

## 3D 콘텐츠 제작을 위한 사진측량기반의 강인기법

\*김재인, \*\*김태정

인하대학교

\*[ejikim@inha.edu](mailto:ejikim@inha.edu), \*\*[tezid@inha.ac.kr](mailto:tezid@inha.ac.kr)

## Robust Technique Based on Photogrammetry for 3D Contents Generation

\*Kim, Jae-In \*\*Kim, Taejung

Inha University

## 요약

본 논문에서는 3D 콘텐츠 제작에 있어 입체피로를 최소화하기 위한 영상의 수직시차 제거과정에 있어 사진측량기반의 강인기법을 제안하고자 한다. 영상의 수직시차 제거 과정은 크게 기하추정 단계와 에피폴라 변환 단계로 구성된다. 본 논문에서는 기하추정을 위해 사진측량에서 널리 활용되고 있는 공면조건 기반 상대표정 알고리즘을 적용한다. 이 때 상대표정 알고리즘에는 자동 정합점 추출에 따른 오정합과 위치오차에 강인성을 확보하기 위해 제약조건을 도입한 베이저안 접근방식을 적용하고자 하며, 이를 바탕으로 수행되는 에피폴라 변환에는 영상의 왜곡과 원 영상 대비 변형을 최소화하기 위해 공선조건기반의 중심투영변환기법을 적용하고자 한다. 알고리즘의 성능검증을 위한 비교 알고리즘으로, 기하추정에는 8점 알고리즘과 스테레오 캘리브레이션 기법이 사용되었으며 에피폴라 변환에는 Hartley 방법과 Bouguet 방법이 사용되었다. 실험결과는 제안 알고리즘의 높은 정확도와 강인성, 그리고 활용적 가치를 보여주었다.

## 1. 서론

현재 3D 산업시장이 직면한 가장 큰 문제는 3D 콘텐츠의 공급부족이라 할 수 있다. 이러한 문제의 원인은 3D 콘텐츠 제작의 기술적 어려움에 크게 기인하고 있다. 3D 콘텐츠의 경우는 매 프레임 작은 기하학적 오차라 할지라도 장시간에 걸쳐 시청하게 될 경우, 입체피로들이 누적되어 시청자들에게 심각한 악영향을 끼치게 될 수 있다. 그리고 이러한 문제가 시장에서의 도태로 이어질 수 있다는 것은 무엇보다도 자명한 사실이다. 이 때문에 3D 콘텐츠 제작과정에는 반드시 완벽한 오차보정이 선행되어야 할 것이며, 이제는 3D 콘텐츠의 제작이 사진측량적 관점에서 높은 정확도와 정밀도를 고려하여 이루어질 필요가 있다고 판단된다. 하지만 실제 3D 콘텐츠 제작에 있어 사진측량적 기법이 도입된 사례는 사실상 거의 전무한 실정이라 할 수 있다. 이에 본 논문에서는 고품질의 3D 콘텐츠 제작을 위한 정밀 수직시차 제거의 방법으로 사진측량기반의 강인기법을 제안하고자 한다.

## 2. 제안 알고리즘

사진측량에서 의미하는 상대표정이란, 스테레오로 촬영된 두 영상간의 상대적인 자세와 위치를 모델공간에서 추정하여, 이를 통해 영상간에 발생된 수직시차(중시차 혹은 Y시차)를 제거하기

위한 작업이다. 영상의 수직시차 제거는 크게 두 단계를 거쳐 수행된다. 먼저 첫 번째 단계에서는 상대표정을 통해 두 영상간의 기하학적 관계 수립이 이루어진다. 일반적으로 이러한 기하학을 설명하는 수학적 모델은 비선형 방정식의 형태를 가지기 때문에, 테일러 전개를 통한 모델 방정식의 선형화와 최소제곱조정을 통한 반복적 추정과정이 요구된다. 두 번째 단계에서는 앞서 추정된 영상간의 상대적 자세와 위치요소로부터 에피폴라 변환을 통해 영상의 수직시차가 제거된다. 특히 이 과정은 추정된 표정요소 정확도에 민감하게 반응하여 결과 영상을 산출하기 때문에 상대표정 과정에서 정확하고 강인한 추정이 보장될 필요가 있다. 다음의 2.1절과 2.2절에서는 3D 콘텐츠 제작을 위해 본 논문에서 제안하고자 하는 상대표정방법과 에피폴라 변환에 대해 각각 기술하도록 한다.

## 2.1 제약조건을 도입한 상대표정

에피폴라 기하학은 두 영상간의 기하학적 관계를 설명할 때 대표적으로 사용되고 있는 개념으로, 에피폴라 기하 수립을 위한 제약조건식(또는 공면조건식)은 그림 1에 나타난 공간상의 벡터들로부터 식 (1)과 같이 표현할 수 있다. 이 때, ‘· (Dot product)’ 연산자와 ‘× (Cross product)’ 연산자는 각각 벡터

의 내적과 외적을 의미하며,  $T$ ,  $P_1$ ,  $P_2$ 는 각각  $T = \overrightarrow{O_1O_2}$ ,  $P_1 = \overrightarrow{O_1P}$ ,  $P_2 = \overrightarrow{O_2P}$ 을 의미한다.

$$(P_1 - T)^T \cdot [T \times P_1] = 0 \quad (1)$$

그리고 위 식은 벡터  $T = [Tx, Ty, Tz]^T$ 라 했을 때, 다음의 식 (2)과 같이 행렬 간 곱의 형태로 정리할 수 있다.

$$(P_1 - T)^T \cdot [T \times P_1] = P_2^T S P_1 = P_2^T \begin{bmatrix} 0 & -T_z & T_y \\ T_z & 0 & -T_x \\ -T_y & T_x & 0 \end{bmatrix} P_1 = 0 \quad (2)$$

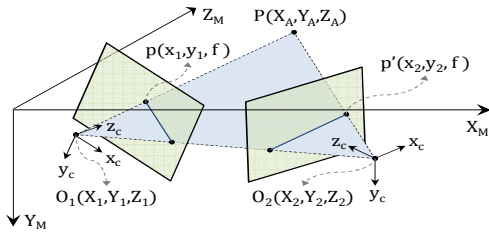


그림 1. 모델공간과 카메라공간에서의 에피폴라 기하

일반적으로 사진측량분야에서는 좌측 영상에 종속적인 상대 표정을 위해 모델 공간좌표계를 좌측 영상의 카메라 공간좌표계와 동일하게 배치시키고 모델 공간의 스케일과 관련된 표정요소인 우측영상의 X방향 투영중심 위치를 적당한 상수로 고정함으로써 실질적인 미지수의 개수를 5개로 최소화 한다. 이는 실제 촬영 환경상의 카메라 배치구조 특성에 따라 유연한 조정이 가능하다.

5개 표정요소를 미지수로 하는 종속적 상대표정을 위해 공면 조건식을 카메라 공간좌표계상에 나타내면 다음의 식 (3)과 같이 표현할 수 있으며,

$$F(\omega, \phi, \kappa, T_Y, T_Z) = p_2^T R_2 S p_1 = \begin{bmatrix} x_2 & y_2 & f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & -T_Z & T_Y \\ T_Z & 0 & -T_X \\ -T_Y & T_X & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ f \end{bmatrix} = 0 \quad (3)$$

최소제곱조정을 통해 5개의 표정요소를 구하기 위해서는 식 (4)와 같이 테일러 전개를 통한 선형화 과정이 요구된다.

$$F(\omega, \phi, \kappa, T_Y, T_Z) = F_{i_0} + dF_i + \varepsilon = 0 \quad (4)$$

여기서,

$$F_{i_0} = F(\omega^0, \phi^0, \kappa^0, T_Y^0, T_Z^0) = -w_i \quad (5)$$

$$dF_i = \left[ \frac{\partial F_i}{\partial \omega} \quad \frac{\partial F_i}{\partial \phi} \quad \frac{\partial F_i}{\partial \kappa} \quad \frac{\partial F_i}{\partial T_Y} \quad \frac{\partial F_i}{\partial T_Z} \right] dx = A_i dx \quad (6)$$

$$dx = [\Delta\omega \quad \Delta\phi \quad \Delta\kappa \quad \Delta T_Y \quad \Delta T_Z]^T \quad (7)$$

위 수식 (4)와 같이 공면방정식이 선형화되고 나면, 다음 식 (8)와 같은 형태로 식을 구성하여 반복적인 최소제곱조정을 통해 최종 표정요소들을 결정할 수 있게 된다.

$$A dx + \varepsilon = w, \quad \hat{dx} = (A^T A)^{-1} A^T w \quad (8)$$

그러나 본 논문에서는 상기의 일반적인 상대표정방법이 아닌, 사전정보의 도입을 통해 표정요소의 추정 안정도를 향상시키기 위한 방안으로 베이지안 추정 접근방식을 기반으로 하는 상대표정 기법을 적용하도록 한다. 다음 수식 (9)는 이러한 접근방식을 적용하기 위해 식 (8)의 모델방정식을 변형한 것이다.

$$B dx + \varepsilon = w, \quad \hat{dx} = (B^T C_w^{-1} B)^{-1} B^T C_w^{-1} w \quad (9)$$

여기서,

$$B = \begin{bmatrix} A \\ I \end{bmatrix}, \quad w = \begin{bmatrix} w_p \\ w_x \end{bmatrix}, \quad C_w = \begin{bmatrix} C_p & 0 \\ 0 & C_x \end{bmatrix} \quad (10)$$

- $w_p$ : 입력 정합점에 대한 카메라 공간좌표의 폐합오차(misclosures) 벡터
- $w_x$ : 미지수 보정인자들에 대한 폐합오차 벡터
- $C_p$ : 카메라 공간좌표계상에서 정합점 위치좌표에 대한 사전 공분산 행렬
- $C_x$ : 미지수 보정인자들의 사전 공분산 행렬

위 설명에서 볼 수 있듯이 베이지안 접근방식에 기반한 최소제곱조정의 절차에서, 사전정보는 가중된 제약조건의 형태로 도입되며 [1], 이러한 사전 불확실성은  $C_p$ 와  $C_x$ 로 표현된다. 이후, 수행되는 과정은 기존 최소제곱조정 절차와 동일하게 진행된다. 식 (9)와 같이 계산된 미지수 보정인자들은 초기 표정인자들을 갱신하게 되며, 이러한 과정은 모든 표정인자들이 수렴에 도달할 때까지 반복적으로 수행된다.

## 2.2 공선조건을 이용한 에피폴라 변환

에피폴라 변환은 수립된 기하구조를 바탕으로 스테레오 영상간의 수직시차를 제거함으로써 입체시가 가능한 상태로 만드는 영상의 기하학적 변환을 의미한다. 일반적으로 사진측량분야에서는 이러한 목적을 달성하기 위해 공선조건식을 이용한 중심투영 변환 기법이 사용되며, 이는 모델 공간좌표계에 대한 수직영상 변환과 촬영기선에 대한 수직영상 변환으로 구성된다 [4]. 여기서 모델 공간좌표계에 대한 수직영상 변환은 모델 공간에 대해 회전요소가 모두 '0'인 수직상태인 영상으로의 변환을 의미한다. 앞 절에서 설명한바와 같이 본 논문에서는 두 영상간의 상대표정요소를 추정하기 위해 종속적 상대표정방법이 적용되었기 때문에, 이 과정은 우측영상에 대해서만 이루어지게 된다(그림 2(a)). 그러나 기선에 대한 수직영상 변환은 그림 2(b)에서 설명하는바와 같이 두 영상 모두 모델 공간좌표계상에서 기선에 대한 회전요소를 가지게 되기 때문에 양쪽 모두에 각각 적용될 필요가 있다.

촬영기선에 대한 각각의 회전요소  $\Omega$ ,  $\Phi$ ,  $K$ 는 우측영상의 위치요소  $T_x$ ,  $T_y$ ,  $T_z$ 로부터 다음 수식 (11)과 같이 계산할 수 있다.

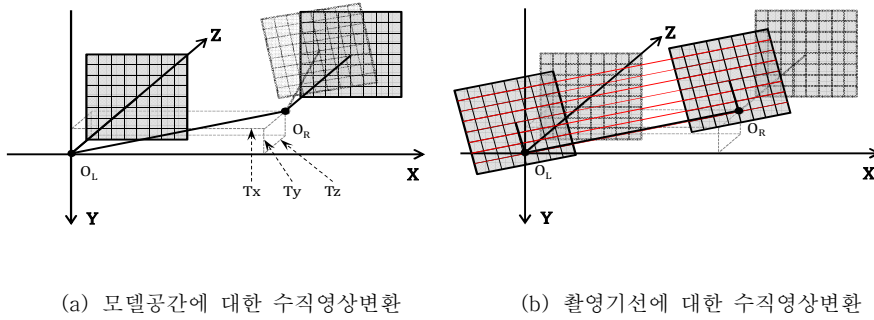


그림 2. 종속적 상대표정에 따른 에피폴라 변환과정

$$\Omega = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2}, \quad \Phi = -\tan^{-1} \frac{T_Z}{(T_X^2 + T_Y^2)^{1/2}}, \quad K = \tan^{-1} \frac{T_Y}{T_X} \quad (11)$$

그리고 두 영상간의 수직시차를 제거하기 위한 회전행렬  $R_T$ 는 모델공간에 대한 회전변환행렬  $R^T$ 와 촬영기선에 대한 회전변환행렬  $R_B$ 로부터 수식 (12)와 같이 정의된다.

$$R_T = R_B R^T, \quad R_B = R_\Omega R_\Phi R_K \quad (12)$$

이 후 회전행렬  $R_T$ 는 공선조건식에 대입되어 수직시차 제거를 위한 에피폴라 영상제작에 사용된다. 다음 수식 (13)은 원 영상 위의 한 점  $(x_o, y_o)$ 이 공선조건에 의해 수직영상 위의 한 점  $(x_r, y_r)$ 으로 투영되는 과정을 보여준다. 이 때, 식의  $r_{11}, \dots, r_{33}$ 은 회전행렬  $R_T$ 의 행렬요소를 의미한다.

$$x_r = f_r \times \frac{r_{11}x_o + r_{12}y_o + r_{13}f_o}{r_{31}x_o + r_{32}y_o + r_{33}f_o}, \quad y_r = f_r \times \frac{r_{21}x_o + r_{22}y_o + r_{23}f_o}{r_{31}x_o + r_{32}y_o + r_{33}f_o} \quad (13)$$

### 3. 실험 결과 및 분석

제안 알고리즘의 성능분석을 위해 웹캠 두 대를 이용하여 실험 데이터를 취득하였다. 실험데이터는 카메라 자세 및 위치를 고정된 채 피사체의 움직임만이 존재하도록 설정되어 연속적인 100장의 시퀀스 형태로 2개 세트(TEST 01, TEST 02)가 제작되었다. 이 때, 촬영과정에서 TEST 01의 경우는 대략적인 카메라 조절을 통해 자세 차이가 크게 나지 않게 하였으며, 반대로 TEST 02는 카메라 간 자세 차이에 따른 영향을 분석하고자 다소 차이를 두어 제작하였다. 다음의 그림 3은 실험에 사용된 데이터를 보여준다.

알고리즘의 성능분석에 있어, 에피폴라 기하 추정에는 비교 알고

리즘으로 8점 알고리즘을 사용하였으며, 추가적으로 패턴영상을 이용한 스테레오 조정 알고리즘과 일반적인 상대표정 알고리즘 또한 구현하여 성능을 분석해보았다. 에피폴라 변환 알고리즘으로는 기본행렬 방식에 적합한 Hartley 알고리즘이 비교 알고리즘으로 사용되었으며, 스테레오 조정방식에는 Bouguet 알고리즘이 사용되었다[2] [3].

알고리즘의 정량적 비교를 위한 성능지표로는 에피폴라 제약조건 만족도, 에피폴라 라인 추정 정확도 및 기울기 변동폭, 그리고 에피폴라 변환에 따른 수직시차 제거 정확도 등이 사용되었다.



(a) TEST 01



(b) TEST 02

그림 3. 실험에 사용된 영상 데이터

에피폴라 기하추정을 위한 정합점 추출에는 SIFT(Scale Invariant Feature Transform) 알고리즘이 사용되었으며, 특히 TEST 02의 경우는 제안 알고리즘의 강인성분석을 목적으로 오정합점 제거를 위한 RANSAC(RANdom SAMple Consensus) 적용시 에피폴라 라인 추정 허용오차를 TEST 01에 비해(TEST 01의 허용오차는 1 pixel로 설정) 3배 크게 설정하여 정합점들을 추출하였다. 또한 각각의 성능지표들은 추정에 사용된 모델점이 아닌 추가적으로

표 1. TEST 01 데이터를 이용한 알고리즘 성능검증 결과

Method	Epipolar Constraint		Epipolar Line Error (pixel)		Y-Parallax Error (pixel)		Slope variation (deg.)	Mean(TPs)
	Mean	Stdev	Mean	Stdev	Mean	Stdev		
Case 1	0.0162	0.4073	1.4882	0.9903	5.4259	19.5535	19.5790	118
Case 2	-0.0152	0.1304	0.5444	0.1667	0.4856	0.1274	4.2643	118
Case 3	-0.0433	0.0000	0.7658	0.0000	0.5897	0.0000	0.0000	118
Case 4	0.0026	0.0138	0.3923	0.1532	0.3939	0.1612	3.2416	118
Case 5	-0.0293	0.0109	0.5716	0.0689	0.4625	0.0451	0.2930	118

표 2. TEST 02 데이터를 이용한 알고리즘 성능검증 결과

Method	Epipolar Constraint		Epipolar Line Error (pixel)		Y-Parallax Error (pixel)		Slope variation (deg.)	Mean(TPs)
	Mean	Stdev	Mean	Stdev	Mean	Stdev		
Case 1	0.0629	0.7496	1.9213	1.4070	10.9903	68.6218	18.8835	78
Case 2	-0.0142	0.0879	0.7434	0.6504	0.7954	1.8448	5.5544	78
Case 3	0.0187	0.0000	0.7919	0.0000	0.6436	0.0000	0.0000	78
Case 4	-0.0161	0.0258	0.6195	0.4627	0.6080	0.5940	5.2475	78
Case 5	-0.0149	0.0302	0.5670	0.5339	0.4900	0.4519	0.5458	78

수동 측정된 검사점들로부터 측정되었다.

영상의 수직시차를 제거하기 위해서는 에피폴라 기하 추정기법과 이에 적합한 에피폴라 변환기법이 요구되며, 일반적으로 에피폴라 변환기법은 기하구조 추정방법에 따라 각각 다른 방식이 적용될 필요가 있다. 본 논문에서는 표기상의 편의를 목적으로 기하추정방법과 이에 따른 에피폴라 변환기법을 표에 나타낸 것과 같이 Case 1에서 5가지로 구분하여 알고리즘 별 성능분석 결과를 정리하였다. 다음은 케이스 별 알고리즘 조합형태를 보여준다.

- Case 1: 8점 알고리즘+ Hartley 변환방법
- Case 2: 정규화된 8점 알고리즘 + Hartley 변환방법
- Case 3: 스테레오 캘리브레이션 + Bouguet 변환방법
- Case 4: 상대표정 알고리즘 + 공선조건기반 중심투영변환
- Case 5: 제약된 상대표정 알고리즘 + 공선조건기반 중심투영변환(제안 알고리즘)

표 1과 2는 TEST 01과 TEST 02를 이용하여 산출된 알고리즘의 성능검증 결과를 나타낸 것으로, TEST\_02에 비해 상대적으로 오차요인이 적은 TEST\_01의 결과에서는 Case 1을 제외한 나머지 알고리즘들이 서로 유사한 성능을 나타내었다. 그러나 TEST\_02의 결과를 보면, 다른 비교 알고리즘들의 경우, TEST\_01 결과에 비해 성능의 저하가 발생된 반면, 제안 알고리즘은 이전 결과의 정확도를 유지할 수 있음을 확인할 수 있었다. 이 뿐 아니라, 제안 알고리즘은 TEST\_01과 TEST\_02 결과, 모두에 있어서 에피폴라 라인 기울기의 변동폭이 가장 작게 산출되었다. 이는 매 프레임마다 수행되는 기하추정과정에서 제안 알고리즘이 안정적이고 일관적으로 기하구조 수립이 이루어졌음을 의미한다. 또한 제안 알고리즘은 다른 비교 알고리즘들에 비해 영상의 변형도와 왜곡도가 가장 작은 것으로 확인되었다. 다음의 그림 4는 방식별 에피폴라 변환결과에 대한 예를 보여준다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 3D 콘텐츠 제작을 위한 스테레오 영상의 수직시차 제거에 있어 사진측량기반의 강인기법이 제안되었다. 제안 알고리즘의 성능 비교분석을 위해 컴퓨터비전 분야에서 널리 사용되고 있는 8점 알고리즘과 스테레오 캘리브레이션 기법이 비교 알고리즘으로 사용되었으며, 검증실험결과 제안 알고리즘의 우수한 성능을 잘 보여주었다. 제안 알고리즘은 일반적인 사진측량분야의 상대표정 알고리즘 보다 진보된 형태로, 제약조건을 도입함으로써 기하추정의 높은 강인성과 정확도가 보장될 수 있었다. 이는 결과적으로 영상의 정밀한 수직시차 제거를 가능케 하였으며, 영상의 변형 또한 최소화되는 모습을

보여주었다. 이에 따라, 수직시차 제거에 있어 높은 정확도 및 정밀도가 요구되는 3D 콘텐츠 제작과정에 있어, 제안 알고리즘은 그 활용적 가치가 매우 높을 것이라 기대된다.

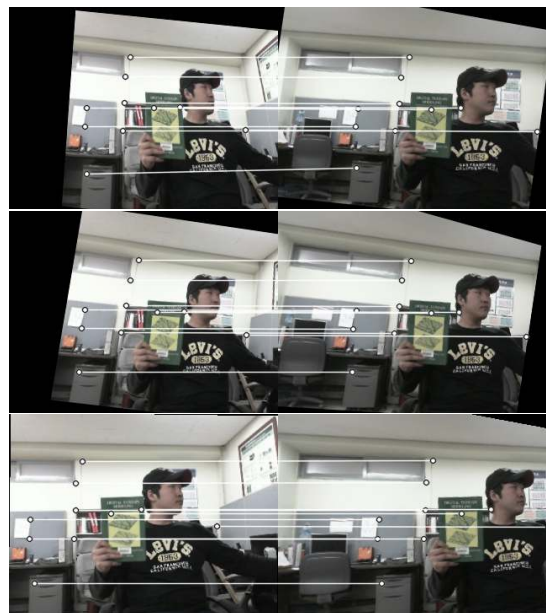


그림 4. 에피폴라 변환 결과(상: Case 1, 중: Case 2, 하: Case 5)

#### ※ 참고문헌

- [1] J. Grodecki and G. Dial, 2003. Block adjustment of high-resolution satellite images described by rational polynomials, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69(1):59-68.
- [2] R. I. Hartley, 1995. In defence of the eight-point algorithm, *Proc. of IEEE International Conference on Computer Vision*, pp.1064-1070.
- [3] R. I. Hartley, A. Zisserman, 2003. *Multiple View Geometry in Computer Vision*, 2<sup>nd</sup> Edition, New York: Cambridge University Press.
- [4] 조우석, 안유신, 2003. 모델공간에서의 에피폴라 영상기하, *한국GIS학회지*, 9(3):76-86.

#### ※ 사사

이 논문은 공간정보 전문인력 양성사업과 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (2011-0009721)