

비선형 보정을 이용한 위성영상의 줄무늬잡음 제거 알고리즘

박종현*, 최은철*, 강문기*, 김용승**

*연세대학교 전기전자공학과, **한국항공우주연구원 위성운영센터

Nonlinear Destriping Algorithm of Satellite Images

Jong Hyun Park*, Euncheol Choi*, Moon Gi Kang*, Yong-Seung Kim**

*Department of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University

**Satellite Operation & Application Center, Korea Aerospace Research Institute

E-mail : agfe@yonsei.ac.kr

요 약

위성에 탑재된 전자광학 카메라(Electro-Optical Camera)로 부터 획득된 영상에서는 카메라의 스캔 방향과 동일한 방향으로 “줄무늬잡음”이 발생하게 된다. 이는 센서의 특성이 동일하지 않고, 우주라는 열악한 환경에서 영상의 획득이 일어나기 때문이다. 본 논문에서는 줄무늬잡음을 제거하기 위해 비선형 보정방법을 제안한다. 영상의 준균일성(quasi-homogeneous)과 센서특성의 시불변성(time-invariancy) 가정을 바탕으로, 보정하려는 열의 이웃 열을 참조하여 줄무늬잡음에 의한 오차를 추정하고 이를 최소화한다. 줄무늬 잡음 정도를 추정하기 위해 줄무늬 잡음을 바이어스에 의한 것과 특성곡선의 경향 차이에 의한 것으로 나눈다. 바이어스에 의한 오차는 센서가 스캔하는 방향과 동일한 방향으로 통계적 특성을 이용하여 추정한다. 특성곡선의 경향차에 의한 오차는 보정하려는 열에서 동일한 밝기 레벨을 갖는 화소들을 조사하고, 이들과 이웃하는 열의 동일 위치에 있는 화소의 밝기 레벨의 통계적 특성을 파악하여 추정한다. 이렇게 추정된 오차를 최소화함으로써, 줄무늬 잡음을 효과적으로 제거하였다.

1. 서 론

위성을 통해 획득한 영상은 일반적으로 장거리에서의 촬영, 우주라는 특수한 환경, 시스템의 구조적인 결함, 바람직하지 못한 센서의 특성 등 여러 가지 원인에 의한 오차(error)와 잡음(noise)을 포함하고 있다. 따라서 일반적으로

영상 자료 분석을 하기 전에 수정 혹은 보정하는 과정을 거쳐야 한다. 위성 영상에 있는 잡음 중에 특히 센서의 스캔 방향과 같은 방향으로 생기는 줄무늬 잡음은 영상의 질을 심각하게 저하시키며, 영상 분석에 좋지 않은 영향을 끼친다. 그림 1은 일반적인 푸쉬브room 주사(pushbroom scanning) 방식의 원거리 영상 획득 시스템을 나타내고 있다. 각 행은 N개의 센서로 이루어진 CCD(Charge Coupled Device) 행에 의해 기록되고, 영상은 위성 시스템이 센서 행에 수직인 방향으로 진행함으로써 형성된다. 각 센서는 보통 위성을 발사하기 전에 센서 특성의 비일관성을 제거하기 위해 센서 특성 곡선의 보정과정을 거친다. 그러나 이 과정 중에도 센서의 비선형성이 두드러지는 부분이나 발사 전 센서 보정이 불가능한 부분에서는 보정이 제대로 이루어지지 않을 수 있다. 센서의 보정과정이 완벽하지 않으면 각 센서는 서로 조금씩 다른 입출력 특성을 갖기 때문에 동일한 빛의 세기도 센서에 따라서 서로 조금씩 다른 출력 신호를 발생시킨다. 이에 따라 위성이 균일한 영역을 지나더라도 각 센서는 다른 신호값을 발생시키고, 위성의 진행방향에 따라 줄이 발생하게 되는 것이다.

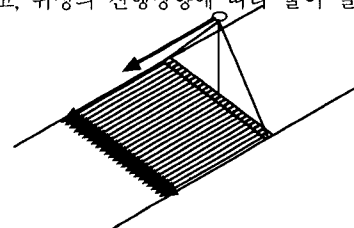


그림 1. 일반적인 푸쉬브room 주사 시스템

이러한 줄무늬 잡음은 위성 및 항공 영상 분야에서 잘 알려진 현상이며, 이를 제거하기 위해 여러 알고리즘이 개발되었다. 가장 간단하고 일반적인 방법은 센서 시스템이 선형, 시불변(Linear and Time-invariant)하다는 가정 하에 영상의 각 열의 평균과 표준편차를 같도록 대응시키는 방법이다.[1]

기준이 되는 평균, 표준편차는 임의의 한 열의 값이 된다. 이 알고리즘은 가장 간단하고 센서 특성이 비교적 선형적인 곳에서는 잘 작동하지만, 센서의 비선형적인 특성을 제대로 반영하지 못하기 때문에 이러한 특성이 두드러지는 영역에서는 좋지 않은 결과를 가져온다. 비선형성을 고려하기 위해, 영상의 특성곡선을 2차 곡선으로 추정하여 그 특성을 보정하는 방법이 제안되었으나[2], 이 방법은 영상이 매우 부드럽을 때에만 좋은 결과를 가져오며, 2차 계수의 작은 변화에도 특성곡선이 민감하게 변화하기 때문에 2차 계수 추정의 정확성에 민감한 단점이 있다. 비선형성을 고려한 다른 방법으로 도수분포도 대응(histogram matching method)이 있다.[1] 이 방법은 각 열의 도수분포도를 구해서 그것이 특정 열을 기준으로 한 도수분포와 같도록 하는 것이다. 이 방법은 비선형성을 비교적 잘 반영하지만, 기준을 어떻게 설정하는가에 따라서 결과가 많이 좌우되고, 모든 영역이 동일한 도수분포도를 가질 수 없기 때문에 기준 열과 분포가 많이 달라지는 열에서는 좋지 않은 결과를 보인다. 한편, 위의 방식과는 달리, 주파수 영역에서 줄무늬 잡음에 의해 생긴 부분을 영상 영역에서 제거하는 방법이 제안되었다[3]. 이 방법은 잡음이 매우 고주파이면서, 영상의 크기가 크지 않을 때만 적용 가능하다.

본 논문에서는 위의 여러 가지 알고리즘의 단점을 개선한 새로운 비선형 줄무늬 제거 알고리즘을 제안한다. 2장에서는 본 알고리즘에 대한 내용을 설명한다. 3장은 아리랑 위성에 탑재된 EOC 카메라를 통해 획득한 영상에 알고리즘을 적용하여 본 알고리즘의 우수성을 검증한다. 4장에서는 본 논문을 요약하고 결론을 맺는다.

2. 비선형 줄무늬 잡음제거 알고리즘

위성영상의 줄무늬를 제거하기 위해서 우선 두 가지를 가정한다. 첫째, 영상은 거의 균일(quasi-homogeneous)하다. 즉, 영상의 임의의 한 열(column)은 그 주변의 열과 통계적 특성이 비슷하다는 가정이다. 둘째, 센서는 시불변(time invariant) 하다. 이것은 센서 각각의 특성 곡선이 영상을 주사하는 동안 변하지 않는다는 것을 뜻한다. 이 가정에 따르면 같은 열 안에서는 같은 밝기 값을 갖는 자연 화소(natural pixel)는 언제나 모두 유일한 값의 화소 값으로 대응된다는 가정이다.

이러한 두 가지 가정을 바탕으로 하여 줄무늬를 제거하기

위한 가장 이상적인 방법은 다음 함수를 최소화하는 것이다.

$$f(r_x) = \sum_{x=1}^N (R(x) - C(x) + r_x)^2 \quad (1)$$

여기서 $R(x)$ 와 $C(x)$ 는 각각 기준 열, 보정 대상 열의 x 번째 화소 값을 나타낸다. r_x 는 차이를 보정해주는 값이다. 따라서 이 식은 원 영상을 보정한 결과와 기준 값과의 차이가 된다. 그 차이를 최소화하는 r_x 가 가장 이상적인 보정 값이 된다. 이 r_x 값을 모든 화소 값에 동일하게 정하면 앞에서 언급한 오프셋만 조정된 결과가 될 것이다.

앞의 두 가지 가정에 따라 (1) 식의 r_x 는 (2) 식과 같이 나누어서 생각할 수 있다.

$$r_x = r_b + r_i \quad (2)$$

여기서 r_b 는 기준 값에 대하여 모든 화소 값이 동일하게 가지고 있는 바이어스를 보정하는 값이다. 이것은 영상이 거의 균일하다는 첫 번째 가정에 기반한 것이다. r_i 는 화소 값이 i 인 화소에 대해 화소 값에 따라 다른 비선형 오차를 보정해주는 값이다. r_i 가 특정 화소 값 i 에 대하여 항상 같은 값을 갖는 것은 센서가 시간에 따라 변하지 않는다는 두 번째 가정에 따른 것이다. i 는 영상의 양자화 정도에 따라 다른 범위를 가질 수 있다. 예를 들어 영상의 각 화소가 8bits/pixel로 양자화 되어 있을 때 i 는 [0, 255]의 범위를 가진다.

i 가 [0, L]의 범위를 가질 때, 식 (3)을 적용하여 식 (1)을 다시 쓰면,

$$f(r_b, r_i) = \sum_{i=0}^L \sum_{x_i=1}^{n_i} (R(x_i) - i + r_b + r_i)^2 \quad (4)$$

이 된다. $f(r_b, r_i)$ 을 최소화하는 r_b 와 r_i 를 찾기 위해 우선 r_b 에 대해 편미분하면,

$$\frac{\partial f(r_b, r_i)}{\partial r_b} = \sum_{i=0}^L \sum_{x_i=1}^{n_i} 2(R(x_i) - i + r_b + r_i) = 0 \quad (5)$$

이 된다. 여기서 x_i 는 화소 값이 i 인 화소들의 색인값(index)을 의미하고, n_i 는 화소 값이 i 인 화소들의 수이다. 이 식을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \sum_{i=0}^L \sum_{x_i=1}^{n_i} r_b &= \sum_{i=0}^L \sum_{x_i=1}^{n_i} (i - R(x_i) - r_i) \\ &= \sum_{i=0}^L \sum_{x_i=1}^{n_i} (i - R(x_i)) - \sum_{i=0}^L \sum_{x_i=1}^{n_i} r_i \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 좌변의 합은 현재 열의 모든 화소 수에 대하여 r_b 를 더한 것이므로 Nr_b 와 같다. 그리고 우변 첫 항의 합 또한 현재 열의 모든 화소 값에 대한 합이다. 우변의 두 번

제 항은 오차의 평균값이라고 할 수 있는 바이어스 성분을 제거한 나머지 비선형 오차의 함이므로 거의 0과 같다고 할 수 있다. 이 결과를 다시 정리하여 r_b 를 구하면

$$\begin{aligned} Nr_b &= \sum_{x=1}^N (C(x) - R(x)) \\ \therefore r_b &= \frac{1}{N} \sum_{x=1}^N (C(x) - R(x)) \\ &= \frac{1}{N} \sum_{x=1}^N C(x) - \frac{1}{N} \sum_{x=1}^N R(x) \\ &= C_m - R_m \end{aligned} \quad (7)$$

이 된다. 여기서 N 은 한 열의 총 화소 수이고 C_m 과 R_m 은 각각 현재 열과 기준 열 화소 값의 평균이다. 따라서 r_b 는 기준이 되는 열과 보정 대상이 되는 열 각각의 평균의 차이가 된다.

한편 $f(r_b, r_i)$ 를 r_i 에 대해 편미분하면

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial r_i} &= \sum_{x_i=1}^{n_i} 2(R(x_i) - i + r_b + r_i) \\ &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

이다. 여기서 $R_b(x_i) = R(x_i) + r_b$ 라 하면,

$$\begin{aligned} \sum_{x_i=1}^{n_i} r_i &= \sum_{x_i=1}^{n_i} (i - R_b(x_i)) \\ n_i r_i &= n_i \cdot i - \sum_{x_i=1}^{n_i} R_b(x_i) \\ r_i &= i - \frac{1}{n_i} \sum_{x_i=1}^{n_i} R_b(x_i) \\ &= i - \frac{1}{n_i} \sum_{x_i=1}^{n_i} R_b(x_i). \end{aligned} \quad (9)$$

식 (7)과 (9)를 각각 이용해서 r_b 와 r_i 를 구하고 이것을 각 화소에 적용하여 보정하여 최종적으로 줄무늬를 제거할 수 있다.

이와 같이 보정 과정을 바이어스 보정과 비선형 오차 보정으로 나누는 이유는 각각에 대해서 기준을 다르게 적용함으로써 더 나은 결과를 얻기 위함이다. 일반적으로 줄무늬 제거를 할 때는 그 기준을 이웃하는 열로 하여 그 둘의 차이를 최소화하도록 하는 방법으로 맨 처음 열부터 순차적으로 각 열의 줄무늬 잡음을 제거한다. 그러나, 이런 방법을 그대로 수행하면 기준 열이 방금 보정한 이웃 열이 되기 때문에 바로 전 열에서 보정한 결과에 있는 오차가 다음 열에 누적된다. 그 이유에 대해 예를 들어 생각해 보자. 바이어스 값을 보정하여 두 열의 차이를 최소화한다는 것은 현재의 열의 평균을 기준의 평균과 같게 하는 것이 된다. 그런데, 이런 과정을 반복하는 것은 영상의 모든 열의 평균을 같게 하는 결과를 가져온다. 이것은 영상이 완전히 균일한 것은 아니므로 옳지 않은 결과이다. 다시 말하면, 단순히 이웃하는 열

을 기준으로 설정하는 것은 영상의 전체적인 경향을 제대로 반영하지 못한다. 따라서 본 논문에서는 이와 같은 문제를 해결하기 위해 줄무늬제거의 단계를 바이어스 제거의 단계와 비선형 오차 제거의 단계로 나누고, 각각에 대해 다른 기준을 사용하여 이러한 문제를 해결하였다.

우선 바이어스 제거의 경우, 영상이 거의 균일하다는 가정에 충실하기 위해서는 실제로는 각 열의 평균이 모두 같지는 않지만 열의 색인값이 증가함에 따라 그 색인값에 대해 천천히 부드럽게 변화하는 값을 가질 것이라고 생각할 수 있다. 오차가 없는 실제 열들의 평균값을 구하는 것은 불가능하다. 따라서 먼저 각 열의 평균을 모두 구한 후에 그 평균값들의 경향만을 추출한 값을 기준 열 평균 R_m 으로 사용한다. 본 논문에서는 이러한 과정을 수행하기 위해 식 (10)과 같이 열의 평균값들의 지역 평균값을 사용하였다.

$$R_m = \frac{1}{w} \sum_{i=-w/2}^{w/2} C_m(x-i) \quad (10)$$

여기서

$$C_m(x) = \sum_{i=0}^{N_i} C(i, x). \quad (11)$$

이러한 방법을 사용함으로써 단순히 영상의 모든 열의 평균을 같게 해주는 것이 아니라 영상의 전반적인 경향을 더 정확히 반영하게 되므로, 이웃하는 열 혹은 특정 열의 평균을 참조하는 것보다 좋은 결과를 얻을 수 있다.

비선형 오차 보정을 수행하기 위해 우리는 앞에서 언급한 것과 마찬가지로 센서의 시불변성을 가정한다. 이때 기준값이 되는 $R_b(x_i)$ 는 다양한 방법을 통해 얻을 수 있다. 예를 들면 첫 번째 가정에 따라 임의 화소의 근처 화소 값들은 그 화소 값과 거의 같은 값을 가질 것이므로, 식 (12)와 같이 단순히 같은 값을 갖는 화소들의 이웃 화소 값들의 평균을 사용할 수 있다.

$$\begin{aligned} r_i &= i - \frac{1}{n_i} \sum_{x_i=1}^{n_i} R_b(x_i) \\ &= i - \frac{1}{n_i} \sum_{x_i=1}^{n_i} R_b(x_i) \\ &= i - \frac{1}{n_i} \sum_{x_i=1}^{n_i} \frac{(C_{-1}(x_i) + C_{+1}(x_i))}{2} \end{aligned} \quad (12)$$

한편, 위와 같은 줄무늬 제거를 수행할 때 잘못된 보정을 방지하기 위해 두가지 보완 방법을 사용한다. 먼저, 영상의 화소 중에는 센서가 인식할 수 있는 최대 범위를 넘거나 최소 범위보다도 작은 강도의 빛이 입력되었을 때, 센서는 그 센서의 동적 범위(dynamic range)의 한계 때문에 각 범위에 속한 강도를 모두 센서의 최대값 혹은 최소값으로 대응시킨다. 이러한 센서의 포화(saturation)현상으로 생성된 화소는 실제 배경영상의 빛의 강도를 제대로 반영하지 못하기 때문에 이러한 화소들을 줄무늬 제거 알고리즘에 사용하면 바람직하지 않은 결과를 가져올 수 있다. 따라서 이러한 화소들은 처리 과정에서 제외하고 그 외의 정상적인 화소들만으로 알고리즘을 수행한다.

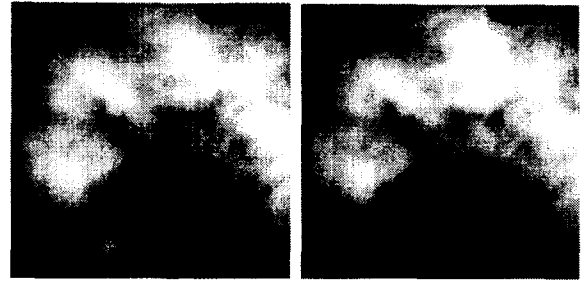
또한 이와 같은 방법으로 구한 r_b 와 r_i 를 실제로 적용했을 때의 결과를 이웃 열과 비교했을 때 수정하기 전의 원 영상보다도 더 좋지 않은 결과를 가져오게 되면 그 값은 사용하지 않는 것이 좋다. 따라서 r_b 와 r_i 로 수정한 결과와 이웃 열과의 차이값을 원 영상과 이웃 열과의 차이값과 비교하여 후자가 후자보다 더 큰 값을 가지는 화소가 있을 때에는 본 알고리즘을 사용하지 않은 원 영상의 화소를 그대로 보존하도록 한다.

3. 실험 및 결과

제안한 알고리즘을 아리랑 1호 위성에 탑재된 EOC카메라로부터 획득한 영상에 적용하였다. 그림2(a)는 실험 대상 영상의 일부분을 나타내고 있다. 세로 방향의 줄무늬가 확연히 드러나는 것을 볼 수 있다. 그림 2(b), (c)는 각각 도수분포도 대응, 평균 및 표준편차 대응 방법을 사용하여 얻은 결과이다. 두가지 방법을 적용한 결과에서 어느정도 줄무늬가 감소된 것을 볼 수 있다. 그러나, 여전히 작은 줄무늬들이 곳곳에 남아있는 것도 볼 수 있다. 그림 2(d)는 2차 곡선 대응 방법을 사용하여 얻은 영상이다. 곡선을 잘 찾는 부분에서는 줄무늬가 많이 제거되었지만, 잘못된 곡선 추정에 의해서 영상의 오른쪽 부분은 오히려 원 영상을 많이 훼손시킨 것을 볼 수 있다. 그림 2(e)는 제안한 방법을 사용하여 얻은 영상이다. 제안한 방법을 사용한 결과에서는 줄무늬가 거의 남아있지 않은 것을 볼 수 있다.

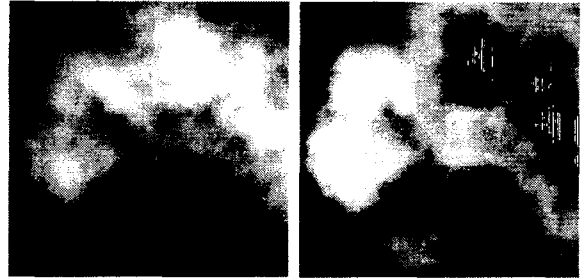
4. 결론

본 논문은 줄무늬 제거를 위해 비선형 보정 방법을 제안하였다. 줄무늬 잡음의 원인을 바이어스에 의한 것과 특성곡선의 차이에 의한 것으로 나누어서 두 오차에 대한 보정의 기준 값을 서로 다르게 적용하여 더 정확한 보정을 할 수 있도록 하였다. 아리랑 1호 위성에 탑재된 EOC로부터 획득한 영상에 본 알고리즘을 적용하여 다른 알고리즘에 대해 우수함을 검증하였다.



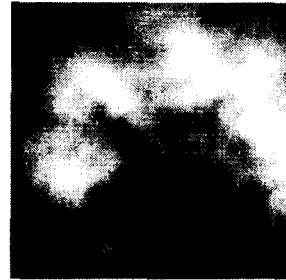
(a) 원 영상

(b) 도수분포도 대응 방법



(c) 평균,표준편차 대응 방법

(d) 2차 곡선 대응 방법



(e) 제안한 방법

그림2. 결과 영상

참고 문헌

[1] B. K. P. Horn and R. J. Woodham, "Destriping LANDSAT MSS Images by Histogram Modification," *Computer Graphics and Image Processing* 10, 1979, 69-83

[2] G. Corsini, M. Diani, and T. Walzel, "Striping Removal in MOS-B Data", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 38, NO. 3, May 2000

[3] J. J. Pan, "Spectral Analysis and Filtering Techniques in Digital Spacial Data Processing." *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 55(8): 1203-1207