

基于双频相移的机器视觉自适应照明测量方法

高嘉乐*, 吕辰刚, 戚皓, 鹏飞

天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300071

摘要 为了解决机器视觉测量中,由被测物体表面结构差异或反射率不同而引起的视觉质量问题,提出一种新型的基于投影仪-相机系统的自适应照明方法。该方法采用双频光栅条纹,可以结合高低频相移方法的特点进行相位解包,因而比传统单一频率的条纹进行解包相位精度更高,能够提升测量过程中所必须获取深度值的精度。同时,该方法利用彩色图像多通道的特点,不同通道处理不同频率的条纹光栅,相较于黑白图像测量的方法速度提升一倍。所提出的双频相移自适应照明方法,可以满足机器视觉测量中的高精度高速度需求,提升机器视觉在线检测的能力,可以广泛应用于工业检测领域与图像识别领域。

关键词 机器视觉; 四步相移; 双频; 自适应照明

中图分类号 TP751

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.031502

Adaptive Illumination Method for Machine Vision Based on Dual-Frequency Phase Shift Profilometry

Gao Jiale*, Lü Chengang, Qi Hao, Peng Fei

School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300071, China

Abstract In order to solve the visual quality problem caused by the different structure or reflectivity of the object surface, a new adaptive illumination method based on camera-projector system is proposed. By adopting the dual-frequency grating fringes, both high and low frequency phase shift characteristics can be combined and used for unwrapping phase, which is more accurate than the traditional single frequency fringe unwrapping method. Thus, the necessary depth accuracy is improved in the measured process. Furthermore, different channels deal with different frequencies of fringe gratings by using the characteristic of the multiple channels of colored images. This method is twice as fast as the black-and-white image measurement method. Therefore, the dual-frequency phase shift adaptive method can meet the requirement of high speed and accuracy in machine vision measurement, and thus improves the on-line detection ability and can be widely used for industrial detection and image recognition.

Key words machine vision; four-step phase shift profilometry; dual-frequency; adaptive illumination

OCIS codes 150.0155; 100.3010; 100.2960

1 引言

机器视觉是通过图像采集设备获得图像,根据图像判断物体的相应状态的一种技术,在机械^[1]、自动化^[2]、探测^[3]等领域起着越来越重要的作用。图像质量决定了判断的准确性。照明系统是机器视觉中不可缺少的一部分,只有在良好的光照条件下,相机才能够采集到清晰的图像。然而,由于物体表面

结构或者材料不同,会造成物体表面反射率的不同。当物体表面存在高反射率部分时,会出现像素过饱和现象,导致图像中物体细节丢失;相反,低反射率部分会出现暗淡,依然不能看清所有物体的细节。所以,简单的照明系统就不能满足机器视觉图像采集时照明的需求。

自适应照明是目前解决上述问题的一种手段。通过光栅相位的信息获得复杂物体每一像素点的深

收稿日期: 2018-07-19; 修回日期: 2018-08-06; 录用日期: 2018-08-22

基金项目: 国家自然科学基金(61205075,61575143,61571320)

* E-mail: gaojiale@tju.edu.cn

度值,这是自适应照明方法进行的必要条件。最常用的测量深度信息的方法为傅里叶变换法和相移法。傅里叶变换方法是依靠投影在物体表面的畸变条纹来获取物体深度信息的一种非接触式测量方法。Takeda等^[4]最先提出投影光栅条纹,利用傅里叶变换来获得三维物体形貌。在此之后,傅里叶变换方法又获得了长足的发展^[5],Wen等^[6]提出在傅里叶变换中的相位高度标定方法,避免了系统参数的直接测量;在文献^[7]中,作者利用傅里叶变换方法获取三维物体的深度信息,完成自适应照明过程。然而考虑到傅里叶变换方法的滤波过程,无法将除基频分量以外的其他部分分量完全滤除,会引入较大误差。并且,傅里叶变换方法复杂的计算会影响整体的运算速度。相移方法^[8]也是一种能够通过图像获得像素深度的有效方法,因为它的计算仅仅是在时域的运算,所以运算速度比傅里叶变换方法更快,而且它是一种点对点的运算,拥有更高的计算精度,但是传统的单色相移方法需要多次拍摄采集,影响整个过程的速度。

本文应用彩色多通道的特性解决了多频多次采集拍摄的问题,在解决了颜色串扰问题的基础上,实现了多频情况下的单次采集,使得投影图像次数减少,从而获得更快的计算速度。采用双频技术是因为在相位解包裹时,高频图像获得细节信息,低频图像获得轮廓信息,选取合适的频率比值,可以利用这两种频率进行相位解包,获得更精确的相位信息,从而获得更好的自适应照明图像。自适应照明需要多次迭代来达到预期的效果。迭代停止是基于人眼的直觉判断,当人眼能够看到物体全部细节时,迭代就可以停止。为了避免主观判断,引入对比度和熵函数的方法来判断图像的质量,通过分析,能够给出判断迭代停止的条件。实验结果表明,该方法可以有效地调整物体像素亮度,从而得到细节清晰的高质量图像。

2 基本原理

2.1 自适应照明结构

在均匀光照射下,物体表面的高反射率和低反射率部分都会影响图像质量,需要增加低反射率区域的曝光度来获得合适的照明,反之亦然。因为物体表面凹凸不平,所以无法进行统一的光线调整,因此需要获得物体表面的深度图。得到深度图之后,根据下式开始进入迭代阶段:

$$C_{N+1}(x,y) = C_N(x,y) + h(x,y) [P_N(x,y) - L_N(x,y)], \quad (1)$$

式中: $C_N(x,y)$ 为相机采集的图像; $P_N(x,y)$ 为相应投影仪投影出的图像; $L_N(x,y)$ 是图像 $C_N(x,y)$ 滤除高频分量以后所得到的图像; $h(x,y)$ 为对应像素的深度值; N 代表迭代次数。根据(1)式可得,随着迭代次数的增加,滤除高频分量后的图像 $L_N(x,y)$ 会越来越接近于滤除高频分量前的图像 $C_N(x,y)$,换句话说,每次迭代后的图像变化越来越小,所以在迭代过程中,可以找到全局的最优解,即最佳的图像。图1为自适应照明过程的结构图,使用(1)式逐渐改变投影到图像表面的照明强度,高反射率部分降低强度,低反射率部分增强强度,之后,将新处理的图像用投影仪投射到物体表面,继续采集、处理、迭代的过程,直到相机采集到清晰的图像为止。

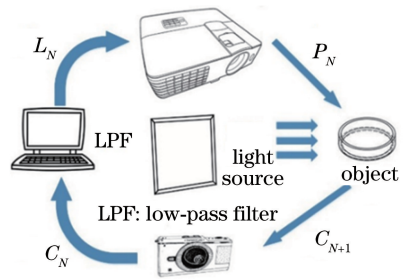


图1 自适应照明结构图

Fig. 1 Schematic of adaptive illumination

2.2 深度值获取

获得物体表面的深度信息是自适应照明的基础,相移法是通过相位来获得深度信息的一种非接触式测量方法,利用三角形相似原则建立相位与深度的关系,如图2所示。

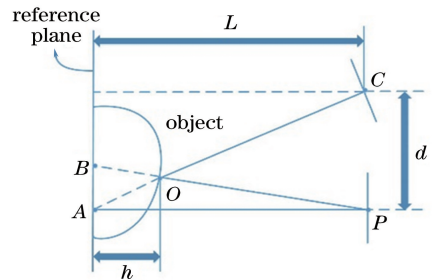


图2 深度测量实验基本结构图

Fig. 2 Basic schematic of depth measurement

点C、P分别代表照相机与投影仪的入射瞳,直线CP平行于参考平面, h 表示物体上某一点相对于参考平面的深度, L 代表CP到参考平面的距离, d 代表投影仪与相机的距离。根据图2可以得出点O的相位与点B的相同,故 $\Delta\phi_{AB}$ 是物体表面O点相对于参考平面的相位差值,也是A点与B点的相

位差。

通过数学关系,可以得到深度 h 与相位 $\Delta\phi_{AB}$ 之间的关系式:

$$h = \frac{L \cdot \Delta\phi_{AB}}{\Delta\phi_{AB} + 2\pi f_0 d}, \quad (2)$$

根据四步相移法,需要投影 4 幅相位不同的条纹图像,将条纹投影到目标物体表面。由于物体高度对于条纹的调制,得到畸变条纹,这 4 幅畸变条纹图像强度 $I_i(x, y)$ 的表达式为

$$I_i = A(x, y) + B(x, y) \cos\left[\phi(x, y) + \frac{\pi}{2}i\right], i = 0, 1, 2, 3, \quad (3)$$

式中 $A(x, y)$ 是背景强度, $B(x, y)$ 是物体表面的反射率。通过 (3) 式可以得到相位 $\phi(x, y)$ 的表达式为

$$\phi(x, y) = \arctan \frac{I_1(x, y) - I_3(x, y)}{I_2(x, y) - I_4(x, y)}, \quad (4)$$

式中 $\phi(x, y)$ 是范围在 $[-\pi, \pi]$ 的包裹相位, 相位中

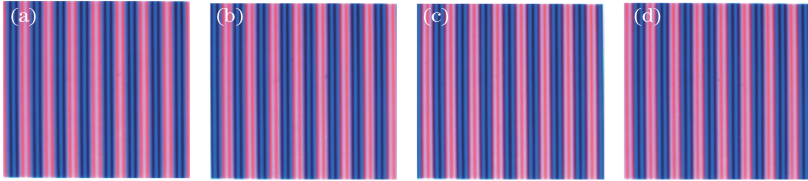


图 3 双频彩色四步相移条纹,相移分别为(a) 0,(b) $\pi/2$,(c) π ,(d) $3\pi/2$

Fig. 3 Dual-frequency color four step phase-shifting fringe pattern. The phase shift

(a) 0, (b) $\pi/2$, (c) π , and (d) $3\pi/2$, respectively

首先,当场景中无物体时,投影仪投射相移条纹到参考平面,相机获取条纹信息;其次,将目标物体放到场景中,条纹受到物体表面调制而发生畸变;最后由相机采集畸变图像,进行运算,得到物体表面像素的深度信息。实验结果与曲线均采用 MATLAB 编程实现,计算机使用 Corei 7 处理器、8 G 内存的工控机完成实验,实验所用设备如表 1 所示。

表 1 实验设备

Table 1 Experiment equipment

Equipment	Brand	Model number	Resolution / Frame rate / (pixel \times pixel) (frame \cdot s $^{-1}$)
CCD camera	Gray	FL2G-	1288 \times 964 30
	Point	13S2C	
Projector	Epson	EB-C740X	1024 \times 768 —
Light source	Philips	39057	— —
PC	Advantech	UNO-2483G	— —

携带着目标物体的信息,不能够使用有 2π 跳变的相位来进行计算。包裹相位需要解包裹才能使用。采用双频技术来进行相位解包,用于计算的公式为

$$\varphi_h = \phi_h + 2\pi n(x, y), \quad (5)$$

$$n(x, y) = \text{int}\left[\frac{k\varphi_l(x, y) - \phi_h(x, y)}{2\pi}\right], \quad (6)$$

式中 φ_h 是高频分量的解包裹相位, ϕ_h 为高频分量的包裹相位, φ_l 为低频分量的解包裹相位, int 是取整操作, k 代表高频与低频的比值^[9]。

3 实验与讨论

3.1 双频四步相移

由于相机投影仪等设备绿色分量与红蓝分量的串扰最严重,会造成颜色串扰现象,故将绿色通道设置为没有条纹,高频和低频相移条纹分别输入红色、蓝色通道。利用这种方法,投影条纹次数要比单纯使用黑白图像处理的条纹投影次数减少一倍,这也提高了获得深度信息的速度,四步相移条纹如图 3 所示。

相位展开是相移技术的关键,有效的相位展开算法为自适应照明奠定了基础。利用 (5) 和 (6) 式得到的相位图如图 4 所示。

根据 (6) 式,低频条纹获取目标物体轮廓信息,高频条纹获取细节信息。通过计算,得到目标物体表面深度分布图如图 5 所示。

3.2 自适应照明

首先,讨论强光照射下的情况,以带有花纹的铝盖为实验对象,可以看出,图 6(a) 中会丢失盖子的细节信息,经过自适应照明过程,图 6(c) 中可以看到清盖子上的花纹图案。

在轻微过饱和的情况下,如图 6(b) 所示,像素值大于 200 的有 81265 个像素,占有所有像素的 31.92%。在迭代之后,图 6(c) 清晰地显示了铝盖表面的纹理。从灰度直方分布图看出,大多数像素都集中在 50~200 个灰度值之间,灰度值大于 200 的像素只占像素的 6.5%。

如图 7(a) 和 (e) 所示,红色框内是高反射率部

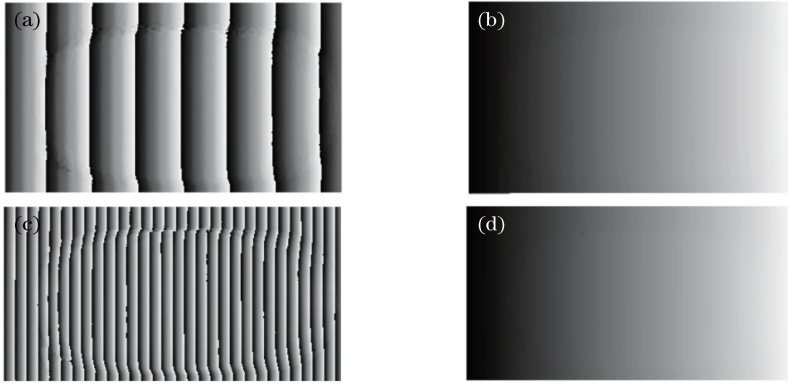


图 4 包裹相位与解包裹相位。(a)低频包裹相位;(b)低频解包裹相位;(c)高频包裹相位;(d)高频解包裹相位

Fig. 4 Wrapped phase and unwrapped phase. (a) Low-frequency wrapped phase; (b) low-frequency unwrapped phase; (c) high-frequency wrapped phase; (d) high-frequency unwrapped phase

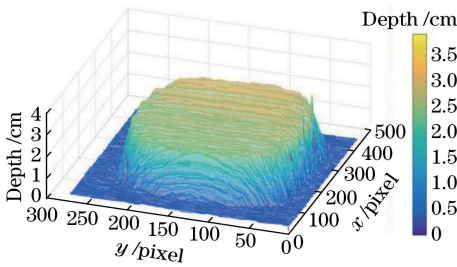


图 5 目标物体表面深度分布图

Fig. 5 Surface depth map of target object

分,像素过度饱和,铝盖上的图案几乎完全被强光覆盖,红框中完全看不到图案。图 7(c)和(g)为自适应照明对图像质量的影响,该系统通过历次的

迭代,调整每个部分的照明,使得图像中的细节显现出来。通过相应的灰度分布图可以看出,像素值主要集中在中间而不是在两端。

讨论了过度饱和的情况之后,验证该方法在弱光情况下的适用性。采用带标签的盒子作为实验事例,在这种情况下,物体表面会出现暗淡部分,如图 8(a)中标签上的图案根本看不到。通过统计,像素值在 0~50 的数量为 42928,大部分像素处于灰度值较低的位置。图 8(c)为经过自适应照明之后得到的图像,该方法提高了暗淡部分的亮度,能够观察到标签上的铅笔图案。通过直方图可以看出,之前出现在不合适范围内的像素点,都集中到了中间部分。

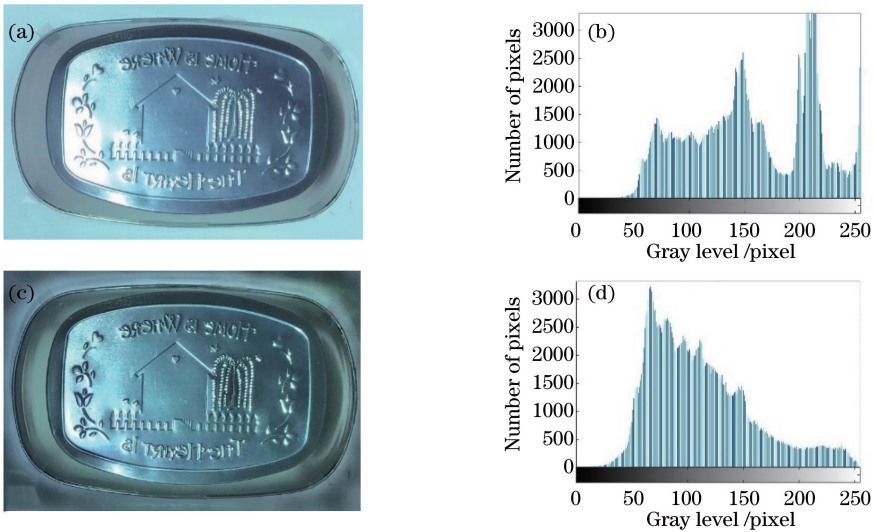


图 6 轻微过饱和情况与相应灰度分布图。(a)自适应照明前物体表面光照分布图;

(b)自适应照明前对应灰度直方图;(c)自适应照明后物体表面光照分布图;(d)自适应照明后对应灰度直方图

Fig. 6 Less oversaturation and gray histograms. (a) Illumination distribution map of object surface before adaptive illumination; (b) corresponding gray histogram before adaptive illumination; (c) illumination distribution map of object surface after adaptive illumination; (d) corresponding gray histogram after adaptive illumination

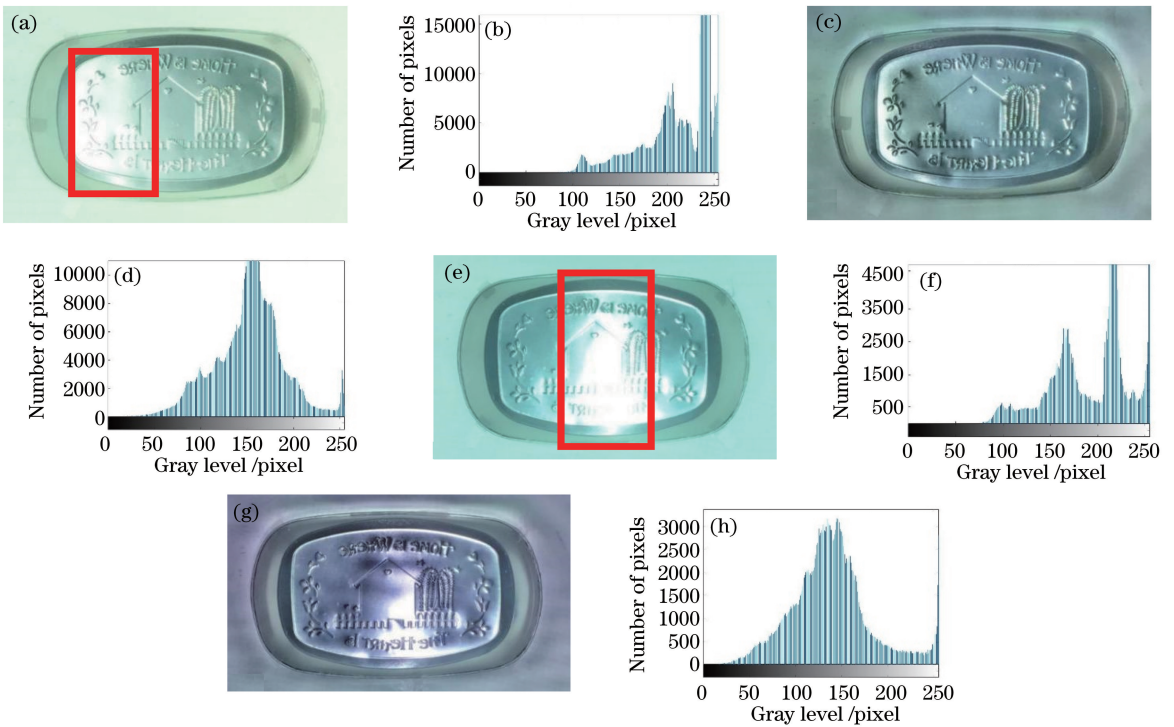


图 7 严重过饱和与相应灰度分布图。(a)(e)自适应照明前物体表面光照分布图；(b)(f)自适应照明前对应灰度直方图；(c)(g)自适应照明后物体表面光照分布图；(d)(h)自适应照明后对应灰度直方图
 Fig. 7 Severe oversaturation and gray histograms. (a)(e) Illumination distribution map of object surface before adaptive illumination; (b)(f) corresponding gray histogram before adaptive illumination; (c)(g) illumination distribution map of object surface after adaptive illumination; (d)(h) corresponding gray histogram after adaptive illumination

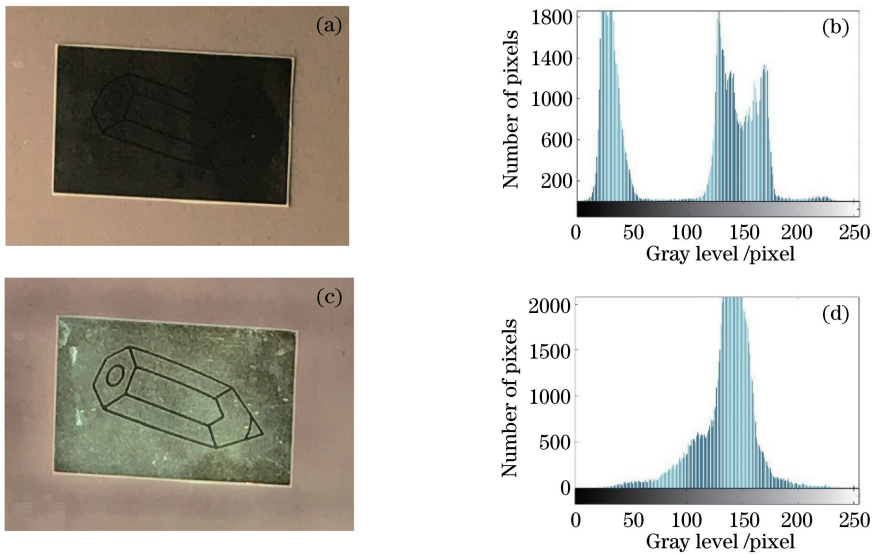


图 8 弱光情况与相应灰度分布图。(a)自适应照明前物体表面光照分布图；(b)自适应照明前对应灰度直方图；(c)自适应照明后物体表面光照分布图；(d)自适应照明后对应灰度直方图
 Fig. 8 Weak light condition and gray histograms. (a) Illumination distribution map of object surface before adaptive illumination; (b) corresponding gray histogram before adaptive illumination; (c) illumination distribution map of object surface after adaptive illumination; (d) corresponding gray histogram after adaptive illumination

通过实验与分析,可以得出结论:无论光照条件和物体表面反射率如何,该方法可以使得暗淡区域增加亮度,使得过饱和区域降低亮度,迭代之后,得到高质量图像。

3.3 实验结果评价

实验结果采用无参考视觉质量信息评价中的对比度函数与熵函数来分别进行评价,起到二次检验的作用,可以更好地验证结论。对比度是指图像黑白像素之间的比率,比率越高,图像质量越好。对比度计算公式为

$$C = \sum_{\delta} \delta(x, y)^2 p_{\delta}(x, y), \quad (7)$$

式中 $\delta(i, j) = |i - j|$ 指相邻像素之间的灰度差异, $p_{\delta}(i, j)$ 代表相邻像素间灰度差的像素分布概率。

以图 7(a) 为例,如图 9 所示,以迭代次数与对比度值为横纵坐标绘制趋势图。初始图的对比度为 102.633,随着迭代次数的增加,对比度上下波动,在第 6 次迭代后,对比度上升到 294.459,之后的迭代中,对比度变化平缓,对比度数值稳定在 200~250 之间,第 6 次迭代是整个照明过程中的全局最优解,对比度的提升意味着得到的图片质量比原始图片要好。根据迭代次数超过一定之后对比度逐渐稳定的特点,可以设置迭代停止条件,当相邻两幅图之间对比度相差小于 2 时,迭代就可以停止,因为此时迭代已经变缓,之前的结果中已经拥有最优图像。

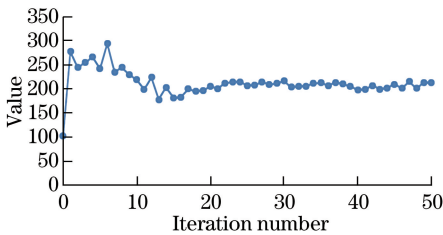


图 9 对比度曲线

Fig. 9 Contrast evaluation

在视觉质量信息评价技术中,熵函数是一种基于统计特征的重要指标,用来测量图像信息的丰富度。根据香农理论,图像的熵表示图像中的信息量,熵越大,图像的细节越详细。熵函数的公式为

$$D(f) = - \sum_{i=0}^{L-1} p_i \ln(p_i). \quad (8)$$

依然以图 7(a) 为例,图 10 由(8)式所得。初始图的熵为 6.9901。通过对图 10 的观察,可以看出最大的熵值是第 6 次迭代的结果(第 6 次迭代后的熵值为 7.4498),与对比度评价结果吻合。通过对对比度与熵函数的二次检验,证明第 6 次迭代之后,图像质量是最佳的。

4 结 论

提出了一种双频彩色四步相移的自适应照明方

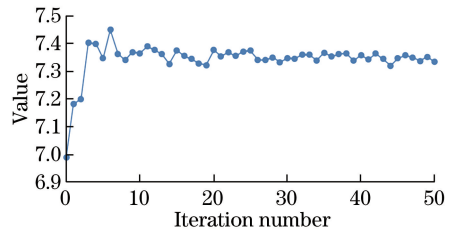


图 10 熵函数评价

Fig. 10 Entropy function evaluation

法,分别对轻微过饱和、过度饱和以及弱光下三种情况进行实验,迭代后,能够看到之前缺失的图像细节信息,并以轻微饱和的情况作为评价对象。从对比度与熵函数两个角度分别进行评价,本文方法能够将对比度由 102.633 提升到 294.459,熵函数由 6.9901 提升到 7.4498,另外得出在对比度相差小于 2 时,可以停止迭代的结论。实验结果表明,利用彩色图像中的红蓝通道完成自适应照明比单纯使用单通道效率更高,无论在强光还是弱光的情况下,在有限次迭代后,均可以得到细节清晰的图片,该方法能够满足工业测量的基本要求,可以广泛应用于工业在线测量领域。

参 考 文 献

- [1] Li M D, Gao X Y, Ye P, *et al.* Design of aspherical double telecentric lens for machine vision [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(7): 070801. 李明东, 高兴宇, 叶鹏, 等. 机器视觉非球面双远心物镜的设计 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(7): 070801.
- [2] Guo M, Hu L L, Zhao J T. Surface defect detection method of ceramic bowl based on Kirsch and Canny operator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(9): 0904001. 郭萌, 胡辽林, 赵江涛. 基于 Kirsch 和 Canny 算子的陶瓷碗表面缺陷检测方法 [J]. *光学学报*, 2016, 36(9): 0904001.
- [3] Zhang L, Yang Y Y, Zhang T L, *et al.* Research of UAV landing guidance technology based on solar-blind ultraviolet imaging [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(7): 0704001. 张磊, 杨雨英, 张铁林, 等. 基于日盲区紫外成像的无人机着陆引导技术研究 [J]. *中国激光*, 2016, 43(7): 0704001.
- [4] Takeda M, Mutoh K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3D object shapes [J]. *Applied Optics*, 1983, 22(24): 3977-3982.
- [5] Su X N, Chen W J. Fourier transform profilometry:

- a review [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2001, 35(5): 263-284.
- [6] Wen Y F, Li S K, Cheng H B, *et al.* Universal calculation formula and calibration method in Fourier transform profilometry[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(34): 6563-6569.
- [7] Lyu C G, Gao S, Yang J C. Adaptive illumination based on projector-camera system for multireflective three-dimensional scene [J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(2): 025104.
- [8] Srinivasan V, Liu H C, Halioua M. Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects [J]. *Applied Optics*, 1984, 23(18): 3105-3108.
- [9] Wang Z Y, Nguyen D A, Barnes J C. Some practical considerations in fringe projection profilometry [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(2): 218-225.