

·信号与信息处理·

双目摄像机的自标定方法研究

朱水娟, 赵勋杰

(苏州大学物理学院, 江苏 苏州 215006)

摘要: 摄像机标定是计算机视觉的关键技术之一。针对现有的标定技术计算过程复杂, 标定物使用不方便等问题, 提出了一种用于双目摄像机自标定的方法, 该方法要求场景中有两组正交的平行直线即可进行标定, 利用其在图像平面上形成的消失点之间的约束关系来建立标定方程, 从而求解出摄像机的内外参数, 再结合双目立体视觉原理标定双目摄像机的结构参数。将该方法在实验室现有设备上进行了对比实验。实验结果表明, 该方法简单、有效, 可广泛应用于机器视觉研究、三维重建等多个领域。

关键词: 自标定; 消失点; 内外参数; 双目立体视觉

中图分类号: TP301.6

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2013)-03-0036-04

Research on Self-calibration Method of Binocular Camera

ZHU Shui-juan, ZHAO Xun-jie

(College of Physics, Soochow University, Suzhou 215006, China)

Abstract: Camera calibration is one of the key technologies to computer vision. According to problems from presently calibration technology such as complicated calculation process and inconvenient calibration targets usage, a self-calibration method for binocular cameras is proposed. Calibration process can be performed when there are two groups of orthogonal parallel line in scene. A calibration equation is built according to constraint relations among vanishing points forming in the image planes. So the intrinsic and extrinsic parameters of cameras are calculated. And structure parameters of a binocular camera are calibrated incorporating with the principle of binocular stereo vision. Comparison experiments are performed to presently laboratory equipments by the method. Experimental results show that the method is easy, effective and can be used in many fields such as research on machine vision and 3D reconstruction.

Key words: self-calibration; vanishing point; intrinsic and extrinsic parameters; binocular stereo vision

摄像机标定技术是计算机视觉^[1]的关键技术之一。摄像机标定是指建立摄像机图像像素位置与场景点位置之间的关系, 其途径是根据摄像机模型, 由已知特征点的图像坐标求解摄像机的模型参数。摄像机需要标定的模型参数分为内部参数和外部参数。现有的标定方法主要有: 传统的标定方法^[2-3]和自标定方法^[4-9]。

传统标定方法有一共同的局限性, 即需要在摄

像机前放一个已知二维或三维物体, 称为标定靶标。在标定过程中, 利用靶标上的一些点的已知三维世界坐标和它们的图像点坐标, 或者是靶标上一些图形的特征参数, 来计算摄像机的内外参数。由于此类方法需要有精度很高的靶标, 算法复杂而且标定过程费时费力, 所以其实际应用受到了很大限制。而自标定方法不需要精确的标定物及其位置信息, 直接利用图像坐标中的信息来标定内外参数。

在实际标定中, 利用数字图像处理技术得到的

收稿日期: 2013-03-06

基金项目: 江苏省高校自然科学基金(BK2009116)

作者简介: 朱水娟(1987-), 女, 江苏南通人, 硕士研究生, 研究方向为计算机视觉及应用。

图像上的直线、平面参数比图像上点的位置更不易受到图像上噪声的影响,把直线、平面等信息引入视觉模型标定中,能降低噪声影响,提高模型标定的精度。作为射影几何中一个重要特征,消失点^[10-12]被广泛应用于摄像机自标定,文中应用了一种以正方形作为标定物的自标定方法,利用其在图像平面上形成的消失点之间的约束关系来建立标定方程,从而求解出摄像机的内外参数,再结合双目视觉原理标定双目摄像机的结构参数。该方法算法简单且易于实现,不用解复杂的Kruppa方程就能线性地求解各参数,对标定物要求简单,只需场景中有正方形就可以标定。

1 基本原理

1.1 双目立体视觉数学模型

双目立体视觉是基于视差原理,由多幅图像获取物体三维几何信息的方法。其数学模型为两个摄像机的图像平面和被测物体之间构成一个三角形,如图1所示。

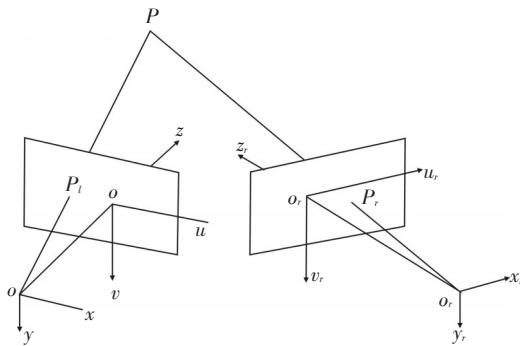


图1 双目立体视觉数学模型

1.2 摄像机参数

以左摄像机为例:假设摄像机的成像模型为针孔成像模型,从三维空间点 $P=(X_w, Y_w, Z_w)^T$ 到二维图像点 $P_i=(u, v, 1)^T$ 的成像关系可描述为

$$s \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_u & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_v & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中, s 为一比例因子, f_u, f_v 为图像坐标系上 u, v 轴上归一化焦距, (u_0, v_0) 为图像坐标系的原点。 \mathbf{R}, \mathbf{T} 分别为摄像机坐标系与世界坐标系之间的旋转矩阵和

平移矩阵, \mathbf{R} 是 3×3 正交单位矩阵; \mathbf{T} 为三维平移向量, $\mathbf{O}=(0, 0, 0)^T$ 。即 f_u, f_v, u_0, v_0 构成摄像机的内参数, \mathbf{R}, \mathbf{T} 构成摄像机的外参数。

1.3 双目立体视觉系统结构参数

在双目立体视觉系统中,分别对左右摄像机进行标定后,可以得到左右两个摄像机的内外参数。设得到的左右摄像机的外部参数分别为 R_l, T_l 与 R_r, T_r ,则 R_l, T_l 表示左摄像机与世界坐标系的相对位置, R_r, T_r 表示右摄像机与世界坐标系的相对位置。 \mathbf{R}, \mathbf{T} 表示左摄像机与右摄像机的相对位置,即左摄像机坐标系与右摄像机坐标系之间的旋转矩阵和平移矩阵,也称系统结构参数。对特征对应点 P 在视觉系统的左右摄像机的图像坐标进行归一化处理,设获得的理想图像坐标分别是 $P_l(u_l, v_l), P_r(u_r, v_r)$ 。假设它在世界坐标系、左摄像机坐标系和右摄像机坐标系下的非齐次坐标分别为 $\bar{x}_w, \bar{x}_l, \bar{x}_r$,则有

$$\bar{x}_l = R_l \bar{x}_w + T_l \bar{x}_r = R_r \bar{x}_w + T_r \quad (2)$$

消去 \bar{x}_w ,得到

$$\bar{x}_l = R_l R_r^{-1} \bar{x}_r + T_l - R_l R_r^{-1} T_r \quad (3)$$

即左右摄像机之间的几何关系为

$$\mathbf{R} = R_l R_r^{-1}, \quad (4)$$

$$\mathbf{T} = T_l - R_l R_r^{-1} T_r$$

因此,如果对双目摄像机分别标定,得到 R_l, T_l 与 R_r, T_r ,则双目摄像机的相对几何位置即结构参数就可以确定。

2 摄像机自标定

射影几何中,两平行直线相交于无穷远处一点,该点在图像平面上的投影点称为消失点,消失点有一个重要的性质^[13]:连接消失点与摄像机光心 O 的连线与形成该消失点的空间平行线平行。以左摄像机为例,利用消失点标定摄像机方法如下。

2.1 确定消失点

采用文中方法标定相机时,要求场景中有两组正交的平行直线即可。这里以正方形为例给出参数求解过程。

设场景中有正方形模板 $ABCD$,经摄像机拍摄对应于图像平面上为 $EFGH$, O 为摄像机的光心,假设 EF 与 GH 方向上的消失点为 M ,利用上述消失点的性

质,即 $OM \parallel AB$, EH 与 FG 方向上的消失点为 N , $ON \parallel BC$ 。如图2所示。

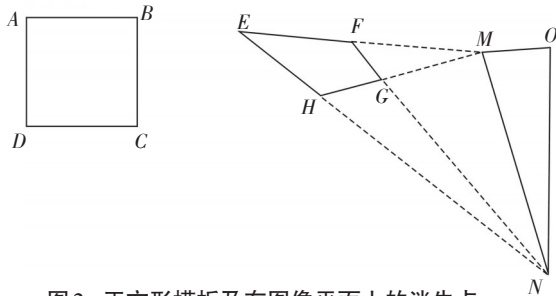


图2 正方形模板及在图像平面上的消失点

2.2 线性求解内参数

已知 $OM \parallel AB$, $ON \parallel BC$, 又因为 $AB \perp BC$, 所以 $OM \perp ON$, 得出 O 位于 MN 为直径的球上。若已知点 $M(u_m, v_m)$, $N(u_n, v_n)$, 而光心 $O(0, 0, 0)^T$ 在球体上, 得到关于内参数的约束方程

$$\frac{1}{f_u}(u_0 - u_m)(u_0 - u_n) + \frac{1}{f_v}(v_0 - v_m)(v_0 - v_n) + 1 = 0 \quad (5)$$

而 $f_u = \frac{f}{dX}$, $f_v = \frac{f}{dY}$, dX, dY 分别为每个像素在 X 轴和 Y 轴上的物理尺寸。所以式(5)中有4个未知数, 至少需要4个独立方程才能求解, 在不考虑畸变的情况下, 拍摄4幅以上不同角度的图像就能线性地求出摄像机的四个内参数。

2.3 坐标系及其转换关系

图3分别示意了世界坐标系、图像坐标系、摄像机坐标系和消失点坐标系及其关系。

世界坐标系 $O_w x_w y_w z_w$, 选择 B 为世界坐标系原点 O_w , BA 方向为 x_w 方向, BC 方向为 y_w 方向, 按右手系规则确定 z_w 。

图像坐标系 $O_u x_u y_u z_u$, O_u 为图像坐标系的原点, 图像坐标系以像素为单位, 图像的 u 轴为 x_u 方向, 图像的 v 轴为 y_u 方向, 光轴 z 方向为 z_u 方向。

摄像机坐标系 $O x_c y_c z_c$, 原点 O 在摄像机光心, x_c 轴 y_c 轴分别平行于图像坐标系的 x_u 轴 y_u 轴。光轴 z 方向为 z_c 方向。

消失点坐标系 $O x_x y_x z_x$, 令光心 O 为消失点坐标系的原点, OM 方向为 x_x 方向, ON 方向为 y_x 方向, 按右手系规则确定 z_x 。

消失点坐标系与世界坐标系的转换关系: 因为

$OM \parallel AB$, $ON \parallel BC$, z 轴都是按右手系规则确定的, 所以消失点坐标系与世界坐标系平行。

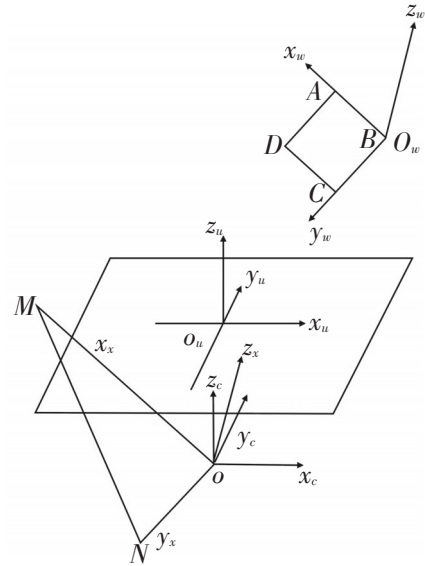


图3 坐标系及其转换关系

2.4 求旋转矩阵 R

R 是摄像机坐标系与世界坐标系的旋转矩阵, 因为世界坐标系与消失点坐标系平行, 所以摄像机坐标系与消失点坐标系的旋转矩阵就是摄像机坐标系与世界坐标系的旋转矩阵。

在摄像机坐标系下: 已知 M 点、 N 点的坐标, 内参数也已经求出, 所以可以得到

$$\begin{aligned} \overline{OM} &= [(u_m - u_0)d_x, (v_m - v_0)d_y, f]^T \\ \overline{ON} &= [(u_n - u_0)d_x, (v_n - v_0)d_y, f]^T \end{aligned} \quad (6)$$

$$\vec{z}_c = \overline{OM} \times \overline{ON}$$

分别对 \overline{OM} , \overline{ON} , \vec{z}_c 归一化后得到 \vec{a} , \vec{b} , \vec{c} , 即世界坐标系与摄像机坐标系的旋转矩阵为

$$R = (\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}) \quad (7)$$

2.5 求平移矩阵 T

设平移矩阵为 $T = (x, y, z)^T$, 已知世界坐标系原点 $O_w(0, 0, 0)$ 在图像平面成像 $O'_w(u_w, v_w)$, 代入式(1)得

$$s \begin{pmatrix} u_w \\ v_w \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_u x + u_0 z \\ f_v y + v_0 z \\ z \end{pmatrix} \quad (8)$$

即如果已知 s , 世界坐标系与摄像机坐标系的平移向量为

$$T = (u_w s - u_0 s, v_w s - v_0 s, s)^T \quad (9)$$

假设已知世界坐标上另一点及其在图像平面的坐标,就可以得到s的值,这样T就可以求解出来。

3 实验结果

为了验证此方法的有效性,进行了一系列的标定实验。实验室现有的设备是美国SRI International公司生产的型号为STH-MDCS3-VAR的Small Vision System,该双目成像系统的成像器件是两个分辨率大小为640×480的CMOS.,如图4所示。



图4 双目立体视觉系统

文中方法采用的模板是正方形模板,场景中有一个正方形就满足实验条件,但为了与上述双目立体视觉系统自带的标定方法进行对比实验,用来拍摄的模板是上述系统标定用的平面棋盘格,用双目摄像机对模板从不同角度进行拍摄,给出其中一组图像对,如图5所示。

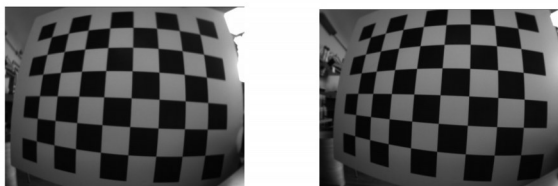


图5 双目摄像机拍摄的图像对

以左摄像机拍摄的图像为例,对图像进行预处理后,切割出第四行第五列的正方形,把这个正方形作为文中方法的标定模板。因为这个正方形在图片的中间部分,受到的畸变影响较小,能得到更精确稳定的结果,用harris角点法提取正方形的四个角点,

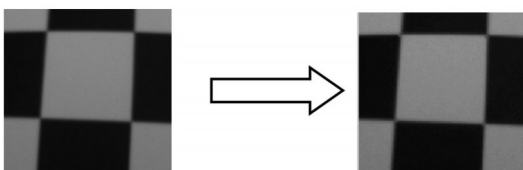


图6 切割的正方形及其提取的四个角点

如图6所示。

每次实验拍摄五组以上图片对,利用每四组图像的正方形的四个角点代入文中方法做一次实验,得到五次实验结果,然后取平均值,就是文中方法得到的摄像机标定参数。

文中方法的实验结果与双目立体视觉系统自带的标定方法计算的内参数做比较,结果如表1所示。

表1 两种方法的内参数实验结果对比

摄像机	方法	u_0	v_0	f_u	f_v
左摄像机	文中方法	313.38	278.72	3.78	3.73
	系统标定方法	296.34	272.73	3.89	3.91
右摄像机	文中方法	344.63	247.74	3.84	3.72
	系统标定方法	347.85	261.80	3.93	3.95

对左右两个摄像机进行外参数标定后,得到双目摄像机的结构参数

$$R = \begin{bmatrix} 0.99616 & -0.01671 & 0.02206 \\ 0.01658 & 0.99844 & 0.00591 \\ -0.02216 & -0.00554 & 0.99739 \end{bmatrix}$$

$$T = [23.41 \quad 0.15 \quad 1.54]$$

4 结论

针对双目立体视觉系统中摄像机标定的多参数、复杂、非线性这一问题,运用消失点的几何特性,结合双目立体视觉原理,线性地求解了双目立体视觉系统的各个系统参数。实验结果表明,该方法与已有的标定方法相比虽然精度不高,但是算法简单且易于实现,在实际标定中只需要从不同角度拍摄四组以上含有矩形的图片,且不需要该矩形的尺寸、位置信息,在标定双目系统中摄像机的内外参数的基础上标定了双目系统的结构参数,实验结果验证了该方法的有效性和实用性。

参考文献

- [1] 张广军.机器视觉[M].北京:科学出版社,2005.
- [2] Tsai R Y. A versatile camera calibration technique for high accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses[J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1987, 3(4):323-344.
- [3] Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11):1330-1334. (下转第44页)

- construction using trained geometric directions in 2D redundant wavelets domain and non-convex optimization[J]. Submitted to Magnetic Resonance Imaging, 2013.
- [11] Yang J, Zhang Y, Yin W. A fast alternating direction method for TV l1-l2 signal reconstruction from partial fourier data[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2010, 4(2): 288-297.
- [12] Chen Y, Ye X, Huang F. A novel method and fast algorithm for MR image reconstruction with significantly under-sampled data[J]. Inverse Problems and Imaging, 2010, 4(2): 223-240.

(上接第35页)

- [3] 王宁,李国华,云茂金.液晶电控双折射特性的研究[J].中国激光,2002,29(12):1061-1064.
- [4] A Takeda, S Kataoka, T Sasaki, et al. A Super-high-quality multi-domain vertical alignment LCD by new rubbing-less technology. SID' 98 Digest, 1998:1077.
- [5] 王谦,余飞鸿,郭海成.外电场作用下液晶指向矢分布差分迭代求解及液晶盒视角光电特性研究[J].光子学报,2001,30(3):311-316.
- [6] 严明,高志山.波片相位延迟测量的简捷方法研究[J].激光技术,2005,29(3):233-236.
- [7] 费民权,费悦.TFT-LCD的宽视角技术[J].现代显示,2008(11):22-26.
- [8] 沈奕,王勇竞,王琳静.延迟膜光谱分析测试系统及应用[J].光学精密工程,2009(5):964-968.
- [9] Togooka T, Yoda E, Kobori y, et al. Optical design for wide viewing angle TN-LCD with hybrid aligned nematic compensation films[J]. In: SID' 98 Digest, 1998:698.
- [10] Chen Jian-min, Bos P J, NSON D J, et al. Four domain TN-LCD fabricated by two alignment layers with low and high pretilt Angles[J]. Jpn J Appl Phys, 1996, 35: 558.
- [11] 范玲,宋菲君.调制偏振光在光学相位延迟测量中的频谱分析[J].光谱学与光谱分析,2007,27(9):1685-1688.
- [12] SHYU L, CHEN C, SUD. Method for measuring the retardation of a wave plate [J]. Applied Optics, 1993, 32(22): 4228-4230.
- [13] 吕新广.对光谱三刺激值概念的理解[J].包装工程,2002,23(5):40241.
- [14] 黄翀,姜言森,欧阳艳东,等.LCD三基色光谱特性的研究[J].光谱学与光谱分析,2007,27(12):2494-2497.

(上接第39页)

- [4] Faugeras O D, Luong Q T, Maybank S. Camera self-calibration theory and experiments[C]. //Proc. The 2nd European Conference on Computer Vision Berlin: Springer, 1992, 588: 321-334.
- [5] Maybank S, Faugeras O D. A theory of self-calibration of a moving camera [J]. International Journal of Computer Vision, 1992, 8(2): 123-151.
- [6] 林立财,李其申,江泽涛.混合优化算法的摄像机自标定方法研究[J].计算机应用研究,2009,26(12):4844-4846.
- [7] 江泽涛,吴文欢.基于本质矩阵的摄像机自标定方法[J].中国图像图形学报,2010,15(14):565-569.
- [8] 杨伟峰,韩华婷,段志伟,等.基于主动视觉的摄像机自标定的方法[J].军械工程学院学报,2006,18(6):74-77.
- [9] 廉小磊,贺利乐,张颖.基于粒子群算法的双目立体视觉系统标定[J].计算机工程与应用,2011,47(24):202-204.
- [10] 殷焰,赵荣椿.一种新的基于直线特征的摄像机自标定方法[J].计算机应用研究,2006(3):170-171.
- [11] 蓝慕云.基于单个正方形的摄像机自标定算法[J].现代计算机,2007,263:7-9.
- [12] 霍炬,杨卫,杨明.基于消隐点几何特性的摄像机自标定方法[J].光学学报,2010,30(2):465-472.
- [13] Hartley R. Multiple View Geometry in Computer Vision[M]. London: Cambridge University Press, 2000.