

基于对称物体的3维重构技术研究

于永彦 于长辉

(淮阴工学院 计算机工程系, 淮安 223001)

摘要 3维重构理论与技术是计算机视觉领域最重要的热点问题之一,而基于单幅图像的3维重构由于缺乏足够的几何信息而难以达到预期效果,已成为世纪性难题。针对大部分物体具有对称性特征,或可分解为有限个对称物体元的客观事实,提出基于透视逆变换原理,首先建立包含摇角、倾角、摆角等三元的透视变换矩阵 T ;再由链码表示的物体轮廓提取特征直线,根据平行线束投影角相近性特点求解主灭点信息,进而确定视点位置、物体对称平面;根据对称性特征,利用物体假想对称平面,通过人工交互指定3对已知对称点的图像坐标及其对应点的空间坐标确定透视变换矩阵 T ,继而反求物体表面其他特征点的空间位置,最后利用OpenGL软件包实现物体3维模型的重建。

关键词 对称物体 视点位置 透视逆变换 反求3D坐标 重建实体模型

中图分类号:TP391 文献标识码:A 文章编号:1006-8961(2008)11-2197-07

Research on the Technology of 3D Reconstruction Based on Symmetrical Object

YU Yong-yan, YU Chang-hui

(Computer Engineering Department, Huaiyin Industrial Technology College, Huai'an 223001)

Abstract The theory and technology of 3D reconstruction is one of the important problems in the computer visual field, and 3D reconstruction based on the single image has been the difficult problem in the century since without enough geometry information it was hard to reach the anticipative effects. This thesis aimed at the fact that most of the objects have the characteristics of symmetry or decompose into the limited symmetry objects, and put forward the principle of perspective reversible transformation. At first, the angle, inclination angle and pivot angle should be established in the ternary perspective transformed matrix T , then the calibration which indicated the outline of the object can pick up the characteristic straight line. It extractes the host extinguishes information in accordance with the similar features of the parallel group of lines projection angle, then ensured the viewpoint situation and the symmetry surface of object. Based on this three pairs of the known symmetry image coordinates and the space coordinates of the corresponding points confirm with the perspective transformative matrix T . The result is reversed to calculate the other space coordinates of the surface of objects. Finally the objects of 3D reconstruction model can be realized by utilizing OpenGL software.

Keywords symmetry object, viewpoint situation, perspective reversible transformation, reversely prove 3D coordinates, reconstruct the hardware model

1 引言

3维重构,是指在已知实体的一组剖面、轮廓

面或轮廓线的基础上,重构实体模型。根据其信息来源及表达方式,可分为基于图像的3维重构与基于图形的3维重构。如机械制造中的3视图重构法就是基于图形的3维重构,而遥感技术、医

基金项目:江苏省高校自然科学基金项目(06KJD520024);淮安市高新技术发展项目(HAG05053)

收稿日期:2006-10-16;改回日期:2007-05-18

第一作者简介:于永彦(1969~),男,讲师。2008年于河海大学获计算机应用技术专业硕士学位。研究领域为遥感图像处理、计算机视觉、图像通信。E-mail:shanshan_yyy@163.com

学 CT 扫描、核磁共振成像等则大多采用基于图像的重构方法。基于图像的 3 维重构是图像处理的一个重要分支,经过多年研究与实践,已取得巨大进展。按其重构对象的不同,可分为基于单幅图像的重构和基于多幅图像的重构。目前已有的基于单幅图像的 3 维重构方法,大都是根据图像的某一方面的特征来恢复物体形状。如基于阴影的重构,基于纹理的重构,基于模糊状况的重构,基于运动的重构及基于轮廓的重构等^[1]。由于人类视觉对彩色图像的识别远比对物体线画图的识别来得慢。因此,基于轮廓的重构已成为人们进行视觉研究的重要手段和方法。3 维场景通过透视投影形成平面图像,反之亦可由 2 维图像经透视逆变换恢复 3 维几何信息。由于单幅图像缺少足够深度信息,仅从一幅图像复原物体 3 维形状几乎不可能。但如果能有效利用物体本身的几何条件,如对称性、凸透性等,则有可能获得正确解。本文先通过对透视成像条件的解析,求出灭点信息,确定视点位置,进而利用假想的物体对称平面,反求特征点的空间坐标,最终复原实体模型。

2 透视逆变换

把 3 维物体转变为 2 维图形表示的过程称为投影变换。根据投影中心与投影平面之间距离的不同,投影可分为平行投影和透视投影,透视投影即透视变换^[2]。一束不平行于投影面的平行线的投影(或延长线)将汇聚为一点,称为灭点,可看作是无限远处的一点在投影面上的投影。坐标轴方向的平行线在投影面上形成的灭点称为主灭点。 x, y, z 3 个坐标轴可形成 3 个主灭点。按主灭点的个数可分为 1 点透视、2 点透视和 3 点透视。

透视变换中,笛卡尔坐标系称为“世界坐标系”或“用户坐标系”,也称“物体坐标系”。以观察点为原点,以观察点到物体的方向为 z 轴形成的坐标系称为“观察坐标系”,也称“视点坐标系”。把物体坐标系中的点 $M(x, y, z)$ 变换为观察坐标系中的点 $M'(x', y', z')$ 的过程称为“视向变换”^[2]。假设视点在物体坐标系中的位置为 $E(x_0, y_0, z_0)$, 如图 1 所示。

经过坐标系平移、绕 X_c 轴旋转 90° 、绕 Y_c 轴旋转 ϕ 角、绕 X_c 轴逆时针旋转 θ 角和逆转 X_c 轴方向等 5 个步骤,可得视向变换矩阵

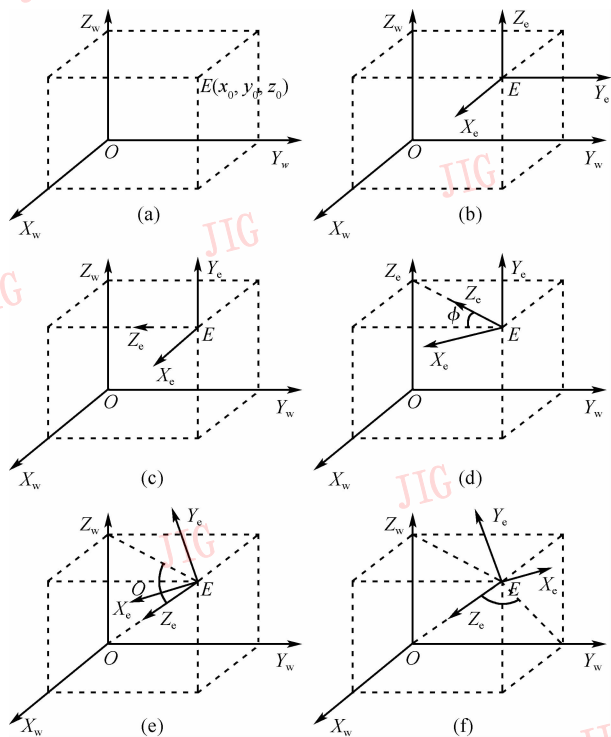


图 1 物体坐标系到观察坐标系的转换

Fig. 1 Transform objects reference frame conversion to observation reference frame

$$T = T_1 \cdot T_2 \cdot T_3 \cdot T_4 \cdot T_5$$

$$= \begin{bmatrix} -\frac{y_0}{a} & -\frac{x_0 z_0}{ab} & -\frac{x_0}{b} & 0 \\ \frac{x_0}{a} & -\frac{y_0 z_0}{ab} & -\frac{y_0}{b} & 0 \\ 0 & \frac{a}{b} & -\frac{z_0}{b} & 0 \\ 0 & 0 & b & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,

$$a = \sqrt{x_0^2 + y_0^2}$$

$$b = \sqrt{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2}$$

可见,观察坐标系与物体坐标系之间存在距离向、方位向的联系。观察坐标系原点相对于物体坐标系存在 3 个角度:摇角 θ 、倾角 ϕ 和摆角 ψ , 分别表示物体坐标系 $O-X_w Y_w Z_w$ 中 X_w-Y_w 平面, Y_w-Z_w 平面和 X_w-Z_w 平面旋转的角度。设画面(投影面) P' 上某点 $M'(x', z')$, 取观察坐标系的原点为视心, X_c-Z_c 平面与观察坐标系中 $O'-X'Z'$ 相同, Y_c 与图像平面 P' 垂直。设 f 为 X_c-Z_c 图像平面在镜头前的距离, 则 $M'(x', z')$ 在观察坐标系的位置为 $M_c(x', f, z')$ 。

透视反变换的根本目的就是物体坐标系来表

达对应的图像点。从观察坐标系到物体坐标系的转换,可以相反顺序操作,即反向旋转 X_c-Z_c 平面 ψ 角, Y_c-Z_c 平面 ϕ 角和 X_c-Y_c 平面 θ 角。

假设 $M(u, v, w)$ 为点 $M_c(x', f, z')$ 在物体坐标系下对应的空间坐标。由透视投影原理,点 M 与点

$$T = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\psi & 0 & -\sin\psi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\psi & 0 & \cos\psi \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\psi + \sin\theta\sin\phi\sin\psi & -\sin\theta\cos\phi & \sin\theta\sin\phi\cos\psi - \cos\theta\sin\psi \\ \sin\theta\cos\psi - \cos\theta\sin\phi\sin\psi & \cos\theta\cos\phi & -\cos\theta\sin\phi\cos\psi - \sin\theta\sin\psi \\ \cos\phi\sin\psi & \sin\phi & \cos\phi\cos\psi \end{bmatrix} \quad (3)$$

3 基于灭点信息确定视点位置

视点对于画面的相对位置,直接影响灭点在投影面上的分布;反之,如果已知灭点分布,就可以反求出视点的空间位置^[3]。灭点是物体上特征平行线的投影线交点,采取基于链码表示的直线提取方法^[4],从图像中提取直线信息,再基于聚类分析法,利用平行线束投影线倾角相近性特征求解主灭点^[5,6]。

由于任意形态或位置的物体,其透视图像均可由 3 点透视来表达。因此,下面主要以 3 点透视为例讨论如何基于灭点信息确定视点位置^[3]。

如图 2 所示, V_1, V_2, V_3 是 3 个灭点,3 点连线构成灭点三角形 $V_1V_2V_3$ 。以三角形的 3 边为直径构造 3 个半球 G_1, G_2, G_3 , 三球的交点 E 即为视点。

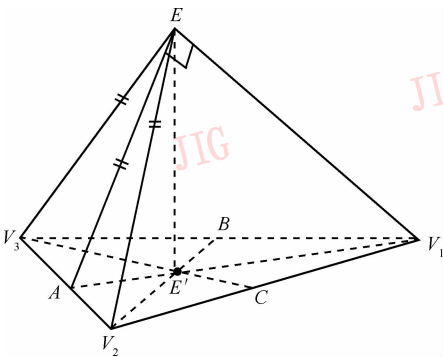


图 2 3 点透视与视点关系

Fig. 2 Three points perspective and angle of view

分别过 V_1, V_2, V_3 作对边的垂线 V_1A, V_2B, V_3C , 垂线交点 E' 就是灭点三角形的垂心,也是视点 E 在投影面的正投影,称为“视心”,是图像的质心, $|EE'|$ 即为视点 E 到图像平面 P' 的距离。

M_c 之间存在以下关系:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = T \times \begin{bmatrix} x' \\ f \\ z' \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中,

因为视点 E 是 3 个半球的交点,以 V_1, V_2, V_3, E 构成的以 E 为顶点的三棱锥的 3 条棱相互垂直^[3],即

$$EV_1 \perp EV_2 \perp EV_3$$

可以证明:

$$EV_1 \perp \triangle EV_2V_3$$

连接点 E, A , 因为直线 EA 包含于平面 EV_2V_3 , 所以有

$$EV_1 \perp EA$$

考察 $\triangle EAE'$ 和 $\triangle V_1EE'$, 显然:

$$\triangle EAE' \sim \triangle V_1EE'$$

因此,得:

$$\frac{|EE'|}{|AE'|} = \frac{|E'V_1|}{|EE'|}$$

可以求得:

$$\begin{aligned} |EE'| &= \sqrt{|AE'| \cdot |E'V_1|} = \sqrt{|BE'| \cdot |E'V_2|} \\ &= \sqrt{|CE'| \cdot |E'V_3|} \end{aligned} \quad (4)$$

已知,观察坐标系分别绕 X, Y, Z 轴旋转 α, β, γ 角,再平移 λ 个单位距离,可与物体坐标系重叠。因此,此处可假设投影面 P' 法线方向与物体坐标系 X, Y, Z 轴的夹角分别为 α, β, γ , 则 P' 的法向余弦为

$$\cos\alpha = \frac{|EE'|}{|EV_1|}, \cos\beta = \frac{|EE'|}{|EV_2|}, \cos\gamma = \frac{|EE'|}{|EV_3|}$$

则视心 E' 在物体坐标系下的坐标为

$$E'(X_{E'}, Y_{E'}, Z_{E'}) = ((O'E' \cdot I_x) \times \sin\alpha, (O'E' \cdot I_y) \times \sin\beta, (O'E' \cdot I_z) \times \sin\gamma) \quad (5)$$

式中, I 为单位矢量,

$$I_x = \frac{E'V_x}{|E'V_x|}, I_y = \frac{E'V_y}{|E'V_y|}, I_z = \frac{E'V_z}{|E'V_z|}$$

如图 3 所示, V_x, V_y, V_z 为 3 个灭主点, E 为视

点。通过上述分析,进而可以确定视点 E 在物体坐标系下的坐标。

$$E(X_E, Y_E, Z_E) = (-D\cos\alpha + X_{E'}, -D\cos\beta + Y_{E'}, -D\cos\gamma + Z_{E'}) \quad (6)$$

式中, D 为视距。

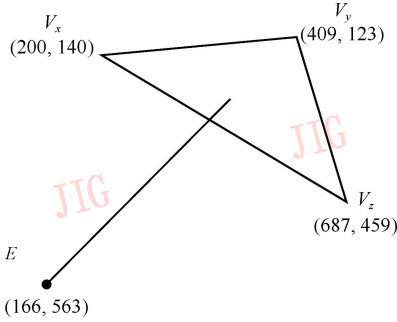


图 3 视点确定

Fig. 3 Make certain the viewpoint

4 确定对称平面

实际上,画面上一点 $M'(x', z')$ 可以是一系列空间点的透视投影,这些具有同样透视投影的点位于从视点出发并经过 $M'(x', z')$ 的同一条视线上。因此空间点与图像点可能是 $m:1$ 的关系。

这里研究的是物体 3 维形状的重建,仅需提取物体表面特征点的 3 维信息,而对于物体内部点可以不予考虑。因此,如果已知图像上至少 3 点对应的图像坐标及其对应空间坐标,即可通过式(2)和式(3)联立方程,解得 θ, ϕ 及 ψ , 构造矩阵 T 。那么如何由图像点获得对应的空间点位置呢?这就需要利用物体本身的对称性特征,需要确定物体的对称平面。

设 O, M 是物体上一对对称点,对称平面为 P 。以 O 为原点、过 O, M 点的 P 平面的法线方向为 X 轴建立物体坐标系,显然 O, M 均匀分布在对称面的两侧。如图 4 所示。

已知投影面为 P' , 已知 3 个灭点 V_1, V_2, V_3 , 其中 V_1 为 X 轴方向的灭点, E 为视点, E 在 P' 上的正投影为 E' 。

设 O, M 的投影点为 O', M' , 因为 O, M 与 X 轴共线,而 X 轴方向的灭点为 V_1 , 所以投影点 O', M' 与灭点 V_1 必共线,即所在直线即为 X 轴在图像平面上的透视投影。

为了便于叙述,假设投影面与物体相接且过坐

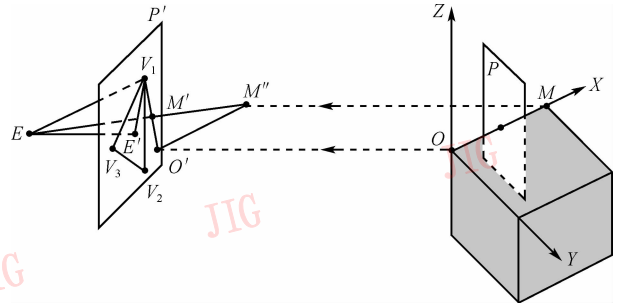


图 4 透视投影与对称平面

Fig. 4 The perspective projection and symmetry plane

标原点 O [3], 显然 O 与其投影点 O' 重叠。实际操作时,只需物体坐标系向投影面作相对平移,使 O 与 O' 重叠,其结果使线段 OM 平移到 $O'M''$ 。因为 $EV_1 \parallel OM$, 所以 $EV_1 \parallel O'M''$ 。这样一来,求解 OM 的问题转换为求解 $O'M''$ 。

根据透视投影定义, E, M', M'' 共线。由于 $EV_1 \parallel O'M''$, 根据平行线原理,有

$$\triangle EV_1M' \sim \triangle M''O'M'$$

根据相似三角形性质,有

$$\frac{|O'M''|}{|EV_1|} = \frac{|O'M'|}{|M'V_1|} \quad (7)$$

可得

$$|O'M''| = \frac{|O'M'|}{|M'V_1|} \times |EV_1| \quad (8)$$

在观察坐标系中,已经求得 V_1 和 E' , 另由用户交互指定对称点投影位置 O' 和 M' , 所以,容易得到 $|M'V_1|$ 和 $|O'M'|$ 。其中 $|EV_1|$ 为

$$|EV_1| = \sqrt{|E'V_1|^2 + |EE'|^2} \quad (9)$$

式中, $|EE'|$ 即为视点 E 距画面的距离,称为“视距”,一般以 D 表示。

由前面假设条件及分析可知, $|O'M''| = |OM|$ 。而 O 为物体坐标系原点, OM 在 X 轴上,则对称平面 P 的方程可以表示为

$$X = k \quad (10)$$

式中,

$$k = \frac{1}{2} |OM| = \frac{1}{2} \times \frac{|O'M'|}{|M'V_1|} \times \sqrt{|E'V_1|^2 + |EE'|^2} \quad (11)$$

检测结果如图 5 所示。

这个结论不仅适用于 3 点透视,对 2 点透视也一样适用 [3]。

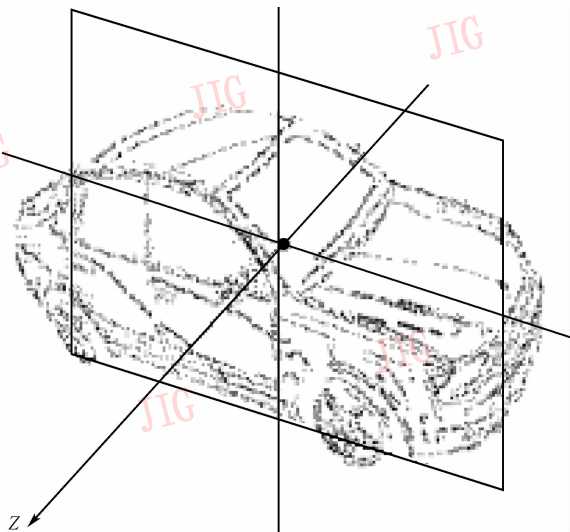


图 5 确定对称平面

Fig. 5 Make certain the symmetry plane

5 确定转换矩阵

式(3)的转换矩阵 T 具有 3 个角变量 θ, ϕ 和 ψ , 因此需要确定至少 3 个点的图像坐标及其空间坐标的对应关系, 通过式(3)联立方程解出 T 。这需要通过寻找“可视”对称点对的信息求解。所谓“可视”对称点对, 是指其空间点及对应投影点坐标均可见, 即可通过人工交互来确定。这对于规则对称物体来说并不困难。

假设一对称点对 $U(x_u, y_u, z_u)$ 和 $V(x_v, y_v, z_v)$, 分布在对称面 P 的两侧, 它们在图像画面 P' 上的投影位置已知, 分别为 $U'(x'_u, z'_u)$ 和 $V'(x'_v, z'_v)$, 下面根据 U', V' 来反求 U, V 。如图 6 所示, E 为视点, P' 为图像平面。

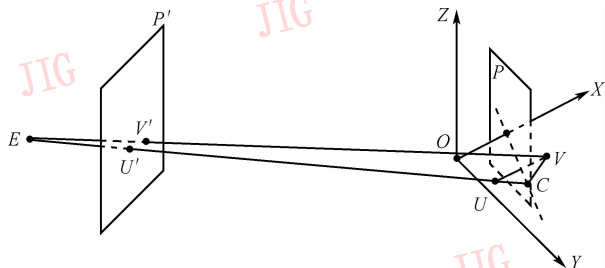


图 6 求解对称点坐标

Fig. 6 Evaluation the reference of symmetry points

由透视投影特性可知, 可根据 E, U', U 三点线由 E, U' 建立以下 $L_{EU'}$ 直线方程:

$$y = F(E, U') \tag{12}$$

$L_{EU'}$ 延长线与对称面 P 交于点 C 。由式(10), 式(12)联立可解出点 C 的坐标。

因为点 U, V 关于 P 面对称, 所以可由 $L_{EU'}$ 求得对称直线 L_{CV} , 其方程为

$$y = F(C, V) \tag{13}$$

同理, E, V', V 共于直线 $L_{EV'}$

$$y = F(E, V') \tag{14}$$

由式(13), 式(14)联立, 解得 $L_{EV'} L_{CV}$ 的交点, 即为 V 点。

求得了 V 坐标, 根据点 U 与 V 关于平面 P 对称, 进而可求得点 U 。

用同样方法, 求得图像上至少 3 个点 $U'(x'_u, z'_u)$, $V'(x'_v, z'_v)$ 和 $Q'(x'_q, z'_q)$ 及其对应空间点: $U(x_u, y_u, z_u)$, $V(x_v, y_v, z_v)$, $Q(x_q, y_q, z_q)$ 。

将 U', V', Q' 转换为观察坐标系下的 $U_e(x_{e,u}, f, z_{e,u})$, $V_e(x_{e,v}, f, z_{e,v})$, $Q_e(x_{e,q}, f, z_{e,q})$

由式(3), 联立 3 个方程:

$$\begin{cases} U = T(\theta, \phi, \psi) \times U_e \\ V = T(\theta, \phi, \psi) \times V_e \\ Q = T(\theta, \phi, \psi) \times Q_e \end{cases} \tag{15}$$

解得 θ, ϕ, ψ , 建立转换矩阵 T 。

6 反求特征点 3 维坐标

上面已经提到, 利用对称平面 P 可以确定一对称点对 U, V 的空间位置, 但前提是 U, V 的投影点 U', V' 图像位置“可视”, 且易于人工标记。这一类对称点毕竟很少, 大部分对称点对只能“可视”其中一个投影点, 另一个为“不可视”, 因而也就无法进行人工标记。这就需要利用上面求得的转换矩阵 T 来进行反向求解。

设已知图像平面上一点 $M'(x', z')$, 其在观察坐标系下的对应位置为 $M_e(x'_e, f, z'_e)$, 其中 f 为视距。已求得转换矩阵 T , 则对应物体坐标系下的点 M 为

$$M = T \times M_e \tag{16}$$

设 M 点关于对称平面 P 的对称点为 M^p , 由式(10)及式(16), 可解出 M^p 位置。

这里有一个问题, 即如何选择 $M'(x', z')$ 点。当然可以对图像上所有特征点进行求解, 但这样会造成大量冗余计算, 因为某些“可视”对称点对将被重复计算。这就要求剔除多余操作, 判断哪些对称点只需计算一次, 或者确认哪些点是“可视”对称

点。对“可视”对称点仅需按对称面求解,或取其中一点按上述过程求解。

7 实验结果分析

以 Windows 2000 Server 为操作环境,SQL 2000

Server 为数据平台,Visual C++6.0 为开发工具,运用 OpenGL 开放技术,基于 C/S 模式,集中完成前述直线提取、灭点检测、视点定位、透视反变换、3 维坐标反求和重建实体模型等工作。

以一幅 24 位图格式的汽车图像为例,首先运用 Canny 检测器检测图像边缘,检测结果如图 7 所示。

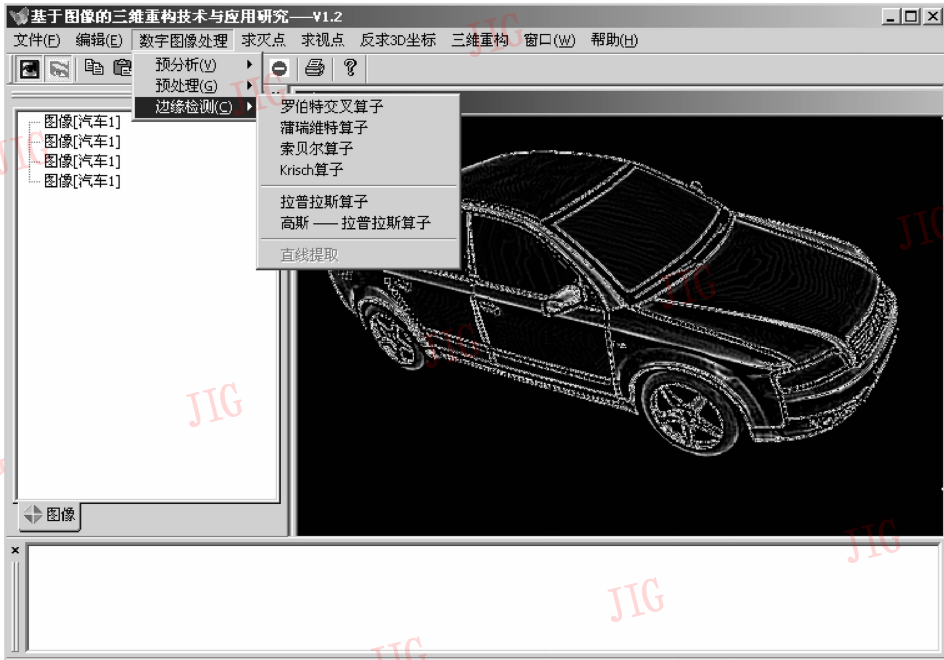


图 7 边缘检测

Fig. 7 Test the edges

用链码表示检测出的边缘轮廓,运用基于链码的方法从中提取直线段,如图 8 所示。

视反变换,反求出图像上物体特征点所对应的空间位置。结果如图 9 所示。



图 8 直线提取

Fig. 8 Distill the beelines

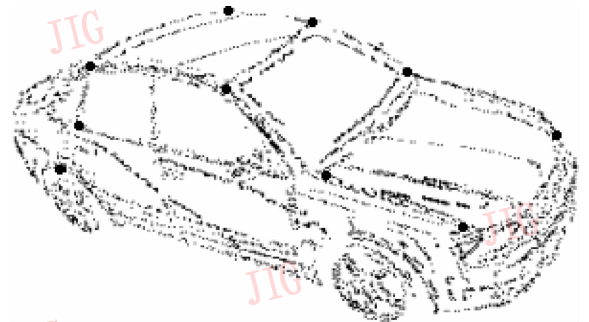


图 9 反求特征点 3D 坐标

Fig. 9 Inverse 3D's reference of the characteristic points

基于物体上平行线投影倾角相似性特征检测灭点信息,进而确定视点 E 的位置。根据物体对称性,求出对称平面 P ,通过人机交互模式,指定图像中 3 对称点对,从而确定透视变换矩阵 T 。利用透

通过空间插值等方法,进一步丰富顶点信息,如图 10 所示。构建的三角网格曲面如图 11 所示。

物体 3 维形状复原以后,就可以运用 OpenGL 的纹理映射(texture mapping)原理,得到汽车的效果图(如图 12 所示)。

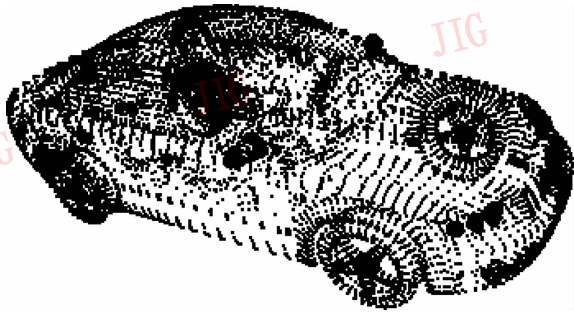


图 10 空间顶点

Fig. 10 The vertexes of space

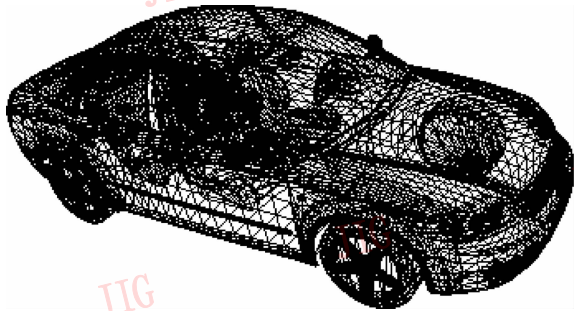


图 11 三角网格面

Fig. 11 Triangle grids surfaces



图 12 重建实体模型

Fig. 12 Reconstruct the entity model

8 结 论

基于图像的 3 维重构理论与技术一直是计算机

视觉的经典问题,而其中基于单幅透视图像的重构,更是由于几何信息的严重匮乏成为一道难以逾越的世纪性难题,其所列方程要么无解,要么是病态解,目前已存在的一些实现方案大多是针对某特定领域的特殊解法。本文研究的也是基于物体对称性特征的 3 维重构。客观世界的大部分物体是对称的,整体不对称的物体也可以通过某种方法分解为一系列对称物体元。如何剖切分解非对称物体,如何分解才是最合理的,分解的速度与精度如何把握,分块重构后如何重新组合等,需要进行深入的理论研究和寻找切实可行的实现方案。研究成果对于基于摄像的虚拟现实,遥感图像的 3D 复原等,均具有较高的实用价值。

参考文献 (References)

- 1 Tian C X X. Computer Image Processing[M]. Translated by Jin Xi-zi, Qiao Shuang. Beijing: Science Press, 2004. [[日]田村秀行著. 计算机图像处理[M]. 金喜子, 乔双译. 北京: 科学出版社, 2004.]
- 2 He Dong-jian. Digital Image Processing [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2003. [何东健. 数字图像处理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2003.]
- 3 Sun Jia-guang. Computer Graphics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998. [孙家广. 计算机图形学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.]
- 4 Sun Han, Ren Ming-wu, Yang Jing-yu. A fast and practical algorithm for line detection [J]. Computer Application Research, 2006, 3(2): 256 ~ 260. [孙涵, 任明武, 杨静宇. 一种快速实用的直线检测算法[J]. 计算机应用研究, 2006, 3(2): 256 ~ 260.]
- 5 Shu Yuan, Tan Zheng. New automatic vanishing point detection algorithm[J]. Infrared and Laser Engineering, 2003, 32(5): 479 ~ 483. [舒远, 谈正. 一种新的消隐点自动测量算法[J]. 红外与激光工程, 2003, 32(5): 479 ~ 483.]
- 6 Chen Ning-fan, Cai Li-dong. An vanishing points detection algorithm based on clustering [J]. Chinese Journal of Stereology and Image Analysis, 2006, 10(1): 205 ~ 210. [陈宁凡, 蔡利栋. 一种基于聚类的消隐点自动测量方法[J]. 中国体视学与图像分析, 2006, 10(1): 205 ~ 210.]