

헤드/아이 통합 트래커 개발 및 통합 성능 검증

Developing Head/Eye Tracking System and Sync Verification

김 정 호, 이 대 우*, 허 세 중, 박 찬 국, 백 광 열, 방 호 충
(Jeong Ho Kim, Dae Woo Lee, Se Jong Heo, Chan Gook Park, Kwang Yul Baek, and Hyo Choong Bang)

Abstract: This paper describes the development of integrated head and eye tracker system. Vision based head tracker is performed and it has 7mm error in 300mm translation. The epi-polar method and point matching are used for determining a position of head and rotational degree. High brightness LEDs are installed on helmet and the installed pattern is very important to match the points of stereo system. Eye tracker also uses LED for constant illumination. A Position of gazed object(3m distance) is determined by pupil tracking and eye tracker has 1~5 pixel error. Integration of result data of each tracking system is important. RS-232C communication is applied to integrated system and triggering signal is used for synchronization.

Keywords: headtracker, eyetracker, sync, IR LED, dichroic filter, multi-threading

I. 서론

현재 개발되거나 상용화 되어 있는 시선 추적 장치의 경우 헬멧의 자세를 추적하거나 눈이 응시하고 있는 지점을 추적하는 두 가지 방법 중에 한 가지 방법을 취하고 있다.

하지만 일반적으로 3차원 공간의 물체를 응시하는 경우, 사용자는 머리를 고정시킨 상태에서 눈동자만을 이용하여 사물을 응시하거나 눈을 고정시킨 상태에서 머리를 돌려 사물을 응시하게 된다. 따라서 눈과 머리의 움직임에 대한 통합적인 고려가 없이는 정확한 사물의 추적에 제한을 받게 된다. 따라서 헤드/아이 통합 트래커를 개발하였다.

정확한 응시점을 측정하기 위해서는 정확한 머리의 위치 및 자세와 양안의 시선 벡터를 알아야 한다. 머리의 위치와 자세, 양안의 시선벡터를 구하기 위하여, 본 연구에서는 적외선 LED를 일정한 패턴으로 삼입한 헬멧과 헬멧 외부에 양안을 촬영하기 위한 카메라, 적외선이 조사된 눈의 영상을 카메라로 반사하기 위하여 다이크로의 필터를 사용하였다.

스테레오 카메라에서 획득한 영상에서 적외선 LED의 각 점을 인식하고, 사전에 정의한 헬멧의 패턴 모델과 비교하여 자세 및 위치를 측정하였다. 자세 추정 실험 결과 0.3m 천이운동 하였을 경우, 7mm 이내의 위치 오차가 발생하였다. 또한 50°/s 의 회전속도에서 0.0329° 이내의 회전각도 오차가 발생하였다.

아이트래커는 또렷한 동공의 영상을 획득하기 위하여 적외선 LED를 이용하여 양안에 적외선을 조사한다. 적외선을

이용할 경우 일반 자연광을 이용하여 양안을 획득할 경우 보다 동공을 쉽게 인식할 수 있다. 획득한 동공의 영상은 전처리 과정을 거쳐 실시간으로 추적되며, 측정된 위치를 기반으로 시선벡터를 구할 수 있게 된다. 실험 결과 실제의 목표물의 픽셀 중심에서 1~2 픽셀의 위치 오차가 발생하였다.

헤드 및 아이트래커 시스템이 동기화되지 않을 경우 측정 시간 차이로 인한 오차가 발생하게 된다. 만약 원거리에 있는 물체를 응시할 경우 동기화 되지 않은 영상 획득 과정은 큰 측정오차를 유발한다. 따라서 동일한 시점에 영상을 획득할 수 있도록 두 시스템을 동기화하여야 한다.

II. 헤드트래커 시스템

1. 헤드트래커 시스템의 구성

헤드트래커 시스템의 무게는 사용자의 피로도와 직결되는 중요한 요인이다. 본 연구에서는 사용자의 피로도를 고

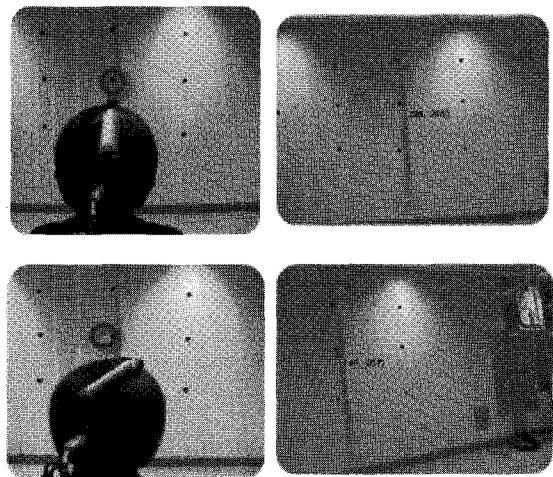


그림 1. 머리를 회전하여 응시하는 경우(위), 눈동자를 이용하여 목표를 응시하는 경우(아래).

Fig. 1. Gaze the point without moving eyeball(Up), gaze the point without head rotation (Down).

* 책임저자(Corresponding Author)
논문접수: 2009. 10. 6., 수정: 2009. 11. 17., 채택확정: 2009. 11. 24.
김정호: 부산대학교(kimsmap@pusan.ac.kr)
이대우: 부산대학교/기계기술연구소(baenggi@pusan.ac.kr)
허세중, 박찬국: 서울대학교
(jjong80@snu.ac.kr/chanpark@snu.ac.kr)
백광열, 방호충: KAIST
(kybaek@fdcl.kaist.ac.kr/hcbang@fdcl.kaist.ac.kr)
※ 본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었음(계약번호 UD070041AD).
※ 상기 논문은 KACC2009 학술대회에서 초안이 발표되었습니다.

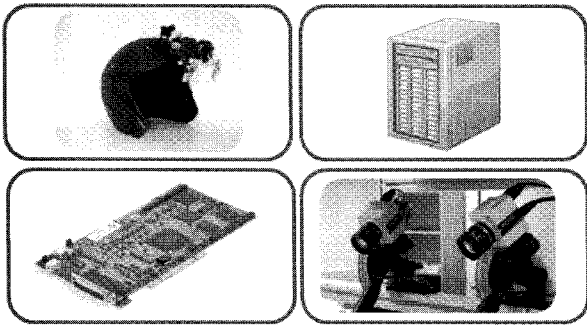


그림 2. 헬멧, 연산 장치(PC), 스테레오 카메라, 영상획득장치 (시계방향).

Fig. 2. Helmet, processor unit(PC), stereo camera, frame grabber board(clockwise).

려하여 가벼우면서 초음파, 레이더 방식에 비해 비교적 가격이 저렴한 광학식 헤드트래커 시스템을 개발하였다. 헤드트래커 시스템의 구성은 그림 2와 같다.

헤드트래커 시스템은 헬멧의 영상을 획득하기 위한 스테레오 카메라와 영상획득장치, 프로그램 구동을 위한 PC 그리고 적외선 LED가 장착된 헬멧으로 구성되어 있다.

헤드트래커 시스템은 적외선 LED가 패턴을 이루며 배치되어 있으며, 양안 촬영을 위한 모듈 카메라를 탑재한 헬멧과 추적 연산을 수행할 PC, 영상 획득을 위한 그래픽 보드, 헬멧 촬영을 위한 스테레오 카메라로 구성되어 있다. 스테레오 카메라는 적외선 영역을 촬영할 수 있는 CCD를 탑재하고 있다.

2. 헬멧의 위치 및 자세 추정

사용자 머리의 위치와 자세를 측정하기 위하여 헬멧에 장착된 적외선 LED의 패턴을 이용한다. 패턴 모델의 정확도를 높이기 위하여 LED를 배치한 후, 3차원 정밀 측정을 이용하여 LED의 3차원 위치를 측정하였다. 미리 정의된 LED 패턴을 스테레오에서 획득한 영상에서 추출한 특징점

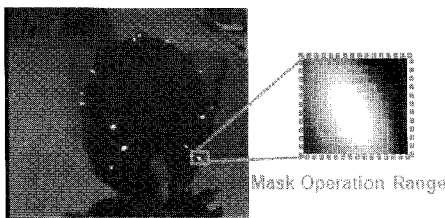


그림 3. 마스크를 이용한 특징점 추출.

Fig. 3. Feature point extraction using mask.

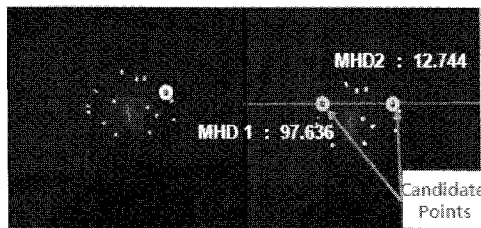


그림 4. 에피폴라 라인을 이용한 후보 위치 선택.

Fig. 4. Choosing candidate points using epipolar line.

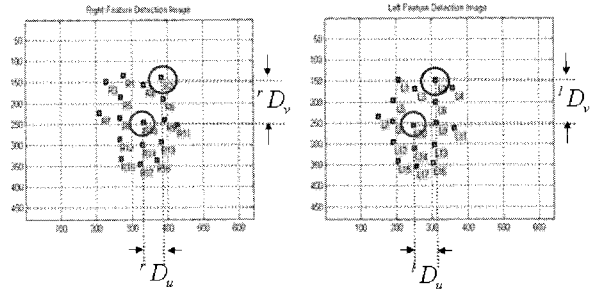


그림 5. 좌우 영상의 스테레오 매칭 결과.

Fig. 5. Result of stereo matching.

패턴과 비교하여 자세 및 위치를 측정한다.

자세를 측정하기 위하여 스테레오 카메라를 이용하여 영상을 획득한다. 획득한 영상에서 특징점의 위치를 구하기 위하여 마스크를 이용한다.

왼쪽 영상의 특징점의 위치를 구한 후 오른쪽 카메라 영상에서의 특징점의 위치와 에피폴라 상관관계에 따라 후보 위치를 지정한다. 에피폴라 상관관계는 카메라의 기하학적 위치 관계를 이용하여 에피폴라 라인을 정의하여 같은 라인 상에 존재하는 점은 같은 점으로 볼 수 있다는 개념이다. 이 과정을 통해 후보 모델을 정의한다.

특징점 후보를 정의한 후 각 점에 번호를 부여한 후 3차원 좌표로 복원을 시키게 된다. 그 후 각 점이 모델의 어떤 점에 해당하는지를 패턴 인식 알고리즘인 기하학적 해상 방법을 이용하여 분석한다. 이 과정을 수행한 후 그림 5와 같이 특징점의 번호가 좌우 영상에 동일하게 부여된다.

영상에 존재하는 모델의 각 점의 위치는 원래의 헬멧 모델의 회전 성분과 전이 이동 성분, 오차 값에 의해 결정된다고 볼 수 있다. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$d_i = R_i + T + v_i$$

위 수식에서 d_i 는 영상에 위치는 점의 위치, R 은 회전 성분, m_i 는 헬멧의 모델의 점의 위치, T 는 전이 이동 성분, v_i 는 오차 성분이다.

특징점의 개수가 증가함에 따라 연산량도 증가하게 되므로 최소의 LED를 배치하면서 정확한 결과를 얻을 수 있는 패턴의 연구가 중요하다. 본 논문에서는 LED를 육각형 패턴보다 연산량이 적은 삼각형의 패턴으로 5묵음을 사용하였으며, 이 경우 어떤 위치에서 측정을 하여도 정확한 위치를 얻을 수 있었다.

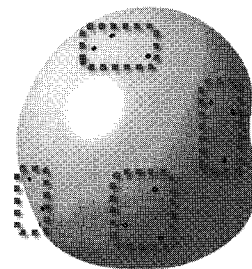


그림 6. 삼각형 LED 특징점 패턴.

Fig. 6. Triangular LED patterns.

표 1. 회전운동 추적 결과.

Table 1. Result of rotating motion.

| 회전 각속도 | 회전각 | RMS 오차(°) |
|--------|------|-----------|
| 5°/s | 5° | 0.0172 |
| 10°/s | 10° | 0.0545 |
| 20°/s | 20° | 0.0348 |
| 50°/s | 50° | 0.0588 |
| 50°/s | 100° | 0.1253 |
| 50°/s | 150° | 0.0228 |
| 50°/s | 200° | 0.0329 |

표 2. 병진운동 추적 결과.

Table 2. Result of translating motion.

| 이동거리 | RMS오차(mm) |
|-------|-----------|
| | 광학 방식 |
| 100mm | 0.7700 |
| 200mm | 2.7832 |
| 300mm | 7.5156 |

헤드트랙커의 자세 추적 결과는 위와 같다.

헤드트랙커는 300mm의 천이이동에 대해 7mm의 오차가 발생하였으며, 표 1에서 보는 바와 같이 헬멧이 회전하는 상태에서 최대 0.0329°의 오차가 발생하였다.

III. 아이트랙커 시스템

1. 아이트랙커 시스템의 구성

아이트랙커 시스템은 그림 7과 같이 두 대의 아이카메라와 한 대의 신(scene) 카메라, 두 개의 다이크로익 필터, 프레임 그래버 및 연산을 위한 PC로 구성되어 있다.

다이크로익 필터는 그림 8과 같이 적외선을 반사하고 가시광선은 통과하는 성질을 가진 필터이다. 이런 특성을 이용하여 적외선 LED에서 방사된 적외선을 눈으로 반사하여 주며, 다시 눈에서 반사된 적외선을 카메라로 반사하여 주는 역할을 한다. 따라서 사용자는 카메라에 의한 이물감이 없이 전방을 자연스럽게 응시할 수 있게 된다.

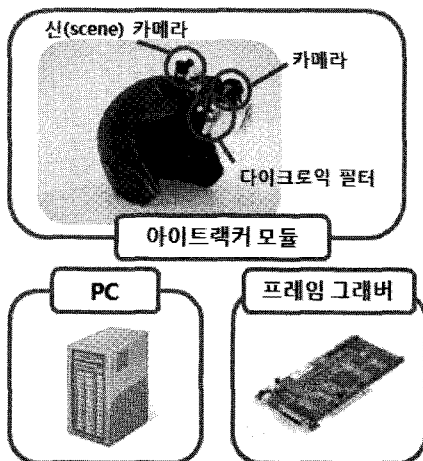


그림 7. 아이트랙커 시스템의 구성.

Fig. 7. Configuration of eyetracker.

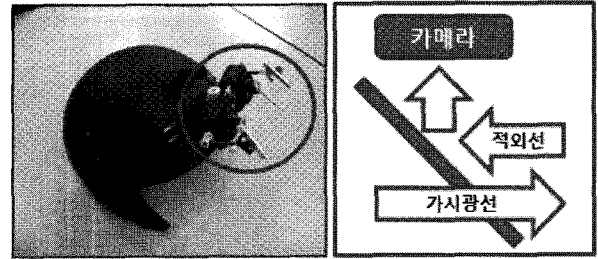


그림 8. 다이크로익 필터의 기능.

Fig. 8. Function of dichroic filter.

2. 아이트랙커의 동공 추적 방법 및 결과

아이트랙커는 앞서 이야기한 바와 같이 적외선을 이용하여 동공을 쉽게 인식할 수 있도록 한다. 동공은 적외선을 흡수하므로 검은색으로 나타나게 되고, 동공 이외의 부분은 적외선을 반사하므로 동공에 비해 밝은 값을 갖는다. 따라서 그림 9와 같이 영상에서 동공을 인식하기 쉬운 상태가 된다.

동공을 추적하는 과정에 있어 칼만 필터를 사용하였다. 칼만 필터는 동공의 위치를 예측하고 측정하는 과정을 거치며, 예측된 위치 주변의 영상만을 고려하게 되어 연산 시간을 줄일 수 있다는 장점이 있다. 칼만 필터와 동시에 원

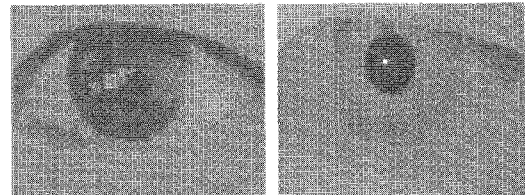


그림 9. 조명에 따른 동공의 상태(일반(좌), 적외선(우)).

Fig. 9. State of pupil(left-normal, right-infrared).

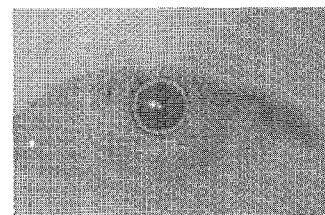


그림 10. 동공 추적 결과.

Fig. 10. Result of pupil tracking.

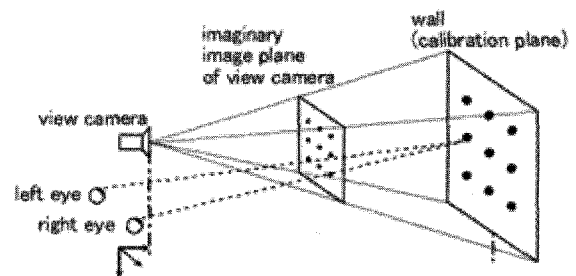


그림 11. 시점 보정 개념도.

Fig. 11. Schematic of gaze point calibration.

형 피팅 알고리즘이 사용되었으며 그림 10과 같이 동공이 정확하게 추적되었다.

신 영상에서 사용자의 응시점을 추적하기 위하여 수학적 관계식을 사용하였다. 전방 3m 지점에 9개의 거리를 알고 있는 점을 배치하고 사용자가 9개의 점을 순차적으로 응시하게 되면, 각 점과 동공의 중심 위치를 기반으로 관계식을 결정할 수 있다.

IV. 통합 시스템 개발

1. 통합 시스템의 구성

통합 시스템은 크게 헤드트랙커 시스템, 아이트랙커 시스템, 중앙 제어 장치로 구성되어 있다. 헤드/아이 통합 트래커에 있어서 동기화는 정밀도를 높이기 위해 중요하다. 두 시스템이 동기화 되어있지 않은 경우, 두 시스템은 그림 13과 같이 다른 시간에 획득된 영상을 이용하여 시선 벡터와 머리의 자세를 결정하게 되므로 시간 차이에 의한 오차가 발생하게 된다.

따라서 중앙 제어 장치를 이용하여 헤드와 아이트랙커 시스템에 트리거 신호를 전송하여 두 시스템을 동기화한다. 또한 중앙 제어 장치는 두 시스템의 연산 결과를 통합 좌표계로 변환하며 정보를 출력하는 역할을 한다.

2. 스레드 동기화(thread synchronization)

중앙 제어 장치는 두 대의 헤드/아이트랙커 시스템에 동기화 신호를 전송하고, 연산 결과를 수신한다. 본 연구에서

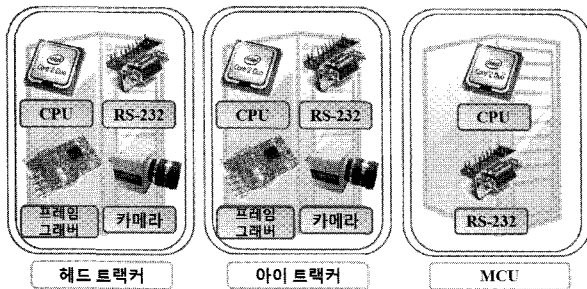


그림 12. 통합 시스템 구성.

Fig. 12. Configuration of integrated system.

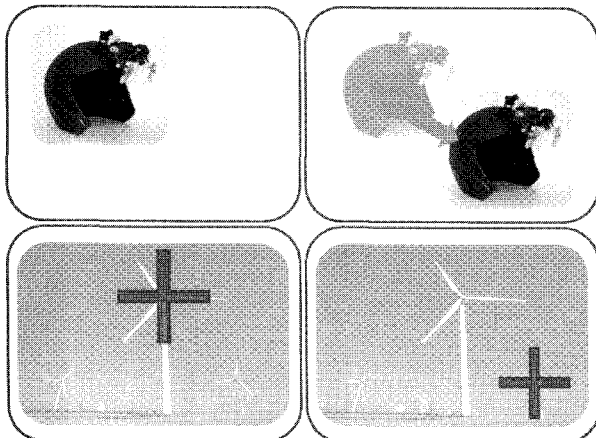


그림 13. 시간차에 의한 오차 발생 개념.

Fig. 13. Concept of error occurrence by time gap.

헤드 및 아이트랙커 시스템은 시간 차이를 없애기 위하여 트리거 신호를 사용하며, 트리거 신호 수신 후 연산 및 결과 전송의 순서를 엄격히 지켜야 한다.

2.1 순차 실행 성능 검증

헤드 및 아이 트래커 시스템은 통신부와 연산처리가 별도의 스레드로서 작동하고 있으며, 이 두 개의 스레드가 동기화되지 않은 경우와 동기화를 수행한 경우 어떻게 동작하는지 확인하기 위하여 실험을 수행하였다.

그림 14는 스레드 동기화 사용 여부에 따른 각 스레드의 실행 순서를 측정하기 위한 소프트웨어이다. 연산 시간이 다른 스레드 A와 B가 동시에 실행되고 있으며 스레드 A가 연산되는 경우 그래프는 1의 값을 나타내고 스레드 B가 연산되는 경우 0의 값이 출력된다.

그림 16에서 보는바와 같이 동기화를 수행할 경우 두 개의 스레드 A, B가 순차적으로 수행됨에 반해 비동기 수행

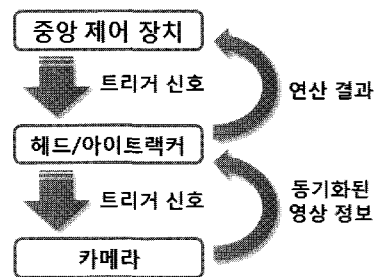


그림 14. 전체 시스템 동기화 구동 순서.

Fig. 14. Synchronized system operation flow.

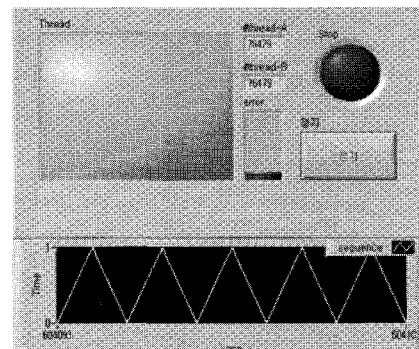


그림 15. 스레드 동기화 검증 소프트웨어.

Fig. 15. Verification software for thread sync.

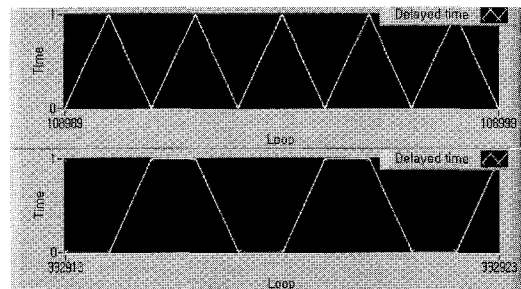


그림 16. 동기 수행(위)과 비동기수행(아래) 결과.

Fig. 16. Result of synchronized threading(up) and unsynchronized threading(down).

의 경우 A, B가 중복 수행되는 현상을 보였다. 따라서 동기화가 멀티 스레드 환경에서 잘 수행됨을 알 수 있었다.

2.2 문맥 스위칭 지연 실험

동기화를 사용하는 경우 스레드 실행에 앞서 동기화 신호 조선을 검사하는 과정을 거치게 된다. 이 때 지연 시간에 의하여 전체 시스템의 성능이 저하된다면 문제가 발생할 수 있다. 따라서 지연 시간을 측정하였다.

이번 실험은 스레드 A와 B의 연산 시간을 임의의 기다림 함수로 설정하고, 전체 스레드 수행 시간을 A와 B의 연산에 필요한 시간을 빼는 방법으로 측정하였다.

그림 17은 문맥 스위칭 지연 시간을 측정하기 위한 소프트웨어이다. 프로그램의 하단에 지연 시간을 ms단위로 표현하여 준다. 측정 결과를 살펴보면 0~2ms 이내의 지연 시간이 발생하는 것을 알 수 있다. 현재 헤드/아이 통합 트랙커의 경우 10Hz로 동작하므로 1회 구동에 100ms를 사용한다. 따라서 발생한 시간 지연이 매우 작아 성능에 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 따라서 트리거 신호와 동기화 함수를 이용한 헤드/아이 트랙커 시스템의 통합 방법이 적절함을 알 수 있다.

3. 헤드/아이트랙커 통합 프로그램 제작

헤드/아이 통합 프로그램은 헤드트랙커와 아이트랙커에 트리거 신호를 전송하여 동기화를 수행하고, 계산된 결과를 이용하여 최종 응시점을 계산하는 역할을 한다. 수신된 정보는 인디케이터를 이용하여 사용자에게 출력하여 주며, 3차원 모델을 이용하여 값의 경향성을 쉽고 직관적으로 확

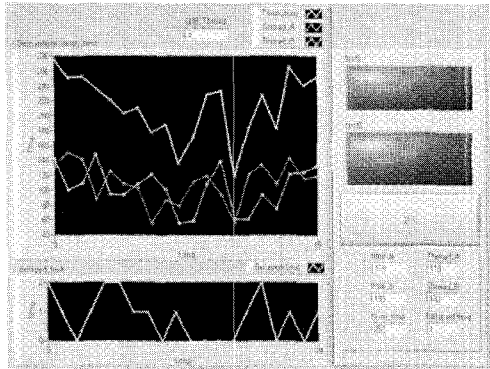


그림 17. 문맥 스위칭 지연 시간 검증 소프트웨어.
Fig. 17. Verification software for context switching delay.

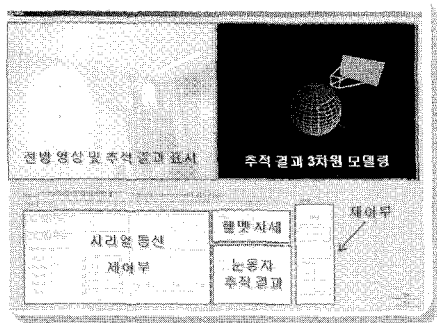


그림 18. 헤드/아이트랙커 통합 프로그램.
Fig. 18. Head/eyetracker integrated program.

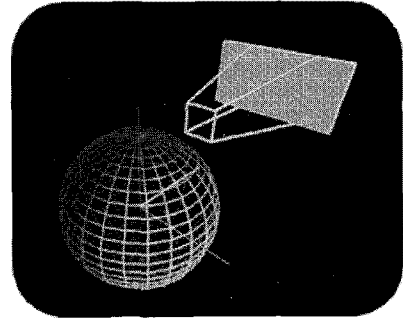


그림 19. 3D 트랙커 모델링.
Fig. 19. 3D tracker modeling.

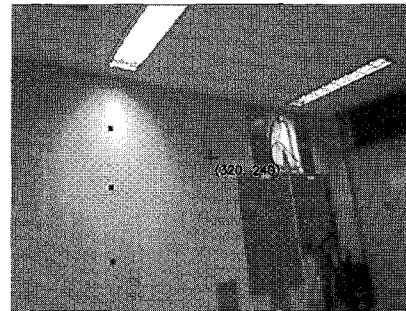


그림 20. 사용자 응시점 출력창.
Fig. 20. User gaze point indicator.

인할 수 있도록 하였다. 또한 전방을 촬영하는 카메라 영상에 응시점을 표시한다.

V. 결론 및 고찰

본 논문은 헤드/아이 통합 트랙커 개발을 위한 시뮬레이터 개발에 대해 논의하고 있다. 헤드트랙커와 아이트랙커를 통합할 경우, 3차원 공간에서 사물을 자연스럽게 응시할 수 있는 이점이 있으며 본 연구의 의의가 있다고 할 수 있다. 개발된 헤드트랙커는 0.3m의 천이 이동에 대해 7mm의 아주 작은 오차가 발생하였으며, 회전 성분에 대해서도 최대 0.0329°의 작은 오차가 발생하였다. 아이트랙커의 경우도 적외선 LED를 이용하여 1~2 픽셀의 작은 오차가 발생하였다. 아이트랙커의 추적 결과는 전방을 촬영하고 있는 전방 영상 위에 표시하도록 되어 있으며 3차원 모델링을 통해서도 쉽게 측정 결과를 확인 할 수 있다.

동기화는 분리되어 있는 별도의 시스템을 통합하는데 있어 정확도에 영향을 주는 요소로 작용함을 인지하고, 동기화 함수를 통해 각 시스템이 중앙 처리 장치의 동기화 신호에 맞춰 정확한 순서를 지키는지 확인하는 실험을 수행하였다.

실험 결과 동기화를 통해 정확히 주어진 수신과 연산, 전송의 과정을 지키는 것을 확인하였으며, 동시에 동기화로 인한 시간 지연이 무시할 만큼의 작은 값으로 나타남에 따라 동기화 기법을 사용하는 것이 적절함을 확인하였다.

헤드와 아이트랙커 각 시스템은 중앙 제어 장치에서 수신된 동기화 신호에 맞춰 구동되며 각 시스템에서 연산된 결과는 중앙 제어 장치로 전송하게 된다. 중앙 제어 장치에

서 수집된 두 연산 결과는 좌표 변환을 통해 최종 시선 벡터로 나타난다.

참고문헌

[1] E. Foxlin, Y. Altshuler, L. Naimark, and M. Harrington "FlightTracker: A novel optical/inertial tracker for cockpit enhanced vision," *IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2004)*, Nov. 2-5, Washington, D.C. 2004.

[2] E. Foxlin, Y. Altshuler, L. Naimark, and M. Harrington, "FlightTracker: A novel optical/inertial tracker for cockpit enhanced vision," *IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2004)*, Nov. 2-5, Washington, D.C. 2004.

[3] J.-G. Wang, E. Sung, and R. Venkateswarlu, "Eye gaze estimation from a single image of one eye," *IEEE Computer Vision*, 2003.

[4] S. N. Nair, A. K. Gramopadhye, J. Vora, and B. J.

Melloy, "Cognitive Feedback Training using 3D Binocular Eye Tracker."

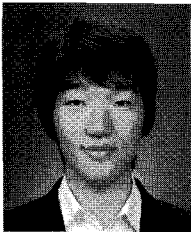
[5] Z. Zhu and Q. Ji, "Novel eye gaze tracking techniques under natural head movement," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 54, no. 12, Dec. 2007.

[6] S. N. Zheltov and S. V. Bratanov, "Multi-Threading for Experts: Synchronization," <http://softwarecommunity.intel.com>

[7] K. M. Zuberi and K. G. Shin, "An efficient semaphore implementation scheme for small-memory embedded systems," *Third IEEE Real-Time Technology and Applications Symposium, Proceedings*. pp. 25-34, 1997.

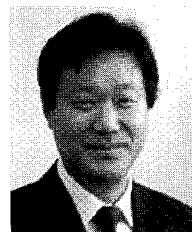
[8] Synchronization development library on MSDN "Synchronization(windows)," msdn.microsoft.com

[9] 김정호, 이대우, 허세중, 박찬국, 백광열, 방효충, "헤드 / 아이 통합 트래커 시뮬레이터 개발," KACC2009.



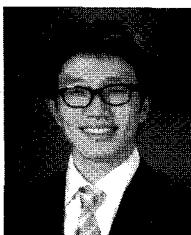
김정호

2008년 부산대 항공우주공학과 졸업. 2008년~현재 부산대학교 항공우주공학과 석사과정. 관심분야는 헤드/아이 트래커, 비전 가이드نس & 내비게이션.



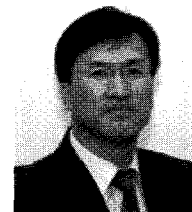
이대우

1993년 부산대 항공우주공학과 졸업. 1997년 동 대학원 석사. 2001년 동 대학원 박사. 2003년~현재 부산대학교 항공우주공학과 부교수. 관심분야는 우주/비행역학 및 재진입 궤적설계 및 유도제어, UAV 시스템 설계.



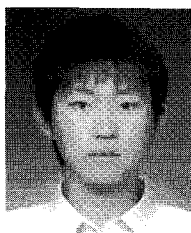
허세중

2008년 서울대학교 기계항공공학부 졸업. 2008년~현재 서울대학교 기계항공공학부 석사과정. 관심분야는 내비게이션 시스템, 헤드/아이 트래커.



박찬국

1985년 서울대학교 공과대학 제어계측공학과 졸업. 1987년 동 대학원 석사. 1993년 동 대학원 졸업(공학박사). 2003년~현재 서울대학교 기계항공공학부 교수. 관심분야는 INS/GPS 결합 알고리즘, MEMS IMU 응용 시스템 개발, 영상 항법시스템, USN을 이용한 Ubiquitous Positioning, 필터링기법.



백광열

2006년 한국과학기술원 항공우주공학과 졸업. 2008년 한국과학기술원 항공우주공학과 석사. 2008년~현재 동대학원 박사과정. 관심분야는 UAV 영상 기반 추적, 광학 아이트래커 시스템. 다중 UAV의 목표물 추적 기법.



방효충

1985년 서울대학교 항공우주공학과 졸업. 1987년 서울대학교 항공우주공학과 석사. 1992년 텍사스 A&M 항공우주공학과 박사. 2001년~현재 한국과학기술원 교수. 관심분야는 인공위성 자세역학 및 제어, 우주비행체 가이드نس & 내비게이션, UAV 가이드نس & 내비게이션, UAV 제어기 설계, 우주비행체 궤적생성 및 최적화.