

능동 하모닉 기어구동시스템의 동기화제어 Synchronized Control of Active Harmonic Gear System

김상진* · 문덕홍** · 김영복***†

Sang-Jin Kim*, Deok-Hong Moon** and Young-Bok Kim***†

(접수일 : 2014년 01월 02일, 수정일 : 2014년 01월 14일, 채택확정 : 2014년 01월 14일)

Abstract: In this paper, the authors consider a gimbal system in which a camera is installed to reconnoiter the objects or targets. The issue for this considered system is to obtain information with good quality always. To achieve given objective, it is necessary to control the gimbal system with accurate rotation angle and speed. In this paper, the authors design a robust control system based on H_{∞} control framework. The controller is designed using a plant model obtained by experiment and simulation. And the experiment result with good control performance is presented.

Key Words : Gimbal System, Camera, Good Control Performance, Robust Control, Experiment.

1. 서 론

1.1 연구배경

시선안정화가 주목적인 영상처리장치기술에도, 광학 및 디스플레이장치기술이 발달함에 따라 소프트웨어적인 부분뿐만 아니라, 하드웨어적인 부분에 이르기 까지 괄목한 만한 발전이 이루어 졌다. 특히, 김벌(gimbal)로 일컬어지는 대표적인 하드웨어부분도 더욱 고품질의 영상획득이 가능한 수준으로 발전하였다. 또한 40배율이 넘는 고배율 광학시스템과 대형 디스플레이장치가 시선안정화 시스템에 적용됨에 따라 영상획득장치를 구동하는 기계시스템도 더더욱 고정밀·고성능화가 요구되고 있다.¹⁾

이와 같은 영상품질 요구수준에 부합하기 위하여 기계 및 제어분야에서도 다양한 기술개발이 촉진되었고 발전하고 있지만, 영상획득 및 처리기술, 통신기술의 발달 수준에는 전반적으로 못 미치고 있는 실정이다. 그 이유는 장비가 사용되는 목적 및 환경적인 특수성 때문에 수반되는 문제를 기계 시스템기술만으로 극복하기 어렵기 때문이다. 시선안정화장치는 일반적으로 김벌시스템이라는 기계시스템에 영상획득 장치인 카메라 모듈이 장착 되는 형태로 구성된다. 이 장치는 구조물에 장착 되어 시선을 상하좌우로 움직이거나 구동되는 기계장치(차량) 외부에 탑재되어 있는 상태에서 안정적인 영상을 획득하는 것이 주된 기능이다. 또한 그 외 다양한 기능 및 모드를 제공함으로써 한

*** 김영복(교신저자), 문덕홍 : 부경대학교 기계시스템공학과

E-mail : kpjiwoo@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6197.

* 김상진 : 부경대학교 대학원 제어기계공학과, 삼성탈레스.

*** Young-Bok Kim (Corresponding author), Deok-Hong Moon : Department of Mechanical System Engineering, Pukyong National University.

E-mail : kpjiwoo@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6197.

*Sang-Jin Kim : Department of Control & Mechanical Engineering, the Graduate School, Pukyong National University and Samsung TALES.

가지 목표를 추적하거나 일정한 시선 속도로 다각도 영상을 획득하는 기능을 구현할 수 있는 전자광학추적기(EOTS : Electro-Optical Tracking System)가 있는데, 헬기의 헬리캠, 목표물 추적장비, 감시정찰 장비 등이 좋은 응용예이다.²⁾

특히 시선안정화시스템은 자이로스코프 센서에서 카메라 모듈의 자세정보를 취득하여 고정된 시선영상을 제공할 수 있기 때문에 의학기기, 건설용 장비, 해양장비 등 그 적용범위도 폭 넓다고 할 수 있다. 이렇게 시선안정화 영상장치가 다양한 환경에서 다양한 용도로 운용이 가능하며 산업이 발달 할수록 그 적용분야에서 요구되는 성능 또한 엄격해 지고 있다. 하지만 앞서 기술한바와 같이 장비가 장착되는 기계시스템특성 및 운용환경적인 요인때문에 안정한 영상을 획득하기가 쉽지 않다. 이러한 환경속에서도 안정하고 고품질의 영상을 획득하기 위해서는, 영상처리 알고리즘자체 보정

기능만으로 어느 정도 문제해결이 가능하다. 그러나 대부분의 불안정 요소는 기계시스템 그 자체에 있기 때문에 소프트웨어적인 해결방법만으로는 완전한 대응이 불가능하다. 예를 들어 회전체구동을 위한 동력전달 방식으로 기어구동방식을 들 수 있는데, 구조상 백래쉬가 반드시 존재하게 되며, 백래쉬는 시선안정화장치에서 다양한 문제점을 발생시킨다. 단순한 회전부하에만 대응하는 시스템의 경우(동일방향으로 일정속도로 운전되는 경우)에는 초기구동영역에서만 백래쉬 영향이 발생하므로, 진동 및 관성변화 등을 발생시키는 외부로부터의 영향이 없다면 백래쉬 그 자체가 큰 문제가 되지 않는다. 즉, 단일 방향 등가속 운전의 경우에는 구동기어와 피동기어간에 백래쉬가 발생하지 않으므로, 외란이 없다면 가공편차로 인한 영향을 제외하고는 부하가 일정하고, 그 변화 또한 선형적으로 작용한다. 하지만, 백래쉬는 감속구간이나 회전방향이 바뀌는 순간에 그 영향이 두드러지게 나타나게 되며, 외력이나 외부진동에 의해서도 그 영향이 발생한다. 이것은 곧 시선안정화장치에서 영상떨림이나 위치오차로 나타나게 된다. 이와 같이 백래쉬는 일종의 비선형 구간으로 예측이나 대응이 어렵다. 또한, 제어시스템을 구축하는 문제에서도 이와 같은 백래쉬에 대한 영향을 고려하고 대응하는 것이 쉬운 일이 아니다.



Fig. 1 Gimbal system



Fig. 2 EOTS of the helicopter

1.2 기존 연구결과 및 연구목적

백래쉬가 존재하는 기어구동에서의 이와 같은 문제점을 해결하기 위한 방법으로 모터직접구동방식³⁾이 주로 사용된다. 모터직접구동방식에서는 기어를 통해 동력전달을 하지 않으므로 백래쉬로 인한 문제발생요인도 없고, 응답성도 우수하다. 하지만 백래쉬로 인한 문제점을 회피하기 위해 모터직접구동방식을 적용하게 되면, 보다 복잡하고 까다로운 설계 구조상의 문제점을 수반하게 된다. 뿐만 아니라, 모터 무게나 부피에 비해 구동토크가 작기 때문에 공간 운용면에 있어서 효율성도 크게 떨어지게 되어 특수한 목적 외는 거의 사용되지 않고 있다.

기어구동방식이 적용된 서보계 설계문제에서 백

래쉬로 인한 문제점을 해결하기 위한 많은 연구결과가 이미 보고되었으며, 제어적관점과 기계적관점에서의 접근방법으로 문제해결 방안을 제시하고 있다. 제어적관점에서는 백래쉬로 인한 시스템의 비선형성, 불확실성에 기인하는 문제점을 해결하는데 초점을 맞추고 있다.^{4),5)} 예를 들어 외란관측기를 도입하여 백래쉬를 보상하기 위한 제어를 설계하여 백래쉬 영향을 감소시키고 있다. 또는 백래쉬로 인한 모터입력전압값의 변화가 시스템 대역폭에 미치는 영향관계를 검증하여 추가적인 설계사양을 제시하기도 한다.

기계적관점에는, 백래쉬에 대한 문제해결을 위해 비선형 특성을 예측하기 위한 해석적 모델을 제시하거나, 동특성을 해석하여 백래쉬 영향을 저감할 수 있는 방법을 찾고자 하는 것이 대부분이다. 예를 들어 기어치형을 새롭게 설계하거나, 응답특성을 개선할 수 있는 요소를 추가-조정해서 백래쉬 영향을 줄이는 것이다.

또 다른 기계적관점에서의 문제해결을 위한 이슈는, 백래쉬로 인해 발생하는 가장 큰 문제점이라 할 수 있는 진동-소음에 초점을 두어 원인파특성을 명확하게 파악하는데 있다. 그리고 진동-소음 특성을 경계조건별로 분류하고 변수에 대한 저감효과를 파악하여 설계 및 운용조건에 반영하기도 한다.^{6,7)}

하지만 백래쉬가 회전구동시스템에 미치는 영향을 줄이기 위한 다양한 노력에도 불구하고 각 해결방법으로 극복 할 수 없는 한계에 직면한다. 즉, 기존방법이 백래쉬가 존재하는 상황에서 그 영향을 줄이고자 하는데 초점을 맞추고 있기 때문에, 백래쉬는 '0'이 되는 것이 아니다. 즉, 단지 그 크기가 작아진다는 것이므로 미시적 관점으로 접근하면 그 영향은 절대로 무시할 수 없는 정도가 된다. 특히 주목적이 동력전달이 아니라 시선안정화를 위한 서보제어에 있다면, 제어목적은 달성할 수 없는 한계상황에 봉착할 수도 있다.

그래서 본 논문에서는 기어로 구동되는 시선안정화 장치가 제로 백래쉬 상태에서 지속적으로 구동될 수 있는 시스템을 구축하는 문제에 대해 고찰하고 있다.

우선 최적의 영상출력을 획득할 수 제어사양을 설정하고, 이를 위해 1개의 구동모터를 제어하기 위한 제어를 설계한다. 제어사양은 카메라의 시선위치를 제어하는 전 구간에서 위치오차가 없고, 과도상태에서도 오버슈트 없이 신속하게 목표치에 도달하는 것이다.

이와 같은 제어적관점에서의 시선안정화시스템 구축 전략에 더하여, 제어적인 방법으로 달성할 수 없는 성능개선을 위해 기계시스템의 구조를 변경하는 방법을 도입하여 백래쉬가 없는 시선안정화시스템을 구축한다.

제안하는 시스템에서는 1개의 피동기어에 DC모터로 구동되는 2개의 구동기어를 도입한다. 즉, DC모터 동기화 제어를 통해 구동모터간의 미세한 속도차이로 기어간의 백래쉬를 없애고자 한다. 즉, 두 개의 모터를 각각 백래쉬가 존재하는 상태로 조립한 후 1개의 구동기어는 서보구동을 목적으로 이용하고, 다른 1개의 구동기어는 백래쉬 제거를 목적으로 하여 구동속도를 제어함으로써 피동기어의 동특성을 개선하고자 한다. 결론적으로 백래쉬를 제거한 기어구동방식 시선안정화 장치를 구축하여, 안정화된 최적의 영상을 획득하는 방법을 도출하는 것이 본 연구에서의 최종목표이다.

2. 제로 백래쉬 시선안정화 장치

2.1 제로 백래쉬 구현원리

본 논문에서 다루고 있는 웜 기어(worm gear) 형 제로 백래쉬 구조를 설명하기에 앞서 제로 백래쉬 구현원리를 설명한다.

기어 회전체 구동 중에 발생하는 백래쉬 현상은 Fig. 3과 같이, 두 기어 접촉선간 변위차 d 의 발생 때문이다. 그러므로 변위 d 의 발생을 방지하면 제로 백래쉬를 구현할 수 있게 된다. 이를 위해 Fig. 4와 같이 m_1 보다 미세하게 느린 m_2 를 m_o 앞에 위치시켜 속도를 조절하면, m_1 , m_2 , m_o 의 속도는 항상 동일하게 되며 m_1 , m_2 에는 항상 일정한 부하증가 생기게 되고, 백래쉬를 없앨 수 있게 된다.

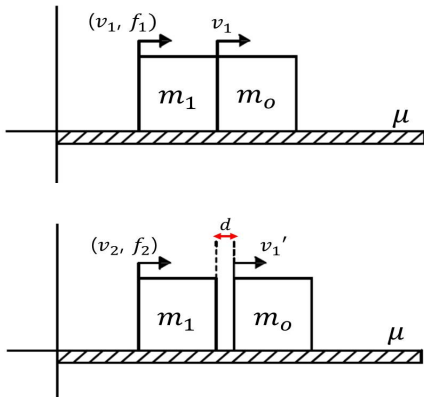


Fig. 3 Principle of backlash

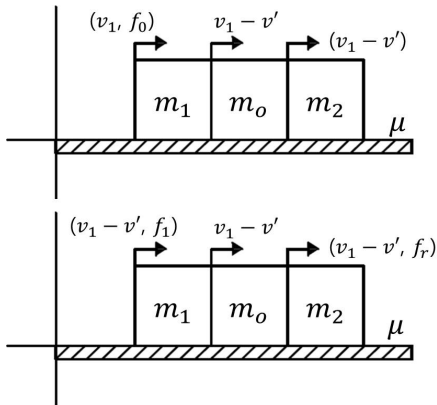


Fig. 4 Principle of zero backlash

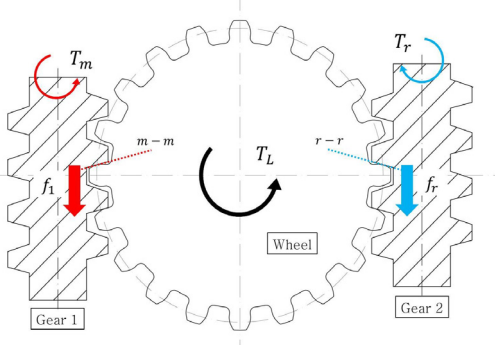


Fig. 5 The structure of a zero backlash worm gear system

2.2 제로 백래쉬 구현을 위한 기구부 구조

본 연구에서 채택한 구동장치는 워엄 기어타입이

다. 이것은 실제 운용중인 시선안정정화장치에 장착된 것이다. 워엄 기어의 가장 큰 특징은 접촉을 통한 미끄럼마찰로 동력을 전달하는 것이다. 그 특성상 역회전을 억제할 수 있어 제어시스템에 자주 사용된다.⁸⁾ 예를 들어, Fig. 5와 같이 워엄의 접촉구조가 피동기어를 정확히 구속할 뿐만 아니라, 역전방지특성은 응답지연을 발생시키지 않는 추가적인 장점도 가진다. 그림에서와 같이 전체적인 구조는 1개의 피동 휠(wheel)에 구동기어로 2개의 워엄 기어를 대칭으로 설치하였다. 여기서, 접선 $m-m$, $r-r$ 사이에 휠이 구속되며, 워엄 기어 1에 의해 발생하는 구동력 f_1 이 휠을 주도적으로 구동한다. 이때, 워엄 기어 2는 기어 1과 미세한 속도차를 가지도록 구동시키면서 접선 $r-r$ 을 유지할 수 있도록 한다. 결과적으로 두 개의 워엄 기어가 휠이 회전하기 시작하는 구간과 정지하는 구간에서 적절한 회전억제력을 발생시키며 이것이 기어간의 충돌, 즉 백래쉬를 없애는 효과를 가져오게 되는 것이다. 여기서, 구동기어인 기어 1과 기어 2의 속도차이는 백래쉬의 상한값을 보충하기 위한 위상차로 결정된다. 백래쉬는 워엄 기어의 일반화된 설계식을 적용하여 다음식과 같이 각각 계산된다.

$$j_{\theta 1} = \frac{360^\circ j_{t1}}{\cos \alpha_n \sin \gamma} \quad (1)$$

$$j_{\theta 2} = \frac{360^\circ j_{t2}}{\cos \alpha_n \sin \gamma} \quad (2)$$

여기서, α 는 압력각, γ 는 진입각, $j_{\theta 1}$ 는 워엄기어의 각도 백래쉬, $j_{\theta 2}$ 는 워엄 휠의 각도 백래쉬를 각각 나타낸다. 그리고, j_{t1} 는 워엄기어의 원주방향 백래쉬, j_{t2} 는 워엄 휠의 원주방향 백래쉬를 나타내며 이것은 각각 다음 식과 정의된다.

$$j_{t1} = \frac{j_n}{\cos \alpha_n \sin \gamma} \quad (3)$$

$$j_{t2} = \frac{j_n}{\cos \alpha_n \cos \gamma} \quad (4)$$

단,

$$j_n = j_{t1} \cos \alpha_n \sin \gamma \quad (5)$$

이다. 워엄 기어와 휠의 각도 백래쉬는 워엄 기어와 휠의 조립정도에 따라서 결정된다. 이와 같이 백래쉬 값이 계산되었다 하더라도, 백래쉬가 전혀 없는 상태로 기어를 구동한다는 것은 어렵다. 따라서 계산값을 기준으로, 기어와 피구동 휠이 떨어지지 않고, 항상 접촉된 상태에서 회전이 시작되고 종료되도록 하는 것이 최선의 방법이다. 이를 위해서는 두 개의 워엄 기어가 위에서 계산된 위상차를 기준으로 하여 적절한 속도차를 갖도록 구동시키도록 하였다. 본 연구에서는 계산값을 기준으로 반복적인 실험을 통해 약 2% 정도의 속도차를 갖는 것이 적절함을 확인하였다.

3. 모델링 및 제어기 설계

3.1 모델링

제로 백래쉬 시스템 구축을 위한 기본적인 아이디어는 앞서 기술하였다. 이 기법이 적용될 제어대상은 Fig. 6과 같이, 하나의 피구동 휠에 두 개의 워엄 기어가 대칭으로 장착된 김벌 구동시스템이다. 본 연구에서는 해당 제어대상의 수식모델을 실험적 방법으로 구하였다. 모델링을 위해 워엄기 구동 모터 드라이버 전압을 입력으로 하고, 피구동 휠의 회전속도를 출력으로 하여 전달함수를 구하였으며 이것은 식 (6)과 같다. 이에 대한 실험결과를 기초로 하여 구한 모델에 대한 시뮬레이션결과를 Fig. 7에 나타내었다. 응답특성으로부터, 구해진 수식모델은 적절하고 신뢰성이 높다고 평가할 수 있다. 이를 기초로 하여 제어기를 설계하도록 한다.

$$G(s) = \frac{0.1474s + 2.249 \times 10^4}{s^2 + 64.65s + 744.7} \quad (6)$$

3.2 H_∞ 제어이론에 기초한 제어기 설계

본 논문에서는 피구동 휠의 회전운동제어를 위한 제어시스템 구축을 위해 H_∞ 제어기법을 도입한다.

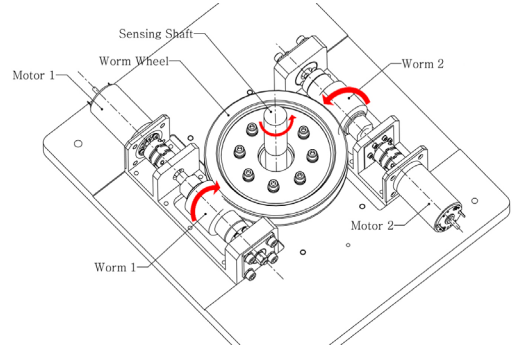


Fig. 6 The controlled system with zero backlash

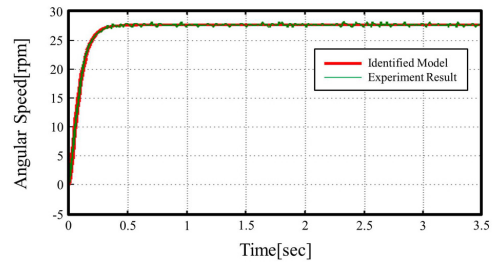


Fig. 7 Simulation and experiment result for modeling

잘 알려져 있는 것과 같이, 목표값 $r(t)$ 에 대해서 출력 $y(t)$ 가 오차 없이 추종하기 위해서는 내부모델원리(Internal Model Principle)에 따라 제어계는 목표값 발생장치와 같은 극을 가져야한다.⁹⁾ 이에 따라 Fig. 8과 같이, 스텝상 외부입력에 대응하기 위해 적분기가 도입된 강인제어 설계법 기반의 서보계를 설계하도록 한다.

Fig. 8의 제어계는, 목표값에 대한 추종오차를 '0', 외란 d 의 영향을 억제함과 동시에 가능한 작은 제어입력을 사용해야 한다는 설계사양을 포함하고 있다.

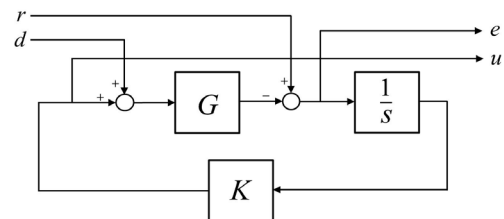


Fig. 8 A servo-system coping with the step type input signals

수식적으로는 외부입력에서 출력까지의 전달함수 $T_{zw}(s)$ 가 다음의 놈 조건

$$\|T_{zw}(s)\|_{\infty} < \gamma \ (\gamma > 0) \quad (7)$$

을 만족하는 제어기 $K(s)$ 를 구하는 문제로 정리된다. 따라서 식 (7)의 조건을 만족하는 제어기는 MatLab을 이용하여 다음과 같이 구하였다.

$$K(s) = \frac{2.65 \times 10^3 s + 2.45 \times 10^5}{s(s^2 + 1.56 \times 10^3 s + 4.44 \times 10^5)} \quad (8)$$

4. 실험 및 고찰

4.1 실험장치

Fig. 9에 실험장치를 나타내고 있다. 중심부에 피구동 휠(김벌부)을 두고, 두 개의 워기어가 대칭으로 설치되어 있다. 앞서 설명한 바와 같이 두 개의 워기어는 회전력을 보완하는 것 외에, 회전이 시작되는 영역과, 정지영역에서 발생하는 기어간 충돌로 인한 떨림을 방지하기 위한 목적으로 도입되었다.

4.2 실험결과 및 고찰

다음 두 가지 조건을 설정하고 실험을 수행하였다. 즉,

- (1) 백래쉬를 고려하지 않고 회전운동 제어시스템만 적용한 경우
- (2) 회전운동 제어시스템에 백래쉬도 고려한 경우와 같은 조건하에서 실험을 수행하였다.

먼저, Fig. 10은 조건 (1)의 경우, 즉 백래쉬를 고려하지 않고 단순히 휠의 회전각도를 엔코더를 통해 피드백하여 보정하는 문제만 고려한 경우의 실험결과이다. 펄스형 목표값에 대해 출력값(회전각)이 오차없이 추종하고 있지만, 정상상태에서 지속적인 진동이 발생하고 있는 것을 알수 있다. 이것은 백래쉬 크기가 엔코더를 통해 계측되는 회전각도 정도(분해능)보다 크기 때문에, 백래쉬를 오차로 인식하여 오차 보정을 위한 제어신호가 지속적으로 구동모터에 전달되기 때문이다. 즉, 백래쉬가

적거나, 계측센서의 정도가 백래쉬보다 큰 경우에는 이러한 문제를 억제할 수 있다. 즉, 허용오차범위를 백래쉬보다 크게 한 경우의 실험결과를 Fig. 11에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 떨림현상은 나타나지 않지만, 목표값(± 30 [deg])에 출력이 추종하지 못하고 오차가 남게 되는 문제가 발생하게 된다. 결국 계측센서 정도가 낮을 경우에는 목표지점을 정확하게 추종하는 것이 어려워지므로, 원거리 목표지점 및 목표물을 정확하게 추종하는 것이 불가능해진다. 이러한 문제를 해결하기 위해 실험 조건 (2)와 같이 백래쉬를 고려하고, 백래쉬에 의한 떨림현상을 없애는 방법을 도입하였다. 백래쉬로 인해 기어간 충돌에 의한 떨림은 정지구간에서 특히 중요한 문제가 된다. 정지구간에서는 목표물과 목표지점에 대한 상세한 정보취득을 위해 고정도의 영상획득이 필수적이기 때문이다. 그래서 조건 (1)과 동일한 회전운동 제어시스템을 도입하고, 여기에 워 기어 1을 주 동력원, 워 기어 2를 보조동력원으로 간주한다. 즉, 휠 회전각도 제어를 위한 회전력은 워 기어 1이 담당하고, 워 기어 2는 회전 시작영역과 정지영역에서 백래쉬를 없애기 위한 억제력을 발생하도록 하였다.

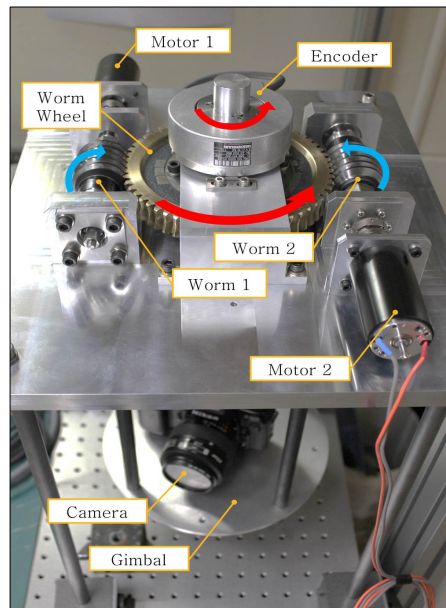


Fig. 9 Experiment apparatus

앞서 기술하였듯이, 이 억제력은 두 워기어간의 속도차로 실현되며, 속도차는 백래쉬의 크기에 대한 정보 및 수차의 시험결과를 기초로 결정할 수 있다. 본 논문에서는 약 2%정도의 속도차로 백래쉬에 의한 떨림을 억제할 수 있음을 확인하였다. Fig. 12에 그 결과를 나타내었다. Fig. 10, Fig. 11과 달리 시작 및 정지영역에서 어떠한 떨림도 발생하지 않으며, 펄스형 목표값(Fig. 12에서 점선)에 오차없이 추종하고 있음을 확인할 수 있다.

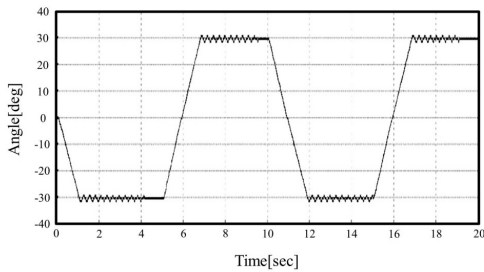


Fig. 10 Control performance without backlash compensation strategy

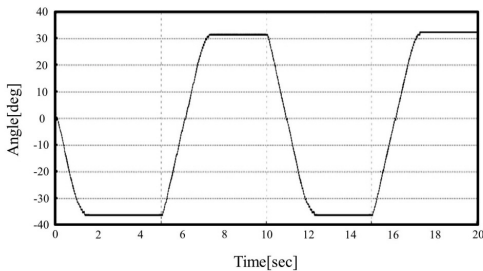


Fig. 11 Control performance by extending error bound limit

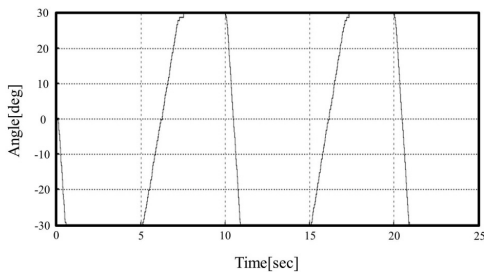


Fig. 12 Control performance with backlash compensation strategy

5. 결 론

본 연구에서는 기어로 구동되는 시스템이 제로 백래쉬를 유지한 상태에서 구동됨으로써 시선안정화 장치의 안정화 성능을 개선하고자 하였다. 기존의 연구가 제어적 관점과 기계적 관점에서 각각 해결방법을 모색하였다면, 본 연구는 구조적 개선을 기반으로 제어요소를 추가하여 백래쉬에 의한 문제점을 극복하고자 하였다. 백래쉬가 시선안정화 장치를 통해 획득되는 영상성능에 미치는 영향을 분석하였다. 즉, 백래쉬가 발생한 상황에서는 그 동특성을 개선한다 하더라도 고정밀 시선안정화 장치 영상을 제공하는데 한계가 있다는 것을 파악하였다. 그래서 제어적기법과 구동장치의 구조개선을 통한 방법을 연계함으로써 정상상태에서의 떨림현상 및 오차를 억제할 수 있었다. 본 연구결과는 고정도 영상획득이 필요한 시선안정화 장치의 핵심기술로 적용되어 양질의 정보획득이 가능할 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 산학협력 선도대학 육성사업(LINC) A+ LINC사업단의 산학공동기술개발과제로 수행된 것임 (과제번호 : 2013-기본-V-10). 또한, 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (2012R1A1A2039012).

References

1. C. H. Kang, B. S. Lee, H. C. Kang and M. H. Kang, 2012, "Current Status of EOTS for Fighter and Its Technical Trends", Proceedings of KSAS Conference, pp. 693-698.
2. J. B. Lim, S. S. Kim and J. Yu, 2013, "Maneuverability Improvement of EOTS by Driving the Outer Gimbal First", Journal of Control, Robotics and Systems, Vol. 19, No. 10, pp. 873-878.

3. J. H. Back, T. S. Yang, S. H. Kim and Y. K. Kwak, 2002, "A Study on the Bandwidth of Gear Reduction Servo System according to Backlash and Motor Supplied Voltage", Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 19, No. 6, pp. 119-127.
4. M. J. Kim, D. W. Shin, K. Y. Kim and J. S. Kim, 2002, "Designs of Line-of-Sight Stabilization Control Systems Using Disturbance Observer and Sliding Mode Observer", Proceedings of KSME Annual Conference, pp. 126-131.
5. W. K. Ahn and W. Y. Hur, 2006, "Disturbance Observer Design for Backlash Compensation of Robot Joint", pp. 187-189.
6. C. I. Park, 2010, "Nonlinear Dynamic Analysis of Helical Gears with Backlash by Torque Fluctuation", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 20, No. 7, pp. 677-684.
7. Y. S. Choi, B. H. Lee and Y. H. Sin, 1997, "Nonlinear Dynamic Analysis of Gear Driving System due to Transmission Error and Backlash", Transactions of the Korean Society of the Automotive Engineers, Vol. 5, No. 1, pp. 69-78.
8. Charles E Wilson, translated by M. S. Park, 1996 "Theory of Mechanics", Huijungdang.
9. K. Nonami, H. Nishimura and M. Hirata, 1998, "Control System Design using Matlab", Tokyo Denki University, pp. 115-118.