

文章编号: 1007- 1385(2010)01- 0043- 05

摄像机标定研究

刘振中 傅 莉

(沈阳航空工业学院自动化学院, 辽宁 沈阳 110136)

摘 要: 目前, 摄像机标定是计算机视觉领域中的研究热点之一, 其目的是通过摄像机拍摄的单幅或多幅图像来确定摄像机的参数模型, 进而获得摄像机的各项参数, 在机器人导航、三维重建、生物医疗、虚拟现实、视觉监控、视觉伺服等领域均有广泛的应用前景。本文综述了传统标定方法, 自标定方法和基于主动视觉的标定方法的研究现状, 对其优缺点作出评价并指出发展方向。

关键词: 摄像机标定; 自标定; 主动标定

中图分类号: TP242. 6⁺2

文献标识码: A

在三维视觉系统中, 三维物体的位置、形状等几何信息是从摄像机获取的图像信息中得到的。为了获取空间点到摄像机图像像素点的对应关系, 摄像机的标定必不可少。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是由摄像机成像的几何模型决定的, 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, 这个过程被称为摄像机标定^[1]。

尽管目前关于摄像机标定的理论已经非常成熟, 标定方法也很多, 但至今为止仍未有一种能够在各种场合普遍使用的标定方法, 兼之摄像机标定在机器人导航、三维重建等方面具有广泛的应用前景和巨大的经济效益, 国内外许多学者和科研机构仍然进行着相关项目的研究。

1 摄像机标定的应用领域

摄像机标定在诸多领域均具有广泛的应用, 在此仅对其典型应用做出简单介绍。

1. 1 移动机器人导航

随着机器人技术的迅猛发展, 为了使机器人能够完成复杂的任务, 迫切要求开发出的机器人具有更强的与外界交互能力, 以实现机器人与环境的互动, 把机器人智能提高到更高层次。在众多的导航方式中, 视觉导航方式具有信号探测范围宽、获取信息完整等优点, 成为未来移动机器人

导航(如无人机导航)的一个主要发展方向^[2-7]。

在视觉导航系统中, 目前国内外应用最多的是采用在移动机器人上安装车载摄像机的基于局部视觉的导航方式。这种导航方式的摄像机安装位置较低, 获取场景范围较小, 一般的标定方法即可满足精度要求, 但所有的计算设备和传感器都装载在机器人车体上, 图像识别、路径规划等高层决策都由车载计算机完成, 因而实时性能略差。为了获取更大的场景, 需要在环境中布置多部摄像机, 这使得摄像机的标定精度、定位坐标的计算方法成为影响。移动机器人导航和定位精度的重要因素, 也使得适用于较大场景下摄像机参数标定方法具有重要的研究意义和实用价值。

1. 2 机器视觉

随着加工技术的发展, 对机械部件的加工呈现出越来越高的要求: 高速度、高精度、整个过程自动化、不需要人工干预等等。基于机器视觉的检测技术具有非接触, 高速度, 精确度高等优点, 被广泛应用于对各种工件的测量。文献[8]提出一种基于机器视觉技术的圆形零件检测技术, 采用简单的标定方法可以实现对圆孔和圆形零件的非接触精密加工。

1. 3 生物医疗

自二十世纪八十年代起, 美、日等国已经开始研究将机器人应用于医疗外科手术方面。在机器人与计算机的帮助下, 我们可以通过制定合理、定量的手术方案, 来提高手术的精度, 减小手术的创伤。不仅如此, 使用机器人还可以完成常规方法难以完成的复杂诊断和治疗手术。实践证明, 发展医疗外科机器人技术是医疗部门摆脱陈旧的手

收稿日期: 2009- 09- 16

项目基金: 国家重点实验室开放基金(项目编号: 2009 S011)

作者简介: 刘振中(1986-), 男, 山西长治人, 硕士研究生, 主要研究方向: 图像处理与模式识别, E-mail: lzzlzzlzz@163. com

术方法, 提高手术的效率、质量和降低手术费用的可靠途径。文献 [9] 中提到的神经外科手术机器人手术 (即通常所说的脑外科立体定向导航手术) 就是一个医学应用的例子。它通过在颅骨上钻一个小孔, 然后借助机器人在定向导航系统引导下将探针或其它更精细、复杂的外科器件引入脑内, 对病灶点进行活检、放疗、切除等操作。目前, 由于存在标定精度等问题, 国内关于机器人辅助立体定向神经外科手术的研究还处于起步阶段, 还需要较长时间的探索。

1.4 视觉监控

随着我国公路建设的快速发展, 路段监控趋于路网监控。我们可以通过图像采集设备获得大量的监控视频、图像等, 分析估计路况隐患, 及时发现车辆逆行、追尾、抛锚、堵塞等交通事故, 保障公路的通畅。

由于高速公路的路况复杂, 通行车辆较多且速度较快, 采集的图像容易受到天气和操作人员的影响, 因此, 如何提高图像采集设备的标定精度以及提高图像的处理速度成为公路监控系统的关键环节^[10]。

此外, 摄像机标定在考古、建筑、农业、机械等领域都有广泛的应用。

2 摄像机标定技术的研究现状

大体来讲, 摄像机标定技术可以分为以下三类: 传统标定技术、自标定技术和基于主动视觉的标定技术, 以下重点介绍各类中比较常用的方法。

2.1 传统标定技术

所谓传统的摄像机标定方法是指用一个结构已知、加工精度很高的标定块作为空间参照物, 通过空间点和图像点之间的对应关系来建立摄像机模型参数的约束, 然后通过优化算法来求取这些参数^[11]。传统方法的优点是可以使用任意的摄像机模型, 标定精度高, 因此当应用场合所要求的精度很高时, 常选用这种方法。其典型代表方法有直接线性变换法 (DLT 法)、非线性优化法、两步法、平面模板法以及双平面法等等。

(1) 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。这种方法先定义一组中间参数, 通过建立和求解线性方程组的手段来求解摄像机模型的内外参数, 不需要迭代运算, 这是直接线性变换方法具有吸引力之处。由于这种方

法涉及的参数较少、便于计算, 所以比较容易被采用。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, 并使用非线性手段求解^[12-14]。

(2) 非线性优化法

由于非线性方法由于考虑到摄像机镜头的畸变问题, 使用大量的未知数和大范围的非线性优化, 这使得计算代价随非线性模型的准确性增高而变大。非线性优化法虽然精度较高, 但是其算法比较繁琐, 速度慢, 而且算法的迭代性需要良好的初始估计。如果迭代过程设计不恰当的话, 尤其在高扭曲的条件下, 优化过程可能不稳定, 从而造成结果的不稳定甚至错误, 因此其有效性不高。文献 [15] 在分析畸变参数标定方法优缺点的基础上, 提出了一种简单快速的镜头畸变参数标定方法。该方法利用了透视投影中的交比不变性质, 在畸变模型为一阶径向畸变的情况下, 只需要空间共线的 4 个点的图像坐标和其交比, 建立一元二次方程即可标定畸变参数。这种方法算法简单且易于实现。文献 [16] 在其基础上对图像进行了校正, 利用线性标定法完成了标定, 避免了其他非线性优化方法可能遇到的不稳定性。

(3) 两步法

直接线性变换法完全没有考虑摄像机镜头的畸变问题, 非线性模型法虽然考虑到非线性因素的影响, 但却使得计算更加复杂, 甚至可能得不到准确解。Tsa 研究并总结了 1987 年以前的传统标定法, 在此基础上对有径向畸变因子的摄像机模型, 提出了一种实用的两步定标算法。首先采用透视矩阵变换的方法求解线性系统的摄像机参数, 再以求得的参数为初始值, 考虑畸变因素, 最后利用最优化方法来提高标定精度。此法的优点在于该模型假设摄像机镜头的畸变是径向的, 无论畸变如何变化, 从图像中心到图像点方向的向量保持不变, 这明显减少了参数空间的维数, 由于其标定的精度较高, 适用于精密的测量。缺点是该校定法对设备的要求比较高, 不适用于简单的标定。

普遍认为一般对于摄像机考虑到二阶畸变因子即径向畸变就能达到很好的精度要求, 考虑更高阶的因子不一定会提高标定精度, 因此, 两步法只考虑了二阶径向畸变, 而没有考虑切向畸变。文献 [17] 提到 Wong 考虑了两种畸变并给出了相

应的算法和定标精度的分析方法,此方法是两步定标法的重大发展。Gao在Tsa的基础上,用世界坐标系中实际三维点和理论三维点之间的距离作为代价函数同时,对摄像机参数和扭曲因子进行同时优化,并在实验中取得了更好的精度。

(4) 双平面法

双平面模型与针孔模型的基本区别在于,双平面模型不像针孔模型那样要求所有投射到成像平面上的光线必须经过光心。给定成像平面上的任意一个图像点,便能够计算出两个定标平面上的相应点,从而确定了投射到成像平面上产生该图像点的光线。

Martins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。

2.2 自标定技术

由于在某些场合下不能选用适合的标定物对摄像机进行标定,于是逐渐产生了一类不依赖于标定参照物,与场景和摄像机的运动无关,仅利用摄像机内参数自身存在的约束(多幅图像间的对应关系)实现标定的方法,称为摄像机自标定方法。此种方法适合于摄像机的内外参不固定的情况下对摄像机进行标定。目前已有的自标定技术可以分为:基于主动视觉的摄像机自标定技术、利用本质矩阵及基本矩阵的自标定方法、利用绝对二次曲线(二次曲面)和极线变换性质的摄像机自标定方法、利用消隐点或消隐线的标定方法以及考虑相机非线性畸变情况下的标定方法等等。

与传统方法相比,摄像机自标定方法仅需要建立图像之间的对应关系,灵活性强,但自标定方法标定过程复杂,不适用于实时性较强的场合,且由于自标定方法采用非线性标定,依赖良好的初值估计,鲁棒性不足,只适用于对精度要求不高的场合,如虚拟现实。

2.3 基于主动视觉的标定技术

为克服传统标定法的烦琐过程,随后出现了控制摄像机运动的主动标定法,例如:控制摄像机做绕光心旋转或纯平移等运动。主动标定法的优点是算法简单,缺点是不能适用于摄像机运动未知或无法控制的场合(如手持摄像机等)。

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。马颂德、胡占义等在这方面做了大量研究^[14-18-21]。

需要指出的是,基于主动视觉的摄像机标定的研究焦点是在尽量减少对摄像机运动限制的同时仍能线性求解摄像机的模型参数。如果对摄像机的运动毫无约束,标定过程本质上是一个多元非线性优化问题,基于主动视觉的标定就回到了自标定的范畴^[18]。

2.4 其他标定技术

(1) 平面模板法

平面模板法是由张正友博士首先提出的,这种方法要求绘制一个具有精确定位点阵的模板,然后使模板和摄像机作相互运动,获得三个以上的不同方位的模板图像,通过确定图像和模板进行匹配,计算出图像和模板之间的单应矩阵,最后利用单应矩阵线性求解摄像机内参数。此方法的优点是可求解镜头畸变因子,缺点是标定过程复杂,在标定过程中需要测量出模板上角点的物理坐标,并需对每幅图像提取角点以及对角点及其图像点进行匹配,使得算法过程中需要介入人工干预,不利于实现自动化标定。

在此基础上,文献[22]提出可以采用一幅标定模板,利用改进的SUSAN算法,完成角点坐标的匹配并在考虑一阶径向畸变的情况下建立摄像机模型;文献[23]提出以圆心作为标定点的2D平面模板。孟晓桥、胡占义采用一种由圆和通过圆心的若干条直线所构成的平面模板来求取摄像机的内参;吴福朝、王光辉、胡占义采用两个非平行矩形作为模板;全红艳等以正方形及四边上的中点为模板完成了摄像机标定;文献[24]在此基础上提出了一种基于单一矩形的平面标定模板。文献[25]提出以圆心和半径均未知的两个相交圆组成的标定模板实现标定;Meng等人利用一周及经过圆心的若干条直线作为标定模板实现标

定。文献[26]提出采用平面二维正弦灰度调制条纹图作为标定板,根据傅里叶变化轮廓术计算得到两个正交方向的截断相位分布,提取相位特征点作为2D标定数据,根据2D共面参照物标定方法实现标定;文献[27]提出以具有两个相似图形的平面模板实现标定的方法等等。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。

(2)神经网络、遗传算法等标定技术

随着神经网络等技术的发展,越来越多的人意识到神经网络在求解非线性模型方面的应用。文献[28]提出了一种基于单个自适应神经元的摄像机传统标定算法,应用一种结构简单、抗干扰能力很强的单个神经元自适应算法代替通常的非线性优化算法进行摄像机标定。实验结果表明该算法无需计算雅可比矩阵,且精度较高,简单可行。文献[29]针对摄像机标定过程中复杂的成像和畸变模型,利用误差逆传播(BP)神经网络对复杂非线性映射关系的强大逼近能力,对姿态测量系统中的摄像机进行隐式标定,使姿态测量系统无须进行复杂的摄像机标定,直接恢复目标特征点的三维信息,从而计算得到目标姿态信息。

人工神经网络能够实现对复杂非线性映射关系的高度逼近,为姿态视觉测量系统的建模提供了一种有效的方法。尽管与传统的各种优化算法相比具有简单实用、计算量较小的优点,但仍然存在很多问题:(1)学习算法效率低、学习速度慢、容易不收敛;(2)学习过程容易陷入局部最优解。因此在用神经网络进行摄像机标定中往往由于陷入局部最优解而使标定误差变大。基于此,文献[30]进一步提出利用神经网络的非线性拟合能力和遗传算法良好的全局搜索能力,有机地结合起来进行单目摄像机的标定。

3 难点与发展趋势

3.1 难点

(1)传统标定方法需要借助标准参照物与其图像的约束关系来求解摄像机模型的内外参数,为了提高摄像机的标定精度需要进一步提高摄像机模型的准确度,这就需要考虑摄像机的畸变(如Tsa的两步法)。事实上,引入畸变后会使得整个摄像机模型成为一个非线性模型,而非线性模型的求解不利于提高摄像机参数的精确度,这成为一对矛盾。

(2)有些摄像机自标定所得到的解不唯一,有时甚至不稳定。准确的说,由约束关系所得到的解在一般情况下是多解的,而且容易受到图像噪声的影响。如何提高非线性解的稳定性和鲁棒性成为自标定领域研究者们面对的一大难题。

3.2 发展趋势

(1)由于存在着内部参数不易获取、不便于和计算机通信、其有限的分辨率影响着测量精度和测量范围等缺陷,摄像机将逐渐被其它仪器或设备所取代。数码相机的应用逐步普及,一种称为工业级摄像机也将在某些场合投入使用,这些新的设备的使用就需要相应的理论和方法与之适应。

(2)在考虑镜头畸变的基础上,如何通过线性的方法获得摄像机的参数并提高解的鲁棒性还需要进一步的工作。

4 结束语

摄像机标定是实现三维重建的重要步骤,是完成机器视觉不可或缺的关键环节,尽管上述提出了诸多方法,但至今为止仍未有一种普遍适用的方法,这也是许多学者依然从事这一工作的原因之所在。如何能够获得非线性模型的准确解并在保证标定精确度的同时提高标定方法的鲁棒性,还需要作进一步的研究。

参考文献:

- [1] 邱茂林,马颂德,李毅.计算机视觉中摄像机标定综述[J].自动化学报,2000,26(1):43-55.
- [2] 李瑞峰,李庆喜.机器人双目视觉系统的标定与定位算法[J].哈尔滨工业大学学报,2007,39(11):1719-1722.
- [3] 韩立伟,徐德,谭民.机器人无标定视觉中摄像机特性的逼近[J].控制与决策,2007,22(1):1-7.
- [4] 张广军,李秀智.移动机器人足目标定方法[J].机器人,2007,29(3):230-233.
- [5] 刁灿,王英勋,王金提,苗森.无人机自动着陆中的机器视觉辅助技术.航空学报,2008,29:79-84.
- [6] 王昭,张平.机器视觉引导系统中摄像机的标定方法.航空学报,2008,29:204-208.
- [7] 王志文,郭戈.移动机器人导航技术现状与展望[J].机器人,2003,25(5):470-474.
- [8] 张宇,黄亚博,焦建彬.一种基于机器视觉的圆形零件检测技术.计算机工程,2008,34(19):185-186.
- [9] 王子昱,唐泽圣,王田苗,等.基于虚拟现实的计算机辅助立体定向神经外科手术系统[J].计算机学报,2000,23(9):931-937.
- [10] 李勃,陈启美.基于监控视频的运动车辆行为分析算法[J].

仪器仪表学报, 2006 27(6)(增): 387—392

[11] 胡占义, 吴福朝. 基于主动视觉摄像机标定方法[J]. 计算机学报, 2002 25(11): 1149—1156

[12] 吴文琪, 孙增圻. 机器视觉中的摄像机标定方法综述[J]. 计算机应用研究, 2004(2): 4—6

[13] 李鹏, 王军宁. 摄像机标定方法综述[J]. 山西电子技术, 2007 4 77—79

[14] 姜大志, 郁倩, 王冰洋, 等. 计算机视觉中的设备标定和三维图形重构综述[J]. 计算机工程与应用, 2001 13 53—55

[15] 贺俊吉, 张广军, 杨宪铭. 基于交比不变性的镜头畸变参数标定方法[J]. 仪器仪表学报, 2004 25(5): 597—599.

[16] 郑榜贵, 田炳香, 段建民. 基于交比不变量的摄像机标定方法[J]. 北京工业大学学报, 2008 34(5): 476—480.

[17] 伍雪冬, 蒋新华, 李建兴, 等. 计算机视觉中传统摄像机标定方法综述[J]. 福建工程学院学报, 2007 5(1): 57—61.

[18] 胡培成, 黎宁, 周建江. 一种改进的基于圆环点的摄像机自标定方法[J]. 光电工程, 2007 34(12): 54—60.

[19] 张小苗, 刘肖琳, 于起峰. 基于等价图像的摄像机自标定方法[J]. 光学技术, 2008 34(2): 217—220.

[20] 许海霞, 王耀南, 万琴, 等. 一种机器人手眼关系自标定方法[J]. 机器人, 2008(4): 373—378

[21] 傅丹, 冯卫东, 于起峰, 等. 一种摄像机自标定的线性方法[J]. 光电工程, 2008 35(1): 71—74.

[22] 王晓华, 傅卫平. 一种改进的摄像机标定方法[J]. 东北林业大学学报, 2007 35(6): 51—53.

[23] 刘金颂, 原思聪, 张庆阳, 等. 双目立体视觉中的摄像机标定技术研究[J]. 计算机工程与应用, 2008 44(6): 237—239

[24] 孙瑾, 顾宏斌. 矩形模板下摄像机标定和目标定位方法研究[J]. 小型微型计算机系统, 2008 9(9): 1740—1744.

[25] 胡钊政, 谈正. 利用二次曲线拟合和圆环点进行摄像机标定[J]. 西安交通大学学报, 2006 40(10): 1065—1068

[26] 刘元坤, 苏显渝, 吴庆阳. 基于傅里叶条纹分析的多摄像机标定方法[J]. 光子学报, 2007 36(9): 1734—1737.

[27] 李欣菊, 祝海江, 吴福朝. 基于平面相似图形的摄像机标定方法[J]. 模式识别与人工智能, 2004 17(4): 457—461.

[28] 袁野, 欧宗瑛. 一种基于单个神经元的摄像机标定自适应算法[J]. 大连理工大学学报, 2005 45(6): 823—826

[29] 蔡盛, 李清安, 乔彦峰. 基于 BP神经网络的姿态测量系统摄像机标定[J]. 光电子·激光, 2007 18(7): 832—834

[30] 李小峰, 李峰. 单目摄像机标定方法的研究[J]. 计算机工程与应用, 2009 45(15): 229—232

Research on camera calibration method

LU Zhen—zhong FU Li

(Department of Automation, ShenYang Institute of Aeronautical Engineering, Liaoning ShenYang 110136)

Abstract: The camera calibration has become one of the most attractive research topics in the domain of computer vision at present. Its purpose is to confirm the camera parameter model and to obtain the camera parameters through the single or multiple images which photographed by the camera. It has the widespread application prospect in the domain of the robot navigation, three—dimensional reconstruction, bio—medical, virtual reality, visual surveillance as well as the visual servo etc. This paper summarizes the research status of the traditional calibration, the self—calibration and the active vision calibration method, analyzes their advantages and disadvantages and the future development trend.

Keywords: camera calibration method, self—calibration, active vision calibration

(责任编辑: 吴萍)