

ウェアラブルセンサを用いた実泳距離推定手法の提案

渡辺 大将^{1,a)} 村尾 和哉^{1,2,b)}

概要：水泳における競泳競技では、0.01 秒の単位で順位を競いあう。しかし競技者は癖や身体のバランスによって蛇行し、実泳距離が延びてしまうことがある。本研究では加速度センサとジャイロセンサを用いて蛇行した際の実泳距離推定手法を提案する。理論上加速度を二重積分すると距離が得られるが、得られた加速度センサの値をそのまま積分すると累積誤差によって推定結果と実泳距離の差が大きくなってしまうため、センサの値を補正し推定する。評価実験では、遊泳動作に対するセンサ値を除くためにビート板の上にセンサを固定して決められた道のりを進む実験と、4 人の被験者の背中、後頭部、腰にセンサを固定して泳ぐ実験を行い、直進ルートと曲進ルートでのそれぞれの距離推定を行った。ビート板を使用した実験では、直進ルート 25m の推定結果は 25.01~25.03[m]、曲進ルート 27.90m の推定値は 28.96~31.98[m] の範囲となった。被験者の背中に装着した際の推定値は直進ルートで 25.16~26.16[m]、曲進ルートでは推定値は 25.79~36.69[m] の範囲となった、被験者の後頭部に装着した際の推定値は直進ルートで 25.15~28.90[m]、曲進ルートにおける推定値は 26.43~33.49[m] の範囲となった。被験者の腰に装着した際の推定結果は直進ルートにおける推定値は 25.07~25.23[m]、曲進ルートにおける推定値は 27.58~30.25[m] の範囲となった。推定結果から、背中と後頭部に装着した場合、遊泳動作の影響を受けやすく、軸がずれ、良い推定結果が得られないが、腰に装着した際には軸のずれが小さく、推定結果も他の部位より誤差が小さくなることから、本提案手法で推定をする際は腰に装着することが推奨されることが分かった。

1. はじめに

水泳における競泳競技では、競技者は 0.01 秒の単位で順位を競い合う。競技者は練習によって筋力を上げたり技術を高めることで競技力を向上させる。しかし、競技者は癖や身体のバランスによって蛇行しながら泳いでしまうことがある。蛇行しながら泳ぐと泳距離が延び、記録が遅くなるため、練習でそのような癖を改善することが必要になる。泳いでいる際に自らの泳ぎを確認することは困難であるため、指導者に泳ぎを見てもらったり、第三者に泳ぎを撮影してもらい、確認する方法が一般的に用いられている。しかし、指導者をつけるとお金がかかり、一人で自由な時間に練習することができないことが問題点として挙げられる。

日本の水泳における競技力は世界でもトップレベルであり、近年、プールが増えたことや、スイミングスクールが増えたことで、水泳を趣味や健康の一環で行う人が増えてきたこともあり、水泳が身近になり、幼少期から水泳を習い、大人になってからも大会に出場し、自身の記録に挑戦する競技者が増えてきた。そのようなアマチュア競技者は

指導者を付けないため、デバイスによって自らタイムや泳距離を測定したり、泳ぎを確認したりする必要がある。最近ではさまざまなスポーツを支援するデバイスが登場しており、競泳競技を支援するデバイスも開発、販売されている。例えば、タイムや泳距離を記録する腕時計型デバイス [1] やゴーグル型のデバイス [2]、泳ぎの特徴をセンサによって認識するデバイス [3] などが開発されている。しかし、これらの距離を計測するデバイスはターンやタッチ動作ごとにプールの距離を単純に加算していくため、蛇行した際の実泳距離を計測することはできない。蛇行した際の実泳距離が分かれば、自分がどの程度蛇行しながら泳いでいるかを知ることができるため、泳ぎの癖やバランスを改善し、競技力の向上につながる。移動距離推定の方法として Wi-Fi や GPS を用いるアプローチがあるが、これらのデバイスを利用した移動距離推定には数 m の誤差があり、水泳中のわずかな蛇行を計測するには適していない。また、プールに Wi-Fi がない施設や、屋内や地下で GPS が利用できないといった状況が考えられる。

本研究では競泳競技における蛇行に着目し、加速度センサと角速度センサを用いて実泳距離を推定する手法を提案する。距離は理論上、加速度値の二重積分で求めることができるが、得られた加速度センサのデータ値を単純に積分

¹ 立命館大学大学院情報理工学研究科

² 科学技術振興機構さきがけ

a) daisuke.watanabe@iis.ise.ritsumei.ac.jp

b) murao@cs.ritsumei.ac.jp

すると離散的サンプリングや量子化誤差、センサの計測誤差が原因で推定結果と実泳距離に大きな誤差が生じてしまう。そのため、本研究ではプールのレーンの長さが既知である情報を用いてセンサ値を補正し、正確な実泳距離の推定を行う。また、センサ値を取得する際に適したセンサ装着位置を検討する。

以降、2節では関連研究を紹介する。3節では提案手法について述べ、4節では評価実験について述べ、最後に5節で本研究をまとめる。

2. 関連研究

本節では移動距離推定や位置推定に関する研究を紹介する。

位置や移動距離を推定する技術として GPS は幅広く利用されているが、GPS を利用した測位は地下などの屋内で利用できない。屋外でも周囲に高い建造物が存在する場合は、大きな測位誤差が生じる可能性がある。そのため GPS を利用した測位には互換性のある信号に屋内位置情報を入れて送信する IMES 方式 [4] や、他のセンサや手法と組み合わせることで測位結果を補正する方式が提案されている。小河原ら [5] は GPS による絶対位置情報とセンサ測定による相対移動推定情報を組み合わせた位置推定システムを提案している。GPS が利用できる場面では GPS を利用し、屋内等の GPS が利用できない場面ではスマートフォンから得られる地磁気センサ、加速度センサの値から移動距離を推定して精度を上げることで、GPS 測位の結果から 1.5m 程度誤差を改善している。山野ら [6] は認知症患者の徘徊行動の見守りのため、Bluetooth と GPS を併用した位置推定手法を提案している。認知症患者に Bluetooth Low Energy (BLE) 発信機を所持させ、スマートフォンを所持した探索者が電波強度と GPS から被探索者の位置を推定する。評価実験では、探索者が被探索者を追い越したタイミングで 8m 以内の誤差で推定している。これらの研究は GPS のみを利用した場合より精度を向上させることができるが、それでも数 m 程度の誤差が生じることが問題点として挙げられる。

屋内でも位置推定をする手法として Wi-Fi を用いた推定 [7] が挙げられる。中谷ら [8] は機械学習を用いて Wi-Fi 電波情報から 2 地点間の物理的な距離を推定する手法を提案し、5m 未満の誤差での推定を実現している。田巻ら [9] は PDR (Pedestrian Dead-Reckoning) を利用した位置推定を Wi-Fi の受信強度を利用して補正する手法を提案し、平均 0.64m、最大 1.55m の誤差で位置を推定している。PDR は加速度センサ、地磁気センサ、ジャイロセンサ、気圧センサなどの情報を用いて位置推定を行うため、屋内でも測位が可能である。また、堀川ら [11] は BLE ビーコンを用いた位置推定とスマートフォンに搭載された加速度、地磁気、ジャイロセンサの値を利用した PDR を併用する位置

推定をしている。位置測位に必要な BLE ビーコンが少ないときには PDR を用いて位置を推定し、BLE ビーコンが使用可能な場合、BLE 位置推定をすることによって、屋内測位を行っている。しかし、PDR での測位は磁場や保持姿勢による影響が大きく、PDR 区間での測位に大きな誤差が生じている。これらの研究では GPS を利用した測位よりも良い精度で推定することができるが、Wi-Fi やビーコンがある場所でしか測位することができない。

また、GPS や Wi-Fi を利用せずに位置や距離を推定する研究も提案されている。遠藤ら [10] は携帯端末に搭載されている加速度センサ、ジャイロセンサ、地磁気センサを用いて歩行者の位置を推定する PDR 技術を提案している。加速度センサから歩数を推定し、歩幅と歩数から移動距離を求め、ジャイロセンサと地磁気センサで進行方向を推定する。ジャイロセンサのドリフト蓄積による長距離の誤差を地磁気センサの値から基準点を決定することで、ジャイロセンサと地磁気センサを組み合わせることで推定した進行方向に対する垂直誤差を 40% 程度改善している。これらの手法は GPS や Wi-Fi を利用できない環境においても移動距離を推定できるが、開始地点の位置情報を既知とした相対的な位置推定であるため、位置推定を行う際には初期地点を指定する必要がある。また、ビーコンを利用する場合も機器の設置やキャリブレーション、学習が必要であり、個人で使用することは難しい。

3. 提案手法

本節では提案手法の構成およびアルゴリズムについて述べる。

3.1 概要

本研究では競技者に装着した加速度センサから得られる値と、角速度センサから得られる値を利用して実泳距離を推定する。提案システムの構成を図 1 に示す。理論上、センサデバイスの移動距離は加速度を二重積分することで求めることができる。しかし、離散的サンプリングや量子化誤差、計測誤差が原因となり、得られたセンサデータを単純に積分しても実泳距離と推定距離に大きな誤差が生じてしまう。そこで、提案手法はプールのレーンの長さが既知であるという想定で加速度センサの値の積分結果を角速度データから得られた角度を用いて補正する。レーンの端から端まで泳いだ時点でセンサデータをもとにレーンに平行な方向の泳距離を計算し、この距離がプールのレーンの長さ (25m プールであれば 25m) となるように補正する係数を求める。そして、斜めに泳いだ距離も係数で補正して実泳距離の推定を行う。

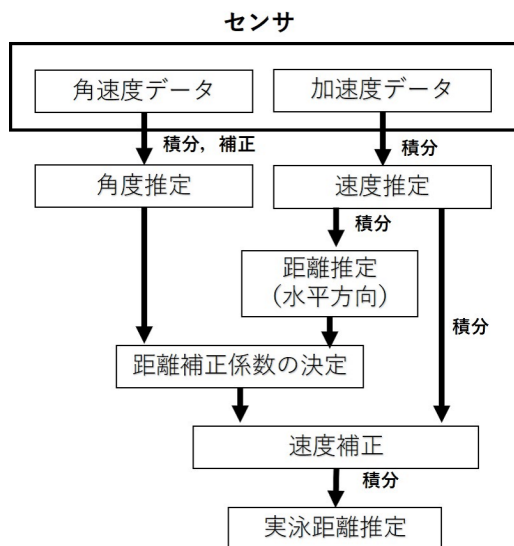


図 1 システム構成図

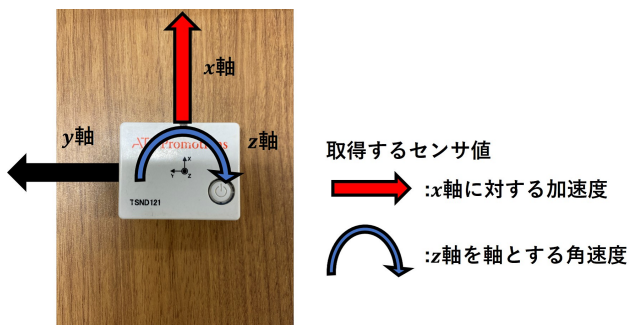


図 2 取得するセンサ値

3.2 センサデータ取得

競技者のセンサデータの取得をする。加速度センサおよび角速度センサを競技者の身体に取り付け、加速度データ、角速度データを取得する。取得するセンサ値は図 2 に示すように、 x 軸方向に競技者が進行し、 z 軸が鉛直方向となるように装着し、時刻 t における x 軸の加速度データ $x(t)$ と z 軸を軸とする角速度データを $\omega(t)$ を取得する。レーンの端から端まで泳いだ区間の加速度データ列 $x(i)[m/s^2](i = 0, \dots, N)$ 、角速度データ列 $\omega(i)[degree/s](i = 0, \dots, N)$ を得る。ただし、 i は計測開始時刻を 0 とした時刻、 N はデータ列のサンプル数とする。レーンの端まで到達した時刻はターンの動作を加速度センサと角速度センサから判定できると想定しているが、本研究では実装しておらず今後の課題とする。

3.3 角度推定

得られた角速度データ列をもとに、レーンに平行な線分と進行方向のなす角、つまりレーンを直進する進行方向からのずれの角度、の系列を推定する。得られた角速度データ $\omega(i)$ から、(1) 式に示す台形積分によって角度変化データ列 $\alpha(i)[degree]$ を得る。ただし、 $\Delta t[s]$ はデータの取得時

間隔であり、連続する 2 サンプルのタイムスタンプの差から得られる。

$$\alpha(i) = \frac{1}{2} (\omega(i) + \omega(i+1)) \cdot \Delta t \quad (i = 0, \dots, N-1) \quad (1)$$

そして、(2) 式に従い累積角度変化を求めることでプールサイドにタッチする瞬間のレーンに平行な線分と進行方向のなす角 A を得る。

$$A = \sum_{i=0}^{N-1} \alpha(i) \quad (2)$$

ここで、角度変化データ列 $\alpha(i)$ には台形積分、量子化誤差、センサ計測誤差による誤差が含まれるため補正する。競技者がレーンを泳ぐ際、途中で蛇行して泳いだとしても、プールサイドにタッチする瞬間のレーンに平行な線分と進行方向のなす角の真値 A_{real} は 0 degree で近似できると考えられる。そこで、(3) 式より、累積角度変化の誤差 d を得る。ただし、 A_{real} は通常の競泳でプールのレーンに沿って泳ぐ場合は 0 で近似できるが、途中で方向転換をするような特集な場合は方向転換した位置から計算される値を入力する必要がある。

$$A_{err} = A - A_{real} \quad (3)$$

そして、(4) 式に従い、累積角度変化の誤差 A_{err} をデータサンプル数 $N-1$ で割った角度変化 1 サンプルあたりの誤差を角度変化 $\alpha(i)$ から引くことで、補正後の角度変化データ $\alpha'(i)$ を得る。

$$\alpha'(i) = \alpha(i) - \frac{A_{err}}{N-1} \quad (4)$$

3.4 速度推定

得られた加速度データ列 $x(i)$ ($i = 0, \dots, N$) から、(5) 式に示す台形積分によって速度データ列 $v(i)[m/s]$ を得る。ただし、 $\Delta t[s]$ はデータの取得時間間隔であり、連続する 2 サンプルのタイムスタンプの差から得られる。

$$v(i) = \frac{1}{2} (x(i) + x(i+1)) \cdot \Delta t \quad (i = 0, \dots, N-1) \quad (5)$$

3.5 距離推定 (水平方向)

速度データ列 $v(i)$ は競技者自身の泳いでいる方向に対する速度であるため、理論上 $v(i)$ を積分すれば実泳距離が得られるが、台形積分や量子化誤差によって誤差が生じる。提案手法では 3.3 節で得られた補正後の角度変化データ列 $\alpha'(i)$ を用いて、レーンに平行な方向の速度データ列 $v_p(i)$ を (6) 式によって求める。

$$v_p(i) = v(i) \cos \alpha'(i) \quad (6)$$

次に $v_p(i)$ を (7) 式にしたがって台形積分し、レーンに平行な方向の移動距離データ列 $l(i)$ を求める。

$$l(i) = \frac{1}{2} (v_p(i) + v_p(i+1)) \cdot \Delta t \quad (i = 0, \dots, N-2) \quad (7)$$

そして、(8)式にしたがって、移動距離データ列 $l(i)$ を積分することでレーンに平行な方向の総移動距離 L を求める。

$$L = \sum_{i=0}^{N-2} l(i) \quad (8)$$

3.6 距離補正係数の決定

総移動距離 L は理想的にはプールのレーンの長さ L_{real} になるが、実際は誤差を含む。そこで L が L_{real} となるように速度データ列 $v(i)$ を補正する係数 k を (9) 式にて求める。

$$k = \frac{L}{L_{real}} \quad (9)$$

3.7 速度補正

補正係数 k を用いて、競技者が泳いでいる方向の速度データ列 $v(i)$ を (10) 式に従って補正し、補正後の速度データ列 $v'(i)$ を得る。

$$v'(i) = kv(i) \quad (10)$$

3.8 実泳距離推定

補正後の速度データ列 $v'(i)$ を (11) 式にしたがって台形積分し、実泳距離データ列 $l'(i)$ を求める。

$$l'(i) = \frac{1}{2} (v'(i) + v'(i+1)) \cdot \Delta t \quad (i = 0, \dots, N-2) \quad (11)$$

最後に、(12) 式にしたがって補正後の速度データ列 $v'(i)$ の総和を求めることで、実泳距離 L' を得る。

$$L' = \sum_{i=0}^{N-2} l'(i) \quad (12)$$

4. 評価実験

本節では提案手法による実泳距離推定誤差を評価するために実施した実験について述べる。実験は2種類の環境で実施した。一つ目は、泳動作によって発生するセンサ値を除くためにビート板の上にセンサを固定し、幅 18m、長さ 25m のプールにおいて図 3 に示す直進ルートと図 4 に示す曲進ルートを進む実験である。二つ目は、実際に被験者にセンサを装着してもらい、前述の直進ルートと曲進ルートを泳ぐ実験である。

4.1 ビート版にセンサを固定した実験

4.1.1 実験環境

泳動作によるセンサ値の変化が無い状況における推定精度を評価するために、図 5 に示すように無線加速度角速度センサを木版にマジックテープで固定して、防水の袋に入れてビート板に固定し、直進ルートと曲進ルートを筆者の一人がビート板を押しながらプールを歩いて進ん

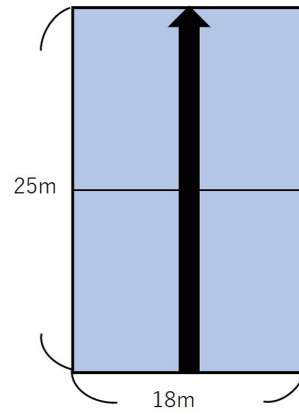


図 3 直進ルート

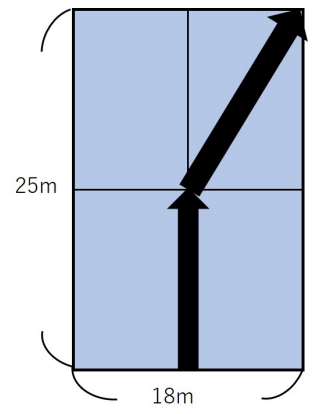


図 4 曲進ルート



図 5 センサを取り付けたビート板

で4回ずつデータを採取した。プールは幅 18m、長さ 25m で、床の中央 12.5m 地点には線が引かれている。センサは ATR-Promotions 社製 TSND121 を使用し、サンプリング周波数は加速度、角速度ともに 1,000Hz である。直進ルートの場合は蛇行せずにプールを直進するため、実泳距離は 25m である。曲進ルートの場合はプールのレーンの中央から移動を開始し、25m コースの中央の 12.5m 地点で進行方向を右側前方に 35.75° 方向を変えてプールの角に向かって直進したため、計算上の実泳距離は 27.90m となる。

4.1.2 結果と考察

直進ルートと曲進ルートでビート版にセンサを固定した実験における、補正をせず、センサの x 軸のデータのみを積分した移動距離推定結果と、提案手法で補正をした場合の移動距離推定結果を表 1 に示す。補正なしの場合、重力の影響、取得するセンサ値の蓄積により大きな誤差が生じる。直進ルートでは計算上 25.00m 進んだが、推定値は 25.01~25.03[m] の範囲となり、誤差は 0.03m~0.01[m] (0.04~0.12%) となった。曲進ルートでは計算上 27.90m 進んだが、推定値は 28.96~31.98[m] の範囲となり、誤差は 1.06~4.08[m] (3.80~14.62%) となった。直進ルートの場合、極めて高い精度で推定できたが、曲進ルートの誤差は大きくなった。特に、曲進ルート 1 回目の試行において、

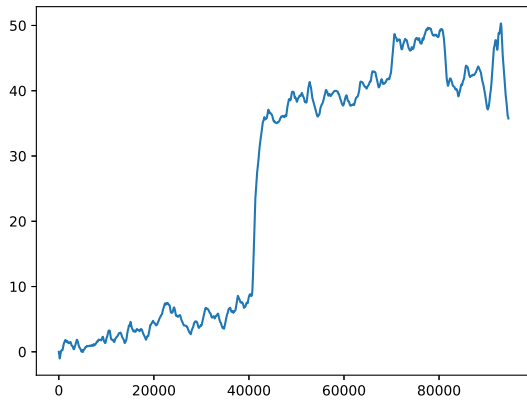


図 6 曲進ルート 1 回目の累計角度の推移

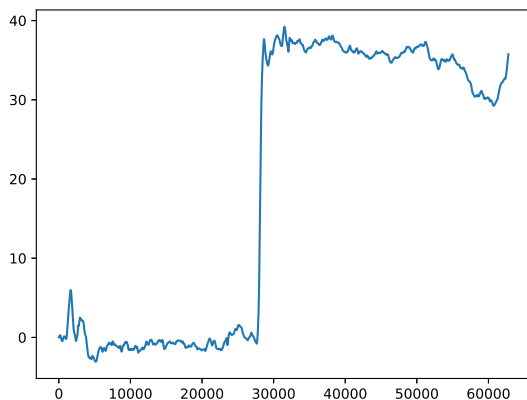


図 7 曲進ルート 4 回目の累計角度の推移

大きな誤差が生じた。1 回目の曲進ルートで得られた累積角度の推移を図 6 に、最も精度が高い 4 回目の曲進ルートで得られた累積角度の推移を図 7 に示す。比較すると 4 回目の試行では方向転換をした瞬間に角度が増加し、それ以外時の累積角度の変化が少ないのに対し、1 回目の試行では方向転換の直前と終了直前で累積角度に変化が見られた。原因として、筆者自身の運び方の問題や、センサデータのずれがあげられる。しかし、曲進ルート 2 回目以降の推定結果は誤差が 1.06~1.75[m] (3.80~6.27%) の範囲であるため、提案手法は移動途中で進行方向を変えても移動距離を正しく推定できていると考えられる。

4.2 被験者にセンサを装着した実験

4.2.1 実験環境

実際の水泳による推定精度を評価するために、被験者にセンサを装着して実験を行った。装着部位による性能の違いを調査するために、被験者の背中、後頭部、腰にセンサを装着した。被験者は体育会水泳部に所属している水泳経験者の 20 代男性 2 名、女性 2 名である。4.1 節において



図 8 背中にセンサを装着した被験者



図 9 後頭部にセンサを装着した被験者

行った実験と同様に直進ルートと曲進ルートをクロールで進んだ。背中にセンサを装着する際は図 8 に示すように、CATAPULT 社製 CATAPULT PLAYR[12] に防水加工したセンサをマジックテープで固定し装着した。後頭部にセンサを装着する際は図 9 に示すように、センサをゴーグルのゴムで固定し、その上からメッシュキャップを被ることで固定した。腰にセンサを装着する場合は図 10 に示すように、木板にセンサをマジックテープで固定し、木板が皮膚にあたると不快に感じるため、スマートフォン用の防水袋に入れ、腰に装着し、さらにベルトで固定した。センサは ATR-Promotions 社製 TSND121 を使用しサンプリング周波数は加速度、角速度ともに 1,000Hz である。いずれの被験者も 1 回の泳ぎにつき 1 か所にセンサを装着し、各ルート 2 回ずつデータを採取した。つまり、被験者ひとりあたり、センサ 3 か所 × ルート 2 種類 × 試行 2 回 = 12 回泳いでデータを採取した。

4.2.2 結果と考察

被験者の背中にセンサを装着した直進ルートと曲進ルートの補正なしの推定結果と補正ありの推定結果を表 2 に示す。直進ルートでは真値 25.00m に対して提案手法の推定値は 25.19~26.16[m] の範囲となり、誤差は 0.19m~1.16[m] (0.76~4.64%) となった。曲進ルートでは計算上 27.90m

表 1 ビート版にセンサを固定した場合の推定結果（括弧内の数値は真値に対する推定結果の割合）

| 試行 | 直進ルート | 曲進ルート | 直進ルート | 曲進ルート |
|------|--------------------|---------------------|------------------|------------------|
| 1 回目 | 964.63m (3858.52%) | -694.88m (2490.60%) | 25.03m (100.12%) | 31.98m (114.62%) |
| 2 回目 | 187.71m (750.84%) | 571.46m (2048.24%) | 25.01m (100.04%) | 29.65m (106.27%) |
| 3 回目 | 843.07m (3372.28%) | 497.46m (1783.01%) | 25.01m (100.04%) | 29.09m (104.26%) |
| 4 回目 | 444.60m (1778.40%) | 328.55m (1117.60%) | 25.01m (100.04%) | 28.96m (103.80%) |



図 10 腰にセンサを装着した被験者

進んだが、推定値は 25.79~36.69[m] の範囲となり、誤差は -2.11~8.79[m] (-7.57%~31.51%) となった。

被験者の後頭部にセンサを装着した際の、直進ルートと曲進ルートの補正なしの推定結果と補正ありの推定結果を表 3 に示す。直進ルートにおける提案手法の推定値は 25.15~28.90[m] の範囲となり、誤差は 0.15m~3.90[m] (0.60~15.60%) となった。曲進ルートにおける提案手法の推定値は 26.43~33.49[m] の範囲となり、誤差は -1.47~5.59[m] (-5.27~20.04%) となった。

被験者の腰にセンサを装着した直進ルートと曲進ルートの補正なしの推定結果と補正ありの推定結果を表 4 に示す。直進ルートにおける提案手法の推定値は 25.03~25.23[m] の範囲となり、誤差は 0.03~0.23[m] (0.12~0.98%) となった。曲進ルートにおける提案手法の推定値は 27.58~30.25[m] の範囲となり、誤差は -0.32~2.35[m] (-1.15~8.42%) となった。

結果から、3 部位の中で後頭部に装着した場合の推定結果が最も誤差が大きく、背中に装着した場合も推定結果の誤差が大きくなった。腰に装着した場合、他の部位よりも曲進ルートと直進ルートで最も小さい誤差の推定結果になった。背中にセンサを装着した場合の推定結果に誤差が生じる原因として、クロールのストローク動作によって背中が左右に振れ x 軸の方向がずれてしまうことが挙げられる。また、同じ被験者でも、試行によって推定結果に大きな差が生じることから、その時の呼吸回数や、ストロークの回数などによって推定結果に影響が出たと考えられる。後頭部に装着した場合も直進ルートと曲進ルートの両方において推定誤差が大きくなる場合があった。原因として被

験者が進行方向を目視で確認する際に顔が上がり、センサの x 軸の方向が天井の方向にずれてしまう瞬間があることや、呼吸動作のタイミングで軸がずれてしまうことが分かった。腰に装着した場合はバタ足によって腰が回転運動の影響を受けてしまうが、背中、後頭部に比べて、進行方向のずれが小さいことが分かった。

これらを踏まえると腰が被験者の泳ぎ方に対する軸のブレが少なく、距離を推定するのに最も適した位置であると考えられる。しかし、遊泳動作中はセンサが傾き、進行方向とセンサの軸が一致していないことが考えられる。遊泳動作中のセンサの傾きを推定し、センサ値を実際の進行方向に補正する必要があるが、今後の課題とする。

5. おわりに

本研究では、競泳の競技者が装着した加速度センサと角速度センサから得られる値を利用して実泳距離を推定する手法を提案した。泳動作によるセンサ値の変化を含めない環境で評価するためにビート板の上にセンサを固定し、直進のみからなる直進ルートと途中で角度をつけて方向を変える曲進ルートを歩いて運ぶ実験を行った。直進ルートの移動距離は 25m、曲進ルートの移動距離は計算上 27.90m となる。推定結果は直進ルートが 25.01~25.03[m]、曲進ルートは 28.96~31.98[m] となった。また、推定に適したセンサ装着部位を検証するために、実際に競技者の背中、後頭部、腰にセンサを装着して直進ルートと曲進ルートをクロールで泳ぐ実験を行った。被験者の背中にセンサを装着した際の推定結果は、直進ルートが 25.16~26.16[m]、曲進ルートは 25.79~36.69[m]、被験者の後頭部にセンサを装着した際の推定結果は、直進ルートが 25.15~28.90[m]、曲進ルートは 26.43~33.49[m]、被験者の腰にセンサを装着した際の推定結果は、直進ルートが 25.07~25.23[m]、27.58~30.25[m] となった。これらの結果から、腰にセンサを装着した際は軸のずれが小さく、推定結果の誤差は他の部位と比較してもっとも小さいことから、腰が最も距離を正しく推定できるセンサ装着部位であるといえる。

今後は、得られたセンサ値に対してローパスフィルタやハイパスフィルタなどを用いたセンサデータ前処理を行い精度を向上させる。また、被験者が泳動作を行う際にセンサが傾いてしまうことが考えられる。そのため加速度センサ、角速度センサ、地磁気センサを利用してセンサの姿勢

表 2 被験者の背中に装着した場合の推定結果 (括弧内の数値は真値に対する推定結果の割合)

| 被験者 | 試行 | 補正なし | | 補正あり | |
|-------|------|----------------------|---------------------|------------------|------------------|
| | | 直進ルート | 曲進ルート | 直進ルート | 曲進ルート |
| 被験者 1 | 1 回目 | 738.38m (2953.52%) | 941.33m (3373.94%) | 25.19m (100.76%) | 30.20m (108.24%) |
| | 2 回目 | 807.54m (3230.16%) | 1253.86m (4494.12%) | 25.61m (102.44%) | 28.37m (101.68%) |
| 被験者 2 | 1 回目 | -195.43m (-781.732%) | -20.94m (-75.05%) | 25.97m (103.88%) | 26.97m (96.67%) |
| | 2 回目 | -140.04m (560.16%) | -115.66m (-414.55%) | 25.86m (103.44%) | 25.79m (92.43%) |
| 被験者 3 | 1 回目 | 690.23m (2760.92%) | 945.97m (3390.57%) | 25.44m (101.76%) | 31.48m (112.83%) |
| | 2 回目 | 566.64m (2266.56%) | 764.22m (2739.14%) | 25.70m (102.80%) | 26.41m (94.65%) |
| 被験者 4 | 1 回目 | 179.30m (717.20%) | 289.32m (1036.99%) | 26.03m (104.12%) | 29.26m (104.87%) |
| | 2 回目 | 262.09m (1048.36%) | 284.01m (1017.95%) | 26.16m (104.64%) | 36.69m (131.51%) |

表 3 被験者の後頭部に装着した場合の推定結果 (括弧内の数値は真値に対する推定結果の割合)

| 被験者 | 試行 | 補正なし | | 補正あり | |
|-------|------|---------------------|---------------------|------------------|------------------|
| | | 直進ルート | 曲進ルート | 直進ルート | 曲進ルート |
| 被験者 1 | 1 回目 | 767.60m (3070.40%) | 1722.89m (6175.23%) | 25.15m (100.60%) | 33.37m (119.61%) |
| | 2 回目 | 819.35m (3277.4%) | 1839.10m (6591.76%) | 25.17m (100.68%) | 26.43m (94.73%) |
| 被験者 2 | 1 回目 | 1892.64m (7570.56%) | 2334.32m (8366.74%) | 25.55m (102.20%) | 29.69m (106.42%) |
| | 2 回目 | 1719.14m (6876.56%) | 2097.40m (7517.56%) | 25.36m (101.44%) | 28.22m (101.15%) |
| 被験者 3 | 1 回目 | 1273.16m (5092.64%) | 1529.73m (5482.90%) | 26.35m (105.40%) | 31.68m (113.55%) |
| | 2 回目 | 1155.69m (4622.76%) | 1632.37m (5850.79%) | 28.90m (115.60%) | 33.49m (120.04%) |
| 被験者 4 | 1 回目 | 1080.85m (4323.40%) | 1897.54m (6801.12%) | 25.81m (103.24%) | 27.90m (100.00%) |
| | 2 回目 | 1062.39m (4249.56%) | 1601.92m (5741.65%) | 26.22m (104.88%) | 27.31m (97.89%) |

表 4 被験者の腰に装着した場合の推定結果 (括弧内の数値は真値に対する推定結果の割合)

| 被験者 | 試行 | 補正なし | | 補正あり | |
|-------|------|--------------------|-----------------------|------------------|------------------|
| | | 直進ルート | 曲進ルート | 直進ルート | 曲進ルート |
| 被験者 1 | 1 回目 | 256.80m (1027.20%) | 350.14m (1254.98%) | 25.07m (100.28%) | 28.63m (102.62%) |
| | 2 回目 | 232.97m (931.88%) | 237.90m (852.69%) | 25.22m (100.88%) | 27.58m (98.85%) |
| 被験者 2 | 1 回目 | 249.56m (998.24%) | -338.614m (-12.137%) | 25.04m (100.16%) | 30.25m (108.42%) |
| | 2 回目 | 218.34m (873.36%) | -495.366m (-1775.51%) | 25.23m (100.92%) | 30.05m (107.71%) |
| 被験者 3 | 1 回目 | 126.45m (505.80%) | 491.98m (1763.37%) | 25.06m (100.24%) | 30.21m (108.28%) |
| | 2 回目 | 180.20m (720.80%) | 510.71m (1830.50%) | 25.06m (100.24%) | 28.75m (103.05%) |
| 被験者 4 | 1 回目 | 357.70m (1430.80%) | 434.60m (1557.70%) | 25.03m (100.12%) | 29.16m (104.52%) |
| | 2 回目 | 332.73m (1330.92%) | 447.82m (1605.08%) | 25.06m (100.24%) | 29.45m (105.56%) |

を推定し、得られた加速度データを進行方向の加速度に補正する。姿勢推定としてクォータニオンによる姿勢表現を用いることでオイラー角では特異点となる $\pm 90^\circ$ になった際の姿勢も表現でき、回転行列よりも少ないパラメータで表現できるため、クォータニオンを用いて姿勢を表現し補正する。さらに、実験ではクロールのみでデータを採取したが、バタフライ、平泳ぎ、背泳ぎでも性能を評価する予定である。

参考文献

[1] Garmin Swim2, <https://www.garmin.co.jp/products/intosports/swim-2-slate/>.
 [2] Form Smart Swim Goggles, <https://www.formswim.com/>.
 [3] 中島 求, 仰木裕嗣, 秋山絵理, 風見直亮, 手首装着型加速度・角速度センサを用いた競泳トレーニング用泳動作表示システムの開発 (水泳), ジョイント・シンポジウム講演論文集: スポーツ工学シンポジウム: シンポジウム: ヒューマン・ダイナミクス, Vol. 2007, pp. 200–203 (2007).
 [4] 五十嵐雄哉, 貞清一浩, Imes 位置情報システムの開発, 日本建築学会技術報告集, Vol. 20, No. 45, pp. 799–802 (2014).
 [5] 小河原亮, 羽多野裕之, 藤井雅弘, 伊藤 篤, 渡辺 裕, GPS 測

位情報とセンサ情報に基づく位置推定システムに関する研究, 情報処理学会論文誌, Vol. 56, No. 1, pp. 2–12 (2015).
 [6] 山野太靖, 白松 俊, 岩田 彰, 永井明彦, Kugler Mauricio, 高齢者徘徊見守りシステムのための bluetooth と GPS を併用した位置推定手法, 第 78 回全国大会講演論文集, Vol. 2016, pp. 995–996 (2016).
 [7] C. Yang and H. Shao, Wifi-based Indoor Positioning, IEEE Communications Magazine, Vol. 53, No. 3, pp. 150–157 (2015).
 [8] 中谷友哉, 前川卓也, 白川真澄, 原隆浩, ニューラルネットワークによる wi-fi 受信電波強度を用いた 2 地点間距離推定に関する検討, 情報処理学会研究報告モバイルコンピューティングとパーベイシブシステム (MBL) 研究会, Vol. 2017-MBL-82, No. 42, pp. 1–8 (2017).
 [9] 田巻櫻子, 田中敏幸, Wi-fi および端末センサ情報を用いた 3 次元屋内位置測位手法の検討, 国際 ICT 利用研究学会論文誌, Vol. 2, No. 1, pp. 24–30 (2018).
 [10] 遠藤 巖, 藤田 悟, 複数のセンサを組み合わせた屋内歩行者位置推定, マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2013 論文集, Vol. 2013, pp. 188–195 (2013).
 [11] 堀川三好, 古舘達也, 工藤大希, 岡本 東, BLE 位置測位および PDR を用いたハイブリッド型屋内位置測位手法の提案, 情報処理学会研究報告モバイルコンピューティングとパーベイシブシステム (MBL) 研究会, Vol. 2015-MBL-76, No. 13, pp. 1–7 (2015).
 [12] PLAYR Soccer GPS Tracker: <https://playr.com/>.

catapultsports.com/us/.