

무감독 Endmember 추출을 통한 하이퍼스펙트럴 영상의 제약 선형분광혼합분석에 관한 연구

A Study on Constrained Linear Spectral Unmixing of Hyperspectral Imagery based on Unsupervised Endmember Selection

최재완* · 김대성** · 김용일***

Jae Wan Choi · Dae Sung Kim · Yong Il Kim

* 서울대학교 대학원 지구환경시스템공학부 석사과정(E-mail: go2oasis@hotmail.com)

** 서울대학교 대학원 지구환경시스템공학부 박사과정(E-mail: mutul94@empal.com)

*** 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 부교수(E-mail: yik@plaza.snu.ac.kr)

요지 선형혼합분광분석(LSU, Linear Spectral Unmixing) 모델은 위성 영상의 한 화소값이 공간 내에 포함된 다양한 지표 대상물의 반사에너지가 혼합된 결과로 나타난다는 가정을 통해 화소이하(Sub-Pixel) 단위의 영상 분석을 수행하는 알고리즘의 한 형태이다. 분석의 결과는 한 화소에 존재하는 순수 대상물(Endmember)의 비율로 나타나며, 최소제곱법을 이용하여 결과를 도출하는 것이 일반적인 방법으로 알려져 있다. 하지만, 최소제곱법을 이용한 선형혼합분광분석 모델은 기본적인 가정을 만족시키지 못하며, Endmember를 사용자가 임의로 지정해야 하기 때문에 영상 분석에 많은 어려움이 있다. 이런 단점을 극복하기 위해 무감독으로 추출된 Endmember를 이용한 제약선형분광혼합분석(Constrained Linear Spectral Unmixing) 모델을 본 연구를 통해 제안하고자 한다. 결과를 통해, 무감독 제약선형분광혼합분석 모델은 선형분광혼합분석 모델에 비해 각각의 Endmember에 대하여 제약조건을 만족하는 점유비율(Abundance) 정보를 제공하였으나, 비슷한 Endmember를 중복 추출할 수 있는 가능성도 지니고 있음을 확인할 수 있었다.

1. 서 론

하이퍼스펙트럴 영상은 좁은(보통 10nm) 폭을 가진 연속적인 많은(수십~수백개) 밴드로 이루어진 영상으로 높은 분광해상도 특성을 가지며(Chen-I, 2000), 분광정보에 의한 물체의 탐지나 화소 이하 분석 등에서 다중분광 영상보다 우수한 성능을 보인다.

기존의 영상처리방법은 혼합된 물질에 대

한 화소를 단일의 지표물로 가정하여 처리하고 있으나 실제 영상 내의 한 화소의 값은 다양한 지표물의 반사에너지가 혼합된 결과로 볼 수 있으므로 원격탐사 데이터의 효과적인 분석과정으로 볼 수 없다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 지상 내의 물질들의 고유한 분광반사특성을 이용하여 각 화소를 구성하는 지표물의 점유비율을 해석하는 분광혼합기법에 대한 연구가 최근 활발히 진행되

고 있으며, ETM+, AVIRIS, Hyperion 영상에 적용한 연구가 대표적이다(Kazuo et al., 2002; Chein-I, 2000; D. S. Kim, 2004). 또한, 분광혼합기법의 정확한 수학적 해석을 위한 시도도 활발히 진행되고 있는데, NNLS 알고리즘을 이용한 방법(Chein-I, 2000), ANOVA 통계분석을 이용한 방법(Harry, 2000), 제한된 총최소제곱법(Jerry, 2000) 등을 통해 하이퍼스펙트럴 영상의 화소 내 물질의 혼합비율을 분석하였다.

본 연구에서 이러한 분광혼합기법의 제약 조건을 만족하는 수학적 모델을 이용하여 Hyperion 영상에 선형혼합분광기법을 적용하여 알고리즘의 유효성을 평가해보았다. 특히, 대부분의 연구사례에서 수동적으로 이루어져 왔던, Endmember¹⁾ 추출을 선형혼합분광 모델 내에 첨가하여 자동으로 실험을 수행해 봄으로써, 무감독 Endmember추출을 통한 혼합분광기법 알고리즘의 가능성과 문제점에 대해서 분석하였다.

2. 제약선형분광혼합분석

2.1 선형분광혼합분석의 제약조건

선형혼합분광모델은 선형적인 관측식을 통해서 화소내의 순수한 물질들의 비율을 분석하는 기법을 말한다(D. Heinz, 2001). 영상 화소 하나의 밝기값이 Abundance²⁾들의 합으로 표시된다고 가정하면, 일반적인 선형혼합분광모델의 관측식은 식 1과 같으며, 식 2를 통해 결과를 도출할 수 있다.

$$x = \sum_{k=1}^M s_k a_k + w \quad (1)$$

$$a_k = (s_k^T s_k)^{-1} s_k^T x \quad (2)$$

여기서,

x : 하이퍼스펙트럴영상의 화소

s_k : Endmember 분광정보 행렬

a : Abundance

w : 발생오차

M : Endmember의 개수

식 2에서 계산되는 Abundance는 비율을 의미하므로 화소 내에 존재하는 Abundance의 합은 1이 되어야 하며(Sum-to-One Constraint, 식 3), Abundance는 모두 0이상의 값을 가져야 한다(Non-Negative Constraint, 식 4). 따라서 혼합분광분석 모델은 다음과 같은 두 가지 제약조건을 만족시켜야 한다.

$$\sum_{k=1}^M a_k = 1 \quad (3)$$

$$0 \leq a_k \leq 1 \quad (4)$$

하지만, 기존의 선형혼합분광모델의 경우 특정 화소 내에 초기에 설정한 Endmember가 존재하지 않아도 모든 Endmember가 존재한다고 가정하여 연산을 수행하므로 화소내의 Abundance가 음의 값을 가지거나 1을 넘어 과도하게 커지며 합이 1이 되지 않는 문제가 발생한다. 따라서 선형혼합분광분석 모델을 사용하여 Abundance 값을 구하기 위해서는 모델이 가지는 제약조건을 만족시킬 수 있는 알고리즘 적용이 필요하다.

2.2 제약선형혼합분광분석 모델

2.2.1 Non-Negative Constraint의 해결

Abundance 값이 양이 되어야 한다는 조건을 만족시키기 위해 Non-Negative Least Square(NNLS) 알고리즘(Rasmus, 1997)을 이용하여 모든 해가 음의 값을 갖지 않도록 최적화하였다. NNLS 알고리즘은 Active Set 알고리즘에 기반을 두고 있으며, 행렬 $Ax=B$ 에서 x 를 계산할 때 세부적인 알고리즘 예는 다음과 같다.

1) 순수한 물질들의 분광 정보

2) Endmember의 화소 내 점유비율

- a. 초기화**
- i. Active set= \emptyset , Passive set= $\{1,..M\}$
(M은 미지수의 개수)
 - ii. 미지수의 초기치 x 산정
 - iii. $w = A^T(B - Ax)$
- b. 기본 수행**
- i. $m = \arg \max(w_n)$
 - ii. i 가 위치하는 미지수를 Active Set에 포함
 - iii. $s = [(A^P)^T A^P]^{-1} (A^P)^T B$
 - iv. if $\min(s) < 0$
 - $a = -\min(x/(x-s))$
 - $x = x + a(s-x)$
 - 새로운 x 에 의거하여 Active, Passive Set 재구성
- $$s = [(A^P)^T A^P]^{-1} (A^P)^T B$$
- v. $x = s$
 - vi. $w = A^T(B - Ax)$
 - vii. $i \sim vi$ 을 반복수행(Passive set= \emptyset or $\max(w) < Tol$ 이면 종료)



<그림 1> 서울남부지역 Hyperion 영상

3.2 실험 방법

초기화과정은 알고리즘의 수행을 위해 초기 Endmember를 설정하는 과정을 말하며, 최소 2개 이상의 Endmember가 존재하여야 관측식을 풀 수 있다. 첫번째 Endmember는 하이퍼스펙트럴 영상의 차원 내에서 가장 큰 벡터 크기를 가지고 있는 화소로 가정하며, 두번째 Endmember는 첫번째 Endmember와 가장 벡터 크기가 큰 화소로서 구하는 식은 아래와 같다.

$$s_1 = \arg \max (x_i^T x_i) \quad (6)$$

$$s_2 = \arg \max (s_1 - x_i)^T (s_1 - x_i) \quad (7)$$

$$Max.err. = (x_i - s_k a_k)^T (x_i - s_k a_k) \quad (8)$$

여기서

x_i : i 번째 화소의 분광 정보

식 6, 7에 의해 얻어진 Endmember를 이용하여 NNLS를 수행하면 음의 값을 가지지 않는 Abundance 값을 도출해 낼 수 있다. 위의 과정을 전체 화소에 대하여 적용한 후, 원영상 화소의 분광 정보와 Abundance 값의 역변환된 값과 비교하여 최대 오차값을 가지는 화소를 다음 Endmember로 재설정하며 (식 8 참고), 최대 오차값이 임계값 미만이면 수행을 종료한다.

4. 실험결과

최대오차의 임계값은 10^5 으로 가정하였고, 10개의 Endmember에 대해 Abundance

2.2.2 Sum-to-One Constraint의 해결

Abundance합이 1이 되어야 한다는 조건은 선형혼합분광분석 모델을 구성할 때, 행렬의 열벡터 첨가를 통해서 적용할 수 있다(식 5 참고).

$$s_M = \begin{bmatrix} s_M \\ 1 \end{bmatrix}, \quad x = \begin{bmatrix} x \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

3. 알고리즘 적용

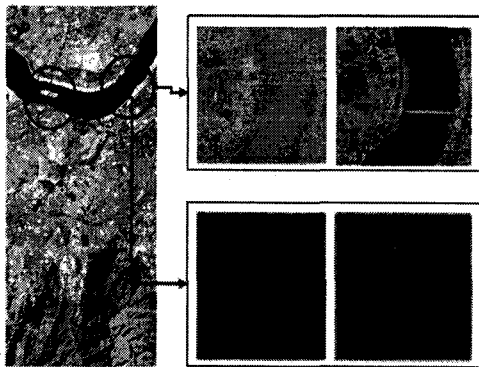
3.1 실험 대상

실험에 사용한 데이터는 EO-1 위성에 탑재된 Hyperion 센서로 촬영된 영상이다. 2002년 4월 3일에 취득된 것으로 도심지, 강, 산림 등으로 이루어진 서울 남부지역을 실험 대상으로 사용하였다. 최종 200pixels \times 500 pixels \times 93밴드를 추출하였으며 <그림 1>을 통해 확인할 수 있다.

값을 계산하였다. 무감독 제약선형혼합분광 분석 모델의 경우 지형내의 물질 비율이 대체적으로 잘 나누어졌으나, 선형혼합분광 모델은 Abundance 영상의 대부분이 단일 물질만을 감지하지 못하고 있으며 영상전체에 오차값들이 분포하고 있음을 확인할 수 있다. 특히 <그림 2>에서 볼 수 있듯, 제약선형혼합분광분석 모델은 물과 인공구조물을 명확하게 구분하지만 선형혼합분광모델은 여러 물질들의 분광특성을 정확히 구분하지 못했다. <그림 3>은 추출된 Endmember와 Abundance 영상을 나타낸다(마지막 장에 정리).

또한, 정량적 평가를 위해서 각 화소의 Abundance의 수치적결과도 확인해 보았으며, 제안한 알고리즘은 모든 Abundance 값들이 0과 1사이임을 알 수 있었다<표 1>. 이는 제약조건을 만족하는 것이기 때문에, 제약선형혼합분광분석 모델이 더욱 효과적인 알고리즘임을 설명한다.

하지만, 무감독 Endmember 추출에 있어 Endmember 수가 증가함에 따라 비슷한 Endmember가 중복 추출될 경우 두 모델의 결과가 불명확해지는 문제점이 나타났다. 이로 인해 특정 Abundance 값이 대부분 0에 가까운 값을 가지게 되며, 많은 수의 Endmember에 비해 다양한 물질들의 특성을 표현하지 못했다<표 2>. 이는 Endmember 추출 시, 분광정보들의 기하학적 모델을 고려하지 않고, 단순히 혼합모델을 역변환하여 원 화소와의 오차만을 가지고 Endmember를 추출했기 때문이다.



<그림 2> Abundance 영상의 결과 비교
(좌: 선형혼합분광 우: 제약선형혼합)

<표 1> Abundance 영상의 수치적 결과

Endmember No.	최대값		최소값	
	선형혼합 분광	제약선형 혼합	선형혼합 분광	제약선형 혼합
1	1.146	1	-0.166	0
2	1.466	1	-0.621	0
3	1	1	-0.132	0
4	1	1	-0.407	0
5	1	1	-0.372	0
6	1	1	-0.646	0
7	1	1	-0.307	0
8	1	1	-1.071	0
9	1	1	-0.584	0
10	1	1	-0.506	0

5. 결 론

기존의 선형혼합분광분석 모델이 가지는 제약문제를 제약혼합분광분석 모델을 통해 기존의 결과보다 시각적으로 우수한 결과를 도출하였으며, 영상점유비율의 수치적인 결과에서도 모든 물질점유비율의 값이 제약조건을 만족하였다. 또한, 선형혼합분광모델에 있어서 사용자의 개입 없이 Endmember를 자동으로 추출할 수 있는 가능성도 확인하였다. 하지만, Endmember 수가 증가함에 따라 비슷한 Endmember가 중복 추출될 경우 두 모델의 결과가 불명확해지는 문제점이 나타났다.

향후 무감독 Endmember 추출 시, 영상 내 최적의 Endmember를 찾는 방법을 고려해야 할 것이며, 정확한 평가를 위해서 알고리즘의 정확도뿐 만 아니라, 하이퍼스펙트럴 영상의 Abundance 영상에 대한 분석도 더욱 세분화해야 할 필요가 있다.

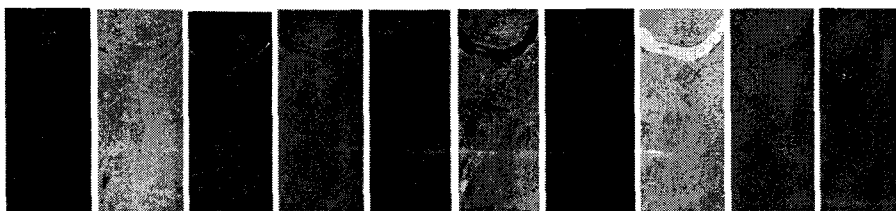
< 참고 문헌 >

1. Chein-I Chang and D. Heinz, "Constrained sub-pixel detection for remotely sensed images," IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 38, No. 3, pp. 1144-1159, 2000.

2. D. Heinz and Chein-I Chang, "Fully constrained least squares linear mixture analysis for material quantification in hyperspectral imagery," IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 39, No. 3, pp. 529-545, 2001.
3. D. S. Kim et al, " Sub-Pixel Analysis of Hyperspectral Image Using Linear Spectral Mixing Model and Convex Geometry Concept", Korean Journal of Geomatics, Vol. 4, No. 1, 2004.
4. Harry N. Gross and John R. Schott, "Evaluation of Two Applications of Spectral Mixing Models to Image Fusion " Remote Sensing of Environment, 2000
5. Jerry Burman, Birsen Sirkeci, David Brady, "Restricted total least squares solutions for hyperspectral imagery", International Conference on Acoustic, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2000.
6. Kaxuo O., H. Oguma, and M. Sugita, "Subpixel Classification of Alder Trees Using Multitemporal Landsat Thematic Mapper Imagery", PE&RS, 68(1), 2002.
7. Rasmus Bro, Sijmen De Tong, "A fast non-negativity-constrained least squares algorithm", Journal of Chemometrics, Vol. 11, pp393-401, 1997.

<표 2> 각 Endmember 간의 상관관계

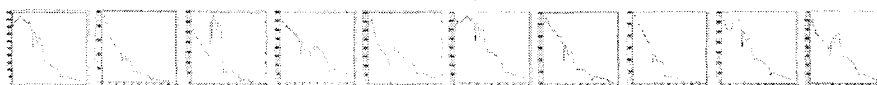
Endmember No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	0.929	0.836	0.938	0.874	0.982	0.979	0.941	0.987	0.927
2	0.929	1	0.772	0.921	0.940	0.878	0.980	0.990	0.910	0.910
3	0.836	0.772	1	0.728	0.781	0.861	0.795	0.736	0.836	0.898
4	0.938	0.921	0.728	1	0.932	0.939	0.945	0.906	0.936	0.920
5	0.873	0.940	0.781	0.933	1	0.862	0.912	0.897	0.862	0.960
6	0.982	0.878	0.862	0.939	0.862	1	0.940	0.877	0.988	0.941
7	0.98	0.980	0.795	0.944	0.913	0.940	1	0.986	0.963	0.921
8	0.941	0.990	0.736	0.906	0.897	0.876	0.986	1	0.914	0.875
9	0.987	0.91	0.836	0.936	0.862	0.989	0.963	0.914	1	0.929
10	0.928	0.91	0.898	0.920	0.960	0.941	0.921	0.875	0.929	1



(a) 선형혼합분광분석 모델 결과



(b) 제약선형혼합분광분석 모델 결과



(c) 무감독 Endmember 추출에 의한 10개의 Endmember 추출 결과

<그림 3> 무감독 Endmember 추출에 따른 선형혼합분광분석 모델과 제약선형혼합분광분석 모델 결과