# 目录

# 图目录

# 表目录

# 引言

## 项目背景

随着社会与经济的全面发展，我国居民对健康生活的关注程度逐步提高。以南京市居民为例，平日参加体育锻炼的居民已对体育锻炼强身健体、消除疲劳、放松心情等功能产生了充分的认可。[1]可以预见，今后将有越来越多的居民参与到体育锻炼中来；同时，不可避免地，我国也正加速步入老龄化社会。与年轻人相比，老年人拥有更加充裕的体育活动时间，但身体条件往往会稍差一些，甚至患有某些慢性病。在这些条件的共同作用下，老年人的体育锻炼更加需要确保自身的安全。

强身健体与人身安全并重的主张同样适用于患有慢性病或正在参加康复训练的人群。对此类人而言，身体运动机能受到或多或少的限制，但运动也是必不可少的。如今，大数据在互联网行业已经得到广泛的应用。如果能够借助物联网与可穿戴设备的潮流，采集此类人群的运动数据与身体状况，并进行大数据分析，医师将能够更加有针对性地调整运动处方或康复训练的质与量，从而提高体育锻炼对患者的作用与价值，并最终推广到运动人群的全体中来，为全民锻炼与保健提供个性化的科学指导。

基于以上条件，使用可穿戴设备收集个人的运动与健康数据是一个相对简单的方案。在众多可穿戴设备中，目前又以智能手环最为大众所接受。因此，以智能手环为最接近人的设备进行数据的采集，并以此为基础建立一个运动数据的分析平台，将会具有良好的前景。

## 国内外可穿戴设备技术现状

可穿戴设备不同于植入人体内、用于医疗用途的嵌入式设备。它植入由用户佩戴在身上或整合在服装外部，只对用户的各项指标进行获取与分析。无论是硬件方面还是软件方面，可穿戴设备都不属于生命攸关产品。换而言之，可穿戴设备没有严苛的实时性要求，偶然的数据采集超时或数据分析超时并不会对宏观分析结果的准确性产生不可接受的影响，故通常将其定位为软实时系统。

硬件方面，国内外可穿戴设备的技术研究着眼设备的轻质化与在满足充分计算性能的前提下，提升可穿戴设备的续航能力上。以为可穿戴设备供电的电池为例，材料和工艺上层出不穷的新技术使得电池的形状与体积打破了传统锂离子电池与干电池在体积和形状上的限制[2]，并且电池的小型化丝毫没有影响电池必要的输出功率[3]。

国内外在软件方面的研究重点在于提高数据分析算法的准确性和效率。以跌倒检测算法为例，有研究表明，在只使用佩戴于腰部的三轴加速度计的情况下，用户在跌倒时，会产生垂直速度以及与竖直方向夹角的特征性变化，并且各方向加速度的变化也满足一定的特征模式。如果将这些条件进行适当的组合逻辑判定，对用户跌倒动作与其它状态各种活动的分辨准确度可以达到100%。[4]再如计步算法，通过对人体运动过程中加速度变化的适当程度分析与处理，计步的精确度完全可以达到令人满意的程度，实现精确计步。

综上所述，以目前的技术水平，可穿戴设备无论在软件还是硬件上都具备充分的可行性。未来的可穿戴设备将以进一步的小型化、智能化与更强的续航能力为发展方向，存在着巨大的发展与革新空间。

## 国内智能手环市场现状

中国信息通信研究院发布的《可穿戴设备研究报告》显示，2015年，中国智能可穿戴设备市场规模为125.8亿元，增速高达471.8%。[6]基于前文所述技术支撑，未来几年内，可穿戴设备的市场规模仍然能够保持相当的增速。

然而，可穿戴设备，尤其是智能手环，在广阔的市场前景背后潜藏着巨大的风险。2009年，Fitbit问世。该产品将互联网技术与传统的计步器相结合，开启了可穿戴运动健身类设备的时代。随后两年内，NIKE+FUELBAND和Jawbone up相继发布，可穿戴式运动产品的热潮迅速被掀起。各互联网行业、体育行业公司以及各家创业公司，都将目光投向这个领域，试图在这一领域挖掘更大的商机。[7]在数年前，智能手环的售价整体较高，产品定位中高端用户。但2014年8月16日，小米手环发布时79元的搅局式定价将智能手环的目标市场群体迅速向下拓展，同时也催化出更多智能手环厂家，并发布了各自的手环产品。目前，市场上存在着大量不同厂家发布的不同型号的智能手环。纵观这些智能手环，它们大多具有计步、睡眠监测、震动提醒等功能，但除去基础功能，各种产品的特有功能基本都与其它类型的产品发生了重叠；没有更多创新性功能的手环产品，则几乎只在外观上有所区别——换而言之，市面上的智能手环产品同质化现象相当严重。

我国市场上现存的智能手环产品还存在着夸大宣传的问题。基于（一）所述的原因，各智能手环的广告宣传都大打“健康”牌，从而吸引更多潜在客户。但事实上，通过包括手环在内的智能可穿戴设备，用户只能获取数据，而不能直接获取健康。智能手环受体积、成本等多方面因素的限制，能够提供的数据极其有限。基于有限数据进行分析而得到的监测指标，其科学性与准确性本身就值得质疑；另一方面，随着智能设备规模的爆炸式增长，与其依靠单个设备通过预置的各项指标与阈值进行离线的健康监测，不如依托云平台和大数据背景，将智能手环作为健康监测设备来单纯地采集数据，由专业的健康管理工作者在专业理论的指导下妥善利用这些海量数据，使其正确、合理地转化为健康管理的具体建议。因此，除了核心技术上的突破，更需要尽快构建完整的生态系统，满足消费者的切实需求。[8]因此，构建一个运动数据分析平台是十分必要并迫切的。

## 设计的主要工作与组织结构

本文主要介绍了运动分析平台中，作为用户终端之一的智能手环这一嵌入式产品的开发原型的设计与实现。这里将从硬件与软件两个方面分别介绍产品设计中的各项重大决策及其原因。

第一章：引言部分，主要介绍了项目背景和当前可穿戴设备，特别是智能手环的技术与市场现状，并描述了本文的主要工作。

第二章：技术简介部分，主要介绍了运动类智能产品中的重要概念，以及本设计基于的原型平台的各项技术与性能指标。

第三章：系统需求分析与概要设计部分，简单地介绍了整个系统需要实现的功能性需求以及必须满足的非功能性需求，并有选择性地详细描述了手环原型这一子系统的概要设计结果。

第四章：硬件选型部分，主要介绍了选择原型平台时的各项考虑因素、各待选方案的对比以及最终的选择结果。

第五章：详细设计与实现部分，主要介绍了手环原型子系统的详细设计结果与其内部嵌入式软件关键机制的细节实现。其中，数据分析的各项算法不是本文的主要内容，届时将不会详细展开详述。

第六章：总结与展望部分，主要介绍了此次设计的产品原型在未来商业化道路上的演化方向，并对现有设计中遗留的问题进行了解释说明，有望成为今后重构的参考与指南。

# 技术简介及原型平台

## MEMS技术与微传感器

MEMS（Microelectromechanical System，微机电系统）是在微电子技术的基础上发展起来的，融合了硅、非硅微加工和精密机械加工技术制作的，包括微传感器、微执行器、微能源等微机械基本部分以及高性能的电子集成线路组成的微机电器件与装置。[9]构建一个MEMS，通常是为了获得特定的工程上的功能，这样的功能往往通过机电或电化学的方法实现。MEMS可以被大批量地制造。[10]

微传感器在全体MEMS产品中占有重要的地位。传统的传感器技术与MEMS结合之后，智能化水平得到了有效提高，并同时具备了小体积、低重量、低能耗、高性能、低成本的特点，便于集成化和多功能化。[9]

## LinkIt RTOS SDK

LinkIt RTOS开发平台[[1]](#footnote-1)由联发科技推出，是为构建智能家居产品、智能工具及物联网设备等产品而具备强大功能的开发平台。其包含的SDK（Software Development Kit，软件开发工具包）以实时操作系统FreeRTOS为基础，并囊括了TCP/IP、HTTP、XML、JSON等大量物联网设备频繁使用的组件。这套SDK支持各种以ARM Cortex-M4架构为基础的单片机，并且完全开源，代码可以由开发者任意更改。[11]值得注意的是，虽然LinkIt RTOS SDK提供了在线版本的API（Application Interface，应用程序接口）参考指南与大量代码示例，但由于SDK的结构尚未完全稳定下来，仍在迅速变动，而大量示例与API说明却没有同步更新，导致它们并不对应最新版本的SDK。这可能会对嵌入式软件的开发造成一定的阻碍。

LinkIt RTOS SDK使用的开源协议中，明确了只要开发的程序不使用其它基于GPL协议的开源代码，最终的产品代码就不必开源。这样一来，LinkIt RTOS SDK就成为了对商业开发十分友善的开源平台。

## LinkIt ONE

### Arduino

Arduino是一个源自意大利的开源电子原型平台系列。从硬件的本质上讲，大部分型号的Arduino都只是一只AVR单片机加上必要的外围电路，因此成本极其低廉。使用Arduino作为产品开发的平台具备显而易见的优势，包括其跨平台开发的特性、简单清晰的开发过程、从软件代码到硬件设计全面而充分的开放性以及来自社区与第三方的广泛支持等。[12]

Arduino具有多种不同型号的产品，如Arduino Uno、Arduino Mega、Arduino Mini等。[[2]](#footnote-2)除物理尺寸与电气接口以外，这些型号的Arduino使用不同的主控芯片，因此在工作频率、存储空间、I/O端口数量、外部中断数量等方面有所不同。[[3]](#footnote-3)在某些特殊型号的Arduino上，引脚的操作电压也有变化。不同型号的Arduino成本也不同，为了降低产品成本，在开发产品原型时，应当根据实际产品的需求，选择性能与其它技术指标最符合条件的型号。

### LinkIt ONE在Arduino基础上的革新

由于Arduino是开源的硬件平台，任何单位和个人都可以在Arduino硬件设计的基础上，利用其它硬件设备构建类似Arduino的开源硬件平台。联发科技于2014年9月22日发布的LinkIt ONE也是Arduino的衍生控制器之一。LinkIt ONE不再使用AVR单片机作为平台的主控，转而使用基于ARM7的STM32处理器，故而计算性能有明显的提升。同时，LinkIt ONE的可用内存也由使用AVR作为主控的Arduino系列产品中最大的96KB提升到了4MB，从而能够应对更加繁重、复杂的计算任务。

LinkIt ONE在实现了Arduino所有基本功能以外，还板载了蓝牙、GSM/GPRS、音视频解码等大量功能性模块，SDK中也提供了对这些模块各项功能的Arduino风格的API封装，让可穿戴设备与物联网设备的原型与应用得以更加快速、简单地被构建出来。[13]

LinkIt ONE采用了与Arduino Uno逻辑兼容的引脚布局，同时移植了 Arduino的原生API，因此大多数Arduino代码都能够不加调整地直接移植到LinkIt ONE上运行；但是处理器的变化也对其兼容性造成了影响与限制，如I/O引脚的驱动电流过小、引脚操作电压与Arduino Uno不同等等。[14]

## 本章小结

本章介绍了开发智能手环原型所涉及的主要技术，以及采用的原型平台的各项技术特征及各自的优缺点。通过这些描述与说明，可以确认构建目标原型所需的技术条件已经初步具备，因此构建相应原型的设想是可行的。与此同时，原型平台或多或少存在一些缺点与限制。明确这些缺陷与不足，能为之后的软硬件设计与开发工作有效地规避项目初期可能面临的重大风险，保障项目得以顺利推进下去。

# 运动数据采集与分析平台需求分析与概要设计

## 运动数据采集与分析平台整体概述

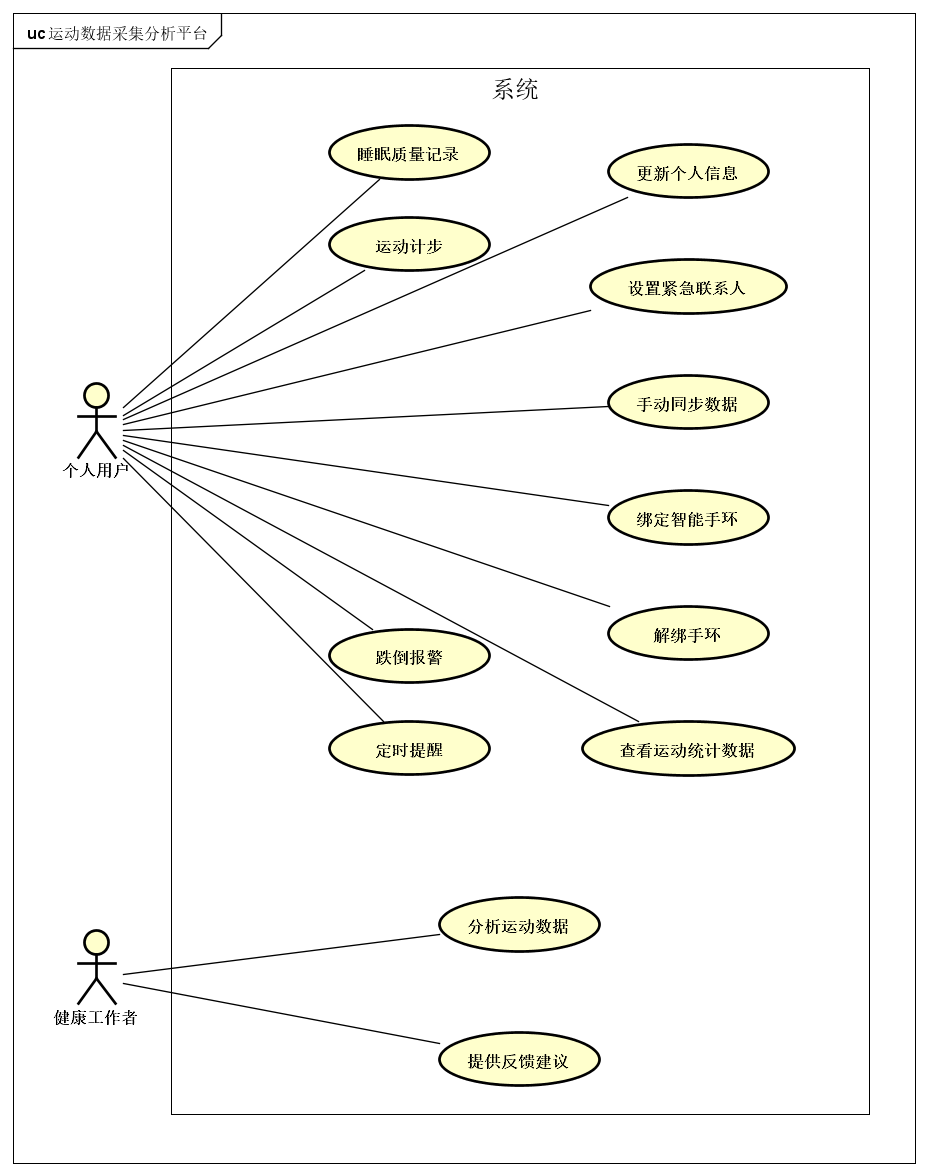
本次开发的运动数据采集与分析平台包括智能设备、移动客户端与服务端三部分。其中，智能设备，即下文所述的智能手环，起到收集运动数据和通过振动、发声等方式向用户发出提醒或通知的功能；移动客户端由于计算性能相比手环更强，会收集智能设备提供的运动数据，并对这些数据进行初步的分析与统计，并上传到服务器。此外，移动客户端还被用于发送紧急求助信息，并在用户同时在多个设备上使用移动客户端，或在不同时间使用多个手环的情况下进行历史运动健康数据的同步；服务端则主要管理用户个人基本信息与历史运动数据。这些历史数据通过专业健康工作者的分析，产生健康建议与提醒，再由服务器分发到移动客户端，向个人用户提供反馈以改进自身的运动、生活方式。

在大多数实际使用场景中，服务端对用户而言是透明的。这里的透明有两层含义：一方面，用户感知不到服务端的实际存在，因为如计步、运动提醒、跌倒报警等最为核心的功能并不以服务端的参与为功能实现的必须条件；另一方面，即使移动客户端与服务端失去联系，除了来自服务器的推送，其它功能都应当能够被正常使用，即使相应的数据没能完成与服务器的同步，在暂时的离线状态下，所有由用户自行产生的数据仍然能正常采集并完成初步分析，用户自行发起的任务请求，如设定定时提醒等，也都能够被正确地响应。这些在离线状态产生的所有数据，在移动客户端恢复与服务端的连接后，将会自动地与服务端同步，保证服务端与客户端数据的相对完整性。

类似地，智能手环也在在一定程度下脱离与移动客户端的连接而独立工作。所有连接断开前的完成设置的定时提醒与通知，在指定的时间仍然会触发，离线期间产生的运动数据，也会在设备存储性能允许的前提下尽可能多地保留下来，在重新与移动客户端建立连接后发送出去。

## 运动数据采集与分析平台的需求分析

本平台的三大部分都存在着各自的功能性需求与非功能性需求。受本文主题的影响，这一部分将主要分析智能手环部分的需求。本系统的用户有两类，分别是普通用户与健康工作者。除去用户注册、登录等极其基本的用例，他们各自对应的用例可以归纳为如下的用例图：



图三‑1 运动数据采集分析平台整体用例图

### 功能需求

图三‑1的用例都能直接转换成本次开发的平台的功能需求。其中，睡眠质量记录、运动计步、跌倒报警、定时提醒、绑定智能手环、解绑智能手环六个用例与智能手环直接关联。这些用例的详细说明如下：

表三‑1 睡眠质量记录用例说明

| 优先级 | 高 |
| --- | --- |
| 用例描述 | 在用户佩戴手环进入睡眠状态后，手环自动地收集睡眠状态信息，并进行相关分析判别睡眠质量。每次产生的睡眠质量统计结果在用户醒来后同步到移动客户端。 |
| 刺激/响应序列 | 刺激：用户开始睡眠  响应：手环侦测到睡眠特征后开始睡眠数据记录  刺激：用户在睡眠中产生翻身等不自主动作  响应：手环记录这些动作，并据此进行质量分析  刺激：用户醒来  响应：手环结束睡眠数据的记录，分析睡眠质量并发送到移动客户端 |

表三‑2 运动计步用例说明

| 优先级 | 高 |
| --- | --- |
| 用例描述 | 用户佩戴手环开始走、跑等移动动作后，手环自动地进入计步状态。依据手环传感器收集到的运动数据，记录用户前进的单步[[4]](#footnote-4)步数。每次的计步结果在用户停止前进，进入平静状态后同步到移动客户端。 |
| 刺激/响应序列 | 刺激：用户开始前进  响应：手环进入计步状态，收集传感器的运动数据  刺激：用户停止前进，保持静止一段时间  响应：手环结束对此段运动的记录，统计步数结果并发送到移动客户端 |

表三‑3 跌倒报警用例说明

| 优先级 | 高 |
| --- | --- |
| 用例描述 | 在用户跌倒后，手环侦测到跌倒动作并提醒用户。用户如果在30秒内对提醒做出了回应，手环回到原先的工作状态；否则，手环向预先设定的紧急联系人发出求救信号。 |
| 刺激/响应序列 | 刺激：用户跌倒  响应：手环提醒用户发生了跌倒，向用户请求取消发送求救信号  刺激：用户响应手环发出的请求  响应：手环取消发送求救信号，回到原先的工作状态  刺激：用户没有相应手环发出的请求  响应：手环向预先设定的紧急联系人发出求救信号，请求援助 |

表三‑4 定时提醒用例说明

| 优先级 | 高 |
| --- | --- |
| 用例描述 | 用户在移动客户端上预先设定提醒的分类（如服药、运动等）、时间与提醒方式（仅振动、仅发声、振动并发生）。设定的提醒同步到手环后，手环在设定的时间到达后向用户发出相应的提醒。 |
| 刺激/响应序列 | 刺激：用户在移动客户端上事先设定提醒  响应：移动客户端将提醒信息同步到手环  刺激：提醒中设定的时间到  响应：手环按实现设定的提醒类型向用户发出提醒 |

表三‑5 绑定智能手环用例说明

| 优先级 | 中 |
| --- | --- |
| 用例描述 | 用户在移动客户端上选择将当前连接到移动端的一个手环进行绑定，这样，在执行解绑操作之前，指定的手环只能与这台智能手机连接并通信。 |
| 刺激/响应序列 | 刺激：用户在移动客户端上要求与智能手环绑定  响应：移动客户端向用户选择的智能手环发出绑定指令，手环记录当前移动客户端的标识符并保存，用于下次连接的身份识别 |

表三‑6 解绑智能手环用例说明

| 优先级 | 中 |
| --- | --- |
| 用例描述 | 用户在移动客户端上或智能手环上选择解除已经设定好的绑定关系。此后，这个手环又可以自由地与其它移动客户端进行连接并通信。 |
| 刺激/响应序列 | 刺激：用户在移动客户端上要求解绑  响应：移动客户端向手环发出解绑指令，手环解除当前的绑定关系  刺激：用户在手环上直接要求解绑  响应：手环解除当前的绑定关系 |

图三‑1中的其它用例由于与智能手环没有直接关联，这里不再展开进行详细的描述。

### 非功能需求

对智能手环这一子模块的开发而言，非功能需求主要包含性能需求与质量属性两部分。非功能需求还包含对外接口与约束两部分，但由于智能手环只与移动客户端进行直接的通信与数据交换，并且此次的原型开发在技术上的限制条件相当宽松，因此这两部分的非功能需求不需要特别进行列举，只会描述未来产品化时的成本约束。智能手环与移动客户端的数据交换格式将推后的详细设计阶段再进行明确的定义。

#### 性能需求

智能手环显然是一个嵌入式设备，对实时性具备一定的要求。虽然智能手环不要求强实时性，但弱实时性仍然对周期性任务的超时频率做出了“偶发”的定义。因此，有必要明确地定义产品的性能的需求。

**对传感器每次产生的新数据要在20ms内完成接收与处理。**20ms的时间限制来自传感器采样频率至少要达到50Hz的条件。在本开发周期中，对传感器的采样频率要求最高的是计步功能。因此，计步功能所要求的传感器频率就是智能手环搭载的传感器采样频率的下限。有资料表明，当代职业田径运动员，在百米跑时的步频最大能达到4.95步/s，两腿最快的交换频率也在3.1-4.85次/s。[15]很容易得到推论，普通用户在跑步时的步频不可能比这个值更高。在健步走的情况下，普通成年人的步频最高水平在148步/min，合2.47步/s。[16]由于计步需要同时兼顾走、跑两种基本运动类型，这里取较快的步频4.95步/s。Nyquist取样定理指出，只有在采样频率大于连续信号中最高频率的2倍时，采样后的数字信号才能完整保留原始信号中的信息。显然，用户在运动过程中产生的运动传感数据可以认为是连续的，并且其中包含各种频率的连续信号。人因走、跑产生的运动信号具备一定的周期性，在所有感兴趣的信号中，这部分信号的频率是最高的，因此，运动信号中最高频率不妨直接取步频。经验上，实际应用中又需要保证采样频率为最高频率的2.56倍～4倍，才能获得理想的结果。因此，在取的情况下，传感器的采样频率应当保证20Hz为下限。因此，每个采样周期的时间间隔为50ms；然而，智能手环上尚有其它任务，如定时提醒、蓝牙通信、同步等在运行，并且这些任务也相当消耗时间。考虑到今后智能手环功能的扩展，传感器数据的处理很可能会增加更多的后续流程，因此，当前的原型产品内对传感器数据的获取与处理占用的CPU时间不能超过40%，即每个数据周期消耗的时间不能超过20ms。

**手环至少能离线存储6小时内产生的全部运动数据。**用户虽然很有可能会随时携带智能手机，但未必会随时开启蓝牙连接与手环进行数据同步。为了保证用户运动数据与健康数据的记录完整性，智能手环必须能缓存一部分数据。目前，马拉松可以被认为是人类持续运动的时间极限。参照近几年国内举办的马拉松赛对业余选手设定的6小时15分的关门时间[17]，认定6小时为最长的持续运动时间具备足够的合理性。

**紧急求救信号要在与移动客户端建立连接后1秒内发送到客户端。**紧急求救信号的“紧急”主要体现在一旦发生，就需要以尽可能快的速度向外界发送。由于成本上的考虑，智能手环并不直接通过移动网络发送求救信号，需要通过智能手机上的客户端中转。如果需要发送求救信号时与客户端没有建立起连接，那么手环应当主动地发起连接。由于等待建立连接的时间与移动端真正通过移动网络发送求救信号消耗的时间不是产品所能控制的，手环与移动客户端间的通信速度这一唯一可控因素就必须加以控制，尽最大的可能缩短求救信号从产生到真正发送出去的时间间隔。

**提醒的前后时间误差不能超过5秒。**在移动客户端的规划中，用户设定的定时提醒时间可以精确到分钟。智能手环上可以配备RTC（Real-Time Clock，实时时钟），但RTC的校准仍然要依靠移动端来完成。由于手环会占据用户手腕的位置，用户不太可能在佩戴智能手环的同时再戴手表，因此此时用户对时间的判断基准只能取自随身携带的手机上的显示时间，而不是来自权威机构的精确时间。受本平台的使用场景影响，用户不会倾向在手环上设置对时间准确性具有极高要求的任务，因此5秒的误差是能够满足用户在运动与健康意义上对“准时”的理解的。

#### 质量属性与经济约束

## 运动数据采集与分析平台的概要设计

### 服务器端

### 智能手机端

### 嵌入式设备端

## 本章小结

# 智能手环的选型分析

## 智能手环产品概述

## 硬件选型

### ARM7EJ-S

### ADXL345加速度传感器

## 本章小结

# 智能手环的详细设计与实现

## 手环嵌入式软件的详细设计

### 蓝牙通信

#### 蓝牙连接的保持

#### 消息的发送

#### 消息的接收

### 传感器数据的读取

### 传感器数据的分析

#### 计步

#### 睡眠质量分析

#### 跌倒报警

### 用户提醒

### 进程间的同步与互斥机制

#### 蓝牙操作许可

#### 传感器共享数据区的读写互斥

#### 收到命令后的解释与执行

### 使用场景中的典型时序

#### 蓝牙连接的建立

#### 命令的接收与执行

#### 运动状态的分析与统计

#### 跌倒报警

## 手环嵌入式软件的实现

### 重要数据结构

#### 环形队列

#### 控制命令堆

### 重要算法

#### 计步算法

#### 睡眠质量分析算法

#### 用户运动状态的判定

# 总结与展望

## 总结

## 展望

### 当前原型的不足

### 未来产品化的方向

# 参考文献

1. 栾世超，雍明.南京市居民体育锻炼现状调查研究[J].体育时空,2015,第11期:28.
2. 聂翠蓉.新型电池能助可穿戴设备融入大众生活[J].前沿科学,2015,第3期:91-92.
3. 日本松下公司研发供可穿戴设备使用的微型针形锂电池[J].电源技术,2014,第11期:1986-1987.
4. Bourke, AK，van de Ven, P，Gamble, M，O'Connor, R，Murphy, K，Bogan, E，McQuade, E，Finucane, P，OLaighin, G，Nelson, J. Evaluation of waist-mounted tri-axial accelerometer based fall-detection algorithms during scripted and continuous unscripted activities[J]. Journal of Biomechanics,2010,43:3051-3057.
5. 陈国良，李飞，张言哲.一种基于自适应波峰检测的MEMS计步算法[J].中国惯性技术学报,2015,第3期:315-321.
6. 吴茂林.2016年智能可穿戴式设备的那些事儿[J].通信世界,2016,第1期:60-61.
7. 高一乐.智能运动手环的发展现状分析[J].当代体育科技,2015,第33期:202,204.
8. 陈念昭，谢敏.从智能手环的热潮看现代信息化健康管理[A].浙江省医学会健康管理学分会第七次学术年会[C],2014:317-319.
9. 董永贵.微型传感器[M].北京：清华大学出版社,2007:6-7.
10. （美）徐泰然（Tai-Ran Hsu）著；王晓浩等译. MEMS和微系统-设计与制造[M].北京：机械工业出版社,2004:1-2.
11. 联发科技创意实验室.什么是联发科技 LinkIt™ RTOS 开发平台?[EB/OL].http://labs.mediatek.com/site/znch/developer\_tools/mediatek\_linkit\_rtos/what\_is\_linkit\_rtos/index.gsp,2016-03-07/2016-03-26.
12. 陈吕洲.ARDUINO程序设计基础 第2版[M].北京：北京航空航天大学出版社,2015:4-6.
13. 联发科技创意实验室.什么是联发科LinkIt™ ONE 开发平台[EB/OL]. http://labs.mediatek.com/site/znch/developer\_tools/mediatek\_linkit/whatis\_linkit\_one/index.gsp,2016-03-01/2016-03-26.
14. 联发科技.联发科技 LinkIt ONE 开发指南[J/OL],v1.3:2016-03-01/2016-03-21.
15. 杨文学.中外男子优秀百米运动员步幅、步频的对比分析[A].中国体育科学学会运动训练学分会第六届全国田径运动发展研究成果交流会[C],2013.
16. 练艺影，王正珍，李雪梅，王娟，米欢，李萌.20～59岁年龄段普通成年人健步走推荐速度及步频的研究[J].北京体育大学学报,2012,第7期:49-51:57.
17. 厦门国际马拉松赛组委会.2016建发厦门国际马拉松赛竞赛规程[EB/OL]. http://www.xmim.org/cn/eventtopic.asp,2015-10-26/2016-04-30.

# 致谢

1. 关于LinkIt RTOS HDK的信息，参见http://labs.mediatek.com/site/znch/developer\_tools/mediatek\_linkit\_rtos/hdk\_intro/index.gsp [↑](#footnote-ref-1)
2. Arduino全部型号的列表，参见https://www.arduino.cc/en/Main/Products [↑](#footnote-ref-2)
3. 关于各型号Arduino的技术参数，参见https://www.arduino.cc/en/Products/Compare [↑](#footnote-ref-3)
4. 人前进时足部动作的一个周期，包括两个腾空周期和两个支撑周期，被称为一个复步。每个复步又包含两个单步。 [↑](#footnote-ref-4)