입체영상 제작을 위한 비정렬 스테레오 영상의 정밀편위수정

김 재 인^{a)}, 김 태 정^{a)*}

Precise Rectification of Misaligned Stereo Images for 3D Image Generation

Jae-In Kim^{a)} and Taejung Kim^{a)*}

요 약

3D 입체영상 콘텐츠 부족현상에 따른 3D 산업시장의 성장정체는 콘텐츠 제작비용 절감을 위한 관련기술 개발의 추진을 야기하고 있다. 3D 입체영상 제작에서 가장 많은 시간과 노력을 요구하는 부분은 촬영 과정에서 발생된 수직시차의 제거라 할 수 있으며, 이는 시장 경쟁력과 직접적으로 관계되는 사안이라 매우 중요한 작업으로 다루어지고 있다. 비 정렬된 스테레오 영상의 수직시차 보정 즉, 편위수정(Rectification)은 사진측량분야에서 오랫동안 다루어 오던 문제로 컴퓨터 비전방식이 빠른 처리속도와 자동화에 초점이 맞추어져 있다면, 사진측량방식에서는 정확도와 정밀도 확보에 목적을 두고 있다. 하나 입체영화 제작에 있어 사진측량학적 관점으로 문제를 해결하려 한 시도는 그 사례를 찾아보기가 매우 힘들다. 이에 본 논문에서는 사진측량방식의 기술을 도입하여 촬영 당시의 기하학적 관계를 복원하고 이를 통해 수직시차를 제거할 수 있는 정밀 편위수정 알고리즘을 제안하고자한다 알고리즘의 성능평가는 기존 컴퓨터비전 알고리즘 두 가지와 성능비교를 통해 수행되었으며, 에피폴라 제약조건 만족도와 에피폴라 라인의 추정정확도, 그리고 정합점 간의 수직시차 측정을 통한 에피폴라 리샘플링의 정확도 등이 분석되었다. 실험결과, 제안 알고리즘은 정확도 및 정밀도 측면에서 비교 알고리즘들 보다 우수한 성능을 나타내었으며, 정합점 위치오차에 대해서도 강인함을 보여주었다.

Abstract

The stagnant growth in 3D market due to 3D movie contents shortage is encouraging development of techniques for production cost reduction. Elimination of vertical disparity generated during image acquisition requires heaviest time and effort in the whole stereoscopic film-making process. This matter is directly related to competitiveness in the market and is being dealt with as a very important task. The removal of vertical disparity, i.e. image rectification has been treated for a long time in the photogrammetry field. While computer vision methods are focused on fast processing and automation, photogrammetry methods on accuracy and precision. However, photogrammetric approaches have not been tried for the 3D film-making. In this paper, proposed is a photogrammetry-based rectification algorithm that enable to eliminate the vertical disparity precisely by reconstruction of geometric relationship at the time of shooting. Evaluation of proposed algorithm was carried out by comparing the performance with two existing computer vision algorithms. The epipolar constraint satisfaction, epipolar line accuracy and vertical disparity of result images were tested. As a result, the proposed algorithm showed excellent performance than the other algorithms in term of accuracy and precision, and also revealed robustness about position error of tie-points.

Keyword : Sterevision, 3D Movie, Rectification, Epipolar geometry, Photogrammetry

a) 인하대학교 지리정보공학과

Department of Geoinformatic Engineering, Inha University

* 교신저자 : 김태정 (tezid@inha.ac.kr)

※ 본 연구는 공간정보 전문인력 양성사업과 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2011-0009721).

· 접수일(2012년2월21일), 수정일(2012년3월23일), 게재확정일(2012년3월23일)

1. 서론

2009년 이후로 시작된 3D 입체영상 콘텐츠에 대한 소비자들의 관심과 수요 급증은 국내외 우수 제조사들의 3D 디스플레이 장치 개발과 생산을 촉진케 하는 계기가 되었다. 하지만 최근 소비자들의 구매 욕구는 이러한 하드웨어 개발과 생산량 증가에 반해 잠시 정체된 양상을 나타내고 있다. 그 원인을 분석해 보면, 가장 큰 요인으로 높은 판매가와 콘텐츠의 부족을 꼽을 수 있다. 현재 시중에서 판매되고 있는 3D TV의 2D-3D 변환 기능은 애초에 3D로 제작된 콘텐츠에 비해 현저히 낮은 입체 품질을 보이고 있을 뿐만 아니라, 제작되는 콘텐츠 역시도 기술적, 인적 및 비용적 측면에서 오는 여러 문제점들로 인해 그 생산량이 매우 한정적인 수준이라 할 수 있다. 이 때문에 소비자들의 구매 만족도는 점차적으로 낮아지게 되어, 결과적으로 3D 시장이 급성장하지 못하게 되는 상황이 야기되었다고 볼 수 있다. 이러한 문제를 근본적으로 해결하기 위해서는 고품질의 콘텐츠 제작이 활성화 되어야 하며, 이를 촉진시키기 위해서는 무엇보다도 제작의 단가를 낮추고 소요 시간을 최소화할 수 있는 관련 기술의 개발이 선행되어야 할 것으로 판단된다.

2D 콘텐츠와는 다르게 3D 입체영상 콘텐츠는 입체감의 품질이 전체 콘텐츠의 품질에 있어서 매우 중요한 부분으로 작용한다. 실제로 영화 '아바타' 이전에도 3D 입체영화는 있었으나, 시장에서 성공하지 못한 이유는 낮은 입체 품질에 따른 시청자들의 시각적 피로에 기인한다고 볼 수 있다. 이렇듯 3D 입체영상 콘텐츠의 가치는 그 내용도 중요하지만 입체시 과정에서 오는 시각적인 피로, 즉 입체 피로의 최소화 정도에 따라 결정된다고 해도 과언이 아니다. 입체 피로의 원인으로는 두 영상 간의 색감, 밝기 및 선명도 차이와 같은 광학적 요소와 두 카메라 간의 비정렬(Misalignment)에 따른 수직 시차 및 과도한 수평 시차와 같은 기하학적 요인으로 나눌 수 있다^[1]. 이 때 수직시차는 입체 피로를 유발하는 가장 큰 요인으로서, 이를 최소화 하는 것이 3D 입체영상 제작과정에서 가장 중요하고, 어려운 부분이라 할 수 있다. 현재 입체영상 촬영 현장에서는 이러한 수직시차를 최소화하기 위해 촬영 전, 특수하게 제작된 카메라

차트를 이용하여 카메라 정렬작업이 수행되고 있다. 하지만 이 작업은 직접 작업자가 수동으로 카메라 리그(Rig)를 조작하여 수행되기 때문에 완벽하게 조정되어질 가능성은 극히 드물다고 볼 수 있다. 그렇기 때문에 이를 보정하기 위한 추가적인 작업이 반드시 후처리 과정에서 이루어져야 한다^[2].

비정렬된 두 카메라로부터 취득된 영상의 수직시차는 편위수정(Rectification)이라 불리는 영상의 기하학적 변환기법을 통해 제거가 가능하다. 이 편위수정을 통해 두 영상은 동일 평면상에 놓이게 되어, 영상 간의 정합점들은 동일 스캔 라인(Scan line) 위에 위치하게 된다. 이러한 편위수정은 크게 카메라 보정(Calibration)에 의한 방법과 그렇지 않은 방법으로 나눌 수 있다. 먼저 전자의 경우는 사전에 미리 확보된 카메라 내부 및 외부 파라미터로부터 편위수정이 이루어지는 방식이라 할 수 있다. 컴퓨터 비전분야에서는 체스보드(Cheese board)와 같은 보정패턴(Calibration pattern)을 이용한 스테레오 보정법^[3]이 카메라 파라미터 추정에 널리 활용되고 있다. 여기서 내부 파라미터란 카메라 초점거리, 주점의 위치 등을 의미하며, 외부 파라미터는 카메라 간의 상대적인 자세 및 위치를 의미한다. 스테레오 보정법을 통해 취득된 카메라 정보는 에피폴라 리샘플링(또는 에피폴라 선 정렬)을 위한 변환행렬 산출에 사용되며, 이 변환행렬을 통해 스테레오 원영상은 수직시차가 제거된 형태로 변환될 수 있다^[4]. 그러나 이러한 방식은 카메라의 위치 및 자세가 바뀔 때마다 변동된 카메라의 외부 파라미터 측정을 위해 반복적으로 재작업이 요구된다는 점에서 그 활용이 크게 제한된다.

반면, 후자의 경우는 위 방식과는 달리 사전에 카메라 정보 없이 영상 간의 정합점만으로도 편위수정이 이루어질 수 있다^[5]. 이 방식에는 에피폴라 리샘플링을 위한 변환행렬 산출에 있어 에피폴라 기하(Epipolar geometry)를 설명하는 기본행렬(Fundamental matrix)이 요구되며, 이 때문에 최종 편위수정 결과는 기본행렬 추정방법과 그 정확도에 매우 종속적이라 할 수 있다. 이와 관련한 초기 연구단계에서는 에피폴라 제약조건식을 선형방정식의 형태로 구성하여 특이 값 분해(SVD, Singular value decomposition)를 통해 기본행렬을 직접적으로 계산하는 방식이 다루어 졌으니^[6]

이러한 방식은 잡음에 매우 민감하다는 단점이 있어, RANSAC(Random sample consensus), LMedS(Least median squares) 등과 같은 강인 추정기법을 적용한 연구가 활발히 진행 중에 있다. 그러나 이러한 접근 방식 역시도 추정에 사용된 정합점 위치오차에 굉장히 의존적이어서 과대 오차가 포함될 경우, 잘못된 기하관계가 수립될 가능성이 존재한다는 단점이 있다.

이에 본 논문에서는 영상 편위수정에 있어 스테레오 보정방식의 한계점과 기본행렬 추정방식의 정확도 문제를 해결하기 위한 방안으로, 정밀기하구조 추정이 가능한 사진측량학적 접근방식을 제안하고자 한다. 구체적으로는 기본행렬 추정을 위해 사진측량기반의 상대표정 기법^[7-9]을 적용하고자 하며, 이를 통해 에피폴라 리샘플링 통한 영상의 정밀편위수정을 수행함으로써, 3D 입체영상 제작에 있어 제안 알고리즘의 활용 가능성을 분석해 보고자 한다. 제안 알고리즘은 크게 정합점 추출단계, 상대표정을 통한 기본행렬 추정단계, 그리고 수직시차 제거를 위한 에피폴라 리샘플링 단계로 나누어진다. 이 때 기본행렬 추정단계에서는 기존 연구의 선형적 접근방식과는 달리, 사진측량방식의 상대표정기법을 통해 스테레오 영상의 외부 파라미터들이 개별적으로 추정될 수 있으며, 수립된 영상간의 기하학적 관계를 바탕으로 정확하고 신뢰적인 기본행렬 산출이 이루어진다. 이러한 부분은 기존 기본행렬 추정방식과 가장 큰 차이점이라 할 수 있다.

이 후, 본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저, II장에서는 기존 기본행렬 추정과 관련한 연구사례 및 방법에 대해 간략히 설명하고, III장에서 논문의 제안 알고리즘, 즉 상대표정을 통한 기본행렬의 추정방법에 대해 상세히 기술한다. 그리고 IV장에서는 알고리즘의 성능분석 결과를 제시한 후, V장에서 논문의 결론을 맺는다.

II. 기본행렬 추정의 선형적 접근

에피폴라 기하학은 다음 그림 1에서 설명하는 바와 같이 두 영상의 투영중심 o, o' 와 공간상의 한 점 P , 그리고 각 영상에 사상된 p, p' 가 공통의 한 평면상에 존재함을 의미한

다. 이 때, 두 투영중심을 연결하는 선분이 각 영상평면과 만나는 지점을 에피폴(Epipole)이라 하며, 이론적으로 영상의 모든 에피폴라 라인(Epipolar line)은 에피폴에서 수렴하게 된다. 여기서 에피폴라 라인이란, 공간상의 한 점 P 가 영상 평면에 점 p 로 사상되었다고 했을 때, 이들을 연결한 공간상의 직선이 다른 한 쪽 영상에 투영되었을 때 나타나게 되는 곡선 l' 을 의미하며, 중심투영 방식의 카메라에서 이 곡선은 직선의 형태로 나타난다^[10]. 에피폴라 기하구조 수립을 위한 에피폴라 제약조건은 정합점 x 와 x' , 그리고 기본행렬로부터 $x'^T Fx = 0$ 과 같이 표현할 수 있으며, 기본행렬과 각 영상의 에피폴라 라인은 각각 $l' = Fx, l = F^T x'$, 그리고 에피폴 e 와 e' 는 $Fe = 0, F^T e' = 0$ 의 관계를 가진다. 여기서 3×3 의 크기를 갖는 기본행렬의 원소들은 카메라 내부 파라미터 정보와 상대적인 자세 및 위치 등의 외부 파라미터를 포함하고 있다.

그림 1. 에피폴라 기하학의 에피폴과 에피폴라 라인
Fig. 1. Epipole and epipolar line at epipolar geometry

좌측 영상의 정합점 p 와 이에 대응되는 우측 영상의 정합점 p' 의 영상좌표를 각각 $p(x, y), p'(x', y')$ 이라 할 때, 앞서 설명한 에피폴라 제약조건식은 식 (1)과 같이 전개할 수 있으며^[10],

$$x'^T Fx = x' x f_{11} + x' y f_{12} + x' f_{13} + y' x f_{21} + y' y f_{22} + y' f_{23} + x f_{31} + y f_{32} + f_{33} = 0 \quad (1)$$

이 때, 식을 ' $Af = 0$ ' 형태의 선형 관계식으로 나타내면,

$$Af = \begin{bmatrix} x_1'x_1 & x_1'y_1 & x_1' & y_1'x_1 & y_1'y_1 & y_1' & x_1 & y_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n'x_n & x_n'y_n & x_n' & y_n'x_n & y_n'y_n & y_n' & x_n & y_n & 1 \end{bmatrix} [f_{11} f_{12} f_{13} f_{21} f_{22} f_{23} f_{31} f_{32} f_{33}]^T \quad (2)$$

n개의 정합점들에 대해 식 (1)은 식 (2)와 같이 행렬의 형태로 표현될 수 있다.

컴퓨터 비전 방식에서 가장 간단하게 기본행렬을 추정할 수 있는 방법은 8점 이상의 정합점들을 이용하여 위 선형방정식 Af의 해를 특이 값 분해를 통해 구하는 방법이다. 이러한 방식은 SURF(Speeded up robust features)^[11]나 SIFT(Scale-invariant feature transform)^[12]와 같은 특징점 추출 알고리즘과의 연계를 통해 전 자동적으로 온라인(Online) 스테레오 보정이 가능하다는 장점이 있다. 하지만 이 방식은 잡음에 대한 고려가 전혀 되어있지 않을뿐더러 데이터의 작은 변화에도 해의 큰 변화를 야기할 수 있다는 점에서 실질적인 활용에는 그리 적합한 방식이라 볼 수 없다. 반면 Hartley^[4,6]는 정합점들의 좌표를 정규화 하여 사용함으로써 이러한 문제를 해결하려 하였으나, 이 또한 정합점들에 포함된 오정합점 문제까지는 해결하지 못하였다. 이후 연구들은 정확한 기본행렬 추정을 위한 오정합점 제거 방법론 개발에 초점을 맞추어 진행되고 있다.

III. 상대표정을 통한 기본행렬의 추정

앞 장에서 언급했듯이 기본행렬은 카메라의 내부 파라미터와 두 카메라 간의 상대적인 외부 파라미터 정보를 담고 있으며, 이러한 기본행렬은 에피폴라 제약조건으로부터 그 유도가 가능하다. 제약조건을 다음의 그림 2에서 설명하고 있는 공간상의 벡터들로 표현하면 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다. 이 수식에서 '(Dot product)' 연산자와 '×(Cross product)' 연산자는 각각 벡터의 내적과 외적을 의미하며, 여기서 T, P1, P2 벡터는 각각 $T = \overrightarrow{O_1O_2}$, $P_1 = \overrightarrow{O_1P}$, $P_2 = \overrightarrow{O_2P}$ 를 의미한다.

$$(P_1 - T)^T \cdot [T \times P_1] = 0 \quad (3)$$

벡터 $T = [Tx, Ty, Tz]^T$ 라 했을 때, 위의 식 (3)은 행렬

곱의 형태로 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} (P_1 - T)^T \cdot [T \times P_1] &= P_2^T S P_1 \\ &= P_2^T \begin{bmatrix} 0 & -Tz & Ty \\ Tz & 0 & -Tx \\ -Ty & Tx & 0 \end{bmatrix} P_1 \\ &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

그림 2. 모델 공간과 카메라 공간상에서의 에피폴라 기하학
Fig. 2. Epipolar geometry in model-space and camera-space

이 때, P1과 P2는 카메라 공간상의 벡터 $p_1 = \overrightarrow{O_1p}$, $p_2 = \overrightarrow{O_2p}$ 와 각각 회전행렬 R1과 R2로부터 $p_1 = R_1P_1$, $p_2 = R_2P_2$ 의 관계에 있고, p1, p2는 영상좌표 q1, q2와 각 카메라 행렬 M1과 M2로부터 다음 식 (5)와 같은 관계에 있기 때문에,

$$\begin{aligned} q_1 = [m_1, n_1, 1]^T &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & c_{m1}/f \\ 0 & 1 & c_{n1}/f \\ 0 & 0 & 1/f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ f \end{bmatrix} = M_1 p_1, \\ q_2 = [m_2, n_2, 1]^T &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & c_{m2}/f \\ 0 & 1 & c_{n2}/f \\ 0 & 0 & 1/f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ f \end{bmatrix} = M_2 p_2 \end{aligned} \quad (5)$$

c_m, c_n : image coordinates of principal points
f: focal length(pixel)

식 (4)는 영상 좌표계 상에 표현될 수 있으며, 결론적으로 기본행렬은 다음의 식 (6)과 같이 유도될 수 있다.

$$q_2^T (M_2^{-1})^T R_2 S R_1^T M_1^{-1} q_1 = q_2^T F q_1 = 0$$

$$\therefore F = (M_2^{-1})^T R_2 S R_1^T M_1^{-1} \quad (6)$$

사진측량학에서 말하는 상대표정이란 두 영상 간의 상대적인 자세와 위치를 추정하는 과정으로서 영상 간의 기하학적 모델로부터 이를 구성하는 개별 파라미터를 추정하는 전반적인 과정을 의미한다^[13]. 보통 실세계 공간의 기하학적 모델은 비선형 방정식이기 때문에 파라미터의 추정은 테일러 전개를 통한 선형화와 최소제곱추정을 통해 수행된다. 이러한 접근 방식은 오정합점 사용에 따른 오차 전파의 문제를 감소시키는데 기여할 수 있다. 위의 식 (6)에서와 같이 기본행렬은 카메라 내부 파라미터 정보와 두 영상의 외부 파라미터 정보로 구성된다. 이를 사진측량학적 관점으로 풀어내기 위해서는 에피폴라 제약조건식을 모델로 하는 상대표정이 수행되어야 한다. 이 때, 기본적으로 식의 미지수는 모델 공간 좌표계를 중심으로 좌측 영상의 회전 $(\omega_1, \phi_1, \kappa_1)$ 요소와 투영중심위치 $O_1(X_1, Y_1, Z_1)$, 그리고 우측 영상의 회전 $(\omega_2, \phi_2, \kappa_2)$ 요소와 투영중심위치 $O_2(X_2, Y_2, Z_2)$ 등, 총 12개가 된다. 그러나 이들 중 특정 몇몇의 미지수들은 모델좌표계와 카메라 간의 상대적인 위치를 초기에 어떻게 설정하느냐에 따라 고정된 상수로 간주될 수 있다. 일반적으로 사진측량학에서는 종속적인 상대표정을 위

그림 3. 종속적 상대표정을 위한 미지수 파라미터의 설정
Fig. 3. Unknown parameters setting for dependent relative

해 그림 3에서와 같이 모델 공간 좌표계를 좌측 영상의 카메라 공간 좌표계와 동일하게 설정하고(일반적으로 Z_1 는 카메라 초점거리 f 로 설정), 모델 공간의 스케일과 관련된 파라미터인 우측영상의 X 방향 투영중심 위치를 적당한 임의의 상수(bm)로 고정함으로써 실질적인 미지수의 개수를 5개로 최소화한다.

이를 통해 카메라 좌표계 상의 에피폴라 제약조건식은 다음 식 (7)과 같이 정리될 수 있으며, 식 (8)과 같이 우측 영상의 5개 파라미터를 미지수로 테일러 전개를 통해 선형화 될 수 있다. 여기서 회전요소 ω, ϕ, κ 는 각각 X 축, Y 축, 그리고 Z 축 방향의 회전량을 의미한다.

$$F(\omega, \phi, \kappa, T_y, T_z) = [x_2 \ y_2 \ f] R_2 \begin{bmatrix} 0 & -T_z & T_y \\ T_z & 0 & -T_x \\ -T_y & T_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ f \end{bmatrix} = 0 \quad (7)$$

$$F(\omega, \phi, \kappa, T_y, T_z) \approx F(\omega^0, \phi^0, \kappa^0, T_y^0, T_z^0) + \frac{\partial F}{\partial \omega} \Delta \omega + \frac{\partial F}{\partial \phi} \Delta \phi + \frac{\partial F}{\partial \kappa} \Delta \kappa + \frac{\partial F}{\partial T_y} \Delta T_y + \frac{\partial F}{\partial T_z} \Delta T_z = 0 \quad (8)$$

파라미터 추정을 위한 최소제곱추정을 위해 식 (8)은 식 (9)와 같이 ' $AX=L$ ' 형태로 구성되며, 최종적으로 각 미지수는 반복 계산과 보정을 통해 높은 정확도로 결정되어진다.

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial F}{\partial \omega} & \frac{\partial F}{\partial \phi} & \frac{\partial F}{\partial \kappa} & \frac{\partial F}{\partial T_y} & \frac{\partial F}{\partial T_z} \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} \Delta \omega \\ \Delta \phi \\ \Delta \kappa \\ \Delta T_y \\ \Delta T_z \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$L = [F - F_0], X = (A^T A)^{-1} A^T L$$

IV. 알고리즘 성능분석

알고리즘의 성능분석을 위한 실험영상으로 스틸영상(Still image)과 영상 시퀀스(Image sequence)가 사용되었다. 스틸영상의 경우에는 Canon EOS 450D 카메라가 사용

되었으며 시점을 달리하여 총 두 쌍의 스테레오 영상이 취득되었다. 그리고 영상 시퀀스는 시중에서 쉽게 구할 수 있는 저가의 웹캠(Microsoft LifeCam Cinema) 두 대로부터 자세 및 위치(기선거리 약 10cm)를 고정한 채, 피사체의 움직임만이 존재하도록 하여 연속적으로 100쌍의 스테레오 영상을 취득하였다. 실험영상은 스틸영상 및 영상 시퀀스 각각 2256×1504 , 320×240 크기로 촬영되었으며, 영상에 렌즈왜곡이 크게 관측되지 않아 추가적인 왜곡보정은 실험에서 고려되지 않았다.

제안 알고리즘의 성능분석을 위해 기존 알고리즘들과의 성능 비교가 수행되었다. 첫 번째 비교 알고리즘은 카메라 보정 없이 정합점만을 이용하여 기본행렬을 추정하는 방식으로, 정합점 위치오차에 강인함이 특징인 RANSAC 기반 8점 알고리즘이 사용되었다. 기본행렬 추정에는 RANSAC을 통해 걸러진 정합점 모두가 사용되었으며, 정합점 좌표의 정규화 과정은 기존 DLT(Direct Linear Transformation) 기반 알고리즘의 문제점을 명확하게 파악하기 위해 본 실

그림 4. 스테레오 보정을 위한 보정패턴 영상
Fig. 4. A calibration pattern image used for stereo calibration

(a) 기준영상 좌표계에 대한 정사투영변환

(b) 기선벡터에 대한 회전변환

그림 5. 사진측량기반의 에피폴라 리샘플링 방식

Fig. 5. Photogrammetric epipolar resampling method

험에서는 적용되지 않았다. 두 번째 비교 알고리즘은 스테레오 보정 알고리즘으로서, 이 방식은 제안 알고리즘과 첫 번째 비교 알고리즘과는 달리 그림 4와 같은 보정패턴 영상으로부터 사전에 카메라 내부 및 외부 파라미터가 계산되어 기본행렬이 산출된다. 실험에는 다양한 각도로 촬영된 체스보드영상 15장이 파라미터 계산을 위해 사용되었으며, 기본행렬 계산을 위한 세부 알고리즘 구현은 컴퓨터 비전 오픈 라이브러리인 OpenCV^[14]를 이용하였다.

제안 알고리즘의 경우에는 기본행렬 추정을 위해 먼저 영상간의 정합점으로부터 상대표정을 통해 개별 외부 파라미터들이 추정된다. 이 때 상대표정과정에는 최소제곱조정을 위해 각각의 외부 파라미터들에 대한 초기 값이 요구되는데, 본 실험에서는 우측 영상의 자세인자($\omega_2, \phi_2, \kappa_2$) 및 위치인자(Y_2, Z_2)를 모두 '0'으로 초기 설정하고 반복적 조정을 통해 각각의 미지수를 추정하였다.

편위수정의 마지막 단계인 에피폴라 리샘플링 단계에서는 비교 알고리즘의 경우, 컴퓨터비전분야에서 널리 활용되고 있는 Hartley 알고리즘^[4]이 적용되었다. 이 알고리즘은 기본행렬로부터 계산된 에피폴라를 무한대로 사상시킴으로써 에피폴라 라인을 평행하게 정렬시키는 방식으로, 스테레오 카메라 간의 자세와 위치가 크게 차이나지 않은 경우에 매우 효과적이라 알려져 있다. 한편, 제안 알고리즘은 비교 알고리즘에 적용된 Hartley 알고리즘뿐 아니라 사진측량분야에서 보편적으로 사용되고 있는 에피폴라 리샘플링 방식으로 리샘플링이 수행되었다.

여기서 사진측량방식 에피폴라 리샘플링은 그림 5에서

와 같이 기준영상 좌표계에 대한 정사투영변환과 기선벡터에 대한 회전변환을 통해 수행된다.

알고리즘 간의 성능비교는 기본행렬 추정 정확도와 에피폴라 리샘플링 정확도 등, 두 가지 측면에서 이루어졌다. 먼저 기본행렬 추정 정확도 분석에는 추정된 기본행렬로부터 에피폴라 제약조건 만족도와 에피폴라 라인추정 정확도가 측정되었다. 여기서 첫 번째 비교 알고리즘과 제안 알고리즘에 요구되는 정합점들은 특징점 검출에 널리 활용되고 있는 SIFT와 SURF 알고리즘을 통해 각각 추출되었으며, 추정에 사용되지 않은 수동 측정된 정합점 10개 지점에서 개별 분석 지표가 측정되었다. 이 때, 영상 시퀀스의 경우에는 카메라의 자세 및 위치가 고정되어 촬영되었기 때문에 100장의 실험영상 모두에 동일한 검사점이 사용되었다. 다음으로, 에피폴라 리샘플링 정확도 분석은 결과 영상에서 추출된 정합점들 간의 수직시차 측정을 통해 이루어졌다. 이 때, 수직시차 측정을 위한 정합점들은 기본행렬 추정에서와 마찬가지로 특징점 검출 알고리즘인 SIFT를 통해 자동으로 추출되었다.

1. 영상 시퀀스를 이용한 실험결과

표 1은 영상 시퀀스를 이용한 알고리즘별 성능분석 결과

를 정리한 것으로, 비교 알고리즘 1과 2를 Case 1과 2, 그리고 제안 알고리즘을 Case 3로 표기하여 나타내었다. Case 2의 경우는 사전에 카메라 내부 및 외부 파라미터가 측정되므로 표에서와 같이 사용된 정합점 개수의 표기 및 실험영상 100장에 대한 표준편차 계산에서는 제외되었다.

실험결과는 기본행렬 추정 및 에피폴라 리샘플링에 있어 제안 알고리즘의 우수한 성능을 보여주고 있다. 분석지표 중 에피폴라 라인추정 오차는 추정된 에피폴라 라인과 검사점 간의 거리오차로서 Case 1의 경우 약 1pixel에 가까운 오차를 보였으나 제안 알고리즘의 경우에는 약 0.5pixel 정도로, 상대적으로 향상된 성능을 나타내었다. 이 때, Case 2의 경우에는 사전에 정밀하게 카메라 내부 및 외부 파라미터가 측정되었지만, 결과는 제안 알고리즘보다 낮은 정확도를 나타내었다. 그림 6은 Case 1과 Case 3에서 산출된 에피폴라 라인 추정 결과의 일례를 보여준다.

실험결과에서 또 하나 주목할 점은 측정값들의 표준편차로서 제안 알고리즘에 비해 Case 1은 정밀도 측면에서 다소 저조한 결과를 나타내었는데, 이러한 결과는 반대로 정합점 위치오차에 대한 제안 알고리즘의 강인성을 반증해준다고 할 수 있다. 한편, 정합점 추출방식에 따른 결과를 살펴보면 SIFT 적용 결과에 비해 SURF 적용 결과는 다소 저

표 1. 영상 시퀀스를 이용한 기본행렬 추정 정확도 및 에피폴라 리샘플링 정확도 분석결과

Table 1. Accuracy analysis results of fundamental matrix estimation and epipolar resampling using the image sequence

	SURF 정합점 이용결과			SIFT 정합점 이용결과		
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 1	Case 2	Case 3
Epipolar Constraint	0.0081 ± 0.1155	-0.0433	0.0067 ± 0.0294	0.0088 ± 0.1039	-0.0433	0.0028 ± 0.0135
Epipolar Line Error (pixel)	0.9883 ± 0.5401	0.7658	0.5137 ± 0.2607	0.8750 ± 0.4664	0.7658	0.3785 ± 0.1326
Tie-Points	48	-	48	120	-	120
Y-Parallax Error 1 (pixel)	0.6008 ± 0.2287	0.5665 ± 0.0472	0.4500 ± 0.1946	0.6804 ± 0.2909	0.6542 ± 0.0657	0.4226 ± 0.1699
Y-Parallax Error 2 (pixel)	-	-	0.4613 ± 0.1977	-	-	0.3904 ± 0.1752

그림 6. 에피폴라 라인추정 결과 영상(정합점 추출방법: SURF, Left: Case 1, Right: Case 3)

Fig. 6. Result images of epipolar line estimated(Tie-point extraction method: SURF, Left: Case 1, Right: Case 3)

감된 정확도를 나타내었는데, 이는 알고리즘 특성에 기인한 결과로 판단된다. 실제로 SURF 알고리즘은 SIFT 알고리즘에 비해 빠른 처리속도라는 장점을 가지지만 정확도 측면에서는 다소 저감된 성능을 나타낸다고 알려져 있다. 하지만 이러한 상황에서도 제안 알고리즘은 좋은 성능을 보여주었으며, 실제 실시간 또는 준 실시간 처리를 위해서는 이러한 고속 정합점 추출 알고리즘의 적용이 불가피 할 것으로 판단된다.

에피폴라 리샘플링에는 앞 서 설명한대로 Hartley 알고리즘과 사진측량방식의 알고리즘이 적용되었으며, 각각의 결과를 수직시차1과 2로 나타내었다. 여기서 사진측량방식 알고리즘은 영상 간의 자세 파라미터와 위치 파라미터가 개별적으로 요구되기 때문에 제안 알고리즘인 Case 3의 경우에만 적용될 수 있었다. 기본행렬 추정에 대한 정확도 분석결과와 마찬가지로 이번 실험에서도 제안 알고리즘의 성능이 정확도 및 정밀도 측면에서 가장 우수함이 확인되었

그림 7. 기하구조가 제대로 수립되지 못한 Case1의 사례와 해당 영상에서의 다른 알고리즘 결과들 (Top: Case 1, Middle: Case 2, Bottom: Case 3)
Fig. 7. A example of the erroneous established geometry in the case 1 and results of other algorithms using same image (Top: Case 1, Middle: Case 2, Bottom: Case 3)

다. 이 때, SURF 알고리즘을 적용한 Case 1의 경우에는 비정상적으로 수립된 기하구조 사례가 총 세 차례 관측되어 이를 제외한 나머지 실험영상 97장에 대해서만 정확도가 분석되었다. 그림 7은 이러한 비정상적 기하구조 수립의 한 사례를 보여준다.

에피폴라 리샘플링 방식에 따른 결과를 보면, Hartley 방식과 사진측량방식의 수직시차는 유사한 정도로 나타났다. 그러나 Hartley 방식의 결과에서는 그림 8에서 볼 수 있듯이 수평방향으로 발생된 기하학적 왜곡이 관측되었으며, 이는 심각한 입체피로의 원인으로 작용될 것이라 판단된다. 반면, 사진측량방식의 결과에서는 그러한 왜곡 없이 수직시차가 잘 제거되었음을 확인할 수 있다.

그림 8. 에피폴라 리샘플링 방식에 따른 Case 3의 결과 (Top: Hartley method, Bottom: Photogrammetric method)

Fig. 8. Epipolar resampling results of Hartley's method and photogrammetric method (Top: Hartley method, Bottom: Photogrammetric method)

2. 스틸영상을 이용한 실험결과

표 2는 앞 서 수행된 영상 시퀀스 실험과는 별도로, 카메라의 자세 및 위치를 달리하여 촬영된 스테레오 스틸영상에 대한 성능분석 결과를 보여준다. 이 실험에서는 사전 스테레오 조정의 어려움으로 인해 비교 알고리즘으로 Case 1만이 채택되었다.

표 2. 스틸영상 이용한 기본행렬 추정 정확도 및 에피폴라 리샘플링 정확도 분석결과

Table 2. Accuracy analysis results of fundamental matrix estimation and epipolar resampling using still images

	Image 1				Image 2			
	SURF 정합점 이용결과		SIFT 정합점 이용결과		SURF 정합점 이용결과		SIFT 정합점 이용결과	
	Case 1	Case 3	Case 1	Case 3	Case 1	Case 3	Case 1	Case 3
Epipolar Constraint	-0.002883	-0.001136	-0.000019	0.000854	0.003555	0.002153	0.006759	-0.000415
Epipolar Line Error (pixel)	1.9787	1.4012	2.0779	1.4492	1.2702	1.0133	1.1445	0.7241
Tie-Points	211		468		634		1402	
Y-Parallax Error 1 (pixel)	1.3224	1.2091	1.2829	0.7634	0.8972	0.6007	0.7306	0.5649
Y-Parallax Error 2 (pixel)	-	1.6450	-	0.8517	-	0.6426	-	0.4867

(a) SIFT 정합점을 사용한 Image 1의 편위수정 결과(좌: Case 1, 우: Case 3, 상: 계산된 에피폴라 라인, 중: 편위수정 결과영상, 하: 편위수정된 영상의 수직시차)

(b) SIFT 정합점을 사용한 Image 2의 편위수정 결과(좌: Case 1, 우: Case 3, 상: 계산된 에피폴라 라인, 중: 편위수정 결과영상, 하: 편위수정된 영상의 수직시차)

그림 9. SIFT 정합점을 이용한 스틸영상의 편위수정 결과

Fig. 9. Rectification result of Still images using SIFT tie-points

실험결과에서 볼 수 있듯이 스틸영상의 경우에도 제안 알고리즘의 우수한 성능을 확인할 수 있었다. 특히 제안 알고리즘은 Case 1 결과 영상에 비해 원 영상에 대한 변형정도가 작게 나타나는 것으로 확인되었다. 다만 정확도 측면에서 영상 시퀀스의 경우보다 다소 오차가 크게 나타났는데, 이는 촬영 당시의 카메라 간 자세와 위치차이에서 오는 복합적인 영향(추출된 정합점의 위치오차 등)으로 분석된다. 실제 영상 1의 결과는 카메라 간 외부 파라미터 차이가 상대적으로 더 작은, 영상 2의 결과보다 다소 낮은 정확도를 나타내었다. 그림 9는 검사점에서 계산된 영상의 에피폴라 라인과 편위수정된 에피폴라 영상, 그리고 수직시차 측정결과 등을 보여준다.

V. 결 론

본 논문에서는 3D 입체영상 제작을 위한 스테레오 영상의 편위수정에 있어 기존 알고리즘의 선형적 접근이 아닌 정확도와 정밀도를 중요시 여기는 사진측량학적 관점에서 이를 해석하고자 하였다. 이를 위해 본 논문에서는 비선형의 에피폴라 조건 방정식으로부터 정합점 위치오차에 따른 오차 전파의 영향을 최소화하고자 개별 외부 파라미터 추정에 최적화된 알고리즘을 적용하였고, 이를 통해 결정된 기본행렬을 이용하여 스테레오 영상의 편위수정을 수행하였다. 제안 알고리즘의 성능평가를 위해 컴퓨터비전 분야에서 널리 활용되고 있는 기본행렬 추정 알고리즘 두 가지를 구현하여 에피폴라 제약조건 만족도 및 에피폴라 라인 추정오차, 그리고 에피폴라 리샘플링 오차 등을 비교분석하였다. 실험결과, 제안 알고리즘은 다른 두 방식에 비해 정확도뿐만 아니라 정밀도 부분에서도 우수한 성능을 나타내었으며, 정합점 위치오차에 대한 강인성 또한 보여주었다. 추가적으로, 에피폴라 리샘플링 방식에 따른 성능분석 실험에서는 기존 Hartley 방식이 수평방향으로 불필요한 왜곡이 발생하여 입체영상 제작에 적합하지 않음이 발견되었으나, 이를 사진측량방식의 에피폴라 리샘플링 방법으로 해결할 수 있음을 확인할 수 있었다.

비록 제안 알고리즘이 기본행렬 추정에 있어 사전에 카

메라 내부 파라미터가 요구된다는 단점이 존재하나, 입체영상 제작에 있어서 이러한 내부 파라미터 수치를 확보하는 문제는 충분히 용인될 수 있는 문제라 판단된다. 현재 후처리 과정에서 사용되는 소프트웨어가 외산 제품에 의존하고 있는 현 실정에서 볼 때, 본 논문의 제안 알고리즘은 제품의 국산화와 경쟁력 확보에 있어 큰 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] T. M. Lambooi, W. A. Ijsselstein and I. Heynderickx, "Visual discomfort in stereoscopic displays: A review," in Proc. SPIE, vol. 6490, pp. 64900I, Jan. 2007.
- [2] Y.-S. Kang and Y.-S. Ho, "An efficient image rectification method for parallel multi-camera arrangement," IEEE Trans. Consumer Electronics, vol. 57, no. 3, pp. 1041-1048, Aug. 2011.
- [3] Z. Zhang, "A flexible new technique for camera calibration," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol.22, no.11, pp.1330-1334, Nov. 2000.
- [4] R. Hartley and A. Zisserman, Multiple View Geometry in Computer Vision, 2nd Ed., New York: Cambridge, 2003.
- [5] H. C. Longuet-Higgins, "A Computer Algorithm for Reconstructing a Scene from Two Projections", Nature, vol. 293, pp. 133-135, 1981.
- [6] R. I. Hartley, "In defence of the eight-point algorithm," Proc. of IEEE International Conference on Computer Vision, pp.1064-1070, Jun. 1995.
- [7] T. Kim and I. Dowman, 2006. "Comparison of two physical sensor models for satellite images: position-rotation model and orbit-attitude model," The Photogrammetric Record, Vol. 21, No. 114, pp. 110-123, June 2006.
- [8] T. Kim, H. Kim and S. Rhee, "Investigation of Physical Sensor Models for Modelling SPOT 3 Orbits," The Photogrammetric Record, Vol. 22, No. 119, pp. 257-273, Sep. 2007.
- [9] T. Kim and J. Jeong, 2011. "DEM matching for bias compensation of rigorous pushbroom sensor models," ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 66, no. 5, pp. 692-699, Sep. 2011.
- [10] T. Kim, "A study on the epipolarity of linear pushbroom images," Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 66, No. 8, pp.961-966, Aug. 2000.
- [11] H. Bay, A. Ess, T. Tuytelaars, L. V. Gool, "SURF: Speeded up robust features," Computer Vision and Image Understanding, vol.110, no.3, pp.346-359, Sep. 2008.
- [12] D. G. Lowe, "Distinctive image features from scale-invariant keypoints," International Journal of Computer Vision, vol.60, no.2, pp.91-110, Nov. 2004.
- [13] P. R. Wolf and B. A. Dewitt, Elements of photogrammetry with application in GIS, 3rd Ed., New York: McGraw-Hill, 2000.
- [14] OpenCV library, <http://sourceforge.net/projects/opencvlibrary>.

저 자 소 개

김 재 인

- 2010년 8월 : 인하대학교 지리정보공학과 학사
- 2010년 9월 ~ 현재 : 인하대학교 지리정보공학과 석사과정
- 주관심분야 : 3D 입체영상 생성, 위성영상 품질평가, 위성영상 활용

김 태 정

- 1991년 8월 : 한국과학기술원 전자공학과 학사
- 1992년 10월 : University College London 석사(위성공학)
- 1996년 2월 : University College London 박사(원격탐사)
- 1995년 8월 ~ 2001년 3월 : KAIST 인공위성연구센터 선임연구원
- 2001년 4월 ~ 2003년 8월 : KAIST 인공위성연구센터 연구교수
- 2003년 9월 ~ 현재 : 인하대학교 지리정보공학과 부교수
- 주관심분야 : 스테레오매칭, 3D 입체영상 생성, 센서모델링, 자동 DEM 생성, 수치도화기 개발