

基于几何特征的曲面物体识别

程义民 丁红侠 王以孝 张海宏

(中国科学技术大学电子科学与技术系计算机视觉实验室, 合肥 230026)

摘要 基于几何特征的曲面物体识别方法是通过从景物深度图象上提取景物表面的高斯曲率和平均曲率、曲率直方图, 曲率的熵等几何信息. 将景物用一个属性关系图 ARG 来表示, 并与模型库中的模型 ARG 图进行优化匹配, 从而来识别曲面景物. 该方法主要是针对机器零部件等人造曲面物体的识别问题而设计的, 其曲面几何特征的描述方法对二阶曲面比较有效, 实验表明, 应用该方法可成功地从深度图象中识别机器零部件等曲面物体, 且有较好的识别结果. 文中所描述的曲面物体表示方法, 可进而推广到较复杂的曲面描述及较复杂的三维曲面物体的识别.

关键词 深度图象 几何信息 曲率 属性关系图 三维物体识别

中图法分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2000)07-0573-07

Curved Object Recognition Based on Geometrical Features

CHENG Yi-min, DING Hong-xia, WANG Yi-xiao, ZHANG Hai-hong

(CV Lab. Dept. of Electronic Science and Technology. USTC. China 230026)

Abstract In this paper, a method for the recognition of curved object is presented which is based on the geometrical features of object. First, geometrical information including Gaussian curvature, mean curvature, histogram of curvature, entropy of curvature, etc. is extracted from scene range image, then the scene is represented as a attribute relational graph(ARG) and is matched optimizely with model ARGs of model database. The approach is designed aiming at the recognition of artificial curved objects such as machine parts and components, etc, the curved surface represent of that curved geometrical features is efficient for second order curved surface. The method has been simulated on a PC computer (PentiumII), and have got some good results. The results indicated that curved objects(such as machine parts and comonents) could be successfully recognized from range images with this method. The represent of curved surface in this paper could be extended to the represent of more complex curved surface, and the approach could also be extended to the recognition of more complex 3D curved object.

Keywords Range image, Geometrical information, Curvature, ARG, 3D object recognition

0 引言

物体的识别一直是计算机视觉研究领域的重要课题, 其中 2D 以及 3D 多面体物体识别研究已取得了一些进展^[1-4]. 然而 3D 曲面物体的识别, 与 2D、3D 多面体识别相比, 有更多的复杂性和更强的实用性, 因而更受到研究者的重视, 已成为当前物体识别的重要研究领域之一.

一般用结构光方法, 可成功恢复 3D 曲面形状^[5], 进而可识别 3D 曲面物体, 但受工艺限制, 光

栅精度常常不能满足描述 3D 曲面的精度需要, 因此, 3D 曲面物体的识别常不能得到满意的效果.

由于高精度深度传感器的出现, 使得深度图象分析引起了科学工作者的广泛兴趣^[6]. 深度图象与灰度图象相比, 由于没有光照产生的阴影问题, 而且物体同一光滑面也没有由于不同颜色区域、材质等产生的“纹理”问题的困扰, 因此几何特征较易提取, 而且精度也高.

Chen 和 Lin 在基于 CSG (constructive solid geometry) 的三维物体识别方法中, 就提出用 PG 图(precedence graph)来表示三维物体^[3], 并成功地

应用神经网络实现了模型与深度图象中景物的匹配,进而实现三维物体的识别.但在该方法中基元的主要参量为曲面类型及大小,因而对三维曲面物体的识别具有一定的局限性.

Chelberg 等人提出用贝叶斯搜索 (Bayesian Indexing) 实现基于模型的三维物体识别^[4].该方法主要提出了 LSG (Local Surface Group) 技术,并在概率论的基础上,用贝叶斯判决准则,判定景物与哪一模型为同一类型,从而能成功地从深度图象中进行三维物体识别,但在该方法的模型库中,由于同一物体,不同的观察方向,需用不同模型描述,致使物体特征有重复,因而模型数据库较大.

本文针对人造 3D 曲面物体(如机器零部件等)的识别问题.描述了一种基于模型的识别方法,该方法的输入为景物的深度图象.景物的每一个表面由一个基于几何特性的特征矢量表示.曲面物体采用属性关系图 ARG (Attribute Relational Graph) 描述,模型用物体的一个全表面 ARG 图表示,然后经过一种优化匹配方法,来求得景物 ARG 图与模型库中的 ARG 图子图的优化匹配结果,进而识别出该景物为哪一类物体.

本文描述的方法,已在 Pentium II PC 机上进行了模拟,并得到了较好的识别结果.

1 系统概述

图 1 给出了该系统的主要流程框图,它包括图象预处理、区域分割、曲面特征计算、属性关系图 ARG 的生成及匹配识别等.

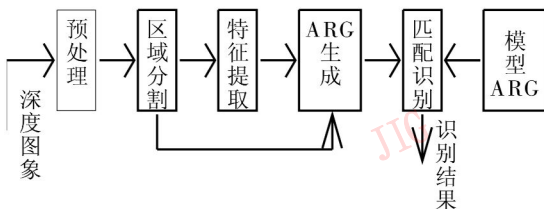


图 1 系统流程框图

其中,图象预处理主要对景物的深度图象,先进行滤波等预处理,以清除噪声对特征抽取的影响;然后再通过归一化,以满足景物表示及识别时对景物比例的要求.而区域分割,则首先进行边界检测,以求出景物可见表面的边界形状,再对各面进行标号,最后得到景物表面的标号图象.

在该标号图象中,景物表面的同一个面,即为标号相同的区域,而该区域则对应于深度图象中的一

个有限曲面(平面可看成一特殊曲面).在分割完成后,可由相应的深度数据,来计算该有限曲面的几何特征矢量.然后根据这些特征矢量来进行识别,由于景物放置位置千变万化,其几何特征矢量也多种多样,为了识别任意位置放置的景物,因此这些特征应选择物体的固有特征及对坐标选择不敏感的特征.上述系统选用的是高斯曲率、平均曲率及最大主曲率、最小主曲率的平均值、高斯曲率和平均曲率的直方图、高斯曲率和平均曲率的熵、区域的脐点分布信息及区域边界信息等 10 种特征作为该有限曲面形状几何特征的描述.

曲面物体景物的结构和形状,可由一属性关系图 ARG 来描述. ARG 由区域分割的标号图象及区域特征的计算结果产生. ARG 是一个图,其结点表示物体表面的面,各面之间的相邻关系用一条边来表示,其中每一个结点的属性对应于景物有限曲面的 10 种特征.

景物曲面的识别过程是一个优化匹配的过程,即求得与景物 ARG 图最佳匹配的模型 ARG 图,且当匹配误差足够小时,则可判决该景物为模型库中的哪类物体.

2 曲面特征及其计算

由微分几何可知,空间曲面上任一点的曲率,是曲面的固有特征,它不随曲面的位置、方向变化而变化,也与曲线的参数化方法无关^[7],因此,以曲面上各点的曲率及曲率分布为主的特征,不随曲面位置、方向变化而变化.

2.1 曲面曲率的计算

在 3D 空间中,一个离散参数曲面可表示为

$$\mathbf{X}(u, v) = [u \quad v \quad f(u, v)]^T$$

$$u = 1, \dots, m; v = 1, \dots, n \quad (1)$$

$U-V$ 平面可看成 3D 空间的参考平面,这时 $f(u, v)$ 表示离散曲面到参数平面点 (u, v) 的距离. T 表示转置. $\mathbf{X}(u, v)$ 可表示为两种基本形式,其中,第一种基本形式表示曲面的内在性质^[7]

$$I(du, dv) = d\mathbf{X} \cdot d\mathbf{X}$$

$$= (\mathbf{X}_u du + \mathbf{X}_v dv) \cdot (\mathbf{X}_u du + \mathbf{X}_v dv) \quad (2)$$

$$= E du^2 + 2F dudv + G dv^2$$

式中, E, F, G 为第一种基本形式参数,并且

$$E = \mathbf{X}_u \cdot \mathbf{X}_u, F = \mathbf{X}_u \cdot \mathbf{X}_v, G = \mathbf{X}_v \cdot \mathbf{X}_v \quad (3)$$

式中, \mathbf{X}_u 是 \mathbf{X} 对 u 的偏微商(其余类同),见式(8).

第二种基本形式表示曲面的外在性质^[7]

$$II (du, dv) = - dX \cdot dn$$

由于 n 与 X_u, X_v 均正交, 即 $n \cdot dX = 0$ ^[6]

故, $d(n \cdot dX) = dn \cdot dX + n \cdot d(dX) = 0$

$$\begin{aligned} \text{即, } -dX \cdot dn &= (X_{uu}du^2 + 2X_{uv}dudv + X_{vv}dv^2) \cdot n \\ &= Ldu^2 + 2Mdudv + Ndv^2 \end{aligned} \quad (4)$$

其中, X_{uu} 是 X 对 u 的二阶偏微商(其余类同), L, M, N 为第二种基本形式参数, n 为表面单位 $X(u, v)$ 的单位法矢, 并且有

$$\begin{aligned} L &= X_{uu} \cdot n, \quad M = X_{uv} \cdot n, \quad N = X_{vv} \cdot n \\ n &= \frac{X_u \times X_v}{|X_u \times X_v|} \end{aligned} \quad (5)$$

由此可见, 由 E, F, G, L, M, N 等 6 个参数唯一确定了曲面的两种基本形式, 而高斯曲率 K , 平均曲率 H , 以及主曲率 k_1, k_2 也可用这些参数表示^[6]

$$K = \frac{LN - M^2}{EG - F^2}, \quad H = \frac{EN + GL - 2FM}{2(EG - F^2)} \quad (6)$$

$$k_1 = H + \sqrt{H^2 - K}, \quad k_2 = H - \sqrt{H^2 - K} \quad (7)$$

因而高斯曲率 K 和平均曲率 H , 以及最大、最小主曲率 k_1, k_2 也就包含了曲面的形状信息。

为了方便, 用 f 表示 $f(u, v)$, 用 X 表示 $X(u, v)$, 则参数曲面 X 的一阶和二阶微商可分别表示为

$$\begin{cases} X_u = [1 \ 0 \ f_u]^T, & X_v = [0 \ 1 \ f_v]^T, \\ X_{uu} = [0 \ 0 \ f_{uu}]^T, & X_{vv} = [0 \ 0 \ f_{vv}]^T, \\ X_{uv} = [0 \ 0 \ f_{uv}]^T \end{cases} \quad (8)$$

其中, $f_u = \frac{\partial f}{\partial u}, f_v = \frac{\partial f}{\partial v}, f_{uu} = \frac{\partial^2 f}{\partial u^2}, f_{vv} = \frac{\partial^2 f}{\partial v^2}, f_{uv} = f_{vu} = \frac{\partial^2 f}{\partial u \partial v}$ 则分别是曲面函数 f 的一阶和二阶微商. 而高斯曲率 K 和平均曲率 H , 以及最大主曲率 k_1 和最小主曲率 k_2 可由曲面函数的微商表示为

$$K = \frac{f_{uv}f_{vv} - f_{uv}^2}{(1 + f_u^2 + f_v^2)^2} \quad (9)$$

$$H = \frac{1(1 + f_v^2)f_{uu} + (1 + f_u^2)f_{vv} - 2f_u f_v f_{uv}}{2(1 + f_u^2 + f_v^2)^{3/2}} \quad (10)$$

$$k_1 = H + \sqrt{H^2 - K}, \quad k_2 = H - \sqrt{H^2 - K} \quad (11)$$

对于数字深度图象表面, 采用局部多项式拟合的方法求其微商值的近似值, 常选 $n \times n$ 子图象, 用 $n \times n$ 算子与原深度图象进行卷积实现。

$$\begin{cases} f_u = D_u * f \\ f_{uu} = D_{uu} * f \\ f_{uv} = D_{uv} * f \\ f_{vv} = D_{vv} * f \\ f_v = D_v * f \end{cases} \quad (12)$$

其中, $D_u, D_v, D_{uu}, D_{vv}, D_{uv}$ 为 $n \times n$ 算子。

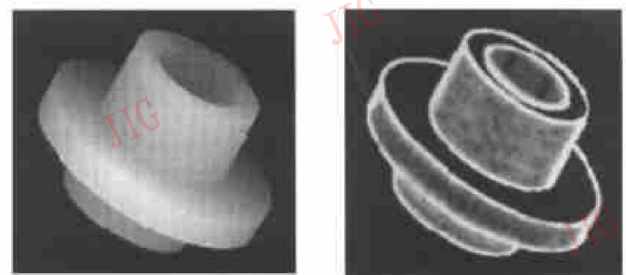
当 $n = 7$ 时, 可推出^[8]

$$\begin{cases} D_u = d_0 d_1^T \\ D_v = d_1 d_0^T \\ D_{uu} = d_0 d_2^T \\ D_{vv} = d_2 d_0^T \\ D_{uv} = d_1 d_1^T \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} d_0 = \frac{1}{7}[1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]^T, \\ d_1 = \frac{1}{28}[-3 \ -2 \ -1 \ 0 \ 1 \ 2 \ 3]^T, \\ d_2 = \frac{1}{84}[5 \ 0 \ -3 \ -4 \ -3 \ 0 \ 5]^T \end{cases} \quad (14)$$

式中, d_0, d_1, d_2 是计算微商窗口算子的列矢量。

将按上式求出的微商值代入式(9)和式(10), 即可求出 K, H, k_1, k_2 , 从而可得到景物的曲率图象. 图 2 给出了一个景物的原始深度图象及相应的高斯曲率(K)图象及平均曲率(H)图象。



(a) 原始深度图象 (b) 高斯曲率图象



(c) 平均曲率图象

图 2

2.2 曲面特征值计算

区域分割得到的标号图象, 每一标号图象区域对应景物表面的一个面, 该面可由根据原始深度数据计算出的高斯曲率 K 的平均值 K 、平均曲率 H 的平均值 H 、最大主曲率的平均值 k_1 、最小主曲率的平均值 k_2 、高斯曲率的直方图 h_k 、平均曲率的直方图 h_H 、高斯曲率的熵 P_K 、平均曲率的熵 P_H 、有限曲面内的脐点分布、区域边界的形状特征信息等表征。

(1) 曲率平均值

曲面曲率的平均值表达了光滑物体表面曲率大小的均衡水平,并且在某种程度上可以反映不同曲面的特征.如,对于两个近似光滑的圆柱面,其平均曲率平均值 H 的大小与半径成反比.类似地,高斯曲率平均值 K 、最大主曲率平均值 k_1 、最小主曲率平均值 k_2 也都反映了物体曲面的某些形状特征.这些曲率平均值可用下式计算

$$\begin{aligned}
K &= \frac{\sum_{i=1}^N K_i}{N}, & H &= \frac{\sum_{i=1}^N H_i}{N}, \\
k_1 &= \frac{\sum_{i=1}^N k_{1i}}{N}, & k_2 &= \frac{\sum_{i=1}^N k_{2i}}{N}
\end{aligned}
\tag{15}$$

其中, N 为该标号图象区域总的象点数.

(2) 曲率直方图

平均曲率虽可在一定程度上反映有限曲面总的形状特征,但为了更进一步描述该曲面特征,可用曲率直方图,进一步得到该有限曲面内曲率分布的统计特征.

设区域中的最大曲率为 C_{max} , 最小曲率为 C_{min} , ΔC 为统一的曲率量化间隔, $N_c(i)$ 为区域中曲率在 $i + \frac{1}{2}\Delta C$ 区间内的象点总数,若 N 为区域中的象点总数, α 为归一化常数,则曲率直方图可表示为

$$\begin{aligned}
h(i) &= \frac{N_c(i)\alpha}{N} \quad i = A, \dots, B, \\
A &= \text{INT} \left\lfloor \frac{C_{min}}{\Delta C} \right\rfloor, \quad B = \text{INT} \left\lfloor \frac{C_{max}}{\Delta C} \right\rfloor
\end{aligned}
\tag{16}$$

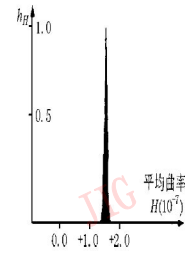
为了使曲率直方图更好地反映区域内曲率的分布,在求曲率直方图前,需对图象进行去噪处理.

图3给出了图2景物的3个不同面的平均曲率直方图.

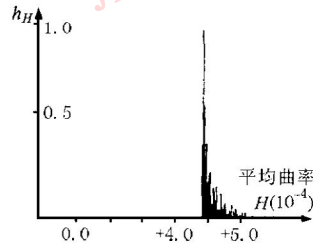
(3) 区域内曲率分布的熵

由于不同的光滑有限曲面,其曲率大小的分布不同,因此其曲面的复杂度也不同.若这种曲率大小及分布越复杂,则其中包含的信息就越多,反之亦然.如,球面与波浪形表面,由于球面上的高斯曲率和平均曲率呈等值分布,因此其分布及变化复杂度比波浪形曲面小,因而所包含的“信息”也少.这种有限曲面曲率分布及变化的复杂性,可用熵来表示.由熵的定义知:

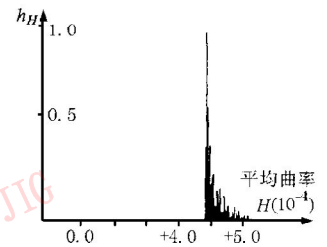
在有限曲面曲率值集合中,曲率值为 i 的个数为 $N(i)$, $i = 0, \dots, l-1$, p_i 表示 i 曲率值出现的概率,



(a) 景物顶部环形平面



(b) 景物顶部环形内凹柱面



(c) 景物上半部凸形圆柱面

图3 图2景物3个不同面的平均曲率直方图

$$p_i = \frac{N(i)}{\sum_{i=0}^{l-1} N(i)}
\tag{17}$$

则该有限曲面曲率的熵为

$$P(t) = - \sum_{i=0}^l p_i \ln p_i
\tag{18}$$

其中, l 是一个常数,可取所有面曲率的最大值,常由实验确定.

(4) 脐点分布

由微分几何可知,当曲面中存在脐点时,则在脐点位置 (u, v) 附近有

$$\begin{aligned}
Z(u, v) &= \kappa(u^2 + v^2) + au^2v + \\
&\quad buv^2 + cu^3 + dv^3
\end{aligned}
\tag{19}$$

$U-V$ 为 3D 空间参考平面(同式(1)), a, b, c, d 为立方近似系数.

可用下式判断脐点的类型

$$D(a, b, c, d) = a^2 + b^2 - 3(ac - bd)
\tag{20}$$

若 $D > 0$, 则为一般星型脐点;若 $D < 0$, 则为柠檬型脐点或单星型脐点;若 $D = 0$, 则为非一般脐点.由此可见,可用脐点类型及相应拓扑关系作为表征曲面的一个特征.

(5) 有限曲面的边界特征

景物表面各个面的边界在标号图象中是一闭合曲线,该闭合曲线的形状特征是该面的重要特征.为了识别不同方向、不同位置放置的景物,该闭合曲线的特征应选择对观察方向不敏感的特征,如可选区域封闭边界的顶点个数、类型及排列顺序等作为边界特征.

3 物体的表示

区域分割得到的标号图象, 若每一标号图象区域用一结点表示, 在相邻区域对应的结点间加一条连接边, 则该标号图象可用一个图来表示. 再将与每个结点所对应有限曲面的特征赋予相应结点, 则景物可用一个属性关系 ARG 图 G 来表示, 即 $G = \{V, A\}$, 其中, $V = \{V(i) \mid 1 \leq i \leq N\}$, 是 N 个属性结点的集合, 对于任一结点 i , 有

$$V(i) = \{V^k(i) \mid 1 \leq k \leq K_1\},$$

若曲面 i 所对应的结点属性为 $k \in \{1, 2, \dots, K_1\}$, 则其属性关系为 $V^k(i)$. 对应前述曲面的 10 个特征, 则 $K_1 = 10$, 且 $V^1(i) = K(i)$ 、 $V^2(i) = H(i)$ 、 $V^3(i) = \bar{k}1(i)$ 、 $V^4(i) = \bar{k}2(i)$ 分别为第 i 个曲面的高斯曲率平均值、平均曲率平均值、最大主曲率平均值和最小主曲率平均值; $V^5(i) = P_K(i)$ 、 $V^6(i) = P_H(i)$ 分别为曲面 i 的高斯曲率的熵和平均曲率的熵; $V^7(i) = h_K(i)$ 、 $V^8(i) = h_H(i)$ 分别为第 i 个曲面的高斯曲率直方图、平均曲率直方图; $V^9(i) = X(i)$ 为第 i 个曲面内的脐点分布; $X(i) = \{U_1(i), U_2(i), U_3(i)\}$, 其中 $U_1(i)$ 、 $U_2(i)$ 、 $U_3(i)$ 分别是第 i 个曲面内的星型脐点、柠檬型或单星型脐点和非一般脐点的个数; $V^{10}(i) = Y(i)$ 为第 i 个曲面区域边界的顶点类型序列.

$A = \{A(i, j) \mid 1 \leq i, j \leq m\}$, 则是这些结点之间关系的集合, 对于一对结点 i 与 j , 其 $A(i, j) = \{A^k(i, j) \mid 1 \leq k \leq K_2\}$, 则表示 i 与 j 两面之间的二元属性, 其中 $k \in \{1, 2, \dots, K_2\}$, 其属性关系为 $A^k(i, j)$. 若只用相邻关系, 则 $K_2 = 1$ 、 $A^1(i, j) = 1$ 则表示与结点 i 对应的曲面和与结点 j 对应的曲面相邻, 否则, $A^1(i, j) = 0$.

4 物体的识别

物体识别主要分为建模和识别两个过程. 而建模过程和识别过程类似, 所不同的是, 建模过程最后是生成物体的全表面 ARG 图. 这样, 识别过程就是景物的 ARG 图与模型的全表面 ARG 图匹配的过程. 由于观察方向的不同, 景物 ARG 图中只包括一部分可见面, 因此需求景物 ARG 图与模型的全表面 ARG 图子图的最佳匹配; 对于那些只能部分观察到的景物面, 则必须求相应结点属性的局域匹配.

识别的具体过程为: 若景物 ARG 图中结点集合为 $S: \{s_j, j = 1, 2, \dots, N_1\}$, 某一模型 ARG 图中结点集合为 $M: \{m_i, i = 1, 2, \dots, N_2\}$, 则从 s_1 开始, 在集合 M 中寻找候选匹配结点, 以生成候选匹配对. 其匹配步骤为

(1) 对景物结点 s_j , 计算其与模型结点集合 M 中每一结点 $m_i, \forall i$, 间的一元误差 E_{1j}

$$E_{1j} = a(\bar{K}_{s_j} - \bar{K}_{m_i})^2 - b(\bar{H}_{s_j} - \bar{H}_{m_i})^2 + c(\bar{k}1_{s_j} - \bar{k}1_{m_i})^2 + d(\bar{k}2_{s_j} - \bar{k}2_{m_i})^2 + e(P_{K_{s_j}} - P_{K_{m_i}})^2 + f(P_{H_{s_j}} - P_{H_{m_i}})^2 + g\epsilon_K + s\epsilon_H + tR_1(X_{s_j}, X_{m_i}) + rR_2(Y_{s_j}, r_{m_i}) \quad (21)$$

式中, \bar{K}_{s_j} 、 \bar{K}_{m_i} 、 \bar{H}_{s_j} 、 \bar{H}_{m_i} 、 $\bar{k}1_{s_j}$ 、 $\bar{k}2_{s_j}$ 、 $\bar{k}2_{m_i}$ 分别是景物结点 s_j 与模型结点的高斯曲率平均值、平均曲率平均值、最大主曲率平均值、最小主曲率平均值; $P_{K_{s_j}}$ 、 $P_{K_{m_i}}$ 、 $P_{H_{s_j}}$ 、 $P_{H_{m_i}}$ 分别是景物结点 s_j 与模型结点 m_i 的高斯曲率的熵和平均曲率的熵; ϵ_K 、 ϵ_H 分别是景物结点 s_j 与模型结点 m_i 的高斯曲率直方图、平均曲率直方图的匹配误差. $R_i(\cdot)$, ($i = 1, 2$) 为一一致性检测函数, 值在 0~1 之间.

结点间高斯曲率直方图与平均曲率直方图的匹配方法类似, 即曲率直方图匹配是在包含两个曲面所有曲率的区间 $[A, B]$ 上进行, 其匹配误差为

$$\epsilon = \sum_{v=A}^B (h_1(v) - h_2(v))^2 \quad (22)$$

取 $E_{1j} \leq T_1$ 的匹配点生成候选匹配对的集合 $MH_j = \{(s_j, m_l), (s_j, m_m) \dots\}$. 然后将集合中的候选匹配对, 按误差值 E_{1j} 从小到大排列.

(2) 检查集合 MH_j 中, 每一候选匹配对与前面 $MH_{1 \sim j-1}$ 集合中匹配对的相容性, 即计算

$$E_{2j} = \sum_{L=1}^{j-1} B[A_s(j, L), A_m(j', L')] \quad (23)$$

其中, $A_s(j, L)$ 为景物中第 j 个结点与第 L 个结点的二元属性关系, $A_m(j', L')$ 是 MH_j 中, 任一 s_j 的候选匹配点 m_j 与前面 $MH_{1 \sim j-1}$ 集合中 s_L ($L = 1, \dots, j = 1$) 的任一候选匹配点 $m_{L'}$ 之间的二元属性关系. $B(\cdot)$ 为布尔函数, 即当两个二元属性关系一致时, 其值为 1, 否则为零.

接着, 在 MH_j 中, 删除那些二元属性关系不一致的点对. 若经过这样筛选后, 集合 MH_j 为空, 则 s_j 的匹配点为空结点.

(3) 按上述方法进行匹配, 直到每一个景物结点都匹配完毕, 则可得到候选匹配点对集合 MH_1 ,

MH_2, \dots, MH_{N_1} .

(4) 检查 $MH_1, MH_2, \dots, MH_{N_1}$, 若每个集合 MH_j 均为空或只有一对匹配点, 则可求出该景物与该模型的匹配误差

$$E = \sum_{j=1}^{N_1} (E_{1j} + E_{2j}^{-1}) \quad (24)$$

否则, 按步骤(2)中的方法反复检查 $MH_1, MH_2, \dots, MH_{N_1}$ 中任两景物点对与相应候选模型点对的一致性, 删除不一致的点对, 直到收敛. 如果不能收敛到每一集合 MH_j 中匹配点对为 1 或空, 则取所有可能匹配的最小匹配误差(式(24))为该景物与该模型的匹配误差.

这时, 即完成了该景物 ARG 图与一个模型 ARG 图的匹配, 并得到二者的匹配误差 E .

(5) 若模型库中有 M_B 个模型, 可按步骤(1)~(4), 求出该景物与每一个模型的匹配误差, E_1, E_2, \dots, E_{M_B} , 再求最小匹配误差 E_K

$$E_K = \min(E_i), \quad i = 1, 2, \dots, M_B \quad (25)$$

且当 $E_K < T_3$ 时, 则可判定, 景物 S 为 K 与对应的模型为同一类物体.

5 实验结果

为了验证本文所述方法的效果, 在一台 Pentium II PC 机上对上述方法进行了模拟. 原始

深度图象是取自 MSU/WFU 模型库中的 7 类物体: adapter(T 型连接件), cap(活塞), column1(柱台), agpart2(管接头件), bigwye(Y 型连接件), ball2(球), halfsph(半球). 每个物体取 5 幅不同观察方向、不同视点的深度图象, 共计 35 幅原始深度图象, 每幅深度图象为 240×240 象素大小, 64bit 灰度级的图象.

然后用每个物体的 4 幅不同方向的深度图象来建模, 以生成 7 个模型全表面 ARG 图及相关参数, 另一幅图象则作为测试用的景物深度图象. 图 4 给出了 bigwye 识别过程中的部分结果, 其中, 图 4(a) 为 bigwye 原始深度图象; 图 4(b) 为图 4(a) 的高斯曲率图象; 图 4(c) 为图 4(a) 的平均曲率图象; 图 4(d) 为图 4(a) 中第 4 面的高斯曲率直方图; 图 4(e) 为图 4(a) 中第 4 面的平均曲率直方图; 图 4(f) 为图 4(a) 第 5 面的高斯曲率直方图; 图 4(g) 为图 4(a) 中第 5 面的平均曲率的直方图; 图 4(h) 为图 4(a) 中景物各个面的属性关系图.

表 1 给出了图 4 景物 ARG 图中各结点的主要特征值. 表 2 给出了图 4 景物 ARG 图与模型库中 7 个模型匹配的中匹配误差. 从表 2 匹配误差可判定图 4 中景物是 bigwye(匹配误差最小).

我们还对另外的测试景物作了实验, 实验结果表明, 该方法对机器零部件等人造物体有较好的识别效果.

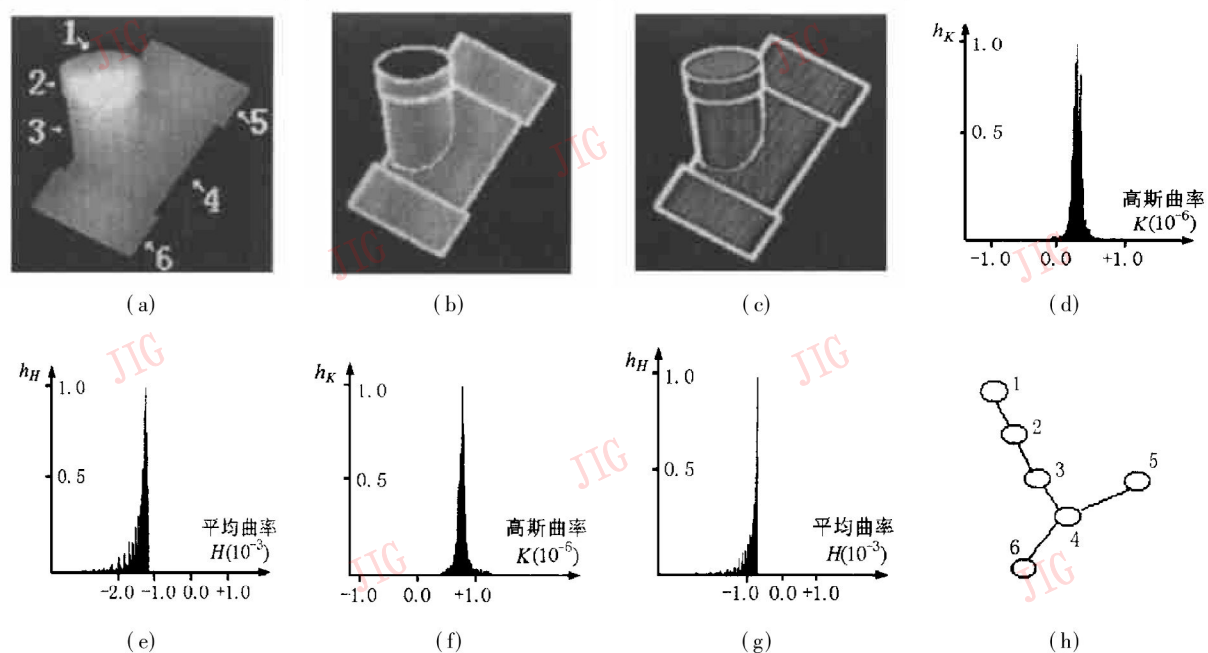


图 4 bigwye 的识别过程

表1 图4中景物ARG图各个结点主要特征列表

结点	K	H	k_1	k_2	P_K	P_H
1	3.44e-007	-7.63e-004	-1.43e-003	-9.78e-005	1.73e+000	1.48e-002
2	9.07e-008	-1.61e-004	-2.95e-004	-2.75e-004	7.34e-001	4.12e-001
3	6.77e-007	-1.06e-003	-1.92e-003	-2.08e-004	1.48e+000	1.75e+000
4	3.12e-008	-7.60e-004	-1.51e-003	6.57e-006	1.67e+000	1.68e-001
5	-8.67e-009	-9.78e-004	-1.96e-003	4.24e-006	1.45e+000	2.51e-001
6	2.74e-007	-8.20e-004	-1.54e-003	-9.89e-005	1.65e+000	1.54e+000

表2 图4(h)与各个模型的匹配误差

匹配模型	T型连接件	活塞	柱台	管接头件	Y型连接件	球	半球
匹配误差	0.0367	0.0314	0.0551	0.0389	0.00119	0.0419	0.0371

6 结论

本文描述了一种从曲面景物深度图象中提取景物表面几何特征,进而识别该景物的方法.曲面景物用一个属性关系图ARG表示.

景物ARG图中的一个结点对应景物表面的一个面,该结点的属性为与该面对应的有限曲面的高斯曲率(K)的平均值、平均曲率(H)的平均值、最大主曲率(k_1)的平均值;最小主曲率(k_2)平均值及熵等几何特征.ARG图的结构表示了景物表面各个面之间的拓扑关系.

上述方法已在PC机上进行了模拟,结果表明,曲面景物用ARG图及以曲率等几何特征表示的其结点属性来描述是有效的;该描述方法较适合于基于模型的景物识别方法,且有较好的识别结果.模拟程序运行稳定可靠,实验的重复性较好.

该方法主要针对人造物体(如机器零、部件等)设计的,因而对二阶曲面物体比较有效,且能得到较好的识别结果.该方法也可作为高阶曲面物体识别的参考,进而可推广到更复杂曲面物体的识别研究.

参考文献

- 1 D A Mitzas, B G Martzios. Recognition with neural classifier based on a fast polygon approximation technique. *Pattern Recognition*, 1994, 27(5): 627.
- 2 Yimin Cheng, Yixiao Wang, Zonghui Zhang *et al.* Recognition of partially occluded objects using neural networks. In: ACCV'95 Second Asian Conference on Computer Vision, Singapore. December, 1995, 5~ 8.
- 3 Tsu-Wang Chen, Wei-Chung Lin. A neural network approach to CSG-Based 3-D object recognition. *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, 1994, 10(7): 719~ 725.
- 4 David M Chelberg. Model-Based 3D object recognition using bayesian indexing. *Computer Vision and Machine Understanding*, 1998, 69(1): 87~ 105.
- 5 Cheng Yimin, Cui Chen. The reconstruction of 3D curved

surface. In: *Proceedings Intern. AMSE Conference Modelling, Simulation & Control Anhui Hefei*, USTC Press, 1992, 4: 2220~ 2229.

- 6 孙龙祥,程义民,王以孝,孙启林等编著.深度图象分析.北京:电子工业出版社,1996.
- 7 王申怀,刘继志等编著.微分几何.北京:北京师范大学出版社,1990.
- 8 Paul J Besl, Ramesh C Jain. Segmentation through variable-order surface fitting. *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, 1988, 10(2): 167~ 192.
- 9 吴伯修等编著.信息论与编码.北京:电子工业出版社,1987.
- 10 Martial Hebert, Katsushi Ikeuchi, Herve Delingette. A Spherical Representation for Recognition of Free-Form Surfaces. *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.* 1995, 17(7): 681~ 690.
- 11 Bikash Sabata. Surface correspondence and motion computation from a pair of range images. *Computer Vision and Machine Understanding*, 1996, 63(2): 232~ 250.



程义民 1969年毕业于中国科学技术大学无线电系计算机专业.现为中国科学技术大学电子科学与技术系教授,目前感兴趣的领域为立体视觉、纹理分析、医学图象分析、深度图象分析、视频图象传输及多媒体技术等.已在国内外发表有关学术论文40余篇,出版专著2部.



丁红侠 1995年获安徽大学电子工程系学士学位,1999年获中国科学技术大学电子科学与技术专业硕士学位.现在上海贝尔公司工作.感兴趣领域为深度图象分析、模式识别、通信技术等.

王以孝 1970年毕业于中国科学技术大学无线电系,现为中国科学技术大学电子科学与技术系副教授.感兴趣领域为医学图象分析、深度图象分析、视频图象传输及通信技术等.

张海宏 1993年毕业于,获合肥工业大学计算机系学士学位,1997年起在中国科学技术大学电子科学与技术系攻读硕士学位.感兴趣领域为计算机视觉、图象处理、信号分析等.