

基于平行直线的相机标定和相对定向

黄汝田, 孙鹏

北京信息科技大学现代测控技术教育部重点实验室

摘要: 摄像机标定是实现机器人视觉系统的必要辅助手段,目前的摄像机标定方法大都基于点特征,当点特征被遮挡或者在纹理贫乏区域同名点稀少时,都会导致无法标定和定向,适用性不强。为克服这些障碍,本文提出一种新的相机标定和定向方法,仅需检测出空间四组共面的平行直线,并利用其进行相机标定和定向,无需提前给出特定的物体形状,这两组平行直线可以组成平行四边形或者矩形。

关键词: 机器视觉;自标定;相机标定;相对定向

中图分类号: TG706;TH162

文献标志码: A

Camera Calibration and Relative Orientation Based on Parallel Lines

Huang Rutian, Sun Peng

Abstract: Camera calibration is the necessary auxiliary means to realize the robot vision system, and the camera calibration methods are mostly based on point feature. When some characteristics or obscured in a poor texture, few corresponding point of the region will lead to can't calibration and orientation, the applicability is not strong. In order to overcome these obstacles, this paper proposes a new method for camera calibration and orientation, just detect space four groups of coplanar parallel straight lines, and use the camera calibration and orientation, without giving a specific object shape, these two sets of parallel lines can form a parallelogram, or rectangle.

Keywords: machine vision; calibration; camera calibration; relative orientation

1 引言

使用计算机模拟人类的视觉功能是机器视觉最重要的任务,对三维真实世界进行拍摄采集信息,并对采集得到的信息进行相应的处理,使之能够用于检测、控制以及测量。其中,使用相机采集三维真实世界中的图像信息,然后计算求解其图像信息对应的空间物体相关的几何信息,完成最终重建和识别空间中的三维物体,这一步骤是机器视觉执行其他功能的前期工作,也是必要工作。若想要准确了解

三维空间中任一点的具体几何位置,以及其在对应的二维图像中的位置和它们之间存有的位置几何关系,首先需要建立几何模型,描述相机对空间中存在的三维目标物体成像的过程。其中,模型中的几何参数是相机本身的参数,包括相机的内参数以及相机在空间中站位的外参数。一般情况下,这些参数是通过相关的理论仿真和实测试验以及相应的数值计算求解得到,整个求解参数的过程被称之为相机标定。

相机的标定过程就是对相机的几何光学参数,相机与世界坐标系之间的方位关系,以及多台相机或者同一台相机不同位姿之间的方位关系进行标

基金项目: 北京市教委科技计划(KM201511232020);现代测控技术教育部重点实验室开放课题(KF20131123206)

收稿日期: 2016年11月

- [5] 林屹. 可调谐半导体激光器波长检测与控制的研究[D]. 武汉:华中科技大学,2015.
- [6] 北京信息科技大学. 蝶形封装 SG#DBR 可调谐半导体激光器模块控制方法. 中国, CN106410604A[P]. 2017-02-15.
- [7] Liu C T, Li H C, He Z X, et al. Design of fiber bragg grating automatic analysis test system based on LabVIEW[J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(2): 206002.
- [8] 凌茂真, 张兴, 高传顺, 等. 高稳定性半导体激光器驱动电路的设计[J]. 半导体光电, 2014, 35(5): 916-918.
- 第一作者: 张鑫鹏, 硕士研究生, 北京信息科技大学仪器

科学与光电工程学院, 100192 北京市

First Author: Zhang Xinpeng, Postgraduate, College of Instrument Science and Opto-electronic Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China

通信作者: 祝连庆, 教授, 博士生导师, 北京信息科技大学仪器科学与光电工程学院, 100192 北京市

Corresponding Author: Zhu Lianqing, Professor, Doctoral Tutor, College of Instrument Science and Opto-electronic Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China

定。标定的精度和算法的稳定性直接影响机器视觉实现相应功能的准确性。传统的标定方法需要设计一个高精度的标定块,利用标定块的精确数据与其图像数据进行匹配,求出摄像机内外参数,这对实验设备的精度要求非常高,在实际应用中难以实现。

1992年,Hartley R.^[1]和Faugeras O. D.等^[2]首次提出摄像机自标定的思想。所谓摄像机自标定,是指不需要标定物也不需要知道场景中物体的几何数据,仅通过多幅图像对应点之间的关系直接标定出摄像机参数,这种标定方法的算法是非线性的,需要非常复杂的计算;为改进此算法,Zhang Z.^[3]用具有精确定位的点阵模板代替传统定标块,然后使模板和摄像机作相互运动,获得3个以上不同方位的模板图像,通过模板数据和图像数据计算出图像与模板间的单应矩阵(homography),最后利用单应矩阵来线性求解摄像机内参数。该方法的不足之处是需要绘制精确定位的点阵模板。

为避免传统方法中需要专门绘制精度较高的标定模板,近几年专家学者们研究出一种新的方法对相机进行标定。该方法利用的结构信息是独立于对应点之外,而且无需预先知道相机的任何运动情况信息,只需采集一幅或多幅空间目标的图像,即可对相机进行标定。Caprile B.等^[4]、Debevec P. E.等^[5]学者曾提出,可以利用已知的几何形状物体的信息对摄像机进行标定,如利用立方体、棱锥等,但缺点是,在进行相机标定时,整个过程很复杂,涉及的计算量也比较大,最终对相机进行标定的结果精度比较低;为提升相机的标定精度,Wilczkowiak M.等^[6]和Chen C. S.等^[7]分别讨论了使用平行六面体进行摄像机标定,发现平行六面体与相机的内参数之间存在着很大联系,这一发现打破了以往只能使用立方体对相机进行标定的限制;Kim J. H.^[8]使相机处于至少3个不同位姿,然后对空间场景中随意摆放的平行四边形进行拍摄,进而采集图像信息,最后使用因式分解的方法得到相机的各种参数,但该方法的标定精度较低。

上述这些标定算法要么依赖各种设定的模板,要么需要识别和匹配大量的特征点。为克服对模板以及特征点的依赖,本文提出了一种新的相机标定和定向方法,该算法仅需检测空间两组共面的平行直线即可。相比于点特征来说,线特征易于提取,稳定性好。在该方法中,需要使用三维空间中两组平行直线,该两组直线共面且可以构成一个平行四边形或矩形,实用性强,灵活方便。

2 利用共面的平行直线进行相机标定和相对定向

2.1 对空间直线之间的位置关系进行识别和分类

在射影几何知识中:将直线上的无穷远点的图像称之为该直线的消失点,如果一组直线具有平行关系,那么它们能够与无限远平面在同一点交汇,说明具有平行关系的直线都会存在一样的消失点(见图1),不仅如此,消失点和选择的直线位置没有关系,只与直线的方向有关^[9,10]。

平面 π 上的无穷远直线 L_∞ 通过相机进行成像投影为像直线,则该像直线称为平面 π 的消失直线。如若一组平面之间具有平行关系,那么它们就会和无穷远平面相交,并且会交于同一条直线,因此具有平行关系的平面有一条相同的消失直线^[11,12]。一个3D到2D的射影变换过程其实是空间目标物体的成像过程,在经过射影变换过程后,直线的平行关系不再平行,垂直关系的也不再垂直,两条直线之间所夹角度都发生了变化,因此想要通过二维图像数据获得其对应的真实空间三维目标,只能借助于射影几何中射影不变量原则和摄影不变性规律。

在射影几何中,消失直线与平面的方向存在一一对应的关系,消失点与直线的方向也存在关系,因此可以使用消失元素的这种特殊约束,对空间中的一组直线的位置关系进行识别和分类。

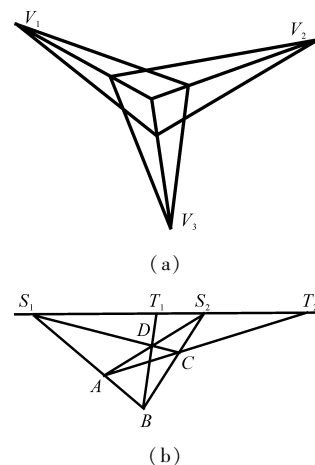


图1 消失点与消失直线

本文探讨在空间目标没有进行矫正或重建的情况下,如何使用直线间存在的平行或垂直关系的相关摄影知识,通过使用消失点列的射影不变量来识别和分类空间平面中直线之间的位置关系。

设 π 为空间中的任意一个平面, V_1, V_2 分别是平面 π 上两组不同的平行线的消失点,将消失点

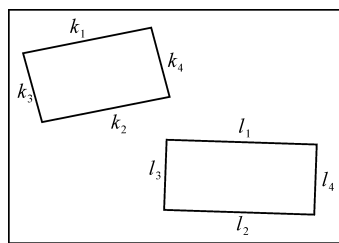
V_1, V_2 连接成直线 U , 则该条直线 U 就是平面 π 在图像中的消失直线。设空间平面中任意两条直线, 投影成为像直线 L_1 和 L_2 , 两像直线交于点 C , 若点 C 位于消失线 U 上, 则两直线平行, 否则不平行。

设空间平面中任意两条直线, 投影成为像直线 L_1 和 L_2 , 它们与消失直线 U 的交点分别为 V_1 和 V_2 , 最优的消失点位置为两点 $V_1 V_2$ 的绝对距离 $D(V_1, V_2)$ 和点 C 到消失线 U 的绝对距离的最小值。

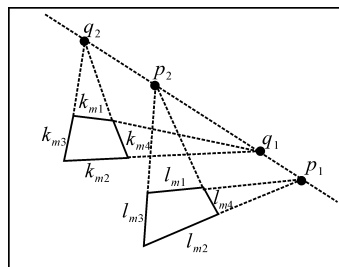
2.2 基于空间共面的平行直线进行相机标定和定向

通过消失点列的摄影不变量识别出空间平面中的四组平行直线, 这四组平行直线组成两个矩形或者平行四边形。本文以组成的矩形为例进行相机标定和定向。若组成的是平行四边形, 其相机标定和定向原理相似^[13,14]。

如图 2 所示, 将识别出的空间平面上的四组平行直线构成两个非平行矩形, 令 $l_1, l_2, l_3, l_4; k_1, k_2, k_3, k_4$ 是空间平面上这四组平行直线的两组对边, $l_{m1}, l_{m2}, l_{m3}, l_{m4}; k_{m1}, k_{m2}, k_{m3}, k_{m4}$ 是空间平面上这四组平行直线通过相机投影成像后所对应的像直线的两组对边。在处理实际图形影像中的直线信息时, 是通过采用 Hough 变换的方法检测并提取像面上的像直线信息, 进而确定各条像直线 $l_{m1}, l_{m2}, l_{m3}, l_{m4}; k_{m1}, k_{m2}, k_{m3}, k_{m4}$ 的具体位置信息, 由于提取像面特征信息是直线特征信息, 因此当空间中的目标物体被部分遮挡时, 也能够使用本文所提出的方法进行相机的标定和定向。



(a) 空间平面上的两个矩形



(b) 对应的图像

图 2 空间平面上的两个矩形及其对应的图像

像直线 l_{m1} 和 l_{m2} 的交点 p_1 是空间平面上具有平

行关系的直线 l_1 和 l_2 所组成的无穷远点通过相机成像在像平面上对应的消失点, 同理, 像直线 l_{m3} 和 l_{m4} 的交点 p_2 是空间平面上具有平行关系的直线 l_3 和 l_4 所组成的无穷远点通过相机成像在像平面上对应的消失点, 像直线 k_{m1} 和 k_{m2} 的交点 q_1 是空间平面上具有平行关系的直线 k_1 和 k_2 所组成的无穷远点通过相机成像在像平面上对应的消失点, 像直线 k_{m3} 和 k_{m4} 的交点 q_2 是空间平面上具有平行关系的直线 k_3 和 k_4 所组成的无穷远点通过相机成像在像平面上对应的消失点。

由射影几何知识可知, p_1, p_2, q_1, q_2 在无穷远直线所对应的像直线上, 且

$$\begin{aligned} p_1 &= l_{m1} \times l_{m2}, p_2 = l_{m3} \times l_{m4} \\ q_1 &= k_{m1} \times k_{m2}, q_2 = k_{m3} \times k_{m4} \end{aligned} \quad (1)$$

显然, p_1, p_2, q_1, q_2 在无限远直线的像直线上, 如图 2 所示。

因为无穷远直线与圆的交点是圆环点, 故坐标为 $I = (1, i, 0, 0)^T$ 和 $J = (1, -i, 0, 0)^T$, 其中 $i = \sqrt{-1}$, 显而易见, 两个圆环点 i, j 是一对共轭虚点, 所以两个圆环点通过相机成像在像平面上所对应的两个像点 m_i, m_j 也是一对共轭虚点, 故可表示为

$$\begin{cases} m_i = (x_1 + i, x_2, y_1 + i, y_2, 1)^T \\ m_j = (x_1 - i, x_2, y_1 - i, y_2, 1)^T \end{cases} \quad (2)$$

由于 l_1, l_2 组成的无穷远点和 l_3, l_4 组成的无穷远点与两个圆环点 i, j 调和共轭^[15], 其相对应的交比为 -1 。

令 $p_i = (u_i^{(p)}, v_i^{(p)}, 1), q_i = (u_i^{(q)}, v_i^{(q)}, 1)$, 有

$$(p_{\infty 1}, p_{\infty 2}, i, j) = -1, (q_{\infty 1}, q_{\infty 2}, i, j) = -1 \quad (3)$$

根据射影变换下交比的不变性可知

$$(p_1, p_2, m_i, m_j) = -1, (q_1, q_2, m_i, m_j) = -1 \quad (4)$$

求解上述方程组, 可得 m_i, m_j 的两组可能解为

$$\begin{cases} m_i^{(1)} = (x_1^* + ix_2^*, y_1^* + iy_2^*)^T \\ m_j^{(1)} = (x_1^* - ix_2^*, y_1^* - iy_2^*)^T \\ m_i^{(2)} = (x_1^* + ix_2^*, y_1^* - iy_2^*)^T \\ m_j^{(2)} = (x_1^* - ix_2^*, y_1^* + iy_2^*)^T \end{cases} \quad (5)$$

每组解中 m_i, m_j 互为共轭, 其中只有一组解合理。文献[14]中对此给出的证明, 也适用于本文。

因为平面 π 上的 2 个圆环点 $i = (1, i, 0, 0)^T, j = (1, -i, 0, 0)^T$ 全都在 AC (绝对二次曲线) 上, 所以它们的像 m_i, m_j 也一定在 IAC (绝对二次曲线的像) 上, 因此得到约束方程组为

$$m_i^T C m_i = 0, m_j^T C m_j = 0 \quad (6)$$

式中, $C = K^{-T} K^{-1}$, K 为相机的内参数矩阵。

由于 m_1, m_j 是一对共轭虚点, 所以上述两个公式等价。因此分别写出上面两个方程的实部与虚部, 得到两个关于相机内参数的线性约束方程为

$$\begin{cases} \operatorname{Re}(m_1^T C m_1) = 0 \\ \operatorname{Im}(m_1^T C m_1) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中, Re 、 Im 分别表示实部与虚部。

可以得出如下结论: 只要给出矩形的 n 幅图像, 就能够得到关于相机内参数的 $2n$ 个线性约束方程。故相机只需在对空间目标物体拍照采集信息的时候, 需要处于三个完全不同的方位下, 并拍摄出 3 幅两两不平行的图像, 便能够得到 6 个方程。因此, 相机在 3 个不同的方位 ($R^{(i)}, t^{(i)}$), $i=1, 2, 3$ 下采集空间目标物体获取 3 幅图像, 计算出这三幅图像中每一幅图像上两个圆环点所对应的两个图像点坐标 $m_1^{(i)}, m_j^{(i)}$, 得到线性方程组为

$$\begin{cases} \operatorname{Re}(m_1^{(1)T} C m_1^{(1)}) = 0, \operatorname{Im}(m_1^{(1)T} C m_1^{(1)}) = 0 \\ \operatorname{Re}(m_1^{(2)T} C m_1^{(2)}) = 0, \operatorname{Im}(m_1^{(2)T} C m_1^{(2)}) = 0 \\ \operatorname{Re}(m_1^{(3)T} C m_1^{(3)}) = 0, \operatorname{Im}(m_1^{(3)T} C m_1^{(3)}) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

求解式(8)便能线性地求解出 $C = (K - TK - 1)$ (若相机采集到的图像信息多于 3 幅图像, 可采用最小二乘法进行求解), 然后再对矩阵 C 进行 Cholesky (乔里斯基) 分解便可以求得 K^{-1} , 最后再对 K^{-1} 进行求逆就能够确定相机的 5 个全部内参数。

假设通过 o 点和 i 点这两点的一条直线为 l_1 , 通过 o 点和 j 点这两点的一条直线为 l_j , 利用空间中两组平行的直线组成矩形, 该矩形的两条对角线之间的夹角记为 $\theta(l_5, l_6)$, 则由 Laguerre (拉格尔) 定理^[15]可得

$$\theta(l_5, l_6) = \frac{1}{2i} \ln(l_5, l_6, l_i, l_j) \quad (9)$$

由交比的不变性可知

$$(l_5, l_6, l_i, l_j) = (l_{m5}, l_{m6}, l_{m1}, l_{mj}) \quad (10)$$

式中, $l_{m1} = o_m \times m_1, l_j = o_m \times m_j$, 于是有

$$\theta(l_5, l_6) = \frac{1}{2i} \ln(l_{m5}, l_{m6}, l_{m1}, l_{mj}) \quad (11)$$

因此, 从图像可以很容易求解矩形两对角线的夹角 θ 。

按照图 3 所示, 建立物体坐标系, 其中坐标原点 o 是用矩形的中心来表示, 坐标平面 xoy 是以包含矩形所在的平面来表示, 而且 x, y 轴分别与矩形的两组对边呈平行关系。相机与物体坐标系之间的位置关系可以通过旋转或者平移, 或者旋转平移相结合的形式来进行表述, 也即它们之间的位置关系可以用 (R, t) 进行表述, 用公式可表示为 $x_c = Rx + t$ 。

令 r 为物体坐标系的度量单位, 那么该矩形的四条边所在的直线用 θ 可表示为

$$\begin{cases} l_1 = (1, 0, \cos \frac{\theta}{2}), l_2 = (-1, 0, \cos \frac{\theta}{2}) \\ l_3 = (0, 1, \sin \frac{\theta}{2}), l_4 = (0, -1, \sin \frac{\theta}{2}) \end{cases} \quad (12)$$

空间中平面上的直线在经相机成像后在像平面上成为像直线, 于是像直线 l_{mi} ($i=1, 2, 3, 4$) 与空间平面上的直线 l_i ($i=1, 2, 3, 4$) 这两者之间存在有单应矩阵 H , 不仅如此, 像直线与空间平面上的直线在相差一个常数的情况下, $l_{mi} = H^T l_i$ 。

矩形的四条边所在的直线恰好能够确定唯一的单应矩阵 H 为

$$H = (l_{m1}, l_{m2}, l_{m3})^{-T} \operatorname{diag}(d_1, d_2, d_3) (l_1, l_2, l_3)^T \quad (13)$$

式中, $d_j = \frac{[(l_1, l_2, l_3)^{-1} l_4]_j}{[(l_{m1}, l_{m2}, l_{m3})^{-1} l_{m4}]_j}$, $j=1, 2, 3$, $[a]_j$ 表示向量 a 的第 j 个分量。

此外, 通过射影几何知识的描述, 得知相机的成像模型实际上是一个透视投影模型, 通过该模型的原理可以得到矩形所在的平面与矩形通过相机透视投影后在相机的像平面所成的像之间存在有单应矩阵, 并且 $H = K(r_1, r_2, t)$, 其中用 r_j 来表示 R (旋转矩阵) 的第 j 列的向量。

故存在常数 s 使得

$$sH = K(r_1, r_2, t) \quad (14)$$

令 $K^{-1}H = (a_1, a_2, a_3)$, 可得

$$(r_1, r_2, t) = s(a_1, a_2, a_3) \quad (15)$$

由于 $\|r_1\| = \|r_2\| = 1$, 所以有

$$s = \pm \frac{1}{\|a_1\|} (\pm \frac{1}{\|a_2\|}) \quad (16)$$

通过上述步骤便能够把相机的旋转矩阵 R 以及平移向量 t 都分别求解出来, 即

$$R_1 = \left(\frac{a_1}{\|a_1\|}, \frac{a_2}{\|a_2\|}, \frac{\varepsilon(a_1 \times a_2)}{\|a_1\| \|a_2\|} \right), t_1 = \frac{a_3}{\|a_1\|} \quad (17)$$

$$R_1 = \left(-\frac{a_1}{\|a_1\|}, -\frac{a_2}{\|a_2\|}, \frac{\varepsilon(a_1 \times a_2)}{\|a_1\| \|a_2\|} \right), t_1 = -\frac{a_3}{\|a_1\|} \quad (18)$$

式中, $\varepsilon = \det \left(\frac{a_1}{\|a_1\|}, \frac{a_2}{\|a_2\|}, \frac{a_1 \times a_2}{\|a_1\| \|a_2\|} \right)$, 可见, 在以上两组解中, 只有一组解能确保矩形处于相机的前面, 那么此解就是该相机方位的合理解。

采用上述方法, 利用空间共面平行直线的像直线求出摄像机位于方位 1 时, 摄像机相对于空间物体的旋转矩阵 R_1 和平移向量 t_1 (称为绝对定向),

同理求出摄像机位于方位 2 时,摄像机相对于空间物体的旋转矩阵 R_2 和平移向量 t_2 ,即可求出物体相对于摄像机的旋转矩阵为: $F_R = R_2^{-1}$, $F_t = -R_2^{-1}t_2$,摄像机位于方位 1 相对于方位 2 时的旋转矩阵 rel_R 和平移向量 rel_t (称为相对定向)可由方位 1 先旋转后平移至方位 2,此时 $rel_R = R_2^{-1}R_1$, $rel_t = R_2^{-1}t_1 - R_2^{-1}t_2$,或由方位 1 先平移后旋转至方位 2,此时 $rel_R = R_2^{-1}R_1$, $rel_t = R_2^{-1}R_1t_1 + R_2^{-2}t_2$ 。

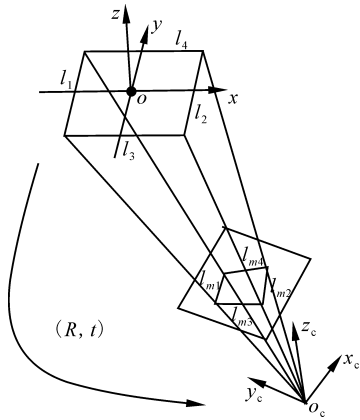


图 3 从图像恢复摄像机的位置

3 实验结果及分析

本文基于平行直线的相机标定和定向,分三步进行试验,并通过仿真实验验证理论可行性,即使用相机对空间中的目标物体进行图像信息的采集,并利用采集到的图像信息对空间中直线之间的位置关系进行识别和分类;其次是对相机进行标定的仿真实验和真实试验,最后是对定向的相关仿真实验和真实试验。

在进行模拟仿真试验中,将摄像机的内部参数设置为(单位为 mm, $pix_Size = 0.006$), $f = 19.5904$, $u_0 = -0.2234$, $v_0 = 0.0961$, $\gamma = 0$,标定模板的图像大小为 $2848pix \times 4288pix$,不考虑畸变。

3.1 利用图像信息对空间直线之间的位置关系进行识别和分类的仿真试验

鉴于本文提出的方法是一种新的摄影不变量,故采集到的图像信息应符合 3D 不变量的性质,即对同一目标或场景的直线属性或参数不应随视点或成像姿态的变化而改变。为了验证该方法在射影变换下存在一致性关系,现对同一空间场景进行仿真拍摄一组不同姿态的图像,进而分析各个视图中直线之间存在的关系,如图 4 所示,给出两组典型的仿真试验结果。

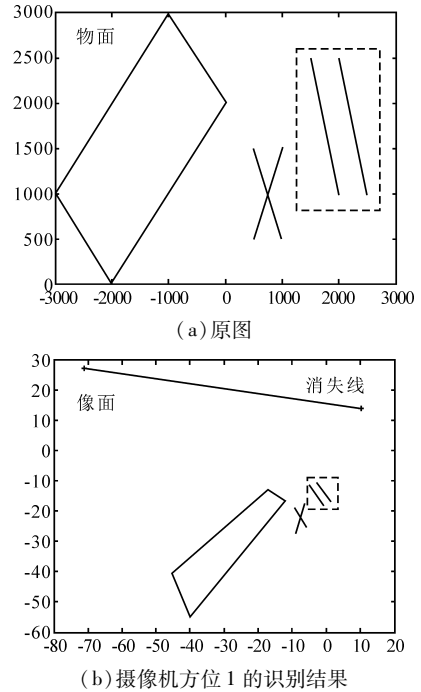


图 4 直线的识别

(1) 试验 1

设计在一个平面中只存在一组平行直线和一组相交直线,采用本方法对这两组直线进行识别和分类,平行直线识别出来后用虚线框标出,试验结果见图 4。

(2) 试验 2

设计在一个平面中,随意凌乱的存在一些平行直线和相交直线,采用本方法对这些直线组进行识别和分类,平行直线识别出来后用虚线框标出来,试验结果如图 5 所示。

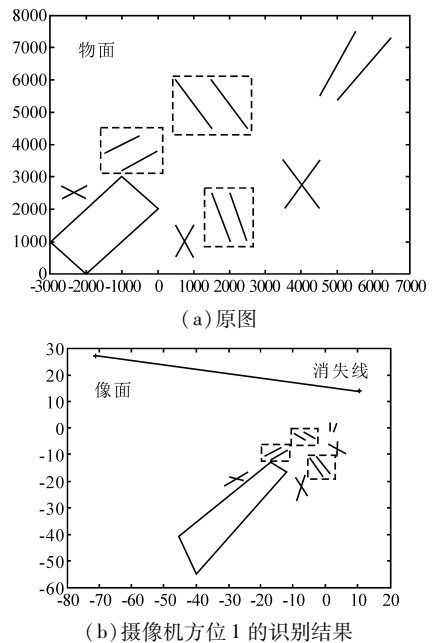


图 5 直线组的识别

由仿真试验结果看出,本方法对空间直线之间的位置关系识别和分类准确率很高,尤其在理想条件下,识别率高达 100%,如此高的识别率对于目标识别和景物解释具有非常重要的意义。

3.2 基于空间平面的平行直线进行相机标定的仿真试验

(1) 模拟仿真试验

在模拟仿真试验中,摄像机的内部参数设置为(单位为 mm, $\text{pix_Size} = 0.006$), $f = 19.5904$, $u_0 = -0.2234$, $v_0 = 0.0961$, $\gamma = 0$,标定模板的图像大小为 2848×4288 像素,不考虑畸变。

摄像机以 3 个不同位姿计算得到 3 幅图像数据,在三维空间中,平面模板的朝向由坐标的旋转角度 κ, ω, φ 表示(单位:弧度),模板的位置由平移向量 t 表示(单位:mm),对应的摄像机姿态参数分别为

$$t_1 = [5202.3357; 1198.0378; 1500],$$

$$[\kappa_1; \omega_1; \varphi_1] = [\pi/3; \pi/5; \pi/8]$$

$$t_2 = [5202.3357; 1198.0378; 500],$$

$$[\kappa_2; \omega_2; \varphi_2] = [\pi/3; \pi/4; -\pi/6]$$

$$t_3 = [5202.3357; 3000; 500],$$

$$[\kappa_2; \omega_2; \varphi_2] = [\pi/3; \pi/4; \pi/6]$$

利用上述方法识别出空间平面中四组平行直线,组成矩形,进行摄像机标定试验,摄像机在每 3 个不同姿态下可以线性标定出摄像机的内参数,标定结果见表 1。

表 1 不同姿态标定结果

摄像机姿态 [$t_x, t_y, t_z, \kappa, \omega, \varphi$]	摄像机内参数			
	f	u_0	v_0	γ
[5202.3357; 1198.0378; 1500; $\pi/3; \pi/5; \pi/8$];	19.5920	-0.2234	0.0961	0
[5202.3357; 1198.0378; 500; $\pi/3; \pi/4; -\pi/6$];				
[5202.3357; 3000; 500; $\pi/3; \pi/4; \pi/6$];				
[5202.3357; 1198.0378; 1500; $\pi/3; \pi/5; \pi/8$];	19.5920	-0.2234	0.0961	0
[5202.3357; 3000; 500; $\pi/3; \pi/4; \pi/6$];				
[5202.3357; 3000; 500; $\pi/2.9; \pi/5.8; -\pi/3$];				
[5202.3357; 1198.0378; 1500; $\pi/4; \pi/15; \pi/14$];	19.5920	-0.2234	0.0961	0
[2202.3357; 3000; 500; $\pi/14; -\pi/15; \pi/13$];				
[1202.3357; 2198.3078; 2500; $\pi/15; \pi/14; \pi/12.6$];				
摄像机本身内参数	19.5920	-0.2234	0.0961	0

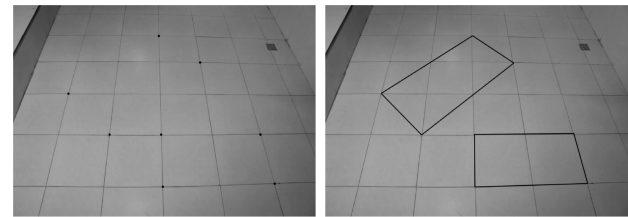
由仿真试验结果可以看出,这种方法的标定精度高,在理想情况下,内参数的标定非常理想。

(2) 真实试验

在真实图像试验中,摄像机采用 Canon EOS

500D 数码相机,试验过程中,没有采用专用的定标模板,而是直接拍摄实验室的地板照片进行试验,拍摄时保持相机焦距固定不变。

已知每块正方形地板的规格相同,以不同的位姿共拍摄 3 幅地板照片,每幅照片要确保包含 4 行 4 列共 16 块完整的地板,图 6 是其中一幅,通过角点提取、边缘检测和曲线拟合方法,提取出每幅图像中 2 个非平行矩形。标定的相机内参数结果见表 2。



(a) 焦点提取 (b) 2 个非平行矩形

图 6 试验图

表 2 采用本方法的摄像机内参数试验定标结果

f	u_0	v_0	γ
2265.07	394.77	407.98	97.89

3.3 基于空间平面的平行直线进行相对定向的仿真试验

在利用空间平面中的平行直线进行相对定向时,是由绝对定向推导出相对定向的。为验证此方法,设计试验,在空间平面上随意给出一个矩形,摄像机位于姿态 1 时对该矩形进行拍摄,得到图像 1,计算出摄像机相对于图像的绝对定向 1,摄像机位于姿态 2 时对该矩形进行拍摄,得到图像 2,计算出摄像机相对于图像的绝对定向 2,摄像机由姿态 1 到姿态 2,无论是先平移再旋转还是先旋转再平移,摄像机的不同姿态以及物体的位置,分别为位置 1、2、3,由该方法计算的相对定向结果见表 3。

表 3 相对定向结果

位置变化	先平移再旋转			
1→2→3	302.2051	315.3348	655.3498	642.2201
	-2386.9171	-1236.8236	394.4806	-755.6128
	-906.5513	-1729.4198	556.0202	1378.8888
1→3	302.2051	315.3348	655.3498	642.2201
	-2386.9171	-1236.8236	394.4806	-755.6128
	-906.5513	-1729.4198	556.0202	1378.8888
	先旋转再平移			
1→2→3	371.3124	327.8065	-239.6316	-196.1257
	-2971.4524	-1974.3940	-22.5870	-1019.6455
	1020.4248	18.4360	1985.2771	2987.2658
1→3	371.3124	327.8065	-239.6316	-196.1257
	-2971.4524	-1974.3940	-22.5870	-1019.6455
	1020.4248	18.4360	1985.2771	2987.2658

由表 3 可见,无论是先平移再旋转还是先旋转

表4 定向结果

相机方位1相对于空间物体位置(绝对定向)	相机方位2相对于空间物体位置(绝对定向)	相机方位1相对于相机方位2的位置(相对定向)
$R_1 = \begin{pmatrix} -0.7052 & 0.2673 & -0.6567 \\ -0.1022 & -0.9549 & -0.2789 \\ -0.7017 & -0.1296 & 0.7006 \end{pmatrix}$	$R_2 = \begin{pmatrix} -0.6553 & 0.1553 & -0.7392 \\ 0.0897 & -0.9557 & -0.2803 \\ -0.7500 & -0.2500 & 0.6124 \end{pmatrix}$	$R = \begin{pmatrix} 0.9927 & 0.0916 & 0.0784 \\ -0.0774 & 0.9829 & -0.1672 \\ -0.0924 & 0.1599 & 0.9828 \end{pmatrix}$
$t_1 = (3.3342 \quad -0.1110 \quad -0.6150)$	$t_2 = (3.8400 \quad -1.5687 \quad -1.4558)$	$t = (498.4721 \quad 728.9220 \quad -1409.5683)$

再平移,由绝对定向都可以很好地算出相对定向,证明此方法可行。

在真实图像试验中,采用本文方法的标定结果对相机进行相对定向,实验结果见表4。

4 结语

本文提出在无需构造特殊的几何约束结构,也无需校准或3D重建条件下,仅利用图像信息中的消失点列即可对空间直线之间的位置关系进行识别和分类,算法简单,识别率高,在理想情况下,识别率高达100%。

识别出空间中的平行直线,组成矩形或者平行四边形后可对相机进行标定和相对定向,这种标定方法基于线特征,克服了当点特征被遮挡或者在纹理贫乏区域同名点稀少时无法定向的问题,并且相比于点特征来说,线特征易于提取,精确度高,同时实际影像中存在着丰富的线特征信息,并且该方法无需标定物,因此实用性强,稳定性好,适用范围广,灵活方便。

参考文献

- [1] Hartley R. Estimation of relative camera positions for uncalibrated cameras[C]. European Conference on Computer Vision, 1992.
- [2] Maybank S J, Faugeras O D. A theory of self-calibration of a moving camera[J]. International Journal of Computer Vision, 1992, 8(2): 123-151.
- [3] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [4] Caprile B, Torre V. Using vanishing points for camera calibration[J]. International Journal of Computer Vision, 1990, 4(2): 127-139.
- [5] Debevec P E, Taylor C J, Mallk J. Modeling and rendering architecture from photographs: a hybrid geometry and image-

based approach[J]. Siggraph, 1996: 11-20.

- [6] Wilczkowiak M, Boyer E, Sturm P. 3D modeling using geometric constraints: a parallelepiped based approach[C]// Proceedings of European Conference on Computer Vision, LNCS2353, Copenhagen, Denmark, 2002.
 - [7] Chen C S, Yu C K, Hung Y P. New calibration-free approach for augmented reality based on parameterized cuboid structure[C]// Proceedings of International Conference on Computer Vision, Keryrn, Greece, 1999.
 - [8] Kim J H. Linear stratified approach for 3D modeling and calibration using full geometric constraints[C]// IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Miami, FL, USA, 2009.
 - [9] 梅向明, 刘增贤, 等. 高等几何[M]. 北京: 高等教育出版社, 1983.
 - [10] 龙泽斌. 几何变换[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1982.
 - [11] Kenichi Kunatani. Computational projective geometry[J]. CVGIP: Image Understanding, 1991, 54(3): 333-348.
 - [12] Kenichi Kunatani. Hypothesizing and testing geometric properties of image data[J]. CVGIP: Image Understanding, 1991, 54(3): 349-357.
 - [13] 王秀平, 白瑞林, 刘子腾. 由任意平行四边形确定摄像机内参数的方法[J]. 上海交通大学学报, 2015, 49(3): 366-370.
 - [14] 吴福朝, 王光辉, 胡占义. 由矩形确定摄像机内参数与位置的线性方法[J]. 软件学报, 2003, 14(3): 703-712.
 - [15] Semple J G, Kneebone G T. Algebraic projective geometry[M]. London: Oxford University Press, 1952.
- 第一作者: 黄汝田, 硕士研究生, 北京信息科技大学现代测控技术教育部重点实验室, 100192 北京市
- First Author: Huang Rutian, Postgraduate, Key Laboratory of Modern Measurement and Control Technology, Ministry of Education, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China