

慣性センサを用いたゴルフパッティング動作の三次元解析

小山 諒^{*1}, 野澤 むつこ^{*2}, 丸山 剛生^{*3}

A three dimensional motion analysis of the golf putting using inertial sensors

Ryo KOYAMA^{*1}, Mutsuko NOZAWA and Takeo MARUYAMA

^{*1} Tokyo Institute of Technology, Dept. of Human System Science
Oh-okayama 35, Meguro-ku, Tokyo, 152-8550 Japan

The purpose of this study was to verify the accuracy of 3D inertial sensor, based on the motion capture system, and analyze 3D motion of human body and putter club during golf putting. To test the accuracy of 3D inertial sensor, we used the physics pendulum of firmly fixed putter club. Ten putts were tried using the physics pendulum as accurately as possible, in order to reach a target distance of 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5m. Then three experienced male golfers participated in this study. They executed putts of the same distance. 3D angular velocity of the putter club during golf putting performed by physics pendulum and human was calculated from 3D inertial sensor and motion capture system (MAC 3D). When participants performed putts, 3D angular velocity of the trunk was also calculated from inertial sensor and motion capture system. The results showed that difference between angular velocity calculated from inertial sensor and the same parameters calculated from motion capture system were relatively large. However, the 3D inertial sensor used in this study basically performed well because it captured motion trend of the putter club and the trunk. Additionally, we found that the more coefficient of variance of the angular velocity calculated from inertial sensor at impact increase, the more putting success rate decrease. These results of this study suggested that we can estimate putting skill by computing coefficient of variance of the angular velocity calculated from inertial sensor at impact.

Key Words : Golf Putting, Inertial Sensor, Motion Analysis, Motion Capture

1. 結 言

ゴルフにおけるパッティングとは、パタークラブを振り子のように動かしてボールを転がす動作のことである。パッティング動作は他のゴルフスイングに比べて小さく単純な動作である⁽¹⁾⁽²⁾が、ゴルファーのパフォーマンスを評価する 1 ラウンドの打数の内、約 43%をパッティング数が占めている⁽³⁾。そのため、パッティングはゴルフにおいて非常に重要な要素であると言える。パッティングを行う際はホールまでの距離やグリーンを的確に判断する能力と、再現性の高い正確な動作を行う能力が求められる。これらのパッティングスキル向上を妨げる要因の一つとして、練習時に動作の正確なフィードバックが行われていないことが報告されている⁽³⁾⁽⁴⁾。従って、パッティング動作のフィードバック情報が競技者にパタークラブの運動を明確に認識させ、失敗や問題の要因を明らかにできれば、パッティング能力向上やスコア向上のために有効なものとなり得ると考えられる。

フィードバック情報を得るためにはスイング動作の計測が必要となる。ゴルフに関する研究の多く⁽⁵⁾⁽⁷⁾では、スイング動作を計測するために複数台のカメラにより得た映像を処理する方法が用いられている。この方法は高精度で動作を計測できるが、複数台の同期の取れるカメラを空間に設置する必要があり、空間的にもシステム構

^{*1} 東京工業大学大学院 社会理工学研究科 (〒152-8550 東京都目黒区大岡山 35)

^{*2} 立命館大学 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1 丁目 1-1)

^{*3} 正員, 東京工業大学大学院 社会理工学研究科 (〒152-8550 東京都目黒区大岡山 35)

E-mail: koyama.r.ab@m.titech.ac.jp

成的にも規模が大きく、高コストとなる。そのため、設置場所も企業や研究機関に限られ、実際のゴルフコースや日常的な練習での使用が困難であるという問題点がある。複数台のカメラを用いる方法の問題点を解消し、パッティング動作を計測するために、本研究では三次元慣性センサに着目した。これは、小型・軽量・無線式で計測環境の制限が少なく、装着部位の三次元加速度と角速度を直接計測できるセンサである。取り付け方法や位置によって誤差が生じるというデメリットもあることに注意すれば、ゴルフの競技環境や日常練習での使用に適した動作計測装置であると考えられる。

これまでに、慣性センサを用いたパッティング動作計測の研究では、簡易なパッティングモデルと、クラブに装着した慣性センサを用いてパター軌跡計測法を提案した研究⁽⁴⁾、専用のクラブに慣性センサを埋め込み、振り子マシンによるパターの動作を計測した研究⁽⁸⁾、などが報告されている。しかし、これらの研究には、専用のパタークラブを必要とする、身体-クラブのシステムとしての動きが考慮できていない、スキル評価まで及んでいないといった問題点がある。慣性センサを用いてパッティング動作を計測する際に専用のパタークラブを必要とせず、身体の動きやスキル評価まで考慮した研究は見当たらない。

そこで、本研究ではモーションキャプチャシステムを基準として加速度・ジャイロセンサを装備した三次元慣性センサの精度を検証し、それを用いてゴルフパッティング動作時のクラブおよび身体の三次元運動を解析することを目的とした。

2. 方法

2・1 振り子マシンによる慣性センサの精度の検証実験

2・1・1 使用機器

本実験では、再現性と正確性の高いパッティング動作を模擬し、単純な運動における慣性センサの精度を検証するために、図1に示す振り子マシンを用いた。振り子マシンによるパッティング動作を慣性センサとモーションキャプチャシステムの2つの方法で計測し、慣性センサから得られた値を動作計測に用いられるモーションキャプチャシステムから得られた値と比較することで、本研究で用いる慣性センサの精度を検証する。

振り子マシンは、両肩を結んだ線の中心を支点とし、この線とグリップ部（手）を結んだ上肢に相当する部分（三角形上）とそのグリップ部に固定したパタークラブからなる振り子運動をパッティング動作とみなして作製されたものである。両肩間および上肢の長さはそれぞれ400、600mmであり、上肢に相当する部分の重さは体重60kgのヒトを想定してWinter⁽⁹⁾の身体部分係数から算出することにより、6.5kgとなっている。上肢に相当する部分は垂直面内の二次元運動のみを行い、パタークラブはライ角に基づきパターヘッドが地面と平行になるようにグリップ部に完全固定されている。支点にはベアリングが用いられ、滑らかかつ再現性の高い振り子運動を実現するようになっている。

パタークラブの運動を計測するために、三次元加速度センサ（±5G）・三次元ジャイロセンサ（±1500deg/s）を搭載し、計測データを内部メモリに格納可能な無線式三次元慣性センサ（ロジカルプロダクト社製、LP-WS1104、40mm×30mm×20mm、重量30g）を用いた。サンプリング周波数は100Hzとした。また、パタークラブへのセンサの装着を簡便に行えるようにアルミ製の治具を用いてセンサをクラブシャフトに取り付けた。

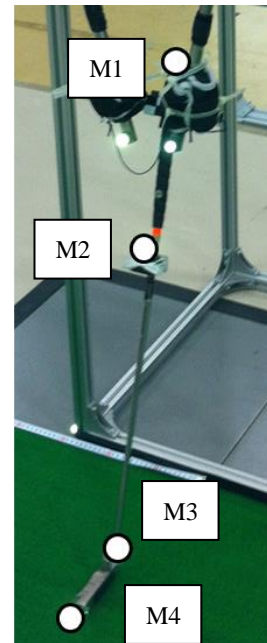
センサでの計測と併せて、10台の赤外線カメラで構成されるリアルタイム光学式モーションキャプチャシステムMAC 3D System（Motion Analysis社製）を用いて振り子マシンによるパッティング動作を撮影した。反射マーカはパタークラブ上に4個、振り子マシン上に9個貼付し、ボール上には1点の反射シールを貼付した。サンプリング周波数はセンサと同様の100Hzとした。本研究を通して、使用するパタークラブ（Callaway Golf社製、Odyssey）とボール（ダンロップスポーツ社製、Srixon）は同一のものであった。

2・1・2 実験試技

室内の平らな場所に4mの練習用マット（人工芝）を引き、実際のホールと同じ大きさ（10.8cm）の円形の紙を目標として置いた。ボールからホールの手前側の縁までの距離が0.5m・1.0m・1.5m・2.0m・2.5mの5つの目標を設定し、実験者が振り子マシンの振幅を調整してボールがホール上に止まるようにパッティングを行った。具体的には、振り子マシンの腕に着けた紐を引っ張ることにより事前に設定した位置までパタークラブを引き



(a) Over all view of physical pendulum



(b) Markers attached on the putter club in pendulum experiment

Fig.1 Physical pendulum

上げた後、別の実験者の合図によりできるだけ外力を加えないよう（初速度ゼロ）にして振り子運動をさせた。そして、ボールに対してパタークラブを垂直に衝突させた。各目標距離で 10 試行ずつパッティングを行い、計 50 回のパッティング動作を計測した。

2・1・3 座標系

絶対座標系は実験室内のある地点に設置し、ボールの打ち出される水平方向を X 軸正方向、鉛直上向きを Z 軸正方向、パタークラブのトゥーからヒールへ向かう方向を Y 軸正方向とした。

図 1(b)に示すようにパタークラブに取り付けたマーカ M1, M2, M3 を用いてクラブ座標系を算出した。すなわち、M3 から M1 に向かう単位ベクトルを e_z 、M4 から M3 に向かう単位ベクトルを S とした。 S と e_z の外積から e_x を求め、 e_z と e_x との外積から e_y を求めた。そして、これら e_x , e_y , e_z からなる座標系をクラブ座標系とした。

なお、三次元慣性センサの座標系は装着の都合上、図 2 に示す向きとなった。これはクラブシャフトに沿ったクラブヘッド方向を x_{s1} 軸、ボールの打ち出される方向を y_{s1} 軸、それらと直交し、被験者前方へ向かう方向を z_{s1} 軸とした。そのため、クラブ座標系で得られた角速度の値などは、慣性センサの座標系における値に変換した。

2・1・4 解析

本研究では、パッティング動作中のパタークラブの動きを次のような局面に分けた。まず、アドレス（スイング開始）からパター座標系の z_{s1} 軸回りの角速度が 0 となる時点（トップオブスイング）までをバックスイングとし、この時点からインパクトまでをダウンスイング、インパクト後から再び z_{s1} 軸回りの角速度が 0 となる時点までをフォロースルー、この時点を終りとした。

振り子マシンを用いた実験では、人が振り子マシンを操作して計測を行うため、解析区間は計測開始後パタークラブが振り子運動によって再び開始位置に戻ってくるまでの区間とした。すなわち、トップオブスイングからフィニッシュ時点を経て、再びトップオブスイングの位置に戻ってくるまでの区間である。

パターシャフト上の三次元慣性センサから出力された値は AD 変換及び単位変換を経て三次元角速度として表され、ノイズ除去のために 5Hz のカットオフ周波数で 2 次のバターワース型ローパスフィルタをかけて平滑化

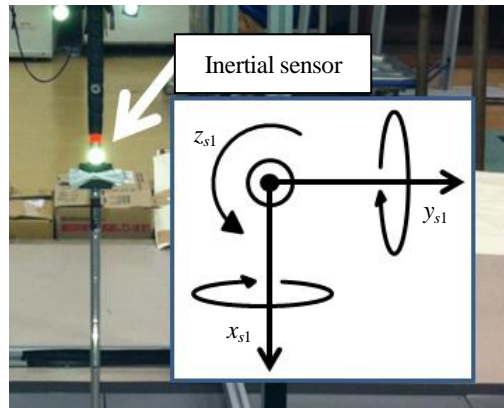


Fig.2 Local coordinate system for inertial sensor on the putter club

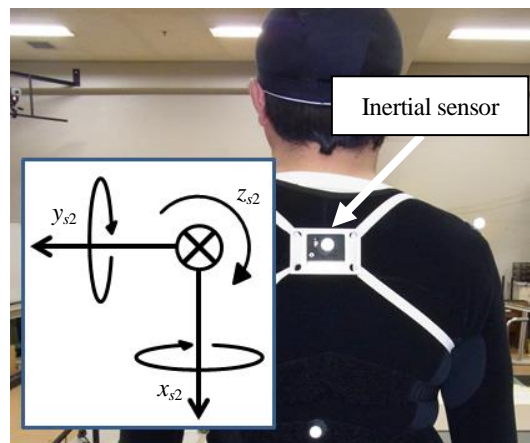


Fig.3 Inertial sensor to measure trunk motion

された。モーションキャプチャシステムから得られたマーカの位置座標データも同様のフィルタで平滑化され、XYZの順に回転させるカルダン角を用いて絶対座標系に対するクラブ座標系の三次元角度を算出した。その値を微分することにより、クラブ座標系における三次元角速度を算出した。

慣性センサの再現性を確認するために、解析区間中の特徴点であるインパクト時と z_{s1} 軸周りの角速度が最小値をとった時点において、慣性センサの角速度データから変動係数を算出した。

また、パッティング後にメジャーを用いて絶対座標系 X 軸上でのボールと目標の距離も計測した。

2.2 ヒトのパッティング動作に関する実験

2.2.1 被験者

本実験には健常な男子アマチュアゴルファー3名（年齢 44.3 ± 6.8 歳，身長 167.0 ± 5.0 cm，体重 62.3 ± 3.2 kg）が参加した。実験前に研究の趣旨を説明し，インフォームドコンセントを得た。

2.2.2 使用機器

パタークラブの運動を計測するための三次元慣性センサとパッティング動作を計測するためのモーションキャプチャシステムは2.1の実験と同様の機器・システムを使用した。加えて，本実験ではパタークラブに装着した三次元慣性センサと同じセンサを図3に示すように被験者の両肩甲骨の間付近に取り付けた。これらの計測機器のサンプリング周波数は2.1の実験と同様とした。

被験者の身体ランドマーク上に反射マーカを33個（+ダミーマーカ2個）貼付し，パタークラブ上の反射マーカは2.1の実験時より増加させて7個装着した。これは，より正確なクラブ座標系設定を行うためである。ボール上には1点の反射シールを貼付した。

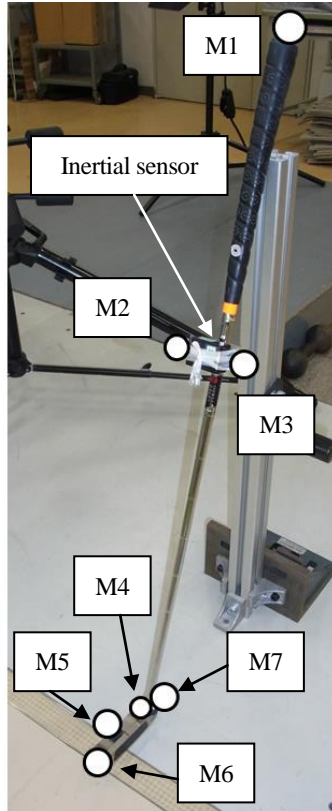


Fig.4 Markers attached on the putter club in human experiment

2・2・3 実験試技

ヒトがパッティング動作をする実験においても、2・1の実験と同様の環境と目標距離を設定した。パッティングを行う際、被験者に「ボールがホール上で止まるように」と教示した。実験前に約5分間のパッティング練習を行った後、各目標距離で10回ずつのパッティングを行うようにして、計50回のパッティング動作を計測した。その際、被験者は1回の試技ごとに無作為に選ばれた目標距離に対しパッティングを行った。

2・2・4 座標系

絶対座標系は2・1の実験と同様とした。クラブ座標系は図4に示すマーカの内の、M1, M2, M3を用いて算出した。すなわち、M2からM3に向かう単位ベクトルを i_x 、M2とM3の中点からM1へ向かう単位ベクトルを U とした。 U と i_x の外積から i_y を求め、 i_x と i_y の外積から i_z を求めた。そして、これら i_x , i_y , i_z からなる座標系をヒトの実験におけるクラブ座標系とした。また、本実験でも三次元慣性センサの座標系(x_{s1} 軸, y_{s1} 軸, z_{s1} 軸)は図2に示す向きであったため、クラブ座標系で得られた角速度の値などは、慣性センサの座標系における値に変換した。

被験者の第7頸椎棘突起、頸切痕、剣状突起に取り付けたマーカを用いて体幹座標系を算出した。すなわち、頸切痕から第7頸椎棘突起に向かう単位ベクトルを j_y 、剣状突起から頸切痕へ向かう単位ベクトルを E とした。 j_y と E の外積から j_x を求め、 j_x と j_y の外積から j_z を求めた。そして、これら j_x , j_y , j_z からなる座標系を体幹座標系とした。体幹に装着した三次元慣性センサの座標系は図3に示す向きとした。これは、直立した際の鉛直下向きに x_{s2} 軸、ボールの打ち出し方向に y_{s2} 軸、それらと直交し被験者の前方へ向かう方向に z_{s2} 軸をとった座標系である。ここでも、体幹座標系で得られた角速度の値などは、慣性センサの座標系における値に変換した。

2・2・5 解析

ヒトがパッティングを行う実験では、被験者がボールにアドレスした状態で、計測開始の合図を実験者が出してから、2・1・4で示したパッティングの各局面を経てフィニッシュに達した時点までを解析区間とした。

パターシャフト上及び体幹上の三次元慣性センサから出力された値は2・1の実験と同様のAD変換及び単位変換を経て三次元角速度として表された。センサ及びモーションキャプチャシステムから得られたデータは、ノイズ除去のために2・1の実験と同様のフィルタを用いて平滑化された。モーションキャプチャシステムから得られたマーカの位置座標データから、XYZの順に回転させるカルダン角を用いて絶対座標系に対するクラブ座標系及び体幹座標系の三次元角度を算出した。その値を微分することにより、それぞれの座標系における三次元角速度を算出した。

本実験では、ヒトによるパッティング動作の再現性を確認するために、解析区間中の特徴点であるインパクト時と z_{s1} 軸周りの角速度が最小となった時点において、パタークラブ上の慣性センサの角速度データから変動係数を算出した。体幹のセンサでも同様の時点で変動係数を算出した

また、パッティング後のボールと目標の距離も2・1の実験と同様の方法で計測した。

3. 結果

3・1 振り子マシンによる慣性センサとモーションキャプチャシステムの比較

図5は、振り子マシンによるパッティング動作時の、慣性センサおよびモーションキャプチャシステムから算出した、センサ座標系各軸周りの角速度の代表例である。目標距離は2.5mであった。図の横軸は解析区間全体を100%とした規格化時間を示し、図中の縦線はインパクトの時点を示している。目標距離2.5mの10試行において慣性センサが計測した角速度とモーションキャプチャシステムから算出した角速度の誤差の絶対値の平均は、 x_{s1} 軸； $3.51 \pm 1.30 \text{deg/sec}$ 、 y_{s1} 軸； $1.78 \pm 0.19 \text{deg/sec}$ 、 z_{s1} 軸； $0.94 \pm 0.09 \text{deg/sec}$ であった。3つの軸の内、特に x_{s1} 軸と y_{s1} 軸周りについては、モーションキャプチャシステムの示す値が大きく振動し、慣性センサの示す値と一致しているように見えない部分があった。これは、他の目標距離における振り子マシンのパッティングにおいても見られた。

図6は、目標距離2.5mでの振り子マシンによるパッティング動作時に慣性センサから算出した、センサ座標系各軸周りの10試行分の角速度である。横軸はデータ点数を示しており、表示区間は解析区間終了時点から前の2秒間である。この図において、慣性センサより算出したインパクト時の各軸周りの角速度の変動係数は、 x_{s1} 軸；15.3%、 y_{s1} 軸；252.9%、 z_{s1} 軸；4.8%であった。また、同様に z_{s1} 軸周りの角速度が最小となった時点における各軸周り角速度の変動係数は、 x_{s1} 軸；1.9%、 y_{s1} 軸；31.9%、 z_{s1} 軸；2.0%であった。

5つの目標距離における振り子マシンによるパッティング後のボールと目標との平均距離は、0.5m：0.039±0.038m、1.0m：0.081±0.042m、1.5m：0.055±0.080m、2.0m：0.121m±0.094m、2.5m：0.174m±0.114mであった。

3・2 ヒトのパッティング動作における慣性センサとモーションキャプチャシステムの比較

ヒトの結果の代表例としてSub.Aを取り上げる。図7は、Sub.Aが行ったパッティング動作時の、慣性センサおよびモーションキャプチャシステムから算出した、パタークラブ上のセンサ座標系各軸周りの角速度の代表例である。目標距離は2.5mであった。図の横軸は解析区間全体を100%とした規格化時間を示し、図中の縦線はインパクトの時点を示している。目標距離2.5mの10試行において慣性センサが計測した角速度とモーションキャプチャシステムから算出した角速度の誤差の絶対値の平均は、 x_{s1} 軸； $5.14 \pm 1.17 \text{deg/sec}$ 、 y_{s1} 軸； $2.17 \pm 0.79 \text{deg/sec}$ 、 z_{s1} 軸； $2.10 \pm 0.25 \text{deg/sec}$ であった。慣性センサのグラフに比べてモーションキャプチャシステムのグラフは大きく振動していることを示していた。これは振り子マシン同様、他の目標距離、及び他の被験者の同様の角速度グラフにおいても共通して見られた。

図8は目標距離2.5mでのSub.Aによるパッティング動作時にパタークラブ上の慣性センサから算出した、センサ座標系各軸周りの10試行分の角速度である。横軸はデータ点数を示しており、表示区間はインパクト(図中の縦線)を中間とした1.6秒間である。この図において、慣性センサより算出したインパクト時の各軸周りの角速度の変動係数は、 x_{s1} 軸；71.9%、 y_{s1} 軸；146.4%、 z_{s1} 軸；6.4%であった。また、同様に z_{s1} 軸周りの角速度が最小となった時点における各軸周り角速度の変動係数は、 x_{s1} 軸；22.9%、 y_{s1} 軸；73.48%、 z_{s1} 軸；3.1%であった。

モーションキャプチャシステムから算出したSub.Aの目標距離2.5mにおける体幹の角速度においても、図7のような振動する様子が確認された。目標距離2.5mの10試行において、体幹の慣性センサが計測した角速度と

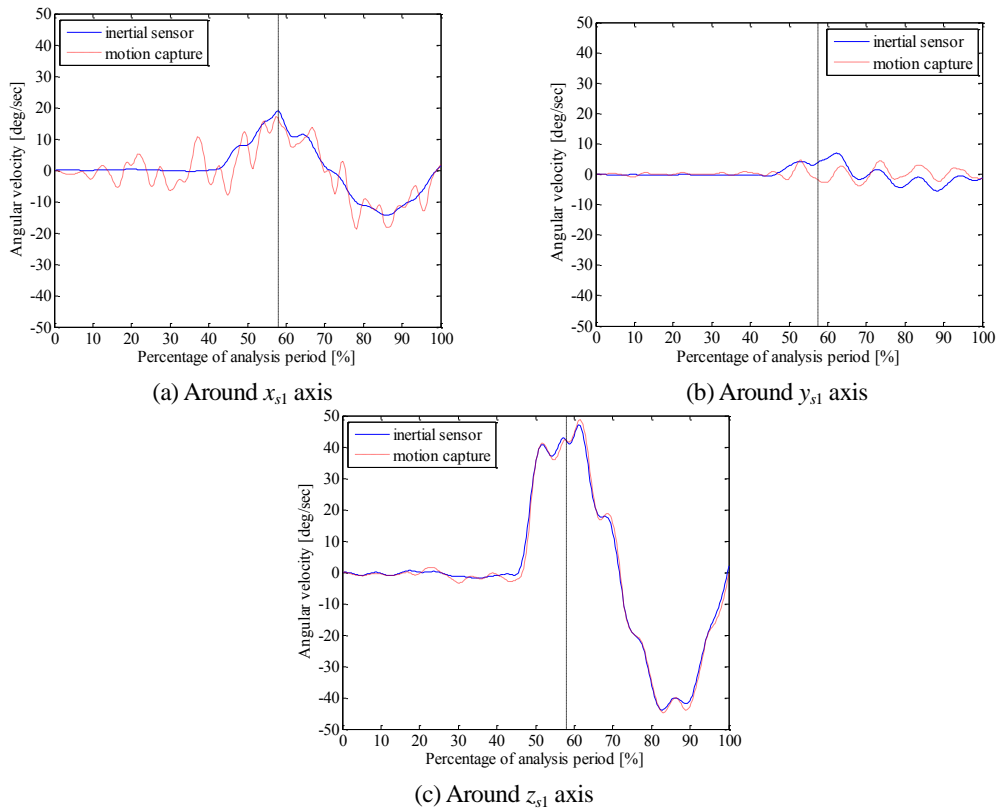


Fig.5 Angular velocity of the club in the physics pendulum putt

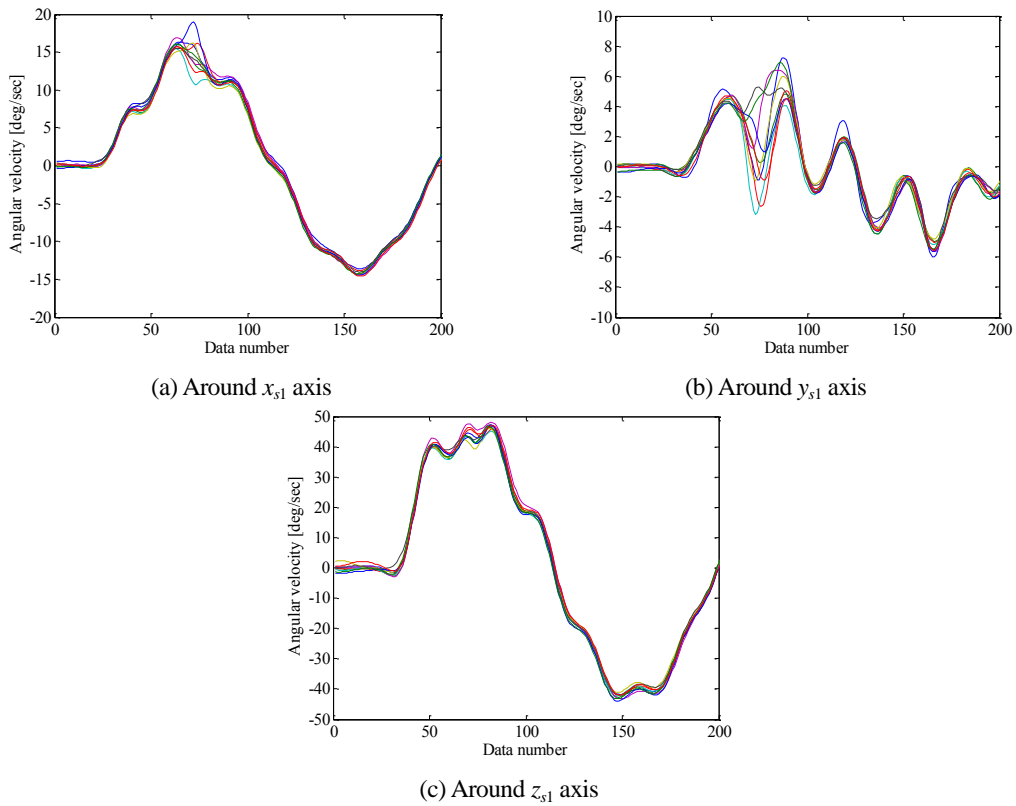


Fig.6 Angular velocity measured by inertial sensor under the terms of 2.5m physics pendulum putt

モーションキャプチャシステムから算出した角速度の誤差の絶対値の平均は、 x_{s2} 軸： $1.14 \pm 0.20 \text{ deg/sec}$ 、 y_{s2} 軸： $1.01 \pm 0.27 \text{ deg/sec}$ 、 z_{s2} 軸： $2.04 \pm 0.37 \text{ deg/sec}$ であった。体幹のセンサにおけるインパクト時の各軸周りの角速度の

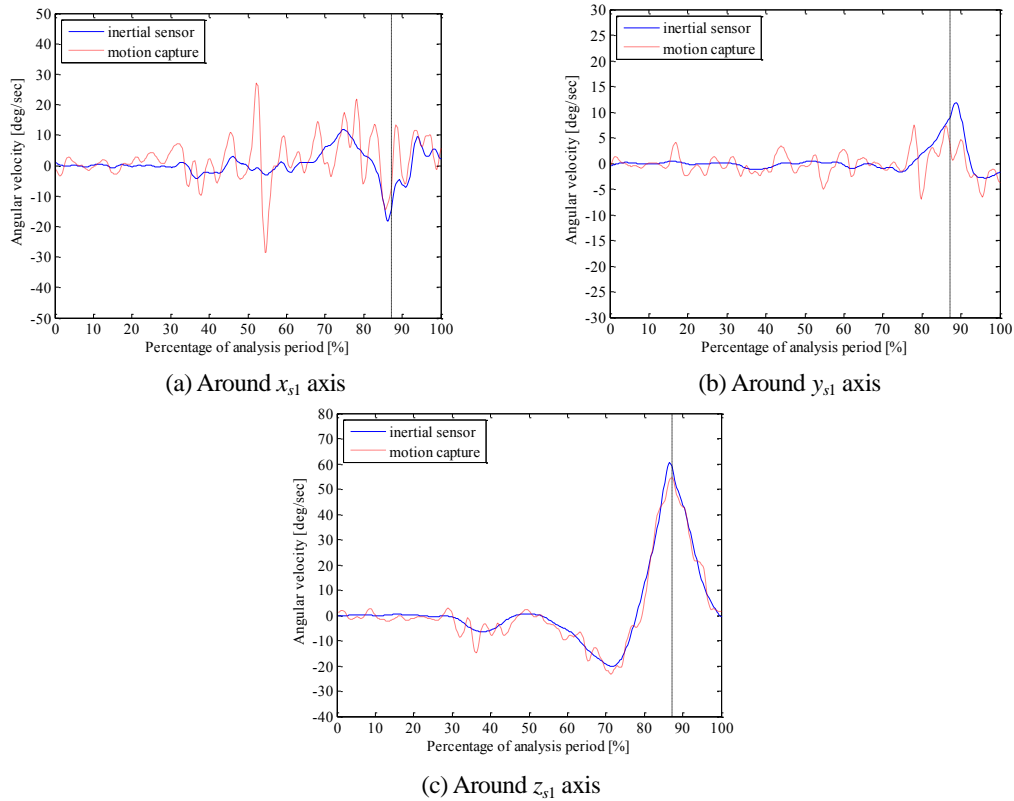


Fig.7 Angular velocity of the club in the human putt

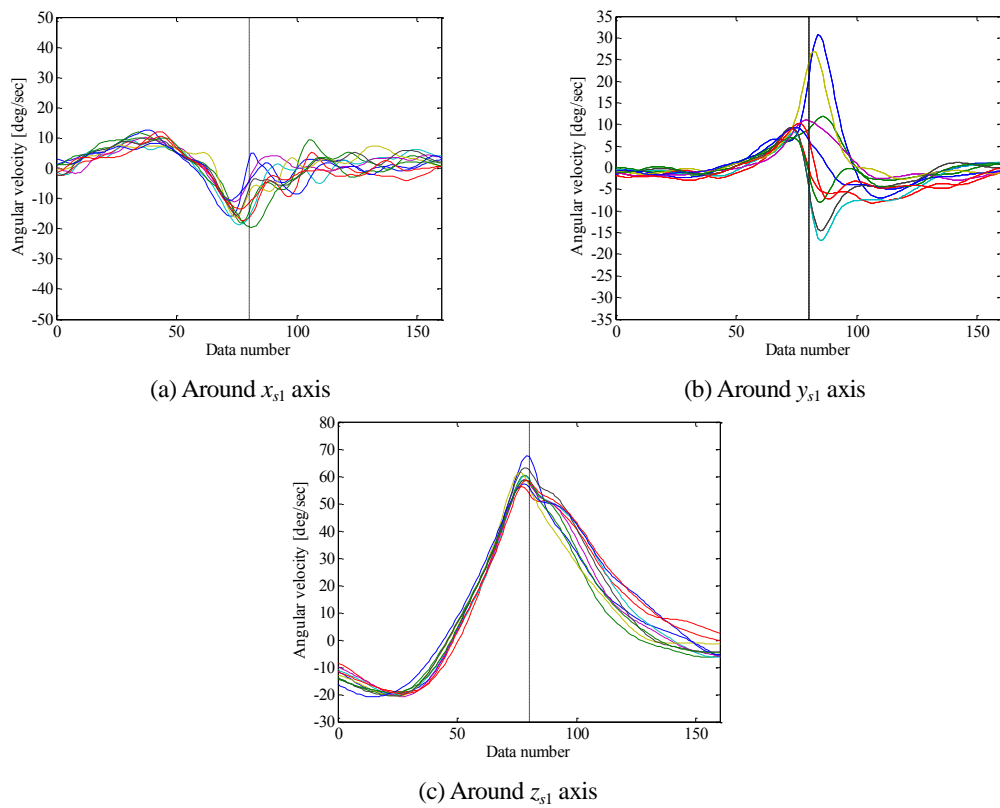


Fig.8 Angular velocity measured by inertial sensor under the terms of 2.5m human pendulum putt

変動係数は、 x_{s2} 軸；8.7%， y_{s2} 軸；115.4%， z_{s2} 軸；19.8%であった。また、クラブ上のセンサの z_{s1} 軸周りの角速度が最大となった時点における体幹のセンサの各軸周り角速度の変動係数は、 x_{s2} 軸；5.1%， y_{s2} 軸；47.8%， z_{s2} 軸；

11.2%であった。

5つの目標距離におけるSub.Aのパッティング後のボールと目標との平均距離は、0.5m : 0.204±0.116m, 1.0m : 0.245±0.118m, 1.5m : 0.209±0.139m, 2.0m : 0.205m±0.150m, 2.5m : 0.164m±0.121mであった。

4. 考察

4.1 慣性センサによるパッティング動作計測精度について

振り子マシンによるパッティングにおいて2つの計測システムから算出される値を比較する。図5より、パタークラブ上の慣性センサ各軸の計測値は、 z_{s1} 軸ではモーションキャプチャシステムから算出した値とほぼ一致していた。しかし、 x_{s1} 軸と y_{s1} 軸ではモーションキャプチャシステム側の値の振動が目立っており、誤差の絶対値の平均も比較的大きかった。その原因として、クラブ座標系を構成するマーカの相対的な距離の変動が考えられる。本研究では、モーションキャプチャシステムで計測されたマーカの位置座標データをカットオフ周波数5Hzのローパスフィルタにかけて平滑化した。それによって個々のマーカの変位は滑らかになるが、それぞれのマーカの相対距離は平滑化されずにわずかに変動している可能性がある。そのため、3つのマーカを用いて局所座標系の三次元角度を算出するカルダン角の方法では位相のずれが生じ、そのずれが微分演算によって増幅されて振動となったと考えられる。しかしながら、図5を見ると角速度変化の傾向は似ており、モーションキャプチャシステムから算出した角速度値の移動平均などをとれば慣性センサの計測値と一致すると考えられる。このことから、モーションキャプチャシステムからの算出値を精度検証の一つの基準とした場合、本研究で使用した慣性センサの計測は概ね良好であり、パタークラブと体幹の運動の傾向を捉えていると考えられる。

図6より、慣性センサの角速度データから算出した変動係数は、先述の誤差と同様に x_{s1} 軸と y_{s1} 軸で比較的大きな値となった。特に y_{s1} 軸には変動係数の算出方法によるゼロ割の発生が影響していると考えられる。ゼロ割の影響を除いて考えれば、変動係数は小さかったため、慣性センサ自体の再現性は比較的高かったと言える。

図7より、ヒトがパッティングを行う際も x_{s1} 軸と y_{s1} 軸ではモーションキャプチャシステム側の値に振動が発生していた。しかし、角速度変化の傾向は図5の場合と同様に2つの計測システムで似ており、体幹のセンサにおいても同様に2つのシステム間で傾向が似ていたことから、ヒトのパッティング動作においても慣性センサを用いることでパタークラブと体幹の運動の傾向を捉えられると考えた。

4.2 慣性センサを用いたヒトのパッティング動作評価について

慣性センサから算出された値のみでヒトのパッティング動作を評価することを考える。Pelz⁽³⁾は、同じライン上を異なるスピードでパッティングした場合、滑らかなグリーンではホールを25cm程度オーバーするスピードが最もホールインの確率が高くなったことを報告している。そこで、本研究ではマシンとヒトの両方で、ボールがホールを超えて25cm以内に停止したパッティングをホールインしたとみなし、成功試技と定義した。この定義に従うと、振り子マシンによる2.5mのパッティング成功率は80%、Sub.Aによる2.5mのパッティング成功率は70%であった。ここで、クラブシャフト上のセンサ座標系の各軸周りの回転の内、ボールの打ち出される方向と転がる距離に大きな影響を与える⁽³⁾ x_{s1} 軸と z_{s1} 軸に着目した。その軸においてパッティング能力の1つである動作の再現性の高さを評価するために、インパクト時のパタークラブ角速度の変動係数を用いた。変動係数が小さいほど、パッティングごとのインパクト角速度のばらつきが少ないため、再現性の高い動作であると言える。Sub.Aのインパクト時角速度の変動係数は x_{s1} 軸；15.3%、 z_{s1} 軸；4.8%であった。一方、2.5mにおける成功率が20%であった。Sub.Bにおいて同様の変動係数を算出すると x_{s1} 軸；105.5%、 z_{s1} 軸；7.57%となり、どちらの軸でもSub.Aより変動係数が大きくなる傾向があることが分かった。この時の体幹のセンサから算出した同様の変動係数について見ると、Sub.A(x_{s2} 軸；8.7%、 z_{s2} 軸；19.8%)よりもSub.B(x_{s2} 軸；6.1%、 z_{s2} 軸；18.2%)の方が小さくなり、パタークラブにおける変動係数とは逆の傾向を示していることが分かった。これは、被験者のパッティング特徴が表れていると考えられ、パタークラブ角速度のばらつきの方がより成功率に影響する可能性を示している。

5. 結 言

本研究では、モーションキャプチャシステムを基準として三次元慣性センサの精度を検証し、ゴルフパッティング動作時のクラブおよび身体の三次元運動を解析することを目的とした。慣性センサの精度の検証には、1軸の振り子運動をする振り子マシーンを用いた。5つの目標距離に対するマシーンとヒトのパッティング動作を、慣性センサおよびモーションキャプチャシステムを用いて計測した結果、振り子マシーンによるパッティングとヒトによるパッティングの両方で、モーションキャプチャシステムから算出した角速度と慣性センサから算出した角速度の平均誤差は比較的大きいことが分かった。しかし、本研究で使用した慣性センサはパッティング動作時のパタークラブと体幹の運動の傾向を捉えており、センサの計測自体は概ね良好であった。これらのことから、本研究において慣性センサの精度を明確に実証することはできなかったが、慣性センサを用いてもゴルフパッティング動作におけるパタークラブと体幹の運動をモーションキャプチャシステムと同じ傾向で捉えられることが分かった。また、慣性センサから算出したインパクト時角速度の変動係数によってパッティング能力の1つである動作の再現性を評価できる可能性が示された。一方、モーションキャプチャシステムを基準として慣性センサの精度を実証する場合、モーションキャプチャシステム加速度を求めるとノイズが増幅されることが判明したため、今後はパタークラブや体幹の三次元角度の観点から慣性センサの精度を検証する必要がある。さらに、並進運動を表す加速度の考慮や、慣性センサを用いて体幹-クラブのシステムとしてのパッティング動作を解析していくことが課題である。

文 献

- (1) Karlsen, J., Smith, G., and Nilsson, J., "The stroke has only a minor influence on direction consistency in golf putting among elite players", *Journal of Sports Science*, 26(3), (2008), pp.243-250.
- (2) Delphinus, E.M., and Sayers, M.G.L., "Putting proficiency: contributions of the pelvis and trunk", *Sports Biomechanics*, 11(2), (2012), pp.212-222.
- (3) Pelz, D., "Dave Pelz's Putting Bible", Random House Publishers, New York, (2000).
- (4) Burchfield, R., and Venkatesan, S., "A Framework for Golf Training Using Low-Cost Inertial Sensors", *Proc. Of the International Conference on Body Sensor Networks*, (2010), pp.267-272.
- (5) Okuda, I., Gribble, P., Armstrong, C., "Trunk rotation and weight transfer patterns between skilled and low skilled golfers", *Journal of Sports Science and Medicine*, 9, (2010), pp.127-133.
- (6) Nesbit, S.M., "A three dimensional kinematic and kinetic study of the golf swing", *Journal of Sports Science and Medicine*, 4, (2005), pp.499-519.
- (7) Kenny, I.C., McCloy, A.J., Wallace, E.S., and Otto, S.R., "Segmental sequencing of kinetic energy in a computer-simulated golf swing", *Sports Engineering*, 11, (2008), pp.37-45.
- (8) King, K., Yoon, S.W., Perkins N.C., Najafi, K., "Wireless MEMS inertial sensor system for golf swing dynamics", *Sensors and Actuators, A*, 141, (2008), pp.619-630.
- (9) Winter, D.A., "Biomechanics and motor control of human movement", John Wiley & Sons, New York, second edition, (1990).