



四足机器人Spot彻底拆解报告

国内首个spot拆解众筹纪念

目录

1 Spot概要	1
1.1 整体概要和规格	2
1.1.1 总体情况	2
1.1.2 规格	5
1.2 操作方法	7
1.2.1 如连接到外部操作设备	7
1.2.2 附属遥控器的操作	8
1.2.3 电脑操作	11
1.3 外部扩展	12
1.3.1 总体情况	12
1.3.2 安装导轨	13
1.3.3 外部接口	14
1.3.4 扩展用的Payload	16
2 软件开发平台	23
2.1 整体概览	24
2.1.1 运行模式	24
2.1.2 服务组	25
2.2 服务	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 Base	35
2.2.9 Payload	36
2.2.10 Arm	37
2.3 编程	38
2.3.1 编程环境	38
2.3.2 示例程序	39
3 动作机能	42
3.1 正常动作	43
3.1.1 移动部件的构成	43
3.1.2 步行方法	44
3.2 异常时的动作	48
3.2.1 发生异常的情况	48
3.2.2 异常时的恢复动作	50

4 整体构造	52
4.1 概要	53
4.1.1 拆解步骤	53
4.1.2 整体结构	56
4.1.3 机盖	58
4.1.4 散热结构	60
4.2 主机架	64
4.2.1 主机架概览	64
4.2.2 前机架	65
4.2.3 中心机架	68
4.2.4 后机架	70
4.2.5 上面板	72
4.3 腿部	74
4.3.1 腿部整体视图	74
4.4 防水防尘措施	76
4.4.1 预期使用环境	76
4.4.2 各部分密封	77
4.4.3 课题	81
5 机械零件	82
5.1 整体视图	83
5.1.1 腿部驱动组件配置概述	83
5.2 膝关节驱动单元	89
5.2.1 膝关节驱动整体结构	89
5.2.2 滚珠丝杠部分	90
5.2.3 称重传感器电路板	91
5.2.4 膝关节驱动用电机	93
5.2.5 连杆周边	96
5.2.6 线性执行器外壳周边	98
5.3 Y轴驱动单元	100
5.3.1 Y轴驱动构成	100
5.3.2 Y轴驱动用电机	105
5.3.3 Y轴驱动扭矩传感器电路板	108
5.3.4 谐波驱动	110
5.3.5 周边旋转部件	113
5.4 X轴驱动单元	115
5.4.1 X轴驱动构成	115
6 电子零件	118
6.1 电气连接	119
6.1.1 连接位置	119
6.1.2 外部接口	122
6.1.3 线束	125
6.1.4 天线	128
6.2 组件	129

6.2.1	连接端板	129
6.2.2	深度相机	133
6.2.3	风扇	136
6.2.4	LED模块	140
6.3	主计算机	142
6.3.1	安装位置和安装方法	142
6.3.2	主板	148
6.3.3	CPU板	150
6.3.4	WiFi高频板	153
6.3.5	姿态传感器	154
6.4	腿驱动组件	156
6.4.1	安装位置和安装方法	156
6.4.2	电机驱动电路板	159
6.4.3	称重传感器电路板	160
6.4.4	扭矩传感器电路板	161
6.4.5	编码器电路板	162
6.5	电池组	163
6.5.1	外观及规格	163
6.5.2	内部构造	164
6.5.3	控制电路板	165
6.6	遥控器	167
6.6.1	外观及规格	167
6.6.2	内部构造	168
6.6.3	主控电路板	169
7	Payload	171
7.1	购买的Payload	172
7.1.1	概要	172
7.2	Spot Cam	173
7.2.1	外观	173
7.2.2	电路板安装位置	174
7.2.3	搭载电路板	176
7.3	EDGE CPU	185
7.3.1	外观	185
7.3.2	电路板安装位置	186
7.3.3	搭载电路板	188
7.4	LIDAR激光雷达	190
7.4.1	外观	190
7.4.2	电路板安装位置	191
7.4.3	搭载电路板	194

第 1 章 Spot概要

1.1 整体概要和规格

1.1.1 总体情况

Spot是美国波士顿动力公司开发，2020年6月开始面向大众销售的机器人(图 1.1)。它具有传统机器人所没有的特点，例如充分利用四条腿像狗一样行走，并且可以前往轮式运动（移动物体）无法到达的地方。比如上下30 cm左右的台阶，坡度30度的地形，在沙地上，在雪地上等都可以移动(图 1.2)。它还具有从跌倒状态中自行爬起来的功能。这是世界上第一台配备这些功能的商用机器人(据Nikkei Cross Tech调查)。



图 1.1: Spot的外观 它由波士顿动力公司开发和销售。外观看起来像狗一样，用四只脚走路。也可以上下楼梯。(照片:加藤康)



图 1.2: Spot正在爬楼梯的地方 30 cm左右的台阶，也可以用4条腿上下。(照片:加藤康)

Spot可以使用遥控器进行远程控制，但这不是唯一的控制方式。它的最大的特点是自主行走，如果搭载了带有LIDAR(Light Detection and Ranging)和360度摄像头并设定巡航路线，它就可以自动执行安检和检查工作。它的有效负载(最大负载能力)为14 kg，也可以将外围设备安装到背部连接外围设备的导轨上，以便执行复杂的工作(图 1.3)。例如，如果给它安装一个手臂，它可以打开或关闭门或捡起物体。



图 1.3: 在建筑工地运行的Spot 在背部安装设备可以进行实地测量。(照片:Boston Dynamics)

1.1.2 规格

Spot的外形尺寸为1100 mm × 500 mm × 191 mm ~ 840 mm，重量为31.7 kg (图 1.4, 图 1.5)。Spot的4条腿的基本结构都是相同的。每条腿由3个电机驱动：一个围绕身体方向旋转的电机，一个围绕垂直方向旋转的电机，以及一个用于弯曲和伸展的膝关节电机。Spot的最大步行速度为1.6 m/s，即5.76 km/h。相当于一个人快走的速度。

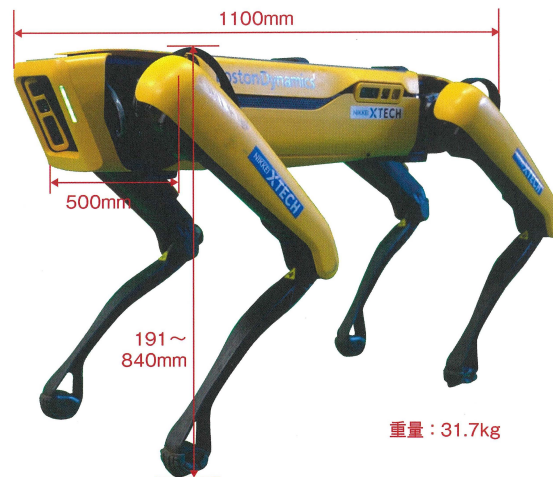


图 1.4: Spot的外形尺寸 当腿伸展时，Spot的高度为840 mm。总长度为1100 mm。它的重量为31.7 kg。(图: Nikkei Cross Tech)

电池	容量	605Wh
	平均工作时间	90分钟
	待机时间	180分钟
	充电时间	120分钟
外部连接	WiFi (2.4GHz IEEE802.11b/g/n)、1000BASE-T	
移动	最大速度	1.6m/s(时速 5.76km)
	最大爬坡角度	±30°
	最大台阶高度	300mm
地形判断	水平视角	360°
	范围	4m
	照明	>2 Lux
工作环境	防撞	设置的距离
	工作温度	-20~45°C
	工作湿度	0~70%RH

图 1.5: Spot的规格 电池容量为605 Wh。最高速度约为6 km/h，大约是一个人快走的速度。(图: Nikkei Crosstech根据波士顿动力网站信息制作)

电池容量为605 Wh。充满电后平均可运行90分钟。电机启动后的待机时间为180分钟。电池安装在腹部，可以通过仰卧更换(图 1.6)。电池使用专用充电器充电。



图 1.6: 电池安装在Spot中的位置 除可以通过使用数据线直接将电池盒和充电器连接起来充电外，还可以通过将充电器数据线连接到Spot后面的插座来充电。(照片:加藤康)

1.2 操作方法

1.2.1 如连接到外部操作设备

Spot的工作原理是通过网络接收来自外部计算机的命令。在附带专用遥控器的情况下，可以使用上面的左右一对操纵杆进行直观操作(图 1.7)。操作感觉及操作方法与无人机类似。从PC等，可以使用调用Spot准备的基于RPC (Remote Procedure Call)的服务的程序进行操作。



图 1.7: Spot遥控器 使用两个操纵杆进行操作。(照片:加藤康)

Spot本身还内置了提前避障和自动驾驶功能，可以实现半自动操作。具体来说，如果行进方向有障碍物，则避开障碍物并朝着目的地前进。在自动驾驶中，通过提前让Spot走想巡逻的路线并记录下来，之后它可以自动走同样的路线。

它配备了深度摄像头和鱼眼摄像头来识别周围环境。为了监控 360° 区域，前部各设2个，左右后各设1个，共5个。深度相机是英特尔的“D430”。红外图像向周围发射，通过双目相机捕获图像的方式差异来检测距离。可以测量距物体10 cm ~ 10 m的距离。但是，根据Spot规格，地形判断在最多4 m的范围内进行，而不是在10 m范围内。

可以通过API从Spot配备的摄像头获取视频，但分辨率较低，因为它用于监控周围环境。因此，为了获得高分辨率的周围环境，需要准备单独的摄像头。

1.2.2 附属遥控器的操作

Spot带有一个用于操作Spot的专用遥控器。使用该遥控器，除了可以移动和操作Spot之外，还可以检查错误和电池容量等状态，并可以设置存在障碍物时的接近距离(图 1.8)。



图 1.8: 使用Spot遥控器检查电池电量 可以从遥控器确认Spot的设置、错误信息等。(照片:加藤康)

遥控器实体是一个安卓平板终端，配备左右一对摇杆、一个十字键和一个功能键。在此平板电脑上启动专用的应用程序软件并连接到Spot。初始状态下，Spot是连接Spot的WiFi接入点，因此在app上选择Spot SSID，输入用户名和密码，即可访问Spot系统。

操作方法是行走时用左侧的操纵杆控制前后左右移动，用右摇杆控制左右旋转(图 1.9)。左边的操纵杆左右控制横着走的左右动作。避障是内置的基本功能，当Spot向障碍物移动时，它会绕着障碍物移动。

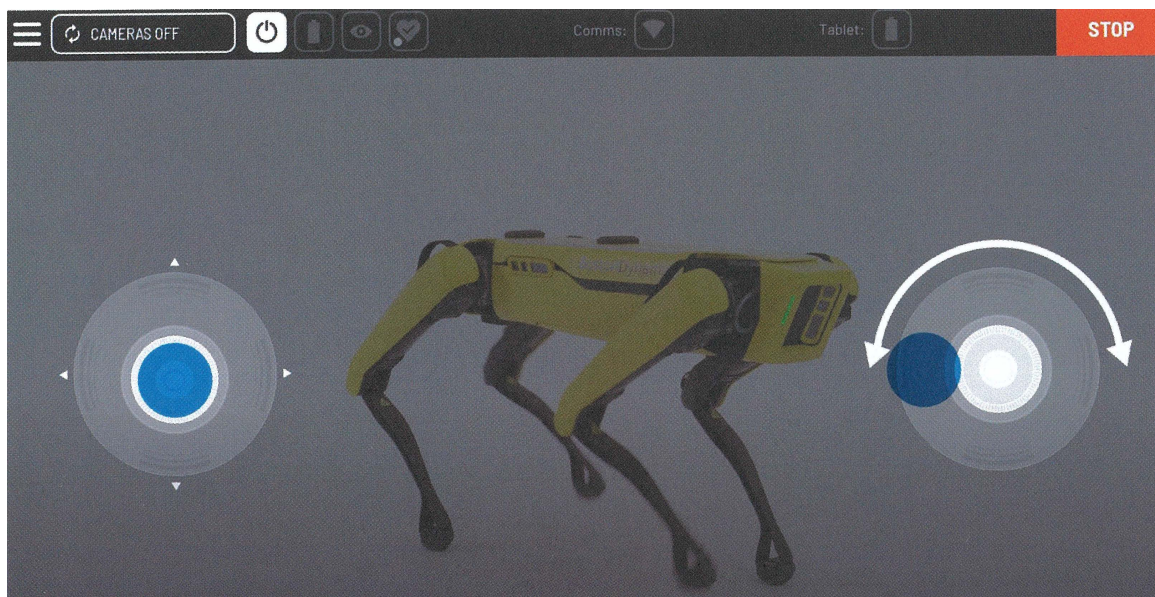


图 1.9: 使用Spot遥控器操作 左摇杆控制前后左右，右摇杆控制拐弯。(图片:Boston Dynamics的YouTube视频截图)

还有一个叫做“Touch to go”的功能，当在屏幕上触摸到想要的位置时，它会自动移动到那个位置(图 1.10)。当触摸前面的摄像头拍到的镜头时它会向前移动，触摸侧面摄像头拍到的镜头时它会横着往那个方向移动。触摸后置摄像头拍到的镜头时，会向后移动到目的位置。同时也会自动避开障碍物。



图 1.10: 使用Spot遥控器的“一触即走”操作画面 当触摸屏幕上的目标位置时，它会自动向该位置移动。(图片:Boston Dynamics的YouTube视频截图)

步行模式可以爬楼梯，但爬楼梯时，建议在楼梯2 m以内改成楼梯模式。在楼梯模式下，通过倾斜以始终向前和向上看来感知前方。

还有一种无需移动就地改变位置的模式，这种情况下可以通过左摇杆的顶部和底部来控制高度，并通过左右来控制身体的左右倾斜。可以通过右摇杆的上下左右控制机体前后倾斜，左右摇杆控制机体左右旋转。

1.2.3 电脑操作

除了专用遥控器外，还可以在PC上安装Spot连接软件，通过编程来操作Spot。Spot连接用的软件由开发商波士顿动力公司提供。可以使用Python交互式或通过执行脚本进行操作。

使用WiFi或网线连接到PC。通过WiFi连接时，可以将Spot作为接入点运行或将Spot作为客户端运行。当作为客户端运行Spot时，如果将SSID设置接入点漫游，则可以在较大范围内连接到同一接入点的PC上操作Spot。

1.3 外部扩展

1.3.1 总体情况

Spot的背面，有一个安装外部设备的导轨(图 1.11)。波士顿动力出售的选购件、原装外设、篮子等都可以在这里用螺丝紧固。背面还有两个接线端子用于Spot和设备连接，通过这些接线端子可以供电，进行网络通信等。



图 1.11: Spot的外部扩展功能 背面有导轨，可以安装Payload。此外，还有两个接线端子用于Payload和主机之间的电气连接。(照片:加藤康)

例如，可以在背部安装温度传感器，以便在巡逻时记录空间的温度。同时，通过在背面安装PC并在此处安装分析传感器信息的程序，可以开发在发现温度异常的位置时通知管理员的系统。

放置在Spot背面的物体在波士顿动力公司中称为Payload，但可装载的Payload总重量不超过14 kg。建议长度在850 mm，宽度在190 mm以内。关于高度，需要使重心位于较低的位置，以便在高度方向上的重心位置不会因Payload而显著变化

1.3.2 安装导轨

用于安装Payload的导轨位于Spot背面的左侧和右侧 (图 1.12)。导轨由铝合金制成。将M5尺寸T型插槽的后置螺母插入导轨，再从顶部用M5螺栓固定。将导轨固定到机身的螺栓头部可用作定位销。

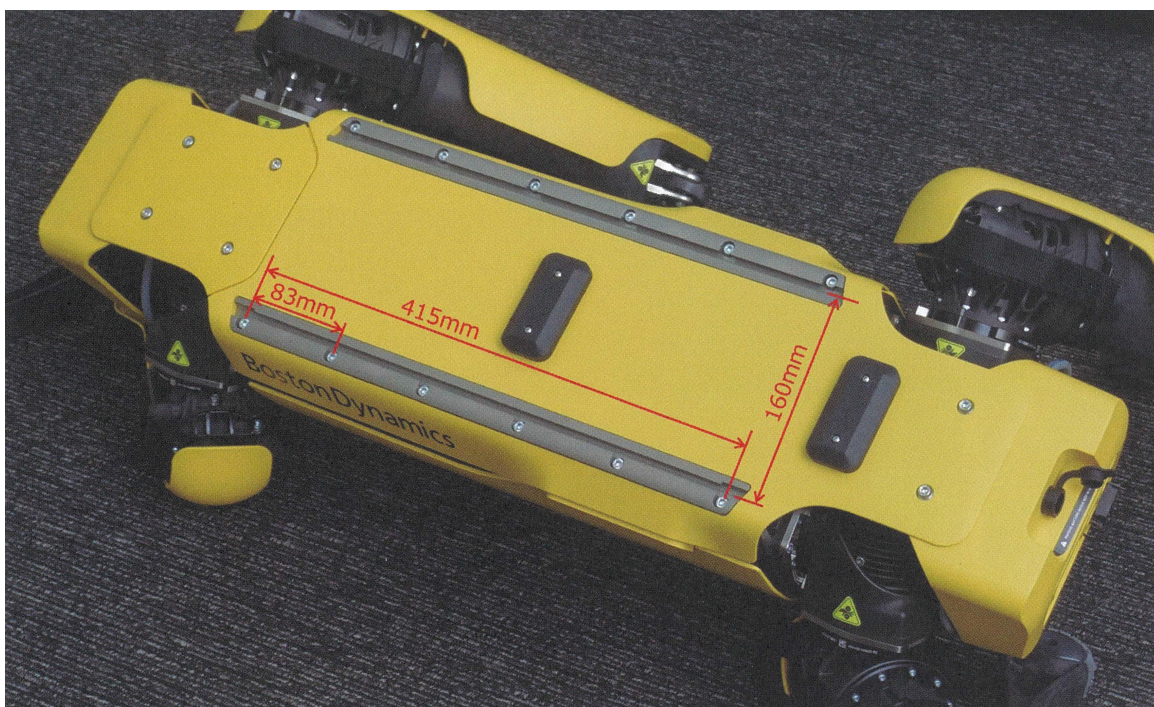


图 1.12: Payload的安装导轨 将T型槽后置螺母插入导轨并从上方用螺栓固定。将导轨固定到机身的螺栓头部可用作定位销。(照片:加藤康)

此外，导轨通过6个螺栓以83 mm的间隔固定在机身上。这种螺栓的头部有一个直径为4 mm的销孔，可用于精确的Payload定位。

1.3.3 外部接口

Spot背面有一个25针D型接线端子，用于与Payload进行电气连接。接线端子提供三种功能：(1)供电，(1)通讯，(1)安全(图 1.13，图 1.14)。

- (1)电源为35 ~ 59 V，3 A/针。最大功率为150 W/端口。
- (2)除了1000BASE-T用于通信外，还提供1 Hz脉冲（精度5 PPS）用于同步。
- (3)作为安全功能，提供了Spot电机电源断电和Payload的电源断电的功能。

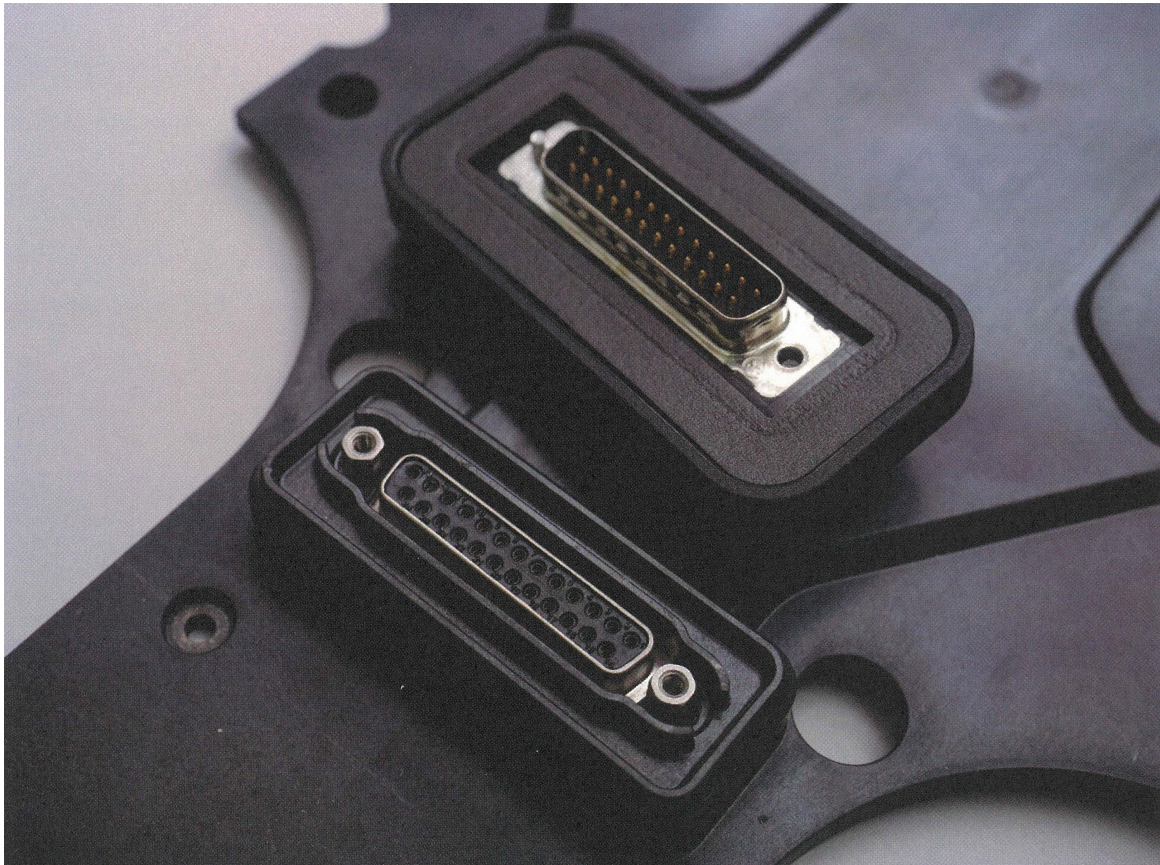


图 1.13: Payload连接用的接线端子 它是一个25针D型接线端子。引脚编号从右上角开始为1~13，从右下角开始为14~25。提供电源、1000BASE-T、安全功能等。(照片:加藤康)

引脚号	名字	说明
1	ETH0_D_N	Ehternet D负
2	ETH0_D_P	Ehternet D正
3	ETH0_B_N	Ehternet B负
4	ETH0_B_P	Ehternet B正
5	PL_SAFETY_O	当此引脚和引脚 18 之间建立导通时, Payload电源启用
6	MP_SAFETY_O	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
7	PPS	1 Hz的周期信号
8	无	-
9	P_GND	有效载荷地面参考。每个引脚支持3A的返回电流
10	P_GND	有效载荷地面参考。每个引脚支持3A的返回电流
11	无	-
12	PWR	供电。在每个引脚上提供 3A
13	PWR	供电。在每个引脚上提供 3A
14	ETH0_C_N	Ehternet C负
15	ETH0_C_P	Ehternet C正
16	ETH0_A_N	Ehternet A负
17	ETH0_A_P	Ehternet A正
18	PL_SAFETY_IN	当此引脚和引脚 5 之间建立导通时, Payload电源启用
19	MP_SAFETY_IN	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
20	无	-
21	P_GND	有效载荷地面参考。每个引脚支持3A的返回电流
22	P_GND	有效载荷地面参考。每个引脚支持3A的返回电流
23	无	-
24	PWR	供电。在每个引脚上提供 3A
25	PWR	供电。在每个引脚上提供 3A

图 1.14: Payload连接用的接线端子的引脚分配 提供Ethernet通信和供电等。(表: Nikkei Cross Tech 参考波士顿动力材料制作)

1.3.4 扩展用的Payload

波士顿动力公司为Spot提供以下扩展Payload(截至2021年8月1日)。

INSPECTION

THERMAL

EDGE CPU

EDGE GPU

LIDAR

Spot Arm

此外，还可以开发和安装自定义Payload。Payload和Spot的核心程序通过以太网与IP通信。

INSPECTION

INSPECTION是一个扩展的Payload，用于在人不想或不便进入的困难环境中收集必要的数​​据 (图 1.15)。除了360°彩色摄像头Spot CAM+外，还配备了云台变焦摄像头，可获取细节丰富的镜头。此外，它内部配备了高灵敏度麦克风，可实现远程听力检查。它还具有内置扬声器，可用于远程通信。价格为 29750 美元。

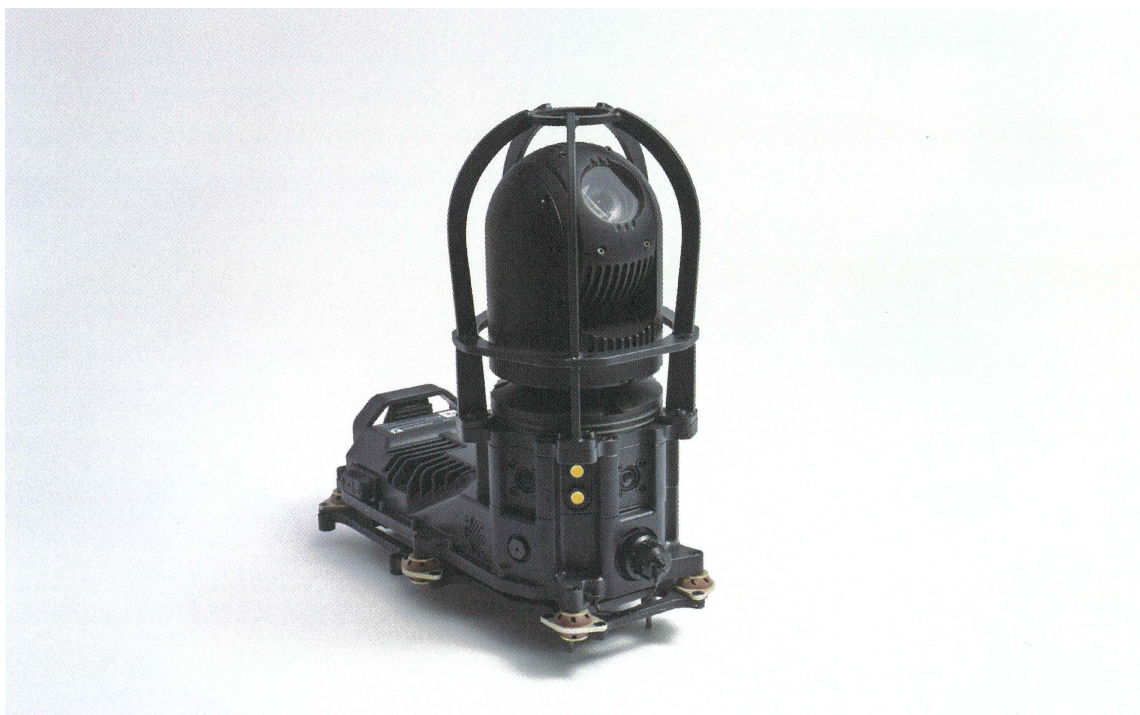


图 1.15: INSPECTION外设的外观 Spot CAM+ 360°摄像机上安装了一个云台变焦摄像机。(照片:Boston Dynamics)

THERMAL

是连接到INSPECTION带有IR（红外）摄像头的扩展Payload (图 1.16)。价格为 38950 美元。



图 1.16: THERMAL外设的外观 除INSPECTION外还安装了红外摄像头。(照片:Boston Dynamics)

EDGE CPU

用于在Spot上运行专用应用程序的扩展Payload (图 1.17)。由于Spot本身除了接收来自外部的指令的操作和学习到的路线的自主行走功能外没有其他功能，因此需要外部计算机来执行其专用的应用软件。例如，LiDAR可用于运行在识别周围环境的同时自动行走的应用程序。默认情况下，安装的是Ubuntu 18.04。作为外部接口，它有USB 3.0端口×3、USB 2.0端口×2、HDMI端口×1、以太网端口×1、RS-232C端口×1、DisplayPort×1。价格为3925美元。



图 1.17: EDGE CPU外设的外观 可以运行专用的应用程序，例如自主行走。(照片:Boston Dynamics)

EDGE GPU

用于执行计算密集型任务(例如Spot机器学习)的扩展Payload (图 1.18)。搭载Intel的CPU “Xeon E3-1515M” 和美国NVIDIA GPU “Quadro P5000”，带有预装SDK的Ubuntu 18.04。它带有USB 3.0端口(Type-C) × 2，USB 3.0端口(Type-A) × 2，HDMI端口 × 1，以太网端口 × 1，RS-232C端口 × 1。内部有一个mini PCI Express插槽。价格为24500美元。



图 1.18: EDGE GPU外设的外观 可以执行需要大量计算（例如机器学习）的专用应用程序。(照片:Boston Dynamics)

LIDAR

它是在广阔的空间中自主行走的扩展Payload (图 1.19)。可以获得最远100 m的距离图像。Spot机身可以获得周围小于4 m的距离图像，但只能用于在房屋或办公室等狭窄空间内进行自主行走。仓库和室外空间等大空间需要此激光雷达选项。激光雷达由美国的Velodyne制造。EDGE CPU也包括在内。价格为18450美元。



图 1.19: LIDAR外设的外观 在大型仓库和户外空间自主行走所必需的。(照片:Boston Dynamics)

Spot Arm

Spot Arm是安装到Spot的前上部的一个扩展Payload，是带有像蛇嘴一样的夹持器的6轴手臂(图 1.20)。夹持器里面有一个4K摄像头和一个灯，可以确认抓到的东西(图 1.21)。可以不用拉动东西就可以移动它们，或者可以把抓住东西放在背上的篮子里。另外，还有转动门把手开门和开/关阀门的功能。如果是人可以抓取的尺寸，可以用夹持器抓取。价格未知。需要联系波士顿动力销售部购买。



图 1.20: 可以操作把手的Spot Arm 可以操作手柄和把手，打开门并通过。此外，也可以把东西组装起来放在背上的篮子里，或者拿着粉笔在路上画字母图画。(图片:Boston Dynamics的YouTube视频截图)

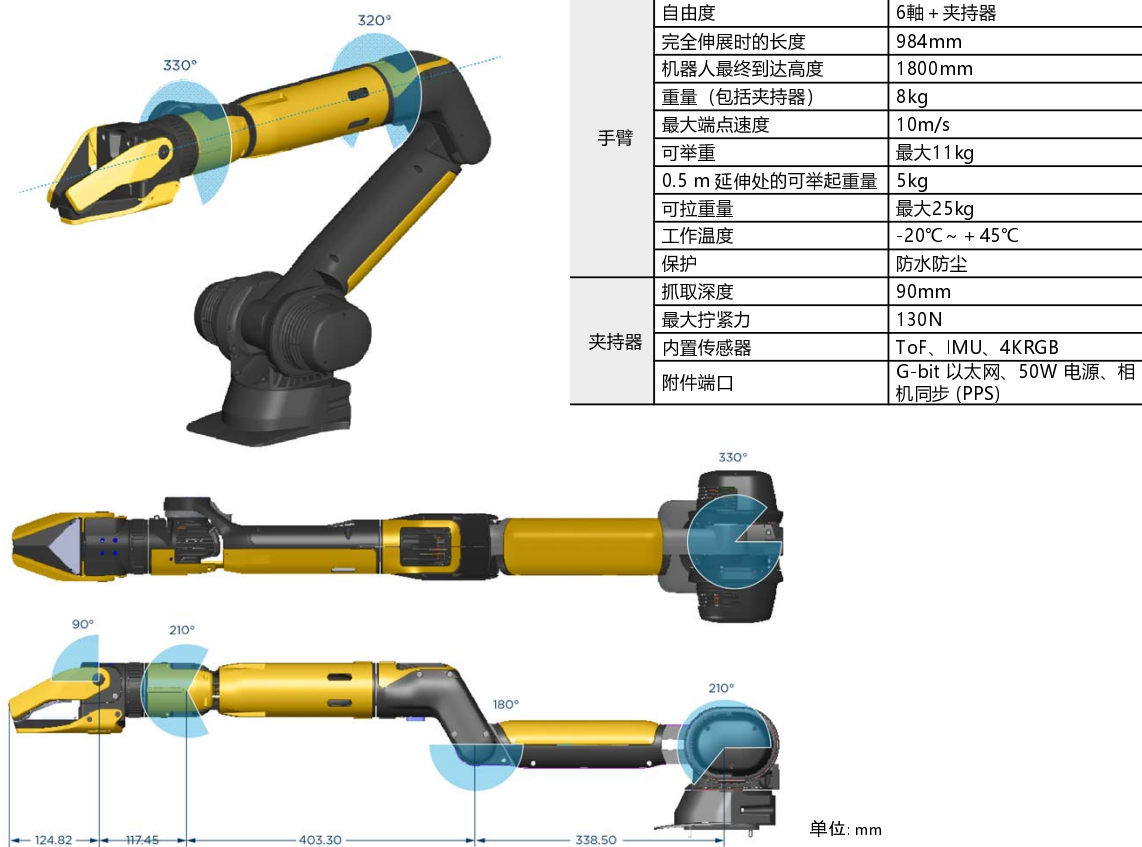


图 1.21: 6轴手臂和夹持器组成 Spot的手臂的6个轴和夹持器有1个轴, 拥有7个自由度。夹持器配备了距离图像传感器和4K摄像头, 可用于设定目标。(图片: 波士顿动力网页, 由 Digital Blast根据波士顿动力信息创建的表格)

注意, 不应该在安有手臂的情况下接近Spot。这是因为它没有允许与人协作的安全功能。Spot的机体通过接近识别有防撞功能, 但是手臂没有接近识别。此外, 即使移动路径上有障碍物或人, 手臂也没有防撞功能以防止接触。只有手臂、Spot的身体和安装在身体上的Payload有碰撞避免功能。

它还具有保护Spot机体和手臂本身免受冲击的功能。这是一个称为力限制器的功能。例如, 为了防止手臂与某物碰撞时对身体施加很大的力, 会自动限制手臂的扭矩, 以防止身体失去平衡。另外, 在举起和搬运物体时, 如果物体太重, 手臂将停止抬起物体。由于此功能旨在防止对Spot本身造成损坏, 因此它不能用作外部人员或物体的安全功能。

第 2 章 软件开发平台

2.1 整体概览

2.1.1 运行模式

使用专用遥控器以外的设备控制Spot时，请通过WiFi或以太网线缆从PC等上运行的程序调用Spot的服务。

调用服务API需要使用名为gRPC的过进程(图 2.1)。gRPC是美国谷歌为开发自己的服务而开发的一种RPC(Remote Procedure Call)，是一种客户端-服务器类型的通信协议。

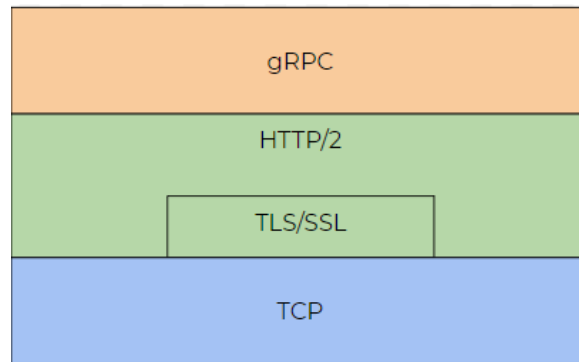


图 2.1: Spot的协议栈 外部程序和Spot的服务在客户端 - 服务器模型中使用gRPC进行通信。(图片:Boston Dynamics)

gRPC 被设计为独立于语言和平台，具有用于实现各种语言的客户端和服务器的开放库。例如，它可以在C、C++、C#、Objective-C、Java、Python、Node.js、Ruby等中使用。协议栈具有基于HTTP的结构。以Spot为例，准备了Python的开发包，可以在不知道gRPC存在的情况下，一边用Python调用服务一边开发应用。

2.1.2 服务组

作为可以使用gRPC使用的Spot服务，大致有9种类型可供选择。分别是“Graph Nav”“Mission”“Choreography”“Docking”“State”“Control”“Data”“Base”“Payloads”(图 2.2)。

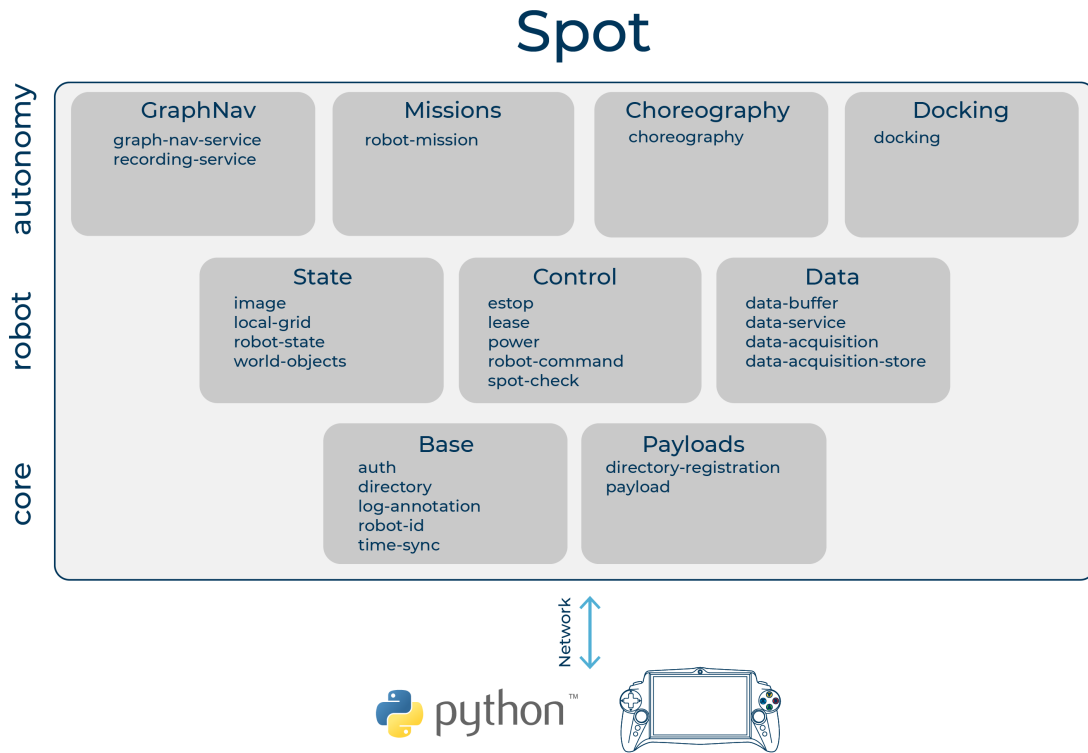


图 2.2: 9种Spot的服务组 一个新的Arm服务已添加到此。(图片:Boston Dynamics)

在对Spot进行编程时，会在调用这些服务的同时进行一系列的操作。另外在2021年2月，“Arm”作为一项新服务添加到操作机器人手臂，这是一项可选功能。包括这个，共有10种服务。

2.2 服务

2.2.1 GraphNav

GraphNav是与Spot的位置和移动相关的服务(图 2.3)。基于预先注册的多个航点以及巡逻路线的地图(图形)数据,可以让Spot自主移动。地图是用Spot走想让它走的巡逻路线并使用它记录的数据。Spot有一个叫做“Autowalk”的功能,可以让Spot沿着预先知道的路线移动,这是基本服务。

API	服务概要
GraphNav Recording Service	让Spot行走并记录地图
GraphNav Service	可以在Spot中输入目的地和到达该点的路线,或将地图上传到Spot,或从Spot下载

图 2.3: GraphNav服务的主要API创建地图以便操作Spot,并提供与移动相关的服务。(图片:DigitalBlast基于波士顿动力的资料制作)

使用GraphNav服务需要进行以下四个步骤。

- (1) 让Spot行走并记录地图
- (2) 将注册的地图上传到Spot
- (3) 初始化Spot在地图上的当前位置
- (4) 指示Spot移动到地图上的航点

2.2.2 Mission

Mission是一种使用动作树来指定Spot先进的自主操作的服务(图 2.4)。运动树描述了诸如沿GraphNav移动到目的地并在目的地拍摄图像等操作。使用这个动作树,不仅可以指定简单的动作来执行一系列任务,还可以指定更复杂的动作,比如在电池电量低时将Spot返回到扩展坞。

API	服务概要
Mission Service	使用GraphNav Recording Service加载和播放录制的任务
Remote Mission Service	用于操作Mission Service中的Payload (外部附加设备)

图 2.4: Mission服务的主要API 可以使用运动树编写自主运动场景。(图片:DigitalBlast基于波士顿动力的资料制作)

Autowalk就是通过这组Mission和GraphNav来实现的。

2.2.3 Choreography

Choreography是一种允许用户通过创建脚本动作让Spot跳舞的服务。编舞可以通过组合多个动作和改变动作参数来创建不同的动作。此外，由于该服务在没有安全功能的情况下会导致不稳定的运行，因此它不向公众开放，并且是只有获得特殊许可的开发人员才能使用的服务。

2.2.4 Docking

Spot Enterprise 是Spot的最新版本，它具有与称为 SpotDock 的扩展坞配合使用的功能。对接时可以供电并可以从Spot下载数据 (图 2.5)。Docking是控制Spot和SpotDock的对接并掌握其状态的服务。

API	服务概要
Docking Service	控制Spot并提供使用Spot Dock的界面

图 2.5: Docking服务的主要API 可以通过Spot Dock控制对接并掌握状态。(图片:DigitalBlast基于波士顿动力的资料制作)

2.2.5 State

State是一种可以监控Spot当前物理状态、获取的摄像头图像、周围地形和障碍物等信息的服务(图 2.6)。可以通过使用这些状态信息来决定Spot的操作。

API	服务概要
Robot State Service	监测测得的当前Spot状态信息(电源状态、网络通讯状态等)
Image Service	获取安装在Spot或Payload上的相机的图像。还可以使用编码和压缩功能来减少通过网络发送的数据大小
Local Grid Service	使用Spot身体和传感器信息了解附近的地形和物体并将该信息保存为地图
World Object Service	跟踪并保存在Spot周围检测到的物体

图 2.6: State服务的主要API 可以获取周围环境的感知信息并掌握机器人本身的状态。(图片:DigitalBlast基于波士顿动力的资料制作)

2.2.6 Control

Control是一种可以启用/关闭Spot电机、启动、坐下、移动等、紧急停止、功能检查等的服务(图 2.7)。在让Spot移动时,可以通过参数指定目的地的位置和移动速度来进行控制。

API	服务概要
E-Stop Service	发生异常时紧急停止。停止可设置为3个不同的状态(立即关闭电机电源、Spot坐好后断开电源、不断开电源)
Power Service	打开或关闭电机电源
Robot Command Service	让Spot执行站立、坐下、移动到指定位置等

图 2.7: Control服务的主要API 提供直接控制Spot的API。(图片:DigitalBlast基于波士顿动力的资料制作)

例如,在左前方鱼眼(frontleft_fisheye)的情况下,相机镜头和垂直方向都指向z轴。x轴和y轴可以根据图像的水平/垂直尺寸相对于相机镜头定位。x = 0、y = 0和z = 1 m的点位于镜头的中心,并且在相机面向的原点前方1 m处。这些坐标系的位置可以通过API相互转换。

在Spot中,有一个代表Spot本身和周围物体的坐标系,位置和旋转都是基于这个坐标系来描述的(图 2.8)。Spot使用x、y、z轴来把握3D空间。

帧	概要
odom	使用机器人运动学,基于Spot启动位置来估计固定位置的惯性坐标系
vision	估计固定位置并使用视觉分析和Spot里程计计算的惯性坐标系
body	表示Spot主体位置和方向的坐标系
flat_body	表示Spot主体的位置和方向的重力坐标系
gpe	表示Spot的地面估计值的坐标系
fiducial_XXX	表示原始参考检测的坐标系。在“XXX”中输入标准标签 ID
filtered_fiducial_XXX	表示过滤的、更稳定的参考检测的坐标系。在“XXX”中输入标准标签 ID
frontleft_fisheye	传感器坐标系之一。这个坐标系名称代表左前方的鱼眼镜头。所有五个摄像头都有自己的传感器坐标系名称,表示摄像头传感器的确切位置和方向。

图 2.8: Spot的Frame 有几种类型的Frame来表示周围环境。(图片:DigitalBlast基于波士顿动力的资料制作)

平移由有三个元素的向量 (x, y, z) 表示，而旋转由表示坐标轴方向变化的四元数 (w, x, y, z) 表示。四元数是一种用四维值来表示三维向量方向及其旋转的方法，便于计算旋转耦合。

2.2.7 Data

Data是一种用于从各种传感器获取数据和图像并将它们存储在Spot的内存中的服务 (图 2.9)。

API	服务概要
Data Acquisition Service	获取Spot元数据和图像
Data Acquisition Plugin Service	从Payload的传感器等获取数据
Data Acquisition Store Service	将数据保存到内存以供以后检索
Data Buffer Service	通过API将数据记录在Spot主体

图 2.9: Data服务的主要API 可以处理Spot获取的数据。(图片:DigitalBlast基于波士顿动力的资料制作)

它可以用于从客户端控制Spot的远程控制模式和通过回放录制的任务来控制的自动行走模式 (图 2.10)。

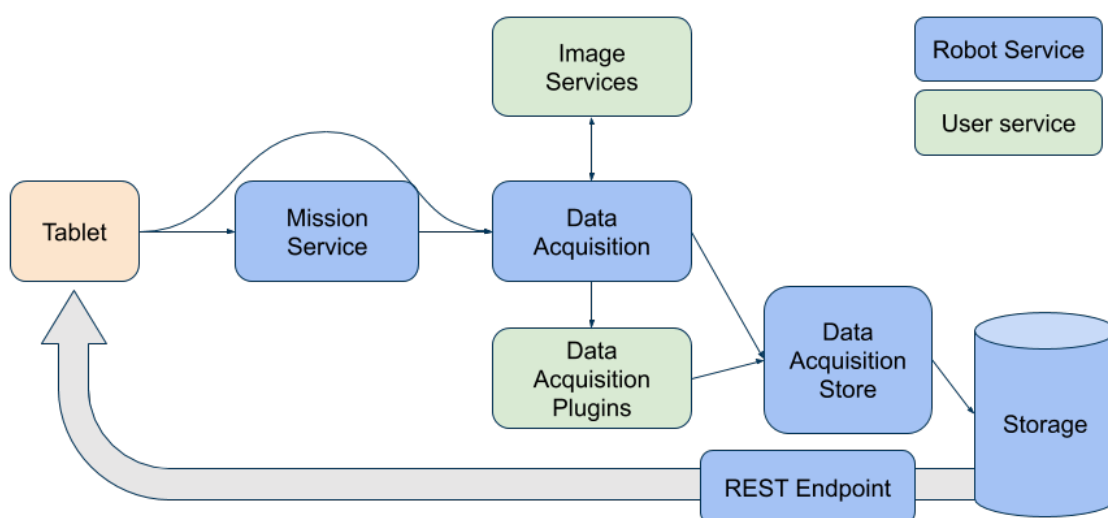


图 2.10: Spot的数据采集模型 最后将Spot获取的数据存入storage，通过REST发送到终端。(图片:Boston Dynamics)

数据获取流程如下。

- (1) 在系统初始化期间，数据采集服务(Data Acquisition Service)从Image服务(Image Service)和数据采集插件服务(Data Acquisition Plugin Service)聚合捕获功能的列表
- (2) 用户从此列表配置动作

- (3) 控制器或任务服务(Mission Service)向数据获取服务发送获取请求来获取数据。
- (4) 数据采集服务向相应的Image服务和数据采集插件服务发送采集请求来采集数据。
- (5) 采集到的数据通过数据采集 存储服务(Data Acquisition Store Service)发送到数据缓存服务。
- (6) 数据缓冲服务将获取的数据写入文件，以便从REST接口下载。

2.2.8 Base

Base是一个包括用户认证、服务发现和时间同步，这些是运行Spot的基础服务(图 2.11)。通过在启动Spot时或使用各种服务之前使用此服务，可以调用各种服务。

API	服务概要
Robot-id Service	通常在Spot启动时访问，提供有关Spot的元数据
Auth Service	向Spot验证用户并将令牌返回给除机器人ID和身份验证之外的所有服务
Directory Service	检测当前在Spot中运行的服务
Time-sync Service	估计应用的时间和Spot的时间之间的偏差并修正这些时间

图 2.11: Base服务的主要API 提供连接机器人服务的认证、列表功能等。(图片:DigitalBlast基于波士顿动力的资料制作)

2.2.9 Payload

Payload是连接到Spot的外部设备。最多可以将两个有效载荷和一个机械臂连接到Spot。Payloads 服务用于与连接的有效负载交换数据并使用Spot提供的一些服务 (图 2.12)。

API	服务概要
Payload Service	向Spot询问当前注册的Payload列表
Payload Registration Service	获取身份验证令牌以注册和激活新的Payload
Directory Service	获取并列出了有关固服务的信息
Directory Registration Service	注册或取消服务

图 2.12: Payloads服务的主要API 提供Payload管理和添加等功能。(图片:DigitalBlast基于波士顿动力的资料制作)

2.2.10 Arm

Arm有一个“Manipulation”服务，用于用夹持器抓取物体，“Arm Surface Contact”服务用于用手臂推动物体，以及“Door”服务用于打开门和通行(图 2.13)。

API	服务概要
Manipulation Service	让Spot走向一个物体并执行捡起它的动作
ArmSurfaceContact Service	在用手臂推动表面的同时执行移动动作
Door Service	用手臂抓住把手，打开门，做通过的动作

图 2.13: Arm服务的主要API 提供抓东西、动臂、开门等功能。(图片:DigitalBlast基于波士顿动力的资料制作)

Manipulation服务是提供抓取目标对象、移动手臂和释放抓取对象的能力的服务。如果只是移动手臂无法到达的地方有物体，它还提供移动Spot的身体以接近目标物体的功能。

ArmSurfaceContact 服务在需要高精度位置移动时使用，可以用手臂推动物体，用抓手握住的粉笔写字，用抹布擦拭。

Door 服务允许用户通过提供与门相关的参数来自动打开和穿过门。

2.3 编程

2.3.1 编程环境

截至2021年8月1日，Spot的开发套件支持Linux Ubuntu 18.04 LTS、Windows 10和MacOS 10.14。Python支持Python 3.6或Python 3.7。在此处添加用于Spot开发的pip (Python件包安装程序)。

添加pip后，用户将能够从Python的shell访问同一网络上的Spot来发送命令和执行脚本。

有关安装pip的更多信息可以在波士顿动力网站上的QUICKSTART页面 (<https://dev.bostondynamics.com/docs/python/quickstart>)上找到。

2.3.2 示例程序

这是用于理解Spot编程的示例Python代码。创建的是使用RobotCommand服务将Spot移动到指定位置一个应用程序。在此应用程序中，指定Spot在向前移动1 m后向左后方移动1 m(向后移动1 m，向左移动1 m)。

执行的示例程序如图 2.14所示。

模块的加载	{	<pre> import argparse import math import sys 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_helpers import ODOM_FRAME_NAME, VISION_FRAME_NAME, get_odom_tform_body, get_vision_tform_body from bosdyn.client.lease import LeaseClient, LeaseKeepAlive </pre>
① 状态检查 & Robot Command设置	{	<pre> 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, " / "such as the estop SDK example, to configure E-Stop." lease_client = robot.ensure_client(LeaseClient.default_service_name) lease = lease_client.acquire() robot.time_sync.wait_for_sync() lk = bosdyn.client.lease.lease_keep_alive(lease_client) robot_state_client = robot.ensure_client(RobotStateClient.default_service_name) robot_command_client = robot.ensure_client(RobotCommandClient.default_service_name) </pre>
② 启动&站立	{	<pre> robot.power_on() blocking_stand(robot_command_client) </pre>
③ 状态检查	{	<pre> vision_tform_body = get_vision_tform_body(robot_state_client.get_robot_state().kinematic_state.transforms_snapshot) </pre>
④ 位置指定	{	<pre> 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 </pre>
⑤ 移动	{	<pre> 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) </pre>
⑥ 状态检查	{	<pre> odom_tform_body = get_odom_tform_body(robot_state_client.get_robot_state().kinematic_state.transforms_snapshot) </pre>
⑦ 位置指定	{	<pre> body_tform_goal = math_helpers.SE3Pose(x=-1, y=1, z=0, rot=math_helpers.Quat()) odom_tform_goal = odom_tform_body * body_tform_goal </pre>
⑧ 移动	{	<pre> robot_cmd = RobotCommandBuilder.synchro_se2_trajectory_point_command(goal_x=odom_tform_goal.x, 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) return True if name == "__main__": if not main(): sys.exit(1) </pre>

图 2.14: 操作Spot的示例程序 执行此程序时，它向前前进1 m，然后向后前进1 m，向左前进1 m。(编程:DigitalBlast)

示例程序是使用“Robot State Service”或“Robot Command Service”创建的，它具有以下结构。

- (1) Spot状态检查和机器人命令RobotCommand的设置
- (2) 启动Spot并让它站起来
- (3) 查看Spot的状态，包括当前位置
- (4) 指定目的地(向前1 m)
- (5) 移动到指定目的地
- (6) 查看Spot的状态，包括当前位置
- (7) 指定一个新的目的地(向后1 m，向左1 m)
- (8) 移动到指定目的地

通过如上所述以编程方式调用Spot API，可以执行指定的操作。另外通过使用更多样化的API创建应用程序，例如，可以开发实际应用，例如响应光线移动Spot、自动步行到注册点、拍摄图像并返回。

第 3 章 动作机能

3.1 正常动作

3.1.1 移动部件的构成

Spot通过移动四条腿(腿驱动组件)实现行走。一个腿驱动组件具有：X旋转轴、Y旋转轴和与膝部轴的线性运动的三个自由度。如果比作人的手臂，用上臂开合胸部的轴是X轴，手臂沿身体前后旋转的轴是Y轴，弯曲和伸展的轴是肘部是膝关节轴。在X和Y轴上电机的旋转由齿轮直接减速来驱动。“膝盖”由线性执行器驱动，该执行器通过旋转轴推拉伸杆，类似于真实生物的肌肉。(图 3.1)。



图 3.1: 腿驱动组件 一条腿具有“X轴”、“Y轴”和“膝部”3个自由度的旋转关节。“X轴”和“Y轴”由电机直接旋转驱动，“膝部”与实际肌肉相同，由有推拉伸杆的线性执行器驱动。(照片:加藤康)

通过控制这四条腿的关节运动，可以实现站立、站立、行走、跑步、跳跃等姿势。

3.1.2 步行方法

Spot的操作方式大致有：(1)站立，(2)静止(保持平衡)，(3)行走，(4)翻身这四种模式。

图 3.2中狗俯卧的状态是标准的关机状态，当从这里上电启动并发出站立命令时，它会迅速站起来。这是(1)的操作(图 3.3)。在这种状态下，保持稳定“站立”状态的控制正在工作，并且当推或拉它时，Spot会跺脚保持站立。如果瞬间施加很大的力而Spot即将摔倒时，Spot会朝可能摔倒的方向移动并保持平衡。



图 3.2: 启动前的姿势 启动前的参考状态。说明书上说2个人拎着4个角可以看到的提手带，从这个状态打开电源开机。(照片:加藤康)



图 3.3: 站立姿势 打开电源，系统待机后发送站立命令，Spot将在此位置站起来待命。(图:加藤康)

在此状态下，操作遥控器的操纵杆并转向时，Spot则开始行走(图 3.4)。在平地上行走时，它的右前腿和左后腿抬起，然后左前腿和右后腿交替伸出行走。此时，有点变得内八字，当成2条腿站立时会控制使其身体不倾斜。虽然Spot也可以像螃蟹一样横着移动，但在这种情况下也可以通过同时沿对角线方向移动前后腿来移动它。在立足点差的地方，Spot可以一次抬起一条腿行走。操作人员不能从遥控器指定对单个的腿的控制。



图 3.4: 步行的Spot 前腿和左后腿抬起，然后左前腿和右后腿抬起，依此类推，斜腿交替抬起移动。(照片: Nikkei Cross Tech)

操作人员通过操纵杆操作，Spot按指定的移动方向运动，但是它使用5个深度摄像头监控周围环境，Spot会做出停止或避开的动作以免与障碍物发生碰撞。如果侧身避开障碍物且可以向前走的情况时，Spot则向前走，如果像墙一样不能绕过去，它就会停下来。在指定路线上有障碍物时，避开那些的算法很重要，但算法已经封装成为了一个黑匣子，用户看不到。在实际操作中，在什么情况下Spot会停止，在什么情况下它会环绕需要进行验证。另外Spot是一个可以通过外部PC的命令自动运行的系统。可以用来自PC的命令替换遥控器上的手动操作的样子。

(3)中行走的质量是Spot的价值所在，但是当实际让它走时，Spot对湿滑的道路和腿下的障碍物非常敏感且经常摔倒。跌倒时会让Spot跺脚，但这种情况下没有考虑周围的障碍物。即使有人在附近，也会有Spot跺脚撞到人并造成伤害的风险。

如果Spot在跌倒、翻倒的情况，从遥控器会发送跌倒恢复指令时它会自动翻身站立(图 3.5、图 3.6、图 3.7、图 3.8)。这就是(4)的翻身模式。跌倒恢复时，前腿先伸直，身体平躺，另一侧腿推动地面翻身。之后，双腿收缩，恢复到启动前的姿势。从这里开始通过(1)站立模式返回站立姿势。通过组合这些(1)到(4)的操作模式，实现Spot在各种地面环境中的操作。



图 3.5: 从跌倒中恢复(1) 完全翻转时的初始状态。(照片:加藤康)



图 3.6: 从跌倒中恢复(2) 伸展前腿并做支点。(照片:加藤康)



图 3.7: 从跌倒中恢复(3) 通过将剩余的腿移向支点来抬起身体。(照片:加藤康)



图 3.8: 从跌倒中恢复(4) 当身体旋转后它返回到俯卧状态。(照片:加藤康)

3.2 异常时的动作

3.2.1 发生异常的情况

为了调查上一节中提到的(3)步行模式的质量，我们计划在在各种各样的地方进行步行测试。由于Spot可以在人们可以去的地方行走，因此可以代表人在人无法接近的危险场所进行调查运输工作和简单的日常工作。从那些我们开始构想，带着Spot到底能使用到什么程度的看法对它的行走场地进行了设想。对于地形，我们假设了平坦的土地、斜坡、降雪和水道等特殊条件，并寻找可能的地方实施了测试。



图 3.9: 沿着海滩走的Spot 在沙地里腿稍微下沉的话还是可以稳定地行走。(照片:Nikkei Cross Tech)



图 3.10: 爬岩石的Spot 如果抓地力有效，Spot可以爬上岩石区，但如果岩石区又湿又滑，它就会摔倒。此外，如果它的腿夹在岩石和岩石之间，则将无法移动并停止。(照片:Nikkei Cross Tech)

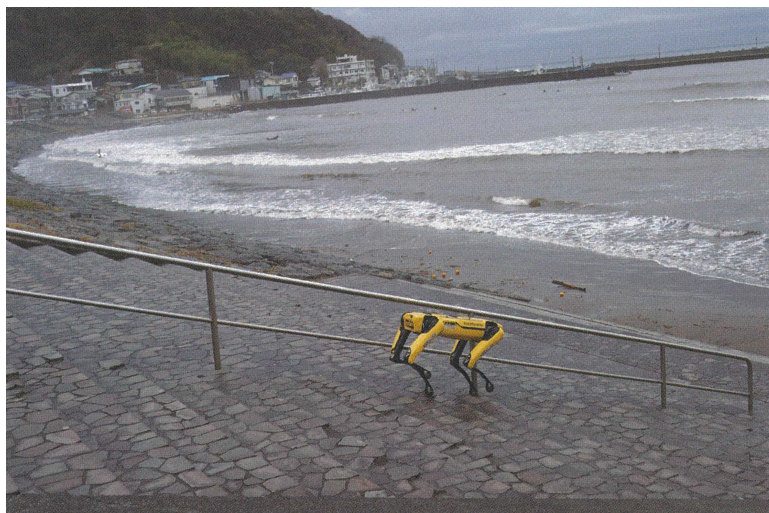


图 3.11: 下台阶的Spot可以轻松地下楼梯,但如果同时有几条腿滑倒,它就会失控。(照片:Nikkei Cross Tech)

行走测试的结果发现,Spot非常容易在腿的接地点上滑倒及卡住(绊倒)。大雨过后不久,让Spot走在潮湿的表面上,Spot到处滑倒了腿并失去了平衡。即使铁楼梯等不湿的地方,Spot在也很容易滑倒并失去平衡。

Spot在工厂和建筑工地似乎也有应用的情况,但它跌倒的可能性很大。在我们的实验中,它成功的站起来场合和跌倒的场合两者都发生了。在铁楼梯上,Spot如果滑倒摔倒则有跌落到楼梯底下的风险。

3.2.2 异常时的恢复动作

作为Spot操作期间的异常，预计跌倒是最频繁发生的。如上一节所述，Spot的腿尖非常容易打滑。虽然脚尖附有防滑橡胶，但在平坦路面上抓地力不大(图 3.12)。Spot通过踩其他的腿并移动站姿来恢复，以便它在滑倒时不会摔倒，但也有很多情况下踩其他的腿也会滑倒。在这种情况下，Spot无法保持平衡，会噼里啪啦地踩腿并尝试在地面抓稳。



图 3.12: Spot的腿尖 意大利Vibram制造。已经安好带凹槽的橡胶，但非常容易打滑。(照片:加藤康)

不言而喻，Spot只有在触地状态稳定的情况下才能保证整体的姿势稳定性，但是该状态崩溃时它恢复操作的动作很大，似乎是猛烈地踩在地上横冲直撞，用户难以靠近。这个恢复的操作完全交给了Spot，操作人员在这个过程中无法指定或控制Spot的运动方向。

在我们的实验里这正是最糟糕的结果。在一次试图越过被雨水淋湿的木头瓦砾的实验中，Spot滑倒了腿，并跌倒它翻了个身。在翻身和站起来的过程中，Spot的腿又滑一下往后退一下，结果滑落到了后面一条涨水的水道。在此期间操作人员完全无法操作，由于是Spot完全自主行为，很不幸它掉进了水道。尽管快速“救援”阻止了主计算机被淹没，但每条腿驱动组件和深度相机都被水淹没了。虽然我们的目标是通过拆卸清洁及烘干每个部分来恢复Spot，但最终由于测量每条腿驱动组件负载的称重传感器单元的应变计浸水以及似乎是电桥电路损坏的故障，未能实现恢复。

在实际操作Spot时，需要研究接地点滑落或被卡住等异常情况下的恢复操作，并非常有必要预测发生事故的情况。另外，考虑到场地的腿尖，例如，像汽车轮胎在雪地上使用无钉防滑钉一样，可以准备适合作业场地的抓地力的脚尖。

第 4 章 整体构造

4.1 概要

4.1.1 拆解步骤

为了理解Spot的整体结构，我们进行了拆解。在此之前，需要确认调查对象的基本规格。

Spot的制造商波士顿动力在网页上显示的规格如 **图 4.1**所示。在说明书中出于安全搬运等原因，有“2个人一起搬是正确的”的说明。Spot尺寸全长110 cm，重31.7 kg，1个人处理是有点玄的数值，但在本次调查中，通过提供合适的工作台和固定工作台，并使用合适的安全防护设备，即使1个人操作也是可能的。

项目	规格	数值
整体规格	长度	1100mm
	宽度	500mm
	高度（站立时最高）	840mm
	高度（坐着时）	191mm
	重量（包括电池）	31.7kg
	自由度	12
	最大移动速度	1.6m/s
环境性能	防水防尘性能	IP54
	工作温度	-20~ +45°C
	坡度	±30°
	台阶	符合美国建筑标准（约7英寸，适用于10~11英寸）
	最大步幅	300mm
电源	电池容量	605Wh
	最大电池电压	58.8V
	平均工作时间	90分钟
	待机时间	180分钟
	充电功率	400W
	最大充电电流	7A
	充电时间	约2小时
	电池组重量	4.18kg
有效负载	最大承载能力	14kg
	最大输入功率（每端口）	150W
	有效负载端口数	2
	T型槽导轨螺栓尺寸	M5×1.0
外围识别	相机类型	投影立体相机
	监控区域	360°
	可识别距离	4m
连接性能	802.11	WiFi（仅限 2.4GHz）
	Ethernet	1000BASE-T

图 4.1: Spot Explorer的规格表 体型和重量和大狗一模一样。(由Nikkei Cross Tech基于波士顿动力数据创建)

拆卸工作按以下程序进行。首先，取出电池(图 4.2)。拆解步骤是按(1)机盖拆解，(2)前后机架拆解，(3)中心机架上部拆解，(4)各种线束接线拆解，(5)各条腿拆解，(6)主计算机拆解的顺序举行的(图 4.3)。对于Spot的零件，完全没有被通常用于固定一般工业产品机盖的爪子钩住。它可以通过简单地卸下螺丝并根据位置的不同，只需剥下魔术贴的固定部分即可轻松取下。



图 4.2: 拆卸前主体和取出电池的状态 体型约为一抱的大小重量31.7 kg(含4.2 kg电池)。电源电压为58.8 V。为了拆解工作的安全, 需要注意这个重量和直流高压。此外, 在搬运过程中, 有必要提着在四个“肩关节”和“髋关节”处设置的提手带, 以免手指被关节夹住。(照片:加藤康)



图 4.3: 拆下主体机盖的状态 机盖用魔术贴等固定, 便于拆卸。(照片:加藤康)

4.1.2 整体结构

图 4.4 显示了拆解和排列的组件。如这张照片所示，Spot 由 1 个车身(躯干)和 4 条腿组成。Spot 机制可以恰当地说，“将 4 条猛男腿连接到了高性能台式电脑上”。表达这一点有 2 个理由。首先，它像台式机或无线电遥控直升机的机身一样使用大量机械螺丝组装，特别是没有钩子或锁扣，只需卸下螺丝即可拆解。另一个是螺丝等紧固部件和电气线路的接线端子的连接的设计不能像工业设备那样经得起多次拆解和组装。

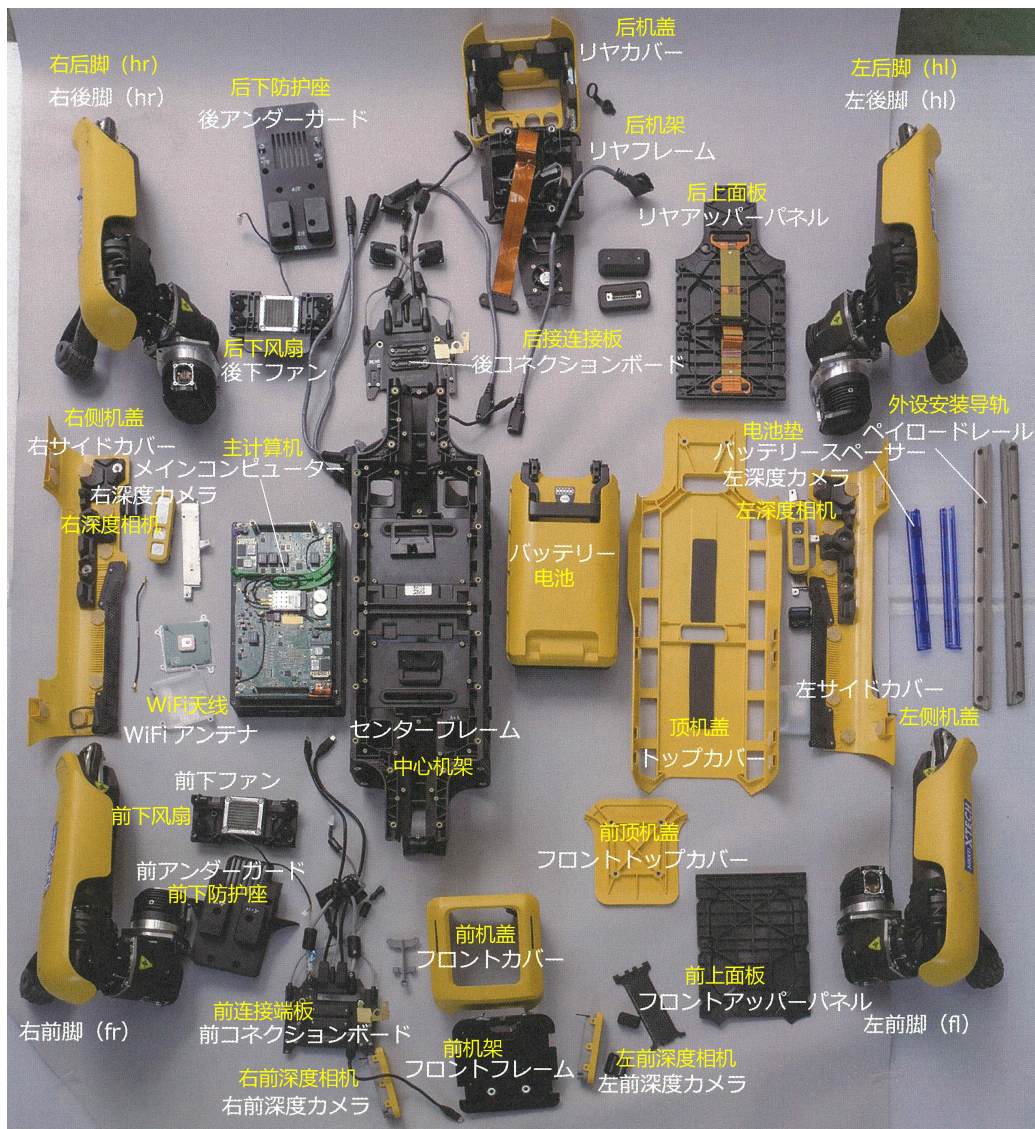


图 4.4: Spot 的整体组件构成 照片里按照标签将组件拆解并大致放置在该位置。基本配置是将 4 条腿连接到中央黑盒形框架的 4 个角的布置。照片底部方向是 Spot 的前方。(照片:加藤康)

中间的黑箱子是中心机架。照片左侧的主计算机模块安放在这个中心部分。该模块在一块主板上带有2组CPU板作为子板。CPU板搭载了美国Intel的Xeon处理器，此外，它还配备了一个512 G的SSD和一个32G的DRAM(每块板)。可以说，它配备了两台高性能工作站服务器。这个模块的底座(安装板的盘子)是一个镁合金铸件，考虑到了热传递，用于冷却CPU的铜散热器的散热片暴露在这个盘子的外侧，露在冷却空气通道中。

搭载的冷却风扇大小有2个种类共计8个。主计算机的散热和移动每条腿的电机外壳采用了散热结构，可见在开发过程中采取防热措施已经相当困难的。大概是这个结果。启动时风扇噪音比较大。

图 4.4的中心机架右侧的电池直接固定在主机模块的正下方，以最短距离与主计算机主板相连。

4条腿中的每一条都是用四个M5螺栓刚性固定在中央箱体上。在Spot中，前面是“f”(Front)，后面是“h”(Hip)，左边是“l”(Left)，右边是“r”(Right)，车身后后轴方向为“x”，90度横轴为“y”，肘(膝)关节称为“Kn(Knee)”。根据这个命名方式，右前肘关节是“fr.kn”，左后后轴是“hl.x”。从遥控器上显示的错误代码可以确定发生问题的部分。

前部(面部: 图 4.4的下方)安装了2个用于前方感应的深度摄像头模块和通过颜色和发光模式显示设备状态的LED灯，以及用于电机冷却用的风扇。

后部(尾部: 照片的上方)布置了1个用于后方感应的深度摄像头模块、电源和电机驱动电源开关、充电插座、以太网模块插座和电机冷却风扇等接口。

每侧安装一个用于感应的摄像头模块和一组WiFi天线。

机盖是用黄色树脂注塑成型的，没有涂漆。对于注定会掉落并充满划痕的保护器来说，这是正确的选择。它由魔术贴固定，可以很容易地拆卸。腿的盖子是一种出色的设计，将它安装到设置在腿的树脂框架上的凸轮形夹子中，旋转它，然后用皮带固定。另一方面，机盖内部各部分附有许多机械螺丝，材质也较软，头部的许多十字孔和六角孔因反复拆装而损坏，无法转动。

照片的中心机架上的黄色圆点是螺丝用的嵌件，它们有多少可以看到。那么多的螺丝，而且长短不一，拆装的时候管理起来很麻烦。看来机盖的设计师和主体设计师是不同的人，思想和感官上的差异很有趣。

4.1.3 机盖

可以被称为Spot的符号颜色的黄色的零件是机盖(图 4.5)。许多工业产品的机盖一般都是设计爪子等的挂钩通过镶嵌来固定。在厂家方面,避免无意拆卸可能是有意义的,但在尝试强行拆卸时爪子断裂的情况很多。因此,在拆解时往往是从寻找爪子的位置开始。

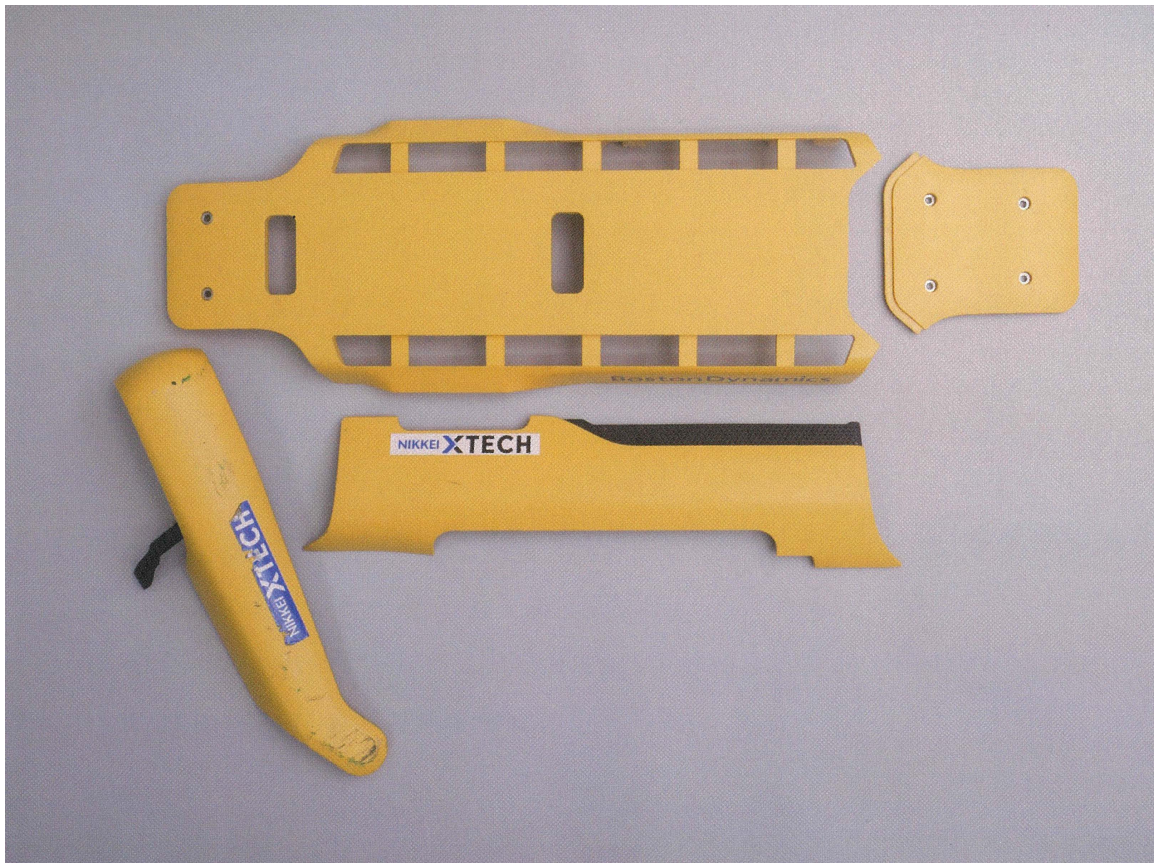


图 4.5: Spot的机盖(外部) 用有色树脂注塑成型。(照片:加藤康)

Spot的设计简单明了，机盖可以很容易地取下。使用魔术贴与主体的连接做得很好(图 4.6)。

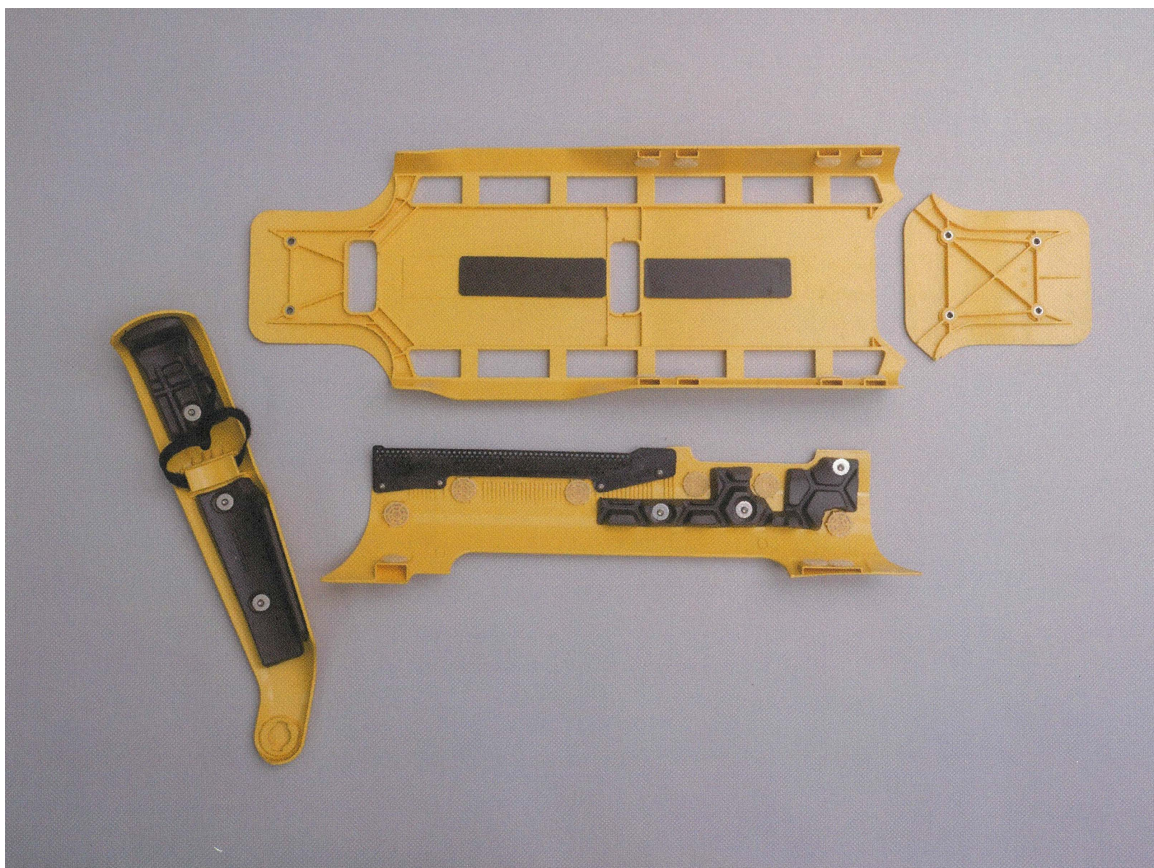


图 4.6: Spot的机盖(内部) 使用魔术贴或魔术贴的钩环带将其固定到主体上。(照片:加藤康)

没有油漆的亚光表面处理可能是预测由于跌落或碰撞造成的损坏的规格。Spot尤其是在湿滑的地面上容易摔跤。作为它的防护盖具有足够的功能。

4.1.4 散热结构

当Spot的电源开关打开时，每个角落的冷却风扇首先旋转并发出巨大的噪音。当硬检查完成后，风扇的旋转速度减慢并切换到正常运行开始。从它有8个大大小小的风扇可以看出，与散热的斗争显然是艰难的(图 4.7)。

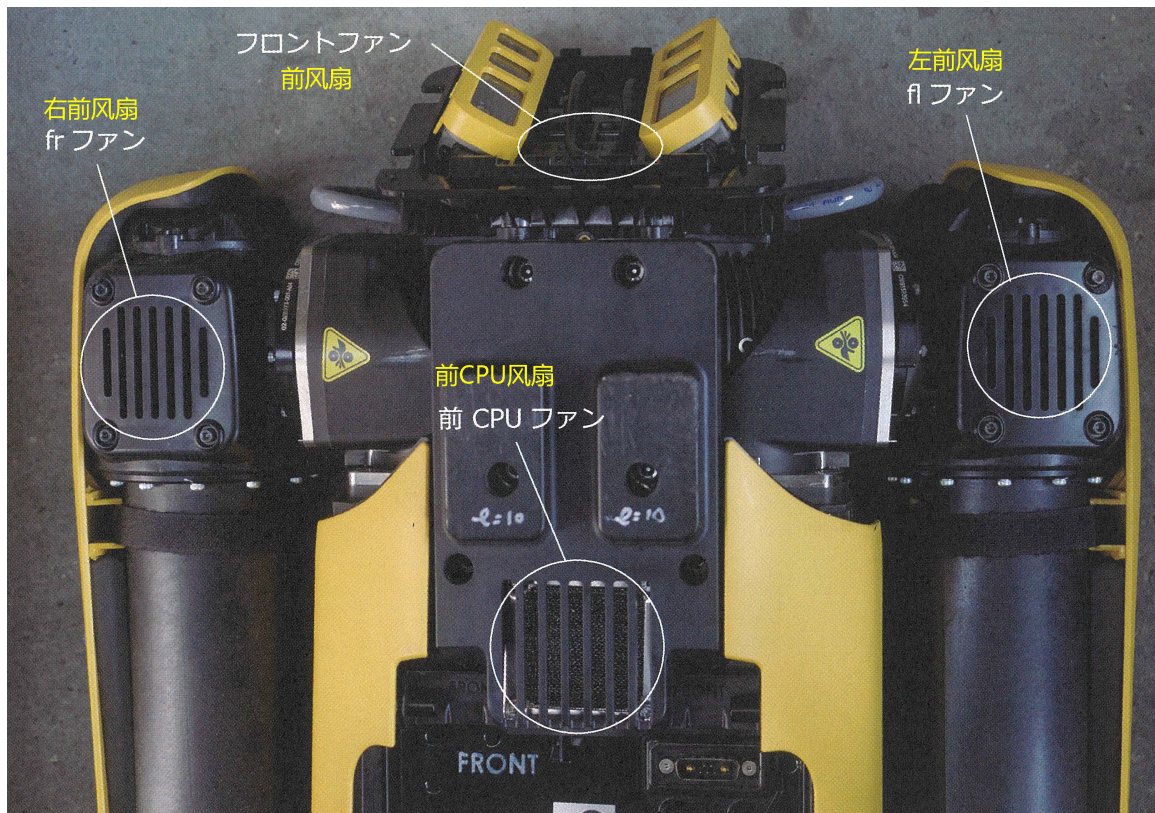


图 4.7: 冷却风扇的安置 它有4个风扇用于前部(Y轴)、左右腿(膝关节)和前部 CPU。后部也是一样，共计8个风扇，可见Spot的发热程度之大。(照片:加藤康)

冷却用的风扇上安装了一个大网孔过滤器(图 4.8)。由于网眼的网眼很大,看来目的不是为了防尘,而是为了防止石头撞到风扇的格子上而使其破碎或阻碍其旋转。左右腿肩部的缝隙下也有冷却风扇。此外,(前半部分)前机架上也安装了一个,即4个。同理,后半部分在主机架下方、左右腿及背面使用了4个,共计使用了8个冷却风扇。机架底部的CPU风扇采用了13.2 W的大容量风扇,通过风道和腿的X轴电机部分引导到主机下方,对CPU的散热器进行冷却。

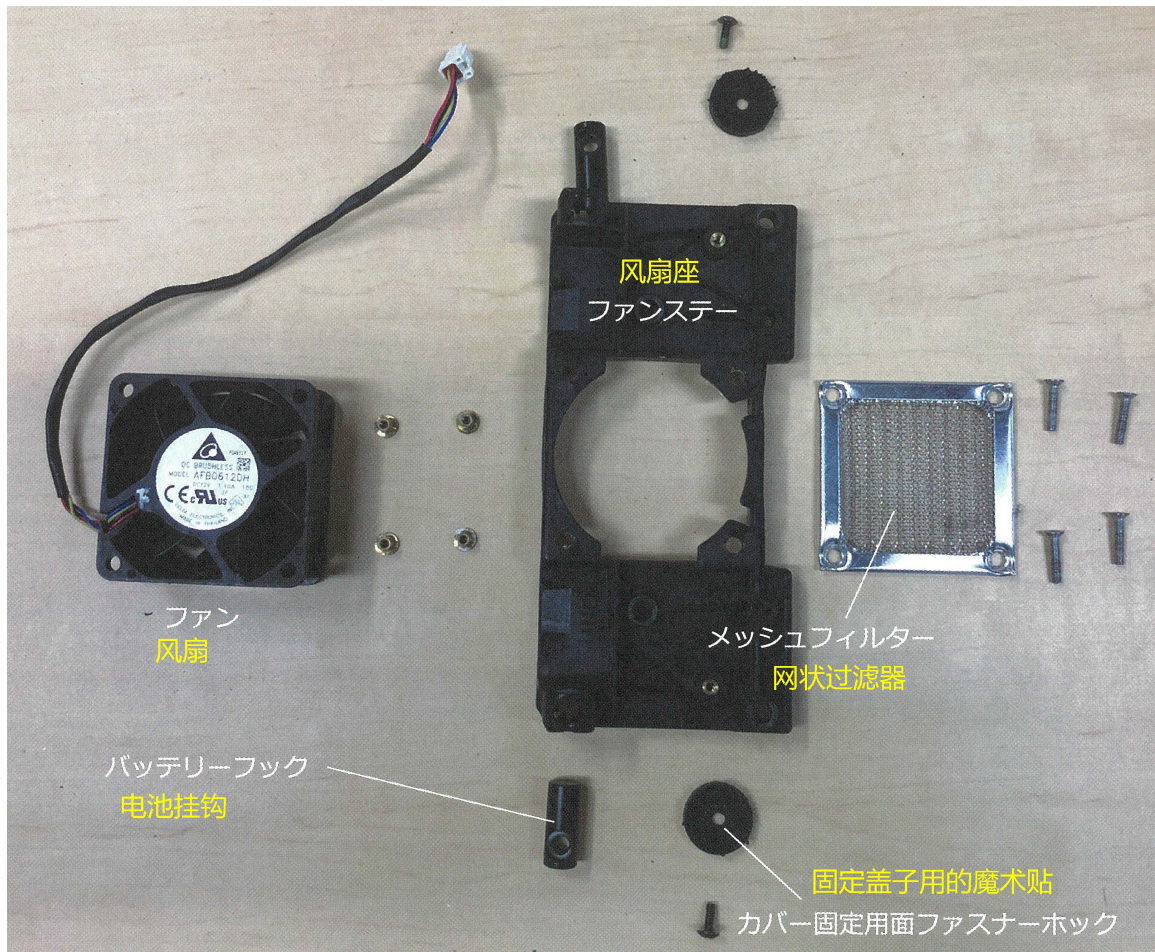


图 4.8: CPU用的冷却风扇 中央前方的风扇构成。流入侧设有网状过滤器,但网孔较大。使用13.2W大容量风扇冷却X轴电机和CPU散热器。(照片:松田篤志)

在主计算机周围，用于作为CPU产生大量热量的工作站的处理器的，它总共配备了2个Xeon。因此，将冷却空气引导至散热器的导风管占据了主机架很大的体积(图 4.9、图 4.10)。

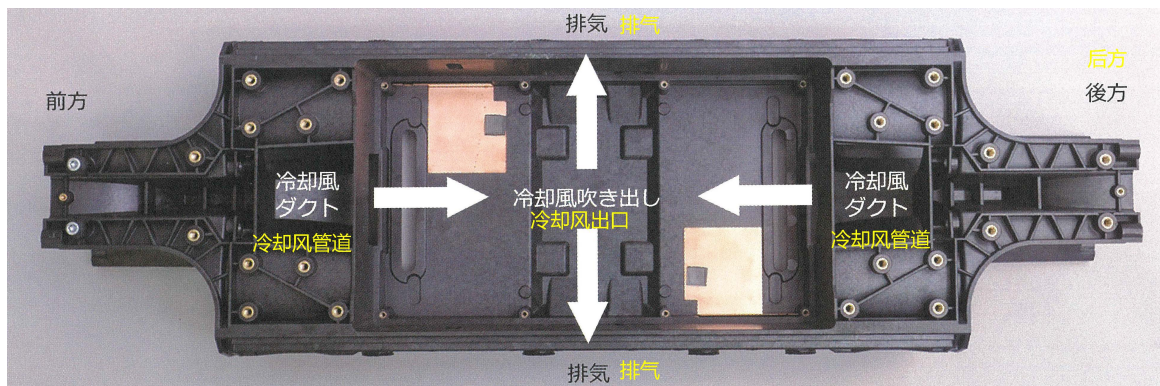


图 4.9: 中心机架(底面) 计算机舱前后中央的梯形孔是散热风道，风扇吸入的空气作用在CPU的散热片上进行散热。(照片:加藤康)

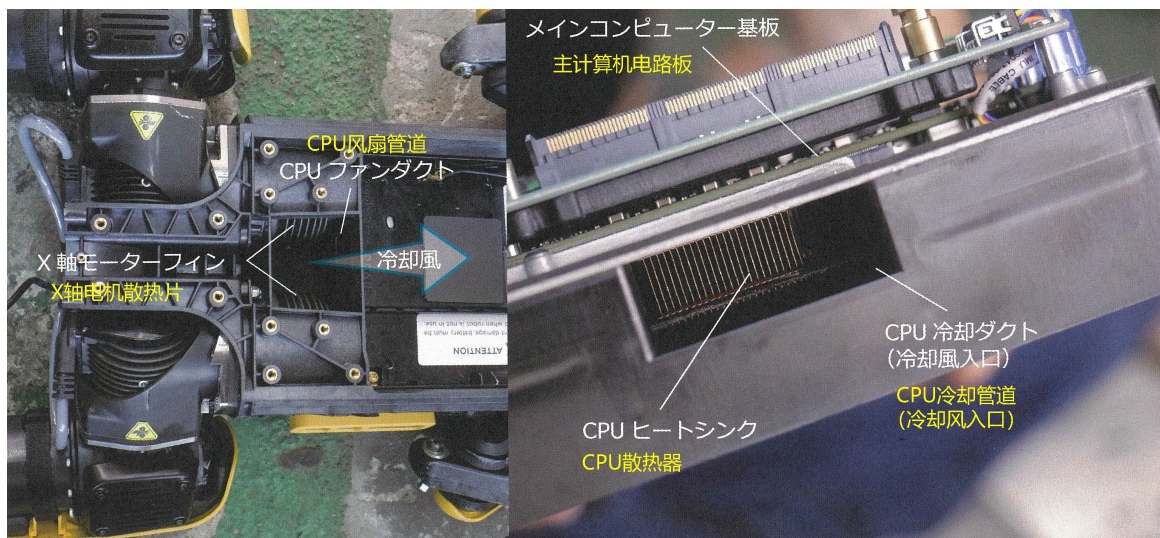


图 4.10: 主计算机CPU冷却风扇 CPU风扇吸入的冷却空气通过CPU风扇风道冷却X轴电机的同时，被引导至中央，冷却CPU散热器，向机身侧面排出。而且前后对称。(照片:加藤康)

另一个主要的热源是电机和逆变器电路板。因此，在逆变器周围的电机外壳中设置了一个大散热片，旨在通过来自风扇的冷却空气进行冷却 (图 4.11)。



图 4.11: 膝关节驱动电机的冷却部分 提供专用风扇来冷却电机和逆变器。(照片:加藤康)

4.2 主机架

4.2.1 主机架概览

如 图 4.12所示，Spot的基本骨架是在机箱的4个角上连着腿的结构。在这张照片中，移除后机架(照片上方)后很难看清，但它的结构与前半部分(照片中的下半部分)几乎相同。



图 4.12: 机架结构概要 腿连接到了容纳主计算机等的箱形结构的四个角上。(照片:加藤康)

主机架较大，分为前机架、中心机架、后机架3部分。此外，还准备了一个上面板来封闭主机架的入口。

4.2.2 前机架

前机架安装了2个摄像头模块、通过颜色和发光模式指示设备状态的LED灯以及用于冷却电机的风扇。图4.13是拆下的前机盖的样子。2个摄像头模块它略微向下安装并向内倾斜58.5度。通过重叠2个相机作为立体相机测量到物体的距离的方法在摄影测量中很常见。仅使用此相机模块即可进行距离测量，但有必要寻求更高的精度。



图 4.13: 前机架 取下前盖从下面看。可以看到两组前置摄像头模组向内倾斜。似乎是故意将摄像头的视角重叠起来，用作立体摄像头。(照片:加藤康)

固定前机架的螺栓在摄像头模块下方，取下摄像头模块是第一步，但是转动安装螺栓的扳手会干扰腿的电机部分，无法直插进去(图 4.14、图 4.15)。需要将腿移动到不同的角度，以保持扳手最容易接近的角度。



图 4.14: 前机架拆解 要卸下前机架，必须先卸下摄像头模块，然后才能进行下一个拆解过程。扳手不适合笔直插入。(照片:加藤康)

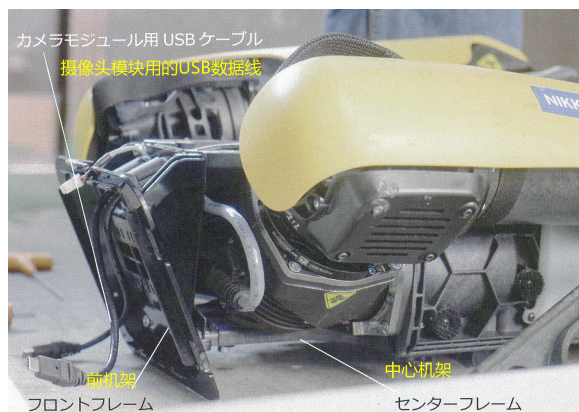


图 4.15: 取下摄像头的前机架 可以看到脸朝下。两条USB Type-C数据线用于摄像头模块。(照片:加藤康)

图 4.16显示了前机架面板。如后文所述，中心机架含有玻璃纤维，但此注塑件中不含玻璃纤维。有4个铝嵌件用于与主机架一起安装。对铝合金板材进行冲压、弯曲，然后将一块黑色氧化铝板镶嵌入该机架面板中，将它们紧固在一起。此板安装了 $12\text{ V} \times 0.08\text{ A} = 0.96\text{ W}$ 冷却风扇。为了与前机架定位，前机架的肋条嵌入4个角安装孔侧面的扇形狭缝中。这种定位方法需要很高的位置和形状精度。通常，在这种情况下，定位是用几个定位销进行的，但该部分剩余的三个圆孔(未使用)可能是定位销的痕迹。最初使用了3个定位销，但据推测，由于与加强筋配合的严格要求和定位销的几何公差，包括降低成本，因此取消了定位销。



图 4.16: 前机架 注塑的前机架面板镶嵌了铝合金板，上面安有用于冷却腿的电机部分的风扇。风扇额定功率约1 W。(照片:加藤康)

带有LED灯等的机盖安装在前机架的外侧(图 4.17)。它用钢板制成的金属钩固定在前机架上。

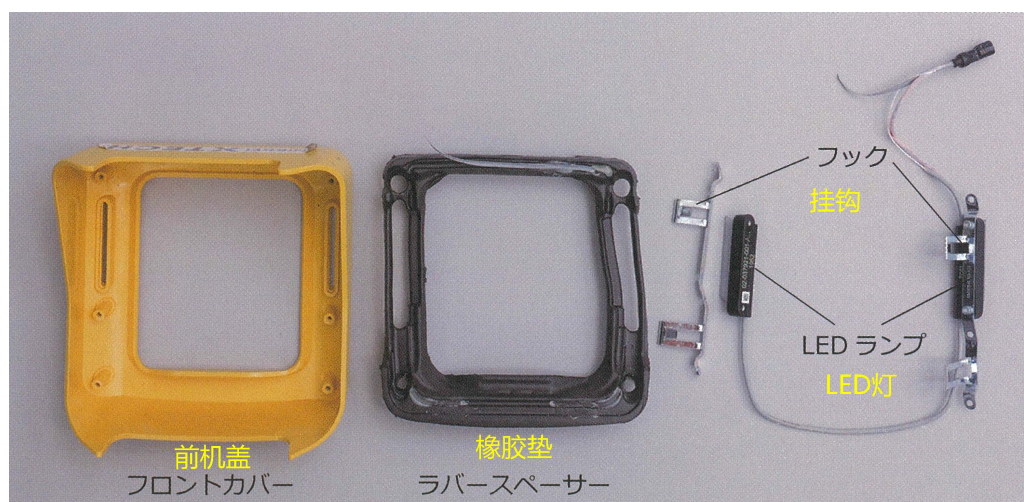


图 4.17: 前盖 在前部前端，安装有通过彩色或闪烁的方式显示系统的运行状态的LED灯。并用钢板钩固定在前机架上。(写真:加藤康)

4.2.3 中心机架

中心机架是主机架的主要结构(图 4.18、图 4.19、图 4.20、图 4.21)。材料看起来是含有玻璃纤维的聚缩醛。除了保证机架原有的基本强度和刚性的功能外,内部还设计了冷却风道。此外,通往各腿部单元和前后单元的线束通道也布置得井井有条。在设计上,各部分孔洞的排列,以及六角形的筋条,相当美观实用。另一方面,使用了大量的固定螺钉使用大量的嵌件,此外由于其形状复杂,因此使用了相当昂贵的注塑模具,该模具使用了很多滑块。

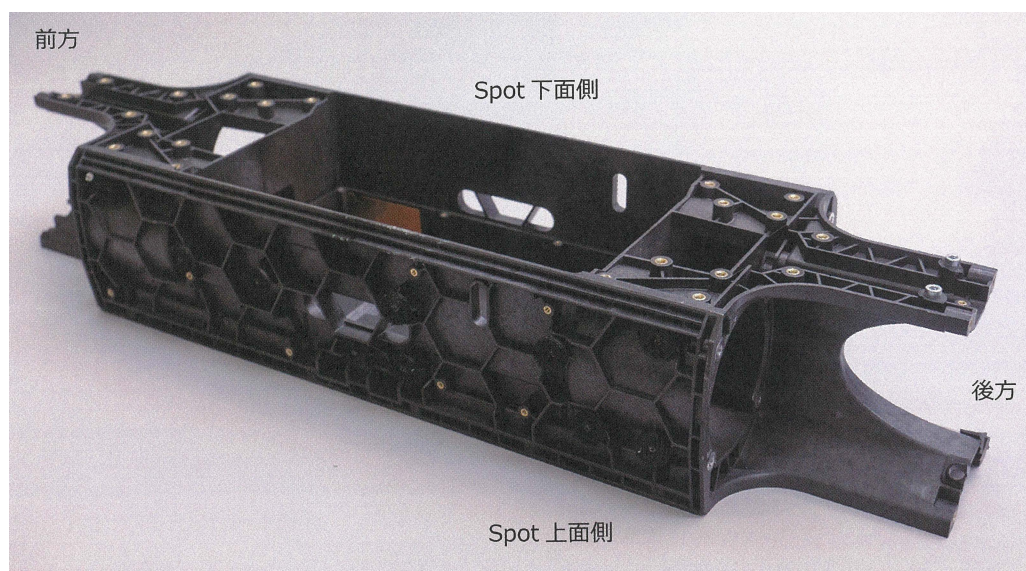


图 4.18: 中心机架 底面放在上面的状态。中央开口部分是容纳主计算机和电池的系统核心的外壳。(照片:加藤康)

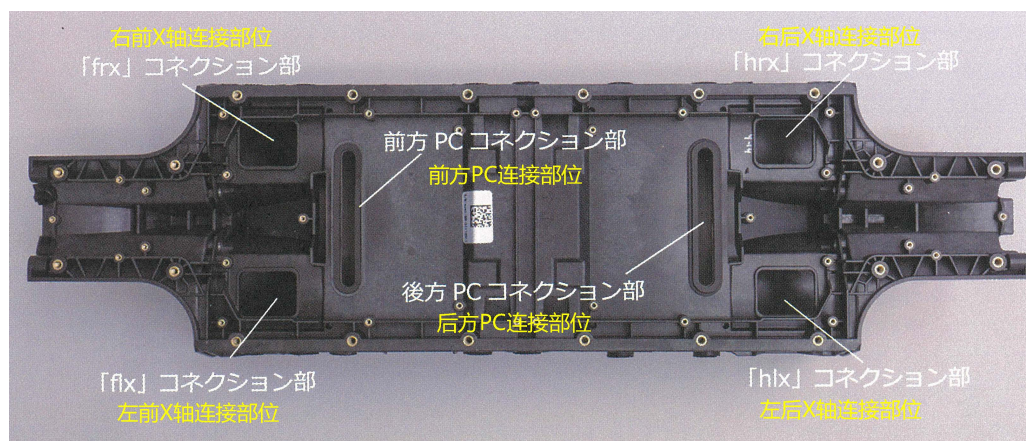


图 4.19: 中心机架(顶视图) 从正上方看到的照片。在顶部隔板上,可以看到中央连接到主计算机的接线端子贯穿部位以及四个角中用于“X 轴”驱动用的线束连接接线端子的孔。(照片:加藤康)

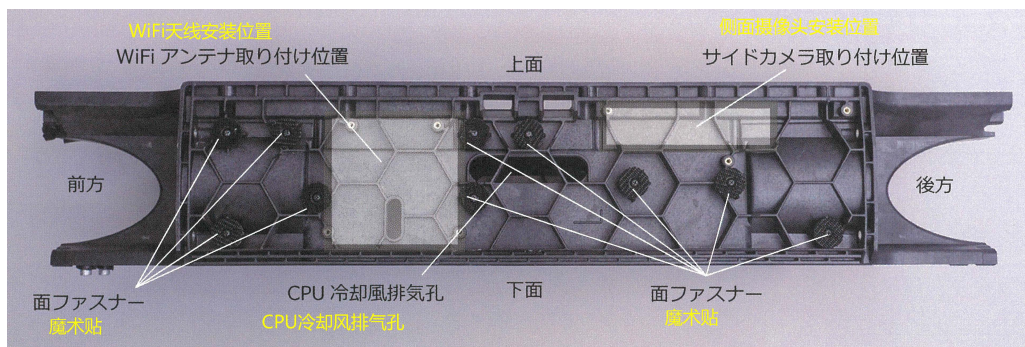


图 4.20: 中心机架(右侧视图) 从右侧看到的照片。侧面(两侧)附有摄像头模块和WiFi天线。照片中的圆形甜甜圈形状的物体是点状的是带有用于固定盖子的硬钩环的魔术贴。(照片:加藤康)

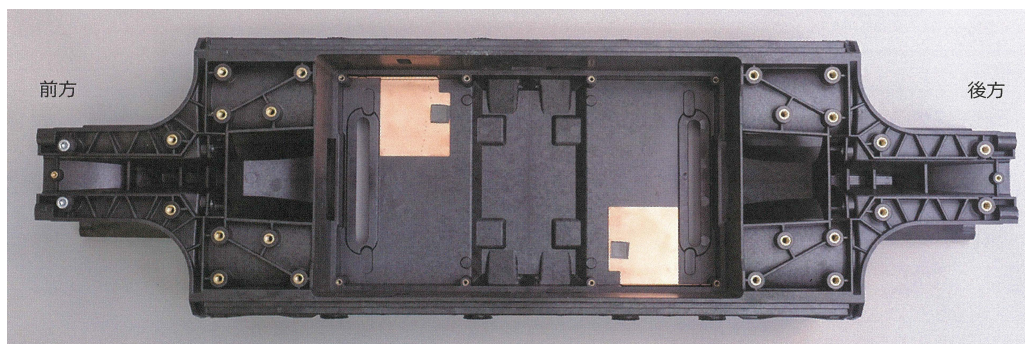


图 4.21: 中心机架(仰视图) 从底部看到的照片。用于屏蔽的铜板附在中央计算机隔间上它位于主板上的SSD正上方。(照片:加藤康)

中心机架的重量为2.1 kg。它的尺寸很大但感觉很轻 (图 4.22)。



图 4.22: 中心机架重量测量 重量是2.1 kg，相对于它的大小来说感觉很轻。(照片:松田篤志)

4.2.4 后机架

与前机架一样，后机架是没有玻璃的注塑产品，并安装有1组摄像头模块，开关及I/O相关的接线端子。它安装在与前机架相同且安装有风扇单元的铝板上，并镶嵌固定在主机架机箱上。该风扇向后面的Y轴电机输送冷却空气以对其进行冷却。与前部一样，尾机盖是通过压紧橡胶垫片并用铁板冲压制成的夹子钩在后机架左右4个凹部上来固定的(图 4.24)。

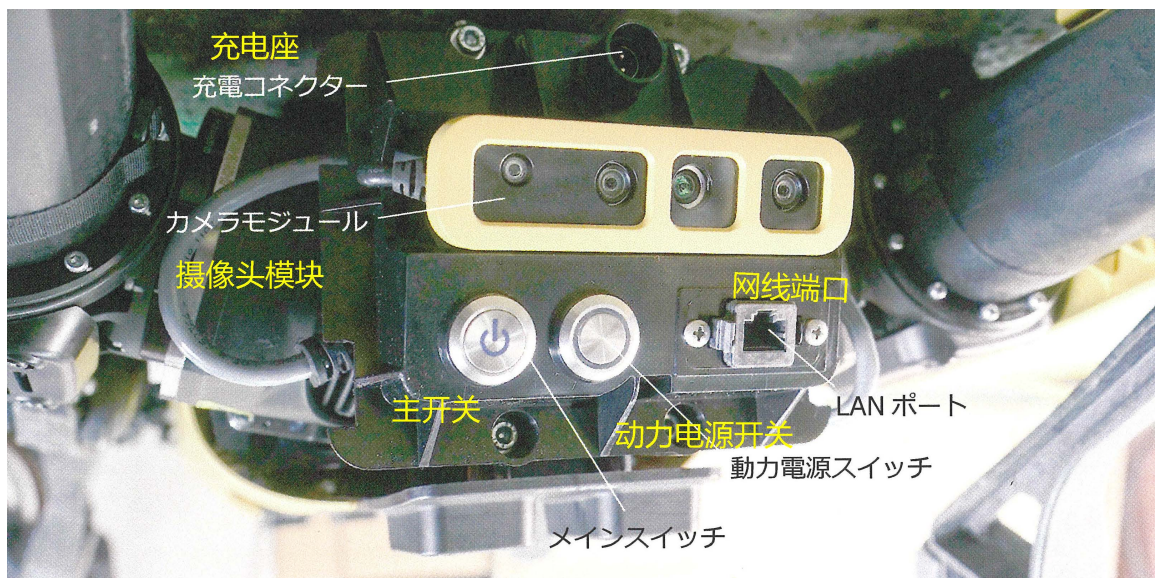


图 4.23: 后机架 后机架配备了摄像头模块、主开关、电源开关、LAN端口和充电座。在这下面有和前机架一样的对后腿的驱动电机部分进行冷却的风扇。(照片:加藤康)

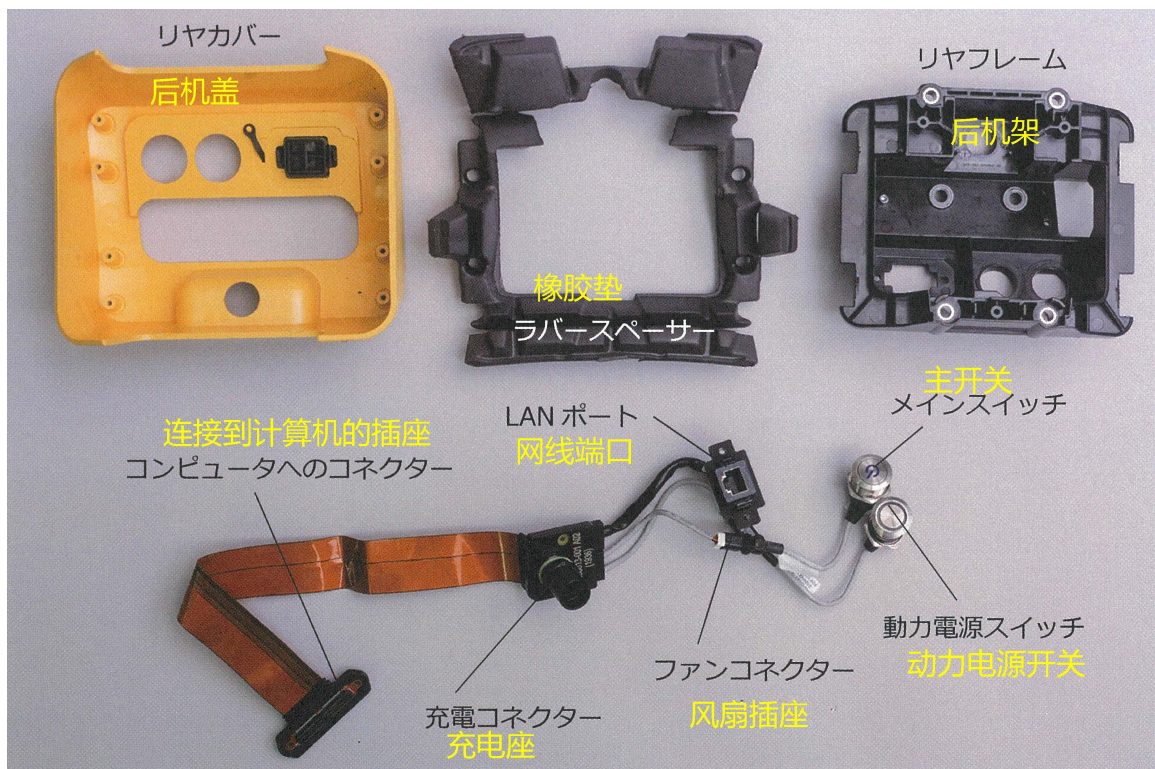


图 4.24: 后部组件 后机盖倒置放置。(照片:加藤康)

4.2.5 上面板

上面板是封闭中心机架顶面的面板，与中心机架一样，由玻璃树脂注塑成型而成(图 4.25)。背面精心设置了加强筋，并增加了连接紧固凸台的斜筋，这似乎是为了增加表面刚度。

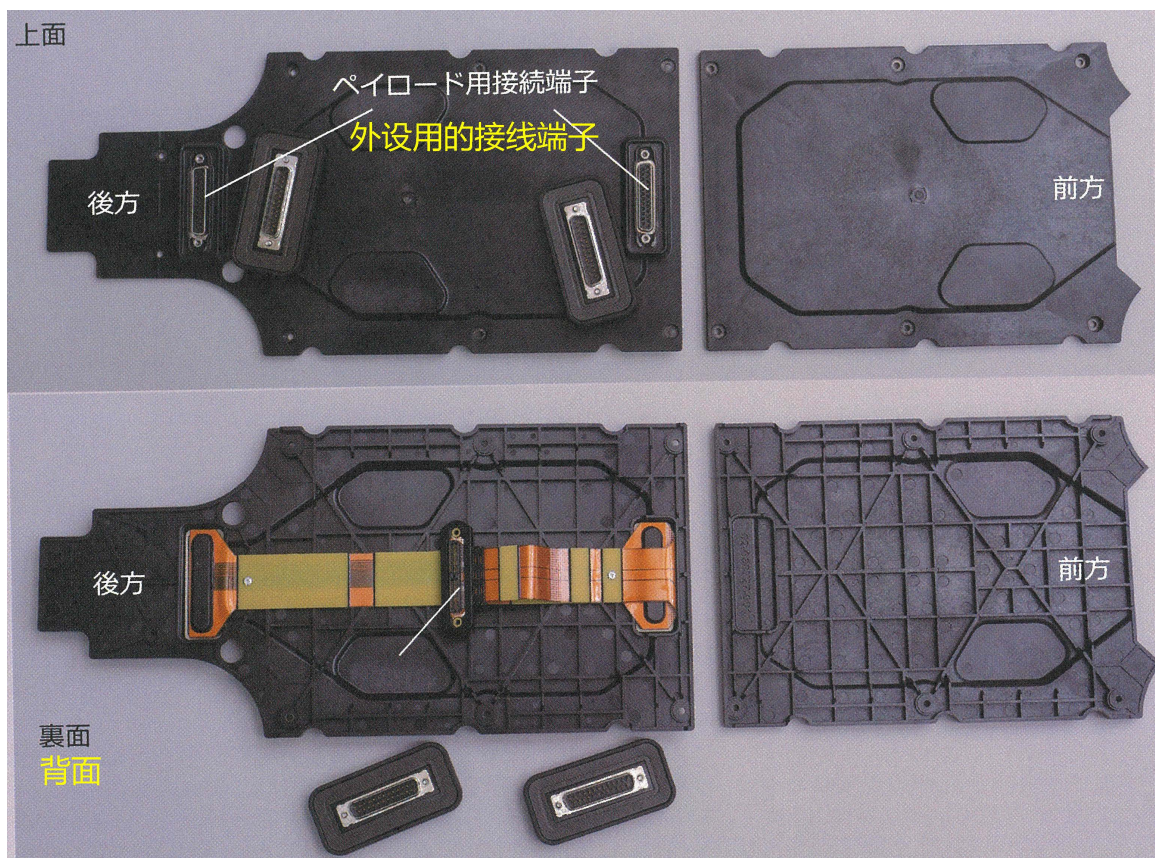


图 4.25: 上面板 它被安装用来封闭主机架的顶面。通过含有玻璃纤维的注塑成型提高刚性。(照片:加藤康)

中心机架和上面板实现了箱形机架结构，但该面板对扭转方向的刚度贡献很大(图 4.26)。当用4条腿行走时，成对的对角腿支撑着重量，而又轮流用另一组支撑负载。也就是说作为箱形机架，不断像拧抹布一样的反复扭转的负载在起作用。这个面板是主要负责支撑那个扭矩，配合面板对抗扭矩的是安装计算机模块的机箱中央的隔板。由箱体的侧面和这些上下表面组成的闭合截面形成扭矩管，并通过面内剪切力抵抗扭转方向上的载荷。虽然通过安装计算机模块进行加强了，但是这个扭力管的高度很低，没有看起来那么坚固。上面板似乎是设计成适合机箱来弥补如此低的刚度。这部分没有密封，接线端板和从它延伸出来的线束部分没有防水密封。



图 4.26: 箱形机架结构 Spot的“主干”对应的结构是一个箱形机架。下部有一个大开口用于电池和主计算机，因此只有内部隔板的上部作为扭矩管有效。(照片:加藤康)

4.3 腿部

4.3.1 腿部整体视图

作为四足行走机器人的先驱，Spot的“腿”驱动系统如图 4.27所示的腿驱动组件构成。



图 4.27: 脚部整体状况 四足步行机器人Spot最具特色的是腿部驱动组件。充分利用这四条腿，可以在各种地形上行走。(照片:加藤康)

如果出现故障，腿部是可以与腿驱动组件一起更换的构造(图 4.28)。肩部附有一条用来提起Spot身体的提手带，虽然重约4 kg，但它非常容易搬运。驱动器通过两个旋转轴(X轴和Y轴)和一个线性运动轴(膝部)实现“行走”的行为。腿部模块的机械设计很在意细节，完成度很高。



图 4.28: 腿驱动组件的机构 实现四足行走的腿是基于2轴旋转和1轴线性运动。因此，每条腿有3个驱动电机。虽然旋转驱动和线性驱动的减速机不同，但3种电机的设计都是一样的。(写真:加藤康)

4.4 防水防尘措施

4.4.1 预期使用环境

Spot由波士顿动力公司在国防高级研究计划局(DARPA)的支持下开发，这是一种大型军用机器狗(图 4.29)。由于它首先是军事用途的必需规格，因此要求它足够强大，以在任何不利的环境或情况下执行其任务。因此，我们对这款机器人的印象是一台坚固的机器，可以在危险的地方或人不能去的陡峭地方在无人值守的情况下执行任务。

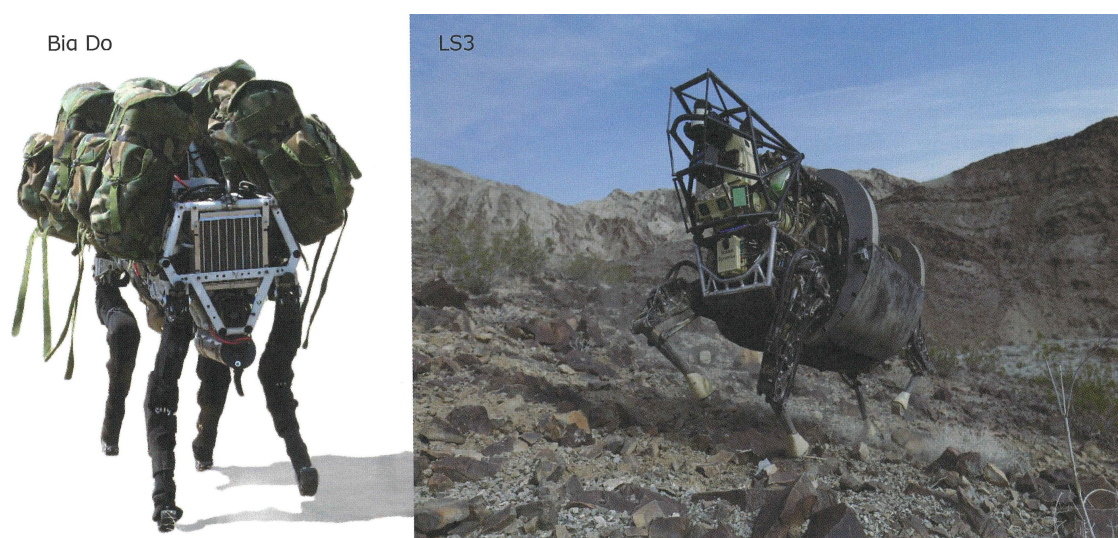


图 4.29: Spo的祖先们 在DARPA的支持下，波士顿动力公司开发了四足机器人“BigDog”(2004)和“LS3”(2010)作为军事研究。两者都是非常强壮和健壮的形象。(照片:Boston Dynamics的网页)

与此形象不同，Spot容易受到恶劣环境的影响。根据使用说明书，步行水深可达膝关节。在雨中行走也是禁止的。换句话说，在晴朗的日子里，可以走过很深的水坑，但很难穿越可能被淹没的河流和沼泽。笔者们在对Spot进行运行测试时无意中让Spot被淹没并导致故障。淹没是指整个身体从背部浸入水中。虽然它变得无法操作，但结果，我们能够评估Spot各个部分的密封功能。

4.4.2 各部分密封

根据评估冗余度的测试计划 (图 4.30)，我们在海边的沙滩或潮湿的楼梯上进行了跑步实验，但掉入了当天被大雨淹没的水道并被淹没。每个零件都经过拆卸、干燥和检查维修。从结论来看，包括电连接线端子在内的许多地方都发现了进水 (图 4.31、图 4.32、图 4.33、图 4.34、图 4.35)。

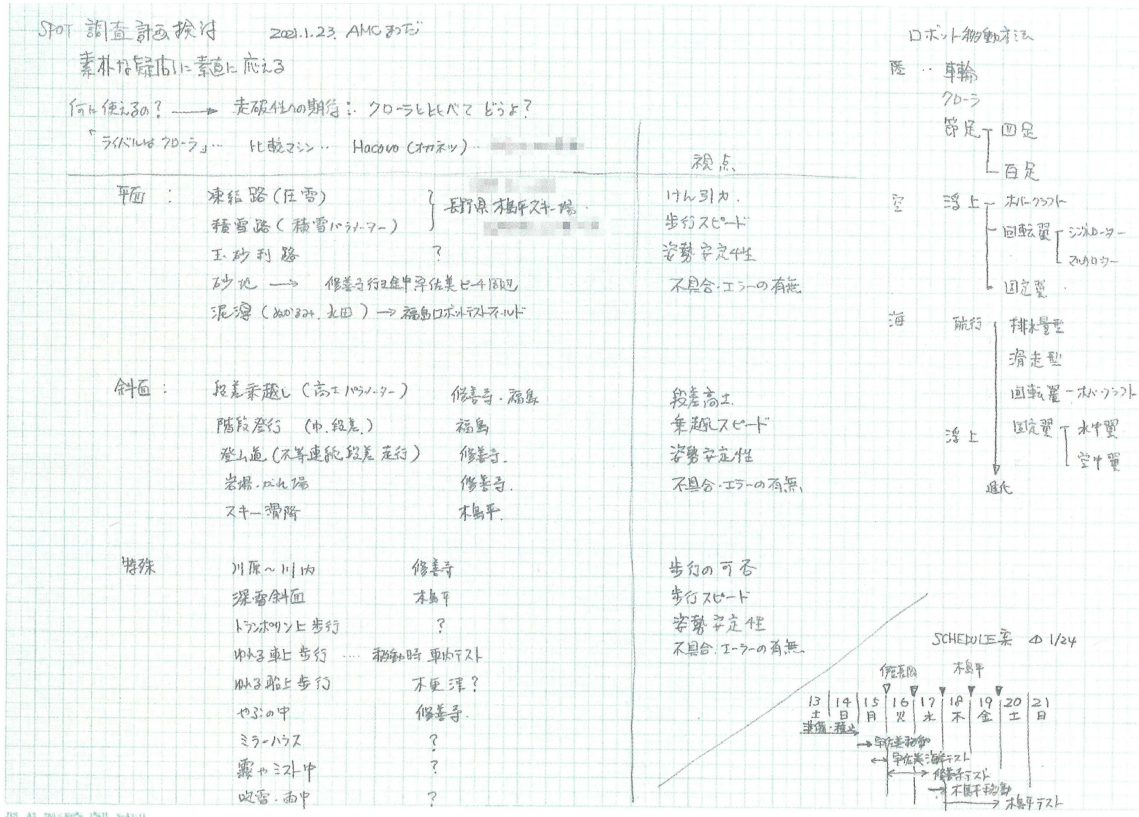


图 4.30: 测试计划 计划在崎岖的道路上行走，例如不平坦的地方和湿滑的地方。(制定:松田篤志)

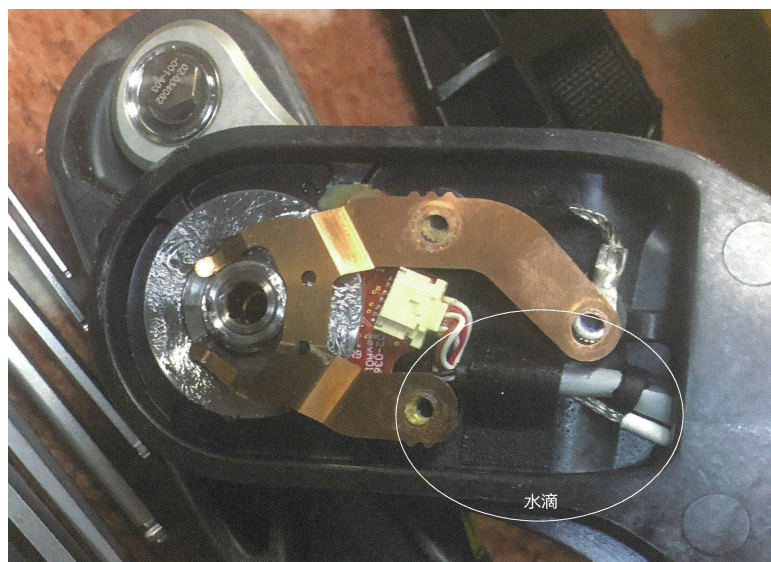


图 4.31: 膝关节编码器部分 测量腿旋转角度的编码器安装部位。观察到水滴。(照片:Nikkei Cross Tech)



图 4.32: 编码器盖 编码器盖。用O型圈密封的，但不能指望与棱角部分紧密接触，所以很容易产生间隙。(照片:Nikkei Cross Tech)

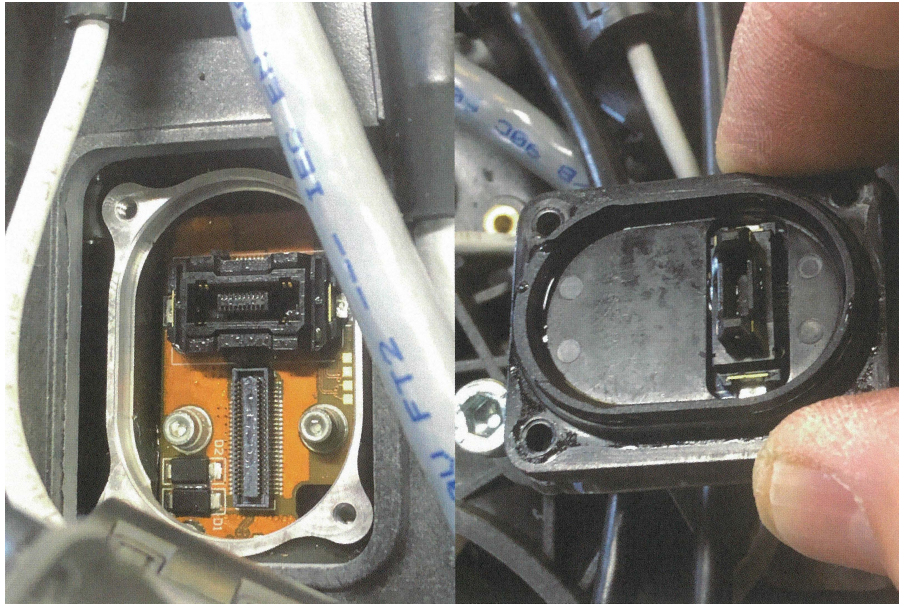


图 4.33: X轴驱动的接线端子 X轴驱动电机接线端子部位。用O形圈密封, 但看到很多水滴。(照片:Nikkei Cross Tech)

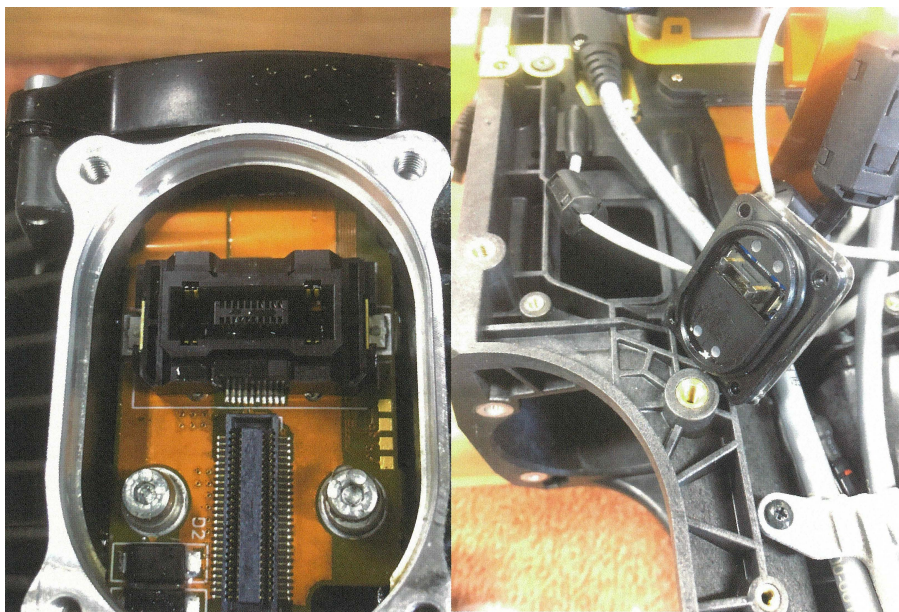


图 4.34: Y轴驱动的接线端子 Y轴驱动电机接线端子部位。这里还观察到进入了许多水滴。(照片:Nikkei Cross Tech)



图 4.35: 直接浸没后的电池仓 电池仓本身没有密封功能，很多水滴附着在接线端子周围。(照片:Nikkei Cross Tech)

4.4.3 课题

在运行测试中，不幸的是第一天就遭遇大雨，然后用在雨停的间隙方式进行，结果Spot被淹没了。所幸的是主计算机等中央控部分正常启动，于是我们试着把各个部分拆开清洗晾干。在这个过程中Spot出现的防水防尘问题如下。

- (1) Spot的防水设计是“随着感觉走的”
- (2) 接线端子本身不防水
- (3) 密封件和接线端子的选择并没有假设它们会被多次拆卸和组装。

关于(1)的防水设计，虽然在努力，但并不彻底。密封处于防尘密封水平，没有采取如安装呼吸器等严格的防水措施。此外，在Spot中，反复拆装经常会损坏螺丝和接线端子。就工业设备而言，它必须能够承受恶劣环境下运行过程中的反复维护和清洁，以基本的耐用性为基础。只有它的韧性，才能作为可靠的无人机械送到工地。如果发送到危险场所的机器出现故障并停止工作，则别无选择，只能放弃它。生存能力对于无人机来说也很重要，而维持其生存所需的正常维护的简便性和可靠性支撑着它们的支柱。从这个角度来看，Spot还没有达到如此可靠的无人系统的程度。

第 5 章 机械零件

5.1 整体视图

5.1.1 腿部驱动组件配置概述

Spot作为可移动工具(移动体), 它的驱动与四足动物相同, 由4个摆动的四肢进行。从历史上看, 人类创造了多种移动方式。工业革命之前, 发明了“动力”, 利用地面上运动阻力小的圆柱物体(如用于金字塔建造的运石的滚轮)免受动物拖曳等, 并转移到轮子上。发明了马车和汽车。通过工业革命, 人类发明了一种发电方式, 从而设计出一种通过转动或“驱动”“车轮”来自由移动的方式。目前, 轮子几乎无一例外地用于在地面上移动的移动设备, 例如铁路、汽车、两轮车和自行车。环形履带(履带)是车轮的衍生机构, 通过扩大车轮的表面来扩大接地面积并降低路面压力, 从而显着提高行驶性能。

另一方面, 轮驱动系统的运行性能在各种地表条件下仍不及野生动物。当在电视上看到鹿在陡峭的悬崖上自由移动的山区生态时, 令人觉得奔跑性能的极致是四足行走。林业有一种“马搬”, 用马匹进行木材搬运, 但它在崎岖路面上行驶的能力最强, 牵引力最强, 小型电动机械根本无法与之相抗衡。

Spot的制造商波士顿动力公司一直在开发一种四足步行机器人作为美国的军事研究已经有一段时间了。该公司最早对外发布的四足步行机器人，是一种像牛一样的大型机器，使用了发动机。步行尽可能接近生物。在那之前，步行机器人(例如本田的“ASIMO”)的动作笨拙到看起来像“机器”，而波士顿动力公司的“牛”则完全不同，虽然引擎的声音告诉我们它是人造物，但怎么看它都可能看起来像就像一头真正的正在奔跑的牛。之后，它变得越来越小型化从“牛”变成了“狗”，并电动化投放到了市场。那也是Spot的四足行走机构是最有特色也最有趣的地方(图 5.1)。



图 5.1: 展现惊艳“肉体之美”的Spot 利用4条腿的独特性，问腿和腰的力量能完成多少任务。(照片:加藤康)

腿驱动组件重约4.2 kg。3套电机、2套减速机、滚珠丝杠执行器、机壳等核心部件集中在轴的根部部位(图5.2)。但是,由于从肘部(膝盖)开始的加速和减速较大,因此必须考虑减轻重量。此外,由于支撑+移动整个重量的大载荷起作用,因此腿部采用含玻璃填充树脂成型,旨在实现轻量化和高刚性。4组单元中的每1组都通过梅花头上的4颗M5螺栓和4颗尼龙螺母固定在如图5.3所示的中心机架的固定部分上。

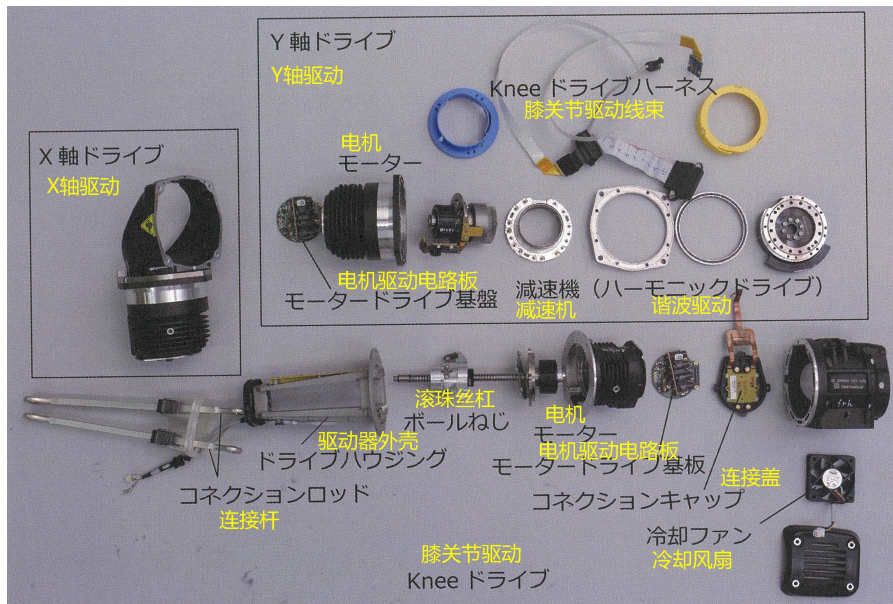


图 5.2: 腿驱动的构成 显示了驱动4条腿的整个机构。有2个旋转轴X和Y是谐波驱动的大型减速电机驱动。在那个尖端通过移动腿的线性执行器会产生4条腿的动作。(照片:加藤康)

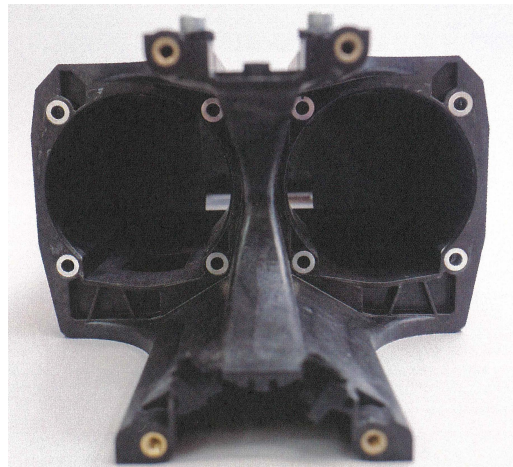


图 5.3: 腿固定部分 中心机架的正面视图。Spot的腿驱动组件通过围绕这个圆孔的4个螺栓固定到机架上。换句话说,所有方向和大小负载都由这4个孔接收。紧固是梅花头M5的螺栓螺母。(照片:加藤康)

驱动用的机构为X轴和Y轴是电机和50: 1减速比的谐波驱动，Knee(膝)是使用与X轴和Y轴相同的电机的一种滚珠丝杠线性执行器。包括外壳和驱动电路板在内都是专用的设计。对于电气连接，X轴从接线端板独立连接到线缆。Y轴及Knee通过接线端板的接线端子和Y轴接线端子的线缆连接，Knee通过旋转Y轴的内部连接到驱动电路板(图 5.4)。



图 5.4: 膝关节驱动线束 驱动膝关节驱动系统前端的线性执行器的线束通过摆动的Y轴进行连接。接线端子和触点使用安装在电路板上的产品。膝关节驱动线束延伸到右侧照片下方可见的蓝色电路板。(照片:加藤康)

膝关节驱动线束通过扁平线缆连接到膝驱动接线端子(图 5.5), 扁平线缆以蕨类植物螺旋圈(fern-like spiral)的形状缠绕在Y轴内。通过卸下将膝关节驱动单元连接到铝制外壳的法兰上的8个M3内六角螺栓并断开此线缆, 可以分离膝关节驱动单元(图 5.6)。因为装有膝关节驱动机构的圆筒和M3螺栓孔很近, 不能使用棘轮扳手, 需要用L形六角扳手一点一点松开, 拆装可操作性差(图 5.7)。



图 5.5: 卸下膝关节驱动装置的法兰 需要拆下固定膝部驱动单元的法兰的12个M3螺栓。(照片:加藤康)



图 5.6: 分离膝关节驱动单元 X轴和Y轴(旋转轴)驱动单元和Knee驱动(线性运动)分离。(照片:加藤康)

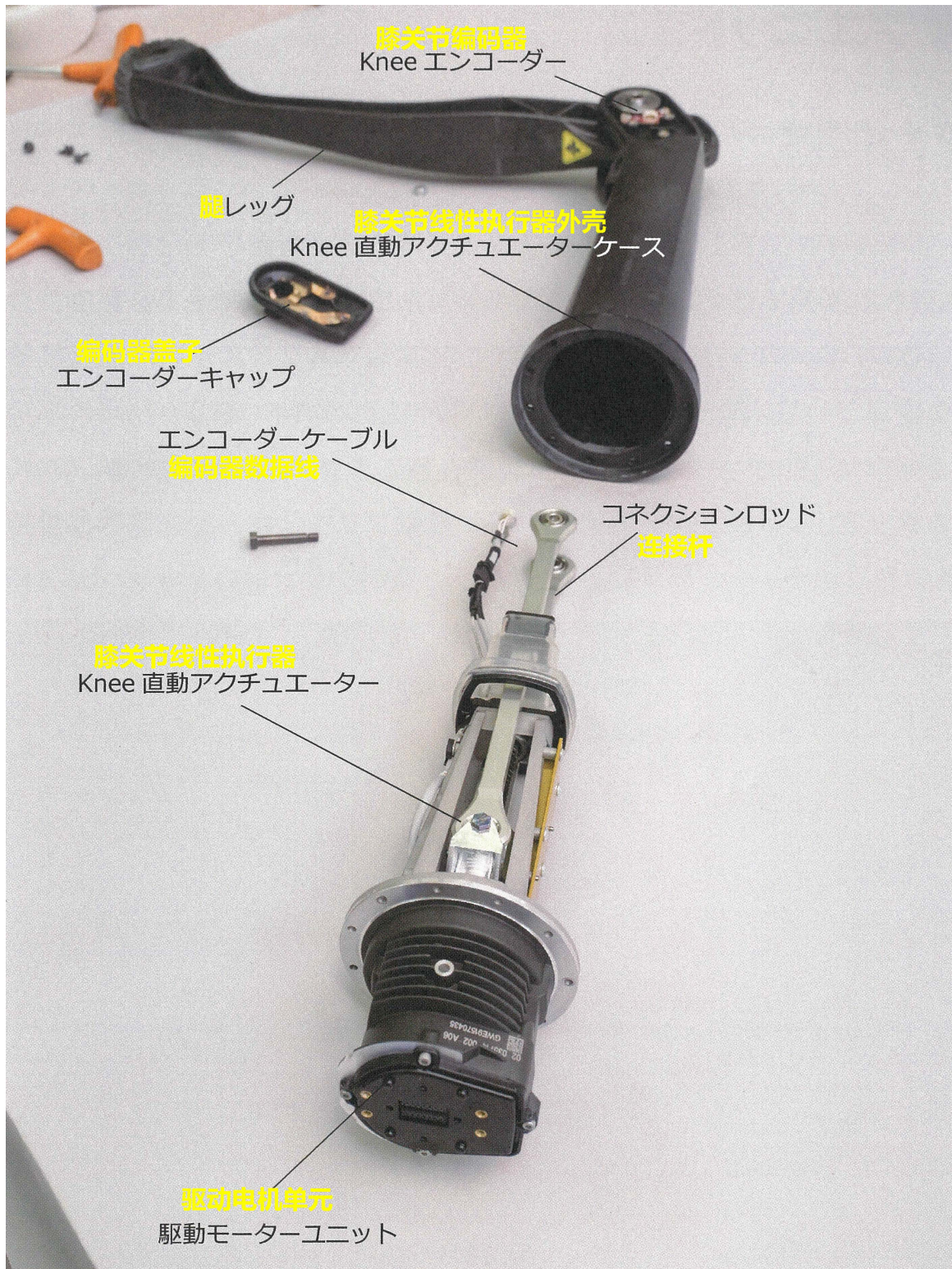


图 5.7: 膝关节驱动部分的拆解 膝关节驱动系统是带有滚珠丝杠的线性运动系统。关节部分设有测量膝关节运动角度的编码器。(照片:加藤康)

5.2 膝关节驱动单元

5.2.1 膝关节驱动整体结构

可以通过断开由Knee(膝)固定的杆端和连接到Knee编码器的线缆，拉出作为Knee驱动器核心的线性执行器部分。线性执行器将电机的旋转传递给滚珠丝杠，与滚珠丝杠啮合的滑块做直线移动，并将旋转转换为线性运动。图 5.8显示了Knee系统的整体结构。左边的黑色部分是电机，由它转动的长滚珠丝杠送出的滑块在中央，并附有2根在膝盖下方摆动的杆。由于线性执行器进行直线运动，膝盖下方的另一侧进行圆周运动，因此它由透明硅胶帽和黑色密封胶轻轻支撑以跟随运动。

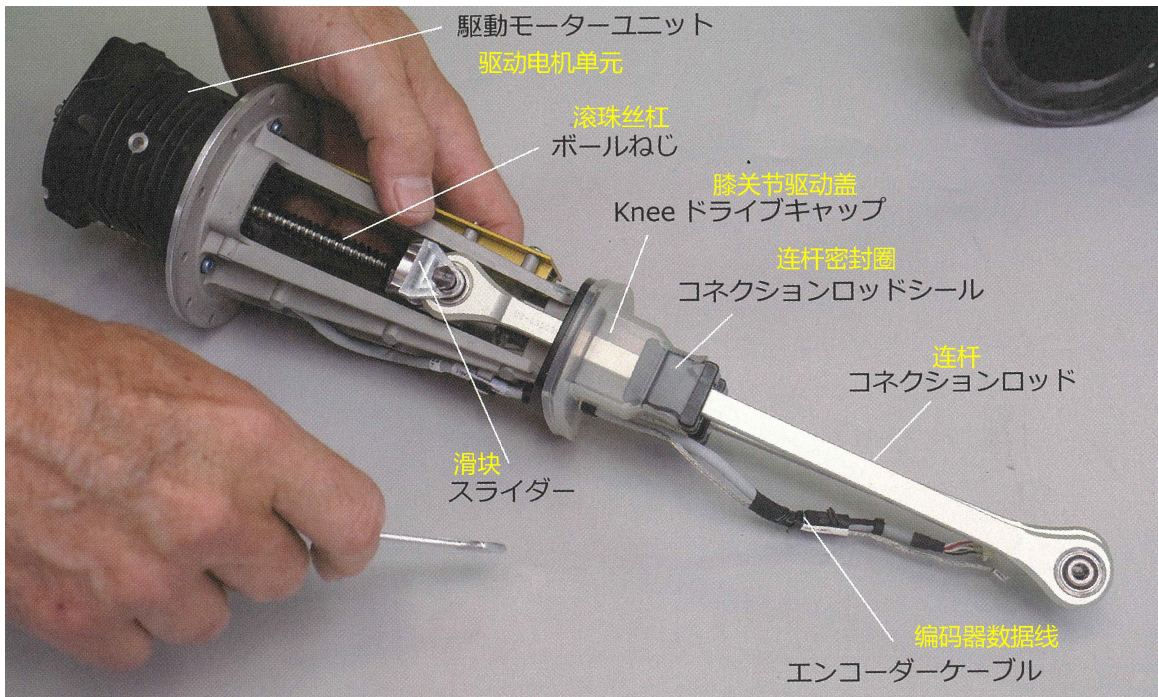


图 5.8: 膝关节驱动单元的线性执行器 基本结构是一般的滚珠丝杠直线运动机构。Spot的独特之处在于，一般通过在滑块部分安装编码器来测量位置，而Spot直接通过旋转轴的编码器来测量要操作的膝部本身的角度。(照片:加藤康)



图 5.9: 线性执行器的拆卸 可以通过拆下固定电机单元和线性执行器外壳的4个螺丝，然后断开编码器连接器将其分开。(照片:加藤康)

5.2.2 滚珠丝杠部分

一般的线性执行器系统具有通过电位计等编码器测量与滚珠丝杠啮合的滑块位置的机构。但是，Spot用的是通过膝盖旁边的编码器测量旋转角度的机构(图 5.10)。在中央的计算机中，它似乎是直接用指令实现膝盖的旋转角度。由于中间介入的零件少，因此可以静态和动态地发送指令和测量准确的位置，因此推测反应速度快。为了准确控制身体重心的位置并保持稳定，可能需要膝盖的高响应频率。虽然这次无法测量，但通过掌握各个转轴对负载的响应特性，可以看出步行机器人的腿部所需的响应速度。

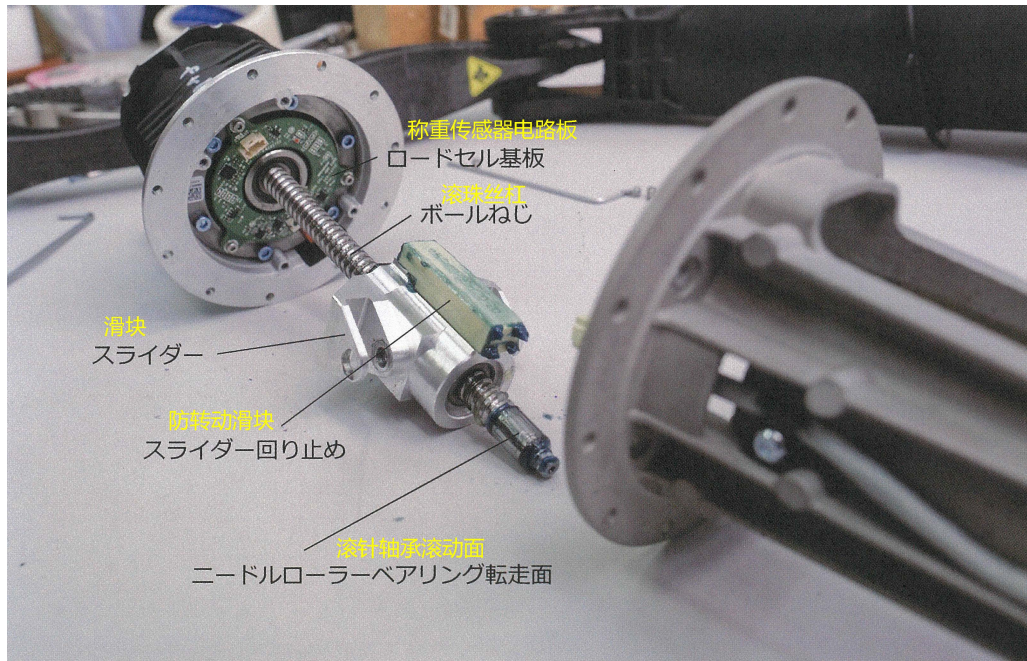


图 5.10: 滚珠丝杠驱动部分 滑块安装在中心的滚珠丝杠上。它上面的立方块是一个防转动滑块。滚珠丝杠的前端由滚针轴承固定。(照片:加藤康)

5.2.3 称重传感器电路板

拆下膝关节驱动的线性执行器侧的杆头，通过从膝关节的编码器断开连接到中央板的线缆的接线端子，可以将电机和滑块分开。连接到电机外壳的电路板是用于测量驱动负载的称重传感器电路板(图 5.11)。

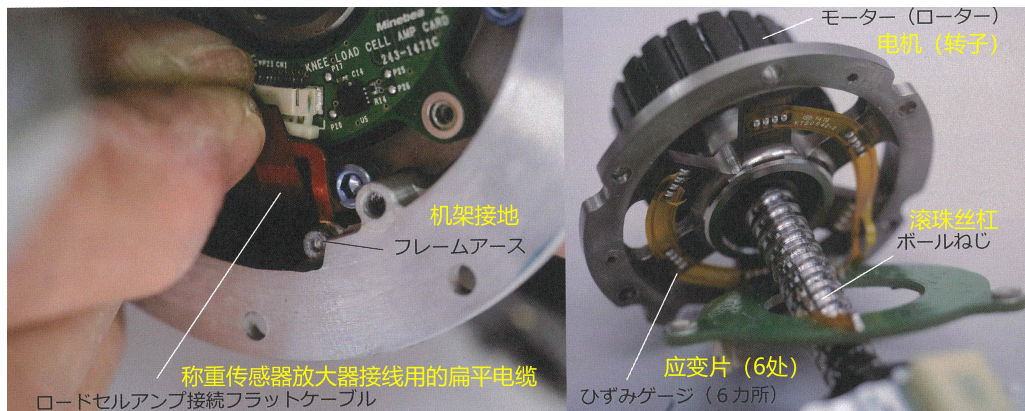


图 5.11: 称重传感器电路板 施加在电机轴承上的载荷由陆地轴承支架的应变计测量。可以在电路板上看到“Minebea”和“KNEE LOAD CELL AMP CARD”的丝印。(照片:加藤康)

扁平线缆焊接到6个肋条上，这些肋条支撑着负责板下滚珠丝杠推力的轴承座。其上安装了应变片，推测是用于测量移动膝盖的推力。这是因为X轴和Y轴电机没有这种机构。电路板上印有“Minebea”的丝印。“Minebea”是小直径轴承的领先制造商，也是称重传感器的领先制造商。

Spot因淹没而停止工作，但在其维修工作中，直到最后仍然存在的错误是称重传感器错误。看这个结构，由于应变片部分受潮而最终无法去除水分，从而偏离了原始电阻值，或是由于意外电流流过桥式放大器导致该桥式放大器测量因溢流或短路而产生的小电流失真，可以认为很可能是这个称重传感器放大器板出现故障。应变片对湿度极为敏感。

通过从称重传感器放大器电路板上的接线端子和电机驱动器电路板上的接线端子上拆下扁平线缆，可以拆除与盖板一体的接线单元(图 5.12)。这个盖子上的接线端子连接已穿过Y轴电机外壳的Knee驱动用的信号和电源。扁平线缆分为2个系统，一个用于电机驱动系统，另一个用于称重传感器放大器，从称重传感器放大器侧的末端附近分支的部分用螺丝固定在铝合金电机外壳上，形成机架地线。



图 5.12: 膝关节驱动板线缆 它分为电机驱动器和称重传感器放大器2个系统。(照片:加藤康)

5.2.4 膝关节驱动用电机

膝关节驱动系统的驱动电机有一个安装在铝压铸外壳中的定子(图 5.13)。定子有18个槽。绕组为集中式绕组。在背面,线圈的“U”、“V”和“W”相的接线触点通过120度分布露出来,这些接线触点与驱动电路板侧的接线触点直接相连。由于每个线圈应分布在6个槽中($3 \times 6 = 18$),所以这个端子和定子线圈之间好像存在一块电路板或母线。电机的驱动电路板的中心有一个霍尔IC,它面对着附着在电机轴中心的磁铁,用来检测电机旋转角度的位置。

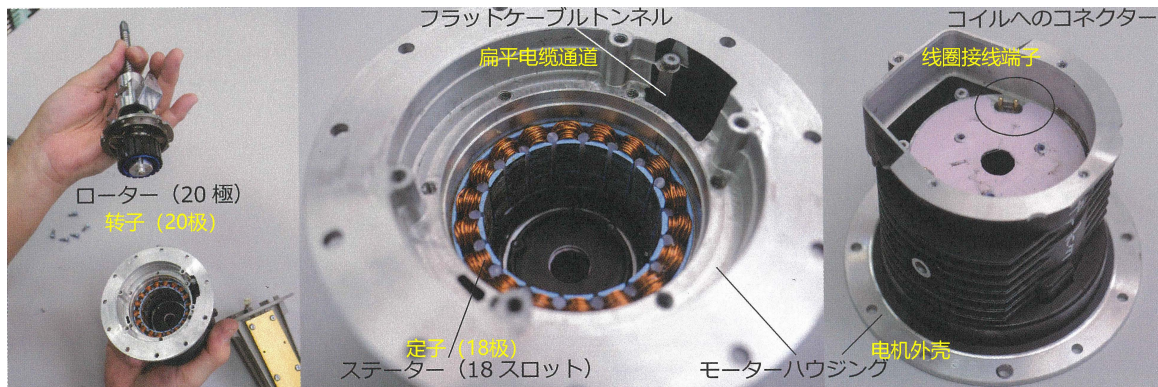


图 5.13: 膝关节驱动电机本体 定子线圈用粘合剂固定在铝压铸外壳上。(照片:加藤康)

图 5.14、图 5.15中显示了驱动20槽18极同步电机的逆变器电路板。它由一个圆形紧凑的电路板和为了确保外部浪涌电流的外置电解电容组成。电路板上的电路对应UVW驱动电机的3相，圆周上有3个分区，以120度为间隔进行的图案设计，电机的输出直接从电路板连接到线圈到电机的每一相，无需使用线缆。

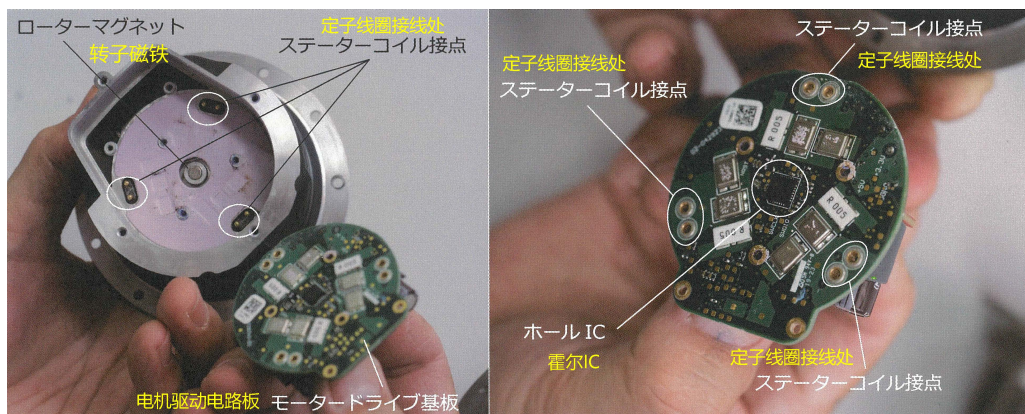


图 5.14: 膝关节驱动的电机驱动电路板的A面 只需安装此电路板，即可同时完成电机定子线圈连接和旋转相位测量霍尔IC的设置。(照片:加藤康)

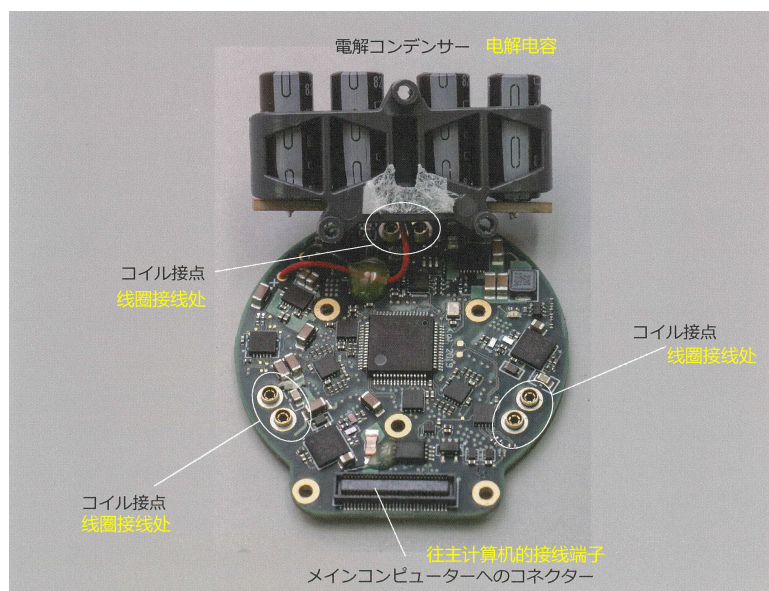


图 5.15: 膝关节驱动的电机驱动电路板的B面 紧凑且功能齐全的电机驱动电路板。电机本身的结构与X轴和Y轴电机相同。(照片:加藤康)

霍尔IC放置在背面的中央，与连接到电机转子端的磁铁彼此面对以测量旋转相位。该电机通过电源和输入旋转指令信号工作。据推测给电机的指令的目标值是编码器的目标位置(膝盖的角度)。

20块磁铁直接粘附在经过蓝色氧化铝处理的电机的转子凸台表面(图 5.16)。也就是说，该电机是20极18槽的SPM (Surface Permanent Magnet) 型同步电机。中间的铝色部分是用于将磁铁固定在中间的支架。中心磁铁是通过对面电路板上的霍尔IC来测量转子的旋转相位。电机的这一侧没有轴承。



图 5.16: 膝关节驱动电机转子磁铁和霍尔IC 电机转子端磁铁与电机驱动板中央的霍尔IC相对，测量转子的旋转相位。(照片:加藤康)

轴承是滚珠丝杠的尖端和转子背面的电机盖这2个承受结构构成。如果在电机滚珠丝杠的相反一侧准备轴承，并在长轴侧附加支撑并以这种方式组装的轴承，则该轴承会干涉而不能顺利旋转，除非确保良好的同轴度。因此，该结构可能没有在滚珠丝杠的相反侧设置轴承。虽然有些多余，但是这个磁铁固定架的零件号是激光雕刻成的扇形，设计的很精致。

5.2.5 连杆周边

图 5.17显示了支撑滚珠丝杠直线运动侧的机架。机身由铸造铝合金制成。在前端安装了支撑滚珠丝杠前端的滚针轴承。前端的树脂零件是用于固定密封部分的零件。该密封部分柔软地支撑连接到线性移动滑块的2个杆件。连接到测量膝盖角位移的编码器的线缆也通过该树脂组件和垫圈从驱动系统内部拉出(图 5.18)。如果仔细观察,会发现信号线的线缆和一根地线在索环外面穿过。这显然是一个改造后的应对规格。是努力对抗噪音的痕迹吧。

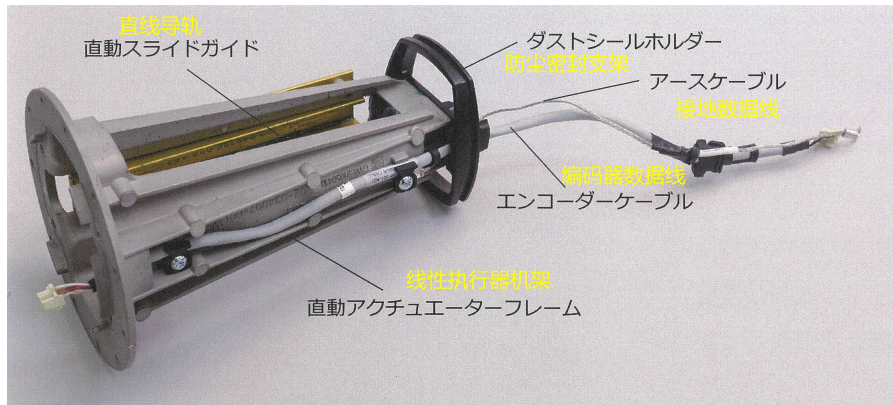


图 5.17: 线性执行器机架 执行器的线性运动侧的机架。在这里将滚珠丝杠的旋转运动转换为直线运动。(照片:加藤康)

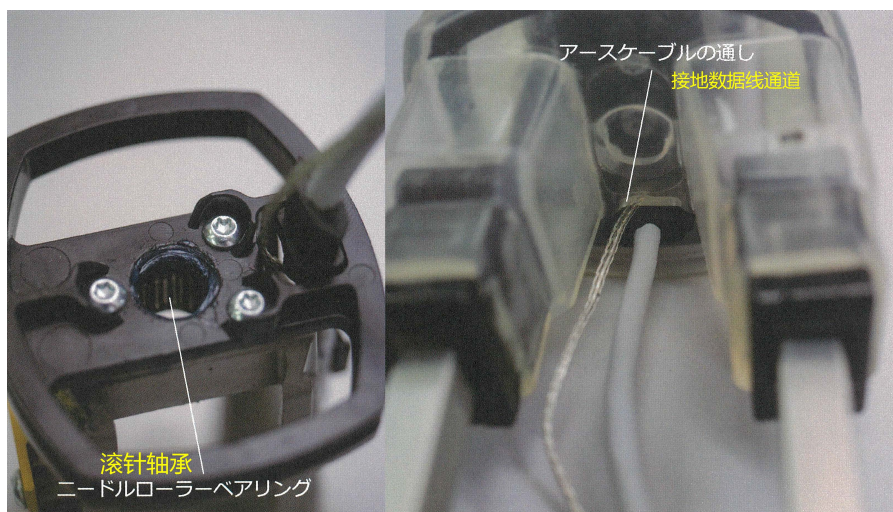


图 5.18: 膝关节线性执行器铝制机架的前端 在前端可以看到滚针轴承。在这上面的是硅防尘密封。网状接地线在线缆通路外侧通过。(照片:加藤康)

杆件的固定部分有一个黑色滑动密封零件，安装在硅胶盖中(图 5.19)。其结构包括在杆件的每个横截面的周围滑动并包裹的白色毛毡，杆被夹在中间并被黑色树脂制的外壳固定。白色毛毡似乎没有被油浸透。

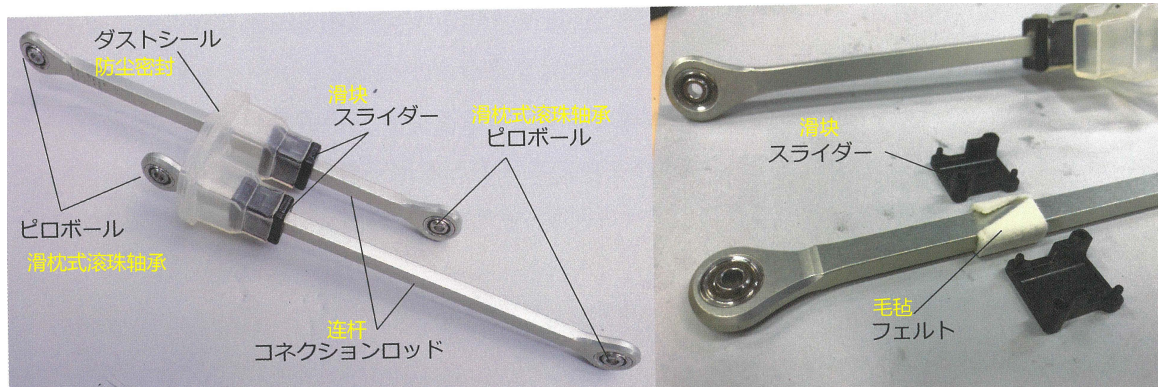


图 5.19: 连杆的周边 采用在加工好的铝棒两端压入滑枕式滚珠轴承的结构。带有防尘密封的滑动部分将毛毡与注塑成型的树脂零件夹在中间。(照片:加藤康)

杆件一根一根经过特殊设计加工，球头(枕球)压入两端。在具有圆形截面的铝杆件的两端使用现成的杆头结构在成本和质量方面应该是有利的，目前尚不清楚为什么采用方形横截面。当认真考虑密封时，方形横截面显然是不利的。

5.2.6 线性执行器外壳周边

图 5.20显示了用加入玻璃注塑树脂成型的线性驱动器的外壳，同时它也是支撑膝盖下方的机架。由于需要保持膝盖以下承受大负荷，因此它在强度和刚度方面都非常坚固。有让2根连杆和测量膝部旋转角度的编码器的线缆通过的开口部分，分别从密封件和垫圈穿过(图 5.21)。由于这里设计和组装工作的复杂性，无法预期密封的稳定性。



图 5.20: 膝关节驱动单元线性执行器外壳 对应于手臂的骨架。外骨骼包含肌肉(执行器)。结构与蟹腿相同。测量轴角度的编码器位于尖端。(照片:加藤康)



图 5.21: 膝关节驱动单元线性执行器外壳的内侧 有让线性执行器的两个连杆杆头通过用的窗口和右边有让编码器线缆通过用的窗口。(照片:加藤康)

编码器具有磁码盘根据膝盖的角度进行旋转并用霍尔传感器测量的结构 (图 5.22、图 5.23)。



图 5.22: 膝关节驱动编码器结构 与膝盖角度相连的磁码盘的角度由霍尔IC测量。盖子那侧的铜板是将带在腿上的静电释放到车身那一侧的接地。黄色标签提醒人们注意夹手指。(照片:加藤康)

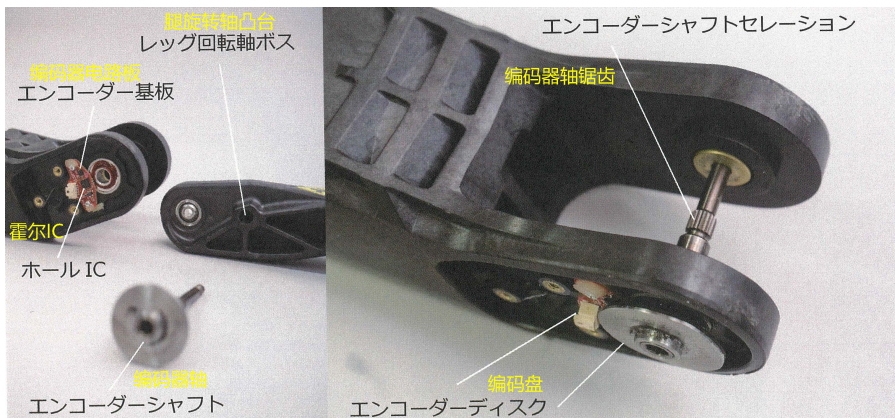


图 5.23: 腿部编码器的详细信息 带有集成圆盘的旋转轴通过锯齿压配合到膝盖的旋转轴中。霍尔IC安装在红色电路板上，用于测量磁码盘的旋转角度。(照片:加藤康)

5.3 Y轴驱动单元

5.3.1 Y轴驱动构成

图 5.24显示了从腿驱动组件上拆下的膝关节驱动单元。右侧的铝压铸外壳是膝关节驱动支架。正面的圆形法兰是与Y轴驱动单元配对的接头。



图 5.24: 膝关节驱动支架 对应于肩关节或髋关节的2轴旋转单元。线性执行器机构连接到法兰的端面。(照片:加藤康)

与Y轴驱动单元的连接是通过8个紧固螺栓实现的。由于安装法兰的直径比支架小，必须用长六角扳手从对面穿过支架转动(图 5.25)。

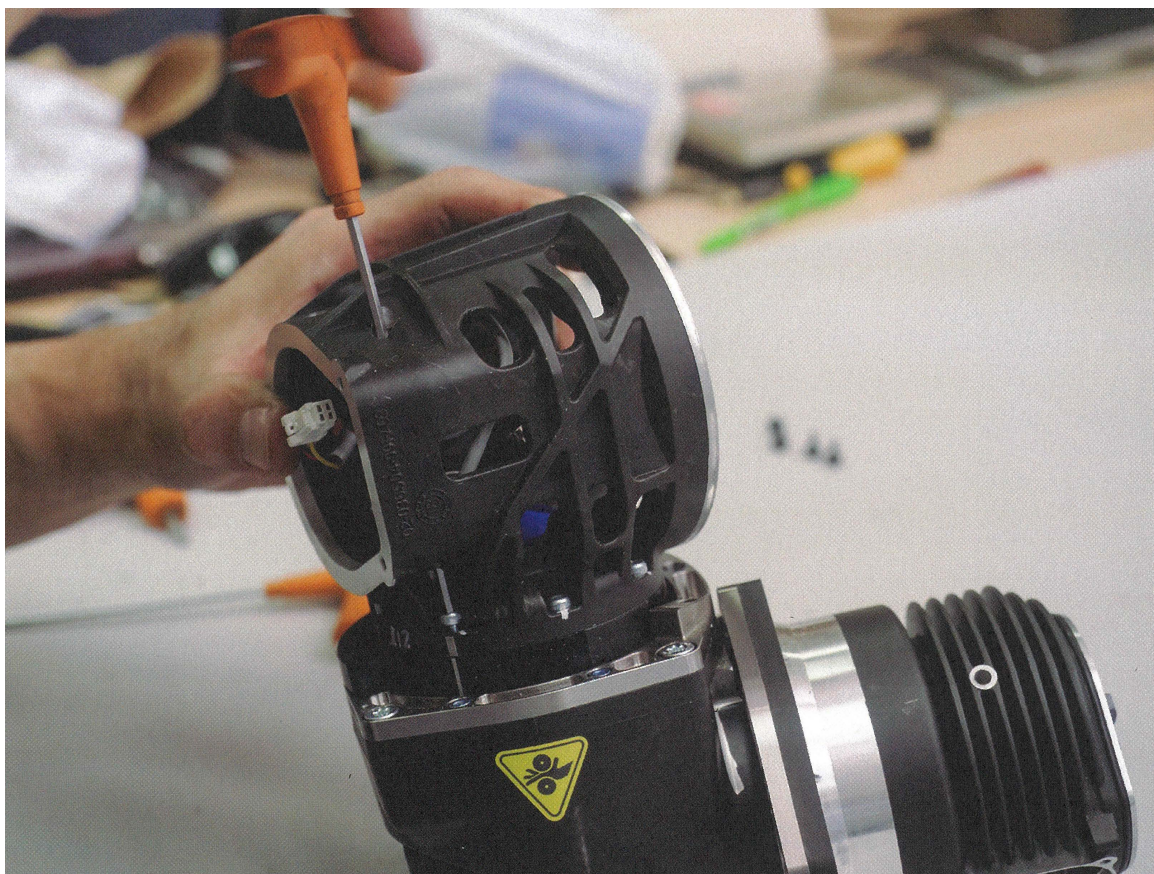


图 5.25: 膝关节驱动支架螺栓 必须通过工具松开将膝关节驱动器连接到Y轴的螺栓。(照片:加藤康)

Y轴驱动单元、X轴驱动单元和Knee驱动单元布局紧凑，没有任何间隙(图 5.26、图 5.27)。



图 5.26: X轴和Y轴驱动构成 为实现复杂的腿部运动，各轴布局合理紧凑。(照片:加藤康)

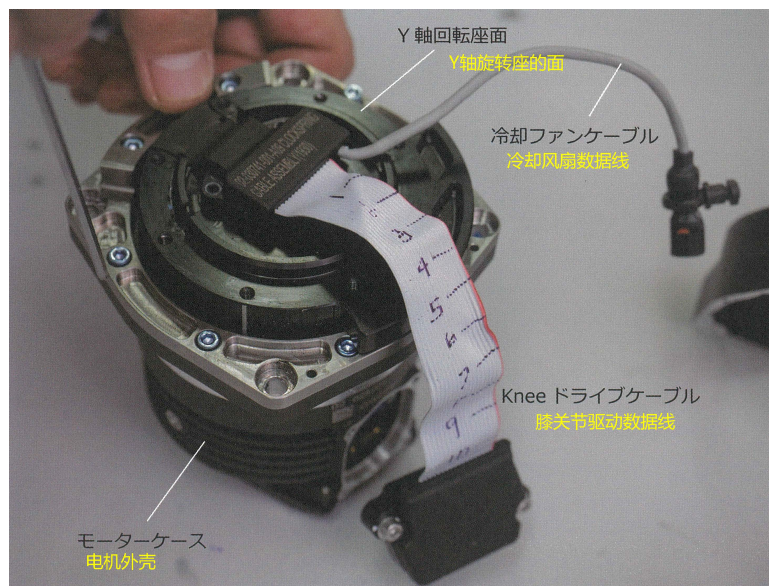


图 5.27: 从膝关节驱动这一侧看Y轴驱动单元 拆下法兰周围的8颗螺栓即可拆解。线缆上有马克笔写的刻度，但这些标记的含义未知。(照片:加藤康)

Y轴驱动单元可以通过卸下法兰上的8个M4螺栓来拆解。当打开盖子时，会出现谐波驱动。白色带状带为膝关节驱动的扁平线缆，由黄色和蓝色导轨引导，以免干扰内部管状谐波驱动旋转系统，像蕨类植物一样按螺旋圈的样子进行缠绕和存放(图 5.28)。由于工作角度小，电信号通过这种原始方法而不是滑环传输到旋转的目的地。



图 5.28: Y轴驱动内部结构 在机器人的驱动机构中安装谐波驱动器是很常见的。扁平线缆以螺旋圈的形状缠绕在其周围，可以允许角位移。这些是汽车转向等常用的机构。(照片:加藤康)

这根膝关节驱动用的扁平线缆连接到主体。它与Y轴驱动接线端子共用相同的接线端座和线束，并通过接线板连接到主计算机(图 5.29)。

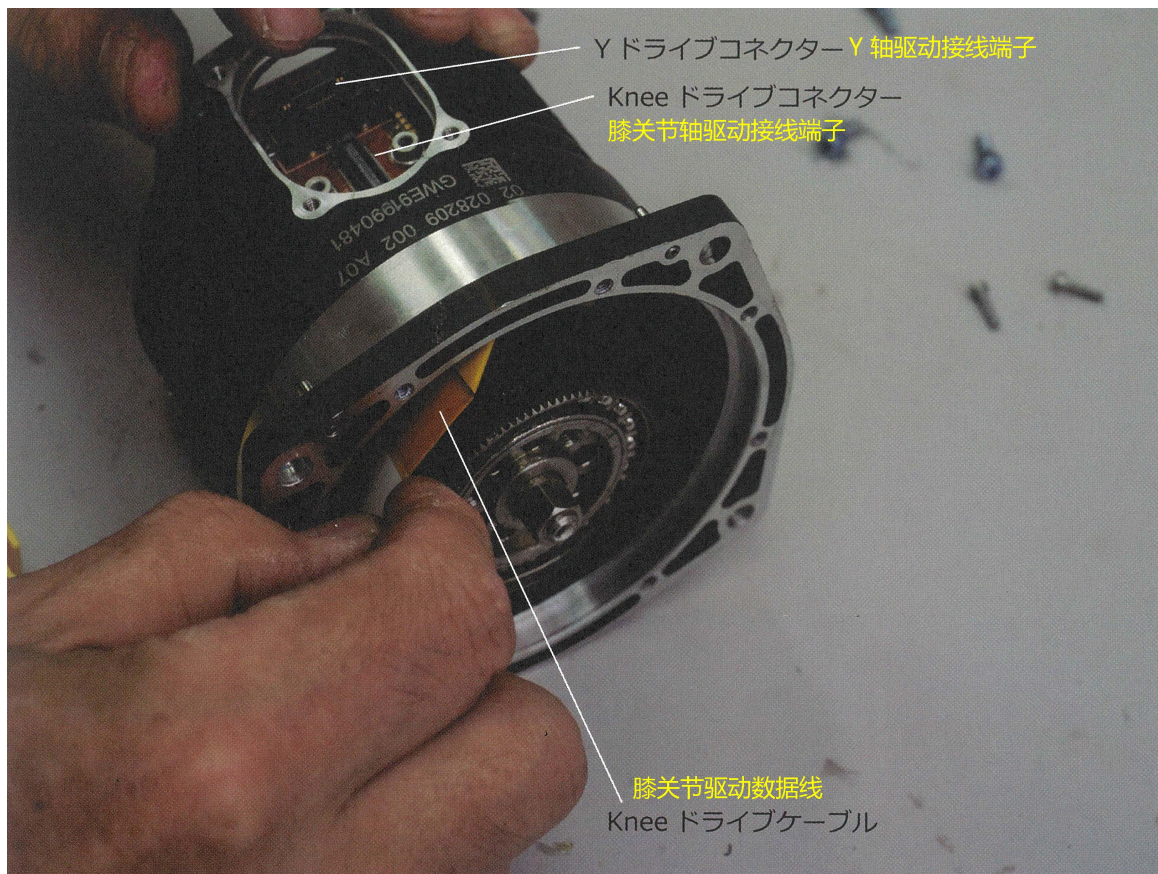


图 5.29: 膝关节驱动用扁平线缆 内部扁平线缆在接线端子接头处连接到电路板，并与Y驱动线束同轴连接到主计算机。(照片:加藤康)

5.3.2 Y轴驱动用电机

Y轴驱动单元的电机和膝关节驱动单元的电机是通用的，都是SPM(Surface Permanent Magnet)型同步电机(图 5.30)。定子固定在电机外壳上。外壳内部的划痕是在卸下“电机盖”时用Leutor磨石刮掉螺丝头时造成的。可以看到螺丝的4个轴，头部从外壳上被刮掉。9个M2.3 × 6 mm长的螺丝通过用螺纹锁定剂来拧紧固定电机盖。目前尚不清楚螺丝头是否因螺丝强度不够或六角孔不准确而损坏。经过拆装过很多次总体感觉Spot中使用的螺丝给人一种柔软的印象。事实上，在拆装工作中，已经损坏了相当多的螺丝头。

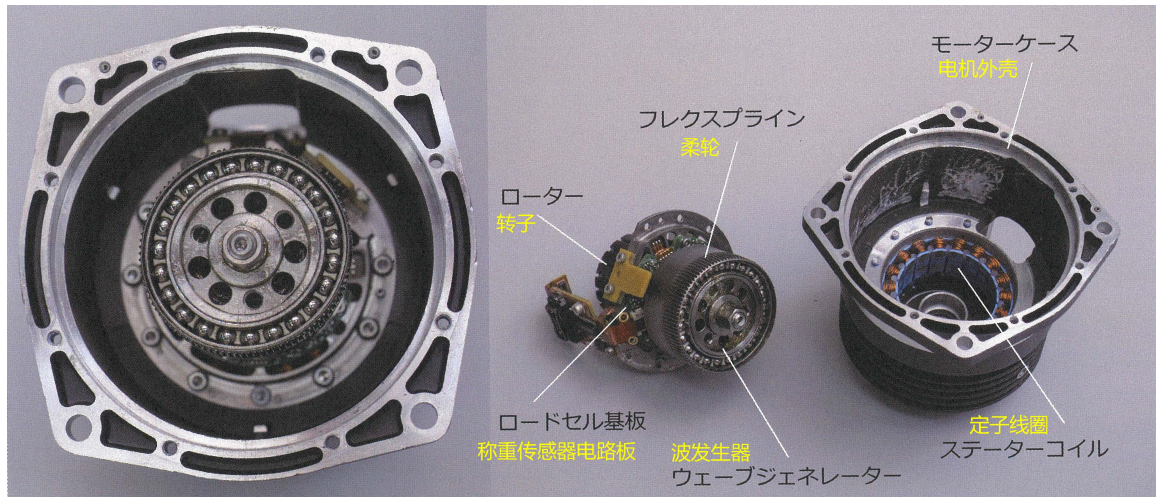


图 5.30: 拆解Y轴驱动单元 谐波驱动波发生器直接连接到电机输出轴。电机外壳内侧的划痕是刮掉和拆卸螺丝头部的痕迹。(照片:加藤康)

拆解零件的构成如图 5.31 所示。中起左侧为电机部分，右侧为减速机(谐波驱动)输入部分。

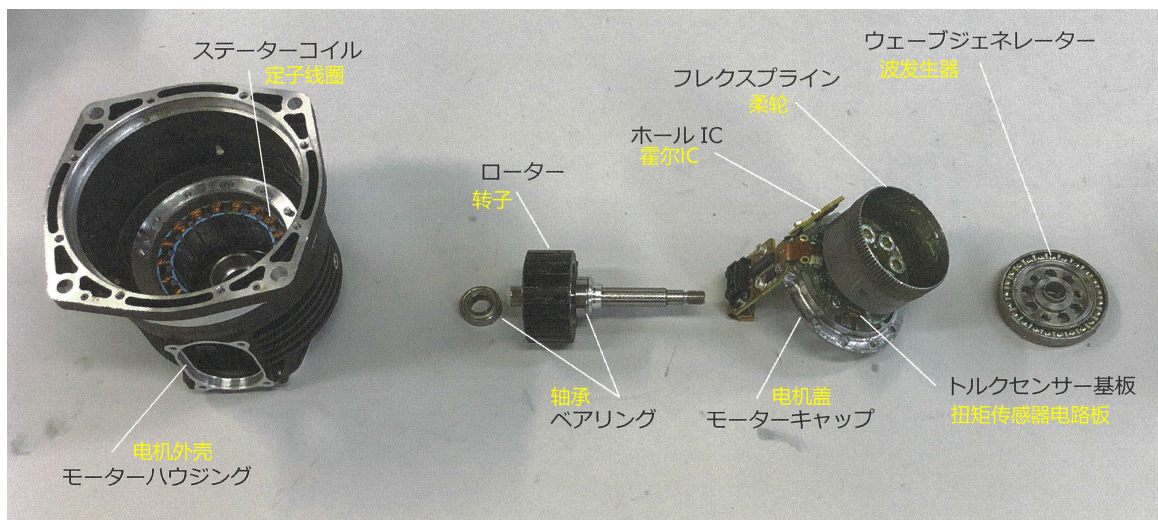


图 5.31: Y轴驱动单元电机部分 显示了来自电机的减速器(谐波驱动)输入部分的构成。(照片:松田篤志)

与膝关节驱动单元的电机不同，转子由转子铁芯两侧的轴承支撑(图 5.32、图 5.33)。可想而知，一位有经验的设计师为了结构特意改变，对膝关节驱动单元的电机轴承和这种轴承设计进行了布局。这里的凸台不是有色氧化铝。这种颜色差异似乎是为了避免错位。由于中心磁铁没有特殊的支架，它与树脂垫片一起直接粘附在轴上。可以说设计难度相当大

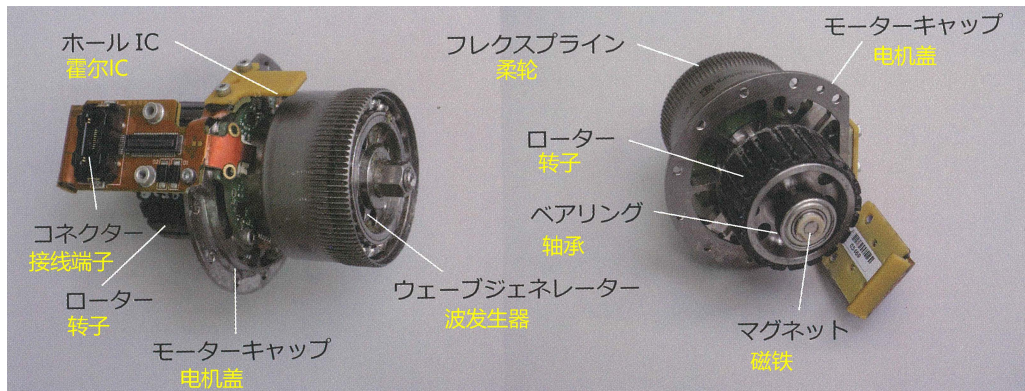


图 5.32: Y轴驱动单元的转子部分 与膝部驱动不同的是，电机部分转子的两侧都有轴承。(照片:加藤康)



图 5.33: 电机轴的轴承 使用的是美蓓亚三美的微型轴承。制造国是泰国。(照片:松田篤志)

5.3.3 Y轴驱动扭矩传感器电路板

“Y轴电机盖”有一个用于安装谐波驱动柔轮的凸台和一个称重传感器电路板(图 5.34)。电路板上写着“MIPTOR QUE CELL AMP CARD”，里面有两根好像是应变片的接线。看来是用来测量支持驱动反作用力的扭矩。

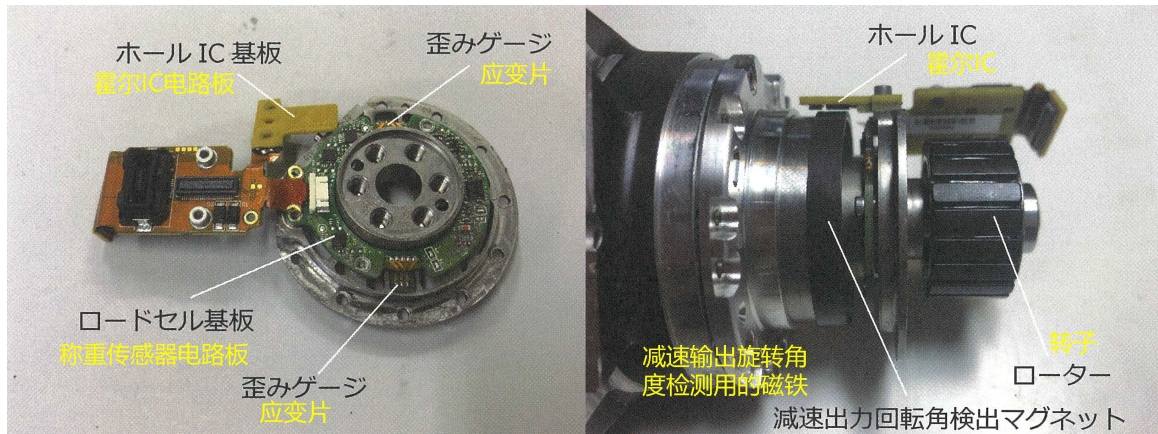


图 5.34: 扭矩传感器电路板 它是测量谐波传动的驱动反作用力的称重传感器。此外，还内置了通过霍尔 IC 测量旋转输出单元的位移角度的电路。
(照片:松田篤志)

霍尔IC贴在图 5.34左边的凸型电路板上，如右图所示，该机构的旋转角度由配合谐波驱动柔轮配对的刚轮外圆周的磁铁进行检测。霍尔IC电路板搭载有刻有“MU Y2HC_44 19702”的德国iC-Haus的霍尔IC。

图 5.35显示了从一开始就没有安装螺丝的状态，而不是在移除扁平线缆部分的螺丝之后。旋转部分的圆筒与谐波驱动的波发生器(可以看到轴承滚珠的部分)配合，但是如果在这里安装螺丝会干扰这个圆筒，所以推测螺丝被废止了。由于和其他电机的组装方式相同，所以不是组装忘记了安，而是故意没有安装螺丝。

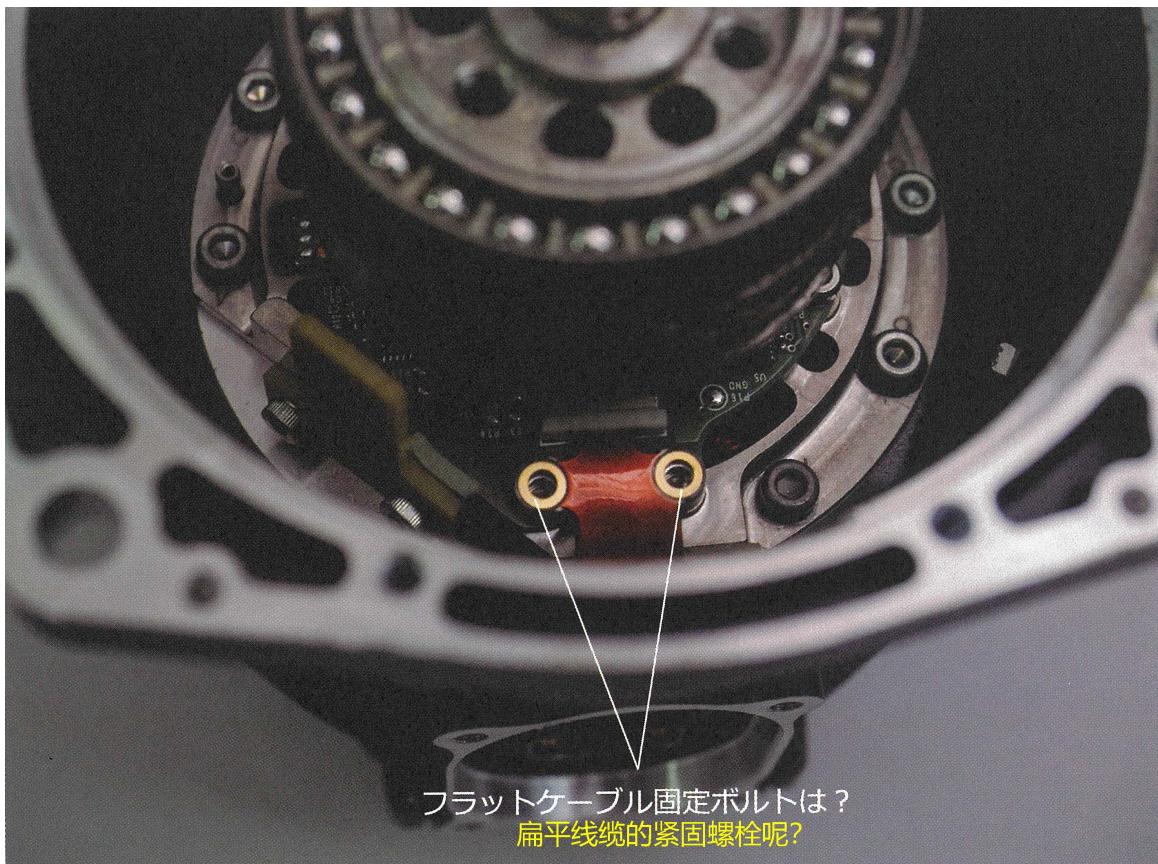


图 5.35: 省略了连接到称重传感器板的扁平线缆固定螺丝 这是Y轴驱动单元的照片，但由于X轴驱动器相同，因此认为螺丝是故意取下的。(照片:加藤康)

5.3.4 谐波驱动

减速机构采用“谐波驱动”，具有如图 5.36所示的结构。谐波驱动的类型由于有很多类似的系列而无法识别，但是可以发现它的尺寸17，减速比是50: 1。

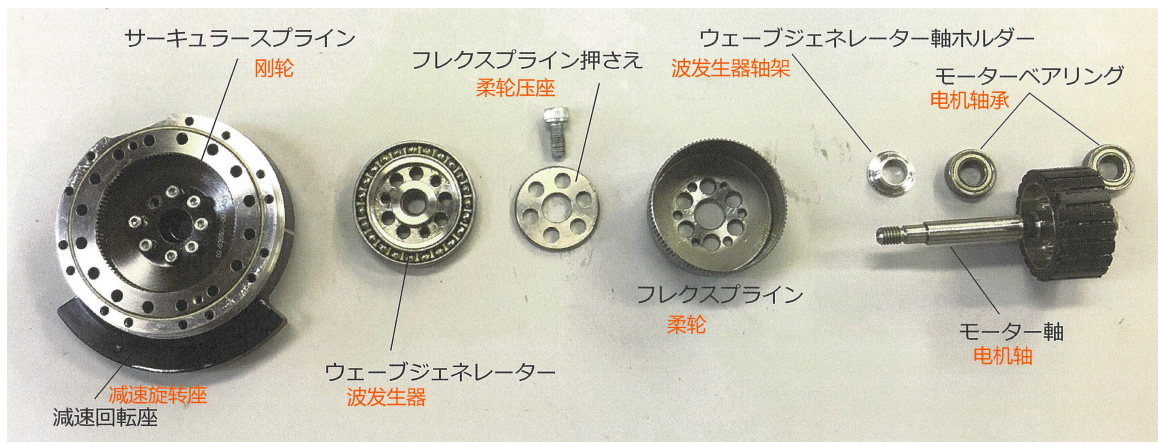


图 5.36: 谐波驱动减速机构成 使用波发生器、柔轮和刚轮这三个零件实现50分之1的减速。(照片:松田篤志)

一个100齿的柔轮变形为椭圆形，如 图 5.37右侧所示装配到102齿的内齿刚轮上。可以看出椭圆的顶部和底部是接触的，但左右有间隙。当电机转动内侧的波发生器时，内外齿的啮合部分移动。当椭圆旋转1圈时，齿圈相对于固定的内柔轮旋转两个齿数不同的齿。这就是谐波驱动的减速原理。由于电机轴旋转一圈传动两个齿，因此减速比为100: 2，即50: 1。50:1的减速比是17尺寸系列中最小的，该系列还有一款最大减速比为120:1的产品。由于没有其他减速机构能够以这种尺寸、重量和零件数量获得如此大的减速比，因此它已成为机器人相关减速齿轮的标准。



图 5.37: 谐波驱动系统的原理 当椭圆波发生器旋转啮合位置时，通过每旋转一圈的刚轮和柔轮之间的齿数差来传动刚轮。从最右侧的照片中，可以看到只有顶部和底部接合。(左图来自Harmonic Drive Catalog，照片：松田篤志)

谐波驱动如图 5.38 所示安装并旋转下面的黑色部分。这是 Y 轴旋转。谐波驱动减速的零件配置如下图所示，谐波驱动的刚轮集成在左端黑色凸起的铝合金零件内，左起第二个减速转座上拧紧固定有一个右侧编码器测量用的圆柱部分的凸台(编码器凸台)

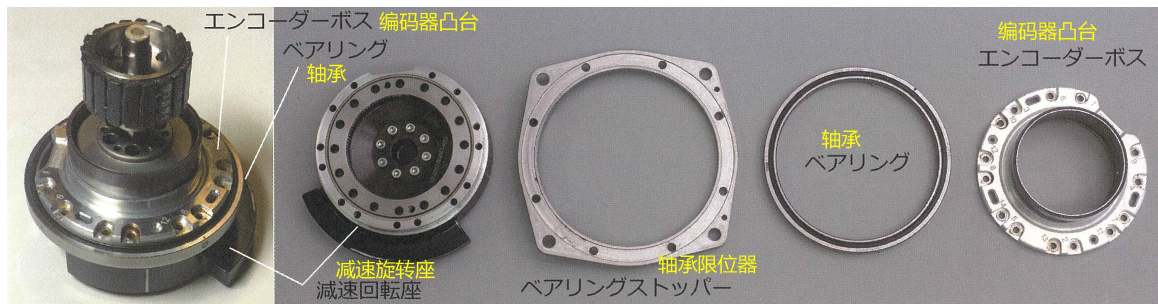


图 5.38: 谐波驱动减速输出结构 照片左侧电机带动旋转，通过谐波驱动减速至 1/50，使减速旋转座旋转。编码器凸台除了用霍尔 IC 测量旋转角度外，还为了用一个大直径轴承固定这个轴系统，用许多螺丝进行了牢固的连接。(照片:松田篤志)

5.3.5 周边旋转部件

对于编码器凸台，有一个钢制圆筒压入并固定在带有螺孔的铝制法兰上，圆筒外周附有带状磁铁(图 5.39)。编码器凸台部件设有定位销孔，以保证压装装配时的定位精度。这样做的目的是为了保证钢制圆筒的带状磁铁的磁纹位置和装配角度的精度。这是连接电机驱动电路板的霍尔IC电路板实时检测旋转角度的部分。该法兰的螺孔附近刻有一个数字。这似乎表明了拧紧顺序，并按顺序绘制了一个近似对角星形。螺丝尺寸为M2.3 × 12mm长，14颗螺丝，只有这颗螺丝被染成黑色，好像是铬钢，六角孔也是实心的。谐波驱动的目录上说安装螺栓可以使用强度为 12.9 或更高的，因此似乎使用这些规格。M2.3的拧紧扭矩也相当大。可以认为这些设计需要保证谐波驱动安装的精度和刚性。



图 5.39: 编码器凸台 带有磁铁的铁圆筒被压配合到铸铝部件中，通过霍尔IC读取旋转位置。螺丝的拧紧顺序也有刻印，是一个很漂亮的部分，设计的相当精致。(照片:松田篤志)

用谐波传动支撑电机外壳输出轴的大直径轴承通过轴承限位器紧固和固定(图 5.40、图 5.41)。材质为不锈钢, 经过全加工不断减轻重量, 重量为45 g。轴承为内径70 mm、外径81 mm、宽度6 mm的薄型轴承。制造商是THK。可以看到字母 MADE IN JAPAN。



图 5.40: 大直径轴承 由THK制造。(照片:松田篤志)



图 5.41: 轴承挡块 用于固定内置于电机外壳末端的大直径轴承的法兰。是不锈钢完全加工的。(照片:松田篤志)

5.4 X轴驱动单元

5.4.1 X轴驱动构成

X轴驱动是腿最里面的关节，相当于髋关节 Y轴驱动控制Knee的旋转角度，X轴驱动控制Y轴驱动和与Y轴驱动相连的Knee驱动的旋转角度。



图 5.42: X轴驱动和Y轴驱动 旋转系统通过组合 X 轴和 Y 轴来确定膝盖输出的方向。(照片:加藤康)

X轴驱动机构为旋转轴减速输出，与Y轴相同，由电机和谐波驱动组成。X轴驱动器配有一个大支架，用于固定Y轴驱动器的固定法兰。有一个拆解时拧不开的螺栓，但仔细一看，一个缺口已经准备好让它能拧出来了。



图 5.43: 螺丝的拧出缺口 提供 X 轴以避免用于固定 Y 轴电机法兰的大支架。(照片:松田篤志)

当电机部分和旋转部分分离时，在旋转挡块上发现了加工痕迹，以扩大决定旋转范围的挡块位置 (图 5.44)。或许是需要增加摆动Y轴的宽度，也就是“开档”的角度。

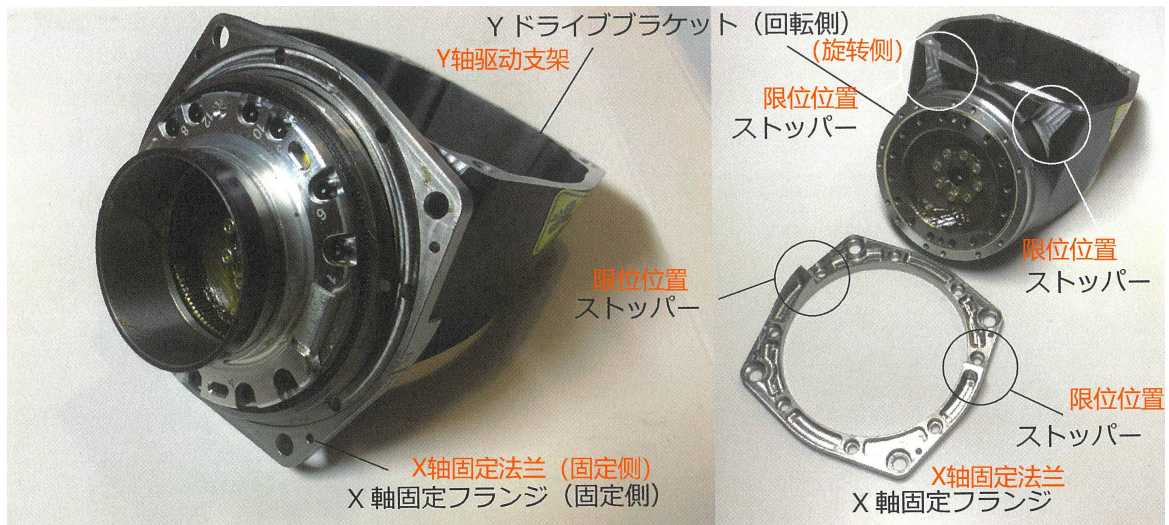


图 5.44: 旋转范围的扩大加工轨迹 有切削加工的痕迹来扩大决定Y轴驱动支架的X轴驱动可动范围的挡块位置。(写真:加藤康)

电机和谐波驱动的机构与Y轴驱动完全相同。

第 6 章 电子零件

6.1 电气连接

6.1.1 连接位置

Spot的电气系统在前半部分和后半部分具有独立的系统。即使一半发生故障不知道另一半能不能继续运行，但这也可能是军事技术故障安全的想法。

图 6.1 是前半部分的接线配置。

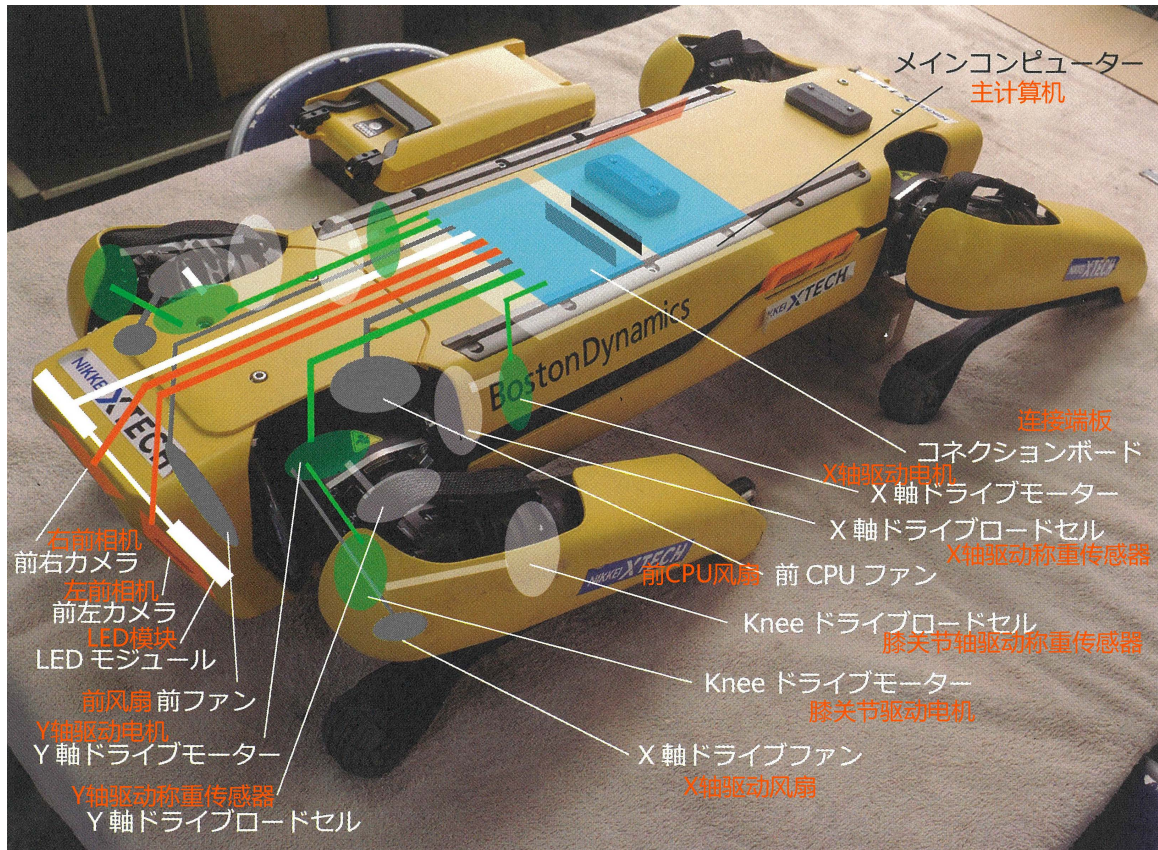


图 6.1: Spot的前半部分接线图 前连接端板的接线草图。(图片:松田篤志在加藤康的照片中添加文字)

图 6.2为后半部分线束接线配置。



图 6.2: Spot的后半部分接线图 后连接端板接线示意图。(图片:松田篤志在加藤康的照片中添加文字)

通过查看主板和线束的连接创建的框图如图 6.3 所示。它有一个非常整洁和合理的结构。有了这种简单的系统配置，电气线束也是必不可少且不是浪费。但是，如 4.4 防水防尘措施所述，存在线束的连接部分的可靠性和冗余性（防尘、防水、反复插拔的耐久性等）极差的问题。

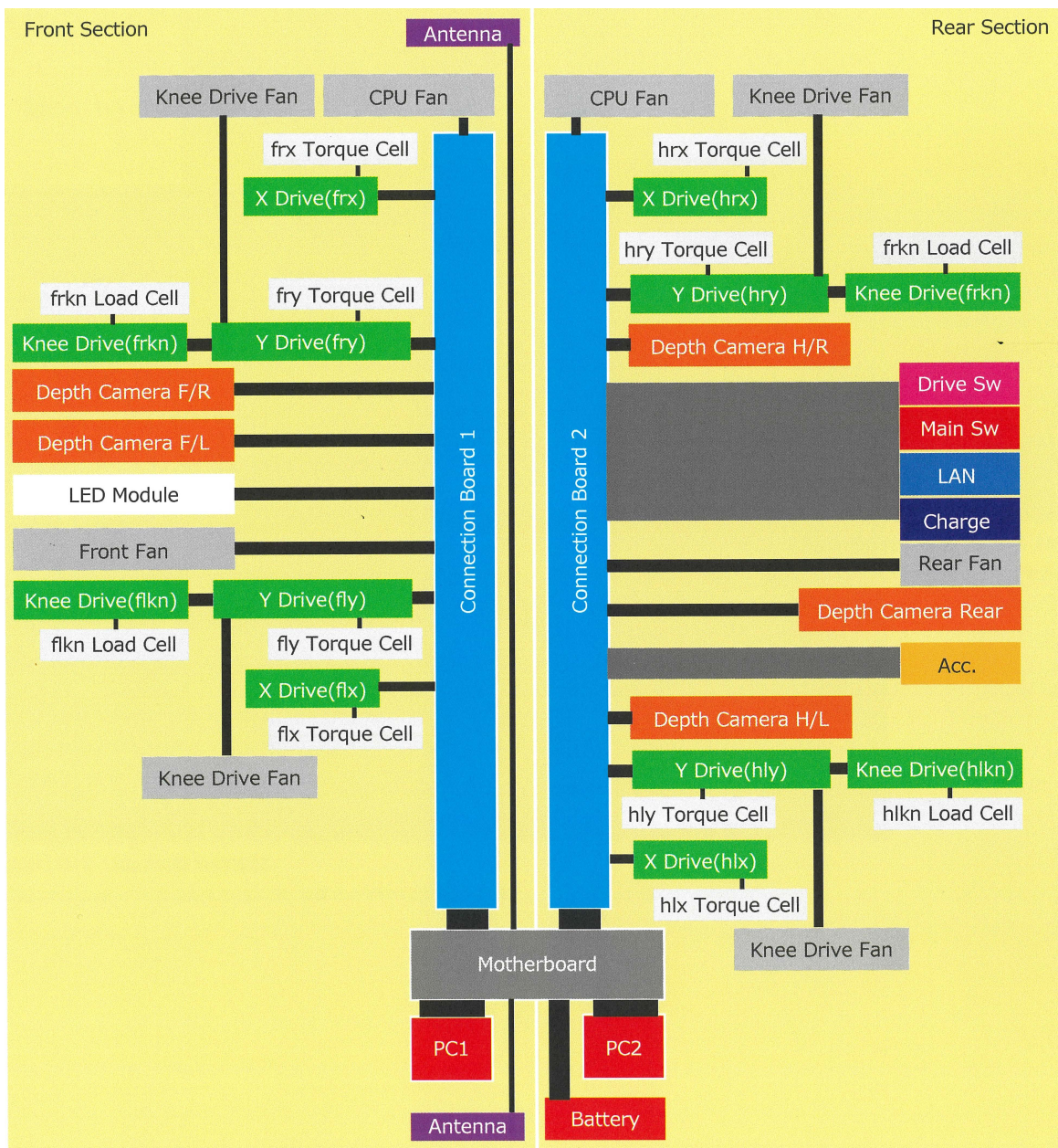


图 6.3: 整体系统框图 前半部分和后半部分系统严格分开。(图片:松田笃志整理)

6.1.2 外部接口

Spot本身和外部设备在3个主要位置连接。1个是后机架上的以太网端口、WiFi 和背面的Payload扩展连接器。以太网端口配备好了1000BASET对应的RJ45 (图 6.4)。当使用以太网线缆连接到 LAN 交换机或PC，并从PC进行各种设置等的时候使用它。WiFi也是如此。



图 6.4: 后机架上的以太网端口 取下左上方的机盖会露出RJ45端口。可以直接连接到PC并执行设置和命令操作等任务。(照片:加藤康)

背部有2个payload接口，都是D-SUB 25针接口 (图 6.5)。

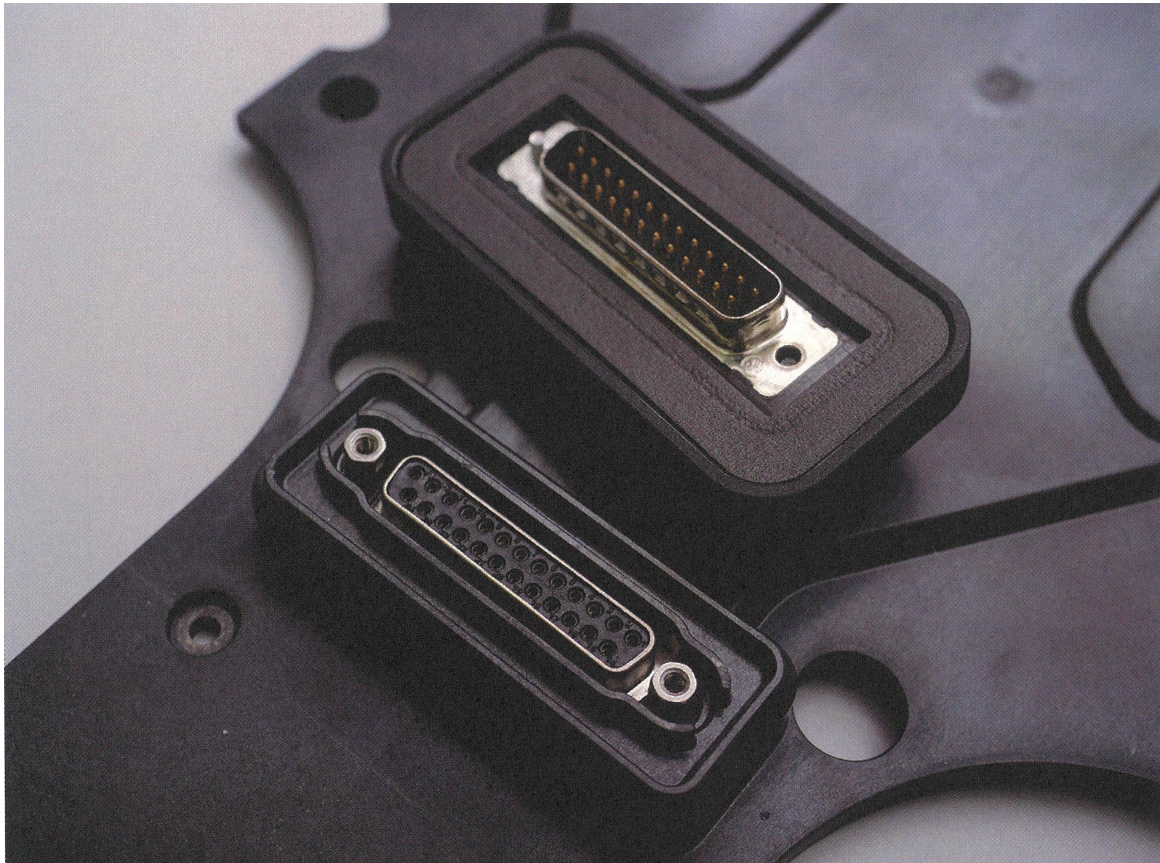


图 6.5: Spot的Payload用的扩展连接器 用于连接Payload。有以太网、电源、电源开关等的引脚。使用D-SUB 25针连接器。(照片:加藤康)

后机架和Payload扩展连接器都连接到主计算机连接端板(图 6.6)。使用FPC扁平线缆连接(图 6.7)。

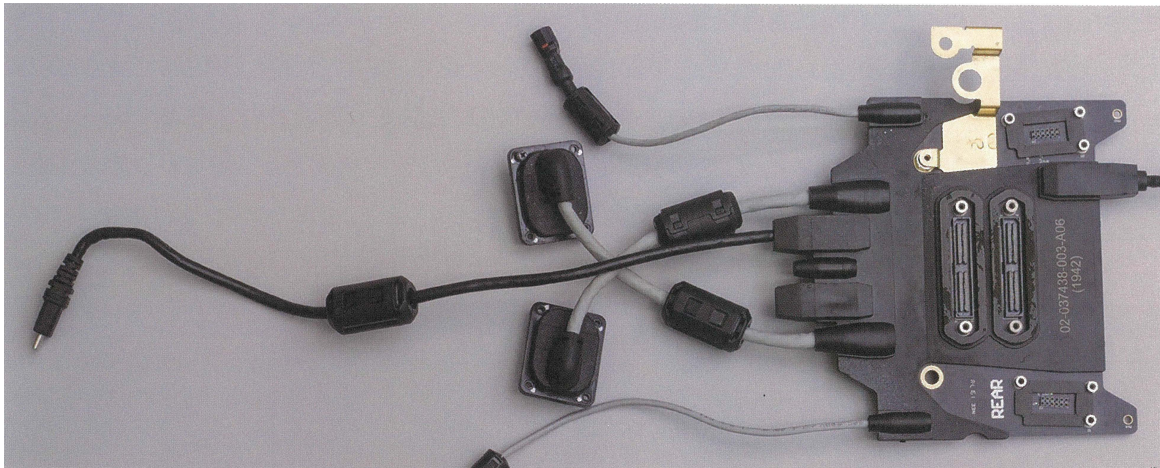


图 6.6: 连接主计算机和外围设备的连接端板（后侧） 该板左侧的连接器连接到后机架并连接到带有以太网端口和电源开关的模块。右侧通过扁平线缆连接到机架顶部的Payload连接器。(照片:加藤康)

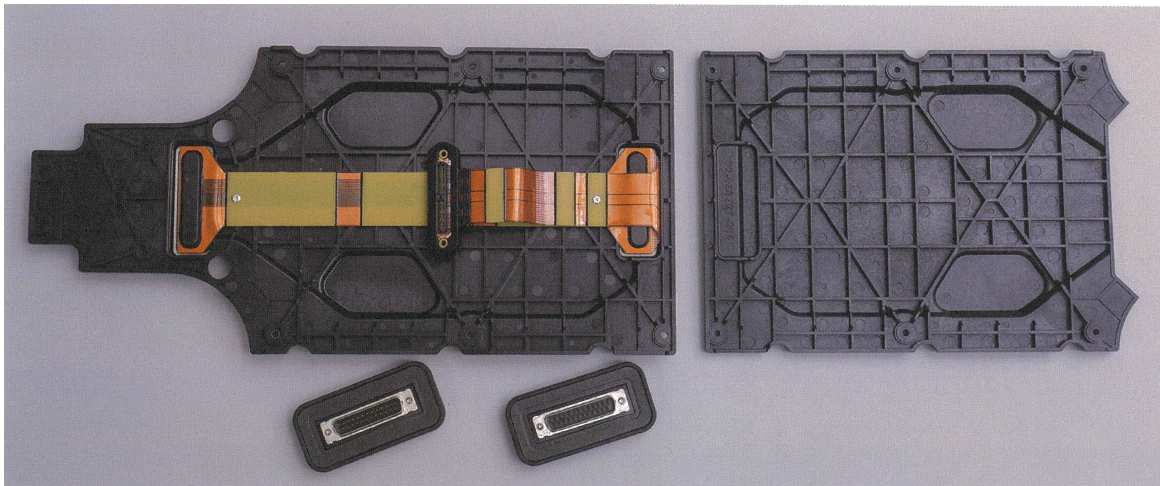


图 6.7: 中心机架的上面板(中心面板) 左侧是后面板。附带扁平线缆。用来与Payload的扩展连接器连接。(照片:加藤康)

然而，在检查线缆时发现了一个奇怪的地方。控制线束上的标号很奇怪。对角线上的腿使用相同的线缆。但是，如图所示，第1根和第3条线缆上的数字是不同的。目前还不清楚为什么会有这样的差异，以及在其他Spot中也是如此。具体来说，尝试从上到下的顺序排列标号为 "02-043900-001-A01 HY CABLE ASSEMBLY FR HL (1936)" "02-043579-001-A01 HY CABLE ASSEMBLY FL HR (1936)" "02-043900-001-A01 HY CABLE ASSEMBLY FR HL (1927)" "02-043579-001-A01 HY CABLE ASSEMBLY FL HR (1936)", 第1条和第3条线缆应该是一样的，但最后(1936)和(1927)之间的区别还不清楚。第2条和第4条的(1936)是相同的。FR和HL可推测分别是Front Foot Right, Hip Left, FL 和 HR分别是Front Foot Left和Hip Right。

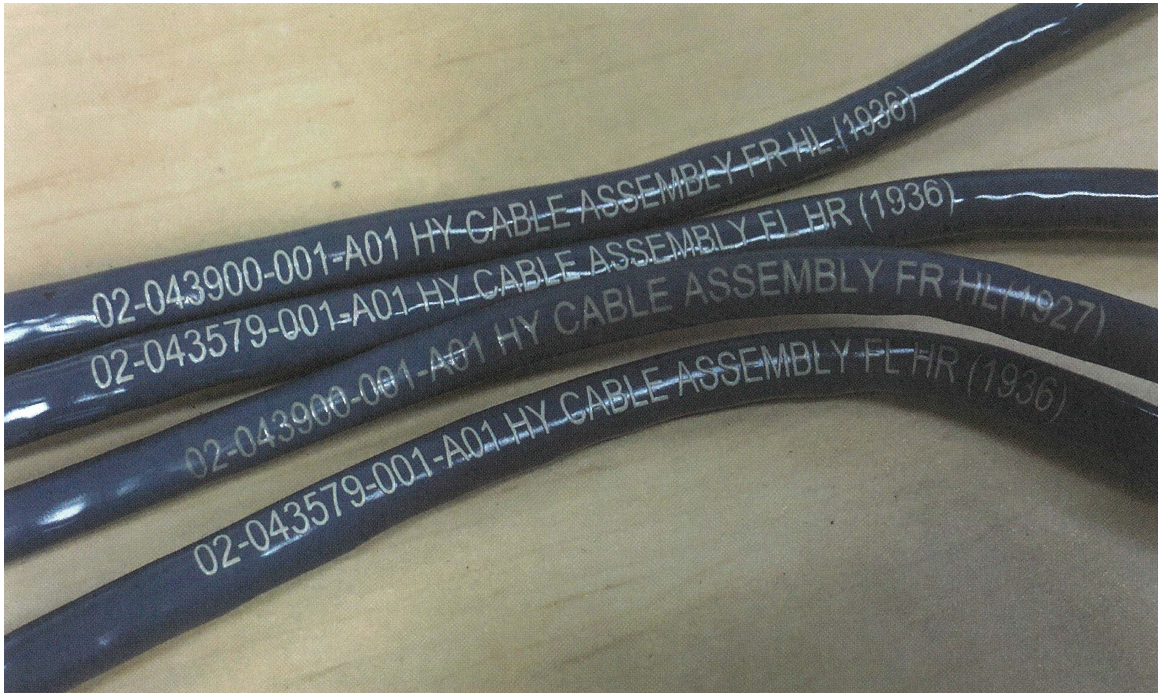


图 6.10: 控制线束的标号 对角线位置应使用相同零件标号的线束，但型号不同。第1根和第3根后四位数字分别为 (1936) 和 (1927) 值得注意。(照片:松田篤志)

另外，控制线束末端的连接器非常松软，使用了IT设备中使用的连接器(图 6.11)。

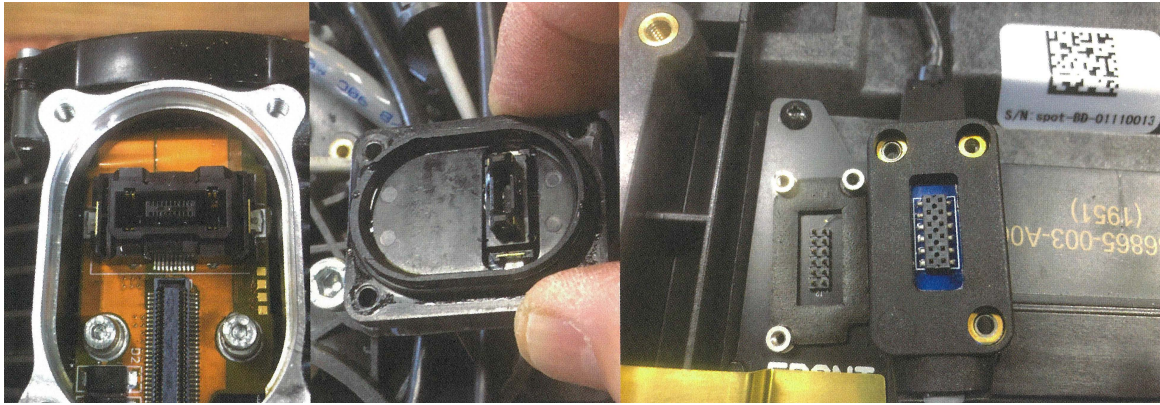


图 6.11: Spot的控制线束连接器 不像是工业设备的连接器，用的有些松软。(照片:Nikkei Cross Tech)

6.1.4 天线

Spot的中心机架两侧安装了天线(图 6.12、图 6.13)。它是用于与 Spot遥控器、LAN和PC进行无线连接的WiFi天线。启动时, Spot 充当 WiFi 接入点或 WiFi 客户端。



图 6.12: 天线安装位置 天线安装在Spot中心机架的两侧。连接线缆穿过中心机架上的孔延伸到中心机架下侧的电池座内部。(照片:加藤 康)



图 6.13: WiFi天线 安装天线的电路板安装在树脂壳中。在这种情况下没有考虑防水或防尘。(照片:加藤 康)

6.2 组件

6.2.1 连接端板

连接端板是中心机架中作为与主计算机的外部接线的板(图 6.14)。具体来说,将主板连接到腿部电机和传感器、深度摄像头、Payload的扩展端口、后机架上的各种开关,以及以太网端口连接到 I/O 线缆。连接端板有前后2个系统。

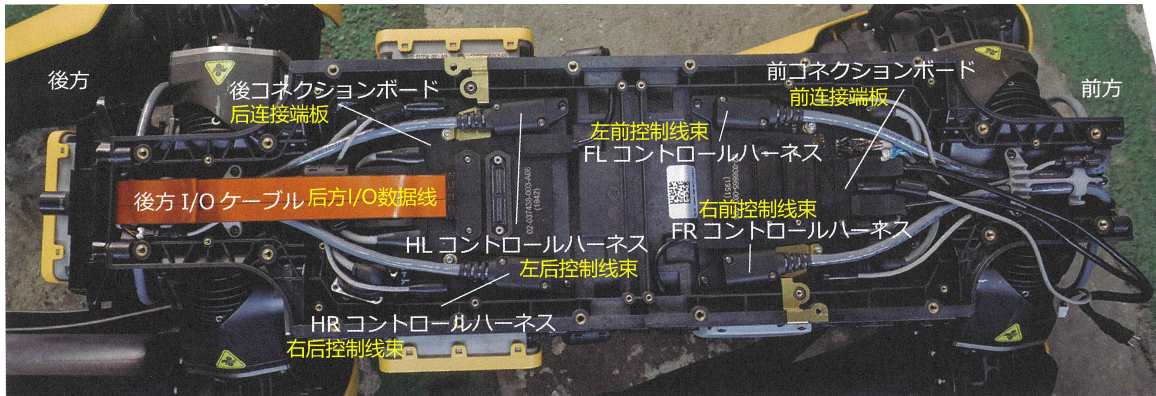


图 6.14: 连接端板的放置 当中心机架的上面板(中央面板)被移除时,每个线束都会出现。前半部分和后半部分在功能上是分开的。布线布局也很整齐。(照片:加藤 康)

主计算机的主板被一个很宽的连接器嵌合并连接到它上面 (图 6.15)。连接器两端设有固定用销钉，用螺栓固定在中心机架上。因此，传递到中心机架的冲击和振动从宽连接器的固定部分传递到了主板。

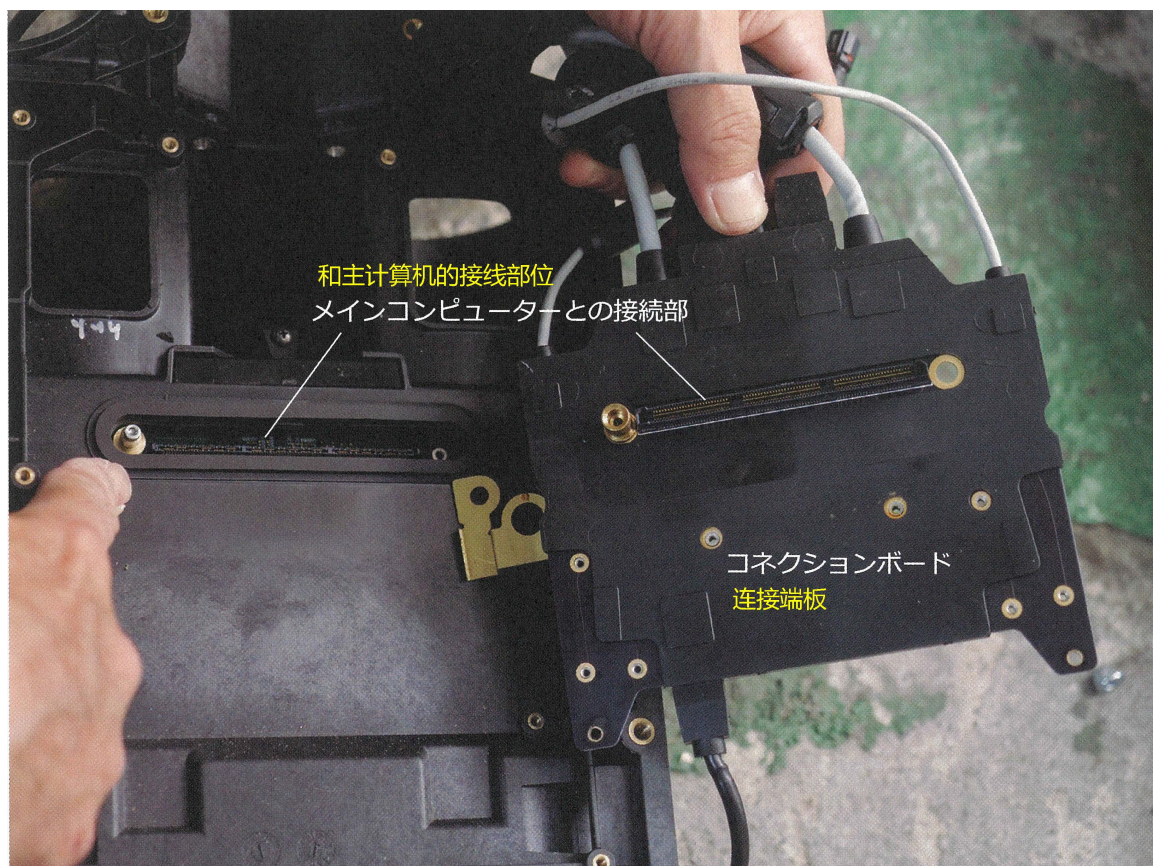


图 6.15: 连接端板与主计算机的连接处 拆下与主计算机相连的连接器两侧的螺栓，即可拆下端板。在连接器孔后面可以看到主计算机电路板。孔周围附有泡沫橡胶密封胶。这张照片显示了试图松开连接器旁边的螺栓，由于背面的安装螺栓转动而不得不卸下连接端板的螺母时的图。(照片:加藤 康)

前后连接端板的基本设计是一样的，但是由于前后摄像头模块的数量不同，从板上延伸出来的USB Type-C线缆的数量是不同的(图 6.16)。从连接端板开始，它延伸到每个X轴电机、每个深度摄像头模块和每个风扇。而且别的连接器连接到“Y”轴电机和“膝关节”执行器电机。控制线束连接到此连接器。此外，与设置在后机架上的开关、连接器和选配件单元的通信通过扁平线缆从别的连接器连接。

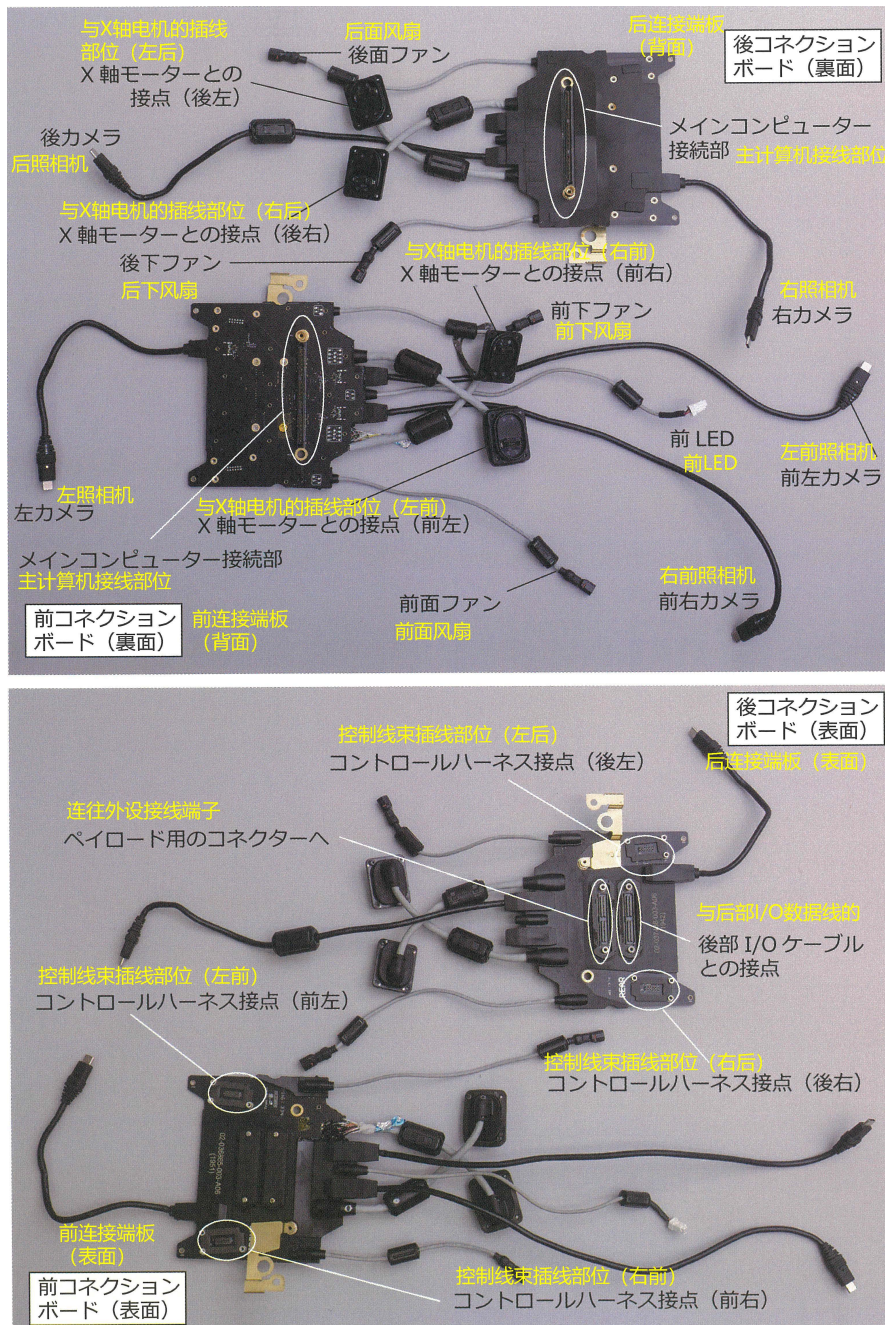


图 6.16: 连接端板的放置 来自主计算机的各种信号和电力从独立的前后板分配给相机、电机、风扇等。就是所谓的总机，但布局合理。铁氧体磁珠连接到每个相机模块和每个驱动电机的所有信号线上。(照片:加藤 康)

每个X轴电机，每个深度相机模块，以及延伸到每个风扇的线缆都被模压并固定在连接端板上(图 6.17、图 6.18)。

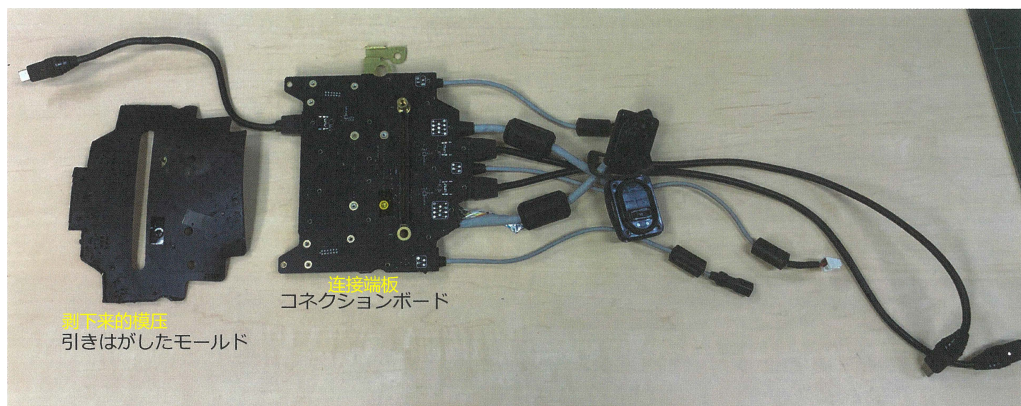


图 6.17: 连接端板的树脂模压 通过将线束和连接器焊接到印刷电路板上固定连接端板后，将其放入模具中并用树脂模压。这种材料可能是软的氯乙烯，因为它很容易被烙铁的热量熔化。(照片:加藤 康)

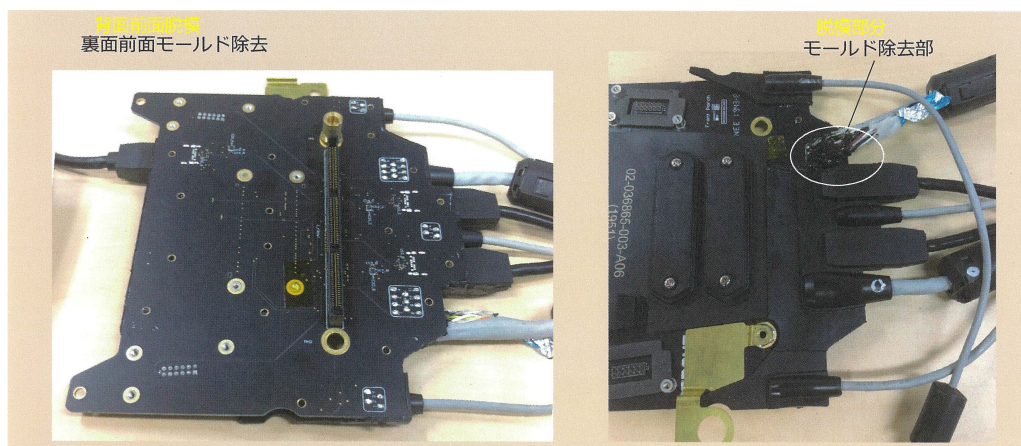


图 6.18: 接线端子内部接线方法 当取下模压时，可以看到它是直接焊接到电路板上的，而不是连接器。(照片:加藤 康)

6.2.2 深度相机

深度相机使用的模块为英特尔的“RealSense D430”，里面添加了图像传感器(图 6.19)。D430采用了从中央的红外投影仪照射图案，用左右相机拍摄该图案，并从视差中导出深度的原理。为了监控360°区域，前部安装了2个相同的模块，左右后部各安装了1个，一共5个。根据D430规格，可以测量距离10 cm ~ 10 m 的物体的距离，但Spot规格是在最大4m的范围内判断地形。

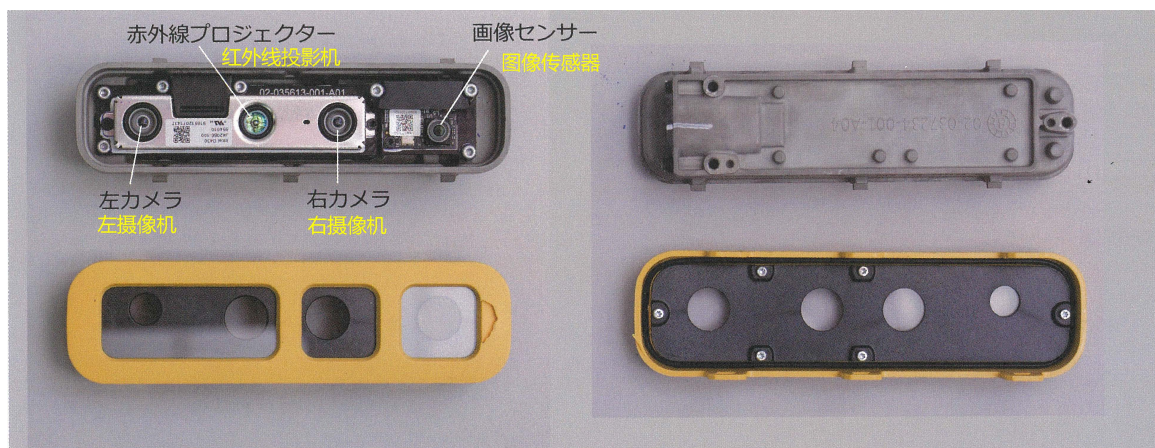


图 6.19: 取下深度相机的外壳时 由英特尔深度摄像头模块“RealSense D430”和图像传感器组成的电路板固定在镁制外壳上。(照片:加藤 康)

深度相机的电路板安装在镁制外壳中。将O型圈夹在它们之间并按下正面的机盖，用外部的6个挂钩将其钩在外壳的爪子上来固定它(图 6.20)。这部分的防水结构简单而良好。外部接口使用 USB Type-C连接器。在镁制外壳上为该连接器部件打了一个孔。其思想是将要连接的数据线插头的树脂模体与镁外壳紧密接触并密封。这一点是模块障碍上的薄弱点，由于没有其他的呼吸器（压力释放）调整内部压力，即通过这个间隙进行抽吸。事实上，当被淹没后检查相机时，水滴已经浸入了所有5组相机模块的壳子内部。看起来典型的吸水机制是通电使外壳内部温度升高>增加压力>从USB连接器的侧面泄压>浸入>冷却>降低外壳内部压力>从外面空气侵入湿气发生了。这也是恶劣环境下的操作弱点。一般都会提供透气孔来释放压力，但需要将透气孔设置为不与水接触，或者使用Gore-Tex等不允许水分子通过但允许空气通过的材料。

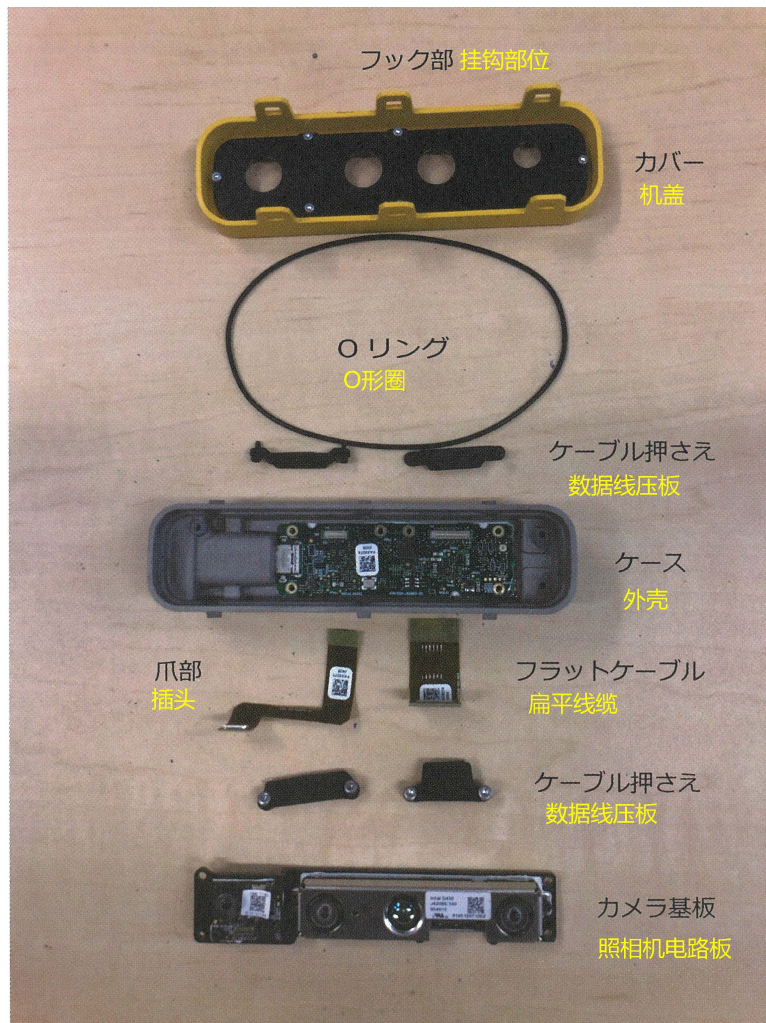


图 6.20: 深度相机组件 由英特尔深度摄像头模块“RealSense 0430”和图像传感器组成的电路板固定在镁制外壳上。(照片:加藤 康)

深度相机模块由一个传感器电路板和带有USB Type-C连接器的接口电路板组成(图 6.21)。传感器电路板上配备深度相机D430电路板和图像传感器电路板。D430和图像传感器电路板通过不同的FPC线缆连接到接口板。

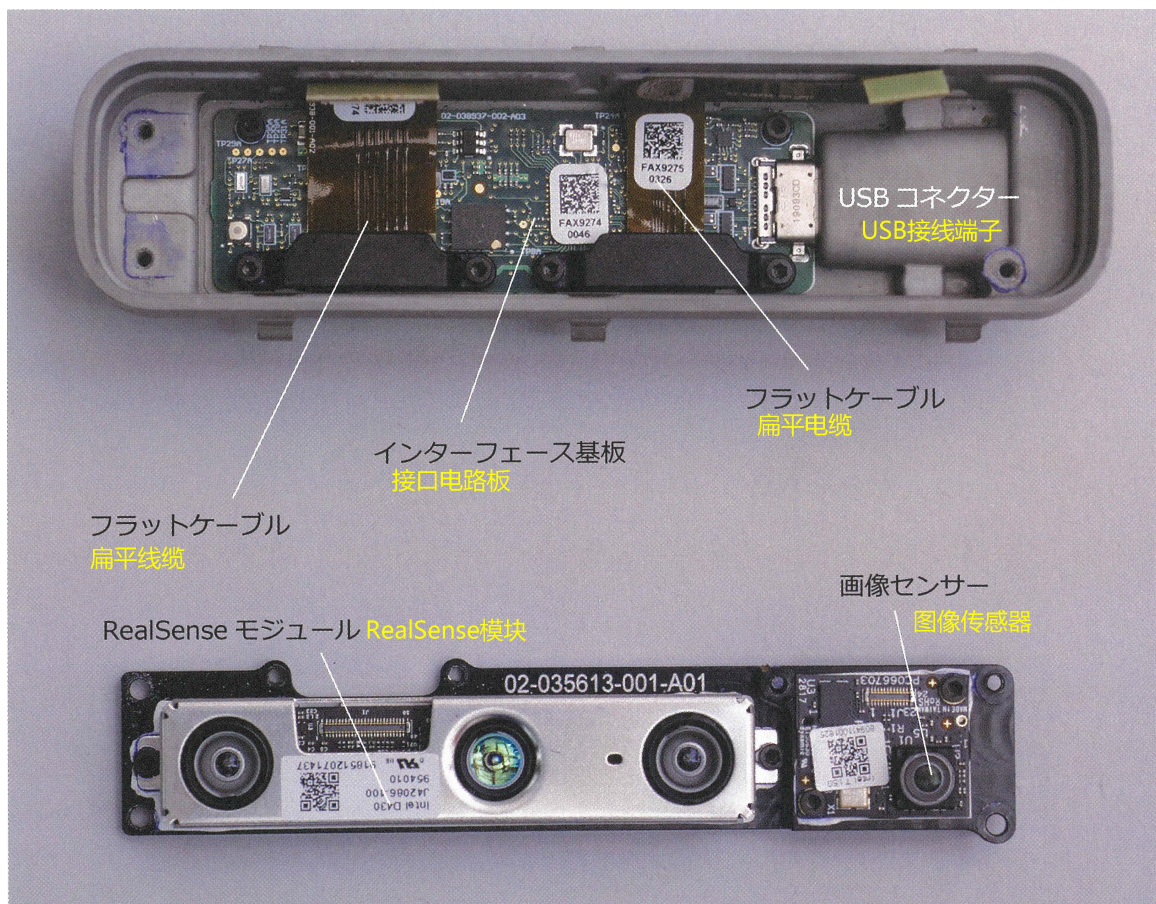


图 6.21: 深度相机电路板配置 它由两块电路板组成, 一块接口电路板, 一块集成D430和图像传感器的电路板。并使用扁平线缆连接到它们。(照片:加藤 康)

6.2.3 风扇

总共配备了8个散热风扇，前后各4个，几乎对称(图 6.22)。具体来说，前面有一个前置风扇，一个FR (Front foot Right) 风扇，一个FL (Front foot Left) 风扇，还有一个前置CPU的散热风扇。在后面，有一个后置后置风扇、HR (Hip Right) 风扇、HL (Hip Left) 风扇和一个用于后置冷却CPU 的风扇。



图 6.22: 冷却风扇的放置 它有4个风扇用于前部 (Y 轴)、左右腿 (膝部) 和前CPU。后部也是如此，一共8个风扇，展示了机器人发热的大小。
(照片:加藤 康)

前风扇和后风扇用来分别冷却前后的Y轴驱动电机(图 6.23)。



图 6.23: 前置风扇 铝冲压折弯板上的1W冷却风扇。冷却Y轴驱动电机外。(照片:加藤 康)

FR/FL/HR/HL风扇安置在冷却空气直接吹到膝关节驱动电机外壳的散热片的位置(图 6.24)。用于冷却这些电机的风扇由美国的Mechatronics制造,在中国制造,输出功率约为1W。用的无刷电机。



图 6.24: 膝关节驱动冷却风扇 冷却空气直接吹到Knee的线性驱动电机外壳的散热片上。(照片:加藤 康)

另外，和前面的CPU风扇一样，后面的CPU风扇通过中心机架内部的风道分流，导向左右X轴驱动电机壳的散热片和主机的CPU散热片冷却(图 6.25、图 6.26)。这款风扇散热目标发热量大，所以输出功率为13.2 W，无刷电机厂家是台湾台达电子，制造国是泰国。

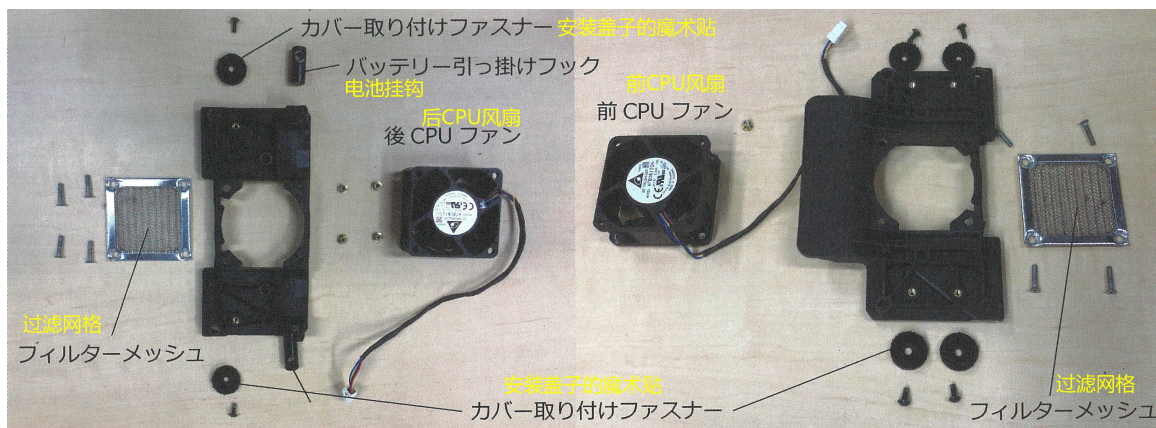


图 6.25: 前后CPU风扇 照片的左侧是Spot的后面部分。风扇可以作为组件移除。(照片:加藤 康)

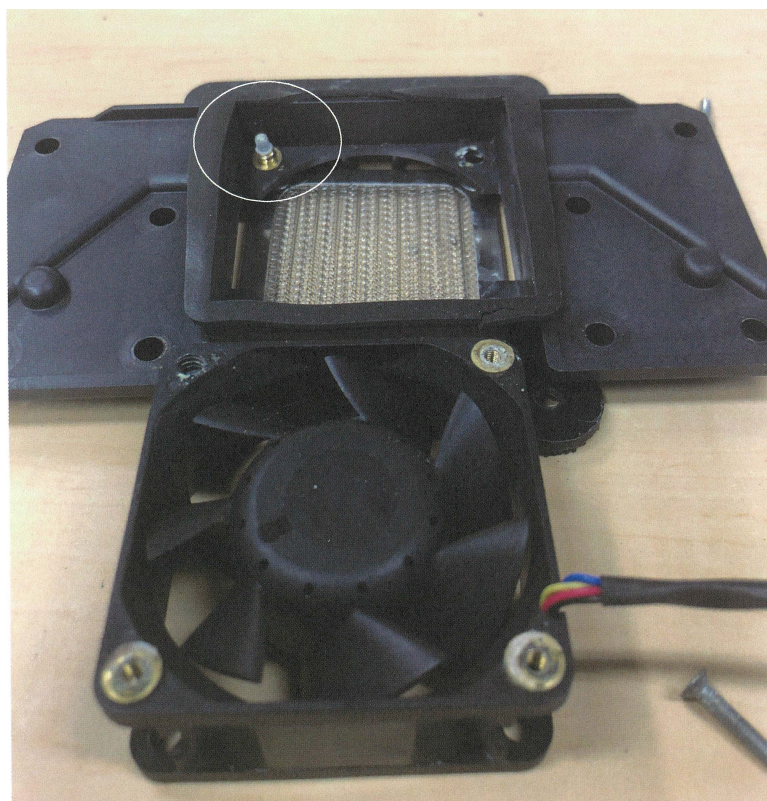


图 6.26: CPU风扇安装故障 黄铜螺母插入件压入树脂风扇主体并用螺丝拧紧。插入件的压入有些松导致旋转，螺丝拧不下来。(照片:加藤 康)

6.2.4 LED模块

LED模块是一种通过LED颜色和照明模式向用户和周围环境通知Spot系统当前状态的设备(图 6.27)。具体地,通过将诸如绿色、蓝色、橙色和红色的颜色的变化与诸如连续发光和闪烁的发光模式的变化相结合来传达状态。虽然可以通过遥控器确认系统状态,但需要通知最少的必要信息,例如与遥控器的连接何时断开或在PC上操作时。但是,由于LED模块只是在正面,当用户在侧面或背面时,则必须绕着去看看。

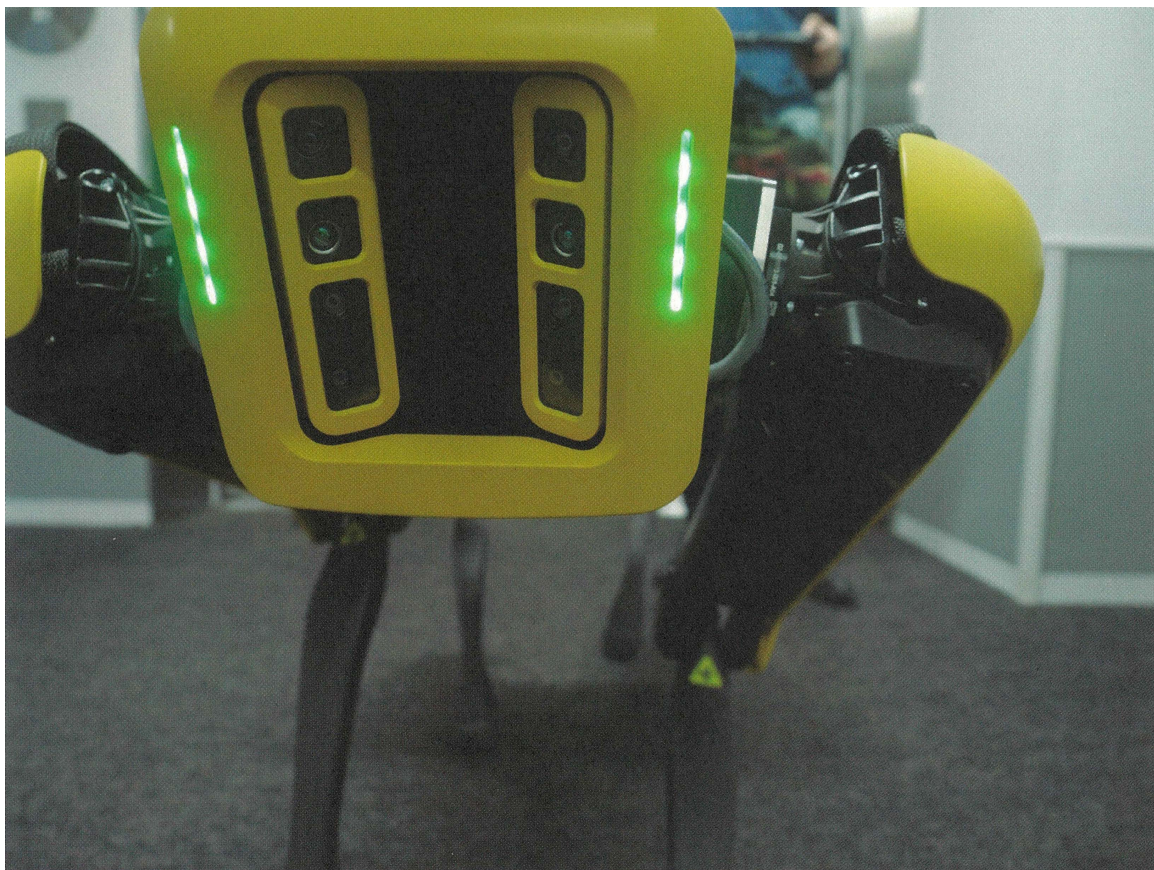


图 6.27: LED模块发光状态 状态由这4个LED的颜色和发光模式传达。(照片:加藤 康)

前机盖内左右两侧共安装了2个LED模块。LED模块由4盏灯和1个磨砂玻璃漫射·导光透镜组成(图 6.28、图 6.29)。

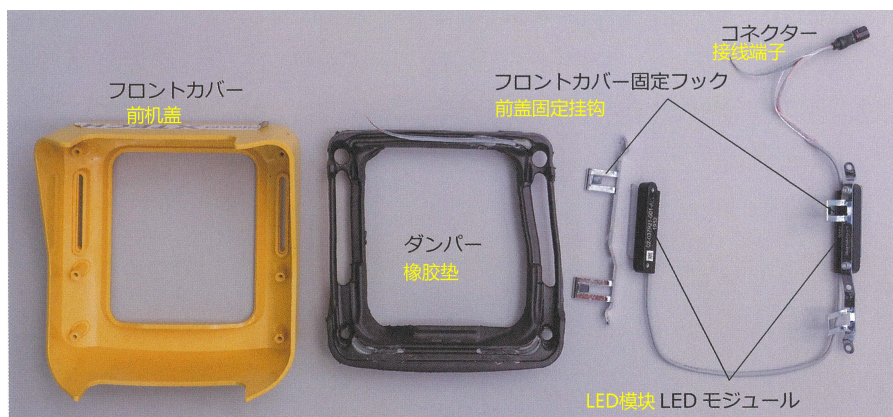


图 6.28: LED模块的布局 连接菊花链的左右LED模组用螺栓固定在铁皮固定钩上。(照片:加藤 康)

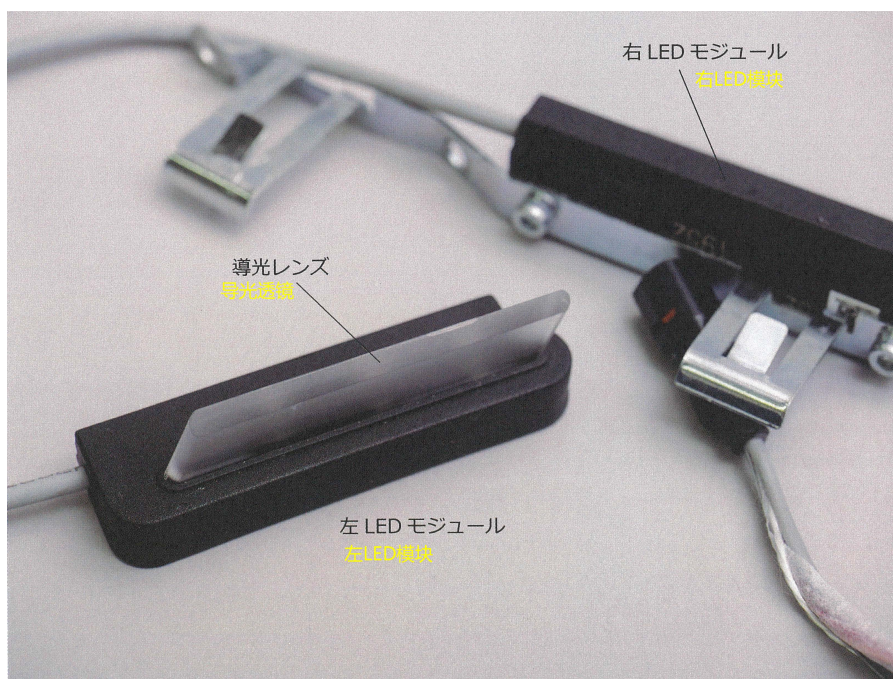


图 6.29: LED模块本体 它是一种将检测状态从Spot侧传达到外部的手段，通过LED的点亮方式和颜色可以掌握情况。黑色树脂外壳内装有一个多色LED，它通过磨砂玻璃状扩散·导光透镜发出柔和的光。(照片:加藤 康)

6.3 主计算机

6.3.1 安装位置和安装方法

Spot 的大脑是主计算机。安装在中心机架内 (图 6.30)。

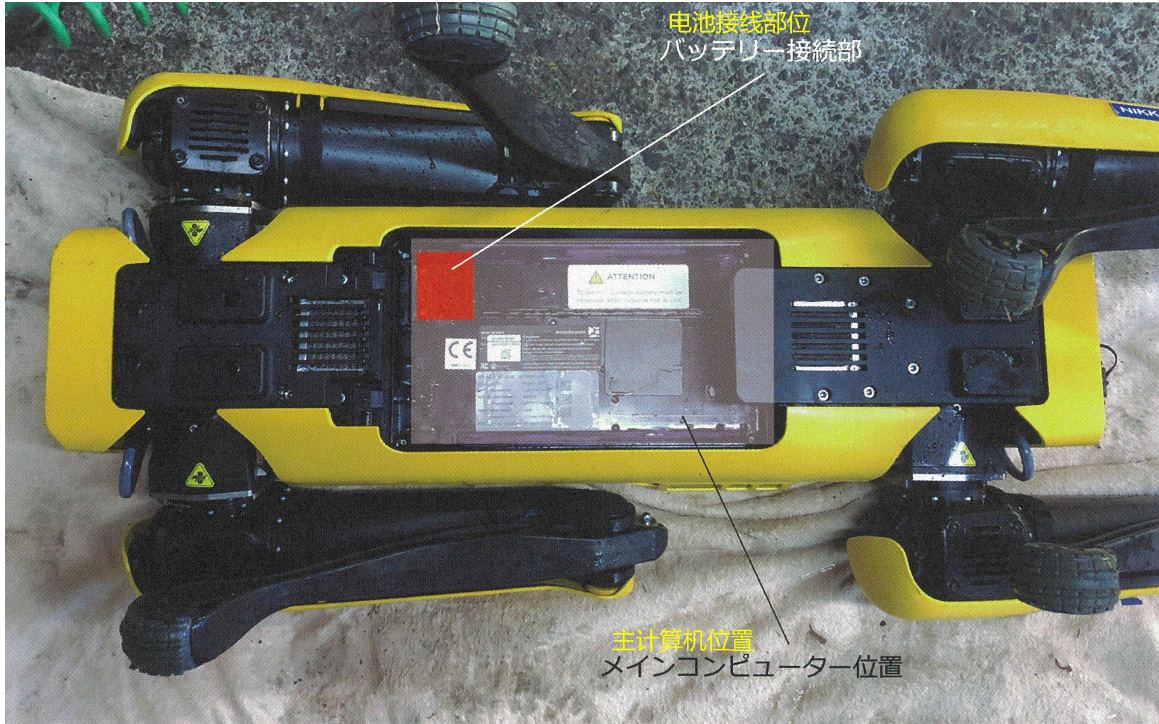


图 6.30: 主计算机安装位置 主计算机内置于Spot机身中央。照片中央的黑色方盒状部分是安装电池的部分。主机通过这个盒子后角的8个螺栓连接到传感器机架上。(照片:加藤 康)

主计算机从底部用8颗螺栓固定在中心机架上(图 6.31)。但是, 仅仅去掉这8个是不能拆下来。还必须卸下将连接端板连接到主计算机主板的连接器上的4个紧固螺丝。如果将这颗螺丝和连接端板的连接器卸下, 主机将作为一个组件可拆下来。



图 6.31: 主计算机的固定位置 拆掉它周围的8颗螺栓后, 通过拆下连接端板的连接器两侧的螺丝 (前后各2颗) 即可将其分开。(照片:加藤 康)

图 6.32中显示了从中心机架中取出的主计算机。在正面可以看到的主板上，有SSD和WiFi的高频板，以及备份用的纽扣电池板，下面是CPU板作为子板。

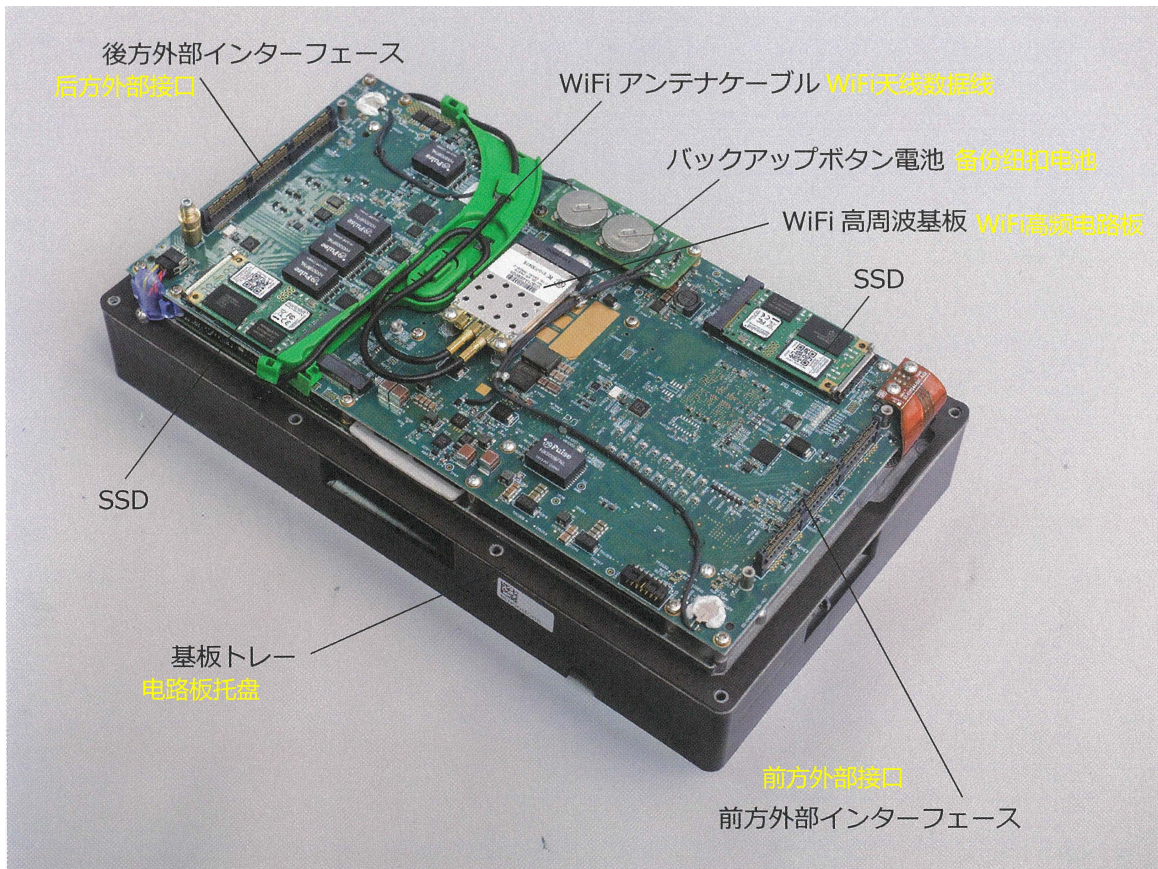


图 6.32: 主计算机的外观前后的CPU板作为子板安装在主板下方，可以从正面看到。(照片:加藤 康)

板子的下面有树脂外壳(图 6.33)。这是中心机架腹部的盖子。

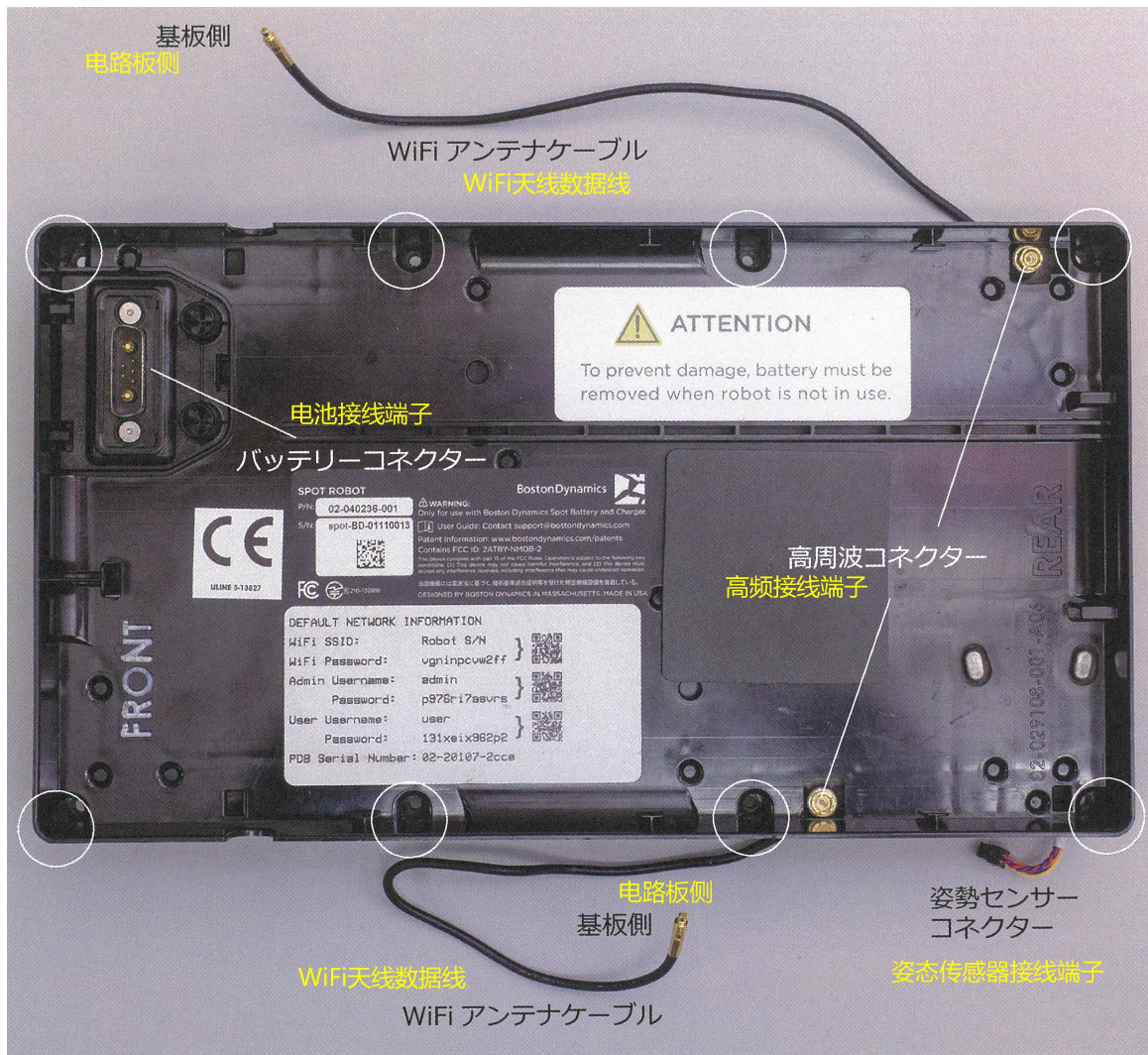


图 6.33: 用作主计算机电路板下方底座的树脂外壳通过上下白圈中的8个螺栓固定到传感器机架上。托盘配有电池连接器、姿态传感器和连接左右WiFi天线的高频连接器。(照片:加藤 康)

树脂外壳和板子之间有一个镁合金铸造托盘，板子用螺丝固定在这里 (图 6.34)。这个托盘上安装了一个姿态传感器。该传感器检测机身（躯干）的姿态并控制姿态。

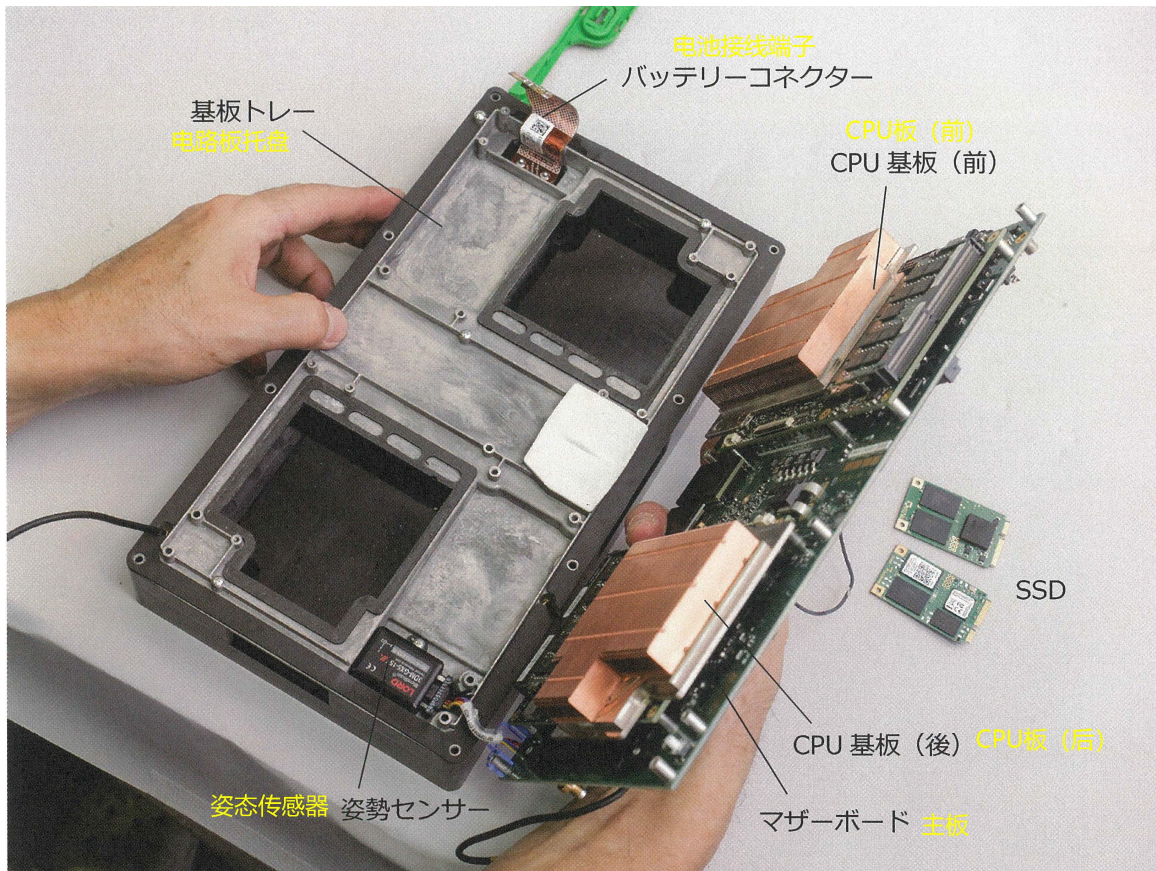


图 6.34: 主计算机下面的镁合金电路板托盘。主板下方有2块CPU板。其结构是铜散热片暴露在基板托盘下方，并由穿过它的冷却空气冷却。姿态传感器模块和电池的连接器安装到了托盘上。(照片:加藤 康)

主板背面，有类似的CPU板形状的散热器(图 6.35)。在树脂外壳的背面和托盘下方的镁合金电缆板托盘上设置了冷却空气通道，以让CPU的散热器有效地冷却。通过散热器加热的空气从中心机架一侧的孔排出到相反侧。散热片和CPU贴有导热硅胶。

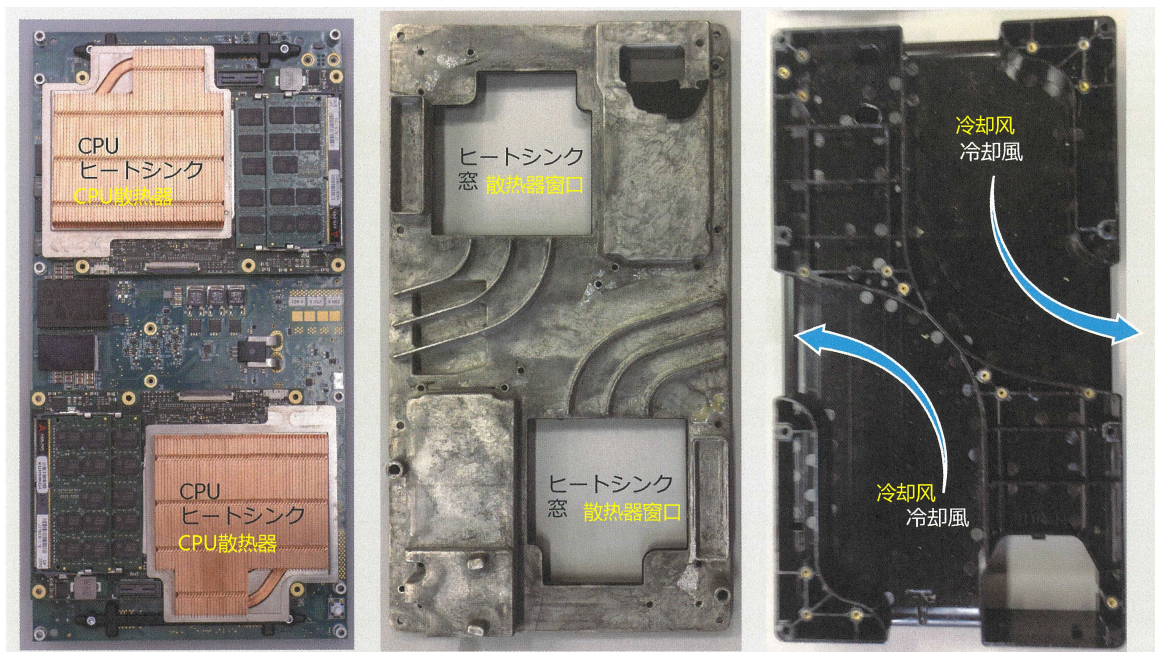


图 6.35: 主计算机的镁合金托盘有冷却风道用于冷却主计算机。(照片:松田篤志)

散热片从镁合金托盘的入口处露出，散热片与此托盘之间放置了泡沫橡胶密封条以防水。表面压力是需要足够防水的，但是表面压力是由CPU板承受的，这不是一个好的设计。相反，如果表面压力低，则防水性能可能低。此外，四足行走的动力的Spot没有任何悬架系统。关节像活物一样柔软地弯曲吸收冲击力看似是一种设计理念，但当腿接触路面时，行走声会发出很大的噪音。这表明高频冲击传递到主体。换句话说，存在这种振动（冲击）会传递到CPU的风险。看来在崎岖路面上的操作没有按预期进行。

6.3.2 主板

主板似乎主要负责从搭载的IC和变压器中产生和控制驱动电机的电源，以及与外部传感器和设备的交换信息网络 (图 6.36、图 6.37、图 6.38)。

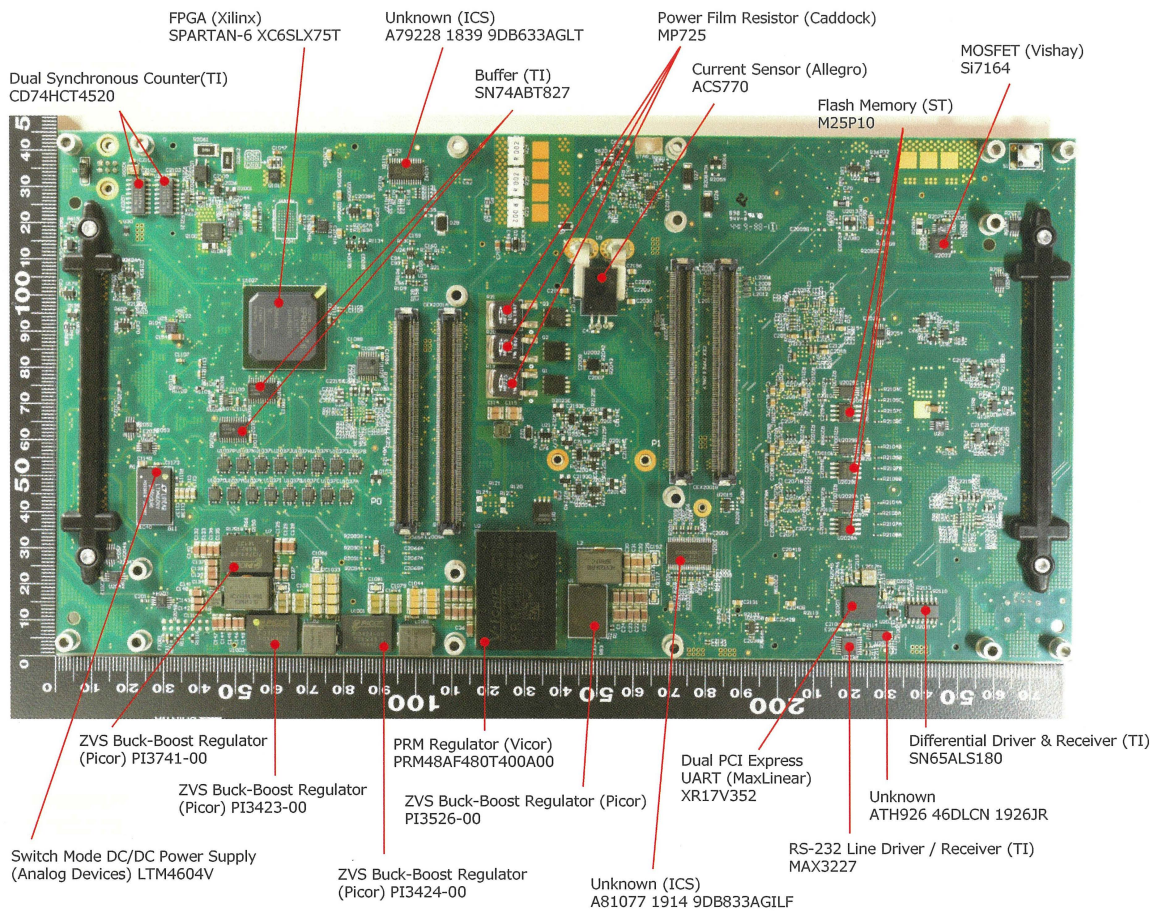


图 6.36: 主板A面1 电源部件有很多，如电阻器、稳压器和DC/DC转换器。电路板的层数为14。(照片：Fomalhaut Techno Solutions)

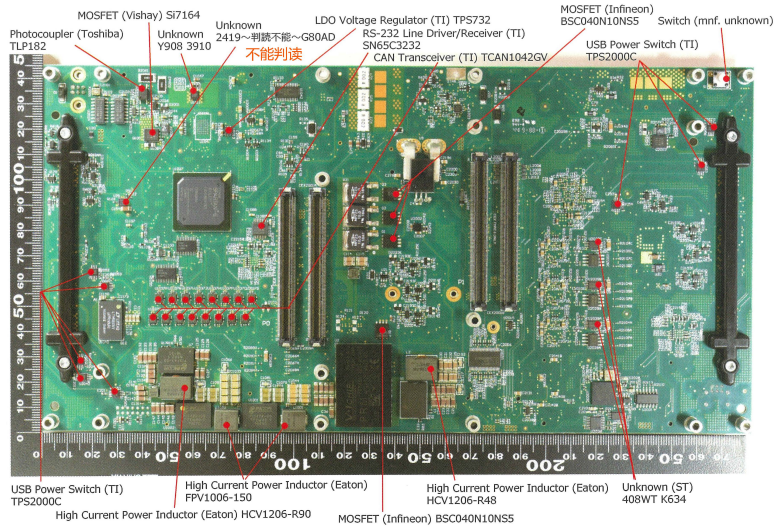


图 6.37: 主板A面除了供电部分, 还可以看到与USB、RS232C、CAN相关的部分, 可以看出它们负责与外界通讯。(照片: Fomalhaut Techno Solutions)

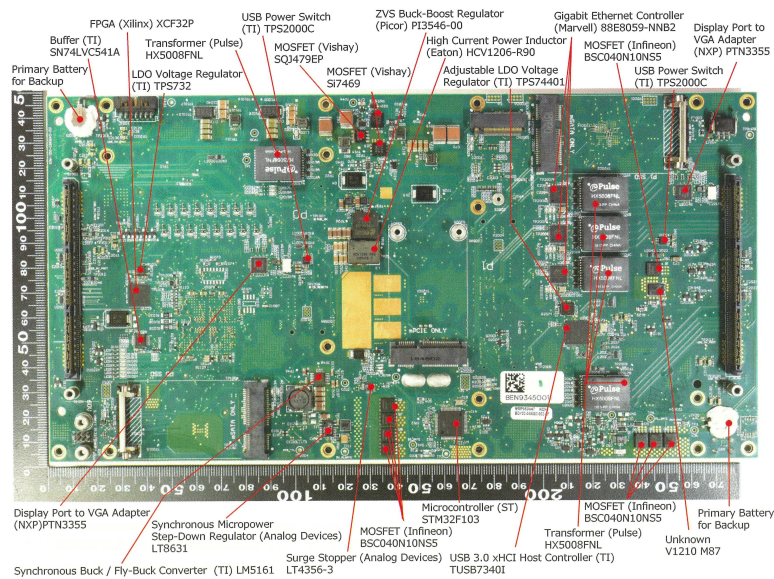


图 6.38: 主板B面除了电源组件外, 还安装了G-bit以太网控制器IC和显示器用的IC。(照片: Fomalhaut Techno Solutions)

6.3.3 CPU板

CPU板是主板的子板，主板上安装了两块相同的子板。CPU板的规格，一句话就是高端服务器。它由英特尔的“Xeon处理器E3v5系列”和作为处理器的外围IC组成。每个CPU板有2个DRAM内存插槽和两个兼容DDR4 2133 MHz的16 GB模块，总共32 GB (图 6.39、图 6.40、图 6.41)。

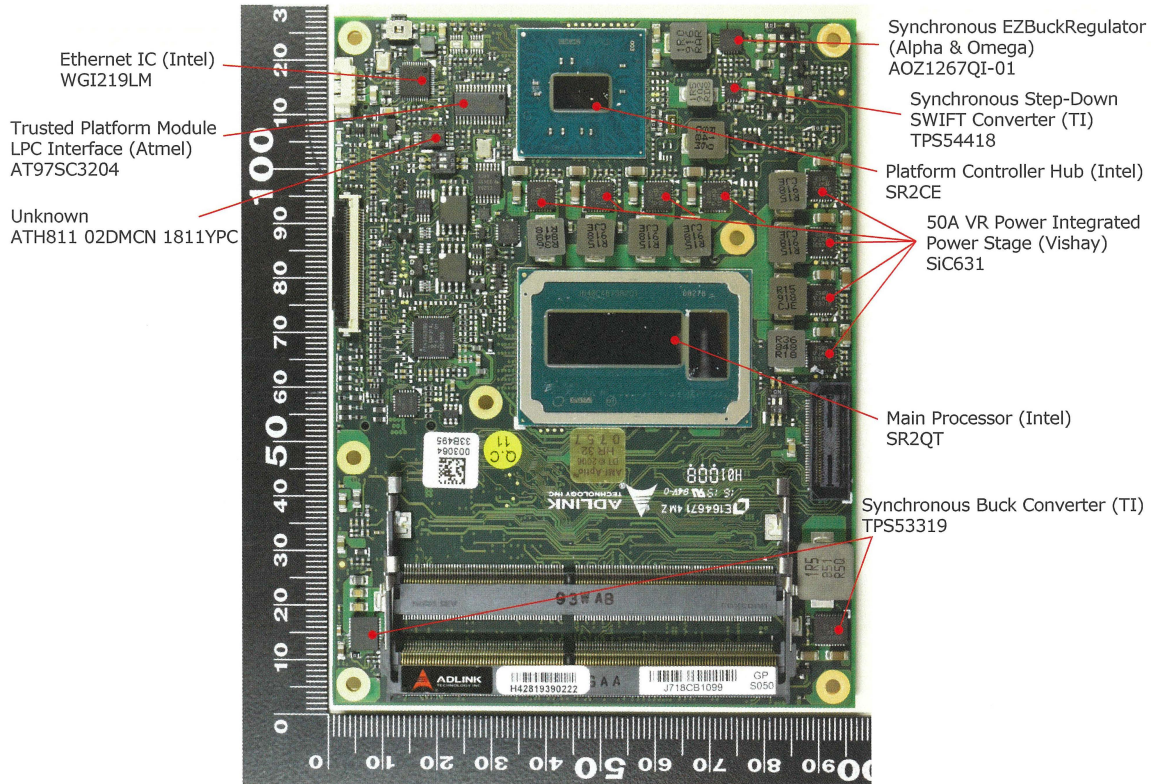


图 6.39: CPU板A面1作为处理器，搭载了Xeon处理器E3v5家族。电路板的层数为12层。(照片：Fomalhaut Techno Solutions)

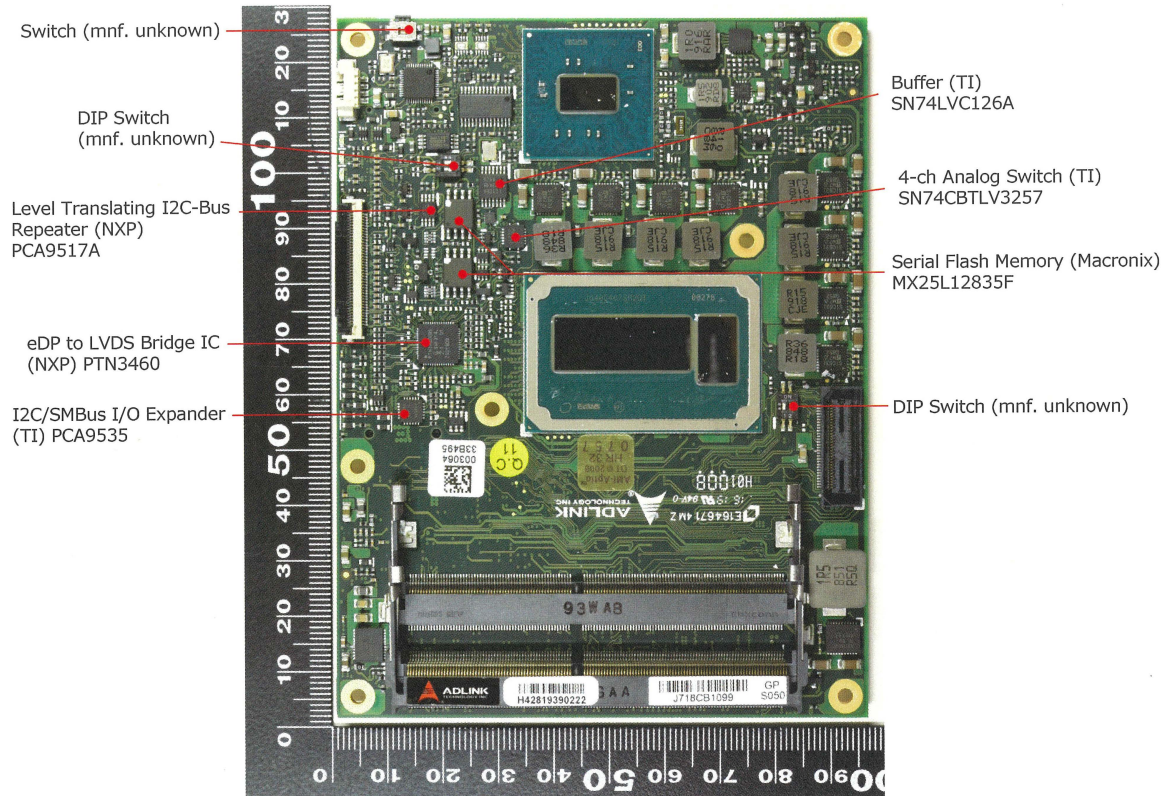


图 6.40: CPU板A面2以处理器为中心, 配备了用于外部接口的外围电路IC。(照片: Fomalhaut Techno Solutions)

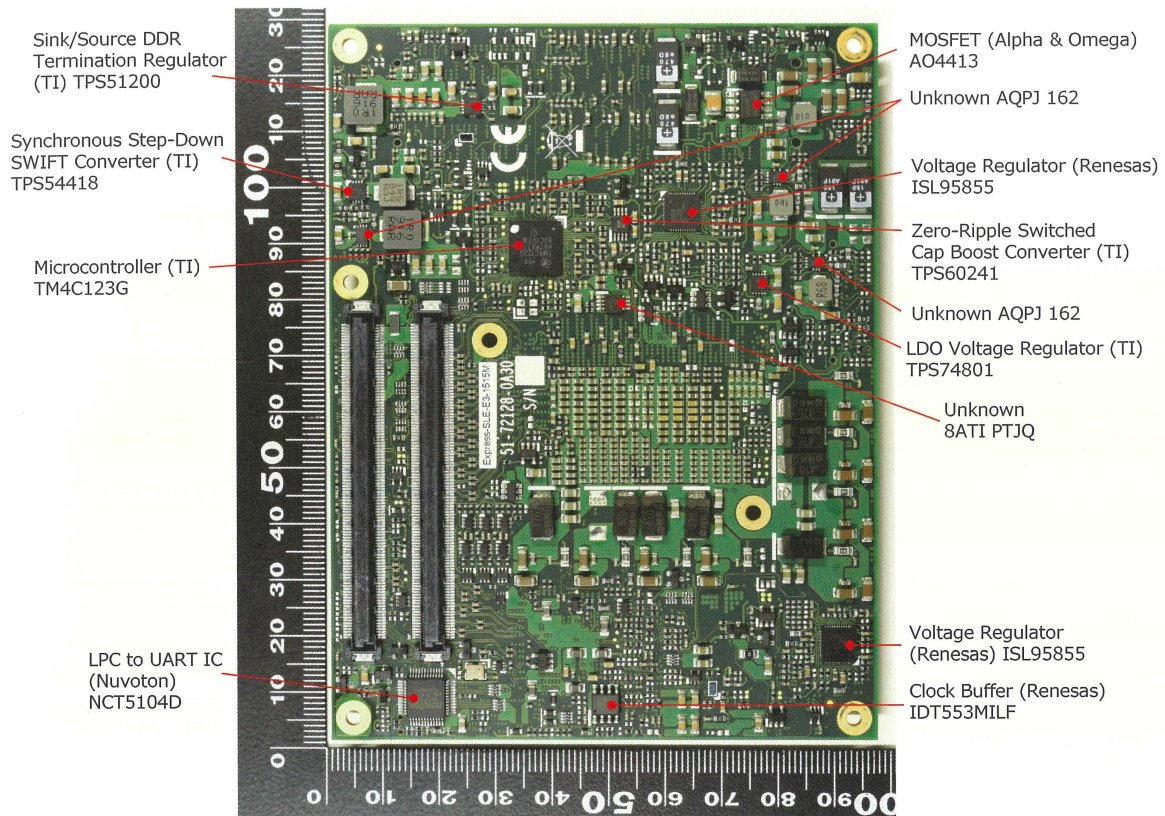


图 6.41: CPU板B面使用左下角可见的连接器连接到主板。在这面可以看到有很多部件可以为处理器稳定供电。(照片: Fomalhaut Techno Solutions)

6.3.4 WiFi高频板

WiFi高频板是搭载兼容IEEE802.11a/b/g/n的无线LAN IC和美国高通Atheros的WiFi集成IC“AR9590”的板卡(图 6.42)。拆解的Spot Explorer只配备了2.4 GHz频段的的天线，因此不支持使用5GHz频段的802.11a。该板似乎是通过一个PCI Express 的连接器连接到主板。

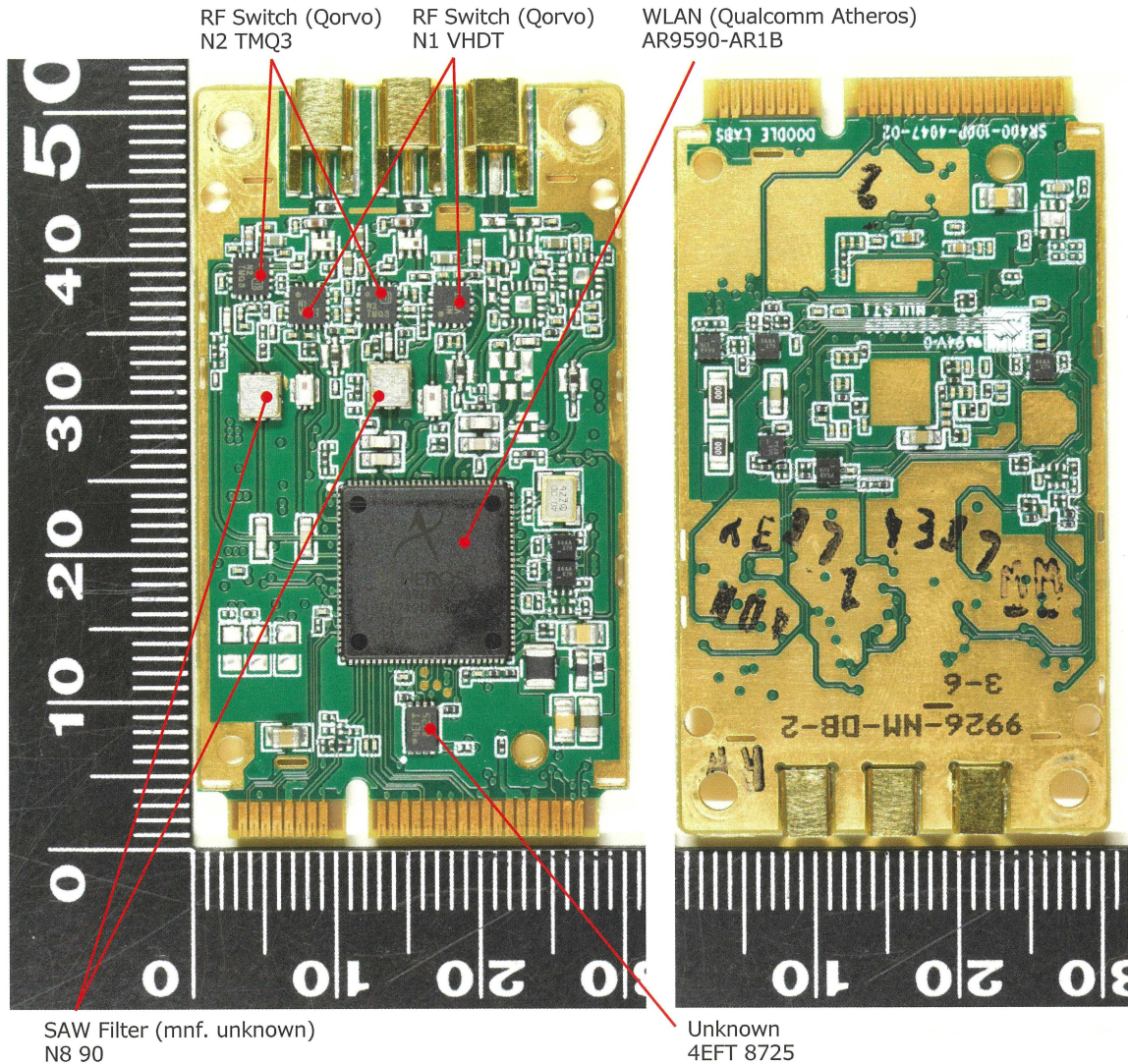


图 6.42: WiFi高频板 搭载高通Atheros WiFi IC, 支持IEEE802.11a/b/g/n。电路板的层数为4。(照片: Fomalhaut Techno Solutions)

6.3.5 姿态传感器

姿态传感器是单独准备在固定主板的托盘上的电子元件。原原本本用的美国LORD MicroStrain的“130-3DM-GX5-15”的这种IMU（惯性测量单元）(图 6.43)。它可以测量6个轴，外壳尺寸为36 mm × 36.6 mm × 11.1 mm。

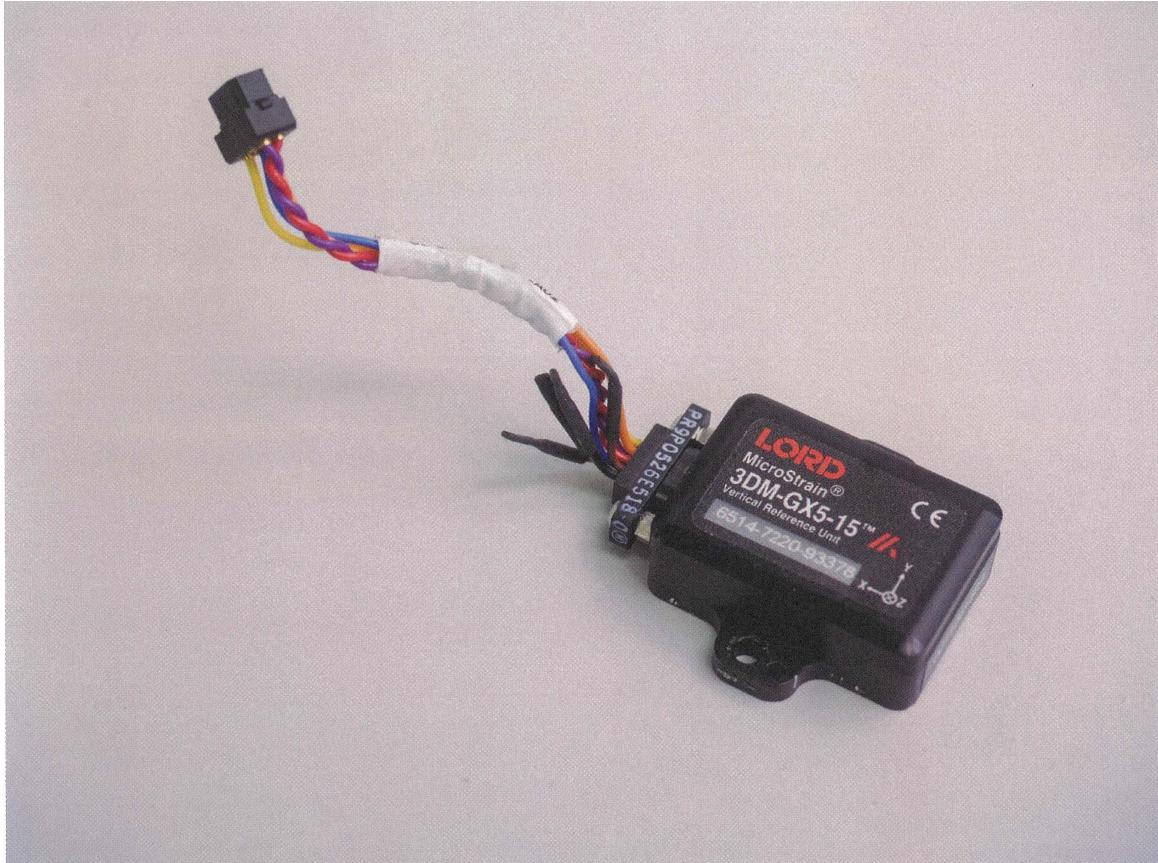


图 6.43: 姿态传感器的外观采用的是LORD MicroStrain的IMU（惯性测量单元）“1303DM-GX5-15”。(照片:加藤 康)

姿态传感器的内部由英国Silicon Sensing的陀螺仪、美国霍尼韦尔的地磁传感器和美国ADI公司的加速度计组成(图 6.44)。

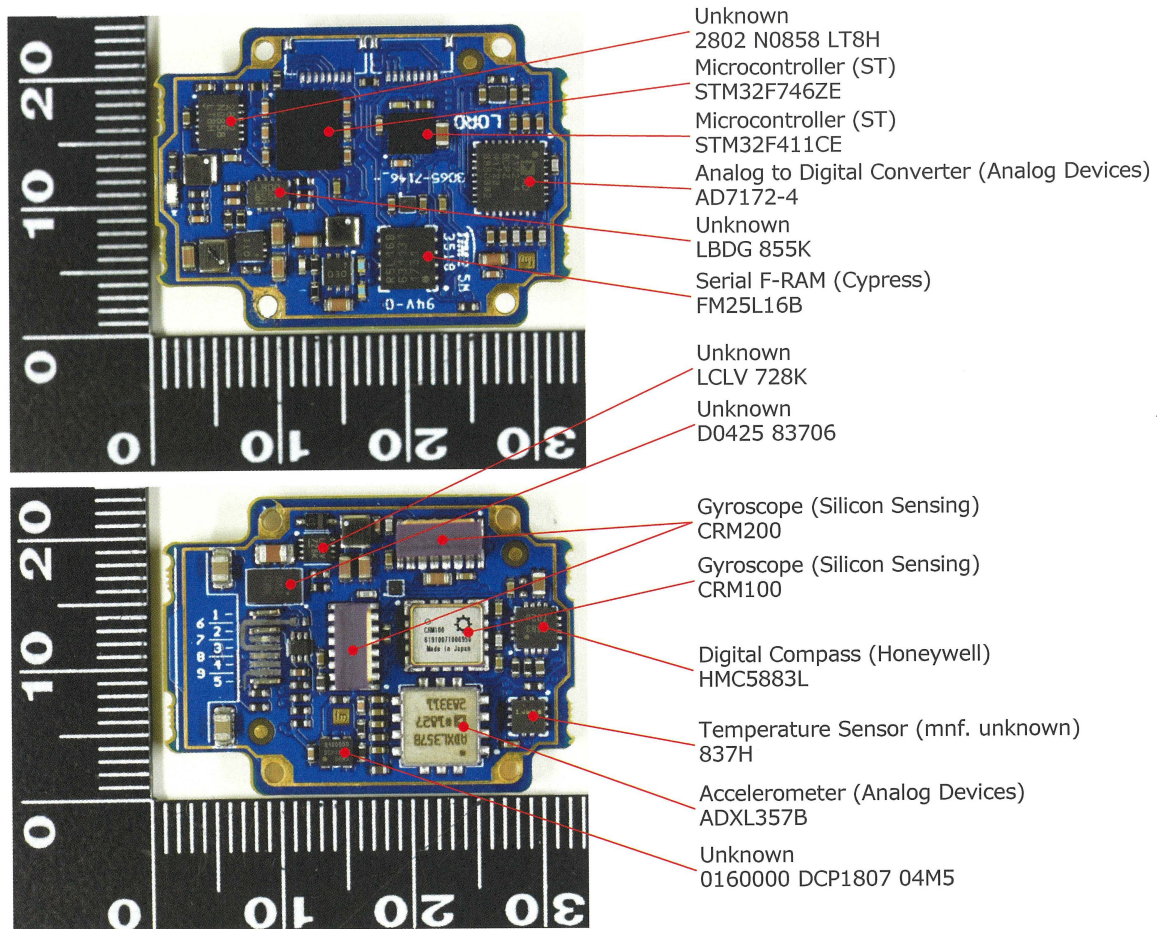


图 6.44: 姿态传感器的内部搭载了Silicon Sensing的陀螺仪、Honeywell的地磁传感器、Analog Devices的加速度计。(照片:加藤 康)

6.4 腿驱动组件

6.4.1 安装位置和安装方法

腿驱动组件的电子元件安装在每个驱动单元上的电路板(图 6.45)。具体来说,有驱动膝部、X轴、Y轴各电机的电机驱动电路板(图 6.46),以及测量施加在腿上的载荷(仅在膝部)的称重传感器电路板(图 6.47),用于测量角度的编码器电路板(图 6.48),X轴和Y轴上的扭矩传感器板以及霍尔IC电路板(图 6.49)。(霍尔IC电路板请参考“5.3.3”Y轴驱动扭矩传感器电路板)。Knee、X轴、Y轴的电机驱动电路板是一样的,4条腿上装的是同一种电路板。

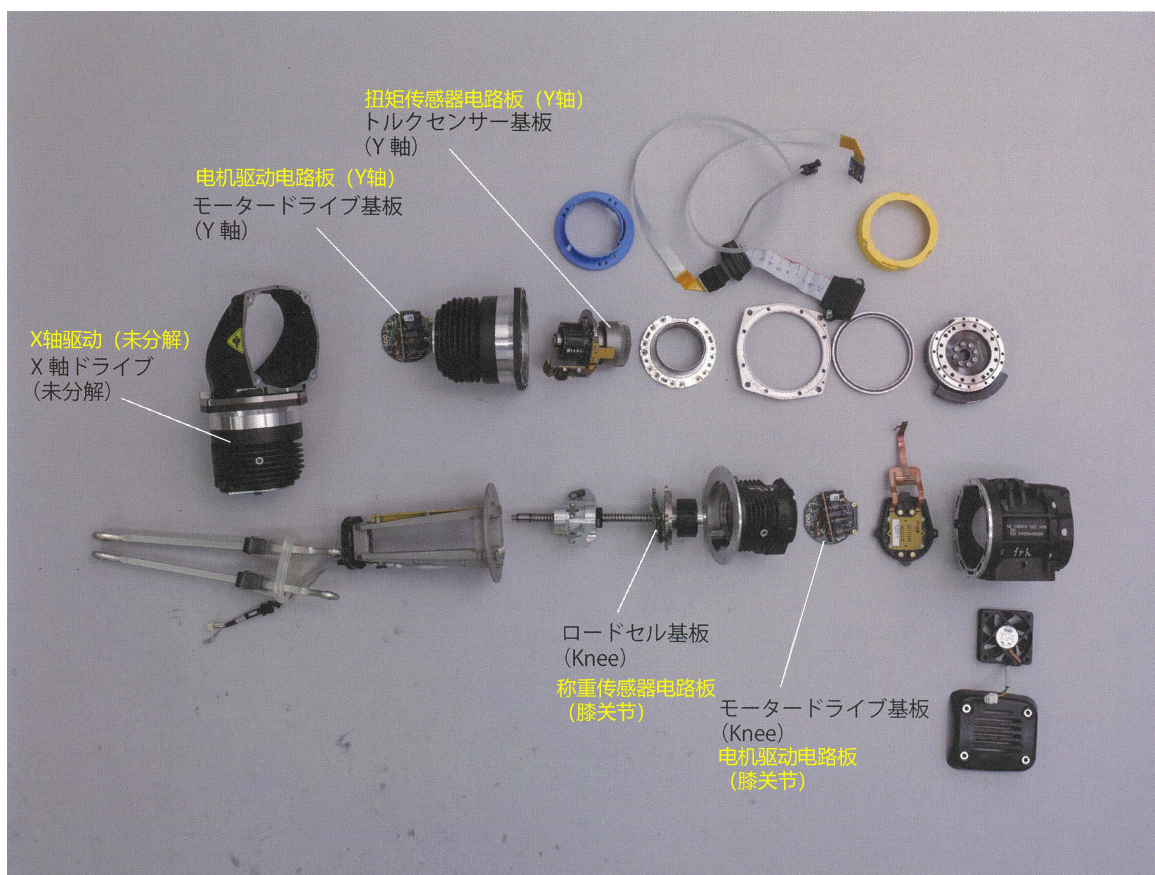


图 6.45: 腿驱动组件中的电路板 编码器电路板安在膝盖的线性执行器的外壳上, 未在照片中显示出来。(照片:加藤 康)

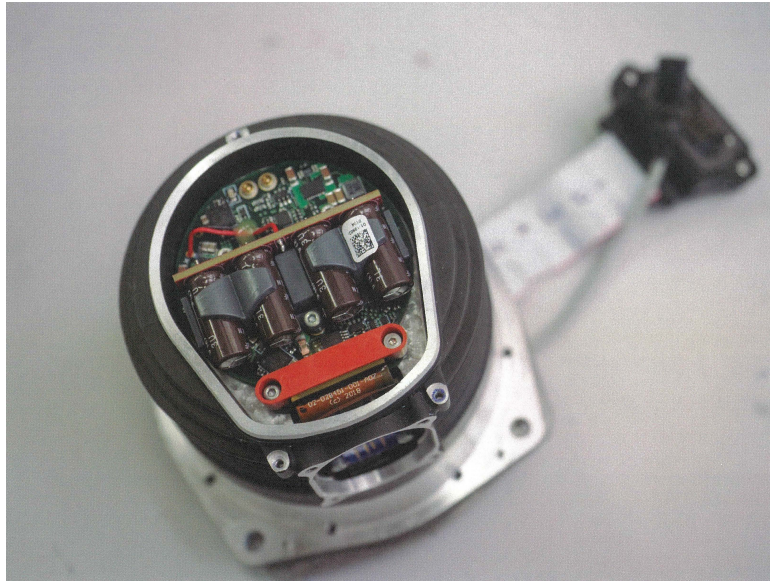


图 6.46: 电机驱动电路板X轴、Y轴、Knee通用。(照片:加藤 康)

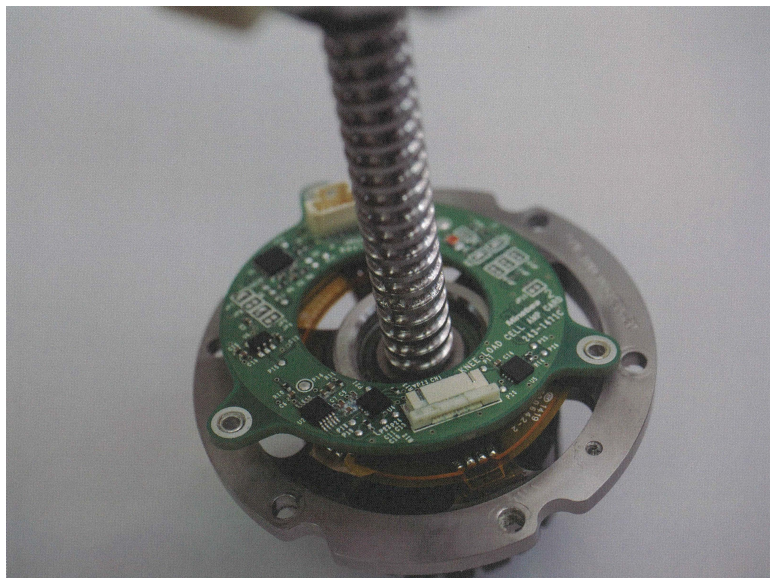


图 6.47: 称重传感器电路板在膝关节电机下方。照片是倒过来拍的，所以可以在上面看到它。(照片:加藤 康)



图 6.48: 编码器电路板 在金属盘下面可以看到的电路板是编码器电路板。(照片:加藤 康)



图 6.49: 扭矩传感器电路板和霍尔IC电路板 照片是Y轴电机驱动, 但X轴也一样。(照片:加藤 康)

6.4.2 电机驱动电路板

电机驱动电路板是Knee、X轴、Y轴通用的电路板。它被安装成挡住电机外壳的一侧。由于电路板上有一个CAN控制器和3对MOSFET，可以看出在通过CAN与主计算机通信的同时使用三相交流电控制电机(图 6.50)。另外，在电机驱动电路板与电机轴接触的地方有一个霍尔传感器，似乎是在这里测量旋转角度。

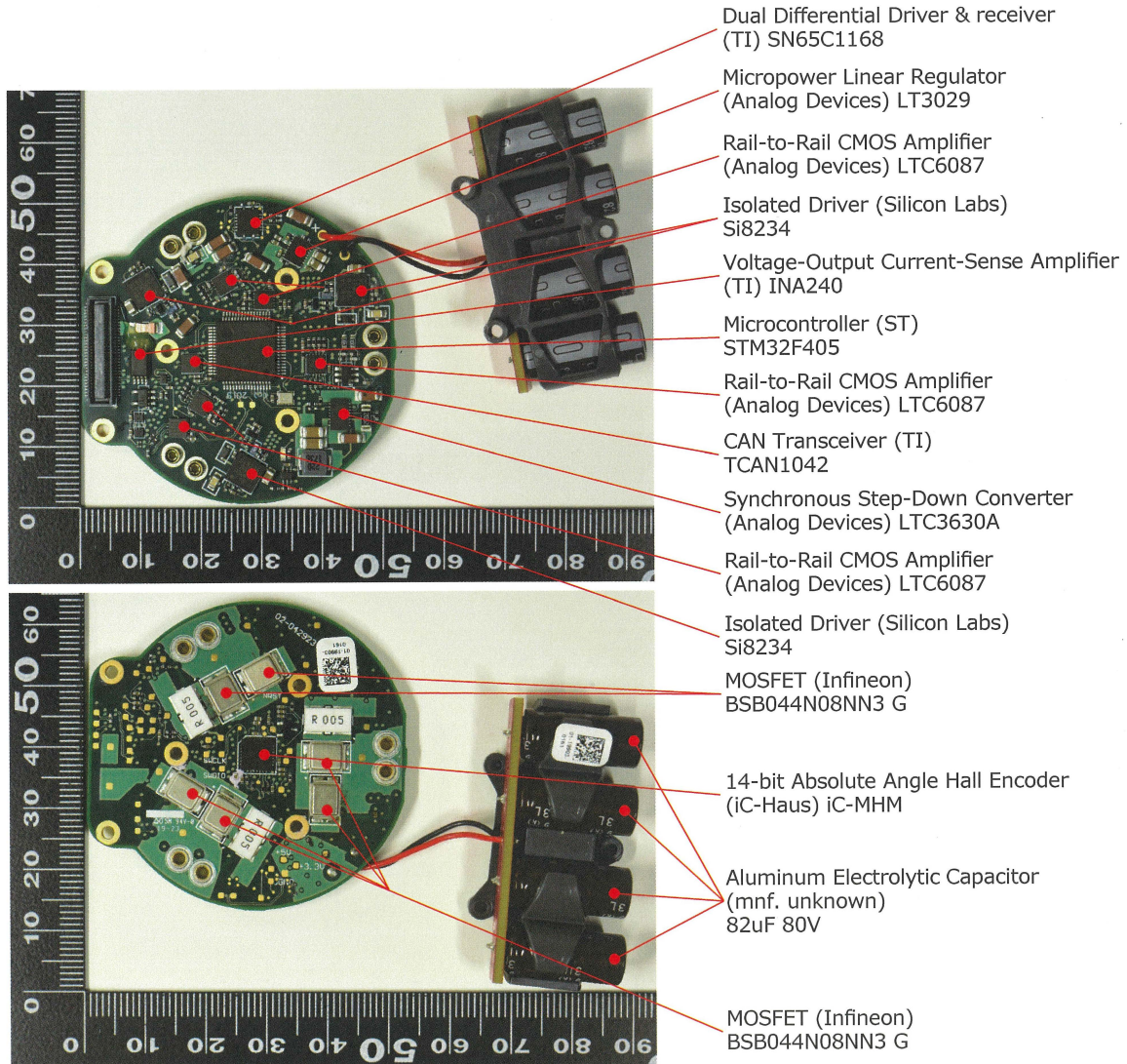


图 6.50: 电机驱动电路板 上图为与电机接触面的相反面, 下图为与电机接触面。它配备了产生三相交流电驱动电机的电路、CAN收发器IC和用于检测旋转角度的霍尔传感器。电路板的层数为8层。(照片: Fomalhaut Techno Solutions)

6.4.3 称重传感器电路板

称重传感器板是用于测量施加到驱动膝关节的滚珠丝杠底部的载荷的电路板 (图 6.51)。挠度似乎是用拉伸在滚珠丝杠的支撑部分上的应变片测量的，然后从那里计算负载。称重传感器板配备了放大应变片电阻值的放大器、将值数字化的IC和传输数据的IC。

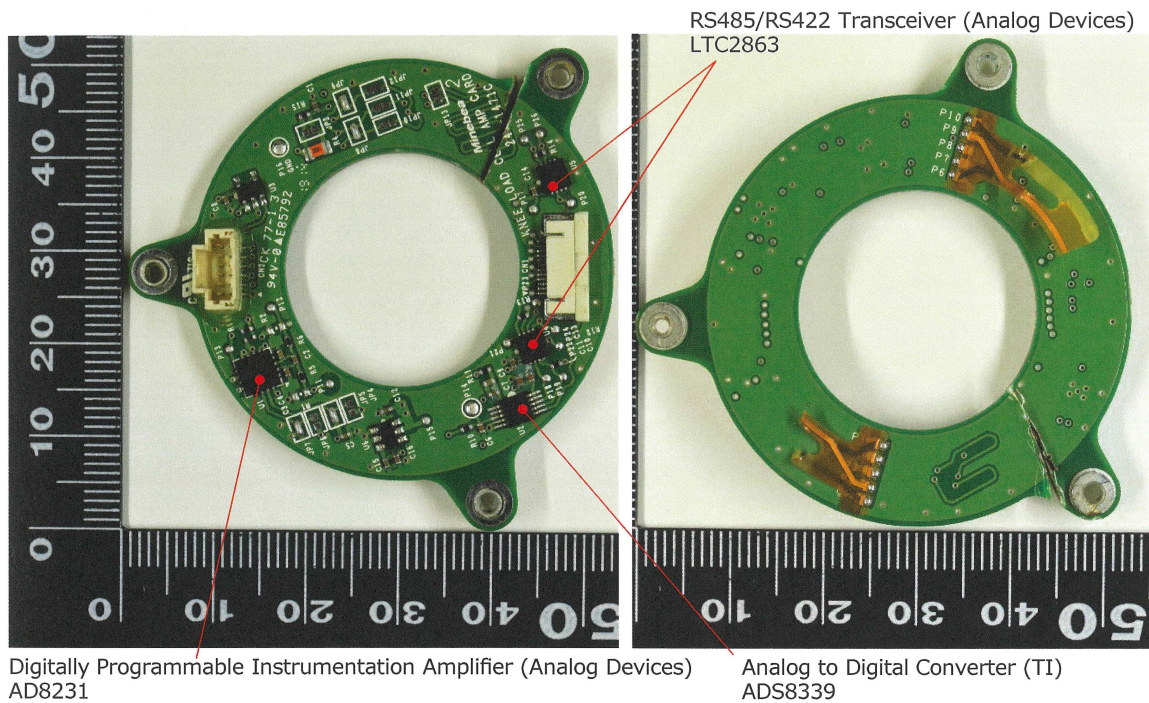


图 6.51: 称重传感器电路板左侧为与电机侧相反的面，右侧为电机侧的面。电机侧有一个滚珠丝杠支撑部分，并附有应变片。应变片是焊接的，所以当拿板子时它已经坏了。电路板层数为6。(照片: Fomalhaut Techno Solutions)

6.4.4 扭矩传感器电路板

扭矩传感器板在X轴和Y轴上，似乎每个驱动器的扭矩都是用应变片来测量的(图 6.52)。安装的IC与“6.4.3称重传感器电路板”完全相同。然而，电路板的形状是不同的，因为进行测量的应变片的位置和安装外壳的形状不同。

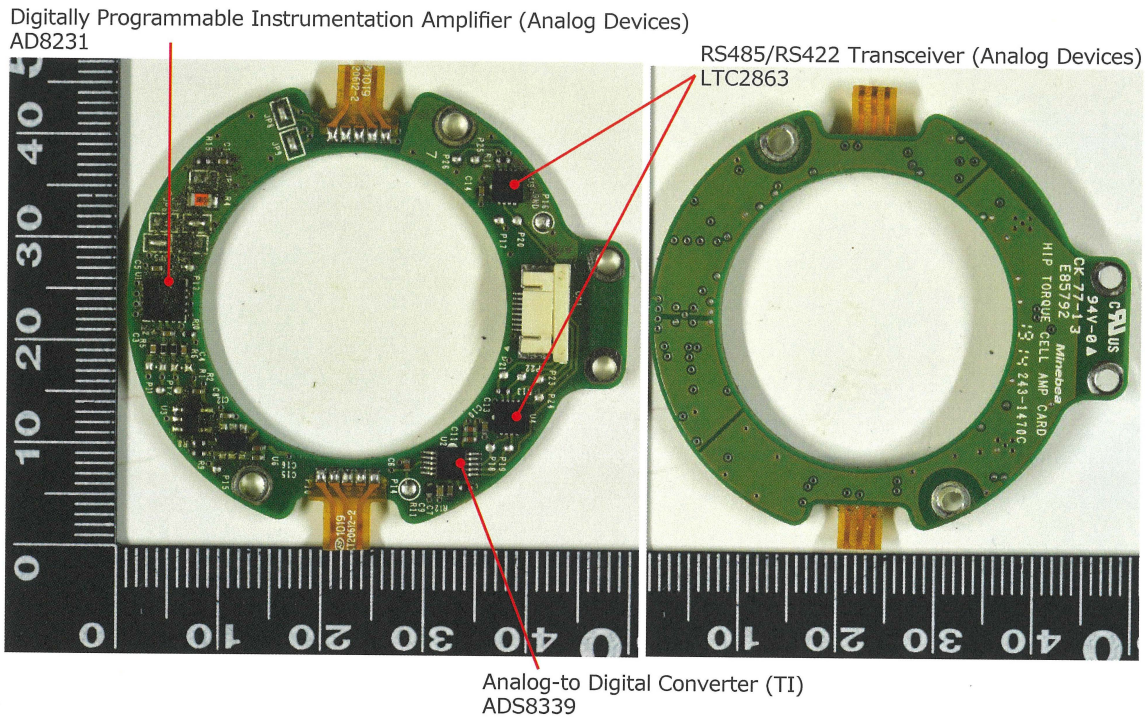


图 6.52: 扭矩传感器电路板 左侧为与电机侧相反的面，右侧为电机侧的面。应变片安装在电机侧的支架上。支撑驱动反作用力的扭矩是通过支架上的应变片来测量的。电路板层数为6。(照片: Fomalhaut Techno Solutions)

6.4.5 编码器电路板

编码器电路板安装在容纳膝关节线性致动器的外壳上，并位于与膝关节对应的轴的旋转部分的外侧 (图 6.53)。一个圆形的金属盘连接到这个轴上，电路板在它下面。电路板上搭载了德国iC-Haus的“Magnetic Off-Axis Absolute Position Encoder”霍尔传感器IC。这个盘子上有磁标记，通过检测磁来测出旋转的角度。

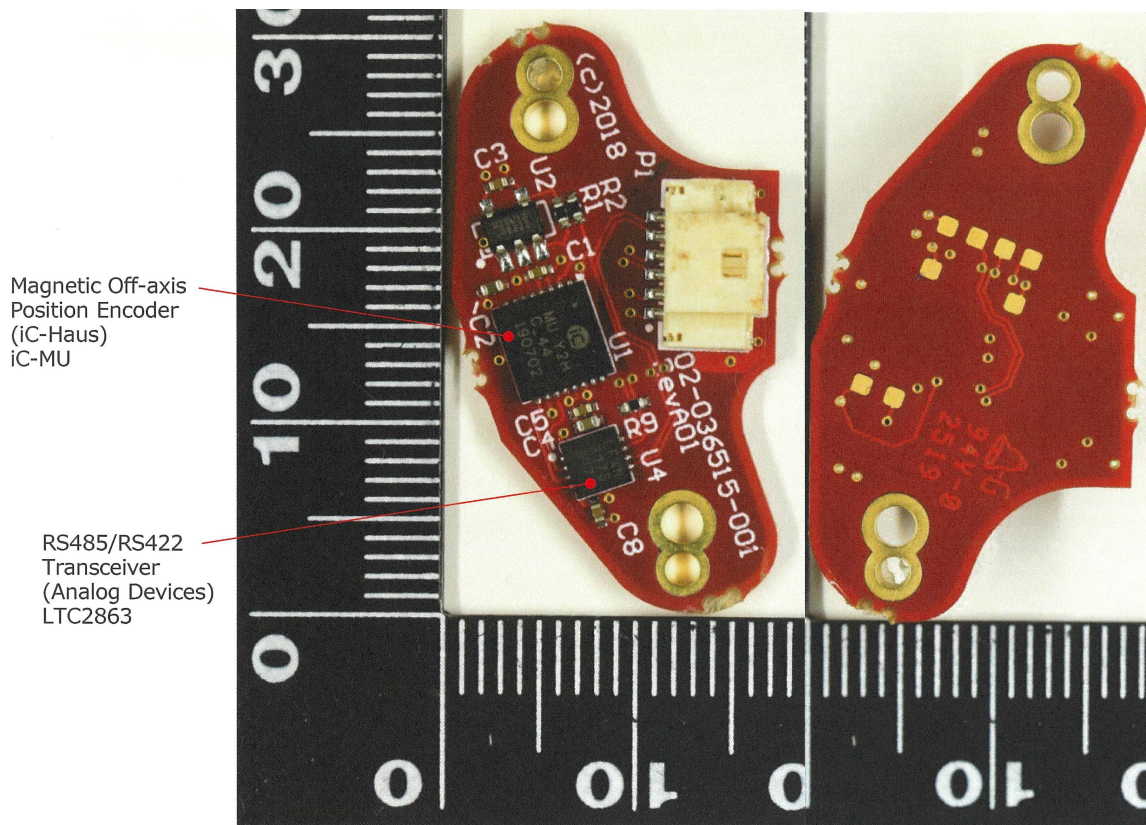


图 6.53: 编码器电路板 左边是圆盘，右边是反面。霍尔传感器是在圆盘下面，好像是在这里检测旋转角度。电路板的层数为4。(照片: Fomalhaut Techno Solutions)

6.5 电池组

6.5.1 外观及规格

电池组存放在Spot机身的腹部。电池组的尺寸为168 mm × 325 mm × 93 mm。电压为50.4 V，容量为605 Wh。



图 6.54: 电池组的外观连接到Spot的腹部。电池组的尺寸为168 mm × 325 mm × 93 mm。电压为50.4 V。容量为605 Wh。(照片: Fomalhaut Techno Solutions)

6.5.2 内部构造

电池组内部由电池模块和一块控制电路板组成(图 6.55)。它配备了56节18650大小的圆柱形电池。有LHS(Latent Heat Solutions)的文字写在模块上。网页显示它提供了一种潜热材料,可以吸收电池突然产生的热量并平衡整体热量。通过用这种材料包围电池,似乎延长了电池的寿命。

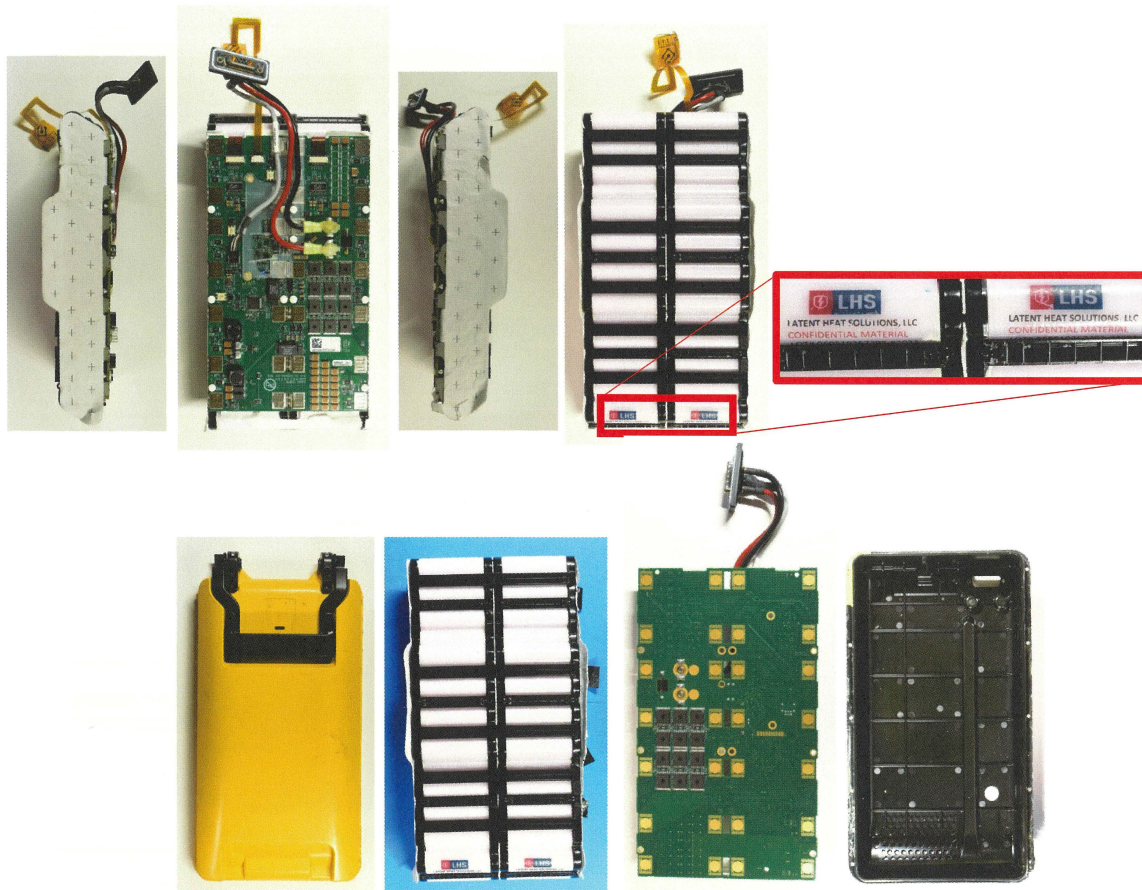


图 6.55: 拆卸电池组时 电池模块和电路板安装在外壳中。(照片: Fomalhaut Techno Solutions)

6.5.3 控制电路板

控制电路板配备了用于监控电池的IC和用于调整电池功率的MOSFET (图 6.56、图 6.57)。此外，它配备了一个CAN收发器IC，CAN用于与主计算机进行通信。

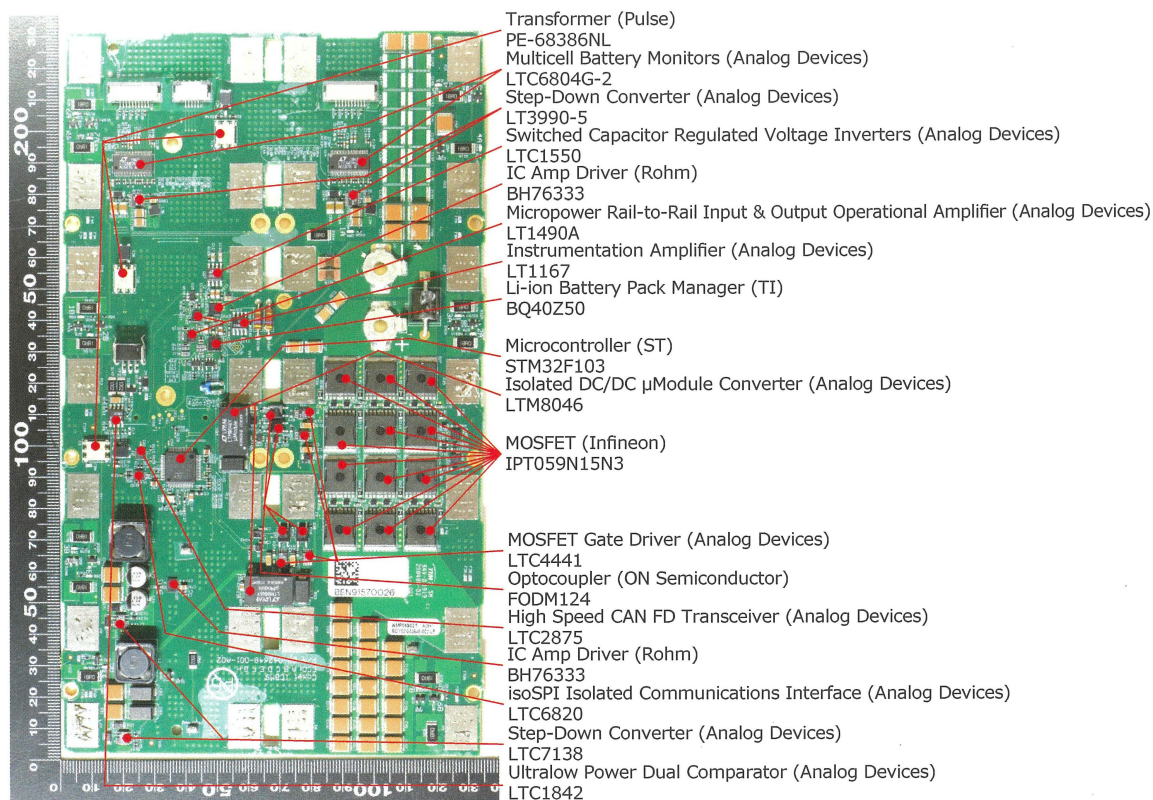


图 6.56: 电池组控制电路板的A面(电池模块的反面)它配备了控制电池的电路和调节电压的电路。电路板的层数为8层。可以在板上看到28个方形焊盘，电池模块的电极线连接到这里。(照片: Fomalhaut Techno Solutions)

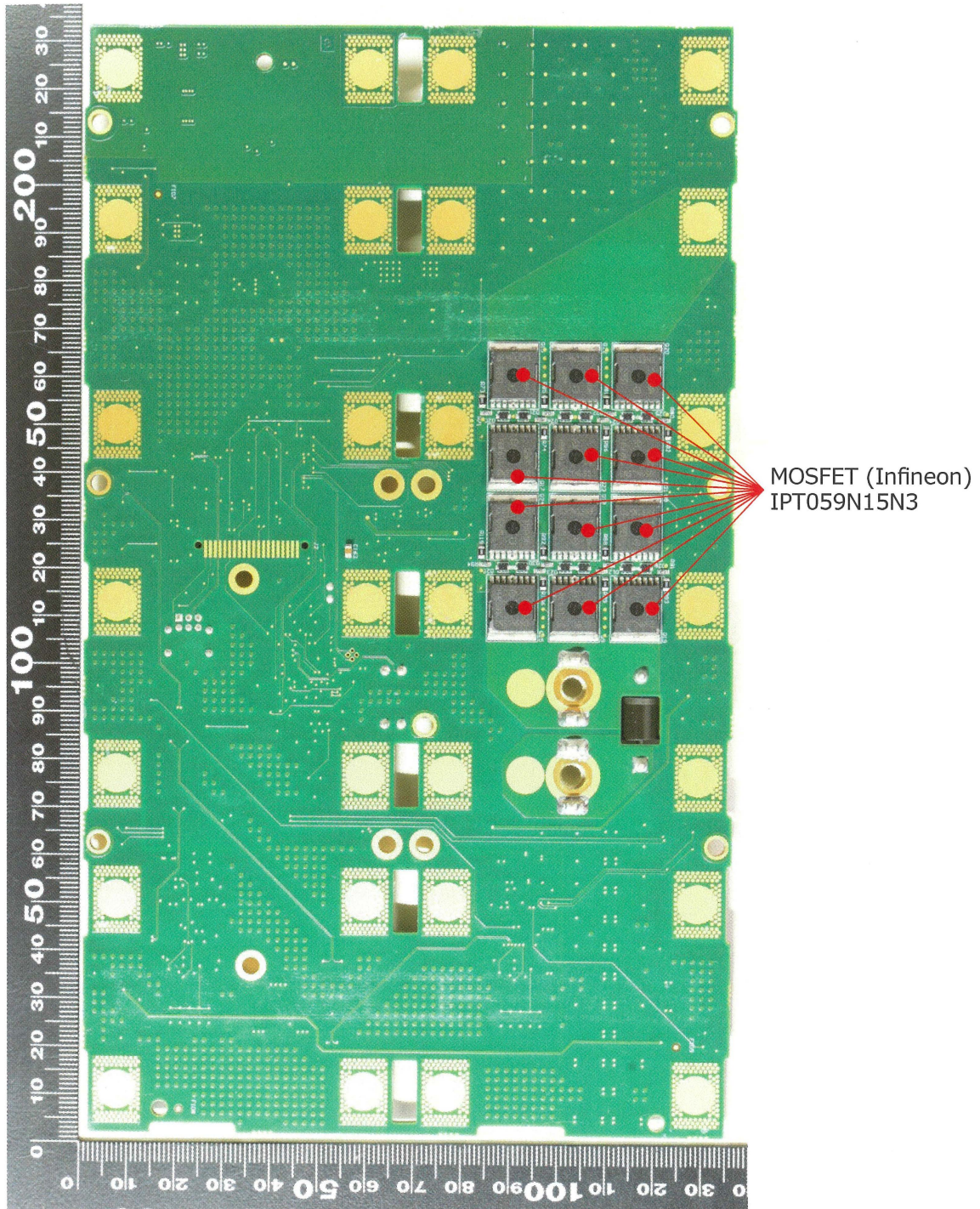


图 6.57: 电池组控制电路板的B面(与电池模块接触的面)这一侧几乎没有安装IC。(照片: Fomalhaut Techno Solutions)

6.6 遥控器

6.6.1 外观及规格

Spot的遥控器是一款安卓平板电脑，带有操纵杆等操作按钮(图 6.58)。由中国JinXingDigital制造，其品牌名为JXD。这款平板电脑不是定制产品，而是通用产品，可以在网上商店购买。型号名称为“JINXINGDAS192K”。它配备了7英寸触摸屏 FHD LCD 面板。处理器搭载中国瑞芯微的“RK3288”，搭载“Arm Cortex A17”四核（1.8 GHz运行）。尺寸为274 mm × 143.5 mm × 53.3 mm，重量为1.26kg。



图 6.58: 遥控器的外观直接使用JinXing Digital的“JINXINGDAS 192K”。(照片: Fomalhaut Techno Solutions)

6.6.2 内部构造

遥控器的内部结构由摇杆板、主板、电池、液晶面板等组成 (图 6.59)。



图 6.59: 遥控器的内部 它结构简单，主要由主控电路板、液晶面板和电池组成。(照片：Fomalhaut Techno Solutions)

6.6.3 主控电路板

主控电路板安装在一侧，结构非常简单，上面安装了处理器、DRAM、闪存和WiFi/蓝牙IC (图 6.60、图 6.61)。

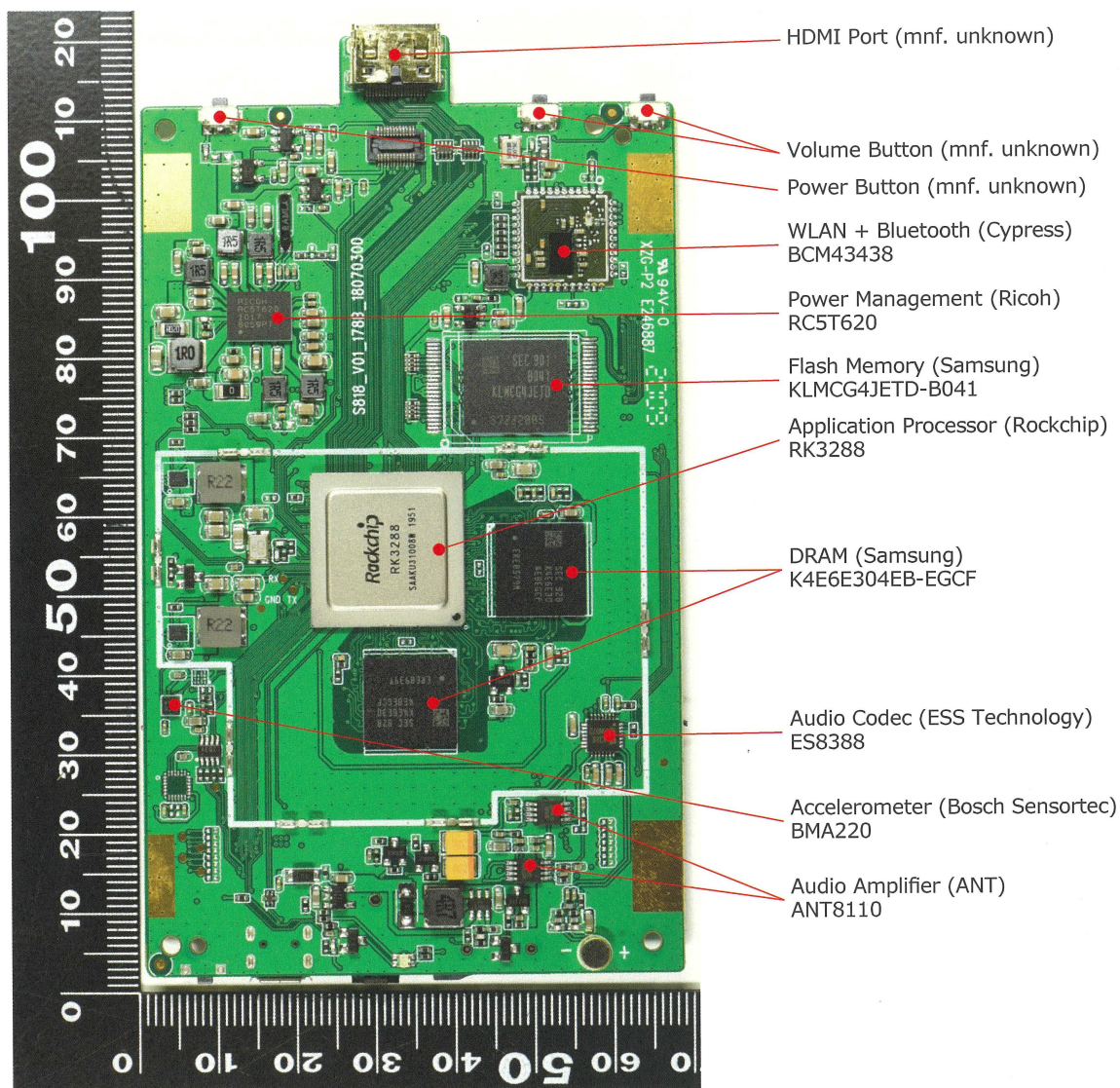


图 6.60: 遥控器主控电路板的A面 它的一侧有处理器、内存、闪存和无线IC。电路板层数为6。(照片: Fomalhaut Techno Solutions)

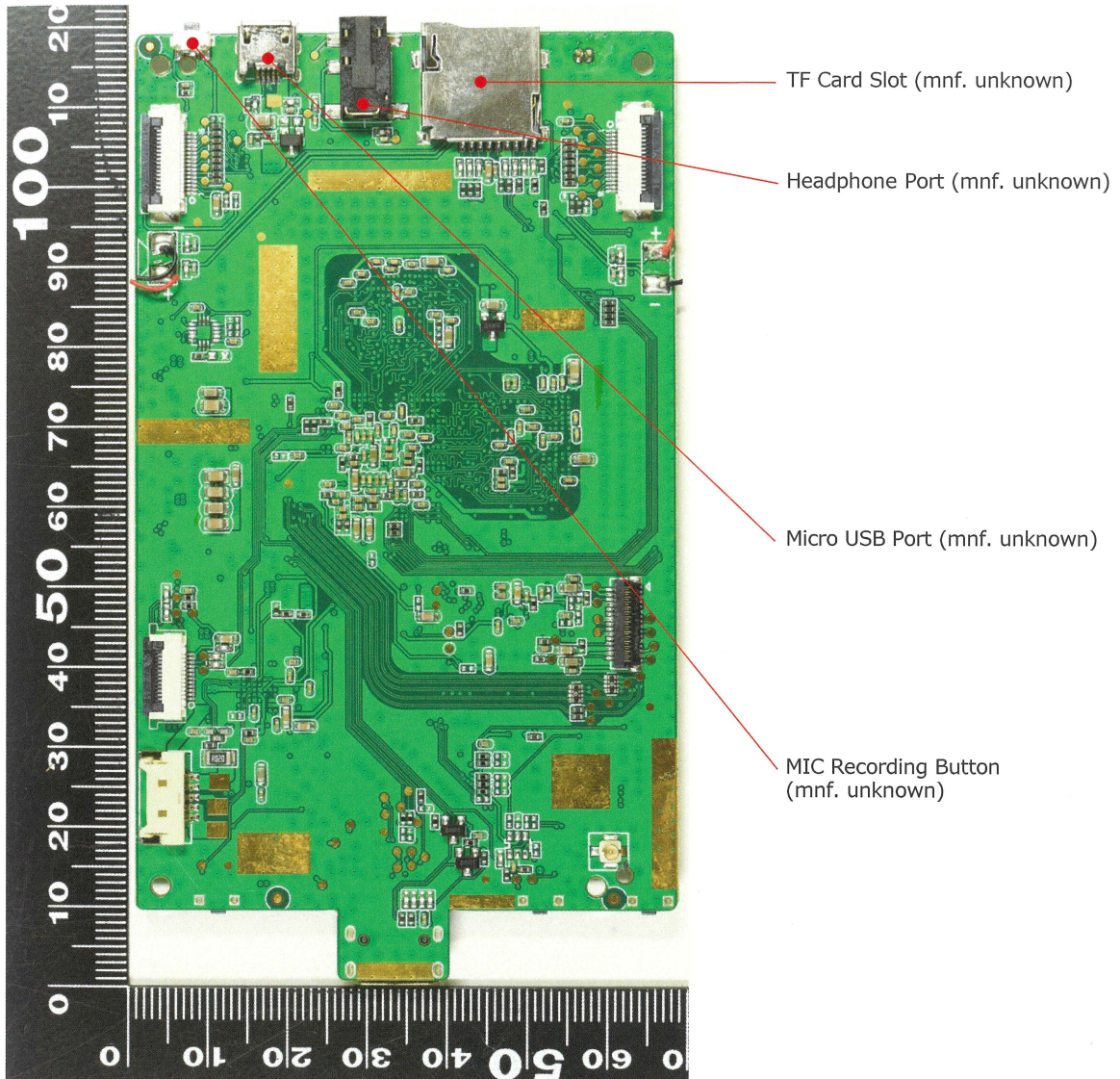


图 6.61: 遥控器主控电路板的B面 大多数都是连接器，没有安装IC。(照片：Fomalhaut Techno Solutions)

第 7 章 Payload

7.1 购买的Payload

7.1.1 概要

在购买Spot的同时也买了Payload，这是一个可选部分(图 7.1)。有摄像机“Spot Cam”和“EAP(Enhanced Autonomy Payload)”。自2021年8月22日起，Spot Cam不再单独销售，而是作为可与云台变焦相机组合使用的“INSPECTION”选项出售。EAP包括LIDAR(Light Detection And Ranging)和用于程序执行PC的“EDGE CPU”。此外，EDGE CPU有时也被称为“Spot Core”。另请参阅“1.3.4 扩展Payload”以了解规格和价格。



图 7.1: 购买的Payload 购买了Spot Cam和EAP(包括LIDAR和EDGE CPU)。(照片:加藤康)

7.2 Spot Cam

7.2.1 外观

Spot Cam是一种通过在圆筒形机身中安装5个摄像头，可以进行360°拍摄的设备(图 7.2)。外部尺寸为334 mm × 203 mm × 130 mm。重3.1 kg。垂直视角为170°，可输出9600 × 4800像素的摄像头图像。它的机身背面有一个连接器，底座可以固定在Spot背面的导轨上，后面部分的连接器可以连接到Spot的扩展端口上。

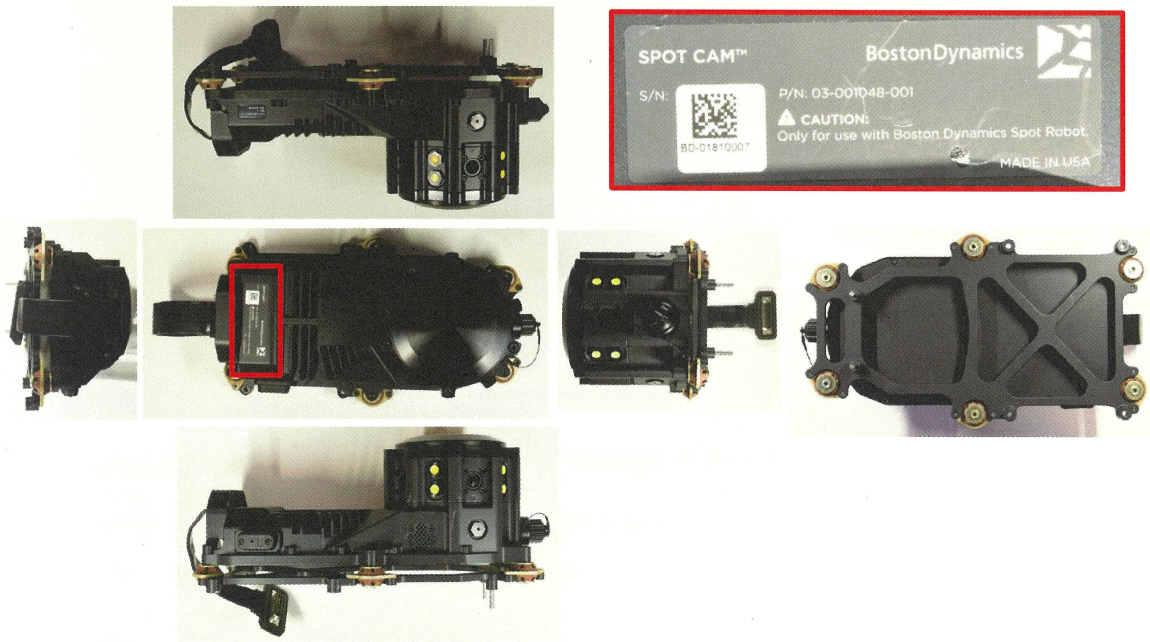


图 7.2: Spot Cam的外观 圆筒周围有5个摄像头。(照片: Fomalhaut Techno Solutions)

7.2.2 电路板安装位置

Spot Cam共安装了6种电路板(图 7.3)。即主板、处理器电路板、电源电路板、DC-DC转换电路板、云台变焦相机电路板、相机电路板。处理器电路板是主板的子电路板, DC-DC转换电路板是电源电路板的子电路板。



图 7.3: 拆解Spot Cam 相机电路板在相机支架中, 在这张照片中没有显示。除此之外, 它由5个电路组成。顶盖下方是云台变焦相机的接口。连接云台变焦相机时, 似乎是卸下了顶盖连接的。(照片: Fomalhaut Techno Solutions)

外壳由铝合金制成，可以看到切削机盖痕迹。这些电路板是立体安放的。因为壳子很大，所以里面有足够的空间 (图 7.4)。

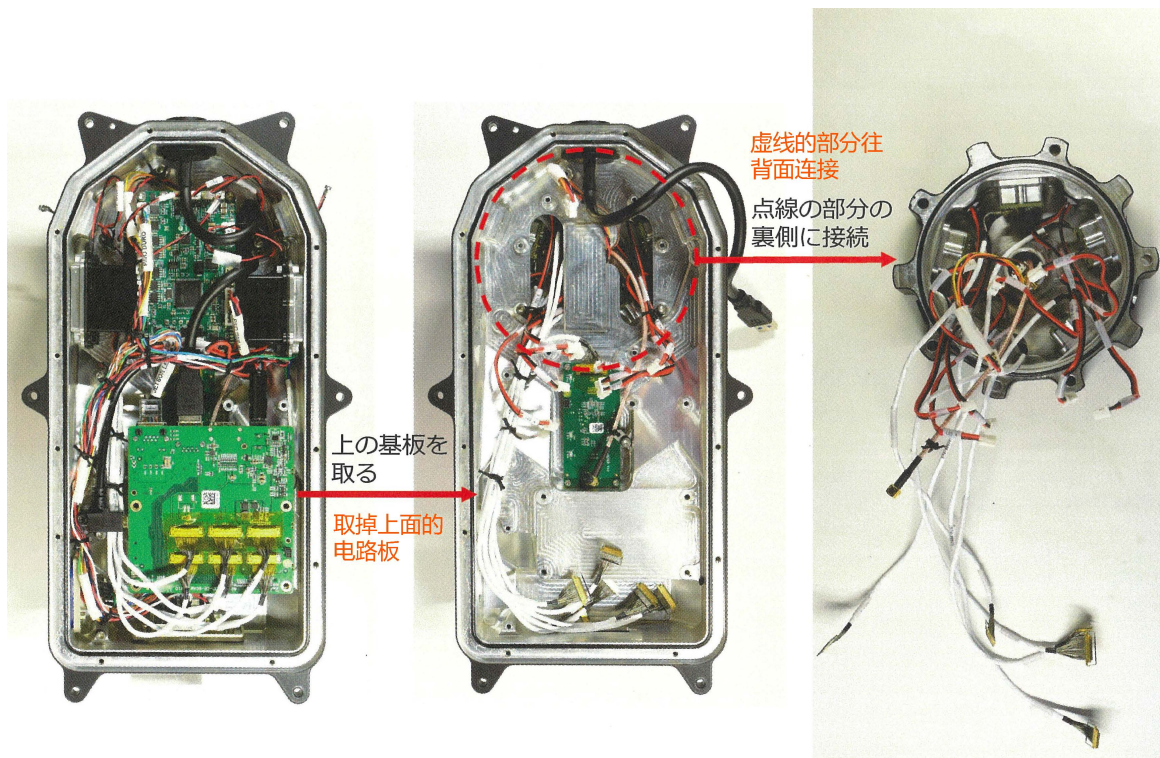


图 7.4: Spot Cam的内部构造 外壳由铝合金制成。电路板是立体安放的，整体上是留有余量的。(照片: Fomalhaut Techno Solutions)

7.2.3 搭载电路板

主板

主板具有桥接安装在 Spot Cam 上的每块板的功能和连接 Spot 机身等外部的接口功能(图 7.5)。它还有 HDMI 和 USB 连接器以及 SD 卡插槽。它还用于连接到子电路板的处理器电路板的连接器。

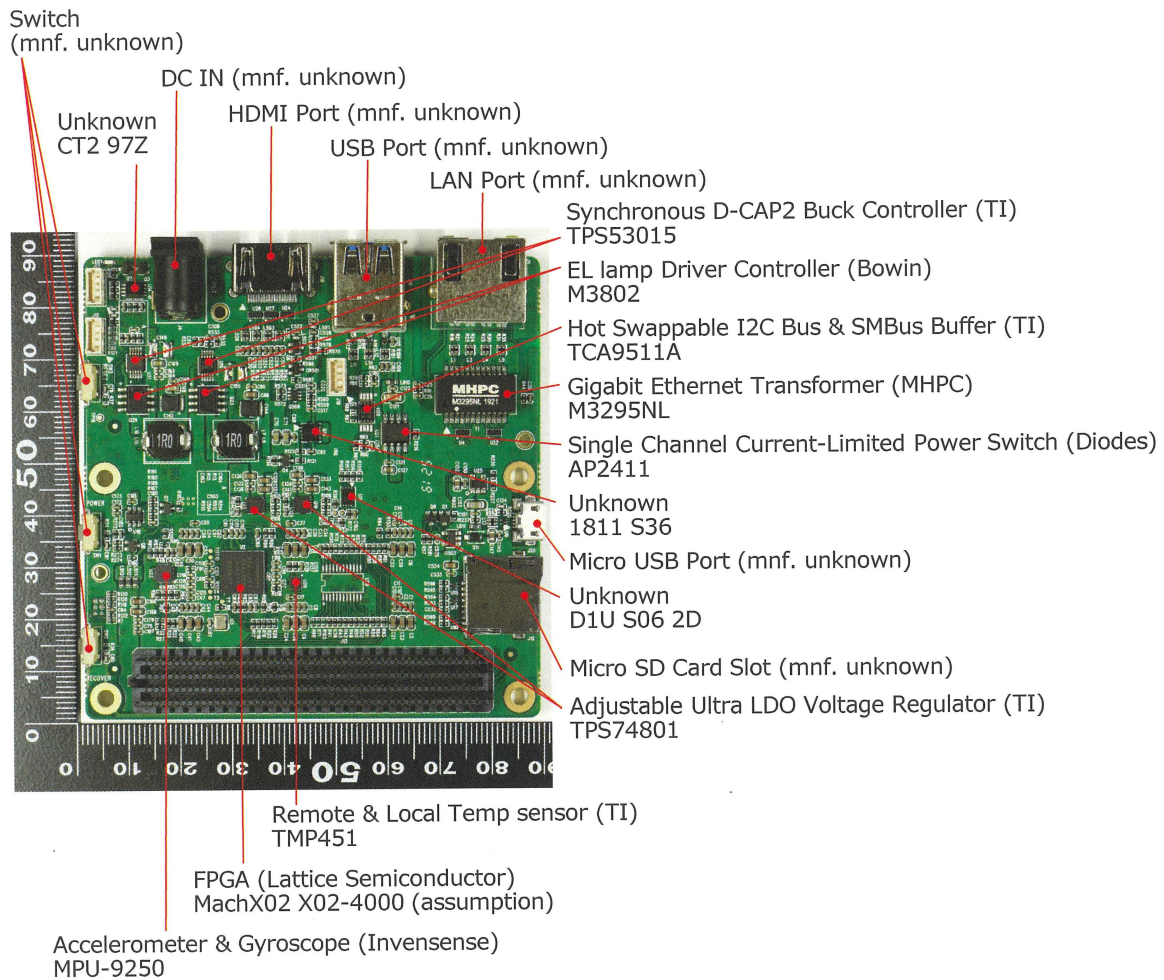


图 7.5: 主板A面 使用照片底部的黑色连接器连接到处理器板。电路板为6层板。(照片: Fomalhaut Techno Solutions)

在与安装了许多IC的一侧和相反的一侧(B侧), 安装了用于连接每个相机的连接器 (图 7.6)。有6个连接器, 5个用于内置摄像头, 1个用于连接外部的云台变焦摄像头。

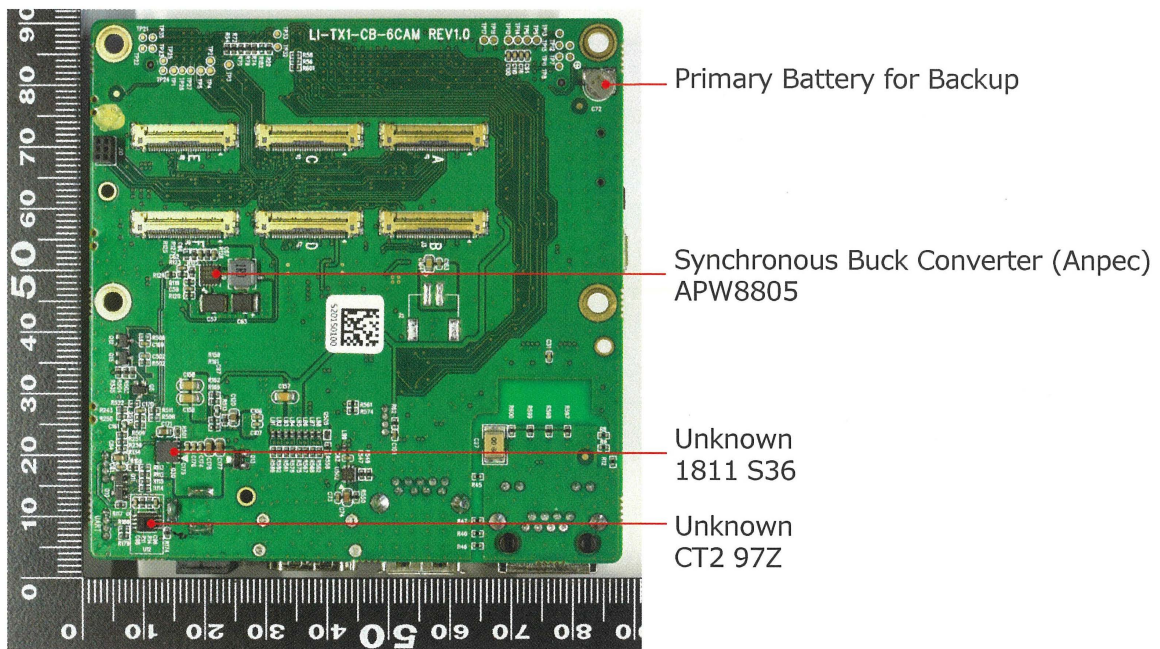


图 7.6: 主板B面 配备连接器以连接到相机。(照片: Fomalhaut Techno Solutions)

处理器电路板

处理器电路板搭载了“TE770D-A2”，即美国英伟达的SoC(System on a Chip) (图 7.7)。就芯片配置而言，似乎是嵌入式“JETSON TX2”模块本身。

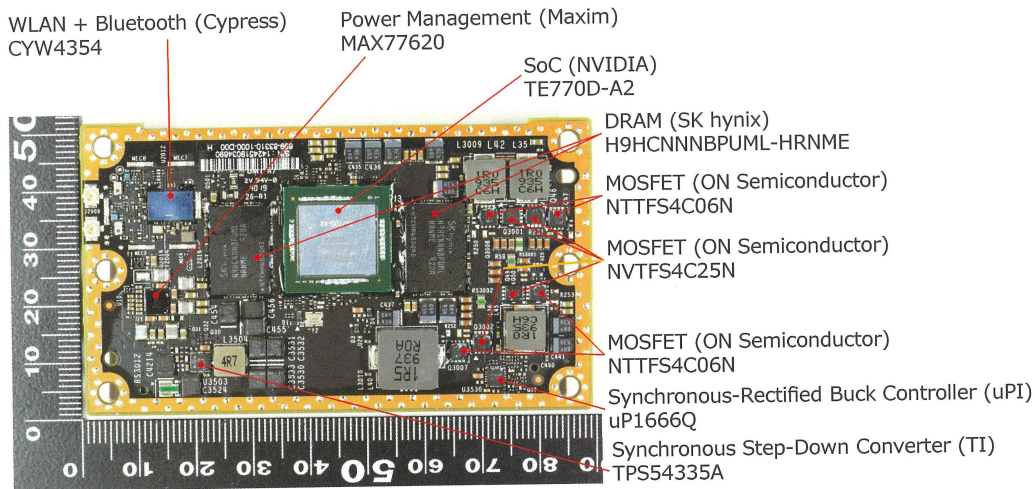


图 7.7: 处理器电路板A面 看来主要作用是接收和处理相机拍摄的图像。电路板12层。(照片: Fomalhaut Techno Solutions)

TE770D-A2搭载两颗基于Armv8的“Denver 2”、一颗Cortex-A57四核处理器，以及一颗基于Pascal架构的GPU (图 7.8)。

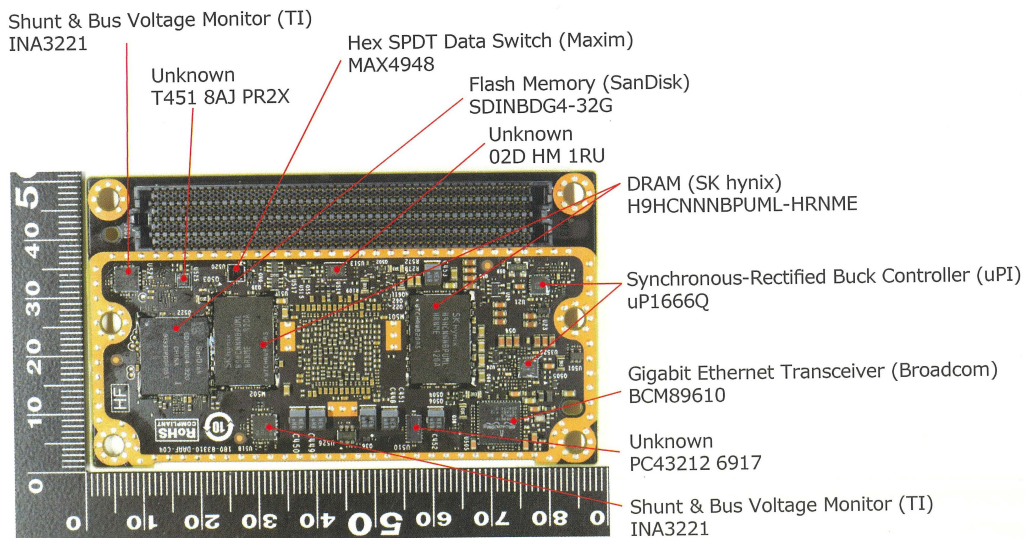


图 7.8: 处理器电路板B面 它配备闪存和DRAM。使用照片顶部的连接器连接到主板。(照片: Fomalhaut Techno Solutions)

电源电路板

电源电路板似乎起到了为Spot Cam中的每个板和部件提供稳定电源的作用(图 7.9)。具体来说,它为LED芯片和主板供电。主板由USB供电。

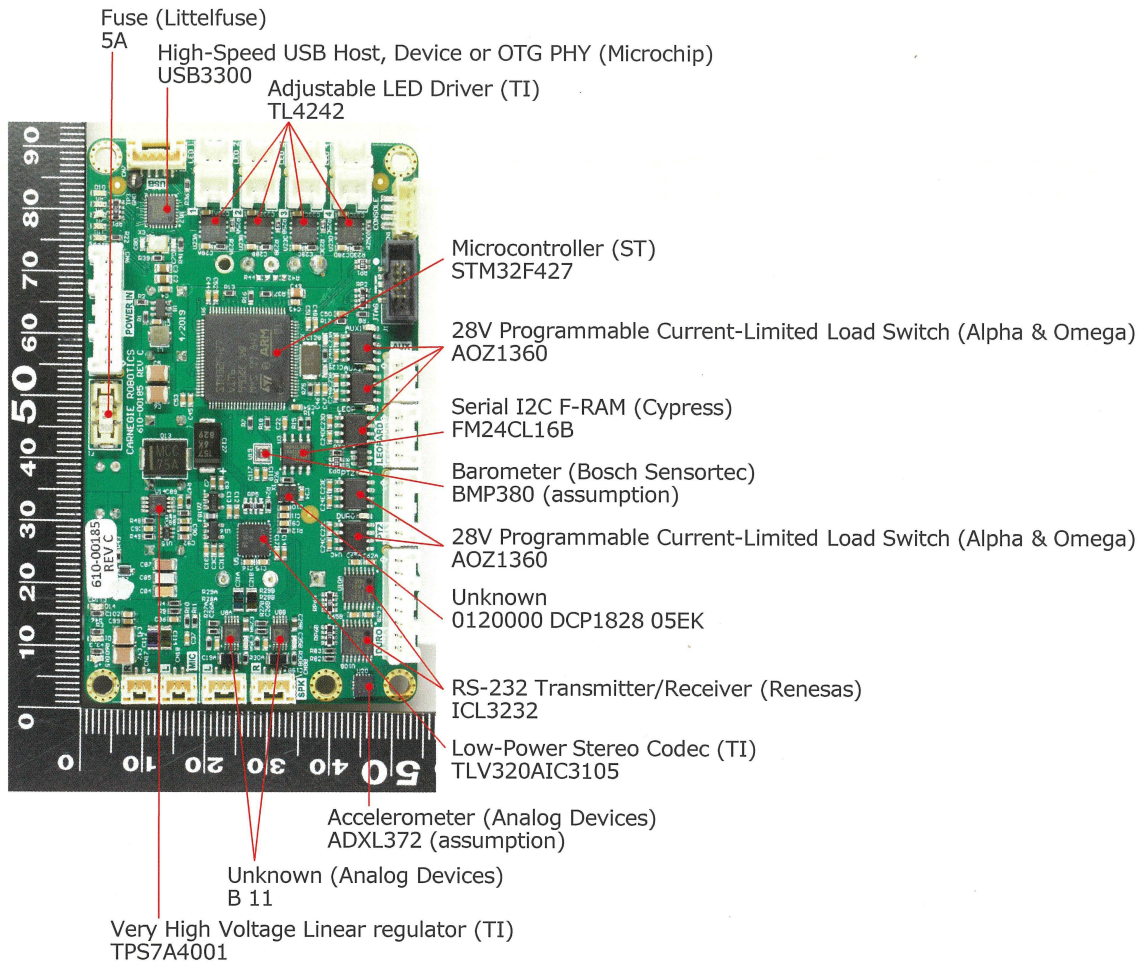


图 7.9: 电源电路板A面 安装了许多与电源相关的IC。(照片: Fomalhaut Techno Solutions)

在电源板IC安装面的对面(B面), 有连接DC-DC转换板的焊盘, DC-DC转换板的引脚焊接在这里 (图 7.10)。

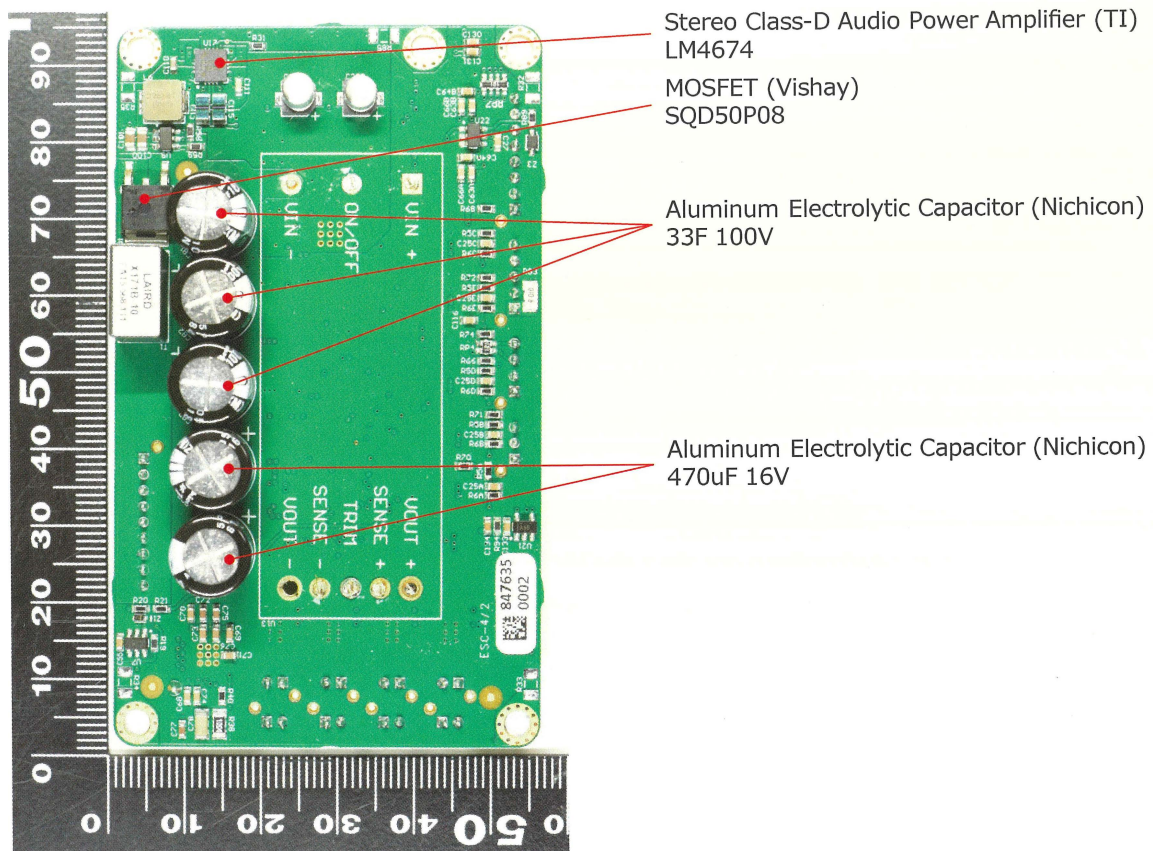


图 7.10: 电源电路板B面 DC-DC转换电路板贴在板上绘制的矩形部分。可以在矩形上方和下方看到焊盘。(照片: Fomalhaut Techno Solutions)

DC-DC转换电路板

DC-DC转换电路板具有将Spot本体提供的35 ~ 59 V电源转换为12 V的功能 (图 7.11)。该电路板是村田的通用绝缘DC-DC转换器“UWE-12/10-Q48NB-C”。根据产品目录页，它将18 ~ 75 V的输入电压转换为12 V的输出电压。最大输出功率为120W (10 A)。

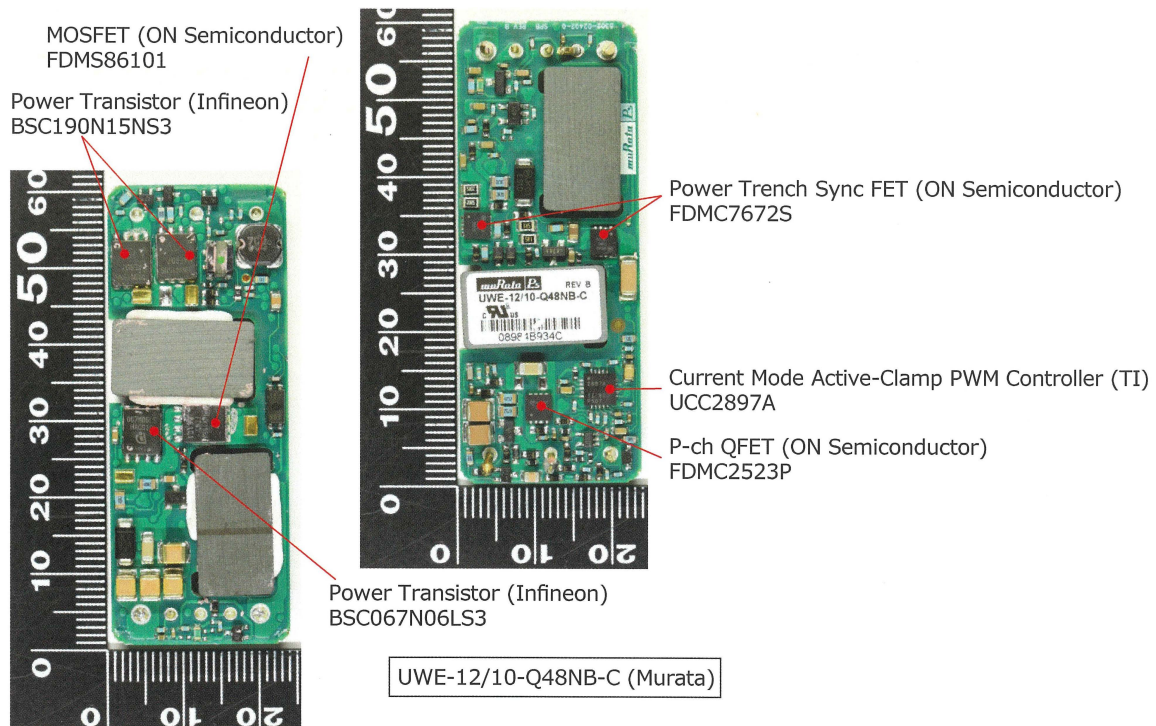


图 7.11: DC-D转换电路板 它负责将Spot本身的电源转换为12 V。该板是村田制作所的通用产品，为“UWE-12/10-Q48NB-C”。电路板为16层板。(照片: Fomalhaut Techno Solutions)

云台变焦相机板用电路板

云台变焦摄像头用的电路板具有桥接功能，可以连接主板和外接的云台变焦摄像头(图 7.12)。将云台变焦摄像头延伸出的同轴信号转换成MIPI信号并发送给主板的设备。

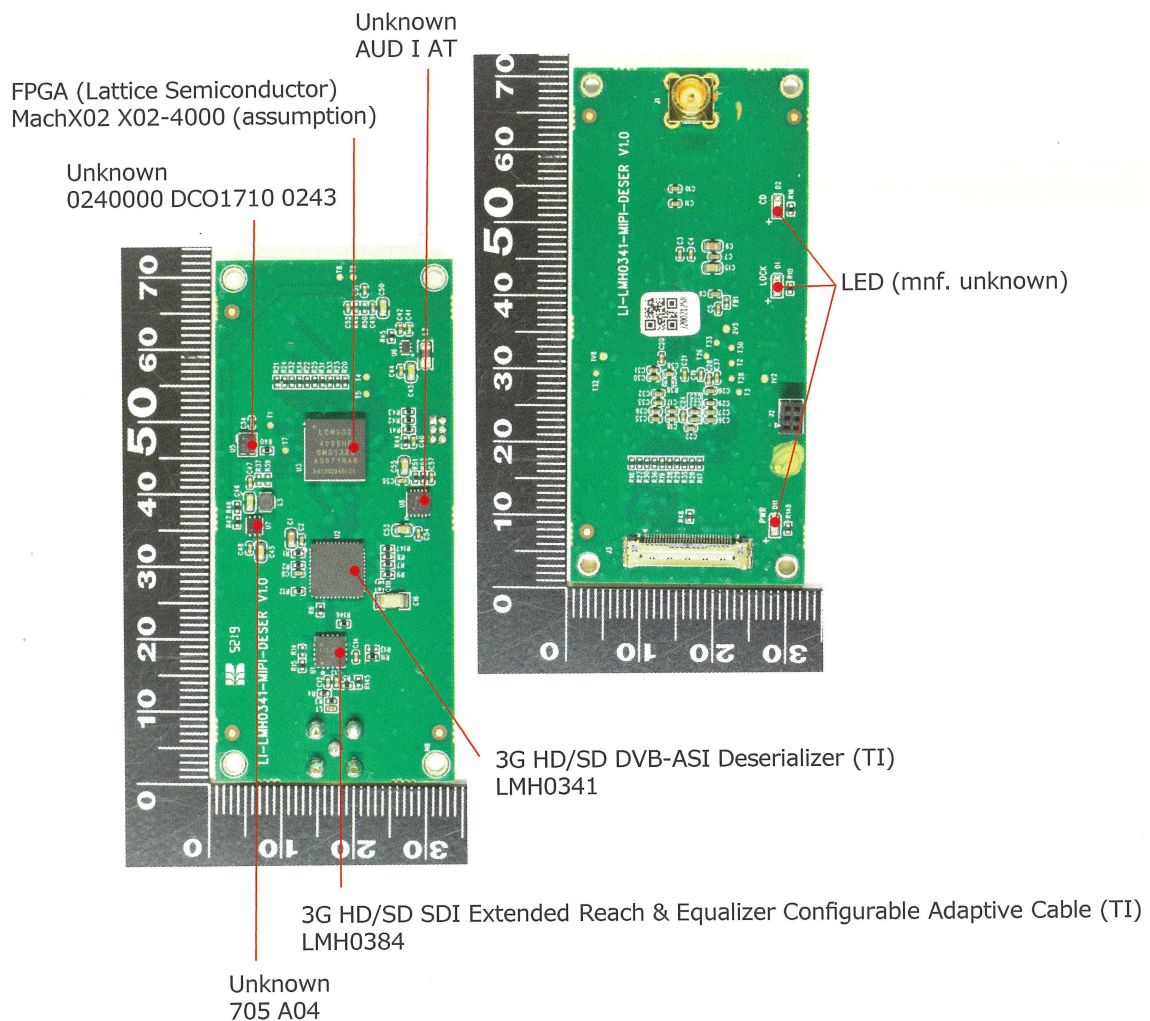


图 7.12: パンチルトズームカメラ用基板 左边是A面, 右边是B面。B侧有一个同轴连接器, 下面有一个连接到主板的连接器。似乎执行转换以并行化来自同轴线缆的信号。它是一个8层电路板。(照片: Fomalhaut Techno Solutions)

相机电路板

摄像头模块提供了使用图像传感器拍摄照片并通过 MIPI 将其发送到主板的功能 (图 7.13)。图像传感器是索尼的“IMX290”。根据规格，可以拍摄1000万像素。

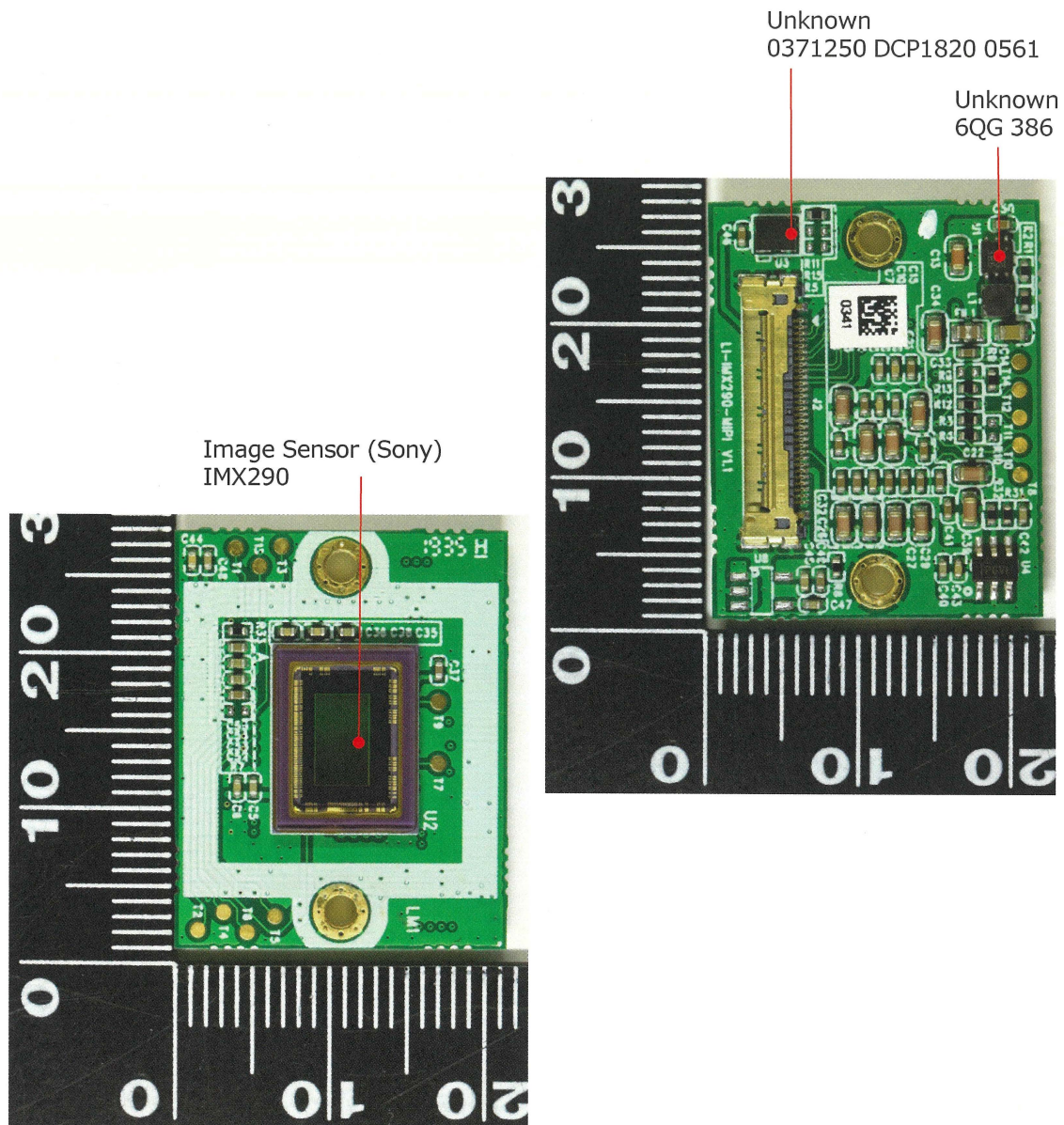


图 7.13: 相机电路板 它具有简单的结构，在图像传感器的背面有一个连接器来连接到主板。(照片：Fomalhaut Techno Solutions)

摄像头电路板装在带镜头的铝合金外壳中 (图 7.14)。

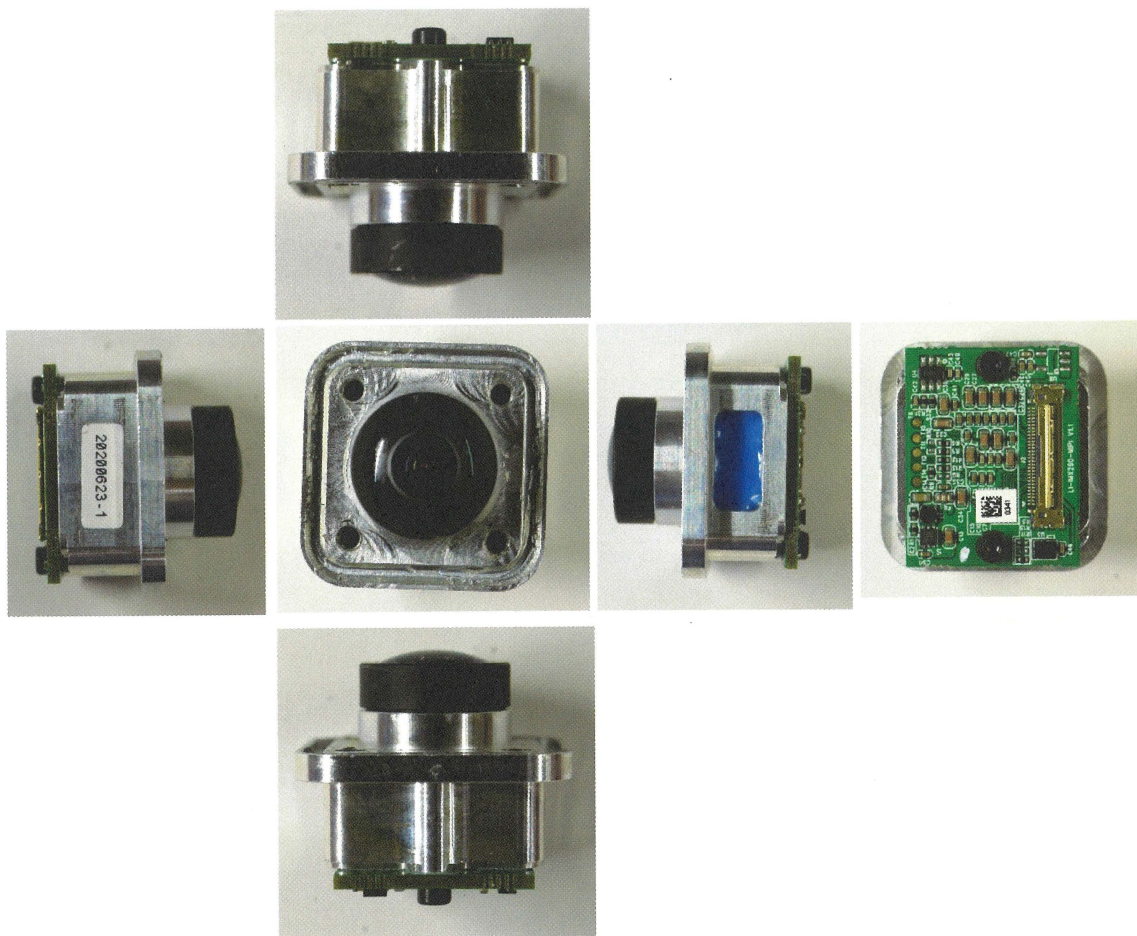


图 7.14: 摄像头模块 该电路板装在一个铝合金外壳中。(照片: Fomalhaut Techno Solutions)

7.3 EDGE CPU

7.3.1 外观

EDGE CPU简言之是一款可以安装在Spot背上底座的PC(图 7.15)。EDGE CPU的尺寸为250 mm × 190 mm × 84 mm，重2 kg。它具有“第8代英特尔酷睿i5处理器”、16 GB的DRAM和512 GB的SSD。

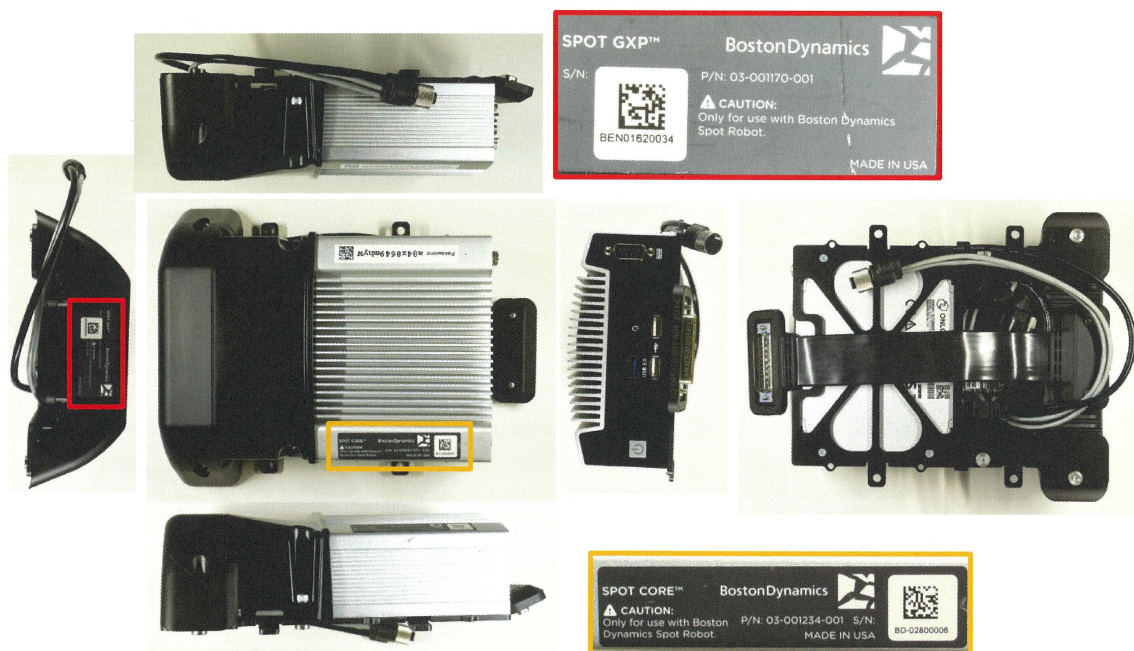


图 7.15: EDGE CPU的外观 适配Spot背上导轨的地方有固定孔。实体是一台搭载Core i5的PC(照片: Fomalhaut Techno Solutions)

Spot本身的内部也搭载了Intel的Xeon处理器，用来控制Spot的运动，而且只能运行预装的软件。为了在外部拥有地图并在使用LIDAR或摄像头估计自身位置的同时自动行走，或执行软件以在目标位置执行某种传感测量，Spot需要本身以外的编程执行环境。这就是EDGE CPU的作用。另外EDGE CPU和Spot本身之间的通信是通过Payload用的连接器用以太网/IP通信进行的。因此，可以通过将Spot连接到WiFi并向Spot远程发送命令来执行相同的操作。

7.3.2 电路板安装位置

EDGE CPU分为黑色树脂外壳部分和金属外壳部分(图7.16)。树脂外壳部分负责将转换Spot机身的Payload连接器和连接激光雷达的线缆。金属部分是PC。

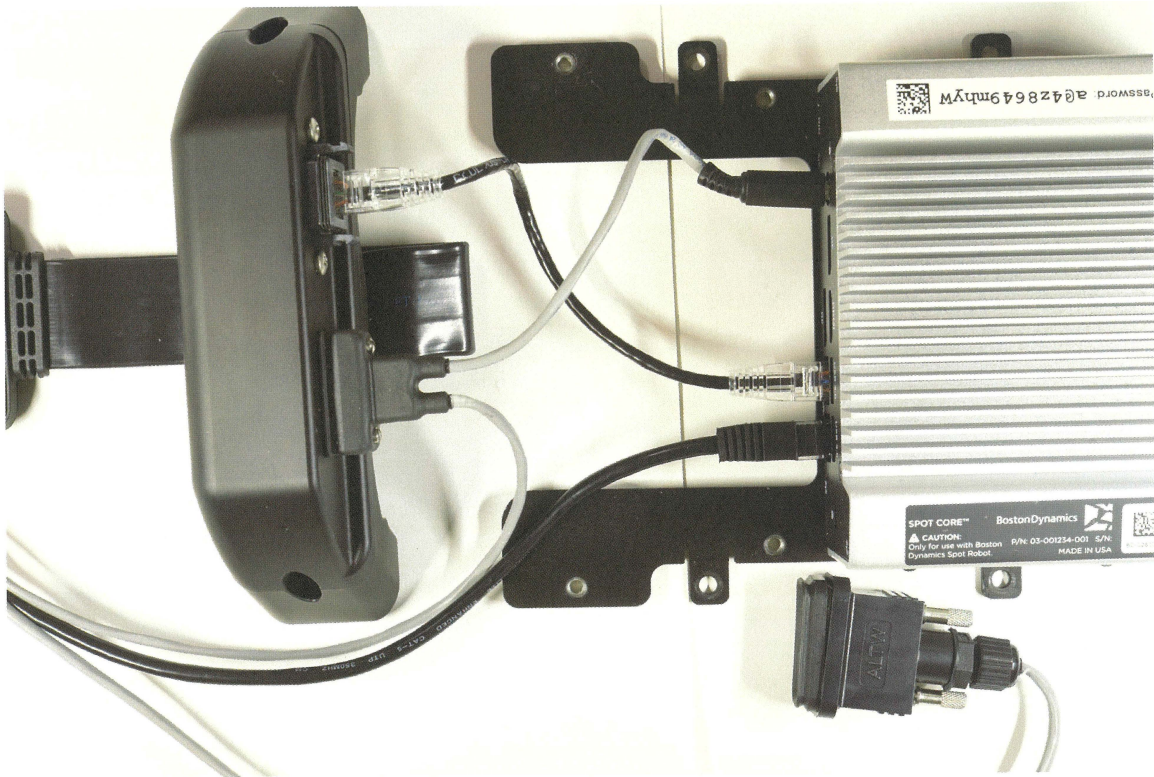


图 7.16: EDGE CPU由两部分组成 黑色树脂外壳部分是连接Spot和LIDAR的连接器的连接处，金属外壳部分是PC。(照片: Fomalhaut Techno Solutions)

主要的电路板集成了PC部分的主板和转换连接器部分的内部电路板 (图 7.17)。

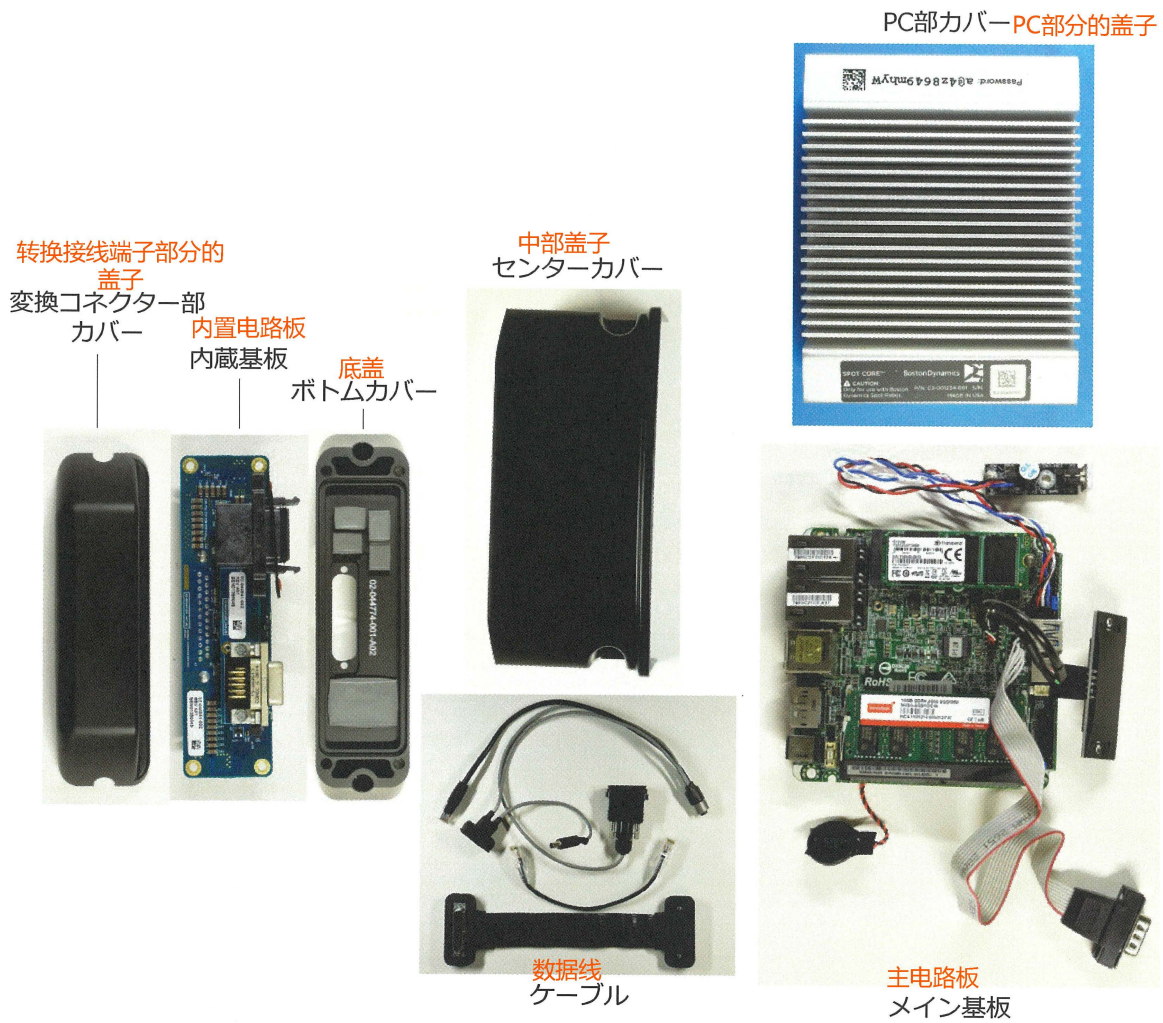


图 7.17: 拆解了的EDGE CPU 主要的电路板只有主板和转换连接器的内部电路板。(照片: Fomalhaut Techno Solutions)

7.3.3 搭载电路板

主板

主板上安装的是英特尔第8代酷睿i5及其驱动IC。还可以看到以太网、RS-232C、HDMI等接口相关IC (图 7.18、图 7.19)。

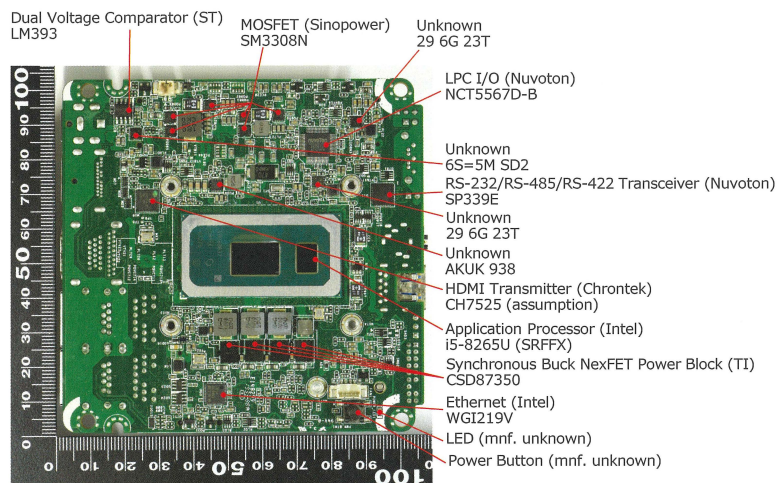


图 7.18: 主板A面 中间的大封装是Core i5。(照片: Fomalhaut Techno Solutions)

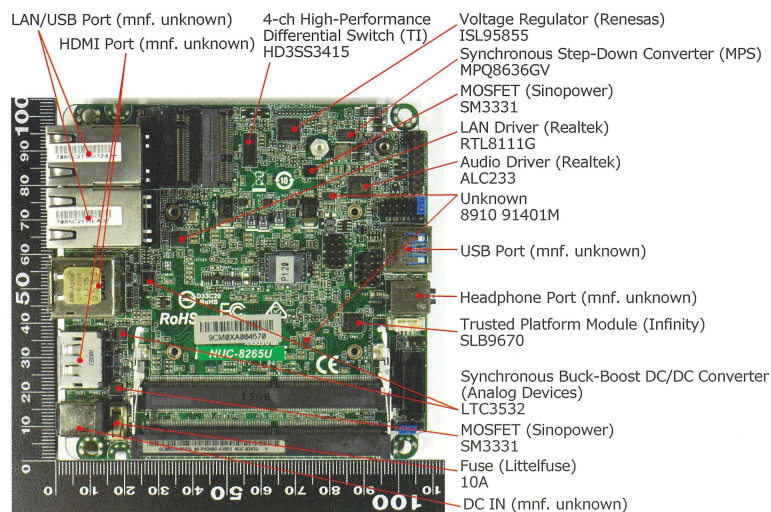


图 7.19: 主板B面 连接器排成一排。(照片: Fomalhaut Techno Solutions)

内置转换连接器电路板

转换连接器内置的电路板除了具有将PC转换为连接器连接Spot主体和激光雷达的功能外，还具有将Spot机身的电源转换为12V供电给PC和LIDAR的功能。因此，用于构成DC-DC转换器的许多IC和电子元件安装在电路板上(图 7.20)。

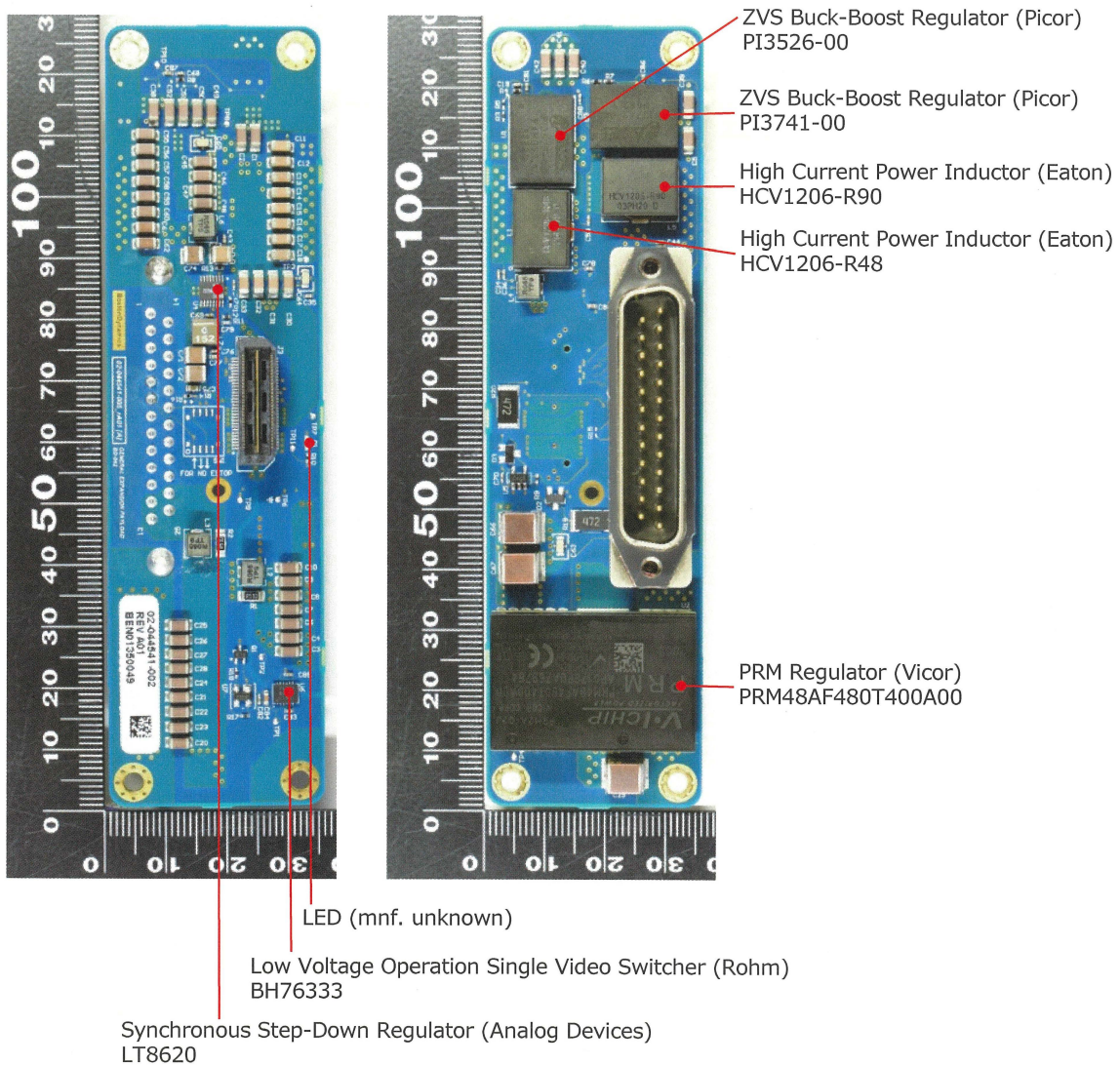


图 7.20: 内置转换连接器电路板 由于此连接器面向底部，用于连接PC的桥接电路板连接到顶部。构成电压转换电路的IC和电子元件排列成一排。
(照片: Fomalhaut Techno Solutions)

7.4 LIDAR激光雷达

7.4.1 外观

作为Spot用的Payload出售的LIDAR是美国Velodyne Lidar销售的“VLP-16”激光雷达，它覆盖了一个专用的外壳，因此可以用作Spot的Payload。它配备16个激光器和探测器，该传感器部分在平面方向上旋转360°，以获取周围360°的距离图像。在垂直方向上，上下各15°，总共可以识别30°。可测量距离为0.5 ~ 100 m。测量点约为300,000。利用903 nm的Class 1 Eye Safe的红外激光。包括外壳在内的重量为1.67 kg，外部尺寸为180 mm × 173 mm × 162 mm。Spot的内置深度相机只能拍摄周围4 m左右的距离图像。该激光雷达用于在工厂或户外等广阔区域内自主移动。



图 7.21: Spot用的LIDAR的外观 主体是Velodyne的“VLP-16”激光雷达。(照片: Fomalhaut Techno Solutions)

7.4.2 电路板安装位置

激光雷达内置了四种类型的电路板。即圆筒顶部的信号处理电路板，底部的电源/接口电路板，中央的激光接收/发射电路板，激光驱动电路板(图 7.22)。

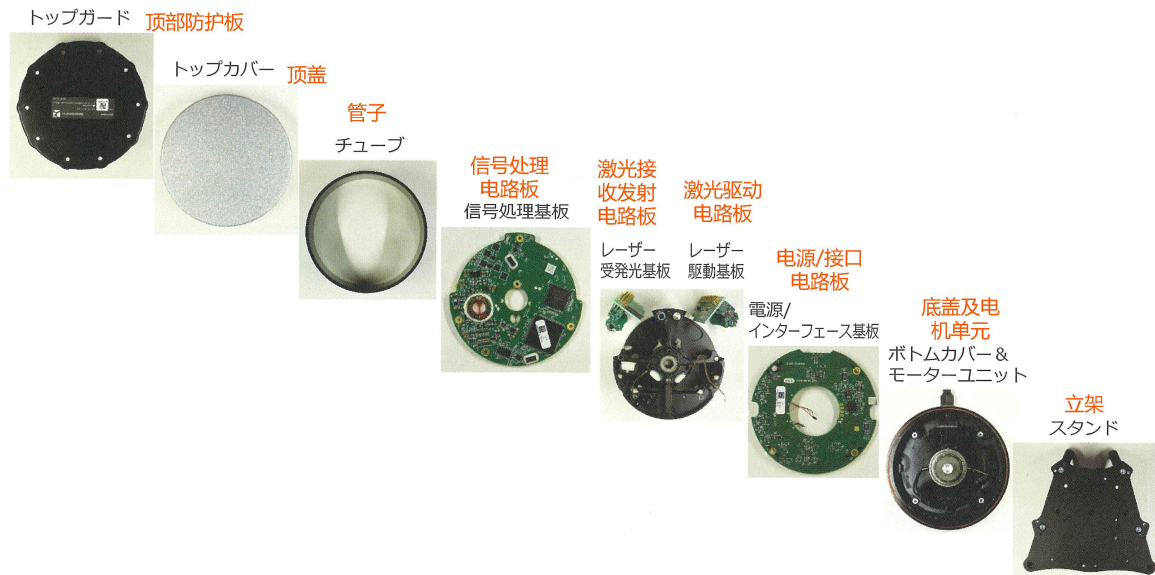


图 7.22: 拆解LIDAR 大致有4种类型的电路板。(照片: Fomalhaut Techno Solutions)

为了360°照射激光，激光接收和发射电路板内置在圆筒外壳中并旋转。因此，用于驱动该激光器的激光器驱动电路板和用于控制这些激光器并处理接收信号的信号处理电路板也与连接器集成在一起并一起旋转(图7.23、图7.24)。电源/接口电路板固定在机箱底部，通过转轴顶部的滑环与信号处理电路板电气连接(图7.25)。电机的线圈在固定轴这一侧，转子的内置永磁体在其外部旋转，是一种外转子类型。外转子的永磁体位于容纳激光发射和接收基板的圆筒外壳内。



图 7.23: 所有电路板都旋转 所有电路板都通过连接器连接，并具有同时旋转的结构。顶部可以看到信号处理电路板。(照片: Fomalhaut Techno Solutions)

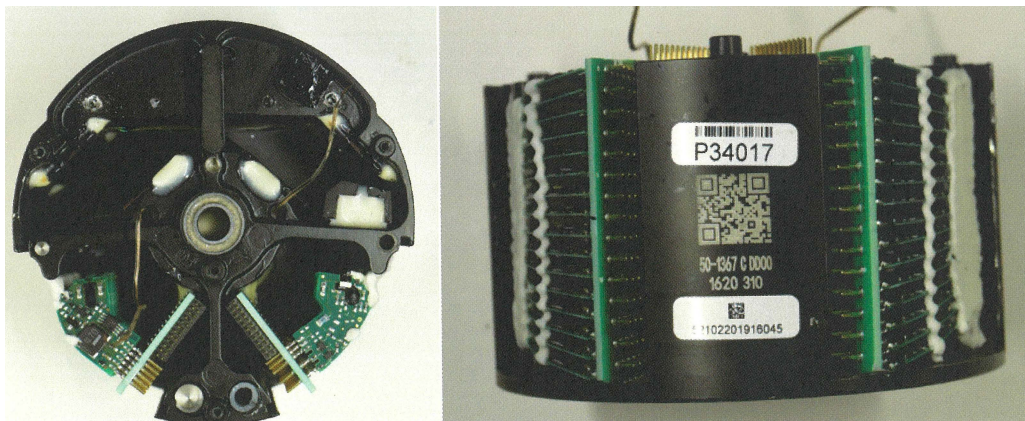


图 7.24: 激光接收/发射板和激光驱动电路板的安装位置 左侧为激光驱动电路板，右侧为激光收发电路板。镜片、半反镜等在电路板的反面。(照片: Fomalhaut Techno Solutions)



图 7.25: 滑环 在轴的顶部可以看到滑环触点。信号处理电路板和电源/接口电路板通过此连接。(照片: Fomalhaut Techno Solutions)

7.4.3 搭载电路板

信号处理电路板

信号处理电路板是旋转体上部的一块电路板，从激光接收/发射板和激光驱动电路板突出的引脚插入该板上的连接器(图 7.26、图 7.27)。推测它具有控制激光器的驱动，处理接收到的信号，并将其作为数字信号发送到电源/接口电路板的功能。

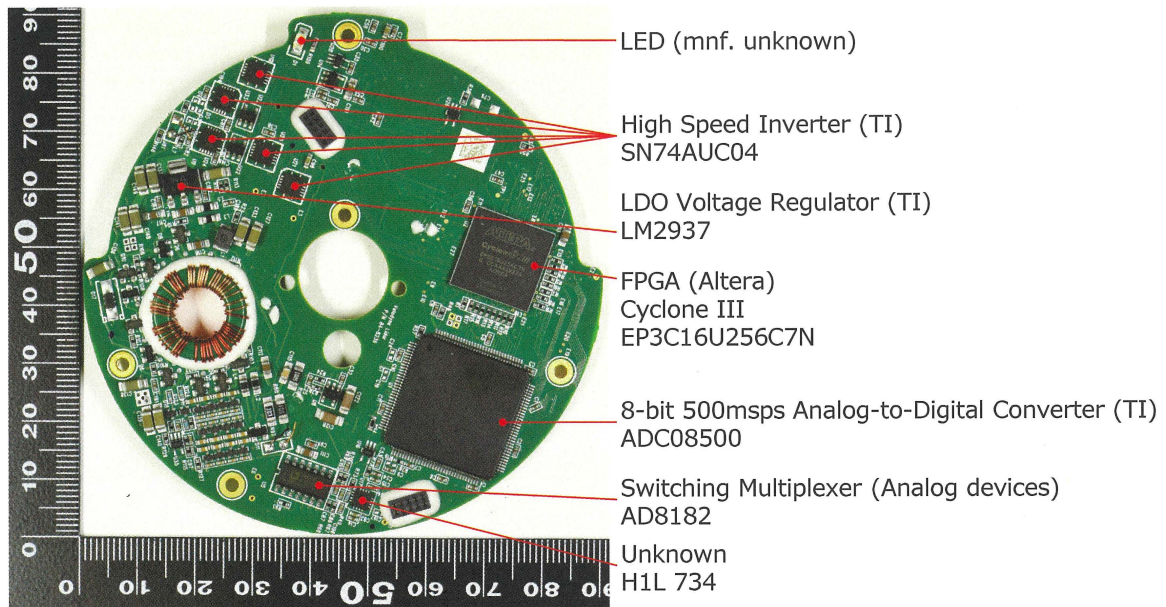


图 7.26: 信号处理电路板A面 它配备了一个用于处理模拟信号的巨大IC。(照片: Fomalhaut Techno Solutions)

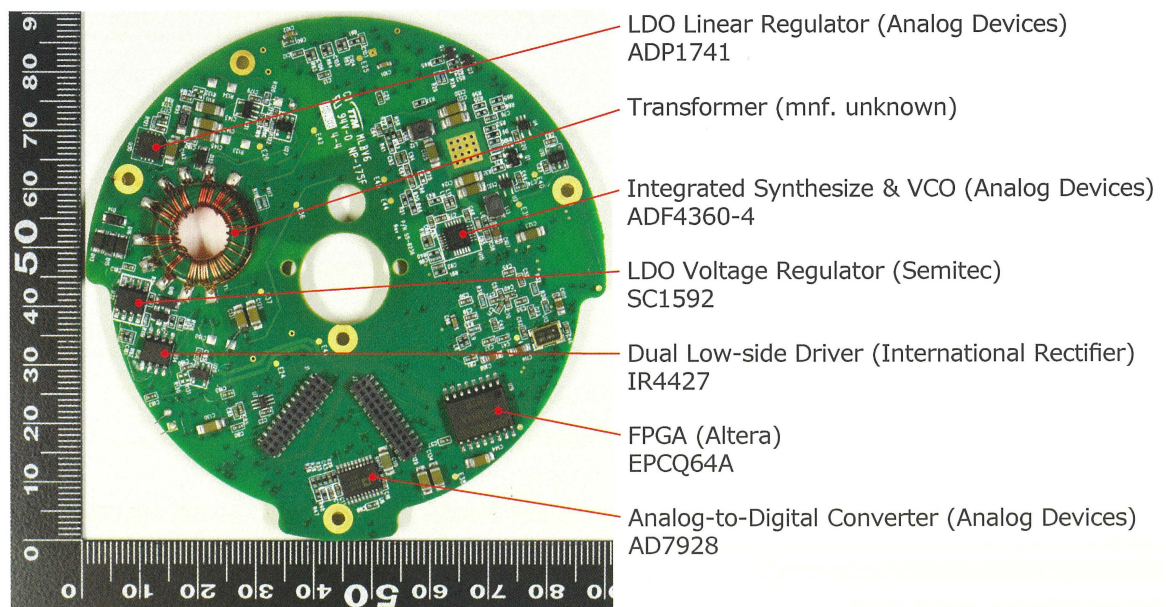


图 7.27: 信号处理电路板B面 照片底部所示的八字形连接器连接激光接收/发射电路板和激光驱动电路板。(照片: Fomalhaut Techno Solutions)

电源/接口电路板

电源/接口电路板似乎起到了从外部接口接收电源并将信号处理电路板的信号作为以太网信号输出到外部的作用(图 7.28、图 7.29)。它还具有产生三相交流电来旋转电机的功能。该基板和信号处理电路板通过滑环连接。

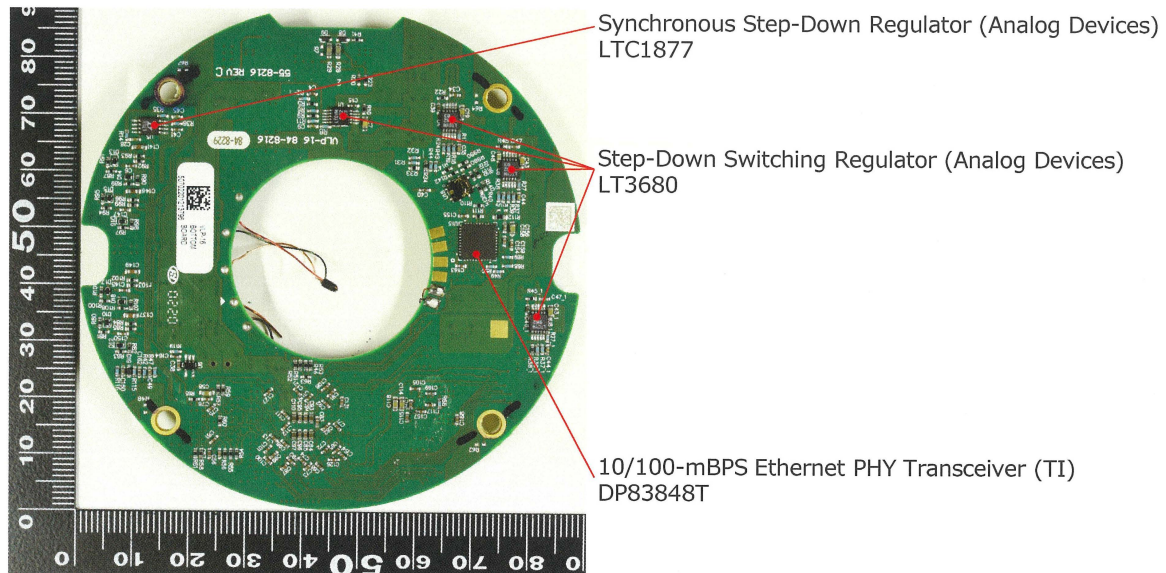


图 7.28: 电源/接口电路板A面 搭载与电源相关的IC和与以太网相关的IC。(照片: Fomalhaut Techno Solutions)

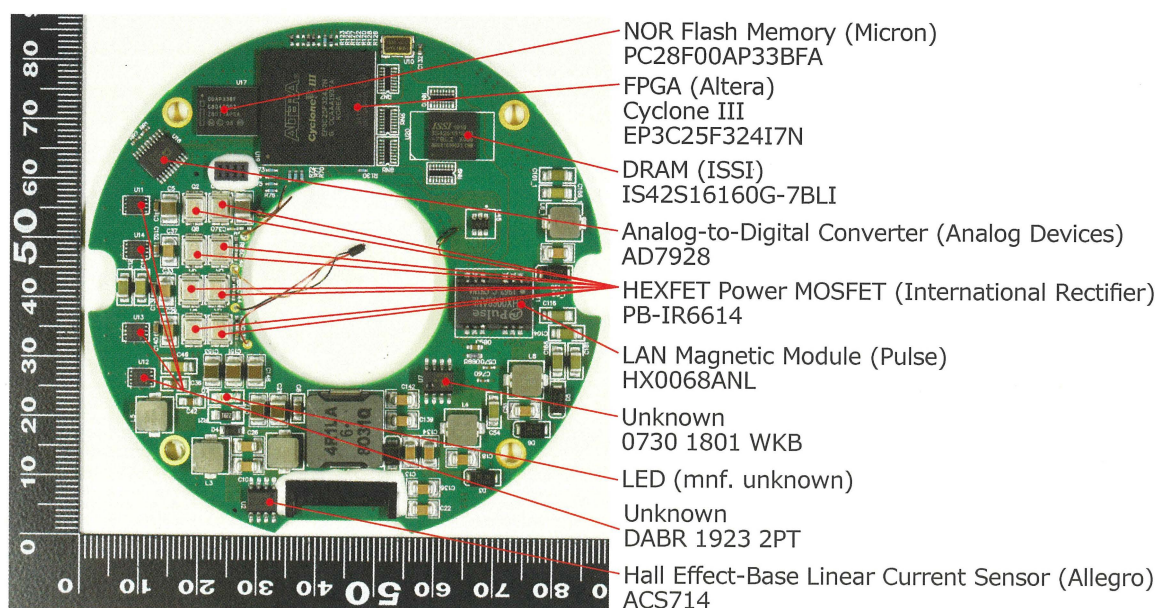


图 7.29: 电源/接口电路板B面 在左侧可以看到用于驱动电机的MOSFET组。(照片: Fomalhaut Techno Solutions)

激光收/发电路板及激光驱动电路板

激光接收和发射电路板和激光驱动电路板都包含在圆筒形树脂外壳中。激光驱动电路板的MOSFET控制着送到激光接收发射部分的功率。在每种情况下，16块电路板都垂直排列(图 7.30、图 7.31)。

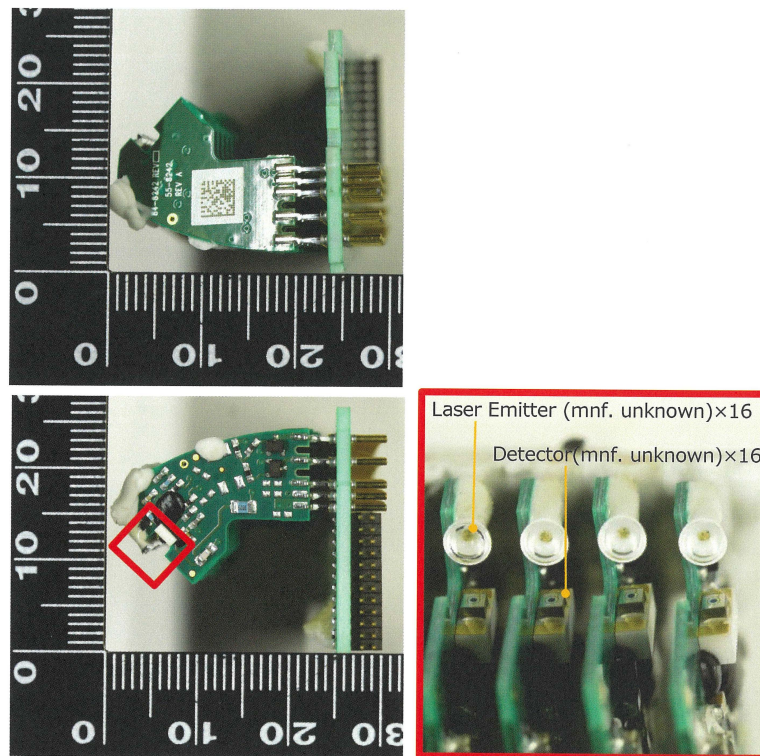


图 7.30: 激光受光/发射电路板 16个电路板的每一块都搭载了一对激光发射元件和一对光接收元件。(照片: Fomalhaut Techno Solutions)

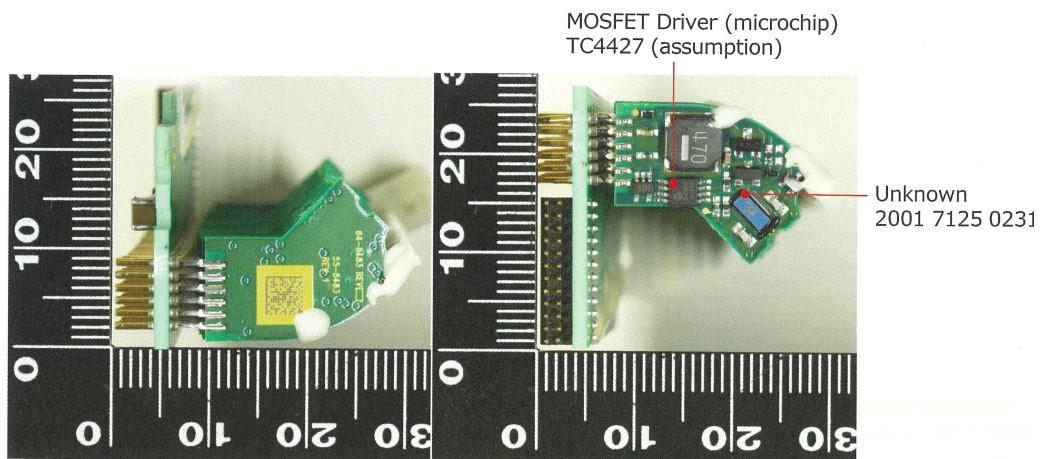


图 7.31: 激光驱动电路板 MOSFET驱动器安装在16块电路板的每一块电路板上。(照片: Fomalhaut Techno Solutions)