

基于一组对应消失线的度量重建*

祝海江⁺, 吴福朝

(中国科学院 自动化研究所 模式识别国家重点实验室,北京 100080)

Metric Reconstruction Based on One Triplet of Corresponding Vanishing Line

ZHU Hai-Jiang⁺, WU Fu-Chao

(National Laboratory of Pattern Recognition, Institute of Automation, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-10-62542946, Fax: +86-10-62551993, E-mail: hjzhu@nlpr.ia.ac.cn, http://www.ia.ac.cn

Received 2003-09-08; Accepted 2004-02-05

Zhu HJ, Wu FC. Metric reconstruction based on one triplet of corresponding vanishing line. *Journal of Software*, 2004,15(5):666~675.

<http://www.jos.org.cn/1000-9825/15/666.htm>

Abstract: A technique for metric reconstruction based on one triplet of corresponding vanishing line in three images is proposed in this paper. Firstly, the infinite homography is computed by using the vanishing line correspondence and the modulus constraint. Then the camera intrinsic parameters are determined linearly by using the property that the infinite homography preserves the image of the absolute conic. Finally a metric reconstruction is obtained. Experiments with simulated data as well as with real images show that the proposed method is workable and applicable in real applications.

Key words: corresponding vanishing line; plane at infinity; infinite homography; camera calibration; metric reconstruction

摘要: 提出了一种由 3 幅图像间一组对应消失线进行度量重建的方法.首先利用对应的消失线和模值约束计算出无穷远平面的单应矩阵,然后根据无穷远平面的单应矩阵保持绝对二次曲线的像不动的性质,线性求解摄像机内参数,最后得到度量重建.模拟实验和真实图像实验均验证了这种度量重建方法的可行性和正确性.

关键词: 对应消失线;无穷远平面;无穷远单应矩阵;摄像机标定;度量重建

中图法分类号: TP391 文献标识码: A

从图像序列重建出场景的三维结构是计算机视觉的主要目标之一.目前,它仍然是计算机视觉领域中的研究热点之一.根据已知信息的不同,三维场景重建主要有以下两类方法:一类是在摄像机运动参数(或称摄像机的外参数)的某些约束^[1]或摄像机内参数的某些约束^[2,3]下进行的三维重建;另一类是在场景几何结构^[4]的某些约束下进行的三维重建.

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.60075004, 60275009 (国家自然科学基金); the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2002AA422230 (国家高技术研究发展计划(863))

作者简介: 祝海江(1971—),男,江西樟树人,博士生,主要研究领域为计算机视觉,三维重建;吴福朝(1957—),男,研究员,博士生导师,主要研究领域为计算机视觉,人工智能.

就场景几何结构约束的三维重建方法而言,文献[5~7]都要求场景中包含3组不同的平行方向或3个互相垂直的方向,先由场景的图像估计出消失点,然后对摄像机进行标定,进而实现度量重建.文献[8]则综合利用由场景中的几何关系(例如建筑物的平行和垂直关系)得到的约束以及关于摄像机的约束对摄像机进行标定,并且通过计算一个物体平面的圆环点,给出对物体平面图像进行校正的方法.文献[9]研究了基于矩形标定摄像机内参数的线性方法.该方法首先通过空间平面上两个非平行矩形的图像来计算两个圆环点的图像,然后由圆环点对摄像机内参数的约束方程来标定摄像机的内参数.总之,以上方法是直接从图像到欧氏空间的重建,要么需要计算出圆环点,要么需要较多的几何信息.

在上述方法中,大多都可以归结为从3组对应消失线实现度量重建.本文将给出仅从一组对应消失线进行度量重建的方法.首先,我们利用一组对应消失线和模值约束^[10]求解无穷远平面的单应矩阵,通常利用模值约束需要求解一个三元四次方程组,而本文仅需求解一元四次方程;然后,再利用无穷远平面的单应矩阵保持绝对二次曲线像不动的性质线性求解摄像机内参数;最后得到度量重建.我们还进一步讨论了这种方法的退化条件.与其他基于几何信息重建方法相比较,本文的方法主要优点如下:

- (1) 它是一个分层重建的过程,即从图像到射影空间,再到仿射空间,最后到欧氏空间的重建过程.这样的重建过程要比直接从图像到欧氏空间的重建鲁棒.
- (2) 它是基于直线的重建,而不是基于圆环点在图像平面上的图像点的重建,从而提高了算法的鲁棒性.
- (3) 它需要的几何信息少,仅需要已知每幅图像上的1条消失线.这在许多场景(特别是人造场景)中都可以得到,例如,从空间中一组平行平面或从空间中任意两组平行线等等,都能获得一条消失线.

1 无穷远平面的单应矩阵与对应消失线

1.1 五参数模型

在本文中,摄像机模型为经典的小孔模型,即摄像机的内参数矩阵为

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} f_u & s & u_0 \\ 0 & f_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

其中, (u_0, v_0) 表示主点坐标, f_u, f_v 分别为图像 u 轴和 v 轴上的尺度因子, s 是畸变因子.并且假定摄像机在移动过程中,内参数保持不变.

1.2 无穷远平面的单应矩阵

一条直线的消失点(vanishing point)是该直线与无穷远平面的交点(即无穷远点)在图像平面上的投影点.三维空间中的一组平行线相交于一个无穷远点,因此平行直线有相同的消失点,即消失点只与直线的方向有关而与直线的位置无关.平面的消失线(vanishing line)是该平面与无穷远平面的交线(即无穷远直线)在图像平面上的像直线.三维空间中的平行平面相交于一条无穷远直线,因此消失线只与平面的法方向有关而与平面的位置无关.两个消失点唯一确定一条消失线.

若设 \mathbf{x} 与 \mathbf{x}' 分别是无穷远平面上的点 \mathbf{X}_∞ 在两幅图像平面上的图像点,如果矩阵 \mathbf{H}_∞ 使得

$$\lambda_0 \mathbf{x}' = \mathbf{H}_\infty \mathbf{x},$$

其中 λ_0 为非零常数因子,则称矩阵 \mathbf{H}_∞ 为无穷远平面关于两幅图像间的单应矩阵.单应矩阵在相差一个非零常数因子的意义下是惟一的,它实现了两幅图像上像点之间的一一对应关系.

无穷远直线在两幅图像平面上的像直线之间也存在对应关系,这个对应关系也可以通过无穷远平面的单应矩阵来描述.更确切地说,令无穷远直线 \mathbf{L}_∞ 在两幅图像中的像直线分别记为 \mathbf{L}_∞^1 和 \mathbf{L}_∞^2 ,则必有

$$\lambda_1 \mathbf{L}_\infty^1 = (\mathbf{H}_\infty)^T \mathbf{L}_\infty^2 \quad (1)$$

其中 λ_1 为非零常数因子.

2 基于一组对应消失线的欧氏重建方法

2.1 确定无穷远平面单应矩阵

假设射影重建已经得到(这可以从图像基元对应计算出来^[4]),即获得 3 幅图像的摄像机投影矩阵:

$$P_1 = [I | \mathbf{0}], P_2 = [H_2 | \mathbf{e}_2], P_3 = [H_3 | \mathbf{e}_3] \quad (2)$$

其中, I 为单位矩阵, H_2 和 H_3 是由空间某一个平面在图像 1 和图像 2 之间以及图像 1 和图像 3 之间诱导的单应矩阵(homography), \mathbf{e}_2 和 \mathbf{e}_3 分别是图像 2 和图像 3 关于图像 1 的极点.

若存在一个空间变换矩阵:

$$A = \begin{bmatrix} I & \mathbf{0} \\ -\mathbf{a}^T & 1 \end{bmatrix}$$

其中 \mathbf{a} 为待求的三维向量,使得

$$P_1^{(a)} = P_1 \cdot A = [I | \mathbf{0}] \begin{bmatrix} I & \mathbf{0} \\ -\mathbf{a}^T & 1 \end{bmatrix} = [I | \mathbf{0}] \quad (3)$$

$$P_2^{(a)} = P_2 \cdot A = [H_2 | \mathbf{e}_2] \begin{bmatrix} I & \mathbf{0} \\ -\mathbf{a}^T & 1 \end{bmatrix} = [H_2 - \mathbf{e}_2 \mathbf{a}^T | \mathbf{e}_2] \quad (4)$$

$$P_3^{(a)} = P_3 \cdot A = [H_3 | \mathbf{e}_3] \begin{bmatrix} I & \mathbf{0} \\ -\mathbf{a}^T & 1 \end{bmatrix} = [H_3 - \mathbf{e}_3 \mathbf{a}^T | \mathbf{e}_3] \quad (5)$$

是摄像机在仿射空间下的投影矩阵,则无穷远平面在图像 1 与图像 2 之间诱导的无穷远单应矩阵^[11]为

$$H_\infty^{(12)} = s_2 (H_2 - \mathbf{e}_2 \mathbf{a}^T) \quad (6)$$

无穷远平面在图像 1 与图像 3 之间诱导的无穷远单应矩阵为

$$H_\infty^{(13)} = s_3 (H_3 - \mathbf{e}_3 \mathbf{a}^T) \quad (7)$$

其中 s_2, s_3 是非零常数因子, \mathbf{a} 是无穷远平面在射影重建坐标系中的方向.

下面我们利用一组对应消失线和模值约束求解向量 \mathbf{a} ,从而可以确定无穷远平面的单应矩阵.令直线 L_1 和 L_2 是图像 1 和图像 2 之间的对应消失线,由式(1)有

$$\lambda_2 L_1 = (H_\infty^{(12)})^T L_2 \quad (8)$$

其中 λ_2 是未知的非零常数.将式(6)代入到式(8)中可得

$$\mathbf{a} = \frac{1}{\mathbf{e}_2^T L_2} (H_2^T L_2 - \frac{\lambda_2}{s_2} L_1).$$

令 $x = \frac{\lambda_2}{s_2}$,则

$$\mathbf{a} = \frac{1}{\mathbf{e}_2^T L_2} (H_2^T L_2 - x \cdot L_1) \quad (9)$$

将式(9)代入式(6)中,可得

$$\frac{\mathbf{e}_2^T L_2}{s_2} H_\infty^{(12)} = (\mathbf{e}_2^T L_2 H_2 - \mathbf{e}_2 L_2^T H_2) + x \cdot \mathbf{e}_2 L_1^T \quad (10)$$

令 $\tilde{H}_2 = \mathbf{e}_2^T L_2 H_2 - \mathbf{e}_2 L_2^T H_2$,则由式(10),有

$$H_\infty^{(12)} \approx \tilde{H}_2 + x \cdot \mathbf{e}_2 L_1^T \quad (11)$$

其中“ \approx ”表示在相差一个常数因子的意义下相等.

不难计算:矩阵 $\tilde{H}_2 + x \cdot \mathbf{e}_2 L_1^T$ 的特征多项式为

$$p(x) = \text{Det}(\lambda I - (\tilde{H}_2 + x \cdot \mathbf{e}_2 L_1^T)) = \lambda^3 + a(x)\lambda^2 + b(x)\lambda + c(x) \quad (12)$$

其中:

$$a(x) = -(\mathbf{e}_2^T L_1) \cdot x - \text{tr}(\tilde{H}_2),$$

$$b(x) = -(\mathbf{e}_2^T (\tilde{\mathbf{H}}_2^T - \text{tr}(\tilde{\mathbf{H}}_2) \cdot \mathbf{I}) \mathbf{L}_1) \cdot x + \sum_{j=1}^3 \text{Det}(\tilde{\mathbf{H}}_2(j, j)),$$

$$c(x) = -((\mathbf{e}_2^T (\tilde{\mathbf{H}}_2)^*)^T \mathbf{L}_1) \cdot x - \text{Det}(\tilde{\mathbf{H}}_2).$$

这里, $\text{tr}(\tilde{\mathbf{H}}_2)$ 表示矩阵的迹, $\tilde{\mathbf{H}}_2(j, j)$ 是矩阵 $\tilde{\mathbf{H}}_2$ 的对角线上的元素所对应的二阶子矩阵, $(\tilde{\mathbf{H}}_2)^*$ 表示 $\tilde{\mathbf{H}}_2$ 的伴随矩阵. 根据模相等约束^[10], 可以得到下面的方程:

$$[b(x)]^3 - c(x)[a(x)]^3 = 0.$$

由于 $a(x), b(x), c(x)$ 至多是 x 的一次式, 所以上式至多是一个四次方程:

$$f_1(x) = a_1 \cdot x^4 + b_1 \cdot x^3 + c_1 \cdot x^2 + d_1 \cdot x + e_1 = 0 \quad (13)$$

其中 a_1, b_1, c_1, d_1, e_1 是常数因子.

将式(9)代入式(7), 根据模值约束相等, 同理我们可以得到未知数 x 的另一个四次方程:

$$f_2(x) = a_2 \cdot x^4 + b_2 \cdot x^3 + c_2 \cdot x^2 + d_2 \cdot x + e_2 = 0 \quad (14)$$

其中 a_2, b_2, c_2, d_2, e_2 是常数因子.

在一般情况下, 通过求解式(13)和式(14)联立组成的方程组, 我们可以惟一确定 x 的值, 从而得到无穷远单应矩阵.

2.2 确定摄像机的内参数和运动参数

由上一节可知, 我们可以从 3 幅图像间的一组对应消失线, 计算出无穷远平面在图像 1 与图像 2 及在图像 1 与图像 3 之间诱导的单应矩阵 $\mathbf{H}_\infty^{(12)}$ 与 $\mathbf{H}_\infty^{(13)}$. 在本节中, 我们主要给出如何从无穷远单应矩阵 $\mathbf{H}_\infty^{(12)}$ 与 $\mathbf{H}_\infty^{(13)}$ 计算摄像机内参数和运动参数.

记摄像机内参数矩阵为 \mathbf{K} , 图像 2 关于图像 1 的摄像机运动参数为 $(\mathbf{R}^{(12)}, \mathbf{t}^{(12)})$, 图像 3 关于图像 1 的摄像机运动参数为 $(\mathbf{R}^{(13)}, \mathbf{t}^{(13)})$, 其中 $\mathbf{R}^{(12)}, \mathbf{R}^{(13)}$ 是旋转矩阵, $\mathbf{t}^{(12)}, \mathbf{t}^{(13)}$ 是平移向量.

• 计算摄像机的内参数矩阵

将 $\mathbf{H}_\infty^{(12)}, \mathbf{H}_\infty^{(13)}$ 的行列式归一化, 归一化后的矩阵仍记为 $\mathbf{H}_\infty^{(12)}, \mathbf{H}_\infty^{(13)}$, 则必有

$$\mathbf{H}_\infty^{(12)} = \mathbf{K} \mathbf{R}^{(12)} \mathbf{K}^{-1}, \quad \mathbf{H}_\infty^{(13)} = \mathbf{K} \mathbf{R}^{(13)} \mathbf{K}^{-1} \quad (15)$$

并且

$$\mathbf{K} \mathbf{t}^{(12)} = \lambda_{12} \mathbf{e}_2, \quad \mathbf{K} \mathbf{t}^{(13)} = \lambda_{13} \mathbf{e}_3 \quad (16)$$

其中 $\lambda_{12}, \lambda_{13}$ 是未知的非零常数.

由式(15), 有

$$\mathbf{H}_\infty^{(12)} \mathbf{K} = \mathbf{K} \mathbf{R}^{(12)}, \quad \mathbf{H}_\infty^{(13)} \mathbf{K} = \mathbf{K} \mathbf{R}^{(13)} \quad (17)$$

两边转置, 有

$$\mathbf{K}^T (\mathbf{H}_\infty^{(12)})^T = (\mathbf{R}^{(12)})^T \mathbf{K}^T, \quad \mathbf{K}^T (\mathbf{H}_\infty^{(13)})^T = (\mathbf{R}^{(13)})^T \mathbf{K}^T \quad (18)$$

由式(17)和式(18)可以得到关于内参数的约束方程:

$$\mathbf{H}_\infty^{(12)} \mathbf{C} (\mathbf{H}_\infty^{(12)})^T = \mathbf{C}, \quad \mathbf{H}_\infty^{(13)} \mathbf{C} (\mathbf{H}_\infty^{(13)})^T = \mathbf{C} \quad (19)$$

其中, $\mathbf{C} = \mathbf{K} \mathbf{K}^T$ 是绝对二次曲线图像的对偶. 式(19)表明绝对二次曲线的图像在无穷远平面单应矩阵变换下是保持不变的. 令

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & c_3 \\ c_2 & c_4 & c_5 \\ c_3 & c_5 & 1 \end{bmatrix},$$

并记 $\mathbf{c} = (c_1, c_2, c_3, c_4, c_5)$, 则式(19)可以写成等价的线性方程组的形式:

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{c} = \mathbf{d} \quad (20)$$

由于 $\mathbf{R}^{(12)}, \mathbf{R}^{(13)}$ 的旋转轴不同, 所以线性方程组(20)有惟一解^[4]. 在求解出矩阵 \mathbf{C} 以后, 对它进行 Cholesky 分解就可以得到摄像机的内参数矩阵 \mathbf{K} .

• 计算摄像机运动参数

在确定了摄像机的内参数矩阵 K 之后,由式(15)得到旋转矩阵 $R^{(12)}, R^{(13)}$:

$$R^{(12)} = K^{-1} H_{\infty}^{(12)} K, R^{(13)} = K^{-1} H_{\infty}^{(13)} K \tag{21}$$

由式(16)可得平移向量 $t^{(12)}, t^{(13)}$:

$$t^{(12)} = \lambda_{12} K^{-1} e_2, t^{(13)} = \lambda_{13} K^{-1} e_3 \tag{22}$$

注意,由于没有物体空间的绝对欧氏度量,我们仅能在相差一个常数因子的意义下求解平移向量^[4].

综合上面的讨论,可以得到基于一组对应消失线的度量重建算法,概述如下:

- (1) 根据对应消失线和模值约束计算无穷远平面的单应性矩阵 $H_{\infty}^{(12)}, H_{\infty}^{(13)}$;
- (2) 求解线性方程组(20),得到矩阵 C ;
- (3) 对矩阵 C 进行 cholsky 分解,得到摄像机的内参数矩阵 K ;
- (4) 由式(21)和式(22)计算摄像机的运动参数.

2.3 退化情况分析

本节我们将指出,由 3 个摄像机光心确定平面的消失线不能对无穷远单应矩阵构成约束,此时本文的方法将失效,即 3 个摄像机光心确定的平面所形成的消失线是本文方法的退化情况.

证明:假设 3 幅图像上的消失线是无穷远平面与 3 个相机光心所在平面的交线的投影,如图 1 所示.

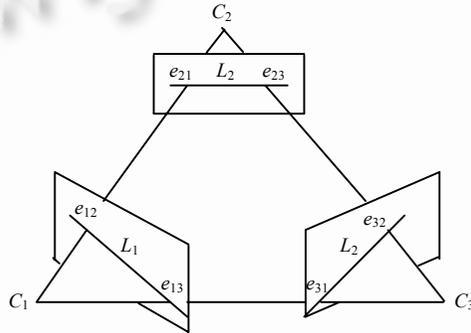


Fig.1 Degeneracy of corresponding vanishing line in three images

图 1 3 幅图像上对应消失线的退化情况

于是,3 条消失线分别为

$$\begin{aligned} L_1 &= e_{12} \times e_{13} = [e_{12}]_k e_{13}, \\ L_2 &= e_{21} \times e_{23} = [e_{21}]_k e_{23}, \\ L_3 &= e_{31} \times e_{32} = [e_{31}]_k e_{32}. \end{aligned}$$

根据式(6)~式(8)可得

$$\lambda \cdot L_1 = (H_{\infty}^{(12)})^T L_2 = (H_{12} - e_{21} \cdot a^T)^T L_2 = H_{12}^T [e_{21}]_k e_{23} - a \cdot e_{21}^T [e_{21}]_k e_{23}.$$

因为 $e_{21}^T [e_{21}]_k e_{23} = 0$, 所以 $\lambda \cdot L_1 = H_{12}^T [e_{21}]_k e_{23}$, 因此,当 3 条消失线是无穷远平面与 3 个相机光心所在平面交线的投影时,它们对无穷远平面在射影重建坐标系中的方向 a 不能构成约束,因此对无穷远平面单应矩阵也不能构成约束.

3 实验结果

3.1 模拟实验

模拟实验的目的是研究本文方法计算摄像机内参数、运动参数对数据噪声的敏感性.

在模拟实验中,摄像机内参数的理论值为 $f_u = 1200, f_v = 960, u_0 = 256, v_0 = 256, s = 0.03$, 图像大小为 512×512

像素.

图像 2 关于图像 1 的摄像机运动参数为:旋转轴 $\mathbf{r}^{(12)} = (-0.7177, -0.5758, 0.3916)^T$, 旋转角 $\theta^{(12)} = 17.8828^\circ$, 平移向量 $\mathbf{t}^{(12)} = (-37.6883, 78.5562, 33.4138)^T$. 图像 3 关于图像 1 的摄像机运动参数为:旋转轴 $\mathbf{r}^{(13)} = (0.4065, 0.3174, 0.8577)^T$, 旋转角 $\theta^{(13)} = 44.7711^\circ$, 平移向量 $\mathbf{t}^{(13)} = (56.3525, -99.8358, 72.5367)^T$.

在空间中选取两组不同方向的平行直线,每条直线上均匀取 50 个点,通过摄像机投影矩阵的理论值得到每条直线上 50 个点的图像点.然后,将随机均匀噪声加在图像点上,产生带有噪声的图像点,应用最小二乘法拟合含有噪声的图像点得到每条图像直线的方程,由这些图像直线计算出消失点(每幅图像上有两个消失点),从而得到 3 幅图像上的对应消失线.最后,根据第 2 节描述的方法,应用上述所得到的消失线计算摄像机内参数与运动参数.

• 内参数的实验结果

在每种噪声水平下随机实验 100 次,表 1 是摄像机内参数平均值的统计结果,表 2 给出了不同噪声水平下摄像机内参数值的标准差.模拟实验结果表明,采用本文的方法,即使在噪声水平较高的情况下,也能得到令人满意的定标结果.这说明本文的方法具有较好的鲁棒性和稳定性.

Table 1 The averages of the estimated intrinsic parameters under different noise levels

表 1 在不同噪声水平下估计的内参数均值

Noise levels (pixel)	f_u	f_v	u_0	v_0	s
0.0	1 200.000 0	960.000 0	255.999 9	256.000 0	0.030 0
0.4	1 254.236 4	999.533 8	231.038 1	273.177 2	-2.215 6
0.8	1 244.058 7	986.022 8	250.843 2	295.399 9	-4.921 3
1.2	1 181.035 8	936.654 1	301.999 1	281.087 7	19.911 5
1.6	1 286.388 8	1 016.861 9	228.272 4	290.234 2	-19.769 9

Table 2 The standard deviations of the estimated intrinsic parameters under different noise levels

表 2 在不同噪声水平下估计的内参数值的标准差

Noise levels (pixel)	f_u	f_v	u_0	v_0	s
0.0	0	0	0	0	0
0.4	21.986 4	18.159 7	25.8242	20.391 3	7.758 6
0.8	26.819 9	21.774 5	33.7090	27.809 9	10.231 7
1.2	33.370 8	25.986 9	38.1495	36.952 7	12.578 9
1.6	34.990 5	26.357 1	40.9071	43.510 7	18.637 0

• 运动参数的实验结果

为了检验本文的算法求解摄像机运动参数的鲁棒性,我们使用以下检验指标:旋转轴的理论值与计算值之间的夹角,旋转角的理论值与计算值之间的绝对误差,平移方向的理论值与计算值之间的夹角.

表 3~表 5 分别是摄像机运动参数的模拟实验结果(每种噪声水平下实验 100 次),图 2 是在不同噪声水平下摄像机运动参数的变化曲线,其中,图 2(a)和图 2(b)分别是 $\mathbf{R}^{(12)}$ 和 $\mathbf{R}^{(13)}$ 的旋转轴的计算值与理论值之间的夹角绝对误差均值随噪声的变化曲线;图 2(c)和图 2(d)分别是 $\mathbf{R}^{(12)}$ 和 $\mathbf{R}^{(13)}$ 的旋转角计算值与理论值之间的绝对误差均值随噪声的变化曲线;图 2(e)和图 2(f)分别是 $\mathbf{t}^{(12)}$ 和 $\mathbf{t}^{(13)}$ 的方向的计算值与理论值之间的夹角随噪声的变化曲线.实验结果表明,在噪声水平较高的情况下,应用本文的方法可以较为精确地计算出摄像机的旋转矩阵和平移向量.

Table 3 The estimated rotation axis of $\mathbf{R}^{(12)}$ and $\mathbf{R}^{(13)}$

表 3 $\mathbf{R}^{(12)}$, $\mathbf{R}^{(13)}$ 的旋转轴的估计结果

Noise levels (pixel)	Rotation axes of $\mathbf{R}^{(12)}$	Rotation axes of $\mathbf{R}^{(13)}$
0.0	(-0.717 7, -0.575 8, 0.391 7)	(0.406 5, 0.314 7, 0.857 7)
0.4	(-0.714 7, -0.584 5, 0.384 0)	(0.410 3, 0.289 1, 0.864 8)
0.8	(-0.727 1, -0.575 5, 0.374 1)	(0.404 8, 0.280 9, 0.870 1)
1.2	(-0.703 4, -0.580 6, 0.409 8)	(0.390 2, 0.257 2, 0.884 0)
1.6	(-0.736 2, -0.585 5, 0.339 2)	(0.391 8, 0.248 0, 0.885 9)

Table 4 The estimated rotation angles of $R^{(12)}$ and $R^{(13)}$

表 4 $R^{(12)}, R^{(13)}$ 的旋转角的估计结果

Noise levels (pixel)	Rotation angle of $R^{(12)}$	Rotation angle of $R^{(13)}$
0.0	17.882 8	44.771 1
0.4	18.667 7	44.794 0
0.8	17.385 1	44.639 7
1.2	18.370 1	44.844 7
1.6	17.423 0	44.857 8

Table 5 The estimated translations of $t^{(12)}$ and $t^{(13)}$

表 5 平移方向 $t^{(12)}, t^{(13)}$ 的估计结果

Noise levels (pixel)	$t^{(12)}$	$t^{(13)}$
0.0	(-1.127 9, 2.351 0, 1.000 0)	(0.776 9, -1.376 3, 1.000 0)
0.4	(-1.113 7, 2.316 3, 1.000 0)	(0.768 6, -1.367 7, 1.000 0)
0.8	(-1.108 9, 2.304 4, 1.000 0)	(0.765 1, -1.363 1, 1.000 0)
1.2	(-1.106 5, 2.295 3, 1.000 0)	(0.763 5, -1.360 4, 1.000 0)
1.6	(-1.103 6, 2.288 8, 1.000 0)	(0.761 4, -1.358 1, 1.000 0)

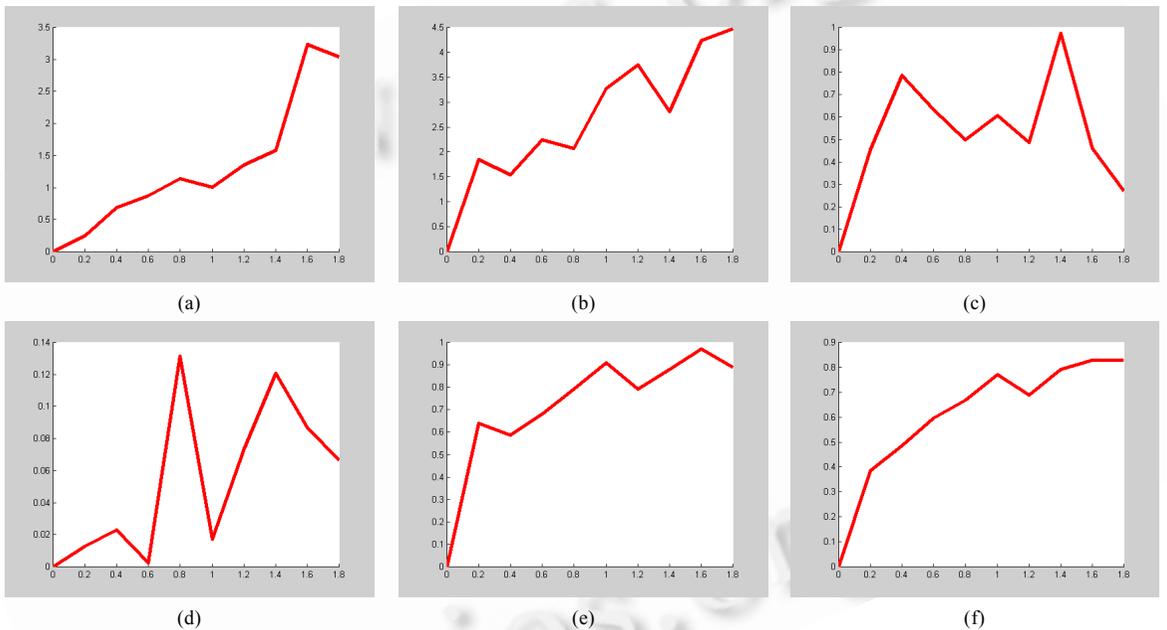


Fig.2 The averages of absolute errors of the camera extrinsic parameters under different noise levels

图 2 摄像机运动参数绝对误差的平均值在不同噪声水平下的变化曲线

3.2 真实图像实验

在真实图像实验中,我们使用的摄像机型号为 Nikon Coolpix 990.用摄像机从 3 个不同位置对定标块拍摄了 3 幅图像(如图 3 所示,从左到右依次为图像 1、图像 2 和图像 3),图像大小为 1024×768 像素.首先通过边沿检测和直线拟合方法,提取出每幅定标块图像中同一个平面上的两组平行线(如图 4 所示),图中白色的直线是拟合的不同方向的两组平行线,这里只给出了在图像 1 中定标块的一个平面上两个方向的平行线,然后计算出每幅图像上的消失线.利用本文第 2 节所描述的方法计算出的图像 1 与图像 2 之间以及图像 1 与图像 3 之间的无穷远单应矩阵分别为

$$H_{\infty}^{12} = \begin{bmatrix} 0.905702 & -0.098845 & 468.735757 \\ 0.084832 & 0.994628 & -59.619665 \\ -0.000114 & 0.000017 & 1.040435 \end{bmatrix},$$

$$H_{\infty}^{13} = \begin{bmatrix} 0.971425 & -0.043533 & 119.137947 \\ -0.036763 & 1.015274 & -135.608583 \\ -0.000040 & 0.000038 & 1.002188 \end{bmatrix},$$

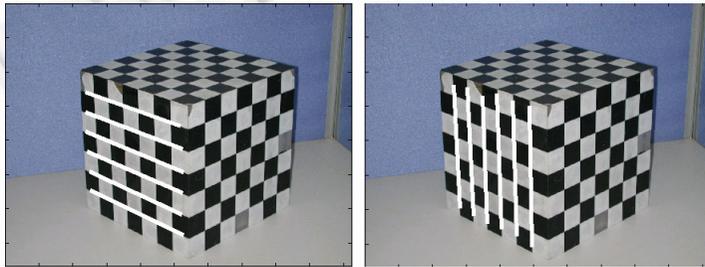
而计算出的摄像机内参数为

$$K = \begin{bmatrix} 1817.54 & 82.35 & 618.71 \\ 0 & 2002.49 & 457.53 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$



Fig.3 Three calibration object images used for experiment

图 3 用于实验的 3 幅定标块图像



The white lines show two sets of parallel lines of a plane in calibration object. 白线表示定标块同一个平面上两个不同方向的平行线

Fig.4 Computation of the vanishing line

图 4 消失线的计算

我们选取前面用于定标的 3 幅图像中的前两幅,重建出了定标块的结构.图 5 给出了重建的三维空间点、三角化及贴纹理显示后的结果.从图中可以看出,重建出的每个面上的点基本上是共面的.

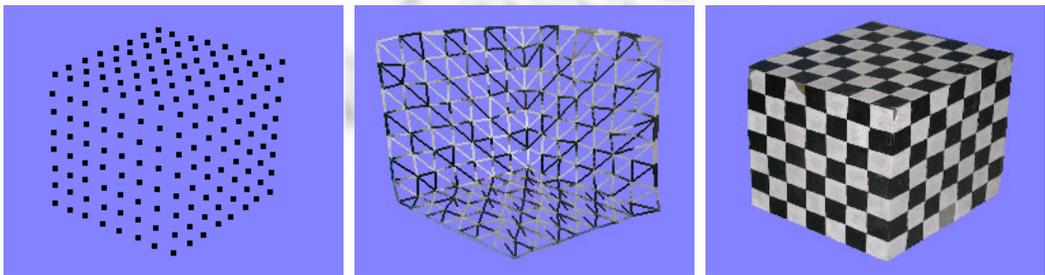


Fig.5 The reconstructed result of calibration object

图 5 定标块的重建结果

另外,为了检验重建精度,我们根据重建的 3 个面计算了定标块 3 个平面间的夹角.若 Π_1 表示左边平面, Π_2 表示右边平面, Π_3 表示顶部平面,则 Π_1 与 Π_2 , Π_1 与 Π_3 , Π_2 与 Π_3 间的夹角分别为 88.33° , 88.49° , 90.33° ,这与真实值 90° 基本上是吻合的.

最后,我们拍摄了一个真实建筑物的 3 幅图像(如图 6 所示),利用本文的方法对该建筑物进行了重建.重建结

果如图 7 所示,其中图 7(a)是重建出的三维空间点,图 7(b)为贴纹理后的显示效果图.真实图像实验也表明本文的方法是可行的,并有较好的重建效果.



Fig.6 Three architecture images used for experiment

图 6 用于实验的 3 幅建筑物图像



Fig.7 The reconstructed result of an architecture

图 7 建筑物的重建结果

4 结束语

本文给出了从 3 幅图像间一组对应消失线进行度量重建的方法,模拟实验和真实图像实验也验证了本文方法的正确性和可行性.与其他基于几何信息重建的方法相比,本文的方法具有如下优点:(1) 它是一个分层重建的过程,比直接从图像到欧氏空间的重建要鲁棒;(2) 它是基于直线的重建,不需要计算圆环点在图像平面上投影,从而提高了算法的鲁棒性;(3) 它需要的几何信息少,仅需要一组对应消失线.因此本文的工作不仅具有理论意义,而且也具有一定的实用价值.

致谢 在此,我们向对本文的工作给予支持和建议的模式识别国家重点实验室机器人视觉组的胡占义研究员、吴毅红副研究员以及其他同学表示感谢.

References:

- [1] Zisserman A, Beardsley P, Reid I. Metric calibration of a stereo rig. In: Anandan P, ed. Proc. of the IEEE Workshop on Representation of Visual Scenes. Boston: IEEE CS Press, 1995. 93~100.
- [2] Heyden A, Åström K. Euclidean reconstruction from constant intrinsic parameters. In: Kavannaugh ME, ed. Proc. of the Int'l Conf. on Pattern Recognition. Vienna: IEEE CS Press, 1996. 339~343.
- [3] Triggs B. Autocalibration and the absolute quadric. In: Proc. of the IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition. Puerto Rico: IEEE CS Press, 1997. 609~614. <http://www.inrialpes.fr/lear/people/triggs/pub/Triggs-cvpr97.ps.gz>
- [4] Hartley RI, Zisserman A. Multiple View Geometry in Computer Vision. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [5] Grossmann E, Ortin D, Victor JS. Single and multi-view reconstruction of structured scenes. In: Suter D, Bab-Hadiashar A, eds. Proc. of the Asian Conf. on Computer Vision. Melbourne: Monash Print Services, 2002. 228~234.
- [6] Cipolla R, Drummond T, Robertson D. Camera calibration from vanishing points in images of architectural scenes. In: Pridmore TP, Elliman D, eds. Proc. of the British Machine Vision Conf. Nottingham: ILES Central Press, 1999. 385~391.

- [7] Montiel JMM, Zisserman A. Automated architectural acquisition from a camera undergoing planar motion. In: Fisher RB, ed. Int. Symp. on Virtual and Augmented Architecture. London: Springer-Verlag, 2001. 1~12.
- [8] Liebowitz D, Criminisi A, Zisserman A. Creating architectural models from images. In: Brunet P, Scopigno R, eds. Proc. of the EuroGraphics. Milan: Springer-Verlag, 1999. 39~50.
- [9] Wu FC, Wang GH, Hu ZY. A linear approach for determining intrinsic parameters and pose of cameras from rectangles. Journal of Software, 2003,14(3):703~712 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/703.htm>
- [10] Pollefeys M, van Gool L. Stratified self-calibration with the modulus constraint. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1999,21(8):707~724.

附中文参考文献:

- [9] 吴福朝,王光辉,胡占义.由矩形确定摄像机内参数与位置的线性方法.软件学报,2003,14(3):703~712.<http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/703.htm>

敬告作者

《软件学报》创刊以来,蒙国内外学术界厚爱,收到许多高质量的稿件,其中不少在发表后读者反映良好,认为本刊保持了较高的学术水平.但也有一些稿件因不符合本刊的要求而未能通过审稿.为了帮助广大作者尽快地把他们的优秀研究成果发表在我刊上,特此列举一些审稿过程中经常遇到的问题,请作者投稿时尽量予以避免,以利大作的发表.

1. 读书偶有所得,即匆忙成文,未曾注意该领域或该研究课题国内外近年来的发展情况,不引用和不比较最近文献中的同类结果,有的甚至完全不列参考文献.

2. 做了一个软件系统,详尽描述该系统的各个方面,如像工作报告,但采用的基本上是成熟技术,未与国内外同类系统比较,没有指出该系统在技术上哪几点比别人先进,为什么先进.一般来说,技术上没有创新的软件系统是没有发表价值的.

3. 提出一个新的算法,认为该算法优越,但既未从数学上证明比现有的其他算法好(例如降低复杂性),也没有用实验数据来进行对比,难以令人信服.

4. 提出一个大型软件系统的总体设想,但很粗糙,而且还没有(哪怕是部分的)实现,很难证明该设想是现实的、可行的、先进的.

5. 介绍一个现有的软件开发方法,或一个现有软件产品的结构(非作者本人开发,往往是引进的,或公司产品),甚至某一软件的使用方法.本刊不登载高级科普文章,不支持在论文中引进广告色彩.

6. 提出对软件开发或软件产业的某种观点,泛泛而论,技术含量少.本刊目前暂不开办软件论坛,只发表学术文章,但也欢迎材料丰富,反映现代软件理论或技术发展,并含有作者精辟见解的某一领域的综述文章.

7. 介绍作者做的把软件技术应用于某个领域的工作,但其中软件技术含量太少,甚至微不足道,大部分内容是其他专业领域的技术细节,这类文章宜改投其他专业刊物.

8. 其主要内容已经在其他正式学术刊物上或在正式出版物中发表过的文章,一稿多投的文章,经退稿后未作本质修改换名重投的文章.

本刊热情欢迎国内外科技界对《软件学报》踊跃投稿.为了和大家一起办好本刊,特提出以上各点敬告作者.并且欢迎广大作者和读者对本刊的各个方面,尤其是对论文的质量多多提出批评建议.