

带有倾斜因子的摄像机自标定方法

裴明涛 于连庆 贾云得

(北京理工大学计算机科学与工程系视觉与智能系统实验室, 北京 100081)

摘要 摄像机自标定是三维重建技术的基本问题, 得到许多学者的大力研究. 为了简化摄像机自标定过程, 一般假设摄像机内参数中的倾斜因子为零, 然后对主点和焦距进行自标定. 但在摄像机模型为完全的射影模型时, 即当倾斜因子(Skew Factor)值较大时, 则使用上述假设得到的自标定参数误差较大, 有时甚至无法得到结果. 为了对倾斜因子值较大的摄像机进行准确标定, 提出了一种当摄像机的倾斜因子已知但不为零时的摄像机自标定方法, 试验结果证明该方法可以得到比较准确的摄像机内参数, 并可使得后续的三维重建得到较好的结果.

关键词 摄像机自标定 三维重建 绝对二次曲线

中图分类号: TP391.41 TP242.62 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2003)01-0023-04

Camera Self-Calibration with Skew Factor

PEI Ming-tao, YU Lian-qing, JIA Yun-de

(Vision and Intelligent Systems Lab Department of Computer Science and Engineering Beijing Institute of Technology Beijing 100081)

Abstract Camera self-calibration is a fundamental problem in 3D reconstruction from un-calibrated image sequences and has been investigated by many researchers in recent years. In order to simplify the camera self-calibration process, the skew factor of the camera is usually assumed to be zero to get a group of linear equations where initial values of the camera's intrinsic parameters can be estimated, then a non-linear algorithm initialized with these values can be used to optimize the self-calibration result. However, when the camera is a complete perspective model, i. e. when the skew factor of the camera is not zero, the error of the self-calibration with the above assumption will be very large and sometimes the self-calibration algorithms will fail to get any result at all. In order to overcome the above problem, this paper addresses a self-calibration algorithm that can successfully compute the intrinsic parameters when the skew factor of the camera is not zero but known. Experiment results of synthetic data as well as real image sequences show that this algorithm can estimate the camera's intrinsic parameters precisely and make the successive 3D reconstruction more easily.

Keywords Camera self-calibration, 3D Reconstruction, Absolute quadric

0 概述

因摄像机自标定是三维重建技术的基本问题, 故得到许多学者的大力研究^[1~4]. 摄像机自标定与传统的摄像机标定方法的最大区别在于, 摄像机自标定方法不需要借助外在的标定物或三维信息已知的控制点, 而仅仅利用图象对应点的信息, 即可直接通过两幅图象间的对应点信息来完成摄像机的标定过程.

摄像机自标定一般是利用绝对二次曲线(Absolute

Conic)的像不随摄像机的刚体运动而改变, 而只与摄像机的内参数有关的性质, 将绝对二次曲线作为虚拟标定物来进行自标定的.

Maybank 和 Faugeras 利用上述性质, 在假设摄像机内参数不变的前提下, 给定 3 幅图象便可以通过由绝对二次曲线建立的 Kruppa 方程来求解摄像机的 5 个内参数^[1]. 为了简化摄像机自标定过程, 一些学者采用了假设摄像机内参数中的倾斜因子为零, 然后对主点和焦距进行自标定的策略. Pollefeys 和 Van Gool 提出了基于绝对二次曲线的自标定算

基金项目: 国家 863 计划航天领域项目(863-2-4-13); 国家自然科学基金项目(K60075005)

收稿日期: 2002-07-15; 改回日期: 2002-10-08

法^[2],该算法在假定摄像机倾斜因子为零,纵横比(aspect ratio)和主点已知的情况下,可根据两幅图象(在拍摄两幅图象的过程中,摄像机的焦距是可变的)间的匹配点信息,用线性方法得到摄像机的焦距以及无穷远平面来对摄像机进行自标定.但是当摄像机为完全的射影模型时,即当有倾斜因子(Skew Factor)存在时,Pollefeys的算法就不适用了.为此,在Pollefeys算法基础上,本文提出了一种摄像机倾斜因子已知,且不为零时的摄像机自标定算法.

1 倾斜因子为零时的自标定算法

文献[2]中介绍了一种在假定摄像机倾斜因子为零,纵横比(aspect ratio)和主点已知的情况下,通过两幅图象之间的对应点信息来进行自标定的线性算法.该方法是通过绝对二次曲面来求解摄像机的内参数.下面对该方法作一简单介绍,具体方法细节可参考文献[2].

绝对二次曲面的像与摄像机的内参数有关,而与摄像机的刚体运动无关,其在图象平面上的像为对偶绝对二次曲线,其与摄像机内参数的关系如下式所示:

$$\omega_i^* = K_i K_i^T \propto P_i \Omega^* P_i^T \quad (1)$$

其中, $K_i = \begin{bmatrix} f_i & s & u \\ 0 & f_i & v \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 为摄像机内参数矩阵,

P_i 为计算出的投影矩阵;

$\Omega^* = \begin{bmatrix} KK^T & -KK^T a \\ -a^T KK^T & a^T KK^T a \end{bmatrix}$ 为绝对二次曲面, a 表示无穷远平面的向量, $i=1,2$ 表示图象数目.由上式可知,对摄像机内参数矩阵 K 的约束,可以转移到对绝对二次曲面 Ω^* 的约束.

假设摄像机内参数主点 (u, v) 已知, s 为零,纵横比 (f_x/f_y) 已知时(不失一般性,设纵横比为1),通过将 $(u, v) \rightarrow (0, 0)$, 式(1)可以推导为下面的形式

$$\lambda \begin{bmatrix} f_i^2 & 0 & 0 \\ 0 & f_i^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = P_i \begin{bmatrix} b_1 & 0 & 0 & b_2 \\ 0 & b_1 & 0 & b_3 \\ 0 & 0 & 0 & b_4 \\ b_2 & b_3 & b_4 & b_5 \end{bmatrix} P_i^T \quad (2)$$

其中, $b_1 = f_i^2$, $b_2 = -f_i^2 a_1$, $b_3 = -f_i^2 a_2$, $b_4 = -a_3$, $b_5 = f_i^2(a_1^2 + a_2^2) + a_3$. 并可以看出,式(2)和下面的方程组是等价的

$$f_i^2 = P_i^{(1)} \Omega^* P_i^{(1)T}$$

$$\begin{aligned} f_1^2 &= P_i^{(2)} \Omega^* P_i^{(2)T} \\ 2P_i^{(1)} \Omega^* P_i^{(2)T} &= 0 \\ 2P_i^{(1)} \Omega^* P_i^{(3)T} &= 0 \\ 2P_i^{(2)} \Omega^* P_i^{(3)T} &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

即

$$\begin{aligned} P_i^{(1)} \Omega^* P_i^{(1)T} &= P_i^{(2)} \Omega^* P_i^{(2)T} \\ P_i^{(1)} \Omega^* P_i^{(2)T} &= 0 \\ P_i^{(1)} \Omega^* P_i^{(3)T} &= 0 \\ P_i^{(2)} \Omega^* P_i^{(3)T} &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $P_i^{(j)}$ 为表示投影矩阵 P_i 第 j 行的行向量, $j=1,2,3$. 通过求解方程组(4),解出 b_1, b_2, b_3, b_4, b_5 , 进而可解出 f_i, a_1, a_2, a_3 , 即解出了摄像机的内参数以及无穷远平面.

2 倾斜因子不为零时的自标定算法

当倾斜因子不为零,但是已知时,可以通过下面的变换,化为倾斜因子为零的形式,再通过上面的方法解出内参数.

当纵横比和主点 (u, v) 已知时,定义变换矩阵

$$V = \begin{bmatrix} 1 & -s/f & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -u \\ 0 & 1 & -v \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

摄像机内参数矩阵 $K = \begin{bmatrix} f & s & u \\ 0 & f & v \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$, 则

$$K' = V \times K = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

三维空间中的点 X 通过内参数矩阵为 K 的摄像机投影到图象平面,若其图象坐标为

$$m = K[R|t]X \quad (7)$$

则其对应的外极线约束为

$$m_1^T F m_2 = 0 \quad (8)$$

F 为与两幅图象对应的基本矩阵.将式(7)两步左乘变换矩阵 V 可得

$$m' = Vm = VK[R|t]X = K'[R|t]X \quad (9)$$

则此时的外极线约束变为

$$\begin{aligned} m_1'^T F' m_2' = 0 &\Rightarrow (Vm_1)^T F (Vm_2) = 0 \\ &\Rightarrow m_1^T V^T F' V m_2 = 0 \\ &\Rightarrow F' = (V^T)^{-1} F V^{-1} \end{aligned} \quad (10)$$

其中, F' 为三维空间中的点 X 通过内参数矩阵为

$$K' = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

的摄像机投影到图象平面时, 所对

应的基本矩阵. 此时基本矩阵 F' 中带有未知数 f , 从下面的推导可以看出, 在基本矩阵 F' 中带有未知数 f 的情况下, 依然可以求出其对应的投影矩阵.

当得到用内参数矩阵为 K 的摄像机拍摄的两幅图象后, 再通过找到两幅图象中的对应点来求出所对应的基本矩阵 F , 即可由下面的方法求出所对应的投影矩阵^[1]

若由 $F^T n = 0$ 求解出 n , 则投影矩阵 P_1, P_2 为

$$P_1 = [I|0], P_2 = [n \times F|n] \quad (11)$$

当通过式(10)求出与内参数矩阵为 K' 的摄像机对应的基本矩阵 F' 后, 则由下式

$$F^T n' = 0 \Rightarrow ((V^T)^{-1} F V^{-1})^T n' = 0 \\ \Rightarrow V^{-1T} F' V^{-1} n' = 0 \quad (12)$$

可以看出, 当 $n' = Vn$ 时, $F^T n' = 0$, 进而可得

$$P'_1 = [I|0], P'_2 = [n' \times F'|n'] \quad (13)$$

P'_2 中含有未知的内参数 f , 将 P'_2 代入方程组(4), 则方程组中的未知数数目不变, 还是 4 个, 通过求解该方程组, 即可解出焦距 f .

3 试验结果

为了验证本文算法的效果, 使用人工合成数据和真实数据进行了自标定试验, 试验结果证明, 本文的自标定方法在倾斜因子不为零的情况下, 仍能较准确地计算出摄像机的内参数.

3.1 模拟数据试验

模拟数据试验是先通过内参数已知(倾斜因子 $s=10$, 焦距 $f=600$)的摄像机将已知的三维点投影到两幅图象上, 然后按假设倾斜因子为 0 和倾斜因子为 10 的情况分别进行自标定, 其得到的结果分别为 570.3264 和 599.9855; 最后用自标定出的结果对三维点分别进行重建, 其得到的结果如表 1 所示, 由表 1 可以看出, 倾斜因子对自标定及重建结果有很大的影响.

表 1 人工数据重建结果

原始三维点坐标			按 $s=0$ 重建			按 $s=10$ 重建		
0	0	100	0.056 549	-0.052 576	98.733 753	-0.000 000	0.000 000	99.999 996
100	0	100	100.098 081	0.006 151	100.029 549	100.000 004	0.000 000	100.000 003
0	100	100	1.626 005	97.540 021	97.489 321	-0.000 000	99.999 998	99.999 999
100	100	100	118.902 368	116.998 306	116.960 538	99.999 899	99.999 897	99.999 898
0	0	250	0.078 086	0.072 875	245.866 821	0.000 000	-0.000 000	250.000 013
100	0	250	99.050 690	-0.044 047	247.416 068	100.000 003	0.000 000	250.000 008
0	100	250	1.640 395	97.134 905	242.919 003	-0.000 001	99.999 986	249.999 960
100	100	250	98.919 104	97.229 676	243.153 859	100.000 101	100.000 101	250.000 253

3.2 真实图象试验

真实图象试验是使用 CCD 摄像机拍摄的图象进行自标定试验. 试验得到的摄像机内参数如表 2 所示, 重建结果如图 2 所示. 由试验结果可以看出, 使用本文的算法在倾斜因子存在的情况下, 仍能比

较准确地计算出摄像机的内参数.

表 2 本文算法自标定得到的摄像机内参数

	f_x	f_y	s	u	v
真实内参数	695.66	694.87	20.62	384	288
自标定得到的内参数	692.01	692.01			

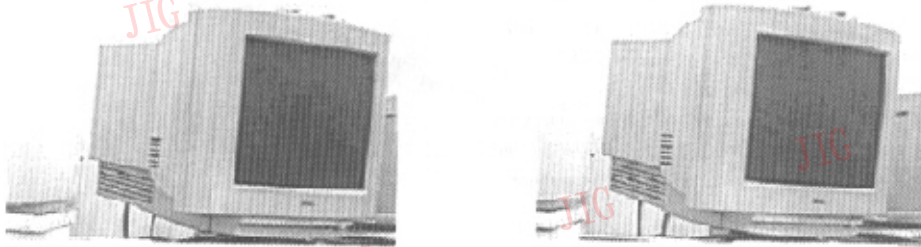


图 1 CCD 摄像机拍摄的计算机显示器的图象

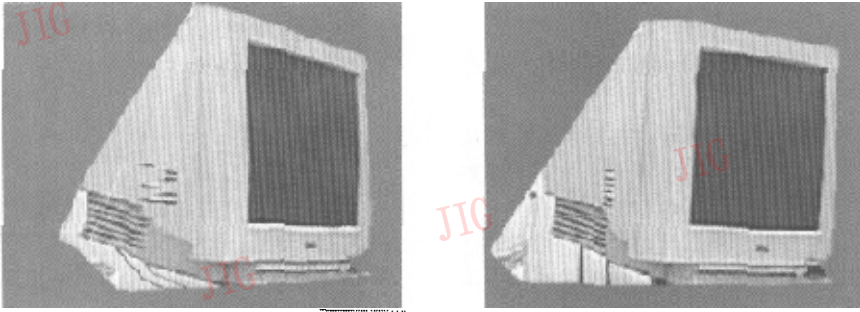


图2 重建结果

4 结论

本文讨论了一种当摄像机模型为完全的射影模型时,通过两幅图象之间的对应点来对摄像机的内参数进行自标定的方法,该方法是对 Pollefeys 自标定算法的扩展,扩展后的算法不仅适用于倾斜因子为零的情况,而且在倾斜因子不为零时,也可以得到比较准确的摄像机内参数.通过对人工合成数据和实际图象进行的自标定实验证明,这种自标定方法在倾斜因子虽不为零,但是已知的情况下也可以得到比较准确的摄像机内参数,从而使得后续的三维重建可以得到较好的结果.

今后,将继续深入进行自标定算法的研究,以解决在实验中遇到的一些问题,例如,当图象序列中的相邻两幅图象之间的基线过大时,会导致算法失败的问题.另外,还将研究在图象数目较多时(>2),如何提高结果精确度的问题.

参考文献

- 1 Maybank S J, Faugeras O. A theory of self calibration of a moving camera[J]. International Journal of Computer Vision, 1992,8(2):123~151.
- 2 Marc Pollefeys, Reinhard Koch, Luc Van Gool. Self-calibration and metric reconstruction in spite of varying and unknown intrinsic camera parameters [J]. International Journal of Computer Vision, 1998,14(5):90~95.
- 3 Zeller C, Faugeras O. Camera self-calibration from video sequences: the kruppa equations revisited[R]. INRIA(Institut National De Recherche en Informatique et en Automatique), France,Research Report 2793.

- 4 Luong Q-T, Faugeras O. Self calibration of a moving camera from point correspondences and fundamental matrices [J]. International Journal of Computer Vision, 1997,13(3):261~289.
- 5 Zhang Zhengyou, Xu Gang. A general expression of the fundamental matrix for both perspective and affine cameras[A]. In Proc of 15th International Joint Conference on Artificial Intelligence[C]. Nagoya, Japan,1997:1502~1507.



裴明涛 1977年生,北京理工大学计算机科学与工程系博士生.研究方向为计算机视觉、人工智能.



于连庆 1974年生,北京理工大学计算机科学与工程系硕士研究生.主要研究计算机视觉领域中的基于图象序列的三维重建、摄像机自标定、图象特征分析.



贾云得 1962年生,教授,博士生导师.研究方向为人工智能、计算机视觉、人机交互技术.