

基于结构光的大锻件尺寸测量中光条纹中心线提取方法

王邦国, 贾振元*, 刘巍, 刘双军, 杜剑, 贾兴华

(大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 大型锻件温度高, 测量条件恶劣, 误差较大, 精确的尺寸测量可有效减少加工余量并提高材料的利用率. 以高温锻件图像采集方法为基础, 双目视觉结合结构光法可用于大型锻件尺寸在线测量. 为消除干扰光线对在线测量锻件尺寸的影响, 提出通过对单幅锻件结构光图像处理提取结构光条纹中心线的方法. 该方法利用结构光条纹在截面上近似高斯分布的特点, 首先根据设定阈值在行方向上搜索, 并确定结构光条纹及干扰光线的起始位置; 其后从起始位置开始沿光条纹在设定范围内搜索, 并判断光条纹截面是否近似符合高斯分布以去除干扰光线; 最后以结构光条纹起始位置为起点上下搜索, 并计算结构光条纹的亚像素中心. 实验结果表明: 该方法具有计算简单、实现快速、稳定性好的特点, 可用于大型锻件尺寸测量中结构光条纹中心线的提取.

关键词: 大型锻件; 尺寸测量; 结构光条纹

中图分类号: TG316.8 **文献标志码:** A

0 引言

大型锻件是加工、制造重大技术装备关键零部件不可缺少的毛坯, 其生产周期长、技术难度大、价格昂贵. 锻件生产过程中温度可达一千多度, 因此在锻压过程中难以对锻件尺寸进行测量. 目前我国大型锻件生产厂通常由工人手持简单的测量工具在热态下进行锻件的直接接触测量, 由于热态锻件温度高, 工作条件恶劣, 测量误差大, 锻件生产中不得不增大加工余量, 从而增大了产品成本. 为实现锻件尺寸的非接触测量国内外已开展了许多研究工作, 文献[1,2]提出了两种高温锻件图像提取方法, 文献[3]和[4]分别将文献[1]和[2]所述图像采集方法应用于锻件尺寸测量. 由于两种方法测量锻件尺寸时, 锻件到 CCD 摄像机的距离均需作为已知条件, 从而限制了其应用. 激光扫描技术可用于锻件尺寸测量^[5], 但无法同时对锻件不同部位尺寸进行测量.

CCD 传感器体积小、可靠性高、环境适应性强, 其拍摄的图像可用于非接触测量, 并已在航空、航天、机械、化工等领域得到应用. 但由于锻件辐射光线的影响, 直接拍摄的锻件图像不能用于尺寸测

量. 文献[6]提出了一种高温锻件图像采集方法, 该方法通过滤除锻件辐射的可见光和红外光线, 可得到锻件接近常温时的图像. 由两个 CCD 传感器组成的双目视觉系统能通过拍摄物体的多幅图像获取物体三维几何信息, 具有测量精度高、实用性强等优点, 再结合高温锻件图像采集方法可用于锻件三维重建. 但是, 利用双目视觉系统拍摄的物体图像对物体进行三维重建时, 需对拍摄的图像进行特征点提取和匹配. 由于特征点提取和匹配用时较长, 难以实现锻件形状快速三维重建和尺寸测量. 使用投影设备投射结构光条纹到锻件表面, 通过识别投射在锻件表面的结构光条纹可简化图像中的特征点提取和匹配过程并提高匹配速度. 锻件加工现场环境复杂, 投影光条纹的识别会受到环境光线、车间照明光线及金属焊接时辐射光线的影响. 另外, 锻件加工过程中部分快锻机锻压频次为 60~120 次/min, 为快速测量锻件尺寸需对拍摄的单幅结构光图像进行快速处理以提取结构光条纹的中心. 目前, 对结构光条纹中心线提取方法已有许多研究成果^[7,8], 但均没有兼顾去除干扰和提高处理速度两个因素, 因此不适用于锻件尺寸的在线测量.

收稿日期: 2010-07-06; 修回日期: 2011-12-08.

基金项目: “九七三”国家重点基础研究发展计划资助项目(2006CB705406).

作者简介: 王邦国(1976-), 男, 博士生, E-mail: wangbg_dalian@yahoo.com.cn; 贾振元*(1963-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, E-mail: jzyxy@dlut.edu.cn.

本文根据锻件表面结构光条纹特点,提出结构光条纹亚像素中心线提取方法,即首先初步确定结构光条纹初始位置并以其为起点检测结构光条纹以去除干扰光条纹,然后从结构光条纹初始位置开始上下搜索并求结构光条纹亚像素中心线,最后使用该方法对投射在高温大尺寸锻件的结构光条纹进行识别和亚像素中心提取实验。

1 大型高温锻件图像采集系统

1.1 高温锻件图像采集方法

使用 CCD 相机直接拍摄高温锻件时,由于高温锻件辐射光线的影响不能拍摄到高温锻件清晰的图像.测量高温锻件的尺寸首先要滤除高温锻件辐射光线.锻件在高温时辐射能量近似满足黑体辐射定律,不同温度下黑体辐射曲线和黑白 CCD 相机感光曲线如图 1 所示(图中 η 为黑白 CCD 相机量子效率, ψ 为相对辐射能量).图中包含黑体在 3 个不同温度下的相对能量辐射曲线,3 个温度值分别为 750、1 100 和 1 250 $^{\circ}\text{C}$.从温度曲线可看出黑体辐射具有以下 3 个规律:(1) 随温度升高黑体辐射能量增加;(2) 各黑体辐射能量曲线仅有一个峰值;(3) 随温度升高峰值向短波方向移动.锻件的锻造温度随材料的不同而不同,一般在 750~1 200 $^{\circ}\text{C}$.从图中黑体辐射曲线可知,在该温度范围内黑体辐射曲线的峰值在红外波段内.在可见光波段内(380~780 nm),黑体辐射能量随波长减小而降低.黑白 CCD 感光度曲线表明,黑白 CCD 相机对可见光、紫外及近红外光线敏感.黑体是理想的辐射体,高温锻件辐射能量低于黑体辐射能量,因此,为滤除高温锻件辐射光线,选择允许可见光波长范围内波长较短的波

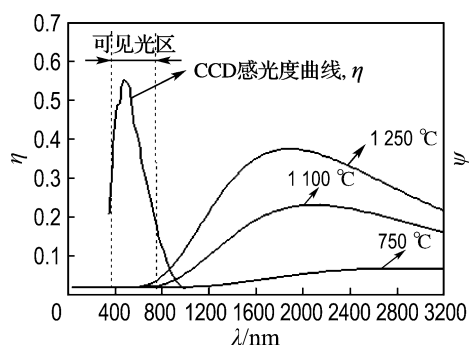


图 1 不同温度下黑体辐射曲线和 CCD 感光度曲线

Fig. 1 Black body radiation curves at various temperatures and the relative sensitivity of a CCD camera

段及紫外波段通过的短波通滤波片.为拍摄到锻件清晰的图像还需使用照明设备投射包含可见光范围内波长较短部分及紫外波段的光线到锻件表面,此方法可采集高温锻件图像。

1.2 高温锻件结构光图像采集系统

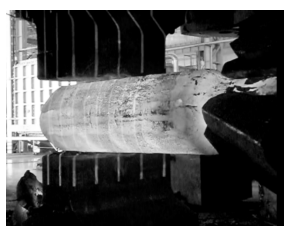
以上述高温锻件图像采集方法为基础,使用双目视觉结合结构光投影的高温锻件尺寸测量系统如图 2 所示.投影设备选用 DLP 投影仪,该投影仪投射的光线包含从紫外到红外的波段,且在可见光的蓝、紫光线范围内辐射光线较强.高温锻件尺寸测量时,DLP 投影仪投射结构光线到锻件表面,锻件辐射光线和反射的投影光线透过短波通滤波片使 CCD 相机感光;在透过短波通滤波片时锻件辐射光线被滤除,从而可拍摄到锻件接近常温的图像。



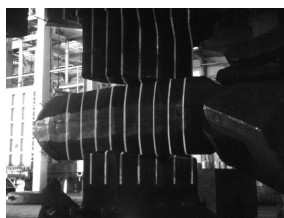
图 2 高温锻件尺寸测量系统

Fig. 2 The dimensional measurement system of hot forging

图 3 是 26 t 大型锻件图像.图 3(a)是直接拍摄的锻件图像,由于锻件辐射光线的影响,投射在锻件表面的结构光条纹被淹没,无法识别.图 3(b)是使用光谱选择性图像采集方法拍摄的锻件结构光图像,在滤除锻件辐射光线后,图像中锻件表面投射的结构光条纹清晰且不受锻件辐射光线的影响。



(a) 直接拍摄的锻件图像



(b) 使用光谱选择性图像采集方法拍摄的锻件结构光图像

图 3 26 t 锻件图像

Fig. 3 Image of 26 t forging

2 锻件表面结构光条纹初始位置识别

索区域内如光条纹在截面上均符合近似高斯分

2.1 结构光条纹初始位置粗定位

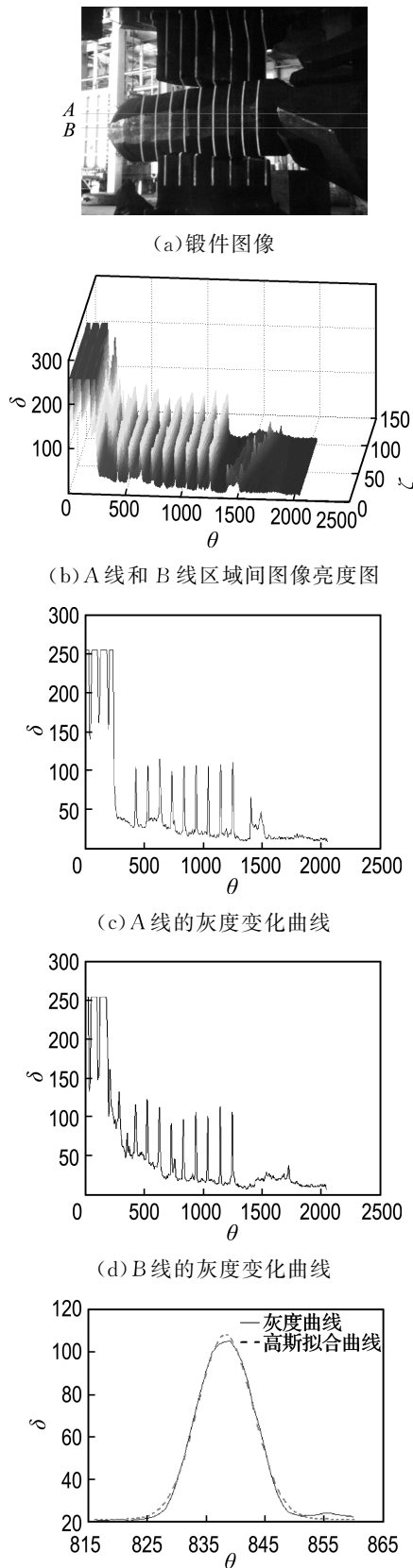
大型锻件加工现场环境复杂,在消除锻件辐射的光线后拍摄的锻件图片仍会受到自然光、照明光线,甚至焊接时辐射光线等外界光线的影响。由于干扰光线变化及锻件的移动等因素影响,通过将拍摄的投射结构光图像和没有投射结构光图像相减来获得锻件表面投射结构光条纹的方法难以实现。为准确提取结构光条纹的中心线,需首先检测锻件表面投射结构光条纹。

大型锻件在加工中相对下砧座上下移动,且其位移在一定范围内。根据图像中锻件位移范围,可在行方向上一定间距内选定两条行方向直线,两线间距可根据图像中锻件的位置和大小预先设定,对于 26 t 锻件图像两线的间距为 100 像素。图像中两线间灰度变化如图 4 所示,为消除锻件图像上的噪声,采用均值滤波对图像进行了预处理。图 4(a)中两线 A 和 B 为选定的图像中两条行方向直线,图 4(b)为图 4(a)中两线间图像的亮度图,图 4(c)为图 4(a)中 A 线的灰度变化曲线,图 4(d)为图 4(a)中 B 线的灰度变化曲线,图 4(e)为 A 线上第 5 个光条纹灰度变化曲线及高斯拟合曲线。由图 4(e)可看出结构光条纹在行方向上的光强分布不均匀,呈近似高斯分布。图 4(b)中投射在锻件表面的结构光条纹在 A 线和 B 线间的各截面上呈此种分布,而干扰光线在截面上仅在一定位置或小范围内近似呈现此种分布。结构光横截面呈近似高斯分布时,其光强有最大值,且向两边灰度值逐渐减小。由图 4(c)和图 4(d)所示的灰度变化曲线可知,在部分位置存在干扰光线。

根据结构光条纹灰度分布特点,为滤除干扰光线,可在图 4(a)中 B 线的行方向上搜索以初步确定沿图 4(a)中 B 线的结构光条纹起始位置。图 5 是锻件图像中沿图 4(a)中 B 线灰度值大于阈值的灰度变化曲线,当图中光条纹宽度为一定像素值时认为是结构光条纹,如宽度远大于或远小于此值则认为是干扰光线。灰度阈值和结构光条纹宽度值根据图像中结构光条纹的灰度值和宽度预先设定。在图 5 所示灰度图中搜索可确定结构光条纹、干扰光条纹范围及各范围的灰度最大值位置 $P(k, l)_{\max} (l = 1, 2, \dots, W)$, 其中 k 表示图像上的第 k 行, W 表示所搜索的光条纹数目。

2.2 结构光条纹初始位置精确检测

以各结构光条纹灰度最大值位置为起点,沿结构光条纹向图 4(a)中 A 线所在的 r 行搜索,搜



(e) A 线上第 5 个光条纹灰度变化曲线及高斯拟合曲线

图 4 图像中两线间灰度变化

Fig. 4 The gray value between two lines in the image

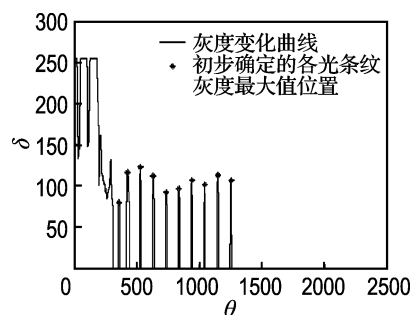


图5 锻件图像中沿B线且灰度值大于阈值60的灰度变化曲线

Fig. 5 Gray value above the threshold 60 along the line B in the image of forging

布,则认为所确定的结构光条纹初始位置正确,否则认为是干扰光条纹.单个结构光条纹判定流程如图6所示.以 $P(k, l)_{\max}$ 为起始点搜索时,在图4(a) $k-1$ 行的 $[P(k, l)_{\max}-6, P(k, l)_{\max}+6]$ 区域内搜索灰度最大值位置 $P(k-1, l)_{\max}$.若区域 $[P(k-1, l)_{\max}-6, P(k-1, l)_{\max}+6]$ 的灰度变化近似符合高斯分布,可认为光条纹 l 的第 $k-1$ 行属于投影结构光条纹,继续搜索 $k-2$ 行直到图4(a)中A线所在的第 r 行或所搜索区域不近似符合高斯分布为止.如果可搜索到图4(a)中A线所在的第 r 行,则确定所搜索结构光条纹的起始点在结构光条纹上,否则起始点在干扰光线上.依

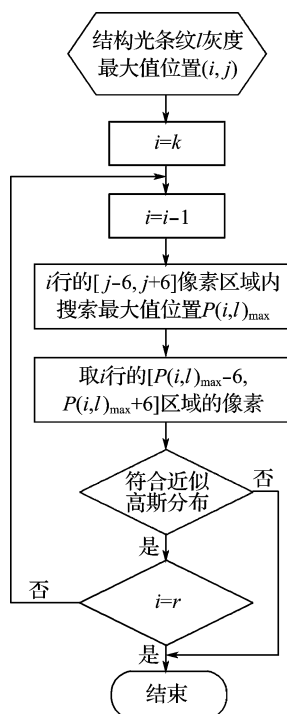


图6 单个结构光条纹精确识别过程流程图

Fig. 6 Flow chart of the accurate recognition of single structured stripe

次搜索各光条纹可去除干扰光条纹,实现图4(a)中B线上各结构光条纹初始位置的定位.

3 结构光条纹亚像素中心快速提取

为实现大型锻件的在线测量,以各结构光条纹起始位置为起点上下搜索光条纹并使用灰度重心法快速计算亚像素中心.在确定 k 行上各结构光条纹最大灰度值所在纵坐标位置后,以光条纹上最大灰度值位置为起点左右搜索确定光条纹在 k 行的范围.设 k 行的第 l 个光条纹灰度最大值位置为 $P(k, l)_{\max}$,其灰度值为 $\delta(k, P(k, l)_{\max})$.为求结构光条纹亚像素中心需先确定结构光条纹的范围,在 k 行上以 $P(k, l)_{\max}$ 为起点向左搜索时如 $\delta(k, P(k, l)_{\max}) \geq \delta(k, P(k, l)_{\max}-1)$,则 $j-1$ 列在光条纹范围内,继续向左搜索直到 $\delta(k, P(k, l)_{\max}-k) \leq \delta(k, P(k, l)_{\max}-k-1)$ ($k=1, 2, \dots$)为止.通过搜索可确定 k 行第 l 个光条纹左侧位置 P_l .同样以 k 行的 $P(k, l)_{\max}$ 为起点向右搜索可确定光条纹的右侧位置 P_r .确定光条纹左右两侧的位置后,在光条纹范围内求灰度均值,设灰度均值为 T_1 ,在光条纹内对灰度值小于 T_1 的光条纹部分再求的均值为 T .将 T 作为阈值对光条纹进行分割,当光条纹内灰度值大于 T 时,取其原值;小于 T 时取零.再使用灰度重心法可求得第 k 行上的第 l 个光条纹的亚像素中心. $(P_m, \delta(k, m))$ ($m=1, 2, \dots, N$)为 k 行第 l 个光条纹范围,光条纹亚像素中心用 P_{cent} 表示:

$$P_{\text{cent}} = \frac{\sum_{m=1}^N (P_m \times \delta(k, m))}{\sum_{m=1}^N \delta(k, m)} \quad (1)$$

式中: N 为 k 行第 l 个光条纹左侧位置 P_l 到右侧位置 P_r 的像素数.第 k 行上其他光条纹的亚像素中心也可用相同的方法求取.图7为灰度重心法求取的 k 行上第 l 个光条纹的光条纹亚像素中心.

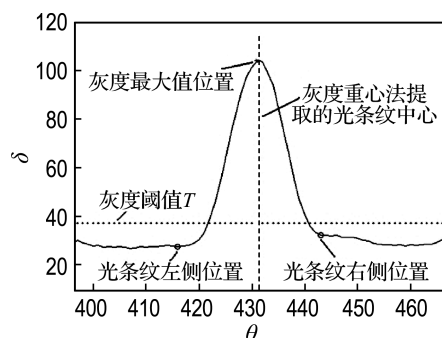


图7 灰度重心法求解的光条纹 l 在第 k 行上的结构光条纹中心

Fig. 7 The center of the stripe l on the row k calculated using the gray centroid method

根据上述第 k 行的第 l 个光条纹亚像素中心求法,通过上下搜索可确定第 l 个光条纹在各行的亚像素中心. 单个结构光条纹亚像素中心提取流程图如图 8 所示. 搜索并计算光条纹的亚像素中心时,先向上搜索并按上述的重心法求结构光条纹亚像素中心,当向上搜索完成后向下搜索并求结构光条纹亚像素中心. 其他结构光条纹亚像素中心也按此过程求解.

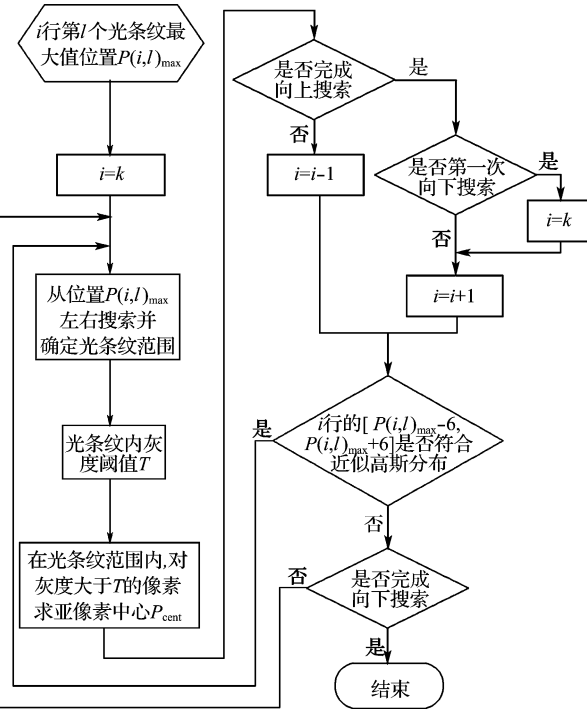
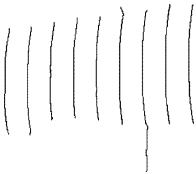


图 8 结构光条纹亚像素中心提取流程图
Fig. 8 Flow chart of extracting the subpixel centers of structured stripes

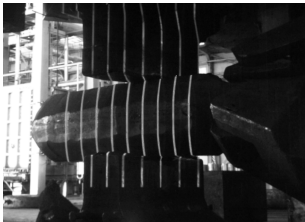
4 实验结果

利用结构光条纹识别和中心提取得到图 9 所示结果. 为验证提取结构光条纹的精度,使用上述方法在常温下的实验室中进行了结构光条纹中心提取实验. 结构光条纹被投射在测量平面上,测量平面为经发黑处理的工件,拍摄时镜头前加装了滤光片. 在外界干扰光源照射工件和没有外界光线干扰情况下分别拍摄了工件的结构光图像. 从拍摄图像中截取的结构光条纹图像如图 10 所示,图 10(a)是受干扰光线影响的图像,图 10(b)是没有干扰光线的图像. 分别对两幅图像中结构光条纹中心进行提取,并在图像的行方向(v 方向)上选取 5 个值对两种情况下求得的结构光中心值进行比较. 由表 1 可以看出,使用本文所述方法提取的结构光条纹中心时,有干扰光线和无干扰光线

两种情况下提取的结构光条纹中心最大误差在 0.12 pixel 以下. 表 1 中各值的单位均为像素. 因此,该方法能有效消除图像中干扰光线对结构光条纹识别的影响,可实现锻件图像中结构光条纹中心的快速、较高精度提取.



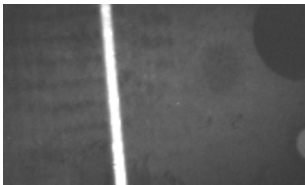
(a)使用本文所述方法检测出来的结构光条纹中心线



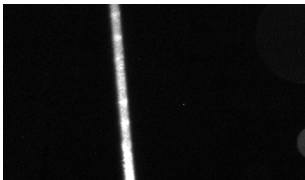
(b)检测出来的结构光条纹中心线与结构光图像的叠加

图 9 结构光条纹中心线提取实验

Fig. 9 The experiment of extracting the center-lines of structured stripes



(a)干扰光线影响下的结构光图像



(b)没有干扰光线的结构光图像

图 10 结构光条纹图像

Fig. 10 Structured light stripe image

表 1 结构光条纹中心 P_{cent} 计算

Tab. 1 The calculated centers P_{cent} of structured light stripes

v/pixel	P_{cent}/pixel		
	有干扰光	无干扰光	误差
850	1 074.985	1 074.906	0.079
900	1 079.392	1 079.323	0.069
950	1 083.857	1 083.741	0.116
1 000	1 088.040	1 087.957	0.083
1 050	1 092.327	1 092.212	0.115

5 结 论

以高温锻件图像采集方法为基础,使用双目视觉系统结合结构光法可测量大型高温锻件尺寸.针对拍摄的锻件图像易受外界光线影响的问题,本文提出了适用于锻件尺寸在线测量的结构光条纹识别和中心提取方法.该方法根据结构光条纹近似符合高斯分布的特性,在一定区域段内搜索并确定结构光条纹的起始点,再以起始点为起点上下搜索并求结构光条纹亚像素中心.实验表明该方法可有效消除干扰光线的影响,具有计算简单、实现快速、稳定性好等特点,能准确地检测出投射在大型锻件表面的结构光条纹中心.

参考文献:

- [1] 聂绍珉,唐景林,郭宝锋,等. 基于 CCD 的大型锻件尺寸测量研究[J]. 塑性工程学报, 2005, **12**(增刊): 85-88
- [2] DWORKIN S B, NYE T J. Image processing for machine vision measurement of hot formed parts [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, **174**:1-6
- [3] 聂绍珉,张 庆,李树奎,等. 大型锻件尺寸 CCD 测量的数学模型研究[J]. 塑性工程学报, 2006, **13**(5): 110-113
- [4] WANG J, QIU Z, LI J. Experimental research on dimensional measurement of hot parts based on CCD [C] // *Proceedings of the International Society for Optical Engineering*. Beijing:ISOE, 2007
- [5] RECH R, MULLER N, LAMM R. Laser measurements on large open die forgings [J]. *Stahl Eisen*, 2006, **126**:53-57
- [6] JIA Z Y, WANG B G, LIU W, *et al.* An improved image acquiring method for machine vision measurement of hot formed parts [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, **210**(2):267-271
- [7] 胡 坤,周富强. 一种条纹中心线快速亚像素提取方法[J]. 光电技术应用, 2005, **20**(6):59-63
- [8] 雷海军,李德华,王建永,等. 一种结构光条纹中心快速检测方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2003, **31**(1):56-57, 67

A method for extracting center-lines of structured light stripes in process of dimension measurement of large forgings

WANG Bang-guo, JIA Zhen-yuan*, LIU Wei, LIU Shuang-jun, DU Jian, JIA Xing-hua

(Key Laboratory for Precision & Non-traditional Machining Technology of Ministry of Education,
Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: It is difficult to measure the dimension of hot large forging accurately in forging process because of the high temperature and poor measuring conditions. Accurate dimension measurement of hot part is very important to improve productivity and reduce scraps during hot forming process. Based on the image acquiring method of hot forgings, binocular structured light system is used to measure the dimension of hot large forgings on-line. Thus, the center-lines of structured light-stripes should be extracted by eliminating other kinds of structured light reflected by hot large forging. A method for extracting the center-lines of structured light-stripes from the single image of hot large forging is proposed. According to a certain threshold, the initial locations of structured light stripes and other kinds of light stripes are determined along a line in the row direction. The cross section of structured light stripe usually obeys the Gaussian distribution, so other kinds of light stripes can be eliminated by searching along the light stripes. Once the start points of light stripes are located in the image, the subpixel centers of structured light stripes can be calculated by searching along the light stripes. Experimental results show that this method is convenient and stable, and can efficiently extract the center-lines of structured light stripes which are projected on the surface of hot large forgings.

Key words: large forging; dimension measurement; structured light stripes