

BRDF를 고려한 적외선 신호의 반사 성분 고속 연산기법에 관한 연구

김동건¹⁾ · 한국일¹⁾ · 최준혁¹⁾ · 최순호²⁾ · 김태국^{*,1)}

¹⁾ 중앙대학교 기계공학부

²⁾ 한화시스템(주) 레이더-PGM 연구소

A Study on a High Speed Computational Scheme for the Reflected IR Signal Component by Considering the BRDF

Dong-Geon Kim¹⁾ · Kuk-Il Han¹⁾ · Jun-Hyuk Choi¹⁾ · Soon-Ho Choi²⁾ · Tae-Kuk Kim^{*,1)}

¹⁾ Department of Mechanical Engineering, Chung-Ang University, Korea

²⁾ Radar-PGM R&D Center, Hanwha Systems Co. Ltd., Korea

(Received 25 November 2015 / Revised 11 October 2016 / Accepted 6 January 2017)

ABSTRACT

This paper is a part of developing a computer code that can be used to generate synthetic IR images by calculating the outgoing infrared signal from objects. To predict the reflected component that is a part of the outgoing IR signal, such as those components reflected from the target surface by the solar and sky irradiations, it is necessary to calculate the complicated BRDF values for considering the directional surface reflection characteristics. Since the calculation of reflectance using the BRDF requires a large amount of computation time due to the hemispherical integral term, it is frequently restricted in applying for a real-time prediction of IR signal. In this research, the simplified method for calculating IR reflected component has been proposed by replacing the integral terms into two parts, a directionally uniform component and a step function representing the specular component, to reduce computation time. The proposed method is proved to result in very fast calculation of the BRDF (up to 600 times faster calculations) for most of the surfaces with minimal loss of the accuracy.

Key Words : IR signal(적외선 신호), BRDF(양방향 반사 분포 함수), Real-time prediction(실시간 예측)

1. 서론

지구상에 존재하는 모든 물체는 복사에너지를 방출하고 적외선 파장대역의 센서는 이러한 복사에너지를 감지하여 물체를 인식 혹은 식별한다. 이러한 탐지 형태는 방출한 전파를 받음으로써 물체를 인식하는 레이더와는 달리 상대방이 피탐지 여부를 인지하기 어려운

* Corresponding author, E-mail: kimtk@cau.ac.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

수동적인 특성을 지닌다. 이러한 특성으로 인해 적외선 신호에 대한 군사적인 목적으로의 응용이 활발하게 이루어지고 있다. 대표적인 군사 응용 분야로는 적외선 센서를 장착한 유도 미사일 개발 및 이와 대비되는 개념의 적외선 스텔스 기술에 대한 연구가 있다.

적외선 신호 응용 연구의 선행 단계는 물체의 적외선 신호를 정확히 분석하는데 있다. 적외선 신호를 분석하는 가장 정확한 방법은 배경 안에 물체를 놓고 적외선 센서를 이용하여 실측된 데이터를 얻는 것이다. 그러나 다양한 환경 인자에 민감하게 변화하는 적외선 신호를 환경 변화에 따라 지속적으로 측정하는 것은 경제적으로나 시간적으로 불가능에 가까운 일이다. 이러한 문제를 보완하기 위해 적외선 신호 예측 소프트웨어를 이용한 적외선 신호 분석이 대두되고 있으며 이미 선진국에서는 다양한 목적과 방식의 소프트웨어를 개발, 보유하고 있다^[1,2].

적외선 신호를 예측하기 위해서는 센서에 입사되는 적외선 신호를 성분 별로 계산해야 한다. 그 중 외부의 열원으로부터 방출된 에너지가 물체 표면에 반사되어 센서로 입사되는 성분을 계산하기 위해서는 물체 표면의 반사율을 이용한다. 물체의 반사율은 파장대역, 입사각, 반사각에 따라 다르게 나타나며 이러한 물체 표면의 방향별 반사특성을 고려하기 위해 BRDF 함수를 이용한다^[3]. 이 과정에서 적분 항 계산에 따른 계산 시간의 증가가 불가피하며, 이는 운용 중 활용을 주목적으로 하는 실시간 적외선 신호 예측 방법에는 적용하기 어려운 문제가 있다. 이러한 이유로 실시간 적외선 신호 예측 방법에는 물체의 표면의 반사율이 방향별로 일정하게 나타난다고 가정하거나 정밀한 예측을 요구하는 경우에만 방향별 반사특성을 고려하였다.

본 연구는 실시간 합성 적외선 영상 생성 소프트웨어 개발의 일환으로 수행되었으며, 본 논문에서는 실시간 적외선 신호 예측 방법에 적용 가능한 수준의 계산 속도를 확보하면서도 방향별로 다르게 나타나는 물체 표면의 반사 특성을 반영하는 방법에 대한 연구 결과를 나타내었다.

2. 이론적 배경

적외선 센서로 입사되는 적외선 신호 성분은 Fig. 1과 같이 구분할 수 있다. 우선 적외선 신호에 가장 큰 영향을 미치는 물체의 표면온도에 기인하여 발생하는

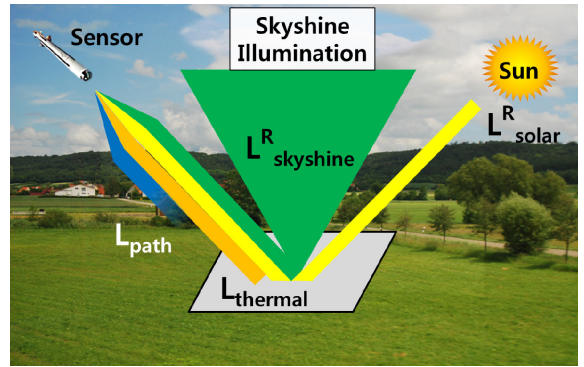


Fig. 1. Radiance received by a remote sensor

자체 방출 성분($L_{thermal}$), 두 번째로는 외부 열원(태양 혹은 대기 복사)으로부터 방출된 복사에너지가 물체 표면에서 반사되어 센서에 입사되는 반사 성분(L_{solar}^R , $L_{skyshine}^R$), 마지막으로 물체와 관계없이 대기에서 산란되어 센서로 입사되는 성분(L_{path})이 있다. 센서에 입사되는 적외선 신호(L_{sensor})는 각 성분에 대한 총합으로 나타낼 수 있으며 아래의 수식과 같이 표현된다^[4].

$$L_{sensor} = L_{thermal} + L_{solar}^R + L_{skyshine}^R + L_{path} \quad (1)$$

2.1 적외선 신호의 반사 성분

외부 열원(태양 및 대기)의 복사에너지가 물체 표면에서 반사된 후 센서로 입사되는 적외선 신호의 반사 성분 계산을 목적으로 하고 있으며, 아래와 같은 수식을 이용해 계산할 수 있다.

$$L_{solar}^R = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau(\lambda) \rho(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) I_{solar}(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

$$L_{skyshine}^R = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau(\lambda) \rho(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) I_{skyshine}(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

여기서 $\tau(\lambda)$ 는 물체와 센서 사이의 파장별 대기투과도, $\rho(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda)$ 는 물체 표면의 특정파장에서의 방향별 반사율(spectral-directional reflectivity)을 나타내며 입사 및 반사되는 천정각(θ)과 방위각(ϕ), 그리고 파장(λ)에 따라 다른 값을 갖는다. $I_{solar}(\lambda)$, $I_{skyshine}(\lambda)$ 은 각각 물체 표면으로 입사되는 파장별 태양 및 대기의 복사에너지를 뜻한다. $I_{solar}(\lambda)$ 은 다음과 같이 직사

성분 및 확산성분의 합으로 표현할 수 있다.

$$I_{solar}(\lambda) = I_{direct}(\lambda) + I_{diffuse}(\lambda) \quad (4)$$

여기서, $I_{direct}(\lambda)$ 와 $I_{diffuse}(\lambda)$ 은

$$I_{direct}(\lambda) = I_{direct,m}(\lambda) \cos \theta_s \quad (5)$$

$$I_{diffuse}(\lambda) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{diffuse,m}(\lambda, \theta, \phi) d\theta d\phi \quad (6)$$

으로 나타낸다. θ_s 는 태양과 물체 표면의 수직 벡터 사이의 값을 나타낸다. $I_{direct,m}(\lambda)$ 와 $I_{diffuse,m}(\lambda)$ 은 측정장비를 이용해 직접 획득하거나 대기모델링 코드인 MODTRAN을 이용해 계산할 수 있다.

2.2 BRDF와 반사를 계산

2.2.1 기존의 Sandford-Robertson 모델

BRDF(Bidirectional Reflectance Distribution Function)는 입사되는 복사에너지와 물체 표면에서 반사되는 복사에너지의 비율로써 정의할 수 있다. BRDF 모델은 가시광 영상렌더링에 주로 사용되며 다양한 BRDF 모델이 존재한다. 본 논문에서는 BRDF를 계산하기 위해 적외선 신호의 반사성분 계산에 주로 쓰이는 모델인 Sandford-Robertson(S-R) 모델을 고려하였다^[5]. S-R 모델을 이용하기 위해서는 다음과 같은 4가지의 표면 재질 정보, Diffuse spectral reflectance($\rho_d(\lambda)$), Spectral emissivity($\varepsilon(\lambda)$), Fresnel coefficient(b), Width of specular lobe(e)가 필요하다. 최종적인 BRDF ($f_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda)$)는 난반사 성분($f_d(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda)$)과

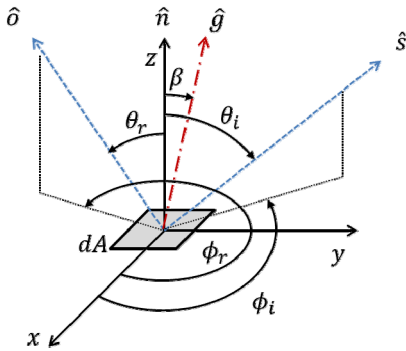


Fig. 2. Hemispherical geometry of the BRDF

정반사 성분($f_s(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda)$)의 합으로 나타내어진다.

Fig. 2에 BRDF의 기하학적 표기를 자세히 나타내었으며, \hat{o} 는 센서의 방향벡터, \hat{s} 는 외부열원의 방향벡터, \hat{n} 은 물체의 법선벡터, \hat{g} 는 \hat{o} 와 \hat{s} 사이의 중간 위치의 벡터, β 는 \hat{g} 와 \hat{n} 의 사이각을 의미한다. θ_i 및 ϕ_i 는 외부열원의 천정각 및 방위각, θ_r 및 ϕ_r 는 센서의 천정각 및 방위각을 의미한다.

$$f_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) = f_d(\theta_i, \theta_r, \lambda) + f_s(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \quad (7)$$

난반사 성분은 각 방향으로 고르게 반사되어 나가는 성분을 뜻하며 다음과 같이 나타낸다.

$$f_d(\theta_i, \theta_r, \lambda) = \frac{\rho_d(\lambda)}{\pi} \frac{g(\theta_i, b)g(\theta_r, b)}{G^2(b)} \quad (8)$$

여기서,

$$g(\theta, b) = \frac{1}{1 + b^2 \tan^2 \theta}$$

$$G(b) = \frac{1}{1 - b^2} \left[1 + \frac{b^2}{1 - b^2} \log(b^2) \right]$$

$$\theta = \theta_i \text{ or } \theta_r$$

로 정의된다. 정반사 성분은 표면 특성에 따라 방향성을 가지는 반사 성분을 뜻하며 다음과 같은 수식으로 나타낸다.

$$f_s(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) = \frac{\rho_s(\theta_i, \lambda)}{4\pi} \frac{h(\beta)}{H(\theta_i, e) \cos \theta_r} \quad (9)$$

여기서,

$$\rho_s(\lambda, \theta_i) = 1 - \rho_d(\lambda, \theta_i) - \varepsilon(\lambda, \theta_i)$$

$$\varepsilon(\lambda, \theta_i) = \varepsilon(\lambda) \frac{g(\theta_i)}{G(b)}$$

$$\rho_d(\lambda, \theta_i) = \rho_d(\lambda) \frac{g(\theta_i)}{G(b)}$$

$$h(\beta) = (e^2 \cos^2 \beta + \sin^2 \beta)^{-2}$$

$$H(\theta_i, e) = \frac{1}{2e^2} \left\{ (1 - e^2) \cos \theta_i + \frac{2e^2 + (1 - e^2)^2 \cos^2 \theta_i}{\sqrt{(1 - e^2)^2 \cos^2 \theta_i + 4e^2}} \right\}$$

로 나타낸다. 표면의 반사율은 임의의 방향으로 입사되는 에너지가 표면에서 흡수 및 굴절되지 않고 임의의 반사각으로 나가는 비율을 뜻한다. BRDF 값은 0부터 무한대의 값을 가지며 이를 반사율 값으로 나타내기 위해서는 아래와 같은 적분 식을 이용한다⁶⁾.

$$\rho(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) = \frac{f_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda)}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} f_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \cos\theta_r \sin\theta_r d\theta_r d\phi_r} \quad (10)$$

이와 같은 적분 식을 이용한 반사율의 계산은 방위각, 고도각의 적분 간격에 따라 정확도가 다른 값이 나타난다, 조밀한 적분 간격으로 계산할수록 정확한 값을 얻을 수 있지만 그에 따라 계산 소요시간은 증가하게 된다.

2.2.2 반사율의 근사적인 고속화 계산 방법

본 연구에서는 실시간 적외선 신호 예측에 적합한 수준의 계산 속도를 확보하면서도 물체 표면의 방향별 반사 특성을 반영하기 위해 상기 식 (10)에 나타난 적분 계산이 포함된 계산을 각도에 따른 선형 함수로 단순화하여 반사율을 계산하는 방법을 제안하고자 한다. 이를 위하여 먼저 아래와 같이 반사율을 난반사 성분과 정반사 성분으로 나누어 표현한다.

$$\rho(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) = \rho_{d,M}(\lambda) + \rho_{s,M}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \quad (11)$$

$\rho_{d,M}(\lambda)$ 는 전 방향으로 일정한 반사율을 갖는 난반사 성분을 의미하며, Phong 모델과 같은 일반적인 BRDF 모델에서는 수식적으로 단순하게 난반사율을 π 로 나누어 사용하게 된다⁸⁾. $\rho_{s,M}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda)$ 는 파장별, 입사각, 반사각에 따라 다르게 나타나는 정반사 성분

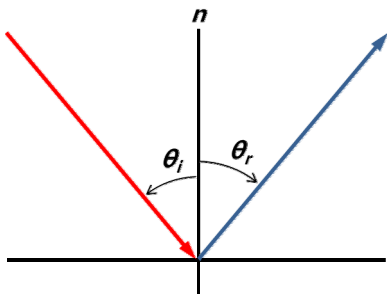


Fig. 3. Snell's law

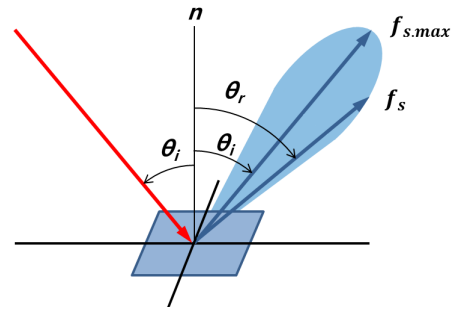


Fig. 4. Components of the BRDF

을 뜻한다. Fig. 3과 같이 Snell의 법칙에 의하면 입사되는 천정각과 반사되는 천정각이 동일하고 방위각이 180도가 차이날 경우에 정반사 성분이 최대로 나타나 반사율이 최대로 나타난다. 여기서 Fig. 4와 같이 최대의 정반사가 나타나는 각도에서 계산되는 BRDF값 ($f_{s,max}$)를 기준으로 하여 임의의 반사방향에 대해서는 각도에 대하여 선형적으로 변하도록 수정된 정반사율 값($\rho_{s,M}$)을 정의하였으며 다음 수식과 같다.

$$\rho(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) = \frac{\rho_d(\lambda)}{\pi} + \alpha(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \cdot \rho_s(\lambda) \quad (12)$$

여기서 수정된 정반사율 값($\rho_{s,M}$)은 Fig. 4와 같이 입사각에 따른 최대 BRDF 값($f_{s,max}$)과 반사방향에 대한 BRDF 값(f_s)의 선형적 비율(α)으로써 계산하여 적용할 수 있으며 이를 수식화하면 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) = \frac{f_s(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda)}{f_{s,max}(\theta_i, \phi_i, \theta_i + \pi, \phi_i, \lambda)} \quad (13)$$

3. 제안된 모델의 검증

3.1 검증에 사용된 조건

본 연구에서는 BRDF 계산 방법에 따른 정확성 및 소요시간을 분석하기 위해 정반사 성향이 강한 재질(알루미늄, 스테인레스 스틸)과 난반사 성향이 강한 재질(콘크리트, 아스팔트), 그리고 중간 성향을 갖는 재질(흙)에 대해 입사되는 방향에 따른 반사율 값의 차이에 대해 분석을 수행하였다. 입사각은 방위각 0도를

고정한 상태에서 천정각을 30도, 45도, 60도로 설정하여 다양한 각도에 대한 분석을 수행하였으며, 센서 위치는 정반사가 가장 잘 나타나는 입사각의 정반대방향(방위각 180도)에서 천정각을 0도부터 90도까지 1도씩 증가시키면서 반사율을 계산하였다. BRDF 계산에 필요한 난반사율과 방사율은 반사 성분 영향이 크게 나타나는 중적외선 영역(3~5 μm)에 대한 물성치를 이용하였으며, 계산에 이용되는 물성치의 값을 다음 표에 자세히 나타내었다. 계산 소요시간은 100,000개의 격자로 구성된 물체를 계산하는 것을 가정한 상태에 대해서 측정하였으며, 이를 위해 각 재질 및 계산 방법에 대해 100,000번의 반복 계산을 수행하였다. 기존의 적분 식을 포함하는 BRDF 계산 방법 이용 시에는 적분 간격을 계산 소요시간 대비 정확도가 높게 나타나는 5도로 설정하여 계산을 수행하였다⁷⁾.

Table 1. Applied surface properties(3~5 μm)

Material	Diffuse reflectance	Emissivity	Fresnel coefficient	Specular lobe width
Aluminum	0.003260	0.055595	0.1569	0.003
Stainless steel	0.039975	0.252780	0.0275	0.003
Asphalt	0.173769	0.823290	0.0213	0.589
Concrete	0.176498	0.821144	0.0188	0.595
Soil	0.13154	0.58559	0.5	0.25

Table 2. Applied incident and reflected angle

구분	방위각	천정각
입사각	0°	30°, 45°, 60°
반사각	180°	0~90°(1°간격)

3.2 계산결과 및 분석

BRDF 계산 방법에 대한 속도 및 정확성에 대한 분석을 위해 앞서 언급한 5가지 재질과 입사 및 반사 각도에 대해 반사율 계산을 수행하였다. 반사율 계산 시에는 Table 1에서 나타낸 중적외선 영역(3~5 μm)의 파장대역을 고려하기 위해 파장별 적분을 수행하였으며,

계산 결과를 Fig. 4-8에 나타내었다. 정반사 성향이 강한 재질인 알루미늄과 스테인리스 스틸의 경우에는 입사되는 천정각에 대해 정반사가 발생하는 30도, 45도, 60도에서 반사율 값이 상대적으로 크고, 그 이외의 각도에서는 반사율이 매우 작다는 것을 확인하였다. 중간 성향을 갖는 흙에서는 반사율의 크기와 정반사율이 나타나는 영역의 차이가 존재하지만 대체로 정반사 성향의 재질 특성과 유사한 경향이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 난반사 성향이 강한 재질인 콘크리트와 아스팔트의 경우에는 정반사가 강한 재질에 비해 반사각도에 따른 반사율 값의 차이가 없어 그래프 상에서 거의 일정하게 나타남을 알 수 있으며, 입사 각도에 대해서도 별다른 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다.

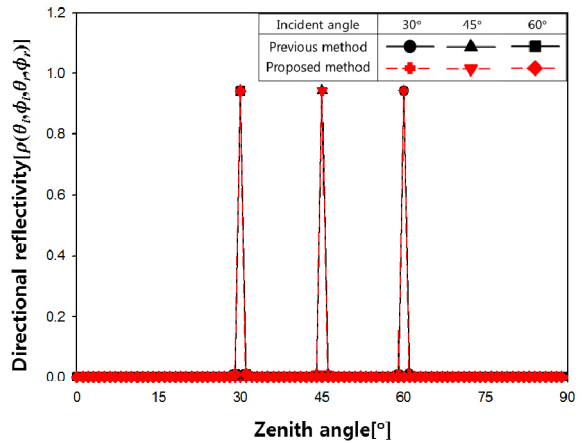


Fig. 5. Calculated reflectivity of an aluminum

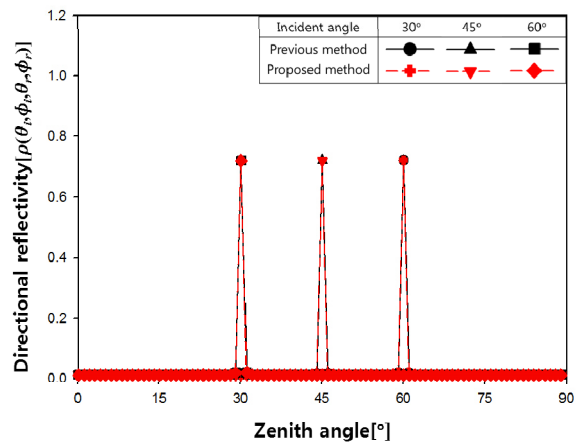


Fig. 6. Calculated reflectivity of a stainless steel

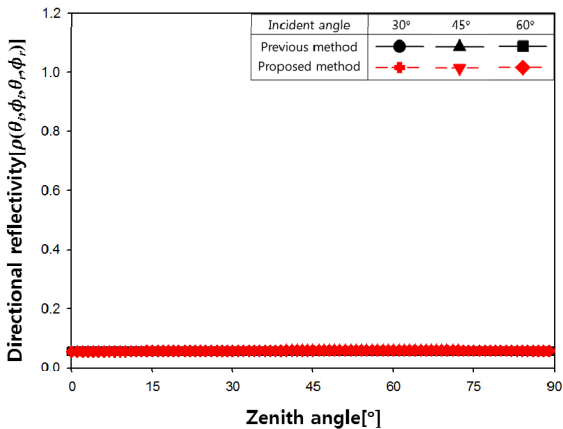


Fig. 7. Calculated reflectivity of an asphalt

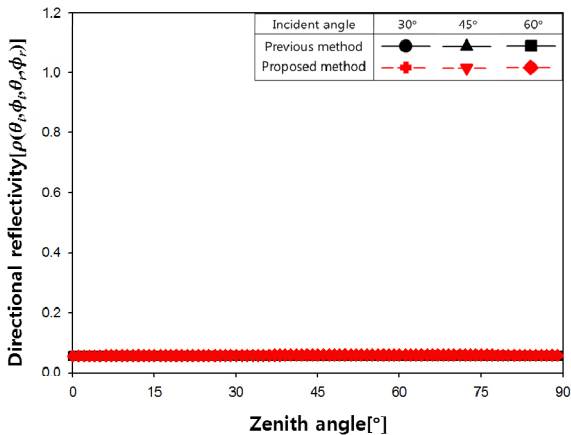


Fig. 8. Calculated reflectivity of a concrete

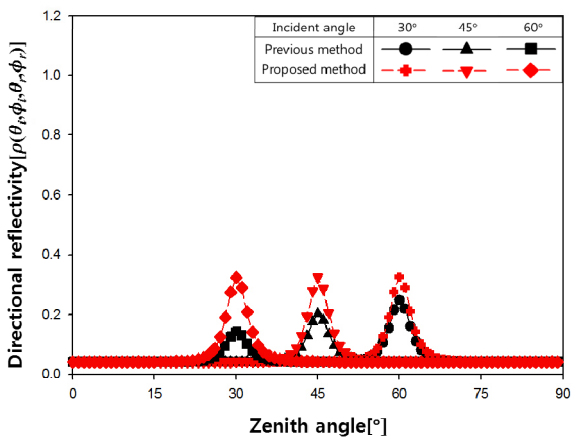


Fig. 9. Calculated reflectivity of a soil

제안된 방법을 통한 계산 결과의 정확도를 분석하기 위해 각 재질에 대한 기존의 계산 방법과 제안된 방법을 이용한 결과 값 간의 상대 오차를 계산하여 그 결과를 Table 3에 나타내었다. 정반사 성향이 강한 알루미늄과 스테인리스 스틸 재질의 경우에는 상대오차가 0.0004 % 이하로 나타나 두 가지 방법에 의한 결과 거의의 차이 없음을 확인하였다. 난반사 성향이 강한 아스팔트, 콘크리트 재질의 경우에는 약 3.8%의 평균오차를 보이며 최대 5.18 %의 오차를 가지는 것으로 확인하였다. 난반사 보다 정반사 성향이 강한 재질에서 오차가 상당히 작게 나타났으며, 이는 정반사 성향이 강할수록 특정 각도에서만 반사율이 크게 나타나고 그 이외의 각도에서는 정반사 성분이 거의 없기 때문이라고 판단된다. 중간 성향을 갖는 흙의 경우는 입사각이 30도인 경우 기존 방법 대비 약 6.9 %의 차이를 나타냈으며 입사각이 커질수록 그 차이는 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 오차가 크게 나타나는 중간 성향의 재질에 대해 반사각을 90도로 설정하여 추가적으로 분석한 결과 오차는 약 0.007 % 수준으로 급감하는 것을 확인할 수 있었다. 더불어 실제 획득된 환경 조건(1월 1일, 정오)에서 기존의 방법과 제안된 방법으로 계산된 반사율을 반영하여 적외선 신호를 계산한 결과 평균 오차는 약 1.3 % 수준으로 떨어지는 것으로 나타났다. 따라서 제안된 계산 방법은 중간 성향을 갖는 재질에 대한 정반사 성분 계산에 있어 정확도가 다소 떨어지거나 적외선 신호량 전체 계산에 있어서는 그 영향이 적은 수준에서 나타나는 것으로 확인하였다.

Table 3. The result of relative error between previous and proposed methods

구분	입사각 30°	입사각 45°	입사각 60°
Aluminum	0.0001 %	0.0002 %	0.0011 %
Stainless steel	4.61E-06 %	0.0004 %	0.0001 %
Asphalt	3.45 %	4.09 %	5.18 %
Concrete	2.73 %	3.21 %	4.12 %
Soil	6.93 %	3.22 %	1.68 %

반사율 계산 방법에 따른 속도 차이는 정확도의 차이에 비해서 크게 나타났다. 기존의 적분 식을 풀이하는 방법을 이용할 경우 5가지 재질에 대해 평균 약

136.1초가 소요되는 것으로 확인하였으며, 제안된 방법으로 계산할 경우에는 약 0.202초로 1초 이내로 계산이 수행되며 기존 방법에 비해 약 673.7배 빠른 것으로 확인하였다. 재질 및 계산 방법에 따른 소요시간은 Table 4에 자세히 나타내었다.

Table 4. Comparison of computational time

구분	기존 방법	제안 방법
Aluminum	135.985 sec	0.202 sec
Stainless steel	135.829 sec	0.202 sec
Asphalt	136.094 sec	0.202 sec
Concrete	136.441 sec	0.202 sec
Soil	136.181 sec	0.202 sec

4. 결론

본 논문에서는 실시간 적외선 신호 계산 및 영상 생성 SW에 적용 가능한 물체 표면의 방향별 반사율 계산 방법에 대해 제안하고 이를 이용한 계산 결과를 나타내었다. 방향별 반사율 계산에는 BRDF 값을 계산하는 과정이 필요하며 기존의 적분 항 계산으로 인해 계산 소요시간이 많이 요구된다. 본 연구에서는 실시간 적외선 신호 계산에 적용 가능한 계산 속도를 확보하기 위해 적분 항을 대체할 수 있는 방법에 대해 제안하였다. 제안된 방법을 이용한 계산 결과, 난 반사 성향이 강한 재질에서는 기존 방법 대비 평균 약 3.8 %의 오차를 보였으며, 중간 성향의 재질에서는 평균 약 4.1 %의 오차를 나타내는 것을 확인하였다. 정반사 성향이 강한 재질에 대해서는 오차가 없이 기존의 S-R모델과 거의 일치하는 수준의 결과를 얻었다. 계산 시간의 경우, 100,000개의 격자를 기준으로 약 0.2초 내외로 소요되어 약 600배 빠른 속도로 계산할 수 있음을 확인하였다. 따라서 본 연구에서 제안한 적외선 신호 반사 성분 계산을 위한 고속화된 반사율 계산 방법은 정확도의 손실을 최소화하면서도 적외선 신호의 실시간 예측에 적용 가능한 빠른 계산 속도를 확보할 수 있는 방법으로 판단된다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소 연구 과제(주관 : 한화시스템㈜) “고성능 합성 적외선 영상 생성 SW 개발”의 일환으로 수행되었습니다.

References

- [1] J. Choi, T. Park and T. Kim, “Modeling of Surface Temperature Characteristics on the Ground by using the Measured Weather Condition Data,” Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, Vol. 13, No. 3, pp. 470-477, 2010.
- [2] J. Schott, S. Brown, R. Raqueno, H. Gross, and G. Robinson, “An Advanced Synthetic Image Generation Model and its Application to Multi/Hyperspectral Algorithm Development,” Canadian Journal of Remote Sensing, Vol. 25, No. 2, pp. 99-111, 1999.
- [3] F. Nicodemus, “Reflectance Nomenclature and Directional Reflectance and Emissivity”, Applied Optics, Vol. 6, pp. 1474-1475, 1970.
- [4] J. Choi and T. Kim, “Characteristics Analysis of IR Signatures for Different Optical Surface Properties by Computer Modeling and Field Measurement,” Proc. of SPIE, 78301L-01-12, 2010.
- [5] B. Sandford and L. Robertson, “Infrared Reflectance Properties of Aircraft Paint,” Proc. IRIS Targets, Backgrounds and Discrimination, 1985.
- [6] F. Nicodemus, J. Richmond, J. Hsia, I. Ginsberg and T. Limperis, “Geometrical Considerations and Nomenclature for Reflectance,” Technical report, Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1977.
- [7] D. Kim, K. Han, J. Choi, J. Shin and T. Kim, “Study on Optimized Calculation Method of BRDF Reflectance for Real-time IR Signal Prediction,” KIMST Annual Conference Proceeding, pp. 227-228, 2015.
- [8] W. Ngan, “Acquisition and Modeling of Material Appearance,” Ph.D. thesis, MIT, 2016.