Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (2014) 20(10):1014-1022
http://dx.doi.org/10.5302/J.ICROS.2014.14.0047 ISSN:1976-5622 eISSN:2233-4335

적응형 필터링 기법을 이용한 회전형 시선제어시스템의 진동 저감 및 영상 주파수노이즈 저감 기법

An Adaptive Filtering Technique for Vibration Reduction of a Rotational LOS Control System and Frequency Noise Reduction of an Imaging System

김 병 학, 김 민 영*
(Byeong-Hak Kim[1,2] and Min-Young Kim[1,3,*])
[1]School of Electronics Engineering, Kyungpook National University
[2]Opto-Electronics Group, Production Engineering, Samsung Thales Co.
[3]Department of Electrical and Computer Engineering, The Johns Hopkins University

Abstract: In mechatronic systems using electric signals to drive control systems, driving signals including the frequency band of the unwanted signals, such as resonant frequencies and noise frequencies, can affect the accuracy of the controlled system and can cause serious damage to the system due to the resonance phenomenon of the mechatronic system. An LOS (Line of Sight) control unit is used to automatically rotate the gimbal system with a video imaging system generally mounted on modern aerial vehicles. However, it still suffers from natural frequency variation problems due to variations of operational temperature. To prevent degradation in performance, this paper proposes an adaptive filtering technique based on real-time noise analysis and adaptive notch-filtering for LOS control systems, and verifies how our proposed method maintains the LOS stabilization performance. Additionally, this filtering technique can be applied to the image noise filtering of the video imaging system. It is designed to reduce image noises generated by switching circuits or power sources. The details of design procedures of the proposed filtering technique and the experiments for the performance verification are described in this paper.

Keywords: adaptive filtering, LOS control system, image noise reduction

I. 서론

그림 1과 같이 외란이 존재하는 항공장비에 탑재되어 안정된 영상을 획득하기 위해 활용되는 회전 구동계 시선제어장치(LOS control system)는 모터구동신호와 구동장치의 공진점이 겹치게 될 경우 동작 중 공진(resonance)현상이 발생 될 수 있으며, 이에 따라 시선안정화 성능이 저하 될 수 있다. 이를 극복하기 위한 해결책으로 구동장치의 모달 해석(modal analysis) [1] 시험을 통하여 공진주파수를 파악하고 모터구동특성과 상호작용하여 발생되는 공진현상을 제거하기 위한 디지털 Notch 필터를 설계하여 모터구동제어기에 적용한다.

그러나 이 방법은 구동계의 온도 및 마찰계수가 작동 환경에 따라 변화되어 기계장치의 공진주파수가 변경되면 공진현상이 재발될 수 있다.

이렇게 수시로 변화하는 기계장치의 공진주파수 특성을 극복하기 위해서 현재의 시선제어장치는 다중노치필터(MNF: Multiple Notch Filter) 혹은 Notch Filter Q-factor 조절과 같은 방법을 사용한다. 하지만 이러한 방법은 광대역의 모터제어신호 출력을 필터링하여 원하는 출력의 대역폭 성능특성 저하와 위상여유 감소의 부작용을 초래할 수 있다. 또한 구동부 주변에 서미스터(Thermistor)를 설계하여 온도변화에 따른 공진주파수를 측정하는 센서를 추가하여, 변화할 수 있는 공진주파수 대역에 해당되는 Notch필터를 여러

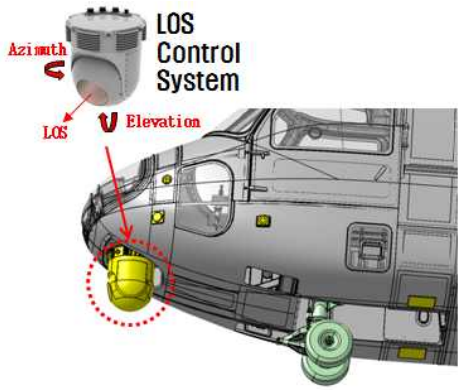


그림 1. 회전구동계 시선제어장치 활용(예시).
Fig. 1. An application of the Rotational LOS control system (example).

* Corresponding Author
Manuscript received May 10, 2014 / revised May 27, 2014 / accepted July 28, 2014
김병학: 삼성탈레스 광전자그룹(byeonghak81.kim@samsung.com)
김민영: 경북대학교 전자공학부(mykim@ee.knu.ac.kr)

Copyright© ICROS 2014

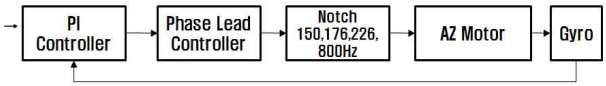


그림 2. AZ Motor 안정화 제어블록(다중 노치필터).
Fig. 2. AZ-Motor Stabilization control (Multiple Notch filter).

개 추가하고 실제 환경에서 서미스터의 검출 온도에 따라 Notch필터가 변경 선택되는 방법을 사용한다[2,3]. 이 방법은 모터제어의 대역폭성능 저하는 최소화 될 수 있는 방식이나, 출하 전 각 제품의 공진주파수 파악을 위한 복잡한 공정이 필요하며, 장시간 사용 시 변화된 조립 강성 및 마찰계수 변화에 따라 해당온도에서 공진주파수가 변화될 경우에는 문제점이 재발생 될 가능성이 존재한다.

따라서 본 논문에서는 기존 기술의 단점을 보완할 수 있도록 대역폭성능의 저하 및 위상여유를 최소화하는 동시에 장시간 사용에 따라 재발할 가능성이 없도록, Gyro 센서를 통하여 기계장치의 공진주파수를 파악하고 스스로 자신의 차단주파수(Cut-off Frequency)를 가변할 수 있는 ANF (Adaptive Notch Filter)를 사용하여 회전 구동계 시선제어장치에 적용하는 방법을 제안하고자 한다.

또한 이러한 설계개념을 노이즈 영상처리 분야에 추가적으로 응용하여 전력소스 및 전자기간섭에 따라 발생될 수 있는 주파수성 노이즈(f-noise)를 저감할 수 있는 설계방법을 제안한다.

현재 회전 구동계 시선제어장치에 사용하였던 다중노치필터(MNF: Multiple Notch Filter) [12] 설계기술은, 그림 2와 같이 수 십 Hz 범위에서 변화하는 공진주파수를 제거하기 위해 노치필터를 3개 이상 결합하여 사용한다. 이러한 방법은 간단한 설계방법으로 공진현상을 예방할 수 있는 방법이 되나 그림 2의 AZ Motor(시선안정화 제어동작에 필요한 방위각 모터)제어 신호를 그림 3과 같이 공진제거용 노치필터가 동시에 필터링 함에 따라, 안정화 모터구동 대역폭 범위의 일부가 동시에 손실되어 시선안정화(LOS control system) 성능감소를 초래할 수 있다.

또한 그림 4의 대역특성을 나타내는 다중 Notch Filter(Fc=90,100,110Hz)를 설계하여 공진현상을 예방하고자 할 경우, 예방 가능한 고유진동수 범위는 약 87~113Hz이며 공진예방 주파수를 확장하기 위하여, Notch filter의 Q-factor를 5에서 3수준으로 조정할 경우[12] 그림 5와 같은

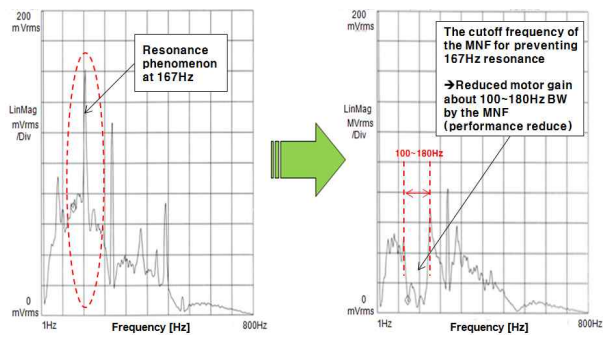


그림 3. MNF 적용에 따른 주파수대역 손실 문제점.
Fig. 3. BW Frequency loss problem of MNF.

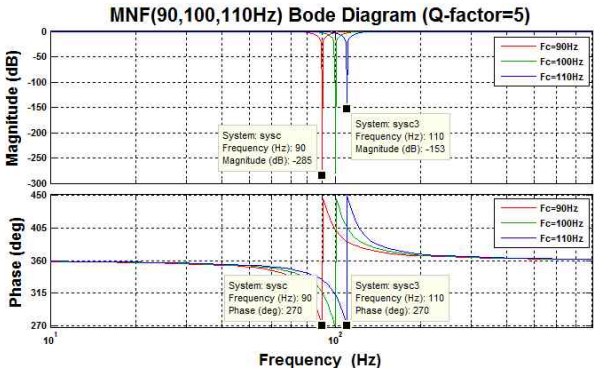


그림 4. Q-factor=5의 다중노치필터(fc=90,100,110Hz).
Fig. 4. The MNF(fc=90,100,110Hz) of Q-factor=5.

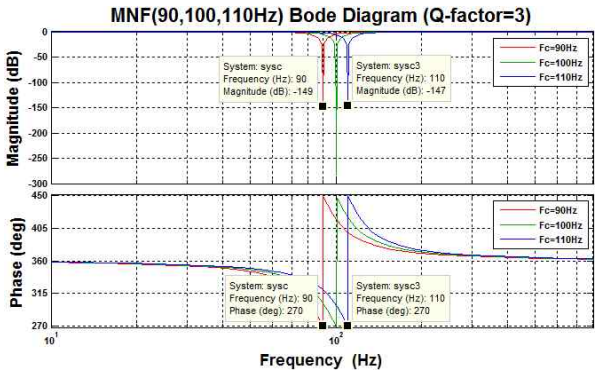


그림 5. Q-factor=3의 다중노치필터(fc=90,100,110Hz).
Fig. 5. The MNF(fc=90,100,110Hz) of Q-factor=3.

대역특성을 나타내며, 공진현상 예방가능 범위는 약 80 ~ 120Hz로 넓어질 수 있다. 하지만 앞서 그림 3에서 설명한 주파수대역 손실은 더욱 커지게 된다.

실제적으로, 회전 구동계 시선제어장치에 적용한 제어방식에 Q-factor가 5인 MNF를 적용하여 확인시험을 수행한 결과, 공진현상 예방 고유진동수 범위는 135 ~ 180Hz 수준이었다. 그러나 저온-고온 노출 환경시험 과정에서, 방위각 회전부 베어링 조립부분의 온도변화(팽창)에 따라 고온에서 고유진동수가 낮아지며, 저온(수축)에서는 고유진동수가 높아진다. 이에 따라 고온 환경에서 135Hz 이하의 주파수에서 공진이 재 발생 되었으며, 이를 극복하기 위해 회전 구동계 시선제어장치는 회전축의 금속재질의 수축/팽창률까지 고려하여 설계하여야 하므로 기계구조의 설계가 까다롭고 수율이 낮다.

앞서 기술한 MNF방식과는 달리 하드디스크의 회전판 VCM에 적용된 진동 제거 기술은, 그림 6과 같이, 회전판에 서미스터(Thermistor)를 장착하여 회전판의 온도를 측정하고, 온도에 따라 미리 설계해 둔 여러 개의 노치필터 중 LUT (Look-Up Table)정보를 검색하여 해당온도에 따라 Notch Filter(노치필터1, 노치필터2, 노치필터3, ...)를 변경 선택하는 방식을 사용한다[2].

그러나 이러한 방식[2,3]으로 동작하게 하기 위해 제품별로 온도-공진주파수 비교테이블을 내장시키는 복잡한 공정과 서미스터(Thermistor) 센서부가 추가되어야 한다.

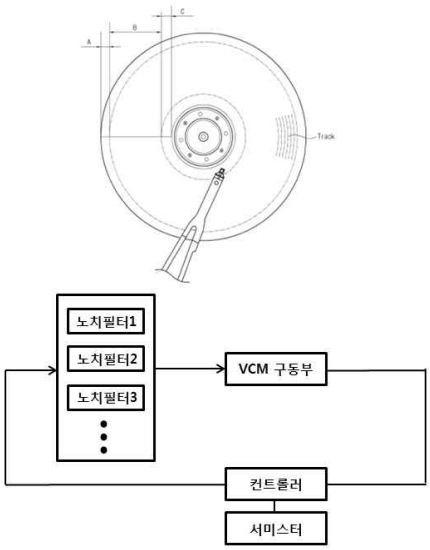


그림 6. VCM에 적용된 선택적 노치필터 [2].
Fig. 6. Selective notch filter for VCM [2].

표 1. 진동 제어 기술의 종류별 장/단점.
Table 1. The advantage and disadvantage about sort of techniques.

Technique	Advantage	Disadvantage
Single Notch	Small BW loss Low design Skill	Large resonance Variable SW
Multiple Notch[12]	Large BW loss Non-variable SW	Low resonance
Selecting Notch[2]	Small BW loss Low resonance	High manufacturing Skill
Proposed Adaptive Filter[12]	Small BW loss Resonance removable SW coherence Low manufacturing Skill	High design Skill

본 연구의 목적은 시선제어장치에서 발생되는 다양한 원인에 따른 주파수 가변 공진현상을 효율적으로 제거하기 위한 방법 및 그 방법을 사용하기 위해 자이로센서를 응용하여 필터를 시스템에 적응시키는 방법을 고안하여 최소의 필터링으로 공진현상을 예방하기 위한 것이다.

II 장에서는 임의의 주파수에서 발생하는 Gimbal의 공진현상을 노치필터가 공진주파수의 위치로 적응/변경되어 공진을 예방하고 시선 안정화 성능을 최적화 하는 설계방법에 대해서 설명하였으며, III 장에서는 제안된 기법을 이용하여 Gimbal 공진제거 효과를 실험/검증한 내용과 이러한 설계개념을 영상처리 분야에 응용할 경우 노이즈 저감의 효과가 있음을 실험결과로 정리하였다.

II. Adaptive Notch Filtering을 이용한 Gimbal 공진 제거

1. Gimbal 공진제거 Adaptive Notch Filtering개념

Gimbal의 공진제거를 위한 ANF (Adaptive Notch Filetering)의 개념은 그림 7과 같이 Gyro 센서신호 검출부(gyro sensor signal detection), 주파수 분석기(frequency analyzer), 파라미터 탐색부(parameter searcher), 노치필터(adaptive notch filter)로 구성된다. 노치필터는 파라미터 탐색의 결과에 따라 차단주파수를 변화 하게 되고, 최종적으로 PID 제어부(PID & Lead Controller)의 출력 신호로 방위각 구동 모터(AZ Motor)를 제어함에 있어 공진주파수 성분을 차단하여 공진현상을 실시간으로 예방하게 된다.

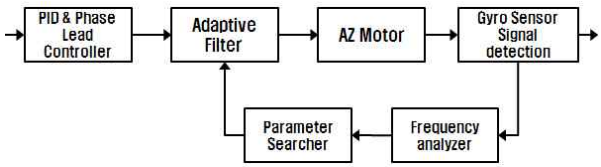


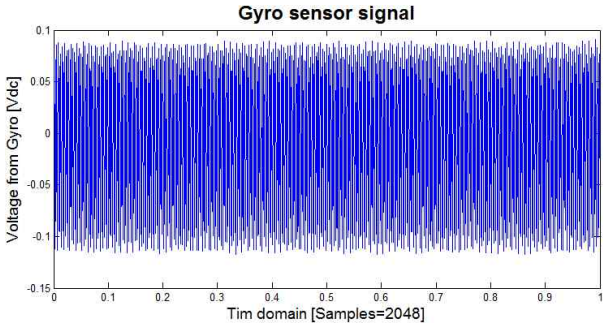
그림 7. ANF (Adaptive Notch Filter)의 기본개념.
Fig. 7. Basic concept of ANF(Adaptive Notch Filter).

Gyro 센서 검출부에서는 안정거울 유닛(LOS 안정화를 목적으로 거울을 회전/제어하여 LOS의 방향을 제어하는 장치)의 방위각 구동특성을 검출하고, 주파수 분석기를 통하여 주파수특성 분석결과를 도출하게 되며, 이를 공진주파수 파라미터 탐색부의 기반 Data로 사용한다. 파라미터 탐색부 블록에서는 주파수 특성분석 결과 값을 검색하여 공진주파수에 해당하는 파라미터를 찾아내게 된다. 적응형 노치필터는 파라미터 값을 전달받아 주파수특성에 따른 노치필터의 전달함수를 생성하게 되며, 생성된 노치필터의 전달함수를 이산화(Z-transform)하여 디지털필터로 적용함으로써, 노치필터의 전달함수를 시스템에 맞게 적응시키도록 한다. PID제어부의 출력신호는 적응형 노치필터에 의해 필터링되며 이는 방위각 모터구동신호 중 공진을 유발할 수 있는 주파수 성분을 제거하는 기능을 한다.

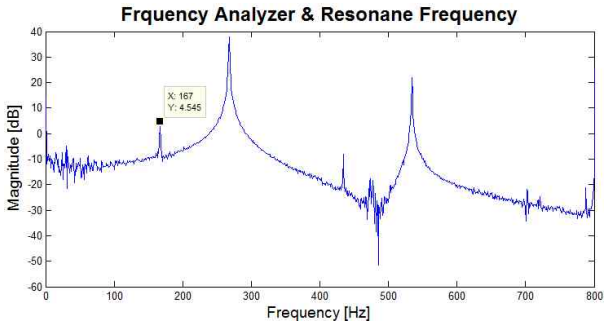
2. 공진제거를 위한 Adaptive filtering 동작원리

Gyro 센서 검출부에서 측정된 검출신호는 그림 8(a)와 같다. 이는 시간에 따른 안정거울 유닛의 방위각 움직임을 Gyro 센서를 이용하여 검출한 값이며, 제어기에서는 이 Gyro 센서 신호를 일정시간(이는 1초일 수 있다) 저장 받아 1차원 배열의 데이터로 저장한다. 하지만 시간의 변화에 따른 방위각 움직임으로 공진주파수를 파악하기는 어려우므로 주파수 분석기로 데이터를 전달한다. 주파수 분석기는 제어기에 내장되어 주파수특성 분석결과를 도출하게 되며, 이를 위해 소프트웨어상에서 주파수특성을 파악 할 수 있도록 식 (1)과 같은 DFT (이산퓨리에변환, Discrete Fourier Transform) 기법을 사용하게 된다. 소프트웨어상에서 DFT를 처리하는 것은 많은 연산량이 발생되어 신호처리기에 많은 부하를 발생시킬 수 있으므로, 주파수 분석기에서는 FFT (고속퓨리에변환, Fast Fourier Transform) 연산을 추가로 사용하며, 여기에는 가능한 고속 연산 처리를 위한 회전인자와 비트 역순의 배열을 생성하는 부분과 FFT를 실행하는 두 가지의 함수로 구성될 수 있다. FFT기법[5]의 경우 현재 보편적으로 알려져 있는 기술이며, 실시간 시스템에 구현하기 위한 기법 또한 각 하드웨어 부품 선정 시 기본함수로 제공되고 있는 경우가 많으므로 본 기술에 대한 설명은 생략한다.

$$F(u) = \sum_{x=0}^{M-1} f(x) e^{-j2\pi(ux/M)} \quad (1)$$



(a) Gyro signal detection.



(b) FFT spectrum.

그림 8. 자이로 신호검출 및 FFT 스팩트럼 분석결과.

Fig. 8. The result of gyro signal detection and FFT Spectrum analysis.

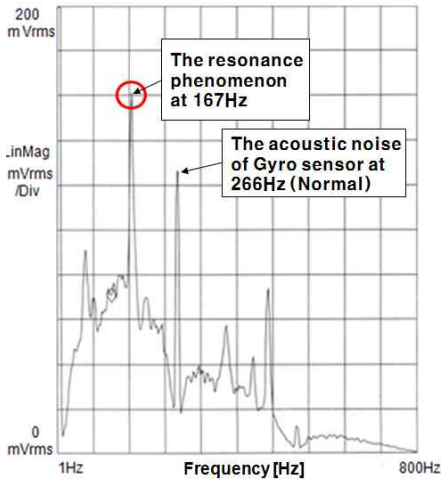


그림 9. 모터 제어신호의 주파수특성.

Fig. 9. Spectrum of motor control signal.

그림 8(b)의 결과는 MATLAB Simulink를 이용하여 그림 8(a)와 같은 Gyro 센서 검출부에서 전달 받은 신호에 FFT 연산을 적용한 결과의 주파수 스펙트럼이다.

그림 9에서 보듯이 약 167Hz의 위치에 공진주파수가 존재 하는 것이 확인되며, 266Hz, 533Hz에는 Gyro 센서의 회전주파수에 따른 고조파가 나타나고 있다. 시스템 공진의 원인이 되는 공진 주파수는 그림 8의 모터 제어신호의 주파수특성에서 확인하듯이 모터를 제어하는 외력이 존재하는 주파수에 위치하는 167Hz의 주파수로 인해 심한 공진현상이 발생할 수 있음을 알 수 있다.

154	0.000752656910	
155	0.000683390255	
156	0.000798138450	
157	0.000886004848	(b)
158	0.000724292736	
159	0.000433201784	
160	0.000168359958	
161	0.000564555349	
162	0.000841868142	
163	0.004839346596	
164	0.115885254660	
165	0.499802069200	
166	0.885160222100	
167	0.960451541000	(a)
168	0.954240211400	
169	0.744372049400	
170	0.294282511600	
171	0.039253031860	
172	0.000875782597	
173	0.000333504723	
174	0.000624871042	
175	0.001529383003	
176	0.002370730446	
177	0.002415861111	(b)
178	0.002083473294	
179	0.001623115470	
180	0.000443297721	

그림 10. 파라미터 탐색.

Fig. 10. Parameter search.

이러한 공진주파수를 그래프를 통하여 확인하였으나, 제어기에서 스스로 공진주파수의 수치정보를 인식하게 하려면 적절한 방법으로 자동 검색하여 공진 주파수를 변수에 저장하는 절차를 거쳐야한다.

따라서 주파수 특성분석 결과 값을 검색하여 공진주파수에 해당하는 파라미터를 찾아내는 공진주파수 파라미터 탐색기 블록이 필요하다.

파라미터 탐색기는 공진현상의 주파수 폭이 좁으며 신호의 크기가 급격히 증가된다는 특성을 이용하여, 공진주파수를 검출한다. 즉 그림 10과 같이 $\pm 10Hz$ 폭을 같는 주파수(-b)와 (+b)구간에서 관심주파수 (a)에서의 크기와 0.5dB이상의 크기 격차를 보이는 경우, 이를 검출(Update)함에 따라 잡음과 공진현상을 구분하도록 한다. 운용개념상 온도변화가 서서히 변화되어 공진주파수가 빈번히 움직이지 않는 경우에는, 사용자가 NUC (Non-Uniformity Correction) [14]의 과정을 1sec정도 길이의 시간동안 파악된 자이로신호를 주파수분석하여 비 주기적으로 파라미터가 갱신되도록 한다. 그러나 운용개념상 온도변화가 매우 급격한 시스템(위성, 미사일 Seeker 혹은 전투기용 시선제어장치)의 경우, 주기적으로 파라미터가 갱신되도록 한다.

파라미터 탐색기는 주파수분석기 출력의 주파수범위 중 주변주파수($\pm 10Hz$)와 Amplitude격차가 0.5dB이상인 성분들에 대해 Amplitude격차 값의 크기에 따라 우월성을 부여하여 검출하는 원리를 사용한다. 그 결과 그림 9와 같이 공진주파수가 167Hz로 검출되었으며, 이를 공진현상 발생 주파수 값으로 판단하고 적응형 노치필터의 파라미터로 값을 전달하는 기능을 한다.

그러나 모터구동 범위와 자이로 회전소음 주파수 성분이 검색대상으로 포함되어 있을 경우, 파라미터 탐색의 입장에서는 노이즈가 되며, 이러한 신호를 공진주파수 성분으로 오판(decision error)하게 되면, 파라미터 탐색기의 공진주파수 검출정확도가 저하된다. 따라서 모터구동신호 주파수영역(1~100Hz)과 자이로 회전소음 주파수 및 전파간섭 주파수영역(200Hz 이상)의 영역을 창 필터 Pre-Filter window)를

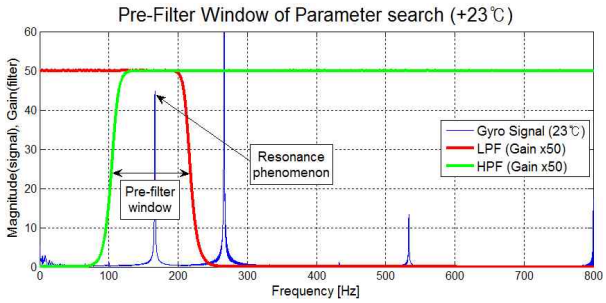


그림 11. 노이즈제거를 위한 창 필터.

Fig. 11. Pre-filter window of noise reduction.

사용하여 제거하는 전처리 과정을 거친다. 창 필터는 그림 11과 같이 시선안정화 장치의 기계적인 특성에서 온도에 따라 변화하는 공진발생가능 주파수 범위를 대역통과 주파수 영역으로 설계하기 위하여 LPF (Low Pass Filter)와 HPF High Pass Filter)를 중첩하여 창 필터의 Pass Band 영역을 구성한다.

위 그림과 같이 공진현상 Resonance phenomenon)이 모터 구동신호(100Hz 이하 영역)보다 매우 큰 성분으로 나타날 경우에는 파라미터 탐색에 에러발생 확률이 없다 단, 266Hz 대역의 자이로 회전소음 주파수만 검출대상에서 제외시킴).

그러나 아래의 그림 12와 같이 미세한 공진현상이 작은 성분으로 발생되었고, 그 성분의 크기가 모터구동신호의 세기와 큰 차이가 없을 경우에는 공진주파수 오검출 확률이 발생된다.

이러한 경우에 그림 13, 14와 같이 창 필터에 의해 파라미터 오검출 가능영역의 신호를 제거하고 공진발생가능영역의 신호만을 검출대상으로 유지하여 검출신뢰성(robust parameter searching)을 높일 수 있다.

이와 같이 파라미터 탐색 블록의 역할은 공진이 발생할 수 있고, 공진을 예방하고자 하는 대역에서 범위를 설정함으로써 발생될 수 있는 모든 범위의 공진주파수를 제거 하기위한 1개의 노치필터 차단주파수를 검출하여 적응형 노치필터의 변수로 전달하는 것이다. 이에 따라 적응형 노치필터는 파라미터 탐색 결과 값인 노치필터 차단주파수를 전달받아 주파수특성에 따른 노치필터의 전달함수를 생성하게 되며, 생성된 노치필터의 전달함수를 이산화(Z-transform)하여 디지털필터로 구현 되도록 한다.

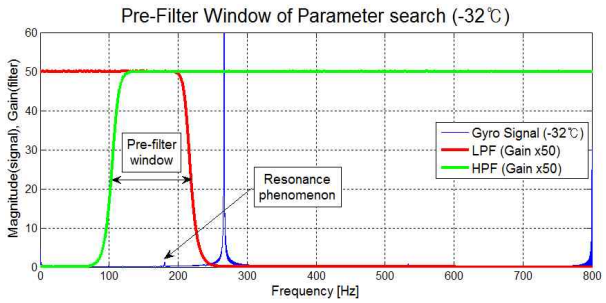


그림 12. 노이즈제거를 위한 창 필터(미세한 공진현상).

Fig. 12. Pre-filter window of noise reduction(fine resonance).

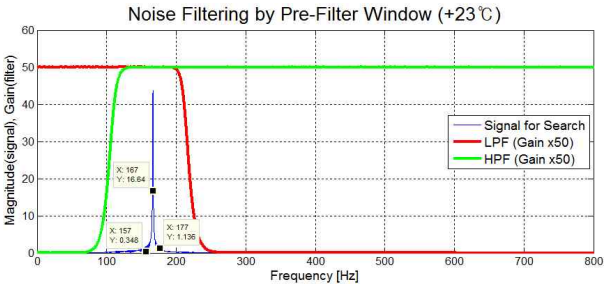


그림 13. 노이즈 제거를 통한 파라미터 검출정확도 향상.

Fig. 13. Robust parameter searching by noise reduction.

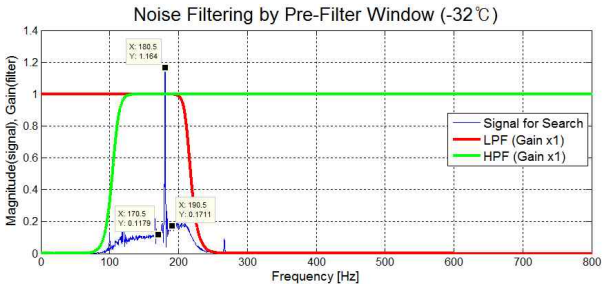


그림 14. 노이즈 제거를 통한 파라미터 검출정확도 향상.

Fig. 14. Robust parameter searching by noise reduction.

적응형 노치필터는 파라미터 탐색의 차단주파수 값을 전달 받아 기본적인 노치필터의 전달함수(식 (2))에 그 값을 적용하여 새로운 2차계의 디지털필터(IIRFilter)인 노치필터(식 (3))의 전달함수를 형성하고 식 (3)을 이산화하여 식 (4)와 같은 주파수특성을 갖는 2차의 무한시간응답 디지털필터(IIR Filter)를 설계할 수 있다[6-8].

$$\text{Notch Filter, } H(s)=\frac{s^2+w_n^2}{s^2+\frac{w_n}{Q}s+w_n^2} \tag{2}$$

파라미터 탐색 출력=차단주파수, $f_c=\frac{w}{2\pi}$

$Q=\frac{f_c}{f_2-f_1}$ where, f1,f2=cut-off frequency at -3dB

$$\text{Notch T.F, } H(s)=\frac{s^2+1.101\times10^{-6}}{s^2+209.9s+1.101\times10^{-6}} \tag{3}$$

$$\text{Z-transform, } H(z)=\frac{a_0z^2+a_1z+a_2}{z^2+b_1z+b_2}$$

$$H(z)=\frac{0.9797z^2-1.917z+0.9797}{z^2-1.917z+0.9797} \tag{4}$$

(Sampling Time=0.0002[sec])

또한 아래와 방법으로 그림 15의 Notch Filter pole-zero 특성(Z1,Z2,P1,P2)을 기반으로 설계할 경우, 특성방정식의 해가 0임을 이용하여 인수분해 방정식(식 (5))를 유도하고, 오일러의 정의(Euler's formula)로 인해 차단주파수(fc)를 변수로 하는 H(z)전달함수(식 (6), 식 (7))로 정리될 수 있으므로 앞서 설명한 방법보다 Z-transform과정이 생략되어 실제 시스템의 코딩 구현이 간단해 진다.

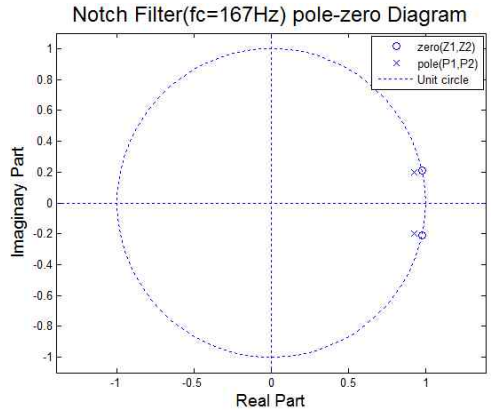


그림 15. Notch Filter의 pole-zero Diagram characteristics.

Fig. 15. Pole-zero Diagram characteristics of a Notch Filter.

$$Z1 = 1 \times e^{+jw_0},\ Z2 = 1 \times e^{-jw_0}$$

$$P1 = r \times e^{+jw_0},\ P2 = r \times e^{-jw_0}$$

(r: Unit circle 반지름 기준 pole의 치우친 반지름 길이)

$$H(z) = \frac{(z - e^{+jw_0})(z - e^{-jw_0})}{(z - r \times e^{+jw_0})(z - r \times e^{-jw_0})} \quad (5)$$

$$= \frac{(1 - e^{+jw_0} \times z^{-1})(1 - e^{-jw_0} \times z^{-1})}{(1 - r \times e^{+jw_0} \times z^{-1})(1 - r \times e^{-jw_0} \times z^{-1})}$$

$$\cos w_0 = \frac{e^{jw_0} + e^{-jw_0}}{2},\ \text{(Euler's formula)}$$

$$H(z) = \frac{1 - 2 \times \cos w_0 z^{-1} + z^{-2}}{1 - 2 \times r \times \cos w_0 z^{-1} \times r^{-2}} \quad (6)$$

$$w_0 = fc/2 \times \pi \times fs,\ (fc = 167, fs = 5000) \quad (7)$$

이와 같은 개념으로, PID Controller의 출력신호는 적응형 노치필터에 의해 필터링되어 종단의 AZ Motor의 구동신호 중 공진을 유발할 수 있는 주파수 성분을 제거하는 기능을 함으로써 공진이 예방되게 된다.

III. 효과검증 및 실험

1. Gimbal 공진 제거효과 실험결과

1.1 실험환경

ANF (Adaptive Notch Filter)의 Gimbal 공진 제거효과를 검증하기 위하여 그림 16과 같은 실험환경을 구성하였다.

또한 Gyro 신호를 획득하여 주파수분석기와 파라미터 탐색부로 전달하기 위한 Logging 장치로 그림 17과 같은 DSA (Dynamic Signal Analyzer)를 사용하였으며, 공진현상의 제거여부를 확인하기 위한 환경은 실제 Gimbal에 장착된 가속도센서를 활용하여 DSA로 확인하였으며 실험환경은 그림 18과 같다.

1.2 실험 #1 (상온 23℃조건)

실제 회전구동계 장치를 상온조건에 설치하여 내부에 부착되어 있는 Gyro 센서를 활용하여 구동장치의 떨림 특성을 그림 9와 같은 DSA로 데이터를 획득하였으며, 측정결과는 그림 19와 같다.

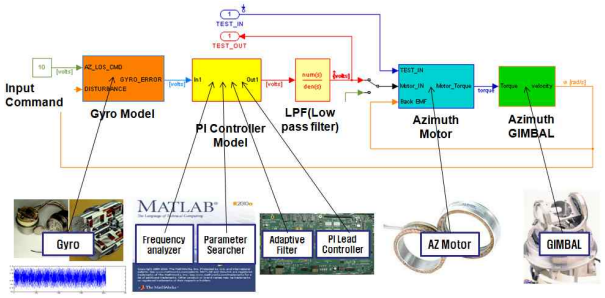


그림 16. 상온(23°C)조건의 회전구동계 장치와 Matlab Simulink 실험환경 블록도.

Fig. 16. The device of a rotational LOS control system at room temperature(23°C) and Matlab Simulink experiment setting block diagrams.

그림 17. Gyro 신호 Logging용 DSA장치.

Fig. 17. DSA (Dynamic Signal Analyzer) device for the gyro signal logging.

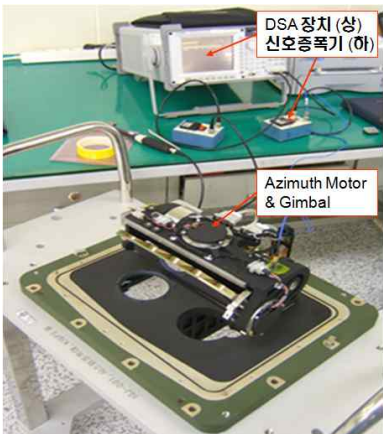


그림 18. Gimbal ANF적용, 공진발생 여부 측정환경(가속도센서+DSA).

Fig. 18. ANF applied Gimbal and measurement system for resonance (acceleration sensor + DSA).

Gyro 센서의 떨림 특성 데이터를 Matlab Simulink 환경으로 입력하여, 주파수분석기 및 파라미터 탐색 알고리즘을 통과한 결과, 그림 20과 같은 스펙트럼에서 공진주파수가 166Hz임을 알 수 있었다.

탐색된 공진주파수에 따라 가변 설계된 ANF의 차단주파수 특성을 확인하기 위하여 Bode Plot을 확인한 결과, 그림 21과 같이 Gyro 신호로부터 탐색된 166Hz의 공진주파수로 변화되었음을 확인할 수 있다.

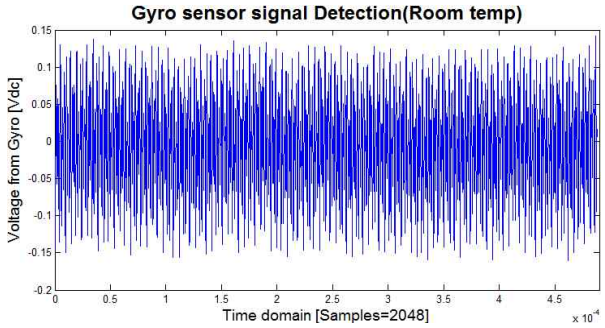


그림 19. 회전 구동계 장치의 Gyro신호(상온 23°C).

Fig. 19. The gyro signal of a rotational LOS control system at room temperature (23°C).

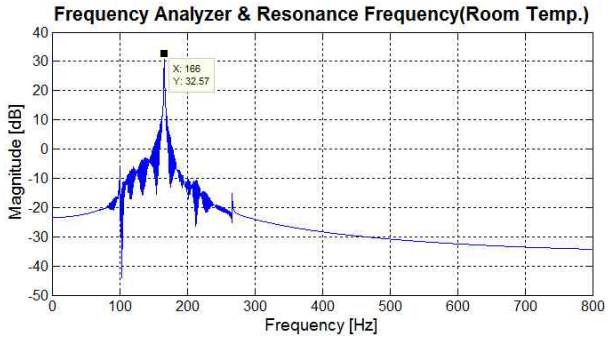


그림 20. 주파수분석기, 파라미터 탐색 결과(상온 +23°C).

Fig. 20. The result of the frequency analyze and parameter search at room temperature (23°C).

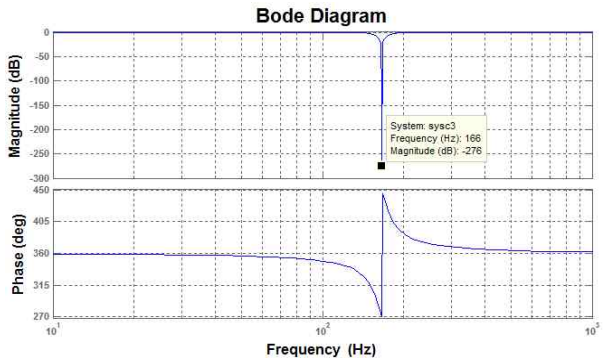


그림 21. Gyro신호로부터 탐색된 공진주파수(166Hz)로 가변된 ANF Bode Plot.

Fig. 21. Variable ANF Bode Plot characteristics to searched resonance frequency (166Hz) from gyro signal.

1.3 실험 #2 (저온 -32℃조건)

앞서 기술한 바와 같이, 회전 구동계 장치는 온도, 체결 토크 또는 재질의 특성변화에 따라 공진주파수가 가변적이므로 실험 #1의 조건에서 회전구동계 장치의 온도를 저온(-32℃) 조건으로 변화하였다.

이에 따라, 검출된 Gyro 신호는 그림 22와 같으며, 동일한 알고리즘의 주파수분석기와 파라미터 탐색기의 동작결과는 그림 23과 같이 탐색주파수가 181Hz로 변경되었음을 확인할 수 있다.

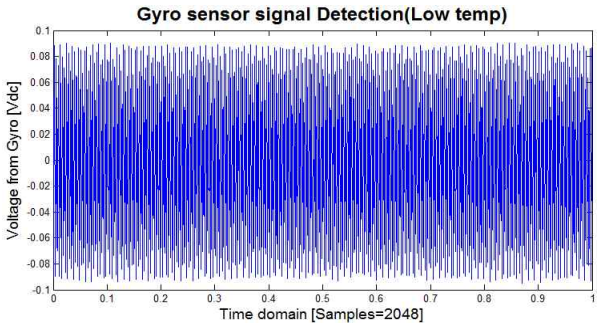


그림 22. 회전 구동계 장치의 Gyro신호 (저온 -32°C).

Fig. 22. The gyro signal of a rotational LOS control system at low temperature (-32°C).

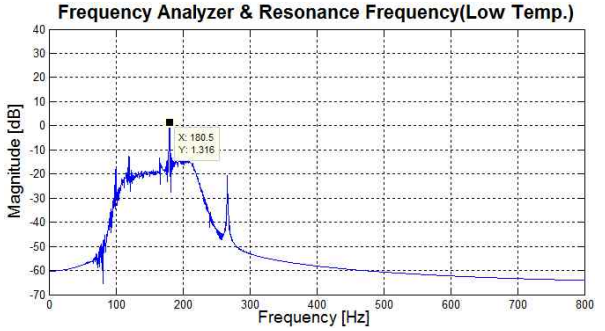


그림 23. 주파수분석기, 파라미터 탐색 결과 (저온 -32°C).

Fig. 23. The result of the frequency analyze and parameter search at low temperature (-32°C).

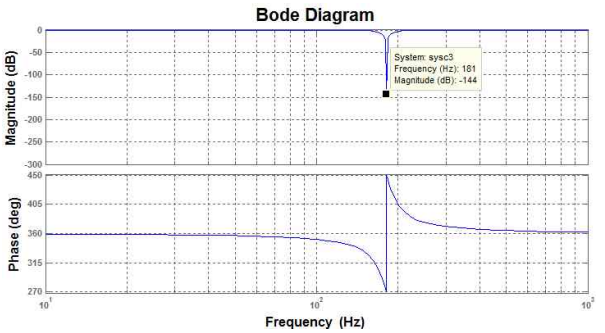


그림 24. Gyro신호로부터 탐색된 공진주파수(181Hz)로 가변된 ANF Bode Plot.

Fig. 24. Variable ANF Bode Plot characteristics to searched resonance frequency (181Hz) from gyro signal.

또한 ANF는 Gyro신호로부터 탐색된 181Hz의 주파수에 가변되어 그림 24와 같이 Bode 특성이 변경됨을 확인하였다.

2. 영상노이즈 제거효과 실험

2.1 동작원리

ANF (Adaptive Notch Filter)를 사용하여 회전 구동계장치(Gimbal)의 공진을 효과적으로 예방할 수 있음을 설명하였다. 아울러 이러한 ANF의 개념을 디지털 영상처리의 영상개선 기술분야[9]에 응용할 수 있으며, 특히 전원노이즈 및 Switching회로 등에 따라 유발되는 영상의 정현파 특성의 주파수노이즈(f-noise)를 효과적으로 저감할 수 있다.

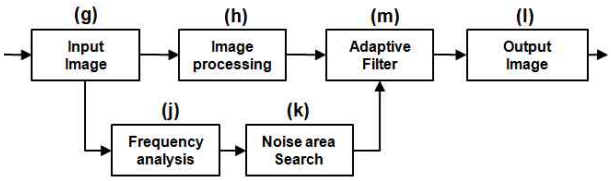


그림 25. 영상의 적응형필터(ANF) 구성 블록도.

Fig. 25. Composition block diagram for Images adaptive filter.

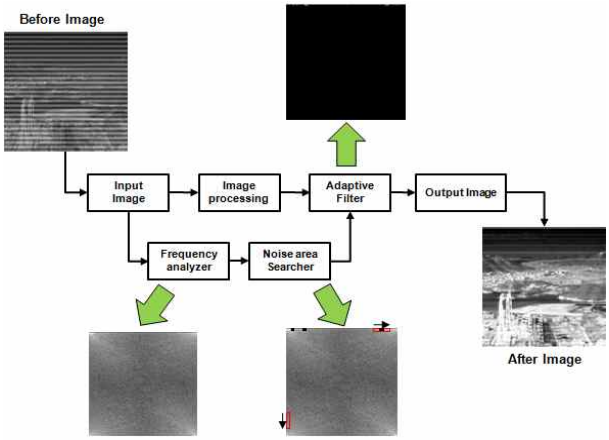


그림 26. 영상노이즈 저감을 위한 ANF 동작원리.

Fig. 26. ANF operational principles for Image noise reduction.

그림 25는 이 기술을 이용한 디지털영상처리의 적응형필터 구현기법에 대한 블록도를 나타내었다. 이는 (g)입력받은 영상을 일반적인 (h)영상처리를 거쳐 (i)출력영상을 생성하는 일반적인 영상처리 방법에 (j)주파수분석기와 (k)노이즈영역탐색기를 두어 (m)적응형 필터를 능동적으로 적응시키도록 하며 이러한 방법으로 영상에 대해 변화하는 주파수성 노이즈를 예방하는 방법이다.

구체적인 동작원리는 아래 그림 26과 같이 표현하였으며, 입력영상(before image)에 대하여 주파수분석기(frequency analyzer)와 노이즈영역 탐색기(Noise area searcher)를 통하여 필터링 할 파라미터(영역)를 검출한다. 이를 Adaptive Filter에 전달하여 IFFT (Inverse Fast Fourier Transform)를 수행하여 오른쪽의 출력영상(After Image)과 같은 노이즈가 저감된 영상을 획득할 수 있다.

2.2 실험환경

ANF (Adaptive Notch Filter)를 활용하여 전원노이즈로 유발되는 영상의 정현파 형태의 노이즈 현상을 저감 할 수 있음을 검증하기 위하여 그림 27과 같은 실험환경을 구성하였다.

2.3 실험 #3(비행용 열화상 화면노이즈 저감)

보조동력엔진을 사용함에 따라 열화상카메라가 공급받는 전원에 노이즈가 추가될 수 있으며, 이러한 전원노이즈 유입에 따라 그림 28(a)와 같은 현상이 발생될 수 있으며, 이 영상에 ANF를 적용하여 필터링 할 경우 (b)와 같이 일부 정현파 노이즈를 저감 할 수 있음을 확인하였다.

(c)의 경우, 저감된 화면에 영상평활화(CEM)적용 경우이다.

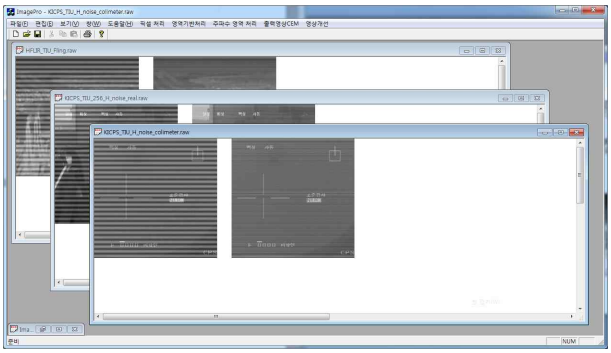
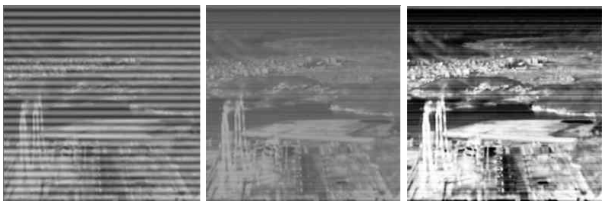


그림 27. ANF알고리즘을 적용한 영상개선 S/W(Win 7환경).

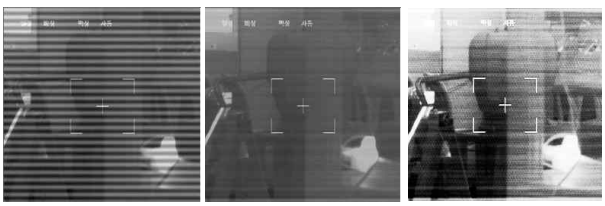
Fig. 27. Image Improvement S/W applied ANF Algorithm.



(a) (b) (C)

그림 28. 비행용 열화상 화면 노이즈 개선결과.

Fig. 28. Noise Improvement result of the Aircraft IR Image.



(a) (b) (C)

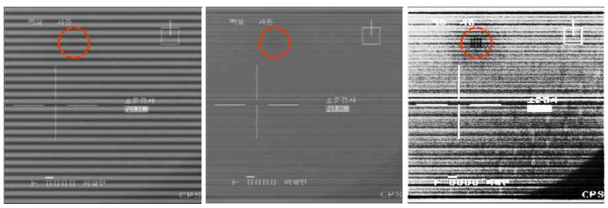
그림 29. 보병용 열화상 화면노이즈 개선결과.

Fig. 29. Noise Improvement result of the Infantry IR Image.

2.4 실험 #4(보병용 열화상 화면노이즈 저감)

입력(1차측)전원과 공급(2차측)전원분리를 위하여 DC-DC Converter를 사용하는 경우, Switching회로의 영향으로 그림 29(a)와 같은 노이즈 현상이 발생될 수 있으며, 이 영상에 ANF를 적용하여 필터링 할 경우 (b)와 같이 일부 정현파 노이즈를 저감 할 수 있음을 확인하였다. (c)의 경우, 저감된 화면에 영상평활화(CEM)를 적용한 경우이다.

2.5 실험 #5(노이즈 저감에 따른 4-bar 표적식별)



(a) (b) (C)

그림 30. ANF적용 화면 노이즈저감에 따른 표적식별.

Fig. 30. Target identify as Noise reduction of ANF applied image.

실험 #4의 제품을 사용하여 검출가능표적 시험을 위한 4-bar 형태의 Target을 관찰한 결과 그림 30(a)와 같은 화면에서 노이즈의 영향으로 Targer관찰이 불가능하며, ANF를 적용하여 필터링한 (b)의 영상에서 미세하게 Target이 관찰되며, 추가적으로 영상평활화(CEM)를 적용한 (c)의 경우, 화면의 4-bar Target(||||)을 식별 할 수 있다.

IV. 결론

이상 설명한 바와 같이, 본 기술에 따라 회전 구동계 제어장치에서 발생될 수 있는 공진주파수가 온도에 따라 변화하거나 체결력 및 재질의 특성으로 가변적인 경우에도 자이로센서와의 연동기법과 자이로센서의 출력신호를 가공 후 필터에 피드백을 주어 시스템에 적응시키는 방법을 사용하여 이를 자동적으로 제거 하는 것이 가능하다.

또한 본 기술에 따라, 안정거울유닛의 공진현상이 고온 또는 저온의 극한 환경 하에서도 능동적으로 제거 되도록 하여 환경 변화에 강인하고, 기존에 해결하기 어려웠던 온도변화에 따른 간헐적 공진현상의 여지를 완전히 차단함에 따른 성능저하를 예방하여 안정거울 유닛의 내구성을 향상하고 시선안정화 성능을 확보할 수 있다.

이와 같이, 본 기술에 따라 자이로센서 신호 검출부, 주파수분석기 및 파라미터 탐색과 같은 기술을 사용하여 노치필터의 능동적 기능을 구현함은 물론 주파수 분석기에서 보드선도(bode diagram)의 데이터를 보유하여 PI, Phase Lead제어필터의 파라미터 및 대역폭을 시스템에 예측, 적응 및 학습 적용하는 기술로 응용가능하며, 이렇게 출력의 결과를 제어시스템이 인지하도록 피드백 및 해당데이터를 가공하여 수치화, 변수화 함으로써 필터 및 제어기를 능동적으로 변화 및 학습시키는 방법의 발전에 기여할 수 있으며, 향후 미래의 지능제어 분야의 기반 기술이 될 수 있다.

REFERENCES

[1] Agilent technologies Inc., “Fundamental of modal testing,” Application note, pp. 243-3, 2000.

[2] Samsung Electronics Co., “Method for removing resonance frequency using notchfilter of hard disk drive and recording media for computer program therefor,” *KOREA* patent 10-2007-0059482, 2007.

[3] D. H. Oh, S. H. Lee, S. E. Back, and H. S. Na, “Adaptive feedforward rejection of microactuator resonance in hard disk drive dual-stage actuator servo,” *Journal of the Korea Society for Noise and Vibration Engineering*, pp. 1596-1600, 2000.

[4] E. Y. Kim, B. H. Kim, H. W. Kim, and S. K. Lee, “Design of a new VSS-Adaptive filter for a potential application of active noise control to intake system,” *Journal of the Korea Society for Noise and Vibration Engineering*, pp. 146-155, 2012.

[5] N. Mikami, “DSP programming using code composer studio,” Sung-An-Dang press, 2006.

[6] L. B. Jackson, “Signals, systems, and transforms,” ADDISON WESLEY press, 1991.

[7] Y. I. Oh and M. J. Kim, “TMS320C6000 processor DSP realtime processing,” Life & Power press, 2007.

[8] S. Jung, “Digital signal processing and filter design,” Ajin press, 2005.

[9] J. H. Lee and Y. H. Ko, “Digital Image Processing using TI DSP TMS320C64XX,” The technical Laboratory of the Hanbaek Electronics Co., 2006.

[10] S. J. Elliott and P. A. Nelson, “Multichannel active sound control using adaptive filtering,” P*roc. of the IEEE International Conf. on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, pp. 2590-2593, 1988.

[11] B. Widrow and S. D. Sterns, *Adaptive Signal Processing*, Prentice-Hall press, 1985.

[12] B. H. Kim, “Apparatus for controlling rotation driveline,” KOREA patent 1010622380000, 2011.

[13] S. M. Kuo and D. R. Morgan, *Active Noise Control Systems Algorithms and DSP Implementations*, John Wiley & Sons press, 1996.

[14] J. S. Ko, “Method for correcting non-uniformity of images in a thermal imaging device,” KOREA patent 1003903160000, 2003.

김 병 학

2007년 국립금오공과대학교 학사. 2012년~현재 경북대학교 IT대학 전자공학부 석사과정 삼성전자-경북대학교 학연산 프로그램. 2007년~현재 삼성탈레스 생산기술 광전자그룹 전문연구원. 관심분야는 전차, 장갑차 지상무기체계 사격통제시스템, 항공무기체계 헬기 및 무인기 체계용 전자광학추적시스템, 로봇센서 및 구동 시스템, 신호처리, 패턴인식, 인공지능.

김 민 영

1996년 KAIST 기계공학과 학사. 1998년 KAIST 대학원 석사 및 2004년 KAIST 대학원 박사. 2004년~2005년 ㈜미래산업 연구소 선임연구원. 2005년~2009년 ㈜ 고영테크놀러지 연구소 머신비젼 책임연구원 및 그룹장. 2009년~현재 경북대학교 IT대학 전자공학부 조교수. 2014년~현재 Johns Hopkins University 전기컴퓨터공학과 방문교수. 2013년~현재 경북대학교 뇌수술 로봇시스템 연구소 부소장. 관심분야는 광메카트로닉스, 로봇 및 머신 비젼, 로봇센서 및 구동 시스템, 의료 로봇시스템.