

위성자료의 시계열 특성에 기반한 실시간 자료 재구축

정명희¹, 이상훈², 장석우^{1*}

¹안양대학교 소프트웨어학과, ²가천대학교 산업경영공학과

Reconstruction of Remote Sensing Data based on dynamic Characteristics of Time Series Data

Myung-Hee Jung¹, Sang-Hoon Lee², Seok-Woo Jang^{1*}

¹Division of Software Engineering, Anyang University

²Division of Industrial Engineering, Gachon University

요약 여러 응용 분야에서 널리 활용되고 있는 위성영상은 지표면을 모니터링 하는데 매우 유용한 자료원이다. 위성자료는 원격 센서를 통해 획득되기 때문에 자료 획득시의 구름이나 에어로졸과 같은 관측 기상 상태나 센서 오작동상태에 따라 많은 노이즈와 에러가 포함되어 있다. 자료의 정확성은 자료 분석 결과의 정확성과 신뢰도에 영향을 주기 때문에 고품질 자료를 위한 노이즈 제거 및 자료 복원은 중요한 전처리(preprocessing) 과정이다. 본 연구에서는 다중주기 하모닉 모델을 이용하여 위성자료의 시계열적 동적 특성을 모형화하고 자료의 공간적 상관관계를 고려하여 적응적으로 자료복원을 수행하는 재구축 시스템을 제안하고 있다. 다중 주기에 기반을 둔 모형은 단일 주기보다 지표면의 연간 변화뿐 아니라 계절적 변화와 같이 내부적인 변화 패턴을 모형화 하는데 적합하다. 또한 기존에 제안된 복원 방법은 일정 기간의 전체 자료에 대한 복원 방법으로 실시간 복원법이 아니지만 제안된 방법은 실시간 자료 복원이 가능하여 위성자료 실시간 재구축을 위한 전처리 시스템의 알고리즘으로 활용될 수 있다. 제안된 방법은 먼저 시뮬레이션 자료를 통해 성능이 평가되었고 2011부터 2016년까지 6년간의 MODIS NDVI 자료에 적용하여 평가되었다. 실험 결과는 제안된 자료 복원 시스템이 위성영상 자료 분석을 위한 고품질 자료 재구축 방법으로 매우 유용함을 보여주고 있다.

Abstract Satellite images, which are widely used in various applications, are very useful for monitoring the surface of the earth. Since satellite data is obtained from a remote sensor, it contains a lot of noise and errors depending on observation weather conditions during data acquisition and sensor malfunction status. Since the accuracy of the data affects the accuracy and reliability of the data analysis results, noise removal and data restoration for high quality data is important. In this study, we propose a reconstruction system that models the time dependent dynamic characteristics of satellite data using a multi-period harmonic model and performs adaptive data restoration considering the spatial correlation of data. The proposed method is a real-time restoration method and thus can be employed as a preprocessing algorithm for real-time reconstruction of satellite data. The proposed method was evaluated with both simulated data and MODIS NDVI data for six years from 2011 to 2016. Experimental results show that the proposed method has the potentiality for reconstructing high quality satellite data.

Keywords : Adaptive Reconstruction, Dynamic Compositing, MODIS NDVI, Multi-period Harmonic Model, Noise Reduction

본 논문은 한국과학재단(NRF) 기초과학연구지원 사업(NRF-2016R1D1A1B03932478)으로 수행되었음.

*Corresponding Author : Seok-Woo Jang(Anyang Univ.)

Tel: +82-10-9482-6547 email: swjang7285@gmail.com

Received July 17, 2018

Revised July 26, 2018

Accepted August 3, 2018

Published August 31, 2018

1. 서론

위성을 이용한 원격탐사 기법은 지표면에서 일어나고 있는 현상에 대해 실시간 정보를 제공해 주는 매우 유용한 기술이다. 1970년대 미국의 LANDSAT을 시작으로 지난 50여 년간 꾸준히 위성 탑재체가 발전되어옴에 따라 이제 위성영상을 이용한 원격탐사는 지표면에서 발생하는 지리적이고 생물학적인 과정에 대한 다양한 자료를 연속적으로 일정한 시간 간격으로 수집할 수 있게 되어 환경, 도시, 재난재해, 생태, 대기, GIS, 등 다양한 분야에서 활용되는 과학적 수단으로 자리매김하게 되었다. 원격탐사자료는 일정에 따라 반복적이고 지속적으로 수집되기 때문에 단기 현상뿐 아니라 중장기적인 차원에서 지표면 변화를 모니터링하고 환경을 감시하는 중요한 정보원이다. 특히 고 시간 해상도(수집 간격이 1일 이내)의 다중분광 위성자료는 상대적으로 낮은 공간 해상도를 가지고 있지만 지구의 생물리학적 과정에 관한 연구에 매우 유용한 공간 및 시간적 정보를 제공해 준다.

Terra와 Aqua에 탑재된 MODIS(MODerate resolution Image Spectroradiometer)는 $0.4 \mu\text{m}$ ~ $14.4 \mu\text{m}$ 사이 파장대의 36개 분광밴드를 가지고 다양한 공간해상도 (2 bands at 250 m, 5 bands at 500 m, 29 bands at 1 km)의 일일 글로벌 자료를 제공해 주는 장점으로 인해 많은 분야에서 유용하게 활용되고 있는 위성자료다[1]. MODIS는 구름층의 변화나 해양, 지표 및 저층 대기권에서 일어나는 현상에 대해 지역적 수준에서뿐만 아니라 지구적 차원에서 역학 측정이 가능하게 설계되어 있어 지표면에서 발생하는 생물리학적 과정에 관한 유용한 정보를 제공하고 있다. 예를 들어 MODIS의 밴드 1과 밴드 2 관측치로부터 변환된 식생지수인 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)는 대표적인 지표면의 식생 관측수단으로 식생, 토지피복, 지표면 온도 변화 등 다양한 지구 생태학적 특성과 관련한 연구에서 사용되고 있고 넓은 지역의 식생 분석에 매우 성공적으로 활용되고 있다[2-4].

장시간에 걸쳐 관측되는 원격탐사 자료의 물리적 과정(physical processes)은 변화에 있어 일반적으로 시계열 경향을 나타내고 있어 시간 도메인에서의 자료 분석은 시간적 변화 양상에 대한 특징을 잘 보여준다. 그러나 연속적인 광학 영상 시리즈의 시계열 분석에 있어 가장 큰 문제점은 sensor의 기계적 문제와 열악한 관측 환경으로

인해 실제 관측 간격이 이론적 관측 간격보다 길다는 것이다. 즉, 일정하게 정해진 시간에 센서를 통해 지표면의 반사강도 자료를 수집하는데 수집당시 지표면을 가리는 구름과 에어로졸 등과 같은 기상관련 관측 장애요인과 센서의 오작동으로 인한 미관측 및 악성 자료가 많이 발생하게 된다. MODIS NDVI 시계열 자료 역시 많은 노이즈 자료나 미관측 자료를 포함하고 있어 일일 자료 사용이 어렵기 때문에 8일 간격 이상의 MVC(Maximum Value Composite)에 의한 합성 자료를 사용한다[5]. 그러나 합성자료 역시 관측환경 악화나 기계적 문제로 인해 노이즈(악성) 자료를 여전히 포함하고 있고 일일자료가 아니기 때문에 합성 기간 보다 짧은 간격의 변화를 탐지할 수 없다는 문제를 여전히 가지고 있다. 이러한 미관측 자료는 궁극적으로 자료를 활용한 분석 결과의 정확성에 영향을 미치게 됨으로 노이즈를 제거하고 미관측 자료를 예측하는 보정과정이 반드시 필요하다[6-7].

본 연구에서는 MODIS NDVI 시계열 자료의 시간에 따른 변화 패턴을 모형화하고 동적 합성(dynamic compositing) 과정의 적응적(adaptive) 방법으로 고품질의 시계열 자료를 재구축 하는 방법론이 연구되었다. 지표면의 생물리학적 과정과 연관된 현상은 기후와 연관되어 있기 때문에 시간에 따른 변화는 일반적으로 계절적 특성을 보인다. 따라서 원격탐사 영상자료의 시간에 따른 동적 변화는 계절적 특성을 모형화하여 설명할 수 있다[8-9]. 하모닉 모형(harmonic model)은 복잡한 파형을 정현파 성분(sinusoidal component)의 합으로 나타내어 수준, 주기, 진폭, 위상 4가지 요소를 통해 변이를 분석하는 방법으로 지표에서 관찰되는 계절적 변화 양상을 모형화 하기 위해 사용되었다[10]. 다중 주기 하모닉 모형의 파라미터는 각 주기마다 exponentially-weighted least-squares 필터를 이용하여 적응적 방법으로 추정되었다.

제안된 자료 복원 및 재구축 알고리즘의 성능은 먼저 시뮬레이션 자료를 이용하여 정량적으로 평가되었다. 또한 MODIS NDVI 실제 자료에도 적용되어 평가 되었는데 2011년부터 2016년까지 6년간의 영상크기 4380x2580의 한반도를 포함하는 총 2,190개의 자료를 사용하여 알고리즘의 유효성을 검증하고자 하였다.

2. 본론

2.1 자료 복원 및 재구축 시스템

제안된 자료 복원 시스템은 미관측 자료에 대한 추정치를 산정하고 노이즈가 없는 원 자료에 대한 예측치를 지속적으로 추정해 가는 필터로 구성된 적응적 과정(adaptive process)으로 이루어져 있다. 노이즈 자료와 미관측 자료는 그 지점에서의 자료의 시간적 흐름 패턴을 추적하여 2차 다항식을 이용해 동적 합성을 통해 복원하고 하모닉 모형을 이용해 추정치를 예측해 간다[11-13]. Fig. 1은 전체적인 자료 복원 및 재구축 시스템의 적응적 과정을 보여주고 있다.

적응적 과정에서 다항식과 하모닉 모형의 파라미터들은 exponentially-weighted least-squares 방법을 이용해 연속적으로 업데이트 되면서 주어진 자료에 맞는(fitting) 파라미터를 추정해 간다[11-12]. 먼저 일정 단위기간의 관측값 중에서 가장 큰 값을 선택하는 정적합성을 수행하고 이 값에 대해 2차 적응 다항식 모형을 사용해 미관측 혹은 노이즈 자료를 연속적으로 복원하는 동적 합성을 수행한다. 동적합성을 통해 복원된 자료에서 Point-Jacobian iteration MAP 필터를 통해 공간적 상관성이 제거된 후 노이즈 없는 원본 자료 값이 추정된다[13]. 다음은 단위 기간마다 하모닉 모형을 적용하여 불완전한 시계열 관측 자료를 재구축하는데 최종 재구축된 값은 정적합성과 적응 하모닉 모형으로 추정된 값 중에서 더 큰 값을 선택하는 합성방식을 사용한다.

이러한 과정에서 재구축 시스템을 구성하는 모형들은 적응 지수를 사용하여 지난 정보를 버리고 현재에 가까운 정보만을 취하면서 반복적으로 같은 과정을 수행하는

데 시간이 지남에 따라 모형들은 주어진 자료에 적응적으로 fitting되어 간다[14]. 제안된 적응 재구축 시스템은 반복적인 피드백 과정을 거쳐 일정 단위 기간 간격을 사용하여 자료를 실시간으로 복원한다.

2.2 하모닉 모형을 이용한 적응 재구축

하모닉 분석(harmonic Analysis or Fourier analysis)은 복잡한 파형을 정현파 성분(sinusoidal component)의 합을 이용하여 변동성을 분석하는 방법이다. NDVI 시계열 자료처럼 계절적 변동성을 보여주는 위성영상의 경우 각 화소가 속하는 지역의 계절적 특성은 하모닉 모형을 사용하여 설명할 수 있다[8,10,14-16]. 지역 내 물리적 과정은 복잡한 파형의 변동성을 나타내기 때문에 다중주기 하모닉 모형이 단일모형보다는 더 적합하다. t 시점에서의 관측치는 다음과 같이 화소 지역의 특징에 대응하는 원래의 화소 값과 노이즈의 합으로 나타낼 수 있다.

$$Y_t = X_t + \epsilon_t \tag{1}$$

$$X_t = \mu_t + \delta_t = \left\{ \eta_t + \sum_{k=1}^p \gamma_{ik} \sin(\omega_{ik}t + \theta_{ik}), i \in I_n \right\}$$

I_n 은 화소 인덱스 집합이고 Y_t 와 X_t 는 각각 관측치와 노이즈가 없는 원 intensity(강도) 벡터, ϵ_t 는 노이즈 벡터, μ_t 는 mean intensity 벡터, δ_t 는 deviation 벡터, p 는 하모닉 주기 수를 나타낸다. 하모닉 모형의 파라미터는 MAP 필터를 통해 추정된 각 픽셀 강도의 원 강도에 대한 시간적 변화추이에 의해 계산된다[13, 16].

각 화소에 대한 식 (1)의 정현파 식은 다음과 같이 자세히 표현될 수 있다.

$$x_t = \eta + \sum_{k=1}^p \gamma_k \sin(\omega_k t + \theta_k) = \eta + \sum_{k=1}^p \alpha_k \cos \omega_k t + \beta_k \sin \omega_k t$$

$$\gamma_k = \sqrt{\alpha_k^2 + \beta_k^2} \tag{2}$$

$$\theta_k = \tan^{-1} \frac{\alpha_k}{\beta_k} \quad \text{for } \beta_k \neq 0$$

연속적인 m 단계, $t = t_1, t_2, \dots, t_m$ 에 대해

$$X_m = H_m V \tag{3}$$

$$X_m = [x_{t_1}, x_{t_2}, \dots, x_{t_m}]^T$$

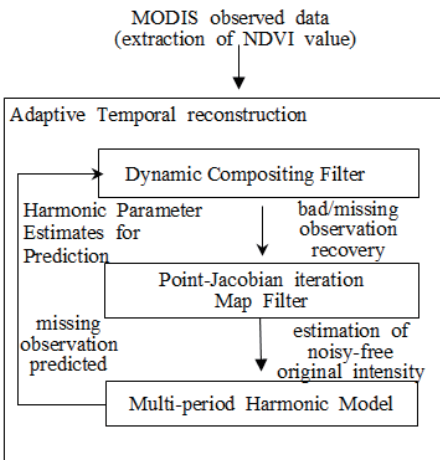


Fig. 1. Adaptive Data reconstruction System

$$\mathbf{H}_m = \begin{bmatrix} 1 & \cos \omega_1 t_1 & \sin \omega_1 t_1 & \dots & \cos \omega_p t_1 & \sin \omega_p t_1 \\ \vdots & \cos \omega_1 t_2 & \sin \omega_1 t_2 & \dots & \cos \omega_p t_2 & \sin \omega_p t_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 1 & \cos \omega_1 t_m & \sin \omega_1 t_m & \dots & \cos \omega_p t_m & \sin \omega_p t_m \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{V} = [\eta, \alpha_1, \beta_1, \dots, \alpha_p, \beta_p]^T$$

하모닉 파라미터 벡터 \mathbf{V} 의 최소자승추정치는 목적 함수로부터 계산된다[16]. 식 (4)의 목적 함수를 1차미분을 한 후 얻어지는 최소자승 추정치는 식 (5)와 같다.

$$\min_{\mathbf{V}} \{ (\mathbf{X}_m - \mathbf{H}_m \mathbf{V})^T (\mathbf{X}_m - \mathbf{H}_m \mathbf{V}) \} \quad (4)$$

$$\hat{\mathbf{V}} = (\mathbf{H}_m^T \mathbf{H}_m)^{-1} \mathbf{H}_m^T \mathbf{X}_m \quad (5)$$

하모닉 파라미터는 exponentially weighted least squares를 이용하여 적응적 과정으로 계산된다[14]. 이때 weight, $0 \leq \lambda_n \leq 1$ 를 사용하는데 λ_n 은 지난 관찰치에 대한 의존도를 낮추는 망각계수로 이를 통해 시간에 따른 변화 의존도를 조절하여 파라미터를 추정한다.

3. 결과

3.1 시뮬레이션 자료를 이용한 평가

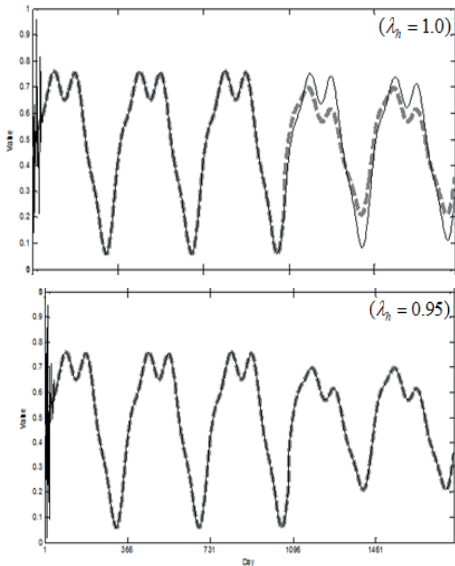


Fig. 2. Original curve (dotted) and estimated curves (solid) of adaptive harmonic temporal filter

먼저 시뮬레이션 자료를 이용하여 제안된 자료 재구축 알고리즘을 테스트 하였다. 자료는 내부적으로 3개 주기(1년, 6개월, 3개월)로 구성된 2개의 하모닉 모형으로 5년간 일일(daily) 자료 총 1825개의 자료를 시뮬레이션 하였다. 이때 시계열 자료 동적 커브의 변화를 주기 위해 처음 3년과 마지막 2년의 파형은 다른 파라미터를 사용하여 시뮬레이션 하였다.

이렇게 시뮬레이션된 자료의 동적 패턴을 추정하기 위해 재구축 시스템 필터는 7 주기(연간, 6개월, 3개월, 2개월, 1개월, 2주, 1주)의 하모닉 모형을 사용하여 적응적으로 패턴을 추정하였다. Fig. 2는 시뮬레이션 커브와 선택한 망각계수($\lambda_n=1.0, 0.95$)별로 하모닉 모형을 통해 추정된 커브를 비교해서 보여주고 있다.

다음은 노이즈 자료에 대한 테스트를 위해 맑은 날씨 50%, 흐린 날씨 25%의 시계열과 맑은 날씨 30%, 흐린 날씨 35%의 5년 시계열 자료를 시뮬레이션 하였고 4주기의 하모닉 모형을 적용하여 시계열패턴을 추적하여 결과를 비교하였다. Fig. 3의 결과에서 알 수 있듯이 하모닉 추정은 처음 3년 패턴에서는 추정 정확성이 떨어지는 것을 볼 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 이동 데이터 윈도우 기법을 적용하여 윈도우내에서 가장 큰 자료값을 대표로 사용하는 MVC 기법을 적용하였다. 그 결과 Fig. 4에서 보듯이 알고리즘 적용시 변동 패턴에 대한 추정 성능은 단일 데이터를 사용하여 알고리즘을 적용하는 것보다 이동 윈도우 기법과 같이 자료의 연속성을 이용하는 것이 더 효과적인 것을 알 수 있다.

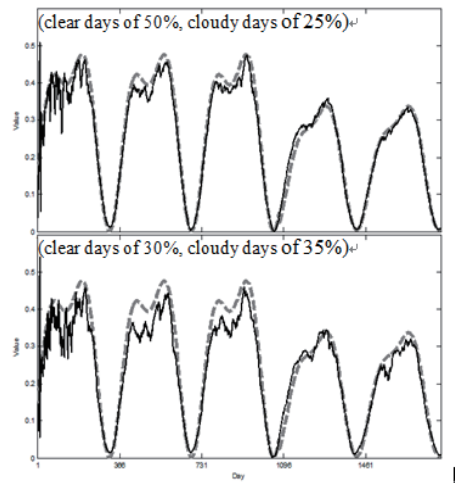


Fig. 3. Results of adaptive reconstruction using 4-periodic harmonic filter (original data-dotted, estimated data - solid)

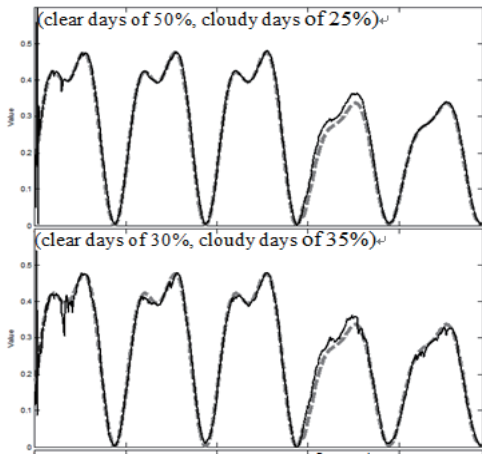
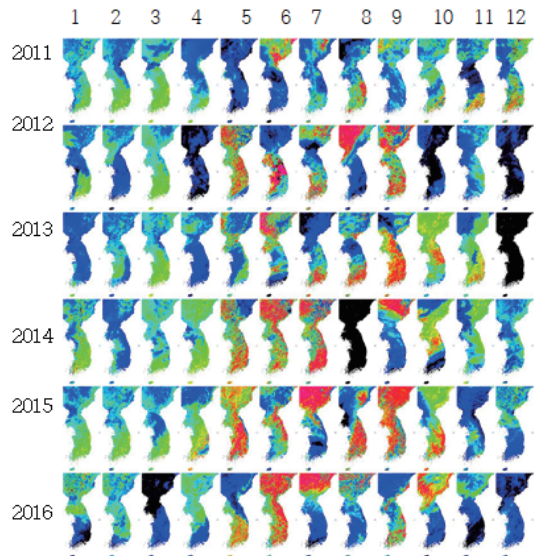


Fig. 4. Results of adaptive reconstruction using 4-periodic harmonic filter and moving window MVC

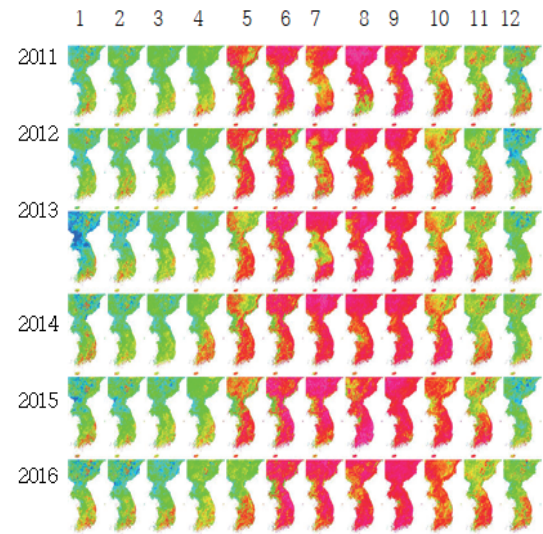
3.2 MODIS NDVI에 적용한 결과

제안된 재구축 시스템을 2011년부터 2016년까지의 일일 MODIS NDVI 자료에 적용하였다. NDVI는 MODIS 36개 밴드 중 밴드 1과 2를 이용하여 생성되었다[1]. Fig. 5는 2011년부터 2016년 까지 NDVI 시계열 자료를 30일 간격의 영상으로 보여주고 있다. Fig. 5의 (a)에서 보듯이 일일 자료의 경우 미관측이거나 많은 노이즈로 인해 자료의 정확성이 떨어지는 것을 볼 수 있다. 반면 Fig. 5의 (b)는 알고리즘 적용 후 재구축된 자료를 30일 간격으로 보여주고 있는데 NDVI 시계열의 계절적 패턴이 명확히 나타난 것을 볼 수 있고 자료의 품질이 향상된 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6과 7에는 NASA가 16-day MVC 기법을 적용하여 제공하는 NDVI 연 평균 영상자료와 제안된 방법을 적용하여 획득된 연 평균 영상자료가 비교되어 있다. 제안된 알고리즘은 16-day MVC 적용 결과와 같은 패턴을 보여주는 것을 확인할 수 있고 16-day MVC 결과에도 여전히 많은 노이즈가 있는 것을 고려할 때 제안된 결과는 노이즈를 제거하고 미관측 자료를 복원하여 고품질 자료를 구축할 수 있음을 확인해 주고 있다. 또한 지금까지의 발표된 재구축 방법들은 일정 기간 자료 전체에 알고리즘을 적용하여 주어진 자료 전체를 재구축하는 방법이지만 본 연구에서 제안된 알고리즘은 실시간으로 입력데이터에 적용하여 실시간 자료 복원이 가능한 방법이다.

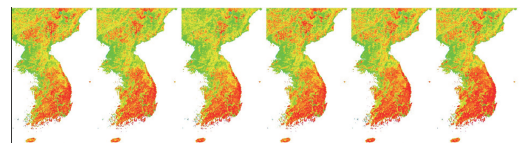


(a) Observed image series of every 30 days

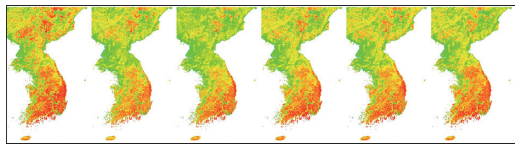


(b) Reconstructed image series of every 30 days

Fig. 5. Comparison of the observed NDVI image series and the reconstructed NDVI image series of every 30 days for 6 years



(a) Year-average NDVI image series of 16-day MVC



(b) Year-average mean-level NDVI image series of adaptive harmonic reconstruction

Fig. 6. Comparison of year-average image series of 16-day MVC and adaptive harmonic reconstruction (AHRC) for 6 Year NDVI data

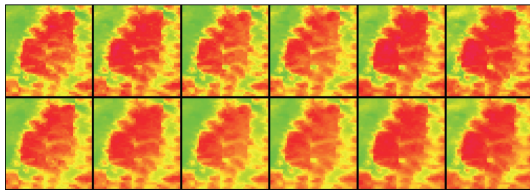


Fig. 7. Sample comparison of year-average NDVI Image Series of 16-day MVC for 6 Year: 16-day MVC NDVI Data (above) and year-average Reconstructed Image Series of AHRC for 6 Year (below)

4. 결론

본 연구는 시계열 위성자료의 동적 특성을 기반으로 실시간으로 노이즈나 미관측 자료를 복원하여 고품질 자료를 재구축하는 방법론을 제안하고 있다. 제안된 방법은 2차 다항식을 이용한 동적 합성을 통해 노이즈를 제거하고 시간적인 동적 패턴을 추적하여 자료를 복원하는 적응적 과정으로 구성되어 있다. 제안된 알고리즘에서 사용된 다중주기 하모닉 모형은 연간 변화 패턴을 가지고 특히 계절적 특성을 갖는 시계열 자료의 동적 패턴을 추정하는데 효과적인 모형이다.

위성자료는 자료 획득시 기상 상태나 기계적 문제로 인해 많은 노이즈 및 미관측 자료가 존재하고 있는 불완전한 자료 상태에 있다. 따라서 자료를 활용하기에 앞서 획득 시점의 지표 상태에 대응하는 원본 자료를 복원하는 과정은 추후 자료 분석을 위해 매우 중요한 전처리 과정에 해당한다. 위성자료가 다양한 분야에서 활용되고 있는 점을 고려할 때 지나간 자료에 대한 분석뿐 아니라 실시간으로 복원된 자료를 공급하여 실시간 모니터링을 가능하게 하는 것이 필요하다. 지금까지 제안된 대부분의 복원 및 재구축 알고리즘은 주어진 시계열 자료 전체를 사용하여 원 자료를 추정하는 방식으로 실시간 복원

방법이 아니다.

본 연구에서 제안된 재구축 시스템은 적응적으로 피드백 과정을 통해 시계열의 동적 특징을 지속적으로 시간을 따라가면 추정하는 방법으로 실시간 자료 복원이 가능하다. 따라서 향후 위성자료를 획득하여 가공하는 전처리 과정이나 실시간 고품질 자료 공급, 실시간 모니터링에 그 활용도가 클 것으로 기대된다.

References

- [1] Y. Lee, K. Lee, I. Seo, S. S. Ko, "Efficient Satellite Mission Scheduling Problem Using Particle Swarm Optimization", *Journal of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, Vol.39, No.1, pp.56-63, 2016. DOI: <https://dx.doi.org/10.11627/jkise.2016.39.1.056>
- [2] H. B. Kim, H. S. Kim, "Optimal Satellite Constellation Design for Korean Navigation Satellite System", *Journal of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, Vol.39, No.3, pp.1-9, 2016. DOI: <https://dx.doi.org/10.11627/jkise.2016.39.3.001>
- [3] L. M. Hwang, B. J. Lee, B. G. Yeo, J. P. Cho, K. S. Kim, "Link Relay H-ARQ mode for Throughput improvement in a Satellite Communication network", *The Journal of the Institute of Internet, Broadcasting and Communication*, Vol.16, No.1, pp.121-127, 2016. DOI: <https://dx.doi.org/10.7236/JIIBC.2016.16.1.121>
- [4] J. Lee, J. Lim, D. Ga, "A Study on Coaxial-Structure Waveguide High-Order Mode Coupler of Ku-Band satellite tracking system for UAV", *The Journal of the Institute of Internet, Broadcasting and Communication*, Vol.16, No.2, pp.93-99, 2016. DOI: <https://dx.doi.org/10.7236/JIIBC.2016.16.2.93>
- [5] S. Kim, S. Park, "Design and fabrication of SSPA module in Ku band for satellite terminals", *The Journal of the Institute of Internet, Broadcasting and Communication*, Vol.16, No.4, pp.59-64, 2016. DOI: <https://dx.doi.org/10.7236/JIIBC.2016.16.4.59>
- [6] J. Y. Jeong, J. H. Park, J. M. Woo, "Design of active beam steering antenna mounted on LEO small satellite", *The Journal of the Institute of Internet, Broadcasting and Communication*, Vol.16, No.5, pp.197-203, 2016. DOI: <https://dx.doi.org/10.7236/JIIBC.2016.16.5.197>
- [7] C. U. Baek, J. W. Jung, "A Study on Optical High-Throughput Efficiency Methods for Digital Satellite Broadcasting System", *The Journal of the Institute of Internet, Broadcasting and Communication*, Vol.17, No.3, pp.63-69, 2017. DOI: <https://dx.doi.org/10.7236/JIIBC.2017.17.3.63>
- [8] Y. M. Lee, J. S. Shin, "Design of VHF Band Meander Sleeve Monopole Antenna for Satellite Communications", *The Journal of the Institute of Internet, Broadcasting and Communication*, Vol.17, No.5, pp.91-96, 2017. DOI: <https://dx.doi.org/10.7236/JIIBC.2017.17.5.91>
- [9] NASA, MODIS, Key instrument aboard the Terra (originally known as EOS AM-1) and Aqua (originally

- known as EOS PM-1) satellites, Available From: <https://modis.gsfc.nasa.gov/> (accessed Jul., 20, 2018)
- [10] P.S. Beck, C. Atzberger and K.A. Høgda, "Improved monitoring of vegetation dynamics at very high latitudes: A new method using MODIS NDVI," *Remote Sensing of Environment*, Vol. 100, pp.321-334 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.10.021>
- [11] P.J. Sellers, C.J. Tucker, G.J. Collatz, S.O. Los, C.O. Justice, and D.A. Dazlich, "A global 1° by 1° NDVI data set for climate studies. Part 2: The generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from the NDVI," *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 151, pp. 3519 - 3545, 1994. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431169408954343>
- [12] A.R. Huete, K. Didan and T. Miura, "Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices," *Remote Sensing of Environment*, Vol. 83, pp. 195 - 213, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/s0034-4257(02)00096-2)
- [13] J. D. Wim, L. Van, A. R. Huete and T. W. Laing, "MODIS Vegetation Index Compositing Approach: A Prototype with AVHRR Data," *Remote Sensing of Environment*, Vol. 69, pp. 264-280, 1999. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0034-4257\(99\)00022-x](https://doi.org/10.1016/s0034-4257(99)00022-x)
- [14] J. N. Hird and G. J. McDermid, "Noise reduction of NDVI time series: An empirical comparison of selected techniques," *Remote Sensing of Environment*, Vol. 113, pp. 248 - 258, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.09.003>
- [15] J. Gu, X. Li, C. Huang and G. S. Okin, "Simplified data assimilation method for reconstructing time-series MODIS NDVI data," *Advanced Space Research*, Vol. 44, pp. 501 - 509, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1109/igarss.2008.4779536>
- [16] P. Jonsson and L. Eklundh, "Seasonality extraction by function fitting to time series of satellite sensor data," *IEEE Trans. of Geoscience Remote Sensing*, Vol. 40, No. 8, pp. 1824 - 1832, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1109/tgrs.2002.802519>
- [17] P. Jonsson and L. Eklundh, "TIMESAT-A program for analyzing time-series of satellite sensor data," *Computers and Geoscience*, Vol. 30, pp. 833-845, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2004.05.006>
- [18] M. E. Jakubauskas, D. R. Legates and J. H. Kastens, "Harmonic Analysis of Time-Series AVHRR NDVI Data," *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 67, No. 4, pp. 461-470, 2001.
- [19] S-H Lee, "Reconstruction and Change Monitoring of Image Series," *Korean Journal of Remote Sensing*, Vol. 18, pp. 157-170, 2002.
- [20] S-H Lee, "Speckle Removal of SAR Imagery Using a Point-Jacobian Iteration MAP Estimation," *Korean Journal of Remote Sensing*, Vol. 23, pp. 33-42, 2007.
- [21] S-H Lee, "Adaptive Reconstruction of Harmonic Time Series Using Point-Jacobian Iteration MAP Estimation and Dynamic Compositing: Simulation Study," *Korean Journal of Remote Sensing*, Vol. 24, pp. 79-89, 2008. DOI: <https://doi.org/10.7780/kjrs.2014.30.6.12>
- [22] S-H Lee, "Adaptive Reconstruction of Multi-periodic Harmonic Time Series with Only Negative Errors: Simulation Study," *Korean Journal of Remote Sensing*, 26(6), pp.721-730, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1109/igarss.2011.6049230>
- [23] M. Jung and E. Chang, "NDVI-based land-cover change detection using harmonic analysis," *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 36. No. 4, pp. 1097-1113 2014. DOI: <https://doi.org/10.7780/kjrs.2013.29.4.1>
- [24] P. Bloomfield, *Fourier analysis of time series: An introduction*, Wiley, NY, 1976.

정 명 희(Myunghee Jung)

[정회원]



- 1989년 : 서울대학교 계산통계학과 (공학사)
- 1991년 : University of Texas, Austin, (공학석사)
- 1997년 : University of Texas, Austin, (공학박사)
- 1998년 3월 ~ 현재 : 안양대학교 소프트웨어학과 교수

<관심분야>

시뮬레이션, 원격탐사데이터 처리, 영상처리, 멀티미디어 등

이 상 훈(Sang-Hoon Lee)

[정회원]



- 1989년 : 서울대학교 계산통계학과 (공학사)
- 1991년 : University of Texas, Austin, (공학석사)
- 1997년 : University of Texas, Austin, (공학박사)
- 1995년 3월 ~ 현재 : 가천대학교 산업경영공학과 교수

<관심분야>

시뮬레이션, OR, 원격탐사데이터 처리, 영상처리 등

장 석 우(Seok-Woo Jang)

[정회원]



- 1995년 2월 : 숭실대학교 전자계학과 (공학사)
- 1997년 2월 : 숭실대학교 컴퓨터학과 (공학석사)
- 2000년 8월 : 숭실대학교 컴퓨터학과 (공학박사)
- 2009년 3월 ~ 현재 : 안양대학교 소프트웨어학과 교수

<관심분야>

로봇비전, 증강현실, HCI, 비디오 색인 및 검색, 등