

摄像机标定方法综述

李 鹏 王军宁

(西安电子科技大学, 陕西 西安 710071)

摘 要: 首先介绍了摄像机标定的基本原理以及对摄像机标定方法的分类。通过对最优化标定法、双平面标定法、两步法等传统摄像机方法的具体分析, 给出了各种方法的优劣对比; 同时对多种自标定方法的研究现状、发展情况以及存在问题进行了探讨。最后给出了发展传统摄像机标定方向、提高摄像机自标定精度的一些参考建议。

关键词: 摄像机标定; 传统标定; 自标定; 优化算法; 成像模型

中图分类号: TN 948. 41 **文献标识码:** A

0 引言

在图像测量过程以及机器视觉应用中, 为确定空间物体表面某点的三维几何位置与其在图像中对应点之间的相互关系, 必须建立摄像机成像的几何模型, 这些几何模型参数就是摄像机参数。在大多数条件下这些参数必须通过实验与计算才能得到, 这个求解参数的过程就称之为摄像机标定^[1]。无论是在图像测量或者机器视觉应用中, 摄像机参数的标定都是非常关键的环节, 其标定结果的精度及算法的稳定性直接影响摄像机工作产生结果的准确性。因此, 做好摄像机标定是做好后续工作的前提, 提高标定精度是科研工作的重点所在。

1 标定分类

摄像机标定的目的是利用给定物体的参考点坐标 (x, y, z) 和它的图像坐标 (u, v) 来确定摄像机内部的几何和光学特性(内部参数)以及摄像机在三维世界中的坐标关系(外部参数)。内部参数包括镜头焦距 f , 镜头畸变系数 (k, s, p) , 坐标扭曲因子 s , 图像坐标原点 (u_0, v_0) 等参数。外部参数包括摄像机坐标系相对于世界坐标系得旋转矩阵 R 和平移向量 T 等参数。

传统摄像机标定的基本方法是, 在一定的摄像机模型下, 基于特定的实验条件如形状、尺寸已知的参照物, 经过对其进行图像处理, 利用一系列数学变换和计算方法, 求取摄像机模型内部参数和外部参数。另外, 由于许多情况下存在经常性调整摄像机的需求, 而且设置已知的参照物也不现实, 这时就需要一种不依赖参照物的所谓摄像机自标定方法。这种摄像机自标定法是利用了摄像机本身参数之间的约束关系来标定的, 与场景和摄像机的运动无关, 所以相比较下更为灵活。

总的来说, 摄像机标定可以分为两大类: 传统的摄像机标定方法和摄像机自标定法。

2 传统的摄像机标定方法

传统的摄像机标定方法按照其算法思路可以分成若干类, 包括了利用最优化算法的标定方法, 利用摄像机变换矩阵的标定方法, 进一步考虑畸变补偿的两步法, 双平面方法, 改进的张正友标定法以及其他的一些方法等。

2.1 利用最优化算法的标定方法

这一类摄像机标定方法的优点是可以假设摄像机的光学成像模型非常复杂。然而由此带来的问题是: 1) 摄像机标定的结果取决于摄像机的初始给定值, 如果初始值给得不恰当, 很难通过优化程序得到正确的结果; 2) 优化程序非常费时, 无法实时地得到结果。

根据参数模型的选取不同, 这一类的方法主要以下两种:

1) 摄影测量学中的传统方法: Faig 在文^[2]中提出的方法是这一类技术的典型代表。分析 Faig 给出的方法, 可以看到在他的标定方法中, 利用了针孔摄像机模型的共面约束条件, 假设摄像机的光学成像模型非常复杂, 考虑了摄像机成像过程中的各种因素, 精心设计了摄像机成像模型, 对于每一幅图像, 利用了至少 17 个参数来描述其与三维物体空间的约束关系, 计算量非常大。

2) 直接线性变换法: 直接线性变换方法是 Abdel-Aziz 和 Karara 首先于 1971 年提出的^[3]。通过求解线性方程的手段就可以求得摄像机模型的参数, 这是直接线性变换方法有吸引力之处。然而这种方法完全没有考虑摄像机过程中的非线性畸变问题, 为了提高精度, 直接线性变换方法进而改进扩充到能包括这些非线性因素, 并使用非线性的手段求解。

2.2 利用透视变换矩阵的摄像机标定方法^[4]

从摄影测量学中的传统方法可以看出, 刻划三维空间坐标系与二维图像坐标系关系的方程一般说来是摄像机内部参数和外部参数的非线性方程。如果忽略摄像机镜头的非

线性畸变并且把透视变换矩阵中的元素作为未知数,给定一组三维控制点和对应的图像点,就可以利用线性方法求解透视变换矩阵中的各个元素。严格来说,基于摄像机针孔模型的透视变换矩阵方法与直接线性变换方法没有本质的区别。

2.3 两步法

Tsai^[5] (1986)给出了一种基于径向约束的两步法标定方法,是摄像机标定的一项重要工作,该方法的核心是先利用RAC(径向一致约束)条件求解除 t_z (像机光轴方向的平移)外的其他像机外参数,然后再求解摄像机的其他参数。Tsai方法的精度比较高,适用于精密的测量,但它对设备的要求也很高,不适用于简单的标定。这种方法的精度是以设备的精度和复杂度为代价的。

2.4 双平面标定法

Martins^[6]等首先提出了双平面模型。这种方法不明确使用摄像机模型,它利用的是世界坐标系下的“视线”,该方法定义的视线为从工作场景前后两个平面出发,到图像上某点的连线。给定空间的标定点以及其图像上的对应点,用插入方法可计算出两张图,插入的方法是:对于每个图像上的点,在前平面和后平面上定义两个对应的点,来定义视线向量。在这种方法中,考虑用局部插入,图像用顶点和标定格交点一致的三角形标画,然后在三角形内线性样条插值。这种方法的优点是利用线性方法就可以解有关参数,缺点是要求解大量的未知参数,存在过分参数化的倾向。

2.5 张正友标定法^[7]

这是一种适合应用的一种新的、灵活的方法。这种方法虽然也是使用针孔模型,但是它的具体标定是在自标定与传统标定之间的一个妥协方法。该方法假设标定用平面图板在世界坐标系中 $Z=0$ 通过线性模型分析计算得出摄像机参数的优化解,然后用基于最大似然法进行非线性求精。在这个过程中标定出考虑镜头畸变的目标函数,最后求出所需的摄像机内、外部参数。这种标定方法既具有较好的鲁棒性,又不需昂贵的精制标定块,很有实用性。但张正友方法在进行线性内外参数估计时,由于假定模板图像上的直线经透视投影仍然为直线,进而进行图像处理,获得亚像素精度的点坐标,实际上引入了误差,所以在广角镜畸变比较大的情况下,校正效果偏差比较大。

2.6 其他标定方法

针对摄像机标定的研究,许多人提出了更多有实用价值的新方法。这其中包括孟晓桥、胡占义的圆标定方法,其使用模板不同于张正友的矩形平面模板,而是圆环模板。还有吴毅红等的平行圆标定方法。这些新发展的新方法,为摄像机标定提供了更多针对性更强的新方向。

3 摄像机自标定法

不依赖于标定参照物,仅利用摄像机在运动过程中周围环境的图像与图像之间的对应关系对摄像机进行的标定称为摄像机自标定方法。

次曲线和极线变换性质解 Kruppa 方程的摄像机自标定方法、分层逐步标定法、基于二次曲面的自标定方法、基于主动视觉的摄像机自标定技术以及其他改进的摄像机自标定技术。

3.1 基于 Kruppa 方程的自标定方法

Faugeras 等^[8]从射影几何的角度出发证明了每两幅图像间存在着两个形如 Kruppa 方程的二次非线性约束,在求解 Kruppa 方程的发展过程中,超越最初基于最基本的代数几何概念的算法,改进优化的求解方式,利用 Kruppa 方程求得多幅图像上的所有像点到对应极线的距离之和,并对这个距离采用 LM 算法求最小值,就可求出相应的摄像机内参数。基于 Kruppa 方程的自标定方法不需要对图像序列做射影重建,而是对两图像之间建立方程,在某些很难将所有图像统一到一致的射影框架的场合,这个方法会比分层逐步标定法更具有优势,但代价是无法保证无穷远平面在所有图像对确定的射影空间里的一致性,当图像序列较长时,基于 Kruppa 方程的自标定方法会不稳定。

3.2 分层逐步标定法

鉴于直接求解 Kruppa 方程的困难,人们提出了分层逐步标定的想法。分层标定法首先对图像序列做射影重建,在此基础上再仿射标定和欧氏标定。

分层逐步标定法特点是在射影标定的基础上,以某一幅图像为基准做射影对齐,从而将未知数数量缩减,再通过非线性优化算法同时解出所有未知数。缺点在于非线性优化算法的初值只能通过预估得到,不能保证收敛性;射影重建时均是以某参考图像为基准,则参考图像的选取不同,标定的结果也不同,这不满足一般情形下噪声均匀分布的假设。分层逐步法在近几年正在逐步成为摄像机自标定的热点,在实际应用中渐渐取了解 Kruppa 方程的方法。

3.3 基于二次曲面的自标定法

Triggs^[9]最早将绝对二次曲面的概念引入到自标定的研究中来,这种自标定方法与基于 Kruppa 方程的方法在本质上是一致的,都是利用了绝对二次曲线在欧氏变换下的不变性,但在输入多幅图像并能得到一致射影重建的情形下,基于二次曲面的自标定法更具有优势,其根源在于二次曲面包含了无穷远平面和绝对二次曲面的所有信息,且基于二次曲面的自标定方法又是在对所有图像做射影重建的基础上计算二次曲面的,从而保证了无穷远平面对所有图像的一致性。

3.4 基于主动视觉的自标定法

基于主动视觉的摄像机自标定方法是摄像机自标定方法中的一个重要分支,所谓的主动视觉系统是指摄像机被精确的安装在可以控制的平台上,通过主动控制摄像机作特殊的运动获得多幅图像,利用图像和可控制的摄像机运动参数来确定摄像机的内参和外参。其代表性的方法是马颂德^[10]提出的基于两组三正交运动的线性方法,后杨长江、李华等提出了改进的方案,分别基于4组平面正交以及5组平面正交运动,利用图像中的极点信息来线性标定摄像机参数。此

种自标定法算法简单,可以获得线性解,不足之处在于必须有可以精确控制的摄像机运动平台,无法自由灵活的移动。

3.5 其他摄像机自标定方法

针对摄像机有可能调整其本身的各种参数(如焦距)以提高性能,人们发展了摄像机可变参数的自标定法。Pollefeys^[11]给出了一种变焦距下的自标定方法,首先控制摄像机保持焦距不变做一次纯平移,从而获得仿射标定,计算出初始焦距后,再利用模约束在焦距变化时标定。Sturmm^[12]提出了一种针对可变焦距摄像机的自标定方法。该方法需要预标定,先确定出5个内参数的互相关模型,从而将焦距变化时的自标定过程简化到只需计算一个内参数。在前人实验的基础之上,Heyden等人证明了在可变参数的自标定过程中,至少一个内参不变情况下,摄像机的自标定是可以实时实现的,但是若是当所有的参数都改变的时候,摄像机的自标定是不可行的。

以上描述的自标定都是针对针孔模型下的透视摄像机而言,当物体的深度远大于摄像机运动的基线长时,可以考虑用其它更简单的模型来近似针孔模型,例如正交投影、弱透视、准透视投影等,所有这些近似,都可以统一到仿射摄像机的模型下。采用新的仿射摄像机模型,可以有更多新思路的摄像机自标定方法,期待有更多的突破。

4 结束语

如前面所指出的,传统的摄像机是利用一个标准参照物与其图像的对应约束关系,来确定摄像机模型的各个基本参数。为了提高计算精度,还需确定非线性畸变校正参数。当前,对传统摄像机技术的研究集中在如何有效地、合理地确定非线性畸变校正参数。从不同的摄像机标定模型出发有不同的标定方法,适当地根据镜头应用情况采用不同的模型是提高精度,提高算法效率的重要途径。而且设计新的比较符合摄像机成像物理模型而又便于分析计算的实用模型是条另辟蹊径的发展方向。此外,从像素级提高原始图像的精度,也是提高传统标定精度的一个直接有效的方式。

摄像机自标定相对于传统方法有更好的灵活性和实用性,但其精度有待于进一步提高。结合当前自标定技术的研究和实际应用,可以采取一些措施来提高自标定的精度:1)使用分层逐步自标定方法,因为它较其它方法具有更好的鲁棒性,并且和分层重建紧密结合;2)随着摄像机硬件技术的发展,某些内参数已非常接近理想值,在精度要求不是很高的场合,可以考虑采用这些理想值以简化摄像机模型,从而大大简化自标定过程;3)自标定问题的求解可以归结为求解一组非线性多项式方程组问题。解决这类问题的最常用

的方法是各种优化算法。所以对优化算法的改进也是提高精度的有效措施。

参考文献

- [1] 马颂德,张正友. 计算机视觉—理论与算法基础[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [2] Faig W. Calibration of close-range photogrammetric systems: mathematical formulation. photogrammetric eng [J]. Remote sensing, 1975, 41(12): 1479—1486.
- [3] Abdel-Aziz Y I, Karara HM. Direct linear transformation into object space coordinates in Close-Range Photogrammetry[J]. In: Proc Symposium on Close-Range Photogrammetry, 1971, 1—18.
- [4] Luh J Y, Klaasen J A. A three dimensional vision by off-shelf system with multi-cameras[J]. IEEE Trans PAMI, 1985, 7(1).
- [5] Tsai R Y. An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision[J]. In: Proc CV PR'86, 364—374.
- [6] Martins H A, Birk J R, Kelley R B. Camera models based no data from two calibration planes[J]. Computer Graphics and Imaging Processing, 1981, 17: 173—180.
- [7] Zhang zheng you. A Flexible Camera Calibration by Viewing a Plane from Unknown Orientations, ICCV99.
- [8] Moons T, Van Gool L, Proesmans M, et al. Affine reconstruction from perspective image pairs with a relative object-camera translation in between[J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1996, 18(1): 77—83.
- [9] Triggs B. Auto-calibration and absolute quadric[J]. In: Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition, 1997, 604—614.
- [10] Ma S D. A self-calibration technique for active vision system[J]. IEEE Trans Robotics and Automation, 1996, 2.
- [11] Pollefeys M, Van Gool L. Self-calibration from the absolute conic on the plane at infinity[J]. In: Proceeding of Computer Analysis of image and Patterns, Lecture Notes in Computer Science, Springer-Verlag, 1997, 1296: 175—182.
- [12] Sturm P. Self-calibration of a moving camera by pre-calibration[J]. In: Proceedings of British Machine Vision Conferences, Scotland: Edinburgh, 1996, 675—684.
- [13] 邱茂林, 马颂德. 计算机视觉中摄像机定标综述[J]. 自动化学报, 2000, 26(1): 43—55.
- [14] Sturm and Maybank. On Plane-Based Camera Calibration: A General Algorithm, Singularities Applications, CVPR99.

Overview of Camera Calibration Methods

Li Peng Wang Jun-ning

(Xidian University, Xi'an Shaanxi 710071, China)

Abstract This paper introduces the fundamental and the classification of the camera calibration methods at first. By comparison and analysis of traditional camera calibration methods, both advantages and disadvantages of each camera calibration method are given in details. The research state, development and the existing problems of the self-calibration method are also discussed in this paper. To develop the traditional calibration methods and improve the self-calibration precision, advice is presented in conclusion.

Key words camera calibration; traditional calibration; self-calibration; optimization algorithm; imaging model