

선형 CCD카메라 영상의 기하학적 모델 수립 및 좌표 변환

신동석 · 이영란

한국과학기술원 인공위성연구센터 원격탐사연구팀

Geometric Modelling and Coordinate Transformation of Satellite-Based Linear Pushbroom-Type CCD Camera Images

Dong-Seok Shin and Young-Ran Lee

Remote Sensing Section, SaTReC, KAIST

Abstract

A geometric model of pushbroom-type linear CCD camera images is proposed in this paper. At present, this type of cameras are used for obtaining almost all kinds of high-resolution optical images from satellites. The proposed geometric model includes not only a forward transformation from a raw image coordinate system to a map coordinate system but also an inverse transformation which is much more efficient. An inverse transformation function cannot be derived analytically in a closed form because the focal point of an image varies with time. In this paper, therefore, an iterative algorithm in which a focal point is converged to a given pixel position is proposed. Although the proposed model can be applied to any pushbroom-type linear CCD camera images, the geometric model of the high-resolution multi-spectral camera on-board KITSAT-3 is used in this paper as an example. The flight model of KITSAT-3 is in development currently and it is due to be launched late 1998.

Keyword : camera modelling, inverse transformation, geometric correction

요 약

본 논문에서는 현재 고해상도 위성 영상을 촬영하는 대부분의 카메라인 pushbroom 형태의 선형

CCD카메라의 기하학적 모델 및 좌표변환 과정을 제안한다. 제안되는 모델은 원시 영상 좌표계로부터 지도 좌표계까지의 정합수 변환 뿐아니라 반대 방향의 역합수 변환도 포함한다. 실제로 resampling의 용이성이나 구현의 효율성을 감안할 때 역합수 변환이 사용되어야 하지만, pushbroom 형태의 영상일 경우 그 축점의 위치가 시간에 따라 변화하므로 역합수 변환 함수가 단순한 수학적 형태로 성립될 수 없다. 따라서 이 논문에서는 반복 연산과 수렴을 통한 역합수 변환의 유도를 제안한다.

제안되는 기하학적 모델은 모든 선형 CCD 위성영상에 적용될 수 있으나 본 논문에서는 유도의 편의성을 위해 현재 비행모델을 제작 중이며 1998년 후반에 발사 예정인 우리별 3호의 고해상도 카메라 영상에 초점을 맞추었다.

I. 서론

초고속 정보화 시대를 맞이하여 정보의 신속한 전달과 해석의 중요성은 날로 커지고 있다. 인공 위성으로부터의 지구관측 영상 정보는 원격탐사의 많은 응용분야에 사용되고 있다. 따라서 신속하고 정확한 위성영상 정보를 사용자들에게 전달하는 것은 영상정보를 활용하여 최대한의 부가가치를 얻는데 매우 중요하다.

한국과학기술원 인공위성연구센터는 1997년부터 고해상도 위성영상을 제공하는 SPOT, JERS-1의 데이터를 직접 수신, 처리, 분배함으로써 국내 원격탐사 연구 및 응용을 보다 활성화 시키고 있다. 위성영상 데이터의 수신, 저장관리, 처리, 검색 및 분배 시스템은 현재 선진국의 몇몇 회사만이 개발, 구현 기술을 보유하고 있어 각국의 위성영상 데이터 수신국에 독점적으로 제공하고 있는 현실이다. 따라서 이 분야의 독자개발 기술확보가 매우 중요하다. 또한 우리별 3호, 다목적실용위성 등 고해상도 지구관측위성의 개발이 국가차원에서 진행 중인 현 상황에서 자체 개발위성의 영상 데이터 처리시스템을 앞으로 계속 국외기술에 의존할 수는 없다.

이에 한국과학기술원 인공위성연구센터에서는 구축된 시스템의 운용으로 얻은 경험과 기술, 요구사항 도출 등을 바탕으로 1995년 말부터 위성영상 데이터의 수신, 처리, 검색 및 분배 시스템을 개발해 왔다. 개발이 완성된 모듈들을 살펴보면 다음과 같다.

- ▶ 우리별 3호 고속 영상데이터의 실시간 비트, 프레임 동기화 및 PC 하드디스크로 직접 저장 시키는 PC 인터페이스 카드 개발(김태정, 1996)
- ▶ 우리별 3호 수신 영상 실시간 디스플레이 소프트웨어 개발(신동석I, 1996)
- ▶ 우리별 1, 2, 3호 자동 위성 궤도추적 소프트웨어 개발(이영란, 1997)
- ▶ 우리별 1, 2호 영상의 전처리(기하학적 보정, 방사학적 보정) 및 보정영상 모자이크 소프트웨어 개발(신동석II, 1996; 이입평 외, 1996; Shin 1996)
- ▶ 우리별 1, 2호 영상, 보조정보의 자동 데이터베이스화 및 웹브라우저를 이용한 검색 소프트웨어 개발(이서립, 1996)

개발된 모든 모듈은 현재 비행모델(Flight Model)을 제작 중이고 1998년 후반에 발사 예정인 우리별 3호의 고해상도 다중과장영역 영상 데이터의 수신, 저장관리, 전처리, 검색 및 분배를 위한 통합적인 시스템을 구축하기 위한 것이다(Kim *et al.*, 1996; Lee, S. *et al.*, 1996). 전처리시스템과 검색시스템은 현재 정상 운용 중인 우리별 1, 2호 영상의 활용을 위해 개발되었으며 우리별 3호 용으로 업그레이드 중에 있다.

우리별 3호는 단번에 평면 영상 획득하는 우리별 1, 2호와는 달리 위성의 진행방향과 수직으로 배열된 선형 CCD(Charge-Coupled Device)를 사용하여 위성의 진행에 따라 연속적으로 촬영하는 Pushbroom형태의 카메라를 탑재하기 때문에 그 원시 영상의 기하학적 왜곡형태가 우리별 1, 2호 영상과는 판이하게 다르다. 우리별 3호 뿐만 아니라 다목적실용위성, SPOT, JERS-1, IRS 등 현재 알려진 대부분의 고해상도 영상을 제공하는 위성들은 이러한 선형 CCD 센서를 사용하고 있으므로 선형 CCD 영상의 기하학적 보정 알고리즘의 개발은 특정 위성이 아닌 많은 고해상도 지구관측 위성 영상 데이터의 전처리시스템 개발을 위해 매우 중요하다.

본 논문에서는 고해상도 지구관측 위성 센서인 선형 CCD 영상의 기하학적 보정을 위한 센서, 위성, 지구 등의 기하학적 모델을 기술한다. 이 모델은 기본적으로 모든 선형 CCD 위성 센서에 적용될 수 있으나 각 위성의 자세조정법, 센서의 촬영 각도 등의 미세한 차이점에 따라 조금씩 변형되어야 한다. 이 논문에서는 우리별 3호의 경우를 들어 기술하였다. 2장에서는 기하학적 보정에 대한 이론적 배경을 설명하고, 센서, 위성, 지구 등에 대한 기하학적 모델의 정합수 변환, 역합수 변환을 각각 3장, 4장에 설명한다.

II. 기하학적 보정

위성에서 촬영한 영상은 실제 지도좌표와 비교해 볼 때 그 위치도 틀릴 뿐 아니라 그 모양도 크게 왜곡되어 있다. 이러한 기하학적 왜곡의 원인으로는 다음과 같은 것들이 있다.

- ▶ 위성의 위치, 진행 방향 추정의 부정확성
- ▶ 위성의 자세 측정의 부정확성
- ▶ 지구 곡률 및 모양의 불규칙성
- ▶ 영상 촬영 중의 지구 자전
- ▶ 센서 각 소자의 촬영 각도 차이
- ▶ 위성과 센서, 센서 내의 렌즈와 감지소자 간의 정렬 오차
- ▶ 대기 투과 중의 광선 굴절

특히 고해상도 위성영상일 경우 저해상도 위성영상과 비교하여 상대적으로 이러한 기하학적 왜곡이 크게 나타나기 때문에 일반적으로 Fig. 1과 같이 두 단계에 걸쳐 보정한다.

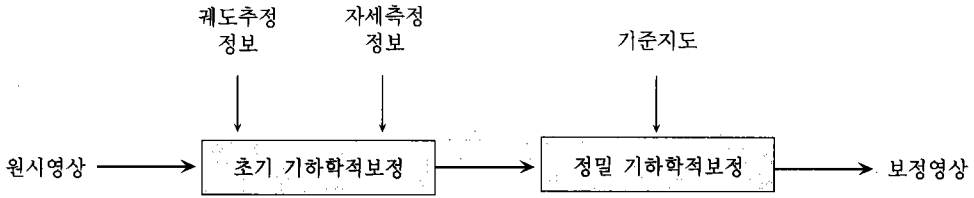


Figure 1. Geometric correction procedure.

초기 기하학적 보정에서는 위성에서의 영상촬영시 센서, 위성, 지구 등의 기하학적 모델을 수학적으로 정립하여 원시영상 각 화소에 감지되는 지구 표면의 좌표를 계산한다. 이러한 초기 기하학적 보정을 수행한 후에도 영상에서는 잔여 오차가 남는다. 예를 들어 약 7 km/sec의 속도로 지나가는 위성의 위치를 0.1초만 잘못 추정할 경우 약 700m의 오차가 초기 기하학적 보정 결과영상에 나타나고, 이는 10m정도의 지상 해상도를 지닌 영상일 때 70화소의 오차에 해당된다. 결국 정확한 기하학적 보정을 요구할 경우에는 초기 기하학적 보정 결과영상과 기준지도 사이의 지상제어점(GCP)을 비교하여 정밀 기하학적 보정을 수행해야 한다. 이 때 초기 보정결과의 정확도에 따라서 최종 보정의 정확도 및 필요한 GCP의 수 등이 결정되므로 초기 기하학적 보정에서의 정확한 위성, 센서, 지구의 모델링이 매우 중요하다.

III. 정함수 변환

정함수 변환은 원시영상의 좌표에서 실제로 지구에 투영되는 지도좌표까지의 변환을 말하며 그 과정은 Fig. 2와 같다.

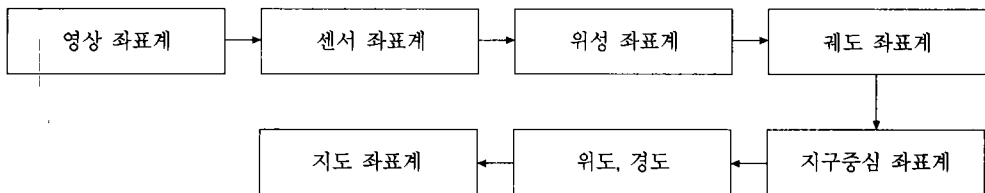


Figure 2. Coordinate systems for forward transformation.

1. 영상 좌표계

한 영상은 3456×3456의 행과 열을 갖는다. 우리별 3호에 탑재한 CCD카메라는 Pushbroom의 형태로서 일정한 짧은 노출 시간 동안 한 행을 한번에 촬영한다. 이 한 행을 찍는 노출 시간 T_d 는

조절할 수 있으며 일반적으로 위성의 진행 속도와 지상 해상도에 따라 결정된다.

2. 센서 좌표계

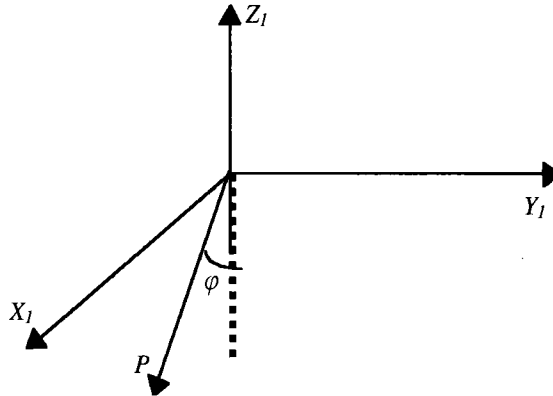


Figure 3. Sensor coordinate system.

센서 좌표계(C_1)는 선형 CCD소자의 배열 방향을 X_I , CCD면의 수선 방향을 Z_I 으로 하는 좌표계이다. 3456개의 CCD소자 각각의 크기는 매우 작아서 무시할 수 있으며 감지하는 각 소자의 각도 (viewing angle)인 φ 만을 고려하면 된다. 각 소자의 IFOV(Instantaneous Field of View)는 $18.75\mu\text{rad}$ 이며 800km상공에서 촬영할 경우 15m(18.75×0.8)의 지상 해상도를 갖는다. 결국 3456개의 CCD소자 각각에 i 라는 번호를 붙이면 $\varphi = 18.75(i-3456/2-1/2)\mu\text{rad}$ 의 값을 갖게 된다.

C_1 좌표계의 화소 촬영 벡터 P 는 $P_I = (\sin \varphi, 0, -\cos \varphi)$ 의 단위 벡터로 지정될 수 있다.

3. 위성 좌표계

카메라가 위성에 탑재될 때 정확한 각도로 부착되기는 힘들다. 하지만 작은 각도의 오차가 지상 영상의 큰 오차로 나타나기 때문에 탑재 후 이러한 misalignment 오차를 측정하는 것이 필요하다. 만일 측정이 이루어 질 수 없으면 약 200-300개의 영상 촬영 후 그것을 정밀 보정하여 규칙적인 각도 오차를 추정해야 하는데 이 또한 매우 어려운 작업이다. 따라서 이러한 misalignment를 고려하여 센서 좌표계에서 위성체 좌표계(C_2)로 변환시켜 주는 작업이 필요하다.

이러한 misalignment 각도 오차를 ($\Delta x, \Delta y, \Delta z$)라고 할 때 P 는 C_2 좌표계로 다음과 같이 변환된다.

$$P_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\Delta x & \sin\Delta x \\ 0 & -\sin\Delta x & \cos\Delta x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\Delta y & 0 & -\sin\Delta y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\Delta y & 0 & \cos\Delta y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\Delta z & \sin\Delta z & 0 \\ -\sin\Delta z & \cos\Delta z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} P_1 \dots\dots\dots (1)$$

4. 궤도 좌표계

궤도 좌표계(C₃)는 위성이 궤도를 돌면서 유지하려고 하는 자세의 방향을 말하며 지구 중심으로부터 위성체 까지의 방사 방향을 Z₃, 궤도면에 놓여 있으며 Z₃와 수직을 이루는 축을 Y₃, 궤도면과 수직인 방향을 X₃로 정의한다. 임의의 촬영 시간에 자세 오차(pitch, roll, yaw)를 (θ_p, θ_r, θ_y)라고 할 때 C₃좌표계에서의 벡터 P는 다음과 같이 결정된다.

$$P_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_p & \sin\theta_p \\ 0 & -\sin\theta_p & \cos\theta_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_r & 0 & -\sin\theta_r \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta_r & 0 & \cos\theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_y & \sin\theta_y & 0 \\ -\sin\theta_y & \cos\theta_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} P_2 \dots\dots\dots (2)$$

5. 지구중심 좌표계

지구중심 좌표계(C₄)는 지구 중심으로부터 지표면의 위도, 경도가 0인 점의 방향을 X₄, 북위 90도인 점을 Z₄로 하여 정의된다. 지구중심 좌표계를 기준으로 궤도의 방사 방향(Z₃)은 위성의 단위 위치 벡터(s_x, s_y, s_z)로 결정될 수 있다. Y₃축은 위성의 진행 방향이라고 생각하면 쉽지만 일반적으로 위성의 위치 벡터와 속도 벡터는 수직을 이루지 않는다. 이에 Y₃의 단위 벡터(q_x, q_y, q_z)를 위성의 단위 위치 벡터와 속도 벡터 V로 구하기 위해 다음과 같은 식을 사용한다.

$$V_p = V - (V \cdot Z_3)Z_3, \\ (q_x \ q_y \ q_z) = \frac{V_p}{\|V_p\|} \dots\dots\dots (3)$$

X₃의 단위 벡터(t_x, t_y, t_z) = (q_x, q_y, q_z) × (s_x, s_y, s_z)가 얻어지면 지구중심 좌표계에서의 P(P₄)는 다음과 같이 결정된다¹⁾.

$$P_4 = \begin{bmatrix} t_x & v_x & s_x \\ t_y & v_y & s_y \\ t_z & v_z & s_z \end{bmatrix} P_3 \dots\dots\dots (4)$$

6. 위도, 경도 결정

지구중심 좌표계에서의 벡터 P₄와 지구 표면이 만나는 점을 결정한다. 지구 표면은 Sphere,

1) Orthogonal행렬의 역행렬은 transpose행렬과 같다.

Ellipsoid(spheroid), Geoid등으로 모델링이 되지만 그 모델의 정확도와 모델의 복잡성 등을 타협하여 일반적으로 타원체(ellipsoid)형태로 결정된다. 지구중심 좌표계에서의 지구 ellipsoid모형은 다음과 같다.

$$\frac{x^2 + y^2}{R_e^2} + \frac{z^2}{R_p^2} - 1 \dots\dots\dots (5)$$

여기서 R_e, R_p 는 각각 지구 적도, 극의 반지름이다. $\mathbf{P}_4 = (p_x, p_y, p_z)$ 라 하면 \mathbf{P}_4 벡터의 직선 방정식은 $(x, y, z) = a(p_x, p_y, p_z) + (S_x, S_y, S_z)$ 가 되며, 이를 식(5)에 대입하면 식(6)와 같이 2차 방정식의 해인 a 가 두개 구해진다. 이 두 해는 직선이 지구를 관통하면서 생기는 두 점이며 이 중 위성과 가까운 점이 지표 촬영 점이된다.

$$a = \frac{-B - \sqrt{B^2 - AC}}{A} \dots\dots\dots (6)$$

$$A = (p_x^2 + p_y^2)R_e^2 + p_z^2R_p^2$$

$$B = (p_xS_x + p_yS_y)R_p^2 + p_zS_zR_e^2$$

$$C = (S_x^2 + S_y^2)R_p^2 + S_z^2R_e^2 - R_e^2R_p^2$$

따라서 구해진 a 값을 \mathbf{P}_4 벡터의 직선 방정식에 대입하면 지상점(X, Y, Z)을 구할 수 있다. 지상점의 위도(geocentric), 경도는 식(7)과 같이 구할 수 있고,

$$\alpha_c = \sin^{-1} \left[\frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}} \right] \dots\dots\dots (7)$$

$$\beta = \cos^{-1} \left[\frac{Y}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \right]$$

Geodetic위도 α_d 는 다음과 같이 구할 수 있다(Wertz, 1978).

$$\alpha_d = \tan^{-1} \left[\frac{\tan \alpha_c}{\left(1 - \frac{R_e - R_p}{R_e}\right)^2} \right] \dots\dots\dots (8)$$

7. 지도 좌표계

구해진 위, 경도를 지도에 투영시키는 방법은 그 목적에 따라 수 많은 방법이 있다(Synder, 1982). 그 중 우리별 3호 CCD 영상의 해상도(15m)에 적합한 투영법은 횡메카토르법(Transverse Mercator, TM) 이며 한국의 공식 지도 또한 이 투영법이 사용된다. 이때 지구 타원체의 모양은

Bessel타원체 등을 사용한다. 위경도에서 TM좌표를 유도하는 법, 또는 반대로 TM의 x,y좌표에서 위경도를 유도하는 방법은 참고 문헌(Pearson, 1990)을 참조하여 구현하였다.

IV. 역함수 변환

기하학적 보정의 목표는 영상 좌표계의 일정한 격자에 위치한 화소의 밝기값을 지도 좌표계의 일정한 격자 위에 대응시키는 것이다. 정함수에 의한 변환은 resampling 모듈을 구현하는데 몇 가지 문제점을 가지고 있다. 첫째 영상 좌표계의 모든 행, 열 좌표를 정함수로 변환시켜 저장한 후에 지도 좌표계의 격자 화소 밝기값을 구해야 한다. 따라서 한 영상 당 많은 양의 화소를 포함한 고해상도 위성영상일 경우 초기 기하학적 보정 알고리즘 구현 시 많은 양의 메모리를 요구하게 된다.

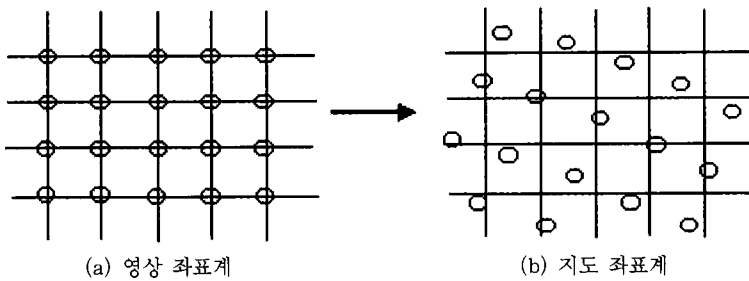


Figure 4. Forward transformation from an image coordinate system to a map coordinate system.

Fig. 4에서 보듯 영상 좌표계의 격자에 있는 화소의 밝기 값은 정함수 변환에 의해 지도 좌표계의 임의의 위치로 변환된다. 지도 좌표계의 격자에 있는 화소의 밝기값은 Fig. 4(b)에서 보듯 그 주위의 변환된 영상 좌표계 화소값으로 결정된다(결정되는 방법(resampling알고리즘)에는 nearest neighbourhood, bilinear, cubic convolution 등의 방법이 있다). 결국 지도 좌표계의 격자 화소값을 결정하기 위해서는 모든 영상 좌표계의 화소를 정함수 변환한 후 그 변환된 좌표를 저장해야 한다. 또한 변환된 좌표는 간단한 규칙성이 없기 때문에 resampling하는 알고리즘을 구현하기가 매우 힘들다.

하지만 Fig. 5와 같은 역함수 변환에서는 결정되어야 할 지도 좌표계의 격자점이 영상 좌표계로 변환이 되므로 하나의 지도 좌표계 격자점의 밝기값은 그 점이 영상 좌표계로 변환, 대응되면 곧 그 주위의 영상 좌표계 격자 화소값들로 계산될 수 있다. 그러므로 각 격자점의 변환된 좌표를 저장할 필요가 없다. 또한 영상 좌표계 격자의 밝기값은 일정한 간격으로 설정되어 있으므로 resampling알고리즘이 간단히 구현될 수 있다. 하지만 pushbroom형태의 카메라에서 촬영한 영상의 역함수 결정은 그리 간단하지 않다.

우리별 1, 2호의 카메라와 같은 framing camera인 경우 영상의 모든 화소값을 순간적으로 촬영

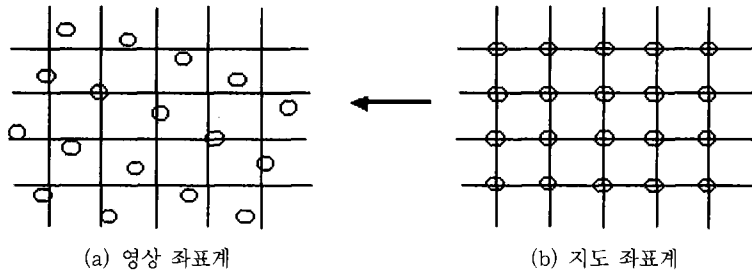


Figure 5. Inverse transformation from a map coordinate system to a image coordinate system.

하므로 영상 촬영시 그 축점의 위치가 변하지 않는다. 그러므로 지상의 특정한 위도, 경도로부터 정해진 축점까지의 벡터를 통해서 역으로 영상 좌표계의 좌표를 결정할 수 있다(이입평 외, 1996). 하지만 우리별 3호, SPOT등과 같은 pushbroom형태의 센서는 영상 촬영시 그 축점이 궤도를 따라서 계속 움직이므로 지상의 특정한 위도, 경도가 촬영된 순간에 위성(축점의 위치)이 어디에 있었는가를 추정할 수 없다. 그러므로 역으로 가는 벡터를 수학적으로 이끌어낼 수 없다.

따라서 역변환은 닫혀진 형식의 함수를 유도하는 대신 반복 연산(iteration)을 통해서 구하는 방법을 사용하며 그 개략적인 순서는 Fig. 6와 같다.

1. 영상 샘플 격자 화소들의 정함수 변환

먼저 영상좌표계의 화소들 중 일정한 간격으로 추출하여(예: 행,열을 50화소 또는 100화소 마다 추출) 이 추출된 화소 위치를 정함수 변환 시켜 지도 좌표계 상의 좌표를 구한다.

Fig. 7(a)의 격자는 영상 좌표계의 각 화소가 아닌 규칙적으로 추출한(예: 50화소마다 또는 100

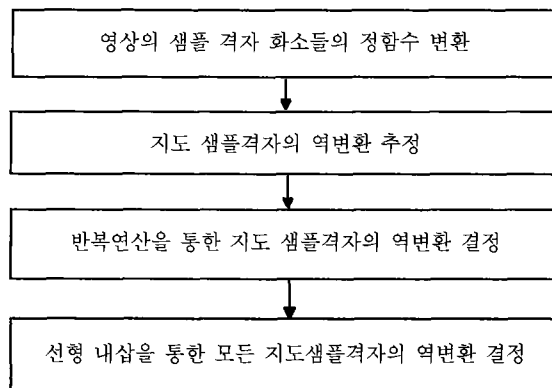


Figure 6. Inverse transformation procedure.

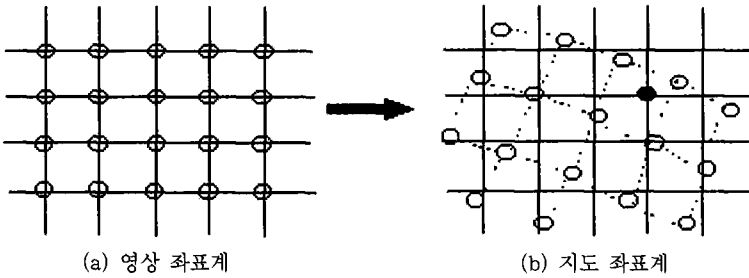


Figure 7. Forward transformation of sampled pixels.

화소마다) 화소들의 위치이다. 추출된 화소 샘플들이 정함수 변환되면 Fig. 7(b)와 같이 지도 좌표계에 나타나며 점선으로 된 가상의 사각형이 생성된다.

2. 지도 샘플격자의 역변환 추정

Fig. 7(b)와 같이 지도 좌표계도 일정한 간격으로 격자를 설정한다. 지도 좌표계의 격자는 정함수 변환된 영상 화소 샘플들의 간격을 고려하여 설정하는 것이 바람직하다. Fig. 7(b)에서 지도 좌표계 격자 위의 한 점(검은 점)을 고려하면 특정한 가상의 사각형 안에 포함됨을 알 수 있다. 이 부분을 확대하면 아래 그림과 같다.

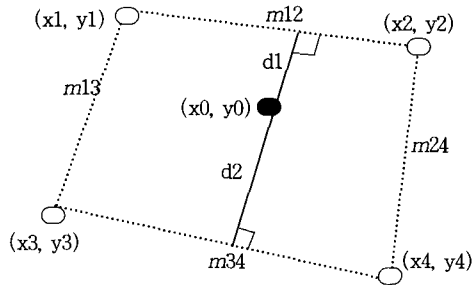


Figure 8. Imaginary quadrangle in a map coordinate system.

위의 그림에 나오는 좌표는 지도 좌표계의 좌표이며 m은 가상선, d는 격자점으로부터 두개의 가상선까지의 거리를 뜻한다. 각 가상선의 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 m_{12} : y &= (y_2 - y_1)(x - x_1) / (x_2 - x_1) + y_1 \text{ or } (x_2 - x_1)y + (y_1 - y_2)x + x_1y_2 - x_2y_1 = 0 \\
 m_{13} : y &= (y_3 - y_1)(x - x_1) / (x_3 - x_1) + y_1 \text{ or } (x_3 - x_1)y + (y_1 - y_3)x + x_1y_3 - x_3y_1 = 0 \\
 m_{34} : y &= (y_4 - y_3)(x - x_3) / (x_4 - x_3) + y_3 \text{ or } (x_4 - x_3)y + (y_3 - y_4)x + x_3y_4 - x_4y_3 = 0 \\
 m_{24} : y &= (y_4 - y_2)(x - x_2) / (x_4 - x_2) + y_2 \text{ or } (x_4 - x_2)y + (y_2 - y_4)x + x_2y_4 - x_4y_2 = 0
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

따라서 격자점 (x_0, y_0) 가 4개의 가상선이 만드는 사각형의 내부에 있으려면 다음과 같은 4개의 조건을 모두 만족시켜야 한다(C언어 코드 예제).

```
#define func(x1,y1,x2,y2,x)      (((y1)-(y2))÷((x1)-(x2))×((x)-(x1))+y1)

if( y0 < func(x1,y1,x2,y2,x0)) // (x0, y0)가 m12선 아래 있을 조건
if( y0 >= func(x3,y3,x4,y4,x0)) // (x0, y0)가 m34선 위에 있을 조건
if( x0 >= func(y1,x1,y3,x3,y0)) // (x0, y0)가 m13선 오른쪽에 있을 조건
if( x0 < func(y2,x2,y4,x4,y0)) // (x0, y0)가 m13선 왼쪽에 있을 조건
```

격자점이 가상 사각형 내에 위치하면 다음은 격자점과 m_{12}, m_{34} 사이의 거리 d_1, d_2 를 구한다. 이는 지도의 격자 좌표에 해당되는 영상 좌표계의 좌표(위성의 위치 포함)를 추정하기 위함이다.

$$d_1 = \frac{|(y_1 - y_2)x_0 + (x_2 - x_1)y_0 + x_1y_2 - x_2y_1|}{\sqrt{(y_1 - y_2)^2 + (x_2 - x_1)^2}} \dots\dots\dots (10)$$

$$d_2 = \frac{|(y_3 - y_4)x_0 + (x_4 - x_3)y_0 + x_3y_4 - x_4y_3|}{\sqrt{(y_3 - y_4)^2 + (x_4 - x_3)^2}}$$

따라서 $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ 점의 영상 좌표계에서의 열이 r , $(x_3, y_3), (x_4, y_4)$ 점의 영상 좌표계에서의 열이 $r+D$ (D 는 영상 좌표계의 격자 간격)라고 하면 (x_0, y_0) 점을 역변환 시킨 영상 좌표계의 열은 $r = r + D(d_1)/(d_1+d_2)$ 로 추정될 수 있다.

3. 반복연산을 통한 지도 샘플격자의 역변환 결정

위의 절에서 역변환하여 추정된 영상 좌표계에서의 열 값은 정확한 값이 아니다. 다만 미지수였던 위성(추점)의 위치를 추정한 값이다. 따라서 추정된 위성의 위치와 그때의 속도 및 자세 값을 사용하여 지도 좌표계의 (x_0, y_0) 점을 영상 좌표계로 역변환시킨다. 역변환시켜서 얻은 행, 열이 (c_0, r_0) 일 때 r_0 와 위에서 추정된 r 의 값은 최대한 근접해야 하며 이는 반복 연산을 통해서 수렴시킨다. 즉,

$$r(i+1) = r(i) + \alpha(r0(i) - r(i)) \quad \alpha: \text{수렴계수}, i: \text{index} \dots\dots\dots (11)$$

여기서 수렴계수 α 는 0에서 1사이의 계수이며 수렴속도와 진동을 감안하여 적절히 설정해야 한다. 위와 같이 추점의 위치, r, α 값이 변함에 따라 다시 역함수 변환을 시켜 r_0 값을 변화시킨다. 이와 같은 반복 연산은 반복 중단 조건, $r(i) - r0(i) < \epsilon$ 이 만족되면 중단되며 이때 구해진 (c_0, r_0) 를 지도 좌표계 격자점 (x_0, y_0) 의 역변환 된 영상 좌표계의 좌표로 결정한다. 반복 중단 조건은 정확도의 요구사항과 수렴 속도를 고려하여 정해져야 하는데 일반적으로 0.1화소 정도로 결정하면 적당하다.

지도 좌표계의 격자점 사이에 있는 화소들의 역변환 결정은 격자점의 역변환 좌표를 내삽하여 결정한다.

V. 성능 분석

3절과 4절에 기술된 정함수 변환과 역함수 변환을 이용하여 위성영상의 기하학적보정을 수행하였다. 이 절에서는 제안된 카메라모델의 정확도 및 수행시간을 비교하는 실험결과를 기술한다.

실험에 사용된 영상은 97년 3월 19일에 촬영된 JERS-1 OPS/VNIR 원시영상이다(아산, 당진 지역). Fig. 9에서 보여 주는 바와 같이 영상 전체에 골고루 12개의 GCP를 추출하였다. 영상 GCP 주로 인공지형물(교차로 등)에서 최대한 추출되었으며 해당 기준 GCP는 1:50,000 지도 영상에서 추출되어 위도, 경도 값을 저장하였다. 3절, 4절에 기술된 카메라 모델에서 VNIR영상의 촬영 및 궤도 성질에 맞게 파라미터들이 설정되었다. 또한 기준 궤도 데이터로는 NASDA의 MMO(Mission Management Office)에서 계산된 데이터를 사용하였다.

먼저 정함수 변환의 성능을 실험하였다. 영상좌표계에서 설정된 12개의 GCP좌표를 정함수 변환시켜 지도좌표(X_{im} , Y_{im})를 구하고 이를 지도 GCP의 좌표(X_{map} , Y_{map})와 비교한다. 지도좌표는 Transverse Mercator 투영법을 사용하여 구하였다.

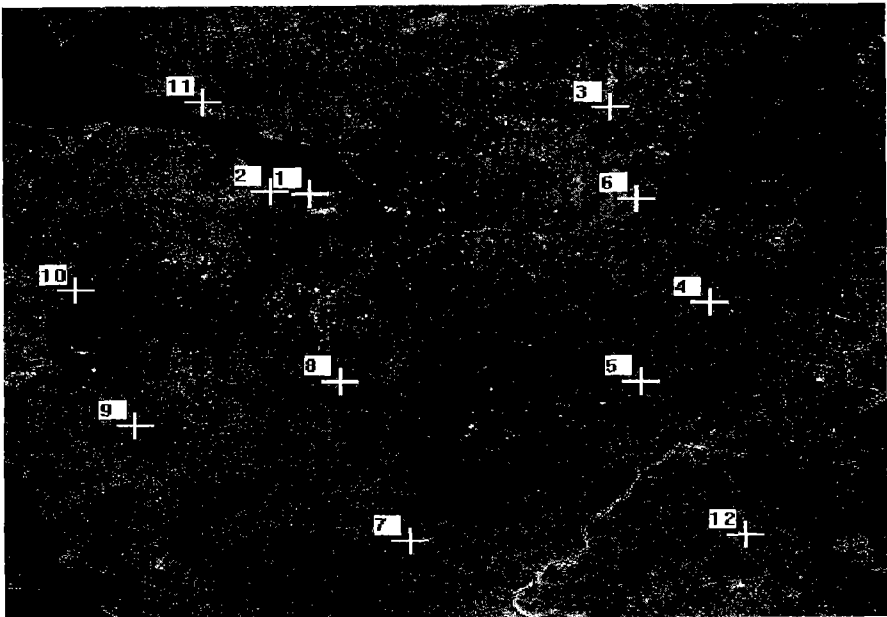


Figure 9. Test image with GCPs

$$E(i) = \sqrt{(Xm(i) - Xmap(i))^2 + (Yim(i) - Ymap(i))^2} \dots\dots\dots (10)$$

$$E_{avg} = \frac{\sum_{i=1}^{12} E(i)}{12} \quad E_{std} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{12} (E(i) - E_{avg})^2}{12}}$$

식(12)에서 오차는 모두 지상거리로 계산된다. 정합수 변환의 결과 평균오차 Eavg = 1.511337km, 표준편차 Estd = 23.39m를 얻을 수 있었다. 여기서 1.5km의 평균오차는 궤도의 부정확성에 기인한 것이므로 정합수 변환의 성능과 상관이 없다. 하지만 표준 편차인 24m는 정합수 변환의 왜곡을 나타내며 18m인 VNIR영상의 해상도보다 높게 나타났다. 이러한 오차는 정합수 변환의 오차 뿐 아니라 위성의 자세 오차, 기준 지도의 정밀도 및 정확도, 지표의 고도에도 크게 의존한다. 여기서 구해진 표준편차는 주로 기준 지도의 정확도 및 1:50,000축척 정밀도의 한계에 기인하는 것으로 추정된다. 따라서 지상 측량, DGPS 등을 이용한 정확한 GCP의 추출이 매우 중요하다.

역합수 변환은 resampling과정을 단순화시키고 정합수 변환의 수행시간을 단축시키기 위해 개발되었으며 정합수 변환의 정확도를 개선시키지는 않는다. 따라서 역합수 변환의 정확도는 역합수 변환이 정합수 변환 결과를 얼마나 충실하게 따르는가를 실험하므로써 결정한다. 즉 지도 좌표계에서 일정 간격의 샘플을 골고루 추출하여 이 좌표를 역변환시켜 해당되는 영상좌표를 구한다. 그리고 이 영상좌표를 다시 정합수변환시켜서 원래 지도좌표와 역변환 및 정변환 된 지도 좌표의 차이를 계산한다. 이러한 오차의 평균 값은 지상거리로 0.002m로 나타났고 따라서 역합수 모델은 정합수 모델을 정확히 표현할 수 있다고 할 수 있다.

다음은 정합수 변환과 그에 따른 resampling 수행 시간과 역합수 변환 및 resampling 수행 시간을 비교하였다. 프로그램은 PC-Windows 하에 Visual C++ 4.0으로 구현되었으며 Pentium 233MHz에서 수행되었다. 4096×4000 크기의 VNIR영상을 정합수, 역합수 변환하여 resampling한 수행시간은 정변환의 경우 8분 30.2초, 역변환의 경우 35.3초였다. 따라서 역합수 변환을 사용하여 resampling을 수행하는 것이 정변환 및 resampling하는 시간보다 약 14배나 단축할 수 있었고 또한 정합수 변환에서 필요한 매우 큰 용량의 가상메모리 또한 필요하지 않았다.

V. 결론 및 토의

지금까지 선형 CCD 영상의 초기 기하학적 보정에 사용될 정합수 및 역합수 변환을 기술하였다. 위성궤도, 센서, 지구를 모두 물리적으로 표현한 Full model을 사용하여 영상좌표계로부터 지도좌표계까지의 정합수 변환 모델을 유도하였다. 정합수 변환 후의 resampling과정의 수행시간을 단축하고 메모리 효율을 높이기 위하여 역합수 변환 모델을 유도하였다. 개발된 정합수 변환 모델의 정확도, 역합수 변환 모델의 정확도, 두 모델의 수행 시간 등을 실험을 통하여 구하였고 이에 따라

역함수 변환 모델은 매우 정확히 정함수 변환 모델을 표현할 수 있으며 수행시간 및 필요한 가상 메모리 또한 크게 줄일 수 있었다.

2장에서 설명되었듯이 초기 기하학적 보정에서 가장 중요한 것은 정확한 센서, 위성, 지구의 수학적 모델링이며 이는 수작업을 요구하는 정밀 기하학적 보정의 정확도에 직접적인 연관이 있다. 제안되는 카메라 모델을 사용한 기하학적 보정은 그 구현 방법에 따라 처리 성능이 결정되며, 보정의 정확도와 처리 속도간에 최적의 절충이 있어야 한다. 정함수와 역함수 변환에서 다수의 행렬 변환, 삼각함수의 사용, 반복 연산 등이 사용되기 때문에 모든 화소에 변환을 적용할 경우 처리 시간이 길어지므로 규칙적으로 선택된 화소의 변환과 나머지 화소들의 보간 방법을 사용하여 처리 성능을 높여야 할 것이다.

참고문헌

- 김태정, 1996. PC Interface card 중간 보고서, 기술문서, 한국과학기술원 인공위성연구센터.
- 신동석(I), 1996. KITSAT-3 Image Moving Window Display, 기술문서, 한국과학기술원 인공위성연구센터
- 신동석(II), 1996. KIMS Developers Manual, 기술문서, 한국과학기술원 인공위성연구센터
- 이서립, 1996. KITSAT Image Distribution System(KIDS), 기술문서, 한국과학기술원 인공위성연구센터
- 이영란, 1997. KIMS3 Orbit Determination 모듈 개발, 기술문서, 한국과학기술원 인공위성연구센터
- 이입평, 김태정, 1996. 우리별 1호 지구 관측 영상의 방사학적 및 기하학적 보정, 대한원격탐사학회지, 12(1):26-42.
- Kim, T., I. Lee and S.D. Choi, 1996. A Low Cost direct Archiving and Preprocessing System for KITSAT-3 Image Data, ISPRS Congress, Commission I, 84-89
- Lee, I. T. Kim and S.D. Choi, 1996. Systematic Correction Mechanism of Geometric Distortions in the KITSAT-1 CCD Earth Images ISPRS Congress, Commission III, 429 - 434.
- Lee, S., D. Shin, D.K. Sung and S.D. Choi, 1996. KITSAT-3 Image Data Acquisition, Preprocessing, Archiving and Distribution, Proceedings of International Symposium on Remote Sensing, 287-292.
- Pearson F. II, 1990. Map Projections - Theory and Applications, CRC Press Inc., USA.
- Shin, D., 1996. On Feasibility of Using Scanned Maps for Ground Control Point Marking, J. of Korean Society of Remote Sensing, 12(1):17-25
- Snyder J.P., 1982. Map Projections Used by the U.S. Geological Survey, US Government Printing office, Washington.
- Wertz, J.R., 1978. Spacecraft Attitude Determination and Control, Kluwer Academic Publishers, 820-823.