



# 4족 로봇Spot완전 분해 리포트

국내 최초spot분해 프로젝트 기념

# 목차

## 1 Spot개요 1

1.1전체 개요 및 사양 .....	2
1.1.1종합 정보 .....	2
1.1.2제품 사양 .....	5
1.2조작 방법 .....	7
1.2.1외부 조작 장치 연결 방법 .....	7
1.2.2별도 리모컨 사용법 .....	8
1.2.3컴퓨터 조작 .....	11
1.3외부 확장 .....	12
1.3.1종합 정보 .....	12
1.3.2가이드 레일 설치 .....	13
1.3.3외부 인터페이스 .....	14
1.3.4확장용페이로드.....	16

## 2 소프트웨어 개발 플랫폼 23

2.1전체 개요 .....	24
2.1.1동작 모드 .....	24
2.1.2서비스 그룹 .....	25
2.2서비스 .....	26
2.2.1 GraphNav.....	26
2.2.2 Mission.....	27
2.2.3 Choreography.....	28
2.2.4 Docking.....	29
2.2.5 State.....	30
2.2.6 Control .....	31
2.2.7 Data.....	33
2.2.8 본체.....	35
2.2.9 페이로드.....	36
2.2.10 암.....	37
2.3프로그래밍 .....	38
2.3.1프로그래밍 환경 .....	38
2.3.2예제 프로그램 .....	39

## 3 동작 기능 42

3.1정상 동작 .....	43
3.1.1이동 부품 구성 .....	43
3.1.2보행 방식 .....	44
3.2이상 발생 시 동작 .....	48
3.2.1이상 발생 상황 .....	48
3.2.2이상 발생 시 복구 동작 .....	50

## 4 전체 구조 52

4.1개요 .....	53
4.1.1분해 단계 .....	53
4.1.2전체적인 구조 .....	56
4.1.3커버 .....	58
4.1.4열 방출 구조 .....	60
4.2메인 프레임 .....	64
4.2.1메인 프레임 개요 .....	64
4.2.2프론트 프레임 .....	65
4.2.3센터 프레임 .....	68
4.2.4리어 프레임 .....	70
4.2.5상단 패널 .....	72
4.3다리 부위 .....	74
4.3.1다리 전체 모습 .....	74
4.4방수 및 방진 대책 .....	76
4.4.1예상 사용 환경 .....	76
4.4.2각 부위의 밀폐 .....	77
4.4.3과제 .....	81

## 5 기계 부품 82

5.1전체 보기 .....	83
5.1.1다리 구동 부품 구성 개요 .....	83
5.2무릎 관절 구동 유닛 .....	89
5.2.1무릎 관절 구동 전체 구조 .....	89
5.2.2볼스크류 부위 .....	90
5.2.3하중 센서 회로 기판 .....	91
5.2.4무릎 구동용 모터 .....	93
5.2.5링크 주변 부품 .....	96
5.2.6리니어 액추에이터 케이스 주변 .....	98
5.3 Y축 구동 유닛 .....	100
5.3.1 Y축 구동 구조 .....	100
5.3.2 Y축 구동 모터 .....	105
5.3.3 Y축 구동 토크 센서 회로 기판 .....	108
5.3.4하모닉 드라이브 .....	110
5.3.5주변 회전 부품 .....	113
5.4 X축 구동 유닛 .....	115
5.4.1 X축 구동 구성 .....	115

## 6 전자 부품 118

6.1전기 연결 .....	119
6.1.1연결 위치 .....	119
6.1.2외부 인터페이스 .....	122
6.1.3와이어 하니스 .....	125
6.1.4안테나 .....	128
6.2모듈 .....	129

---

6.2.1연결 단자판 .....	129
6.2.2깊이 카메라 .....	133
6.2.3팬 .....	136
6.2.4 LED모듈 .....	140
6.3주 컴퓨터 .....	142
6.3.1설치 위치 및 방법 .....	142
6.3.2메인보드 .....	148
6.3.3 CPU보드 .....	150
6.3.4 WiFi고주파 보드 .....	153
6.3.5상태 센서 .....	154
6.4다리 구동 모듈 .....	156
6.4.1설치 위치 및 방법 .....	156
6.4.2모터 드라이버 보드 .....	159
6.4.3중량 센서 회로 기판 .....	160
6.4.4토크 센서 회로 기판 .....	161
6.4.5엔코더 회로 기판 .....	162
6.5배터리 팩 .....	163
6.5.1외관 및 사양 .....	163
6.5.2내부 구조 .....	164
6.5.3제어 회로 기판 .....	165
6.6리모컨 .....	167
6.6.1외관 및 사양 .....	167
6.6.2내부 구조 .....	168
6.6.3메인 제어 회로 기판 .....	169
<b>7 페이로드 171</b>	
7.1구매한페이로드 .....	172
7.1.1개요 .....	172
7.2 SpotCam .....	173
7.2.1외관 .....	173
7.2.2회로 기판 설치 위치 .....	174
7.2.3장착된 회로 기판 .....	176
7.3 EDGECPU.....	185
7.3.1외관 .....	185
7.3.2회로 기판 설치 위치 .....	186
7.3.3장착된 회로 기판 .....	188
7.4 LIDAR라이다 센서 .....	190
7.4.1외관 .....	190
7.4.2회로 기판 설치 위치 .....	191
7.4.3장착된 회로 기판 .....	194

# 제 1 장 Spot개요

## 1.1 전체 개요 및 사양

### 1.1.1 개요

Spot은 미국의 Boston Dynamics에서 개발한 로봇으로, 2020년 6월부터 일반 소비자에게 판매가 시작되었습니다 (그림 1.1). 기존 로봇에는 없는 특별한 기능을 가지고 있으며, 네 개의 다리를 활용해 마치 개처럼 걷고, 바퀴로는 접근이 어려운 곳까지 이동할 수 있습니다. 예를 들어 약 30 cm 높이의 계단이나, 30도 경사의 지형, 모래밭, 눈밭 등에서도 자유롭게 움직일 수 있습니다 (그림 1.2). 넘어졌을 때 스스로 일어설 수 있는 기능도 갖추고 있습니다. 이처럼 다양한 기능을 갖춘 최초의 상업용 로봇입니다(Nikkei Cross Tech 조사에 따르면).

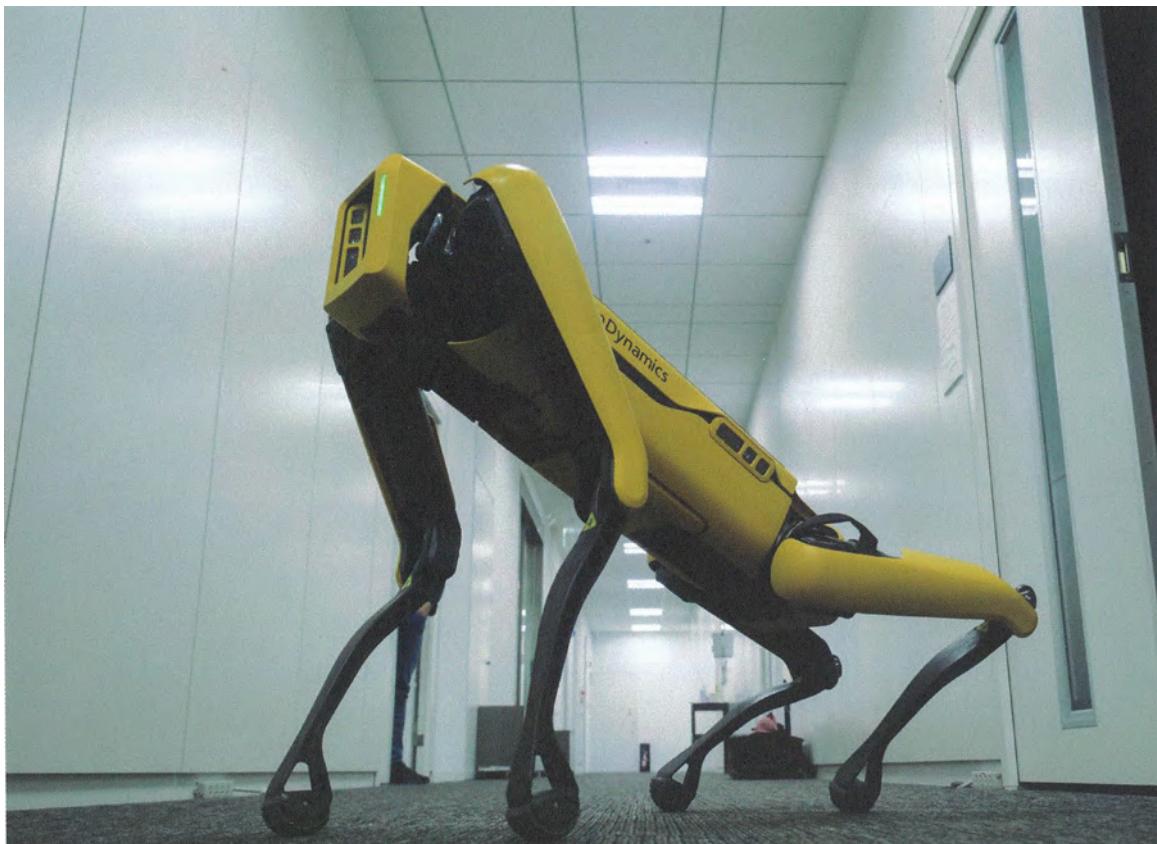


그림 1.1: Spot의 외형이 로봇은 Boston Dynamics에서 개발하여 판매하고 있습니다. 네 개의 다리로 걷는 모습이 강아지를 연상시키며, 계단도 오르내릴 수 있습니다.(사진:가토 야스시)



그림 1.2: Spot이 계단을 오르는 모습 30 cm정도의 계단을 네 다리를 이용해 오르내릴 수 있습니다.(사진:가토 야스시)

Spot은 리모컨을 사용해 원격 조종할 수 있지만, 이 방식만 있는 것은 아닙니다. Spot의 가장 큰 특징은 스스로 움직일 수 있다는 점입니다. LIDAR(라이다, 빛 감지 및 거리 측정)과 360도 카메라를 탑재하고, 순찰 경로를 설정하면 자동으로 보안 점검이나 검사 작업을 수행할 수 있습니다. Spot의 최대 적재 하중은 14 kg이며, 등 쪽에 장비 결합용 레일이 있어 다양한 외부 장치를 연결해 복잡한 작업도 처리할 수 있습니다 (그림 1.3). 예를 들어, 로봇 팔을 장착하면 문을 열거나 닫거나, 물건을 집을 수도 있습니다.



그림 1.3: 건설 현장에서 작동 중인Spot등에 장비를 장착하면 현장 측정 작업이 가능합니다.(사진:Boston Dynamics)

### 1.1.2 사양

Spot의 외형 크기는 1100 mm × 500 mm × 191 mm □ 840 mm이며, 무게는 31.7 kg (그림 1.4, 그림 1.5)입니다. Spot의 4개의 다리는 모두 동일한 구조로 되어 있습니다. 각 다리에는 3개의 모터가 장착되어 있습니다: 하나는 몸 방향으로 회전, 또 하나는 수직 방향으로 회전, 그리고 마지막 하나는 무릎 관절을 굽히거나 펴는 역할을 합니다. Spot의 최대 보행 속도는 1.6 m/s로, 5.76 km/h에 해당합니다. 이는 사람이 빠르게 걷는 속도와 비슷합니다.



그림 1.4: Spot의 외형 크기 | 다리가 펼쳐져 있을 때, Spot의 높이는 840 mm입니다. 전체 길이는 1100 mm이며, 무게는 31.7 kg입니다.(이미지 출처: Nikkei Cross Tech)

	☒	▼
☒·☒☒	°☒° !▽"#\$%& '((( " )*+*,-. /01(23	
4fi	6789 사양 표 제품 상세	" *;! 8 "<=:- 기본 정보 설명 ::
특징	구성 요소 기능 옵션 UV	정보 요약 #: 상세 설명 WXYZ[
▼	^9 `9	2^ # _ < ab%

그림 1.5: Spot의 사양 | 배터리 용량은 605 Wh입니다. 최대 속도는 6 km/h로, 이는 사람의 빠른 걸음 속도와 비슷합니다.(이미지:Nikkei Crosstech, 보스턴 디아내믹스 공식 웹사이트 참고)

배터리 용량은 605 Wh입니다. 완전히 충전하면 평균적으로 90분 동안 사용할 수 있습니다. 모터를 켜 후 대기 시간은 180분입니다. 배터리는 복부에 장착되어 있으며, 등을 대고 누운 상태에서 교체할 수 있습니다 (그림 1.6). 전용 충전기를 사용해 배터리를 충전합니다.



그림 1.6:Spot에 배터리가 장착된 위치  
배터리 박스와 충전기를 데이터 케이블로 직접 연결해 충전하는 것뿐만 아니라, 충전기 케이블을 Spot 후면의 소켓에 연결해 충전할 수도 있습니다.(사진:가토 야스시)

## 1.2 조작 방법

### 1.2.1 외부 조작 기기 연결 시

Spot은 네트워크를 통해 외부 컴퓨터에서 명령을 받아 작동합니다. 전용 리모컨이 제공될 경우, 위쪽의 좌우 두 개 조이스틱을 사용해 직관적으로 조작할 수 있습니다(그림 1.7). 조작 감각과 방식은 드론과 유사합니다. PC 등에서는 Spot에서 제공하는 RPC(Remote Procedure Call) 기반 서비스를 이용하는 프로그램을 통해 제어할 수 있습니다.



그림 1.7: Spot 리모컨은 두 개의 조이스틱으로 조작합니다.(사진:가토 야스시)

Spot은 사전 장애물 회피와 자동 주행 기능이 내장되어 있어 반자동 운전이 가능합니다. 예를 들어 이동 경로에 장애물이 있으면 이를 피해 목적지까지 이동합니다. 자동 주행에서는 Spot이 미리 순찰할 경로를 따라가며 기록하면, 이후에는 같은 경로를 자동으로 이동할 수 있습니다.

주변 환경을 인식하기 위해 Spot에는 깊이 카메라와 어안 카메라가 탑재되어 있습니다. 360° 전방위 감시를 위해 앞쪽에 2개씩, 좌우와 뒤편에 각각 1개씩, 총 5개의 카메라가 배치되어 있습니다. 깊이 카메라는 인텔의 “D430” 모델이 사용되며, 적외선을 주변에 쏘고 스테레오 카메라로 받아들이는 방식으로 거리 측정이 가능합니다. 물체와의 거리는 10 cm ↔ 10 m까지 측정할 수 있습니다. 다만 Spot의 사양상 지형 인식은 최대 4 m 범위 내에서 이루어지며, 10 m까지는 지원되지 않습니다.

Spot에 탑재된 카메라의 영상을 API를 통해 받아볼 수 있지만, 주로 주변 감시에 사용되기 때문에 해상도는 낮은 편입니다. 보다 높은 화질로 주변 영상을 얻으려면 별도의 고해상도 카메라를 준비해야 합니다.

## 1.2.2 부속 리모컨 사용법

Spot은 Spot을 작동시키기 위한 전용 리모컨이 함께 제공됩니다. 이 리모컨을 사용하면 Spot을 움직이고 조작할 수 있을 뿐만 아니라 오류나 배터리 잔량 같은 상태도 확인할 수 있습니다. 또한 장애물이 있을 때 접근 거리를 설정하는 것도 가능합니다(그림 1.8)입니다.



그림 1.8: Spot리모컨을 활용해 배터리 잔량을 확인할 수 있습니다. 리모컨에서 Spot의 설정이나 오류 정보 등도 확인 가능합니다.(사진:카토 아스시)

이 리모컨은 안드로이드 태블릿으로, 좌우에 각각 조이스틱이 있고 십자키와 기능 버튼이 장착되어 있습니다. 태블릿에서 전용 앱을 실행한 후 Spot에 연결합니다. 초기에는 Spot이 WiFi 접속 지점으로 동작하므로, 앱에서 Spot SSID를 선택하고 사용자명과 비밀번호를 입력하면 Spot 시스템에 접속할 수 있습니다.

조작 방법은 걷는 동안 왼쪽 조이스틱으로 앞뒤, 좌우 이동을 제어하고, 오른쪽 조이스틱으로 방향을 회전시킵니다 (그림 1.9). 왼쪽 조이스틱의 좌우 움직임으로 옆으로 걷는 동작을 할 수 있습니다. 장애물 회피는 기본 내장 기능으로, Spot이 장애물 쪽으로 이동하면 이를 피해 자동으로 우회합니다.

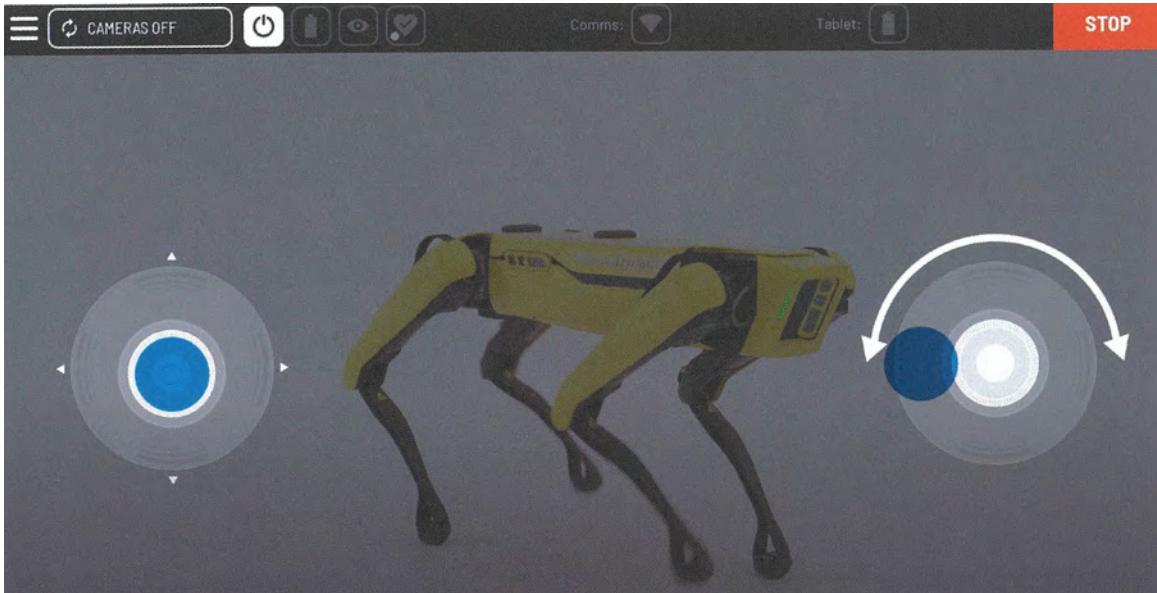


그림 1.9: Spot 리모컨을 사용하여 왼쪽 조이스틱은 앞뒤와 좌우 이동을, 오른쪽 조이스틱은 방향 전환을 조작합니다. (이미지: Boston Dynamics의 YouTube 영상 캡처)

또한 “Touch to go”라는 기능이 있어, 화면에서 원하는 위치를 터치하면 자동으로 그 위치로 이동합니다 (그림 1.10). 앞쪽 카메라로 촬영된 화면을 터치하면 앞으로 이동하고, 측면 카메라 화면을 터치하면 해당 방향으로 옆으로 움직입니다. 후면 카메라 화면을 터치하면 뒤로 이동하여 목표 위치에 도달합니다. 동시에 장애물이 있으면 자동으로 피해서 움직입니다.



그림 1.10: Spot리모컨의 “터치 투 고” 작동 화면  
화면에서 원하는 위치를 터치하면 자동으로 그 위치로 이동합니다. (이미지:Boston Dynamics의YouTube 영상 캡처)

워킹 모드에서는 계단을 오를 수 있지만, 계단을 오를 때는 2 m 이내에서 계단 모드로 변경하는 것이 좋습니다. 계단 모드에서는 항상 전방과 위쪽을 인식할 수 있도록 기기가 기울어집니다.

이동하지 않고 제자리에서 위치를 바꿀 수 있는 모드도 있습니다. 이 모드에서는 왼쪽 조이스틱을 위아래로 움직이면 높이를 조절할 수 있고, 좌우로 움직이면 몸의 좌우 기울기를 조정할 수 있습니다. 오른쪽 조이스틱을 사용해 앞뒤로 기울기를 조정하고, 좌우로 돌리면 몸체를 회전시킬 수 있습니다.

### 1.2.3 컴퓨터에서 조작하기

전용 리모컨 외에도, PC에 Spot 연결 소프트웨어를 설치하면 프로그래밍을 통해 Spot을 조작할 수 있습니다. 이 소프트웨어는 개발사인 Boston Dynamics에서 제공합니다. Python을 이용해 대화형으로 직접 제어하거나, 스크립트를 실행하여 사용할 수 있습니다.

WiFi 또는 유선 LAN을 통해 PC와 연결할 수 있습니다. WiFi로 연결 시, Spot을 액세스 포인트로 설정하거나 클라이언트로 동작시킬 수 있습니다. Spot이 클라이언트로 동작할 때 SSID를 로밍으로 설정하면, 넓은 범위에서도 동일한 액세스 포인트에 연결된 PC에서 Spot을 제어할 수 있습니다.

## 1.3 외부 확장 기능

### 1.3.1 종합 안내

Spot의 뒷면에는 외부 장치를 장착할 수 있는 레일이 있습니다 (그림 1.11). Boston Dynamics에서 판매하는 옵션 부품, 정품 액세서리, 바구니 등을 이곳에 나사를 이용해 고정할 수 있습니다. 뒷면에는 Spot과 장치를 연결할 수 있는 두 개의 단자도 있어, 이를 통해 전원 공급과 네트워크 통신 등을 할 수 있습니다.



그림 1.11: Spot의 외부 확장 기능 뒷면에는 레일이 있어 Payload를 장착할 수 있습니다. 그리고 두 개의 단자가 있어 Payload와 본체 간의 전기적 연결이 가능합니다.(사진:가토 야스시)

예를 들어, 뒷면에 온도 센서를 설치하면 순찰 도중 환경 온도를 기록할 수 있습니다. 또한, 뒷면에 PC와 센서 정보를 분석하는 프로그램을 함께 설치하면 온도 이상이 감지된 장소를 관리자에게 알리는 시스템을 구축할 수도 있습니다.

Spot의 뒷면에 장착되는 물체는 Boston Dynamics에서 'Payload'라고 부릅니다. 적재 가능한 Payload의 총 무게는 최대 14 kg을 넘지 않아야 합니다. 추천되는 길이는 850 mm, 폭은 190 mm 이내입니다. 높이의 경우, 무게 중심이 낮게 위치하도록 해 Payload에 의해 높이 방향의 무게 중심 변화가 크지 않도록 해야 합니다.

### 1.3.2 가이드 레일 설치

Payload 장착을 위한 가이드 레일은 Spot의 뒷면 왼쪽과 오른쪽에 위치합니다 (그림 1.12)에 표시되어 있습니다. 레일은 알루미늄 합금 소재로 제작되었습니다. M5 규격의 T형 슬롯 후방 너트를 레일에 삽입한 뒤, 위쪽에서 M5 볼트로 고정합니다.

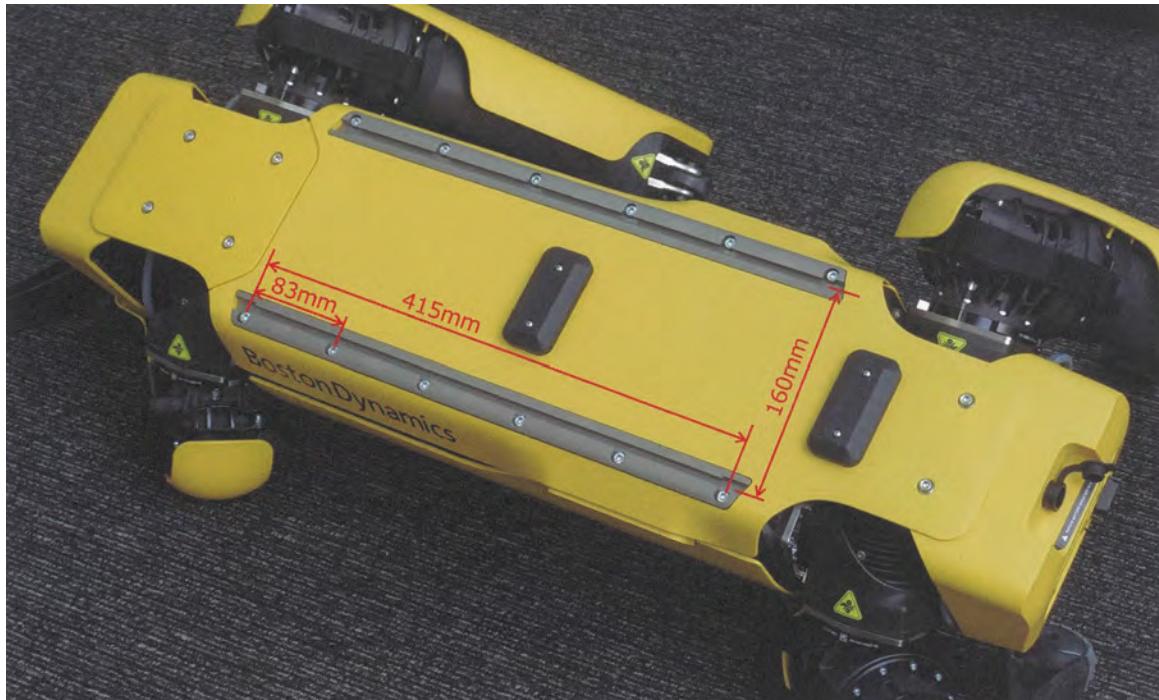


그림 1.12: Payload 장착용 가이드 레일 T형 슬롯 후방 너트를 레일에 삽입하고, 위에서 볼트로 단단히 고정합니다. 레일을 본체에 고정하는 볼트의 머리는 위치 결정 핀으로 사용할 수 있습니다.(사진:가토 앤서니)

또한, 이 가이드는 6개의 볼트로 83 mm 간격으로 본체에 고정되어 있습니다. 각 볼트의 머리에는 4 mm 직경의 핀 홀이 있어 Payload를 정확하게 위치시킬 때 사용할 수 있습니다.

### 1.3.3 외부 인터페이스

Spot의 후면에는 25핀 D타입 커넥터가 있어 Payload와의 전기적 연결에 사용됩니다. 이 커넥터는 세 가지 주요 기능을 제공합니다: (1)전원 공급, (1)통신, (1)안전 (그림 1.13, 그림 1.14).

- (1)전원 공급은 35~59 V, 핀당 3 A입니다. 최대 전력은 포트당 150 W입니다.
- (2)1000BASE-T를 통한 통신 외에도, 1 Hz 펄스(정확도 5 PPS)가 동기화를 위해 제공됩니다.
- (3)안전 기능으로 Spot의 모터 전원 차단과 Payload의 전원 차단 기능이 포함되어 있습니다.



그림 1.13: Payload연결용 단자이 단자는 25핀D타입 단자입니다. 핀 번호는 오른쪽 상단에서 1 ~ 13까지, 오른쪽 하단에서 14 ~ 25까지 지정됩니다. 전원, 1000BASE-T, 안전 기능 등을 지원합니다.(사진:가토 야스시)

引脚号		
		☒
▼	☒	☒
•	☒	☒☒
☒	☒ °☒	当此引脚和引脚 18 之间建立导通时, Payload电源启用
9	: °☒ "	当此引脚和引脚 19 之间建立导通时, 机器人的电机电源启用
@	도 !	A?BCD
&	E	F
;	G	有效载荷地面参考。每个引脚支持3A的返回电流
	G	有效载荷地面参考。每个引脚支持3A的返回电流
	E	F
	XY	供电。在每个引脚上提供 3A
▼	XY	供电。在每个引脚上提供 3A
•	^	
☒	^☒	^☒
9	☒	☒
@		☒☒
&	☒☒	当此引脚和引脚 5 之间建立导通时, Payload电源启用
;	: - °☒ -	当此引脚和引脚 6 之间建立导通时, 机器人的电机电源启用
	E !	F
	G	有效载荷地面参考。每个引脚支持3A的返回电流
	G	有效载荷地面参考。每个引脚支持3A的返回电流
▼	E	F
•	XY	供电。在每个引脚上提供 3A
☒	XY	供电。在每个引脚上提供 3A

그림 1.14: Payload연결용 단자 핀 배열 Ethernet통신 및 전원 공급 지원(표:Nikkei Cross Tech보스턴 다이나믹스 자료 참고)

### 1.3.4 확장용 Payload

보스턴 다이내믹스는 Spot을 위한 확장 Payload를 다음과 같이 제공합니다(2021년 8월 1일 기준).

- INSPECTION
- 열화상
- 엣지 CPU
- 엣지 GPU
- 라이더
- 스팟 암

이외에도 사용자의 필요에 따라 맞춤형 Payload를 개발하거나 설치할 수 있습니다. Payload와 Spot의 핵심 소프트웨어는 이더넷을 통해 IP로 통신합니다.

#### INSPECTION

INSPECTION은 확장형 Payload로, 사람이 직접 들어가기 어렵거나 위험한 환경에서 필요한 데이터를 수집할 수 있도록 설계되었습니다 (그림 1.15). 기본 360° 컬러 카메라인 Spot CAM+ 외에도, 세밀한 영상을 확보할 수 있는 짐벌 줌 카메라가 추가로 탑재되어 있습니다. 내장 고감도 마이크로 원격 청음 검사도 가능하며, 내장 스피커로 원격 통신도 지원합니다. 가격은 29750달러입니다.

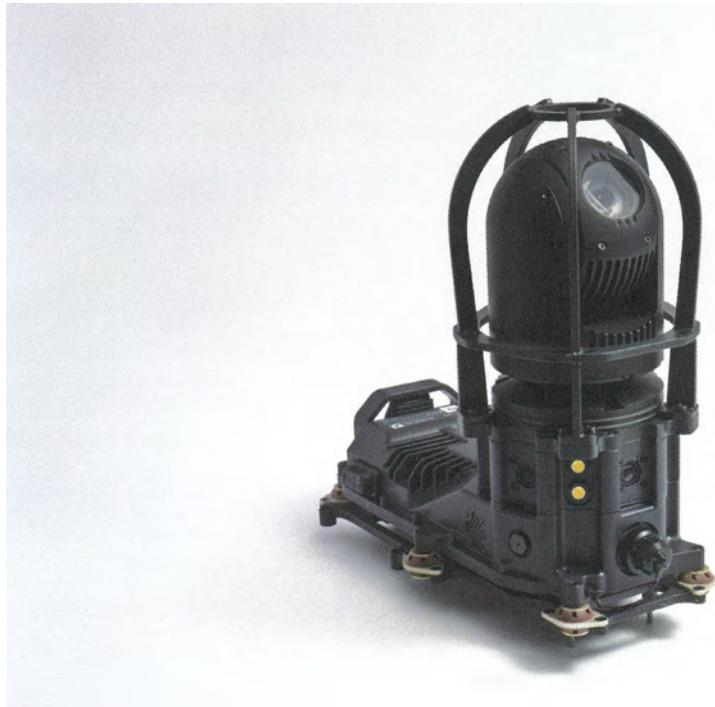


그림 1.15: INSPECTION 외부 장치의 외관 Spot CAM+ 360° 카메라에 짐벌 줌 카메라가 장착되어 있습니다.(사진:Boston Dynamics)

## THERMAL

INSPECTION에 연결되는 IR(적외선) 카메라가 탑재된 확장페이지로드입니다 (그림 1.16). 가격은 38950달러입니다.



그림 1.16: THERMAL외부 장치의 외관 INSPECTION에도 적외선 카메라가 장착되어 있습니다.(사진: Boston Dynamics)

## EDGE CPU

Spot에서 전용 애플리케이션을 실행할 수 있는 확장Payload(그림 1.17)입니다. Spot은 외부 지시를 받고 자율적으로 경로를 따라 움직이는 기능 외에는 별도의 기능이 없으므로, 전용 소프트웨어를 실행하려면 외부 컴퓨터가 필요합니다. 예를 들어, LiDAR를 활용하면 주변 환경을 인식하면서 자동으로 이동하는 애플리케이션을 구현할 수 있습니다. 기본적으로 Ubuntu 18.04가 설치되어 있습니다. 외부 연결 포트로는 USB 3.0 포트 × 3, USB 2.0 포트 × 2, HDMI 포트 × 1, 이더넷 포트 × 1, RS-232C 포트 × 1, DisplayPort × 1이 있습니다. 가격은 3925달러입니다.



그림 1.17: EDGE CPU외부 장치의 모습

## EDGE GPU

고성능 연산 작업(예: Spot 머신러닝)을 실행하기 위한 확장 페이로드(그림 1.18)입니다. 인텔의 CPU “Xeon E3-1515M”과 미국 NVIDIA GPU “Quadro P5000”이 탑재되어 있으며, SDK가 사전 설치된 Ubuntu 18.04가 제공됩니다. USB 3.0(Type-C) 포트 2개, USB 3.0(Type-A) 포트 2개, HDMI 포트 1개, 이더넷 포트 1개, RS-232C 포트 1개가 장착되어 있습니다. 내부에는 mini PCI Express 슬롯이 하나 있습니다. 가격은 24,500달러입니다.



그림 1.18: EDGE GPU외부 장치 외관 고도의 연산이 필요한 전용 애플리케이션(예: 머신러닝)을 실행할 수 있습니다.(사진:Boston Dynamics)

## LIDAR

넓은 공간에서 자율 주행이 가능한 확장형pei로드입니다(그림 1.19). 최대 100 m까지의 거리 이미지를 획득할 수 있습니다. Spot 본체는 4 m 이하 거리의 이미지만 얻을 수 있으며, 주로 집이나 사무실 등 좁은 공간에서의 자율 주행에 적합합니다. 창고나 야외처럼 넓은 공간에서는 이 LIDAR 옵션이 필요합니다. 이 LIDAR는 미국 Velodyne에서 제조되었습니다. EDGE CPU도 포함되어 있습니다. 가격은 18450 달러입니다.



그림 1.19: LIDAR외장 기기 모습 넓은 창고와 야외 공간에서 자율 주행에 꼭 필요합니다.(사진: Boston Dynamics)

## Spot Arm

Spot Arm은 Spot의 앞쪽 상단에 장착되는 확장형 페이로드입니다. 뱀의 입처럼 생긴 집게가 달린 6축 로봇 암으로 (그림 1.20)입니다. 집게 내부에는 4K 카메라와 조명이 탑재되어 있어, 집은 물체를 확인할 수 있습니다 (그림 1.21). 물건을 직접 끌지 않고도 옮길 수 있고, 잡은 물건을 등 쪽 바구니에 담을 수 있습니다. 또한 문 손잡이를 돌려 문을 열거나, 밸브를 열고 닫는 기능도 제공합니다. 사람이 들 수 있는 크기의 물건이라면 집게로 집을 수 있습니다. 가격은 미정이며, 구매를 원할 경우 Boston Dynamics 영업팀에 문의해야 합니다.



그림 1.20: 손잡이 조작이 가능한Spot Arm은 손잡이나 핸들을 돌려 문을 열고, 통과할 수 있습니다. 또한 여러 물건을 조립해 등 쪽 바구니에 담거나, 분필로 길 위에 글씨나 그림을 그릴 수도 있습니다.(이미지:Boston Dynamics의YouTube영상 캡처)

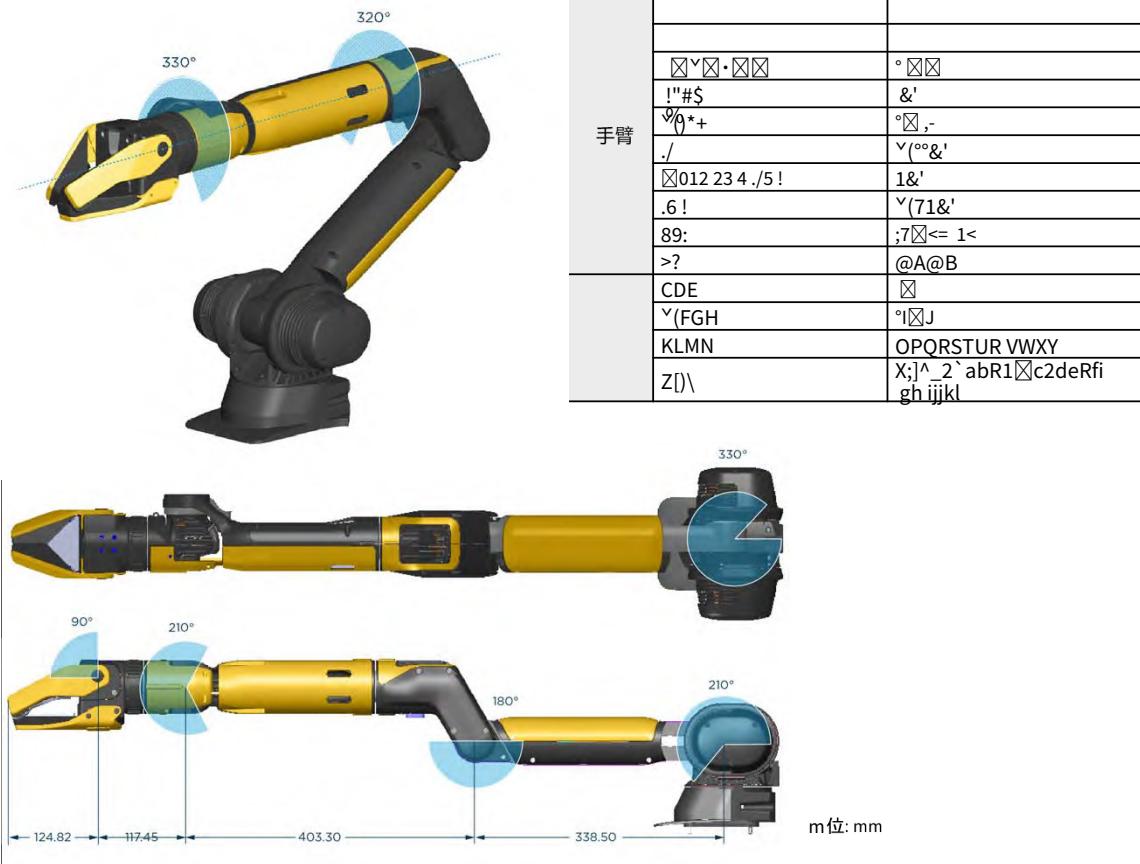


그림 1.21: 6축의 로봇 팔과 그립퍼로 구성 Spot의 팔에는 6개의 축이, 그립퍼에는 1개의 축이 있어 총 7개의 자유도를 가집니다. 그립퍼에는 거리 이미지 센서와 4K카메라가 장착되어 목표 설정에 활용할 수 있습니다.(이미지: Boston Dynamics 웹페이지, Digital Blast가 Boston Dynamics 정보를 기반으로 제작한 표)

주의: 팔이 장착된 상태에서 Spot에 가까이 다가가면 안 됩니다. 이는 사람과 협업할 수 있는 안전 기능이 없기 때문입니다. Spot 본체에는 근접 인식 기반의 충돌 방지 기능이 있으나, 팔에는 해당 기능이 없습니다. 또한 이동 경로에 장애물이나 사람이 있어도 팔이 접촉을 막는 충돌 방지 기능을 제공하지 않습니다. 오직 팔, Spot 본체, 그리고 본체에 장착된 Payload만 충돌 회피 기능을 갖추고 있습니다.

Spot 본체와 팔 자체를 충격으로부터 보호하는 기능도 있습니다. 이 기능은 '힘 제한기'라고 불리며, 예를 들어 팔이 무언가에 부딪혔을 때 본체에 과도한 힘이 가해지는 것을 막기 위해 자동으로 팔 토크를 제한해 균형이 무너지지 않게 합니다. 또한 물체를 들어올릴 때 너무 무거우면 팔이 자동으로 동작을 멈춥니다. 이 기능은 Spot의 손상을 막기 위한 것으로, 외부 인원이나 사물의 안전을 위한 기능으로 사용할 수 없습니다.

## 제 2장 소프트웨어 개발 플랫폼

## 2.1 전체 개요

### 2.1.1 운영 모드

전용 리모컨이 아닌 다른 기기를 사용해 Spot을 제어하려면 WiFi 또는 이더넷 케이블을 통해 PC 등에서 실행 중인 프로그램으로 Spot의 서비스를 호출해야 합니다.

서비스 API를 호출하려면 gRPC라는 프로세스 간 통신 방식이 필요합니다 (그림 2.1)입니다. gRPC는 구글에서 자체 서비스 개발을 위해 만든 RPC(Remote Procedure Call) 기반의 클라이언트-서버 통신 프로토콜입니다.

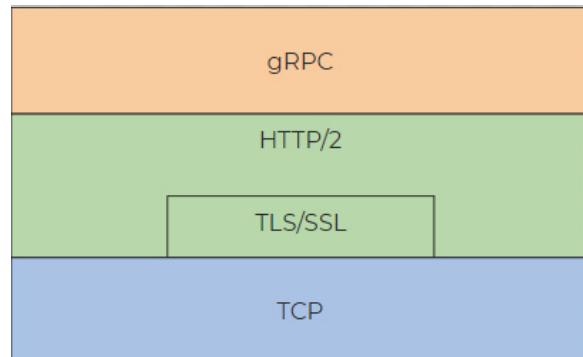


그림 2.1: Spot의 프로토콜 스택  
외부 프로그램과 Spot의 서비스는 클라이언트-서버 모델에서 gRPC를 통해 통신합니다.(이미지:Boston Dynamics)

gRPC는 다양한 언어와 플랫폼에서 독립적으로 작동하도록 설계되었으며, 여러 언어에서 클라이언트와 서버를 구현할 수 있는 오픈 소스 라이브러리를 제공합니다. 예를 들어, C · C++ · C# · Objective-C · Java · Python · Node.js · Ruby 등 다양한 환경에서 활용할 수 있습니다. 이 프로토콜 스택은 HTTP를 기반으로 한 구조를 가지고 있습니다. 예를 들어, Spot에는 Python 개발 패키지가 마련되어 있어서 gRPC의 존재를 몰라도 Python으로 서비스를 호출하여 애플리케이션을 개발할 수 있습니다.

### 2.1.2 서비스 그룹

gRPC로 사용할 수 있는 Spot 서비스는 총 9가지 유형이 있으며, 각각은 “Graph Nav”, “Mission”, “Choreography”, “Docking”, “State”, “Control”, “Data”, “Base”, “Payloads”로 구성되어 있습니다(그림 2.2).

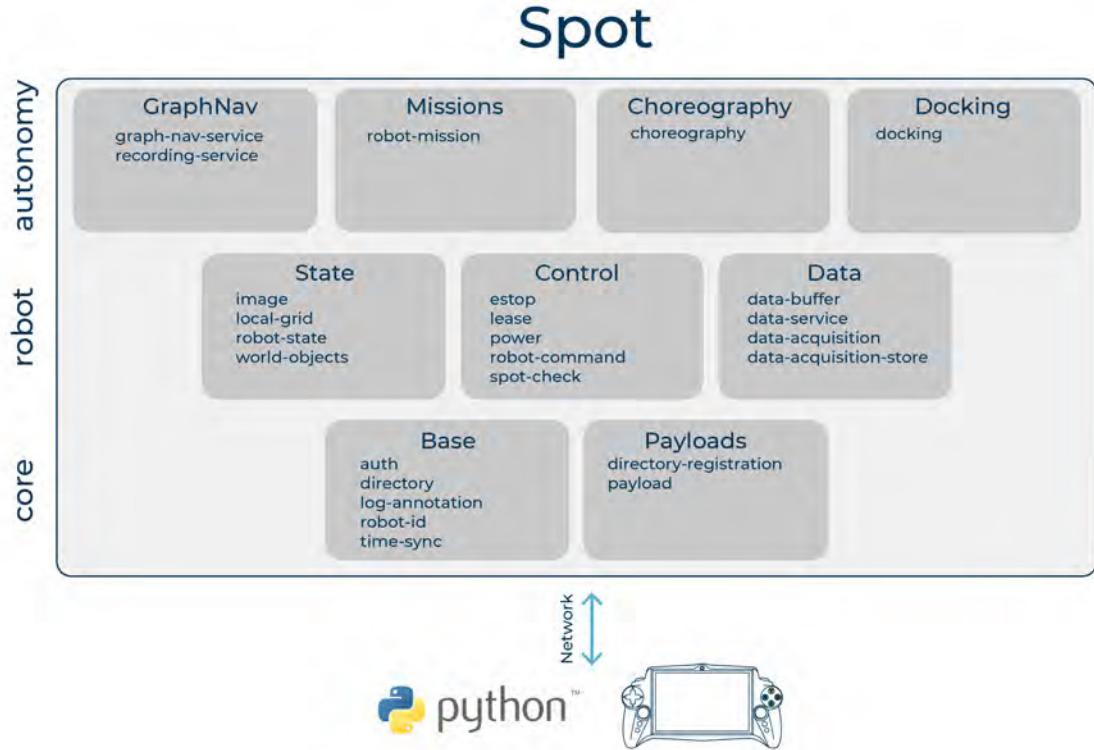


그림 2.2: Spot 서비스 그룹 9종에 새로운 Arm 서비스가 추가되었습니다.(이미지: Boston Dynamics)

Spot을 프로그래밍할 때, 이러한 서비스들을 호출하면서 다양한 작업을 함께 수행하게 됩니다. 또 2021년 2월에는 'Arm' 서비스가 새롭게 추가되어 로봇 팔을 조작하는 선택적 기능으로 사용할 수 있게 되었으며, 이를 포함해 총 10가지 서비스가 제공됩니다.

## 2.2 서비스

### 2.2.1 GraphNav

GraphNav는 Spot의 위치 및 이동과 관련된 서비스입니다 (그림 2.3). 사전에 등록된 여러 지점과 순찰 경로의 지도(그래프) 데이터를 기반으로 Spot이 자율적으로 이동할 수 있습니다. 지도는 Spot이 원하는 순찰 경로를 따라 이동하며 기록한 데이터로 생성됩니다. Spot에는 "Autowalk"라는 기능이 있어, 미리 설정된 경로를 따라 이동할 수 있는데, 이 기능이 기본 서비스입니다.

	ÿ
	ÿ ☐☒ .☒ ☐☒ “ÿ

그림 2.3: GraphNav서비스의 주요API로 지도를 생성하여 Spot을 제어하고, 이동 관련 서비스를 제공합니다.(이미지: DigitalBlast, Boston Dynamics 자료 기반 제작)

GraphNav 서비스를 사용하려면 아래의 네 단계를 진행해야 합니다.

- (1) Spot을 이동시키며 지도를 기록합니다.
- (2) 등록된 지도를 Spot에 업로드합니다.
- (3) Spot의 현재 위치를 지도에서 초기화하기
- (4) Spot에게 지도의 지정된 위치로 이동하도록 지시하기

### 2.2.2 Mission

Mission은 동작 트리를 활용해 Spot의 첨단 자율 작업을 지정하는 서비스입니다(그림 2.4). 동작 트리는 GraphNav를 따라 목적지까지 이동하거나 도착 지점에서 이미지를 촬영하는 등의 작업을 묘사합니다. 동작 트리를 활용하면 여러 단순 작업을 순차적으로 실행할 수 있을 뿐만 아니라, 배터리 잔량이 부족할 경우 Spot을 도킹 스테이션으로 복귀시키는 등 복잡한 동작도 지정할 수 있습니다.

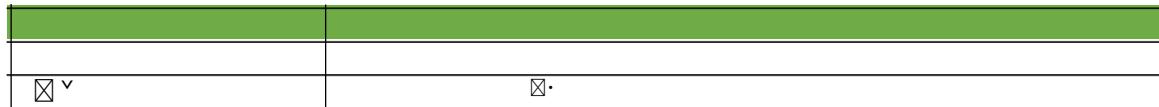


그림 2.4: Mission서비스의 주요API로 동작 트리를 활용한 자율 이동 시나리오를 구현할 수 있습니다.(이미지:DigitalBlast가 Boston Dynamics 자료를 참고하여 제작)

Autowalk은 이Mission과GraphNav을 통해 작동합니다.

### 2.2.3 안무

Choreography는 사용자가 스크립트 동작을 만들어 Spot에게 춤을 추게 할 수 있는 서비스입니다. 여러 동작을 조합하거나 동작의 세부 설정을 변경하여 다양한 퍼포먼스를 연출할 수 있습니다. 단, 이 서비스는 안전 기능이 적용되어 있지 않아 시스템이 불안정해질 수 있으므로 일반에 공개되지 않으며, 특별 허가를 받은 개발자만 사용할 수 있습니다.

## 2.2.4 도킹

Spot Enterprise는 Spot의 최신 버전으로, SpotDock라는 도킹 스테이션과 연동되어 사용할 수 있습니다. 도킹 시 전원이 공급되고 Spot에서 데이터를 내려받을 수 있습니다 (그림 2.5). Docking은 Spot과 SpotDock의 도킹 상태를 관리하고 제어하는 서비스입니다.



그림 2.5: Docking 서비스의 주요 API는 Spot Dock를 통해 도킹과 상태 관리를 할 수 있습니다.(이미지:DigitalBlast가 Boston Dynamics 자료를 바탕으로 제작)

### 2.2.5 상태(State)

State는 Spot의 현재 물리 상태, 카메라로 촬영한 이미지, 주변 지형 및 장애물 등 다양한 정보를 실시간으로 확인할 수 있는 서비스입니다 (그림 2.6). 이러한 상태 정보를 활용하여 Spot의 동작을 결정할 수 있습니다.

	ÿ
☒	☒ÿ•☒ °☒ I" #\$%& '!()*+ÿ /01 2ÿ 34 56ÿ8 & v ☒
	ÿ*.ÿ->?@A BC*D:EFÿ HIJB KLEHÿ. MNO P D:

그림 2.6: State서비스의 주요API를 통해 주변 환경 정보를 수집하고 로봇의 상태를 파악할 수 있습니다.(이미지:DigitalBlast는 Boston Dynamics 자료를 기반으로 제작함)

### 2.2.6 제어(Control)

Control은 Spot의 모터를 켜고 끄거나, 기동, 앓기, 이동, 긴급 정지, 기능 점검 등 다양한 동작을 가능하게 하는 서비스입니다 (그림 2.7). Spot을 이동시킬 때는, 목적지 위치와 이동 속도를 파라미터로 지정하여 조작할 수 있습니다.

	ÿ
	&#171;ÿ!&#172;&#173;&#174;&#175;&#176;&#177;&#178;&#179;&#170;
ÿ	ÿ !&#171;&#172;&#173;&#174;&#175;&#176;&#177;&#178;&#179;&#170;

그림 2.7: Control서비스의 핵심API를 통해 Spot을 직접 조작할 수 있습니다.(이미지: DigitalBlast가 Boston Dynamics 자료를 바탕으로 제작함)

예를 들어, 원쪽 앞에 위치한 어안 카메라(frontleft\_fisheye)를 사용할 때, 카메라 렌즈와 수직 방향이 모두 z축을 가리킵니다. x축과 y축은 이미지의 가로/세로 크기를 기준으로 렌즈 위치에 맞춰 설정할 수 있습니다. x = 0, y = 0 와 z = 1 m의 좌표는 렌즈의 중앙에 위치하며, 카메라가 바라보는 기준점에서 1 m 앞에 해당합니다. 이러한 좌표계의 위치는 API를 통해 서로 변환할 수 있습니다.

Spot에는 Spot 자체와 주변 사물을 나타내는 좌표계가 존재하며, 위치와 회전 정보는 이 좌표계를 기반으로 설명됩니다 (그림 2.8). Spot은 x축, y축, z축을 활용해 3D 공간을 인식합니다.

ÿ	
	ÿÿÿ
	ÿÿÿ !#ÿÿÿ
	ÿÿÿ \$%ÿÿÿ
	ÿÿÿ \$ÿÿÿ &'ÿÿÿ
	ÿÿÿ \$ÿÿÿ 컨트롤
	ÿÿÿ 기본 제어 기능 컨트롤 동작 실행
	ÿÿÿ 고급 제어 및 이동 컨트롤 동작 실행
제어	ÿÿÿ 컨트롤 프레임 ?@컨트롤ABC\$DEF GHIJ. KLM@NOJPLQR ;ÿÿÿ 컨트롤AB ÿÿÿ \$%NOJ;ÿÿÿ ST FU.

그림 2.8: Spot의프레임에는 여러 종류의프레임이 있어 주변 환경을 표현합니다.(이미지:DigitalBlast가 Boston Dynamics 자료를 기반으로 제작함)

이동은 세 가지 요소( $x, y, z$ )로 이루어진 벡터로 표현되며, 회전은 좌표축 방향의 변화를 나타내는 사원수( $w, x, y, z$ )로 표시됩니다. 사원수는 네 개의 값으로 3차원 벡터의 방향과 회전을 효과적으로 표현할 수 있어, 회전 연산을 더욱 쉽게 계산할 수 있습니다.

### 2.2.7 데이터

Data는 다양한 센서로부터 데이터와 이미지를 수집하여 Spot의 메모리에 저장하는 서비스입니다 (그림 2.9).

	☒ yy
▼☒☒	☒·☒☒°☒

그림 2.9: Data 서비스의 주요API는 Spot이 수집한 데이터를 처리할 수 있습니다.(이미지: DigitalBlast가 Boston Dynamics의 자료를 기반으로 제작)

이 서비스는 클라이언트에서 Spot의 원격 제어 모드와 녹화된 작업 재생을 통한 자동 이동 모드를 모두 제어하는 데 사용할 수 있습니다 (그림 2.10)입니다.

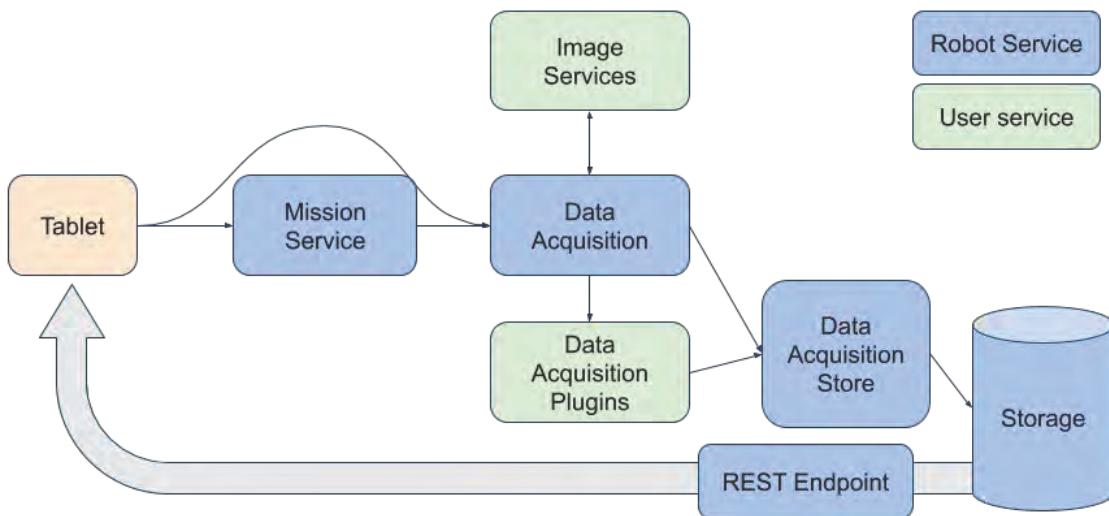


그림 2.10: Spot의 데이터 수집 모델은 최종적으로 Spot이 수집한 데이터를 storage에 저장하고, REST를 통해 단말기로 전송합니다.(이미지: Boston Dynamics)

데이터 수집 절차는 다음과 같습니다.

(1) 시스템 초기화 중에 데이터 수집 서비스(Data Acquisition Service)는 이미지 서비스(Image Service)와 데이터 수집 플러그인 서비스(Data Acquisition Plugin Service)에서 캡처 기능 목록을 통합합니다.

플러그인

(2) 사용자가 이 목록에서 동작을 설정합니다.

- (3) 컨트롤러 또는 임무 서비스(Mission Service)가 데이터 획득 서비스에 요청을 보내 데이터를 받아옵니다.
- (4) 데이터 수집 서비스가 해당 Image 서비스와 데이터 수집 플러그인 서비스에 요청을 보내 데이터를 수집합니다.
- (5) 수집된 데이터는 데이터 수집 저장 서비스(Data Acquisition Store Service)를 통해 데이터 캐시 서비스로 전송됩니다.
- (6) 데이터 캐시 서비스는 수집된 데이터를 파일로 저장하여 REST 인터페이스를 통해 다운로드할 수 있도록 합니다.

## 2.2.8 Base

Base는 사용자 인증, 서비스 탐색, 시간 동기화 등 Spot 운영에 필수적인 핵심 서비스를 포함하고 있습니다 (그림 2.11). Spot을 시작할 때나 각종 서비스를 사용하기 전에 이 서비스를 이용하면 다양한 기능을 호출할 수 있습니다.

베이스 인증	기본
	베이스 인증 서비스!" #연결 & 기능 ()*
	+ 기본. /01 기능
베이스 인증	234 5# 5&5 67☒89;; 5

그림 2.11: Base서비스의 주요API는 로봇 서비스 연결을 위한 인증과 목록 등의 기능을 제공합니다.(이미지:DigitalBlast가 보스턴 다이내믹스 자료를 바탕으로 제작)

## 2.2.9 페이로드

페이로드는 Spot에 연결되는 외부 장치입니다. Spot에는 최대 두 개의 페이로드와 한 개의 로봇 팔을 연결할 수 있습니다. 페이로드 서비스는 연결된 장치와 데이터를 주고받거나 Spot이 제공하는 다양한 기능을 사용할 때 이용됩니다 (그림 2.12)입니다.

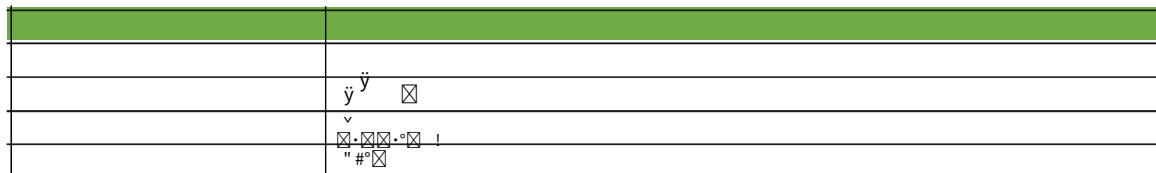


그림 2.12: Payloads서비스의 주요API는 Payload 관리 및 추가 등 다양한 기능을 제공합니다.(이미지: DigitalBlast, Boston Dynamics 자료 기반 제작)

## 2.2.10 Arm

Arm에는 ‘Manipulation’ 서비스가 있어 집게로 물체를 집을 수 있고, ‘Arm Surface Contact’ 서비스는 팔로 물체를 밀 때 사용하며, ‘Door’ 서비스는 문을 열고 통과할 때 활용됩니다 (그림 2.13).

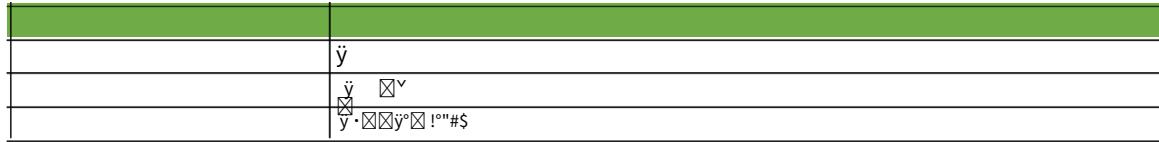


그림 2.13: Arm서비스의 주요API는 물건을 집거나, 팔을 움직이고, 문을 여는 등 다양한 기능을 지원합니다.(이미지:DigitalBlast과 Boston Dynamics 자료를 바탕으로 제작)

Manipulation서비스는 목표 대상을 집거나 팔을 움직이고, 집은 대상을 놓는 기능을 제공합니다. 팔만으로 담을 수 없는 위치에 물건이 있을 경우, Spot의 몸체를 움직여 목표물에 가까이 접근하는 기능도 포함되어 있습니다.

ArmSurfaceContact서비스는 정밀한 위치 이동이 필요할 때 사용되며, 로봇 팔로 물체를 밀거나 그리퍼로 분필을 잡아 글씨를 쓰거나, 걸레로 표면을 닦을 수 있습니다.

Door서비스는 문과 관련된 정보를 입력하면 자동으로 문을 열고 통과할 수 있도록 지원합니다.

## 2.3 프로그래밍

### 2.3.1 프로그래밍 환경

2021년8월1일 기준, Spot 개발 키트는 Linux Ubuntu 18.04 LTS, Windows 10 및 MacOS 10.14를 지원합니다. Python의 경우, Python 3.6 또는 Python 3.7 버전이 호환됩니다. Spot 개발을 위해 pip(Python 패키지 설치 프로그램)를 이곳에 추가하세요.

pip를 추가하면, 사용자들은 Python의 shell에서 동일 네트워크에 있는 Spot에 접속해 명령을 보내고 스크립트를 실행할 수 있습니다.

pip 설치 관련 자세한 안내는 Boston Dynamics 공식 웹사이트의 QUICKSTART 페이지에서 확인할 수 있습니다.

(<https://dev.bostondynamics.com/docs/python/quickstart>)에서 확인하실 수 있습니다.

### 2.3.2 예제 프로그램

이 코드는 Spot 프로그래밍을 쉽게 이해할 수 있도록 만든 Python 예제입니다. RobotCommand 서비스를 활용해 Spot을 지정된 위치로 이동시키는 방법을 보여줍니다. 이 예제에서는 Spot이 앞으로 1m 이동한 후, 왼쪽 뒤 방향(뒤로 1m, 왼쪽으로 1m)으로 이동하도록 설정되어 있습니다.

실행 예제 프로그램은 그림 2.14에서 볼 수 있습니다.

```

模块的加载
[ import argparse
import math
import time
import bosdyn.client
import bosdyn.client.util
from bosdyn.client.robot_state import RobotStateClient
from bosdyn.client.robot_command import RobotCommandClient, RobotCommandBuilder, blocking_stand
from bosdyn.api import geometry_pb2 as geo
from bosdyn.client import math_helpers
from bosdyn.client.frame_helper import ODOM_FRAME_NAME, VISION_FRAME_NAME,
get_vision_tform_body
from bosdyn.client.lease import LeaseClient, LeaseKeepAlive

& def main():
parser = argparse.ArgumentParser()
bosdyn.client.util.add_common_arguments(parser)
options = parser.parse_args()
sdk = bosdyn.client.create_standard_sdk('RobotCommandMaster')
robot = sdk.create_robot(options.hostname)
robot.authenticate(options.username, options.password)
assert not robot.is_estopped(), "Robot is estopped. Please use an external E-Stop client. 25
"such as the estop SDK example, to configure E-Stop."
lease_client = robot.ensure_client(LeaseClient.default_service_name)
lease_client.acquire()
robot.time_sync.wait_for_sync()
lk = bosdyn.client.lease.LeaseKeepAlive(lease_client)
robot_state_client = robot.ensure_client(RobotStateClient.default_service_name)
robot_command_client = robot.ensure_client(RobotCommandClient.default_service_name)

&     1 ^/
blocking_stand(robot_command_cli +
[ vision_tform_body = get_vision_tform_body(
    robot_state_client.get_robot_state().kinematic_state.transforms_snapshot)
[ body_tform_goal = math_helpers.SE3Pose(x=1, y=0, z=0, rot=math_helpers.Quat())
vision_tform_goal = vision_tform_body * body_tform_goal

fi     robot_cmd = RobotCommandBuilder.synchro_se2_trajectory_point_command(goal_x=vision_tform_goal.x,
goal_y=vision_tform_goal.y,
goal_heading=vision_tform_goal.rot.to_yaw(),
frame_name=VISION_FRAME_NAME)
end_time= 2.0
robot_command_client.robot_command(lease=None, command=robot_cmd,
end_time_secs=time.time() + end_time)
time.sleep(end_time)

&         v   v   -   v   v   /
[ robot_state_client.get_robot_state().kinematic_state.transforms_snaps +
[     v   v   -   v
#7.
/3-48  -8  -9  -  v
; /++_cmd = RobotCommandBuilder.synchro_se2_trajectory_point_command(goal_x=odom_tform_
goal_y=odom_tform_goal.y,
goal_heading=odom_tform_goal.rot.to_yaw(),
frame_name=ODOM_FRAME_NAME)
end_time= 5.0
robot_command_client.robot_command(lease=None, command=robot_cmd,
end_time_secs=time.time() + end_time)
time.sleep(end_time)

@ if name == "__main__":
if not main():
sys.exit(1)

```

그림 2.14: Spot 조작 예제 프로그램이 프로그램을 실행하면, 앞으로 1m 이동한 뒤 뒤로 1m, 그리고 왼쪽으로 1m 이동합니다.(프로그래밍:DigitalBlast)

예시 프로그램은 “Robot State Service” 또는 “Robot Command Service”를 활용해 작성되며, 아래와 같은 구성으로 이루어져 있습니다.

(1) Spot의 상태 확인 및 로봇 명령RobotCommand 설정

(2)Spot을 작동시키고 일어서게 합니다

(3) Spot의 상태와 현재 위치를

확인합니다

(4)목적지 지정하기(앞으로1 m)

(5) 지정한 위치로 이동

(6) Spot의 상태와 현재 위치를

확인합니다

(7) 새로운 목적지 지정하기(뒤로1 m, 왼쪽으로1 m)

(8) 목적지로 Spot을 이동시키기

위에서 설명한 방식대로 Spot API를 프로그래밍으로 호출하면 원하는 동작을 수행할 수 있습니다. 더 다양한 API를 활용해 실제로 빛에 반응해 움직이거나, 자동으로 등록된 지점까지 걸어가거나, 이미지를 촬영하고 복귀하는 등 여러 응용 프로그램 개발도 가능합니다.

## 제 3장 동작 기능

## 3.1 일반 동작

### 3.1.1 이동 부품의 구조

Spot은 네 개의 다리(다리 구동 모듈)을 움직여 걸을 수 있습니다. 각 다리 구동 모듈에는 X축, Y축, 그리고 무릎축의 직선 운동 등 3가지 자유도가 있습니다. 사람의 팔을 예로 들면, 위팔을 가슴 쪽으로 펴고 접는 축이 X축, 팔을 몸 앞뒤로 돌리는 축이 Y축, 그리고 팔꿈치의 구부림과 펴짐이 무릎 축에 해당합니다. X축과 Y축은 모터가 직접 회전하여 기어를 통해 속도를 줄여 움직이고, "무릎"은 선형 액추에이터가 회전축을 따라 로드를 밀고 당겨 실제 생물의 근육과 유사하게 작동합니다.(그림 3.1)입니다.



그림 3.1: **다리 구동 모듈**한 다리에는 “X축”, “Y축” 그리고 “무릎”的 3가지 자유도 회전 관절이 있습니다. “X축”과 “Y축”은 모터 회전으로 직접 구동되며, “무릎”은 실제 근육처럼 로드를 밀고 당기는 선형 액추에이터에 의해 움직입니다.(사진:가토 야스시)

네 개의 다리 관절을 제어함으로써 서기, 걷기, 달리기, 뛰기 등 다양한 동작을 구현할 수 있습니다.

### 3.1.2 걷기 방법

Spot의 주요 작동 모드는 다음과 같습니다:(1) 서 있기,(2)정지(균형 유지),(3)걷기,(4)뒤집기 등 총 네 가지입니다.

그림 3.2에서 강아지가 엎드린 모습은 표준 전원 종료 상태입니다. 이 상태에서 전원을 켜고 '서기' 명령을 내리면, Spot은 즉시 일어납니다. 이것이 (1)에서 설명하는 동작입니다(그림 3.3). 이때 안정적으로 '서기'를 유지하는 제어가 작동하며, Spot을 밀거나 당기면 다리를 굽게 딛고 자세를 유지합니다. 갑자기 큰 힘이 가해져서 Spot이 넘어질 듯하면, 균형을 잡기 위해 넘어질 방향으로 이동해 자세를 바로잡습니다.



그림 3.2: 전원 투입 전 자세 전원을 켜기 전의 기준 상태입니다. 매뉴얼에 따르면, 2명이 각각 4개의 모서리에 있는 손잡이를 잡고 이 상태에서 전원을 켜면 됩니다.(사진:가토 야스시)



그림 3.3: 기립 자세 전원을 켜고 시스템이 대기 상태에 들어가면, '서기' 명령을 보내 Spot이 해당 위치에서 일어서서 대기합니다.(그림:가토 야스시)

이 상태에서 조이스틱을 조작하고 방향을 전환하면, Spot이 걷기 시작합니다 (그림 3.4). 평평한 바닥을 걸을 때는 오른쪽 앞다리와 왼쪽 뒷다리가 들리고, 이어서 왼쪽 앞다리와 오른쪽 뒷다리가 교차로 움직입니다. 이때 다리가 약간 안쪽으로 모이며, 두 다리로 서 있을 때 몸이 기울지 않도록 제어합니다. Spot은 게처럼 옆으로도 이동할 수 있으며, 이때도 앞뒤 다리를 대각선 방향으로 움직여 이동이 가능합니다. 발 디딤이 불안정한 곳에서는 한 번에 한 다리씩 들어올리며 걷습니다. 조종자는 리모컨으로 개별 다리를 직접 지정해 조작할 수는 없습니다.



그림 3.4: 걷고 있는Spot의 앞다리와 왼쪽 뒷다리가 들린 뒤, 왼쪽 앞다리와 오른쪽 뒷다리가 차례로 올라가며 대각선으로 교차해 걷습니다. (사진 제공: Nikkei Cross Tech)

조이스틱을 조작하면 Spot이 지정한 방향으로 움직입니다. 동시에, 5개의 딥 카메라로 주변을 감시해 장애물과의 충돌을 피하기 위해 멈추거나 우회합니다. 옆으로 피해도 전진할 수 있는 상황이라면 Spot은 앞으로 나아가고, 벽처럼 돌아갈 수 없는 장애물 앞에서는 정지합니다. 지정된 경로에 장애물이 있을 때 이를 회피하는 알고리즘은 핵심이지만, 그 내용은 블랙박스로 처리되어 사용자는 볼 수 없습니다. 실제 조작에서는 Spot이 언제 멈추고 언제 우회하는지 직접 검증이 필요합니다. 또한 Spot은 외부 PC의 명령으로 자동 운행이 가능하며, PC에서 보내는 명령으로 리모컨 조작을 대체할 수도 있습니다.

(3)에서 Spot의 보행 성능이 핵심 가치이지만, 실제로 움직이면 Spot은 미끄러운 바닥이나 다리 아래 장애물에 민감해서 자주 넘어집니다. 넘어질 때는 Spot이 발을 구르지만, 이때 주변 장애물은 고려되지 않습니다. 주변에 사람이 있을 경우 Spot이 발을 구르면서 사람과 부딪혀 다칠 위험도 있습니다.

Spot이 넘어지거나 뒤집힌 경우, 리모컨에서 복구 명령을 보내면 자동으로 몸을 뒤집어 일어납니다 (그림 3.5·그림 3.6·그림 3.7·그림 3.8)입니다. 이것이 바로 (4)번 자세 전환 모드입니다. 넘어졌을 때는 앞다리를 먼저 곧게 펴고, 몸을 바닥에 평평하게 한 뒤, 반대쪽 다리로 힘을 줘 몸을 뒤집습니다. 그런 다음 두 다리를 접어 초기 자세로 돌아갑니다. 여기서부터는 (1)번의 서기 모드로 전환하여 다시 일어납니다. 이처럼 (1)부터 (4)까지의 동작 모드를 조합해 Spot이 다양한 지면 환경에서 움직일 수 있도록 합니다.



그림 3.5: 넘어짐 복구(1) 완전히 뒤집힌 초기 상태.(사진:가토 야스시)



그림 3.6: 넘어짐 복구(2) 앞다리를 펴서 지지대로 사용.(사진:가토 야스시)



그림 3.7: 넘어짐에서의 회복(3)남은 다리를 지점 쪽으로 옮겨 몸을 들어 올립니다.(사진:가토 야스시)



그림 3.8: 넘어진 후 회복(4)몸을 회전시킨 뒤 다시 엎드린 자세로 돌아갑니다.(사진:가토 야스시)

### 3.2 비정상 상황에서의 동작

#### 3.2.1 이상 발생 시의 상황

앞서 언급된(3)번 걷기 모드의 품질을 조사하기 위해, 다양한 장소에서 걸음 테스트를 실시하기로 하였습니다. Spot이 사람이 갈 수 있는 곳을 자유롭게 이동할 수 있기 때문에, 사람이 접근하기 어려운 위험 지역에서도 조사·운반이나 일상적인 간단 작업을 대신할 수 있음을 보여줍니다. 이러한 아이디어에서 출발해, Spot이 실제로 어느 정도까지 활용될 수 있을지 다양한 장소를 상상하며 걸음 환경을 설계했습니다. 지형 조건으로는 평지, 경사로, 눈이 쌓인 곳, 수로 등 여러 특수 상황을 상정하여 테스트가 가능한 장소를 찾아 실험을 진행하였습니다.



그림 3.9: 해변을 따라 걷는Spot은 모래에 다리가 약간 파묻혀도 안정적으로 이동할 수 있습니다.(사진:Nikkei Cross Tech)



그림 3.10: 바위 지대를 오르는Spot은 접지력이 충분하다면 암벽 구간도 오를 수 있지만, 바위가 젖거나 미끄러우면 넘어질 수 있습니다. 또한 다리가 바위 사이에 끼이면 더 이상 움직이지 못하고 멈출 수도 있습니다.(사진:Nikkei Cross Tech)



그림 3.11: 계단을 내려가는Spot은 계단을 쉽게 내려갈 수 있지만, 여러 다리가 동시에 미끄러지면 제어를 잃을 수 있습니다.(사진: Nikkei Cross Tech)

보행 테스트 결과, Spot은 다리가 닿는 지점에서 미끄러지거나 걸려 넘어지는 일이 아주 쉽게 발생하는 것으로 나타났습니다(걸려 넘어짐). 큰비가 지난 직후, Spot이 젖은 바닥을 걷게 하자, 여기저기서 다리가 미끄러지면서 균형을 잃었습니다. 심지어 금속 계단처럼 물기가 없는 곳에서도 Spot은 쉽게 미끄러져 균형을 잃을 수 있었습니다.

Spot은 공장이나 건설 현장에서도 활용 가능성이 있어 보이지만, 넘어질 위험이 상당히 높습니다. 저희 실험에서는 혼자서 일어선 경우와 넘어지는 경우 모두 발생했습니다. 금속 계단에서는 Spot이 미끄러져 넘어진다면 계단 아래로 추락할 위험도 있습니다.

### 3.2.2 이상 발생 시 복구 동작

Spot을 조작하는 도중에 가장 자주 발생하는 예기치 못한 상황은 넘어짐입니다. 앞서 설명한 바와 같이 Spot의 다리 끝은 미끄러지기 쉽습니다. 미끄럼 방지 고무가 부착되어 있지만, 평평한 표면에서는 접지력이 충분하지 않습니다(그림 3.12). Spot은 다른 다리를 구르듯이 내딛고 자세를 바꿔 미끄러짐을 극복하려 하지만, 때로는 그 다리마저도 미끄러지기도 합니다. 이런 경우 Spot은 균형을 잃고 다리를 킁킁거리며 땅에 버티려고 시도하게 됩니다.



그림 3.12: Spot의 다리 끝 이탈리아 Vibram에서 제작함. 흙이 있는 고무를 장착했지만, 여전히 미끄러지기 쉬릅니다.(사진:가토 아스시)

말할 필요도 없이, Spot이 지면을 안정적으로 딛고 있을 때 전체적인 자세 안정성이 유지됩니다. 하지만 이 상태가 무너지면 Spot이 '복구를 시도할 때 동작이 크고, 마치 땅을 세게 차며 여기저기 움직이는 것처럼 보여서 사용자가 가까이 가기 어렵습니다. 이러한 복구 동작은 전적으로 Spot이 스스로 처리하며, 이 과정에서 조작자는 Spot의 움직임 방향을 지정하거나 제어할 수 없습니다.'

우리 실험에서 이것은 가장 바람직하지 않은 결과였습니다. 비에 젖은 나무 잔해를 넘어가려던 실험 중, Spot이 미끄러져 다리가 넘어지며 몸이 뒤집혔습니다. 몸을 돌려 일어나려는 과정에서, Spot의 다리가 다시 미끄러져 뒤로 밀리면서 결국 뒤쪽에 불어난 수로로 추락하고 말았습니다. 이때 조작자는 전혀 개입할 수 없었고, Spot이 완전히 자율적으로 움직였기 때문에 아쉽게도 수로에 빠지고 말았습니다. 신속한 "구조" 덕분에 메인 컴퓨터는 침수되지 않았으나, 각 다리의 구동 장치와 깊이 카메라는 모두 물에 잠겼습니다. Spot을 분해하여 세척하고 건조해 복구하려 했지만, 각 다리 구동부의 하중을 측정하는 센서 유닛의 스트레인 게이지가 침수되고 브리지 회로가 손상된 것으로 보여 복구에는 실패했습니다.

Spot을 실제로 운용할 때에는, 접지면에서 미끄러지거나 다리가 끼이는 등 예기치 못한 상황에서 어떻게 복구할 수 있을지에 대한 연구가 필요하며, 사고 발생 가능성을 미리 예측하는 것도 매우 중요합니다. 또한 작업 환경에 맞는 다리 끝 부분, 예를 들어 자동차 타이어가 눈길에서 스터드리스 타이어를 사용하는 것처럼, 현장에 적합한 접지력을 가진 다리팁을 준비하는 것도 고려해야 합니다.

## 제 4장 전체 구조

## 4.1 개요

### 4.1.1 분해 단계

Spot의 전체 구조를 이해하기 위해 분해를 진행했습니다. 그에 앞서 조사 대상의 기본 사양을 먼저 확인해야 합니다.

Spot의 제조사 Boston Dynamics에서 웹사이트에 공개한 사양은 그림 4.1에 나타나 있습니다. 매뉴얼에는 안전한 운반 등을 위해 “2명이 함께 들어야 한다”라는 안내가 있습니다. Spot의 크기는 길이 110 cm, 무게 31.7 kg으로, 1명이 옮기기에는 다소 부담스러운 무게입니다. 하지만 이번 조사에서는 적절한 작업대와 고정장치, 그리고 안전 보호 장비를 사용하면 1인 작업도 충분히 가능함을 확인했습니다.

项目		
整体规格		1100mm
		500mm
		840mm
		191mm
		31.7kg
	■	12
	ÿ■·■	1.6m/s
■°■	!"!#■	IP54
	工作温度	-20 ~ + 45°C
		±30°
	\$%	&'()*+,- ./01234567~6601
	ÿ	300mm
8	电	605Wh
	ÿ 9	58.8V
	::<= >	90?@
		180?@
	电	400W
	ÿA B	7A
	电时间	
CDEÿ	电	4.18kg
	ÿGÿ H	14kg
	ÿIJKL MNO	150W
	CDEÿNOP	2
	QRSTUVÿX1	M5×1.0
\$■	■^	■·■■
	°■	360°
	! "#	4m
	%& '((	WiFi ( ) *GHz)
	Ethernet	1000BASE-T

도 4.1: Spot Explorer 사양표 체형과 무게는 빅독과 동일합니다.(Nikkei Cross Tech가 Boston Dynamics 데이터를 바탕으로 제작)

분해 작업은 다음과 같은 순서로 진행됩니다. 먼저 배터리를 분리합니다 (도 4.2). 분해 절차는 (1) 상부 커버 분리, (2) 전후 프레임 분리, (3) 중앙 프레임 상단 분리, (4) 각종 하네스 분리, (5) 다리 분리, (6) 메인 컴퓨터 분리 순서로 진행됩니다 (도 4.3). Spot의 부품은 일반 산업 제품의 커버를 고정하는 클립이나 흙이 전혀 사용되지 않았습니다. 나사만 풀면 되고, 부위에 따라 벨크로만 떼어내면 손쉽게 탈착이 가능합니다.



그림 4.2: 분해 전 본체와 배터리 분리 상태  
크기는 팔로 한 번 감쌀 정도이며, 무게는 31.7 kg(배터리 포함 4.2 kg)입니다. 전원 전압은 58.8 V로, 분해 작업 시 무게와  
직류 고전압에 각별히 유의해야 합니다. 운반 시에는 네 곳의 '어깨 관절'과 '엉덩이 관절'에 있는 손잡이 끈을 잡아 손가락이 관절 사이에 끼이지 않도록 주의하세요.(사진:가토  
야스시)



그림 4.3: 본체 커버를 분리한 모습  
커버는 벨크로 등으로 고정되어 있어 손쉽게 분리할 수 있습니다.(사진:가토 야스시)

가운데 검은 상자는 중앙 프레임입니다. 사진 왼쪽에 보이는 메인 컴퓨터 모듈이 이 중앙 부분에 장착되어 있습니다. 해당 모듈은 한 개의 메인보드 위에 2개의 CPU 보드가 서브보드 형태로 실려 있습니다. CPU보드에는 미국 Intel사의 Xeon 프로세서가 탑재되어 있으며, 이외에도 512 G용량의 SSD와 32G DRAM(각 보드당)이 장착되어 있습니다. 사실상 고성능 워크스테이션 서버 두 대가 들어 있다고 볼 수 있습니다. 이 모듈의 하단(설치 보드의 받침대)은 마그네슘 합금으로 주조되어, 열전달을 고려하여 CPU 냉각용 구리 히트싱크의 방열판이 바깥쪽에 노출되어, 냉각 공기 통로로 드러나 있습니다.

장착된 냉각 팬은 2가지 크기로 총 8개입니다. 메인 컴퓨터의 발열과, 각 다리의 모터 하우징도 냉각 구조로 설계되어 개발 단계에서 방열 대책에 상당한 어려움이 있었음을 알 수 있습니다. 그 결과일 것입니다. 전원을 켜면 팬 소음이 꽤 크게 들립니다.

그림 4.4의 중앙 프레임 오른쪽에 위치한 배터리는 메인 컴퓨터 모듈 바로 아래에 직접 고정되어, 메인보드와 최단 거리로 연결됩니다.

각각의 4개의 다리는 모두 네 개의 M5볼트로 중앙 본체에 견고하게 고정됩니다. Spot에서는 앞쪽을 “f”(Front), 뒤쪽을 “h” (Hip), 왼쪽을 “l”(Left), 오른쪽을 “r”(Right)라고 합니다. 차체의 앞뒤 축, 방향은 “x”, 90도 횡축은 “y”, 그리고 팔꿈치(무릎)관절은 “Kn(Knee)”로 부릅니다. 이런 명명 규칙에 따라 오른쪽 앞 무릎 관절은 “fr.kn”, 왼쪽 뒤 앞뒤 축은 “hl.x”로 표시됩니다. 리모콘에 표시되는 오류 코드를 통해 어떤 부위에 문제가 생겼는지 확인할 수 있습니다.

**앞부분(얼굴 측면: 그림 4.4의 아래쪽)**에는 전방 감지를 위한 2개의 깊이 카메라 모듈과, 기기의 상태를 색상과 조명 패턴으로 나타내는 LED램프, 그리고 모터 냉각용 팬이 장착되어 있습니다.

**뒷부분(꼬리 쪽: 사진의 윗부분)**에는 후방 감지를 위한 1개의 깊이 카메라 모듈과 전원 및 모터 구동 스위치, 충전 단자, 이더넷 모듈 단자, 그리고 모터 냉각 팬 등 다양한 인터페이스가 배치되어 있습니다.

양쪽에는 감지용 카메라 모듈과 한 세트의 WiFi안테나가 각각 탑재되어 있습니다.

외부 커버는 노란색 수지로 사출 성형되어 도색 없이 사용됩니다. 쉽게 긁히고 떨어질 수밖에 없는 보호 커버에는 이 방식이 잘 어울립니다. 벨크로로 고정되어 탈착도 간편하죠. 다리 커버는 독특하게 설계되어 다리 프레임의 홈에 끼우고 돌린 뒤 스트랩으로 단단히 고정하는 구조입니다. 반면에 본체 커버 내부에는 여러 개의 기계식 나사가 쓰였는데, 재질이 부드러워 자주 분해·조립하다 보면 십자나 육각 구멍이 마모되어 더 이상 돌릴 수 없게 됩니다.

사진 속 중앙 프레임에 박힌 노란색 점들은 나사 삽입용 인서트입니다. 종류도 길이도 다양한 나사가 상당히 많아 분해·조립 시 관리가 번거롭습니다. 커버 디자이너와 본체 디자이너가 서로 달랐던 듯, 두 설계자의 방식과 감각 차이가 느껴집니다.

### 4.1.3 커버

Spot을 상징하는 노란색 부품은 바로 본체 커버입니다 (그림 4.5)입니다. 많은 산업용 제품의 커버는 클립이나 갈고리 형태의 고정 장치로 끼워 고정하는 방식이 일반적입니다. 제조사 입장에서는 불필요한 분해를 막는 것이 중요하지만, 억지로 분해를 시도할 경우 클립이 쉽게 부러지는 일이 자주 발생합니다. 그래서 분해할 때는 먼저 클립의 위치를 파악하는 것부터 시작하는 경우가 많습니다.

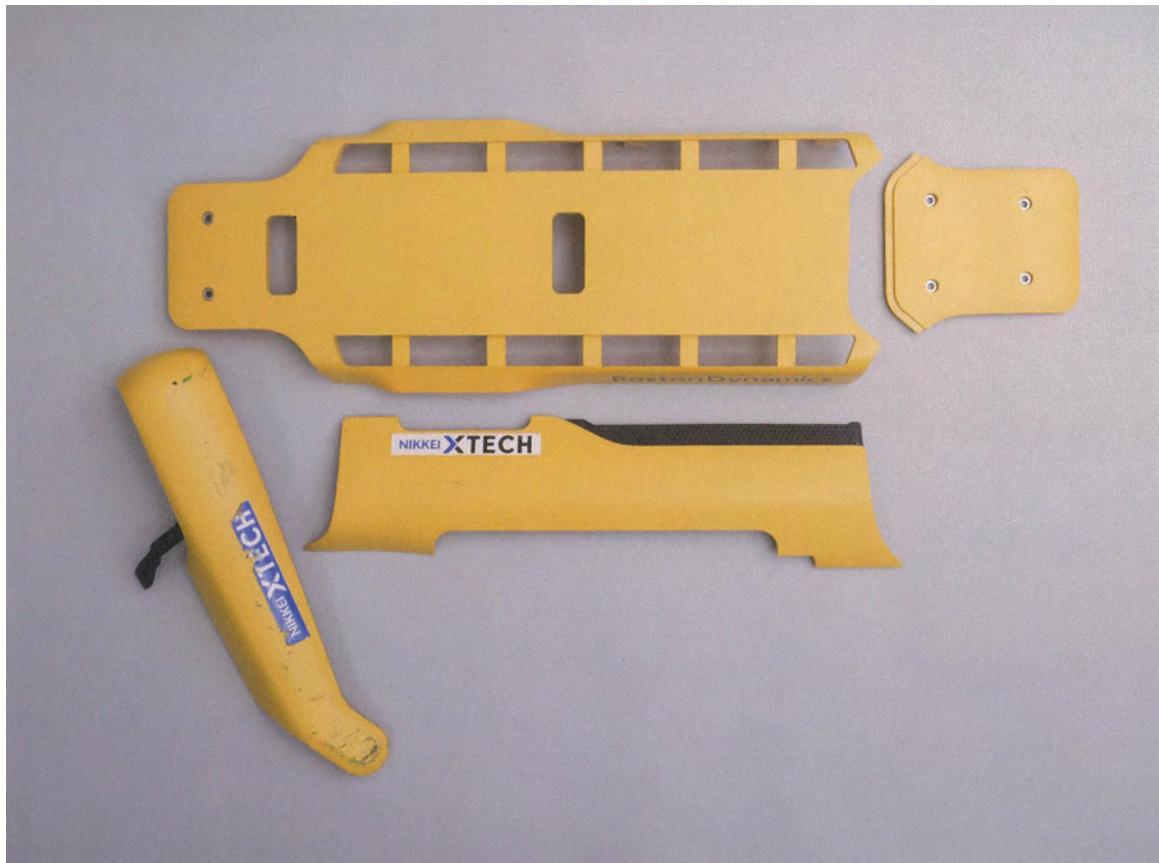


그림 4.5: Spot의 본체 커버(외부)는 색이 들어간 수지로 사출 성형되었습니다.(사진:가토 야스시)

Spot의 디자인은 단순하고 직관적입니다. 덮개는 쉽게 분리할 수 있으며, 본체와의 연결은 벨크로를 사용하여 매우 견고하게 되어 있습니다 (그림 4.6)입니다.

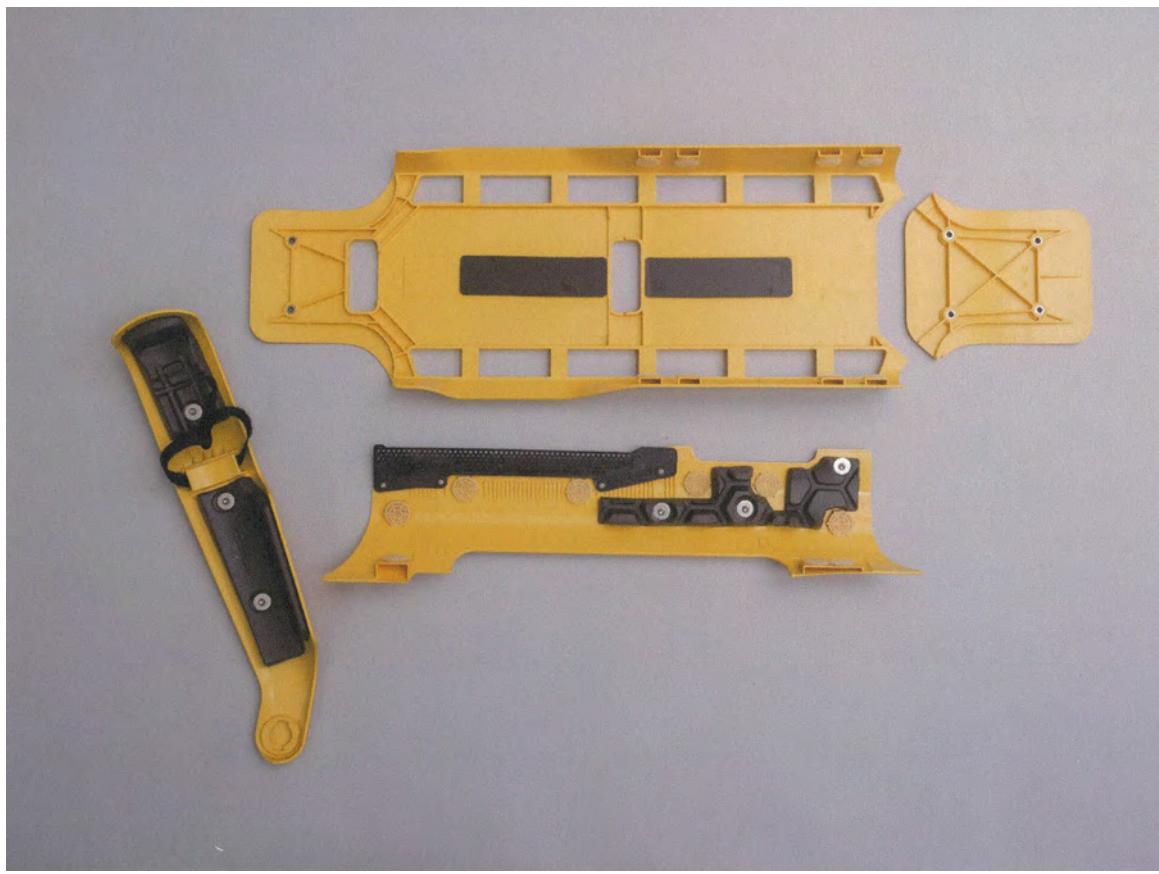


그림 4.6: Spot의 커버(내부)는 벨크로나 벨크로 테이프로 본체에 단단히 고정됩니다.(사진:가토 야스시)

페인트 처리가 없는 무광 마감은 낙하나 충격으로 인한 손상을 대비한 설계로 보입니다. Spot은 특히 미끄러운 바닥에서 넘어지기 쉬우며, 이 커버는 충분한 보호 역할을 합니다.

#### 4.1.4 냉각 구조

Spot의 전원 스위치를 켜면, 각 모서리에 위치한 냉각 팬이 먼저 빠르게 돌면서 큰 소음을 납니다. 초기 하드웨어 점검이 끝나면 팬의 속도가 줄어들고, 정상 작동 모드로 전환됩니다. 크고 작은 팬이 총 8개나 장착된 것을 보면, 효과적인 열 방출을 위해 상당한 노력이 필요함을 알 수 있습니다.(그림 4.7).

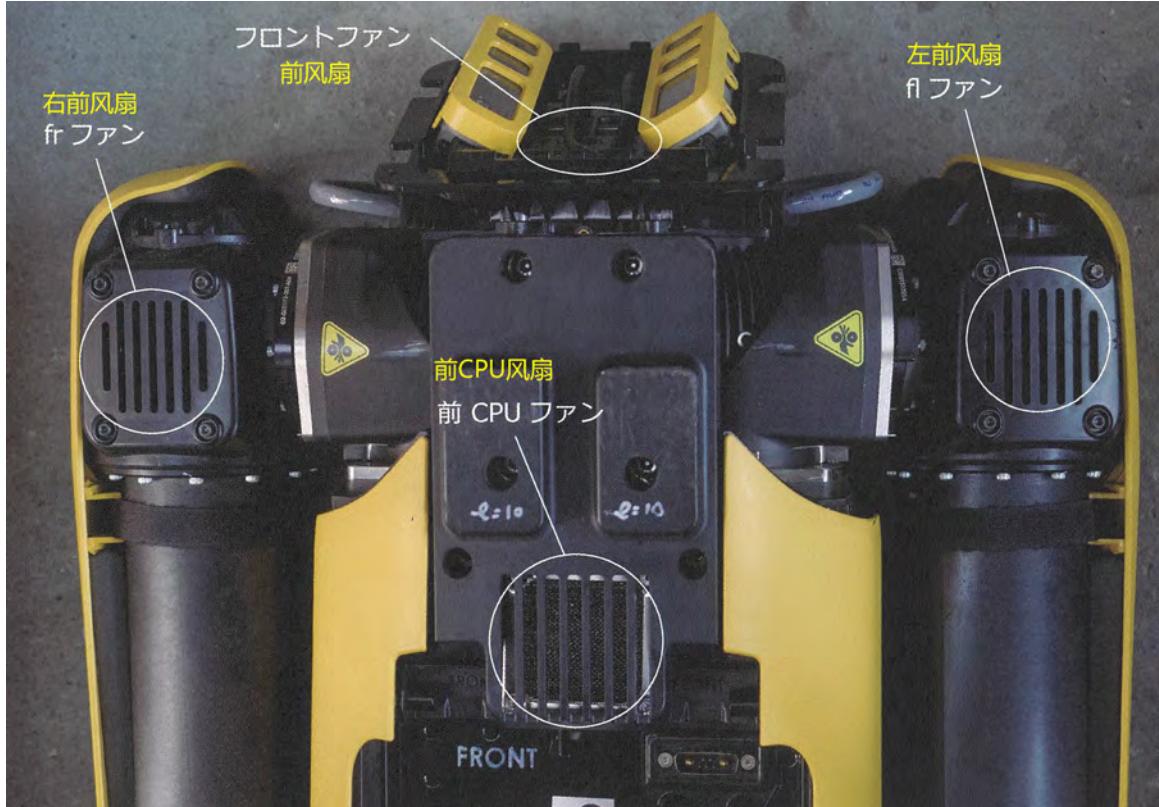


그림 4.7: 냉각 팬 배치  
전면(Y축), 좌우 다리(무릎 관절), 그리고 전면 CPU에 각각 4개의 팬이 장착되어 있습니다. 후면도 동일하게 구성되어 있어, 총 8개의 팬으로 Spot의 높은 발열을 효과적으로 관리합니다.(사진:가토 야스시)

냉각용 팬에는 큰 망사 필터가 장착되어 있습니다 (그림 4.8). 필터 망의 구멍이 커서, 먼지를 막기보다는 돌멩이 등이 팬 그릴에 부딪혀 파손되거나 회전을 방해하는 것을 막기 위한 것으로 보입니다. 좌우 다리와 어깨 부분 틈새에도 냉각 팬이 달려 있습니다. 또한, (전면부) 전면 프레임에도 각각 하나씩, 총 4개가 설치되어 있습니다. 마찬가지로, 후면에는 본체 프레임 아래쪽과 양쪽 다리, 그리고 뒷면에 4개가 배치되어, 전체적으로 8개의 냉각 팬이 사용됩니다. 프레임 하단의 CPU 팬은 13.2 W의 고용량 팬을 사용하여, 덕트와 다리의 X축 모터 부분을 통해 본체 하단으로 유도되어, CPU 방열판의 열을 식혀줍니다.

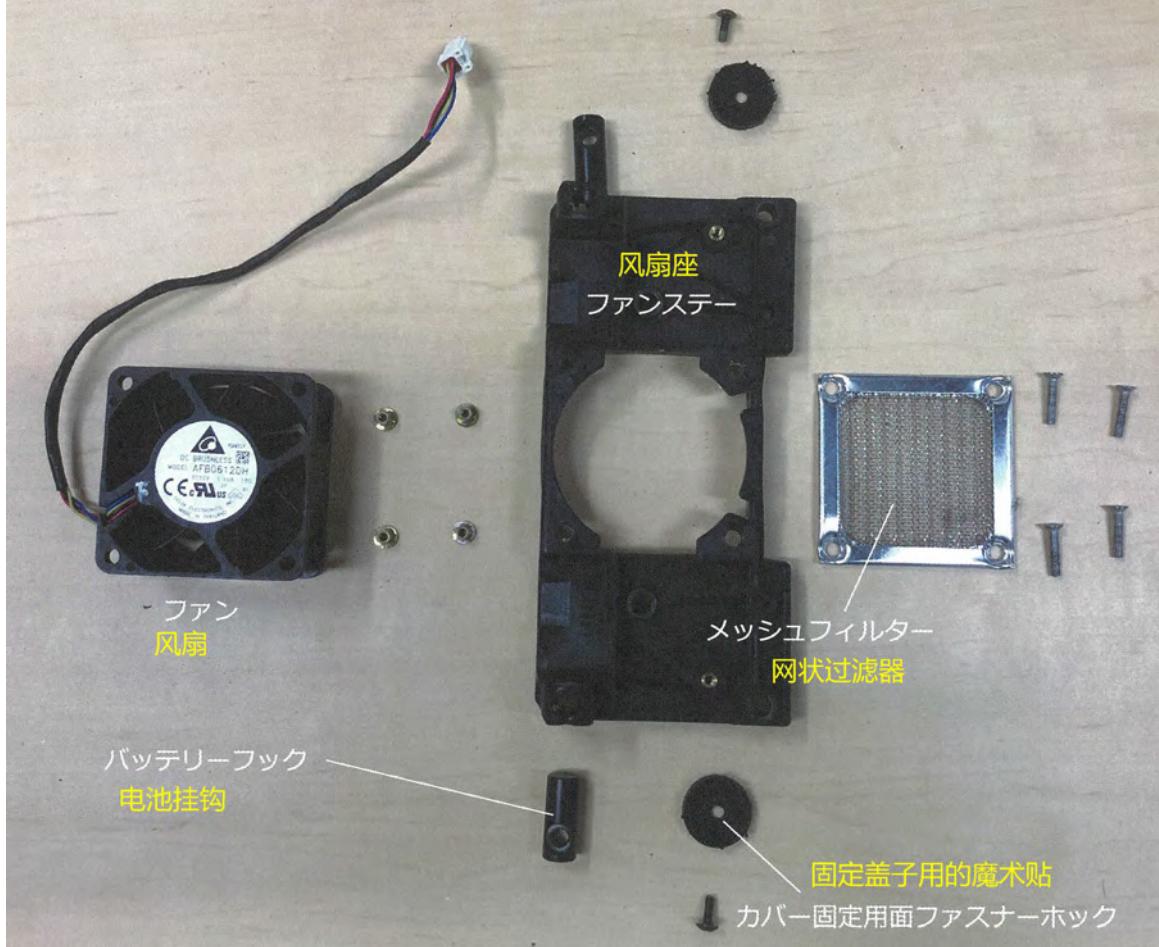


그림 4.8: CPU용 냉각 팬 중앙 전면 팬의 구성입니다. 유입 측에는 그물망 필터가 있지만, 망의 구멍이 큽니다. 13.2W의 대용량 팬을 사용해 X축 모터와 CPU 방열판을 냉각합니다.(사진:마쓰다 아츠시)

주 컴퓨터 주변에는 대량의 열을 발생시키는 워크스테이션용 프로세서가 탑재되어 있으며, 총 2개의 Xeon이 장착되어 있습니다. 이로 인해 냉각 공기를 방열판으로 유도하는 덕트가 본체 랙의 많은 공간을 차지하게 됩니다 (그림 4.9, 그림 4.10).

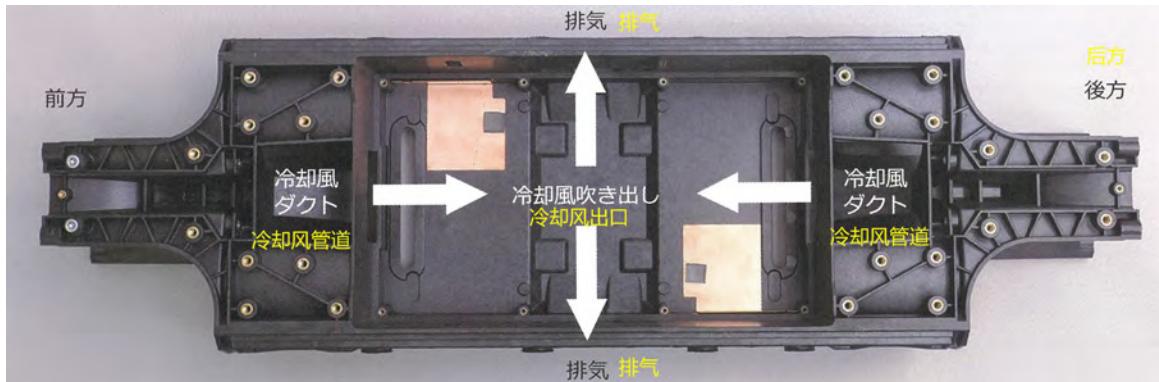


그림 4.9: 중앙 랙(하단) 컴퓨터 챠버 전후 중앙의 사다리꼴 구멍은 냉각용 에어덕트이며, 팬이 흡입한 공기가 CPU 방열판을 식혀줍니다.(사진:가토 야스시)

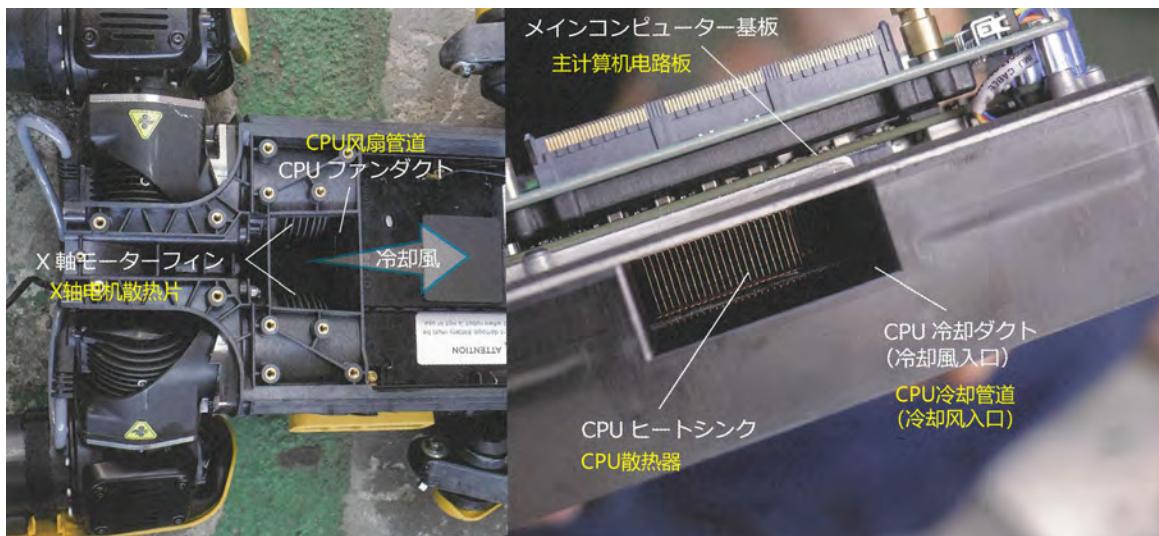


그림 4.10: 메인 컴퓨터CPU냉각 팬 CPU팬이 빨아들인 차가운 공기는 CPU 팬 덕트를 거쳐 X축 모터를 냉각시키며, 중앙부로 유입되어 CPU 방열판을 식힌 뒤 본체 측면으로 배출됩니다. 또한 전후가 대칭 구조입니다.(사진:가토 야스시)

또 다른 주요 열원은 모터와 인버터 회로 기판입니다. 따라서 인버터 주변의 모터 하우징에 대형 방열판이 설치되어, 팬에서 나오는 냉각 공기로 효과적으로 냉각되도록 설계되었습니다 (그림 4.11)。



그림 4.11: 무릎 관절 구동 모터의 냉각 부위  
모터와 인버터를 효과적으로 냉각하기 위해 전용 팬이 적용되었습니다.(사진:가토 앤스시)

## 4.2 메인 프레임

### 4.2.1 메인 프레임 개요

그림 4.12에서 볼 수 있듯이, Spot의 기본 프레임은 케이스 네 모서리에 다리가 연결된 구조입니다. 이 사진에서는 후면 프레임(사진 상단)이 제거되어 잘 보이지 않지만, 앞부분(사진 하단)과 거의 같은 구조를 가지고 있습니다.



그림 4.12: 프레임 구조 개요  
다리는 주 컴퓨터 등 주요 부품을 담는 박스형 구조의 네 모서리에 연결되어 있습니다.(사진:가토  
야스시)

본체 프레임은 크기가 크며, 앞 프레임, 중앙 프레임, 뒤 프레임 이렇게 세 부분으로 나뉩니다. 또한 본체 프레임의 입구를 덮는 상판도 마련되어 있습니다.

#### 4.2.2 전면 프레임

전면 프레임에는 2개의 카메라 모듈과, 색상 및 빛의 변화로 장치 상태를 알려주는 LED램프, 모터 냉각용 팬이 장착되어 있습니다. 그림 4.13은 전면 커버를 분리한 모습입니다. 2개의 카메라 모듈은 약간 아래쪽을 향하게 설치되어 있으며, 안쪽으로 58.5도로 기울어져 있습니다. 두 대의 카메라를 겹치게 하여 스테레오 카메라로 물체까지의 거리를 측정하는 방식은 사진 측량에서 흔히 사용됩니다. 이 카메라 모듈만으로도 거리 측정이 가능하지만, 더 높은 정밀도가 필요할 수 있습니다.



그림 4.13: 전면 프레임의 전면 커버를 분리한 후 아래에서 바라본 모습입니다. 두 쌍의 전면 카메라 모듈이 안쪽으로 기울어진 것이 보이며, 의도적으로 시야를 겹치게 하여 스테레오 카메라로 활용하고 있는 것으로 보입니다.(사진:가토 야스시)

전면 프레임을 고정하는 볼트는 카메라 모듈 아래에 위치해 있습니다. 따라서 먼저 카메라 모듈을 분리해야 하지만, 볼트를 돌릴 때 사용하는 렌치가 다리의 모터 부분과 간섭되어 곧바로 삽입할 수 없습니다 (그림 4.14, 그림 4.15). 렌치를 가장 쉽게 접근할 수 있도록 다리의 각도를 조정해야 합니다.



그림 4.14: 전면 프레임 분해  
전면 프레임을 제거하려면 먼저 카메라 모듈을 분리해야 하며, 그런 다음 다음 분해 작업을 진행할 수 있습니다. 렌치가 곧게 들어가지 않아 작업이 어렵습니다.(사진:가토 야스시)



그림 4.15: 카메라를 분리한 전면 프레임  
분리 후에는 프레임이 아래를 향하게 됩니다. 카메라 모듈에는 USB Type-C 데이터 케이블 두 개가 연결되어 있습니다.(사진:가토 야스시)

그림 4.16에서는 전면 프레임 패널을 확인할 수 있습니다. 후속 설명과 달리, 중앙 프레임은 유리섬유가 포함되어 있지만, 이 사출 성형 부품에는 유리섬유가 사용되지 않았습니다. 4개의 알루미늄 인서트가 메인 프레임과 결합하여 장착됩니다. 알루미늄 합금 판재는 프레싱과 벤딩을 거쳐, 검은색 산화 알루미늄 판이 프레임 패널에 삽입되어 함께 고정됩니다. 이 패널에는  $12V \times 0.08A = 0.96W$  냉각 팬이 장착되어 있습니다. 전면 프레임과의 정확한 위치 결정을 위해, 전면 프레임의 리브가 네 모서리 장착홀 측면의 부채꼴 홈에 삽입됩니다. 이 방식은 매우 높은 위치 및 형상 정밀도가 요구됩니다. 일반적으로 이럴 때는 여러 개의 위치 결정 판을 사용하지만, 남아 있는 세 개의 원형 구멍(미사용)은 위치 핀의 흔적으로 보입니다. 초기에는 세 개의 위치 핀이 사용되었으나, 보강 리브와의 정밀한 결합 요구와 위치 핀의 기하 공차 문제, 그리고 비용 절감 등을 이유로 위치 핀은 삭제된 것으로 추정됩니다.

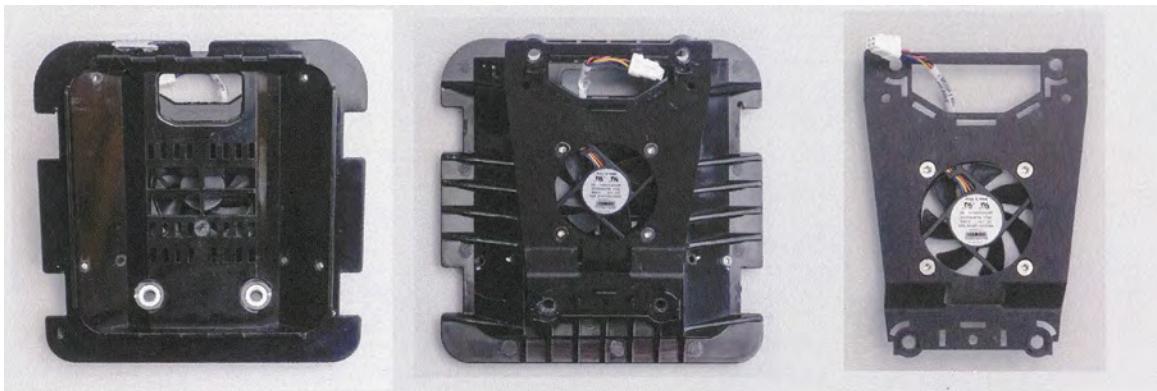


그림 4.16: 전면 프레임 사출 성형된 전면 프레임 패널에 알루미늄 합금판이 끼워져 있으며, 하단에는 다리 모터 부분 냉각용 팬이 장착되어 있습니다. 팬의 정격 전력은 약 1W입니다.(사진:카토 아스시)

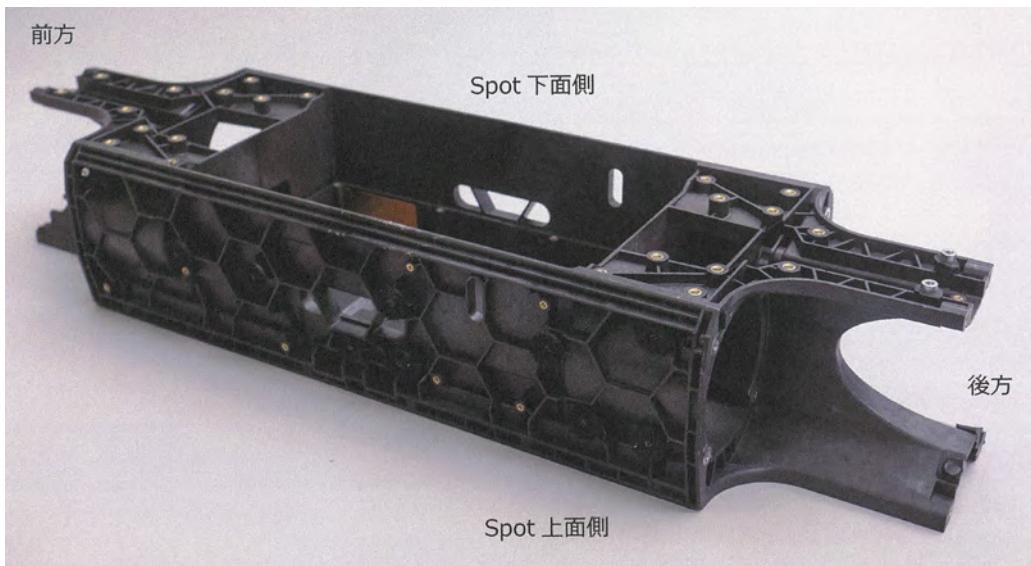
LED 램프 등이 장착된 커버가 전면 프레임 바깥쪽에 설치되어 있습니다 (그림 4.17). 이 커버는 강판으로 만든 금속 고리로 전면 프레임에 고정되어 있습니다.



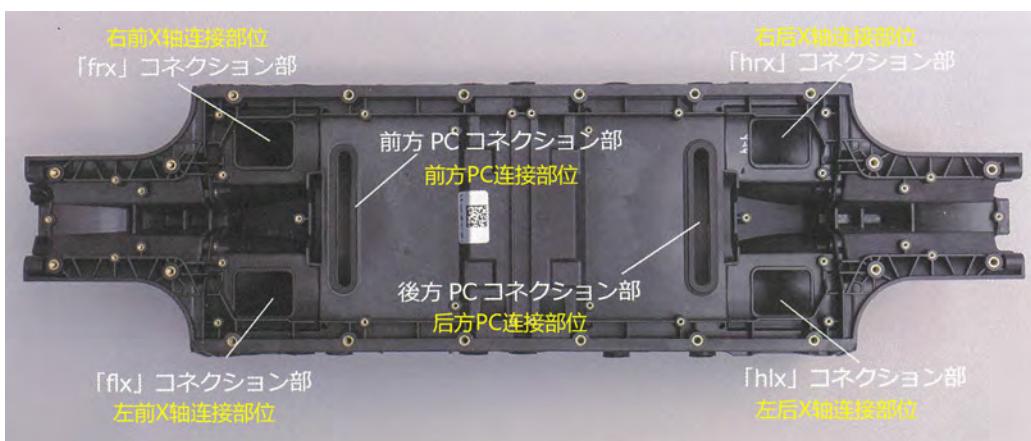
그림 4.17: 전면 커버는 앞쪽 끝 부분에 위치하며, LED 조명이 색상 변화나 깜빡임을 통해 시스템 작동 상태를 표시합니다. 금속 고리가 전면 커버를 프레임에 고정합니다.(사진:카토 아스시)

### 4.2.3 중앙 프레임

중앙 프레임은 본체 프레임의 핵심 구조입니다 (도 4.18, 도 4.19, 도 4.20, 도 4.21). 소재는 유리섬유가 함유된 폴리아세탈로 보입니다. 프레임의 기본적인 강도와 견고함을 확보하는 것은 물론, 내부에는 냉각을 위한 공기 통로가 설계되어 있습니다. 또한, 각 다리 유닛과 전후 유닛으로 연결되는 배선 경로도 깔끔하게 배치되어 있습니다. 설계 측면에서는 각종 허브의 배열과 육각형 리브 구조가 미적이면서도 실용적입니다. 반면, 다수의 고정 나사와 인서트가 사용되었으며, 복잡한 형태로 인해 고가의 사출 금형과 다수의 슬라이드가 적용되었습니다.



도 4.18: 중앙 프레임의 바닥 면을 위로 향하게 놓은 모습입니다. 중앙의 개방된 부분은 메인 컴퓨터와 배터리가 들어가는 시스템 코어 하우징입니다.(사진:카토 야스시)



도 4.19: 중앙 프레임(상단에서 본 모습) 위에서 내려다본 사진입니다. 상단 격벽에는 중앙 컴퓨터에 연결되는 단자부와, 네 모서리 부분에 'X축' 구동을 위한 배선 연결 단자 구멍이 보입니다.(사진:카토 야스시)

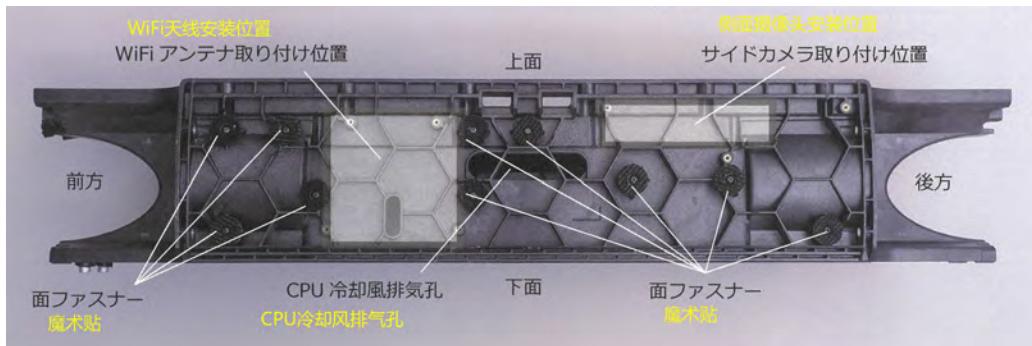


그림 4.20: 센터 프레임(우측 측면도) 오른쪽에서 바라본 사진입니다. 양쪽 측면에는 카메라 모듈과 WiFi 안테나가 부착되어 있습니다. 사진 속 동그란 도넛 모양의 물체는 덮개를 고정할 수 있도록 만든 벨크로(찍찍이)입니다.(사진:가토 야스시)

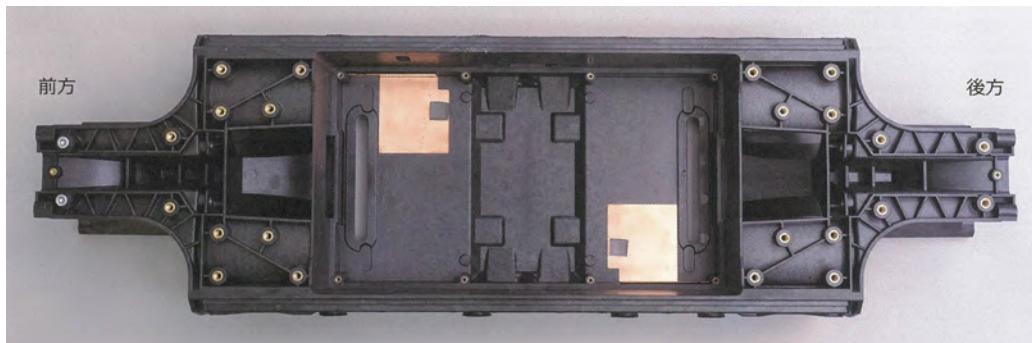


그림 4.21: 중앙 기계 프레임(아래쪽에서 본 모습) 아래에서 촬영한 사진입니다. 차폐를 위한 동판이 중앙 컴퓨터 구획에 부착되어 있으며, 이는 메인보드에 장착된 SSD 바로 위에 위치합니다.(사진:가토 야스시)

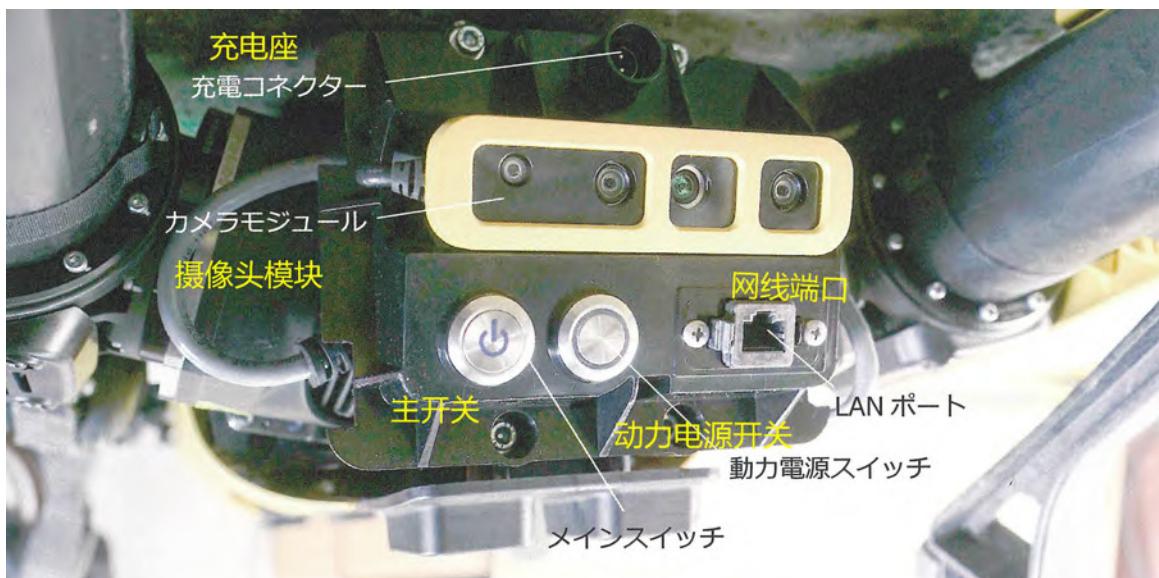
중앙 기계 프레임의 무게는 2.1 kg입니다. 크기는 크지만 실제로 들어보면 상당히 가볍게 느껴집니다 (그림 4.22)。



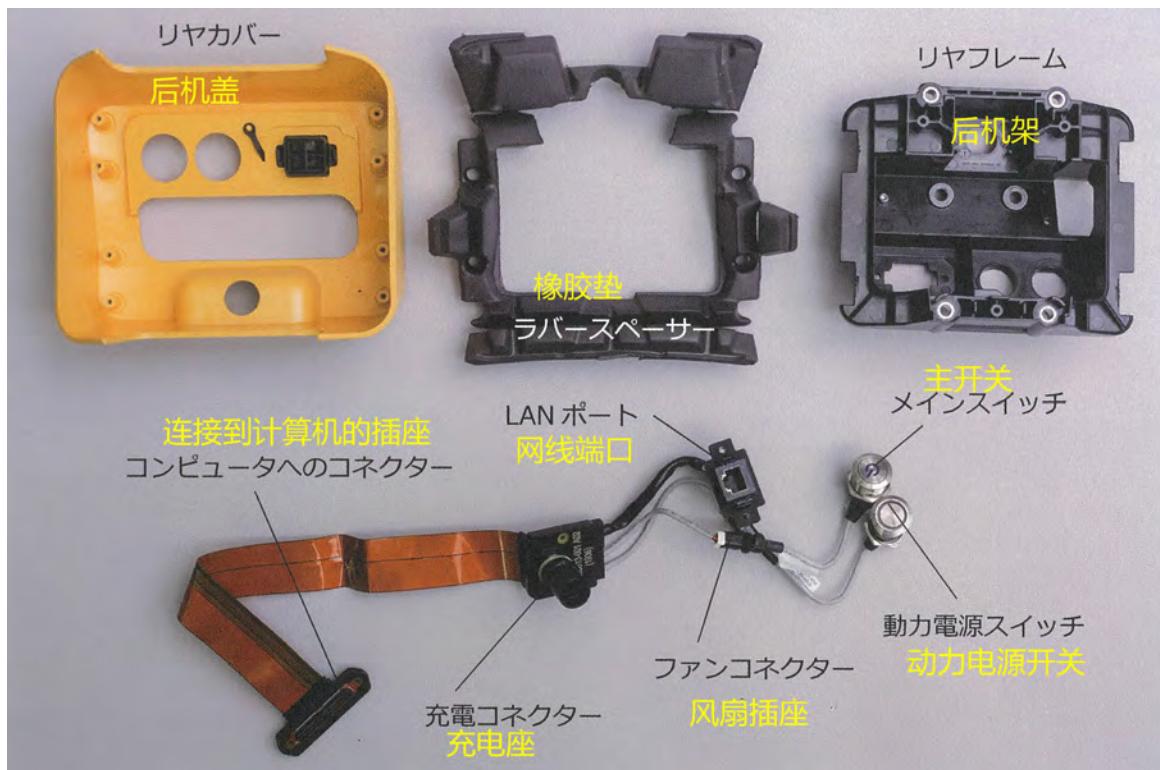
그림 4.22: 중앙 기계 프레임 무게 측정 무게는 2.1 kg이며, 크기에 비해 가볍게 느껴집니다.(사진:마쓰다 아츠시)

#### 4.2.4 후면 프레임

전면 프레임과 마찬가지로, 후면 프레임도 유리가 없는 사출 제품이며, 1개의 카메라 모듈, 스위치, I/O 관련 배선 단자가 장착되어 있습니다. 이 프레임은 전면과 동일한 구조의 팬 유닛이 장착된 알루미늄 판에 설치되어, 본체 케이스에 고정됩니다. 해당 팬은 후면의 Y축 모터로 냉각 공기를 공급하여 모터를 식힙니다. 앞쪽과 마찬가지로, 후면 커버는 고무 패킹을 놀려 철판으로 제작된 클립으로 후면 프레임 좌우 4개의 홈에 고정됩니다 (도 4.24).



**도 4.23: 후면 프레임** 후면 프레임에는 카메라 모듈, 메인 스위치, 전원 스위치, LAN포트와 충전 단자가 탑재되어 있습니다. 그 아래에는 전면 프레임과 동일하게 뒷다리 구동 모터 부분을 냉각시키는 팬이 있습니다.(사진:가토 야스시)



도면 4.24: 후부 부품(후면 커버를 뒤집어 놓은 모습)(사진:가토 야스시)

#### 4.2.5 상부 패널

상단 패널은 중앙 프레임의 윗면을 덮는 패널로, 중앙 프레임과 마찬가지로 유리섬유 강화 플라스틱으로 사출 성형되었습니다 (그림 4.25). 뒷면에는 보강 리브가 정교하게 배치되어 있고, 고정 돌기를 연결하는 경사형 리브도 추가되어 표면의 강성을 높이는 데 중점을 두었습니다.

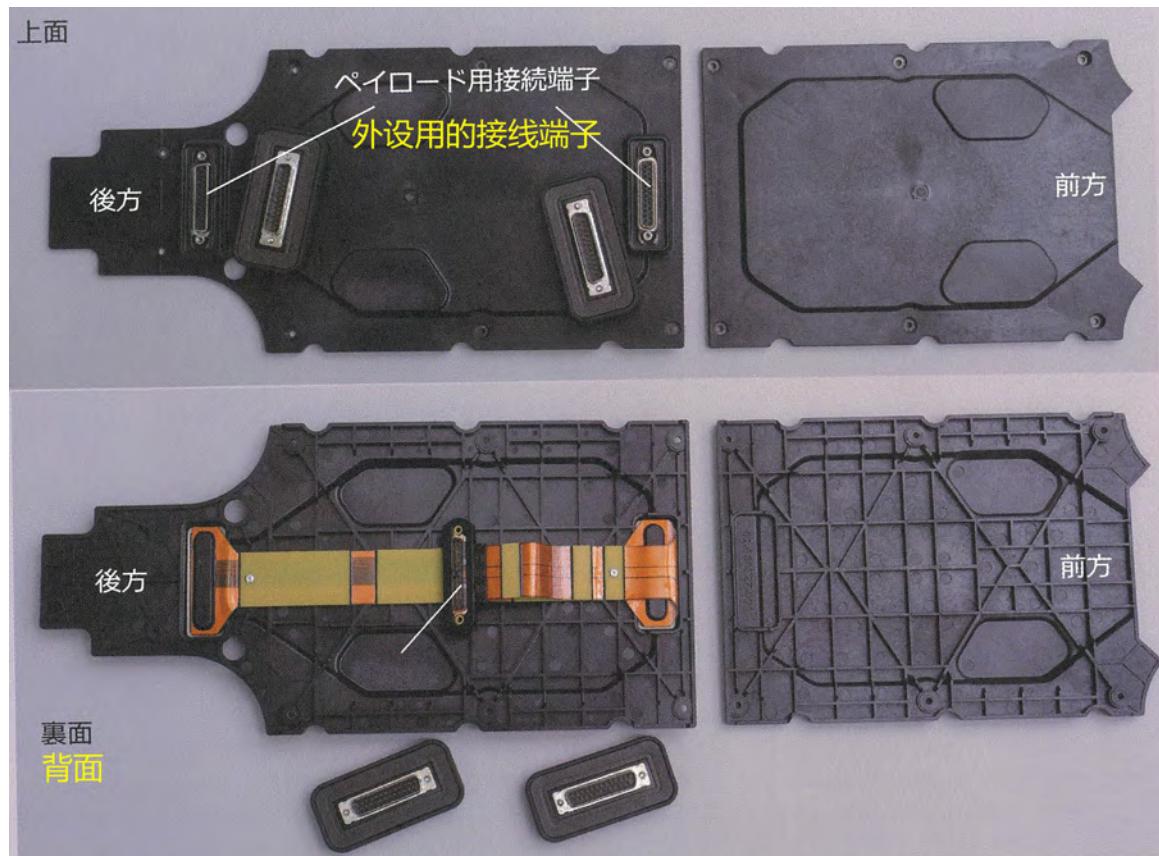


그림 4.25: **상단 패널**이 패널은 본체 프레임의 상단을 덮는 용도로 장착됩니다. 유리섬유를 활용한 사출 성형 방식으로 강성이 향상되었습니다.(사진:가토 야스시)

중앙 프레임과 상판은 박스형 프레임 구조로 설계되었으며, 이 중 상판이 비틀림 방향의 강성에 큰 역할을 합니다 (그림 4.26). 네 다리로 걸을 때는 대각선으로 짹을 이룬 두 다리가 번갈아 무게를 지탱합니다. 즉, 박스 구조의 프레임 전체에 반복적으로 비틀림 하중이 가해지는 셈입니다. 이 상판이 주요하게 토크를 지지하며, 중앙 프레임에 설치된 컴퓨터 모듈 장착용 칸막이가 함께 토크에 대응합니다. 박스 측면과 상하 표면이 결합돼 폐쇄 단면을 이루어 토크 튜브 역할을 하며, 면 내 전단력으로 비틀림 하중에 저항합니다. 컴퓨터 모듈을 추가해 구조를 보강하긴 했으나, 이 토크 튜브의 높이가 낮아 걸보기보다 견고하지 않습니다. 상판은 이런 낮은 강성을 보완하도록 케이스에 맞게 설계된 것으로 보입니다. 이 부분은 밀폐되어 있지 않으므로, 배선 단자판과 거기서 뻗어나오는 배선 부위 또한 방수 처리가 되어 있지 않습니다.



그림 4.26: 박스형 프레임 구조 Spot의 '척추'에 해당하는 구조는 박스형 프레임입니다. 하단에는 배터리와 메인 컴퓨터를 위한 커다란 개구부가 있어 내부 격벽의 상단 부분만이 토크 튜브 역할을 합니다.(사진: 가토 야스시)

## 4.3 다리 부위

### 4.3.1 다리 전체 보기

사족 보행 로봇의 선두주자인 Spot의 '다리' 구동 시스템은 그림 4.27에 나와 있는 다리 구동 부품들로 이루어져 있습니다.



도 4.27: 다리 전체 모습 4족 보행 로봇 Spot의 가장 큰 특징은 다리 구동 장치입니다. 이 네 개의 다리를 활용해 다양한 지형을 자유롭게 이동할 수 있습니다.(사진:가토 야스시)

고장이 발생하면 다리와 다리 구동 모듈을 함께 교체할 수 있는 구조입니다 (그림 4.28). 어깨에는 Spot 본체를 들어올릴 수 있는 손잡이 스트랩이 달려 있으며, 무게는 약 4 kg이지만 매우 쉽게 운반할 수 있습니다. 구동기는 두 개의 회전축(X축과 Y축)과 하나의 직선 운동축(무릎)을 통해 ‘걷기’ 동작을 구현합니다. 다리 모듈의 기계 설계는 세밀함에 신경을 쓴 완성도 높은 구조입니다.



그림 4.28: **다리 구동 모듈 구조** 사족보행을 가능하게 하는 다리는 2축 회전과 1축 직선 운동을 기반으로 설계되었습니다. 따라서 각 다리에는 3개의 구동 모터가 장착되어 있습니다. 회전 구동과 직선 구동에 사용되는 감속기는 다르지만, 3가지 모터의 설계는 동일합니다.(사진:가토 야스시)

## 4.4 방수 및 방진 대책

### 4.4.1 예상 사용 환경

Spot은 미국 방위고등연구계획국(DARPA)의 지원을 받아 보스턴 다이내믹스가 개발한 대형 군사용 로봇입니다(그림 4.29). 처음부터 군사용을 염두에 두고 강한 성능을 요구받아, 어떠한 악조건이나 상황에서도 임무를 수행할 수 있도록 설계되었습니다. 그래서 이 로봇은 위험 지역이나 사람이 접근하지 못하는 가파른 곳에서도 무인으로 임무를 수행할 수 있는 견고한 기계라는 인상을 줍니다.



그림 4.29: Spot의 조상들은 DARPA의 지원으로 보스턴 다이내믹스가 군사 연구를 목적으로 개발한 사족 보행 로봇 'BigDog'(2004)와 'LS3'(2010)입니다. 이 두 로봇 모두 매우 튼튼하고 강인한 이미지를 지니고 있습니다.(사진: Boston Dynamics 공식 웹사이트)

하지만 이러한 인상과 달리, Spot은 거친 환경에 다소 취약합니다. 사용 설명서에 따르면, 무릎 높이까지의 물에서는 걷기가 가능하지만, 빗속에서는 작동이 금지되어 있습니다. 즉, 맑은 날에는 깊은 웅덩이는 건널 수 있지만, 강이나 습지처럼 잠길 위험이 있는 곳은 통과하기 어렵습니다. 필자가 Spot을 테스트할 때, 실수로 Spot이 완전히 물에 잠겨 고장이 발생한 적이 있습니다. 여기서 '잠긴다'는 것은 기체 전체가 등까지 물에 잠기는 상황을 의미합니다. 작동이 멈추긴 했지만, 그 덕분에 Spot의 각 부품의 방수 성능을 평가해볼 수 있었습니다.

#### 4.4.2 각 부위의 밀봉

평가된 중복성 테스트 계획에 따라 (그림 4.30)을 바탕으로, 해변의 모래사장이나 습한 계단에서 달리기 실험을 진행하였습니다. 그러나 실험 도중, 그날 폭우로 침수된 물길에 빠져 장비가 잠긴 일이 있었습니다. 각 부품은 분해 및 건조 후 점검·수리를 실시하였으며, 결론적으로 전선 연결 단자를 포함한 여러 부분에서 물이 유입된 사실이 확인되었습니다 (그림 4.31, 그림 4.32, 그림 4.33, 그림 4.34, 그림 4.35)에서 볼 수 있습니다.

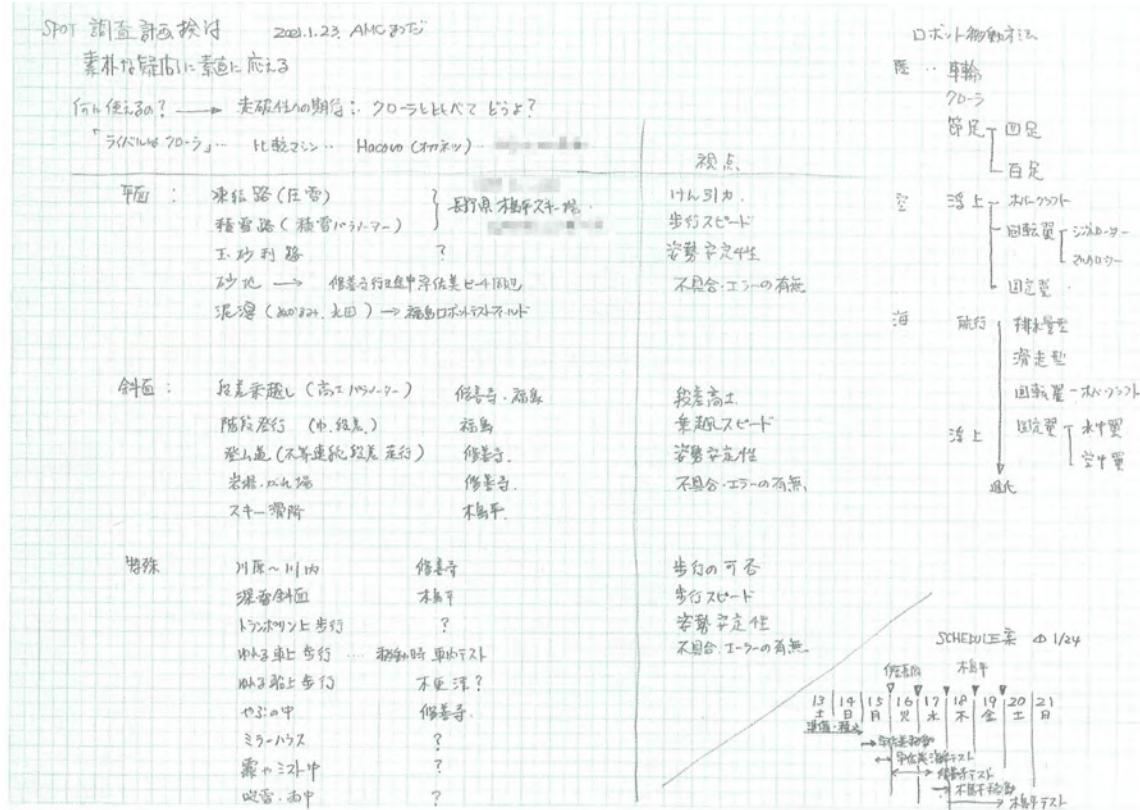


그림 4.30: 테스트 계획 험난한 길, 물통불통하거나 미끄러운 장소 등에서 실험이 진행될 예정입니다.(작성자:마즈다 아즈시)

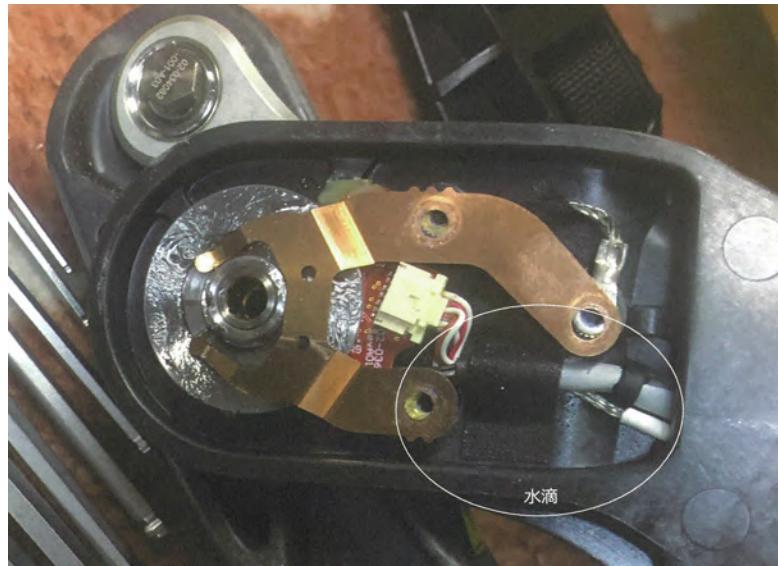


그림 4.31: 무릎 관절 인코더 부위  
다리 회전 각도를 측정하는 인코더가 설치된 위치. 물방울이 확인됨.(사진:Nikkei Cross Tech)



그림 4.32: 엔코더 커버  
엔코더 커버는 O-링으로 밀봉되어 있지만, 모서리 부분과는 완전히 밀착되지 않아 틈이 생기기 쉽습니다.(사진:Nikkei Cross Tech)

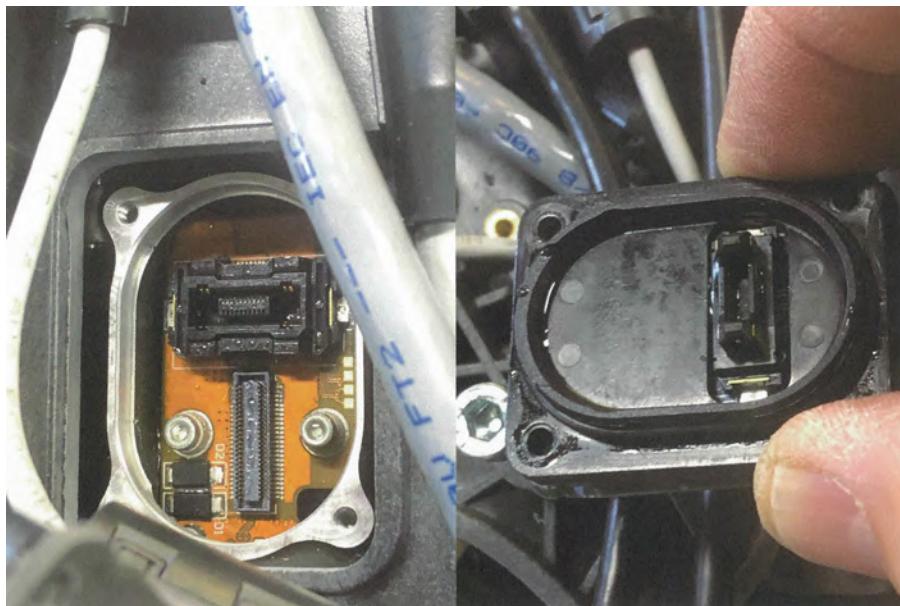


그림 4.33: X축 구동의 단자대 X축 구동 모터의 단자대 부분. O링으로 밀봉되었으나 물방울이 많이 보입니다.(사진:Nikkei Cross Tech)



그림 4.34: Y축 구동부의 단자함 Y축 구동 모터의 단자함 부위입니다. 이곳에서도 물방울이 다수 유입된 것이 확인됩니다.(사진:Nikkei Cross Tech)



그림 4.35: 직접 침수된 배터리함 배터리함 자체에는 밀폐 기능이 없어, 접속 단자 주변에 많은 물방울이 맺혀 있습니다.(사진:Nikkei Cross Tech)

### 4.4.3 과제

운영 테스트 첫날, 예상치 못하게 폭우를 만났고, 비가 그친 틈을 타 시험을 진행했으나 결국 Spot이 침수되었습니다. 다행히도 중앙 제어를 담당하는 메인 컴퓨터 등은 정상적으로 부팅되어, 각 부품을 분해해 세척하고 건조시키는 작업을 시도했습니다. 이 과정에서 Spot이 드러낸 방수·방진 문제점은 다음과 같습니다.

(1) Spot의 방수 설계는 '감각에 따라 진행된 것'입니다.

(2) 접속 단자 자체가 방수가 되지 않습니다.

(3) 실링 부품과 접속 단자의 선택이 반복적인 분해와 조립을 고려하지 않았습니다.

(1)에 대한 방수 설계는 노력은 했으나 충분하지 않았습니다. 밀봉 수준은 방진 정도에 그치고, 브리더 설치 같은 본격적인 방수 대책은 적용되지 않았습니다. 게다가 Spot은 반복적으로 분해와 조립이 이뤄지면서 나사나 단자가 손상되는 경우가 많았습니다. 산업 장비로서 혹독한 환경에서 반복되는 유지보수와 청소에도 견딜 수 있어야 하며, 기본 내구성이 필수적입니다. 이런 강인함이 있어야만 신뢰할 수 있는 무인 기기로 현장에 투입될 수 있습니다. 위험 지역에 투입된 기기가 고장으로 멈추면, 결국 포기할 수밖에 없습니다. 무인 기기에는 생존력 또한 중요한데, 그 생존력을 지탱하는 것은 손쉬운 유지관리와 신뢰성입니다. 이런 점에서 Spot은 아직 완전한 신뢰를 받을 수 있는 무인 시스템의 수준에는 미치지 못합니다.

## 제 5장 기계 부품

## 5.1 전체 개요

### 5.1.1 다리 구동 부품 구성 개요

Spot은 이동 가능한 도구(모바일 플랫폼)로서, 네 발 달린 동물과 같은 방식으로 4개의 다리가 움직이며 동작합니다. 역사를 돌아보면, 인류는 다양한 이동 방식을 개발해 왔습니다. 산업혁명 이전에는, 동력이란 개념이 생겨났고, 바닥에서 저항이 적은 원통형 물체(예: 피라미드 건설 시 돌을 옮기던 둘레 등)를 사용하여 동물의 힘을 줄이거나, 바퀴로 전환하는 방법이 고안되었습니다. 이후 마차와 수레가 등장했습니다. 산업혁명을 통해 인류는 동력을 생산하는 방법을 발명했고, 바퀴를 돌려 이동하는 방식도 본격적으로 발전했습니다. 오늘날, 바퀴는 철도, 자동차, 이륜차, 자전거 등 대부분의 지상 이동 장치에 거의 예외 없이 사용되고 있습니다. 그리고 트랙(무한궤도)은 바퀴를 확장한 구조로, 접지 면적을 넓혀 지면 압력을 줄이고 주행 성능을 크게 향상시킨 장치입니다.

한편, 바퀴로 움직이는 시스템은 다양한 지면 환경에서는 야생 동물에 비해 성능이 부족합니다. 텔레비전에서 가파른 절벽을 자유롭게 오가는 사슴의 모습을 보면, 네 발로 걷는 방식이 움직임의 정점임을 느끼게 됩니다. 임업 분야에서는 말로 목재를 운반하는 '말 운반'이 있는데, 거친 지형에서의 주행력과 견인력은 최고 수준이며, 소형 전동 기계는 도저히 따라갈 수 없습니다.

Spot의 제작사인 보스턴 다이내믹스는 미국의 군사 연구를 위해 오랫동안 4족 보행 로봇을 개발해 왔습니다. 최초로 공개된 4족 로봇은 소를 닮은 대형 기계로, 엔진을 사용하며 걷는 동작도 가능한 한 자연스럽게 구현되었습니다. 그 이전까지 보행 로봇(예: 혼다의 'ASIMO')은 움직임이 어색해서 '기계'처럼 보였지만, 보스턴 다이내믹스의 '소'는 엔진 소리가 인공적임을 알려주면서도 달리는 진짜 소처럼 보일 정도로 자연스러웠습니다. 이후 점점 소형화되어 '소'에서 '개'로 변신했고, 전동화되어 시장에 출시되었습니다. Spot의 4족 보행 구조는 가장 독특하고 흥미로운 특징 중 하나입니다(도 5.1).



그림 5.1: Spot이 보여주는 감탄스러운 '신체의 아름다움'은 4개의 다리를 활용한 독특함으로 다리와 허리의 힘이 얼마나 다양한 임무를 해낼 수 있는지 보여준다.(사진:가토 앤스시)

다리 구동 모듈의 무게는 약 4.2 kg입니다. 3개의 모터, 2개의 감속기, 볼스크류 액추에이터, 기구 외장 등 핵심 부품이 축의 루트 부분에 집중되어 있습니다 (도 5.2). 하지만 팔꿈치(무릎)부터 가속과 감속이 크기 때문에 경량화가 필수적입니다. 또 전체 무게를 지지하고 움직이는 데 큰 하중이 걸리므로, 다리에는 유리섬유 강화 수지 성형을 적용해 가볍고 높은 강성을 실현했습니다. 4개의 유닛 중 각 1개 유닛은 플라워 헤드에 있는 4개의 M5 볼트와 4개의 나일론 너트로, 도 5.3에서 보이는 중앙 프레임 고정부에 단단히 고정됩니다.



그림 5.2: 다리 구동 구조 네 개의 다리를 움직이는 전체 메커니즘을 보여줍니다.X축과Y축, 두 개의 회전축은 대형 감속 모터와 하모닉 드라이브로 구동됩니다. 끝 부분에 설치된 리니어 액추에이터가 다리를 움직여 네 개의 다리가 각각 동작합니다.(사진:가토 야스시)



그림 5.3: 다리 고정 부위 중앙 프레임의 정면 모습입니다.Spot의 다리 구동 모듈은 이 원형 구멍을 둘러싼4개의 볼트로 프레임에 고정됩니다. 즉, 모든 방향과 크기의 하중은 이4개의 구멍을 통해 전달됩니다. 고정에는 스타 헤드 M5 볼트와 너트가 사용됩니다.(사진:가토 야스시)

구동 메커니즘은 X축과 Y축에 각각 모터와 50:1 감속비가 적용된 하모닉 드라이브가 사용됩니다. Knee(무릎)에는 X축, Y축과 동일한 모터를 적용한 볼스크류 타입의 리니어 액추에이터가 탑재되어 있습니다. 외관과 드라이브 회로 기판까지 모두 전용 설계로 이루어져 있습니다. 전기 연결 방식은 X축이 단독으로 터미널 보드에서 케이블로 연결되고, Y축과 Knee는 터미널 보드 단자와 Y축 단자의 케이블을 통해 연결됩니다. Knee는 Y축 내부를 회전하여 드라이브 회로 기판에 연결됩니다(그림 5.4).



**그림 5.4: 무릎 관절 구동 하네스** 무릎 관절 구동 시스템의 전면부에 위치한 선형 액추에이터의 하네스는 회전하는 Y축을 통해 연결됩니다. 터미널과 접점은 회로 기판에 장착된 제품을 사용합니다. 무릎 관절 구동 하네스는 오른쪽 사진 하단에 보이는 파란색 회로 기판까지 이어집니다.(사진:가토 야스시)

무릎 관절 구동 와이어 하네스는 플랫 케이블을 통해 무릎 구동 단자에 연결되어 있습니다 (그림 5.5). 플랫 케이블은 고사리와 같은 나선형 형태로 Y축 내부에 감겨 있습니다. 무릎 구동 유닛을 알루미늄 하우징의 플랜지에 고정한 8개의 M3 육각 볼트를 풀고 이 케이블을 분리하면 무릎 관절 구동 유닛을 분리할 수 있습니다 (그림 5.6). 무릎 구동 기구가 들어 있는 원통과 M3 볼트 구멍이 가까워서 래칫 렌치는 사용할 수 없으며, L자형 육각 렌치로 조금씩 천천히 풀어야 하므로 분해와 조립이 불편합니다 (그림 5.7).



그림 5.5: 무릎 관절 구동 장치의 플랜지 분리를 위해 무릎 구동 유닛 플랜지를 고정하는 12개의 M3 볼트를 분해해야 합니다.(사진:가토 야스시)



그림 5.6: 무릎 관절 구동 유닛 분리 X축과Y축(회전축)구동부와무릎구동부(선행 운동)가 분리된 모습입니다.(사진:가토 야스시)

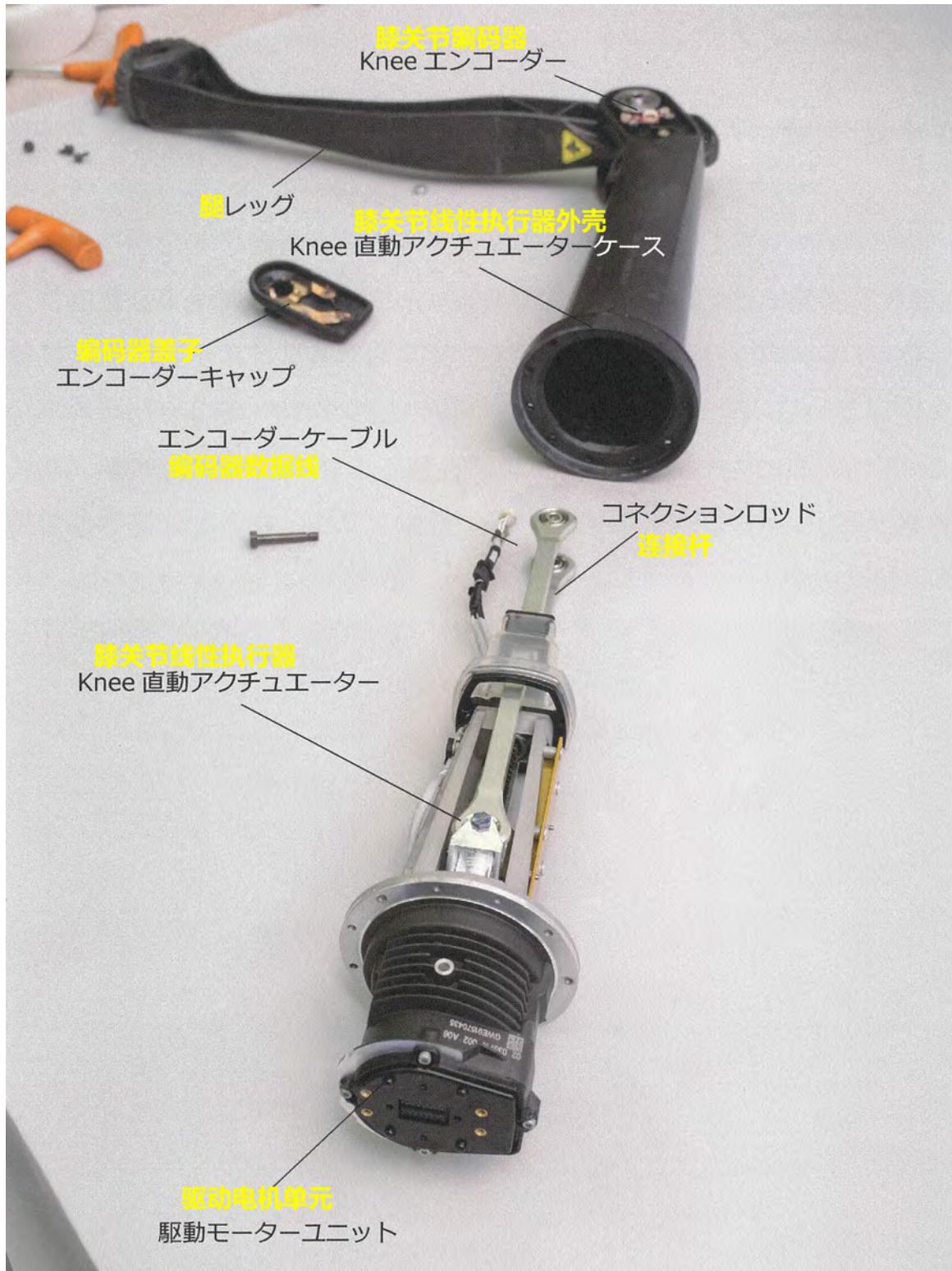


그림 5.7: 무릎 관절 구동부 분해도이 구동 시스템은 볼스크류가 탑재된 선형 운동 방식입니다. 관절에는 무릎의 움직임 각도를 측정하는 인코더가 장착되어 있습니다.(사진:가토 야스시)

## 5.2 무릎 관절 구동 유닛

### 5.2.1 무릎 관절 구동 전체 구조

Knee(무릎)에서 고정된 로드 끝과 Knee 인코더에 연결된 케이블을 분리하면, Knee 구동기의 핵심인 리니어 액추에이터를 꺼낼 수 있습니다. 리니어 액추에이터는 모터의 회전을 볼스크류에 전달하며, 볼스크류와 맞물린 슬라이더가 직선으로 움직여 회전 운동을 직선 운동으로 변환합니다. 그림 5.8은 Knee 시스템의 전체 구조를 보여줍니다. 왼쪽의 검은색 부분이 모터이고, 모터가 돌리면 중앙에 있는 긴 볼스크류를 따라 슬라이더가 움직이며, 무릎 아래쪽에서 두 개의 로드가 흔들립니다. 리니어 액추에이터가 직선 운동을 하면, 무릎 아래쪽의 반대편에서는 원형 운동이 발생하여, 투명한 실리콘 캡과 검은색 실링으로 부드럽게 치지되어 움직임을 따라갑니다.

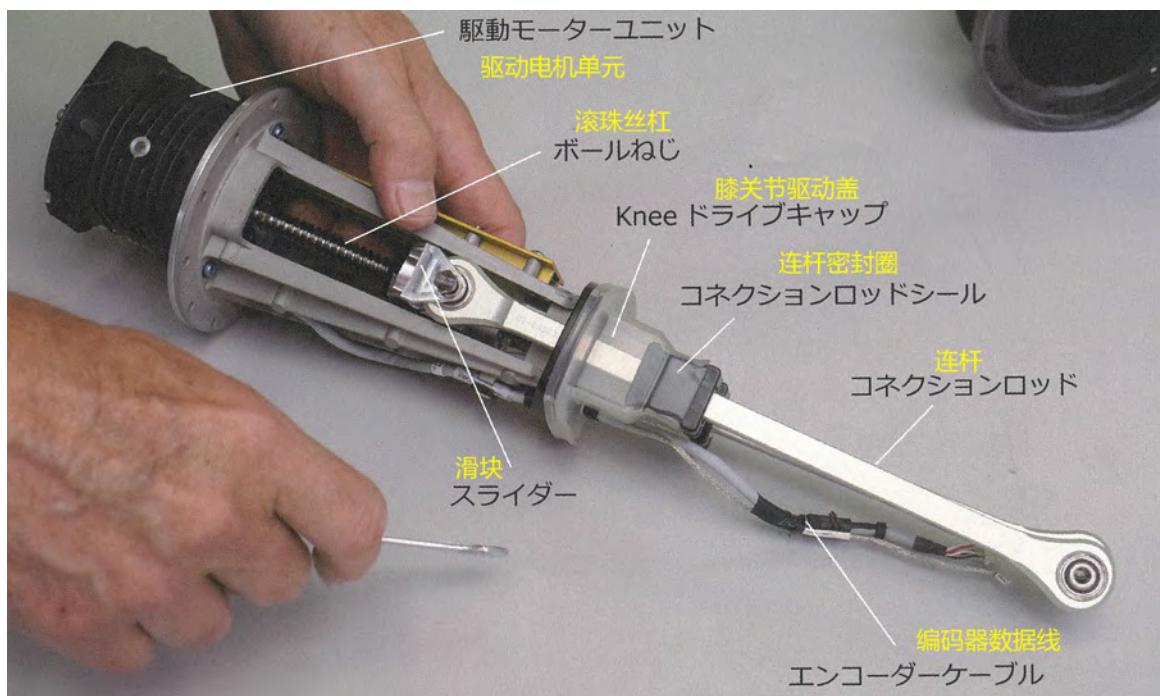


그림 5.8: 무릎 관절 구동 유닛의 리니어 액추에이터의 기본 구조는 일반적인 볼스크류 직선 운동 메카니즘입니다. Spot의 특징은 보통 슬라이더 부분에 인코더를 설치해 위치를 측정하지만, Spot은 회전축 인코더를 통해 직접 무릎의 각도를 측정한다는 점입니다.(사진:가토 야스시)



그림 5.9: 리니어 액추에이터의 분해는 모터 유닛과 리니어 액추에이터 외부 케이스를 고정하는 4개의 나사를 풀고, 인코더 커넥터를 분리하면 가능합니다.(사진:가토 야스시)

## 5.2.2 볼스크류 부품

일반적인 선형 액추에이터 시스템은 전위차계 등과 같은 인코더를 통해 볼스크류와 맞물린 슬라이더의 위치를 측정하는 구조를 가지고 있습니다. 그러나 Spot은 무릎 옆에 있는 인코더로 회전 각도를 측정하는 방식을 사용합니다 (그림 5.10). 중앙 컴퓨터에서는 무릎 회전 각도를 직접적으로 명령으로 제어하는 것으로 보입니다. 중간에 개입하는 부품이 적어 명령과 위치 측정이 정적 및 동적으로 모두 정확하게 이루어질 수 있어 반응 속도가 빠를 것으로 예상됩니다. 신체의 무게중심을 정확히 제어하고 안정성을 유지하려면 무릎의 빠른 응답 주파수가 필수적일 수 있습니다. 이번에는 실제 측정이 어렵지만, 각 회전축의 하중 반응 특성을 파악하면 보행 로봇의 다리에 필요한 응답 속도를 알 수 있습니다.

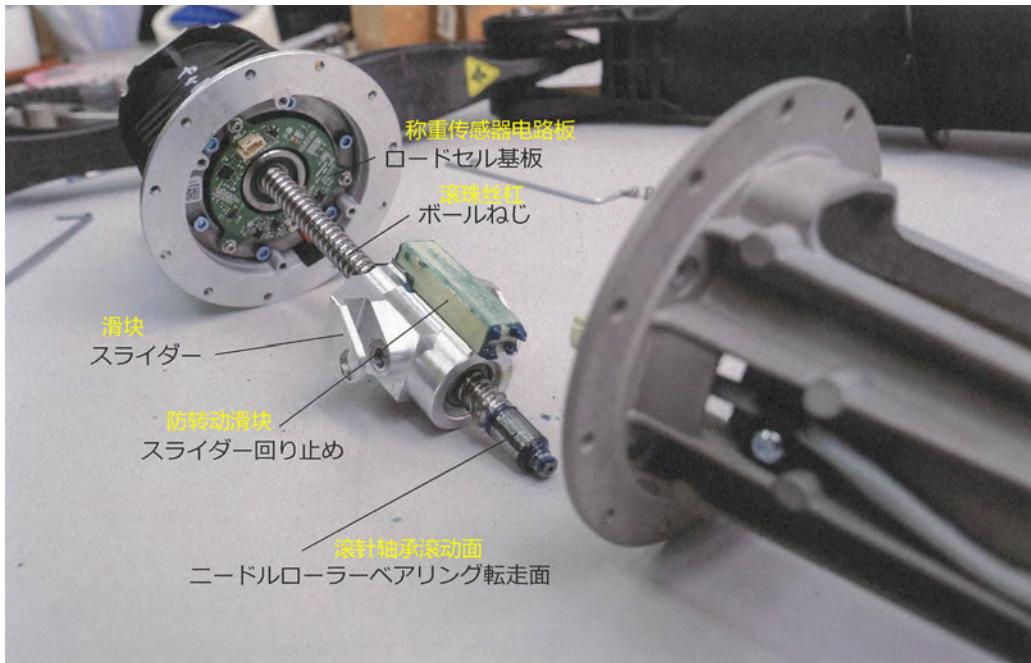


그림 5.10: 볼스크류 구동부  
슬라이더는 볼스크류 중앙에 설치되어 있습니다. 그 위에 있는 큐브는 회전 방지 슬라이더입니다. 볼스크류의 앞쪽 끝은 롤러 베어링으로 고정되어 있습니다.(사진:가토 야스시)

### 5.2.3 중량 센서 회로판

무릎 관절 구동부의 선형 액추에이터 쪽의 로드 헤드를 분리하고, 무릎 관절의 인코더에서 중앙 제어판으로 연결된 케이블의 단자를 분리하면 모터와 슬라이더를 분리할 수 있습니다. 모터 하우징에 연결된 회로판은 구동 부하를 측정하는 중량 센서 회로판입니다 (그림 5.11)입니다.

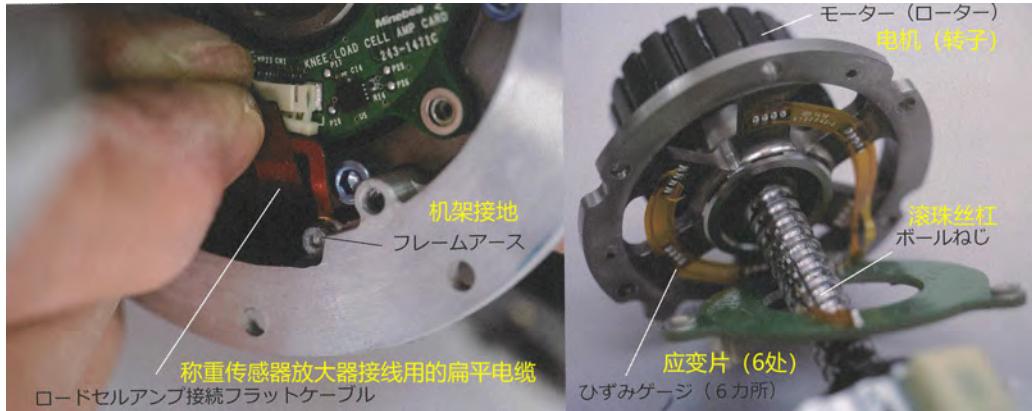


그림 5.11: 중량 센서 회로 기판 모터 베어링에 가해지는 하중은 랜드 베어링 브래킷에 부착된 스트레인 게이지로 측정됩니다. 회로 기판에는 “Minebea”와 “KNEE LOAD CELL AMP CARD”라는 실크 인쇄를 확인할 수 있습니다.(사진:가토 야스시)

플랫 케이블은 6개의 리브에 납땜되어 있으며, 이 리브들은 기판 아래 볼스크류의 추력을 담당하는 베어링 하우징을 지지합니다. 그 위에 스트레인 게이지가 부착되어 있는데, 이는 이동하는 무릎의 추력을 측정하는 용도로 추정됩니다. 이는 X축과 Y축 모터에는 이러한 구조가 없기 때문입니다. 회로 기판에는 “Minebea”라는 실크 인쇄가 있습니다. “Minebea”는 소형 베어링 분야와 중량 센서 분야를 선도하는 제조사입니다.

Spot은 침수로 인해 작동이 중단되었지만, 수리 과정에서 끝까지 남아 있던 오류는 중량 센서 오류였습니다. 이 구조를 보면, 스트레인 게이지 부분이 습기에 노출되어 수분이 완전히 제거되지 않아 원래의 저항값에서 벗어나거나, 브리지 증폭기에 예상치 못한 전류가 흘러 넘침이나 단락으로 인해 증폭기가 측정한 미세 전류에 왜곡이 생겼을 가능성이 있어 중량 센서 증폭기 기판에 문제가 발생한 것으로 추정됩니다. 스트레인 게이지는 습도에 매우 민감합니다.

무게 센서 증폭기 회로 기판의 단자와 모터 드라이버 회로 기판의 단자에서 플랫 케이블을 분리하면, 덮개와 일체형으로 되어 있는 접속 유닛을 분해할 수 있습니다 (그림 5.12). 이 덮개에 있는 단자는 Y축 모터 외부 케이스를 통과해 무릎 구동용 신호와 전원에 연결되어 있습니다. 플랫 케이블은 두 가지 시스템으로 나뉘며, 하나는 모터 구동 시스템용, 다른 하나는 무게 센서 증폭기용입니다. 무게 센서 증폭기 측 끝부분에서 분기된 부분은 알루미늄 모터 외부 케이스에 나사로 고정되어 프레임 접지 역할을 합니다.



그림 5.12: 무릎 관절 구동 보드 케이블이 케이블은 모터 드라이버와 무게 센서 증폭기, 두 시스템으로 분리되어 있습니다.(사진:카토 애스시)

### 5.2.4 무릎 관절 구동용 모터

무릎 관절 구동 시스템의 구동 모터에는 알루미늄 다이캐스팅 케이스에 장착된 고정자가 있습니다 (그림 5.13). 고정자에는 18개의 슬롯이 있습니다. 권선은 집중 권선 방식입니다. 후면에는 “U”, “V”, “W”상 단자가 120도 간격으로 노출되어 있으며, 이 단자는 구동 회로 기판과 직접 연결됩니다. 각 코일은 6개의 슬롯에 분포되어야 하므로 ( $3 \times 6 = 18$ ), 이 단자와 고정자 코일 사이에는 회로 기판이나 버스바가 있는 것으로 보입니다. 모터 구동 회로 기판의 중앙에는 허 IC가 배치되어 있으며, 이는 모터 축 중심에 부착된 자석을 마주보고 있어, 모터의 회전 각도를 감지하는 역할을 합니다.



그림 5.13: 무릎 관절 구동 모터 본체  
고정자 코일은 접착제를 이용해 알루미늄 다이캐스팅 케이스에 고정되어 있습니다.(사진:가토  
아쓰시)

그림 5.14, 그림 5.15에는 20 슬롯 18극 동기 전동기를 구동하는 인버터 회로 기판이 나타나 있습니다. 이 회로 기판은 원형의 컴팩트한 형태로 설계되었고, 외부 서지 전류를 방지하기 위한 외장형 전해 콘덴서가 장착되어 있습니다. 기판에는 UVW 구동 모터의 3상 회로가 배치되어 있으며, 원주를 따라 120도 간격으로 3개의 구역이 패턴화되어 있습니다. 전동기의 출력은 별도의 케이블 없이 기판에서 바로 코일을 통해 각 상으로 연결됩니다.

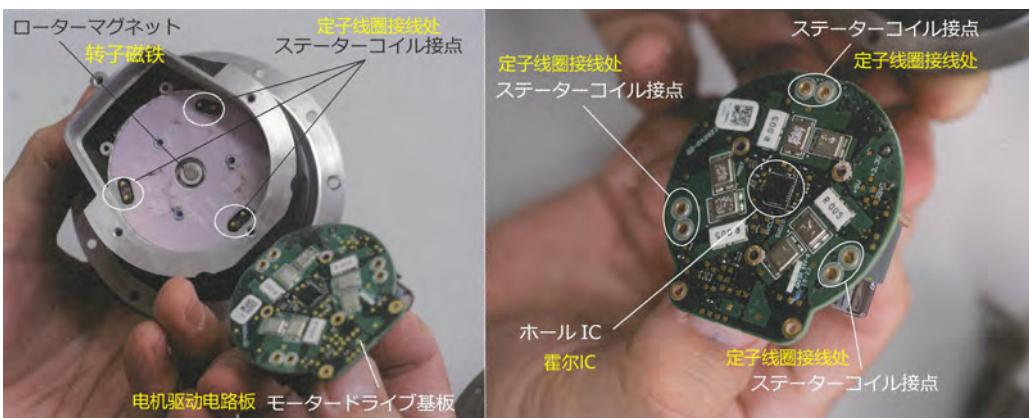


그림 5.14: 무릎 관절 구동용 모터 드라이버 기판의 A면이 기판만 장착하면 모터의 고정자 코일 연결과 회전 각도 측정용 헤일 IC 설정을 동시에 완료할 수 있습니다.(사진:가토 야스시)

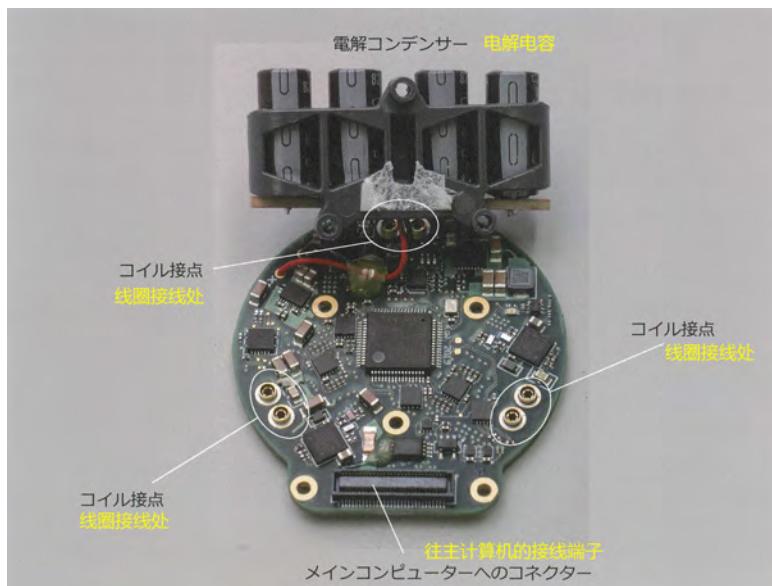


그림 5.15: 무릎 관절 구동용 모터 드라이버 기판의 B면 작고도 다양한 기능을 갖춘 모터 드라이버 기판. 모터 구조는 X축과 Y축 모터와 동일합니다.(사진:가토 야스시)

홀IC는 뒷면 중앙에 위치하며, 모터 로터 끝에 연결된 자석과 서로 마주보게 하여 회전 위상을 측정합니다. 이 모터는 전원과 회전 명령 신호 입력으로 동작합니다. 모터에 전달되는 명령의 목표값은 인코더의 목표 위치(무릎 각도)로 추정됩니다.

20개의 자석이 파란색 알루미늄 산화 처리된 모터 회전자 돌출부 표면에 직접 부착되어 있습니다 (그림 5.16). 즉, 이 모터는 20극 18슬롯의 SPM(Surface Permanent Magnet) 타입 모터입니다. 중앙의 은색 알루미늄 부분은 자석을 고정하기 위한 브래킷 역할을 합니다. 중앙 자석은 반대편 회로 기판에 있는 홀IC로 회전자의 회전 위상을 측정합니다. 모터의 이 면에는 베어링이 없습니다.

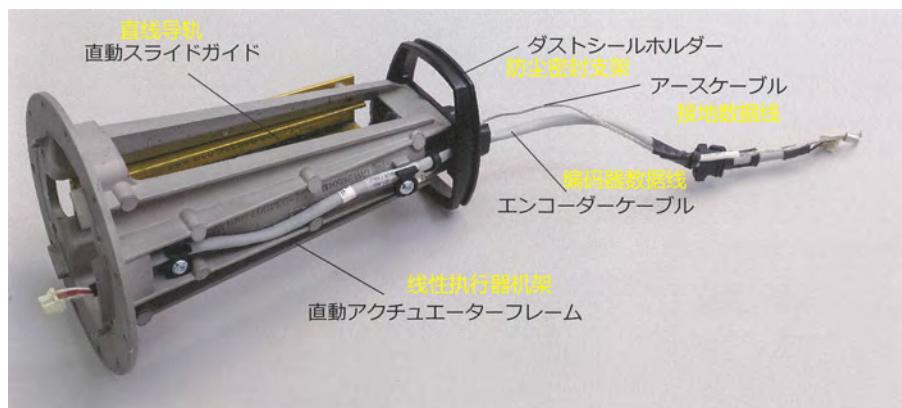


그림 5.16: 무릎 관절 구동 모터 회전자 자석과 홀IC 모터 회전자 단부 자석과 모터 구동 보드 중앙의 홀IC가 마주보고 있어, 회전자의 회전 위상을 측정합니다.(사진:가토 야스시)

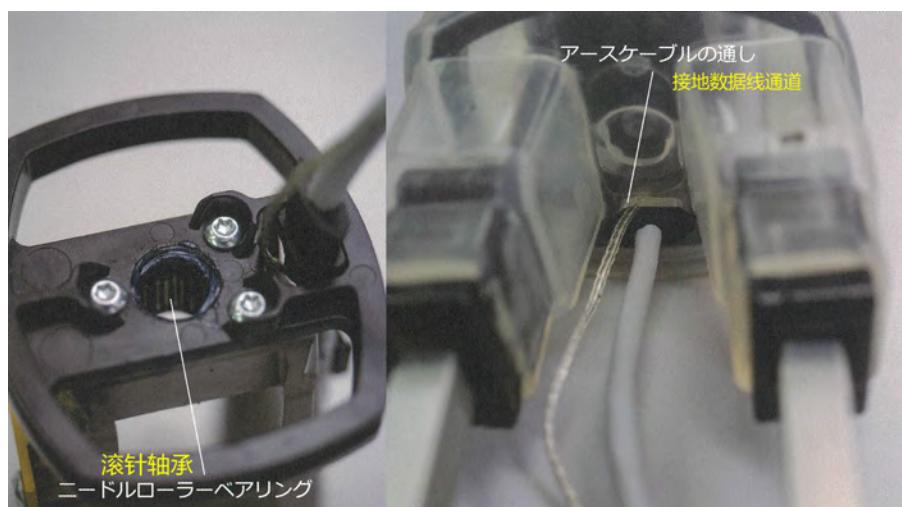
베어링은 볼스크류의 끝부분과 회전자 뒷면의 모터 커버, 이 두 가지 지지 구조로 구성되어 있습니다. 만약 모터 볼스크류의 반대편에 베어링을 설치하고, 긴 축 방향에 추가 지지대를 부착해 조립할 경우, 동심도가 충분히 맞지 않으면 베어링이 간섭하여 부드럽게 회전하지 못할 수 있습니다. 이러한 이유로, 이 구조에서는 볼스크류 반대편에 베어링이 설치되어 있지 않을 가능성이 있습니다. 다소 과할 수 있지만, 이 자석 고정대의 부품 번호는 레이저로 부채 모양으로 각인되어 있어 디자인이 매우 정교합니다.

### 5.2.5 링크 주변 부품

도 5.17은 볼스크류의 직선 운동을 지지하는 프레임을 보여줍니다. 본체는 주조 알루미늄 합금으로 제작되었습니다. 전면에는 볼스크류 앞단을 지지하는 바늘 베어링이 장착되어 있고, 전면의 수지 부품은 씰링 고정을 위한 역할을 합니다. 이 씰링 부위는 선형 이동 슬라이더에 연결된 두 개의 로드를 부드럽게 지지합니다. 무릎 각 변위를 측정하는 엔코더의 케이블도 이 수지 부품과 와셔를 거쳐 구동 시스템 내부에서 밖으로 빠져나옵니다 (도 5.18). 자세히 보면 신호선 케이블과 접지선이 케이블 글랜드 바깥으로 나가는 것을 볼 수 있습니다. 이는 명백히 개량된 대응 사양으로, 노이즈 억제를 위한 흔적임을 알 수 있습니다.



도 5.17: 선형 액추에이터 프레임 액추에이터의 직선 운동 측 프레임입니다. 여기에서 볼스크류의 회전 운동이 직선 운동으로 변환됩니다.(사진:가토 야스시)



도 5.18: 무릎 관절 리니어 액추에이터 알루미늄 프레임의 전면부 전면에는 니들 롤러 베어링이 설치되어 있습니다. 그 위에는 실리콘 방진 씰이 장착되어 있고, 메쉬 접지선이 케이블 경로 외부를 따라 연결되어 있습니다.(사진:가토 야스시)

로드의 고정 부위에는 검은색 슬라이드 씰 부품이 있으며, 실리콘 캡 안에 장착되어 있습니다 (그림 5.19). 구조는 로드 단면 주위를 따라 미끄러지며 감싸는 하얀 펠트가 포함되어 있고, 로드는 중앙에 위치하여 검은색 수지 하우징으로 고정됩니다. 하얀 펠트에는 오일이 스며들지 않은 것으로 보입니다.

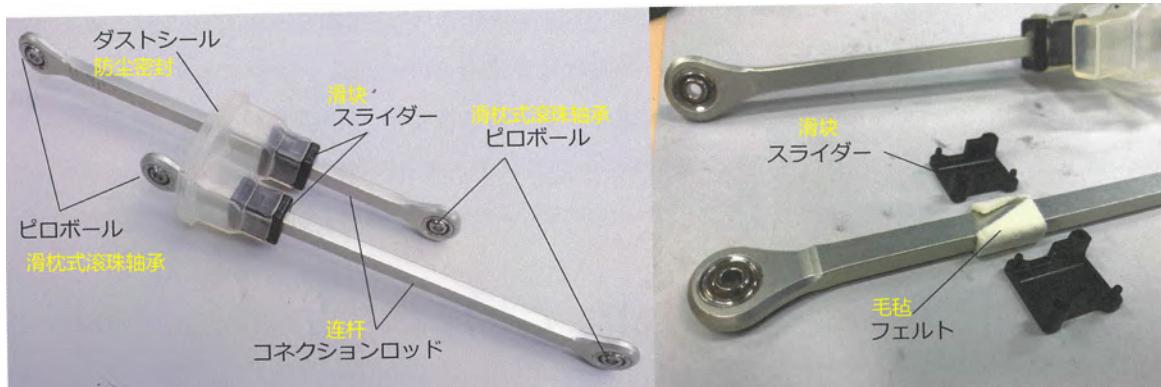


그림 5.19: 연결봉의 주변부는 가공된 알루미늄 봉 양쪽 끝에 슬라이딩 베어링이 삽입된 구조를 채택했습니다. 먼저 방지 씰이 적용된 슬라이딩 파트가 펠트와 사출 성형된 수지 부품을 중간에 끼우고 있습니다.(사진:가토 야스시)

각 연결봉은 특별히 설계·가공되어, 볼 조인트(베어링 볼)가 양쪽 끝에 삽입되어 있습니다. 원형 단면의 알루미늄 봉 양쪽 끝에 기존의 로드 엔드 구조를 사용하면 비용과 품질 면에서 유리할 것 같으나, 왜 사각 단면을 선택했는지는 명확하지 않습니다. 밀봉성을 신중하게 고려할 때, 사각 단면은 불리한 점이 분명합니다.

### 5.2.6 선형 액추에이터 하우징 주변

그림 5.20에서는 유리섬유 강화 플라스틱으로 사출 성형된 선형 액추에이터 외장이 보여집니다. 이 외장은 무릎 아래를 지탱하는 구조 프레임 역할도 겸합니다. 무릎 아래에 큰 하중이 걸리기 때문에, 강도와 강성이 매우 높게 설계되어 있습니다. 2개의 링크와 무릎 회전각을 측정하는 엔코더 케이블이 통과할 수 있도록 개구부가 마련되어 있는데, 각각 실(seal)과 와셔(고무 패킹)를 통해 통과합니다(그림 5.21). 이 부분은 설계와 조립이 복잡하여, 밀폐성의 안정성을 보장하기 어렵습니다.



그림 5.20: 무릎 관절 구동부의 선형 액추에이터 외장은 팔의 뼈대와 대응합니다. 외골격에는 근육(액추에이터)이 포함되어 있습니다(액추에이터). 구조는 게 다리와 유사하며, 축의 각도를 측정하는 엔코더가 끝부분에 장착되어 있습니다. (사진:카토 야스시)



그림 5.21: 무릎 관절 구동 유닛의 선형 액추에이터 외함 내부에는 선형 액추에이터의 두 링크 헤드가 통과할 수 있는 창과, 오른쪽에는 인코더 케이블이 통과하는 창이 있습니다.(사진:카토 야스시)

인코더는 무릎의 각도에 따라 회전하는 마그네틱 디스크와 홀 센서를 이용해 각도를 측정하는 구조입니다 (그림 5.22, 그림 5.23)입니다.



도 5.22: 무릎 관절 구동용 인코더 구조 무릎 각도와 연동된 자석 디스크의 각도를 홀IC가 측정합니다. 덮개 쪽의 구리판은 다리에 발생한 정전기를 차체 쪽 접지로 방전시킵니다. 손가락 끼임에 주의하라는 노란색 경고 라벨이 있습니다.(사진:가토 야스시)



도 5.23: 다리 인코더의 상세 구조 통합 디스크가 장착된 톱니 형태로 무릎 회전축에 압착되어 결합됩니다. 홀IC는 빨간색 회로 기판에 설치되어 자석 디스크의 회전 각도를 측정합니다.(사진:가토 야스시)

## 5.3 Y축 구동 유닛

### 5.3.1 Y축 구동 구성

그림 5.24는 다리 구동 부품에서 분리된 무릎 관절 구동 유닛을 보여줍니다. 오른쪽에 위치한 알루미늄 다이캐스트 케이스는 무릎 관절 구동 브래킷이며, 앞면의 원형 플랜지는 Y축 구동 유닛과 결합되는 커넥터입니다.



그림 5.24: 무릎 관절 구동 브래킷은 어깨 또는 엉덩이 관절의 2축 회전 유닛과 대응합니다. 선형 액추에이터 기구가 플랜지 단면에 연결되어 있습니다.(사진:가토 야스시)

Y축 구동 유닛은 8개의 고정 볼트로 연결됩니다. 설치 플랜지의 직경이 브래킷보다 작기 때문에, 긴 육각 렌치를 사용해 반대쪽에서 브래킷을 관통하여 돌려야 합니다(그림 5.25)입니다.

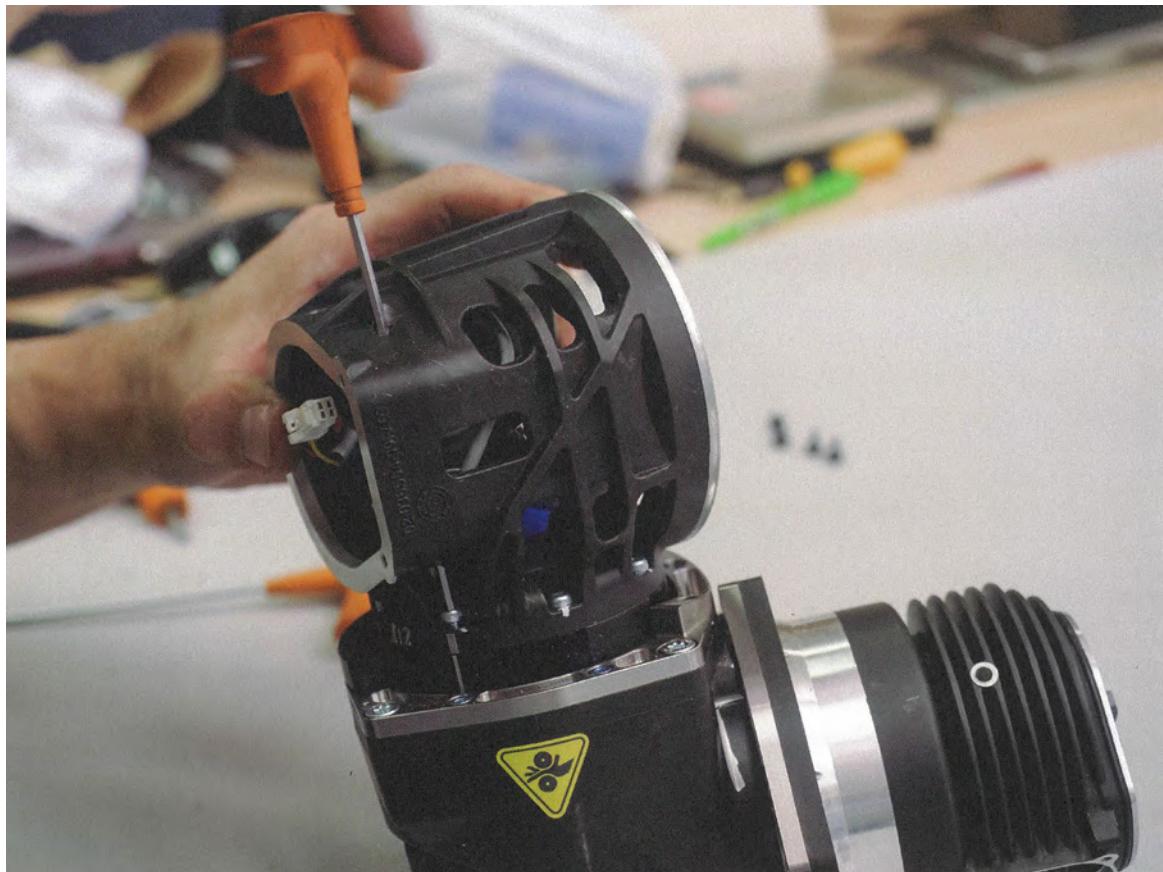


그림 5.25: 무릎 구동 브래킷 볼트는 도구를 사용해 폴리야 Y축에 구동 장치를 연결할 수 있습니다.(사진:가토 앤스시)

Y축 구동 유닛, X축 구동 유닛 그리고 Knee 구동 유닛이 서로 밀착되어 틈이 전혀 없습니다 (그림 5.26, 그림 5.27).



그림 5.26: X축과Y축 구동부의 구성  
복잡한 다리 움직임을 구현하기 위해 각 축이 효율적으로 밀집되어 배치되어 있습니다.(사진:가토 야스시)



그림 5.27: 무릎 구동부 쪽에서 바라본Y축 구동 유닛  
플랜지 주변의 8개 블트를 풀면 쉽게 분해할 수 있습니다. 케이블에는 마커펜으로 표시된 눈금이 있으나, 그 의미는 확인되지 않았습니다.(사진:가토 야스시)

Y축 구동 유닛은 플랜지 부분의 8개의 M4볼트를 제거하면 분해할 수 있습니다. 커버를 열면 하모닉 드라이브가 나타납니다. 하얀 띠 모양의 케이블은 무릎 구동을 담당하는 플랫 케이블로, 노란색과 파란색 가이드 레일을 따라 배치되어 내부의 튜브형 하모닉 드라이브 회전 시스템에 방해가 되지 않도록, 고사리 잎처럼 나선형으로 감아 정리되어 있습니다 (그림 5.28). 동작 각도가 작기 때문에, 슬립링 대신 이와 같은 원시적인 방식으로 전기 신호가 회전부로 전달됩니다.



그림 5.28: Y축 구동부 내부 구조 로봇의 구동 장치에는 종종 하모닉 드라이브가 장착됩니다. 평면 케이블이 나선형으로 감겨 있어 각도 이동이 가능합니다. 자동차 조향 장치 등 다양한 곳에서 활용되는 구조입니다.(사진:가토 야스시)

이 무릎 관절 구동용 플랫 케이블은 본체에 연결됩니다. 이 케이블은 Y축 구동 단자와 동일한 터미널 및 하네스를 공유하며, 배선판을 통해 주 컴퓨터에 연결됩니다 (그림 5.29).

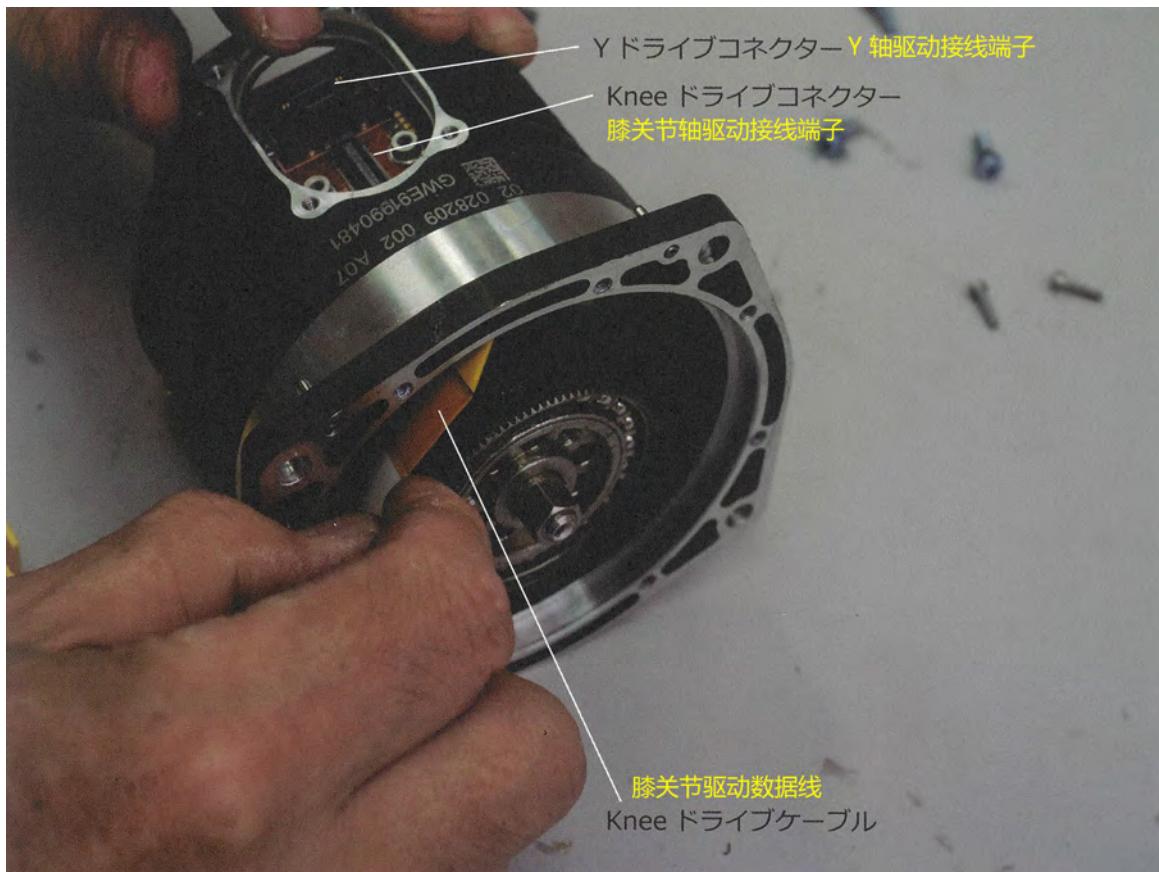


그림 5.29: 무릎 관절 구동용 플랫 케이블 내부 플랫 케이블이 단자 커넥터에서 회로 기판에 연결되며, Y축 구동 배선과 함께 주 컴퓨터에 동축 연결됩니다.(사진:가토 야스시)

### 5.3.2 Y축 구동 모터

Y축 구동부의 모터와 무릎 관절 구동부의 모터는 동일한 SPM(Surface Permanent Magnet)형 동기 모터를 사용합니다 (그림 5.30). 스테이터는 모터 외관에 고정되어 있습니다. 모터 커버를 분리할 때 Leutor 그라인더로 나사 머리를 제거하며 내부에 깊은 자국이 남을 수 있습니다. 나사 4개의 축이 보이며, 그 머리 부분이 외관에서 깎여 나간 상태입니다. 9개의 M2.3 × 6 mm 길이의 나사는 나사 고정제를 사용해 모터 커버를 단단히 고정합니다. 나사 머리가 나사 강도가 부족하거나 육각 구멍이 맞지 않아 손상되는지는 아직 확실하지 않습니다. 여러 번 분해와 조립을 반복해본 결과, Spot에 사용된 나사는 비교적 부드럽다는 인상을 받았습니다. 실제로 분해 작업 중에 많은 나사 머리가 손상된 경험이 있습니다.

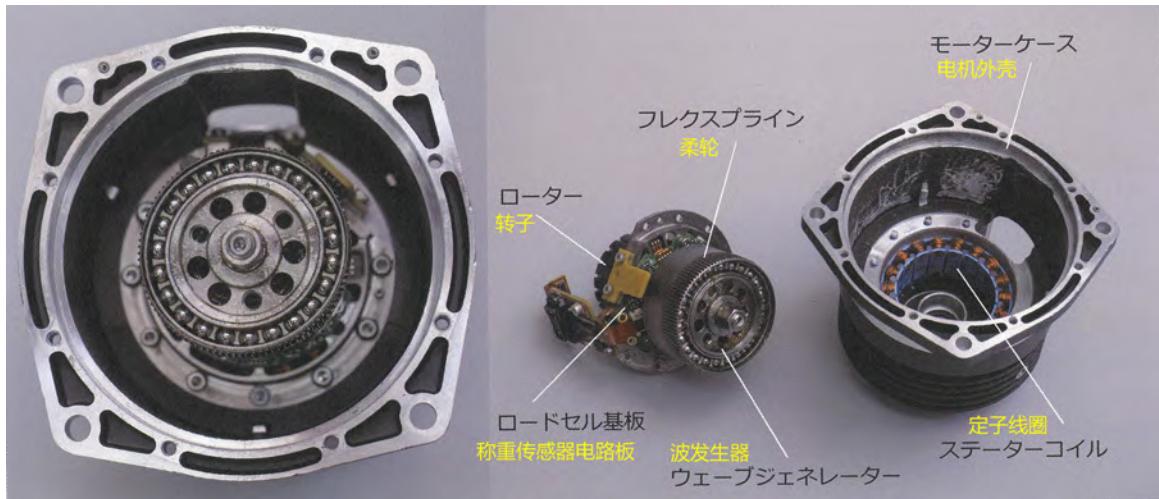


그림 5.30: Y축 구동부 분해 하모닉 드라이브 웨이브 제너레이터가 모터 출력축에 직접 연결되어 있습니다. 모터 외관 내부의 깊은 자국은 나사 머리 제거와 분해 시 남은 흔적입니다.(사진:가토 야스시)

분해된 부품의 구성은 그림 5.31에 나와 있습니다. 중앙 왼쪽은 모터, 오른쪽은 감속기(하모닉 드라이브)의 입력 부분입니다.

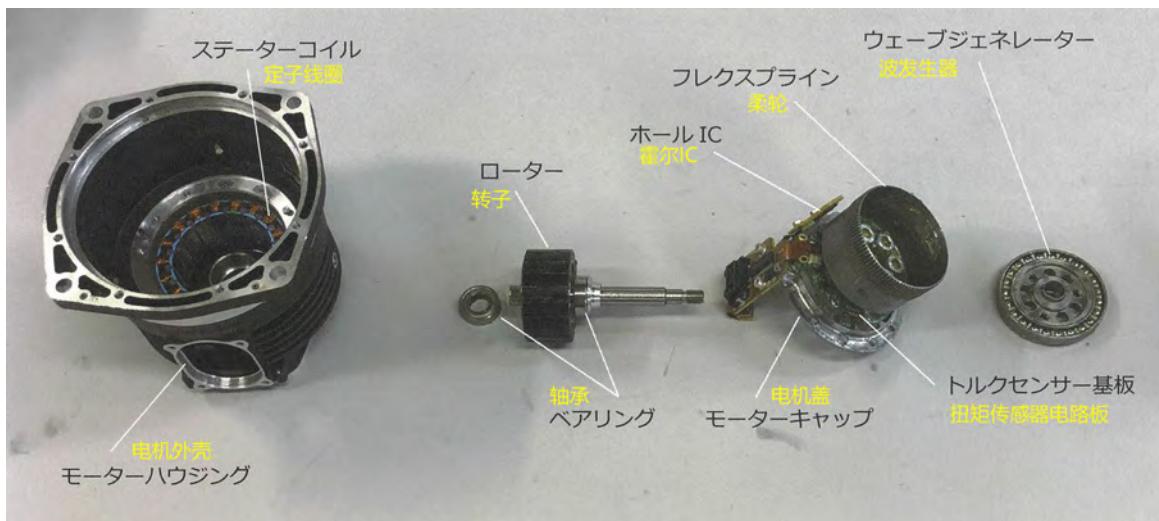


그림 5.31: Y축 구동 유닛 모터 부분은 모터에서 나온 감속기(하모닉 드라이브) 입력 부분의 구조를 보여줍니다.(사진:마쓰다 아즈시))

무릎 관절 구동 유닛의 모터와는 달리, Y축의 회전자는 양쪽에 위치한 베어링에 의해 지지됩니다 (그림 5.32, 그림 5.33). 숙련된 설계자가 구조상의 이유로 의도적으로 변경하여, 무릎 관절 구동 유닛의 모터 베어링과 Y축 베어링을 배치했습니다. 이곳의 돌출부는 컬러 알루미늄이 아니며, 색상 차이는 부품 혼동을 방지하기 위한 것으로 보입니다. 중심 자석에는 별도의 지지대가 없어, 수지 스페이서와 함께 축에 바로 부착되어 있습니다. 설계 난이도가 상당히 높다고 할 수 있습니다.

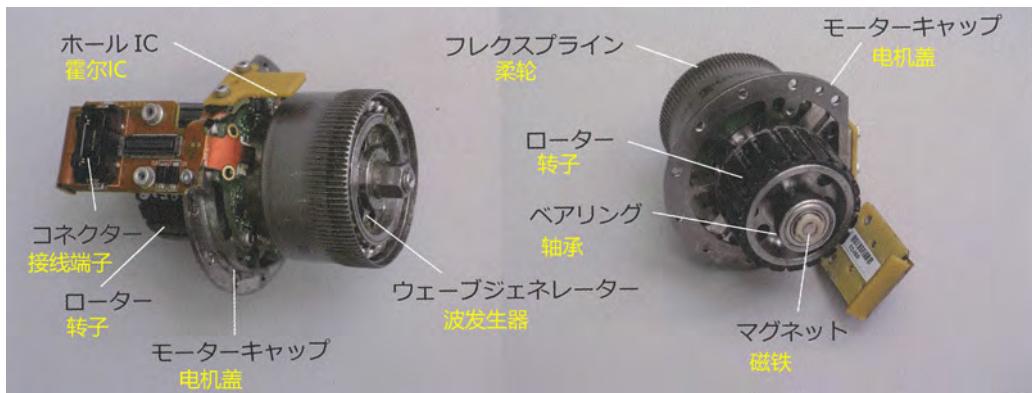


그림 5.32: Y축 구동 유닛의 로터 부분은 무릎 구동과 달리, 모터 로터 양쪽에 베어링이 있습니다.(사진:가토 야스시)



그림 5.33: 모터 측의 베어링은 미베야산미의 미니아처 베어링이 사용되었습니다. 제조국은 태국입니다.(사진:마쓰다 아츠시)

### 5.3.3 Y축 구동 토크 센서 회로 기판

“Y축 모터 커버”에는 하모닉 드라이브 플렉스휠을 장착할 수 있는 돌출부와 무게 센서 회로 기판이 있습니다 (그림 5.34). 회로 기판에는 “MIPTOR QUE CELL AMP CARD”라고 적혀 있으며, 내부에는 스트레인 게이지로 보이는 두 가닥의 배선이 연결되어 있습니다. 이는 구동 반작용력을 측정하는 토크 센서로 보입니다.

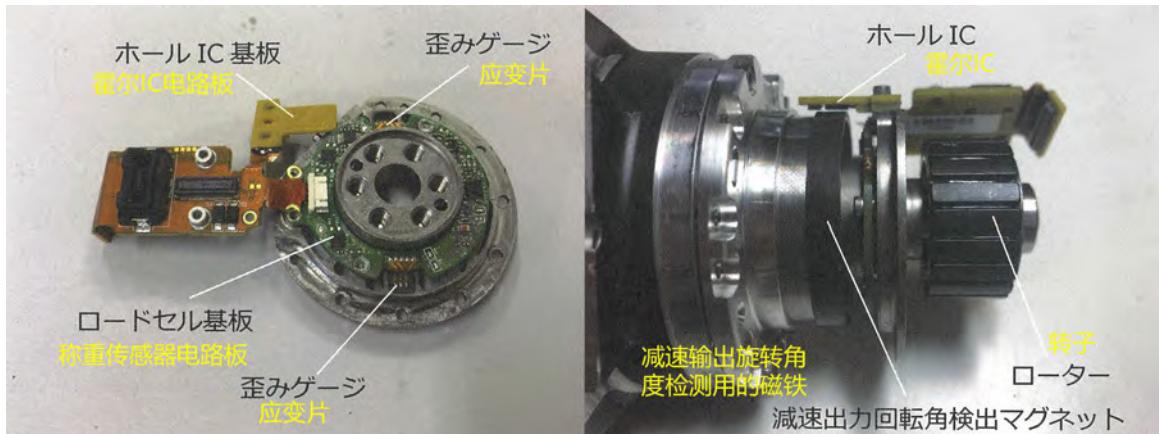


그림 5.34: 토크 센서 회로 기판이 장치는 하모닉 드라이브의 구동 반작용력을 측정하는 무게 센서입니다. 또한, 훌 IC를 활용해 회전 출력 유닛의 변위 각도를 측정하는 회로도 내장되어 있습니다. (사진:마쓰다 아츠시)

훌IC는 그림 5.34의 왼쪽 돌출된 회로 기판에 장착되어 있으며, 오른쪽 그림처럼 이 장치의 회전 각도는 하모닉 드라이브 플렉서 휠과 맞물린 퀘일리턴스 휠의 바깥 둘레에 부착된 자석으로 감지됩니다. 훌IC 회로 기판에는 “MU Y2HC\_44 19702”라는 문구가 새겨진 독일iC-Haus의 훌IC가 탑재되어 있습니다.

그림 5.35에는 처음부터 나사가 설치되지 않은 상태가 나타나 있으며, 이는 평면 케이블 부분의 나사를 제거한 이후가 아닙니다. 회전 부의 원통과 하모닉 드라이브의 웨이브 제너레이터(베어링 볼이 보이는 부분)이 맞물려 있지만, 이 위치에 나사를 설치하면 원통에 간섭이 생기므로 나사가 생략된 것으로 추정됩니다. 다른 모터의 조립 방식과 동일하기 때문에, 단순히 조립 과정에서 빠진 것이 아니라 의도적으로 나사를 설치하지 않은 것입니다.

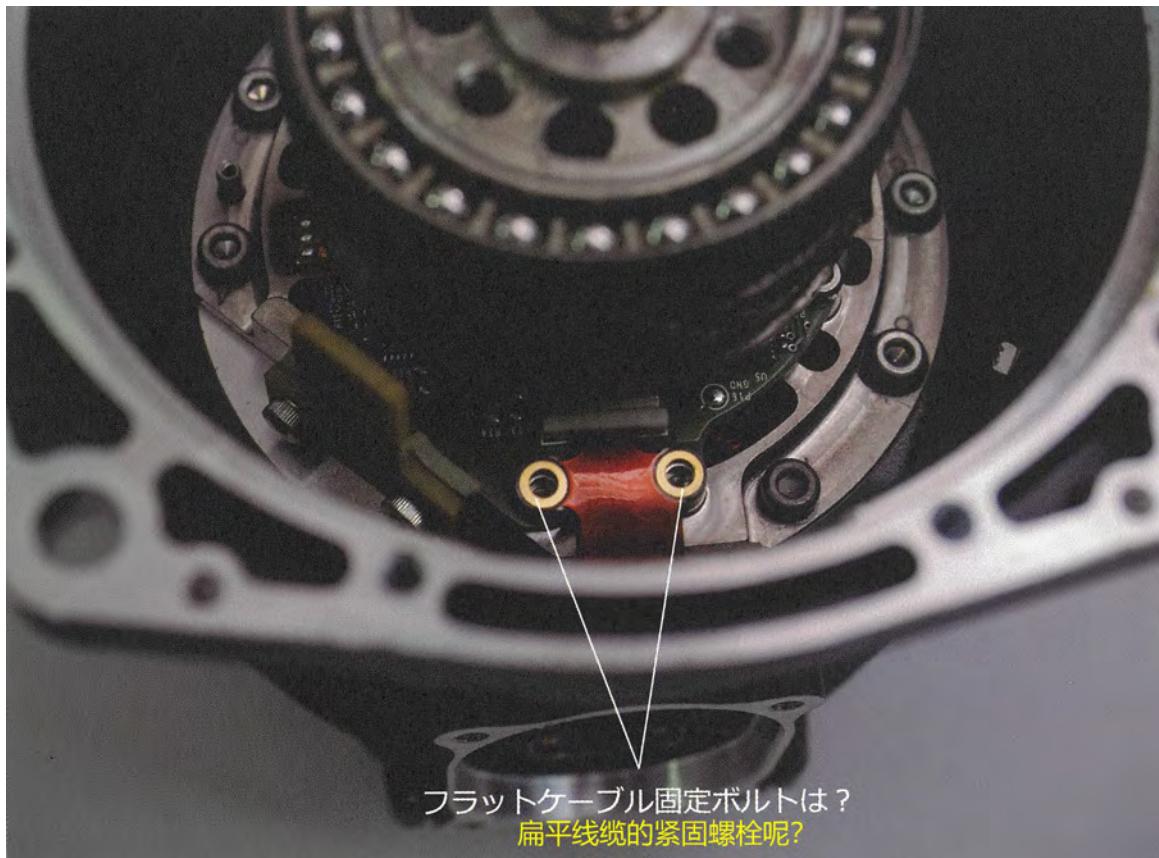


그림 5.35: 무게 센서 보드에 연결되는 플랫 케이블 고정 나사가 생략됨 이것은 Y축 구동 유닛의 사진이며, X축 구동기 또한 동일하므로 나사는 의도적으로 제거된 것으로 판단됩니다.(사진:가토 야스시)

## 5.3.4 하모닉 드라이브

감속 장치는 ‘하모닉 드라이브’를 적용하였으며, 그 구조는 그림 5.36에서 볼 수 있습니다. 하모닉 드라이브는 유사한 시리즈가 많아 정확한 모델 구분은 어렵지만, 크기가 17이고 감속비는 50:1로 확인됩니다.



그림 5.36: 하모닉 드라이브 감속 장치 구성 웨이브 제너레이터, 플렉스스플라인, 링기어 등 3개의 부품을 이용해 50대 1 감속을 실현합니다.(사진:마쓰다 아츠시)

치수가 100인 플렉시블 휠이 타원형으로 변형되어, 그림 5.37의 오른쪽처럼 102치의 내부 기어 휠에 조립됩니다. 타원의 위쪽과 아래쪽은 맞닿아 있지만, 양옆에는 틈이 있습니다. 모터가 내부 웨이브 제네레이터를 회전시키면, 내부와 외부 기어의 맞물림 위치가 움직입니다. 타원이 한 바퀴 돌면 기어의 원 둘레가 고정된 내부 플렉시블 휠에 비해 서로 다른 두 치만큼 회전하게 됩니다. 이것이 바로 하모닉 드라이브의 감속 원리입니다. 모터 축이 한 바퀴 돌 때 두 치가 전달되어 감속비는 100:2, 즉 50:1이 됩니다. 50:1 감속비는 17 사이즈 시리즈 중 가장 작으며, 이 시리즈에는 최대 감속비가 120:1인 제품도 있습니다. 이처럼 동일한 크기, 무게, 부품 수에서 큰 감속비를 구현할 수 있는 감속기는 없기 때문에, 이 방식이 로봇용 감속기어의 표준으로 자리 잡았습니다.



그림 5.37: 하모닉 드라이브 시스템의 원리 타원형 웨이브 제네레이터가 회전하면서 맞물림 위치가 변하면, 강휠과 플렉스휠의 한 바퀴 회전 시 발생하는 치수 차이에 의해 강휠이 구동됩니다. 가장 오른쪽 사진을 보면, 오직 상단과 하단만 맞물려 있는 것을 볼 수 있습니다.(왼쪽 그림은 Harmonic Drive Catalog에서 발췌, 사진: 마쓰다 아츠시)

도면 5.38에 나온 대로, 아래쪽 검은색 부분을 설치하고 회전시키면 이것이 Y축 회전이 됩니다. 하모닉 드라이브 감속기 부품은 아래 그림과 같이 구성되어 있고, 하모닉 드라이브의 강체 기어는 왼쪽 끝의 검은색 돌출된 알루미늄 파트 안에 통합되어 있습니다. 왼쪽에서 두 번째 감속 회전 좌에는 오른쪽의 인코더 측정용 원통형 돌출 부분(인코더 돌출부)이 단단히 고정되어 있습니다.(인코더 돌출부)



그림 5.38: **하모닉 드라이브 감속기 출력 구조** 사진의 왼쪽에 보이는 모터가 회전을 유도하며, 하모닉 드라이브 감속기를 통해 1/50로 감속되어 회전 베이스가 움직입니다. 인코더 돌출부는霍IC로 회전 각도를 측정하는 기능 외에, 대형 베어링으로 축 시스템을 견고하게 고정하기 위해 다수의 나사로 단단히 결합되어 있습니다.(사진:마쓰다 아츠시)

### 5.3.5 주변 회전 부품

인코더 돌출부에는 나사 구멍이 있는 알루미늄 플랜지에 강철 원통이 압입 고정되어 있으며, 원통의 바깥쪽에는 띠 모양의 자석이 부착되어 있습니다(그림 5.39). 인코더 돌출부 부품에는 위치 결정용 핀 구멍이 있어, 압입 조립 시 정밀한 위치를 맞출 수 있습니다. 이는 강철 원통에 감긴 자석의 자화 패턴 위치와 조립 각도의 정확도를 높이기 위한 설계입니다. 이 부분은 모터 구동 회로 기판과 연결된 휠IC 회로 기판이 실시간으로 회전 각도를 감지하는 역할을 합니다. 플랜지의 나사 구멍 근처에는 숫자가 새겨져 있는데, 이를 통해 조임 순서를 알 수 있으며, 대각선 별 모양으로 순서가 그려져 있습니다. 나사의 크기는 M2.3 × 12mm이고, 총 14개의 나사가 사용되며, 이 중 한 개만 검은색으로 도장되어 있습니다. 재질은 크롬강으로 보이고, 육각 구멍도 꽉 막혀 있습니다. 하모닉 드라이브 카탈로그에는 설치 볼트로 강도 12.9 이상을 사용할 수 있다고 안내되어 있어, 이 사양이 적용된 것으로 보입니다. M2.3 나사의 조임 토크도 상당히 큽니다. 이러한 설계는 하모닉 드라이브의 장착 정밀도와 강성을 보장하기 위함으로 해석할 수 있습니다.



그림 5.39: 인코더 돌출부 자석이 부착된 철제 원통이 주조 알루미늄 부품에 압입되어, 휠IC를 통해 회전 위치를 감지합니다. 나사의 조임 순서도 각인되어 있으며, 전체적으로 매우 아름답고 정교하게 설계된 부분입니다.(사진:마쓰다 아츠시)

하모닉 드라이브로 지지되는 모터 하우징 출력축의 대형 베어링은 베어링 리미터로 단단히 고정됩니다 (그림 5.40, 그림 5.41). 스테인리스 스틸 소재로 완전 가공되어 경량화되었으며, 무게는 45 g입니다. 베어링은 내경 70 mm, 외경 81 mm, 폭 6 mm의 슬림한 타입입니다. 제조사는 THK이며, MADE IN JAPAN이라는 문구를 볼 수 있습니다.



도 5.40: 대구경 베어링은 THK에서 제작되었습니다.(사진:마쓰다 아츠시)



도 5.41: 베어링 스토퍼는 모터 하우징 끝에 내장된 대구경 베어링 플랜지를 고정하는 역할을 합니다. 스테인리스 스틸로 정밀 가공되었습니다.(사진:마쓰다 아츠시)

## 5.4 X축 구동 유닛

### 5.4.1 X축 구동 구조

X축 구동은 다리의 가장 안쪽 관절로, 고관절에 해당합니다. Y축 구동은 무릎의 회전 각도를 제어하며, X축 구동은 Y축 구동과 그에 연결된 무릎 구동의 회전 각도를 함께 제어합니다.



그림 5.42: X축 구동과 Y축 구동 회전 시스템은 X축과 Y축을 결합하여 무릎의 출력 방향을 결정합니다.(사진:가토 야스시)

X축 구동 메커니즘은 회전축 감속 출력 방식으로, Y축과 동일하게 모터와 하모닉 드라이브로 구성되어 있습니다. X축 구동기는 Y축 드라이버의 고정 플랜지를 잡아주는 대형 브래킷이 장착되어 있습니다. 분해할 때 쉽게 풀리지 않는 볼트가 하나 있지만, 자세히 보면 풀 수 있도록 홈이 미리 마련되어 있습니다.



그림 5.43: 나사를 풀 수 있도록 마련된 홈은 X축에서 Y축 모터 플랜지 고정용 대형 브래킷을 피할 수 있도록 합니다.(사진:마쓰다 아츠시)

모터 부분과 회전부가 분리될 때, 회전 스토퍼에서 가공 흔적이 발견되어 회전 범위를 결정하는 스토퍼 위치가 넓혀진 것을 알 수 있습니다 (그림 5.44). 아마도 Y축의 스윙 폭, 즉 '벌림' 각도를 더 넓히기 위한 것일 수 있습니다.



도 5.44: 회전 범위 확장 가공 흔적 Y축 구동 브래킷의 X축 이동 범위를 결정하는 스토퍼 위치를 넓히기 위해 절삭 가공 자국이 남아 있습니다.(사진:가토 야스시)

모터와 하모닉 드라이브 구조는 Y축 구동과 동일합니다.

## 제 6장 전자 부품

## 6.1 전기 연결

### 6.1.1 연결 위치

Spot의 전기 시스템은 앞부분과 뒷부분에 각각 독립적인 구조로 되어 있습니다. 한쪽에 문제가 생겨도 다른 쪽이 계속 작동할 수 있는지는 확실하지 않지만, 이는 군사 기술에서의 안전 설계 개념과 관련이 있을 수 있습니다.

그림 6.1은 앞부분의 배선 구성입니다.

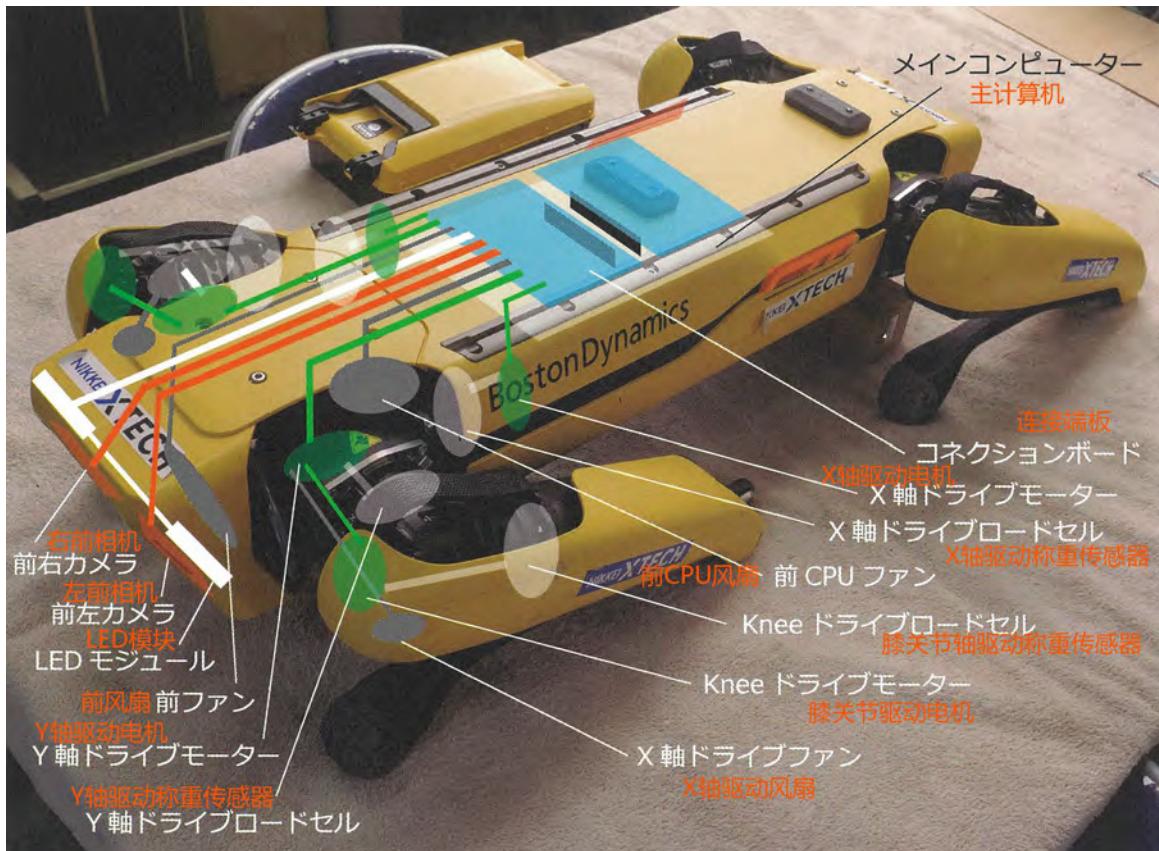


그림 6.1: Spot의 앞부분 배선도 전면 연결 단판의 배선 스케치입니다.(이미지:마쓰다 아츠시가 가토 야스시의 사진에 문자를 추가함)

그림 6.2는 후면 하네스의 배선 구성입니다.



도 6.2: Spot의 후면부 배선도

메인보드와 전선 하네스의 연결 구조를 살펴보면, 도표 6.3에 나타난 바와 같이 깔끔하고 합리적으로 구성되어 있습니다. 이러한 간단한 시스템 구성 덕분에 전기 하네스 역시 필수적이며 불필요한 낭비가 없습니다. 그러나 4.4방수 및 방진 대책에서 언급한 바와 같이, 하네스의 커넥터 부분에서는 방진, 방수, 반복 연결에 대한 내구성 등에서 신뢰성과 내구성이 크게 떨어지는 문제가 존재합니다.

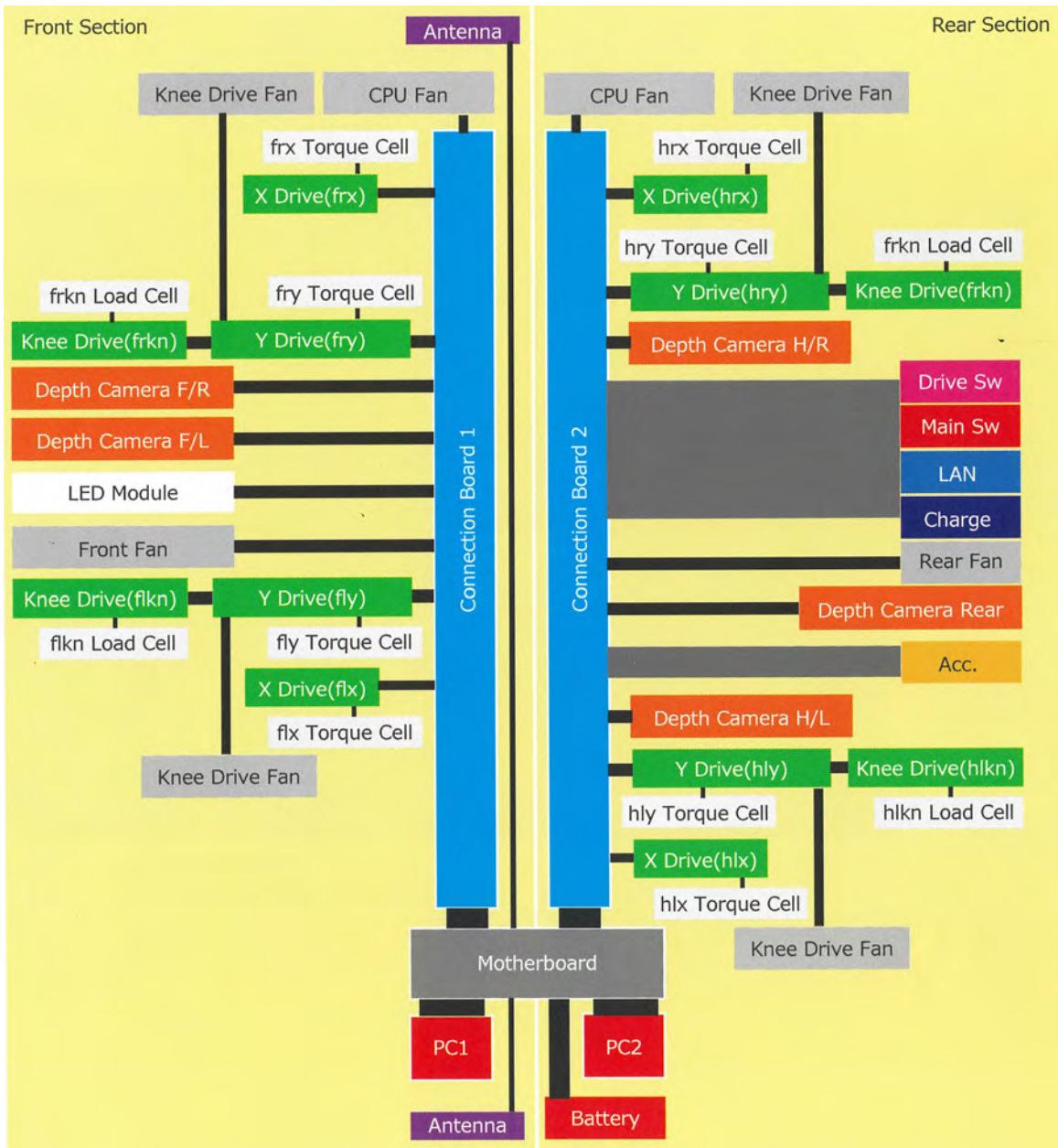


그림 6.3: 전체 시스템 구성도 전반부와 후반부 시스템이 엄격하게 분리되어 있습니다.(이미지:마쓰다 아즈시 정리)

### 6.1.2 외부 인터페이스

Spot은 외부 장치와 총 3개의 주요 위치에서 연결됩니다. 첫 번째는 후면 랙에 있는 이더넷 포트, WiFi 그리고 뒷면의 Payload 확장 커넥터입니다. 이더넷 포트는 1000BASET에 대응하는 RJ45 (그림 6.4)로 준비되어 있습니다. 이더넷 케이블로 LAN 스위치나 PC에 연결해 PC에서 다양한 설정을 할 때 사용할 수 있습니다. WiFi 또한 동일하게 사용할 수 있습니다.



그림 6.4: **후면 랙의 이더넷 포트** 왼쪽 상단 커버를 제거하면 RJ45 포트가 보입니다. 이 포트에 PC를 직접 연결해 설정이나 명령 작업을 수행할 수 있습니다.(사진:가토 야스시)

후면에는 2개의 페이로드 포트가 있으며, 모두 D-SUB 25핀 커넥터입니다 (그림 6.5).



그림 6.5: Spot의 페이로드 전용 확장 커넥터는 페이로드 연결에 사용됩니다. 이더넷, 전원, 전원 스위치 등 다양한 핀을 지원하며, D-SUB 25핀 커넥터를 사용합니다. (사진: 가토 야스시)

후면 랙과 Payload 확장 커넥터는 모두 메인 컴퓨터의 접속 패널에 연결됩니다 (그림 6.6). FPC 플랫 케이블을 사용하여 연결합니다 (그림 6.7).

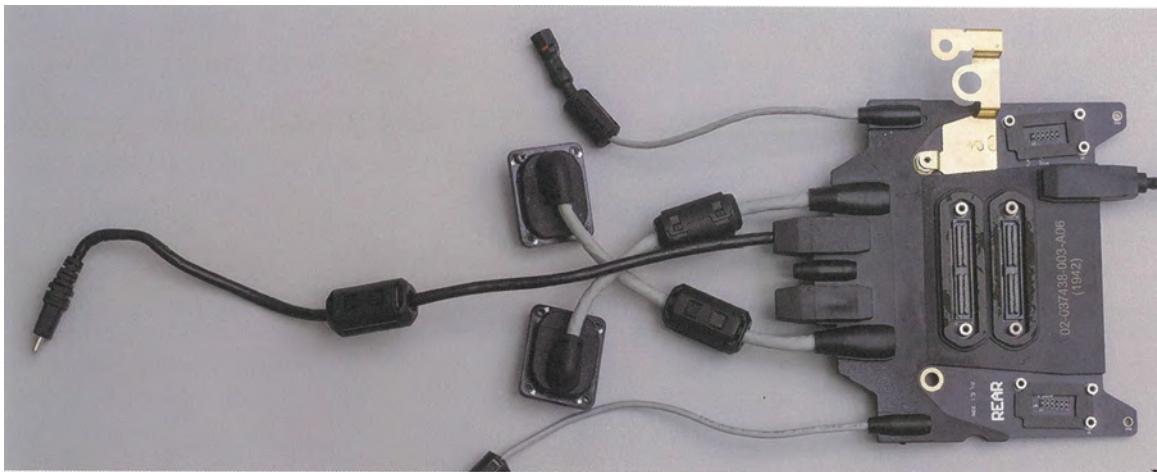


그림 6.6: 메인 컴퓨터와 주변 장치를 연결하는 후면 단자판이 판의 왼쪽 커넥터는 후방 랙과 연결되어 있으며, 이더넷 포트와 전원 스위치가 있는 모듈에 연결됩니다. 오른쪽은 플랫 케이블을 통해 랙 상단의 Payload 커넥터에 이어집니다.(사진:가토 야스시)

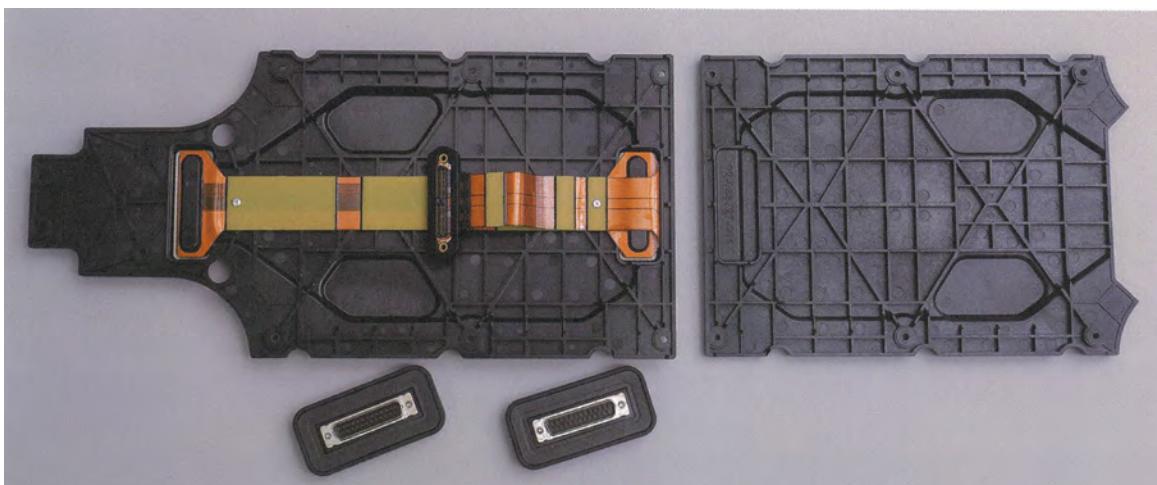


그림 6.7: 중앙 랙의 상단 패널(센터 패널)왼쪽에는 후면 패널이 있습니다. 플랫 케이블이 포함되어 있으며, Payload의 확장 커넥터와 연결하는 데 사용됩니다.(사진:가토 야스시)

## 6.1.3 와이어 하네스

Spot의 전기 시스템은 121페이지의 그림 6.3에 나타난 것처럼, 복잡한 동작을 수행하는 자율 로봇 시스템임에도 불구하고 배선이 놀랄 만큼 간단합니다. 메인 컴퓨터, 각 구동 시스템, 그리고 외부 장치 간의 연결은 그림 6.8과 그림 6.9의 두 가지 타입의 선만 사용됩니다. 4개의 Y축 구동기와 무릎 관절 구동기는 대각선상에서 동일한 제어 하네스를 사용하며, 전체 구조는 대칭적이고 단순합니다. 다만, 각 커넥터의 간격이 좁고 밀폐 성능이 떨어져 반복적인 조립·분해나 충격 진동에 취약합니다.

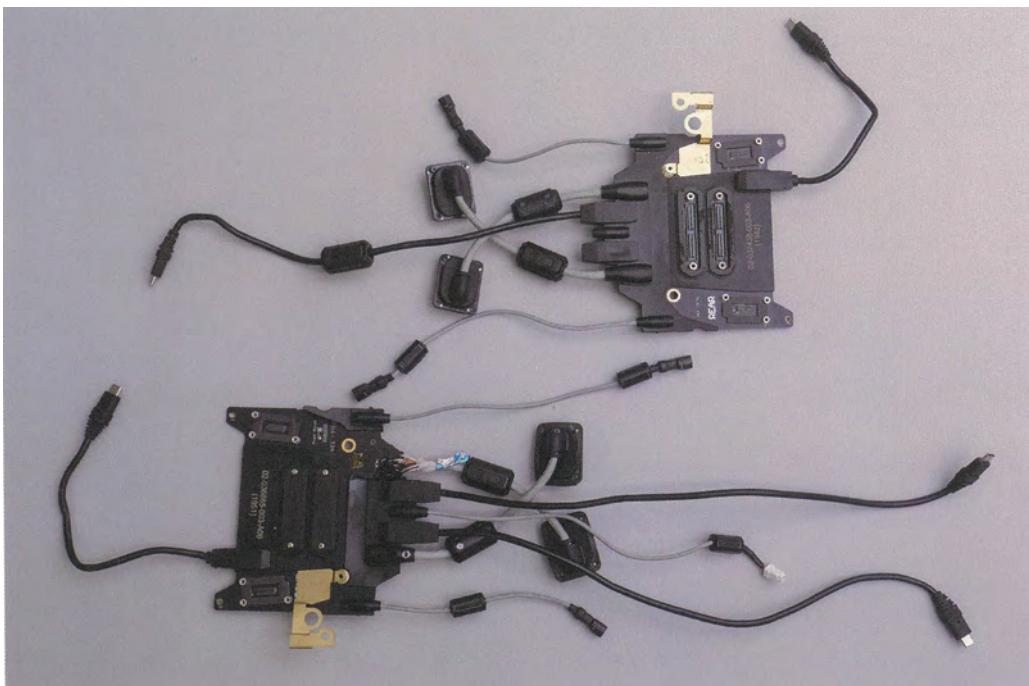


그림 6.8: 연결 단자판 대부분의 배선이 이곳에서 분배됩니다. 모든 배선에는 페라이트 비드가 연결되어 있습니다.(사진:가토 야스시)



그림 6.9: Y축 구동 및 무릎 관절 구동 제어용 하네스는 대각선 위치에서 동일한 부품 번호의 하네스를 사용합니다.(사진:마쓰다 아츠시)

하지만 케이블을 점검하던 중 이상한 점을 발견했다. 제어 하니스에 붙어 있는 라벨이 독특했다. 대각선에 위치한 다리에는 같은 케이블이 사용되었으나, 그림에서 보듯 1번과 3번 케이블의 숫자가 서로 달랐다. 왜 이런 차이가 있는지, 그리고 다른 Spot에서도 동일한 현상이 있는지는 아직 명확하지 않다. 구체적으로, 위에서 아래로 순서대로 "02-043900-001-A01HY CABLE ASSEMBLY FR HL (1936)", "02-034579-001-A01HY CABLE ASSEMBLY FL HR (1936)", "02-043900-001-A01HY CABLE ASSEMBLY FR HL (1927)", "02-043579-001-A01HY CABLE ASSEMBLY FL HR (1936)"으로 배열해 보면, 1번과 3번 케이블은 동일해야 하지만, 마지막 네 자리 (1936)과 (1927)의 차이가 무엇인지 알 수 없다. 반면, 2번과 4번 케이블의 (1936)은 같다. FR과 HL은 각각 Front Foot Right와 Hip Left, FL과 HR은 Front Foot Left와 Hip Right를 의미하는 것으로 추정된다.



그림 6.10: 컨트롤 하니스의 라벨 대각선 위치에는 동일한 부품 번호의 하니스를 사용해야 하지만, 모델명이 다릅니다. 1번과 3번 하니스의 마지막 네 자리 숫자가 각각 (1936)과 (1927)로 구분되어 있는 점이 주목할 만합니다.(사진:마쓰다 아즈시)

또한, 컨트롤 와이어 하네스 끝 부분에 사용된 커넥터는 매우 유연하며, IT 장비에서 흔히 볼 수 있는 커넥터가 적용되어 있습니다(그림 6.11)입니다.

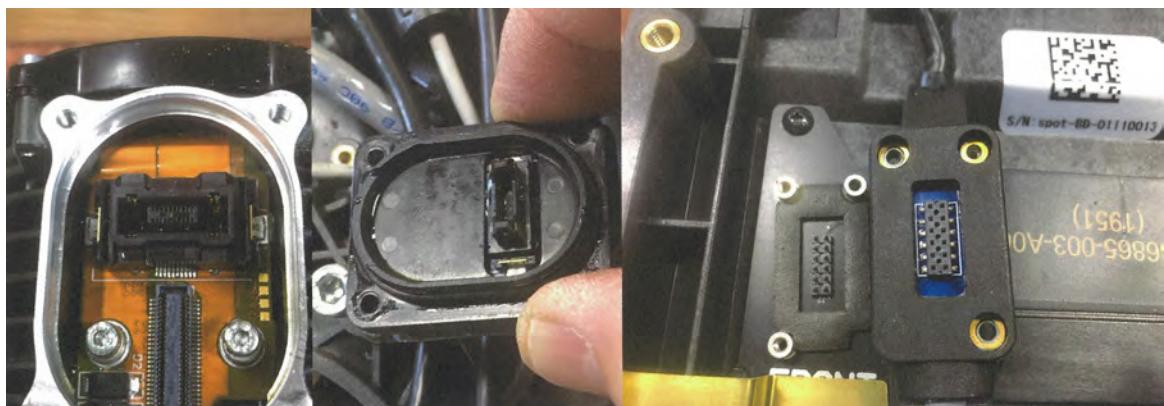


그림 6.11: Spot의 컨트롤 하니스 커넥터는 산업용 장비 커넥터 같지 않고, 다소 느슨하게 보입니다.(사진:Nikkei Cross Tech)

#### 6.1.4 안테나

Spot의 중앙 프레임 양쪽에 안테나가 설치되어 있습니다 (그림 6.12, 그림 6.13). 이 안테나는 Spot 리모컨, LAN, PC와의 무선 연결을 위한 WiFi 안테나입니다. Spot 기기가 작동할 때, WiFi 액세스 포인트 또는 WiFi 클라이언트 역할을 합니다.



그림 6.12: **안테나 설치 위치** 안테나는 Spot의 중앙 프레임 양쪽에 설치되어 있습니다. 연결 케이블은 중앙 프레임의 구멍을 통해 아래쪽 배터리 거치대 내부로 확장됩니다.(사진:카토 야스시)



그림 6.13: **WiFi안테나** 설치 안테나의 회로 기판은 수지 케이스에 장착되어 있습니다. 이 경우에는 방수나 방진 기능이 고려되지 않았습니다.(사진:카토 야스시)

## 6.2 구성 요소

### 6.2.1 연결 단자판

연결 단자판은 중앙 프레임에서 본체 컴퓨터와 외부 장치를 연결하는 역할을 하는 판입니다 (그림 6.14). 구체적으로는 메인보드를 다리 모터와 센서, 깊이 카메라, Payload의 확장 포트, 후면 프레임의 다양한 스위치, 그리고 이더넷 포트를 I/O 케이블에 연결합니다. 연결 단자판은 앞쪽과 뒤쪽 두 시스템으로 구성되어 있습니다.

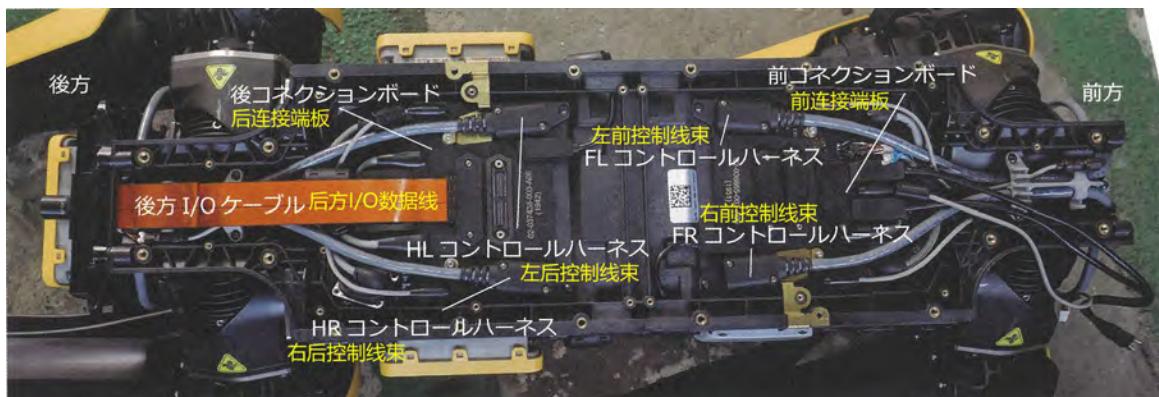


그림 6.14: 연결 단자판의 배치 중앙 프레임 상판(중앙 패널)을 제거하면, 각 배선 하니스가 드러납니다. 앞부분과 뒷부분은 기능적으로 분리되어 있으며, 배선 정리가 매우 깔끔하게 되어 있습니다.(사진:가토 야스시)

메인 컴퓨터의 메인보드는 넓은 커넥터를 통해 결합되어 연결됩니다(그림 6.15). 커넥터 양쪽 끝에는 고정용 핀이 있으며, 볼트로 중앙 프레임에 단단히 고정됩니다. 그 결과, 중앙 프레임에 가해지는 충격과 진동이 넓은 커넥터의 고정된 부분을 통해 메인보드로 전달됩니다.

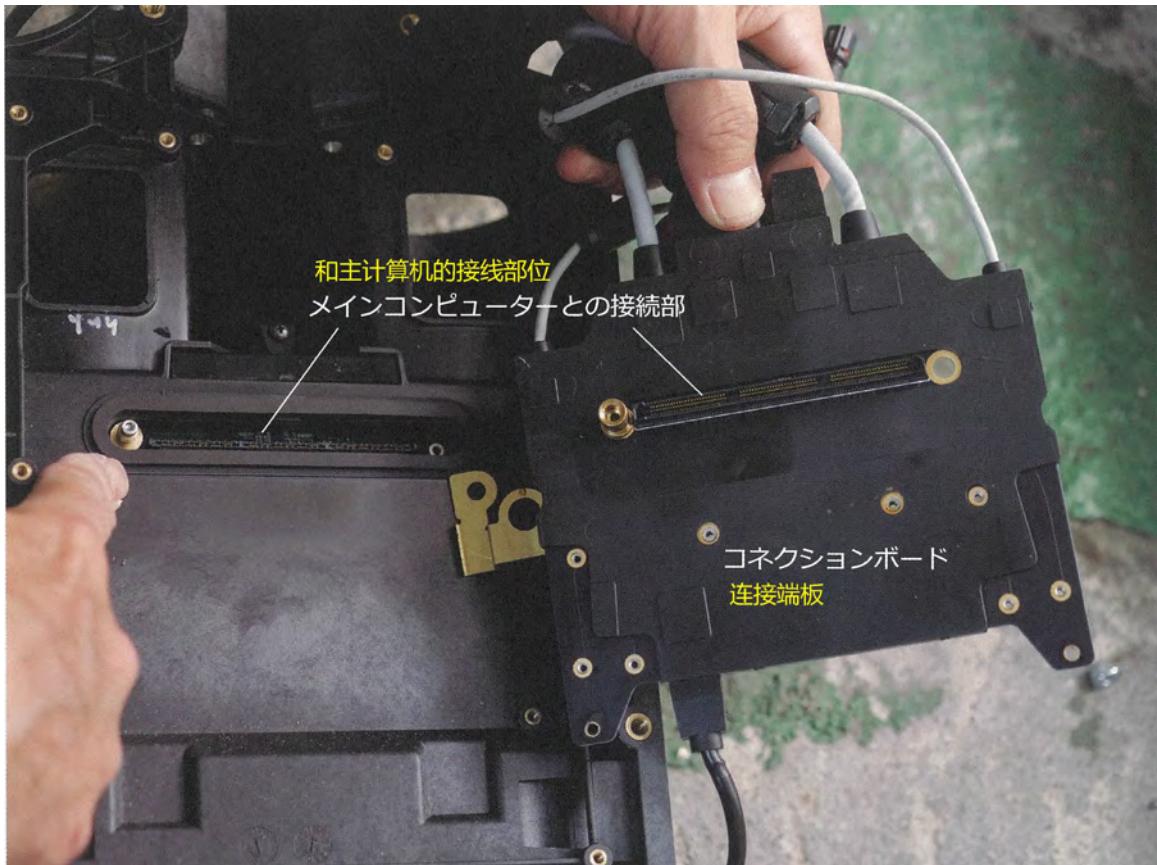


그림 6.15: 연결 단판과 주 컴퓨터 연결 부위 주 컴퓨터와 연결된 커넥터 양쪽의 볼트를 풀면 단판을 분리할 수 있습니다. 커넥터 구멍 뒤로는 주 컴퓨터의 회로 기판이 보입니다. 구멍 주위에는 스폰지형 고무 패킹이 부착되어 있습니다. 이 사진은 커넥터 옆의 볼트를 풀는 과정에서, 뒷면의 장착 볼트가 회전해 연결 단판의 너트를 분리해야 했던 상황을 보여줍니다.(사진:가토 야스시)

앞뒤 연결 단판의 기본 설계는 동일하지만, 전후방 카메라 모듈의 수가 다르기 때문에 보드에서 나오는 USB Type-C 케이블의 수도 다릅니다(그림 6.16). 연결 단판에서 시작해 각각의 X축 모터, 각 깊이 카메라 모듈, 그리고 각각의 팬으로 이어집니다. 또 다른 커넥터는 “Y”축 모터와 “무릎관절” 액추에이터 모터에 연결됩니다. 제어 와이어 하네스도 이 커넥터에 연결되며, 후면 랙에 설치된 스위치, 커넥터, 옵션 장치와의 통신은 플랫 케이블을 통해 별도의 커넥터에서 연결됩니다.

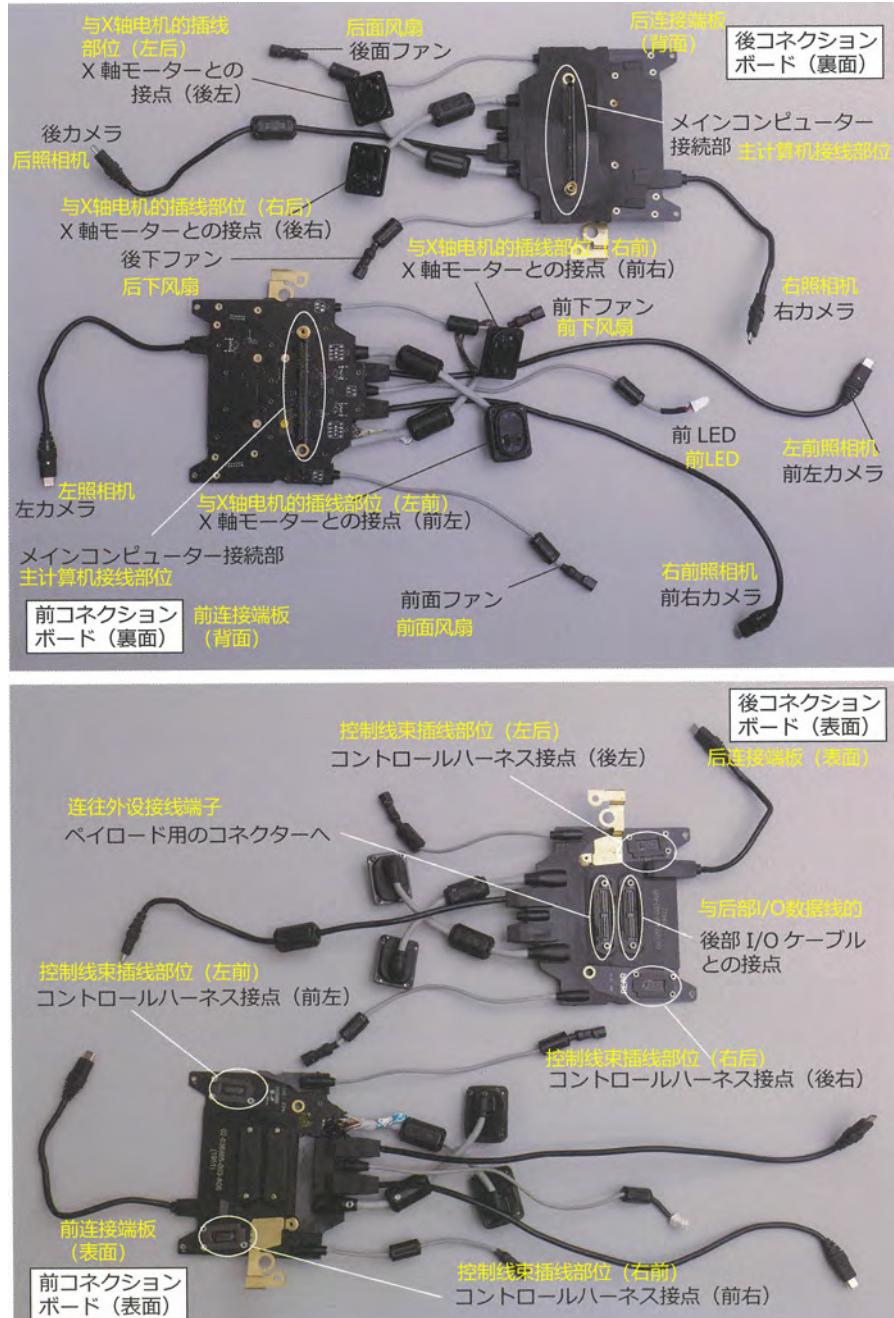


그림 6.16: 연결 단판의 배치 | 주 컴퓨터에서 나오는 다양한 신호와 전력이 각각의 독립된 전후판을 통해 카메라, 모터, 팬 등에 분배됩니다. 일명 메인 유닛이지만, 구조가 매우 효율적으로 설계되었습니다. 페라이트 비드는 모든 카메라 모듈과 구동 모터의 신호선에 연결되어 있어 안정성을 높입니다.(사진:가토 야스시)

각X축 모터, 각 심도 카메라 모듈, 그리고 각각의 팬으로 연결된 케이블이 몰딩 처리되어 연결 단자판에 고정됩니다(그림 6.17,그림 6.18)입니다.

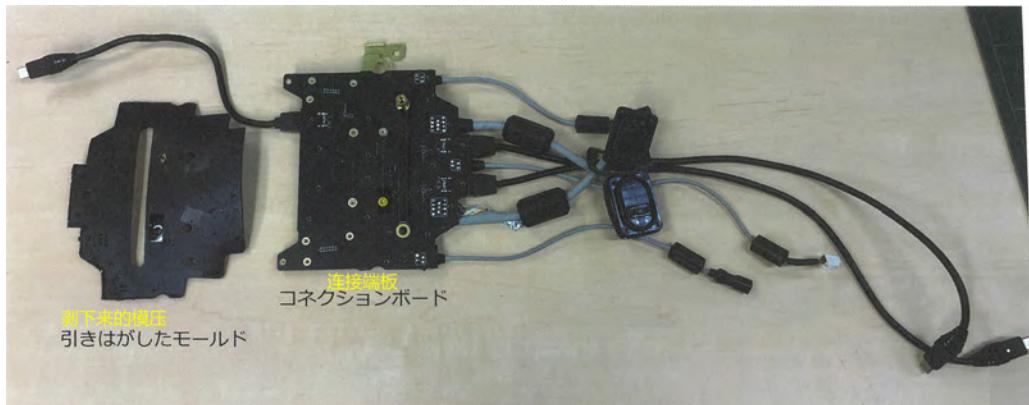


그림 6.17: 연결 단판의 수지 몰딩 배선과 커넥터를 인쇄 회로 기판에 납땜하여 연결 단판을 고정한 뒤, 몰드에 넣어 수지로 몰딩합니다. 이 소재는 부드러운 염화비닐일 수 있는데, 납땜기의 열로 쉽게 녹는 특징이 있습니다.(사진:가토 야스시)

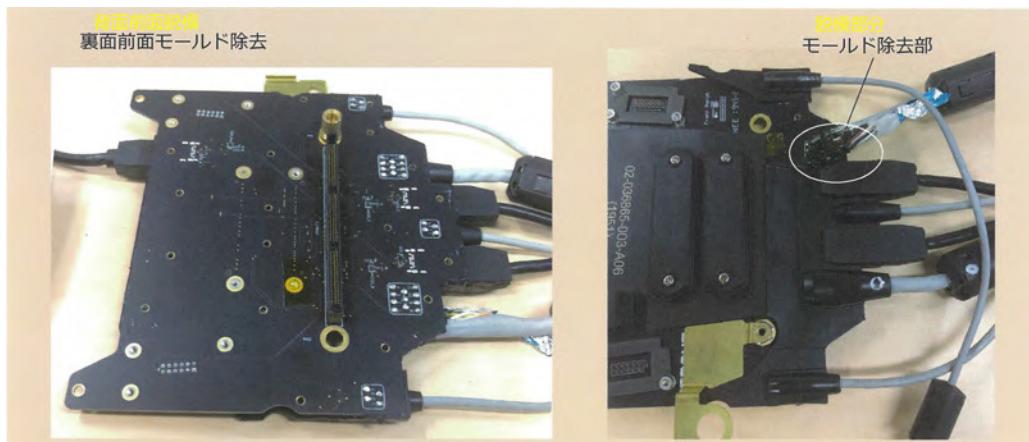


그림 6.18: 접속 단판 내부 배선 방식 몰딩을 제거하면, 커넥터가 아닌 회로 기판에 직접 납땜된 형태임을 확인할 수 있습니다.(사진:가토 야스시)

### 6.2.2 깊이 카메라

이 깊이 카메라는 인텔의 RealSense D430 모듈을 사용하여, 내부에는 이미지 센서가 탑재되어 있습니다 (그림 6.19). D430는 중앙의 적외선 프로젝터에서 패턴을 비추고, 좌우에 배치된 카메라로 그 패턴을 촬영하여 시차를 계산해 깊이를 추출하는 방식입니다. 360° 영역을 모니터링하기 위해 전면에 동일한 모듈 2개, 좌우 후면에 각각 1개씩 설치되어 총 5개의 모듈이 장착되어 있습니다. D430 사양에 따르면 10cm에서 10m까지 거리 측정이 가능하지만, Spot 사양에서는 최대 4m 범위 내에서 지형을 판별합니다.

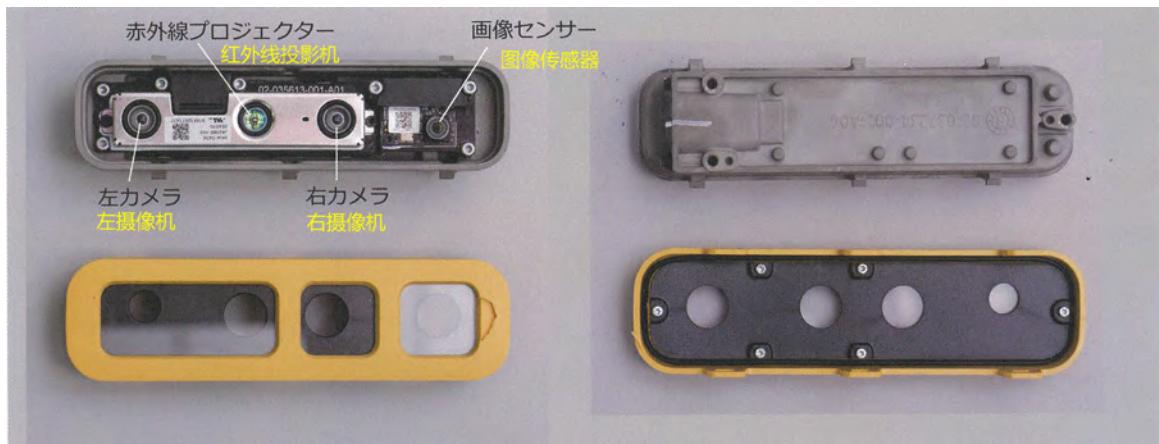


그림 6.19: 깊이 카메라의 외부 케이스를 분리하면, 인텔의 RealSense D430 카메라 모듈과 이미지 센서로 구성된 회로 기판이 마그네슘 재질의 케이스에 고정되어 있습니다.(사진: 카토 야스시)

깊이 카메라의 회로 기판은 마그네슘 소재의 케이스 안에 장착됩니다. 그 사이에 O-링을 끼운 뒤, 전면 커버를 눌러 외부에 있는 6개의 걸쇠로 케이스의 클로(클립)에 고정합니다 (그림 6.20). 이 부분의 방수 구조는 단순하면서도 효과적입니다. 외부 인터페이스는 USB Type-C 커넥터를 사용하며, 마그네슘 케이스에는 커넥터 부품을 위한 구멍이 뚫려 있습니다. 커넥터 플러그의 수지 몰드가 마그네슘 케이스에 밀착되어 밀봉된다는 점이 특징입니다. 하지만 이 부분은 모듈의 약점으로, 별도의 기압 조절(압력 해소) 장치가 없어 이 틈을 통해 내부 압력이 변화할 때 외부로부터 흡입이 이루어집니다. 실제로 카메라가 침수된 후 확인해보면, 5개의 카메라 모듈 모두 케이스 내부에 물방울이 스며든 것을 알 수 있었습니다. 전원이 들어오면 케이스 내부 온도가 올라가고 > 압력이 높아진 다음 > USB 커넥터 측면에서 압력이 빠져나가며 > 침수 > 냉각 > 내부 압력 감소 > 외부 공기와 함께 습기가 유입되는 전형적인 흡수 메커니즘이 작동합니다. 이는 혹독한 환경에서 작동 시 취약점이 되기도 합니다. 일반적으로 압력 해소를 위한 통풍구를 제공하지만, 통풍구가 물에 닿지 않도록 설계하거나 Gore-Tex처럼 물 분자는 차단하고 공기만 통과시키는 소재를 사용하는 것이 필요합니다.

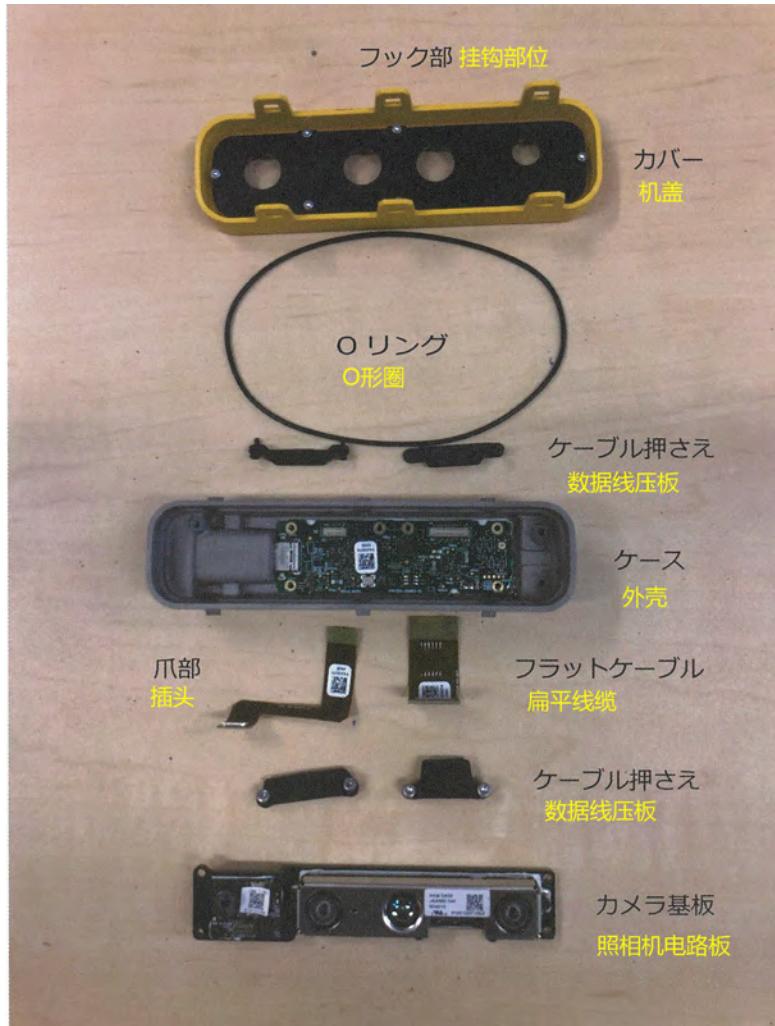


그림 6.20: 깊이 카메라 구성품은 인텔의 딥 카메라 모듈 'RealSense 0430'와 이미지 센서가 결합된 회로 기판이 마그네슘 합금 케이스에 고정되어 있습니다.(사진:가토 야스시)

딥 카메라 모듈은 센서 회로 기판과 USB Type-C 커넥터가 탑재된 인터페이스 기판으로 이루어져 있습니다 (그림 6.21). 센서 기판에는 딥 카메라 D430 회로와 이미지 센서 회로가 장착되어 있습니다. D430와 이미지 센서 기판은 각각 다른 FPC 플랫 케이블을 통해 인터페이스 보드에 연결됩니다.

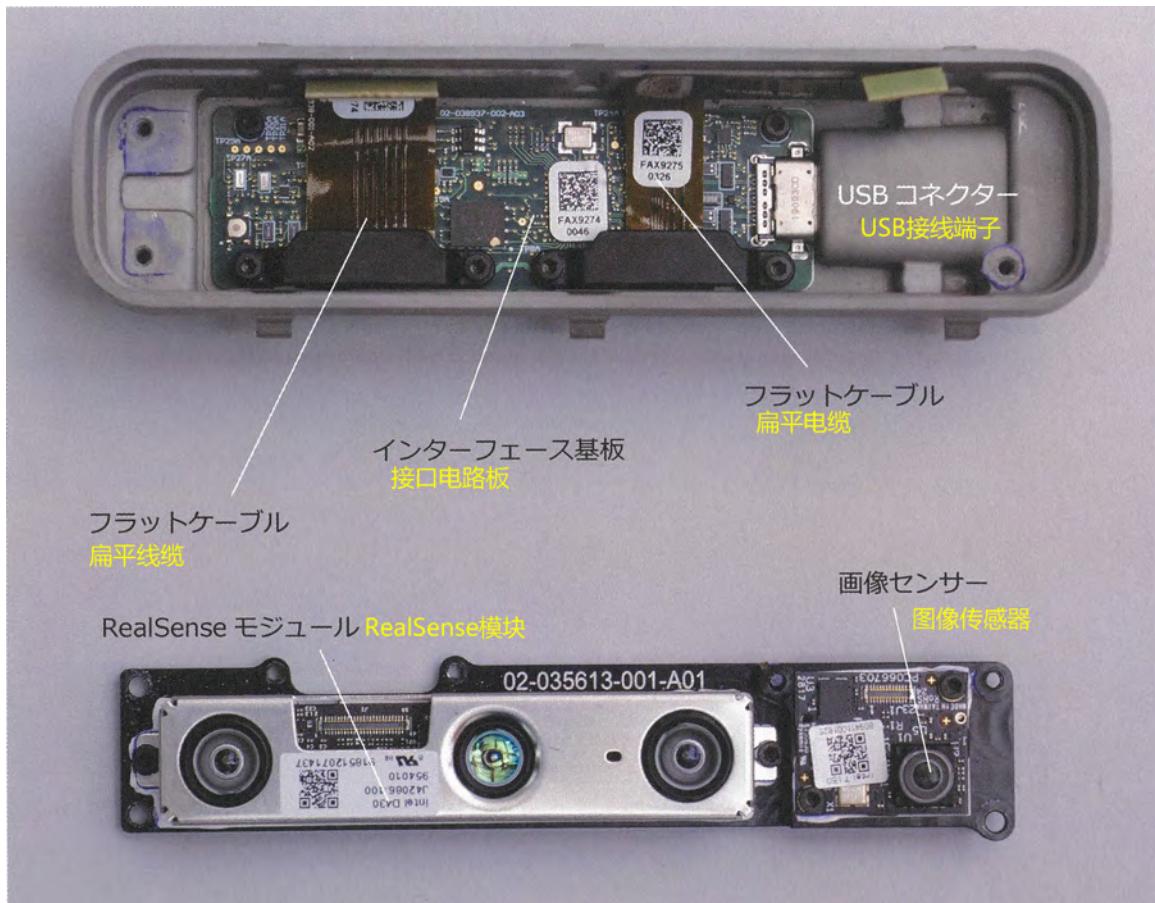


그림 6.21: 딥 카메라 회로 기판 구성이 시스템은 두 개의 회로 기판으로 이루어져 있습니다. 하나는 인터페이스 기판이고, 다른 하나는 D430과 이미지 센서를 통합한 기판입니다. 두 기판은 플랫 케이블로 연결되어 있습니다.(사진:가토 야스시)

### 6.2.3 팬

총 8개의 쿨링 팬이 장착되어 있으며, 앞뒤로 각각 4개씩 거의 대칭적으로 배치되어 있습니다(그림 6.22). 구체적으로 보면, 전면에는 프론트 팬, FR(Front foot Right) 팬, FL(Front foot Left) 팬 및 전면 CPU 쿨링 팬이 있습니다. 후면에는 리어 팬, HR(Hip Right) 팬, HL(Hip Left) 팬 그리고 후방 CPU의 쿨링 팬이 각각 장착되어 있습니다.



그림 6.22: 냉각 팬 배치  
(사진: 가토 야스시)

전면에는 4개의 팬이 Y축 전면, 양쪽 무릎, 그리고 전면 CPU에 사용됩니다. 후면도 마찬가지로 총 8개의 팬이 설치되어 있어 로봇의 발열이 얼마나 큼지 알 수 있습니다.

전면 팬과 후면 팬은 각각 앞과 뒤에 위치한 Y축 구동 모터를 냉각하는 데 사용됩니다 (그림 6.23)입니다.



그림 6.23: 전면 팬  
알루미늄 프레스 절곡판에 장착된 1 W 냉각 팬입니다. Y축 구동 모터 외부 냉각용.(사진:가토 야스시)

FR/FL/HR HL팬은 냉각 공기가 무릎 관절 구동 모터 하우징의 방열판에 직접 닿는 위치에 설치되어 있습니다 (그림 6.24). 이 모터를 냉각하기 위한 팬은 미국 Mechatronics사에서 설계하였으며, 중국에서 생산되었고, 출력은 약 1W입니다. 무브러시 모터가 사용되었습니다.



그림 6.24: 무릎 관절 구동 냉각 팬의 냉각 공기가 Knee의 리니어 구동 모터 외부 방열판에 직접 닿는 모습.(사진:가토 야스시)

또한, 앞쪽에 있는CPU팬과 마찬가지로, 뒤쪽CPU팬은 중앙 프레임 내부의 에어డクト를 통해 분리되어, 좌우X축 구동 모터 하우징의 방열판과 본체의CPU방열판으로 냉각됩니다(그림 6.25, 그림 6.26). 이 팬은 높은 발열을 목표로 하므로 출력은 13.2 W이며, 브러시리스 모터 제조사는 대만 델타전자이고 생산국은 태국입니다.

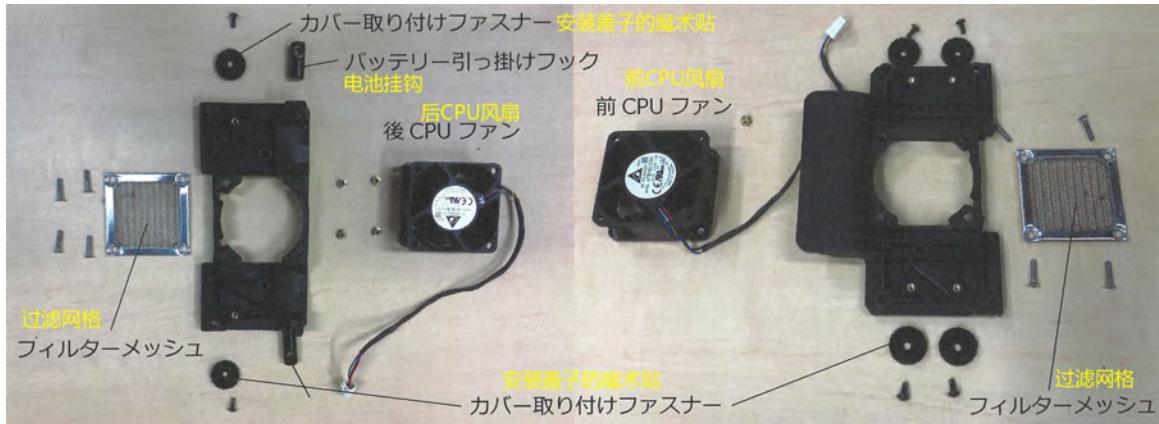


그림 6.25: 앞뒤CPU팬 사진의 왼쪽에는 Spot의 후면이 보입니다. 팬은 부품 단위로 분리할 수 있습니다.(사진:가토 야스시)

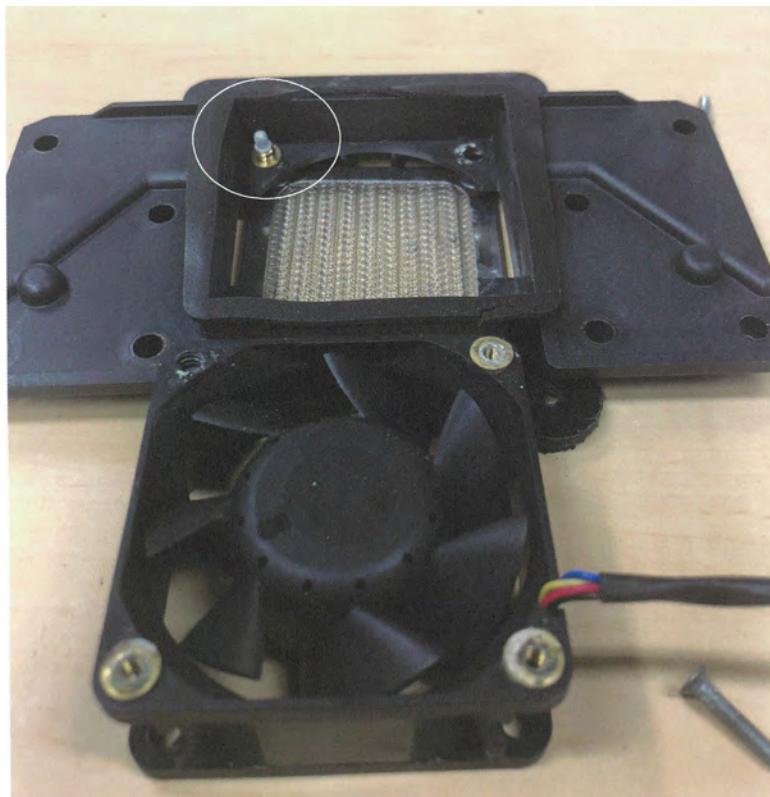


그림 6.26: CPU팬 조립 문제 활동 너트가 수지 팬 본체에 삽입되어 나사로 고정됩니다. 인서트가 느슨하게 들어가 회전하면서 나사가 풀리지 않습니다.(사진:가토 야스시)

#### 6.2.4 LED모듈

LED모듈은 LED의 색상과 조명 패턴을 활용해 사용자와 주변 환경에 Spot 시스템의 현재 상태를 알리는 장치입니다(그림 6.27). 예를 들어, 흰색, 파란색, 주황색, 빨간색 등의 색 변화와 지속 점등 또는 깜빡임 같은 발광 패턴을 조합해 상태를 전달합니다. 리모컨으로 시스템 상태를 확인할 수 있지만, 리모컨 연결이 끊기거나 PC에서 조작 중일 때 등 꼭 필요한 최소 정보만을 표시합니다. 단, LED 모듈이 전면에만 위치해 있어 사용자가 측면이나 후면에 있을 때는 직접 돌아서 확인해야 합니다.

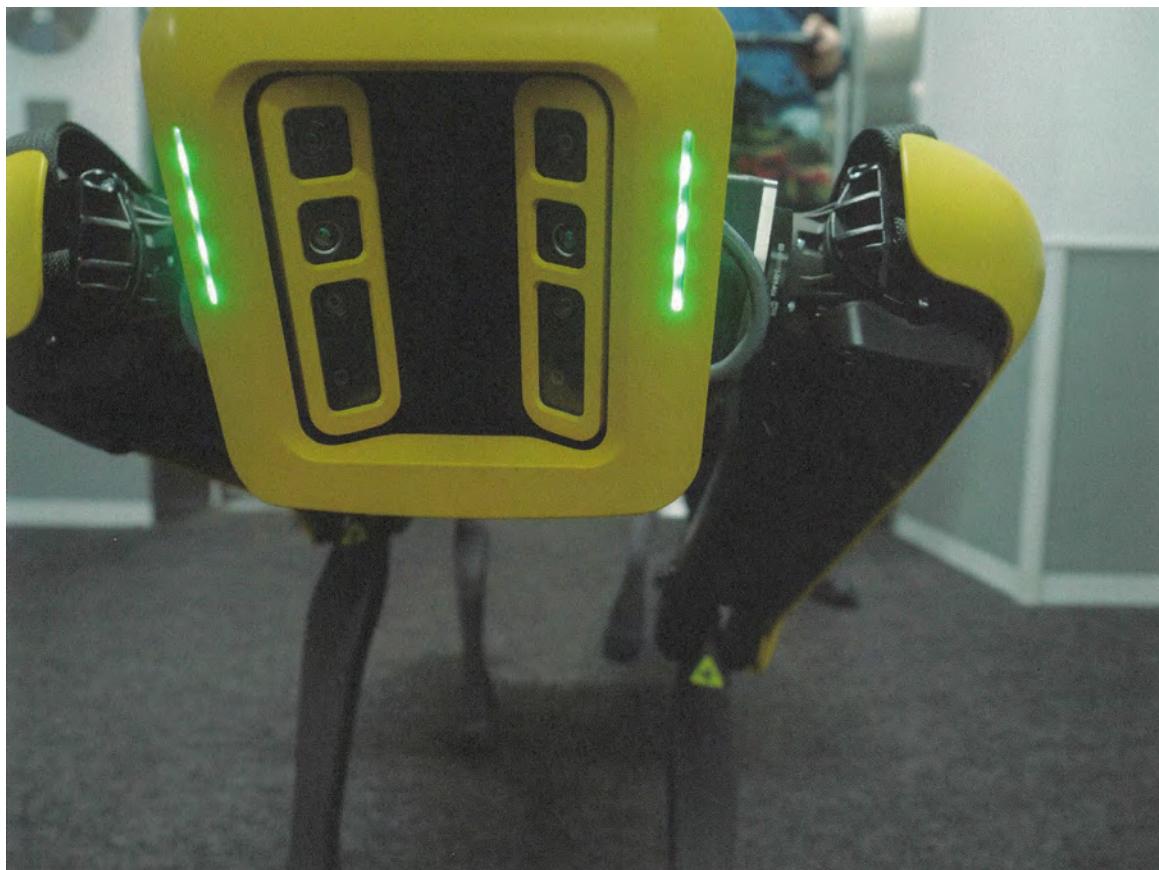


그림 6.27: LED모듈의 점등 상태이 네개의 LED의 색상과 발광 방식으로 표시됩니다.(사진:카토 야스시)

앞 보닛의 좌우에 각각 2개의 LED 모듈이 장착되어 있습니다. LED 모듈은 4개의 램프와 1개의 무광 유리 확산·광 가이드 렌즈로 구성되어 있습니다 (그림 6.28, 그림 6.29)입니다.



그림 6.28: LED모듈 배치 좌우 LED 모듈은 테이지 체인 방식으로 연결되어 있으며, 철판 고정고리에 볼트로 단단히 고정됩니다.(사진:가토 야스시)



그림 6.29: LED모듈 본체 이 모듈은 Spot 측의 감지 상태를 외부로 전달하는 역할을 하며, LED의 점등 방식과 색상으로 현황을 쉽게 파악할 수 있습니다. 검은색 수지 케이스 내부에는 다색 LED가 장착되어 있고, 매트한 유리 느낌의 확산·광학 렌즈를 통해 부드러운 빛을 발산합니다.(사진:가토 야스시)

## 6.3 주요 컴퓨터

### 6.3.1 설치 위치 및 방법

Spot의 두뇌 역할을 하는 주 컴퓨터는 중앙 랙에 장착되어 있습니다(그림 6.30).

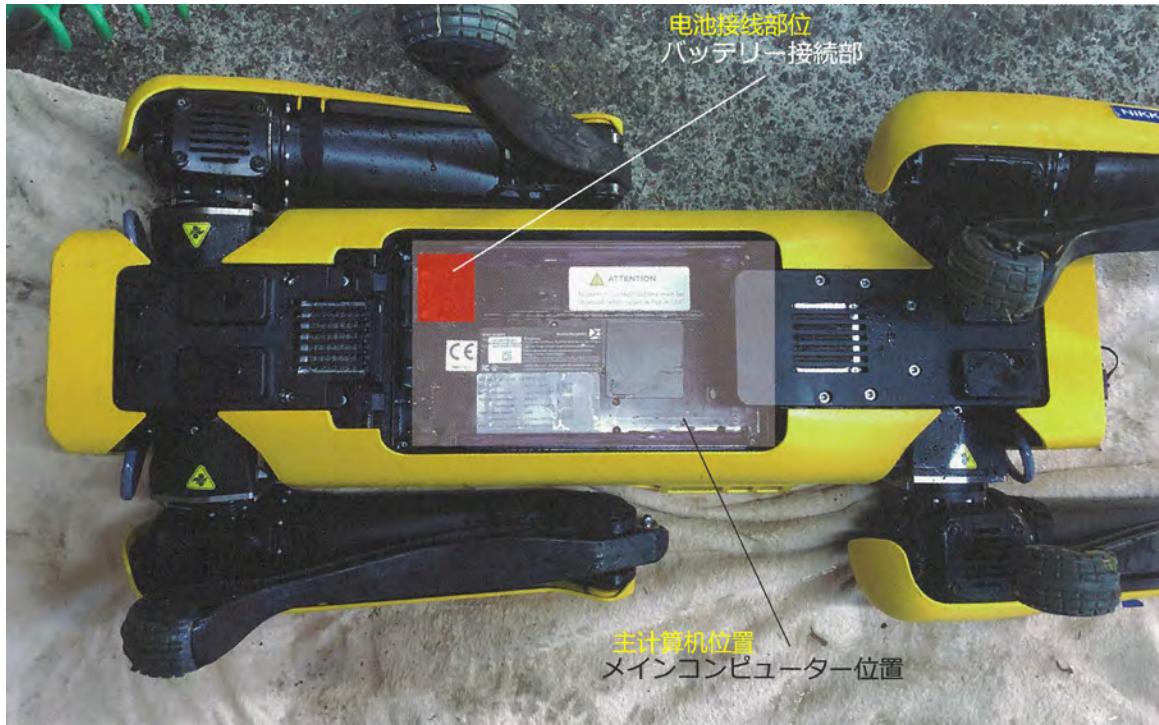


그림 6.30: 주 컴퓨터 설치 위치 주 컴퓨터는 Spot의 본체 중앙에 내장되어 있습니다. 사진 중앙에 보이는 검은색 사각 상자는 배터리 장착 부분입니다. 주 컴퓨터는 이 상자의 뒤쪽 모서리에 있는 8개의 볼트로 센서 랙에 연결되어 있습니다.(사진:가토 야스시)

메인 컴퓨터는 바닥에서 8개의 볼트로 중앙 랙에 고정되어 있습니다 (그림 6.31). 하지만 이 8개의 볼트만 제거해서는 분리할 수 없습니다. 메인 컴퓨터 메인보드에 연결된 단자판 커넥터의 4개의 고정 나사까지 추가로 풀어야 합니다. 이 나사들과 단자판 커넥터를 분리하면, 본체를 하나의 모듈로서 떼어낼 수 있습니다.



그림 6.31: 메인 컴퓨터의 고정 위치 주변의 8개의 볼트를 제거한 후, 연결 단판의 커넥터 양쪽에 있는 나사(앞뒤 각각 2개)를 풀면 분리할 수 있습니다.(사진:카토 야스시)

그림 6.32에는 중앙 랙에서 분리된 메인 컴퓨터가 나와 있습니다. 정면에서 보이는 메인보드에는 SSD와 WiFi 고주파 회로, 백업용 동전형 배터리 보드, 그리고 그 아래에 서브보드로 CPU 보드가 장착되어 있습니다.

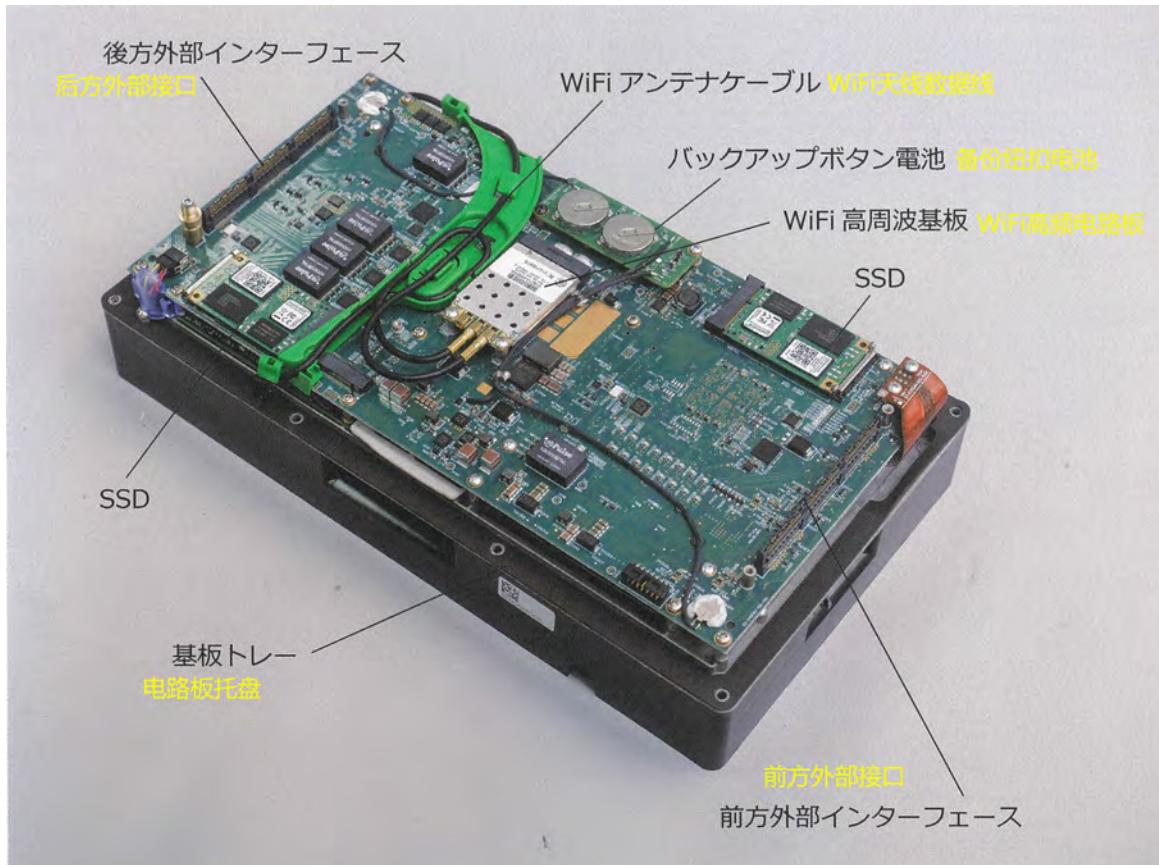


그림 6.32: 주 컴퓨터의 외관 앞뒤에 위치한CPU보드는 서브보드로서 메인보드 하단에 장착되어 있으며, 전면에서 확인할 수 있습니다.(사진:가토 야스시)

기판 아래에는 수지 재질의 커버가 있습니다 (그림 6.33). 이 커버는 중심 프레임 하단을 덮는 역할을 합니다.

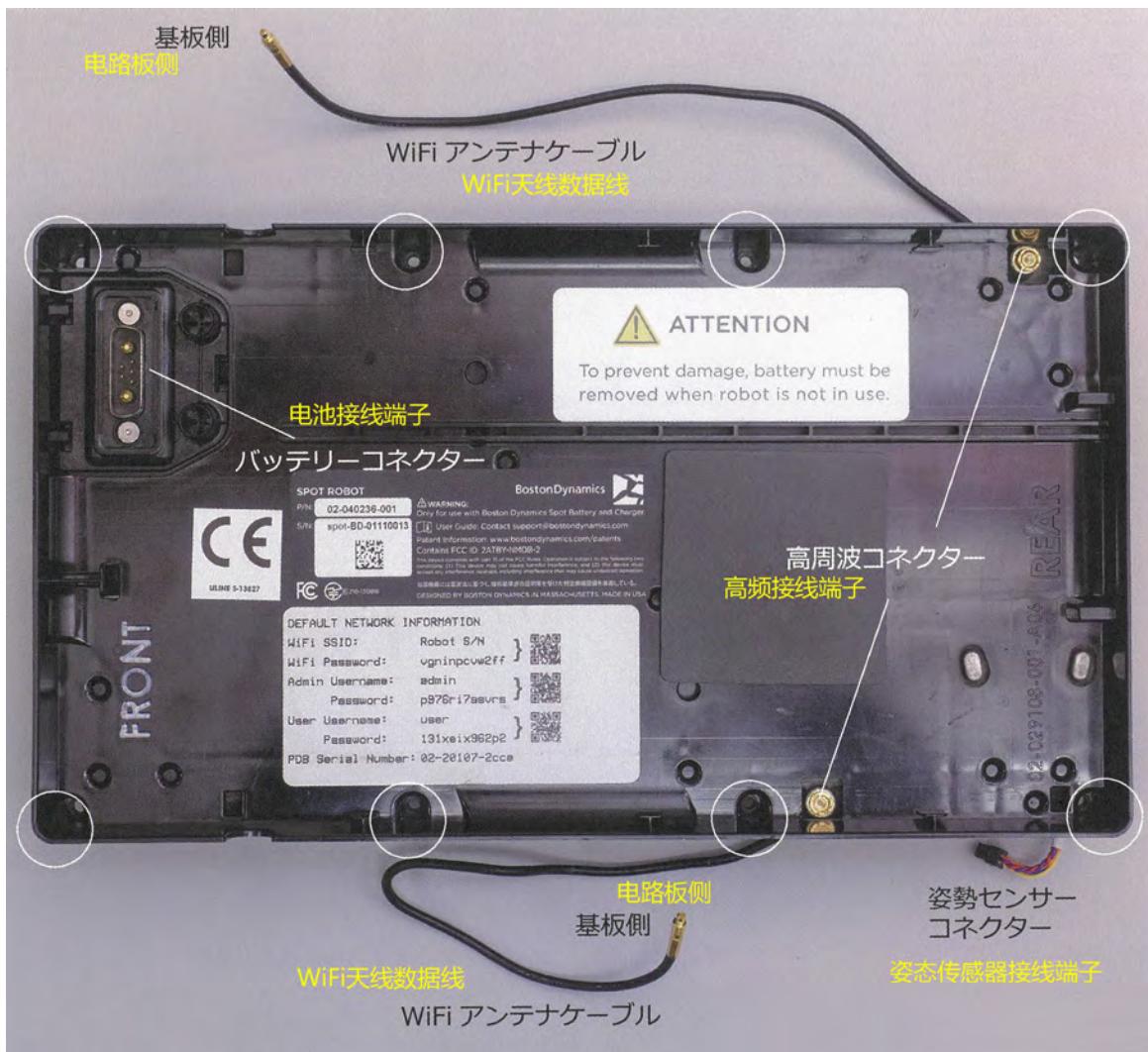


그림 6.33: 주 컴퓨터 메인보드 하단에 위치한 수지 외장 케이스가 위아래 흰색 원에 있는8개의 블트로 센서 프레임에 고정되어 있습니다. 트레이에는 배터리 커넥터, 상태 센서, 좌우 WiFi 안테나를 연결하는 고주파 커넥터가 포함되어 있습니다.(사진:가토 야스시)

수지 외부 케이스와 보드 사이에는 마그네슘 합금으로 만들어진 트레이가 있으며, 보드는 나사로 이곳에 고정되어 있습니다 (그림 6.34). 이 트레이에는 자세 센서가 장착되어 있습니다. 이 센서는 본체(몸통)의 자세를 감지하고 제어하는 역할을 합니다.

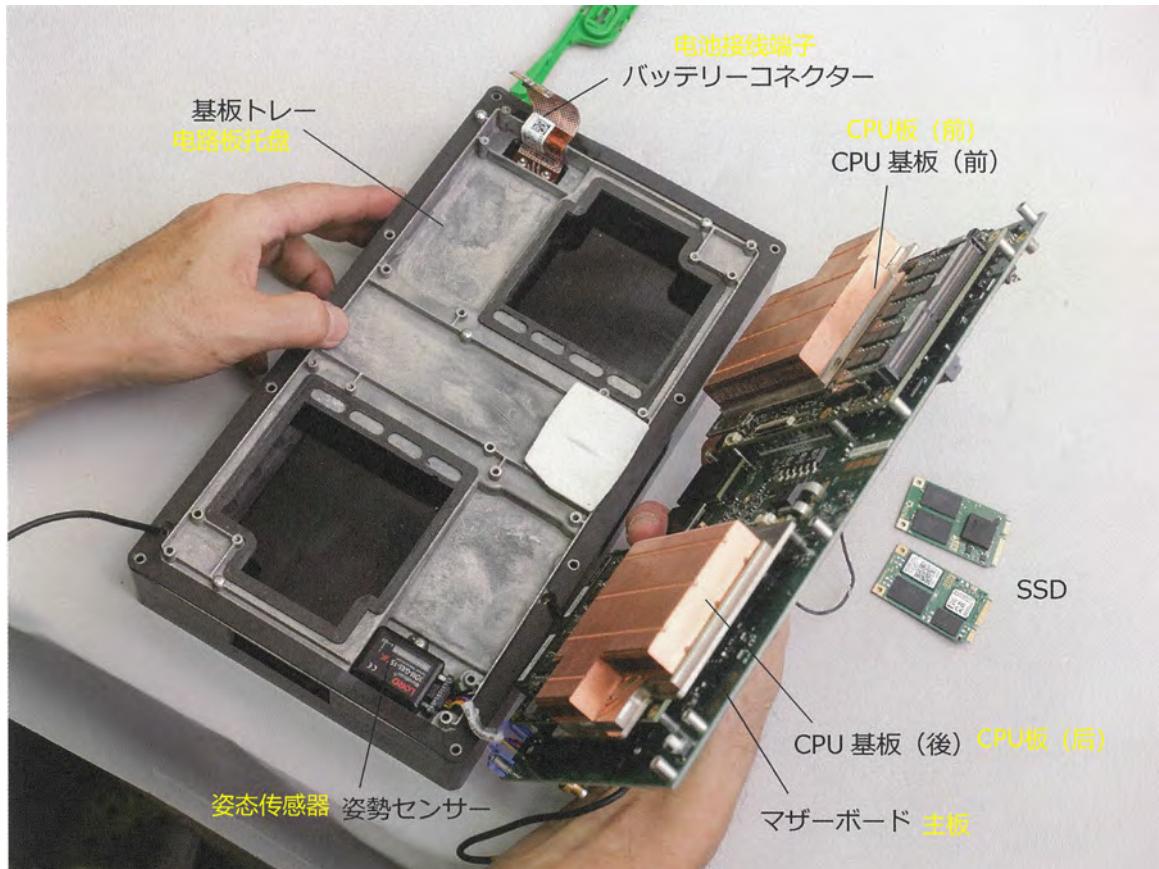


그림 6.34: 주요 컴퓨터 하단의 마그네슘 합금 회로기판 트레이 메인보드 아래에는 2개의 CPU보드가 있습니다. 이 구조는 구리 방열판이 트레이 하단에 노출되어 있으며, 그 사이로 흐르는 냉각 공기에 의해 열이 식혀집니다. 자세 센서 모듈과 배터리 커넥터도 트레이에 장착되어 있습니다.(사진:가토 야스시)

메인보드 뒷면에는 CPU 보드와 유사한 형태의 방열판이 있습니다 (그림 6.35). 수지 케이스의 후면과 트레이 아래쪽에 위치한 마그네슘 합금 케이블 트레이에는 냉각 공기 통로가 마련되어 있어 CPU 방열판의 효율적인 냉각이 가능합니다. 방열판에서 데워진 공기는 중앙 랙 한쪽의 구멍을 통해 반대편으로 배출됩니다. 방열판과 CPU 사이에는 열전도 실리콘이 도포되어 있습니다.

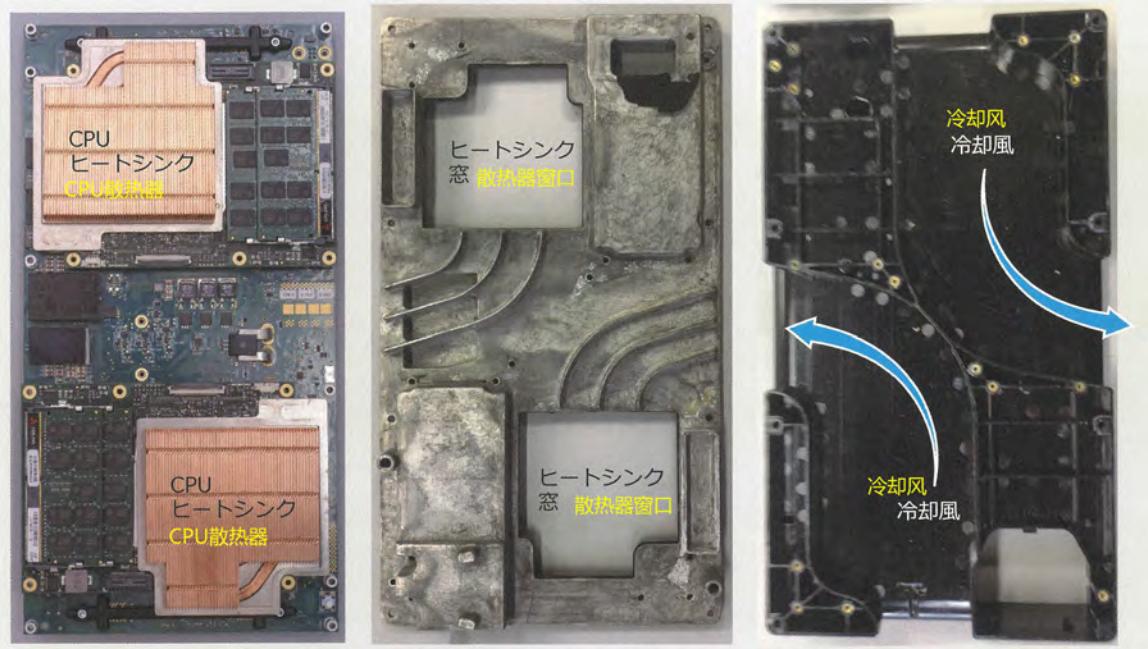


그림 6.35: 주 컴퓨터의 마그네슘 합금 트레이에는 냉각을 위한 공기 통로가 설계되어 있습니다.(사진:마쓰다 아즈시)

방열판은 마그네슘 합금 트레이의 입구에서 드러나 있으며, 방열판과 트레이 사이에는 방수 처리를 위해 풀 고무 실링이 적용되어 있습니다. 표면 압력이 충분히 유지되어야 방수가 가능한데, 현재는 이 압력을 CPU 보드가 직접 받는 구조라서 이상적이지 않습니다. 반대로 압력이 부족하면 방수 성능도 떨어질 수 있습니다. 또한, 4족 보행 로봇 Spot에는 서스펜션 시스템이 없어 관절이 유연하게 충격을 흡수하도록 설계된 듯 보이지만, 다리가 지면에 닿을 때 발생하는 소음이 크다는 점에서 높은 주파수의 충격이 본체에 전달됨을 알 수 있습니다. 즉, 이러한 진동(충격)이 CPU까지 전달될 위험이 있습니다. 실제로 험난한 지면에서는 예상만큼의 성능이 발휘되지 않는 것으로 보입니다.

## 6.3.2 메인보드

메인보드는 내장된 IC와 변압기를 통해 구동 모터의 전원을 생성하고 제어하는 역할을 주로 하며, 외부 센서와 기기와의 정보 교환 네트워크를 담당합니다 (그림 6.36, 그림 6.37, 그림 6.38)입니다.

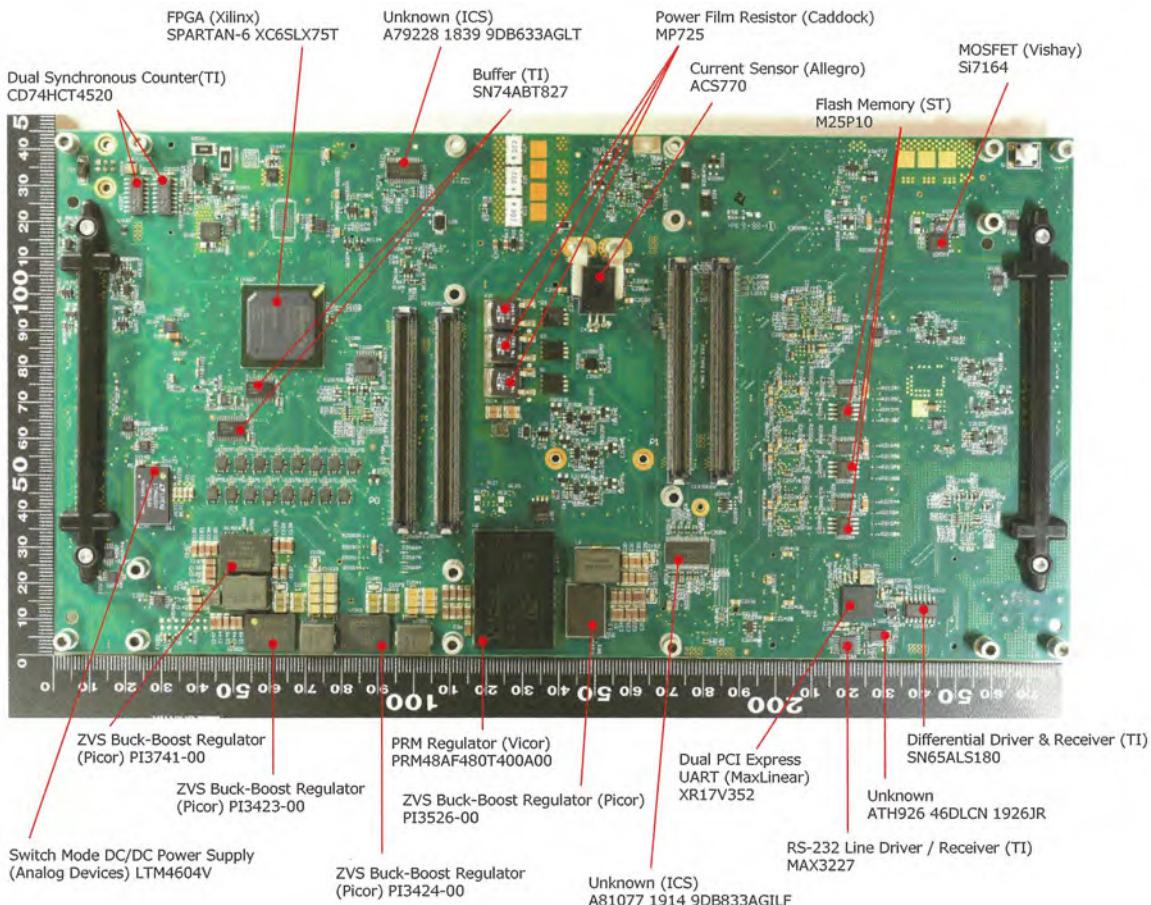


그림 6.36: 메인보드A면1 전원 부품에는 저항, 안정화장치, DC/DC 컨버터 등 다양한 요소가 포함되어 있습니다. 기판은 총 14층으로 구성되어 있습니다.(사진 제공: Fomalhaut Techno Solutions)

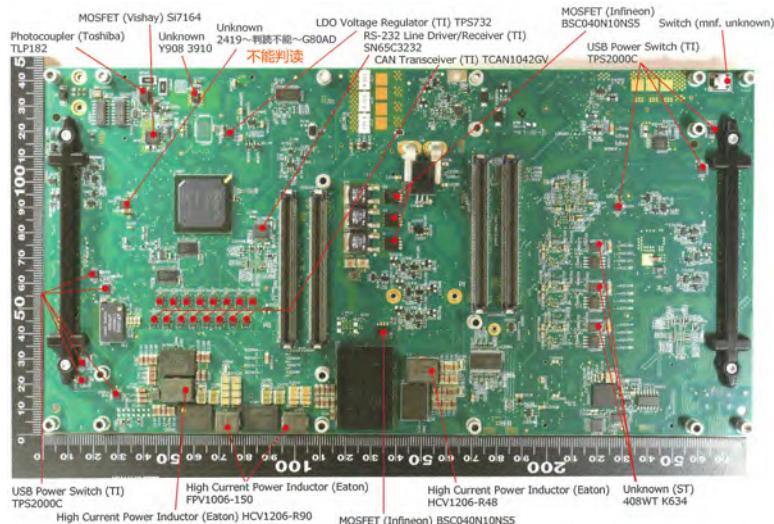


그림 6.37: 메인보드 A면2 전원부 외에도 USB, RS232C, CAN 통신과 관련된 부품들이 보이며, 이들이 외부와의 통신을 담당함을 알 수 있습니다.(사진:Fomalhaut Techno Solutions)

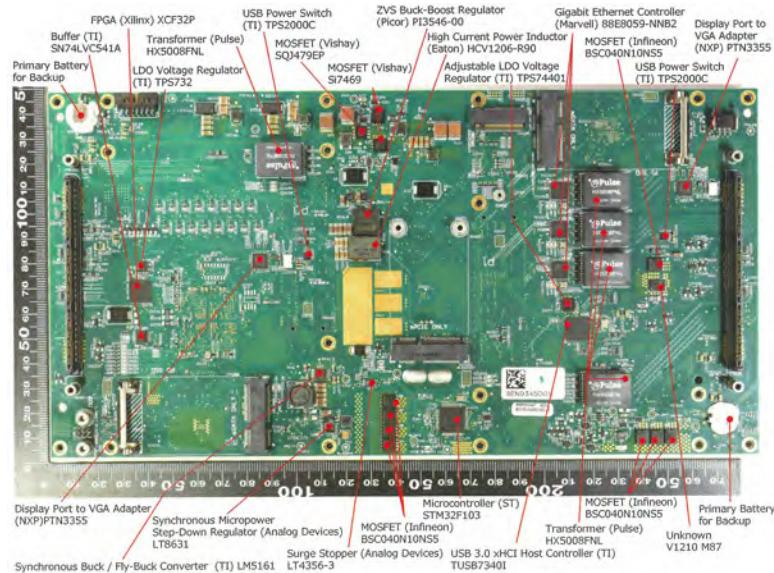


그림 6.38: 메인보드 B면에는 전원 부품 외에도 G-bit 이더넷 컨트롤러 IC와 디스플레이 IC가 탑재되어 있습니다.(사진: Fomalhaut Techno Solutions)

### 6.3.3 CPU보드

CPU보드는 메인보드에 장착되는 서브보드로, 동일한 서브보드가 두 장 설치되어 있습니다. CPU보드의 사양은 한마디로 고성능 서버 수준입니다. 인텔의 “Xeon프로세서E3v5시리즈”와, 이를 보조하는 주변IC로 구성되어 있습니다. 각CPU보드에는DRAM메모리 슬롯이 2개 있으며, DDR4 2133 MHz를 지원하는 16 GB 모듈 2개로 총 32 GB의 용량을 제공합니다 (그림 6.39, 그림 6.40, 그림 6.41).

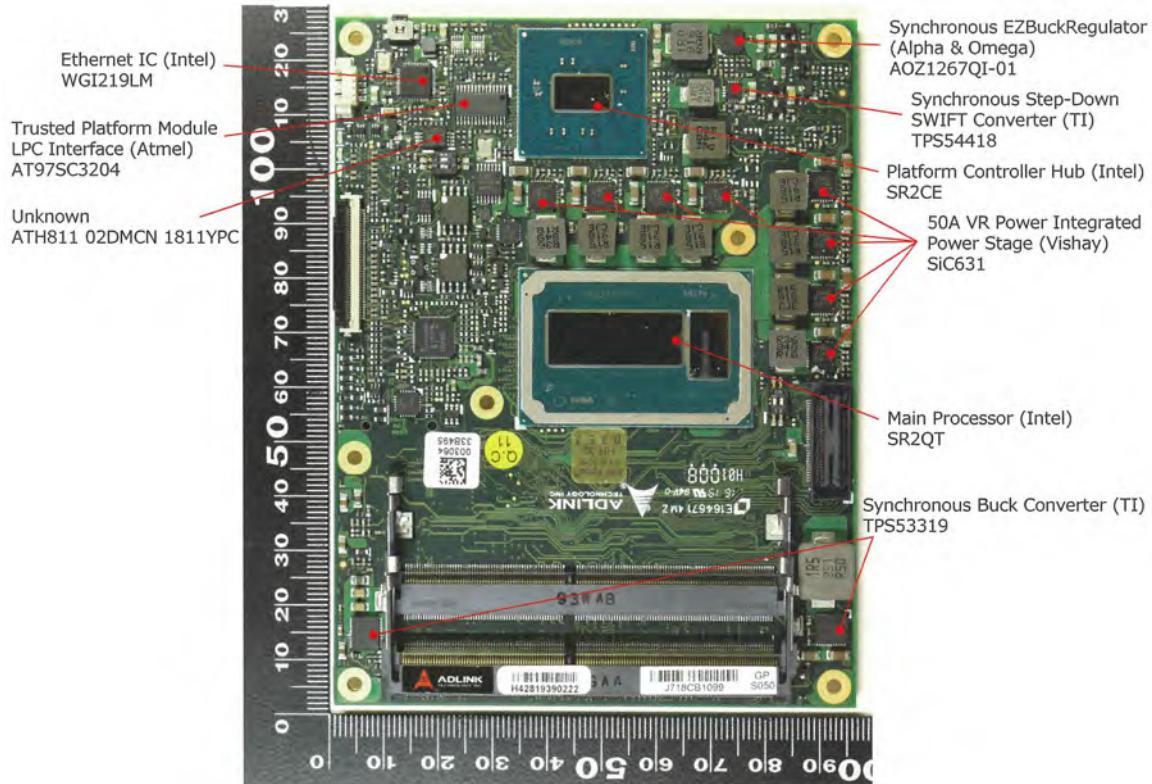


그림 6.39: CPU보드A면1 프로세서로는 Xeon E3v5 시리즈가 탑재되었습니다. 이 회로 기판은 12층 구조로 구성되어 있습니다.(사진 제공: Fomalhaut Techno Solutions)

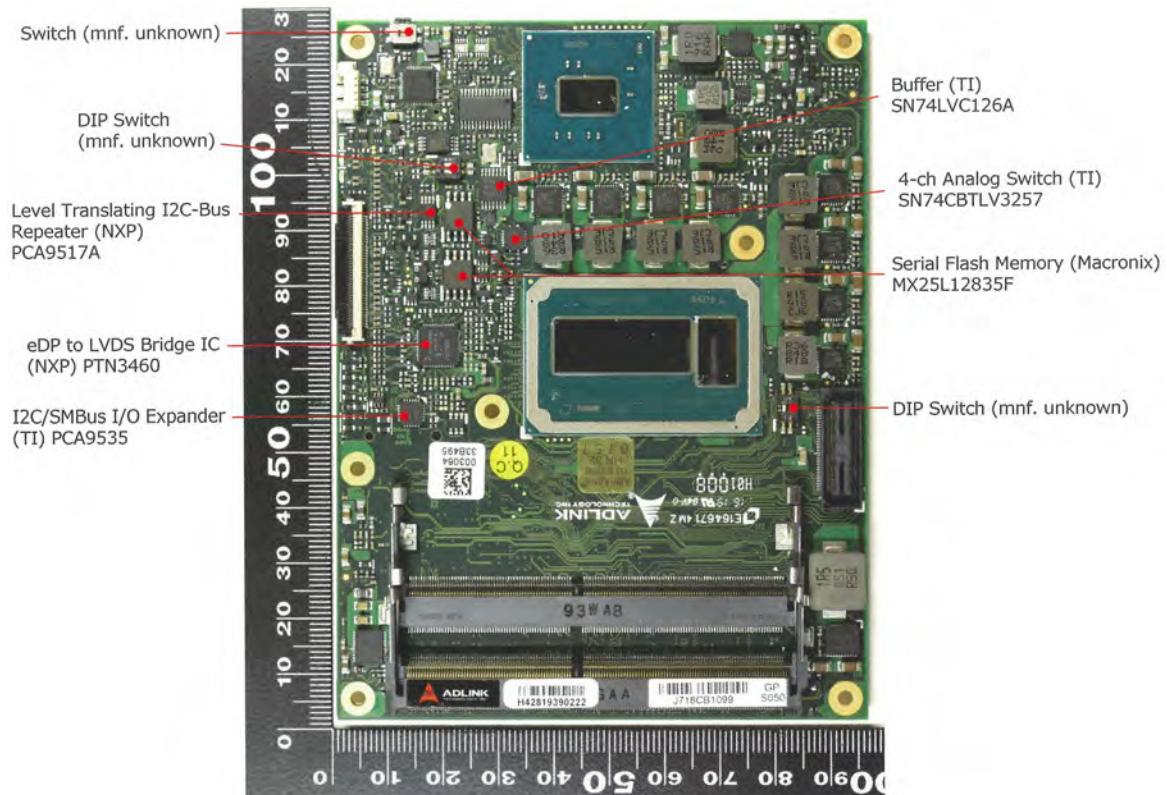


그림 6.40: CPU보드A면2 프로세서를 중심으로 외부 인터페이스용 주변 회로 IC가 탑재되어 있습니다.(사진: Fomalhaut Techno Solutions)

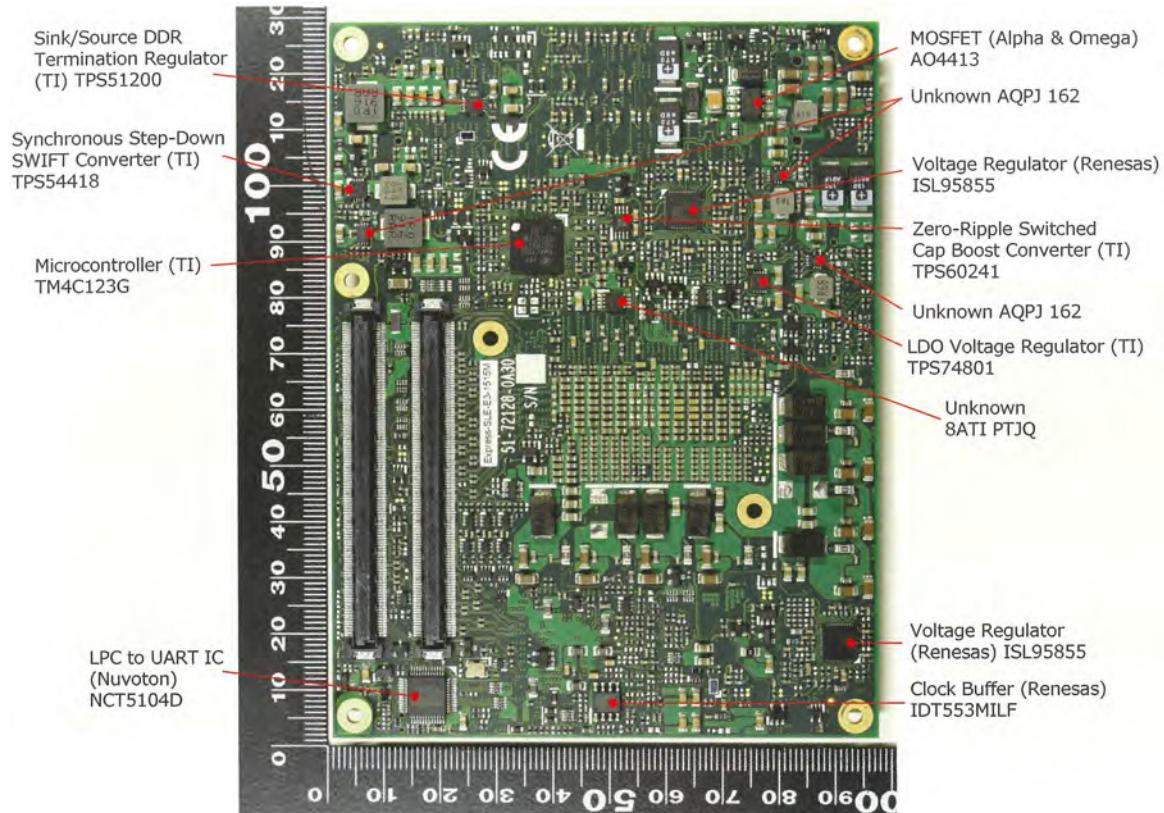


그림 6.41: CPU보드B면 좌측 하단에 보이는 커넥터를 통해 메인보드와 연결됩니다. 이 연에는 프로세서에 안정적으로 전원을 공급하는 다양한 부품들이 배치되어 있습니다.(사진 제공: Fomalhaut Techno Solutions)

### 6.3.4 WiFi고주파 보드

WiFi고주파 보드는 IEEE802.11a/b/g/n을 지원하는 무선 LAN IC와 미국 퀄컴 Atheros의 WiFi 집적 IC ‘AR9590’이 탑재된 보드입니다(그림 6.42). 분해된 Spot Explorer에는 2.4 GHz 대역 안테나만 장착되어 있어 5GHz 대역의 802.11a 사용은 지원하지 않습니다. 이 보드는 PCI Express 커넥터를 통해 메인보드와 연결된 것으로 보입니다.

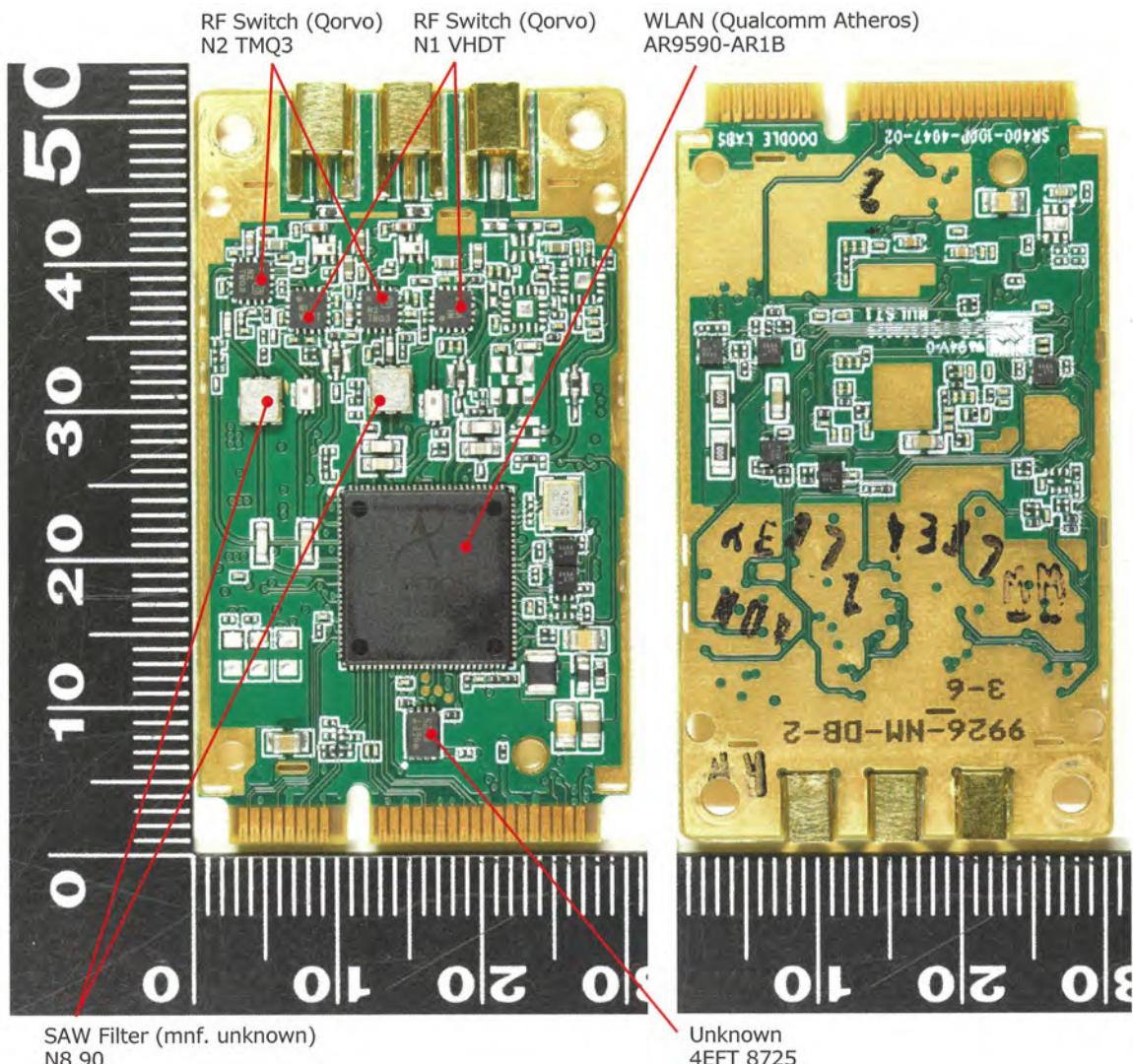


그림 6.42: WiFi고주파 보드는 퀄컴 Atheros WiFi IC를 탑재하고 있으며, IEEE802.11a/b/g/n을 지원합니다. 회로 기판은 4층 구조입니다.(사진: Fomalhaut Techno Solutions)

### 6.3.5 상태 센서

상태 센서는 메인보드에 고정된 트레이에 별도로 장착되는 전자 부품입니다. 원래 미국 LORD MicroStrain의 “130-3DM-GX5-15” IMU (관성 측정 유닛) (그림 6.43)를 사용했습니다. 이 센서는 6축을 측정할 수 있으며, 외형 크기는 36 mm × 36.6 mm × 11.1 mm입니다.

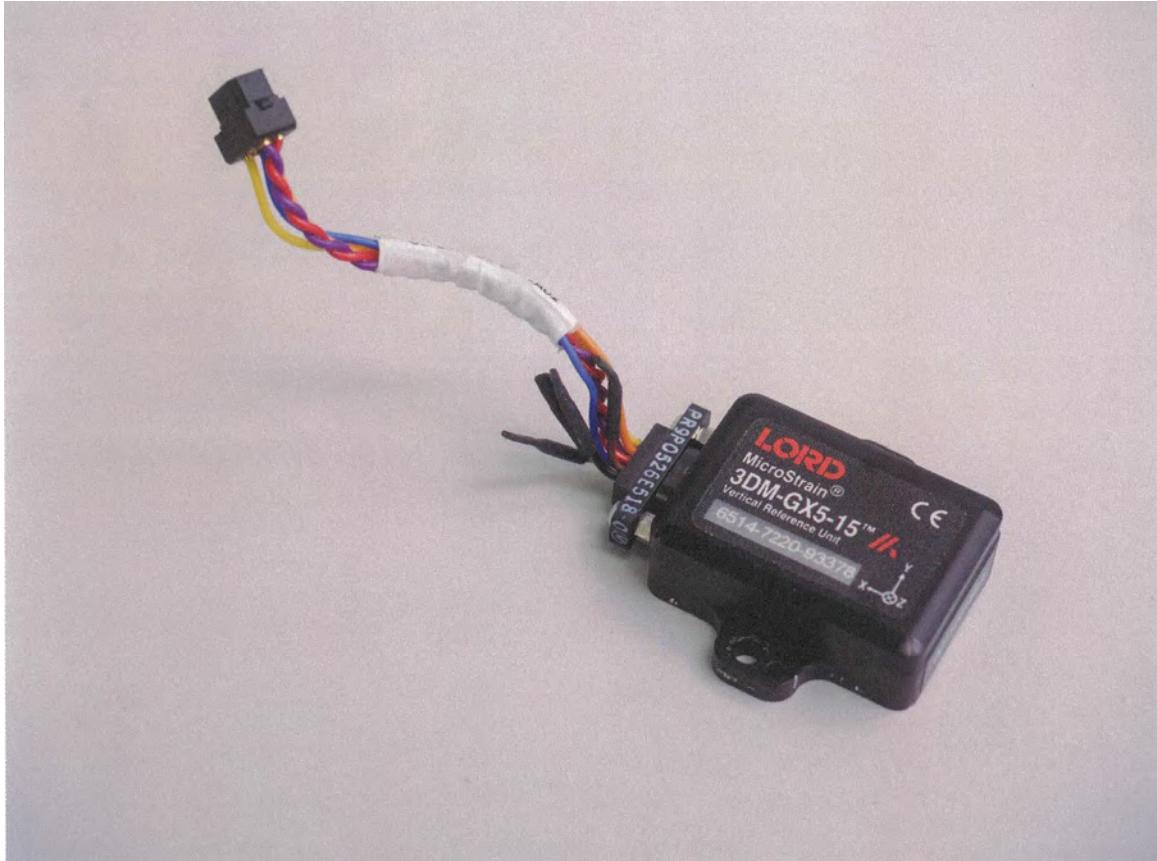


그림 6.43: 상태 센서의 외관은 LORD MicroStrain의 IMU(관성 측정 유닛) “1303DM-GX5-15”를 적용한 모습입니다.(사진:가토 아스시)

상태 센서 내부에는 영국Silicon Sensing사의 자이로스코프, 미국 Honeywell의 지자기 센서, 그리고 미국ADI의 가속도계가 탑재되어 있습니다 (그림 6.44)입니다.

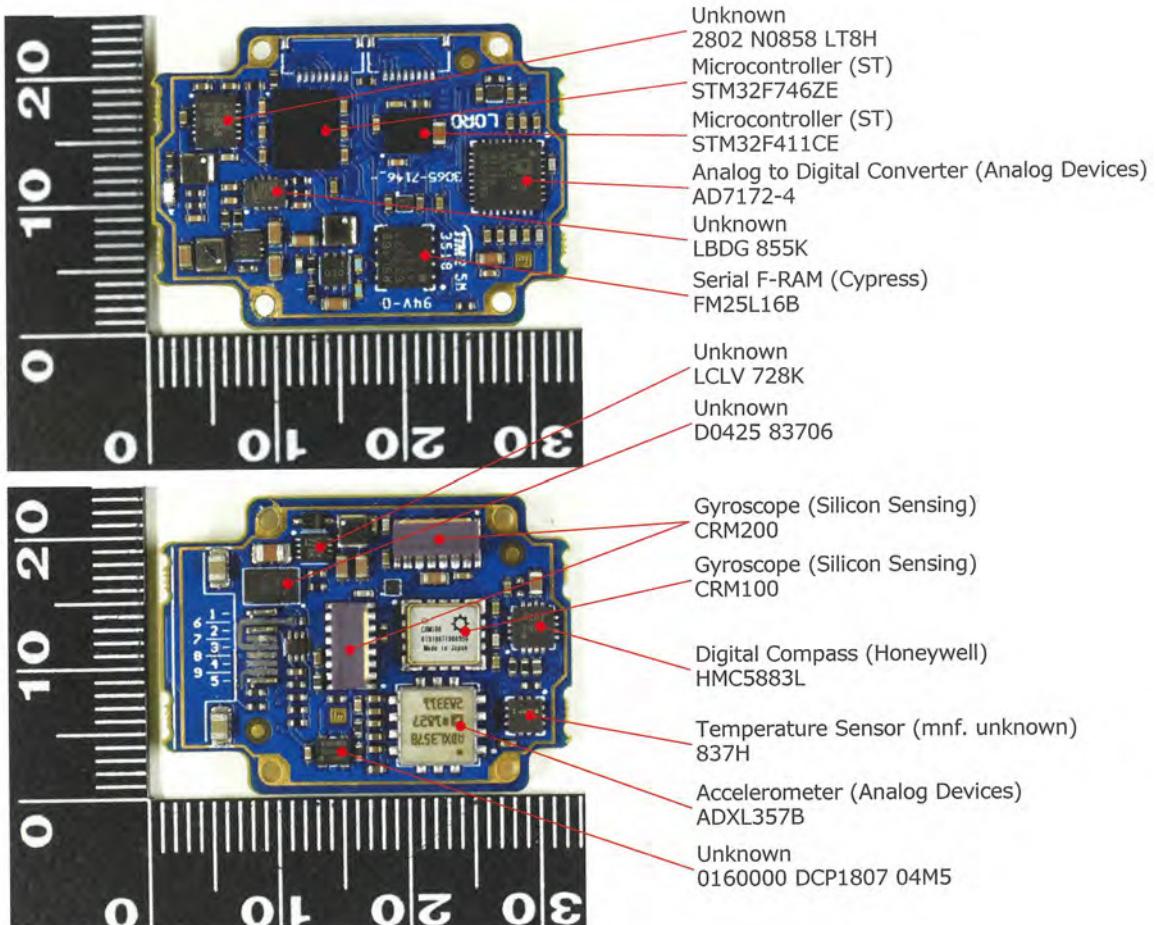


그림 6.44:상태 센서 내부에는Silicon Sensing의 자이로센서,Honeywell의 지자기 센서,Analog Devices의 가속도계가 탑재되어 있습니다.(사진:가토 야스시)

## 6.4 다리 구동 부품

### 6.4.1 설치 위치와 방법

다리 구동 장치의 전자 부품들은 각 구동 유닛의 회로기판에 탑재되어 있습니다 (그림 6.45). 구체적으로, 무릎, X축, Y축 각각의 모터를 제어하는 모터 드라이버 회로기판 (그림 6.46)와, 다리에 가해지는 하중을 측정(무릎 부위 한정)하는 중량 센서 회로기판 (그림 6.47), 각도를 측정하는 인코더 회로기판 (그림 6.48), 그리고 X축과 Y축에 장착된 토크 센서 기판 및 훌 IC 회로기판 (그림 6.49)가 있습니다. (훌 IC 회로기판에 대해서는 “5.3.3 ”Y축 구동 토크 센서 회로기판을 참고하세요.) 무릎, X축, Y축 모터 드라이버 회로기판은 동일하며, 네 개의 다리에 모두 같은 종류의 회로기판이 장착되어 있습니다.

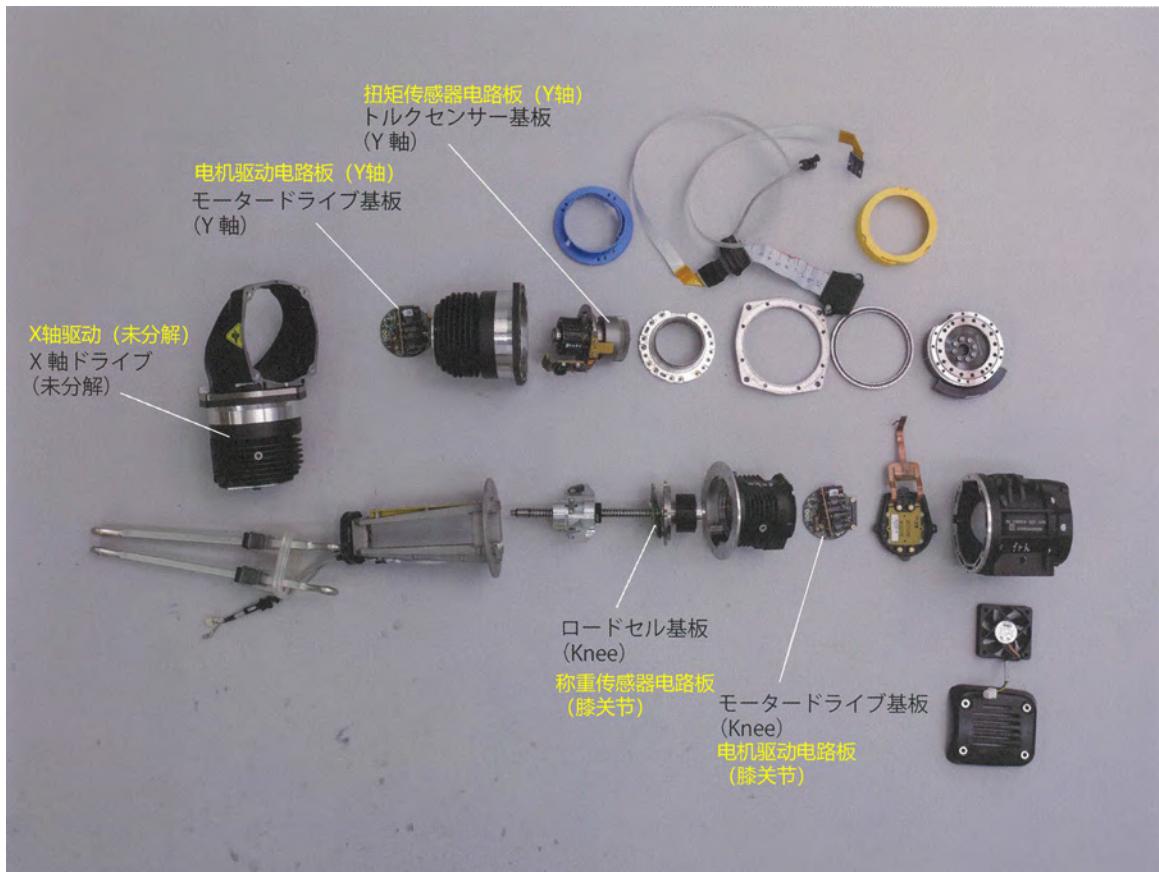


그림 6.45: 다리 구동 모듈 내의 회로 기판  
인코더 회로 기판은 무릎 부분의 리니어 액추에이터 케이스에 장착되어 있으나, 사진에는 나타나지 않습니다.(사진:가토 야스시)

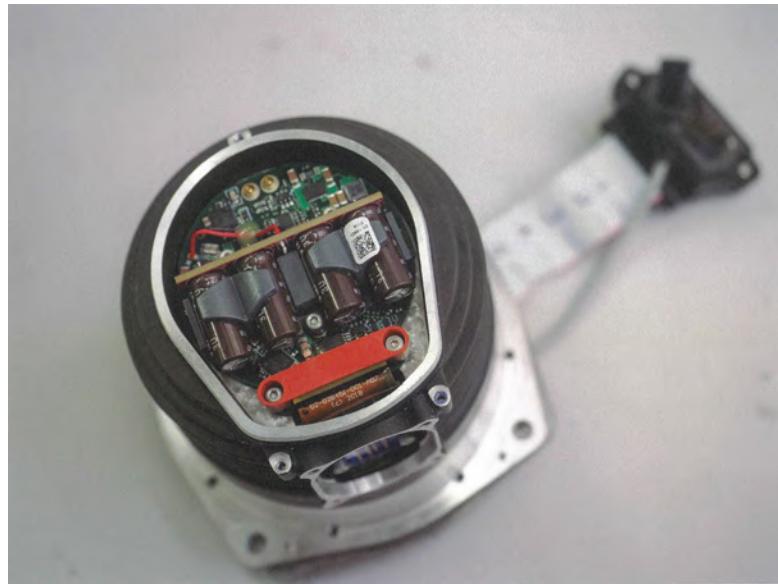


그림 6.46: 모터 구동 회로 기판 X축,Y축,무릎에 공통 적용.(사진:가토 야스시)



그림 6.47: 무게 감지 센서 회로 기판은 무릎 관절 모터 아래에 있습니다. 사진은 위에서 아래로 찍힌 것으로, 센서 기판이 위쪽에 보입니다.(사진:가토 야스시)



그림 6.48: 인코더 회로 기판  
금속 디스크 아래에서 보이는 회로 기판이 인코더 회로 기판입니다.(사진:가토 야스시)



그림 6.49: 토크 센서 회로 기판과 홀IC회로 기판  
사진은Y축 모터 구동 예시이며,X축도 동일합니다.(사진:가토 야스시)

#### 6.4.2 모터 구동 회로 기판

모터 구동 회로 기판은 Knee축, X축, Y축에서 공용으로 사용됩니다. 이 회로 기판은 모터 외관의 한쪽 면을 가리도록 설치되어 있습니다. 기판에는 CAN 컨트롤러와 3쌍의 MOSFET가 탑재되어 있어, CAN을 통해 메인 컴퓨터와 통신하면서 동시에 3상 교류 전류로 모터를 제어할 수 있음을 알 수 있습니다 (그림 6.50). 또한, 모터 구동 회로 기판이 모터 축과 맞닿는 부분에는 홀 센서가 장착되어 있어, 이곳에서 회전 각도를 측정하는 것으로 보입니다.

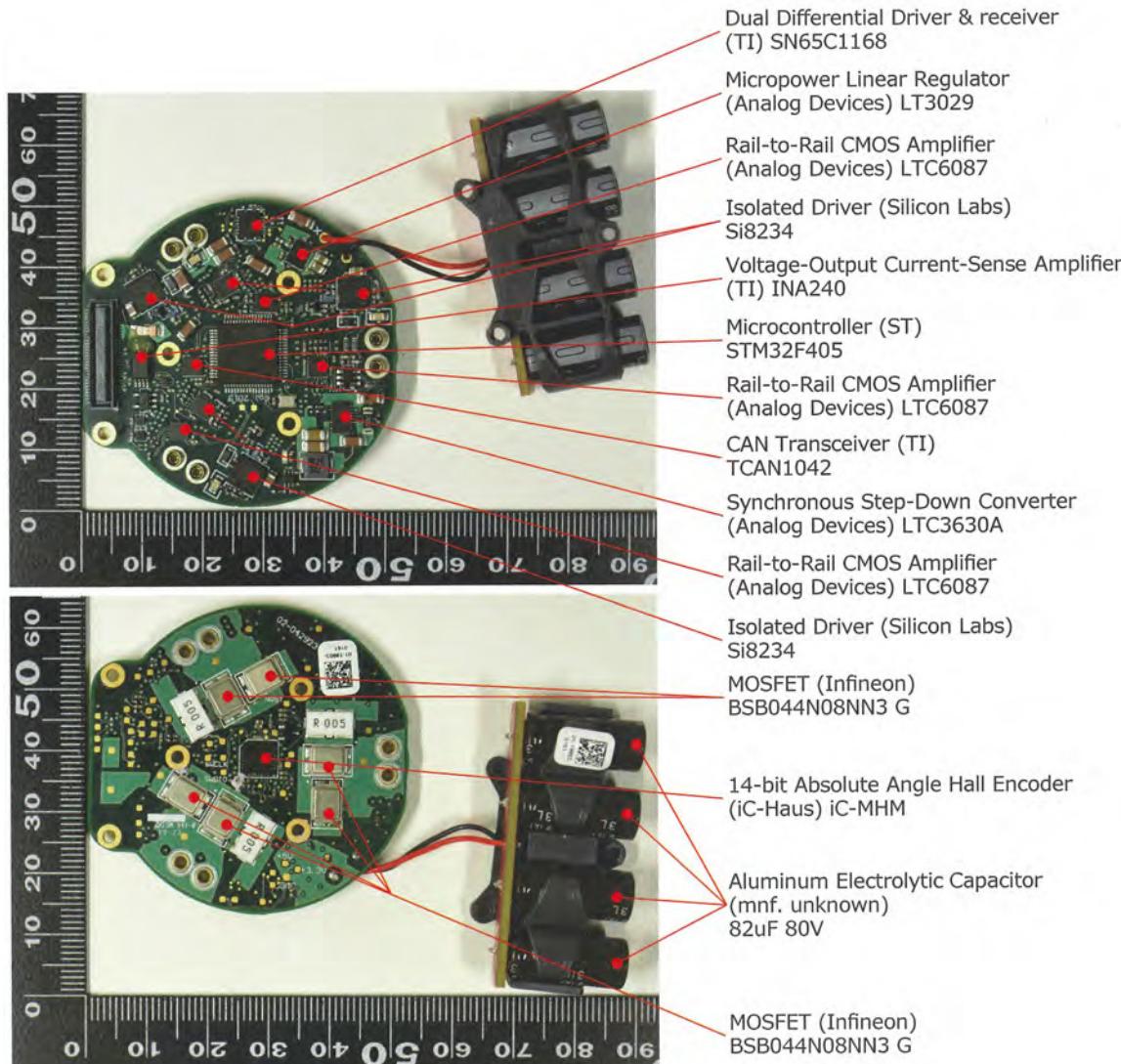


그림 6.50: 모터 구동 회로 기판의 위쪽 사진은 모터와 닿는 면의 반대쪽, 아래쪽 사진은 모터 접촉면을 보여줍니다. 이 회로 기판에는 3상 교류로 모터를 구동하는 회로와 CAN 트랜시버 IC, 그리고 회전 각도를 감지하는 홀 센서가 탑재되어 있습니다. 기판은 총 8층 구조로 이루어져 있습니다.(사진: Fomalhaut Techno Solutions)

### 6.4.3 하중 센서 회로 기판

무게 감지 센서 보드는 구동 무릎 관절의 볼스크류 하단에 가해지는 하중을 측정하는 전용 회로판입니다(그림 6.51). 볼스크류 지지부에 장착된 스트레인 게이지로 힘을 감지하고, 이 데이터를 바탕으로 하중을 계산합니다. 이 센서 보드에는 스트레인 게이지의 저항값을 증폭해주는 앰프, 값을 디지털로 변환하는 IC, 그리고 데이터를 전송하는 IC가 탑재되어 있습니다.

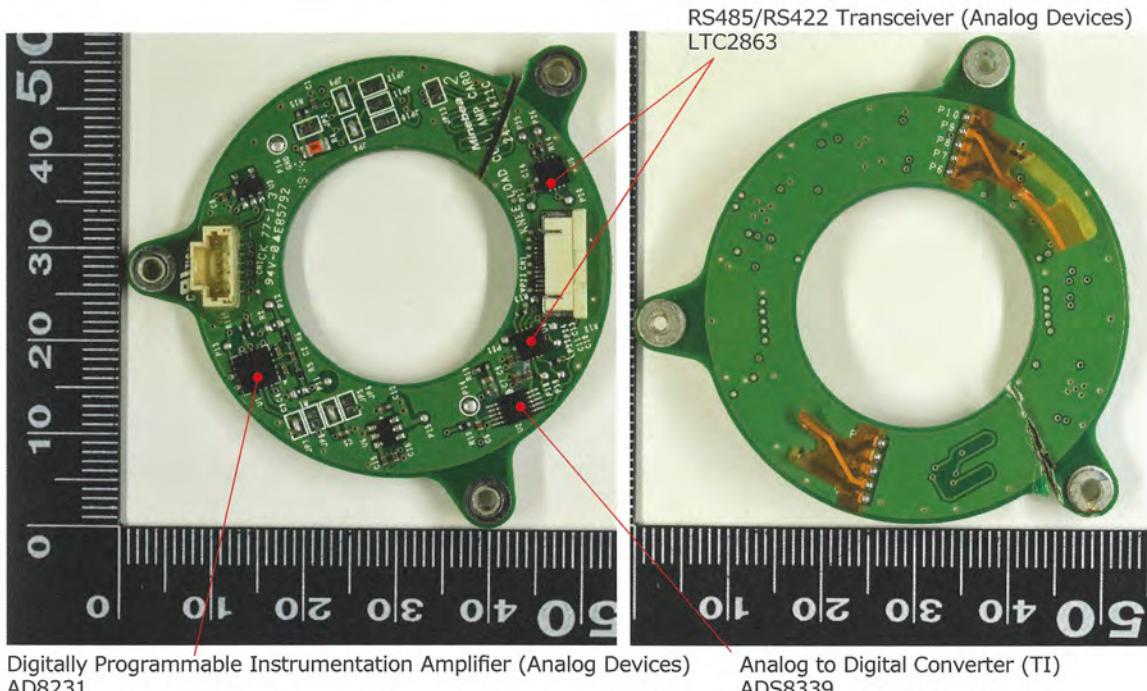


그림 6.51: 무게 감지 센서 회로판. 左쪽은 모터가 없는 면이고, 오른쪽은 모터가 있는 면입니다. 모터 쪽에는 볼스크류 지지부와 스트레인 게이지가 부착되어 있습니다. 스트레인 게이지는 납땜되어 있기 때문에, 보드를 분리하면 이미 손상된 상태입니다. 회로판은 총 6층으로 이루어져 있습니다.(사진:Fomalhaut Techno Solutions)

#### 6.4.4 토크 센서 회로 기판

토크 센서 보드는 X축과 Y축에 위치해 있으며, 각 구동기의 토크는 스트레인 게이지를 사용해 측정되는 것으로 보입니다 (그림 6.52). 장착된 IC는 “6.4.3하중 센서 회로 기판”과 동일합니다. 다만, 측정용 스트레인 게이지의 위치와 장착되는 케이스의 형태가 달라 회로 기판의 모양이 다르게 설계되어 있습니다.

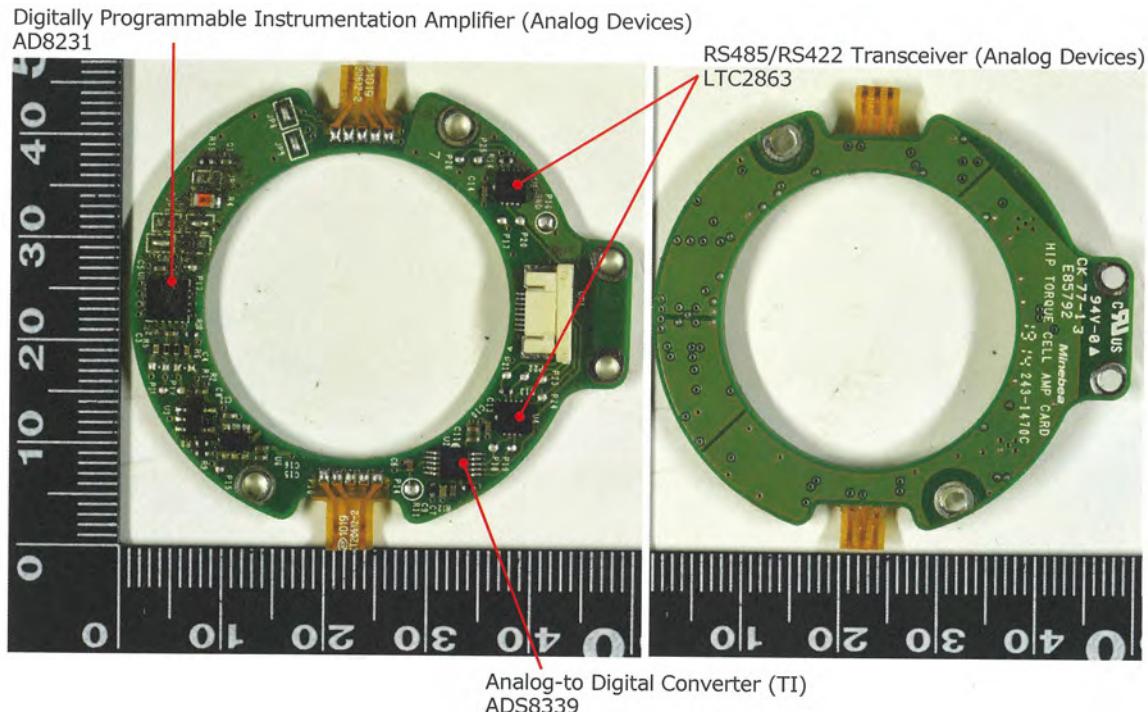


그림 6.52: 토크 센서 회로 기판. 左쪽은 모터 반대편, 오른쪽은 모터가 있는 면입니다. 스트레인 게이지는 모터 쪽 브래킷에 설치되어 있으며, 구동 반작용력의 토크는 이 브래킷에 부착된 스트레인 게이지로 측정됩니다. 회로 기판은 6층 구조입니다. (사진:Formalhaut Techno Solutions)

#### 6.4.5 인코더 회로 기판

인코더 회로 기판은 무릎 관절의 리니어 액추에이터를 수용하는 외함에 장착되어 있으며, 무릎 관절에 해당하는 축의 회전 부위 바깥쪽에 위치합니다(그림 6.53). 축에는 원형 금속 디스크가 연결되어 있고, 그 아래에 회로 기판이 있습니다. 기판에는 독일 iC-Haus의 “Magnetic Off-Axis Absolute Position Encoder” 헐 센서 IC가 탑재되어 있습니다. 이 디스크에는 자성 마크가 있어, 마그넷을 감지해 회전 각도를 측정합니다.

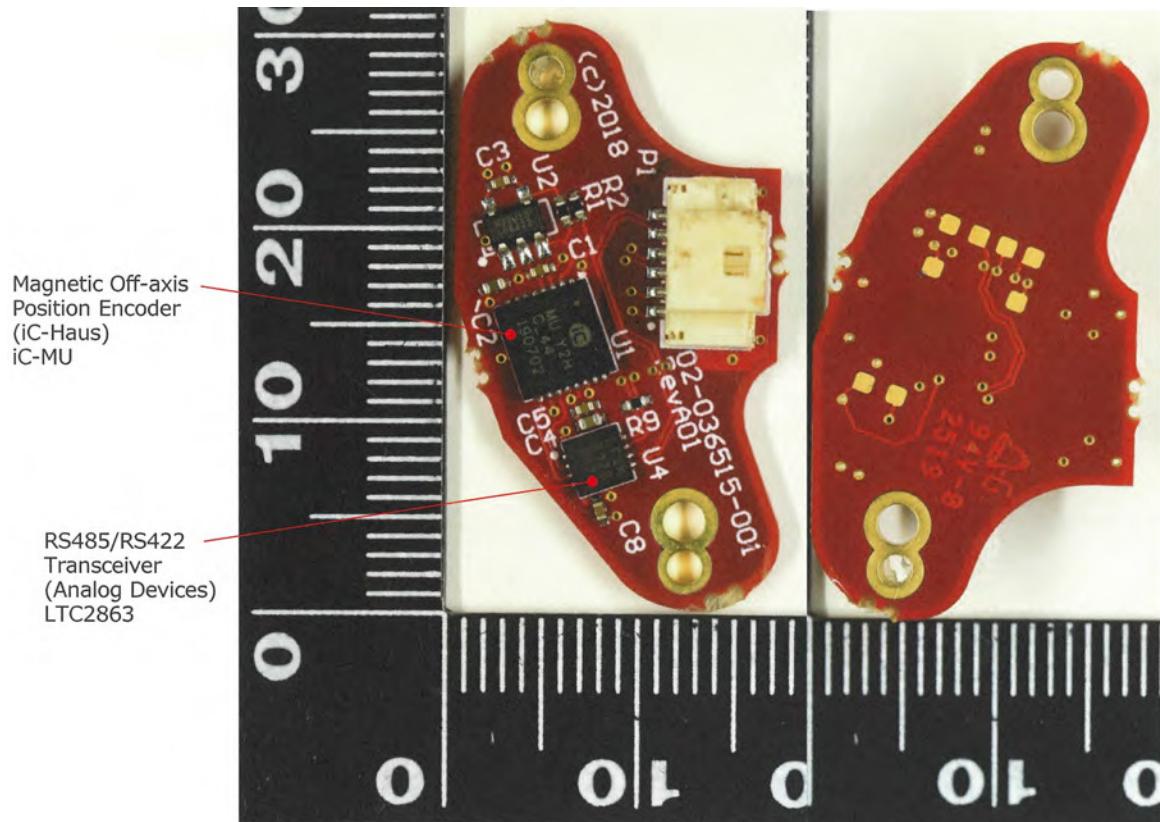


그림 6.53: 인코더 회로 기판 왼쪽이 디스크, 오른쪽이 뒷면입니다. 헐 센서는 디스크 아래에 위치하며, 여기서 회전 각을 감지하는 것으로 보입니다. 회로 기판은 4층 구조입니다.(사진:Fomalhaut Techno Solutions)

## 6.5 배터리 팩

### 6.5.1 외관 및 사양

배터리 팩은 Spot 본체 하단에 위치합니다. 배터리 팩 크기는 168 mm × 325 mm × 93 mm입니다. 전압은 50.4 V, 용량은 605 Wh입니다.



그림 6.54: 배터리 팩 외관이 Spot의 하단에 연결되어 있습니다. 배터리 팩의 크기는 168 mm × 325 mm × 93 mm이며, 전압은 50.4 V, 용량은 605 Wh입니다.(사진: Fomalhaut Techno Solutions)

### 6.5.2 내부 구조

배터리 팩의 내부는 배터리 모듈과 제어 회로 기판으로 구성되어 있습니다 (그림 6.55). 이 팩에는 56개의 18650 규격 원통형 배터리가 들어 있습니다. LHS(Latent Heat Solutions)라는 문구가 모듈에 표시되어 있습니다. 웹사이트 정보에 따르면, 이 모듈에는 급격하게 발생하는 열을 흡수하고 전체 열을 조절하는 잠열 소재가 적용되어 있다고 합니다. 배터리를 이 소재로 감싸면 수명이 연장되는 효과가 있는 것으로 보입니다.

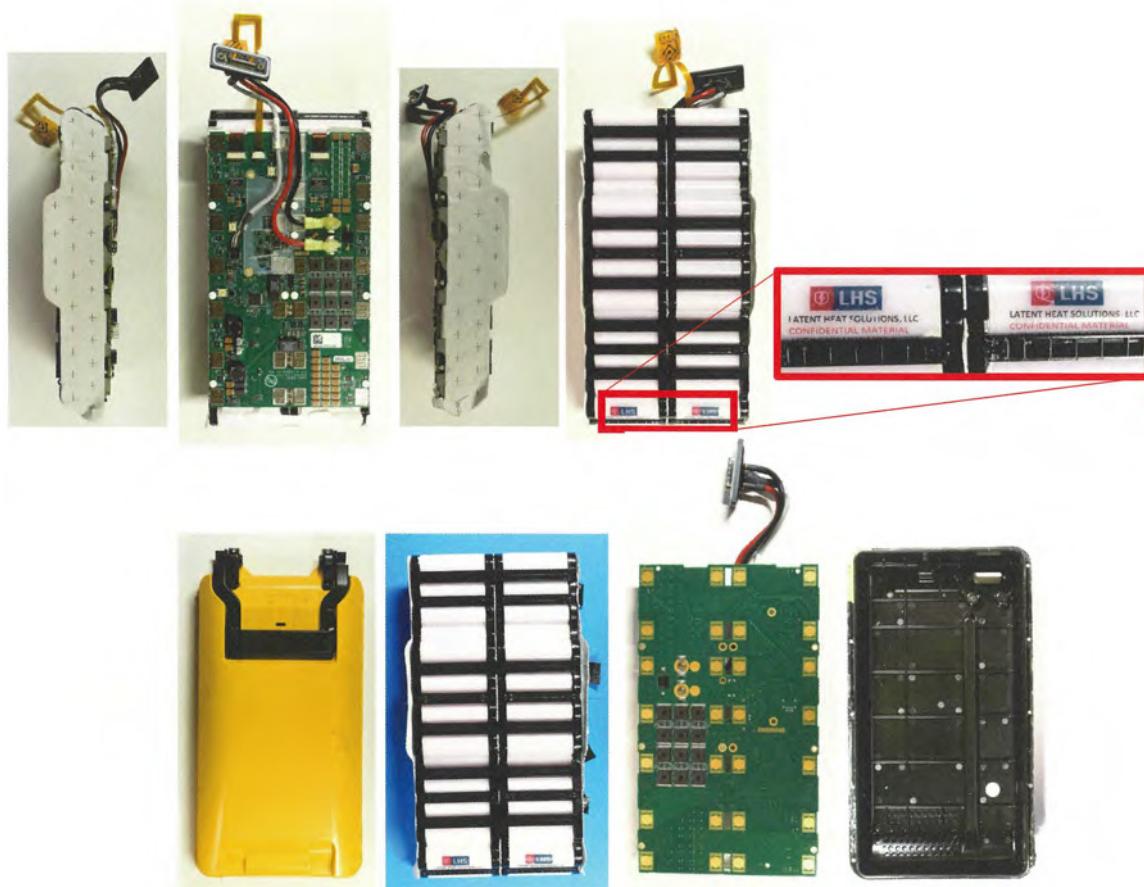


그림 6.55: 배터리 팩 분해 시 배터리 모듈과 회로 기판이 케이스 안에 설치되어 있습니다.(사진:Fomalhaut Techno Solutions)

### 6.5.3 제어 회로 기판

제어 회로 기판에는 배터리 상태를 감시하는 IC와 배터리 전력 제어를 위한MOSFET(그림 6.56, 그림 6.57)이 탑재되어 있습니다. 또한, 주 컴퓨터와의 통신을 위한CAN트랜시버IC도 포함되어 있습니다. CAN은 주 컴퓨터와의 데이터 통신에 사용됩니다.

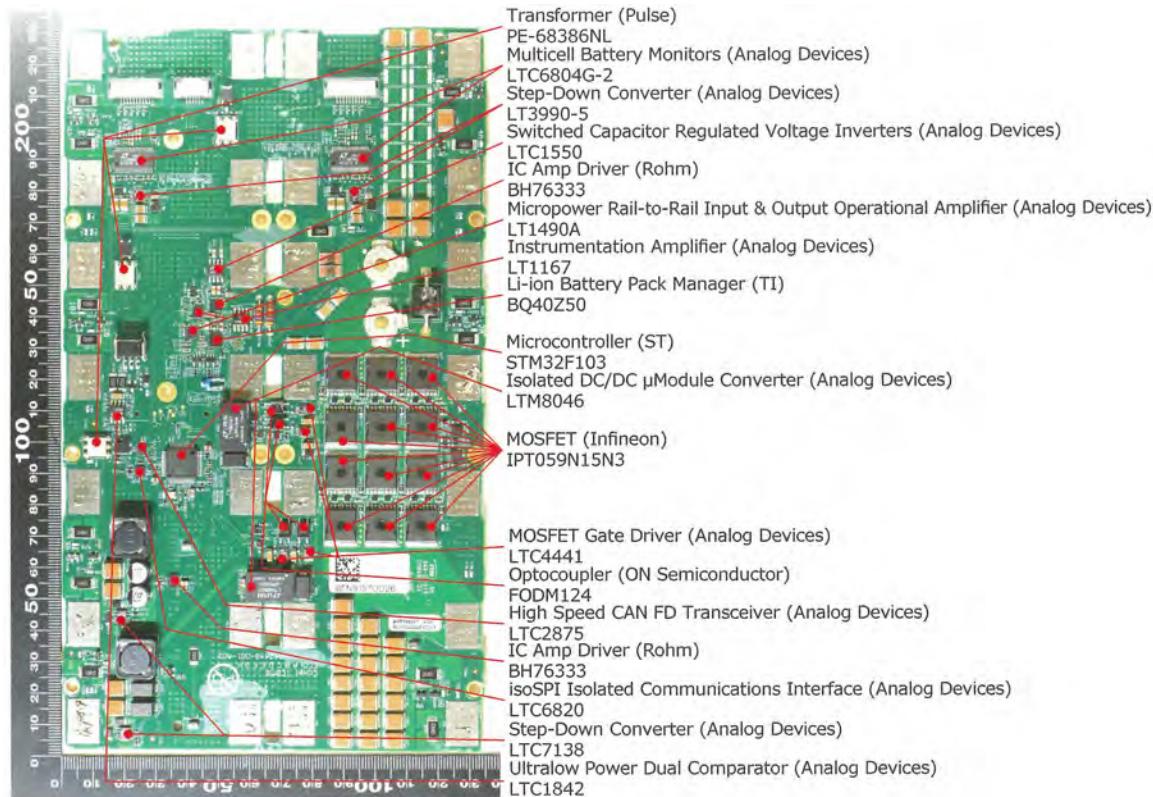


그림 6.56: 배터리 팩 제어 회로 기판의A면(배터리 모듈의 반대쪽)이 면에는 배터리 제어용 회로와 전압 조절 회로가 구성되어 있습니다. 기판은 총8층으로 이루어져 있으며, 기판 위에는28개의 사각형 패드가 있어 배터리 모듈의 전극선이 이곳에 연결됩니다.(사진: Fomalhaut Techno Solutions)

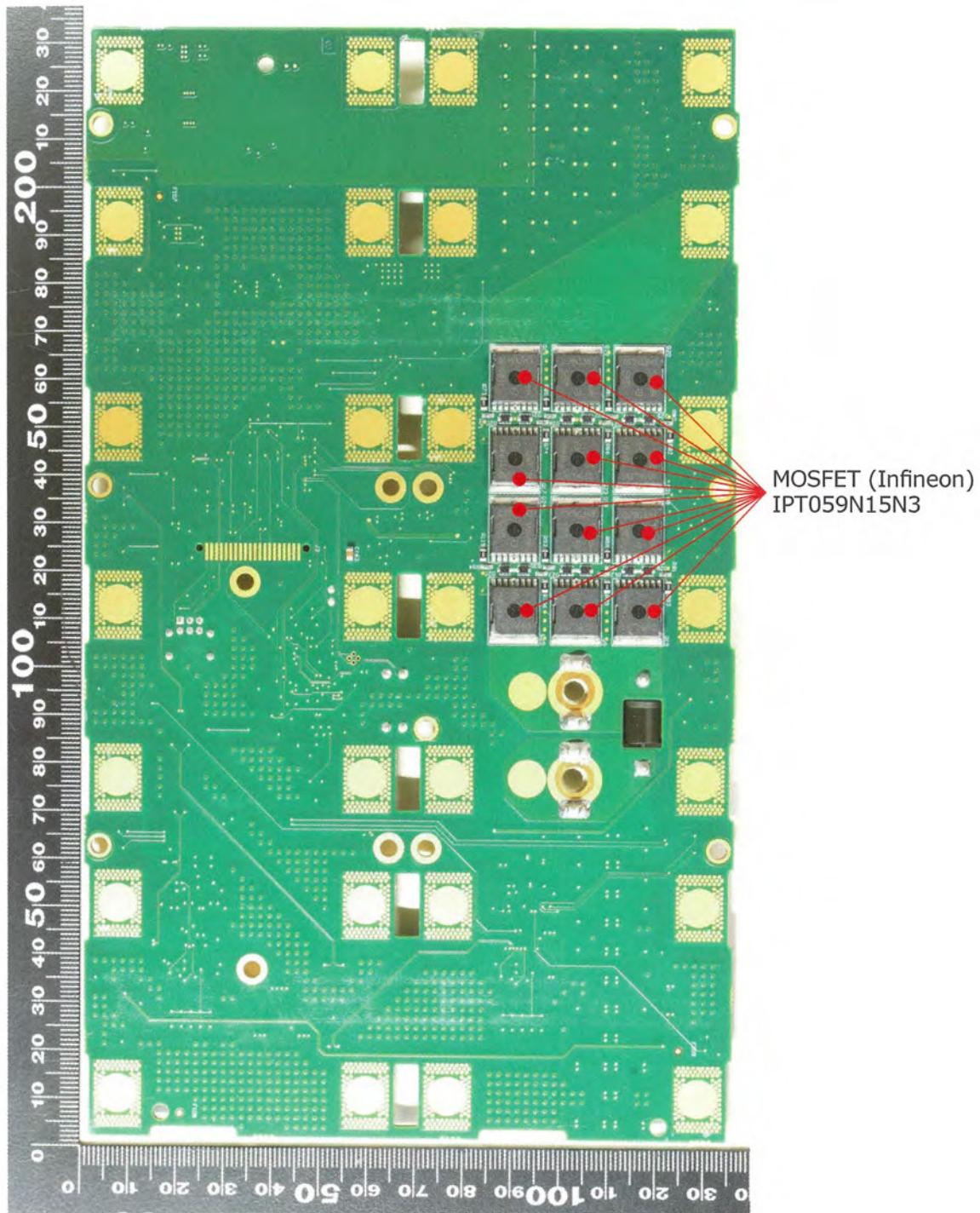


그림 6.57: 배터리팩 제어 회로 기판의 B면(배터리 모듈과 맞닿는 쪽)에는 거의 IC가 탑재되어 있지 않습니다.(사진: Fomalhaut Techno Solutions)

## 6.6 리모컨

### 6.6.1 외관 및 사양

Spot의 리모컨은 조이스틱 등 조작 버튼이 탑재된 안드로이드 태블릿입니다 (그림 6.58). 중국 JinXingDigital사가 제조하며 브랜드는 JXD입니다. 이 태블릿은 맞춤형 제품이 아닌 범용 제품으로, 온라인 쇼핑몰에서 구매가 가능합니다. 모델명은 “JINXING DAS192K”입니다. 7인치 FHD LCD 터치스크린이 탑재되어 있으며, 프로세서는 중국 Rockchip의 “RK3288”와 “Arm Cortex A17” 쿼드코어(1.8 GHz 동작)를 사용합니다. 크기는 274 mm × 143.5 mm × 53.3 mm이고, 무게는 1.26kg입니다.



그림 6.58: 리모컨 외관은 JinXing Digital의 ‘JINXINGDAS 192K’을 그대로 사용합니다.(사진: Fomalhaut Techno Solutions)

## 6.6.2 내부 구조

리모컨 내부는 조이스틱 보드, 메인 보드, 배터리, LCD 패널 등으로 구성되어 있습니다(그림 6.59)입니다.



그림 6.59: 리모컨 내부는 간단한 구조로, 주로 메인 제어 회로, LCD 패널, 배터리로 이루어져 있습니다.(사진: Fomalhaut Techno Solutions)

## 6.6.3 메인 제어 회로판

주요 제어 회로판은 한쪽에 장착되어 있으며, 구조가 매우 간단합니다. 이 회로판 위에는 프로세서, DRAM, 플래시 메모리, WiFi/블루투스IC가 탑재되어 있습니다(그림 6.60, 그림 6.61).

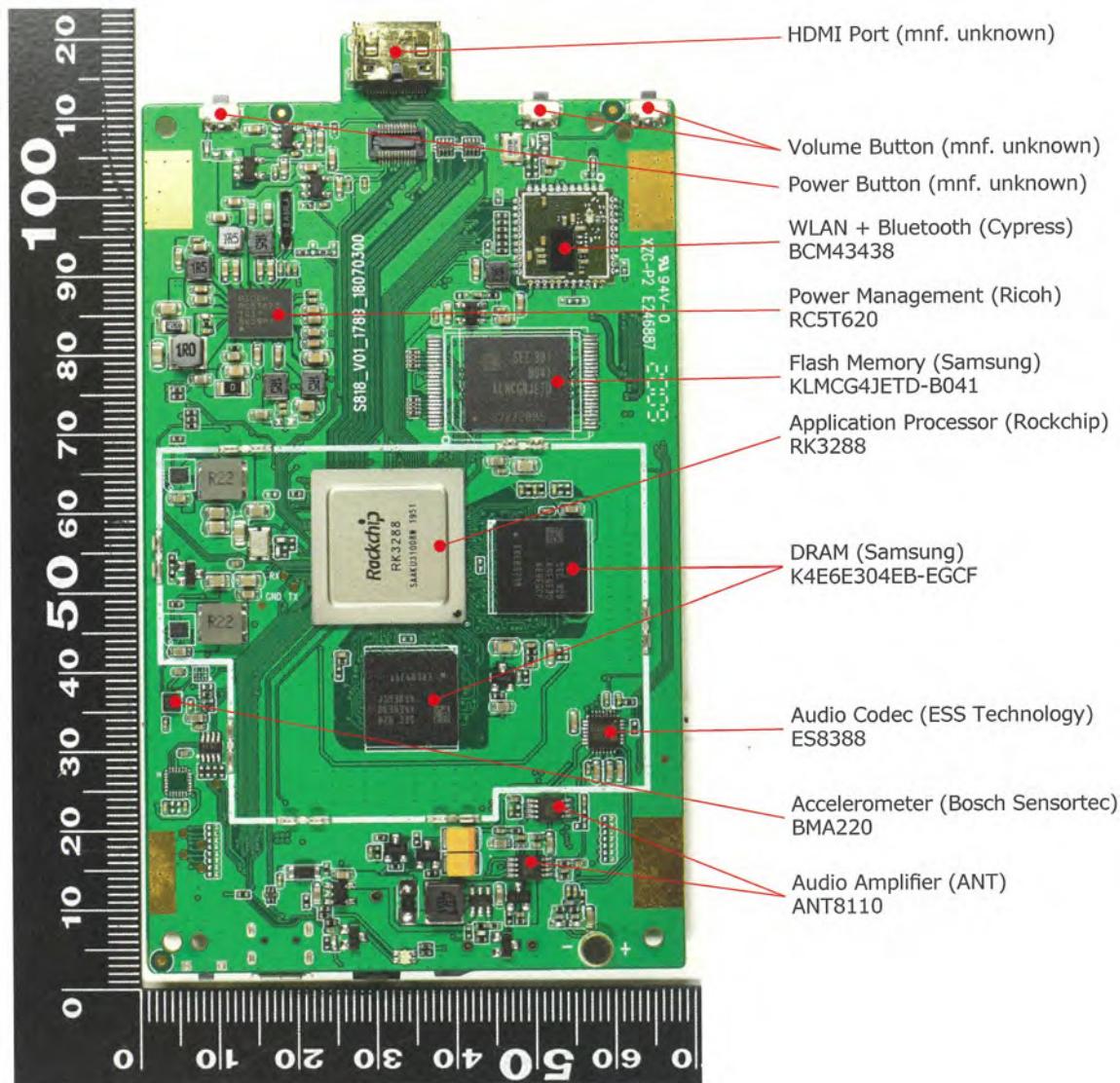


그림 6.60: 리모컨의 주요 제어 회로판 A면 한쪽에 프로세서, 메모리, 플래시, 무선IC가 있습니다. 회로판은 총6층 구조입니다.(사진: Fomalhaut Techno Solutions)

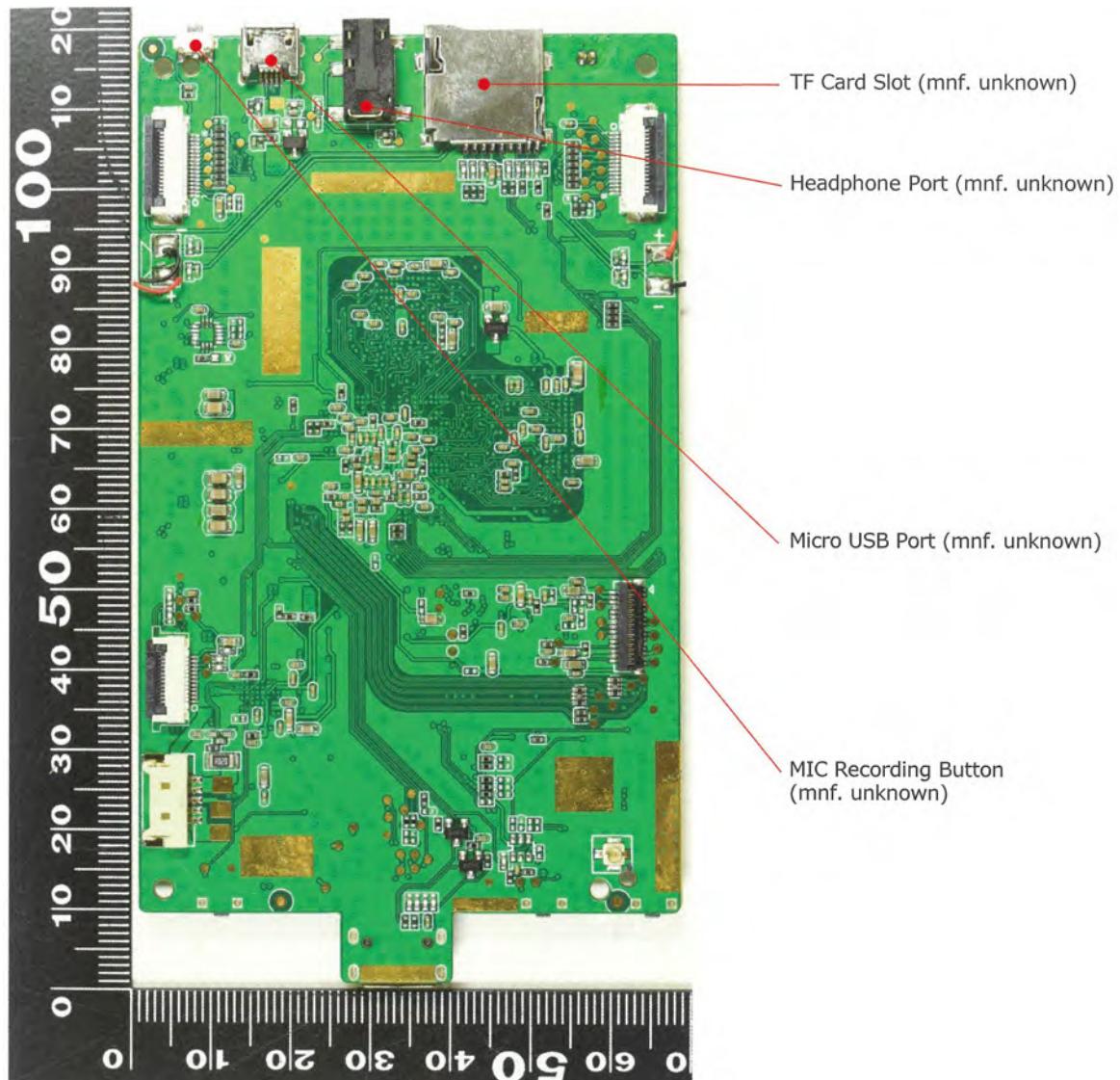


그림 6.61: 리모컨 메인 제어 회로 기판의 B면은 대부분 커넥터만 있고, IC는 장착되어 있지 않습니다.(사진: Fomalhaut Techno Solutions)

## 제 7 장 페이로드

## 7.1 구매한페이로드

### 7.1.1 개요

Spot을 구매할 때 선택적으로 추가할 수 있는 Payload도 함께 구매했습니다 (그림 7.1). 카메라 ‘Spot Cam’과 ‘EAP(Enhanced Autonomy Payload)’이 있습니다. 2021년8월22일 이후로 Spot Cam은 단독 판매되지 않고, 패틸트 줌 카메라와 조합된 ‘INSPECTION’ 옵션으로 제공됩니다. EAP에는 LIDAR(Light Detection And Ranging)와 프로그램 실행용 PC ‘EDGE CPU’가 포함되어 있습니다. 참고로, EDGE CPU는 ‘Spot Core’라고도 불립니다. 자세한 사양과 가격은 ‘1.3.4 확장 Payload’ 항목을 참고하세요.



그림 7.1: 구매한페이로드 Spot Cam과EAP(LIDAR와EDGE CPU 포함)을 구매함.(사진:가토 야스시)

## 7.2 스팟캠

### 7.2.1 외관

Spot Cam은 원통형 본체에 5개의 카메라를 탑재해 360° 촬영이 가능한 장치입니다(그림 7.2). 외관 크기는 334 mm × 203 mm × 130 mm이며, 무게는 3.1 kg입니다. 수직 시야각은 170°이고, 최대 9600 × 4800 픽셀의 이미지를 출력할 수 있습니다. 본체 후면에는 커넥터가 설치되어 있어, 베이스 부분을 Spot 본체의 뒷면 레일에 장착할 수 있고, 후방 커넥터는 Spot의 확장 포트에 연결할 수 있습니다.



그림 7.2: Spot Cam의 외관 원통형 본체 주위에 5개의 카메라가 장착되어 있습니다.(사진 제공: Fomalhaut Techno Solutions)

### 7.2.2 회로 기판 설치 위치

Spot Cam에는 총6종류의 회로 기판이 장착되어 있습니다(그림 7.3). 메인보드, 프로세서 기판, 전원 기판, DC-DC 변환 기판, 짐벌 줌 카메라 기판, 카메라 기판으로 구성되어 있습니다. 프로세서 기판은 메인보드의 하위 기판이고, DC-DC 변환 기판은 전원 기판의 하위 기판입니다.



그림 7.3: Spot Cam 분해 모습 카메라 기판은 실제로 카메라 브라켓 내부에 있지만, 본 사진에서는 보이지 않습니다. 이외에는 5개의 회로로 구성되어 있습니다. 상단 커버 아래에는 짐벌 줌 카메라 연결 포트가 있습니다. 짐벌 줌 카메라를 연결할 때는, 상단 커버를 분리한 뒤 연결하는 것으로 보입니다.(사진 제공:Fomalhaut Techno Solutions)

외부 케이스는 알루미늄 합금으로 만들어졌으며, 절삭 흔적이 보입니다. 내부의 회로 기판들은 입체적으로 배치되어 있습니다. 케이스가 넉넉한 크기라 내부 공간도 충분합니다(그림 7.4).

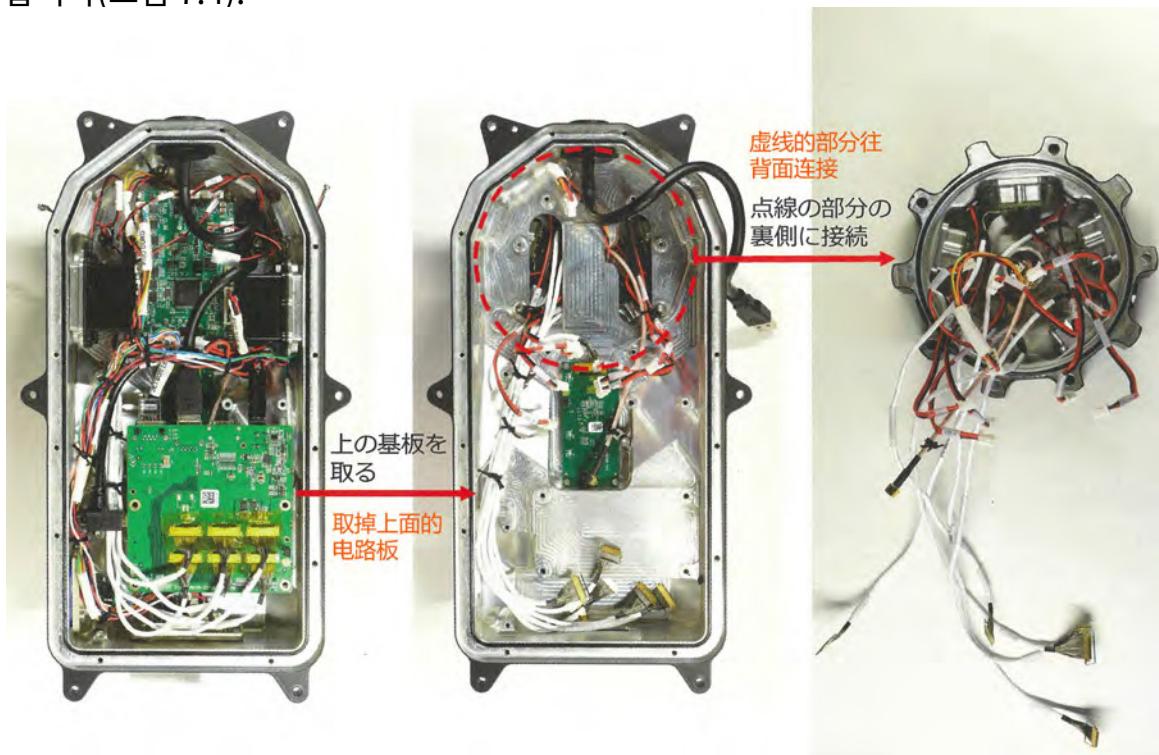


그림 7.4: Spot Cam의 내부 구조 외부 케이스는 알루미늄 합금으로 만들어졌으며, 기판은 입체적으로 배치되어 전체적으로 넉넉한 공간을 확보하고 있습니다.(사진:Fomalhaut Techno Solutions)

### 7.2.3 장착된 회로 기판

메인보드

메인보드는 Spot Cam에 장착된 각 보드를 연결하고, Spot 본체와 같은 외부 인터페이스 역할을 합니다 (그림 7.5). 또한, HDMI 및 USB 포트와 SD 카드 슬롯도 탑재되어 있습니다. 이 외에도, 서브 보드와 연결되는 프로세서 보드의 커넥터 역할도 담당합니다.

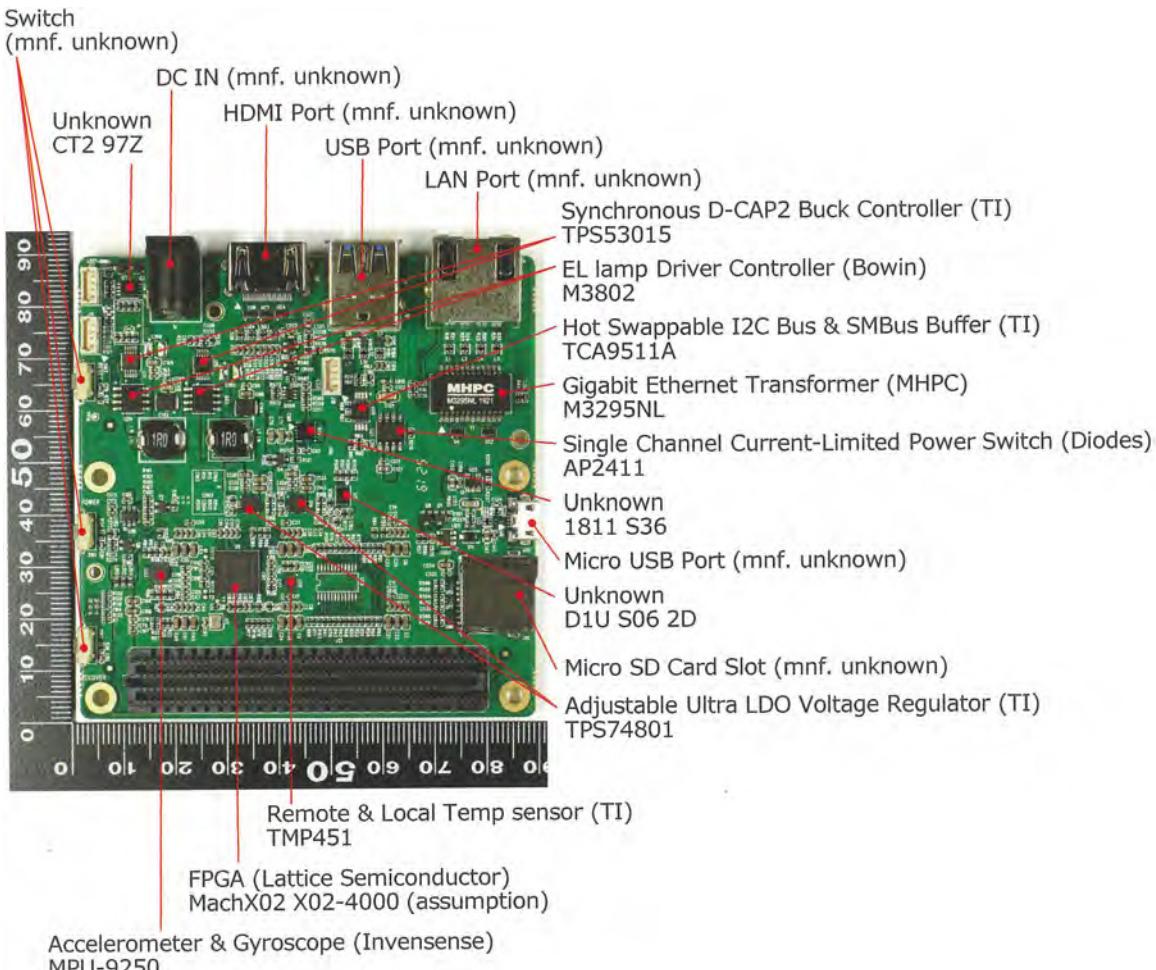


그림 7.5: 메인보드A면 사진 하단의 검은색 커넥터로 프로세서 보드와 연결됩니다. 이 보드는 6층 구조로 되어 있습니다.(사진 출처: Fomalhaut Techno Solutions)

IC가 다수 장착된 면과 그 반대편(B면) 모두에 각 카메라를 연결할 수 있는 커넥터가 설치되어 있습니다(그림 7.6). 총 6개의 커넥터가 있으며, 이 중 5개는 내장 카메라용, 1개는 외부 팬틸트 줌 카메라 연결에 사용됩니다.

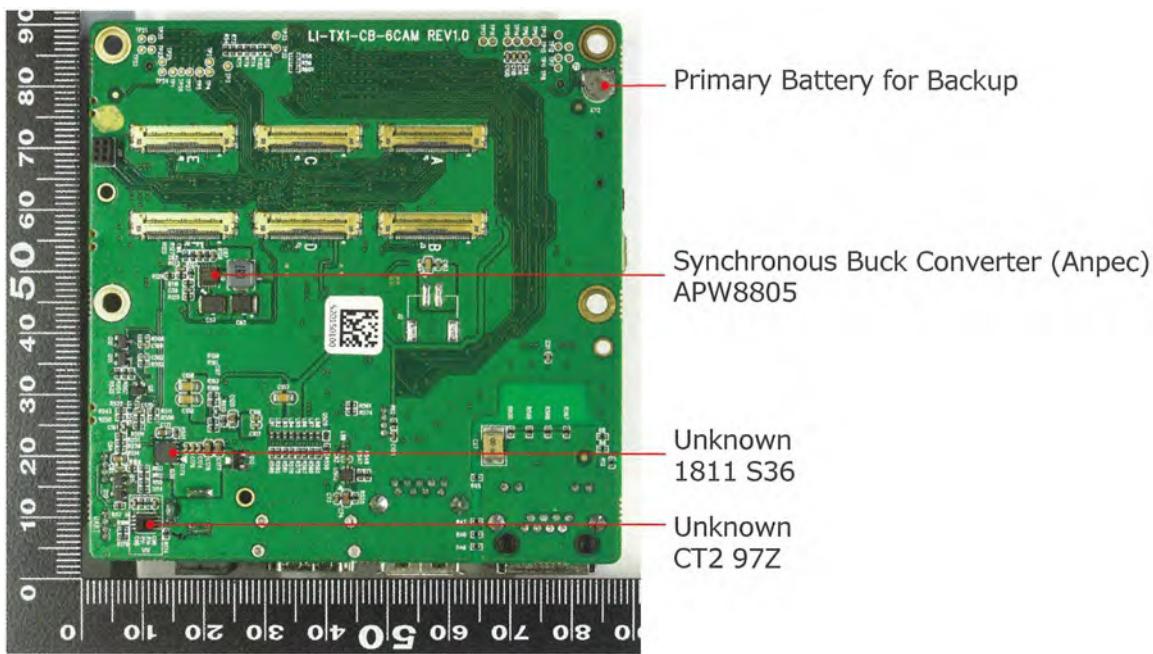


그림 7.6: 메인보드 B면에 카메라 연결용 커넥터가 장착되어 있음.(사진 제공: Fomalhaut Techno Solutions)

### 프로세서 회로 기판

프로세서 회로 기판에는 ‘TE770D-A2’가 탑재되어 있습니다. 이는 미국 엔비디아의 SoC(System on a Chip)입니다 (그림 7.7). 칩셋 구성만 보아도, 내장형 ‘JETSON TX2’ 모듈 그대로인 듯합니다.

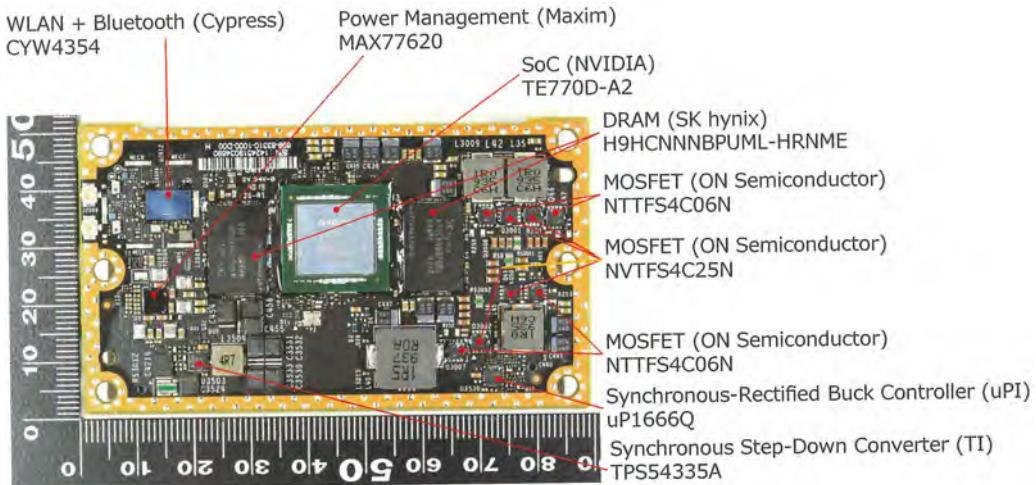


그림 7.7: 프로세서 회로 기판A면의 주요 역할은 카메라가 촬영한 이미지를 수신하고 처리하는 데 있습니다. 이 회로 기판은 12층 구조로 되어 있습니다.(사진: Fomalhaut Techno Solutions)

TE770D-A2에는 Armv8 기반의 “Denver 2” 코어 2개, Cortex-A57 쿼드코어 프로세서 1개, 그리고 Pascal 아키텍처 기반 GPU 1개가 탑재되어 있습니다(그림 7.8).

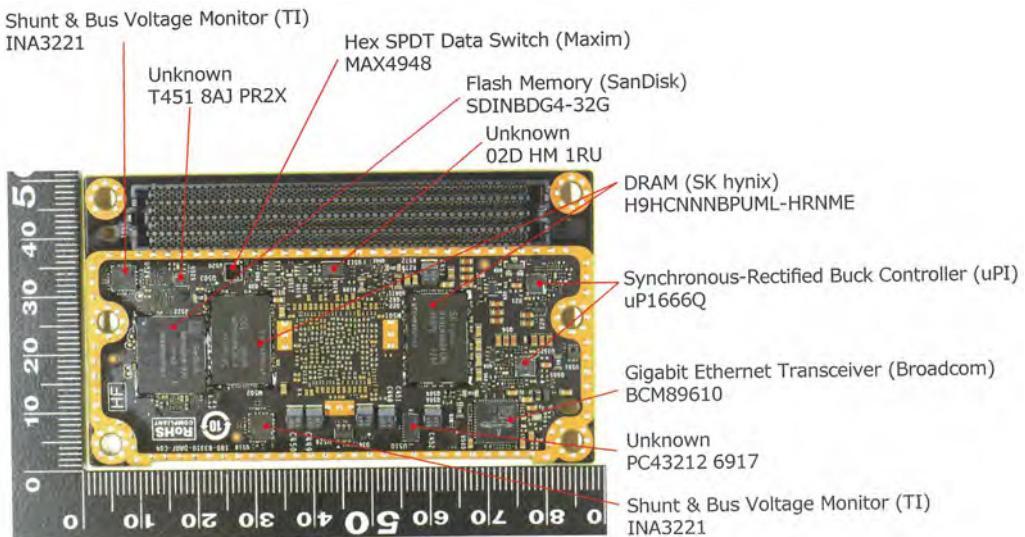


그림 7.8: 프로세서 회로 기판B면에는 플래시 메모리와 DRAM이 탑재되어 있습니다. 사진 상단에 보이는 커넥터를 통해 메인보드와 연결됩니다.(사진: Fomalhaut Techno Solutions)

## 전원 회로 기판

전원 회로 기판은 Spot Cam의 각 보드와 부품에 안정적인 전원을 공급하는 역할을 하는 것으로 보입니다 (그림 7.9). 특히, LED 칩과 메인보드에 전원을 공급하며, 메인보드는 USB로 동작합니다.

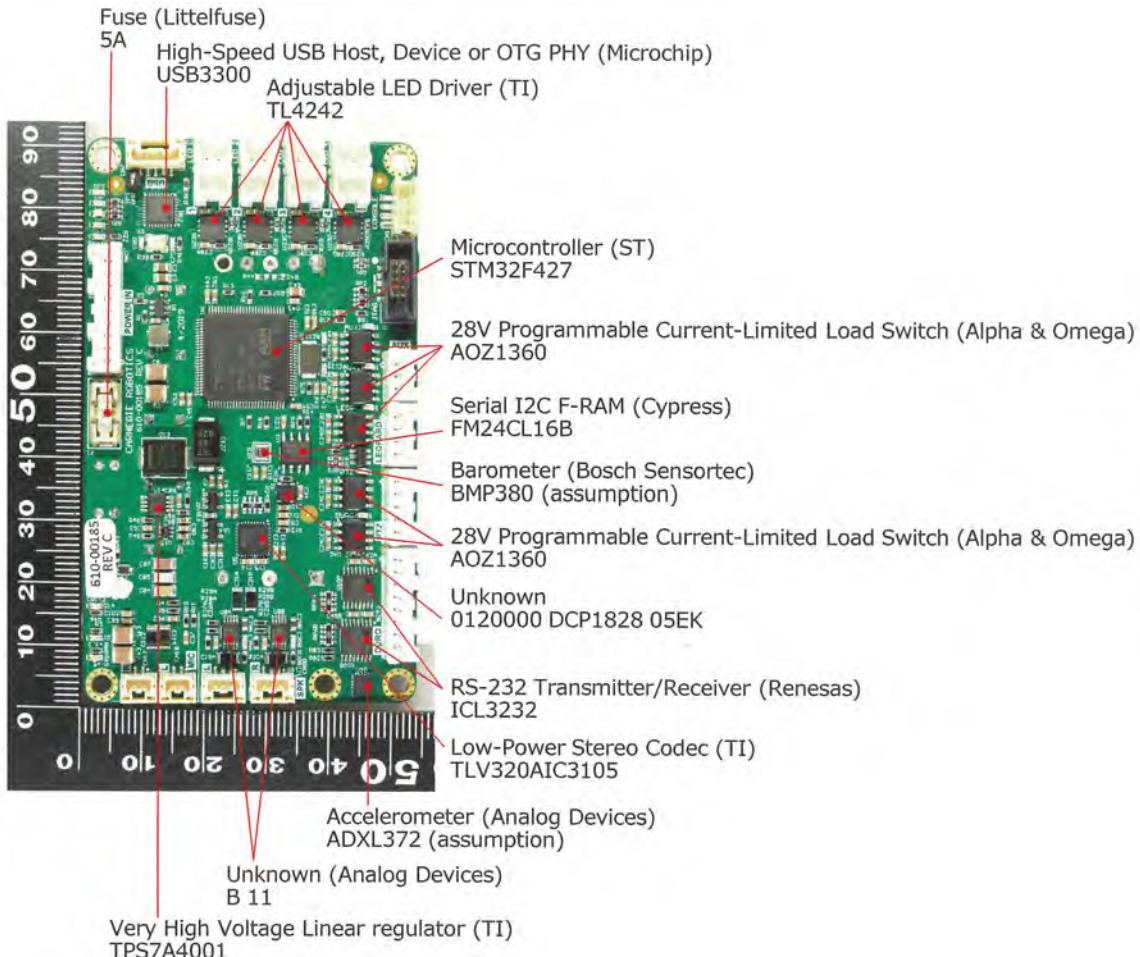


그림 7.9: 전원 회로 기판A면에는 전원 관련 IC가 다수 탑재되어 있습니다.(사진: Fomalhaut Techno Solutions)

전원 회로 기판의 IC 장착 면 반대쪽(B면)에는 DC-DC 변환 보드와 연결되는 패드가 있습니다. DC-DC 변환 보드의 핀이 이곳에 납땜됩니다(그림 7.10).

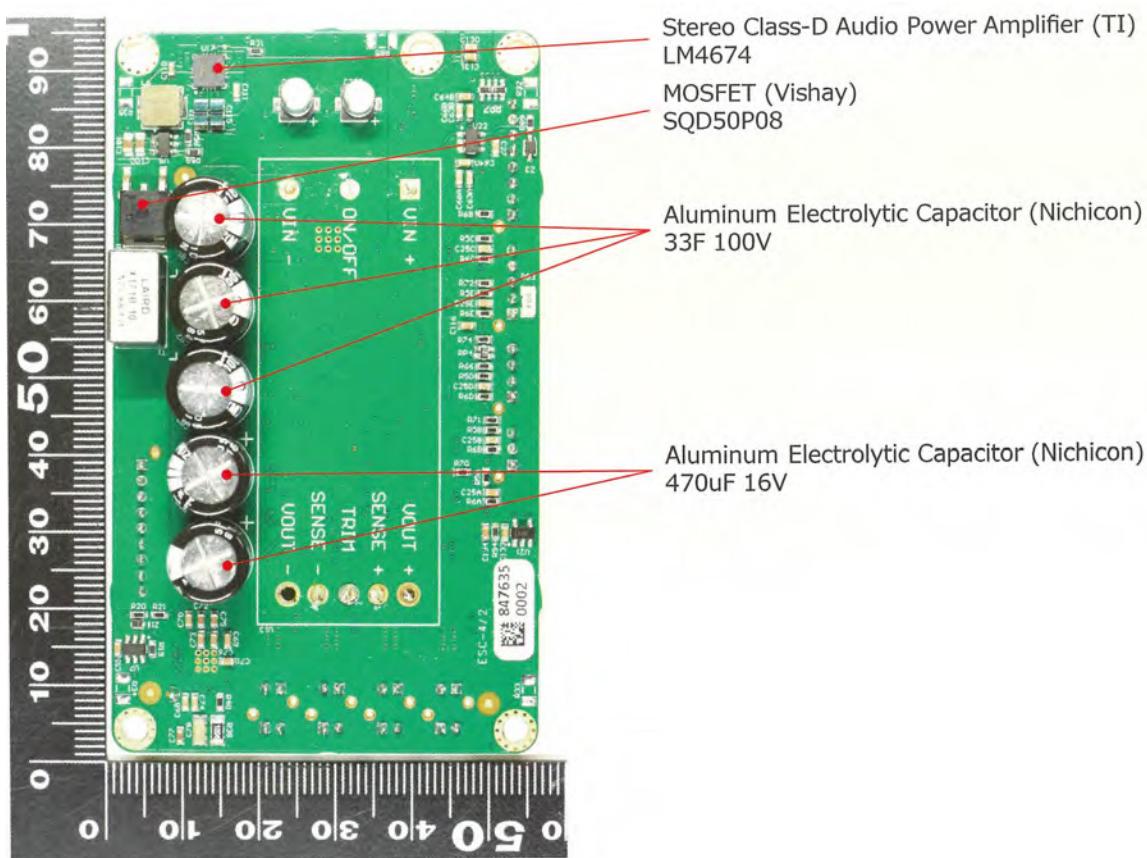


그림 7.10: 전원 회로 기판B면 DC-DC변환 회로 기판이 기판의 사각형 영역에 부착되어 있습니다. 사각형 위와 아래에 패드가 보입니다.(사진:Fomalhaut Techno Solutions)

## DC-DC 변환 회로 기판

DC-DC변환 회로 기판은 Spot본체에서 공급하는 35  $\times$  59 V전원을 12 V로 변환하는 역할을 합니다 (그림 7.11). 이 기판은 Murata의 범용 절연 DC-DC 변환기 “UWE-12/10-Q48NB-C”입니다. 제품 카탈로그 기준으로, 이 변환기는 18  $\times$  75 V의 입력 전압을 12 V 출력 전압으로 변환합니다. 최대 출력은 120W (10A)입니다.

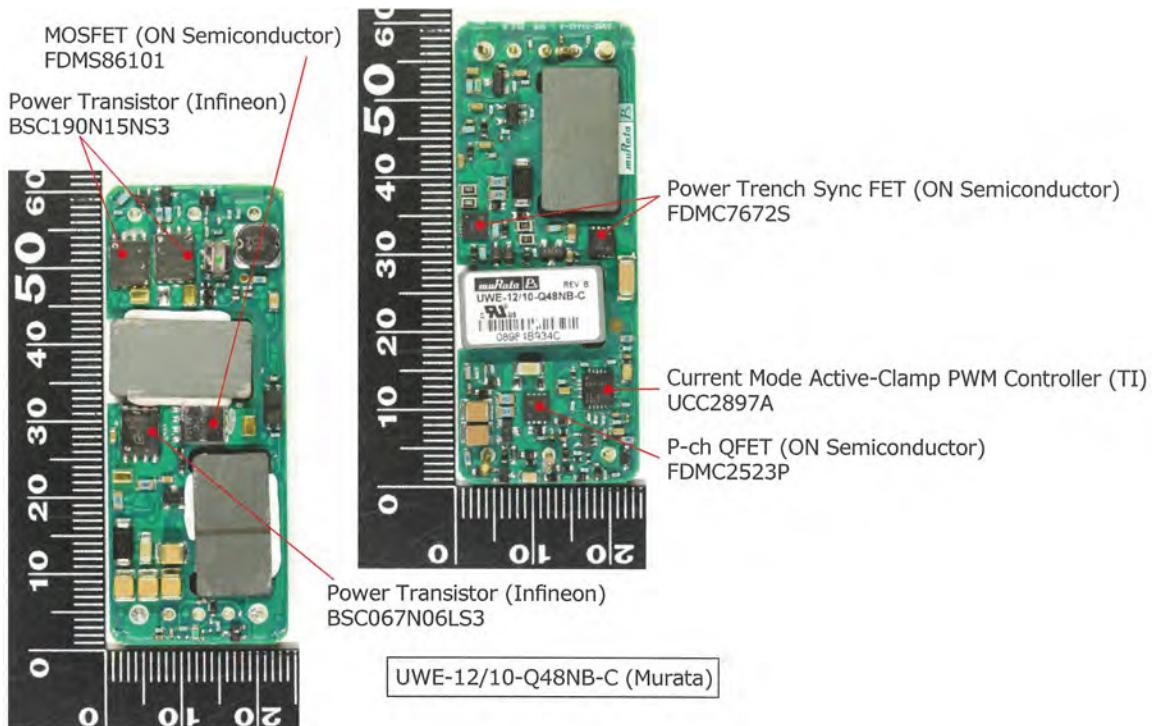


그림 7.11: DC-D변환 회로 기판Spot의 전원을 12 V로 변환하는 역할을 합니다.이 기판은 Murata의 범용 제품인 “UWE-12/10-Q48NB-C”입니다. 회로 기판은 16층으로 구성되어 있습니다.(사진  
사진: Fomalhaut Techno Solutions 제공

### 팬틸트 줌 카메라용 회로 기판

팬틸트 줌 카메라에 사용되는 회로 기판은 브릿지 역할을 하여 메인보드와 외부 팬틸트 줌 카메라를 연결할 수 있는 기능을 갖추고 있습니다(그림 7.12). 팬틸트 줌 카메라에서 출력되는 동축 신호를 MIPI 신호로 변환해 메인보드로 전송하는 장치입니다.

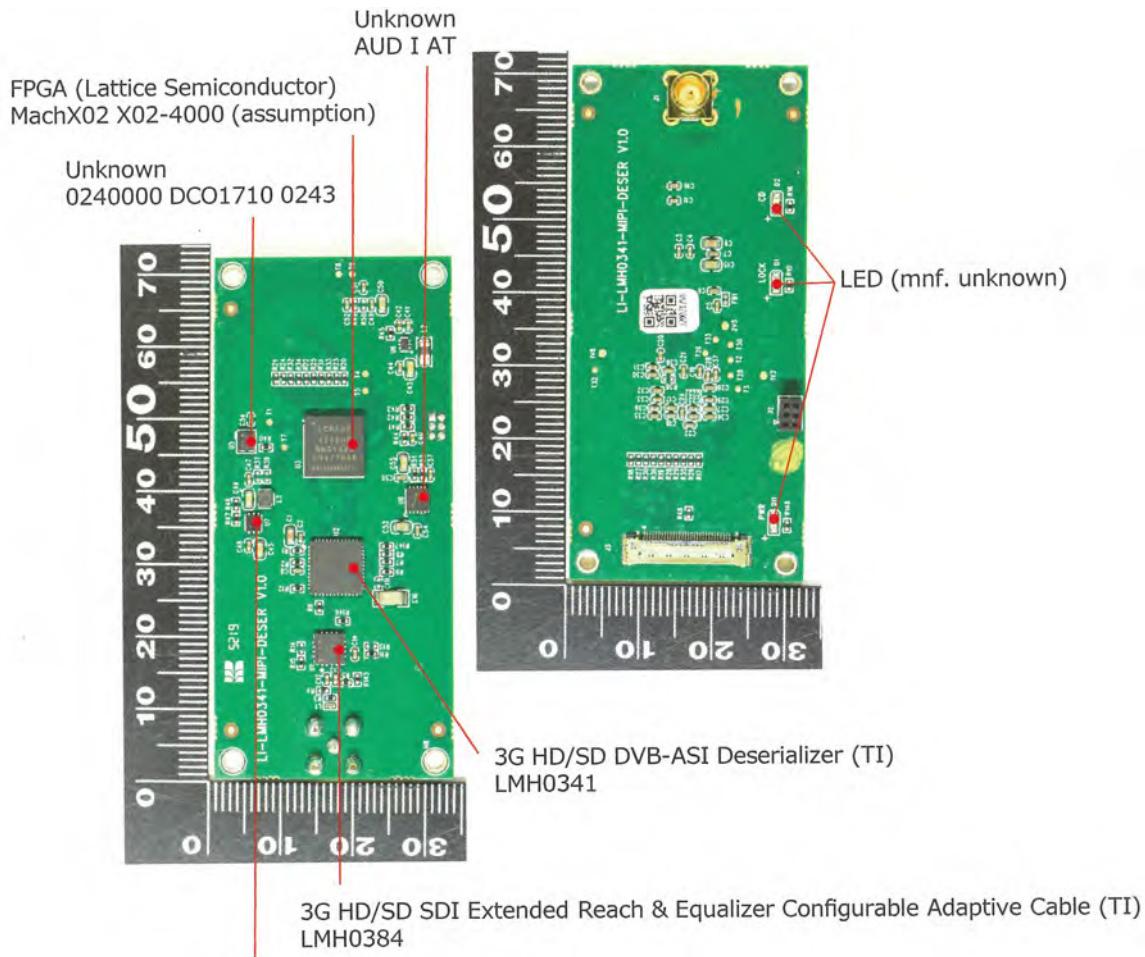


그림 7.12: 팬틸트 줌 카메라용 기판. 左쪽이 A면, 오른쪽이 B면입니다. B측에는 동축 커넥터가 하나 있고, 그 아래에는 메인보드에 연결하는 커넥터가 있습니다. 동축 케이블에서 들어오는 신호를 병렬로 변환하는 역할을 하는 것으로 보입니다. 8층 구조의 회로 기판입니다.(사진:Fomalhaut Techno Solutions)

## 카메라 회로 기판

카메라 모듈은 이미지 센서를 이용해 사진을 촬영하고, 이를 MIPI 인터페이스를 통해 메인보드로 전송하는 기능을 갖추고 있습니다(그림 7.13). 이미지 센서로는 소니의 IMX290가 사용되며, 사양에 따르면 1,000만 화소 촬영이 가능합니다.

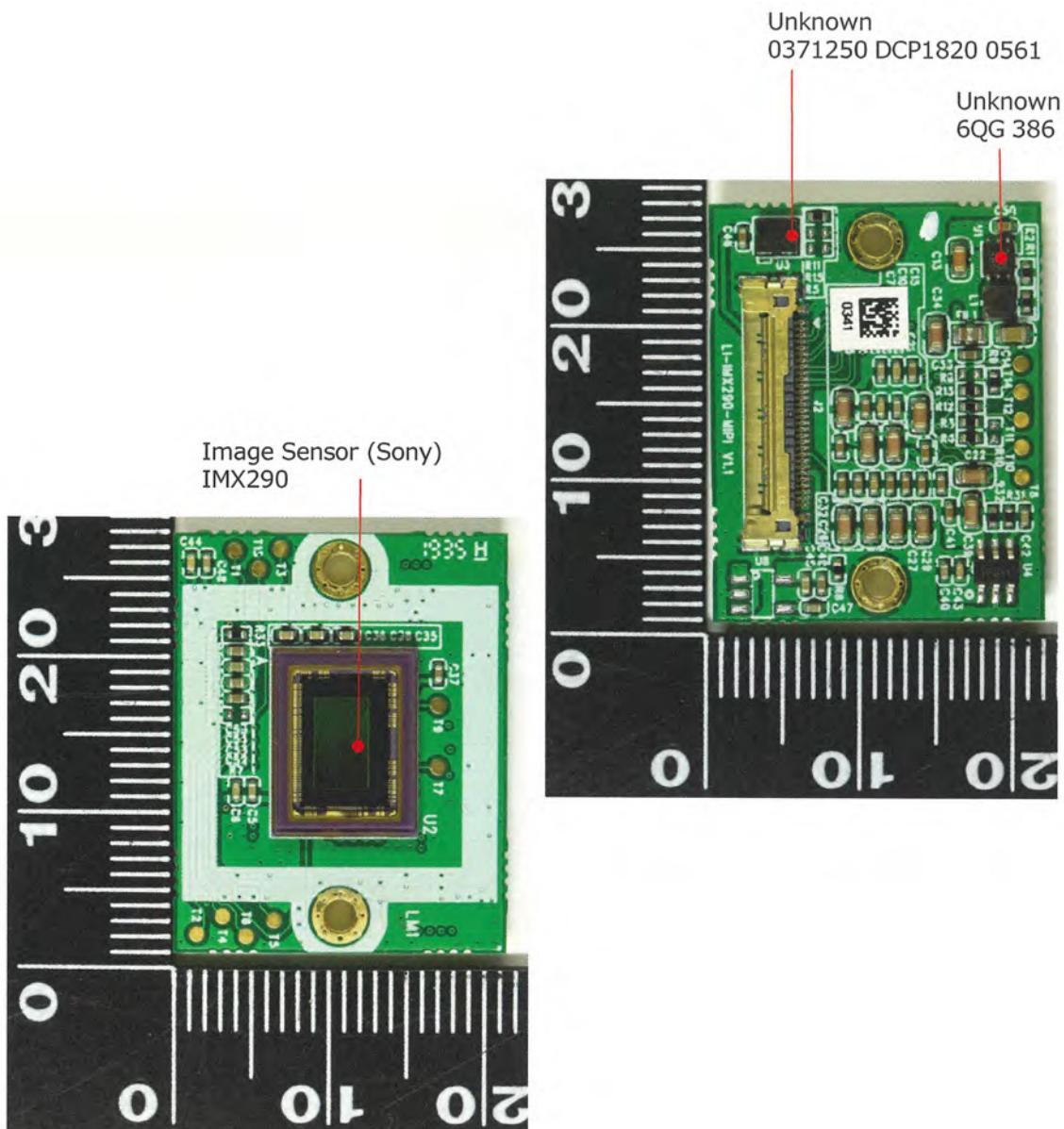


그림 7.13: 카메라 회로 기판은(는) 구조가 단순하며, 이미지 센서 뒷면에 메인보드와 연결할 수 있는 커넥터가 위치해 있습니다.(사진: Fomalhaut Techno Solutions)

카메라 회로 기판은 렌즈가 장착된 알루미늄 합금 케이스에 내장되어 있습니다(그림 7.14).

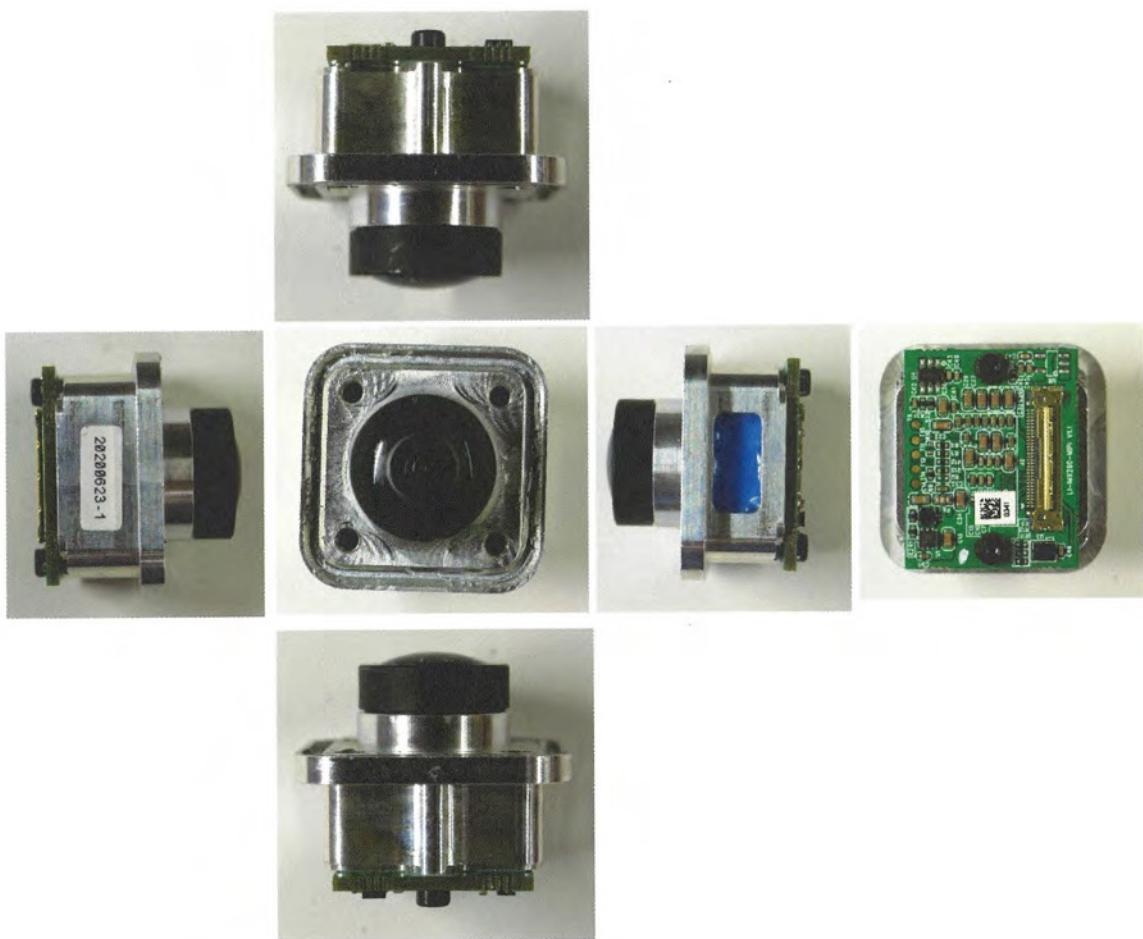


그림 7.14: 카메라 모듈이 회로 기판은 알루미늄 합금 케이스에 내장되어 있습니다.(사진 제공: Fomalhaut Techno Solutions)

## 7.3 엣지 CPU

### 7.3.1 외관

EDGE CPU는 간단히 말해 Spot의 등 부분에 장착할 수 있는 PC입니다 (그림 7.15). EDGE CPU의 크기는 250 mm × 190 mm × 84 mm이며, 무게는 2 kg입니다. 8세대 인텔 코어 i5 프로세서와 16 GB DRAM, 512 GB SSD를 탑재하고 있습니다.

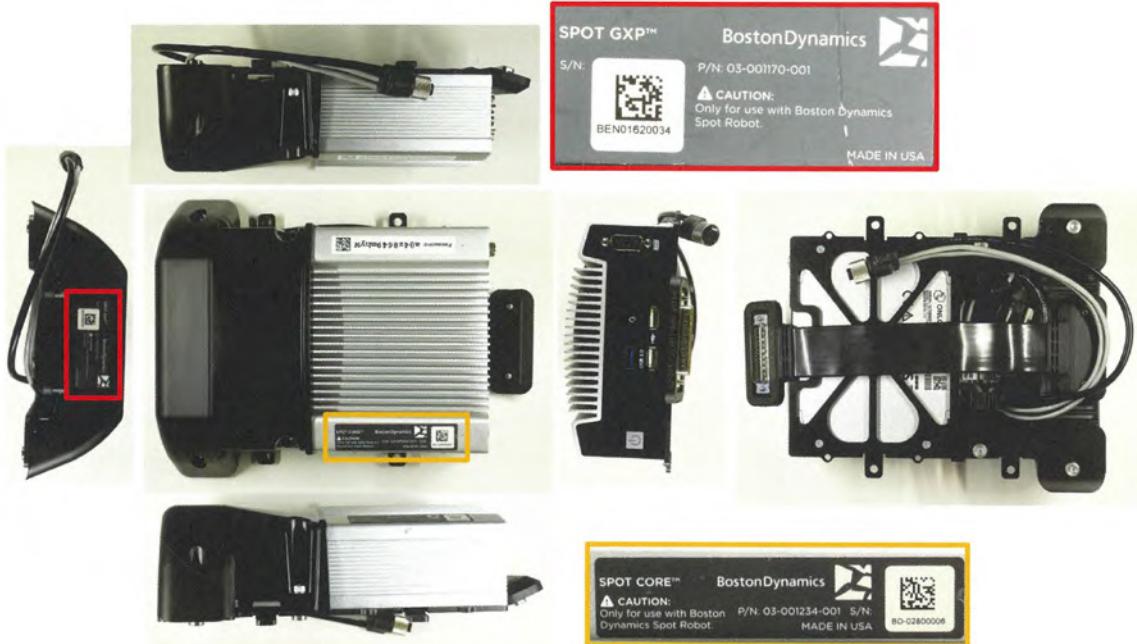


그림 7.15: EDGE CPU의 외형 Spot의 등 부분 레일에 맞게 고정할 수 있는 훌이 마련되어 있습니다. 실물은 Core i5기 탑재된 PC입니다(사진: Fomalhaut Techno Solutions)

Spot 내부에는 Intel Xeon 프로세서가 탑재되어 있어 Spot의 움직임을 제어하며, 기본적으로 설치된 소프트웨어만 실행할 수 있습니다. 외부에서 지도를 사용하거나 LIDAR 또는 카메라로 위치를 추정하며 자동으로 이동하거나, 특정 위치에서 센서 측정을 위한 소프트웨어를 실행하려면 Spot 외부에 프로그래밍 환경이 필요합니다. 이 역할을 하는 것이 바로 EDGE CPU입니다. 또한 EDGE CPU와 Spot 간의 통신은 Payload 연결 커넥터를 통해 이더넷/IP로 이루어집니다. 따라서 Spot을 WiFi에 연결해 원격으로 명령을 보내 동일한 작업을 수행할 수 있습니다.

### 7.3.2 회로 기판 설치 위치

EDGE CPU는 검은색 수지 케이스와 금속 케이스로 나뉩니다 (그림 7.16). 수지 케이스는 Spot 본체의 페이로드 커넥터와 라이다 연결 케이블을 담당합니다. 금속 케이스는 PC입니다.

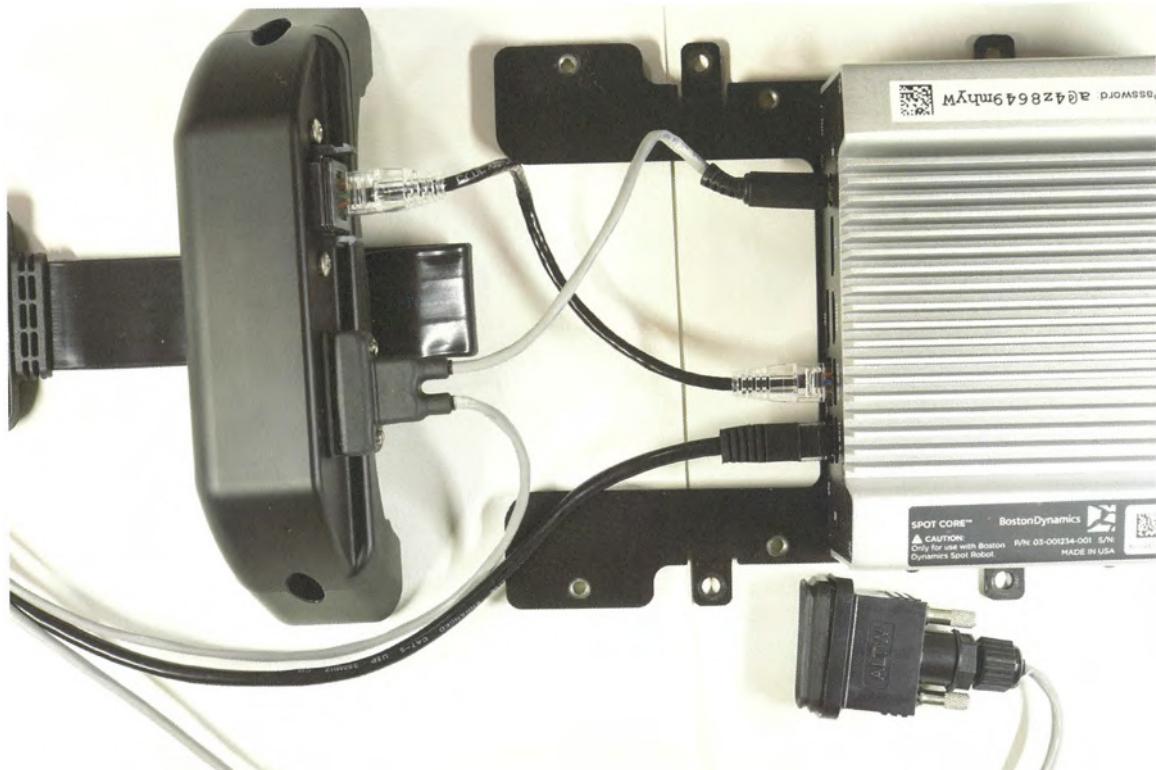


그림 7.16: EDGE CPU는 두 부분으로 구성되어 있습니다. 검은색 수지 케이스는 Spot과 LIDAR를 연결하는 커넥터 부분이고, 금속 케이스는 PC입니다.(사진: Fomalhaut Techno Solutions)

주요 회로 기판에는 PC부분의 메인보드와 변환 커넥터 부분의 내부 회로 기판이 통합되어 있습니다 (그림 7.17).

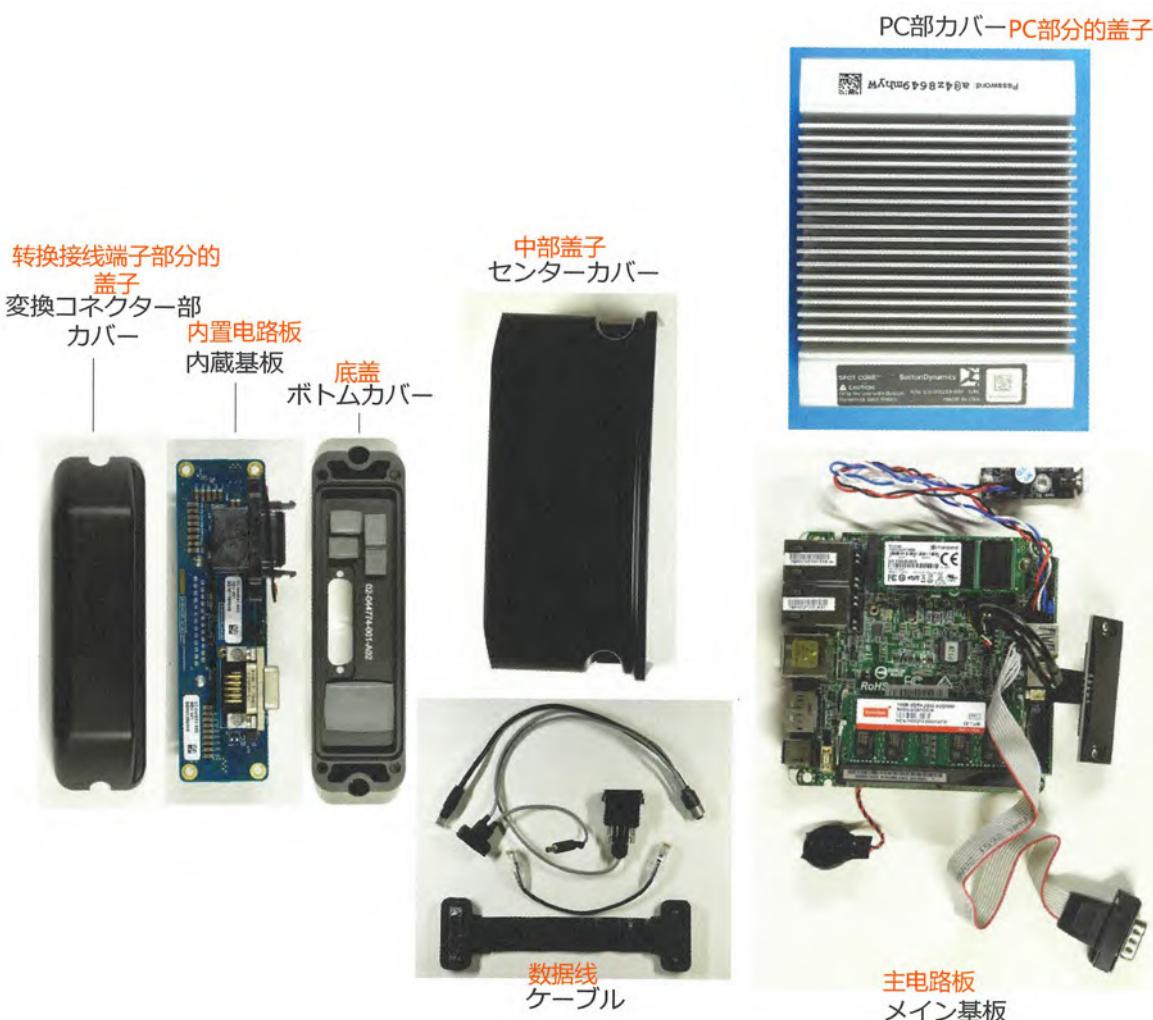


그림 7.17: **분해된EDGE CPU**의 주요 회로 기판에는 메인보드와 변환 커넥터용 내부 기판만 남아 있습니다.(사진: Fomalhaut Techno Solutions)

### 7.3.3 장착된 회로 기판

메인보드

메인보드에는 인텔 8세대 코어 i5와 그 드라이버 IC가 장착되어 있습니다. 또한 이더넷, RS-232C, HDMI 등 다양한 인터페이스용 IC도 확인할 수 있습니다(그림 7.18, 그림 7.19).

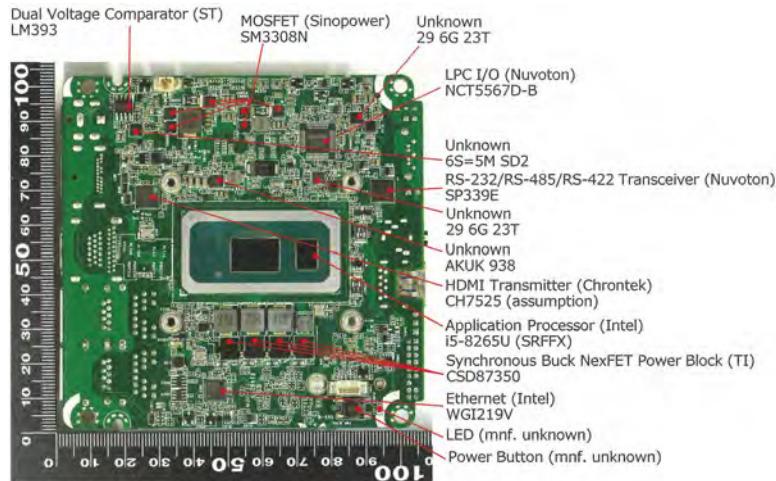


그림 7.18: 메인보드 A면 중앙에 있는 큰 칩셋이 Core i5입니다.(사진: Fomalhaut Techno Solutions)

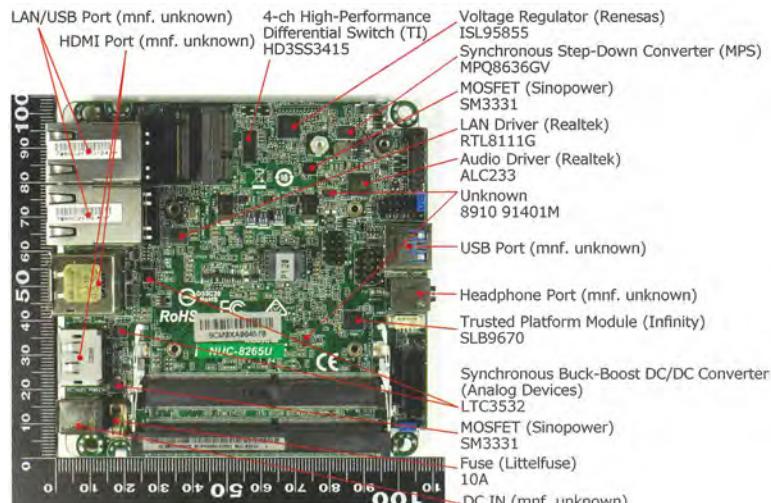


그림 7.19: 메인보드 B면에는 커넥터들이 일렬로 배치되어 있습니다.(사진: Fomalhaut Techno Solutions)

### 내장형 변환 커넥터 회로 기판

변환 커넥터가 내장된 회로 기판은 PC를 커넥터를 통해 Spot 본체와 라이다에 연결하는 역할 외에도, Spot의 전원을 12V로 변환하여 PC와 LIDAR에 공급하는 기능도 갖추고 있습니다. 이러한 이유로 DC-DC 변환 회로를 구성하는 다양한 IC와 전자 부품들이 기판에 실장되어 있습니다(그림 7.20)입니다.

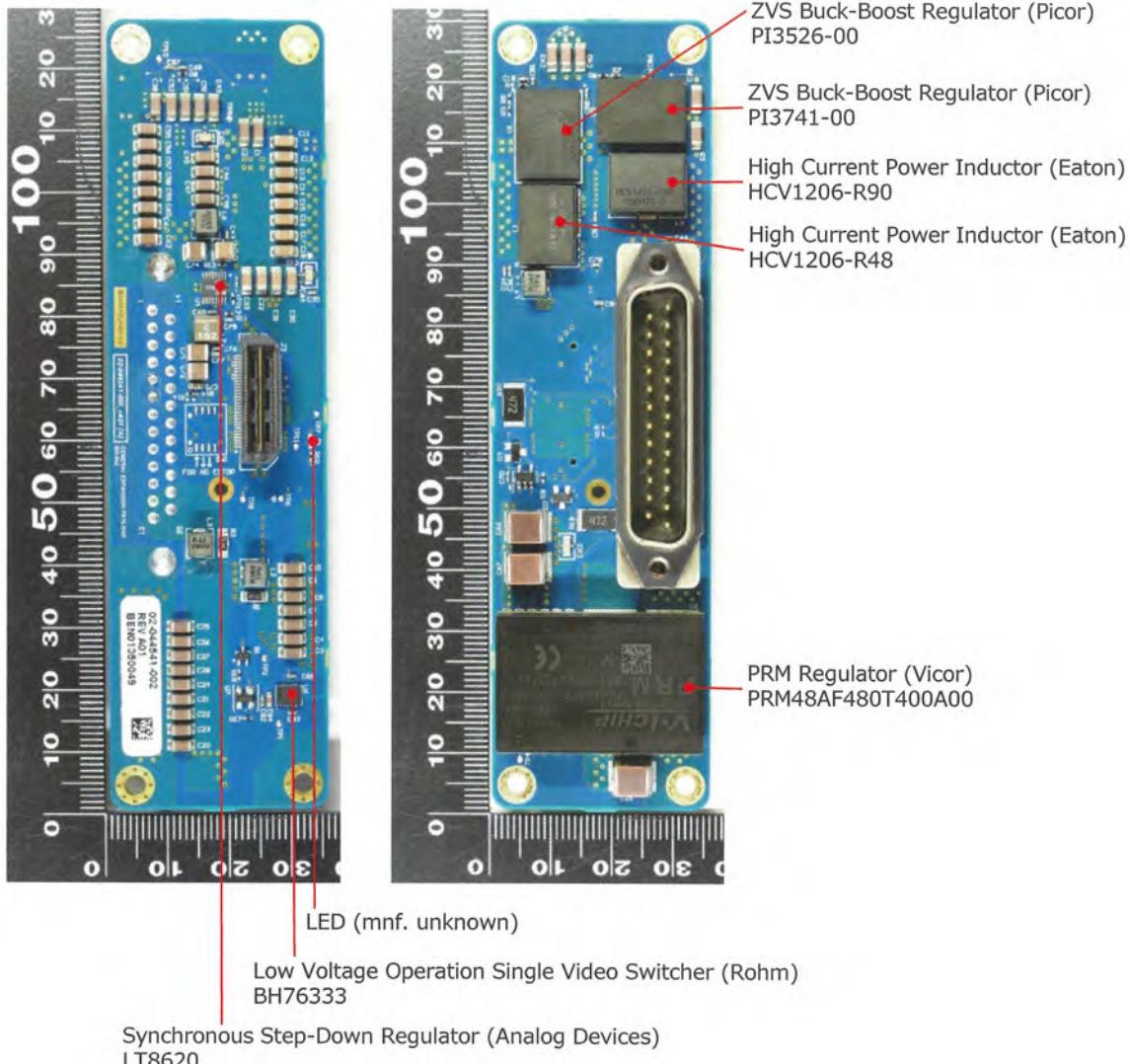


그림 7.20: **내장 변환 커넥터 회로 기판**이 커넥터는 아래 방향을 향하고 있어, PC와 연결되는 브리지 회로 기판은 위쪽에 부착됩니다. 전압 변환 회로를 구성하는 IC와 전자 부품들은 일렬로 배열되어 있습니다.  
(사진 제공:Fomalhaut Techno Solutions)

## 7.4 LIDAR라이다 센서

### 7.4.1 외관

Spot에 장착하여 Payload로 판매되는 LIDAR는 미국 Velodyne Lidar의 'VLP-16' 모델입니다. 이 제품은 전용 케이스로 감싸져 있어 Spot의 Payload로 바로 사용할 수 있습니다. 16개의 레이저와 센서를 탑재하고 있으며, 센서부가 수평으로 360° 회전해 주변 전체의 거리 이미지를 획득합니다. 수직 방향으로는 위아래로 각각 15°, 총 30°까지 감지할 수 있습니다. 측정 가능한 거리는 0.5~100m이고, 측정점은 약 300,000개입니다. 903nm의 Class 1 Eye Safe 적외선 레이저를 사용하며, 케이스 포함 무게는 1.67kg, 외형 크기는 180mm × 173mm × 162mm입니다. Spot의 내장 카메라는 약 4m 거리까지만 촬영할 수 있지만, 이 LIDAR는 공장이나 야외 등 넓은 공간에서 자율 이동에 활용됩니다.



그림 7.21: Spot에 사용된 LIDAR의 외관. 본체는 Velodyne의 "VLP-16" 라이다입니다.(사진 제공: Fomalhaut Techno Solutions)

### 7.4.2 회로 기판 설치 위치

LIDAR에는 네 가지 종류의 회로 기판이 내장되어 있습니다. 원통 상단에는 신호 처리 회로 기판, 하단에는 전원/인터페이스 회로 기판, 중앙에는 레이저 수신/발신 회로 기판, 그리고 레이저 구동 회로 기판이 있습니다. (그림 7.22)입니다.



그림 7.22: LiDAR를 분해하면 네 가지 주요 회로 기판이 확인됩니다.(사진 제공: Formalhaut Techno Solutions)

360° 전방위로 레이저를 조사하기 위해, 레이저 수신 및 발사 회로 기판이 원통형 외관 내부에 내장되어 회전합니다. 따라서 레이저를 구동하는 드라이브 회로 기판과 이 레이저를 제어하고 수신 신호를 처리하는 신호 처리 회로 기판 역시 커넥터와 통합되어 함께 회전하는 구조입니다(그림 7.23, 그림 7.24). 전원/인터페이스 회로 기판은 본체 하단에 고정되어 있으며, 회전축 상단의 슬립링을 통해 신호 처리 회로 기판과 전기적으로 연결됩니다(그림 7.25). 모터 코일은 고정된 축 쪽에, 로터에 내장된 영구 자석은 그 바깥쪽에서 회전하는 외전형 구조입니다. 외전 로터의 영구 자석은 레이저 발사 및 수신 기판이 들어 있는 원통형 하우징 내부에 위치합니다.



그림 7.23: 모든 회로 기판이 회전함 모든 회로 기판이 커넥터로 연결되어 동시에 회전하는 구조입니다. 상단에는 신호 처리 회로 기판이 보입니다.(사진:Fomalhaut Techno Solutions)

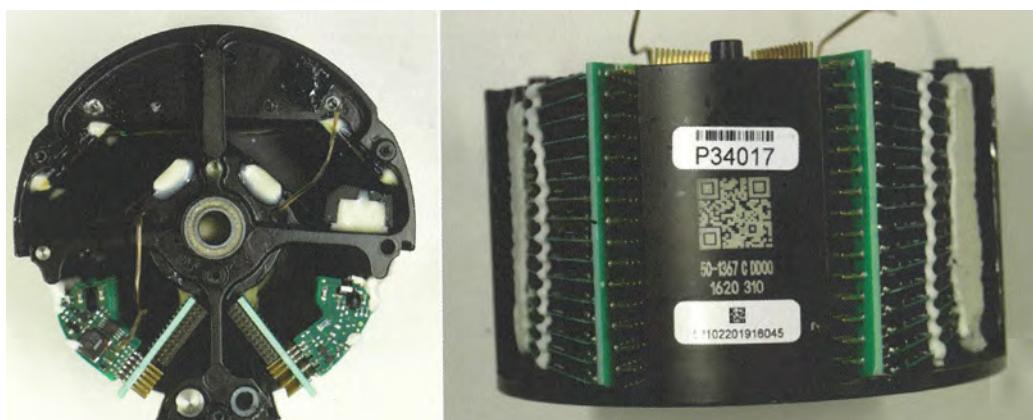


그림 7.24: 레이저 수신/발사 기판과 레이저 드라이브 회로 기판의 설치 위치왼쪽이 레이저 드라이브 회로 기판이고, 오른쪽이 레이저 송수신 회로 기판입니다. 렌즈와 반투과 거울 등은 회로 기판의 반대편에 장착되어 있습니다.(사진:Fomalhaut Techno Solutions)



그림 7.25: 슬립 링의 접점이 속 상단에서 확인됩니다. 신호 처리 회로 기판과 전원/인터페이스 회로 기판이 이 부분을 통해 연결됩니다.(사진: Fomalhaut Techno Solutions)

### 7.4.3 탑재 회로 기판

#### 신호 처리 회로 기판

신호 처리 회로 기판은 회전체 상단에 위치한 기판으로, 레이저 수신/송신 기판과 레이저 구동 회로 기판에서 나온 핀이 이 기판의 커넥터에 꽂혀 연결됩니다(그림 7.26, 그림 7.27). 이 회로 기판은 레이저 구동 제어, 수신 신호 처리, 그리고 이 신호를 디지털 신호로 변환해 전원/인터페이스 회로 기판으로 전달하는 역할을 하는 것으로 추정됩니다.

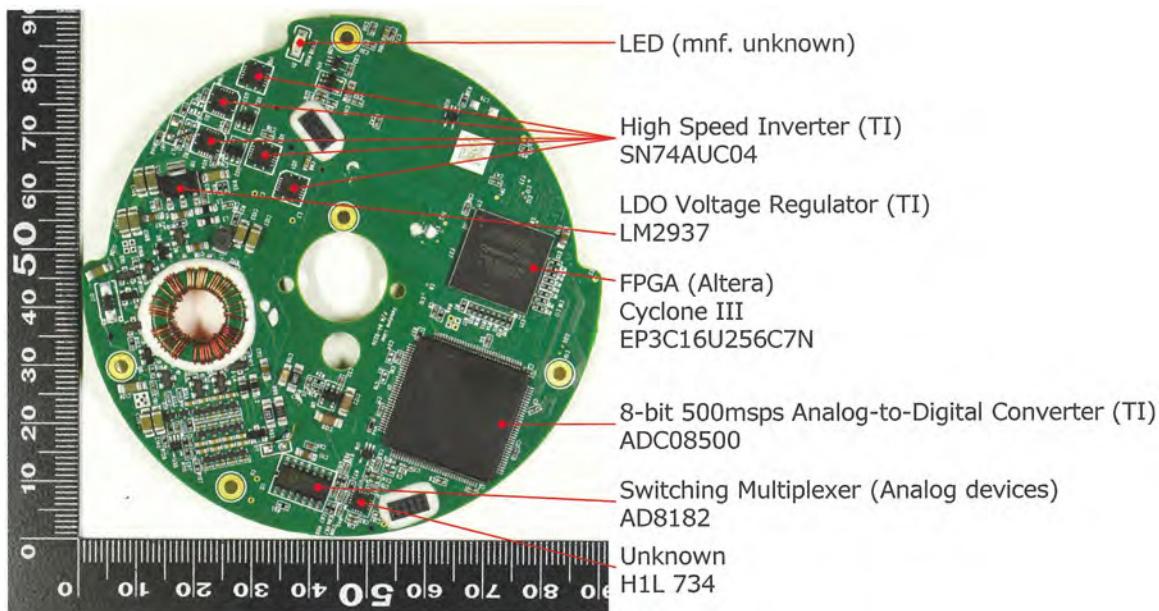


그림 7.26: 신호 처리 회로 기판A면 아날로그 신호 처리를 담당하는 대형 IC가 탑재되어 있습니다.(사진: Fomalhaut Techno Solutions)

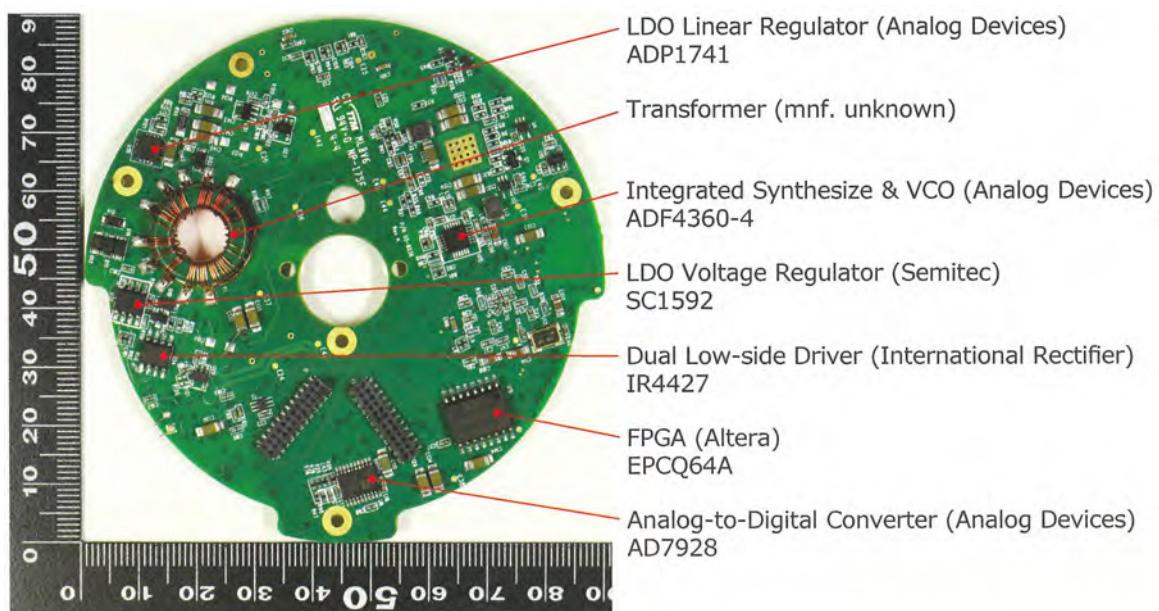


그림 7.27: 신호 처리 회로 기판B면 사진 하단에 보이는 8자 형태의 커넥터는 레이저 수신/송신 회로 기판과 레이저 구동 회로 기판을 연결합니다.(사진: Fomalhaut Techno Solutions)

### 전원/인터페이스 회로 기판

전원/인터페이스 회로 기판은 외부 인터페이스에서 전원을 받아 신호 처리 회로 기판의 신호를 이더넷 신호로 변환하여 외부로 출력하는 역할을 하는 것으로 보입니다 (그림 7.28, 그림 7.29). 또한, 삼상 교류 전력을 생성하여 모터를 회전시키는 기능도 가지고 있습니다. 이 기판과 신호 처리 회로 기판은 슬립 링을 통해 연결됩니다.

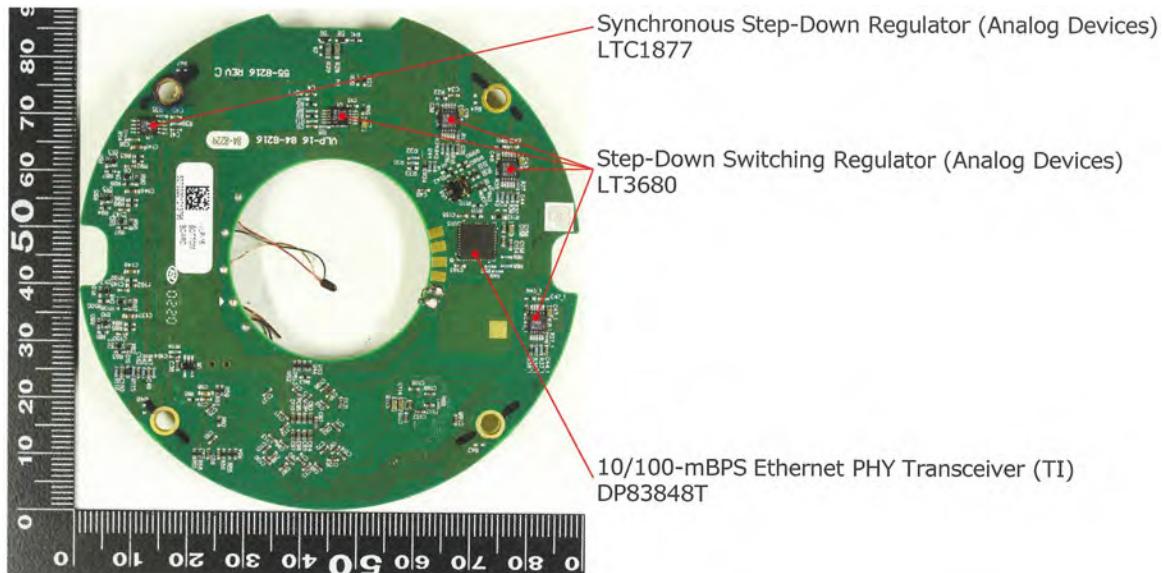


그림 7.28: 전원/인터페이스 회로 기판A면에는 전원 관련 IC와 이더넷 관련 IC가 탑재되어 있습니다.(사진 제공: Fomalhaut Techno Solutions)

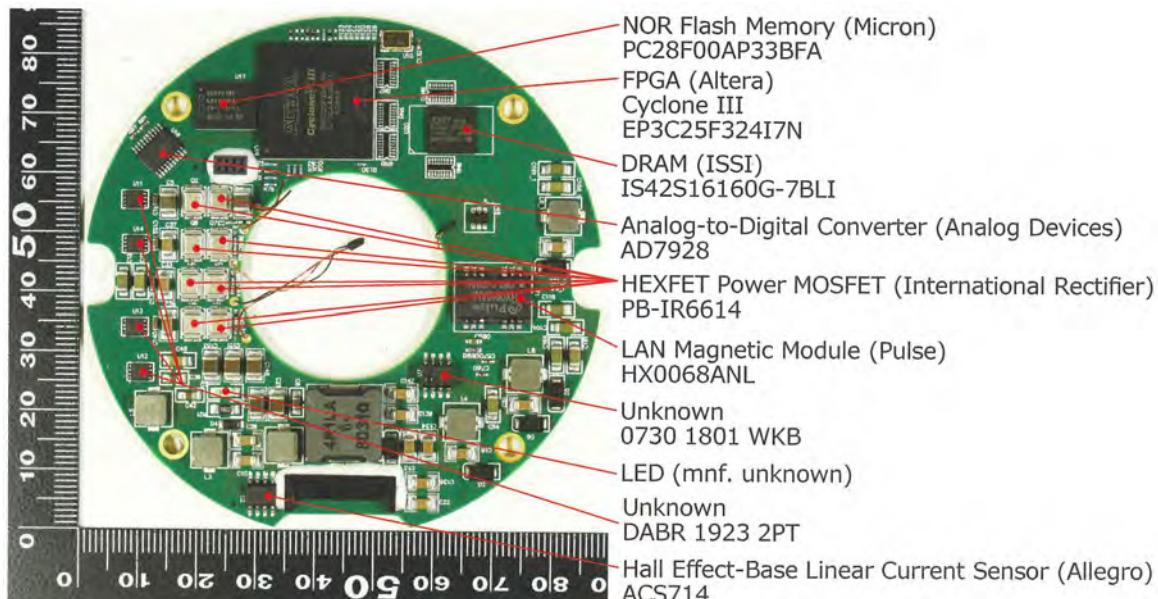


그림 7.29: 전원/인터페이스 회로 기판B면에는 모터 구동에 사용되는 MOSFET 그룹이 보입니다.(사진: Fomalhaut Techno Solutions)

### 레이저 수신/발신 회로판 및 레이저 구동 회로판

레이저 수신 및 송신 회로 기판과 레이저 구동 회로 기판은 모두 원통형 수지 케이스에 내장되어 있습니다. 레이저 구동 회로 기판의 MOSFET가 레이저 송수신부로 전달되는 전력을 제어합니다. 모든 경우에, 16개의 회로 기판이 수직으로 배열되어 있습니다 (그림 7.30, 그림 7.31).

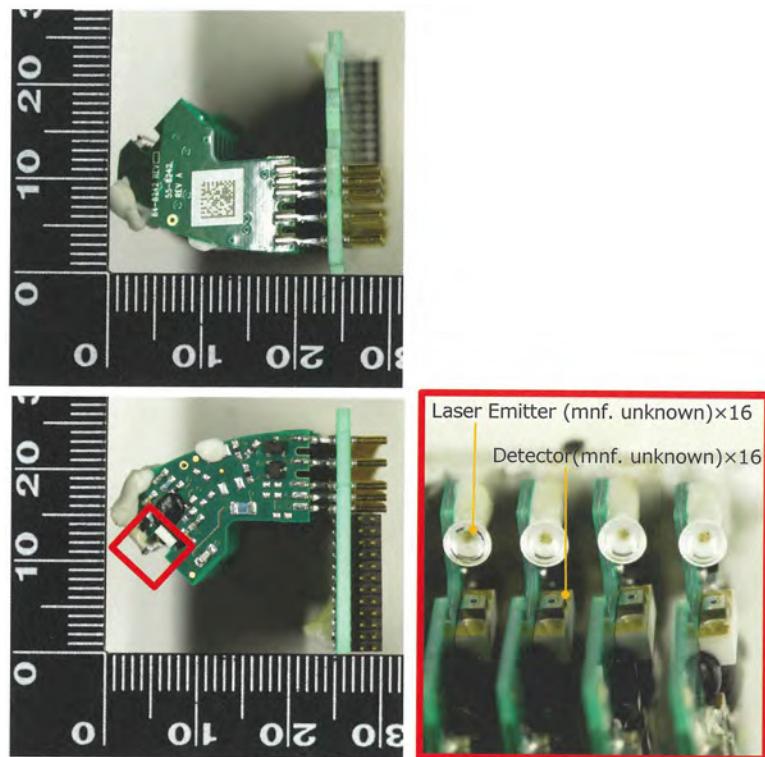


그림 7.30: 레이저 수광/송신 회로 기판 16개의 각 회로 기판에는 레이저 송신 소자 한 쌍과 수광 소자 한 쌍이 탑재되어 있습니다.(사진: Fomalhaut Techno Solutions)

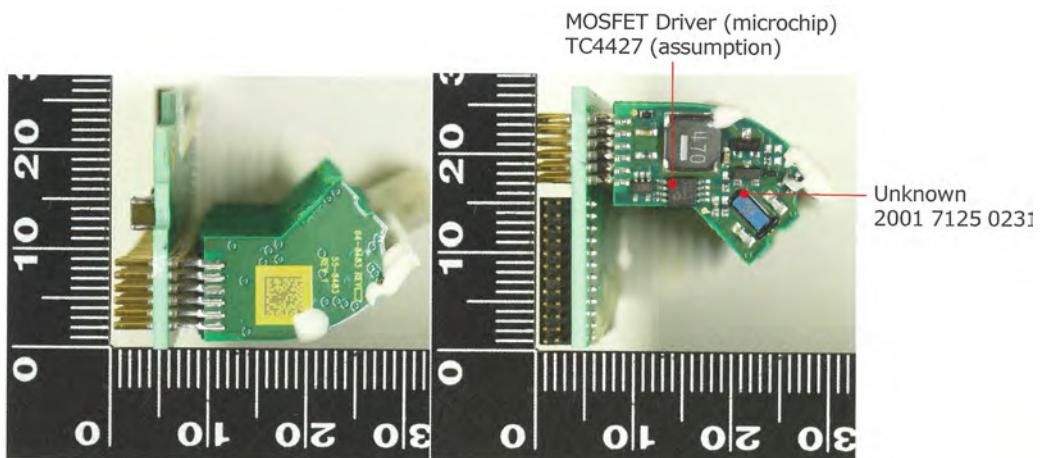


그림 7.31: 레이저 구동 회로 기판 MOSFET 드라이버가 16개의 각 회로 기판에 장착되어 있습니다.(사진: Fomalhaut Techno Solutions)