{sd}$ , 构成  $p$  的路径需满足路径最短原则, 即沿顺时针(逆时针)方向搜索得到的组成封闭轮廓  $p$  的路径长度最短, 设空间封闭轮廓  $p(e_1, e_2, \dots, e_n)$  由  $n$  条路径首尾连接而成, 引入了空间封闭轮廓变形参数建立空间图形轮廓提取数学模型如下

$$\min Z = \sum_{i=1}^n l(e_i)$$

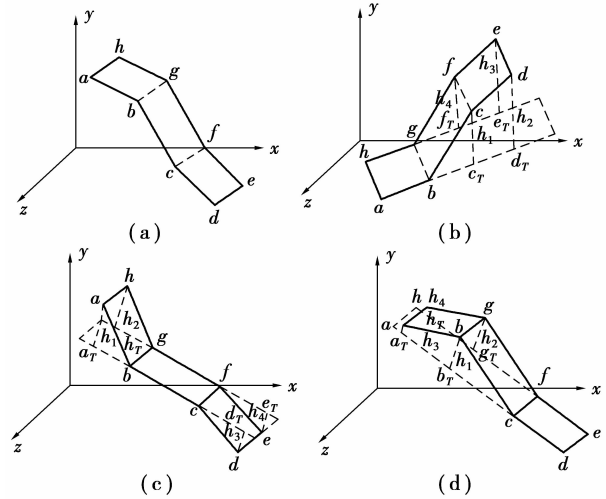


图 2 空间封闭轮廓形状控制参数计算

$$\text{s. t. } \begin{cases} \sum_{j=1}^n g_i(e_j) = 2; i = 1, 2, \dots, n, \\ j \neq i \\ \sum_{i=1}^n b(e_i) \geq 1, \\ \sum_{i=1}^n q(e_i) \geq 1, \\ k \leq K_{\text{标}}, \\ k, K_{\text{标}} \geq 0, \\ g(e_i), b(e_i), q(e_i) \in [0, 1]. \end{cases}$$

其中:

$Z$  为在源节点  $s$  到目的节点  $d$  的最短路径, 构成封闭轮廓  $p$ 。

$l(e_i)$  为路径  $e_i$  的物理长度。

$g_i(e_j)$  为路径  $e_j$  在封闭轮廓  $p$  中的关联路径属性, 自身不计算关联关系, 路径  $e_j$  与路径  $e_i$  关联则  $g_i(e_j) = 1$ , 否则  $g_i(e_j) = 0$ , 当封闭轮廓不唯一时  $\sum_{j=1}^n g_i(e_j) \geq 3$ 。

$b(e_i)$  为路径  $e_i$  在二维视图中的边界属性,  $e_i$  为边界路径时  $b(e_i) = 0$ , 否则  $b(e_i) = 1$ , 根据路径边界标志对路径进行排序, 优先沿非边界路径进行搜索, 可一次性提取出两个封闭轮廓, 比沿边界路径进行单向搜索提高效率 50% 以上, 判断  $\sum_{i=1}^n b(e_i) = 0$  可避免对边界轮廓的重复提取。

$q(e_i)$  为路径  $e_i$  的搜索标志, 初始时所有路径的搜索标志  $q_i = 1$ , 每次查找完成后动态修改搜索过的路径的搜索标志  $q_i = 0$ , 下次拾取到该路径时会自动排除, 在封闭轮廓提取的过程中, 搜索标志  $q_i = 1$  的路径会迅速减少, 能使整个搜索过程快速收敛。

$k$  为封闭轮廓  $p$  内顶点  $T_j (j=1, 2, \dots, r)$  到基准面  $A^i (i=1, 2, \dots, m)$  的最大距离。

$K_{\text{标}}$ —空间封闭轮廓变形参数阈值,若  $k > K_{\text{标}}$  则判定空间封闭轮廓  $p$  为一孔洞。

在空间图形轮廓提取过程中,在分支节点处需要根据路径特征值大小进行路径选择。为了获得完全的轮廓信息并且避免重复搜索,设置了搜索标志  $q_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ )对初始搜索路径进行控制,搜索过程中动态的修改路径搜索标志,从较少的路径出发就能提取出所有的封闭轮廓,可以提高搜索效率;每次提取的封闭轮廓都包含新的路径,保证了封闭轮廓的不重复性,同时也可以避免搜索遗漏。在路径搜索时,沿边界路径搜索容易出现边界轮廓重复提取及轮廓信息遗漏,设置了边界标志  $b_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ )对边界路径进行标识,一方面可以避免边界路径重复形成边界轮廓,另一方面通过边界标志对路径搜索顺序进行控制,以减少轮廓提取次数,提高搜索效率。

从空间图形轮廓提取数学模型可以看出,通过约束条件对路径选择提取的空间封闭轮廓进行合法性判断,保证了空间封闭轮廓的正确性。在模型具体实现中,为了减少路径选择的条件判断次数以获得较好的时效性,利用罚函数的思想将约束条件统一为一个惩罚因子  $Q$ , 设  $g = 3 - g_{\text{max}}, g_{\text{max}} = \max\left\{\sum_{j=1, j \neq i}^n g_i(e_j) \mid i=1,2,\dots,n\right\}$ , 封闭轮廓  $p$  不包含其它封闭轮廓时  $g = 1$ , 否则  $g \leq 0$ ;  $b = \max\{b(e_i) \mid i=1,2,\dots,n\}$ , 封闭轮廓  $p$  为边界轮廓时  $b = 0$ , 否则  $b = 1$ ;  $q = \max\{q(e_i) \mid i=1,2,\dots,n\}$ , 封闭轮廓  $p$  重复时  $q = 0$ , 否则  $q = 1$ ; 计算  $a = K_{\text{标}} - k, a \geq 0$  则空间封闭轮廓  $p$  有效, 置  $k = 1$ , 否则  $k = 0$ 。计算  $Q = g \cdot b \cdot q \cdot k$ , 将  $Q$  作为乘子添加到目标函数形成新的目标函数  $\min Z = \sum_{i=1}^n l(e_i) \cdot Q$ , 可知当路径合法时  $Q = 1$ , 不改变实际路径长度最小值  $Z$ , 否则  $Q \leq 0$  使路径长度  $Z \leq 0$ , 对不合法的封闭轮廓进行惩罚, 路径选择只需对  $Z$  值进行一次判断就能检验提取的空间封闭轮廓  $p$  的正确性。

### 2.3 空间图形轮廓提取方法

相对于平面图形轮廓提取,空间图形需要构造投影面以获得空间图形轮廓提取的二维视图进行路径选择,通过空间封闭轮廓变形参数对空间封闭轮廓的有效性进行判断,构造空间图形轮廓提取方法如图 3 所示。首先获得图形  $G(T, E)$ , 生成关系图  $G(L)$  对图形的几何和拓扑结构信息进行描述, 然后采用法向矢量动态合成的方法自动确定投影平面  $\beta$ , 在投影平面内获得空间图形的二维视图  $G_T(T, E)$ , 并生成新的关系图  $G_T(L)$ , 选择适当的路径选择方法进行路径选择, 搜索路径构成空间封闭轮廓  $p$ , 利用约束条件计算惩罚因子  $Q$  添加到目标函数, 检验

空间封闭轮廓的合法性, 最后获得有效空间封闭轮廓信息存入数据库, 对路径进行循环操作直到提取出完整的轮廓信息。

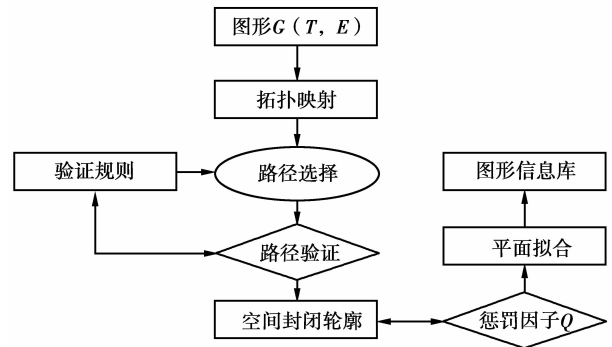


图 3 空间图形轮廓提取方法

### 3 实例验证与应用

如图 4 所示的空间旋转楼梯钢结构, 进行结构分析需要把活载荷、地震载荷等面积载荷分摊到构件或节点上, 而具体的分摊过程是基于结构的最小空间封闭轮廓按照等弯矩原则进行。通过法向矢量动态合成法获得投影平面  $\beta$ , 对空间工程矢量图形进行投影运算获得楼梯模型的二维视图, 选择拓扑映射法进行路径选择, 通过比较映射点的坐标大小循环搜索路径, 直到回到起点则提取出平面视图封闭轮廓  $p_i^T$  ( $i=1,2,\dots,25$ ), 图中用①、②、③……标示, 根据图形投影关系得到对应的空间图形封闭轮廓  $p_i$  ( $i=1,2,\dots,25$ ), 图中用数字 1、2、3……标示。对于  $p_i$  计算其顶点到相应基准面的最大距离  $d_{\text{max}}^i$ ,  $d_{\text{max}}^i$  小于预设空间封闭轮廓变形阈值  $K_{\text{标}}$  ( $K_{\text{标}}$  大于  $\max(d_{\text{max}}^i \mid i=1,2,\dots,25)$ ), 则空间封闭轮廓  $p_i$  满足变形要求, 在投影基准面内获得空间封闭轮廓  $p_i$  的投影平面轮廓  $p_i^T$ , 在  $p_i^T$  内进行面积载荷向单元载荷的分摊计算。

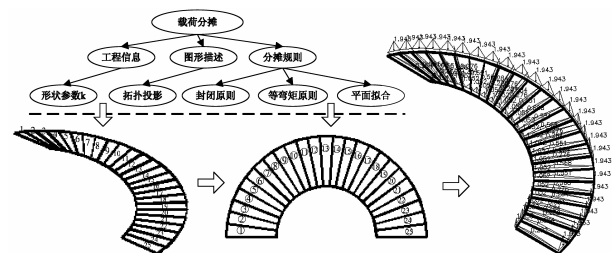


图 4 面积载荷自动分摊

基于 AutoCAD 提供的 ObjectARX 开发支持环境进行二次开发, 实现了空间工程模型面积载荷向单元载荷或节点载荷的自动转化, 目前该方法已经成功运用于建筑金属结构工程分析系统的开发中, 系统已经在几十家企业中得到推广应用。

## 4 结 论

根据拓扑投影不变原理,首先将空间图形轮廓提取问题转化到二维投影平面中进行处理;引入空间封闭轮廓变形参数对空间封闭轮廓的有效性进行判断,建立了空间图形轮廓提取数学模型;最后构造了空间图形轮廓提取方法并进行了实现,实际应用证明了该方法的有效性。与传统图形轮廓提取方法相比,所述方法在保证正确计算路径特征值的前提下,能快速确定出空间图形的投影平面,无需人工参与,且易于程序实现;空间图形轮廓提取数学模型不仅适用于求解空间图形轮廓提取,而且适用于平面图形轮廓提取。结论如下:

1)提出了一种法向向量动态合成法自动确定空间图形轮廓提取的投影平面,该方法利用关联路径组成平面的法向向量迭代求和快速确定出投影平面的法向向量,保证了路径特征值的计算正确。

2)引入空间封闭轮廓变形参数 $k$ 对空间封闭轮廓的变形程度进行度量,为其进行合法性判断提供依据。

3)在同样的提取规模下,通过设置路径的关联属性、边界属性及搜索标志,将约束条件统一为惩罚因子 $Q$ ,作为乘子添加到目标函数对最短路径长度 $Z$ 值进行惩罚,减少了路径选择的条件判断次数,提高了提取算法的效率。

### 参考文献:

- [1] HU J S, SU T M. Flexible 3D object recognition framework using 2D views via a similarity-based aspect-graph approach [J]. International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2008, 22(6):1141-1169.
- [2] BELONGIE S, MALIK J, PUZICHA J. Shape matching and object recognition using shape contexts. [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(4):509-522.
- [3] SEZGIN T M, DAVIS R. Sketch recognition in interspersed drawings using time-based graphical models[J]. Computers and Graphics, 2008, 32(5):500-510.
- [4] SEZGIN T M, DAVIS R. Sketch interpretation using multiscale models of temporal patterns[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2007, 27(1):28-37.
- [5] DING K, HE C, et al. Geometrically invariant watermarking based on gravity center [J]. IEICE Transaction on Fundamentals, 2004, E87-A(2):513-515.
- [6] 张建勋,何玉林,罗书强. 零件二维视图轮廓信息和封闭图形信息的自动提取[J]. 计算机工程与应用, 2000, 36(10):38-40.  
ZHANG JIAN-XUN, HE YU-LIN, LUO SHU-QIANG. Automatically search and pick-up information of contour and closed graph in 2D part drawing[J]. Computer Engineering and Applications, 2000, 36(10):38-40.
- [7] 张树有,谭建荣,彭群生. 基于拓扑映射的视图轮廓信息自动获取算法[J]. 中国图象图形学报, 2001, 6(10):1016-1020  
ZHANG SHU-YOU, TAN JIAN-RONG, PENG QUN-SHENG. The algorithm of automatic acquisition of view contour information based on topological mapping[J]. Journal of Image and Graphics, 2001, 6(10):1016-1020.
- [8] 张淮声,张佑生,方贤勇. 基于矢量积的二维封闭图形轮廓信息提取方法[J]. 计算机工程与应用, 2002, 38(8):93-94.  
ZHANG HUAI-SHENG, ZHANG YOU-SHENG, FANG XIAN-YONG. The method of pick-uping contour information in 2D closed graph by vector multiplication [J]. Computer Engineering and Applications, 2002, 38(8):93-94.
- [9] 林小夏,张树有. 基于中点法的复杂图形轮廓信息自组织算法研究[J]. 中国图象图形学报, 2008, 13(3):541-546  
LIN XIAO-XIA, ZHANG SHU-YOU. The Algorithm of Automatic Organization of Complex View Contour Information Based on Midpoint Method[J]. Journal of Image and Graphics, 2008, 13(3):541-546.
- [10] 胡延平,马德成等. 基于模型重建技术的图形匹配原理与方法[J]. 大连理工大学学报, 2005, 45(2):220-225.  
HU YAN-PING, MA DE-CHENG, et al. Principle and method of graphic matching based on model reconstruction [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2005, 45(2):220-225.
- [11] HUANG H C, LO S M et al. Graph theory-based approach for automatic recognition of CAD data[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2008, 21(7):1073-1079.
- [12] WANG H X, HE C, DING K. Public watermarking based on chaotic map [J]. IEICE Transaction on Fundamentals, 2004, E87-A(8):2045-2047.
- [13] 王宏霞,罗键. 基于图像连通性的自适应水印同步方案[J]. 西南交通大学学报, 2005, 40(6):720-726.  
WANG HONG-XIA, LUO JIAN. Self-adaptive Watermarking Synchronization Scheme Based on Image Connectivity [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2005, 40(6):720-726.
- [14] 何援军. 投影与任意轴侧图的生成[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17(4):729-733.  
HE YUAN-JUN. Projective transformation and generation of arbitrary axonometric drawing [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2005, 17(4):729-733.
- [15] 方贵盛,何利力,孔繁胜. 支持草绘的概念图形设计系统研究与实现[J]. 中国机械工程, 2007, 18(5):569-572.  
FANG GUI-SHENG, HE LI-LI, KONG FAN-SHENG. Research and Implementation of the Sketching Design System [J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(5):569-572.

(编辑 张小强)