

三维表面的曲面描述与相似性判别

柳葆芳 肖菁 平西建 邵美珍

(郑州信息工程大学信息技术学院信息科学系, 郑州 450002)

摘要 针对三维物体表面的描述和识别问题,从描述三维表面变化的基本参数——法向量出发,以法向量累积分布曲线 NVDC 为不变量,对比较光滑的三维曲面,给出了一种描述形状的方法和相似性判别准则,并依法向量的方向角将三维空间分割成子空间,然后统计落入每个子空间的法向量个数,以得到法向量的分布,再将其排序后,即得到法向量累积分布曲线 NVDC。由于与不同的法向量累积分布曲线对应的三维曲面也是不同的,所以采用 NVDC 之间的差异为相似性判别准则,对不同三维曲面进行了一对一的相似性判别。为检验该方法的效果,还对平底表面进行了实验,结果表明,该曲面描述方法与相似性判别准则是有效的。

关键词 计算机视觉 法向量 法向量累积分布曲线 深度数据

中图法分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2001)02-0199-05

The Representation and Comparability Determination of Three-Dimensional Surface

LIU Bao-fang, XIAO Jing, PING Xi-jian, SHAO Mei-zhen

(Zhengzhou Information Engineering University Information Technology Institute
Information Science Department Zhengzhou, Zhengzhou 450002)

Abstract This paper proposes a method of representation and comparability determination of the surface. The method is based on the geometric feature of three-dimensional surface. It calculates the normal vector of the points on the surface. The method segments the three-dimensional space into subspaces according to the direction angle of normal vectors and counts the number of normal vectors belonging to the three-dimensional subspace. Then the distribution of normal vectors of three-dimensional surface can be obtained. And it uses the distribution of normal vectors to represent three-dimensional surface. At last the method uses the difference between two normal vector cumulative distributing curves—NVDCs to determine the comparability of two three-dimensional surfaces. The method proposed in this paper is not sensitive to small changes of the datum plane. Experimental results show that the method is valid in the representation and comparability determination of three-dimensional surfaces.

Keywords Computer vision, Normal vector, Normal vector cumulative distributing curve, Range data

0 引言

三维物体表面的描述和识别是计算机视觉^[1,2] (Computer Vision)、人工智能(Artificial Intelligence)、虚拟现实(Virtual Reality)等前沿领域的一个热点和难点。由于自然界大多数物体表面形状复杂,难以用合适的曲面方程来描述,因此如何选择适当的描述方法是后继工作的关键。为了能够简单有效地识别

三维表面,人们常采用对三维物体(或三维表面)进行处理来提取某些特征的方法。在这方面有很多算法,如用超二次曲面来描述和识别曲面的方法和基于曲线形状分析的三维表面识别方法^[5],虽然前一种方法具有整体描述性好和识别简单等突出优点,但由于超二次曲面的对称性^[3,4],致使在对自然界中的不规则物体进行描述和识别时有一定的困难;而后一种方法虽可以将三维的描述和识别问题转化为二维曲线形状的描述和识别问题,但是这种方法

在实际应用中却受到一定的限制,因为物体深度数据获取时,必须有一致的基准面,如果物体所处的基准面发生旋转,则识别结果很可能会差别很大,但对于刚性物体,其表面法向量反映了表面的局部变化,而且不论该物体旋转,还是平移,其法向量的某种分布关系将是不变的,因此本文从描述三维物体表面变化的基本参数——法向量出发,以法向量累积分布曲线——NVDC(Normal Vector Cumulative Distributing Curve)为不变量,对比较光滑的三维曲面,给出了一种描述形状的方法和相似性判别准则。

1 三维曲面的法向量累积分布曲线

1.1 曲面的法向量

设曲面 $S:r(u, v)=(x(u, v), y(u, v), z(u, v))$, $(u, v) \in G, P_0$ 为 S 上一点; $r_u|_{u=u_0, v=v_0}$ 和 $r_v|_{u=u_0, v=v_0}$ 分别为过 P_0 点的 u 曲线和 v 曲线的切向量,那么,曲面 S 在 P_0 点的单位法向量 n 为

$$n = \frac{r_u \times r_v}{|r_u \times r_v|} \quad (1)$$

式(1)是在曲面 S 的参数方程已知的情况下,求解法向量的公式。

由于人们感兴趣的是法向量的方向,设得到的单位法向量 $n=(n_x, n_y, n_z)$,则 n 与 x, y, z 轴的夹角 α, β, γ 称为法向量 n 的方向角,可由下式求得

$$\begin{aligned} \alpha &= \arccos \frac{n_x}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2}} \\ \beta &= \arccos \frac{n_y}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2}} \\ \gamma &= \arccos \frac{n_z}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2}} \end{aligned} \quad (2)$$

1.2 曲面的法向量累积分布曲线

为了描述法向量的分布,先将三维空间进行角度分割。这里法向量的方向角 α, β 的取值范围是 $[0^\circ, 180^\circ], \gamma$ 的取值范围是 $[0^\circ, 90^\circ]$ 。假设角度分割的基本单元是 $\Delta(0 < \Delta \leq 180^\circ, \Delta \in Z)$,则 α, β, γ 各有 $180/\Delta, 180/\Delta, 90/\Delta$ 等分,这样,半个三维空间就有 $N=(180/\Delta) \times (180/\Delta) \times (90/\Delta)$ 份。这里, Δ 的大小表示了分割的疏密程度。如果将每一份看成是三维空间的一个子空间,则可将半个三维空间分成 N 个子空间。其实,法向量的方向角 α, β, γ 是相关的,且满足 $\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma = 1$,虽然这样分得

的子空间有的为空,但空的子空间对法向量累积分布曲线并没有影响。

由空间角度分割原理可知,法向量的方向角 α, β, γ 必然要落入 N 个子空间中的某一个。如果统计落入各个子空间的法向量方向角的个数,就可以得到法向量的分布情况。

以 k 代表法向量的方向角所落入的子空间,这里 k 是有限值,将落入各个子空间的法向量的个数记为 $x_k(k=1, 2, \dots, N)$,令

$$p_k = x_k / \sum_{k=1}^N x_k \quad (3)$$

那么, $P = \{p_1, p_2, \dots, p_N\}$ 即可以看成是某随机变量 X 的概率分布,这里将 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_N\}$ 称为表面法向量分布。

为了得到反映三维表面的不变性参量,故将此概率分布按从小到大的顺序重排成 p'_1, p'_2, \dots, p'_N ,这样事件概率为 0 的就全部排在序列的左边 $(0 \leq p'_1 \leq p'_2 \leq \dots \leq p'_N \leq 1)$ 。通过定义序列 S_n

$$\begin{cases} S_0 = 0 \\ S_n = \sum_{i=1}^n p'_i, n = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (4)$$

即可以得到 $S_N = 1$ 。

以 n/N 为横轴,以 S_n 为纵轴,联接点 $(n/N, S_n), n=0, 1, \dots, N$,即得到一条折线 α (图 1)。

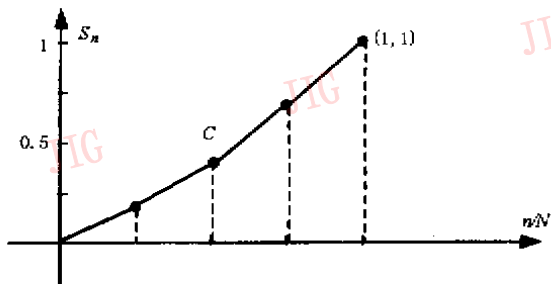


图 1 法向量累积分布曲线

该曲线 C 则称为法向量累积分布曲线 NVDC (Normal Vector Cumulative Distributing Curve)。若 p_i 都相等,则曲线 C 即变成了一条自 $(0,0)$ 到 $(1,1)$ 的直线,否则, NVDC 将是这一直线下面的凹折线。该曲线有如下特点:

(1) 如果物体旋转,则曲面的法向量也会相应旋转,但将法向量分布按从大到小排序后,法向量是不会改变的,其法向量累积分布曲线也是不变的。

(2) 对于简单典型的三维曲面,法向量累积分布曲线可以反映曲面的性质特征,例如平面的法向量累积分布曲线可以表示为

$$\begin{cases} y = 0 & \text{for } 0 < x \leq (N-1)/N \\ y = N \times (x - (N-1)/N) & \text{for } (N-1)/N < x \leq 1 \end{cases} \quad (5)$$

而球面的法向量累积分布曲线可以表示为

$$y = x \quad \text{for } 0 \leq x \leq 1 \quad (6)$$

2 三维表面的相似性判别准则

对于两个三维曲面,如果它们法向量累积分布曲线不同,那么这两个三维曲面也是不同的。

若两个三维曲面的 NVDC 分别为曲线 f, g (图 2),则两条曲线必相交于点 $(0, 0)(1, 1)$,这样即可用 $d(f, g)$ 来衡量曲线 f, g 之间的差别,例如 $d(f, g)$ 可以是两条曲线所夹的面积。将 $d(f, g)$ 定义为

$$d(f, g) = \sum_{i=0}^N |S_i^g - S_i^f| \quad (5)$$

其中, S_i^g 和 S_i^f 分别为曲线 f, g 对应的序列。

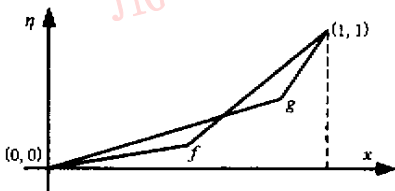


图 2 两个表面的 NVDC

如果 $d(f, g)$ 越小,则 f, g 两条 NVDC 越接近,且两个三维曲面也就越相似,据此给出相似性判别准则如下:

设定一个门限 T_1, T_2

若 $d(f, g) \leq T_1$ 则认为曲线 f 与 g 相似;

若 $d(f, g) \geq T_2$ 则认为曲线 f 与 g 不相似;

若 $T_1 \geq d(f, g) \geq T_2$, 则不对曲线 f 与 g 的相似性进行判断,在这种情况下,就需要采用其他方法进行相似性判断。

说明:由于不同三维曲面的法向量分布也可能相同,所以根据法向量累积分布曲线只能作出两个曲面是否相似的判断,而要对曲面进行识别,还需要采取其他的方法。

3 实验结果

3.1 法向量的计算

在实际的应用中,由于曲面 S 的参数方程是未知的,而且各点是离散的,各点的取值为该点所在位置的深度值(图 3),在这种情况下无法用式(1)来求

法向量,因此需采用下面的方法来求解法向量。

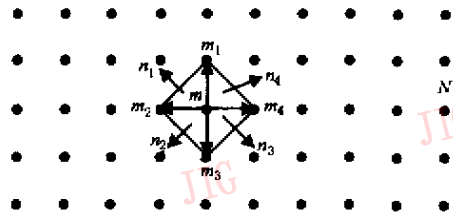


图 3 某物体的象素点阵图

设在某三维坐标系下,有 5 个点 $m(x, y, z), m_1(x_1, y_1, z_1), m_2(x_2, y_2, z_2), m_3(x_3, y_3, z_3), m_4(x_4, y_4, z_4)$,如图 3 所示,依据三点成一个平面的常识,若 $mm_1mm_2, m_2mm_3, m_3mm_4, m_1mm_4$ 各组成一个平面,则点 m 是这 4 个平面的交点,而点 m 到点 m_i 的矢量用 mm_i 表示。若要求 m 点的法向量,则必须先求得 4 个平面的法向量,设 4 个平面的法向量各为 n_1, n_2, n_3, n_4 ,那么

$$\begin{aligned} n_1 = mm_1 \times mm_2 &= (x_1 - x, y_1 - y, z_1 - z) \times \\ & (x_2 - x, y_2 - y, z_2 - z) = \\ & ((y_1 - y)(z_2 - z) - (y_2 - y)(z_1 - z), \\ & (x_2 - x)(z_1 - z) - (x_1 - x)(z_2 - z), \\ & (x_1 - x)(y_2 - y) - (x_2 - x)(y_1 - y)) \end{aligned} \quad (6)$$

同理, $n_2 = mm_2 \times mm_3, n_3 = mm_3 \times mm_4,$

$$n_4 = mm_4 \times mm_1.$$

点 m 的法向量 $n = (n_1 + n_2 + n_3 + n_4)/4$ 。由于式(1)中得到的是单位法向量,所以需将 n 归一化,得到归一化法向量。

需要说明的是,虽然这种法向量的计算方法并不是很精确,但对于光滑的、没有曲率突变点的三维曲面(如足底表面)来讲,用这种方法来近似计算其表面的法向量还是可行的。

3.2 足底表面的法向量累积分布曲线与相似性判别

如图 4(a)(b)(c) 分别是根据数据文件 Lhwa10.dat, Lhwa4.dat 和 Zhaz2.dat 作出的足底深度图象,其中, Lhwa10.dat, Lhwa4.dat 是同一足底的数据文件,而 Zhaz2.dat 是另一足底的数据文件。

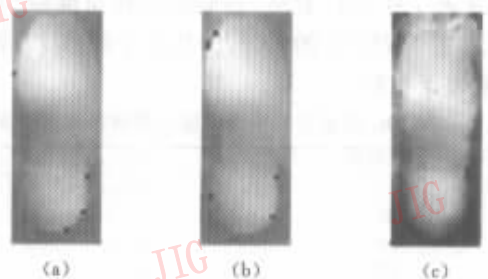


图 4 足底的深度图象

然后分别求图4各足底表面法向量累积分布曲线,并绘制 NVDC(图5)。图5(a)显示的是图4(a)与图4(b)NVDC的比较,从中可看出,两条曲线是非常接近的,几乎快要重合。而在图5(b)中显示的是图4(a)与图4(c)NVDC的比较,两条 NVDC 区别较

大。在图5(a)中, $d(f, g) = 0.0021$,图5(b)中 $d(f, g) = 0.0166$,显然,后者比前者要大得多。若取阈值 $T_1 = 0.01, T_2 = 0.015$,则图5(a)中代表的两个足底表面是相似的,而图5(b)中代表的两个足底表面则不相似。

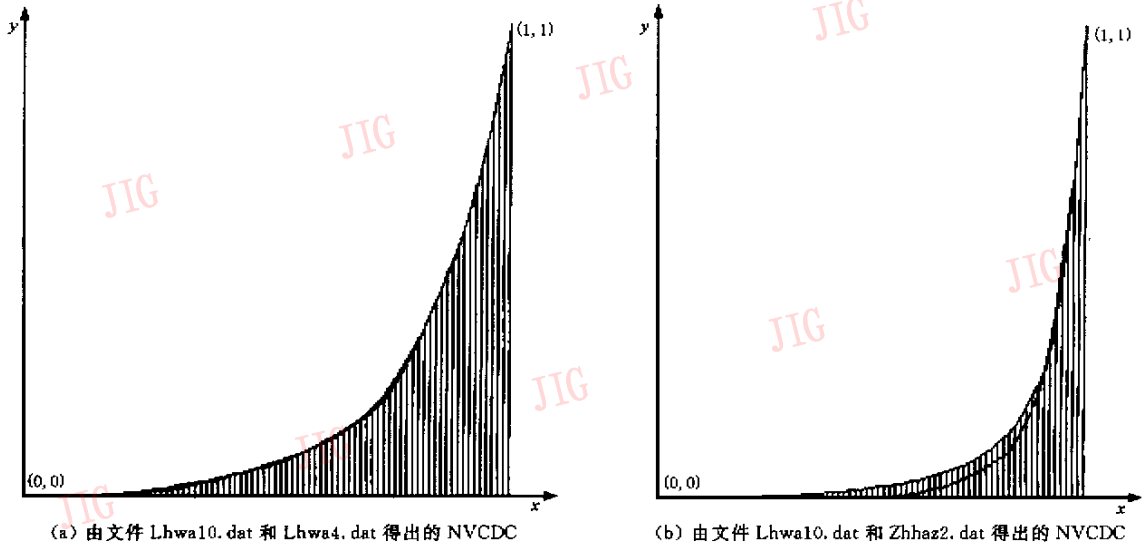


图5 足底的法向量累积分布曲线比较

这种用法向量分布曲线对足底表面进行相似性判别的方法,对足底表面的基准面不敏感,故以足底表面的旋转来近似数据采集基准面的变化。图4(a)与其旋转 6° 后的 NVDC 曲线比较见图6。

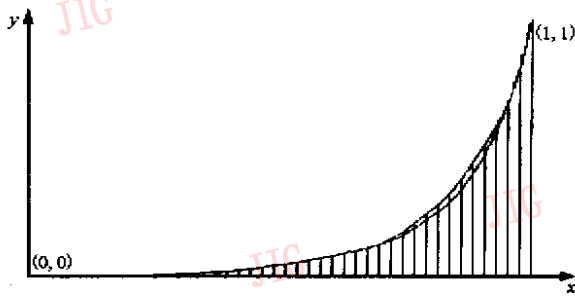


图6 Lhwa10.dat 与旋转 6° 的 NVDC

该图中两条曲线的 $d(f, g) = 0.0074 < T_1$,可见这两条曲线相似。该足底旋转其他角度的数据见表1。从表1中可以看出,表面的旋转角度在 10° 以内时,两条 NVDC 的 $d(f, g)$ 均小于阈值 T_1 ,则两个足底表面相似。

表1 NVDC 识别方法不相似度与旋转角度的关系

旋转角度	$d(f, g)$
1°	0.0041
5°	0.0062
10°	0.0091
15°	0.0251
20°	0.0874

4 结论

鉴于法向量是表面垂直方向的向量,它的分布情况能很好地反映物体的几何特征,为此,本文从描述三维表面变化的基本参数——法向量出发,以法向量累积分布曲线 NVDC 为不变量,对比较光滑的三维曲面,给出了一种描述形状和相似性的判别准则;同时,本文依法向量的方向角将三维空间分割成子空间,然后统计落入每个子空间的法向量个数,以得到法向量的分布,将其排序后即得到法向量累积分布曲线 NVDC。由于与不同的法向量累积分布曲线对应的三维曲面也是不同的,因此,本文以 NVDC 之间的差异为相似性判别准则,来对不同三维曲面进行一对一的相似性判别。

实验中,用本文提出的 NVDC 方法,即用法向量的分布来分析和描述三维表面形状,并根据表面法向量累积分布曲线之间的差别来对足底表面进行相似性判别,实验结果表明,它能反映刚体的旋转、平移不变性,可见,它是进行三维表面相似性判别的一种合理有效的方法。本文虽在三维表面描述和分析方面进行了有意义的探索,但尚有一些问题需要进一步的研究。

参 考 文 献

- 1 马颂德,张正友. 计算机视觉——计算理论与算法基础. 北京: 科学出版社,1998.
- 2 吴立德. 计算机视觉. 上海:复旦大学出版社,1993.
- 3 Alok Gupta, Ruzena Bajcsy. An integrated approach for surface and volumetric segmentation of range images using biquadrics and superquadrics. In: Proceedings of SPIE—The International Society of Optical Engineering Applications of Artificial Intelligence 8: Machine Vision and Robotics, 1992, 1708-210227.
- 4 Barr A H. Superquadrics and angle-preserving transformations. IEEE Comp. Grap. App, 1981, 1(1):1113.
- 5 田越. 基于曲线形状分析的三维表面识别[硕士学位论文]. 郑州:郑州信息工程大学,1997.

柳葆芳 1999 年获郑州信息工程学院硕士学位,现为郑州信息工程大学信息技术学院信息科学系博士研究生. 主要研究方向为图象处理与分析、图象压缩编码、信息隐藏.

肖菁 讲师,1999 年获郑州信息工程学院硕士学位. 主要研究方向为图象处理与分析、计算机视觉、图象识别、图象检索.

平西建 1982 年获北京航空学院硕士学位,现任郑州信息工程大学信息技术学院信息科学系教授,博士生导师. 主要研究兴趣为图象信源编码理论与方法、图象处理与识别、计算机视觉、信息隐藏.

邵美珍 1988 年获郑州信息工程学院硕士学位,现任郑州信息工程大学信息技术学院信息科学系副教授. 主要研究兴趣为模式识别、图象处理与分析、图象信源编码理论与方法.