

基于机器视觉的大幅面陶瓷地砖尺寸测量研究

卢清华¹ 许重川² 王 华³ 张宪民² 范彦斌¹

(¹ 佛山科学技术学院机电系, 广东 佛山 528000; ² 华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640)
³ 东莞科视自动化科技有限公司, 广东 东莞 523000)

摘要 提出一种基于机器视觉的单相机大幅面陶瓷地砖尺寸高精度测量方法。设计一种由多个反射镜组成反射光路的光学系统。该光学系统采用单个相机采集陶瓷地砖 4 个角的图像, 而不是整幅图像, 避免了采用多个相机采集测量图像导致不同步的问题, 提高了测量精度。提出一种基于边界搜索拟合和动态补偿的瓷砖测量算法。在该算法中, 考虑实际生产中瓷砖的偏移和旋转, 利用采集的瓷砖 4 个角图像, 通过对图像进行边界搜索和测量尺寸动态补偿, 获取陶瓷地砖高精度的对角线和边长尺寸。设计的系统用于测量 600 mm×600 mm 及 800 mm×800 mm 瓷砖的对角线和边长尺寸时, 其标准差均小于 0.02 mm, 重复性精度接近 0.06 mm。实验结果表明, 该测量系统能够在高档陶瓷地砖生产企业得到广泛的应用。

关键词 测量; 高精度; 机器视觉; 陶瓷地砖

中图分类号 TP391 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0312004

Research on Dimension Measurement of Large Size Ceramic Floor Tiles Based on Machine Vision

Lu Qinghua¹ Xu Chongchuan² Wang Hua³ Zhang Xianming² Fan Yanbin¹

¹ Department of Mechatronics, Foshan University, Foshan, Guangdong 528000, China

² College of Mechanical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China

³ Dongguan CST Automation Science and Technology Co., Ltd., Dongguan, Guangdong 523000, China

Abstract A dimensional measurement method with high accuracy for large size ceramic floor tiles based on the machine vision using single camera is presented. An optical system is designed, whose reflective light path consists of multiple mirrors. The images of four corners of the ceramic floor tiles are acquired by the single camera rather than the whole image, thus the asynchronous problem caused by multiple cameras acquiring the measured images is solved. Then the accuracy of measurement is improved. An algorithm for the tiles measurement is proposed based on boundary searching fitting and dynamic compensation. In such an algorithm, considering shift and rotation of the tiles in practical production, the dimension of diagonals and sidelines with high accuracy can be obtained by using the images of the four corners, which boundary searching of the measured images and dynamic compensation of measured dimension is performed. The measured standard deviation is less than 0.02 mm, and the repeatability approaches 0.06 mm when measuring dimension of diagonals and sidelines of 600 mm×600 mm and 800 mm×800 mm tiles. The experimental results show that the measurement system can be widely used in ceramic floor tiles manufacturers with high quality.

Key words measurement; high accuracy; machine vision; ceramic floor tiles

OCIS codes 150.3045; 150.0155; 150.1488; 150.1135

收稿日期: 2012-10-15; **收到修改稿日期**: 2012-11-21

基金项目: 国家自然科学基金(51105077)、广东省自然科学基金(S2011010001218)、广东省教育厅科技创新项目(2012KJCX0103)、佛山市科技发展专项(2009011)和广东省精密装备与制造技术重点实验室开放基金资助课题。

作者简介: 卢清华(1978—), 男, 博士, 副教授, 主要从事光学精密测量及精密机械装备等方面的研究。

E-mail: qh.lu@mail.scut.edu.cn

1 引 言

据统计,2010年,我国陶瓷墙砖总产量达到了 $7.576 \times 10^9 \text{ cm}^2$ ^[1],总销售额达到了2500多亿元。随着人们收入和欣赏品位的提高,高端陶瓷地砖产品需求不断扩大,而这些高端瓷砖产品要求尺寸精准、平整度高。此外,高端瓷砖产品更注重无缝拼贴,在精度上的要求更加严格。目前,大多数厂家采用人工结合游标卡尺对瓷砖进行离线的接触式测量,其速度慢、效率低,影响产能,而且出错率高,容易出现检测质量不稳定等不确定因素。因此,研究一种速度快、精度高、在线的非接触式瓷砖检测方法对提高我国陶瓷地砖产品的质量和生产效率显得非常重要。

具有测量精度高、响应速度快、全场测试等特点的机器视觉方法^[2~5]在陶瓷地砖的几何尺寸测量^[6]、分类^[7]及缺陷检测^[8~10]等领域得到了广泛的应用。文献^[11]采用6个线阵CCD相机成对安装在瓷砖几个边的不同位置,设计了一种瓷砖几何尺寸在线检测系统。但是,该方法中的6个相机不能保证完全同步,测量精度较低,同时调整和标定困难,实用性较差。李亚标等^[12]采用两个CCD相机,设计了一种瓷砖尺寸在线检测系统,该方法同样存在相机采集不同步的问题。文献^[5,13,14]通过使用单个CCD相机拍摄陶瓷地砖整个幅面图像,设计了用于瓷砖尺寸在线检测的视觉系统。然而,由于相机的像素有限,拍摄整个瓷砖幅面得到的图像往往畸变严重,导致测量精度不高。意大利System公司等^[15]开发了基于机器视觉的在线检测系统,能够实现瓷砖尺寸、平整度、色彩及缺陷的检测,然而这些国外相关检测设备由于技术封锁或成本昂贵,国内企业很难获得合适的设备或者必须承担高昂的设备成本费用。

本文采用机器视觉方法,通过设计一套带有反射光路的光学系统,结合基于边界搜索拟合和动态补偿的瓷砖测量算法,提出一种单相机大幅面陶瓷器地砖高精度测量方法。该方法采用单相机取代传统的多相机采集瓷砖图像,可以消除多个相机采集图像不同步而导致的测量误差。

2 单相机瓷砖尺寸测量光学系统设计

2.1 光学系统设计

目前大部分陶瓷地砖检测系统都是采用2个或2个以上的相机对瓷砖进行尺寸测量或表面质量检

测。本文采用单个相机实现大幅面陶瓷地砖的尺寸测量,因此光学系统的设计是实现该方法的关键。

在设计的光学系统中,采用单个相机采集陶瓷地砖的4个角图像,实现其几何尺寸的测量,如图1所示。该光学系统由1个CCD相机、4个反射镜、1个棱锥状的四棱镜及4个背光源组成。在测量陶瓷地砖时,由4个对角反射镜和1个中心四棱反射镜组成8个反射面,其中对角反射镜具有一个有效的反射面,分别安装在陶瓷墙砖4个对角的正上方,与陶瓷墙砖的夹角为 45° ;中心反射棱镜由4个有效的反射面组成,这4个反射面与陶瓷墙砖成 45° 角且成锥形分布,形成1个棱锥体,它安装在陶瓷地砖中心位置的正上方,4个对角反射镜的反射面分别与中心四棱反射镜的4个反射面平行。在中心反射棱镜的正上方安装1个CCD相机,而在瓷砖4个对角的正下方分别安装1个背光源。通过背光源的照射,陶瓷地砖4个对角的图像通过对角反射镜反射到中心反射镜上,再通过中心反射镜直接反射到CCD相机,从而CCD相机只需拍摄面积为中心反射棱镜面积大小的视野范围,就可以直接捕捉到陶瓷地砖4个对角的图像信息。这种方法只需通过拍摄瓷砖很小的视野就可以计算其外形尺寸,从而保证了高精度的在线测量。

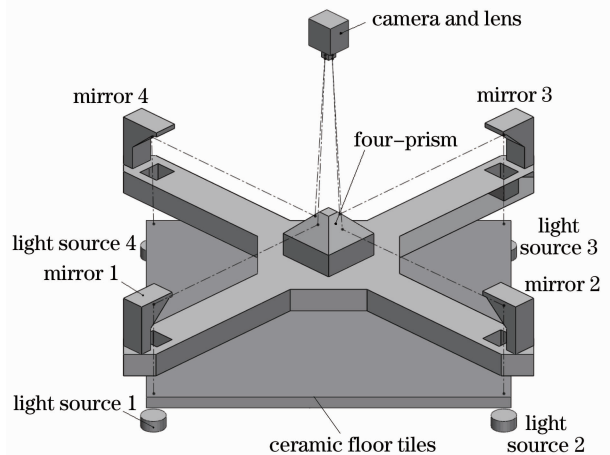


图1 光学系统结构

Fig.1 Structure of optical system

2.2 成像原理

成像原理如图2所示。在光源的照射下,瓷砖对角的图像信息通过反射镜1反射到反射镜2上,再通过反射镜2反射回相机,从而形成瓷砖的对角图像。其中反射镜1和反射镜2平行放置,且这两个反射镜与瓷砖平面的夹角为 45° 。图2中,CA为瓷砖和反射镜1之间的距离,AB为反射镜1与反射

镜 2 在水平方向上的距离, BD 为反射镜 2 与相机之间的距离。可以看出, 成像系统的工作距离为 CA 、 AB 以及 BD 的距离之和。

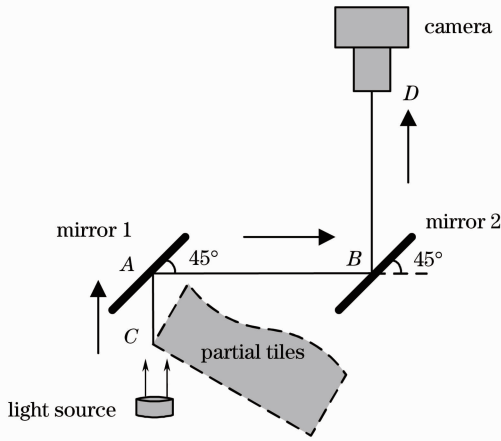


图 2 成像原理图

Fig. 2 Schematic diagram of imaging principle

在光源照射下, 相机通过 4 个反射镜拍摄到瓷砖的 4 个角图像。在瓷砖没有偏移和旋转的情况下, 成像效果如图 3 所示。假设瓷砖整体图像为正方形, 则阴影部分为其边角图像。

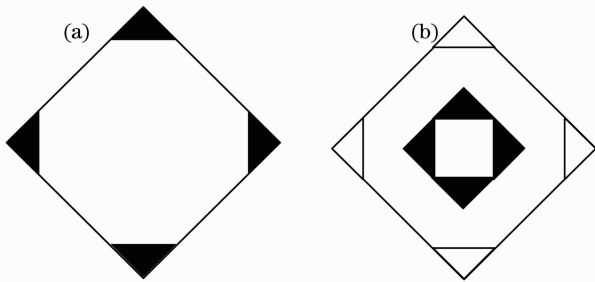


图 3 瓷砖成像效果图

Fig. 3 Imaging effect diagram of files

然而, 在实际生产过程中, 瓷砖不可避免地会发生偏移和旋转, 这时瓷砖的成像效果如图 4 和图 5 所示。从图 4 中可以看出, 在偏移的情况下, 图像的形状没有发生改变, 只是在视野中的位置发生了移动, 因此这种偏移对测量没有任何影响。从图 5 可

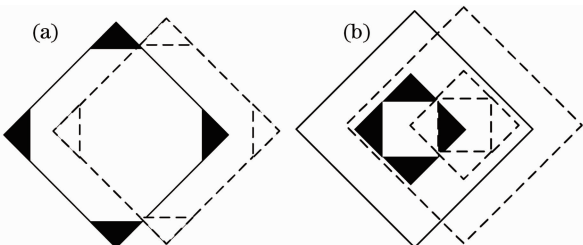


图 4 瓷砖偏移时的成像效果图

Fig. 4 Diagram of imaging effect when shifting tiles

以看出, 当瓷砖发生旋转后, 图像形状发生了改变, 导致其对角线和边线的长度发生变化。测量时需要根据瓷砖旋转的角度, 通过标定和设计测量算法对瓷砖的边长和对角线进行动态补偿。

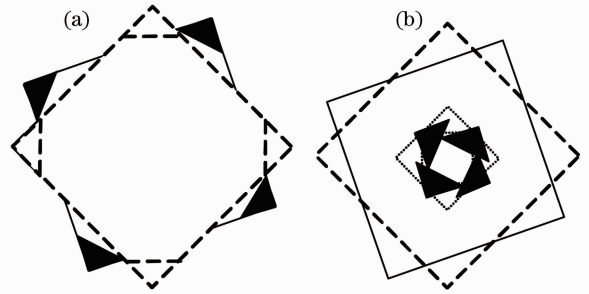


图 5 瓷砖旋转时的成像效果图

Fig. 5 Diagram of imaging effect when rotating tiles

3 基于动态补偿的瓷砖测量算法设计

在设计单相机瓷砖尺寸测量系统中, 只采集瓷砖的 4 个角图像, 因此, 需要首先通过标定, 对测量的瓷砖尺寸进行补偿才能获得其实际尺寸。如图 6 所示, 由于系统采集的只是瓷砖的 4 个角图像 $abcd$, 因此采用图像处理方法得到的只是边长 ab 或对角线 ac 的长度。实际瓷砖的边长为 AB , 对角线长度为 AC 。以对角线为例, 由图 6 可知, 对角线 AC 的实际长度为 Aa 的 2 倍和 ac 的长度之和, 即 $AC = 2Aa + ac$, 其中 $2Aa$ 称为对角线尺寸补偿量, ac 称为测量尺寸。对角线尺寸补偿量通过对测量系统进行标定确定, 而测量尺寸 ac 需要根据采集的瓷砖 4 个角图像, 通过设计测量算法得到。

由上述成像原理可知, 在瓷砖没有偏移和旋转时, 其四角图像为规则的四边形图像, 因而采用边界

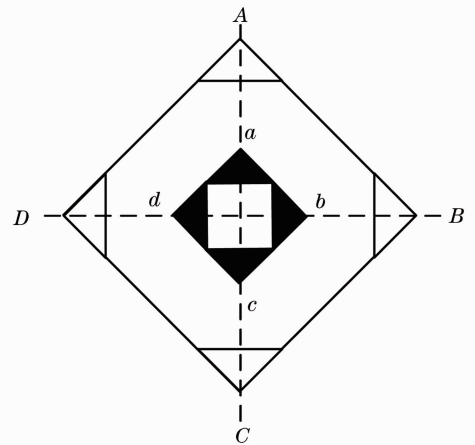


图 6 瓷砖实际尺寸计算示意图

Fig. 6 Schematic diagram of actual dimensional computation of tile

搜索拟合算法,结合采集的4个角图像,可以直接获取其测量尺寸。然而,在实际生产过程中,瓷砖往往会发生偏移和旋转。由前述成像原理分析可知,瓷砖在发生偏移而没有发生旋转的情况下,图像的形状没有发生改变,因此对测量结果没有影响。但是瓷砖发生旋转后,其采集的4个角图像形状发生了改变,对角线和边长发生了变化,因此需要设计考虑旋转角度的新算法,该算法原理如图7所示。

图7中假设对角线尺寸补偿量为 D_0 ,瓷砖的偏转角为 α ,即 $\angle AOA' = \alpha$ 。在直角三角形 $A'Ma'$ 中

$$\overline{A'M} = \frac{1}{2}D_0 \cos \alpha, \quad (1)$$

在三角形 $a'OM$ 中

$$\overline{OM} = \sqrt{d_{\text{image}}^2 - \frac{1}{4}D_0^2 \sin^2 \alpha}, \quad (2)$$

式中 d_{image} 为 $a'O$ 的长度,即瓷砖旋转后图像顶点与中点的距离,通过采集的瓷砖4个角图像获得。瓷砖偏转后其实际的对角线长度 $\overline{A'C'}$ 为

$$\overline{A'C'} = 2 \overline{A'O} = 2(\overline{OM} + \overline{A'M}), \quad (3)$$

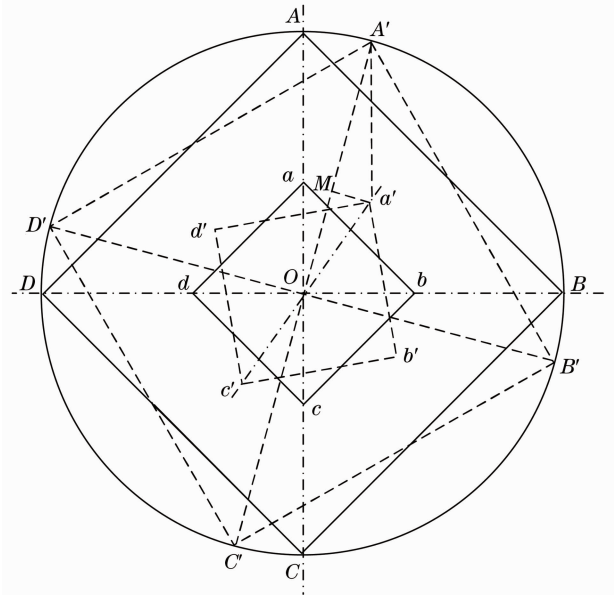


图7 瓷砖偏转时尺寸测量原理
Fig. 7 Dimensional measurement principle when tiles shifting

将(1)式和(2)式代入(3)式得

$$\overline{A'C'} = 2 \left[\sqrt{d_{\text{image}}^2 - \frac{1}{4}D_0^2 \sin^2 \alpha} - \frac{1}{2}D_0(1 - \cos \alpha) \right] + D_0. \quad (4)$$

根据对称性,另一条对角线同样可得出,在此不予赘述。类似地,瓷砖旋转后其实际的一条边长 L_1 为

$$L_1 = L_{01} + \sqrt{2} \left[\frac{L_{1\text{image}} \sqrt{k^2 + 1} - \frac{\sqrt{2}}{2}(L_{01} + L_{02})(k - 1)}{\sin \alpha - \cos \alpha} - \frac{\sqrt{2}}{2}(L_{01} + L_{02}) \right], \quad (5)$$

式中 $k = \frac{\sin \alpha - \cos \alpha}{\sin \alpha + \cos \alpha}$, $L_{1\text{image}}$ 为通过采集的瓷砖4个角图像获得的边长尺寸,即图7中 $a'b'$, L_{01} 和 L_{02} 分别为两边长的尺寸补偿量。(5)式化简后可得

$$L_1 = L_{1\text{image}} + L_{01} \cos \alpha - (1 - \cos \alpha)L_{02}, \quad (6)$$

同理可得另外一条边长为

$$L_2 = L_{2\text{image}} + L_{02} \cos \alpha - (1 - \cos \alpha)L_{01}, \quad (7)$$

式中 $L_{2\text{image}}$ 为通过采集的瓷砖4个角图像获得的边长测量尺寸,即图7中 $b'c'$ 。

4 实验结果与分析

4.1 基于机器视觉的单相机瓷砖尺寸测量系统

基于机器视觉的陶瓷地砖尺寸测量系统由1个CCD相机、镜头、4个背光源、反射镜以及图像采集和存储系统等组成,系统硬件平台如图8所示。

在图8所示的瓷砖尺寸测量系统中,4个背光源为东莞科视自动化科技有限公司的非标准光源,

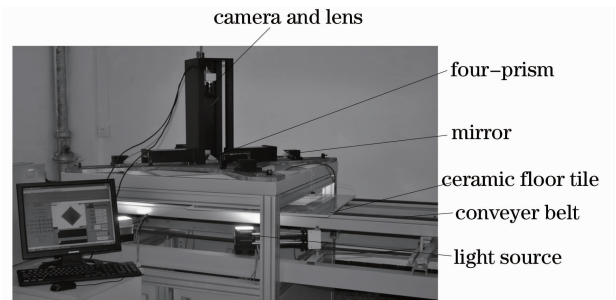


图8 瓷砖尺寸测量系统硬件平台
Fig. 8 Hardware platform of tiles dimensional measurement system

该光源专为陶瓷地砖尺寸测量设计。镜头为日本VST公司型号为SV-7527V的定焦镜头,其焦距为75 mm。相机为日本SENTECH公司型号为STC-TB202USB-ASH的相机,该相机是一种具有两百万像素分辨率、单色、可选软硬件触发及多扫描模式的CCD相机。此外,该相机通过USB接口与计算

机相连,可以实现图像的自动存储。该系统在测量不同尺寸类型的瓷砖时,只需要调整相机和4个反射镜的位置,就可以方便地进行测量。

4.2 系统标定

在高精度的机器视觉测量系统中,标定是保证其精度和稳定性的基础和前提^[16]。系统的工作距离被确定之后,为了利用瓷砖图像占有的像素跨距计算瓷砖的实际尺寸,需要对系统进行尺寸标定。本文采用精密标定板对系统进行标定。为了提高系统的标定精度,取10次标定的平均值为测量系统的标定结果值,其标定值为0.04335 mm/pixel。

此外,需要通过标定确定瓷砖测量算法中尺寸

的补偿量。根据设计的测量算法,瓷砖的实际尺寸为测量尺寸和尺寸补偿量之和。对于测量尺寸,由采集的瓷砖4个角图像通过测量算法确定,而尺寸补偿量需要通过标定获得。为了减少瓷砖表面凹凸不平导致光线反射发生变化而对测量结果的影响,本系统直接采用瓷砖本身而不是标准标定板来确定尺寸补偿量。而且,为了克服瓷砖表面颜色和形状等因素对测量结果的影响,在测量每一类型瓷砖前,重新对系统进行标定以确定其尺寸补偿量。在本系统中,通过标定得到的各类瓷砖尺寸补偿量如表1所示。

表1 瓷砖尺寸补偿量(单位:mm)

Table 1 Dimensional compensation of tiles (unit: mm)

Tile type	Compensation of diagonal 1	Compensation of diagonal 2	Compensation of sideline 1	Compensation of sideline 2
600×600	802.90	803.02	567.28	567.62
800×800	1090.64	1090.88	771.36	770.88

4.3 结果与分析

实验时,为了避免不同瓷砖表面光线反射情况的不同而影响尺寸测量结果,需要设置图像采集系统的参数。经多次调试,将采集系统CCD相机的增益设为60,曝光时间设为40 ms时,采集的瓷砖图像效果较好。此外,实验中采用硬件触发方式,实现瓷砖尺寸的动态测量。测量瓷砖尺寸时,首先采集待测瓷砖的4个角图像,然后通过设计的测量算法对其进行分析得出测量结果。图9(a)为待测瓷砖的原始图像,图9(b)为瓷砖无偏移和旋转时采集的四角图像,图9(c)为瓷砖发生偏移时采集的四角图像,图9(d)瓷砖发生旋转时采集的四角图像。

对于陶瓷地砖而言,最重要的参数是边长和对角线尺寸^[12]。实验时,采用本系统对两种不同瓷砖的相互垂直的两条边线和两条对角线尺寸进行测量。此外,在相同系统参数设置和环境条件下,利用该系统对同一瓷砖进行10次测量,然后求其标准差。表2为采用本系统测量两种不同品牌600 mm×600 mm瓷砖时对角线和边长尺寸的标准差。从表2可以看出,设计的单相机瓷砖尺寸测量系统用于测量600 mm×600 mm瓷砖对角线尺寸时,其标准差的最大值小于0.016 mm。同时,该系统在测量600 mm×600 mm瓷砖边长尺寸时,其标准差的最大值接近于0.013 mm。这表明设计的瓷砖尺寸测量系统完全能够满足目前600 mm×600 mm高档陶瓷地砖生产中尺寸测量的需要。

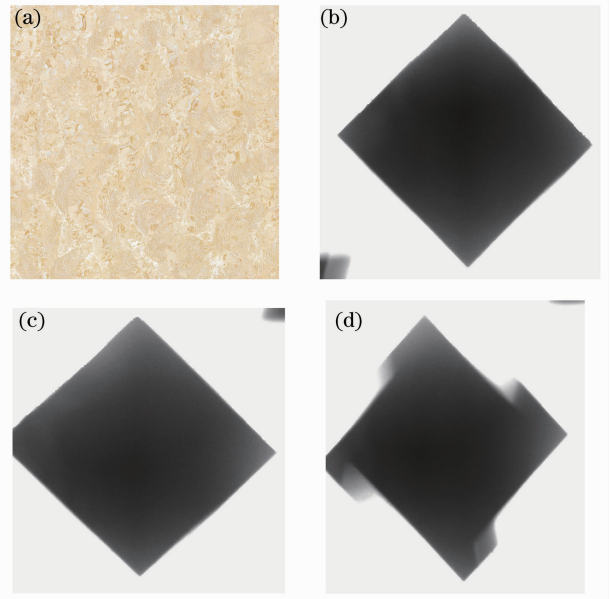


图9 瓷砖图像。(a)瓷砖原始图像;(b)瓷砖的四角图像;(c)偏移时的四角图像;(d)旋转时的四角图像

Fig.9 Tile images. (a) Original image; (b) four corner image; (c) four corner image when shifting tiles; (d) four corner image when rotating tiles

类似地,调整相机和4个反射镜的位置,在相同测量系统参数设置和环境条件下,采用设计的系统测量了两种不同品牌800 mm×800 mm瓷砖的对角线和边长尺寸,其标准差如表3所示。从表3可以看出,该系统用于测量800 mm×800 mm瓷砖对角线和边长尺寸时,其标准差的最大值均接近于

0.017 mm。这表明设计的系统同样能够满足目前800 mm×800 mm 高档陶瓷地砖生产中尺寸测量的需要。

表 2 600 mm×600 mm 瓷砖尺寸标准差(单位:mm)

Table 2 Standard deviations of 600 mm×600 mm tiles dimensions (unit: mm)

Tile type	Diagonal 1	Diagonal 2	Sideline 1	Sideline 2
Tile 1	0.0120	0.0092	0.0120	0.0130
Tile 2	0.0130	0.0152	0.0072	0.0100

表 3 800 mm×800 mm 瓷砖尺寸标准差(单位:mm)

Table 3 Standard deviations of 800 mm×800 mm tiles dimensions (unit: mm)

Tile type	Diagonal 1	Diagonal 2	Sideline 1	Sideline 2
Tile 1	0.0168	0.0140	0.0100	0.0170
Tile 2	0.0144	0.0136	0.0156	0.0140

图 10 和图 11 给出的是采用设计的测量系统,测量两种 600 mm×600 mm 瓷砖对角线和边长尺寸时的重复性精度。从图 10 可以看出,该系统在相同条件下多次测量同一 600 mm×600 mm 瓷砖时,其对角线尺寸的最大值和最小值的差值接近 0.04 mm,这意味着该系统用于测量 600 mm×600 mm 瓷砖对角线尺寸的重复性精度接近 0.04 mm。类似地,图 11 表明该系统在相同条件下多次测量同一 600 mm×600 mm 瓷砖时,其边长尺寸的重复性精度接近 0.05 mm。相对于目前存在的基于机器视觉的陶瓷地砖尺寸测量系统,本文设计的系统具有更高的重复性精度,完全可以满足高档瓷砖尺寸测量的要求。

图 12 和图 13 为采用设计的测量系统测量两种 800 mm×800 mm 瓷砖对角线和边长尺寸时的重复

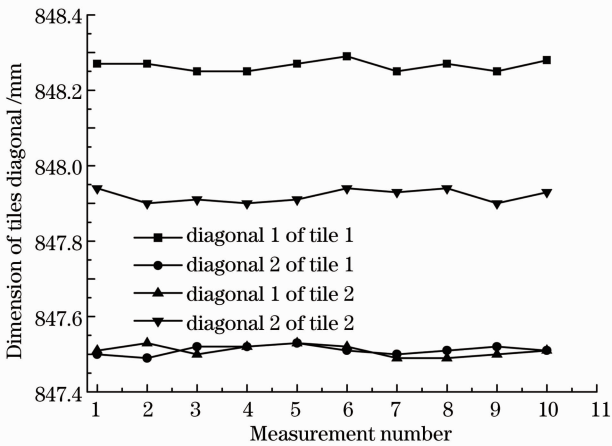


图 10 600 mm×600 mm 瓷砖对角线测量的重复性
Fig. 10 Repeatability of measuring 600 mm×600 mm tiles diagonals

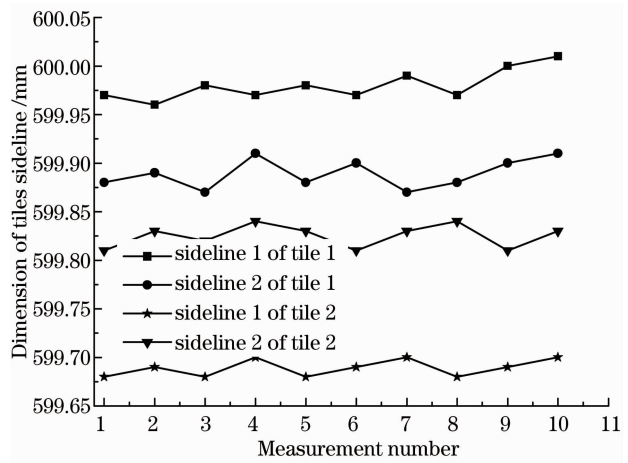


图 11 600 mm×600 mm 瓷砖边线测量的重复性
Fig. 11 Repeatability of measuring 600 mm×600 mm tiles sidelines

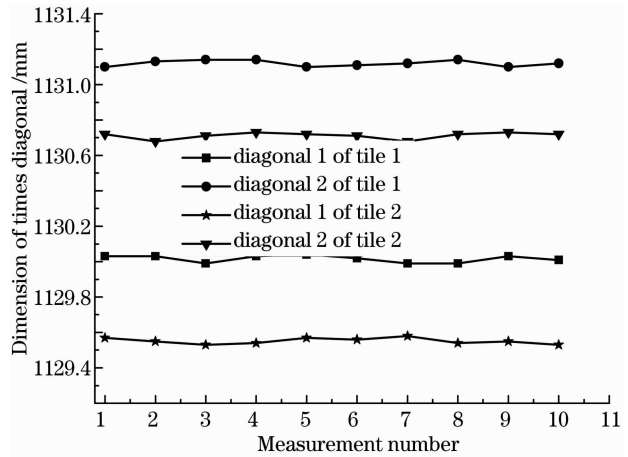


图 12 800 mm×800 mm 瓷砖对角线测量的重复性
Fig. 12 Repeatability of measuring 800 mm×800 mm tiles diagonals

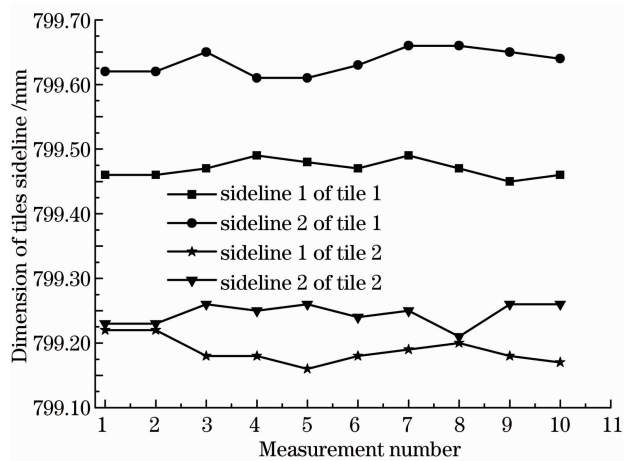


图 13 800 mm×800 mm 瓷砖边线测量的重复性
Fig. 13 Repeatability of measuring 800 mm×800 mm tiles sidelines

性精度。从图 12 和图 13 可知,该系统在相同条件测量 800 mm×800 mm 瓷砖对角线和边长尺寸时的重复性精度分别为 0.05 mm 和 0.06 mm。结合图 10 和图 11 可以看出,该系统用于测量 800 mm×800 mm 瓷砖时对角线和边长尺寸的重复性精度比测量 600 mm×600 mm 瓷砖时稍大,造成这种精度降低的可能原因是:系统在测量不同规格瓷砖尺寸时,需要调整相机的位置即光学系统的工作距离,而该位置可能不是用于测量 800 mm×800 mm 瓷砖的相机最佳位置。在实际测量中,一般瓷砖厂生产不同类型的瓷砖由不同的生产线组成,所以不会产生这种误差。测量时,设计的单相机陶瓷地砖尺寸测量系统在采集瓷砖图像时不需要瓷砖在生产线上停止运行,而是在瓷砖运动过程中通过硬件触发进行动态采集,而且算法处理的图像只是瓷砖 4 个角的图像,因此其测量速度高于目前存在的大多数基于机器视觉的陶瓷地砖尺寸测量系统。

5 结 论

1) 提出了一种基于机器视觉的陶瓷地砖高精度尺寸测量方法。在该方法中,采用单个相机,设计了一种由带有反射光路的光学系统,实现了单相机大幅面陶瓷地砖的尺寸测量。

2) 设计了一种基于边界搜索拟合及动态补偿的瓷砖尺寸测量算法。结合设计的光学系统采集陶瓷地砖 4 个角图像,采用该算法对瓷砖图像边界搜索拟合并对测量尺寸进行动态补偿,获取陶瓷地砖的对角线和边长的尺寸。

3) 实验结果表明,设计的基于机器视觉的单相机大幅面陶瓷地砖尺寸测量系统在测量 600 mm×600 mm 及 800 mm×800 mm 瓷砖对角线和边长尺寸时,测量的标准差均小于 0.02 mm,重复性精度接近 0.06 mm。该系统稳定性好、成本低,能够在高档陶瓷地砖生产企业得到广泛应用。

参 考 文 献

- 1 Yin Hong. Report of Production, Customer and Development for the World Ceramic Floor Tiles in 2010 [EB/OL]. [2012-02-28]. <http://www.chinachina.net/Info-Center/ArticleShow.asp?ArticleID=30195>
- 尹虹. 2010 年世界陶瓷砖生产消费发展报告 [EB/OL]. [2012-02-28]. <http://www.chinachina.net/Info-Center/ArticleShow.asp?ArticleID=30195>
- 2 Lu Qinghua, Zhang Xianming, Fan Yanbin. Robust multiscale method for in-plane micro-motion measurement based on computer microvision [J]. *Chinese J. Mechanical Engineering*, 2009, **45**(2): 164~169

- 卢清华, 张宪民, 范彦斌. 基于计算机微视觉的鲁棒多尺度平面微运动测量[J]. *机械工程学报*, 2009, **45**(2): 164~169
- 3 Yuan Jiangtao, Yang Li, Wang Xiaochuan *et al.*. Measurement and analysis of water mist droplet size based on machine vision [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2842~2847
- 袁江涛, 杨立, 王小川等. 基于机器视觉的细水雾液滴尺寸测量与分析[J]. *光学学报*, 2009, **29**(10): 2842~2847
- 4 Zhang Xuping, Wang Jiaqi, Zhang Yixin *et al.*. Large-scale three-dimensional stereo vision geometric measurement system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0812003
- 张旭苹, 汪家其, 张益昕等. 大尺度三维几何尺寸立体视觉测量系统实现[J]. *光学学报*, 2011, **31**(8): 0812003
- 5 Xiao Yongliang, Su Xianyu, Chen Wenjing. Fringe inverse videogrammetry based on global pose estimation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(8): 0808003
- 肖永亮, 苏显渝, 陈文静. 基于全局位姿评估的条纹反向视觉测量[J]. *中国激光*, 2011, **38**(8): 0808003
- 6 Yan Chao. Research on Detection System of Geometry Size of Tile Based on Digital Image [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2010
- 闫超. 基于数字图像的瓷砖几何尺寸实时检测系统设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2010
- 7 Li Shilong, Chen Yao. Research on intelligent classification system of ceramic tiles based on machine vision [J]. *Appl. Mechanics and Materials*, 2012, **101-102**: 648~651
- 8 S. Joaquim, J. F. Manuel, S. Cristina *et al.*. Computer vision techniques applied to the quality control of ceramic plates [C]. Gippsland: IEEE International Conference on Industrial Technology, 2009. 1~6
- 9 G. Ehsan, P. Ahmed, Y. Leila *et al.*. Ceramic tile border defect detection algorithms in automated visual inspection system [J]. *J. American Science*, 2011, **7**(6): 542~550
- 10 S. N. Farzaneh, P. Hossein. Corner defect detection based on dot product in ceramic tile images [C]. IEEE 7th International Colloquium on Signal Processing and Its Applications, 2011. 293~297
- 11 Zhou Yunfeng. Study on Ceramic Tile Geometric Dimension Online Inspection System [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005
- 周云锋. 陶瓷墙地砖几何尺寸在线检测系统研制[D]. 杭州: 浙江大学, 2005
- 12 Li Yabiao, Wang Baoguang, Jiang Xi. Research on online measuring system of ceramic tile size based on linear array CCD [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2010, **29**(1): 27~29
- 李亚标, 王宝光, 姜希. 基于线阵 CCD 的瓷砖尺寸在线检测系统的研究[J]. *传感器与微系统*, 2010, **29**(1): 27~29
- 13 Zhang Shuai, Deng Wenyi, Liu Lishuang. A vision system for online dimension measurement of ceramic tile [J]. *J. Beijing Institute of Machinery*, 2008, **23**(4): 20~23
- 张帅, 邓文怡, 刘力双. 一种基于视觉的瓷砖尺寸在线检测系统[J]. *北京机械工业学院学报*, 2008, **23**(4): 20~23
- 14 Li Qingli, Wang Yongqiang, Hao Tianlu. Study on measurement of geometric dimensions of ceramic tile by machine vision [J]. *J. Ceramics*, 2009, **30**(4): 508~510
- 李庆利, 王永强, 郝天鹿. 陶瓷砖长、宽尺寸视觉检测系统研究[J]. *陶瓷学报*, 2009, **30**(4): 508~510
- 15 System Ceramics. Liner 2000 [OL]. [2013-01-23]. <http://www.system-ceramics.com/prodotti/controllo-qualit%C3%AO/liner-2000>
- 16 Yang Bowen, Zhang Liyan, Ye Nan *et al.*. Camera calibration technique of wide-area vision measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(9): 0915001
- 杨博文, 张丽艳, 叶南等. 面向大视场视觉测量的摄像机标定技术[J]. *光学学报*, 2012, **32**(9): 0915001