



Received: 2026/05/12
Revised: 2026/05/24
Accepted: 2026/06/23
Published: 2026/06/30

***Corresponding Author:**

WonSeok Kang

E-mail: wonseok.kang@lignex1.com

Abstract

본 논문은 영상기반 레이저 추적기 개발을 위해 레이저 스팟 오경보를 구조적으로 저감할 수 있는 파장대역 별 특성을 비교하였다. 이를 위해 두 후보 파장과 no-filter 조건에서 자연·도심·야간 환경 영상을 획득하였고, 오경보 발생 원인에 따라 네 그룹으로 재분류하였다. 각 그룹의 정량 분석을 위해 표적-배경 편차 모델로부터 도출한 다섯 가지 정량지표를 적용하였고, 분석결과 주간의 세 그룹에서는 905 nm가 일관된 우세를 보였고, 야간 점광원 그룹에서는 808 nm의 우세가 매우 큰 폭으로 나타났다. 제안한 분석 결과는 향후 레이저를 포함한 운용 상황에서 배경과 레이저 스팟 특성분석 연구를 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

This paper compares wavelength-band characteristics for reducing false alarms in an imaging-based laser tracker. Environmental images were acquired under natural, urban, and night conditions for two candidate wavelengths and a no-filter condition. The images were analyzed using five quantitative metrics derived from a target-background deviation model. The experimental results showed that 905 nm provided consistently superior performance in daytime environments, whereas 808 nm demonstrated significant advantages under nighttime point-light conditions. The proposed analysis can serve as a foundation for future studies on background and laser spot characteristics in laser-guided operational environments.

Keywords

레이저 스팟 검출(Laser Spot Detection), 파장대역 선정(Wavelength Selection), 협대역 필터(Narrow-Band Filter), 배경클러터 억제(Background Clutter Suppression), 오경보 저감(False Alarm Reduction), 야외 환경 영상 분석(Outdoor Image Analysis)

야외배경 및 인공조명에 대한 영상편차 분석을 통한 레이저 스팟 검출용 파장대역 비교 연구

A Comparative Study on Wavelength Bands for Laser Spot Detection Through Image Variance Analysis Under Outdoor Backgrounds and Artificial Lighting

강원석^{1*}, 정보희¹, 윤수빈², 이은정³, 손성덕³, 이승태¹

¹엘아이지 디엔에이 영상탐색기개발단 수석연구원

²엘아이지 디엔에이 영상탐색기개발단 연구원

³엘아이지 디엔에이 영상탐색기개발단 선임연구원

WonSeok Kang^{1*}, BoHee Jung¹, SuBin Yoon², EunJung Lee³, SungDeok Son³, SeungTae Lee¹

¹Chief resercher, LIG Defense&Aerospace IIR/SAL Seeker R&D

²Researcher, LIG Defense&Aerospace IIR/SAL Seeker R&D

³Senior researcher, LIG Defense&Aerospace IIR/SAL Seeker R&D

1. 서론

최근 전장은 대형 플랫폼보다는 민첩하고 기동성이 높으며 저비용으로 반복 전투가 가능한 드론/로봇개 등과 같은 무인 소형플랫폼이 확대되고 있다. 이에 본 연구에서는 현대전 소형 플랫폼에서도 활용 가능한 레이저 유도무기 시스템을 개발하기 위해 전통적인 4분할 광검출기를 사용하는 방식이 아닌 가시광 센서를 사용하여 이를 달성하려 한다[1].

실제 야외 환경에선 태양광 및 대기 산란 등 자연 배경 뿐만 아니라 다양한 조명 등에서 발생하는 스펙클러 반사로 인해 오인 요인이 많아질 수 밖에 없다. 이를 구별하기 위해 고성능 프로세서와 복잡한 최신 고성능 알고리즘을 사용할 수 있지만 이는 소형/경량/저가화가 핵심인 레이저유도무기의 가격 전략과는 상충된다.

이러한 배경 아래에서 알고리즘으로 오인 레이저 스팟을 제거하기보다는 레이저 조사기와 카메라의 파장대역을 적절히 선정함으로써 오인 가능성을 구조적으로 저감하는 접근이 중요해졌다.

즉, 다양한 필터 대역을 야외 배경이나 인공 조명 하에서 상호 비교하여, 레이저 스팟 대비 배경 신호의 편차가 충분히 큰 파장대역을 선정하는 것이 핵심 설계이다.

본 논문에서는 야외 배경 및 인공조명 환경의 파장대역별 특성을 편차 기반 지표로 분석하여 비교한다. 획득한 영상은 오경보 발생 원인이 서로 다른 장면이 한 그룹으로 묶이는 한계를 피하고자 4개의 그룹으로 재분류하여 **composite score**를 산출하고, 그 결과가 가중치 변동에도 강건한지를 함께 검증하였다.

본 논문은 2장에서 후보 파장대역의 선정 근거와 분석 모델, 정량평가지표를 기술하였고, 3장에서는 실험설계와 결과를 차례로 제시하고, 마지막 4장에서는 결론과 향후 연구 방향을 정리하였다.

2. 본론

2.1 후보 파장대역 선정

본 연구에서는 복잡한 배경 환경에서의 오경보를 억제하면서 동시에 실용적인 구현 가능성을 확보하기 위하여, 다음과 같은 네 가지 기준에 따라 후보 파장대역을 선정하였다.

첫째, 태양광 및 인공조명의 기여가 커 배경 에너지 레벨이 높은 가시광 대역은 먼저 배제하였다. 둘째, 향후 영상 추적기와의 이중모드 운용 확장 가능성을 고려하여, 가시광 카메라가 충분한 감도를 유지하는 근적외선 영역을 후보 범위로 한정하였다. 셋째, 근적외선 전 영역을 포괄하는 고가의 광학계를 적용하기보다는 비용 절감 관점에서 상용 가시광 렌즈가 실질적으로 초점 성능을 보장하는 파장 범위를 우선 검토하였다. 마지막으로 시스템 단가 및 수급 용이성 고려하여 상용 레이저 다이오드의 가용성이 높은 파장대역을 중심으로 후보군을 도출하였다.

이러한 기준을 종합적으로 고려하여 도출된 1차 후보 파장대역은 808 nm, 905 nm, 980 nm였다. 이들 후보 가운데 어떤 파장이 본 연구에 적합한지를 결정하기 위해, 카메라 양자효율과 AM1.5G 기준 태양 복사조도, 광학계의 회절 한계 세 가지를 함께 살펴보았다[2].

Fig. 1은 AM1.5G 기준 태양 복사조도를 나타낸다. 808 nm 부근의 복사조도는 약 $1.08 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$,

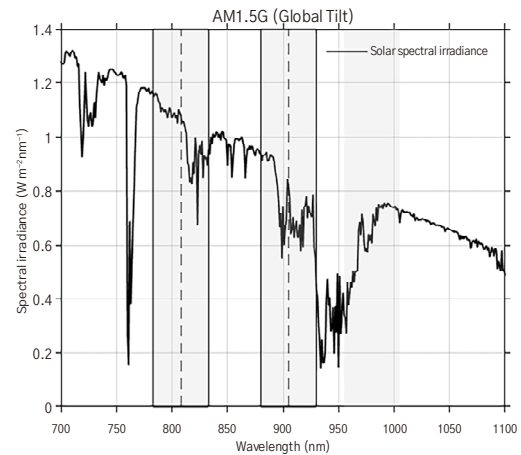


Fig. 1. Solar irradiance (AM1.5G)

905 nm 부근은 약 $0.81 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$, 980 nm 부근은 약 $0.60 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$ 로, 배경 광량 측면만 보면 980 nm가 가장 유리한 것으로 추정되었다. 하지만 본 연구에서는 다음과 같은 이유로 980 nm를 분석 대상에서 제외하였다.

우선 사용 카메라의 980 nm 부근 양자효율이 8% 수준으로, 905 nm의 양자효율(약 25%)에 비해 3배 가량 낮아 야외에서 충분한 SBR(signal to background ratio)을 확보하기 어렵다. 광학계의 회절 한계 측면에서도 F1.8 광학계와 $3.45 \mu\text{m}$ 픽셀 피치 조건에서 980 nm의 Airy 직경은 약 $4.30 \mu\text{m}$ 로 픽셀 크기 대비 25% 크게 형성되어 옆 픽셀들로 분산되는 정도가 가장 크다. 따라서 본 연구에서는 양자효율과 회절 한계 측면에서 안정적인 808 nm와 905 nm 두 파장만을 후보로 두고, 협대역 필터를 부착하지 않은 no-filter 조건과 함께 비교하여 결과를 제시한다.

2.2 표적-배경 편차 기반 분석 모델

본 연구가 지향하는 경량 레이저 스팟 탐지/추적 알고리즘은 임계값 기반의 단순한 구조에서 동작 가능해야 하므로 성능 비교 시 디지털 출력의 절대값이 아니라 표적 픽셀과 주변 배경 픽셀 간의 상대적 편차가 더 중요하며 비율이 높을수록 임계값 기반 탐지가 쉬워진다.

2.2.1 이미지 센서에서 표적-배경 출력 모델

파장대역 λ 에서 광학계를 통해 카메라 센서 배열

에 적분된 전자 수 $N(\lambda)$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다[3].

$$N(\lambda) \propto \int L(\lambda) \tau_{filter}(\lambda) QE(\lambda) t_{int}(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

여기서 $\tau_{filter}(\lambda)$ 는 대역통과 필터의 파장별 투과율, $QE(\lambda)$ 는 CMOS 센서의 양자효율, $t_{int}(\lambda)$ 는 적분시간이다. 그리고 협대역 필터를 사용하기 때문에 중심파장 λ_C 에서의 값으로 근사하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$N_{bg}(\lambda_C) \propto L_{bg}(\lambda_C) \tau_{filter}(\lambda_C) QE(\lambda_C) t_{int}(\lambda_C) \quad (2)$$

$$N_{spot}(\lambda_C) \propto [L_{bg}(\lambda_C) + L_{laser}(\lambda_C)] \tau_{filter}(\lambda_C) \cdot QE(\lambda_C) t_{int}(\lambda_C) \quad (3)$$

카메라의 디지털 출력값 I 는 ADC 이득 K , 오프셋 I_{offset} 을 고려하여 다음과 같이 근사할 수 있고, 상대적 비율 계산을 위해 상수 계수인 K , τ_{filter} , I_{offset} 을 생략 가능하다.

$$I \approx KN + I_{offset} \quad (4)$$

2.2.2 배경 평균값 고정 조건에서의 출력 모델

일반적으로 카메라 운용 시 자동 노출 제어(auto exposure, AE)를 사용하고, 이러한 조건을 모델에 반영하기 위하여, 영상 평균 배경 출력값을 동일한 값 I_0 를 유지하도록 적분시간 $t_{int}(\lambda_C)$ 를 제어한다. 이때 배경만 존재하는 픽셀의 평균 출력값 $I_{bg}(\lambda_C)$ 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$I_{bg}(\lambda_C) \propto L_{bg}(\lambda_C) QE(\lambda_C) t_{int}(\lambda_C) = I_0 \quad (5)$$

다만 야간 환경에서는 태양 복사량이 거의 없으므로 적분시간을 고정한 채 배경 휘도가 낮은 상태로 데이터를 획득하며, 이는 배경 평균 고정 가정이 성립하지 않는 조건으로 별도 해석이 필요하다. 이에 대한 구체적인 처리 방식은 3장 실험 설계에서 기술한다.

2.2.3 표적-배경 편차: ΔI_{true}

레이저 스팟이 존재하는 픽셀의 출력값을 $I_{spot}(\lambda_C)$, 배경 평균을 $I_{bg}(\lambda_C)$ 라 하면, 표적-배경 편차 ΔI_{true} 는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\Delta I_{true}(\lambda_C) = I_{spot}(\lambda_C) - I_{bg}(\lambda_C) \quad (6)$$

식 (3)에 식 (5)에서 계산 가능한 t_{int} 를 대입하면 $I_{spot}(\lambda_C)$ 은 아래와 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} I_{spot}(\lambda_C) &\propto [L_{bg}(\lambda_C) + L_{laser}(\lambda_C)] QE(\lambda_C) t_{int}(\lambda_C) \\ &= [L_{bg}(\lambda_C) + L_{laser}(\lambda_C)] QE(\lambda_C) \frac{I_0}{L_{bg}(\lambda_C) QE(\lambda_C)} \\ &= I_0 \left(1 + \frac{L_{laser}(\lambda_C)}{L_{bg}(\lambda_C)} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

이를 식 (6)에 대입하면 표적-배경 편차는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta I_{true}(\lambda_C) &= I_0 \left(1 + \frac{L_{laser}(\lambda_C)}{L_{bg}(\lambda_C)} \right) - I_0 \\ &= I_0 \frac{L_{laser}(\lambda_C)}{L_{bg}(\lambda_C)} \end{aligned} \quad (8)$$

식을 살펴보면, 양자효율 $QE(\lambda_C)$ 와 적분시간 $t_{int}(\lambda_C)$ 는 상쇄되며, 이는 배경 출력 값을 고정하면 파장대역 비교에서 양자효율, 적분시간 특성에 무관하게 비교할 수 있음을 의미한다.

2.2.4 국소배경-배경 편차: ΔI_{false}

실제 레이저 추적기 알고리즘의 오경보율은 배경 내 국소적으로 밝은 영역(글린트, 차량 헤드램프, 강한 LED 등)의 빈도와 세기에 의해 결정되며 아래와 같이 식을 세울 수 있다.

$$\Delta I_{false}(\lambda_C) = I_0 \frac{L_{bg,local}(\lambda_C)}{L_{bg}(\lambda_C)} \quad (9)$$

여기서 $L_{bg,local}(\lambda_C)$ 는 평균 배경 대비 국소적으로 추가된 휘도 성분이다.

따라서 데이터 분석 시 $\Delta I_{true}(\lambda_C)$ 는 크면서 Δ

$I_{\text{false}}(\lambda_C)$ 의 빈도와 크기는 작게 하는 방향으로 성능지표를 정의하는 것이 본 연구의 목적에 부합하는 정량적 분석 방향임을 알 수 있다. Fig. 2는 두 편차의 물리적 의미를 단면 프로파일 관점에서 도식화한 것이다.

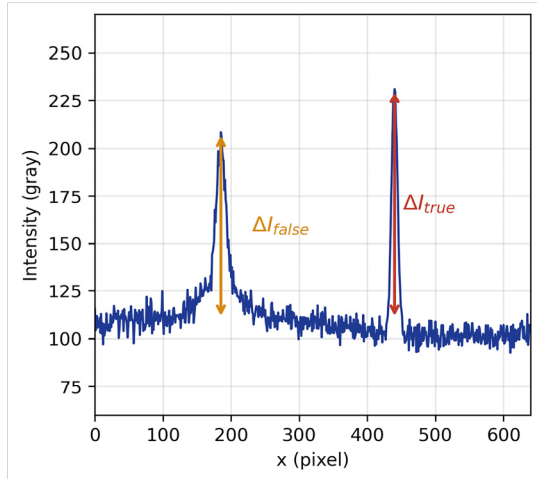


Fig. 2. Line cross-section profile of image

2.3 정량평가지표

앞 절의 편차 모델에 따르면 파장대역에 따라 ΔI_{true} 는 크게, ΔI_{false} 의 빈도와 크기는 작게 해야 한다. 그러나 임계값 기반 탐지기의 오경보만으로는 단일 지표화하기 어렵고 장면에 따라 지표 간 상충되는 부분도 존재하므로, 본 연구는 다섯 가지 정량지표를 정의하고 이를 가중합한 종합 지표 composite score를 도입하였다. BLOB_AUC와 $Z_{p99.9}$ 를 핵심 지표로, RMS contrast, svClutter, gradP95를 보조 지표로 두며, 모든 지표는 값이 작을수록 해당 파장대역의 배경 억제 성능이 우수함을 의미하도록 정의하였다[4].

BLOB_AUC는 본 연구에서 새로 도입한 지표이다. 운용 가능한 임계값 구간 $[k_{\min}, k_{\max}]$ 전체에서의 가짜 스팟 평균 발생 빈도로 정의하며, 식은 다음과 같이 정의한다.

$$C_{\text{blobs}}(k) = \text{connected}\{R_n(x, y) > k\} \quad (10)$$

$$N_{\text{blobs}}(k) = \{C \in C_{\text{blobs}}(k) | C > A_{\min}\} \quad (11)$$

$$AUC_{\text{avg}}(x) = \frac{1}{k_{\max} - k_{\min}} \int_{k_{\min}}^{k_{\max}} x(k) dk \quad (12)$$

$$BLOB_AUC = AUC_{\text{avg}}(N_{\text{blob}}(k)) \quad (13)$$

$N_{\text{blobs}}(k)$ 는 임계값 k 에서 검출된 가짜 스팟의 개수이며 이상치 제거를 위해 $R_n(x, y)$ 계산 시, 상·하위 2.5%를 제외한 평균값으로 정규화하였으며, Blob 판단 시 8-방향을 적용하여 연결성을 확인했다. 레이저 스팟의 최소 면적인 $A_{\min}$ 은 10으로 설정하여 분석의 현실성을 높였다.

$Z_{p99.9}$ 는 픽셀 단위 정규화 편차 분포의 상위 0.1% 지점을 의미한다. 영상 내 가장 강한 외란의 절대 세기를 나타내며, 외란 강도가 임계값을 초과할 가능성을 직접 반영하는 지표이다.

$$Z(x, y) = \frac{I(x, y) - \mu_{\text{local}}(x, y)}{\max(\sigma_{\text{local}}(x, y), \sigma_{\min})} \quad (14)$$

$$Z_{p99.9} = \text{percentile}(Z(x, y), 99.9) \quad (15)$$

보조지표는 다음 세 가지이다. RMS contrast는 영상 전체의 표준편차를 평균으로 나눈 σ/μ 로 정의되며 배경의 전역적 명암 변동을 정량화한다. svClutter는 영상을 32×32 블록으로 분할한 뒤 블록별 평균값의 공간 표준편차로, 배경의 공간적 비균질성을 평가한다. gradP95는 그래디언트 크기 분포의 상위 5% 지점으로, 인공 옛지 성분의 강도를 반영한다.

다섯 지표는 데이터셋 전체에서 추출한 지표별 상·하한으로 min-max 정규화한 후, 가중합으로 composite score를 산출했다. 가중치는 Table 1과 같이 핵심지표에 70%, 보조지표에 30%를 배분하였다. 가중치는 스팟 검출 알고리즘의 개발 방향을 고려한 것으로 주요 특성은 핵심지표로 그 외의 정량평가 지표는 보조지표로 구성하여 배경의 공간적, 통계적 특성을 다각도로 반영하였다.

$$\tilde{x}_i = \frac{x_i - \min(x_i)}{\max(x_i) - \min(x_i) + \epsilon} \quad (16)$$

$$\text{Composite Score} = \sum_i w_i \tilde{x}_i \quad (17)$$

Table 1. Weight for composite score

Category	Metric	w_i [%]	Subtotal [%]
Core Metrics	BLOB_AUC	45	70
	Z_p99.9	25	
Supplementary Metrics	RMS Contrast	10	30
	svClutter	10	
	Gradient Magnitude	10	
Total	-	100	100

3. 실험

3.1 영상획득시스템

영상 획득에는 CMOS 센서가 적용된 산업용 카메라를 사용하였다[5]. 주요 사양은 Table 2에 정리하였다. No-filter 조건은 동일 광학계에서 필터만 제거한 상태이다. 모든 조건에서 동일한 자동 노출 알고리즘을 적용하여 영상의 평균 출력을 1000 ± 50 gray로 유지하였다. 이는 2.2.3절 출력 모델 산출 조건을 실험적으로 모사한 것이다.

Table 2. System specification

Items	Value
Resolution	640 × 480 cropped
Pixel Pitch	3.45 μm
QE @808/905	55 / 25%
ADC	12 bit (0~4095 gray)
Frame Rate	30Hz
Lens	35 mm (F1.8)
Filter	808, 905 ± 25 nm
Auto Exposure	1000 ± 50 gray

3.2 데이터셋 및 시나리오

3.2.1 영상획득 시나리오

실제 야외 운용 시 획득 가능한 배경 조건을 포함하기 위해, 데이터를 자연 배경, 도심 배경, 야간 인공조명 배경 세 시나리오로 나누어 획득하였다. 자연 배경에는 나무·수풀·강·잔디·진흙·하늘 등 비도심 환경의 자연 요소를 포함하였으며, 도심 배경에는 건물 외벽·변압기·오토바이·입간판 등 인공 구조물로 구성하

였고, 야간 인공조명 배경은 가로등·외벽 등·LED 차단봉 등 자연광이 거의 없는 환경에서 인공 광원이 지배적인 장면으로 구성하였다.

각 장면은 동일한 촬영 위치·각도·시간대 조건에서 각기 다른 필터(no-filter, 808 nm, 905 nm)를 사용하여 연속 촬영하였고, 시간 경과에 따라 변화하는 이동 물체나 깜박이는 불빛은 분석 과정에서 오류를 유발할 수 있으므로 근거리에서 정지 물체를 대상으로 촬영하였다.

저장한 영상 중 자동노출 제어로 출력 안정화가 된 상태에서 카메라 진동, 일조 변화, 풍속에 의한 수풀·수면의 동적 변동 등 일시적 외란이 없는 프레임을 각 조건당 대표로 1장씩 선정하였다.

3.2.2 오경보 발생 원인 기반 재분류

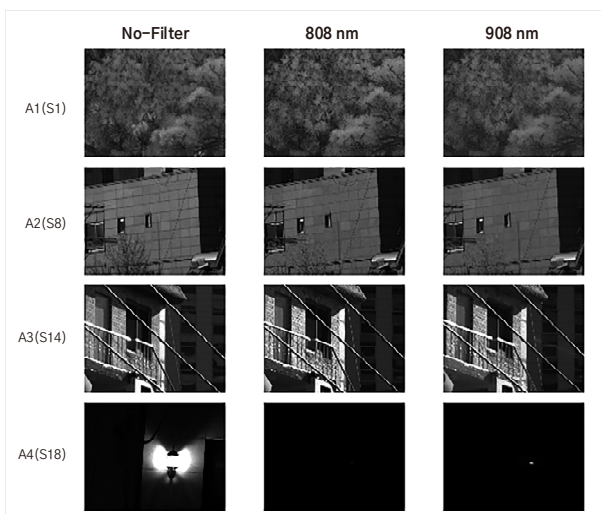
앞 절의 세 시나리오는 데이터 다양성 확보를 위한 획득 단계의 분류이다. 그러나 분석 단계에서는 파장대역별 차이를 만들어내는 물리적 특성을 기준으로 장면들을 다시 분류할 필요가 있다. 예를 들어 자연 배경의 ‘하늘’과 ‘잔디’는 둘 다 태양광 산란을 주된 광원으로 하는 자연확산 반사체이며, 도심 배경의 ‘건물 외곽선’과 ‘오토바이 차체’ 또한 고주파 인공구조물이 지배적이라는 공통점을 갖는다. 한편 같은 도심 시나리오 안에서도 ‘입간판’과 ‘유리창’은 정반사 성분이 두드러져 별도 그룹으로 분리해 분석하는 편이 합리적이다.

이러한 관점에서 19개 장면을 다음 네 가지 분석 그룹으로 재분류하였다. (A1) 자연확산 배경(diffuse natural)은 태양광 산란이 지배적이며 비정형적 확산 반사를 보이는 수풀, 잔디, 진흙, 하늘 등이다. (A2) 인공구조 배경(structured edges)에는 건물 외곽선, 창문틀, 오토바이 차체, 입간판 등 고주파 인공 엣지 성분이 강한 구조물이 포함된다. (A3) 거울반사 배경(specular/highlight)은 강 수면, 금속 차단봉, 유리창 등 정반사에 의한 국소 고휘도가 두드러지는 반사체이며, (A4) 야간 점광원 배경(night point-light)은 가로등, 외벽 LED, LED 차단봉처럼 자연광이 거의 없는 환경에서 인공 점광원이 지배적인 장면이다.

Table 3에 시나리오 분류와 메커니즘 기반 분석 그룹을 함께 표기하였으며, 각 분석 그룹별 대표 장면은 Fig. 3에서 확인할 수 있다.

Table 3. Image data set

Scenario	Scene ID	Scene	Analysis Group
Nature	S1	tree	A1 Natural Diffuse
	S2	shrub	A1 Natural Diffuse
	S3	grass	A1 Natural Diffuse
	S4	river	A3 Specular Reflection
	S5	mud	A1 Natural Diffuse
	S6	sky	A1 Natural Diffuse
Urban	S7	shaded wall	A2 Artificial Structure
	S8	building wall	A2 Artificial Structure
	S9	building	A2 Artificial Structure
	S10	pole transformer	A2 Artificial Structure
	S11	motorcycle	A2 Artificial Structure
	S12	A-frame sign	A2 Artificial Structure
	S13	window+building	A3 Specular Reflection
	S14	bollard small	A3 Specular Reflection
	S15	bollard big	A3 Specular Reflection
Night time	S16	window	A3 Specular Reflection
	S17	streetlight	A4 Night point-light
	S18	wall light	A4 Night point-light
	S19	barrier pole	A4 Night point-light

**Fig. 3.** Representative scenes for analysis group

3.2.3 야간 환경 처리

앞 절에서 전제한 배경 평균 고정 조건은 충분한 광량이 존재하는 주간 환경을 대상으로 한 것이다. 그러나 야간 점광원 그룹(A4)은 태양 복사가 거의 없으므로 적분시간을 시스템 운용 한계(30 Hz 동작 기준)까지 늘려도 평균 출력값이 1000 gray에 도달할 수

없으므로 A4 그룹에서는 30 Hz 동작이 가능한 최대 적분시간을 설정한 후 데이터를 획득하였으며, 이는 모델의 가정과 다른 부분이라는 점을 명시해둔다.

다만 야간 환경에는 분석 관점에서 다음과 같은 두 가지 특성이 있다. 첫째, 배경 휘도 자체가 매우 낮아 ΔI_{false} 의 절대 크기 또한 작다. 둘째, 점광원의 출력은 주간에 비해 상대적으로 매우 높기 때문에 임계값 기반 탐지에서 진짜 표적과의 구분이 상대적으로 용이한 측면이 있다. 이러한 점을 고려하여 본 연구에서는 야간 데이터를 영상획득률을 유지하는 한계 내에서 정량 비교하되, 그 결과를 주간 결과와 별도로 해석하였다.

3.3 실험 결과

각 영상에서 5개의 정량지표를 산출한 후, 데이터셋 전체에서 추출한 지표별 상·하한 값으로 min-max 정규화를 수행하였다. 이후 Table 1의 가중치를 곱한 합으로 **composite score**가 결정된다. 모든 지표는 작을수록 배경 억제 성능이 우수하도록 정의하였으며, **composite score** 또한 그룹 안에서 가장 작은 값을 갖는 파장이 해당 그룹에서 배경을 효과적으로 억제하는 파장으로 선정하였다. 이하 절에서는 **composite score** 매트릭스, 핵심지표, 임계값 강건성 곡선, 보조지표라는 네 관점에서 결과를 제시하였다.

3.3.1 Composite Score 종합 비교

Fig. 4는 4개의 분석 그룹과 3개의 파장 조건에 대한 **composite** 매트릭스이다. 각 행에서 가장 작은 값을 갖는 셀은 붉은 테두리로 표시하여 그룹별 우세파장을 시각적으로 강조하였다.

그룹별로 살펴보면, A1, A2에서는 905 nm, 808 nm, no-filter 순으로 우세하였다. A3 역시 905 nm가 가장 우세하나 no-filter 조건이 808 nm보다 더 낮은 값을 기록하였다. 한편 A4 그룹에서는 808 nm가 908 nm나 no-filter보다 큰 폭으로 앞섰다.

A3에서 808 nm가 no-filter보다 불리한 결과를 보인 점은 자동 노출 제어에 의한 동적범위 축소가 거울반사 환경에서 가장 강하게 나타났기 때문으로 해석된다. 거울반사 그룹은 정반사에 의한 국소 영역이 가짜 스팟의 주된 발생 인이 되는 환경이며, 이 out-

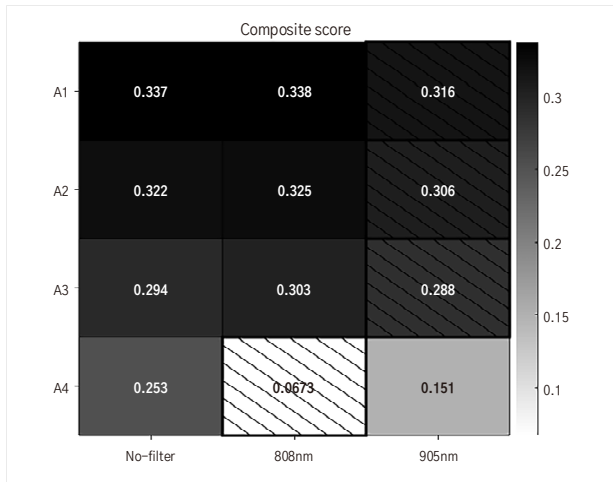


Fig. 4. Composite score matrix

lier의 상대적 강도는 영상의 동적 범위에 따라 민감하게 반응한다. No-filter는 광대역 입력 광량이 매우 커 적분시간이 짧게 설정되고 그 결과 동적범위가 축소, outlier의 출력 강도가 상대적으로 평탄화된다. 반면 808 nm 협대역 필터는 적분시간이 길어지며 outlier가 평균 대비 더 두드러지게 나타나 이번 분석 결과와 같이 미세한 불리함을 누적시켰다. 그 결과 composite score 단계에서 no-filter와 808 nm 사이에 역전이 일어났다. 이 결과는 no-filter가 우수한 배경 억제 성능을 갖는다는 의미가 아니다. 동적 범위 축소는 표적 신호 또한 함께 줄어들어 레이저가 집광되는 조건에서의 SBR 관점에서는 오히려 불리하게 작용할 수 있다.

A4 야간점광원 그룹은 다른 분석 그룹보다 표본이 적으나 획득한 배경은 가스방전등, LED 등 야간 인공 점광원의 주요 유형을 내포하고 있고 다른 파장대역들과는 달리 composite score 간의 차이가 5~10배 수준으로 매우 크다는 점을 고려했을 때 표본 수가 부족하지만 충분한 신뢰성을 갖는다고 판단된다.

이상의 결과를 종합해보면, 주간 환경(A1~A3) 전반에서 905 nm가 일관되게 우세하며, 야간 점광원 환경(A4)에서는 808 nm가 압도적으로 우세하다는 결론을 내릴 수 있다.

3.3.2 핵심지표 분석: BLOB_AUC, $Z_{p99.9}$

Composite score의 70%를 차지하는 BLOB_AUC와 $Z_{p99.9}$ 가 그룹별로 어떤 패턴을 보이는지 Fig. 5에 도시하였다.

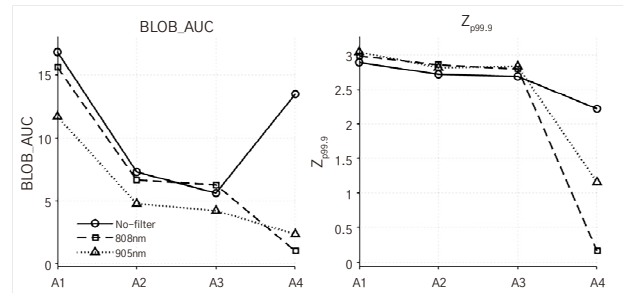


Fig. 5. Core metrics by analysis group

BLOB_AUC의 그룹별 패턴을 살펴보면, 자연확산의 경우 모든 파장 가운데 가장 높은 값을 보였으며, A2 인공구조와 A3 거울반사로 갈수록 점차 감소함을 볼 수 있다. A1이 가장 높게 나타난 이유는 자연식물의 경우 미세 텍스처가 z-score 분포에 많은 outlier를 만들어내기 때문으로 보인다. 그리고 모든 주간 분석 그룹의 경우 905 nm가 no-filter나 808 nm 대비 약 30%가량 낮은 값을 보였으며, A4 야간 그룹에서는 no-filter가 다시 상승하는 반면 808 nm와 905 nm는 거의 0~3 수준에 머무르는 것을 볼 수 있고, 그 중에서도 808 nm가 가장 낮다.

$Z_{p99.9}$ 는 픽셀 단위 정규화 편차 분포의 상위 0.1% 지점이다. 주간 그룹에서는 세 파장 모두 유사한 값을 보여 그 차이가 파장에 따라 크게 나지 않음을 확인하였다. 그러나 A4 야간 그룹에서는 no-filter가 808 nm, 905 nm 대비 매우 높게 나타나는 것을 볼 수 있고, 이는 협대역 필터가 점광원 성분을 효과적으로 차단함으로써 평균 대비 외란의 두드러짐을 많이 감소시킨 것으로 보인다. 덧붙여 A4 808 nm의 composite score가 주간 그룹에 비해 매우 작은 절댓값을 갖는 이유는 핵심지표 2종의 결과가 모두 매우 낮아서였다. 즉 핵심지표만으로 가중평균을 계산하더라도 808 nm가 야간에는 압도적으로 우세하다는 결론을 도출할 수 있었다.

3.3.3 임계값 강건성: $FAR_{pixel}(k)$, $N_{blobs}(k)$

본 연구의 핵심 차별점인 임계값 의존성 제거 효과를 직접 확인하기 위해 Fig. 6에 임계값 k 의 변화에 따른 $FAR_{pixel}(k)$ 와 $N_{blobs}(k)$ 의 변화 양상을 그룹별로 도시하였다.

$FAR_{Pixel}(k)$, $N_{blobs}(k)$ 두 곡선 모두 임계값이 높아질수록 단조 감소하는 경향을 보인다. 하지만

A1:N_blobs 곡선을 보면 $k=2$ 일 때 우세 파장대역은 905 nm, no-filter, 808 nm 순이었으나 $k=3$ 일 때 905 nm, 808 nm, no-filter 순으로 뒤바뀌었으며 A3:N_blobs 곡선을 살펴보면 k 값이 3에서 4로 증가 하였으나 오히려 결과가 안 좋아지는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 본 연구가 도입한 AUC(area under curve) 지표의 운용적 가치를 뒷받침한다.

3.3.4 보조지표 분포

Fig. 6는 보조지표 세가지(RMS contrast, svClutter, gradP95)의 그룹별 분포를 보인 것이다.

RMS contrast는 주간 그룹에서 세 파장 모두 0~1 사이 낮은 값을 보이지만, A4 야간 그룹에서는 808 nm와 908 nm가 15 이상으로 크게 증가하는 양상을 보인다. 이는 야간 환경에서 협대역 필터를 통과한 영

상의 평균 배경 출력이 매우 낮아져 σ/μ 비율이 비정상적으로 커지는 현상이며, 2.2.3절에서 미리 명시한 야간 배경 평균 고정 가정이 성립하지 않는 실증적 결과로 볼 수 있을 것이다. 다만 RMS contrast는 보조 지표로 가중치가 10%로 composite score 산정에 미치는 영향이 제한적이고, 핵심지표가 모두 808 nm가 우세를 명확히 가리키고 있어 야간 그룹의 결론 자체는 강건하게 유지된다.

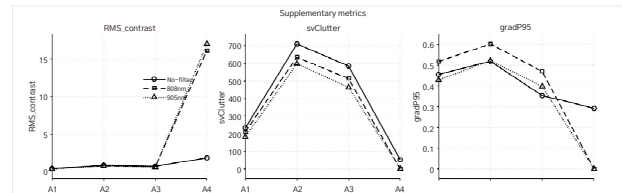


Fig. 7. Supplementary metrics by analysis group

svClutter는 모든 그룹에서 905 nm가 가장 작고 no-filter가 가장 큰 순으로 일관되게 관찰되며 905 nm가 배경의 공간적 복잡도를 가장 효과적으로 제한함을 의미하는 것으로 볼 수 있다.

gradP95는 A2 인공구조 그룹에서 808 nm가 가장 큰 값을 기록했다. 이 808 nm가 가시광에 가까워 인공 표면의 재질 텍스처와 엣지 성분이 더 살아남기 때문으로 해석되며, 이는 가짜 스팟의 잠재적 원인이 더 많이 보존된다는 의미로 받아들일 수 있다. 결과적으로 보조지표 gradP95의 분포는 905 nm 우세 결론을 보조적으로 뒷받침한다.

4. 결론

본 연구에서는 야외 환경에서 운용되는 능동형 레이저 스팟 검출용 협대역 광학 필터의 파장대역 선정 문제를 정량적으로 다루었다. 808 nm와 905 nm 두 파장과 기준점으로 삼을 수 있는 no-filter 조건에 대해 자연·도심·야간을 배경으로 19개 장면 영상을 획득하였고, 이를 정량평가하기 위해 '표적-배경 편차 기반 분석 모델'로부터 다섯 가지 정량지표 BLOB_AUC, Z_p99.9, RMS Contrast, svClutter, gradP95를 산출하였다. 그리고 레이저 스팟 탐지 알고리즘의 특성을 고려하여 핵심지표에는 70%, 보조지표에는 30%의 비율로 가중합한 composite score를 대표 지표로 선정하여 그룹별 우세 파장을 평가하였고 운용환경에

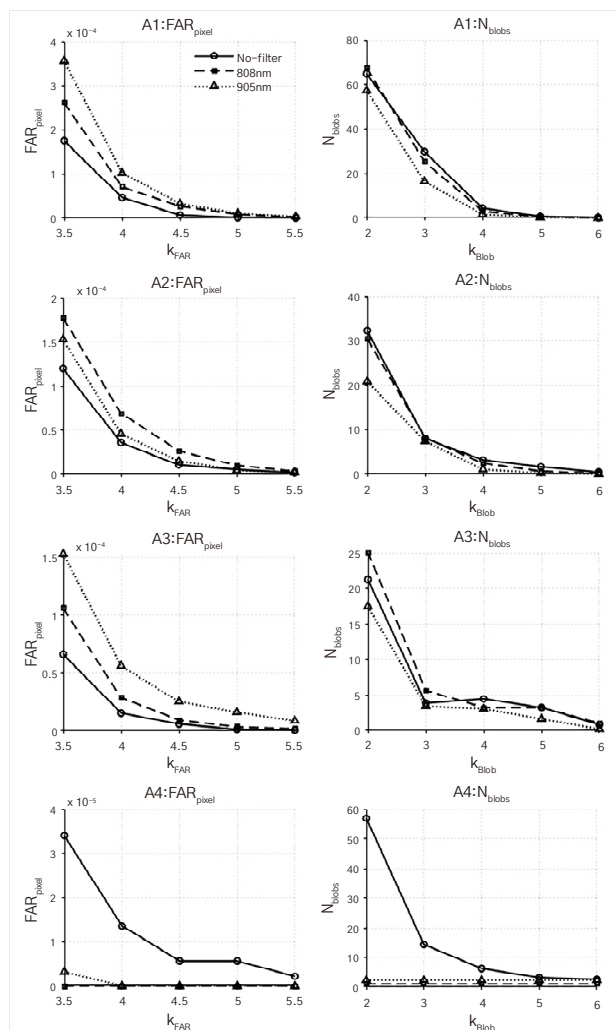


Fig. 6. Threshold-robustness curves

따라 파장 선택 지침을 도출할 수 있었다.

주간 환경에 해당하는 자연확산·인공구조·거울반사 세 그룹에서는 905 nm가 일관된 우세를 보였다. 거울 반사 환경에서 808 nm가 no-filter보다 불리한 결과를 보였는데 이는 자동노출설정에 의한 동적범위가 축소로 인한 결과로 no-filter가 808 nm보다 우수한 배경 억제 성능을 갖는다는 의미가 아니었다. 한편 야간 점광원 환경에서는 808 nm가 크게 우세한 것으로 확인되었으며, 이는 협대역 필터링이 램프 및 LED 인공 점광원의 발광 스펙트럼을 효과적으로 차단한 결과로 해석할 수 있었다. 결국 단일 최적 파장이 존재하다기 보다는 운용환경을 고려하여 파장대역을 적절히 선택하는 접근이 필요함을 알 수 있다.

본 연구의 핵심 기여는 세 가지로 요약하였다. 첫째, 단일 임계값 의존성을 줄이는 BLOB_AUC 지표를 새로 도입함으로써 임계값 강건성을 갖춘 정량 비교 방식을 제안하였다. 둘째, 19개 장면을 오경보 발생 원인에 따라 4개의 그룹으로 재분류하여 동일 시나리오 안에서 물리적 특성이 다른 장면이 한 그룹에 묶여 결과 분석에 있어 오류가 발생할 수 있는 여지를 해소하였다. 셋째, 다양한 조건을 고려한 핵심·보조 지표를 포함한 가중합 방식의 composite score를 제

안하였다.

본 연구에서는 표적이 존재하지 않는 배경만을 대상으로 한 파장 적합성 평가에 집중하였으나, 향후 연구에서는 실제 레이저 ON 조건에서의 표적 검출률, 오탐률을 정량평가하고자 한다. 또한 980 nm 대역의 한계를 보완할 수 있는 광학계와 센서가 확보될 경우 본 연구의 비교 틀을 그대로 적용한 후속 평가를 실시하고자 한다. 마지막으로 레이저 스팟 탐지 알고리즘을 개발하고 이를 임베디드 환경에서 실시간 동작시키는 후속 연구를 할 예정이다.

참고문헌

- [1] K. Mehmood & S. Qureshi, 'The Role of Unmanned Aerial Systems in Conventional and Asymmetric Battle Fields,' International Journal for Conventional and Non-Conventional Warfare, 2024.
- [2] James R. Janesick, Photon Transfer, SPIE Press, 2007.
- [3] Cornelius J. Willers, Electro-Optical System Analysis and Design: A Radiometry Perspective, SPI Press, 2013.
- [4] Gerald C. Holst, Electro-Optical Imaging System Performance, SPIE Press, 2008.
- [5] Basler, acA2040-120um Camera User's Manual, 2021.