

# 최대 클릭을 이용한 2차원 데이터의 대응관계로부터 3차원 좌표복원\*

김성진\*, 추창우\*, 이동훈\*, 정순기\*, 원광연\*\*

\*경북대학교 컴퓨터공학과, \*\*한국과학기술원 전산학과

## 3D point recovery from 2D correspondence Using Maximum Clique

SungJin Kim\*, ChangWoo Chu\*, DongHoon Lee\*, SoonKi Jung\*  
and KwangYun Wohn\*\*

\*Dept. of Computer Engineering, Kyungpook National University

\*\*Dept. of Computer Science, KAIST

### 요 약

여러 대의 카메라를 통해 캡춰된 2차원 데이터를 사용하여 3차원의 좌표를 추출하기 위해서는 각 카메라의 2차원 영상 데이터들의 대응점(correspondence point)을 구해야 한다. 이를 위해 에피폴라 제약조건(epipolar constraints)을 이용하여 에피폴라 라인(epipolar line)에 근접한 점을 추출하였다. 에피폴라 제약조건을 사용하면, 실제 원하는 점 이외에 많은 수의 고스트(ghost)가 발생할 수 있다. 또한 카메라로부터 은닉(occlusion)된 점들로 인해 모든 카메라에서 대응되는 점이 존재하는지의 여부를 보장할 수 없다. 본 논문에서는 각 카메라의 대응관계를  $k$ -partite graph로 모델링하고, 전역 탐색을 위해 가중치를 적용하여 클릭(clique)을 추출함으로써, 고스트가 제거된 대응점을 구한다.

## 1. 서 론

동작포착(motion capture)이란 분석 또는 재생을 목적으로 인체 또는 다른 관찰체의 움직임을 기록하는 기술이다[1]. 동작포착을 위한 방법으로는 크게 자기(magnetic) 동작 포착 방법과 광학적(optical) 동작 포착 방법으로 나눌 수 있다. 광학적 동작 포착은 반사가 잘되는 마커들을 몸에 붙이고, 이들의 3차원 궤적을 구하는 방법이다. 이 경우 각기 다른 카메라로부터 얻은 2차원 데이터로부터 3차원의 좌표를 추출하여야 한다. 이 때, 가려짐 현상(occlusion problem)과 대응점 문제(correspondence problem) 등으로 인해 정확한 3차원 좌표를 추출하는데 어려움이 있다.

일반적으로 3차원 위치를 복원하기 위하여 에피폴라 제약조건을 사용한다. 그러나 에피폴라 제약조건만을 사용한 경우 많은 양의 고스트가 생성된다. 본 논문에서는 에피폴라 제약조건 사용시 생기는 많은 수의 고스트를 제거하기 위하여 2차원의 점들의 대응관계를 그래프로 모델링한다. 또한 전역 탐색을 위해 가중치를 적용하여 클릭을 추출함으로써, 고스트가 제거된 대응점을 구한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 에피폴라 제약조

건 적용시 발생하는 고스트 문제를 알아보고, 3장에서는 2차원의 대응점의 관계성을 이용한 고스트 제거 방법을 제시한다. 4장에서는 2차원 데이터를 3차원으로 복원하는 방법을 보이며, 5장에서는 제시한 방법을 사용하여 실험한 결과를 보인다. 6장에서는 결론 및 향후 연구 과제에 대해 제시한다.

## 2. 고스트 문제(ghost problem)

여러 대의 카메라에서 얻은 2차원 데이터로부터 3차원 좌표를 추출하기 위해서 서로 다른 카메라의 2차원 데이터들의 대응관계를 구해야 한다. 대응관계를 구하기 위해서 에피폴라 제약조건[2]을 이용하여 에피폴라 라인을 구한다. 라인상에 정확히 대응되거나 근사한 값을 대응점으로 볼 수 있으나, 대응에 오류가 있어 하나 이상의 대응점이 생길 가능성이 많다. 이러한 경우 실제 구하고자 하는 3차원 상의 점과 고스트라고 불리는 실제로는 존재하지 않는 점이 생긴다. 그림 1은 3차원 좌표 추출시 고스트가 생기는 예로서 카메라 1에서의 한 점은 카메라 2에서 에피폴라 라인으로 투영(projection)되고, 라인 상에 맺히는 점을 대응점으로 본다. 이미지 2의 에피폴라 라인 상에 맺히는 점 중 하나는 고스트이다. 실제로는 대응점은 에피폴라 라인 상에 정확히 대응되어야 하지만, 카메라의 왜곡이나 잡음 등으로 인해 오차가 생긴다. 따라서 적절한 임계값을 적용하여 임계값 범위 내의 점을 대응점으로 본다.

\* 이 논문은 1999년 한국전자 통신연구원(ETRI)의 "저가형 광학식 모션 캡처 시스템 및 후처리 소프트웨어 개발" 연구과제(9MC2400)의 지원에 의한 것임

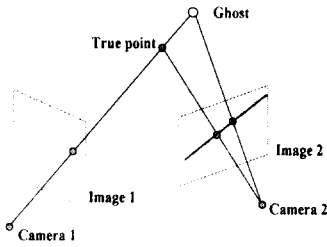


그림 1. 3차원 특징점 추출 시 고스트가 생기는 예

모든 카메라에 대해서 각 2차원 데이터에 대응되는 점을 찾아서 그 중에 각 카메라마다 대응되는 실제로 존재하는 3차원 좌표를 구하는 것은 사실상 불가능하다. 왜냐하면 고스트가 있는 경우에는 어느 점이 고스트인지 실제 데이터인지 구별할 수 없다. 따라서 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 각 카메라의 대응관계를 k-partite graph로 모델링하고, 그래프의 성질을 이용하여 고스트가 제거된 대응점을 구한다.

### 3. 2차원 대응점의 관계성을 이용한 고스트 제거

#### 3.1 k-partite graph

그림 2와 같이 정점들의 집합이 동일한 집합 내부에서는 연결성을 가지지 않는 두 개의 집합으로 나누어져있는 그래프를 bipartite 그래프라고 부른다. 집합의 갯수가 k개일 때 이는 k-partite 그래프이다[3].

k-partite 그래프는 같은 집합 내에 노드들간에는 서로 상관 관계가 없다. 이를 각 카메라와 마커들에 적용시킨다. 다시 말해서 카메라를 하나의 집합으로 보고 그 집합의 노드들은 마커가 된다. 동일한 카메라에서 보이는 마커들 간에는 서로 상관관계가 없다. 또한 서로 다른 카메라에서 보이는 마커들간의 연관성을 그래프의 에지(edge)로 표현한다. 각 마커들간의 관계는 에피폴라 제한조건을 이용하여 서로의 연관성을 찾고 관계된 마커끼리는 에지로 표현한다. 이러한 설정은 정확히 k-partite 성질을 만족시킨다. 본 논문에서는 특정카메라의 특정 마커에 대한 각 카메라의 대응되는 점을 찾아내는데 그래프의 이론을 도입하였다. 고스트는 클릭을 이루지 않는 노드이며, 이를 제거한 결과가 고스트가 제거된 결과와 동일하다.

#### 3.2 특정 마커에서의 대응점의 관계

이렇게 생성한 그래프는 상당히 복잡한 에지들로 연결되어 있다. 이런 복잡한 그래프에서 마커들의 상관관계를 찾기란 매우 어려운 문제이다. 따라서 특정 카메라의 특정 마커와 연관성이 있는 각 카메라들의 마커들 간의 에지를 추출하여 서브그래프(subgraph)를 만든다. 그림 3은 카메라 1의 첫 번째 마커와 연결된 다른 카메라와의 관계를 나타낸다.

$C_1$ 는 1번째 카메라,  $m_n$ 는 n번째 마커, 임의의 카메라 k에서의 마커번호를  $m_1^k, m_2^k, \dots, m_n^k$ 라 두자. 실제의 마커는 많은 수의 카메라에서 동시에 대응을 이를 확률이 높고, 위와 같이 그래프의 관점에서는 최대클릭(maximum clique)을 이루는 마커의 집합이 실제의 마커일 가능성이 높다.

따라서,  $m_1^1$ 과  $m_2^2$ 이 이루는 에지는 고스트로 볼 수 있다. 그러나 임의의 카메라에서 마커가 은닉되는 상황, 그림 3에서  $m_1^1$ 과  $m_1^2$ 가 은닉되었을 때, 실제 마커가  $\{m_1^1, m_2^2\}$ 일 가능성

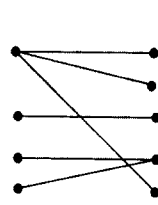


그림 2. bipartite graph

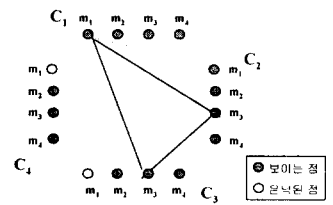


그림 3. subgraph

을 배제할 수 없다. 즉, 특정한 하나의 카메라의 특정 마커에서 추출한 최대 클릭이 실제 마커일 가능성은 높지만 반드시 그렇다고 보장할 수 없다.

#### 3.3 전역 검색과 가중치 부여

임의의 서브그래프에서 추출한 최대 클릭이 다른 카메라의 특정 마커에서도 동일하게 존재한다면 실제 마커일 가능성은 커질 것이다. 반면에 임의의 카메라에서는 최대 클릭을 이루지만, 그 외의 카메라에서 대응되는 점이 없다면, 실제 마커로 보기 힘들다. 본 논문에서는, 식 1과 같이 그래프의 관계에 대한 검사를 특정 카메라에 국한하지 않고, 전역적으로 실시하여 가중치와 벌칙을 부여함으로써 실제 마커를 추출하였다.

$$\sum(\text{weight} + \text{penalty}) > \text{threshold} \quad (1)$$

가중치의 부여는 경험적 방법으로 결정할 수 있으며, 본 논문에서 사용한 방법은 그림 4와 같다.

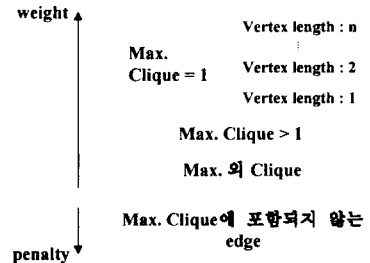


그림 4. 가중치와 벌칙의 우선 순위

### 4. 삼차원 좌표 추출

임의의 카메라의 한 마커에 대응될 가능성이 있는 후보 마커들이 결정이 되면, 이 마커들로부터 하나의 3차원 좌표를 구한다. 에피폴라 라인 상의 점을 통해 한 개의 좌표를 구할 수 있고, 카메라 중심의 좌표(center of projection)를 알고 있으므로, 식 (2)에 의해 직선방정식을 구할 수 있다.

$$\frac{x-x_p}{a_p} = \frac{y-y_p}{b_p} = \frac{z-z_p}{c_p} \quad (2)$$

(a, b, c는 직선의 방향 벡터이다.)

위 수식은 두개의 방정식 (3a,b)로 표현된다.

$$b_p x - a_p y = b_p x_p - a_p y_p, \quad c_p y - b_p z = c_p y_p - b_p z_p \quad (3a,b)$$

이렇게 n개의 마커에 대해 각각 2개씩의 방정식을 구할 수 있고, 이를 행렬식으로 나타내면, 식 (4)와 같다.

$$\begin{bmatrix} b_1 & -a_1 & 0 \\ 0 & c_1 & -b_1 \\ & \vdots & \\ b_n & -a_n & 0 \\ 0 & c_n & -b_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 x_1 - a_1 y_1 \\ c_1 y_1 - b_1 z_1 \\ \vdots \\ b_n x_n - a_n y_n \\ c_n y_n - b_n z_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

이 행렬을 AX=B로 나타냈을 때, 식 (5)와 같이 3차원 좌표 X를 구할 수 있다.

$$X = (A^T A)^{-1} A^T B \quad (5)$$

### 5. 실험

실험을 위한 데이터로 일정한 공간 내에 무작위로 추출한 3차원 데이터를 사용하였다. 이 3차원 데이터를 각 카메라의 위치 정보를 이용하여 2차원 데이터로 변환했으며, 은닉(occlusion)을 고려하여 무작위로 임의의 카메라의 마커들을 추출하여 보이지 않는 점으로 간주하였다. 카메라의 calibration 에러를 고려하여 무작위로 추출한 임의의 이차원 데이터에 대해 위치를 교정하였고, 4 대의 카메라, 각각 20개 마커를 두어 가상의 환경을 조성했다.

그림 5(a)는 전체 그래프에 대한 출력의 결과이며 그림5(c)는 임의의 카메라의 특징점과 연결된 서브그래프를 추출한 결과이다. 그림5(c)에서 최대 클릭을 추출한 결과는 그림5(d)와 같다. 이를 전역으로 가중치를 적용하여 고스트를 제거한 전체 그래프의 결과는 그림5(b)에 나타나 있다. 그림5(a)와 그림5(b)를 비교하였을 때 직관적으로도 많은 양의 고스트가 제거되었음을 알 수 있다.

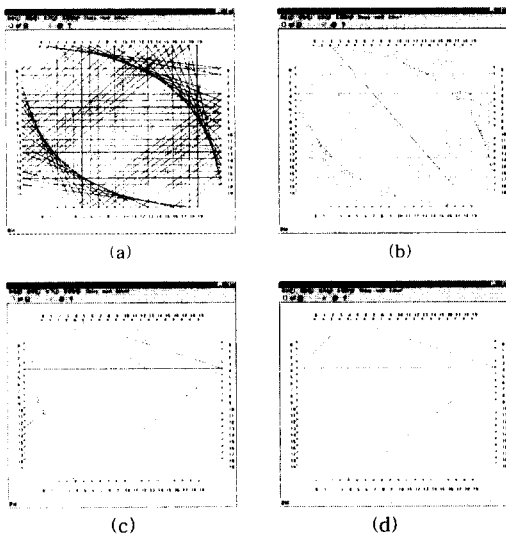


그림 5. (a)는 대응되는 에지들의 전체 그래프를 출력한 결과이고 (b)는 고스트가 제거된 전체 그래프를 출력한 결과이다. (c)는 임의의 마커에서 추출한 서브그래프이고, (d)는 서브그래프에서 최대 클릭을 뽑아낸 결과이다.

실제 환경에 대한 실험을 위해 Motion Analysis사의 Eva

Motion capture system[4]에서 동작 포착(motion capture)한 총 2633프레임의 이차원 데이터를 사용하여 실험하였다. 동작 포착을 위해 사용된 카메라의 갯수는 8대이며, 마커 수는 33개이다. 그림6(a)는 에피플라 제약조건만을 적용하여 뽑은 점을 3차원 좌표로 변환하여 출력한 결과이다. 본 논문에서 제안한 방법을 적용하여 그림6(b)와 같이 고스트가 제거된 3차원 좌표를 복원하였다.

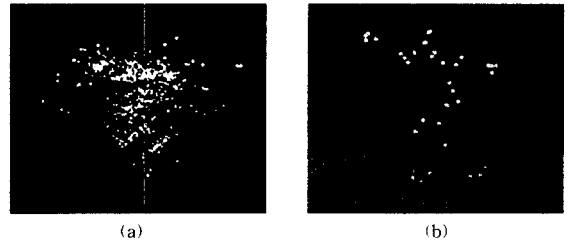


그림 6. (a)는 고스트가 포함된 3차원 좌표의 출력결과이고, (b)는 제시한 방법으로 추출한 3차원 좌표의 출력결과이다.

### 6. 결론 및 향후과제

본 논문에서는 여러 대의 카메라를 통해 캡춰된 2차원 데이터의 대응점을 구하기 위해 에피플라 제약조건을 사용하여 구해진 점들의 집합에서 효과적으로 고스트를 제거하기 위한 방법을 제시하였다. 본 논문에서 제시한 방법을 사용하여 개별 프레임에서 고스트가 제거된 실제 마커의 집합으로 3차원 좌표를 추출하였으며, 전체 프레임에 적용하여 결과를 확인하였다. 비교 대상으로 Eva system에서 복원한 3차원 좌표를 사용하였다. 그러나, 비교대상인 데이터는 3차원 궤적 추적을 통해 고스트를 재차 제거한 파일로, 본 논문에서 제시한 방법보다는 더 많은 양의 고스트가 제거된 결과를 보였다.

향후과제로 본 논문에서 경험적으로 수행한 가중치 적용의 방법을 relaxation labeling[5] 등의 방법을 사용하여 결과의 신뢰도를 높이고, 3차원 궤적 추적을 통해 나머지 고스트에 대한 처리를 수행할 계획이다.

### 참고문헌

- [1] SoonKi Jung. Motion Analysis of Articulated Objects For Optical Motion Capture. PhD thesis, KAIST 1997.
- [2] Z. Zhang and O. Faugeras, "3D Dynamic Scene Analysis", Berlin Heidelberg, NY : Springer-Verlag, 1992.
- [3] Eric W. Weisstein. "Eric's Treasure Troves of Science", <http://www.treasure-troves.com/>.
- [4] Motion Analysis Company, <http://www.motionanalysis.com/>.
- [5] Dana H. Ballard and Christopher M. Brown, "Computer Vision", Prentice Hall, pp. 408-430, 1982.