

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

長谷川 凌佑¹ 内山 彰¹ 東野 輝夫¹

概要: 近年、スポーツにおけるデータ活用が注目を集めており、特に各選手の位置情報は戦略分析や選手育成などの様々な応用が可能な基礎データとして重要である。本研究では、車いすバスケットボールを対象として各選手の位置を把握するため、競技用車いすの左右の車輪といす下に設置した慣性センサおよび地磁気センサを利用した位置推定方式を検討する。本方式では、地磁気および角速度から車いすの速度と進行方向を推定し、自律航法により位置を推定する。さらに、自律航法による蓄積誤差の影響を抑えるため、BLE ビーコンや車いす同士の衝突により、位置を補正する方式を検討した。実際に車いすバスケットボールの試合におけるデータを収集し、評価を行った。その結果、約5分間の試合に対して、自律航法のみでは平均誤差は最大約5.3m、BLE ビーコンによる位置補正を想定した場合には、平均誤差は最大約2.8mとなることが分かった。

キーワード: 車いすバスケットボール, 自律航法, 9軸センサ, 衝突判定, BLE ビーコン

1. はじめに

近年、スポーツにおけるビッグデータ活用はますます注目を集めており、高度な戦略分析や選手育成などの様々な用途で利用されている。例えば、サッカードイツ代表は高精細カメラで選手やボールのスピード、相手チームの動きなど、1試合で約4000万件ものデータを取得・解析し、それを元にトレーニングメニューを作成し、実行したことが2014年のサッカーW杯で優勝する大きな要因になったと言われている。ラグビー日本代表も、選手の位置情報を徹底的に分析し、大きな成功を収めた。このような成果を受けて、大学などアマチュアスポーツでも、データ活用が進められている。

しかし、このような膨大なデータを集めるためにはデータ収集・分析を担当する専門家が必要であり、日々の練習や試合の度に機器を設営することは人的コストが高いという課題が存在する。このため、できる限り煩雑な作業なしで、スポーツに関連する様々なデータを収集することが求められている。スポーツで収集されるデータの例として、選手やボールの動きに関わる位置、加速度に加えて、心拍数などの生体情報が挙げられる。特に、位置情報はこれらの中でも最も応用範囲の広い基礎的データである。そこ

で、本研究では、車いすバスケットボールを対象に、できる限り低い人的コストで各選手の位置を把握することを目的とする。

屋外ではGPS(Global Positioning System)が主に利用されており、サッカーフィールドのように周辺に高い建物が無く空が開けた場所では、十分な精度で選手の位置が追跡可能である。準天頂衛星「みちびき」の運用開始により、GPSの精度はさらに向上していくことが期待されている[1]。一方、屋内ではGPS衛星の信号が届かないため、WiFiやカメラなど様々な測位手法が活用されている。特に、スポーツにおいてはプライバシーの問題が少ないため、カメラを用いることが一般的であり、いくつかの製品も存在する[2], [3]。しかしながら、映像を利用したトラッキングでは、専門の技術者により適切にカメラを設置する必要があるが、遮蔽による追跡の失敗が避けられない。このため、カメラを複数台設置することが必要となり、測定の手間が大きくなる。また、映像中の選手が誰であるかを特定(同定)する必要があり、トラッキングが途切れる度に手動での補正を求められるのが現状である。

これに対して、選手にセンサを装着する測位方式では、どの選手がどのセンサを装着しているかは既知であるため、同定を行う必要が無い点が大きなメリットである。車いすは車輪により移動するため、ロボットなどと同様に車輪の回転数を用いることで移動量や移動方向を知ることが

¹ 大阪大学大学院 情報科学研究科
Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

できる。ロボットの場合は、車輪の回転数による自律航法とレーザーなどによる測位を組み合わせた手法 [4] が数多く提案されている。しかし、車いすの場合は、ロボットと異なり車軸などにセンサを内蔵することが難しいため、正確な車輪の回転数を把握することが難しい。このため、文献 [5] では、車いすのスポークに取り付けた磁石により車輪の回転数を計測し、通路の形状と組み合わせた位置推定を実現している。しかし、車いすのスポークは本数が限られているため、計測可能な回転数の解像度が粗くなってしまい、動きの自由度が高い車いすバスケットボールでは十分な精度が得られないことが危惧される。

そこで本研究では、車いすバスケットボールにおける人的コストの少ない選手位置の把握を目的として、9軸センサを用いた自律航法を検討する。まず、移動量を推定するため、左右の車軸に取り付けたセンサにより角速度を計測し、それぞれの回転数を推定する。また、椅子下に取り付けたセンサにより地磁気を取得する。車いすバスケットボールでは車いす同士の衝突などにより、車輪の回転数だけでは正確に移動方向の変化量を捉えられない場合があるため、地磁気を利用して移動方向を推定する。体育館などの環境では周辺に地磁気を乱す電子機器などが存在しないため、一般的な屋内位置推定と異なり、地磁気を用いて方向を把握することができる。

さらに、本研究では、自律航法により蓄積する誤差に対して、いくつかの位置補正方式を検討する。具体的には、(1) 車いす同士の衝突、(2) ゴールに設置した BLE ビーコン、(3) ランダムに手動補正、の3種類を検討する。車いすバスケットボールでは、相手の進路をブロックする目的で車いす同士の衝突が頻繁に起こる。車いす同士の衝突発生時は衝突した車いす同士が隣接していなければならないことから、位置補正に利用することができる。衝突の検知には、車いす下の加速度センサを用いる。

本方式により実現可能な性能を明らかにするため、実際に車いすバスケットボールの練習試合において、6名のデータを収集し、評価を行った。自律航法のみでは、時間経過とともに誤差が蓄積するものの、約5分間の試合に対して、平均誤差は最大で5.3mとなることが分かった。また、いくつかの位置補正情報を組み合わせた場合の影響をシミュレーションにより評価した結果、衝突とビーコンによる補正を併用した場合において、平均誤差は最大2.8mとなることが分かった。以上の結果より、詳細な戦術の分析などの用途に対しては十分な精度が得られないものの、選手一人一人の移動パターンやダッシュ、ターンなどの車いす操作技能に関するデータを取得する目的においては、許容される精度を達成できることが分かった。

2. 関連研究

2.1 映像を用いたトラッキング

ChyronHego社製のTRACABでは、複数台のカメラを用いてフィールド全域を捉えた映像に対して画像認識技術を用いることで、ピッチ上の全選手とボールの移動軌跡を算出する [2]。また、Qoncept社の4D Trackerは特殊なセンサやハイスピードカメラなしで映像中の物体や人物をリアルタイムにトラッキングすることに成功しており、バレーボールや卓球などでの導入実績がある [3]。しかしながら、映像を利用したトラッキングでは、専門の技術者により適切にカメラを設置する必要があったり、物体の重なり(オクルージョン)による追跡の失敗が避けられない。このため、複数のカメラにより異なる角度から映像を撮影することで、オクルージョンを回避することが必要となる。また、映像によるトラッキングでは、映像中の選手が誰であるかを特定(同定)することが必要となる。このため、選手の背番号を認識する手法 [6] や、選手の顔を認識する手法 [7]、テキスト情報と機械学習アルゴリズムを用いた手法 [8] などが提案されている。しかし、背番号や顔を常にカメラで鮮明に写すためには多数のカメラを組み合わせる必要がある。また、試合のテキスト情報が得られるのはプロの限られた試合のみであり、アマチュアなど多くの場合では人手による記録を行う必要がある。

2.2 電波を用いた位置推定

スマートフォンの普及が進んでいることから、WiFiやBLEビーコンを用いた位置推定法は盛んに研究されてきた [9], [10] が、測位精度は数mと限られる。UWBを用いた位置推定では、広帯域の特性を生かして誤差数cmオーダーでの位置推定が可能である [11]。しかしながら、広帯域であるが故に国によって周波数帯の利用状況が異なり、日本では法的な規制が厳しいことから普及は進んでいない。また、これらの位置推定法では、位置の基準となるビーコンや複数の基地局を設置する必要があるなど、設置場所に制約を伴うスポーツでは実現が困難という課題もある。

2.3 自律航法

環境に設置した基地局などを利用せず、センサ単独で位置を推定する手法では、自律航法(Dead Reckoning)と呼ばれる手法が用いられる。自律航法では、単位時間ごとの移動方向と移動量を地磁気・角速度や加速度により推定し、それらを積算することによって初期位置からの相対的な移動軌跡を推定する。これに対して、任意の時点での絶対位置が与えられれば、それ以外の時点における絶対位置を推定することができる。ただし、自律航法のみでは時間経過

とともに移動方向や移動量の推定に対する誤差が蓄積し、位置誤差が大きくなるという課題がある。したがって、自律航法は蓄積した誤差をリセットできる WiFi などの位置推定法と併用することが一般的である。例えば文献 [12] では、歩行者の胸ポケットに入ったスマートフォンを用いて、加速度センサから歩数を推定し、角速度センサから推定される方向と組み合わせて自律航法を行ったうえで、ビーコンから信号を得た場合に位置を補正する。ただし、このような歩行者を対象とした自律航法では、前方に動くことが前提とされており、車いすのように後方への移動が多く発生することは想定されていない。さらに、歩行者では 1 歩ごとに観測される加速度の特徴が車いすでは現れないため、車いすの移動特性を考慮した自律航法の設計が必要である。文献 [4] では、車輪型移動ロボットでの左右車輪の速度に基づく自律航法とレーザーによる測位を組み合わせた手法が提案されている。しかし、周辺の壁などの形状に特徴がほとんど現れない体育館などの環境では、レーザーによる周辺形状測位の効果は薄い。

3. 位置推定方式

3.1 概要

本研究で検討する位置推定方式の概要を図 1 に示す。図 2 のように、競技用車いすの両車輪の車軸といす下に 1 つずつ、合計 3 つのセンサを設置する。センサにはスポーツセンシング社製の DSP ワイヤレス 9 軸モーションセンサを使用した (図 3)。このセンサを用いて 3 軸加速度、3 軸角速度、3 軸地磁気データを取得する。センサの計測可能な範囲は表 1 に示す通りであり、サンプリングレートは 200Hz である。

本方式では、これらのセンサデータと車いす形状のデータを組み合わせることにより、車いすの単位時間あたりの移動量と移動方向を推定する。これを繰り返すことで、自律航法によって各選手の移動軌跡を推定する。自律航法によって得られる軌跡は相対的な移動軌跡であるため、コート上の位置を決定するためには、いずれかの時点での絶対位置が必要となる。このため、本研究では、試合開始時点の絶対位置を手動で与えるものとした。また、自律航法だけでは時間経過とともに蓄積する誤差が避けられないため、低頻度で位置補正のための情報が得られるものとした。具体的には、BLE ビーコンによる位置補正、およびランダムなタイミングで映像から得られる実位置の 2 種類の絶対位置情報に加えて、車いす同士の衝突発生時には、相互に隣接する位置に存在するという相対位置情報の利用を検討する。

3.2 自律航法

3.2.1 位置推定

自律航法による位置推定は、直前の位置に移動ベクト

表 1 センサの計測可能範囲

センサの種類	単位	計測可能範囲
加速度	G	-16 ~ +16
角速度	dps	-1500 ~ +1500
地磁気	Gauss	-10 ~ +10

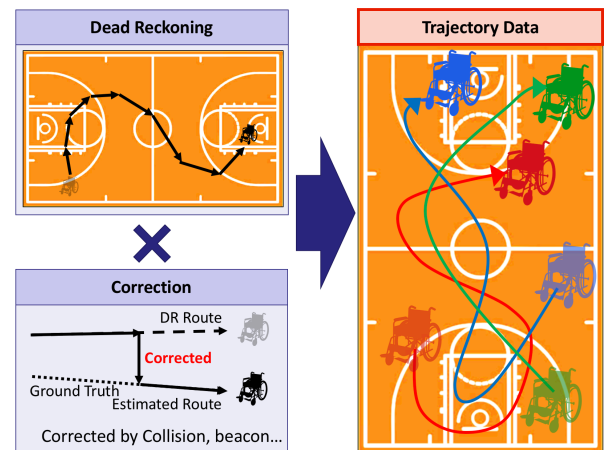


図 1 位置推定方式の概要

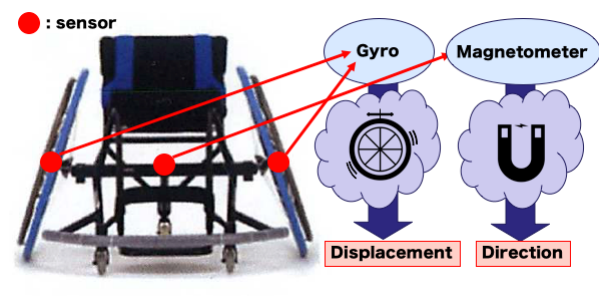


図 2 センサ取り付け箇所



図 3 センサ外観

ルを加えることで行う。具体的には、時刻 t の推定位置 (x^t, y^t) は時刻 $t-1$ から t にかけての移動量 d^{t-1} と進行方向 ψ^{t-1} を用いて、以下のように定義する。

$$x^t = d^{t-1} \cos \psi^{t-1} + x^{t-1} \quad (1)$$

$$y^t = d^{t-1} \sin \psi^{t-1} + y^{t-1} \quad (2)$$

3.2.2 移動量の推定

歩行者などと異なり、車いすは車輪があるため、時刻 t

における車輪の角速度 $\theta(t)$ [degree/sec.] から T 秒後までの車輪の回転角 Θ [degree] を以下のように求められる。

$$\Theta = \int_0^T \theta(t) dt \quad (3)$$

角速度は車いすが前方に進むときに正の値をとるものとする。車輪の直径を R とすると、左右それぞれの車輪の移動量 d_l, d_r は

$$d = R \times \frac{\Theta}{360} \quad (4)$$

と表せる。ここで、両車輪の速度が明らかになれば車いす全体の移動量 d^t は

$$d^t = \frac{d_r + d_l}{2} \quad (5)$$

となる。

3.2.3 移動方向の推定

車いすの移動方向は両車輪の移動量と車輪間の距離から計算することもできるが、車輪の移動量推定には誤差が累積するため、方向推定の精度が低下してしまう。このため、本研究では地磁気を用いて移動方向を推定する。一般的な屋内向け位置推定方式では、地磁気よりも角速度センサによって移動方向を推定することが多いが、体育館などの環境では地磁気の乱れを生じさせる要因となる電子機器などが存在しないため、地磁気でも高精度に移動方向を把握できると考えている。実際、周辺に電子機器が無い環境での予備実験において、椅子下に設置した地磁気センサによる方向推定が高精度に行えることを確認している。

本研究では、試合において地磁気データを収集することができなかつたため、正しい移動方向がわかるものと仮定する。

3.3 位置補正手法

3.3.1 BLE ビーコンによる位置補正

BLE ビーコンを設置することで、車いすに装着したセンサでビーコン ID を受信した時に、選手が付近にいることを把握できる。車いすバスケットボールでは攻守においてゴール下に入ることが重要であることから、選手はゴール下付近に集まる傾向がある。したがって、BLE ビーコンをゴールに取り付けることで、ゴール下にいる選手の位置補正を検討する。

車いすがゴール下に入り、ビーコンを受信し始めてから、受信できなくなるまでの期間を $0, \dots, F$ とする。ビーコンによる位置補正は、ビーコンの受信が途絶えてから行うものとする。ビーコン受信期間における車いすの推定位置を

$$P = \{(x_0, y_0), (x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_F, y_F)\}$$

とすると、推定位置の重心となる位置 $P_g = (x_g, y_g)$ は以下の式で求められる。

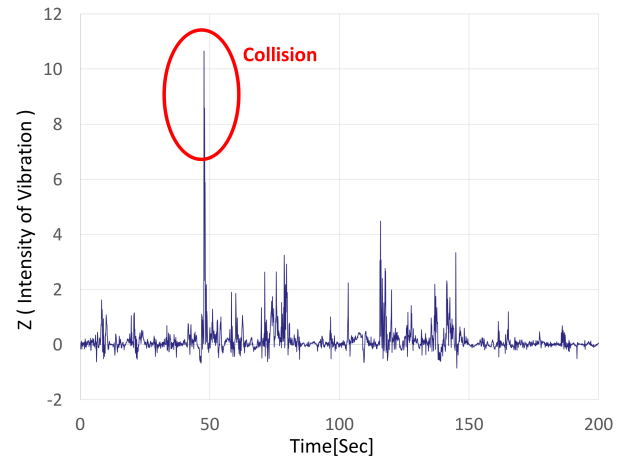


図 4 衝突時と通常時における振動の大きさ

$$P_g = \left(\frac{\sum_{i=0}^F x_i}{F}, \frac{\sum_{i=0}^F y_i}{F} \right) \quad (6)$$

車いすの位置補正は、重心 P_g がゴールの真下の座標になるように、ビーコン受信期間の移動軌跡を平行移動することで行う。

3.3.2 衝突による補正

車いすバスケットボールにおいて防御時に相手の攻撃を防ぐために車いすをぶつけて停止させるというプレーは頻繁に行われる。そこで、衝突時と通常移動時に発生する加速度変化の違いから衝突を検知し、それぞれの車いす位置を補正する方式を検討する。

衝突検知手法: 3 軸加速度のセンサデータ (a_x, a_y, a_z) から重力加速度 $1G$ を除いたものを振動の大きさ Z^t とすると、

$$Z^t = \left| \sqrt{a_x^{t2} + a_y^{t2} + a_z^{t2}} - 1 \right| \quad (7)$$

と表せる。車いすバスケットボールにおけるこの振動の大きさの変化を図 4 に示す。これより、通常移動時に比べて衝突時の振動の大きさは顕著であることが分かる。したがって、本方式では閾値による衝突検知を行う。ここで、各車いすにおいて、衝突が検知されたタイミングが、他の車いすにおいて衝突が検知されたタイミングと十分に近い場合、該当する 2 台の車いす間で衝突が発生したものと見なす。具体的には 0.5 秒以内の場合、タイミングが十分近いものとした。

衝突検知を位置補正の情報として利用することを考えると、衝突検知の信頼性はできる限り高いことが望ましい。このため、本研究では適合率が高くなるように実際の試合で収集した加速度データに基づき、閾値を決定した。詳細は 4.2 節で述べる。

なお、ほぼ同じタイミングで複数の閾値を超える加速度が検知された場合、実際に衝突が発生した車いすの組合せを決定することが必要となる。前述の通り、位置補正の情報として衝突検知結果の利用を考える場合、衝突検知の信

頼性をできる限り高めることが重要となる。このため、今回は3台以上の車いすではほぼ同時に閾値を超える加速度を検知した場合、衝突検知は行わないものとした。

補正手法: 衝突を検知した際の位置補正には、いくつかの方法が考えられる。ここでは、2種類の方法を検討する。1つ目は衝突した車いす同士を双方の中間点に移動させる手法である。2つ目はそれぞれの推定位置に信頼度を設け、信頼度の比に応じて重み付けを行った位置に補正を行う手法である。信頼度は1を初期値とし、0.1秒ごとに0.001ずつ減衰していくように設定した。ただし、信頼度の下限は0.01とした。なお、ビーコンおよび手動で位置補正を行った時に信頼度は1にリセットされるものとした。衝突発生時の双方の車いすの位置を $P_1 = (x_1, y_1)$, $P_2 = (x_2, y_2)$, 信頼度を L_1, L_2 とすると、双方の位置 $P_{collision}$ は以下の座標に補正される。

$$P_{collision} = P_1 + (P_2 - P_1) \times \frac{L_2}{L_1 + L_2} \quad (8)$$

また、双方の信頼度 $L_{collision}$ も同様に以下の式で更新されるものとした。

$$L_{collision} = L_1 + (L_2 - L_1) \times \frac{L_2}{L_1 + L_2} \quad (9)$$

4. 評価

4.1 評価環境

提案手法の評価を行うために実際の車いすバスケットボールの試合においてデータを収集した。試合時間は5分17秒で記録映像のフレームレートは10fps、総フレーム数は3177フレームであった。試合に参加した選手は10名であったが、センサの不備により6名分のデータしか収集することができなかった。選手の使用した車いすの車輪直径は、選手ID3のみが670[mm]で、それ以外の選手は610[mm]であった。位置および衝突の真値は映像から取得した。なお、データ収集時に地磁気を記録することができなかったため、性能評価では映像から抽出した移動方向を用いた。また、選手の初期位置は、映像に基づき真値を与えた。

4.2 衝突検知性能

衝突検知における閾値の影響を調べるため、図5に衝突検知の評価結果を示す。この結果より、閾値が大きくなるほど検知漏れが増加するが、適合率は向上することが分かる。位置補正への利用を考えると、適合率は高いことが望ましいため、この評価結果より、以降では閾値を8と定めることとした。

4.3 自律航法の位置誤差

自律航法において、車輪直径の計測が間違っていると、結果に大きな影響を及ぼす。このため、まず実際の移動軌

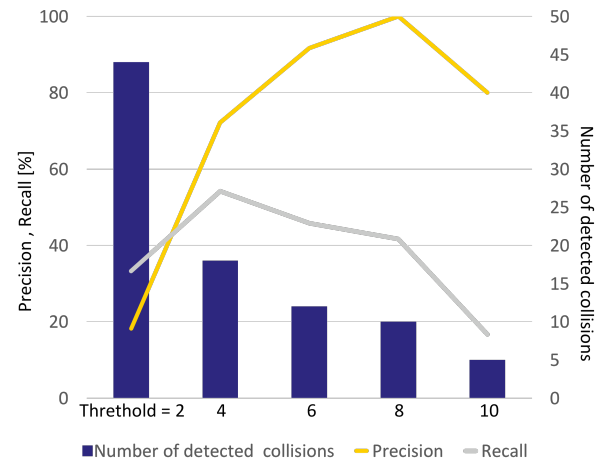


図5 衝突検知結果

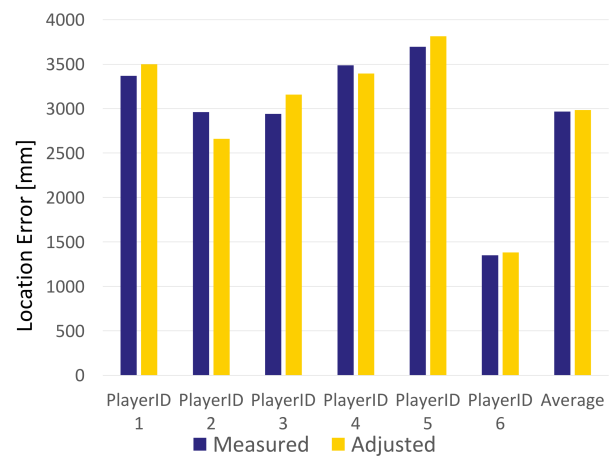


図6 車輪直径の調整効果

跡の長さが推定した移動軌跡の長さと同じになるように車輪の直径を設定した場合の位置誤差を評価した。結果を図6に示す。この結果より、車輪の直径を調整しても、必ずしも精度が向上するとは限らないため、車輪直径の計測誤差以外の要因が大きいことが分かる。このため、以降の評価では事前に計測した車輪直径をそのまま利用するものとした。

自律航法による位置誤差の時間変化を図7に示す。この結果より、時間経過とともに徐々に誤差が大きくなっていくことがわかる。これは自律航法の特長上、避けられない課題であり、BLEビーコンなどの位置補正を行うことで、誤差の蓄積を避けることが必要となる。それでもなお、約5分間の試合に対して、初期位置を与えた自律航法のみで、平均誤差は最大で5.3mとなることが分かった。また、2分間での平均位置誤差の増加は2.2m程度に抑えられることが分かった。

4.4 補正の効果

4.4.1 ビーコンによる補正の効果

データ収集時にはBLEビーコンの設置ができなかった

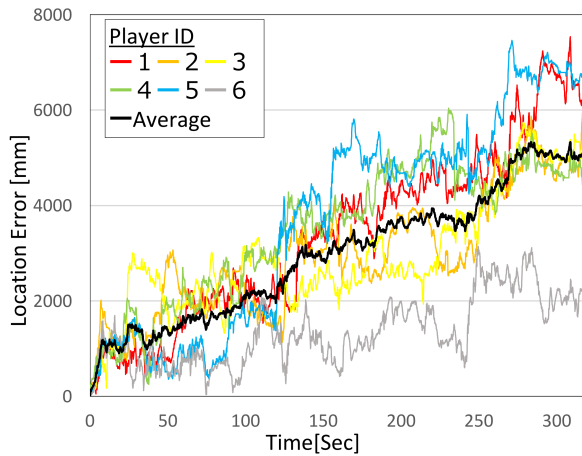


図 7 自律航法単独での位置誤差の時間変化

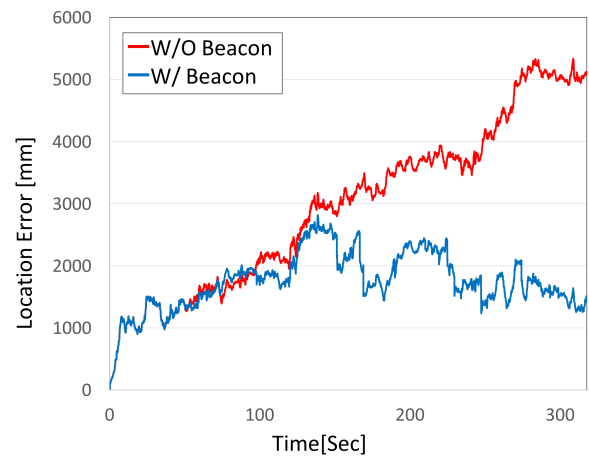


図 9 ビーコンによる補正後での位置誤差の時間変化

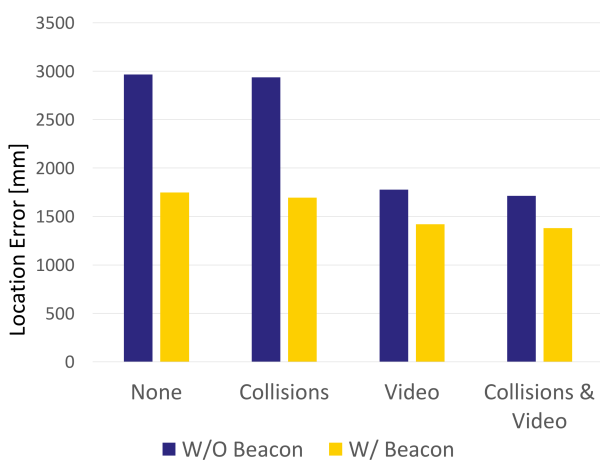


図 8 ビーコンによる補正結果

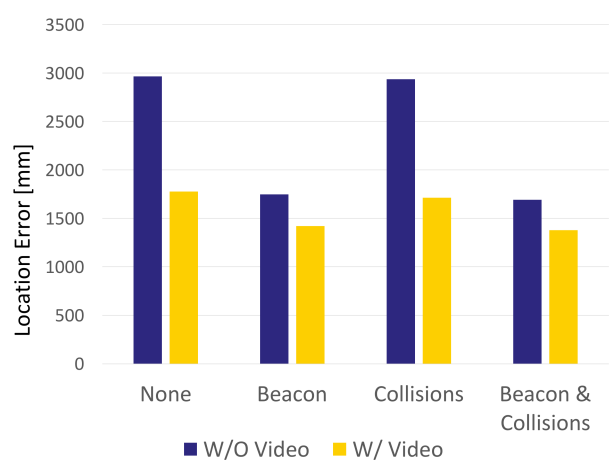


図 10 映像による補正結果

ため、今回の評価では、シミュレーションにより BLE ビーコンの補正効果を評価した。ゴール下を中心として、半径 1m の円内に存在する時に、ビーコンを受信できるものとし、車いすの位置を補正した。結果は図 8 のようになり、ビーコンによる補正を行うことで、平均誤差が最大 2.8m 程度に抑えられることが分かった。これは補正がない状態と比べて 41.1% の位置誤差低減になる。また、他の補正手法と組み合わせることでさらに誤差を抑えられることが分かった。

ビーコンによる補正を行なった時の平均誤差の時間変化は図 9 のようになった。この結果から、補正がない状態では誤差が蓄積され続けていくのに対して、ビーコンによる補正を行うことで平均誤差 2.8m 以内で収束することが分かった。このことから、選手同士の位置関係が重要となる戦術分析などの用途には不十分なものの、選手一人一人の移動パターンやターンなどの車いす操作技能に関するデータを収集する目的では、実用可能と考えられる。

4.4.2 映像に基づく補正の効果

比較のため、映像に基づき正しい絶対位置に位置を補正した場合の位置誤差を評価した。今回の評価では、10fps

の映像に対してフレームごとに 1/200 の確率で位置補正を行うものとした。これにより 20 秒に 1 回程度の補正が行われるようにした。補正を行う際には、対象となる車いすを 1 台ランダムに決定した。

図 10 は 10 回シミュレーションを行った場合の平均誤差を示している。この結果より、映像に基づく補正を行うことで平均誤差を 2m 以内に抑えることが可能になるが、人的コストが大きいため、この結果はあくまで比較対象として考える。ビーコンによる位置補正 (図 8) の結果と比較すると、ほぼ同等の位置誤差になっていることが分かる。得られる位置補正情報の精度は映像による補正を行った方が遥かに高いにもかかわらず、このような結果になった原因として、補正の行われる頻度がビーコンの場合よりも少なかったことが考えられる。実際に映像による補正を行うことは、追加でのカメラ設置が必要となり、人的コストの増大につながるが、より高精度な位置情報が必要となる場合には、このような追加での位置情報が必要となる。

4.4.3 衝突による補正の効果

衝突による補正結果を図 12 に示す。全体的に誤差はわずかながら小さくなっている。しかし、ビーコンや映像に

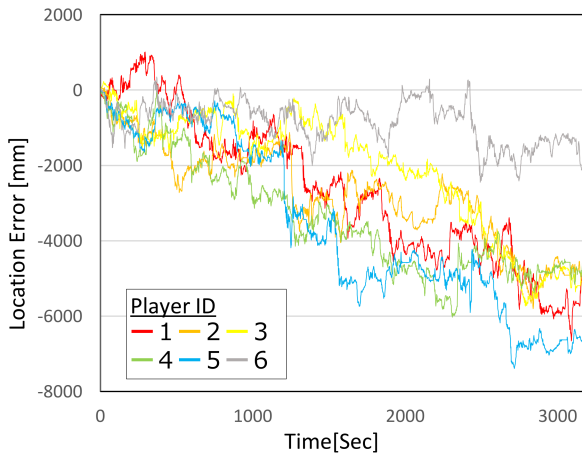


図 11 センターライン方向の位置誤差

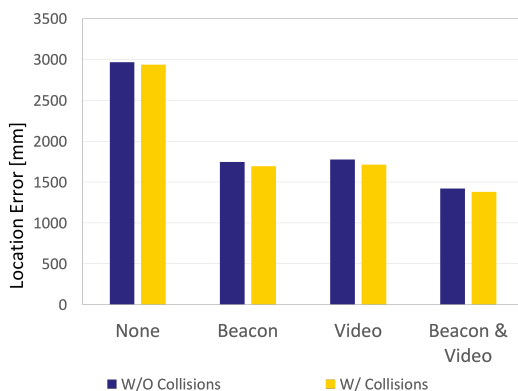


図 12 衝突による補正結果

よる補正に比べて著しい精度の向上は見られなかった。この原因として、衝突による補正は上記 2 つの補正手法と違い、相対的な位置補正であるため、双方の位置に依存することが挙げられる。特に今回収集したデータにおいては、実際の動き方に偏りが存在した等の理由により、全体的に同じ方向に推定位置がずれる傾向が見られた。

このことを確認するため、センターライン方向の位置誤差を図 11 に示す。この図において正負の値は、推定位置がずれている方向を表している。この結果から、全ての車いすが同じ方向にずれた推定位置となっていることが確認できる。このような場合、衝突検知による位置補正が行われたとしても、片方は実際の位置に近づき、もう片方は遠ざかることとなるため、互いに補正の効果を打ち消しあってしまったことで、全体的な平均誤差を大幅に減らすことができなかつたと考える。また、今回は 10 人中 6 人のデータしか利用できておらず、衝突回数が十分でなかったことも一因として考えられる。したがって、今後さらに衝突回数と位置誤差の関係を調査する必要がある。

5. おわりに

本研究では車いすバスケットボールを対象として、競技用車いすの左右の車輪といす下に設置した 9 軸センサを

利用した位置推定方式について検討を行った。その結果、約 5 分間の試合に対して、初期位置を与えた自律航法のみで平均誤差は最大 5.3m となることが分かった。さらに、ゴールに設置した BLE ビーコンによる補正を想定した場合、平均誤差は最大 2.8m となることを確認した。この結果より、詳細な戦術分析などの用途に対しては不十分なものの、選手一人一人の移動パターンやダッシュ、ターンなどの車いす操作技能に関するデータを取得する目的では、許容される精度を達成できることが分かった。

今後の課題として、衝突頻度を变化させたときの影響をシミュレーションにより評価することが挙げられる。実環境では、衝突の頻度を变化させて様々な条件のデータを収集することは非常に困難であるため、自律航法の誤差をモデル化し、シミュレーションを行うことは重要と考えている。さらに、戦術分析などに利用可能な位置精度を得るため、カメラにより得られたトラッキングデータと車いすに装着したセンサデータの併用も検討している。

謝辞 本研究は、平成 27 年度～平成 30 年度スポーツ庁受託事業「スポーツ研究イノベーション拠点形成プロジェクト (SRIP)」における成果である。

参考文献

- [1] 内閣府：みちびき (準天頂衛星システム), 内閣府 (オンライン), 入手先 (<http://qzss.go.jp/index.html>) (参照 2018-04-11).
- [2] 加藤健太：サッカーにおけるデータ分析とチーム強化, 電子情報通信学会 通信ソサイエティマガジン, Vol. 10, No. 1, pp. 29–34 (2016).
- [3] Qoncept: テクノロジー - 株式会社コンセプト — Qoncept, Inc., 株式会社コンセプト (オンライン), 入手先 (<http://qoncept.co.jp/ja/technology.html>) (参照 2018-04-16).
- [4] 橋本雅文, 大場史憲, 藤川泰司, 今牧和敏, 西田哲生: レーザ位置計測とデッドレコニングの統合による車輪型移動ロボットの位置推定法, 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 7, pp. 96–106 (1993).
- [5] Fan, R., Lam, S., Lin, E., Artemenko, O., Lu, Y. and Gerla, M.: Localizing a wheelchair indoors with magnetic sensors, *Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop*, pp. 141–147 (2013).
- [6] Šarić, M., Dujmić, H., Papić, V. and Rožić, N.: Player number localization and recognition in soccer video using HSV color space and internal contours, *International Conference on Signal and Image Processing (ICSIP 2008)* (2008).
- [7] Ballan, L., Bertini, M., Bimbo, A. D. and Nunziati, W.: Soccer players identification based on visual local features, *ACM International Conference on Image and Video Retrieval*, ACM, pp. 258–265 (2007).
- [8] Lu, W.-L., Ting, J.-A., Murphy, K. P. and Little, J. J.: Identifying players in broadcast sports videos using conditional random fields, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, IEEE, pp. 3249–3256 (2011).
- [9] 須ヶ崎聖人, 下坂正倫: 複数受信電波強度に基づく楕円周特徴量を用いた機種依存性の低い高精度屋内測位, 情報処理学会研究報告, Vol. 2017-MBL-82, No. 43, pp. 1–8

- (2017).
- [10] 佐野博之, 塚本昌克, 片桐雅二, 池田大造, 太田賢: BLE タグを用いた屋内位置推定手法における耐障害性の向上, 情報処理学会論文誌, Vol. 58, No. 5, pp. 1138–1150 (2017).
 - [11] Labs, P.: Pozyx - centimeter positioning for arduino, Pozyx Labs (online), available from <https://www.pozyx.io/> (accessed 2018-04-17).
 - [12] 菊池典恭, 矢野貴大, 中林昭一, 浜口雅春, 小池康晴: 歩行者自律航法の位置及び進行方向修正において電波ビーコン及び赤外線レーダの近接検出を用いる屋内測位システム, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. 100, No. 3, pp. 404–418 (2017).