

文章编号: 1002-2082(2008)01-0062-05

扫描型红外成像系统仿真及 TOD 曲线预测方法研究

宁殿艳¹, 张 翔¹, 石 磊¹, 陈利菊²

(1. 西安电子科技大学 技术物理学院, 陕西 西安 710071;

2. 西安通信学院 基础部, 陕西 西安 710106)

摘 要: 针对实际三角形方向鉴别(TOD)阈值温差测试的数据量大、时间长,以及测试结果常具有不稳定和不确定性等问题,提出一种扫描型红外成像系统效应仿真。建立了红外成像系统性能预测仿真平台,并对靶标效应图进行人眼判定。根据人眼判定结果对神经网络进行了训练。由基于 BP 神经网络的 TOD 阈值温差预测方法判定仿真样条的方向,统计正确的判定概率,实现 TOD 曲线的预测。实验结果表明:该方法预测的 TOD 曲线与实际测量的 TOD 曲线具有很好的一致性。

关键词: 红外成像系统;BP 神经网络;三角靶方向机器视觉判定;性能预测

中图分类号: TN216-34

文献标志码: A

IR imaging system simulation and TOD prediction

NING Dian-yan¹, ZHANG Xiang¹, SHI Lei¹, CHEN Li-ju²

(1. Institute of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China;

2. Xi'an Institute of Communication, Xi'an 710106, China)

Abstract: To overcome mass data, long duration, instability and uncertainty in the test of triangle orientation discrimination (TOD), a simulation method for IR scanning imaging systems is presented. A simulation platform for predicting IR imaging systems performance was established, and the triangle pattern images were discriminated by human eyes. According to the results, training was carried out for the neural network. Based on the predictive method of TOD by the neural network, the direction of the simulation spline is discriminated, the correct discrimination probability was obtained by utilizing the statistical method, and the TOD prediction curve is achieved. Experimental results show that the predicted TOD curve is consistent with the measurement.

Key words: IR imaging system; BP neural network; triangle orientation discrimination (TOD); performance prediction

引言

近年来,三角形方向鉴别(TOD^[1-2])阈值温差性能的方法受到了红外成像评价领域广泛的重视。然而由于实际的 TOD 测试数据量大、时间长,加之所得结果常常具有不稳定和不确定性等问题。本文根据 TOD 性能测试思想,建立了扫描型红外成像

系统性能预测仿真平台,避免了实际测试中经常出现的问题。TOD 靶标方向的判定分为人眼判定和机器判定 2 种情况。人眼判定工作量大,耗时,观察者容易疲劳,导致测试结果不能准确反映实际情况;而已有的机器视觉判定是依据人眼视觉系统的主要效应,利用方向通量滤波及其视觉特征相关

收稿日期:2007-10-14; 修回日期:2007-10-28

作者简介:宁殿艳(1980—),女,陕西靖边人,硕士研究生,主要从事光电成像系统建模与性能评估研究工作。

E-mail:ningmeng800829@sohu.com

方法建立的一种针对 TOD 测量的靶标方向机器视觉判定方法^[3],虽能模拟人眼效应进行三角靶方向判定,但需要先对每幅图像进行多通道滤波,再与4幅标准图像的通道输出图进行匹配,这需要耗费大量时间。本文提出的BP神经网络判定方法是利用计算机对效应三角靶进行特征提取,然后利用主观测试结果训练后的神经网络对特征向量进行识别和判定,从而做出符合主观测试规律的判定结果,节省了判定时间。

1 性能预测仿真平台

为了利用扫描型红外成像系统仿真图像进行

性能预测,需要建立性能预测仿真平台。本文从红外成像系统仿真角度出发,以红外成像信号传递方程生成标准的等边三角形样条为基础,借助频域处理和空域处理相结合的方法来模拟系统物理效应(如几何扭曲、空间传递特性、非线性因素和噪声特性等)。

1.1 红外标准靶标图像的生成

1.1.1 确定标准三角靶的空间频谱分布^[4]

假设等边三角形标准靶的边长为 w (单位: mrad),与背景的温差为单位振幅,三角形内部为目标温度,外部为背景温度。其空间分布在原点位于三角形中心点的笛卡儿坐标系中的数学描述为

$$o(x,y) = \begin{cases} 1 & \left\{ \begin{array}{l} -\frac{w}{2} \leq x \leq 0 \\ -\frac{\sqrt{3}}{6}w \leq y \leq \sqrt{3}x + \frac{\sqrt{3}}{3}w \end{array} \right\}, \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

1.1.2 推导经过红外成像系统的目标输出信号

依据普朗克辐射公式,扩展源目标辐射经过红外光学系统输出的电压差值信号为

$$\Delta V_{sys} = G \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_d(\lambda) \cdot \frac{[M_e(\lambda, T_T) - M_e(\lambda, T_B)] A_d}{4F^2} \times \tau_{optics}(\lambda) T_{atm}(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

式中: G 为前置放大器的增益; $R_d(\lambda)$ 为探测器的响应率; A_d 为探测器的面积; $\tau_{optics}(\lambda)$ 为光学系统的衰减; F 为光学系统光圈数; $T_{atm}(\lambda)$ 为大气的光谱透过率; $M_e(\lambda, T_T)$ 和 $M_e(\lambda, T_B)$ 分别为目标和背景的光谱辐射出射度。

1.1.3 灰度量化

对红外成像系统的 A/D 转换器位数进行灰度量化。假设 A/D 转换器为 8 位,变换的电压信号范围为 $V_{min} \sim V_{max}$, 其最小灰度级 $V_{min} = 0$, 最大的灰度级为 $V_{max} = 255$ 。此情况下任意电压信号对应的灰度级为

$$G = \frac{255 - 0}{V_{max} - V_{min}} (\Delta V_{sys}) \quad (3)$$

然后根据灰度级生成灰度图像。

1.2 红外成像系统物理效应仿真

红外成像系统的物理效应包括光学系统几何扭曲、渐晕,线性调制引起的模糊效应,探测器的非线性效应、非均匀性,噪声特性及后续处理电路的信号处理算法等。本文针对光学系统几何扭曲、模

糊效应、空间非线性调制效应和噪声特性,分别从空域和频域 2 个方面进行物理效应仿真,仿真流程如图 1 所示。

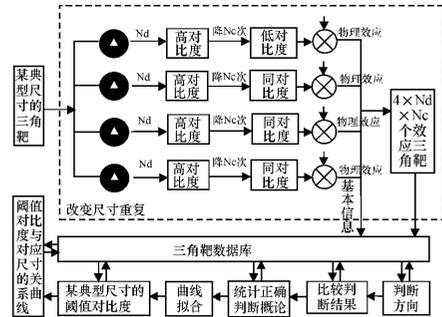


图 1 红外成像系统物理效应仿真流程图

Fig. 1 Flow chart for physical effects simulation of IR imaging systems

1.2.1 几何扭曲效应

它主要是由光学系统引起的,但不影响图像的清晰程度,而只影响像与物的相似性。产生畸变的原因可认为是光学系统对共轭面上不同高度的物体有不同的放大率所致^[5]。

1.2.2 红外成像系统线性调制模糊效应

该模糊效应包括光学系统的衍射、几何像差、散焦,探测器的空间和时间滤波效应,信号处理电路的低通滤波、高通滤波、高频提取、CCD 转移以

及监视器的空间调制效应。采用 MTF 方法仿真红外成像系统各组成模块的线性调制传递特性,系统的 MTF_{sys}(f_x, f_y)^[6]数学表达式为

$$MTF_{sys}(f_x, f_y) = MTF_{opt}(f_x, f_y) MTF_d(f_x, f_y) \times MTF_{sp}(f_x, f_y) \times MTF_m(f_x, f_y) \quad (4)$$

式中: MTF_{opt}(f_x, f_y)为光学系统的调制传递函数; MTF_d(f_x, f_y)为探测器的调制传递函数;

$$MTF_{total}(f_x, f_y) = MTF_{pixel}(f_x, f_y) \times MTF_{sampl}(f_x, f_y) = \sin[c(af_x)] \sin[c(bf_y)] \sin[c(af_x)] \sin\left[c\left(\frac{bf_y}{m}\right)\right]$$

式中: a 和 b 为探测器的像元尺寸; m 为采样系数。

1.2.4 实验用三维噪声模型

该模型按照时间(t)、空间水平(v)和空间垂直(h)三维空间划分7个分量。对于扫描型红外成像系统来说,主要有时空随机噪声 σ_{tvh} , 随机行噪声 σ_{tv} 和固定行噪声 σ_v 3个噪声分量,其他噪声分量可忽略。目前三维噪声项中只有 σ_{tvh} 建立了相应的数学模型,对于扫描系统, σ_{tvh} 的描述可参考文献[3]和[7]。其他噪声项通常可通过测试方法得到或者采用测试的典型统计量。本文采用 FLIR92 模型给出典型缺省值^[8], $\sigma_{tv} = 0.75\sigma_{tvh}$, $\sigma_v = 0.75\sigma_{tvh}$ 。依据计算得到的各噪声分量方差并考虑红外成像系统本身的灰度量化关系,生成不同噪声成分的噪声图像,然后用像素处理方法,将得到的系统噪声图像和图像像素值相加。

2 性能预测方法

基于BP神经网络改进模型的三角形方向阈值温差预测方法的步骤如下:

2.1 三角靶图像特征的选择和提取

选取4个量: 1) 三角形上下面积之比 $L_1 = S_{\uparrow} / S_{\downarrow}$ (自中心点 $O(c_x, c_y)$ 按照水平和垂直方向可把图形分为上下部分和左右部分,面积分别记为 S_{\uparrow} , S_{\downarrow} 和 S_{\leftarrow} , S_{\rightarrow}); 2) 三角形右侧面积与左侧面积之比 $L_2 = S_{\rightarrow} / S_{\leftarrow}$; 3) 对比度 L_3 ; 4) 三角形面积 L_4 。作为判定特征。把面积因子 L_1 和 L_2 作为三角形的2个方向特征参数^[9]。

2.2 BP网络模型的确定

BP神经网络是一种多层前向神经网络,它采用误差反向传播(back propagation-BP)学习算法。采用3层BP网络,选取训练集三角靶的2个方向特征 L_1 和 L_2 。输入向量 $X_1 = \{L_1, L_2\}$, 网络的期望

$MTF_{sp}(f_x, f_y)$ 为信号处理电路的调制传递函数; $MTF_m(f_x, f_y)$ 为显示器的调制传递函数。

1.2.3 空间非线性调制效应

本文只考虑空间非线性调制的采样效应,在垂直扫描方向上对像素有限尺寸引起探测器阵列作空间取样;在扫描方向上,有限的采样频率引起探测器对每个元件存在时间取样(可将其等效在空间取样),采样空间调制传递函数为

输出值为0(上),1(右),2(下),3(左)。因此输入层的节点数为2,输出层的节点数为4,而隐节点数选择为8。输入层以及隐层至输出层的传递函数均选用非线性S型函数——Sigmoid函数。

2.3 神经网络训练

训练集的构成直接关系到神经网络的学习结果,因此在收集学习样本时,要注意所收集数据的准确性。本文采用选取较少的质量好的方向特征作为训练集,用训练好的神经网络对320幅效应图像进行机器视觉判定。

2.4 性能预测

将仿真生成某一尺寸、4个方向的标准靶加入物理效应,得到系统作用后的320个效应三角靶,用训练好的BP神经网络对320幅效应图像进行特征提取、识别和判定。统计输出判定结果,并进行Weibull拟合,利用插值算法就可得到75%正确判断概率对应的对比度。改变标准三角靶的尺寸,重复上述过程,就可获得阈值对比度与尺寸的对应关系,即TOD曲线^[10-11]。生成的部分图像如图2所示,其中图2(a)为相同尺寸、相同方向、不同对比度的3个效应三角靶;图2(b)为不同尺寸、相同方向、相同对比度的3个效应三角靶。

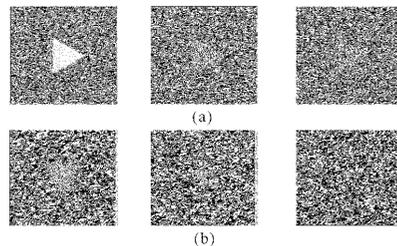


图2 3个物理效应三角靶

Fig.2 Physics effect of 3 triangle targets

3 结果分析

对典型扫描型红外成像系统进行仿真, 系统参数如下: 光学系统的焦距为 150 mm, F 数为 1.8; 探测器的水平尺寸为 $25 \mu\text{m}$, 垂直尺寸为 $25 \mu\text{m}$, 水平采样间隔为 $30 \mu\text{m}$, 垂直采样间隔为 $30 \mu\text{m}$, 串联数为 4, 并联数为 288, 帧频为 50 Hz, 光谱探测率为 $5 \times 10^{10} \text{cm}(\text{Hz})^{1/2}/\text{W}$, 三维噪声值取 FLIR92 缺省值; 电路的数字量化动态范围为 $0 \sim 255$ 。依据以上参数, 将仿真生成某一尺寸、4 个方向的标准靶加入物理效应, 得到系统作用后的 320 个效应三角靶, 用训练好的 BP 神经网络对 320 幅效应图像进行特征提取、识别和判定。将输出的容差定为 0.5, 若输出与方向值 (0, 1, 2, 3) 的误差在 $0 \sim 0.5$ 以内, 则认为待判方向为对应的方向值。图 3 所示为典型尺寸的判定结果, 图中 0, 1, 2, 3 处呈阶梯状是因仿真中同一尺寸、同一对比度生成 8 幅相同的效应图所致。图 4 所示为典型尺寸的 Weibull 拟合曲线。

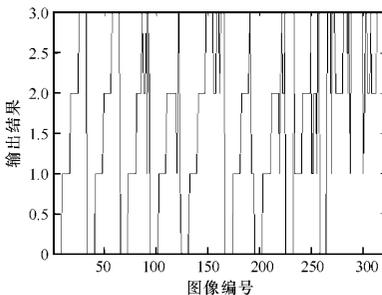


图 3 量化后的输出结果图

Fig. 3 Output result after quantization

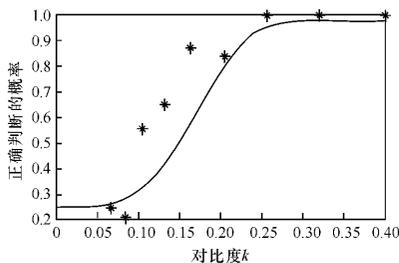


图 4 Weibull 拟合曲线 ($\alpha=0.169742, \beta=0.169742$)

Fig. 4 Weibull fitting curve ($\alpha=0.169742, \beta=0.169742$)

图 5 为仿真系统的阈值对比度与尺寸关系曲线, 图中“星号”标记曲线为人眼判断结果, “加号”标记曲线为 BP 神经网络判断结果, “圆圈”标记曲线为相同类型红外成像系统测量的 TOD 曲线 (此

测量数据和传感器参数由荷兰 TNO 实验室提供)。由图 5 可看出人眼判断结果与实际测量曲线在低频 (尺寸较大) 比较接近, 而在高频 (尺寸较小) 存在较大的相对误差; 而 BP 神经网络判断结果与实际测量曲线的相对误差随空间频率的变化比较小。预测结果显示 BP 神经网络判断结果比人眼判定结果更具稳定性, 且提高了测试效率。

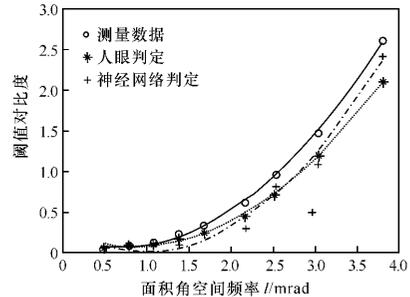


图 5 仿真曲线与测量曲线的比较

Fig. 5 Comparison between simulated curve and measured curve

4 结论

本文建立的红外成像系统性能测试仿真平台, 其输出图像满足 TOD 性能测试要求, 避免了实际测试中经常出现的不稳定因素。针对三角靶方向判定实现了基于神经网络改进模型的三角靶方向机器视觉判定, 判定结果符合人眼判定规律, 大大节省了测试时间, 提高了测试效率, 为简化和优化新型红外成像系统的性能测试奠定了基础。

参考文献:

- [1] BIJL P, VALETON J M. TOD, a new method to characterize electro-optical system performance [J]. SPIE, 1998, 3377: 182-193.
- [2] PIET B, MAARTEN A H, MATHIEU V J. TOD NVTherm, and TRM3 model calculations: a comparison [J]. SPIE, 2002, 4719: 51-62.
- [3] 何国经, 张建奇, 王晓蕊, 等. 用于三角方向鉴别测量的客观判别模型 [J]. 光学学报, 2007, 27(3): 437-442.
HE Guo-jing, ZHANG Jian-qi, WANG Xiao-rui, et al. An objective discrimination model for triangle orientation discrimination threshold measurement [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(3): 437-442. (in Chinese)
- [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:西安电子科技大学, 2005.

WANG Xiao-rui. Research on modeling of IR FPA imaging system & TOD performance characterization method [D]. Xi'an: Xidian University, 2005. (in Chinese)

- [5] 王晓蕊, 张建奇, 冯卓祥, 等. 采样红外成像系统仿真及最小可分辨温差预测方法研究[J]. 红外与毫米波学报, 2004, 23(6): 436-440.

WANG Xiao-rui, ZHANG Jian-qi, FENG Zhuo-xiang, et al. Sampled IR imaging system simulation & MRTD prediction [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2004, 23(6): 436-440. (in Chinese)

- [6] 李旭东, 惠渭生, 胡铁力, 等. 红外热成像系统调制传递函数(MTF)测试研究[J]. 应用光学, 2006, 27(4): 323-326.

LI Xu-dong, XI Wei-sheng, HU Tie-li, et al. Research on MTF measurement for thermal imaging systems[J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27(4): 323-326. (in Chinese)

- [7] 李旭东, 艾克聪, 张安锋. 热成像系统 MRTD 数学模型的研究[J]. 应用光学, 2004, 25(6): 38-42.

LI Xu-dong, AI Ke-cong, ZHANG An-feng. Research of the MRTD mathematical model for thermal imaging system[J]. Journal of Applied Optics, 2004,

25(6): 38-42. (in Chinese)

- [8] LEATHERS R A, DOWNES T V, RICHARD G P. Scene-based nonuniformity corrections for optical and SWIR pushbroom sensors[J]. Optics Express, 2005, 13(13): 5136-5150.

- [9] 李华, 曲卫东, 党冬妮, 等. 基于模糊模式识别的红外成像系统 TOD 参数测量[J]. 激光与红外, 2003, 33(5): 392-395.

LI Hua, QU Wei-dong, DANG Dong-ni, et al. An objective method for infrared imaging systems' TOD parameter measurement based on fuzzy pattern recognition[J]. Laser & Infrared, 2003, 33(5): 392-395. (in Chinese)

- [10] J Dirk-jan, LANGE de, VALETON J M, et al. Automatic characterization of electro-optical sensors with image processing, using the triangle orientation discrimination (TOD) method [J]. SPIE, 2000, 4030: 104-110.

- [11] 王晓蕊, 张建奇, 常洪花, 等. 一种表征红外成像系统性能的新方法[J]. 红外技术, 2003, 25(2): 24-28.

WHANG Xiao-rui, ZHANG Jian-qi, CHANG Hong-hua, et al. A new method to characterize IR imaging system performance [J]. Infrared Technology, 2003, 25(2): 24-28. (in Chinese)