

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 44(2), 123-130(2016)

DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2016.44.2.123

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

실시간 헬멧자세 추적시스템의 설계 및 구현

황상현*, 정철주*, 김동성**

Design and Implementation of Real-Time Helmet Pose Tracking System

Sang-Hyun Hwang*, Chul-Ju Chung* and Dong-Sung Kim**

The 7th R&D Institute, Agency for Defense Development*

Dept. of Electronic Engineering, Kumoh National Institute of Technology**

ABSTRACT

This paper describes the design and implementation scheme of HTS(Helmet Tracking System) providing coincident LOS(Line of Sight) between aircraft and HMD(Helmet Mounted Display) which displays flight and mission information on Pilot helmet. The functionality and performance of HMD system depends on the performance of helmet tracking system. The target of HTS system design is to meet real-time performance and reliability by predicting non-periodic latency and high accuracy performance. To prove an availability of a proposed approach, a robust hybrid scheme with a fusion optical and inertial tracking system are tested through a implemented test-bed. Experimental results show real-time and reliable tracking control in spite of external errors.

초 록

본 논문에서는 항공기 조종사 헬멧에 장착된 HMD(헬멧시현기, Helmet Mounted Display)에 비행정보 및 임무정보를 조종사의 시선(Line of Sight)과 일치시켜 시현하기 위한 헬멧자세 추적시스템(HTS, Helmet Tracking System)을 설계 및 구현했다. HMD 시스템의 기능과 성능은 HTS의 성능에 기반하므로 이를 고려하여 동작의 실시간을 보장하고 정확도를 높이기 위해 관성센서와 광학식센서의 데이터를 융합처리하여 다양한 운용 환경에서도 강건한 성능을 제공할 수 있는 HTS를 설계 및 구현 했다. 구현된 HTS의 효용성을 검증하기 위하여 테스트 베드 환경에서 오차 발생시 동작의 정확도 및 실시간성을 검증하였다.

Key Words : HMD(헬멧장착시현기), HTS(헬멧자세 추적시스템), Optical Pose Tracking (광학식 자세 추적), Inertial Pose Tracking(관성식 자세 추적)

1. 서 론

최신 군용항공기에 필수장비로 적용되고 있는

HMD는 조종사의 시선방향에 일치하는 비행정보와 임무정보를 시현하여 복잡한 전장상황에서도 직관적인 상황인식 기능을 제공하여 조종사의

† Received : October 7, 2015 Revised : December 16, 2015 Accepted : Januaray 16, 2016

* Corresponding author, E-mail : hyunhs21@add.re.kr



Fig. 1. Flight information display using HMD

임무성공률과 생존성을 향상시킨다.

일반적으로 HMD는 헬멧에 장착된 시현기만을 의미하며 헬멧, 헬멧추적시스템, 시현컴퓨터 등과 연동되는 헬멧시현시스템의 한 구성품이다. 이들 구성품은 시스템 운용요구사항에 기반하여 상호 연동관계 및 개별적 성능규격이 정의되어야 한다. 헬멧시현시스템은 소재, 광학, 전자, 기계 등 다양한 분야의 첨단 기술이 융합되어 적용됨에 따라 세대별 뚜렷한 기술적 특징이 반영되고 있다. 초기에는 단안형 고글형태로 헬멧에 장착되어 좁은 시야각으로 시각정보를 제공하였으나, 최근에는 헬멧 바이저에 투사하는 양안형 방식 또는 눈 앞에 근접하는 접안형 시현기가 대세적이다. 최신에 항공기인 F-35(JSF)에는 HMD가 전통적인 시현기인 HUD(전방시현기, Head-Up Display)를 대체함에 따라, 향후 개발되는 모든 항공기는 HMD가 조종사의 주 시현기로 자리매김을 할 것으로 파악된다.

헬멧추적시스템의 발달과정을 살펴보면, 초기에는 기계식 방식으로서 조종석 후방에서 헬멧으로 연결되는 기계적 링크를 이용하여 헬멧의 자세를 추적하였으나 조종사의 불편과 정확도 저하, 교정의 불편함으로 인해 다양한 항공기에 적용되지는 않았다. 이후 전자적 신호처리기술이 발달함에 따라 초음파센서, 자계센서, 관성센서, 광학센서, 레이저 스캔센서 등을 이용한 다양한 방식의 헬멧자세 추적기술이 개발되었다. 일반적으로 항공기에 많이 적용되고 있는 헬멧자세 추적기술은 자계센서 방식과 관성센서 방식 및 광학센서 방식이다[1].

본 연구에서는 헬멧추적 시스템의 요구성능을 정의하고 다양한 추적용 센서의 장,단점을 비교 분석하여 시스템 구조를 설계하였고, 관성센서와 광학센서를 융합하는 헬멧자세 추적시스템의 알고리즘을 제안하여 시스템 단위에서 제작 및 시험을 수행하였다[2].

II. 본 론

2.1 헬멧자세 추적을 위한 요구성능 정의

헬멧자세 추적시스템을 특정 항공기에 적용하기 위해 항공기 진동특성, 기동특성, 센서장착 위치 등의 특수성이 고려되어야 한다. 그러나 이러한 특수성은 다양한 항공기에 적용을 위한 일반화가 필요하며 이를 위해 최대한 정규화되어야 한다. 고정익 및 회전익으로 구분되는 특수성은 피할 수 없으나 최소한 센서 및 알고리즘은 공통기법이 적용되어야 한다. 그리고 시스템 전체에 걸쳐 특정 부품의 현실적 성능제한을 초과하는 과도한 시스템 성능요구는 시스템의 성능을 높이기 보다는 다른 성능을 저하시키는 상쇄가 발생하므로 신중하게 요구성능을 정의하여야 한다. 예로서 시현화면 해상도 또는 광학적 분해능을 초과하는 자세추적 정확도 요구와, 시현 갱신률을 상당히 초과하는 자세추적 갱신률은 대표적인 예일 것이다. 또한 조종사의 머리위치, 머리 이동범위 및 머리회전 속도 등은 조종사의 운용환경에 의해 결정되며, 이는 센서장착 위치 및 신호처리속도에 대한 기준으로 사용된다. 헬멧추적 정확도를 정의하기 위해 항공기 관성항법장비, 레이더, 전자광학추적기 및 다양한 무장에 대한 제원 및 성능에 대한 요구사항을 분석하여야 하며, 따라서 이들을 모두 포함하는 정적오차 및 동적오차 유발요소에 대한 분석을 수행하여야 한다. 그러나 다양한 구성품들에 대한 개별적 성능에 맞추는 특수성은 상당한 비용이 초래되므로 해외 회전익용 헬멧추적시스템(이스라엘 Elbit, 영국 BAE, 프랑스 Thales)의 성능규격서를 참고하여 정리하여 보면, Table 1과 같은 운용환경

Table 1. Performance requirement analysis for helmet pose tracking

요구 성능	실험실 환경 (Stand Alone)	운용환경 (Aircraft Integrated)
헬멧 자세추적 정확도(1 σ)	5 ~ 6 mrad	8 ~ 10 mrad
처리속도 (System Latency)	4 ~ 10 msec	10 ~ 40msec
머리위치 범위 (Head Motion Box)	500*500*200 mm(W*D*H)	500*500*200 mm(W*D*H)
머리회전 속도	400 ~ 500°/sec	300 ~ 400°/sec

및 실험실 환경 성능으로 정의할 수 있다. 운용 환경성능은 항공기에 장착된 상태에서의 성능이므로 본 시스템이외의 측정하기 어려운 오차요소(기계적 장착오차, 계측오차, 항공기 정렬오차, 헬멧 착용오차 등)들이 존재한다. 따라서 본 시스템의 성능시험은 고정밀 계측이 가능한 실험실 환경에서 수행하여 평가하였다.

실험실 환경의 자세추적 정확도는 RMSE(Root Mean Square Error)로 정의하며 1σ 표준편차로 6 mrad이 요구된다. 실험실 수준의 연산처리 지연시간(System Latency)는 헬멧추적 시스템 그 자체의 시간지연을 의미하며 최소 10ms 이내에 신호처리가 되어야 항공기 통합 시간지연 40ms를 만족할 수 있다. 머리위치 및 머리회전 속도는 조종사의 표적인지 및 상황인지를 위한 일반적 임무환경으로 정의된다. 본 연구에서는 상기 요구성능을 만족하는 시스템 구조설계 및 구현을 수행하고 시험을 통해 평가결과를 제시한다.

2.2 헬멧추적 시스템 구조 설계

헬멧의 자세를 정확하게 추적하기 위해 1장에서 언급한 것과 같이 해외에서는 다양한 방식의 접근을 시도하였다. 초음파(Ultrasonic)를 발사하여 반사하여 돌아오는 초음파의 위상차(Phase shift) 또는 시간차(Time of Flight)를 이용한 방식은 항공기의 소음간섭과 센서잡음에 따른 오차가 커서 일반화되지 못하였다. 자계(Magnetic) 방식은 항공기 전자기 간섭과 조종석의 금속성 물질에 대한 민감도가 높아 까다로우나 현재까지 많이 사용되는 방식이다. 적외선 영역의 LED(Light Emitted Diode)를 헬멧표면에 일정한 패턴으로 부착하여 광학센서로 자세를 추적하는 기술이 일반화되고 있으나, 광학센서가 헬멧상부 및 후부를 지향하기 위한 적절한 장착위치를 결정하는 것이 제한적이며 광학센서의 시야각 및 초점거리의 이탈시 오차가 커지는 문제점을 갖고 있다. 관성센서를 헬멧에 부착하여 자세를 추적하는 방식은 시스템 구조의 단순화에 대한 장점은 있으나 시간에 따른 부유(Drift) 오차가 급격하게 발생하여 실효성이 없다. 최근에는 이러한 각 센서들의 장,단점을 상호 보완하여 성능 및 운용성을 높이는 하이브리드 기술을 개발하는 추세이다. 자계센서와 관성센서의 조합과 광학센서와 관성센서의 조합이 가장 많이 개발되고 있다. 자계센서는 광학센서에 비해 정확도 수준은 높으나 조종석 자계매핑(mapping) 및 전자기간섭과 같은 운용적 제한성이 크고 유지보수성이 떨어지므로 본 연구에서는 Fig. 2와 같이 광학센서와 관성센서를 이용한 하이브리드 시스템 구조를 설

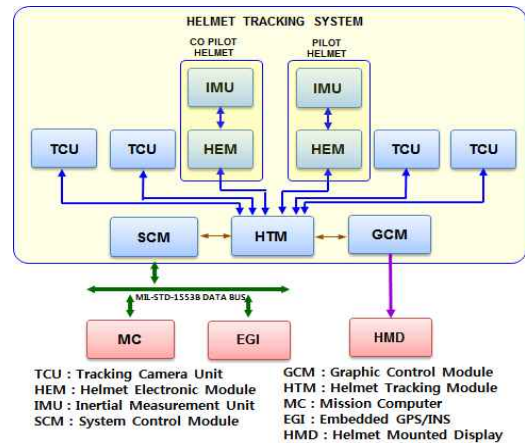


Fig. 2. Architecture of Helmet Tracking System

계하였다. 조종사별 2대의 TCU(추적용카메라, Tracking Camera Unit)는 조종사 헬멧의 주변에 장착되어 헬멧을 주시하고 있으며, 헬멧에는 IMU(관성측정유닛, Inertial Measurement Unit)가 부착되어 있다. HEM(헬멧전자모듈, Helmet Electronic Module)은 IMU 데이터를 광신호로 변환하여 HTM(헬멧추적모듈, Helmet Tracking Module)으로 전송한다. EGI(내장형 위성/관성장비)에서 생성된 항공기의 위치 및 자세정보는 SCM(시스템제어모듈, System Control Module)을 경유하여 수신한다. 최근 F-35(JSF) 전투기 개발이 지연되었던 문제점 중에 하나로서 헬멧자세 추적시스템이었다. 항공기 급기동 시 조종사의 시선각과 시현화면의 시간차이가 발생하여 실외부 영상(Out the Window Image)과 시현정보간에 일치하지 않는 문제가 발생했다.

일반적으로 항공기에서 무장사격 명령은 실시간 인터럽트로 처리되지만 항법정보는 20ms (50Hz) 단위로 통신되고, 시현화면은 30Hz ~ 60Hz로 갱신이 된다. 이와 같은 시스템에서는 아무리 헬멧자세 추적시스템이 빠르게 신호처리를 하더라도 항공기 관성항법장비, 임무컴퓨터, 통신버스 등에 대한 정보교환 시차 때문에 F-35와 같은 문제가 생길 수 밖에 없다. Fig. 3은 본 연구물인 관성-광학 하이브리드 헬멧자세 추적시스템을 항공기에 적용하기 위해 신호처리의 흐름과 지연시간을 분석한 내용을 나타내고 있다. TCU는 항공기에 고정되어 있어 항공기의 좌표축과 절대적인 관계가 있으나, 조종사의 헬멧에 부착되어 있는 IMU는 항공기의 자세와 헬멧의 자세가 복합된 실세계(Real World)의 관성공간의 데이터를 250Hz 단위로 제공한다. 따라서 항공기 좌표축의 IMU 데이터를 얻기 위해 항공기에

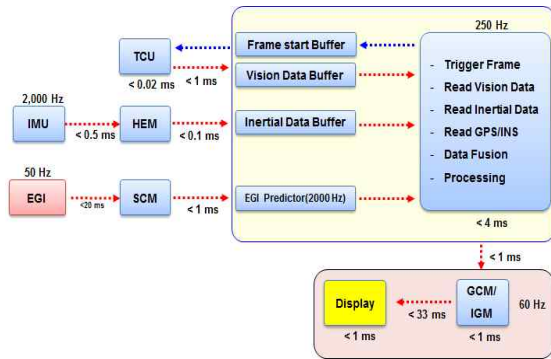


Fig. 3. Processing flow of sensor data for the helmet tracking system

장착되어 있는 EGI를 이용하여야 한다. 그러나 EGI는 50Hz 단위로 항공기의 위치/자세를 제공하며 SCM을 경유하여야 한다. IMU와 EGI가 갱신률의 차이가 크고 EGI의 데이터 전송지연시간이 커서 항공기 좌표축에 대한 헬멧의 실시간 자세를 추정하기에 심각한 문제가 발생한다. IMU의 시간차 문제를 해결하기 위해 시스템 전체에 걸친 시간동기화가 필요하다. GPS 시간을 기준으로 시스템시간을 초기화하여 각 신호생성의 시점을 알면 외삽보간 및 내삽보간을 하여 시차를 일치시킬 수 있다. 본 시스템의 TCU는 50Hz, IMU는 250Hz로 동작시켜 HTMP로 데이터를 받아 250Hz 단위로 헬멧자세 데이터를 처리한다. TCU는 HTMP의 서버명령을 받을 시 동작하므로 동기화된 데이터이나, IMU는 2,000Hz로 자세신호를 생성을 하지만 출력은 250Hz단위로 연속실행(Free Run)하므로 HTMP 관점에서는 비동기 데이터이다.

본 연구에서는 TCU가 촬영하는 시점을 기준으로 IMU 데이터를 샘플링하여 영상데이터를 융합처리하고 나머지 250Hz의 구간에서는 IMU 기반 데이터를 필터링하여 헬멧자세를 추정하는 기법을 적용하였다. 따라서 자세추적용 센서(TCU, IMU, EGI) 데이터가 HTMP에서 처리되어 HMD에 시현되는 전체 구간의 시간지연(Latency Time)은 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있다. 본 시스템의 센서데이터에 의한 시간지연은 갱신률이 가장 높은 IMU에 의해 결정되므로 약 0.6ms으로 시스템 전체의 시간지연에 미미한 영향을 미친다. 그러나 TCU와 EGI는 IMU의 갱신률에 비해 상당히 느리므로 Fig. 4와 같이 비동기 시간지연을 위한 특별한 처리를 하여야 한다. HTMP(HTM Process software)는 센서데이터 융합처리를 담당하는 소프트웨어로서 실시간성을 보장하기 위해 PPC8548 프로세서와 VxWorks

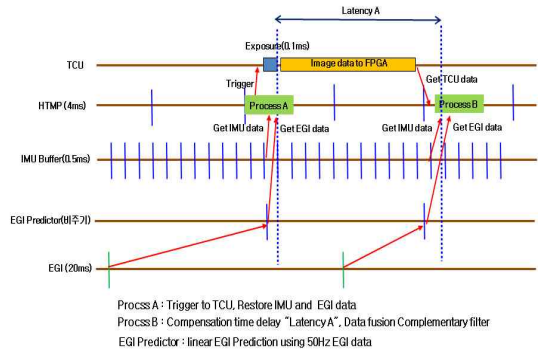


Fig. 4. Time synchronization and propagation delay compensation

Ver.6.0이상의 OS(운영체제)를 사용한다. HTMP는 본 연구의 결과물인 다양한 알고리즘이 내장된다. HTMP는 4ms의 데이터 갱신률을 가지며 두 명의 조종사에 해당하는 TCU 4대, IMU 2대, EGI 1대에 대한 데이터 처리를 동시에 수행한다. 본 연구의 대상은 아니나 영상신호의 흐름을 살펴보면, 헬멧자세 추적결과가 GCM에 전송되면 GCM은 항공기 자세와 비교하여 헬멧시선방향의 영상을 생성하여 HMD에 표준 영상포맷(Optical DVI, 30 frame/sec, 1280*728픽셀)으로 전송한다.

Figure 4는 센서데이터의 비동기 문제 및 전송 지연에 대한 문제를 해결하기 위해 제안된 보상 기법을 나타내고 있다. HTMP(HTM Process Software)는 4ms(250Hz)의 주기로 수행되며 매 주기의 전반부에 수행되는 프로세스 'A'가 TCU에게 촬영명령(Trigger)하는 시점을 기준으로 IMU 0.5ms(2,000Hz)의 데이터와 EGI 예측기(EGI Predictor, EGI 50Hz) 데이터를 보간하여 예측하여 버퍼에 저장한다. HTMP 프로세스 'B'는 이전 주기에서 저장된 IMU, EGI 데이터와 TCU에서 수신된 데이터를 이용하여 "Latency A" 시간동안의 항공기와 헬멧의 변위를 예측하여 현재시점의 헬멧 자세를 융합처리(광학센서 자세추출, 상보필터)하여 최종 자세를 시현장치에 제공한다.

본 제안을 통해 센서 데이터의 비동기 문제와 전송지연의 문제는 해결되며, 단지 시현장치(GCM, IGM, 광학시현기)에서 발생하는 약 33ms의 시현지연은 발생한다. 이러한 시현지연을 보상하기 위해 헬멧의 움직임과 항공기의 기동을 추가적으로 예측하는 것은 오정보를 제공할 수 있으므로 별도로 고려하지 않는다. 다만 대부분의 지연을 발생시키는 시현장치 지연문제를 해결하기 위해 고성능의 그래픽 하드웨어, 영상신호 표준의 발전 및 영상시현기의 개선이 필요하다.

Table 2. Error factors

오차 유발요소	
정적 오차	항공기 관성센서-기축 정렬오차
	광학센서-기축 정렬오차
	광학센서 렌즈-센서 정렬오차
	헬멧-관성센서 정렬오차
	헬멧 시현기 정렬오차
	헬멧 형상 오차
	헬멧-머리 정렬오차
	광학센서 광학왜곡
동적 오차	헬멧-머리 비틀림 오차
	관성센서 부유오차
	광학센서 전기잡음
	항공기 관성센서와 비동기 시차오차
	헬멧 주변광 간섭잡음
	IR-LED 전기잡음
	항공기 진동
	광학센서-헬멧 초점거리 이탈

2.3 자세추적 오차 유발요소 분석

광학센서 및 관성센서를 이용한 헬멧 자세추적 시스템이 항공기에 적용되어 운용되기 위해 항공기 관점에서의 전반적인 오차 유발요소 분석이 필요하다. 오차 유발요소를 정적요소와 동적요소로 분류하고 오차에 대한 경중을 비교하여 효과적인 오차감소 방안을 수립하여야 한다.

본 연구에서는 Table 2와 같이 오차유발 항목을 식별하였다. 정적오차 요인은 대부분 부품간, 구성품간의 정렬오차에 의해 발생하며, 이를 줄이기 위해 정밀측정장비를 이용하거나 전용치구를 제작하여 통합오차를 0.5 mrad(0.028°) 이하로 정밀하게 계측하고 보정하여야 한다. 그러나 헬멧-머리 정렬오차는 조종사가 헬멧을 착용할 때 발생하는 오차로서 시스템 관점에서는 이 오차를 계측하기에 어려움이 있다. 이 문제를 해결하기 위해 조종석 전방부에 무한광학계로 구성된 기축 참조표시기(BRU, Boresight Reference Indicator)를 거치하여 조종사가 헬멧을 착용한 상태에서 헬멧시현기의 참조점과 일치시키는 조정(Adjust)을 수행하여야 한다.

동적오차의 요인은 운용환경의 동적특성이나 전기적 잡음에 의해 발생하는 오차로서, 이를 줄이기 위해 각 요소별 동적특성 분석을 통해 감쇄할 수 있는 적응형 필터 알고리즘을 개발하여야 한다.

2.4 광학센서를 이용한 헬멧추적 시스템 설계

본 시스템에서는 광학센서로서 상용카메라를

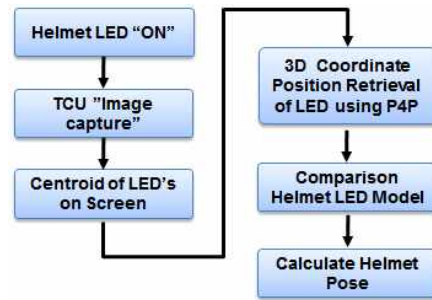


Fig. 5. Data processing flow for optical pose tracking

사용하지 않고 시간지연을 최소화하고 화각 및 초점거리를 최적화하기 위해 TCU를 자체 설계 개발하였다[3]. TCU는 2048*2048 픽셀의 CMOS 영상검출기가 내장되며 50Hz의 갱신률을 가진다. TCU는 영상신호를 출력하지 않고 검출기에서 출력하는 스트림 데이터를 이용하여 각 LED의 중심점을 직접 계산한 후 HTM에 전송한다. 따라서 프레임 단위의 영상전송에 따른 시간지연을 최소화할 수 있다.

헬멧의 표면에는 4개씩 그룹화된 7개의 IR-LED 그룹으로 헬멧의 상부, 측부 및 후부로 배치되어 있으며, HTM의 제어하에 TCU의 촬영 동기신호에 맞추어 점멸된다. 각 IR-LED 그룹은 평면 사각형 형태로서 TCU의 시선각과 가장 가까운 그룹이 선택되어 점등되며, 이때 촬영된 LED의 중심점(Centroid) 좌표는 P4P(Perspective 4 Point) 알고리즘[5]을 사용하여 3차원 좌표로 변환된다. P4P는 같은 평면상의 4개의 점의 좌표를 알고 있을 때 카메라에서 바라보는 각 점의 벡터를 이용하여 4점의 위치와 평면의 회전을 추정하는 알고리즘이다. 본 연구에서는 7개의 평면을 갖는 헬멧을 설계하여 각 평면에 4개의 LED를 부착하여 헬멧의 자세를 추정한다. Fig. 5는 광학식 자세추적을 위한 데이터 처리흐름을 나타낸다[8].

2.5 관성센서 융합을 통한 하이브리드 시스템 설계

광학식 헬멧 자세추적은 TCU의 최적 초점거리, LED 그룹 평면과의 직교성, 무진동 및 낮은 자세변위와 같은 특정 조건에서는 우수한 성능을 제공하지만, 상기 조건이외의 상황에서는 성능이 저하될 수 있다. 즉 저주파 특성은 우수하나 고주파 특성은 다소 정확도가 떨어진다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 관성센서를 헬멧에 부착하여 고주파특성을 보강한다. 관성센서는 시간이 지날수록 부유오차(Drift)가 발생하므로 광학식

추정 데이터를 이용하여 보정하는 상호보완이 필요하다. 기존에 연구된바 있는 관성-광학식 하이브리드 헬멧추적 시스템[6]은 스테레오 카메라(분리된 2개의 카메라)를 이용하여 LED의 각 특징점을 추출하여 삼각 측량기법을 통해 3차원 좌표를 복원하였다. 복원된 LED 좌표를 헬멧모델 맵과 비교하여 자세를 추정한 후 관성센서와 EKF(Extended Kalman Filter)로 상호 보정하여 최종 자세를 출력하였다. 그러나 이 연구에서는 관성센서와 광학센서의 초기자세 비정렬, 제한된 단축운동(Z-axis only), 광학센서의 LED 특징점 추출오차 과다, 시스템 지연시간 등에 대한 상세 조건 반영이 미흡하여 시스템의 정확도 및 실용성이 다소 떨어졌다.

본 연구에서는 광학센서 및 관성센서가 갖는 저주파, 고주파 특성을 이용하여 전통적 상보필터(Complementary Filter)[4]를 응용하여 적용하였다. 또한 Fig. 4와 같이 각 센서의 데이터 획득 시차를 보정하는 예측모델을 사용하여 실시간성을 확보하였다. Fig. 6은 관성센서의 각속도를 적분한 자세와 광학센서의 자세 출력을 비교하여 계수 K를 조정함으로써 저주파 및 고주파 필터의 차단주파수(Cut-off Frequency)를 동적으로 결정하는 적응형 상보필터에 대한 도식이다. 식 (1)에서와 같이 관성센서의 각가속도 M을 적응형 계수로 입력하고 식 (2)와 같이 논리적으로 α 비율을 결정한다. K_I 는 적분이득(integral gain), K_P 는 비율조정이득(proportional gain), ω 는 차단주파수(cut-off frequency), ζ 는 댐핑률(damping ratio), $D(M)$ 는 자세변환분이다. 헬멧의 자세변화분이 크면 LED의 블러링(blurring)과 그룹경계 민감도가 커지므로 광학식 자세 보다 관성센서의 자세를 활용하는 것이 우수한 특성을 보인다. 따라서 본 연구에서는 조종사 머리회전의 운용적인 상황을 고려하여 $D(M)$ 의 최소(D_L), 최대 상수

(D_H)를 각각 $20^\circ/\text{sec}$, $100^\circ/\text{sec}$ 로 정의하였다.

고주파 잡음을 없애기 위한 저주파 필터는 일정 시간영역에서 누적평균값을 사용하는 형태를 가지므로 시간지연이 발생하지만, 본 상보필터는 두 센서의 가중치를 조정하는 형태이므로 시간지연은 거의 없다. 광학센서는 50Hz로 촬영하여 자세값을 갱신하고 있으나, 이 자세값은 항상 사용되지는 않는다. 즉 이상적인 촬영조건에서 출력한 자세값만 선택하여 관성센서의 부유오차를 보정하는 용도로 동작된다. 관성센서는 10초(0.1Hz)에 약 0.1° 의 부유오차가 발생하므로 최소한 10초 이내에서 한번은 광학센서의 자세값으로 보정이 되어야 한다.

$$\begin{aligned} \hat{\phi} &= \frac{1}{s}(\dot{\phi}_g - \dot{\phi}_v) = \frac{1}{s} \left(\dot{\phi}_g + K_P(\phi_v - \hat{\phi}) + \frac{K_I}{s}(\phi_v - \hat{\phi}) \right) \\ K_I &= \alpha^2 \omega^2 \\ K_P &= 2\zeta \alpha \omega, \zeta = 0.707 \\ e &= \hat{\phi} - \phi_v \\ M &= \sqrt{\dot{\phi}_{gx}^2 + \dot{\phi}_{gy}^2 + \dot{\phi}_{gz}^2} \end{aligned} \tag{1}$$

$$\alpha = \begin{cases} 1.0 & D(M) \geq D_H \\ 0.5 & D_L \leq D(M) < D_H \\ 0.1 & D(M) < D_L \end{cases} \tag{2}$$

$$D(M) = \| M(t_0) - M(t_{-1}) \|$$

$$D_H = 100^\circ/\text{sec}, D_L = 20^\circ/\text{sec}$$

III. 실험시험 및 결과분석

본 연구에서 관성과 광학이 융합된 하이브리드 방식의 헬멧 자세추적 시스템(HTS) 설계에 대한 성능검증을 위해 Fig. 7의 항공기 시스템 모의장치와 Fig. 8과 같이 자세 정확도를 계측하기 위

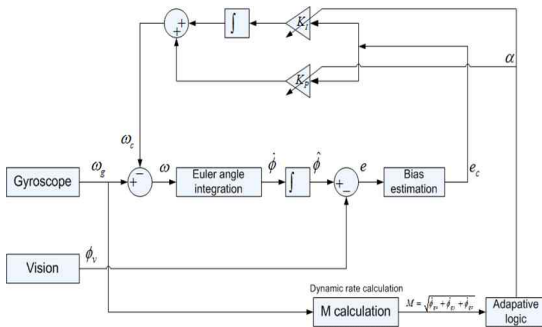


Fig. 6. Adaptive complementary filter for the inertial and optical data fusion

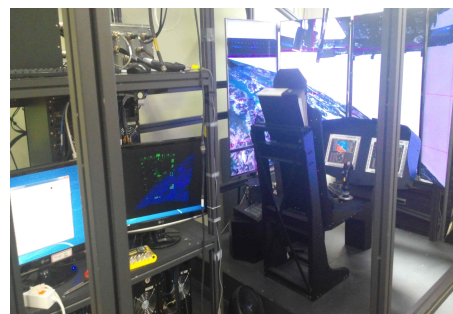


Fig. 7. Test environment for the helmet tracking system

한 장치를 이용하였다. 본 연구에서 개발한 PPC8548 프로세서 컴퓨터에 본 알고리즘이 구현된 소프트웨어[7]를 내장하여 시험을 수행하였다.



Fig. 8. Accuracy test rig for optical pose tracking(using 3-DOF Rate table)

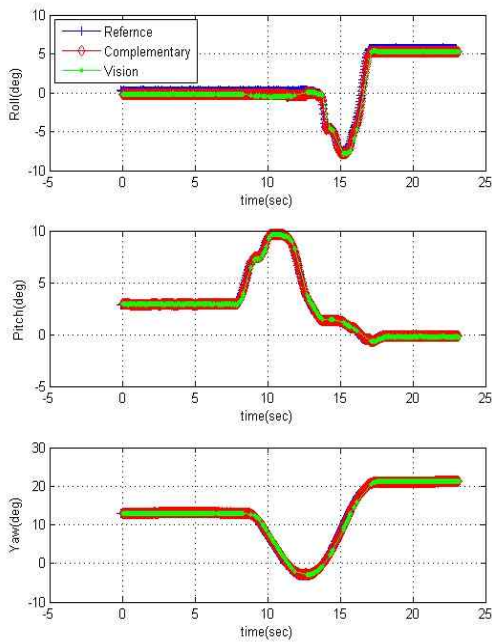


Fig. 9. Test result : Measured 3 axis(roll, pitch, yaw) Pose of Reference(Rate Table), Optical(only) and Adaptive Complementary Filter

Fig. 8과 같이 헬멧의 표면에 7개의 평면을 제작하여 각 평면에 4개의 IR-LED가 부착하였고, 헬멧 하단면에 관성센서를 부착하여 3축 레이트 테이블에 장착하였다. 헬멧 상부에는 약 300mm 이격된 헬멧추적카메라(TCU)를 장착하였다.

시험결과로서 Fig. 9와 같이 각 축별 자유운동을 수행하였을 때 기준자세(레이트 테이블 자세값, 청색)에 대비하여 광학식 자체 자세(녹색)와 적응형 상보필터 자세(적색)에 대한 데이터를 추출하였다. Fig. 10은 추출된 측정 데이터를 기준값(0)에 대한 오차 그래프로 나타낸 것으로서 Table 3과 같이 광학식 자체 자세오차는 7mrad(RMSE 1 σ), 적응형 상보필터는 5mrad (RMSE 1 σ)의 결과를 보였다. 따라서 실험실 환경의 요구 정확도(6 mrad, 0.35°)를 만족함을 확인할 수 있었다.

Figure 4와 같이 설계한 소프트웨어가 구현[7]

Table 3. Test result of Pose Tracking using Optical Only or Adaptive Complementary Filter

	RMSE(mRadian)
Optical(Vision) Only	7.0488
Adaptive Complementary Filter(Inertial-Optical)	4.7868

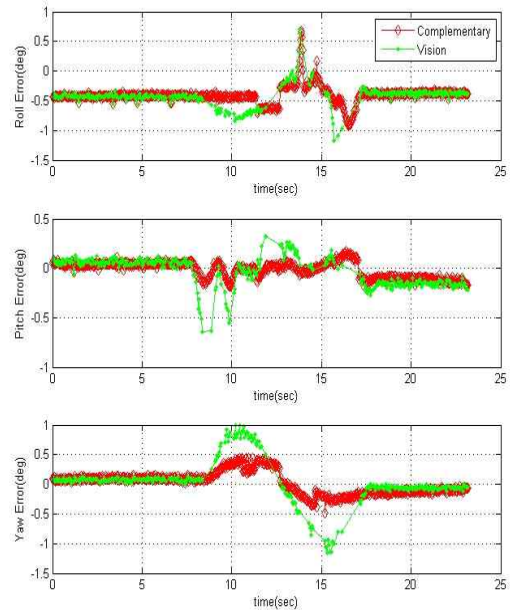


Fig. 10. Test result : Measured error of 3 axis(roll, pitch, yaw) pose tracking

되어 TCU, IMU 및 EGI에 대한 시차가 보상됨을 확인하였고, 헬멧추적 주기는 IMU 데이터 갱신주기와 동일하므로 250Hz 이며, 머리위치의 이탈범위 및 머리회전 속도는 IMU를 사용함에 따라 요구성능을 만족하였다. 단 IMU는 부유오차의 허용범위(0.1°/sec)내에서 광학식 자세값으로 보정되어야 하므로 10초 이상의 머리위치 이탈 시 조종사에게 성능저하를 고지(주의 경보)하여야 한다.

IV. 결 론

본 연구에서는 항공기 조종사용 HMD에 시선방향과 일치하는 시현정보를 제공하기 위해 헬멧의 자세를 추적하여 시현장치에게 전달하는 헬멧 자세추적 시스템(HTS)를 설계 및 구현하여 시스템 단위에서 시험한 결과를 확인하였다. 관성센서 및 광학센서의 장점을 이용하여 관성센서의 부유오차, 광학센서의 머리위치 범위 제한 및 자세추적 갱신을 저하 등의 단점을 상쇄시키는 기법으로서 그 성능이 목표치에 도달함을 확인하였다. 그러나 이러한 시험은 좋은 조건의 실험실에서 수행되었으므로 실제 항공기 운용상황에서는 보다 저하된 성능을 보일 것으로 예상된다. 따라서 향후에는 항공기와 유사한 진동조건, 적외선 간섭조건 등의 상황을 구현하여 시험을 수행할 예정이며, 정밀한 정렬치구 및 계측장비를 추가로 개발하여 항공기와 동일한 수준의 정렬시험과 그 오차의 영향성을 검토할 예정이다.

후 기

본 논문은 민군겸용기술센터의 지원을 받아 연구한 결과물입니다(Program, 11-DU-EE-01).

References

1) Sang-Hyun Hwang and Chul-Ju Chung, "The Trend Analysis of Leading-Edge

Technology for Defense System," Defense System Trend Analysis, Vol. 27, pp. 23-26, Mar. 2013.

2) Sang-Hyun Hwang, "The Conceptual Design of HMD System using Multi-Sensor Image Data Fusion and Stereography Display Technology," ASSK Vol. 2, No. 2, pp. 113-129, July, 2013.

3) Chul-Ju Chung and Sang-Hyun Hwang, "Design and Implementation of Helmet Tracking Sensor using FPGA," 2014 KSAS Fall Conference, pp. 1667-1670, Nov. 2014.

4) Mahony, R., Hamel, T., and Pflimlin, J. M. (2008). Nonlinear complementary filters on the special orthogonal group. IEEE Transactions on Automatic Control, 53 (5), pp. 1203-1218.

5) Bachmann, E. R., Duman, I., Usta, U. Y., Mcghee, R. B., Yun, X. P., and Zyda, M. J. (1999). Orientation tracking for humans and robots using inertial sensors. Computational Intelligence in Robotics and Automation, International symposium of the IEEE 1999, pp. 187-194

6) Young-Il Kim, Young-Jun Lee, Jun-Kyu Lim and Chan-Gook Park. "Hybrid Head Tracker System to Compose Optical/Inertial Head Tracker System", International Conference on Soft computing Intelligent system, Information Technology, pp. 287-290.

7) Chul-Ju Chung, Sang-Hyun Hwang, "Study on the Design of Onboard Helmet Tracking Software" 2015 KSAS Fall Conference, pp. 2110-2113, Nov. 2015.

8) Jung-Ho Kim, Young-sik Kim, Kyum-Rae Jo and Dae-woo Lee, "Elements of Error Analysis of Optical HTS Algorithm and Optimization Algorithm for Initial Alignment Angle", 2015 KSAS Fall Conference, pp. 447-450, Nov. 2015.