

이동 프로젝터 투사영역의 폐회로 기반 위치추적에 의한 인터랙티브 투사

(Interactive Projection by Closed-loop based Position Tracking of Projected Area for Portable Projector)

박지영^{*} 이선민^{**} 김명희^{***}
(Ji-Young Park) (Seon-Min Rhee) (Myoung-Hee Kim)

요약 본 연구에서는 영상을 대형으로 디스플레이 함과 동시에 사용자가 보다 세밀하게 관찰하고자 하는 관심영역을 이동 프로젝터로 투사함으로써 개선된 해상도와 밝기로 디스플레이 하는 인터랙티브 투사 기법을 제안한다. 사용자는 이동 프로젝터를 들고 움직이며 관심영역의 위치를 변경하게 되는데 이 때 적절히 투사영상을 업데이트하기 위해 폐회로(closed-loop) 기반 추적 방법을 제안한다. 먼저 대형 디스플레이 영상에 이동 프로젝터의 위치를 나타내는 표시자를 삽입하고 이를 이동 프로젝터에 부착된 카메라로 획득한 연속영상에서 추출한다. 표시자의 중심이 항상 카메라 영상의 중심과 일치하도록 하는 제약조건 하에서 이를 만족시키기 위해 대형 디스플레이 상에서 표시자의 위치를 지속적으로 업데이트 한다. 이렇게 계산된 표시자의 위치에 해당하는 사각형 영역을 이동 프로젝터가 투사하게 되며 이때 카메라와 이동 프로젝터 사이의 투사변환을 적용하여 왜평한다. 표시자 분할은 총 네 단계로 이루어지며 카메라 영상에 대해 HSI 기반 전처리, 직선 탐지, 사각형 조건 검사, 교차비(cross-ratio) 검사를 거쳐 최종 네 개의 코너점이 결정된다. 제안된 투사 기법을 적용하여 구현한 인터랙티브 투사 시스템은 약 24fps의 처리속도를 지원하며 사용자 평가 결과 높은 유용성을 나타냈다.

키워드 : 이동 프로젝터 추적, 인터랙티브 투사, 표시자 분할

Abstract We propose an interactive projection technique to display details of a large image in a high resolution and brightness by tracking a portable projector. A closed-loop based tracking method is presented to update the projected image while a user changes the position of the detail area by moving the portable projector. A marker is embedded in the large image to indicate the position to be occupied by the detail image projected by the portable projector. The marker is extracted in sequential images acquired by a camera attached to the portable projector. The marker position in the large display image is updated under a constraint that the center positions of marker and camera frame coincide in every camera frame. The image and projective transformation for warping are calculated using the marker position and shape in the camera frame. The marker's four corner points are determined by a four-step segmentation process which consists of camera image preprocessing based on HSI, edge extraction by Hough transformation, quadrangle test, and cross-ratio test. The interactive projection system implemented by the proposed method performs at about 24fps. In the user study, the overall feedback about the system usability was very high.

Key words : Portable projector tracking, interactive projection, marker segmentation

* 본 연구는 지식경제부와 한국산업기술진흥원의 전략기술인력양성사업 및 지식경제부와 문화체육관광부의 산업원천기술개발사업 지원에 의해 수행되었음 (2008-F-033-02, e-Entertainment를 위한 실시간 물리 시뮬레이션 기술 개발)

논문접수 : 2009년 4월 6일
심사완료 : 2009년 10월 19일

^{*} 학생회원 : 이화여자대학교 컴퓨터공학과
lemie@ewhain.net

^{**} 정회원 : University of Southern California Computer Graphics and Immersive Technology Lab. Postdoctoral researcher
seonminr@usc.edu

^{***} 종신회원 : 이화여자대학교 컴퓨터공학과 교수
mhkim@ewha.ac.kr

Copyright©2010 한국정보과학회 : 개인 목적이나 교육 목적인 경우, 이 저작물의 전체 또는 일부에 대한 복사본 혹은 디지털 사본의 제작을 허가합니다. 이 때, 사본은 상업적 수단으로 사용할 수 없으며 첫 페이지에 본 문구와 출처를 반드시 명시해야 합니다. 이 외의 목적으로 복제, 배포, 출판, 전송 등 모든 유형의 사용행위를 하는 경우에 대하여는 사전에 허가를 얻고 비용을 지불해야 합니다.

정보과학회논문지 : 소프트웨어 및 응용 제37권 제1호(2010.1)

1. 서론

최근 박물관, 미술관, 도서관 등의 문화기반시설에서는 이용자들이 효과적으로 지식자원에 접근할 수 있도록 대형 디스플레이를 활발히 도입하고 있으며 교육기관 및 교회 등에서도 대형 디스플레이는 정보를 공유하고 메시지를 전달하는데 효과적으로 사용되고 있다. 산업현장에서도 시뮬레이션 및 협업환경을 구축하는데 대형 디스플레이가 핵심적인 역할을 수행하고 있으며 작업의 효율성 증대와 생산비용 절감이라는 긍정적인 효과를 이끌어내고 있다. 이 같은 다양한 사례를 중심으로 대형 디스플레이와 사용자의 상호작용을 어떻게 효과적으로 구현할 것인가에 대한 다양한 연구가 발표되고 있다. 특히 최근에는 휴대폰, PDA 등과 같은 일상생활에서 사용되는 이동형 기기를 사용하는 예가 늘어나고 있다. 초기에는 이동형 기기를 사용하여 단순히 기존의 마우스와 같은 포인팅 디바이스를 대체하는 인터랙션을 구현한 시도가 대부분이었으나 디스플레이 하드웨어가 발전하면서 이동형 기기의 내장 디스플레이를 인터랙션에 사용하여 대형 디스플레이의 단점을 개선하는 상호보완적 디스플레이가 시도되고 있다. 대형 디스플레이는 전체 영상을 한눈에 파악하는데 효과적이거나 밝기나 해상도(단위면적당 화소 수)가 일부 영역을 세밀하게 관찰하기에는 충분하지 않다. 반면에 이동형 디스플레이는 크기가 작지만 높은 해상도와 밝기 때문에 전체 영상보다는 부분 영역을 관찰하기에 적합하다. 그러므로 두 디스플레이의 결합은 사용자로 하여금 전체를 한눈에 파악함과 동시에 특정 관심 영역은 개선된 화질로 제공할 수 있는 이상적인 작업환경을 구축할 수 있다. 실제로 대형 디스플레이 영상의 일부 영역을 태블릿 PC나 소형 프로젝터 등 개인 디스플레이를 통해 제공하는 연구가 발표된 바 있다[1-3]. 이동형 프로젝터의 경우 실제 휴대폰에 내장될[4] 정도로 구성 하드웨어가 초소형화 되어 응용범위가 점차 확대되고 있으며 대형 디스플레이와 결합하는 경우, 대형 화면 위에 부분영상이 덧입혀짐으로써 마치 한 영상을 보는 것과 같은 자연스러운 표현이 가능하고 덧입혀지는 부분영역의 크기와 형태를 필요에 따라 조정할 수 있다는 장점을 가진다.

이동형 프로젝터를 대형 디스플레이와 결합하는데 있어 가장 중요한 문제는 대형 디스플레이 상에서 이동형 프로젝터 투사영역의 위치와 형태를 계산하여 그에 적합한 영상이 투사되도록 함으로써 덧입혀지는 영역에서 대형 영상과 부분 영상이 자연스럽게 혼합되도록 하는 것이다. 기존의 시도들은 특수 트래킹 장비를 사용하거나 공간내에 복잡한 하드웨어 셋업을 요구한다는 점에서 제한된 어플리케이션에만 적용이 가능하다는 한계가

있다. 이에 본 연구에서는 현재 많은 이동형 기기에 기본적으로 탑재되는 카메라를 이용할 수 있는 위치추적 방법을 제안하고 그에 기반하여 한 영상을 대형으로 디스플레이 함과 동시에 특정 세부영역을 이동 프로젝터로 투사함으로써 사용자 관심영역을 개선된 해상도와 밝기로 디스플레이 하는 인터랙티브 투사 기법을 제안한다. 이를 위해 카메라를 이동 프로젝터에 부착하고 이동 프로젝터의 투사영상의 위치를 가리키는 표시자를 대형 투사영상에 삽입한다. 사용자가 이동 프로젝터를 들고 이동하는 동안 획득되는 카메라 연속영상에서 표시자를 탐지하여 그 위치를 폐회로(closed-loop) 방식으로 제어함으로써 이동 프로젝터 투사영역의 위치를 계산하게 된다. 제안된 기법은 하드웨어 구성을 최소화함에 따라 두 가지 문제를 해결해야 한다. 첫째는 카메라 영상에서 정확하게 표시자를 추출하는 것이며 둘째는 표시자가 사용자 시야를 방해하지 않도록 해야 하는 것이다. 그에 따라 본 연구에서는 카메라 영상에서 정확하게 표시자가 추출하기 위한 표시자의 정의와 그에 적합한 일련의 분할 단계를 제안하였다. 또한 사용자 평가를 통해 표시자가 사용자 시야를 어느 정도 방해하는지에 대한 자료를 수집하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 대형 디스플레이 인터랙션을 위한 휴대용 기기 위치추적의 기존 연구에 대해 살펴본다. 3장에서는 제안한 이동형 프로젝터 투사영역 추적 기법의 하드웨어 구성요소를 소개하고 4장에서는 위치추적 알고리즘과 인터랙티브 투사 방법을 세부적으로 설명한다. 5장에서는 구현결과와 실험결과를 제시하고 6장에서 결론과 향후연구에 대해 서술한다.

2. 관련 연구

본 장에서는 대형 디스플레이와 소형 디스플레이를 결합하여 대형 영상의 세부영역 관찰시 밝기와 해상도를 개선하여 제공하는 사례들을 살펴보고 이때 사용된 소형 디스플레이의 위치추적 방법에 대해 알아본다.

Baudisch[5]는 대형 디스플레이 자체에 고해상도의 스크린을 내장시키는 방법으로 대형 디스플레이에서 부분영역 관찰시 낮은 해상도 문제에 대한 해결을 시도하였다. 고해상도 스크린의 위치가 고정되기 때문에 사용자가 작업중 세밀하게 관찰하고자 하는 관심영역을 고해상도 스크린 위치로 이동시키게 된다. 이 연구에서는 소형 디스플레이에 대한 위치추적이 불필요하지만 소형 디스플레이를 다른 종류로 교체하거나 위치와 크기를 변경하기 어렵다는 단점이 있다. Sanneblad[1]은 태블릿 PC와 대형 디스플레이를 결합하여 사용자가 태블릿 PC를 대형 디스플레이 위의 원하는 위치에 걸쳐놓도록 함으로써 사용자의 자유로운 이동을 지원하고 전체영상

에서 관심영역의 위치 파악과 변경이 직관적이라는 장점이 있다. 그러나 위치추적을 위한 초음파 트래킹 장비가 요구되며 태블릿 PC의 디스플레이 크기가 고정되어 있기 때문에 관심영역의 형태나 크기를 자유롭게 조정할 수 없다는 단점이 있다.

이동 프로젝터를 사용한 예로서 Cao[2]는 두 개의 이동 프로젝터를 이용하여 각각 전체영상과 부분영상을 투사하도록 하는 어플리케이션을 제안하였다. 각 프로젝터에는 적외선 기반 비전 트래킹을 위해 표시자가 부착되며 이를 공간상에 설치된 카메라를 통해 획득된 영상에서 탐지함으로써 3차원 위치를 계산하였다. 계산된 위치 및 회전 값은 투사영상에 적용되어 두 프로젝터의 투사결과가 자연스럽게 연결되게 된다. 이는 공간 전체를 대상으로 3차원 트래킹 시스템이 지원된다는 가정하에 구현되었기 때문에 실제 응용을 위해서는 카메라와 표시자의 설정을 포함한 복잡한 초기 설치 과정을 거쳐야 한다.

Cotting[3]은 테이블탑 디스플레이와 이동 프로젝터를 결합하였다. 이동 프로젝터 투사영역 인식을 위한 카메라는 대형 디스플레이용 프로젝터와 함께 공간의 천장에 설치하였다. 먼저 고정된 프로젝터로 전체 영상을 대형으로 디스플레이하고 사용자가 이동 프로젝터로 대형 디스플레이 상에 특정 위치에 투사를 하면 카메라 연속 영상에서 두 디스플레이의 밝기 차이를 이용하여 이동 프로젝터 투사영역의 위치를 계산하게 된다. 이 기법에서는 카메라 영상에서 이동 프로젝터 투사영역 추출을 용이하게 하기 위해 시간차를 두고 디스플레이와 카메라 영상 획득이 수행되도록 하였는데 이는 장치들을 동기화하는 복잡한 하드웨어 설정이 필요하다. 또한 카메라와 디스플레이 사이에 장애물이 있을 경우 위치추적의 정확성을 보장할 수 없기 때문에 테이블탑 환경이 아닌 수직형 디스플레이를 사용할 경우 빈번하게 발생하는 가림 현상에 대한 추가적인 문제해결이 요구된다.

살펴본 바와 같이 기존 연구들은 공통적으로 위치추적을 위한 복잡한 하드웨어 환경을 공간상에 구축하는 작업이 필요하기 때문에 초기 설정과 향후 설정 변경이 어려우며 이는 다양한 어플리케이션에의 활용도를 감소시키는 큰 원인이 된다.

3. 하드웨어 구성 및 캘리브레이션

본 연구에서는 두 개의 투사부로 구성된 디스플레이 시스템을 구축하였다. 먼저 전체영상을 디스플레이하는 투사부는 고정 프로젝터에 연결되며 전체영상의 부분영역 디스플레이를 위한 투사부는 사용자가 직접 들고 조작하는 이동 프로젝터에 연결된다. 각 프로젝터는 투사할 영상을 계산하는 PC에 연결되며 두 개의 투사부

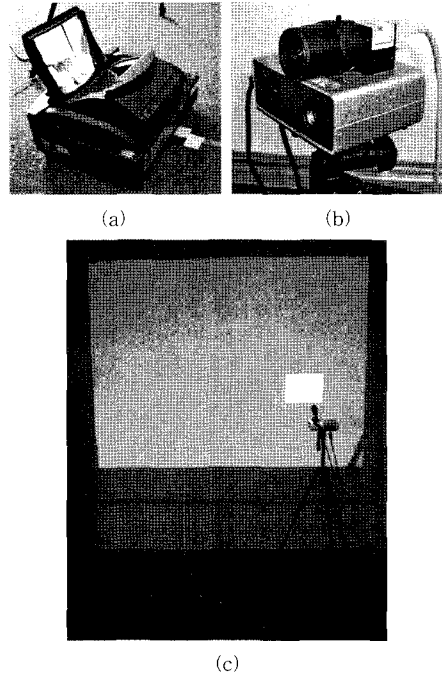


그림 1 (a) 전체영상을 투사하는 고정 프로젝터; (b) 카메라가 부착된 이동 프로젝터(Mitsubishi PK20); (c) 투사 시스템 초기화 상태

는 네트워크를 통해 서로 통신한다. 그림 1은 각 투사부의 하드웨어 셋업 및 초기화 상태를 보여준다.

이동 프로젝터에 의해 투사되는 세부영역이 정확하게 대형 투사영상 위에 겹쳐지기 위해서는 전체영상에서 이동 프로젝터가 투사할 세부영역의 위치를 알아야 한다. 본 연구에서는 세부영역의 위치를 계산하기 위해 카메라를 이동 프로젝터에 부착하고 획득된 연속영상을 사용한다. 이동 프로젝터 투사영상의 위치는 두 개의 상관관계를 계산함으로써 결정할 수 있는데 즉, 카메라 프레임과 고정 프로젝터 투사영상간의 투사변환 관계, 그리고 카메라 프레임과 이동 프로젝터 투사영상간의 투사변환 관계이다. 전자는 카메라 프레임 상의 특정 점이 대형 투사영상의 어느 점에 대응되는지를 결정하는 변환이며 시스템 구동중 모든 카메라 프레임에 대해 계산되어야 한다. 후자는 카메라 프레임 상의 점과 이동 프로젝터 영상의 점을 대응시키는 변환으로 사전 캘리브레이션 작업에 의해 미리 계산된다. 이 같은 상관관계들은 식 (1)과 같은 3×3 투사변환 행렬로 표현되며 8 자유도(degree of freedom)를 가진다.

$$\begin{pmatrix} x'w \\ y'w \\ w \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

위 식은 간략하게 $\mathbf{x}' = \mathbf{H}\mathbf{x}$ 로 표현되며 카메라 프레임과 이동 프로젝터 투사영상간 투사변환 계산의 경우 \mathbf{x}' 는 세부영상의 한 점으로서 카메라 프레임에서 \mathbf{x} 에 대응된다. 행렬 \mathbf{H} 는 다음과 같은 과정에 의해 결정된다. 먼저 카메라로 평면 캘리브레이션 패턴을 여러 방향의 뷰에서 획득한 영상을 통해 카메라의 내부 파라미터를 계산한다[6]. 다음으로 이동 프로젝터를 사용하여 캘리브레이션 패턴 영상을 평면의 투사면에 투사하고 부착된 카메라로 투사된 패턴에 대한 영상을 획득한다. 왜곡보정을 거친 후 카메라 영상과 투사영상에서 최소 8개의 대응점들을 결정한다. 이 대응점 집합에 DLT(direct linear transformation) 알고리즘[7]을 적용함으로써 최적의 \mathbf{H} 를 계산할 수 있다. 카메라 프레임과 고정 프로젝터 투사영상간 투사변환 관계는 4.2절에서 기술한다.

4. 대형투사영상 세부영역의 인터랙티브 투사

본 장에서는 제안된 이동 프로젝터 투사영역 위치추적 방법의 기본개념과 이를 적용한 인터랙티브 투사 파이프라인에 대해 세부적으로 설명한다. 투사영역 위치추적 기법은 대형 디스플레이 영상에 표시자를 삽입하고 이를 이동 프로젝터에 부착된 카메라 연속영상에서 관찰하고 특정 제약조건에 따라 표시자를 업데이트 하는 폐회로(closed-loop) 제어방식에 기반한다.

4.1 표시자의 폐회로 제어 기반 이동 프로젝터 투사영역 추적

이동 프로젝터가 투사하는 세부영상을 대형 투사영상 위에 적절히 위치시키기 위해서는 전체영상에서 이동 프로젝터 투사영역의 위치에 대응하는 부분영역을 알아야 한다. 본 논문에서는 이동 프로젝터에 부착된 카메라 연속영상에 대해 측정과 수정을 반복하는 폐회로 방식으로 위치추적 문제를 접근한다. 이는 [8]에서 제안된 휴대용 카메라를 이용한 대형 디스플레이 커서 조작기법에 착안한 것으로서 레이저 포인터와 유사하게 카메라 이동에 따라 표시자가 함께 이동하게 된다.

먼저 대형 투사영상에 표시자를 삽입한다. 표시자는

내부가 비어있는 사각형으로 이동 프로젝터 사용자로 하여금 그 내부에 영상을 투사하도록 한다. 사용자에게 의해 이동 프로젝터가 움직이게 되면 그에 따라 표시자가 이동하도록 하는데 이 같은 표시자 제어의 기본 개념은 그림 2와 같다.

카메라 프레임 상에서 표시자 중심의 위치에 따라 두 가지 상태가 존재하는데 즉, 표시자의 중심이 카메라 프레임의 중심과 일치하는 상태와 그렇지 않은 상태이다. 이 중에서 전자를 이상적인 상태로 설정하고 이를 모든 카메라 연속 프레임에서 유지하도록 한다. 만약 이동 프로젝터의 움직임에 의해 카메라 프레임 상에 나타난 표시자의 위치가 조건을 만족시키지 못할 경우에는 카메라 프레임과 대형 투사영상간 대응관계를 사용하여 대형 투사영상에서 카메라 프레임의 중심에 해당하는 좌표를 계산하고 그 위치에 표시자를 다시 그려주게 된다. 이를 통해 표시자의 중심은 다시 카메라 프레임 중심과 일치하게 된다. 사용자가 이동 프로젝터를 움직이는 동안 이 같은 과정을 매 프레임 반복함으로써 표시자의 위치를 트래킹하고 이동 프로젝터가 투사할 세부영상을 적절히 업데이트 할 수 있다.

4.2 인터랙티브 투사 파이프라인

이동 프로젝터 투사영역의 위치추적을 포함한 인터랙티브 투사 시스템의 파이프라인은 그림 3과 같다. 두 개의 투사부가 각각 전체영상과 세부영상을 디스플레이하며 네트워크를 통해 정보를 교환한다.

초기에 고정 프로젝터는 특정 위치에 표시자가 삽입된 전체영상을 디스플레이 한다. 다음으로 이동 프로젝터에 부착된 카메라가 영상획득을 시작하고 표시자가 카메라 프레임 상에 보여지게 되면 표시자의 네 개 코너점의 위치가 계산된다. 이 위치는 카메라 좌표계 상의 좌표로 표현되며 고정형 투사부로 전송되어 카메라 프레임과 대형 투사영상 사이의 투사변환 \mathbf{H}_{cc} 를 계산하는데 사용된다. 계산 방법은 2장에서 설명한 카메라와 이동 프로젝터의 캘리브레이션 방법과 유사하다. 즉, 카메라 프레임에서 네 점의 위치와 전체영상에서 표시자 코

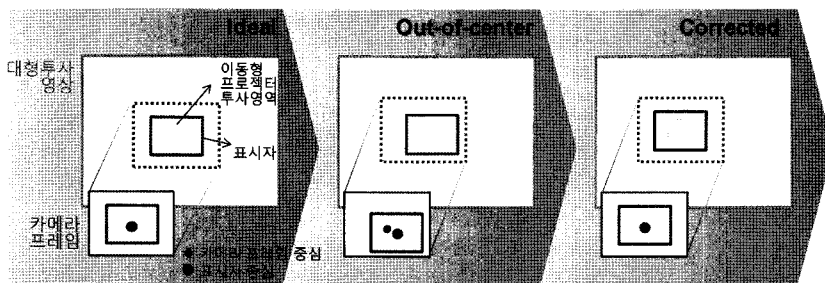


그림 2 폐회로 기반 표시자 제어

너 4개의 위치를 입력으로 투사변환 행렬을 계산한다. 카메라 프레임의 중심과 표시자의 중심이 일치해야 하는 조건을 만족하기 위해 카메라 프레임의 중심 좌표 (c)를 식 $c' = H_{cc}c$ 를 통해 대형 투사영상 좌표계 상의 점(c')으로 변환한다. c'는 표시자 중심의 새로운 위치가 되며 표시자 크기를 사용하여 전체영상에서 표시자를 다시 그려주게 된다. 또한 c'는 이동형 투사부로 전송되어 그에 해당하는 부분 영역 영상을 투사할 텍스처로 설정한다.

이동 프로젝터의 투사결과는 직사각형이 아닌 경우가 대부분이며 그에 따라 투사면에서 대형 투사영상과 이동 프로젝터 투사영상이 인접한 부분에서 자연스러운 연결을 위해 투사 텍스처를 와핑한다. 카메라 프레임에서 추출된 표시자의 네 코너점을 사전 캘리브레이션 단계에서 계산된 카메라와 이동 프로젝터 투사영상간 투사변환에 의해 이동 프로젝터 좌표계로 변환한다. 이 두 개의 좌표계로 표현된 점들을 입력으로 텍스처 변환행렬을 계산하고 이동 프로젝터의 텍스처 투사 단계에 적용한다. 이 과정을 반복함으로써 표시자는 이동 프로젝터의 움직임 즉, 투사면 상의 세부영상의 움직임에 따라 이동하며 그에 따라 자연스러운 세부영상이 디스플레이 된다.

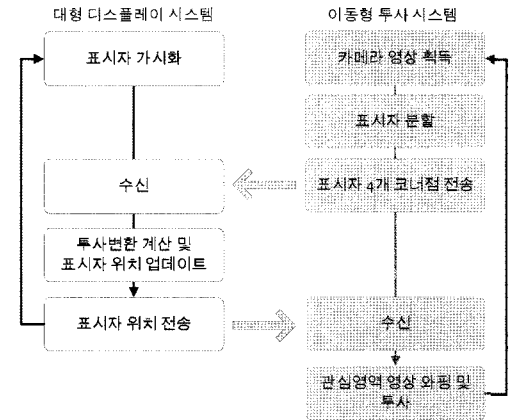


그림 3 이동 프로젝터 투사영역의 위치추적을 통한 인터랙티브 투사 파이프라인

4.3 표시자 분할

모든 카메라 프레임에서 표시자의 코너점을 추출한다. 표시자는 다양한 영상에서도 강건한 추출 결과를 보장하기 위해 그림 4(a)의 왼쪽과 같이 표시자의 테두리는 얇은 세 개의 선으로 그려지며 가운데 선의 색은 양쪽 선의 보색을 사용하였다. 그림 4는 분할과정 단계별 결과의 예를 보여주며 전체 분할과정은 다음과 같이 총

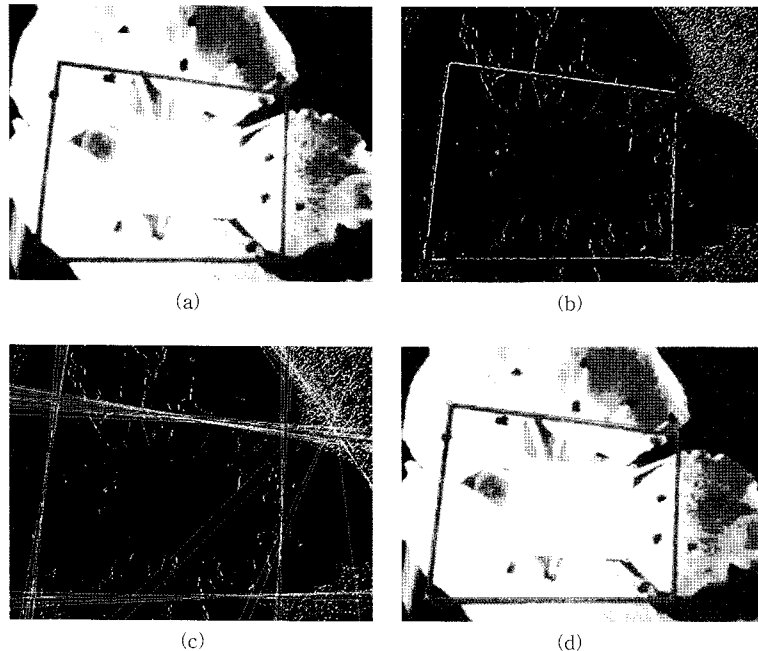


그림 4 표시자 분할 단계별 결과. (a) 왜곡보정후 카메라 영상; (b) HSI 기반 전처리 결과; (c) 허프 변환으로 추출된 직선(녹색)과 사각형 검사 및 교차비 검사를 통해 최종 결정된 직선(청색); (d) 최종 결정된 직선들의 교차점을 연결하여 나타난 표시자(적색 사각형) 및 이동 프로젝터 투사영역(황색 사각형)

네 단계인 HSI 기반 전처리, 직선 탐지, 사각형 조건 검사, 교차비(cross-ratio) 검사로 구성된다. 본 연구에서는 카메라 연속 프레임에서 표시자의 위치 변화가 크더라도 강건한 추출결과를 제공하기 위해 전역적 탐색을 사용하였으며 실제 구현 결과, 실시간 처리를 충분히 지원하는 것으로 나타났다.

4.3.1 HSI 기반 전처리

표시자는 두 개의 보색으로 그려지기 때문에 먼저 모든 픽셀을 검사하여 주변과 색상차이가 가장 큰 픽셀들을 추출한다. 우선 카메라 영상을 HSI(Hue-Saturation-Intensity) 공간으로 변환하고 가우시안(Gaussian) 필터를 적용한 후 색상 채널에 대해서 소벨(Sobel) 연산을 적용한다. 대부분 이동 프로젝터 투사영상이 대형 투사영상보다 훨씬 밝기 때문에 그림 4(a)와 같이 카메라 영상에서 백색에 가까운 사각형 영역이 나타나게 된다. 이 밝은 영역과 이웃 영역은 색상차이가 크기 때문에 사각형 영역의 경계부분에서 많은 픽셀들이 추출되어 다음 단계인 직선 탐지를 적용할 경우 잘못된 직선들이 추출되게 된다. 이를 방지하기 위해 이동 프로젝터 투사영역 외곽부의 높은 강도 픽셀들을 제거한다. 그러나 이 같은 전처리 후에도 일부 픽셀들이 남게 되는데 이들로 인해 생성되는 직선은 향후 탐지된 직선들로 구성되는 사각형의 형태를 검사함으로써 제거된다. 그림 4(b)를 살펴보면 표시자에 해당하는 픽셀들의 대부분이 추출되었으며 그 내부의 이동 프로젝터 투사영역 경계부분에 일부 픽셀들이 남아있는 것을 볼 수 있다.

4.3.2 직선 탐지

전 단계의 결과 이진 영상에 허프(Hough) 변환을 적용하여 직선을 추출한다. 추출된 직선은 허프 파라미터 ρ_i 와 θ_i 로 표현되며 리스트 형태로 저장된다. 그림 4(c)의 녹색 선들이 본 단계의 결과이다. 이 단계에서 추출된 직선들에 대해 다음으로 설명할 두 개의 반복적인 검사를 적용하여 표시자에 해당하는 최종 네 개의 선을 결정한다. 즉, 추출된 직선들 중 허프 변환시 가장 많은 점들이 분포된 순서로 4개씩을 선정하여 검사를 수행하고 모든 조건을 만족하는 최초 네 개의 직선이 발견될 때까지 선정과 검사를 반복한다. 즉, 모든 조건을 만족함과 동시에 영상에서 가장 뚜렷하게 나타난 직선으로 최종 표시자 위치가 결정되도록 한다.

4.3.3 사각형 조건 검사

선정된 네 개의 선이 적절한 사각형을 구성하는지 검사한다. 본 논문에서는 Zhang의 사각형 탐지 알고리즘 [9]을 본 연구에 최적화하여 사용한다. 적절한 사각형이 만족해야 하는 세가지 조건은 다음과 같다.

i) 마주보는 두 선은 ρ_i 값에서 큰 차이를, θ_i 값에서 작은 차이를 가진다.

ii) 이웃하는 두 선은 θ_i 값에서 큰 차이를 가진다.

iii) 사각형의 각 선분 상에 존재하는 픽셀은 주변과 색상 차이가 크다.

실제 구현 상에서 θ_i 를 위한 차이 임계값은 30°로 설정하고 ρ_i 를 위한 임계값은 표시자가 이동 프로젝터 투사영역을 둘러싸는 것을 가정하므로 카메라 프레임에서 이동 프로젝터 투사영역의 외곽선 중 길이가 가장 짧은 선분의 길이로 설정한다. 세가지 조건 중 색상 차이를 고려하는 마지막 조건은 허프 변환을 통해 추출되는 직선의 길이가 유한하지 않기 때문에 필요하다. 주어진 네 개 직선이 처음 두 개의 조건에 대한 검사를 통과하면 네 개의 교차점을 계산하고 연결함으로써 네 개의 선분을 구성한다. 다음으로 첫 번째 전처리 단계의 결과 이진영상을 참고하여 각 선분 상에 존재하는 픽셀들이 참의 값을 가지는지 검사하게 된다.

4.3.4 교차비(cross-ratio) 검사

본 검사의 목적은 사각형 검사를 통과한 선들 중 표시자에 해당하는 선들만을 추출해내는 것이다. 이를 위해 전단계에서 주어진 네 개의 교차점들의 교차비와 표시자의 교차비의 유사성을 검사한다. 교차비는 길이의 비율로서 투사변환 하에서 불변인 특성이며 [7]. 4개의 점 $x_i, i = 1, \dots, 4$ 가 투사평면 상에 존재할 때 그들의 교차비는 다음 식과 같이 정의된다.

$$CR(x_1, x_2, x_3, x_4) = \frac{|x_1x_2||x_3x_4|}{|x_1x_3||x_2x_4|} \quad (2)$$

$|x_i x_j|$ 는 x_i 와 x_j 간의 거리이다. 만약 두 교차비가 주어진 임계값을 초과하면 주어진 후보점들은 표시자에 해당되지 않는 것으로 판단하며 다음 네 개의 후보점들을 선택하여 전 단계로 돌아가 사각형 조건 검사를 수행한다. 이 작업은 두 개의 검사를 모두 만족하는 네 개의 직선을 찾을 때까지 계속된다. 그림 4(c)의 청색 직선들은 상기에 설명된 알고리즘에 의해 결정된 표시자 직선이다. 이 네 개의 직선의 교점을 계산함으로써 적색 점으로 표시된 네 개의 모서리 점이 결정되며 이는 카메라 프레임과 대형 투사영상 간 투사변환 관계를 계산하는데 사용된다.

5. 구현 및 실험 결과

본 장에서는 제안된 인터랙티브 투사기법을 실제 고정 프로젝터와 이동 프로젝터를 사용하여 구현한 결과를 제시한다. 투사된 대형 영상의 크기는 가로 220cm, 세로 165cm이며 이동 프로젝터는 표시자의 위치에 해당하는 부분영역 영상을 투사하게 된다. 구현 결과와 함께 고정 프로젝터에 의한 전체영상과 이동 프로젝터에 의한 세부

영상의 화질을 해상도와 밝기 면에서 비교하고 각 단계 별 수행시간 및 사용자 평가 결과를 제시한다.

또한 본 연구에서는 밝기와 해상도가 서로 다른 두 종류의 이동 프로젝터를 사용하여 투사결과를 비교하였다. 사용된 하드웨어 정보는 아래 목록과 같다. 프로젝터는 최적의 투사결과를 위해 보장되어야 하는 투사면으로부터의 최소거리와 그에 따른 투사결과의 최소 크기가 존재하는데, 이는 표시자의 크기를 설정할 때 고려해야 하는 사항으로서 표시자가 최소 투사영역 크기보다 지나치게 작거나 클 경우 영상이 번지는 결과가 나타나기 때문이다. 각 이동 프로젝터의 최소 투사영상 대각선 크기와 스크린 표면으로부터의 거리는 V-339의 경우 약 38cm, 60cm 이고 PK20의 경우 30cm, 38cm 이다. 본 연구에서는 실험을 통해 적절한 표시자의 크기를 설정하였다.

- 이동 프로젝터 1: Plus DLP projector V-339, 1024×768 resolution, 1300 ANSI lumens, 크기 186×46×176mm, 무게 1.3kg
- 이동 프로젝터 2: Mitsubishi LED projector PK20, 800×600 resolution, 25 ANSI lumens, 크기 123×97×48.2mm, 무게 500g
- 고정 프로젝터: NEC DLP projector WT615, 1024×768 resolution, 2000 ANSI lumens, 크기 380×318×313mm, 무게 6.4kg
- 카메라: Point Grey Research Flea CCD camera, 1024×768 resolution, 30fps frame-rate

5.1 구현결과

고정 프로젝터와 이동 프로젝터 투사 결과의 비교를 위해 ISO 12233 표준에 근거한 해상도 테스트 패턴 영상(13A/ISO Resolution Test Chart)[10]을 제안된 인터랙티브 투사기법을 적용하여 투사하였다. 그림 5(a)에서 보여지는 바와 같이 이동 프로젝터가 투사한 가운데 영역과 그 주변 영역이 큰 밝기 차를 갖는 것을 확인할 수 있다. 또한 붉은 점선으로 표시된 일부 영역에서 고정 프로젝터와 이동 프로젝터의 투사 결과는 그림 5(b)와 그림 5(c)와 같다. 이 실험에서 이동 프로젝터 2의 투사영역 크기는 가로 28cm, 세로 21cm로 설정하였다. 동일한 영역에서 고정 프로젝터의 픽셀수를 계산해보면 투사영역의 크기가 가로 220cm, 세로 165cm일 때 픽셀수가 1024×768이므로 결과적으로 약 130×98의 픽셀수를 제공하게 된다. 이는 이동 프로젝터 픽셀 해상도 800×600과 비교했을 때 1/6보다 적으며 그에 따라 그림 5(b)와 같이 계단현상이 확연히 나타나게 된다.

그림 6은 고정 프로젝터로 전체 이미지를 투사하고 부분영역을 두 개의 이동 프로젝터 1과 2의 투사한 결과를 보여준다. 두 개의 이동 프로젝터 모두 고정 프로

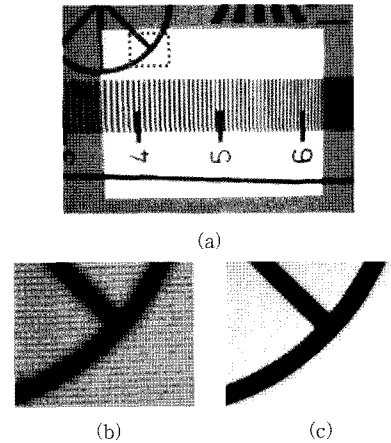


그림 5 고정 및 이동 프로젝터 투사결과와 해상도 및 밝기 비교. (a) 전체영상 및 세부영상 인접 영역; (b) (a)에서 빨간 점선으로 표시한 영역에서 고정 프로젝터 투사 결과 확대뷰; (c) 이동 프로젝터 투사결과 확대뷰

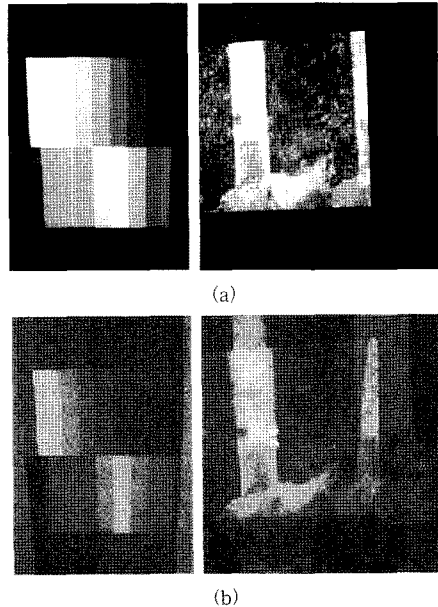


그림 6 서로 다른 밝기의 이동 프로젝터에 의한 세부영역 투사 결과. (a) 이동 프로젝터 1 (1300ANSI); (b) 이동 프로젝터 2 (25ANSI)

젝터에 비해서 개선된 밝기를 제공하나 그림 6(b)에서는 25ANSI의 낮은 밝기로 인해 고정 프로젝터 투사영상과 간섭이 일어나는 것을 볼 수 있다. 실험결과 촬영에 사용한 카메라는 셔터속도 1/20sec 조리개는 F2.8로 설정하였다.

5.2 성능

제안된 표시자 분할 기법은 표시자의 모서리 점들을 직접 추출하기 보다 표시자에 해당하는 직선을 추출하여 그 교점들을 계산함으로써 결정되기 때문에 카메라 영상에서 표시자가 부분적으로 안보이는 상황 하에서도 강건한 추출 결과를 얻을 수 있다. 그림 7은 다양한 검침 상황에서 표시자 추출 결과를 보여준다.

제안된 인터랙티브 투사기법의 단계별 수행시간은 표 1과 같다. 시스템 사양은 Intel Xeon 3.0GHz CPU, 2GB RAM이고 카메라 영상 해상도는 속도개선을 위해 400×300로 축소하였다. 표시자의 크기는 320×240로 고정 프로젝터가 1280×1024 영상을 220cm×165cm로 투사한다고 했을 때 약 55cm×38.7cm의 실제 크기를 가진다. 직선추출 단계에서 허프 변환 결과로 추출되는 직선의 수는 50을 넘지 않도록 설정하였다. 표 1에서 제시된 수행시간은 연속된 10 프레임에 대한 소요시간을 평균한 값으로서 이동 투사부에서 영상획득에서 네트워크 전송을 포함한 세부영상 와핑 단계까지 측정하였다. 전체 수행시간의 대부분은 영상획득과 표시자 분할 단계에서 소요되었으며 총 24.3fps의 처리속도를 나타냈다. 표시자 분할 수행시간에서는 허프 변환에 가장 많은 시간이 소요되었으며 전처리를 거쳐 추출된 픽셀의 수가 1500인 경우 7ms, 15000인 경우 55ms로 측정되었다. 분할 총 수행시간은 평균적으로 약 13ms로 초당 약 75 프레임 이상 처리가 가능하므로 현재 수행속도는 높은

표 1 단계별 수행시간

단계	시간(msec)	
영상획득	27.8	
표시자 분할	HSI 기반 전처리	6.3
	허프 변환	7.0
	직선 분류	0.02
투사영상 와핑	0.06	
합계	41.18(24.3 fps)	

획득속도를 지원하는 카메라를 통해 개선될 수 있다.

5.3 사용자 평가

본 논문에서 구현된 인터랙티브 투사 시스템에 대한 15명의 사용자를 대상으로 사용성 평가를 수행하였다. 먼저 투사 시스템의 개요에 대해 설명하고 그림 8(a)와 같이 외국의 지하철 노선도를 대형 디스플레이 하여 역명이 뚜렷이 보이지 않는 것을 확인시킨 후 그림 8(b)와 같이 이동 프로젝터로 전체 중 일부 영역을 투사해 보여줌으로써 해상도와 밝기 개선 결과를 인지하도록 하였다. 다음으로 표시자의 기능과 관심영역 이동 방법을 시연과 함께 설명한 후 사용자로 하여금 직접 이동 프로젝터를 움직여 노선도를 관찰하는 작업을 하도록 하고 설문지 작성을 수행하였다. 설문은 아래와 같이 총 다섯 개의 질문으로 구성하였으며 5점의 Likert 스케일로 평가하도록 하였다. 추가적으로 시스템 사용후 느낀 장점과 단점, 향후 개선방안에 대한 의견을 수집하였다.

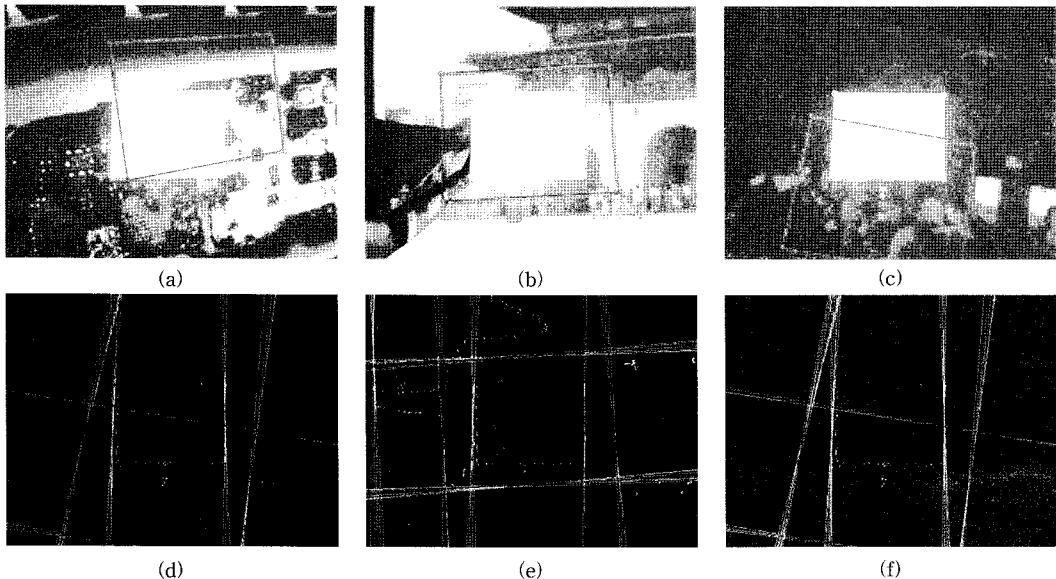


그림 7 다양한 검침 상황에서 표시자 탐지 결과; (a) 이동 프로젝터 투사영역에 의한 검침; (b) 사용자 손과 그림자에 의한 검침; (c) 일시적인 카메라 프레임 아아웃에 의한 가림. (d-f)는 추출된 모든 직선과 최종 결정된 직선을 (a-c)의 전처리 이전 영상에 표시한 결과임

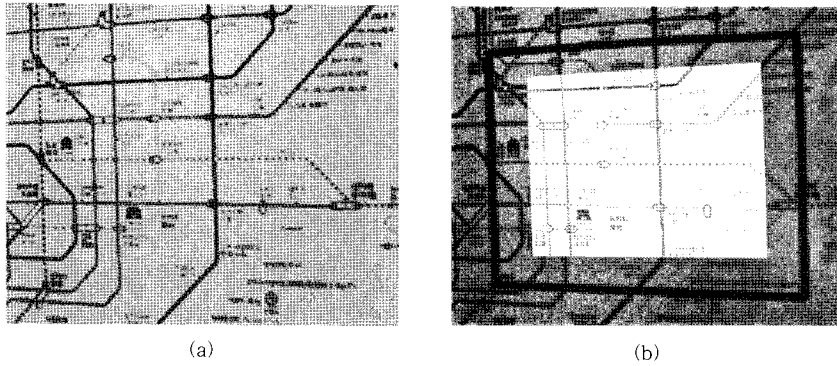


그림 8 고정 및 이동 프로젝터를 이용한 인터랙티브 투사 결과. (a) 이동 프로젝터로 관심영역 영상 투사 전; (b) 관심영역 영상 투사 후

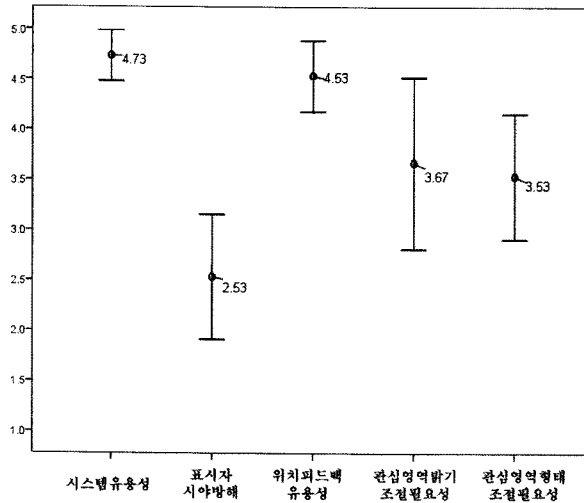


그림 9 사용자 평가 결과

- 설문1: 이동 프로젝터로 관심영역을 관찰하는 기능의 유용성 정도
- 설문2: 관심영역 관찰시 표시자가 시야를 방해하는 정도
- 설문3: 표시자로 인한 현재 위치 피드백의 유용성 정도
- 설문4: 이동 프로젝터 투사영역 밝기 조절의 필요성 정도
- 설문5: 이동 프로젝터 투사영역 형태 조절의 필요성 정도

설문결과와 평균과 분포를 정리한 도표는 그림 9와 같다. 설문 1로 알아본 시스템에 대한 전체적인 평가 결과($\mu: 4.73, \sigma: 0.458$)는 최고점 5에 가까운 값으로 매우 긍정적이었다. 설문 2의 결과($\mu: 2.53, \sigma: 1.125$)를 살펴 보았을 때 표시자가 사용자로 하여금 시야를 방해한다

고 느끼는 정도가 높지 않은 것으로 나타났다. 즉, 사용자는 관심영역 관찰시 표시자보다는 대상으로 하는 관심영역 자체에 더 집중하는 것으로 나타났다. 오히려 설문 3의 결과를 보았을 때 표시자는 사용자로 하여금 시스템의 위치추적 상황을 인식하고 적절히 대응할 수 있도록 하는 기능을 수행하였으며 이 같은 피드백에 대한 설문결과($\mu: 4.53, \sigma: 0.640$)도 실제로 매우 긍정적이었다. 다음으로 설문 4의 결과($\mu: 3.67, \sigma: 1.543$)에서는 이동 프로젝터 투사영역의 밝기가 지나치게 밝은 경우 평균적으로 사용자는 불편감을 느꼈으며 대형 디스플레이 영상과 관심영역이 인접한 부분에서 밝기가 자연스럽게 이어지도록 하는 효과가 필요한 것으로 나타났다. 그러나 응답결과 분포가 넓게 나타난 바와 같이 밝기 차이에 민감하지 않은 사용자도 다수 있었다. 마지막 설문결과($\mu: 3.53, \sigma: 1.125$)에서 관심영역의 형태가 스크

린 표면에 대한 이동 프로젝터 투사가 변화에 따라 달라지는 것에 대해 평균적인 반응은 부정적이었으며 그에 따라 일관적으로 형태를 유지하기 위한 형태 왜곡보정 기능을 추가해야 할 것으로 보인다.

6. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 대형 투사영상의 부분영역을 고화질로 디스플레이 하기 위해 이동 프로젝터 투사영역의 폐회로 기반 위치추적을 통한 인터랙티브 투사기법을 제안하였다. 제안된 기법은 대형 투사영상에 삽입한 표시자와 이동 프로젝터에 부착된 카메라를 사용함으로써 기존의 방법들과 같이 복잡한 하드웨어 설정이나 특수 장치를 요구하지 않으며 설정 변경이 용이하여 다양한 어플리케이션에서 사용될 수 있다는 강점을 가진다.

현재 관심영역에서의 두 개의 프로젝터 투사결과가 겹쳐지는 간섭 현상을 개선하기 위해 향후 고정 프로젝터 투사영상에서 관심영역에 해당하는 부분은 검은색으로 설정하여 결과적으로 이동 프로젝터 투사결과만이 나타나도록 할 예정이다. 또한 사용자 평가 결과에서 요구된 기능들을 추가하고 표시자 형태 및 이동 프로젝터 투사영상의 표현을 사용자가 조절할 수 있도록 하는 작업이 필요하다. 마지막으로 구현된 인터랙티브 투사 시스템은 향후 수행속도의 개선이 요구되며 다양한 영상을 대상으로 표시자 추출 실험을 수행할 예정이다.

참고 문헌

- [1] Sanneblad, J. and Holmquist, L. E., "Ubiquitous graphics: combining hand-held and wall-size displays to interact with large images," In *Proc. of the Working Conference on Advanced Visual interfaces*, pp.373-377, 2006.
- [2] Cao, X., Forlines, C., and Balakrishnan, R., "Multi-user interaction using handheld projectors," In *Proc. of ACM UIST '07*, pp.43-52, 2007.
- [3] D. Cotting and M. Gross, "Interactive visual workspaces with dynamic foveal areas and adaptive composite interfaces," In *Proc. of Eurographics 2007*, pp.685-694, 2007.
- [4] Haptic Beam (SPH-W7900). http://www.samsung.com/sec/consumer/detail/detail.do?group=mobilephone&type=mobilephone&subtype=kt&model_cd=SPH-W7900UWKF
- [5] Baudisch P., Good N. and Stewart P., "Focus plus context screens: combining display technology with visualization techniques," In *Proc. of UIST '01*, pp.31-40, 2001.
- [6] Zhang, Z., "Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations," In *Proc. of the 7th Int. Conference on Computer Vision*, pp. 666-673, 1999.
- [7] Hartley, R.I. and Zisserman, A., *Multiple View Geometry in Computer Vision*. 2nd Ed., p.88, Cambridge University Press, New York, 2003.
- [8] H. Jiang, E. Ofek, N. Moraveji, and Y. Shi, "Direct pointer: direct manipulation for large-display interaction using handheld cameras," In *Proc. of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI 2006)*, pp.1107-1110, 2006.
- [9] Z. Zhang, Y. Wu and Z. Liu, "Side statistics and maximum discriminant analysis for real-time tracking," In *Proc. of 5th Asian Conference on Computer Vision (ACCV '02)*, pp.308-313, 2002.
- [10] I3A/ISO Resolution Test Chart. <http://www.edmundoptics.com/onlinecatalog/displayproduct.cfm?productid=2287>



박지영

2002년 이화여자대학교 컴퓨터학과 졸업(학사). 2004년 이화여자대학교 컴퓨터학과(공학석사). 2004년~현재 이화여자대학교 컴퓨터공학과 박사과정. 관심분야는 가상현실, HCI 등



이선민

1999년 이화여자대학교 컴퓨터학과 졸업(학사). 2001년 이화여자대학교 컴퓨터학과 졸업(공학석사). 2007년 이화여자대학교 컴퓨터학과 졸업(공학박사). 2007년 이화여자대학교 컴퓨터 그래픽스/가상현실 연구센터, 박사 후 연구원. 2008년~현재 University of Southern California, Postdoctoral Researcher. 관심분야는 가상현실, 컴퓨터 그래픽스, 컴퓨터 비전, HCI 등



김명희

1974년 이화여자대학교 사회학과 졸업(학사). 1979년 서울대학교 계산통계학과(석사). 1986년 독일 괴팅겐대학교 Informatik(Ph. D). 1987년~현재 이화여자대학교 컴퓨터공학과 교수. 1999년~현재 이화여자대학교 컴퓨터그래픽스/가상현실 연구센터 센터장. 관심분야는 영상가시화, 시뮬레이션, 컴퓨터 그래픽스, 가상현실 등