

文章编号 1004-924X(2016)增-0237-08

三角形方向阈值鉴别的自动测量

郭宇翔*, 李晓霞, 马德跃, 黄章斌, 赵 亮
(脉冲功率激光技术国家重点实验室, 合肥 安徽 230037)

摘要:为了减小光电成像系统三角形方向鉴别阈值模型(TOD)测量中三角形靶标方向鉴别率的主观因素影响,有效提高测量效率,研究了机器自动鉴别代替人工识别的方法,并建立了一套基于相关匹配的三角形方向阈值自动判别模型。将人眼视觉系统模型 MTF 作为处理靶标图像传递衰减的基础,采用基于相关运算的模板匹配法,通过计算靶标图像与模板的相关度完成了三角形方向的自动鉴别。根据标准 TOD 模型测量法建立了一套三角形靶标模板,并实验对比了人工识别和机器自动鉴别的正确率,采用 Weibull 视觉心理测量函数拟合统计结果,建立了系统的 TOD 曲线。结果表明,与人工识别相比,机器鉴别对三角形靶标方向鉴别正确率的平均偏离值为 0.9%,机器识别与人工判别的鉴别阈值曲线能够较好的吻合,可用于光电成像系统的 TOD 曲线测量。

关键词:光电成像系统;三角形方向阈值鉴别;自动测量;人眼视觉系统

中图分类号:TN201 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162413.0237

Automatic measurement of triangle orientation discrimination threshold

GUO Yu-xiang*, LI Xiao-xia, MA De-yue, HUANG Zhang-bin, ZHAO Liang

(State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Hefei 230037, China)

* Corresponding author, E-mail: Guoyx1982@163.com

Abstract: In order to reduce the impact of subjective factors on the triangle target orientation discrimination rate in Triangle Orientation Discrimination Threshold (TOD) measurement for the opto-electronic imaging system, and to effectively improve the measurement efficiency, an automatic machine vision method for replacement of artificial discrimination was proposed, and a TOD automatic discrimination modal was established based on correlation matching. In this mode, the MTF in human visual system was taken as the base for the treatment of target image transmission attenuation. The automatic triangle orientation was discriminated by calculating the relevancy between target image and template with the correlation calculation-based template matching method. In addition, a triangle target template was established based on the standard TOD model measurement for comparison of the accuracy between the artificial discrimination and the automatic mechanical discrimination. Finally, a systematic TOD curve was plotted in accordance with the fitting results of the Weibull visual and psychological measurement function. It indicates that compared with artificial discrimination, the average accuracy deviation for mechanical triangle target orientation discrimination is 0.9%, which means the curves for discrimination threshold through artificial discrimination and mechanical discrimination are in good

收稿日期:2016-05-28;修订日期:2016-06-17.

基金项目:学院基金资助项目(No. KY14A291)

agreement and can be applied to the TOD curve measurement for opto-electronic imaging system.

Key words: opto-electronic imaging system; triangle orientation threshold discrimination; automatic measurement; Human Visual System(HVS)

1 引言

最小可分辨温差(Minimum Resolvable Thermal Difference, MRTD)和最小可分辨对比度(Minimum Resolvable Contrast, MRC)主要用于评估光电成像系统的目标识别能力。但由于测试过程的主观性,以及对欠采样频谱混叠、非线性响应特性的考虑不足,它们在准确预测光电成像系统的目标识别性能上存在先天不足^[2]。荷兰 TNO 研究所 P. Bijl 提出了三角形方向鉴别阈值法(Triangle Orientation Discrimination, TOD),用于表征光电成像系统性能。该方法以不同尺寸、不同对比度等边三角形靶标取代四条带作为测试样条,采用四选一(4AFC)测量过程,由观察者通过光电成像系统多次鉴别三角形靶标的方向,得到 75% 正确鉴别率对应的三角形靶标尺寸和阈值对比度之间的关系曲线,可以准确地预测成像系统对真实目标的识别性能。

在 TOD 模型测试中,大量的靶标需要人工鉴别,测量结果受人眼视觉的主观性影响较大,且易受疲劳导致的主观心理和客观状态不稳定的影响,从而不能准确反映成像系统的实际性能。通过机器视觉代替人工观察进行三角形靶标方向识别,可以免受人为因素干扰,获取更加准确的测量结果^[1,3]。何国经^[1]等建立了一套专门针对三角方向鉴别测量的客观判别模型,通过模拟人眼视觉系统的光学效应来计算视觉特征矢量相关度,实现了三角形靶标方向的判别,但该模型在低对比度区域与主观判别能力有所不符。初秀琴^[2]等研究了一种神经网络代替人眼实现 TOD 自动测量的方法,利用神经网络模式识别分类器对特征向量进行识别和判断,分类器在主观测试结果的训练条件下可以得到符合主观测试的判断结果,但该方法未给出与人工判别的对比结果。Pierre^[3]将 TOD 模型用于全景成像系统的图像质量评价,通过 Pearson 相关算法实现了三角形方向的自动识别。Dirk-Jan^[5]等研究了基于 TOD 方法的光电探测器及图像处理技术的评价方法,

在三角方向识别算法中考虑了人眼视觉效应的影响。

TOD 方法的核心是以三角形靶标取代传统的四条带模型,以三角形靶标的方向识别取代四条带的周期判断。通过人眼判断不同尺寸和对比度条件下三角形的方向是完成 TOD 测试的关键,因此研究机器识别取代人眼判断的关键是基于相关基础上的四选一(4AFC)测量过程的再现,且机器识别结果应具备与人眼判断的一致性。模板匹配技术具有算法简单、计算量少以及识别率高的特点。匹配算法包含基于灰度匹配和基于特征匹配两种。其中,前者利用图像本身的灰度统计信息来度量图像的相似程度,实现简单、匹配率高。后者通过提取图像的点、线、区域等显著特征为匹配基元,适用于复杂背景中的目标特征匹配。本文建立了一种基于相关运算的模板匹配 TOD 自动测量模型,该模型包含了人眼视觉效应对机器识别的影响。采用该模型对 4 320 幅靶标图像进行了自动判别与人工判别的对比,分别建立了相应的 TOD 曲线。结果表明,该方法得到的 TOD 曲线与人眼判别方法所得的结果非常接近,能够准确预测光电成像系统的目标识别性能。

2 标准 TOD 测量方法

TOD 方法中使用的靶标为均匀背景中的等边三角形,分别指向上下左右 4 四个方向,如图 1 所示。测试样条由其尺寸(S)和对比度 C 表示,样条尺寸 S 定义为三角形靶标的角平方根面积, S_R 表示靶标的角空间频率,为角平方根面积的倒数,C 为视见对比度。表达式分别如式(1)~(3)所示。

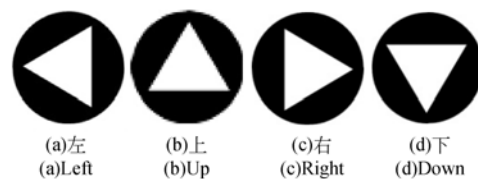


图 1 不同方向的三角形靶标

Fig. 1 Four different stimuli used in TOD method

$$C = \frac{L_T - L_B}{L_B} \times 100\%, \quad (1)$$

$$S = \frac{\sqrt[4]{3}}{2} l, \quad (2)$$

$$S_R = \frac{1}{S}, \quad (3)$$

式中: L_T, L_B 分别为目标、背景的亮度, l 为三角形靶标的边长。

TOD 测试过程中, 观察者多次通过光电系统观察给定靶标, 在相同靶标尺寸下调整对比度大小, 同时观察者依次判断靶标指向, 统计判断的正确率。利用式(4)的 Weibull 函数拟合得到相同靶标尺寸下对比度与判断正确率的关系曲线。

$$P_{q\gamma\delta}(x) = (1 - \delta) - (1 - \gamma - \delta) \cdot 2^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta}, \quad (4)$$

式中: δ 指在判断正确时人为出错的几率, γ 为完全分辨不出时猜中目标的正确概率, α 代表靶标的强度阈值, β 为决定函数的斜率。

通过拟合可以得到靶标阈值强度与识别正确率的关系, 如图 3 所示。 α_{75} 定义为一定靶标尺寸下对应于 75% 判断正确率的阈值对比度。

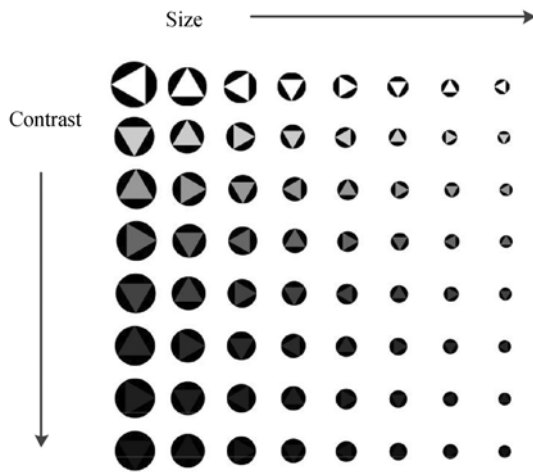


图 2 TOD 测试靶标

Fig. 2 TOD test patterns arranged by size and contrast

依次改变靶标尺寸, 重复测试过程, 分别得到在 75% 正确判断率时对应的对比度, 即可得到一组靶标尺寸与对比度的对应点, 以 S_R 为横坐标表示空间频率, 以对比度 C 为纵坐标拟合得到 TOD 曲线。TOD 曲线是对应 75% 的三角形方向鉴别率时, 靶标角尺寸与对比度的关系。TOD 曲线与 MRC 曲线类似, 表征的是光电系统的固有性能,

表示的是目标识别所需空间频率与阈值对比度之间的关系。

$$\frac{\alpha_{TS}}{\alpha} = \left[-\log_2 \left(\frac{0.25 - \delta}{1 - \gamma - \delta} \right) \right]^\beta. \quad (5)$$

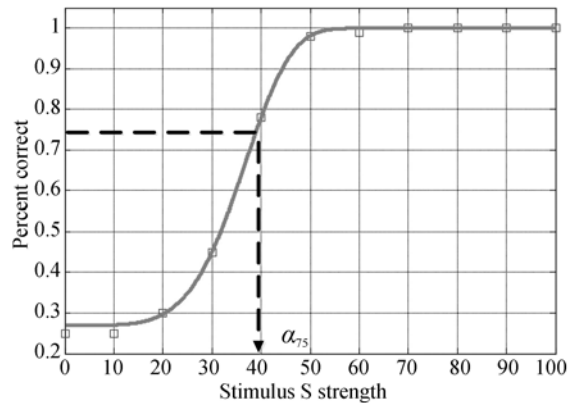


图 3 Weibull 函数拟合曲线

Fig. 3 Fitting curve of weibull psychometric function for a contrast threshold measurement with positive and negative targets

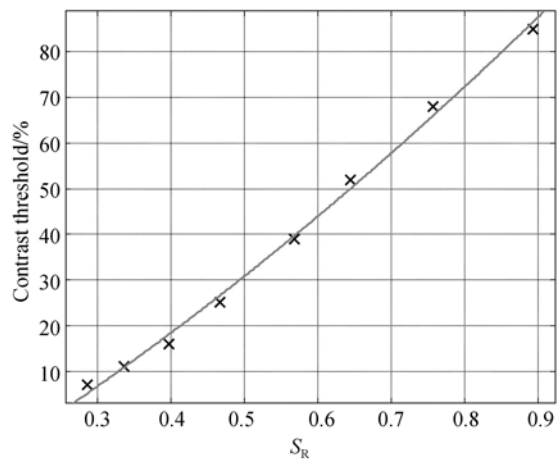


图 4 TOD 曲线

Fig. 4 TOD curve

TOD 准则是研究人员以 TOD 曲线为基础, 建立的基于 TOD 曲线和目标特征的作用距离预测模型。针对具体的光学成像系统, 可用于计算特定环境下各种鉴别等级对应的作用距离, 通过大量的实验验证, TOD 准则比 MRTD 和 MRC 准则预测更加准确, 可作为光电成像系统的性能分析模型。它综合了成像系统的灵敏度、分辨率及观察者的响应特性, 能够准确预测系统的现场性能^[5-6]。

3 基于相关匹配的 TOD 自动测量

基于自动识别和人工识别的 TOD 测量模型框架如图 5 所示。基于相关匹配的 TOD 自动测量,是以计算机识别三角形方向取代人工识别,通过相关计算模拟人眼对靶标方向的识别过程,得到相应的鉴别正确率,自动生成 TOD 曲线。相比标准 TOD 法,自动识别是将监视器中的靶标图像输入计算程序中。为了更加符合人眼识别的特点,输入图像必须考虑人眼的视觉效应,即应当经过人眼视觉系统(Human Visual System, HVS)模型处理后输入到计算程序中。

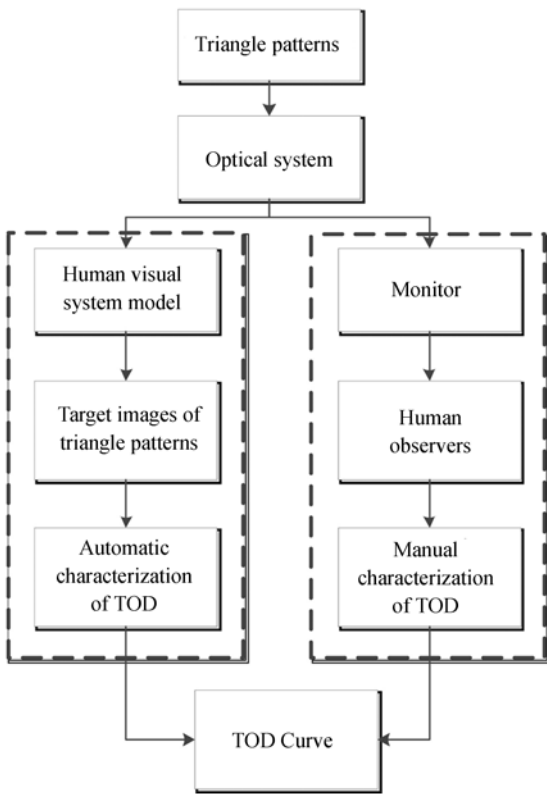


图 5 基于机器鉴别和人工判别的 TOD 测量方法

Fig. 5 TOD measurement based on artificial and automatic identifications

3.1 人眼视觉模型(HVS)

人眼是一个复杂的光学系统,建立人眼视觉系统模型通常要考虑视觉非线性效应、衬比度敏感效应、掩盖效应等。把人眼作为一个光学系统,以其调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF),可以准确完成人眼的图像传递

和复现。Overington 模型给出了人眼 MTF 的计算方法^[5],即:

$$MTF_{eye}(\rho) = MTF_{eyeoptics}(\rho) \cdot MTF_{retina}(\rho) \cdot MTF_{tremor}(\rho), \quad (6)$$

式中: $MTF_{eyeoptics}(\rho)$ 、 $MTF_{retina}(\rho)$ 、 $MTF_{tremor}(\rho)$ 分别是人眼光学系统 MTF、视网膜 MTF 及考虑振动影响的 MTF。

$$MTF_{eyeoptics}(\rho) = \exp\left\{-\left[43.69 \frac{\rho}{\rho_0}\right]^{i_0}\right\}, \quad (7)$$

$$MTF_{retina}(\rho) = \exp\{-0.375\rho^{1.21}\}, \quad (8)$$

$$MTF_{tremor}(\rho) = \exp\{-0.441\rho^2\}, \quad (9)$$

式中: ρ 为空间频率, ρ_0 , i_0 是随人眼瞳孔直径变化的量,如表 1 所示。取典型瞳孔直径为 3.655 mm,根据表 1 中数据插值拟合得到 $\rho_0 = 26.2$, $i_0 = 0.754$,计算得到人眼视觉系统的 MTF 为:

$$MTF_{eye}(\rho) = \exp\{-(1.67\rho)^{0.754}\}. \quad (10)$$

表 1 瞳孔直径及相应的计算参数

Tab. 1 Pupil diameters and corresponding calculation parameters

Pupil diameter/mm	ρ_0	i_0
1.5	36	0.9
2.0	39	0.8
2.4	35	0.8
3.0	32	0.77
3.8	25	0.75
4.9	15	0.72
5.8	11	0.69
6.6	8	0.66

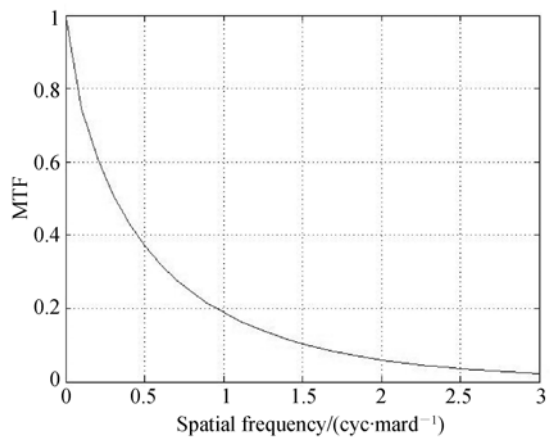


图 6 人眼视觉系统 MTF

Fig. 6 MTF of human visual system

3.2 基于相关匹配的 TOD 自动测量

根据模板和相关准则,模板匹配可分为归一化互相关法 NCC(Normal Cross Correlation)、SSD(Sum of squared Difference)、SAD(Sum of Absolute Difference)和 SSDA(Sequent Similarity Detection Algorithm)。其中,NCC 是基于灰度统计的图像配准方法,可用于模板匹配和模式识别^[10]。

基于相关匹配的三角形靶标方向自动识别模型和 TOD 自动测量流程分别如图 7 和图 8 所示。靶标图像经光电成像系统和人眼视觉系统后作为目标图像,通过预处理、提取阈值、图像分割、维度匹配后,分别计算它与四个不同方向模板图像的相关度,根据相关度大小判定靶标指向^[8-9]。模板与目标的相关系数可通过式(10)计算。

$$r = \frac{\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A}) - (B_{mn} - \bar{B})}{\sqrt{(\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A}))(\sum_m \sum_n (B_{mn} - \bar{B}))}} \quad (10)$$

式中: A 代表待匹配目标图像, B 代表模板图像, m, n 是模板和匹配图像的像素索引。模板和匹配图像应尺寸相同。

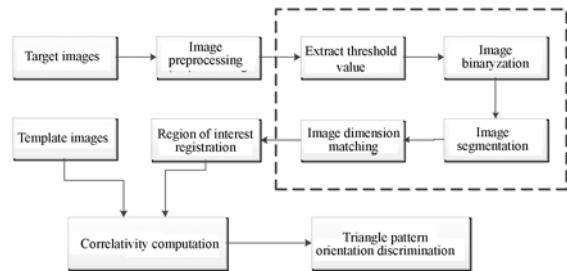


图 7 三角靶标方向自动识别模型

Fig. 7 Model for automatic identification of triangle target direction

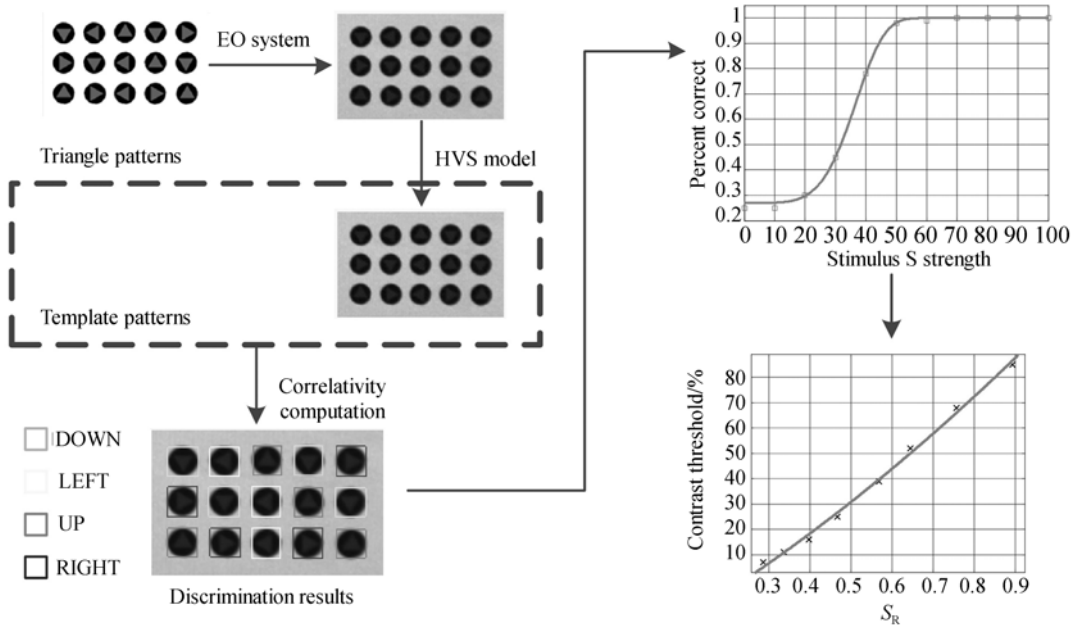


图 8 TOD 自动测量流程

Fig. 8 Automatic measurement processes of TOD

表 2 三角形靶标的尺寸和空间角频率

Tab. 2 Size, space and angular frequency of triangle targets

ID	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8
l/mm	5.3	4.51	3.83	3.25	2.77	2.35	2.0	1.7
S/mrad	3.49	2.97	2.52	2.14	1.82	1.55	1.32	1.12
S _R /mrad ⁻¹	0.287	0.337	0.397	0.467	0.549	0.645	0.758	0.893

4 实验与结果讨论

4.1 实验

根据标准 TOD 测试方法^[6],利用计算机共生成 8 幅尺寸依次减小的三角形靶标(见表 3),每幅靶标由 12 级对比度依次减小、方向随机指向的 15 个三角形靶标组成,第 1 组和第 8 组如图 9 所示。

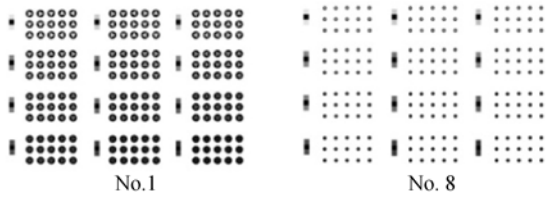


图 9 不同尺寸和对比度的靶标图像(No. 1 and No. 8)
Fig. 9 TOD test patterns arranged by size and contrast(No. 1 and No. 8)

4.1.1 人工识别

实验中共 4 名观测者参与测试,参与实验前接受简单培训,双眼视力在 1.0 以上,测试时距离监视器距离 1 m。测试时每幅靶标经光电成像系统显示在监视器上,观测人员依次判断每个三角形的指向,同时敲击键盘的上、下、左、右方向键给出判断结果(采用四选一(4AFC)测量方法,无论是否看清,必须做出判断),得到判断正确率,根据标准方法得到 TOD 曲线。

4.1.2 机器识别

将供人工识别靶标图像输入 TOD 自动判别模型中,得到判别数据,生成 TOD 曲线。

4.2 结果与讨论

图 10 是在不同靶标尺寸下人工识别与自动识别的测量结果对比曲线。横坐标为靶标的对比度,纵坐标为判别概率。图 12 为分别根据人工和机器测量结果生成的 TOD 曲线。

由实验结果可以看出:与人工识别相比,机器鉴别对三角形靶标方向鉴别正确率的平均偏离为 0.9%。机器识别模型测量曲线与人工判别曲线能够较好的吻合,证明可以通过机器识别准确地预测人工判别概率。对比相同靶标尺寸下人工识别与机器判别曲线,可以看到,在低对比度区域人工识别概率高于机器判别概率,是由于人眼视觉系统及视神经系统具有特殊的时间和空间效应,

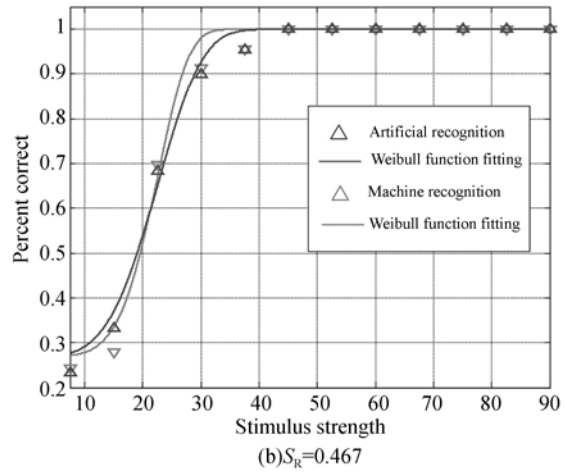
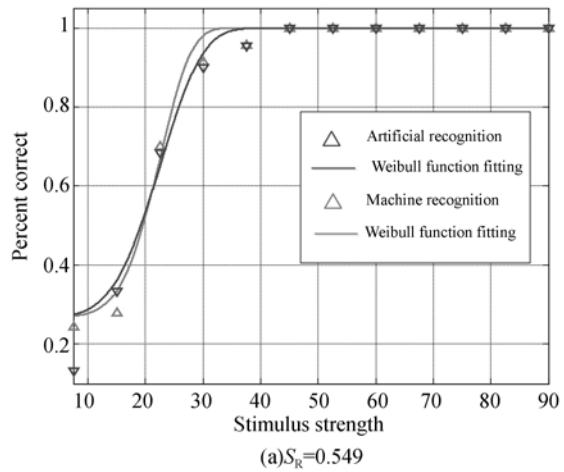


图 10 人工识别与自动识别测量结果对比
Fig. 10 Comparison of experimental results between artificial recognition and machine recognition

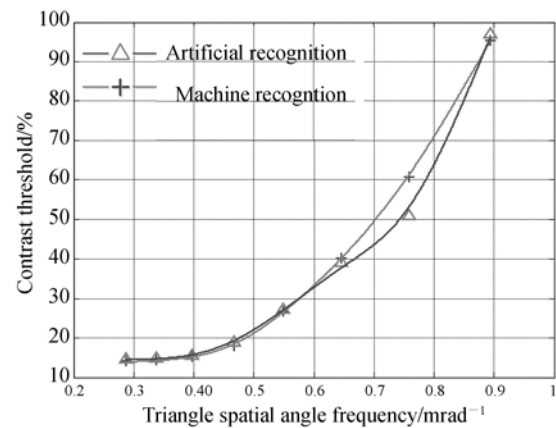


图 11 人工识别与自动识别 TOD 曲线对比图
Fig. 11 TOD curves of artificial recognition and machine recognition

能有效整合空间信息,提高低对比度信号的信噪比,获得较高的识别正确率;但是,在高对比度区域人工识别概率低于机器判别概率,因为该区域图像对比提高,信息细节丰富,机器判别可以获得较高的准确率;在识别率接近 1 的高对比度区域,人工识别与机器的判别概率基本相当。要进一步提高机器识别准确率,需要进一步改进 HVS 模型,模拟接近真实的人眼视觉系统对图像的衰减效果。

由图 12 可以看到,虽然人工判别受到主观因素影响,产生的误判样本在局部形成偏离,但由人工识别和机器判断结果生成的 TOD 曲线吻合得较好,说明通过机器识别建立的 TOD 模型可以替代人工测量方法。

参考文献:

- [1] 何国经,张建奇,王晓蕊,等. 用于三角形方向鉴别测量的客观判别模型[J]. 光学学报,2007,27(3): 437-442.
HE G J, ZHANG J Q, WANG X R, *et al.*. An objective discrimination model for triangle orientation discrimination threshold measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007,27(3): 437-442. (in Chinese)
- [2] 初秀琴,胡方明,王飞. 基于神经网络的三角阈值判别法(TOD)设计[J]. 红外技术,2009,31(12):716-719.
CHU X Q, HU F M, WANG F. The realization of triangle orientation discrimination threshold using artificial neural network[J]. *Infrared Technology*, 2009,31(12):716-719. (in Chinese)
- [3] DÉSAULNIERS P, THIBAUT S. Performance evaluation of panoramic electro-optic imagers using the TOD method[J]. *SPIE*, 2011, 8014(3):760-771.
- [4] 王晓蕊. 红外焦平面成像系统建模及 TOD 性能表征方法研究[D]. 西安:电子科技大学,2005.
WANG X R. *Research on Modeling of IR FPA Imaging System & TOD Performance Characterization Method* [D]. Xi'an: Xidian University, 2005. (in Chinese)
- [5] DRIGGERS R G, COX P, EDWARDS T. *Introduction to Infrared and Electro-optical Systems*

5 结 论

本文提出的基于机器识别的 TOD 自动测试方法,以人眼视觉系统模型作为处理靶标图像传递衰减的基础,使用相关运算的模板匹配法,计算靶标图像与模板相关度完成三角形方向的自动鉴别,提高了光电成像系统 TOD 测量的速度。通过与人工测量的三角方向鉴别阈值曲线进行比较,验证了该预测曲线的合理性。但要用于光电成像系统现场性能的预测标准,必须针对各种类型成像系统,测量大量的实验数据,进一步修正和完善成像系统模型和优化鉴别算法,这是未来的工作重点。

- [M]. Artech House, 1999.
- [6] BIJL P. Guidelines for accurate TOD measurement [J]. *SPIE*, 1999, 370(3701): 14-25.
- [7] PEARSON K. Mathematical contributions to the theory of evolution. III. Regression, heredity and panmixia[J]. *Philos. Trans. Royal Soc. London*, 1896, 187: 253-318.
- [8] DE LANGE J D, VALETON J M, BIJL P. Automatic characterization of electro-optical sensors with imageprocessing, using the triangle orientation discrimination (TOD) method [J]. *SPIE*, 2000, 3701, 104-111.
- [9] 孙正. 数字图像处理与识别[M]. 北京:机械工业出版社, 2014: 182-192.
SUN ZH. *Process and Identification of Numeral Image* [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2014: 182-192. (in Chinese)
- [10] 张影. 空间相机的颤振成像调制传递函数及仿真实验[J]. 光学精密工程, 2011, 19(9):2146-2153.
ZHANG Y. Imaging MTF of space camera under vibration and simulation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(9):2146-2153. (in Chinese)
- [11] TERRY K. A guide to chi-squared testing[J]. *Biometrics*, 1996, 39(4):157-158.
- [12] 姚军财,刘贵忠. 结合人眼对比度敏感视觉特性的视频质量客观评价[J]. 光学精密工程, 2016, 24(3): 659-667.

Yao J C, LIU G ZH. Video quality objective assessment combined contrast sensitivity characteris-

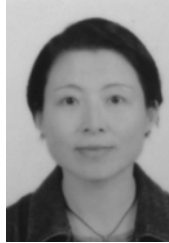
tics of human visual system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(3): 659-667. (in Chinese)

作者简介:



郭宇翔(1982—),男,河南洛阳人,博士研究生,讲师,2007年于电子工程学院获得硕士学位,主要从事光电对抗技术方面的研究。E-mail: Guoyx1982@163.com

导师简介:



李晓霞(1969—),女,陕西宝鸡人,博士研究生,教授,1998年于国防科技大学获得博士学位,主要从事光电技术和新材料器件方面的研究。E-mail: Lxx-hong@163.com