JKIICE Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering

한국정보통신학회논문지 Vol. 23, No. 4: 365~373, Apr. 2019

정밀 유도무기용 적외선 영상탐색기의 운용환경에 따른 성능대비 개발비용 최적화 연구

김호용[1] · 강석중[2*] · 지호진[3]

The Cost Optimization Solution for Developing the Image Infra-Red (IIR) Missile Seeker Operated Under Various Environments

Ho-Yong Kim[1] · Seok-Joong Kang[2*] · Ho-Jin Jhee[3]

[1]Graduate Student, Graduate School of Management of Technology, Korea University, Seoul, Korea 02841
[2*]Professor, Graduate School of Management of Technology, Korea University, Seoul, Korea 02841
[3]Research Engineer, LIG Nex1 Co., Ltd. 207, Mabuk-ro, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do, Korea 16911

요 약

본 논문은 정밀 유도무기에 장착되어 목표물 명중 확률을 좌우하고, 비용적인 측면에서 유도무기의 가장 큰 부분을 차지하는 적외선 영상탐색기에 대한 성능 대비 개발비용 최적화에 대한 연구이다. 탐색기 개발 비용의 주요항목인 해상도와 그에 따른 탐지성능에 영향을 미치는 인자들을 분석함으로써, 설계 단계에서 해상도 별 탐지성능과 개발 비용과의 상관관계를 분석하는 연구를 수행하였다. 다양한 신호 대 클러터 비 조건에서 해상도 별 표적탐지 확률을 설계 시 중요인자로 정의하고, 개발비용 선정의 기준이 되는 해상도 별 탐지성능 분석을 수행하였으며, 탐지성능 확보를 위한 최적의 해상도와 그에 따른 투입비용에 대한 관계를 도출하였다. 다양한 클러터 환경에 따른 사례연구를 통하여 제안한 분석 방식이 탐지성능 만족을 위하여 요구되는 개발비용 예측에 효과적임을 검증하였으며, 유도무기 운용 환경에서 성능대비 최적화된 개발비용을 설계단계에서 미리 도출할 수 있는 연구 자료로 활용하고자 한다.

ABSTRACT

An Image Infra-Red(IIR) seeker is widely used for precision guided munitions to provide intelligent and precise target detection in terms of high kill probability. However, there have been issues in determining the performance versus cost trade-offs due to high cost of seeker comparing to other units of the munitions. In this paper, performance/cost evaluations have been carried out to find the most cost-effective solution for developing the IIR seekers. The relationships between the critical parameters and cost are investigated to determine the optimal point which represents the low cost with high performance. It is expected that the presented approach will be able to be used for guidelines to select the appropriate IIR seeker for the given operating conditions and can be useful to estimate the cost effectiveness of the precision guided munitions at early design stage.

키워드 : 영상클러터, 영상해상도, 적외선 영상탐색기, 정밀 유도무기, 탐지확률

Keywords : Detection Probability, IIR Seeker, Image Clutter, Image Resolution, Precicion Guided Munitions

Received 8 March 2019, **Revised** 13 March 2019, **Accepted** 18 March 2019

***Corresponding Author** Seok-Joong Kang(E-mail : sjkang64@korea.ac.kr, Tel:+82-2-3290-4871)
Professor, Graduate School of Management of Technology, Korea University, Seoul, Korea 02841

Open Access http://doi.org/10.6109/jkiice.2019.23.4.365 print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

ⓒThis is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/li-censes/by-nc/3.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright ⓒ The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

Ⅰ. 서 론

현대전에서는 공격뿐 아니라 아이언 돔과 같은 방어의 개념에서도 유도무기의 역할은 증대되고 있으며, 다양한 운용환경 조건에서 목표물에 대한 높은 명중 확률(Kill Probability)을 가지는 정밀 유도무기가 요구되고 있다. 또한, 경제적 관점으로 볼 때, 방위산업의 수출을 통한 글로벌 경쟁시대에서 성능 대비 가격경쟁력은 매우 중요한 요인으로 작용하고 있다.

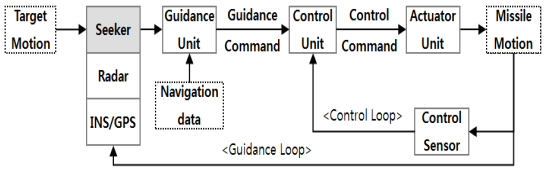
유도무기 개발의 목적은 다양한 전장 환경에서 위협 표적에 대하여 높은 명중확률을 확보하는 유도탄을 개발하는 것이다. 유도무기는 크게 발사 플랫폼, 표적 및 사거리 등에 따라 분류되며, 용도에 따라서는 전략 유도무기와 전술 유도무기로 구분이 된다. 발사 플랫폼과 대상표적에 따라 지대지(Surface to Surface), 공대공 (Air to Air), 지대공(Surface to Air) 등으로 구분되며, 사거리에 따라 단거리, 중거리, 장거리 유도무기로 분류된다. 유도무기에 탑재되는 구성품 중 탐색기(Seeker)는 유도탄 운용 중 표적을 포착하고, 추적하여 유도탄의 유도조종부에서 유도명령을 계산하는데 필요한 방향 및 위치 정보를 제공함으로써 최종적으로 유도탄을 위협표적 위치로 구동시키는 핵심적인 역할을 담당한다. 탐색기는 크게 표적 탐색, 포착, 유도신호 도출 단계로 임무를 수행하며, 센서의 해상도, 표적 주면의 클러터(Clutter) 등에 의하여 주요 성능이 결정된다 [1]. 또한, 개발 및 제작비용 측면에서 유도무기 개발비용의 30% 이상을 차지할 만큼 유도무기 가격을 결정하는 주요 구성품이다 [2]. 전술 및 전략용 유도무기에 이르기까지 서로 다른 목표와 사양의 탐색기가 개발되어왔으며 유도무기체계의 경제성, 운용성, 신뢰성과 명중률의 향상을 위해 설계 요구조건이 더욱 다양화되고 있다 [3]. 탐색기는 유도무기의 목적 및 용도에 따라 크게 광학탐색기, RF 탐색기, 복합탐색기로 구분될 수 있으며, 광학탐색기 중 적외선 영상을 통하여 표적위치를 추정하는 적외선 영상탐색기가 대표적이다 [4]. 적외선 영상탐색기는 표적으로부터 방사되는 열에너지를 광학계를 거쳐 적외선 검출기에 집광시키고 이를 통하여 생성된 영상을 처리하여 표적위치 정보를 유도탄에 제공한다. 적외선 영상탐색기의 성능을 결정하는 구성품은 적외선 신호 투과와 잡광 차단을 위한 적외선 광학계, 영상획득을 위한 검출기 그리고 최종적으로 영상신호처리를 담당하는 신호처리기로 나눌 수 있다. 이 중 광학계는 탐색기 초기 설계 단계에서 적용 영상해상도 선정이 필요한 구성품으로 탐색기에 의해 취득되는 영상의 품질과 직접적으로 관련이 있는 구성품이다. 탐색기의 운용조건에 따라 최적의 영상 해상도 선정이 필요하며 특히, 탐색기의 운용조건 대비 과도한 영상 해상도가 적용될 경우 광학계 및 검출기 선정 시 필요 이상의 비용 부담이 발생할 수 있다. 이는 적외선 영상탐색기의 설계 및 개발비용의 상승을 초래할 수 있고 결과적으로 유도무기 체계 전체 개발 비용에 큰 영향을 미칠 수 있다. 따라서, 탐색기 초기 설계단계에서 운용조건에 부합되는 최적의 해상도 선정이 선행되어야 한다. 이를 위하여 적외선 영상탐색기가 운용되는 환경을 표적 주변의 클러터 조건으로 정의하고, 각 클러터 환경에서 영상 해상도가 탐색기 성능을 나타내는 중요인자(Critical Parameters)인 표적 탐지확률 P_D(Detection Probability)에 미치는 영향분석을 통하여 최적의 해상도를 선정할 수 있는 접근방법을 제시한다. 클러터 조건, 영상해상도 및 탐지확률의 상관관계를 분석하여 적외선 영상탐색기가 운용되는 환경 별 최적의 해상도를 도출하고 이러한 방식을 설계단계에서 적용하고자 한다.

본 논문에서는 적외선 영상탐색기를 유도무기에 적용할 경우 성능 대 가격의 최적화를 위해 다양한 클러터 환경에서 해상도 별 탐지 성능과 설계비용의 상관관계를 분석하는 연구를 수행하였다. 유도탄의 글로벌 가격 경쟁력을 위하여 비용이 가장 큰 탐색기 가격 절감을 위하여 최적화 연구를 전개한다. 영상탐색기 설계 시 주요 인자인 다양한 신호대 클러터 비(Signal to Clutter Ratio: SCR) [5]에 따른 탐지확률(P_D)을 계산하고 성능 확보를 위해 요구되는 최적의 해상도와 그에 따른 투입비용에 대한 관계를 도출하였다. 사례연구를 통하여 제안된 분석결과가 영상탐색기의 탐지성능 요구조건 만족을 위하여 요구되는 설계비용 예측에 효과적임을 검증하였다. 본 논문은 다음과 같이 구성된다. Ⅱ.장에서는 적외선 영상탐색기 개요 및 소요 핵심기술을 관련분야로써 기술하고, Ⅲ.장에서는 탐색기 운용조건 별 성능인자 및 비용인자 상관관계 분석을 수행하였다. 또한 Ⅳ.장에서는 Ⅲ장의 분석결과를 탐색기 개발 관점에 적용 및 기술함으로써 개발비용에 미치는 영향을 도출하였으며 Ⅴ.장에서는 결론을 제시하였다.

Ⅱ. 본 론

2.1. 적외선 영상탐색기 개요 및 선정

유도탄 맨 앞부분에 탑재되어 사람의 눈에 해당되는 탐색기를 구비한 유도무기는 비행 외란 환경 하에서 유도탄과 표적간의 상대운동을 감지하여 종말호밍에 필요한 유도신호(시선각 변화율, 시선각 등)를 측정한 후 유도-조종장치에 전달하는 관성센서 역할을 수행하여 발사된 후에 목표를 정확히 명중할 수 있게 한다. 유도탄에서 표적을 바라보는 시선의 방향(LOS, Line Of Sight)을 일정하게 유지하면 표적과 유도탄이 조우한다는 가정을 기반으로 하는 비례항법(Proportional Navigation) 수행을 위한 시선각 변화율(LOSR, Line Of Sight Rate)을 계산하는 곳이 탐색기이다. 표적 정보를 빠르게 획득하고 정밀 추적을 위해서는 고가의 김발(Gimbal) 형 탐색기가 필요하며 목적에 따라서 다소 저렴한 동체 고정식 스트랩다운(Strapdown) 형 탐색기도 존재한다. 그림. 1은 일반적인 유도무기에서 탐색기의 위치 및 유도무기 운용개념을 나타낸다.



INS : Inertial Navigation System

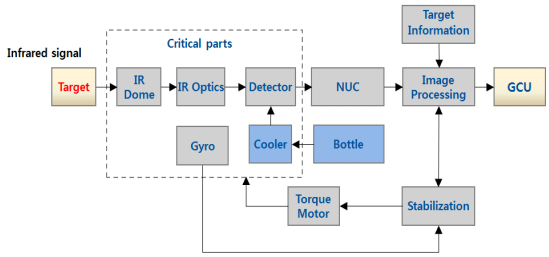
Fig. 1 Guidance Concept of Missile

탐색기의 종류는 목적과 용도에 따라 다양하게 존재하며 크게 광학탐색기, RF 탐색기, 복합탐색기로 구분이 된다. 광학탐색기에는 다시 세부적으로 수동 호밍으로 유도되는 단순 적외선 추적 방식의 적외선탐색기, 정밀 영상처리를 거치는 가시광 또는 적외선 영상탐색기가 있다. 표적에 대한 정확한 정보가 무엇보다도 중요하며, 탐색기로서는 주어진 표적정보와 얻어진 영상을 비교 분석하여 표적을 자동 인식하는 기능을 보유해야 하고, 탐색기를 정확히 지향할 수 있는 기능이 있어야 한다. 제3의 위치에서 에너지를 조사하고 표적에서 반사되는 신호를 포착, 추적하는 반능동 호밍 방식의 레이저 유도를 이용한 반능동 레이저탐색기(SAL)도 있다 [5]. RF탐색기는 표적에 에너지(마이크로파, 밀리미터파 등)를 조사하고 반사 신호를 획득하여 표적을 탐지, 추적하는 능동호밍 방식의 탐색기이며 주로 대공, 대함유도무기에 많이 적용된다. 복합탐색기는 광학탐색기와 RF 탐색기의 기능이 모두 탑재되어 있는 탐색기를 말하며 상대적으로 다양한 임무를 수행할 수 있고 대함 유도탄 방어와 대함유도무기로 많이 사용된다. 현재 가장 많이 사용되고 있으며 성능적으로 활용성이 우수하여 타 탐색기 대비 당분간 미래 적용이 가장 유용한 적외선 영상탐색기를 선정하여 본 논문의 개발 비용 최적화 모델로 삼으려고 한다. 적외선 영상탐색기는 표적으로부터 방출되는 열에너지(Thermal Infrared)를 감지하여 동작하는 탐색기를 말한다. 표적에서 방사되는 에너지 신호를 획득하여 표적을 포착/추적하는 센서로서 자체 송신원이 없으므로 적에게 노출될 염려가 없어 은닉성이 보장되는 게 특징이다.

본 논문에서는 다양한 클러터 조건에서 적외선 영상탐색기의 해상도 별 탐지확률을 분석하여 요구되는 설계비용을 예측하고 운용환경에서 탐지성능 요구조건을 만족할 수 있는 최적의 탐색기 개발 비용을 제안하는 것이다.

2.2. 적외선 영상탐색기 구성품 및 성능

모든 물체는 절대온도 0 K(-273.15℃) 이상에서는 복사에너지를 방출한다. 이 원리를 이용하여 표적으로부터 복사 방출되는 적외선을 감지하여 탐지/추적하는 수동호밍(Passive Homing) 장치가 적외선 영상탐색기이다. 표적으로부터 방사되는 열 에너지는 광학계를 통하여 검출기(Detector)로 집광되어 전기적 신호로 변환되고 이를 이용하여 영상을 생성 후 영상신호처리를 거쳐 표적의 추정위치를 유도-조종장치에 전송하는 역할을 담당한다 [6]. 이에 탐색기의 성능은 유도무기의 명중확률과 직결된다고 할 수 있다. 그림. 2의 점선으로 구성된 주요 부품들(Critical parts)인 광학계와 검출기는 표적 신호를 취득하는 주요 핵심부품이며, 적외선 영상탐색기의 운용환경 및 조건에 따라 최적의 조건으로 선정되어야 한다 [7]. 이는 적외선 영상탐색기의 성능확보 측면 뿐 아니라 설계하고자 하는 탐색기 시스템의 비용과도 밀접한 관계를 가지게 된다. 탐색기 가격에서 이 두 품목들이 차지하는 비율은 대략 35% 이상으로 고가의 핵심 품목들이다.



IR : Infra Red, NUC : Non-Uniformity Correction, GCU : Guidance Control Unit

Fig. 2 Schematic Diagram of Image IR Seeker

본 논문에서 해상도 대비 탐지확률(P_D) 관계에서 가장 영향을 주는 품목이 광학계와 검출기이며 작전운용 환경에서 가장 민감한 검출기 성능대비 비용의 최적화를 예측 및 구현 하려고 한다. 다양한 신호 대 클러터 비 조건에서 적외선 영상탐색기의 해상도 별 표적탐지 확률은 영상탐색기 설계 시 중요 성능으로 정의할 수 있다. 영상탐색기의 개발 비용 선정의 기준이 되는 해상도 별 탐지성능 분석을 수행하여 요구된 탐지성능 확보를 위하여 필요한 적정의 해상도와 그에 따른 설계비용에 대한 최적화를 구현하고자 한다.

2.3. 주요 인자 및 핵심기술

적외선 영상탐색기의 성능을 결정하는 주요 인자들은 외부 인자와 내부 인자로 구분이 되고 외부 인자들 중에는 영상 성능을 방해하는 클러터 조건이 주요 외부 인자로 판단이 된다. 또한 내부 인자들은 등가잡음온도차(NETD), 최대탐지거리, 시계(FOV), 변조전달함수(MTF) 등이 있으며 이러한 내부 인자들은 영상 해상도를 구성하는 주요 요소들이다 [8].

적외선 영상탐색기를 구성하는 핵심기술은 시스템 설계기술, 적외선 센서 기술, 김발 제어 기술, 신호처리 기술, 핵심 부품 기술로 나눠진다. 본 논문에서는 적외선 센서 기술에 관하여 논의하고자 한다. 적외선 센서 기술에는 '광학계 설계 기술', '적외선 신호 검출 및 영상 보정 기술'로 세분화 된다. 광학계 설계 기술은 운용온도 변화에도 영상 초점이 일정하게 유지되도록 하는 수동 비열화 설계가 주요 기술이다. 이는 영상탐색기가 가혹한 운용환경에서도 표적을 탐지, 추적 할 수 있는 핵심 기술이다. 적외선 신호 검출 및 영상 보정 기술은 그림. 3과 같이 광학계로부터 입사된 에너지가 검출기에서 전기적 신호로 변환되어 저대역통과필터(LPF)를 거친 후 아날로그 신호가 디지털 신호로 변환되어 신호처리기로 전달된다. 신호처리기에서는 영상 보정(NUC) [9]을 거쳐 표적 영상을 탐지, 추적 할 수 있게 되며 이러한 일련의 기술을 말하는 것이다.

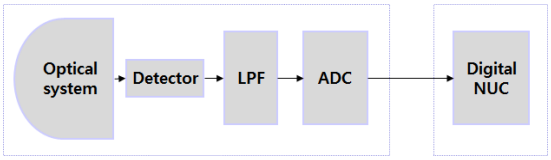


Fig. 3 Image Flow Chart of Image IR Seeker

탐색기 개발 시 검토해야 할 사항들은 표적종류 및 배경(대공표적, 함상표적, 지상표적), 표적의 전자기파 특성, 표적의 동특성 그리고 유도탄 운용개념, 유도탄 운용환경 등을 종합적으로 고려해야 하며, 탐색기 성능에 영향을 주는 이들은 광학계 설계기술을 포함한 적외선 센서 기술과 밀접한 관련이 있다.

클러터 조건은 탐색기가 표적을 탐지, 추적하는 것을 방해하는 가장 주요한 인자들로서 일정한 신호 대 클러터 비로 국한했을 때 영상해상도(lp)와 탐지확률(P_D) 관계는 영상해상도가 일정 범위까지 증가함에 따라 탐지확률도 개선됨을 알 수 있다. 적외선 영상시스템 설계 시 운용환경에 따른 클러터 조건은 매우 다양하게 나타날 수 있으며 각각의 운용환경에 맞춰서 영상 해상도를 최적화하여 유도무기 설계 및 개발비용 예측에 활용이 가능할 것으로 판단된다.

Ⅲ. 운용조건 별 성능인자 및 비용인자 상관관계 분석

3.1. 적외선 영상탐색기 성능인자 및 비용인자 정의

본 절에서는 적외선 영상탐색기의 성능을 나타내는 지표인 탐지확률과 영상 해상도와의 상관관계를 분석하여 특정한 운용조건에서 탐지성능 확보를 위하여 요구되는 탐색기의 영상 해상도를 추정함으로써 광학 구성품 설계 및 개발 시 요구되는 최소 비용 분석에 활용하고자 한다. 영상 해상도 선정은 적외선 영상탐색기 설계 시 표적으로부터 방사되는 열 에너지를 집광시키는

광학계 (렌즈 조립체), 집광된 신호를 검출하여 영상을 생성하는 소자인 열상검출기(Thermal Detector) 선정과 밀접한 관계를 가지고 있다. 탐색기가 운용되는 조건에서 최적화된 영상 해상도를 도출함으로써, 탐색기 개발 비용에 영향을 미치는 광학계 및 검출기 선정을 위한 소요비용 예측에 그 결과를 반영할 수 있다. 이를 위하여 다양한 운용조건 하 에서의 적외선 영상탐색기의 성능을 표적 탐지확률로 정의하고, 성능 확보를 위하여 발생되는 개발비용을 탐색기에 적용되는 영상 해상도로 정의하였다. 이는 특정 영상 해상도를 확보하기 위하여 요구되는 광학부 (광학계 및 검출기) 개발 비용이 해상도 증가와 비례관계를 가진다는 점에서 적용이 가능하다. Johnson은 일반적인 적외선 광학 시스템에서 표적의 탐지, 인식 및 식별을 위하여 요구되는 최소의 영상 해상도에 대한 분석을 수행하였다 [10]. 이 결과는 민수용 광학장비나 군사적 목적의 표적 획득 시스템 설계 시 유용하게 활용되고 있으며 많은 영상시스템 설계 단계에서 분석 및 시뮬레이션 목적으로 활용되어왔다. 특히, [11]에서는 영상획득 및 분석 시스템이 요구하는 탐지 성능에 부합될 수 있도록 하는 영상 해상도 수치를 추론해 낼 수 있었다. 하지만, 이러한 해상도 선정 기준은 영상 내에서 존재하는 표적이 차지하는 면적(화소수) 만을 고려한 분석 방식이었으며, 실제 영상내에 존재하는 다양한 클러터 조건에서는 그 적용성이 매우 제한적 이었다. 실제로 영상 표적탐지 시스템의 성능을 좌우하는 표적탐지 확률은 표적주변에 발생하는 왜란 신호들에 의한 클러터 조건에 따라 매우 큰 영향을 받게된다. 예를 들어, 특정 광학시스템의 운용환경이 해상이나 공중일 경우 관심 표적 주변의 배경환경은 비교적 단순하기 때문에 동일 해상도를 가지는 지상 표적 탐지 목적의 시스템 보다 높은 탐지 성능을 가지게 된다. 따라서 보다 정확한 개발비용 분석을 위해서는 적외선 영상탐색기가 운용되는 클러터 조건 별로 탐지성능을 만족시키는 영상 해상도를 도출하는 방식이 필요하다. 이에 본 논문에서는 적외선 영상탐색기의 성능인자를 탐지확률로, 비용인자를 영상 해상도로 각각 정의하고, 다양한 클러터 조건에서 요구되는 성능인자를 달성하기 위하여 적외선 영상탐색기 광학부 개발에 투입되어야 하는 최적의 비용인자를 도출하는 인자 별 상관관계 분석을 수행하였다.

3.2. 다양한 운용조건에서 성능인자와 비용인자의 상관관계 분석

인자 별 상관관계 분석을 위하여 활용되는 데이터는 관측자(Observer)가 직접 표적이 포함되어있는 영상을 보고 영상 내 표적들의 존재 및 위치를 확인하여 탐지여부를 판단하고 이를 기반으로 표적 탐지확률을 계산한 결과이다 [12]. 탐지확률 계산을 위하여 사용된 영상은 합성영상 생성기법을 통하여 생성되었고, 원적외선 파장대역 (8~12㎛) 검출기를 활용한 영상취득 방식을 모사하여 제작되었다. 다양한 영상 해상도를 얻기 위하여 최초로 생성된 영상에 공간 필터를 적용하여 표적 해상도가 각 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 및 6.0 line pair (lp)로 될 수 있도록 하였다. (최대 영상 해상도: 6.0 line pair). 일반적으로, 해상도와 영상의 품질은 비례하며 해상도 향상을 통하여 탐지성능의 증가를 기대할 수 있다. 표적 해상도와 영상 내 클러터 영향분석을 위하여 신호 대 클러터 비를 정의하였고, 다양한 해상도 영상들을 통하여 SCR 값을 0.33, 1.2, 5.8 및 39.0으로 산출하였다. SCR 0.33을 High-클러터, 1.2 및 5.8을 Moderate-클러터, 그리고 39.0을 Low-클러터 조건으로 정의하였다. 마지막으로, 분석을 위하여 관측자에 의해 측정된 표적 탐지확률을 P_D로 정의하고 각 SCR 및 해상도 조합 별로 영상 내 탐지확률을 (1)과 같이 계산하였다.

$$P_D = \frac{\sum_{i=1}^{K} Tar_i}{\sum_{i=1}^{K} N_i} \tag{1}$$

여기서 Tar_i은 i 번째 영상 데이터에서 관측자에 의해 성공적으로 탐지된 표적 갯수, N_i 는 i 번째 영상내 존재하는 표적의 총 갯수를 나타낸다. 본 논문에서 활용된 데이터에 대한 보다 자세한 설명은 [12]에 기술되어 있다.

그림. 4는 위에서 언급된 4가지의 SCR 조건에 대하여 상 해상도 별 탐지확률을 나타내고 있다.

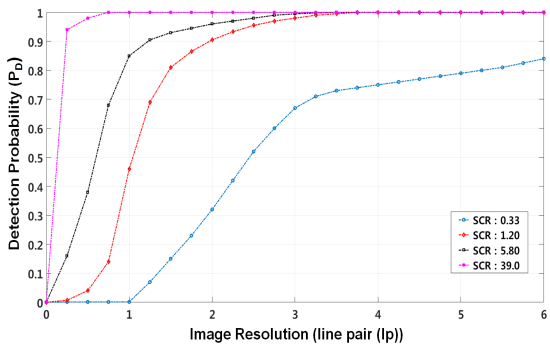


Fig. 4 Detection probabilities corresponding to each Image resolution (for different SCR conditions)

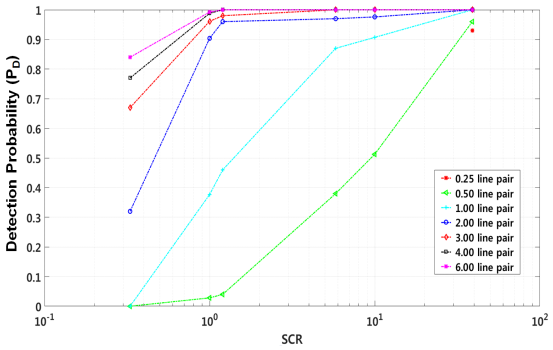


Fig. 5 Detection probabilities corresponding to each SCR condition (for different Image resolutions)

예측한 바와 같이 표적탐지 확률 P_D는 클러터 조건 및 영상 해상도에 의해 영향을 받음을 확인할 수 있다. High-클러터 조건의 경우 (SCR: 0.33) 본 분석에 적용된 최고 영상 해상도 $6.0lp$ 에서도 탐지확률 90%이상의 성능 확보가 불가하였으며, 최대 탐지확률 80% 정도의 성능을 나타내었다. 이는 표적 주변 클러터의 영향으로 인하여 정확한 표적탐지가 제한적이었고, 이를 극복하기 위하여 영상 해상도를 증가시켰지만 성능 향상에 한계를 보였다. 성능인자 ($P_D > 90\%$)를 만족시키기 위하여 비용인자 ($6.0lp$)를 증가시켰지만, 클러터 조건에 의해 그 영향이 낮음을 알 수 있다. 이와는 반대로 Low-클러터 조건 (SCR: 39.0) 의 경우, $0.25lp$의 매우 낮은 영상 해상도 만으로도 탐지확률 90% 이상을 확보할 수 있었다. 이는 영상 내 표적이 단일 픽셀로 표현되는 $0.5lp$ 기준에서도 표적 탐지가 가능한 성능을 확보할 수 있음을 나타낸다. 또한, 이 경우 탐지성능은 영상 해상도의 증가에 크게 민감하지 않고 모든 해상도 구간에서 만족스러운 성능 ($P_D > 90\%$)을 가짐을 확인할 수 있다.

그림. 5는 다양한 클러터 조건에 따른 영상 해상도 별 탐지확률을 나타낸다. 그림. 5에서 SCR이 1.0인 경우 탐지성능 $P_D > 90\%$를 달성하기 위해서 최소 $2.0lp$ 의 영상 해상도가 요구되며 SCR이 10 인 경우에는 영상 해상도 $1.0lp$ 이상만 유지할 경우 높은 탐지확률을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다. 또한, 영상 해상도가 $2.0lp$ 보다 낮을 경우 클러터 조건이 따른 탐지성능에 미치는 영향이 커짐을 알 수 있다.

서로 다른 클러터 조건에서 성능인자와 비용인자의 관계는 그림. 6에서 설명될 수 있다. 그림. 6은 비용인자인 영상 해상도에 대한 SCR을 성능인자인 탐지확률 P_D 50% 와 90%의 경우에 대하여 도식하였다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 SCR 1.0 이하에서 성능인자를 50%에서 90%로 향상시키기 위해서 요구되는 비용인자는 점차 증가하게 된다 ($1lp$ 이상). 또한, SCR 1.0~10 에서는 성능인자 확보를 위하여 요구되는 비용인자는 거의 일정하게 유지되고 있으며 ($0.5lp \sim 1lp$), SCR 10 이상에서는 성능인자 확보를 위하여 요구되는 비용인자의 변화량은 매우 작게 유지됨을 확인할 수 있다 ($0.5lp$ 이하).

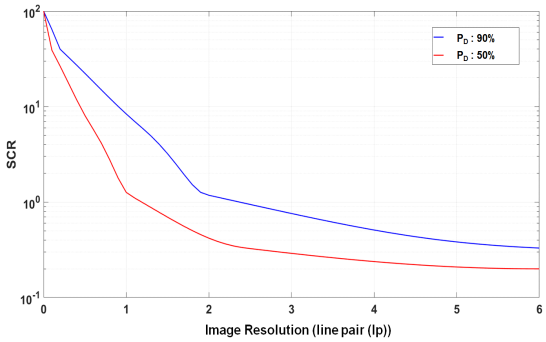


Fig. 6 SCR corresponding to each Image resolution (for detection probability (P_D) of 50% and 90% cases)

이러한 결과는 클러터 조건 별로 비용인자의 변화에 따른 성능인자의 민감도를 설명하였던 그림. 4와 그림. 5의 분석 결과와 동일함을 알 수 있다.

Ⅳ. 고 찰

Ⅲ. 장의 그림. 6에서 비용인자 대비 성능인자 변화특성을 분석하여 SCR 조건을 새롭게 정의 할 수 있다. 그림. 4와 그림. 5에서 볼 수 있듯이 클러터 조건에 따라 비용인자에 따른 성능인자의 변화 특성은 상이하였다. 성능인자는 낮은 SCR 조건 (HIgh-클러터)에서 비용인자의 변화에 민감하였고, 이와는 반대로 높은 SCR 조건 (Low-클러터)에서는 비용인자의 변화에 크게 영향을 받지 않음을 확인하였다. 이러한 결과를 이용하여 그림. 6에서 성능인자의 변화 특성이 발생하는 SCR 값을 새로운 클러터 조건을 위한 경계 값으로 도출하고 그 경계 내에 포함되는 영역을 정규화된 클러터 조건으로 정의 할 수 있다. 다시 말해서, 그림. 6의 그래프에서 SCR 1.0 이하 영역은 성능인자 향상을 위한 비용인자의 변화가 크게 발생하기 때문에 High-클러터 영역, SCR 10 이상 영역은 비용인자의 변화가 크지 않기 때문에 Low-클러터 영역으로 분류한다. 또한, SCR 1.0~10 영역은 Moderate-클러터 영역으로 구분할 수 있다. 이와 같은 클러터 영역의 정규화를 통한 비용인자(영상 해상도) 대비 성능인자 (탐지확률) 관계는 그림. 7과 같다. 적외선 영상탐색기 개발 시 운용목적에 따른 배경 클러터 조건이 정의되었다면 그림. 7의 결과를 활용하여 요구되는 성능인자(P_D)를 달성하기 위한 비용인자(lp)의 추정이 가능하다. 예를 들어, 탐색기의 운용환경이 배경 클러터가 낮은 공중 표적의 탐지라고 한다면 분석결과에 의해 Low-클러터에 해당되며, 이 경우 성능인자 90% 달성을 위하여 요구되는 최소의 비용인자를 $0.9lp$로 도출할 수 있다. 이러한 비용인자 분석 방식을 통하여 탐색기 개발 중 적절한 비용인자를 선정하고 운용조건과 부합되는 비용인자가 설계 및 개발에 반영되어, 과도설계 (over-specification)에 의한 추가비용이 발생되는 결과를 사전에 방지할 수 있다.

결과적으로 본 논문에서 제시한 분석방식으로 적외선 탐색기의 운용조건 대비 성능인자를 비용인자로 분석함으로써 개발비용 분석에 유용한 정보로 활용될 수 있다.

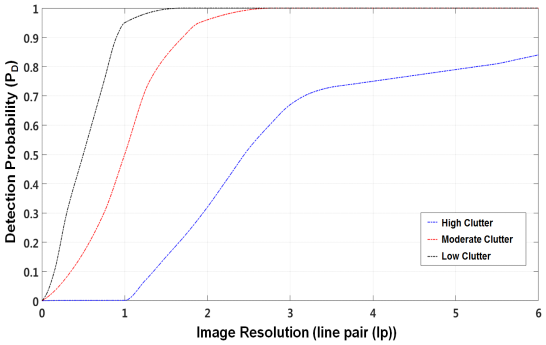


Fig. 7 Detection probabilies at generalized Low, Moderate, and High clutter conditions

표. 1은 본 논문에서 활용된 SCR 조건별 비용인자 및 성능인자를 요약하였으며, 표 2.는 본 장에서 정규화된 클러터 조건에 따른 성능인자 및 비용인자 관계를 나타낸다.

Table. 1 Detection probabilities and Image resolutions at different SCR conditions

	0.50 line pair	1.00 line pair	2.00 line pair	3.00 line pair	4.00 line pair	6.00 line pair
	SCR = 0.33					
P_D =	0.00	0.00	0.32	0.67	0.77	0.84
	SCR = 1.20					
P_D =	0.04	0.46	0.96	0.98	1.00	1.00
	SCR = 5.80					
P_D =	0.38	0.87	0.95	1.00	1.00	1.00
	SCR = 39.00					
	0.25	0.50		1.00	2.00	
P_D =	0.93	0.96		1.00	1.00	

Table. 2 Relationship between performance and cost factors at generalized clutter conditions

	Cost factor (Image resolution (line pair))		
Performance factor (Detection Probability)	Low Clutter SCR>10	Moderate Clutter 1.0 ≤ SCR ≤ 10	High Clutter SCR<1.0
1.00	1.70	2.80	-
0.95	1.00	1.90	-
0.90	0.90	1.70	7.00

Performance factor (Detection Probability)	Cost factor (Image resolution (line pair))		
	Low Clutter SCR>10	Moderate Clutter 1.0 ≤ SCR ≤ 10	High Clutter SCR<1.0
0.80	0.75	1.30	5.00
0.50	0.50	1.00	2.50
0.30	0.30	0.75	2.00
0.10	0.15	0.35	1.40
0.02	0.05	0.10	1.00
0.00	0.00	0.00	0.00

Ⅴ. 결 론

본 논문에서는 적외선 영상탐색기의 성능을 결정하는 중요인자인 탐지확률과 영상 해상도와의 상관관계를 분석하여 탐색기 운용조건에서 탐지성능 확보를 위하여 요구되는 개발비용 분석에 활용하는 방식을 제안하였다. 이를 위하여 탐색기의 탐지성능(P_D)을 성능인자로 정의하고, 다양한 클러터 조건에서 성능 확보를 위하여 요구되는 영상 해상도(lp)를 비용인자로 정의하여 다각적인 분석을 수행하였다. 다양한 클러터 조건에서 요구되는 성능인자를 달성하기 위하여 적외선 영상탐색기 광학부 개발에 투입되어야 하는 최적의 비용인자를 도출하는 인자 별 상관관계 분석을 진행하였으며. 운용조건 별 성능인자와 비용인자 사이의 특성을 도출하여, 정규화된 운용조건 범주를 정의하였다. 본 논문에서 제안한 분석방식을 적용하여 적외선 영상탐색기의 운용조건에 최적화된 영상 해상도를 도출함으로써, 탐색기 개발 비용에 영향을 미치는 광학계 및 검출기 선정을 위한 소요비용 예측에 그 결과를 반영할 수 있다. 또한, 유도무기 개발 비용의 많은 비율을 차지하는 탐색기 비용 예측 관점에서 최적화된 구성품 선정을 통한 탐색기 개발 소요 비용 분석에 적용이 가능할 것으로 판단된다.

REFERENCES

[1] S. Kim, and J. Lee, “Scale invariant small target detection by optimizing signal-to-clutter ratio in heterogeneous background for infrared search and track,” *Pattern Recognition*, vol. 45, Issue 1, pp. 393-406, Jan. 2012.

[2] W. H. Licata, “Missile Seekers for Strike Warfare beyond the Year 2000,” Lecture on Technology for Future Precision Strike Missile Systems, Tbilisi, Georgia, 2001.

[3] P. L. Cross, and M. Mulford, “Realizing collaborative systems design for missile seekers by combining design margin analysis with multi-disciplinary optimization,” *Concurrent Engineering: Research and Applications*, vol. 23, Issue 3, pp. 226-235, 2015.

[4] Y. U. Lee, “A study on the Seeker Technology in Guided Weapon System,” *Journal of Information and Security*, vol. 8, no. 2, pp. 103-109, Jun. 2008.

[5] G. Katulka, D. Lyon, F. Fresconi, D. Petrick, and T.G Horwath, “Development and Characterization of Low Cost Seeker Technology for US Army Applications,” *26th US Army Science Conference*, Dec. 2008.

[6] D. A. Huckridge, and R. R. Ebert, “Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications VIII,” *Proc. of SPIE,* vol. 8185 81850A-1-10, Dec. 2017.

[7] R. Fraenkel, J. Haski, U. Mizrahi, L. Shkedy, I. Shtrichman, and E. Pinsky, “Cooled and uncooled infrared detectors for missile seekers,” *Proc. of SPIE*, vol. 9070, Infrared Technology and Applications XL, 90700P-1-10, Jun. 2014.

[8] G. M. Koretsky, M. S. Taylor, and J. F. Nicoll, “A Tutorial on Electro Optical/Infrared (EO/IR) Theory and Systems,” Institute for Defense Analyses, pp. 15-19, Jan. 2013.

[9] J. Hu, Z. Xu, and Q. Wan, “Non-uniformity correction of infrared focal plane array in point target surveillance systems,” *Infrared Physics & Technology*, vol. 66, pp. 56-69, Jul. 2014.

[10] T. A. Sjaardema, C. S. Smith, and G. C. Birch, “History and Evolution of the Johnson Criteria,” Sandia National Laboratories, SAND2015-6368, CA, U.S.A, Jul. 2015.

[11] S. Kim, and J. Lee, “Small infrared target detection by region-adaptive clutter rejection for sea-based infrared search and track,” *Sensors (Basel)*, vol. 14, no. 7, pp. 13210-42, Jul. 2014.

[12] M. R. Weathersby, and D. E. Schmieder, “An Experiment Quantifying The Effect Of Clutter On Target Detection,” *Proc. SPIE* 0510, Infrared Technology X, pp. 26-33, Jan. 1985.

김호용(Ho-Yong Kim)

한양대학교 정밀 기계공학 학사, Seoul, Korea (1989. 2)
연세대학교 경영학 석사, Seoul, Korea (2011. 2)
LIG넥스원(주) 탐색기/광학연구센터장 (2013. 1)
LIG넥스원(주) 감시정찰사업부장 (2017. 12)
현재 : LIG넥스원(주) 감시정찰1연구소장/상무
※관심분야 : 감시정찰, 유도무기, 탐색기, 무기체계

강석중(Seok-Joong Kang)

Indiana Univ. 전산학 학사, Indiana, U.S.A (1988. 5)
Indiana Univ. 전산학 석사, Indiana, U.S.A (1991. 5)
Univ.of California, Irvine, 전자전산공학 박사, California, U.S.A (2003. 2)
광운대학교 교수, Seoul, Korea (2012. 8)
현재 : 고려대학교 기술경영전문대학원, 국방기술 경영학과 교수
※관심분야 : 실시간체계, 소프트웨어공학, 획득체계

지호진(Ho-Jin Jhee)

동국대학교 전자공학 학사, Seoul, Korea (1997. 2)
Univ. of Florida 전기/컴퓨터공학 석사, Florida, U.S.A (2002. 5)
Univ. of Florida 전기/컴퓨터공학 박사, Florida, U.S.A (2009. 5)
LG 이노텍(주) 선임연구원 (2011. 12)
현재 : LIG넥스원(주)감시정찰1연구소 수석연구원
※관심분야 : 신호처리 알고리즘, 영상처리, 적외선 영상시스템