

外部因素对光电跟踪仪低对比度目标捕获能力的影响分析

黄欣^{1,2} 沈湘衡¹ 叶露¹

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 在分析存在外部因素影响光电设备跟踪能力检测的基础上,提出了利用建模分析的方法,在外部因素(目标速度、目标大小、目标亮暗和物方目标对比度)和图像目标对比度之间建立起数学模型。实验采用可调对比度无穷远目标源装置、高速摄像机、精密转台和捕获仿真装置等建立检验环境,通过数学模型分析和图像分析相互验证,着重对不同的外部因素进行了特性分析。实验结果证明:在背景辐亮度为 $3.2 \text{ W}/(\text{sr}\cdot\text{m}^2)$ 的工况条件下,拟合的方程能够准确地表述各外部因素与图像对比度的数学关系,通过设定各外部因素水平能够对光电跟踪设备的捕获能力进行有效检测。

关键词 光学器件;光电跟踪仪;低对比度目标捕获能力;外部因素;图像对比度

中图分类号 TH761.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0723002

External Factors Analysis for Influence of Low-Contrast Target Capture Capability on Photoelectric Tracker

Huang Xin^{1,2} Shen Xiangheng¹ Ye Lu¹

(¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The method to detect the capture capability of photoelectric tracker affected by the external factors is analyzed. The mathematical equations that involve the relations between image contrast and the external factors which include target size, target velocity, target contrast in object space, light (dark) target are put forward. The detection environment consists of the adjustable contrast optical target device, high-speed camera, capture simulator and turntable. Characteristic analysis of the different external factors on capture capability gets fine mutual verification by the model analysis and image analysis. The experimental results show that the fitting equations is suitable for the accurate calculation between image contrast and the external factors in the background of which the spectral radiance is $3.2 \text{ W}/(\text{sr}\cdot\text{m}^2)$. The study on the external factors and image contrast is meaningful for the evaluation of the capture capability on photoelectric tracker.

Key words optical devices; photoelectric tracking device; low-contrast target capture capability; external factors; image gray contrast

OCIS codes 230.5160; 350.4800; 100.2960

1 引 言

光电跟踪设备的跟踪性能与所跟踪的目标对比

度有关,当目标对比度很低时,光电跟踪测量设备将无法探测到目标的存在,或者可以探测到目标但捕

收稿日期: 2014-01-10; 收到修改稿日期: 2014-02-24

基金项目: 国家 863 计划(2012AA040503)、国家自然科学基金重点基金(11034007)

作者简介: 黄欣(1983—),男,博士研究生,主要从事光学设备检测技术方面的研究。E-mail: huangx_1234@sina.com

导师简介: 沈湘衡(1952—),男,研究员,博士生导师,主要从事光电测量设备精密检测技术和方法方面的研究。

E-mail: shenxiangheng@163.com

获能力下降,从而影响跟踪性能。影响整机动态低对比度目标捕获能力的因素主要分为外部因素和内部因素。外部因素主要有:目标移动速度、目标尺寸、目标亮暗、物方目标对比度、跟踪距离等。内部因素主要有:光学镜头的成像质量、透射率、杂散光系数、系统的信噪比、图像处理算法、CCD 积分时间等。国外对光电跟踪设备捕获能力检测的相关文献是封锁的,国内文献对内部因素进行研究较多^[1-7],从模型的建立和图像处理算法等方面进行捕获能力分析,而对外部因素进行分析较少。目前捕获性能指标的验证方法是利用一个已知信噪比的模拟电信号,直接检验图像处理器能否对此信号进行捕获,这种验证没有包含光学系统、电视传感器及电路噪声信号对目标对比度的影响,不能真实反映电视系统

的整体性能。

最佳的检测方法是依据各外部因素建立整机检验环境^[8-11],涵盖内部因素对捕获能力的影响。可调对比度无穷远目标源装置能够实现对各外部因素水平的合理设定,可以对实际目标(具体大小、速度、距离及物方对比度)进行整机捕获能力的检测,所以外部因素特性分析是设备捕获能力判断的关键。本文通过将外部因素与图像中的目标对比度联系起来进行建模分析,确立外部因素条件和设备捕获能力的数学关系,为在外部因素检验环境中评价设备捕获能力评价提供参考。

2 检验环境建立及指标

依据文献[8-11],可调对比度无穷远目标源装

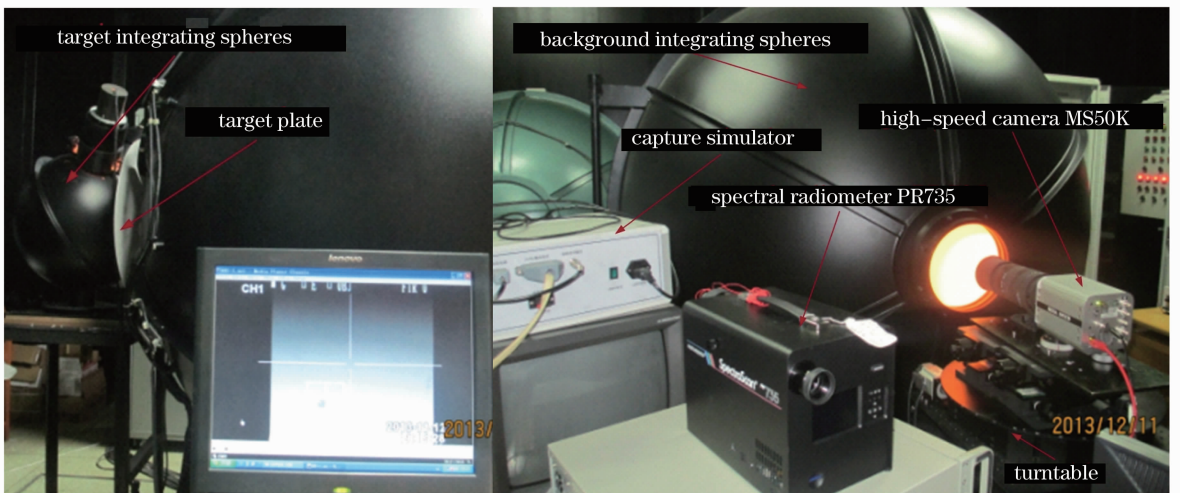
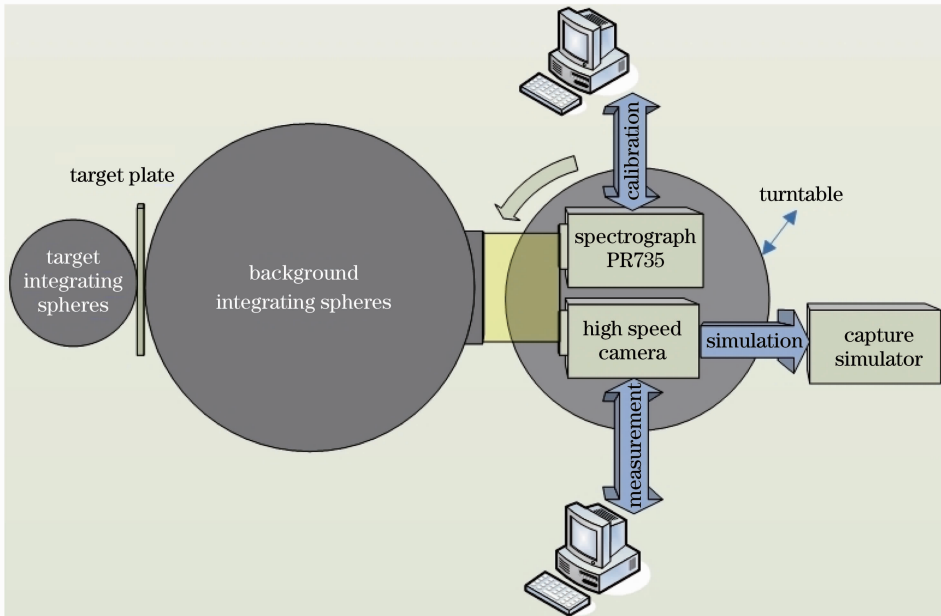


图 1 低对比度目标捕获能力检测装置实物图

Fig. 1 Adjustable contrast optical target device

置作为室内检测设备。外部因素跟踪距离暂不予考虑,目的是简化模型便于其他因素分析;实际应用中跟踪距离可通过蒙气差法将其影响直接补偿在物方目标对比度上。

低对比度目标捕获能力检测装置主要部分为可调对比度无穷远目标源和精密转台^[8-9,11],可提供连续精密可调物方目标对比度和目标移动速度,不同规格的目标尺寸及目标亮暗设定。考虑到光电跟踪设备主光学系统采用的是高速摄像机,实验中图像提取设备采用加拿大 Mega Speed 公司生产的高速摄像机 MS50K,特点是整幅图像灰度稳定,采样频率高,通过对其标定^[10,12-14],符合本测量系统的采样要求:

1) 可调对比度无穷远目标源装置技术指标及标定^[8,15-16]:物方对比度 C 变化范围为 $0\% \sim 90\%$, $C = |(N_B - N_M)| / N_B$, N_M 表示目标辐亮度, N_B 表示背景辐亮度;对比度稳定精度: $|\Delta C| \leq 1\%$, 使用美国 PHOTO RESEARCH 公司生产的 PR735 光谱辐亮度计标定;目标靶轮的目标孔尺寸根据实验要求配做,规格为 $\phi 2.6$ mm、 $\phi 4$ mm、 $\phi 6$ mm、 $\phi 8$ mm、 $\phi 9.4$ mm 通过游标卡尺标定;试验中参数设

定:背景辐亮度 $N_B = 3.20$ W/(sr·m²) 为暗背景条件,保持恒定。目标移动速度由精密转台输出,精度为 $0.05^\circ/\text{s}$ 。

2) 高速摄像机 MS50K 技术指标:快门速度为 $2 \mu\text{s} \sim 40$ ms,光谱范围为 $400 \sim 1000$ nm,像素尺寸为 $12 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$,全画幅最大录取图像频率为 750 Hz;试验中 CCD 曝光时间 30 ms,配焦距 200 mm 尼康镜头。

3 外部因素与图像灰度关系建模方法探讨

由于不同型号光电跟踪设备其软硬件配置、技术指标及内部因素不尽相同,外部因素与图像灰度关系建模方程不会存在固定模型,但是建模方法及外部因素分析方法可以统一。其方法采用完全析因(全因子)实验设计,运用 Minitab 软件对测量数据进行统计学分析^[17],证明实验数据处理及外部因素分析的可靠性,最后通过实验验证分析的准确性。根据已取得的研究成果^[7-8],将影响设备捕获能力的外部因素作为完全析因实验的输入因子,各因子水平设置如表 1 所示。

表 1 析因实验设计

Table 1 Factorial experimental design

Factor	Name	Type	Low level	High level	Unit
A	Target velocity	Numeric	4.5	12.0	($^\circ$)/s
B	Target size	Numeric	4.00	8.00	mm
C	Dark or light target	Text	-1 (dark)	1 (light)	
D	Target contrast in object space	Numeric	0.10	0.15	

添加 6 个中心点,设计出 $2^4 + 6 = 22$ 次试验表,具体形式不予叙述,可参考相关试验设计文献。图像处理中目标对比度定义是依据 GJB1830 光电跟踪仪通用规范中的规定^[18],即

$$C_T = \frac{V_T - V_B}{V_W - V_{BL}}, \quad (1)$$

式中 C_T 为目标与背景之间的对比度, V_T 为目标灰度值, V_B 为背景灰度值, $V_W - V_{BL}$ 为 CCD 的灰度等级,是一个常数。实验中获取的图像为 8 bit 位图, $V_W - V_{BL} = 2^8 = 256$, V_T 和 V_B 通过软件读取,将 C_T 作为实验设计响应变量。通过 Minitab 软件处理数据, C_T 数学模型和残差统计量分别如图 2、3 所示。

实验中数据均是在显著水平 $\alpha = 0.05$ 条件下处理与分析的。通过图 3 分析可知,数据残差呈现随机性、正态性以及等方差特性,说明外部因素的 4 个因子取值合理。图 2 中显示拟合曲线与实测曲线差异较小,依据回归方程拟合判定系数 $R^2 = 98.04\%$ 、

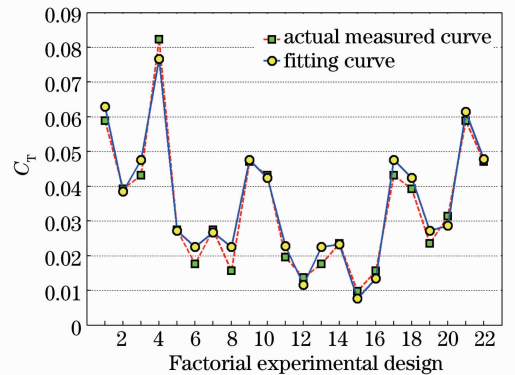


图 2 C_T 实测数据曲线与拟合曲线对比图

Fig. 2 Comparison diagram of actual measured C_T curve and fitting C_T curve

$R_1^2 = 97.06\%$ (R_1^2 为调整后系数)及 $E_{MSE} = 9.73 \times 10^{-6}$,说明 C_T 拟合方程能够表征 C_T 与 4 个因子的实际函数关系。拟合方程为

$$C_T = -0.01466 + 5.9 \times 10^{-4} A + 3.8 \times 10^{-3} B - 2.273 \times 10^{-2} C + 0.39226 D + 1.25 \times 10^{-3} AC - 2.628 \times 10^{-2} AD. \quad (2)$$

为了说明 4 个因子对 C_T 值影响的程度,可以依据各因子影响 C_T 值的主效应图判断,如图 4 所示。

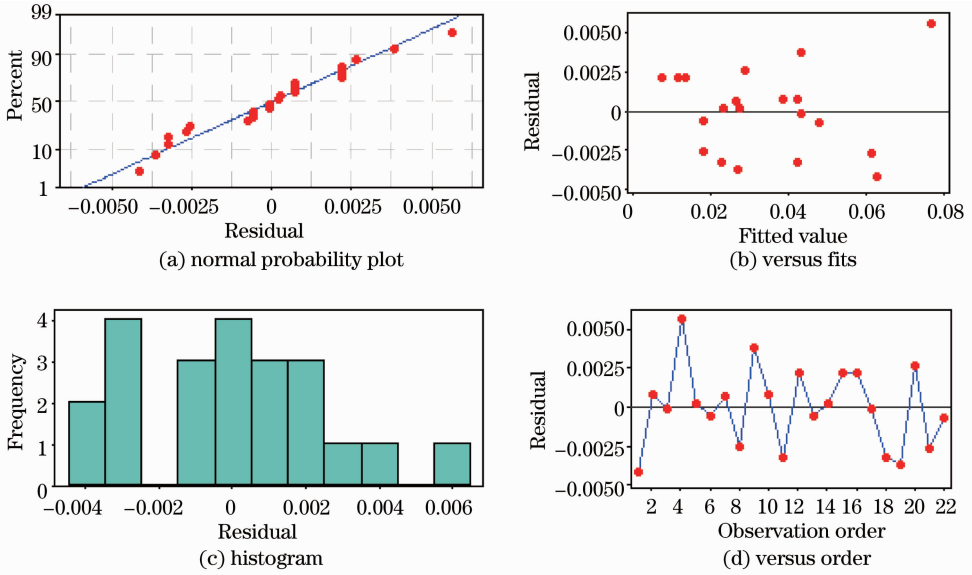


图 3 C_T 残差基本统计量分析图

Fig. 3 Residual plots of C_T

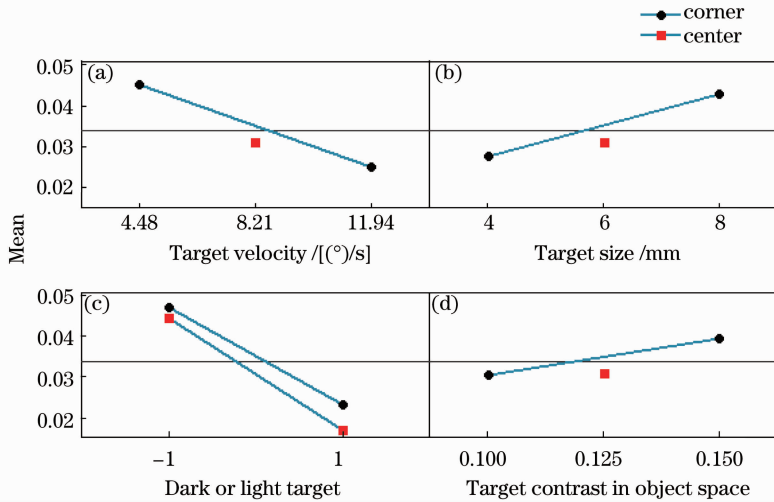


图 4 影响 C_T 的主效应图

Fig. 4 Main effects plot about C_T

通过主效应图分析,外部因素 4 个因子对 C_T 值影响显著的顺序为:目标亮暗>相对速度>目标大小>物方对比度。目标亮暗和相对速度主效应图的斜率为负值,说明这两个因子在低水平条件下,可获得更高的 C_T 值。目标亮暗的影响是由于 CCD 对于暗目标需要更长的积分时间,导致暗目标曝光量相对亮目标不足,在相同外部因子水平及 CCD 积分时间条件下,暗目标对应的 C_T 值更大。表 2 为实验条件,效果如图 5 所示。

表 2 实验条件 1

Table 2 Experimental condition1

Experimental conditions		
Factors	Value	Unit
A	4.5	(°)/s
B	8	mm
D	0.1	
Exposure time	30	ms

相对速度的影响,具体效果可由 CCD 目标灰度值(3)式解释^[8]:

$$H_{i_0} = \begin{cases} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} C(\lambda) \eta \frac{1}{16} \frac{\pi^2 d^2}{n^2 ab} \tau_o \left/ \left\{ F^2 \left[L_o \frac{ib \times S}{\omega R \times f'} + L_b \left(t_{int} - \frac{ib \times S}{\omega R \times f'} \right) \right] \right\} \right. d\lambda, & t_{int} > \frac{ib \times S}{\omega R \times f'} \\ \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} C(\lambda) \eta \frac{1}{16} \frac{\pi^2 d^2}{n^2 ab} \tau_o \left(F^2 L_o t_{int} d\lambda \right), & t_{int} \leq \frac{ib \times S}{\omega R \times f'} \end{cases}, \quad (3)$$

式中 H_{i_0} 表示目标灰度, λ_1, λ_2 为 CCD 积分谱段(波长范围), $C(\lambda)$ 为光谱效率函数, η 为 CCD 转换效率, d 为圆孔目标直径, n 为像点覆盖像元的个数, a, b 为 CCD 像元的长度宽度, F 为相对孔径, L_o 为目标辐亮度, t_{int} 为积分时间, i 为目标在移动中所能照射像元数, S 为目标相对视轴距离, W 为目标相对视轴转动速度, R 为转动半径, f' 为光学系统焦距。

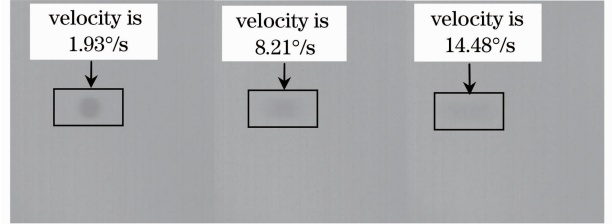


图 6 相同条件下不同目标移动速度对 CCD 成像的不同效果

Fig. 6 Effect picture of target velocity under the same conditions

建模, 因子取值水平均按表 1 所示。图 7 为暗目标 C_T 曲线拟合图, 图 8 为亮目标 C_T 曲线拟合图。

暗目标拟合公式为

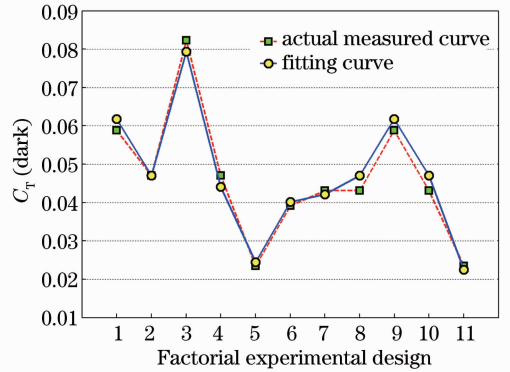


图 7 C_T (暗) 实测数据曲线与拟合曲线

Fig. 7 C_T (dark) fitting curves

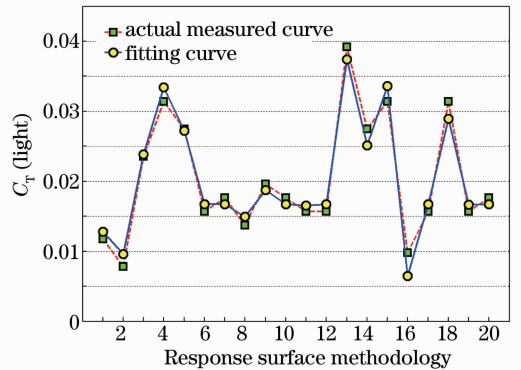


图 8 C_T (亮) 实测数据曲线与拟合曲线

Fig. 8 C_T (light) fitting curves

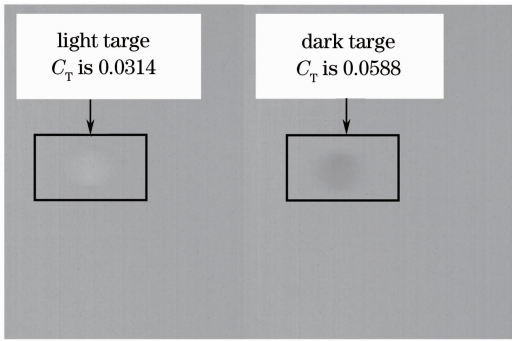


图 5 相同条件下目标亮暗对 CCD 成像的不同效果

Fig. 5 Effect picture between light target and dark target under the same conditions

当目标移动时, 沿运动方向的长度 nb 越长, 目标中心处灰度越接近静态时灰度。随着移动速度增大, CCD 积分时间越长, 目标灰度就越为接近背景的灰度, 当速度达到一定程度时, 目标最终要淹没于背景之中。但若减少积分时间, 则目标与背景均会变暗, 图像对比度就会降得更低。表 3 为实验条件, 效果如图 6 所示。

表 3 实验条件 2

Table 3 Experimental condition2

Experimental conditions		
Factors	Value	Unit
B	6	mm
D	0.125	
Exposure time	30	ms

目标大小和物方对比度的主效应图的斜率为正值, 说明这两个因子在高水平条件下, 可获得更高的 C_T 值。目标大小和物方对比度的影响比较容易理解。

上述分析证明目标亮暗对 C_T 影响最为显著, 将拟合模型进一步细化, 分别对暗目标和亮目标进行数学

$$C_T(\text{dark}) = -0.015424 + 1.314 \times 10^{-3}A + 4.412 \times 10^{-3}B + 0.541345D - 0.042054AD, (4)$$

方程评价相关参数 $R^2 = 97.67\%$ 、 $R_1^2 = 96.12\%$ 及 $E_{\text{MSE}} = 1.06 \times 10^{-5}$;亮目标拟合公式为

$$C_T(\text{light}) = 0.022925 - 4.843 \times 10^{-3}A - 3.688 \times 10^{-3}B + 0.169156D + 2.12 \times 10^{-4}A^2 + 5.64 \times 10^{-4}B^2, (5)$$

方程评价相关参数为 $R^2 = 96.36\%$ 、 $R_1^2 = 95.06\%$ 及 $E_{\text{MSE}} = 4 \times 10^{-6}$ 。

$C_T(\text{dark})$ 和 $C_T(\text{light})$ 拟合方程不同说明目标亮暗因子确实对 C_T 有明显影响,在表 1 相同因子水平条件下, $C_T(\text{dark})$ 实测值变化范围为 0.02~0.08, $C_T(\text{light})$ 实测值变化范围为 0.01~0.04,说明 $C_T(\text{dark})$ 比 $C_T(\text{light})$ 有更高的响应水平,也验证了目标亮暗因子对 C_T 值的影响确实非常显著。

表 4 仿真实验 [$N_B = 3.20 \text{ W}/(\text{sr}\cdot\text{m}^2)$]

Table 4 Validation experiment [$N_B = 3.20 \text{ W}/(\text{sr}\cdot\text{m}^2)$]

Number	Fitting C_T	Target velocity / $[(^\circ)/\text{s}]$	Target size / mm	Dark or light target	Target contrast	Measured C_T	Errors of C_T (absolute value)
1	0.01	7.35	4	Light	0.1	0.01177	0.00177
2	0.01	11.25	6	Light	0.1	0.01177	0.00177
3	0.02	3.64	4	Light	0.1	0.02353	0.00353
4	0.02	4.91	6	Light	0.1	0.02353	0.00353
5	0.03	1.94	6	Light	0.1	0.03137	0.00137
6	0.03	9.06	4	Dark	0.1	0.02745	0.00255
7	0.03	11.94	6	Dark	0.1	0.03137	0.00137
8	0.04	5.64	4	Dark	0.1	0.03922	0.00078
9	0.04	8.65	6	Dark	0.1	0.03922	0.00078

表 4 中数据验证了上述拟合方程的正确性,可通过方程拟合值估算出实测 C_T 值;在需求 C_T 值及目标亮暗一致条件下,大尺寸目标可以设定更高的相对速度,效果如图 9 所示,分别对应表 4 中序号 3

表 5 捕获实验 [$N_B = 3.20 \text{ W}/(\text{sr}\cdot\text{m}^2)$]

Table 5 Capture experiment [$N_B = 3.20 \text{ W}/(\text{sr}\cdot\text{m}^2)$]

Number	Target velocity / $[(^\circ)/\text{s}]$	Target size / mm	Dark or light target	Target contrast	Fitting C_T	State
1	8.21	4	Light	0.1	0.00862	No capture
2	4.48	4	Light	0.1	0.01666	No capture
3	8.21	8	Light	0.1	0.02092	No capture
4	4.48	8	Light	0.1	0.02895	No capture
5	8.21	4	Light	0.15	0.01708	No capture
6	4.48	4	Light	0.15	0.02512	No capture
7	8.21	8	Light	0.15	0.02937	Capture
8	4.48	8	Light	0.15	0.03741	Capture
9	8.21	4	Dark	0.1	0.03333	Capture
10	4.48	4	Dark	0.1	0.04412	Capture
11	8.21	8	Dark	0.1	0.05098	Capture
12	4.48	8	Dark	0.1	0.06177	Capture

数学建模意义在于通过拟合方程来编撰 C_T 与 4 个因子的数值表(表 4),这样根据图像算法需求 C_T 值合理地设定 4 个因子取值水平,检验光电跟踪设备捕获能力,对高速移动目标及弱小目标室内检测具有实际意义。

4 模型验证及捕捉能力检验试验

为了验证模型(4)、(5)式的适用性,进行实验验证,测量实际的 C_T 值,考虑目标孔径实现连续可变较困难,选取整值 4 和 6,在背景辐亮度 $N_B = 3.20 \text{ W}/(\text{sr}\cdot\text{m}^2)$ 工况条件下,将取物方目标对比度 C 值设为 0.1 比较合理^[7-8]。按照表 4 实验条件进行实证试验,结果如表 4 所示。

和 4。

根据上述分析,建立光电跟踪设备低对比度动态目标捕获性能检验实验,依据建立的数学模型算出拟合 C_T 值,实验条件及结果如表 5 和图 10 所示。

表 5 中数据验证了在相同工况条件下,暗目标比亮目标有更高的 C_T 值、低速目标比高速目标有更高的 C_T 值、大尺寸目标比小尺寸目标有更高的 C_T 值;文中 C_T 值均是未经图像处理的图像灰度对比度,与光电跟踪设备经过图像处理的 C_T 值存在一定的差异,但是可以通过相关图像处理与其统一起来。经图 10 分析,光电跟踪仪目标捕获能力大致

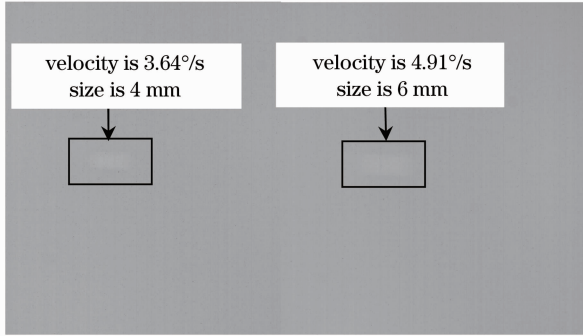


图 9 C_T 值相同条件下相对速度与目标大小的效果图
Fig. 9 Effect picture between target velocity and target size under the same C_T conditions

位于 $C_T=0.03$ 的水平,这样可通过查如表 4 所示编撰的条件表来设置外部因素具体数值安排实验,如高速条件下、低速条件下、小目标条件下等其他值如何合理设定;同时可为图像处理的算法编写提供一定的参考价值。捕获效果如图 12(a)~(e)所示,分别对应于表 5 中序号 8、4、6、10、11,限于篇幅不全部列举。

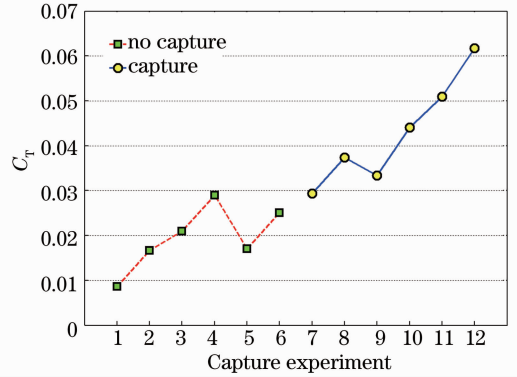


图 10 捕获能力与 C_T 值关系图
Fig. 10 Relationship between target capture capability and C_T

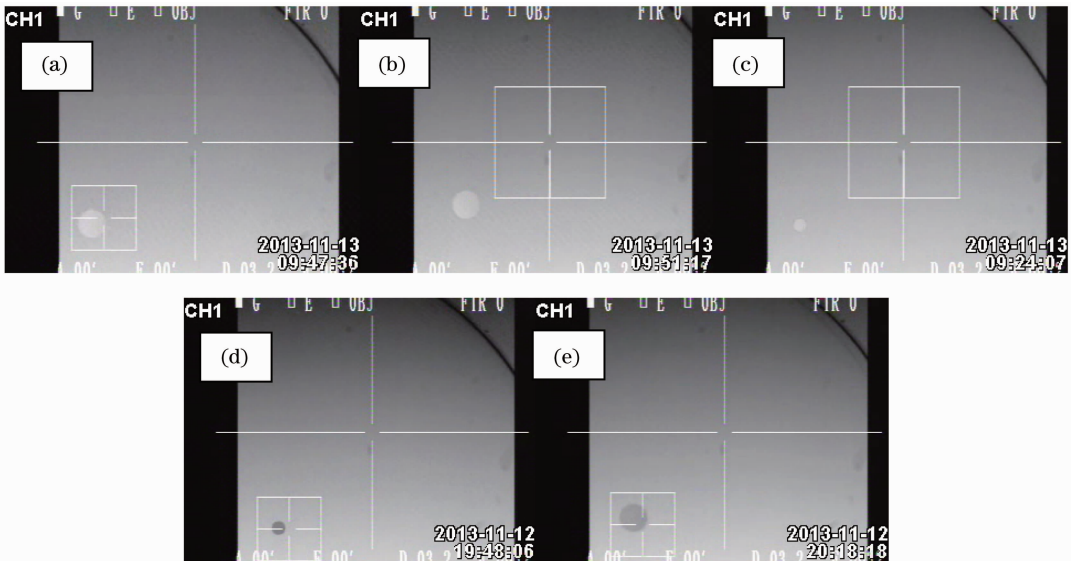


图 11 光电跟踪设备动态捕获性能检验
Fig. 11 Testing of target capture capability for photoelectric tracker

5 结 论

提出了外部因素与图像对比度之间数学模型建立及评价的方法,通过实验验证了相对速度、目标大小,目标亮暗及物方目标对比度对 C_T 值的影响,分析了这 4 个外部因素对其影响程度的差异:目标亮暗因素影响最为显著,因此 C_T (dark) 和 C_T (light) 拟合方程不同,应区分目标亮暗类型分别检测。通

过拟合方程编撰 C_T 值外部因素条件表,当评价设备捕获能力时,根据侧重的方向:速度型能力评价(高速或低速)、目标型能力评价(目标大小及形状)、物方目标对比度(高对比度或低对比度)及上述综合评价,来合理设定外部因素水平。如评价相同 C_T 值时,较大的相对速度与较大的目标,较小的相对速度与较小的目标搭配更为合理。

参 考 文 献

- 1 Wang Feng, Cao Jianzhong, Zhou Renkui, *et al.*. Image processing method used in flying object's pose measurement [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(11): 1780-1783.
王 锋, 曹剑中, 周仁魁, 等. 飞行目标姿态测量中的图像处理方法[J]. *光子学报*, 2006, 35(11): 1780-1783.
- 2 Wang Miao, Li Hua. Capturing of CCD vertical target measurement system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(6): 1539-1542.
王 苗, 李 华. CCD立靶测量系统目标捕获性能研究[J]. *光子学报*, 2009, 38(6): 1539-1542.
- 3 Sun Lianming. The Research of Moving Object Tracking System Based on Embed Image Process Unit [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.
孙连明. 基于嵌入式图像处理单元的运动目标跟踪系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- 4 Shao Wenkun, Huang Aimin, Wei Qing. Research on moving object tracking with background motion [J]. *Computer Simulation*, 2006, 23(5): 181-184.
邵文坤, 黄爱民, 韦 庆. 动态场景下的运动目标跟踪方法研究[J]. *计算机仿真*, 2006, 23(5): 181-184.
- 5 Ding Xuemei, Wang Weiya, Huang Xiangdong. New method for detecting and tracking of moving target based on difference and invariant [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(4): 570-576.
丁雪梅, 王维雅, 黄向东. 基于差分和特征不变量的运动目标检测与跟踪[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(4): 570-576.
- 6 Nie Shouping, Wang Ming, Liu Feng. Image segmentation algorithm study for low contrast image [J]. *Chinese J Lasers*, 2004, 31(1): 89-91.
聂守平, 王 鸣, 刘 峰. 低对比度图像分割算法研究[J]. *中国激光*, 2004, 31(1): 89-91.
- 7 Jin Yongliang, Wang Yanjie, Liu Yanying, *et al.*. Pre-detection method for small infrared target [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(1): 171-178.
靳永亮, 王延杰, 刘艳滢, 等. 红外弱小目标的分割预检测[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(1): 171-178.
- 8 Ye Lu. Testing of low-contrast target acquisition for photoelectric tracket [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11): 1115001.
叶 露. 光电跟踪设备低对比度目标捕获能力检验方法研究[J]. *光子学报*, 2012, 32(11): 1115001.
- 9 Huo Jinming, Shen Xiangheng, Ye Lu, *et al.*. Testing of low-contrast target acquisition for photoelectric tracket [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0512004.
霍金明, 沈湘衡, 叶 露, 等. 光电跟踪设备低对比度动态目标捕获能力检验[J]. *光子学报*, 2013, 33(5): 0512004.
- 10 Wang Suhua, Sheng Xiangheng, Ye Lu. Calibration of contrast for adjustable contrast optical target equipment [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(5): 949-956.
王素华, 沈湘衡, 叶 露. 可调对比度目标源装置中对比度的标定[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(5): 949-956.
- 11 Ye Lu, Gu Lishan, Shen Xiangheng. Design of adjustable contrast optical target [J]. *Appl Opt*, 2010, 31(5): 681-684.
叶 露, 谷立山, 沈湘衡. 可调对比度光沈无穷远目标源设计[J]. *应用光学*, 2010, 31(5): 681-684.
- 12 Qian Feng, Jia Jianjun, Zhang Liang, *et al.*. Positioning accuracy of spot-detecting camera in acquisition, tracking, pointing system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 40(2): 0205007.
钱 锋, 贾建军, 张 亮, 等. 捕获、跟踪、瞄准系统中光斑探测相机的定位精度[J]. *光子学报*, 2013, 40(2): 0205007.
- 13 Jiang Dengbiao, Li Bo, Chen Qimei. CCD irradiance calibration algorithm for HDR image acquisition [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(11): 2980-2988.
江登表, 李 勃, 陈启美. 用于高动态范围图像生成的 CCD 辐照度标定[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(11): 2980-2988.
- 14 Hu Hao, Liang Jin, Tang Zhengzong, *et al.*. Global calibration for muti camera videogrammetric system with large-scale field-of-view [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(2): 369-378.
胡 浩, 梁 晋, 唐正宗, 等. 大视场多像机视频测量系统的全局标定[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(2): 369-378.
- 15 Wang Chong, You Zheng, Xing Fei, *et al.*. Image motion velocity field for wide view remote sensing camera and detectors exposure integration control [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0511002.
王 翀, 尤 政, 邢 飞, 等. 大视场空间遥感相机的像速场及图像传感器曝光积分控制[J]. *光子学报*, 2013, 33(5): 0511002.
- 16 Liu Hongxing, Sun Jingxu, Liu Zexun, *et al.*. Design of integrating sphere solar spectrum simulator based on xenon lamp and LEDs [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(7): 1447-1454.
刘洪兴, 孙景旭, 刘则洵, 等. 氙灯和发光二极管作光源的积分球太阳光谱模拟器[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(7): 1447-1454.
- 17 Wang Jianjun. Optimized design of parameters affecting the accuracy of airborne lidar by using orthogonalization-based experiments [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(2): 0214003.
王建军. 基于正交化实验对影响机载激光雷达测量精度的工作参数进行最优化设计[J]. *中国激光*, 2013, 40(2): 0214003.
- 18 GJB1830-93. 电视跟踪器通用规范 [S]. [1993-12-20].
GJB1830-93. General Specification for Video Tracker [S]. [1993-12-20].

栏目编辑: 何卓铭