

文章编号:1000-582X(2010)05-089-06

连铸热坯表面缺陷图像清晰度控制算法

张兴兰¹, 欧阳奇², 赵立明²

(1. 重庆理工大学 计算机科学与工程学院, 重庆, 400050; 2. 重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆, 400044)

摘要:连铸热坯表面缺陷机器视觉检测系统中, 获得清晰稳定信噪比高的图像是检测能否成功的前提条件。针对当前连铸坯表面缺陷获取图像质量及清晰度问题, 提出一种基于聚焦平方梯度及 CCD 靶面照度参数的缺陷图像质量控制算法。选取连铸热坯表面上的一个标志点作为对象, 首先采用聚焦窗口平方梯度函数获得系列离焦平面的清晰度最高图像对象, 再通过识别该对象和分析对象的面积损失率获得 CCD 靶面照度参数, 进而获得全局采集图像的质量最清晰点。该算法解决了连铸热坯表面缺陷成像系统中焦平面选择及 CCD 积分时间控制, 具有很好的实用性。同时, 该算法也为其他机器视觉工程的图像采集提供良好的指导作用。

关键词:连铸热坯; 表面缺陷; 机器视觉; 图像清晰度; 聚焦窗口平方梯度

中图分类号:TF777.1

文献标志码:A

The image definition improved algorithm for hot continuous casting billet surface defects inspection

ZHANG Xing-lan¹, OUYANG Qi², ZHAO Li-ming²

(1. College of Computer Science & Technology, Chongqing University of Technology, Chongqing 400050, P. R. China; 2. College of Material Science & Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: In the hot continuous casting billet surface defect inspection system based on machine vision, acquiring a high signal-to-noise image is the key for successful inspection. To solve the disadvantages existing in current machine vision engineering, a new algorithm with improved image definition is presented based on both focus window and CCD target area illumination parameters. It selects a target object from series of hot continuous casting billet surface images, and then acquires the optimum articulation through focus window square gradient algorithm. By recognizing and calculating target's area loss rate, target area parameter evaluation can be done. The global optimum image quality point is achieved. The algorithm is effective in selecting focus plane and shutter time during hot continuous casting surface imaging process and is of a good practical value. At the same time, the algorithm is useful for image collecting work in other machine vision engineering.

Key words: hot continuous casting billet; surface defects inspection; machine vision; image definition; focus windows squared gradient

收稿日期:2010-01-26

基金项目:国家自然科学基金和上海宝钢集团公司联合资助项目(50974151)

作者简介:张兴兰(1972-),女,讲师,主要从事智能控制、图像处理及模式识别等方面的研究,(E-mail)zxlan@cqut.edu.cn.

连铸坯表面在线无损探伤技术就是在热状态下在线检测铸坯表面及近表面的缺陷,这一技术可实现铸坯质量的实时管理,避免缺陷铸坯毫无意义的继续深加工,实现高质量铸坯的“热送热轧”。虽然连铸技术仍在不断改进,但连铸坯特别是连铸板坯存在的表面缺陷仍难以避免。目前,国内外钢厂对连铸坯表面缺陷的检测,主要依靠人工目测手段定性判断铸坯的表面质量;对铸坯近表面缺陷的检测,主要采用先将铸坯冷却至低温,然后用人工火焰清理或抽检酸洗的方法。采用人工目测法,其缺点是检测的准确率受人工经验制约,且手段落后、自动化程度低、工作强度大;火焰清理或抽检酸洗法因为造成能量资源的巨大浪费导致成本高、生产率低、自动化程度低、工作强度大。这 2 种方法都无法实现连铸坯表面缺陷的在线检测和质量评估,也无法实现缺陷连铸坯的在线剔除和高质量坯的“热送热轧”。在热状态下在线检测连铸坯表面缺陷,是各工业国家自连铸工艺诞生以来就已引起高度重视并竞相发展的一项技术。

自 20 世纪 70 年代以来不少人就已经开始了光学、超声和涡流等探伤方法的研究。在光学检测方面,日本住友金属公司对热态连铸板坯表面缺陷进行光学检测的研究^[1];Nippon 钢铁公司运用电子耦合器件(CCD)对铸坯表面火焰清理熔池和火花进行图像探测与分析,对铸坯近表面缺陷的在线检测进行实验研究^[2];Hajime 等采用红外面阵 CCD 对铸坯表面缺陷进行在线检测的研究^[3];日本白基男等采用激光成像技术检测连铸坯裂纹的应用研究^[4];欧阳奇等开展了高温铸坯表面缺陷机器视觉无损检测的理论和实验研究^[5];Fabijanska 等采用信息融合术进行了铸坯表面及近表面缺陷的在线检测研究^[6];Ewaryst 等采用不同时序的辐射图像数据融合处理技术开展表面缺陷的检测研究^[7]。在研究基于机器视觉的铸坯表面缺陷检测方法中,获得高信噪比、易于后端进行数字图像处理 and 模式识别的数字图像,是展开检测的前提与必要条件。在图像采集环节,需要对采集到的铸坯表面图像质量进行评价,才能实时对机器视觉系统中的光学及照明装置进行调节,以达到最佳的采集图像质量点。

目前,常用的图像质量评价函数方法有灰度差分绝对值之和(SMD)、灰度方差、Laplacian 函数、平方梯度、TenenGrad 函数、熵函数及基于图像变换的函数等方法^[8]。对于正常光照下拍摄的图像,这些方法呈现单峰特征,基本适用图像质量及聚焦控制。在连铸坯表面缺陷机器视觉检测中,由于铸坯表面

多个目标像距不同,加之由于克服图像过饱和和输出曝光控制过程时产生的大量噪声和图像中包含高亮目标等因素的影响,直接利用 SMD、灰度方差、Laplacian 函数等对图像质量进行控制时,聚焦曲线出现了多个局部峰值,呈多峰特性,影响图像质量控制^[9]。笔者针对目前常用的图像清晰度及质量控制方法存在的问题,提出了针对连铸热坯表面缺陷检测的聚焦窗口平均图像清晰度和 CCD 靶面照度参数的改进算法,先对不同离焦平面图像进行聚焦平方梯度函数计算,得到最清晰的离焦图像,然后控制曝光时间,用图像面积损失率最小值摄取最清晰图像,同时实现摄像系统焦平面及曝光时间的控制,适合连铸热坯表面及高温物体表面 CCD 辐射成像。

1 连铸坯表面缺陷检测中照明分析

1.1 检测装置

连铸坯表面缺陷机器视觉检测系统的图像采集装置,如图 1 所示。

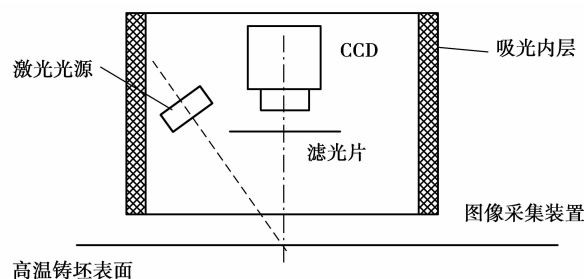


图 1 连铸坯表面缺陷检测系统装置简图

在检测系统中,照明条件和采集图像质量的要求根据连铸坯表面的形状特点和表面粗糙度设计照明系统,在该系统下得到的图像应将表面中需要可视化的裂纹等缺陷显现出来,能够清楚辨认。上述原则虽然简单,但是具有很多不确定因素,如何评价图像是否完全包含了被检测对象的感兴趣区,是否易于后端处理等,这些因素均需要采用量化的指标进行衡量。其中,图像清晰度是一个必不可少的参数。除此之外,CCD 靶面照度也是另一个重要参数。对于铸坯表面缺陷检测系统,当 CCD 的成像面或谱面照度分配不均,其最大最小照度差超过了 CCD 器件的动态响应范围时,无论调节照明或光学系统的参数均不能改善成像质量,要么铸坯表面暗区无法成像,要么曝光量过大而造成亮度失真。因此,对采集图像质量的评价还应该包含光敏面的照度参数。

1.2 CCD 成像的照度参数理论计算

CCD 为积分型器件,其成像为输出的电流值 I ,大小与 CCD 光敏面上的照度 E 以及 2 次取样的时间间隔 t 有关

$$I = KEt = KQ, \quad (1)$$

式中: K 为光电转换系数, Q 为曝光量。对既定的图像采集系统,当 Q 超过了 CCD 器件的最大值,则成像发生照度失真;同时,当照度过低,则连铸坯上缺陷的暗区无法成像,使得检测发生严重误差。故 Q 应在一定范围内,即

$$Q_{\min} \leq Q \leq Q_{\max}, \quad (2)$$

式中: Q_{\min} 为能保证最暗区成像的最低照度, Q_{\max} 为 CCD 的饱和曝光量。对以 CCD 为基础的铸坯图像采集装置,CCD 任何光敏单元上的照度均应满足式(2)。

CCD 器件光敏面的照度实际上是铸坯表面的散射光经过光学系统成像的像面照度,或经过光学系统傅立叶变换后的谱面照度。当散射特性接近余弦辐射体时,光学系统光轴上成像点的照度 E 和轴外像点照度 E' ,分别用式(3)、(4)表示^[9-10]

$$E = \left(\frac{\gamma'}{\gamma}\right)^2 \eta \pi L \sin^2 U', \quad (3)$$

$$E' = E \cos^4 \omega, \quad (4)$$

式中: γ' 和 γ 分别为光学系统的像方和物方介质的透射率; η 为光学透过率; L 为发光物体的亮度; U' 为像方孔径角; ω 为计算点对应的视场角。

为了获得理想采集图像,需对 CCD 曝光时间进行控制。根据 RGB 三基色对应分别产生的电流积分,由采集图像最高灰度值小于 255 可不产生照度失真的原则,得到最大曝光时间 t_{\max} ^[10-11]

$$t_{\max} = \min(t_r, t_g, t_b), \quad (5)$$

其中, t_r, t_g, t_b 分别为 R、G、B 三色光决定的最大曝光时间,分别由式(6)、式(7)和式(8)决定。

$$t_r < \frac{2^\omega \lambda_r^5 e^{\frac{c_2}{\lambda_r T}}}{\pi A_r m^2 \varepsilon(\lambda_r, T)}, \quad (6)$$

$$t_g < \frac{2^\omega \lambda_g^5 e^{\frac{c_2}{\lambda_g T}}}{\pi A_g m^2 \varepsilon(\lambda_g, T)}, \quad (7)$$

$$t_b < \frac{2^\omega \lambda_b^5 e^{\frac{c_2}{\lambda_b T}}}{\pi A_b m^2 \varepsilon(\lambda_b, T)}, \quad (8)$$

式(6)-(8)中: ω 为 CCD 的位深度; λ 为光源中每种色光的波长; c_2 为第二普朗克常数; T 为黑体温度; A 为光敏单元输出电流和图像灰度值之间的转换常数; m 为相对孔径值;最小曝光时间 t_{\min} 直接由对应各色波长映射到光敏面的最小照度决定。

2 采集图像质量的综合评价方法

2.1 基于实验的图像质量二元评价方法

理论分析和现场实验表明,当铸坯表面缺陷较为复杂时,或 CCD 谱面照度分布严重不均匀时,其照度差超过了 CCD 的响应范围,则无论如何调节光学系统的参数,均不能采集到理想图像。若增大像面照度或曝光时间,则某些区域可能出现高亮,发生照度失真;若减少照度或曝光时间,则某些暗区无法成像。2 种情况均使得铸坯表面缺陷检测发生偏差。采用基于聚焦窗口平方梯度函数进行图像清晰度分析,并结合 CCD 谱面照度参数,进行图像获取质量控制可较好地获取连铸热坯表面缺陷图像,并调整光学系统的焦平面和曝光时间等参数^[12]。

2.2 图像质量综合评价方法实现过程

由于图像清晰度因子和照度因子为二维互相不耦合的参数,可采用贯序方法调整这 2 个参数达到最大值,从而获得整体的最高清晰度图像质量点 P_{\max} ,即首先通过调焦,达到图像的最高清晰度点 D_{\max} ;再调整采集装置里的照度参数,达到最佳照度点 I_{\max} ,该点为 P_{\max} 。具体实现过程如下^[12]:

1)利用经验或式(6)-(8)大致计算,获得光学系统和照度系统的初始点。

2)在铸坯表面上选择一个区域,该区域含有一个已知标志模板,该标志模板应简单,同时在图像中易于识别。

3)保持光学系统不变,利用聚焦窗口平方梯度图像清晰度函数调焦获得最高图像清晰度位置 D_{\max} 。

4)改变照明光强和分布参数,形成一系列关于光强步长的图像。在该系列中,模板图像会出现如下 4 种情况:

- 通过事先设定的模式识别方法,能够识别;
- 通过事先设定的模式识别方法,不能够识别;
- 计算的模板面积 S' 小于已知目标模板的面积 S ;
- 计算的模板面积 S' 大于已知目标模板的面积 S 。

对 a、b 两种情况的模式识别方法,采用了模板匹配识别方法,可信度设置为 95%。对 c、d 两种情况,表明了高照度和低照度失真的情况,如图 2 所示。

5)为了衡量照度参数对成像质量的影响,定义连铸热坯表面标志模板的面积损失率 I 为^[13-14]

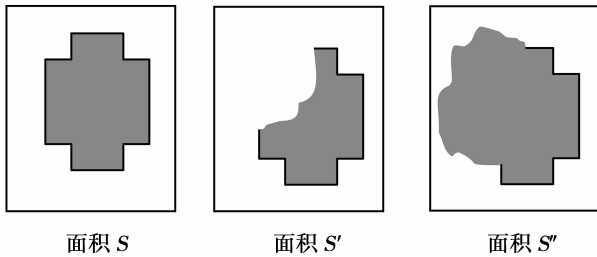


图2 标准模板及其两种失真情况

$$I = \left| \frac{S - S'}{\max(S, S')} \right| \quad (9)$$

可知,在 D_{\max} 光学参数的基础上,改变光强参数的过程中必然会得到 I_{\max} ,该 I_{\max} 点就是全局最高清晰度点 P_{\max} ,以确定连铸热坯表面缺陷检测中图像采集装置的光学和照明参数。采用上述方面寻找 P_{\max} 时,需要注意两个方面的问题:

1) 标准模板的选择。模板选择应考虑到铸坯表面固有的,且容易进行图像处理,处理结果易于识别等特点。由于实际铸坯表面缺陷的复杂性,不能作为标准模板,但可以人工制作铸坯表面裂纹缺陷的标准样板作为模板。

2) 图像处理方法和识别方法的选择。由于标准模板已知,因此在实验中可选用简单的识别方法,如模板匹配等,这样使得计算复杂度较小,不需要进行迭代训练,图像采集系统更适合后端的识别过程。

3 实验分析

利用上述方法对连铸坯表面缺陷机器视觉检测的图像采集装置进行实验,选择人工制作铸坯表面裂纹缺陷的标准样板作为模板。图像采集系统采用的物镜镜头最大光圈 F2.0,焦距为 35 mm,光源采用柯拉照明光源,其照明强度为 4 000 cd/cm²。图像清晰度评价函数采用聚焦窗口平方梯度函数。选择 5 区域模式,即将图像均分为 9 等份,取中心区域与 4 个角落的子图像块作为聚焦区域,5 个聚焦窗口分别用 W_O 、 W_A 、 W_B 、 W_C 、 W_D 表示,聚焦窗口如图 3 所示。

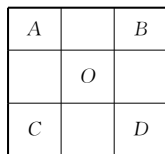


图3 聚焦窗口图

采用式(10)计算各区域聚焦评价价值,分别用 FV_O 、 FV_A 、 FV_B 、 FV_C 、 FV_D 表示,它们在聚焦评估函数式(11)-(12)中可根据实际情况取不同权重。考虑到图像中心区域通常为有用或感兴趣区域,中

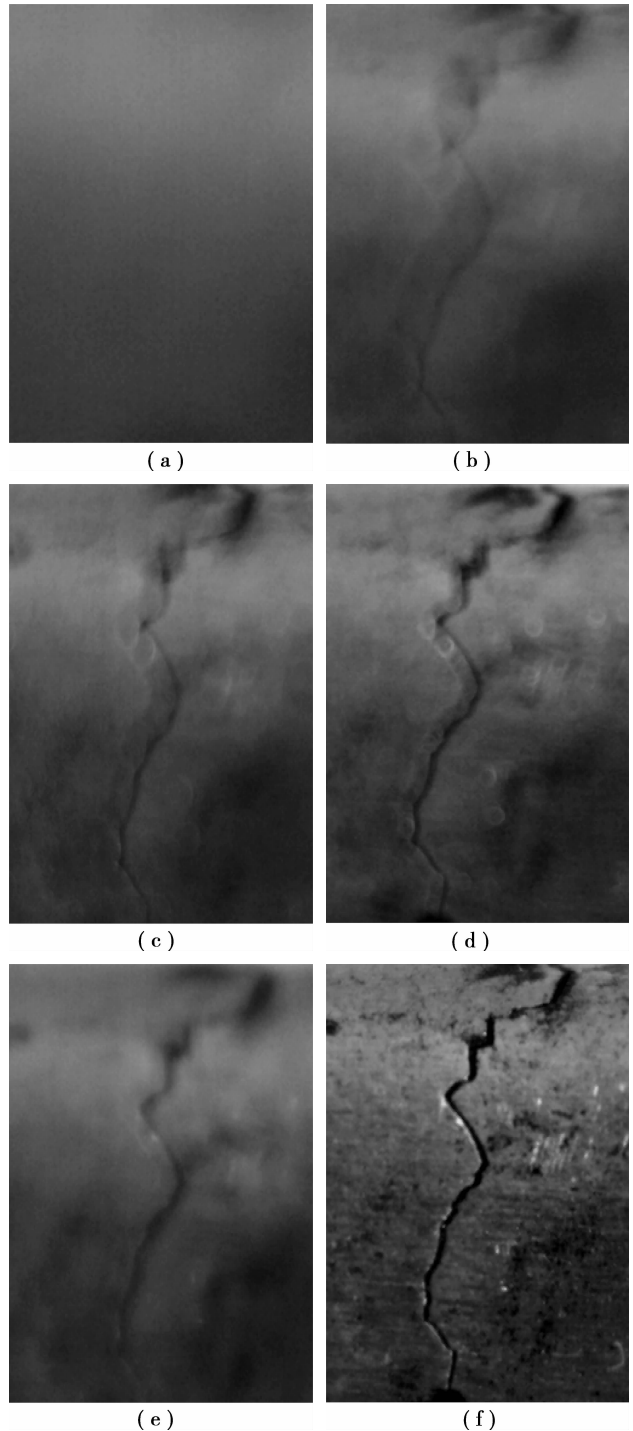
心区域在聚焦评估函数中权重 k_1 较其他区域权重 k_2 大,窗口聚焦平方梯度聚焦评价函数^[15-16]

$$FV_{\text{region}} = \sum_{x,y \in W_{\text{region}}} [f(x,y+1) - f(x,y)]^2, \quad \text{region} = O, A, B, C, D, \quad (10)$$

$$F_{\text{sq-grad}=k_1} \times FV_O + k_2 \times (FV_A + FV_B + FV_C + FV_D), \quad (11)$$

$$k_1 + 4 \times k_2 = 1. \quad (12)$$

在光轴上物距离从 200 mm 到 600 mm,每隔 50 mm 采集图像一次,形成离焦图像序列,如图 4 所示。



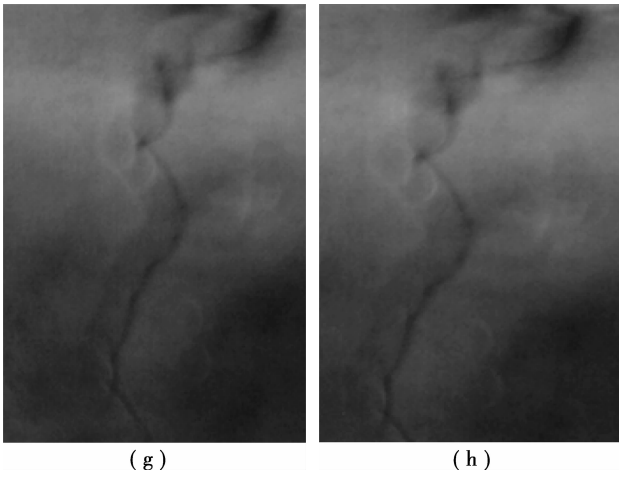


图 4 不同离焦平面下的图像序列

采用聚焦窗口平方梯度函数,其中式(12)中权重 k_1 、 k_2 分别取 0.4、0.15,对图 4 图像进行清晰度计算,计算曲线如图 5 所示。

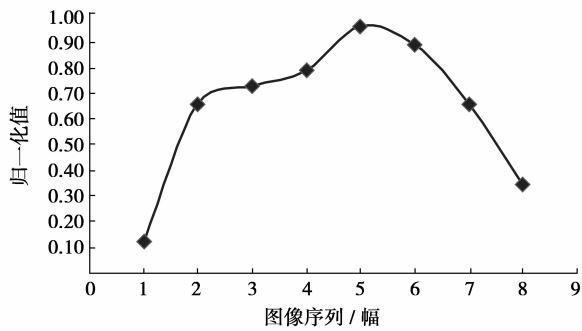


图 5 聚焦平方梯度实验结果

从图 5 可知,第 5 幅图像处于最佳清晰度点,此时光学系统的各项参数的位置设置为 D_{max} 。保持该 D_{max} 位置所在的光学系统参数不变,改变照明系统的照度参数。照度参数的改变方法是增加和减少光源的光强及分布,在 $2\ 000\sim 4\ 400\text{ cd/cm}^2$ 之间以每次步长 300 cd/cm^2 逐次减少,且改变照度分布。由此得到 8 幅系列图像,如图 6 所示。

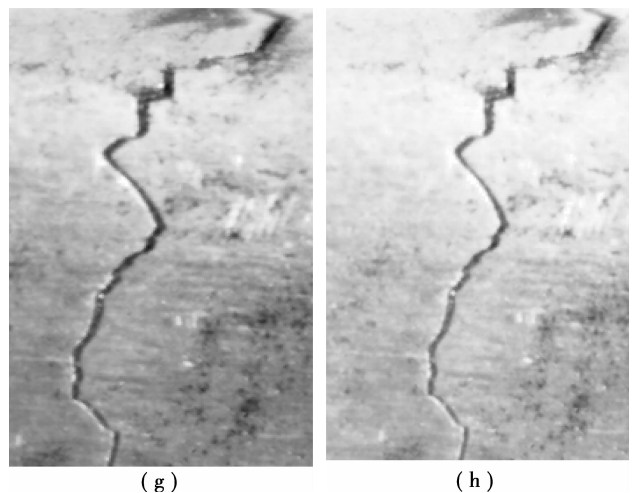
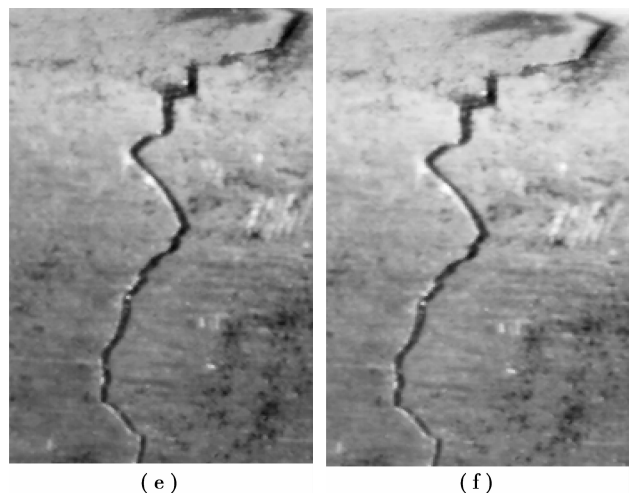
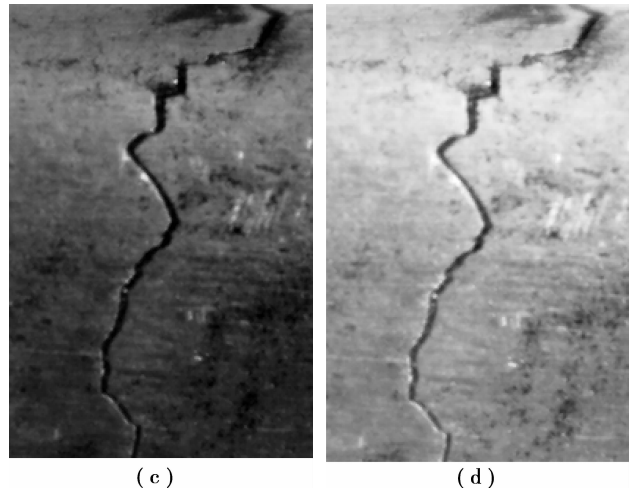
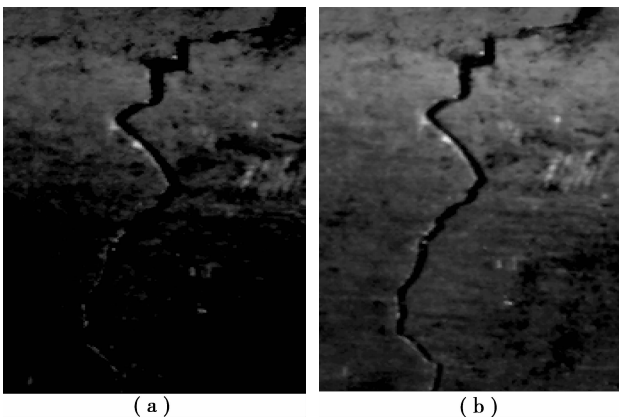


图 6 不同照度参数改变下的图像序列

为了衡量照度参数对成像质量的影响,根据定义的铸坯表面标志模板的面积损失率 I 计算式(9),得到面积损失率的结果,如表 1 所示。可知,在第 5 张图像的 I 值最小,为 0.14,则第 5 幅图像所在照度参数为铸坯表面图像质量全局最高清晰度点,即 P_{max} 。

表1 基于面积损失率的标志模板失真值

| 图像序号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 图像损失率 | 1.00 | 0.65 | 0.67 | 0.23 | 0.14 | 0.72 | 0.85 | 1.00 |

4 结 论

针对连铸热坯表面缺陷机器视觉检测系统中的图像采集清晰度问题,提出了基于聚焦窗口平方梯度和 CCD 靶面照度参数的图像质量控制算法,以获取最高清晰度图像质量点,该算法具有如下特点:

1) 可快速对连铸热坯表面缺陷机器视觉检测系统的图像采集参数进行调节,并能获得理想的连铸热坯表面图像;

2) 该算法可克服高温炽热物体表面成像中 CCD 势阱饱和,导致图像发白现象,能清晰获取炽热物体表面图像,可操作性强;

3) 该算法同样在连铸热坯表面缺陷检测机器视觉中得到了验证,同时可推广到其他机器视觉工业检测领域 CCD 成像质量控制。

参考文献:

- [1] MEILLAND P. Novel multiplexed eddy-current array for surface crack detection on rough steel surface[C]// Proceedings of 9th, EC NDT, September 25-29, 2006, Berlin, Germany. Berlin: [s. n.], 2006, 4(8): 1-8.
- [2] KITAGAWA H, FUJII A, MIYAKE S. An automatic surface detection system for hot ingot casting slabs using an infrared scanning camera and image processors[J]. Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, 1981, 21(3): 9-15.
- [3] SOLEIMANI M, LIONHEART W R B, PEYTON A J, et al. A three-dimensional inverse finite-element method applied to experimental eddy-current imaging data[J]. IEEE, Transactions on Magnetics, 2006, 12(5): 1560-1567.
- [4] 欧阳奇, 张兴兰, 陈登福, 等. 高温连铸坯表面缺陷的机器视觉无损检测[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2007, 30(11): 27-32.
OUYANG QI, ZHANG XING-LAN, CHEN DENG-FU, et al. Raceway section temperature measurement algorithm based on machine vision[J]. Journal of Chongqing University(Natural Science Edition), 2007, 30(11): 27-32.
- [5] FABIJANSKA A, SANKOWSKI D. Aura removal algorithm for high temperature image quantitative analysis systems [C]// Proceedings of International Conference of Mixed Design of Integrated Circuits and Systems, June 21-23, 2007, Cichocinek, Poland. Cichocinek, Poland: [s. n.], 2007: 617-621.
- [6] RAFAJLOWICZ E, WNUK M, RAFAJLOWICZ W. Local inspection of defects from image sequences [J]. International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, 2007, 18(4): 581-592.
- [7] 王凌云, 黄红辉, 王雪, 等. 重轨表面缺陷机器视觉检测的关键技术[J]. 重庆大学学报, 2007, 30(9): 27-30.
WANG LING-YUN, HUANG HONG-HUI, WANG XUE, et al. The study on key technology of faults detecting on surface of rail steel based on machine vision [J]. Journal of Chongqing University(Natural Science Edition), 2007, 30(9): 27-30.
- [8] 任四刚, 李见为, 谢利利. 基于灰度差分法的自动调焦技术[J]. 光电工程, 2003, 30(2): 53-55.
REN SI-GANG, LI JIAN-WEI, XIE LI-LI. Automatic focusing technique based on gray scale difference method [J]. Optical Electronic Engineering, 2003, 30(2): 53-55.
- [9] 王勇, 谭毅华, 田金文. 一种新的图像清晰度评价函数[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(3): 124-126.
WANG YONG, TAN YI-HUA, TIAN JIN-WEN. A new kind of sharpness evaluation function of Image [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 29(3): 124-126.
- [10] 陈国良, 黄心汉, 王敏, 等. 基于图像分析的显微视觉自动调焦方法研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2007, 35(5): 1-4.
CHEN GUO-LIANG, HUANG XIN-HAN, WANG MIN, et al. Micro-vision auto focus by image analysis [J]. Huazhong University of Science & Technology (Nature Science Edition), 2007, 35(5): 1-4.
- [11] 王勇, 谭毅华, 田金文. 一种新的图像清晰度评价函数[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(3): 124-127.
WANG YONG, TAN YI-HUA, TIAN JIN-WEN. New kind of clarity-evaluation-function of image [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 29(3): 124-127.
- [12] YAO Y, ABIDI B, DOGGAZ N, et al. Evaluation of sharpness measures and search algorithms for the auto focusing of high magnification images [C] // Visual Information Processing XV, April 18-19, 2006, Kissimmee, Florida, USA. Kissimmee, Florida, USA: [s. n.], 2006: 1-12.
- [13] KEHTARNAVAZA N, OH H J. Development and realtime implementation of a rule based auto focus algorithm[J]. Real-Time Imaging, 2003, 9(3): 197-203.
- [14] MENG B, ZHU M, CAI C J. Design of video auto focusing based on image processing [J]. Optical Information Processing, 2006, 6027(2): 1279-1287.
- [15] FENG L, HONG J. A fast auto focusing method for digital still camera [C] // Proceedings of the Fourth International Conference on Machine Learning and Cybernetics, August 18-21, 2005, Guangzhou, China. [S. l.]: IEEE, 2005: 5001-5005.
- [16] 张兴兰. 基于机器视觉的包装缺损检测方法[J]. 重庆工学院学报: 自然科学版, 2009, 23(5): 90-94.
ZHANG XING-LAN. Study on packaging defects automatic measurement method based on machine vision [J]. Journal of Chongqing Institute of Technology: Natural Science Edition, 2009, 23(5): 90-94.

(编辑 王维朗)