

白点定位图像处理算法

吴 晓^{1,2}, 曹其新¹

(1. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240; 2. 莆田学院, 福建 莆田 321100)

摘要: 为了解决全自主足球机器人自定位难题, 采用白点定位图像处理算法求解足球场地白线边缘中点作为自定位特征点. 通过沿预定义一维扫描线的彩色滤波、求最大梯度点和亚像素分解求中点等 3 个步骤, 求解出若干定位白点, 为机器人自定位做准备. 结果表明: 白点定位图像处理算法, 定位精度最大误差为 1.2mm, 程序运行平均时间为 15ms, 定位过程抗干扰能力强, 完全能够满足足球机器人自定位准确性、实时性和鲁棒性的要求.

关键词: 白点定位; 图像处理; 亚像素; 机器人

中图分类号: TP 242 62; TS 251 52 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1964(2008)06-0830-04

Image Processing Algorithm of White Point Localization

WU Xiao^{1,2}, CAO Qi-xin¹

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;
2. Putian University, Putian, Fujian 321100, China)

Abstract: In order to solve the problem of self-localization for autonomous robot soccer, an image processing algorithm of white point localization was applied to find out the midpoint of white line edge of the soccer field as the reference point for self localization. By following colored filter of predefined single-dimension scanline, calculating the maximum gradient point, and deriving the midpoint through sub-pixel decomposition, several localizing white points were derived to prepare for the robot's self-localization. The results show that the image processing algorithm of white point localization has a maximum localization accuracy error of 1.2 mm, an average program-running time of 15 ms, and is strongly resistant to interference in the process of localization. The image processing algorithm of white points localization can completely satisfy the requirements of accuracy, realtime and robustness for robot soccer in self-localization.

Key words: white points localization; image processing; sub-pixel; robot

白点定位图像处理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 3 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

收稿日期: 2008-04-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(60443007)

作者简介: 吴 晓(1964-), 男, 江苏省徐州市人, 副教授, 硕士, 从事机器视觉, 气力输送方面的研究.

E-mail: wuxiao186@163.com Tel: 13123297300

换为 HIS 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 是光照特性所以受环境影响较小,因此效果会更好;首先用查表法将 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,因而不能够满足比赛对于实时性的要求。基于区域的分割方法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的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)的特点,且白线的特征明显,易与其它颜色区分,直接采用沿预定义一维扫描线求梯度向量的方法,在 RGB 空间进行彩色边缘检测,求取机器人自定位白点。经检索截止 2008 年 5 月,国内、外各类期刊尚未发现相关白点定位算法的报道。

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,预定义一维扫描线分别为 0°, 25°, 50°, 75°, 取像范围 3 m × 4 m 场景。

1.2 试验方案

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,也就是说即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点的性质了。为了选定正交试验各个工艺参数的取值范围,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(4⁴) 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。

表 1 因素水平表

因素	水平			
	1	2	3	4
机器人 X/mm	500	1 000	2 000	3 000
机器人 Y/mm	500	1 500	2 500	3 500
机器人 / (°)	0	25	50	75
白线宽度 d/mm	50	75	100	125

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 这 3 个通道求梯度的迭加,而需按照 Di Zenzo [1986]提出的彩色梯度公式计算^[5]。

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

$$u = \frac{\partial R}{\partial x} r + \frac{\partial G}{\partial x} g + \frac{\partial B}{\partial x} b. \tag{1}$$

$$v = \frac{\partial R}{\partial y} r + \frac{\partial G}{\partial y} g + \frac{\partial B}{\partial y} b. \tag{2}$$

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

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

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

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

R, G 和 B 及由此而来的 g 是 x 和 y 的函数。利用该表示法,某 (x, y) 点彩色梯度的最大变化率方向可以由角度给出

$$= \frac{1}{2} \arctan \left[\frac{2 g_{xy}}{g_{xx} - g_{yy}} \right]. \tag{3}$$

该 (x, y) 点在 方向上变化率的值由下式给出

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

如图 1 所示, O 和 O' 分别表示机器人中心坐标的 2 种位置, θ 表示扫描线倾角, (x, y) 表示图像相对坐标系。图 1 中列举了 2 种位置的扫描线与白

线相交的情况,由于是全向视觉,所以图像中心就是机器人坐标中心,当沿扫描线求梯度时可按照公式(3),(4)求出白线的梯度方向和梯度值 $F(\cdot)$,由于是沿一维扫描线求梯度,不难看出公式(3)的就是图1的径向扫描线斜率的反正切.这样所求的 $F(\cdot)$ 可得到进一步简化

$$g_{yy} = \tan^2(\cdot) g_{xx}, g_{xy} = \tan(\cdot) g_{xx},$$

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

式中: $K =$

$$\sqrt{\frac{1 + \tan^2(\cdot) + \cos(2\cdot) [1 - \tan^2(\cdot)] + 2\sin(2\cdot) \tan(\cdot)}{2}}$$

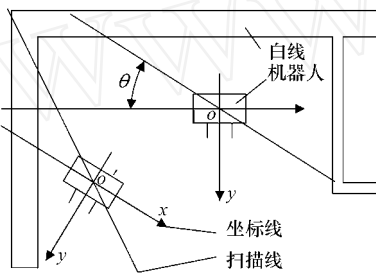


图1 白线与机器人位置

Fig. 1 White line with the robot draft

当沿坐标轴 x 方向求彩色空间梯度即 $\theta = 0^\circ$ 时,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、拉普拉斯滤波等可能通过对三色分别滤波,然后迭加的方法进行,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,不能通过三色分别滤波求迭加的方法获得.

根据实时性要求,这里我们采用沿径向扫描线、坐标线进行最大、最小值滤波法进行滤波,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,我们选取 x 轴做为扫描线,根据全向摄像头的分辨率 640×480 确定有效工作范围约为 480×360 ,扫描线所能通过的最大像素个数为600.在进行最大值、最小值滤除噪声时的,RGB 域值范围如下,超出范围的即为

噪声,得以滤除,由于只是沿径向扫描线滤除,所以处理很快.

$$R_{\min} < R_i < R_{\max};$$

$$G_{\min} < G_i < G_{\max};$$

$$B_{\min} < B_i < B_{\max}.$$

其中 i 是扫描线上的点 $0 - 600$,max 表示设定的最大阈值,min 是设定的最小阈值.

2.3 白点坐标分析

如图2所示,以 x 轴作为径向扫描线时的情况,其中 d 是沿扫描线梯度最大2点间距离.通过沿扫描线最大值、最小值滤波后,按照公式(6)求彩色梯度,最大梯度处的点就是白线边界点,取边界点坐标的中点即白点的坐标.

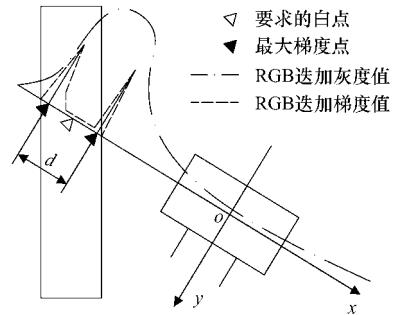


图2 求白点过程示意图

Fig. 2 Sketch process of seeking white point

按照规则白线的宽度为125 mm,全自主机器人的球场为长 \times 宽 = $8 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ = 全向视觉的有效工作范围 $480 \text{ pixels} \times 360 \text{ pixels}$,所以白线宽度相当于的像素数: $P_{125} = \frac{360}{6000} \times 125 = 7.5 \text{ pixels}$,又由于全向视觉越向中心分辨率越高的特点,加上我们的试验是在四分之一赛场范围内,所以, $P_{125} 7.5 \times 2 = 15 \text{ pixels}$.同理,100 mm 相当于 12 pixels;50 mm 相当于 6 pixels.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2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 $\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$ 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: $0.5 \times 125 \div 15 = 4.2 \text{ mm}$.如此大的误差是不能满足自定位要求的,我们采用亚像素定位.

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, $g(x) = \frac{1}{\sqrt{2}} e^{-\frac{x^2}{2}}$;如果求 $f(x)$ 的质

心: $x_0 = \frac{\int x / f(x) / dx}{\int f(x) / dx}$;同理,梯度 $f(x)$ 的质心: $x_0 = \frac{\int x / f'(x) / dx}{\int f'(x) / dx}$ 即图 2 所示的最大梯度点.

求取 x 的信息取自 $f(x)$ 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 $|f'(x)|$ 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,这里不再介绍,请参考文献[3].如图 2 所示,求出边界点梯度中点后按照公式(7)求出白点中心坐标 X_p .

由于采用了亚像素所以白点坐标的理论最大误差可降为 0.084 mm.另外此算法是不需预先进行像素级边缘检测的,即可直接进行亚像素级边缘检测如公式(8).

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 , ,白线宽度如表 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.

表 2 白点定位值与真值
Table 2 Test value and true value

试验编号	机器人 x/ mm	机器人 y/ mm	机器人 $\theta / (^\circ)$	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	25.0	499.376	500.000	49.266	50.000
2	1	2	2	2	37.256	37.5	1 284.483	1 284.333	82.422	82.753
3	1	3	3	3	50.962	50.0	1 964.500	1 963.711	131.371	130.541
4	1	4	4	4	61.401	62.5	1 868.032	1 867.228	483.831	482.963
5	2	3	1	3	49.914	50.0	2 500.075	2 500.000	99.927	100.000
6	3	2	2	2	38.400	37.5	584.213	584.871	83.063	82.753
7	4	4	1	3	51.278	50.0	3 500.997	3 500.000	98.908	100.000

通过分析可以看出机器人距离白线近点和远点如(500,500)(3 000,3 500),误差较大约 1.1 mm;机器人距离白线中间点如(1 000,1 500)(2 000,2 500),误差较小约 0.15 mm.

这也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变小;还有随着倾角 越大误差越大.

所以图像的内外两部分的误差较大,中间的误差较小,致使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,最大误差为 1.2 mm,在 VC++6.0 环境下编程计算机硬件为双核 2.5 G 的 CPU,内存为 3 G,实时运行求白点坐标程序,实测平均运行时间约为 13~16 ms.其实时性、准确性完全能够满足全自主机器人自定位的要

求.

4 结 论

基于白点定位图像处理算法具有如下优点:

- 1) 定位精度高最大误差为 1.2 mm,最小误差为 0.15 mm,准确率达 97.6%.
- 2) 实验表明白点定位鲁棒性好,能够适应各种变化的光照场景.
- 3) 由于采用了沿径扫描线求梯度,所以运算速度快,实时性高,白点定位程序平均运行时间为 15 ms,完全能够满足全自主中型组机器人的快速自定位.

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.

(下转第 847 页)

- BIAN Xiao-zeng, ZHU Zhi-xian, ZHOU Wei-dong. The framework of geotectonic evolution from palaeozoic to mesozoic[J]. *Geology of Fujian*, 1993, 12(4):280-291.
- [24] 张德全, 余宏全, 阎升好, 等. 福建紫金山地区中生代构造环境转换的岩浆岩地球化学证据[J]. *地质论评*, 2001, 47(6):608-616.
- ZHANG De-quan, SHE Hong-quan, YAN Sheng-hao, et al. Geochemistry of mesozoic magmatites in the Zijinshan region and implication on regional tectonic inversion [J]. *Geological Review*, 2001, 47(6):608-616.
- [25] 毛建仁, 陶奎元, 李寄喁, 等. 闽西南地区中生代花岗闪长质岩石的特征及其构造演化[J]. *岩石矿物学杂志*, 2002, 21(2):135-142.
- MAO Jian-ren, TAO Kui-yuan, LI Ji-yu, et al. Characteristics of mesozoic granodioritic rocks in southwestern Fujian and their tectonic evolution[J]. *Acta Petrologica & Mineralogica*, 2002, 21(2):135-142.
- [26] 毛建仁, 胡青, 许乃政, 等. 闽西南地区早中生代汤泉岩体同位素年代学、地球化学特征及其构造意义[J]. *地质学报*, 2003, 77(3):351-371.
- MAO Jian-ren, HU Qing, XU Nai-zheng, et al. Geochronology and geochemical characteristics in early mesozoic Tangquan body, southwestern Fujian and their significance [J]. *Acta Geologica Sinica; English Edition*, 2003, 77(3):351-371.
- [27] 毛建仁, 许乃政, 胡青, 等. 闽西南地区中生代花岗闪长质岩石的同位素年代学、地球化学及其构造演化[J]. *吉林大学学报:地球科学版*, 2004, 34(1):12-20.
- MAO Jian-ren, XU Nai-zheng, HU Qing, et al. Geochronology and geochemical characteristics in mesozoic granodioritic rocks in southwestern Fujian and their tectonic evolution[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2004, 34(1):12-20.
- [28] 赵海玲, FRED A F, HANG Shi-chun, 等. 东南沿海地区第四纪大陆岩石圈地幔的特征[J]. *现代地质*, 2002, 16(4):347-352.
- ZHAO Hai-ling, FRED A F, HANG Shi-chun, et al. The mantle characteristics of quaternary continental lithosphere, southeast coast of China[J]. *Geoscience*, 2002, 16(4):347-352.
- [29] 赵海玲, 狄永军, 刘振文, 等. 东南沿海地区新生代火山作用和地幔柱[J]. *地质学报*, 2004, 78(6):781-788.
- ZHAO Hai-ling, DI Yong-jun, LIU Zhen-wen, et al. Cenozoic volcanism and mantle-plume along southeast coast of China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78(6):781-788.

(责任编辑 姚志昌)

(上接第 833 页)

- WU Xiao. Research of based on the new rules of autonomous robot soccer[J]. *Journal of Hunan College of Arts*, 2008, 20(2):61-66.
- [2] LAUER M, LANGE S, RIEDMILLER M. Calculating the perfect match: an efficient and accurate approach for robot self-localization[C]// *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Bonn:[s. n.], 2005:375-382.
- [3] INGEMAR J. Cox. Blanche-an experiment in guidance and navigation of an autonomous robot vehicle [J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1991, 7(2):193-204.
- [4] 黄晶. 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.
- HUANG Jing. Based on the rapid transformation of the color space robot soccer goal search [J]. *Journal of Harbin University*, 2003, 35(9):1036-1038.
- [5] 许志倩. 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. Robot soccer vision system target recognition algorithms to improve [J]. *Fluid Driver and Control*, 2007, 22(3):1-3.
- [6] 王卫. 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. Robot soccer color visual image segmentation and recognition[J]. *Engineering and computer applications*, 2005, 17(7):68-71.
- [7] 盛遵冰. 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. Generic sub-pixel edge detection algorithm [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2007, 41(6):911-915.
- [8] 白国长, 侯伯杰. 机器人的一种鲁棒控制方法[J]. *郑州大学学报:英文版*, 2007, 23(1):52-58.
- SHANG Hai-tao, CHEN Tie-jun. Intelligent control of the xanthan gum fermentation proces [J]. *Journal of Zhengzhou University: Engineering Science*, 2007, 23(1):52-58.

(责任编辑 姚志昌)