

基于平面方格点的摄像机标定改进算法

徐经纬, 郝泳涛

(同济大学 CAD 研究中心, 上海 201804)

摘要: 分析基于平面方格点的摄像机标定算法, 指出基于表征靶标平面到图像平面映射的矩阵的求解存在标定点的相关性问题。通过引入基准系统, 包括确定标记选取的理论标准、分析其环境识别率和相互间的错误识别率, 提出一套从标记点提取到其像平面坐标计算的改进过程和相关公式。实验结果表明, 该算法对室内场景可控的小视场标定领域具有实际应用价值。

关键词: 摄像机标定; 基准标记; 相关性

Improved Camera Calibration Algorithm Based on Plane Grid Points

XU Jing-wei, HAO Yong-tao

(CAD Research Center, Tongji University, Shanghai 201804)

【Abstract】 This paper analyzes the algorithm based on the grid points and points out the basis of the algorithm, i.e. the solving of the matrix which indicates the mapping from the target surface to the image surface has the correspondence problem of the calibration points. Through introducing the fiducial marker system, which includes defining the selection criteria of fiducial markers and analyzing their recognition rate from the environment and the wrong recognition rate from each other, an improved progress from extracting the calibration points to calculating their image coordinates and the formulas relative are given. Experimental result proves the algorithm is efficient and liable, and has a practical value for the small FOV in which indoor environments can be controlled.

【Key words】 camera calibration; fiducial marker; correspondence

1 基于平面方格点的摄像机标定方法分析

摄像机标定是指建立起场景中物点到图像上像点之间的映射关系。首先, 必须预定义摄像机透视模型, 然后参照该模型, 通过已知特征点的世界坐标与图像坐标的对应关系, 来求解摄像机透视模型中的各种参数。

摄像机标定大致可分为传统标定方法和自标定方法 2 类。一般来讲, 自标定技术场景限制少, 精度低, 常用于遥感、机器人巡航等场景不可知的室外领域。而传统标定方法要求在场景中必须有参照物, 从而产生了对场景的限制条件, 但精度高, 常用于对精度有一定要求, 场景已知且可控的室内小视场领域。其中, 以基于二维平面靶标的标定技术较为流行。该类方法克服了三维靶标作为参照物制作难度大, 成本高的缺点, 同时又保留了三维靶标标定过程简单易行的优点, 广泛应用于诸多领域。

基于平面方格点的摄像机标定方法也属于基于二维平面靶标的摄像机标定技术, 本文在该标定技术的基础上进行改进。

1.1 基本步骤和算法分析

基于平面方格点的摄像机标定方法要求摄像机在 2 个以上不同的方位拍摄同一个平面靶标, 靶标上有很多方格, 方格上的点即为标定点。摄像机和二维平面靶标都可以自由地移动, 不需要知道运动参数。在标定过程中, 假定摄像机内部参数始终不变, 即不论摄像机从任何角度拍摄靶标, 摄像机内部参数都为常数, 只有外部参数发生变化。

1.1.1 靶标平面到图像平面映射关系的求解

设靶标平面上的标记点的三维世界坐标 M 为 (x, y, z) , 它

在像平面上的二维坐标 m 为 (u, v) ; A 为摄像机的内参数矩阵; R 和 T 分别为摄像机的旋转矩阵和平移向量; s 为一任意的非零比例因子。不失一般性, 令靶标平面位于世界坐标系的 xy 平面。根据针孔成像模型, 有

$$s \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} r_1 & r_2 & t \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

令

$$H = (h_1 \quad h_2 \quad h_3) = \lambda A \begin{pmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \end{pmatrix} \quad (2)$$

则有

$$sm = HM \quad (3)$$

令目标函数为 $\min \sum_i \|m_i - n_i\|^2$, 其中 m_i 为实际像点坐标; n_i 为根据计算出的像点坐标。通过最小二乘法使参差最小化的过程, 即可求得 $H^{[1]}$ 。

1.1.2 内外参数矩阵的求解

H 求出之后, 由式(2)及 R 的正交性, 有

$$\begin{cases} h_1^T A^{-T} A^{-1} h_2 = 0 \\ h_1^T A^{-T} A^{-1} h_1 = h_2^T A^{-T} A^{-1} h_2 \end{cases} \quad (4)$$

令 $B = A^{-T} A^{-1}$; $b = (B_{11} \quad B_{12} \quad B_{22} \quad B_{13} \quad B_{23} \quad B_{33})^T$; $v = (h_{11}h_{j1} \quad h_{11}h_{j2} + h_{12}h_{j1} \quad h_{12}h_{j2} \quad h_{13}h_{j1} + h_{11}h_{j2} \quad h_{13}h_{j2} + h_{12}h_{j3} \quad h_{13}h_{j3})$ 易知, B 具有对称性。有

作者简介: 徐经纬(1984-), 男, 硕士研究生, 主研方向: 机器视觉; 郝泳涛, 副教授、博士

收稿日期: 2009-09-20 **E-mail:** haoyt@vip.sina.com

$$\begin{pmatrix} \mathbf{v}_{12}^T \\ (\mathbf{v}_{11} - \mathbf{v}_{22})^T \end{pmatrix} \mathbf{b} = 0 \quad (5)$$

如果从 n 个不同的位置拍摄靶标平面, 就得到了 n 幅图像和 n 个上面的方程。对这些方程进行联立, 可得 $\mathbf{V}\mathbf{b}=\mathbf{0}$ 。其中, \mathbf{V} 为 $2n \times 6$ 的矩阵。如果 $n \geq 3$, 就可以在相差一个比例因子的情况下唯一地确定 \mathbf{b} 。

求出 \mathbf{b} 后, \mathbf{B} 也随之确定。然后通过 Cholesky 矩阵分解算法, 得到 \mathbf{A}^{-1} , 再求逆即可得到摄像机的内参数矩阵 \mathbf{A} 。

根据式(2), 有

$$\begin{cases} r_1 = \lambda \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h} \\ r_2 = \lambda \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_2 \\ r_3 = r_1 \times r_2 \\ t = \lambda \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_3 \end{cases} \quad (6)$$

至此, 摄像机的内外参数全部求出。

1.2 标定点的关联性问题

如上所述, 该方法继承了一般基于二维靶标的摄像机标定方法的优点。首先, 其靶标制作极为简便, 完全可以使用高分辨率打印机打印靶标表面, 该表面包含事先设计好的方格, 然后附于任意平面上制作而成。因此, 制作成本非常低廉。其次, 整个标定过程仅对摄像机内参数进行约束, 而对摄像机的外参数, 即摄像机的位置和姿态不做假设, 这不仅方便了拍摄, 增强了标定过程中人的随意性, 更大大加快了标定过程中拍摄阶段的速度。最后, 该方法稳定可靠, 具有较强的鲁棒性和精度。

同时也可以看到, 虽然在整个标定过程的拍摄阶段, 该方法简单易行。但是, 在后续的处理过程中却免不了大量的人工劳动。这是因为从上节的算法分析不难发现, 该方法是建立在表征靶标平面到图像平面映射的矩阵 \mathbf{H} 的基础之上, 而 \mathbf{H} 的计算必须首先解决靶标平面上标定与图像上标定点的关联性问题。换言之, \mathbf{H} 的计算依赖于 2 个先决条件:

(1) 特征点的筛选, 即在每幅图像中哪些特征点是标定点哪些不是标定点, 必须确定。

(2) 标定点的定位, 即如果某特征点是标定点, 那么它在靶标中的位置也必须确定。

对于上述 2 个条件, 该算法只能通过人为地鉴别和观察来满足。而且对于每幅图像, 都必须进行人工处理。如果标定过程数据采集量较大, 图像数量多, 势必需要大量人工劳动。这就大大降低整个标定过程的自动化程度, 更降低了处理的速度和可靠性。

2 基准标记系统

基准标记系统是一套使用独特设计图案的计算机视觉算法, 可以用来帮助解决机器视觉理论中的关联性问题, 自动地找到不同摄像机位置拍摄的图像中同一物体上的点。基准标记系统包括一套配置于环境中的标记图案, 通过使用相关适应算法, 能够自动地在数字影像中被探测出来。对于现实增强技术、机器人漫游技术、三维建模及其他很多领域都有较大作用。

基准标记系统的研究由来已久, 但直到 2005 年前后纯数字化技术的应用代替了之前的图像相关性技术, 才标志着该领域真正走向了成熟, 进入了实用的阶段。目前, 已经出现了数套成型系统, 以时间为序, 主要有 ARToolkit, ARTag 和 ARToolkit Plus。而基于这三套系统的应用也层出不穷。其中, 尤以 ARTag 的应用较为广泛。

本文将通过应用 ARTag 标记系统, 将基准标记系统引入摄像机标定的过程之中, 来解决前述基于平面方格点的摄像机标定方法中标定点的关联性问题。

ARTag 标记系统是一套二值平面图案标记系统, 包括了一套特殊的用强鲁棒性校验技术和前向校验技术编码的 ID 标识。它具有非常低的误识别率, 并且不像其他系统一样需要设置灰度级别阈值, 可以识别超过 2002 种不同的标记和 ID。许多实验数据表明, ARTag 系统是一套高效稳定的系统。

3 标定点关联性问题解决

3.1 方格的识别及误识别率分析

靶标上的所有方格均采用 ARTag 中的标记, 大小全部相同, 行列有序地阵列于靶标平面上。且分为 2 类, 其一位于靶标最左上角的那个方格, 采用 ARTag 中的第 0 号标记; 另一类包括其他所有方格, 采用 ARTag 中的第 1 号标记。带有 ARTag 标记的平面靶标如图 1 所示。

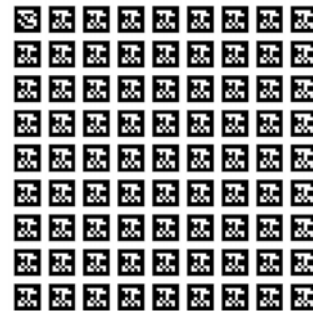


图 1 带有 ARTag 标记的平面靶标

将利用每个方格的 4 个顶点作为标定点。如果错误地将场景中自然的四边形识别成靶标上的方格, 就会传给式(2)错误的参数, 计算出错误的 \mathbf{H} , 从而导致整个标定算法失败。因此, 方格的正确识别对于标定点关联性问题解决很重要。

笔者仅使用了 2 种 ARTag 标记, 而 ARTag 标记是四边形有 4 个方向, 那么从 4 个方向看, 总共就有 $2 \times 4 = 8$ 种被接受的内部编码序列。又由于 ARTag 的识别算法中, 采用了 FEC 校验技术, 能够校正最多 2 位编码异常, 从而使每个可被接受的内部编码序列又有 $1 + C_{36}^1 + C_{36}^2 = 667$ 种变化^[2]。因此实际上能被算法接受的内部编码序列就有 $8 \times 667 = 5336$ 种。而对于图像中任意一块自然的四边形, 如果同样将其内部分为 36 个小区域, 读出内部编码, 总共有 2^{36} 种可能性。所以其正好与能被接受的内部编码序列吻合的概率为 $5336/2^{36} = 7.76 \times 10^{-8}$, 几乎为 0。因此, 虽然理论上仍存在方格误识别的可能性, 但实际上不可能发生, 下文的实验数据可验证这一点。

3.2 方格的定位及误识别率分析

在识别出最左上角的方格之后, 其余所有的方格都可以利用透视原理的直线交比不变性, 确定其在方格阵列中的行列位置, 如图 2 所示。

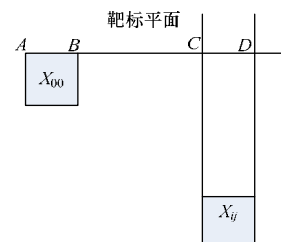


图 2 方格标记间的相对位置

设最左上角方格为 X_{00} , X_{00} 左上角顶点在靶标上的物点为 A , 在图像平面上的像点为 A' ; 同样地, 设 X_{00} 右上角顶点的物点和像点分别为 B 和 B' ; 靶标平面上, AB 的延长线交方格 X_{ij} 左右 2 条边的延长线于 C 和 D ; 图像平面上, $A'B'$ 的延长线交方格 X_{ij} 左右 2 条边的延长线于 C' 和 D' 。

那么根据直线的交比不变性^[3], 有

$$CR(A, B, C, D) = CR(A', B', C', D') \quad (7)$$

即

$$\frac{AC / BC}{AD / BD} = \frac{A'C' / B'C'}{A'D' / B'D'} \quad (8)$$

等式的右边可由图像中的信息得到, 设为 c ; 若方格的边长为 1, 则有

$$\frac{(l+BC)/BC}{(l+2BC)/(l+BC)} = c \quad (9)$$

$$BC = (\sqrt{c^2 - 2c + 1} - c + 1)l \quad (10)$$

若方格之间的间距为 l' , 则有

$$j = \frac{BC + l}{l + l'} = \frac{(\sqrt{c^2 - 2c + 1} - c + 2)l}{l + l'} \quad (11)$$

这样就得到了方格的列位置 j 。同理, 可得方格的行位置

$$i = \frac{(\sqrt{c^2 - 2c + 1} - c + 2)l}{l + l'}$$

其中, $c' = \frac{A'E' / D'E'}{A'F' / D'F'}$; D' 为 X_{00} 在像平面内的左下角顶点; E', F' 分别为靶标平面上 $A'D'$ 的延长线与方格 X_{ij} 上下 2 条边的交点。

可以发现, 上面的方格定位过程, 必须首先对方格的类别进行区分, 辨认出最左上角方格, 得到一个绝对位置, 然后通过比较其他方格相对于最左上角方格的相对位移, 得到所有方格的位置信息。因此, H 的正确计算, 是建立在方格类别正确区分的基础之上。而方格间的误识别率, 也影响着整个标定过程的成败。一般可以通过 Hamming Distance 即码距, 来分析方格间的误识别概率^[4]。

笔者使用了 ARTag 中的第 0 号和第 1 号 2 个标记来作为方格的载体, 其码距为 12。对于 36 位 ARTag 标记编码, 设其内部每一位二进制码被正确辨认的概率为 p 。那么, 本算法方格间的误识别概率就等于 $p^{24}(1-p)^{12}$ 。易见, 只要 $p > 0.9$, 则误识别率 8×10^{-14} , 从而绝对趋近于 0, 在实际应用中根本不会发生。后续的实验数据很好地验证了这一点。

3.3 标定点相关性的确立

本文使用每个方格的 4 个顶点作为标定点。在每个方格的行列位置确定之后, 可以直接算出这 4 个顶点的世界坐标。不失一般性, 设靶标平面位于世界坐标系 xy 平面; 最左上角方格的左上角顶点位于世界坐标系原点, 其上面和左面相邻 2 条边分别与世界坐标系的 x 轴与 y 轴重合, 如图 3 所示。

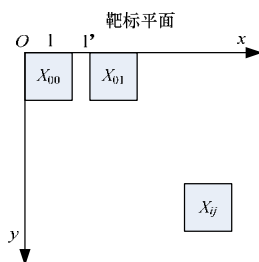


图 3 坐标系中的方格标记

则对于第 i 行第 j 列的方格 X_{ij} , 其 4 个顶点的世界坐标可由下列式子计算:

左上角:

$$X_w = i \times (l + l'), Y_w = j \times (l + l') \quad (12)$$

右上角:

$$X_w = i \times (l + l') + l', Y_w = j \times (l + l') \quad (13)$$

左下角:

$$X_w = i \times (l + l'), Y_w = j \times (l + l') + l' \quad (14)$$

右下角:

$$X_w = i \times (l + l') + l', Y_w = j \times (l + l') + l' \quad (15)$$

4 个顶点的图像坐标获得步骤如下:

(1) 由 ARTag 算法提取 ARTag 标记的同时, 已经得到了四边形的图像位置^[5], 从而得到了其 4 个顶点的像素级图像坐标, 但这还不够, 一般需要亚像素级的精度水平。因此, 以每个顶点为中心, 取出原图像中的一小块子图。(2) 对这块子图进行角点探测, 得到所有亚像素级的角点坐标。(3) 参照预先设定好的阈值, 将与顶点距离大于阈值的部分角点舍去。(4) 如果剩下的角点集合非空, 取一个与顶点距离最小的角点, 作为该顶点在图像中的像点, 从而得到了其亚像素级图像坐标。

至此, 同一标定点的世界坐标和图像坐标都已经得到, 即可代入式(2)中进行计算。而在 OpenCV 中, 函数 cvCalibrateCamara_64d 已经实现了式(2)的数学计算过程, 可以在编程阶段使用它直接求出内外参数。从而得到关键的, 表征靶标平面到图像平面映射的矩阵 H 。标定点的相关性问题得以解决。

4 实验数据分析

为验证本算法的有效性, 实验分 2 组进行。A 组实验光照条件相对固定, 用于考验本算法在理想情况下的效率; B 组试验加上一些光线变化, 主要考验算法对于光照条件的适应程度。所采用的摄像机为 Canon PowerShot A560, 分辨率选择 640×480 。

A 组实验标定次数为 20, 标定点个数为 6 480, 识别个数为 6 476, 识别率为 99.9%, 错误率为 0%, 误识别率为 0%, 用时约为 5 min。参数标定均值为: $\alpha_x = 880.87$, $\alpha_y = 809.58$, $u_0 = 323.12$, $V_0 = 283.34$ 。

B 组实验标定次数为 20, 标定点个数为 6 480, 识别个数为 6 428, 识别率为 99.2%, 错误率为 0%, 误识别率为 0%, 用时约为 5 min。参数标定均值为: $\alpha_x = 879.82$, $\alpha_y = 811.33$, $u_0 = 331.79$, $V_0 = 280.56$ 。

在 A 组中, 有 1 个标定方块未被正确识别, 造成 4 个标定点的缺失。这应该是受到摄像机分辨率的制约, 致使算法采样区域有所偏移, 导致编码读数有误。在 B 组中, 有 13 个标定方块未被正确识别, 造成 4 个标定点的缺失。这应该是受到了光线的影响, 使方块表面的黑色区域产生了比较强烈的反射, 混淆了黑白两色的识别。虽然 2 组实验都发生了轻微的未识别现象, 但实验中均没有发生误识别事件与误识别事件, 从而对后续计算工作不产生实质影响, 也证明了算法具有很强的鲁棒性。

从实验数据可以看出, 本算法对于标定点的有效识别率还是极高的, 为后续标定计算的展开提供了坚实的基础。

(下转第 264 页)