平成15年度 修士論文

加速度センサを使った
自律位置同定機構の設計と評価

電気通信大学 大学院情報システム学研究科

情報システム設計学専攻

0150023　富永 直樹

指導教官　多田 好克　助教授
渡辺 俊典　教授
前川 守　　教授

提出日　平成16年3月1日

目 次

第 1 章　はじめに **6**

第 2 章　背景と目的 **7**

2.1 位置同定方法の分類 7

2.1.1 外部装置を利用したシステム 7

2.1.2 自律航法型のシステム 7

2.2 位置同定システムの種類 8

2.2.1 電波航法型システム 8

2.2.2 INS 8

2.2.3 ハイブリッド型システム 9

2.2.4 マップマッチング 9

2.3 位置同定の用途 10

2.4 個人レベルで利用できる位置同定システム 10

2.5 研究の目的 10

第 3 章　加速度センサと実験環境 **12**

3.1 加速度センサ 12

3.1.1 加速度センサの出力の流れ 12

3.1.2 加速度センサの分解能と出力周期 13

3.2 実験環境 13

第 4 章　予備実験 **16**

4.1 予備実験 16

4.2 精度改善のための対策案 18

4.2.1 カルマンフィルタ 19

4.2.2 停止時の較正 21

第 5 章 実験と考察 22

5.1 一定の加速度での計測 23

5.1.1 角度 2.87° での計測 23

5.1.2 角度 1.72° での計測 25

5.1.3 角度 0.57° での計測 27

5.2 ランダム移動での計測 29

5.3 定期的に停止させ計測 32

5.4 1 回の移動距離を制限して計測 36

5.5 結果の考察 40

第 6 章 位置同定機構の構築 41

6.1 制約条件 41

6.2 停止状態を人が指示する同定 41

6.2.1 システムの手順 42

6.2.2 実験結果 42

6.3 停止状態の自律検知による同定 44

6.3.1 停止状態の自律検知手法の検討 44

6.3.2 実験結果 48

6.4 考察 49

第 7 章 2 次元への応用 51

7.1 2 次元での測定方法 51

7.1.1 定義 51

7.1.2 位置の導出 52

7.2 ADXL202 を用いたときの見積もり 53

第 8 章　おわりに 54

図 目 次

3.1 ADXL202 14
3.2 実験環境 15

4.1 1 分ごとの出力の平均の推移 18
4.2 出力へのカルマンフィルタの適用 19

5.1 レールの傾き $\sin^{-1}0.05$ における加速度 24
5.2 レールの傾き $\sin^{-1}0.05$ における速度 24
5.3 レールの傾き $\sin^{-1}0.05$ における移動距離 25
5.4 レールの傾き $\sin^{-1}0.03$ における加速度 26
5.5 レールの傾き $\sin^{-1}0.03$ における速度 26
5.6 レールの傾き $\sin^{-1}0.03$ における移動距離 27
5.7 レールの傾き $\sin^{-1}0.01$ における加速度 28
5.8 レールの傾き $\sin^{-1}0.01$ における速度 28
5.9 レールの傾き $\sin^{-1}0.01$ における移動距離 29
5.10 ランダム移動における加速度の計測結果 30
5.11 ランダム移動における速度の計測結果 31
5.12 ランダム移動における移動距離の計測結果 31
5.13 10 秒間隔で停止させた時の加速度の計測結果 33
5.14 10 秒間隔で停止させた時の速度の計測結果 33
5.15 10 秒間隔で停止させた時の移動距離の計測結果 34
5.16 5 秒間隔で停止させた時の加速度の計測結果 34
5.17 5 秒間隔で停止させた時の速度の計測結果 35
5.18 5 秒間隔で停止させた時の移動距離の計測結果 35

5.19 移動距離を制限した時の加速度の計測結果: 補正前 37
5.20 移動距離を制限した時の加速度の計測結果: 補正後 37
5.21 移動距離を制限した時の速度の計測結果: 補正前 38
5.22 移動距離を制限した時の速度の計測結果: 補正後 38
5.23 移動距離を制限した時の移動距離の計測結果: 補正前 39
5.24 移動距離を制限した時の移動距離の計測結果: 補正後 39

6.1 停止状態と移動状態での分散値の対比 45
6.2 0.5 秒間隔の分散，移動状態を含むものと含まないものとの対比 . . 46
6.3 0.5 秒間隔の平均値と過去 5 秒間の平均値との差，移動状態を含むものと含まないものとの対比 47

第 1 章

はじめに

近年，歩行者の道案内や迷子防止，利用者の位置状況に応じた情報配信など，個人レベルで利用可能な位置同定技術が注目されてきている．

現在，個人レベルで利用可能な位置同定システムとして GPS (Global Positioning System) が主流になりつつある．GPS は GPS 衛星からの電波を受信して位置を測定しているので，地下や屋内など電波の妨害される場所では利用することができない．このため，GPS で同定できない場所ではジャイロや加速度センサなどを利用した INS (Inertial Navigation System, 慣性航法装置) を併用するというハイブリッド型システムの提案もされ始めている．しかし，既存の INS の製品や研究で用いられているセンサは高価であり，消費電力も大きく，個人が手軽に利用するのは困難である．そこで，本研究では，小型で低消費電力の加速度センサに注目する．そして，個人レベルで携帯利用でき，外部装置を必要としない位置同定システム実現のための指標となることを目的とし，この加速度センサを使った 1 次元の位置同定システムを構築する．そのために，このセンサの検証を行い，位置同定に必要な制約条件を提示する．また，回転を含めた平面での位置同定について検証を行う．

第 2 章

背景と目的

この章では，はじめに研究の背景として位置同定技術について述べる．その後，本研究の目的を述べる．

2.1 位置同定方法の分類

位置同定方法を分類する基準の 1 つに外部装置の利用の有無がある．

2.1.1 外部装置を利用したシステム

これらは，位置同定を行うために外部装置を設けたものである．例としては，GPS や PHS など，外部からの電波を使った電波航法型位置同定システムがある．GPS は GPS 衛星，PHS は基地局が外部装置にあたる．

位置同定システムに外部装置を加えることによって，大きく精度向上を図ることができる．しかし，外部装置を用いる場合，通信が妨害されるような状況では利用できない．また，外部装置の設置，維持にコストがかかるという問題がある．

2.1.2 自律航法型のシステム

外部装置を用いずに，自身のシステムによる観測のみで位置同定を行うものを自律航法システムという．一般的なものとして，INS が挙げられる．INS は，加速

度センサやジャイロなどによって得た加速度を 2 階積分することによって移動距離を求めるような，慣性系を利用したシステムである．

自律航法システムの利点は，外部との通信を行う必要が無いため，GPS などに比べ利用場所の制限が少ないことである．しかし，得られる情報が限定されるため，誤差の補正の方法も限られ，誤差が蓄積する欠点もある．

2.2 位置同定システムの種類

ここでは，現在の主な位置同定手法の種類について述べる．

2.2.1 電波航法型システム

電波航法型のシステムは，事前に場所のわかっている基地局があり，そことの信号のやりとりの時間差，送られてくる信号の減衰率などから距離を求め，受信方向と合わせることで位置を同定するものである．基地局からの距離や電波状況が精度に影響する．

電波航法型システムの代表的なものとして GPS がある．GPS は，GPS 用の人工衛星を利用した位置同定システムである．この人工衛星は全世界を有効範囲としている．複数の人工衛星から送られる電波を受信し，それぞれの衛星との距離から 3 次元の位置を同定することができる．このシステムを用いると，地上において誤差が蓄積することなく 3 次元の位置を同定できる．しかし，分解能が低いといった問題や，障害物のある場所では正確な位置を得ることができない問題がある．

2.2.2 INS

INS は，加速度や角加速度，速度など，慣性を利用したシステムである．加速度センサやジャイロを使って加速度や角加速度を測定し，これを 2 階積分することにより移動した距離を求めることができる．INS は自律航法型の位置同定システムで

あるため，屋内でも利用可能であるなど，GPS に比べ場所の制限が少ない．しかし，加速度や速度を位置に変換するときに積分を用いているため，誤差が蓄積してしまうといった欠点がある．また，加速度センサやジャイロにはドリフトの存在という問題もある．ドリフトとは，温度や静電容量などの影響を受けてセンサの出力値がずれてしまうことである．ドリフト誤差が大きいと，誤差が積分によって蓄積するため，正確な同定が困難になる．現在では，複数の慣性系センサを用いるのに加え，地磁気センサや気圧計などを併用することによって，ドリフトを最小限に押える技術が発達してきている．

2.2.3 ハイブリッド型システム

位置同定方法としては，現在 GPS が最も一般的である．しかし，GPS には電波が届かない場所での測定ができないという問題が存在する．そのため，GPS で測定できない場合には INS を用いて補完するようなハイブリッド型のシステムがでてきている．このシステムは，GPS の分解能が低いという問題と，INS の誤差が蓄積するという問題の双方に対して有効であるので，高い精度で位置を同定することが可能である．近年では，カーナビゲーションシステムに搭載されるなど，一般レベルでも実用化されている．

2.2.4 マップマッチング

マップマッチングは，カーナビゲーションにおいて，他の航法によって自身の位置を推測し，地図上の道路に合わせ込む方法である．定期的に進行角度や移動距離を補正することで，地図上の道をなぞるように同定を行う．マップマッチングでは，以前は方位や慣性センサによる相対データの蓄積のみで同定を行っていたため，道のパターンによっては実際の道を外れてしまう場合があるといった問題が存在した．しかし，現在では GPS の出現により，ハイブリッド型システムと合わせて使用することにより信頼度を増している．

2.3 位置同定の用途

位置同定の技術は，軍事分野や航空分野において，ミサイルの軌道修正や航空機の航行支援を目的に発展してきた．近年では，カーナビゲーションシステムや，PHS による迷子防止のように，一般レベルでの利用が進み，医療や障害者介護などを目的としても研究されている [4]．そして，位置同定を用いたサービス分野のさらなる発展が望まれている．将来的には，地形や混雑状況，移動状況に応じた道案内や，特定範囲内にいる人への情報配信などのサービスが実現することが期待される．

2.4 個人レベルで利用できる位置同定システム

近年，個人用途の位置同定システムとしても，GPS が主流になりつつある．しかし，GPS には電波が妨害される場所での利用ができない欠点があるため，それを補完するような別の同定方法が必要である．前述したように，近年では，GPS と INS を組み合わせたハイブリッド型の位置同定システムも提案されてきている．また，INS による位置同定の精度向上のため，個人用途の位置同定においても，磁気センサや気圧計なども同時に用いた方法の研究も行われている [5]．しかしこれらの装置は，個人が手に入れるにはまだ高価であり，規模が大きく携行には適さない．

個人レベルでの携帯利用を可能にするには，システムが安価で，小型，軽量，低消費電力であることが要求される．

2.5 研究の目的

本研究では，他のジャイロや加速度センサに比べ，安価であり，小型，軽量，低消費電力という点で優位性を持つ加速度センサ ADXL202 を採用する．この加速度

センサを使って 1 次元方向の移動測定を行い，条件ごとの精度を出し，位置同定装置として実用に供するために必要な条件を提示する．そして，小型，低消費電力の位置同定システム実現の指標を示すことを目的として，この加速度センサのみによる位置同定の有効性について検証を行う．

第 3 章

加速度センサと実験環境

この章では，本研究で用いる加速度センサ ADXL202[1] について述べ，その後，実験環境について述べる．

3.1 加速度センサ

ADXL202 は小型，低価格，低消費電力の 2 軸の加速度センサである [図 3.1]．このセンサでは，$\pm 2g$(g は重力加速度) の範囲で移動時にかかるような動的加速度，重力などの静的加速度が共に計測可能である．

3.1.1 加速度センサの出力の流れ

計測を行うと，検出軸の加速度のアナログ信号は，デューティサイクル変調器によってディジタル信号に変換される．このとき，加速度に比例した値がデューティサイクル (周期に対するパルス幅の比率) に現われる．そして，このデューティサイクルをマイクロコントローラによってデコードすることでセンサの出力を得る．重力加速度に対するデューティサイクルは 12.5% であるので，ゼロ点 (ゼロ g を示す値) がわかれば，デューティサイクルから加速度を得ることが可能である．

3.1.2 加速度センサの分解能と出力周期

内部抵抗との関係

出力の周期である，デューティサイクルの周期はセンサの内部抵抗によって調整が可能である．周期を短く設定すれば，単位時間でより多くの回数の測定ができ，周期を長く設定すれば，分解能を向上させることができる．この場合，分解能と出力回数はトレードオフの関係にある．

マイクロコントローラのクロックとの関係

デコードするマイクロコントローラのクロックが速ければそれだけ細かくデューティサイクルを調べることができる．そのため，分解能を上げることができ，同じ分解能に対する測定周期を短くすることができる．マイクロコントローラのクロックとプログラムによる分解能は，デューティサイクルを決定する目安となる．

マイクロコントローラの制御プログラムとの関係

本研究で使用する加速度センサはマイクロコントローラのプログラムを使ってデューティサイクルをデコードしている．このときの，パルス確認にどれだけのクロック数を要しているかによって分解能が変化する．クロック数が少なければそれだけ分解能を向上することができる．

3.2 実験環境

今回の計測では，加速度センサを力学台車に固定し，それをレール (移動可能範囲 : 1.2m) 上で走らせた時に発生する加速度を観測した [図 3.2] . 出力は RS232C 経由でノート PC に送信した。5 章で行った実験では、計測後にオフラインで速度や位置計算の処理を行った．また、6 章では、実時間で速度や位置計算の処理を行った．

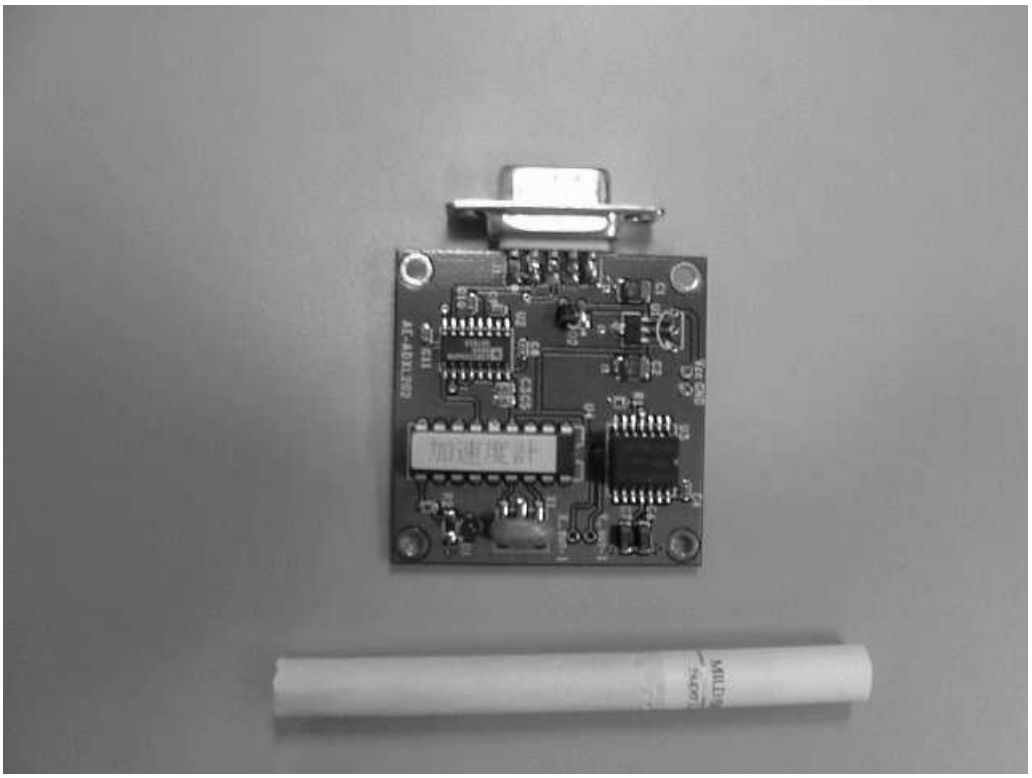

図 3.1: ADXL202

今回の加速度センサの出力は定期的に行っており，出力周期は約 5 ミリ秒である．内，ディーティサイクルの読み出しに約 2 ミリ秒，ノート PC への送信に約 3 ミリ秒かかっている．それに対し，加速度センサの分解能は $30\mathrm{cm/s^2}$ である．分解能は大きいが，測定回数が重要と考え，この設定とした．

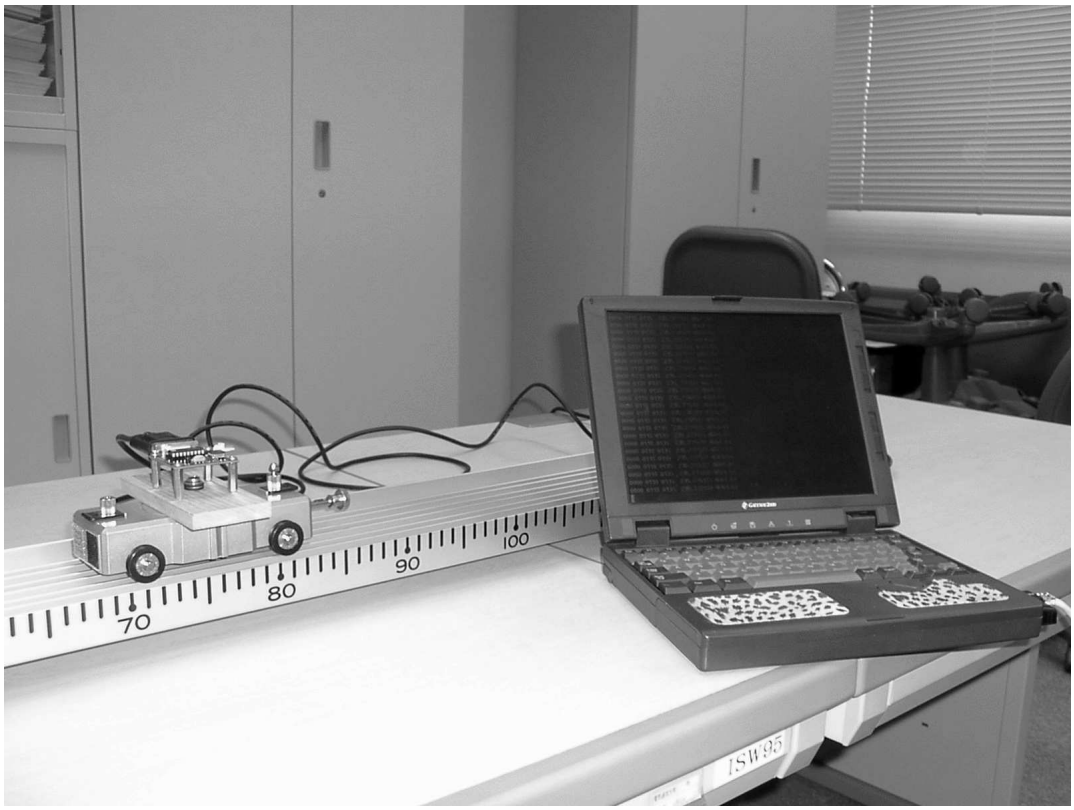

図 3.2: 実験環境

第 4 章

予備実験

この章では，センサの特性を調べるために行った予備実験について述べる．そして，計測時に適用すべき精度改善のために検討した対策案について述べる．

4.1 予備実験

加速度センサの特性を調べるため，予備実験として，静止状態で 10 時間の観測を行った．そして，加速度の値の標準偏差と変化量の標準偏差を求めた．

[表 4.1] は，センサの出力の標準偏差と変化量の標準偏差を求めたものである．出力の変化量の標準偏差が出力の標準偏差よりも大きいことがわかる．これは，ゼロ点の移動範囲よりも，雑音や分解能による出力のばらつきが大きいことを示している．

表 4.1: 10 時間静止した場合の標準偏差と変化量の標準偏差

	標準偏差	変化量の標準偏差
出力 (デューティ比)(%)	0.17	0.22
出力 (cm/s^2)	13.50	17.66

次に，1 秒ごと，10 秒ごと，1 分ごとに平均を出し，その値の標準偏差と変化量の標準偏差を求めた．その結果を [表 4.2] に示す．範囲内の平均値は，その時点でのゼロ点と考えることができる．そのため，範囲ごとの平均値の遷移は，ゼロ点の遷移として考えられる．[表 4.2] からは，ゼロ点は大局的に見て移動はするものの，その移動はゆっくりであることがわかる．また 1 秒間隔では，雑音の影響のためか平均値の変化が大きいことがわかる．

表 4.2: 10 時間静止時の出力から範囲ごとの平均値を出したときの，標準偏差と変化量の標準偏差

平均値を出す範囲	標準偏差 $(\mathrm{cm/s^2})$	変化量の標準偏差 $(\mathrm{cm/s^2})$
1 秒	3.4	2.8
10 秒	2.8	1.1
1 分	2.7	0.6

1 分ごとの平均値の推移 [図 4.1] をみると，計測開始より 1 時間までは大きく変化しており，1 時間経過以降は変化は小さくなった．これは温度が安定し，温度変化による観測値への影響が少なくなったため偏差が少なくなったのだと考えられる．よって，以後の実践的な計測はセンサを起動させ 1 時間経過してから行うこととした．

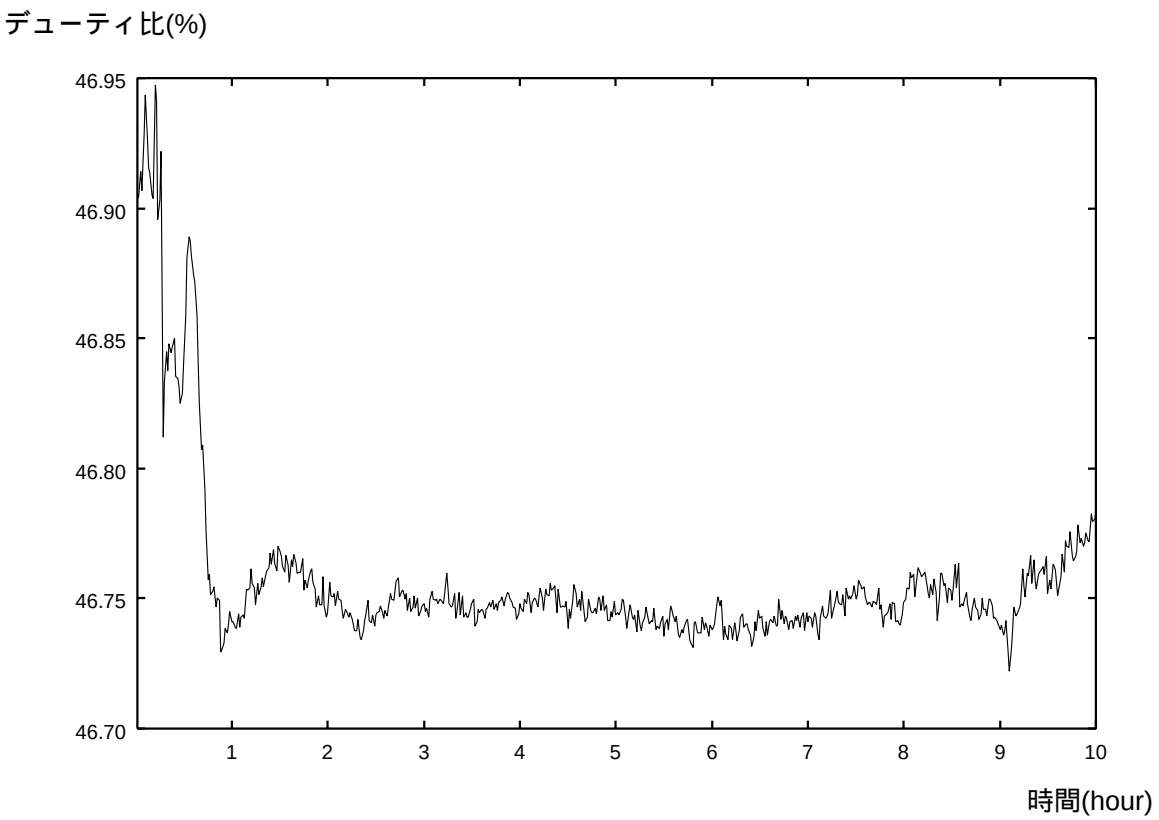

図 4.1: 1 分ごとの出力の平均の推移

4.2 精度改善のための対策案

予備実験で示されたように加速度センサの出力には雑音が入り，分散が大きくなることや，センサのゼロ点がずれるランダムバイアスドリフトが存在するといった問題がある．そのため，より正確な同定を行うためには，分散を減らすことや適宜補正を行う必要がある．本研究では以下の方法を用いる．

- カルマンフィルタの適用
- 停止時にゼロ点を較正

4.2.1 カルマンフィルタ

カルマンフィルタは，分散を小さくするように，確率論を用いて状態を予測，推定を行うようなフィルタである [6]．位置同定を行う場合においてカルマンフィルタはしばしば用いられる [3]．本研究の場合は雑音を軽減させることに利用できる．本研究では，カルマンフィルタを実装し，全ての実験で適用した．[図 4.2] は，加速度センサの出力にカルマンフィルタを適用した例である．

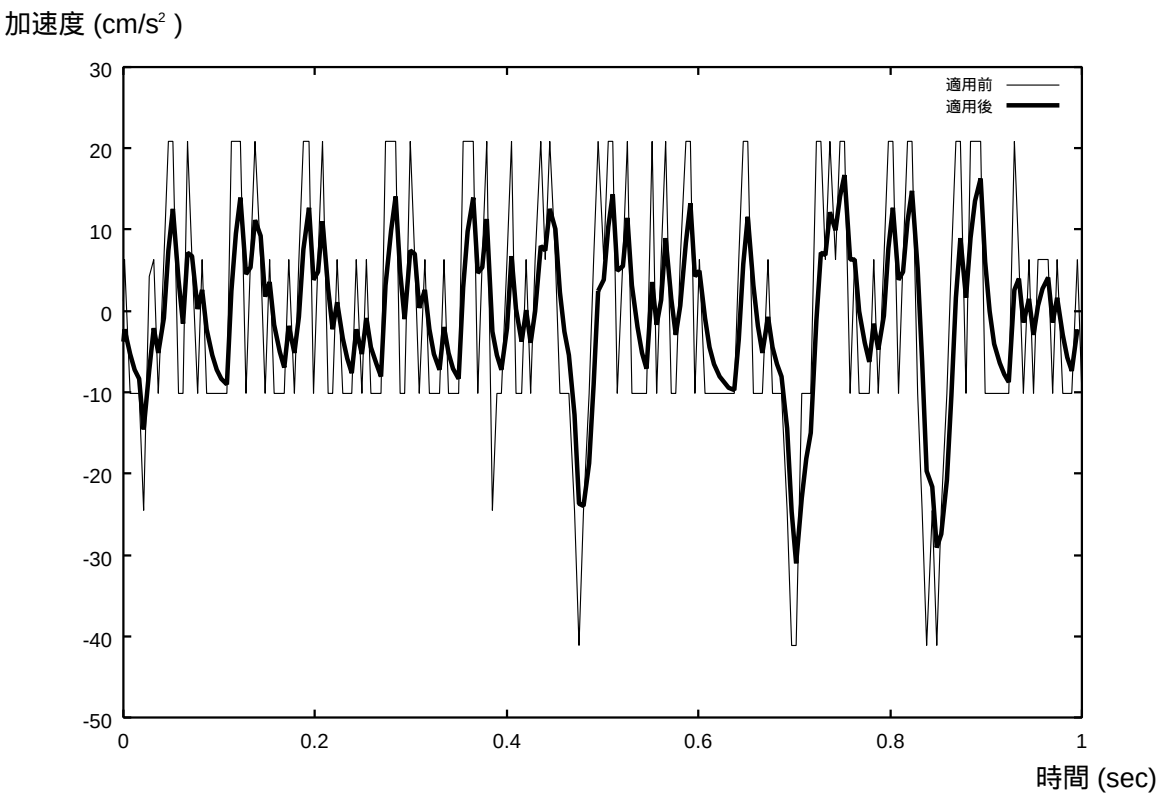

図 4.2: 出力へのカルマンフィルタの適用

以下にカルマンフィルタについて簡単に説明する．

基本システム

$$\boldsymbol{x}_{k+1} = \boldsymbol{F}_k\boldsymbol{x}_k + \boldsymbol{G}_k\boldsymbol{w}_k \quad (\text{状態方程式})$$

$$\boldsymbol{y}_k = \boldsymbol{s}_k + \boldsymbol{v}_k = \boldsymbol{H}_k\boldsymbol{x}_k + \boldsymbol{v}_k \quad (\text{観測方程式})$$

それぞれの意味を以下に示す．

$\boldsymbol{x}_k$: 状態ベクトル　　$\boldsymbol{y}_k$: 観測信号

$\boldsymbol{w}_k$: システム雑音　　$\boldsymbol{F}_k$: 状態遷移行列

$\boldsymbol{s}_k$: システムの出力　$\boldsymbol{G}_k$: 駆動行列

$\boldsymbol{v}_k$: 観測雑音　　$\boldsymbol{H}_k$: 観測行列

ここで，$k \geq 0$ であり，$\boldsymbol{x}_k$，$\boldsymbol{w}_k$，$\boldsymbol{s}_k$，$\boldsymbol{v}_k$，$\boldsymbol{y}_k$ は確率変数ベクトル，$\boldsymbol{F}_k$，$\boldsymbol{G}_k$，$\boldsymbol{H}_k$ は既知の確率行列とする．

通常フィルタリング問題において以下の仮定を行う．

- $\{\boldsymbol{x}_k\}$ と $\{\boldsymbol{w}_k\}$ は白色過程 (白色雑音)
- $\{\boldsymbol{x}_k\}$ と $\{\boldsymbol{w}_k\}$ はそれぞれ平均値ベクトル $\boldsymbol{0}$ の既知の共分散行列をもつガウス過程
- $\{\boldsymbol{x}_k\}$ と $\{\boldsymbol{w}_k\}$ は互いに独立な確率過程
- $\boldsymbol{x}_0$ は既知の平均値ベクトルと共分散行列をもつガウス確率変数ベクトル
- $\boldsymbol{x}_0$ は $\{\boldsymbol{x}_k\}$，$\{\boldsymbol{w}_k\}$ と独立

カルマンフィルタリング問題

基本システムにおいて，$\{\boldsymbol{F}_k\}$，$\{\boldsymbol{G}_k\}$ $\{\boldsymbol{H}_k\}$，$\boldsymbol{x}_0$，$\{\boldsymbol{\Sigma x}_0\}$，$\{\boldsymbol{\Sigma w}_k\}$ は事前に既知とする．このとき，観測量 $\boldsymbol{y}_0$，$\cdots\cdots$，$\boldsymbol{y}_k$ が与えられたときの $\boldsymbol{x}_k$ の最小分散推定量 $\hat{\boldsymbol{x}}_{k|k} = \mathrm{E}\{\boldsymbol{x}_k \mid \boldsymbol{y}_0,\cdots\cdots,\boldsymbol{y}_k\}$ や，$\hat{\boldsymbol{x}}_{k|k-1} = \mathrm{E}\{\boldsymbol{x}_k \mid \boldsymbol{y}_0,\cdots\cdots,\boldsymbol{y}_{k-1}\}$ を求めるのがカルマンフィルタリング問題である．最小分散推定量は平均自乗誤差を最小にする量である．$\boldsymbol{F}_k$，$\boldsymbol{G}_k$，$\boldsymbol{H}_k$ は，物理法則から導かれる場合や，あらかじめ実験で測定された信号の相関性などから導かれる場合がある．

4.2.2 停止時の較正

停止状態から移動を開始し，再び停止状態に戻った時，その間の速度差が 0 であることを利用してゼロ点の較正を行う．始点と終点の速度差が 0 であれば，始点から終点までの加速度の総和は 0 となる．そのため，その間の平均値をゼロ点にすることで速度を較正し，位置を補正した．それにより，位置誤差の蓄積を押えることができる．

第 5 章

実験と考察

この章では本研究で行った実験について述べる．今回の実験の目的は，加速度センサを使った位置同定を行うために，このセンサを検証し，位置同定に必要な条件を提示することである．そのため，以下のような条件を付けて，1 次元の加速度を計測した．

- 一定の加速度で計測
- ランダム移動での計測
- 定期的に停止させ計測
- 1 回の移動距離を制限して計測

そして，最後に実験結果の考察を行った．

5.1 一定の加速度での計測

加速度の大きさとセンサの感度との関係を調べるため，一定の加速度下における計測を行った．計測は，一定の加速度をかけるためにレールを傾け，台車を一定の距離滑らせることで行った．そして，センサの出力した加速度を 2 階積分して得た距離と実際の移動距離を比較することによって，センサがそのときの加速度を正しく観測しているかを調べた．この計測は，角度を $2.87°$，$1.72°$，$0.57°$ [1]において行った．

5.1.1 角度 $2.87°$ での計測

レールを角度 $\sin^{-1}0.05$(約 $2.87°$) に傾斜させて計測を行った時の結果を [図 5.1]，[図 5.2]，[図 5.3] に示す．移動距離は $120\mathrm{cm}$ とした．このとき，台車にかかる加速度は，計算から $0.05g \fallingdotseq 49\mathrm{cm/s^2}$ となる．

[図 5.1] は計測時に観測された加速度の遷移を時系列で示したものである．結果をみると理論上の予測値に近い値が出力されていることがわかる．図中 2.3 秒前後でプラス方向に大きな加速度がかかっているのは，壁に当たった衝撃によるものである．[図 5.2] は同計測時の速度を積分により求めた結果であり，等加速運動をしていることが現われている．図中のプラス方向への速度変化は壁に当たった衝撃によるものであるが，衝撃にかかる加速度は一瞬であり，センサの許容範囲に比べ大きいので，加速度センサは正しく感知していない．計算した移動距離は，[図 5.3] は壁に当たるまでの移動距離を 2 階積分によって求めた結果である．実際の距離である $120\mathrm{cm}$ に対して，誤差 $5\mathrm{cm}$ 程度に納まっている．$0.05g$ はこの加速度センサによって感知できているといえる．

[1] それぞれ $\sin^{-1}0.05$， $\sin^{-1}0.03$，$\sin^{-1}0.01$ に対応する

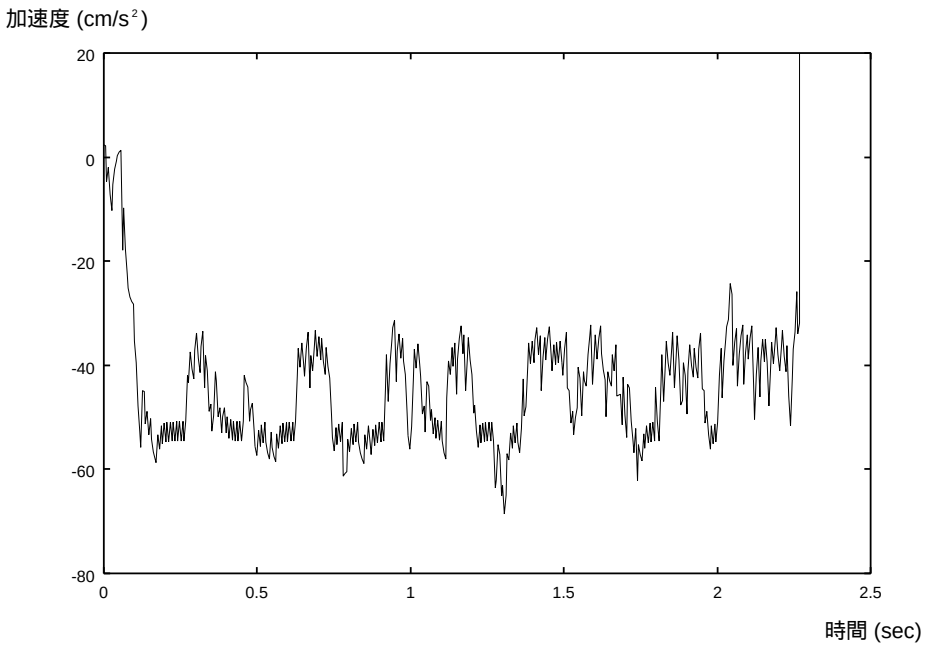

図 5.1: レールの傾き $\sin^{-1}0.05$ における加速度

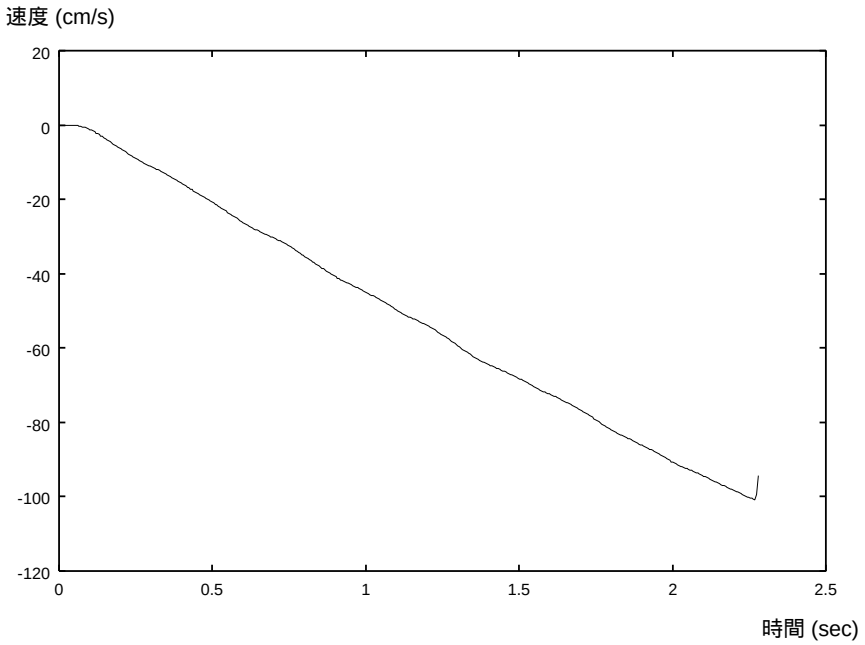

図 5.2: レールの傾き $\sin^{-1}0.05$ における速度

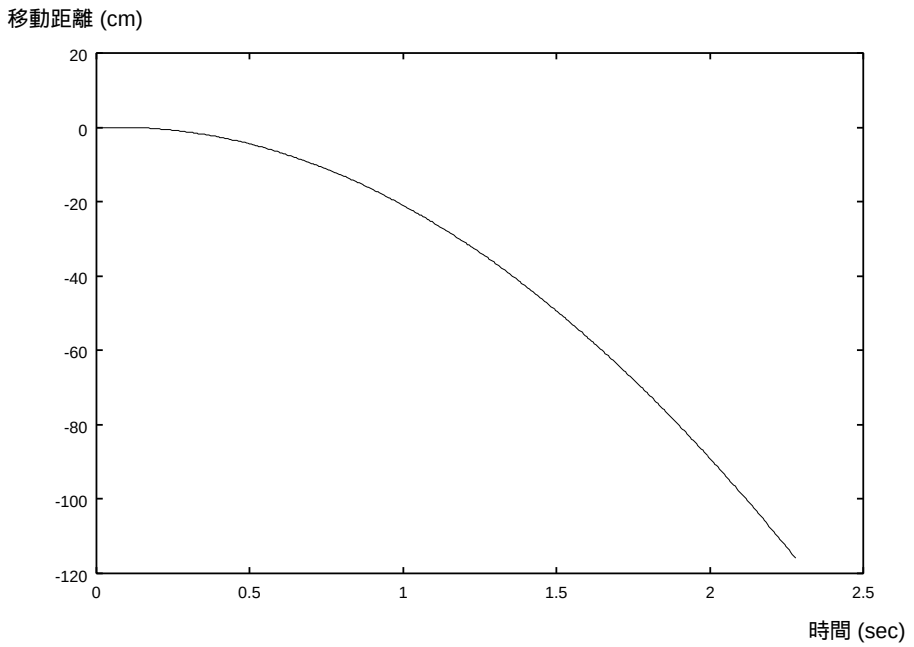

図 5.3: レールの傾き $\sin^{-1}0.05$ における移動距離

5.1.2 角度 1.72° での計測

センサの出力の分解能とほぼ同じである $0.03g$ の加速度がかかるように，レールを角度 $\sin^{-1}0.03$ (約 1.72°) 傾斜させて計測を行った．その結果を [図 5.4]，[図 5.6]，[図 5.6] に示す．加速度が小さくなり移動に時間がかかることが予想される．ドリフトの影響を小さくするため，今回の移動距離は $50\mathrm{cm}$ とした．

[図 5.4] は計測時に観測した加速度を示したものである．その結果から，雑音による加速度のゆらぎが出力に対して大きいことがわかる．[図 5.5] は積分して得た速度を示している．これをみると，ほぼ等加速度運動をしていることがわかる．[図 5.6] は 2 階積分によって得た移動距離である．結果をみると，誤差 $4\mathrm{cm}$ 程度に納まっている．

今回はセンサの出力の分解能とほぼ同じ大きさの加速度において計測を行った．雑音による加速度のゆらぎが出力に対して大きかったが，計算では，実際と同じように，等加速運動をしていることが現われており，移動距離の誤差も $4\mathrm{cm}$ 程度に

納まった．分解能とほぼ同じ加速度もセンサは感知できているといえる．

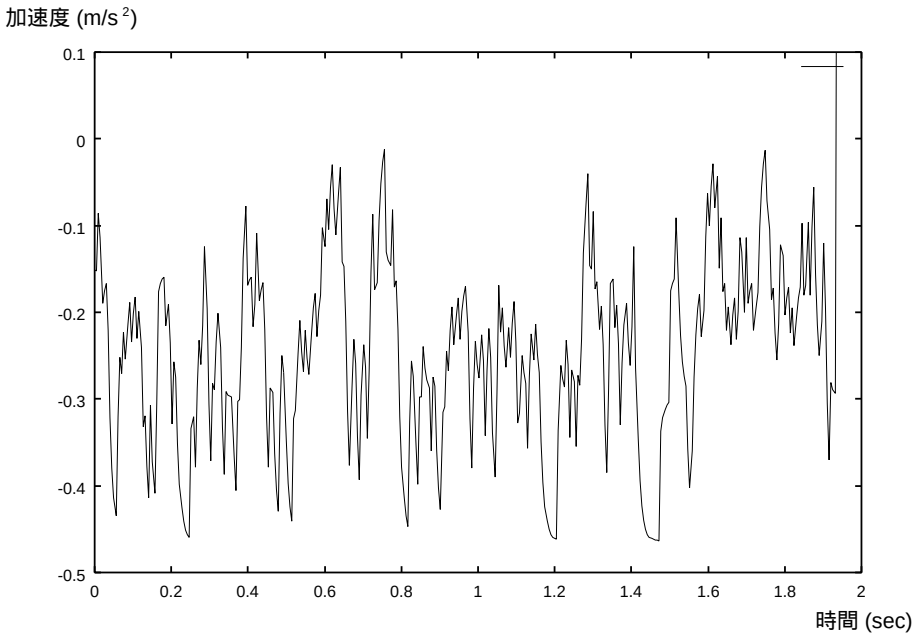

図 5.4: レールの傾き $\sin^{-1}0.03$ における加速度

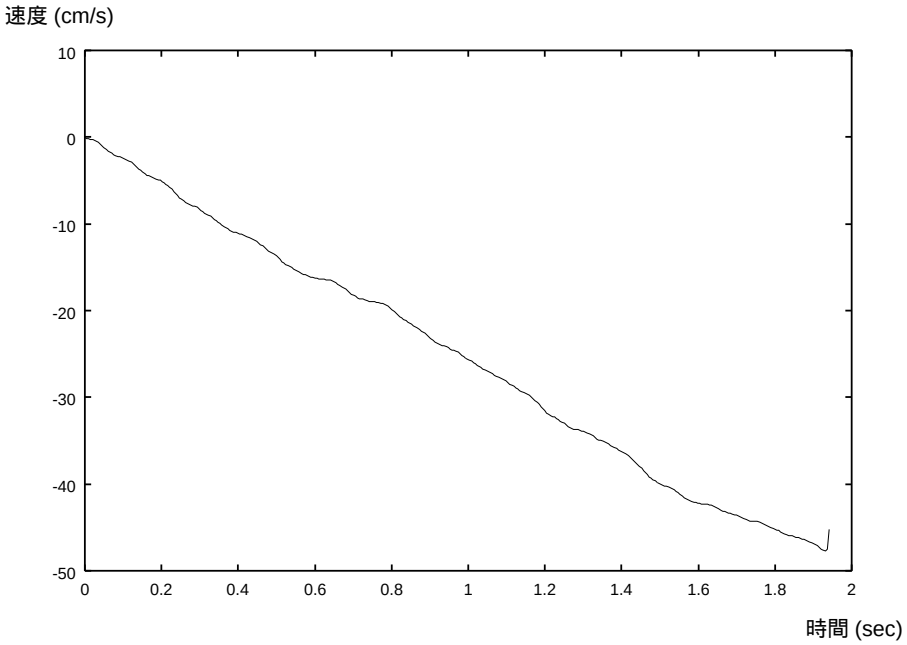

図 5.5: レールの傾き $\sin^{-1}0.03$ における速度

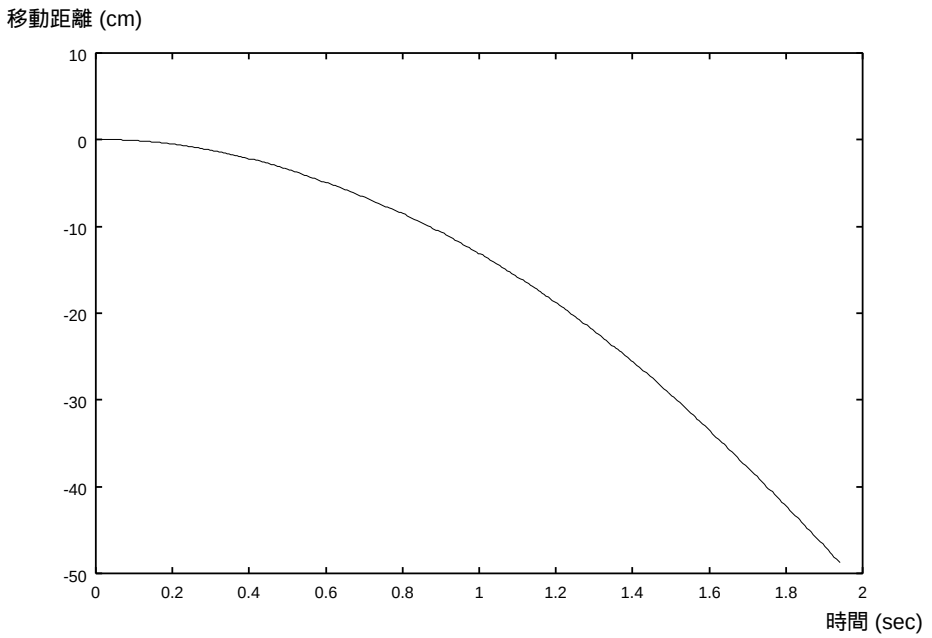

図 5.6: レールの傾き $\sin^{-1}0.03$ における移動距離

5.1.3 角度 $0.57°$ での計測

センサの出力の分解能よりも小さい加速度である $0.01g$ がかかるように，レールを角度 $\sin^{-1}0.01$ (約 $0.57°$) にして計測を行った．その結果を，[図 5.7]，[図 5.8]，[図 5.9] に示す．移動距離は $50\mathrm{cm}$ として行った．

[図 5.7] は計測時に観測した加速度を示している．これをみると，測定した加速度よりも雑音や分解能の粗さによるずれのほうが大きいことがわかる．[図 5.8] は積分して得た速度を示している．その結果から，等加速度運動しているとみることができる．[図 5.9] は 2 階積分して得た移動距離を示している．結果から，計算で得た移動距離は，実際の距離との誤差 $3\mathrm{cm}$ 程度に納まっている．

今回の実験では，センサの出力の分解能よりも小さな加速度において計測した．結果より，測定した加速度よりも雑音の幅の方が大きかったが，ほぼ一定の加速度がかかっていることが計算からも現われた．そして，2 階積分して得た移動距離は，実際の移動距離に対し，誤差 $3\mathrm{cm}$ 程度の結果が得られた．センサの出力の分解能

より小さな加速度であるがセンサは感知しているといえる．

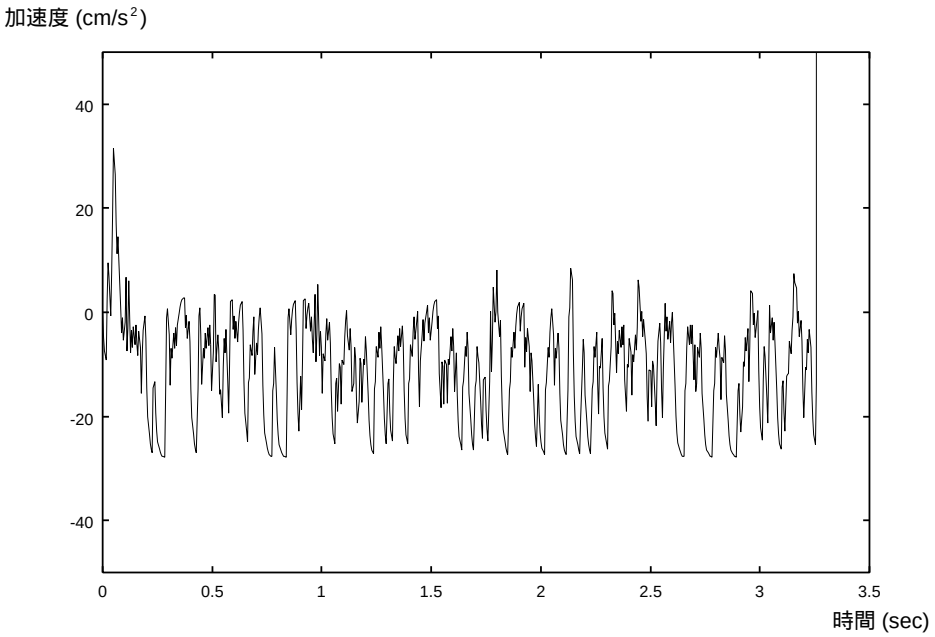

図 5.7: レールの傾き $\sin^{-1}0.01$ における加速度

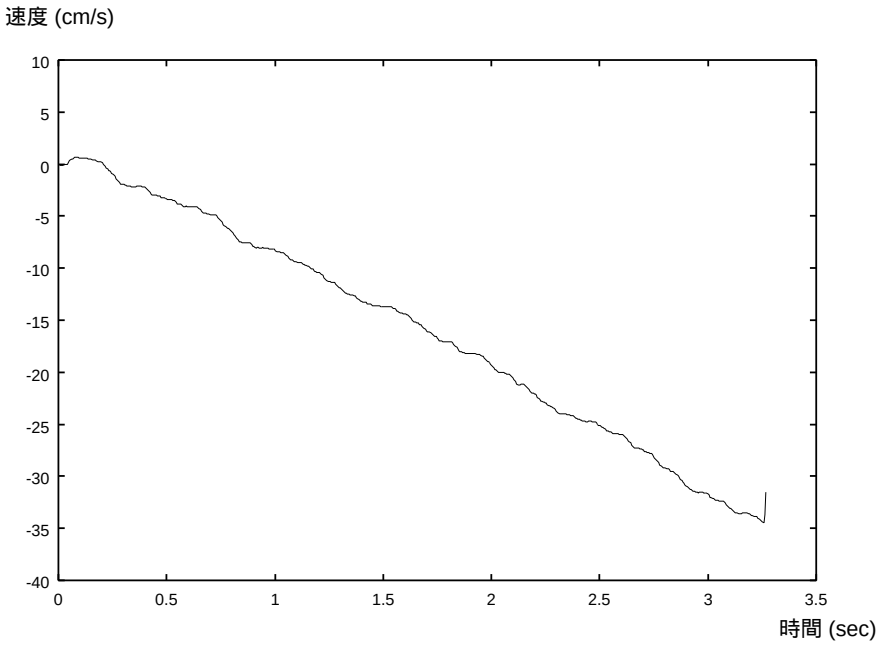

図 5.8: レールの傾き $\sin^{-1}0.01$ における速度

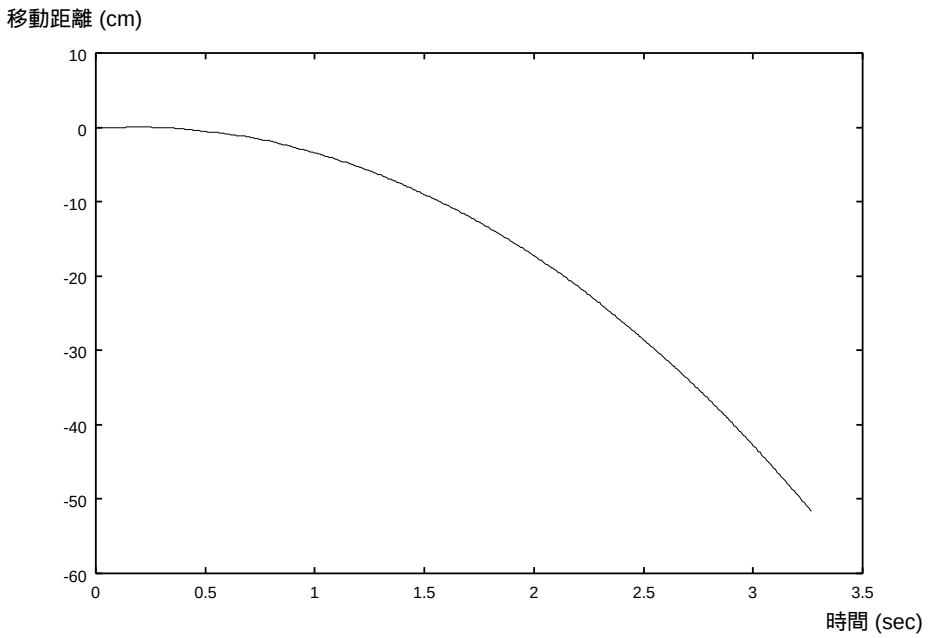

図 5.9: レールの傾き $\sin^{-1}0.01$ における移動距離

5.2 ランダム移動での計測

制約なしの場合のセンサの性能を調べるため，台車をレール上で 1 分間ランダムに滑べらせる計測を数回行った．その結果の 1 つを [図 5.10]，[図 5.11]，[図 5.12] に示す．この計測では，60 秒後に開始した位置に戻って計測を終了した．

[図 5.10] は，計測によって得た加速度を示している．[図 5.11] は，計測結果を積分して得た速度を示している．[図 5.12] は，2 階積分によって得た移動距離である．これをみると，60 秒間で 350cm 移動したと計算されている．[図 5.10] の結果からは，理由は分からないが，[図 5.11]，[図 5.12]，の結果，前半の 40 秒間において，外部から一定の加速度を受けたことがわかる．これは，計測途中でゼロ点がずれていったためであると考えられる．計測開始時のずれであるため，蓄積した誤差は最終的には 350cm にもなった．他の計測でも 2 m から 5 m 程のずれが生じた．

ランダム移動計測の結果から，ドリフトの補正を行う必要があり，このままでのセンサの利用は難しいことを示している．5.1 節の等加速度の実験ではドリフトの

影響が小さいのに対し，本実験では計測時間が長く，また，浮遊容量を利用して加速度を測定するセンサの機構による誤差の蓄積があるものと考えられる．

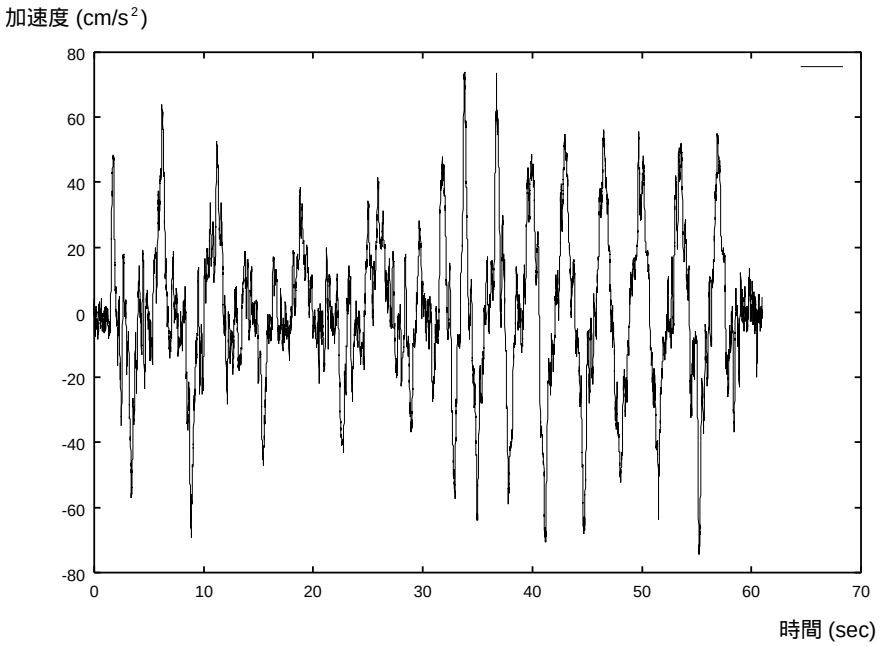

図 5.10: ランダム移動における加速度の計測結果

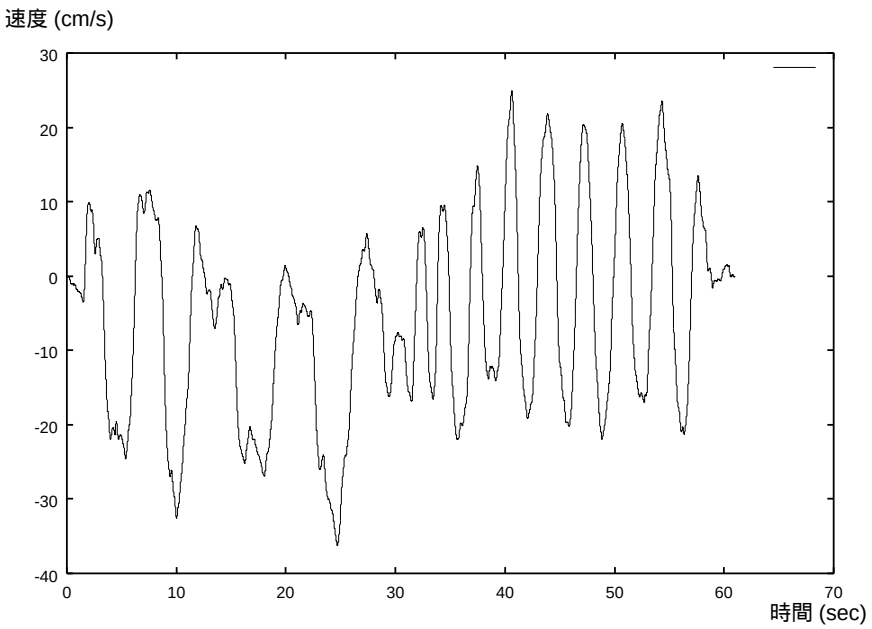

図 5.11: ランダム移動における速度の計測結果

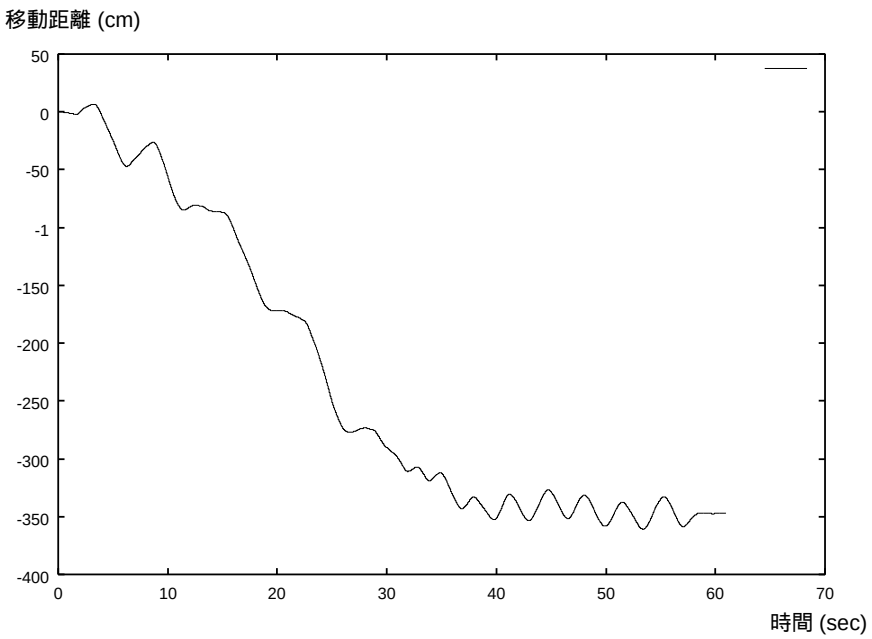

図 5.12: ランダム移動における移動距離の計測結果

5.3 定期的に停止させ計測

ドリフトの補正を行う手段として，停止時にゼロ点を較正する方法を採用して計測を行った．一定周期で補正を行うために，計測時は定期的に停止するという制約を設けた．停止する周期は 10 秒間隔，5 秒間隔の 2 通りとして計測した．10 秒間隔の結果の 1 つを [図 5.13] [図 5.14]，[図 5.15] に，5 秒間隔の結果の 1 つを [図 5.16] [図 5.17]，[図 5.18] にそれぞれ示す．

[図 5.13]，[図 5.16] は，それぞれ，10 秒間隔，5 秒間隔で停止させ計測したときに観測した加速度を示している．[図 5.14]，[図 5.17] は，それぞれ，10 秒間隔，5 秒間隔で停止させ計測したときの計算した速度を示している．[図 5.15]，[図 5.18] は，それぞれ，10 秒間隔，5 秒間隔で停止させ計測したときの計算した移動距離を示している．この結果より，移動距離の誤差は 1 分間で 20cm 以内に納まっていることがわかる．どちらの場合も，速度の累積誤差を押えることが有効であったといえる．10 秒間隔で停止させたときの移動距離の誤差は，最終的には 7cm 程度であったが，他の計測では誤差が 40cm になるものもあった．[図 5.14]，[図 5.17] をみると，停止しているはずの時点で速度変化が起こっている場合がある．これは，停止周期内でゼロ点が変化したことが現われたと考えられる．大きな誤差がでた場合もゼロ点に大きな変化があったためと思われる．

この結果から停止時に補正することは有効であることがわかった．しかし，現在の方法では，5 秒間隔の補正ではまだ不十分であり，制約を増やすか，新たな方法を用いる必要がある．

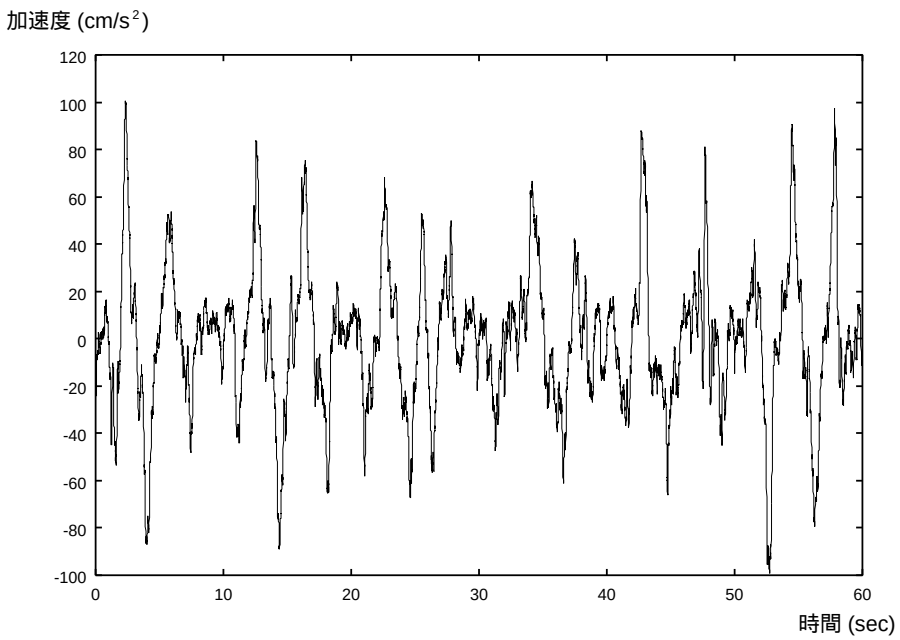

図 5.13: 10 秒間隔で停止させた時の加速度の計測結果

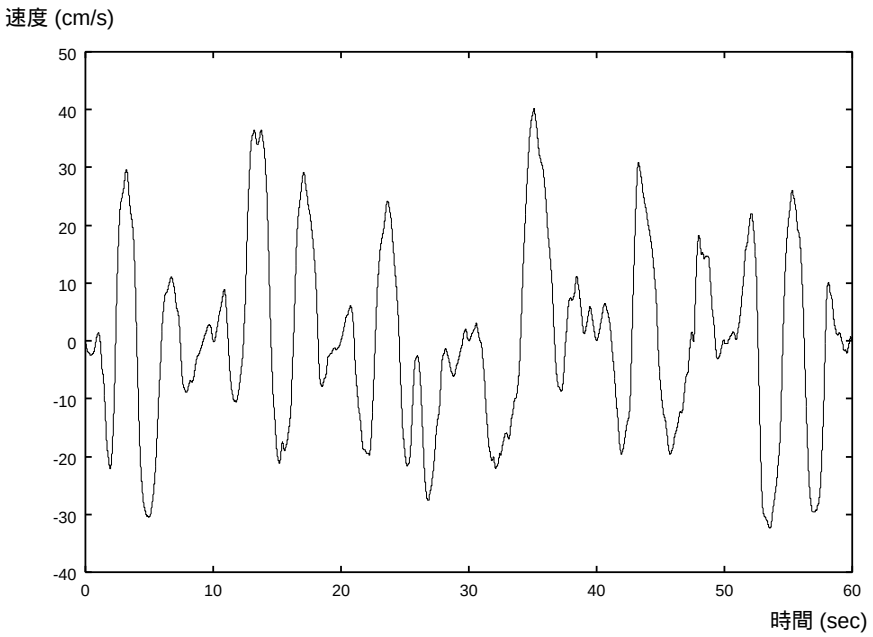

図 5.14: 10 秒間隔で停止させた時の速度の計測結果

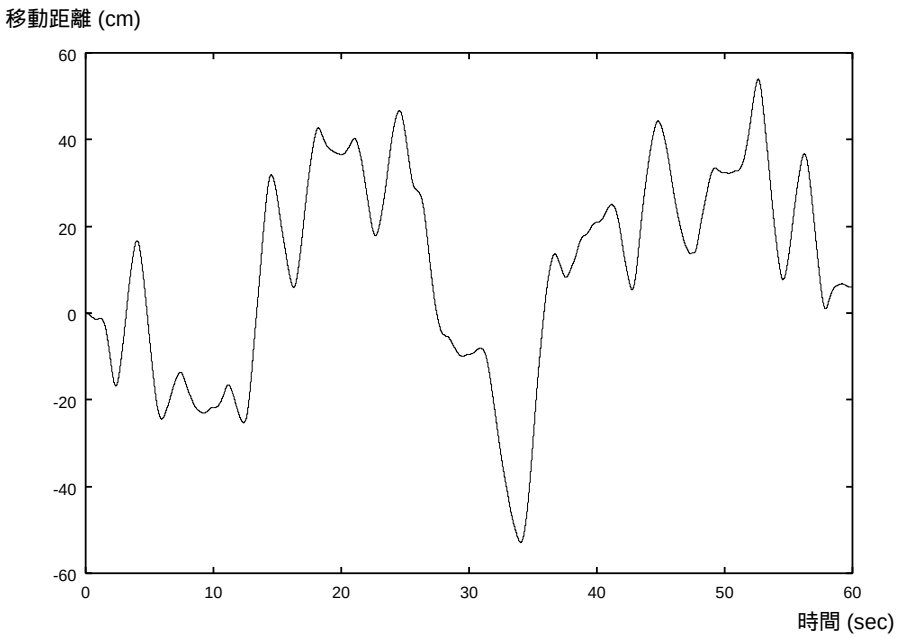

図 5.15: 10 秒間隔で停止させた時の移動距離の計測結果

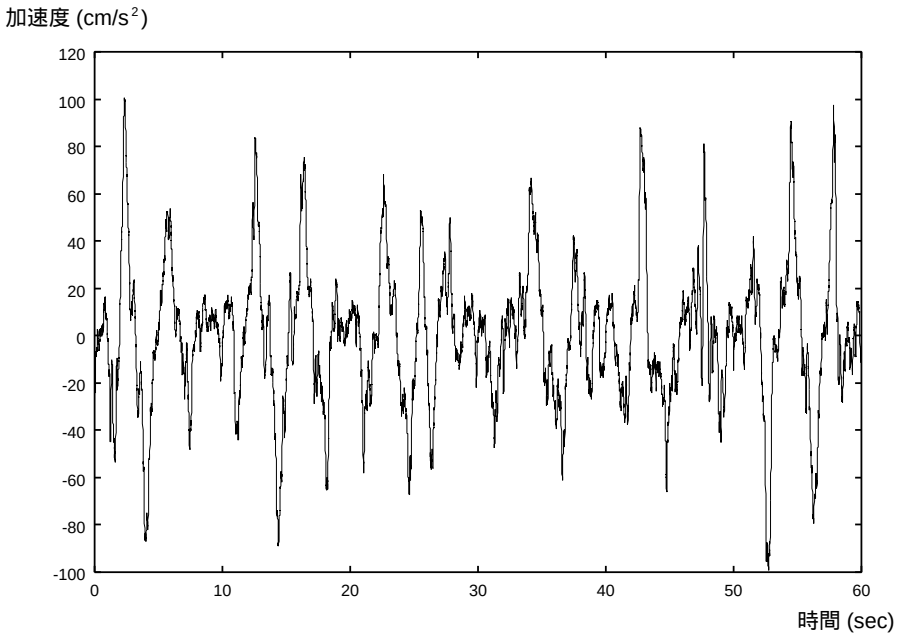

図 5.16: 5 秒間隔で停止させた時の加速度の計測結果

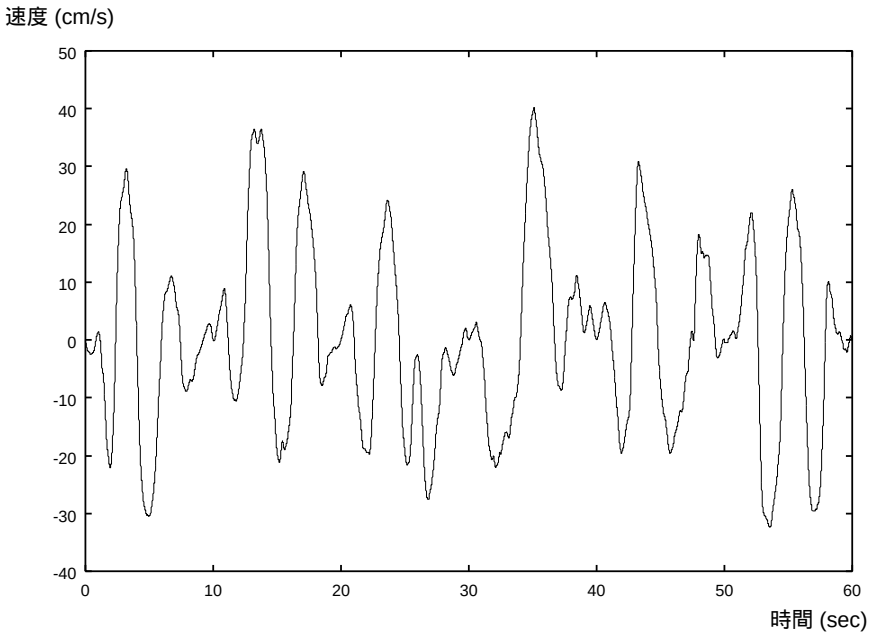

図 5.17: 5 秒間隔で停止させた時の速度の計測結果

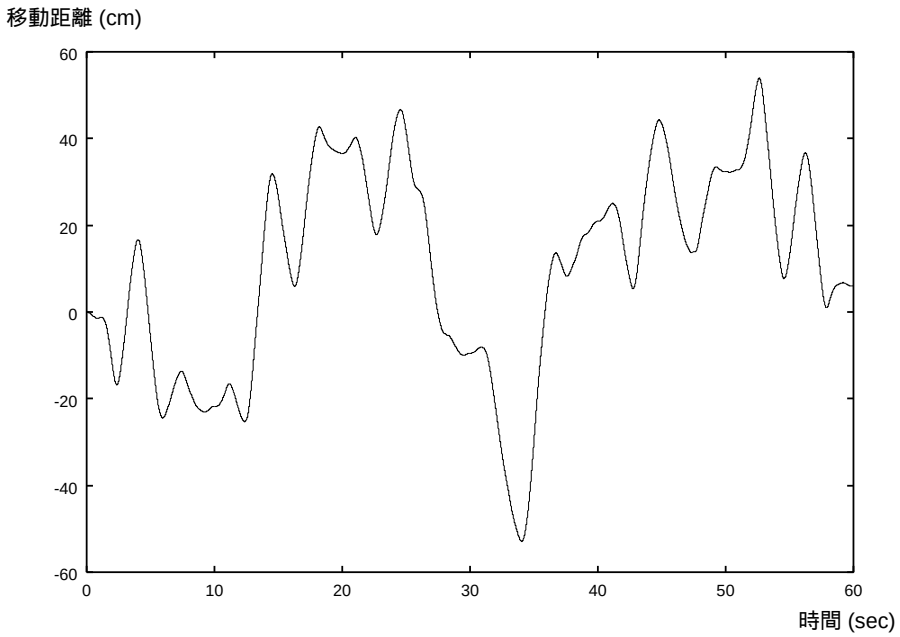

図 5.18: 5 秒間隔で停止させた時の移動距離の計測結果

5.4 1 回の移動距離を制限して計測

台車にかかる加速度のぶれを小さくし，1 回の移動で現われる誤差を明確にするため，移動中進行方向を変えず，一定距離直進させて停止するという制約を設けて測定した．また，移動時間は 5 秒以内と制限して計測を行った．そして，停止時の誤差を無くすため，停止した時間を記録しておき，計算時にそれをもとにゼロ点の較正を行った．その結果を [図 5.20]，[図 5.22]，[図 5.24] に示す．[図 5.20] は計測で観測した加速度を補正した結果を示している．[図 5.22] は補正した加速度を積分して得た速度を示しており，[図 5.24] は補正後の加速度を 2 階積分して得た移動距離である．[図 5.23] は補正前の加速度を 2 階積分して得た移動距離を示している．今回の計測では，補正前は [図 5.23] にあるように 4m 以上の誤差が出ていたが，[図 5.24] より補正後は，1 回の移動での誤差はすべて 3cm 以内であった．また，移動回数の 80%で誤差は 2cm 以内となった．[図 5.19] は計測時に観測した補正前の加速度を示し，[図 5.21] はその加速度を積分して得た速度である．[図 5.19] と [図 5.20]，[図 5.21] と [図 5.22] を比較すると，一度の移動ですぐに補正するので，短期間でバイアスドリフトの影響を消せたことが誤差の抑制につながったと考えられる．今回は計測終了後に補正を行ったが，停止による加速度及び，速度，位置の補正は実時間でも可能である．よって，このセンサの使用時には実時間処理においても，停止時の信号が送れる状態，または，停止の感知が可能な状態であれば，10cm の移動を，誤差の標準偏差が 2cm で計測が可能であることがわかった．この結果から，この条件ならば加速度センサは有効であることがわかった．

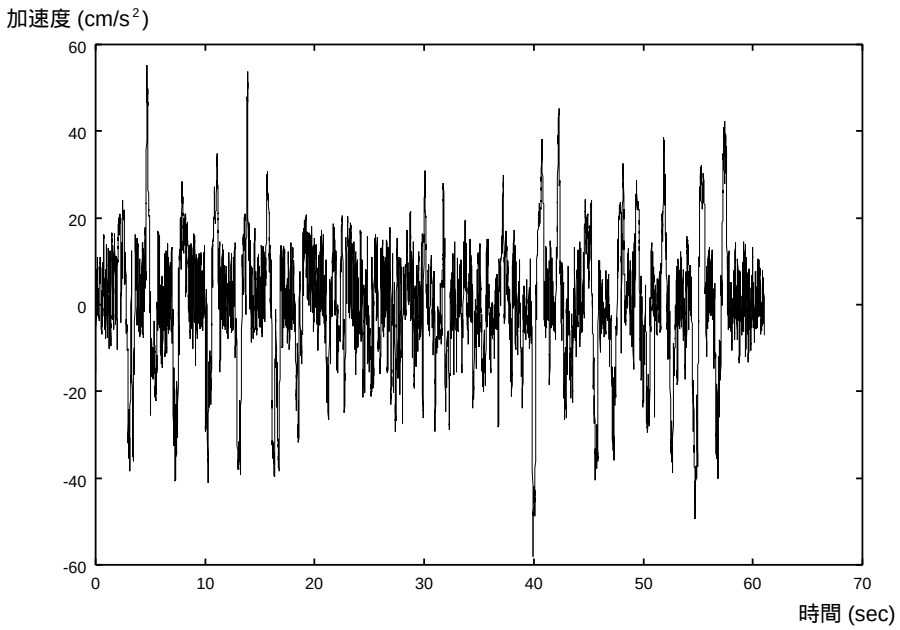

図 5.19: 移動距離を制限した時の加速度の計測結果: 補正前

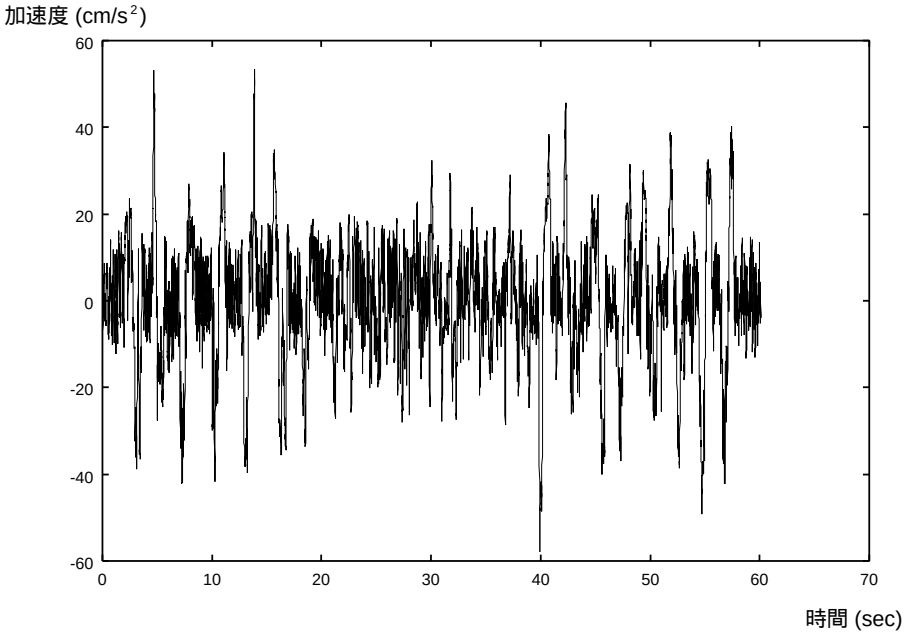

図 5.20: 移動距離を制限した時の加速度の計測結果: 補正後

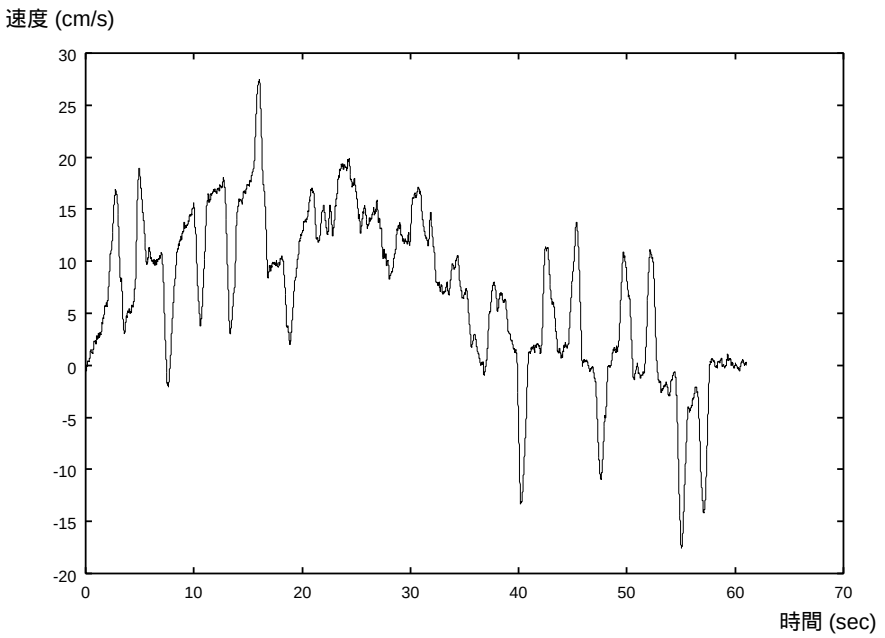

図 5.21: 移動距離を制限した時の速度の計測結果: 補正前

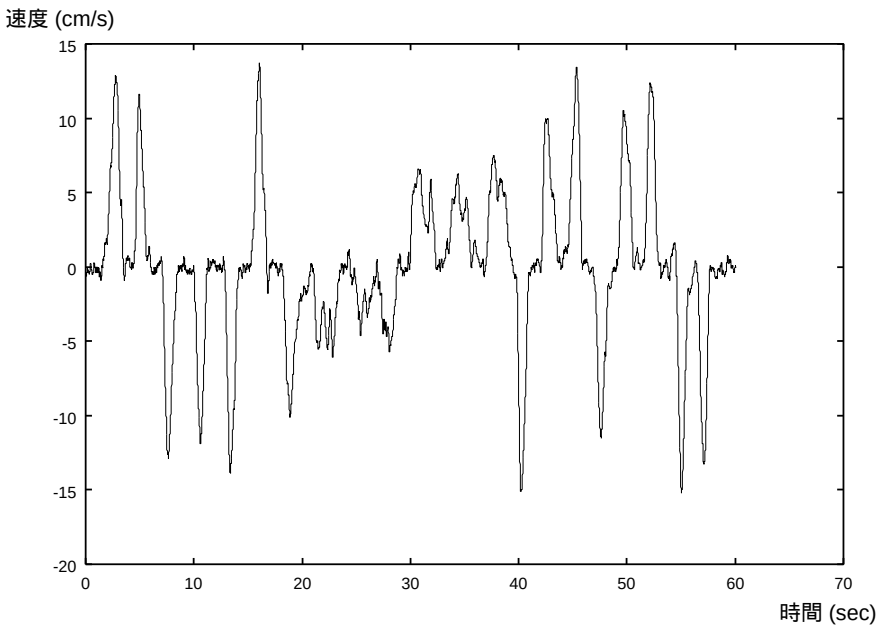

図 5.22: 移動距離を制限した時の速度の計測結果: 補正後

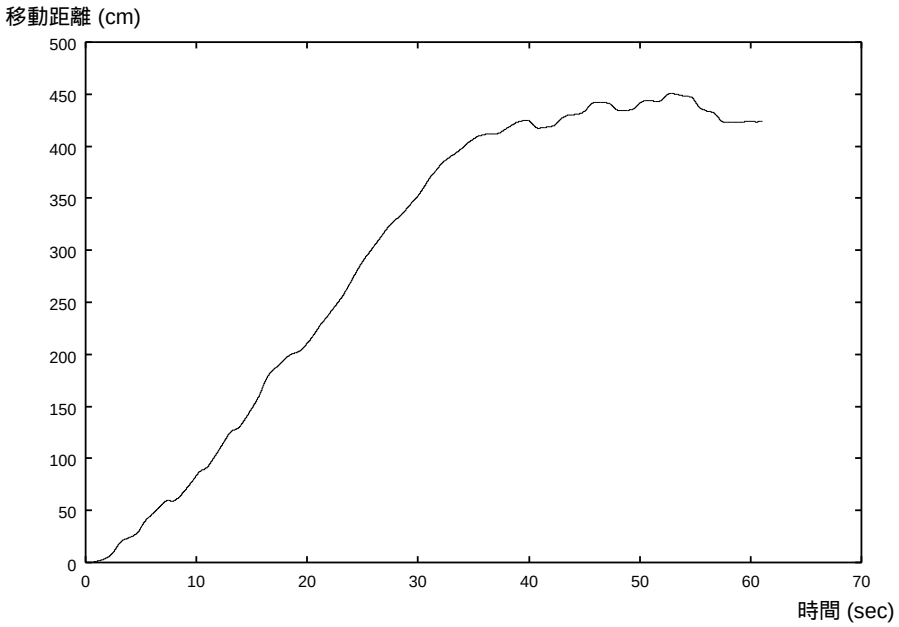

図 5.23: 移動距離を制限した時の移動距離の計測結果: 補正前

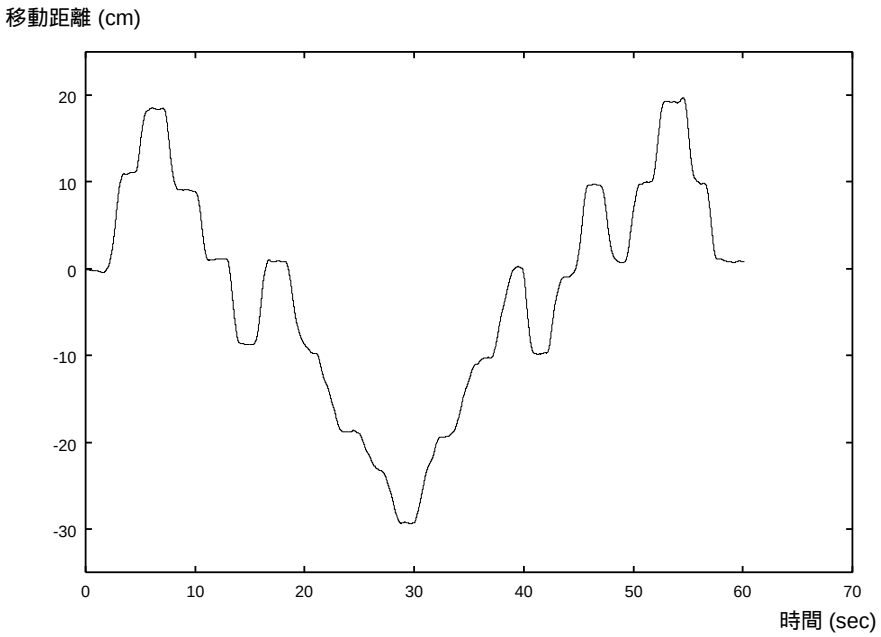

図 5.24: 移動距離を制限した時の移動距離の計測結果: 補正後

5.5 結果の考察

加速度センサ ADXL202 の位置同定における有効性を示すため，4 種類の計測を行った．以下に考察を示す．

予備実験により，加速度センサのバイアスドリフトが大きく，適宜補正を行わなければならないことがわかった．そこで，その対策として停止した状態を利用し，ドリフト誤差を修正することによって速度の誤差の蓄積を押える方法を試した．その結果，5 秒ごとに停止して，補正を行う方法では，位置の誤差を 1 分間で 20 cm 以下とすることができた．このとき，誤差は 5cm から 20cm の間でばらつきが出たが，その理由として，大きなゼロ点の移動が起こったことが考えられる．そして，停止による補正を行う際，範囲内でゼロ点が常に同じとして扱ったために，ゼロ点の移動の軌跡とのずれが現われたためと考えられる．安定して良い結果を得るためには，補正方法の工夫が必要であるといえる．しかし，停止した状態であるときは速度や位置を計算せず，移動したときのみを計測し，短い周期で停止して補正を行えれば，10 cm の移動において，誤差の標準偏差が 約 2cm で計測できるという結果が得られた．結果から，この加速度センサを使った位置同定を考えた場合，移動距離を固定し，移動時間を制限して計測し，停止状態を利用したドリフトの補正を行えば，一定距離の移動の測定は高い信頼性で行えると推測できる．

今回は事後的に補正を行ったが，実際に取扱う場合には，実時間処理を行うことと，人の手を介さずに補正を行うことを考える必要がある．停止状態でのドリフトの補正は，サイクル数と加速度の平均値さえ分かれば瞬時に速度や位置の補正値を計算することができるので，実時間処理は可能である．

また，実験では加速度センサの分解能は約 30 $\mathrm{cm/s^2}$ にして計測を行ったが，実際の観測ではそれよりも小さい約 9.8 $\mathrm{cm/s^2}$ の加速度まで感知することができた．これの理由としては，白色雑音と考えられる揺れの影響を受けて値が平均化されたためであることや，これを単位時間の測定回数の多さで補ったことが考えられる．

第 6 章

位置同定機構の構築

この章では加速度センサを用いた位置同定機構について述べる．5 章で行った実験の結果をもとに，実時間で 1 次元での位置を同定するシステムを構築した．このシステムによる同定結果の成否を示す．

はじめに，位置同定で用いた制約条件を提示する．次に，停止状態を人の手で指示した場合の位置同定結果の成否を示す．その後，停止状態を自律検知する手法について検討し，その手法を用いたときの位置同定結果の成否を提示する．

6.1 制約条件

5 章の実験結果より，停止状態を利用した補正を行うために，10cm 間隔で停止させ，移動時間に制限をかければ，誤差の標準偏差が約 2cm という精度で移動を計測できることがわかった．この章では，前章の結果を踏まえ，移動単位を 10cm ごとに限り，移動時間を 4 秒以内として，一次元の位置同定の実験を行った．

6.2 停止状態を人が指示する同定

この節では，位置同定を行う際，移動の開始，及び終了時にノート PC にキー入力することで停止状態を明示的に指示することで補正を行った．そして，この方法による同定結果を示す．

6.2.1 システムの手順

実時間での位置同定において，停止状態を人が明示的に指示する場合のシステムは，以下の手順を繰り返し行っている．

手順 **1** 加速度センサの出力値を取得する

手順 **2** 出力値をフィルタにかけ，分散を軽減する

手順 **3** 移動，停止を示すキー入力の確認し，移動ならば手順 4-1，停止ならば手順 4-2 へ進む

手順 **4-1** 移動時 出力値をもとに速度，位置を計算し，手順 1 へ戻る

手順 **4-2** 停止時 最後の停止から現在までの速度変化が 0 となるように，速度，位置を補正し手順 1 へ戻る

6.2.2 実験結果

実験は，10cm 単位で 10cm から 50cm までの移動を総計 450 回行い，その動きを計測した．そして，それによって得た移動距離の値から 10cm 単位とした場合の移動距離に変換し，実際の移動距離と比べることで同定の成否を判定した．同定の成功率と計測の誤差の標準偏差を，移動距離ごと，移動時間ごとについてまとめた結果を [表 6.1] ，[表 6.2] にそれぞれ示す．[表 6.1] に見られるように，誤差の標準偏差はどの場合でも 3cm 以内に収まっており，成功率は 40cm 以下で約 95%，50cm の場合でも 90%であった．移動時間に焦点を当てて結果を見ると，[表 6.2] に見られるように，移動時間が 3 秒以内である場合には成功率は 95%を越えた結果を得られた．しかし，4 秒近く移動させた場合は成功率は 70%以下に落ち，誤差の標準偏差も 3 秒以下の場合に比べ倍近くなった．

以上の結果より，同定の成功率は移動距離よりも移動時間に影響を受けることがわかった．移動距離ごとの結果で，距離が伸びて成功率が減ったのは，長い距離を

移動するために時間が長くなりやすいためと考えられる．また，3 秒以内の移動における同定の成功率を [表 6.3] に示した．[表 6.3] に見られるように，移動時間を 3 秒以内に限れば，50cm 以下の 10cm 単位の移動を約 97.8%の確率で位置同定できることがわかった．

表 6.1: 停止状態を指示した場合の移動距離ごとの成功率と，計測誤差の標準偏差

移動距離 (cm)	計測数	成功率 (%)	誤差の標準偏差 (cm)
10	79	96.2	2.0
20	95	95.8	2.0
30	90	96.7	2.3
40	92	94.6	2.6
50	94	90.2	2.8

表 6.2: 停止状態を指示した場合の移動時間ごとの成功率と，計測誤差の標準偏差

移動時間 (秒)	計測数	成功率 (%)	誤差の標準偏差 (cm)
~ 2.0	93	98.9	1.7
$2.0 \sim 2.5$	143	98.6	1.7
$2.5 \sim 3.0$	127	96.1	2.3
$3.0 \sim 3.5$	59	86.7	3.1
$3.5 \sim$	28	69.0	4.3

表 6.3: 停止状態を指示した場合の 3 秒以内の移動における成功率と，計測誤差の標準偏差

移動時間 (秒)	計測数	成功率 (%)	誤差の標準偏差 (cm)
~ 3.0	363	97.8	2.0

6.3 停止状態の自律検知による同定

この節では，停止状態を自律検知する手法について検討し，その手法を用いた位置同定の結果を示す．

はじめに，停止状態の検知を行う手法として，出力の分散値と平均値を利用した手法の検討を行った．まず，移動状態である場合と停止状態である場合を比較するため，停止と 10cm の移動を繰り返す実験を行った．そして，このときの移動状態の場合と停止状態の場合とで分散値と平均値に差がでるかを調べた．

次に，分散値と平均値を利用した手法を用いて位置同定の実験を行い，その成否を提示する．

6.3.1 停止状態の自律検知手法の検討

停止状態の検知を行うには，移動状態における出力値の特性と，停止状態における出力の特性の違いとを見極める必要がある．今回は，停止状態を判断する材料として出力の平均値と分散に注目し，それについて検証を行った．

図 [6.1] は，1 回につき 10cm 移動した際に発生した出力の分散値と，停止状態における出力の分散値を対比させたものである．この図より，移動状態になったときは，はっきりと分散値に現われることがわかる．図の 200 秒から 300 秒にかけて分散値が小さくなっているのは，移動に時間がかかっており，加速度が小さいためである．

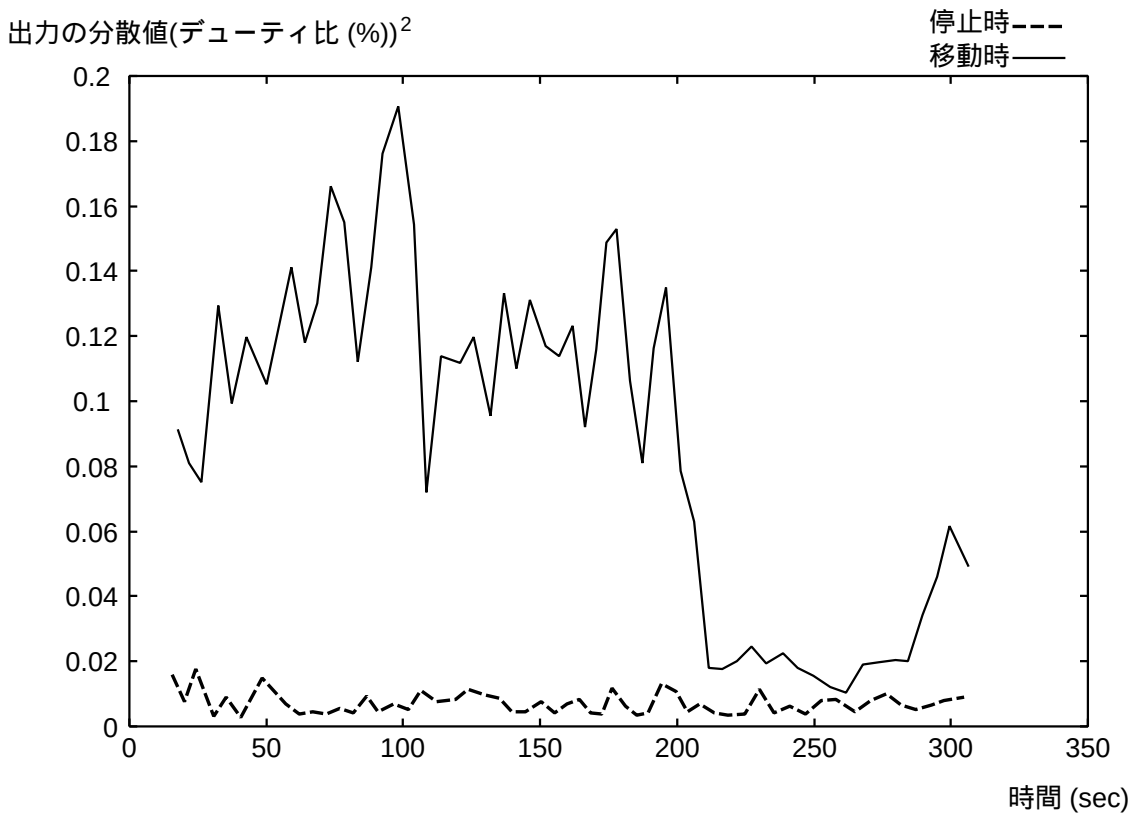

図 6.1: 停止状態と移動状態での分散値の対比

[図 6.1] において，分散値を求めている範囲は，移動時間である 1.5 から 4 秒の間である．しかし，実際の計測時に分散を求める場合には適切な範囲はわからない．そのため，一定間隔で分散を求め，間隔内で移動状態を含むものと含まないものとの比較する実験を行った．[図 6.2] は 0.5 秒間隔で分散を求め，間隔内で移動状態を含むものと含まないものとを対比させた結果を示した図である．図より，分散が 0.02 以上であれば移動状態にあると推測できることがわかる．停止状態でこの値を越える場合もあるが，その前後が停止状態となれば影響は無く，移動状態であっても長く連続して移動状態が続かなければ大きな影響はでることは少ないと考えられる．一方で，移動状態であるものが停止状態と判定されると，大きな誤差が生まれるため，閾値とする値は大きめにする方が望ましい．

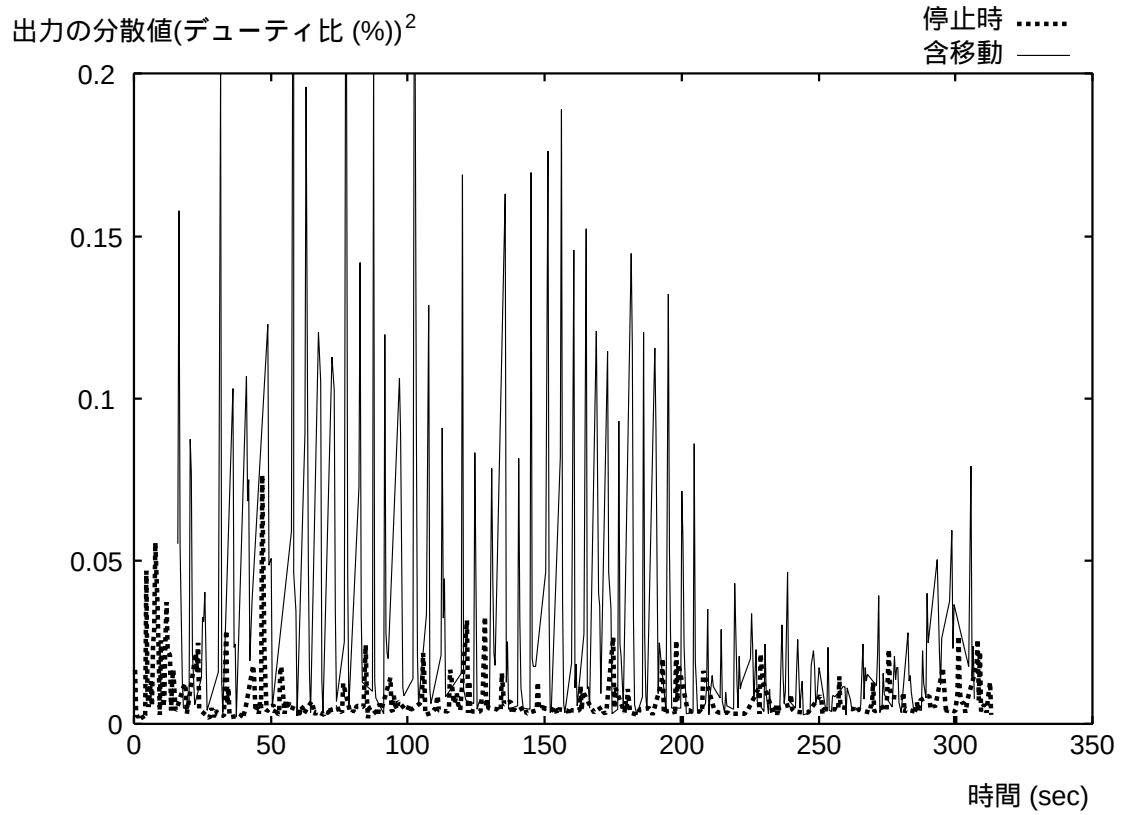

図 6.2: 0.5 秒間隔の分散，移動状態を含むものと含まないものとの対比

以上の実験結果より，出力の分散によって，停止状態の検知ができると予測できる．ここで，分散を求める間隔は，以下の理由で小さくする必要がある．

- 停止状態を利用した補正が有効であるようにするため
- 停止状態と移動状態が両方とも含まれるような場合，特性が薄れてしまうので，そのロスを少なくするため
- ゼロ点のドリフトがあり，時間が長いと，分散が大きくなるため

実験では 0.5 秒という値を用いたが，これは，これ以上短い間隔 (例えば 0.2 秒など) を用いると逆に間隔が短すぎて停止状態と移動状態の区別がつきづらくなったためである．

次に移動状態と停止状態における平均値を調べた．ゼロ点が移動することを考慮して全体の平均ではなく，過去 5 秒間の平均値と 0.5 秒ごとの平均値の差を求め，その推移を移動状態を含むものと含まないものとで比較した．[図 6.3] はその対比を示したものである．図より，平均値の差異が 0.1 以上あれ移動状態であると考えることができる．

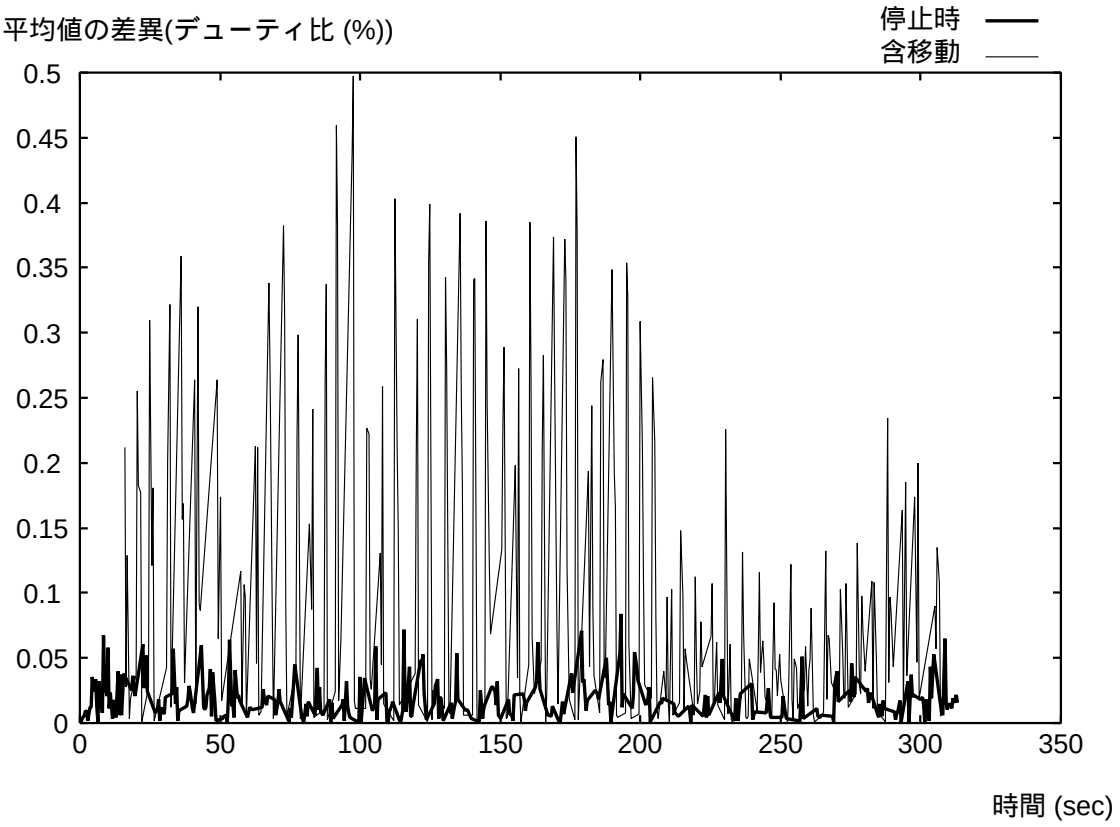

図 6.3: 0.5 秒間隔の平均値と過去 5 秒間の平均値との差，移動状態を含むものと含まないものとの対比

以上の 2 つの手法を使って停止状態を検出し，位置同定を試みた．0.5 秒ごとに，出力の分散と平均値とを求め，これらの値が

- 分散がデューティ比で 0.02 以上となる
- 範囲の平均値の過去 5 秒間の平均値との差がデューティ比で 0.1 以上となる

という 2 つの条件の一方を満たした場合を移動状態と判定した．そして，共に満たさなかった場合を仮停止状態と判定した．ここで，仮停止状態と判定したときが，等加速度運動状態である可能性も考えられる．そのため，移動時間が 4 秒以内であるという制約条件を利用し，1 秒以上仮停止状態を判定した場合，実際に停止状態にあると判断することとした．したがって，停止状態を検知させるには少なくとも 1 秒以上続ける必要があり，実際に停止してから移動結果がでるまで約 1 秒の遅延がある．

6.3.2 実験結果

実験は，前節と同じように移動時間を 4 秒以内に限り，10cm 単位で 10cm から 50cm までの移動を総計 450 回計測して行った．そして，0.5 秒ごとの出力の分散値と，平均値の過去 5 秒間の平均値との差異を利用して停止状態と移動状態の判定を行った．それによって得た移動距離の値を 10cm 単位の距離に直し，実際の移動距離と比べて位置同定の成否を判定した．この同定の成功率を，移動距離，移動時間それぞれについて求めた結果を [表 6.4]，[表 6.5] に示す．[表 6.4] に見られるように，移動距離ごとの成功率では，停止状態を指示していたときと比べ，成功率が全体的に 15 ポイント程度低くなった．10cm の移動の同定の成功率が低くなったのは，移動に 3 秒以上時間をかけると，かかる加速度が小さいため，分散が大きくならず，移動の検知が正確にできなかったものと考えられる．[表 6.5] に見られるように，2.5 秒を境に成功率が低下が大きくなった．2.5 秒以内の移動では 90%以上の成功率であったが，2.5 秒を越える移動では 20 ポイント以上の成功率の低下が見られた．

[表 6.6] は 2.5 秒以内の移動における成功率をまとめたものである．この場合では 90.1%という結果が得られた．

表 6.4: 停止状態を自律検知したときの移動距離ごとの成功率

移動距離 (cm)	計測数	成功率 (%)
10	83	79.5
20	97	83.5
30	88	84.1
40	90	78.9
50	92	75.0

表 6.5: 停止状態を自律検知したときの移動時間ごとの成功率

移動時間 (秒)	計測数	成功率 (%)
~ 2.0	95	91.6
$2.0 \sim 2.5$	143	90.2
$2.5 \sim 3.0$	129	76.0
$3.0 \sim 3.5$	56	66.1
$3.5 \sim$	27	37.0

6.4 考察

実時間で位置同定を行うシステムを構築し，それを用いた同定結果を示した．この節ではその考察を行う．

表 6.6: 停止状態を自律検知したときの 2.5 秒以内の移動における成功率

移動時間 (秒)	計測数	成功率 (%)
~ 2.5	238	90.8

停止状態を人が指示した場合の同定では，移動時間が 3 秒以内のとき 97%の確率で正確な結果を得ることができた．また，同定の成功率は移動距離の大きさよりも移動時間に影響を受け，ゼロ点の移動は 3 秒範囲ならば影響は小さいことがわかった．

停止状態の自律検知では，移動時間が 2.5 秒以内の場合に同定の成功率が 90.1%という結果が得られた．一方，移動時間が 2.5 秒以上となった場合では，人が停止状態を指示していたときと比べて成功率が 20 ポイント以上落ちた．同定に失敗した理由としては，

- 停止状態にもかかわらず移動状態と判定されたため，計測時間が長くなりゼロ点の移動の影響を受けた
- 移動状態にもかかわらず平均値の差異や分散値が小さく，停止状態と判定された

ということが挙げられる．同じ移動距離に対しては移動時間が長くなるほど同定の成功率が落ち，同じ移動時間に対しては移動距離が短くなるほど同定の成功率が落ちた．これより後者の理由がより大きいと考えられる．これは，センサの出力の分解能が大きいため停止状態でも分散が大きくなり，加わる加速度が小さい場合では分散値に移動と停止の違いが強く現われないためと考えられる．停止状態の自律検知の精度を上げるための方法としてセンサの分解能を良くすることが挙げられる．

第 7 章

2 次元への応用

本章では，加速度センサを用いた 2 次元の測定について述べる．

2 次元や 3 次元では直線的な移動だけでなく，回転を考えることが必要である．関連研究では加速度センサで 3 次元の位置を同定をする研究も行われている [2]．今回使用している加速度センサでも，複数同時に使うことによって回転を含めた 2 次元 3 軸，3 次元 6 軸の測定を行うことも理論的には可能である．

7.1 2 次元での測定方法

本研究で用いた ADXL202 のような 2 軸の加速度センサを使って，回転を含めた平面における位置同定を行う方法を示す．

7.1.1 定義

センサにかかる加速度を処理するとき，地面とセンサ 2 つのプラットホームを考える．センサで出力されるのはセンサ座標でみた加速度であるので，それを絶対座標に変換し，センサの原点がどう移動し，回転したかを逆算して位置を求める．

以下に定義を示す．

原点

2 つの加速度センサを x 軸が重なるように配置して固定し，その中間点をセンサの原点とする．そして，センサの原点の初期位置を絶対座標の原点とする．

変数

- センサの初期位置における x ,y 軸に重なるように，絶対座標の x ,y 軸を定義する．その方向にかかる加速度をそれぞれ $absolute\mathbf{x}$,$absolute\mathbf{y}$ とする．
- 原点から見て x の正の方向のセンサをセンサ 1，負の方向にあるセンサをセンサ 2 とし，それぞれのセンサの出力 (センサにかかる負荷) を (x_1, y_1) ,(x_2, y_2) とする．またセンサの原点とそれぞれのセンサとの間の距離を r とする．
- センサの原点から見たセンサの x 軸方向への負荷を X，y 軸方向への負荷を Y とする．
- センサ原点を中心とした角加速度，角速度，をそれぞれ A，ω，絶対座標の x 軸に対するセンサの x 軸の角度を θ とする．

7.1.2 位置の導出

センサの出力 $x1$,$y1$,$x2$,$y2$ は以下の式で与えられる．

$$
\begin{aligned}
x_1 &= X + r\omega^2 \\
y_1 &= Y - rA \\
x_2 &= X - r\omega^2 \\
y_2 &= Y + rA
\end{aligned}
$$

以上の式を整理すると，以下のようになる．

$$
\begin{aligned}
X &= \frac{x_1 + x_2}{2} \\
Y &= \frac{y_1 + y_2}{2} \\
\omega^2 &= \|\frac{x_1 - x_2}{2r}\| \\
A &= \frac{y_2 - y_1}{2r}
\end{aligned}
$$

ω を積分，または，A を 2 階積分して θ を得ると，以下のようにして絶対座標での加速度を導くことができる．

$$
\begin{aligned}
absolute\mathbf{x} &= -(X\cos\theta - Y\sin\theta) \\
absolute\mathbf{y} &= -(X\sin\theta + Y\cos\theta)
\end{aligned}
$$

これを 2 階積分することで位置の計算ができる．

7.2 ADXL202 を用いたときの見積もり

加速度センサを用いて回転を求める場合の角度の精度は，センサの分解能と 2 つのセンサの距離に左右される．本研究で用いた加速度センサの分解能は約 $30\ \mathrm{m/s^2}$ であり，センサ間の距離を $20\mathrm{cm}$ として設定すると，角加速度の分解能は $86^\circ/\mathrm{s}^2$ 程になる．しかし，本研究の実験では，約 $10\ \mathrm{m/s^2}$ の加速度の観測が可能であった．そのため，$29^\circ/\mathrm{s}^2$ の観測が可能であることが推測できる．1 次元の場合と同じように停止状態における補正を頻繁に行い，移動と回転角を一定の値にさせれば回転を含めた 2 次元 3 軸の同定が可能であると期待できる．

なお，複数の加速度センサを用いて観測を行う場合は，センサより送られてくるデータの同期をいかにしてとるかという問題がある．

第 8 章

おわりに

本研究では、個人が手軽に利用、携帯できる位置同定システムの実現のための指標となることを目的として、小型，軽量，低消費電力の加速度センサ ADXL202 の検証を行い、このセンサを使った 1 次元の位置同定システムを構築した。そしてこのシステムによる位置同定実験により、移動単位を 10cm ごとに限定すれば、停止状態を指示した場合で、3 秒以内の移動を 97.8%、停止状態を自律検知した場合で、2.5 秒以内の移動を 90.1%の確率で同定できることを示した。また、回転について考察し、この加速度センサを使った平面における位置同定の可能性を示すことができた。

今後の課題として，以下のことが挙げられる．

- 停止時の補正を行う際のゼロ点決定方法の改善
- 異なる分解能や周期での実験を行い、これらと精度との関係を明確にする
- 加速度センサによる回転の精度の確認

謝辞

本研究を遂行するにあたっては，いろいろな方々にお世話になりました．

まず，指導教官の多田好克先生には日頃から熱心なご指導，そしてご鞭撻を賜わりました．また，多忙中にもかかわらず論文の草稿を丁寧に読んで下さり，大変貴重なご助言をいただきました．また，安田絹子助手にも多大なご助言を頂きました．ここに厚く御礼申し上げます．そして，福田伸彦さん，佐藤喬さん，山之内暢彦さんには日頃から大変お世話になりました．心から感謝いたします．

参考文献

[1] アナログ · デバイセズ株式会社，http://www.analog.co.jp/productSelection/datasheets/ADXL202.pdf

[2] Sou-Chen Leek and Yu-Chao Huang: "Innovative Estimation Method with Measurement Likelihood for All-Accelerometer Type Inertial Navigation System," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 38, No. 1, pp. 339–346, January 2002.

[3] Dan Simon and Tien Li Chia: "KalmanFiltering with State Equality Constraints," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 38, No. 1, pp. 128–136, January 2002.

[4] Shinji Miyazaki: "Long-Term Unrestrained Measurement of Stride Length and Walking Velocity Utilizing a Piezoelectric Gyroscope," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Vol. 44, No. 8, pp. 753–759, August 1997.

[5] 小西勇介: "自律方式による歩行者用ポジショニングシステムの開発", 東京大学大学院工学系研究科修士論文, 2001.

[6] 中野道雄 著, 西山清 監修, "パソコンで解くカルマンフィルタ", 丸善 (株) 出版事業部, 1993. ISBN 4-621-04594-6