

사실적 3D 손 인터페이스를 위한 가상 양시점화 기법

배동희^o 김진모 조형제
 동국대학교 멀티미디어학과

vision0529@dongguk.edu, mythsjin@dongguk.edu, chohj@dongguk.edu

Virtual Two-View Technique for Real 3D Hand Interface

Donghee Bae^o Jinmo Kim Hyungje Cho
 Dept. of Multimedia, Dongguk Univ.

요 약

기존의 인간과 컴퓨터 사이의 상호작용을 제어하는 손 인터페이스들은 대부분이 2차원 영상을 분석, 제어하는 간단한 구조로 되어 있거나 3차원 분석의 경우 주로 두 대의 카메라로 영상을 입력 받아 매 프레임 많은 연산을 처리하는 불필요한 구조로 구현된 경우가 많다.

본 논문에서 제안하는 가상 양시점화 기법은 두 카메라 사이의 변환 정보를 호모그래피(Homography) 행렬로 계산한 후에는 오직 한 대의 카메라만을 이용하여 사실적인 3차원 손 좌표 복원을 수행한다. 즉, 초기에 구해진 호모그래피 행렬을 통해 가상의 두 번째 카메라의 좌표 값을 예측하여 한 대의 카메라만을 사용하면서도 두 대의 카메라로 처리하는 것과 같은 결과를 얻으려는 시도이다. 이는 단일 손 영상을 분석하여 3차원 정보를 유추하는 기존의 3차원 손 인터페이스 방식에 비해 보다 정확한 3차원 정보를 얻을 수 있으며, 두 대의 카메라를 동시에 구동할 때보다 연산량의 감소로 실시간 처리에 있어 효율적이다.

1. 서 론

최근 몇 년간 컴퓨터 시스템의 급속한 발전과 더불어 인간과 컴퓨터 시스템 간의 상호 작용을 향상시키기 위한 효과적인 방법들에 관한 연구가 꾸준히 진행되고 있다. 특히 영화, 방송 그리고 게임 등 디지털 콘텐츠 제작 기술의 급속한 발전으로 사용자는 사실적이고 실감나는 영상을 일반 가정에서도 쉽게 접해 볼 수 있게 되었다. 이로 인해 사용자는 컴퓨터 시스템과 사용자 간의 보다 긴밀한 상호 작용을 기대하게 되었으며 이를 충족시키기 위해 HCI(human computer interaction) 기술과 3차원 복원에 관한 수많은 연구들이 일반 대학과 기업 연구소 등에서 수행되어지고 있다[1].

이러한 HCI 기술은 시스템을 사용하는 과정에서 사용자의 편리성이 가장 우선이 되어야 하며, 이와 더불어 사용자에게 최적의 경험 또한 제공해 줄 수 있어야 한다. 이러한 최적의 경험을 느낄 수 있게 하기 위한 핵심 분야가 바로 인터페이스의 설계이며, 이를 위해 실시간으로 3차원 공간을 자유롭고 효과적으로 제어할 수 있는 인터페이스가 개발되어야 한다[2].

그 중 현재 많이 제안되고 사용되는 일반적인 인터페이스로는 손 인터페이스(hand-interface)를 들 수 있다. 손은 인간에게 있어 정보 전달의 중요한 도구로 인간과 컴퓨터 사이에 상호 작용을 할 수 있도록 도와주는 인터페이스 구현에 많이 활용된다. 하지만 기존의 손 인터페이스에 관한 연구들이 대부분 2차원 좌표를 제어하는 단순한 원리에 주로 초점이 맞춰져 있다[3]. 3차원 정보를 얻기 위해서는 보통 물리적 장치(데이터 글러브, 스페이스 볼 등)를 활용해야 하는 데 이는 경제적인 부담과 불편함 때문에 효율성이 떨어진다[2][4][5].

최근 손 인터페이스 시스템에 있어 컴퓨터 비전 기반의 3차원 손 분석에 관한 연구가 진행되고 있지만 2차원 손 동작 인식 연구들에 비해 열악한 상황이다. 일반적으로 손 동작 인식 하는 데는 한 대의 카메라로 충분 하지만 정확한 3차원 정보 복원을 위해서는 두 대 이상의 카메라로 매 프레임 영상을 입력받아 처리하는 과정이 필요하다. 이러한 과정은 많은 처리 과정과 연산을 수행하기 때문에 매우 비효율적이다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 한 대의 카메라로 두 대의 카메라를 사용할 때와 유사하게 정확한 3차원 손 좌표를 유추해내는 가상 양시점화 기법을 설계하였다. 초기에 전처리 과정으로 두 대의 카메라의 위치를 설정하고 각 카메라의 투영행렬과 두 카메라 사이의 변환관계인 호모그래피 행렬을 계산한다. 이후 3차원 손 좌표의 복원 과정에서는 한 대의 카메라로만 처리한다. 한 대의 카메라로 입력 받은 손의 좌표가 구해지면 이를 구해둔 호모그래피 행렬을 통해 가상의 카메라로 촬영 되어질 손의 좌표를 추정하고 계산된 각 카메라의 투영행렬을 통해 3차원 좌표로 복원한다. 이러한 과정을 통하여 얻어진 좌표는 마치 두 대의 카메라로 처리할 때와 같은 결과를 얻을 수 있다. 단, 이는 한 손을 기반으로 하며 손 영상 전체가 아닌 손의 특정 좌표만을 복원하는 것으로 보이지 않는 부분에 대한 처리는 고려하지 않는다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 서론에 이어 2장에서는 전처리 과정으로 카메라 계산과 호모그래피 행렬을 구하는 과정을 보이고, 3장에서는 본 논문에서 제안한 가상 양시점화 기법을 통해 한 대의 카메라만으로 손 영상을 분석 및 복원하는 과정을 설명한다. 4장에서는 실험결과를 제시 하고, 마지막 5장에서 결론을 맺는다.

2. 전처리 과정

본 논문에서는 두 대의 웹캠을 통해 촬영된 영상을 바탕으로 3차원 정보를 복원하는 기본적인 원리를 기반으로 한다. 따라서 전처리 과정으로 두 대의 카메라 투영 정보를 계산하고 제안한 가상 양시점화 기법의 효율적 처리를 위하여 카메라 사이의 위치 변환 정보인 호모그래피 행렬을 계산한다.

2.1 카메라 투영정보 계산

본 연구는 보다 정확한 3차원 복원을 위해 체크무늬 정육면체를 제작, 배치하여 촬영한 영상으로부터 투영정보를 계산한다. 계산 과정은 다음과 같다. 3차원 공간에 있는 한 점 X 가 카메라를 통해 2차원 평면에 투영되었을 때 그 점을 x 라 하면 이 두 좌표 사이에는 $x = PX$ 의 관계가 성립한다. 이를 좀 더 자세히 풀어 보면 아래의 식 (1)과 같이 표현할 수 있다[6].

$$x: \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} \sim \begin{bmatrix} m_{00} & m_{01} & m_{02} & m_{03} \\ m_{10} & m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{20} & m_{21} & m_{22} & m_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ 1 \end{bmatrix} : X \quad (1)$$

위의 식 (1)을 $Am = 0$ 의 선형방정식 형태로 표현하였을 때 A 는 식 (2)와 같이 정리될 수 있다[6].

$$A = \begin{bmatrix} X_i & Y_i & Z_i & 1 & 0 & 0 & 0 & -u_i X_i & -u_i Y_i & -u_i Z_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_i & Y_i & Z_i & -v_i X_i & -v_i Y_i & -v_i Z_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

위의 식 (2)는 대응되는 좌표 하나당 2개의 식이 유도되므로 투영행렬을 계산하기 위해서는 최소 6개의 점이 필요하다. 따라서 입력받은 두 영상(체크무늬 영상)에서 얻어진 6개의 대응점 정보를 통해 A 행렬을 계산하고, 이를 SVD(특이값 분해, singular value decomposition)를 통하여 투영행렬 P 를 구한다. 같은 방법으로 두 번째 카메라의 투영행렬 P' 를 구한다. P 와 P' 가 구해지면 삼각화 기법(triangulation method)을 통해 3차원 좌표를 계산한다[6]. 삼각화 기법은 3.2절에서 설명한다.

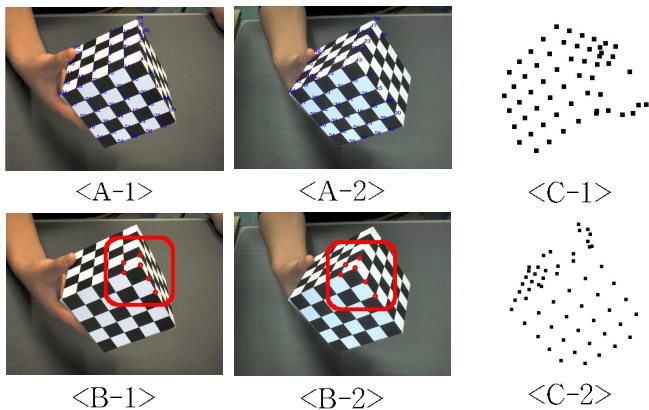


그림 1. 카메라 투영정보 계산 과정 및 결과

입력 받은 두 영상에서 찾아낸 대응점(그림 1. A-1, A-2)들 중 임의의 6개 포인트를 선택하여 (그림 1. B-1, B-2) 계산되어진 투영행렬 P, P' 를 이용하여 입력 영상의 3차원 정보를 얻어낸다(그림 1. C-1, C-2).

표 1. 계산된 투영 행렬 P, P'

P	$\begin{bmatrix} -4.04050 & 2.79192 & 1.40805 & 395.76589 \\ 2.57310 & 4.31655 & -2.33634 & 155.14639 \\ 0.00247 & 0.00136 & 0.00420 & 1.00000 \end{bmatrix}$
P'	$\begin{bmatrix} -2.86427 & 3.29969 & 2.90403 & 357.66419 \\ 2.81439 & 4.37221 & -2.29926 & 162.64447 \\ 0.00444 & 0.00089 & 0.00446 & 1.00000 \end{bmatrix}$

표 1은 본 논문에서 구성한 실험 환경을 바탕으로 계산된 두 카메라의 투영 행렬 결과이다.

2.2 호모그래피 행렬 계산

다음으로 가상 양시점화를 통한 효율적 3차원 손 좌표 복원을 위해 두 카메라사이의 변환 행렬인 호모그래피 행렬을 계산한다. 이는 입력받은 두 장의 손 영상으로부터 특징점(feature point)과 대응점(correspondence point)을 구하고 이로부터 두 카메라 사이의 변환 관계식인 호모그래피 행렬을 다음과 같이 구한다[6][7].

첫 번째 영상에서 검출된 한 점을 x_i , 이에 대응되는 다음 영상에서의 한 점을 x'_i 라고 할 때, 두 좌표 사이에는 $x'_i = Hx_i$ 과 같은 관계가 성립한다. $x'_i = Hx_i$ 의 관계는 $x'_i \times Hx_i = 0$ 와 같이 표현되고 이를 풀어서 나열하면,

$$x_i = (u_i, v_i, w_i)^T, x'_i = (u'_i, v'_i, w'_i)^T, H = \begin{bmatrix} h^{1T} \\ h^{2T} \\ h^{3T} \end{bmatrix} \text{ 일 때,}$$

아래 식 (3)으로 정리된다.

$$x'_i \times Hx_i = \begin{bmatrix} v'_i h^{3T} x_i - w'_i h^{2T} x_i \\ w'_i h^{1T} x_i - u'_i h^{3T} x_i \\ u'_i h^{2T} x_i - v'_i h^{1T} x_i \end{bmatrix} \quad (3)$$

이를 $A_i h = 0$ 의 형태로 정리하면 식 (4)와 같다[6].

$$\begin{bmatrix} 0^T & -w'_i x_i^T & v'_i x_i^T \\ w'_i x_i^T & 0^T & w'_i x_i^T \\ -v'_i x_i^T & u'_i x_i^T & 0^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \end{bmatrix} = 0 \quad (4)$$

n 개의 대응점에 부합하는 A_i 행렬을 구하고 이를 SVD하여 최종적인 호모그래피 행렬 H 를 계산한다. 이 때 호모그래피 행렬의 정확성을 높이기 위하여 RANSAC 알고리즘을 적용한다[6]. 이는 계산된 호모그래피 행렬의 오차($\sum_i d(x_i, H^{-1}x'_i)^2 + d(Hx_i, x'_i)^2$)를 높이는 잘못된 대응점들(outliers)들을 찾아 제거하거나 올바른 대응점(inliers)을 찾아 보다 정확한 호모그래피 행렬을 계산하는 방법이다.



그림 2. 호모그래피 행렬 연산을 위한 입력 영상

그림 2는 두 대의 카메라로부터 입력받은 손 영상으로 이로부터 특징점과 대응점을 찾아 위의 연산과정을 통해 호모그래피 행렬을 계산하였다. 계산된 호모그래피 행렬 H 의 예는 다음과 같다.

표 2. 계산된 호모그래피 행렬 H

$\begin{bmatrix} -0.52197 & 0.04820 & -72.37885 \\ 0.01639 & -0.56503 & -6.74684 \\ 0.00016 & -0.00001 & -0.61360 \end{bmatrix}$
--

3. 가상 양시점화 기법

전처리 과정을 통해 카메라 정보, 호모그래피 행렬이 계산되면 실시간으로 입력받은 손 영상 좌표의 효율적 3차원 복원 과정이 수행되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 손 영상의 실시간 3차원 복원을 위하여 두 대의 카메라를 사용하는 환경이 아닌 한 대의 카메라를 이용하여 두 대의 카메라를 이용할 때와 같은 결과를 얻는 가상 양시점화 방법을 설계하였다.

3.1 시뮬레이션 모델

가상 양시점화 기법은 3차원 손 복원 과정에서 한 대의 카메라만을 사용한다. 1번 카메라로 촬영한 영상에서 손의 특정 좌표(x_i)가 구해지면 호모그래피 행렬(H)을 통해 2번 카메라로 촬영될 손의 좌표(x'_i)를 추정하게 된다($x'_i = Hx_i$). 이러한 과정을 통해 한 대의 카메라를 통해 두 대의 카메라로 처리하는 것 같은 정확한 결과를 얻을 수 있다. 그림 3은 이러한 과정을 나타낸 것이다.

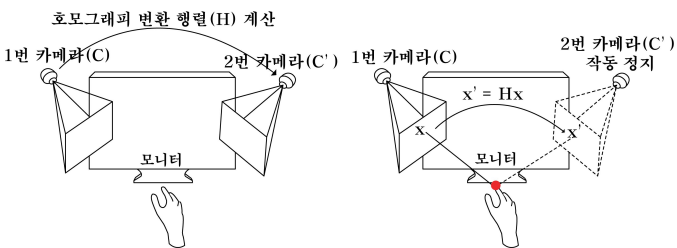
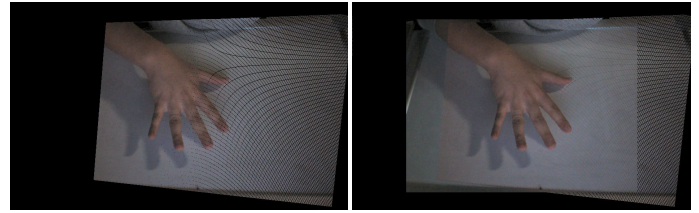


그림 3. 가상 양시점화 기법 시뮬레이션 모델

위의 과정을 바탕으로 실시간으로 처리되는 3차원 손 좌표 복원 과정에서는 두 대의 카메라가 아닌 한 대의 카메라만으로 모든 처리과정이 진행된다. 이는 손 영상의 3차원 복원 과정에서 발생할 수 있는 불필요한 연산을 최소화하기 위한 것으로 기존의 3차원 핸드 인터페이스와 비교하여 정확성과 효율성을 높일 수 있는 하나의 방법이다.

이러한 조건이 만족되기 위해서는 호모그래피 행렬을 통해 추정되는 좌표 값이 두 번째 카메라로 촬영되는 좌표 값과 일치하여야만 정확한 3차원 복원 과정이 이루어질 수 있다. 그림 4는 앞서 그림 2의 <A-1> 입력 영상으로부터 호모그래피 행렬 연산을 통해 얻어진 결과가 <A-2>의 영상과 유사한지 여부를 나타낸 결과이다.



<A-1> <A-2>

그림 4. 호모그래피 행렬 연산 결과

그림 4의 A-1은 호모그래피 행렬을 통해 계산된 결과이다. 그리고 그림 2의 A-2에 호모그래피 행렬을 곱하여 얻어진 결과<그림 4, A-1>를 합성하여 나타낸 결과가 A-2이다. 그림을 보면 알 수 있듯이 호모그래피 변환 영상으로 표현되지 않는 원 영상과의 합성영역이 자연스럽게 정합됨을 확인할 수 있다(그림 4, A-2의 선택영역). 또한 4장의 실험 과정에서 오차 범위가 미세함을 보여줄 것이다.

이러한 과정을 통해 마치 두 대의 카메라를 통해 추출된 것과 같은 손 영상의 두 좌표가 유도되면 앞서 전처리 과정을 통해 계산된 카메라 정보를 바탕으로 3차원 복원을 수행한다.

3.2 가상 양시점화를 통한 3차원 복원

전처리 과정을 통해 구해진 카메라의 투영 정보와 호모그래피 행렬, 그리고 한 대 카메라로부터 검출된 손 좌표와 가상 양시점화 기법을 통해 계산된 손 좌표가 모두 구해지면 삼각화 기법(triangulation method)을 통해 3차원 손 좌표를 계산한다[6][8].

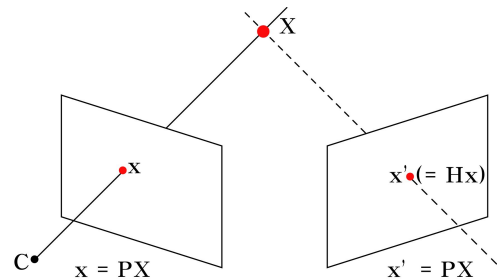


그림 5. 삼각화 기법을 통한 대응점의 3차원 복원

그림 5와 같이 한 대의 카메라로부터 투영된 좌표와 가상 양시점화를 통해 유도된 투영좌표를 각각 x , $x' (= Hx)$, 각 카메라의 투영행렬을 P, P' , 대응점의 3차원 좌표를 X 라 할 때 이는 $x = PX, x' = P'X$ 의 관계를 가지며 $x \times PX = 0$ 식과 $x' \times P'X = 0$ 식으로 유도 할 수 있다. 이를 $AX = 0$ 의 선형 방정식으로 정리하면 A 는 다음 식 (5)과 같다[6].

$$x_i = (u_i, v_i, w_i)^T, x'_i = (u'_i, v'_i, w'_i)^T, H = \begin{bmatrix} h^{1T} \\ h^{2T} \\ h^{3T} \end{bmatrix} \text{ 일 때,}$$

$$A = \begin{bmatrix} up^{3T} - p^{1T} \\ vp^{3T} - p^{2T} \\ u'p'^{3T} - p'^{1T} \\ v'p'^{3T} - p'^{2T} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} up^{3T} - p^{1T} \\ vp^{3T} - p^{2T} \\ \frac{h^1 \cdot x}{h^3 \cdot x} p'^{3T} - p'^{1T} \\ \frac{h^2 \cdot x}{h^3 \cdot x} p'^{3T} - p'^{2T} \end{bmatrix} \quad (5)$$

입력 손 영상에서 대응되는 두 좌표($x, x' (=Hx)$)와 투영행렬을 통해 행렬 A 를 계산한 후, 이를 SVD하여 3차원 좌표 X 를 계산한다.

위와 같이 전처리 과정을 통해 계산된 투영행렬 P 와 P' , 매 프레임 바뀔 때 마다 변화 되는 투영좌표 x 의 정보만 있다면 가상의 두 번째 카메라로부터 투영되는 좌표 x' 에 대한 정보를 유도할 수 있으며 이를 바탕으로 정확한 3차원 좌표 정보를 효율적으로 계산할 수 있다.

카메라 투영정보 계산과 호모그래피 행렬 연산 과정은 손의 3차원 복원과정에 있어 한번만 수행하면 되는 것으로 전처리 과정에서 수행된다. 그리고 실시간으로 처리되는 손의 3차원 좌표 복원 과정에서는 제안한 가상 양시점화 방법을 통해 한 대의 카메라만으로 두 대의 카메라를 사용하는 것과 동일한 결과를 얻어 내므로써 매우 효과적으로 계산량을 감소시킬 수 있다. 뿐만 아니라 특징점과 대응점을 찾는 과정에서의 비효율적인 연산 또한 줄일 수 있다. 이로 인하여 좀 더 빠르고 효과적인 3차원 복원이 가능하게 됨으로써 지금까지 여러 연구를 통해 제안된 방법들보다 효율적인 방법이 될 것이라고 기대한다. 다음 그림 6은 이러한 일련의 과정을 요약한 것이다.

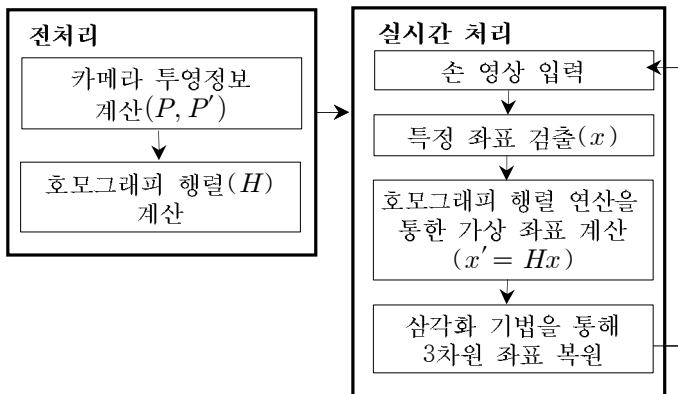


그림 6. 가상 양시점화 기법 처리과정

전처리 과정은 물리적으로 보다 정확한 3차원 정보 유도를 위한 것으로 계산된 투영정보와 호모그래피 행렬이 존재한다면 장소와 환경에 영향을 받지 않는 일반화 된 알고리즘으로써 다양한 3차원 핸드인터페이스 시스템에서 활용 가능할 것으로 생각한다.

4. 실험 및 검토

본 논문에서의 실험은 두 가지 단계로 나누어 진행하였다. 우선 전처리 과정에서 가상 양시점화의 정확성을 높이는 중요한 과정 중 하나인 호모그래피 행렬 계산의 정확성을 실험하였고, 두 번째로 가상 양시점화를 통한

손의 3차원 복원 과정의 정확성을 실험하였다.

실험 PC 사양은 Intel core2 Duo CPU, Memory DDR2 1Gbyte이고 Lebeca pro USB web-cam을 사용하였으며, Visual C++ 2005, MFC, OpenCV 라이브러리를 이용하여 구현하였다.

두 대의 웹캠을 임의의 위치에 설정하고 제작한 체크 무늬 패턴의 정육면체 객체를 통해 카메라의 투영 정보를 계산하였으며, 또한 두 대의 웹캠을 통해 촬영된 손 영상을 바탕으로 호모그래피 행렬을 계산하였다. 이를 바탕으로 실시간으로 입력되는 손 좌표의 3차원 복원 과정을 한 대의 카메라와 사전에 계산된 각 카메라의 투영행렬과 호모그래피 행렬을 통해 구현하였다.

아래 그림 7과 표 3은 두 번째 카메라로 손의 좌표를 촬영하였을 때의 좌표와 호모그래피 행렬을 통해 추정된 손 좌표와의 차이를 나타낸 것으로 전체 에러의 합은 6.54378픽셀이고, 평균 오차는 0.654378픽셀, 최대 오차값은 1.466249로 활용하기에 큰 무리가 없음을 확인할 수 있다. 여기서 오차는 유클리안 거리 공식을 통해 계산하였다.

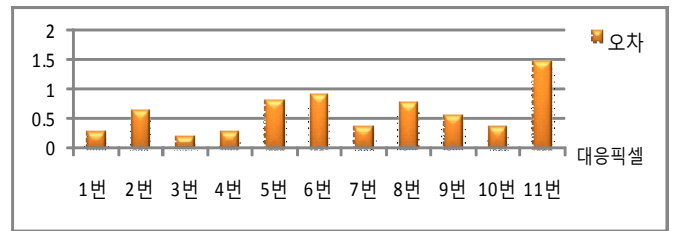


그림 7. RANSAC을 통한 호모그래피 오차 그래프

표 3. 호모그래피 행렬 오차 계산(단위 : 픽셀)

대응점 수	에러 합계	평균 오차	최대 오차 값
11개	6.54378	0.59489	1.466249

또한 그림 8과 표 4는 두 대의 카메라를 통해 투영된 손 영상의 대응점 정보를 계산된 카메라 투영행렬을 통해 3차원으로 복원한 결과와 가상 양시점화를 통해 추정된 두 번째 카메라의 투영 좌표를 바탕으로 복원된 3차원 좌표 사이의 오차를 계산한 것으로 두 대의 카메라를 활용하지 않고도 제안한 가상 양시점화 방법을 통해 비교적 정확한 3차원 좌표를 복원하였음을 확인할 수 있다. 여기서 오차는 유클리안 거리 공식을 통해 계산하였다.

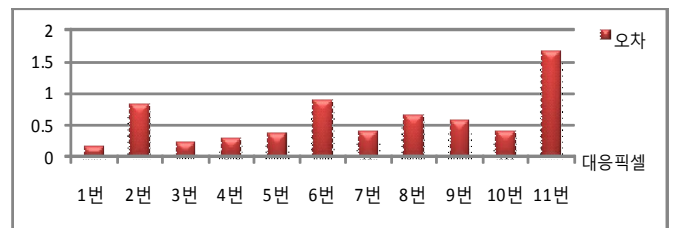


그림 8 가상 양시점화의 3차원 복원 오차

표 4. 양 시점 과 가상 양시점화 간의 3차원 복원 오차 계산

복원 좌표 수	에러 합계	평균 오차	최대 오차 값
11개	6.438983	0.585362	0.81912

표 5. 3차원 대응점 복원 오차 계산

대응점 No.	오차
1	0.159136
2	0.819126
3	0.234585
4	0.291415
5	0.366717
6	0.884555
7	0.397151
8	0.667608
9	0.551108
10	0.404229
11	1.663353

표 5는 입력 손 영상의 11개 특징점들을 각각 복원하여 유클리안 거리 계산을 통해 오차를 계산한 것으로 전체적인 오차값이 1.0을 넘지 않는 것을 확인할 수 있다.

5. 결론

최근 들어 급속히 발전하고 있고, 꾸준히 연구되고 있는 HCI 기술에 있어, 손 인터페이스에 관한 많은 연구들은 2차원 손동작 인식에 관한 연구들이 큰 비중을 차지하고 있으며, 3차원 손동작 분석에 대한 연구는 2차원 분석에 비해 미흡한 실정이다. 본 연구를 통해 3차원 제어에 있어 효과적인 손 인터페이스 구현을 실시간으로 처리하는 과정에서 보다 효과적이고 효율적인 대안이 될 것이라 기대해 본다. 정확한 3차원 복원을 위해서 필요한 장비들이 많았던 문제들과 한 대의 카메라로 3차원 핸드인터페이스를 구성하는데 정확성이 다소 떨어지는 문제들을 동시에 해결해 줌으로써 보다 다양하고 정확한 실시간의 3차원 손 인터페이스를 구성하는 새로운 시도가 될 것이라고 생각한다.

나아가 얼굴, 몸동작 등 다른 여러 비언어적 요소를 3차원으로 분석할 수 있는 새로운 방안이 될 것이다. 또한 현재 많은 관심이 주목되고 있는 3D 분야뿐 아니라 앞으로 접하게 될 홀로그램 영상 분야에서 사용되어질 인터페이스 구현에 쉽게 적용될 수 있을 것이라고 전망한다. 또한 본 연구에서 제안한 가상 양시점화 기법을 게임이나 가상현실 시스템과 같은 응용 프로그램에 적용함으로써 고가의 장비 없이도 누구나 손쉽게 가상현실 시스템을 이용할 수 있는 하나의 방향을 제시할 수 있을 것으로 생각한다.

[참고문헌]

[1] 이동하, 이문희, “인간과 컴퓨터 상호작용(HCI) 기술 정책 동향”, 전자공학회지, 제34권, 제6호, pp. 628-637, 2007.
 [2] 강애경, 3차원 그래픽 객체 제어를 위한 영상처리 기반의 핸드인터페이스, 동국대학교 석사학위논문, 2008.
 [3] T. Maung, "Real-Time Hand Tracking and Gesture Recognition System Using Neural Networks," World

Academy of Science, Engineering and Technology 50 ,2009

[4] S.U. Lee and I. Cohen, "3D Hand Reconstruction from a Monocular View," Proceedings of International Conference on Pattern Recognition, Vol. 3, pp. 310-313, 2004.
 [5] M. Lee, R. Green and M. Billinghurst, "3D Natural Hand Interaction for AR Applications," Image and Vision Computing New Zealand 23rd International Conference, 2008.
 [6] R. Hartley and A. Zisserman, "Multiple View Geometry In Computer Vision," 2003
 [7] 정정훈, “대응점을 이용한 퍼면 불활 알고리즘 및 에 피폴라 기하 해석에의 응용”, 중앙대학교, 영상처리 및 이해에 관한 워크샵 논문집, 2003.
 [8] A. Argyros, and I.A. Lourakis, "Binocular Hand Tracking and Reconstruction Based on 2D Shape Matching," Proceedings of International Conference on Pattern Recognition, Vol. 1, pp. 207-210, 2006.