

修 士 論 文 の 和 文 要 旨

研究科・専攻	大学院情報システム学研究科 情報メディアシステム学専攻 博士前期課程		
氏 名	今井 友成	学籍番号	1450004
論 文 題 目	気圧高度を用いた足部の高さ測定のための靴搭載型デバイスの開発		
<p style="text-align: center;">要 旨</p> <p>本研究では、日常的な運動可能性の拡大，運動負荷の確保を目的に，靴に搭載可能，かつ歩行時の足の高さを計測可能な活動量計の開発を目指していた．その過程で，現時点では静止状態や擬似階段において高さ方向に数～数十 cm のオーダーで計測が可能であること，平地歩行時や階段歩行時では高さの計測はできなかったが，足の動作による高さ方向の変化をとることができた．</p> <p>気圧と高度の関係について述べた後，実際に 1 つの気圧センサを使い気圧高度を求めることをおこなった．しかしながら，結果としては気圧高度の値が設置した高さの真値から最大 35cm 異なっていた．改善策として 2 つの気圧センサを使うことを検討し，その際発生する 2 つの気圧センサの個体差を埋めるための対策について以下の 3 つのことを検討した．</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 補正の方法として 2 つの気圧センサを同じ高さに設置し数秒間の計測の後，平均をとりその差を用いることを提案した． 2. センサそれぞれの持つ温度センサの取得する値の違いにより発生していた個体差について温度センサの値を共有することで解決を図った． 3. ケースに格納することによって，気圧センサがそれぞれ違う空間となってしまうケース内での気圧を計測してしまうことによって個体差が発生していた．これは 2 つの気圧センサを同一な空間に設置することで解決した． <p>静止状態における気圧高度の計測がある程度おこなえるようになったため，歩行時における気圧高度の計測を行った．歩行に関しては平地歩行，擬似階段歩行，階段歩行の全部で 3 つの状態で実験をおこなった．擬似階段歩行については高さの真値との誤差が数 cm に収まっていた．しかし，平地歩行や階段歩行における気圧高度による足部の高さを測定することができなかった．これはセンサの向きや足の振り方などいくつか原因が考えられるため，今後はそれぞれの要素に対して検証をおこなっていく必要があると考えられる．</p> <p>階段部での歩行における足部の高さ計測をもとに踏み台運動支援のためのアプリケーションを作成した．ユーザ評価を行った結果，達成感やモチベーションの改善が多少見られた．</p>			

平成 27 年度修士論文

気圧高度を用いた足部の高さ測定のための
靴搭載型デバイスの開発

大学院情報システム学研究科情報メディアシステム学専攻

学 籍 番 号 : 1450004

氏 名 : 今井 友成

主任指導教員 : 野嶋 琢也 准教授

指 導 教 員 : 田野 俊一 教 授

指 導 教 員 : 橋山 智訓 准教授

提出年月日 : 平成 28 年 1 月 28 日

目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究背景と目的	1
1.2	本論文の構成	10
第 2 章	関連研究	12
2.1	気圧センサを用いた研究	12
2.2	靴に搭載したセンサを用いた身体計測システム	16
2.3	ビジョンベースを用いた身体計測システム	24
2.4	本研究の立ち位置	32
第 3 章	気圧と高度	34
3.1	気圧高度の求め方	34
3.2	気圧高度と歩行	37
3.3	気圧センサの仕組み	38
3.4	気圧センサ T5403	40
3.5	気圧センサ C961	43
3.6	T5403 と C961 の性能比較	46
第 4 章	計測システムのプロトタイプ作成	48
4.1	システム構成	48
4.2	デバイスの消費電力	52
4.3	ケーシング	53

目次

4.4	靴	54
4.5	モニタリングソフトの開発	55
第 5 章	平滑化と個体差の補正	57
5.1	気圧値の平滑化处理	57
5.1.1	単純移動平均フィルタ	57
5.1.2	加重移動平均フィルタ	58
5.1.3	指数移動平均フィルタ	58
5.1.4	カルマンフィルタ	59
5.2	気圧センサにおける個体差の補正	62
5.3	片方の温度値共有による個体差低減	64
5.4	2 つの温度値の平均を用いた個体差低減	65
5.5	ケースの有無によるノイズの確認	67
第 6 章	提案手法の性能評価	71
6.1	提案手法による静止状態における高さ計測	71
6.1.1	実験概要	71
6.1.2	実験結果	74
6.2	擬似的階段動作における高さ方向のセンシング	76
6.2.1	実験概要	76
6.2.2	実験結果	77
第 7 章	歩行動作における気圧高度の計測	80
7.1	平地歩行時における高さ方向のセンシング	80
7.1.1	実験概要	80
7.1.2	実験結果	81
7.2	階段歩行時における高さ方向のセンシング	84
7.2.1	実験概要	84

目次

7.2.2	実験結果.....	85
第 8 章	アプリケーションへの応用.....	89
8.1	概要.....	89
8.2	ユーザテスト.....	91
8.3	結果.....	93
第 9 章	結論	96
参考文献	98
謝辞	101

図目次

図 1 : 横浜市平成 20 年度「健康に関する市民意識調査」 [2]	2
図 2 : 直近 1 年以内に行った運動・スポーツの変化 (20 年前との比較) 3	
図 3 : 活動量計 HJA-403C カロリスキャン	4
図 4 : SmartBand 2 SWR12(sony) [4]	5
図 5 : 活動量計の装着方法	5
図 6 : 計測可能な情報	7
図 7 : 活動量計のアプリケーション例	8
図 8 : Improving Floor Localization Accuracy in 3D Spaces Using Barometer [5]	13
図 9 : ドアイベントでの気圧変化における調査 [8]	15
図 10 : Paradiso らのシステムの概略図	17
図 11 : Paradiso らのシステムの外観	18
図 12 : Intelligent Shoes の外観	19
図 13 : 中敷きに設置されたセンサ類	19
図 14 : E-TRACES [11]	20
図 15 : E-TRACES の構成	21
図 16 : Orphe [12]	23
図 17 : Cyclops: Wearable and Single-Piece Full-Body Gesture Input	

図目次

Devices [13]	25
図 18 : Cyclops のハードウェア外観	25
図 19 : Wearable Smartphone のシステム概要	27
図 20 : Wearable Smartphone のアプリケーション例.....	27
図 21 : Fantastic Phantom Slipper の概要.....	28
図 22 : Fantastic Phantom Slipper をプレイしている様子.....	29
図 23 : Gravity Space [16]	30
図 24 : Gravity Space のハードウェア概略.....	31
図 25 : 気圧センサ断面図.....	38
図 26 : 気圧センサのセンサ部分の設置概要	39
図 27 : 気圧センサ T5403 の外観（赤丸）	40
図 28 : 気圧センサ C961 の外観（赤丸）	43
図 29 : T5403 と C961 の比較をした結果	46
図 30 : 回路の様子(Bluetooth モジュールは取り外して撮影)	49
図 31 : 加速度センサ軸設定	50
図 32 : ジャイロセンサ軸設定	51
図 33 : 作成したケース全体	53
図 34 : デバイスを搭載する靴全体	54
図 35 : 計測データモニタリングソフト外観	56
図 36 : デバイスの軸関係（黒：ジャイロセンサ 白：加速度センサ） .	56
図 37 : カルマンフィルタブロック線図	60
図 38 : 個体差を補正した結果	63
図 39 : ケーシングの有無による気圧高度の変化.....	67
図 40 : ケースに回路を収めた様子	69

図目次

図 41 : 熱の伝導イメージ.....	69
図 42 : 実験に使用したブロック	72
図 43 : 実験の様子	72
図 44 : センサ性能からの精度予想	73
図 45 : 実験結果.....	74
図 46 : 擬似階段歩行再現装置	76
図 47 : 擬似階段実験における気圧高度と X 軸加速度の変化	78
図 48 : 平地歩行実験の様子	81
図 49 : 計測で得られた気圧高度と右足加速度センサ Z 軸の推移	82
図 50 : 実験に使用した階段.....	85
図 51 : 階段歩行の計測結果.....	86
図 52 : 27 秒後のデータ	87
図 53 : 作成した踏み台支援アプリケーション	90
図 54 : 踏み台運動支援アプリケーションユーザテストの様子	92
図 55 : 運動した実感.....	94
図 56 : この運動を何日続けることができるか	95

表目次

表 1 : Sankaran らのシステムの認識精度.....	14
表 2 : Wu らのシステムの認識精度	15
表 3 : 本研究の立ち位置.....	33
表 4 : ICAO 標準大気の諸定数	35
表 5 : T5403 と C961 の標準偏差	47
表 6 : Arduino Micro の仕様.....	50
表 7 : 各部品の消費電力等	52
表 8 : 温度共有の有無による気圧高度の平均の違い.....	64
表 9 : 温度の共有による気圧高度の平均.....	65
表 10 : 温度の共有による気圧高度の標準偏差	66
表 11 : 求めた気圧高度の平均.....	68
表 12 : 各高さにおける平均と標準偏差	74
表 13 : 加速度センサのピーク付近の気圧高度	79
表 14 : 加速度センサピーク付近の気圧高度	83
表 15 : 気圧高度の変化量.....	88

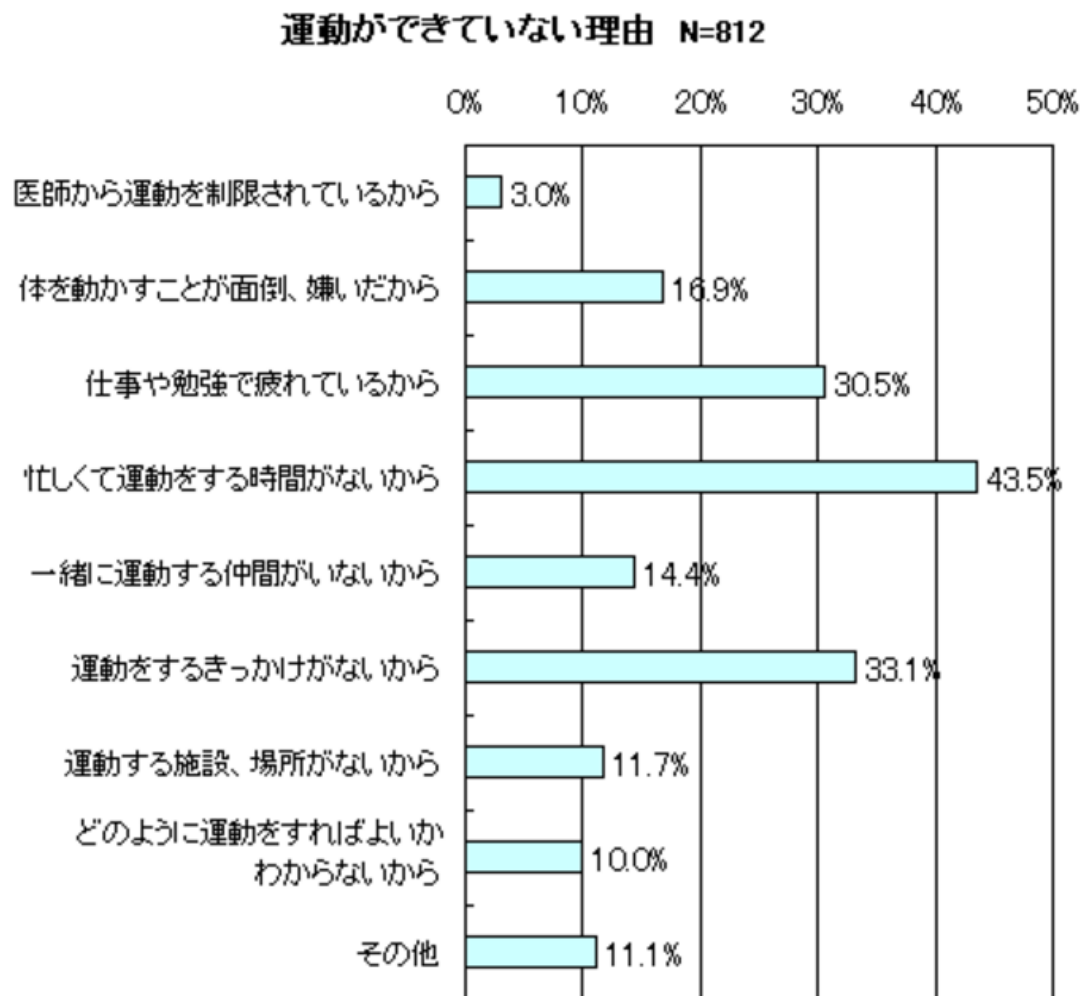
第1章 序論

1.1 研究背景と目的

日常的な運動が、健康にいい影響を与えるということは広く知られている。身体活動・運動の量が多い者は、それらが少ない者と比較して循環器疾患やがんなどの NCD（Non-communicable Disease(s)：非感染症疾患）の発症リスクが低いという結果が出ている。また最近では、身体活動・運動の意義は NCD の発症予防だけでなく、高齢者の認知機能や運動機能の低下など社会生活機能の低下と関係することも明らかになってきた [1]。こういった情報は日常の至る場面にあふれているにもかかわらず、適切な運動を、継続的に実行できる人は少ない。例えば厚生労働省が進めている健康日本 21 という政策では、30 分・週 2 回以上の運動を 1 年以上継続している者を運動習慣者と定義している。厚生労働省の調査によれば、この定義に基づく運動習慣者は、平成 22 年では 24.3 % に過ぎないとされている。そこで同政策では、この運動習慣者を平成 34 年度までに 34 % に増加させよう目標を立てている。

ではどのようにすれば運動習慣者の増加に寄与できるであろうか。運動が継続できない理由については、さまざまな原因が議論されている。例えば横浜市が平成 20 年度におこなった健康に関する市民意識調査 [2] では、運動ができない理由として「忙しくて運動をする時間がないから」が 43.5 % となっており、もっとも多かった（図 1）。この観点からか、昨今では手軽に始められるウォー

キングを、日常的な運動として選択する人が増えている。厚生労働省が発行している厚生労働白書によると、直近1年間でおこなった運動・スポーツについて1994年と2013年を比較すると、ウォーキングに関しては倍以上増加していることがわかる（図2）。



平成20年度「健康に関する市民意識調査」より

図1：横浜市平成20年度「健康に関する市民意識調査」 [2]

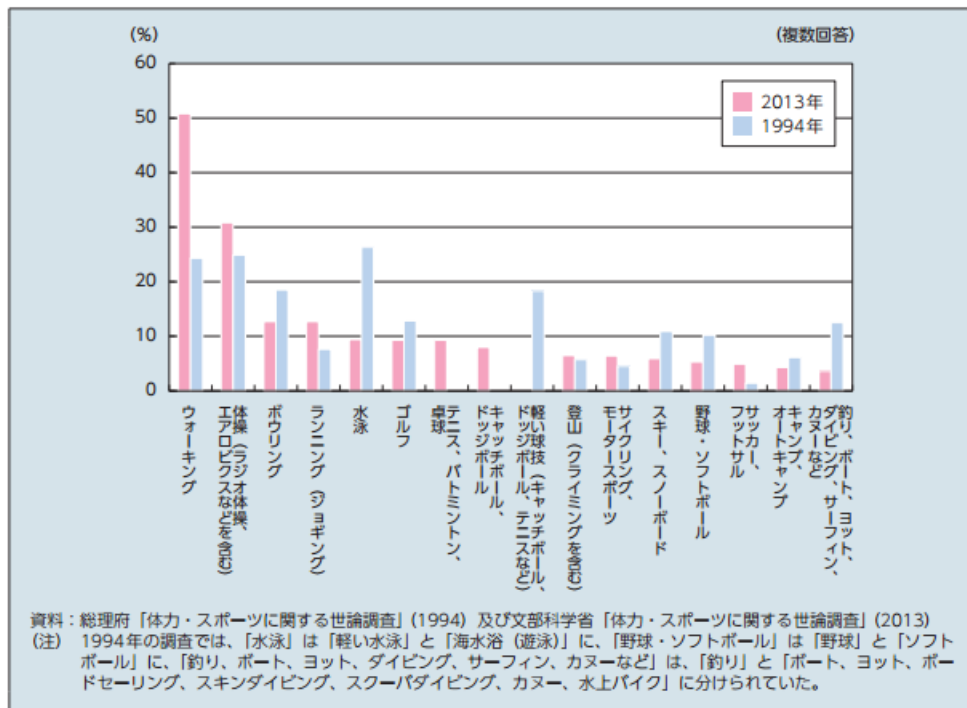


図 2：直近 1 年以内に行った運動・スポーツの変化（20 年前との比較）

図 2 の結果からは、ウォーキング人口が増えているように見受けられるが、それでも健康日本 21 のデータを考慮すれば、運動習慣者となるにはまだ大きな障害があると考えられる。そこで本研究では、歩行に合わせて変化するアプリケーションを提供することによって、ウォーキングの習慣化に寄与しうるのはないかと考えた。例えば加速度など種々のセンサを組み合わせる歩行運動を計測し、運動したいと思っている人たちにモチベーションとなるアプリケーションを提供する、という考えである。

このような考えそのものは、現在ではもはや古典といっても過言ではない。実際に同様の趣旨に基づく製品は実用化されており、活動量計としてひろまっている。例えばオムロンの活動量計 HJA-403C カロリスキャン [3] が挙げられる。これは階段上りや早歩き歩数の計測が可能であり、歩数や活動カロリーのデータを iPhone/Android スマートフォンやパソコンで管理することができる。

また，毎日の目標活動カロリーを設定することができ，達成度をインジケータ
ーで表示することができる．



図 3：活動量計 HJA-403C カロリスキャン

Sony の Smart Band2 (図 4) [4]は多数のセンサが内蔵されており，手首に
装着することで歩数，ウォーキング時間，ランニング時間，睡眠時間，脈拍，
ストレスを計測することができる．これらの記録は専用の **Lifelog** アプリケーシ
ョンを使用することで見ることができる．この製品の大きな特長として心拍セ
ンサを用いることでストレスレベルを 4 段階で計測することができる．また睡
眠の質も判断することができ，これらを可視化することで生活の改善を期待し
ている．



図 4 : SmartBand 2 SWR12(sony) [4]

これらの活動量計の違いは、装着方法、計測可能な情報、アプリケーションの3点が大きくある。

装着方法については、腕時計のように腕に付けるもの、衣服にクリップで付けたリポケットに入れるタイプのものが主流である。(図 5)



(a)ポケットに入
れるタイプ



(b)衣服に着ける
タイプ



(c)腕時計タイプ

図 5 : 活動量計の装着方法

ウォーキングという運動の特長は、その気になればいつでもどこでも実行できるという点にある。例えば通勤途中で駅一つ分多く歩く、といったことでも実行可能である。これが意味することは何かと言え、なるべく身体に装着されている可能性を高める必要があるということである。現行の装着方法は、この点についてそれ程大きな問題とはなりにくい。しかしそれでも、子供や動物を扱うために腕時計やクリップ式装置は装着できない、ポケットのない衣服(女性服に多く存在する)のため、活動量計をしまっておけない、といった問題は発生しうる。完全な解決は困難ではあるが、多少なりとも装着可能性を向上させる、新たな活動量計装着手法を検討する必要があるのではないかと考えられる。この観点で考察した場合、靴は極めてよい活動量計のプラットフォームになると期待される。日本では屋内で靴を脱いでしまうが、世界的には屋内でも靴をはき続ける文化圏は広く存在している。また、他の装着手法は装着し忘れるという可能性が少なからず存在するが、外出時に靴を履き忘れる可能性は極めて低い。一方靴はその時の装いや天候にあわせて履き替えるのが普通である。従来のように一人に一つの活動量計、というような考え方に基づくならば、履き替えた時点で計測できなくなってしまうことは明らかである。しかし仮に全ての靴に活動量計が搭載されていたならば、そのような問題は発生しないこととなる。これについては想像の域を出ないのは確かであるが、後述のように高度化された靴が多数提案されていること、IoT という概念の普及といった現状からすれば、可能性は十分あり得ると考えられる。

センサ技術の進歩に伴い、旧来の活動量計が歩数のみの計測に止まっていたのに対し、現在では心拍すら計測できるようになってきている。

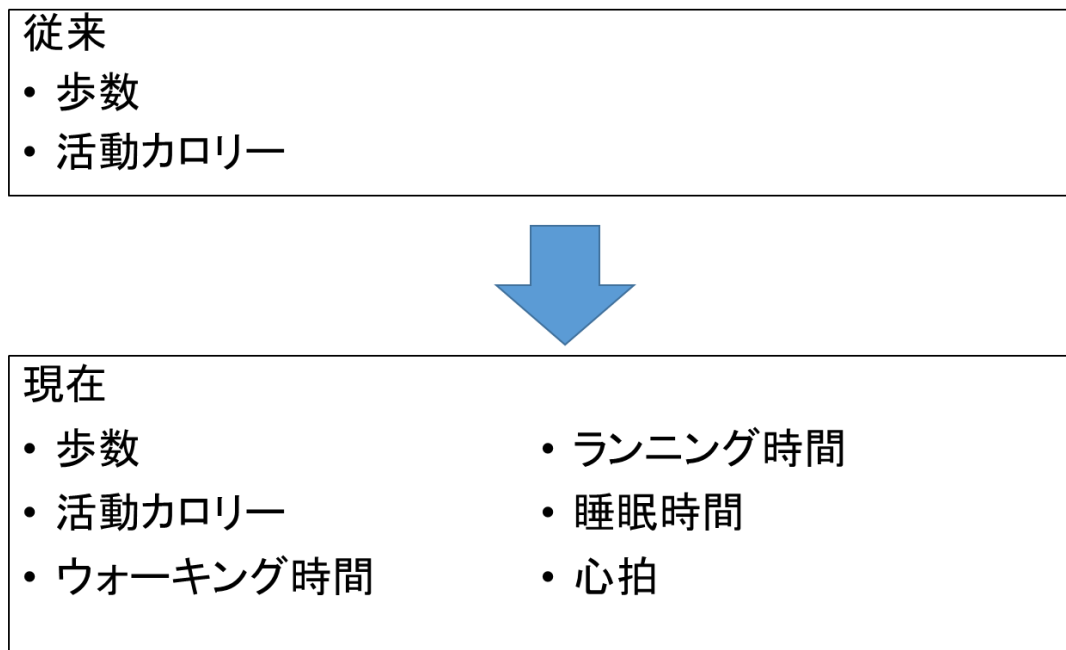


図 6：計測可能な情報

ここでウォーキングの行動について考えてみる。ウォーキング，すなわち歩行とは，足を上げて前に移動し，着地させることの繰り返しである。この運動には周期(ピッチ，ストライド)と振幅(地面から足までの高さ)という二つの側面がある。ピッチは歩行の時間的周期であり，ストライドは空間的周期である。日常的な歩行の範囲で運動強度を上げる際には，ピッチを増加させるという手法がしばしば推奨される。しかしながら歩行を続けて疲労してきた時のことを考えると，その影響は，ストライドの縮小，ピッチの低下，そして振幅の低下と言う形で現れてくることが多い。振幅の低下，すなわち足をあげにくくなるということは，通常であればなんでもないような段差でも引っかかることがあるということであり，非常に疲労している場合，あるいは筋力が低下した高齢者などで見受けられる。現在の活動量計では，ピッチの計測は可能であるものの，ストライド，および振幅の計測は不可能である。

アプリケーションに関しては、旧型の活動量計では歩数の表示機能しか搭載していなかった。そのため各自で、目標とする歩数(多くの場合1万歩)に対して、達成したかどうかを日々チェックするという使い方が主流であった。しかし現在ではスマートフォンと連携し、活動履歴をグラフィカルに表示することはもちろんのこと、SNSを通じた活動履歴の共有、さらにはスマートフォン側に食事の記録機能を付与することで、消費/摂取カロリー管理といったアプリケーションまで提案されている(図7)。活動データをスマートフォンに取り込むことによって、アプリケーションのバリエーションは大きく広がることとなった。



図7：活動量計のアプリケーション例

以上の議論を踏まえて、本研究では、靴に搭載可能、かつ歩行時の足の高さを計測可能な活動量計の開発を目指すものとする。これにより日常的な運動可能性の拡大を狙い、さらに足の高さを通じた、一定量の運動負荷の確保を狙う。とくに足の高さについては、高齢者の転倒予防といった観点でも効果があると

期待される．なお，足の高さ計測をより直接的に実現することを狙い，センサとして高精度気圧センサを利用することとした．

1.2 本論文の構成

本論文は以下に示す各章により構成される.

第2章 関連研究

気圧センサを用いた研究, 靴にセンサを搭載した研究, ビジョンベースの行動計測についての研究を紹介し, 本研究の立ち位置を示す.

第3章 気圧と高度

気圧と高度の関係について述べたあと, 歩行との関係について述べる.

第4章 計測システムのプロトタイプ作成

足部運動計測のための計測システムのプロトタイプについて述べる.

第5章 平滑化と個体差の補正

気圧高度を測定する前処理としての気圧値の平滑化と個体差の補正について述べる.

第6章 提案手法の性能評価

本提案手法での高さ方向における計測の性能について述べる.

第7章 歩行動作時における気圧高度の計測

歩行動作時における気圧高度の測定として平地歩行, 階段歩行の計測をおこなったことについて述べる.

第 8 章 アプリケーションへの応用

提案システムを用いた踏み台運動支援アプリケーションについて述べる.

第 9 章 結論

本研究で提案したシステムの結論と今後について述べる.

第2章 関連研究

第 2 章では気圧センサを用いた既存の研究や靴に搭載したセンサを用いた身体計測システムやカメラなどのビジョンベースを用いた身体計測システムについて述べる.

2.1 気圧センサを用いた研究

Improving Floor Localization Accuracy in 3D Spaces Using Barometer [5]

人間の位置を推定する技術として GPS, WiFi や BLE を用いたものがある. これらの技術は使用環境が整っている場合では, 平面における位置推定については高精度に推定することができる. しかし, 高さ方向を合わせた立体的な位置推定になると精度が悪くなる (図 8). そこで Dipyaman ら [5]は気圧センサを用いて補正をすることによって精度を向上させた. また気圧センサの正確な計測のために必要な較正について述べ, 自動的に較正を行う手法の提案を行っている. 彼らのアルゴリズムは位置推定の精度で平均 25%の改善をもたらし, ほぼ 99%の精度で階の移動と移動した階数を検出することができた.

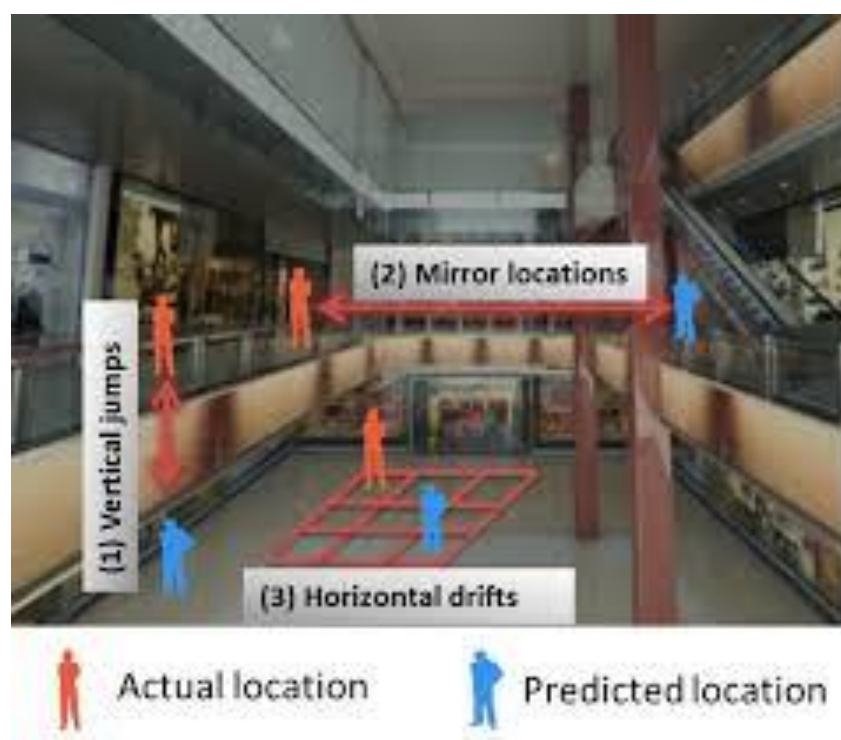


図 8 : Improving Floor Localization Accuracy in 3D Spaces Using Barometer
[5]

Barometric Phone Sensors – More Hype Than Hope! [6]

スマートフォンにも気圧センサが搭載されるようになってきている。しかし、Muralidharan ら [6]の発表当時、スマートフォンの気圧センサを用いた研究はそれほどなされていなかった。気圧センサを搭載したスマートフォンは垂直方向への人の移動を検出することに有用であると述べている。Muralidharan らは気圧センサの使い方について調査を行った。スマートフォン以外のデバイスとの精度さとの比較を行った後、階の移動や何を使用したか（エレベータ、エスカレータまたは階段）について推定をおこなった。彼らは 7 つの建物と 3 台のスマートフォンを用いて実験をおこなった。

Using Mobile Phone Barometer for Low-Power Transportation Context Detection [7]

加速度センサはスマートフォンにおける省電力な行動認識によく使われるセンサである。しかし、傾きや位置に依存したり、高いサンプリングレートで計測をおこなったりする必要がある。また精度を上げるには複雑な処理や機械学習が必要であったりする。Sankaran ら [7]は加速度センサの代替的な手法としてスマートフォンに搭載された気圧センサのみを用いて行動認識をおこなった。気圧センサはスマートフォンの位置や傾きからは独立しているので影響を受けにくい。彼らは 32mW という加速度センサよりも少ない消費電力で、静止、歩行、乗り物に乗った状態を特定できることを示した（表 1）。

表 1 : Sankaran らのシステムの認識精度

	Idle	Walking	Vehicle
Idle	76 %	19 %	5 %
Walking	19 %	54 %	27 %
Vehicle	6 %	13 %	81 %

Monitoring Building Door Events using Barometer Sensor in Smartphones [8]

建物のセキュリティシステムは通常、建物への侵入を検出するため設置される。セキュリティシステムはドアの開閉を精度よく検出することができるが、導入やメンテナンスなどのコストが高い。Wu ら [8]は気圧センサを用いて建物の中のどこからでもドアの開閉が認識できるシステムを開発した。気圧センサによる急激な気圧変化の観察はユーザの行動（階段を上るなど）がある場合と

同様に開閉を検出するのに十分である．彼らはドア開閉の検出のため，それが起こす気圧変化の特徴について調査をおこなった（図 9）．加えて，3 つの建物から集めたデータを基に 99.34 % - 99.81 %の精度でドアの開閉を認識することができた（表 2）．

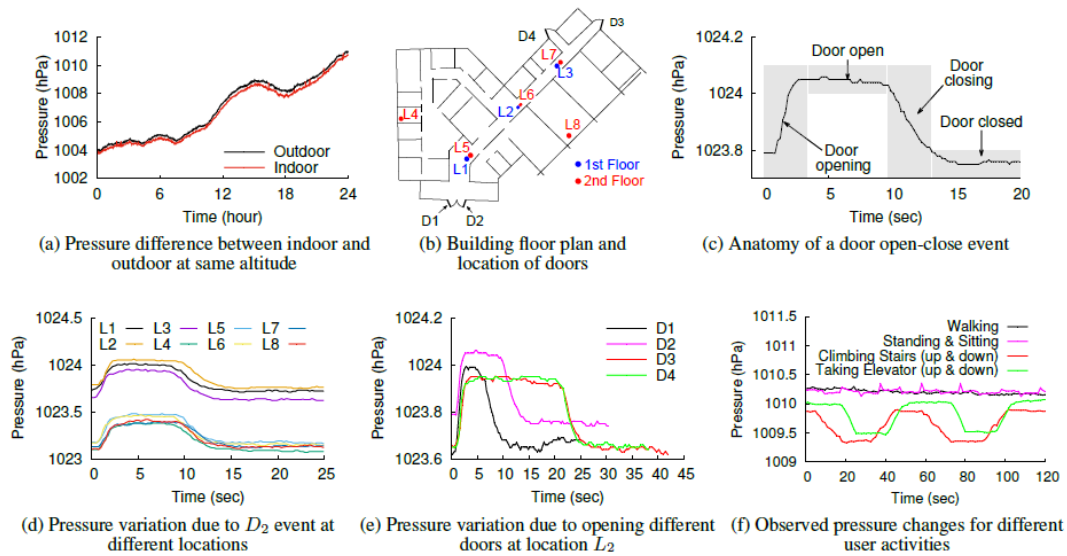


図 9：ドアイベントでの気圧変化における調査 [8]

表 2：Wu らのシステムの認識精度

Event/activity	True Positive Rate	False Positive Rate
Door opening	100 %	0 %
Climbing stairs	93.6 %	1.8 %
Taking elevator	87.0 %	0.3 %
Walking/sitting/standing	97.8 %	3.9 %

2.2 靴に搭載したセンサを用いた身体計測システム

Interactive Music for Instrumented Dancing Shoes [9]

Paradiso ら [9]は16種類のセンシングとジェスチャをパラメータとすることができるスニーカーの設計と構築を行った(図10・図11)。これは靴の前半部に3点、かかと部分に1点の圧力を検出できる。他にもソールのそり、3軸の地磁気、重力加速度、垂直方向の衝撃と角度、靴の座標を計測できる。両足の靴はこれらのパラメータを無線で共有する。デバイスを動作させるためのバッテリーも持っており、電源をケーブルで繋ぐことなく動作することができる。PCでは靴からのデータをモニタリングし、リアルタイムでインタラクティブに音楽を変化させることができる。身体的な動作と音楽とを組み合わせたパフォーマンスをおこなう。

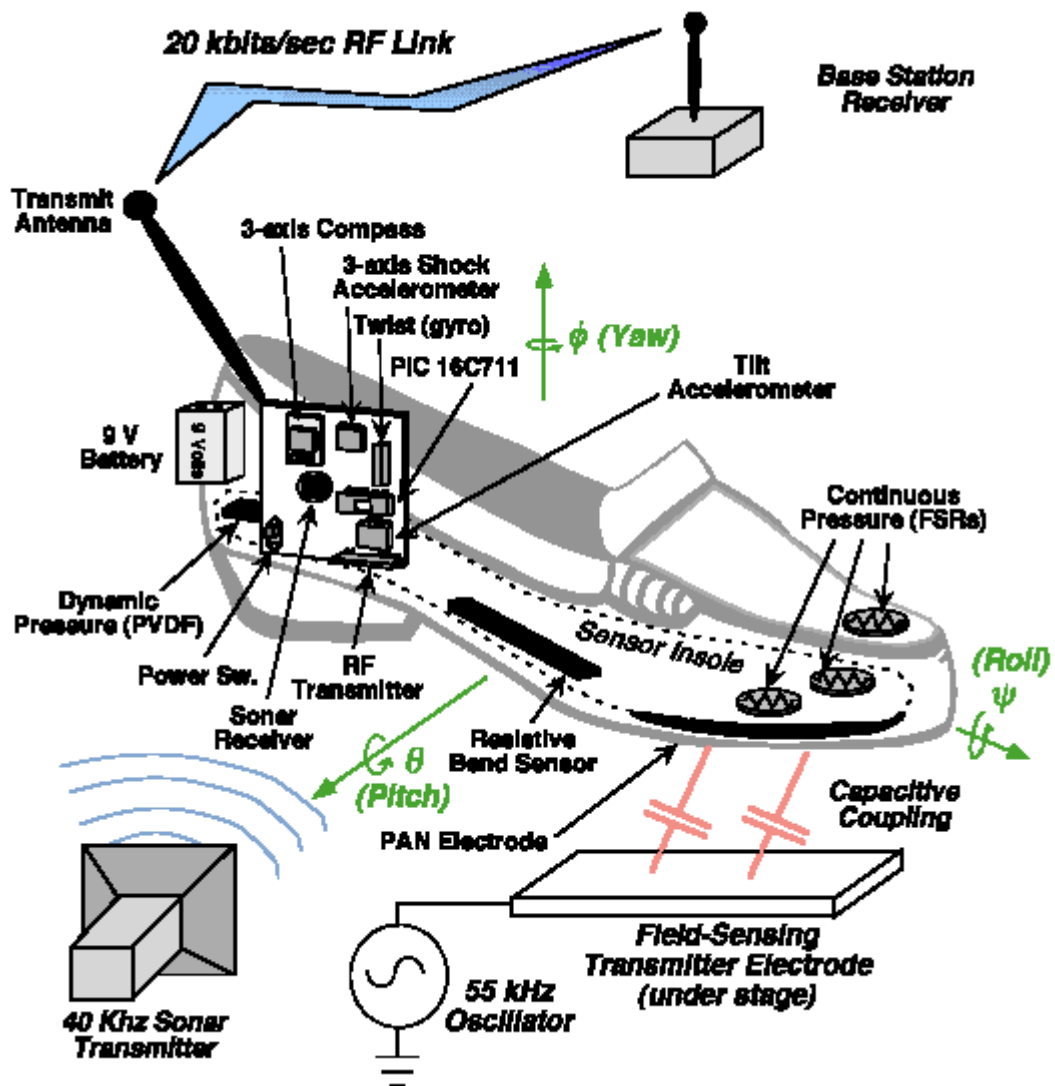


図 10 : Paradiso らのシステムの概略図



図 11 : Paradiso らのシステムの外観

Intelligent Shoes for Human Identification [10]

人間の歩行は生物学的に複雑で模倣することが難しい．これはパスワードや指紋，顔などの静的特徴のものよりもユニークでよりセキュアである．Huang ら [10]は動的に人間の歩行を解析し捉えるフレームワークの下，個人の特定のための Intelligent shoes を示した．彼らは個々の歩行をモデル化することによって装着者の分類をおこなえるという考え方に注目して調査をした．彼らは靴に加速度センサ，超音波センサ，曲げセンサ，スイッチセンサ，ジャイロセンサを搭載し，歩行実験より人それぞれの特徴的な歩行データを収集し，歩行の特徴と個人とを対応付けた．その結果，靴を用いた個人認識は 98 % の精度で個人を認識することが可能であった．実際に使用された靴と中敷きに設置されたセンサの様子を図 12，図 13 に示す．

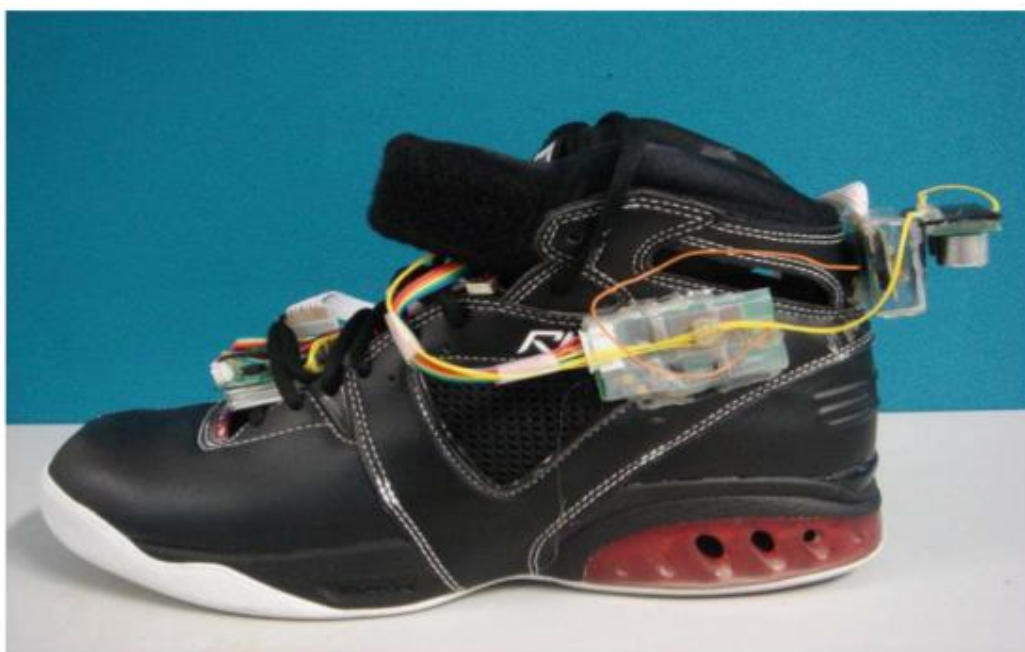


図 12 : Intelligent Shoes の外観



図 13 : 中敷きに設置されたセンサ類

E-TRACES [11]

Lesia らは E-TRACES [11] というバレエダンサー向けの足部計測機能を搭載したシューズのコンセプトを発表している (図 14). ダンサーの足の圧力と動

きを記録し、他のデバイスへデータを送ることで、足の動きをグラフィカルに確認しようとしている（図 15）これによりダンサーが、動きの改善や他の人と動きの比較を行うことが容易になる。



図 14 : E-TRACES [11]

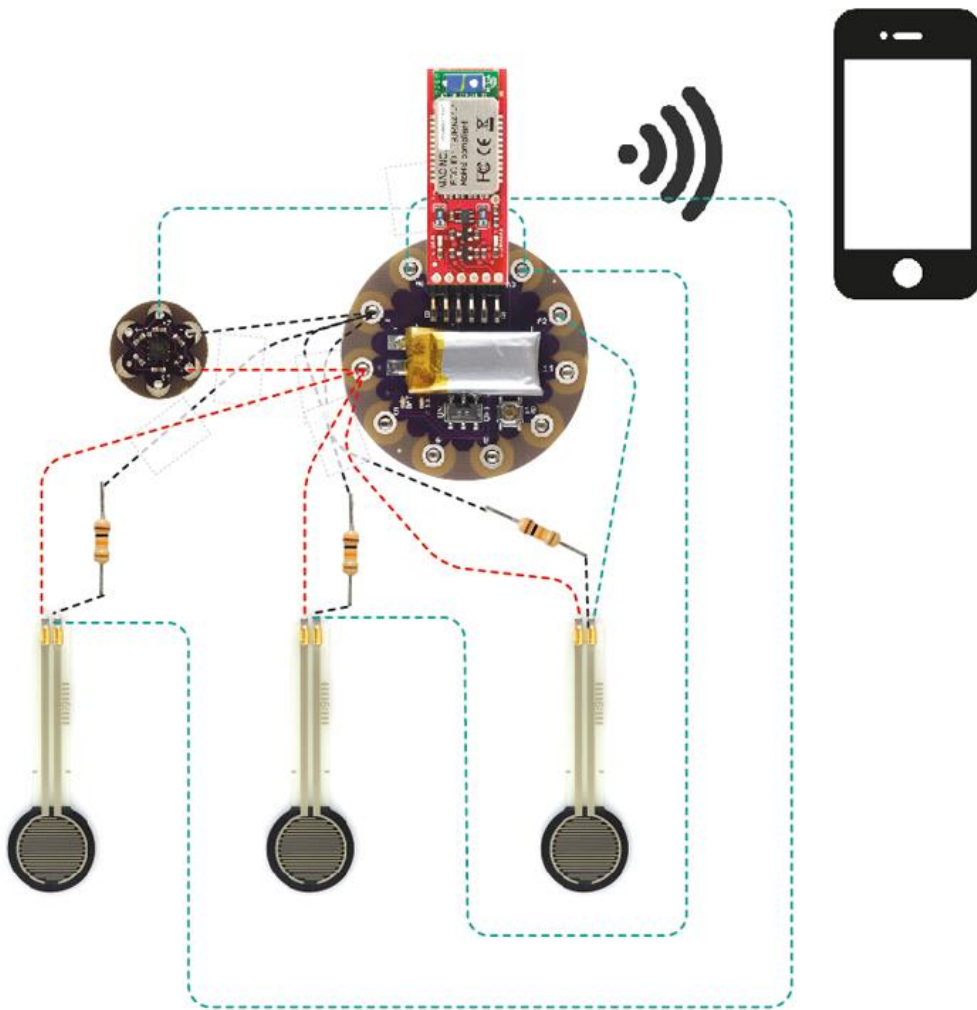


図 15 : E-TRACES の構成

Orphe

Orphe は no new folk studio が現在開発を進めているスマートシューズである。ソール部分に約 100 個のシリアル制御フルカラーLED, 9 軸のモーションセンサ, Bluetooth モジュール・ARMCortex-M3 プロセッサを内蔵している。特殊形状のソールに高密度のシリアル制御フルカラーLED を内蔵させ, 各 LED を独立して制御することで独特の光のシルエットを実現している。また, Orphe

は最新の 9 軸モーションセンサによってユーザの足元の動きを認識している。内蔵されている Bluetooth モジュールによって、外部の機器やソフトウェアにリアルタイムにモーションデータを送ることが可能である。そして、自分でデザインした Orphe のカラーパターンや音、インタラクションをネットワーク上でシェアするサービスも提供されており、他のユーザのジェスチャをダウンロードして練習することができることに加えて、デザインを手に入れることも可能となる。また、自分で Orphe を使ったアプリケーションをつくってみたいというユーザのために SDK も公開している。Orphe の入出力を簡単に制御するための仕組みを用意し、オープンソースで誰もがアプリケーションを開発しシェアすることができる。Orphe は、ダンス・音楽・エンジニアリング・ファッションなど様々なジャンルを結びつけると考えている。



図 16 : Orphe [12]

2.3 ビジョンベースを用いた身体計測システム

Cyclops: Wearable and Single-Piece Full-Body Gesture Input Devices [13]

Chan ら [13]はユーザの体の中心に着けた魚眼レンズを介して取得している視界から体全体のジェスチャを見ることができる一体型のウェアラブルデバイスである Cyclops を提案している。これはユーザの大腿部や体の姿勢の判別を効果的におこなうことが可能である。従来の独立した外部カメラや分散型のモーションセンサを使用したボディジェスチャ認識システムとは異なり、Cyclops はペンダントやバッジとして着けられる。彼らは Cyclops のコンセプトデバイスと静止または体の動きを用いたジェスチャを認識するアルゴリズムを開発し、インタラクティブな身体トレーニング、手や足を用いたモバイルレースゲーム、フルボディバーチャルシステム、タンジブルなおもちゃを使ったインタラクションの4つの適用例を示した。20人の参加者から収集した20のジェスチャのデータベースを用いて実験をおこない、より高度な機械学習では92%、簡単なテンプレートマッチングでは79%の認識率を達成している。使用している様子やハードウェアの外観を図17、図18に示す。



図 17 : Cyclops: Wearable and Single-Piece Full-Body Gesture Input Devices
[13]

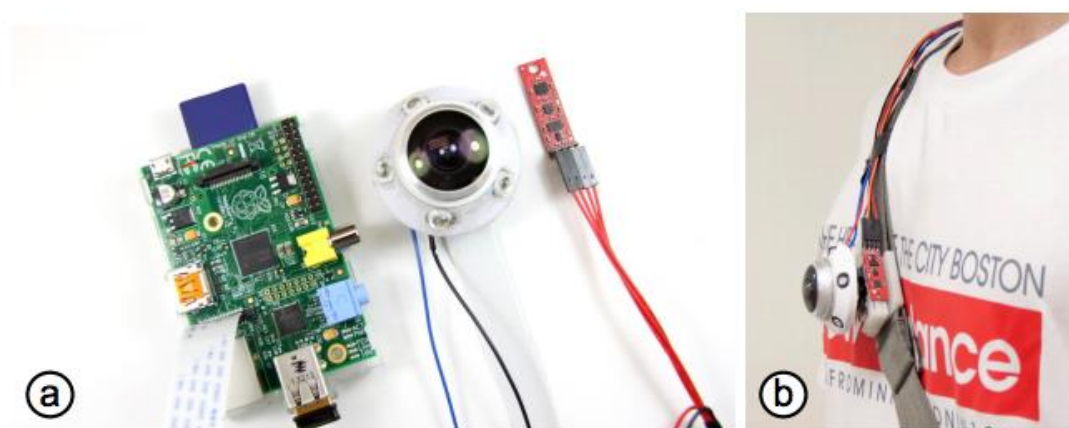


図 18 : Cyclops のハードウェア外観

Wearable Smartphone: Wearable Hybrid Framework for Hand and Foot Gesture Interaction on Smartphone [14]

スマートフォンを用いてウェアラブルなインタラクションシステムを構築することに関心が高まっている. Lv ら [14]は低コストなハードウェアとソフトウ

.....

ウェアを組み合わせた物を基にスマートフォンを用いたハイブリッドなインタラクションシステムのフレームワークを構築した。スマートフォンの画面を使用してタッチレスなグラフィックやステータスについて表示をする。ユーザはスマートフォンの背面カメラを介して手や足のジェスチャを用いてアプリケーションとインタラクションをおこなう。彼らはコンセプトを実証するためウェアラブルハイブリッドフレームワークに基づいた 4 つのアプリケーションを開発した。彼らのシステムの概要と作成されたアプリケーションを図 19, 図 20 に示す。

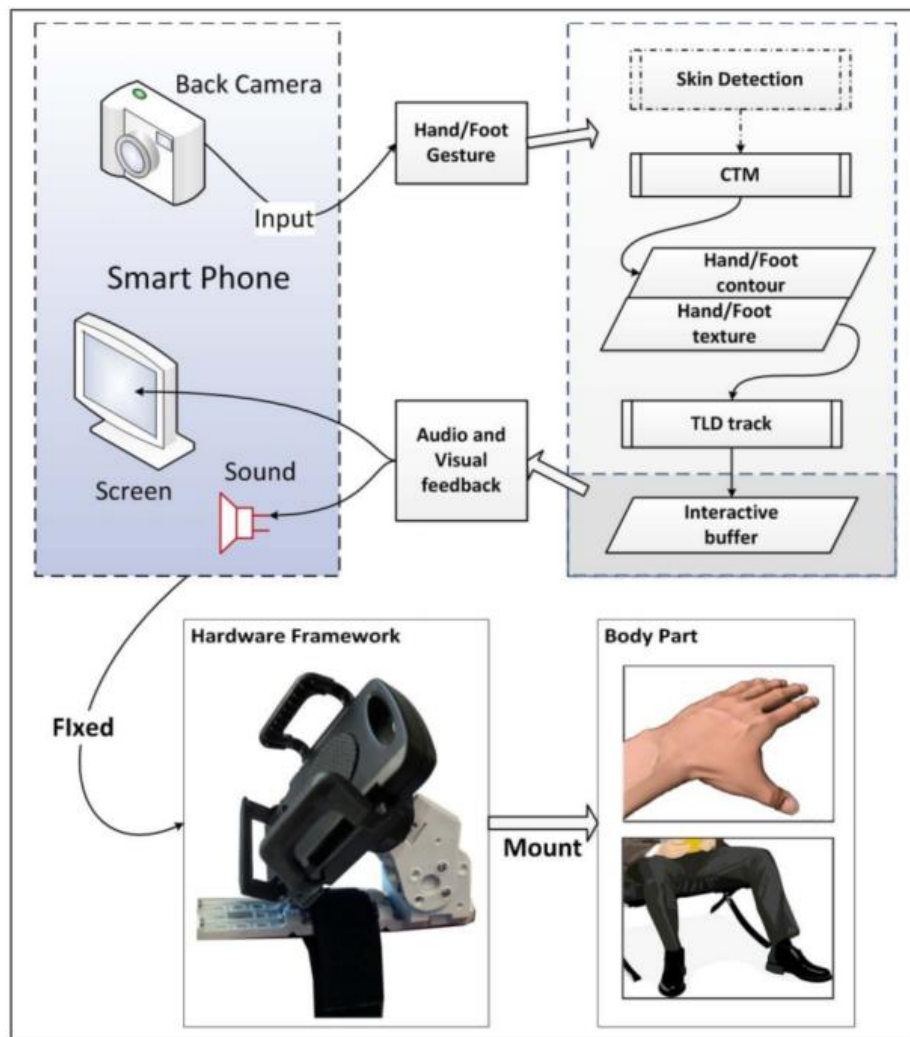


図 19 : Wearable Smartphone のシステム概要



図 20 : Wearable Smartphone のアプリケーション例

Foot Interface: Fantastic Phantom Slipper

Shirai ら [15]は Fantastic Phantom Slipper を, “Walk into the Cyber World” をコンセプトとして制作した. 「身体性のリアリティが VR, MR においていかに重要な要素となるか」を作品の体験を通して実感してもらうことを狙いとしている. 彼らはこの思想を生かすため, 体験者の体はできるだけ自由であることが必要と考え, 画面表示には HMD 等を使用しなかった. 代わりに直接歩けるディスプレイと触覚表示が可能な靴型インターフェースを開発し, 体験者の自由度を可能な限り高く保つことを設計上の最優先項目とした.

Fantastic Phantom Slipper は赤外 LED が左右 2 点ずつ実装されており 2 次元 PSD (Position Sensitive Detector) を用いてベクトル動作検出をおこなうことができる. 靴底には携帯電話用バイブレータが 2 点ずつ実装されていて, 振動刺激により触感を提示する. Fantastic Phantom Slipper のシステム概要を図 21 に, Fantastic Phantom Slipper をプレイしている様子を図 22 に示す.

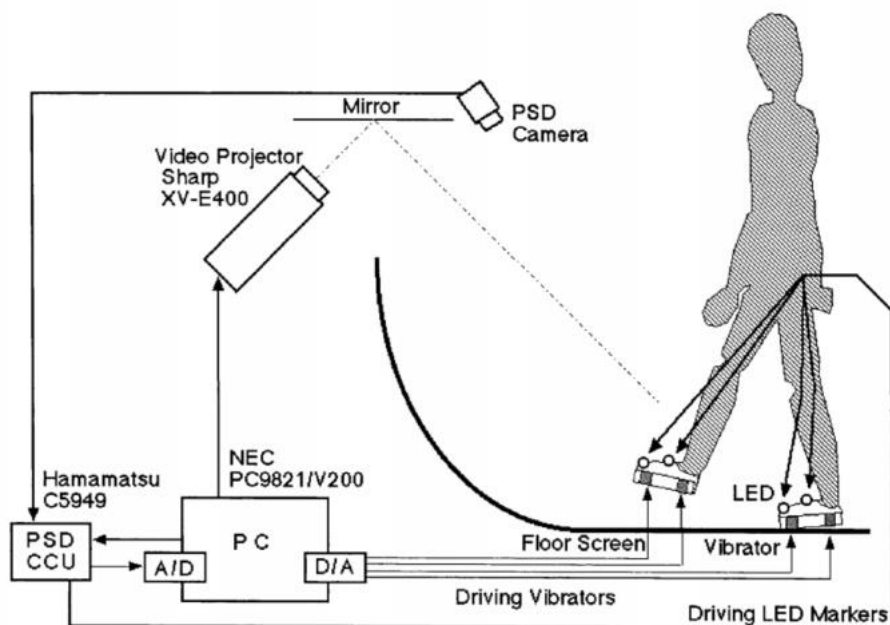


図 21 : Fantastic Phantom Slipper の概要

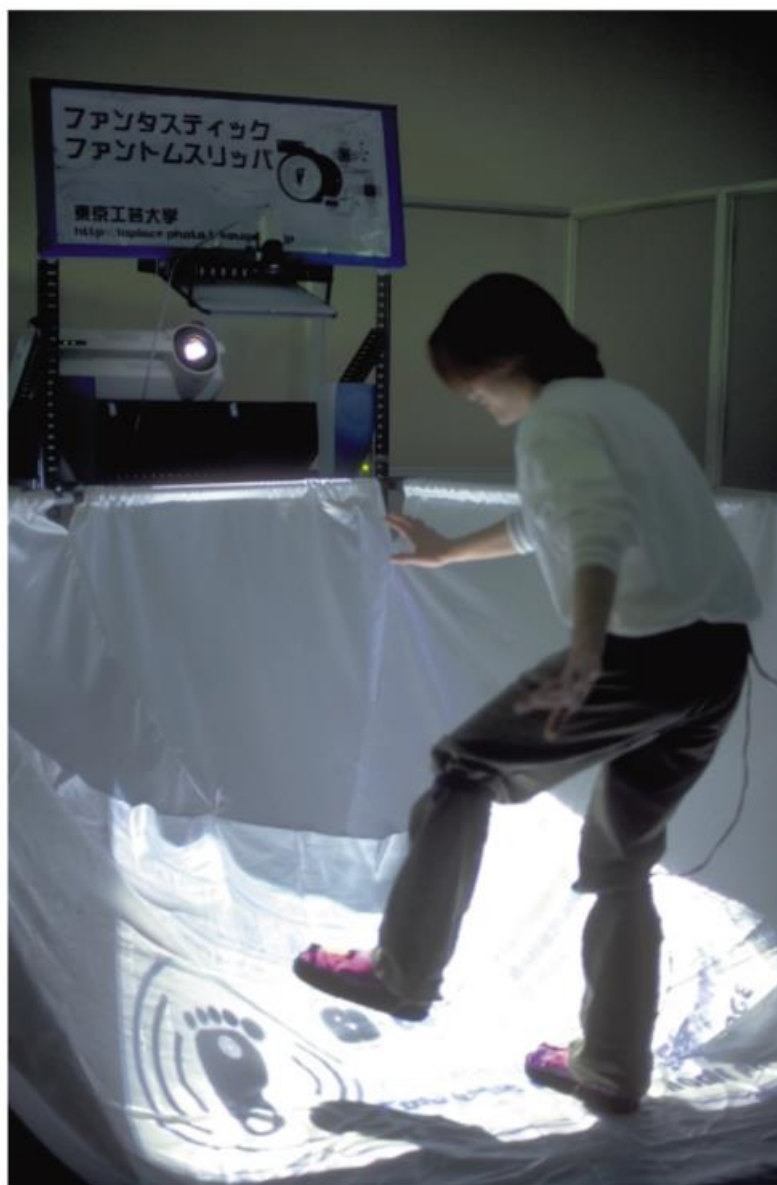


図 22 : Fantastic Phantom Slipper をプレイしている様子

GravitySpace: Tracking Users and Their Poses in a Smart Room Using a Pressure-Sensing Floor

Branzel ら [16]はカメラを用いた高解像度な感圧式の床に基づいて人や家具を追跡する方法を提案している (図 23). 従来はユーザの姿勢や仮想物体との

衝突などを計測することは難しかった。彼らはユーザ，家具，姿勢を識別するため，パッシブ式のタッチセンサ家具を作成し，識別アルゴリズムを開発した。ハードウェアの概略について図 24 に示す。



図 23 : Gravity Space [16]

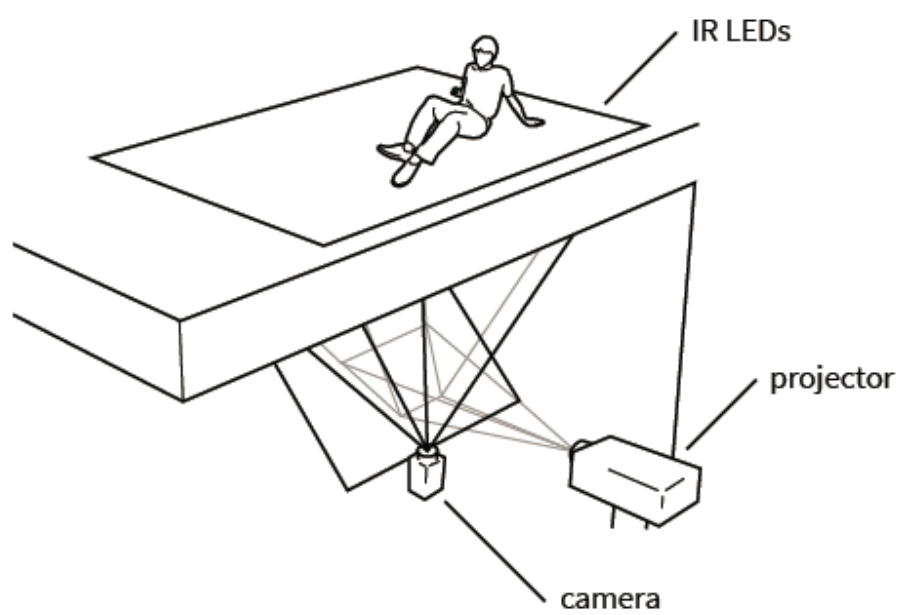


図 24 : Gravity Space のハードウェア概略

2.4 本研究の立ち位置

従来では気圧センサは行動認識，計測に用いられていた．気圧センサを身体計測に用いることは新しい使い方である．身体計測の手法としては加速度センサや圧力センサなど他のセンサを用いる手法やカメラなどビジョンベースを用いて計測する手法が主に研究されている．どちらの手法もメリット・デメリットが存在する．例えば，加速度センサによる計測は数多く研究されておりさまざまな知見が得られているが，移動量を出す際の積分の過程で誤差が蓄積しやすいことなどが言われている．このため，誤差を減らすために複雑な処理やアルゴリズムが必要となっていた．カメラによる手法は詳細な計測が可能ではあるが，多くの場合カメラの固定環境の用意や，認識の際に照明の影響を受けやすいという問題がある．カメラによる手法のなかにはウェアラブルなものを用いて環境に依存しない手法もあるが，ジェスチャ認識などが主であり歩行に関して研究している手法は少ない．気圧センサは加速度センサと比べると足の高さを直接的に計測することが可能であるので，シンプルな処理で計測がおこなえるはずである．また，複数使用することによって計測において誤差を少なくすることができると思われる．本研究の立ち位置を表 3 に示す．

表 3 : 本研究の立ち位置

	計測手法		
	気圧センサ	他センサ	ビジョンベース
身体計測	本研究	<ul style="list-style-type: none"> ・ Paradiso ら [9] ・ Huang ら [10] ・ E-TRACES [11] 	<ul style="list-style-type: none"> ・ Cyclops [13] ・ Wearable Smartphone [14] ・ Fantastic Phantom Slipper [15] ・ GravitySpace [16]

第3章 気圧と高度

この章では気圧と高度の関係，および気圧取得のためのセンサの基本原理，使用したセンサについて述べる．

3.1 気圧高度の求め方

大気圧は高度が高くなるにつれて低くなってくることが知られている．気圧高度は標準大気の気圧と高度の関係を基準にし，大気圧の高低から求めた高度である．気圧高度の求め方について坂井ら [17]の解説を参考に説明をする．

平衡状態にある高さ Z の気柱を考えると，大気密度 $\rho \text{ kg/m}^3$ および重力加速度 g を用いて高度 Z と大気圧 $P \text{ N/m}^2$ の関係を次のように表せる．

$$dP = -\rho g dZ \quad (1)$$

気体方程式 $\rho RT = MP$ ($R \text{ J/K/mol}$ は気体定数， $T \text{ K}$ は気温， $M \text{ kg/mol}$ は大気
のモル質量) より

$$RTdP = -MPgdZ \quad (2)$$

ここで， R ， M は一定とみなせるものとし，気温 T の変化が高度 H に対して線形であると仮定して，

$$T = T_0 + LH \quad (3)$$

の近似を用いることとすると（添字 0 は基準となる値を意味する），

$$\frac{P}{P_0} = \left(\frac{T_0}{T_0 + LH} \right)^{\frac{g_0 M}{RL}} \quad (4)$$

あるいは

$$H = \left[T_0 \left(\frac{P}{P_0} \right)^{-\frac{RL}{g_0 M}} - T_0 \right] / L \quad (5)$$

が得られる． L は気温減率である．気圧高度は大気の状態により様々な影響を受けるため，標準的な大気モデルが定められている．代表的な国際標準大気モデルのひとつは ICAO（International Civil Aviation Organization：国際民間航空期間）が 1952 年から採用している ICAO 標準大気で，そのパラメータは表 4 の通りである． [18]

表 4：ICAO 標準大気の諸定数

記号	パラメータ	値	単位
P_0	地上の気圧	1013.25	hPa
g_0	地上の重力加速度	9.80665	m/s^2
T_0	地上の気温	288.15	K
L	気温減率	-0.0065 ($H < 11$ km) 0 ($11 \leq H < 20$ km) +0.001 ($20 \leq H < 32$ km)	K/m
M	大気の実モル質量	0.0289644	kg/mol
R	気体定数	8.31432	$J/K/mol$

これらの気圧高度を求める式は航空機の高度を用いることを目的にしている

ため、基準となる値が地上の気圧や気温となっている。しかし、局所的 2 地点の片方を基準とすることで気圧高度による高さ方向の測定ができるを考える。

気圧高度による高さ方向の測定の参考とするため、表 4 の標準大気モデルと式 (17) を用いて、1Pa における気圧高度を求める。基準となる地上の気圧 P_0 は表 4 より 1013.25 hPa となるので、計測された気圧 P は 1 Pa 少ない 1013.24 hPa とする。地上の歩行について考えるため、高度は 11 Km より小さくなるので気温減率 L は -0.0065 K/m とする。このとき式 (17) は次のとおりとなる。有効係数 6 桁で計算をおこなった。結果は 0.0886615 (m) であり cm に直すと約 8.9 cm となる。

$$\begin{aligned}
 H &= \frac{\left[288.15 \times \left(\frac{1013.24}{1013.25} \right)^{\frac{8.31432 \times (-0.0065)}{9.80665 \times 0.0289644}} - 288.15 \right]}{-0.0065} \quad (6) \\
 &= \frac{(288.15 \times (0.999990)^{0.190263} - 288.15)}{-0.0065} \\
 &= 0.0886615 \quad (\text{m})
 \end{aligned}$$

3.2 気圧高度と歩行

前節より，気圧高度を求める式には多くのパラメータが存在し，大気環境の変動の影響を容易に受けてしまうことがわかる．つまり単一の気圧センサのみでは，所定の高さを測ることは不可能であるということの意味する．

一方で航空分野においては，気圧高度は極めて標準的な計器として重要視されている．飛行のフェーズによって異なるが，もっとも精密な高度情報が求められる着陸フェーズの場合，着陸予定滑走路の気圧値を基準値として採用し，滑走路からの差分高度(着陸時に気圧高度計が 0 を示す)という手法が用いられている．

これを歩行と合わせて考えてみる．本研究で求めるべきは足の高さであるが，気圧センサ単体では歩行時の足の高さを求めることは難しい．しかし足は通常 2 本あり，交互に上下運動をしている．特に歩行の場合，片足が上がっているときには，もう片方の足は必ず接地している．このことを考えるならば，両足に気圧センサを搭載し，その差分により両足の高度差を求めるという手法が最も現実的であると考えられる．

3.3 気圧センサの仕組み

気圧を測る仕組みは主にアネロイド式とピエゾ抵抗式の 2 つがある。アネロイド式はダイアフラムと呼ばれる真空の密閉容器（空盒）が気圧変化により膨張や収縮する動きを用いて気圧を計測する。アネロイド式は仕組みがシンプルなので故障が少なく、電波障害などの問題もないことが特徴である。しかし、アネロイド式気圧計は構造的に小型化に限界がある。そこで現れたのがピエゾ抵抗効果を利用した圧力センサである。ピエゾ抵抗型の気圧センサの断面図を図 25 に示す。

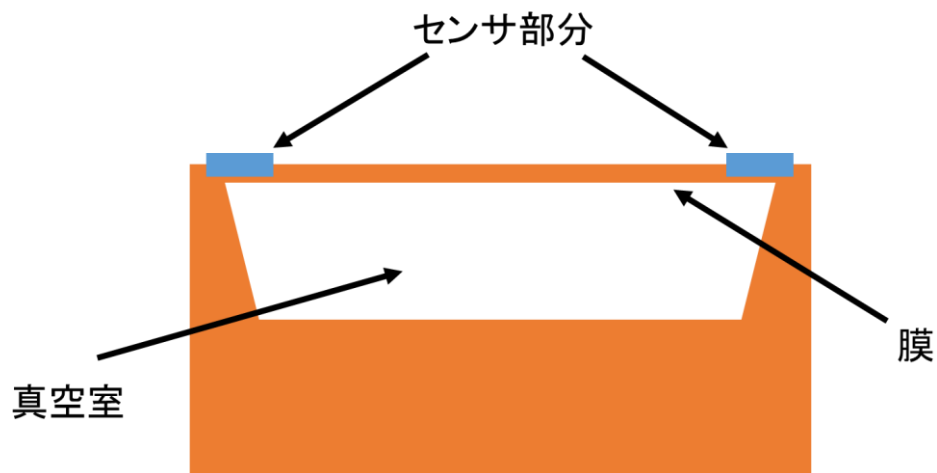


図 25 : 気圧センサ断面図

気圧変化により真空室の上の膜の部分がたわみ、センサ部分の電気抵抗値が変化します。センサ部分は図 26 のように配置され、ホイーストンブリッジ回路として構成される。

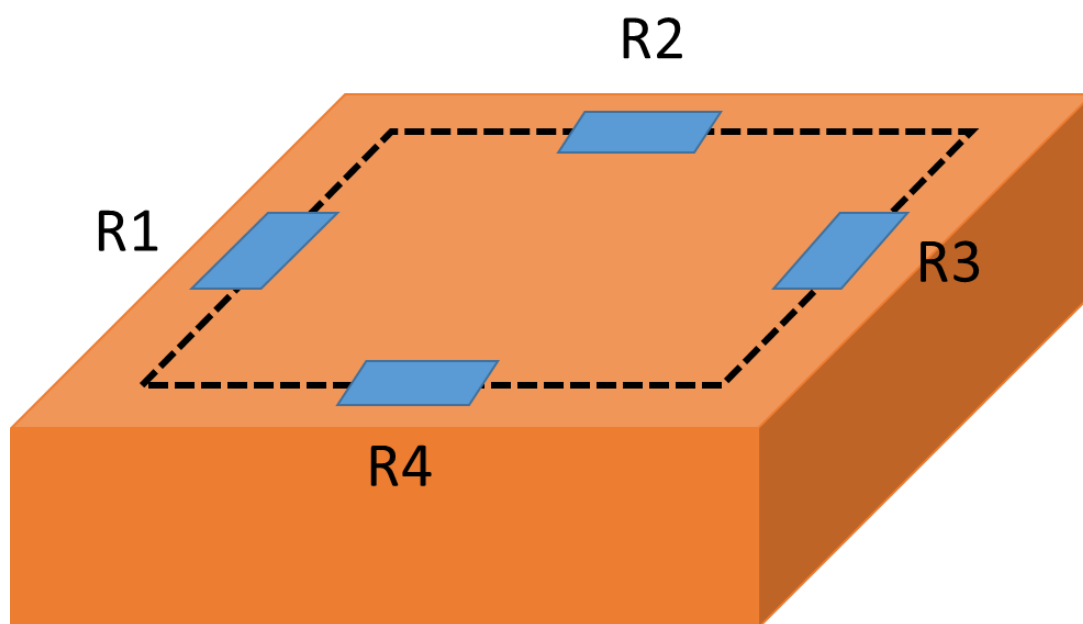


図 26 : 気圧センサのセンサ部分の設置概要

3.4 気圧センサ T5403

TDK 社が提供している気圧センサ T5403 を研究開始当初使用していた。T5403 の外観を図 27 に示す。

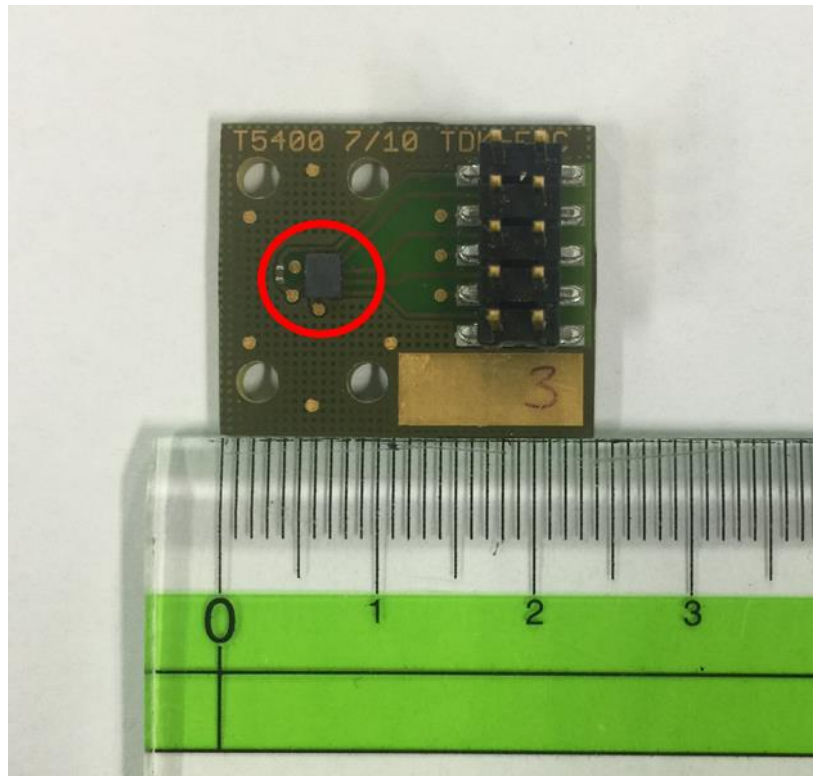


図 27 : 気圧センサ T5403 の外観 (赤丸)

サイズが $2.78\text{ mm} \times 2.23\text{ mm} \times 0.67\text{ mm}$ と小さく、低消費電力であることが特徴である。気圧の計測可能範囲は 300 hPa から 1100 hPa であり、計測は 4 つのモードが選択できる。データシートより、1 番精度の高い計測でノイズは 2.7 Pa であり、1 番高速な計測でノイズは 5.1 Pa である。

出力はデジタル出力であり、気圧値、温度値、気圧センサ値、温度センサ値およびセンサのキャリブレーションデータを出力することができる。このセンサではセンサ値を内部で変換し、気圧値と温度値を出力する。センサ値から気

圧値，温度値への変換はデータシートより次の通りである．

$$t_a = \frac{100 \times \left(\frac{c_1 \times t_r}{2^8} + c_2 \times 2^6 \right)}{2^{16}} \quad (7)$$

$$A = \frac{c_9 \times t_r^2}{2^{15}} \quad (8)$$

$$S = c_3 + \frac{c_4 \times t_r}{2^{17}} + \frac{\frac{c_5 \times t_r}{2^{15}} \times t_r}{2^{19}} + \frac{\frac{A}{2^{15}} \times t_r}{2^{16}} \quad (9)$$

$$O = c_6 \times 2^{14} + \frac{c_7 \times t_r}{2^3} + \frac{\frac{c_8 \times t_r}{2^{15}} \times t_r}{2^4} + \frac{A}{2^{16}} \times t_r \quad (10)$$

$$X = \frac{S \times p_r + O}{2^{14}} \quad (11)$$

$$p_a = X + \frac{\left(\frac{(X-75000)^2}{2^{16}} - 9537 \right) \times c_{10}}{2^{16}} \quad (12)$$

t_a : 温度値

p_a : 気圧値

t_r : 温度センサ値

p_r : 気圧センサ値

$c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8, c_9, c_{10}$: キャリブレーション値

気圧および温度データは 16bit で表現される. マイクロコンピュータとの通信は I2C 通信と SPI 通信の 2 種類から選択できる. 本研究では取り扱いやすかったため I2C 通信を選択した.

3.5 気圧センサ C961

TDK 社が提供している気圧センサ C961 を現在は使用している。気圧センサの外観を図 28 に示す。

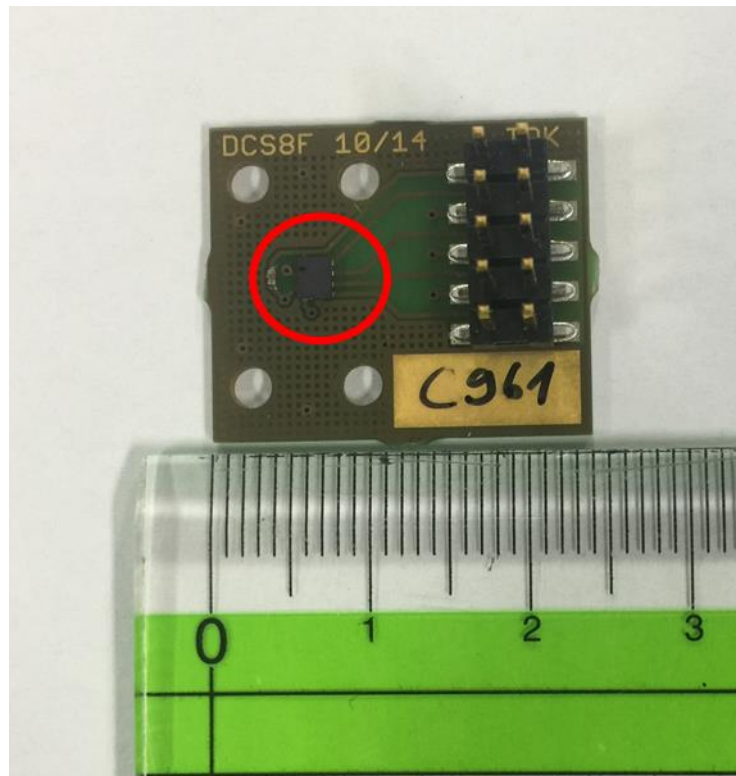


図 28 : 気圧センサ C961 の外観 (赤丸)

基本的な機能は T5403 と同じであるが、いくつか変更が加えられている。まずサイズが $2.0\text{mm} \times 2.5\text{mm} \times 0.8\text{mm}$ と幅と長さが小さく、高さが大きくなった。また T5403 では気圧値、温度値、気圧センサ値、温度センサ値、キャリブレーションデータが出力できたが、C961 ではそれに加えて、湿度を出力できるようになっている。気圧および温度データは 20bit で表現されるようになった。T5403 と同じく計測速度と計測精度の設定を 4 パターン持っている。データシートより一番計測速度が速い設定でノイズが 3.5 Pa, 一番精度が高い設定でノ

イズが 0.9 Pa である.

気圧センサ値, 温度センサ値から気圧値, 温度値を導出する式は T5403 から変更になっている. 気圧センサ値, 温度センサ値からの導出の式はデータシートより次の通りである.

$$t_s = t_r - 2^{19} \quad (13)$$

$$T = \frac{c_1 \times t_s}{2^{16}} + c_2 \quad (14)$$

$$A = 2^{11} \times c_6 + \frac{c_3 \times p_r}{2^8} \quad (15)$$

$$B = \left(2^8 \times c_4 + \frac{c_5 \times t_s}{2^{12}} + \frac{c_9 \times t_s^2}{2^{29}} \right) \times \frac{p_r}{2^{19}} \quad (16)$$

$$C = 2^8 \times c_7 + \frac{c_8 \times t_s}{2^{12}} + \frac{c_9 \times t_s^2}{2^{29}} \quad (17)$$

$$X = A + (B + C) \times \frac{t_s}{2^{17}} \quad (18)$$

$$p = X + \left(\frac{(X - 75000 \times 2^8)^2}{2^{24}} - 9537 \times 2^8 \right) \times \frac{c_{10}}{2^{16}} \quad (19)$$

t_r : 温度センサ値

T : 温度値 (°C/100)

p_r : 気圧センサ値

p : 気圧値 ($Pa/2^8$)

気圧および温度データは 16bit で表現される. マイクロコンピュータとの通信は I2C 通信と SPI 通信の 2 種類から選択できるが, この設定はセンサ出荷時に決定され, 使用者が変更することはできない. 本研究では I2C 通信を選択した.

3.6 T5403 と C961 の性能比較

気圧センサの性能を示す値としてノイズの大きさが考えられる。T5403 と C961 の性能を比較するために実環境におけるノイズの大きさの比較をおこなう。データシート上では C961 は T5403 と比べてノイズが小さいため、C961 のセンサは実環境でもノイズが抑えられているのではと考えられる。と実験は 2 つのセンサを同じ高さに設置をし、30 秒間静止状態で計測をおこなう。どちらのセンサも同じサンプリングレートの設定を用いた。実験で得られた結果を図 29 に示す。

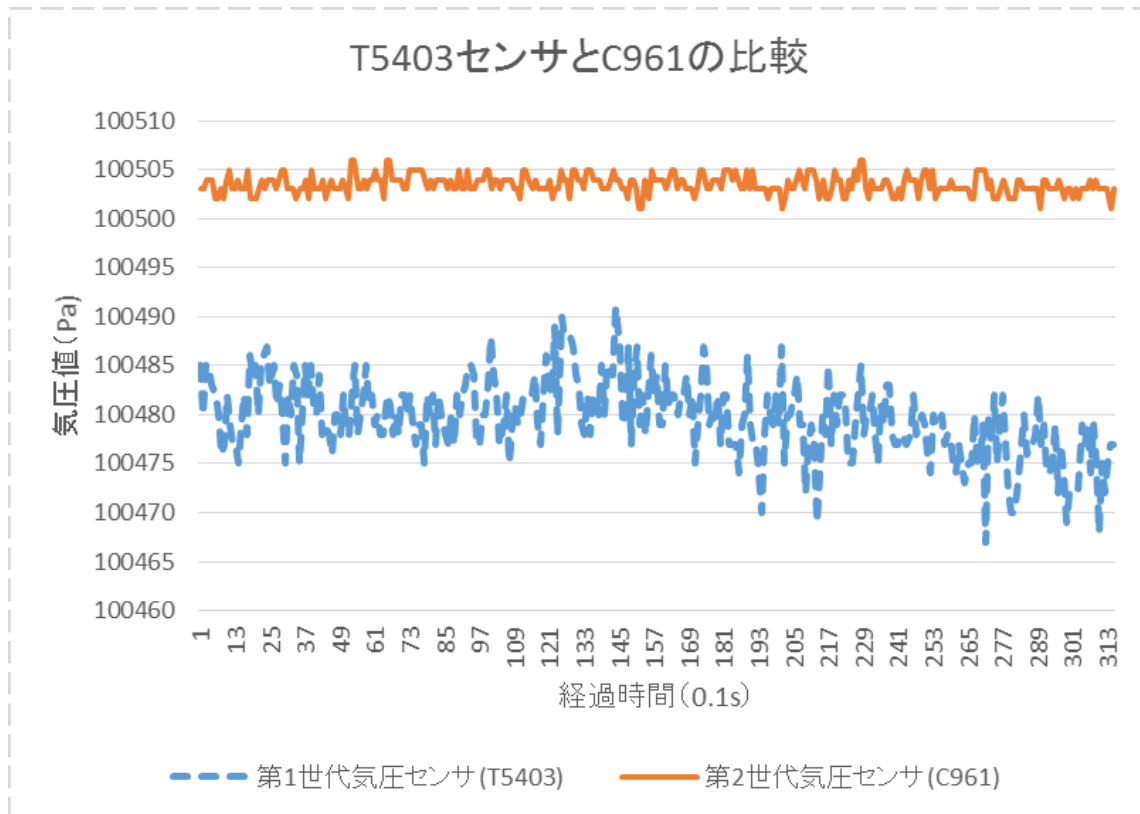


図 29 : T5403 と C961 の比較をした結果

図 29 より、ノイズによる値の振動が C961 の方が小さいことが分かる。加えて 2 つのセンサのこのデータにおける標準偏差を求めた結果を表 5 に示す。

表 5 : T5403 と C961 の標準偏差

	T5403	C961
標準偏差(Pa)	3.9532	1.0091

表 5 より, C961 の方が T5403 の方よりノイズが 1/4 程度少ないことが分かる. このことより C961 を使用することで, より精度よく気圧高度を計測することができると考えられる.

第4章 計測システムのプロトタイプ作成

初めにシステムの構成について説明をおこなう。その後使用したマイコンとセンサについて述べ、回路保護のためのケーシングについてとデバイスを搭載する靴について述べる。最後に計測をモニタリングするため作成したモニタリングソフトについて述べる。

4.1 システム構成

システムはデバイスサイドとクライアントサイドに分かれて構成される。デバイスサイドではセンサを用いて足部運動の計測を行い、クライアントサイドではデバイスサイドで計測したセンサ値を用いて運動状態の推定など処理を行う。クライアントサイドとデバイスサイドは Bluetooth を用いて接続され値の受け渡しを行う。よってクライアントサイドは Bluetooth のプロファイルが対応しているものを使用する。作製したデバイスの回路を図 30 に示す。今回デバイスの設置箇所は足の甲付近に設定した。

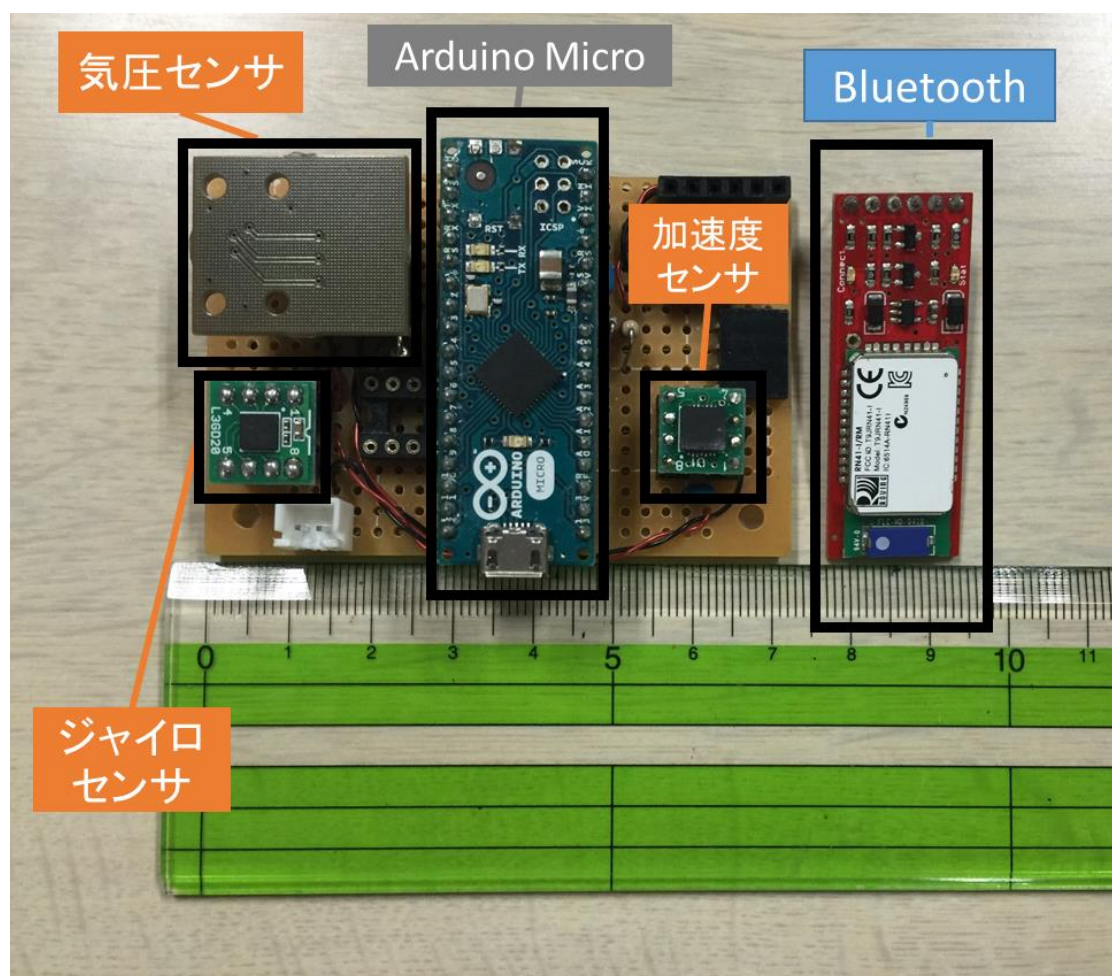


図 30 : 回路の様子(Bluetooth モジュールは取り外して撮影)

Arduino Micro

デバイスサイドにおける各種センサの操作やデータの処理を行うためのマイクロコンピュータとして Arduino Micro を使用した。Arduino Micro の仕様を表 6 にまとめる。

表 6 : Arduino Micro の仕様

名称	Arduino Micro
プロセッサ	ATmega32u4
クロック	16 MHz
消費電流	15 mA
動作電圧	5 V
消費電力	75 W

気圧センサ : C961

詳細は前章にて述べた.

加速度センサ : KXR94-2050

足全体の動きの計測するため, Kionix 社の 3 軸加速度センサ KXR94-2050 を使用した. 測定レンジは $\pm 2G$, 感度は 660mV/g , 非直線性誤差は $0.1\%FS$ である. このセンサはアナログ出力である. 入手のしやすさ取り扱いやすさからこのセンサを使用した. 加速度センサの軸設定を図 31 に示す.

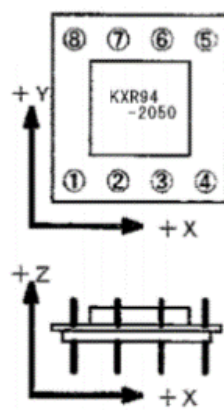


図 31 : 加速度センサ軸設定

ジャイロセンサ : L3GD20

足の回転運動計測のため, ST マイクロ社の 3 軸ジャイロセンサ L3GD20 を使用した. 測定範囲と分解能は選択することができ, 今回は測定範囲 ± 250 dps, 分解能 0.00875 dps を使用した. また通信方法も I2C 通信と SPI 通信の 2 種類から選択することができるが, 今回は気圧センサの通信方法に合わせて I2C 通信を選択した. ジャイロセンサの軸設定を図 32 に示す.

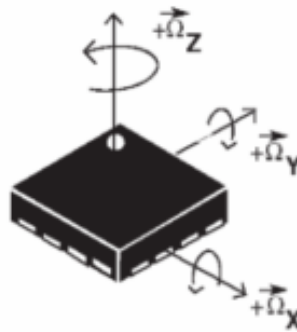


図 32 : ジャイロセンサ軸設定

圧力センサ : FRS-400

足圧の計測のため, Interlink electronics Inc.の圧力センサ FSR-400 を使用した. FSR-400 は高分子厚膜フィルム(PTF)デバイスの 1 つであり, センサ部分に加えられた力に伴いセンサ部の電気抵抗が変化する. 圧力センサは足の母指球とかかと部分に設置をする.

4.2 デバイスの消費電力

本研究で作成するデバイスは日常的に使用できる物を目指している．そのため稼働時間を長くする必要があると考えられる．靴型のデバイスなので，日本では朝 8 時に仕事に出かけて夜 9 時に仕事から帰り家に入ると仮定し，帰宅時に充電を行うというサイクルを想定するとデバイスの駆動時間は13時間程度あると望ましい．そこで本デバイスの消費電力を調査し，デバイスのおおよその稼働時間を求めた．

表 7：各部品の消費電力等

部品名	消費電流	電源電圧	消費電力
ATmega32U4 (Arduino Micro)	15 mA	5 V	0.075 W
C961	0.3 μ A	3.3 V	9.9×10^{-4} W
Bluetooth モジュール	30 mA	5 V	0.15 W
KXR94-2050	1.25 mA	3.3 V	4.1×10^{-3} W
L3GD20	6.1 mA	3.3 V	0.02 W

表 7 より，デバイスの消費電力は約 0.25009 W であった．使用した電源は Li-Po バッテリーの出力電圧が 3.7 V，容量が 1400mAh である．よって今回作製したデバイスは 20 時間以上稼働できると予想される．

4.3 ケーシング

回路の保護を目的としてケースを 3D プリンターで作成した。ケースを含めたサイズは $52.4\text{mm} \times 74.4\text{mm} \times 29.2\text{mm}$ となった。作製したケースの全体を図 33 に示す。

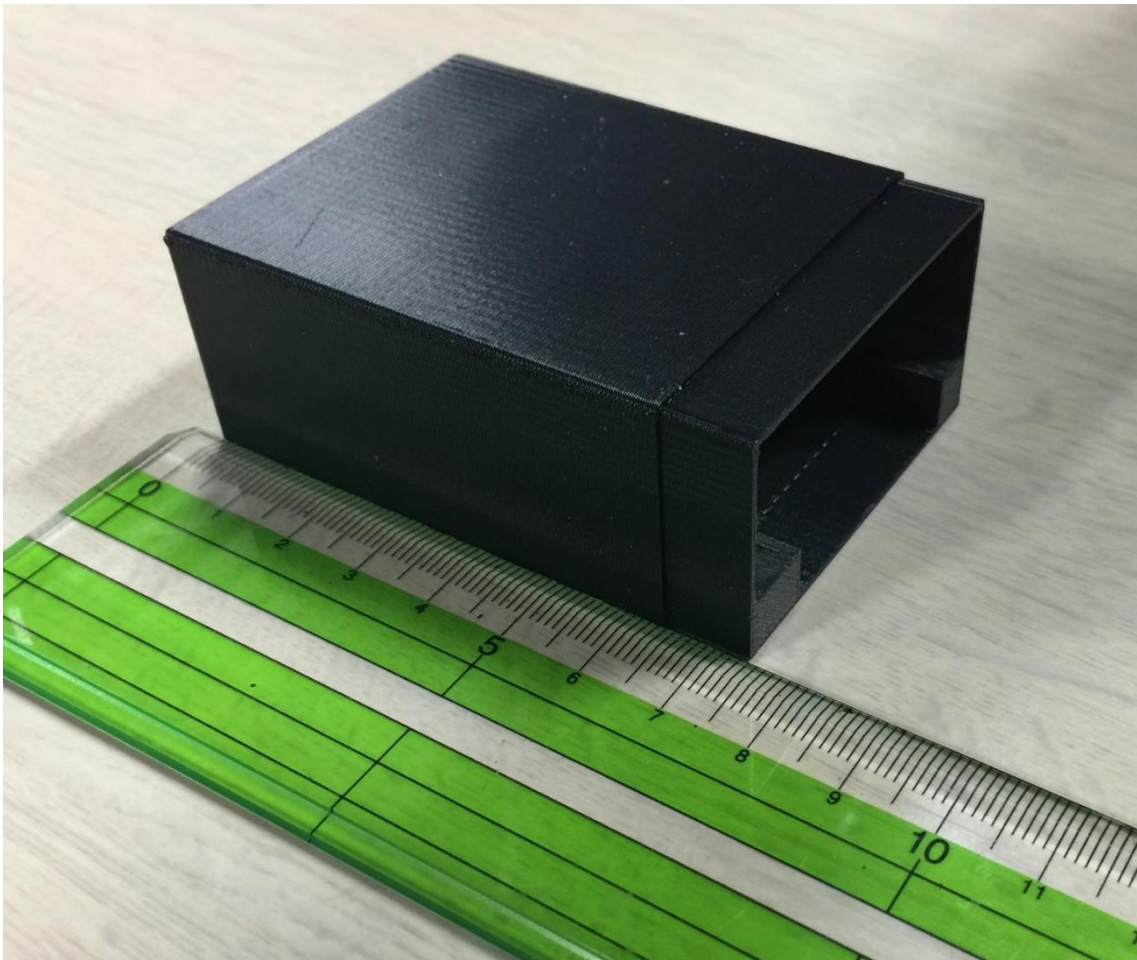


図 33 : 作成したケース全体

4.4 靴

デバイスを搭載する靴を図 34 に示す. プロトタイプであり様々な動きを計測するため, 動きやすいスニーカーを用いた. 靴のサイズは 26.5cm である. デバイスは足の甲にある布製の袋に搭載する. 袋と靴の固定は, 袋に縫い付けられたベルトループを用いて, 足を靴に固定するためのバンドをそこに通して固定する.



図 34 : デバイスを搭載する靴全体

4.5 モニタリングソフトの開発

このデバイスを用いたアプリケーション開発を容易にするため、計測データのモニタリングソフトを開発した（図 35）。画面左側には換算された気圧高度（cm）を文字で表示すると共にグラフ表示する。気圧高度を文字で表示するのはグラフのみでは読み取りづらい詳細な値を確認するためである。これにより足の動作における気圧高度の変化を詳細に観察することが容易になる。画面右側のグラフエリアでは気圧、加速度、ジャイロ、圧力のいずれか 2 つのセンサ値を選択してグラフ表示できるようになっている。これにより足の動作における気圧高度の変化と加速度センサなどの他のセンサとの関連性の観察が容易になることが期待される。また、このモニタリングソフトはデータのファイル保存も可能となっており、データ時刻（時、分、秒）、センサ側の電源投入からの経過時間（ミリ秒）、気圧センサデータ（換算前気温、換算前気圧、換算後気温（℃）、換算後気圧（Pa）、ジャイロセンサデータ（X 軸・Y 軸・Z 軸回り角速度（dps））、加速度センサデータ（X 軸・Y 軸・Z 軸方向加速度（G））が記録される。デバイスでの軸関係は図 36 に示す。

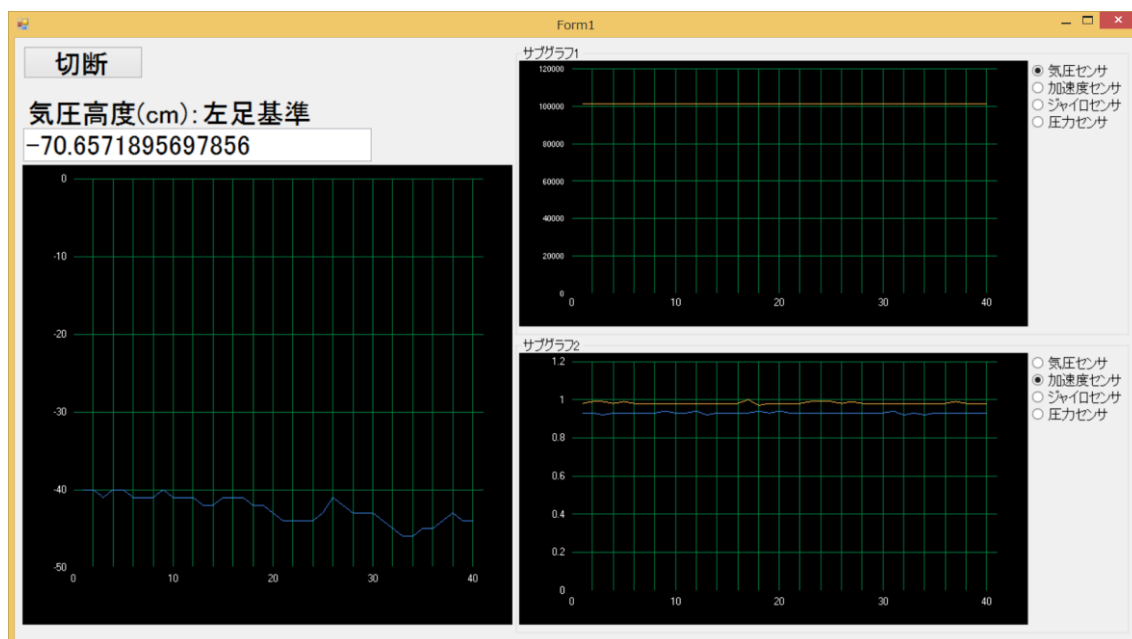


図 35 : 計測データモニタリングソフト外観

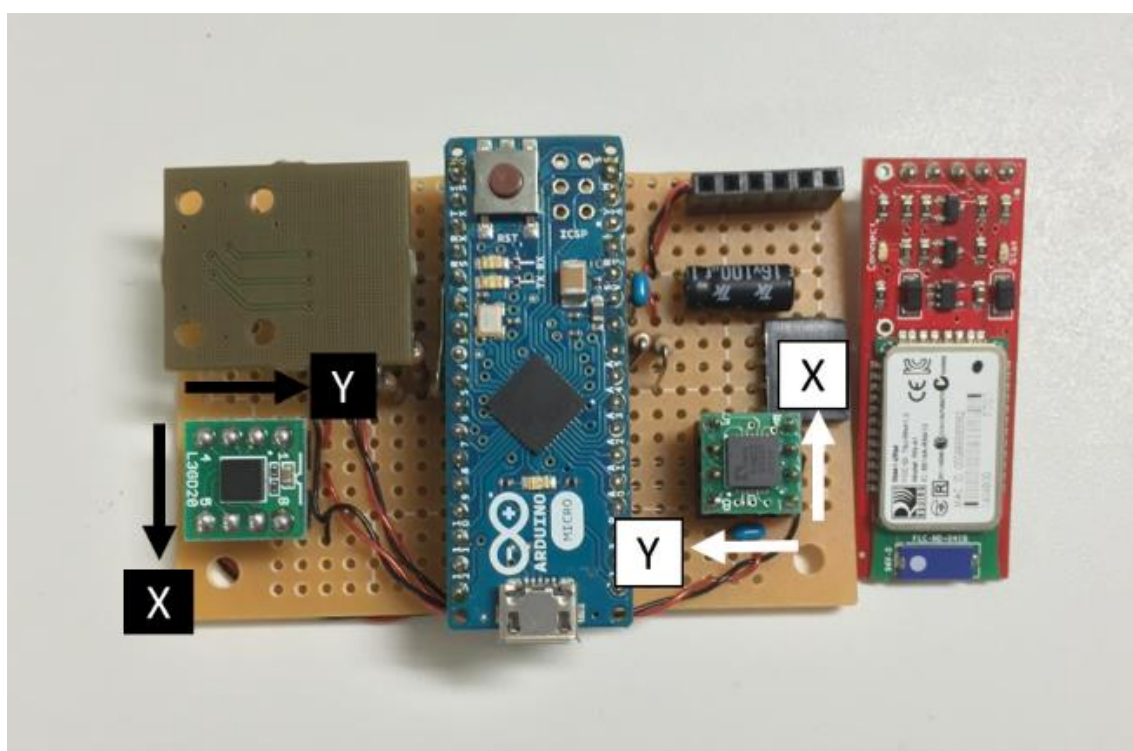


図 36 : デバイスの軸関係 (黒 : ジャイロセンサ 白 : 加速度センサ)

第5章 平滑化と個体差の補正

5.1 気圧値の平滑化处理

気圧値を用いて気圧高度を計測する場合、1Pa の気圧差で約 8.9cm の差が発生する。気圧センサの出力はサンプリングレート 100Hz の設定を用いて 30 秒間静止状態のまま計測を行った。気圧センサの出力をそのままの状態ですべて標準偏差を求めると 4.71Pa となる。これをそのままにして気圧高度の算出を行うと、同じ高さで計測をおこなっていた場合、約 83.8cm の誤差が生じる可能性がある。足の運動を計測するにはこの誤差は大きい、そこでデータの平滑化を行い誤差の低減を行う必要がある。この節ではいくつかの平滑化处理をあげ、どの処理を適用するかについて述べる。なお平滑化处理については MATLAB® のドキュメントを参考におこなった。

5.1.1 単純移動平均フィルタ

初めに単純移動平均フィルタについて検討を行う。単純移動平均フィルタは移動平均フィルタの中でも簡単な形であり、直近の N 個ごとにサンプルの平均をとることでローパスフィルタとして働き平滑化をおこなうことができる。 N の値の設定によってカットオフ周波数が変化する。 N の値が大きくなればカットオフ周波数は低くなり、 N の値が小さくなればカットオフ周波数は高くなる。しかし、 N の値によって位相遅れが発生し、 N が大きくなると位相遅れが大きくなる。先程の計測結果に $N=100$ の単純移動平均を適用した結果、標準偏差は

0.95Paであった. この場合2つのセンサ間におけるノイズはおよそ2Paとなり, 気圧高度に変換すると約16cmとなる.

5.1.2 加重移動平均フィルタ

次に加重移動平均フィルタについて検討する. 加重移動平均フィルタはサンプルそれぞれに重み付けを行うことで, 着目するサンプルの影響を大きくするものである. 今回重み付けは $(1/2)^{1/2}$ の2項展開式を用いた. これはNが大きくなるほどカットオフ周波数が低いローパスフィルタとして働く. また重み付けの形としては正規曲線に近似する. よって, このフィルタは単純移動平均に比べて位相遅れが小さくなる. 単純移動平均フィルタと同じサンプルにN=100の加重移動平均フィルタを適用した結果, 標準偏差は1.33Paとなった. 結果としては単純移動平均フィルタよりも平滑化されなかった.

5.1.3 指数移動平均フィルタ

単純移動平均フィルタはウィンドウサイズの影響で位相遅れが大きくなり, 加重移動平均フィルタは位相遅れが改善されるが単純移動平均より平滑化がなされなかった. そこで指数移動平均フィルタの適用について検討を行う. 指数移動平均フィルタは指数関数的に重みを減少させることで平滑化を行う. これは大きなウィンドウサイズを必要としないところが特徴である. 指数移動平均フィルタは次の式で表現される.

$$S_t = \alpha \times Y_t + (1 - \alpha) \times S_{t-1}$$

S_t は時点 t の指数移動平均を表し, Y_t は時点 t の値である. 平滑化の強さは α で表され, α が小さければ小さいほど平滑化の強さが強くなる. 他のフィルタ

と同じサンプルに $\alpha = 0.01$ の指数移動平均フィルタを適用した結果、標準偏差は 0.87Pa となった。この結果より、階段の段差の判別の可能性が出てきた。

5.1.4 カルマンフィルタ

前節までの移動平均フィルタは階段の段差を判別できる程度の平滑化が行えたが、本研究では人間の平地の歩行時の足の高さの計測を行いたい。しかし、十数 cm 程度のノイズが残っており、現時点では数 cm のオーダーの計測は難しい。そこで平滑化の手法としてカルマンフィルタの適用を検討する。

カルマンフィルタは1960年にR.E.Kalmanによって線形フィルタリングと予測問題への新しいアプローチとして発表された。その後、Kalman と同僚の数学者である Bucy によって連続時間カルマンフィルタが提案された。Kalman は任意の相関性をもつ有色信号が白色雑音を入力とする線形動的システムの出力として表現できることに着目し、信号の生成過程まで立ち入ってモデル化した。信号の生成過程のモデル化の際に導入された状態変数の最適な推定値（最小分散推定値）を観測信号を用いて逐次求めるアルゴリズムとして導かれている。すなわち、時刻 t_k までの観測信号 y_0, \dots, y_k と信号生成に関わる線形動的システムを用いて、ある時刻 $t_{k'}$ のシステムの状態 $x_{k'}$ の最小分散推定量をカルマンフィルタは求めている。

カルマンフィルタのアルゴリズムは次の通りである [19]。状態推定値の初期値 $\hat{x}(0)$ は $N(x_0, \Sigma_0)$ に従う正規性確率ベクトルとする。すなわち、

$$\hat{x}(0) = E[x(0)] = x_0 \quad (20)$$

$$P(0) = E[(x(0) - E[x(0)])(x(0) - E[x(0)])^T] = \Sigma_0 \quad (21)$$

とおく．また，システム雑音の分散 σ_v^2 と観測雑音の分散 σ_w^2 を設定する．これらはカルマンフィルタの調整パラメータである．

$k = 1, 2, \dots, N$ に対して次式を計算する．

予測ステップ

$$\text{事前状態推定値} : \hat{x}^-(k) = A\hat{x}(k-1)$$

$$\text{事前誤差共分散行列} : P^-(k) = AP(k-1)A^T + \sigma_v^2 bb^T$$

フィルタリングステップ

$$\text{カルマンゲイン} : g(k) = \frac{P^-(k)c}{c^T P^-(k)c + \sigma_w^2}$$

$$\text{状態推定値} : \hat{x}(k) = \hat{x}^-(k) + g(k)(y(k) - c^T \hat{x}^-(k))$$

$$\text{事後誤差共分散行列} : P(k) = (I - g(k)c^T)P^-(k)$$

図 37 に時系列に対するカルマンフィルタのブロック線図を示す．ここで，入力 は時系列で，出力は状態推定値である．図より，カルマンフィルタは状態方程式と同じように，行列・ベクトルを係数としてもつ 1 次系，すなわち 1 階差分方程式で記述されることがわかる．

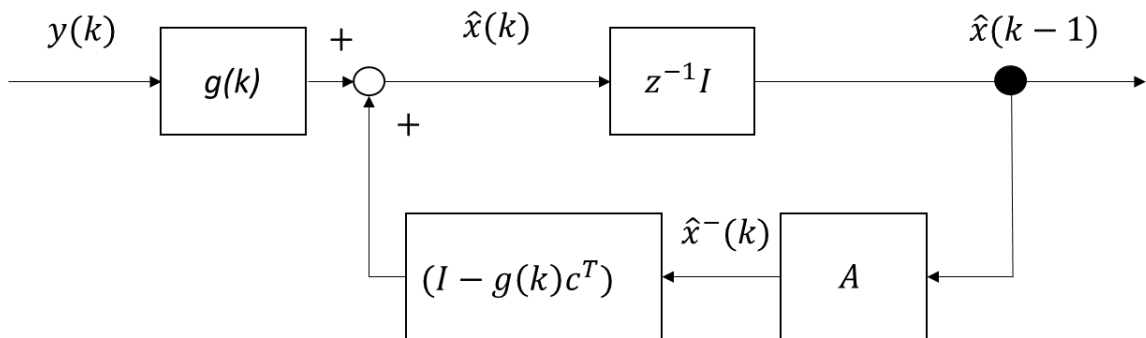


図 37 : カルマンフィルタブロック線図

カルマンフィルタを適用した結果，標準偏差は 0.86Pa となり，指数移動平均

フィルタと変わらない結果となった。しかし、今回カルマンフィルタはパラメータを経験的に決定したりモデルが単純なものを利用したりしたため、今後改善の余地がある。

これらの実験の結果、平滑化には指数移動平均フィルタまたはカルマンフィルタを適用することがよいと考えられる。

5.2 気圧センサにおける個体差の補正

複数のセンサを扱う上で 1 つ大きな問題としてセンサの個体差による誤差がある。2 つの気圧センサを同じ高さへ設置し、静止状態で 30 秒間の計測を行った。この時のそれぞれのセンサによる気圧値の平均の絶対差は 51.5268Pa となった。これは気圧高度に直すと約 408m の高さとなり、非常に大きなずれが発生してしまう。よって、この節では 2 つの気圧センサの個体差を補正する手法について検討を行う。

個体差を補正する手法として 2 つのセンサの平均の差をとる方法について検討する。2 つのセンサを同じ高さへと設置し、10 秒間計測を行う。計測終了後 2 つのセンサそれぞれで気圧値の平均を取り、片方のセンサの気圧値を基準としそれらの差を取る。この差を求めた後、基準のセンサと気圧値が近くなるように他のセンサの気圧値に差を補正として加える。

個体差を補正した結果を図 38 に示す。図 38 より気圧差が小さくなったことが分かる。

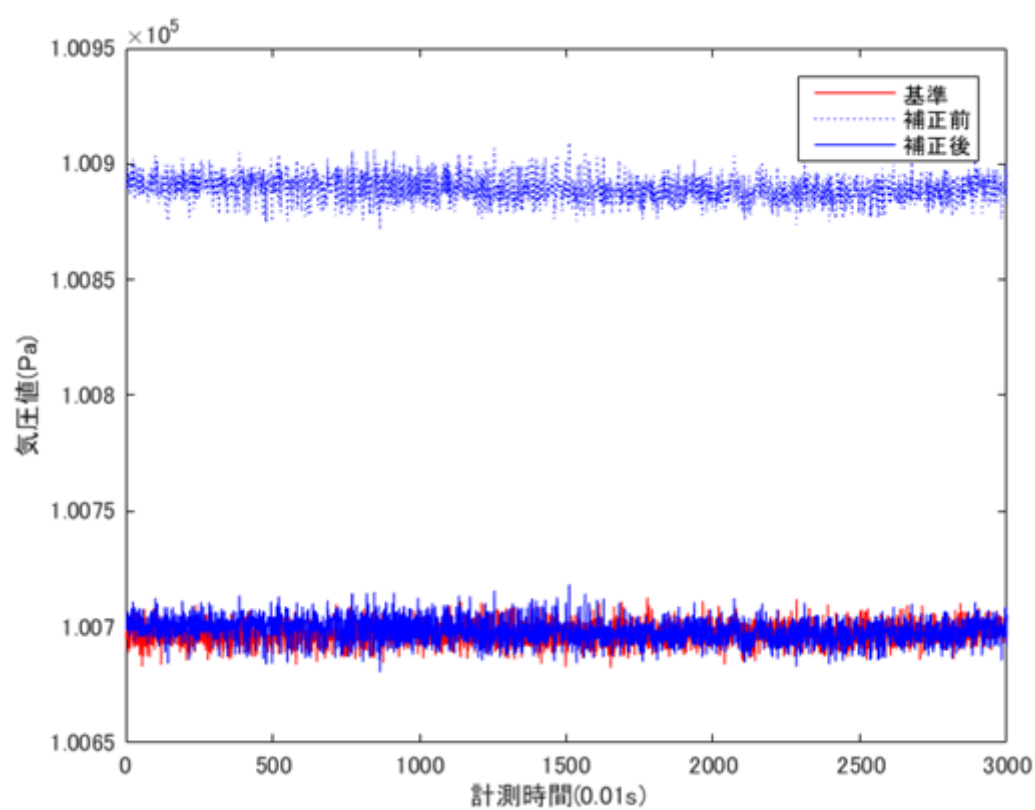


図 38 : 個体差を補正した結果

5.3 片方の温度値共有による個体差低減

さらにデバイス間の個体差を低減するため温度の共有について検証を行った。2つのデバイスを隣接させた状態で計測を約1時間行った。実験場所は電気通信大学東2号館317号室で行った。計測したデータに平滑化処理として指数移動平均によるローパスフィルタ処理を適用し、気圧値と高度の換算式から差分高度を求めた。気圧値と高度の換算式は次の通りである。

$$\text{気圧高度(cm)} = 153.8 \times (t_0 + 273.3) \times \left(1 - \left(\frac{P}{P_0}\right)^{0.1902}\right) \times 100$$

今回の計測では t_0 は 27.7°C を使用した。求めた差分高度を平均した結果を表8に示す。

表 8 : 温度共有の有無による気圧高度の平均の違い

	共有無し	共有有り
平均	62.8291 cm	29.2475 cm

温度を共有した場合、しない場合に比べて、二つのデバイスの平均的な高度差が小さくなった。今回の実験では常に同じ高さに設置していたため、理想的な平均は 0cm であるが、温度の共有のみでは約 30cm の誤差が発生していた。

5.4 2つの温度値の平均を用いた個体差低減

前項では、片方のセンサの温度値を用いて気圧高度の計算をおこなった。本項では 2 つのセンサの温度値の平均を用いて気圧高度の計算をおこない、個体差の低減に着いて検証をおこなった。実験は電気通信大学東 2 号館 309 号室でおこない、2 つの気圧センサは同じ高さへと設置をおこなった。

データの処理は MATLAB を用いておこなった。得られたセンサの気温の未処理データの平均をとった後、センサそれぞれの初期値を用いて、気温と気圧を求める。この共有で求めた気圧を用いた気圧高度とセンサ値をそのまま用いた気圧高度の比較をおこなう。試行回数は 5 回でありそれぞれのデータセットで平均と標準偏差を求めた。

共有の有無による気圧高度の 5 つのデータセットの平均をまとめたものを表 9 に示す。

表 9：温度の共有による気圧高度の平均

	平均（共有無し）	平均（共有有り）
No.1	-389.5 cm	1314.3 cm
No.2	-434.3 cm	1216.7 cm
No.3	-416.6 cm	1114.2 cm
No.4	-444.3 cm	828.0 cm
No.5	-430.9 cm	867.2 cm

表 9 より、個体差が小さかったのは温度の共有をしなかった場合である。しかし、今回の実験は試行回数が少なかったため、今後は試行回数を増やして共

有による個体差の低減が望めるか検証することが必要と考えられる.

共有の有無による気圧高度の 5 つのデータセットの標準偏差をまとめたものを表 10 に示す.

表 10 : 温度の共有による気圧高度の標準偏差

	共有無し	共有有り
No.1	65.6 cm	47.9 cm
No.2	61.8 cm	48.8 cm
No.3	65.5 cm	47.4 cm
No.4	78.7 cm	47.7 cm
No.5	52.5 cm	48.5 cm

表 10 より, 共有無しよりも共有有りの方が, 標準偏差が小さくなった. このことより, 共有をした方が気圧高度の変化が安定することが分かった.

5.5 ケースの有無によるノイズの確認

ケーシングの有無による個体差の軽減を検証するため実験を行った。2つのデバイスを隣接させた状態で計測を約 1 時間行った。実験場所は電気通信大学東 2 号館 309 号室で行った。気圧高度は気圧値と高度の換算式から求め、 t_0 は 22.0°C を使用した。ケースの有無による気圧高度変化の様子を図 39 に、求めた差分高度を平均した結果を表 11 に示す。

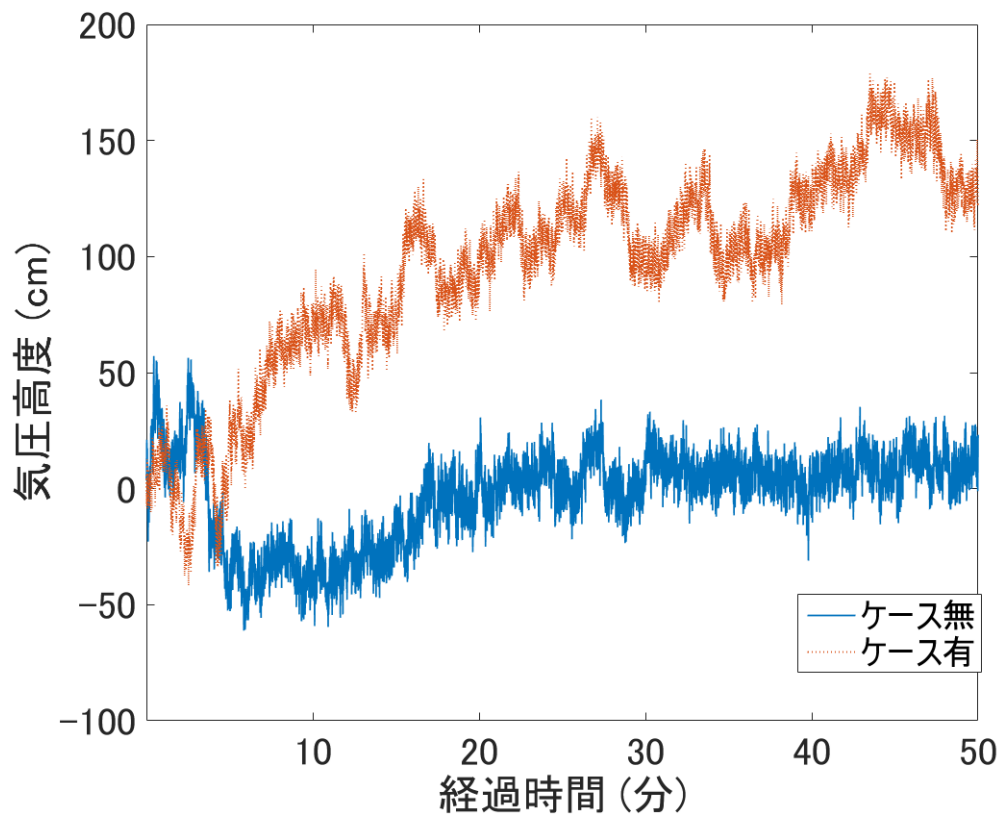


図 39 : ケーシングの有無による気圧高度の変化

表 11：求めた気圧高度の平均

	ケース有	ケース無
平均	94.8681 cm	-2.8907cm

今回の計測では 2 つのデバイスを同じ高さに設置した。よって、2 つのデバイスによる差分高度を平均したものは 0cm となることが理想である。表 11 より、ケースが無い方が有る方に比べて精度が良くなった。また図 39 より、気圧高度がケース有は時間が経つにつれ大きくなっていっているが、ケース無は最後まで一定の範囲内に収まっている様子が分かる。原因としては気圧センサがケース内の気圧を測ってしまっており、ケースの温度が上昇することでそれぞれのケース内の気圧が大きくなりすぎてしまっていた。ケースの温度が上昇した原因は電子回路の配置に問題があった点である。ケースを用いて計測をおこなった後、デバイスについて調べたところ、Arduino Micro の CPU と Bluetooth モジュールのチップが発熱をしていた。また、ケースに電子回路を収める場合、図 40 のように、電子回路とバッテリーを密着させるように設置をしていた。

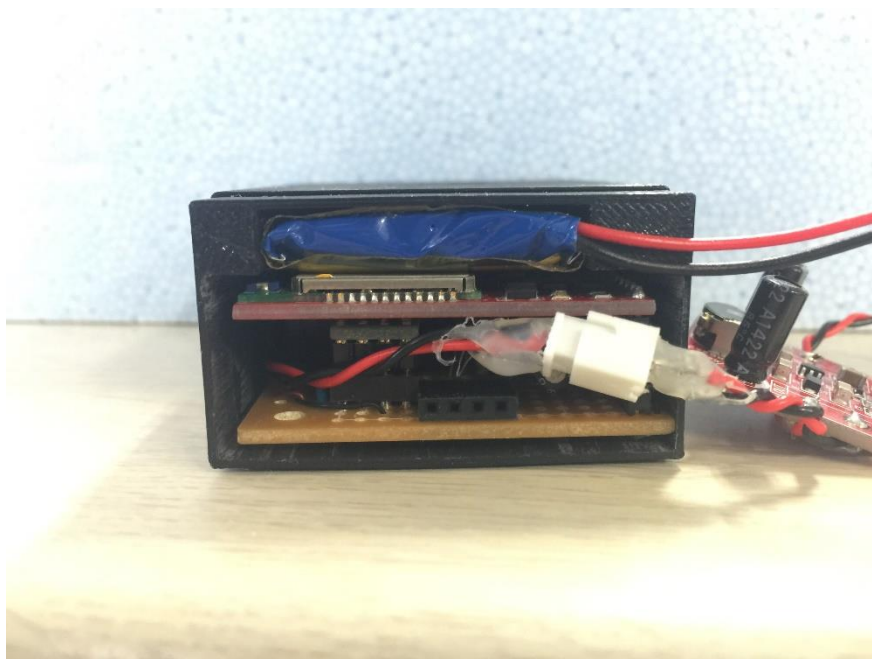


図 40：ケースに回路を収めた様子

これらのことより，Arduino Micro や Bluetooth モジュールからの発熱による熱がバッテリーを通じて，ケースや気圧センサ，さらにケース内の空気に伝達され，温度による個体差が発生したのではないかと考えられる（図 41）．

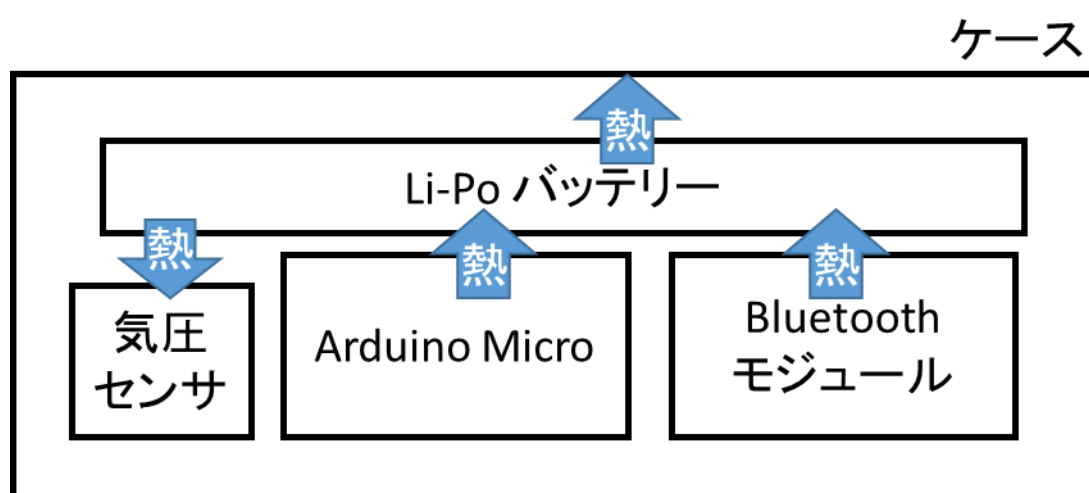


図 41：熱の伝導イメージ

.....

このことから気圧センサはケース内に設置するよりもケースの外に設置するほうがよい．もしくは空気が留まらないようにケースを設計する必要がある．

第6章 提案手法の性能評価

6.1 提案手法による静止状態における高さ計測

6.1.1 実験概要

本提案手法における静止状態での高さ計測の精度を検証するため実験を行った。実験場所は電気通信大学東 2 号館 309 号室を使用した。部屋は空調を切り、窓やドアを閉め切った状態で実験を行った。天気は曇り、気温は 24 度であった。計測は 2 つの気圧センサの高さの差が 0cm, 5cm, 10cm, 15cm, 20cm の 5 通り計測を行った。高さは発泡スチロール製のブロック (図 42) を 2 つ組み合わせて 5 つの高さを構築した。実験は初めに 2 つの気圧センサを同じ高さに設置し、約 20 秒間計測をおこなう。その後、基準ではない方の気圧センサを設定した高さへと移動させ、10 秒間計測をおこなった。実験の様子を図 43 に示す。

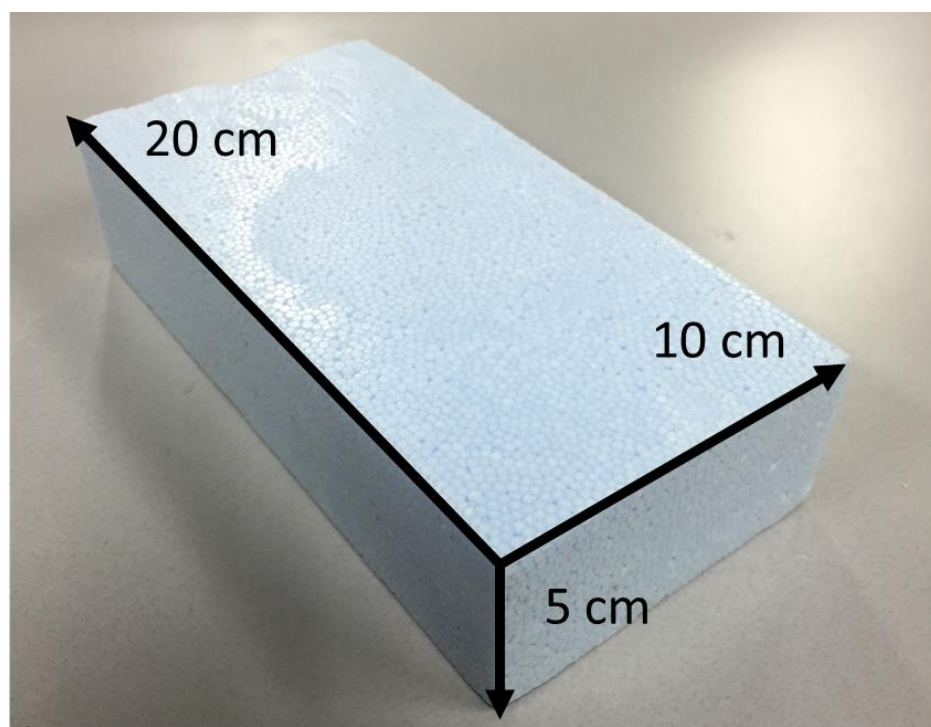


図 42 : 実験に使用したブロック

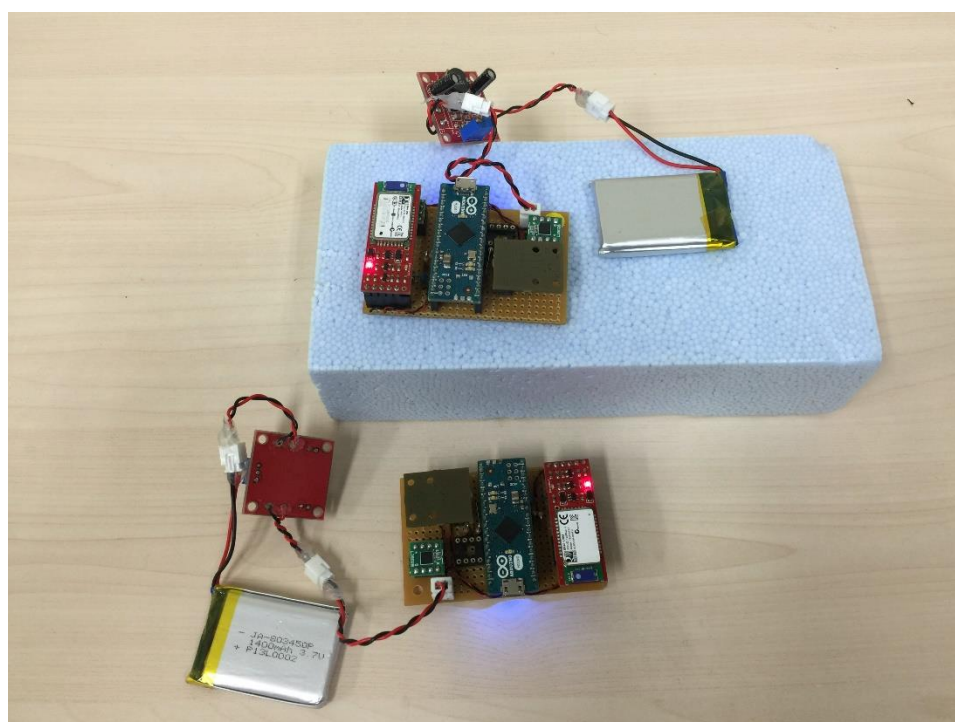


図 43 : 実験の様子

実験データは MATLAB を用いて、事後分析をおこなった。平滑化処理としてそれぞれのセンサ値に指数移動平均を平滑化係数 $\alpha = 0.01$ で適用し、個体差の補正として同じ高さで 10 秒間計測した平均の差を用いた。

気圧センサの単体の精度がデータシートより $\pm 0.09 \text{ Pa}$ であり、これを高さへの変換をおこなうと約 7 cm となる。これより、2 つの気圧センサを用いて計測をおこなった場合 $\pm 14 \text{ cm}$ の精度で計測ができるのではないかと考えられる。このことから予想される値の範囲を図 44 に示す。縦軸がセンサの取りうる値であり、横軸が設定の高さである。実線が計測における真値であり、点線の範囲内であれば、性能通りの計測精度が発揮されていると考えられる。

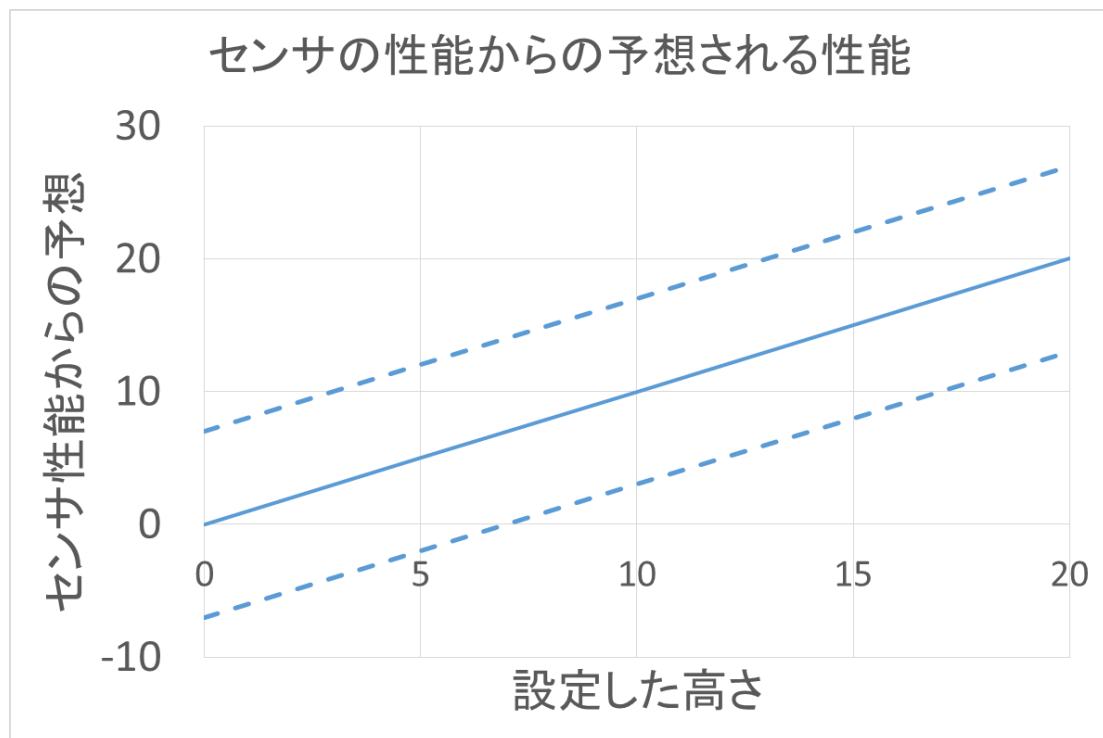


図 44 : センサ性能からの精度予想

1 回のデータとして 10 秒間の記録を用い、これをそれぞれの高さで 5 セット記録した。実験手順は次の通りである。初めに 2 つの気圧センサを同じ高さへ

とセットし計測を開始する．この状態で 30 秒間計測を行い，片方の気圧センサを計測する高さへと移動する．

6.1.2 実験結果

実験から得られたデータを表 12 に示す．また，これらの結果を予想のグラフへプロットしたものを図 45 に示す．

表 12：各高さにおける平均と標準偏差

	0cm	5cm	10cm	15cm	20cm
平均(cm)	2.6544	-1.5228	3.0788	5.6280	20.3023
標準偏差(cm)	6.4373	18.6536	6.0167	6.9798	14.8404

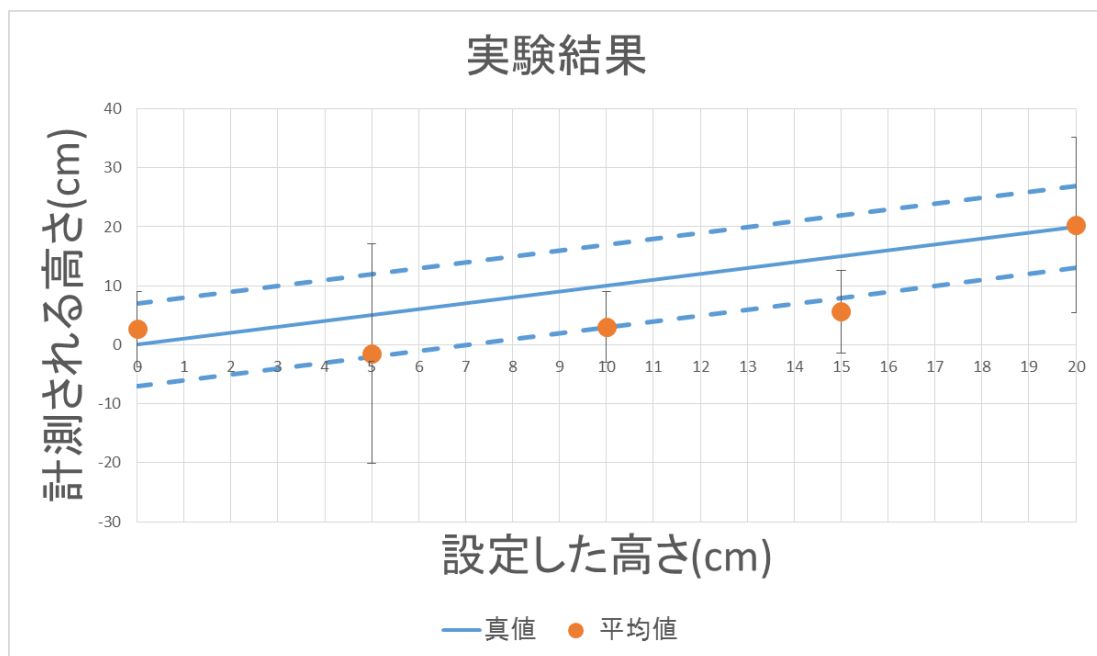


図 45：実験結果

図 45 より，実験で得られた結果，平均の値については予想の範囲内にほとんどが収まっていたと言えるが，標準偏差を含めて考えるとより精度の向上を求める必要があると考えられる．

平均の値の真値からのズレは個体差の補正が最適でないことが原因と考えられる．個体差の補正は現在開始直後のキャリブレーション区間を用いておこなっているため，時間が経つほどセンサの温度や感度にズレが生じていると考えられる．これを解消するため，定期的なキャリブレーション処理を適用する必要があるのではないかと考えられる．

標準偏差の大きさについては適用する平滑化処理についてさらなる検討が必要と考えられる．現在は経験的に平滑化係数を決定しているが，システムに最適化したフィルタ設計が必要であると思われる．

6.2 擬似的階段動作における高さ方向のセンシング

6.2.1 実験概要

動作状態の気圧高度の計測をおこなう．実際には身体足部に装着して，装着者の運動計測をおこなうことを目的としているが，本来であれば完全に同一の運動を繰り返し実施し，その時に計測されたデータを比較検証することによって，提案するシステムの計測性能評価をおこなうことが望ましい．しかしながら人間にとって，同一の身体運動を繰り返し実施することは容易ではない．そこで XY プロッタを用いて，擬似的に階段運動の再現し計測を行う実験を行った．計測は電気通信大学東 2 号館 317 号室で行った．まず、図 46 にあるように、XY プロッタを運動面が垂直になるように立てて設置する。



図 46：擬似階段歩行再現装置

そして二つの計測用センサのうち、一つをXYプロッタ上に固定、もう一つをXYプロッタフレームに固定する。フレームに固定されたセンサからのデータは、気圧基準値として利用する。プロッタ上に固定されたセンサを運動側として、20 cm幅で階段状に動作させる。すなわち左下を原点(0cm,0cm)として、(20cm, 0cm)、【20cm, 20cm】、(40cm, 20cm)、【40cm, 40cm】、(60cm, 40cm)、【60cm, 60cm】、(80cm, 60cm)、【80cm, 80cm】、(100cm, 80cm)、【100cm, 100cm】と動作させる。そして運動中の加速度センサの評価、およびこれらの合計 10 地点での気圧値の評価を行う。なおこの 10 地点のうち、【】で囲われている座標値への移動の時に、高さ移動が発生していることになる。

実験データは MATLAB を使って分析をおこなった。実験で得られた各種センサ値に指数移動平均フィルタを平滑化係数 $\alpha = 0.01$ で適用した。キャリブレーション方法としては、2 つの気圧センサを同じ高さに設置し、10 秒間の気圧値の平均の差を補正值として片方のセンサの気圧値に割り当てる方法を用いた。

6.2.2 実験結果

気圧高度と X 軸加速度の変化を図 47 に示す。加速度センサが X 軸であるのは計測デバイスの設置の仕方によるもので、プロッタの上下方向と対応している。

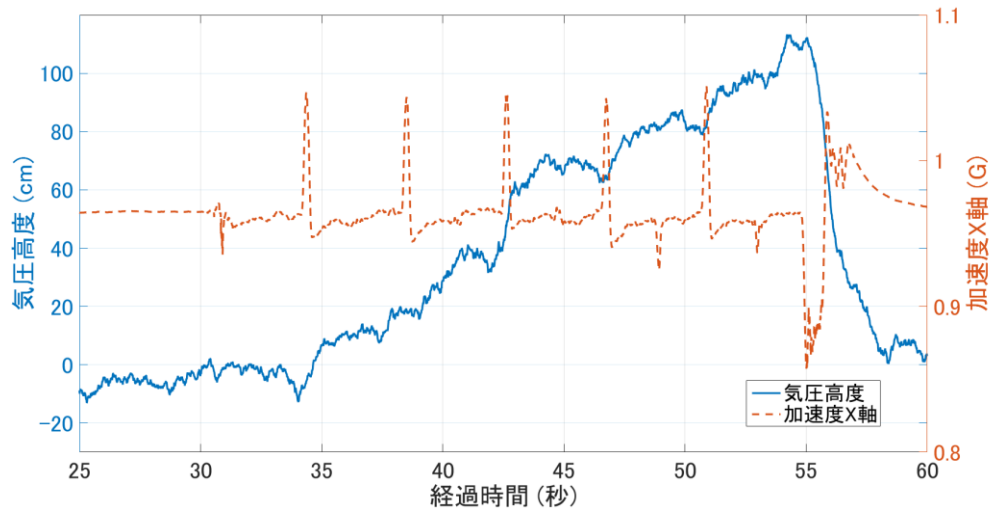


図 47：擬似階段実験における気圧高度と X 軸加速度の変化

図 47 より，加速度センサは正のピークが全部で 7 つ見られるが，最初の正のピークはキャリブレーション時の移動によるもので，最後の正のピークは原点復帰によるものである．それらに挟まれた 5 つの正のピークがプロッタによって移動が行われたタイミングのものである．原点復帰による加速度の変化を除いた 6 つの変動を時系列の早いものから No.0 ～ No.6 とナンバリングをした．

加速度センサのピーク付近の気圧高度の平均と前地点からの移動量についてまとめた結果を表 13 に示す．

表 13 : 加速度センサのピーク付近の気圧高度

加速度センサのピーク	気圧高度の平均 (cm)	前地点からの移動量 (cm)
No.0	-3.26	
No.1	7.34	10.60
No.2	20.80	13.46
No.3	66.16	45.36
No.4	73.67	7.51
No.5	91.15	17.48

気圧高度の平均に着目をするるとそれぞれのピーク付近では指定した高さへと高度が変化していた。しかし、誤差が最大で約 20 cm 程度発生していた。静止状態での実験結果を踏まえて考えると取りうる値ではあるが、20 cm の誤差は段差 1 段分の差となるため、今後は精度の向上が必要と考えられる。また、全地点からの移動に着目すると移動量の誤差は約 3 ～ 25 cm であった。No.3 が特に誤差が大きかったが今後この原因を特定すること、試行回数を増やして移動量の性能をより確認することが必要であると考えられる。

第7章 歩行動作における気圧高度の計測

7.1 平地歩行時における高さ方向のセンシング

7.1.1 実験概要

前節までの結果を踏まえて、平地歩行時における高さ方向のセンシングについて検証を行うため実験を行った。計測は電気通信大学東 2 号館 317 号室でおこなった。被計定者は 1 名である。計測デバイスを靴に装着し、靴を履いて計測のスタートラインに移動してもらう。そしてキャリブレーション用データ取得のため、その場所にて 10 秒以上静止状態で待機してもらう。その後 10 m の直線区間で被計定者が普段からおこなっている歩行をしてもらい、10 m のラインを越えたところで記録を停止する。今回の計測では歩数は 15 歩であった。実験の様子を図 48 に示す。



図 48：平地歩行実験の様子

7.1.2 実験結果

この計測で得られた気圧高度と右足加速度センサ Z 軸の推移を図 49 に示す．右足加速度センサ Z 軸を用いたのはデバイスの Z 軸が足の上下方向に対応しており，足の上下に動作したタイミングを知るのに適切であったと考えた．また右足のみなのは，今回の計測では自然な歩行を行っており，右足の動作の間に左足の動作が入ると見当がつくためである．

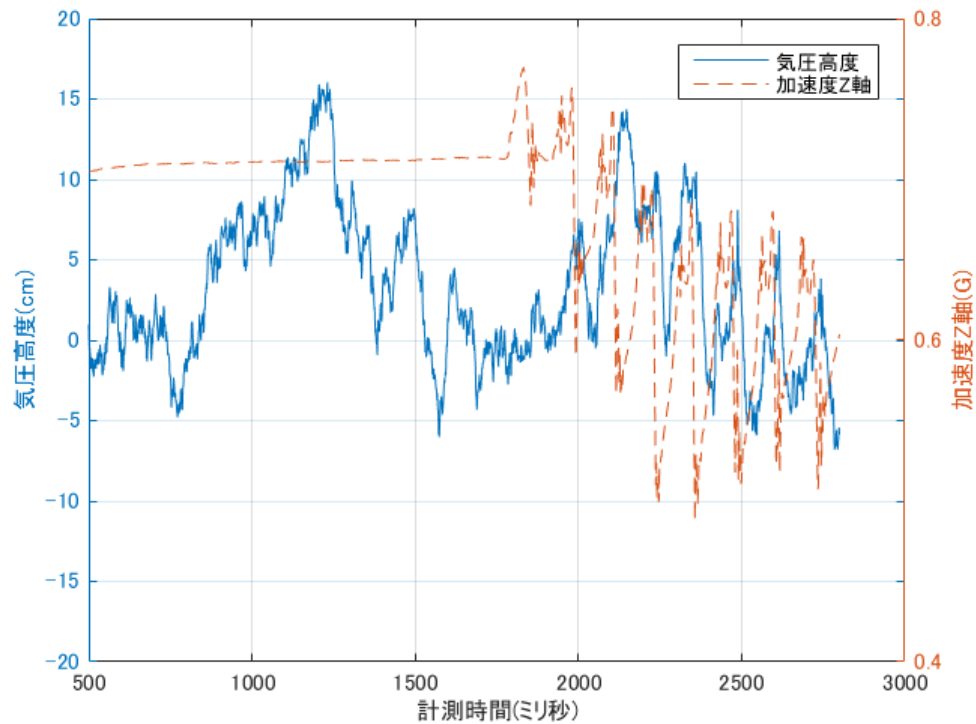


図 49 : 計測で得られた気圧高度と右足加速度センサ Z 軸の推移

気圧高度を見ると、歩行の開始前に約 15cm の両足の差が取れている。この時両足は静止状態であり、個体差の補正が適切になされていなかった可能性が考えられる。計測時間の 18000 ミリ秒から 30000 ミリ秒の間に着目すると、右足の動作に追随して、気圧高度が変化しているように見て取れる。そこで加速度センサに 8 つあるピーク付近の気圧高度について調べた。ピーク付近の気圧高度 50 個を平均した結果を表 14 に示す。

表 14：加速度センサピーク付近の気圧高度

計測時間（10 ミリ秒）	気圧高度（cm）
2000 ～ 2050	3.3622
2100 ～ 2150	11.2169
2200 ～ 2250	8.4585
2300 ～ 2350	8.5587
2400 ～ 2450	-0.8310
2500 ～ 2550	-3.5923
2600 ～ 2650	0.5331
2700 ～ 2750	0.6473

表 14 より，ピーク付近での気圧高度は最大で 11.2169cm，最小で-3.5923cm となった．記録を確認しても今回の計測で足を 11cm 上げて歩行していた場面はなく，平地歩行での足の高さまで計測できているとは現時点では言いづらい．これらの主な原因として歩行の際に生じる気流が影響している可能性が考えられる．デバイスは布製のカバーに覆われて設置されているがこのカバーは空気を通すため，足を振り上げたときの向かい風によって値が変動したのではないと思われる．

7.2 階段歩行時における高さ方向のセンシング

7.2.1 実験概要

前節では，平地歩行時について検証を行ったが十分な結果を得ることができなかった．現在のセンサや処理では平地を歩行する際の足を上げる高さ（数十 mm ～数 cm）の計測を行うことは難しい．よって，階段など明確な段差に対して高さの検出が可能であるか検討するため実験を行った．計測は電気通信大学東 2 号館 3 階と 4 階の間にある階段を使用した（図 50）．3 階廊下の階段手前を開始地点とし，3 階と 4 階の間にある踊り場までの歩行を記録した．記録したデータは MATLAB を用いて分析をおこなった．用いた平滑化は平滑化係数 $\alpha = 0.01$ の指数移動平均を用いた．また個体差の補正は，キャリブレーション区間の平均の差分を補正值として適用した．



図 50 : 実験に使用した階段

7.2.2 実験結果

計測して得られた気圧高度の変化と加速度 Z 軸の変化をグラフにしたものを
図 51 に示す.

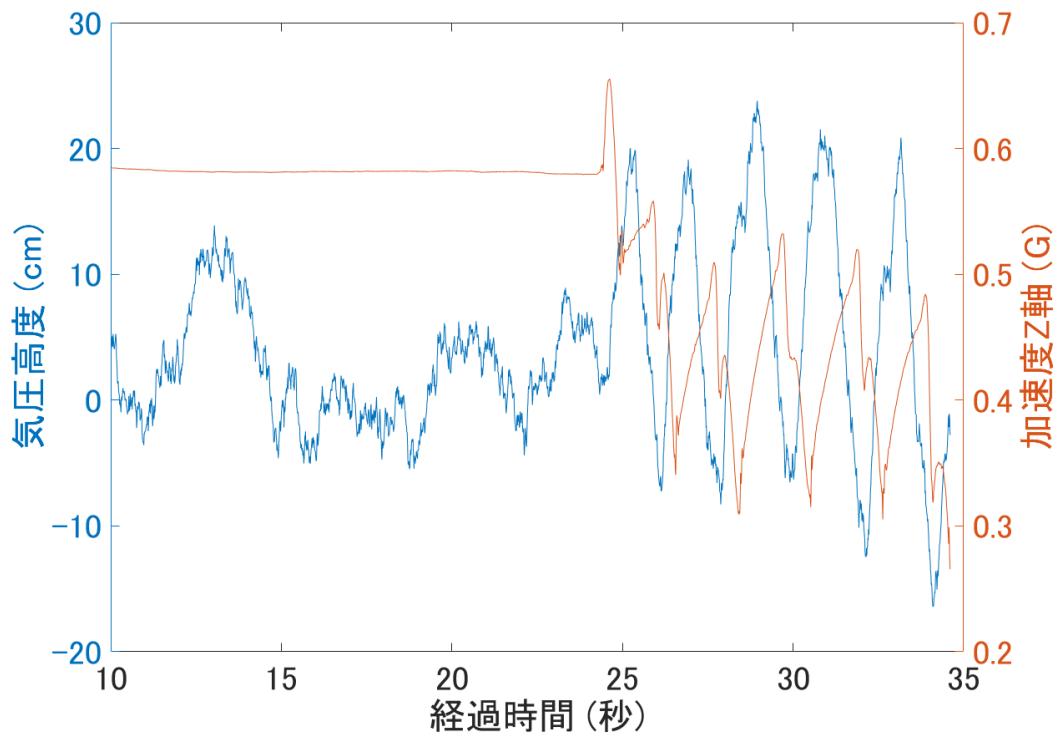


図 51 : 階段歩行の計測結果

平地歩行と同様，はっきりと高さを計測することはできなかったが，歩行と思わしき変動をとることができた．しかし，加速度 Z 軸の変動と比較をおこなうと，気圧高度のピークは加速度 Z 軸のピークより遅れて現れている．より詳細に確認を行うため，歩行の安定している 27 秒以降のデータを拡大して検証をおこなう．27 秒以降のグラフは図 52 の通りとなる．

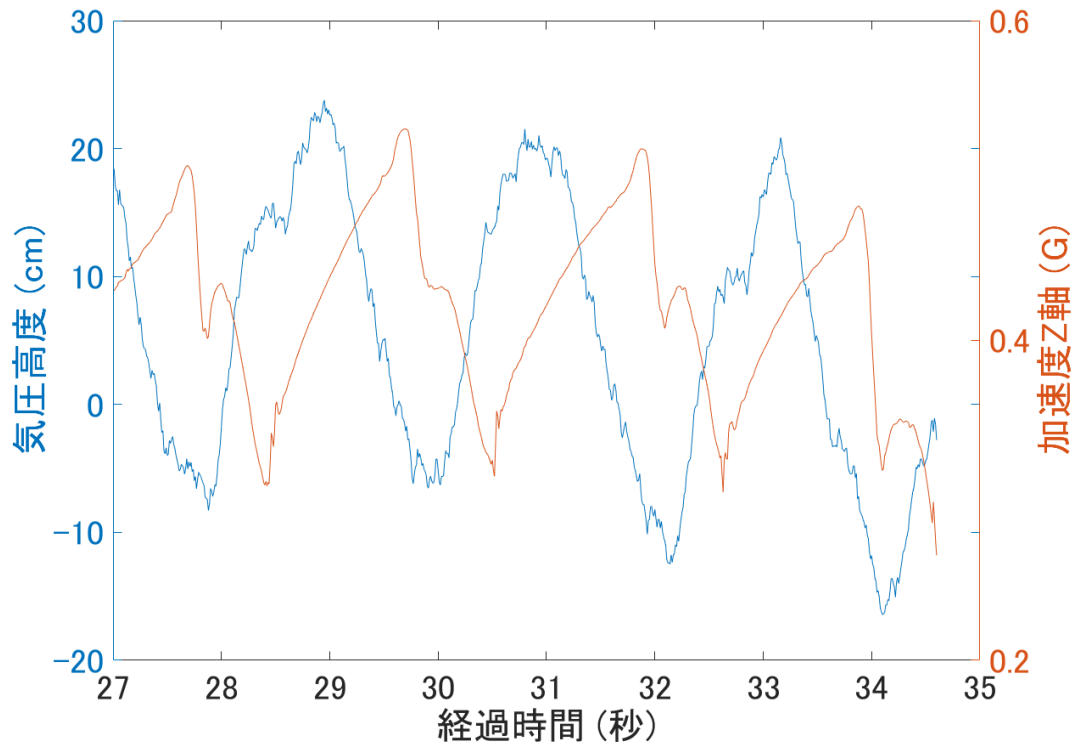


図 52 : 27 秒後のデータ

拡大をして加速度と気圧高度のピークの時間差を見ると約 0.5 秒気圧高度が遅れて反応しているように見える。これらの遅れはハードウェアの遅延，気圧変化の遅延などいくつか原因が考えられるが，今後より詳細に検証する必要があると思われる。

また気圧高度のそれぞれのピークに着目してみる。それぞれのピークを時系列順に No.1, No.2, No.3 とナンバリングをおこなう。そしてそれぞれのピークに対して変化前との差をとると表 15 のようになる。

表 15 : 気圧高度の変化量

	No.1	No.2	No.3
高度変化 (cm)	32.07	28.06	33.34

今回の実験では階段の段差は 1 段 18 cm であるが、歩行の際片足は 1 段飛ばすように歩くため、片足の移動は 36 cm の移動があることが予想される。今回の実験結果は現在のデバイスの精度を考慮すると取りうる値の範囲ではあるが、すべてのピークが実際の移動量よりも少なくなったことを考えると、足を振った際の気流による気圧の変化など、より気圧高度に影響を与える要因を調査する必要があるのではないかと考えられる。

第8章 アプリケーションへの応用

8.1 概要

靴に搭載した気圧センサを用いた足の高さ測定の応用として、踏み台運動支援アプリケーションを構築した。踏み台運動は必要なスペースや機材、時間が少ないため、屋内でできる簡単な運動としてダイエットなどのためおこなわれている。しかし、簡単ではあるが継続して踏み台運動をおこなうことは難しい。踏み台運動が継続することが大変な原因として運動の動きが単調なので運動している実感が得られにくいことや、モチベーションを維持することが難しいことが挙げられる。そこで踏み台運動の継続を支援するため、足を上げた量を計測し表示するアプリケーションの開発を行った。足を上げた量を気圧高度の変化から求め、運動終了後にどのくらい上げたかを身近なもので例えて表示を行う。作製した踏み台アプリケーションを図 53 に示す。

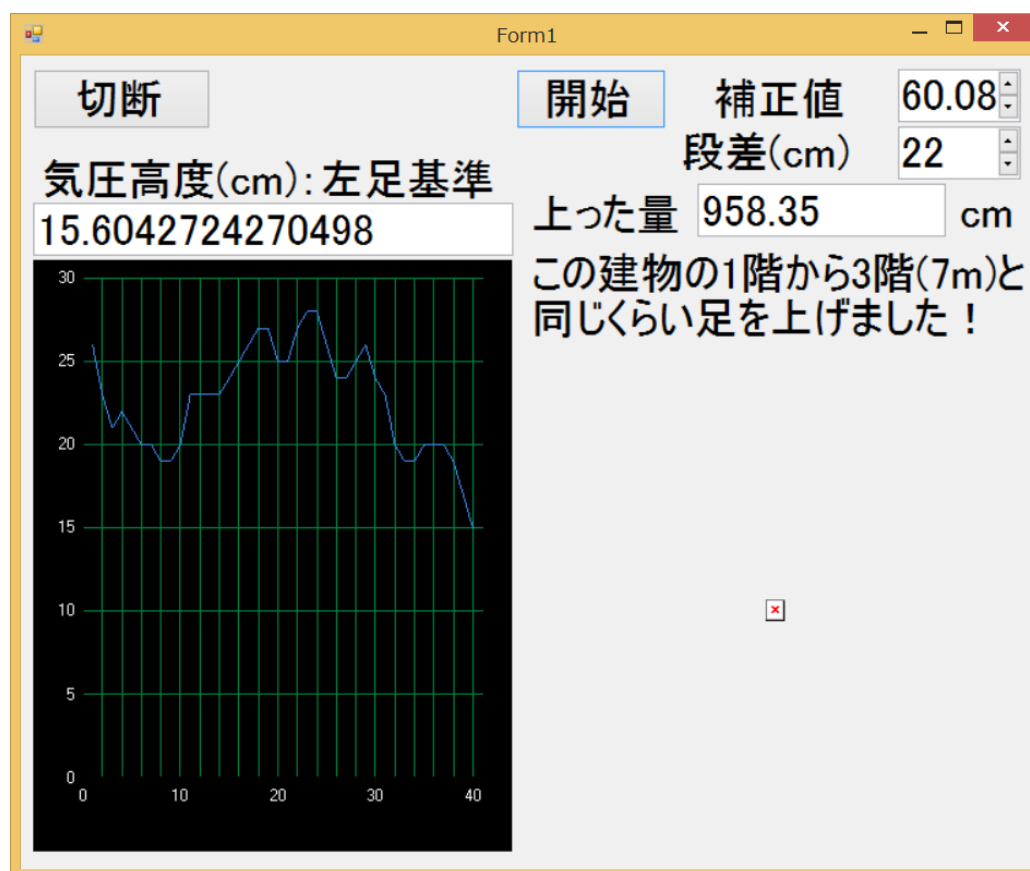


図 53 : 作成した踏み台支援アプリケーション

8.2 ユーザテスト

このアプリケーションがどれくらい運動を支援できるかユーザテストを行った。被験者は健常な 20 代の男性 5 人である。実験手順は次の通りである。初めにアプリケーションを用いずに踏み台運動を 3 分間してもらい、運動が終わったら休憩をはさむ。休憩後にアプリケーションを用いて踏み台運動を 3 分間してもらい、その後アンケートに答えてもらう。踏み台運動のペースは被験者の任意とした。実験風景を図 54 に示す。またアンケート内容は次の通りである。

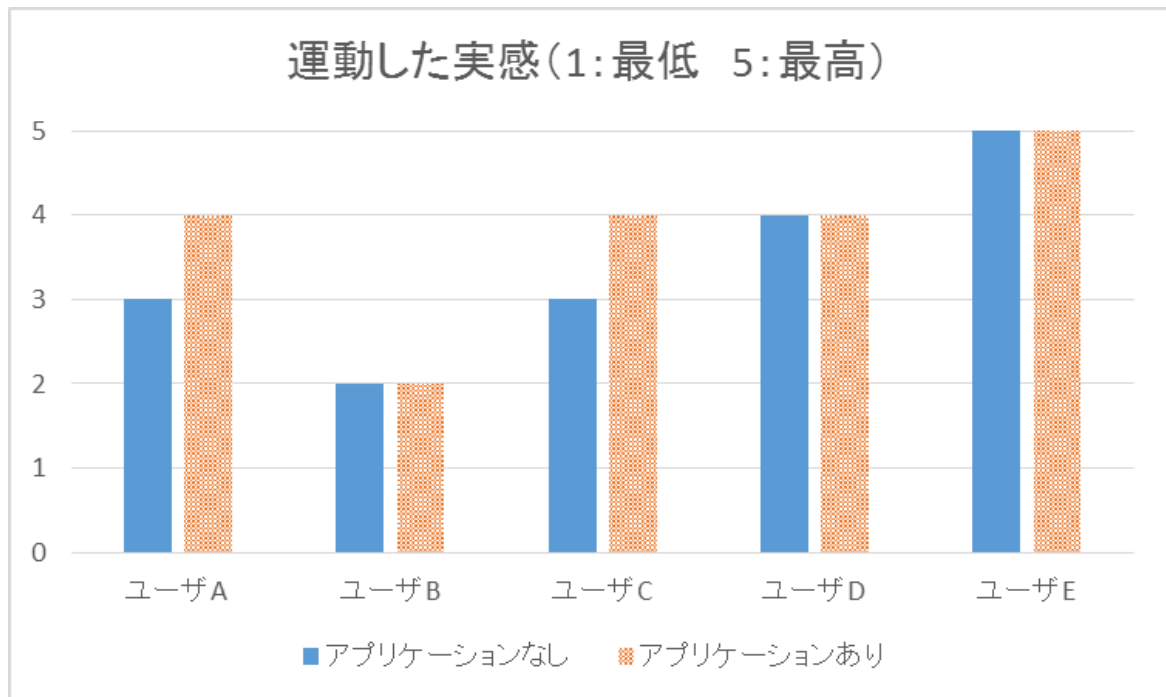
- アプリケーションを使用しなかった場合、運動したという実感を得られたか（1：得られなかった，5：得られた）
- アプリケーションを使用した場合、運動したという実感を得られたか（1：得られなかった，5：得られた）
- アプリケーションを使用しなかった場合、何日続けることができそうですか（日数記述形式）
- アプリケーションを使用した場合、何日続けることができそうですか（日数記述形式）
- 他に感じたことがあれば自由に記述してください（自由記述）



図 54 : 踏み台運動支援アプリケーションユーザテストの様子

8.3 結果

実験から得られたアンケートをまとめた結果を図 55・図 56 に示す。運動した実感については図 55



より、アプリケーションを用いることで一部のユーザでは実感の向上が得られた。しかし、多くのユーザで実感は変わらなかった。このため今回のアプリケーションに関しては運動をしたという達成感を得られたとはいえないのではと考えられる。また、事前に運動をしてもらうという説明を行ったため、実験参加者が運動をおこなうという心構えで実験に臨んでしまったことも原因の 1 つとして考えられる。

次に踏み台運動を何日続けることができるか、モチベーションの向上は図 56 より、多くのユーザにモチベーションの向上が見られた。ユーザ A にアプリケーションを使用してもしなくてもどちらも続けることができる日数が 0 日であったことについてインタビューをおこなった。ユーザ A はどちらも 0 日とした理由として、「踏み台運動をするなら他の運動を選択したい」と述べており、ア

アプリケーション有無にかかわらず踏み台運動自体に魅力を感じていなかった。

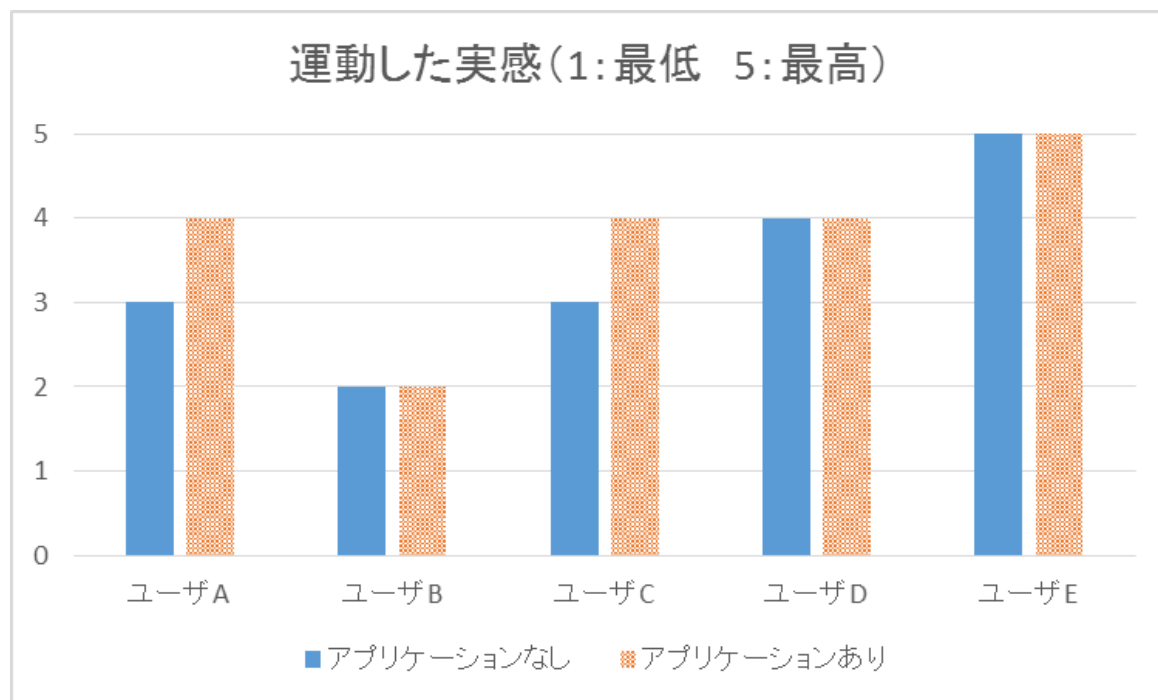


図 55 : 運動した実感

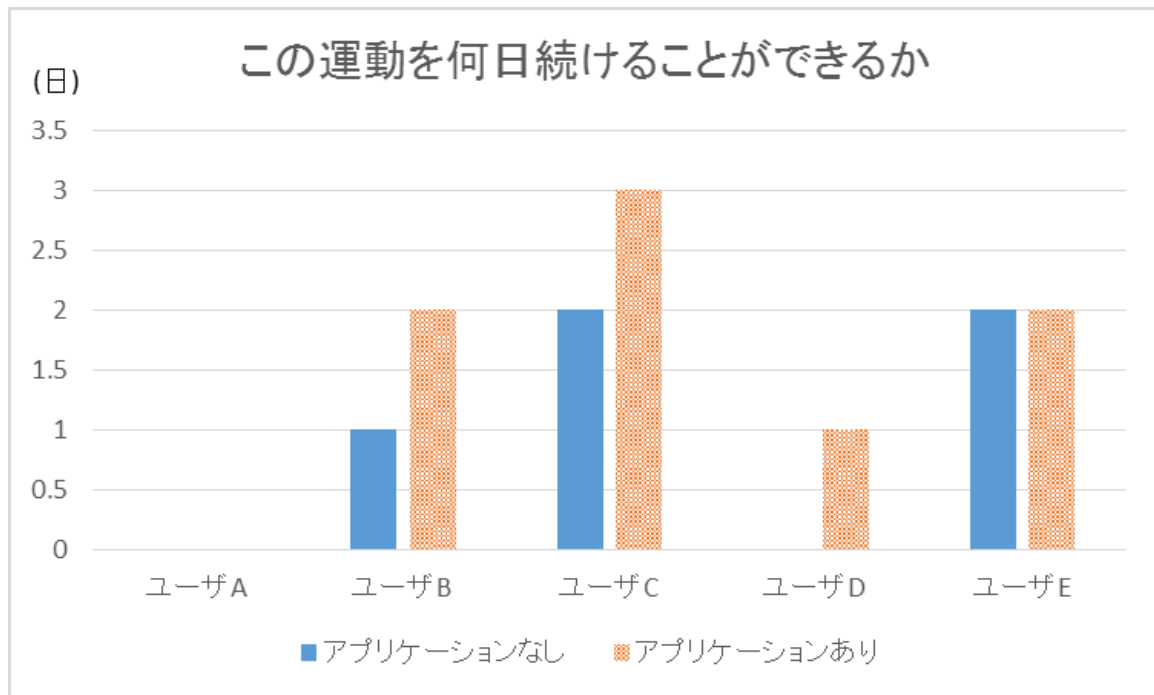


図 56 : この運動を何日続けることができるか

また、これらの質問の他にいくつかコメントを得ることができた。「運動のモチベーション UP として、アプリケーションを用いるのであればリアルタイムでどのくらいの高さか、グラフィックや映像などがあると良いと思った」や「上げた足の高さとかわかりやすい値のが良さそう」というコメントがあった。今回のアプリケーションでは足を上げた量の累計を表示していたが、テキストサイズや直観的ではない表示の影響が出ていたと考えられる。今後は視覚的に分かりやすい情報に変更した方がよいと考える。また、「アプリケーションの機能として、テンポを上げたり下げたりさせるモードとかあると面白そう」というコメントがあった。今回は累計量を示すという機能しかなかったため、途中で飽きが発生したりしたのではないかと考える。このことから機能の追加はアプリケーション作成の重要な課題の 1 つだと思われる。

第9章 結論

本研究では、日常的な運動可能性の拡大、運動負荷の確保を目的に、靴に搭載可能、かつ歩行時の足の高さを計測可能な活動量計の開発を目指した。その過程で、現時点では静止状態や擬似階段において高さ方向に数～数十 cm のオーダーで計測が可能であること、平地歩行時や階段歩行時では高さの計測はできなかったが、足の動作による高さ方向の変化をとることができた。

初めに気圧と高度の関係について述べ、気圧センサを用いることで数 cm の高さの計測が可能なることについて述べた。次に実際に 1 つの気圧センサを使い気圧高度を求めることをおこなった。しかしながら、結果としては気圧高度の値が設置した高さの真値から気圧センサ C961 で最大 35cm 異なっていた。改善策として 2 つの気圧センサを使い気圧高度を求めることをおこなった。この際、2 つの気圧センサの個体差を埋めるための対策について以下の 3 つのことを検討した。

1. 2 つの気圧センサを同じ高さに設置し数秒間の計測の後、平均をとりその差を補正する手法を提案した。
2. センサそれぞれの持つ温度センサの取得する値の違いにより発生していた個体差について温度センサの値を共有することで解決を図った。
3. ケースに格納することによって、気圧センサがそれぞれ違う空間となってしまうケース内での気圧を計測してしまうことによって個体差が発生していた。これは 2 つの気圧センサを同一な空間に設置することで解決した。

以上の取り組みにより、静止状態における気圧高度の計測がある程度おこなえるようになったため、歩行時における気圧高度の計測を行った。歩行に関しては平地歩行、擬似階段歩行、階段歩行の全部で3つの状態で実験をおこない、擬似階段歩行については高さの真値との誤差が数 cm に収まっていた。しかし、平地歩行や階段歩行における気圧高度による足部の高さを測定することができなかった。これはセンサの向きや足の振り方などいくつか原因が考えられるため、今後はそれぞれの要素に対して検証をおこなっていく必要があると考えられる。

最後に、階段部での歩行における足部の高さ計測をもとに踏み台運動支援のためのアプリケーションを作成した。ユーザ評価を行った結果、達成感やモチベーションの改善が多少見られた。しかし、コメントで「分かりやすい表示がほしい」や「機能を追加すると面白そう」のような指摘があった。

今後の課題として、今回のデバイスは靴と比較して大きく、違和感なく靴として使用できるようにするためには小型化をする必要があると考える。また、活動量計として使用する場合、正確に足の動作を計測することが必要となるため、気圧高度による計測の精度を向上させる必要がある。精度を向上させるためには気圧高度が影響を受ける要因について詳細に調査する必要があると考えられ、例えば、足を振った際の気流の変化による誤差やデバイスごとの温度の違いによるセンシングの誤差などが考えられる。また、応答速度の問題も重要であると考えられる。本研究では詳細な応答速度の調査をおこなうことができなかったが、1歩の時間を考えると現状の応答速度はセンシングに影響がでる可能性が考えられる。これらに加えて、アプリケーションであったコメントに対して対応をしていきたい。

参考文献

- [1] Sofi F, Valecchi D, Bacci D, Abbate R, Gensini GF, Casini A, Macchi C, “Physical activity and risk of cognitive decline: A meta-analysis of prospective studies.,” J Intern Med, 2011.
- [2] 横浜市健康福祉局保健事業課, “運動ができていない理由は「時間がないから」【企業の方へ】Wellness Life style : 横浜市健康福祉局,” 1 12 2008. [オンライン]. Available: <http://www.city.yokohama.lg.jp/kenko/wls/corp/undou/c-undou01.html>. [アクセス日: 28 1 2016].
- [3] オムロン, “活動量計 HJA-403C カロリスキャン,” [オンライン]. Available: <http://www.healthcare.omron.co.jp/product/hja/hja-403c.html>. [アクセス日: 15 1 2016].
- [4] sony, “SmartBand 2 SWR 12,” sony, [オンライン]. Available: <http://www.sonymobile.co.jp/product/smartwear/swr12/>. [アクセス日: 14 1 2016].
- [5] Dipyaman Banerjee, Sheetal K Agarwal, Parikshit Sharma, “Improving Floor Localization Accuracy in 3D Spaces Using Barometer,” ISWC '15, 2015.
- [6] Kartik Muralidharan, Azeem Javed Khan, Archan Misra, Rajesh

- Krishna Balan, Sharad Agarwal, “Barometric Phone Sensors - More Hype Than Hope!,” HotMobile' 14, 2015.
- [7] Kartik Sankaran, Minhui Zhu, Xiang Fa Guo, Akkihebbal L. Ananda, Mun Choon Chan, and Li-Shiuan Peh, “Using Mobile Phone Barometer for Low-Power Transportation Context Detection,” SenSys'14, 2014.
- [8] Muchen Wu, Parth H. Pathak, Prasant Mohapatra, “Monitoring Building Door Events using Barometer Sensor in Smartphones,” UbiComp'15, 2015.
- [9] Joseph Paradiso, Kai-Yuh Hsiao, Eric Hu, “Interactive Music for Instrumented Dancing Shoes,” Presented at the 1999 International Computer Music Conference(ICMC), 1999.
- [10] Bufu Huang, Meng Chen, Weizhong Ye, Yangsheng Xu, “Intelligent Shoes for Human Identification,” Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2006.
- [11] L. T. González, “E-TRACES,” [オンライン]. Available: <http://cargocollective.com/lesiaturbat/E-TRACES-memories-of-dance>. [アクセス日: 24 1 2016].
- [12] no new folk studio, “Orphe: Smart Footwear for Artists and Performers | no new folk studio inc.,” [オンライン]. Available: <http://no-new-folk.com/products/orphe/>. [アクセス日: 24 2 2016].
- [13] Liwei Chan, Chi-Hao Hsieh, Yi-Ling Chen, Shuo Yang, Da-Yuan Huang, Rong-Hao Liang, Bing-Yu Chen, “Cyclops: Wearable and Single-Piece Full-Body Gesture Input Devices,” CHI'15, 2015.

-
- [14] Zhihan Lv, “Wearable Smartphone: Wearable Hybrid Framework for Hand and Foot Gesture Interaction on Smartphone,” 2013 IEEE International Conference on Computer Vision Workshops, 2013.
 - [15] Akihiko Shirai, Masaru Sato, Yuichiro Kume, Machiko Kusahara, “Foot Interface: Fantastic Phantom Slipper,” SIGGRAPH '98, 1998.
 - [16] Alan Bransel, Christian Holz, Daniel Hoffmann, Dominik Schmidt, Marius Knaust, Patrick Luhne, Rene Meusel, Stephan Richter, Patrick Baudisch, “GravitySpace: Tracking Users and Their Poses in a Smart Room Using a Pressure-Sensing Floor,” CHI 2013, 2013.
 - [17] 坂井 丈泰, 椎村 和宣, 新美 賢治, “気圧高度計による高度測定誤差とその補正,” 電子航法研究所報告, 2005.
 - [18] 国立天文台編, 理科年表, 丸善, 2000.
 - [19] 足立修一, 丸田一郎, カルマンフィルタの基礎, 東京電機大学出版局, 2012.
 - [20] K. Gotz-Neumann 原著 ; 月城慶一, 山本澄子, 江原義弘, 盆子原秀三訳, 観察による歩行分析, 医学書院, 2005.

謝辞

本論文をまとめるにあたり，日ごろからの的確な助言，厚いサポートを賜りました野嶋琢也准教授に厚く御礼申し上げます．至らない部分も多々あった私ですが，野嶋琢也准教授の熱心な指導により，研究の進め方や論文の書き方，技術や知識など多くのことを学ぶことができました．

同講座の広田光一教授，佐藤俊樹助教授，栗原恒弥客員准教授には様々な助言を頂き大変お世話になりました．特に広田光一教授には XY プロッタなど，機材の貸し出しや使い方の講習をしていただき大変感謝しております．

また，本研究を進めるにあたって気圧センサを提供していただいた TDK 株式会社，デバイスを搭載する靴を提供していただいたアキレス株式会社に感謝申し上げます．

ベルギーへの研究留学では快く受け入れていただき，多くのサポートや指導を頂いた Hasselt University の Johannes Schöning 教授，慣れない研究室生活で様々な気を使ってくださった Pavel Samsonov，現地や周辺国の案内をしていただいた Fredy Cuenca には大変お世話になりました．おかげさまで留学を大変充実したものとすることができました．改めて感謝申し上げます．

研究室の先輩である甲斐貴大さん，關靖史さん，大久保賢さん，奥寺洋二さん，柳青さんには研究室配属当初から様々な助言をいただきました．また同期である，知念佑太さん，遠藤直樹さん，梅津周平さん，梶原直哉さん，矢部慎一郎さんにはいろいろな相談にのっていただいたり，充実した学生生活を一緒

におくったり多くの点でお世話になりました。研究室の後輩達には作業や実験を手伝ってもらい本当にありがとうございました。特に吉田昌史くん、皆川太志くんには大変お世話になりました。

最後になりましたが、多くの迷惑をかけたけれども上京してからも不自由の無い学生生活を送らせていただいた両親に心より感謝申し上げます。

2016 年 1 月 28 日

今井 友成