

車輪に取り付けたBLEビーコンによる 車椅子移動認識手法

大鐘 勇輝¹ 水野 涼雅¹ 榎堀 優² 梶 克彦¹

概要: 医療技術の発達により人の寿命は年々伸び、WHO (世界保健機関) はこれからは単に寿命を延ばすのではなく、健康寿命を延ばしていくのが大切だと提唱している。健康寿命を延ばす重要な要素の1つとして運動があり、それを知る指標として歩数を確認する方法が挙げられる。しかしながら、歩数は自立して歩ける人のみに適用できる指標であり、車椅子使用者ではこの指標を用いた運動量の推定は行えない。これまで車椅子における移動認識の先行研究として、GPSを用いた手法や加速度、角速度、地磁気を用いた手法など様々な手法が提案されてきた。しかし、これらの手法は高精度な位置推定に焦点を当てているため導入コストが高く、一般の人では運用が難しい。そこで本研究ではBLEビーコンを用いて、低コストで導入・運用が行える移動認識手法を提案する。本手法は車椅子にBLEビーコンを取り付け、状態によって変化するBLEビーコンの電波強度をもとに移動認識を行う。この時、取得したデータには様々なノイズが載っているため、複数のデジタルフィルタを適用しノイズの軽減を試みる。そして、ノイズを軽減したデータから車輪の回転数や回転方向を推定し、移動を推定していく。上記の手法を用いてテスト環境で車椅子の移動認識精度を確かめた。その結果、車輪の回転数推定は100%、前進・後進推定は100%・98.5%の精度で推定できた。また移動経路推定は、長方形の周りを1周する移動、スラロームの動き、円の周りを1周する移動の3種類で実位置との誤差を比較し評価を行なった。その結果、それぞれの移動における平均推定誤差は13.95m, 6.75m, 6.51mであった。

Wheelchair Movement Recognition Method Using BLE Beacon Attached to Wheels

YUKI OGANE¹ RYOGA MIZUNO¹ YU ENOKIBORI² KATSUHIKO KAJI¹

1. はじめに

医療技術の発達や公衆衛生活動の発展より人の寿命は年々伸び続けている。厚生労働省が公開している『平成30年簡易生命表』[1]によると、日本における2018年時点の平均寿命は男性が約81年、女性が約87年と公表されている。この数字は1947年の平均寿命が男性は約50年、女性は約54年だという事実から考えると、71年間で男女ともに30年以上伸びている。このような背景から近年では人生100年時代と呼ばれるようになり、WHO (世界保健機関) はこれからは単に寿命を延ばすのではなく、健康寿命を延ばしていくのが大切だと提唱している。健康寿命とは

WHOが「健康上の問題で日常生活が制限されることなく生活できる期間」[2]と定義したもので、この延長が実現できれば介護人の負担を軽減できるほか、医療費の削減に繋がられるだろうと期待されている。健康寿命を延ばす重要な要素として、適度な運動やバランスの良い食事、質の高い睡眠などが挙げられるが、特に運動に注目して考えてみると、運動量を知る指標として歩数を確認する方法が挙げられる。歩数は単純に足を動かした回数であるため、運動量の目標を立てやすく、その算出も容易である。

しかし、歩数は自立して歩ける人のみに適用できる指標であり、車椅子使用者ではこの指標を用いた運動量の推定は不可能である。これまで車椅子における移動認識の先行研究として、GPSを用いた手法[3]や加速度、角速度、地磁気を用いた手法[4]など様々な手法が提案されてきた。

¹ 愛知工業大学 情報科学部情報科学科

² 名古屋大学 大学院情報科学研究科

[3]の手法はGPS電波が受信できる屋外では高精度な位置推定が実現できる反面、GPS電波が届かない屋内では利用できないという問題がある。また、[4]の手法はセンサを取り付けて直接車椅子の動きをセンシングするため、屋外・屋内のどちらでも位置推定ができる一方、定期的に電池交換といったメンテナンスが必要である。本研究は介護施設や老人ホームといった施設で、職員が車椅子を使用する入居者の健康管理を行うシーンを想定している。そのため、低コストで導入でき、かつ電子機器の取り扱いに慣れていない人でも運用を行えるのが望ましい。

そこで本研究ではBLEビーコン(以下、ビーコンと呼称)を用いた車椅子の移動認識手法を提案する。ビーコンは小型で低価格、また省電力なため電池寿命が長いという特徴があり、車椅子への設置が容易で運用も低コストで行える。加えてビーコンの電波はスマートフォンといった汎用的な機器で受信できるため、専用の機材を設置するなどのコストがかからない。本手法はビーコンを車椅子の車輪部分に取り付け、受信機は車椅子背面のポケットに入れ、ビーコンから発せられる電波強度の測定によって移動認識を行う。概要図を図1に示す。ビーコンの電波は微弱であるため、車輪の回転動作によって受信機との向きや距離が変化すると、その受信電波強度にも変化が現れる。本手法ではこの特徴を利用して車輪の回転を捉え、移動を推定していく。この時、測定した受信電波強度の値をそのまま使用してしまうと、ノイズによる影響を受けてしまい正確に推定を行えない。この対策として、カルマンフィルタや移動平均を用いたローパスフィルタの適用によってノイズを軽減し、精度の向上を図る。

本稿の構成は以下の通りである。2章では、車椅子における移動認識に関する既存研究を紹介し、その問題点を述べる。3章では、既存手法における問題点を解決するために、本研究のビーコンを使用した車椅子の移動認識手法について述べる。4章では、本研究で提案した手法の評価を行う。最後に5章・6章で、考察と本研究のまとめを行う。

2. 関連研究

車椅子の移動認識手法として、センサやGPS、カメラを用いた手法など様々な手法が提案されてきた。センサを用いた手法では、加速度センサや角速度センサ、ロータリエンコーダといった、モーションセンサを用いた手法が数多く提案されている[5],[6]。これらの手法は、車椅子に直接センサを取り付けてセンシングするため、正確な動きの情報が得られる。しかし、この手法は測定データから得られる移動方向と距離をもとに、初期位置からの相対的な移動を推定していくものであるため、長距離移動した場合ズレが蓄積してしまう。この問題に対処するため、長谷川らはビーコンを用いて誤差を補正し、車椅子バスケットにおける選手の位置推定を行う手法を提案している[4]。車椅子に設

各機器の設置



移動認識

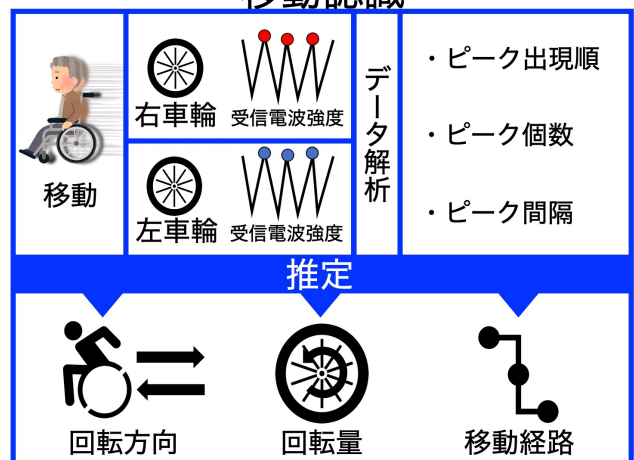


図1 提案手法の概要

置された受信機でビーコンの電波を受信し、そのビーコンIDと紐付けられた位置情報をもとに、位置誤差を修正するという手法である。このようにモーションセンサを用いた手法では、位置誤差を修正する必要がある。

位置誤差が蓄積しない手法として、GPSを用いた手法がある。GPSは現在位置を緯度・経度の絶対座標として取得できるため、屋外において高精度な移動認識が実現できる。この特徴を利用し、屋外の道路において左右どちらの歩道を通じたか推定する研究がある。阿部らは、人のそばにある建物上空のGPS信号は受信し難いが、上が開けている車道側上空のGPS信号は受信されやすいという特徴に着目し、歩道単位での位置推定を実現している[3]。この研究はGPS信号のみを使用して歩行通路判定を行うため、マップマッチングなどの補正をする必要がなく、実装が簡単に行えるメリットがある。一方で、GPS信号は屋外でしか受信できないため、屋内での移動認識は不可能である。

屋内においても移動認識を実現する手法として、カメラを用いた手法がある。この手法は、あらかじめ目印となる物とその座標を結びつけておき、カメラでその目印を検出

して位置推定を行う。この特徴を用いて車椅子ナビゲーション [7] や、軌道追跡 [8] を実現する研究がある。これらの研究は目印となる物を設置するだけで位置推定環境が整うため、専門知識がない人でも簡単に導入が行える。しかしながら、目印の検出には画像処理が必要であり、計算量のコストが他の手法と比べて高いという問題がある。

導入コストが低い移動認識手法として、スマートフォンに内蔵されたセンサを用いる手法がある。ワッタナワロンクンらは移動速度を測る車輪センサと、スマートフォンの方位センサを組み合わせる測位をしている [9]。また、測位結果をもとに坂道や階段を回避した目的地への最適ルートを計算し、スマートフォン上に図面データと共に表示する。この手法はスマートフォンをナビゲーションシステムとして使うだけでなく、測位のためのセンサとしても使用している。そのため、モーションセンサだけを使用する手法と比べて導入コストを抑えられる。岩崎らは室内の天井にスピーカを取り付け、そこから発せられる周波数の異なる音波をスマートフォンで受信し、測位する手法を提案している [10]。この手法は車椅子側にセンサを取り付ける必要が無いので、車椅子を多く使用する施設では導入コストの大幅な削減が実現できる。一方で、スマートフォンは機種によってセンサ精度に違いがあるため、人によって得られる結果が異なる可能性がある。

通常、移動認識に使用される情報を他の用途に活用する研究がいくつか行われている。まず、加速度センサの情報をもとに、車椅子使用者の消費カロリーを推定する研究がある。谷本らは加速度の変化から車輪を漕いだ回数を推定し、その際の強度を3つのレベルに分類するという手法で車椅子使用時の消費カロリーを推定している [11]。この研究は加速度の情報から消費カロリーを算出しているため、移動認識と運動量推定が同時に実現できる。

また、センサデータに基づいたバリア情報の評価を目指す研究がある [12], [13], [14], [15]。通常、移動認識に使用される情報を活用して、歩道の傾斜や障害物といったバリア情報を発見・評価するという研究である。これらの研究は、その評価したバリア情報から車椅子使用者の行動支援をできるだけだけでなく、障害物を目印とすることで移動認識における位置誤差の修正にも応用が可能である。

3. ビーコンを用いた車椅子移動認識

車椅子における移動認識の先行研究は、様々なセンサを用いて高精度な位置推定を実現するものや、得られたセンサデータを使ってバリア情報を収集するものが多い。しかし、実際に高齢者支援施設等への導入を考えた時、保守や運用の面から設置コストが小さく、汎用的な機器のみで動作できるのが望ましい。そこで、本研究では省電力で小型、かつスマートフォンで電波を受信できるビーコン (図 2) を用いた移動認識手法を提案する。ビーコンは、マーケティ

ング [16] や在室管理 [17], [18], 混雑度推定 [19], [20] など様々な用途で利用されている。これらの利用法は、ビーコンの電波が特定の範囲内ではしか受信できないという特徴を応用している。また、ビーコンの遮蔽状態の変化に伴う、電波強度の増減に着目した研究がある [21], [22]。これらの研究はビーコンの電波が微弱であるという特徴を応用している。

本研究では上記の事例で用いられている、ビーコンの特徴に着目した手法を取り入れる。具体的にはビーコンを車椅子の車輪に取り付け、回転によって変化する受信電波強度の増減から車輪の回転を推定するという手法である。車輪にビーコンを取り付けた状態で移動すると、周期的な電波強度変化 (図 3) が現れる。提案手法ではこの情報から車輪の回転を捉え、車椅子の移動認識を行う。

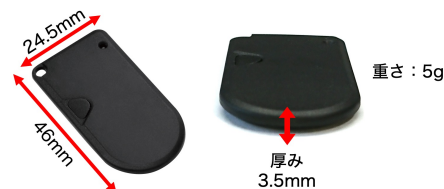


図 2 BLE ビーコン

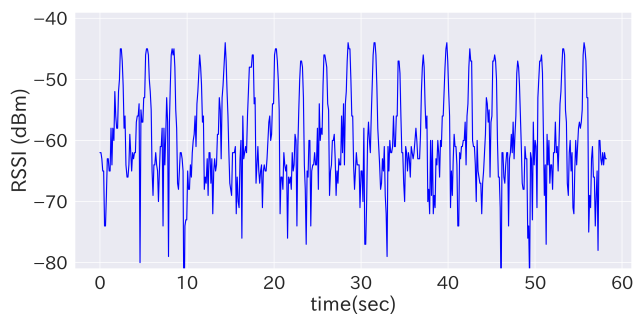


図 3 車輪に取り付けた BLE ビーコンの電波強度変化

3.1 電波強度データの収集

本手法ではビーコンの受信機としてスマートフォンを使用する。しかし、公開されている既存のアプリはビーコン電波のスキャン間隔が固定されていたり、ファイルに記録する機能がないという問題があった。そこで本研究では、専用の Android アプリの作成を行なった (図 4)。本アプリはスキャン間隔の設定や記録するビーコンの選択が可能であり、複数のビーコン電波強度を同時に測定できる。また、記録したデータは CSV 形式で保存され、プログラム側で簡単に扱えるようになっている。

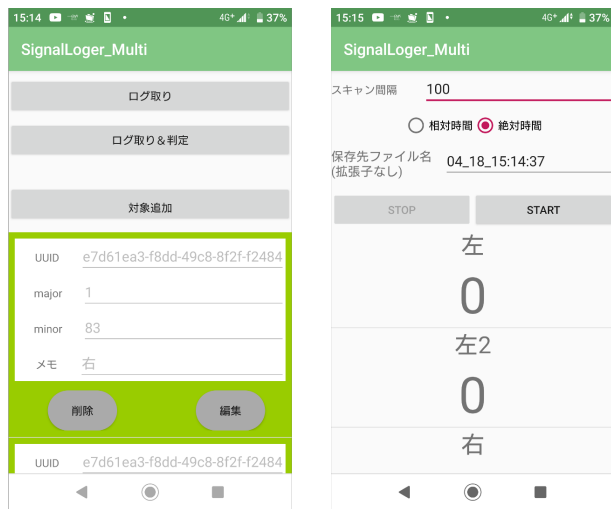


図 4 BLE ビーコンの電波強度を測定する Android アプリ

3.2 機器の取り付けと指向性アダプタ

本手法は車輪の回転によって変化するビーコンの電波強度をもとに推定を行う。そのため、ビーコンと受信機はその変化が一番大きくなる位置に設置する必要がある。これを踏まえ本手法では、ビーコンを図5の位置に、受信機を図6の位置に設置した。また、ビーコンの送信間隔は小さな変化も検知可能にするため、100msと設定した。

ビーコンは通常あらゆる方向に電波を発する。これは在室管理や混雑度推定に使用する場合、数mから数十mの距離を移動した時の電波強度変化を取得できるため問題ないが、車椅子の車輪では小さい変化にとどまる。そこで本手法では、ビーコンに指向性を持たせるアダプタを取り付け、電波強度に顕著な変化が出るようにする。今回はパラボラアンテナのような形状で、なおかつ軽量という理由から料理用の計量カップ(図7)を指向性アダプタとして採用した。指向性アダプタの取り付け有無による電波強度の変化を図8に示す。指向性アダプタを付けているグラフと付けていないグラフを比較すると、付けている方が受信電波強度が大きく、極大値の値が揃っているのが分かる。このことから指向性アダプタの取り付けによって、安定的でより顕著な電波強度変化を得られると考えられる。

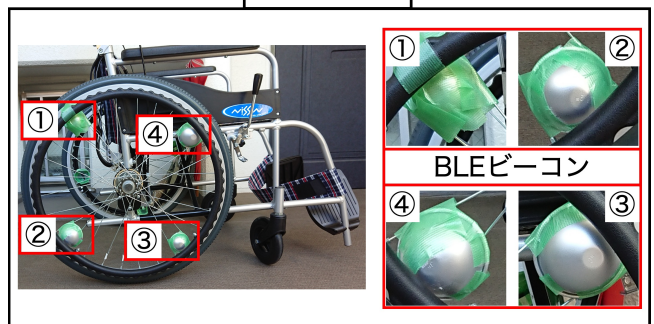
3.3 電波強度情報を用いた車輪の回転数推定

電波強度情報から車輪の回転数を推定する方法として、本手法では電波強度のピーク値の個数を用いる。この時、取得したデータをそのまま使用すると、ノイズや揺らぎによる影響を受けてしまい正確に推定を行えない。そこで、取得したデータに対して複数の処理を施し、ノイズの軽減を図る。

3.3.1 ノイズ軽減処理

ノイズを軽減するための処理として、本手法ではカルマンフィルタと移動平均を用いたローパスフィルタを使用する。カルマンフィルタは、ノイズの含まれている観測値か

右車輪



左車輪

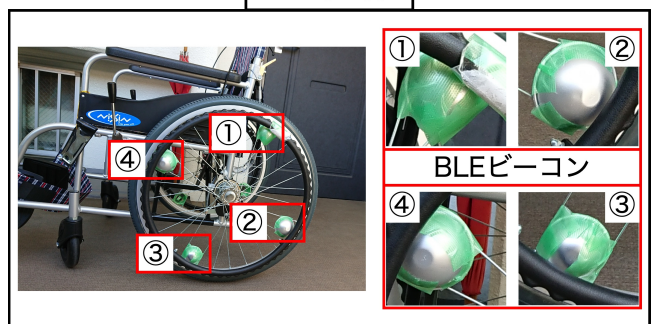


図 5 車輪に設置した BLE ビーコン



図 6 受信機の設置位置



図 7 指向性アダプタ

ら内部状態を推定できる。そこで、今回は受信電波強度のデータをローカルレベルモデルに当てはめ、カルマンフィルタにより内部状態の推定を行う。ここで、パラメータは

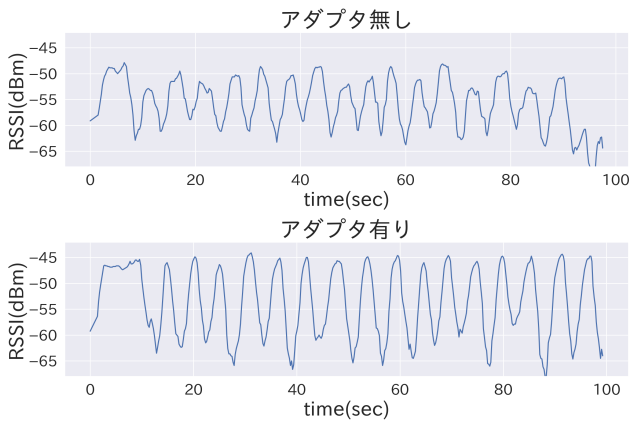


図 8 指向性アダプタの有無による受信電波強度の変化

最尤法によって決定している。図 9 にカルマンフィルタの適用結果を示す。カルマンフィルタだけではまだ小さな揺らぎが残っているため、続いてローパスフィルタを適用する。ここで、フィルタを適用するサンプル数は 10 個 (1 秒分) としている。図 10 にローパスフィルタの適用結果を示す。

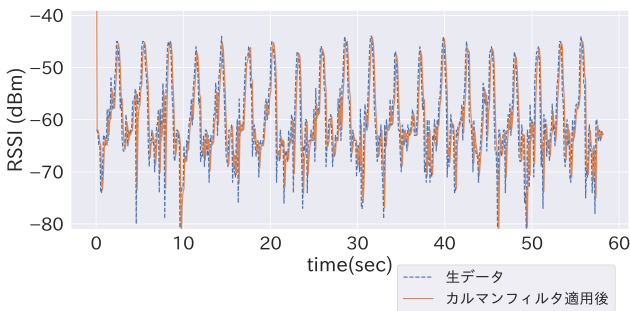


図 9 カルマンフィルタの適用

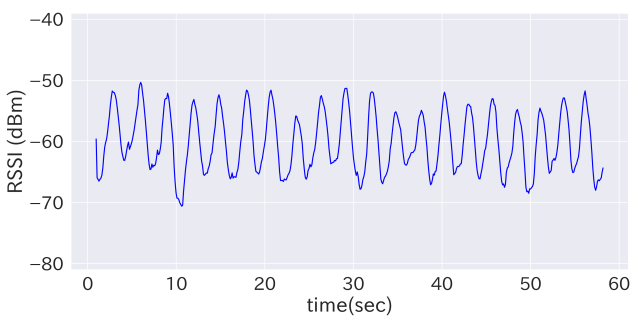


図 10 ローパスフィルタの適用

本手法は最終的に閾値処理で回転数の推定を行う。しかし、使用するビーコンは電池で駆動しているため、電池残量が減少すると送信電波の出力が弱まり、受信電波強度も小さくなる。これによりピーク検出の際の閾値が定まらなくなってしまう、結果として移動推定の精度に影響してしまう。そこで、取得したデータを 0~1 の間の値になるよ

う正規化し、変化の尺度の統一を行う。図 11 に正規化後のグラフを示す。

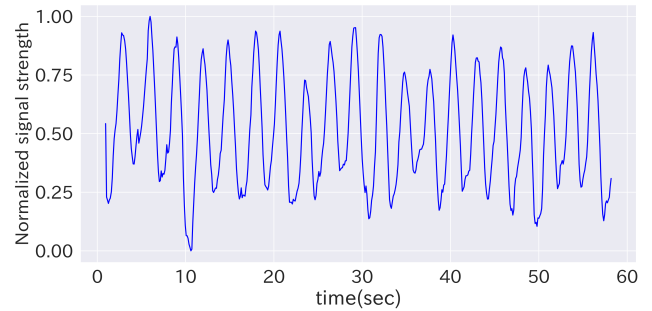


図 11 値の正規化

3.3.2 ピーク値の検出及び車輪の回転数推定

ピーク値とは、ある範囲内における極大値 (極小値) の値であり、本研究ではビーコンの電波強度が最も強く (弱く) なる所に当たる。ここで回転数推定には、極大値のピーク個数と極小値のピーク個数を使う方法が考えられるが、極小値のピーク値は電波強度が弱く正しく検出できない場合がある。そのため、本手法では極大値のピーク個数のみを回転数推定の指標として使用する。

また、車輪の回転状態やビーコンの電波状態によっては、ローパスフィルタで除去しきれない電波強度の揺らぎが発生し、ピーク値の判定を誤る場合がある。これを防止するため、ピーク値同士の時間間隔とそれぞれの信号強度に閾値を設けて誤検出の抑制を行う。今回は時間の閾値として 2 秒、信号強度の極小閾値として 0.00~0.50、極大閾値として 0.55~1.00 と設定している。図 12 にピーク値の検出結果を示す。

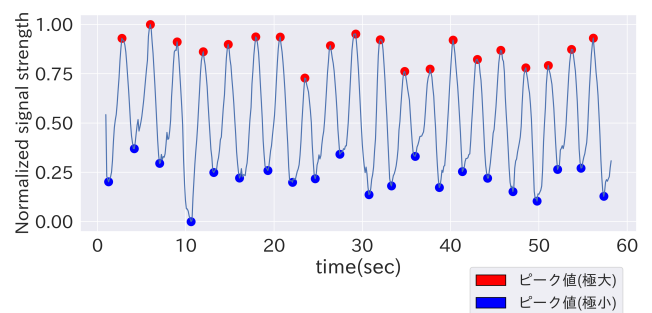


図 12 ピーク値の検出

3.4 前進・後進推定

前進・後進の推定は、車輪の回転数推定と同じくピーク値の情報をもとに行う。しかしながら、1つのビーコンから得られるのは移動したという情報だけであり、前進・後進の判定まではできない。そこで、本手法では2つのビーコンを組み合わせ判定を行う。以降、図 5 内の ①をビー

コン1, ②をビーコン2として説明を行う。

4つのビーコンは、それぞれ90°ずつずらした位置に取り付けられている。そのため、前進した場合は必ずビーコン1のピークが先に来るが、後進した場合はビーコン2のピークが先に来る(図13)。この特徴から、それぞれのピーク検出時間の差を計算すれば前進・後進の判定が可能である。例えば、ビーコン1のピーク検出時間からビーコン2のピーク検出時間を引いた値が0より小さければ前進と判定し、反対に0より大きければ後進と判定する。

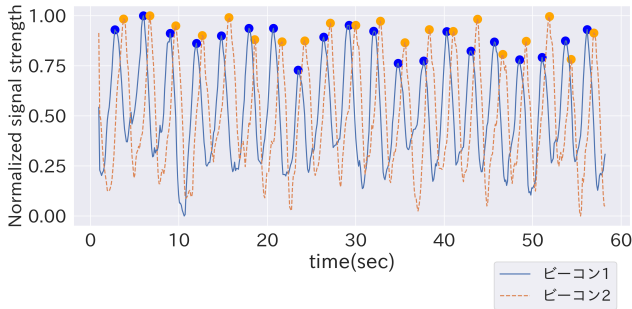


図13 取り付け位置の違いによる位相のずれ

前進・後進の判定は2つのビーコンのピークのうち、どちらが先に来るのかだけを見ている。そのため、ピーク検出が正常に行えていなかった場合、判定を誤ってしまう。そこで、判定に用いるピーク同士の範囲に制限を設けて対策を行う。本手法では制限範囲として、ビーコン1のピーク検出時間に±X秒(Xは任意の値)した範囲を使用する。図14にXを1.5秒とした時の例を示す。色で塗りつぶされた範囲が、ビーコン1のピーク検出時間に±1.5秒した範囲を表している。前進・後進の判定は、この領域内にビーコン2のピークが存在する場合のみ行う。この時もし、同じ範囲内に2つのピークが入っていた場合は、時間的距離が近い方を選ぶようにしている。

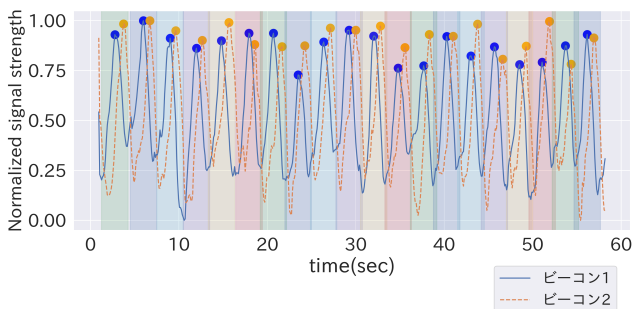


図14 前進・後進の誤判定対策

3.5 移動経路推定

車椅子の移動経路を推定する方法として、本研究ではWheel Odometryを用いる。この手法は主にロボットの自

己位置推定に用いられるもので、車輪の回転数情報のみから移動量を計算し、基準点からの相対的な位置を推定する。本研究で移動経路推定に使用できる情報は、ビーコンの電波強度をもとにした車輪回転数とその回転方向だけである。そのため、Wheel Odometryは本研究において非常に有効な手法である。しかしながら車輪回転数の情報は、車輪が1回転する動きをしなければ取得できない。そこで、移動経路推定では、4つのビーコンの情報を組み合わせて推定を行う。これにより1/4回転ごとの速度計算が可能となり、高精度な推定が期待できる。

車椅子の単位時間あたりの移動量 d は、左右車輪の移動量をそれぞれ d_L , d_R とおくと以下のように表せる。ここで、ピーク間距離とは4つのビーコンにおいて検出したピークを検出時間順に並べた時のそれぞれの時間間隔である。

$$d_R = \frac{\text{タイヤの周長}}{4 \times \text{右車輪の各ピーク間距離}} \quad (1)$$

$$d_L = \frac{\text{タイヤの周長}}{4 \times \text{左車輪の各ピーク間距離}} \quad (2)$$

$$d = (d_R + d_L)/2 \quad (3)$$

(1), (2)式より左右の車輪の移動量が分かると、三角関数を用いて移動時の角度が計算できる。計算式を下記に示す。ここで、数式内の W はトレッド幅(左右車輪間の距離)を示している。

$$\theta = \arctan((d_R - d_L)/W) \quad (4)$$

車椅子の移動量 d と角度 θ で表される座標は極座標系である。これでは移動経路が読み取れないので、最後に (x, y) の形で表される直交座標系への変換を行う。式を下記に示す。

$$x = d \cos(\theta) \quad (5)$$

$$y = d \sin(\theta) \quad (6)$$

4. 評価実験

本稿で提案した手法の推定精度を確かめるため、評価実験を行なった。評価する対象は、車輪の回転数推定、前進・後進移動推定、移動経路推定の3つとし、その推定結果と実際の動きを比べて正答率を算出した。

4.1 実験端末の選定と設定

Bluetoothのセンサ精度は端末ごとに異なるため、実験に用いる端末は変化を正しく捉えられるものが望ましい。我々は以前、ビーコンを用いた車椅子移動認識の基礎検討として、Xperia XZ1を用いた回転数推定の評価実験を行なっている[23]。評価の結果、この端末において良好な精

度の推定が行えた。そこで、本研究でも先行研究と同じく Xperia XZ1 をビーコンの受信機として使用する。

また、本研究ではビーコンを車椅子の車輪部分に取り付けるため、使用するビーコンはできるだけ小さい方が望ましい。そこで、今回の評価実験では小型・軽量という理由からフォーカスシステムズ社の FCS1301(図 2) を使用する。

各機器は、それぞれ図 5、図 6 の場所に設置し、ビーコンの発信間隔と受信機の受信間隔はともに 100ms と設定した。また、ビーコンは片側 4 つずつで計 8 つ取り付けられているが、8 つのビーコン全てを使用するのは移動経路推定の評価だけである。その他の評価では、前進・後進推定の評価では計 4 つ、車輪の回転数推定の評価では計 2 つを使用する。

4.2 車輪回転数における推定精度の測定

車輪回転数の推定精度を確認するため、図 15 の場所を直進させて評価を行なった。実験設定として、車椅子の車輪が 20 回転するように直進させ、その推定回転数と実際の回転数から正解率を算出して評価を行なった。この時、処理に用いるパラメータとして、ローパスフィルタに用いるサンプル数は 10 個、ピーク検出時の時間閾値は 2 秒、信号強度の極大閾値として 0.55~1.00 と設定した。評価実験の結果を表 1 に示す。

同様の実験を同一人物が 5 回行った結果、全ての試行において誤推定はなく、最終的な正解率は 100 % となった。



図 15 評価実験を行なった環境

表 1 車輪回転数における推定精度

試行回数	正答率 (右)	不正解数 (右)	正答率 (左)	不正解数 (左)
1	100 %	0 個	100 %	0 個
2	100 %	0 個	100 %	0 個
3	100 %	0 個	100 %	0 個
4	100 %	0 個	100 %	0 個
5	100 %	0 個	100 %	0 個
総合正解率	100 %			

4.3 前進・後進移動における推定精度の測定

前進・後進移動における推定精度を確認するため、図 15 の場所で前進・後進させて評価を行なった。実験設定として、車椅子の車輪が 20 回転するように前進および後進させ、実際の移動と推定された移動から正解率を算出して評価を行なった。この時、処理に用いるパラメータとして、ローパスフィルタに用いるサンプル数は 10 個、ピーク検出時の時間閾値は 2 秒、信号強度の極大閾値として 0.55~1.00 と設定した。また、誤判定対策の処理の閾値として 1.5 秒と設定した。前進推定の正解率を表 2 に、後進推定の正解率を表 3 に示す。

同様の実験を同一人物が前進・後進ともに 5 回ずつ行った結果、前進推定の正解率は 100 %、後進推定の正解率は 98.5 % となった。

表 2 前進移動における推定精度

試行回数	正答率 (右)	不正解数 (右)	正答率 (左)	不正解数 (左)
1	100 %	0 個	100 %	0 個
2	100 %	0 個	100 %	0 個
3	100 %	0 個	100 %	0 個
4	100 %	0 個	100 %	0 個
5	100 %	0 個	100 %	0 個
総合正解率	100 %			

表 3 後進移動における推定精度

試行回数	正答率 (右)	不正解数 (右)	正答率 (左)	不正解数 (左)
1	100 %	0 個	95 %	1 個
2	100 %	0 個	100 %	0 個
3	100 %	0 個	95 %	1 個
4	100 %	0 個	95 %	1 個
5	100 %	0 個	100 %	0 個
総合正解率	98.5 %			

4.4 移動経路における推定精度の測定

移動経路における推定精度を確認するため、図 16 の場所で車椅子を移動をさせて評価を行なった。実験設定として、①長方形の周りを 1 周する移動、②スラロームの動き、③円の周りを 1 周する移動を行い、実位置との誤差を比較し評価を行なった。以後、各移動を ①、②、③と示す。それぞれの動きを図 17 に示す。この時、処理に用いるパラメータとして、ローパスフィルタに用いるサンプル数は 10 個、ピーク検出時の時間閾値は 1.5 秒と設定した。また、信号強度の極大閾値は、曲がる動作の際にピーク値が小さくなる場合を考慮し、0.50~1.00 と設定した。推定結果を図 18,19,20 に、誤差の一覧を表 4 に示す。

各移動を同一人物が 5 回ずつ行った結果、それぞれの平均推定誤差は 13.95m, 6.75m, 6.51m となった。

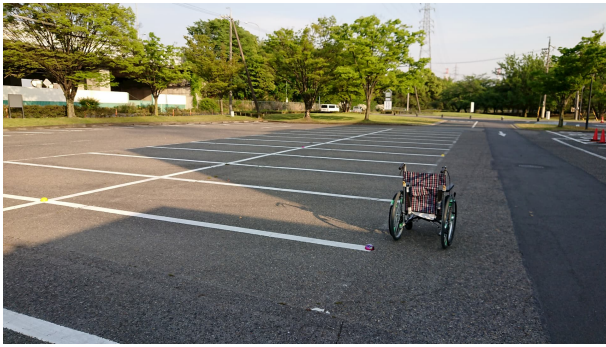


図 16 評価実験を行なった環境

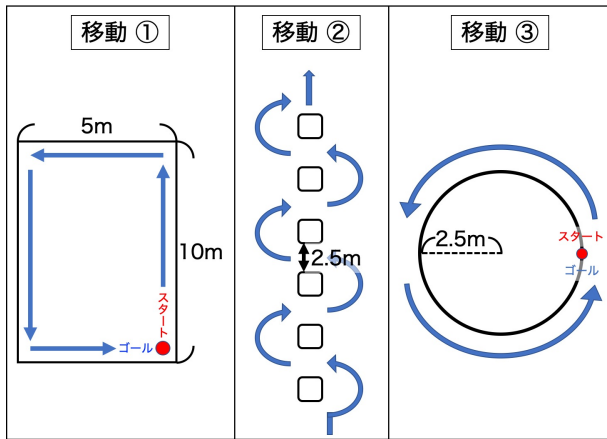


図 17 移動の種類

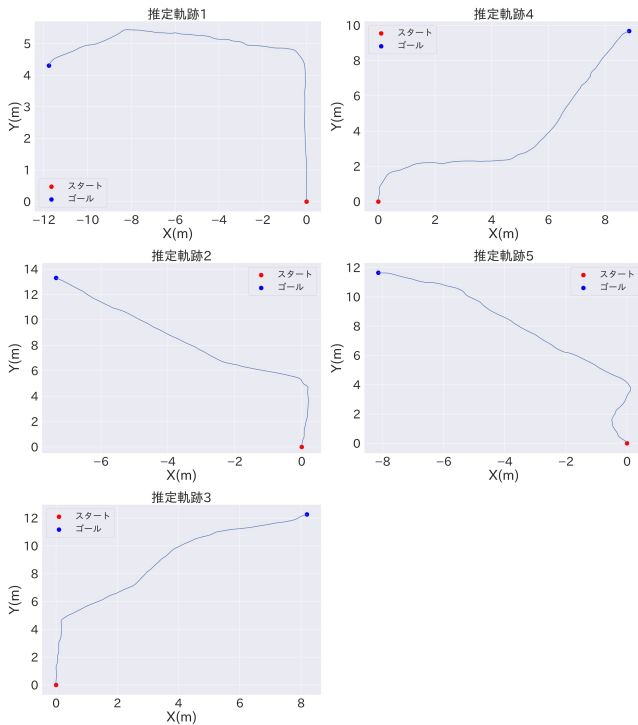


図 18 移動①の経路推定結果

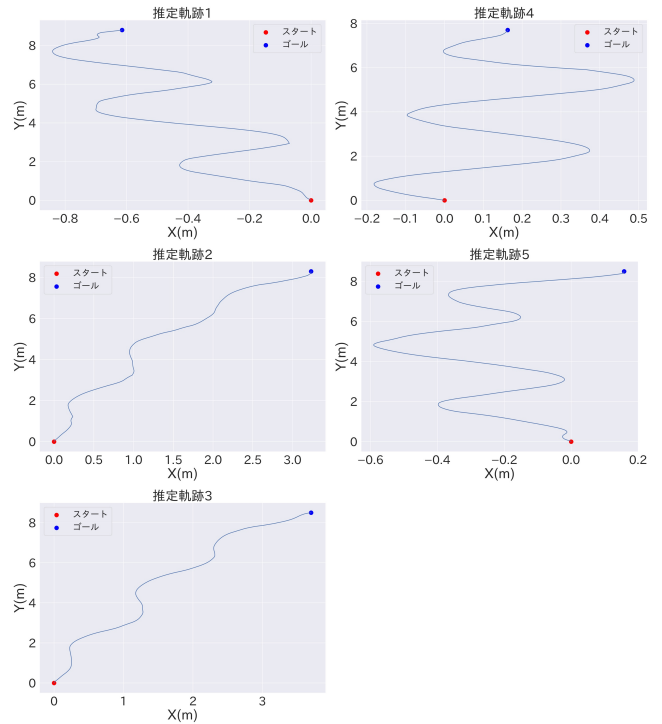


図 19 移動②の経路推定結果

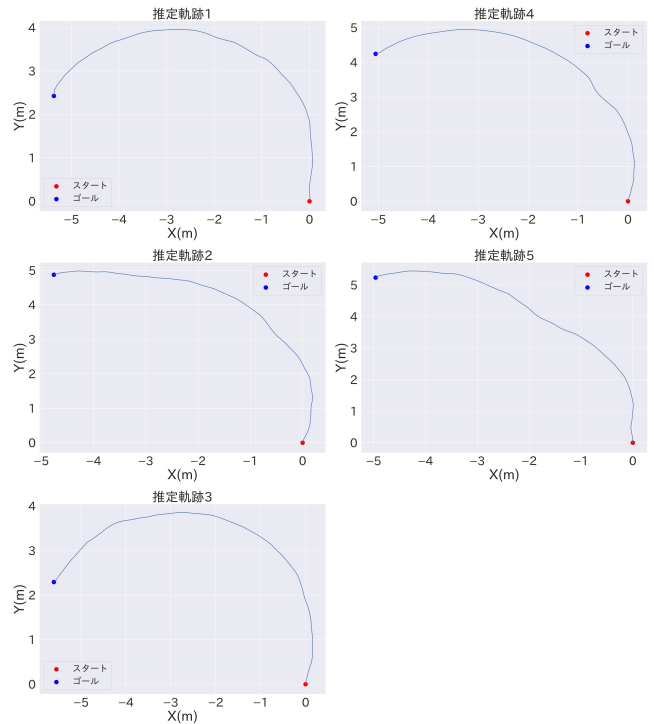


図 20 移動③の経路推定結果

5. 考察

車輪回転数は、回転によって変化する受信電波強度から

ピーク値を探し、その個数をもとに推定している。この時、ビーコンには指向性アダプタを取り付けており、推定には極大値のピークのみを使用している。そのため、誤判定に繋がるノイズの影響をあまり受けず、100%の精度で推定できたと考えられる。

前進・後進の評価実験では、前進については100%の精度で推定できたが、後進については誤判定をした箇所があっ

表 4 移動経路推定における実位置との誤差一覧

試行回数	移動①の推定誤差	移動②の推定誤差	移動③の推定誤差
1	12.53m	5.98m	5.89m
2	15.19m	7.21m	6.80m
3	14.75m	2.26m	6.05m
4	13.11m	7.05m	6.59m
5	14.20m	6.25m	7.20m
平均推定誤差	13.95m	6.75m	6.51m

た。この原因として、誤判定を抑制するために設定した閾値が、適切な値ではなかったというのが考えられる。車椅子では、前進する際は顔が前を向くが、後進する際は後ろを振り返らなければならない。そのため、前進と後進で移動する速度が異なり、後進では閾値から外れてしまったため判定を誤った。このことから、推定精度をより高めるためには、この閾値の設定を見直す必要があると思われる。

移動経路推定の評価では、①,②,③の3種類の移動で評価を行なった。その結果、①の移動では3回目と4回目の試行において、実際に曲がった方向とは逆向きに曲がったと推定されてしまった。この誤判定について原因を調査するべく、取得した電波強度の波形を確認したところ、2つの原因が見つかった。一つ目は、左に曲がる際に左タイヤが止まって右タイヤのみが回るといった動きが発生し、左タイヤがビーコン1,2と距離が近い位置で止まったため、両方のビーコンのピークが近い時間に検出されてしまった。その結果、左のタイヤが高速で回転したと推定され、最終的に右に曲がったと推定されてしまった。二つ目は、左に曲がる際は右車輪が通常より高速で回転するため、電波強度の変化が瞬間的なものとなり、ピーク値が閾値より低い値となった。その結果、曲がった際に右車輪が回転していないと見なされ、最終的に右に曲がったと推定されてしまった。

②,③の移動の推定結果は①の結果と比べて実際の動きに近い推定が行えた。これは①の直角に曲がる移動と異なり、緩やかに曲がる移動であるためだと思われる。しかし、②の評価の2回目と3回目の試行においては、曲がった時の角度が正確に捉えられていない。また、③の評価では、全ての試行において実際は円の周りを1回転しているのに関わらず、推定結果では約0.5回転になっている。これらの問題の原因として、実際の移動量と推定移動量の間にズレがある可能性が考えられる。本研究では、電波強度のピーク情報から車輪の回転量を推定している。この時、移動経路推定では、必ずピークは1/4周期で出現するという前提のもと処理を行なっている。しかし、実際には誤差が僅かながら存在する。そのため、この誤差が蓄積され推定移動量が少なくなったと考えられる。

6. まとめ

本稿ではビーコンを車輪に取り付け、回転によって変化する電波強度から車椅子の移動認識を行う手法を提案した。これまで車椅子の移動認識には、モーションセンサやGPSなどが用いられてきたが、これらの手法は導入コストや運用コストが高いという問題があった。そこで我々は導入と運用が簡単に行える手法を目指し、小型で低価格なビーコンの利用によって低コストな移動認識を実現した。ビーコンが発する電波は通常、あらゆる方向に飛んでいく。この特徴は、在室管理といった用途に使用する場合には有利に働くが、本研究のような使い方では反対に不都合である。この解決策として、ビーコンに対し指向性を持たせるアダプタを取り付けるという方法で電波強度変化を大きくし、推定精度の向上を図った。評価実験では車輪回転数や前進・後進、移動経路推定の3つについて評価し、推定精度を確かめた。その結果、車輪回転数では100%、前進・後進では100%・98.5%、移動経路では長方形の周りを1周する移動、スラロームの動き、円の周りを1周する移動で平均推定誤差が13.95m, 6.75m, 6.51mの精度で推定ができると判明した。

提案した手法は、車輪回転数や前進・後進といった個々の推定は非常に高い精度で行える。しかし、複数の情報を組み合わせる移動経路推定では、まだまだ精度が低く改善が必要である。そこで今後の課題として、移動経路における推定精度の向上を行う必要がある。現状は、実際に曲がった方向とは逆向きに曲がったと推定されてしまったり、推定移動量が実際の移動量と比べて小さいという問題がある。これらの問題の解決策として、前者の問題では各車輪の推定移動速度に閾値を与え、その値を超える場合には異常値とみなし判定を行わないという方法が考えられる。具体的な閾値の値としては、電動車いす安全普及協会の型式認定基準 [24] である最高速度 6km/h 以下という値が参考になる。また後者の問題では、移動においてどのくらい推定移動距離の誤差が出るか調べ、キャリブレーションの作業を行うという解決策が考えられる。

参考文献

- [1] 『平成 30 年簡易生命表』：入手先 <<https://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/life/life18/d1/life18-15.pdf>>, (参照 2020-04-13).
- [2] WHO Stat2006 Definitions and Metadata：入手先 <<http://www.who.int/whosis/whostat2006DefinitionsAndMetadata.pdf>>, (参照 2020-04-13).
- [3] 阿部裕文, 落合慶広, 瀬下仁志. 衛星測位と歩道情報に基づく歩行通路判定法, オーディオビジュアル複合情報処理 (AVM), Vol.106, No.9, pp.1-6 (2019).
- [4] 長谷川凌佑, 内山彰, 東野輝夫. 車いすバスケットボールにおける 9 軸センサを用いた選手位置推定の検討, 高

- 度交通システムとスマートコミュニティ (ITS), Vol.73, No.6, pp.1-8 (2018).
- [5] Y. Tanimoto, K. Namba, K. Furusawa, H. Yamamoto, A. Tokuhira and H. Ukida, Measurement and imaging of wheelchair movement for manual wheelchair users, 2011 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques, pp.253-258 (2011).
- [6] K. Maatoug, M. Njah and M. Jallouli, Multisensor data fusion for electrical wheelchair localization using extended Kalman Filter, 2017 18th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA), pp.257-260 (2017).
- [7] 池田克, 清田公保, 合志和洋, 三好正純. マーカ認識による位置姿勢推定を用いた車椅子ナビゲーションシステムの開発, ユビキタスコンピューティングシステム (UBI), Vol.24, No.9, pp.1-6 (2009).
- [8] K. Nakamura and K. Kojima, Development of Trajectory Tracking System for Wheelchair Basketball, 2018 IEEE 7th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE), pp.490-491 (2018).
- [9] ワタナワラオンクン, ナッタポップ, 若原俊彦. 身障者向け車椅子の屋内・屋外ナビゲーションシステムの研究, 情報処理学会研究報告, (2012).
- [10] 岩崎改, 五百蔵重典. スマートフォンの内蔵マイクを用いた屋内測位方式の提案, 情報科学技術フォーラム講演論文集, Vol.14, No.4, pp.105-110 (2015).
- [11] Y. Tanimoto, H. Yamamoto, K. Nanba, A. Tokuhira, K. Furusawa and H. Ukida, Measurement of wheelchair users' calorie consumption to develop a wheelchair activity device, 2016 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, pp.1-6 (2016).
- [12] 宮田章裕, 伊勢崎隆司, 中野将尚, 石原達也, 有賀玲子, 望月崇由, 渡部智樹, 水野理. 直近移動能力を考慮した車椅子操作推定モデル, 情報処理学会論文誌, Vol.57, No.10, pp.2316-2326 (2016).
- [13] 隅田康明, 松永勝也, 合志和晃, 志堂寺和則. 車輪付き手動移動体の走行負荷に基づく歩道の評価方法, 情報処理学会論文誌, Vol.57, No.7, pp.1652-1662 (2016).
- [14] 荒井研一, 園田稔, 立石拓也, 一貫坂駿介, 小林透. 一般車椅子利用者からのセンサ情報を活用したオンデマンド型バリアフリー情報提供システム, マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2016 論文集, Vol.2016, pp.73-78 (2016).
- [15] K. Kojima, H. Taniue and J. Kaneko, Mahalanobis distance-based road condition estimation method using network-connected manual wheelchair, 2016 IEEE International Conference on Consumer Electronics-Taiwan (ICCE-TW), pp.1-2, (2016).
- [16] LINE 公式ブログ: 入手先 <<http://official-blog.line.me/ja/archives/73098915.html>>, (参照 2020-04-18).
- [17] 安部誠, 梶克彦. 滞在ウォッチにおける管理コストの削減, 第 82 回全国大会講演論文集 (2020).
- [18] 梶岡慎輔, 山本大介, 打矢隆弘, 齋藤彰一, 松尾啓志, 内匠逸. BLE ビーコンを用いた位置推定による打刻システムの運用と課題, インターネットと運用技術 (IOT), Vol.2016-IOT-35, No.12, pp.1-7 (2016).
- [19] Rachael Purta, Aaron Striegel. Estimating dining hall usage using bluetooth low energy beacons, UbiComp '17 Proceedings of the 2017 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing and Proceedings of the 2017 ACM International Symposium on Wearable Computers, pp.518-523, (2017).
- [20] 佐藤大祐, 美原義行, 佐藤吉秀, 田中悠介, 宮本勝, 佐久間聡. BLE ビーコンを利用した混雑可視化サービス, 情報処理学会論文誌コンシューマ・デバイス&システム (CDS), Vol8, No.1, pp.1-10 (2018).
- [21] 池田翔太, 梶克彦. BLE ビーコンをパカパカ, マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2016 論文集, Vol.2016, pp.899-904 (2016).
- [22] 大鐘勇輝, 水野涼雅, 梶克彦. 物体内部に設置した BLE ビーコンの電波強度を用いた状態推定手法, マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2019 論文集, Vol.2019, pp.792-799 (2019).
- [23] 大鐘勇輝, 水野涼雅, 榎堀優, 梶克彦. 車輪に取り付けた BLE ビーコンによる車椅子移動認識の基礎検討, 第 82 回全国大会講演論文集 (2020).
- [24] 電動車いすの型式認定基準: 入手先 <<https://www.den-ankyo.org/guidance/standard.html>>, (参照 2020-05-08).