

基于图像的摄像机焦距参数的算法研究

唐 虹, 怀时卫, 石 峰

(西北工业大学机电学院, 陕西 西安 710072)

摘要:在虚拟演播室中前景和背景的融合需要摄像机的平摇、俯仰及变焦参数。前两个参数是利用编码器来采集, 而使用编码器采集焦距参数需要额外在镜头处加装复杂的机械支撑机构, 在应用中不能采集到满足精确度要求的参数值。为此探讨了基于对图像的处理, 利用改进的 GA 算法和 LM 算法的结合, 实现对摄像机自标定中的基本矩阵及其 Kruppa 方程的优化运算, 从而得到摄像机的内参。由于焦距属于摄像机的一个参数, 当内参值确定时, 便能得到摄像机焦距参数。从而能为虚拟演播室提供精确的摄像机焦距数据。

关键词: 焦距; 克虏方程; 遗传算法; 麦夸尔特算法; 摄像机自标定

中图分类号: TP301 **文献标识码:** A

Algorithm of Camera Focal Length Base on Image

TANG Hong, HUAI Shi - wei, SHI Feng

(College of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an Shanxi 710072, China)

ABSTRACT: Fusion of foreground and background in the virtual studio needs parameters of pan, tilt and zoom. First, two parameters are collected by encoder, while the collection of focal parameter needs complicated supporting mechanism installed in the lens, and still precise parameter can not be collected in the application. This paper discusses the image processing based on the use of the improved GA algorithm and the combination of LM algorithm to realize the camera self - calibration of the fundamental matrix and the Kruppa equations optimize operations to get the camera internal parameters, in which the camera focal length is a parameter. When the internal reference value is determined, the camera focal length can be a parameter for the virtual studio camera focal length to provide accurate data.

KEYWORDS: Focal length; Kruppa equations; GA algorithm; LM algorithm; Camera self - calibration

1 引言

虚拟演播室技术是近些年发展起到用于电视节目制作的虚拟现实技术, 其最重要的环节便是前景和背景的融合, 在融合的过程中需要摄像机的平摇、俯仰及焦距三路参数的数据支持。其中的平摇和俯仰参数的获得, 是利用在摄像机云台上安装光电编码器的方式, 来采集固定于云台上摄像机的平摇和俯仰参数; 在目前的应用中, 对摄像机焦距参数的采集, 也是采用在镜头处加装光电编码器, 这种方法的不足之处是镜头处编码器的安装需要一套机械装置的支撑, 而随着镜头的伸缩, 机械支撑装置的便不能保证编码器能精确的随着镜头移动, 故而采集到的焦距参数值精度很差。因此本文提出基于图像处理的焦距参数的采集, 这种方案涉及摄像

机自标定的相应技术, 自标定的技术成熟, 获得的摄相机内参精度高。本文着重探讨基于图像处理的摄相机自标定的混合优化算法, 在相关基于遗传算法的相机自标定新方法^[1]的启示下, 设计出更符合本文目标的改进算法, 这种算法是改进的 GA 算法和 LM 算法的结合。算法的思路是通过对基本矩阵的奇异值分解得到简化的 Kruppa 方程, 再通过改进的 GA 算法得到摄像机内参的初始值, 最终利用 LM 算法和改进的 GA 算法相结合, 实现摄像机内参的精确求解, 从而获得内参之一的焦距参数值。

2 摄相机自标定的相关算法

为了实现基于系列图像的处理而得到摄像机的焦距参数, 须选择合适的算法, 从而能对摄像机的内参做出准确的计算。RANSAC 算法^[2]是基于三张影像的, 其算法流程是: 读入 3 幅对应图像, 提取 Harris 角点^[2], RANSAC 算法计算基本矩阵, 获取 3 个同一参考系统下投影矩阵, 相机自标定,

基金项目: 西北工业大学种子基金项目资助(Z2010019)

收稿日期: 2010-07-28

获得相机矩阵。缺点是对噪声非常敏感,如果其投影矩阵无法保持很高的计算精度,则所获得的摄像机内部参数将会有极大的误差。

基于如上考虑,本文提出一种混合优化算法的摄像机自标定方法,一来解决摄像机内参的标定,以得到所需要的焦距参数;二来将此算法的仿真实验结果与别的方法进行对比,以验证此算法的鲁棒性。

这种混合优化算法^[3]在摄像机自标定中的分三个步骤。首先,通过基本矩阵的奇异值分解得到简化的 Kruppa 方程,进而转换为优化的价值函数;其次,通过利用改进的 GA 算法(遗传算法)来优化价值函数,从而得到摄像机内参的初始值;最后,通过使用 LM(Levenberg-Marquardt)算法对价值函数进一步的优化,得到精确的解决方案。

3 基本矩阵和 Kruppa 方程

3.1 基本矩阵

基本矩阵 F 是一个 3×3 且秩为 2 的矩阵,它定义了两个图像的极线几何关系,这两个图像由未标定的摄像机和两个独立场景结构摄像机的位置特征所定义。基本矩阵包含了两幅图像的所有几何信息,因此对基本矩阵 F 的准确数学运算是摄像机自标定的重要一个环节。考虑在三维世界空间一个点,其在两个不同位置的摄像点的投影图像为 $m_1 = [x_1, y_1, 1]^T$, $m_2 = [x_2, y_2, 1]^T$, 从而有如下的约束公式:

$$m_1^T F m_2 = 0. \quad (1)$$

通过在两个图像之间设置相应的二维图像的像素点,能够对基本矩阵做出计算。因为两幅图像之间的基本矩阵包含所有的几何信息,故对基本矩阵 F 的精确计算对摄像机自标定有极重要的意义。本文中对基本矩阵的精确求解采用的是 RANAC 算法,由未标定的序列图像中实现角点的检测和特征点的匹配,而错误的匹配点也将被 RANAC 算法所拒绝,从而 F 的值将更加精确。

3.2 Kruppa 方程

本文的摄像机模型是针孔模型,如图 1 所示。在齐次坐标中由一个三维坐标点 $X = (x, y, z)^T$ 到一个二维图像坐标点 $m = (u, v, 1)^T$ 的形成过程可以如下表示:

$$m \cong K[R | t]X, \quad (2)$$

式(2)中 $K = \begin{pmatrix} f_u & s & u_0 \\ 0 & f_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ 便是摄像机的标定矩阵, R 和 t 分别是

从世界坐标系到相机坐标系的旋转矩阵和转换矢量,“ \cong ”意味着有一个非零的比例因子可使等式成立,摄像机内参 f_u 和 f_v 代表测得的焦距值。 (u_0, v_0) 表示主点坐标, s 代表的是 x 和 y 方向的传感器阵列之斜角。故摄像机自标定的目标就是解决摄像机内参矩阵 K 。

从固定内参的相机的两个不同位置获得两个图像,由绝对二次曲线的极线几何,可以得到以下关系式:

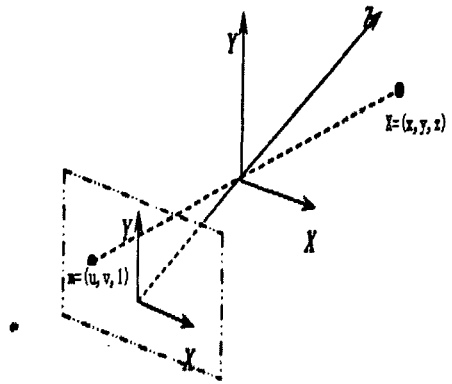


图1 针孔透视模型

$$FCF = \lambda [e']_x C [e']_x^T, \quad (3)$$

式(3)是以数学形式展现的经典的 Kruppa 方程^[4],其中 $C = KK^T$, λ 是一个未知的正当比例因子, F 和 e' 分别是两幅图像之间的基本矩阵和第二幅图像中的独立极点。 $[e']_x$ 是有向量 $e' = [e'_1, e'_2, e'_3]$ 所构成的反对称矩阵,如下所示:

$$[e']_x = \begin{pmatrix} 0 & -e'_3 & e'_2 \\ e'_3 & 0 & -e'_1 \\ -e'_2 & e'_1 & 0 \end{pmatrix}$$

从上面可以知道, Kruppa 方程和基本矩阵之间有着密切的联系, Kruppa 方程估计需要计算从原来 Kruppa 方程形式得到的不稳定的极点。Hartley 推导出了一个不需要计算一幅图像极点的新的 Kruppa 方程形式,从而仅由基本矩阵就可以直接推断出来。Hartley 所推导的基本公式形式如下所示:

$$\frac{\sigma_1^2 v_1^T C v_1}{u_2^T C u_2} = \frac{\sigma_1 \sigma_2 v_1^T C v_2}{-u_1^T C u_1} = \frac{\sigma_2^2 v_2^T C v_2}{u_1^T C u_1} \quad (4)$$

这里有 $F = UDV^T$, 其中 u_1, u_2, u_3 是 U 的列向量, v_1, v_2, v_3 是 V 的列向量。如果 C 能确定下来以使上面三个方程保持平等,那么摄像机的自标定便可以完成了。式(4)中的三个表达式分别用 f_1, f_2, f_3 表示如下: $f_1 = \frac{\sigma_1^2 v_1^T C v_1}{u_2^T C u_2}$, $f_2 =$

$$\frac{\sigma_1 \sigma_2 v_1^T C v_2}{-u_2^T C u_1}, f_3 = \frac{\sigma_2^2 v_2^T C v_2}{u_1^T C u_1}.$$

从而摄像机自标定可以从求解 Kruppa 方程转化为纯粹数学问题的价值函数。这种价值函数可以应用于一对图像或多对图像。对于一对图像,价值函数 $f(f_u, f_v, u_0, v_0, s)$ 可以表示如下所示:

$$f(f_u, f_v, u_0, v_0, s) = (f_1 - f_2)^2 + (f_1 - f_3)^2 + (f_2 - f_3)^2 \quad (5)$$

如果价值函数取最小值,那么在 $f(f_u, f_v, u_0, v_0, s)$ 取最小值时的 C ,将会是价值函数 $f(f_u, f_v, u_0, v_0, s)$ 最小值条件下的目标矩阵,并且矩阵 K 也能估计出来。对于多对图像,式

(5)应该乘上相应的权重因子 w_i, w_i 与匹配点的数量相关。在本文中,权重因子和图像像素的要点数量部分一起计算,其中图像像素是图片行乘以图像列,其值介于 0 和 1 之间,它表示着能计算出基本矩阵 F_i 的置信水平, F_i 是对应于第 i 对图像的基本矩阵。方程可以表示如下所示:

$$F(f_u, f_v, u_0, v_0, s) = \sum_{i=1}^N w_i f_i(f_u, f_v, u_0, v_0, s) \tag{6}$$

公式中 w_i 是第 i 个图像对的权重因子, $f_i(f_u, f_v, u_0, v_0, s)$ 是对应于基本矩阵的第 i 个价值函数。价值函数中的五个参数分别是 f_u, f_v, u_0, v_0, s 。本文中通过优化价值函数到最小值(或到 0)从而获得这些参数,也就是说,首先要用一种改进的遗传算法获得每个参数的初始值,然后用 LM 算法对价值函数进一步优化,以获得每个参数的精确值。

4 遗传算法和 LM 算法的混合优化

现在,一般自标定方程中的价值函数都是由基本的 LM 算法或基本的遗传算法来优化的。而用基本的 LM 算法很难决定 LM 算法的初始值;同样的,仅仅使用基本的遗传算法也不能得到精确的优化结果。有鉴于此,本文中遗传算法将和 LM 算法联合以优化式(6)。

因为遗传算法使用组搜索代替在传统优化算法中使用的个别搜索,故相比于传统的优化算法,遗传算法有更好的全局搜索功能。但是,遗传也有不足之处,如表现不佳的收敛和局部搜索能力差。本文的最优个体保留方法是采用了遗传算法的选择操作,以及动态范围是由突变产生的遗传和变异运算。此外,由使用遗传算法而获得的摄像机内参稳定且小的偏差是很困难的,主要的原因是遗传算法的进化是随机的,从而结果可能会改变。为了确保摄像机内参有稳定和合理的初始值,本文中重复改进遗传算法在优化过程中多次实验,并以此作为对 LM 算法的初始值的平均值。改进的遗传算法和 LM 算法相结合的步骤如下:

- 1)初始种群:每一个个体都是 f_u, f_v, u_0, v_0, s 的排列组合,而它们都是以二进制的形式表示,位长分别是 16、16、11、11、3,故一个个体的位长是 57。种群的数量大小标记为“popsize”,数量定为 100,每个个体都可以在搜索空间随机的初始化。
- 2)最优函数:最优函数用来评价在式(6)中所定义的每个个体的表现。每个初始的个体都将会进行解码并且它的最优值会单独的计算。
- 3)选择算子:同代的个体最优值的总和被定义为“sumfit”,阈值设置为 $T = 2 * \text{sumfit} / (\text{popsize} * 3)$ 。为了保证收敛,最优的个体保留方法将会被采用,也就是说,如果个体的最优值大于 T ,那么父代最好的个体将会取代目前的个体;否则,目前的个体将被保留。
- 4)交叉算子:交叉概率称为“Pc”设置为 $P_c = 0.6$,采取单点交叉。单点交叉在[2,57)的范围内是随机的,然后两个个体在基因位的部分基因进行交流。

5)变异算子:基因突变的概率称为“Pm”,设置 $P_m = 0.06$ 。通过遗传代和最优值在变异操作中控制变异的范围。通过遗传代对个体的每个参数的编码独立的分为三个组分。为了产生一个新的个体,每个参数的三组分之一,根据个体的最优值而被定为变异个体。

- 6)每一个个体都将被解码并且其最优值由最优函数获得。
- 7)如果达到遗传最大迭代次数的 200,在上一代最优个体被认为是一次最优的成果,否则,转到步骤 2)。改进后的遗传算法将这样运行 100 次并对所有结果的平均值进行计算。
- 8)从第 7)步骤所获得的摄像机内参值作为 LM 算法的初始值以便进一步的优化。其结果是进一步用 LM 作为最终解决算法优化摄像机内参数。

5 实验结果

在一组合成图像序列下进行仿真实验。摄像机的内参固定为: $f_u = f_v = 1200, u_0 = v_0 = 512, s = 0.3$ 。在一个边长为 200 的正方体内通过对三维空间点的投影得到四幅图像,摄像机旋转轴其相应的各组成向量是在随机数 1~5 的范围内波动,旋转角度为 300,每个转换因子的向量是随机的在 0~50 之间选择。匹配点选择为 100 个,试验次数也定为 100 次。改进的遗传算法参数 f_u, f_v, u_0, v_0, s 的边界范围分别设置为:[0, 2000]、[0, 2000]、[0, 1000]、[0, 1000]、[-10, 10]。为了验证本文算法的鲁棒性,对投影图像点的噪音增加 0.1 到 1.5 的等级扰动。这里可以求出摄像机内参的全部五个参数变化,因本文目标是获取焦距参数,故随着噪音的增加,在 100 次实验中焦距参数的平均值和文献[5]的数据对比如表 1 所示。

表 1 焦距参数平均值

噪音等级	本文 f_u	本文 f_v	文献[5] f_u	文献[5] f_v
0.1	1199.7	1203.0	1200.4	1209.9
0.2	1212.1	1210.2	1180.7	1221.5
0.3	1231.9	1230.0	1131.6	1178.4
0.4	1200.2	1177.1	1114.1	1188.2
0.5	1205.1	1179.2	1078.5	1119.4
0.6	1152.5	1143.2	1090.7	1174.1
0.8	1177.1	1045.3	1119.2	1184.2
1.0	1108.5	1093.5	1029.3	1079.7
1.5	1040.1	1006.1	955.8	1002.9
平均绝对误差	40.98	55.45	100.05	56.05

表 1 中结果显示随着噪音等级由 0.1 增加到 1.5,焦距参数的平均值比文献[5]更加稳定且误差更小,从而显示该方法在不同的噪音水平下有更好的鲁棒性。

6 结论

本文基于图像处理求得摄像机的焦距参数值,利用了摄像机自标定的一种新算法。这种基于改进的遗传算法和 LM 算法的结合,第一步,通过对基本矩阵的奇异值分解得到简化的 Kruppa 方程;第二步,利用改进的遗传算法通过对价值函数的优化得到摄像机内参的初始值;最终,LM 算法结合改进的遗传算法,得到精确的摄像机内参值。仿真实验表明该方法较单一的优化方法精确度得到了很大的提高。通过摄像机自标定得到的摄像机焦距参数值,能满足虚拟演播室中对此数据精度的要求,实现了本文的目标。

参考文献:

- [1] 雷成,胡占义,吴福朝. 一种新的基于 Kruppa 方程的摄像机自标定方法[J]. 北京:计算机学报, 2003.
- [2] 李海滨,郝向阳,山海涛,陈杰. 基于同一场景 3 张影像的相机自标定算法[J]. 北京:测绘科学技术学报, 2008.

- [3] Li QiShen. A Camera Self-calibration Method Based on Hybrid Optimization Algorithm[J]. 2009 Second International Symposium on Electronic Commerce and Security, 2009. 60-64.
- [4] A Hamed, B Boufama. Camera self-calibration from bivariate polynomials derived from Kruppa's equations[J]. Pattern Recognition 41, 2008. 2484-2492.
- [5] H Li, Z Y Hu. A linear Camera self-calibration technique based on projective reconstruction[J]. Journal of Software, 2002, 13(12): 2286-2294.

[作者简介]



唐虹(1957-),男(汉族),重庆人,西北工业大学机电学院教授,主要研究方向:机电控制与自动化。

怀时卫(1984-),男(汉族),安徽六安人,西北工业大学机电学院硕士研究生,主要研究方向:机电一体化与机器人。

石峰(1985-),男(汉族),辽宁锦州人,西北工业大学机电学院硕士研究生,主要研究方向:机电控制与自动化。

(上接第 97 页)

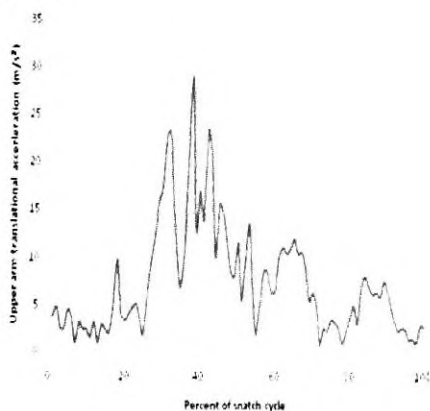


图5(a) 质心平移加速度曲线

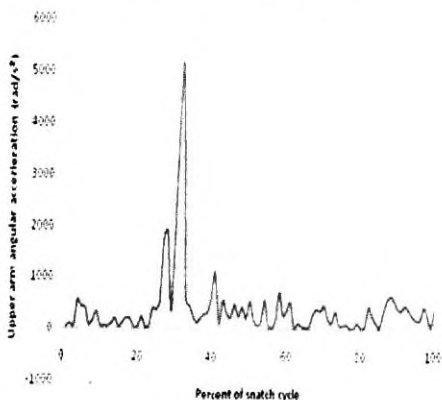


图5(b) 质心角加速度曲线

参考文献:

- [1] J Chadwick, D Haumann, R Parent. In Layered construction for deformable animated characters[C]. ACM New York, NY, USA: 1989. 243-252.

- [2] K Grochow, et al. In Style-based inverse kinematics[M]. ACM New York, NY, USA: 2004. 522-531.
- [3] A Rafi. Motion capture and computer art[J]. International Journal of Arts and Technology, 2008, 1(1): 1-12.
- [4] S Van Sint Jan. Color atlas of skeletal landmark definitions - Guidelines for reproducible manual and virtual palpations[M]. In Churchill-Livingstone-Elsevier, 2007.
- [5] 高士谦. 实用解剖图谱(上肢分册)[M]. In 上海:上海科学技术出版社, 2004.
- [6] W Baumann, et al. The snatch technique of world class weightlifters at the 1985 world championships[J]. JAB 1988-4. 1.
- [7] T Isaka, J Okada, K Funato. Kinematic analysis of the barbell during the snatch movement of elite Asian weight lifters[J]. JAB, 1996-12. 4.
- [8] V Gourgoulis, et al. Comparative 3-dimensional kinematic analysis of the snatch technique in elite male and female Greek weightlifters[J]. The Journal of Strength and Conditioning Research 2002, 16(3): 359-366.

[作者简介]



唐刚(1982-),男(汉族),重庆人,博士研究生,主要研究领域为人体神经肌肉运动生物力学仿真。

白雪岭(1978-),男(汉族),吉林长春人,博士,主要研究领域为体育运动。

王洪生(1986-),男(汉族),江苏苏州人,硕士研究生,主要研究领域为医疗康复。

王成焘(1940-),男(汉族),天津人,教授,博士研究生导师,主要研究领域为人体骨肌生物力学、生物摩擦学等。