

소형무인항공기용

영상 이동표적표시(MTI) 기법과 동향

소형 무인항공기가 발달함에 따라 영상센서의 활용이 증가하였다. 특히 발전된 컴퓨팅 파워와 소형화된 영상센서의 발달로, 무겁고 값비싼 레이더 장비의 기술을 영상센서로 구현하는 연구가 활발히 진행 중이다. 영상 이동표적표시(Moving Target Indication, MTI) 기법은 이런 시대의 흐름에 따라 발달된 기술이며, 현재 미군의 소형무인항공기 RQ-11 Raven에 상용화되었다. 본 논문에서는 소형 무인항공기용 영상 MTI 기법의 원리를 설명하고, 영상 MTI에서 주로 사용하는 카메라 운동 보정 기법인 매개변수 / 비매개변수 방식의 영상정합의 접근법을 위주로 설명하였다. 또한 소형 무인항공기용 영상감시시스템 구현에서 가장 큰 문제점인 시차 / 항공기 진동 보정에 대한 진행 중인 연구논문도 소개하였다.

■ 윤승규, 강승은, 고상호*
(한국항공대학교)

I. 서론

이동표적표시(Moving Target Indication, 이하 MTI) 기법은 연속된 데이터로부터 변화를 감지하여 이동표적을 탐지/추적하는 필터(또는 프로세스, 시스템)를 말한다. MTI는 레이더신호처리 분야에서 유래하였고, 최근 영상신호처리에서도 관련연구가 진행 중이다. 사용하는 데이터의 형태에 따라 레이더 MTI 또는 영상 MTI라고 부른다.

영상 MTI 연구는 무인항공기의 수요증가와 함께 진행되었다. 무인항공기 개발의 선두국가인 미국과 이스라엘에서는 일찍이 소형무인항공기를 전력으로 사용해왔으며, 최근에는 소형무인항공기인 RQ-11 RAVEN을 실전 배치하였다. 주된 기능은 영상정보를 통한 다중 이동표적을 탐지 / 추적하는 것이며, 2인 이하의 인원으로도 구동이 가능하도록 설계되었다(그림 1). 2013년 기준, RQ-11 RAVEN은 10여개국에서 13,000대 이상의 수출실적을 가지고 있다[1]. 하지만, 이런 세계적인 수요에도 불



그림1. RQ-11 Raven의 MTI 시스템(1).

구하고 현재 국내 무인항공기 시장에서는 영상 MTI에 대해 적용된 기술이 없고, 관련 연구도 미미한 실정이다.

영상기반 정찰감시시스템이 각광받은 이유는 영상센서의 소형화와 컴퓨터의 계산능력 증대로 다양한 플랫폼에 손쉽게 운용이 가능하기 때문이다. 그림 2는 영상기반 정찰 및 감시시스템을 기능별로 도식화한 것이다. 관측데이터가 가공되어 사용자 인터페이스에 이르기까지 다양한 경로가 있으며 각 경로마다 정찰 및 감시시스템의 한 유형이 될 수 있다. 여기서 영상 MTI 시스템은 운동물체를 탐지함으로써 사전 관측정보가 없이도 물체 인식(recognition)과 추적 / 상태 추정까지 자동운용이 가능해지는 장점이 있다.

본 기고에서는 영상센서 기반 이동표적표시 기법의 과정을 설명하고, 접근 방식과 장단점에 대해 알아본다. 또한 소형무인항공기에서 영상처리를 위해 어떤 문제를 해결해야 하는지 살펴본다.

II. 영상 MTI 알고리즘의 기본구성

1. 영상 MTI 알고리즘의 기본구성

소형 무인항공기용 영상 MTI기법의 핵심은 영상내의 운동량 분석이다. 고정된 CCTV에서의 운동물체 탐지와는 다르게 무인항공기에 탑재된 영상센서는 움직이는 상태에서 영상데이터

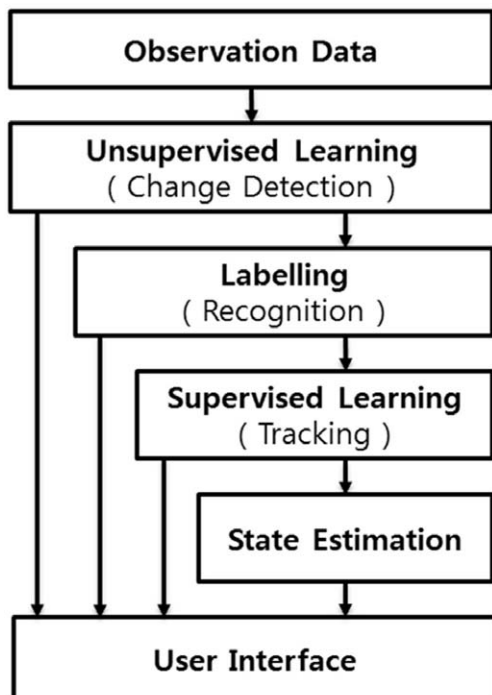


그림 2. 영상기반 정찰 / 감시시스템 기능별 블록선도.

를 획득하게 된다. 따라서 이 영상데이터는 카메라운동(camera motion)과 물체운동(object motion)에 대한 데이터를 모두 가지고 있다. 따라서 항공영상에서 물체 운동을 분리하려면, 카메라 운동의 효과를 제거해야 한다. 이것이 기본적인 MTI시스템의 운동물체 탐지원리이다.

카메라운동을 계산하기 위해, 영상데이터와 운동량을 수식으로 표현하면 다음과 같다. 연속된 영상에서 먼저 촬영된 영상 I_1 과 다음 영상 I_2 사이의 시간동안 카메라운동을 함수 $h(X)$ 로 표현하면, 영상 I_2 는 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$\hat{I}_2(X) = h(X)I_1(X)$$

만약 카메라운동만 존재한다면, 실제영상 I_2 와 추정된 영상 \hat{I}_2 는 동일하다. 하지만 두 영상의 오차가 발생하면, 그 위치 X_k 에는 카메라운동을 제외한 다른 운동이 존재함을 뜻한다. 바로 그 영역이 '독립된 물체운동' 이고, 영상 MTI 시스템은 영상을 이용하여 해당영역을 찾는 것이 목적이다.

$$I_2(X_k) - \hat{I}_2(X) = \begin{cases} 0, & \text{좌표 } X_k \text{ 물체운동 없음} \\ e \neq 0, & \text{좌표 } X_k \text{ 물체운동 존재} \end{cases}$$

이처럼 물체운동을 명확히 탐지하려면, 카메라 운동 함수 $h(X)$ 의 정확한 추정이 필요하다. 정확한 변환함수를 통해 두 이미지를 일치시킬 수 있는데, 이와 같은 기법을 영상정합(image registration)이라 부른다. 영상정합의 정의는 서로 다른 좌표계의 영상을 하나의 좌표계에 통일하는 것으로 영상 안정화에 많이 사용된다.

무인항공기용 영상 MTI가 영상정합이 주의해야 할 점은 시차(parallax)이다. 시차는 카메라의 3차원 운동을 2차원 영상으로 구현하지 못하여 깊이 정보가 손실되어 발생한 오차이다. 특히 소형 무인항공기가 촬영한 저고도 영상에서는 고층 건물, 나무 등의 지형 높이에 영향을 받으므로, 시차가 빈번히 발생한다. 참고문헌[2]에서는 카메라 운동과 시차, 그리고 보정에 대한 광범위한 연구를 정리하였다.

영상정합은 크게 '매개변수(parameter) 방식', '비매개변수(non-parameter)' 두 가지 접근법을 가지고 있다. 두 방식 모두 통계학적 분석에 기반을 두고 있으며, 매개변수 방식은 컴퓨터비전분야에서, 비매개변수 방식은 레이더분야에서 발전한 방법이다. 영상정합은 영상 MTI 기법의 정확도에 중요한 부분이기 때문에, 다음 장에서 각 방식에 대한 간략한 소개와 이를 이용한 영상 MTI 논문을 따로 다루도록 하겠다.

Ⅲ. 카메라 운동 보정 접근법

1. 매개변수(parametric) 방식 영상정합 접근법

매개변수 방식은 유한한 개수의 매개변수로 함수를 모델링하여, 주어진 매개변수를 추정하는 접근법이다. 영상에서는 카메라운동을 모델링하여, 카메라운동을 추정한다.

이 방식은 컴퓨터비전 분야 중 스테레오 비전(stereo vision) 연구 분야에서 발전되었다[3]. 두 카메라에서 얻어진 영상을 분석하여, 카메라의 상대위치를 구하였다. 이를 단일 카메라에 응용하여 연속된 영상을 분석하면, 카메라의 운동도 추정할 수 있다.

그림 3은 매개변수 방식의 영상정합을 설명한다. 다른 시각에서 찍은 두 장의 원본사진에서 특징점을 찾아(그림 3 상단), 서로 겹치는 특징점을 일치시키기 위해 라벨링을 한다(그림 3 중단). 그리고 이 일치된 특징점들의 변환함수를 계산(그림 3 하단 좌측)하여, 동일 좌표계에서 두 이미지를 연결시킨다면 두 이미지가 일치하는 결과를 얻을 수 있다(그림 3 하단 우측).

매개변수 방식을 통한 카메라 운동 추정 접근법을 간략히 나타내었다(그림 4). 영상좌표계 (x, y) 위의 한 점 p 가 카메라의 직선운동 $V = [V_x, V_y, V_z]$ 과 회전운동 $\Omega = [\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z]$ 에 의해 운동을 한다면, 점 p 의 속도벡터 $V_p = [u, v]$ 는 다음의 식으로 나타낼 수 있다[5].

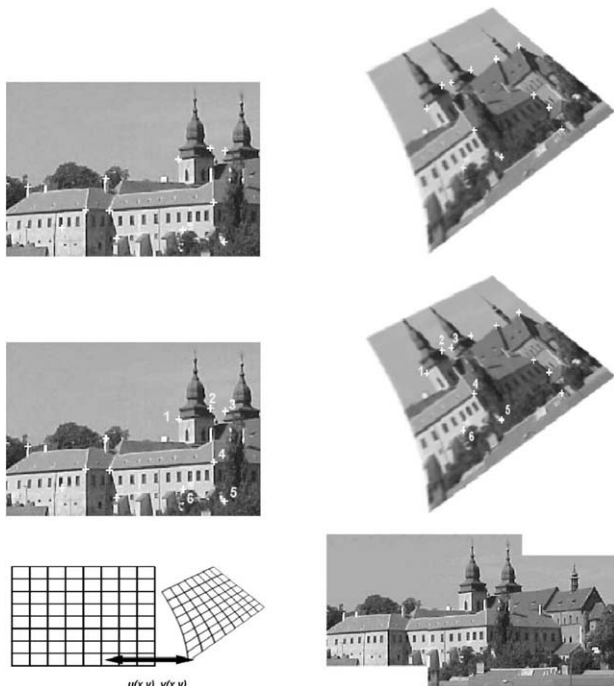


그림 3. 매개변수방식 영상정합 순서(4).

$$u = x \frac{V_z}{Z} - \frac{V_x}{Z} + xy\Omega_x - (1+x^2)\Omega_y + y\Omega_z,$$

$$v = y \frac{V_z}{Z} - \frac{V_y}{Z} + (1+y^2)\Omega_x - xy\Omega_y - x\Omega_z.$$

위의 식을 보면 평행이동과 회전에 대한 6-자유도가 모두 포함되어있는 것을 알 수 있다. 이것은 이미지의 여러 점들로부터 카메라의 움직임을 추정할 수 있다는 것을 나타낸다. 또한 위의 식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$u(x, y) = a_1 + a_2x + a_3y + a_7x^2 + a_8xy$$

$$v(x, y) = a_4 + a_5x + a_6y + a_7xy + a_8y^2$$

현재 이미지와 이전 이미지를 비교하여 각 위치의 점이 어디로 이동하였는지 찾아내면, 즉 u 와 v 를 구하면, a_1, \dots, a_8 를 계산함으로써 카메라의 움직임에 대한 변수 (Ω, V) 를 추정할 수 있다.

이동량 $V_p = [u, v]$ 를 구하기 위해, 간소화 모델은 평행이동(translation), 아핀(affine), 이동평면표면(moving planar surface) 모델[7]을 골자로 발전해왔다. 특히 간소화 모델인 평행이동 모델과 아핀 모델을 주로 사용하나, 이러한 가정은 저고도 비행인 소형무인항공기에는 적합하지 못하다. 그렇기 때문에 간소화 없이 그대로 사용하는 이동평면표면 모델을 사용한다. 관계식의 비선형성으로 인해 계산은 복잡하지만, 항범정보까지 획득할 수 있어 소형무인항공기에 적용가능성이 높은 모델이라 할 수 있다.

매개변수방식을 사용한 영상 MTI 시스템은 P.J.Burt[8]에서 첫선을 보였다. 매개변수 방식으로 카메라 운동을 모델링을 한다

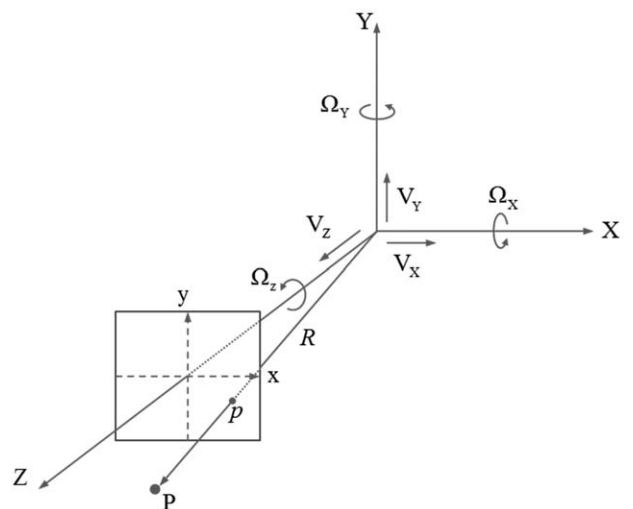


그림 4. 카메라 / 영상의 공간 좌표계(6).

음, 차영상을 통하여 이동물체를 검출하였다. 하지만 이 방법은 시차에 취약하여 Garbis Salgian[9]은 각 픽셀당 광류(Optical flow)을 이용해 단점을 보완하였다. 광류를 통해 전체 이미지의 이동 방향을 확인하고, 주된 이동방향과 다른 픽셀은 운동이 존재한다고 가정하였다. 하지만 이 기법은 카메라와 물체의 이동방향이 같으면 물체의 운동을 인지하지 못하는 단점을 가지고 있다. Chang Yuan[10]은 위의 단점을 보완하고자, 여러 장의 연속된 이미지를 이용하여 MTI 시스템을 구현했다. Ronald Jones[11]는 카메라 운동 대신 각 이미지에서 배경을 모델링하여, 연속된 이미지에서 배경에 해당하는 부분을 제거하여 물체 운동을 감지하였다.

2. 비매개변수(non-parametric) 방식 영상정합 접근법

비매개변수 방식은 매개변수 방식과 다르게 오로지 주어진 데이터를 통해 모델링을 완성하는 방식이다. 함수를 특정 모델로 가정하지 않고, 매개변수의 개수를 무한대로 가정하여 오차가 가장 적은 모델을 만드는 방식이다.

이 방식은 초기 레이더분야에서 발전하였다. 도플러 효과를 이용하여 운동물체를 찾았던 초기 1차원 레이더 방식에서 다른 위치에 있는 센서의 보정과 잡음을 줄이기 위해 사용하였다[12, 13]. SAR 레이더가 발명되면서 2차원 데이터에 도입되었는데, 매개변수 방식으로 표현되지 않는 국소의 변화에도 민감하게 반응하는 것이 장점이다.

그림 5는 비매개변수 방식의 알고리즘 순서도이다. 배경과 물체가 함께 찍힌 연속된 영상 I_1, I_2 는 카메라 운동과 함께 물체

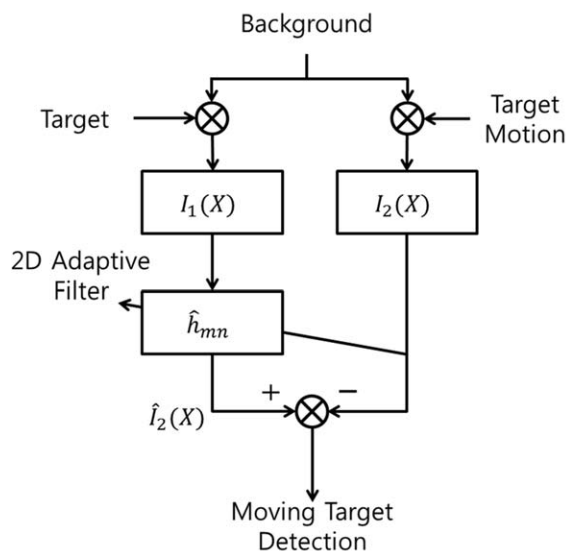


그림 5. 비매개변수 방식 영상정합의 신호모델.

의 운동도 포함하고 있다. 그래서 최소자승법 등을 이용하여 두 영상데이터의 오차를 최소화 하는 2차원 필터를 설계한다. 그렇게 추정된 \hat{I}_2 에도 실제 영상 I_2 와 차이가 발생하게 된다면, 이를 운동물체라고 판단 할 수 있다.

비매개변수 방식의 영상정합 접근법 중 가장 널리 사용된 방식은 신호 부공간 처리(Signal Subspace Processing, 이하 SSP)이다 [14]. SSP는 데이터를 k 등분하여 각 영역별로 오차를 최소화하는 카메라 운동 함수를 구하는 방식인데, 여기서 k 등분한 영역을 최대한 작게한다면, 카메라 함수 $h(X)$ 를 필터상수 h_{mn} 로 변경하여 구할 수 있으며(그림 6), 수식은 다음과 같다.

$$\hat{I}_2^{(k)}(X_k) = \sum_{n,m} h_{mn}^{(k)} I_1^{(k)}(X_k - s(m,n))$$

여기에서, X_k 는 k 번째 블록 안의 픽셀 좌표를 나타내고, $s(m,n)$ 는 탐색할 윈도우 크기이다. 이렇게 영역별로 추정된 영상을 통합하여 카메라운동에 의한 효과를 상쇄시키고 난 다음 발생하는 오차를 찾음으로써 물체 운동이 존재하는 영역을 찾을 수 있다.

비매개변수 방식의 영상정합은 비선형적인 카메라 운동과 국소의 변화에도 대응할 수 있고, 시차의 복잡한 모델링을 구현하지 않는다는 장점이 있다. 또한 SAR 레이더의 2차원 영상데이터 뿐만 아니라 소나센서, 레이더 등의 1차원 데이터 처리에서도 널리 사용되었다.

초기 비매개변수 방식 변환함수에 대한 동향조사논문은 C. A Glasbey[15]에 정리되어있다. 그 중 M. Soumekh[16]은 2차원 영상데이터에 비매개변수 방식의 영상정합을 제시하고, 여러 분야의 확장 가능성을 알렸다. 이는 90년도 후반 미공군에서 진행되었던 Multi-channel Airborne Radar Measurement (MCARM) 프로그램[17]에서 SAR MTI의 구현을 위해 이 접근법을 사용했다. Lance M. Kaplan[18]는 필터상수 h_{mn} 를 선형필터인 위너필터설계, 영상 MTI를 구현하여 매개변수 방식의 영상정합과의 성능 비교를 하였고, Andrew J. patti[19]은 칼만필터를 이용하여 영상의 운동보정을 실행하였다. 또한 현재 본 저자는 비매개변수 방

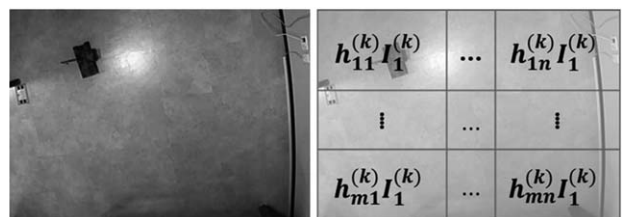


그림 6. SSP의 영상예제.

식의 영상정합을 이용한 영상 MTI 시스템을 구현 중이며, 자세한 기술적 서술은 참고문헌[20]에 서술하였다.

IV. 영상 MTI 연구 방향

영상 MTI 시스템은 영상기반 통합정찰 / 감시시스템이다. 따라서 단일 알고리즘이 아닌 상황별, 기능별로 다양한 알고리즘을 통합하여 구성된다. 2장에서 설명했던 카메라 운동효과를 제거하고, 운동물체를 탐지하는 MTI 시스템은 기본적인 개념을 소개한 것이다. 기본 MTI 시스템에 추가적으로 다양한 알고리즘을 더해 효과를 증폭시킬 수 있다. 그림 7은 MTI 시스템의 구성을 도표화한 것이다. 이 중에서도 소형무인항공기에 특별히 적용되는 연구방향을 설명하고자 한다.

첫째, 다양한 상황별 영상 전처리 과정으로 정확한 이미지를 얻는 연구가 진행 중이다. 보통 영상 전처리 과정은 컴퓨터비전분야에서 활발히 진행되고 있는 주제 중 하나이다. 좁게는

카메라 렌즈의 왜곡보정에서 시작하여 크게는 무인항공기의 진동에 따른 영상진동보정[21] 등의 연구가 진행되고 있다. 또한 소형무인항공기의 야외환경에서 적응성을 높이기 위해, 조도변화에 따른 영상보정[22]과 파도나 나뭇잎의 흔들림으로 탐지 성능저하요소를 분류하는 환경변화 보정 등의 연구가 진행 중이다.

둘째, 카메라 운동 추정에 따른 항법정보 획득이다. 카메라 운동 모델링을 통해 카메라의 자세와 운동상태를 알 수 있기 때문에 위성항법의 대안으로 고려되고 있으며, 이런 방식으로 얻는 항법정보를 특별히 *Odometry*라 한다[23]. 또한 영상센서와 다른 항법센서 간의 퓨전센서 연구[24], 이를 통해 SLAM 연구도 활발히 진행 중이다.

마지막으로, 무인항공기에 탑재될 연산프로세서를 이용한 연산알고리즘을 구현하는 연구이다. 실시간 영상처리는 매우 큰 연산량을 필요로 한다. 따라서 소형무인항공기나 근거리엔 연결된 휴대용 컴퓨터의 연산능력에 맞게 계산량을 줄이는 연

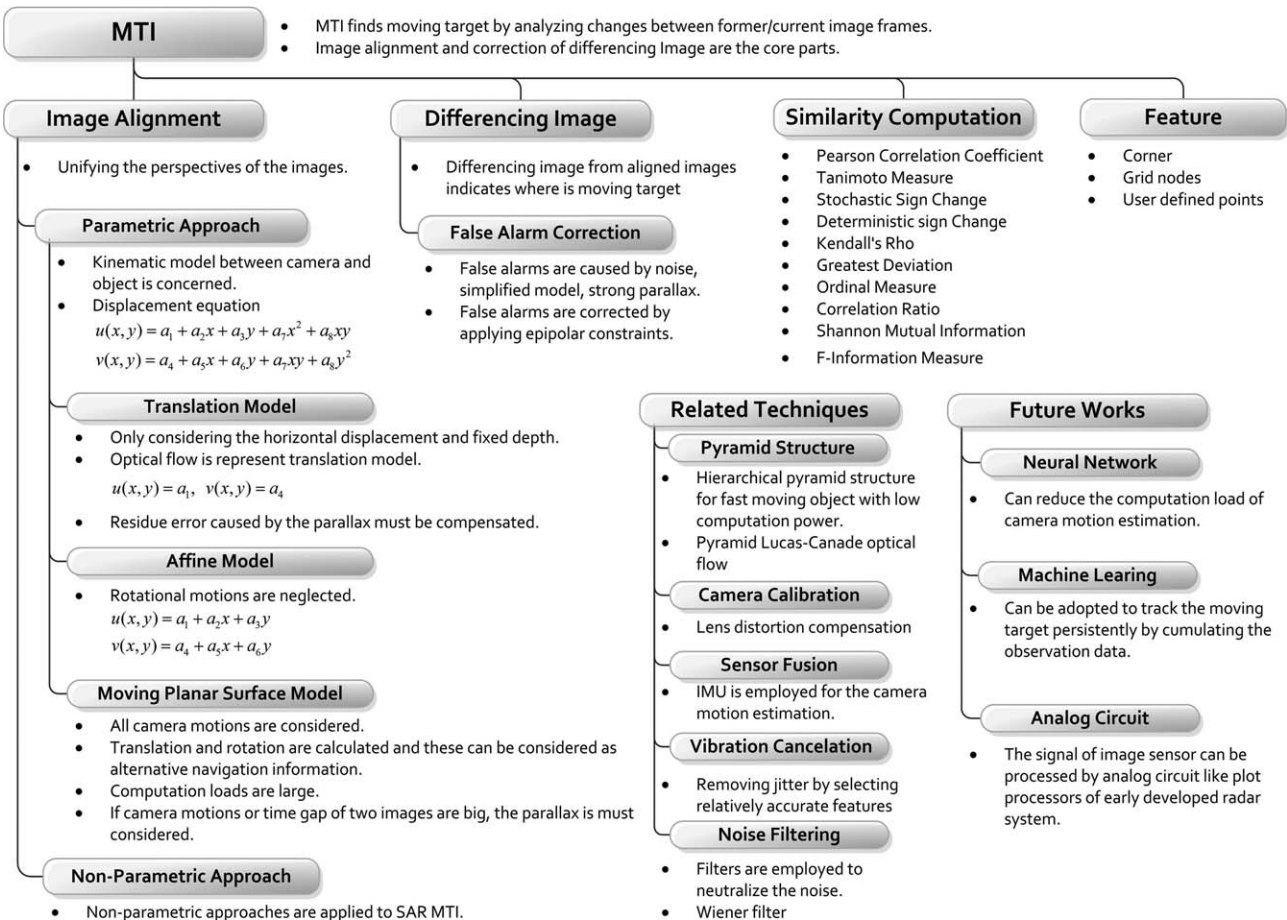


그림 7. 영상 MTI 전체 구성도 (2).

구를 진행 중이다. 현재까지의 가장 대표적인 해법으로는 다해상도 영상처리로 영상피라미드 구조[25]와 웨이블릿[26]이 있다. 다해상도 영상처리는 연산량 감소 외에도, 고속 움직임 탐지란 또다른 장점을 지니고 있다. 고속 움직임을 탐지하기 위해서는 윈도우를 이미지 프레임 전체에 걸쳐 이동하며 일치도를 계산해야하는데, 이를 저해상도부터 진행하며 영상전반에 걸쳐 계산을 진행하는 방식으로 이루어진다.

V. 결론

본 기고에서는 기존에 연구된 영상 MTI 알고리즘에 대한 방법 및 연구 진행방향에 대해 알아보았다. 영상 MTI는 통합시스템으로 각각의 접근 방법들은 고유의 장단점이 있으며, 상황에 맞는 구현이 중요하다. 이를 통해 영상기반 감시시스템 구현은 물론이고, 미래 전장 자동화 로봇이나 미래자동차 등에 연구가 크게 도움이 될 수 있다. 특히 무인항공기가 상용화되는 가까운 미래에 활용 가능성이 높다. 하지만 정밀한 구현을 위해선 해결해야 할 문제들이 많기 때문에 앞으로도 다방면에서의 연구가 필요하다.

참고문헌

- [1] http://www.avinc.com/uas/small_uas/raven
- [2] M. Irani and P. Anandan, "A unified approach to moving object detection 2d and 3d scenes," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 20, no. 6, pp. 577-589, 1988.
- [3] Andrew Blake, Alan Yuille, *Active vision*, Cambridge, MITI, 1992
- [4] B. Zitova, and J. Flusser. "Image registration methods: a survey." *Image and vision computing* 21.11, pp, 977-1000, 2003.
- [5] Longuet-Higgins, H.C., Prazdnt, K. "The interpretation of a moving retinal image," *Proc. Royal Soc. London, Series B*, vol.208, pp.385-397, 1980.
- [6] 윤승규, 강승은, 고상호, "소형무인항공기용 이동표적표시 기법에 대한 기술동향 분석 : 매개변수 방식," 한국항공우주학회지, 제 42권 제 7호, pp. 576-585, 2014,
- [7] M.Irani, B. Rousso, S. Peleg, "Computing occluding and transparent motions," *Int'l J. Computer Bision*, bol. 12, pp. 5-16, Feb. 1994.
- [8] P. J. Burt, J. R. Bergen, R. Hingorani, R. Kolczynski, W. A. Lee, A. Leung, and H. Shvayster, "Object tracking with a moving camera," *Proc. of Workshop on Visual Motion, IEEE*, pp. 2-12, Mar. 1989.
- [9] G. Salgian, J. Bergen, S. Samarasekera, and R. Kumar, "Moving target indication from a moving camera in the presence of strong parallax," *Proc. of the 25th Army Science Conference*, Orlando, Florida, USA, 2006.
- [10] C. Yuan, G. Medioni, J. Kang, and I. Cohen, "Detecting motion regions in the presence of a strong parallax from a moving camera by multiview geometric constraints," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, pp. 1627-1641, Sep. 2007.
- [11] R. Jones, D. M. Booth, and N. J. Redding, "Video moving target indication in the analysts' detection support system," *Defence Science and Technology Organisation Edinburgh (Australia) Intelligence Surveillance and Reconnaissance DIV*, No. DSTO-RR-0306, 2006.
- [12] B. Cantrell, "A short-pulse area MTI," *NRL Report* 8162, September 1977
- [13] M. Hartless and J. Barry, "Shipboard infrared search and track," *Final Report of Contract N66001-94-C-6001, NCCOSC*, December 1994.
- [14] M. Soumekh, "Signal subspace fusion of uncalibrated sensors with application in SAR, diagnostic medicine and video processing." *Image Processing, 1997. Proceedings., International Conference on*, Vol. 3, pp. 280-283, 1997.
- [15] C. A. Glasbey, and K. V. Mardia, "A review of image-warping methods," *Journal of Applied Statistics*, vol. 25, no. 2, pp. 155-171, 1998.
- [16] M. Soumekh, "Signal subspace fusion of uncalibrated sensors with application in SAR and diagnostic medicine." *Image Processing, IEEE Transactions on* 8. 1, pp. 127-137, 1999.
- [17] M. Soumekh and H. Braham, "SAR-MTI processing of multi-channel airborne radar measurement (MCARM) data." *Radar Conference, Proceedings of the IEEE*, 2002.
- [18] L. M. Kaplan and N. M. Nasrabadi, "Block Wiener-based image registration for moving target indication," *Image and Vision Computing*, vol. 27, no. 6, pp. 694-703, 2009.
- [19] J. Andrew, A. Patti, Murat Tekalp, and M. Ibrahim Sezan. "A new motion-compensated reduced-order model Kalman filter for space-

varying restoration of progressive and interlaced video.” *Image Processing*, IEEE Transactions on 7.4, pp. 543-554, 1998.

- [20] 윤승규, 강승은, 고상호, “소형 무인항공기용 영상센서 기반 이동표적표시 기법,” *로봇·제어·시스템학회 논문지*, 제 20권, 제 12호, pp. 1189-1195, 2014
- [21] A. C. Shastry, R. A. Schowengerdt, “Airborne video registration and traffic-flow parameter estimation,” *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, 6(4), 391-405. 2005.
- [22] S. G. Yun, S. Lee, and S. Ko, “A moving target indication algorithm adaptive to illuminance variation using the histogram matching,” *2014 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology*, Sep. 2014, Shanghai, China.
- [23] D. Nister, O. Naroditsky, J. Bergen, “Visual odometry for ground vehicle applications,” *Journal of Field Robotics*, 23(1), 2006.
- [24] Q. Yang, C. Wang, Y. Gao, H. Qu, E. Y. Chang, “Inertial sensors aided image alignment and stitching for panorama on mobile phones,” *In Proceedings of the 1st international workshop on Mobile location-based service*, pp. 21-30. ACM. 2011.
- [25] P. J. Burt and E. H. Adelson, “The laplacian pyramid as a compact image code,” *IEEE Transanction on Communication*, vol. COM-31, no. 4, pp. 532-540, 1983.
- [26] S. Hongli, and B. Hu, “Image registration using a new scheme of wavelet decomposition,” *Proc. of Instrumenta- tion and Measurement Technology Conference*, IEEE, pp. 235-239, 2008.

저 자 약 력



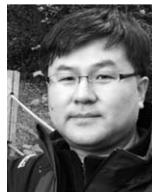
윤 승 규

- 2013년 한국항공대학교 항공우주공학심화(공학사).
- 2013년~현재 동 대학원 항공우주 및 기계공학과 석사과정.
- 관심분야 : 영상처리, 신호처리, 동역학 및 제어.



강 승 은

- 2012년 한국항공대학교 항공우주공학과(학사).
- 2014년 동 대학원 항공우주 및 기계공학과(석사).
- 2014년~현재 동 대학원 박사과정.
- 관심분야 : 무인항공기 협동기동, 시스템식별, 영상처리.



고 상 호

- 한국항공대 항공기계공학과.
- KAIST 항공우주공학(석사).
- 미국 University of California, San Diego 기계항공공학과(공학박사).
- 호주 University of Melbourne 전기전자공학과 Research Fellow 재직.
- 2008년~현재 한국항공대 항공우주및기계공학과 부교수로 재직 중.
- 관심분야 : 시스템 식별, 시스템 고장진단 및 손상예지 및 항공우주 시스템 제어.