金属表面特性对差动式视觉测量的影响实验

苏国营 曲兴华 张福民
（天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室，天津 300072）

摘要 介绍了一种全面的金属表面反射模型，从理论上论证差动式视觉测量的可行性。在平行光照明下，测量不同级别粗糙度比较样块在入射面内的反射亮度，在大量数据的基础上总结分布规律，以寻求事实依据。搭建视觉测量系统，采集金属工件的明、暗域图像，并对图像差分融合，进行实验验证。结果表明，工件表面的缺陷信息得到了大幅增强，杂乱的背景信息被有效抑制。基于金属表面反射特性提出的差动式视觉测量系统，在提高图像对比度和增强边缘方面显示了其优越性。

关键词 机器视觉；反射分布；平行照明；金属表面粗糙度；差动式融合
中图分类号 TB89 **文献标识码** A **doi**：10.3788/AOS201333.0115001

Experiments on Metal Surface Characteristics′ Effect on Differential Visual Measurement

Su Guoying Qu Xinghua Zhang Fumin
(*State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instrument*, *Tianjin University*, *Tianjin* 300072, *China*)

Abstract A comprehensive metal surface reflection model is introduced to demonstrate the feasibility of the differential visual measurement theory. In order to seek the factual basis, the reflection brightness of some roughness comparison specimens is measured in the plane of incidence, and then the distribution law is summarized based on a large amount of data. A vision system is built, and the images collected from the bright and dark fields are fused by differential algorithm. Experimental results show that the target surface defects are greatly enhanced and the clutter background information is effectively suppressed. The differential visual measurement system based on the reflective properties of the metal surface shows its superiority in improving contrast and enhancing edge of images.

Key words machine vision; reflection distribution; parallel illumination; metal surface roughness; differential fusion
OCIS codes 150.0155; 150.1835; 150.3040; 040.1880

1 引 言

随着计算机视觉技术的不断发展和非接触式测量对视觉技术要求的不断提高，多目视觉检测技术受到了国内外的广泛关注。Montijano 等[1]构造了以多部相机为基站的拓扑网络，实现了一个街区范围的图像的融合。Emilio 等[2]用多目视觉引导焊接机器人，最终达到了 1 mm 的定位和路径追踪精度。张祖勋等[3]提出了多基线正直摄影和多基线交向摄影方法，并对三峡工程的尾水边坡进行了测量实验。该技术代表了机器视觉技术的一种发展方向，且随着研究的深入不断进步，逐渐实用化，不仅成为工业检测、生物医学和虚拟现实等领域的关键技术，而且还被应用于航天遥测、军事侦察和国防建设等领域[4~8]。

收稿日期：2012-08-20；**收到修改稿日期**：2012-09-12
基金项目：天津市自然科学基金(12JCYBJC11000，11ZCGYSF01300)和高等学校博士点基金(20100032120062)资助课题。

作者简介：苏国营(1986—)，男，硕士研究生，主要从事机器视觉方面的研究。E-mail：suying913824@163.com
导师简介：曲兴华(1956—)，男，教授，博士生导师，主要从事精密测量方面的研究。
E-mail：quxinghua@tju.edu.cn

平行光是一种各向异性的照明光源，它的反射光对被测表面的粗糙程度十分敏感，被测表面的粗糙状况会造成反射光成分的强度和空间分布的不同[9~11]；而这种不同是有一定的规律可循的，一些比较成熟的反射模型也已经发表，对各种反射情形做了细致的描绘。本文对金属表面的反射特性做了大量实验分析，从而提出了一种基于平行光照明的差动式多目视觉检测方法[12~14]。从明域和暗域采集被测物图像，然后利用图像灰度信息的差异性和互补性实现图像的差动式融合[15]。这样既能提高前景的显现力，又能去除背景的干扰；分离前后景信息，提高目标边缘饱和度和均匀性的效果非常明显。

2　原理分析

研究金属表面的反射特性对机器视觉的发展有很大的推动作用，目前主要有物理光学和几何光学两种基本方法。比如，Beckmann-Spizzichino 模型是一种物理模型，对镜面尖峰部分的分析很透彻；Torrance-Sparrow 模型是一种几何模型，善于描述反射光中的镜面叶瓣成分[16]。Beckmann-Spizzichino 模型下的反射强度公式为

$$\langle E_2 E_2^* \rangle = \frac{E_o^2 A^2 \cos^2\theta_i}{\lambda^2 R_o^2} e^{-g}\left[\rho_o^2 + \frac{\pi T^2 D^2}{A}\sum_{m=1}^{m=\infty}\frac{g^m}{m!m}\exp\left(\frac{\nu_{xy}^2 T^2}{4m}\right)\right], \tag{1}$$

式中 E_o 为光的电场分量强度，A 为被测表面的微元，θ_i 和 θ_r 分别为光入射角和反射角，λ 为光波长，R_o 为被测点到测量点距离，g 为粗糙度，T 为被测面起伏的相关距离，D，ρ_o 和 ν_{xy} 是有关 θ_i 和 θ_r 的函数。(1)式右边第 1 项表示镜面尖峰部分，第 2 项表示镜面叶瓣部分。当金属表面非常光滑时，第 1 项仅在理想镜面反射方向的周围很小范围内存在较大值，在其他方向均趋于零；第 2 项的值在任何方向均趋于零。当表面粗糙度增大时，第 1 项在任意方向上趋于零，第 2 项在理想镜面反射方向周围一定范围内都有较大值。只是，该模型忽略了遮挡和 2 次反射等影响因素，对镜面叶瓣的估计存在较大偏差。

Torrance-Sparrow 模型利用几何光学中的菲涅耳反射系数进行直接分析，并引入了几何衰减因子 $G(\theta_i,\theta_r,\phi_r)$，因此该模型特别适用于表面粗糙度较高的情况。再结合朗伯理论推导出包含镜面反射叶瓣和漫反射叶瓣两种成分的反射模型，模型辐亮度表达式为

$$L_r = \kappa_{diff}\max[0,(L_i d\omega_i \cos\theta_i)] + \kappa_{spec}\frac{L_i d\omega_i}{\cos\theta_r}\exp\left(-\frac{\alpha^2}{2\sigma_\alpha^2}\right), \tag{2}$$

式中 κ_{diff} 和 κ_{spec} 分别决定漫反射和镜面反射叶瓣部分的能量，L_i 为光源辐亮度，α 为模型中被测表面微元的倾角，σ_α 为倾角的标准差。

综上所述，平行光照明下传感器的图像辐照方程可以写成 3 个反射部分的线性叠加，该模型为

$$I_{im} = C_{dl} + \frac{C_{sl}}{\cos\theta_r}\exp\left(-\frac{\alpha^2}{2\sigma_\alpha^2}\right) + C_{ss}\delta(\theta_i-\theta_r)\delta(\Phi_r), \tag{3}$$

式中 C_{dl}，C_{sl} 和 C_{ss} 分别代表漫反射叶瓣、镜面叶瓣和镜面尖峰部分的强度。(3)式所示的强度分布如图 1所示。

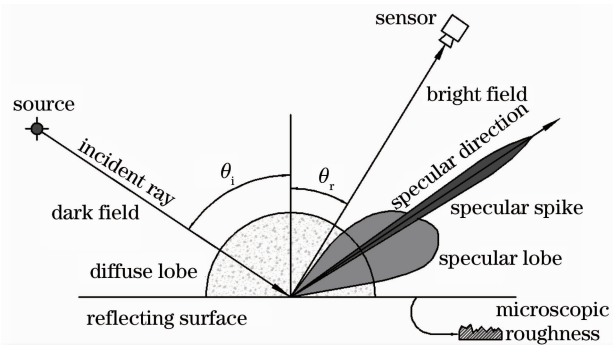

图 1　3 种反射光成分的分布示意图

Fig. 1　Distribution diagram of three reflected light components

3　表面影响的实验验证

3.1　实验方法

实验环境为封闭暗室，排除了环境光等外因的影响。光源为高亮发光二极管(LED)加透镜组制成的平行光照明系统，目标物为标准粗糙度比较样块，检测设备是 PR655 光谱光度/色度/辐射度计。实验装置如图 2 所示。

实验 1，测量目标物表面亮度分布。固定平行光源入射角，以目标物表面法线方向为 0°，以 5°为间隔，测量反射面内 $-80°\leqslant\theta_r\leqslant 80°$ 角度范围的亮度分布。

实验 2，测量光源入射角度对目标物表面亮度分布的影响。把光源入射角设定为 30°，45°和 60°，

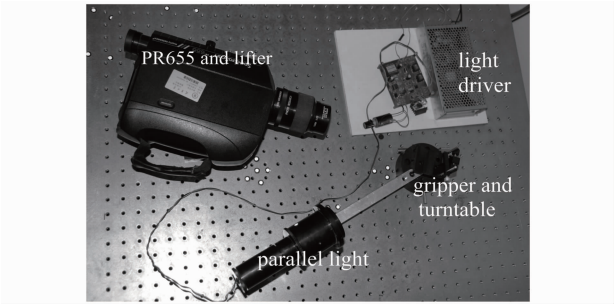

图 2 实验装置图

Fig. 2 Experiment set-up

分别重复实验 1 过程。

实验 3，测量目标物表面粗糙度对反射光成分分布的影响。改用不同粗糙度的比较样块，分别重复实验 2。

测得光源的峰值波长为 448 nm，光强主要集中在 430～480 nm 和 510～630 nm 两个波段。所以，选择了两组有代表性的粗糙度比较样块作为实验目标物。第 1 组包括两块表面粗糙度 R_a（R_a 为中心线平均粗糙度）分别为 3.2 μm 和 0.8 μm 的刨床样块，第二组包括两块表面粗糙度 R_a 分别为 0.8 μm 和 0.1 μm 的平磨对比块。图 3 为实验中选用的 4 块粗糙度比较样块。

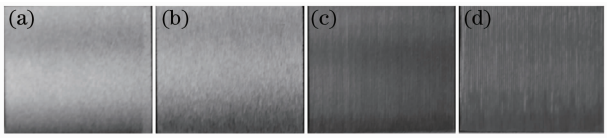

图 3 粗糙度比较样块(a)平磨 R_a=0.1 μm，(b)平磨 R_a=0.8 μm，(c)刨床 R_a=0.8 μm 和(d)刨床 R_a=3.2 μm

Fig. 3 Roughness comparison specimens. (a) Flat ground R_a = 0.1 μm, (b) flat ground R_a = 0.8 μm, (c) planed R_a=0.8 μm and (d) planed R_a=3.2 μm

3.2 实验结果与分析

3.2.1 一般的亮度分布规律

以如图 3(b)所示的 R_a=0.8 μm 的平磨样块为例，光源入射角分别设定为 30°，45°和 60°，测得 3 组反射光亮度分布数据并绘制成图 4 所示曲线。

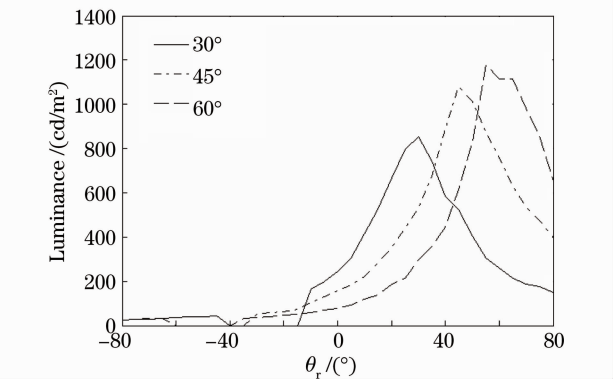

图 4 平磨样块一般反射分布

Fig. 4 General reflection distribution of flat ground specimen

在实验过程中，PR655 和平行光源在一定观测角度内会发生遮挡，如入射角为 30°时，出射角－40°～－15°范围内的数据缺失。但数据总体分布规律基本符合光反射模型：在镜面反射方向及附近较小角度范围内有很强的反射光；当观测角度逐渐偏离理想镜面反射方向时，反射光亮度迅速降低；在暗域，反射光亮度比较低，同时亮度变化幅度也比较小。3 组数据中，镜面尖峰的位置和强度发生了相应变化，但分布规律并没有差异。

3.2.2 粗糙度对亮度分布的影响

实验选取两组不同粗糙度的样块，并把光源入射角设定为 30°。图 5(a)为两种不同粗糙度平磨样块的亮度分布。R_a=0.1 μm 时，粗糙度小于光源波长，镜面尖峰部分非常明显；当 R_a=0.8 μm时，粗

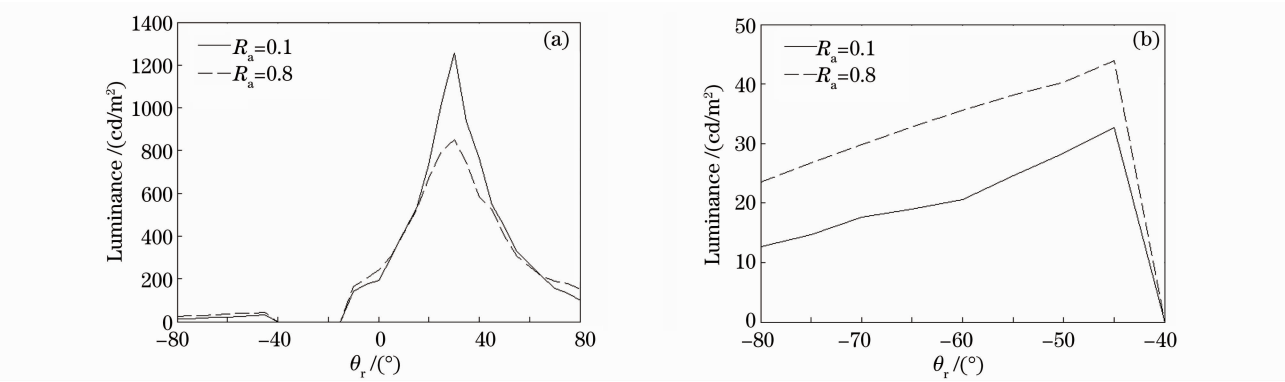

图 5 不同粗糙度平磨样块的反射分布

Fig. 5 Reflection distribution of flat ground specimens with different roughnesses

糙度与光源波长相当，尖峰部分有所下降，漫反射成分却有一定程度的加强，图 5(b)为暗域部分的放大图。

图 6(a)为两种不同粗糙度刨床样块的亮度分布，图 6(b)为暗域部分的放大图。$R_a=3.2$ μm 时，粗糙度远大于光源波长，镜面尖峰已经消失，而镜面叶瓣及漫反射部分相较 $R_a=0.8$ μm 的样块是有所增强的。

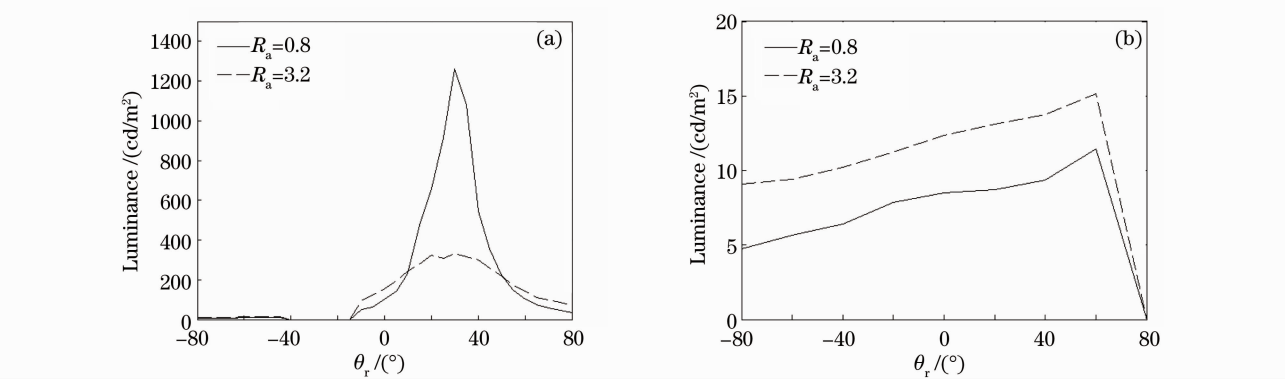

图 6　不同粗糙度刨床样块的反射分布

Fig. 6　Reflection distribution of planed specimens with different roughnesses

实验结果表明，在同一种加工方式下，粗糙度变化会影响反射光成分的分布，并且这种影响与经典反射模型的推导结果吻合度比较好。

3.2.3　入射角度对亮度分布的影响

以两块不同粗糙度平磨样块为研究对象，在以 30°，45°和 60°角度入射的光源的照射下，表面亮度分布如图 7 所示。尽管光源的发光亮度并没有改变，但是反射光分布发生了变化。1)随着光源入射角的增大，镜面反射方向的反射光亮度增强；2)随着光源入射角的增大，高亮区的分布越发集中在镜面反射方向附近；3)随着光源入射角的增大，漫反射成分有减少的趋势。因此，光源入射角过大会导致明域相机的饱和、暗域相机的曝光不足，从而影响成像质量；同时，相机拍摄角度过大也会造成目标物在图像中较大的形变，不利于图像的精确处理。所以，在选择光源和相机的放置位置时，不宜选择较大的照射和拍摄角度。

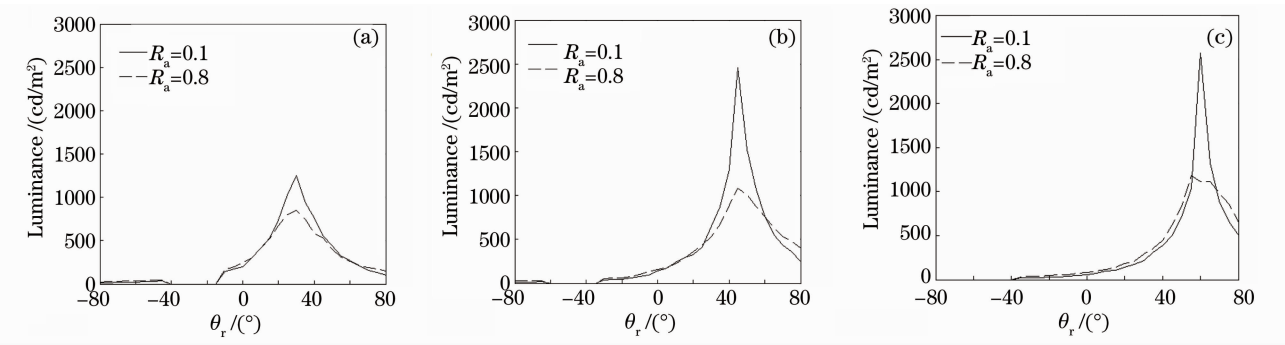

图 7　不同照明角度下反射分布。(a) 30°；(b) 45°；(a) 60°

Fig. 7　Reflection distribution with different incident angles. (a) 30°; (b) 45°; (a) 60°

4　视觉系统的应用

4.1　系统搭建与图像获取

上述实验与分析证明目标表面亮度与其粗糙度和观测角度具有密切关系，这对本系统中组件及其位姿的选择具有一定的指导性。系统主要由平行光源和 3 台相机搭建而成，3 台相机与光源位于同一个平面内，其中光源入射角约为 45°，而相机 1 观测角度为 45°，相机 2 观测角为－30°，相机 3 观测角为 0°，分别用于获取明域、暗域和中间基准图像。装置示意图如图 8 所示。

实验中选择的研究对象是圆片形钕铁硼工件，其表面为光滑度较高的镀层，系统需要检测表面缺陷并测量工件外形尺寸。实验分别以带有麻坑和裂纹缺陷的两个工件作为对象，3 相机得到的图像分别如图 9 所示。

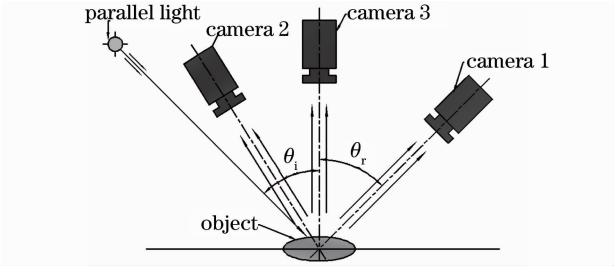

图 8 视觉测量装置示意图

Fig. 8 Schematic of visual measurement device

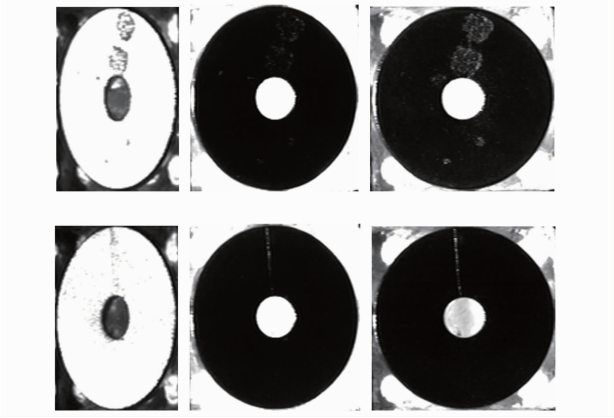

图 9 实验对象的三相机图像 I_{mB}、I_{mD} 和 I_{mM}

Fig. 9 Images of subject I_{mB}, I_{mD} and I_{mM}

相对于工件光滑的镀层表面，缺陷处的粗糙度比较高。所以，在明域图像中光滑表面的亮度基本饱和，较细的裂纹缺陷几乎被淹没，只有麻坑处的灰度较低还可辨识；暗域图像中光滑表面的灰度很低，缺陷却显示出较高的亮度；基准图像的情况与暗域图像相似，这是由于只有在镜面反射方向附近的较小范围内，光滑表面的反射光强于粗糙表面，而相机3是平行于法线的。上述实验结果印证了原理分析，与实验规律也是相符的。

4.2 图像处理

利用直接线性变换（DLT）算法将明域、暗域图像复原到基准图像坐标系中，然后对图像进行差分融合处理，结果如图10所示。

图10(a)和(c)由 $I_{mB}-5I_{mM}$ 得到，图10(b)和(d)则由 $I_{mB}-10I_{mD}$ 得到。将两种处理结果与图9中的原始图像相比，两种缺陷的对比度均得到了明显提高，较小的麻坑缺陷也得到良好的体现；并且杂乱的背景信息被消除了，这对于提取工件的边缘信息也有很大的帮助。

为了更好地说明该方法的优势，选取了两种较常用的视觉检测方法作为对比，分别是日光灯照明的单目视觉和积分球光源照明的单目视觉检测。结果如图11所示。图11(a)为本文所提的方法，图11(b)

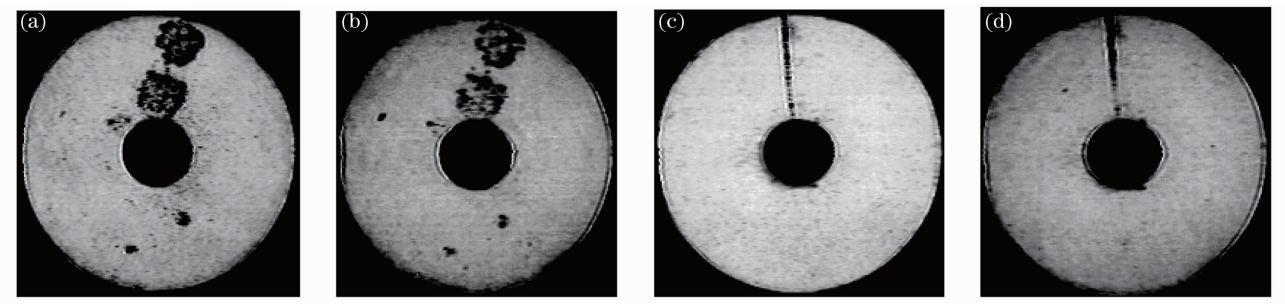

图 10 差分融合后的图像

Fig. 10 Differential fused images

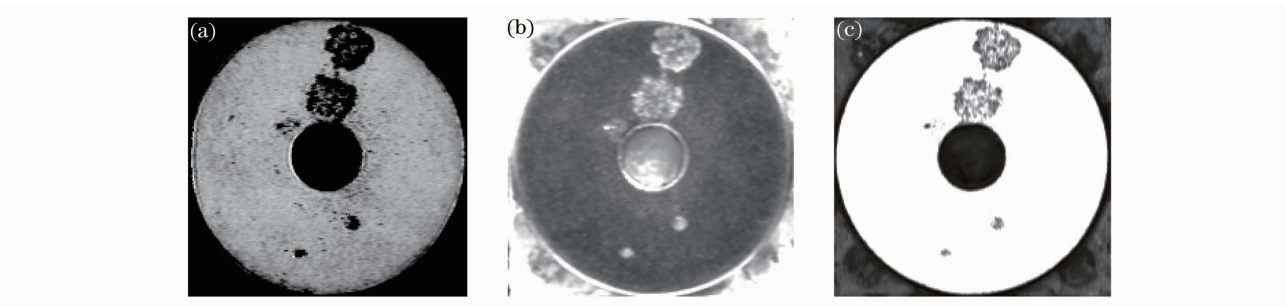

图 11 对比图像

Fig. 11 Contrast images

为日光灯照明法，图 11(c)为积分球光源照明法。求 3 幅图像的整体对比度，结果分别为 71.67，50.19 和 78.98。本文所提方法与积分球光源照明法的对比度相当，且比日光灯照明下的整体效果要好很多。然后对图 11 的缺陷处的局部对比度进行分析，结果分别为 73.13，34.97 和 46.35。数据显示差动式视觉检测方法的优势非常明显，说明该方法对图像缺陷的显现力有很强的提高能力。

5 结　论

实验结果显示，过大的光源入射角会影响图像的质量，使明域图像容易饱和，在视觉系统中把光源入射角定为 30°效果比较好。在平行光照明条件下，具有不同粗糙度的前景和背景在明域和暗域中呈相反的显现方式。利用 DLT 算法和差分融合算法对工件图像做了处理，大幅提高了表面缺陷的对比度；还成功地抑制了背景无用信息的影响，降低了边缘眩光强度，增强了工件和缺陷的边缘。但由于图像配准算法固有的误差以及被测物缺陷处的深度，会使融合图像中的缺陷边缘产生一些偏差，对测量精度有一定的负面影响。不过这种影响可以通过改进配准算法加以修正。

参 考 文 献

1 E. Montijano, C. Sagues. Distributed multi-camera visual mapping using topological maps of planar regions [J]. *Pattern Recogn.*, 2011, **44**(7): 1528～1539

2 J. Emilio, R. Sergio, J. Michael *et al.*. An efficient multi-camera, multi-target scheme for the three-dimensional control of robots using uncalibrated vision [J]. *Robot. CIM-INT Manuf.*, 2003, **19**(5): 387～400

3 Zhang Zuxun, Yang Shengchun, Zhang Jianqing. Multi-baseline digital close-range photogrammetry [J]. *Geospatial Information*, 2007, **5**(1): 1～4
张祖勋，杨生春，张剑清. 多基线数字近景摄影测量[J]. 地理空间信息，2007，**5**(1)：1～4

4 S. Hata, D. Shima, K. Kaida. Relative stereo method for 3-D measurement in production lines [C]. IEEE Emerging Technologies and Factory Automation, 2003, **2**:479～482

5 Z. Wei, G. Zhang. Inspecting verticality of cylindrical workpieces via multi-vision sensors based on structured light [J]. *Opt. Laser. Eng.*, 2005, **43**(10): 1167～1178

6 Gao Shiyou, Ma Lei, Zhang Runsheng. Method of monitoring cutting point state in laser cutting plank process based on vision [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(2): 0203007
高士友，马　雷，张润生. 基于视觉激光切割厚板切割状态监控方法[J]. 中国激光，2012，**39**(2)：0203007

7 M. Ho, C. Tseng, C. Lien *et al.*. A multi-view vision-based hand motion capturing system [J]. *Pattern Recogn.*, 2011, **44**(2): 443～453

8 A. Kumar. Computer-vision-based fabric defect detection: a survey [J]. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2008, **55**(1): 348～363

9 Y. Cai, X. Qin, Q. Liu *et al.*. Study on high-precision inspection multi-vision cameras space layout [C]. Second International Conference on Communication Systems, Networks and Applications, 2010, **1**: 168～171

10 Yang Yufeng, Wu Zhensen, Cao Yunhua. Optical constants deduction and scattering bidirectional reflectance distribution function computation of alloy aluminum surface in near infrared waveband [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 0229001
杨玉峰，吴振森，曹运华. 合金铝表面近红外波段光学常数的反演与双向反射分布函数的计算[J]. 光学学报，2011，**31**(2)：0229001

11 G. He, L. Lao. The multi-vision method for localization using modified Hough transform [C]. World Congress on Computer Science and Information Engineering, 2009

12 Xiao Yongliang, Su Xianyu, Chen Wenjing. Fringe reflection photogrammetry based on pose estimation with free planar mirror reflection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(5): 0512003
肖永亮，苏显渝，陈文静. 基于自由镜面反射位姿评估的条纹反射摄影测量[J]. 光学学报，2012，**32**(5)：0512003

13 G. Rosati, G. Boschetti, A. Biondi *et al.*. Real-time defect detection on highly reflective curved surfaces [J]. *Opt. Laser. Eng.*, 2009, **47**(2-3): 379～384

14 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

15 Hou Junjie, Wei Xinguo, Sun Junhua. Calibration method for binocular vision based on matching synthetic images of concentric circles [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(3): 0315003
侯俊洁，魏新国，孙军华. 基于同心圆合成图像匹配的双目视觉标定[J]. 光学学报，2012，**32**(3)：0315003

16 S. K. Nayar, E. Ikeuchi, T. Kanade. Surface reflection: physical and geometrical perspectives [J]. *IEEE Trans. Pattern Anal.*, 1991, **13**(7): 611～634

栏目编辑：李文喆