

一种 Zernike 矩的高精度板材尺寸测量方法

李江昀^{1,2}, 王宇浩¹, 童朝南^{1,2}

(1. 北京科技大学自动化学院, 北京 100083; 2. 北京科技大学钢铁流程先进控制教育部重点实验室, 北京 100083)

摘 要: 目前技术条件下, 对于大视场的高精度边缘测量而言, 工业级面阵 CCD 传感器的分辨率难以满足要求. 文章针对钢板尺寸测量系统, 首先介绍了测量环境和工作原理. 继而在 Zernike 矩以及 Zernike 矩亚像素精度边缘检测原理的基础上, 提出了适用于钢板尺寸测量的亚像素精度边缘检测算法. 该算法不仅具较好的抗噪性能和检测精度, 而且在传统界定边缘点的阈值处理方法上进行了改进, 使边缘受限于单个像素的宽度范围内, 能够实现亚像素精度的定位. 系统实际运行表明, 该方法能够有效提高测量精度, 具有良好的效果和实用价值.

关键词: 边缘检测; 钢板尺寸; Zernike 矩; 亚像素

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2015)07-1432-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.07.028

An Accurate Zernike Moment-Oriented Method for Measuring Flat Strip Dimension

LI Jiang-yun^{1,2}, WANG Yu-hao¹, TONG Chao-nan^{1,2}

(1. School of Automation & Electrical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of Advanced Control of Iron and Steel Process (Ministry of Education),

University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Currently, the resolution of industrial-grade array CCD sensor can hardly satisfy the high precision requirements on the edge detection across a huge field. For the system of steel plate dimensional measurement, this paper introduces running environment and operation principle. Then, it proposes a sub-pixel level edge detection algorithm for steel plate dimensional measurement based on Zernike moment and also its theory applied to sub-pixel detection. This algorithm has good anti-noise performance and high detection precision. Moreover the proposed algorithm also improves the traditional threshold method for processing edge points, which can obtain an edge within a single pixel width and the location in sub-pixel level. In practice, the results show that the proposed algorithm improves the measurement accuracy and has efficient effect as well as practical value.

Key words: edge detection; plate dimension; Zernike moment; sub-pixel

1 引言

钢板的几何尺寸精度是评价板材质量最基本的指标. 人工测量方法, 不仅占用人力, 还存在测量速度慢, 测量精度低等缺点, 难以满足生产需求. 随着图像传感器和机器视觉的发展和成熟, 使用机器视觉的方法测量钢板几何尺寸逐渐得到应用. 大量已有文献根据待检测物体的特点提出了适用的图像边缘检测算法^[1], 并在特定的工程环境中取得了较好的应用效果, 但是对视觉图像中边缘的准确提取仍然是一项极具挑战性的研究课题^[2]. 对于高精度板带尺寸测量而言, 由于测量视场广 (宽度在 2 ~ 5m, 长度 2 ~ 10m), 测量精度高 ($< \pm 1 \sim 2\text{mm}$), 目前的面阵图像传感器在像素精度层次还无法满足需求, 需要使用亚像素精度的边缘检测方法.

传统的边缘检测方法 (如 Sobel 算子、Roberts 算子、Canny 算子等) 只能把图像的边缘定位到像素级^[3], 且由于其以微分运算符为基础, 对图像中的噪声敏感, 极易检测出伪边缘^[4]. 而某类基于小波变换^[5]和数学形态学^[6]的方法对于亚像素级边缘检测的有效性也没有相关论述.

亚像素边缘检测技术的概念最早由 Hueckel 提出^[7], 目前按照其数学模型的不同, 可以分为拟合法、插值法和矩方法等. 矩方法是其中应用最为广泛的一种, 主要包括空间矩方法和 Zernike 矩方法^[8]. 基于 Zernike 矩的亚像素精度边缘检测算法最早由 Ghosal 和 Mechroltal 提出^[9,10], 利用理想的单位圆内灰度阶跃模型, 通过计算三个不同阶次的 Zernike 矩来得到模型的 4 个参数, 从而判断边缘点以及计算亚像素坐标^[11]. 由于其以

积分算子为基础,拥有很好的抗噪声能力,在实际图像的处理中体现出了很大的优势。

传统的 Zernike 矩亚像素边缘检测算法在边缘点的界定问题上采用固定的阈值,对拥有理想阶跃边缘的图像进行处理能够获得单像素宽度的边缘.而对于现场采集的非理想状态的图像而言,采用固定的阈值来确定边缘点,对于现场采集的非理想图像进行处理只能得到较粗的边缘,较粗的边缘使得亚像素坐标的计算难以进行.针对钢板尺寸测量中只需获得单条边高精度坐标的特点,本文对边缘判定的方法进行了改进。

2 钢板尺寸测量系统工作原理

钢板尺寸测量一般包括长、宽和厚三个维度,基本测量原理相同,本文以长度测量为例进行阐述.长度测量子系统如图 1 所示,每部 CCD 传感器采集一个边部图像。

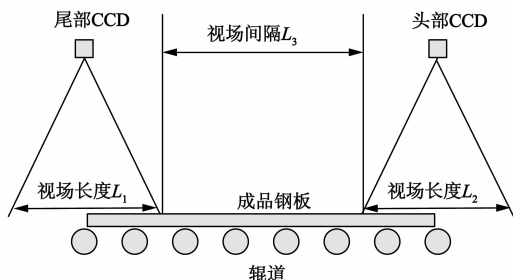


图1 钢板尺寸测量系统工作原理

通过准确的边缘检测,可以得到钢板在 CCD 视场内部分的长度 L_1 和 L_2 ,两部 CCD 传感器视场距离设为 L_3 .则钢板长度

$$L = L_1 + L_2 + L_3 \quad (1)$$

其中, $L_3 <$ 最短待测钢板长度.以某冷轧钢板生产为例,其终轧产品规格为长 4 ~ 10m,则各长度应满足 $L_3 = 4\text{m}$, $L_1 = L_2 = 3\text{m}$ 。

如果选用主流 500 万像素工业传感器,像素矩阵为 2448×2048 .理论计算精度为 $3000/2448 \approx 1.23\text{mm}$,对于尺寸精度 $< \pm 1\text{mm}$ 的高精度板材来讲,显然该精度是不满足要求的.因此,亚像素级检测成为理想的不增加硬件成本的解决方案。

3 Zernike 矩亚像素边缘检测算法

3.1 算法原理

图像 $f(x, y)$ 的 n 阶 m 次 Zernike 矩定义为

$$Z_{nm} = \frac{n+1}{\pi} \iint_{x^2+y^2 \leq 1} f(x, y) V_{nm}^*(\rho, \theta) dx dy \quad (2)$$

积分外面的项 $\frac{n+1}{\pi}$ 仅仅是个常量,可以被忽略掉。

其中,积分核函数 $V_{nm}(\rho, \theta)$ 可以表示为

$$V_{nm}(\rho, \theta) = R_{nm}(\rho) e^{jm\theta} \quad (3)$$

由于多项式 $V_{nm}(\rho, \theta)$ 是正交的,满足如下关系

$$\iint_{x^2+y^2 \leq 1} V_{nm}^*(x, y) V_{pq}(x, y) dx dy = \frac{\pi}{n+1} \quad (4)$$

当且仅当 $n = p$ 和 $m = q$ 时成立,否则积分的值为 0。

图像的 Zernike 矩有一个重要性质,那就是把一幅图像旋转 φ 角度后,旋转后图像的 Zernike 矩 Z'_{nm} 与旋转前的 Zernike 矩 Z_{nm} 存在如下关系

$$Z'_{nm} = Z_{nm} e^{-jm\varphi} \quad (5)$$

从上式中可以看出旋转前后 Zernike 矩的模值并没有发生变化,只有相角产生了变化.利用这个性质,基于理想的数学模型,可以得到计算亚像素边缘坐标所需的参数。

图 2 所示为图像中理想阶跃边缘的模型.图中的圆为一单位圆,被阶跃边缘分割成两部分. h 为背景部分的灰度值, k 为边缘的阶跃高度, φ 是边缘与 x 坐标轴之间的夹角, l 为圆心与边缘的垂直距离。

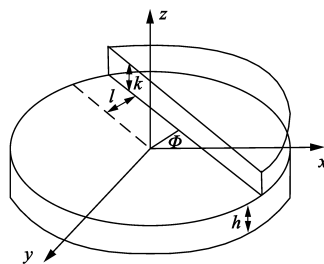


图2 理想阶跃边缘模型

将理想的阶跃边缘模型旋转 $-\varphi$ 角度,边缘将平行于 y 坐标轴,模型将满足以下条件

$$\iint_{x^2+y^2 \leq 1} f'(x, y) y dy dx = 0 \quad (6)$$

这里 $f'(x, y)$ 代表旋转后的边缘函数。

使用 Zernike 矩进行亚像素边缘检测时只需用到 Z_{00} 、 Z_{11} 、 Z_{20} 这三个不同阶次的 Zernike 矩.根据式(5)原始图像的 Zernike 矩与旋转后图像的 Zernike 矩存在着如下关系

$$Z'_{00} = Z_{00}; Z'_{11} = Z_{11} e^{j\varphi}; Z'_{20} = Z_{20} \quad (7)$$

对于旋转后的 1 阶 1 次 Zernike 矩 Z'_{11} 而言,由于旋转后的边缘平行于 y 坐标轴,图像关于 x 轴对称,则经过积分后 Z'_{11} 的虚部的值为零,即

$$\text{Im}[Z'_{11}] = \sin(\varphi) \text{Re}[Z_{11}] - \cos(\varphi) \text{Im}[Z_{11}] = 0 \quad (8)$$

式中 $\text{Im}[Z_{11}]$ 和 $\text{Re}[Z_{11}]$ 分别代表 Z_{11} 的虚部和实部.因此可以求出边缘与 x 坐标轴的夹角

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}[Z_{11}]}{\text{Re}[Z_{11}]} \right) \quad (9)$$

根据理想阶跃模型的原理图,旋转后各个阶次的

Zernike 矩可以由以下各式计算出

$$Z'_{00} = h\pi + \frac{k\pi}{2} - k \sin^{-1}(l) - kl \sqrt{1-l^2} \quad (10)$$

$$Z'_{11} = \frac{2k(1-l^2)^{\frac{3}{2}}}{3}; Z'_{20} = \frac{2kl(1-l^2)^{\frac{3}{2}}}{3}$$

由于 $Z'_{00} = Z_{00}$, $Z'_{11} = Z_{11} e^{j\varphi}$, $Z'_{20} = Z_{20}$, 进一步推导可以求出

$$l = \frac{Z'_{20}}{Z'_{11}}; k = \frac{3Z'_{11}}{2(1-l^2)^{\frac{3}{2}}}$$

$$h = \frac{Z_{00} - \frac{k\pi}{2} + k \sin^{-1}(l) + kl \sqrt{1-l^2}}{\pi} \quad (11)$$

这样,模型中的未知参数 φ 、 h 、 l 、 k 都已经求出,可以得到亚像素精度的边缘点坐标

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + l \begin{bmatrix} \cos(\varphi) \\ \sin(\varphi) \end{bmatrix} \quad (12)$$

从式(11)中可以看出,在未知参数的求解过程中需要确定 Z_{00} 、 Z_{11} 、 Z_{20} 这三个不同阶次 Zernike 矩的值. 由于数字图像是离散的,单位圆内的积分操作转变为模板与图像中对应像素间的卷积操作. 经前文的推导过程计算即可得到该像素点处的 4 个未知参数. 经典 Zernike 矩理论使用的是 5×5 尺寸模板,曲迎东^[4]等人的研究表明,大尺寸模板具有更高的定位精度. 本文采用 7×7 大小的模板,如图 3 所示. 经过计算,可以得到所需三个阶次 Zernike 矩的离散模板.

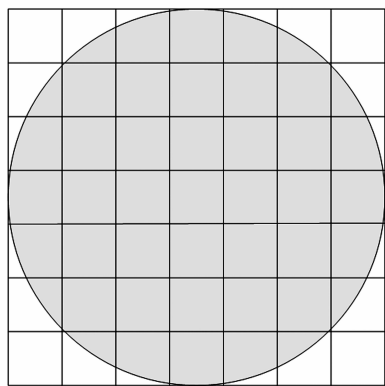


图3 7×7 大小模板

在实际的亚像素精度边缘点坐标的计算过程中,模板的大小会对单位圆造成成比例的缩放. 在本文所选用的 7×7 大小模板的作用下,亚像素精度边缘点坐标的计算公式改进为

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \frac{7}{2} l \begin{bmatrix} \cos(\varphi) \\ \sin(\varphi) \end{bmatrix} \quad (13)$$

3.2 边缘阈值选取

在实际的计算过程中, k 和 l 可以作为边缘界定的参数. 由于 l 代表的是单位圆圆心到边缘的距离,必须

满足边缘在圆心所在像素的范围之内, k 则是边缘的阶跃强度,取适当的值来分割图像. 只有同时满足 k 和 l 的取值条件,才可以界定这一像素点为边缘. 利用上文描述的算法,在 Matlab 平台下对算法进行实现.

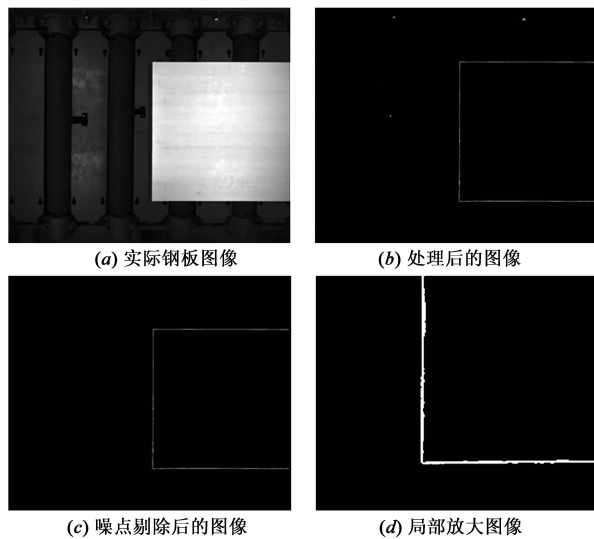


图4 现场实际采集的钢板图像

图 4(a) 为现场其中一部传感器采集到的钢板图像,对这张图像进行处理,结果如图 4(b) 所示. 可以看出钢板的边缘被清晰的提取了出来,由于 Zernike 矩良好的抗噪性能并没有产生太多的噪点,且这些少数的噪点也都是由辊道反光造成的,位置固定,可以作为背景剔除掉. 图 4(c) 为剔除噪点后的图像.

在钢板长度的实际测量中,我们真正需要获得的是钢板长度方向边缘的精确坐标. 通过局部放大图像图 4(d) 可以看出,传统的 Zernike 矩边缘检测算法存在着边缘定位较粗的问题,这一问题使得边缘的亚像素精度坐标难以获得,需对算法进行改进.

4 算法的改进

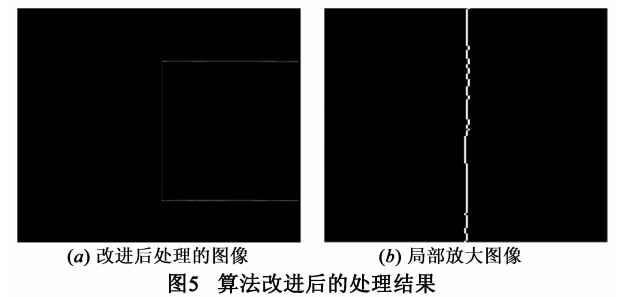
传统的 Zernike 矩边缘检测界定边缘点的方法依前文所述是在参数 l 满足要求的前提下通过对 k 取阈值分割得到的. 由于图像是在钢板运动过程中采集的,曝光时间使得钢板边缘并不是理想的阶跃边缘. 在灰度值过渡的斜坡部分,参数 k 的值均大于选定的阈值,分割后导致边缘较粗.

为了获得钢板长度方向上单像素宽度的边缘,提出以下方法进行改进. 以图 4 采集的图像为例,长度方向边缘出现在 485 行至 1680 行之间,以每一行为基本单位,依据下式进行分割.

$$k(x_t, y_t) = \begin{cases} 1, & k(x_t, y_t) = \max_{1 \leq x \leq 2448} k(x, y_t) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

$$485 \leq y_t \leq 1680$$

可以看出,每一行中 k 值最大的像素点取 1,其余像素点均取 0,如此分割,即可得到单像素宽度的长度方向边缘.处理结果如图 5 所示.



在获得单像素宽度的长度方向边缘后,利用式(13)即可计算出精确的亚像素边缘点坐标.

5 实验结果

经过对现场前后两部传感器同时采集的图像进行处理计算,在钢板长度方向边缘上每隔 90 个像素点取一次精确坐标,结果如表 1 所示.

表 1 长度方向边缘点坐标

头部传感器像素精度坐标	头部传感器亚像素精度坐标	尾部传感器像素精度坐标	尾部传感器亚像素精度坐标
(1251,485)	(1251.13,485.00)	(1286,485)	(1286.54,484.99)
(1250,575)	(1250.68,574.99)	(1286,575)	(1286.27,574.99)
(1250,665)	(1250.50,664.99)	(1286,665)	(1286.20,664.99)
(1250,755)	(1250.05,754.99)	(1286,755)	(1286.18,754.99)
(1250,845)	(1249.80,845.00)	(1286,845)	(1286.19,845.00)
(1249,935)	(1249.43,935.00)	(1286,935)	(1286.27,935.00)
(1249,1025)	(1249.24,1024.99)	(1286,1025)	(1286.39,1024.99)
(1249,1115)	(1248.85,1115.00)	(1287,1115)	(1286.77,1114.99)
(1249,1205)	(1248.90,1205.00)	(1287,1205)	(1286.94,1204.99)
(1248,1295)	(1247.89,1295.00)	(1287,1295)	(1287.06,1295.00)
(1247,1385)	(1247.44,1385.00)	(1287,1385)	(1287.28,1385.00)
(1247,1475)	(1246.98,1475.00)	(1287,1475)	(1287.35,1475.00)
(1246,1565)	(1246.36,1565.00)	(1288,1565)	(1287.66,1565.00)
(1246,1655)	(1245.94,1655.00)	(1288,1655)	(1287.84,1655.00)

在亚像素精度边缘坐标的基础上结合传感器标定理论^[12],再对两台传感器视场间隔进行补偿,经计算可得到整张钢板不同位置的长度.由于钢板的理论真值无法获得,实际比对中,采用通过多组人工测量的方式.各种测量长度如表 2 所示.

表 2 钢板长度

像素精度测量长度	亚像素精度测量长度	实际测量长度
8221mm	8220.43mm	8219mm
8220mm	8219.34mm	8219mm
8218mm	8218.56mm	8220mm
8219mm	8219.21mm	8220mm
8219mm	8219.94mm	8221mm
8220mm	8220.34mm	8221mm
8222mm	8221.67mm	8221mm
8223mm	8222.61mm	8222mm
8224mm	8223.23mm	8221mm
8222mm	8221.55mm	8221mm
8220mm	8220.81mm	8222mm
8220mm	8220.33mm	8221mm
8221mm	8220.47mm	8220mm
8221mm	8220.08mm	8219mm

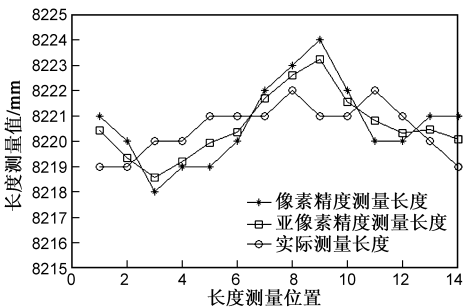


图6 钢板长度曲线

从图 6 中可以直观的看到利用 Zernike 矩亚像素边缘检测方法相对于像素级的边缘检测方法在检测结果上更加接近实际测量值,能够有效减小测量误差.

6 结论

传统的 Zernike 矩亚像素边缘检测只能对理想的阶跃边缘求出精确坐标,针对钢板尺寸在线测量系统的实际情况,在传统理论的基础上对阈值分割算法进行改进,能够解决这一问题,得到精确的亚像素精度坐标.经现场实际测量检验,利用这些亚像素精度坐标点计算出来的钢板长度更加接近实测值,可以在不增加硬件成本的情况下提高测量精度,已经成功应用.但是在 Zernike 矩亚像素边缘检测的具体过程中,对每一个像素点都计算了所有参数,造成了很多的冗余计算量,需要在以后的研究中予以改进.

参考文献

[1] Ziou D, Tabbone S. Edge detection techniques-an overview[J].

- Pattern Recognition & Image Analysis, 1998, 8(4): 537 – 559.
- [2] 陈青, 刘金平, 唐朝晖, 等. 基于分数阶微分的图像边缘细节检测与提取[J]. 电子学报, 2013, 41(10): 1873 – 1880.
Chen Q, Liu J, Tang Z, et al. Detection and extraction of image edge curves and detailed features using fractional differentiation [J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(10): 1873 – 1880. (in Chinese)
- [3] Rafael C, Richard E. Digital Image Processing (3rd Edition) [M]. Prentice Hall, 2007.
- [4] 曲迎东, 李荣德, 白彦华, 等. 高速的 9×9 尺寸模板 Zernike 矩边缘算子[J]. 光电子·激光, 2010, 21(11): 1683 – 1687.
QU Y, Li R, Bai Y, et al. A high-speed Zernike moments edge operator based on 9×9 masks [J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2010, 21(11): 1683 – 1687. (in Chinese)
- [5] 李哲涛, 李仁发, 谢井雄. 基于全向小波的图像边缘检测算法[J]. 电子学报, 2012, 40(12): 2451 – 2455.
Li Z, Li R, Xie J. An edge detection algorithm based on omnidirectional wavelet transform [J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(12): 2451 – 2455. (in Chinese)
- [6] 赵继印, 徐艳蕾, 焦玉斌. 基于顺序形态学的图像边缘检测快速算法的研究[J]. 电子学报, 2008, 36(11): 2195 – 2199.
Zhao J, Xu Y, Jiao Y. The fast arithmetic study of image edge detection based on the order morphology [J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(11): 2195 – 2199. (in Chinese)
- [7] Zhao B, Qi Y. Improved algorithm for sub-pixel edge detection based on Zernike moments [J]. Advanced Materials Research, 2012, 341: 763 – 767.
- [8] Kaur A, Singh C. Sub-pixel edge detection using pseudo Zernike moment [J]. International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition, 2011, 4(2): 107 – 118.
- [9] Ghosal S, Mehrotra R. Detection of composite edges [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1994, 3(1): 14 – 25.
- [10] 高世一, 赵明扬, 张雷, 等. 基于 Zernike 正交矩的图像亚像素边缘检测算法改进[J]. 自动化学报, 2008, 34(9): 1163 – 1168.
Gao S, Zhao M, Zhang L, et al. Improved algorithm about sub-pixel edge detection of image based on Zernike orthogonal moments [J]. Acta Automatica Sinica, 2008, 34(9): 1163 – 1168. (in Chinese).
- [11] Ghosal S, Mehrotra R. Orthogonal moment operators for sub-pixel edgedetection [J]. Pattern recognition, 1993, 26(2): 295 – 306.
- [12] Zhang Z. A flexible new technique for cameracalibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330 – 1334.

作者简介



李江昀(通信作者) 副教授, 男, 1977 年 1 月出生, 山西侯马人. 2006 年 4 月, 毕业于北京科技大学, 获得博士学位并留校任教. 早先从事冶金过程智能控制研究工作, 目前主要研究兴趣为机器视觉在冶金生产企业中的应用.

E-mail: jiangyunlee@gmail.com



王宇浩 男, 1987 年 9 月出生于北京市. 北京科技大学自动化学院博士研究生, 主要研究方向为计算机视觉、图像测量与模式识别.

E-mail: aspirewang@126.com