

Performance Degradation Mechanisms of Template-Matching Trackers under Laser Dazzling Effects

Jeong-Hyeon Moon*, Kyuhong Choi*, Min-Sue Hong**

*Engineer, Hanwha Systems, Seongnam-si, Korea

**Chief Engineer, Hanwha Systems, Seongnam-si, Korea

[Abstract]

This paper investigates the performance degradation mechanisms of template-matching trackers under laser dazzling effects. An experimentally grounded image-synthesis pipeline was developed using real sensor measurements of dazzling patterns to replicate saturation and chromatic distortion phenomena in vision sensors. The pipeline statistically defines saturation regions and dynamically composites them into public datasets, enabling systematic evaluation of tracker robustness under varying laser power, divergence, and modulation conditions. Experimental results show that even under low-influence dazzling conditions, where the target remains visually observable, the tracking success rate of the Sobel-NCC combination drops significantly from approximately 0.6 to around 0.3, indicating substantial performance degradation without full saturation. Under over-saturation conditions, the success rate further collapses to below 0.1, while Sobel-SSD exhibits an immediate outer-jump failure due to severe central mismatch. These results provide a quantitative understanding of how laser dazzling distorts feature correlation and similarity computation in vision-based tracking algorithms, offering practical insights for designing robust electro-optical guidance and protection systems.

▶ **Key words:** Laser dazzling, Template matching, Image-based tracking, Electro-optical sensor

[요 약]

본 논문은 레이저 대즐링 환경에서 템플릿 매칭 기반 추적기의 성능 붕괴 메커니즘을 규명한다. 실제 센서로부터 획득한 대즐링 영상을 이용하여, 포화 및 색상 왜곡 현상을 재현할 수 있는 실험 기반 합성 파이프라인을 구축하였다. 제안된 파이프라인은 포화 영역을 통계적으로 정의하고, 공용 데이터셋에 동적으로 합성함으로써 레이저 출력, 발산각, 조사 형태에 따른 추적기의 강건성을 체계적으로 평가한다. 실험 결과, 객체가 시각적으로 인지 가능한 비완전 포화(LID) 조건에서도 Sobel-NCC 조합의 추적 성공률은 약 0.6에서 0.3 수준으로 유의미하게 감소하였다. 이는 완전 포화가 발생하지 않더라도 대즐링으로 인한 국소 포화 및 주변부 왜곡이 추적 성능을 크게 저하시킬 수 있음을 의미한다. 완전 포화(OOD) 조건에서는 성공률이 0.1 이하로 붕괴되었으며, Sobel-SSD 조합은 중심부 불일치로 인해 즉각적인 outer-jump 실패를 보였다. 본 연구는 이러한 정량적 결과를 통해 대즐링이 영상 기반 추적기의 내부 상관 구조를 어떻게 왜곡시키는지 규명하였으며, 향후 전자광학 유도 및 보호 체계의 강건성 설계에 실질적인 기여를 제공한다.

▶ **주제어:** 레이저 대즐링, 템플릿 매칭, 영상 기반 추적, 전자광학 센서

-
- First Author: Jeong-Hyeon Moon, Corresponding Author: Jeong-Hyeon Moon
 - *Jeong-Hyeon Moon (mjh319@ajou.ac.kr), Hanwha Systems
 - *Kyuhong Choi (ckh2028@hanwha.com), Hanwha Systems
 - **Min-Sue Hong (minsue.hong@hanwha.com) Hanwha Systems
 - Received: 2025. 12. 03, Revised: 2025. 12. 26, Accepted: 2025. 12. 29.

I. Introduction

현대 전장에서는 각종 공격체계가 정밀한 영상 기반 추적·유도 기능에 크게 의존하고 있으며, 이에 따라 영상 센서는 전력의 생존성 및 임무 완수 능력을 좌우하는 핵심 감지 매체로 자리 잡았다 [1]. 따라서 영상 센서의 기능을 일시적 또는 영구적으로 저하시킬 수 있는 교란·무력화 수단은 전술적·전략적 관점에서 중요한 대응 옵션으로 간주된다.

레이저 대즐링(Laser Dazzling)은 고출력 레이저 빔이 센서의 수광부를 포화(saturation)시켜 영상 정보를 왜곡시키거나 손실시키는 비파괴적 방해 현상이다. 군사·보안 분야에서 센서 블라인딩(blinding) 또는 추적 교란용으로 활용 가능하다 [2]. 기존 대응 체계 중 물리적 파괴 기반의 하드킬(hard-kill) 방식은 탄약 소모, 근거리 교전 의존성, 높은 운용 비용 등의 한계를 지니며, 차폐 기반의 연막탄(smoke munition) 또한 소모성과 환경 의존성으로 인해 지속적 대응에는 제약이 따른다.

반면 레이저 대즐링은 물리적 손상을 야기하지 않으면서도 수 W~수십 W급 출력만으로 센서의 즉각적인 포화나 영상 왜곡을 유도할 수 있다. 다만 실제 운용 환경에서는 조사 거리, 광학계 조건, 픽셀 포화 특성, 그리고 자동 노출(AE)/자동 게인(AGC) 동작에 의해 센서의 완전 과포화가 항상 쉽게 발생하지는 않으며, 표적이 가시적인 상태에서 국소 포화 및 색상 왜곡이 발생할 수 있다.

이에 비해, 레이저를 이용하여 구조적 손상이나 전자장치 고장을 일으켜 무력화하기 위해서는 수 kW 급 이상의 고출력이 필요하며, MBDA의 HEL 실험에서는 1~2 kW 급 연속파(CW) 레이저가 1 km 이하 거리에서 10 초 이내에 소형 UAV를 열적으로 천공하거나 전자장치를 무력화할 수 있음이 보고되었다 [3]. 즉, 수 W 급 레이저 대즐링은 비파괴적 수준의 출력으로도 영상 센서 기능을 효율적으로 교란할 수 있는 반면, kW 급 HEL 시스템은 플랫폼 자체를 물리적으로 파괴하기 위해 훨씬 높은 에너지와 복잡한 광학 안정화가 필요하다 (Table 1).

Table 1. Representative HEL systems and their effects (adapted from [3]).

System	Power	Range/Time	Effect
Dragonfire	50 kW	~5 km/ few sec	Platform destruction
LWD	20 kW	1-2 km/ few sec	Mini-drone kill
HELMA-P	2 kW	<1 km/ ~10 sec	Disablement
Laser dazzling	1~30 W	~5 km / 1 sec	Sensor saturation

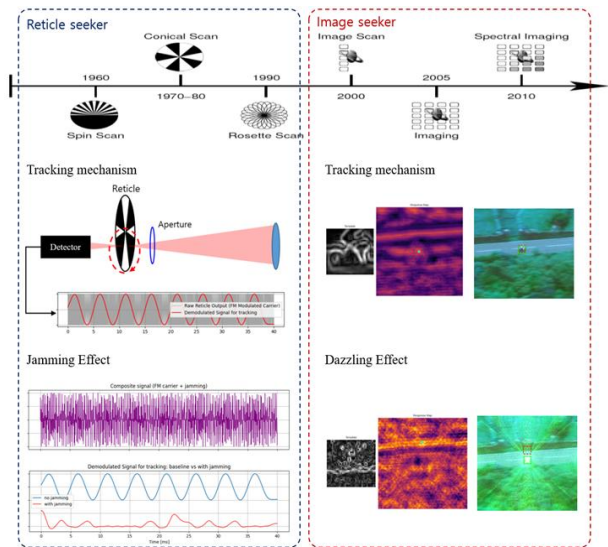


Fig. 1. Evolution of seeker mechanisms and corresponding dazzling effects. Early reticle-based seekers relied on the periodic modulation pattern, making them vulnerable to jamming techniques that perturb the modulation frequency. In contrast, image-based seekers employ pattern-level tracking, where dazzling induces local saturation and template corruption, which nonlinearly affect the internal similarity computation and update process.

따라서 대즐링은 출력 대비 효과성 측면에서 효율적인 센서 교란 수단으로 평가되며, 이러한 기술적 효율성은 최근 전장에서 급속히 확산되고 있는 영상 기반 추적 체계의 등장과 맞물려 새로운 연구 필요성을 제기하고 있다. 과거의 reticle 기반 시커는 광 신호의 세기나 변조 특성을 이용해 목표를 추적했기 때문에, 변조 특성을 활용한 재밍을 이용하여 교란이 발생할 수 있었다. 반면 최근 등장한 영상 기반 추적기는 영상 내 피처(feature)나 공간적 패턴을 이용하는 알고리즘 중심으로 발전하면서, 대즐링에 의한 국소적 포화, 색상 왜곡, 템플릿 오염 등이 추적 성능에 미치는 영향이 훨씬 복잡해졌다. 특히 대즐링은 수 W~수십 W 수준의 출력만으로도 영상 센서의 부분적 포화를 유발할 수 있지만, 이러한 현상이 실제 추적 알고리즘의 내부 연산에 어떤 형태로 반영되는지에 대한 체계적 분석은 여전히 부족하다 (Figure 1).

특히 우크라이나 전쟁을 비롯한 실제 교전 사례에서는, 영상 기반 탐지·추적 알고리즘을 활용해 고가치 표적을 정밀하게 공격하는 3세대 대전차 미사일과 자율비행 드론의 활용이 급격히 증가하고 있다. 이러한 변화는 단픽셀 기반 시커에 초점을 맞춰 개발된 기존 교란 체계(DIRCM, 신호 재밍 등)로는 한계가 있음을 보여준다. 따라서 영상 센서가 실제 장면에서 어떻게 대즐링 영향을 수용하고, 그 결과가 추적 알고리즘의 오작동으로 어떻게 이어지는지를

규명하려는 연구가 필요하다.

이러한 필요성에 따라 레이저 대즐링에 관한 다양한 연구가 수행되어 왔다. 기존 연구들은 주로 레이저의 파장, 출력, 입사각과 같은 광학적 요인이나, 센서 상에서 발생하는 과포화 영역의 물리적 현상을 중심으로 분석을 진행하였다 [4]. 일부 연구에서는 과포화 영역이 일정 크기 이상 확장되면 탐지가 실패한다는 조건을 제시하는 데 그치기도 하였다 [5]. 그러나 이러한 접근은 주로 ‘완전 포화’ 또는 ‘차폐 면적’ 중심으로 논의를 전개하여, 표적이 가지적인 비완전 포화 조건에서 추적 알고리즘의 유사도 계산이 어떻게 왜곡되고 어떤 방식으로 붕괴하는지에 대한 설명이 충분하지 않다. 따라서 본 연구는 실제 센서 기반 대즐링 패치를 이용하여 비완전 포화 조건에서도 발생하는 추적 성능 붕괴를 정량적으로 검증한다.

이러한 한계를 극복하기 위하여, 본 연구에서는 템플릿 매칭 기반 추적 알고리즘을 대상으로 레이저 대즐링의 영향을 정량적으로 분석하였다. 실제 센서로부터 획득한 대즐링 데이터를 활용하여, 영상 내에서 대즐링으로 인해 형성되는 영역을 구체적으로 정의하였다. 각 영역은 포화 강도와 색상 분포의 통계적 특성을 기준으로 세분화하였으며, 이는 단순한 출력 강도 구분이 아니라 대즐링 영상 내의 공간적·스펙트럼적 변화를 반영한다.

정의된 영역 특성은 실제 센서 기반 대즐링 패치로부터 통계적으로 추출되었고, 합성 과정을 통해 기존 공개 데이터셋에 동적으로 적용하였다. 이를 기반으로 다양한 추적 알고리즘에 대한 성능 변화를 비교 및 분석한다.

본 연구의 기여는 세 가지로 요약된다. 첫째, 실제 센서 기반 대즐링 영상으로부터 ‘완전 차폐 여부’가 아니라 ‘추적 성능 저하에 직접적으로 기여하는 대즐링 영역’을 통계적으로 정의하고, 저출력/비완전 포화 조건까지 포함하여 공개 데이터셋에 동적으로 합성할 수 있는 실측 기반 파이프라인을 제안한다.

이 파이프라인은 출력 세기와 조사 조건이 서로 다른 다양한 상황을 모사할 수 있도록 설계되어, 여러 환경과 영상 조건에서의 추적 알고리즘 성능을 체계적으로 평가할 수 있게 하였다. 둘째, 제안된 합성 파이프라인을 활용하여 기존에 정성적이거나 제한된 사례 중심으로 논의되던 추적 알고리즘의 성능을 표준화된 지표 기반의 정량적 벤치마크로 구축하였다. 이를 통해 알고리즘 간의 공정한 비교와 성능 검증의 재현성을 확보하였다. 특히, 본 연구에서는 레이저 대즐링에 의해 유사도 계산이 붕괴되는 핵심 매커니즘을 명확히 분석하기 위해, 온라인 모델 갱신이나 고차원 특징 학습을 포함하지 않는 템플릿 매칭 기반

추적기로 분석 대상을 한정하였다. 마지막으로, 벤치마크 실험 결과를 통해 센서 중심부의 완전 포화(core saturation)뿐만 아니라 주변부 영역 또한 추적 성능 저하에 유의미하게 기여함을 규명하였다. 본 연구는 이러한 복합적 교란 효과를 정량적으로 규명함으로써, 향후 알고리즘 설계와 강건성 평가에 중요한 기준을 제공한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 레이저 대즐링과 이와 관련된 영상 기반 추적 알고리즘에 관한 기존 연구를 정리하고, 레이저 대즐링 현상과 관련된 배경 이론 및 추적 알고리즘의 특성을 간략히 소개한다. 3장에서는 실제 센서 기반 데이터를 활용한 대즐링 합성 파이프라인의 설계와 구현 과정을 상세히 설명한다. 4장에서는 제안된 파이프라인을 활용하여 구축한 정량적 벤치마크와 실험 환경을 기술하고, 다양한 템플릿 매칭 기반 추적 알고리즘을 대상으로 한 성능 평가 결과를 제시한다. 또한 대즐링 효과에 따른 알고리즘별 취약성을 분석한다.

마지막으로 5장에서는 본 연구의 결론을 요약하고 향후 연구 방향을 논의한다.

II. Preliminaries

1. Related works

레이저 대즐링 현상을 분석하기 위한 초기 연구들은 대부분 광학적 시뮬레이션을 기반으로 진행되었다. Benoit [6]는 CCD 카메라에 대한 레이저 조사 시 과포화 영역의 면적을 예측하기 위한 단순 모델을 제안하였으며, PSF와 픽셀 포화 용량을 입력으로 하여 레이저 조사량에 따른 스팟 직경의 세제곱근 관계를 규명하였다. Ritt [5]는 인간의 눈 안전성 개념을 센서 시스템에 도입함으로써 센서 기반의 안전거리 예측식을 제시하였다. 이와 유사하게 McLin [4]은 다양한 조도 조건에서의 레이저 조사에 따른 시인성 저하를 실험적으로 측정하고, CIE의 글레어 함수에 보정 계수(K-factor)를 적용하여 대즐링 강도를 정량화하였다. [7]의 연구에서는, 연속파(CW) 및 진폭 변조(AM) 레이저를 CMOS 센서에 조사하여, 자동 노출(AE) 및 자동 게인(AGC)이 대즐링 효과의 예측 가능성에 미치는 영향을 실험적으로 규명하였다. 이러한 연구들은 대체로 이상화된 광학 모델 또는 제한된 환경에서 수행되었으며, 실제 센서 내부에서의 노출, 게인 조절, 비선형 응답 등의 영향을 충분히 반영하지 못했다.

직접적으로 고출력 레이저가 생성해내는 광원의 센서에서의 효과에 대한 연구도 진행되었다. Abdelhakim [8]는

다양한 파장대의 고출력 펄스형 적외선 레이저를 EO/IR 센서에 조사하여, 파장과 대기 조건에 따른 대즐링 및 손상 거리의 변화를 분석하였다. 또한 Goyvaerts [9]는 실제 드론(UAV) 플랫폼을 대상으로 가시광 그린 레이저에 의한 카메라 및 충돌회피 센서의 교란을 실험적으로 평가하여, 상용 UAV의 대즐링 취약성을 규명하였다. 이러한 연구들은 실환경에서의 레이저 조사 효과를 정량적으로 제시하였다는 점에서 중요한 의미를 갖지만, 대부분 센서의 출력 영상 특성이나 탐지 알고리즘 수준의 분석으로 확장되지 않았다.

대즐링이 영상 기반 탐지 및 추적 알고리즘에 미치는 영향을 정량적으로 평가하려는 시도도 이루어지고 있다. Lewis [10]는 중적외선(MWIR) 영상에서 템플릿 매칭 기반 알고리즘을 대상으로 다양한 시공간적 대즐링 조건을 적용하여, 유사도 측정 결과의 변화를 분석하였다. Zheng 등은 펄스 레이저를 이용한 대즐링 실험을 수행하고, Canny 에지 검출과 상관계수를 이용해 추적 성능 저하를 정량적으로 평가하였다 [11]. 이러한 연구들은 대즐링의 시공간적 특성이 알고리즘의 응답 특성에 직접적인 영향을 미침을 보여주었으나, 대부분 단일 객체나 제한된 실험 조건에서 수행되어 실제 운용 환경의 다양한 변수를 포괄하지 못하였다.

2. Theory

적외선 센서 기반 거리 추정 문제를 해결하기 위해서는, 열원에서 방출된 복사 에너지가 대기 중을 전파하며 감쇠되고, 센서에 도달하기까지의 전체 물리적 전달 과정을 정량적으로 이해할 필요가 있다. 본 절에서는 열원의 복사 특성부터 대기 감쇠(transmittance), 경로 복사(path radiance), 그리고 센서 수신 에너지 구성까지 각 단계별 물리적 메커니즘을 정리하고, 이를 바탕으로 이후 거리 추정을 위한 기반을 마련한다.

2.1 Optical Mechanism of the Dazzling Effect

레이저 대즐링은 협대역의 고출력 레이저 빔이 영상 센서의 수광면을 포화시켜 영상 정보를 왜곡시키는 비파괴적 교란 현상이다. 이때 발생하는 포화 패턴은 단순한 점 형태가 아니라, 광학계의 회절(diffraction), 조리개(aperture) 형상, 렌즈 수차(aberration) 및 입사 조건에 따라 공간적으로 확산된 구조를 가진다.

이론적으로, 이상적인 단색 점광원이 원형 조리개를 통과할 경우 센서면에는 에어리 디스크(Airy disk)라 불리는 회절 패턴이 형성된다. 그 복사 강도 분포는 다음과 같

이 주어진다.

$$I(r) = I_0 \left[\frac{2J_1(\pi Dr/\lambda f)}{\pi Dr/\lambda f} \right]^2 \quad (1)$$

식 (1)은 이상적인 회절 한계 조건에서 형성되는 에어리 디스크의 복사 강도 분포를 나타낸다. 여기서 J_1 은 제1종 1차 베셀 함수(Bessel function of the first kind), D 는 조리개 직경, λ 는 레이저 파장, f 는 렌즈 초점거리, r 은 광축으로부터의 거리이다. 이 식은 회절 한계(optically diffraction-limited) 조건을 전제로 하지만, 실제 센서 환경에서 형성되는 대즐링 형상은 이 이상적 분포와 현저히 다르다.

그 주요 원인은 광학계 내부의 수차(aberration)와 다중 반사(multiple reflection), 그리고 레이저의 입사각 및 광축 불정렬(misalignment)에 있다. 렌즈 재질과 곡면의 미세 불균일성으로 인한 구면수차(spherical aberration)와 비점수차(astigmatism)는 중심부의 에너지를 주변으로 확산시키며, 이 과정에서 에어리 패턴의 중심 대비가 약화된다. 더불어, 레이저가 영상면에 완전히 수직으로 입사하지 않을 경우 회절 패턴이 타원화되거나 한쪽으로 치우친 비대칭 구조를 띠게 된다.

결과적으로, 실제 센서에서 관찰되는 대즐링 영상은 이상적인 에어리 디스크보다는 복합적인 수차-반사-정렬 오차가 결합된 확산 무늬(diffuse spot) 형태로 나타난다. 이에 본 연구에서는 이론적 회절 모델 대신, 실제 센서 기반 실험을 통해 관측된 대즐링 형상을 분석 단위로 정의하고, 이를 기반으로 추적 알고리즘의 교란 메커니즘을 평가하였다.

2.2 Tracking Algorithm on a Mobile Platform

본 연구에서 다루는 시나리오는 FPV 드론이나 대전차 미사일과 같이 직접적인 기동을 수행하는 이동체의 추적 문제이다. 이는 감시 카메라나IRST(Infrared Search and Track) 시스템과 같이 정지된 센서가 넓은 영역을 감시하면서 새로운 객체를 탐지하는 문제와는 본질적으로 다르다. 본 연구의 초점은 이미 초기 프레임에서 주어진 객체가 있을 때, 이후 프레임에서 해당 객체의 위치를 계속해서 추적하는 과정에 있다. 따라서 여기서 추적은 새로운 객체 발견(detection)이 아니라 대상의 중심 좌표를 갱신하는 문제로 정의된다.

본 연구에서 다루는 템플릿 매칭 기반의 추적기의 기본적인 구조는 다음과 같다. 프레임 t 에서 얻은 템플릿 T 를 기반으로, 다음 프레임 $t+1$ 에서 후보 윈도우 X 와의 유사도(similarity)를 계산하여 가장 높은 응답을 갖는 위치를 새로운 객체 중심으로 선택한다. 이때 가장 기본적으로

사용되는 유사도 척도는 SSD(Sum of Squared Difference) 계열이다. 템플릿 T 와 후보 영역 X 사이의 SSD는

$$SSD(T, X) = \sum_{i=1}^N (T_i - X_i)^2 \quad (2)$$

와 같이 정의되며, 여기서 N 은 템플릿 내의 총 픽셀 수이다. 이러한 방식은 계산량이 선형 $O(N)$ 으로 제한되어 임베디드 환경에서도 적용하기 용이하다. 그러나 SSD는 픽셀 값의 절대적인 크기 차이에 의존하기 때문에 조명 변화나 센서 노이즈에 취약하다는 단점이 있다. SSD는 픽셀 간 절대적인 밝기 차이를 누적하는 방식이므로, 대즐링으로 인해 템플릿 내부에 포화 영역이 형성될 경우 중심부 불일치가 급격히 증가하여 비용 함수가 민감하게 반응한다.

이 한계를 보완하기 위해 피쳐 추출이 유사도 계산 전에 적용되며, 이는 추적기의 강건성을 좌우하는 핵심 요소이다. 가장 단순한 경우는 원본 화소 값(raw intensity) 그 자체를 사용하는 것이고, 보다 견고한 대안으로는 기울기 기반 특징(gradient feature)이 있다. Sobel 필터는 국소적인 밝기 변화율을 강조하여 경계 정보를 추출하는 연산으로, 일반적인 조명 변화에는 비교적 강건한 특징을 제공한다. 기울기는 보통 Sobel 필터를 이용하여 추출하며,

$$G_x = I * \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, G_y = I * \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

와 같이 수평(G_x), 수직(G_y) 방향 기울기를 계산하여 에지 정보를 강조한다. 이와 같이 추적기는 다양한 피쳐를 SSD나 NCC(Normalized Cross Correlation)와 같은 유사도 함수에 결합시켜 사용하며, 피쳐의 종류와 유사도 함수의 조합이 성능을 결정한다.

추적 과정에서 중요한 또 다른 요소는 임계값 기반 예외 처리이다. 일반적으로 유사도 함수의 응답이 불안정하거나 주변 대비가 뚜렷하지 않은 경우, 탐지 결과를 보류하거나 템플릿 갱신을 제한하는 방식으로 안정성을 확보한다. Figure 2는 본 연구에서 사용되는 추적 알고리즘의 전체적인 플로우 차트이다.

이러한 절차는 배경 잡음이나 일시적인 가림(occlusion)으로 인한 추적 실패를 방지하기 위한 일반적인 대응 전략이다. 본 연구에서 다루는 드론이나 미사일과 같은 직접 기동체 환경에서는 대상에 빠르게 접근하는 시나리오를 가정하므로, 일시적인 가림보다는 급격히 크기가 변화하는 객체에 대한 적응적 대응이 더욱 중요하다.

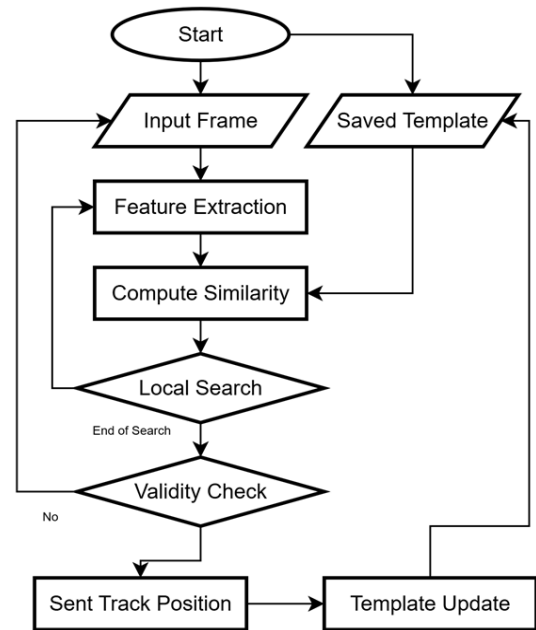


Fig. 2. Conceptual diagram of the tracking algorithm for moving target control.

따라서 일정 간격으로 템플릿을 갱신하며 추적기의 안정성을 유지해야 한다. 이에 따라 본 연구에서는 임계값 조정보다는 피쳐 추출법과 유사도 함수의 조합이 추적 안정성에 미치는 영향을 중점적으로 분석하였다. 이러한 구조적 이해를 바탕으로, 이후 제안하는 대즐링 합성 벤치마크에서 각 추적기의 성능을 정량적으로 평가한다.

III. The Proposed Scheme

본 장에서는 실험 기반으로 획득한 대즐링(dazzling) 패치를 표준화하고, 이를 기존 추적 데이터셋에 합성하여 다양한 추적 알고리즘의 성능 저하를 정량적으로 평가하기 위한 전체 파이프라인을 제안한다.

1. Acquisition and Characterization of Dazzling

1.1 Experimental Acquisition of Dazzling Patches

대즐링 형상을 얻기 위해 일정 출력 이상의 레이저를 영상센서에 조사하였다. 영상의 중앙 영역에서 세로 해상도와 동일한 길이를 가로 방향으로 잘라 정사각형 패치를 추출하였다. 이러한 추출 방식은 패치가 중심부 대즐링 형상을 충분히 포함하면서도, 이후 합성 단계에서 다른 영상에 정합하기 용이하도록 크기를 표준화하는 목적을 가진다.

획득된 대즐링 패치는 이후 데이터셋 합성에 활용될 수 있도록 전처리 과정을 거쳤으며, 이 과정에서 포화-준포

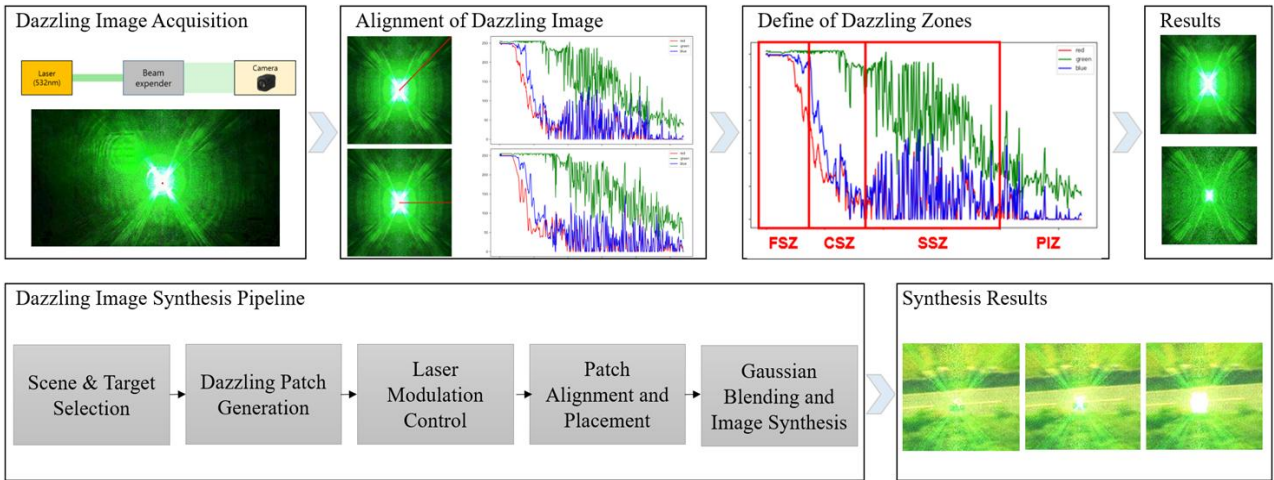


Fig. 3. Overview of dazzling patch acquisition and the proposed dazzling-image synthesis pipeline.

화 주변부와 같은 영역별 특성을 분석하고 리샘플링 및 블러링을 수행하여 합성 조건에서 일관된 활용이 가능하도록 준비하였다.

1.2 Dazzling Regions and Boundary Estimation

기존 연구들은 광학적 접근을 취하여, 영상센서로 들어오는 대즐링으로 인한 영향력으로 객체가 어느 정도 차폐되었는가에 따라 대즐링 성공 여부를 논의하였다. 그러나 이러한 정의는 실제 탐지 및 추적 알고리즘의 실패 메커니즘과는 반드시 일치하지 않는다. 탐지/추적기는 센서 전체가 가려지지 않더라도, 국소 영역의 포화로 인해 템플릿이 오염되거나 유사도 계산이 왜곡되면 쉽게 추적 성능이 저하될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 대즐링을 단순한 차폐 면적이 아니라, 영상 내 픽셀 분포의 통계적 특성을 반영하여 추적에 실질적인 영향을 미치는 영역을 획득하는 것이 주요 목표 중 하나이다. 이를 위해 센서 영상의 기하학적 중심 $c^* = (x_c, y_c)$ 를 기준으로, 각 픽셀 위치 (x, y) 를 방사형 좌표 (r, θ) 로 변환하여 분석하였다. 여기서 $r = \sqrt{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2}$ 은 중심으로부터의 거리, $\theta = \arctan((y - y_c)/(x - x_c))$ 는 극각(polar angle)을 의미한다.

획득된 대즐링 패치는 $\hat{P} \in R^{S \times S \times 3}$ 으로 정의된다. 여기서 S 는 패치의 가로 및 세로 크기(픽셀 단위)를 의미하며, 본 연구에서는 영상 중심부에서 정사각형 형태로 잘라낸 크기이다. 마지막 차원 3은 RGB 세 채널을 나타낸다.

획득된 대즐링 패치 \hat{P} 에서 반경 r 의 고리(annulus) 영역을 $A(r)$ 라 하고, 채널 $c \in \{R, G, B\}$ 의 픽셀 강도 집합을 $I_c(r)$ 라 하자. 본 연구에서는 분위수(quantile) 기반 신뢰구간을 사용한다. 이때 영역은 다음과 같이 정의된다.

a) **Full Saturation Zone(FSZ)**: 완전 포화 영역으로, 모든 채널의 하위 5% 분위수 $q_{0.05}(I_c(r)) \geq 250$ 인 영역.

b) **Center-Wavelength Saturation Zone(CSZ)**: 중심 파장 포화 영역으로, 중심 파장 채널 c_0 에서는 $q_{0.05}(I_{c_0}(r)) \geq 250$, 채널 $c \neq c_0$ 에서는 상위 85% 분위수 $q_{0.85}(I_c(r)) \geq 180$ 인 영역.

c) **Sub-Saturation Radiance Zone(SSZ)**: 준포화 복사 영역으로, 중심 채널의 중위수 $\tilde{I}_{c_0}(r)$ 가 기준 대비 50% 이상 증가한 영역.

d) **Peripheral Influence Zone(PIZ)**: 주변 영향 영역으로, FSZ/CSZ/SSZ 조건에 속하지 않는 주변부 영역.

Figure 4는 실험에서 획득한 대즐링 패치와, 중심으로부터의 반경에 따른 픽셀 강도 히스토그램을 나타낸다. 이 곡선을 통해 각 영역의 경계 반경을 추정할 수 있으며, 이후 합성 과정에서 영역별 스케일 변환 및 블렌딩 기준으로 활용된다.

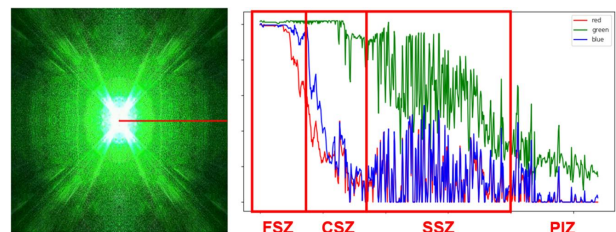


Fig. 4. Experimentally acquired dazzling patches and pixel-intensity histograms as a function of radius from the patch center.

1.3 Patch Normalization

실험적으로 획득된 대즐링 패치는 광학계 수차, 센서의 불균일 응답, 그리고 레이저 빔 정렬 오차 등으로 인해 이

상적인 원형 대칭을 보이지 않는다. 실제 영상에서는 좌우 또는 상하 분면마다 서로 다른 밝기와 포화 분포가 나타나며, 이로 인해 동일한 조건임에도 객체의 위치나 방향에 따라 추적 성능이 불합리하게 달라질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 대즐링 패치를 기하학적으로 균질화하여 정량 분석의 일관성을 확보하고자 하였다. 이를 위해 대표 분면(quadrant)을 선택하고 이를 대칭 복제하여 표준화된 합성 패치를 구성하였다. 좌표계는 영상 중심 $c^* = (x_c, y_c)$ 를 원점으로 두고, 12시 방향을 $\theta = 0^\circ$ 로 설정하여 방사형 좌표 (r, θ) 를 정의하였다.

대표 분면의 선택과정은 다음과 같다. 전체 각도를 45° 간격으로 나누어 여덟 개의 부채꼴 영역 $\theta_k (k = 0, \dots, 7)$ 을 정의한다. 각 θ_k 에서 중심 채널 c_0 의 방사형 에너지 프로파일을 계산한다. 즉, 반경 r 에서의 평균 픽셀 강도는

$$\varepsilon_{c_0}(r|\theta_k) = \frac{1}{|A(r, \theta_k)|} \sum_{x \in A(r, \theta_k)} I_{c_0}(x) \quad (4)$$

로 정의된다. 그 다음 $\varepsilon_{c_0}(r|\theta_k)$ 가 가장 낮은 영역 θ_k^* 를 가공에 사용할 영역 후보로 선택한다. 해당 영역의 프로파일 $\varepsilon_{c_0}(r|\theta_k^*)$ 가 반경에 따라 단조 감소하는지 여부를 확인한다. 본 연구에서 정의한 영역별로 반경을 나누어 FSZ 영역부터 PIZ를 기준으로 평균 픽셀 강도의 단조감소를 확인하며, 감소하지 않을 경우에는 그 다음으로 작은 영역을 후보로 삼아 동일한 과정을 반복한다.

최종적으로 선정된 θ_k^* 를 중심으로 좌우 인접 영역의 절반을 포함하여 패치의 1/4 분면 Q_k^* 을 정의한다. 해당 패치를 기준 패턴으로 삼고, 이를 좌우 및 상하 대칭 복제하여 네 분면을 채움으로써 표준화된 원형 패치 P_{std} 를 정의하여 실험에 사용한다. 이렇게 생성된 패치는 방향에 따른 불균일성을 제거하고, 합성 실험에서 객체 방향이나 위치에 따른 편차를 줄이며 정량 비교의 일관성을 보장한다.

2. Dazzling-Image Synthesis Pipeline

본 연구에서는 실험 기반으로 획득한 표준화 대즐링 패치 P_{std} 를 공용 추적 데이터셋에 합성하여 추적 알고리즘의 성능 저하를 정량적으로 평가할 수 있도록 하였다. 합성 과정은 4단계로 구성된다.

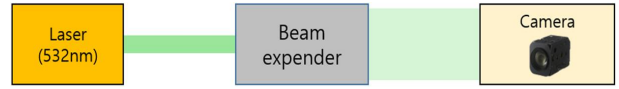


Fig. 5. Experimental setup. A fiber laser was expanded by a beam expander and projected onto a camera to reproduce actual sensor saturation.

2.1 Target Video and Object Selection

바운딩 박스 주석이 제공되는 데이터셋을 사용하였으며, 프레임 내 객체 크기가 전체 대비 너무 작은 경우나 너무 큰 경우는 합성에서 제외하였다.

2.2 Intensity Compensation & Radial Remapping

앞서 정의한 네 가지 대즐링 영역을 기반으로, 실험 조건에 맞추어 표준 대즐링 패치 P_{std} 의 출력 분포와 기하 구조를 동시에 보정하였다.

본 과정은 단순한 확대나 리사이즈가 아닌, 각 영역별 포화 강도와 발산 특성을 고려한 반경 기반 비선형 리맵핑으로 수행된다. 이를 위해 반경 축을 영역 정의에 따라 $[r_i, r_{i+1}]$ 으로 구간화하고, 각 구간별로 출력 스케일 계수 s_i 를 설정하였다. s_i 는 실험 조건(레이저 출력, 거리, 발산 각)에 따라 동적으로 조정되어 s_i 가 1보다 클 경우는 해당 구간이 확장되고, 1보다 작을 경우는 해당 구간이 압축된다.

반경 리맵은 출력 반경 r' 에 대해 입력 영상상의 대응 반경 r_{in} 을 계산하여, 각 출력 픽셀이 원본 패치의 어느 위치로부터 샘플링되어야 하는지를 결정한다.

입력 반경 축을 $\{r_i\}_{i=0}^N$ 으로 정의하면, i 번째 구간의 출력 반경 길이는 s_i 배 확장된 $\Delta r'_i = s_i(r_{i+1} - r_i)$ 로 주어진다. 이에 따라 출력 반경의 누적 시작점은

$$R_i = \sum_{j=0}^{i-1} s_j(r_{j+1} - r_j), R_0 = 0 \quad (5)$$

이 된다. 출력 반경 r' 이 $[R_i, R_{i+1}]$ 에 속할 때,

해당 구간의 입력 반경은 다음과 같은 선형 보간으로 계산된다.

$$r_{in}(r') = r_i + \frac{r' - R_i}{s_i} \quad (6)$$

이 식은 s_i 가 커질수록 동일한 출력 거리 변화에 대해 더 넓은 입력 반경 영역이 압축되어 대응된다. 극좌표 공간에서의 대응 입력 좌표는

$$(x_{in}, y_{in}) = (x_c + r_{in}(r')\cos\theta, y_c + r_{in}(r')\sin\theta) \quad (7)$$

로 표현된다. 여기서 (x_c, y_c) 는 패치 중심이며, θ 는 출력 픽셀의 극각이다. 이 좌표 변환을 이용해, 출력 영상의 각 픽셀은 입력 영상의 (x_{in}, y_{in}) 위치에서 보간을 통해 값을

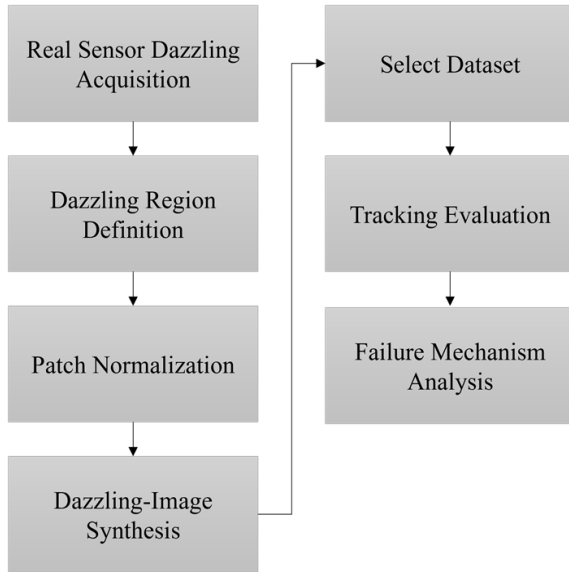


Fig. 6. We illustrate the overall experimental pipeline of this study. Real sensor-measured dazzling patterns are first characterized and normalized, then dynamically synthesized into public tracking datasets.

샘플링한다. 픽셀 보간 이후에는 언샤프 마스크(unsharp mask) 기반의 고주파 복원을 적용하여 포화 경계의 인공 블러를 억제하였다. 최종적으로 표준 대즐링 패치의 포화 구조와 복사 특성이 대상 크기 및 발산 조건에 맞추어 정규화된 출력 패치 P 로 변환된다.

2.3 Object Alignment and Patch Placement

각 프레임에서의 객체 중심은 바운딩 박스의 넓이 및 높이의 절반이 위치하고 있는 곳으로 하였다. 합성될 대즐링 패치 크기는 객체에 비례하도록 $R = \alpha \max(w, h)$ 로 정의하며, 합성시 패치를 객체 중심에 정렬하여 삽입한다.

Table 2. Average SR@IoU>0.5 under different dazzling conditions

Match+ Feature	No Dazzle	OOD	PDD	LID
NCC+Original	0.502	0.432	0.341	0.012
NCC+Laplacian	0.499	0.112	0.153	0.074
NCC+Sobel	0.641	0.300	0.210	0.039
SSD+Original	0.508	0.011	0.011	0.011
SSD-Laplacian	0.601	0.009	0.009	0.081
SSD-Sobel	0.411	0.061	0.014	0.100

2.4 Spatial Blending with Gaussian Window

합성 경계의 매끄러움을 위해 2D 가우시안 마스크를 적용하였다. 합성 창 크기를 (H_p, W_p) 라 할 때,

$$G(i, j) = \exp\left(-\frac{(i - H_p/2)^2 + (j - W_p/2)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (9)$$

의 가우시안 분포를 생각하자. 이를 이용하여 최종 합성된 픽셀은 다음과 같다.

$$I^*(\xi, \eta) = d_f G(\xi, \eta) P(\xi, \eta) + (1 - G(\xi, \eta)) I(\xi, \eta) \quad (10)$$

IV. Experiments

본 장에서는 제안한 대즐링 합성 파이프라인의 유효성을 검증하기 위해 수행한 실험 결과를 제시한다. 실험은 실제 센서 기반으로 획득한 대즐링 패치를 사용하여 합성한 영상에 대해 수행되었으며, 공개 데이터셋을 기반으로 다양한 추적 알고리즘의 성능을 비교 및 분석하였다.

또한, 포화 강도와 조사 형태에 따른 성능 변화를 정량적으로 평가하고, 각 알고리즘 구성 요소가 대즐링 조건에 따라 어떻게 상호작용하는지를 분석하였다.

1. Experimental Setup

1.1 Acquisition of Dazzling Patterns

본 연구에서 사용된 대즐링 패치는 실제 센서 기반 실험을 통해 획득되었다. 광원은 Fiber Laser로, SHG (Second Harmonic Generation) 구조의 532 nm 레이저를 사용하였다. 출력된 레이저는 빔 익스팬더(beam expander)를 이용하여 빔 직경을 확장한 후, 평행광 형태로 변환하여 가시광 카메라에 입사시켰다. 이 과정을 통해 실제 장거리 조사 조건에서 센서 포화를 유발하는 대즐링 형상을 획득하였다.

센서로는 FHD RGB CMOS 카메라를 사용하였으며, 시야각(FOV) 30°, 개구 직경 36.75 mm, 해상도 1920 × 1080, 픽셀 피치 2.9 μm 조건에서 영상을 획득하였다.

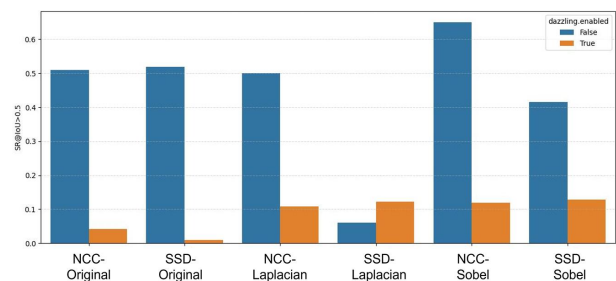


Fig. 7. Comparison of average tracking success rate (SR@IoU>0.5) before and after dazzling for each feature-matching combination. Under continuous-wave (CW) over-saturation, all combinations degrade sharply, with Sobel-NCC dropping from 0.6 to approximately 0.1.

실험 환경은 Figure 5 하에서 얻어진 결과이며, 1km 거리에서의 이래디언스를 가정한 영상이다. 이렇게 획득한 영상은 본 논문에서 제안한 대즐링 형상 패치 획득 방법에 사용되었다.

1.2 Tracking Algorithm Configuration

본 실험에서는 방법론에서 제시한 템플릿 매칭 (Template Matching) 기반 구조를 적용하였다. 탐색 영역은 객체의 위치 불확실성과 대즐링으로 인한 시야 교란을 고려하여 기준 템플릿 크기의 2.5배로 설정하였다.

유사도 측정 방식은 SSD, NCC를 비교하였다. SSD는 두 영상 간의 밝기 차이를 직접 누적하여 오차를 최소화하는 방식이며, NCC는 밝기 분포를 정규화하여 조도 변화에 대한 영향을 줄이는 상관 기반 방법이다.

피쳐 추출은 세 가지 방식으로 구성하였다. (1) RGB 3채널의 평균값을 이용한 일반 intensity 기반 표현, (2) 소벨(Sobel) 함수로 구현된 1차 미분 기반 경계 강조 필터 (3) 라플라시안(Laplacian) 함수로 구현된 2차 미분 기반 고주파 강조 필터를 사용하였다.

1.3 Dataset Selection and Object Criteria

대즐링 합성 실험에는 공개 추적 데이터셋인 OTB50[12]와 VOT2018[13]을 사용하였다. 본 연구에서 제안하는 대즐링 합성 파이프라인에서 언급한 바와 같이, 각 시퀀스의 초기 바운딩 박스를 기준으로 객체 면적을 계산하고, 객체 크기가 1000 보다 크고 3000 보다 작은 경우에만 실험에 사용 하였다.

1.4 Performance Metrics

추적기의 붕괴 여부를 명확히 평가하기 위해 Success Rate $SR@IOU > 0.5$ 를 단일 성능 지표로 사용하였다. 이 지표는 전체 프레임 수 N 에서 각 프레임에서 예측 박스와 실제 박스 간의 IoU(Intersection over Union)가 0.5 이상인 경우를 성공으로 정의하며, 여기서 IOU는 실제 객체 영역 대비 예측 영역의 교집합 비율을 의미한다.

1.5 Definition of Dazzling Conditions and Classification Scheme

본 연구에서는 실험 기반으로 획득한 표준 대즐링 패치를 활용하여, 포화 강도와 레이저 조사 형태에 따른 추적 알고리즘의 강건성을 체계적으로 분석하였다.

대즐링 조건은 포화 강도 (강 / 중 / 약), 조사 형태 (연속 조사형 / 변조 조사형)의 2가지 조건을 조합하여 정의

하였다. 포화 강도는 방법론에서 정의한 영역 구분(FSZ, SSZ, PIZ)을 기반으로 구현하였다.

실제 형상은 Figure 3의 Synthesis Results 에서와 같이 나타나며 본 실험은 다음과 같은 3가지 조건을 기반으로 실험을 진행하였다.

먼저 Object-Occluding Dazzle(OOD)는 패치가 객체를 완전 포화 하는 경우로, 패치가 객체 전체를 덮어서 RGB 3채널 모두 최대 포화값(255)에 근접하는 경우를 의미한다. 센서 영상 내에서 객체가 표시되는 대부분의 영역이 포화되어 객체 정보가 완전히 소실된다. 이 조건은 추적 불능 상황에 대한 기준선(baseline failure case)으로 사용된다.

Pattern-Distorting Dazzle(PDD)인 중간 포화형 조건은 패치의 중심부만 포화되고, 주변부에는 여전히 텍스처가 남아 있는 경우를 가정한다. 이는 주변부 대비를 유지함으로써, 형상 왜곡은 존재하지만 객체의 전체 구조는 일부 남아 있는 경우를 모사한다.

Low-Influence Dazzle(LID) 인 약 포화 조건은 센서가 완전히 포화되지 않은 상태에서 전체 밝기 상승이나 객체 패턴의 부분적 변화가 발생하는 경우를 의미한다. 레이저 출력력이 낮거나 원거리 조사 환경을 가정하며, 본 연구에서는 FSZ 영역이 객체 중심에만 약하게 존재하고 대부분의 영역이 SSZ와 PIZ로 구성되도록 구현하였다.

2. Results and Analysis

2.1 Tracking Performance under Dazzling Conditions

본 절에서는 다양한 합성 조건 중에서도 알고리즘 구조의 차이를 가장 명확히 구분할 수 있는 대표 대즐링 케이스를 선정하였다. 모든 실험은 객체 전체가 완전히 포화되는 OOD 조건을 기반으로 하였으며, 이는 포화 영역이 영상 내 대부분을 차지하여 추적기의 응답 특성이 가장 뚜렷하게 드러나는 상황이다. 이 조건은 이후 비교 실험에서 알고리즘의 구조적 민감도를 분석하기 위한 기준으로 사용된다. 즉, 동일한 대즐링 환경에서 매칭 함수, 피쳐 표현 등의 요소에 따른 성능 변화를 비교함으로써, 각 알고리즘이 포화 교란에 반응하는 내부 메커니즘을 확인한다.

Figure 7과 Table 2는 베이스라인 대즐링 조건(연속 조사형, 완전 포화형)에서 매칭 함수와 피쳐 조합에 따른 평균 성공률($SR@IoU>0.5$) 변화를 비교한 결과를 나타낸다. 실험은 총 여섯 가지 조합, 즉 NCC-Sobel, NCC-Laplacian, NCC-Original, SSD-Sobel, SSD-Laplacian, SSD-Original에 대해 대즐링 적용 전후의 성능 변화를 비교하였다.

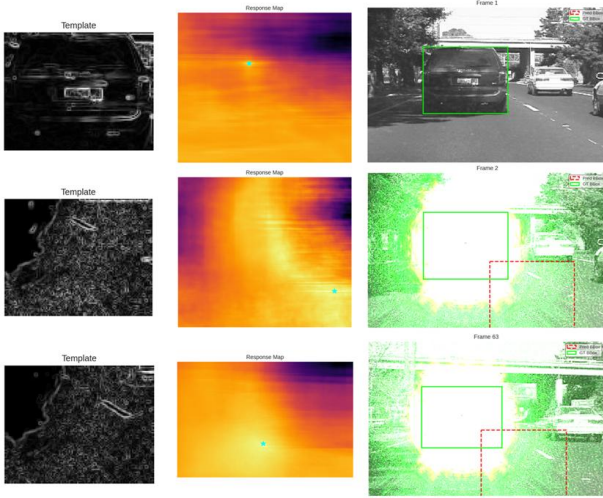


Fig. 8. Example of outer-jump behavior in the Sobel+SSD combination under over-saturation (OOD). The central mismatch increases the cost sharply, and partial matching with the dazzling ring produces a minimum cost at the outermost boundary, resulting in an immediate tracking jump.

대부분의 조합에서 대즐링이 적용되면 성능이 급격히 감소하였으며, 특히 Sobel-NCC 조합은 대즐링이 없는 경우 평균 성공확률이 0.6 이상으로 가장 높은 성능을 보였으나, 대즐링이 적용되면 약 0.1 수준으로 급락하였다.

반면 Laplacian-SSD 조합은 대즐링 전후 모두에서 낮은 성능(약 0.1 수준)을 보였으며, 일부 경우 대즐링 후 약간의 증가가 관찰되었으나 이는 SR 절대값이 0.1 내외로 매우 작아 의미 있는 향상으로 보기 어렵다.

일반 intensity 피쳐 기반 조합(Original-NCC, Original-SSD) 또한 대즐링 미적용 시 약 0.5 수준이었으나, 대즐링 후 0.1 이하로 감소하여 과포화된 연속 조사형 레이저가 추적기의 상관 구조를 근본적으로 교란함을 확인할 수 있다.

즉, 완전 포화형 대즐링은 모든 매칭 구조에 대해 치명적인 성능 저하를 유발하며, 특히 Sobel-NCC 조합과 같이 정규화 기반 구조적 매칭 기법에서도 강력한 교란 효과가 나타난다.

2.2 Failure Mechanisms of Sobel-Based NCC/SSD under OOD

본 절은 Sobel 필터에 대해서 OOD조건에서 왜 NCC와 SSD가 서로 다른 방식으로 무너지는지를 수식과 예시로 설명한다. Sobel은 이산 미분(경사) 근사로서 아래와 같은 수식 형태를 지니게 된다.

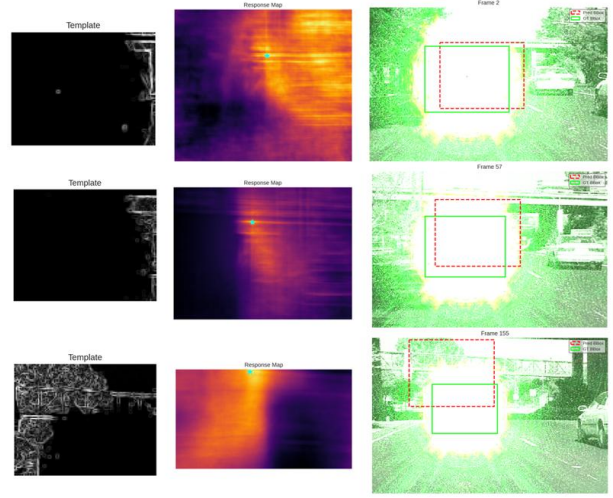


Fig. 9. Example of response drift in the Sobel+NCC combination under over-saturation (OOD). The gradient in the dazzling core vanishes, while the strong edge gradient along the halo dominates the correlation, causing the response peak to gradually shift outward.

$$G_x = I * \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, G_y = I * \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$\|\nabla I\| = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}$$

이로 인해 포화 영역에서는 경사 정보가 소실되고, 에너지가 경계부에 집중된다. 즉, 만약 대즐링으로 영상이 클리핑(saturation)되면 코어 내부는 거의 상수영역 $\nabla I \approx 0$ 이 되어 경사 소실이 발생한다. 반면 코어의 경계에서는 급격한 단계(step) 전이가 생겨 강한 링(edge ring)이 형성된다. 즉, Sobel 피쳐 맵은 중심부는 경사=0, 경계부는 큰 경사라는 도넛형 에너지 분포로 재편된다.

Sobel 피쳐는 코어 내부에서는 0에 근사한 반면, 대즐링으로 생성된 강한 링 경계는 템플릿의 외곽 경계와 부분적으로 유사한 패턴을 제공하므로, 최적의 유사점 위치는 코어를 피하고 링을 맞춘 위치에서 더 작아진다.

그 결과, Figure 8에서 확인할 수 있는 것처럼 Sobel-SSD는 대즐링이 발생하자마자 최외곽으로 peak가 도약(outer jump)하며 즉각적 추적 붕괴가 일어난다.

Sobel 피쳐 벡터에 대한 결과를 이미지와 템플릿에 대해서 g_x, g_T 라 할 때 NCC를 통한 유사도 수식은 다음과 같다.

$$NCC(g_T, g_x) = \frac{\sum (g_{T,i} - \bar{g}_T)(g_{x,i} - \bar{g}_x)}{\sqrt{\sum (g_{T,i} - \bar{g}_T)^2} \sqrt{\sum (g_{x,i} - \bar{g}_x)^2}} \quad (12)$$

즉, 정규화 과정에서 중심부 기여가 감소하고, 외곽 경사 성분이 상관 값을 지배하게 된다. 포화 코어 내부는

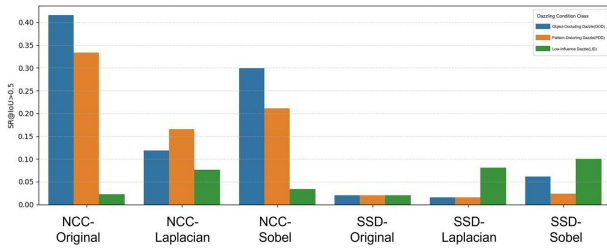


Fig. 10. Experimental tracking performance under varying dazzling intensity.

$g_{x,i} \approx 0$ 이므로 분자 기여가 사실상 사라지고, 동시에 분모의 표준편차도 작아진다. 결과적으로 **상관은 코어 경계의 큰 경사(halo edge)가 지배하며**,

유사도의 최대치는 외곽 링을 가장 잘 맞추는 위치로 조금씩 이동한다. 이로 인해 **Sobel-NCC는 중앙부를 무시하고 외곽 정보에 의존하는** 응답으로 수렴하며, Figure 8 처럼 프레임이 진행될수록 peak가 링을 따라 점진적 drift를 보인다. 즉, 대즐링 포화는 Sobel 피쳐 맵을 중앙 무경사-외곽 고경사의 도넛형 구조로 만든다.

2.3 Performance Variation across Dazzling Class

Figure 10은 매칭 함수(SSD, NCC)와 피쳐 조합에 대해 포화 강도(색상 구분)에 따른 성공률의 변화를 나타낸다. 모든 조합에서 포화 강도가 증가할수록 SR이 감소하는 공통적인 경향을 보였다. NCC-Original 조합은 LID 조건에서 SR이 약 0.41로 가장 높은 성능을 보였으나, 포화가 강해질수록 0.05 아래 수준까지 급격히 저하되었다.

NCC-Sobel 역시 0.3에서 0.03로 감소하였으며, 이는 대즐링 중심부의 포화로 인한 gradient 소실이 원인으로 판단된다. 반면 Laplacian 기반 조합은 NCC 조건에서는 전체적으로 SR이 0.1 수준에 머물러 작은 패턴의 변화에 가장 민감한 피쳐로 확인되었다. 결과적으로, 포화 강도가 증가하면 대부분의 추적기가 급격한 성능 저하를 보이는 것을 알 수 있다. 따라서 포화 강도는 추적 성능을 결정하는 주요 요인이다.

V. Conclusions

본 연구에서는 실제 센서 기반의 측정 데이터를 활용하여 현실적인 레이저 대즐링 현상을 정량적으로 정의하고, 이를 공개 추적 데이터셋에 동적으로 합성할 수 있는 대즐링 영상 합성 파이프라인을 제안하였다. 제안된 방법은 이상적 광학 시뮬레이션에 의존하지 않고 실험 기반 패치를

직접 이용함으로써, 기존 연구가 지닌 현실-모델 간 괴리를 극복하였다. 또한, 템플릿 매칭 기반 추적기의 구조적 민감도를 체계적으로 분석하여 포화 강도에 따른 정량적 성능 저하를 규명하였다. 특히 Sobel-NCC와 Sobel-SSD 조합의 붕괴 메커니즘을 포화 코어 형성과 외곽 gradient 의존성으로 설명함으로써, 대즐링이 단순한 밝기 교란이 아니라 추적기의 내부 상관 구조를 무너뜨리는 근본적 요인임을 실험적으로 입증하였다.

실험 결과, 포화 강도가 증가할수록 모든 추적기의 성공률(SR@IoU>0.5)은 급격히 감소하였으며, 완전 포화형(OOD)에서는 평균 SR이 0.1 이하로 수렴하였다. 이는 포화 강도가 대즐링 교란 효과를 결정하는 핵심 요인임을 보여준다. 향후 연구에서는 제안된 합성 파이프라인을 활용하여 다양한 레이저 파장대 및 센서 스펙트럼 응답 특성에 따른 대즐링 효과를 확장 분석할 예정이다. 또한 알고리즘 측면에서 correlation filter 기반 및 Siamese 네트워크 기반 추적 알고리즘에 대한 강건성 비교 분석으로 확장할 예정이다. 본 연구의 결과는 향후 소프트 킬(Soft-Kill) 기반 표적 교란 시스템 설계의 기초 데이터로 활용될 수 있다.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the government of the Republic of Korea through the Defense Acquisition Program Administration (DAPA) and was conducted under the supervision of the Korea Research Institute for Defense Technology Planning and Advancement (KRIT) (Grant No. KRIT-CT-23-004, Project Title: Directional Infra-Red Countermeasures for APS).

REFERENCES

- [1] N. JOVANOVIĆ, "The russo-ukrainian war: Insights and lessons for the future of modern warfare." Contemporary Macedonian Defense/Sovremena Makedonska Odbrana, vol. 25, no. 48, 2025. ISSN: 1409-8199
- [2] O. Steinvall, "Laser dazzling: an overview," Technologies for Optical Countermeasures XIX, vol. 12738, pp. 17-31, 2023. DOI: 10.1117/12.2678416
- [3] M. Taillandier, C. Regnault, A. Beaumadier, A. Beigbeder, and

- G. Pasquier, "High-energy lasers for c-uas applications," in *High-Power Lasers and Technologies for Optical Countermeasures II*, vol. 13201. SPIE, 2024, pp. 154–168. DOI: 10.1117/12.3031435
- [4] L. N. McLin, P. A. Smith, L. E. Barnes, J. R. Dykes, T. Kuyk, B. J. Novar, P. V. Garcia, and C. A. Williamson, "Scaling laser disability glare functions with "k" factors to predict dazzle," in *International Laser Safety Conference*, vol. 2013, no. 1. Laser Institute of America, 2013, pp. 278–287. DOI: 10.2351/1.5056803
- [5] G. Ritt, "Laser safety calculations for imaging sensors," *Sensors*, vol. 19, no. 17, p. 3765, 2019. DOI: 10.3390/s19173765
- [6] K. W. Benoist and R. H. Schleijsen, "Modeling of the over-exposed pixel area of ccd cameras caused by laser dazzling," in *Technologies for optical countermeasures xl; and high-power lasers 2014: technology and systems*, vol. 9251. SPIE, 2014, pp. 105–113. DOI: 10.1117/12.2066305
- [7] J. Fjellström, "Laser dazzling of cmos imaging sensors using amplitude modulated and continuous wave lasers," 2023.
- [8] M. M. Abdelhakim, A. A. Khalil, A. Salah, and M. Alshershby, "Exploring the impact of high-power infrared lasers on electro-optical systems performance: A field study with different wavelengths," *Infrared Physics & Technology*, vol. 139, p. 105348, 2024. DOI: 10.1016/j.infrared.2024.105348
- [9] J. Goyvaerts, T. F'oldes, A. Borghraef, and M. Vandewal, "Assessing laser dazzling effects on uav cameras and collision avoidance in laboratory and field settings," in *High-Power Lasers and Technologies for Optical Countermeasures II*, vol. 13201. SPIE, 2024, pp. 85–96. DOI: 10.1117/12.3031630
- [10] G. D. Lewis, A. Borghraef, and M. Vandewal, "The disruptive impact of dynamic laser dazzling on template matching algorithms applied to thermal infrared imagery," in *Technologies for Optical Countermeasures XIX*, vol. 12738. SPIE, 2023, p. 1273803. DOI: 10.1117/12.2685204
- [11] H. Zheng, Y. Wang, Y. Liu, T. Sun, and J. Shao, "Dazzling evaluation of the impact of a high-repetition-rate co2 pulsed laser on infrared imaging systems," *Sensors*, vol. 24, no. 6, p. 1827, 2024. DOI: 10.3390/s24061827
- [12] Wu, Y., Lim, J., Yang, M.H.: Object tracking benchmark. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* DOI: 10.1109/TPAMI.2014.2388226
- [13] Kristan, M., Leonardis, A., Matas, J., Felsberg, M., Pflugfelder, R., Cehovin Zajc, L., Vojir, T., H'ager, G., Lukeři'c, A., Eldesokey, A., Fernandez, G.: The visual object tracking vot2017 challenge results (2017), DOI: 10.1109/ICCVW.2017.230

Authors



Jeong-Hyeon Moon received his B.S. degrees in Mathematics and Computer Engineering from Ajou University, Suwon, Korea, in 2018, and his Ph.D. degree in Artificial Intelligence from the same university in

2024. He is currently working at Hanwha Systems in the Electro Optics System, where he is involved in the laser dazzling countermeasure systems.



Kyuhong Choi received his B.S. degrees in physics from Ajou University, Suwon, Korea, in 2015, and his M.S. degree in Applied Physics from the same university in 2017. He is currently working at Hanwha Systems

in the Electro Optics System, where he is involved in the laser systems.



Min-Sue Hong received his B.E. degree in Electrical and Electronic Engineering from Chung-Ang University, Seoul, Korea, in 2007.