



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

곤충 평형곤의 센싱 메커니즘을  
모사한 각속도 추정방법

A Method for Estimating Angular Velocity  
Inspired by Sensing Mechanism of  
Insect Haltere

2019 년 2 월

서울대학교 대학원

전기·정보공학부

성진우

곤충 평형곤의 센싱 메커니즘을  
모사한 각속도 추정방법

A Method for Estimating Angular Velocity  
Inspired by Sensing Mechanism of  
Insect Haltere

지도교수 조 동 일

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함  
2019 년 2 월

서울대학교 대학원

전기·정보공학부

성 진 우

성진우의 공학석사 학위논문을 인준함  
2019 년 2 월

위 원 장 \_\_\_\_\_ 이 범 희 \_\_\_\_\_ (인)

부위원장 \_\_\_\_\_ 조 동 일 \_\_\_\_\_ (인)

위 원 \_\_\_\_\_ 심 형 보 \_\_\_\_\_ (인)

# 초 록

파리류 곤충에서 발견되는 평형곤은 코리올리 힘을 감지하여 생체의 각속도를 추정하는 기관이다. 평형곤 한 쌍은 서로 유기적으로 연계되어 있기에 두 개만으로 3축 각속도를 감지할 수 있다. 또한, 평형곤은 날개와 기계적으로 연결되어 있어 구동에 별도로 에너지를 소비하지 않는다. 본 논문은 이러한 특징을 갖는 곤충 평형곤의 각속도 센싱 메커니즘을 기반한 생체모사 각속도 추정기법을 제시한다. 평형곤이 코리올리 힘을 감지하기 위해서는 선속도가 필요한데 이를 구현하기 위해 비행로봇의 날개 구동에 사용하는 날갯짓 메커니즘에 기반한 센서 구동 메커니즘을 제작하였다. 제작한 메커니즘의 평형곤 구조물의 끝에 가속도계를 장착하여 측면에 발생하는 로봇의 회전에 의한 코리올리 힘을 측정한다. 측정한 코리올리 힘은 로봇의 각속도에 평형곤 구조물의 선속도가 반송파로서 진폭변조 되어있다. 변조된 신호에서 각속도 검출할 수 있는 동기 검파에 기반한 신호처리 방법에 대해 제시한다. 제안한 방법의 유효성을 평가하기 위하여 P3DX 로봇을 rate table 용도로 사용하여 제자리 회전 실험을 진행하였다. 해당 로봇에 상용 자이로스코프를 함께 장착하여 성능비교를 진행하였다.

**주요어** : 생체모사, 자이로스코프, 평형곤, 신호처리, 날갯짓 메커니즘

**학 번** : 2017-29441

# 목 차

제 1 장 서 론.....	1
제 1 절 연구의 배경.....	1
제 2 절 연구의 내용요약 및 논문의 구성.....	7
제 2 장 본 론.....	9
제 1 절 좌표계 .....	9
제 1 항 정의 .....	9
제 2 항 좌표계 변환 .....	11
제 2 절 곤충 평형곤의 각속도 센싱 메커니즘 .....	12
제 1 항 곤충 평형곤의 생물학적 특성.....	12
제 2 항 곤충 평형곤의 동역학 해석 .....	14
제 3 항 거동에 따른 평형곤 운동 해석.....	17
제 4 항 평형곤을 이용한 각속도 추정 알고리즘 .....	17
제 3 절 센서 구동 메커니즘 및 하드웨어 구현 .....	19
제 1 항 날갯짓 메커니즘 .....	19
제 2 항 센서 구동 메커니즘 설계 및 제작.....	22
제 3 항 메커니즘 제어 환경 구축 .....	26
제 4 절 각속도 추정을 위한 신호처리 .....	28
제 1 항 신호처리 개요.....	28
제 2 항 진폭 변조를 이용한 각속도 추정 .....	28
제 5 절 로봇 회전 실험을 통한 각속도 추정 방법의 유효성 평가 .....	32
제 1 항 실험 방법.....	32
제 2 항 실험 결과 및 분석.....	34
제 3 장 결 론.....	39
제 1 절 결과 요약 .....	39
제 2 절 향후 계획 .....	40
참고문헌.....	41
Abstract .....	46

## 표 목차

표 2-1 DM 8515 물성표 .....	25
표 2-2 라즈베리파이 3 Model B+ 사양 .....	26
표 2-3 ADXL345 사양 .....	26

## 그림 목차

그림 1-1 다양한 항법 기술 예시 .....	1
그림 1-2 상용 관성항법장치 (VECTORNAV 社 VN-200).....	2
그림 1-3 위성항법시스템 .....	2
그림 1-4 회전식 자이로스코프(Honeywell 社 JG7044N).....	3
그림 1-5 광섬유 자이로스코프 (AIRBUS 社 ASTRIX 200).....	4
그림 1-6 링레이저 자이로스코프 (Honeywell 社 GG1320AN).....	4
그림 1-7 MEMS 자이로스코프(ST 社 LSM9DS0) .....	5
그림 1-8 튜닝포크 구조 구동 예시.....	6
그림 2-1 관성 좌표계, 지구 고정 좌표계, 항법 좌표계의 정의 .....	10
그림 2-2 관성 좌표계, 동체 좌표계 모식도.....	11
그림 2-3 곤충 평형곤의 사진 및 작동 원리 .....	13
그림 2-4 평형곤의 SEM 사진 및 모식도 .....	13
그림 2-5 날개-평형곤의 기계적 연결 구조 .....	14
그림 2-6 2차 평면에서 벗어난 평형곤 모델 .....	15
그림 2-7 두 개의 방향을 갖는 코리올리 힘 분석 .....	18
그림 2-8 피치, 요에 의한 코리올리 힘 주파수 차이.....	18
그림 2-9 곤충의 몸통 좌표계와 두 평형곤의 좌표계 b, c .....	19
그림 2-10 기존에 연구된 다양한 날갯짓 메커니즘 .....	20
그림 2-11 링크 메커니즘 예시 (Robotic Hummingbird) .....	21
그림 2-12 스트링 메커니즘 예시 (Nano Hummingbird).....	21
그림 2-13 랙-피니언 날갯짓 메커니즘 .....	22
그림 2-14 크랭크-슬라이더와 스카치-요크의 가속도 비교 .....	23
그림 2-15 사양을 맞추기 위한 메커니즘 기어비 설정 .....	24
그림 2-16 설계한 센서 구동 메커니즘 .....	24
그림 2-17 제작한 센서 구동 메커니즘 .....	25
그림 2-18 제작한 평형곤 구조물 PCB.....	27
그림 2-19 설계한 PCB 회로도 .....	27
그림 2-20 제작 완료한 PCB.....	27
그림 2-21 평형곤 거동에 따른 선속도 분석 개념도 .....	29
그림 2-22 평형곤 거동에 따른 선속도 분석.....	29
그림 2-23 DSB-SC 변조의 스펙트럼 .....	30
그림 2-24 동기검파를 이용한 DSB-SC 변조신호 복조 .....	31
그림 2-25 선속도 계산방법.....	31
그림 2-26 평형곤 각속도 신호처리 블록선도 .....	32
그림 2-27 파이오니어 로봇(P3DX)을 활용한 실험환경 구성 .....	33
그림 2-28 측면방향 (X축) 가속도 raw data .....	34
그림 2-29 구동방향 (Y축) 가속도 raw data .....	35
그림 2-30 Y축 가속도 raw data의 FFT 결과 .....	35
그림 2-31 필터 처리한 Y축 가속도 신호 .....	36
그림 2-32 X축 가속도 raw data의 FFT 결과 .....	36
그림 2-33 Pitch 방향에 해당하는 주파수 성분 (4.35 Hz).....	37

그림 2-34 Yaw 방향에 해당하는 주파수 성분 (8.7 Hz).....	37
그림 2-35 X축 데이터 신호처리 결과(위)와 상용 자이로스코프 출력(아래) 비교 .....	38

# 제 1 장 서 론

## 제 1 절 연구의 배경

로봇이 목적지까지 정확하게 이동하기 위해서는 자신의 현재위치, 속도, 자세를 파악하여 목적지까지 거리와 방향을 알아야 한다. 이러한 정보를 실시간으로 알아내는 것을 항법(navigation)이라 한다. 항법에는 관성센서를 이용하는 관성항법장치, 위성항법시스템을 이용하는 위성항법, 관성항법을 기반으로 다양한 센서 정보를 융합하는 복합항법이 있다.



그림 1-1 다양한 항법 기술 예시 [1]

관성항법시스템(Inertial Navigation System, INS)은 이동체에 있는 관성센서(가속도계, 자이로스코프, 지자기계)를 이용하여 측정한 가속도, 각속도를 적분하여 위치, 속도, 자세를 파악한다. 해당 방식은 약천후, 전과교란에 강인하지만, 오차누적 문제가 발생한다는 단점이 있다.

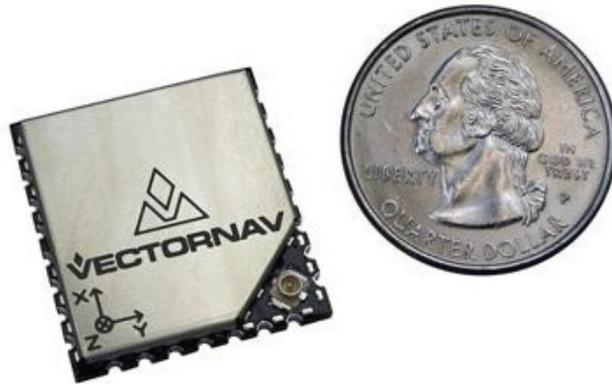


그림 1-2 상용 관성항법장치 (VECTORNAV 社 VN-200) [2]

위성항법시스템(Global Navigation Satellite System, GNSS)은 인공위성으로부터 전파를 수신하여 삼각측량(triangulation) 원리에 따라 이동체의 위치와 시간을 제공한다. 관성항법장치에 비해 상대적으로 낮은 비용으로 측위가 가능하지만, 외부 전파교란에 취약하다는 단점을 가지고 있다 [3].



그림 1-3 위성항법시스템 [4]

이외에도 별 정보를 이용하는 천측항법(astronavigation) [5], 지형을 이용하는 지형대조항법(Terrain Contour Matching, TERCOM) [6], 전파를 이용하는 전파항법(radionavigation) [7] 등이 있으며, 복합방법은 이러한 센서 정보를 동시에 융합하여 최적항로를 산출하는 방법이다. 이 중에서 관성항법은 외부 정보없이 독자적인 항법이 가능하기에 로봇에 많이 사용되고 있다 [8].

자이로스코프(gyroscope)는 이러한 관성항법의 필수기술 중 하나이며, 이동체의 자세추정을 가능하게 한다. 자이로스코프는 다양한 형태로 개발되어 기계식, 광학식으로 구분할 수 있으며, 기계식에는 회전식, 진동식으로 나눌 수 있다. 회전식 자이로스코프는 고속으로 회전하는 회전체의 각운동량 보존법칙에 기반한 방식으로, 회전축으로 외력이 가해질 경우 회전 반발력이 생겨 세차운동(precession)을 하기에 이를 이용하여 회전을 감지할 수 있다 [9]. 하지만, 회전식 자이로스코프는 부피가 크고, 정확도와 분해능이 낮으며, 동작 수명이 짧다는 단점이 있다.

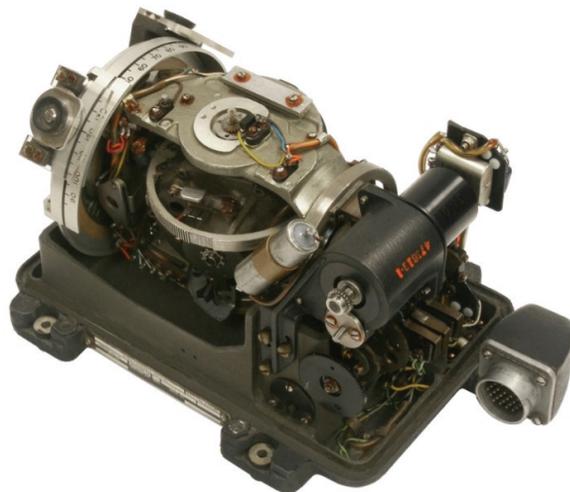


그림 1-4 회전식 자이로스코프(Honeywell 社 JG7044N) [10]

광학식 자이로스코프는 회전 시 빛의 성질을 이용한 사낙효과 (Sagnac effect)에 기반한 방식으로, 링 형태의 광섬유의 양단에 빛을 서로 반대방향으로 방사하여 회전에 따라 발생하는 위상차를 검출하여 회전을 감지할 수 있다 [11]. 광학식 자이로스코프는 위상차를 검출하는 방식에 따라 광섬유 자이로스코프, 링레이저 자이로스코프로 나눌 수 있다. 해당 방식은 정밀하지만 상당히 고가이고 비교적 크기에 비행기, 미사일과 같은 군용기구나 대형 이동체에 주로 사용된다.

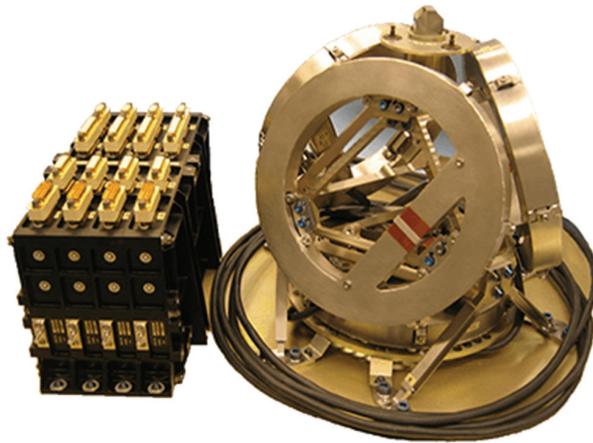


그림 1-5 광섬유 자이로스코프 (AIRBUS 社 ASTRIX 200) [12]



그림 1-6 링레이저 자이로스코프 (Honeywell 社 GG1320AN) [13]

진동식 자이로스코프는 코리올리 효과(Coriolis effect)를 기반으로 회전을 감지하는 방식으로, 일정한 주파수로 공진하는 질량체(proof mass)에 회전이 가해지면 센서 프레임 기준으로 질량체에 변위가 생기고, 이 변위를 정전용량형 감지 방식을 통해 측정하여 회전 속도를 추정할 수 있다 [9]. 진동식 자이로스코프는 미세전자기계시스템 (microelectromechanical systems, MEMS) 기술 기반으로 제작되기에 MEMS 자이로스코프라고 불리며, MEMS 기술의 발전에 따라 고성능화와 함께 소형화가 가능해져 대량생산에 적합하다. 이러한 장점으로 실내 로봇 제어, 자동차 항법 시스템, 휴대기기, 마우스, 모션 게임 등 산업 전반에 걸쳐 널리 사용되고 있다 [14].

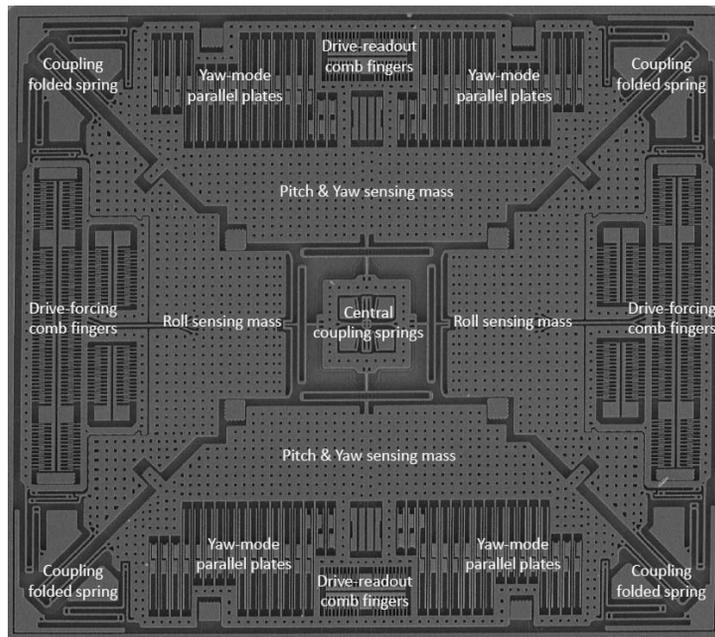


그림 1-7 MEMS 자이로스코프(ST社 LSM9DS0) [15]

상용화된 MEMS 자이로스코프는 튜닝 포크(tuning fork) 구조를 이용한다. 해당 구조는 그림 1-8과 같이 두 개의 질량체가 반대방향으로 공진하여 코리올리힘이 서로 반대방향으로 유도되어 가속도와 같은 공통모드(common mode)에 대한 응답을 상쇄시킨다.

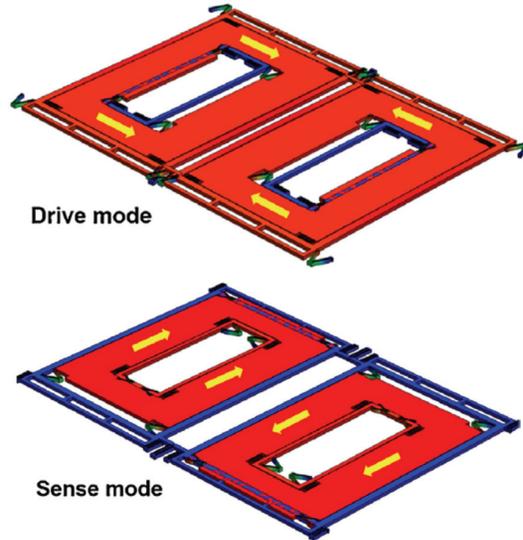


그림 1-8 튜닝포크 구조 구동 예시 [16]

하지만, 이러한 진동식 자이로스코프는 센서 내부의 질량체를 계속 공진시켜야 하기에 로봇이 정지하고 있을 때에도 전력이 불필요하게 소모된다는 단점이 있다. 또한, 최근에는 MEMS 자이로스코프의 공진주파수에 해당하는 음파를 이용하여 각속도 추정 정확도를 떨어뜨리는 연구가 이루어지고 있다 [17-19]. 이러한 연구결과를 기반으로 음파공격을 통한 드론과 같은 MEMS 자이로스코프를 기반으로 위치를 추정하는 비행체를 무력화시키는 연구도 진행된 바 있다 [20]. MEMS 자이로스코프는 코리올리 힘을 유도하기 위하여 센서 내부의 질량체를 기계적 공진주파수만큼 계속 진동시킨다. 또한, 감도를 높이기 위해 구동모드와 검출모드는 100,000, 10,000 이상의 높은 품질계수(quality factor)를 갖도록 설계하여 고정된 공진주파수로 진동하는데[21], 이는 센서의 공진주파수와 같은 주파수의 외부 진동이 인가될 경우 질량체의 공진이 심해져 센서의 각속도 추정 오차가 커지게 되는 것이다. 위 사항을 정리하면, 이러한 단점은 센서 질량체의 공진을 이용한 방식으로 인해 발생한다고 볼 수 있다. 이러한 문제를 해결하기

위해서는 공진을 이용하지 않는 새로운 방식의 진동형 자이로스코프 개발이 필요하다.

## 제 2 절 연구의 내용요약 및 논문의 구성

본 논문은 곤충 평형곤(halteres)의 각속도 센싱 메커니즘을 모사하여 로봇의 각속도를 추정할 수 있는 생체모사 각속도 추정 기법을 제안한다. 제안한 방법은 곤충의 평형곤 구동 방식을 모방한 메커니즘의 평형곤 구조물에 회전에 의한 코리올리 힘(Coriolis force)을 감지하기 위한 가속도계(accelerometer)를 부착한 형태이다.

곤충 평형곤의 각속도 센싱 메커니즘을 분석하기 위해 곤충 평형곤의 생물학적 특성과 조사와 함께 평형곤의 운동을 동역학적으로 해석하였다. 해석한 내용을 기반으로 각속도 추정 방법을 도출하였다. 평형곤은 날개와 기계적으로 연결되어 있다는 생물학적 특성을 착안하여, 제안한 센서의 구동 메커니즘은 비행로봇의 날갯짓 메커니즘(flapping mechanism)을 기반으로 개발하여 비행로봇의 동력을 전달받아 코리올리 힘을 측정하기 위한 선속도를 얻을 수 있도록 하였다. 가속도계를 통해 측정한 신호를 동기검파 방식으로 코리올리 힘을 추출하고, 이를 평형곤의 선속도로 나누면 평형곤의 각속도를 추정할 수 있다. 그리고 서로 평행하지 않은 두 평형곤의 두 개 각속도 성분을 합성하여 로봇의 3축 각속도를 추정하는 방법을 제안한다.

마지막으로 본 논문에서 제안하는 곤충 평형곤의 구동 메커니즘 기반 생체모사 각속도 추정 기법의 유효성을 평가하기 위해 상용센서와 함께 P3DX (Adept MobileRobots, USA) 로봇 [22] 위에 장착하여 로봇 회전 실험을 진행하였다.

본 논문의 서론에 이어 본문의 구성은 다음과 같다.

2장 1절에서는 항법 시스템을 수학적으로 표현하기 위한 여러 좌표계를 정의하고, 특정 좌표계 에서의 여러 시스템 변수들의 구성에 대해 설명한다.

2장 2절에서는 곤충 평형곤의 각속도 센싱 메커니즘을 이해하기 위한 평형곤의 생물학적 특성을 정리하고, 동역학적 해석을 기반한 몸통 각속도 추정 방법에 대해 설명한다.

2장 3절에서는 비행로봇의 구동부로 사용되는 날갯짓 메커니즘과 이를 기반으로 구현한 곤충 평형곤 유사 메커니즘 설계 및 제작방법과 메커니즘 구동 및 신호수신용 PCB(printed circuit board) 설계 및 제작에 대하여 설명한다.

2장 4절에서는 각속도 센싱 메커니즘을 구현하기 위한 진폭 변조(amplitude modulation, AM)된 신호를 복조하기 위한 신호처리 방법과 필터를 이용한 잡음(noise) 제거기법에 대해 설명한다.

2장 5절에서는 제안한 각속도 추정 기법의 유효성을 평가하기 위한 로봇 회전 실험 과정과 결과를 다룬다.

3장은 결론 부분으로 본 논문의 내용 및 결과를 요약하고 제안하는 방법에 대한 전체적인 총평과 결론, 그리고 향후 계획을 소개한다.

## 제 2 장 본 론

### 제 1 절 좌표계

가속도, 속도, 위치 등 시스템 변수들이 물리적 의미를 지니기 위해서는 기준 좌표 시스템과 연관되어야 한다. 본 절에서는 항법 시스템을 수학적으로 표현하기 위한 여러 좌표계를 정의하고, 특정 좌표계 에서의 여러 시스템 변수들의 구성에 대해 설명한다.

#### 제 1 항 정의

시스템 변수들을 수학적으로 표현하기 위한 좌표계들을 정의한다. 모든 항법식들은 정의된 좌표계들을 기준으로 유도, 전개되기에 좌표계에 대한 정확한 이해가 필요하다. 주로 사용되는 좌표계로 관성 좌표계, 지구고정 좌표계, 항법 좌표계, 동체 좌표계 등이 있다.

관성 좌표계(inertial frame)는 뉴턴의 운동법칙 (Newton's laws of motion)이 적용되는 항법에서 기준이 되는 좌표계로 지구의 움직임과 관계없이 공간상에 고정되어 있는 가상 좌표계이다. 지구의 중심을 원점 X축과 Y축은 적도 평면상에 있으며 Z축은 지구의 자전축과 일치한다.

지구고정 좌표계(Earth-Centered Earth Fixed frame, ECEF frame)는 지구의 자전에 따라 함께 회전하는 좌표계로 지구상의 항체의 위치를 나타내는데 필수적인 좌표계이다. 좌표축은 관성 좌표계와 같이 구성되어 있으나 Z축을 중심으로 지구 자전 각속도 크기로 회전한다. X축은 그리니치 자오선(Greenwich meridian)과 적도면이 만나는 방향을 나타내며, Y축은 X축에서 동쪽 경도방향으로 90도 회전한 방향으로 정의한다.

항법 좌표계(navigation frame)는 질량 중심을 원점으로 하고

N축이 북쪽, E축이 동쪽, D축이 수직 아래쪽으로 정의되는 local-level 좌표계이다. D축은 지구 타원체에 수직이며, N축은 지구회전벡터의 local-level 면에서의 북쪽으로 정사영이다. 그리고 E축은 두 축이 이루는 면과 오른쪽으로 수직축을 형성한다.

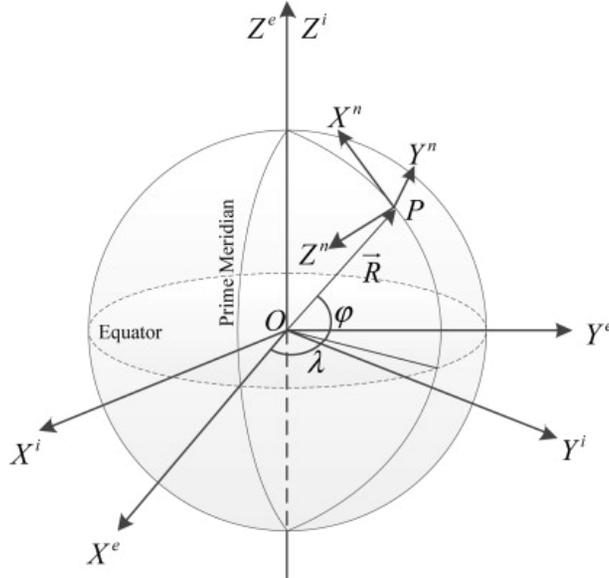


그림 2-1 관성 좌표계, 지구 고정 좌표계, 항법 좌표계의 정의 [23]

동체 좌표계(body frame)는 항체의 질량중심을 원점으로 하고, X축은 항체의 선수방향, Y축은 X축에 대하여 항체의 우측방향, Z축은 항체의 수직 아래방향으로 정의되는 좌표계이다. 이에 따라 동체 좌표계와 항법 좌표계는 같은 원점에 대한 회전에 의해 일치시킬 수 있으며, 이러한 회전은 항체의 자세에 해당한다. 관성측정장치(inertial measurement unit, IMU)가 항체에 직접 부착된 경우 센서의 출력은 동체 좌표계로 표현되는데, 동체 좌표계는 좌표계의 방향이 항체의 운동에 따라 변하므로 항법의 기준 좌표계로 이용할 수 없다. 이러한 경우에는 동체 좌표계를 다른 좌표계로 변환시키는 과정이 필요하다.

## 제 2 항 좌표계 변환

관성 좌표계에 대하여 동체 좌표계의 점 P가 운동(motion)하면, 그림 2-2처럼 나타낼 수 있다. 여기서 관성 좌표계는 OXYZ 좌표계, 동체 좌표계는 oxyz로 표현하였다.

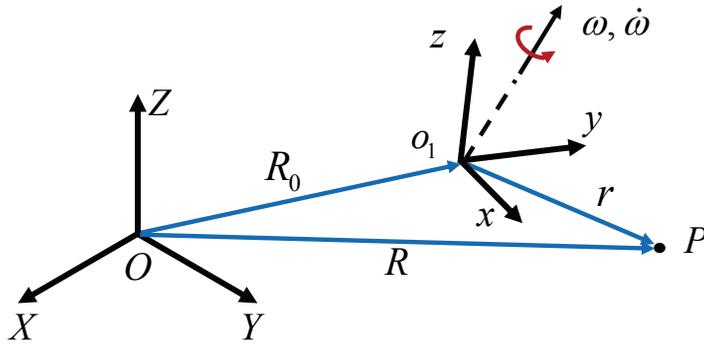


그림 2-2 관성 좌표계, 동체 좌표계 모식도

$$r = xu_x + yu_y + zu_z \quad (2.1.1)$$

$$v_{rel} = \left( \frac{\partial r}{\partial t} \right)_{rel} = \dot{x}u_x + \dot{y}u_y + \dot{z}u_z \quad (2.1.2)$$

$$a_{rel} = \left( \frac{\partial^2 r}{\partial t^2} \right)_{rel} = \ddot{x}u_x + \ddot{y}u_y + \ddot{z}u_z \quad (2.1.3)$$

$r$ 은 동체 좌표계에 대하여 점 P의 위치벡터를 의미한다. 관성좌표계에 대하여 점 P의 운동을 표현하면 다음과 같다.

$$R = R_0 + r \quad (2.1.4)$$

$$\begin{aligned} v(t) &= \frac{dR}{dt} = \frac{dR_0}{dt} + \frac{dr}{dt} = \dot{R}_0 + \left[ \frac{\partial}{\partial t} \right]_{rel} + \omega \times r \\ &= \dot{R}_0 + \left( \frac{\partial r}{\partial t} \right)_{rel} + \omega \times r = \dot{R}_0 + v_{rel} + \omega \times r \end{aligned} \quad (2.1.5)$$

$$\begin{aligned}
a(t) &= \frac{dv}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{dR_0}{dt} \right) + \frac{d}{dt} (v_{rel}) + \frac{d}{dt} (\omega \times r) \\
&= \frac{d^2 R_0}{dt^2} + \left[ \frac{\partial}{\partial t} \right]_{rel} + \omega \times v_{rel} + \frac{d}{dt} (\omega) \times r + \omega \times \frac{d}{dt} (r) \\
&= \ddot{R}_0 + \frac{\partial v_{rel}}{\partial t} + \omega \times v_{rel} + \dot{\omega} \times r + \omega \times \left[ \frac{\partial}{\partial t} \right]_{rel} + \omega \times r \quad (2.1.6) \\
&= \ddot{R}_0 + a_{rel} + \omega \times v_{rel} + \dot{\omega} \times r + \omega \times \left[ \frac{\partial}{\partial t} \right]_{rel} + \omega \times (\omega \times r) \\
&= \ddot{R}_0 + a_{rel} + 2(\omega \times v_{rel}) + \dot{\omega} \times r + \omega \times (\omega \times r)
\end{aligned}$$

식 (2.1.6)을 분석하면 관성좌표계에 대하여 점 P의 가속도는 5 가지 항의 가속도를 받는 것을 알 수 있다.  $\ddot{R}_0$ 는 동체 좌표계의 가속도,  $a_{rel}$ 은 가속도,  $2(\omega \times v_{rel})$ 은 코리올리 가속도(Coriolis acceleration),  $\dot{\omega} \times r$ 는 각가속도,  $\omega \times (\omega \times r)$ 은 구심력에 의해 발생하는 가속도이다.

## 제 2 절 곤충 평형곤의 각속도 센싱 메커니즘

곤충 평형곤은 날개와 일체형으로 구동하여 코리올리 힘을 감지하고, 이를 기반으로 몸통의 위치를 추정한다. 이러한 평형곤의 각속도 추정 메커니즘을 로봇에 적용하기 위해서는 평형곤의 특성, 거동 해석에 대한 이해가 필요하다. 본 절에서는 평형곤의 생물학적 특성을 정리하고, 동역학적 해석을 기반한 몸통 각속도 추정 방법에 대해 설명한다. 본 절의 내용은 국방생체모방자율로봇 특화연구센터 생체모방 감지센서 연구진에 의해 도출된 결과이다 [24-25].

### 제 1 항 곤충 평형곤의 생물학적 특성

평형곤은 파리류 곤충에서 발견되는 기관으로 그림 2-3과 같이 곤충 날개 뒤쪽에 위치하며, 곤봉 형태로 이루어져 있다. 해당 기관은 진동형 자이로스코프처럼 작동하며 [26], 평형곤과 연결된 부위에

수많은 기계적 수용기(mechanoreceptors)가 스트레인 센서(strain sensor) 역할을 하여 코리올리 힘을 감지한다.

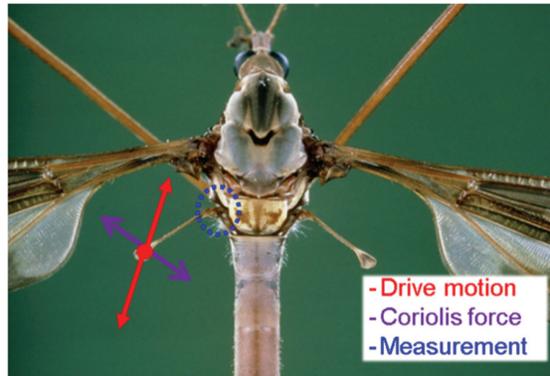


그림 2-3 곤충 평형곤의 사진 및 작동 원리 [27]

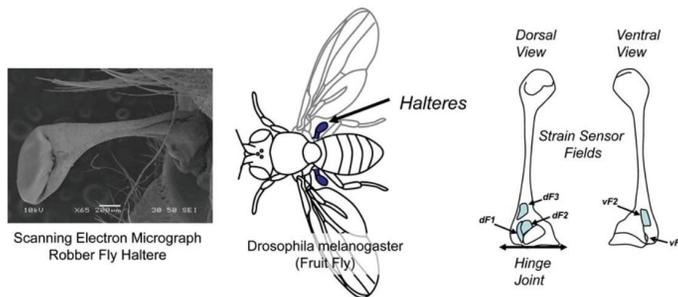


그림 2-4 평형곤의 SEM 사진 및 모식도 [28]

해당 기관은 파리류 곤충의 뒷날개가 퇴화되어 만들어진 것으로, 파리의 가슴 가운데 부분에 약 30° 기울어져 부착되어 있다. 평형곤은 날개와 수직한 평면으로 180° 위상차를 가지고 진동하며, 응답속도는 약 1~2 ms이다. 그리고 평형곤의 무게는 전체 몸통 무게의 약 0.01% 정도여서 해당 기관의 진동이 비행에 영향을 주지 않는다.

파리의 생체실험 연구사례 [29]를 통하여 평형곤은 그림 2-5와 같이 날개와 기계적으로 연결되어 있다는 것을 알 수 있다. 날개와 평형곤은 sub-epimeral ridge 기관을 통해 연결되어 180° 위상차를 가지고 진동하며, 왼쪽과 오른쪽 두 개의 평형곤은 소순판(scutellum)

기관으로 연결되어 같은 위상으로 진동할 수 있다 [29]. 이러한 기계적 구조로 평형곤은 별도의 근육을 사용하지 않고 날갯짓에 사용되는 근육에서 동력을 얻어 진동한다. 이러한 진동은 회전에 따른 코리올리 힘 발생을 위한 선속도로서 작용한다. 그리고 실제 파리의 방향 변경은 날개의 진동수가 아니라 날개의 진폭 변화로 이루어지기에 두 평형곤이 같은 진동수로 움직이는 것이 파리의 주행을 제한하지 않는다.

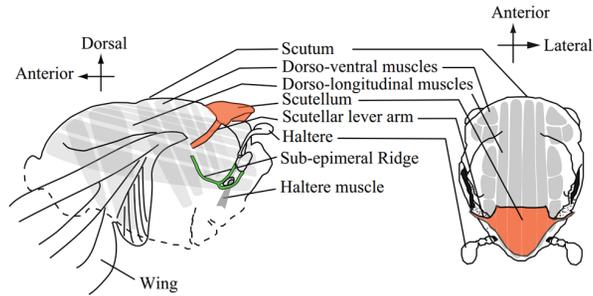


그림 2-5 날개-평형곤의 기계적 연결 구조 [29]

## 제 2 항 곤충 평형곤의 동역학 해석

곤충이 병진운동 없이 회전운동 할 때, 평형곤에 작용하는 힘은 식 (2.2.1)과 같다.

$$F = mg - 2m\omega \times v - m\omega \times (\omega \times r) - m\dot{\omega} \times r - ma \quad (2.2.1)$$

여기서  $mg$  는 평형곤에 작용하는 중력,  $2m\omega \times v$  는 코리올리 힘,  $m\omega \times (\omega \times r)$  는 평형곤에 작용하는 원심력,  $m\dot{\omega} \times r$  는 각관성력,  $ma$  는 관성력이다. 평형곤이 진동하는 평면에서는 관성력이 매우 크게 작용하기에 코리올리 힘에 관한 정보를 얻기 힘들다. 반면, 평형곤의 측면 방향으로 작용하는 힘은 코리올리 힘을 제외한 힘은 매우 작아, 이를 이용하면 몸통의 요(yaw), 피치(pitch), 롤(roll) 축의 각속도를 알아 낼 수 있다.

그림 2-6과 같이 R. A. Thompson의 2차 평면에서 벗어난 평형곤

모델 [28]을 고려한다. 여기에서  $\hat{b}$ 는 평형곤 밑단에 붙어있는 몸통 고정 좌표계(body fixed reference frame)이고,  $(r, \gamma, \theta)$ 는 구면좌표계에서의 평형곤 끝 부분의  $\hat{b}$ 에 대한 상대적 위치를 나타낸다. 이 중에서  $r$ 은 평형곤의 길이,  $\gamma$ 는 평형곤이 진동하는 평면(primary plane of haltere motion) 위에서의 변위각이고,  $\theta$ 는 진동하는 평면으로부터 이탈된 각이다. 이 중에서  $\gamma, \theta$ 는 시간에 대한 함수이다.

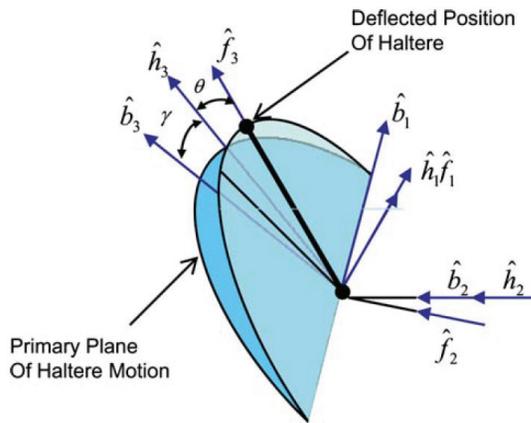


그림 2-6 2차 평면에서 벗어난 평형곤 모델 [28]

$\theta = 0$ 이면, 평형곤이 2차 평면에 구속된 운동을 가정하는 경우이다. 즉, 평형곤은 피치 축과 일정한 각도(파리류 곤충의 경우,  $30^\circ$ 로 틀어져 있음)를 유지하며 상하로 진동하는 모델이다. 반면,  $\theta \neq 0$ 인 구속제한이 없는 일반적인 평형곤 운동에 대한 미분 방정식을 유도하면 다음과 같다. 평형곤이 달려있는 물체인 몸통(body)이 각속도  ${}^{e \rightarrow b} \vec{\omega}$ 로 움직이고 있다고 가정하면,  $\hat{e}$  좌표계에서 해당 각속도는  $\hat{b}$  좌표계의 기저로 식(2.2.2)와 같이 표현가능하다 [28].

$${}^{e \rightarrow b} \vec{\omega} = \Omega_1 \hat{b}_1 + \Omega_2 \hat{b}_2 + \Omega_3 \hat{b}_3 \quad (2.2.2)$$

여기서  $\hat{e}$ 는 뉴턴 좌표계(Newtonian reference frame) 혹은 지구

좌표계 (earth inertial frame)이다. 그리고 각 좌표계에서 각 좌표축들의 각속도는 식(2.2.3), 식(2.2.4)와 같다 [28]. 여기에서  ${}^{a \rightarrow b} \omega$  는  $\hat{a}$  좌표계에서  $\hat{b}$  좌표축의 각속도를 의미한다.

$${}^{b \rightarrow h} \omega = \dot{\gamma} \hat{b}_2 \quad (2.2.3)$$

$${}^{h \rightarrow f} \omega = \dot{\theta} \hat{h}_1 \quad (2.2.4)$$

그림 2-6 에서 점 2 의 위치와 각 좌표계에서의 점 2 의 속도는 식 (2.2.5)–식(2.2.11)으로 유도된다 [28]. 이 때, 몸통과 평형곤의 상대속도와 가속도에 비하여 몸통의 속도와 가속도가 충분히 작다는 가정하에 유도하였다. 여기에서  ${}^{a \rightarrow b} a \equiv {}^{a \rightarrow b} \omega$  는  $\hat{a}$  좌표계에서  $\hat{b}$  좌표축의 각가속도를 의미한다.

$$\vec{P}_{12} = r \hat{f}_3 \quad (2.2.5)$$

$${}^h \vec{v}_2 = {}^h \vec{v}^f \times \vec{P}_{12} \quad (2.2.6)$$

$${}^b \vec{v}_2 = {}^h \vec{v}_2 + {}^{b \rightarrow f} \omega \times \vec{P}_{12} \quad (2.2.7)$$

$${}^e \vec{v}_2 = {}^b \vec{v}_2 + {}^{e \rightarrow b} \omega \times \vec{P}_{12} \quad (2.2.8)$$

$${}^h \vec{a}_2 = {}^h \vec{a} \times \vec{P}_{12} + {}^h \vec{\omega} \times {}^h \vec{\omega} \times \vec{P}_{12} \quad (2.2.9)$$

$${}^b \vec{a}_2 = {}^h \vec{a}_2 + 2({}^{b \rightarrow f} \omega \times {}^h \vec{v}_2) + {}^b \vec{a} \times \vec{P}_{12} + {}^{b \rightarrow h} \omega \times {}^{b \rightarrow h} \omega \times \vec{P}_{12} \quad (2.2.10)$$

$${}^e \vec{a}_2 = {}^b \vec{a}_2 + 2({}^{e \rightarrow b} \omega \times {}^b \vec{v}_2) + {}^e \vec{a} \times \vec{P}_{12} + {}^{e \rightarrow b} \omega \times {}^{e \rightarrow b} \omega \times \vec{P}_{12} \quad (2.2.11)$$

이를 바탕으로, 지구 좌표계에서  $\hat{f}_2$  방향으로 점 2 의 가속도는  $\hat{f}_2$  방향과의 내적을 통하여 다음과 같이 구할 수 있으며, 평형곤 측면 방향으로의 가속도  $\hat{f}_2 \cdot {}^{e \rightarrow 2} a$  와 각  $\gamma, \theta$  를 측정할 수 있다면, 식 (2.2.12)을 통하여 각속도  $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3$  를 추정할 수 있다 [28].

$$\begin{aligned}
\hat{f}_2 \cdot \overset{e \rightarrow 2}{a} = & r[\dot{\Omega}_3 \sin(\gamma) - \dot{\Omega}_1 \cos(\gamma) - \gamma^2 \cos(\theta) \sin(\theta)] \\
& + 2\dot{\gamma}\{(\Omega_3 \cos(\gamma) + \Omega_1 \sin(\gamma)) \cos^2(\theta) - \Omega_2 \cos(\theta) \sin(\theta)\} \\
& + (\Omega_3^2 \cos^2(\gamma) + \Omega_1^2 \sin^2(\gamma) - \Omega_2^2) \cos(\theta) \sin(\theta) \quad (2.2.12) \\
& + (\Omega_2 \Omega_3 \cos(\gamma) + \Omega_1 \Omega_2 \sin(\gamma)) \cos(2\theta) \\
& + 2\Omega_1 \Omega_3 \cos(\theta) \sin(\theta) \cos(\gamma) \sin(\gamma) - \ddot{\theta}]
\end{aligned}$$

### 제 3 항 거동에 따른 평형곤 운동 해석

회전운동에 따른 평형곤의 측면방향으로 작용하는 코리올리 힘에 대해 분석한다. 평형곤의 운동을 이상적인  $\pm 90^\circ$  만원 진동으로 가정하면, 그 위상은  $\gamma = \frac{\pi}{2} \sin(2\pi ft)$  로 모델링할 수 있다 [28]. 평형곤이 측면방향으로 받는 힘에 의하여  $\theta$  만큼 각변위가 발생하는데, 이 변위에 따른 감쇠력(damping force)과 강성력(stiffness force)을 식(2.2.13), 식(2.2.14)와 같이 모델링 하면 [24], 모델링한 식과 더불어 최종적인 평형곤 2 차 모델은 식(2.2.15)로 표현할 수 있다 [24].

$$\hat{f}_2 \cdot \vec{F}_{damping} = 2\zeta\omega_n \dot{\theta}r \quad (2.2.13)$$

$$\hat{f}_2 \cdot \vec{F}_{stiffness} = \omega_n^2 \theta r \quad (2.2.14)$$

$$\begin{aligned}
\ddot{\theta} + 2\zeta\omega_n \dot{\theta} + \omega_n^2 \theta = & -\gamma^2 \cos(\theta) \sin(\theta) \\
& + 2\dot{\gamma}\{(\Omega_3 \cos(\gamma) + \Omega_1 \sin(\gamma)) \cos^2(\theta) - \Omega_2 \cos(\theta) \sin(\theta)\} \\
& + (\Omega_3^2 \cos^2(\gamma) + \Omega_1^2 \sin^2(\gamma) - \Omega_2^2) \cos(\theta) \sin(\theta) \quad (2.2.15) \\
& + (\Omega_2 \Omega_3 \cos(\gamma) + \Omega_1 \Omega_2 \sin(\gamma)) \cos(2\theta) \\
& + 2\Omega_1 \Omega_3 \cos(\theta) \sin(\theta) \cos(\gamma) \sin(\gamma)
\end{aligned}$$

### 제 4 항 평형곤을 통한 각속도 추정 방법

평형곤 모델은 진동이나 회전을 포함하는 평면에 존재하는 두 개 축 방향의 선속도를 가질 수 있기에 하나의 구조에서 두 가지 각속도

성분을 추정할 수 있다. 코리올리 힘은 각속도와 선속도의 외적으로 발생하기에 평형곤 진동의 측면 방향으로 발생하는 코리올리 힘은 피치와 요, 두 각속도에 의해 발생한다. 그림 2-7 은 피치, 요에 의해 발생하는 코리올리 힘을 나타낸다. 측면 방향에서 작용하는 힘을 측정할 때, 요 각속도에 의해 발생하는 코리올리 힘의 주파수는 피치 각속도에 의해 발생하는 코리올리 힘 주파수의 2 배이다. 이러한 주파수 차이를 이용하여 측면에 발생하는 힘으로부터 해당 두 성분의 힘을 분리하여 요와 피치 각속도 성분을 추정할 수 있다.

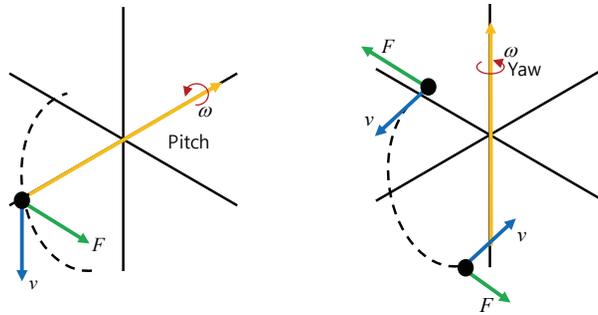


그림 2-7 두 개의 방향을 갖는 코리올리 힘 분석 [24]

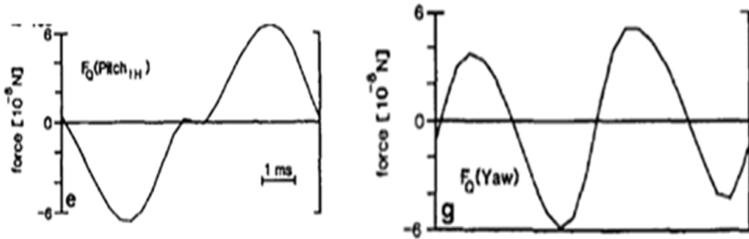


그림 2-8 피치, 요에 의한 코리올리 힘 주파수 차이 [30]

따라서, 그림 2-9 와 같이 나란하지 않은 두 개의 평형곤을 이용하면 4 개의 각속도 성분( $\Omega_{1b}, \Omega_{3b}, \Omega_{1c}, \Omega_{3c}$ )을 추정할 수 있으며, 몸통 좌표계의 3 축 각속도 성분은 식(2.2.16)과 같으며, 각 평형곤의 2 개 각속도 성분을 측정하여 몸통의 3 축 각속도  $W_1, W_2, W_3$ 를 식(2.2.17)을 통해 추정할 수 있다 [24].

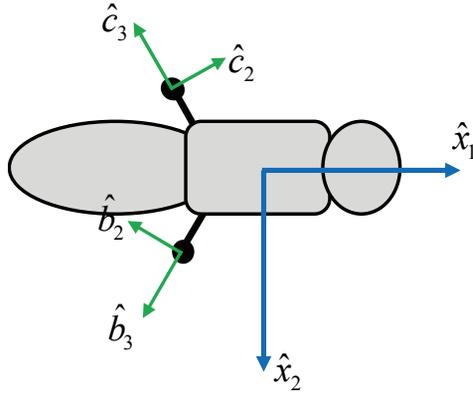


그림 2-9 곤충의 몸통 좌표계와 두 평형곤의 좌표계 b, c [24]

$$\begin{aligned}
 {}^e\vec{\omega} &= W_1\hat{x}_1 + W_2\hat{x}_2 + W_3\hat{x}_3 \\
 &= \Omega_{1b}\hat{b}_1 + \Omega_{2b}\hat{b}_2 + \Omega_{3b}\hat{b}_3 \\
 &= \Omega_{1c}\hat{c}_1 + \Omega_{2c}\hat{c}_2 + \Omega_{3c}\hat{c}_3
 \end{aligned} \tag{2.2.16}$$

$$\begin{aligned}
 W_1 &= -\frac{\Omega_{b3} + \Omega_{c3}}{2\sin(\pi/6)} \\
 W_2 &= -\frac{\Omega_{b3} - \Omega_{c3}}{2\cos(\pi/6)} \\
 W_3 &= -\frac{\Omega_{b1} + \Omega_{c1}}{2} = -\Omega_{b1} = -\Omega_{c1}
 \end{aligned} \tag{2.2.17}$$

### 제 3 절 센서 구동 메커니즘 및 하드웨어 구현

곤충 평형곤의 특성을 모사한 메커니즘을 구현하기 위해서는 로봇의 구동부와 연결되어 움직일 수 있는 구조로 설계하여야 한다. 본 절에서는 비행로봇의 구동부로 사용되는 날갯짓 메커니즘과 이를 기반으로 구현한 곤충 평형곤 유사 메커니즘 설계 및 제작방법과 메커니즘 구동 및 신호수신용 PCB 설계에 대하여 설명한다.

#### 제 1 항 날갯짓 메커니즘

곤충 평형곤이 날개와 기계적으로 연결되어 있다는 것에 착안하여,

날갯짓 구동 장치를 기반으로 센서 구동 메커니즘을 구현하고자 한다. 이러한 센서 메커니즘 구조는 날갯짓 메커니즘의 동력원을 같이 사용 가능하기에 에너지 소모가 적다는 장점이 있다. 기존에 연구된 날갯짓 비행체를 조사하여 구동방식을 링크 메커니즘, 스트링 메커니즘, 기어 메커니즘 세 종류로 나누었다.

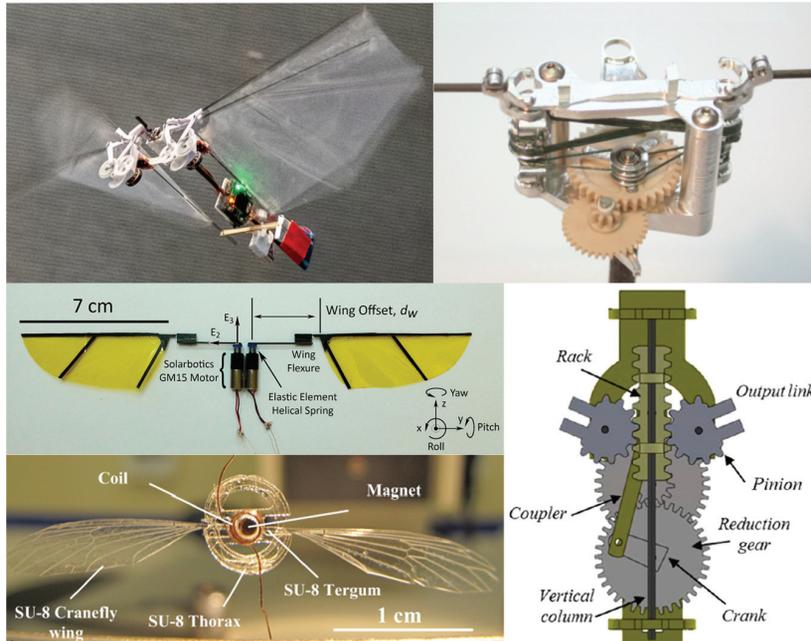


그림 2-10 기존에 연구된 다양한 날갯짓 메커니즘 [31-34]

링크 메커니즘(link mechanism)은 링크가 회전하는 축 중 한 쌍의 위치를 변화시켜 제어력을 발생시키는 원리를 이용한 방식으로, 브뤼셀 자유대학교의 Robotic Hummingbird [32], Festo 社 BionicOpter [36]가 이 방식을 사용한다. 해당 방식은 날갯짓 구동장치와 제어를 위한 메커니즘을 결합하여 부피와 무게를 줄일 수 있다. 하지만, 왕복운동하는 rigid 부품의 관성력, 회전축의 비대칭 하중에 의한 비틀림 등의 요인에 의해 날갯짓 속도를 높이기 어렵다. 또한, 여러 파트를 연결하기 위해서는 많은 링크가 필요하기에 무겁고 마찰력이 크다는 문제점이 있다.

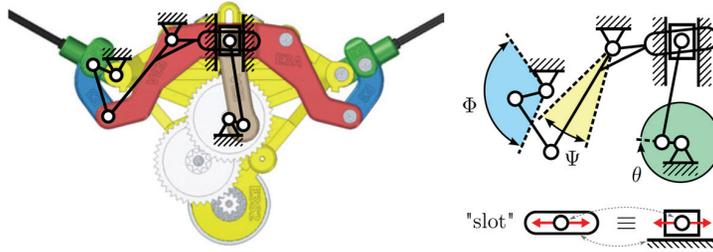


그림 2-11 링크 메커니즘 예시 (Robotic Hummingbird) [32]

스트링 메커니즘(string mechanism)은 팔의 회전에 따라 두 끈의 장력이 교대로 발생하는 점을 이용하여 날갯짓 속도와 비행방향을 제어하는 방식으로, AeroVironment 社 Nano Hummingbird [31]가 이 방식을 사용한다. 해당 방식은 왕복운동하는 부품을 끈으로 대체하여 기체 총 중량 및 관성력에 의한 효율손실을 최소화할 수 있다. 하지만, 끈의 길이, 매듭의 크기, 끈의 인장에 따른 메커니즘 안정화가 어렵다는 단점이 있다.

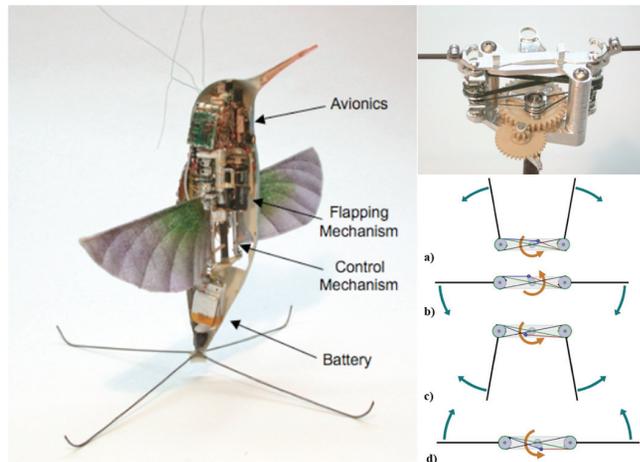


그림 2-12 스트링 메커니즘 예시 (Nano Hummingbird) [31]

기어 메커니즘(gear mechanism)은 링크 메커니즘의 단점을 보완하기 위해 제안된 방식으로, 구조가 간단하여 강건성이 확보되며, 구동부 마찰이 적고 조립이 쉽다는 장점이 있다. 또한, 날갯짓 각도를  $160^\circ$ 이상 구현가능하며, 기어비를 조절하여 해당 각도를 조절할 수 있다.

## 제 2 항 센서 구동 메커니즘 설계 및 제작

평형곤의 각속도 센싱 메커니즘을 구현하기 위한 조건으로 구동각, 구동속도, 틸트각이 있다. 하나의 평형곤에서 두 개의 각속도를 얻기 위해서는  $180^\circ$  구동각이 필요하며, 메커니즘의 구동속도가 빠를수록 따라 감지할 수 있는 코리올리 힘이 커지기에 구동속도는 빠를수록 좋다. 센서 메커니즘의 목표 구동속도를 5 Hz로 설정하여 설계하였다. 또한, 두 개의 평형곤을 이용하여 3축 각속도를 센싱하기 위해서는 두 평형곤은 몸통과 일정 각도로 기울어져야 한다. 파리의 평형곤은 몸통과  $30^\circ$  기울어진 상태로 있기에, 센서 메커니즘의 목표 틸트각을  $30^\circ$ 로 설정하였다. 제안한 센서 메커니즘은 높은 구동각도 및 구동 안정성을 확보하고 일정한 틸트각을 주기 위해서 기존에 개발된 기어 메커니즘인 랙-피니언(rack-pinion) 메커니즘 [33]을 기반으로 개발하였다. 랙-피니언 메커니즘은 랙의 기울기에 따라 평형곤에 틸트각을 자유롭게 조절할 수 있으며, 또한 기어 이빨의 개수에 따라 구동각 및 랙의 이동거리에 따른 피니언의 구동각도를 효과적으로 제어 가능하다.

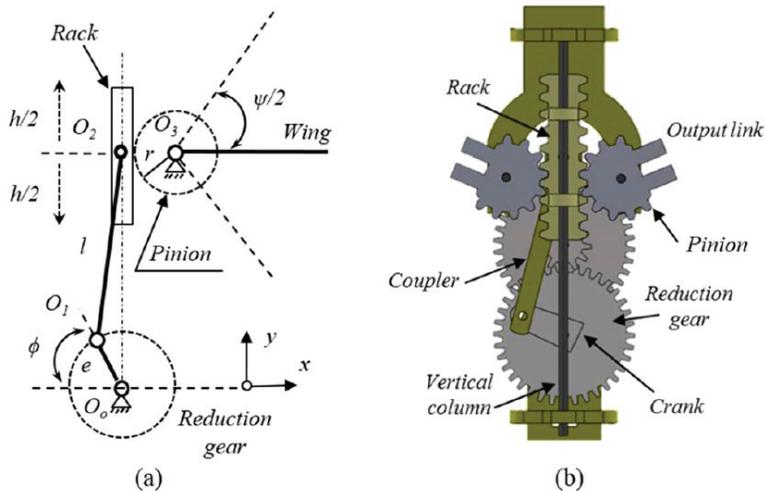


그림 2-13 랙-피니언 날갯짓 메커니즘 [33]

기존 랙-피니언 메커니즘은 모터의 회전운동을 슬라이더-크랭크 구조를 이용하여 랙 기어의 선운동으로 변환한다. 이후 랙 기어의 선운동을 피니언 기어의 회전 운동으로 변환되어 평형곤 구조물이 반원운동 가능하도록 한다. 하지만, 슬라이더-크랭크 구조는 동력 전달에는 용이하지만, 평형곤의 일정한 속도 변화를 구현할 수 없어 본 연구의 목적인 곤충 모방 각속도 센싱 기법에 적절하지 않다. 그렇기에, 본 연구에서는 슬라이더-크랭크를 통한 원운동-선운동 변환구조가 아닌, 스카치-요크(scotch-yoke) 구조를 사용하여, 모터의 원운동을 랙의 선운동으로 변환하였다. 해당 구조는 각속도가 일정한 주기를 나타내기에 선속도를 사용하여 코리올리 힘을 계산하기 용이하다.

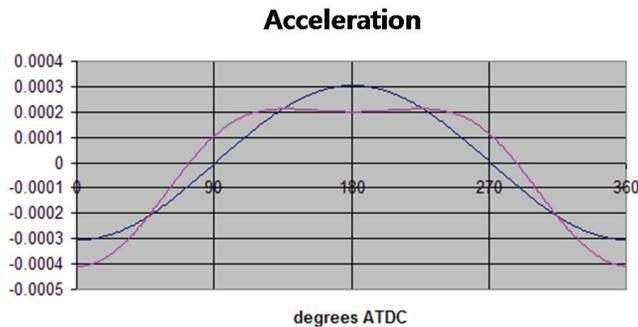


그림 2-14 크랭크-슬라이더와 스카치-요크의 가속도 비교 [37]

제안한 메커니즘의 설계를 위해 3D CAD (SOLIDWORKS 2018, Dassault systems)를 이용하여 모델링을 수행하였다. 먼저, 기어비를 1:1.5로 설정하여 모터 속도의 2/3배로 감속하도록 하였고, 스카치-요크 메커니즘을 통해 랙 기어가 상하로 7 mm 이동하도록 하였다. 이 때, 랙 기어 이빨이 5개 이동한다. 그리고 랙 기어를 요크의 양쪽에 30° 기울기로 부착하여, 피니언 기어가 30° 기울어지도록 설계하였다. 피니언 기어의 이빨 개수를 10개로 설정하여, 랙 기어가 상하로 한번 이동하면 180°씩 두 번 이동할 수 있도록 하였다. 해당 메커니즘의 구동

주파수를 5 Hz 이상으로 설정하기 위해서는 모터의 회전속도가 450 RPM 이상이어야 한다. 이러한 조건을 만족하기 위하여 모터는 정격 회전수가 510 RPM인 RA-12WGM 02 DC 기어드 모터를 사용하였다.

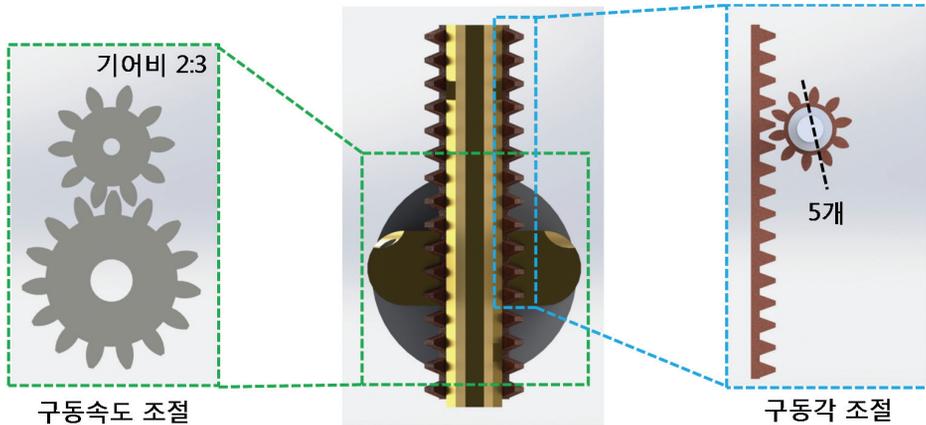


그림 2-15 사양을 맞추기 위한 메커니즘 기어비 설정

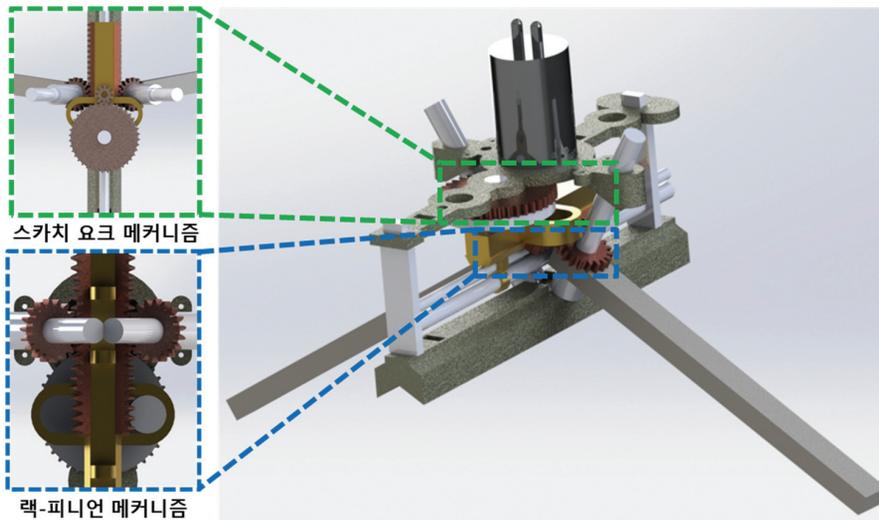


그림 2-16 설계한 센서 구동 메커니즘

이를 제작하기 위하여 Stratasys 社의 OBJET260 CONNEX3 [38] PolyJet 방식 3D 프린터를 사용하였다. 해당 방식은 액상 포토폴리머 (photopolymer) 재료를 한 레이어의 형상대로 분사하고, 분사된 포토폴리머 재료를 자외선으로 바로 경화하여 제작하는 방식으로,

단단한 재료 및 고무 재질의 재료를 혼합하여 사용 가능하기에 강도 조절이 가능하며, 제작 해상도가 높아 기어 등 정밀부품 제작이 가능하다는 장점이 있다. 메커니즘의 재료는 Stratasys 社의 VeroWhitePlus, TangoBlackPlus 섞어 제작한 DM 8515를 사용하였으며, 재료의 특성은 표 2-1와 같다.

표 2-1 DM 8515 물성표 [39]

인장 응력	40-60 MPa
파괴 인장	15-25%
탄성 계수	1700-2300 MPa
굽힘 강도	55-75 MPa

완성한 메커니즘은 그림 2-17와 같으며, 전원공급기로 모터에 정격전압인 6 V 인가하여 센서 메커니즘을 구동하였다. 그 결과, 해당 메커니즘은 목표 구동각을 만족하였다.



그림 2-17 제작한 센서 구동 메커니즘

### 제 3 항 메커니즘 제어 환경 구축

실험 진행에 앞서 평형곤 구조물 끝 부분에 작용하는 코리올리 힘 측정 및 센서 메커니즘 구동 모터 제어를 위한 PCB를 설계 및 제작한다. 라즈베리파이(Raspberry Pi) 3 Model B+ [40]를 이용하여 Python 3 기반으로 센서 데이터 처리 및 모터 구동환경을 통합적으로 제어할 수 있도록 그림 2-19와 같이 환경을 구축하였다. 라즈베리파이 3의 사양은 표 2-2와 같다.

표 2-2 라즈베리파이 3 Model B+ 사양 [40]

SoC	BCM2837 (1.4 GHz, 64-bit, quad core)
메모리	1GB LPDDR2 SDRAM
통신	802.11.b/g/n/ac wireless LAN, Bluetooth 4.2
입출력포트	40-pin GPIO header
전원	5V/2.5A DC power input

먼저, 평형곤 구조물 끝 부분에 장착하기 위한 가속도계 PCB에 대해 설명한다. 해당 PCB의 구조는 그림 2-18과 같이 가로 0.5 cm, 세로 4 cm 크기의 중횡비가 큰 직사각형 모양이고, PCB 끝 부분에 코리올리 힘을 감지하기 위한 Analog Device 社 ADXL345 [41] 가속도계를 부착하였다. 해당 PCB는 두 개 사용하였으며, I<sup>2</sup>C(Inter-Integrated Circuit) 통신을 이용하여 가속도 데이터를 교대하여 수신하였다. ADXL345 가속도계의 사양은 표 2-3와 같다.

표 2-3 ADXL345 사양 [41]

소모 전력	해상도	측정범위	크기	통신 방식
0.35 mW	13-bit	±16 g	3×5×1 mm <sup>3</sup>	I <sup>2</sup> C, SPI

모터 제어는 H-bridge 방식으로 구동하는 Texas Instrument 社의 DRV8838 [42] 모터 드라이버를 사용하였다. 설계한 PCB의 회로도는 그림 2-19와 같으며, 이를 기반으로 그림 2-20과 같이 제작하였다.



그림 2-18 제작한 평형곤 구조물 PCB

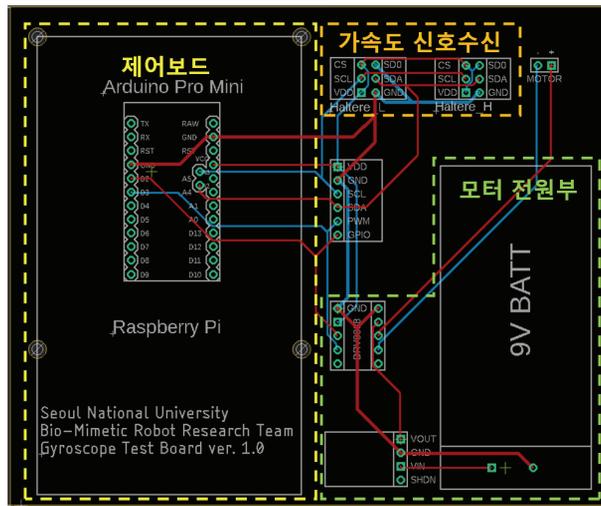


그림 2-19 설계한 PCB 회로도



그림 2-20 제작 완료한 PCB

## 제 4 절 각속도 추정을 위한 신호처리

근층 평형곤의 각속도 센싱 메커니즘을 구현하기 위해서는 평형곤 구조물 끝에 부착한 가속도계 데이터를 이용하여 로봇의 각속도를 추정하는 신호처리가 필요하다. 본 절에서는 각속도 센싱 메커니즘을 구현하기 위한 신호처리 방법에 대해 설명한다.

### 제 1 항 신호처리 개요

2절에서 설명한 평형곤의 동역학 해석에 따라 몸통의 pitch 회전에 의한 코리올리 힘의 주파수는 메커니즘의 구동 주파수와 같고, 몸통의 yaw 회전에 의한 코리올리 힘의 주파수는 메커니즘 구동 주파수의 2 배이다. 이러한 특성으로 인하여 진폭변조 방식을 이용하여 두 회전에 의한 코리올리 힘을 추출할 수 있다. 추출한 각 코리올리 힘을 구동 메커니즘의 선속도로 나누면 평형곤의 각속도 신호를 추출할 수 있다.

평형곤 구조물에 부착한 가속도계를 통해 받은 신호에는 코리올리 힘 외에 원심력, 각가속력, 관성력 등 여러 잡음 성분이 존재한다. 앞서 설명한 각속도 센싱 메커니즘에서 측면 방향에서 측정하는 코리올리 힘에 의한 가속도가 다른 힘들을 무시할 정도로 충분히 크기에 필터를 이용한 간단한 신호처리 방법으로 잡음 성분을 제거할 수 있다.

### 제 2 항 진폭 변조를 이용한 각속도 추정

평형곤 구조물이 반원운동 하면서 발생하는 선속도는 그림 2-21와 같이 서로 수직인 속도성분  $v_x$ ,  $v_y$  로 나눌 수 있으며, 이는 몸통의 회전각속도인  $\Omega_{pitch}$ ,  $\Omega_{yaw}$  에 대응한다. 평형곤의 각변위를  $\phi$ ,  $v_x$  와  $v_y$  사이 각도를  $\theta$  라 하면  $v$ 와 성분  $v_x$ ,  $v_y$  는 다음과 같이 표현가능하다.

$$\mathbf{v}(t) = r \times \omega \sin \phi(t) \quad (2.4.1)$$

$$v_x(t) = v(t) \sin(\theta(t)) = r\omega \sin(\phi(t)) \sin(\theta(t)) \quad (2.4.2)$$

$$v_y(t) = v(t) \cos(\theta(t)) = r\omega \sin(\phi(t)) \cos(\theta(t)) \quad (2.4.3)$$

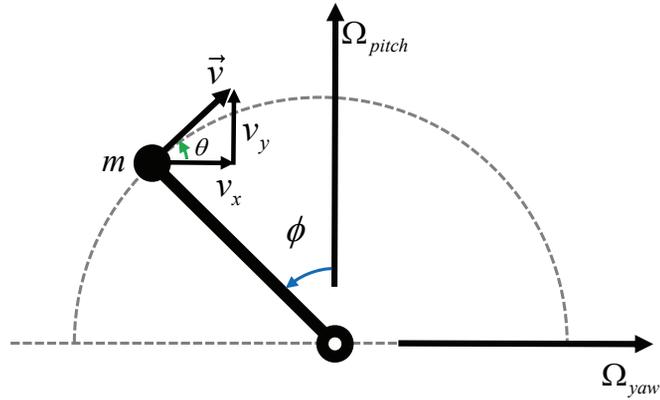


그림 2-21 평형곤 거동에 따른 선속도 분석 개념도 [28]

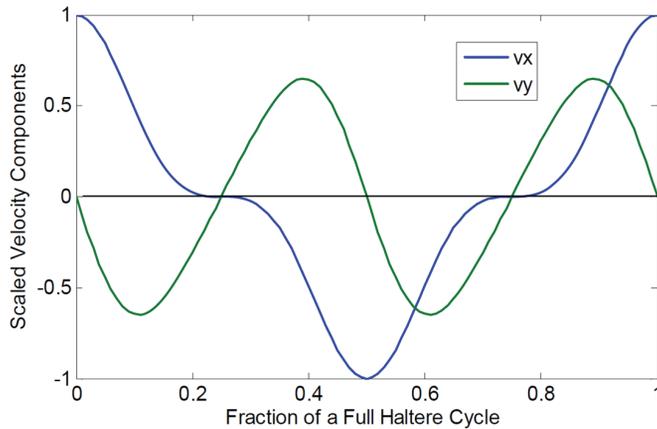


그림 2-22 평형곤 거동에 따른 선속도 분석 [28]

회전 각속도와 같이 전달하고자 하는 신호파(message signal)  $m(t)$ 가 존재하면 평형곤의 선속도는 반송파(carrier signal)  $c(t)$ 로서 그림 2-23과 같이  $s_m(t)$ 로 양 측파대 억압 반송파(Double Side Band - Suppressed Carrier, DSB-SC)방식으로 변조되어 나타난다. 여기서  $A_c$ 는 반송파의 신호크기,  $f_c$ 는 반송파의 주파수를 의미한다.

$$c(t) = A_c \cos(2\pi f_c t) \quad (2.4.4)$$

$$S_m(t) = m(t)c(t) = m(t)A_c \cos(2\pi f_c t) \quad (2.4.5)$$

이를 푸리에 변환 (Fourier transform)을 통해 주파수 영역으로 변환하면 다음과 같이 표현할 수 있으며, 스펙트럼 모양, 형태는 변형되지 않고, 신호 크기만 0.5배로 줄어드는 것을 알 수 있다.

$$S_m(f) = \mathcal{F}\{S_m(t)\} = \frac{1}{2}\{M(f - f_c) + M(f + f_c)\} \quad (2.4.6)$$

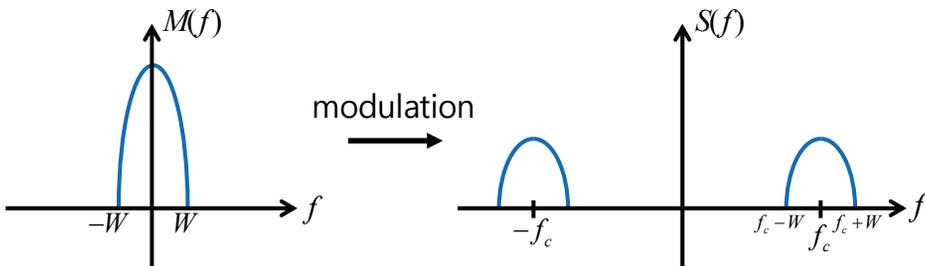


그림 2-23 DSB-SC 변조의 스펙트럼

변조된 신호  $s_m(t)$  를 원래 신호  $m(t)$  로 복원하기 위해서는 복조 과정 (demodulation)이 필요하며, DSB-SC 방식에서는 동기 검파 (coherent detection) 방식을 사용한다. 해당 방식은 그림 2-24와 같이 반송파 대역통과 신호  $s_m(t)$  를 국부 발진기 (local oscillator)에 발생한 정현파  $c_{LO}(t)$  와 곱한 후 저역통과 필터 (low pass filter, LPF)를 통과시켜 신호를 복구한다.  $s_m(t)$  와 국부 발생 정현파를 곱한 신호를  $r(t)$  이라 하면 다음과 같이 표현할 수 있으며, 최종적으로 복구한 신호의 크기 (amplitude)는 원래신호 크기의 1/2 배가 된다.

$$\begin{aligned} r(t) &= m(t) \cos^2(2\pi f_c t) \\ &= \frac{1}{2}m(t) + \frac{1}{2}m(t) \cos(4\pi f_c t) \end{aligned} \quad (2.4.7)$$

$$R(f) = \frac{1}{2}M(f) + \frac{1}{4}\{M(f - 2f_c) + M(f + 2f_c)\} \quad (2.4.8)$$

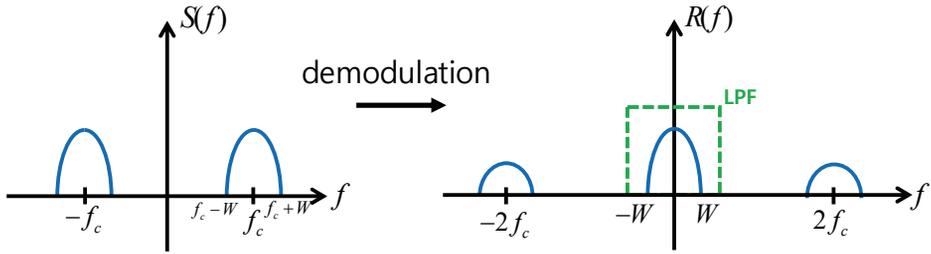


그림 2-24 동기검파를 이용한 DSB-SC 변조신호 복조

이러한 방식을 응용하여 측정된 가속도를 신호처리하면 평형곤에 작용하는 두 각속도 성분을 추출할 수 있다. 국부 발생 정현파는 반송파와 주파수, 위상이 모두 동기화 되어야 한다는 조건이 있어, 해당 복조방식을 구현하기 위해서는 반송파에 해당하는 평형곤의 선속도 신호  $v$ 와 해당 성분  $v_x, v_y$ 의 주파수, 위상을 알아야한다. 이는 가속도계의 한 축을 평형곤의 선속도의 방향과 일치하게 만들어 해당 방향의 가속도를 측정하고 적분하여 선속도를 추정한 뒤, 피크 검출(peak detection)을 이용하여 선속도 신호  $v$ 의 위상을 알면, 각도  $\theta$  및  $v_x, v_y$ 을 계산할 수 있다. 아래 그림 2-25은 위 신호처리 과정을 개념적으로 정리하여 표현하였다.

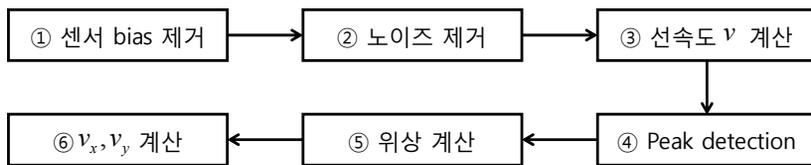


그림 2-25 선속도 계산방법

계산한  $v_x, v_y$ 의 주파수  $f_x, f_y$ 와 같은 정현파를 각각 수신한 가속도 신호에 곱하고 복조과정을 거치면 각 선속도 성분에 대응하는 코리올리 힘을 구할 수 있다. 해당 코리올리 힘을  $v_x, v_y$ 로 나누면 회전속도  $\Omega_{pitch}, \Omega_{yaw}$  신호를 추정할 수 있다. 두 평형곤에서 추정된 네 개 각속도 성분을 식 (2.2.17)을 이용하여 계산하면, 몸통의 3축 각속도

성분을 추정할 수 있다. 해당 과정을 그림 2-26 로 개념적으로 정리하였다.

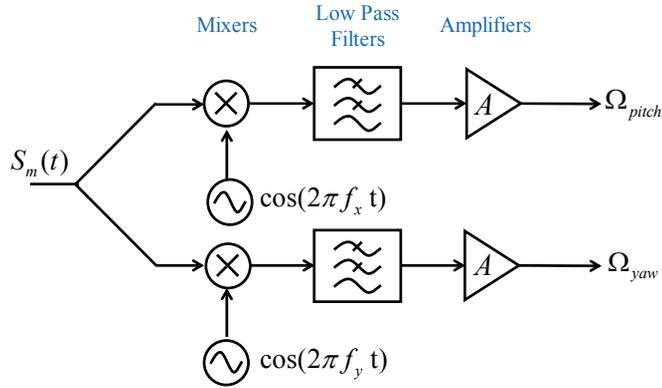


그림 2-26 평형곤 각속도 신호처리 블록선도

## 제 5 절 로봇 회전 실험을 통한 각속도 추정 방법의 유효성 평가

본 절에서는 로봇 회전 실험을 진행하여 로봇이 회전하는 구간에서 제안한 각속도 추정 방법의 코리올리 힘 감지가능성을 판단하여 해당 방법의 유효성을 평가하고자 한다.

### 제 1 항 실험 방법

제작한 자이로스코프를 Adept MobileRobots 社의 P3DX 로봇 [22] 위에 장착하여 그림 2-27 와 같이 실험환경을 조성하였다. 해당 로봇은 2 차원 평면 운동만 할 수 있어, yaw 방향에 대한 회전운동만 가능하다. P3DX 로봇 위에 상용 자이로스코프인 InvenSense 社의 MPU-6050 [43]을 함께 장착하여 제안한 자이로스코프와 성능을 비교하였다. 로봇을 제자리에서 90 dps 회전 각속도로 시계방향으로 180° 씩 총 3 회 회전시켰다. 가속도는 평형곤 구조물 구동방향(Y 축)과 측면방향(X 축)을

측정하였다. Y 축 가속도를 통해 메커니즘의 구동 특성을 파악하였고, X 축 가속도를 통해 로봇 회전에 의한 코리올리 힘을 검출하였다.

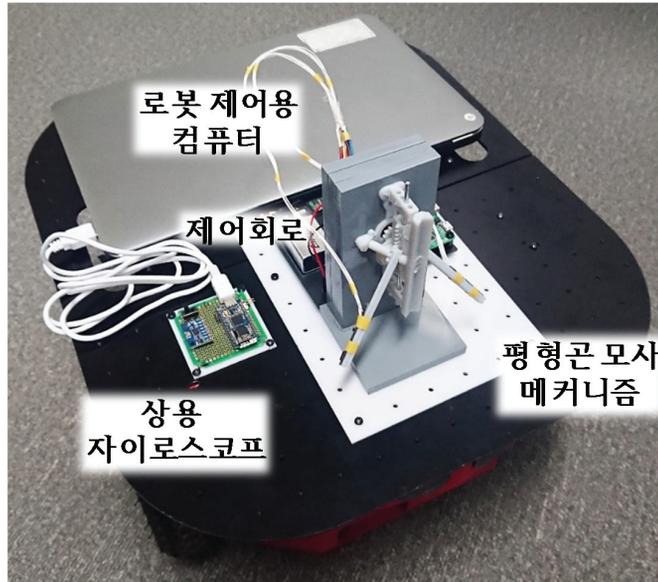


그림 2-27 파이오니어 로봇(P3DX)을 활용한 실험환경 구성

실험을 진행하기에 앞서, 로봇의 회전에 의한 코리올리 힘을 감지하기 위한 최소 각속도 조건 및 실험 조건에 의해 발생할 것으로 예상되는 코리올리 가속도를 계산해보았다. 실험에 사용한 ADXL345의 noise density는  $280 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ , 대역폭 (bandwidth)은 200 Hz이다. 식 (2.5.1)를 이용하면, 해당 센서의 해상도는 약 5 mg로 계산된다.

$$\text{Resolution} = \text{noise density} \times \sqrt{\text{BW} \times \frac{\pi}{2}} \quad (2.5.1)$$

이어서, 센서 구동 메커니즘에 의한 평형곤 끝부분의 속도를 계산한다. 메커니즘의 구동 주파수를 4.35 Hz, 평형곤 구조물의 길이가 8 cm이면, 시간에 따른 변위, 속도, 가속도는 식(2.5.2)–(2.5.4)로 표현할 수 있다.

$$r(t) = 0.08 \sin(\omega t) = 0.08 \sin(8.7\pi t) \quad (2.5.2)$$

$$v(t) = 2.18 \cos(8.7\pi t) \quad (2.5.3)$$

$$a(t) = -59.55 \sin(8.7\pi t) \quad (2.5.4)$$

식(2.5.3)을 통해 로봇의 회전에 의해 발생하는 코리올리 가속도가 가속도 센서의 해상도보다 높아지기 위한 로봇의 최소 회전속도는 0.75 dps 이며, 로봇의 회전속도가 0.75 dps 보다 빠르면 회전감지가 가능하다. 그리고 실험조건에 의해 발생하는 코리올리 가속도는 0.7 g 로 예상된다.

## 제 2 항 실험 결과 및 분석

로봇의 yaw 방향 회전에 대해서는 두 평형곤에 받는 힘은 같으므로, 한 쪽 평형곤 신호만 표시하였다. 평형곤에 부착된 X, Y 축 신호를 그림 2-28, 그림 2-29 처럼 측정이 되었지만, 잡음이 심하여 FFT (Fast Fourier Transform)를 이용하여 신호 분석 및 처리를 진행하였다.

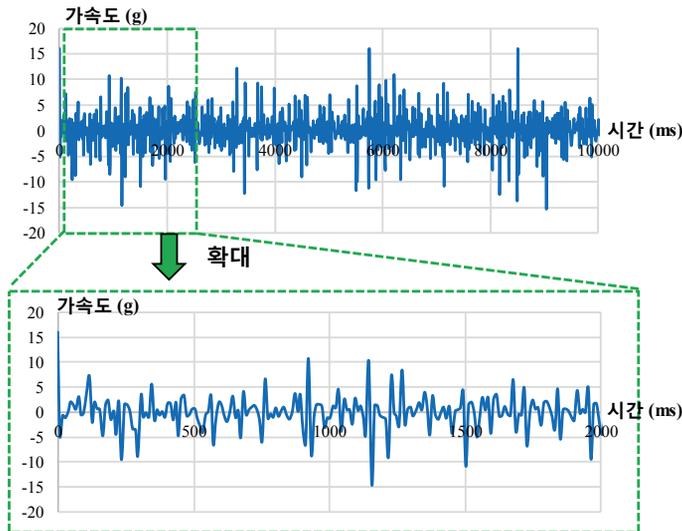


그림 2-28 측면방향 (X축) 가속도 raw data

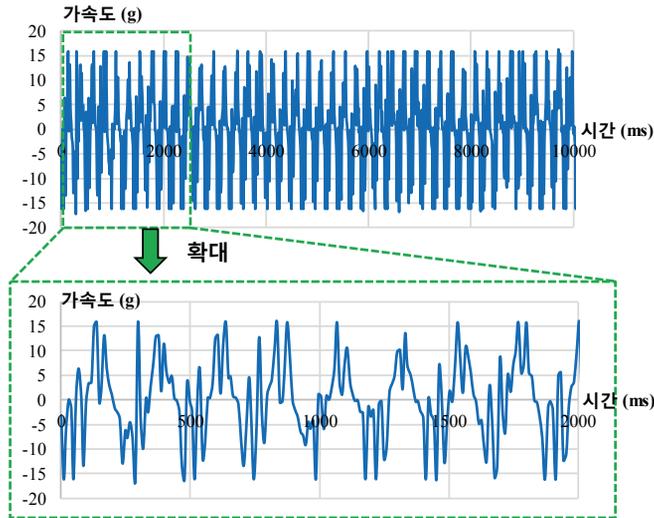


그림 2-29 구동방향 (Y축) 가속도 raw data

먼저, 평형곤의 선속도 방향에 대하여 그림 2-30 과 같이 FFT 를 진행하였으며, 메커니즘의 구동 주파수는 4.35 Hz 이었다. 또한, 구동 주파수의 배수(harmonic) 성분이 존재하였다. 이를 제거하기 위해 차단 주파수가 9 Hz 인 4 차 버터워스(Butterworth) 저대역 필터(low pass filter)를 사용하였다. 적용 결과, 그림 2-31 과 같이 약  $\pm 6g$  범위에서 진동하는 정현파 그래프가 나온다. 이는 앞에서 이론적으로 계산한 가속도인 식(2.5.4)와 유사하다. 이를 통해 센서 메커니즘이 정상적으로 동작하는 것을 알 수 있다.

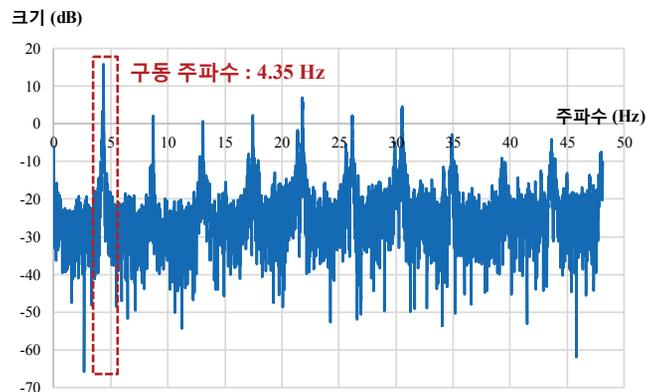


그림 2-30 Y축 가속도 raw data의 FFT 결과

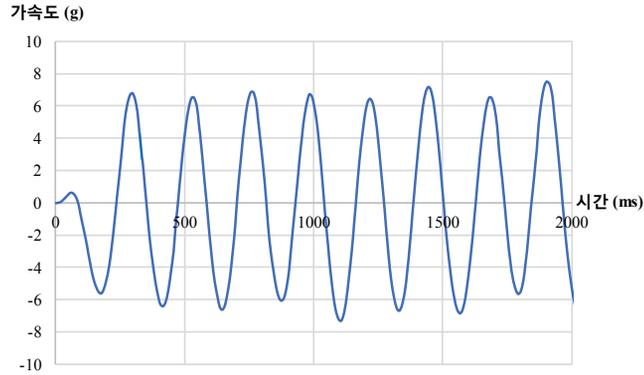


그림 2-31 필터 처리한 Y축 가속도 신호

이어서 측면 방향 (X 축) 가속도 데이터를 분석하였다. 그림 2-32 와 같이 FFT 를 진행하여 신호를 분석하였다. 분석 결과 pitch 방향 회전에 대한 주파수인 4.35 Hz, yaw 방향 회전에 대한 주파수인 8.7 Hz 성분이 존재하였고, 그 외에 구동 주파수의 배수 성분이 존재하였다. Pitch 방향 신호와 yaw 방향 신호를 추출하기 위해 4 차 버터워스 대역통과 필터(band pass filter)를 사용하였으며, pitch 방향 신호의 통과대역은 1-6 Hz, yaw 방향 신호의 통과대역은 6-12 Hz 로 설정하였다. 필터 통과 후 신호에서 pitch 성분은 해당 방향으로 회전하지 않았기에 그림 2-33 과 같이 잡음신호만 검출되었고, yaw 성분은 해당 방향으로 회전하였기에 그림 2-34 와 같이 진폭 변조된 신호가 검출되었다.

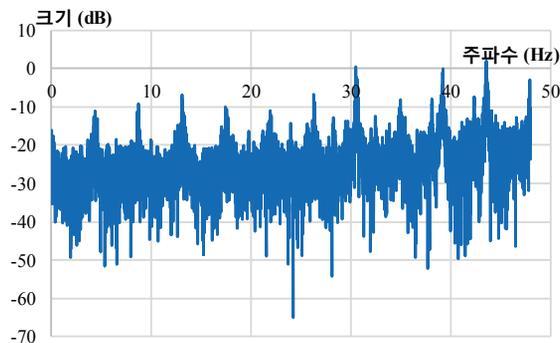


그림 2-32 X축 가속도 raw data의 FFT 결과

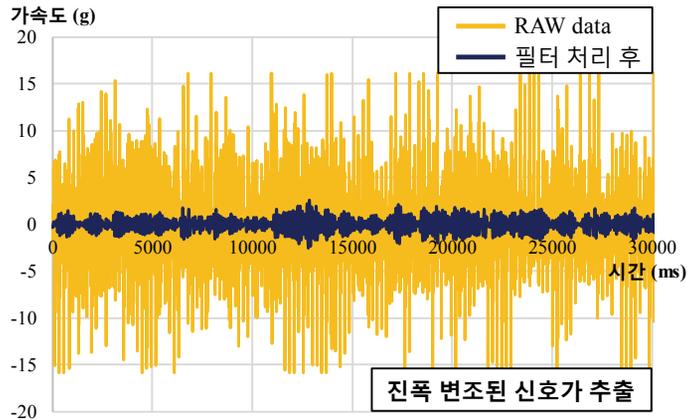


그림 2-33 Pitch 방향에 해당하는 주파수 성분 (4.35 Hz)

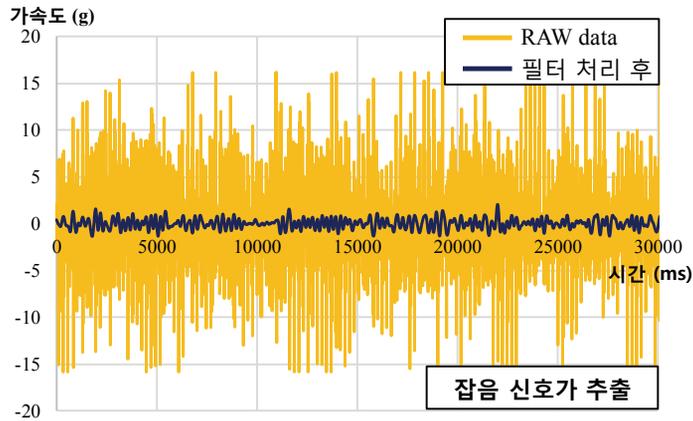


그림 2-34 Yaw 방향에 해당하는 주파수 성분 (8.7 Hz)

Yaw 방향에 해당하는 신호를 추출한 후, 해당 신호를 피크 검출을 기반으로 포락선 검파(envelope detection)하여 코리올리 가속도를 계산하였다. 계산 결과, 로봇이 회전하는 구간에서 코리올리 가속도로 판단되는 신호가 검출되었으며, 해당 신호의 최대 값은 0.6 g이다. 해당 값은 앞에서 이론적으로 계산한 예상 코리올리 가속도인 0.7 g 보다 작다. 이는 잡음 제거를 위한 신호처리 과정에서 코리올리 가속도 신호 부분이 영향을 받은 것으로 판단된다. 이러한 오차를 줄이기 위해서는 기어 진동과 같은 구동 메커니즘에 의한 잡음과 평형곤 구조물의

관성력에 의한 가속도 잡음을 최소화해야 한다. 계산한 코리올리 가속도 신호를 평형곤 구조물의 선속도로 나누어 최종적으로 로봇의 회전 각속도를 그림 2-35와 같이 추정하였다. 추정 결과, 90 dps 회전구간에서 74-82 dps 크기로 추정되었으며, 회전하지 않는 구간에서 0-12 dps 크기로 추정되었다.

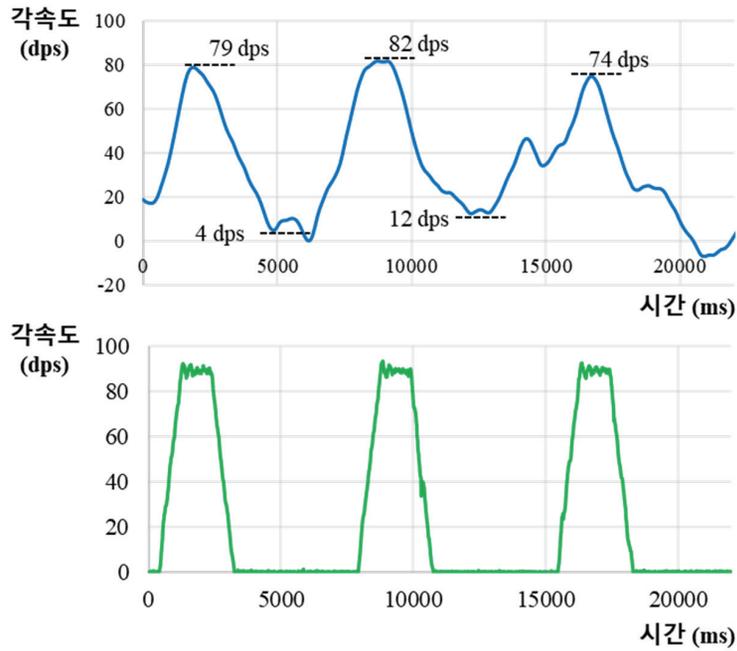


그림 2-35 X축 데이터 신호처리 결과(위)와 상용 자이로스코프 출력(아래) 비교

# 제 3 장 결 론

## 제 1 절 결과 요약

본 논문에서는 곤충 평형곤의 각속도 센싱 메커니즘을 모사하여 로봇의 각속도를 추정할 수 있는 생체모사 각속도 추정 기법을 제안하였다. 제안한 센서는 로봇의 구동부와 연결되어 움직일 수 있는 구조로 만들기 위하여 비행로봇에 사용되는 날갯짓 메커니즘 기반으로 평형곤 구조물을 진동시키는 구동 메커니즘과 로봇의 회전에 의하여 발생하는 코리올리 힘을 측정하고 신호처리를 통해 로봇의 각속도를 추정하는 신호처리 장치로 구성된다. 제안한 센서는 로봇의 구동력을 이용하여 코리올리 힘 추정에 필요한 선속도를 얻기에 최소한의 전력으로 각속도 추정이 가능하다. 추가적으로, 본 논문에서는 상용 가속도계인 ADXL345를 사용하였고, 소비전력은 0.35 mW이다. 제안한 방식은 가속도계 2개를 사용하므로 소비전력이 0.7 mW가 된다. 반면, 상용 자이로스코프의 소비전력은 9 mW 이기에 제안한 방법의 전력효율이 상용과 대비하여 매우 높은 것을 알 수 있다. 그리고 선속도를 얻는데 센서의 공진을 이용하지 않기에 음파를 이용한 해킹공격에 강인하다는 장점도 있다.

센서 구동 메커니즘은 기존에 개발된 날갯짓 메커니즘 중 기어 메커니즘 기반으로 개발하여 강건성을 확보하고, 간단하게 목표사양을 맞출 수 있도록 설계하였다. 설계한 메커니즘은 3D 프린터를 통해서 제작할 수 있으며, 시험 구동 결과 목표로 한 사양을 만족하였다. 각속도 신호 처리는 코리올리 힘을 통신에서 많이 사용되는 변조방식이 진폭 변조로 되어있고, 이를 각속도 신호로 복조하기 위해서 동기 검파 방식을 이용하면 되는 것을 확인하였다. 제안한 각속도 추정방법의 유효성을 평가하기 위하여 P3DX 로봇을 이용하여 로봇의 회전 실험을 진행하였다. 로봇이 회전하는 구간에서 해당 방향에 해당하는 코리올리 힘이 측정되었으며, 이를 기반으로 로봇의 회전속도를 추정할 수 있었다.

## 제 2 절 향후 계획

제안한 자이로스코프는 생체모방로봇 플랫폼에 적용하는 것을 가정하고 개발하였다. 그렇기에 생체모방 지상로봇 및 날갯짓 비행체로 적용하기 용이할 것이다. 본 논문의 연구는 아직 프로토타입 단계이다 보니 개선해야 할 점이 있다. 빠른 프로토타이핑을 위해 3D 프린터로 기어를 제작하였는데, 해당 방식의 결과물은 강성이 약하여 기어 마모가 심하고, 기어 자체의 힘전달율이 떨어진다는 문제점이 있다. 이는 강성이 높은 상용 기어를 사용하면 해결할 수 있을 것으로 보인다. 또한, 구조체의 크기를 줄일 수 있기에 메커니즘 구동에 필요한 토크가 작아지면서 회전속도가 높은 코어리스 모터를 적용할 수 있을 것이다. 추가적으로 메커니즘의 구동속도를 높일 수 있다. 그리고 메커니즘의 구동속도가 높아지면 구동각이 쉽게 발산하는 문제점이 있는데 이를 보완할 수 있는 제어기술 개발이 필요할 것으로 보인다.

그리고 평형곤 구조물의 진동에 의한 관성력을 최소화하기 위하여 해당 구조물을 최대한 작고 가볍게 만드는 것이 중요하다. 이러한 이슈는 해당 구조물을 PCB 로 대체하면 가능할 것으로 보인다. 대신, 경량화를 위해 PCB 를 너무 얇게 만들 경우 모드 진동이 발생하여 가속도 손실이 심해지는 문제점이 있기에, tradeoff 를 고려하여 제작해야 한다.

소형화가 충분히 가능해지면, 소형 로봇의 구동부에 직접 연결하여 위치추정을 할 수 있을 것이다. 이러한 연구를 진행하기 위해서는 로봇 메커니즘, 회로 재설계가 필요하기에 다른 연구과제와의 협업을 통한 종합적인 접근이 필요할 것이라 생각한다.

## 참고문헌 (References)

- [1] “다양한 항법기술,” 2018. [Online] Available: <http://www.add.re.kr/>
- [2] VECTORNAV, “Vectornav Industrial Series: VN-200 GPS/INS datasheet,” 2017.
- [3] F. Dimc, M. Bažec, D. Borio, C. Gioia, G. Baldini, M. Basso, “A Experimental Evaluation of Low-Cost GNSS Jamming Sensors,” *Navigation*, vol. 64, no. 1, pp. 93–109, 2017
- [4] “GPS Techonology – Closer and More Accurate,” 2018. [Online] Available: [https://www.kari.re.kr/eng/sub03\\_06.do](https://www.kari.re.kr/eng/sub03_06.do)
- [5] K. A. Zischka, “Astronavigation A Method for Determining Exact Position by the Stars,” Springer, 2018.
- [6] J. P. Golden, “Terrain Contour Matching (TERCOM): A Cruise Missile Guidance Aid,” *The 24th Image Processing for Missile Guidance*, San Diego, USA, Dec. 23, 1980.
- [7] B. Forssell, “Radionavigation Systems,” Artech House. 2008.
- [8] B. Barshan, H. F. Durrat-Whyte, “Inertial Navigation Systems for Mobile Robots,” *IEEE Robotics and Automation Society*, vol. 11, no. 3, pp. 328–342, 1995.
- [9] A. Noureldin, T. B. Karamat, J. Georgy, “Fundamentals of Inertial Navigation, Satellite-based Positioning and their Integration,” Springer, 2013.
- [10] “JG7044N (Honeywell),” [Online] Available: [https://www.ion.org/museum/item\\_view.cfm?cid=5&scid=16&iid=41](https://www.ion.org/museum/item_view.cfm?cid=5&scid=16&iid=41)
- [11] J. Awrejcewicz, Z. Koruba, "Classical Mechanics: Applied Mechanics and Mechatronics," Springer, 2012.
- [12] AIRBUS Defence and Space, “ASTRIX 200 Datasheet,” 2018. [Online] Available: <https://spaceequipment.airbusdefenceandspace.com/avionics/fiber-optic-gyroscopes/astrix-200/>

- [13] Honeywell, "GG1320AN Digital Ring Laser Gyroscope Datasheet," [Online] Available: <https://aerospace.honeywell.com/en/products/navigation-and-sensors/gg1320an-digital-ring-laser-gyroscope>
- [14] Yole Development, "Status of the MEMS Industry 2018 Market and technology Report " 2018.
- [15] Systemplus consulting, "STMicoelectronics LSM9DS0 9-Axis MEMS IMU Reverse Costing Analysis," 2013.
- [16] G. Q. Wu, G. L. Chua, Y. D. Gu, "A dual-mass fully decoupled MEMS gyroscope with wide bandwidth and high linearity," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 259, pp. 50–56, Jun., 2017.
- [17] P. Soobramaney, "Mitigation of the Effects of High Levels of High-Frequency Noise on MEMS Gyroscopes," Ph.D. dissertation, Graduate Faculty of Engineering, Auburn University, Auburn, Alabama, Aug., 2013.
- [18] R. N. Dean, S. T. Castro, G. T. Flowers, G. Roth, A. Ahmed, A. S. Hodel, B. E. Grantham, D. A. Bittle, J. Brunsch, "A Characterization of the Performance of a MEMS Gyroscope in Acoustically Harsh Environments," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 7, 2011"
- [19] R. N. Dean, et al., "On the Degradation of MEMS Gyroscope Performance in the Presence of High Power Acoustic Noise," *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Vigo, Spain, Jun. 4–7, 2007.
- [20] Y. Son, et al., "Rocking Drones with Intentional Sound Noise on Gyroscopic Sensors," *USENIX Security Symposium*, Washington DC, USA, Aug. 12–14, 2015.
- [21] C. Acar, A. Shkel, "MEMS Vibratory Gyroscopes: Structural Approaches to Improve Robustness," Springer, 2009.
- [22] Mobilerobots, "P3DX Datasheet Rev. A," [Online] Available: [www.mobilerobots.com/Libraries/Downloads/Pioneer3DX-P3DX-RevA.sflb.ashx](http://www.mobilerobots.com/Libraries/Downloads/Pioneer3DX-P3DX-RevA.sflb.ashx)

- [23] T. Chu, N. Guo, S. Backen, D. Akos, “Monocular Camera/IMU/GNSS Integration for Ground Vehicle Navigation in Challenging GNSS Environments,” *Sensors*, vol. 12, no. 3, pp. 3162–3185, 2012.
- [24] “국방생체모방자율로봇 특화연구센터 생체모방 감지센서 연구실 1 단계 종결보고서,” 국방과학연구소, 대전, 한국, 2015.
- [25] 국방과학연구소, “구동력을 이용한 각속도 추정장치 및 이를 포함하는 로봇,” 특허등록 10-1770913, 2017.
- [26] X. Liang, L. Sun, Z. Liu, “Mechanosensory Transduction in *Drosophila Melanogaster*,” Springer, USA, 2017.
- [27] “국방생체모방자율로봇 특화연구센터 생체모방 감지센서 연구실 2 단계 종결보고서,” 국방과학연구소, 대전, 한국, 2018.
- [28] R. A. Thompson, et al., “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.
- [29] T. Deora, et al., “Biomechanical basis of wing and haltere coordination in flies,” *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 112, no. 5, pp. 1481–1486, 2015.
- [30] G. Nalbach, “The halteres of the blowfly *Calliphora*,” *Journal of Comparative Physiology A*, vol. 173, pp. 293–300, 1993.
- [31] M. Keenon, K. Klingebiel, H. Won, A. Andriukov, “Development of the Nano Hummingbird: A Tailless Flapping Wing Micro Air Vehicle,” *The 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, Nashville, USA, Jan. 9–12, 2012.
- [32] M. Karasek, “Robotic hummingbird: Design of a control mechanism for a hovering flapping wing micro air vehicle,”

- Ph.D. dissertation, Graduate Faculty of Engineering, Université libre de Bruxelles, Bruxelles, Belgium, 2017.
- [33] T. A. Nguyen, H. V. Phan, T. K. L. Au, H. C. Park, “Experimental study on thrust and power of flapping–wing system based on rack–pinion mechanism,” *Bioinspiration & Biomimetics*, vol. 11, no. 4, 046001, 2016.
- [34] T. Vanneste, A. Bontemps, X. Q. Bao, S. Grondel, J. Paquet, E. Cattan, “Polymer–Based Flapping–Wing Robotic Insects: Progresses in Wing Fabrication, Conception and Simulation,” *Nanoengineering for Medicine and Biology*, vol. 2, pp. 771–778, 2011.
- [35] L. Hines, D. Campolo, M. Sitti, “Liftoff of a Motor–Driven, Flapping–Wing Microaerial Vehicle Capable of Resonance,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 30, no. 1, Feb. 2014.
- [36] Festo, “BionicOpter Datasheet,” [Online] Available: <https://www.festo.com/group/en/cms/10224.htm>
- [37] Wikipedia, “Comparison of displacement and acceleration for a Scotch yoke compared with a crank and slider,” [Online] Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Scotch\\_yoke](https://en.wikipedia.org/wiki/Scotch_yoke)
- [38] Stratasys, “Objet260 Connex3 Datasheet,” [Online] Available: [http://www.stratasys.com/-/media/files/printer-spec-sheets/pss\\_pj\\_objet260connex3\\_0217a\\_web.pdf](http://www.stratasys.com/-/media/files/printer-spec-sheets/pss_pj_objet260connex3_0217a_web.pdf)
- [39] Stratasys, “Digital Materials Datasheet,” [Online] Available: [https://www.stratasys.com/-/media/files/material-spec-sheets/mss\\_pj\\_digitalmaterialsdatasheet\\_0617a.pdf](https://www.stratasys.com/-/media/files/material-spec-sheets/mss_pj_digitalmaterialsdatasheet_0617a.pdf)
- [40] RaspberryPi, “RASPBerry PI 3 MODEL B+ Datasheet,” [Online] Available: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b-plus/>

- [41] Analog Devices, “ADXL345 Datasheet,” [Online] Available:  
<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adxl345.pdf>
- [42] Texas Instruments, “DRV8838 Datasheet,” [Online] Available:  
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv8837.pdf>
- [43] InvenSense, “MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.4,” [Online] Available:  
[https://store.invensense.com/datasheets/invensense/MPU-6050\\_DataSheet\\_V3%204.pdf](https://store.invensense.com/datasheets/invensense/MPU-6050_DataSheet_V3%204.pdf)

## Abstract

# A method for Estimating Angular Velocity Inspired by Sensing Mechanism of Insect Haltere

Jinwoo Sung

Electrical and Computer Engineering

The Graduate School

Seoul National University

Haltere is an organ found in Diptera, which detects the Coriolis force and estimates the angular velocity of the body. The pair of haltere is organically connected to each other. Thus, the three-axis angular velocity can be estimated. In addition, the organ does not consume extra energy for operation due to its mechanical connection to the wing. This paper presents a bio-inspired angular velocity estimation technique based on the sensing mechanism of insect haltere. To detect the Coriolis force, the haltere needs a linear velocity. To manufacture the sensor apparatus, flapping wing mechanism for flying robot is introduced. To measure the Coriolis force induced by the rotation of the robot, two accelerometers are attached to each end of the haltere mimetic structure. The measured Coriolis force is amplitude-modulated by the linear velocity of the equilibrium structure as a carrier wave at the angular velocity of the

robot. A signal processing method based on coherent detection that can derive angular velocity in the modulated signal. To evaluate the effectiveness of the proposed method's angular velocity estimation, P3DX robot is used as a rate table for *in situ* rotation experiment.

**Keywords : Bio-mimetic, Gyroscope, Halteres, Signal processing, Flapping mechanism**

**Student Number : 2017-29441**