

用于摄像机标定的网格状纹理的检测方法

宋雪峰 杨明 王宏

清华大学智能技术与系统国家重点实验室 北京 100084

songxuefeng99@mails.tsinghua.edu.cn

摘 要 摄像机标定方法在移动机器人视觉系统的研究中具有重要意义。本文提出了一种基于网格状地面的简易摄像机标定方法，通过引入边缘提取、霍夫变换、灭点检测等图像处理技术，对网格状地面图像进行了垂直和水平两个方向的直线检测，进而确定标定点的位置，最终实现了摄像机的快速标定。实验结果表明，该方法是可靠有效的。

关键词 摄像机标定 直线检测 霍夫变换 灭点检测

A Grid Texture Detection Method For Camera Calibration

Song Xuefeng Yang Ming Wang Hong

State Key Laboratory of Intelligent Technology and Systems, Tsinghua University, Beijing 100084

songxuefeng99@mails.tsinghua.edu.cn

Abstract: Camera Calibration is very important in Robot Vision. In this paper, a simple calibration method based on grid texture is described. By using edge extraction, Hough transform, determination of vanishing points, this method detects the lines on grid images and position the calibration points. Experimental results with real images prove the effectiveness of the method.

Keywords: Camera Calibration, Hough Transform, Determination of Vanishing Points

1 引言

在移动机器人视觉系统的研究中，通常需要根据摄像机获取的图像信息计算三维空间中物体的几何信息，并由此重建和识别物体，而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，这个过程被称为是摄像机标定^{[10][11]}。常用的标定方法包括：利用透视变换矩阵的标定方法^[1]，两步法^[2]，双平面标定方法^[3]和自标定方法。

在这些标定方法中，基于摄像机线性模型的透视变换矩阵方法是一种简单易用的方法。在这种方法中，摄像机参数由一个透视变换矩阵表示，只要确定一组标定点的空间坐标和对应的图像坐标，就可以利用线性方法求解。如果采用人工的方式，即人工测量标定点的空间坐标和图像坐标，则要消耗相当长的时间。本文以常见的网格状地面为研究对象，引入直线检测等图像处理技术，实现了标定点图像坐标的自动确定，从而构造了一种快速的摄像机标定方法。

第 2 节简要介绍了线性模型摄像机的标定原理，给出了本文提出的标定方法。第 3 节详细介绍了在标定点定位中为检测直线使用的各种处理技术，并给出了一些对比实验结果。

2 线性模型摄像机的标定

向量 $[X, Y, Z]^T$ 和 $[u, v]^T$ 分别表示三维空间中的一点在世界坐标系和以像素为单位的图像坐标系下的坐标。如果用线性模型(针孔模型)来近似表示摄像机的成像关系^[11]，则：

$$r \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{f}{dx} & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \frac{f}{dy} & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中， r 是一个常数， (R, t) 是世界坐标系相对于摄像机坐标系的旋转矩阵和平移向量，称为摄像机外参数。 f 是摄像机的焦距， (u_0, v_0) 是摄像机光心在图像坐标系下的坐标， (dx, dy) 是一个像素在 x 轴和 y 轴方向上的物理尺寸，它们是摄像机的内参数。

在移动机器人视觉系统的研究中，有时只需要求取摄像机图像平面和地平面间的射影变换关系，则可以以地平面为 X - Y 平面 ($Z=0$) 建立世界坐标系，上式变换为：

$$r \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{34} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

上式包括三个方程，化简后得到：

$$\begin{cases} m_{11} \cdot X + m_{12} \cdot Y + m_{14} - u \cdot m_{31} \cdot X - u \cdot m_{32} \cdot Y = u \cdot m_{34} \\ m_{21} \cdot X + m_{22} \cdot Y + m_{24} - v \cdot m_{31} \cdot X - v \cdot m_{32} \cdot Y = v \cdot m_{34} \end{cases} \quad (3)$$

如果已知 n 个点的地平面坐标 $(X_i, Y_i)(i=1, \dots, n)$ 以及相应的图像坐标 $(u_i, v_i)(i=1, \dots, n)$ ，则可以构成关于 $m_{i,j}$ 的 $2n$ 个线性方程，如下：

$$\begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -u_1 \cdot X_1 & -u_1 \cdot Y_1 \\ 0 & 0 & 0 & X_1 & Y_1 & 1 & -v_1 \cdot X_1 & -v_1 \cdot Y_1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_n & Y_n & 1 & 0 & 0 & 0 & -u_n \cdot X_n & -u_n \cdot Y_n \\ 0 & 0 & 0 & X_n & Y_n & 1 & -v_n \cdot X_n & -v_n \cdot Y_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{11} \\ m_{12} \\ m_{14} \\ m_{21} \\ m_{22} \\ m_{24} \\ m_{31} \\ m_{32} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \cdot m_{34} \\ v_1 \cdot m_{34} \\ \dots \\ u_n \cdot m_{34} \\ v_n \cdot m_{34} \end{bmatrix} \quad (4)$$

由式(2)可见, M 矩阵乘以任意不为零的常数并不影响 (X, Y) 与 (u, v) 的关系, 因此, 在式(4)中可以指定 $m_{34} = 1$ 。未知数有 8 个, 当 $2n \geq 8$ 时, 可以使用最小二乘法求出上述线性方程组的解, 即求出了地平面和图像平面的射影关系。

从上面关于标定的分析可以看出, 确定一组标定点的地平面坐标和图像坐标是进行摄像机标定的关键一步。如果用手工的方式在地面和图像上分别确定标定点的坐标, 则需消耗大量的时间。为了达到快速标定的目的, 我们采用了如下的方式测量标定点的坐标: 首先选择一块有清晰网格的地面, 确定一组网格交点作为标定点的坐标, 一次性测量出这些标定点的地平面坐标。然后对摄取的图像进行处理, 自动找出标定点的图像坐标, 进而自动计算出变换矩阵。这样, 以后如再需要对摄像机进行标定时, 就只需用摄像机在相同的地方摄取大致相同的图像, 便可以快速地完成标定了。

我们在摄取标定地面图像时, 使摄像机光轴方向与地面网格的其中一个方向大致垂直, 这样, 在获取的图像上, 网格由两类直线组成, 一类大致与图像底边平行, 可称为水平方向的直线, 另外一类相应地称为垂直方向的直线。

为了简化问题, 我们对图像的水平方向和垂直方向分别进行处理, 即分别进行边缘检测和直线检测。最后, 求出两个方向的直线的交点(即标定点的)位置。

边缘检测使用了 Sobel 算子^[9], 直线检测采用经典的 Hough 变换^[4], 直线用参数 (r, q) 表示, r 表示原点到直线的距离, q 表示与直线垂直的向量与 X 轴的夹角。

3 直线检测

对网格状地面图像进行直线检测时, 主要需要解决以下两个问题:

(a) 由于摄像机摄取的图像并非理想图像, 边缘检测的结果中必然存在一些不是网格直线上的边缘点, 这些边缘点对以后的处理会产生不良影响。

(b) Hough 变换的特点产生了直线积聚, 长度大的直线占优等问题。

为了更准确地检测到目标直线, 我们对以下几种直线约束的方法进行了研究。

3.1 局部最大值约束

通常，在 Hough 变换的结果中，一条目标直线附近的几条直线对应的权值也都比较大，这些直线和目标直线经过一些共同的边缘点。某些这样的直线的权值经常比其他目标直线的权值还要大，如果只是根据权值的大小来确定直线，就会出现多条直线积聚在一起的现象，如图 1a。而一条目标直线与其周围的直线相比，权值通常都是最大的。通过分析上述现象我们认为，只有权值局部最大的直线才可能是目标直线。局部最大值的判定依据是直线参数 (r, q) 和它的权值，如果一条直线 (r, q) 在其周围的小邻域 $(r - \Delta r \cdots r + \Delta r, q - \Delta q \cdots q + \Delta q)$ 内权值最大，则认为该直线是局部最大的。通过图 1a 和图 1b 的对比可以明显看出该方法的效果。

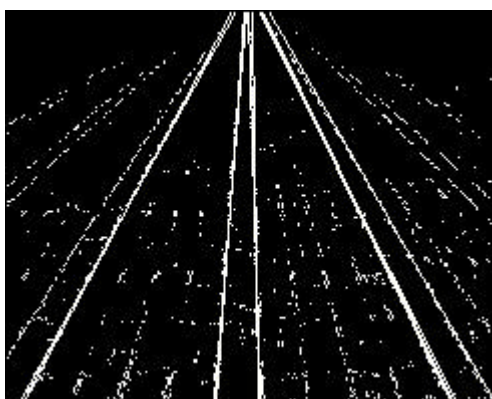


图 1a 未使用局部最大约束时权值找到的直线

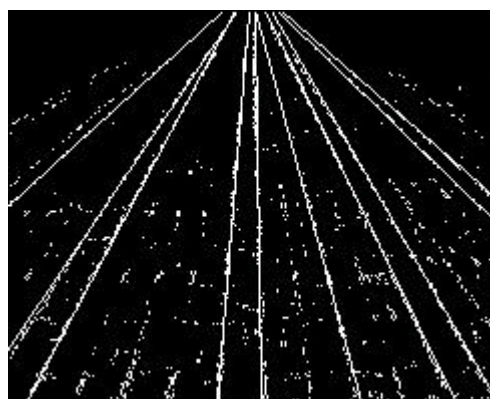


图 1b 使用局部最大约束后找到的直线

3.2 利用直线在图像中表现的长度调整直线的权值

Hough 变换统计了直线上边缘点的数目，这样，在图像中体现的长度大的直线（如：对角线）就比体现的长度小的直线更容易得到大的权值。为了解决这种不公平的现象，我们用直线在图像中体现的长度去除 Hough 变换后直线的权值，结果作为该直线新的权值。设 Hough 变换后某直线的权值是 H ，它在图像中表现的长度是 L ，则该直线新的权值 $H' = H / L$ 。如果该直线的长度很小（如： $L < 1/4$ 图像宽度），则设 $H' = 0$ 。实验结果表明使用这种方法可以有效地去除一些误检测的直线。

图 2 中直线的标号表示直线被优先检测出的顺序，即直线权值由大到小的顺序。图 2a

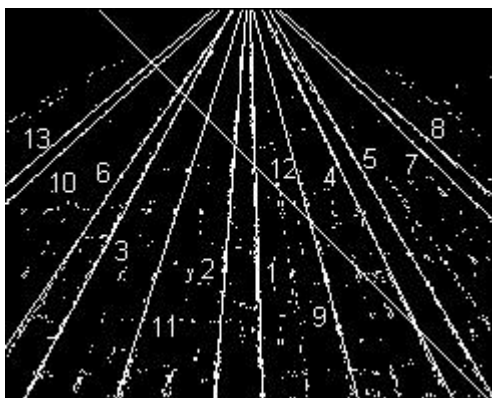


图 2a 未使用长度约束的结果

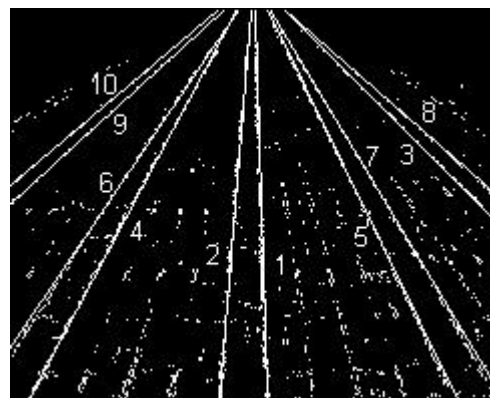


图 2b 使用了长度约束的结果

中的标号 9、11、12 的直线经过的边缘点并不密集，但由于其长度大、经过的边缘点多，所以权值都大于直线 13，从而被优先检测出来。而在图 2b 中使用了长度约束后，原直线 13 的权值变大，成为新的直线 10 而被优先检测出来。

3.3 利用灭点约束直线

根据透视投影的原理，空间中一组平行的直线在投影图像中交于一点，称为灭点^{[5][6]}。本文中直线检测的对象是网格状地面上的直线，它们在地面上是彼此平行的，所以在投影图像上应该相交于一点。通过实现灭点的检测，可以把这些平行的直线聚类，从而去除一些误检测的直线。具体实现的步骤如下：

(1) 以摄像机的焦心作为原点，光轴方向为 Z 轴，建立空间坐标系。设定图像平面平行于 X-Y 平面 ($Z=0$)，并且位于 $Z=s$ 处， s 是常数。

(2) 设图像上有两条直线 1 和 2，点 p_1 和 p_2 在直线 1 上，点 p_3 和 p_4 在直线 2 上， $p_i = (x_i, y_i, s), i=1,2,3,4$ 。则可求出直线 1 和 2 的交点 $p(\bar{x}, \bar{y}, s)$ 。

$$\begin{cases} \bar{x} = \frac{1}{t} \cdot [(x_2 - x_1) \cdot (x_4 \cdot y_3 - x_3 \cdot y_4) - (x_4 - x_3) \cdot (x_2 \cdot y_1 - x_1 \cdot y_2)] \\ \bar{y} = \frac{1}{t} \cdot [(y_3 - y_4) \cdot (x_2 \cdot y_1 - x_1 \cdot y_2) - (y_1 - y_2) \cdot (x_4 \cdot y_3 - x_3 \cdot y_4)] \end{cases} \quad (5)$$

其中， $t = (y_2 - y_1) \cdot (x_4 - x_3) - (y_4 - y_3) \cdot (x_2 - x_1)$

(3) 用球面坐标 (a, b) 表示高斯球上的点，则直线交点在高斯球上的投影坐标为：

$$a = \arctan\left(\frac{\bar{y}}{\bar{x}}\right), \quad b = \arctan\left(\frac{s}{\sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2}}\right) \quad (6)$$

(4) 对所有交点在高斯球上的投影进行聚类，找到交点的投影最集中的区域，取该区域的中心作为灭点在高斯球上的投影。聚类时使用球面上两点间的距离公式：

$$d = \arccos(\cos(90 - b_1) \cdot \cos(90 - b_2) + \sin(90 - b_1) \cdot \sin(90 - b_2) \cos(a_1 - a_2)) \quad (7)$$

(5) 如果一条直线靠近灭点，则认为它是目标直线，否则认为它不是所要找的直线。图 3 是利用灭点约束直线的结果，可以看出靠近灭点的直线(实线)和远离灭点的直线(虚线)

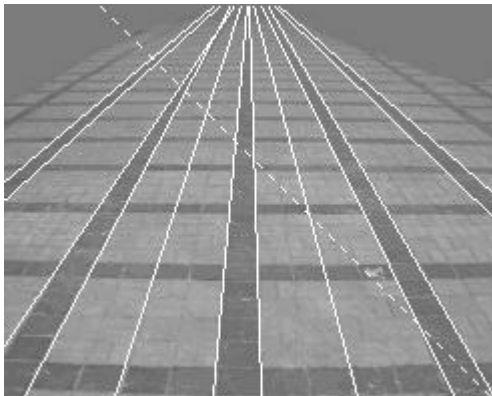


图 3 利用灭点约束的结果

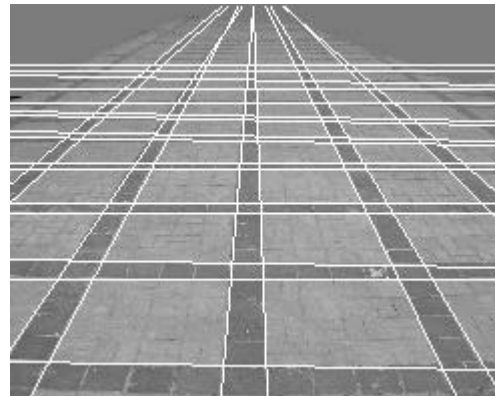


图 4 交点定位的结果

被清楚地分开了。

3.4 水平方向直线的检测

与垂直方向的直线检测相比，水平方向的直线检测要相对容易。利用 Sobel 算子对图像的水平方向进行边缘检测，然后进行 Hough 变换，最后利用局部最大值约束找到需要的直线数目。同样，灭点检测的方法在这里也可以使用。如图 4，实验结果是令人满意的。

4 总结和讨论

本文利用边缘提取、Hough 变换、灭点检测等图像处理技术对网格状地面图像进行了垂直和水平两个方向的直线检测，进而确定标定点的位罝，最终实现了摄像机的快速标定。由于摄像机镜头存在非线性畸变，这样得到的标定数据精度有限，但仍然不失为一种很有效的标定方法。

参考文献

- [1] Yakimovsky Y, Cunningham R. A system for extracting three dimensional measurements from a stereo pair of TV cameras. *Computer Graphics and Image Processing*. 78(7): 195-210, Jul. 1978
- [2] Weng J, Cohen P, Herniou M. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation. *IEEE Trans. PAMI*, 14(10): 965-980, 1992
- [3] Wei G, Ma S. Complete two-plane camera calibration and experimental comparisons. In: Proc. ICCV'93. 439-446, 1993
- [4] John Immerkar. Some remarks on the straight line Hough transform. *Pattern Recognition Letters* 19: 1133-1135, 1998
- [5] J D Foley , A Van Dam. *Fundamentals of Interactive Computer Graphics*, Addison-Wesley, Reading, Mass., 269-270, 1982
- [6] M J Magee and J K Aggarwal. Determining Vanishing Points from Perspective Images. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* 26:256-267, 1984
- [7] Evelyne Lutton, Henri Maitre, and Jaime Lope-Krahe. Contribution to the Determination of Vanishing Points Using Hough Transform, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 16(4):431-438, 1994
- [8] B.Brillault-O'Mahony. New Method for Vanishing Point Detection. *CVGIP: Image Understanding*. 54(2): 289-300, 1991
- [9] Kenneth R Castleman. 数字图像处理 朱志刚等译. 电子工业出版社, 1998
- [10] 邱茂林, 马颂德, 李毅. 计算机视觉中摄像机定标综述. *自动化学报*. 26(1):43-55, 2000
- [11] 马颂德, 张正友. 计算机视觉—计算理论与算法基础. 科学出版社, 1998
- [12] 徐光祐. 计算机视觉. 清华大学出版社, 1999

作者简介：

宋雪峰，清华大学计算机系硕士生，研究方向：图像处理，计算机视觉

杨明，清华大学计算机系博士生，研究方向：图像处理，计算机视觉，机器人，人工智能

王宏，副教授，清华大学计算机系，研究方向：移动机器人，人工智能