

摄像机标定方法研究

张铨伟,王彪,徐贵力

(南京航空航天大学 自动化学院,江苏 南京 210016)

摘要:摄像机标定是计算机视觉技术中的关键步骤,在三维重建、姿态估计、虚拟现实等领域有着广泛的应用。文中首先对摄像机标定的基础知识作了简要的介绍,然后从不同的角度对目前的摄像机标定方法做了一个较为详细的分类与比较,最后介绍了常用的标定工具。在实际应用中,不同工作背景需要不同的摄像机标定方法,这就要求在现有标定方法上从模型表达、畸变校正、算法研究等多方面进一步改善各种标定方法,使其能灵活应用于具体工作。

关键词:摄像机标定;计算机视觉;成像模型;内参数;外参数

中图分类号:TP391

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2010)11-0174-06

A Study on Classification of Camera Calibration Methods

ZHANG Cheng-wei, WANG Biao, XU Gui-li

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Camera calibration is the key step in computer vision technology. It has a wide range of applications in three-dimensional reconstruction, pose estimation, virtual reality. In this paper, the basic knowledge of camera calibration is introduced briefly, and then a more detailed classification and comparison is made on current camera calibration methods from different points of view, lastly the commonly used calibration tools are introduced. In practice, different working backgrounds require different camera calibration methods. This drives us to further improve the various existing calibration methods focusing on the aspects of calibration model, distortion correction, algorithm research etc. So that they can be applied to specific works effectively.

Key words: camera calibration; computer vision; imaging model; intrinsic parameters; extrinsic parameters

0 引言

计算机视觉的研究目标是使计算机能通过二维图像认知三维环境,并从中获取需要的信息用于重建和识别物体。摄像机便是3D空间和2D图像之间的一种映射,其中两空间之间的相互关系是由摄像机的几何模型决定的,即通常所称的摄像机参数,是表征摄像机映射的具体性质的矩阵。求解这些参数的过程被称为摄像机标定(或称为标定)^[1]。

迄今为止,对于摄像机标定问题已提出了很多方法,不同的应用需要不同的标定方法,不同的方法需要对应的算法,因此对现有方法进行一个比较系统的细分类有助于具体应用时对标定方法的选取,这是十分有意义的工作。目前已有许多学者对摄像机标定方法

做了一些分类与比较,但绝大部分文献都只从某一个角度进行分类,如文献[1]中仅依据是否需要标定物将标定方法分为传统标定方法和自标定方法;文献[2]也仅从传统标定方法和自标定方法这两个大类进行研究,只是在对自标定方法进行分类时与文献[1]提出了不同看法;文献[3]则将基于主动视觉的方法从自标定方法中分离出来,与传统方法和自标定方法并列为三大类方法;文献[4]从线性定标、非线性定标和两步定标这三种方法进行分类;此外另有一些学者仅从标定方法的算法或标定物的种类着手进行分类。可以说他们的分类比较笼统和单一,不能很好地从整体上对标定方法进行多方面考察。文中的目的就在于从多角度多方面对现有的摄像机标定方法进行较为系统的分类,以便为实际应用中标定方法选取做导向。

1 摄像机成像模型

摄像机模型是对真实摄像机的几何抽象,其成像过程是对空间点的摄影变换^[5],不同的摄像机模型对应不同的参数集合;不同的参数集合又需要不同的求

收稿日期:2009-03-16;修回日期:2010-06-27

基金项目:国家自然科学基金(60974105)

作者简介:张铨伟(1985-),男,硕士研究生,研究方向为计算机视觉、图像处理;王彪,副教授,硕士生导师,研究方向为飞行控制、计算机视觉、精确制导;徐贵力,副教授,硕士生导师,研究方向为光电检测技术、计算机视觉、数字图像处理与模式识别。

解方法。目前,较为常见的成像模型为:线性模型(小孔成像模型)和非线性模型。

1.1 常用坐标系及其关系

为了定量地描述摄像机成像过程,定义了世界坐标系、摄像机坐标系、图像物理坐标系、图像像素坐标系四个参考坐标系,如图 1 所示。

(1) 世界坐标系(${}^wX, {}^wY, {}^wZ$), 是任意定义的空间 3D 坐标系。

(2) 摄像机坐标系(${}^cX, {}^cY, {}^cZ$), 以摄像机光心为坐标原点, 通常以沿光轴方向为 Z 轴, 且与像平面垂直, 光轴与图像平面焦点 ${}^cO(u_0, v_0)$ 为图像主点, ${}^cO^pO$ 为摄像机焦距 f 。

(3) 图像物理坐标系(${}^pX, {}^pO, {}^pY$), 以光轴和像平面的交点为原点, 即图像主点 ${}^pO(u_0, v_0)$, 其中 X 轴 Y 轴分别平行于摄像机坐标系的 X, Y 轴, 以毫米为单位, 是 2D 平面直角坐标系。

(4) 图像像素坐标系(U, O, V), 即计算机帧存坐标系, 是图像上的平面直角坐标系, 一般以像素为单位, 图像左上角为其原点, U, V 轴分别平行于图像物理坐标系的 X, Y 轴。像素坐标 (u, v) 分别表示该像素在图像上的列数和行数, 即 (u, v) 为以像素为单位的图像坐标系^[6]。

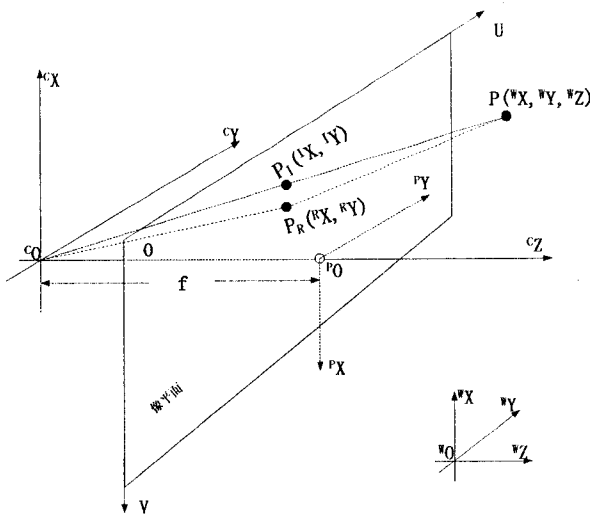


图 1 摄像机成像模型中各坐标系示意图

1.2 摄像机线性成像模型

理想的小孔成像模型为线性模型, 如图 1 所示。设空间一点 $P({}^wX, {}^wY, {}^wZ)$, P 与光心 cO 的连线交图像平面于点 $P_I({}^lX, {}^lY)$, P_I 为理想的成像点。空间点至对应成像点的关系可由以下几个变换表示。

(1) 世界坐标系与摄像机坐标系变换关系^[7]。

世界坐标系到摄像机坐标系的变换关系可由一个平移矩阵 T 和一个单位正交矩阵 R 表示为:

$$\begin{bmatrix} {}^cX \\ {}^cY \\ {}^cZ \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} {}^wX \\ {}^wY \\ {}^wZ \end{bmatrix} + T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^wX \\ {}^wY \\ {}^wZ \end{bmatrix} + T \quad (1)$$

齐次坐标表示为:

$$\begin{bmatrix} {}^cX \\ {}^cY \\ {}^cZ \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & T \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^wX \\ {}^wY \\ {}^wZ \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中矩阵 R 是正交旋转矩阵, $T = [t_x, t_y, t_z]^T$ 为世界坐标系的原点在摄像机坐标系中的表示。

正交旋转矩阵 R 实际只有 3 个自由度, 再加 T 的三个变量, 共 6 个参数, 称这 6 个参数为摄像机外部参数或内部校准^[5]。

(2) 图像坐标系与摄像机坐标系变换关系。

摄像机坐标系中特征点 P 在图像物理坐标系中的像点 P_I 坐标如图 1 所示, 可表示为: ${}^lX = {}^cXf/{}^cZ$, ${}^lY = {}^cYf/{}^cZ$ 。齐次坐标表示为:

$${}^cZ \begin{bmatrix} {}^lX \\ {}^lY \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^cX \\ {}^cY \\ {}^cZ \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

将上式图像物理坐标进一步转化为图像像素坐标

$$\begin{cases} u - u_0 = {}^lX/d_x = s_x {}^lX \\ v - v_0 = {}^lY/d_y = s_y {}^lY \end{cases} \quad (4)$$

齐次坐标表示为:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_x & 0 & u_0 \\ 0 & s_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^lX \\ {}^lY \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中, u_0, v_0 是主点坐标, d_x, d_y 分别为一个像素在 P_X, P_Y 方向上的物理尺寸, $s_x = 1/d_x, s_y = 1/d_y$ 表示单位长度的像素个数。

则空间点 P 与像点 P_I (像素坐标表示) 的变换关系可表示如下:

$${}^cZ \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^wX \\ {}^wY \\ {}^wZ \\ 1 \end{bmatrix} =$$

$$M_1 M_2 X_w = M X_w \quad (6)$$

其中, $f_x = f s_x = f/d_x, f_y = f s_y = f/d_y$; M 为 3×4 矩阵, 称为投影矩阵; M_1 完全由 f_x, f_y, u_0, v_0 决定, 由于它们只与摄像机内部结构有关, 故称为摄像机内部参数, 记为:

$$K = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

(6) 式即为摄影测量学中最基本的共线性方程,

也就是针孔模型的数学表达式,要求物点、光心和像点这三点须在同一直线上。

1.3 摄像机非线性成像模型

由于工艺水平等因素限制,摄像机光学系统精确度不可能达到理想化的小孔成像模型,物点在像平面上实际所成的像与理想成像间存在光学畸变误差。此时线性模型不能准确描述摄像机成像的几何关系,如在近距或广角时的情形^[1]。目前主要的畸变误差可分为三类:偏心畸变、薄棱镜畸变和径向畸变,前两类则既产生径向偏差又产生切向偏差,而第 3 类只产生径向位置的偏差。如图 1 所示,点 $P_R(^RX, ^RY)$ 便是由于畸变实际成的像点。

描述非线性畸变模型可用如下公式:

$$\begin{cases} ^IX = ^RX + \delta_x(^RX, ^RY) \\ ^IY = ^RY + \delta_y(^RX, ^RY) \end{cases} \quad (8)$$

其中 $(^IX, ^IY)$ 是由线性模型计算出来的成像点坐标的理想值; $(^RX, ^RY)$ 为实际的成像点坐标, δ_x, δ_y 是非线性畸变值,与图像点在图像中的位置有关,可用以下公式表示:

$$\begin{cases} \delta_x(^RX, ^RY) = ^RX(k_1 r_d^2 + k_2 r_d^4) + (p_1(3^RX^2 + ^RY^2) + 2p_2^RX^RY) + s_1(^RX^2 + ^RY^2) \\ \delta_y(^RX, ^RY) = ^RY(k_1 r_d^2 + k_2 r_d^4) + (p_2(3^RX^2 + ^RY^2) + 2p_1^RX^RY) + s_2(^RX^2 + ^RY^2) \end{cases} \quad (9)$$

其中 $r_d^2 = ^RX^2 + ^RY^2$, δ_x 或 δ_y 的第一项称为径向畸变(radial distortion),是由于镜头在制造过程中的磨制工艺所造成的,第二项称为离心畸变(decentering),第三项称为薄棱镜畸变(thin prism),两者是由于镜头和相机在装配过程中的定位不精确所产生的^[6]。式中的 $k_1, k_2, p_1, p_2, s_1, s_2$ 称为非线性畸变参数。但根据实际情况,相比于径向畸变,离心畸变和薄棱镜畸变对视觉精度影响较小,故一般只考虑一阶径向透镜畸变:

$$\begin{cases} ^IX = ^RX(1 + k_1 r_d^2) \\ ^IY = ^RY(1 + k_1 r_d^2) \end{cases} \quad (10)$$

可见 X, Y 方向的畸变相对值与径向半径的平方成正比,即在图像中心处的畸变较小,在边缘处的畸变较大。

由此可见,非线性模型的相机内部参数由线性模型中的 f_x, f_y, u_0, v_0 以及非线性畸变参数 $k_1, k_2, p_1, p_2, s_1, s_2$ 组成;外参数依旧为旋转矩阵 R 与平移矢量 T 。

2 摄像机标定方法分类

摄像机标定的目的是利用给定 3D 空间物体的特

征点坐标 (x, y, z) 与其 2D 图像空间的图像坐标 (u, v) 来计算获得摄像机的内、外参数。近几年机器视觉技术发展十分迅速,作为基础工作的摄像机标定工作的研究也取得了很大发展,新的方法层出不穷,且应用范围越来越广。

摄像机标定方法很多,按照不同的依据有不同的分类方法,如根据前面摄像机模型分类可分为线性标定和非线性标定。非线性标定方法较繁,速度慢,算法一般需要一个良好的初值,且非线性搜索不能完全保证参数收敛到全局最优解,目前广泛采用的非线性优化方法有 LM 优化算法和 Newton Raphson(NR)优化算法。Faig^[8]提出了对参数标定的非线性优化算法, Tsai 给出在假定只存在径向畸变条件下的标定算法。

文中将从不同角度对摄像机标定方法进行分类,并对主流方法进行介绍。

2.1 根据是否需要标定物进行分类

根据是否需要标定物可分为传统摄像机标定方法、摄像机自标定方法以及基于主动视觉的标定方法^[9,10],这也是目前最被广为接受的方法。

2.1.1 传统摄像机标定方法

传统摄像机标定可分为 4 类:

- (1)利用最优化算法的定标方法;
- (2)利用摄像机变换矩阵的定标方法;
- (3)进一步考虑畸变补偿的两步法;
- (4)采用更为合理的摄像机成像模型的双平面定标方法^[1]。

1)利用最优化算法的定标方法优点在于可假设成像模型非常复杂,根据参数模型可具体分为:a. 摄影测量学中的传统方法, Faig 在文献[8]中提出的方法最具代表性,利用针孔摄像机模型的共面约束条件,假设成像模型非常复杂,并合理细致的设计成像模型,考虑成像过程中的各种可能因素,采用至少十七个参数来描述每幅图像与 3D 空间物体的约束关系,但计算的量比较庞大;b. 直接线性变换(Direct Linear Transformation, DLT)法,此方法由 Abdel-Aziz 和 Karara 于 1971 年首次提出。只需通过求解线性方程求得摄像机模型参数,这是 DLT 的优势所在。Dainis 和 Juberts 在文献[11]给出了利用 DLT 进行标定的结果。因在成像过程中 DLT 方法没有考虑非线性畸变问题,故其通过非线性最优化算法来提高精度。因此 DLT 虽然是通过解线性方程求得参数,但求解的过程不排除使用非线性优化算法,可以说它是对摄像测量学中的传统方法的一种简化^[2]。

2)由前面成像模型介绍可知,当忽略畸变时,可利用线性方法求解,因此严格来说,基于线性模型的透视

变换矩阵的方法与 DLT 方法没有本质区别^[1],此方法应用广泛,并取得了满意的结果^[12~15]。文献^[16]给出了一个由此方法求解的摄像机内外参数的方法,并对求解过程作了详细分析。

3)1986 年 Tsai 提出的基于径向约束(RAC)的标定方法是两步法的代表,RAC 方法是利用径向一致约束来求解像机外参数,然后再求解其它参数^[17]。基于 RAC 的方法中大部分方程是线性方程,因此可降低参数求解的复杂性,使标定过程准确快捷^[5]。Tsai 只考虑了径向畸变,没有考虑切向畸变,在文献^[18]中 Weng 等人在 Tsai 基础上又考虑了切向畸变,并给出相应算法。

4)Martins 等^[19]首先提出了双平面模型,利用线性方法就可解相关参数;但弊端在于要求解大量的位置参数。国内对利用双平面模型进行标定方面,马颂德教授和魏国庆教授有很多的研究^[20~22],具有较大贡献。

2.1.2 摄像机自标定方法

20 世纪 90 年代初, Faugeras, Luong, Maybank^[23,24]等人首次提出摄像机自标定。摄像机自标定可不借助于标准参照物来获取准确的 3D 信息,仅通过控制安装摄像机的转台运动得到图像序列,经过对图像序列的匹配来获得一定的约束关系从而计算参数。自标定具有灵活方便的优点,但一般精度不太高,鲁棒性不足。自标定基本思路为,首先通过绝对二次曲线建立关于摄像机内参数矩阵的约束方程,称为 Kruppa^[24]方程;再求解 Kruppa 方程确定矩阵 C ($C = K^{-T}K^{-1}$, K 为内参数矩阵);最后通过 Cholesky 分解得到矩阵 K 。

目前自标定方法可分为四类,即分层逐步标定法、基于主动视觉标定法、利用绝对二次曲线和极线变换性质解 Kruppa 方程的方法以及基于二次曲面法等。此外还有学者对自动标定进行了另一种分类,见文献^[1]。

(1)基于 Kruppa 方程的方法不需对图像序列进行射影重建,只对两幅图像之间建立方程,当图像序列较长时,该方法出现不稳定^[1]。Faugeras 等人利用射影几何证明了每两幅图像间存在两个形如 Kruppa 方程的二次非线性约束,并利用 Kruppa 方程来求得多幅图像上的所有像点到对应极线的距离之和,采用 LM (Levenberg - Marquardt)算法求出距离最小值,得到内参数。

(2)由于求解 Kruppa 方程有一定的困难,有学者通过对图像序列做射影重建,并利用绝对二次曲线(面)添加约束条件进行摄像机参数的求解,这就是分

层逐步标定方法。该方法在实际应用中逐渐取代了直接求解 Kruppa 方程的方法。其中最具代表性的方法是由 Hartley^[25]提出的一种对摄像机投影矩阵进行 QR 分解的自标定方法。

(3)绝对二次曲面最早由 Triggs^[26]引入自标定研究中,虽然其本质同 Kruppa 方程一样运用了绝对二次曲线在欧式变换下的不变性,但当多幅图像输入并且能得到一致射影重建的情况下,该方法将更具优势。

2.1.3 基于主动视觉的标定方法

基于主动视觉的方法是将摄像机精确安装于可控平台,主动控制平台作特殊运动来获得多幅图像,利用图像和摄像机运动参数来确定摄像机内外参数,鲁棒性比较强而且通常可线性求解。但当摄像机运动未知或者运动无法控制的场合不能使用该方法,且该方法所需运动平台精度较高,成本也较高。此方法最经典的是马颂德教授提出的基于两组三正交运动的线性法^[27],后李华、杨长江等提出了基于四组和五组平面正交运动的方法,利用图像中的极点信息线性标定^[28]。此外,胡占义教授提出的基于平面单应矩阵的正交运动方法和基于外极点的正交运动方法更容易实现^[28],相比马教授的方法可多求出一个内参数,即 5 个内参数。

2.2 根据标定物进行分类

根据标定物的不同可分为基于 3D 立体靶标的标定,基于 2D 平面靶标的标定。

(1)基于 3D 靶标通过以形状、尺寸已知的 3D 物体为标定物进行标定,此方法精度很高,但是成本高、标定物精度要求高且运用不灵活,适用于工业测量,故未被广泛应用。其典型代表为 Tsai 的方法,利用标定物的三维形状知识与相应图像间的对应关系得到一个标定参数的函数,然后对此函数优化得到标定参数。

(2)2D 靶标常使用平面方格点、矩形或二次曲线为模板图案,目前比较常见的有张正友、Bouguet、Heikkil 的三种模板^[2]。

张正友^[9]方法假设模板位于世界坐标系 $Z_w = 0$ 的平面,然后从不同角度拍摄 3 幅以上(含 3 幅)模板图像,结果图像处理获得各角点的像素坐标,然后代入(6)式得到单应矩阵,将其线性分解得到内、外参数矩阵,再根据相应算法得到畸变系数 k_1, k_2 ,最后利用 LM 算法优化参数。

Bouguet 是在张的方法上提出,他们的模板相似,算法上 Bouguet 在计算畸变参数时采用了完整的 Brown 畸变校正模型,可以得到其他畸变系数。

Heikkilä 模板以圆孔中心为标定参照点,优点是圆孔中心坐标对图像处理中的阈值化不敏感,缺点是成

像时圆孔会成椭圆。算法方面,针对此模型 Heikkilä 提出了非对称性投影的校正方法,并重新定义内参数

矩阵 $\mathbf{K} = \begin{bmatrix} sf & 0 & u_0 \\ 0 & f & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$, 这里 s 为图像的纵横比,此外

镜头畸变的矫正模型采用了 Brown 模型的非解析逆模型。

此外,杨长江等对张正友等的方法进行推广,利用图像和靶标平面的二次曲线对应来标定摄像机,而不是利用点与点之间的对应。由于二次曲线是一种更简洁,更全局化的基元,因而可以进一步提高方法的稳定性。国内孟晓桥教授、胡占义教授利用圆进行标定^[29],此方法基于曲线拟合,且不需要任何匹配,比较稳定;吴毅红教授采用平行圆的平面模板,此方法基于摄像机成像的准仿射不变性来计算图像上二次曲线的交点,由此得到圆环点的像来标定^[10],该方法也不需要匹配,不需要计算圆心,应用场合广泛。

在这之后还有很多基于不同平面图像模板的标定方法,有基于梯形、菱形、多边形等,如文献[30]采用正方形模板进行标定,文献[31]基于等边三角形进行标定,两者均根据射影几何中的交比关系以及调和共轭性质进行标定。

2.3 根据求解参数的结果进行分类

根据求解参数的结果可以分为显式标定和隐式标定。隐参数标定以转换矩阵元素作为标定参数,以一个转换矩阵表示空间物点与像点之间的对应关系,因参数不具有明确的物理意义,故称为隐参数标定^[2]。由于隐参数标定方法只需求解线性方程,故当精度不是首要因素时此方法可获得较高的效率^[3]。较典型的是直接线性变换(DLT)。DLT 以线性模型为对象,用一个 3×4 矩阵表示 3D 空间物点与 2D 空间像点的对应关系,忽略中间成像过程^[3]。

为了提高标定精度,就需要构造精密的几何模型,并精确分析摄像机成像的中间过程,考虑具有物理意义的参数(一般包括镜头畸变参数、有效焦距偏差、帧存扫描水平比例因子和图像中心偏差)^[4],最后求解这些参数,这一过程即为摄像机的显参数定标。这类标定方法适用于摄像机生产过程中的参数校准与标定,不适用于摄像机产品的后期参数估计。

2.4 其他分类方法

根据视觉系统所用的摄像机个数不同可分为:单摄像机(单目视觉)标定和多摄像机标定。单目视觉标定以之前介绍的各种方法为主。对于多摄像机标定,文献[32]采用一维标定物(三个以上距离已知的共线点),并使用最大似然准则对线性算法进行精化。更常

见的多目标定为双目标定,与单个摄像机标定相比,双目标定不仅需要知道每台摄像机内外参数,还需要通过标定来测量两摄像机之间的相对位置和方向。

在双目摄像机标定中,一般先用单目标定方法分别得到两摄像机的内外参数。设摄像机 C_1 的外参数为 R_1 和 T_1 ,摄像机 C_2 的外参数为 R_2 和 T_2 。对空间点 P ,若其世界坐标系和两个摄像机(C_1, C_2) 坐标系下的坐标分别为 x_w, x_{c1}, x_{c2} ,则:

$$x_{c1} = R_1 x_w + T_1 \quad x_{c2} = R_2 x_w + T_2$$

将上式的 x_w 消去后得:

$$x_{c1} = R_1 R_2^{-1} x_{c2} + T_1 - R_1 R_2^{-1} T_2$$

因此,两摄像机之间的几何关系可用 R, T 表示为: $R = R_1 R_2^{-1}, T = T_1 - R_1 R_2^{-1} T_2$ 。

另外,根据内部参数是否可变,可分为可变内部参数的标定和不可变内部参数标定。根据摄像机运动方式不同,可分为非限定运动方式的摄像机标定和限定运动方式的摄像机标定,其中后者又可分为纯旋转的标定、正交平移的标定等等。根据标定步骤可分为两步法、三步法、四步法等。

3 标定工具介绍

目前广为流传的标定工具有“GML Camera Calibration toolbox”软件(见图 2)以及 Matlab 的标定工具箱。此外,OpenCV(目前最新版本为 OpenCV2.0)中具有以棋盘格模板为例的标定函数,使用较为简单快捷。

这里给出一些相关软件的下载地址,均为软件作者官网,是大家一同维护的免费资源。Matlab 标定工具箱(包含鱼眼镜头标定): http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/;

GML 标定工具可全自动标定内外参数:

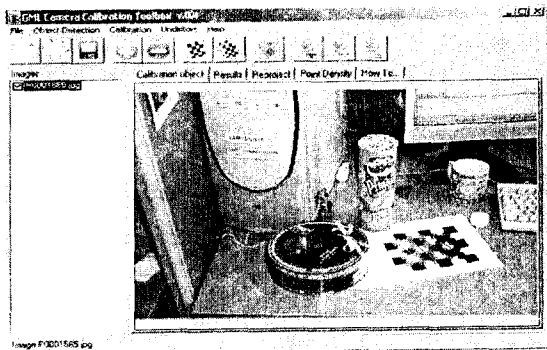


图 2 GML 软件界面

<http://graphics.cs.msu.ru/science/research/calibration/cpp>;

Matlab 机器视觉工具箱,内含多种函数可用于机器视觉和基于视觉的控制: <http://www.petercorke>.

com/Machine_Vision_Toolbox.html;

最后为一些被高度推荐的机器视觉软件: <http://www.csse.uwa.edu.au/~pk/Research/MatlabFns/othersites.html>。

4 结束语

文中从不同的角度对现有摄像机标定的方法进行了一个较为详尽的分类,并对主流方法进行了简单介绍和比较,介绍了目前比较常用的标定工具和软件。但是,对摄像机标定方法的研究是没有终点的,因为机器视觉在飞速发展,应用范围更加广阔,人们所追求的是运算更快,精度更高,使用更灵活方便的标定方法。因此需要在模型表达、畸变校正、非线性计算、方程病态、冗余参数等各方面继续深入研究和探索。以求更好的标定方法,为机器视觉工作打下坚实的基础。

参考文献:

- [1] 邱茂林,马颂德,李毅. 计算机视觉中摄像机定标综述[J]. 自动化学报, 2001, 26(1): 43-55.
- [2] 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.
- [3] 李洪海,王敬东. 摄像机标定技术研究[J]. 光学仪器, 2007(4): 7-12.
- [4] 吴文琪,孙增圻. 机器视觉中的摄像机定标方法综述[J]. 计算机应用研究, 2004(2): 4-6.
- [5] 曾建兰. 摄像机标定若干问题的研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2008.
- [6] 沈慧杰. 基于单目视觉的摄像机定位方法的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
- [7] 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): 1740-1744.
- [8] Faig W. Calibration of close-range photogrammetric systems: mathematical formulation. Photogrammetric eng[J]. Remote sensing, 1975, 41(12): 1479-1486.
- [9] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Trans. PAMI, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [10] 中国科学院自动化研究所模式识别国家重点实验室[J]. 摄像机标定课件[EB/OL]. 2006. <http://www.nlpr.ia.ac.cn/english/rv>.
- [11] Dainis A, Juberts M. Accurate remote measurement of robot trajectory motion[C]//International Conference on Robotics and Automation. [s.l.]: [s.n.], 1985: 92-99.
- [12] Yakimovsky Y, Cunningham R. A system for extracting three dimensional measurements from a stereo pair of TV cameras[J]. Computer Graphics and Image Processing, 1978, 7(2): 195-210.
- [13] Hall E L, Tio J B K, McPherson C A, et al. Curved surface measurement and recognition for robot vision[C]//Conference Record of the 1982 Workshop on Industrial Applications of Machine Vision. Research Triangle Park, NC, USA: [s.n.], 1982: 187-99.
- [14] Itoh H, Miyauchi A, Ozawa S. Distance measuring methods using only simple vision constructed for moving robots[C]//Seventh International Conference on Pattern Recognition (Cat No. 84CH2046-1). Montreal, Que., Canada: [s.n.], 1984.
- [15] Luh J Y, Klaasen J A. A three dimensional vision by off-shelf system with multi-cameras[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1985, 7(1): 35-45.
- [16] Ganapathy S. Decomposition of transformation matrices for robot vision[C]//International Conference on Robotics. Silver Spring, MD, USA: IEEE Comput. Soc. Press, 1984.
- [17] Tsai R Y. An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision[C]//Proceedings CVPR '86: IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (Cat. No. 86CH2290-5). Miami Beach, FL, USA: [s.n.], 1986: 364-74.
- [18] Weng J, Cohen P, Herniou M. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(10): 965-980.
- [19] Martins H A, Birk J R, Kelley R B. Camera models based no data from calibration planes[J]. Computer Graphics and Imaging Processing, 1981, 17: 173-180.
- [20] Wei G, Ma S. Two-plane calibration: a unified model[C]//Proceedings 1991 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (91CH2983-5). Los Alamitos, CA, USA: IEEE Comput. Soc. Press, 1996: 133-138.
- [21] Wei Guo-Qing, Ma Song De. Implicit and explicit camera calibration: theory and experiments[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1994, 16(5): 469-480.
- [22] Wei G Q, Ma S D. A Complete two-plane camera calibration method and experimental comparisons [C]//Proceedings Fourth International Conference on Computer Vision. Berlin, Germany: [s.n.], 1993: 439-446.
- [23] Faugeras O, Luong Q T, Maybank S. Camera self-calibration: Theory and experiments[C]//In: Proceeding of the 2nd European Conference on Computer Vision. Italy: [s.n.], 1992: 321-334.
- [24] Maybank S, Faugeras O. A theory of self-calibration of moving camera[J]. International Journal of Computer Vision, 1992, 8(2): 123-151.
- [25] Hartley R. Euclidean reconstruction and invariants from multiple images[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1994, 16(10): 1036-1041.

政府的支持,有了实质资金后能找到应用物联网的商品,搭建无线网络及系统平台,再进行物品的信息存储,然后进行传感设备的安装,但是现阶段推广物联网应用的商品仍属于风险投资,因为国内在物联网上缺乏核心技术的累积,同时,国内传感器产业化水平较低,高端产品被国外厂商垄断。另一方面我国的宽带建设目前还处于初级阶段,大规模的普及无线传感网络短期内还难以实现,所以物联网在中国的普及还需要做多方面的努力。

3 结束语

因特网把人与所有的物体连接起来,物联网将人与人、人与物、物与物连接起来。虽然物联网的概念早在十多年前就有了雏形,但想要建立理想中物联网还有很多技术需要完善,例如安全、寻址、标准、接入方式、生物工程等。只有通过这些技术进步和出台统一的规范,才能够获取一个公平和以用户为中心的物联网。

参考文献:

- [1] Internet of the things. the first international conference on the Internet of the things [EB/OL]. 2008. H - <http://www.ior2008.org/adjunctproceedings.pdf>.
- [2] Auto - ID Labs [EB/OL]. 1999. <http://www.autoidlabs.org>.
- [3] ITU Internet Reports 2005: The Internet of Things [EB/OL]. 2005. <http://www.itu.int/osg/spu/publications/internetofthings/>.
- [4] 智慧地球. IBM 商业价值研究院 [EB/OL]. 2008. <http://www-900.ibm.com/ibm/ideasfromibm/cn/smarterplanet/20081106/index.shtml?ca=apch-sp-20090428&me=psearch&met=Baidu1&re=>.
- [5] 陈新河. 无线射频识别(RFID)技术发展综述[J]. 信息技术与标准化, 2005(7): 20-24.
- [6] 付 俊. 无线射频识别技术研究[J]. 山西科技, 2009(1): 22-23.
- [7] Welbourne E, Battle L, Cole G, et al. Building the Internet of Things Using[J]. IEEE Internet Computing, 2009, 13(3): 48-55.
- [8] 宋合营, 赵会群. 物联网分布式识读者数据采集方案设计与实现[J]. 北方工业大学学报, 2008(1): 22-26.
- [9] 任丰原, 黄海宁, 林 闯. 无线传感器网络[J]. 软件学报, 2003, 14(7): 1282-1291.
- [10] Fortuna C, Mohorcic M. Trends in the development of communication networks: Cognitive networks[J]. computer networks, 2009(53): 1354-1376.
- [11] 糜正琨. 认知网络与网络的融合[J]. 中国新通信, 2009(6): 5-10.
- [12] 陈 康, 郑纬民. 云计算: 系统实例与研究现状[J]. 软件学报, 2009(5): 1338-1348.
- [13] Boss G, Malladi P, Quan D, et al. Cloud computing. IBM White Paper [EB/OL]. 2007. <http://download.boulder.ibm.com/ibmdl/pub/software/dw/wes/hipods/Cloud-computing-wp-final-8Oct.pdf>.
- [14] Maggiani R. Cloud Computing Is Changing How We Communicate [C] // Professional Communication Conference IEEE International. [s. l.]: [s. n.], 2009: 1-4.
- [15] EPC 全球动态 [EB/OL]. 2009. <http://www.epcglobal.org.cn/dataFile/EPC%E5%85%A8%E7%90%83%E5%8A%A8%E6%80%81200905.pdf> 2009, 5(4).
- [16] Ning Kong, Xiaodong, Yan Bao ping. A Model Supporting Any Product Code Standard for the Resource Addressing in the Internet of Things [C] // Proceedings of the 2008 First International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems. Wuhan: [s. n.], 2008: 233-238.
- [17] 刘奕昌, 关新平. EPC 物联网络系统的 H ∞ 控制问题 [C] // IEEE World Congress on intelligent Control and Automation. [s. l.]: [s. n.], 2008: 6917-6922.
- [18] Nemmaluri A, Corner M D, Shenoy P. Sherlock: Automatically Locating Objects for Humans [C] // Proc. 6th Int'l Conf. Mobile Systems, Applications and Services (MobiSys 08). [s. l.]: ACM Press, 2008.
- [19] Viega J. Cloud Computing and the Common Man [J]. IEEE Computer, 2009, 42(8): 106-108.
- [20] 无线传感器网络安全研究与分析 [EB/OL]. 2007. <http://www.eepw.com.cn/article/61231.htm>.
- [21] Triggs B. Auto - calibration and absolute quadric [C] // Proceedings of the 1997 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'97). [s. l.]: [s. n.], 1997.
- [22] Ma Sang De. A Self - calibration technique for active vision system [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1996, 12(1): 114-120.
- [23] 李 伟, 吕晓旭, 钱晓凡, 等. 基于平面模板的摄像机标定方法比较 [J]. 激光杂志, 2006(2): 54-55.
- [24] 孟晓桥, 胡占义. 一种新的基于圆环点的摄像机自标定 [J]. 软件学报, 2002, 13(5): 957-965.
- [25] 陈 西, 黎 宁, 周建江. 基于正方形模板的摄像机自标定新方法 [J]. 信息通信, 2009(1): 27-30.
- [26] 杨世梁, 倪霞林. 基于等边三角形的摄像机标定方法 [J]. 计量与测试技术, 2007, 34(12): 29-31.
- [27] 王 亮, 吴福朝. 基于一维标定物的多摄像机标定 [J]. 自动化学报, 2007, 33(3): 225-231.

(上接第 179 页)