

未标定单幅结构场景图像的三维重构

杨 敏 沈春林

(南京航空航天大学自动化学院, 南京 210016)

摘 要 提出了一种单视三维重构方法, 该方法是利用用户提供图像点及其对应的三维点之间几何信息。由于结构场景是由大量平面构成的, 存在大量的平行性、正交性约束, 因此该方法主要应用于结构场景的三维重构。首先, 相机定标和计算每个平面的度量信息, 即先基于3组互相垂直方向的影灭点, 对方形像素相机标定, 再利用影灭线和圆环点像, 对每个平面度量校正; 然后考虑每个校正平面的尺度因子和非正交平面间的相对面向, 从而将所有校正后的平面缝合起来。采用真实图像进行实验, 实验结果表明, 该方法简单易用。

关键词 单视三维重构 圆环点 相机定标 度量校正

中图分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2004)04-0456-04

3D Reconstruction of Structured Scene from One Uncalibrated Image

YANG Min, SHEN Chun-lin

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016)

Abstract In this paper, a method for performing single-view 3D reconstruction is present, in which the user provides image points and geometric information about the corresponding 3D points. The main application is to structured scene, mostly planar structures where there are plentiful constraints to be had from parallelism and orthogonality. There are two components to the reconstruction process. First, the camera calibration and metric structure of each plane is computed, that is to calibrate a square pixel camera from three vanishing points of orthogonal directions and metric rectify each plane by computing the imaged circular points and the vanishing line. The second stage involves stitching the individually rectified planes together, accounting for the arbitrary scale factors in the rectification of each plane and the relative orientation of planes not known to be orthogonal. Real image have been used to test the proposed method, and good results have been obtained and have demonstrated the proposed method is easy to use.

Keywords single-view 3D reconstruction, circular points, camera calibration, metric rectification

1 引 言

计算机视觉文献中, 基于图像的三维重构方法有多种, 大量工作是利用多视点图像, 来建立复杂场景精确、完整的三维模型, 如矩阵分解算法^[1]是在正交投影相机模型基础上实现的, 特点是将由二维图像点坐标构建的测量矩阵分解为表示相机运动和空间物体三维几何形状的2个矩阵; 文献^[2]从理论和

实践上解决了可变内部参数下的自标定问题, 并相应地给出了一种比较实用的基于优化的自标定方法, 从而利用未标定图像序列, 进行三维欧氏重构。上述方法在某些特定情况下, 如已消失的建筑, 只留下单张照片, 这些重构方法就不可行。对于建筑物等结构场景, 如果充分考虑场景的几何属性, 如共面性、正交性、平行性等, 则三维场景重构的质量可大大地提高^[3], 由于传统方法没有充分考虑这些几何属性, 近些年, 提出了多种单视三维重构方法, 如选择一个基准面, 计算它的影灭线和位于基准面垂直

方向的影灭点,然后基于一个单点到基准面的参考距离,计算场景中每一个特征点到基准面的垂直距离^[4];通过人工交互定义正交方向的点和平行线,然后基于一个带约束的优化算法,同时重构出点和面^[5]。单视重构方法由于无需事前知道相机参数,所以在几何建模、CAD 中有大量的应用前景,但是该方法必须通过人工交互,给出场景结构的几何信息和约束。

本文考虑单视结构场景图像的三维重构问题。由于在许多情况下,利用结构场景中几何属性,从单幅图像本身,可获取场景的度量信息,进行三维重构,因此提出了将相机定标和平面度量校正结合起来,进行结构场景的三维重构的方法。

2 单视标定

假定畸变因子为 0、纵横比为 1 的简单相机模型,利用场景中 3 组互相正交的平行线,就可求出相机的其余 3 个参数^[6]。当 3 组互相正交的平行线所对应的 3 个影灭点 $((u_i \ v_i \ 1)^T, i=1,2,3)$ 已知时,相机内部参数和未知非零常数因子 λ_i 的约束关系为^[7]

$$\begin{bmatrix} u_1 & u_2 & u_3 \\ v_1 & v_2 & v_3 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 & u_2 & u_3 \\ v_1 & v_2 & v_3 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^T = \mathbf{K}\mathbf{K}^T \quad (1)$$

式中, \mathbf{K} 是相机的内部参数阵

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} f & 0 & u_0 \\ 0 & f & v_0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, f 为相机焦距, u_0, v_0 表示主点坐标,是光轴与图像面的交点,则式(1)可改写成 6 个线性参数方程(从对称矩阵的 6 个参数得出),则可解出相机 3 个内部参数和未知的非零常数因子 λ_i^2 。几何解释:主点就是以 3 个影灭点为顶点的三角形的垂心。

3 度量校正

度量校正,就是利用场景中的几何约束,对某个场景面在图像上投影面进行校正,校正后的投影面,与所对应的场景面有相同的度量信息,如对于非平行的线段,角度和线段之比维持不变。

如图 1 所示,场景面在空间同无穷远平面 π_∞ 的交线,称为无穷远直线。无穷远直线同绝对二次曲线

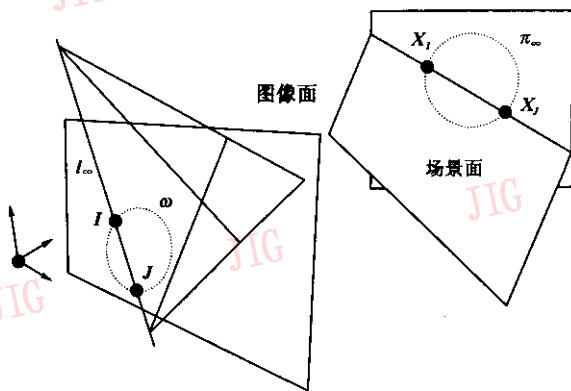


图 1 度量校正所用圆环点及其投影,无穷远线和影灭线的关系图

的两个交点 X_1, X_2 称为场景面的圆环点。绝对二次曲线的投影,即像是 $\omega; X_1, X_2$ 圆环点的像是 I, J ;无穷远直线的像是影灭线 l_∞ 。

如图 2 所示,左边是一个投影扭曲的矩形,投影变换 H_p 将它映射成平行四边形,将影灭线 l_∞ 映射到无穷远;仿射变换 H_a 将平行四边形映射成矩形。当估算出结构场景图像上某个场景面的影灭线 l_∞ 时,就确定了仿射属性,即找到投影变换 H_p 。

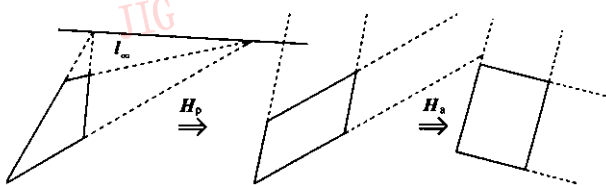


图 2 度量校正中投影变换和仿射变换示意图

影灭线由下式计算

$$l_\infty = (l_1 \ l_2 \ 1)^T = \mathbf{u} \times \mathbf{v} \quad (3)$$

其中, \mathbf{u}, \mathbf{v} 是两个影灭点,分别对应图像上该平面的 2 组正交平行线。

当估算出结构场景图像上某个场景面的圆环点像 I, J ,就确定了可度量属性,即找到仿射变换 H_a ,校正后的平面两边保持互相垂直,边长之比等同于真实场景面边长之比。

在欧氏空间中,每个场景平面上的圆环点是一个复数共轭点对,它的坐标为 $(1, \pm i, 0)^T$,位于无穷远直线上。从欧氏空间平面到图像面的射影变换为 H^{-1} ,圆环点的像为^[8]

$$\begin{cases} \mathbf{I} = H^{-1}(1, i, 0)^T = \\ (\alpha - i\beta, 1, -l_2 - \alpha l_1 + i l_1 \beta)^T \\ \mathbf{J} = \text{conj}(\mathbf{I}) \end{cases} \quad (4)$$

其中, α, β 是圆环点像 I, J 的复数组成部分, I, J 互

为共轭。一旦图像面上圆环点的像确定下来,就确定了 α, β, l_1, l_2 这些参数,也就确定了变换 H 。

整个变换 H 有投影变换 H_p 和仿射变换 H_a 两部分组成,它有4个自由度,即

$$H = H_a H_p = \begin{pmatrix} \frac{1}{\beta} & -\frac{\alpha}{\beta} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ l_1 & l_2 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\beta} & -\frac{\alpha}{\beta} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ l_1 & l_2 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

如摄像机内部参数 K 已知,则绝对二次曲线的像 $\omega = K^{-T} K^{-1}$ 也已知。由于圆环点的像都位于 ω 上,度量校正平面可通过影灭线 l_∞ 与 ω 的交点 I, J 确定,交点 I, J 中的未知仿射参数 α, β 可通过下式计算

$$I^T \omega I = 0 \quad (6)$$

$$\text{其中, } \omega = \begin{pmatrix} \omega_1 & \omega_2 & \omega_3 \\ \omega_2 & \omega_3 & \omega_5 \\ \omega_4 & \omega_5 & \omega_6 \end{pmatrix}。$$

用影灭线 l_∞ 和 α, β 表示 I

$$I = (I_1, I_2, I_3)^T = (\alpha - i\beta, 1, -l_2 - \alpha l_1 + i l_1 \beta)^T = (I_1, 1, -l_2 - l_1 I_1) \quad (7)$$

将式(7)代入式(6),可得

$$(\omega_1 - 2l_1\omega_4 + l_1^2\omega_6)I_1^2 + 2(l_1l_2\omega_6 + \omega_2 - l_1\omega_5 - l_2\omega_4)I_1 + \omega_3 - 2l_2\omega_5 + l_2^2\omega_6 = 0 \quad (8)$$

如纵横比为1,畸变因子为0,绝对二次曲线的像为

$$\omega \sim \begin{pmatrix} 1 & 0 & -u_0 \\ 0 & 1 & -v_0 \\ -u_0 & -v_0 & f^2 + u_0^2 + v_0^2 \end{pmatrix} \quad (9)$$

其中, u_0, v_0, f 是相机内部参数,“ \sim ”表示在一个常数因子下相等。将式(9)代入式(8)可得

$$(1 + 2u_0l_1 + l_1^2(u_0^2 + v_0^2 + f^2))I_1^2 + 2(l_2u_0 + l_1v_0 + l_1l_2(u_0^2 + v_0^2 + f^2))I_1 + 2l_2v_0 + l_2^2(u_0^2 + v_0^2 + f^2) + 1 = 0 \quad (10)$$

式(10)的解是一对共轭复数根, α, β 分别取其实部和虚部。

总之,影灭线与圆环点像确定了场景面在图像上投影面的度量信息。

4 场景面之间夹角

当相机定标后,得到相机内部参数 K ,则用单个影灭线就可完全校正所对应的平面,确定该平面在相机坐标系中的面向方位。当相机内部参数 K 和图像上两个场景面的影灭线已知时,则可计算两个场景面之间的相对面向,即两个平面的夹角。

考虑一个场景三维平面 $\pi = (\pi_1 \ \pi_2 \ \pi_3 \ \pi_4)^T$,该平面的面向,可用法向量 $n_\pi = (\pi_1 \ \pi_2 \ \pi_3)^T$ 描述。平面 π 同无穷远平面相交于线 $\pi_\infty = (0 \ 0 \ 0 \ 1)^T$,这条线的投影就是该场景面在图像上的影灭线 $l_\infty = K^{-T} n_\pi$ 。平面 π 的法向量,在相机坐标系中表示为

$$n_\infty = K^T l_\infty$$

两个场景平面之间的角度可用平面法向量的内积表示

$$\cos(\theta) = \frac{n_{\pi_1}^T n_{\pi_2}}{\|n_{\pi_1}\| \|n_{\pi_2}\|} = \frac{l_{\infty 1}^T \omega^{-1} l_{\infty 2}}{\sqrt{l_{\infty 1}^T \omega^{-1} l_{\infty 1}} \sqrt{l_{\infty 2}^T \omega^{-1} l_{\infty 2}}} \quad (11)$$

其中, $\omega = K^{-T} K^{-1}$, n_{π_1}, n_{π_2} 分别是两个场景面的法向量, $l_{\infty 1}, l_{\infty 2}$ 分别是两个场景面在图像上的影灭线,由此就可确定非正交平面的相对面向。

5 实验与结论

测试图像大小为 250×250 ,特征点提取过程为先用Hough变换提取直线,再求出直线的交叉点(提取小房子顶点作为特征点),如图3所示。

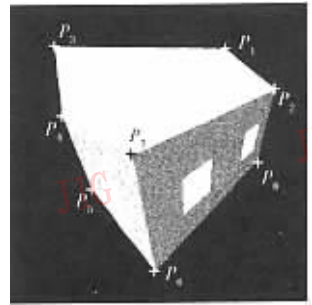


图3 测试图像及其提取的特征点

人工输入数据:点 P_4, P_5, P_6, P_7 组成的平面,点 P_7, P_6, P_8, P_2 组成的平面与点 P_5, P_6, P_8 组成的平面,三者之间互相垂直;3组平行线:一组是线 P_4P_5 ,线 P_7P_6 ,线 P_2P_8 ;一组是线 P_3P_1 ,线 P_7P_2 ,线

P_6P_8 ; 一组是线 P_4P_7 , 线 P_5P_6 。这3组平行线确定了3个方向的影灭点: $(149.5119, 357.6925)$, $(293.2238, 40.2819)$, $(4.6772, 70.6310)$ 。由式(1)可得:主点为 $(125.0514, 125.1320)$, 焦距为 124.9768 。点 P_7, P_2, P_6, P_8 组成的平面, 度量校正后如图4(a)所示, 通过对映射后的点计算, 可得(线 $P_7P_2 +$ 线 P_6P_8) 与(线 $P_7P_6 +$ 线 P_2P_8) 距离之比为 2.1519 ; 点 P_4, P_5, P_6, P_7 组成的平面, 度量校正后如图4(b)所示, 通过对映射后点计算, 可得(线 $P_4P_7 +$ 线 P_5P_6) 与(线 $P_7P_6 +$ 线 P_4P_5) 距离之比为 1.3410 ;

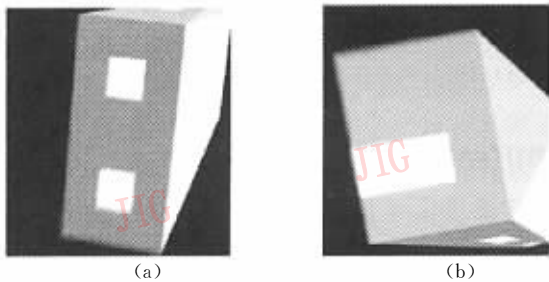


图4 平面度量校正示意图

由式(11)计算可得, 点 P_7, P_6, P_8, P_2 组成的平面和点 P_1, P_3, P_7, P_2 组成的平面之间夹角为 51.77° , 由此可计算出点 P_3 到线 P_4P_7 之间的距离与线 P_7P_6 距离之比为 0.5282 。

设物体坐标系原点固定在点 P_6 , 令线 P_6P_7 距离为 1 , 点 P_6 到 P_7 的方向为 Z 轴正向, 点 P_6 到 P_8 的方向为 X 轴正向, 点 P_6 到 P_5 的方向为 Y 轴正向; 则各点坐标分别如下

$$\begin{aligned} P_6(0, 0, 0), P_5(0, 1.3410, 0), P_8(2.1519, 0, 0), \\ P_7(0, 0, 1), P_2(2.1519, 0, 1), P_4(0, 1.3410, 1), \\ P_3(0, 0.6705, 1.5282), \\ P_1(2.1519, 0.6705, 1.5282) \end{aligned}$$

由此就得到物体的三维欧氏重构。

实验表明, 本文单视重构方法确实可行, 但要注意的是: 单视重构并不是完全三维重构, 与立体或多视重构相比, 只允许测量特别的平面或在特别方向的点, 两个普通点间的三维距离是不可能测量的, 重构的场景是有限制的, 一般是如建筑物这样有平面组成的人造结构场景。

参考文献

- 1 Tomasi C, Kanade T. Shape and motion from image streams under orthography: a factorization method [J]. International Journal of Computer Vision, 1992, 9(2): 137~154.
- 2 Pollefeys Marc, Koch Reinhard, Gool Luc Van. Self-calibration and metric reconstruction in spite of varying and unknown internal camera parameters [A]. In: Proceedings of the Sixth International Conference on Computer Vision [C], Bombay, India, 1998: 90~95.
- 3 Bougnoux Sylvain. From projective to Euclidean space under any practical situation, a criticism of self-calibration [A]. In: Proceedings of the Sixth International Conference on Computer Vision [C], Bombay, India, 1998: 790~796.
- 4 Criminisi A, Reid I, Zisserman A. Single view metrology [J]. International Journal of Computer Vision, 2000, 40(2): 123~148.
- 5 Strum P F, Maybank S J. A method for interactive 3D reconstruction of piecewise planar objects from single views [A]. In: Proceedings of British Machine Vision Conference [C], Nottingham England, 1999: 265~274.
- 6 Caprile V, Torre B. Using vanishing points for camera calibration [J]. International Journal of Computer Vision, 1990, 4(2): 127~140.
- 7 Cipolla R, Drummond T, Robertson D. Camera calibration from vanishing points in images of architectural scenes [A]. In: Proceedings of British Machine Vision Conference [C], Nottingham England, 1999: 382~391.
- 8 Leibowitz D, Criminisi A, Zisserman A. Creating architectural models from images [A]. In: Proceedings of EuroGraphics [C], Vienna, Austria, 1999, 18: 39~50.

杨敏 1969年生, 讲师。2000年于新疆大学控制理论与控制工程专业获硕士学位, 2004年于南京航空航天大学导航、制导与控制专业获博士学位。研究方向为基于未标定图像的三维重构、多视点几何、智能控制和软计算。



沈春林 1935年生, 教授, 博士生导师, 现任自动化学院飞行控制研究所所长, 兼任自动控制研究所所长、中国飞行控制研究所兼职研究员、美国纽约科学院院士、美国IEEE学会高级会员。研究方向为超低空飞行及其低空突防技术、精确制导与精确打击技术、智能控制技术、网络与控制技术。

