

주변 환경 온도 변화를 고려한 열화상 온도 데이터의 보정 알고리즘 설계

Design of a Compensation Algorithm for Thermal Infrared Data considering Environmental Temperature Variations

송 성 호[★]

Seong-Ho Song[★]

Abstract

This paper suggests design methodology for thermal infrared data correction algorithms considering environmental temperature variations. First, a thermal infrared measurement model is suggested by a parameter-dependent first-order input-output equation using the relationship between infrared measurement data and model environmental parameters. In order to compensate the influence of environmental temperatures on infrared data, a compensation function is identified. Through experiments, the proposed algorithm is shown to reduce the influence of environmental temperatures on the infrared data effectively.

요 약

이 논문에서는 환경 온도 변화를 고려한 열 적외선 데이터 보정 알고리즘을 설계하는 방법을 제시한다. 첫째, 열 적외선 측정 모델은 적외선 측정 데이터와 모델 환경 매개 변수 간의 관계를 사용하여 매개 변수 종속적인 1차 입력-출력 방정식으로 주어지고, 적외선 데이터에 대한 환경 온도의 영향을 보상하기 위해 보상 함수를 구한다. 실험을 통해 제안된 알고리즘이 적외선 데이터에 대한 환경 온도 변화의 영향을 효과적으로 보상할 수 있음을 보인다.

Key words : Thermal infrared Data, compensation algorithm, parameter-dependent model, environmental temperature variation

1. 서론

적외선 열화상 카메라는 발열성 감염증의 선별 검사에 널리 사용되는데, 정확한 체온을 감지하려면 적외선 카메라를 정밀하게 보정해야 한다. 적외

선 카메라의 보정은 열화상 감지센서(detector)가 갖는 비선형 특성 때문에 어려움이 있다[1-3]. 적외선 카메라에서 정밀한 온도측정을 위하여 열화상 감지센서로부터 획득한 데이터를 보정하고 정밀한 온도측정값을 구하는 일반적인 방법은 열전 소자

* School. of Software, Hallym University

★ Corresponding author

E-mail : ssh@hallym.ac.kr Tel : +82-33-248-2346

※ Acknowledgment

This paper is supported by LINC+.

Manuscript received May 8, 2021; revised June 12, 2021; accepted June 14, 2021.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

나 흑체 소스를 이용하여 측정데이터를 보정하여 온도측정값을 구하는 것이다[5]. 정밀한 온도 보정을 위하여 흑체 소스를 이용하여 다양한 대상온도에 대하여 열화상 적외선 데이터를 측정하여 조회 테이블을 오프라인으로 생성하여 온도 측정을 수행한다[4], 최근에는 열화상 이미지의 보정을 위하여 온라인으로 장면 기반(scene-based) 보정 알고리즘도 널리 연구되고 있다[6]. 이러한 측정 및 보정 절차가 성공적으로 완료되었다라든가 적외선 카메라의 감도는 열 감지센서 자체 온도 및 주변 환경 온도에 따라 달라지기 때문에 이러한 환경 조건을 고려하여 추가 보정을 진행해야 한다.

본 논문에서는 주변 온도를 고려한 카메라 측정 모델[1-3, 5]을 기반으로 온도 측정을 위한 열 적외선 데이터 보정 알고리즘을 설계한다. 적외선 데이터를 보정하기 위해 적외선 카메라 측정 모델을 매개 변수 종속 1 차 입력-출력 방정식으로 모델링할 수 있는데, 이 모델에서 가장 주요한 영향을 미치는 매개 변수는 주변 온도로서, 이 매개 변수 측면에서 단순화된 모델을 제시하고, 이 모델을 기반으로 환경 온도와 적외선 열 데이터의 관계를 파악하여 정밀 온도측정을 위한 적외선 열 데이터의 보정 알고리즘을 개발한다.

II. 본론

1. 열화상 카메라 온도 측정 모델

일반적으로 i 번째 행, j 번째 열 픽셀 요소에 대한 적외선 카메라 측정 모델은

$$y_{ij}(t) = a_{ij}(T_e)x_{ij}(t) + b_{ij}(T_e) \quad (1)$$

과 같이 정의할 수 있으며, 여기서 x_{ij} 과 y_{ij} 는 각각 (i, j) 번째 픽셀 요소에 대한 열화상 카메라의 열화상 입력과 출력 온도를 나타내고, 모델 계수(model nominal coefficient) a_{ij} , b_{ij} 는 각 열화상 픽셀의 이득과 오프셋을 나타내며, 흑체를 이용하여 구해진다. 그런데, 열화상 카메라의 특성상 이러한 모델 변수 a_{ij} , b_{ij} 는 픽셀마다 편차가 있고, 특히 주변 환경 온도 T_e 에 따라서 변화하게 되어 이에 대한 정밀한 추정을 통한 보정이 필요하다.

그림 1은 흑체 온도가 30°C 로 설정되었을 때 열화상 카메라 출력 및 열화상 카메라 주변 환경 온

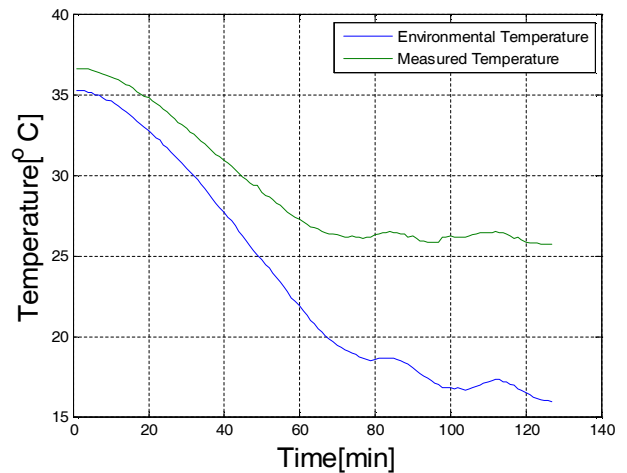


Fig. 1. Time profiles of infrared camera data and camera environmental temperature.

그림 1. 열화상 카메라 출력과 환경온도 시간 궤적

도의 시간 프로파일을 나타내며, 열화상 카메라 주변 환경 온도가 15°C 에서 38°C 까지 변화할 때 열화상 카메라로부터 획득한 흑체 온도에 대한 열화상 카메라 측정값을 나타낸다. 열화상 카메라의 주변 환경 온도는 열화상 카메라내부에 장착한 온도 센서로부터 측정된다. 그림에서 볼 수 있듯이 열화상 카메라 출력과 카메라 환경 온도는 상당한 상관관계가 있음을 알 수 있다.

식(1)로 주어지는 열화상 카메라 주변 환경 온도를 고려하여 다음 식으로 정의할 수 있다.

$$y_{ij}(t) = a_{ij}(T_o)x_{ij}(t) + b_{ij}(T_0) + f_{ij}(T_e) \quad (2)$$

모델 계수(model nominal coefficient) a_{ij} , b_{ij} 는 일반적으로 기준 환경 온도 T_0 에서 흑체를 이용하여 결정되는 모델 계수이며, $f_{ij}(T_e)$ 는 카메라 환경 온도 T_e 의 변화에 따른 열화상 데이터의 부분을 나타낸다. 따라서, (2)식으로 주어지는 온도 측정 모델에 대하여 이 함수 값을 정확히 보정함으로써 기준 환경 온도에서 획득한 모델에 기반하여 정확한 온도를 제공할 수 있다.

그림 2는 열화상 카메라의 중앙 픽셀의 출력과 카메라 주변 환경 온도 간의 관계를 보여준다. 따라서 모델 방정식 (2)에서 환경온도 보정을 위한 함수 $f_{ij}(T_e)$ 는 식(2)와 같이 열화상 카메라의 기준 환경 온도 T_0 와 실제 카메라 환경 온도 T_e 사이의 환경 온도 차이 $\Delta T = T_e - T_0$ 의 함수임을 쉽게 알 수 있다.

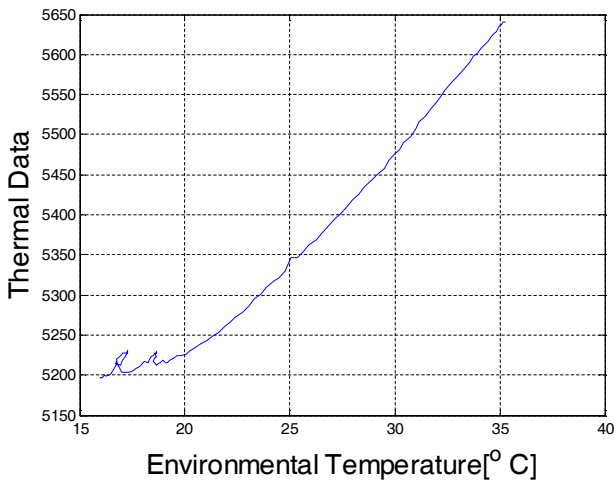


Fig. 2. Relationship between infrared camera data and environmental temperature.

그림 2. 열화상 카메라 출력과 환경온도와의 관계

$$f_{ij}(T_e) = f_{ij}(T_e - T_0) \tag{3}$$

일반적으로 식(3)으로 주어지는 보정함수를 구하기 위하여 일반적으로 기준 환경 온도로 병원 등에서 실내 기준 온도로 설정하는 $T_0 = 25^\circ C$ 을 설정한다. 여기서, 모델 공칭 계수 a_{ij}, b_{ij} 는 주변 환경 온도가 기준 환경 온도와 같을 때, 즉 $T_e = T_0 = 25^\circ C$ 일 때 그림 2로 주어지는 열화상 카메라 출력과 카메라 주변 환경 온도 간의 관계로부터 식(2)와 식(3)을 사용하여 구할 수 있다. $T_e = T_0 = 25^\circ C$ 인 경우 식(2)에서 $f_{ij}(T_e) = f_{ij}(T_e - T_0) = 0$ 이다. 기준온도 $T_0 = 25^\circ C$ 에서 벗어난 주변 환경온도 T_e 에서의 보정함수 $f_{ij}(T_e)$ 는 그림 2로 주어지는 관계를 추정하고, 해당 근사 추정 함수를 사용하여 열화상 카메라 출력 데이터에 대한 카메라 환경 온도의 영향을 보정할 수 있다.

2. 열화상 카메라 온도 보정 알고리즘

식(2)와 식(3)으로 주어지는 열화상 카메라 온도 측정 모델에서 주변 환경 온도 변화에 따른 측정 온도 데이터의 보정을 위하여 함수 $f_{ij}(T_e)$ 를 그림 2와 같은 열화상카메라 출력과 환경온도 관계를 이용하여 보정함수 $\bar{f}_{ij}(T_e)$ 를 추정하여 다음과 같이 보상함으로써 정확한 온도 측정을 수행한다.

$$y_{ij}(t) = a_{ij}(T_o)x_{ij}(t) + b_{ij}(T_0) + f_{ij}(T_e) - \bar{f}_{ij}(T_e) \tag{4}$$

식(4)에서 $\bar{f}_{ij}(T_e) = f_{ij}(T_e)$ 이면, 식(4)로부터 온도

측정 알고리즘은 간단히 기준 환경 온도에서 흑체를 통하여 구한 모델 변수 a_{ij}, b_{ij} 만을 이용하여 다음과 같이 식(5)로 단순화 및 표준화될 수 있다.

$$y_{ij}(t) = a_{ij}(T_o)x_{ij}(t) + b_{ij}(T_0) \tag{5}$$

3. 보정함수 $\bar{f}_{ij}(T_e)$ 의 추정 알고리즘

식(4)로 주어지는 온도 측정 모델에서 보정함수 $\bar{f}_{ij}(T_e)$ 의 추정은 그림 2로 주어지는 열화상카메라 출력과 환경온도 관계를 이용하여 최적 근사화 함수를 구한다. 이를 위하여 다음과 같은 목적함수를 최소화하기 위한 문제를 푼다.

$$\min \|f_{ij}(T_e) - \bar{f}_{ij}(T_e)\| = \min \|y_{ij}(t) - a_{ij}(T_o)x_{ij}(t) - b_{ij}(T_0) - \bar{f}_{ij}(T_e)\| \tag{6}$$

그림 2에서 볼 수 있듯이 보정 함수는 비선형 특성을 가지며 이에 대한 최적 보상 함수를 찾기 위해 두 가지 경우를 고려한다. 하나는 다항식 기반 함수 근사법과 신경망을 기반으로 한 최소화 문제를 통하여 보정함수를 구한다.

식(6)으로 주어지는 최소화문제를 풀기 위하여 다항식 기반 함수 근사법으로 다음과 같은 1차 다항식과 2차 다항식 형태의 근사화 함수를 구한다.

1) 1차 다항식

$$\bar{f}_{ij}(T_e) = c_{ij} + d_{ij}(T_e - T_0) \tag{7}$$

2) 2차 다항식

$$\bar{f}_{ij}(T_e) = c_{ij} + d_{ij}(T_e - T_0) + e_{ij}(T_e - T_0)^2 \tag{8}$$

다항식 기반 함수 근사화 방법과 더불어 보다 정밀한 비선형 관계를 근사화하는 보상 함수 $\bar{f}_{ij}(T_e)$ 의 추정을 위해 신경망 기반 알고리즘을 고려한다. 이를 위하여 각각의 신경망은 하나의 입력, 하나의 은닉층 및 하나의 출력 계층으로 구성된다. 일반적으로 신경망의 구조는 각 신경망층에서 다음과 같은 입력-출력 방정식으로 정의된다.

- 입력층

$$Y_i^l = W_i^l T_e + B_i^l \tag{9}$$

$$O_i^l = \text{sigmoid}(Y_i^l), i = 1, \dots, N_l$$

- 은닉층

$$Y_i^H = \sum_{j=1}^{N_I} W_{ij}^H O_j^I + B_i^H \quad (10)$$

$$O_i^H = \text{sigmoid}(Y_i^H), i = 1, \dots, N_H$$

- 출력층

$$\bar{f}_{ij}(T_e) = \sum_{j=1}^{N_H} W_j^O O_j^H + B_j^O \quad (11)$$

식(9)에서 N_I, W_i^I, B_i^I, O_i^I 는 각각 입력 계층의 뉴런 수, i 번째 뉴런과 입력 환경 온도 T_e 사이의 가중치 및 오프셋 매개 변수, 입력 계층의 i 번째 뉴런의 시그모이드 출력이고, 식(10)에서 $N_H, W_{ij}^H, B_{ij}^H, O_i^H$ 은 각각 은닉층의 뉴런 수, 은닉층의 i 번째 뉴런과 입력 층의 j 번째 출력 사이의 가중치 및 오프셋 매개 변수, 은닉층의 i 번째 뉴런의 시그모이드 출력이다. 입니다. 마지막으로 식(11)에서 W_j^O, B_j^O 은 출력층에서의 출력과 은닉층의 i 번째 출력 사이의 가중치 및 오프셋 매개 변수를 나타낸다. 식(11)에서 보면 알 수 있듯이 출력층의 출력은 환경온도에 대한 온도측정모델에서의 보정함수 $\bar{f}_{ij}(T_e)$ 임을 알 수 있다. 따라서, 식(9), 식(10)과 식(11)로 주어지는 신경망의 출력을 구함으로써 식(4)에서 환경온도에 따른 열화상 카메라 온도 데이터를 보정하는 보정함수를 구할 수 있다.

4. 실험 결과

본 절에서는 식(7), 식(8) 및 식(9)–식(11)에 설명된 보정 알고리즘에 대하여 그 성능을 분석한다. 본 실험에서 열화상 데이터는 640×480 Jenoptik 열화상 카메라를 사용하여 수집하였고, 흑체 소스는 30°C로 설정하여 이에 대한 열화상 데이터를 보정 알고리즘을 이용하여 측정하여 성능을 비교 분석하였다. 성능 비교를 위하여 중앙 픽셀을 선택했지만 어떤 픽셀을 선택하든 성능 비교에는 중요하지 않다. 이전 절에서 언급했듯이 식(4) 또는 식(5)로 주어지는 온도 측정 모델에서 중앙 픽셀의 공칭 계수 a_{ij}, b_{ij} 는 그림 2에서 기준 환경 온도가 $T_0 = 25^\circ\text{C}$ 일 때 값을 이용하여 구할 수 있으며, 다음과 같다.

$$a_{ij} = 0.0242, b_{ij} = -98.61 \quad (12)$$

그림 2를 근사화하는 식(7)로 주어지는 최적의 1차 다항식 보정 알고리즘의 계수를 구하면,

$$c_{ij} = 0, d_{ij} = 0.8333 \quad (13)$$

으로서, 그림 3은 이 계수값을 사용하여 얻은 1차 다항식 보정 알고리즘의 온도 보상 결과를 보여준다. 보정된 열화상 측정 온도 오차는 대상 흑체 온도 30°C에 대하여 $30 \pm 1.0^\circ\text{C}$ 이내이다. 일반적으로 산업용 열화상 카메라에서 저가형은 $\pm 2^\circ\text{C}$, 고가형은 $\pm 1^\circ\text{C}$ 를 최대 측정오차로 제시하고 있어서, 1차 다항식 보정 알고리즘으로도 충분한 성능을 보여주고 있다. 또한, 식(8)로 주어지는 2차 다항식 보정 알고리즘의 계수를 구하면,

$$c_{ij} = -0.0878, d_{ij} = 0.6115, e_{ij} = 0.0206 \quad (14)$$

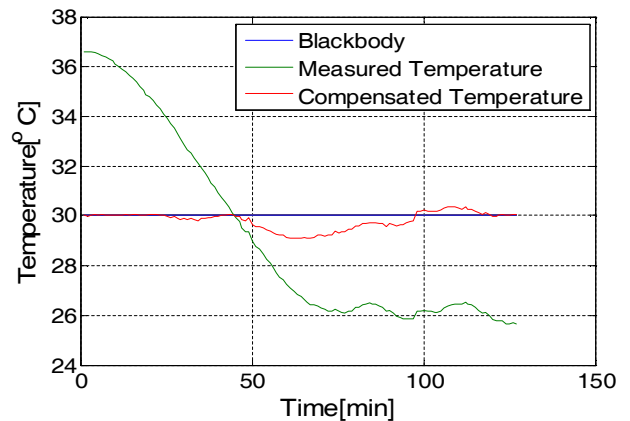


Fig. 3. Compensation performance : 1st order polynomial case.

그림 3. 1차 다항식 보정 알고리즘의 온도 측정 성능

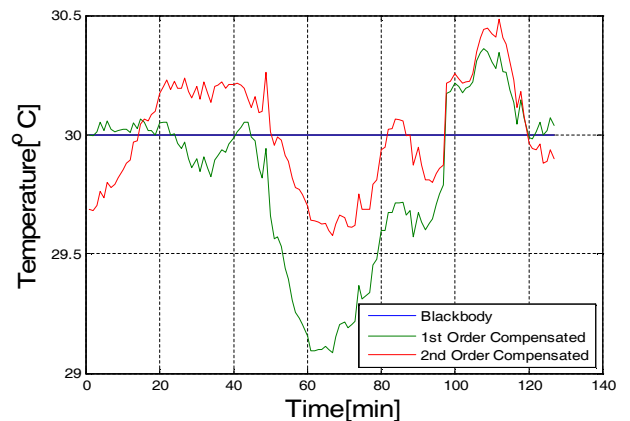


Fig. 4. Performance comparison of polynomial based compensation algorithms.

그림 4. 다항식 보정 알고리즘의 성능비교

이다. 그림 4는 식(12)와 식(13), 식(14)를 계수값으로 갖는 식(7)로 주어지는 1차 다항식 보정알고리즘과 식(8)로 주어지는 2차 다항식 보정알고리즘의 온도 측정 성능을 비교한 결과이다. 그림 2로 주어지는 열화상 데이터와 주변 환경 온도와의 관계가 비선형성을 갖고 있기 때문에 당연히 식(8)로 주어지는 2차 다항식 보정 알고리즘이 우수함을 알 수 있으며, 온도 측정 오차는 $\pm 0.5^{\circ}C$ 로서 비교적 우수함을 알 수 있다.

그림 2로 주어지는 열화상 카메라 데이터의 비선형성을 고려하여 보정 알고리즘을 구성하면, 보다 정밀한 온도 측정 성능을 보장할 수 있을 것이다. 이를 위하여 식(9)-식(11)로 주어지는 신경망 알고리즘에서 입력층과 은닉층의 뉴런의 수를 $N_I=20$, $N_H=20$ 으로 설정하였다. 각 층의 뉴런 수는 신경망의 성능에 영향을 미치는 중요한 인수로서, 너무 작게 선택하면 추정 성능이 좋지 않고, 뉴런의 수를 크게 선택하면 추정 성능은 개선되지만, 신경망을 학습시키는 데 많은 시간이 걸리게 되어, 실시간 구현이 어렵게 된다. 현재는 GPU 기술의 발전으로 실시간 구현이 더 쉽고 가능해졌으나, 각 레이어의 뉴런 수를 적절하게 선택하는 것이 매우 중요하다. 그림 5는 제안된 신경망의 추정 결과를 보여주고 그림 6은 신경망의 보상 성능을 보여준다. 그림 5에서 보듯이 비선형성은 신경망에 의해 잘 추정됨을 알 수 있고, 신경망의 매개 변수를 학습시키기 위하여 1만 epochs를 수행하였다. 보정된 열 적외선 온도는 목표 흑체 온도 내에서 잘 유지되어 예상대로 제안된 신경망 접근 방식은 카메라 환경 온도 변화에 대해 우수한 보상 성능을 보여줌을 알 수 있다.

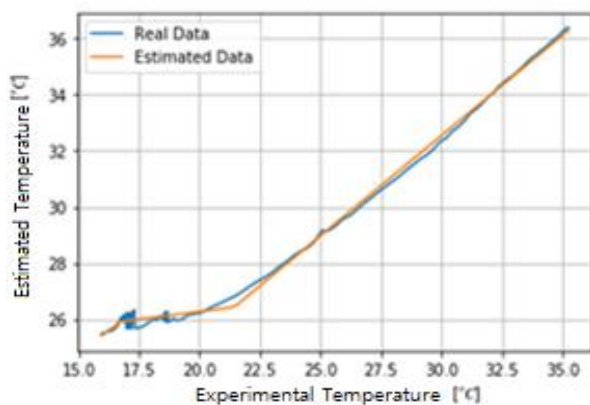


Fig. 5. Neural network based approximation of a function $f_{ij}(T_e)$.

그림 5. 신경망 알고리즘에 의한 보정함수 $f_{ij}(T_e)$ 의 근사화

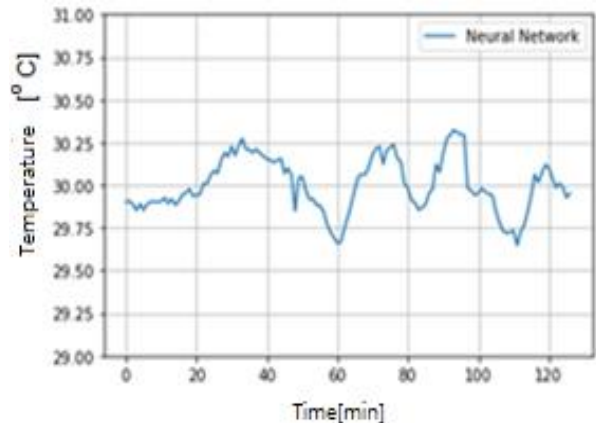


Fig. 6. Compensated temperature using neural network based algorithm.

그림 6. 신경망기반 알고리즘에 의한 측정 온도 궤적

Table 1. Performance of Thermal data compensation.

표 1. 열화상 데이터 보정 성능 비교

(단위 : $^{\circ}C$, 흑체온도 $30^{\circ}C$)

	1st Order	2nd Order	3rd Order	4th Order	Neural Network
Max Temp	30.35	30.48	30.46	30.46	30.32
Min Temp	29.08	29.57	29.61	29.63	29.68
Max error	0.92	0.48	0.46	0.46	0.32

표 1은 다항식 기반 보정알고리즘과 신경망 알고리즘의 열화상 데이터 보정 성능을 비교한 것으로 다항식 기반 알고리즘과 신경망 기반 보정 알고리즘의 보다 정확한 성능 비교를 위하여 3차식, 4차식의 고차 다항식 기반 알고리즘의 열화상 데이터 보정성능도 포함하였다. 최대 측정 오차를 보면 다항식 기반 알고리즘은 비선형 특성을 고려한 2차식 이상의 고차식 기반 보정알고리즘에서 1차식 보정 알고리즘보다 우수하며, 2차식 이상의 고차식에서는 성능 차이가 없음을 알 수 있고, 신경망 알고리즘의 최대 보정 오차는 0.32 도로 보정 성능이 가장 우수함을 알 수 있다.

III. 결론

본 논문에서는 카메라 내부 및 주변 공기 온도와 같은 환경 변수를 고려하여 열화상 카메라 데이터를 효율적으로 보정하는 방법으로서 다항식 기반 보정알고리즘과 신경망 기반 보정알고리즘에 대하여 제안하였고 성능을 비교분석하였다. 일반적으로 열화상 카메라의 데이터는 주변 환경 온도에 의하

여 민감한 영향을 받고, 이러한 주변 환경 온도와 열화상 카메라 데이터의 관계는 비선형 특성을 갖는다. 따라서, 단순한 다항식 기반 보정알고리즘에 비하여 비선형 함수관계를 정밀하게 근사화할 수 있는 신경망 알고리즘에 의한 보정방법이 다항식 함수 기반의 보정 방법에 비하여 주변 환경 온도 변화에 대한 열화상 데이터의 보정 성능에 있어서 보다 우수함을 알 수 있다.

References

- [1] J. M. Lloyd, *Thermal Imaging Systems* PLENUM press, New York, 1982.
- [2] Gerald C. Holst, Testing and Evaluation of infrared imaging systems, *SPIE Optical Engineering Press*, USA.
- [3] M. Thomas, D. Newman, M. Frolli, D. Pritchett, "Nonuniformity correction of cryogenic 5122 emitter arrays: The 5 minute 5% NUC using FIESTA," *Proceeding of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, Vol.4366, 2001.
- [4] H. Budzier, and G. Gerlach, *Thermal Infrared Sensors, Theory, optimization and practice*, Wiley, Hoboken, NJ., USA, Chichester, UK, 2011.
- [5] A. Tempelhahn, H. Budzier, V. Krause, and G. Gerlach, "Development of a shutterless calibration process for microbolometer based infrared measurement systems," *The e-journal of Nondestructive Testing*, Vol.20, 2015.
- [6] K. G. LeSueur, E. Jovanov, and A. Milenkovic, "Lookup table based real-time non-uniformity correction of infrared scene projectors," US Army, Developmental Test Command Redstone Technical Test Center, Bldg. 4500 Redstone Arsenal, AL 35898-8052.
- [7] D. L. Perry and E. L. Dereniak, "Linear theory of nonuniformity correction in infrared staring sensors," *Opt. Eng.*32, pp.1853-1859, 1993.
DOI: 10.1117/12.145601
- [8] R. C. Harris, M. M. Hayat, E. E. Armstrong, and B. Yasuda, "Scene-based nonuniformity correction using video sequences and registrations," *Appl. Opt.*39, pp.1241-1250, 2000.

BIOGRAPHY

Seong-Ho Song (Member)



1987 : BS degree in Control and Measurement Engineering, Seoul National University.

1991 : Control and Measurement Engineering, Seoul National University.

1995 : PhD degree in Control and Measurement Engineering, Seoul National University.

1996.3~present : Professor, School of Software, Hallym University.