

从单幅灰度图象复原二次曲面体

杨忠根 栾晓明 赵昶冰

(哈尔滨工程大学电子工程系, 哈尔滨 150001)(哈尔滨工业大学机器人研究所, 哈尔滨 150001)

摘要 开发了二次曲面体的三维位姿和它的图象轮廓线之间的闭式映射关系, 该关系可用于从灰度图象鲁棒地提取的二次曲线参数直接确定二次曲面体的三维位姿。实验例证了此技术是快速、高效和鲁棒的。

关键词 三维形状复原, 三维位姿确定, 二次曲面体, 轮廓线, 透视投影, 深度唯一性约束。

1 引言

三维形状复原是三维视觉的一个主要的也是最困难的任务。因为, 三维物体的二维成象是多对一的透视投影过程, 而从三维物体的二维图象复原其三维形状并确定在三维空间的位姿是一对多的病态的逆透视投影过程。我们必须利用各种先验约束、合理假设和可达的先验知识来最优地求解此病态问题。

在各种三维复原技术中, 尽管有一些新思想、新观点、新技术正在不断地被研究开发出来, Shape From X 仍是目前研究和用得最广泛的技术, 即使是在陆基视觉中。而由分析研究^[1]可知, 在水下三维视觉中 Shape From Contour 技术即使不是唯一的选择也至少是最易鲁棒地实现的 Shape From X 技术。

从轮廓线复原形状(SFC)本质上属于基于模型的三维视觉技术。该技术所用的模型知识都不难通过分析研究感兴趣物体的样本图象离线地学习出来, 尤其当这些物体是由多面体和二次曲面体组装成的人造物体或者物体的体元可近似地模型为多面体和二次曲面体时。水下物体和工业构件大多满足此条件。这些模型知识在系统在线工作时被有效地用于进行实体图象与模型图象之间的匹配和基于模型从实体轮廓线参数复原实体的三维形状与位姿。

值得注意的是, 尽管对 SFC 技术已有不少的论述^[2,3], 但对最简单的曲面体——二次曲面体却很少

有清楚的论述。

2 从单视图轮廓线复原二次曲面体

目标的图象轮廓线是由于目标的自遮挡造成的观看者的立体视锥和目标表面相切形成的交线, 如图 1 所示。这意味着对于一般的表面而言, 轮廓线上的三维点 R 应满足^[3]

$$R^T n = 0 \quad (1)$$

其中, n 是点 R 处的表面法线。换言之, 通过轮廓线上的点 R 的视线与表面相切。由于二次曲面是凸表面, 它使视线上的象点 r 所对应的表面三维点 R 满足唯一性约束, 即仅有一个 R 使得表面方程成立。

由于轮廓线上的任一点 R 与其象点 r 满足透视投影关系

$$R = Zr \quad (2)$$

因此, 把它代入表面方程后可知, 唯一性约束又等价于深度唯一性约束, 即表面对每个图象轮廓点 r 有唯一的深度 Z 的解。我们认为使用深度唯一性约束比使用约束式(1)方便。因为, 一般的二次曲面可表

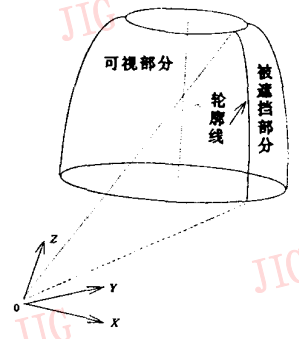


图 1 轮廓线的生成

Fig. 1 Generation of contour

示为

$$R^T A R - 2b^T R + c = 0 \quad (3)$$

把式(2)代入并使用深度唯一性约束后可知,一般的二次曲面的图象轮廓线方程为

$$r^T B r = 0 \quad (4)$$

其中 $B = cA - bb^T = H_B \Lambda_B H_B^T$, H_B 和 Λ_B 分别是实对称阵 B 的本征阵和本征矢量阵。二次曲面的图象轮廓线必为包括直线在内的二次曲线,而且二次曲面参数可从其轮廓线的二次曲线参数复原。只要我们从二次曲面体的单幅透视投影图最优地估计其二次曲线参数,就可闭式地计算其三维位姿。下面我们举例说明此复原过程。

例 1 圆柱情况

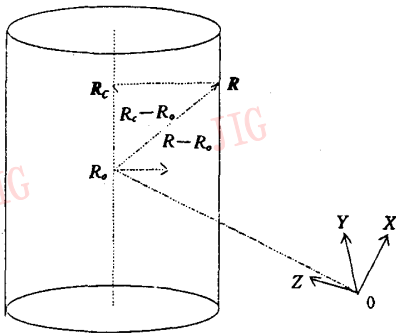


图 2 圆柱情况
Fig. 2 Cylinder Case

图 2 示出了圆柱情况。设圆柱表面上的任一点 R 对应于其图象轮廓线上的点 r , R_c 为 R 在圆柱轴线 c 上的投影点, R_0 为 c 上的距离摄像机坐标系的坐标中心 O 最近的点,即

$$R_0^T C = 0 \quad (5)$$

并且 R_0 与 c 共面,这使得在轴线上的投影满足

$$R_c - R_0 = CC^T \quad (6)$$

于是 $R - R_c = R - R_0 - CC^T R$ 。利用 $|R - R_c| = R_z$, 其中 R_z 为从模型库已知的圆柱半径,并注意到 $I - cc^T$ 为等幂阵后,有圆柱的表面方程

$$R^T (I - CC^T) R - 2R_0^T R + R_0^T R_0 - R_z^2 \quad (7)$$

显然,因为 R_z 已知,式(7)仅有 5 个待定参数,所以圆柱可从其单视图轮廓线唯一地复原。把式(7)与式(3)相比后可知,在圆柱情况

$$R_{cy} = I - CC^T, b_{cy} = R_0 \quad \text{和} \quad (8)$$

$$C_{cy} = R_0^T R_0 - R_z^2$$

其中,下标 cy 标记圆柱(Cylinder)。把上式代入式(4)并经运算后有

$$(1 - r_z^2)(r^T(r_0 \times c))^2 - (r_z r^T r_0)^2 = 0$$

$$\text{其中 } r_0 = R_0/|R_0| \text{ 和 } r_z = R_z/|R_0| \quad (9)$$

摄像机观看的是圆柱面面向摄像机的部分,这意味着 $r_z < 1$ 。这就证明了圆柱的图象轮廓线是两条不平行的直线,即

$$l_i: u_i^T r = 0, i = 1, 2$$

$$\text{其中 } u_1 = \sqrt{1 - r_z^2} r_0 \times c + r_z r_0 \text{ 和}$$

$$u_2 = \sqrt{1 - r_z^2} r_0 \times c - r_z r_0 \quad (10)$$

由上式可见, u_i 为图象轮廓线 l_i 的解释平面的单位法矢量,因为圆柱轮廓线 L_i 必在此平面上。式(10)叙述了圆柱轮廓线如何透视投影为其图象轮廓线(两条不平行的直线)。

由式(10)易证圆柱的三维位姿可从其图象轮廓线直接了当地确定,因为当这两条直线的参数已知后就可由下式确定 R_0 和 c , 其中 R_0 定义了圆柱的三维位置,而 c 定义了其三维姿态。

$$R_0 = \frac{2R_z(u_1 - u_2)}{|u_1 - u_2|} \text{ 和 } c = \frac{u_1 \times u_2}{|u_1 \times u_2|} \quad (11)$$

例 2 圆锥情况

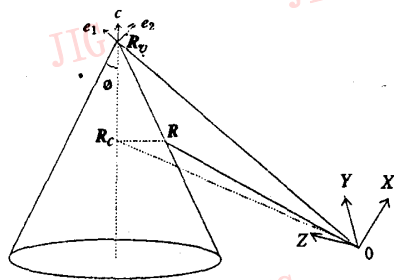


图 3 圆锥情况
Fig. 3 Cone Case

图 3 示出了圆锥情况。设圆锥表面上的任一点 R 对应于其图象轮廓线上的一点 r , 它们满足式(1)给出的透视投影关系, R_c 为 R 在圆锥轴线 c 上的投影点, R_v 为圆锥的顶点, ϕ 为圆锥的半顶角。从图 3 所示的几何关系不难证明圆锥面方程为

$$|(R - R_v)^T c| = |R - R_v| \cos \phi \quad (12)$$

即: 矢量 $R - R_v$ 在轴线上的投影为其长度乘以它们的夹角余弦。把上式平方后与式(3)相比知,在圆锥情况

$$A_{co} = I \cos^2 \phi - cc^T, b_{co} = A_{co} R_v, \quad (13)$$

$$c_{co} = R_v^T A_{co} R_v$$

其中,下标 co 标记圆锥(Cone)。显然,因为半顶角 ϕ

可从圆锥模型已知,式(12)仅有 5 个待定参数,所以圆锥也可从其单视图轮廓线唯一地复原。把上式代入式(4)并经运算后有圆锥的图象轮廓线方程

$$B_{co} = (\cos^2\phi - \sigma_1^2)e_3e_3^T - \sin^2\phi e_2e_2^T \quad (14)$$

其中, $e_1 = R_v/|R_v|$, $e_2 = (c - \sigma_1e_1)/\sigma_2$, $e_3 = e_1 \times e_2$, $\sigma_1 = c^T e_1$ 和 $\sigma_2 = c^T e_2$, 且 $c = \sigma_1e_1 + \sigma_2e_2$ 和 $\sigma_1^2 + \sigma_2^2 = 1$, 即 e_1 和 e_2 为由坐标原点、圆锥的顶点和轴线组成的平面的一个基矢量对。

考虑到该轮廓线所张的视角必小于圆锥的顶角,即 $\sigma_1 < \cos\phi$ 必成立,由式(14)易证,圆锥的图象轮廓线为两条相交于顶点象素的直线:

$$l_i: u_i^T r = 0, \quad i = 1, 2$$

其中

$$u_1 = \mu_1e_3 + \mu_2e_2 \text{ 和 } u_2 = \mu_1e_3 - \mu_2e_2 \quad (15)$$

式中 $\mu_2 = \sqrt{\cos^2\phi - \sigma_1^2}/\sigma_2$ 和 $\mu_1 = \sin\phi/\sigma_2$

同样地,这儿的 u_i 为圆锥图象轮廓线 l_i 的解释平面的单位法矢量,因为圆锥轮廓线 L_i 必在此平面上。式(15)叙述了圆锥轮廓线如何透视投影为其图象平面上的轮廓线(两条相交于圆锥顶点象素的直线)。

由上述诸式易证,圆锥的三维位姿可从其图象轮廓线直接了当地确定,因为当我们已知这两条直线的参数后就可由下式确定 R_v 和 c , 其中 R_v 定义了圆锥的三维位置,而 c 定义了其三维姿态。

$$e_1 = \frac{u_1 \times u_2}{|u_1 \times u_2|}, e_2 = \frac{u_1 - u_2}{|u_1 - u_2|}, \sigma_2 = \frac{2\sin\phi}{|u_1 - u_2|}, \sigma_1 = \sqrt{1 - \sigma_2^2}, \quad c = \sigma_1e_1 + \sigma_2e_2 \quad (16)$$

例 3 圆球情况

当圆球半径 R_p 已知时,球在空间的三维位姿(实际上,此时仅是位置,因为球的全方位对称使得它已无姿态而言)完全由它的球心位置 R_0 确定,即球面方程为

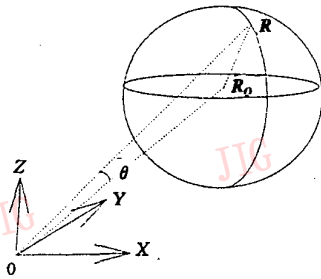


图 4 圆球情况

Fig. 4 Sphere Case

$$(R - R_0)^T(R - R_0) = R_p^2 \quad (17)$$

把式(17)与式(3)相比知,在圆球情况

$$A_{sp} = I, b_{sp} = R_0, c_{sp} = R_0^T R_0 - R_p^2 \quad (18)$$

其中,下标 sp 标记圆球(Sphere)。把上式代入式(4)并经运算后知,对圆球的图象轮廓线方程而言

$$B_{sp} = (1 - r_{sp}^2)I - r_{sp}^2 r_0 r_0^T$$

其中 $r_0 = R_0/|R_0|$ 和 $r_{sp} = R_{sp}/|R_0|$ (19)

式(19)说明,与许多人的直感上的错觉不同,一般(除非 $r_0^T = [0 \ 0 \ 1]$ 即摄影机光轴通过球心)球的图象轮廓线为一椭圆而不是一个圆!

由图 4 知, $r^T r_0 = \cos\theta > 0$ 必成立,这样式(19)可等价地写为

$$r^T n = 1$$

其中 $r = r/|r|$ 和 $n = r_0/\sqrt{1 - r_{sp}^2}$ (20)

上式叙说圆球的图象轮廓线是椭圆与半顶角 θ 满足 $\cos\theta = \sqrt{1 - r_{sp}^2}$ 的视锥的交线。

在我们使用文献[4]的曲线鲁棒提取技术提取了由式(20)表述的圆球图象轮廓线的参数 n 后就得出球心的三维坐标 R_0 。

$$R_0 = nr_{sp}/\sqrt{n^T n - 1} \quad (21)$$

应当指出,用上述技术要比先提取椭圆参数再计算球心参数的方法有效得多。这是因为,一般的椭圆有 5 个自由参数,而作为球图象轮廓线的椭圆仅有 3 个自由参数。

例 4 椭球情况

必须指出,由于二次曲线至多仅有 5 个自由度,因此从单视图轮廓线能且只能复原自由度不超过 5 的二次曲面的形状和三维位姿。例如,一般的椭球 $(R - R_0)^T H A H^T (R - R_0) = 1$ 有 9 个自由度(椭球心 R_0 三个,旋转阵 H 三个, A 表示的轴半径三个),即使从模型先验地已知三个轴半径的大小,还有 6 个自由参数未知。这 6 个自由度实际上等价于从椭球模型到它的实体的平移变换和旋转变换的 6 个参数。可见,从单视图轮廓线复原一般的椭球是不可能的,对它只能通过多视图轮廓线来复原。

不失一般性,我们设它为一椭圆绕其长轴旋转一周得到,如图 5 所示。这样,如设 R 为其表面上一点,通过 R 的截面与长轴 c 交于截面圆的圆心 R_a ,

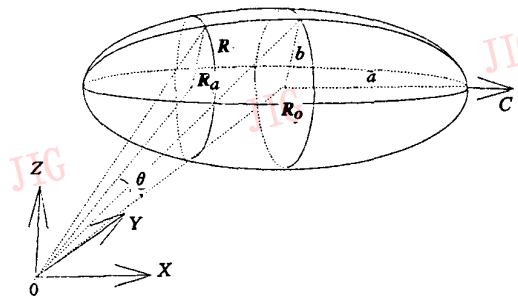


图 5 椭球情况

Fig. 5 Ellipsoid case

并设椭球中心为 R_o , 长短轴半径分别为 a 和 b , 则由几何关系易证

$$\left(\frac{|R_a - R_o|}{a}\right)^2 + \left(\frac{|R - R_a|}{b}\right)^2 = 1 \quad (22)$$

由于矢量 $R_a - R_o$ 为矢量 $R - R_o$ 在长轴上的投影, $I - cc^T$ 为其投影算子, 因此 $R_a - R_o = (I - cc^T)(R - R_o)$

把它代入式(22)后不难知, 对我们所讨论的椭球, 有

$$A_{el} = I - (1 - k^2)cc^T, \quad B_{el} = A_{el}R_o \text{ 和 } c_{el} = R_o^T A_{el} R_o - b^2 \quad (23)$$

其中, $k = b/a < 1$ 。这儿, 下标 el 标记椭球 (Ellipsoid)。显然, 因为长短轴可从椭球模型已知, 式(22)仅有 5 个待定参数, 所以这样的椭球也可从其单视图轮廓线唯一地复原, 并且其中心确定其三维位置, 其长轴方向确定其三维姿态。把式(22)代入式(4)后不难有

$$b_{el} = (r_o^T A r_o - b_o^2) A - A r_o r_o^T A$$

$$\text{其中 } r_o = R_o / |R_o|, b_o = b / |R_o| \quad (24)$$

可以证明实对称阵 B_{el} 可本征值-一本征向量分解为

$$B_{el} = H_{el} \Lambda_{el} H_{el}^T$$

$$\text{其中 } H_{el} = E_{el} H_o, E_{el} = [e_1 \ e_2 \ e_3],$$

$$e_1 = r_o, e_2 = (c - \sigma_1 r_o) / \sigma_2, e_3 = e_3 \times e_2,$$

$$H_o = \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha & 0 \\ -\sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\Lambda_{el} = \begin{bmatrix} \lambda_{el}^{(1)} & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{el}^{(2)} & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_{el}^{(3)} \end{bmatrix},$$

$$\sigma_1 = c^T r_o, \sigma_1 = \sqrt{1 - \sigma_1^2},$$

$$\lambda_{el}^{(1)} < 0 < \lambda_{el}^{(2)} < \lambda_{el}^{(3)},$$

因此, 在我们使用文献[1]的曲线鲁棒提取技术提取了由式(24)表述的椭球图象轮廓线的参数阵 B_{el} 后就可由下述计算得出椭球位置 R_o 和椭球姿态 c_o 。

步 1 把实对称阵 B_{el} 本征值-本征向量分解为 $B_{el} = H_{el} \Lambda_{el} H_{el}^T$, 其中应使其本征值阵满足

$$\lambda_{el}^{(1)} < 0 < \lambda_{el}^{(2)} < \lambda_{el}^{(3)} \text{ (必要时把 } B_{el} \text{ 乘以 } -1), \text{ 并令 } H_{el} = [h_1 \ h_2 \ h_3]$$

步 2 计算 $\lambda_{el}^{(i)} = \lambda_{el}^{(2)} / \lambda_{el}^{(3)}, i = 1, 2, w = \overline{\lambda_{el}^{(1)}} + \overline{\lambda_{el}^{(2)}} - \overline{\lambda_{el}^{(1)}} \overline{\lambda_{el}^{(2)}} (1 + k^{-2}), b_o^2 = -\overline{\lambda_{el}^{(1)}} \overline{\lambda_{el}^{(2)}} / w,$

$$\sigma_1^2 = \frac{(1 - b_o^2 - k^2/w)}{(1 - k^2)}, \sigma_2^2 = 1 - \sigma_1^2, \alpha = \frac{1}{2} \text{tg}^{-1} \left(\frac{2\sigma_1 \sigma_2 b_o^2 (1 - k^2) (\overline{\lambda_{el}^{(2)}} - \overline{\lambda_{el}^{(1)}})}{-\overline{\lambda_{el}^{(1)}} (k^2 - b_o^2 (1 - k^2)) (\sigma_1^2 - \sigma_2^2)} \right),$$

$$c = [h_1 \ h_2] \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha \\ -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \end{bmatrix}, R_o = [h_1 \ h_2] \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha \\ -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b/b_o \\ 0 \end{bmatrix}.$$

不难看出, 此椭球三维复原算法是很简单有效的。我们在此算法中用最大本征值尺度其它两个本征值是考虑到乘以任何正常数仍为椭球图象轮廓线的参数阵。应当指出, 有两个不等的正本征值和一个负本征值是椭球图象轮廓线参数阵的特征, 这可有效地用于区别椭球与球。

3 实验

我们在本文开发的技术已集成进我们所研制的实时水下三维视觉系统, 该系统成功地导引水下智能机器人(AUV)智水一号和二号进行了大量的智能试验, 其中包括自主剪缆作业、自主投掷作业和自主避障等。这些试验要求我们的视觉能实时鲁棒精确地识别和三维复原感兴趣目标, 其中包括悬浮的锚雷球、锚雷链、圆筒和悬挂于水底的圆球、椭球等二次曲面体。

尽管在这些试验中, 水池的清晰度并不好, 水中有大量漂浮物、气泡和大小不等的游鱼, 池底和池壁有大量的杂散图案, 布设在水中的目标也常互相干扰, 自然照明光变化得很厉害, 我们的视觉系统由于采用了本文开发的技术, 在所有的实验中仍取得了十分令人满意的成功。

这些实验表明, 我们的视觉系统在较恶劣的工作条件下达到了几乎百分之百的正确识别率和几乎百分之百的虚警率, 并且其复原精度达到了 1.47% 的平均误差和 1.17% 的平均标准离差。

图 6 至图 9 示出了其中的几例。在每个图片中, 由本文的技术所复原出的三维信息简要地示于其下部(仅示出了目标的形心), 并且据此信息重透视投影出的目标图象轮廓线已迭加于目标的水下图象上。可以清楚地看出, 在所有情况中它与目标的实际图象的边界吻合得很好。这例证了本文的技术是鲁棒和精确的。

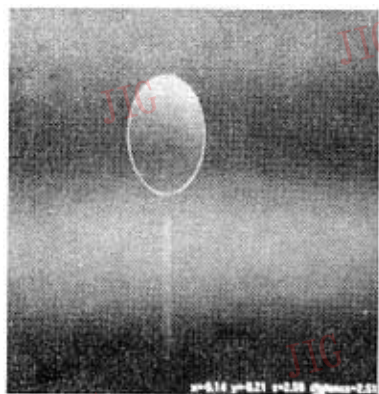


图 6 似锚雷体的球

Fig. 6 Sphere of a mine-like solid

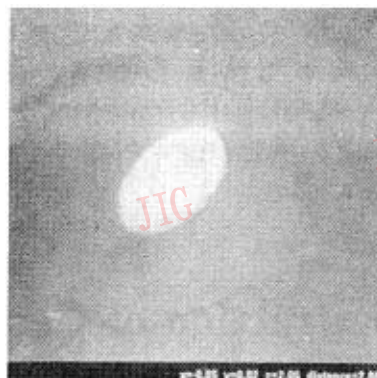


图 9 悬放于水底的椭球

Fig. 9 Ellipsoid lying on pillo floor

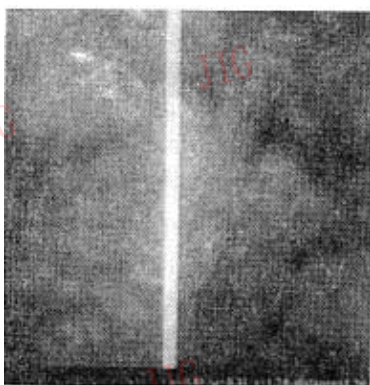


图 7 似锚雷体的链

Fig. 7 Cable of a mine-like solid

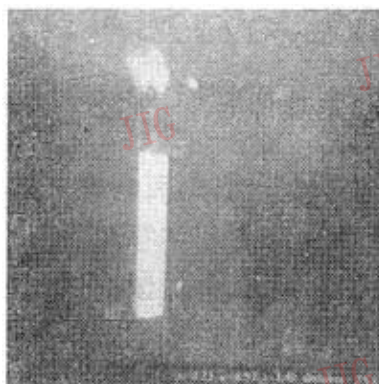


图 8 悬浮于水中的圆柱障碍物

Fig. 8 Cyllder obstacle floating in water

4 结束语

本文根据二次曲面体透视成像时其轮廓线必须满足深度唯一性约束的原理,证明了其图象轮廓线必为二次曲线,显式地推导了二次曲面体的图象轮廓线方程参数和二次曲面参数之间的关系,使得自由度不大于 5 的二次曲面体可由其单视图轮廓线复原其三维位姿。然后,我们显式地给出了圆柱、圆锥、圆球和椭球等 4 例的三维位姿复原公式,由这些公式我们就可从这些几何体的每一个的图象轮廓线参数直接了当地计算其三维位姿。由于我们使用了在文献[4]中开发的技术来鲁棒精确地提取直线和二次曲线,使得这些二次曲面体的三维复原很鲁棒和精确。我们的实验证明了此技术的正确性和有效性。

参考文献

- 1 Yang Zhonggen, et. al., Robustly, Exactly and Real-time Extracting Straight Lines and Conics from a Gray-level Image, ICNNP'95, 1995; 1410~1413.
- 2 Brady M, Yuille A. An Extremum Principle for Shape from Contour, IEEE Tr. PAMI 1984, 6, 288~301.
- 3 Ulupinar F, Nevatia R. Shape from Contour, IEEE Tr. PAMI 1995, 17(2), 120~135.
- 4 Yang Zhonggen, et. al., A Real-time 3D Vision System Guiding AUV in Underwater Mission, ACCV'95, Vol. 3 of 3, Singapore, Dec. 1995; III-509~III-513.



杨忠根,哈尔滨工程大学电子工程系副教授。1969年毕业于哈尔滨军事工程学院海军工程系,1978年研究生入学于东南大学无线电工程系,1981年获工学硕士。曾于1987~1988年赴美国休斯顿大学电气工程系进修。现从事信号与信息处理、图象处理、模式识别、计算机视觉的教学和科研。

Extraction of Conicoid from the Gray-Level Image of Its Single View

Yang Zhonggen, Luan Xiaoming

Zhao Changbing

(Dept. of EE, Harbin Eng. Univ., Harbin 150001) (Robot Research Inst., Polytechnic Univ. of Harbin, Harbin 150001)

Abstract A new technique to extract the 3-D vision information of conicoids robustly from their gray-level image is successfully developed in this paper. The closed mapping relationship between the 3-D position-and-attitude of a conicoid and its image contour is explicitly derived. The relationship can be applied to efficiently determining the position and attitude of a conicoid from the conics robustly extracted from the gray-level image by means of the technique mentioned in [1]. The experiments have demonstrated that the technique is fast, efficient and robust.

Keywords 3-D shape restoration, 3-D position and attitude determination, Conicoid, Contour, Perspective projection, Restrain on depth uniqueness

好书推介

《遥感图像目视解译原理与方法》

濮静娟主编 中国科学技术出版社出版

是一部集基础性、理论性和实用性于一体的综合性遥感读物,内容丰富,论述详尽,图文并茂。即可充作遥感工作者的工具书,又是指导初学者入门的较好的教科书。本书深得农林水利、地质地理、军事测绘、土地管理、环境保护、城市规划、资源调查等部门科研、生产工作者,以及有关大专院校师生欢迎。有意购买者请与中国科学院遥感应用研究所濮静娟、周艺联系。

通讯地址:北京 9718 信箱(100101)中国科学院遥感应用研究所