

물리적 센서모델을 이용한 RPC 모델 추출 연구

A STUDY ON THE RPC GENERATION FROM THE PHYSICAL SENSOR MODEL

김혜진* · 김대성** · 김용일***
Kim, Hye Jin · Kim, Dae Sung · Kim, Yong Il

1. 서론

고해상도 위성이 개발되면서 각기 센서들의 복잡성과 보안성 문제로 인해 물리적 센서모델을 공개하거나 제공하지 않는 추세이다. 대신 물리적 센서모델을 대체할 수 있는 모델의 하나로 Rational Polynomial Coefficients(RPC) 모델의 활용도가 높아졌으며 대표적인 상업용 고해상도 위성인 IKONOS 2호 역시 각 영상에 대한 RPC만을 제공한다. 이러한 추세에 따라 물리적 센서모델로부터 RPC를 추출하는 원천 기술을 확보하고 RPC의 물리적 센서모델 대체 가능성을 평해보자 하였다. 이를 위해 고해상도 위성영상과 같이 영상의 공간해상도가 높은 항공사진과 공간해상도 6.6m의 KOMPSAT-1 위성영상의 물리적 센서 모델로부터 RPC모델을 추출하는 실험을 수행하였다.

2. Rational Polynomial Coefficients 모델

일반적인 RPC 모델의 형태는 식(1)과 같이 표현되어지며 기본적인 개념은 다음과 같다. RPC 식에서 r , c 는 영상좌표, X , Y , Z 는 지상좌표를 나타내며 a_{ijk} , b_{ijk} , c_{ijk} , d_{ijk} 다항식계수를 나타내고 분모식의 상수항인 b_{000} , d_{000} 는 1이다. RPC 식 각각의 m_1 , m_2 , m_3 , n_1 , n_2 , n_3 는 세제곱까지로 제한되어있다. 즉, $i+j+k > 3$ 일 때, 다항식계수는 0이다.

$$r = \frac{t1(X, Y, Z)}{t2(X, Y, Z)} = \frac{\sum_{i=0}^{m_1} \sum_{j=0}^{m_2} \sum_{k=0}^{m_3} a_{ijk} X^i Y^j Z^k}{\sum_{i=0}^{n_1} \sum_{j=0}^{n_2} \sum_{k=0}^{n_3} b_{ijk} X^i Y^j Z^k} = \frac{t3(X, Y, Z)}{t4(X, Y, Z)} = \frac{\sum_{i=0}^{m_1} \sum_{j=0}^{m_2} \sum_{k=0}^{m_3} c_{ijk} X^i Y^j Z^k}{\sum_{i=0}^{n_1} \sum_{j=0}^{n_2} \sum_{k=0}^{n_3} d_{ijk} X^i Y^j Z^k} \quad (1)$$

3. 물리적 센서모델을 이용한 RPC모델 추출 알고리즘

물리적 센서모델로부터 RPC 추출 방법의 특징은 영상 좌표들에 물리적 센서모델을 적용한 가상 객체공간의 표본점들에 근사되는 RPC모델을 계산한다는 점이다. 그림 1은 물리적 센서모델로부터의 RPC모델을 추출하는 과정의 간략한 흐름도이다.

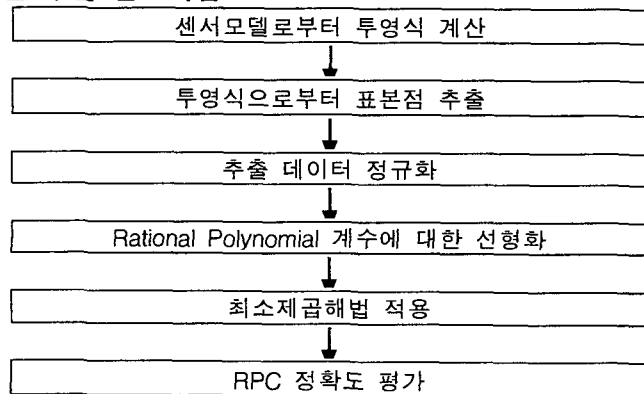


그림 1. 물리적 센서모델로부터 RPC 모델 추출 과정

* · 서울대학교 지구환경시스템공학부 공간정보연구실 석사과정 · 02-880-6286(e-mail:vicky2@snu.ac.kr)
 ** · 서울대학교 지구환경시스템공학부 공간정보연구실 석사과정 · 02-880-7371(e-mail:mutul94@empal.com)
 *** · 서울대학교 지구환경시스템공학부 부교수 · 02-880-7364(e-mail:yik@snu.ac.kr)

3.1 객체공간상의 표본점 추출

물리적 센서모델은 영상 좌표와 지상좌표간의 관계를 정의하는 것이므로 단영상의 경우 2차원상의 영상좌표만으로는 3차원인 지상좌표를 얻어낼 수 없다. 따라서 가상의 3차원 객체공간상의 점들을 추출하기 위해 영상좌표와 임의의 지상 높이값 Z 를 부여하고 이에 해당하는 평면 지상좌표 (X, Y)를 추출하는 방법을 사용한다. 사용되는 영상좌표는 영상을 고루 반영할 수 있도록 격자 간격으로 취득하며 3차원 공간을 표현하기 위해 각 영상좌표에 대하여 여러 Z 를 부여한다. 즉, n 개의 높이 레이어가 주어졌을 경우 하나의 영상좌표 (x, y)에 대해서 높이에 따른 n 개의 지상좌표 (X, Y, Z)를 얻게 된다.

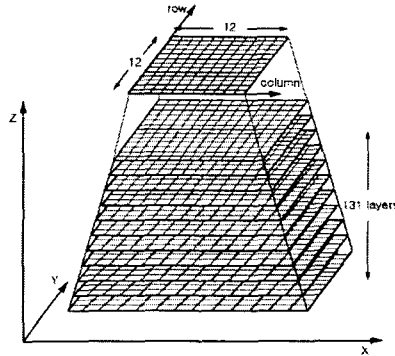


그림 2. 객체공간상의 표본점 추출

3.2 추출된 데이터의 정규화

위와 같은 과정을 통해 추출된 표본점들에 근사되는 RPC를 계산하기 위해서는 우선 표본점 데이터의 정규화가 필요하다. 이는 scale이 다른 값들의 계산 시 발생할 수 있는 singularity를 해결하고 계산의 안정성을 도모하기 위한 과정이다. 정규화는 영상좌표와 지상좌표 각각에 오프셋과 축척 계수 조정을 통해 이루어지며 오프셋은 데이터의 평균값이 축척 계수는 최대값 혹은 최소값과 평균값의 차를 사용한다.

3.3 RPC모델의 선형화

최소제곱법을 적용하려면 방정식이 미지수에 대해 선형이어야 한다. 그러므로 RPC 모델을 RPC에 대하여 선형화하는 과정이 필요하다. RPC모델 식(1)에서, 분모식을 양변에 곱하여 RPC에 대하여 선형화한 식은 다음과 같다.

$$(1 \ Z \ Y \ X \ \dots \ Y^3 \ X^3) \cdot (a_0 \ a_1 \ \dots \ a_{19})^T - r(1 \ Z \ Y \ X \ \dots \ Y^3 \ X^3) \cdot (1 \ c_1 \ \dots \ c_{19})^T = 0 \quad (2)$$

$$(1 \ Z \ Y \ X \ \dots \ Y^3 \ X^3) \cdot (b_0 \ b_1 \ \dots \ b_{19})^T - c(1 \ Z \ Y \ X \ \dots \ Y^3 \ X^3) \cdot (1 \ c_1 \ \dots \ c_{19})^T = 0 \quad (3)$$

3.4 Lagrange 인자를 이용한 최소제곱법 적용

선형화된 식(2), 식(3)을 이용하여 n 개의 점에 대한 관측행렬을 구성하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_{n1} \\ \vdots \\ v_m \\ v_{c1} \\ \vdots \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \dots & X_1^3 & 0 & \dots & 0 & -r_1 Z_1 & \dots & -r_1 X_1^3 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \dots & X_n^3 & 0 & \dots & 0 & -r_n Z_n & \dots & -r_n X_n^3 \\ 0 & \dots & 0 & 1 & \dots & X_1^3 & -c_1 Z_1 & \dots & -c_1 X_1^3 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & 1 & \dots & X_n^3 & -c_n Z_n & \dots & -c_n X_n^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ \vdots \\ a_{19} \\ b_0 \\ \vdots \\ b_{19} \\ c_1 \\ \vdots \\ c_{19} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \\ \vdots \\ r_n \\ c_1 \\ \vdots \\ c_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

위 식을 보다 간단히 나타내면 다음과 같다.

$$V = AX - L \quad (5)$$

식 (5)의 해가 $X = (A^T A)^{-1} A^T L$ 됨은 자명하다. 그런데 이와 같이 얻어진 데이터를 직접 대입하여 최소제곱해를 구할 경우 역행렬 계산에서 singularity가 발생하여 무의미한 해가 얻어질 수 있다. 따라서 이러한 singularity 해결을 위해 Lagrange 인자를 이용한 regularization을 적용하였다. Lagrange 인자법은 최소제곱법과 같이 임의의 식 $f(x)$ 를 최소로 하는 해를 결정하고자 할 때 제약조건을 추가하여 유일한 해를 결정하는 방법 중 하나로 미지수의 개수가 많을 경우 유용하다.

$$L(x; \lambda) = f(x) + \lambda g(x) \quad (6)$$

이 때, $g(x) = 0$ 이 제약조건이며 λ 를 Lagrange 인자라 한다. 제약조건을 더하여 새로운 함수 $L(x; \lambda)$ 를 정의하였지만 $g(x) = 0$ 이므로 $L(x; \lambda)$ 의 값은 $f(x)$ 와 동일하며 이를 주어진 변수에 대해 각각 미분하여 $f(x)$ 를 최소로 하는 해를 구할 수 있다. 제약조건은 여러 가지로 주어질 수 있으나 본 연구에서는 singularity만을 해결하면 되므로 가장 간단한 조건을 부가하였다. 구하고자 하는 해 X 는 임의의 상수 값을 가지므로 $X - constant = 0$ 이라는 조건을 줄 수 있다.

$$X = (A^T A + \lambda^2 I)^{-1} A^T L \quad (7)$$

이 때, Lagrange 인자 λ 는 0에서 ∞ 의 상수 값을 가지며 실험적으로 결정할 수 있다.

4. 실험 및 결과

4.1 실험 데이터

본 연구에 사용된 영상은 서울 지역의 KOMPSAT-1 영상과 성남시 분당 신도시 지역의 항공사진으로 자료의 제원은 아래와 같다. KOMPSAT-1 영상의 물리적 센서 모델은 pushbroom으로 본 연구에서는 2차의 보간식을 사용하였고, 항공사진은 외부표정과 내부표정 과정을 거쳐 공선조건식을 사용하였다.

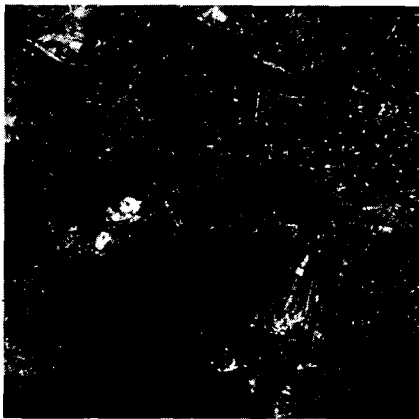


그림 3. 서울 KOMPSAT-1 영상
표 1. KOMPSAT-1 영상의 제원

센서	EOC(Electro-Optical Camera)
공간해상력	6.6m
관측 고도	685km
초점 거리	1045mm
관측 일시	2001. 3. 18
영상 크기	2592X2798 pixel

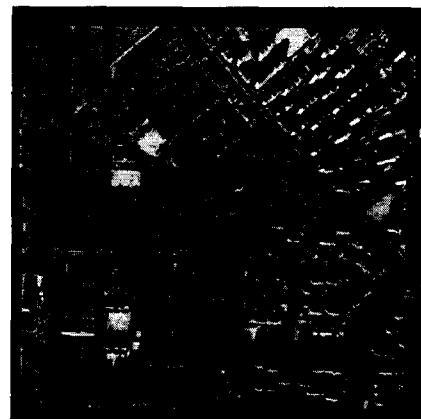


그림 4. 성남지역 항공사진

표 2. 항공사진의 제원

촬영 고도	885m
초점 거리	0.1535899m
촬영 일시	1999. 12. 11
영상 크기	11908X11908 pixel

4.2 RPC 모델의 추출 및 정확도 평가

RPC 추출을 위한 영상좌표는 영상 전체에 고르게 격자 간격으로 144점(12X12)을 취득하였으며 가상 높이 레이어(layer)는 KOMPSAT-1 영상은 41개(3840000m~3860000m, 지심좌표 기준), 항공사진은 31개(-50m~250m, 수준면 기준)의 레이어를 선정하였다. 따라서 각 영상좌표와 가상 높이 Z값을 물리적 센서모델에 대입하여 KOMPSAT-1 영상은 5904점(12X12X41), 항공사진은 총 4464개(12X12X31)의 표본점을 생성하였다. 추출한 표본점을 이용하여 식(5)의 행렬 A를 구성하고 이를 Lagrange 인자를 고려한 최소제곱법을 통해 RPC모델을 추출하였다. 이 때 Lagrange 인자 λ 를 변화시켜 가며 계산하여 최적의 RPC를 결정하였다.

생성된 RPC모델과 물리적 센서모델간의 오차를 분석하기 위해 표본점 외의 100개의 검사점을 가상 지표 공간범위 내에서 랜덤 추출하였다. 검사점의 지상좌표를 RPC 모델에 대입하여 구한 영상좌표와 물리적 센서 모델에 대입하여 구한 영상좌표의 오차를 구하고 이에 대한 평균제곱근오차(RMSE)를 RPC모델의 평가자료로 사용하였다.

RPC모델 추출 실험 결과 $\lambda=0.002$ 인 경우 최적의 RPC모델을 얻을 수 있었으며, 생성된 RPC모델의 계수는 $-0.001 \sim 1.92$ 값을 가지며 전반적으로 각 항의 차수가 증가할수록 감소하나 뚜렷한 경향을 보이지는 않았다.

표 3. 표본점 오차

		KOMPSAT-1	항공사진
RMSE (pixel)	x	0.0000479	0.0000458
	y	0.0000268	0.0000403
Max. Error (pixel)	x	0.000192	0.000192
	y	0.000116	0.000195

표 4. 검사점 오차

		KOMPSAT-1	항공사진
RMSE (pixel)	x	0.0000402	0.0000399
	y	0.0000230	0.0000355
Max. Error (pixel)	x	0.000118	0.000120
	y	0.0000474	0.0000723

5. 결론 및 향후 연구과제

KOMPSAT-1 영상과 항공사진의 물리적 센서모델로부터 RPC모델을 추출한 결과 검사점에 대한 RMSE가 10^{-4} pixel 이하로 무시할 수 있는 정도의 오차를 보였다. 따라서 RPC모델이 KOMPSAT-1 영상과 항공사진의 물리적 센서모델을 대체할 수 있음이 확인되었다. 또한 Lagrange 인자법을 이용한 regularization 과정을 통해 계산의 안정성과 정확도를 향상할 수 있었다.

그러나 본 연구만으로는 고해상도 위성영상에 대한 RPC 모델의 적합도를 장담하기 어려우며 앞으로 보다 다양하고 개선된 실험이 필요하다. 우선 다양한 고해상도 위성영상에의 적용 가능한지를 확인하기 위한 연구가 이루어져야 하며 RPC 추출 알고리즘에 있어서도 보다 정밀한 작업이 수행되어야 할 것으로 보인다. 이와 더불어 계산상의 오차를 감소시키고 RPC모델의 안정성을 향상시키기 위해 고차항 계수가 0에 수렴하도록 저항치를 부가하는 기법과 반복 최소제곱법을 적용한 RPC 추출 알고리즘을 구현하고자 한다.

참 고 문 헌

1. R. I. Hartley, T. Saxena, 1997, The Cubic Rational Polynomial Camera Model, Image Understanding Workshop, pp. 649--653
2. C. V. Tao, 2001, A Comprehensive Study of the Rational Function Model for Photogrammetric Processing, PE&RS Vol. 67, No. 12, pp.1347-1357
3. W. H. Press, 1992, *Numerical Recipes in C - Second Edition*, Cambridge Univ. Press
4. X. Yang, 2000, Accuracy of Rational Function Approximation in Photogrammetry, ASPRS
5. Paul R. Wolf, Bon A. Dewitt, 2000, *Elements of Photogrammetry with Applications in GIS - 3rd edition*, McGraw-Hill Companies, Inc.