Developing an Interactive Upper Limb Training Device for Arm Stretching and Reaching Exercise

Submitted by

Chen Minghao

Beijing Jiaotong University

School of Electronic and Information Engineering

The final year project work was carried out under the 3+1+1 Educational Framework at the National University of Singapore (Suzhou) Research Institute

**May 2023**

ABSTRACT

脑瘫是一种损害人类的运动功能，从而严重影响正常生活的疾病。如今脑瘫患者越来越多，尤其在儿童中的增长速度越来越快。在当前时代，康复是一个非常常见且有效的治疗脑瘫的方法，但是由于脑瘫儿童越来越多，同时康复医院尤其是儿童康复医院数量的不够，所以只有很少一部分脑瘫儿童能得到康复治疗师的康复训练。但是传统的康复训练也不是面面俱到的，它难以用精确的可以量化的指标评价脑瘫儿童患病程度和治疗效果，并且面对重复无聊的康复训练动作，脑瘫儿童很可能无法年复一年地坚持。因此，一个新型的针对脑瘫儿童的康复手段迫在眉睫。

本项目就是在脑瘫儿童对康复训练急迫的需求和传统康复手段的不足的背景下开展的。这个项目针对上肢末端的康复设计了一个双手持握的球形设备。脑瘫儿童可以通过这个装备训练手腕和手指的大部分能力，同时我们设计了unity游戏界面让训练过程变得有趣。在这个项目中为主要负责了硬件电路的设计制作、ESP32芯片的编程、IMU惯性测量单元的编程、压力传感器的电路设计、球形设备的建模打印和mediapipe框架下手部检测的设计。

最后，我们成功设计了这个上肢康复设备，并为其配备了两个游戏，一个训练手指，一个训练手腕，从而达到了训练脑瘫儿童上肢末端大部分功能的目的，同时能给康复治疗师较好的康复效果参考。

ACKNOWLEDGMENTS

在该项目进行的过程中，有很多老师给了我非常大的帮助。我由衷地感谢新加坡国立大学的LIANG Yung Chii教授、西交利物浦大学的Sun Jie教授和西交利物浦大学的Bu Qinglei教授。在我迷茫的时候，您独道见解总能为我指点迷津；在我误入歧途的时候，您独具慧眼总能指出我的错误；在我陷入困境时，您知识渊博总能给我很大帮助。我的项目是在各位老师的悉心指导下成长起来的。

此外，我还感谢同学们的陪伴和鼓励，还有我的队友Li Qingyu在游戏设计方面做出的努力。

最后，我很感谢这个项目，它不仅仅让我学到了很多知识，还让我结识了很多友善的朋友和和蔼的老师，我将携着这次珍贵的记忆继续探索知识的海洋。

CHAPTER 1

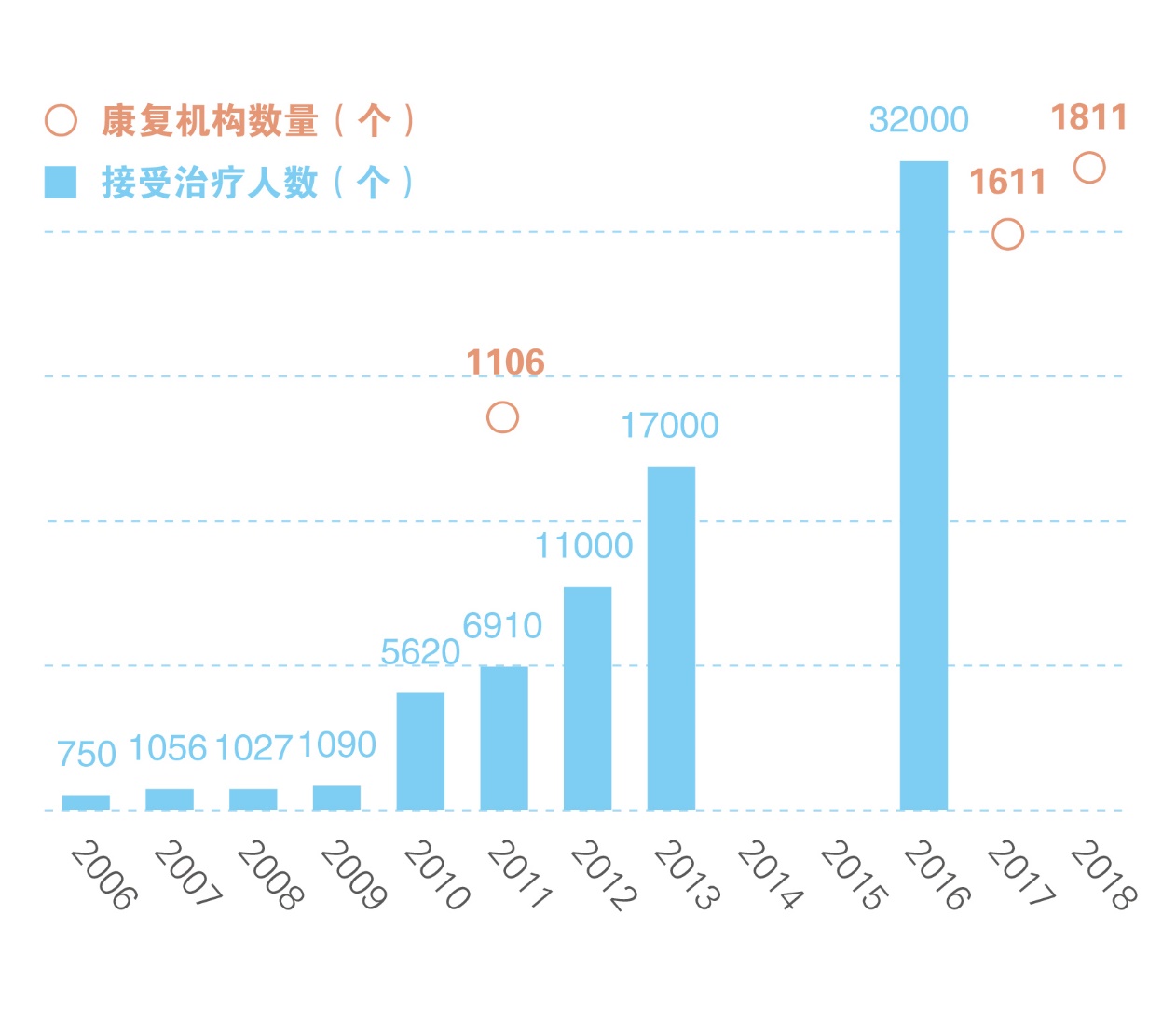
Introduction

1.1Background

[脑瘫儿童人数呈递增趋势 业内呼吁完善康复救助体系\_中国经济网——国家经济门户 (ce.cn)](http://www.ce.cn/cysc/yy/hydt/202307/05/t20230705_38617668.shtml#:~:text=%E6%8D%AE%E7%9B%B8%E5%85%B3%E6%95%B0%E6%8D%AE%E7%BB%9F%E8%AE%A1%E6%98%BE%E7%A4%BA%EF%BC%8C%E6%88%91%E5%9B%BD%E7%9B%AE%E5%89%8D%E7%8E%B0%E6%9C%89%E7%BA%A6600%E4%B8%87%E5%90%8D%E8%84%91%E7%98%AB%E6%82%A3%E8%80%85%EF%BC%8C12%E5%B2%81%E4%BB%A5%E4%B8%8B%E7%9A%84%E8%84%91%E7%98%AB%E5%84%BF%E7%AB%A5%E8%BF%91200%E4%B8%87%E4%BA%BA%EF%BC%8C%E6%AF%8F%E5%B9%B4%E6%96%B0%E5%A2%9E%E8%84%91%E7%98%AB%E7%97%85%E4%BE%8B4%E4%B8%87%E8%87%B35%E4%B8%87%E4%BA%BA%E3%80%82,%E8%AE%B0%E8%80%85%E8%BF%91%E6%97%A5%E8%B0%83%E7%A0%94%E5%8F%91%E7%8E%B0%EF%BC%8C%E8%84%91%E7%98%AB%E5%84%BF%E7%AB%A5%E4%BA%BA%E6%95%B0%E6%AF%8F%E5%B9%B4%E5%91%88%E7%8E%B0%E5%A2%9E%E5%8A%A0%E8%B6%8B%E5%8A%BF%EF%BC%8C%E5%BD%93%E5%89%8D%E8%84%91%E7%98%AB%E5%84%BF%E7%AB%A5%E5%BA%B7%E5%A4%8D%E6%95%91%E5%8A%A9%E5%B7%A5%E4%BD%9C%E4%BB%8D%E5%AD%98%E5%9C%A8%E5%8C%BB%E7%96%97%E6%8A%80%E6%9C%AF%E6%B0%B4%E5%B9%B3%E7%9B%B8%E5%AF%B9%E8%90%BD%E5%90%8E%E3%80%81%E5%BA%B7%E5%A4%8D%E6%95%99%E8%82%B2%E8%9E%8D%E5%90%88%E9%81%87%E9%98%BB%E3%80%81%E4%BF%A1%E6%81%AF%E5%8C%96%E5%BB%BA%E8%AE%BE%E6%BB%9E%E5%90%8E%E7%AD%89%E9%9A%BE%E9%A2%98%E3%80%82)

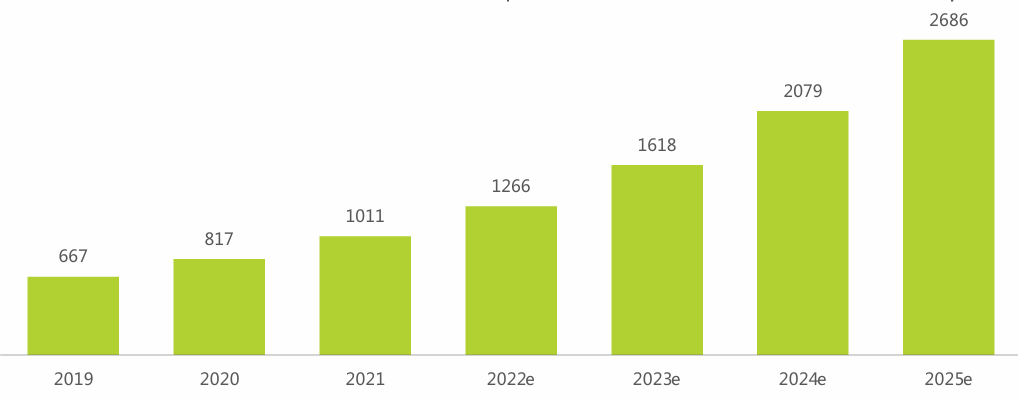
[守望孤独星球：孤独症儿童的成长之路\_澎湃号·湃客\_澎湃新闻-The Paper](https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_4070322)

脑瘫儿童的数量在中国越来越多，增长速度越来越快。在中国已经有接近200万个脑瘫儿童，每年新增约5万名。但是于此对应的康复机构的新增数量却相当有限。可以从图中看到，能够接收康复机构治疗的脑瘫儿童的数量远远低于脑瘫儿童总数，同时康复机构的增长速度远远低于脑瘫儿童的增长速度，这带来的是越来越多比例的脑瘫儿童得不到正规的康复治疗，同时得到康复治疗的儿童也会因为康复人数的增多而降低康复效果。（）



Number of patients able to receive treatment

与此同时，康复医疗的市场前景也无比广阔。2021年市场规模达到了1011亿元，在疫情冲击和人口老龄化的现状下，人民的康复意识越来越强烈，因此也康复医疗的市场也逐年增长，在2025年预计将达到2686亿元。因此，康复设备有很大的市场需求（）

https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3\_AP202206291575553684\_1.pdf

The scale and potential of the Chinese rehabilitation medical service market (in 100 million yuan)

外在注意焦点比内在注意焦点更有利于学习运动活动，从而更有利于脑瘫儿童的康复。就像投篮一样，专注于篮筐和篮球的位置比专注于手部动作更有利于进球，而在传统康复中，重点是身体本身，这是一种内在的焦点。另外一方面传统康复治疗的过程枯燥乏味，有的儿童会因为被动受力疼痛而拒绝治疗，同时传统康复训练对于康复治疗师数量的需求是巨大的，往往一个康复治疗师同一时间只能帮助一个脑瘫儿童。

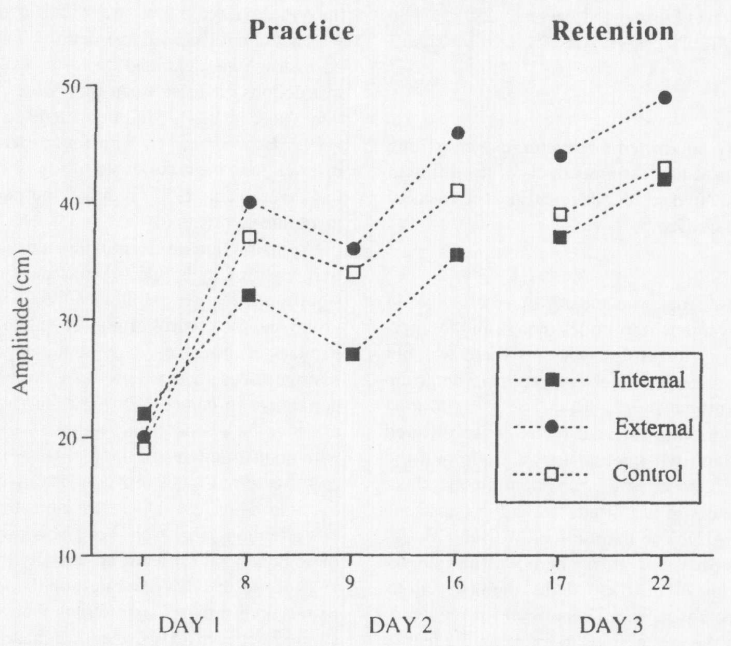
因此，我们打算设计专注于外在焦点的康复设备和游戏，它们比传统康复的内在注意焦点更有效。他能训练双手的手腕运动和手指运动，通过游戏画面和引导语音吸引孩子的注意力它基本能供脑瘫儿童自己独立使用，能在一定程度上缓解对康复治疗师的巨大需求。（）

1.2Literature Review

国内外对于康复领域理论和上肢康复器械的研究都较为完备，以下是和本次研究有关的部分重要文章。

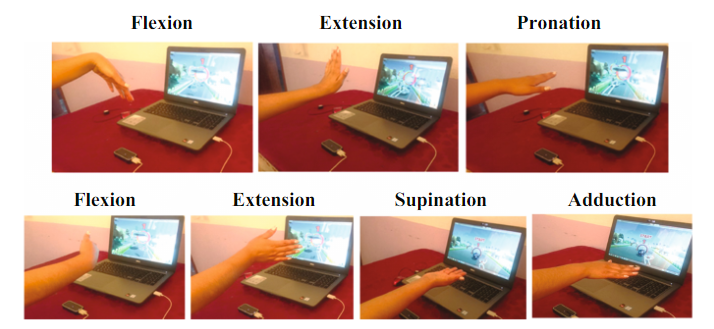
1. Instructions for Motor Learning: Differential Effects of Internal Versus External Focus of Attention

这次项目的理论基础主要来自于这篇关于注意力机制和运动学习的研究。文中将参与者分为三组，一组使用内部焦点指令进行训练，另一组使用外部焦点指令进行训练，而control group没有给予任何指令作为对照组。可以发现，内部焦点指令的训练效果甚至并没有比对照组好，而外部焦点指令的训练效果明显高于其他两组。而传统康复训练中，很大一部分都是内部焦点指令，比如叫小孩尽力舒展手部等。因此传统康复手段在一定程度上有转化为外部焦点指令从而优化康复训练效果的可能。



2 Interactive System for Hands and Wrist Rehabilitation

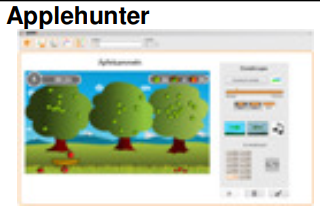
在这项研究中，利用Leap Motion设备和Unity3D软件，设计了一个交互式系统，用于手部和腕部康复。系统通过创建两个应用程序，实现了多种动作，如屈曲、伸展、旋前、旋后和内收。用户通过界面获得沉浸感，并能正确执行练习，因为在游戏结束时会呈现视觉和听觉反馈。五名参与者使用了该系统，并进行了SEQ可用性测试，结果为59.6。这表明该系统具有良好的接受度，可用于康复训练。这项研究给了我们灵感：使用unity设计游戏来吸引使用者的注意能让儿童更能接受康复训练。但是该研究没有硬件设计，一方面信号的采集没有硬件的校准会难以比较精确，另外一方面硬件和手部之间硬件结构的设计能更好地调整手部的姿态，从而达到更好的训练效果。



3. Robotic and Sensor Technology for Upper Limb Rehabilitation

这个项目的灵感主要来源于Tyromotion公司的Pablo® Plus系统，该系统的Multiball装置给予了我们许多灵感。这是一个单手持握的球型装置，可以训练腕屈肌、腕背肌、桡侧腕屈肌和尺侧腕屈肌。同时还配备了一系列不同锻炼目的的游戏，包括控制装置的位置控制篮子接掉落的苹果，旋转装置控制水枪的方向灭火等。



 图形用户界面

描述已自动生成

但是，Tyromotion的康复系统主要是针对成年人的，他的体积相较于脑瘫儿童还是太大了，难以持握。同时Tyromotion的康复系统相当昂贵，还需要配备专业人员辅助康复，种种缺点导致其在中国是很难推广出去的。

1.3Main Research Content

本次研究目的在于设计一个可供双手持握，具备人机交互功能，便携的脑瘫儿童上肢康复装置。该装置能够提供视觉和听觉反馈来引导脑瘫儿童康复，训练腕部关节灵活度和手指力量的精细控制，同时康复的大部分过程将不需要专业康复治疗师辅导，最终还能够将康复结果总结成可视化数据报告供医生参考。

1.4Organization of The Thesis

CHAPTER2

User Study

2.1 Hospital Visit

为了设计一个新型康复设备，对传统康复方法的研究是必不可少的。为此，我们造访了数次江苏省 康复医院，实地考察了在传统康复体系下，脑瘫儿童从进入康复医院到康复成功的整个流程。具体包括康复医院的入院测试、康复训练的日常方法、针对手部康复训练的不同类型、康复效果评估的指标、传统康复治疗的缺陷和康复治疗师对本次上肢康复设备的期待等。

（）

从医生的反馈结果看，对于脑瘫儿童，康复训练内容多半是和日常生活有关的，比如涂色、开灯关灯、丢沙包、拼积木等。而康复评估大部分情况下是通过特定的评估量表测试，包括入院测试、日常测试和出院测试都是由评估量表的测试结果来判断脑瘫儿童的康复效果。评估量表测试是根据脑瘫儿童能否进行一系列不同难度的动作，从而为其打分的方法，这种方法非常繁琐，每次测试需要经过十几甚至几十个动作指标。同时，一份评估量表是需要医院购买的，价格十分昂贵，通常一个康复医院只有几份评估量表。在少数情况下，康复治疗师会直接通过捏脑瘫儿童的肌肉，观测患者手部舒展的程度等方面，运用经验大概判断患者的康复效果，而这种方法是没办法形成量化指标的，但运动范围的判断在康复中是最直接也是最有效的评估方法。因此使我们的装置能直接得到手腕等的运动范围是非常必要的。

对于儿童康复，我们必须考虑脑瘫儿童的配合问题，一个吸引儿童兴趣的游戏往往能使孩子配合康复治疗。考虑每位脑瘫儿童感兴趣的事物往往不一样，为了设计适合的游戏吸引大部分孩子们的兴趣，我们先进行了调研，内容涵盖了最喜欢的康复游戏、最喜欢的卡通人物、最想做的事等诸多方面。我们对（）位脑瘫儿童进行了调研，得到如下结果。

（）

从调研结果来看，儿童们通常最喜欢的康复游戏和最喜欢做的事通常都是涂色。因此，我们打算设计一个涂色游戏来更好地吸引孩子们的兴趣，从而提高康复效果。

此外，我们发现医院所用的康复训练中，对于手指的训练少之又少，而医院所参考的康复书籍中有一个捏水袋的康复训练方式，用来训练对手指力量的精细控制能力，但是迫于医院场地限制，脑瘫儿童从未有过机会进行这样的康复训练。因此，我们计划再设计一个游戏供脑瘫儿童锻炼对手指力量精细控制的能力。

最后，我们发现还有一部分脑瘫儿童，他们往往双手中会有一只健全的手，而另外一只运动功能受损，这时候用健全的手来辅助引导功能不完善的手是一个非常好的选择。

2.2 Previous Design

在这个项目开展之前，我们已经有了一次来自National University of Singapore (Suzhou) Research Institute的设计经验，他们初步完成了脑瘫儿童上肢康复装置的设计。该装置可以较为粗略地检测手腕的运动，并设计了相关的游戏。但上肢康复装置的设计还远远未完成。该设计从原理上有巨大缺陷：该装置未对手腕角度进行补偿，脑瘫儿童如果放在球上的手部姿态不对，那么角度的检测将偏离真实情况，会产生错误的康复结果。与此同时，对于只存在一只功能受损的手的孩子，当他们很难握住这个球的时候，他们的另外一只手只能束手无策，因此对于这类孩子很难达到理想的康复效果。除了这两个问题外，该装置的角度数据准度很差，并且会产生相当严重的温度漂移，因此，对于该装置的进一步迭代改良式很有必要的。



2.3Design requirements

综上所述，这次的设计要求应该由以下几个部分组成

1. 设计一个可供双手持握的球体模型。
2. 设计一套较为精确的手腕活动方向信号采集装置，以得到最直接的运动范围作为评估标准。同时这个装置应该有自校准功能。
3. 设计一个能够检测手指力量变化的信号采集装置，该装置应该能很好地锻炼脑瘫儿童对手指力量精细控制的能力。
4. 设计能够吸引小孩兴趣的游戏。
5. 康复结束后能够生成可以量化的康复效果报告。

CHAPTER 3

Overview Of The Hardware Design

3.1System Design Proposal

该装置的由一个3D打印的双手持握的球形康复装置和配套的可交互的电脑游戏组成。其中康复装置包括供电芯片和电池、检测手腕运动方向的IMU、检测手指力量的压力传感器和处理并传递数据给电脑的ESP32微控制器，电脑接受到数据后即可操控使用unity设计的具有视觉和听觉反馈的游戏。在游戏结束后，一份量化的可以体现康复效果的报告可以反馈给医院作为参考，以调整游戏的难度。

（）

3.2Hardware Structure and Analysis

硬件部分主要包含双手持握的3D打印模型、处理并传递信号的微处理器、用于手腕运动范围信号采集的IMU、用于手指力量变化信号采集的压力传感器、充电模块和电池。

（）

3.2.1Component Selection

1.Inertial Measuring Unit

惯性测量单元是一种集成了陀螺仪、加速度计的设备，有的惯性测量单元甚至还会集成磁力计以校准偏航角的输出，它能获知物体的三个姿态角：偏航角、俯仰角以及横滚角。对于采集手腕运动范围的传感器，IMU是一个非常不错的选择。一个包含了陀螺仪、加速度计和磁力计的九轴IMU的具体姿态解算的主要步骤是：1.通过陀螺仪和加速度计获得物体的角速度和加速度，通过磁力计获得地球磁场的方向；2.通过陀螺仪输出的角速度得到初步的三个姿态角；3.通过加速度计输出的加速度校准通过陀螺仪得到的横滚角和俯仰角；4.通过磁力计输出的磁场方向校准陀螺仪输出的偏航角，到此最终的三个姿态角就全部得到了。

在这次研究中有两种IMU我们都尝试过，一个是WHEELTEC N100，另一个是MPU605.

Table 1 : IMU selection

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Types** | **Size** | **Power** | **Advantages** | **Disadvantages** |
| WHEELTEC N100  （Nine-axis  attitude sensor） | 31mm  \* 41mm | 5V | Featuring a powerful Sigma Point Kalman filter (SPKF), as well as a set of high performance algorithms, up to 1000Hz sensor sampling frequency and cone and rowing motion compensation for high accuracy, high immunity to magnetic interference and a wide range of  applications. | Higher price, slightly larger size |
| ATK- MPU6050  （Six-axis  attitude senso） | 16mm  \* 18mm | 3.3V/5V | A digital motion processing (DMP) hardware acceleration engine is included to output the posture solved data to the application via the main IIC interface. Using the motion processing library provided by InvenSense, attitude resolution can be easily implemented, reducing the load of motion processing operations on the operating system and significantly reducing the development  effort. | Average precision |

一方面MPU6050是六轴IMU，没有磁力计。对于没有磁力计的IMU，由于没有磁力计的校准，随着时间的偏移偏航角的输出偏差会越来越大。另一方面WHEELTEC N100还集成的温度传感器，使用温度传感器可以很大程度上减少温度漂移，并且WHEELTEC N100的精度远远高于MPU6050，因此，本次项目采用WHEELTEC N100作为我们的手腕运动范围的信号采集传感器。值得一提的是，大多数IMU的应用会伴随着滤波算法的使用，滤波算法能抑制传感器测量中的噪声和误差，可以进一步提高IMU输出角度的精度。而本次项目采用了多种滤波算法进行尝试

滤波算法对比：

（）

可以看出卡尔曼滤波算法具有最优性和递归更新两个主要特点，这对于我们计算资源较少的微处理器是一个最好的选择，所以本次项目采用的滤波算法是卡尔曼滤波算法。

The physical image of MPU6050 is shown in Figure 11.

（）

2.Microcontroller Unit