

一种新的白点定位图像处理算法

吴晓 曹其新

(上海交通大学机器人研究所 上海 200030)

摘要:白点定位是求解足球机器人坐标的关键步骤。通过分析以往的定位方法的优缺点,提出了一种基于沿预定义径向线求梯度亚像素定白点的新方法,并在足球机器人视觉系统中进行了实验。实验结果表明该方法既在一定的程度上降低了噪声干扰的影响,又避免了逐个像素求解边界及中点,降低了计算量,从而提高了系统的实时性和可靠性。

关键词:白点定位 图像处理 亚像素边缘检测 足球机器人

中图分类号:TP242;TP391.41 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-8755(2008)03-0071-05

A New Image Processing Algorithm of White Points Location

WU Xiao, CAO Qi-xin

(Research Institute of Robotics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: The white points localization is a key step to solve soccer robot self-localization. A new method was proposed, in which white lines' gradient information based on search along predefined radial scan-lines and subpixel were applied simultaneously, and this method was also used in the experiment of the soccer robot. The experiments show that the new method reduces not only the noise interference but also the amount of calculation by avoiding computation of the boundary and middle point pixel by pixel, which can considerably enhance the real-time performance and the reliability of the vision system of soccer robot for MSRL.

Key words: White points localization; Image processing; Subpixel edge detection; Soccer robot

白点定位算法是自主足球机器人完成自定位的关键步骤,它是利用白点与地图模型点匹配的方法实现机器人自定位的^[1-2]。足球机器人有了自定位后,诸如踢球、罚球等动作就很好解决了,当然在帧间连续定位时还要用到最小误差逼近、卡尔曼滤波迭代等方法^[3-4]。

在进行白点定位算法之前首先要分割出球场白线,传统的彩色图像分割算法大致分为三类:(1)阈值法;(2)基于边缘的方法;(3)基于区域的方法。其中,阈值法假设颜色值在一定范围内的像素属于同一类区域,据此将色彩空间划分为若干不相交的子集。这是足球机器人视觉处理较常采用的一种方法,通过建立阈值快速查询表减少阈值判决的运算量,从而在RGB色彩空间中实现像素的快速分类。但是由于受场地光照环境以及其它因素的影响,场上各个目标的色彩空间并非是规则且互不相交的矩形区域,很难选取恰当的阈值来准确地分割多个目标,因此效果并不理想。采用从RGB空间转换为HS空间再分割的方法效果会更好,因为HS代表物体本身的特性,I是光照特性,HS受环境因素影响较小,因此效果会更好,这种方法首先

收稿日期:2008-04-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60443007)。

作者简介:吴晓,男,1964年出生,副教授,硕士研究生,主要研究方向为机器视觉,气力输送。E-mail:wuxiao186@163.com。

要用查表法将 RGB 颜色空间转换为 HSI 颜色空间,然后采用只含 HS 的颜色阈值法确定目标种子点的阈值,最后用顺序网格与种子点生长相结合的目标搜索方法确定场上的白线目标^[5-6]。基于边缘的方法则假设在不同区域边缘像素的颜色值有快速的变化,用梯度运算来检测边缘,进而分割出区域。然而由边缘检测算子得到的图像边缘往往是不连续的,而且包含了很多虚假边缘,因此需要进行边缘跟踪、平滑、细化等一系列后续处理,这些后续处理往往计算量很大,比较耗时,因而不能满足比赛实时性的要求。基于区域的分割方法是假设同一区域内的相邻像素具有相似的颜色、灰度、纹理等视觉特征,著名的分+合算法,就属于这类方法,而种子点区域生长是一种被广泛应用基于区域的分割算法,在这种算法中,如何自动选取合适的种子点以及选择什么样的同类判据是一个很难处理的问题,直接关系到图像分割的效果^[7-8]。

鉴于以上的分割方法和机器人的实时性,我们根据新规则颜色通道较少(去掉黄门、蓝门等)、白线的特征明显且易与其它颜色区分的特点,直接采用沿预定义扫描线求梯度向量的方法,在 RGB 空间进行彩色边缘检测,利用亚像素计算求取白点。

1 试验过程

1.1 试验方法

求白点试验在 8 m × 6 m 的自主足球机器人的球场上进行,边框白线宽度为 125 mm,内框白线宽度为 50 mm,场地为绿色,采用网球门。全向摄像机分辨率为 640 × 480,采取 USB2.0 传输,预扫描线分别为 0°、25°、50°、75°,取像范围 3 m × 4 m 场景。

1.2 试验方案

表 1 因素水平表
Tab. 1 Level of factors

因素	水平			
	1	2	3	4
机器人 X/mm	500	1000	2000	3000
机器人 Y/mm	500	1500	2500	3500
机器人 $\theta/^\circ$	0	25	50	75
白线宽度 d/mm	50	75	100	125

为了大幅度减少试验次数而不降低试验可行性,我们采用正交试验法,预先取一些试验白点,这些点是所有试验点的一组最小正交基,也就是说所有试验点都可以由这几个基本点衍生表示,故而考虑基的性质就能推断所有白点的性质了。为了选定正交试验各个坐标参数的取值范围,先结合以往试验研究的经验,然后又进行了 50 帧不同角度图像的摸索性试验,确定了正交试验参数。正交试验按照 L16 正

交表进行试验。指标项目为白点的坐标、距离,因素水平表如表 1 所示。

正交表能够在因素变化范围内均衡抽样,使每次试验都具有较强的代表性,由于正交表具备均衡分散的特点,保证了全面试验的某些要求,这些试验往往能够较好或更好的达到试验的目的。

2 定位原理

2.1 彩色边缘检测

彩色空间求图像的边缘并不是简单的 R、G、B 3 个通道求梯度的迭加,而需按照 Di Zenzo[1986]提出的彩色梯度^[9]。

假设 r, g, b 是 RGB 彩色空间沿 R、G、B 轴的单位向量,可定义梯度向量为:

$$u = \frac{\partial R}{\partial x}r + \frac{\partial G}{\partial x}g + \frac{\partial B}{\partial x}b \quad (1)$$

$$v = \frac{\partial R}{\partial y}r + \frac{\partial G}{\partial y}g + \frac{\partial B}{\partial y}b \quad (2)$$

标量 g_{xx} 、 g_{yy} 和 g_{xy} 定义为这些向量的点乘,如下表示:

$$g_{xx} = u \cdot u = u^T u = \left| \frac{\partial R}{\partial x} \right|^2 + \left| \frac{\partial G}{\partial x} \right|^2 + \left| \frac{\partial B}{\partial x} \right|^2$$

$$g_{yy} = \mathbf{v} \cdot \mathbf{v} = \mathbf{v}^T \mathbf{v} = \left| \frac{\partial R}{\partial y} \right|^2 + \left| \frac{\partial G}{\partial y} \right|^2 + \left| \frac{\partial B}{\partial y} \right|^2$$

$$g_{xy} = \mathbf{u} \cdot \mathbf{v} = \mathbf{u}^T \mathbf{v} = \frac{\partial R}{\partial x} \frac{\partial R}{\partial y} + \frac{\partial G}{\partial x} \frac{\partial G}{\partial y} + \frac{\partial B}{\partial x} \frac{\partial B}{\partial y}$$

R、G 和 B 及由此而来的 g 是 x 和 y 的函数。利用该表示法,彩色梯度的最大变化率方向可用角度给出:

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan \left[\frac{2g_{xy}}{g_{xx} - g_{yy}} \right] \quad (3)$$

$$F(\theta) = \left\{ \frac{1}{2} [(g_{xx} + g_{yy}) + (g_{xx} - g_{yy}) \cos 2\theta + 2g_{xy} \sin 2\theta] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

如图 1 所示,由于是全向视觉,所以图像中心就是机器人坐标中心,如果是沿扫描线求梯度即按照公式(3)、(4)可求出 θ 和 $F(\theta)$,其实公式(3)的 θ 就是图 1 的扫描线斜率角。这样所求的 $F(\theta)$ 可得到进一步简化: $\theta g_{yy} = \tan^2(\theta) g_{xx}$, $g_{xy} = \tan(\theta) g_{xx}$, 所以:

$$F(\theta) = K \sqrt{\left| \frac{\partial R}{\partial x} \right|^2 + \left| \frac{\partial G}{\partial x} \right|^2 + \left| \frac{\partial B}{\partial x} \right|^2} \quad (5)$$

$$\text{其中, } K = \sqrt{\frac{1 + \tan^2(\theta) + \cos(2\theta) [1 - \tan^2(\theta)] + 2\sin(2\theta) \tan(\theta)}{2}}$$

$$\text{如果沿坐标轴 } x \text{ 方向求彩色空间梯度时即 } \theta = 0, \text{ 则 } F(x) = \sqrt{\left| \frac{\partial R}{\partial x} \right|^2 + \left| \frac{\partial G}{\partial x} \right|^2 + \left| \frac{\partial B}{\partial x} \right|^2}$$

由于开方、平方不好处理,所以 $F(x)$ 可近似为:

$$F(x) = \left| \frac{\partial R}{\partial x} \right| + \left| \frac{\partial G}{\partial x} \right| + \left| \frac{\partial B}{\partial x} \right| \quad (6)$$

2.2 去噪性能分析

由于现场光线变化、电路干扰等会引起一些图像噪声,对于线性滤波如均值滤波、高斯滤波和拉普拉斯滤波等可以通过对三色域分别滤波,然后迭加的方法获得,但均值滤波会平滑边界,高斯滤波、拉普拉斯滤波对噪声敏感会产生虚假边界,且花费的时间也很长。中值滤波既能很好保持原图像的边界信息,又可以有效滤除脉冲干扰,但它是非线性滤波,不能通过三色域分别滤波求迭加的方法获得。

根据实时性要求,我们采用沿扫描线、坐标线进行最大、最小值滤除法进行滤波,这样既能减少处理时间,又能滤除噪声。

根据正交实验因素水平表 1,选取 x 轴做为扫描线,根据全维摄像头的分辨率 640×480 设定范围约为 480×360 像素,扫描线所通过的最大像素个数为 600,设三色阈值分别为:

$$R_{\min} < Ri < R_{\max}; G_{\min} < Gi < G_{\max}; B_{\min} < Bi < B_{\max} \text{ 其中 } i \text{ 是扫描线上的点 } 0 \sim 600, \max \text{ 表示设定的最大阈值, } \min \text{ 是设定的最小阈值。}$$

2.3 白点坐标分析

扫描线通过滤波后按照公式(6)求梯度,最大梯度处就是白线边界点,取边界点坐标的中点即白点的坐标如图 2 所示。

按照规则,白线的宽度为 125 mm,相当于的像素数: $P =$

$$\frac{360}{600} \times 125 = 7.5, \text{ 又因为全向视觉的越向中心分辨率越高的特}$$

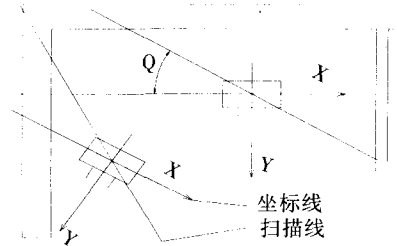


图 1 白线与机器人位置图

Fig.1 Situation of white lines and robot

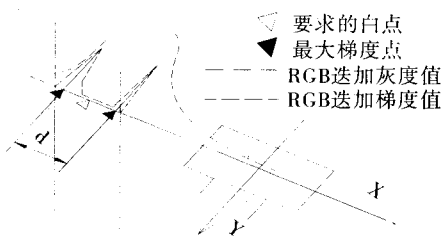


图 2 求白点过程示意图

Fig.2 Sketch map of solving process of white points

点,因为机器人在四分之一场范围内,所以, $P \approx 7.5 \times 2 = 15$;同理, 100 mm 相当于 12;50 mm 相当于 6。在空间域求公式(6)梯度可改写为差分的方式:

$$F(i) = |R(i) - R(i-1)| + |G(i) - G(i-1)| + |B(i) - B(i-1)|$$

至少选出两个最大梯度坐标 $X_{\max 1}$ 、 $X_{\max 2}$;

最终的白点坐标为:

$$X_p = \frac{X_{\max 1} + X_{\max 2}}{2} \quad (7)$$

当机器人的位姿 $\begin{pmatrix} x \\ y \\ \theta \end{pmatrix}$ 发生变化时,计算方法基本相同。由于分辨率的问题理论上的最大误差为: $0.5 \times$

$125 \div 15 = 4.2$ mm,如此大的误差是不能满足自定位要求的,这里我们采用亚像素的方法定位白点。

2.4 亚像素级白点定位分析

理论上,一般认为图像是原始理想信息在点扩散函数的卷积作用下形成的^[10]。在不考虑噪声影响的情况下,其一维数学模型简单表示为 $f(x) = u(x) * g(x)$,其中: $u(x)$ 为原始理想信号; $f(x)$ 为一维图像信息; $g(x)$ 为点扩散函数,一般近似为高斯函数, $g(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}$; 如果求 $f(x)$ 的质心: $x_0 =$

$\frac{\int_{-\infty}^{+\infty} x |f(x)| dx}{\int_{-\infty}^{+\infty} |f(x)| dx}$;同理,梯度 $f'(x)$ 的质心: $x_0' = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} x |f'(x)| dx}{\int_{-\infty}^{+\infty} |f'(x)| dx}$,即图 2 所示的最大梯度点。

求取边界点的信息来自 $f(x)$ 的一阶导数,在无噪声干扰的情况下,只有在边缘过渡区内 $|f'(x)|$ 值才较大,在远离边缘过渡区 $|f'|$ 迅速衰减至非常小的值,几乎近于零。故在实际计算时,只需取某一个边缘过渡区间即可。

用差分代替微分则:

$$x_0' = \frac{\sum_{i=1}^n x_i |f_i - f_{i-1}|}{\sum_{i=1}^n |f_i - f_{i-1}|} \quad (8)$$

当然,按公式(8)计算边界中点,还有许多判断因素如梯度阈值的取值,扫描线的定义等^[1]。如图 2 所示,求出边界点梯度中点后再按照公式(7)求出白点中心坐标 X_p 。

由于采用了亚像素插值,所以白点坐标的理论最大误差可降为 0.084 mm。另外,此算法不需要预先进行像素级边缘检测,即可直接进行亚像素级边缘检测如公式(8)的计算。

3 试验数据分析

结合正交实验,我们预定义了机器人坐标的位置:足球机器人的绝对坐标 (x, y, θ) 、白线宽度 (d) 如表 1 所示。利用计算机程序求解白点坐标真值,然后按照本文的白点定位算法得出实验值如表 2 所示。经分析可以看出机器人距离白线近点和远点的误差是不同的,如 $(500, 500)$ $(3000, 3500)$ 误差较大;机器人距离白线中间点如 $(1000, 1500)$ $(2000, 2500)$ 误差较小。

该结果比较符合全向视觉图像分辨率和失真的情况,因为全向视觉反光镜在中心的加工面易产生误差,引起图像畸变;而距离图像中心较远的地方的图像分辨率又变小;还有随着倾角 θ 越大误差也越大。所以图像的内、外两测的误差会较大,而中间的误差较小。因此测量的白点坐标与之有对应的关系,理论计算与实际测量值比较接近,最大误差 1.278 mm 在亚像素级之内。

表2 白点定位值与真值
Tab. 2 White location value and true value

试验 编号	机器人 X /mm	机器人 Y /mm	机器人 θ /°	白线宽度 d /mm	白点坐标 x / mm		白点坐标 y / mm		白线宽度 d / mm	
					试验值	真值	试验值	真值	试验值	真值
1	1	1	1	1	25.891	25	499.376	500	49.266	50
2	1	2	2	2	37.256	37.5	1284.483	1284.333	82.422	82.753
3	1	3	3	3	50.962	50	1964.50	1963.711	131.371	130.541
4	1	4	4	4	61.401	62.5	1868.032	1867.228	483.831	482.963
5	2	3	1	3	49.914	50	2500.075	2500	99.927	100
6	3	2	2	2	38.400	37.5	584.213	584.871	83.063	82.753
7	4	4	1	3	51.278	50	3500.997	3500.0	98.908	100

4 结论

足球机器人比赛是一项实时性非常高的项目,自定位及定位精度是足球机器人的关键问题,也是足球机器人射门研究的核心内容。本文运用白点定位算法对识别图像进行了预处理和亚像素定位分析,使识别精度有很大的提高,同时保障了识别定位在规定的时间内完成,对整个足球机器人系统性能的提高,起到了良好的作用。

参考文献

- [1] 吴晓. 基于新规则自主足球机器人的研究[J]. 湖南文理学院学报, 2008, 20(2): 61~66.
WU Xiao. Research on Based Rules and Regulations of the Game to MSRL for 2008[J]. Journal of Hunan University of Arts and Science, 2008, 20(2): 61~66. (in Chinese)
- [2] Martin Lauer, Sascha Lange, and Martin Riedmiller. Calculating the Perfect Match: an Efficient and Accurate Approach for Robot Self-Localization[C]. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA99), 2005. 375~382.
- [3] Ingemar J. Cox. Blanche-an Experiment in Guidance and Navigation of an Autonomous Robot Vehicle. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1991, 7(2): 193~204.
- [4] R. 西格沃特. 自主移动机器人导论[M]. 西安: 西安交通大学出版社. 2006.
Siegwart, Roland, Illah R. Nourbakhsh. Introduction to Autonomous Mobile Robots[M]. LI Ren-hou(trans.) Xi-an: Xi-an Jiaotong University Press, 2006. (in Chinese)
- [5] 黄晶, 赵臣, 周明明. 基于快速彩色空间变换的足球机器人目标搜索[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(9): 1036~1038.
HAUNG Jing, ZHAO CHENG, Zhou Ming-ming. Identification of Objects for Micro Soccer Robot Based on Fast Color Space Transformation[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2003, 35(9): 1036~1038. (in Chinese)
- [6] 许志倩, 张作龙, 朱万胜. 足球机器人视觉系统目标识别算法的改进[J]. 流体传动与控制, 2007, 22(3): 1~3.
XU Zhi-qian, ZHANG Zuo-long, ZHU Wan-sheng. The Amelioration in Target Recognition Arithmetic of Soccer Robot Vision System[J]. Fluid Power Transmission & Control, 2007, 22(3): 1~3. (in Chinese)
- [7] 王卫, 陈继荣, 徐景业. 足球机器人彩色视觉图像的分割与识别[J]. 计算机工程与应用, 2005, 17(7): 68~71.
WANG Wei, CHEN Ji-rong, XU Jing-ye. Color Image Segmentation and Recognition for Soccer Robots[J]. Computer Engineering and Applications, 2005, 17(7): 68~71. (in Chinese)
- [8] Wesley E. Snyder. 机器视觉教程[M]. 林学闫译. 北京: 机械工业出版社. 2005.
Snyder, W. E. Machine Vision[M]. LIN Xue-yan (trans.) Beijing: Mechanical Industry Press, 2005. (in Chinese)
- [9] Rafael C. Gonzalez. 数字图像处理[M]. 阮秋琦, 译. 北京: 电子工业出版社. 2007.
Gonzalez, Rafael C., Richard E. Woods. Digital Image Processing[M]. YUAN Qiu-qi (trans.) Publishing House of Electronics Industry, 2007. (in Chinese)
- [10] 盛遵冰, 崔贤玉, 高国安. 通用亚像素边缘检测算法[J]. 上海交通大学学报, 2007, 41(6): 911~915.
SHENG Zun-bin, CUI Xian-yu, GAO Guo-an. A Universal Algorithm for Subpixel Edge Detection[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2007, 41(6): 911~915. (in Chinese)