

基于场景几何约束未标定两视图的三维模型重建

杨 敏 沈春林

(南京航空航天大学自动化学院, 南京 210016)

摘 要 提出了一种从两幅未标定图象重建场景三维模型的方法. 这种方法充分利用了人造结构场景中大量存在的平行性和正交性几何约束, 即利用每幅视图中三组互相垂直的平行线, 计算出 3 个影灭点, 从而对每幅视图进行标定. 对两幅未标定图象, 从基本矩阵只能得到射影重构, 如果每幅图象都已标定, 则可将基本矩阵转化为本质矩阵. 三维重构过程有两个步骤: 先是恢复相机的位置和运动; 后是用三角测量法计算出点的三维坐标. 对多平面组成的场景进行三维重构实验, 所得三维模型产生新的视点图象, 与所观察的场景一致, 重构的两个平面夹角与实际值相近, 实验结果表明, 该算法是行之有效的.

关键词 计算机图象处理(520·6040) 影灭点 相机标定 基本矩阵 本质矩阵 三角测量法 三维重构

中图法分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2003)08-0872-05

Uncalibrated Two-views 3D Reconstruction Based on Geometric Constraints in Scene

YANG Min, SHEN Chun-lin

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

Abstract In this paper, the methods for the uncalibrated two-views 3D reconstruction is proposed. The methods employ geometric constraints available from geometric relationships that are plentiful in manmade structure—such as parallelism and orthogonality of lines and planes, these constraints lead to simple method to calibrate the intrinsic parameters of the camera. This is done by determining the vanishing points associated with parallel lines in the world, under the assumption of zero skew and known aspect ratio, three mutually orthogonal directions are exploited to give the camera calibration matrix. It is possible to obtain only a projective reconstruction from the fundamental matrix. If each image is calibrated, it be able to convert from the uncalibrated fundamental matrix to the essential matrix. A Euclidean reconstruction would be preferable. Once the essential matrix is recovered, if the first camera is assumed to be at origin of the coordinate system, then it is a simple matter to calculate the rotation and translation of the second camera relative to the first. After the camera intrinsic and extrinsic parameters had been estimated, camera projection matrices may be recovered and used to estimate the structure. The 3D reconstruction process has two stages; the first to recover the camera positions and motions, the second step involves triangulation to recover the 3D points. The validity of the proposed algorithm is confirmed by experiment for a number of multi-plannar scenes. The reconstructed scene is modeled. New images are generated of the model for new view points. The geometry agrees with our perception of scene. The angle between the two reconstructed planes looks just like a right angle.

Keywords Computer image processing, Vanishing points, Camera calibration, Fundamental matrix, Essential matrix, Triangulation, 3D reconstruction

0 引言

在计算机视觉领域中, 由多幅图象来恢复摄像

机运动参数和空间物体表面的 3D 几何形状问题称为多视点 3D 重构. 对两幅未标定的图象, 从基本矩阵(Fundamental Matrix)只能得到射影重构^[1]. 为了进行三维可度量重构(metric reconstruction----

基金项目: 国防科工委预研基金(B0122-035)

收稿日期: 2002-12-09; 改回日期: 2003-03-21

能够正确描述场景中长度比例和角度大小), 必须要恢复相机的位置和运动; 以及用三角测量法计算出点的三维坐标. 在恢复相机的位置和运动时, 需要将没有标定的基本矩阵转化为本质矩阵(Essential Matrix), 这牵涉到自标定(虽然在某些情况下, 可采用定标网格), 而一旦本质矩阵恢复, 设第 1 相机为坐标系原点, 就可计算出第 2 相机相对于第 1 相机的旋转和平移, 当估算出这些参数, 就可恢复相机的投影矩阵, 重建三维模型.

本文提出一种从两幅未标定图象重建场景三维模型的方法. 这种方法充分利用了人造结构场景(如建筑物和坦克等军事装备)中大量存在的平行性和正交性几何约束信息, 即利用每幅视图中 3 组互相垂直的平行线, 计算出 3 个影灭点, 从而对每幅视图进行标定, 即相机标定. 对已不存在的建筑和不能直接测量的军事装备, 利用有限数量照片, 采用该方法就可以恢复三维结构. 与 Debevec 方法^[2]不同的是: 后者需要大量相片, 并且需要知道相机位置和相机内部参数; 而本文方法则不需要知道这些参数.

1 单视图标定

针孔相机模型中, 从欧氏三维空间到二维图象的透视投影变换, 可用一个 3×4 的投影矩阵 P 描述

$$\lambda \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ 1 \end{bmatrix} = K[R \ t] \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, $[X_i, Y_i, Z_i, 1]^T$ 是三维空间第 i 个点, $[u_i, v_i, 1]^T$ 是其在图象上投影坐标, λ_i 是其对应的非零常数因子; R 是 3×3 的旋转矩阵, t 是 3×1 的平移向量, R, t 描述相机在世界坐标系中的面向、位置; K 是一个 5 参数上三角矩阵, 是相机的内部参数阵

$$K = \begin{bmatrix} f_u & s & u_0 \\ 0 & f_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, u_0, v_0 表示主点(光轴与图象面的交点)坐标; f_v 为图象 v 轴的尺度因子; f_u 为图象 u 轴的尺度因子, 两者之比称为纵横比; s 为畸变因子, 如像素为矩形, 即 v 轴与 u 轴的夹角为 90° 时, s 为 0. 随着相机硬件技术的发展, 某些内参数已非常接近理想值(如主点坐标近似图象中心, s 近似于 0, 纵横比近似于 1), 在精度要求不是很高的场合, 如重构所得三

维模型用于显示, 可以考虑采用这些理想值, 以简化相机模型, 从而大大简化标定过程. 如对 s 为 0 和纵横比为 1 的 CCD 相机, 即方形像素相机, 有 f_u 与 f_v 相等, 可得

$$K = \begin{bmatrix} f & 0 & u_0 \\ 0 & f & v_0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, f 为 v 轴与 u 轴的尺度因子.

由式(1)和 3 个影灭点 $((u_i, v_i, 1)^T, i=1, 2, 3)$ 所对应方向互成直角, 可导出投影矩阵参数约束

$$\begin{bmatrix} \lambda_1 u_1 & \lambda_2 u_2 & \lambda_3 u_3 \\ \lambda_1 v_1 & \lambda_2 v_2 & \lambda_3 v_3 \\ \lambda_1 & \lambda_2 & \lambda_3 \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, $\lambda_i (i=1, 2, 3)$ 是未知非零常数因子. 式(4)可用相机内部参数阵 K 和旋转矩阵 R 表示

$$\begin{bmatrix} u_1 & u_2 & u_3 \\ v_1 & v_2 & v_3 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} = KR \quad (5)$$

由旋转矩阵 R 的属性: $RR^T = I$ (单位阵), 可导出相机内部参数和未知尺度因子 λ_i 的约束关系

$$\begin{bmatrix} u_1 & u_2 & u_3 \\ v_1 & v_2 & v_3 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 & u_2 & u_3 \\ v_1 & v_2 & v_3 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^T = KK^T \quad (6)$$

如纵横比和畸变因子已知, 则式(6)可改写成 6 个线性参数方程(从对称矩阵的 6 个参数), 解出相机 3 个未知内部参数和 $\lambda_i (i=1, 2, 3)$. 主点从几何角度看, 就是以 3 个影灭点为顶点三角形的垂心^[1].

2 两视图重构

2.1 基本矩阵及其计算

对极几何是两视图之间固有的投影几何, 它独立于场景结构, 只依赖相机的内部参数和相对位置与面向. 对极几何关系是指将立体视觉中左(右)图中的匹配点映射成右(左)图中的对极线的数学关系, 对于未标定图象, 这一几何关系是可以从匹配点对中获得的唯一信息. 对极几何代数描述形式可以用一个 3 阶、秩为 2 的矩阵——基本矩阵(F 阵)来表示. 令 I_1, I_2 分别是第 1 幅和第 2 幅图象, 若对任意的一对匹配点 $m_1 \in I_1, m_2 \in I_2$, 齐次坐标为 $m_1 = (x_1, y_1, 1)^T, m_2 = (x_2, y_2, 1)^T$ 则矩阵 F 使得

$$(m_2)^T F m_1 = 0 \quad (7)$$

引入符号 $[t]_{\times}$ 来表达三维向量 t 定义的对称矩阵.若 $t = (t_x \ t_y \ t_z)^T$,那么

$$[t]_{\times} = \begin{bmatrix} 0 & -t_z & t_y \\ t_z & 0 & -t_x \\ -t_y & t_x & 0 \end{bmatrix}, t \times x = [t]_{\times} x, \forall x$$

定义本质矩阵为

$$E = t \times R = [t]_{\times} R \quad (8)$$

其中, t 和 R 分别为平移向量和旋转矩阵,说明两相机间的相对位置和面向关系,则

$$E = K_2^T F K_1 \quad (9)$$

其中, K_1, K_2 分别为第1幅和第2幅图象的相机内部参数阵.

基本矩阵估算方法可分为线性算法、非线性优化迭代算法、鲁棒估计算法三大类^[4].当图象提取的特征点位置精确,且两视图特征点不存在误匹配的情况下,可采取线性算法,如文献[5]改进的8点算法,给定8对以上图象匹配点可线性计算基本矩阵.它是通过在计算前对二维数据规范化进行处理(平移和尺度变换),以减少噪声的干扰.

2.2 R 和 t 的计算^[6]

设第1相机为坐标原点,令 t 和 R 分别为第2相机相对于第1相机的平移向量和旋转矩阵.对本质矩阵进行奇异值分解

$$E = USV^T \quad (10)$$

其中, U, V 分别是 3×3 的正交阵; $S = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$,

其中, $\sigma_1 \approx \sigma_2 > 0$

$$R = UWV^T \text{ 或 } R = UW^T V^T \quad (11)$$

$$t = u_3 \text{ 或 } t = -u_3$$

其中, u_3 是 U 的最后一列, $W = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$.

由式(11)可得 R 和 t 的4组解,如何确定正确的一组解?从图象匹配点对中取一数据,作为测试点,计算该点的三维位置,由此确定该三维点在两个相机中的深度,选择在两个相机中深度为正值的 R 和 t ,即为正解.

2.3 三角测量

计算出平移向量 t 和旋转矩阵 R 后,则第1幅和第2幅图象的投影矩阵为

$$P_1 = K_1 [I | 0]; P_2 = K_2 [R | t] \quad (12)$$

其中, I 是 3×3 单位矩阵,表明世界坐标系固定在第1相机上.设 $p_{i,1}, p_{i,2}$ 分别是 P_1, P_2 的3行,三维点(齐次坐标) $\tilde{X} = [X \ Y \ Z \ W]$ 在两幅图象上的投影分别是 $(x_1 \ y_1)$ 和 $(x_2 \ y_2)$,则

$$w \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{1,1} \\ p_{2,1} \\ p_{3,1} \end{bmatrix} \tilde{X} \quad (13)$$

消除非零常数因子 w 可得

$$\begin{bmatrix} p_{3,1}x_1 - p_{1,1} \\ p_{3,1}y_1 - p_{2,1} \end{bmatrix} \tilde{X} = 0 \quad (14)$$

同理对 $(x_2 \ y_2)$ 可得相同式子,这样对每一对应匹配点,单位是像素,可得

$$A \tilde{X} = \begin{bmatrix} p_{3,1}x_1 - p_{1,1} \\ p_{3,1}y_1 - p_{2,1} \\ p_{3,2}x_2 - p_{1,2} \\ p_{3,2}y_2 - p_{2,2} \end{bmatrix} \tilde{X} = 0 \quad (15)$$

由于射影坐标 \tilde{X} 定义在一个非零常数因子下,增加约束 $\|\tilde{X}\| = 1$,矩阵 $A^T A$ 最小特征值所对应的特征向量为解,由此可得欧氏三维点坐标为 $(X/W \ Y/W \ Z/T)$.

3 实验结果

两幅测试图象(250×250)如图1所示.

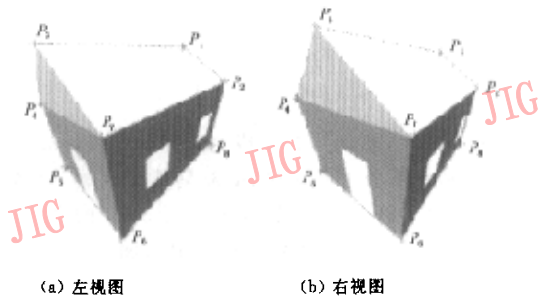


图1 测试所用两幅图象

特征点提取: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),进而从3组相互垂直的平行线算出3个影灭点.计算所得:左图3个影灭点为:(-54.4237, 56.7764), (237.6250, 56.9226), (126.0930, 357.3724);右图3个影灭点为:(4.6772, 70.6310), (293.2238, 40.2819), (149.5119, 357.6925).

利用影灭点,对每幅视图进行标定,即相机标

定. 左图主点为 (126.209 9, 123.830 6), 焦距为 -125.055 4; 右图主点为 (125.051 4, 125.132 0), 焦距为 124.976 8;

利用 8 个特征对应点计算基本矩阵如下

$$\begin{bmatrix}
 0.000\ 000\ 02 & 0.000\ 006\ 99 & -0.000\ 880\ 61 \\
 -0.000\ 000\ 39 & -0.000\ 000\ 07 & -0.004\ 168\ 07 \\
 0.000\ 056\ 60 & 0.003\ 270\ 90 & 0.112\ 414\ 65
 \end{bmatrix}$$

对应点到极线距离均值为 0.099 7 像素.

求出旋转矩阵为

$$R = \begin{bmatrix}
 -0.980\ 753\ 93 & 0.000\ 275\ 52 & 0.195\ 247\ 65 \\
 -0.001\ 612\ 23 & -0.999\ 976\ 34 & -0.006\ 687\ 43 \\
 -0.195\ 241\ 19 & 0.006\ 873\ 50 & -0.980\ 731\ 17
 \end{bmatrix}$$

平移向量为

$$[-0.978\ 429\ 13 \quad 0.000\ 790\ 01 \quad -0.206\ 581\ 26]^T.$$

最后用文中算法, 求得以第 1 相机为坐标系原点的 8 点欧氏三维坐标如表 1 所示.

表 1 以第 1 相机为坐标系原点的 8 点欧氏三维坐标

	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8
X 轴	-2.545 8	-4.234 3	1.312 9	2.969 3	3.009 5	-0.289 1	-0.288 8	-4.351 4
Y 轴	4.313 0	2.332 2	1.908 3	1.179 2	-1.580 4	-2.738 8	-0.036 5	-0.588 0
Z 轴	6.709 9	6.380 5	2.269 9	4.170 5	5.708 1	3.331 9	1.876 1	8.049 8

注: 保留 4 位小数.

采用三角面绘制, 从两个不同视点所看到三维结构如图 2 所示, 3 个点决定一个面, 斜线为三角形的一边. 图 2(a) 是点 P_7, P_6, P_8, P_2 组成的面与点 P_4, P_5, P_6, P_7 组成的面, 两个平面之间的夹角图, 理论值是 90° .

实验结果表明, 本文提出的未标定两视重构方法是有效的, 它利用人造结构场景中大量存在的平行性和正交性几何约束信息, 求出影灭点, 进而对每幅视图标定; 从而将基本矩阵转化为本质矩阵, 然后进行三维模型重建. 本文方法简单实用, 适应于由大

量正交平面组成的人造结构场景, 但并不对所有场景有效. 本文的运动恢复, 即求 R, t , 以及三角测量方法, 对任何场景都是通用的. 本文是利用场景的 3 个影灭点来对方像素相机进行标定, 如对一些图象, 只存在两个影灭点, 如何进行相机定标? 是下一步要做的工作. 总之, 要获得欧氏两视重构, 必须知道相机内部参数, 否则只能获得射影重构. 对于已不存在的建筑物, 如只留下 1 张照片, 是否能进行三维重构, 即单视重构? 是今后的研究方向.

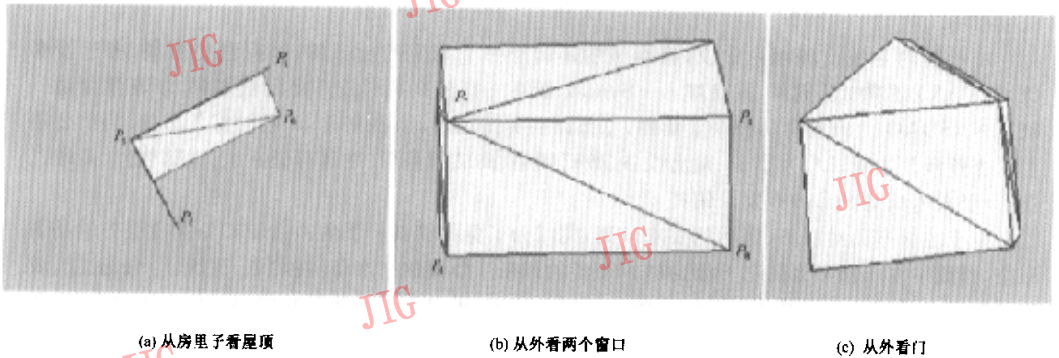


图 2 二维重构后, 3 个不同视点的新视图

参 考 文 献

- 1 Faugeras O. What can be seen in three dimensions with an uncalibrated stereo rig? [A]. In: Proceedings of Second European Conference on Computer Vision [C], S. Margherita, Ligure, Italy, 1992; 563~578.
- 2 Debevec P E, Taylor C J, Malik J. Modeling and rendering architecture from photographs: A hybrid geometry and image-

- based approach [A]. In: Proceedings of ACM SIGGRAPH [C], New Orleans, Louisiana USA, 1996; 11~20.
- 3 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; 2:382~391.
- 4 Zhang Z. Determining the epipolar geometry and its uncertainty—a review [J]. The International Journal of

Computer Vision, 1998, 27(2):161~195.

- 5 Hartley R I. In defense of the 8-point algorithm [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1997, 19(6):580~593.
- 6 Hartley R I, Zisserman A. Multiple view geometry in computer vision [M]. England Cambridge shire: Cambridge University Press, 2000:238~241.



杨 敏 1969年生,2000年获新疆工学院控制理论与控制工程获硕士学位,现为南京航空航天大学自动化学院导航、制导与控制专业博士研究生,研究方向为基本矩阵鲁棒估计、相机自标定、基于多视图象的三维重构、智能控制。



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、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。

新泰主板全面上市

随着国内电脑应用的日益普及,市场空间不断扩展,作为电脑基础骨干的主机板也成为众商家争夺的焦点。由于主板品质的好坏对电脑整机性能影响很大,因此技术实力和生产能力成为主板进入市场的门槛,那些能长期占领市场的品牌也都以技术和品质著称。

近日,盘踞欧美高端市场的新泰(SYNTAX)集团不畏市场竞争的激烈,也把触角伸向了国内市场,在上海投资成立精邦电子科技有限公司,并同期推出六款主板新品,全力进入国内中高端主板市场。

对于国内主板市场用户来说,新泰显然还属于一个陌生的新品牌,但在欧美市场,提起新泰(SYNTAX)可谓如雷贯耳,其品牌——Syntax 新泰一直是高端科技产品的代名词。新泰集团是一家在NASDAQ上市的高科技企业集团,总部设在美国加州,已经具有17年的悠久历史。当前公司主营业务涉及主板、LCD、显卡、输出设备、数码网络、高端服务器、磁盘存储系统、电脑软件、高端工作站、个人电脑等产品的开发及销售。

由于主板产品对服务、售后的要求较高,同时为了保持新泰一贯的高品质产品优质服务的品牌形象,因此早在年初新泰就已开始为国内市场的开拓计划提前作准备。在北京、深圳、上海、武汉、成都等都设立了芯片级维修工厂及完备的售后服务队伍,用以提供迅速及时周到的售后维修业务,并首家提供电脑部件一年免费保修,三年免费维修的服务承诺。在建立了完整的售后服务体系之后,新泰才于近日正式启动其产品销售活动。而本次新泰在国内市场的产品销售将与美国市场保持同步,这意味着国内用户将可以同步享受国际化的高品质产品。凭借集产品研发、供应和综合服务于一体的经营理念以及强大的市场推广能力,新泰必将打破国内主板市场的现有格局,成为高端市场的实力品牌。