

# 모자이크 영상 생성을 위한 영상과 수치지도로부터 접합선 결정 Seamline Determination from Images and Digital Maps for Image Mosaicking

김동한<sup>1)</sup> · 오채영<sup>2)</sup> · 이대건<sup>3)</sup> · 이동천<sup>4)</sup>

Kim, Dong Han · Oh, Chae-Young · Lee, Dae Geon · Lee, Dong-Cheon

## Abstract

Image mosaicking, which combines several images into one image, is effective for analyzing images and important in various fields of spatial information such as a continuous image map. The crucial processes of the image mosaicking are optimal seamline determination and color correction of mosaicked images. In this study, the overlap regions were determined by SURF (Speeded Up Robust Features) for image matching. Based on the characteristics of the edges extracted by Canny filter, seamline candidates were selected from classified edges with their characteristics, and the edges were connected by using Dijkstra algorithm. In particular, anisotropic filter and image pyramid were applied to extract reliable seamlines. In addition, it was possible to determine seamlines effectively and efficiently by utilizing building and road layers from digital maps. Finally, histogram matching and seamline feathering were performed to improve visual quality of the mosaicked images.

Keywords : Image Mosaick, Image Matching, Color Balancing, Seamless Mosaicking

## 초 록

여러 장의 영상을 조합하여 한 장의 영상으로 제작하는 영상 모자이크는 넓은 지역의 영상을 판독하고 분석하는데 효과적이며, 연속 영상지도 등 다양한 공간정보 분야의 활용에 중요하다. 영상 모자이크의 중요한 과정은 인접 영상의 중복지역에서 최적의 접합선 추출과 모자이크된 영상의 색조보정이다. 이를 위해 본 연구에서는 SURF (Speeded Up Robust Features)에 의한 영상정합을 수행하여 중복지역을 결정하였다. Canny 필터로 추출한 윤곽선의 특성에 따라 등급을 정하여 접합선이 될 가능성이 높은 윤곽선을 선별하고, Dijkstra 알고리즘을 사용하여 윤곽선들을 연결하여 접합선을 결정하였다. 특히 비등방성 필터와 영상 피라미드를 적용하여 신뢰성 있는 접합선을 추출할 수 있었다. 또한 수치지도의 건물과 도로 레이어를 이용하여 효과적이고 효율적인 접합선을 결정할 수 있었다. 최종적으로 인접 영상들의 색조를 조절하여 품질을 향상시키기 위하여 히스토그램 정합과 접합선 feathering을 수행하였다.

핵심어 : 영상 모자이크, 영상정합, 색조보정, 연속 모자이크

Received 2018. 11. 05, Revised 2018. 11. 15, Accepted 2018. 12. 14

1) Dept. of Environment, Energy & Geoinformatics, Sejong University, Korea (E-mail: kimdonghan@sju.ac.kr)

2) Technology & Support Dept., ESRI, Korea (E-mail: cyoh@esrikr.com)

3) Member, Dept. of Environment, Energy & Geoinformatics, Sejong University, Korea (E-mail: dglee@sju.ac.kr)

4) Corresponding Author, Member, Dept. of Environment, Energy & Geoinformatics, Sejong University, Korea (E-mail: dclee@sju.ac.kr)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 1. 서론

카메라의 촬영각(또는 시야각)인 Field-of-View (FoV)에 의해서 영상에 촬영되는 면적은 한정되므로 넓은 지역을 촬영한 다수의 영상을 조합하여 연속된 하나의 영상으로 조합하는 과정이 필요하다. 특히 무인항공기(UAV: Unmanned Aerial Vehicle)에서 촬영된 영상은 촬영면적이 작아서 대량의 영상이 요구된다. 그러나 각각의 영상은 명도, 대조비 등 색조가 서로 다르기 때문에 원래 영상을 단순히 연결하여 조합하면 개별 영상들의 경계가 나타나고 영상간에 일관성과 동질성이 유지되지 않아서 시각적 품질이 저하되어 영상판독 등 여러 활용에 불편하다. 또한 하나의 객체가 인접 영상 경계선에서 분리되어 보이므로 일체감이 상실된다. 그러므로 여러 장의 영상들을 집성(mosaicking)하여 넓은 지역을 한 장의 영상으로 촬영한 것과 같은 효과를 얻기 위한 연속 영상 모자이크(seamless image mosaicking)방법이 요구된다. 모자이크 영상의 기하학적 및 방사적 품질을 향상시키기 위해 두 단계로 수행된다. (1) 접합선(seamline) 추출 및 최적 접합선 결정, (2) 인접 영상간의 화질 균일화(color balancing)이다.

인접 영상간의 명도 및 색조 차이 등 화질을 일치 시켜도 직선 형태의 물리적 영상 경계선이 육안으로 보일 수 있다. 그러나 객체의 윤곽선(예: 건물 외곽선, 도로 및 하천 경계선 등)을 접합선으로 모자이크하면 접합선을 쉽게 식별하기 어려우므로 자연스럽게 한 장의 영상으로 보이게 된다. 그러므로 영상 모자이크에서 중요한 것은 최적의 접합선 추출이다. 그 외에 고려해야 할 사항은 인접 영상간의 서로 다른 촬영고도(지상영상의 경우 촬영거리)에 따른 축척 변화와 촬영방향 변화에 따른 객체의 왜곡, 카메라의 중심투영과 지형지물의 높이에 따른 기복변위, 그리고 그림자 등 여러 조건에 따라 여러 장의 영상이 완전하게 한 장의 영상처럼 보이도록 모자이크하는 것은 거의 불가능하다. 그러므로 기하학적 왜곡이 보정되고 폐색지역이 복원된 엄밀정사영상(true orthoimage)을 모자이크하는 것이 의미가 있다. 그러나 엄밀정사영상을 생성하는 것은 어려운 과정이고 엄밀정사영상이 존재하지 않은 경우에는 원래 영상을 모자이크하는 경우가 많다. 인터넷 포털의 항공 및 위성영상 서비스와 로드뷰(또는 스트리트뷰)는 영상의 기하학적 왜곡을 최소화하고 화질의 일체감을 유지하여 연속된 영상 공간을 구성하기 위한 모자이크나 stitching이 요구된다.

육안으로 인식하기 어려운 접합선을 추출하여 영상간의 화질 변화를 최소화하여 연속성과 일체성이 유지된 한 장의 영상으로 모자이크하는 방법의 자동화가 핵심이며, 디지털 영

상의 활용이 증가하기 시작한 2000년대 초부터 고품질 영상 모자이크 관련 연구는 많이 수행되었다. 대표적인 연구로는, Litvinov and Schechner (2005)는 카메라의 방사적 반응과 렌즈의 광학적 비선형 특성, 그리고 영상의 주변부가 어두워지는 vignetting 현상을 수학적으로 모델링하여 모자이크 영상의 화질을 개선하는 방법을 제안하였다. Song (2005)은 윤곽선 검출 알고리즘인 절대차이 합과 Canny 필터를 적용하여 추출한 선형 부분과 불연속 부분을 연결하여 접합선을 결정하고, 히스토그램 정합을 수행하여 모자이크 영상을 생성하였다. Brown and Lowe (2007)는 영상의 축척, 회전, 명도 등에 불변한 특성과 노이즈에 민감하지 않은 영상정합 기법에 의한 다중 파노라마 영상의 자동 stitching 방법을 개발하였으며, 특히 왜곡이 심한 파노라마 영상보정을 위해 번들조정법을 적용하였다. Woo *et al.* (2009)은 HSI (Hue-Saturation-Intensity) 모델을 이용하여 모자이크 영상 품질의 객관적인 평가를 위해 동일 색상에 대한 채도 및 명도를 기반으로 유사성과 대비를 정량적으로 측정하는 방법을 제시하였다.

Chon *et al.* (2010)은 영상 모자이크를 위한 최적의 접합선 결정을 위해 Dijkstra 알고리즘을 사용하여 접합선 추출 오류를 최소화하는 방법을 제시하였다. Mills and McLeod (2013)은 접합선의 연결점으로 이루어진 망을 구성하고 접합선 결정을 위해 계산량을 최소화하는 그래프 기반 방법을 제안하여 최단 경로를 탐지하여 정사영상 모자이크를 생성하는 방법을 개발하였다. Chen *et al.* (2014)은 수치표면모델(DSM)을 이용하여 접합선을 추출하는 방법을 제시하였다. 이를 위해 추출한 접합선으로 이루어진 네트워크 구조로부터 객체를 통과하는 접합선을 탐지하고 제외시키는 방법으로 정사영상 모자이크를 생성하였다. DSM을 이용하면 영상에서 접합선을 결정할 결과보다 더 타당한 결과를 얻을 수 있다고 제안하였다. Pan *et al.* (2014)은 효율적인 정사영상 모자이크를 위해 mean shift 알고리즘과 객체들을 추출하는 RCR (Region Change Rate) 방법으로 최적의 접합선을 추출하였다. Choi *et al.* (2015)은 KOMPSAT-2 위성영상을 모자이크하기 위해 Sobel 필터를 적용하여 최적의 접합선을 추출하고 계절에 따른 색조 변화를 최소화하기 위하여 직선회기 방법으로 인접 영상간의 화질을 균일화하고 연속성을 유지하기 위한 feathering 기법을 적용하였다. 또한 영상정합 방법은 외부표정요소가 없는 위성 또는 항공영상의 기하학적 왜곡보정과 geocoding을 위해 수치지도와 영상간의 좌표변환에 적용될 수 있으며(Lee and Lee, 2016), 영상정합과 모자이크 개념과 유사한 원리는 영상뿐 아니라 라이다 데이터의 여러 개의 스트립을 연결하고 스트립간의 이격을 최소화하여 하나의 연속 데이터로 통합하

기 위해 활용된다(Lee, 2018).

최근에는 인공지능망(ANN: Artificial Neural Network)을 활용하여 접합선을 결정하는 연구들이 발표되고 있다. Saito *et al.* (2015)은 다량의 항공영상과 label 영상으로 학습(training)된 합성곱 신경망(CNN: Convolutional Neural Network) 모델을 이용하여 의미적 분할(semantic segmentation)을 수행하여 건물들을 탐지한 후 접합선이 건물 객체를 지나는 것을 방지하는 방법을 제안하였다. Li *et al.* (2017)은 심층 합성곱 신경망(deep CNN)을 이용하여 최적의 접합선을 추출하고 정사영상을 모자이크하는 방법을 제안하였다. 그러나 모자이크 영상은 주관적 판단에 영향을 받으므로 시각적 품질을 객관적이고 정량적으로 평가하는 것은 한계가 있다.

본 논문은 모자이크 영상을 자동으로 생성하기 위해 영상 정합(image matching), 접합선 추출 및 최적의 접합선 결정, 그리고 화질 균일화 단계로 수행하였다. 영상정합은 외부표정요소(EOP: Exterior Orientation Parameters)가 있는 경우에서 표정요소를 이용하여 중복지역을 쉽게 결정할 수 있다. 접합선은 Canny 필터를 적용하여 추출하였으며, 모자이크 영상의 화질 개선을 위해 히스토그램 매칭과 접합선 지역에서 Laplacian pyramid blending 기법을 적용하여 접합선 feathering을 수행하여 연속 모자이크 영상을 생성하였다.

제안한 방법의 특징은 비등방성 확산 필터(anisotropic diffusion)를 이용하여 접합선으로 부적합하거나 불필요한 윤곽선을 효과적으로 제거하였다. 인접 영상간의 중복 형태에 따라 접합선의 전반적인 방향성(global direction)과 추출된 개별 윤곽선의 특성(길이, 밝기차에 의한 강도, 방향)에 따라 등급화한 지역적인 방향성(local direction)을 복합적으로 이용하여 최적의 접합선 결정 방법을 제안하였다. 또한 수치 지도의 건물과 도로를 접합선으로 이용한 결과와 영상으로부터 결정된 접합선에 의한 모자이크 영상을 비교 분석하였다.

## 2. 연구방법

본 연구는 인접 영상간의 중복지역 탐지, 접합선 추출 및 색조보정 단계로 수행하였다. 외부표정요소가 제공되는 영상은 중복지역을 용이하게 결정할 수 있지만, 그렇지 않은 영상은 영상정합 과정이 필요하다. 접합선은 객체의 윤곽선을 이용하여 접합 부분이 나타나지 않도록 하고, 영상간의 색조 차

이를 최소화하여 모자이크된 영상이 자연스럽게 하나의 영상으로 보이도록 한다. Fig. 1은 본 논문의 연구수행 과정을 보여주고 있다.

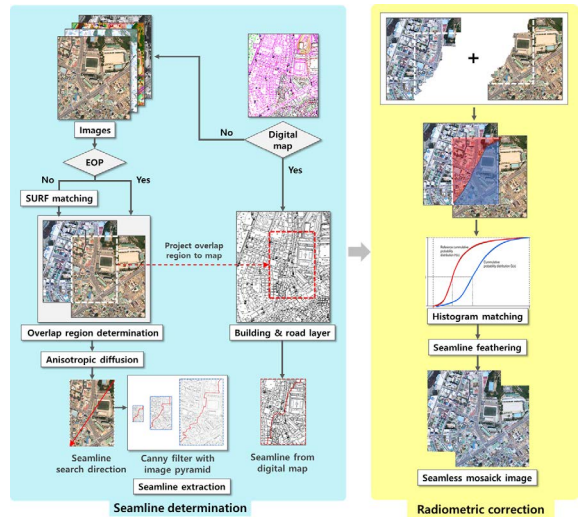


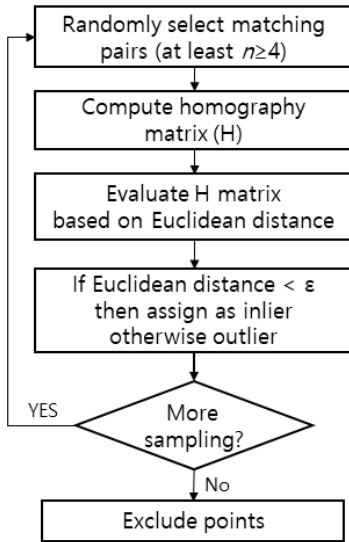
Fig. 1. Work flow of seamless image mosaicking

### 2.1 중복지역 결정

인접 영상간의 중복지역에서 추출한 접합선을 기준으로 모자이크 영상을 생성하므로 중복지역을 결정하는 것이 선행되어야 한다. 중복지역은 항공삼각측량에 의해서 외부표정요소와 절대좌표가 geocoding된 영상과 그렇지 않은 영상으로 구분하여 결정하였다. Geocoding된 영상은 기준 좌표계상에서 중복지역을 용이하게 결정할 수 있지만, 그 외의 영상은 중복지역을 자동으로 결정하기 위해 영상정합을 수행하였다. FAST (Features from Accelerated Segmentation), CSS (Curvature Scale Space), SIFT (Scale-Invariant Feature Transform), SURF 등 영상정합에 관한 여러 방법들이 제안되었다(Anitha and Deepa, 2014; Awrangjeb and Lu, 2008; Bay *et al.*, 2006; Lowe, 2004; Rostern and Drummond, 2006).

본 논문에서는 축척과 회전 등 기하학적 변형에 성능이 우수하다고 판단되는 SURF 기법을 사용하였다(Lee, 2018). 또한 잘못 정합된 점을 제거하여 최적의 정합점을 결정하기 위해 RANSAC (Random Sample Consensus) 알고리즘(Fischler and Bolles, 1981)을 적용하였다. RANSAC에 의한 영상정합 향상 방법은 Brown *et al.* (2004), Kim and Kim (2014) 및 Kim *et al.* (2016)을 참조하였다. RANSAC은 과대오차를 포함하는 데이터로부터 반복적으로 과대오차를 탐지하고 제외하여 최적의 결과를 추정하기 위한 방법이다. 영상정합에서는 과대오차에 해당하는 오정합 쌍을 제거하여 정

합 결과를 향상시켜 중복지역을 보다 정확하게 결정할 수 있다. Fig. 2는 RANSAC 알고리즘을 설명하고 있다.



(where  $n$  and  $\epsilon$  denote number of point pairs and threshold, respectively.)

**Fig. 2. RANSAC algorithm to improve matching between adjacent images**

RANSAC은 샘플링 횟수 및 inlier와 outlier의 경계(즉, 임계값) 설정이 중요하다. 반복 횟수는 계산의 효율성을 높이기 위해 확률적으로 산정하며, 일반적으로 RANSAC의 반복 횟수( $N$ )는 Eq. 1에 의해 결정된다.

$$N = \frac{\log(1-p)}{\log(1-w^n)} \quad (1)$$

where  $N$  is number of iteration, and  $n$  is number of randomly selected points.  $p$  and  $w$  denote probability of points to be inlier and rate of outlier, respectively.

중복지역에서 추출한 정합점들 사이에는 오정합이 존재할 수 있으므로 데이터간의 기하학적 일치 관계(또는 유사성)를 나타내는 homography matrix ( $H$ )를 추정하여 오정합 쌍을 제거할 수 있다. Homography matrix는 정합점간의 변환 정보를 포함하고 있으며, Eq. 2, 3 및 4에 의해 결정된다.

$$H = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 & h_3 \\ h_4 & h_5 & h_6 \\ h_7 & h_8 & h_9 \end{bmatrix} \quad (2)$$

where  $h_1, h_2, \dots, h_9$  are elements of homography matrix representing geometric relations between adjacent image.

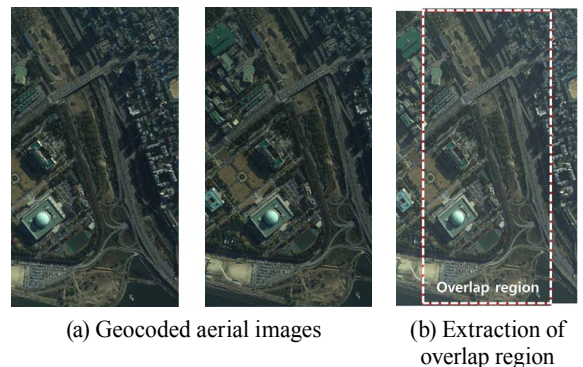
$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 & h_3 \\ h_4 & h_5 & h_6 \\ h_7 & h_8 & h_9 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -x_1 & -y_1 & 1 & y_2x_1 & y_2y_1 & y_2 \\ x_1 & y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_2x_1 & -x_2y_1 & -x_2 \\ -y_2x_1 & -y_2y_1 & -y_2 & x_2x_1 & x_2y_1 & x_2 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ h_4 \\ h_5 \\ h_6 \\ h_7 \\ h_8 \\ h_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

where  $(x_1, y_1)$  and  $(x_2, y_2)$  represent coordinates of corresponding matching point pairs in overlap region.

Eq. 4는 실제적으로 3번째 행은 1번째 행과 2번째 행의 선형 조합으로 구성되었으므로 제거할 수 있다. 또한 Eq. 4는 한 쌍의 정합점에 대한 식이므로 선택된 정합점들의 수가 증가하면 각점에 대해 행을 확장하여 H matrix의 요소를 구한다. RANSAC 알고리즘에서 최소로 선택하는 정합점의 수가 4개인 이유는 H matrix의 자유도(degree of freedom)가 8이기 때문이다.

Fig. 3은 절대위치 정보를 가지고 있는 영상의 중복지역을 보여주고 있다. Fig. 4(a)는 회전 및 축척 변경이 발생한 영상간의 정합결과를 보여주고 있으며, 기하학적 변형이 발생한 영상에서도 정합이 수행됨을 알 수 있다. 또한 RANSAC을 적용하여 오정합(erroneous matching)의 일부를 제거할 수 있었다. Fig. 4(b)는 영상정합에 의해 결정된 중복지역을 보여주고 있다.



**Fig. 3. Determination of overlap region with EOP information**

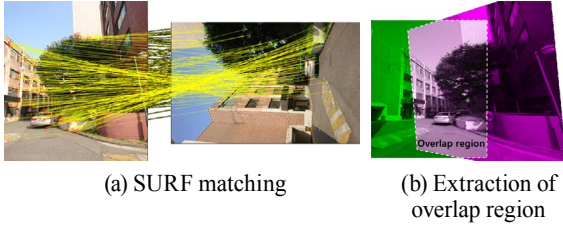


Fig. 4. Determination of overlap region using image matching

## 2.2 윤곽선 추출

### (1) 영상에서 윤곽선 추출

접합선은 모자이크 영상에서 인접한 영상들이 하나의 영상처럼 보이게 하기 위해서 객체들의 윤곽선(edge)으로 이루어져야 하는 것이 타당하다. 예를 들면, 건물의 외곽선, 도로의 경계 등을 접합선으로 이용할 수 있다. 본 논문에서는 다른 필터에 비해 우수한 Canny 필터를 적용하여 윤곽선을 추출하였다(Canny, 1986). Canny 필터를 적용한 윤곽선 영상과 수치지도에는 여러 후보 접합선(candidate seamline)들이 있다. 그 중에서 인접 영상간의 배치 형태에 따라 접합선의 시작점과 끝점을 지정하고, 가능하면 방향성을 유지하고 복잡한 경로를 피하면서 단순한 형태의 접합선을 추출하는 것이 바람직하다. 경우에 따라서는 여러 개의 서로 연결되지 않은 윤곽선(edge segment)들을 연결하여 연속된 접합선을 결정하여야 한다. 이러한 조건들을 만족하는 최적의 접합선 결정을 위해 접합선의 시점과 끝점 및 방향성을 판단하는 방법을 제안하였고, 하나의 윤곽선의 정점(node)에서 다른 정점까지의 최단 경로를 탐색하는 Dijkstra 알고리즘(Dijkstra, 1959)을 적용하여 최적 접합선을 결정하였다(Pan *et al.*, 2014; Saito *et al.*, 2015).

Canny 필터를 영상에 적용하면 여러 객체들에 의해서 불필요한 윤곽선들도 함께 추출되므로, 명확하고 접합선이 될 가능성이 높은 윤곽선을 보존하고 노이즈, 작은 객체 및 불필요한 객체(예: 차량, 차선, 수목 등)의 윤곽선을 제거하기 위한 anisotropic diffusion을 이용하였다(Eqs. 5, 6 and 7 참조)(Oshel *et al.*, 1995; Sapiro, 2006; Perona and Malik, 1990).

$$\frac{\partial I(x,y)}{\partial t} \Big|_t = \frac{\partial^2 I(x,y)}{\partial x^2} \Big|_t + \frac{\partial^2 I(x,y)}{\partial y^2} \Big|_t = \text{div}(c(x,y) \nabla I(x,y)) \quad (5)$$

$$I(x,y) \Big|_{t+1} = I(x,y) + T \sum_{d=1}^n (c(x,y) \nabla I_d(x,y)) \Big|_t \quad (6)$$

$$c(x,y) = \exp\left(\frac{\nabla I(x,y)}{k^2}\right) \quad (7)$$

where  $I(x,y)$  is image,  $t$  denotes different level of image pyramid created by Gaussian filter,  $\text{div}$  stands for divergence operator,  $c(x,y)$  is diffusion function,  $\nabla I(x,y)$  is image gradient,  $T$  is constant with respect to diffusion directions,  $n$  denotes number of directions (4 or 8 at current center pixel), and  $k$  is diffusion coefficient.

Anisotropic diffusion은 객체의 경계지역에서는 화소의 밝기값 변화가 크므로 이를 과대오차로 추정하여 확산(즉 밝기값을 균일한 값으로 변경하는 과정)을 정지(edge-stopping diffusion)하는 특성을 가지고 있다. 그러므로 anisotropic diffusion은 객체의 윤곽 지역을 훼손하지 않고 객체 내부의 값들을 유사한 값들로 변화시키며 노이즈를 효과적으로 감소시킬 수 있다. 활용분야로는 자기공명영상(MRI)같은 노이즈가 많고 선명하지 않은 의학영상 화질 개선에 사용된다(Gerig *et al.*, 1992). 또한 LiDAR 데이터에 적용하면 노이즈가 제거되고 객체 윤곽선이 향상되므로 객체 모델링의 정확도를 높일 수 있다(Jung *et al.*, 2008).

Anisotropic diffusion 결과는 확산함수의 종류 및 계수, 그리고 반복 횟수에 따라 다르다. Fig. 5(a)는 여러 방향성이 뚜렷한 선형 객체인 고속도로 입체교차로를 촬영한 영상으로서 본 논문에서 제안한 접합선 결정 알고리즘의 타당성을 확인할 수 있는 적합한 실험 영상이라고 판단된다. Fig. 5(b)는 Canny 윤곽선 추출 결과를 보여주고 있다. Fig. 6은 확산 계수와 반복 횟수를 변화시켜 anisotropic diffusion을 적용한 윤곽선 추출 결과이며, 확산 계수와 반복 횟수를 증가시켜도 일정 한계에 도달하면 큰 변화가 없다. 또한 본 논문에서는 Fig. 6에서 보여주는 것처럼, Anisotropic diffusion을 영상 피라미드에 적용한 계층적 방법(hierarchical 또는 coarse-to-fine approach)으로 해상도를 변경하여 윤곽선을 추출하였다. 원래 해상도를 단계적으로 저하시키면 원래 영상보다 낮은 해상도 영상(Fig. 7(c) 참조)에서 불필요한 객체인 차량 및 차선 등의 윤곽선은 추출되지 않고 접합선으로 결정될 가능성이 높은 윤곽선을 추출할 수 있다.

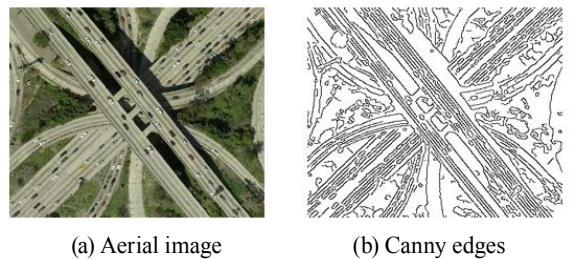


Fig. 5. Canny edge detection

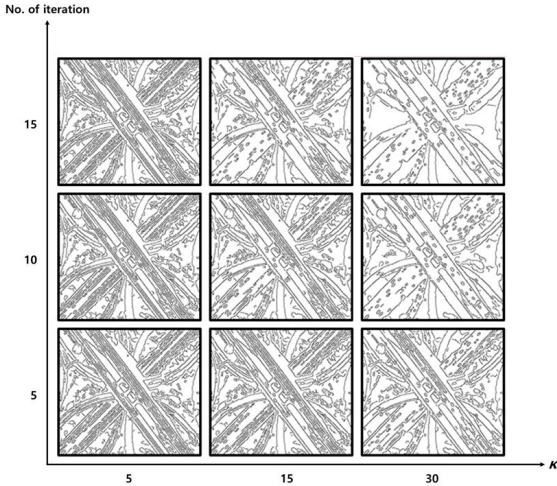
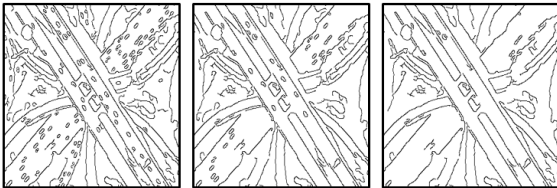


Fig. 6. Edges after anisotropic diffusion with different coefficient and iteration



(a) High resolution (b) Middle resolution (c) Low resolution

Fig. 7. Edges in image pyramid after applying anisotropic diffusion

(2) 수치지도에서 윤곽선 추출

수치지도를 사용하면 영상으로부터 윤곽선을 추출하는 과정이 필요 없으므로 효율적으로 최적의 접합선을 결정할 수 있다. 특히 수치지도의 건물 및 도로 레이어를 이용하면 건물을 통과하는 접합선을 배제할 수 있는 장점이 있다. 인접 영상의 중복지역에 해당하는 수치지도에서 접합선 추출은 영상과 마찬가지로 영상의 배치 형태에 따라 접합선 탐지 방법과 동일하게 적용하였다(Fig. 8 참조). 수치지도의 건물 윤곽선과 도로 경계선을 Dijkstra 알고리즘으로 연결하여 접합선을 결정하게 되므로 영상으로부터 접합선을 결정하는 방법보다 정확도와 객관성 및 일관성이 높다. 접합선이 결정되면 후속 처리 단계인 화질보정 과정을 수행하였다.

2.3 접합선 결정

접합선은 인접 영상간의 중복지역에서 추출하고 영상간의 배치 형태는 Fig. 8에서 보여주는 것처럼 3가지 경우가 가능하고, 접합선의 시작점과 끝점 및 방향은 배치 형태에 따라 서로

다른 방식으로 결정된다. Fig. 9와 같은 방식으로 접합선을 추출하면 접합선 이외의 부분에서 영상 경계가 보이게 된다. 그러나 시작점, 끝점 및 탐지 방향은 획일적으로 정해지는 것이 아니고 접합선의 추출 방향의 추세 또는 가이드를 제시하는 것이며, 일정 범위 내에서 융통성 있게 결정하게 된다.

Case	(a) Side-by-side	(b) Left-up/right-down	(c) Left-down/right-up
Configur-ation			
Starting to ending point	Midpoint to midpoint	NE corner to SW corner	NW corner to SE corner

Fig. 8. Seamline search scheme

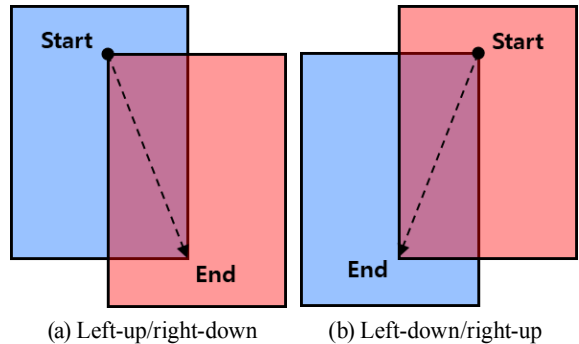


Fig. 9. Incorrectly determined seamlines

블록을 형성하는 영상의 경우에는 Fig. 10에서 보여주는 것 같이 먼저 스트립 방향으로 인접한 영상에서 접합선을 추출하여 스트립별로 모자이크한 후 스트립 사이의 중복지역에서 접합선을 추출하여 모자이크 영상을 생성하였다.

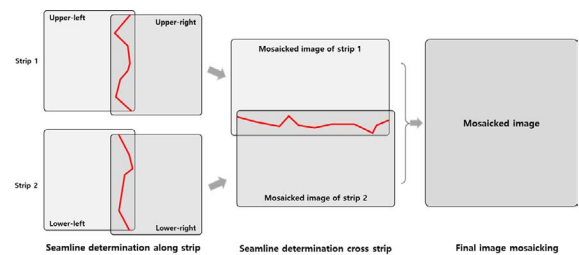


Fig. 10. Mosaicking of image block

영상으로부터 추출한 윤곽선(edge segment)들은 다양한 모양의 선형(linear feature)이지만 길이, 방향(orientation 또는 direction) 및 강도(gradient 또는 strength) 등 중요한 특성 요소를 가지고 있다. 길이는 양 끝점에서 윤곽선의 길이이며, 주성분 방향(principal orientation)은 윤곽선을 지나는 타원의 장/단반경으로 추정할 수 있으며, 강도는 영상에서 윤곽선 주위의 밝기 변화에 의해 결정된다(Fig. 11 참조). 이런 요소들을 기반으로 각각의 윤곽선에 체계적으로 등급을 부여할 수 있다.

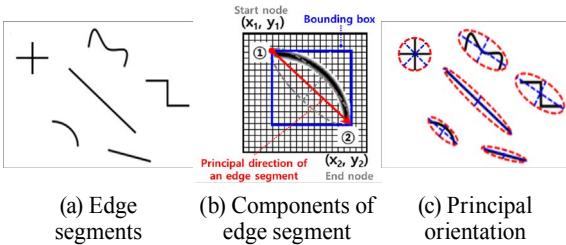


Fig. 11. Components of an edge segment

본 논문에서는 Fig. 8에서 설명한 바와 같이, 인접 영상간의 배치 형태에 따라 시작점과 끝점으로 결정되는 방향각을 접합선의 탐색 방향(또는 guide orientation)으로 정하고, 윤곽선 길이, 방향 및 강도에 따라 가중치를 설정하여 등급을 정하였다. 그러므로 상위 등급의 윤곽선들은 접합선이 될 가능성(candidate seamline)이 높다. Guide orientation에 근접한 윤곽선들을 선택하고 윤곽선의 끝점(node)에서 최단거리 탐색 방법인 Dijkstra 알고리즘으로 윤곽선들을 연결하여 접합선을 결정하였다.

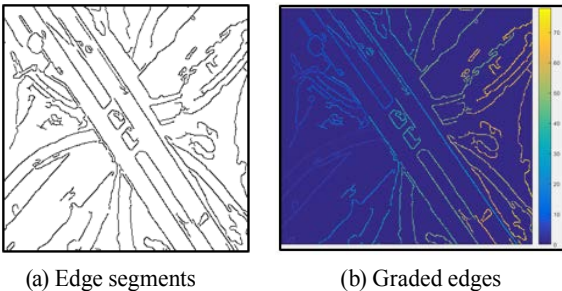


Fig. 12. Classification of edges based on proposed method

각 윤곽선의 가중치는 최소 및 최대값을 1과 5로 정하고 길이에 비례하여 가중치를 부여하였다. 또한 윤곽선이 guide

orientation 방향에 일치하는 경우(즉 각도 차이 = 0°)에는 “1”, 완전히 다른 방향(즉 각도 차이 = 90°)인 경우에는 “0” 값을 부여하고 윤곽선의 방향과 guide orientation과의 각도 차이에 따라 가중치를 차등적으로 부여하여 윤곽선을 분류하였다. 이와 같은 방법으로 등급화 하여 분류한 윤곽선을 시각화 하면 Fig. 12에서 보여주고 있는 것과 같으며, 예시 영상에서는 약 80개의 윤곽선이 추출되었고 윤곽선 등급은 서로 다른 색으로 보여주고 있다.

Dijkstra 알고리즘의 비용행렬(cost matrix), 즉 윤곽선을 등급 점수의 역순으로 변환한 행렬을 이용하여 값이 최소가 되는 경로를 최적의 접합선을 결정하였다. Fig. 13은 인접 영상의 배치 관계로부터 접합선의 시작점과 끝점에 의한 접합선의 탐색방향을 결정하고, 비용행렬에 의해 각 경우에 대해 접합선이 결정되는 것을 보여주고 있다.

Case	(a) Side-by-side	(b) Left-up/Right-down	(c) Left-down/Right-up
Search direction			
Cost matrix			
Seamline extraction			

Fig. 13. Proposed scheme for seamline determination

### 2.4 색조보정

모자이크된 영상은 위치 정확도뿐만 아니라 조합된 여러 장의 영상이 한 장의 영상으로 보이게 하는 시각적 효과가 품질을 좌우한다. 그러므로 인접 영상간의 방사적 특성(명도 및 대조비 등)인 색조를 일치(color balancing)시켜 화질을 균일하게 유지해야 한다. 영상의 방사적 특성을 대표할 수 있는 방법은 히스토그램이며, 본 논문에서는 중복지역의 히스토그램 분포 형태를 유사하게 변환시키는 누적 히스토그램 정합(cumulative histogram matching) 방법을 적용하였다. Fig. 14(a)에서 보여주는 것처럼 두 영상이 접합선을 기준으로 중

복지역 내의 히스토그램을 특성에 따라 명도와 대조비를 유사하게 변경하기 위해서 Fig. 14(b)와 같이 한쪽 영상을 기준으로 인접 영상의 히스토그램을 동일한 형태로 조절한다. 조절된 히스토그램을 중복영역 이외의 각각의 인접 영상에 적용하여야 전체적으로 화질을 유사하게 유지할 수 있다.

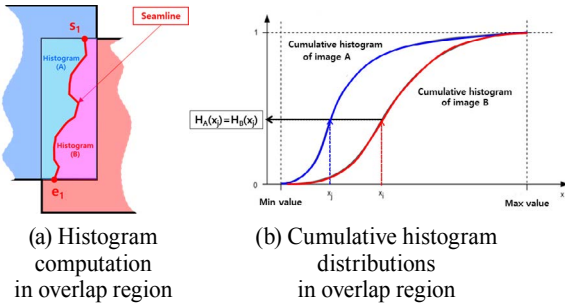


Fig. 14. Cumulative histogram matching

Fig. 15는 히스토그램 조절 전의 영상이고, Fig. 16(a)는 각각 영상의 전체 지역의 누적 히스토그램을 매칭한 결과이다. 이 경우에는 한쪽 영상의 히스토그램의 영향을 받아 전체적으로 붉은 색조가 강조되어 보인다. Fig. 16(b)는 중복지역의 누적 히스토그램을 이용하여 중복지역만 히스토그램 매칭 결과이며, 중복지역에서는 화질이 균일하지만 그 외의 지역은 원래 영상의 히스토그램을 유지하고 있어서 영상의 경계 윤곽이 보이게 된다. Fig. 16(c)는 중복지역의 누적 히스토그램을 이용하여 중복지역뿐 아니라 전체 영상의 히스토그램을 매칭한 결과이다. 이 방법은 색조, 밝기 및 대조비 등 전체 지역에 대한 화질의 일체감을 유지시키므로 한 장의 영상처럼 보인다.



Fig. 15. Adjacent images before histogram matching

Case	(a) Scheme 1	(b) Scheme 2	(c) Scheme 3
Histogram matching result			
Histogram computation region	Entire image	Overlap region	Overlap region
Histogram matching region	Entire image	Overlap region	Entire image

Fig. 16. Histogram matching results from different schemes

### 2.5 접합선 완화 (Seamline feathering)

두 개의 데이터가 중첩된 지역에서 데이터 값을 혼합(bleending)하여 하나의 데이터 값에서 다른 데이터 값으로 점진적으로 변화하게 하는 방법을 feathering이라고 한다. 영상의 경우에는 인접 영상간의 접합선이 육안으로 식별되는 것을 감소시키기 위한 목적으로 사용한다. 히스토그램 정합에 의해서 인접 영상간의 색조가 유사하게 조절되었다 하더라도 접합선의 존재가 보이는 경우가 있으므로, 더욱 자연스럽게 하나의 영상처럼 보이도록 하는 과정인 feathering(또는 blending)을 수행하여 seamless 영상 모자이크를 생성하였다. 대표적인 기법으로는 Laplacian pyramid blending (Burt and Adelson, 1983)과 gradient domain blending (Horn, 1986)이 있다. Fig. 17처럼 접합선을 중심으로 feathering을 수행할 영역을 설정하여야 하며, Fig. 18에서 보여주는 것 같이 Gaussian pyramid의 표준편차에 의해서 결정할 수 있다.

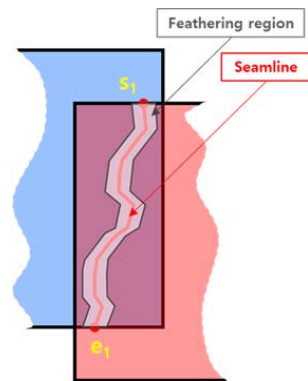


Fig. 17. Seamline feathering region



Gaussian pyramid	Original image	Standard deviation ( $\sigma$ )		
		0.1	0.5	1.0
Image A				
Image B				

Fig. 18. Seamline feathering region in overlap area

본 논문에서는 Laplacian pyramid blending 방법을 적용하였다. 앞에서 제안한 접합선 추출에 적용한 방법과 마찬가지로 계층적인(coarse-to-fine) 기법으로서 인접한 2개의 영상에 대해 각각의 영상에 Gaussian 필터를 순차적으로 적용하여 Gaussian 피라미드 생성하고, 각 피라미드 level에서 Gaussian 필터링 전후 영상을 차분하여 Laplacian 피라미드를 생성하였다. 최종적으로 2개의 인접 영상을 혼합(또는 융합)하는 방법은 Eq. 8에 의해서 수행되며, Fig. 19는 적용한 알고리즘의 개념과 과정을 보여주고 있다.

$$L_S(i, j) = G_R(i, j) \otimes L_A(i, j) + (1 - G_R(i, j)) \otimes L_B(i, j) \quad (8)$$

where  $L_S$  is blended image pyramid,  $L_A$  and  $L_B$  are Laplacian pyramids from image  $A$  and  $B$ , respectively.  $G_R$  is Gaussian pyramid from selected region  $R$ , and  $\otimes$  denotes convolution operator.

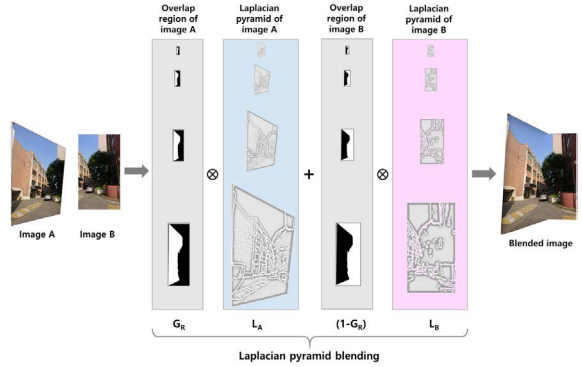


Fig. 19. Demonstration of feathering by Laplacian pyramid blending algorithm

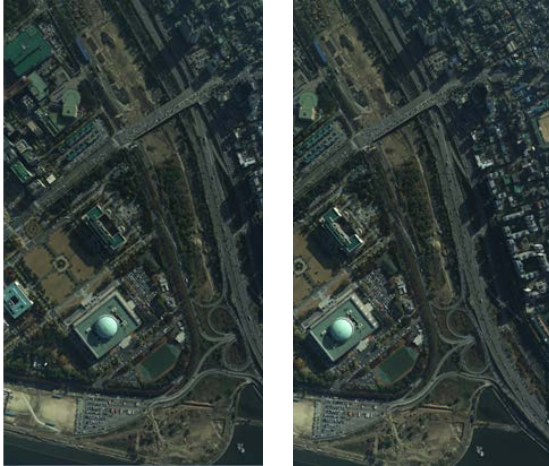
### 3. 결과 및 분석

#### 3.1 실험 데이터

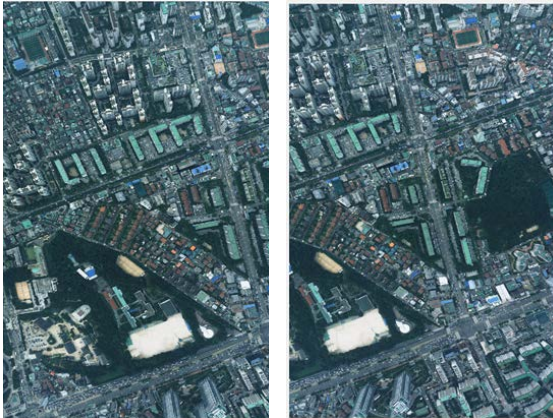
실험에 사용한 영상은 항공영상(Figs. 20 and 21)과 지상영상(Figs. 22 and 23)이며, Table 1에 특징이 요약되어 있다. 외부표정요소나 절대좌표가 부여되지 않은 영상의 중복지역을 결정하기 위해 SURF 방법을 사용하였다. 또한 의도적으로 카메라를 회전해서 촬영한 영상(Fig. 22)에 SURF의 적용 결과를 확인하였다. 또한 지도에 묘사된 객체의 윤곽선 및 경계선을 접합선으로 이용한 결과와 영상에서 추출한 접합선과 비교 분석하기 위해 1/5,000 수치지도의 건물 및 도로 레이어 데이터를 사용하였다(Fig. 24).

Table 1. Test images

Case	No. of images	Type	EOP	No. of pixels	Camera	Seamline extraction
A	2	Aerial	Yes	13000 × 9000	Intergraph DMC	Image and Digital map
B	2	Aerial	N/A	13000 × 9000		Image
C	2	Terrestrial	N/A	1100 × 850	Smart phone	Image
D	4	Terrestrial	N/A	850 × 800		Image



(a) Left image (b) Right image  
**Fig. 20. Aerial image: Case A**



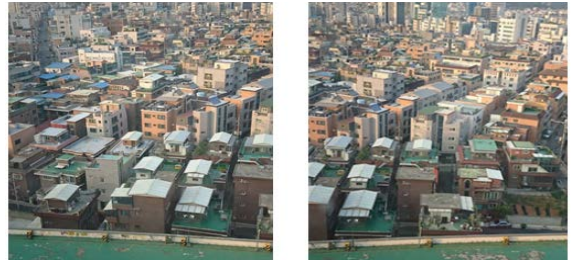
(a) Left image (b) Right image  
**Fig. 21. Aerial image: Case B**



(a) Left image (b) Right image  
**Fig. 22. Terrestrial image: Case C**



(a) Upper-left (b) Upper-right



(c) Lower-left (d) Lower-right

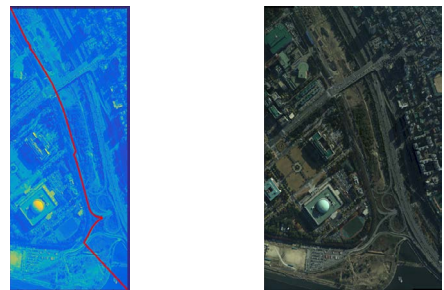
**Fig. 23. Terrestrial image: Case D**



**Fig. 24. Building and road layers from digital map in overlap region of Case A**

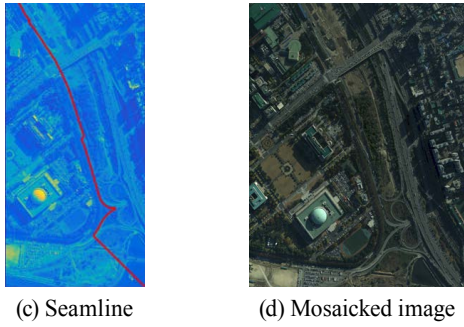
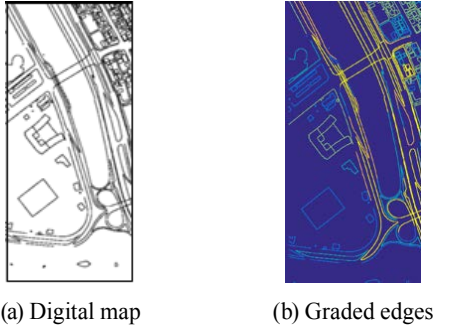
### 3.2 실험 결과

제안한 방법으로 생성한 영상 모자이킹 결과는 Fig. 25부터 Fig. 31까지 제시하였다.

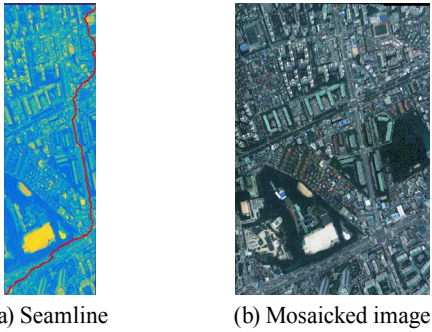


(a) Seamline (b) Mosaicked image

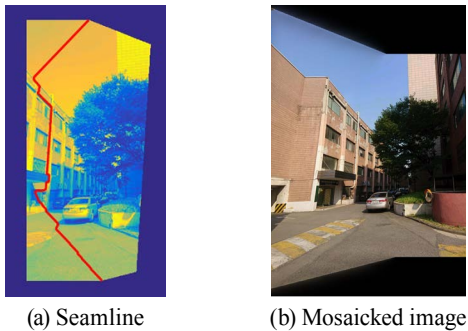
**Fig. 25. Seamline from image and mosaicked image of Case A**



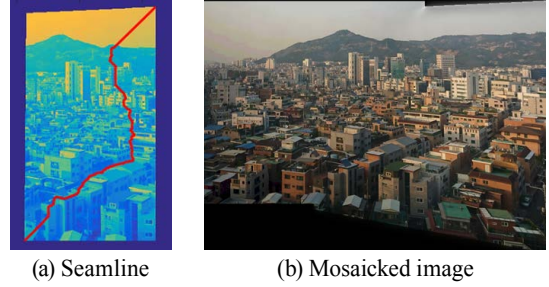
**Fig. 26. Seamline from digital map and mosaicked image of Case A**



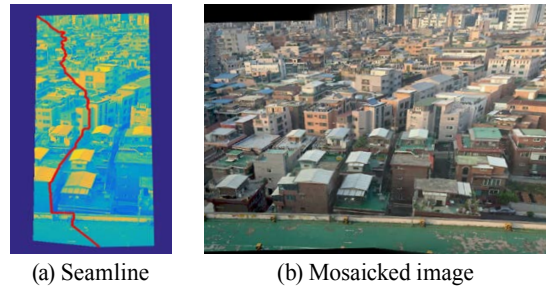
**Fig. 27. Seamline from image and mosaicked image of Case B**



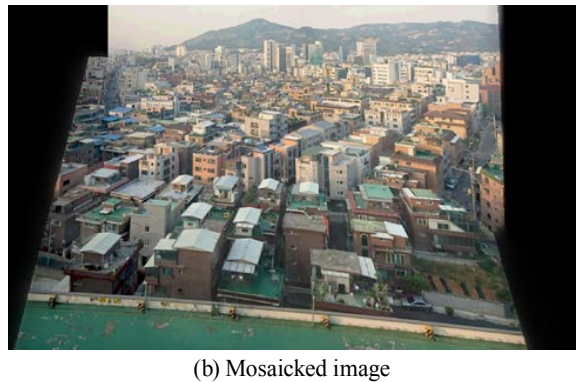
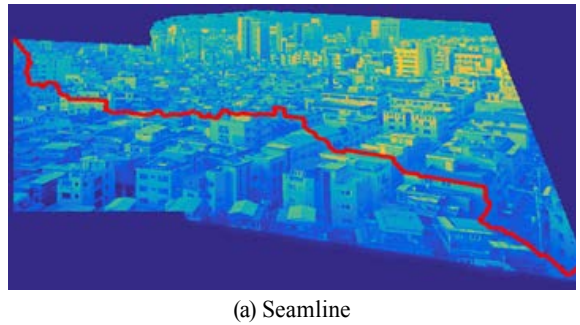
**Fig. 28. Seamline from image and mosaicked image of Case C**



**Fig. 29. Seamline from images in strip 1 and mosaicked image of Case D**



**Fig. 30. Seamline from images in strip 2 and mosaicked image of Case D**



**Fig. 31. Seamline from image of strip 1 and 2, and mosaicked image of Case D**

### 3.3 결과 분석

SURF는 기하학적 변형이 발생한 인접 영상간의 중복지역을 자동으로 결정하기 위해 타당한 방법임을 확인할 수 있었다. 접합선은 객체의 윤곽을 따라 결정하는 것이 적절하며, Canny 필터는 다른 윤곽선 탐지 필터에 비해 우수하지만, 접합선으로 사용하기 부적합하거나 불필요한 객체들의 윤곽선도 추출되므로 이를 최소화하기 위해 비등방성 필터인 anisotropic diffusion을 사용하여 효과적인 결과를 얻을 수 있었다. 또한 영상 피라미드에 의한 계층적 기법으로 신뢰성 높은 접합선을 효율적으로 추출하였다.

영상에서 추출한 접합선은 주관적 판단과 알고리즘에 따라 다른 결과를 얻을 수 있지만, 수치지도의 건물과 도로 레이어를 이용하여 접합선을 추출하면, 다양성이 배제될 가능성이 높으므로 일관성이 유지된 접합선을 결정할 수 있다. Fig. 32는 영상과 수치지도에서 추출한 접합선을 비교하기 위해 모자이크한 영상간의 차분 결과를 보여주고 있다. 모자이크에 사용한 영상은 엄밀정사영상이 아니므로 차분영상(differential image)을 생성하면 중심투영, 영상간의 축척 변화 및 카메라 회전, 기복변위 등의 왜곡에 의해서 차이가 발생하여, 접합선을 기준으로 기하학적으로 서로 일치하지 않는 영상으로 모자이크 영상이 생성되었다. 그러므로 색조가 보정되었다 하더라도 인접 영상의 화소간의 위치 차이에 의해 객체의 형태가 나타났다. Fig. 32처럼 차분영상을 확대한 부분에서 입체교차로 형태가 보인다.

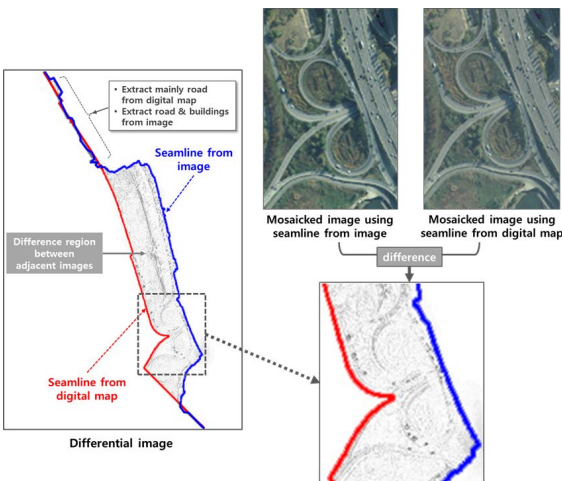


Fig. 32. Seamline comparison and difference of mosaicked images

결과이며, 영상의 경우는 도로를 통과하는 접합선이 추출되지만(Fig. 33(a) 참조), 수치지도의 경우는 도로 경계선을 따라 접합선을 추출할 수 있으므로 시각적으로 자연스러운 모자이크 영상을 생성할 수 있으며(Fig. 33(b) 참조), 특히 접합선이 복잡하지 않고 단순하므로 접합부분이 정밀하고 feathering 효과도 크다고 판단된다. 또한 히스토그램 정합과 접합선 feathering을 적용하여 모자이크 영상의 품질을 향상할 수 있음을 확인하였다. 실험에 사용한 영상에서 색조보정과 feathering을 적용하여 전체 영상의 색조가 유사한 특성으로 조절되어 접합선이 식별되지 않는 한 장의 영상으로 보이는 효과를 얻을 수 있었다.

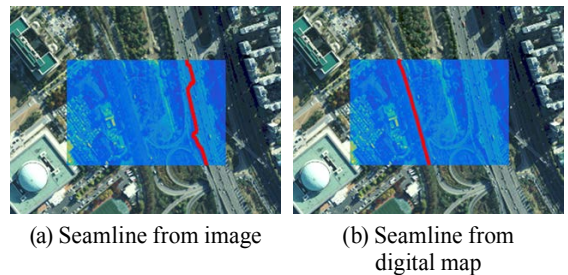


Fig. 33. Comparison of seamlines

항공영상의 경우, 영상과 수치지도에서 추출한 접합선은 서로 다르지만 객체의 윤곽선을 따라 결정되었으며, 특히 수치지도는 명확하게 정의된 객체 윤곽선을 이용하여 효율적이고 효과적으로 접합선을 결정할 수 있다. 그러나 수치지도에 묘사되지 않은 지역은 접합선이 끝점으로 직선으로 연결된다(Fig. 26(b) 오른쪽 아래 부분 참조).

본 논문에서 제안한 접합선 추출 조건과 방법은 시작점과 끝점에 의해 정해지는 초기 방향성(Fig. 34에서 seamline search direction)과 추출한 윤곽선의 길이 및 주성분 방향에 따른 등급화이다. 이에 따라 후보 접합선(seamline candidates)들 중에서 최적 접합선을 결정하는 것이다. Fig. 34의 결과를 분석하면, 건물지역(A 지역)에서는 대부분 건물을 통과하지 않고 윤곽선을 따라 접합선이 결정되었다. 또한 도로가 주요 객체인 지역(B와 C지역)에서는 건물의 윤곽선보다는 도로 경계선을 따라 접합선이 결정되었음을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 윤곽선의 적절한 등급화뿐 아니라 anisotropic diffusion 및 영상 피라미드에 의한 계층적 방법의 효과라고 판단되어 제안한 방법은 타당하고 실용적이라고 사료된다.

Fig. 33은 영상과 수치지도에서 추출한 접합선을 비교한

#### 4. 결론

영상 모자이크는 자동화가 이루어지지 않으면 많은 노력과 시간이 소요되는 비효율적인 과정이다. 그러나 결과의 평가는 시각적이고 주관적인 판단에 좌우되므로 최적의 결과를 도출하는 것이 중요하다. 최근 영상 모자이크는 항공영상뿐 아니라 드론영상, 위성영상, 로드뷰영상 등에 활용 빈도가 많아지고 있다. 본 연구에서 모자이크 각 단계에 필요한 과정을 수행한 결과를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

수치지도를 사용하면 많은 장점이 있다. 객관적이고 최적의 접합선을 정확하게 추출할 수 있으며, 특히 건물이나 도로와 같은 객체를 통과하는 접합선이 존재하지 않기 때문에 영상에서 윤곽선을 추출하는 것보다 효율적이다. 그러나 수치지도에는 촬영 당시의 조건 등 여러 상황이 반영되지 않으므로 수치지도에 묘사되지 않는 그림자 또는 차량과 같은 객체에 의해 모자이크 영상이 시각적으로 부자연스러울 수 있다. 그러므로 수치지도로부터 추출한 접합선을 기준(또는 가이드)으로 주변의 화소값을 고려하여 영상과 복합적으로 사용하여 보다 현실적인 접합선을 결정하는 방법이 필요하다고 사료된다.

엄밀정사영상이 아닌 일반 항공영상의 경우에는 기복변위에 의해 수치지도와 영상이 정확하게 일치하지 않는 문제점이 있으므로, 고층건물이 밀집한 지역의 항공영상의 모자이크를 위해 수치지도로부터 추출한 접합선은 영상에 잘 부합되지 않을 수 있다. 그러므로 일반 영상의 모자이크는 높은 정확도 요구되지 않는 활용분야에 사용될 수 있고, 엄밀정사영상의 모자이크가 실제적으로 의미가 있다. 또한 향후 딥러닝(deep learning)을 이용하면 영상에서 건물 등 다양한 객체들을 인식하여 보다 객관적인 접합선을 추출할 수 있으며, 그림자 영역을 탐지하여 최적의 접합선을 추출할 수 있다고 판단된다.

#### 감사의 글

이 논문은 2015년 정부(교육부)의 재원으로 한국 연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2015R1D1A1A01056933)

#### References

Anitha, J. and Deepa, S. (2014), Tracking and recognition of objects using SURF descriptor and Harris corner detection, *International Journal of Current Engineering*

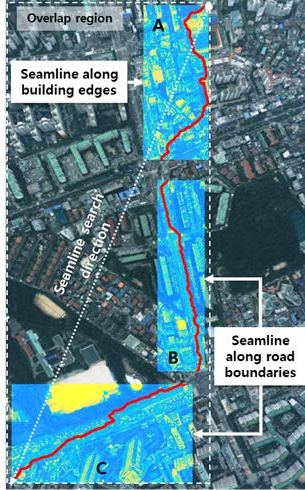
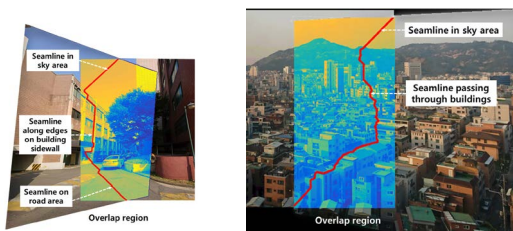


Fig. 34. Seamline characteristics

일반 카메라로 촬영한 근접 지상영상의 경우는 영상간에 축척 및 회전 등 기하학적 변화와 왜곡, 그리고 색조 차이가 크지만 제한한 방법으로 효과적으로 모자이크 영상을 생성할 수 있었다. 지상영상은 동질감(homogeneity)이 유지되어야 하는 하늘이나 도로가 촬영되는 경우가 많으므로, 모자이크 영상에 접합선의 경계가 나타나지 않고 색조의 일체감을 유지하는 것이 중요하다. Fig. 35(a)는 건물을 통과할 수밖에 없는 영상에서 추출된 접합선을 보여주고 있다. 건물의 구조적 특성이 잘 반영된 접합선이 추출되었음을 확인할 수 있으며, 모자이크 결과를 보여주는 Fig. 28에서 하늘과 도로에서 접합선이 식별되지 않아 색조보정과 접합선 feathering이 잘 적용되었다고 판단된다. Fig. 35(b)는 축척변화가 큰 경사영상이므로 윤곽이 명확하게 구별되는 건물(즉 멀리 있지만 큰 규모의 건물 또는 가까이 있는 소규모 주택)의 윤곽선이 접합선으로 추출되었지만, 영상 중앙 지역에서는 접합선이 건물을 통과하는 경우가 있다. 그러나 Fig. 31에서 보여주는 최종 모자이크 영상은 기하학적 및 색조 측면에서 우수한 결과를 얻었다.



(a) Case C image

(b) Case D image

Fig. 35. Close-range terrestrial image mosaicking

- and Technology*, Vol. 4, No. 2, pp. 775-778.
- Awrangjeb, M. and Lu, G. (2008), An improved curvature scale-space corner detector and a robust corner matching technique for transformed image identification, *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 17, No. 12, pp. 2425-2441.
- Bay, H., Tuytelaars, T., and Van Gool, L. (2006), SURF: Speeded up robust features, In: Leonardis, A, Bischof, H., and Pinz, A. (eds.), *Computer Vision: Proceedings 9th European Conference on Computer Vision Part I, Lecture Notes in Computer Science (LNCS 3951)*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp. 404-417.
- Brown, M., Szeliski, R., and Winder, S. (2004), *Multi-Image Matching Using Multi-scale Oriented Patches*, Technical Report MSR-TR-2004-133, Microsoft Corporation, Redmond, WA, 46p.
- Brown, M. and Lowe, D. (2007), Automatic panoramic image stitching using invariant features, *International Journal of Computer Vision*, Vol. 74, No. 1, pp. 59-73.
- Burt, P. and Adelson E. (1983), The Laplacian pyramid as a compact image code, *IEEE transactions on Communications*, Vol. 31, No. 4, pp. 532-540.
- Canny, J. (1986), A computational approach to edge detection, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 8, pp. 679-698.
- Chen, Q., Sun, M., Hu, X., and Zhang, Z. (2014), Automatic seamline network generation for urban orthophoto mosaicking with the use of a digital surface model, *Remote Sensing*, Vol. 6, pp. 12334-12359.
- Choi, J., Jung, H., and Yun, S. (2015), An efficient mosaic algorithm considering seasonal variation: Application to KOMPSAT-2 satellite images, *Sensors*, Vol. 15, pp. 5650-5665.
- Chon, J., Kim, H., and Lin, C. (2010), Seam-line determination for image mosaicking: A technique minimizing the maximum local mismatch and the global cost, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 65, pp. 86-92.
- Dijkstra, E. (1959), A note on two problems in connection with graphs, *Numerische Mathematik*, Vol. 1, No.1, pp. 269-271.
- Fischler, M. and Bolles, R. (1981), Random sample consensus: A paradigm for model fitting with application to image analysis and automated cartography, *Communications of the ACM*, Vol. 24, pp. 381-395.
- Gerig, G., Kubler, O., Kikinis, R., and Jolesz, F. (1992), Nonlinear anisotropic filtering of MRI data, *IEEE Transactions on Medical Imaging*, Vol. 11, No. 2, pp. 221-232.
- Horn, B. (1986), *Robot Vision*, MIT Press, Cambridge, MA, 509p.
- Jung, H., Lim, S., and Lee, D.C. (2008), Utilizing airborne LiDAR Data for building extraction and superstructure analysis for modeling, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 26, No. 3, pp. 227-239.
- Kim, D., Yoon, U., and Jo, G. (2016), Feature point filtering method based on CS-RANSAC for efficient planar homography estimating, *Korea Information Processing Society Transactions on Software and Data Engineering*, Vol. 5, No. 6 pp. 307-312.
- Kim, J. and Kim, D. (2014), Matching points filtering applied panorama image processing using SURF and RANSAC Algorithm, *Journal of The Institute of Electronics and Information Engineers*, Vol. 51, No. 4, pp. 820-834.
- Lee, D. (2018), *Determination of High Level-of-Detail Model Key Points of Buildings Using Airborne LiDAR data*, Master's thesis, Sejong University, Seoul, Korea, 138p.
- Lee, D. and Lee, D.C. (2016), Satellite image geocoding using image and map matching, *Proceedings of Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry, and Cartography*, 28-29 April, Suwon, Korea, unpaginated CD-ROM. (in Korean with English abstract)
- Li, L., Yao, J., Liu, Y., Yuan, W., Shi, S., and Yuan, S. (2017), Optimal seamline detection for orthoimage mosaicking by combining deep convolutional neural network and graph cuts, *Remote Sensing*, Vol. 9, No. 7, pp. 1-22.
- Litvinov, A. and Schechner, Y. (2005), Radiometric framework for image mosaicking, *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 22, No. 5, pp. 839-848.
- Lowe, D. (2004), Distinctive image features from scale-invariant key points, *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 20, pp. 91-110.
- Mills, S. and McLeod, P. (2013), Global seamline networks

- for orthomosaic generation via local search, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 75, No. 1, pp. 101–111.
- Oshel, E., Stevenson, P., and Heipke, C. (1995), Experiments with anisotropic diffusion for adaptive image smoothing, In: Heipke, C. (ed.), *From Digital Images to Spatial Objects*, Report No. 433, Dept. of Geodetic Science and Surveying, The Ohio State University, Columbus, OH, pp. 67-85.
- Pan, J., Zhou, Q., and Wang, M. (2014), Seamline determination based on segmentation for urban image mosaicking, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, Vol. 11, No. 8, pp. 1335-1339.
- Perona, P. and Malik, J. (1990), Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion, *IEEE Transactions on Pattern Analysis And Machine Intelligence*, Vol. 12, No. 7, pp. 629-639.
- Rosten, E. and Drummond, T. (2006), Machine learning for high speed corner detection, In: Leonardis, A., Bischof, H., and Pinz, A. (eds.), *Computer Vision: Proceedings 9th European Conference on Computer Vision Part I, Lecture Notes in Computer Science (LNCS 3951)*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp. 430–443.
- Saito, S., Arai, R., and Aoki, Y. (2015), Seamline determination based on semantic segmentation for aerial image mosaicking, *IEEE Access*, Vol. 3, pp. 2847-2856.
- Sapiro, G. (2006), *Geometric Partial Differential Equations and Image Analysis*, Cambridge University Press, New York, NY, 385p.
- Song, N. (2005), *Methodology of Seamline Extraction for Automatic Image Mosaic Generation*, Master's thesis, Inha University, Incheon, Korea, 63p.
- Woo, H., Noh, M., Park, J., Cho, W., and Kim, B. (2009), Color assessment for mosaic imagery using HSI model, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 27, No. 4, pp. 429-435.