



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

로봇 구동부의 회전을 이용한 각속도
추정 방법 및 생체모방
로봇의 적용 방안

A method for estimating the angular velocity of
a robot by utilizing rotating force and its
application to biomimetic robots

2018 년 8 월

서울대학교 대학원
전기·정보공학부
박 지 호

로봇 구동부의 회전을 이용한 각속도 추정 방법 및 생체모방 로봇의 적용 방안

A method for estimating the angular velocity of a robot by utilizing rotating force and its application to biomimetic robots

지도교수 조 동 일

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함
2018 년 8 월

서울대학교 대학원
전기·정보공학부
박 지 호

박지호의 공학석사 학위논문을 인준함
2018 년 8 월

위 원 장	이 범 희	(인)
부위원장	조 동 일	(인)
위 원	최 진 영	(인)

초 록

과거 군사용으로만 주로 활용되었던 드론과 같은 무인항공기는 점차 구조, 배송, 사진 촬영과 같은 다양한 용도로 활용되고 있다. 이러한 무인항공기를 사용자가 원하는 움직임으로 동작시키고 항공기의 위치를 추정하기 위해서는 각속도를 추정하는 기술이 필수적이다. 일반적으로 각속도 데이터를 얻기 위해서는 자이로스코프 센서를 주로 활용하는데, 자이로스코프 센서는 각속도를 추정하기 위해서 내부의 proof mass 를 특정 주파수로 항상 공진시키고 있기 때문에 불필요한 전력낭비가 발생한다. 또한, 자이로스코프 센서의 공진 주파수와 같은 주파수의 외부 음파가 인가될 경우, 증폭 현상이 발생하여 각속도 추정이 잘 이뤄지지 않는 문제점이 있다. 따라서 본 논문에서는, 로봇의 구동부에 구동부 일체형 센서를 부착하여 측정되는 코리올리의 힘을 이용해 로봇의 각속도를 추정하는 방법을 제시한다. P3DX 파이오니어 로봇과 서보 모터를 활용하여 구축한 실험환경에서의 실험을 통해, 본 논문에서 제안한 방법이 로봇의 각속도를 효과적으로 추정함을 확인하였다. 또한, 본 논문에서 제안한 방법을 생체모방 로봇에 적용하기 위한 구동부 일체형 센서의 특성을 정의하였다. 나아가, 획득한 데이터를 처리하기 위한 신호 복조 방법과 노이즈를 제거하기 위한 다양한 필터 처리 기법을 제안한다.

주요어 : 코리올리 힘, 칼만 필터, 진폭 변조, 생체모방 로봇
학 번 : 2016-20909

목 차

제 1 장 서론	1
제 1 절 연구의 배경	1
제 2 절 연구의 내용	2
제 2 장 본론	4
제 1 절 회전하는 frame 내에서 물체가 받는 힘	4
제 2 절 오일러 각도를 활용한 물체의 움직임 모델링	5
제 3 절 파리류 곤충의 각속도 감지 메커니즘	6
제 4 절 생체모방 로봇에 적용하기 위한 생체의 특성 분석	9
제 5 절 실험환경 및 실험방법	12
제 6 절 신호 분석 및 획득 데이터 필터 처리 방법	16
제 7 절 제자리 회전 실험 결과 및 데이터 분석	18
제 8 절 자이로스코프 센서 무력화 실험 및 사각주행 실험	27
제 3 장 결론 및 발전방향	35
사사문	36
참고문헌	37
Abstract	41

표 목차

[표 2-1] 지상 생물체의 특성	11
[표 2-2] 비행 생물체의 특성	11
[표 2-3] 제자리 회전 실험 프로파일	14
[표 2-4] 자이로스코프 센서 분산값 비교	28
[표 2-5] 자이로스코프 센서 데이터 및 구동부 일체형 센서 추정 값 비교.....	34

그림 목차

[그림 1] 구동부 일체형 센서 및 프로펠러 블레이드	3
[그림 2] 여러 개의 회전하는 frame 내의 점 P.....	5
[그림 3] 임의의 방향으로 움직이는 로봇의 모델링	5
[그림 4] 파리의 평형곤의 위치와 현미경 사진	8
[그림 5] 파리에 존재하는 한 쌍의 평형곤	8
[그림 6] 왼쪽, 오른쪽 평형곤에서 측정되는 roll, pitch, yaw 방향 으로의 힘.....	9
[그림 7] 생체모방 로봇 ‘Rhex’	10
[그림 8] 생체모방 로봇 ‘Smart bird’.....	10
[그림 9] 생체모방 로봇 ‘RoboBee’	11
[그림 10] 파이오니어 로봇 실험환경 세팅.....	14
[그림 11] 파이오니어 로봇과 서보 모터 결합 모식도	15
[그림 12] 프로펠러 블레이드와 서보 모터 결합 모식도	15
[그림 13] 획득 데이터 demodulation 과정	17
[그림 14] 주파수 대역에서의 demodulation 과정	19
[그림 15] 파이오니어 로봇의 제자리 회전 실험	19
[그림 16] Raw 데이터 및 reference gyroscope 데이터 (프로펠 러 블레이드 회전 속도 : 60 rpm)	20
[그림 17] 저역통과필터 적용 데이터 및 reference gyroscope 데 이터 (프로펠러 블레이드 회전 속도 : 60 rpm)	21
[그림 18] Raw 데이터 및 reference gyroscope 데이터 (프로펠 러 블레이드 회전 속도 : 80 rpm)	21
[그림 19] 저역통과필터 적용 데이터 및 reference gyroscope 데 이터 (프로펠러 블레이드 회전 속도 : 80 rpm)	22
[그림 20] Raw 데이터 및 reference gyroscope 데이터 - 주파수 영역 분석 (프로펠러 블레이드 회전 속도 : 60 rpm)	22
[그림 21] Raw 데이터 및 reference gyroscope 데이터 - 주파수 영역 분석 (프로펠러 블레이드 회전 속도 : 80 rpm)	23
[그림 22] 여러 k_{depth} 값 notch filter 의 bode plot.....	24
[그림 23] Notch filter 적용 후 추정 데이터 (프로펠러 블레이드 회전 속도 : 60 rpm)	24
[그림 24] Notch filter 적용 후 추정 데이터 (프로펠러 블레이드 회전 속도 : 80 rpm)	25
[그림 25] Kalman filter 추정 과정	26
[그림 26] Kalman filter 적용 후 데이터 (프로펠러 블레이드 회전 속도 : 60 rpm)	26
[그림 27] Kalman filter 적용 후 데이터 (프로펠러 블레이드 회전	

속도 : 80 rpm)	26
[그림 28] 외부 음파 실험 환경 (주파수 : 27,000 Hz)	28
[그림 29] 외부 음파가 존재할 경우와 존재하지 않는 경우의 자이로센서 데이터 비교.....	28
[그림 30] 사각주행 실험 환경.....	30
[그림 31] 사각주행 실험 경로.....	30
[그림 32] 사각주행 실제 실험 경로.....	31
[그림 33] VICON 장비 실험 환경	31
[그림 34] VICON 카메라.....	32
[그림 35] VICON 장비를 활용하여 측정한 파이오니어 로봇의 경로	32
[그림 36] 회전 각속도 및 회전 각도의 방법별 비교 (27,000 Hz의 외부의 음파 존재하지 않을 경우)	33
[그림 37] 회전 각속도 및 회전 각도의 방법별 비교 (27,000 Hz의 외부의 음파 존재할 경우)	33

제 1 장 서 론

제 1 절 연구의 배경

무인항공기에 대한 연구는 1960년대에서 부터 시작되었으며 주로 국가적인 차원에서 군사용 목적으로 연구되었다 [1]. 그러나 최근에는 쿼드로터와 같은 네 개의 회전 프로펠러를 갖는 무인항공기에 대한 연구가 대학 및 연구소에서도 활발히 진행되고 있다 [2]. 무인항공기는 군사용 목적뿐만 아니라 인명구조, 사진 촬영, 농업 용도 등 다양한 분야에서 활용됨으로서 인간의 삶의 질 향상에 큰 도움이 되고 있다 [3, 4]. 또한 컴퓨터 과학 기술의 발달로 스스로 경로를 찾아서 비행하는 인공지능 비행체에 대한 연구도 탄력을 받고 있다 [5].

이러한 무인항공기 또는 비행체 로봇을 사용자가 원하는 목적 및 동작으로 구동시키기 위해서는 해당 비행체의 각속도를 추정하는 기술이 필수적이다. 로봇의 각속도를 추정하는 용도로 자이로스코프 센서가 주로 활용되는데, 자이로스코프 센서의 종류에는 광학식 자이로스코프 센서, micro electro mechanical systems (MEMS) 자이로스코프 센서, 회전식 자이로스코프 센서가 있고 각자 다른 특징을 가지고 있으며 사용되는 용도가 다르다 [6]. 최근에는 MEMS 기술의 발달로, 초소형화된 자이로스코프 센서가 제작이 가능해짐으로서 자동차, 스마트폰, 산업용 로봇 등 다양한 영역에서 MEMS 자이로스코프 센서가 활용된다 [7]. MEMS 자이로스코프 센서의 원리는 물체가 회전 시 발생하는 코리올리 힘을 감지하여 각속도를 측정하는 것이다. 기본적으로 코리올리의 힘을 감지하기 위해서 MEMS 자이로스코프 센서의 내부는 proof mass 를 일정한 주파수로 공진시키고 있는데 이로 인해 각속도를 측정하지 않는 상태에서도 불필요한 전력이 낭비되는 문제가 있다. 또한, 자이로스코프 센서의 공진 주파수와 같은 외부의 음파가 인가될 경우, 증폭현상이 발생하여 각속도 측정이 제대로 이뤄지지 않는 문제점이 있다. 최근에는 이와 같은 현상을 역이용하여,

드론과 같은 비행체를 무력화시키는 연구도 진행되고 있다 [8].

본 논문에서는 자이로스코프 센서를 사용하지 않고 구동부 일체형 센서를 활용하여 로봇의 각속도를 추정하는 방법 및 구동부 일체형 센서를 사용하여 얻은 데이터를 처리하는 방법을 제시한다. 나아가 본 논문에서 제시한 방법을 생체모방 로봇에 적용하기 위한 방법과 기준을 제시한다. 실제 드론 및 파리의 평형곤의 메커니즘과 유사하게 만든 실험 환경에서의 실험을 통해, 본 논문에서 제시한 방법이 로봇의 각속도를 효과적으로 추정함을 보였다.

제 2 절 연구의 내용

회전하는 frame 내에서 움직임을 갖는 물체는 중력, 원심력 이외에도 코리올리의 힘의 영향을 받는다는 점에 착안하여 본 논문의 연구 내용을 진행하게 되었다. 구동부 일체형 센서를 사용하여 물체가 받는 힘을 측정할 수 있다면 로봇의 각속도도 추정할 수 있게 된다. 무엇보다도 본 논문에서 제안한 방법을 이용한다면, 내부의 proof mass 를 일정한 주파수로 공진시키는 자이로스코프 센서와 달리 외부에서 인가되는 여러 주파수의 음파 공격에 강건하다는 상당한 이점이 있다.

구동부 일체형 센서는 아두이노 프로미니 마이크로 컨트롤러 (Sparkfun electronics 社, USA), MPU-6050 6축 자이로스코프 센서 (Invensense 社, USA), HC-06 블루투스 통신 모듈 (Guangzhou HC 社, China) 을 사용하여 제작하였고, 로봇의 구동부에 해당하는 프로펠러 블레이드는 DP201 3D 프린터 (Sindoh 社, Korea) 를 사용하여 아크릴 및 polylactic acid (PLA) 재질로 제작하였다. 제작된 프로펠러 블레이드 내부에 구동부 일체형 센서를 부착하여 프로펠러 블레이드 회전 시 발생하는 3축 방향으로의 가속도를 측정하였다. 최종 제작된 프로펠러 블레이드는 아래 그림 1에 나타내었다. 획득한 가속도 데이터는 블루투스 통신을 통해 스마트폰으로 데이터를 전송하였고 신호 처리 및 필터 처리 방법을 통해 로봇의 각속도를 추정하였다. 또한,

프로펠러 블레이드의 회전 속도를 보다 정밀하게 제어하기 위해 200W 서보 모터 (RS Automation 社, Korea) 및 CSD7 서보 드라이브 (RS Automation 社, Korea) 를 활용하였고 서보 모터와 프로펠러 블레이드를 결합한 후, 서보 드라이브를 통해 속도 명령을 인가하였다. 또한, P3DX 파이오니어 로봇 (Adept technology, Inc., USA) 을 원하는 회전 각속도로 제어하기 위해 microsoft foundation class (MFC) 라이브러리를 기반으로 한 응용 프로그램을 제작하여 원하는 회전 속도로 파이오니어 로봇을 제어하였다.

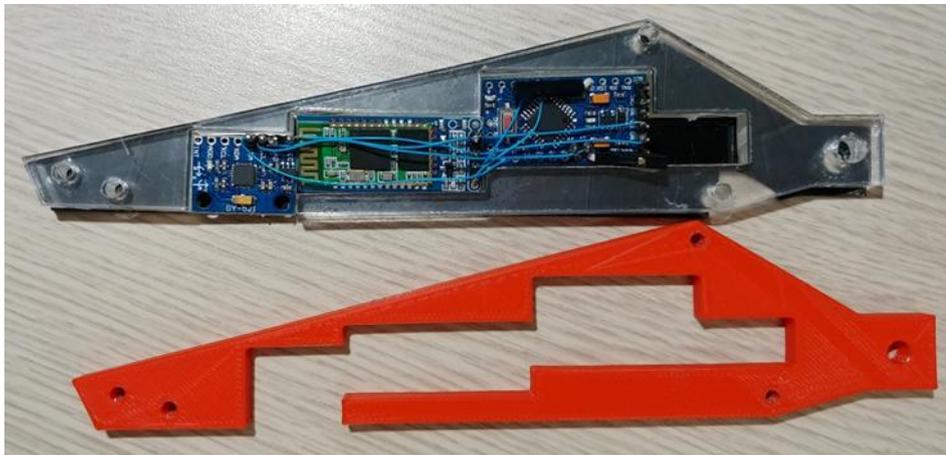


그림 1. 구동부 일체형 센서 및 프로펠러 블레이드

제 2 장 본 론

제 1 절 회전하는 frame 내에서 물체가 받는 힘

아래 그림 2 와 같이 세 개의 frame $OXYZ$, $O_1X_1Y_1Z_1$, $O_2X_2Y_2Z_2$ 가 있다고 가정하자. Frame $OXYZ$ 는 reference frame 으로서 고정되어 있는 기준 frame 이고 나머지 두 개의 frame $O_1X_1Y_1Z_1$, $O_2X_2Y_2Z_2$ 는 reference frame $OXYZ$ 에 대해 각각 ω_1 , ω_2 의 각속도로 회전한다. 이러한 경우에 대해 frame $O_2X_2Y_2Z_2$ 내의 점 P 가 받는 속도와 가속도를 기준 frame $OXYZ$ 에 대해서 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} v_p &= \frac{dR_0}{dt} + v_{rel} + \omega \times r \\ &= \dot{r}_1 + \dot{r}_2 + \dot{r}_3 + \omega_1 \times r_2 + \omega_2 \times r_3, \end{aligned} \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} a_p &= \frac{d^2R_0}{dt^2} + a_{rel} + 2(\omega \times v_{rel}) + \dot{\omega} \times r + \omega \times (\omega \times r) \\ &= \ddot{r}_1 + \ddot{r}_2 + \ddot{r}_3 + 2\omega_1 \times \dot{r}_2 + \dot{\omega}_1 \times r_2 + \omega_1 \times (\omega_1 \times r_2) \\ &\quad + 2\omega_2 \times \dot{r}_3 + \dot{\omega}_2 \times r_3 + \omega_2 \times (\omega_2 \times r_3), \end{aligned} \quad (2.2)$$

R_0 , v_{rel} , a_{rel} , r_1 , r_2 , r_3 는 각각 점 O 에서 O_2 까지의 위치벡터, frame $O_2X_2Y_2Z_2$ 내부의 점 P 의 상대 속도, frame $O_2X_2Y_2Z_2$ 내부의 점 P 의 상대 가속도, 점 O 에서 O_1 까지의 위치벡터, 점 O_1 에서 O_2 까지의 위치벡터, 점 O_3 에서 점 P 까지의 위치벡터이다. 따라서, 점 P 위치에 있는 물체가 받는 가속도는 식 (2.2) 과 같이 나타낼수 있다. 식 (2.2) 를 구성하는 요소 중, 코리올리 힘에 의한 영향으로 발생하는 가속도(= $2(\omega \times v_{rel})$) 값을 측정하여 P 점의 선속도를 구할 수 있다면, P 점에 위치한 물체의 회전 각속도를 추정할 수 있다. 그러나 코리올리의 힘은 벡터의 외적값으로 구해지므로 P 점의 선속도와 frame의 각속도의 방향을 고려한 계산을 하여야 한다.

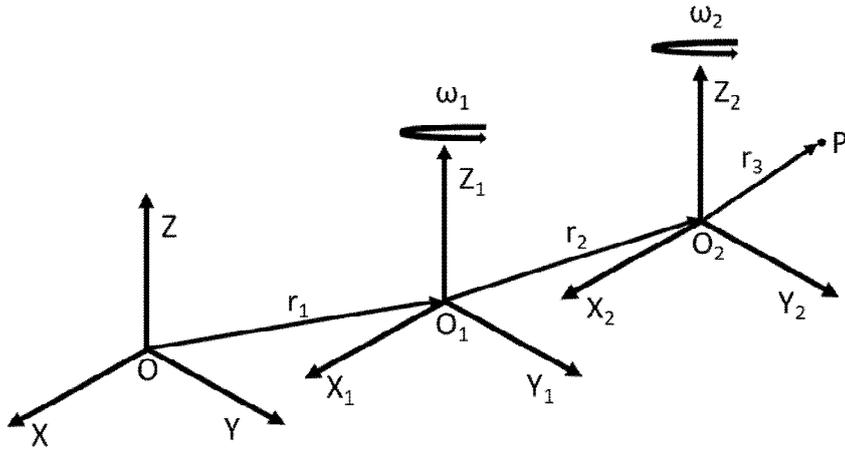


그림 2. 여러 개의 회전하는 frame 내의 점 P

제 2 절 오일러 각도를 활용한 물체의 움직임 모델링

아래 그림 3 과 같이 로봇이 frame 내에서 임의의 방향으로 3차원 병진 운동 및 회전 운동을 할 경우에 대해 오일러 각도를 활용하여 로봇의 움직임을 나타낼 수 있다.

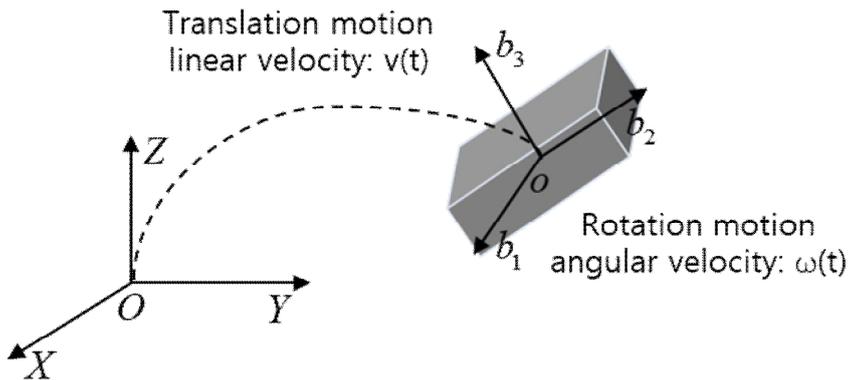


그림 3. 임의의 방향으로 움직이는 로봇의 모델링

로봇의 무게중심 o 의 reference frame $OXYZ$ 에 대한 선속도를 $v = [u \ k \ w]^T$, 로봇의 frame $ob_1b_2b_3$ 의 reference frame $OXYZ$ 에

대한 각속도를 $\omega = [p \ q \ r]^T$ 이라고 하자. 이러한 경우에 대해, 뉴턴 제 2 법칙과 코리올리 이론을 사용하여 로봇의 선속도와 각속도를 오일러 각도를 활용하여 표현하면 다음과 같다.

$$\dot{v} = \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{k} \\ \dot{w} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -g \sin \theta + rk - qw \\ g \sin \phi \cos \theta - ru + pw \\ g \cos \phi \cos \theta + qu - pk \end{bmatrix}, \quad (2.3)$$

$$\omega = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\phi} - \dot{\psi} \sin \theta \\ \dot{\theta} \cos \phi + \dot{\psi} \cos \theta \sin \phi \\ \dot{\psi} \cos \phi \cos \theta - \dot{\theta} \sin \phi \end{bmatrix}, \quad (2.4)$$

$$\dot{\omega} = \begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{I_{b_1}} \{L + (I_{b_2} - I_{b_3})qr\} \\ \frac{1}{I_{b_2}} \{M + (I_{b_3} - I_{b_1})pr\} \\ \frac{1}{I_{b_3}} \{N + (I_{b_1} - I_{b_2})pq\} \end{bmatrix}, \quad (2.5)$$

$$\begin{bmatrix} L \\ M \\ N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{b_1} \dot{p} - I_{b_2} qr + I_{b_3} qr \\ I_{b_2} \dot{q} + I_{b_1} pr - I_{b_3} pr \\ I_{b_3} \dot{r} - I_{b_1} pq + I_{b_2} pq \end{bmatrix}, \quad (2.6)$$

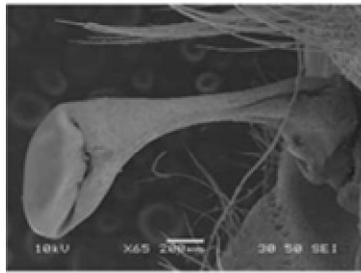
$g, \theta, \phi, \psi, I_{b_1}, I_{b_2}, I_{b_3}$ 는 각각 중력 가속도, 로봇의 b_1 축으로의 회전 각도, 로봇의 b_2 축으로의 회전 각도, 로봇의 b_3 축으로의 회전 각도, 로봇의 b_1 축으로의 관성 모멘트, 로봇의 b_2 축으로의 관성 모멘트, 로봇의 b_3 축으로의 관성 모멘트이다. 식 (2.3) ~ (2.6) 과 측정되는 코리올리 힘을 통해, 로봇이 단순한 직선 운동이나 회전 운동으로 하는 경우가 아닌 3축으로 임의의 움직임을 할 때의 로봇의 roll, pitch, yaw 각속도를 구할 수 있다.

제 3 절 파리류 곤충의 각속도 감지 메커니즘

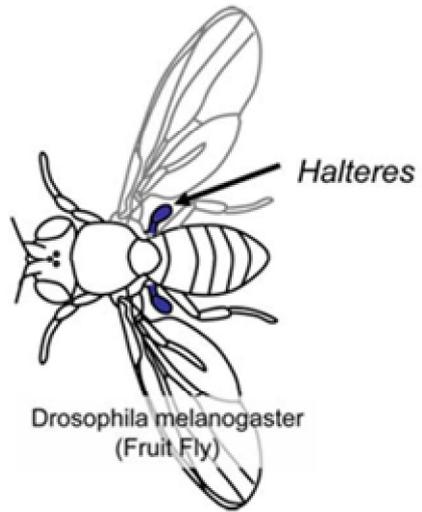
파리와 같은 비행 곤충은 머리, 가슴, 몸통 세 부분으로 나뉘고 각 부분에 다양한 감각기관이 존재한다 [9]. 여러 감각기관 중, 가슴 뒷 부분에 ‘평형곤’ 이라는 기관이 존재하는데 이는 곤봉 형태의 구조를 갖고 있는 기관으로서 약 400 여개의 감각기가 있어 코리올리의 힘을 감지한다 [10]. 아래 그림 4, 5 는 파리류 곤충에 붙어있는 평형곤의 위치와 현미경 사진을 나타낸 것이다 [11]. 파리류의 곤충이 이 감각기관에서 측정된 코리올리의 힘을 이용하여 몸체의 각속도를 감지한다. 평형곤은 다른 감각기관과 달리 동력을 날갯짓에서 얻어 진동하기 때문에 평형곤을 진동시키기 위한 별도의 근육이 필요하지 않다. 또한, 평형곤은 기관의 부착 위치 상, 곤충의 날개와 약 180° 정도의 위상 차이를 갖게 된다 [12]. 곤충이 회전 운동을 할 경우에 곤충의 평형곤에서 측정되는 힘을 다음과 같이 나타낼 수 있다. 아래 그림 6에 왼쪽, 오른쪽 평형곤에서 측정되는 roll, pitch, yaw 방향으로의 힘을 그래프로 나타내었다.

$$F = mg - 2m\omega \times v - m\omega \times (\omega \times r) - m\dot{\omega} \times r - ma, \quad (2.7)$$

여기서 g , m , a , ω , v , r 는 각각 중력가속도, 곤충의 질량, 곤충의 가속도, 곤충 몸통의 각속도, 날갯짓의 선속도, 몸통의 무게 중심부터 곤충의 평형곤 까지의 거리이다. 평형곤에 작용하는 힘은 코리올리 힘 이외에도 가속력, 원심력 등이 존재한다. 그러나, 곤충이 등각속도 운동을 할 경우에 대해 계산한다면 코리올리 힘이 가장 우세하다고 가정할 수 있다. 또한, 코리올리의 성분을 구성하고 있는 요소 중, 선속도 성분 (곤충의 날갯짓의 선속도) 이 다른 힘을 구성하고 있는 변수들 보다 유의미하게 크기 때문에 더욱 코리올리의 힘이 우세하다고 할 수 있다. 따라서, 곤충은 평형곤의 측면 방향에서의 코리올리 힘을 바탕으로 곤충이 다양한 방향으로 회전운동을 할 경우에 대해 곤충의 몸통의 roll, pitch, yaw 방향으로의 각속도를 감지한다.



Scanning Electron Micrograph
Robber Fly Haltere



Drosophila melanogaster
(Fruit Fly)

그림 4. 파리의 평형근의 위치와 현미경 사진

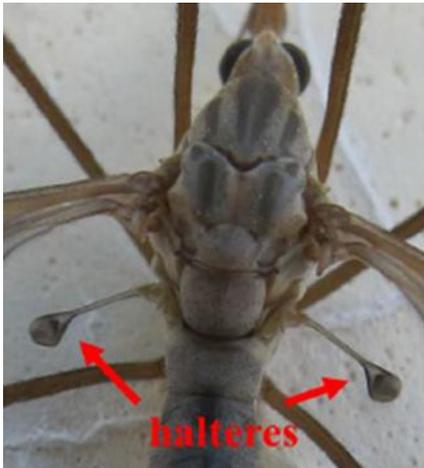


그림 5. 파리에 존재하는 한 쌍의 평형근

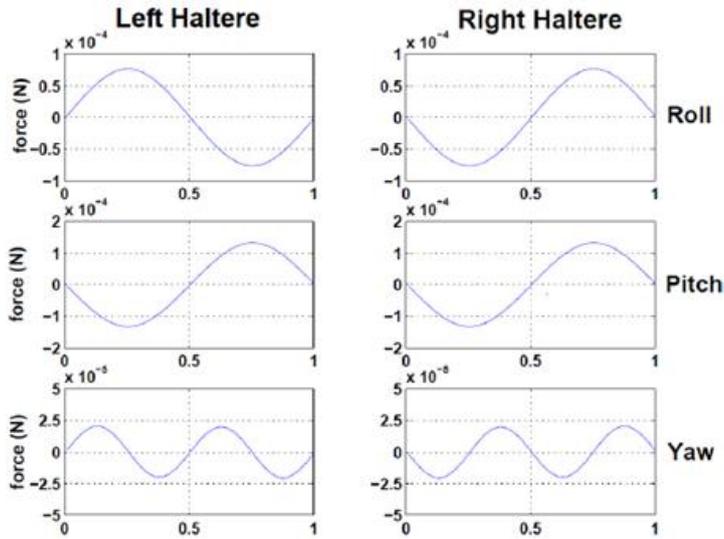


그림 6. 왼쪽, 오른쪽 평형곤에서 측정되는 roll, pitch, yaw 방향으로의 힘

제 4 절 생체모방 로봇에 적용하기 위한 생체의 특성 분석

생체모방 로봇 (Biomimetics robot)은 생명체가 가지고 있는 우수한 특성을 활용하여 만든 로봇으로 인간을 비롯한 동물이나 곤충, 물고기 등의 기본구조, 원리 및 매커니즘을 모방하여 만든 로봇이다 [13]. 과거의 생체모방 로봇은 단순히 생명체의 움직임을 모방하는 것에 초점이 맞춰져 있었으나 최근에 연구되고 있는 생체모방 로봇은 실질적인 용도로 정찰, 촬영 등 다양한 분야에서 활용되고 있다 [14]. 대표적인 생체모방 로봇으로는 Boston dynamics 사의 ‘Rhex’, Festo 사의 ‘Smart bird’, 미국 하버드 대학교의 ‘RoboBee’ 등이 있다 [15].



그림 7. 생체모방 로봇 'Rhex'



그림 8. 생체모방 로봇 'Smart bird'

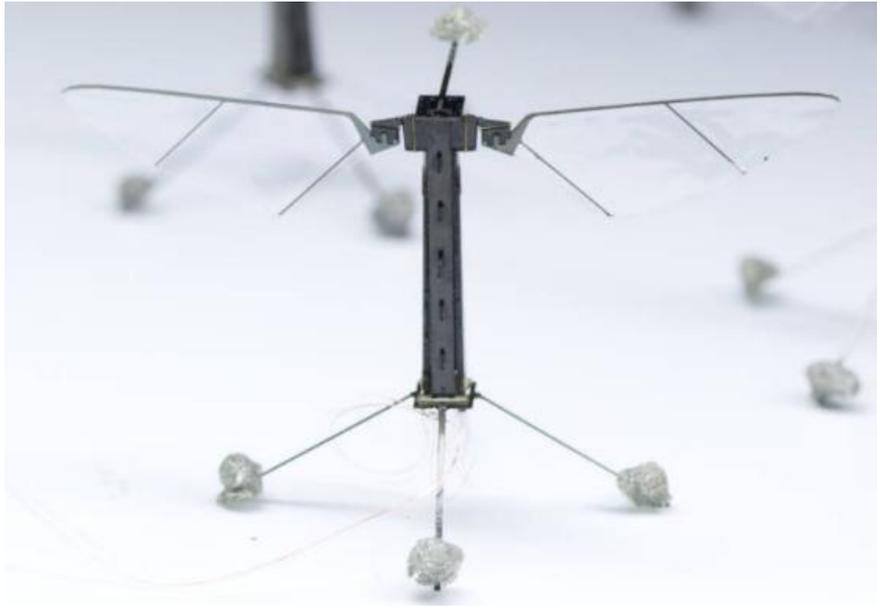


그림 9. 생체모방 로봇 ‘RoboBee’

본 논문에서 제안한 방법을 실제 생체모방 로봇에 적용하기 위해서는 지구상에 존재하는 생물체의 특성을 조사하는 과정이 필요하다. 따라서, 지구상의 지상, 비행 생물체의 특성을 표 2-1, 표 2-2 에 정리하였다.

표 2-1. 지상 생물체의 특성

구분	귀뚜라미 (Cricket)	메뚜기 (Locust)	바퀴벌레 (Cockroach)	개미 (Ant)	거미 (Spider)	전갈 (Hadrurus arizonensis)	집쥐 (Rattus norvegicus)	도마뱀 (Gekko gecko)
무게	0.01-0.5 g	0.4-2.5 g	1-4 g	10 mg	15-22 g	4-7 g	250-400 g	150-400 g
크기	10-21 mm	10-70 mm	30-50 mm	2-3 mm	1-5 cm	10-18 cm	20-25 cm	20-50 cm
속도	3-22 cm/s	3 m/s (jumping)	19-24 cm/s	6-10 cm/s	4-22 cm/s	10-15 cm/s	25-100 cm/s	60-180 cm/s
각속도	최대 90 °/s (yaw)	240-1500 °/s (pitch) (jumping시 발생)	최대 115 °/s (yaw)	최대 120 °/s (yaw)	-	-	-	-
가속도	170 m/s ² (jumping시 발생)	147 m/s ² (jumping시 발생)	-	-	0.04 - 0.3 m/s ²	-	-	11-22 m/s ²
기타	운동에 대한 반응 시간 : 50 - 200 ms	-	걸음주파수 : ~ 7 Hz	걸음주파수 : ~ 17 Hz	Stride frequency : 1-3 Hz (slow: 0.68-1.14 Hz, fast: 2.32-3.48 Hz)	4쌍 다리를 활용해 이동	-	-

표 2-2. 비행 생물체의 특성

구분	파리 (Fly)	모기 (Mosquito)	벌 (Bee)	잠자리 (Dragonfly)	참새 (Sparrow)	벌새 (Hummingbird)	왕관앵무새 (Cockatiel)	비둘기 (Dove)
무게	1 - 12 mg (housefly 기준)	2 - 10 mg	80-100 mg (honeybee 기준)	0.5- 1.1 g	12-17 g	3-20 g	80 g	140 g
크기	0.2-0.25 cm	0.5 cm	0.5-5.5 cm	2-15 cm	10-12 cm	10-21 cm	27-35 cm	29-37 cm
속도	2-4 m/s	0.5-0.7 m/s	~ 3 m/s	~ 13 m/s	10-14 m/s	4-25 m/s	17 m/s	20 m/s
평균 날개짓	200 Hz (최고 1000Hz)	200-300 Hz (최고 1000Hz)	190 Hz	35 Hz	26 Hz	41-80 Hz	6-8 Hz	7-10 Hz
각속도	1000-2000 °/s	500-2800 °/s	500-1500 °/s	500-3000 °/s	400-700 °/s	-	-	45-150 °/s
가속도	각가속도 : 105 °/s ² 수준	-	-	17-130 m/s ²	-	24 m/s ²	22.6 m/s ²	40 m/s ²
기타	평균 반응속도 : 4.5 ms 이하(222.2 Hz 이상)	-	-	-	wing span : 17-20 cm	wing span : 13-18 cm	wing span : 45 cm	wing span : 62 cm

표 2-1 과 표 2-2 를 바탕으로 생체모방 로봇의 구동부에 부착할 구동부 일체형 센서가 가져야 하는 특성을 정의할 수 있다. $0.04 \text{ m/s}^2 \sim 170 \text{ m/s}^2$ 의 가속도, $40^\circ/\text{s} \sim 3,000^\circ/\text{s}$ 의 각속도 측정이 가능해야 하며, 센서의 반응은 4.5 ms 이내로 나와야 하며, 센서의 대역폭은 300 Hz 이상, 센서의 해상도는 $1^\circ/\text{s}$ 이상이 되어야 한다. 무엇보다도 로봇의 구동부에 부착을 해야하기 때문에 센서 전체의 크기와 무게가 생체모방 로봇의 움직임에 영향을 주지 않아야 한다.

제 5 절 실험환경 및 실험방법

아래 그림 10 과 같이 P3DX 파이오니어 로봇 (Adept technology, Inc., USA) 에 200W CSMT 서보 모터 (RS Automation, Korea) 를 부착하고 보다 정확한 속도 명령을 인가하기 위해 서보 모터에 CSD7 서보 드라이브 (RS Automation, Korea) 를 연결하여 속도 명령을 인가하였다. 또한, 서보 모터에 DP201 3D 프린터 (Sindoh 社, Korea) 로 제작한 프로펠러 블레이드를 결합하여 실제 드론의 블레이드와 유사하게 만든 실험 환경에서 실험을 진행하였다. 프로펠러 블레이드 내부에 구동부 일체형 센서를 부착하여 프로펠러 블레이드 회전 시 발생하는 3축 방향으로의 가속도를 측정하였다. 구동부 일체형 센서 모듈은 아두이노

프로미니 마이크로 컨트롤러 (Sparkfun electronics, USA), HC-06 블루투스 모듈 (Guangzhou HC 社, China), MPU-6050 6축 자이로스코프 센서 (Invensense 社, USA) 를 연결하여 제작하였다. 시리얼 통신을 통해 MPU-6050 센서와 아두이노 프로미니가 통신을 하고, 그 결과값을 HC-06 블루투스 통신 모듈을 이용하여 스마트폰 또는 컴퓨터로 전송한다. 또한, 40 mAh 의 리튬 폴리머 배터리를 사용하여 구동부 일체형 센서로 전원을 공급한다. P3DX 파이오니어 로봇을 제어하기 위해 C++ 기반의 Microsoft foundation class (MFC) 라이브러리를 사용하여 제자리 회전 및 사각주행을 할 수 있게 하였다.

P3DX 파이오니어 로봇이 제자리 회전을 하는 경우는, $10^{\circ}/s$, $30^{\circ}/s$, $45^{\circ}/s$ 의 시계 방향으로의 회전 속도 명령이 인가되는 세 가지 경우에 대해 각속도 추정 실험을 하였다. 이 때, 200W 서보 모터는 60 rpm(=360 $^{\circ}/s$), 80 rpm(=480 $^{\circ}/s$) 두 가지의 속도로 파이오니어 로봇과 마찬가지로 시계 방향으로 회전을 하였다. 표 2-3에 제자리 회전 실험을 할 경우의 파이오니어 로봇 및 프로펠러 블레이드 속도의 프로파일에 대해 정리하였다. 파이오니어 로봇은 2초 동안 회전하고 0.5초 동안 정지하는 과정을 3번 반복하였고, 프로펠러 블레이드는 항상 인가되는 속도로 회전을 하고 있는 상태에서 데이터를 획득하였다. 또한, 구동부 일체형 센서로 추정되는 파이오니어 로봇의 각속도와 실제 파이오니어 로봇의 각속도와 비교하기 위해, 파이오니어 로봇 상단에 상용 자이로스코프 센서를 부착하여 비교하였다.



그림 10. 파이오니어 로봇 실험환경 세팅

표 2-3. 제자리 회전 실험 프로파일

(파이오니어 로봇 회전 속도)

	10 °/s	30 °/s	45 °/s
60 rpm	실험 1	실험 2	실험 3
80 rpm	실험 4	실험 5	실험 6

(프로펠러 블레이드 회전 속도)

추가적으로 자이로스코프 센서의 공진 주파수와 같은 주파수를 갖는 외부의 음파가 존재하는 경우, 파이오니어 로봇이 1.4 m × 1.5 m 사각 주행을 하는 경우에 대해 파이오니어 로봇의 각속도 추정 및 회전 각도 추정 실험을 진행하였다. 사각주행 실험의 경우, vicon motion systems 사의 motion capture camera 시스템을 활용하여 파이오니어 로봇의 이

동경로를 추적하여 파이오니어 로봇의 각속도 및 회전각도의 ground truth 값으로 사용하였다. 앞서 서론에서 언급했다시피, 자이로스코프 센서는 각속도를 측정하기 위해 내부의 질량체가 일정한 주파수로 공진하고 있는데, 해당 주파수와 같은 외부의 음파가 존재할 경우, 각속도 추정이 잘 이뤄지지 않는 문제점이 있다. 따라서, 실험을 통해 본 논문에서 제시한 방법은 외부의 음파에 대해 영향을 받지 않고 효과적으로 각속도를 추정함을 보이고자 한다.

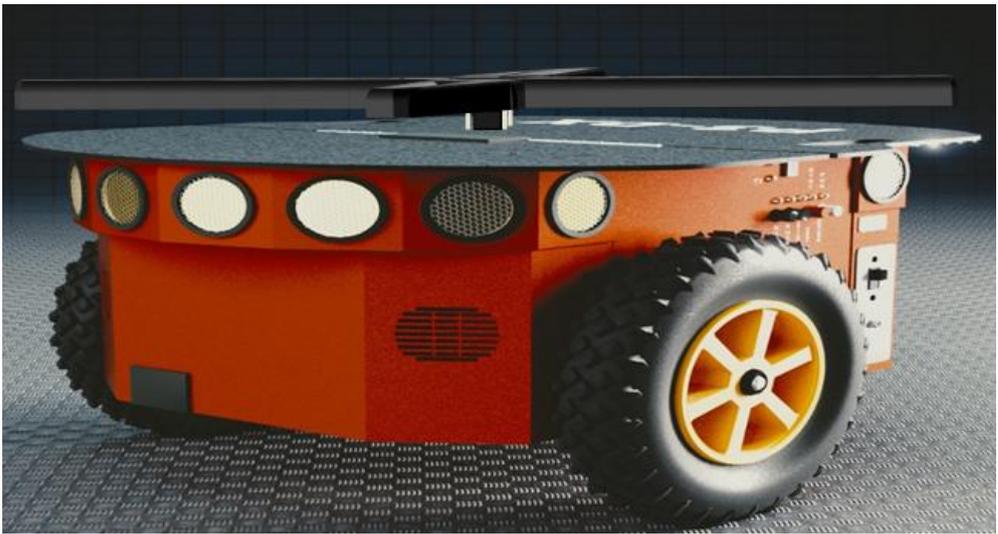


그림 11. 파이오니어 로봇과 서보 모터 결합 모식도

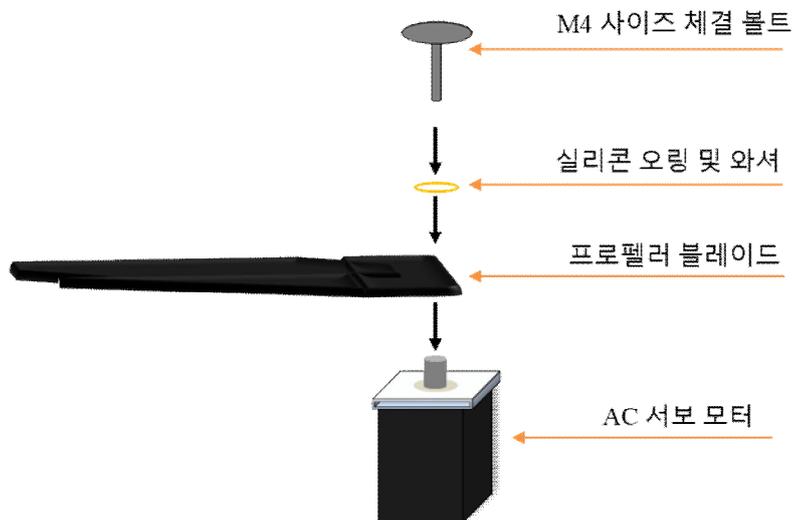


그림 12. 프로펠러 블레이드와 서보 모터 결합 모식도

제 6 절 신호 분석 및 획득 데이터 필터 처리 방법

구동부 일체형 센서를 통해 얻은 가속도 데이터는 코리올리 힘 외에도 원심력, 각가속력 등 여러 성분이 존재한다.

$$F_{\text{measure}} = -mg + ma + m\dot{\omega}_1 \times r + m\omega_1 \times (\omega_1 \times r) + 2m\omega_1 \times v + m\omega_2 \times (\omega_2 \times r), \quad (2.7)$$

g , a , ω_1 , ω_2 , r , v , m 는 각각 중력가속도, 구동부 일체형 센서의 가속도, 파이오니어 로봇의 각속도, 프로펠러 블레이드의 각속도, 회전 중심으로 부터 구동부 일체형 센서까지의 변위, 구동부 일체형 센서의 선속도, 구동부 일체형 센서의 질량이다. 만약, 파이오니어 로봇이 회전하지 않고 프로펠러 블레이드만 회전할 경우에 대해 구동부 일체형 센서에서 측정되는 값은 다음과 같다.

$$F_{\text{offset}} = -mg + ma + m\dot{\omega}_1 \times r + m\omega_2 \times (\omega_2 \times r) \quad (2.8)$$

등각속도 구간에서 데이터를 측정한다면 아래와 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$F_{\text{measure}} - F_{\text{offset}} \approx 2m\omega_1 \times v = 2m\omega_1 \times (\omega_2 \times r) \quad (2.9)$$

그러나, 구동부 일체형 센서 모듈을 통해 획득한 가속도 데이터는 구동부의 선속도 (프로펠러 블레이드의 회전으로 인한 구동부 일체형 센서의 선속도) 에 의해 amplitude modulation (AM) 된 신호로서 정확한 데이터를 얻기 위해서는 그림과 같이 demodulation 하는 과정이 필요하다.

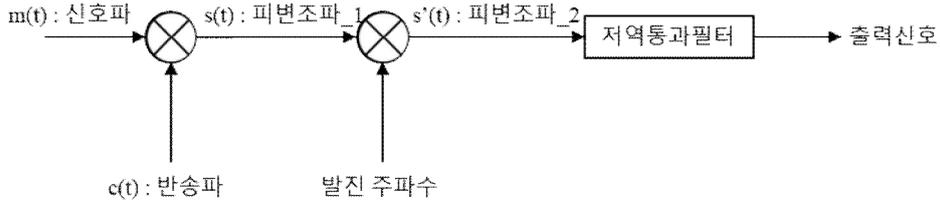


그림 13. 획득 데이터 demodulation 과정

$$m(t) = A \cos(2\pi f_m t + \varphi) \quad (2.10)$$

$$c(t) = B \cos(2\pi f_c t + \phi) \quad (2.11)$$

$$s(t) = m(t)c(t) = AB \cos(2\pi f_m t + \varphi) \cos(2\pi f_c t + \phi) \quad (2.12)$$

$$= \frac{AB}{2} \{ \cos(2\pi(f_m + f_c)t + \varphi + \phi) + \cos(2\pi(f_m - f_c)t + \varphi - \phi) \}$$

$$s'(t) = m(t)c(t) \cos(2\pi f_c t) = AB \cos(2\pi f_m t + \varphi) \cos(2\pi f_c t + \phi) \cos(2\pi f_c t) = \frac{AB}{2} \{ \cos(2\pi(f_m + f_c)t + \varphi + \phi) + \cos(2\pi(f_m - f_c)t + \varphi - \phi) \} \cos(2\pi f_c t) = \frac{AB}{4} \{ \cos(2\pi(f_m + 2f_c)t + \varphi + \phi) + \cos(2\pi f_m t + \varphi + \phi) + \cos(2\pi f_m t + \varphi - \phi) + \cos(2\pi(f_m - 2f_c)t + \varphi - \phi) \} \quad (2.13)$$

$$S'(f) = \frac{AB}{8} e^{j\frac{\varphi+\phi}{f_m+2f_c}} [\delta(f+f_m+2f_c) + \delta(f-f_m-2f_c)] + \frac{AB}{8} e^{j\frac{\varphi+\phi}{f_m}} [\delta(f+f_m) + \delta(f-f_m)] + \frac{AB}{8} e^{j\frac{\varphi-\phi}{f_m}} [\delta(f+f_m) + \delta(f-f_m)] + \frac{AB}{8} e^{j\frac{\varphi-\phi}{f_m-2f_c}} [\delta(f+f_m-2f_c) + \delta(f-f_m+2f_c)]$$

$$(2.14)$$

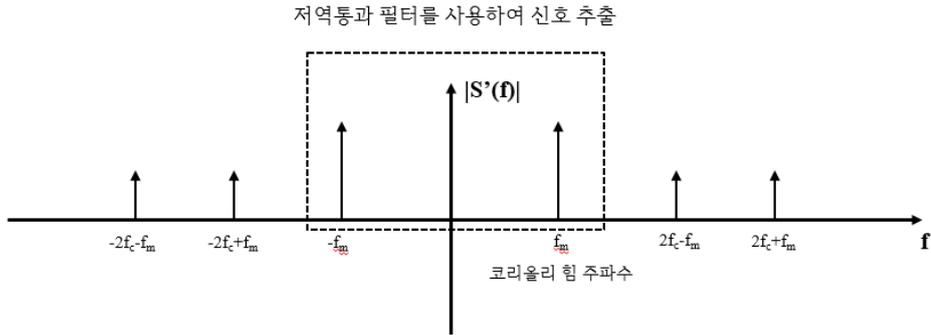


그림 14. 주파수 대역에서의 demodulation 과정

식 (2.10) ~ (2.14) 에서 $m(t)$, $c(t)$, $s(t)$, $S'(f)$ 는 각각 신호파, 반송파, 시간영역에서의 피변조파, 주파수영역에서의 피변조파로서 amplitude modulation (AM) 하는 과정에서 사용되는 변수이다. 구동부 일체형 센서에서 획득한 데이터 중 코리올리 힘에 의한 영향으로 인한 가속도를 측정하려면 저역통과필터를 사용하여야 한다. 예를 들어, 프로펠러 블레이드가 60 rpm 의 속도로 회전할 경우, 반송파의 주파수는 1 Hz 가 되므로 해당 주파수를 제거하기 위한 저역통과필터의 cut-off frequency 를 1 Hz 부근으로 설정하여 코리올리 힘에 의한 성분만 추출할 수 있다. 또한, 프로펠러 블레이드의 회전 속도가 80 rpm 의 속도로 회전할 경우, 반송파의 주파수는 약 1.3 Hz 가 되므로 저역통과필터의 cut-off frequency 를 1.3 Hz 부근으로 설정하여 코리올리 힘에 의한 성분만 추출할 수 있다.

제 7 절 제자리 회전 실험 결과 및 데이터 분석

P3DX 파이오니어 로봇이 제자리 회전을 하는 경우에 대해 파이오니어 로봇의 각속도 추정 실험을 하였다. 프로펠러 블레이드의 회전 속도는 60 rpm, 80 rpm 두 가지의 속도로 회전 속도를 변경하면서 진행하였고 10 °/s, 30 °/s, 45 °/s 의 세 가지의 P3DX 파이오니어 로봇 회전 각속도에 대해 구동부 일체형 센서 모듈을 통해 얻은 가속도 데이터를 바탕으로 파이오니어 로봇 몸체의 회전 각속도 추정하였다. P3DX 파이

오니어 로봇 및 프로펠러 블레이드의 회전 방향은 시계방향으로 하여 실험하였다.



그림 15. 파이오니어 로봇의 제자리 회전 실험

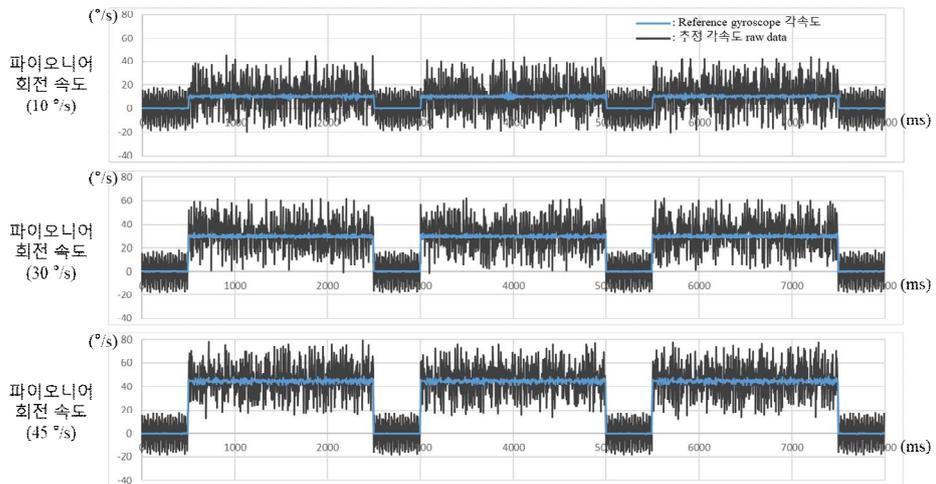


그림 16. Raw 데이터 및 reference gyroscope 데이터
(프로펠러 블레이드 속도 : 60 rpm)

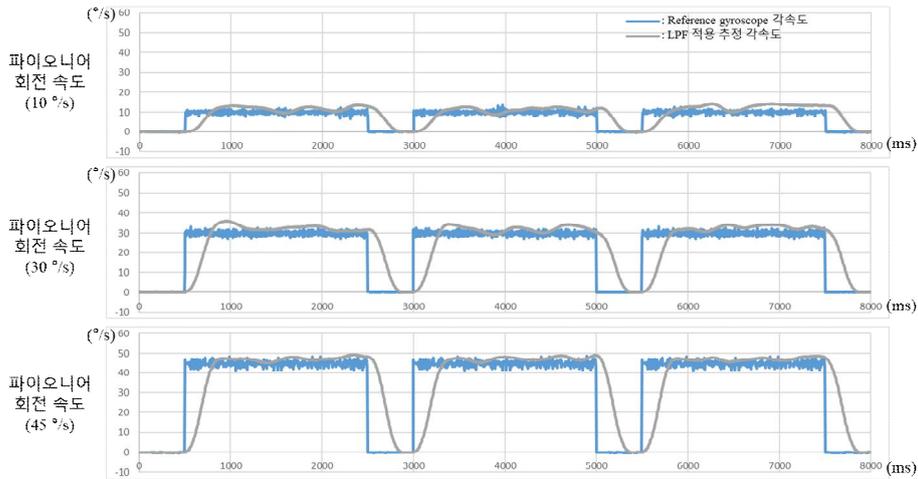


그림 17. 저역통과필터 적용 데이터 및 reference gyroscope 데이터

(프로펠러 블레이드 속도 : 60 rpm)

그림 16 에서 알 수 있듯이, 구동부 일체형 센서를 통해 얻은 raw data 에는 고, 저주파의 노이즈가 포함되어 있고 일정한 각속도로 추정되지 않기 때문에 실제 로봇에 적용하기 어렵다. 이는 블루투스 통신 노이즈, 파이오니어 로봇 구동 시 발생하는 바닥과의 마찰 및 구동부의 움직임에 의해 amplitude modulation 된 신호로서 앞장에서 언급한 것처럼 저역 통과필터를 사용하여 demodulation 을 하여 노이즈를 제거하는 과정이 필요하다. 그림 17 은 저역통과필터 (4차 butterworth 필터) 를 적용한 후의 데이터인데, 비교적 추정이 잘 이뤄짐을 확인할 수 있으나 필연적으로 발생하는 위상 지연 현상으로 인해 빠른 반응을 요구하는 실제 로봇에 적용하기에는 한계점이 있다. 마찬가지로 프로펠러 블레이드의 회전 속도가 80 rpm 인 경우에 대해 실험한 결과는 다음과 같다.

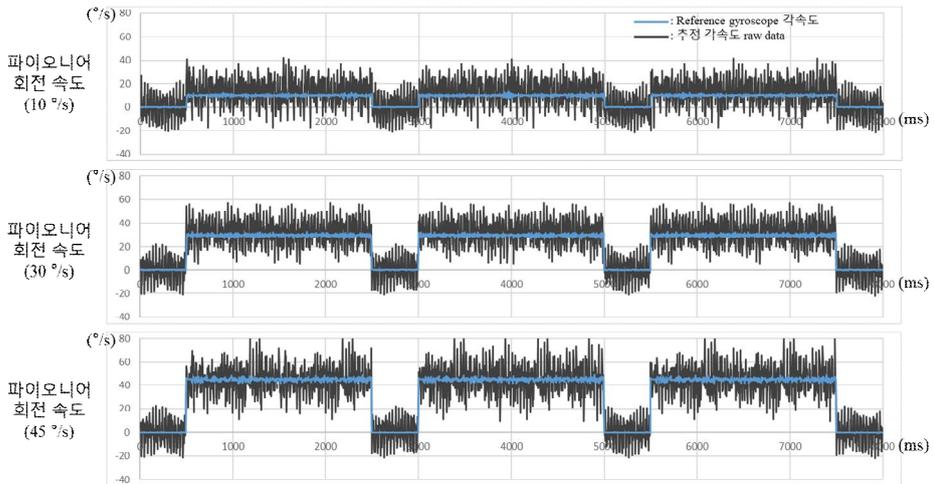


그림 18. Raw 데이터 및 reference gyroscope 데이터
(프로펠러 블레이드 회전 속도 : 80 rpm)

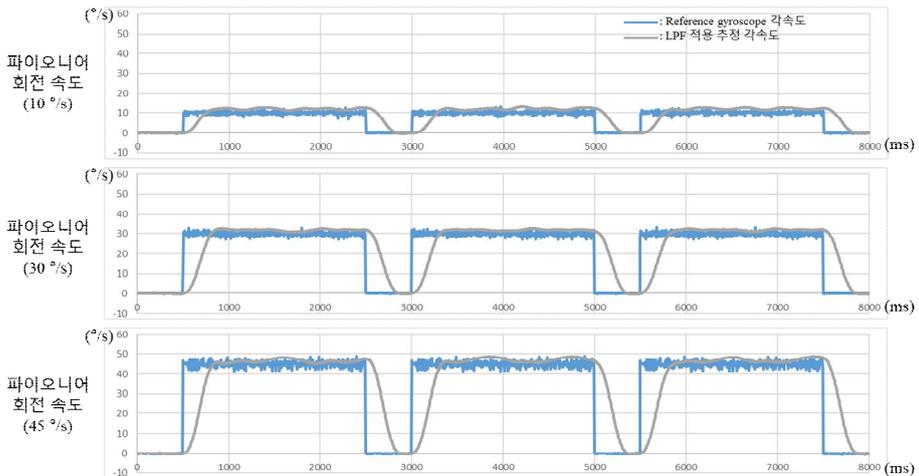


그림 19. 저역통과필터 적용 데이터 및 reference gyroscope 데이터
(프로펠러 블레이드 회전 속도 : 80 rpm)

프로펠러 블레이드의 회전속도가 60 rpm 인 경우와 비슷하게 저역통과 필터 적용 시, 각속도 추정이 잘 이뤄짐을 확인할 수 있다. 그러나 마찬가지로 위상 지연 현상으로 인해 실제 로봇에 적용하기에는 한계점이 있다. 또한, 각속도 추정값에 저주파의 잔여 진동이 존재하여 정확한 추정값을 요구하는 로봇에 대해 적용이 불가하다. 그러나 프로펠러 블레이드

회전 속도가 60 rpm 인 경우와 다르게 80 rpm 인 경우는 등각속도 구간에서 오차가 비교적 적었다. 이는 빠른 회전 속도에서는 구동부 일체형 센서에서 측정되는 데이터 중, 코리올리의 힘에 의한 영향보다 원심력에 의한 영향이 더 커져 발생한 현상으로 생각된다.

위와 같은 이슈에 착안하여, 오차를 유발하는 주파수 대역을 찾기 위해 푸리에 변환을 통해 주파수 대역에서 raw data 를 분석하였다.

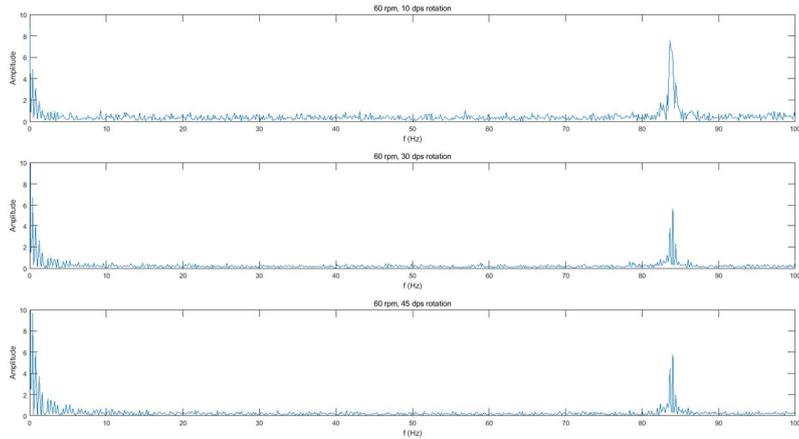


그림 20. Raw 데이터 및 reference gyroscope 데이터 - 주파수 영역 분석
(프로펠러 블레이드 회전 속도 : 60 rpm)

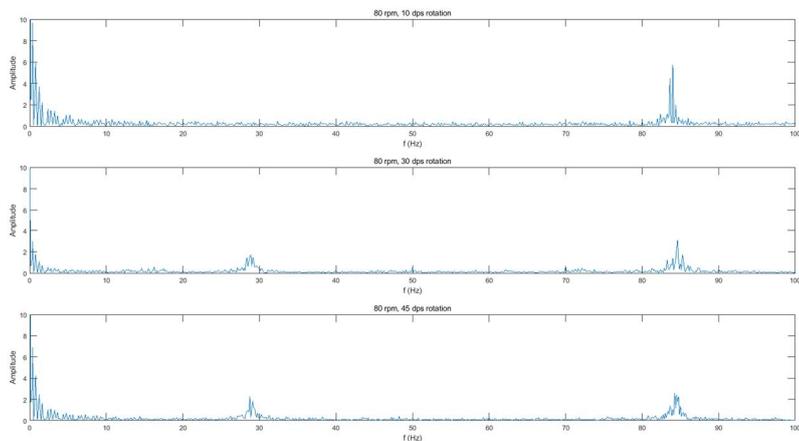


그림 21. Raw 데이터 및 reference gyroscope 데이터 - 주파수 영역 분석

(프로펠러 블레이드 회전 속도 : 80 rpm)

모든 경우에 대해, 약 85 Hz 부근에 노이즈 성분이 존재하는 것을 확인하였다. 해당하는 주파수 성분을 제거하기 위해 저역통과필터에 추가적으로 아래와 같은 전달함수를 갖는 2차 notch filter 를 적용하였다.

$$H_N(s) = 1 - k_{\text{depth}} \frac{\frac{\omega_n}{Q} s}{s^2 + \frac{\omega_n}{Q} s + \omega_n^2} = \frac{s^2 + (1 - k_{\text{depth}}) \frac{\omega_n}{Q} s + \omega_n^2}{s^2 + \frac{\omega_n}{Q} s + \omega_n^2} \quad (2.15)$$

Notch filter 는 band-reject 필터로서 특정 성분의 주파수만을 제거하기 위해 사용되고 기계적인 문제로 해결되지 않는 잔여 진동, 공진 문제를 해결하기 위해 사용된다. 또한, 제거하고자 하는 주파수 특성에 따라 Q , k_{depth} 값을 조절하여 notch filter 를 사용하여 제거되는 주파수 성분의 깊이 및 폭을 조절할 수 있다.

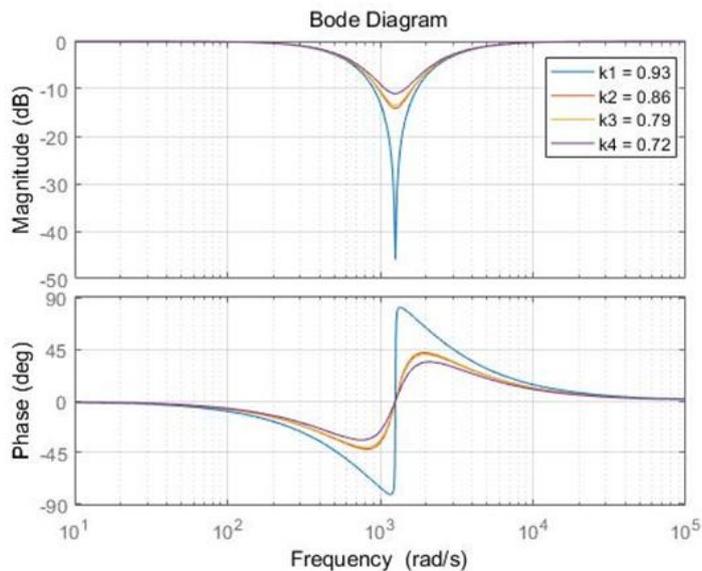


그림 22. 여러 k_{depth} 값 notch filter 의 bode plot

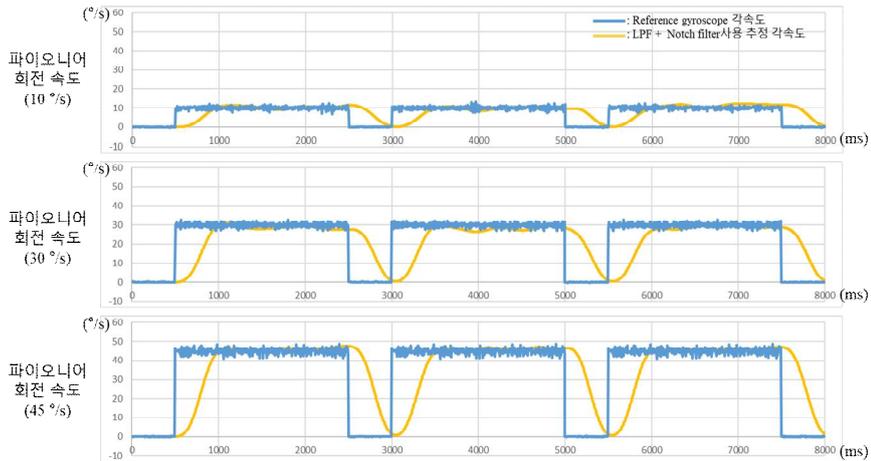


그림 23. Notch filter 적용 후의 추정 데이터
(프로펠러 블레이드 회전 속도 : 60 rpm)

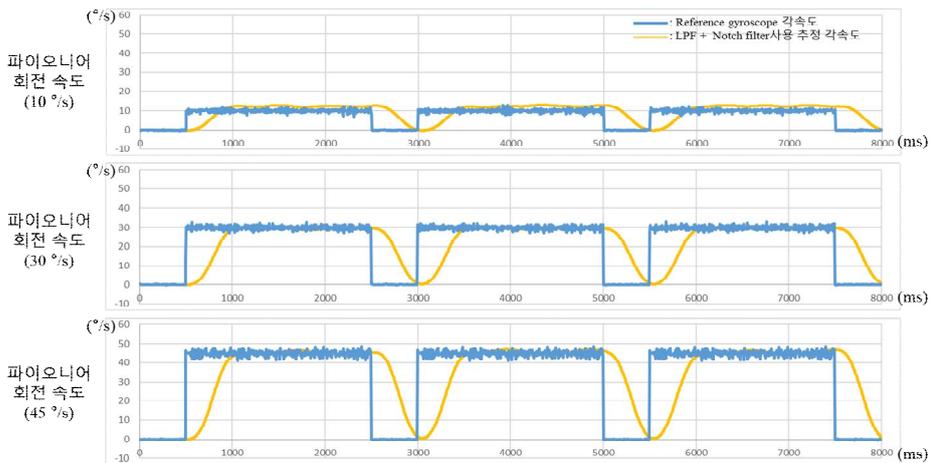


그림 24. Notch filter 적용 후의 추정 데이터
(프로펠러 블레이드 회전 속도 : 80 rpm)

그림 23, 24 에서 확인한 결과, 프로펠러 블레이드의 회전 속도가 60 rpm, 80 rpm 인 모든 경우에 대해, 저역통과필터 및 notch filter 를 적용한 결과, 저역통과필터만 적용한 결과 값에 비해 저주파의 노이즈가 사라진 것을 확인할 수 있었다. 또한 overshoot 현상도 줄어들었고 등속 구간에서의 오차도 적어진 것을 확인할 수 있다. 등속구간에서의 분

산 값의 평균이 약 14.7% 줄어들었다. 그러나 여전히 상대적으로 높은 차수의 필터를 사용하기 때문에, 위상 지연 문제가 생기는 문제가 발생하여 이를 해결하기 위해 Kalman filter 를 사용하였다. Kalman filter 는 prediction 과 dynamic update 를 동시에 사용하여 비교적 높은 정확성을 갖는 필터로서 일종의 저역통과필터 역할을 한다. 아래와 같은 Kalman filter 의 iteration 과정을 통해 각속도를 추정하였다. 또한 사용된 행렬 및 변수의 초기값은 다음과 같다.

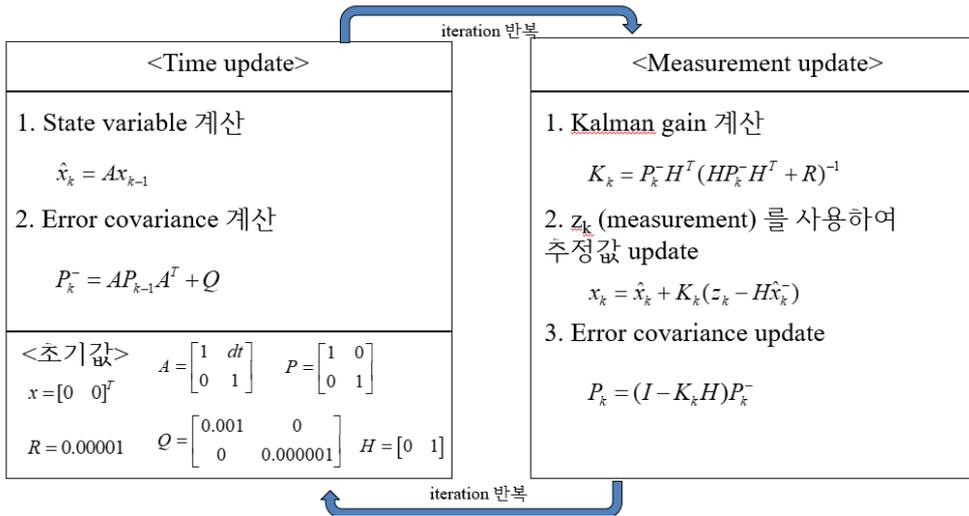


그림 25. Kalman filter 추정 과정

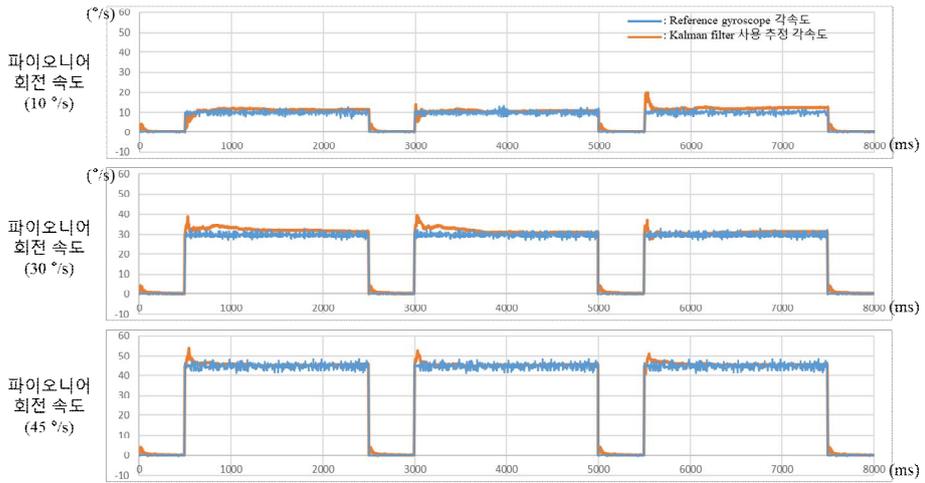


그림 26. Kalman filter 적용 후 데이터
(프로펠러 블레이드 회전 속도 : 60 rpm)

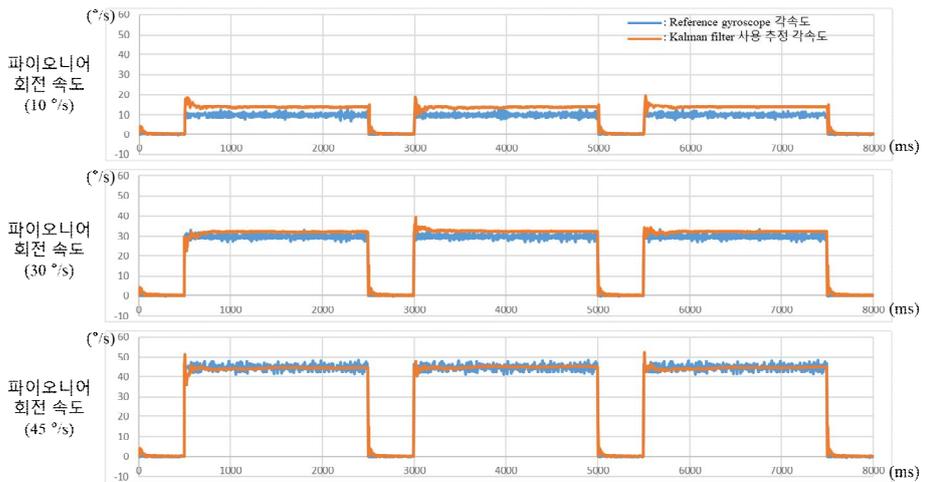


그림 27. Kalman filter 적용 후 데이터
(프로펠러 블레이드 회전 속도 : 80 rpm)

Kalman filter 적용 시, 다른 필터를 적용한 것에 비해 response 및 추정오차가 적게 나왔다. 이는 다른 필터와 달리 update 하는 과정에서 반복을 통해 연속적으로 계산이 되기 때문에 오차가 적게 발생한 것이라고 생각할 수 있다.

제 8 절 자이로스코프 센서 무력화 실험 및 사각 주행 실험

앞서 서론에서 언급했던 것처럼 자이로스코프 센서는 각속도를 추정하기 위해 내부의 질량체를 특정 주파수로 공진시킨다. 내부의 질량체를 공진시키는 과정에서 불필요한 전력소모가 발생하고 무엇보다도 자이로스코프 센서의 공진 주파수와 같은 외부의 음파가 인가될 경우 증폭 현상이 발생하여 각속도 추정이 잘 되지 않는 문제가 발생한다.

위와 같은 현상을 재현하기 위해 0 Hz ~ 100 kHz 사이의 주파수를 발생시킬 수 있는 주파수 발생기와 상용 스피커를 연결하여 자이로스코프 센서의 공진 주파수와 동일한 주파수를 갖는 외부 음파를 발생시켰다. 자이로스코프 센서와 스피커의 거리는 1 cm 로 설정하였으며, 실험에 사용할 MPU-6050 6축 자이로스코프 센서의 공진 주파수를 찾기 위해 센서의 데이터 시트의 정보 및 관련 논문을 바탕으로 25,000 Hz 에서 28,000 Hz 사이 주파수의 음파를 100 Hz 단위로 인가하였다. MPU-6050 6축 자이로스코프 센서를 평면에 정지상태로 두었고 외부 음파를 인가하여 0 ~ 2,000 ms 사이 측정되는 raw 데이터 값의 분산을 계산하였다. 실험 결과, 자이로스코프 센서 데이터 중, 27,000 Hz 의 주파수의 음파를 인가하였을 때, 획득한 raw 데이터의 분산 값이 유의미하게 커진 것을 확인할 수 있었다. 27,000 Hz 의 외부 음파가 존재할 경우의 자이로스코프 센서의 X, Y, Z 축의 raw 데이터 값의 변화는 그림 2.22 에 나타내었다. 따라서 27,000 Hz 를 MPU-6050 6축 자이로스코프 센서의 공진 주파수로 가정하고 자이로스코프 센서 무력화 실험을 진행하였다. 또한, 외부의 음파가 존재하지 않는 경우에 대해서도 파이오니어 로봇의 사각주행 실험을 하여 구동부 일체형 센서와 자이로스코프 센서, VICON 값을 비교하였다.

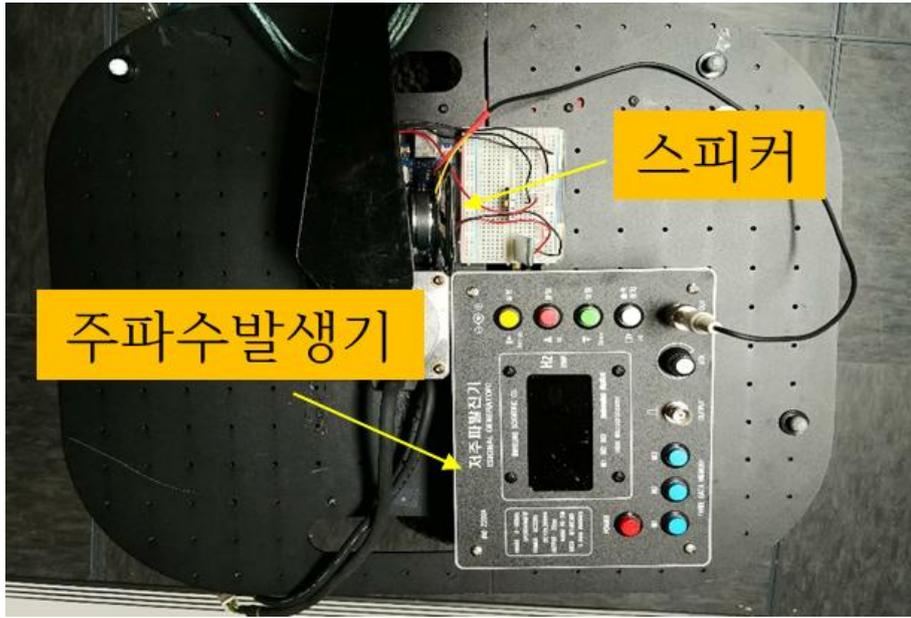


그림 28. 외부 음파 인가 실험 환경
(주파수 : 27,000 Hz)

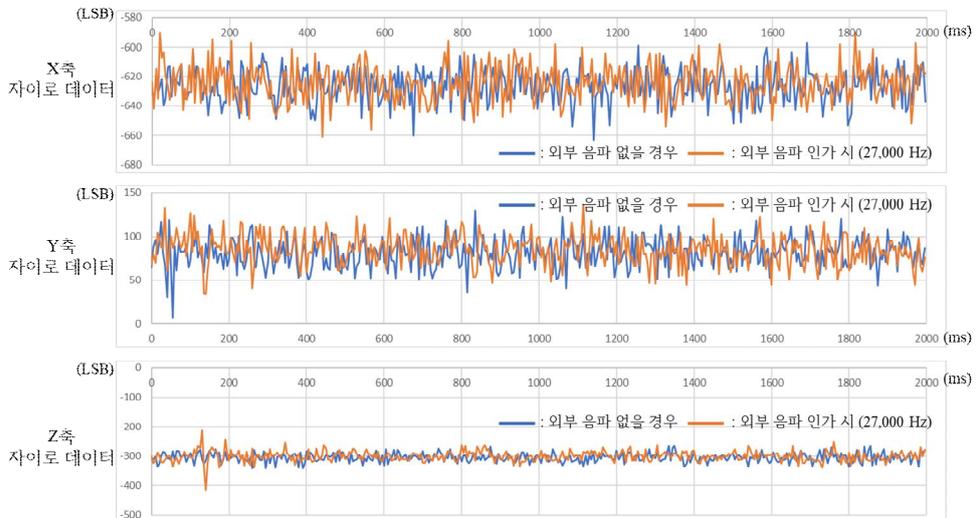


그림 29. 외부 음파가 존재할 경우와 존재하지 않는 경우의
자이로센서 스코프 데이터 비교

표 2-4. 자이로스코프 센서 분산값 비교

	외부 음파가 없는 경우	외부음파인가 될 경우 (주파수 : 27,000 Hz)
X축	11.18	12.61 (약 12.8% 증가)
Y축	16.82	16.95 (약 0.77 % 증가)
Z축	15.14	17.43 (약 15.1% 증가)

(0 ~ 2000 ms 구간에서의 분산값)

자이로스코프 센서의 공진 주파수와 같다고 생각되는 27,000 Hz의 외부 음파가 존재할 경우에 대해, 자이로스코프 센서 각 축에서 획득한 데이터를 분석한 결과, 외부 음파가 존재하지 않는 경우에 비해 자이로스코프 센서의 X, Y, Z 축의 분산 값이 각각 12.8%, 0.771%, 15.1% 증가하였다. 각속도를 추정하는 경우, 이 정도 수준의 오차는 크다고 간주되지 않을 수 있지만, 각속도를 누적하여 계산하는 회전 각도의 경우 오차가 누적되어 상당한 오차를 발생시킨다.

위의 실험 결과를 바탕으로 P3DX 파이오니어 로봇이 1.4 m × 1.5 m 사각주행을 할 경우의 회전 각속도 및 회전 각도 추정 실험을 하였다. P3DX 파이오니어 로봇의 회전속도 명령은 50 °/s 로 인가하였고, 프로펠러 블레이드의 회전 속도는 80 rpm 으로 설정하였다. 실험 환경 및 사각 주행 경로는 그림 30 및 그림 31 에 나타내었다. 비교적 정확한 데이터를 얻기 위해, 초당 100 프레임의 이미지를 캡처할 수 있는 총 8 대의 VICON 카메라 실험 장비를 사용하였고, VICON 장비를 통해 획득한 파이오니어 로봇의 각속도와 회전을 ground truth 값으로 설정하였다. 사각주행을 하는 경우에 대해 VICON 장비를 사용하여 얻은 파이오니어 로봇의 회전 각도, 구동부 일체형 센서를 사용하여 추정한 회전 각속도 및 회전 각도, 자이로스코프 센서를 통해 얻은 회전 각속도 및 회전 각도값을 비교하였다.

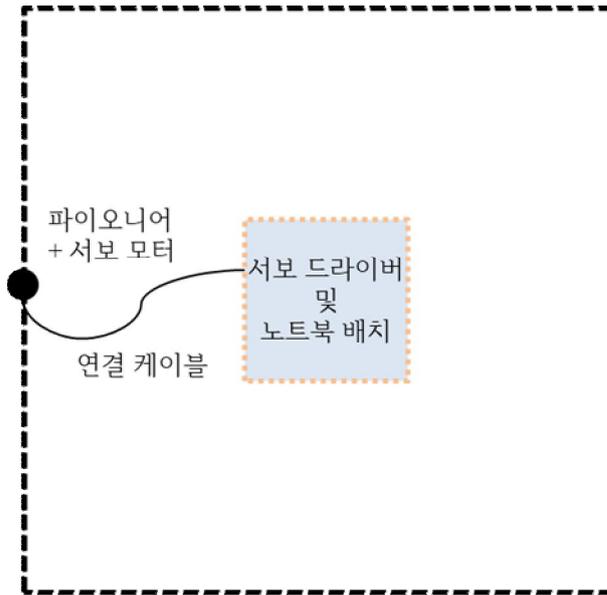


그림 30. 사각주행 실험 환경

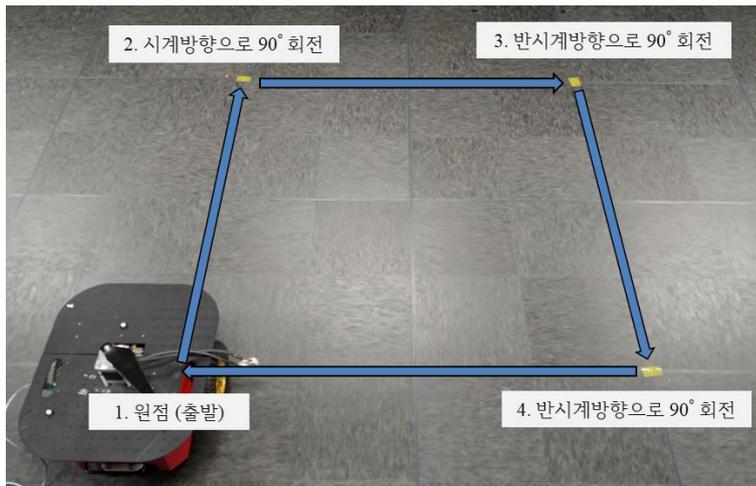


그림 31. 사각주행 실험 경로



그림 32. 사각주행 실제 실험 경로



그림 33. VICON 장비 실험 환경



그림 34. VICON 카메라

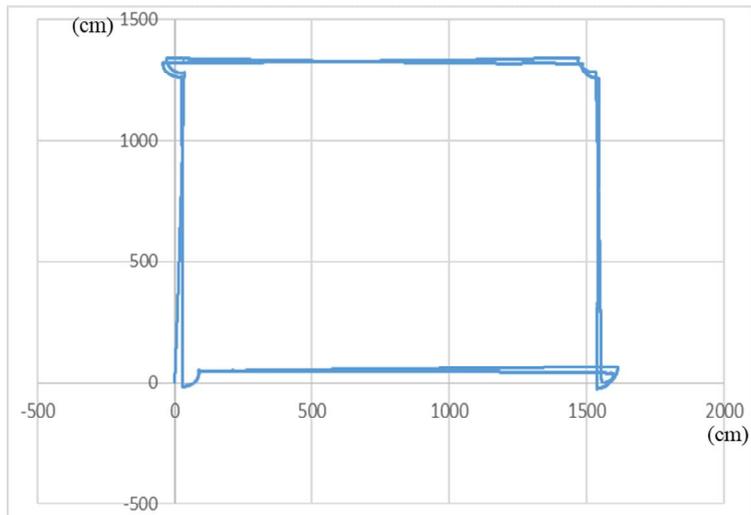


그림 35. VICON 장비를 활용하여 측정한 파리오니어 로봇의 경로

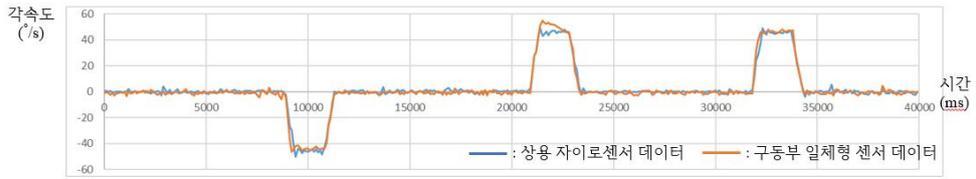


그림 36. 회전 각속도 및 회전 각도의 방법별 비교
(27,000 Hz 의 외부의 음파 존재하지 않을 경우)

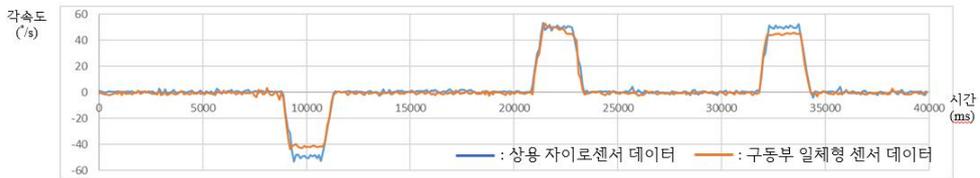


그림 37. 회전 각속도 및 회전 각도의 방법별 비교
(27,000 Hz 의 외부의 음파 존재할 경우)

그림 36, 37 에서 볼 수 있듯이, 외부의 음파가 존재하지 않는 경우에 대해서는 자이로스코프 센서로 측정된 파이오니어 로봇의 회전각도 값이 구동부 일체형 센서로 측정된 값에 비해 VICON 값과 더 유사하였다. 4번의 반복실험을 통해 측정된 결과, 자이로스코프 센서를 이용하여 측정된 회전각도는 VICON 장비를 사용해서 얻은 값과 약 1.31% 수준의 오차를 보였으나 구동부 일체형 센서를 사용해서 측정된 회전각도는 약 10.8% 정도 수준의 오차를 보였다. 반면, 자이로스코프 센서와 같은 공진 주파수 (27,000 Hz) 의 외부 음파가 존재하는 경우에 대해서는 구동부 일체형 센서로 측정된 회전각도 값이 자이로스코프 센서로 측정

한 회전각도에 비해 더 정확하게 추정되는 경우가 발생하였다. 해당 실험 결과는 표 2-5에 정리하였다. 외부 음파가 존재하는 경우의 사각주행 실험에 대해, 구동부 일체형 센서로 추정된 각속도 값이 자이로스코프 센서로 획득한 각속도 값에 비해 정확하지 않은 이유는 인가되는 외부 음파의 세기가 부족하기 때문이라고 생각된다. 데이터시트 및 관련 논문을 참고하여 추후 추가적인 실험을 통해 자이로스코프 센서에 영향을 줄 수 있는 음파의 세기 및 자이로스코프 센서와 스피커 사이의 거리에 대한 분석이 필요하다.

표 2-5. 자이로스코프 센서 데이터 및 구동부 일체형 센서 추정값 비교

	실험 1	실험 2	실험 3	실험 4
지이로 센서 (ground truth (VICON) 와의 오차)	27.89%	8.87%	16.57%	16.49%
구동부 일체형 센서 (ground truth (VICON) 와의 오차)	5.591%	12.08%	15.95%	5.67%

제 3 장 결론 및 발전 방향

본 논문에서는 로봇의 구동부 (프로펠러 블레이드) 에 가속도 값을 측정할 수 있는 센서 모듈 (구동부 일체형 센서 - 마이크로 컨트롤러, 블루투스 모듈, 가속도 센서) 을 부착하여 획득한 가속도 데이터를 통해 자이로스코프 센서를 사용하지 않고 로봇 몸체의 회전 각속도를 추정하는 방법을 제시하였다. 구동부 일체형 센서에서 측정된 코리올리 가속도를 이용하여 로봇 몸체의 회전 각속도를 추정할 수 있고, 다양한 필터 적용 방법 및 demodulation 과정을 통해 노이즈를 제거하고 보다 정확하게 로봇의 각속도를 추정하였다. 본 논문에서 제안한 방법은 외부의 전원 장치 없이 로봇의 구동부의 움직임에 의해서 동력을 얻기 때문에 불필요한 전력 소모를 방지할 수 있다는 장점이 있고, 무엇보다도 자이로스코프 센서와 달리 외부의 음파 공격에 강건하다는 장점이 있다. 파이오니어 로봇과 서보 모터를 사용하여 파리의 평형곤의 메커니즘과 유사하게 만든 실험 환경에서의 실험을 통해, 본 논문에서 제안한 방법이 효과적으로 로봇 몸체의 각속도를 추정함을 보였고, 3D 프린터를 사용하여 만든 프로펠러 블레이드를 통해 구동부 일체형 센서 모듈이 로봇의 구동부에 부착이 가능함을 검증하였다.

향후 초소형화 된 구동부 일체형 센서 모듈을 제작한다면 파리와 같은 보다 작은 곤충형 생체모방 로봇에도 적용이 가능할 것이고, 로봇 몸체의 회전방향과 로봇의 구동부의 회전방향이 임의의 각도를 이루고 있는 경우에 대해서도 오일러 각도를 활용하여 로봇 몸체의 각속도 추정이 가능할 것이다. 또한, 블루투스 통신뿐만 아니라 상황에 맞게 wi-fi 통신 혹은 시리얼 통신을 활용하여 다양한 로봇에 적용할 수 있을 것이다. 나아가, 헬리콥터와 같이 몸통 부분과 꼬리 부분의 구동부의 회전 축이 서로 다른 두 축의 구동부를 갖는 로봇에 대해 각 축에 구동부 일체형 센서 모듈을 부착하여 두 축 이상의 코리올리 가속도에 대한 정보를 얻을 수 있다면 로봇 몸체의 roll, pitch, yaw 각속도를 보다 정확하게 추정할 수 있을 것이다.

사사문

본 논문의 구동부 일체형 센서에서 측정되는 코리올리 힘을 통해 amplitude modulation 후 로봇 몸체의 각속도를 추정하는 아이디어는 Bio-Mimetic Robot Research (BMRR) 23 과제 연구진에 의해 본인이 과제에 참여하기 이전에 도출된 것이다.

참고 문헌

- [1] Kendra L. B. Cook, “The Silent Force Multiplier: The History and Role of UAVs in Warfare,” *IEEE Aerospace Conference*, USA, 2007.
- [2] Austin M. Murch, Yew Chai Paw, Rohit Pandita, Zhefeng Li, and Gary J. Balas, “A Low Cost Small UAV Flight Research Facility,” *Advances in Aerospace Guidance, Navigation and Control*, pp. 29–40, Germany, 2011.
- [3] E. Altug, J. P. Ostrowski, and R. Mahony, “Control of a quadrotor helicopter using visual feedback,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom., ICRA*, 2002, vol. 1, pp. 72–77.
- [4] Kim Hartmann, and Keir Giles, “UAV exploitation: A new domain for cyber power,” *8th International Conference on Cyber Conflit (CyCon)*, Estonia, Aug. 2016.
- [5] E. Frazzoli, M. A. Dahleh, and E. Feron, “Real-time motion planning for agile autonomous vehicles,” *AIAA J. Guid. Control, Dyn.*, vol. 5, no. 1, pp. 116–129, 2002.
- [6] N. Barbour and G. Schmidt, “Inertial sensor technology trends,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 1, no. 4, pp. 332–339, 2001.
- [7] G. Xu, W. Tian, and L. Qian, “EMID-and SVM-based temperature drift modeling and compensation for a dynamically tuned gyroscope (DTG),” *Mechanical Systems*

and Signal Processing, vol. 21, no. 8, pp. 3182–3188, 2007.

- [8] Y. M. Son, H. C. Shin, D. K. Kim, Y. S. Park, J. H. Noh, K. B. Choi, J. W. Choi, and Y. D. Kim, “Rocking drones with intentional sound noise on gyroscopic sensors,” *USENIX Conference on Security Symposium*, pp. 881–896, Washington, USA, Aug. 2015.
- [9] G. Nalbach, “The halteres of the blowfly calliphora,” *Journal of Comparative Physiology A*, vol. 173, no. 3, pp. 293–300, 1993.
- [10] Frank B. Gill, “Hummingbird flight speeds,” *The Auk*, vol. 102, no. 1, pp. 97–101, 1985.
- [11] Yu, Junzhi, Shuo Wang, and Min Tan., “Basic motion control of a free–swimming biomimetic robot fish,” *42nd IEEE International Conference on Decision and Control*, USA, Dec. 2003.
- [12] Carlo M. Biancardi, C. Gabriel Fabrica, Patricia Polero, Jefferson Fagundes Loss, and Alberto E. Minetti, “Biomimechanics of octopedal locomotion: Kinematic and kinetic analysis of the spider *Grammostola mollicoma*,” *The Journal of Experimental Biology*, 2011.
- [13] Safak, Koray K., and George G. Adams., “Modeling and simulation of an artificial muscle and its application to biomimetic robot posture control,” *Robotics and Autonomous Systemes*, vol. 41, no. 4, Dec. 2002.

- [14] R. L. Anderson, *A Robot Ping-Pong Player: Experiment in Real-Time Intelligent Control*. Cambridge, MA: MIT Press, 1988.
- [15] G. Smith, R. Rudy, D. Devoe, S. Bedair, and W. Nothwang, "Thin Film PZT Piezo MEMS for Micro-Robotic Angular Rate Sensing and Rotary Actuation," US Army Research Laboratory, July 31, 2012.
- [16] M. Elsayed, Y. Elsayed, and M. N. El-Gamal, "A Novel Comb Architecture for Enhancing the Sensitivity of Bulk Mode Gyroscopes," *IEEE Sensors Journal*, vol. 13, pp. 16641–16656, 2013.
- [17] H. Myung, H. K. Lee, K. Choi, and S. Bang, "Mobile robot localization with gyroscope and constrained Kalman filter," *International Journal of Control, Automation and Systems*, vol. 8, no. 3, pp. 667–676, 2010.
- [18] 반육, 윤종민, 이상섭, 이상훈, 조동일, "ANF 기반 주파수 추정기를 위한 추정 오차에 비례하는 주파수 조정 방법," *제30회 제어로봇시스템학회 학술대회*, pp. 352–353, 대한민국, 2015.
- [19] B. F. La Scala, and R. R. Bitmead, "Design of an Extended Kalman Filter Frequency Tracker," *Signal Processing, IEEE Transactions on*, vol. 44, issue. 3, pp. 739–742, Mar. 1996.
- [20] T. Deora, A. K. Singh, and S. J. Sane, "Biomechanical basis

of wing and haltere coordination in flies,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 112, no. 5, pp. 1481–1486, Feb. 2015.

[21] R. A. Thompson, W. F. Wehling, J. H. Evers, and W. E. Dixon, “Body rate decoupling using haltere mid-stroke measurements for inertial flight stabilization in Diptera,” *Journal of Comparative Physiology A*, vol. 195, no. 1, pp. 99–112, 2009.

[22] 정민기, 김지수, 장서형, 이태재, 심형보, 고희호, 조규진, 조동일, “평형곤을 모사한 생체모방형 구동부 일체형 각속도 센서,” 제어로봇시스템학회 논문지 제22권 제9호, pp. 705–709, 2016.

[23] R. E. Mayagoitia, A. V. Nene, and P. H. Veltink, “Accelerometer and rate gyroscope measurement of kinematics: an inexpensive alternative to optical motion analysis systems,” *Journal of Biomechanics*, vol. 35, no. 4, pp. 537–542, April. 2002.

[24] L. Qiang, J. A. Stankovi, M. A. Hanson, A. T. Barth, J. Lach, and G. Zhou, “Accurate, Fast Fall Detection Using Gyroscopes and Accelerometer-Derived Posture Information,” *6th International Workshop on Wearable and Implantable Body Sensor Networks*, Berkeley, USA, June. 2009.

[25] Ville Kaajakari, *Practical MEMS: Design of Microsystems, Accelerometers, Gyroscopes, RF MEMS, Optical MEMS, and Microfluidic Systems*, Small Gear Publishing, Mar. 2009.

Abstract

A method for estimating the angular velocity of a robot by utilizing rotating force and its application to biomimetic robots

Jiho Park

Electrical and Computer Engineering

The Graduate School

Seoul National University

This paper presents a method for estimating the angular velocity of a robot by utilizing rotating force and signal processing method in the process of estimating an angular velocity from the rotating force. Several types of filters are used to calculate the angular velocity of a robot. An accelerometer sensor module is fabricated by utilizing Arduino pro mini (micro controller), MPU-6050 (gyroscope sensor), and HC-06 (Bluetooth communication tool) and attached to the moving part of a robot to measure Coriolis force. Also, specification of the accelerometer sensor module is analyzed to apply presented method to biomimetic robots.

In case of conventional gyroscopes, which are widely used in navigation and stabilization process of robots, oscillate proof mass at a certain frequency to measure angular velocity or rotation angles. This leads to a waste of power even when the robots do not require angular velocity information. Also, these gyroscopes are vulnerable to the external sound waves whose frequency is same as

the oscillation frequency of the gyroscopes. When external waves are applied to the gyroscopes, resonance phenomenon happens which deteriorates the performance of the gyroscopes. In contrast, the proposed method does not need to oscillate proof mass at a certain frequency, it can save the power and robust to the any frequency of the external sound waves.

Experimental results show that proposed method successfully estimates the angular velocity of a robot even in the presence of outer sound wave noise while gyroscope sensor shows degradation of performance in the presence of outer sound wave noise. Also, it takes short time to estimate the angular velocity of the robots.

Keywords : Coriolis force, Kalman filter, Amplitude modulation, Biomimetic robots

Student Number : 2016-20909