

위성영상으로부터 수치표고모형 추출을 위한 새로운 정합구역의 비선형 최소자승 영상정합 알고리즘 개발

김태정* · 이흥규**

한국과학기술원 인공위성연구센터*, 한국과학기술원 전산학과**

Development of A New Patch-Based Stereo Matching Algorithm for Extraction of Digital Elevation Model from Satellite Imagery

Tae-Jung Kim* and Heung-Kyu Lee**

Satellite Technology Research Center, KAIST*, Department of Computer Science, KAIST**

Abstract

This paper describes the development of a stereo matching algorithm for extracting Digital Elevation Model(DEM) from satellite images. This matching algorithm is based on a non-linear least squares correlation estimation but has improved matching speed. The algorithm consists of three steps: matching execution, matching control and matching optimization. Each is described. The performance of the presented algorithm is quantitatively analyzed with experiments on matching probability, matching speed and matching convergence radius.

Keyword : Stereo Matching, Digital Elevation Model(DEM), Digital Photogrammetry

요 약

본 논문에서는 위성영상으로부터 수치표고모형 추출을 목적으로 하는 영상정합 알고리즘의 개발에 관하여 기술한다. 개발된 알고리즘은 주어진 목적에 맞추어 비선형 최소자승법에 기초한 영역정합방식에 기초하였으나 새롭게 정의된 정합구역을 이용함으로써 기존의 정합방식보다 향상된

정합 수행속도를 가진다. 이 정합 알고리즘은 정합수행 모듈, 정합조정 모듈, 정합최적화 모듈로 구성되어 있으며 각각의 기능에 대하여 기술한다. 또한 제안된 알고리즘의 성능을 정합 가능도, 수행 속도, 정합 수렴 반경 등을 이용하여 정량적으로 분석한다.

I. 서론

최근 많은 원격탐사 위성이 발사되어 원격탐사 영상이 환경감시, 피복도 제작, 사진판독 등의 여러 분야에서 유용하게 사용되고 있다. 특히 국내에서도 1999년에 약 10m 이내의 고해상도 EOC(Electro-Optical Camera) 카메라를 탑재한 다목적 실용위성이 발사될 예정이어서 EOC 영상을 이용한 여러가지 고부가가치 정보 추출작업이 활성화될 전망이다. 위성영상을 이용한 여러 정보 추출작업 중에서도 수치표고모형(Digital Elevation Model, DEM) 추출은 지도제작, 지도보정(Update), 정사영상제작(Orthophoto Generation), 3차원 GIS(Geographic Information System) 등 여러 응용분야를 위해서 반드시 필요한 작업이라고 할 수 있다.

위성영상으로부터 수치표고모형의 추출을 위해서는 고도의 영상처리 기술 및 사진측량 기술이 필요하다. 특히 이중에서도 스테레오 영상에서 상응점(Conjugate Points)을 찾아내는 영상정합기술(Stereo Matching)은 핵심기술이다. 본 논문에서는 위성영상으로부터 수치표고모형을 추출해내기 위한 영상정합 알고리즘의 개발 및 구현에 관하여 기술한다.

영상정합기술은 약 20여년전 Marr와 Poggio(1979)가 인간의 입체인식에 대한 수학적 모델을 처음 발표하면서 본격적으로 연구가 시작되어 지금도 활발히 연구가 진행되고 있는 분야이다. 이제 까지 제안된 여러 영상정합 기술은 흔히 영역 영상정합(Area-based Stereo Matching) 기술과 특징 영상정합(Feature-based Stereo Matching) 기술의 두가지로 나누어지나(Lemmens, 1988) 정합기술의 응용 분야에 따라 객체 영상정합(Object Space Matching)(Wrobel, 1991), 관계 영상정합(Relational Matching)(Cho, 1996) 등 현재 여러가지 정합 방법이 소개되어 위의 이원적 분류방법은 사실상 큰 의미를 잃어가고 있다.

본 논문에서 사용한 정합은 최소자승법을 이용한 영역 영상정합 방법에 속한다. 이 정합 방법을 선택한 이유는 이 정합 방법이 위성영상에서 수치표고모형을 추출하고자하는 목적에 가장 부합한 방법이라 판명되기 때문이다. 이에 관하여는 2장에서 자세히 설명하기로 한다. 3장에서는 본 논문에서 제안하는 정합기법에 관하여 설명하고 4장에서는 이 정합기법의 성능을 정량적으로 분석한다.

II. 위성영상으로부터 수치표고모형 추출을 위한 정합기법의 고찰

앞서 기술한 바와 같이 스테레오 영상에서 높이 정보를 추출하는 데에 사용되는 영상정합 방법

으로 현재 여러가지 알고리즘이 제안되었다. 이 중에서 최적의 알고리즘을 선택하는 것은 영상정합 결과를 어떻게 응용하여 사용할 것인가에 좌우된다. 이 논문에서는 스테레오 위성영상에서 수치표고모형을 추출해 내는 것을 목적으로 하고 있으므로 영상정합도 이 목적에 부합되는 것으로 결정하여야 한다.

먼저 수치표고모형을 추출하기 위한 요구사항 중의 하나로 영상정합의 결과가 영상의 특정부분이나 특정한 물체에 대한 높이값이 아닌 영상 전역에 걸친 높이값이어야 한다는 것을 들 수 있다. 이 요구사항을 충족시키기 위해서 영상내의 특정한 특징(Feature)에 관하여만 정합을 실시하는 특징 정합방식 대신에 영상내의 각 점을 정합할 수 있는 영역정합방식을 선택하였다.

이제까지 발표된 여러 영역정합 알고리즘 중에서 비선형 최소자승법에 의한 정합 알고리즘이 가장 정밀한 결과를 나타내는 것으로 알려져 있다(Day and Muller, 1989). 따라서 본 논문에서는 비선형 최소자승법의 일종인 Gruen(1985)이 발표한 알고리즘을 기본으로 해서 개발되었다. 그러나 이 알고리즘은 매우 정밀한 결과를 얻을 수 있는 알고리즘인데 반하여 정합의 초기 예측치가 비교적 정확해야만(3 화소 이내) 올바른 정합 결과를 내고¹⁾, 또한 많은 연산을 필요로 하기 때문에 수행시간이 매우 길다는 단점을 가지고 있다(Otto and Chau, 1989). 정확한 정합 초기 예측치를 필요로 하는 단점을 극복하기 위해서는 정합 초기 예측치를 적절히 선정해 내고 또한 정합이 영상 전역에 걸쳐 조밀하게 일어나도록 정합을 조절하는 방식을 적절하게 고안하여야 한다. 이제까지 알려진 조절방식 중에서 "Best-first"라는 방식이 최적의 방식으로 발표되었으며(Otto and Chau, 1989), 본 논문에서도 이 조절방식에 입각하여 정합 알고리즘을 설계하였다. Gruen의 알고리즘이 가지는 수행속도에 관한 단점은 정합점을 중심으로 정의되는 정합구역(Patch)의 격자점을 효율적으로 정의하는 방법을 고안하여 일부분 처리하였다(Kim and Choi, 1997). 이에 관한 내용은 정합 최적화 모듈에서 설명하기로 한다.

본 논문에서 제안된 정합 알고리즘은 해상도가 비교적 높지않은(5m 이하) 스테레오 영상에만 적용할 수 있다. 그 이유는 해상도가 약 2~3m 보다 높아지면 "Best-first"조절 방식에서 가장하고 있는 지표면의 연속성에 위배되기 때문이다(Kim and Muller, 1995). 이를 극복하는 방식이 Kim과 Muller(1996)에 의해 제기되었으나 본 논문에서는 고려하지 않았다. 또한 본 논문에서 제안된 알고리즘은 잠재적으로 좌우 영상간의 스케일 차이를 극복할 수 있으나 스테레오 영상은 동일한 위성 카메라에서 촬영되었다는 가정 하에 최적화되도록 설계되었다. 다음장에서 이 알고리즘에 관하여 자세히 설명하기로 한다.

III. 제안된 정합 알고리즘의 구성

본 논문에서 제안된 정합 알고리즘은 하나의 정합 예측치에서 정합점을 찾아내는 정합수행 모

1) 즉, 정합 수렴 반경이 작고

들, 정합이 영상의 전역에 걸쳐 이루어지도록 조절하는 정합조절 모듈, 정합 알고리즘의 성능 향상을 위해 여러가지 파라미터를 최적화하는 정합최적화 모듈의 세가지 모듈로 구성된다.

1. 정합수행 모듈

왼쪽과 오른쪽 영상의 밝기값 함수를 각각 $f(x, y)$, $g(x, y)$ 라고 하자. 왼쪽 영상의 한점 (x_l, y_l) 과 오른쪽 영상의 점 (x_r, y_r) 이 서로 정합되는 점이라고 하면, 좌우 영상의 밝기값간의 관계는 다음과 같다.

$$f(x_l, y_l) = g(x_r, y_r) + n(x, y) \dots\dots\dots (1)$$

여기서, $n(x, y)$ 는 잡음 함수이다.

위의 수식에서 왼쪽 영상의 한점 (x_l, y_l) 이 주어졌을 때 이 점에 해당하는 오른쪽 영상의 한점 (x_r, y_r) 을 구함으로써 정합이 이루어지게 된다. 우선 왼쪽 영상의 한점에 해당하는 오른쪽 영상의 상응점에 대한 예측치 (x_0, y_0) 를 알고 있다고 가정하자. 이때에 실제의 상응점 (x_r, y_r) 과 초기 예측치 사이의 관계를 유사변환(Affine Transformation)으로 모델링을 한다면, 다음과 같은 수식으로 나타낼 수 있다²⁾.

$$\begin{aligned} x_r &= a_{11} + a_{12}x_0 + a_{21}y_0 \dots\dots\dots (2) \\ y_r &= b_{11} + b_{12}x_0 + b_{21}y_0 \end{aligned}$$

위의 수식을 식(1)에 대입하고 예측치 (x_0, y_0) 를 중심으로 Taylor 전개식으로 선형화시키면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} f(x_l, y_l) - g(x_0, y_0) - n(x, y) &= g_x da_{11} + g_x x_0 da_{12} + g_x y_0 da_{21} \dots\dots\dots (3) \\ &+ g_y db_{11} + g_y x_0 db_{12} + g_y y_0 db_{21} + r_s \end{aligned}$$

이때 g_x, g_y 는 각각 $\frac{\partial g(x_0, y_0)}{\partial x_r}, \frac{\partial g(x_0, y_0)}{\partial y_r}$ 이고 r_s 는 두 영상간의 방사학적 차이를 고려하여 식(1)에 첨가된 항이다. 위의 수식에서 미지수의 갯수는 7개이며, 따라서 최소자승법으로 미지수를 구하기 위해서는 7개 이상의 방정식이 필요하다. 필요한 여분의 방정식은 좌우 영상의 예측점 (x_l, y_l) 과 (x_0, y_0) 을 중심으로 정합구역(혹은 정합 윈도우)을 정의하고, 이 정합구역 내의 각각의 격자점에 대하여 식(3)을 구해 얻는다. 이때 왼쪽 영상에서의 정합구역은 일정 크기의 정사각형 모양을 가지도록 정의되고 오른쪽 영상의 정합구역은 이 정사각형을 앞서 모델링한 유사변환에 의하여 변환시킨 모양을 가지도록 정의된다. 정합구역 상의 격자점을 정의하는 방법은 다음 절에서 설명한다. 위의 식(3)을 벡터형태로 나타내면 아래와 같다.

2) (x_0, y_0) 와 (x_r, y_r) 를 유사변환이 아닌 좀더 복잡한 수식으로 모델링을 할 수도 있으나 여기서는 유사 변환으로 제한하여 고찰한다. 참고로 유사변환은 두 점간의 스케일 변화, 평행 이동 및 회전 이동을 고려한 변환기법이다.

$$\begin{aligned}
 \mathbf{I} - \mathbf{e} &= \mathbf{A}\mathbf{x} \\
 \mathbf{I} &= \{f(x_i, y_i) - g(x_0, y_0)\} \\
 \mathbf{e} &= \{n(x, y)\} \\
 \mathbf{x}^T &= \{da_{11}, da_{12}, da_{21}, db_{11}, db_{12}, db_{21}, r_s\} \dots\dots\dots (4) \\
 \mathbf{I} &= \{g_x, g_x x_0, g_x y_0, g_y, g_y x_0, g_y y_0, 1\}
 \end{aligned}$$

\mathbf{I} 은 좌우 정합구역의 격자점 간의 밝기값의 차이로 이루어진 $1 \times m$ 크기의 행렬이다. 이때 m 은 사용한 정합구역의 격자점 수이다. \mathbf{e} 는 각각의 격자점 상에서의 에러 행렬이나 이 벡터는 최소자승법에 의한 추정과정에서 제거될 수 있다. \mathbf{x} 는 최소자승법으로 구하고자하는 파라미터 벡터이며 관측 행렬 \mathbf{A} 는 우측 영상정합구역의 격자점 상에서의 x, y 축 방향으로의 밝기값 변이율 등으로 계산되는 $7 \times m$ 크기의 행렬이다.

Gruen(1985)은 위의 벡터식을 언바이어스드 가우스-마르코프 추정 모델(Unbiased Gauss-Markov Estimation Model)(Rohatgi, 1939)에 적용시켰다. 이 모델에 의하면 구하고자하는 파라미터 \mathbf{x} 에 대한 추정치 $\hat{\mathbf{x}}$ 는 최소 분산(Minimum-Variance) 언바이어스드 선형 추정법(Linear Estimation)을 이용하여 다음과 같이 구하여 진다.

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{I} \dots\dots\dots (5)$$

위의 방정식에서 \mathbf{P} 는 가중치 행렬(Weighting Matrix)로 정합구역의 격자점에 대하여 얻은 관계식(식(3))간의 가중치를 정의한다. 본 논문에서는 특별히 가중치를 정하지 않고 \mathbf{P} 를 단위행렬(Identity Matrix)로 정의한다. 만약 관계식간의 가중치를 설정하면 가중치에 따라 정합을 조절할 수 있으나 이에 따른 추가적인 연산과정으로 인하여 정합의 수행속도가 저하된다. 정합 최적화 모델에서 설명하게 되는 방법에 따라 정합구역의 격자점을 적절히 정의하면 수행속도를 저하시키지 않으면서 정합구역 내에 가중치를 부과하는 효과를 얻을 수 있다.

원래의 방정식이 비선형이므로 최종적인 (x_n, y_n) 을 찾기 위해서는 최소자승법을 반복적으로 수행하여야 한다. 따라서 초기예측치 (x_0, y_0) 로부터 최종값 (x_n, y_n) 를 구하는 과정은 다음과 같다.

1. 초기값 (x_0, y_0) 및 초기 유사변환 파라미터 값과 식(4), (5)를 이용하여 벡터 \mathbf{x} 를 최소자승법으로 구한다.
2. 구해진 벡터 \mathbf{x} 의 파라미터인 $da_{11}, da_{12}, da_{21}, db_{11}, db_{12}, db_{21}, r_s$ 를 이용하여 유사변환 값을 수정한다.
3. 수정된 유사변환 행렬을 토대로 정합구역을 다시 정의하고 관측 행렬 \mathbf{A} 를 다시 구해낸다.
4. 새로운 행렬 \mathbf{A} 를 이용하여 최소자승법을 다시 수행하여 벡터 \mathbf{x} 를 구한다.
5. 정합이 성공적으로 수행하였다는 조건이 충족될 때까지 2~4의 과정을 반복 수행한다. 정합 성공 조건은 다음 절에 설명한다.

2. 정합조절 모듈

정합수행 모듈에서 설명한 알고리즘은 좌우 영상의 한점만을 정합시키는 모듈이다. 영상 전체에 걸쳐 많은 점을 정합시키기 위해서는 정합수행 모듈의 정합 알고리즘을 영상내의 많은 점들에 적절히 적용시켜야 하며, 이를 위하여 정합조절 모듈이 필요하게 된다. 정합조절 모듈에서는 정합수행 모듈에서 사용된 알고리즘의 정합 수렴반경 이내로 초기예측치를 공급하여 정합이 성공적으로 수행될 수 있도록 해야한다.

이를 위해서 다음과 같은 단계의 조절방식을 채택하였다.

1. 초기의 정합은 수동으로 주어진 초기 정합시작점들에 대하여 수행된다.
2. 하나의 정합이 끝난 후 정합점과 인접한 점들 중 정합이 아직 이루어지지 않은 점들을 정합 예비점으로 생성하고 이 점들을 큐(Queue)에 저장한다. 이때 정합 예비점의 초기예측치는 그 예비점을 생성시킨 정합점의 유사변환 파라미터와 평행이동 파라미터를 물려받아 이를 토대로 설정된다. 이 방식은 지표면에 급격한 높이 변화가 없는 한 수렴반경 내에 정합 초기 예측치를 설정할 수 있게 한다.
3. 다음 정합은 정합 예비점 큐에 있는 점 중 가장 정합 가능도가 높은 점부터 정합을 수행한다. 정합 예비점의 정합 가능도는 그 정합 예비점을 생성하게 한 정합점의 정합 정확도를 물려받는다.

위 방식에 따르면 정합은 가장 정합 가능도가 높은 점에서 정합을 시작하며("Best-first") 이 방식이 에러를 최소화할 수 있는 방식으로 발표된 바 있다(Otto and Chau, 1989). 이때에 정합 예비점의 정합 가능도, 혹은 정합점의 정확도는 여러가지로 정의될 수 있다. 그 중 본 논문에서는 최소자승법으로부터 얻어지는 해 x 의 분산-공분산 행렬(Variance-Covariance Matrix)의 고유값(Eigenvalue)과 유사변환 행렬의 행렬식(Determinant)의 두가지를 정합 가능도로 이용하고자 한다. 분산-공분산 행렬의 고유값은 가우스-마르코프 모델을 이용한 추정치의 안정도를 나타내는 값이며, 유사변환 행렬의 행렬식은 좌우 정합점 간의 기하학적 왜곡 정도를 나타내는 값이다. 이 두값을 이용한 실험 결과의 비교는 4장에서 논하기로 한다.

3. 정합 최적화 모듈

이 절에서는 제안된 정합 알고리즘을 위성영상에서의 수치표고모형 추출이라는 목적에 최대한 부합되도록 최적화시키는 모듈에 관하여 설명한다. 최적화 모듈은 수렴 반경을 증대하는 방식, 정합구역의 격자점을 정의하는 방식, 최소자승법에 의한 추정의 반복 수행의 종결 여부를 결정하는 방식으로 나누어 소개한다.

먼저 수렴반경을 증대하는 방식에 관하여 논의한다. 실험결과로부터 수렴반경은 오른쪽 영상의 정합구역의 격자점에 대한 밝기값의 내삽방법과 밝기값의 변이율 g_x, g_y 의 정의 및 산출방법에 밀접한 연관이 있음이 밝혀졌다. 또한 수렴반경과 수행속도 사이에는 절충이 필요하다는 사실도 밝

혀졌다. 적절한 수렴반경을 유지하면서 수행속도를 저하시키지 않기 위하여 본 논문에서는 다음과 같이 최적화하였다. 실제 구현된 알고리즘의 수렴반경을 확인하는 실험은 다음 장에서 설명한다.

1. 밝기값 및 밝기값의 변이율의 내삽방식은 Bilinear 내삽 방식을 택한다.
2. 밝기값의 변이율은 수렴반경이 방향성을 가지지 않도록 상하좌우 동형으로 다음과 같이 정의한다.

$$g_x = \frac{g(x-1, y) - g(x+1, y)}{2}, \quad g_y = \frac{g(x, y-1) - g(x, y+1)}{2}$$

3. 정합구역의 격자점 상에서의 밝기값의 변이율은 인접한 4개의 화소의 밝기값 변이율을 구한 후, 이 값들을 이용하여 Bilinear 방식으로 내삽하여 구한다.

다음은 정합 수행속도를 높이기 위한 정합구역의 격자점의 정의방식에 관하여 논의한다. 정합구역의 격자점을 정의하기 위해 이제까지 사용해진 일반적인 방법은 정사각형 모양인 좌측 영상의 정합구역에 1화소 간격의 격자점을 정의하고 우측 영상의 정합구역에는 1화소 간격 격자점에 유사변환을 적용하여 격자점을 정의하는 방식이었다. 그러나 이 방식에 의하여 격자점을 정의하면 오른쪽 정합구역에서 격자점의 밝기값과 밝기값 변이율을 구하는 과정에서 정합구역 내의 화소의 밝기값이 매우 중복되어 사용된다. 이 이유는 앞서 설명한 밝기값과 밝기값 변이율을 구하는 방식에 의해 하나의 격자점의 밝기값 및 밝기값 변이율을 구하기 위해서는 격자점 주변의 총 12개 화소의 밝기값이 이용되기 때문이다. 1화소 간격으로 정의된 격자점에서는 인접한 격자점 각각의 밝기값 및 변이율을 구하기 위해 8개의 주변 화소의 밝기값이 중복 사용된다.

결국 이러한 중복은 필요 이상의 연산을 수행하게 함으로써 정합 수행속도를 떨어뜨린다(Kim and Choi, 1997). 본 논문에서는 이러한 단점을 없애고 정합의 수행속도를 향상시키기 위하여 정합구역의 격자점을 여러가지 간격으로 정의하여 실험하였다. 또한 격자점의 간격을 가변적으로 정의하면 이는 정합수행 모듈의 식(4)에서 가중치 행렬 \mathbf{P} 를 정의하는 것과 유사한 효과를 낼 수 있다. 일례로 정합구역의 중심에서 끝으로 갈수록 격자점의 간격이 선형적으로 늘어나도록 정합구역을 정의하고, 이를 이용하여 정합을 실시하였다. 여러 형태로 정의된 격자점을 가지는 정합구역을 이용한 정합결과를 다음 장에 소개하고 최적의 격자점 형태를 찾기로 한다.

정합의 최적화를 위하여 고려해야 하는 요소 중에 하나는 최소자승법에 의한 추정의 반복수행의 종료를 결정짓는 방식이다. 본 논문의 정합 알고리즘의 반복수행은 정합 성공시, 정합 실패시, 반복수행 한계 완료시에 종료되도록 설계하였다. 이때 반복수행을 종결하는 방식의 최적화는 보다 정확한 정합 성공점의 취득 및 정합 불가능점의 조기 발견과 제거를 위해 반드시 필요한 작업이다. 이를 위하여 다음과 같은 종결조건을 고안하였다.

1. 정합 성공 여부는 추정 전후의 정합 예측치의 절대값 차이를 비교하여 결정한다. Gruen (1985)은 벡터 \mathbf{x} 각항의 절대값 크기 비교를 종결 방식으로 제안하였으나 본 논문에서의 실험 결과 이는 최적의 종결 방식이 아님이 판명되었다.
2. 정합 실패 여부는 유사변환 행렬의 각 항과 행렬식이 일정범위를 벗어나는가로 결정한다. 이

는 정합에 사용되는 스테레오 영상이 동일한 위성의 카메라에서 얻어진 영상이라고 가정하여 최적화한 것이다.

3. 반복수행의 한계는 50회로 설정하였다. 정합 알고리즘 수행시 이 값을 50회 이상으로 설정할 수도 있으나 실험결과 50회 이상으로 설정하여도 정합 성공점은 거의 증가하지 않았다.

IV. 제안된 정합 알고리즘의 수행 결과

이 장에서는 제안된 정합 알고리즘을 이용한 여러 실험결과를 소개한다. 실험은 SGI OCTANE(주메모리 64MB) 상에서 JERS 위성에서 촬영한 스테레오 영상을 이용하여 수행되었다. JERS 위성영상은 약 18m의 해상도를 가지는 3대역의 칼라영상이나 실험에서는 녹색 파장대역만을 이용하였고 전체 영상 중 512×512 화소만을 추출하여 정합을 수행하였다. 그림 1은 실험에서 사용한 영상을 나타낸다. 이 영상은 1993년 3월 28일에 촬영되었으며 영상에 나타난 지역은 팔당호 주변지역이다.

표 1은 정합조정 모듈에서 정합 가능도로 분산-공분산 행렬의 고유값을 사용했을 때와 유사변환 행렬의 행렬식을 사용하였을 때의 결과를 보이고 있다. 정합결과는 정합 성공률(Matching Success Rate), 정합속도(Matching Speed) 및 정합 정확도(Matching Accuracy)로 비교하였다. 정합 성공률은 전체 정합 가능점 수에 대한 정합 성공점의 비율이며, 정합속도는 한점을 정합하는 데에 드는 시간이다. 정합 정확도의 정확한 산출은 정합결과를 토대로 수치표고모형을 작성, 이 모형을 지상기준 수치표고모형과 비교하는 것이나 여건상 간접적인 비교방식을 택한다. 간접 정합 정확도로 Gruen(1985)은 유사변환 행렬의 파라미터들의 분산값을 이용하였고, Otto와 Chau(1989)는 x, y

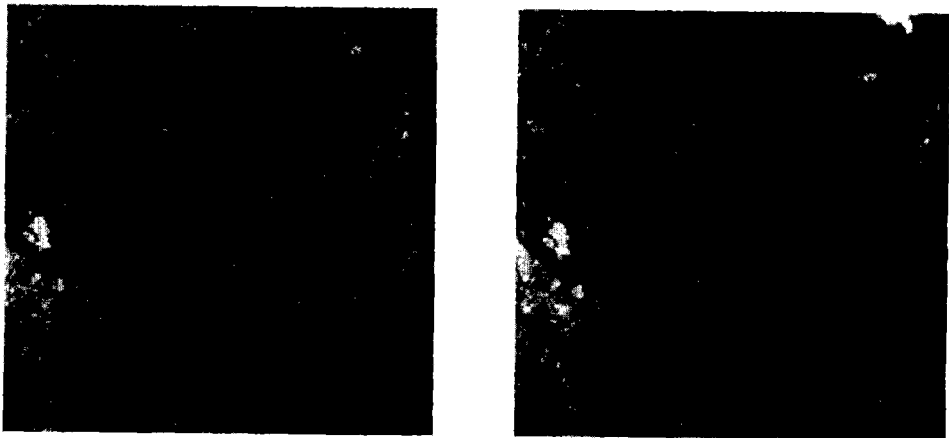


Figure 1. JERS stereo pair used for experiments(copyright owned by MITI/NASDA)

Table 1. Comparison of Matching Results from Different Matching Probabilities: Eigenvalue of Variance-Covariance Matrix vs. Determinant of Affine Transformation Matrix

	Results using the Eigenvalue as Matching Probability	Results using the Determinant as Matching Probability
Matching Success Rate	86.9%	83.4%
Matching Speed	26.2 msec/point	30.2 msec/point
Matching Accuracy Index (Variance x 100)	6.73	9.53

disparity를 이용하였다. 본 논문에서는 Gruen이 제안한 각 파라미터의 분산값을 평균하여 정합 정확도 지수(Matching Accuracy Index)로 사용하였다. 표에서 볼 수 있듯이 분산-공분산 행렬의 공유값을 정합 가능성도로 사용하는 것이 모든 면에서 나은 결과를 보이고 있다. 또한 실험결과는 정합조절 모듈에서의 작은 변화가 전체 정합에 미치는 영향이 매우 클 수 있다는 것을 간접적으로 암시하고 있다.

표 2은 제안된 정합 알고리즘에 1화소 간격의 격자점("1 pixel" grid), 2화소 간격의 격자점("2

Table 2. Matching Results using Patches with various Grid Pattern

	Size of the Patch used for Matching(Pixel × Pixel)							
	9 × 9	13 × 13	17 × 17	21 × 21	25 × 25	29 × 29	33 × 33	37 × 37
Matching Success Rate								
"1 pixel" grid	54%	68%	92%	94%	94%	96%	88%	86%
"2 pixel" grid	16%	58%	80%	88%	90%	94%	94%	96%
"3 pixel" grid	6%	34%	34%	62%	76%	76%	88%	94%
"linear" grid	32%	66%	92%	92%	96%	96%	94%	88%
Matching Speed (msec/point)								
"1 pixel" grid	26	46	46	58	74	86	156	246
"2 pixel" grid	14	18	20	24	26	26	34	44
"3 pixel" grid	6	12	12	18	22	22	24	22
"linear" grid	10	14	14	20	18	22	28	34
Matching Error(Pixel)								
"2 pixel" grid	0.103	0.124	0.093	0.088	0.064	0.055	0.042	0.042
"3 pixel" grid	0.812	0.286	0.282	0.238	0.256	0.255	0.168	0.180
linear grid	0.123	0.141	0.111	0.084	0.080	0.078	0.070	0.075
No. of Grids in a Patch								
"1 pixel" grid	81	169	289	441	625	841	1089	1369
"2 pixel" grid	25	49	81	121	169	225	289	361
"3 pixel" grid	9	25	25	49	81	81	121	169
"linear" grid	25	49	81	121	169	225	289	361

pixel" grid), 3화소 간격의 격자점("3 pixel" grid), 선형적으로 간격이 변하는 격자점("linear" grid)을 가지는 정합구역을 적용하였을 때에 얻은 결과를 보이고 있다. 표의 결과는 50개의 초기 정합 예측치에 관하여만 정합을 수행한 결과이다. 이때 정합오차(Matching Error)는 1화소 간격의 격자점의 정합구역을 이용해서 얻은 정합점과 여러 간격의 격자점의 정합구역을 이용해서 얻은 정합점 간의 영상 좌표값 차이를 사용하였다.

표에서 볼 수 있듯이 정합구역의 격자점을 효율적으로 정의함으로써 같은 크기의 정합구역을 기준으로 비교할 때, 정합 성공률은 약간 떨어지나 수행속도를 최고 10배 이상 향상시켰다. 정합 성공률이 떨어지는 것은 더 큰 크기의 정합구역을 이용함으로써 극복될 수 있다. 같은 격자점 수를 기준으로 비교하면 본 논문에서 제안된 격자점 정의 방식이 정합 성공률과 속도 면에서 모두 향상된 성능을 보인다. 그러나 3화소 간격의 격자점의 경우에는 속도는 매우 향상되나 정합 성공률 및 정합 정확도에서 부진한 결과를 내었다. 선형적으로 간격이 변하는 격자점의 경우가 여러 경우 중 가장 최적의 결과를 나타내고 있으나 정합 정확도 면에서는 2화소 간격의 격자점의 경우가 약간 나은 결과를 보이고 있다.

표 3은 정합 수렴반경에 관한 실험 결과이다. 이상적인 조건에서의 정합 수렴반경을 알아보기 위하여 좌측과 우측의 영상을 동일한 영상으로 사용하였으며 주어진 초기예측치 100개의 정합 결과를 분석하였다. 초기 정합 예측치를 원래의 참값에서 일정한 오차를 가지도록 설정한 후 이를 이용하여 실험하였다. 실험시에 초기예측치가 가지는 오차의 크기에 따라 최적의 정합결과를 얻도록 정합구역의 크기도 이에 맞추어 적절하게 변화시켰다. 표 3에서 정합 성공률은 정합 알고리즘에 의하여 구한 해가 참값인 경우이고 Blunder³⁾율은 정합 알고리즘에 의하여 구한 해가 참값이 아닌 경우를 나타낸다. Blunder는 정합 수행시에 유사변환 파라미터 값들의 변화를 제한함으로써 제거할 수 있으나 오차의 크기에 따른 Blunder율을 비교하기 위하여 이를 적용하지는 않았다. 표 3을 분석하면 약 3화소의 오차 내에서 정합은 성공적으로 수행됨을 알 수 있다. 오차가 4화소 이상인 경우에도 어느 정도 참값을 구할 수는 있으나, Blunder 역시 커지는 것을 확인할 수 있다. 따라서

Table 3. Experiments on Matching Convergence Radius

Magnitude of Error in Initial Estimate Points (Patch Size)	Matching Success Rate(Blunder Rate)	Matching Speed	Matching Error (Matching Error including Blunders)(Pixel)
1 pixel error(17×17)	99%(0%)	6 msec	0.000778
2 pixel error(17×17)	98%(0%)	9 msec	0.000447
3 pixel error(21×21)	96%(2%)	15 msec	0.000343(0.0398)
4 pixel error(25×25)	90%(6%)	25 msec	0.000339(0.125)
5 pixel error(29×29)	87%(5%)	40 msec	0.000296(0.160)
6 pixel error(29×29)	70%(12%)	57 msec	0.000253(0.629)

3) 정합 결과가 잘못된 값으로 수렴하는 경우를 Blunder라고 한다.

본 논문에서 개발한 정합 알고리즘의 수렴반경은 약 3화소라고 볼 수 있다. 표에서 초기 정합 예측치의 오차가 커짐에 따라 정합 오차가 줄어드는 현상이 보이거나 이는 예측치의 오차가 커질수록 넓은 정합구역을 사용하였으므로 정합 성공점에 대해서는 더 정밀한 추정치를 얻었기 때문이다. Blunder를 포함한 정합 오차는 초기 정합 예측치의 오차에 비례한다.

V. 결 론

본 논문에서 이제까지 위성영상에서 수치표고모형을 추출하고자하는 목적을 위한 정합 알고리즘 개발에 대하여 설명하였다. 먼저 주어진 목적에 최대한 부합하는 알고리즘의 선택에 관하여 논의하였고, 개발된 알고리즘을 정합수행 모듈, 정합조정 모듈, 정합최적화 모듈로 나누어 설명하였다.

본 논문에서는 특히 적절한 정합조정 모듈의 중요성을 강조하였고 이를 위하여 정합 가능도로 사용할 수 있는 두가지 인자를 제시하였으며, 실험결과와 분석을 통하여 최적의 정합 가능도를 보였다. 개발된 알고리즘은 새로 고안된 형태의 정합구역을 사용함으로써 기존의 비선형 최소자승법에 의한 영역정합 알고리즘에 비하여 수행속도를 최고 10배 이상 향상시켰다. 또한 정합 알고리즘의 수렴반경에 관한 논의와 실험결과와 분석을 통해서 정합 알고리즘에 있어서 수렴반경이 가지는 중요성을 강조하였고, 개발된 정합 알고리즘의 수렴반경이 약 3화소임을 정량적으로 분석하였다.

본 논문에서는 정합결과의 정확도를 상대적인 방법으로 비교하였다. 보다 정량적인 정합결과의 분석을 위해서는 정합결과를 수치표고모형으로 변환하여 지상기준 수치표고모형과 비교하여 분석하여야 한다. 그러나 정합결과를 수치표고모형으로 변환하는 과정은 정밀 수치사진측량 기법을 필요로 하는 복잡한 과정이다. 이를 위하여 지속적인 연구 및 실험을 수행 중이고 이에 대한 논의는 차후의 과제로 미룬다.

사 사

본 연구는 과학기술처 국책연구개발과제인 원격탐사 기반 및 응용기술 개발사업 “EOC영상 자료 처리, 활용 기술 개발 연구” 과제(과제번호 NN20560)의 연구지원의 의하여 수행되었습니다.

참고문헌

Cho, W., 1996, “Relational Matching for Automatic Orientation”, *Int. Archives of Photogrammetry and*

- Remote Sensing*, 31(B3):111-119
- Day, T., and J-P. Muller, 1989, "Digital Elevation Model Production by Stereo Matching SPOT Image-Pairs: A Comparison of Algorithms", *Image and Vision Computing*, 7(2):95-101
- Gruen, A.W., 1985, "Adaptive Least Squares Correlation: A Powerful Image Matching Techniques", *South African Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Cartography*, 14(3):175-187
- Kim, T., and S. D. Choi, 1997, "Selection of an Optimum Patch for an Area-Based Stereo Matching Algorithm", *Proc. of IGARSS 97*, Singapore, 4-8 August, 1997
- Kim, T., and J-P. Muller, 1995, "Effects of image resolution on an Automated Building Extraction System", *Proc. of 21st Annual Conference and Exhibition of the Remote Sensing Society, "Remote Sensing in Action"*, University of Southampton, United Kingdom, pp. 1259-1266, 11-14 September 1995
- Kim, T., and J-P. Muller, 1996, "Automated Urban Area Building Extraction from High Resolution Stereo Imagery", *Image and Vision Computing*, 14(2):115-130
- Lemmens, M.J., 1988, "A Survey on Stereo Matching Techniques", *Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 27(3):11-23, 1988
- Marr, D., and T. Poggio, 1979, "A Computational Theory of Human Stereo Vision", *Phil. Trans. Royal Society*, London, B-204:301-328
- Otto, G.P., and T.K. Chau, 1989, "A Region-Growing Algorithm for Matching of Terrain Images", *Image and Vision Computing*, 7(2):83-94
- Wrobel, B.P., 1991, "The Evolution of Digital Photogrammetry from Analytical Photogrammetry", *Photogrammetric Record*, 13(77):765-776
- Rohatgi, 1939, V.K., *Statistical Inference*, Wiley