

# 基于 X 射线立体视觉的产品装配结构自动检测技术研究

韩跃平 李瑞红

(中北大学电子测试技术国家重点实验室, 山西 太原 030051)

**摘要** 对于产品内部零部件的漏装、错装及相互之间空间位置关系是否正确的快速自动无损检测, 依旧是行业内没有很好解决的难题。研制了基于单相机的 X 射线视觉检测系统, 获取产品在全周向视角下垂直于射线光路的图像序列, 提取识别特征, 完成快速自动识别。研究了系统成像的物理机理, 提出了空间采样频率与先验已知的最小结构尺寸及系统分辨率之间关系的空间采样准则, 保障空间结构信息的完整获取; 剖析序列图像之间的有序相关性, 实现在单一或有限方位下利用不完全数据的快速识别理论。统计结果表明, 在平均误检率小于 4.5% 的情况下, 系统对每个产品的平均识别时间小于 5 s。

**关键词** 成像系统; X 射线; 结构识别; 快速检测; 有限方位

中图分类号 O434.12 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP50.121104

## Study on Automatic Test of the Assembly Structures Inside Products Based on X-Ray Stereoscopic Vision

Han Yueping Li Ruihong

(National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China)

**Abstract** It is still an unresolved issue to test the assembly structures inside products in industry applications. Spatial sampling criteria based on the single view imaging system are proposed for recognition of structural objects. There must be a maximum rotary step for an object within which the least structural size to be tested is ascertained. Rotating the object by the step and imaging it and so on until a 360° turn is completed, an image sequence is obtained that includes the full structural information for recognition. The maximum rotary step is restricted by the least structural size and the resolution of the imaging system. Based on the spatial sampling criteria for structural recognition, the theory of fast recognition of structural objects is proposed. It is verified that objects could be fast recognized at a single or some limited orientations with a single camera by analyzing the smooth correlations among the image sequence sampled from 0° to 360° orientation. The theory is applied to the X-ray digital radiography system designed for online automatic inspection of interior assembly structures of complex products. Experiments show that the average identification takes less than 5 s in test progress at the wrong recognition rate of 4.5%.

**Key words** imaging systems; X-ray; structural recognition; fast test; limited orientation

**OCIS codes** 110.7440; 340.7440; 100.3005

## 1 引言

随着产品的零部件生产及其装配技术与系统自动化程度的快速发展, 对各种产品的质量检测与过程控制提出了更高的要求<sup>[1-3]</sup>。基于图像处理的计算机视觉检测技术已在可见光的表面检测、射线的内部结构检测中获得了广泛应用<sup>[4-10]</sup>。大量的有关视觉检测技术与系统的文献报道表明, 国内外众多学者的研究大多是针对具体的工程应用领域与特定的检测识别对象而展开的具体软件算法研究与硬件系统集成, 着眼于

收稿日期: 2013-09-01; 收到修改稿日期: 2013-10-01; 网络出版日期: 2013-11-15

基金项目: 国家自然科学基金(601171178)、山西省自然科学基金(2012011010-3)、2012年度山西省高等学校优秀青年学术带头人支持计划

作者简介: 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: yuepinghan@163.com

提高视觉检测系统的识别精度与识别速度这对互为矛盾、互相制约的技术指标,导致了算法研究的局限性与系统设计的盲目性。目前,对视觉检测技术的研究与系统设计尚缺乏具有通用性的先验指导理论研究。对于内部零部件多、装配结构复杂的产品的快速自动检测,仍然是行业内未能很好解决的难题<sup>[11]</sup>。

对于大多数装配好的产品,其外壁均由不透明壳体封装,可见光难以达到对内部的识别,传统的检测手段难以获取有效的内部结构信息。X射线因其强穿透能力而广泛应用于对产品内部结构的检测。目前,基于计算机数字图像识别的产品内部结构检测技术主要有数字射线成像(DR)技术和计算机层析成像(CT)检测技术。

传统的 DR 检测技术对平行于射线光路的缺陷无能为力,而且被检测产品内部零部件之间存在的射线遮挡会造成单一视角下固有的视觉盲区,不能很好地用于目标内部结构状态的三维识别。CT 成像分辨率高,可以精确识别产品任意方位切面的状态与缺陷,并且可以实现三维目标的精确重建,但数据扫描时间长、计算量庞大,不能满足实时在线检测的速度要求。

完整的图像视觉检测系统主要包含图像信息获取与图像处理识别两部分<sup>[12]</sup>。本文突破常规的 X 射线检测方法,构建新型的基于 X 射线立体视觉的自动检测系统,获取产品在全周向视角下垂直于射线光路的图像序列(而非平行于射线束的 CT 断层投影数据),提取识别特征,完成快速自动识别。为此研究了系统成像的物理机理,提出了空间采样频率与先验已知的最小结构尺寸及系统分辨率之间关系的空间采样准则,保障空间结构信息的完整获取;剖析序列图像之间的有序相关性,实现有限方位下利用不完全数据的快速识别理论。

## 2 全方位识别原理

自动识别技术是由计算机代替人眼判读的视觉检测。对于被检测产品,假设其内部待识别目标相互之间的空间位置关系以概率 1 完全相关,对于射线源与成像器件固定的单相机计算机视觉检测系统,无论选取何种识别特征模式,若不考虑检测识别速度,理想的策略是,在垂直于成像光路的方向上以某一轴线为旋转中心,以某一旋转步长对被检测产品与标准合格产品分别作 360°周向间歇式旋转,并且在所有方位下各自成像,分别获取合格产品与被检测产品的图像序列,对序列图像提取相同的特征,在每一个相同的方位下进行序列图像的匹配识别,最终完成对产品及其内部目标的全方位检测。检测系统原理框图如图 1 所示。

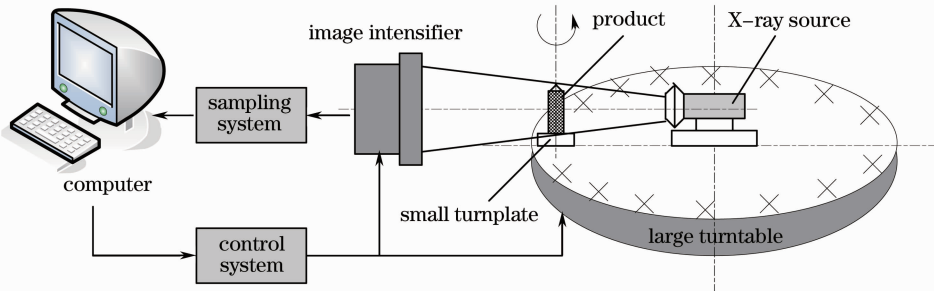


图 1 检测系统原理框图

Fig. 1 Test system diagram

假定视觉系统的最小可识别步长为  $n^\circ$  (为简化分析,假设 360 可以被  $n$  整除,下文中有类似的约定),完备的全方位检测流程如下:

- 1) 依次获取标准合格产品的全方位  $N=360/n$  幅图像  $X_1, X_2, \dots, X_N$  并建库;
- 2) 对被检测产品在随机方位下成像,在标准样本库中搜索对应方位下的那幅标准样本图像作为最优解进而执行匹配识别过程,并记下最优解的位置信息  $i(0 < i \leq N)$ ;
- 3) 如果依据某一设定的阈值(如相似度为 0.997 的“3 $\sigma$ ”原则),找不到最优解或匹配失败,则决策该产品不合格,检测下一个产品或目标,否则执行下一步;
- 4) 以  $n^\circ$  为步长旋转被检测产品,获取第 2 幅图像,与其最优解(标准样本库中的第  $i+1$  幅图像)执行匹配识别;
- 5) 直到获取第  $N$  幅图像执行上述过程;
- 6) 给出决策。

上述流程对未知产品在随机周向方位下所成图像的检测分为两步:首先,寻找其在合格产品图像库中的最优解并获取方位信息;然后,在确定方位下对未知产品图像与合格产品图像匹配,给出在该方位下可能得到的结构缺陷分类信息。

### 3 结构体识别的空间采样准则

对产品全周向方位序列图像的获取过程,其实质是利用精密机械检测转台与固定的射线成像系统对产品在全周向方位区间内连续结构视觉信息的一个数字量化过程。以上述  $n^\circ$  为识别步长,则把产品在全周向范围内的连续结构信息数字量化为有限个  $N$  幅序列图像,由此带来两个问题:

- 1) 有限个  $N$  幅序列图像能否包含产品全部方位的空间结构信息?
- 2) 如果  $N$  存在,则  $N$  最小可以取到多小?

第一个问题关系到利用方位序列图像对产品空间结构检测的可行性,最终将反映为检测精度;第二个问题关系到对产品检测的速度。下面以连续信号的抽样定理为出发点进行理论分析。

根据 Nyquist 采样定理,若产品内部最小待识别结构尺寸为有限值  $l_{\min}$  (mm),则其对应的空间频率为  $1/l_{\min}$  (lp/mm) (1 mm 单位长度上的黑白线对数),在确定方位下对产品检测时,成像系统模拟/数字(A/D)图像采集卡的采样频率必须大于等于  $2/l_{\min}$  (lp/mm),如此则获得的数字图像完整地保留了结构体在该方位下的原始空间结构信息。而在利用序列图像对产品进行全方位识别的过程中,工件每次旋转的步长应该以不丢失  $l_{\min}$  结构信息为最低原则,即工件每转动一次,前后两幅图像中的信息畸变量应小于  $l_{\min}/2$ 。

以上述理论为基础,结合 CT 检测与重构的理论基础 Randon 变换与傅里叶中心切片定理,针对本节一开始提出的两个问题,结合实际的工程检测,得出一种基于图 1 所示单相机系统的空间采样方法:对于最小识别结构尺寸确定的任意一个三维结构体,总可以找到一个最大步长  $q^\circ$  ( $q \geq n$ ),在周向方位下每隔  $q^\circ$  获取一幅图像,得到的  $M=360/q$  幅图像序列  $X_1, X_2, \dots, X_M$  包含了产品识别所需要的完整结构信息。

$q^\circ$  的确定准则为: $m^\circ$  受限于最小待识别结构尺寸  $l_{\min}$  以及成像系统的固有分辨率(透度灵敏度的灰度可分性与空间分辨率的尺度可分性)。

如果  $q^\circ$  存在,上述结构体的  $M$  幅图像线性无关,对于该结构体在任意周向方位下所成的图像,均可由  $X_1, X_2, \dots, X_M$  线性表示。 $X_1, X_2, \dots, X_M$  构成该结构体序列图像的一个极大线性无关组,张成该结构体在  $[0, 2\pi)$  上的  $M$  维线性空间。由于成像周向方位的随机性,结构体序列图像的极大线性无关组不唯一。

对于空间位置完全确定(零部件之间的空间位置以概率 1 完全相关)的合格产品检测,其在任意周向方位下所成图像  $X^{(i)}$ ,总可以由上述  $M$  幅标准样本图像线性表出:

$$X^{(i)} = k_1 X_1 + k_2 X_2 + \dots + k_M X_M, \quad (1)$$

式中  $k_1, k_2, \dots, k_M$  不全为 0。显然,  $l_{\min}$  越大,数字化旋转步长  $m^\circ$  的取值越大,序列图像的数量  $M$  越小,识别速度也越快。

### 4 有限方位下对产品的快速识别理论

空间采样方法的全方位检测思想保证了检测的准确率。对未知产品的检测过程可以看作两步模式识别问题:对未知件产品图像的  $M$  类方位信息判别;在每一确定方位下的缺陷模式判别。

如果  $M$  本身也是一个很大的值,以合格产品的  $M$  个线性无关的周向序列图像  $X_1, X_2, \dots, X_M$  作为识别原型,则大量序列图像成对匹配识别的计算耗费显然无法满足工程实时性的检测要求。若要既保证对产品的全方位检测,同时又满足产品在线生产检测的快速要求,就必须减少参与匹配比较的方位图像个数,在保证识别精度的前提下,利用尽可能少的方位图像达到对产品内部结构的全方位快速识别。

在最小识别结构尺寸  $l_{\min}$  确定的条件下,任取一件完全符合装配公差要求的合格产品作为标准参照样本,以  $m^\circ$  为周向空间的采样步长,假定系统在任一随机周向方位  $i$  的微小区间  $\left[ \frac{2\pi}{q}i - \frac{\pi}{q}, \frac{2\pi}{q}i + \frac{\pi}{q} \right)$  内随机获取的所有图像均为相似度大于等于  $\rho_{\text{TH}}$  的等价图像,则取检测周期为  $2\pi$  时,依次获取合格产品的序列图像,可得到  $M$  帧图像:  $X_1, X_2, \dots, X_M$ 。

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  $\xi$ ,均可在上述  $M$  个标准样本图像序列中以相似度大于等于  $\rho_{TH}$  找到最优解作为识别原型,且必然满足

$$P\{\xi = x_i\} = \frac{q}{360} = \frac{1}{M} \quad (i = 1, 2, \dots, M) \quad (2)$$

的均匀分布。

对大量的合格产品进行全方位检测,在其他物理条件(成像环境参数)相同的条件下,任取一件合格产品在第  $k$  时刻观测到的图像记为  $X(k)$ ,则随机变量  $X(k)$  服从(2)式的均匀分布。所有的观测结果构成一个随机序列,记为

$$X(k), k = 1, 2, \dots, M. \quad (3)$$

显然,  $X(k)$  满足

$$E[X(k)] = m_X(k) = m_X, \quad (4a)$$

$$R_X(k, k+t) = R_X(t). \quad (4b)$$

式中  $E$  为随机变量  $X(k)$  的数学期望,  $m_X$  为  $X(k)$  的平均值,  $R_X$  为  $X(k)$  的互相关。

因此,对合格产品的大量检测过程可近似看作一平稳随机序列过程。在一个检测周期( $2\pi$ )范围内,每一个样本都经历了随机过程的各种可能状态,任一样本都能充分代表随机序列的统计特性,也即该平稳随机序列是各态历经的,满足

$$\overline{X(k)} = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M X(k) = m_X, \quad (5a)$$

$$\overline{X(k)X(k+t)} = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M X(k)X(k+t) = R_X(t). \quad (5b)$$

工程实际中,一个随机序列通常用矩阵  $\mathbf{X}$  表示,  $\mathbf{m}$  和  $\mathbf{s}$  分别表示随机序列的数学期望和方差向量,即

$$\mathbf{X} = \left[ X(1), X(2), \dots, X\left(\frac{360}{M}\right) \right]^T$$

$$\mathbf{m} = \left[ m(1), m(2), \dots, m\left(\frac{360}{M}\right) \right]^T$$

$$\mathbf{s} = \left[ \sigma(1), \sigma(2), \dots, \sigma\left(\frac{360}{M}\right) \right]^T$$

式中  $T$  表示向量或矩阵的转置,  $X(1), X(2), \dots, X\left(\frac{360}{M}\right)$  分别表示随机序列  $X(k)$  在  $k = 1, 2, \dots, M$  时的随机变量。平稳随机序列  $\mathbf{X}$  的自相关函数矩阵和协方差函数矩阵可表示为如下的形式:

$$\mathbf{R}_X = \begin{bmatrix} R(0) & R(1) & \cdots & R(M-1) \\ R(1) & R(0) & \cdots & R(M-2) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ R(M-1) & R(M-2) & \cdots & R(0) \end{bmatrix}, \quad (6a)$$

$$\mathbf{C}_X = \begin{bmatrix} \sigma^2 & C(1) & \cdots & C(M-1) \\ C(1) & \sigma^2 & \cdots & C(M-2) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ C(M-1) & C(M-2) & \cdots & \sigma^2 \end{bmatrix}, \quad (6b)$$

式中,协方差阵的对角线是平稳随机序列的方差。利用上述信息与自相关系数的定义

$$r_X(n) = \frac{C_X(n)}{\sigma_X^2} = \frac{R_X(n) - m_X^2}{\sigma_X^2}, \quad (7)$$

可进一步得到相关系数的矩阵形式:

$$\mathbf{r}_X = \begin{bmatrix} 1 & r(1) & \cdots & r(M-1) \\ r(1) & 1 & \cdots & r(M-2) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r(M-1) & r(M-2) & \cdots & 1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

当用自相关函数表征随机序列的相关性大小时,不能用直接比较其值大小的方法来决定,因为自相关函数包含随机序列的数学期望和方差。协方差函数虽不包括数学期望,但仍然包含方差。相关系数是对数学期望和方差归一化的结果,不存在数学期望和方差的影响。因此相关系数可以直观地说明两个随机序列过程的相关程度的强弱,或随机序列起伏的快慢。

由上述分析可知,在对合格产品进行全检测的过程中,首先选取合格产品随机序列中的任一样本如  $X_i(k); X_i(1), X_i(2), X_i(3), \dots, X_i(M)$  作为识别模板。对任一产品在任一一周向  $j$  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  $y_j$  与样本  $X_i(k)$  中的  $M$  幅图像逐个匹配比较的过程。如果以  $y_j$  置换样本  $X_i(k)$  中对应方位下的那幅图像,所得到的相关系数矩阵应该以某一相似度无限趋近于式(8),因此可以实现单一或有限几个方位下对产品的全检测。

## 5 实验系统及测量结果

### 5.1 实验系统与样品

实际检测的总体流程如图2所示,包括离线学习与在线检测两部分。离线学习处理中,获取标准样本的全周向序列图像及其特征描述并建立特征库;在线检测阶段对被检测工件图像作与标准样本相同方法的特征描述与提取;在匹配阶段,对输入的目标图像特征与样本特征相比较,得出检测识别结果。

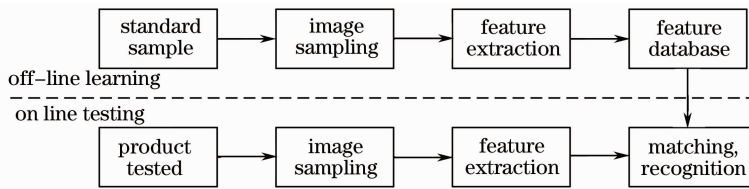


图2 检测流程

Fig. 2 Testing process

产品内部结构学习的有序性,保障了在学习阶段得到的全方位特征是产品内部结构的三维有序信息库。在任意单一或有限个方位角度下检测产品,根据图像序列与特征之间的相关有序性,理论上均可实现产品内部结构的识别。为了加速产品的识别速度,本文提取了综合图像灰度均值与方差的混合投影函数作为降维识别特征,进而利用下式所示的改进的反向传播(BP)神经网络的并行计算能力实现对产品内部装配结构状态的快速检测:

$$f_k = \sum_{j=1}^{n_k} \omega_{jk}^2 F \left( \sum_{i=1}^{n_i} \omega_{ij}^1 x_i + b_j \right), \quad (9)$$

式中  $\omega_{ij}^1$  表示连接输入  $x_i$  与隐层的权重;  $\omega_{jk}^2$  表示隐层与输出层的权重;  $n_i$  和  $n_k$  是输入节点与隐层节点的数目,  $b_j$  是隐层的阈值,  $F(*)$  是激活函数,选择 sigmoid 函数。为了达到识别的目的,输入节点数量取决于提取特征的维数,而输出节点数量取决于要识别的目标数量。

集成的 X 射线 DR 检测系统如图3所示,其透度灵敏度为 1.2%、空间分辨率为 3 lp/mm,计算机配置为 Pentium4 单核 CPU、2.80 GHz 主频、256 MB 内存,在 Visual C++ 6.0 环境下编程,图像大小为



图3 X射线视觉自动检测系统

Fig. 3 X-ray vision automatic detection system

768 pixel×576 pixel。

对图 4 所示的多种具有钢质外壳的轴状产品进行检测,产品外壳有局部螺纹,其内部识别目标有钢球、钢针、销钉、销筒以及其他不规则零部件,既有对错装与漏装的识别要求,也有对部分零部件尺寸大小以及装配位置的精确检测要求。

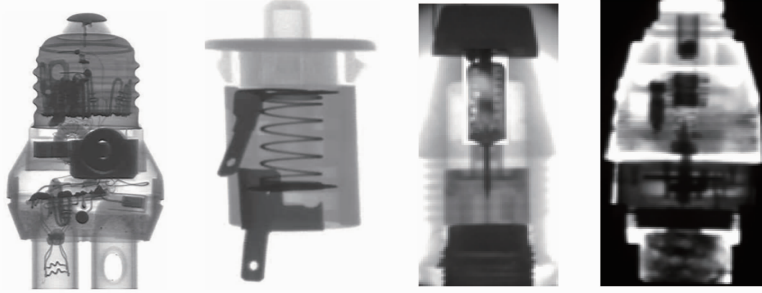


图 4 被检测产品样图

Fig. 4 Some products tested

对多种类产品的大量实际检测统计表明,在平均误检率小于 4.5%的情况下,系统对每个产品的离线学习速度小于 55 s,在线检测过程中每个产品的平均识别速度小于 5 s。

为便于分析,抽取产品内部的识别目标如图 5 所示。图 5(a)为在轴向某个层面上按照 120°周向均匀分布的三颗钢球,图 5(b)为在另一层面上按 60°均布的六颗铝球,图 5(c)为与外壳螺纹同向的细钢针,图 5(d)为轴向与外壳螺纹同向的薄壁销筒,图 5(e)为销筒装配不到位,图 5(f)为半圆小缺槽,图 5(g)为开口方位。根据被识别零部件相对于旋转轴线的空间分布特性,把产品内部的识别目标分为轴回转体结构、多向轴对称结构、单向结构体三种类型。

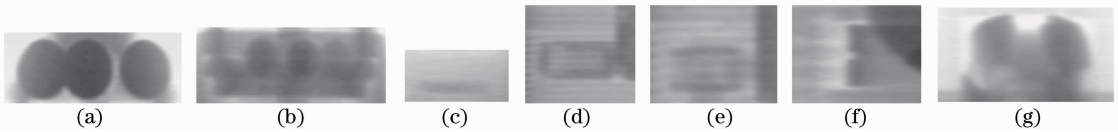


图 5 检测目标。(a) 三颗钢球;(b) 六颗铝球;(c) 钢针;(d) 薄壁销筒;(e) 销筒装配不到位;(f) 半圆小缺槽;(g) 开口方位

Fig. 5 Objects tested. (a) Three steel balls; (b) six small aluminum balls; (c) steel needle; (d) thin pin cylinder; (e) unplaced pin cylinder; (f) small slot; (g) opening

## 5.2 轴回转体结构的识别

该类型典型的结构体有球体、实心圆柱体、圆锥体、圆环、圆锥环体等。在无其它结构体遮挡且成像条件完全相同的理想情况下,从垂直于其轴线的任意方向成像,所采集到的图像数据均完全相同。故在满足成像系统分辨率的情况下,对该种结构体的识别步长为 360°,即获取任意方位下的单幅图像即可完成识别。

## 5.3 多向轴对称结构体的识别

图 5(a)与(b)均为典型的多向轴对称结构体。以 120°均布的 3 颗钢球识别为例,如图 6 所示。其中图 6(a)为合格品,图 6(b)漏装一颗钢球,图 6(c)一颗钢球偏小。以 10°为采样步长,依次获取三件产品的序列图像。由图可见,0°为最佳识别方位,0°~20°均为可识别方位,30°为无法识别方位;进一步,在 25°方位下尽管可识别该目标合格与否,但难以给出缺陷图 6(b)与图 6(c)的分类信息。

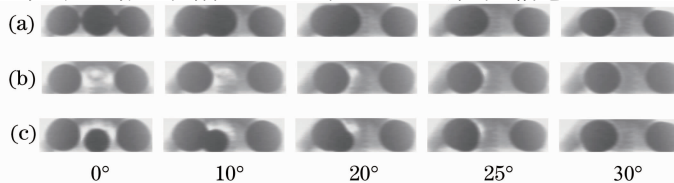


图 6 产品内呈 120°均布的 3 颗钢球。(a) 合格品;(b) 漏装一颗;(c) 一颗偏小

Fig. 6 Three balls evenly distributed within product (a) Qualified; (b) one ball omitted; (c) one ball being smaller than standard size

统计实验中,以 $5^\circ$ 为采样步长,分别获取图6(a)、(b)、(c)三种产品全周向方位的72幅图像并分割子目标区域。以某一合格品的相同子目标为标准样本,用像素级的相关匹配算法对三种产品做识别验证,得到图7所示的统计折线图。由图7可见,在最佳识别方位下,少一颗钢球比一颗钢球尺寸偏小容易识别,如第9幅与第46幅图像;两种缺陷情况下都存在不可识别方位,但这些方位基本都是孤立点或近似孤立点,所以适当选取识别步长,则在至多两个角度下即可识别合格与否;在不可识别的孤立点附近,少装钢球的曲线比一颗钢球偏小的曲线较为陡峭,因此判读少装钢球的识别步长必然大于判读一颗钢球偏小的识别步长,即采样步长与结构体的最小识别尺度有关。由于钢球的托盘与其他零部件的干扰以及子目标的定位误差等影响,统计曲线具有一定的不规则性。

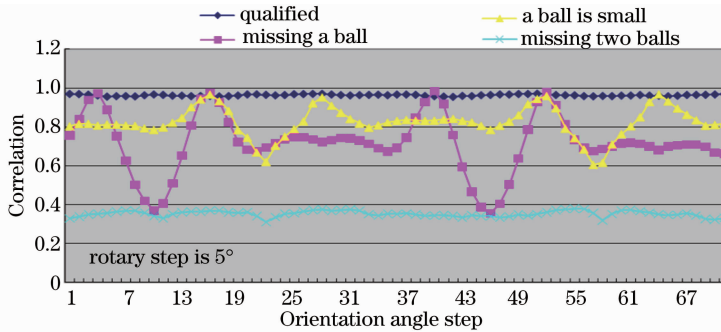


图7 钢球检测实验数据统计

Fig. 7 Experiment data statistics of steel ball test

根据轴对称结构特征可知,对于呈 $120^\circ$ 均布的3个钢球的检测,其检测周期为 $\pi/3$ ,若以 $3^\circ$ 为采样步长,共需获取20 frame图像即可。而对6颗铝球的检测,其检测周期为 $\pi/6$ ,检测步长根据尺度信息及误判率要求确定。

#### 5.4 单向结构体的识别

图5(c)~(g)皆为典型的单向结构体。以图5(e)为例,左面销筒与中间定位装置紧贴为合格,若装配不合格则存在图示定量宽度的空隙。实际检测验证中,考虑与销筒轴向一致的产品外壳螺纹的干扰,以 $1^\circ$ 为识别步长获取序列图像,如图8所示。由图8可见, $0^\circ$ 为最佳识别方位, $0^\circ\sim 7^\circ$ 为可识别方位范围, $8^\circ$ 勉强可以识别, $9^\circ$ 则无法识别。

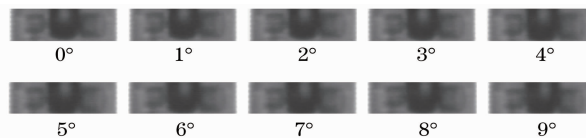


图8 销筒与定位装置

Fig. 8 Pin barrel and positioning device

统计实验中,以 $5^\circ$ 为采样步长,分别获取合格品与不合格品在全周向72个方位的序列图像并分割子目标识别,得到统计折线图9。由图9可见,对该空隙的检测仅在 $0^\circ$ 或 $180^\circ$ 附近区域方可行, $5^\circ$ 的识别步长显

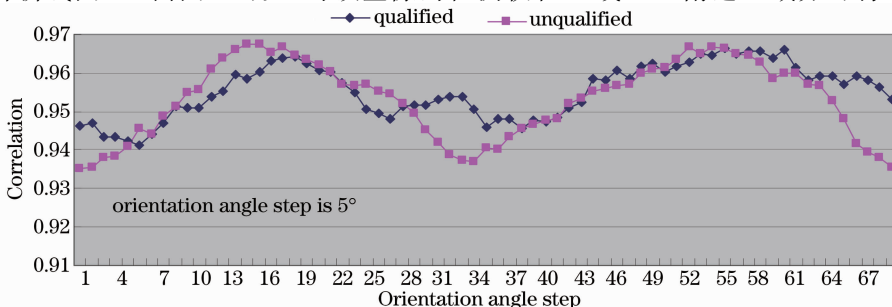


图9 销筒与定位装置检测实验数据统计

Fig. 9 Experiment data statistics of pin barrel and positioning device

然难以跨越  $90^\circ$  与  $270^\circ$  的识别盲区。实际检测中,对该结构信息的检测,取  $1^\circ$  为采样步长。

利用研制的 X 射线成像系统,针对不同产品以及产品内部不同的待识别结构体目标类型与最小待识别结构尺寸,结合工程检测要求,识别软件自动给出不同的周向采样步长并调整同一种产品内部不同结构体识别步长的兼容性。系统成功服役于重庆长安汽车集团有限公司某型号系列产品的检测,已累计检测产品数百万件。

## 6 结 论

提出了单目视觉检测系统对三维结构体识别的空间采样准则,指出最大识别步长受限于最小待识别结构尺寸以及成像系统的固有分辨率。尽管给出了该准则的理论说明并成功用于指导工程实践,但仍然有必要作进一步严谨的数学理论证明与实验验证。分析了结构体在不同空间方位下所获取图像之间的固有相关性,提出了视觉检测系统在单一或有限方位下对结构体的快速识别理论,并成功应用于工程在线检测。

## 参 考 文 献

- 1 Wu Xiaoyan, Yu Yingjie, Lü Lijun. Review on non-destructive detection of inner defects of object [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(4): 040002.  
伍小燕, 于瀛洁, 吕丽军. 物体内部缺陷无损检测技术综述[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(4): 040002.
- 2 A Kobler, A Kashiwar, H Hahn, *et al.*. Combination of *in situ* straining and ACOM TEM: a novel method for analysis of plastic deformation of nanocrystalline metals[J]. *Ultramicroscopy*, 2013, 128: 68–81.
- 3 S Bagavathiappan, B B Lahiri, T Saravanan. Infrared thermography for condition monitoring: a review[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2013, 60: 35–55.
- 4 Lu Qinghua, Xu Chongchuan, Wang Hua, *et al.*. Research on dimension measurement of large size ceramic floor tiles based on machine vision[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3): 0312004.  
卢清华, 许重川, 王 华, 等. 基于机器视觉的大幅面陶瓷地砖尺寸测量研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(3): 0312004.
- 5 Chen Jianzhao, Lin Danying, Huang Jianheng, *et al.*. Research progress of phase contrast methods for high-resolution X-ray microscope[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(6): 060004.  
陈剑钊, 林丹樱, 黄建衡, 等. 用于高分辨 X 射线显微镜的相衬方法研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(6): 060004.
- 6 Julio Molleda, Juan L Carus, Ruben Usamentiaga, *et al.*. A fast and robust decision support system for in-line quality assessment of resistance seam welds in the steelmaking industry[J]. *Computers in Industry*, 2012, 63(3): 222–230.
- 7 Curtise K C Ng, Zhonghua Sun. Development of an online automatic diagnostic reference levels management system for digital radiography: a pilot experience[J]. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 2011, 103(3): 145–150.
- 8 Li Jinjun, Zhao Hong. Feature patch-based vision measuring technique for complex surface and silhouette[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(8): 0812003.  
李进军, 赵 宏. 基于特征面片的复杂型面轮廓视觉测量方法[J]. *光学学报*, 2011, 31(8): 0812003.
- 9 Xiang Shoubing, Su Guangda, Chen Jiansheng, *et al.*. Brick stack anomaly detection and recognition based on machine vision[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(7): 0715002.  
向守兵, 苏光大, 陈健生, 等. 基于机器视觉的码坯异常检测与识别[J]. *光学学报*, 2011, 31(7): 0715002.
- 10 Dong Liming, Li Jia, Ni Chenyin, *et al.*. Crack detection of engine blade based on laser-heating assisted surface acoustic waves generated by scanning laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(11): 1103001.  
董利明, 李 加, 倪辰荫, 等. 基于光热调制检测发动机叶片疲劳裂纹的激光声表面波方法[J]. *中国激光*, 2011, 38(11): 1103001.
- 11 V Cnudde, M N Boone. High-resolution X-ray computed tomography in geosciences: a review of the current technology and applications[J]. *Earth-Science Reviews*, 2013, 123: 1–17.
- 12 Han Yueping, Han Yan, Li Ruihong, *et al.*. Application of X-ray digital radiography to online automated inspection of interior assembly structures of complex products[J]. *Nucl Instrum Meth Phys Res A*, 2009, 604(3): 760–764.