

基于变步长采样的产品表面缺陷检测研究

徐青 韩跃平 杨志刚

(中北大学信息与通信工程学院, 山西 太原 030051)

摘要 为了实现复杂产品结构质量的准确快速检测,对于产品表面有多种结构体及空间尺寸的待检区域,采用变步长采样机制快速获取待测产品的周向方位图像序列,实现在有限方位下利用不完全数据对多个待识别区域的快速检测。首先采用垂直投影法确定各待检区域的旋转步长,为保证标准库中信息的完整性选一最小步长作为合格品的采样步长。其次采用尺度不变特征变换(SIFT)算法与折半查找法确定随机摆放的待检产品在标准库中的最优位置信息。最后通过相关度计算判别各区域有无缺陷。实验表明在保证检测准确率的前提下,采用变步长机制比固定步长检测平均可节省 4.14 s。

关键词 测量;缺陷检测;变步长采样;投影法;尺度不变特征变换算法;折半查找法

中图分类号 TP391.41 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.091203

Research on Variable Step-Size Sampling in the Defect Detection of Product Surface

Xu Qing Han Yueping Yang Zhigang

(School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China)

Abstract In order to achieve the detection of the structural quality for complicated products accurately and rapidly, we adopt variable step-size sampling mechanism to quickly obtain the circumferential range image sequence for the product that has a variety of structural and spatial dimensional areas to be tested on the surface. With such an image sequence, rapid detection of multiple areas to be identified can be realized in the limited orientation by using incomplete data. Firstly, projection method is used to determine the rotational step and a minimum step size is selected as the qualified product sampling step in order to ensure the integrity of the information in the standard library. Secondly, the scale invariant feature transform (SIFT) algorithm and binary search are selected to find the optimal location information of product in the standard image library. Finally, the correlation degree is calculated to discriminate defects in some areas. The experimental result shows that the variable step-size method can save an average detection time of 4.14 s in comparison with the traditional fixed-step detection in the premise of ensuring the accuracy of detection.

Key words measurement; defect detection; variable step-size sampling; projection method; scale invariant feature transform algorithm; binary search method

OCIS codes 120.4630; 150.1835; 150.3040; 100.2000; 100.3008

1 引言

随着人们对产品质量要求的提高,传统的人工随机抽样离线检测由于检测时间长,产品缺陷得不到及时

收稿日期: 2013-04-14; 收到修改稿日期: 2013-05-17; 网络出版日期: 2013-08-20

基金项目: 国家自然科学基金(61171178,61171179)、山西省自然科学基金(2012011010-3)、2012年山西省高等学校优秀青年学术带头人支持计划

作者简介: 徐青(1989—),女,硕士研究生,主要从事 X 射线无损检测与图像处理技术等方面的研究。

E-mail: sizhuqingsci@163.com

导师简介: 韩跃平(1974—),男,博士,副教授,主要从事 X 射线无损检测、图像处理与模式识别等方面的研究。

E-mail: hanyueping@nuc.edu.cn

纠正,造成材料浪费、生产效率降低,不能得到令人满意的检测结果。在这种情况下,急需一种快速的缺陷检测系统^[1]。

近年来,红外技术、CCD技术和计算机技术都有了飞速地发展,基于激光扫描、光谱图像、红外成像和超声波扫描的机器视觉技术因其成本低、无损伤、准确、快速、永不疲劳等优点在缺陷检测领域也得到了越来越广泛的应用^[2-6],包括印刷品检测、玻璃瓶检测、金属或皮革表面及材料的缺陷检测、管道检测等领域。例如在印刷品质量检测领域,利用在线/离线的视觉系统发现印刷过程中的质量问题,同时在线设备将检测结果反馈给可编程逻辑控制器,进行在线调节提高印刷品质量和效率。在玻璃检测中,可检测产品外形尺寸(高度、直径等)和内部缺陷(裂纹、气泡等)。

国外在产品自动检测领域的研究较早,如美国的 NI、Cognex、PROIMAGE 公司,瑞士的 BOBST 公司,德国的 VMT 公司,加拿大的 Hexsight 公司,日本的 DAC、TOKIMEC、Keyence 公司等,都已能提供产品表面缺陷视觉在线检测系统的产品和方案,并且获得了较好的应用与推广。国内视觉检测技术的研究起步较晚,但随着对产品质量检测要求的提高,自动检测技术在国内也有了较大的发展,如北京凌云光视数字图像技术有限公司研发的印刷品表面质量分析检测仪、大恒图像技术有限公司的玻璃瓶质量在线检测系统都已用于实际检测中^[7]。

然而在上述应用中检测的实时性仍然是行业内未能很好解决的难题,其主要原因是产品的检测系统大多采用了针对最小待识别结构目标的固定旋转步长,造成了庞大的数据量。而变步长的自适应采样机制在保证有效信息完整获取的情况下,能利用有限方位下不完全数据达到对结构体的快速识别,最终可解决在线识别的实时性问题。因此,对基于变步长机制的研究是十分重要和必要的。本文首先通过投影法确定各待检区域的旋转步长,并按相应步长在有限方位下获取待测产品图像序列。为了保证标准库中信息的完整性,选一最小步长作为合格品采样步长,获取合格品全周向图像序列。其次对合格品与待检品采用尺度不变特征变换(SIFT)算法匹配,根据匹配的点数结合折半查找法确定随机摆放产品在标准库中的最优位置信息,最后通过相关度计算判别各区域有无缺陷。

2 检测的总体流程

自动识别技术是由计算机代替或模拟人眼判读的视觉检测技术,其系统框图如图 1 所示^[8]。

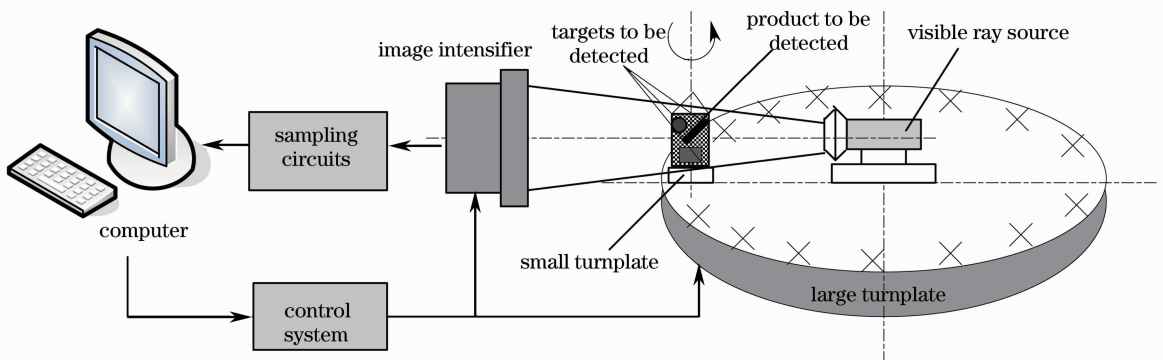


图 1 视觉检测原理框图

Fig. 1 Schematic of vision inspection system

常见的产品缺陷可分为内部装配缺陷与外部表面缺陷,这两种缺陷信息的获取是通过不同成像系统得到的,比如内部缺陷检测通常用数字 X 射线成像系统,而外部缺陷检测则用相机通过可见光即可获取。但在缺陷检测时所采用的检测算法对不同成像系统所得的图像具有通用性。为使所选对象具有代表性且更好地验证算法效果,用测试分辨率的具有代表性的每毫米黑白线对数来验证。由图 1 所示的检测原理知,检测对象为具有轴对称结构的产品且有如图 2(a)所示的多个待识别目标[即使所检产品不对称也可设其绕某一轴线旋转,如图 2(b)所示],具有代表性的圆柱表面不同分辨率的黑白条纹图如图 2(c)所示,实验具体过程如下。

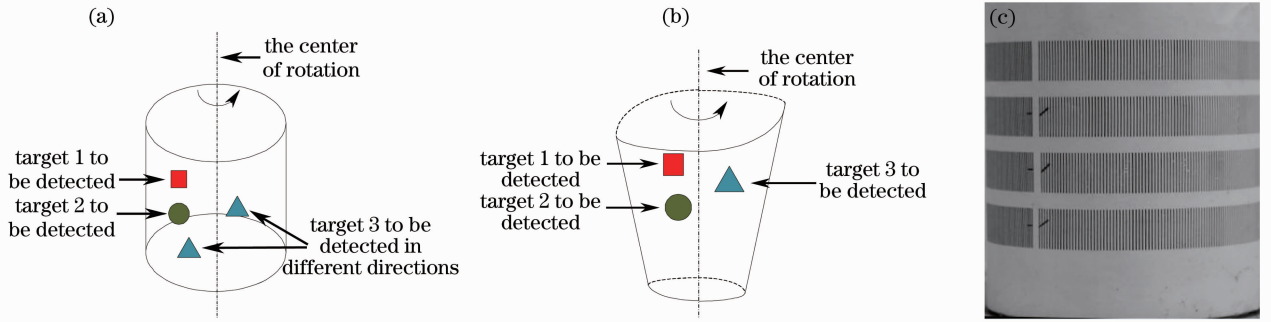


图2 (a)轴对称结构产品；(b)非对称结构产品；(c)表面有不同分辨率条纹的圆柱产品

Fig. 2 (a) Axisymmetric structural product; (b) non-symmetric structural product; (c) the surface of cylindrical product with stripes of different resolutions

1) 对于不同待检区域中不同间距的条纹,采用垂直投影法确定相应的旋转角度。为提高检测的速度,对被检测产品在保证有效信息完整的情况下在各区域采用变步长采样机制采集其不完全数据。为了保证标准库中信息的完整性,在上述各种角度中选一最小角度作为标准产品的旋转步长,在 $[0, 2\pi)$ 全周向方位区间内依次获取合格品在各个方位下的图像序列 X_1, X_2, \dots, X_N 。

2) 对随机摆放的待检产品图像与合格品图像采用 SIFT 算法提取相同特征进行匹配,根据匹配点数结合折半查找法确定待检产品在标准库中的最优方位信息。

3) 根据先验知识,将待检产品转到待检区域条纹开始出现的位置,采用相应的步长依次与标准库中相同方位下的图像进行匹配,如果相似度小于某一阈值,则判别该区域存在缺陷,否则继续匹配,直到所有条纹检测完为止。

3 算法介绍

3.1 基于变步长采样机制的图像获取

产品检测的两个指标为精度(准确率)和速度。产品的检测系统大多采用了针对最小待识别结构目标的固定旋转步长,即以某一轴线为中心作周向 360° 自旋转,依次获取合格产品与被检产品在各个周向方位下的序列图像,然后完成匹配识别^[9]。这样虽然可以提高检测的准确率,但却以增加识别时间为代价,因而有可能难以满足在线识别的实时性。而变步长的引入去除了信息量间的冗余,减少了参与匹配比较的方位图像个数,在保证有效信息完整获取的情况下利用较少方位的图像达到对产品的快速检测,可以在不影响识别准确率的同时提高速度。

由于产品表面不同部位有不同尺度的缺陷,因此采用变步长机制对不同尺寸的待检区域旋转不同角度与标准库中对应位置的图像进行匹配识别。在各个待检区域条纹间距确定的情况下,本文采用垂直投影法确定相应的旋转步长,该方法本质上是一种统计方法^[10]。假设所获取的整体视场图像大小为 $A \times B$,目标图像为 $a \times b$,用鼠标在视场中选择一个略大于目标图像的定位区域 $K \times L$,并记下其左上角 $P_1(x_1, y_1)$ 与右下角 $P_2(x_2, y_2)$ 的位置坐标。垂直投影就是将一列所有像素点的灰度值累加求和:

$$V(x) = \sum_{y=y_1}^{y_2} I(x, y), \quad x_1 \leq x < x_2, \quad (1)$$

式中 (x, y) 表示像素所处的位置, $I(x, y)$ 表示该像素点的灰度值。通过分析投影图中相邻冲击波谷的位置来确定相应的旋转角度。

在图像采集阶段,首先采用上述投影法确定各待检区域的旋转步长。为提高检测的速度,对被检测产品采用变步长采样机制获取其不完全数据。为了保证标准库中信息的完整性,任取一符合公差要求的合格产品作为标准样本,选一最小旋转步长作为周向空间的采样步长,在检测周期 2π 范围内依次获取合格产品的 M 帧序列图像 X_1, X_2, \dots, X_M 。在对合格产品的检测过程中,假定在任一随机周向方位获取一帧图像 ξ ,均可在上述 M 个标准样本图像序列中以相似度大于等于 ρ_{TH} 找到最优解作为识别原型,且服从均值为 $1/M$ 的均

匀分布。对大量的合格产品进行全方位检测,在成像环境参数等物理条件相同的前提下,任取一件合格产品在第 k 时刻观测到的图像记为 $X(k)$,则所有的观测结果构成一各态历经的平稳随机序列^[9]。对任一合格产品在任一一周向方位下的一次检测识别过程,均可认为是获取的被检测产品在该方位下的图像与样本中的 M 幅图像逐个匹配比较的过程。因此,采用变步长机制可以实现在单一或有限几个方位下利用不完全数据对产品的全检测。

3.2 待配图最优位置的确定

在采用变步长机制获取相应的图像信息后,要实现对未知产品在随机周向方位下所成图像的检测,首先要寻找其在合格产品图像库中的最优方位信息。寻找最优解位置实质是图像的匹配过程,常见的多视角产品匹配方法包括 MSER (Maximally stable extremal region)^[11]、Harris-affine^[12]、Hessian-based affine^[13]、Edge-based regions^[14]、ASIFT 算法^[15]和 SIFT 算法^[16]。在上述算法中,SIFT 算法^[16]不仅完美地实现了尺度空间理论,而且也是一种稳健性很高的特征描述符,因此它是一种被广泛使用的特征提取算法。

在获取合格品全周向图像序列及随机摆放的待检产品图像后,对上述图像采用 SIFT 算法提取相同特征匹配最终根据匹配数目确定其位置。该过程主要包括以下步骤:首先生成尺度空间,为了在尺度空间中高效检测出稳定的关键点位置,Lowe^[10]提出在高斯差分函数与图像卷积得到的空间 $D(x, y, \sigma)$ 中寻找极值点;其次为增强匹配稳定性和抗噪声能力,需去除低对比度的特征点和不稳定的边缘点,并确定这些关键点的位置和关键点所处的尺度;最后使用关键点邻域梯度的主方向作为该点的方向特征,以实现算子对尺度和方向的无关性。上述过程的具体实现如下。

通过下式生成尺度空间:

$$L(x, y, \sigma) = G(x, y, \sigma) * I(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) * I(x, y), \quad (2)$$

式中 $I(x, y)$ 代表图像, $G(x, y, \sigma)$ 代表尺度可变高斯函数, σ 为可变的尺度参数,其值越小则表征该图像被平滑得越少。大尺度对应于图像的概貌特征,小尺度对应于图像的细节特征。实验中图像的初始尺度为 $\sigma = 1.6$,尺度空间各层迭代关系为 $\sigma = \sigma \times 2^{1/s}$,其中 $s = 5$ 。通过下式生成差分尺度空间:

$$D(x, y, \sigma) = [G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma)] * I(x, y) = L(x, y, k\sigma) - L(x, y, \sigma), \quad (3)$$

其中,相邻两个尺度由一个常数 k 分开。为得到尺度无关的特征点,首先需计算相邻尺度图像的差分,得到一系列图像并在该图像空间中求特征点。其实特征点就是高斯差分尺度(DoG)空间的局部极大值点和极小值点。特征点的检测是通过同一组内各个 DoG 相邻层之间的比较来完成的。在尺度域中,用检测点分别和它的 8 个相邻点,再加上和它相邻两个尺度空间所对应的 9×2 个点总共 26 个点分别比较,在空间和尺度上的最大值和最小值的点就是候选特征点。特征描述符的生成通过以下各式完成:

$$m(x, y) = \sqrt{I_x(x, y)^2 + I_y(x, y)^2}, \quad (4)$$

$$\theta(x, y) = \arctan \frac{I_y(x, y)}{I_x(x, y)}, \quad (5)$$

$$I_x(x, y) = I(x + 1, y) - I(x - 1, y), \quad (6)$$

$$I_y(x, y) = I(x, y + 1) - I(x, y - 1), \quad (7)$$

式中 m 代表幅值, θ 代表方向。

在对序列图像检测到稳定的特征点后,需对特征点进行描述生成特征向量。该过程包括两个步骤:1)将特征点周围局部区域顺时针旋转 θ 角度, θ 角度是特征点的方向,也就是把坐标轴旋转为特征点的方向,这种旋转的目的是确保其具有旋转不变性;2)在旋转后的矩形区域内,以特征点为中心取 16×16 的邻域作为采样窗口,将采样点与特征点的相对方向通过高斯加权后归入包含 8 个 bin 的方向直方图,最后获得 $4 \times 4 \times 8$ 的 128 维特征描述子。

当待检产品图像序列和标准图像序列的 SIFT 特征向量生成以后,在每一个相同的方位下采用关键点特征向量的欧氏距离作为两幅图像中关键点相似性判定度量。取待测图的某个关键点,通过遍历找到距离标准图最近的两个关键点。在这两个关键点中,如果次近距离除以最近距离小于某个阈值,则判定为一对匹配点,本文所选阈值为 0.8。

为了提高寻找随机摆放的待检产品在标准库中最优方位的速度,根据待测图和标准图的匹配点数结合折半查找的方法确定其位置。折半查找的基本思想是对于已按关键字排序的序列,经过一次比较,可将序列分割成两部分,然后只在有可能包含待查元素的一部分中继续查找,并根据试探结果继续分割,逐步缩小查找范围直到找到为止。折半查找法每查找一次缩小一半的范围,可减少一半的特征提取及匹配操作,大大提高找最优解的速度。

3.3 缺陷检测

采用 SIFT 算法与折半查找法找到随机摆放的产品在标准库中的最优位置信息,然后对未知产品在确定方位下采用变步长采样机制获取其待测图像序列并与相同方位下对应的标准图像匹配。最后,通过(8)式计算相关度,

$$r = \frac{\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A})(B_{mn} - \bar{B})}{\sqrt{\left[\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A})^2\right] \left[\sum_m \sum_n (B_{mn} - \bar{B})^2\right]}}, \quad (8)$$

与根据实验经验设定的阈值 $\rho_{TH}=0.90$ 比较,当某一区域所有角度图像的相似度都大于等于 ρ_{TH} 时,则判断该区域无缺陷。若在某一角度下相似度小于设定阈值,则停止计算判断该区域为缺陷区域。

4 实验结果与分析

实验中所用相机为奥林巴斯 FE4010,有效像素为 1200 万,采用图像大小为 2026 pixel \times 1669 pixel,实验条件为,Intel(R)Core(TM)i7-3612QM 2.10 GHz 处理器,4.00 GB 内存,Matlab2011b,操作系统 Windows7。

为验证上述算法的效果,以底圆直径为 8 cm、高 9.5 cm、表面不同待检区域有不同间距条纹的杯子为例进行实验,其中标准的 0°基准图与随机摆放的待检产品如图 3 所示。



图 3 0°基准图与随机摆放的待配图

Fig. 3 0° reference image and randomly placed image to be matched

各待检区域条纹如图 4 所示,其中待检区域一总长 2.4 cm,高 1.9 cm,相邻条纹间隔为 8 mm;待检区域二总长 2.5 cm,高 1.9 cm,相邻条纹间隔为 5 mm;待检区域三总长 1.8 cm,高 1.9 cm,相邻条纹间隔为 2 mm。



图 4 待检区域

Fig. 4 Areas to be tested

为获取标准图像序列及待检图像序列,首先需确定相应区域的旋转步长。对待检区域一采用垂直投影法的效果如图 5 所示。

为准确确定此区域的旋转步长,经 10 次实测分析得出,在垂直投影图中当相邻冲击波谷间的距离大于

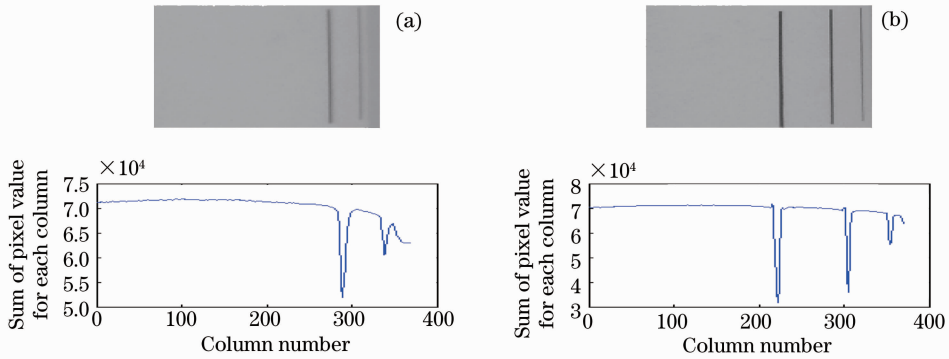


图5 待检区域一垂直投影图

Fig. 5 Vertical projection of the first area to be tested

等于 49 pixel 时会出现一对完整的黑白条纹,而此时的旋转步长为 12° 。对待检区域二和三采用相同的方法可得出相应的旋转步长,如表 1 所示。

为保证标准库中信息的完整性,取上述最小旋转步长 3° 作为标准合格品的旋转步长,依次获取标准合格品的 120 幅图像作为模板库。对随机摆放的待检产品以标准库中的 0° 图为基准(图 3),采用 SIFT 与折半查找法确定其在标准库中的最优解位置,如表 2 所示,从表中可知待配图与标准库中 198° 图相对应。

表 1 各待检区域对应的旋转步长

Table 1 Rotation step corresponding to the area to be detected

	The first area to be detected	The second area to be detected	The third area to be detected
Distance between adjacent waves /pixel	49	24	15
Rotation step /($^\circ$)	12	8	3

表 2 基于 SIFT 算法的待配图像和标准图像序列匹配数目

Table 2 Matching number of the images to be matched and standard image sequence based on SIFT algorithm

Image to be matched	0°	357°	177°	267°	222°	198°	210°	204°	201°
Number of key points	412	117	154	435	485	94	420	458	446
Number of matches		0	3	25	8	23	399	43	50

根据先验知识可知,待检区域一从第一对黑白条纹完全出现到该区域条纹全部出现是 $72^\circ \sim 108^\circ$ 之间,区域二为 $123^\circ \sim 163^\circ$ 之间,区域三为 $195^\circ \sim 222^\circ$ 之间。由表 2 知随机摆放的产品在 198° ,因此将待检产品逆时针旋转 126° 与标准库中的第 25 幅图像计算相关度,区域一的检测结果如表 3 所示。

表 3 区域一相似度计算结果

Table 3 Similarity calculation results of the first area

Direction of the image to be matched /($^\circ$)	72	84	96	108
Corresponding frame of standard image	25	29	33	37
Correlation coefficient	0.9506	0.9191	0.96	0.9741

由表 3 可知各角度与标准库对应位置图的相似度均大于设定阈值,可判断该区域无缺陷。同理可得区域二也无缺陷。

区域三的检测结果如表 4 所示,首先计算待检产品在 195° 与标准库中第 66 幅的相关度,若大于设定的阈值则按照相应的旋转角度计算下一角度与标准库中下一幅图像的相关度,若某一角度下的相关度小于设定的阈值则停止计算,判断该区域存在缺陷。

表 4 待检区域三相似度计算结果

Table 4 Similarity calculation results of the third area

Direction of the image to be matched /($^\circ$)	195	198	201	204	207
Corresponding frame of standard image	66	67	68	60	70
Correlation coefficient	0.9718	0.9417	0.9072	0.9029	0.8265

由表 4 可知,待检产品在 207° 与标准库中第 70 幅图像的相关度为 0.8265,小于设定的阈值,因此停止计算,判断该区域存在缺陷。待检产品与合格产品在 207° 的图像如图 6 所示。



图 6 待检产品与合格品 207° 图

Fig.6 Products to be tested and qualified at 207°

在整个检测过程中,为保证变步长角度的准确性,每个区域需经过 10 次实测,每次垂直投影需时为 0.37 s,因此 3 个待检区域共需时为 $0.37 \times 30 = 11.1$ s。在线检测过程中,确定随机摆放待检产品在标准库中最优解位置时,平均每次匹配需时约为 0.64 s,采用折半查找法共需时间为 5.76 s。计算一次相关度需时约 0.23 s,待检产品 3 个区域共计 14 次,需时约为 $0.23 \times 14 = 3.22$ s。在各区域旋转角度确定的情况下,对此产品采用变步长检测共需时间为 8.98 s 且可准确判断出各区域有无缺陷。若按照最小间隔进行固定步长检测,需计算 32 次相关度,整个在线检测过程约为 13.12 s。因此本文所用方法在保证准确率的情况下可节省 4.14 s。

5 结 论

针对检测系统大多采用固定旋转步长难以满足在线检测的实时性要求的问题,在变步长采样及寻找最优解方面做了一些研究。复杂产品表面有若干不同尺度与结构形状的待检区域,在保证有效信息完整获取的情况下采用变步长机制获取最少方位图像个数,达到利用不完全数据对产品结构信息的快速检测。结果表明该方法提高了信息的采集速度,在不影响检测精度的前提下可提高在线检测的速度。本文程序均在 Matlab 平台验证,所有数据及图片均来自实验结果。上述研究为实际工程应用奠定了良好基础,有助于加速计算机视觉检测技术在自动识别领域的推广应用。

参 考 文 献

- Xu Lang, Zeng Zhong, Liu Jinzan, *et al.*. Application and research of machine vision on on-line inspection for printed defect [J]. Computer Systems & Applications, 2013, 22(3): 186–190.
徐浪,曾忠,刘金赞,等. 机器视觉在印刷缺陷在线检测中的应用与研究[J]. 计算机系统应用, 2013, 22(3): 186–190.
- Zhang Xuewu, Ding Yanqiong, Yan Ping. Vision inspection of metal surface defects based on infrared imaging [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(3): 0312004.
张学武,丁燕琼,闫萍. 一种基于红外成像的强反射金属表面缺陷视觉检测方法[J]. 光学学报, 2011, 31(3): 0312004.
- Li Yaping, Zhang Guangjun, Li Qingbo. Application of O2-PLS in experimental study on non-invasive measurement of blood glucose [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(3): 854–860.
李亚萍,张广军,李庆波. 基于 O2-PLS 方法的血糖无损检测实验研究[J]. 光学学报, 2010, 30(3): 854–860.
- Wu Yiquan, Yin Danyan. Detection of small target in infrared image based on background predication by FLS-SVM [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(10): 2806–2811.
吴一全,尹丹艳. 基于 FLS-SVM 背景预测的红外弱小目标检测[J]. 光学学报, 2010, 30(10): 2806–2811.
- Gong Fang, Zhang Xuewu, Sun Hao. Detection system for module surface defects based on constrained ICA model and PSO method [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(4): 0415002.
龚芳,张学武,孙浩. 基于独立分量分析和粒子群算法的太阳能电池表面缺陷红外热成像检测[J]. 光学学报, 2012,

- 32(4): 0415002.
- 6 Shen Huan, Li Shunming, Bo Fangchao, *et al.*. On road vehicles real-time detection and traction using vision based approach [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(4): 1076–1083.
沈 暉, 李舜酩, 柏方超, 等. 路面车辆实时检测与跟踪的视觉方法[J]. *光学学报*, 2010, 30(4): 1076–1083.
- 7 Han Fangfang. Key Techniques for Surface Defects Online Detection Based on Machine Vision [D]. Tianjin: Tianjin University, 2011. 3–7.
韩芳芳. 表面缺陷视觉在线检测关键技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2011. 3–7.
- 8 Han Yuepin, Han Yan, Wang Liming, *et al.*. Development of X-ray digital radiography to automatic test of interior assembly structures of complex products [J]. *Acta Armamentarii*, 2012, 33(7): 881–885.
韩跃平, 韩 焱, 王黎明, 等. 复杂产品内部结构装配正确性 X 射线自动检测系统的研究[J]. *兵工学报*, 2012, 33(7): 881–885.
- 9 Han Yueping. Research of X-Ray Digital Radiography to Automated Inspection of Interior Assembly Structures of Complex Products[D]. Taiyuan: North University of China, 2009. 16–26.
韩跃平. 复杂产品内部结构装配正确性 X 射线自动检测技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2009. 16–26.
- 10 Wang Wencheng, Chang Faliang. A precise eye localization method based on region projection [J]. *J Optoelectronics • Laser*, 2011, 22(4): 618–622.
王文成, 常发亮. 一种基于区域投影的人眼精确定位方法[J]. *光电子·激光*, 2011, 22(4): 618–622.
- 11 J Matas, O Chum, M Urban, *et al.*. Robust wide-baseline stereo from maximally stable extremal regions [J]. *Image and Vision Computing*, 2004, 22(10): 761–767.
- 12 K Mikolajczyk, C Schmid. Scale & affine invariant interest point detectors [J]. *Int J Computer Vision*, 2004, 60(1): 63–86.
- 13 Lakemond Ruan, Sridharan Sridha, Fookes Clinton. Hessian-Based affine adaptation of salient local image features [J]. *J Mathematical Imaging and Vision*, 2012, 44(2): 150–167.
- 14 T Tuytelaars, L Van Gool. Matching widely separated views based on affine invariant regions [J]. *Int J Computer Vision*, 2004, 59(1): 61–85.
- 15 Yu Guoshen, J M Morel. ASIFT: a new framework for fully affine invariant image comparison [J]. *SIAM J Imaging Sciences*, 2009, 2(2): 438–469.
- 16 D G Lowe. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. *Int J Computer Vision*, 2004, 60(2): 91–110.