

卒業論文 2011年度(平成23年度)

ステップ情報を用いた
路面状態検出の為の情報収集及び検証

指導教員

慶應義塾大学環境情報学部

徳田 英幸

村井 純

楠本 博之

中村 修

高汐 一紀

Van Meter, Rodney D

植原 啓介

三次 仁

中澤 仁

武田 圭史

慶應義塾大学 総合政策学部

勝治 宏基

hiropon@ht.sfc.keio.ac.jp

卒業論文要旨 2011年度(平成23年度)

ステップ情報を用いた路面状態検出の為の情報収集及び検証

本研究は、様々な路面状態の場所を歩いた上で、歩行時間と路面状況の関連性を検証する。人の歩行は路面の状態に影響を受けるため、歩行者がどのような場所を歩いているかを取得する事は人が安全に道を歩く為には重要である。例えば、高齢者の歩行時における転倒のリスクは若者のそれに比べて高い。そのため、高齢者の転倒を防止する必要がある。歩行者の転倒の原因の一つに路面の状況が挙げられるため、路面状態の取得は歩行者のリスクを低減させる為に有意義である。本論文では、歩行者の状態と路面の状態の関係性を検証する為に、スマートフォンの加速度センサを利用して人が歩行する際の三軸加速度を取得する。取得した加速度を解析し、歩行者が歩いた情報をステップとして検出する。その後、検出したステップの情報から、歩行者が一歩歩くのにかかる時間を取得する。そして、取得した歩行時間を分析して、歩行のばらつきを示す不偏分散値と歩くペースを表す平均歩行時間を求める。これらの2つを指標に歩行者が特定の道を歩いた際に生じる変化を検証する。本論文では検証の為に、慶應義塾大学の学生8人を対象に加速度センサを携帯してもらった上で様々な道を歩いてもらった。実験後、計測した加速度データを解析し、被験者の歩行情報と実験場所の路面情報について検証を行った。歩行時間の不偏分散値と平均歩行時間を利用するだけでは、歩行場所の判別を行う事は困難であった。しかし、いくつかの実験場所については特徴的な点を見つける事が出来た。そのため、個人差に考慮したキャリブレーションや本論文で手法として利用した歩行時間の平均や不偏分散値以外の要素を利用する事で、歩行場所についてある程度分類を行う事が出来る可能性を示した。

スマートフォン, ヒューマンプローブ, モバイルセンシング, ユビキタスコンピューティング

慶應義塾大学 総合政策学部

勝治 宏基

Abstract of Bachelor's Thesis Academic Year 2011

Information gathering and study for the sidewalk surface state detection using step information

This research walks along the place of various road surface states, in order to verify walk time and the relevance of a road surface situation. Since those who are walking are affected in the state of a road surface, it is important to acquire along what kind of place the pedestrian is walking, in order for people to walk along a way safely. For example, the risk of the fall at the time of elderly people's walk is high compared with it of a young man. Therefore, it is necessary to prevent elderly people's fall. Since the situation of a road surface is mentioned to one of the causes of a fall, acquisition of a road surface state is significant in order to reduce a pedestrian's risk. In this paper, in order to verify the relationship of the state of a walk, and the state of a road surface, the 3 axis acceleration at the time of people walking using the accelerometer of a smart phone is acquired. We analyze the acquired acceleration and detect the information along walking as a step. Then, we acquire the time concerning a pedestrian walking one step from information from the detected step. We analyze the acquired walk time, and find the unbiased variance value which shows the variation in a walk and the average walk time which expresses the pace of walk. We verify change which produces the unbiased variance and the average walk time when a pedestrian walks along a specific way against an index. After having the accelerometer carried for eight students of Keio University for verification, I had you walk along various ways in this paper. The measured acceleration data was analyzed after the experiment and it verified about a subject's walk information and the road surface information on a test site place. As a result, only by using the unbiased variance value of walk time, and average walk time, it was difficult to distinguish a walk place. However, the characteristic point was able to be found about some test site places. Therefore, a possibility that a certain amount of classification could be performed by using elements other than the index used as a technique in the calibration taken into consideration to individual difference or this paper was shown.

smartphone, human probe, mobile sensing, ubiquitous computing

Hiroki Shoji

**Faculty of Policy Management
Keio University**

目次

第 1 章	序論	1
1.1	背景	1
1.2	本研究の問題意識	2
1.3	本研究の目的	2
1.4	本論文の構成	2
第 2 章	ステップ情報を用いた路面状況のセンシング	3
2.1	仮説	3
2.2	予備実験	3
2.3	アプローチ	6
2.4	本章のまとめ	6
第 3 章	関連研究	7
3.1	路面状態のセンシング	7
3.1.1	天候による路面状態の変化のセンシング	7
3.1.2	道路の異常検出	8
3.1.3	モバイルロボットによる摩擦力を利用した路面環境の認識	9
3.1.4	加速度センサと圧力センサを使ったセンシング	10
3.1.5	本研究との比較	10
3.2	ステップ検出に関する研究	10
3.3	本章のまとめ	11
第 4 章	設計	12
4.1	設計	12
4.1.1	ソフトウェア構成	12
4.1.2	センサデータの取得	13
4.1.3	ステップ時間算出用アプリケーション	13
4.1.4	歩行分析	14
4.2	実装環境	15
4.2.1	ハードウェア構成	15
4.2.2	ソフトウェア構成	15
4.3	本章のまとめ	16

第 5 章	検証実験	17
5.1	実験目的	17
5.2	実験方法	17
5.3	実験結果	17
5.3.1	ステップ検出精度	17
5.3.2	検証に用いる指標	18
5.3.3	平均ステップ時間の検証結果	18
5.3.4	ステップ時間の不偏分散の検証結果	19
5.4	考察	20
5.4.1	平均歩行時間を利用した検証の考察	20
5.4.2	不偏分散値を利用した検証	20
5.4.3	ステップ検出タイミングのズレによる分布の変化	21
5.4.4	実験データ数	21
5.5	本章のまとめ	22
第 6 章	結論	23
6.1	今後の課題	23
6.1.1	ステップ時間と路面状況の相関性	23
6.1.2	今回利用したパラメータ以外の要素	23
6.1.3	ステップ検出のタイミング	23
6.1.4	アルゴリズムの高速化	24
6.2	本研究のまとめ	24
	参考文献	26

目次

2.1	予備実験の実施場所	4
2.2	予備実験結果の一例	5
2.3	ステップの定義	6
3.1	画像解析を利用した検出	7
3.2	気象センサ	8
3.3	地面の窪み	8
3.4	カメラを利用した窪みの検出	9
3.5	ロボットを利用した走行場所の素材検出	9
3.6	圧力センサと加速度センサ	10
4.1	ソフトウェア構成図	12
4.2	平滑化の前後	14
4.3	ステップ検出	14
5.1	実験場所別の平均ステップ時間の散布	18
5.2	草が生い茂っている場所を除いた平均ステップ時間の散布	19
5.3	歩行場所別のステップ時間の不偏分散の散布	19
5.4	一部を除いたステップ時間の不偏分散の散布	20
5.5	着地の際に生じる複数ピーク	21

表目次

2.1	予備実験場所とその環境	4
3.1	本研究と既存手法の比較	11
4.1	HTC EVO 3D	15
4.2	分析用 PC	15
4.3	三軸加速度データ収集アプリケーション	15
4.4	歩行時間算出用アプリケーション動作環境	16
5.1	ステップ検出精度	18

第 1 章

序論

本章では、まず本研究の背景及び問題意識を述べる。その後、本研究の目的を説明した上で本論文の構成について述べる。

1.1 背景

近年様々なセンサや高性能な計算機を搭載しているスマートフォンの普及により、モバイルデバイスを利用した人の行動センシングが盛んに行われている。また、比較的新しい技術や物への関心が強い若者だけでなく、一般的にデジタル機器への苦手意識のある高齢者向けのスマートフォンの登場などにより、幅広い世代を対象にしたモバイルセンシングを行い易くなった。

一方で、近年情報技術の発展に伴う地図情報の普及・浸透により、それらを利用したサービスが利用出来る様になった。Google の提供するマップサービスの Google Maps[1] は Web 上で世界中の地図情報を提供している。Google Maps は単純な地図情報以外にも地域別の天気情報や航空写真、360 度のパノラマ写真を利用可能な Google ストリートビュー等を利用する事が出来る。また、Google Maps は API が公開されており、API を利用する事で地図情報を利用した様々なアプリケーションやサービスを作成、利用する事が出来る。地図情報の普及はマップアプリケーションだけでなく、ナビゲーションサービスにも広く利用されている。トータルナビゲーションサービスとして利用されている NAVITIME[2] は歩行者や自動車向けのナビゲーションは勿論、自転車用のナビゲーションや電車等を利用を考慮に入れた総合ナビゲーション等も利用する事が出来る。近年はそれらに加え、路面状況を考慮して段差や道幅の狭い道避ける、なるべくエスカレータやエレベータを利用する様なルート案内を利用する事が可能である。

現在普及しているマップアプリケーションやナビゲーションサービスには、付加情報として路面状況を利用する事が出来る。付加情報に路面状況を利用したサービスの一例に、特定の歩行者や車椅子利用者が通行し辛い道避けるナビゲーションが考えられる。高齢者は若者よりも歩行時に転倒する頻度が高く、転倒したときのリスクも高い。また、車利用利用者は急勾配や砂利道は当然、多少の凹凸がある場所を通行するだけでも多大なストレス感じる [3] [4]。路面状況を利用する事で、利用者が避けたいと思う様な路面の場所を回避したルートでナビゲーションを行う事が可能になる。

路面状況は応用する事で運動促進アプリケーションにも利用する事が出来る。近年、ジョギングやウォーキング、ランニングなどが流行している。このような活動にセンサや GPS データなどを使うサービスが、Nike+iPod[5] などを筆頭に多く利用されている。これらのサービスに路面情報を利用する事でサービスの質を向上させる事が出来る。例えば、砂浜を走ったときの負荷はアスファルトを走ったときよりも高い。このよ

うに路面情報を利用する事で利用者の消費カロリーやトレーニング際に生じた負荷を高い精度で取得する事ができる。

1.2 本研究の問題意識

現状の地図情報の持つ問題点として、道の路面状況の様な詳細な情報をデータ化する事が困難である点が挙げられる。先ほど述べた NAVITIME の路面状況を考慮したナビゲーションは東京や大阪などの大都市の一部の地域でしか利用する事が出来ない。詳細な路面状況をデータ化する事は、時間面、コスト面の両方から現実的ではない。また、詳細な路面状況は一度取れば良い訳ではなく、道路の路面を舗装する事や逆に長い間放置される事で、それらの状況は変化する。そのため、路面情報を定期的に更新する必要もあり、コストはさらに増大する。

1.3 本研究の目的

これらの問題点を踏まえて本研究では、歩行者が歩いている路面の状態低コストにデータ化する事を目的とする。本研究の目的が達成され、人の歩行状態から路面状態の取得を行う事で、人が歩く道の状態を利用した様々なサービスを利用する事が可能になる。また、取得した路面状況を共有する事で路面の状態を反映した路面状況マップの作成を行う事が可能になる。

1.4 本論文の構成

第1章にて、本論文の研究背景及び問題意識述べた上で、本研究の目的をを説明した。本論文では、第2章でモバイルデバイスを利用した人の歩行状態に関する仮説及び仮説を検証する為の予備実験をふまえ、本研究で提案する手法を説明する。第3章では、本研究と類似する目的を持つ既存研究を比較した上でそれらと本研究の差分を明確にし、本研究の方向性について述べる。第4章では、本研究の手法を用いた分析用アプリケーションの設計及び実装について説明する。その後、第5章では実験目的を明らかにした上で、実験方法と評価結果及び、それに関する考察を述べる。最後に第6章で今後の課題と展望について述べた上で、本論文をまとめる。

第2章

ステップ情報を用いた路面状況のセンシング

本研究の目的を達成する為には低コストな方法で、歩行者が現在歩いている場所の路面情報を取得しデータ化する必要がある。低コストな路面の情報取得の為のプラットフォームとしてスマートフォンの利用が考えられる。スマートフォンは様々なセンサを内蔵しており、人の様々な行動を検出する事が出来る。また、スマートフォンは近年急速に普及している。そのため、ユーザが自身のスマートフォンを利用して路面状況を検出する事で、低コストな路面情報のデータ化を実現する事が出来る。本章では、まず人の歩行状態と路面状態に関する仮説を述べる。その後、仮説に対する検証を予備実験を通じて行い、本研究で提案するステップ情報を用いた路面状況センシング手法を説明する。

2.1 仮説

本研究を進める上で路面の状態が人の歩行動作に与える影響についての仮説を立てた。(1) 獣道や障害物の多い道の様な歩きにくい道を歩く場合、歩き方に以下の様な変化が生じる事が考えられる。歩く際に一歩毎に要する時間が平坦な道を歩く際よりも長くなる。歩行時の一歩あたりに要する時間が変化する。(2) 仮説(1)における歩き方の変化は加速度センサを利用する事で検出可能である。通常、障害物の無い平坦な道を歩く場合は、歩行動作は一定のリズムで行われる。そのため、平坦な道を歩く場合加速度センサを利用して得られるセンサデータの値は、一歩毎にほぼ一定の周期になる。一方、歩きにくい場所を歩く場合では平坦な道を歩く場合に比べセンサデータから取得出来る加速度の周期が長くなる、一定で無くなると考えられる。以上の2点についての検証を行う為に予備実験を実施する。本研究で立てた仮説が実証される事で、歩行者が身につけた加速度データから、歩きにくい場所を歩いていることを予測することができる。

2.2 予備実験

前節で立てた仮説を検証する為に、予備実験を行った。実験は慶應義塾大学の学生3人を対象に慶應義塾大学湘南藤沢キャンパス及びその周辺で実施した。実験場所には、多くの人が利用するであろう整備の行き届いた道路や大学構内などではよく見かける芝生など、日常生活で人が歩く様な場所を六ヶ所を選んだ。実験場所を表2.1に示す。また、図2.1に実験場所の写真を示す。

本研究では、天候の違いや周囲の明るさの違いにより、歩行者の歩き方に変化が生じる事に考慮して、天気

表 2.1 予備実験場所とその環境

実験場所	路面の素材	凹凸	障害物
道路	アスファルト	なし	なし
多少の起伏がある道	土	あり	なし
芝生	芝	なし	なし
土	土	なし	なし
砂利道	土, 石	あり	なし
草が生い茂っている道	草	なし	あり



図 2.1 予備実験の実施場所

が晴れかつ周りの明るい午前 10 時から午後 4 時半までの時間を対象に実験を行った。実験では、被験者の任意のポケットに三軸加速度センサ搭載の携帯端末をしまってもらい、各々の場所を約 30 メートル程歩いてもらった。その際に携帯端末を利用して歩行時の三軸加速度を記録した。センサデータは 50Hz で取得した。また、予備実験後歩いた場所について簡単なインタビューを行った。インタビューより得られた意見を以下にまとめる。

- 草が生い茂っている所や枯れ葉などにより地面の状態が分からない様な場所は、アスファルトなどを歩く場合に比べて足を高く上げる、着地が慎重になるなど歩き方に変化が生じる。
- 砂利道を歩く際は大きめの石を踏まない様に意識して歩く。

インタビューの結果より、足下の不安定な砂利道や地面の状態を確認し辛い草の生い茂った道など歩行者が歩きにくいと感じる場所では、歩く際に足下を意識する事や意図的に歩き方を変化させるなど、仮説 (1) のような傾向が実際に起こりうる事が分かった。そこで次に、実際に歩きにくい場所では平坦な道に比べて加速度センサから得られるデータにどのような変化が生じるのかを検証した図 2.2 に比較的歩き易い道路と歩きにくい草の生い茂った場所をそれぞれ 15 歩分歩いた際に計測した歩行時間を示す。

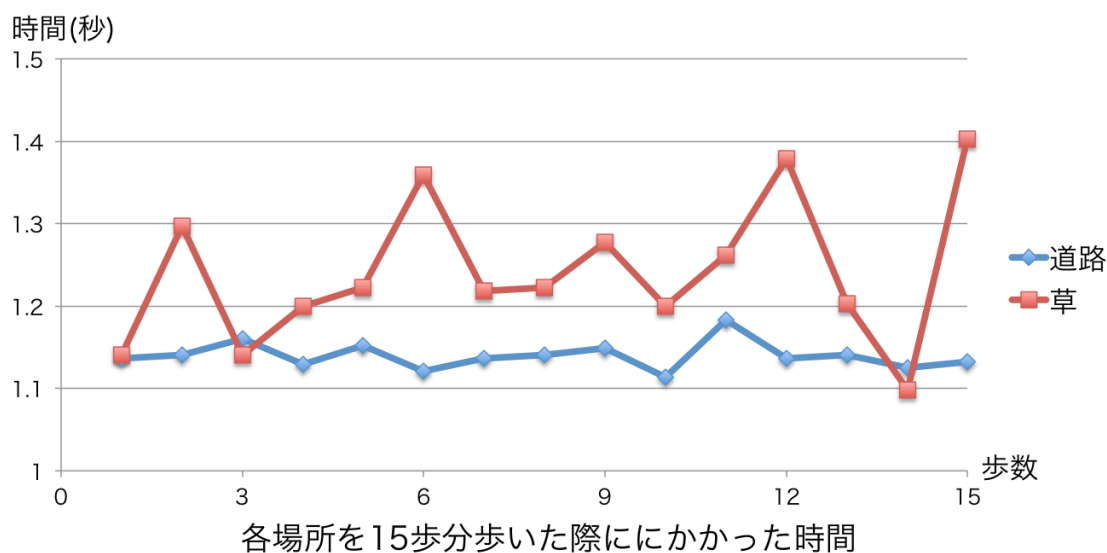


図 2.2 予備実験結果の一例

両者を比較すると、道路を歩く場合と草の生い茂った場所を歩く場合では歩き方に変化が生じる事が分かる。歩きにくい場所を歩く場合は、一歩あたりの時間がまばらになる、歩くペースが遅くなる、といった傾向が得られた。これは、仮説 (2) で述べた様に歩きにくい場所では歩き方に変化が生じ、その変化を加速度の周期の変化として取得する事が可能である事をが予想される。予備実験ではサンプル数が少なく断定は出来ないが、歩きにくい場所では歩行者の歩き方の変化を加速度の値や周期の変化から検出する事が可能であると考えられる。

2.3 アプローチ

本研究のアプローチとして、歩行時に観測出来る一歩あたりの時間に注目して歩行情報の分析を行う。一歩あたりの時間は歩行時に観測出来る加速度のピークからステップ検出を行った上で算出する。本研究では、1度着地した足が次に着地するまでの期間をステップ時間として定義する。

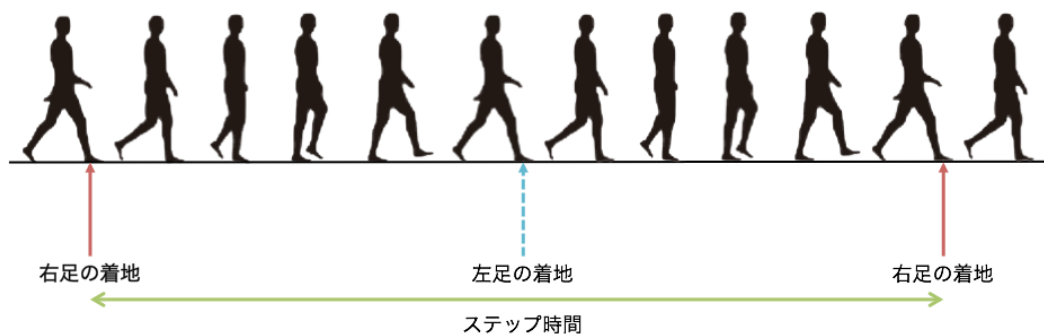


図 2.3 ステップの定義

予備実験結果より、歩行者が歩く路面の状態によって歩き方は変化する傾向があり、それに伴いステップ時間が変化する事が予想される。そこで本研究では、ステップ時間の分散を求める不偏分散を利用して分析を行う。不偏分散とは、観測データのがその平均からの散らばり具合を示す。不偏分散の計算式を式 2.1 に示す。ステップ時間の平均値を \bar{st} 、 n 項目目のステップ時間を st_n で示す。

$$Variance(n) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{st} - st_i)^2 \quad (2.1)$$

不偏分散の値が大きくなる場合、ステップ時間にばらつきが出ている事が分かる。ばらつきが大きい場合、歩行が一定のリズムで行われていない為、歩き辛い路面を歩いていると予想する事が出来る。

2.4 本章のまとめ

本章では、本研究の目的を達成する為の低コストな路面の情報取得のプラットフォームとしてスマートフォンの利用を提示した上で、歩行者が道を歩く際の行動に関する仮説を述べた。そして、仮説に対する検証を予備実験を通じて行い、本研究で提案する手法を述べた。次章では、本研究と関連する研究を述べ、本研究との比較を行う。

第 3 章

関連研究

本章では、本研究に関連する既存研究を紹介した上で本研究との比較、考察を行う。既存研究は路面状態の識別を目的とする研究と、本研究で利用するステップ検出に関する研究を紹介した上で比較を行う。

3.1 路面状態のセンシング

本節では、既存の路面状態の検出を目的とした研究を述べた上で本研究の焦点との差異を明確にする。

3.1.1 天候による路面状態の変化のセンシング

路面の状態を取得する際に目的となる物の一つに天候による路面状態の変化が挙げられる。天候の変化により、道路が乾いている、濡れている、凍っている、雪が積もっている、など路面の状態は大きく変化する。特に路面の凍結時や雪が降っている時はドライバーが十分注意をしてもに大きな事故が起こりうる。

山田氏たちは画像解析を用いて路面状態の変化を高い精度で検出した [6]。彼らは道路が乾いている、濡れている、ぬかるんでいる、凍っている、雪が積もっている、といった 5 つの路面状態について 92.3 % の精度で検出を行った。その後、彼らは車に搭載したカメラを利用して昼夜によらず道路が乾いているか、濡れているかの判定を行った [7]。彼らのシステムは日中で 90 % 以上、夜間においても 83 % 以上の精度で判定を行った。



図 3.1 画像解析を利用した検出

Jonsson 氏は、気象センサとカメラを利用して天候による路面の変化（地面が乾いている、ぬれている、

凍っている、雪に覆われている)を判定し、カメラの画像のみの判定方法よりも信頼性を増加させることを見いだした [8].

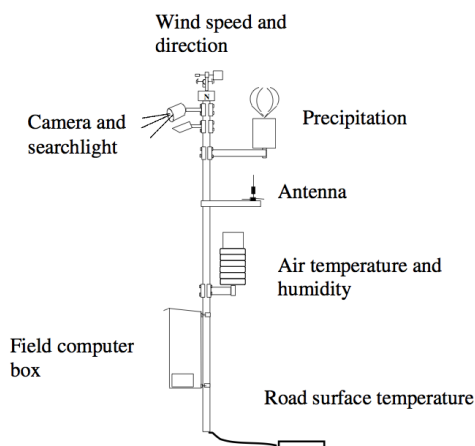


図 3.2 気象センサ

彼らの研究は、天候や気象現象による道路の路面状況の変化に特化しており、人がどのような場所を歩いているかを検出する事は出来ない。本研究では、歩行者を対象にし歩行情報の変化による路面状況の検出を目標としている。

3.1.2 道路の異常検出

車道に空いた穴や道路の劣化を検出する事は困難である。道路に生じた異常を放置する事で、様々なトラブルが生じる危険が増す。特にバイクや自転車を利用する場合、異常が生じた道路を走る事で転倒などの事故に繋がる危険がある。



図 3.3 地面の窪み

Jakob 氏たちは、車に搭載された加速度センサを利用して、道路の窪みや異常を検出し、共有する機構を作成した [9]. 彼等の手法により検出した異常のある道路のうち 90 パーセント以上が、修理を必要とする程の異常を持つ道路であった。しかし、彼らの手法では、加速度に変位が生じない程度の小さな窪みや道路の中心で

自動車のタイヤが接触しない場所にある窪みを検出することができない。また、平地と橋を繋ぐ様な場所での道路の継ぎ目を通る場合などで誤検出を行ってしまう場合もある。

Christian 氏たちは画像解析を行う事で地面の窪みの検出を行った [10]。彼らの手法は画像解析を用いる事で、加速度センサでは検知出来ない道路の中央の穴の検出や道路の継ぎ目を渡った時に生じる振動による誤検出を防止することを可能にする。

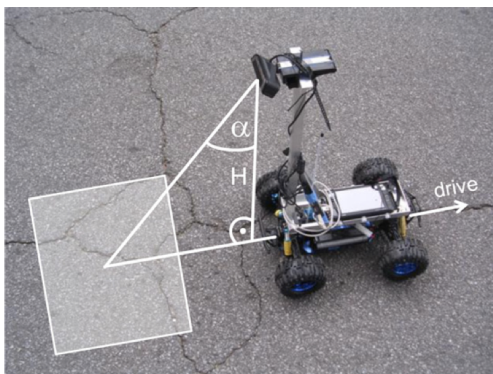


図 3.4 カメラを利用した窪みの検出

彼らの研究は道路の窪みや劣化を高い精度で検出する事を可能にしている。しかし、彼らの想定は車の通る車道であり、歩行者のみが通行する場所を想定していない。本研究では歩行者の利用を想定し、歩行者が通行する様な場所の取得を行う。

3.1.3 モバイルロボットによる摩擦力を利用した路面環境の認識

渡辺氏たちは、モバイルロボットによる摩擦力を利用した路面状況の認識を行った [11]。ロボットを遠隔操作する事で、人が活動する事が困難な場所における活動が可能になる。ロボットを操作する際に、より安全・快適に操作を行う為には、ロボットの操縦者が遠隔地にいながらもロボットの走行する路面の状況を認識する必要がある。そこで彼らは路面とロボットのホイール間の摩擦力を基に、路面の種類を認識する手法を提案した。彼らの研究は主にロボットでの利用を想定しており、路面環境の検出には摩擦力を利用している。そのため、歩行者は同様の方法では路面状況をセンシングする事は出来ない。

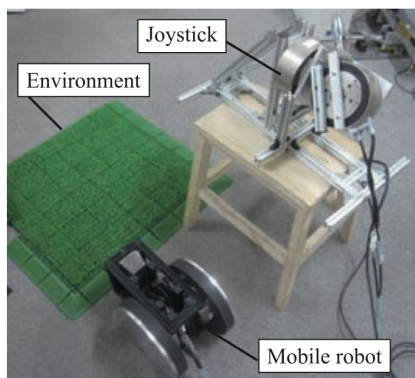


図 3.5 ロボットを利用した走行場所の素材検出

3.1.4 加速度センサと圧力センサを使ったセンシング

大島氏たちは、靴型ヒューマンプロブ実現に向け、圧力センサと加速度センサを利用して、平地と階段、スロープ、芝生でのセンサデータの変化について検証を行った [12]。彼らの研究はセンサを利用して人の行動を検出し、路面状況を取得する点では、本研究と非常に類似した研究である。本研究の目的は、私たちの殆どが日常的に利用している携帯電話やスマートフォンを利用して、特別なセンサを利用する事なく路面状況を検出する事である。

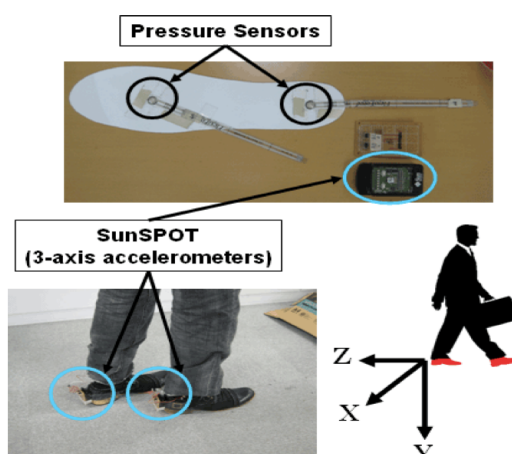


図 3.6 圧力センサと加速度センサ

3.1.5 本研究との比較

上記の研究はそれぞれ対象としている路面の種類や状況、センシングを行う対象が異なる。[6], [7], [8] は道路が濡れている、凍っている、乾いているなどの天候により変化する路面状態の変化を取得する事を目標としている。そのため、本研究とは検出を目的とする路面の状態が異なる、[9] は車に搭載したセンサを利用して道路の劣化を取得し、センサネットワークで共有する手法を利用している。また、[10] はロボットに搭載したカメラを利用し、画像解析を用いて道路に生じた穴の検出行った。彼らの手法はあくまで車を利用した道路の状態検知であり、本研究で対象としている歩行者の利用する道の路面状況に利用出来るケースはは多くない。[11] はロボットによる摩擦力を利用した路面状態として、絨毯、芝、アルミニウムプレートの検出を行った。彼らの研究は利用対象を小型ロボットに限定している為、同様の手法を歩行者に対しては行うことが出来ない。[12] はセンシングの対象を歩行者としており、歩行者がどのような場所を歩いているかを検出する事を目的としている点で本研究と類似している。しかし、彼らが検出を目的としている場所や段差の昇り降りや坂道の検出で、本研究と同じ様な目的の場所は芝生の検出のみである。本研究では、芝生のみでなく砂利道や土の道など、様々な環境の検出を目的としている。

3.2 ステップ検出に関する研究

Martin 氏たちは、加速度センサが内蔵しているモバイルデバイスを利用した加速度ベースのステップ検出、カウント用ミドルウェアを開発した [13]。彼らは、携帯端末を格納する向きや場所に依存しないステップ検出

表 3.1 本研究と既存手法の比較

手法	センサの配置場所	取得する路面状況
Discrimination of the road condition toward understanding of vehicle driving environments[6]	環境側	天候による路面状態の変化
Detection of wet-road conditions from images captured by a vehicle-mounted camera[7]	車	天候による路面状態の変化
Road Condition Discrimination using Weather Data and Camera Images[8]	環境側	天候による路面状態の変化
The Pothole Patrol: Using a Mobile Sensor Network for Road Surface Monitoring[9]	車	道路の窪み
Pothole detection in asphalt pavement images[10]	ロボット	道路の窪み
モバイルロボットによる摩擦力に基づいた路面環境の認識と分類 [11]	ロボット	地面の素材
Integrating Pressure Sensors and Accelerometers for Footwear-Based Human Probes[12]	歩行者の靴	歩行場所, 地面の素材
本手法	歩行者のズボンや上着のポケット	地面の素材

手法を提案し、それらをミドルウェアとして実装した。彼ら手法はステップの誤検出、検出漏れを合わせた誤差をワーストケースで3.7パーセントにまで押さえられている。本研究では、ステップ時間の算出を目的としたステップ検出を行うため、ステップ検出のエラーは勿論ステップ検出のタイミングのズレにまで注目をする必要がある。そのため、彼らの手法では本研究の目的を達成する為の機能要件としては不十分である。

Jimenez氏たちは、靴に搭載したセンサ歩行者デッドレコニングの研究として、靴に搭載したセンサを利用したステップ検出を行った [14]。ステップの検出には三軸加速度、ジャイロセンサ、電子コンパスを利用した三種類のアルゴリズムを用意し、三軸加速度センサを利用したステップ検出は誤差0.1パーセントで行った。彼らの研究では、非常に高い精度でステップ検出を行っているが、その目的は歩行者デッドレコニングを行う事であり、ステップ検出を利用して路面状態に関して考察を行う事はしていない。また、彼らの手法は加速度センサを自身の靴に装着する必要があるが、本研究では携帯端末をしまう場所はある程度限定するが、特定の場所に固定する事は強くない。

3.3 本章のまとめ

本章では、本研究と目的の類似する研究や、本研究に似た手法を行う研究を対象とし、研究目的やセンサの装着場所などを本研究との比較を行った。次章では本手法の設計及び実装について説明する。

第4章

設計

本章ではスマートフォンを利用したセンサデータ収集アプリケーション及びデータ分析用アプリケーションの設計及び実装と実装環境について説明する。

4.1 設計

本節では、センサデータ収集アプリケーション及びデータ分析用アプリケーションの設計を記述する。

4.1.1 ソフトウェア構成

本研究では、スマートフォンを加速度センサとして利用し、歩行時に取得した三軸加速度センサのセンサデータを外部ストレージに一度記録する。センサデータの収集後、取得したセンサデータを外部ストレージからPCに入力し、PC内のアプリケーションを利用して取得した三軸加速度からステップ時間を求める。求めたステップ時間を分析して歩行状態と路面状態の関係の検証を行う。ステップ時間取得用アプリケーションのソフトウェア構成図を図4.1に示す。

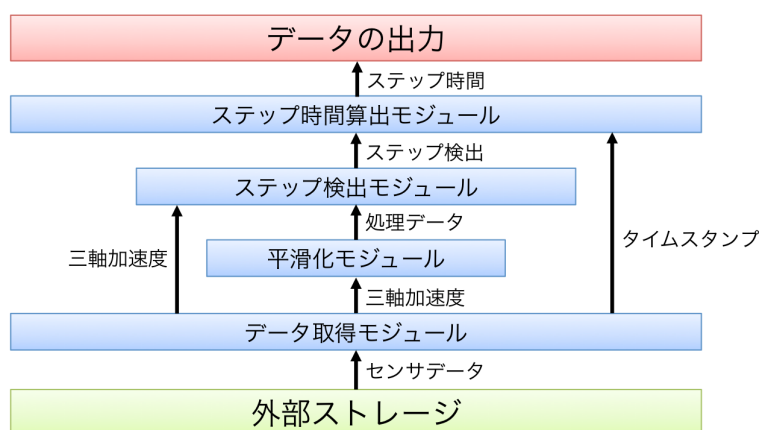


図 4.1 ソフトウェア構成図

スマートフォン内部の三軸加速度センサから加速度を取得したタイミングでタイムスタンプを計測し、一度外部ストレージへ保存する。その後、外部ストレージに保存されたデータを利用して分析を行う。まず、外部データ取得モジュールで外部データに保存したデータセットを受け取る。次に、受け取ったデータセットか

ら加速度データを平滑化モジュールに送る。平滑化モジュールで加速度データの処理を行いステップ検出モジュールへ送る。ステップ検出モジュールでは処理データと処理前の加速度データを利用してステップ検出を行い、ステップ検出情報をステップ時間算出モジュールに送る。ステップ時間算出モジュールはステップを検出情報を受け取ると外部データ管理モジュールからタイムスタンプを利用しステップ時間を算出する。最後に算出したステップ時間を出力し、データの分析を行う。

4.1.2 センサデータの取得

センサデータ取得部では、スマートフォン内部の三軸加速度センサを利用して歩行時の三軸加速度センサを取得する。加速度の取得は 50Hz で行い、加速度を取得したタイミングでタイムスタンプを取り、加速度とセットで運用する。取得したデータは csv 形式で外部ストレージに出力し、データ収集後解析用 PC で解析を行う。

4.1.3 ステップ時間算出用アプリケーション

ステップ時間算出用アプリケーションではスマートフォンを利用して取得した加速度センサデータからステップ時間の算出を行う。算出したステップ時間を利用して歩行分析を行う。

平滑化モジュール

平滑化モジュールではステップ検出の為に、取得した三軸加速度の処理を行う。まず、取得した三軸加速度のスカラ値を取得する。

$$ScalarValue = \sqrt{AccelerationX^2 + AccelerationY^2 + AccelerationZ^2} \quad (4.1)$$

次に取得したスカラ値と直前の k 個分のデータの単純移動平均を求める。 k は平滑化を行う際の係数で、予備実験結果より $k = 14$ に設定した。

$$MeanData = \frac{1}{k+1} (ScalarValue + \sum_{i=1}^k PreviousScalarData_i) \quad (4.2)$$

さらに、処理データに平滑化係数 α を利用して指数移動平均を求める。 α の値も k 同様に予備実験結果から $\alpha = 0.05$ に設定した。

$$SmoothedData = MeanData \times \alpha + PreviousSmoothedData \times (1 - \alpha) \quad (4.3)$$

最後に求めた処理データと直前の k 個分のデータの中央値を求める。図 4.2 に平滑化前と後の加速度センサデータのグラフを示す。

ステップ検出モジュール

ステップ検出モジュールでは処理したデータと処理前の三軸加速度のスカラ値を利用してステップの検出を行うステップの検出にはまず、平滑化を行った処理データに対してピーク検出を行う。処理データを利用して検出したピークは、実際に足を地面に着地した時間とズレがある可能性が高い。ズレを補正する為に、処理データの前後 10 フレームずつのデータを取得し、それらのデータの最大値を計測する場所を探し、その地点でステップの検出を行う。

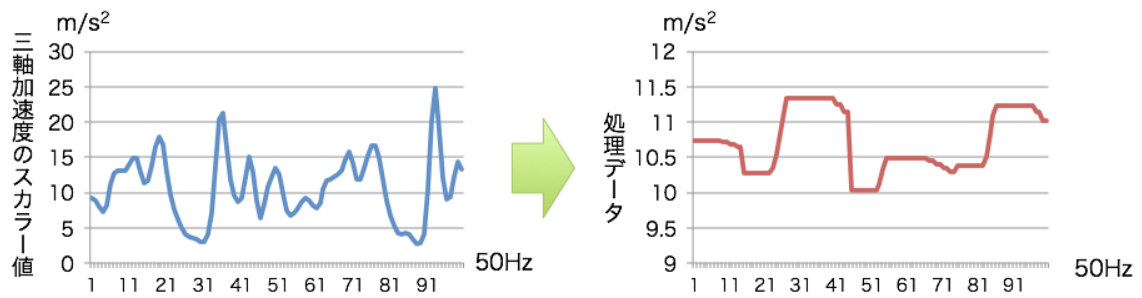


図 4.2 平滑化の前後

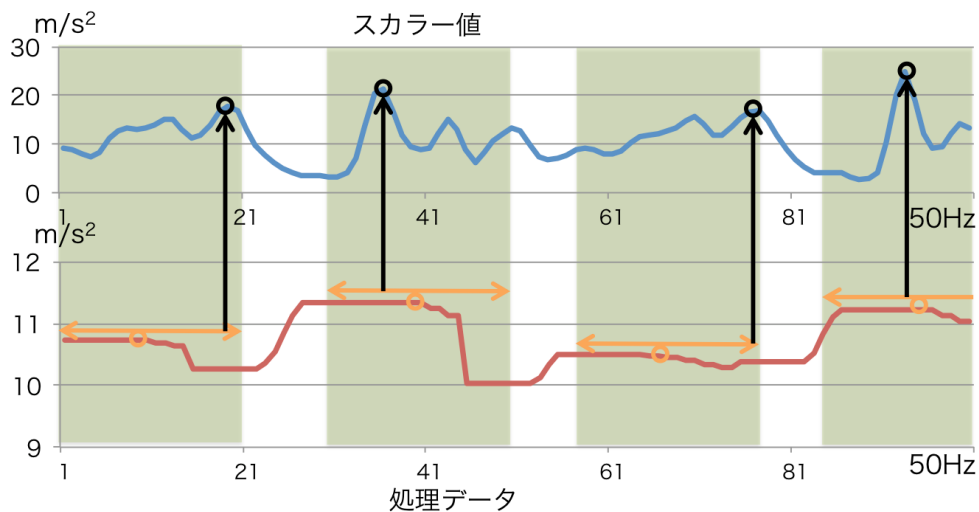


図 4.3 ステップ検出

本研究では、一度着地した足が次にもう一度着地する迄の期間をステップと定めているので、任意の整数 n に対して、 $2n - 1$ 回目に行ったステップ検出に関しては、ステップ検出として判定しない。

ステップ時間算出モジュール

ステップ時間算出モジュールでは、ステップにかかった時間を算出する。新たにステップ検出を行った場合、検出したステップのタイミングでのタイムスタンプと直前のステップのタイムスタンプの差からステップ時間を算出する。算出したステップ時間を利用して歩行状態の変化と路面状態の関係について検証を行う。

4.1.4 歩行分析

算出したステップ時間を利用して歩行分析を行う。歩行分析には平均歩行時間と、歩行時間の不偏分散値を利用する。平均歩行時間は一歩あたりに平均でどの程度の時間を要しているかの指標として利用する。草が生い茂っている場所など、歩きにくい場所では一歩あたりの歩行時間が長くなる傾向がある。歩行時間の不偏分散値は歩行時間のばらつきを示す指標として利用する。きちんと整備された道路など歩き易い場所では歩行者が歩く際、ほぼ一定のリズムで歩く。しかし、足下が不安定な場所などでは歩行時のリズムが変化する事が多い。そこで、歩行時間の不偏分散値を利用して歩行時間のばらつき具合を求める。データの解析には

Microsoft Excel 2011 for Mac 及び AnalystSoft StatPlus:mac LE を利用した。

4.2 実装環境

本節では、実装に使用したハードウェア、プラットフォーム、言語、IDE を示し、本研究で開発したアプリケーションの実装環境を詳細に述べる。

4.2.1 ハードウェア構成

本研究の実装に使用した機器のハードウェア環境について述べる。センサデータ収集端末には HTC EVO 3D を利用した。また、センサデータ分析用 PC には Apple Macbook を利用した。表 4.1, 4.2 にそれぞれのハードウェアの詳細環境を示す。また、データ収集用の外部ストレージは一般向けに販売されている microSD カードを利用した。

表 4.1 HTC EVO 3D

ハードウェア名	HTC EVO 3D X515m
CPU	1.2GHz dualcore
主メモリ	1.00GB
加速度センサ	ハードウェア内蔵

表 4.2 分析用 PC

ハードウェア名	Apple Macbook 2010 mid
CPU	Intel core 2 Duo 2.4GHz
主メモリ	4GB 1067MHz DDR3
OS	Mac OS 10.6.8

4.2.2 ソフトウェア構成

本研究で利用した三軸加速度収集アプリケーション及び分析アプリケーションのソフトウェア環境について述べる。ソフトウェア環境を図 4.3, 4.4 に示す。

表 4.3 三軸加速度データ収集アプリケーション

プラットフォーム	Android(TM) 2.3.4 with HTC Sense(TM) 3.0
使用言語	Java(TM) SE Runtime Environment Version 1.6.0.29

表 4.4 歩行時間算出用アプリケーション動作環境

実装 OS	Mac OS 10.6.8
使用言語	Java(TM) SE Runtime Environment Version 1.6.0_29
IDE	Eclipse IDE 3.7.0(INDIGO)

4.3 本章のまとめ

本章では、本研究で提案する、加速度データ収集アプリケーション及びデータ分析アプリケーションの設計及び実装環境について述べた。加速度データ収集アプリケーションは、スマートフォンを利用して歩行時の三軸加速度及びタイムスタンプを記録する。記録した加速度データは一度外部ストレージに記録する。その後、解析用 PC を利用して加速度センサデータの解析を行う。加速度データの解析にはまずデータの平滑化を行う。次に平滑化を行った処理データを利用してピーク検出を行いステップの検出を行う。ステップ検出には処理データ以外にも処理前の三軸加速度データのスカラー値を利用する。ステップ検出後、ステップ間の時間をステップ時間として取得する。本研究では、ステップ実感を利用する事でステップのばらつき具合の取得に利用可能なステップ時間の不偏分散と、歩行時の歩行ペースに利用可能な平均ステップ時間を取得する。次章では、本章で作成した分析用アプリケーションを利用して取得したデータの路面状態検出への影響を検証する為の実験及び評価考察を行う。

第 5 章

検証実験

本章では、前章で説明した、ステップ時間算出アプリケーションを使用した上で歩行分析を行い、取得した歩行状態と路面状態に関する検証を行う。

5.1 実験目的

本節では、本章で行う実験の目的を明確にする。予備実験より、歩く場所により、人の歩き方が変化する傾向を得る事が出来た。また、獣道や障害物の多い、見通しが悪い様な道では、歩行に影響が生じる傾向を見る事が出来た。そこで評価実験を行い、獣道などが、実際にどのように人の歩行に影響を与えるか、またそれにより取得するデータにどのような影響を与えるのかを分析する。

5.2 実験方法

本評価実験では、歩行者が実際に道を歩く場合を想定し、慶應義塾大学湘南藤沢キャンパス及びその周辺の様々な環境を歩いてもらう。実験場所には 2 章で説明した予備実験と同様の場所を利用した。被験者は慶應義塾大学の学生 8 名で、男性 4 名、女性 4 名を対象に行った。実際に歩行する際に、天候の違いや朝夜の違いにより道の見通しの良さが変化し歩行状態に差異が生じる可能性がある。そのため予備実験同様、検証実験も全て晴れの日で日が昇っており、周りが明るい午前 10 時から午後 4 半の間で行った。被験者には実験用端末として、前章で説明した加速度収集アプリケーションをインストールした三軸加速度センサ内蔵のスマートフォンを携帯してもらう。その上で、実験場所を歩いてもらい、一人一ヶ所につき合計 300 歩分の加速度データを収集した。本研究では 2 歩分で 1 ステップと定義しているのので、一人一ヶ所につき 150 データを収集した。実験終了後、収集した三軸加速度の値から歩行者のステップ検出及び歩行状態の検出を行う。

5.3 実験結果

5.3.1 ステップ検出精度

本研究では路面の状態が歩行に影響を与えるという仮説のもとで、ステップ時間の算出を行った。ステップ時間を正しく取得する為には、ステップ検出を正しく行う必要がある。本手法を用いたステップ検出の検出誤差表 5.1 を示す。

ステップ検出の際に最も効果的な平滑化係数は個人により異なる。ベストケースの被験者は予備実験を行っ

表 5.1 ステップ検出精度

	誤検出	検出漏れ
ベストケース	0 %	0.11 %
ワーストケース	0 %	1.11 %
平均	0 %	0.56 %

実際の被験者の一人である。そのため、ステップ検出に利用する平滑化係数の算出のモデルの一人となった為、非常に高い精度でステップ検出を行えたと考えられる。逆にワーストケースの被験者は予備実験を行った際の被験者ではない。そのため、ベストケース場合に比べて検出漏れが多くなったと考えられる。本研究の実用化を想定した場合、歩行者の加速度データの計測は自身の持つ携帯端末を利用するため、自身に最も効果的な平滑化係数を利用する事で高い精度で検出を行う事が出来ると考えられる。

5.3.2 検証に用いる指標

歩行状態と歩行場所の路面状態の検証にはステップ時間の平均と不偏分散値を指標として利用する。ステップ時間の平均は歩行に要する時間の指標として利用する。歩きにくい場所などでは整備された道路など歩き易い場所に比べ、値が高くなる事が想定される。不偏分散値は歩行時間のばらつきを示す指標として利用する。この指標は、起伏や障害物など歩くペースを乱す傾向がある場所では値が高くなると想定される。

5.3.3 平均ステップ時間の検証結果

平均ステップ時間の検証では、歩く速度などの個人を低減するため、を道路を歩いた場合の平均ステップ時間を基準とした。その上で、各実験場所を歩いた際の平均ステップ時間と道路を歩いた場合の平均ステップ時間の差を利用して検証を行った。実験場所別に平均ステップ時間の差の散布を図を 5.1 に示す。殆ど全ての場

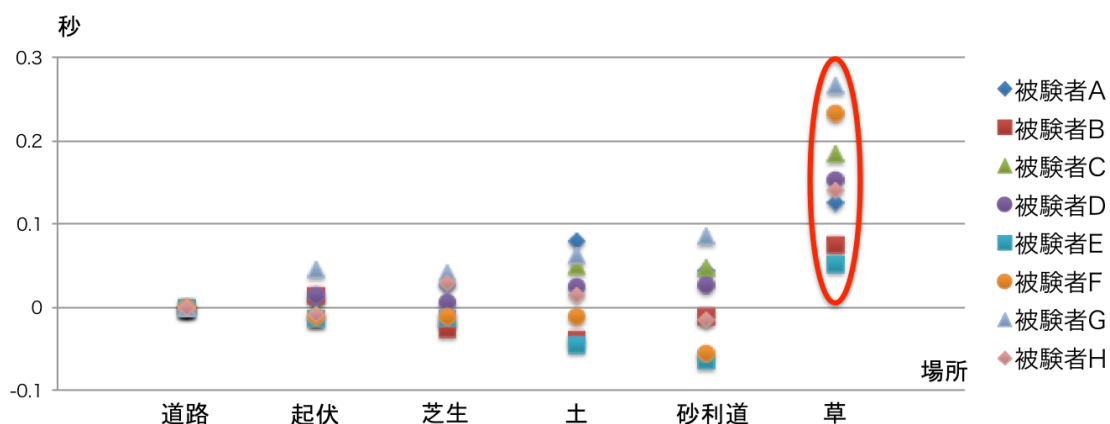


図 5.1 実験場所別の平均ステップ時間の散布

合で、草が生い茂っている場所を歩いた場合の平均ステップ時間の差が他の場所を歩いた場合に比べて時間を要した結果が得られた。また、被験者別の結果を検証した場合は、他のいずれの場所を歩く場合よりも草が生い茂っている場所を歩く場合が最も平均ステップ時間の差が高くなった。これは、歩き辛い様な場所を歩く場

合は、通常よりも高く足を上げる、慎重に歩く事により一歩歩くのに必要になる時間が長くなる事が要因として考えられる。

一方で、草が生い茂っている場所以外の場所での平均ステップ時間の差は非常に個人差が高い結果になった。そのため、これらの場所に関しては、平均ステップ時間を利用して歩行場所の特定に利用するのは困難であった。草が生い茂っている場所を除いた検証結果を図 5.2 に示す。

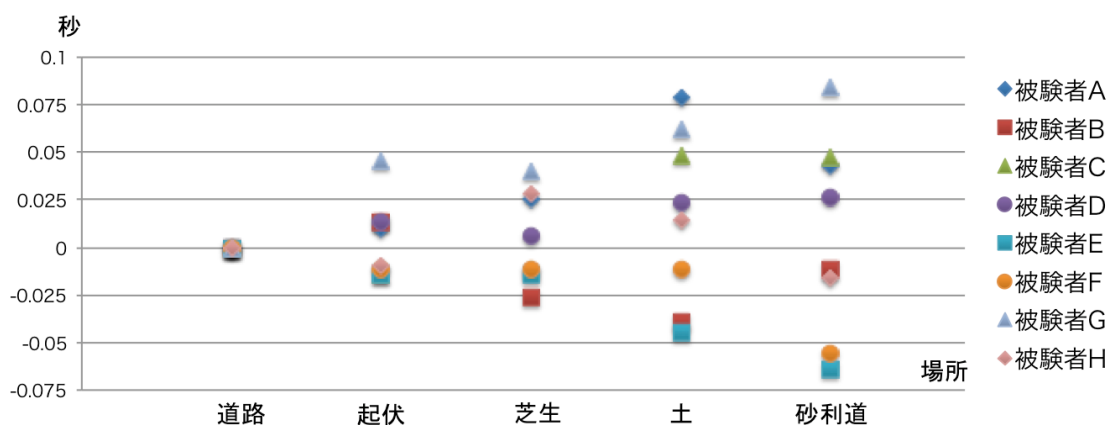


図 5.2 草が生い茂っている場所を除いた平均ステップ時間の散布

5.3.4 ステップ時間の不偏分散の検証結果

実験場所別のステップ時間の分散を図 5.3 に示す。ステップ時間の不偏分散では、被験者 F と被験者 G が

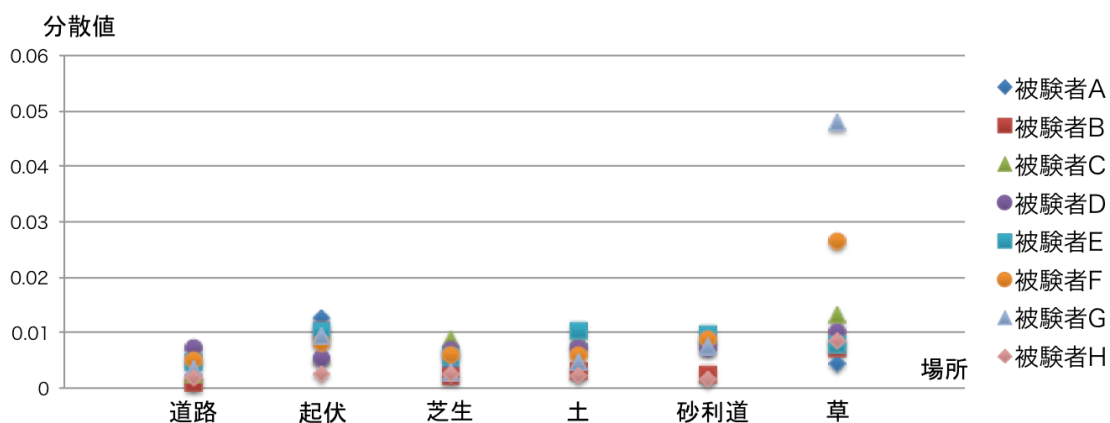


図 5.3 歩行場所別のステップ時間の不偏分散の散布

草の生い茂っている道を歩いた場合が非常に高い値を示した。そこで両者が草の生い茂っている道を歩いた場合を除外した散布を図 5.4 に示す。起伏のある道や砂利道、草の生い茂った道の分散値が道路を歩く場合よりも高くなる傾向があった。これらの道は起伏や、砂利による障害、草が生い茂っているため足下の視認が難しいなど、整備された道路を歩く場合に比べると、被験者にとっては歩きにくい場所であった。これにより、個人差はあるものの、歩きにくい場所では道路を歩く場合に比べて分散値が高くなる傾向になる知見が得られた。一方で、芝生と土は個人差の影響が非常に大きく、分散値では判別を行う事は困難である結果が得られ

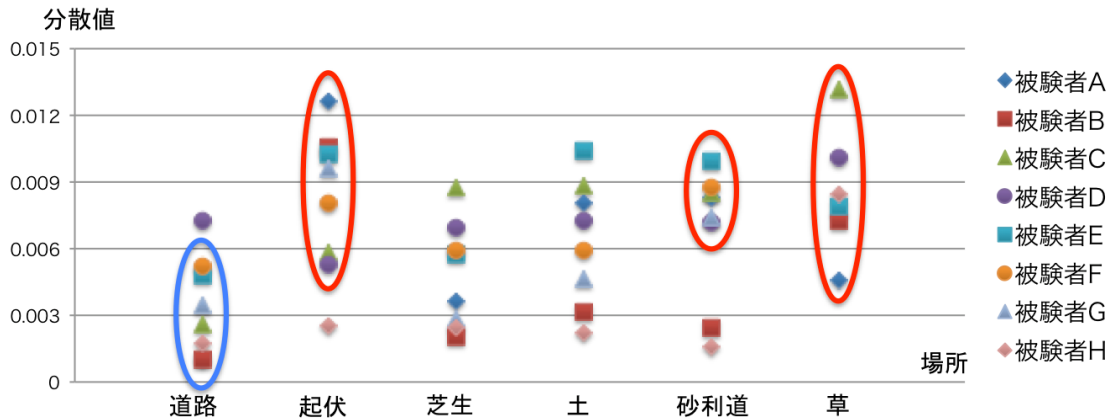


図 5.4 一部を除いたステップ時間の不偏分散の散布

た。そのため、これらの場所の分類を行うには今回利用した歩行時間の平均や不偏分散値以外の指標が必要である。

5.4 考察

本節では実験及び分析結果を踏まえた考察を行う。

5.4.1 平均歩行時間を利用した検証の考察

本研究では、歩き辛い様な場所では、歩行動作の変化により平均歩行時間が変化すると予測を立てた。実際に検証を行うと、草が生い茂っている場所を歩いた場合、いずれの被験者についても他の実験場所を歩いた場合に比べて平均歩行時間が高くなった。これは、草の生い茂っている場所では、他の場所に比べて足下の状態を視認し辛く、そのため歩行の動作が慎重になった為と推測することができる。一方で、砂利道や多少の起伏ある道など、少し歩きにくい程度の場所を歩く場合はゆっくり歩く場合の他に小刻みに歩く様な被験者もいた。そのため、足下が視認出来る歩きにくい場所では必ずしも歩行時間が長くなる訳ではないという結果が得られた。

5.4.2 不偏分散値を利用した検証

本研究では人が歩き辛く感じる様な場所では、歩行のタイミング変化し、それが歩行時間の分散値として数値に出力される仮説を立てた。実際、実験を行うと、足下の不安定な砂利道や、足下を視認し辛い草の生い茂った道などでは、きちんと整備された道路を歩く場合に比べて分散値が高くなる傾向が得られた。一方で、芝生や土を歩く場合は非常に個人差が高かった。これは芝生などの環境が歩行動作に必ずしも大きな影響を与えるとは限らず、人によっては多少の影響を受ける場合があっても、それらの影響を殆ど受けない様な人も多くいる事が考えられる。不偏分散を利用するだけでは判別を行う事は困難である。また、道路を歩く場合に比べて分散値が高くなる傾向が得られた起伏のある道や砂利道においても、これらの二つの場所の分類を行う必要がある。

5.4.3 ステップ検出タイミングのズレによる分布の変化

ステップ検出時のデータを解析すると検出のタイミングにズレが生じているケースがある事が分かった。本手法ではステップ検出の際に、ステップ検出を行ったタイミングの前後 10 フレーム分の三軸加速度のスカラ値の最大値を計測している地点をステップ検出のタイミングとしてステップ検出を行った。しかし、実際に取得した加速度データの解析を行うと、歩行時に一度上げた足が地面に接地する際に複数ののピークを検出する事が分かった。基本的に人は歩く際、着地時にかかとから着地しその後足の裏が地面に接地する。そのため、例えば携帯端末をズボンのポケットに入れた場合、携帯端末を入れた方のズボンの足の着地の際に複数のピークを観測する。各ピークは数フレームずれて行われている為、誤ったタイミングでのピーク検出を行うと歩行分析に利用するステップ時間に誤差が生じてしまう。また、それぞれのピークのどれが加速度の最大値を計測するかは個人差や歩行場所の影響を大きく受ける。例えばズボンのポケットに携帯端末を入れてアスファルトと芝生を歩いた場合は、かかとの接地の際に生じる三軸加速度の値がアスファルトを歩いた時に比べて明らかに低くなる。そのため、単純に加速度の最大値のみを取得する方法では正確なタイミングでのステップ検出を行う事は出来ない。今後の発展として正確なタイミングでステップ検出を行う機構の実装が挙げられる。より正確なタイミングでステップ研究を行う事で、高い精度での歩行状態の検出が可能になると考えられる。

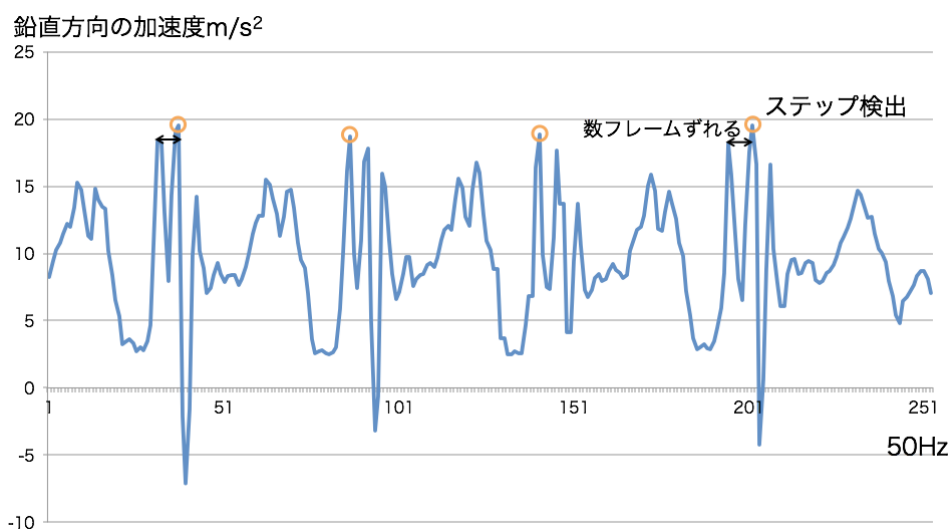


図 5.5 着地の際に生じる複数ピーク

5.4.4 実験データ数

本論文執筆にあたり、ステップ時間の分散及び平均ステップ時間と路面状態の関係を検証する為に行った実験を行った。しかし、実験を行った際の被験者の人数が 8 人であったなど、被験者数が不十分であると考えられる。また、被験者の年代が 10 代後半から 20 代前半であるなど、年齢層に偏りが出た。データの検証を行う為には幅広い層に対して実験を行う必要がある。特に、転倒の事例やリスクが高い高齢者を対象とした実験を行う必要性が高いと考えられる。今後は実験の被験者数や層を増やす事で、より信頼性の高いデータにする必要がある。

5.5 本章のまとめ

本章では、前章で説明したステップ検出手法の精度評価を行った。結果はワーストケースで 98.89 パーセント、全体の平均検出率は 99.44 パーセントであった。また、ステップ検出から取得する歩行状態の指標として、歩くペースを表す平均ステップ時間と、歩き方のばらつきを表すステップ時間の不偏偏差値を利用した。検証結果としては、複数の被験者に対して単純に分散の値のみで比較を行うのみでは、歩行場所の判別を行う事は出来なかった。しかし、被験者別の評価を行った場合、歩く場所によってはある程度特徴的な点を観測する事が出来た。そのため、個人差を考慮したキャリブレーションを行う事で、歩行場所に対してある程度の分類を行う事が出来る可能性を示した。次章で本論文をまとめる。

第6章

結論

本章では、本研究の総括として、本研究の今後課題と展望についてまとめ、その上で本論文の結論を述べる。

6.1 今後の課題

本節では、本研究の今後の課題について述べる。

6.1.1 ステップ時間と路面状況の相関性

本研究では加速度センサを利用して、歩行者の歩行状態の指標を表す要素の一つであるステップ時間を取得した。取得したステップ時間の平均値や不偏分散値が高くなる、つまりステップ時間が長くなる、分散している場合は、歩きにくい道を歩いているという仮説を立てた。その結果、いくつかの場所においては歩行場所の違いによる平均歩行時間や歩行時間の不偏分散値に特徴的な値を確認する事が出来た。しかし、歩行者の被験者によって歩行時間の変化や分散の傾向が異なり、完全に分類を行う事が困難な場所も確認された。そのため、ステップ時間の平均値や不偏分散値のみでは歩行場所の分類を完全に行う事は困難であると考えられる。

6.1.2 今回利用したパラメータ以外の要素

今後、ステップ時間以外で路面状況の認識を行う為には歩行状態を示す要素を取得する必要があると考えられる。利用が期待される要素としては進行方向、鉛直方向の加速度や、それらを積分した速度、進行距離、またステップ時間を平均や分散以外で利用する方法なども考えられる。

6.1.3 ステップ検出のタイミング

本研究はステップの検出やピーク検出に加速度の最大値を利用した検出を行った。しかし、実際に足が接地するタイミングで加速度が最大値を計測するとは限らない。そのため、本手法によるステップ検出はステップの検出自体は非常に高い精度で検出出来るものの、歩行状態を取得する為にはより正確なタイミングステップを検出する必要がある。

6.1.4 アルゴリズムの高速化

現在は、モバイル端末は、歩行時の三軸加速度を計測するのみに留まっている。しかし、本研究の目標を達成する為には、路面状態検出システムを実際に携帯端末に実装した上で運用をする必要がある。それに伴い現状のアルゴリズムを最適化及び高速化する必要がある。

6.2 本研究のまとめ

本論文では、人の歩行状態の変化が路面状態にどのような影響を与えるかを検証する為の実験及び考察を行った。本研究の仮定では、砂利道や獣道など、歩き辛い場所を歩く際に歩き方が変化し、それは人が身につけたセンサの値から何か変化を見る事が出来るという仮説を立てた。仮説の検証を行う為に慶應義塾大学湘南藤沢キャンパスの学生を対象に予備実験を行った。その結果、サンプル数が少なく、断定は出来ないが、実験場所によっては歩行動作に変化が得られる傾向が確認出来た。そこで歩行場所によっては歩き方がまばらになるなど、歩行動作に変化が生じるという仮説を立てた。仮説の検証を行う為の分析用アプリケーションを作成し、実験を行った。実験の結果、足下の視認し辛い場所や足下が不安定な場所では、歩行時間の平均や不偏分散は路面状態の検出に利用可能な指標の一つであるという結果が得られた。しかし、それらの要素だけでは路面状態の判別を行う事は困難であり、今後、本研究の目標である、歩行状態の検出から路面状態を検出するを達成する為には、歩行状態の検出に利用出来る様々なコンテキストの取得が課題となる。

謝辞

本論文の執筆にあたり、絶えず丁寧な御指導して頂きました、慶應義塾大学環境情報学部教授徳田英幸博士に深く感謝致します。また、慶應義塾大学環境情報学部准教授高汐一紀博士、慶應義塾大学環境情報学部専任講師中澤仁博士には貴重なご助言を賜り、感謝致します。

また、慶應義塾大学徳田研究室の諸先輩方には折に触れ貴重なご助言を頂き、また多くの議論の時間を割いて頂きました。特に政策・メディア研究科特任助教米澤拓郎氏、政策・メディア研究科研究員伊藤友隆氏には、本研究を進めるにあたって多くの励ましと御指導を頂きました。また、政策・メディア研究科修士課程唐津豊氏、瀧本拓哉氏には本論文の執筆に当たって様々な御指導を頂きました。ここに深い感謝の意を表します。

最後に、研究生生活を支えてくれた家族、同じ研究会で研究の日々を家族同然の様に過ごした、慶應義塾大学環境情報学部4年西山勇毅氏、西條晃平氏、加藤碧氏、Nguyen Gia 氏、研究の日々を共に過ごした研究グループ ACE 及び CPSF の皆様、その他多くの友人に深く感謝し、謝辞と致します。

2012年3月1日

勝治 宏基

参考文献

- [1] Google Maps. <http://www.googlemaps.com/>.
- [2] NAVITIME. <http://www.navitime.co.jp/>.
- [3] 石田眞二, 亀山修一, 岳本秀人, 姫野賢治, 鹿島茂. 車椅子の走行負荷に基づいた歩道の路面凹凸評価方法. 土木学会論文集, Vol. 62, No. 2, pp. 295–305, 2006-07-20.
- [4] 岡村美好. タイル舗装の目地が走行中の車いすの振動と乗り心地に及ぼす影響. 土木学会論文集 E, Vol. 64, No. 1, pp. 237–246, 2008.
- [5] Nike + iPod. <http://www.apple.com/jp/ipod/nike/>.
- [6] M. Yamada, K. Ueda, I. Horiba, and N. Sugie. Discrimination of the road condition toward understanding of vehicle driving environments. *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, Vol. 2, No. 1, pp. 26–31, mar 2001.
- [7] M. Yamada, K. Ueda, I. Horiba, S. Yamamoto, and S. Tsugawa. Detection of wet-road conditions from images captured by a vehicle-mounted camera. *J. Robot. Mechatron.*, Vol. 17, , 2005.
- [8] P. Jonsson. Road condition discrimination using weather data and camera images. In *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2011 14th International IEEE Conference on*, pp. 1616–1621, oct. 2011.
- [9] Jakob Eriksson, Lewis Girod, Bret Hull, Ryan Newton, Samuel Madden, and Hari Balakrishnan. The pothole patrol: using a mobile sensor network for road surface monitoring. In *Proceedings of the 6th international conference on Mobile systems, applications, and services*, MobiSys '08, pp. 29–39, New York, NY, USA, 2008. ACM.
- [10] Christian Koch and Ioannis Brilakis. Pothole detection in asphalt pavement images. *Advanced Engineering Informatics*, Vol. 25, No. 3, pp. 507–515, 2011. Special Section: Engineering informatics in port operations and logistics.
- [11] 渡部達人, 桂誠一郎. モバイルロボットによる摩擦力に基づいた路面環境の認識と分類. 電気学会論文誌. D, 産業応用部門誌 = The transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan. D, A publication of Industry Applications Society, Vol. 131, No. 3, pp. 357–363, 2011-03-01.
- [12] Kazumasa Oshima, Yasuyuki Ishida, Shinichi Konomi, Niwat Thepvilojanapong, and Yoshito Tobe. Integrating Pressure Sensors and Accelerometers for Footwear-Based Human Probes. In *Proc. of the Asian Workshop on Sensing and Visualization of City-Human Interaction (AWSVCI 2009)*, 2009.
- [13] Martin Mladenov and Michael Mock. A step counter service for java-enabled devices using a built-in accelerometer. In *Proceedings of the 1st International Workshop on Context-Aware Middleware and Services: affiliated with the 4th International Conference on Communication System Software and*

- Middleware (COMSWARE 2009)*, CAMS '09, pp. 1–5, New York, NY, USA, 2009. ACM.
- [14] A.R. Jimenez, F. Seco, C. Prieto, and J. Guevara. A comparison of pedestrian dead-reckoning algorithms using a low-cost mems imu. In *Intelligent Signal Processing, 2009. WISP 2009. IEEE International Symposium on*, pp. 37–42, aug. 2009.
- [15] 新野直明, 小坂井留美, 江藤真紀. 在宅高齢者における転倒の疫学. 日本老年医学会雑誌, Vol. 40, No. 5, pp. 484–486, 2003-09-25.