

# 倒立振り子型 PMV のハンドル操作及び走行軌跡からの 利用者の操縦特徴抽出

安藤 隆史<sup>1,a)</sup> 木谷 友哉<sup>1,b)</sup>

概要：新しい移動手段としてパーソナルモビリティ・ビークル (PMV) が期待されており、将来的に PMV プローブデータの需要が見込まれる。本研究は Segway® PT (Personal Transporter) に代表される倒立振り子型 PMV に取り付けられたセンサで得たデータから、利用者ごとの操縦に関する個人差の抽出を試みた。プローブデータとして収集したデータは、車両ハンドル部の慣性運動データと、位置情報算出のための測位衛星信号である。この 2 種類のデータを、静岡県浜松市にある植物園において実施された倒立振り子型 PMV に乗車して観光をするツアーで収集した。慣性運動データは 15 人の乗車動作、測位衛星信号は 52 人が走行した植物園観光コース 1 周 2.5km のデータが得られた。そのデータのうち、PMV ハンドル部の加速度・角速度データに対して動的時間伸縮法 (DTW) による時間領域での波形の類似度を求める手法、コヒーレンスによる周波数領域での波形の類似度を求める手法を適用し、被験者ごとにハンドル操作における差異抽出を行った。また、測位衛星信号から走行速度を算出し、被験者ごとの走行スピードについても差異が現れるかを統計処理によって分析を行った。結果として、今回の手法ではハンドル操作における被験者ごとの差は現れなかったが、移動速度については被験者による差が生まれることが分かった。

キーワード：倒立振り子型 PMV (パーソナルモビリティ・ビークル)、操縦者個人差、慣性運動、振幅二乗コヒーレンス、Dynamic Time Warping, Real-time kinematic 測位

## 1. はじめに

近年、情報通信技術や機械制御技術の発達と共に社会のスマート化が進んでいる。例えば、IoT (Internet of Things) 製品の普及により、外出先から自宅の様子を見たり、家庭用電化製品を動かしたりできるようになった。このような、安心・安全・快適・環境に優しいサービスが増えている。

スマート化はモビリティにも及ぶ。携帯通信網を利用した交通情報の提供や、車と道路、車と車が通信しあうことで交通事故を減らすシステムの開発などが進んでいる。また、移動手段自体も変化しようとしており、次世代型のモビリティとして PMV (Personal Mobility Vehicle) に期待が集まっている。理由として、車両の大きさが小型である事、操作が容易である事が挙げられる。これらの特徴から、空港や駅、観光地といった場所や、高齢者の生活の足として、1km~2km 程の距離における移動手段になり得る。しかしながら、現在の PMV の利用率は僅少で、挙動の分析に関する研究も少ない。

本研究は、PMV の中で認知率の高い Segway<sup>\*1</sup> に代表される“倒立振り子型”の車両に焦点を当てる。この車両は二つのタイヤが平行についた電動二輪車で、ステップに乗り体重を前後にかけることで前進・後退、操縦棒を手または足で左右に倒すことで車体が回転する仕組みとなっており、縦横無尽に走行することが出来る。また、1 台 5 万円程度の価格で入手しやすい車両であり、海外で警備員の移動手段として利用されているなど実績があるため、今後最も普及が見込まれると考え選択した。本研究では、Ninebot® mini<sup>\*2</sup> を用いてハンドル部の慣性運動と車両の位置情報を収集するデバイスによるデータ収集をし、動作の特徴点の抽出を行う。

## 2. PMV の走行特性把握を把握する関連研究

大野らは、倒立振り子型 PMV の加速・制動性能、操縦安定性の限界性能を検討するために、Segway による加速・制動・定常円旋回試験を行った [1]。実験結果として得られた慣性運動データから、車両の最大加速度の平均は  $1.5\text{m/s}^2$  で、制動時の最大減速度の平均が  $2.8\text{m/s}^2$  であるとした。

<sup>1</sup> 静岡大学 大学院総合科学技術研究科 情報学専攻  
Johoku, Naka-ward, Hamamatsu, Shizuoka 432-8011, Japan

a) t-ando@kitanilab.org

b) t-kitani@kitanilab.org

<sup>\*1</sup> Segway は米国 Segway 社の登録商標です。

<sup>\*2</sup> Ninebot は Ninebot Inc. の登録商標です。

また、操縦者のロール角について最大 24deg、横加速度最大が  $5.7\text{m/s}^2$  であったとし、横加速度が  $4.0\text{m/s}^2$  を超えると操縦者が恐怖を感じるとした。

塩見らは、Segway に乗ってスラローム、歩行者の追い越し、すれ違い、制動実験を行い、映像から障害物との距離について分析した [2]。その結果、被験者の乗車経験に回避距離は依らないとし、制動距離と空走距離について、 $4.2\text{m/s}$  の速度での走行時に停止まで  $6.1\text{m}$  かかる点が自転車に類似すると結論付けた。

竹下らと石坂らは、高精度な位置情報を算出する RTK-GPS<sup>\*3</sup>を用いて、2cm 精度の位置を算出できる技術により、Segway に乗り、人とすれ違う、追い越す実験を行った。 $5\text{km/h}$ 、 $10\text{km/h}$ 、 $15\text{km/h}$  での走行を、各速度ごとに竹下らは被験者 2 人に 3 回、石坂らは被験者 5 人は 5 回行い、回避する時の距離を走行速度と関連付けて分析した。その結果、回避開始動作の距離は、走行速度が  $5\text{km/h}$  の時と  $10\text{km/h}$  の時で比較すると、すれ違い時には歩行者の手前  $2.1\text{m}$  から  $3.7\text{m}$  へと平均値が広がったとし、回避して横並びになった時の距離は、速度が上がっても  $1.0\text{m}$ ~ $1.3\text{m}$  程と変化しなかったとした [3]。また、制動距離について考察した結果、 $5\text{km/h}$  での走行での制動時間は 1.2 秒、制動距離は  $1.3\text{m}$  で、 $15\text{km/h}$  での走行は、制動時間が 1.8 倍、制動距離が 4.3 倍となり、 $15\text{km/h}$  での走行では追い越しやすれ違い時に前方の人と衝突する危険性があるとした [4]。

### 3. PMV プローブデータ収集手法

本研究を行うにあたり、倒立振子型 PMV の挙動データが必要となる。しかしながら、PMV の利用が少ない事に加え、そういったプローブデータの収集環境が整備されていない。そこで、我々は独自にプローブデータ収集システムを開発した。また、静岡県浜松市の浜松地域活性化 ICT 技術研究組合 [5] と協力し、一般観光客が市内の植物園「はままつフラワーパーク<sup>\*4</sup>」を PMV に乗って観光するツアー [6] を実施し、独自開発したデータ収集システムを用いて PMV のハンドル部の慣性運動データと位置情報を収集した。

#### 3.1 プローブデータ収集システムの設計

倒立振子型 PMV は小型で非常に単純な構造な為、センサの設置スペースは非常に限られている。従って、プローブデータの収集にあたり使用する計測機器は、装着しても操縦動作に影響の出ない小型で軽量である事が望ましい。そこで筆者は、所属する研究チームの協力を得ながら小型の計測システムを設計した。

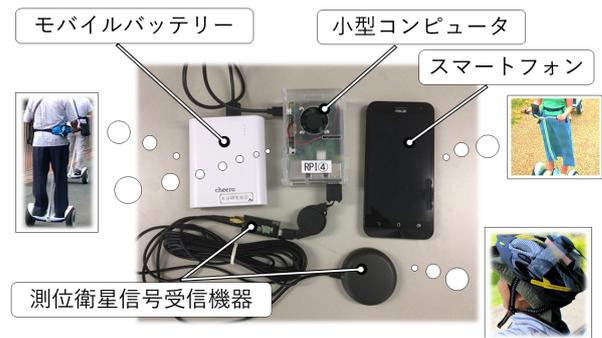


図 1 プローブデータ収集システム構成機器一覧

独自開発したシステムは、車両のハンドル部に取り付けることができるスマートフォン内蔵の 9 軸加速度センサを用いた慣性運動データ収集システムと、小型コンピュータと GNSS 信号受信アンテナを用いた RTK 測位のための測位衛星信号収集システムである。これらシステムの特徴は、機材が一般の人でも入手できる 2 万円程度の低価格で、小型の機器で構成できる点である。機器の一覧を図 1 に示す。

##### 3.1.1 慣性運動データ収集システム

将来的に倒立振子型車両が普及した時に、プローブデータの分析が行われる可能性は高い。その場合、車体に設置できる安価で小型なセンサから収集したデータとなると考えられる。よって、本実験においても高価な計測機器を用いた高品質なデータではなく、安価なセンサで収集したデータを分析に用いることにした。安価な計測機器として、マイクロプロセッサに 9 軸センサをつけて収集する手法もあるが、機器の大きさと電源の問題があり、その問題を解決したデバイスの開発には時間がかかる。そこで、9 軸センサに加えて、数時間以上ロギング可能なバッテリーも搭載するスマートフォンの利用を検討した。スマートフォンの慣性運動センサは既にあらゆる研究で利用されており、センシングデバイスとして利用して問題ないと言える。例えば、真部ら [7] や笠原ら [8] は、スマートフォンの動きを内蔵の加速度センサでセンシングすることで人物の識別を行い、Eren ら [9] や Seraj ら [10] は、スマートフォンの加速度・角速度から人の行動推定を行った実績がある。そこで、計測手段としてスマートフォンを選定した。

本研究のプローブデータ収集システムにスマートフォンを用いる利点は 2 つある。まず、機材が小型・軽量なため、操縦者の車体操作は何も装着していない状態に近いデータが得られる点、もう一つは大量のデータを集める際に、高精度な機材を用いるよりもデータの質は劣るが、その分計測システムも多く用意することができるため、収集データの数で質の低さを補完できる点である。

このシステムによって収集するデータを表 1 に、システムの構造を図 2 に示す。本システムのサンプリング周波数は  $100\text{Hz}$  で、1 秒周期でデータをストレージに保存す

<sup>\*3</sup> Global Positioning System (アメリカ) を利用した Real Time Kinematic 測位のこと。受信信号を基準局のデータを用いて補正することでセンチメートル級の精度にすることが可能。

<sup>\*4</sup> 静岡県浜松市西区館山寺町 195 番地

る。100Hz でサンプリングすることで、周波数領域での解析時のナイキスト周波数は 50Hz となり、50Hz 以下のスペクトルを正しく求めることができる。人間の震えである振戦でも 20Hz に満たないため [11], 100Hz のサンプリングレートで十分だと言える。なお、このシステムでも位置情報を収集しているが、もう一つの収集手段として使用する我々が設計した『測位衛星信号受信システム』で集めたデータの方がより詳細なデータ解析を行う事ができる。このシステムの詳細は次節に記す。

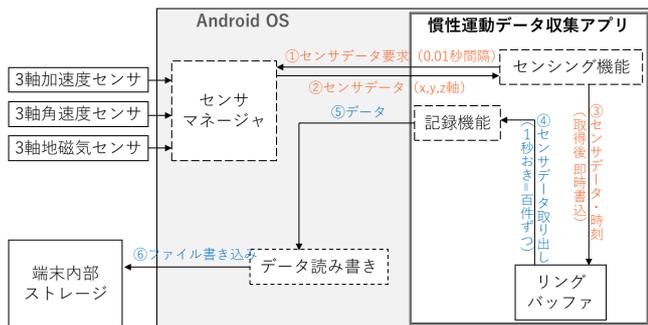


図 2 慣性運動データ収集システムの概要図

### 3.1.2 測位衛星信号収集システム

測位衛星を用いて得られるデータから個人差を分析するには、誤差の少ない情報が必要である。しかしながら、スマートフォンなどに搭載された測位システムでは、位置情報で 5m から 10m の誤差が出てしまうため測位結果から距離や速度を分析するのが難しいと考えた。

そこで多くの測位衛星信号を捕捉し、搬送波位相を用いて高精度に位置を算出できる、GNSS (Global Navigation Satellite System) 信号を用いた RTK (Realtime Kinematic) 測位技術を採用した [12]。この技術は一般的に測量に用いられており、位置情報の誤差は最も高い精度 (fix 解) が出て誤差数センチメートル、完全な精度でない場合 (float 解) で概ね 1m 以内の誤差である。また、測位衛星信号から算出できる情報は緯度・経度だけでなく、高さ (楕円体高) や、受信機の進行速度、進行方向なども得られる。これらは、受信可能な衛星数や衛星の分散度に影響されるため、一般的なスマートフォンが受信しているアメリカの測位衛星である GPS だけでなく、ヨーロッパ連合の Galileo やロシアの GLONASS (Global Navigation Satellite System)、中国の BeiDou (BeiDou Navigation Satellite System) といった複数の測位衛星システム (GNSS) 信号を同時に利用することで、安定した高精度な位置算出を行う。

市販されている RTK 測位の機材は大型で自由度が無いため、我々の研究グループで独自に機器構成とシステムを設計・開発した。構成は小型のコンピュータである Raspberry pi 2 を記録装置として、Tallysman 社製の GNSS アンテナ (TW-2710)、ublox 社製の受信機 (NEO-M8T) で、3万円

程度で準備可能である。Raspberry Pi 内部で、RTK 測位演算を行う RTKLIB を動かし、データを蓄積する機能を用いて測位衛星信号を SD カードに保存させた (図 3)。

GNSS 信号の取得頻度は 5Hz とした。これは、時速 10km/h で約 55cm 間隔でデータを収集することができる。Nibebot mini の横幅が 55cm であることから RTK 測位による位置の精度を考慮すると、この精度で十分に動きを計測・比較できると考えた。

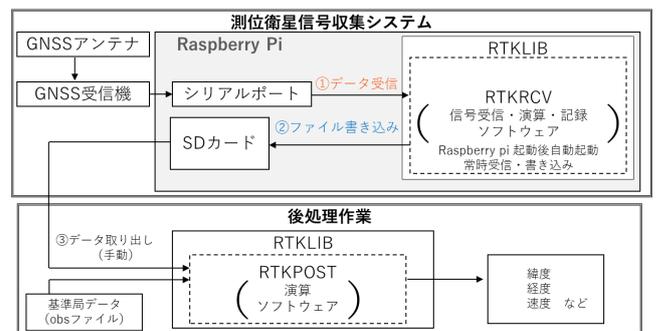


図 3 測位衛星システムの概要図

### 3.2 データの校正

本章では、3.1 節で設計したシステムから得たデータに対して、分析しやすいデータ形式に変換させる前処理について説明する。

#### 3.2.1 慣性運動データの校正 (キャリブレーション手法)

慣性運動データ取得時のスマートフォンの車体への設置角度は実験をするごとに異なる。そこで軸の回転を行い、取得データを統一した角度に補正する必要がある。本実験で用いたセンシングアプリは 9 軸慣性運動データを取得しており、それらデータからセンサ姿勢角を校正する手段を検討した。

9 軸慣性運動センサの中の 3 軸加速度センサは重力加速度を計測することが可能である。また、重力加速度は常に地面方向に一定の大きさでかかる。その性質を利用し、静止した状態や動的加速度が小さい場合の 3 軸加速度データを用いることで、センサの初期設置角を求める [13]。加速度から求めた、スマートフォンが地面と水平になった状態をロール角、ピッチ角の基準とし、その状態からのロール角  $\phi_A$ 、ピッチ角  $\theta_A$  の算出する計算を式 (1)、式 (2) 示す。ここで、 $A_y$ 、 $A_z$  を加速度 y 軸の値、z 軸の値とする (図 4)。

$$\phi_A = \tan^{-1} \frac{A_y}{A_z} \quad (1)$$

$$\theta_A = \frac{\tan^{-1} -A_x}{\sqrt{A_y^2 + A_z^2}} \quad (2)$$

算出したロール角とピッチ角から、傾斜誤差を補正した角速度と地磁気を得ることが出来る [13]。ここで、 $M_x$ 、

表 1 慣性運動データ収集システムの収集データ

データ名	取得形式	取得例
9 軸センサ	加速度 meter/s <sup>2</sup>	1.8291701, -0.5554548, 9.672575
	角速度 radian/s	0.057421334, 0.013439035, 0.02565634
	地磁気 μT	23.9375, 9.1875, -43.25
センサ値取得時刻	millisecond	1510812370884
GPS	NMEA 情報 (時刻, 緯度, 経度, 高度, 移動方位, 移動速度等)	GGA, 55256.52, 3445.842535, N, 13737.75719, E, 1, 8, 2.4, 0, M, 36.8, M,, *6E, RMC, 55256.52, A, 3445.842535, N, 13737.75719, E, 2.1, 298.9, 60817,, A*5E, GSA, A, 3, 1, 3, 11, 17, 22, 23, 28,,,,, 5.5, 2.5, 4.9*37, GSV, 3, 3, 10, 6, 33, 285,, 9, 20, 152, *7C,

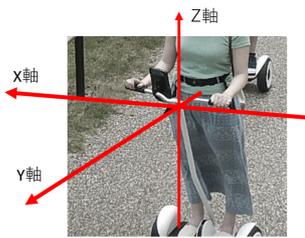


図 4 初期設置角補正後の軸の定義

$M_y$ ,  $M_z$  は地磁気センサの出力,  $M_{xi}$ ,  $M_{yi}$ ,  $M_{zi}$  は傾斜誤差を補正する式を式 (3) に示す.

$$\begin{bmatrix} M_{xi} \\ M_{yi} \\ M_{zi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \phi \sin \theta & \cos \phi \sin \theta \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \theta & \sin \phi \cos \theta & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} \quad (3)$$

この計算によってすべての慣性運動データを補正した.

### 3.2.2 走行速度の取得方法と精度

走行速度は, 測位衛星信号受信システムで蓄積したデータから算出する. 速度情報は測位衛星信号の搬送波を計測し, “ドップラ効果” による搬送波の周波数変化を用い, 既定の周波数と受信した時の信号の周波数のズレから速度を算出する. 測位衛星から得られる信号は, 大きく「搬送波」と「コード」の二つに分けられる. スマートフォンの位置測位などで使われる信号 (L1 信号) の搬送波は, アメリカの GPS とヨーロッパの Galileo だと 1575.42MHz, 中国の BeiDou では 1561.098MHz という厳密な周波数で発信されている. コードは, 測位衛星ごとに定められたデータフォーマットで, この中に測位衛星の移動速度や向き等が含まれている. これら衛星情報と衛星の受信したときの搬送波の周波数の変化量から, 衛星と受信機の相対速度が分かり, 最終的に受信機の移動速度の算出できる. ただし, 速度を求めるには計算に必要な未知数が 4 つあることから 4 機以上の衛星信号を受信している必要がある. なお, GPS のドップラ効果を用いた仕組みで速度算出した場合の速度の算出精度は, 空が開けている状態で 0.3m/秒であるとされている [14].

その演算機能が含まれるオープンソースソフトウェアである RTKLIB<sup>\*5</sup> の中の後処理演算ソフトウェアである RTKPOST を使い, 静岡大学構内にある RTK 測位用の基準局のデータ [15] と組み合わせて後処理による RTK 測位演算を行い, 位置情報や速度情報などを算出した. 最終的なデータ形式は, 緯度・経度・速度の情報が格納されるデータフォーマットである NMEA0183 形式<sup>\*6</sup> で出力し, RMC (recommended minimum data for gps) センテンスのみを利用した. RMC センテンスから取り出した速度情報の単位は knot (ノット) であるため, 車両の速度として日本で一般的に用いられる km/h (キロメートル毎時) に変換した.

### 3.3 倒立振り子型 PMV のプローブデータ収集

PMV が現在普及しておらず, 一般利用者の倒立振り子型 PMV の車体運動データを得ることは困難である. そこで我々は浜松地域活性化 ICT 技術研究組合の協力を得て, 一般観光客が倒立振り子型 PMV に乗りながら植物園内を観光する実験的なツアーの中でデータを収集した.

#### 3.3.1 観光社会実験によるプローブデータ収集

実験場所は, 浜松市内の植物園『はままつフラワーパーク』である. このツアーの参加者は, ウェブページ上 [6] で実験実施を予告し, 事前予約の形式で一般観光客を募った. ツアーの走行コースは全長 2km で, コースの高低差は最低海拔約 5m ~ 最高約 25m (地理院地図 [16] より算出) である. コースの概要図を図 5 に示す. コースは図左上のスタート地点から時計回りに観光し, スタート地点に戻る. 2 箇所の休憩箇所 (写真スポット) があり, 1 か所目までは上り坂の多い道, 2 か所目まではアップダウンのある道, 3 か所目までは下り坂の多い道となっている.

実験車両として Ninebot mini (仕様: 表 2) を使用し, 2017 年 7 月 23 日, 8 月 6 日, 8 月 20 日, 9 月 3 日の全 4 日間の中で実験を行った<sup>\*7</sup>. 1 日に 3 回ツアーを行い, 1 回

\*5 オープンソースの測位演算ライブラリ. <http://www.rtklib.com/>

\*6 受信機とナビゲーション機器との通信で用いられるプロトコルのこと.

\*7 9 月 3 日分の慣性運動データは取得できていない.



図 5 はままつフラワーパーク実験ツアールート ([6] より引用)

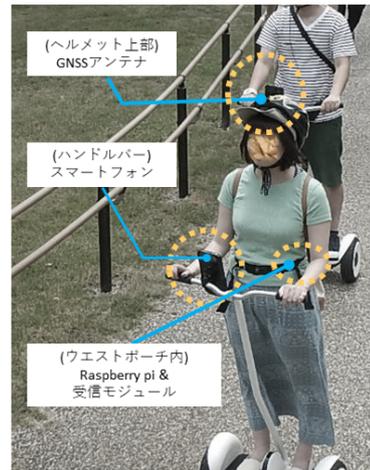


図 6 計測機器を取り付けた位置

表 2 実験で使用した倒立振り型 PMV の仕様

機種	Ninebot mini
最高速度	16km/h
操作仕様	後付けハンドル (非公式)
ハンドル位置 (ステップからの高さ)	88cm
ハンドル幅	55cm

あたりの定員は 6 名とした。被験者は、このツアーに参加した一般観光客である。実験を行う前にデータ収集の概要や目的等について説明した上で同意 (インフォームド・コンセント) を得た。慣性運動計測は 3.1.1 節で述べたシステムを用いた。実験開始直前に、慣性運動データの取り付け角の校正のために必要な加速度データを、重力加速度の向きを検出できるように実験者が実験車両に乗った状態で 15 秒間静止した姿勢をとり収集した。実験機器の取り付け位置を図 6 に示す。なお、本実験では、3 台の Ninebot mini を対象に、それぞれ 1 台のスマートフォンを用いてデータを収集した。

測位衛星信号の受信は 3.1.2 節で述べたシステムを用いた。GNSS アンテナはヘルメットに固定し、データ保存を行う小型コンピュータとその電源供給のためのモバイルバッテリーはウエストポーチに入れることで、参加者全員に着用してもらった。

### 3.3.2 倒立振り型 PMV への乗車動作把握のための実験

PMV に乗り込む乗車挙動を分析するためには、データの切り出し作業が必要である。植物園の実験で得たデータから分析する動作のみを取り出すために、どのような加速度・角速度の変化が乗車動作の時に観測されるのかを予め把握する必要がある。そこで、予備実験として基本操作についての操作を単独で行い、その時の慣性運動データ収集した。このデータは、植物園で得られた実験データと共に、分析にも使用した。

予備実験の流れは次の通りである。

- (1) スマートフォン設置角度把握のために乗車した状態で静止し、15 秒間センシングする

- (2) 被験者に PMV のハンドルを持ってもらい、乗車前の姿勢をとってもらう
- (3) センシングを開始する
- (4) 約 7 秒後に乗車を開始してもらう
- (5) 乗車し、姿勢が安定したところでセンシングを終了する

この 2~5 の動作を、複数パターンの乗車動作を確認するため、乗車動作の個人差異の抽出の追加の被験者データとして用いるために 3~10 回程度 3 名に行ってもらった。

### 3.4 提案した PMV プローブデータ収集システムに対する評価

本研究で使用した慣性運動データ収集システムと衛星信号収集システムに対する自己評価を行った。

#### 3.4.1 スマートフォンを用いた慣性運動データ収集システムの評価

本研究では、スマートフォンを用いて 3 軸加速度・3 軸角速度・3 軸地磁気センサのデータと、緯度・経度情報を含む NMEA 情報を収集した。植物園内での実験で、本来は観光ツアー 1 周分のデータを取得する予定であったが、多くのデータが 10 分程度で計測が中断されてしまった。計測が中断されてしまった要因として、スマートフォン端末の温度の上昇が考えられる。

植物園での実験は夏の炎天下の中で行い、端末を日差しが当たる場所に置くだけで温度が上昇する状況であった。Android 端末は一定以上のバッテリー温度になると、安全のためにアプリを強制的に停止させる機能があり、その影響でセンシングが停止したと考えられる。従って、夏の屋外で行う実験においてスマートフォンを用いた慣性運動データの収集は不向きであった。しかしながら、気温が低い時期や屋内での実験においては、そういった問題が起これず手軽にデータ収集ができる点で優れている。

以上の事から、マイクロプロセッサに通信機能をつけて

データを収集しクラウド上でデータ管理、スマートフォンでデータ確認するシステムの導入が望ましいと言える。

### 3.4.2 衛星信号収集システムの評価

今回の実験で収集したデータの後処理による RTK 測位演算で、fix 率が平均 40%程度の演算結果が得られ、データの約 5 割が 50%以上の fix 率で、7 割が 40%以上の fix 率であった (図 7)。fix 率が 40%程度しか得られなかった要因として、1 つに植物園の環境が挙げられる。観光実験のツアーで走行した、植物園の通路脇には木が植えてあり、その影響で衛星が特定の方角の衛星信号しか受けられない事、受信できる衛星信号数が少なくなった事が挙げられる。もう 1 つの理由として、ヘルメットの傾きが挙げられる。今回、サイクリスト向けのヘルメットを用意して着用してもらった。しかし、女性にとってヘルメットのサイズが少し大きく、ヘルメットが後方にずれ落ちてしまった人が見られた。その結果、ヘルメットに固定されたアンテナの向きが地面と水平にちかくなってしまい、信号の受信感度が悪くなったのではないかと考えられる。また、ヘルメットをしっかり被った状態であっても、細い道を走る時など下方に注意を向けるために頭を下に傾けた場合、同様にアンテナの向きが横向きになってしまう。その点をどう解決するかが課題である。システムの稼働率としては、コース 1

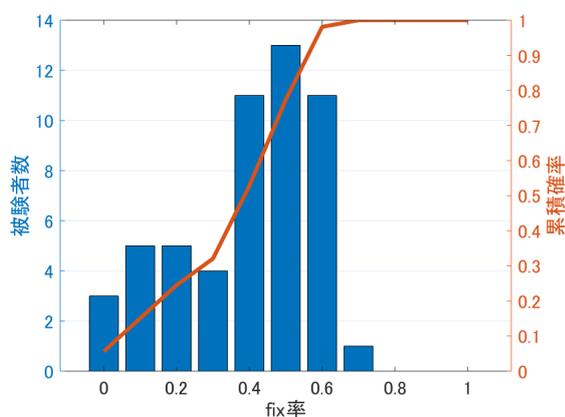


図 7 収集データの fix 率

周分のデータを蓄積できたこと、実験後に行ったアンケート結果が操作への影響がなかった、得られた測位結果と地図と照らし合わせた結果、fix 解に近い float 解であったので、計測器としては十分と言える。

操作性に関しては、システム立ち上げや終了の動作は電源をつなぐだけで起動し、アンテナの USB 接続を切断することで終了する仕組みであるため良いが、起動後にエラーが発生しているか、正常なのか明示的な情報が出力されないため改善が必要である。

## 4. プローブデータからの個人差異抽出

本章では、独自に開発したプローブデータ収集システム

で得たデータから PMV の動きに関する利用者個人差異を抽出を行うための検討した手法について記す。

### 4.1 個人差異抽出に用いるデータに対する前処理

はままつフラワーパークでの実験から、Ninebot mini に初めて乗る時から観光走行開始までのハンドル部の慣性運動データが取得できた。このデータから、利用者が地面に両足をついた状態から、PMV のステップに両足を乗せ、姿勢が安定するまでの“乗車動作”に絞ってデータの切り出しを手作業で行った。

切り出しの目安は加速度の Y 軸の値である。3.2.1 節のスマートフォンの設置角の補正で、乗車した状態でスマートフォンと地面が平行になるようにしてある。PMV は乗車していない状態だと、乗りやすいように車両前方が上向きになり、Y 軸のプラス方向に重力加速度が加わるが、乗り込むと前方に倒れ、加速度成分が 0 に近づく。

### 4.2 乗車動作データからの個人差異抽出手法

先に述べた前処理で切り出した“乗車動作”に対して、時間領域での分析と、周波数領域での分析の 2 手法を用いて行った個人差異の抽出手法について述べる。

#### 4.2.1 動的時間伸縮法による時間領域における本人・他人間の類似度算出

計測した波形の時間における伸び縮みを考慮した比較方法として、DTW (Dynamic Time Warping)<sup>\*8</sup>[17]がある。これは、2 つの異なるデータ長の波形に対して、対応する点のユークリッド距離が短くなるように引き延ばしを行う手法である。算出された値は 2 波形間の差であり、0 に近いほど類似していると言える。

乗車動作におけるハンドル部の x, y 軸角速度に対して DTW を適用し個人ごとに比較、個人差が抽出されるのか検討した。

#### 4.2.2 コヒーレンスによる周波数領域における本人・他人間類似度算出

周波数領域における類似度の算出手法として、振幅二乗コヒーレンスがある。この手法は、2 つの時系列データのクロススペクトル二乗と、それぞれのパワースペクトルの商によって求められる値であり、各周波数の相関を算出できる。1 に近づくほど周波数における類似度が高いと言える。

本研究では、データ長を合わせるために、比較する際に波形が短い方を 0 埋めすることで波形を合わせる。サンプリング周波数が 100Hz であるため類似度の算出は 0~50Hz の周波数で、本手法で用いるのは、50Hz までを 256 区間に分けて算出したコヒーレンスの内の 0~10Hz を積分した値である。その積分値が、本人データ同士と他人データと

\*8 動的計画法 (Dynamic Planning) マッチングとも呼ばれる

で、本人データのほうが値が大きくなるのか検証した。

### 4.3 走行速度からの個人差異抽出手法

測位衛星信号蓄積システムで収集したはままつフラワーパークのPMV観光コース1周分のデータから、PMVの移動速度を算出し、速度における個人差を検討した。

PMV観光コースを2か所の休憩ポイント(図5の写真スポット)で3区間に分ける。それぞれの区間は、上りの区間、アップダウンのある区間、下りの区間である。さらに、下りの区間の中急な下りかつづら折りの区間(SL:図5のほたるの池南側つづら折りの坂道)も抽出し、計4区間の速度データから個人差の抽出する。被験者ごと・4区間ごとの速度データの中央値を用いて、道の傾斜とその速度の間に相関が有るのか分析をした。

## 5. 被験者ごとの動作における差異抽出の結果

4章の手法を植物園での実験と予備実験で得られたデータに適用した結果について説明する。

### 5.1 DTWによる乗車動作角速度データにおける個人差異

収集した乗車動作時のハンドルバー x, y 軸角速度データから、ハンドルバーの姿勢角変化記録できた15人全52データを用いて本人データと他人データとの間に差異が現れるのか検証した。本人同士のデータ検証は、15人のうち4名が複数回乗車を行っているため、そのデータ全37データを用いた。4名のデータそれぞれと、その他14名のデータに対してDTWによる距離差を求めた結果を8に示す。

本人-他人を比較出来るデータのうち19個のデータで、本人データの方が他人データよりも値が小さくなる傾向が見られた。

### 5.2 コヒーレンスによる乗車動作の加速度データにおける個人差異

収集した乗車動作のハンドルバーの加速度データ15人分50データを使い、それぞれのx, y軸データに対してコヒーレンスを求め、本人データ間と対他人データにおいて差異が抽出されるか検討した。結果として、0~10Hzのコヒーレンス積分値においては本人・他人間で大きな差異は得られなかった。

ここで、10Hzよりも大きい領域においても同様の結果となるのか比較するための実験を行った。10Hz毎にそれぞれ積分値を出し、コヒーレンスの閾値13以下の場合本人と判定、大きい場合本人でない判定するロジックとして、本人拒否率(FRR)・他人受け入れ率(FAR)を算出し、その目安とした。その結果を次の2つの表に示す。この結果からも、0~10Hzのコヒーレンス積分値を本人・他人間の識別には不向きだと言える。



図8 DTWによる本人間・対他人データ類似度の算出値比較

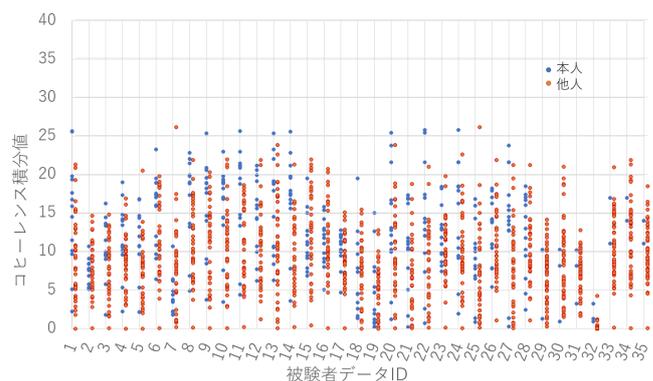


図9 乗車動作の本人間・対他人コヒーレンス積分値比較

本研究は10Hz間隔で積分をしたが、より絞り込んだ周波数領域のコヒーレンスを算出した場合、本人・他人間で差が大きくなる可能性がある。また、今回は乗車動作という2・3秒の動作であることから、よりデータ長の長い動作を比較対象とすることで差異が現れやすくなるのではないかと考える。

### 5.3 走行速度からの個人差異抽出

観光ツアー参加者52名から得られた、植物園のコース1周分の走行時の測位衛星信号データから得られた速度情報について統計的処理を行った結果を次に示す。

観光コースの区間ごとに走行速度を被験者ごとに色を分けて相関を算出した(図10)。その結果、各区間の速度において0.4より大きい相関係数が出たことから、路面状態に関わらず、移動速度の特徴が出ることが分かった。

## 6. まとめ

本研究は、倒立振り子型PMVのハンドル部の加速度・角速度および、測位衛星信号から算出した速度情報から、乗車している利用者ごとの操作における差異の抽出を試みた。

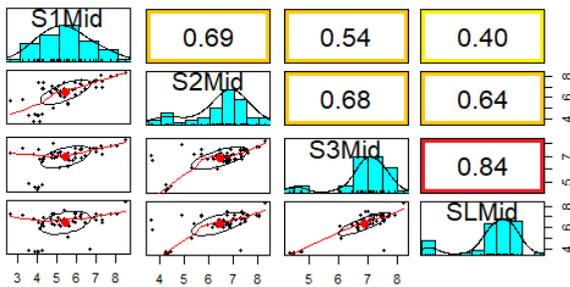
抽出の手法として3つの手法を採用した。1つ目は、乗車動作のハンドル部の加速度データに対してコヒーレンスを算出する手法を用いて周波数領域での周波数帯の類似度を求める手法で、2つ目はハンドル部の角速度データに

表 3 x, y 軸加速度の周波数帯ごとのコヒーレンスによる FRR

周波数帯	x 軸	y 軸
0Hz < S ≤ 10Hz	57.0%	56.7%
10Hz < S ≤ 20Hz	57.6%	61.1%
20Hz < S ≤ 30Hz	53.3%	67.1%
30Hz < S ≤ 40Hz	69.0%	59.0%

表 4 x, y 軸加速度の周波数帯ごとのコヒーレンスによる FAR

周波数帯	x 軸	y 軸
0Hz < S ≤ 10Hz	19.3%	22.1%
10Hz < S ≤ 20Hz	20.9%	24.4%
20Hz < S ≤ 30Hz	25.7%	22.3%
30Hz < S ≤ 40Hz	29.2%	24.7%



S1: スタート地点～写真スポット 1  
S2: 写真スポット 1～写真スポット 2  
S3: 写真スポット 2～ゴール地点  
SL: S3 序盤のつづら折り状坂道区間

図 10 被験者ごとの各区間走行速度中央値における相関

DTW の手法を適用し、時間領域における 2 データの類似度を算出する手法である。3 つ目は、測位衛星信号から得られた速度データの特徴について、走行コースを 4 区間に分けたそれぞれの区間での速度の中央値同士で相関係数を算出する手法である。

結果として、今回の手法ではハンドル部の加速度・角速度から被験者ごとの差異は抽出できなかったが、移動速度からは、速度を出す被験者は路面状況によらず速く走るということが分かった。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 17H01731 の助成を受けたものです。また、本研究で使用したデータは浜松地域活性化 ICT 技術研究組合の株式会社シーポイントラボ、株式会社 mocha-chai と、はままつフラワーパーク関係者の方々、そして実験に参加いただいた一般の方々のご協力により得られたものです。皆様のご支援、ご協力により本研究を遂行できました。ここにお礼申し上げます。

#### 参考文献

[1] Ohno, H., Tominaga, S., Okano, M., et al.: Experiments on Safety Performance of Personal Mobility Vehicle in Acceleration, Braking and Steady-state turn, Proceedings of infrastructure planning, Vol. 45, p. 43, 2012.  
[2] Shiomi, Y., Nishiuchi, H.: A FUNDAMENTAL ANALYSIS OF SEGWAY'S RUNNING BEHAVIOR FOCUSING ON RIDERS' EXPERIENCE, Proceedings of infrastructure planning, Vol. 43, p. 189, 2011.

[3] 竹下 裕貴, 佐田 達典, 石坂 哲宏 ほか: RTK-GPS を用いたパーソナルトランスポートの回避特性に関する研究, 土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, Vol. 38, p. IV-23, 2011.  
[4] Ishizaka, T., Sada, T., Sasamoto, K.: STUDY ON THE RUNNING BEHAVIOR OF PERSONAL TRANSPORTER USING RTK-GPS, Proceedings of infrastructure planning, Vol. 43, p. 188, 2011.  
[5] 総務省: 総務省 | 浜松地域活性化 ICT 技術研究組合の設立の認可, 入手先 ([http://www.soumu.go.jp/menu\\_news/s-news/01tsushin03\\_02000026.html](http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01tsushin03_02000026.html)) (2018.04.10).  
[6] 浜松地域活性化 ICT 技術研究組合: Hamamatsu パーソナルモビリティツアー, 入手先 (<http://hamamatsu-pm.jp>) (参照 2018-04-10).  
[7] Manabe, Y., Matsuzaki, K., Sugawara, K.: Accelerometer-Based Human Identification for Multi-Walking States, Journal of Japan Society for Fuzzy Theory and Intelligent Informatics, Vol. 27, No. 5, pp. 711-722, 2015.  
[8] 笠原 弘樹, 甲藤 二郎, 小松 尚久: 携帯端末の加速度センサを用いた歩行認証に関する研究, 修士論文, 早稲田大学, 2012.  
[9] Eren, H., Makinist, S., Akin, E., et al.: Estimating Driving Behavior by a Smartphone, 2012 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp. 234 - 239, 2012.  
[10] Seraj, F., Zhang, K., Turkes, O., et al.: A Smartphone based method to enhance road pavement anomaly detection by analyzing the driver behavior, Adjunct Proceedings of the 2015 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing and Proceedings of the 2015 ACM International Symposium on Wearable Computers, pp. 1169 - 1177, 2015  
[11] Gondaira, Y., Sakakibara, M., Shindo, K., et al.: Physiological and pathological analysis of tremor in human beings by main frequency, Biomechanisms, Vol. 14, pp. 109-117, 1998.  
[12] Misra, P., Enge, P.: GLOBAL POSITIONING SYSTEM Signals, Measurements, and Performance, Ganga-Jamuna Press, Massachusetts (2006). 測位航法学会 (訳): 精説 GPS 基本概念・測位原理・信号と受信機 改訂 第 2 版, 松香堂書店, (2010).  
[13] Hirose, K., Kondo, A.: Special Issues No. 3 : Measurement Technique for Ergonomics, Section 1-2 : "Measurement of Body Motion", The Japanese journal of ergonomics, Vol. 50, pp. 182-190, 2014.  
[14] Meguro, J., Kojima, S., Suzuki, N., et al.: Vehicle Trajectory Estimation Technique Using GPS Doppler and Inertial Sensors, Journal of Information Processing, Vol. 53, No. 1, pp. 212-222, 2012.  
[15] 静岡大学 木谷研究室: HAMAMATSU-GNSS (浜松 GNSS), 入手先 (<https://hamamatsu-gnss.org/>) (参照 2018-04-10).  
[16] 国土地理院: 地理院地図, 入手先 (<http://maps.gsi.go.jp/>) (参照 2018-04-10).  
[17] Myers, C., Rabiner, L., Rosenberg, A.: Performance tradeoffs in dynamic time warping algorithms for isolated word recognition, IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Vol. 28, Issue. 6, pp. 623-635, 1980.