

加速度センサ及び角速度センサを用いたグリップエンド装着型ゴルフスイング計測器の開発

根來, 弘志 / NEGORO, Hiroshi

(発行年 / Year)

2013-03-24

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2013-03-24

(学位名 / Degree Name)

修士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

2012 年度 修士論文

加速度センサ及び角速度センサを用いた
グリップエンド装着型ゴルフスイング計測器の開発

THE DEVELOPEMT OF GOLF SWING MEASURING INSTRUMENT USING
ACCELERATION SENSOR AND GYRO SENSOR AT GRIP END OF GOLF CLUB

指導教員 渡辺嘉二郎 教授

大学院 工学研究科
システム工学専攻 修士課程

11R6137

ネゴロ ヒロシ
根來 弘志

THE DEVELOPEMT OF GOLF SWING MEASURING INSTRUMENT USING ACCELERATION SENSOR AND GYRO SENSOR AT GRIP END OF GOLF CLUB

Hiroshi NEGORO

ABSTRACT

This paper describes a novel method for analyzing the angular motion and speed of a golf swing in a global coordinate system measured by a 3D acceleration sensor and a 3D gyro sensor at the grip end of a golf club. The conventional method for measuring motion in sports is optical direct linear transformation (DLT). However, this method requires infrared high-speed cameras to be set in the test field and infrared reflectors to be attached to the moving object. Furthermore, the system's wireless transmitter enables noninvasive measurement and its fine-tuning is expensive. In this paper, we propose an alternative method that is more easily set and fine-tuned, and is also cheaper than the DLT method. The results of the proposed method are almost equal to those of the DLT method.

Key words: *golf motion measurement, direct linear transformation (DLT), acceleration sensor, gyro sensor*

目次

第1章	はじめに.....	5
第2章	ゴルフスイングについて.....	6
2.1	アドレス.....	6
2.2	バックスイング.....	6
2.3	トップオブスイング.....	7
2.4	ダウンスイング.....	7
2.5	インパクト.....	7
2.6	フォロースイング.....	7
2.7	フィニッシュ.....	7
第3章	計測システム.....	9
3.1	軸の定義.....	11
3.2	スイング動作検出用センサについて.....	12
3.2.1	限界加速度実験.....	12
3.2.2	限界角速度実験.....	14
3.2	スイング動作検出用センサについて.....	16
第4章	基礎実験1.....	17
4.1	目的.....	17
4.2	方法.....	17
4.3	各フェーズの求めかた.....	18
4.4	結果.....	19
4.5	考察.....	20
第5章	基礎実験2 ～姿勢の求め方～.....	21
5.1	目的.....	21
5.2	方法.....	21
5.3	アドレスの姿勢角の求め方.....	21
5.4	結果.....	23
5.5	考察.....	24
第6章	応用実験1 ～角度～.....	25
6.1	目的.....	25
6.2	方法.....	25
6.3	角度の求め方.....	25
6.4	結果.....	28
6.5	考察.....	33

第7章 応用実験2 ～速度～	34
7.1 目的	34
7.2 方法	34
7.3 速度の求めた	34
7.4 結果	36
7.5 考察	41
第8章 応用実験3 ～変位～	42
8.1 目的	42
8.2 方法	42
8.3 変位の求め方	42
8.4 結果	44
8.5 考察	49
第9章 おわりに	50
参考文献	51
謝辞	52

第1章 はじめに

スポーツに対する科学的アプローチの第一歩は、対象を定量化することである。それによりトレーニングの効率化や諸問題を合理的に解決することが可能となる。

打撃系のスポーツの代表例であるゴルフとはクラブで静止したボールを打ち、コース上のホールと呼ばれる穴に入れ、その打数の少なさを競うスポーツである。ゴルフは中高年から始めることが可能であり、他のスポーツでは年齢が上がるごとに競技人口が減っていくがゴルフは高齢となってもプレーを楽しむことができる。さらに、ゴルフ場や練習場などゴルフをプレーすることができる施設などが他のスポーツなどに比べると圧倒的に多いことなどから、男女問わず幅広いプレイヤー層をもち、非常に人気のあるスポーツである。

ゴルフクラブのスイングの軌跡を定量化することは、ゴルフクラブの物理的特性のスイングフォームに対する影響を把握でき、ゴルフスイングの向上だけでなく、ゴルフクラブの開発や、適切なクラブの選定に重要な意味を持つ。一般的にゴルフの練習では、10回の中9回は初めてゴルフをやりだした出した時からの同じ過ちを繰り返していると言われており[1]。上達するためにはわずかではあるが正しい動作を会得し、むらのないスイングを妨げる諸動作を排除し、再現性があり安定したゴルフクラブのスイングの軌跡が要求される。そのため、現在の一般的な練習では、プレイヤーはクラブコントロールを感覚的に捉え、より理想的なクラブの軌跡に近づけようと練習を繰り返している。しかし、ゴルフスイングは、瞬時の運動であるため、その動きは自覚しづらく、上達に多くの時間を費やしてしまう。ゴルフスイングにおけるゴルフクラブの軌跡を定量化し、プレイヤーヘフィードバックさせることが可能であれば、練習効率を向上させることが可能である。

ゴルフスイングに関する研究では、人の身体をリンクモデルで表し、そのモデルに運動学や動力学を応用する方法[2][3]、感圧ゴムを用いて、グリップ力を計測する方法[4][5]、ボールの回転運動や打球方向の予測に関する研究[6][7]、など多数報告されている。現在、ゴルフクラブの軌跡を計測する方法としては、あまり提案されておらず、赤外線反射マーカーをゴルフクラブに設置し、複数台の高速度カメラで撮影し、3次元座標のデータを計測する方法が主流である。しかしながら、この方法では複数のカメラを設置する場所が必要であり、測定の前にシステム全体のキャリブレーションが必要である。さらに、装置が高価だけでなく、設置場所なども必要なことなどから一般の人が使用することは困難である。これらのことを解決するためにインパクト前後のクラブヘッドの動きを1つのカメラで読み取る方法[8]などが挙げられる。また、加速度センサと角速度センサを使ったクラブの計測方法[9][10]が提案されているが、これらの研究ではゴルフのフルスイングではなくパターであることやDLT方式をなどのリファレンスと比較していない。

本論文では、ゴルフスイングにおいて、アドレスからインパクトまでのゴルフクラブの角度、速度および変位を、ゴルフクラブのグリップエンド部分に設置した加速度センサと角速度センサにより計測する方法を提案する。

第2章 ゴルフスイングについて

本論文に入る前に，論文中に扱うゴルフ用語について述べていく．ゴルフスイングの動作は一般的に“アドレス”→“バックスイング”→“トップオブスイング”，→“ダウンスイング”，→“インパクト”，→“フォロースイング”，→“フィニッシュ”の7つのフェーズに分割することができる．Fig. 1 にスイング動作における各フェーズを示す．また，以下にその状態の詳細について示していく．



Fig. 1 Swing Motion

2. 1 アドレス

アドレスとはスイングを行う上での基本姿勢でありこの姿勢からスイングを開始していく．このとき，主にグリップとスタンス及び上体が重要となってくる．

グリップは左手の手の甲を目標に向け，手のひらの肉の暑い部分と人差し指の付け根に掛けてシャフトを握る．グリップは，ゴルファーの意思をボールに伝えるための唯一の接点であるため，手先を制御することで，常に同じスイングをすることができる．

スタンスは，スイング中に体がぐらつかず，体の切れを損なわない程度に狭くなければならない．両足のかかと部分が肩幅を超えない広さで，両膝が左右の足の指の付け根に来るように曲げる．

上半身は前傾姿勢で両膝をやや曲げて，背筋は伸ばし両足の肉子球を意識して左右の足に均等に体重を掛けて構える．そこから左腰の位置を右腰よりも高くするとよい．そして捻転がスムーズに行える様な体勢をとり，リラックスしながらいつでも勢いよく指導できる状態となる．

2. 2 バックスイング

バックスイングとはアドレスからクラブを打球方向とは逆の方向に引きゴルフクラブを振り上げる動作である．このとき左腕の肘は曲げないように伸ばすのが理想である．両肩

をできるだけ回転させ、背中が目標に向かって直角になるようにする。また、両肩が回転していき、腰を引き締める形になるまで腰の動きは抑制する。

2. 3 トップオブスイング

トップオブスイングは右足に体重をかけるピークであり、バックスイングで最もクラブを高く振り上げた状態のことである。このとき肘は伸ばした状態にすることが重要である。このとき腰の角度は 45 度、肩の角度は 90 度まで回転していることが理想とされている。このトップオブスイングまでが自分の意思でコントロールできる部分であり、トップオブスイングの後に来るダウンスイングの正しい軌道を決めるとともにボールの方向性を左右する。

2. 4 ダウンスイング

ダウンスイングとは、トップスイングからインパクトまでのゴルフクラブを振り下ろしている動作のことである。スムーズなバックスイングができていてもトップから力任せに振りおろしてしまえばミスショットになってしまう。そのためバックスイングからダウンスイングへの切り返しの場面では決して急いではない。最初は両腰を左へねじ戻し、その後上半身が動き始めトップオブスイングで作られた手首の角度を保ちながらクラブを引き落とししていく。このとき体は正面を向いた状態を保たなければならない。また、腰が両肩をリードする形となり、連鎖運動の動きによってスピードが増していく。

2. 5 インパクト

インパクトとは、ゴルフクラブのヘッドがゴルフクラブに当たった瞬間のことを言う。アドレスの位置に静かに戻す感覚であるとよく、インパクトは意識して向かえるものではない。スイングの弧が大きくなればなるほどクラブのヘッドスピードを増加できる余地が大きくなる。

2. 6 フォロースイング

フォロースイングはダウンスイングから振り下ろした力をそのままに、インパクト後にクラブを振り上げて最後まで振り切る動作である。フォロースイングはインパクトの後頭を動かさずに、クラブに体と両腕が連動して回転し続ける。このとき、グリップエンドは左側に移動しているが、クラブヘッドは少ししか動いていない。このとき右足にかかっていた力を徐々に左足に乗せていく。インパクトから進み両腕が伸びきったときにヘッドスピードは最大のスピードに達する。

2. 7 フィニッシュ

フィニッシュとはフォロースイングで最後までゴルフクラブを振り切った状態のことである。

る。このとき全体重は左足に乗り、右足はつま先立ちしている程度でよく、左足に体重は乗っている。左足から頭までがストレートに直列している姿勢が理想であり、目はボールを追う。このフィニッシュの体勢を数秒間維持することができるのならば、クラブをコントロールすることができバランスのいいスイングをしたといえる。

第3章 計測システム

ここでは、本論文で用いる計測システムについて述べていく。以下に示した図のように2つの検出範囲の異なるモーションセンサをゴルフクラブのグリップエンド部分に装着して計測を行う。被験者の体にセンサを設置しないことにより、被験者への計測の負担を減らすことが可能である。また、グリップエンド部分に装着することによりインパクトなどの振動がゴルフクラブに直接伝わってくるため、インパクトタイミングを正確に計測することや、他のクラブへの装着も容易に行うことができると考えた。今回使用するセンサは2種類ある。クラブのスイング動作を検出するための70Gまで計測することが出来るFMS-001(富士通社製)と、4Gまで計測でき静止状態での姿勢を求めるために用いるWAA-006(ワイヤレステクノロジー社製)を使用する。これらのセンサはサンプリング間隔3msで計測をおこなう。計測したデータはブルートゥースによって無線通信されパソコンにデータを送信して計測を行うことが可能であるため、先行研究[12]では被験者に負担が大きかったが負担を軽減することができた。

センサで求めたデータが正しいかを判断するためにモーションキャプチャーシステムでモーションセンサと一緒に計測を行う。モーションキャプチャーシステムとはゴルフクラブに取り付けられたマーカを複数の高速カメラで読み取り3次元座標系のデータを取得する方法である。本研究ではモーションキャプチャーシステムは以下の図に示すようにゴルフクラブの11箇所に赤外線反射マーカを設置する。これらの赤外線反射マーカをハイスピードカメラで読み取って計測を行う。

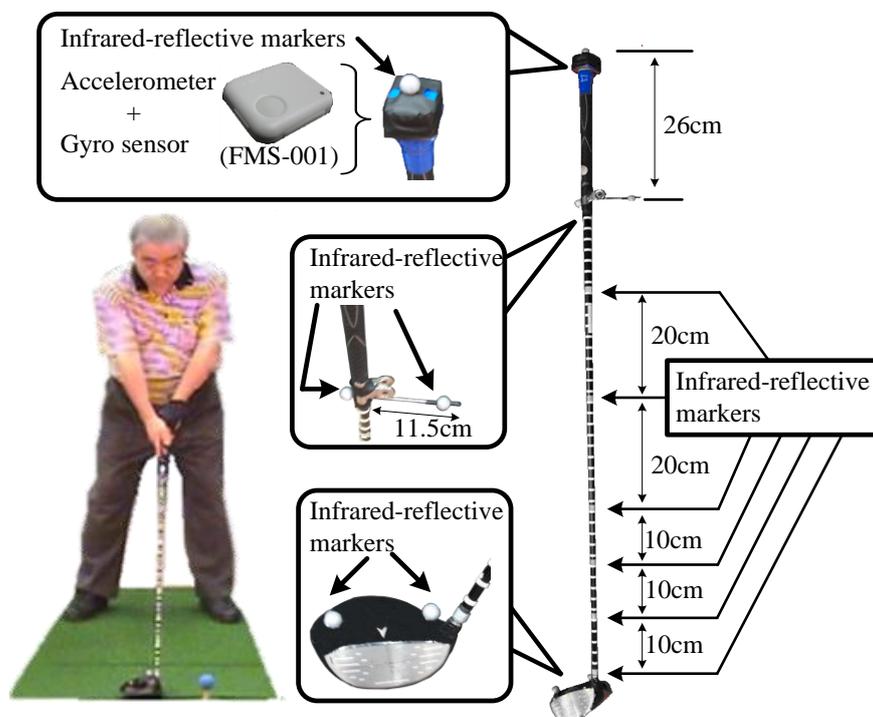


Fig. 2 Measurement system

モーションキャプチャーシステムで使用するカメラは130万画素の高解像度のセンサを搭載し、最大秒間 1000 フレームの超高速映像にも対応しているハイエンドカメラである VICON 社製の MCAM2 カメラを前方 8 台後方 4 台の計 12 台使用する。また、撮影された画像は、VICON 8i というシステムを用いて解析される。これらのモーションキャプチャーシステムは実験協力会社である株式会社デジタル・メディア・ラボのものであり、モーションキャプチャーシステムによる計測と解析については同社に一任して行った。これらの実験は大阪電気通信大学のモーションキャプチャースタジオにて行った。以下に実験を行ったモーションキャプチャースタジオを示す。

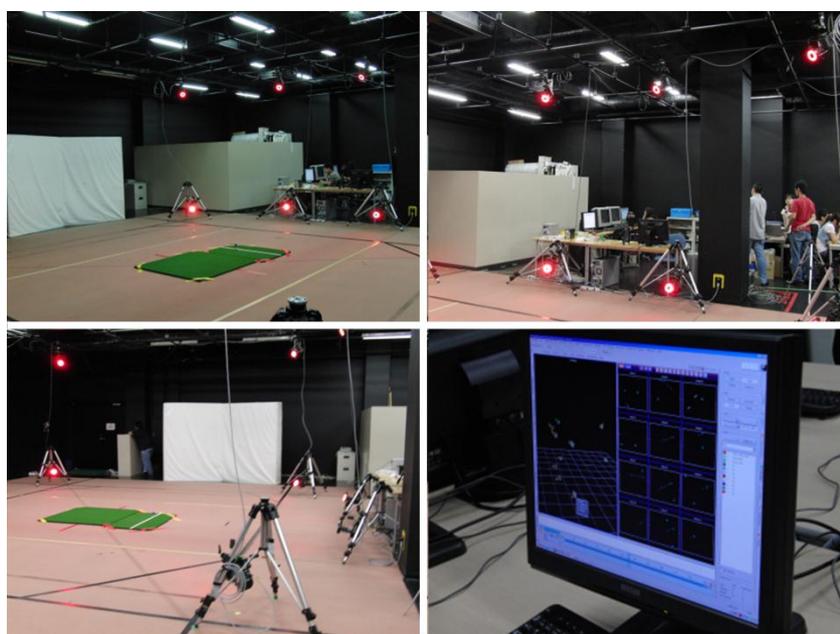


Fig. 3 Referential system using camera

3. 1 軸の定義

本論文では, Fig. 1 に示すゴルフスイングを, 絶対直交座標系と相対直交座標系で考える. Fig. 4 に, ゴルフスイングのアドレスの状態における絶対座標系と相対座標系を示す. 絶対座標系の原点は, アドレス時のゴルフクラブのグリップエンドの位置とし, クラブが移動しても, その位置に固定される. ボールの進行方向を Y 軸, ゴルファーの前後方向を X 軸, 重力方向を Z 軸とする. 相対座標系の原点は, ゴルフクラブのグリップエンドとする. z 軸はゴルフクラブのシャフト軸の方向, y 軸はクラブのフェースに対して垂直方向とし, x 軸は z 軸, y 軸に垂直な方向とする. 相対座標系はクラブ上に固定されており, ゴルフスイングに伴い, クラブと一緒に移動する.

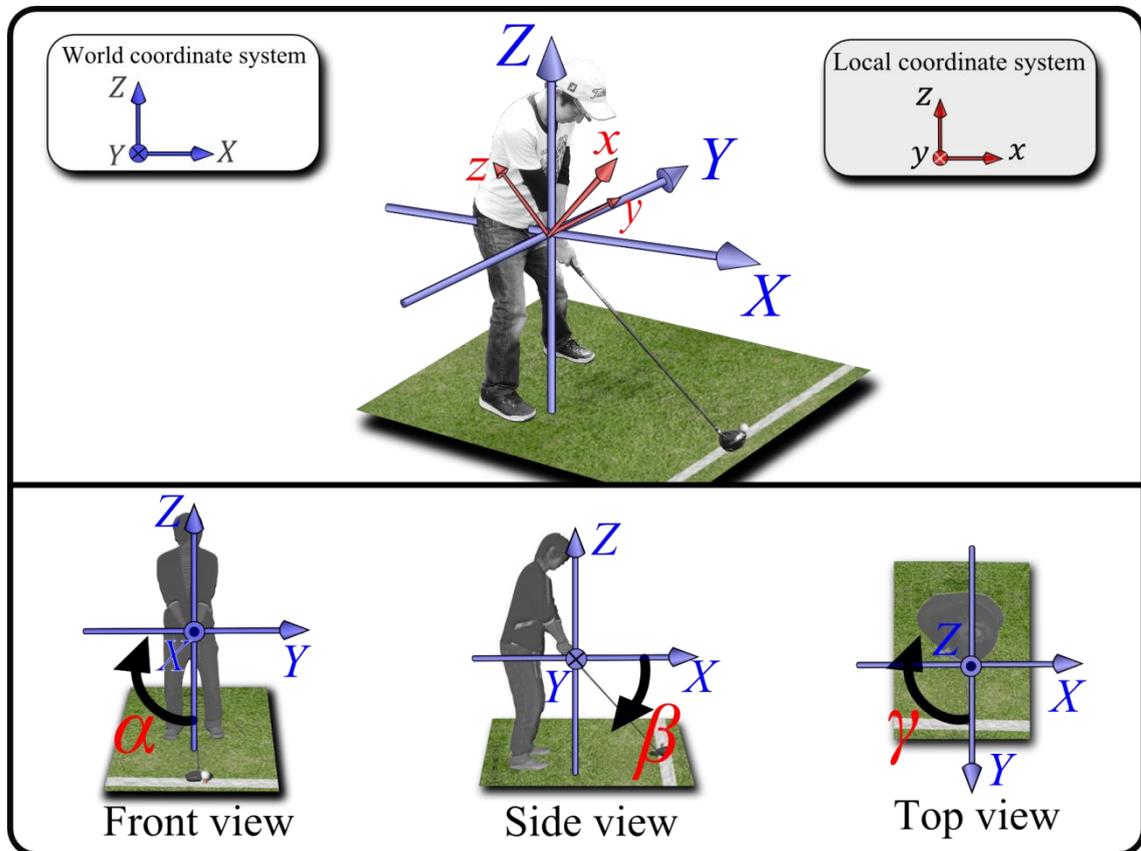


Fig. 4 Definition of global coordinate system and local coordinate system

本論文では, Fig. 4 に示すようにゴルフクラブと絶対座標系の X, Y, Z 軸となす角度 $\alpha(t)$, $\beta(t)$, $\gamma(t)$, 各軸方向の速度 $V_x(t)$, $V_y(t)$, $V_z(t)$ 及び変位 $X_x(t)$, $Y_y(t)$, $Z_z(t)$ を求める.

3. 2 スイング動作検出用センサについて

本研究ではスイング動作の検出センサとして富士通社製の FMS-001 を使用する. 本センサには加速度を検出する加速度センサと回転の速度を検出する角速度センサが内蔵されており 3 次元の動作を計測することが可能となっている. 以下の Fig. 3 にセンサ, Table 1 に本センサの主な仕様を示す.



Fig. 5 Motion Sensor FMS-001

Table 1 Specification of motion sensor

Model number	FMS-001
Dimension [mm]	39(W)×44(D)×12(H)
Weight [g]	20
Range of detection [deg/s]	±4000
Range of detection [G]	X, Z : ±70 Y : ±35

次に, センサの仕様通りの加速度と角速度の検出範囲を計測できるか及び, 仕様書に書かれていない時間ドリフトについて検証していく.

3. 2. 1 限界加速度実験

ここでは, 先ほどのセンサの限界加速度を調べていく.



Fig. 6 Rolling devise

Fig.6 に示したように、モーターの先端に板を取り付け、板の端にモーションセンサ FMS-001 を取り付ける。モーターの回転速度を光学式回転速度系で計測し、モーションセンサの加速度の出力値を加速度に変換したものと比較していく。はじめに、本実験で用いる回転実験器について説明していく。

Fig. 7 ではグラフの横軸に光学式回転速度計から求めた加速度、縦軸にモーションセンサの出力から求めた加速度を示している。この結果より X 軸と Z 軸は-800 から+800 m/s^2 までの範囲で線形性を保っており、仕様書に書かれている $\pm 70G$ の検出範囲を超えるところまで正確に計測することが可能であると分かった。また、Y 軸では $\pm 435 m/s^2$ まで線形性を保つことができ、仕様書に書かれた $\pm 35G$ を超えた加速度の値を検出することが可能である。

先行研究よりゴルフにおけるグリップエンド部分のスイング動作時に加わる加速度が $\pm 150 m/s^2$ ほどであるために、このセンサでグリップエンド部分の加速度の値を十分に検出されることが確認できた。

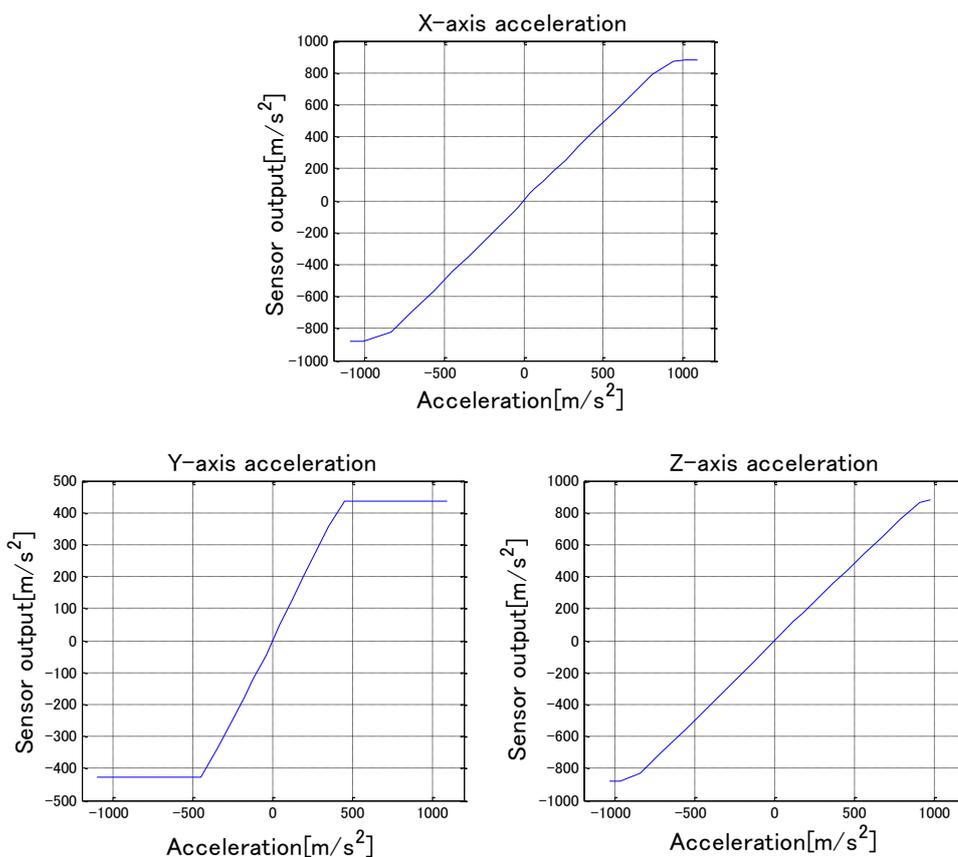


Fig. 7 Result of limited acceleration

3. 2. 2 限界角速度実験

先ほどのモーター及び光学式回転速度系を用いて今度はモーションセンサ FMS-001 の角速度がどのぐらい検出可能かを検証していく。モーターの端にプーリーを装着し、その上にモーションセンサ FMS-001 を固定する。モーターを回転させその回転速度を光学式回転速度計とセンサの出力結果の値を比較する。限界角速度を測定するため、センサの値が飽和するまでを計測する。以下の Fig. 8 に実験装置を、Fig. 9 に実験結果を示す。



Fig. 8 Rotation device

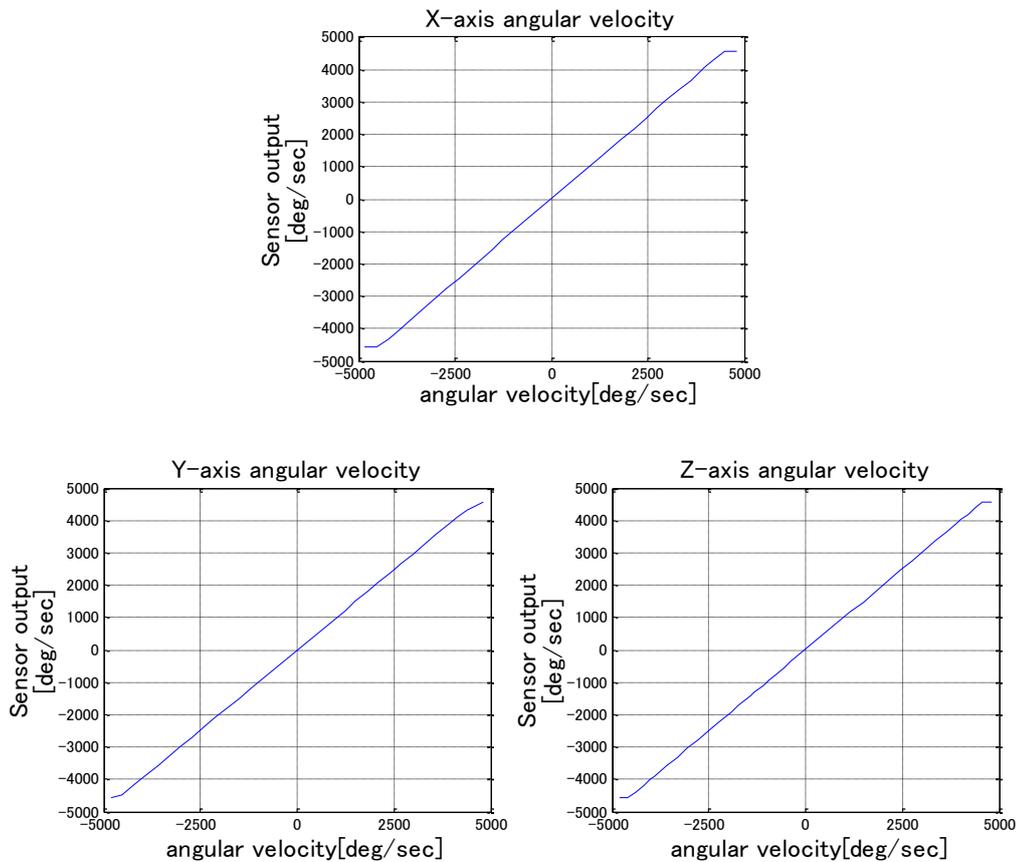


Fig. 9 Limit angular velocity

Fig. 7 より，このモーションセンサでは仕様書に書かれている通り -4000 から $+4000$ deg/sec の範囲で線形な特性を持つことがわかった．ゴルフスイングにおける角速度は先行研究より ± 2000 deg/sec ぐらいであるため，このモーションセンサで角速度を十分に測定することが可能である．

3. 1. 1 時間ドリフト実験

センサはスイッチを付けた瞬間と時間がたったときの出力値に違いがある場合がある．そこで，センサの長時間使用におけるドリフト変化を調べるため 1 時間使用したときのドリフト変化を計測する．本実験では学生活動によって計測環境が変わることを防ぐため，人の出入りの少ない部室棟を利用して実験を行った．以下 Fig. 10 に結果を示す．

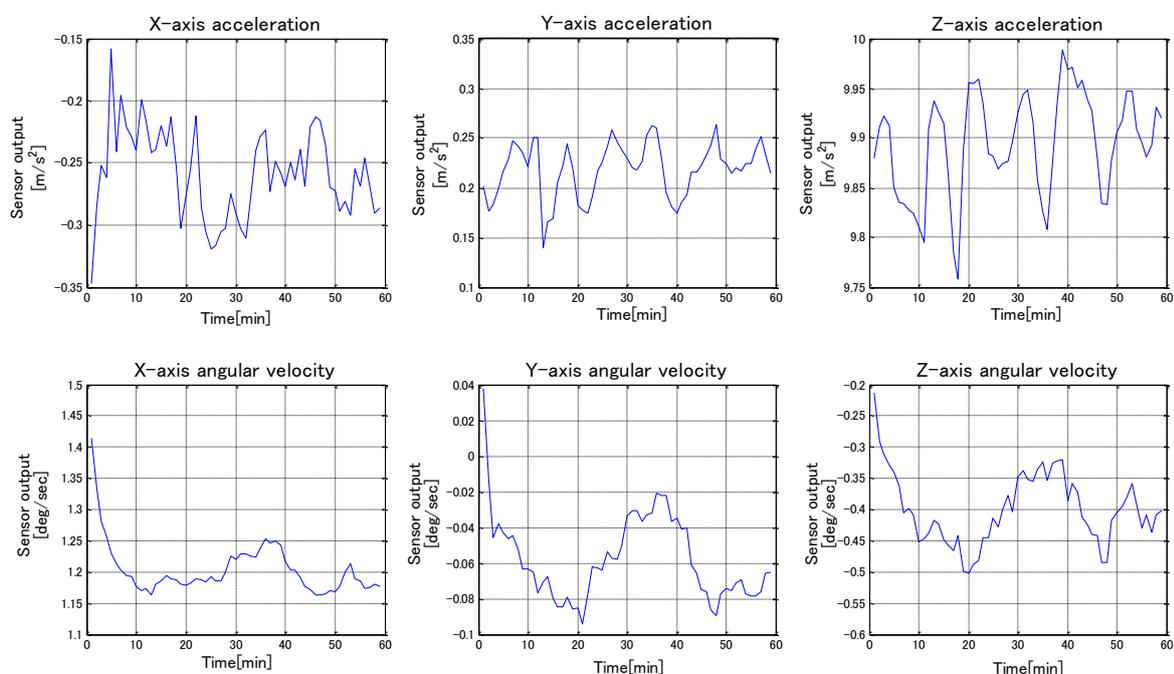


Fig. 10 Long period of operation

Fig. 10 の結果よりモーションセンサの長時間におけるドリフト変化は X 軸加速度で $0.1872 m/s^2$ ，Y 軸加速度で $0.1239 m/s^2$ ，Z 軸加速度で $0.2292 m/s^2$ である．また X 軸角速度で 0.2524 deg/sec，Y 軸角速度で 0.1323 deg/sec，Z 軸角速度で 0.2946 deg/sec，とすべての軸で問題にならない程度のドリフトである．Z 軸の加速度は重力加速度の値であり $9.75 \sim 10 m/s^2$ の範囲の出力値を示しており， $9.8 m/s^2$ に近く正確に重力加速度を検出しているといえる．また，角速度の結果よりスイッチを入れた後約 10 分程度はセンサが安定していないことがわかった．このことから実際に実験で使用するときは電源を入れてから 10 分程度たってから使用することが望ましいと言える．

3. 2 スイング動作検出用センサについて

本研究では，動作検出用のセンサの他に姿勢を検知するためにモーションセンサ WAA-006（ワイヤレステクノロジー社製）を使用する．このセンサには3軸加速度センサと3軸角速度センサの2つのセンサが内蔵されている．Fig.11にモーションセンサの写真，Table 2にモーションセンサの仕様を示す．



Fig. 11 Motion sensor WAA-006

Table 2 Specification of motion sensor

Model number	WAA-006
Dimension [mm]	39(W)×44(D)×12(H)
Weight [g]	20
Range of detection [deg/s]	X,Y : ±500, Z : ±300
Range of detection [G]	±4

第4章 基礎実験1

4.1 目的

加速度センサと角速度センサによってゴルフスイングを計測する，計測した波形から Fig.1 でもとめたアドレス時刻からインパクト時刻までの各フェーズの時刻を求める．

4.2 方法

実験方法は先ほどの計測システムで説明したセンサをゴルフクラブのグリップエンド部分に取り付ける．Table 3 に示した被験者 5 人にゴルフスイングを 10 回行ってもらう．そのとき測定したセンサの出力からアドレスからインパクトまでを判別するようなアルゴリズムを考える

Table 3 Specification of subject's data

Subject	Height [cm]	Weight [kg]	Golf history [years]	Mean score [strokes]
A	168	76	10	105
B	175	75	15	85
C	168	63	15	90
D	165	52	3	120
E	170	80	15	110

実験に使用したゴルフクラブはドライバーであり，Table 4 にその主な仕様について示した．

Table 4 Club data

Model	XXIO6
Length [cm]	126
Weight [g]	282.1
Loft [deg]	10.5
Real loft [deg]	11.5
Balance	D2.5

また，実験はモーションキャプチャスタジオで行ったため，安全性を考え実際のゴルフボールではなくゴムボールを使用して実験を行う．このゴムボールは実際のゴルフボールとは打つ感触が異なるが，しっかりとインパクトを検出できることを確認した．また本研究の目的がインパクトまでのスイング動作の計測なので，実験に影響が出ないと考えられる．Fig. 12 に実験で使用したボールを示す．



Fig. 12 Ball

4. 3 各フェーズの求めかた

ここではゴルフスイングにおける5つのフェーズ, ‘アドレス’, ‘バックスイング’, ‘トップオブスイング’, ‘ダウンスイング’, ‘インパクト’に分割するための時刻検出について述べる. この5つのフェーズのうち‘アドレス’, ‘トップオブスイング’, ‘インパクト’の3つはスイング中の状態を表し, これらの状態は波形の中で1点として扱うことが出来る. 各フェーズの決定はインパクト→トップオブスイング→アドレスの順番で時系列をさかのぼって行う. これは, アドレス時刻の検出から始めた場合, アドレスの前にクラブヘッドを左右に小刻みに動かす動作である‘ワググル’を行うプレイヤーもいることも考えられ, 動き始めの波形の判断が難しく, 波形から正確にアドレス時刻を求められないためである.

インパクト

インパクトとはゴルフクラブがボールに当たった瞬間のことである. ボールが当たることにより加速度と角速度センサの値が急激に変化する. このことを利用して, ω_z の最大値, ω_x の最小値の時刻そしてZ軸方向の加速度 a_z の最小値の時の時刻. この三つの時刻の最小の時刻をインパクト時刻とする.

トップオブスイング

トップオブスイングとは, バックスイングからダウンスイングへと運動の方向が切り変わるときであり, 動作が一瞬止まる. そのため角速度 $\omega_y=0\text{deg/s}$ となる. インパクト時刻から 0.5s さかのぼった時刻から角速度が 0deg/s を超える時刻を見つけ, その時刻をトップオブスイング時刻とする.

アドレス

アドレスとは静止している基本姿勢である. トップオブスイングから時系列を戻していき角速度 ω_x が安定する直前を仮アドレスとする. その後仮アドレスからモーションセンサ WAA-006 の加速度のデータが安定している時刻を探しその時刻をアドレス時刻とする.

4. 4 結果

以下の Fig. 13 に被験者 A の一球目のゴルフスイングにおける、加速度と角速度の結果を示す。また、求めたアドレス、トップオブスイング、インパクトを縦線で示した。Fig.13 の上の図が加速度センサによって検出した加速度の波形、下の図が角速度センサによって検出した角速度の波形となっている。

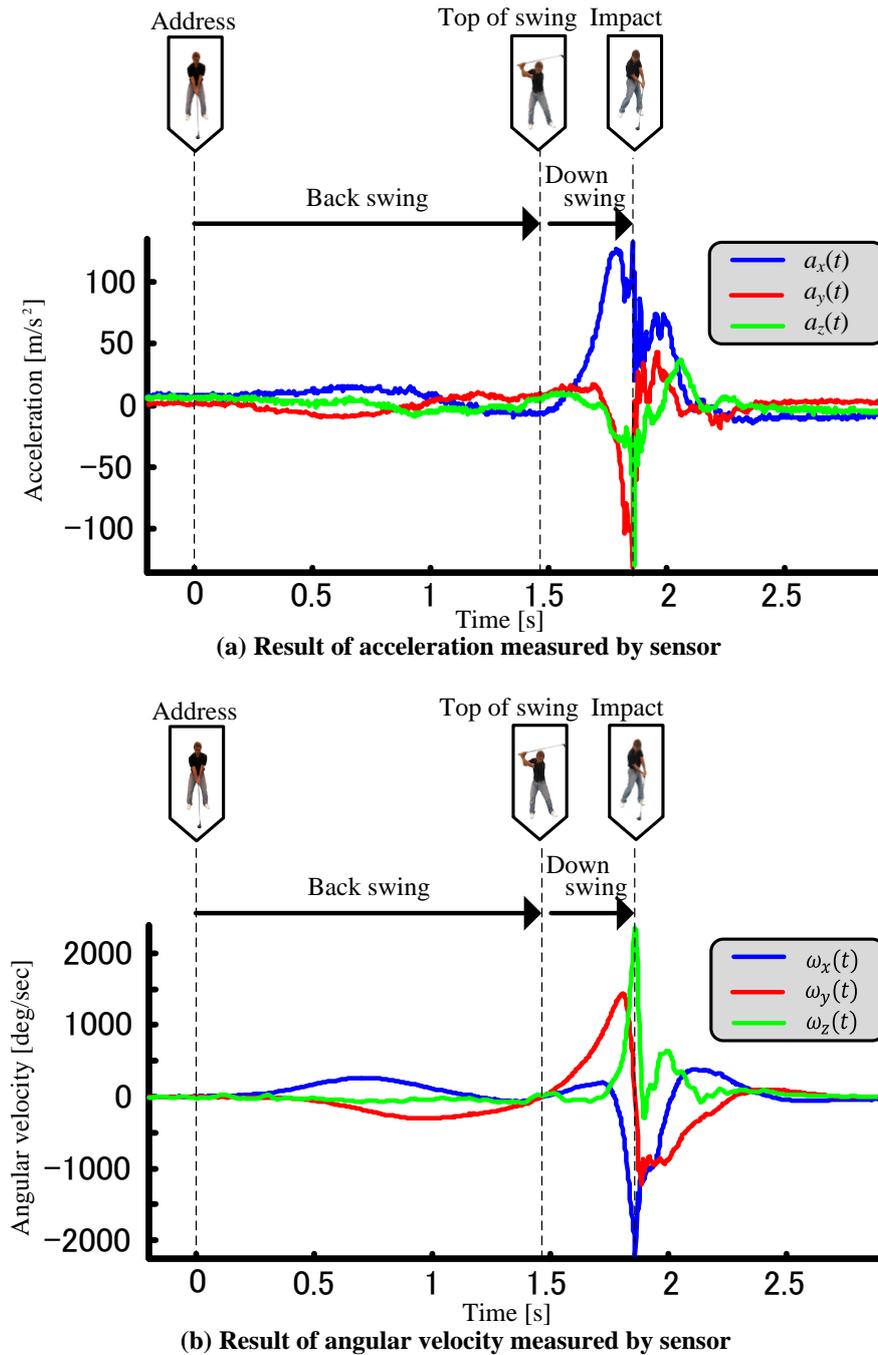


Fig. 13 Golf swing motion from address to finish

以下の Table 5 にインパクト時刻を 0[s]としたときにおけるセンサから求めたトップオブスイングとモーションキャプチャーシステムから求めたトップオブスイングの時刻を示す。

Table 5 Top of swing time

Shot	Top of swing time [s]														
	Subject A			Subject B			Subject C			Subject D			Subject E		
	Sensor	Motion	Difference	Sensor	Motion	Difference	Sensor	Motion	Difference	Sensor	Motion	Difference	Sensor	Motion	Difference
1st	-0.390	-0.380	0.010	-0.363	-0.360	0.003	-0.363	-0.356	0.007	-0.420	-0.432	0.012	-0.489	-0.488	0.001
2nd	-0.414	-0.444	0.030	-0.357	-0.360	0.003	-0.360	-0.360	0.000	-0.429	-0.428	0.001	-0.486	-0.488	0.002
3rd	-0.378	-0.392	0.014	-0.369	-0.372	0.003	-0.360	-0.356	0.004	-0.420	-0.424	0.004	-0.501	-0.508	0.007
4th	-0.363	-0.384	0.021	-0.375	-0.376	0.001	-0.363	-0.356	0.007	-0.444	-0.444	0.000	-0.513	-0.524	0.011
5th	-0.399	-0.404	0.005	-0.372	-0.368	0.004	-0.411	-0.404	0.007	-0.420	-0.408	0.012	-0.489	-0.484	0.005
6th	-0.387	-0.384	0.003	-0.363	-0.368	0.005	-0.351	-0.352	0.001	-0.435	-0.428	0.007	-0.495	-0.492	0.003
7th	-0.339	-0.360	0.021	-0.372	-0.372	0.000	-0.372	-0.372	0.000	-0.411	-0.424	0.013	-0.492	-0.492	0.000
8th	-0.366	-0.384	0.018	-0.348	-0.348	0.000	-0.411	-0.412	0.001	-0.423	-0.416	0.007	-0.498	-0.496	0.002
9th	-0.390	-0.392	0.002	-0.342	-0.336	0.006	-0.348	-0.344	0.004	-0.426	-0.424	0.002	-0.480	-0.476	0.004
10th	-0.360	-0.364	0.004	-0.366	-0.368	0.002	-0.351	-0.352	0.001	-0.438	-0.440	0.002	-0.489	-0.484	0.005

4. 5 考察

Fig.13 より提案したアルゴリズムによって加速度センサ及び角速度センサの出力値からゴルフスイングの動作を検出し、どのゴルフスイングのどの段階の状態であるかを表示することが出来た。この結果を利用すれば、トップオブスイングまでの時間やインパクトまでの時間、そしてそれぞれの状態における加速度と角速度を検出することが出来る。このことを利用すればプレイヤーへのアドバイスなども送ることができると考えられる。

Table 5 において、どの被験者の誤差も非常に小さい結果となった。このことからすべての被験者においてトップオブスイングが正確な時刻で計測できていると言える。また、ここで生じている誤差は、センサとモーションキャプチャーシステムの時刻が完全に同期しておらずインパクト時間に多少の誤差が生じた影響であると考えられる。

第5章 基礎実験2 ～姿勢の求め方～

5.1 目的

最初の構えであるアドレスを絶対座標けいへ変換を行い、モーションキャプチャーシステムから求めたアドレスの姿勢と一致するかを検証する。

5.2 方法

先ほどの被験者5人にアドレスの姿勢を3秒間構えてもらう。この動作を各被験者に10回ずつ行ってもらう。そのとき測定したセンサからの出力データから求めたアドレス時の姿勢角 $\theta'_x, \theta'_y, \theta'_z$ とモーションキャプチャーシステムから求めたアドレス時の姿勢角の真値との比較を行う。その結果からセンサとモーションキャプチャーシステムでの結果とが一致するような補正式を決定し補正後のアドレス時の姿勢角 $\theta_x^{address}, \theta_y^{address}, \theta_z^{address}$ を求める。

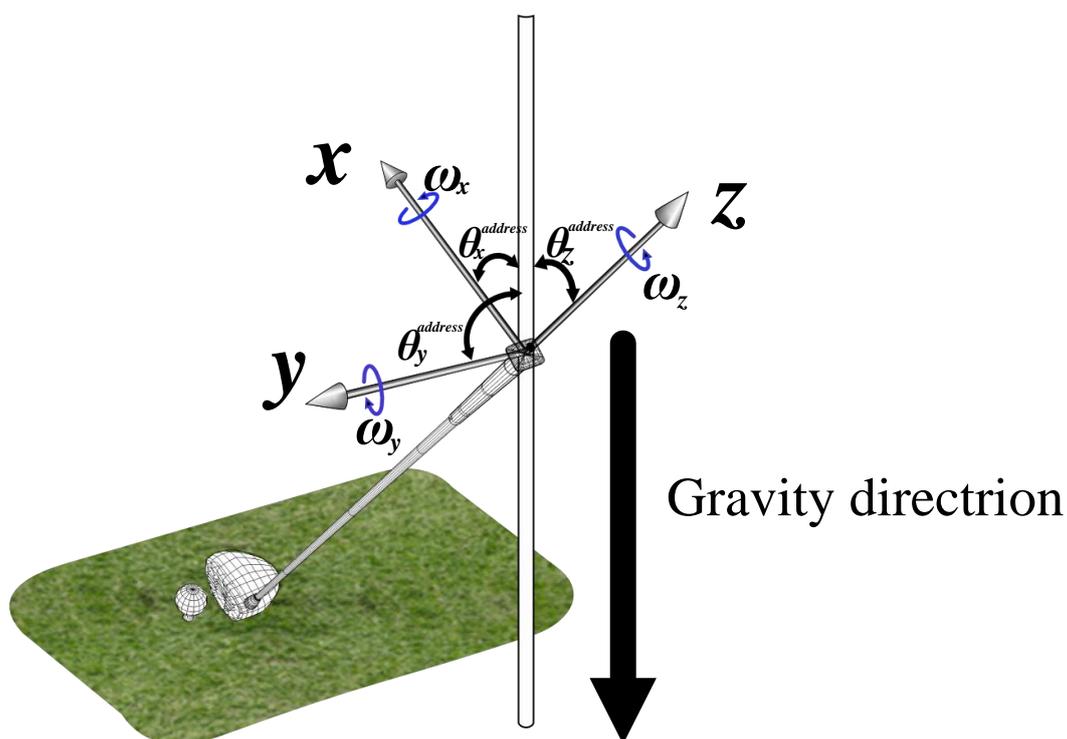


Fig. 14 Attachment points for the acceleration sensor and gyro sensor

5.3 アドレスの姿勢角の求め方

はじめに、重力方向 G から極座標系のセンサの X, Y, Z 軸への角度 $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ を求める。
先ほど求めたアドレスにおける低 G 加速度センサ WAA-006 の加速度 X, Y, Z をそれぞれ

a_x, a_y, a_z としたとき, その姿勢角 $\theta'_x, \theta'_y, \theta'_z$ はそれぞれ,

$$\begin{aligned}\theta'_x &= \cos^{-1} \left(\frac{a_x(0)}{\sqrt{a_x(0)^2 + a_y(0)^2 + a_z(0)^2}} \right) \\ \theta'_y &= \cos^{-1} \left(\frac{a_y(0)}{\sqrt{a_x(0)^2 + a_y(0)^2 + a_z(0)^2}} \right) \\ \theta'_z &= \cos^{-1} \left(\frac{a_z(0)}{\sqrt{a_x(0)^2 + a_y(0)^2 + a_z(0)^2}} \right)\end{aligned}\tag{1}$$

と表せる. この式を利用してモーションキャプチャーシステムのデータと合わせるために補正式を求めていく. センサの出力を使って(1)式によって求めた角度を縦軸, モーションキャプチャーシステムから求めた角度を横軸としたグラフを Fig.15 に示す. またそこから最小 2 乗法によって適切な補正式を求めていく.

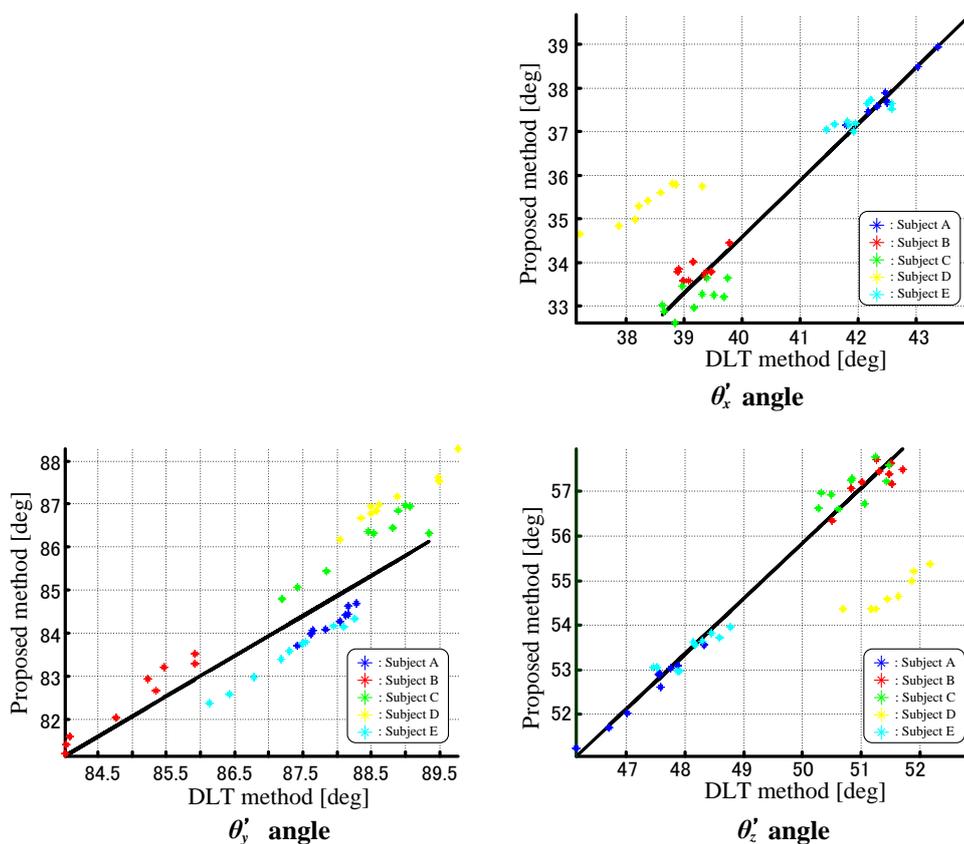


Fig. 15 Result of address angle

黄色い点で示した被験者 D においては他の被験者と傾向があっていなかった. これはこの被験者の計測時に背センサーが取れてしまったためもう一回付け直したためであると考えられ

る。そこで被験者 D を除いた 4 人から補正式((2)式)を導き出し姿勢角 $\theta_x^{address}$, $\theta_y^{address}$, $\theta_z^{address}$ を求める。

$$\theta_x^{address} = \frac{1}{1.2953} \theta'_x + 17.2252$$

$$\theta_y^{address} = \frac{1}{0.9342} \theta'_y - 2.6580 \quad (2)$$

$$\theta_z^{address} = \frac{1}{1.2435} \theta'_z + 6.3335$$

5. 4 結果

以下に式(2)を用いて求めた各被験者 10 球分のアドレス姿勢の角度 $\theta_x^{address}$, $\theta_y^{address}$, $\theta_z^{address}$ を示す。縦軸がセンサで求めて(2)式によって求めた計測値, 横軸がモー

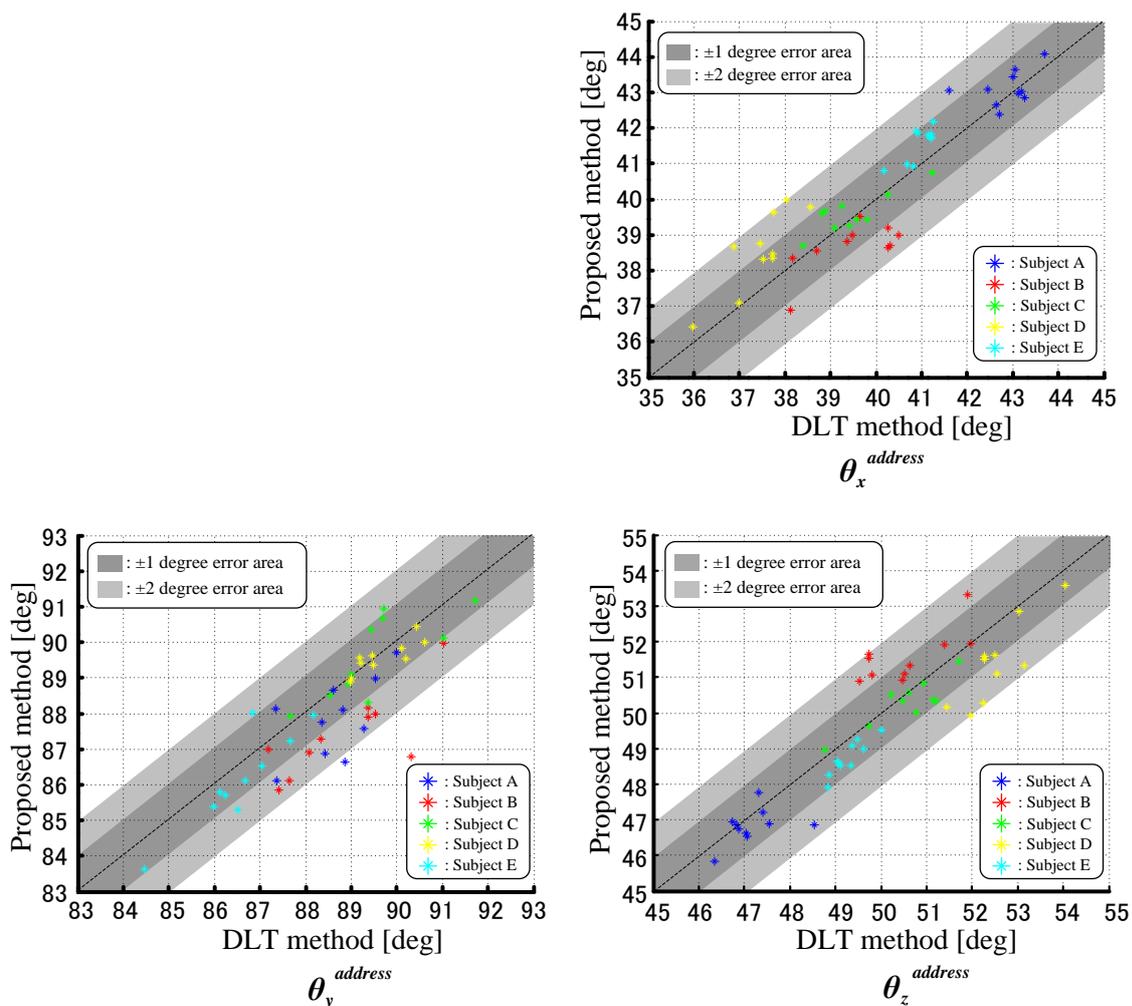


Fig. 16 Result of angle of subject A's 1st shot

ションキャプチャーシステムから求めた真値である。なお、途中でセンサが取れてしまった被験者 D については別に補正式をつくり補正した。薄い灰色の範囲は誤差の範囲が ± 2 度以内、濃い灰色の範囲は誤差の範囲が ± 1 度以内の結果となっている。

5. 5 考察

今回は地軸センサなどを使用していないためモーションキャプチャーシステムの角度と一致させるために補正式を算出した。その結果 Fig. 16 からほぼすべてのデータで ± 2 度以内誤差範囲においての一致を示している。このことより補正式は有効であったということが分かる。また、今回モーションキャプチャースタジオという限られた場所でやったため、センサが取れてしまった被験者 D においては別途補正式を作ることによって、Fig. 16 において、他の被験者と変わらない精度を保った。少しの設置の違いでかなりの誤差が出てしまうこのことより初期のセンサの設置位置が非常に重要であるということが言える。今後は、センサの取り付け方及び地軸センサの使用などが課題として挙げられる。

第6章 応用実験1 ～角度～

6.1 目的

ゴルフスイングのアドバイスをを行うときは、局座標系で説明するよりも全体座標系で説明するほうが分かりやすい。そこで、計測した測定データを全体座標系に変換することにより、正面から見たときの角度、側面から見たときの角度、天井から見たときの角度の3つの角度を求める。さらにセンサから求めた角度データをモーションキャプチャシステムにより求めた角度と比較していく。

6.2 方法

先ほどの計測システム及び被験者に1人10球ずつ実際にスイングをしてもらいボールを打ってもらう。アドレス時刻の加速度センサの値から初期全体座標を求め全体座標に変換していく。最後にモーションキャプチャシステムから求めた角度と比較をする。

6.3 角度の求め方

はじめに、本論文で用いる姿勢行列 $N(t)$ について(3)式に示す。この姿勢行列は3つの成分 $P_x(t)$, $P_y(t)$, $P_z(t)$ によって成り立っている。

$$\begin{aligned} N(t) &= [P_x(t) \quad P_y(t) \quad P_z(t)] \\ &= \begin{bmatrix} X_x(t) & Y_x(t) & Z_x(t) \\ X_y(t) & Y_y(t) & Z_y(t) \\ X_z(t) & Y_z(t) & Z_z(t) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

微小時間 Δt のとき、 x 軸まわりの角度、 y 軸まわりの角度及び z 軸まわりの角度はサンプリング間隔 dt を用いて以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned} \theta_x(t) &= \omega_x(t) \cdot dt \\ \theta_y(t) &= \omega_y(t) \cdot dt \\ \theta_z(t) &= \omega_z(t) \cdot dt \end{aligned} \quad (4)$$

絶対座標系に変換を行うオイラー角の公式は x 軸まわりの回転行列 $R_x(t)$ 、 y 軸まわりの回転行列 $R_y(t)$ 、 z 軸まわりの回転行列 $R_z(t)$ を用いて以下のように示すことができる。

$$\begin{aligned} T(t) &= [R_x(\theta_x(t))R_y(\theta_y(t))R_z(\theta_z(t))] \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_x(t) & \sin\theta_x(t) \\ 0 & \sin\theta_x(t) & \cos\theta_x(t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\theta_y(t) & 0 & \sin\theta_y(t) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta_y(t) & 0 & \cos\theta_y(t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\theta_z(t) & \sin\theta_z(t) & 0 \\ \sin\theta_z(t) & \cos\theta_z(t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

したがって、 Δt 秒後の姿勢行列 $N(t+\Delta t)$ は以下のように表せる。

$$N(t + \Delta t) = N(t) \cdot T(t) \quad (6)$$

(6)式は姿勢行列 N の差を表し，時間ごとに姿勢行列は更新されていく．(6)式を解くための最初の姿勢行列 $N(0)$ は，アドレス時における加速度の出力によって求められる．

初期状態 $N(0)$ における姿勢行列の求め方について述べていく．これらはゴルフクラブのグリップエンドに取り付けたモーショセンサによって求められる．

はじめに，以下のような姿勢行列 $N(0)$ を得ることが出来る．

$$\begin{aligned} N(0) &= [P_x(0) \ P_y(0) \ P_z(0)] \\ &= \begin{bmatrix} X_x(0) & Y_x(0) & Z_x(0) \\ X_y(0) & Y_y(0) & Z_y(0) \\ X_z(0) & Y_z(0) & Z_z(0) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

$N(0)$ における垂直成分 $[Z_x(0) \ Z_y(0) \ Z_z(0)]$ は先の実験で求めたアドレス角度 $\theta_x^{address}$ ， $\theta_y^{address}$ ， $\theta_z^{address}$ を用いて，(8)式より直接求めることが出来る．

$$\begin{aligned} Z_x(0) &= \cos \theta_x^{address} \\ Z_y(0) &= \cos \theta_y^{address} \\ Z_z(0) &= \cos \theta_z^{address} \end{aligned} \quad (8)$$

(8)式によって姿勢行列の P_z 成分を求めることができた． $N(0)$ の残りの成分である $Y_x(0)$ ， $Y_y(0)$ ， $Y_z(0)$ と $X_x(0)$ ， $X_y(0)$ ， $X_z(0)$ は以下のように求める．

まず，絶対座標に変換するために(9)式をつくる．

$$\begin{aligned} \theta &= \theta_x^{address} \\ \phi &= \frac{\theta_y^{address}}{\theta_z^{address}} \\ \psi &= \frac{X_x(0)}{\sin \theta_z^{address}} \end{aligned} \quad (9)$$

そのとき，オイラー角の公式を用いると(10)式を作ることができる．

$$\begin{aligned} Y_x(0) &= -\sin \phi \cdot \cos \psi - \cos \phi \cdot \cos \theta \cdot \sin \psi \\ Y_z(0) &= \sin \theta \cdot \sin \psi \end{aligned} \quad (10)$$

また，行列の関係により(11)式が成り立つ．

$$\begin{aligned} X_x(0)^2 + Y_x(0)^2 + Z_x(0)^2 &= 1 \\ X_y(0)^2 + Y_y(0)^2 + Z_y(0)^2 &= 1 \\ X_z(0)^2 + Y_z(0)^2 + Z_z(0)^2 &= 1 \end{aligned} \quad (11)$$

(11)式より $X_x(0)$ 及び $X_z(0)$ は以下のように求めることが出来る．

$$\begin{aligned} X_x(0) &= \sqrt{1 - Y_x(0)^2 - Z_x(0)^2} \\ X_z(0) &= \sqrt{1 - Y_z(0)^2 - Z_z(0)^2} \end{aligned} \quad (12)$$

外積の関係を使い(13)式を求められる.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} X_y(0) \\ Y_y(0) \\ Z_y(0) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} X_z(0) \\ Y_z(0) \\ Z_z(0) \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} X_x(0) \\ Y_x(0) \\ Z_x(0) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} Y_z(0)Z_x(0) - Z_z(0)Y_x(0) \\ Z_z(0)X_x(0) - X_x(0)Z_z(0) \\ X_z(0)Y_x(0) - X_x(0)Y_z(0) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (13)$$

(13)式を利用することで残りの成分である $X_y(0)$ 及び $Y_y(0)$ は以下のように示すことが出来る.

$$\begin{aligned} X_y(0) &= Y_z(0)Z_x(0) - Z_z(0)Y_x(0) \\ Y_y(0) &= Z_z(0)X_x(0) - X_x(0)Z_z(0) \end{aligned} \quad (14)$$

以上の式より, $X_x(0)$, $X_z(0)$ は(12)式, $X_y(0)$ は(14)式によって求める. $Y_x(t)$, $Y_z(t)$ は(10)式, $Y_y(t)$ は(14)式によって求められる. $Z_x(0)$, $Z_y(0)$, $Z_z(0)$ は(8)式によって求めることができ, すべての初期姿勢行列の成分を求めることができた.

この初期姿勢行列 $N(0)$ と(6)式を利用して, 全体座標系における角度 $\alpha(t)$, $\beta(t)$, $\gamma(t)$ は以下のように求めることが出来る.

$$\begin{aligned} \alpha(t) &= \arctan\left(\frac{Y_y(t)}{-Z_z(t)}\right) \\ \beta(t) &= \arctan\left(\frac{X_z(t)}{-Z_z(t)}\right) \\ \gamma(t) &= \arctan\left(\frac{X_z(t)}{Y_y(t)}\right) \end{aligned} \quad (15)$$

6. 4 結果

以下に被験者 A の 1 球目の結果を示す. 青い線が提案手法によって求めた結果, 赤い線がモーションキャプチャーシステムによって求めた結果となっている. 0s の点線はアドレスそして 1.5s 付近の点線がトップオブスイングそして右端がインパクトとなっている.

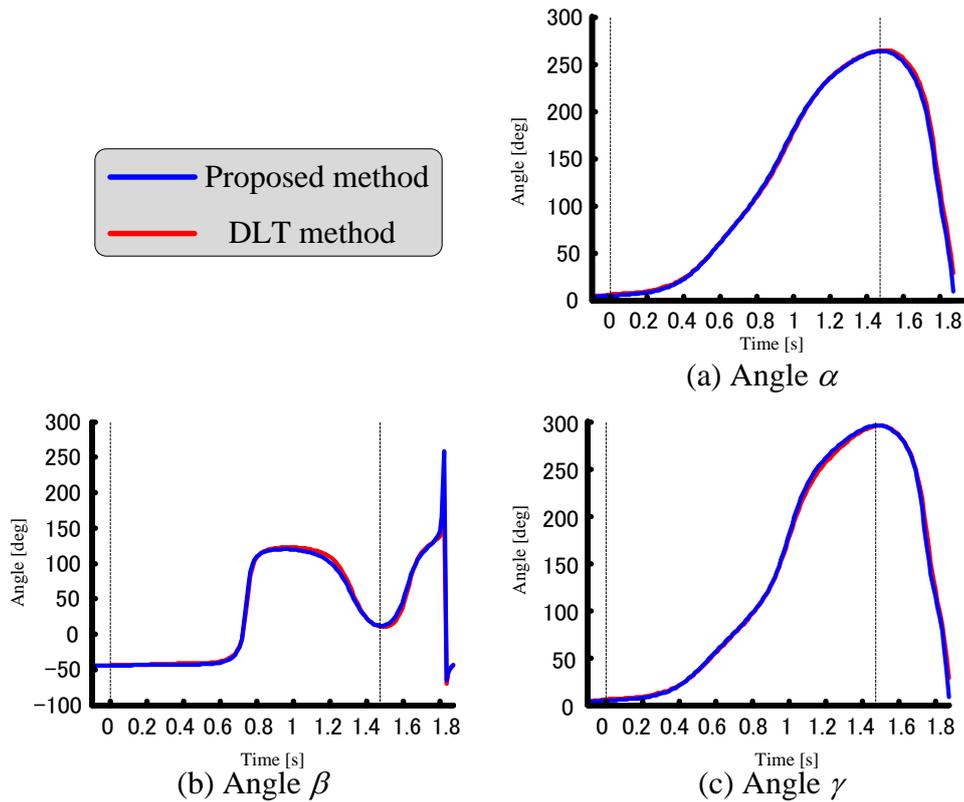


Fig. 17 Result of angle of subject A's 1st shot

Table 6 Root mean square error of subject A's estimated angle

Ball	RMSE of subject A's 10 trial		
	Angle α	Angle β	Angle γ
1st shot	3.68	7.24	3.71
2nd shot	3.76	6.82	3.65
3rd shot	2.98	6.14	3.81
4th shot	3.74	4.09	3.36
5th shot	4.51	8.45	4.99
6th shot	2.67	4.46	3.27
7th shot	2.65	4.15	3.12
8th shot	2.53	4.49	2.83
9th shot	3.27	4.85	3.94
10th shot	3.52	5.52	3.73
Mean	3.33	5.62	3.64

以下に被験者 B の 3 球目の結果を示す。青い線が提案手法によって求めた結果、赤い線がモーションキャプチャーシステムによって求めた結果となっている。

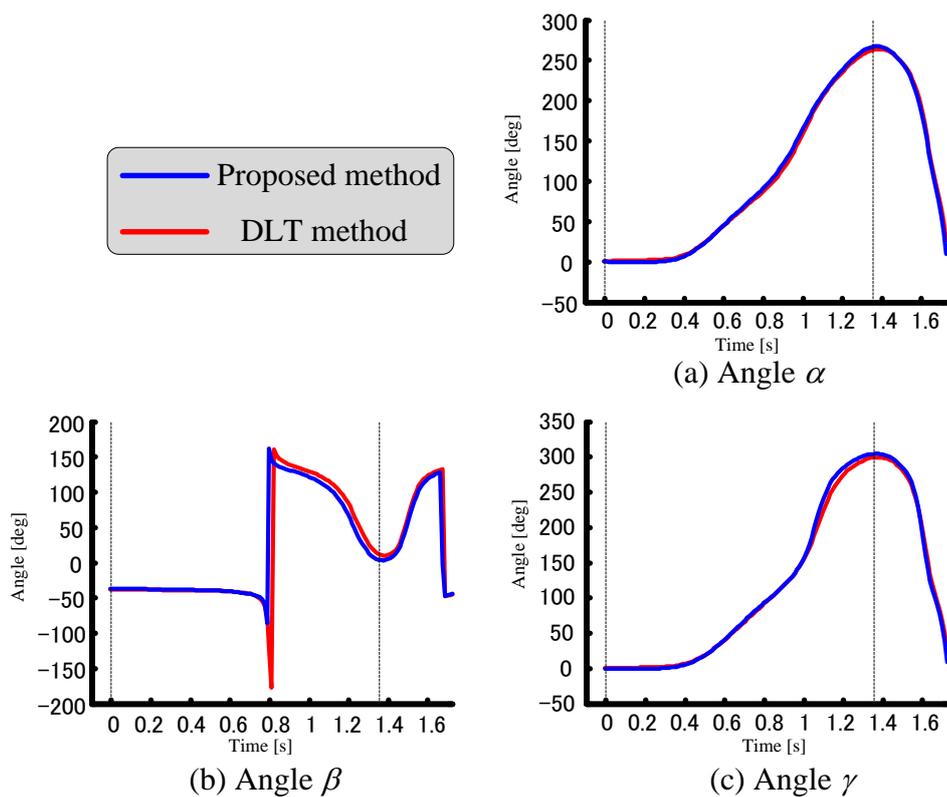


Fig. 18 Result of angle of subject B's 3rd shot

Table 7 Root mean square error of subject B's estimated angle

Ball	RMSE of subject B's 10 trial		
	Angle α	Angle β	Angle γ
1st shot	3.11	57.92	5.31
2nd shot	3.76	37.99	5.84
3rd shot	5.49	47.62	6.12
4th shot	2.97	54.20	4.71
5th shot	5.67	47.19	6.45
6th shot	3.93	43.35	5.06
7th shot	5.09	46.05	38.15
8th shot	5.01	48.18	5.89
9th shot	8.14	49.96	9.70
10th shot	5.90	38.60	6.89
Mean	4.91	47.11	9.41

以下に被験者 C の 7 球目の結果を示す。青い線が提案手法によって求めた結果，赤い線がモーションキャプチャーシステムによって求めた結果となっている。

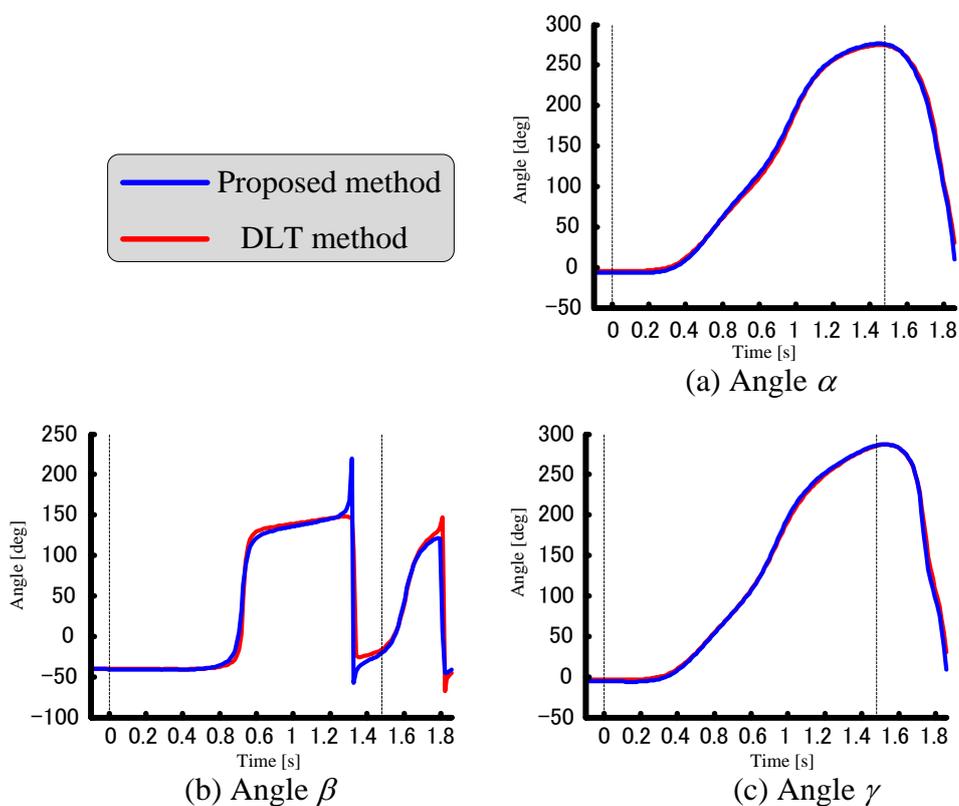


Fig. 19 Result of angle of subject B's 3rd shot

Table 8 Root mean square error of subject C's estimated angle

Ball	RMSE of subject C's 10 trial		
	Angle α	Angle β	Angle γ
1st shot	7.90	51.16	7.72
2nd shot	6.52	42.25	7.85
3rd shot	6.49	36.57	7.37
4th shot	5.27	90.99	5.56
5th shot	7.25	73.87	7.79
6th shot	7.24	27.67	8.47
7th shot	3.85	18.37	4.41
8th shot	6.07	22.43	7.01
9th shot	5.98	15.82	6.51
10th shot	5.46	23.49	6.28
Mean	6.20	40.26	6.90

以下に被験者 D の 4 球目の結果を示す。青い線が提案手法によって求めた結果、赤い線がモーションキャプチャーシステムによって求めた結果となっている。

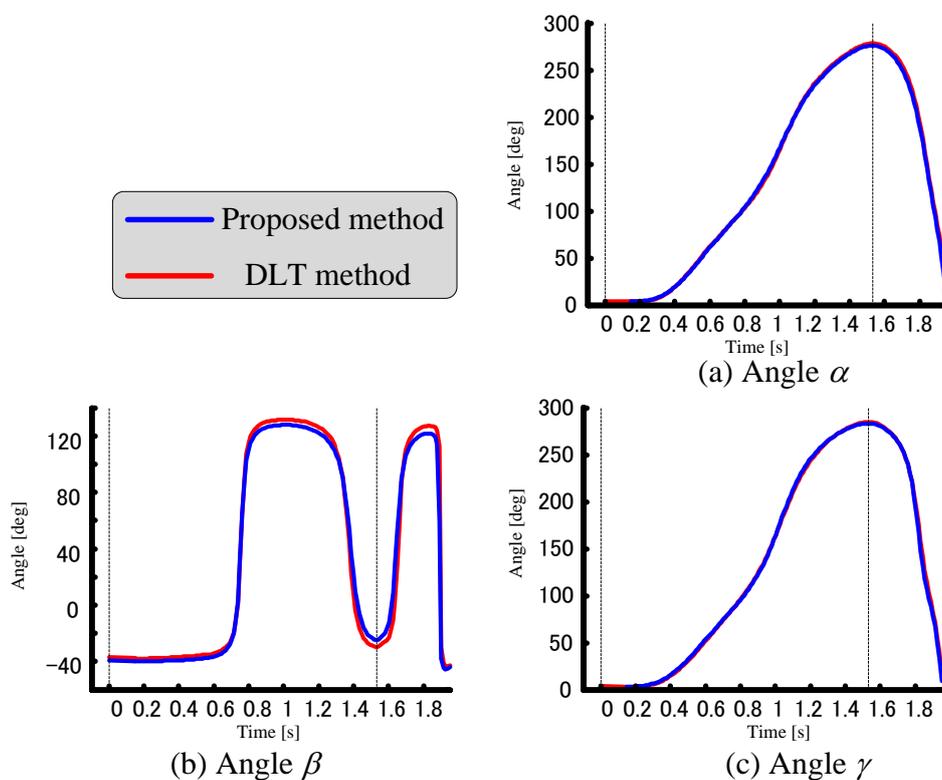


Fig. 20 Result of angle of subject B's 3rd shot

Table 9 Root mean square error of subject D's estimated angle

Ball	RMSE of subject D's 10 trial		
	Angle α	Angle β	Angle γ
1st shot	2.61	7.33	2.53
2nd shot	5.94	13.50	6.24
3rd shot	3.52	9.88	3.69
4th shot	5.27	11.15	5.67
5th shot	7.16	14.46	7.56
6th shot	5.67	11.55	5.84
7th shot	2.49	4.70	2.72
8th shot	7.35	14.55	7.81
9th shot	5.01	10.50	5.51
10th shot	4.11	8.13	4.31
Mean	4.91	10.57	5.19

以下に被験者 E の 6 球目の結果を示す。青い線が提案手法によって求めた結果、赤い線がモーションキャプチャーシステムによって求めた結果となっている。

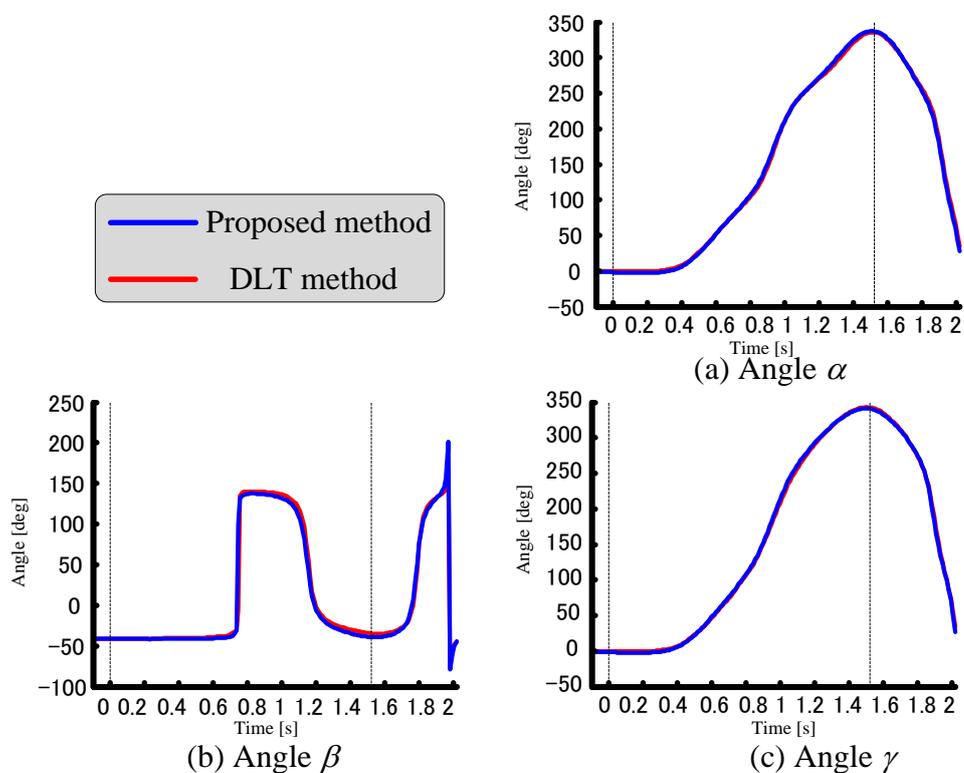


Fig. 21 Result of angle of subject B's 3rd shot

Table 10 Root mean square error of subject E's estimated angle

Ball	RMSE of subject E's 10 trial		
	Angle α	Angle β	Angle γ
1st shot	3.68	7.24	3.71
2nd shot	3.76	6.82	3.65
3rd shot	2.98	6.14	3.81
4th shot	3.74	4.09	3.36
5th shot	4.51	8.45	4.99
6th shot	2.67	4.46	3.27
7th shot	2.65	4.15	3.12
8th shot	2.53	4.49	2.83
9th shot	3.27	4.85	3.94
10th shot	3.52	5.52	3.73
Mean	3.33	5.62	3.64

6. 5 考察

以上の結果よりすべての被験者において本研究による提案手法によって求めた絶対座標系における角度の結果とモーションキャプチャーによって求めた絶対座標系における角度の結果とはほぼ等しい結果となった。

以下の表に各被験者の平均の二乗平均誤差を示した。

Table 11 Root mean square error of estimated angle

Subject	Mean RMSE of 10 trial [deg]		
	Angle α	Angle β	Angle γ
A	3.33	5.62	3.64
B	4.91	47.11	9.41
C	6.20	40.26	6.90
D	4.91	10.57	5.19
E	3.33	5.62	3.64
Mean	4.54	21.84	5.76

今回リファレンスとして使用したモーションキャプチャーシステムの誤差が $\pm 3\text{deg}$ であることから、正面方向から見た角度 α と天井方向から見た角度 γ において全被験者の平均の二乗平均誤差が 4.56 deg と 5.76 deg とほぼモーションキャプチャーと等しいことが言える。しかしながら側面方向の角度 β では 21.84 deg とかなり大きな誤差となってしまった。このことは角度を求める(15)式において逆関数を使っていることが原因であると考えられる。また、側面方向の動きは正面や天井方向に比べ速いためセンサのサンプリング間隔である 0.003s ずれてしまうだけで 5度 から 10度 ぐらい変化してしまうためであると考えられる。角度を求める時は初期姿勢角度が非常に重要であるため今後は地磁気センサなどを利用することで初期角度の誤差を減らすことによってより精度を上げていきたい。

第7章 応用実験2 ～速度～

7.1 目的

応用実験1で使用した姿勢行列を利用して絶対座標系におけるグリップエンド部分の速度を求める。求めた速度をモーションキャプチャーシステムによって求めた結果と比較を行う。

7.2 方法

先ほどの実験の結果である各被験者10球分のデータから絶対座標系における加速度を求める。その結果を積分し絶対座標系におけるグリップエンド部分の速度を求める。その結果をモーションキャプチャーシステムで求めた結果と比較を行う。

7.3 速度の求めた

速度の求め方について示していく。計測した加速度の出力には重力成分が含まれており、積分することによって誤差が積み重なってしまう。そこで、重力成分の値を除去する。まず、重力加速度の値を局座標系に座標変換するために姿勢行列の転置行列を求める。次にこの行列に重力成分を掛けることで、局座標系での重力成分を求める。重力加速度の値を g とすると、局座標系の重力加速度 $\mathbf{G}(t)$ は以下のように表せる。

$$\mathbf{G}(t) = N^T(t) \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix} \quad (16)$$

相対座標系の加速度 $\mathbf{a}(t) = [a_x(t) \ a_y(t) \ a_z(t)]$ から(16)式より求めた局座標系における重力加速度成分を取り除くことによって、重力加速度成分の含まない加速度 $\mathbf{a}'(t)$ を求めることができる。

$$\mathbf{a}'(t) = \mathbf{a}(t) + \mathbf{G}(t) \quad (17)$$

(17)式と姿勢行列 $N(t)$ を用いて、絶対座標系における加速度 $\mathbf{A}(t) = [A_x(t) \ A_y(t) \ A_z(t)]$ は以下のように表すことが出来る。

$$\mathbf{A}(t) = N(t) \cdot \mathbf{a}'(t) \quad (18)$$

(18)式によって絶対座標系における加速度を求めることができた。絶対座標系における速度はこの絶対座標系における加速度 $\mathbf{A}(t)$ を積分することによって求めることが出来る。しかしながら、求めた加速度には遠心力など様々なノイズ成分が含まれており完全積分を行うとノイズ成分も増幅してしまい誤差が大きくなってしまう。

本論文ではバックスイングからダウンスイングにかけて運動の方向が切り替わる時であるトップオブスイングにおいてクラブが一瞬停止すると仮定する。そのことにより、トップオブスイングの速度が 0m/s となるように速度波形をオフセットすることによって

この誤差をなくす．完全積分によって求めた速度を $\hat{V}(t)$ とする．この時，トップオブスイングの時間を T_{top} とし，その時の速度の値を A_{top} とすると速度は以下の $V(t)$ ように表すことができる．

$$V(t) = \hat{V}(t) - \frac{A_{top}}{T_{top}}t \quad (19)$$

7. 4 結果

以下に被験者 A の 1 球目の絶対座標系におけるアドレスからインパクトまでの速度の結果を示す。青い線が提案手法によって求めた結果，赤い線がモーションキャプチャーシステムによって求めた結果となっている。

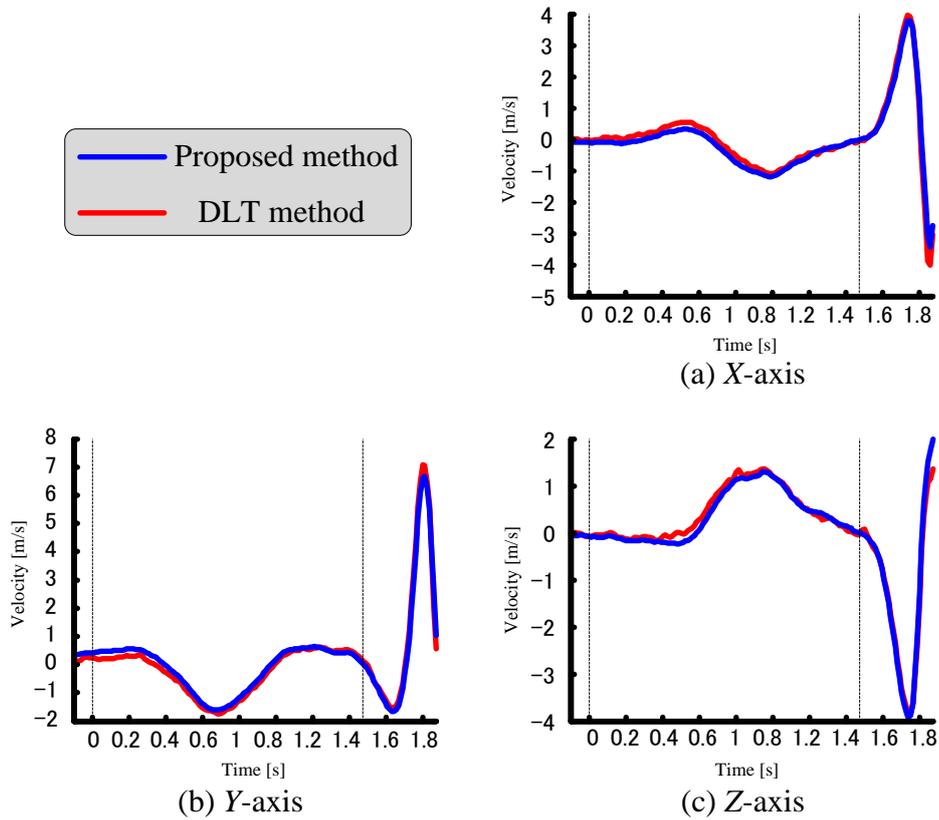


Fig. 22 Result of velocity of subject A's 1st shot

Table 12 Root mean square error of subject E's estimated velocity

Ball	RMSE of subject A's 10 trial		
	X-axis [m]	Y-axis [m]	Z-axis [m]
1st shot	0.17	0.18	0.12
2nd shot	0.19	0.20	0.11
3rd shot	0.22	0.26	0.09
4th shot	0.33	0.30	0.11
5th shot	0.23	0.18	0.10
6th shot	0.33	0.30	0.10
7th shot	0.31	0.37	0.07
8th shot	0.32	0.29	0.10
9th shot	0.25	0.25	0.09
10th shot	0.25	0.22	0.09
Mean	0.26	0.26	0.10

以下に被験者 B の 3 球目の絶対座標系における速度の結果を示す。青い線が提案手法によって求めた結果，赤い線がモーションキャプチャーシステムによって求めた結果となっている。

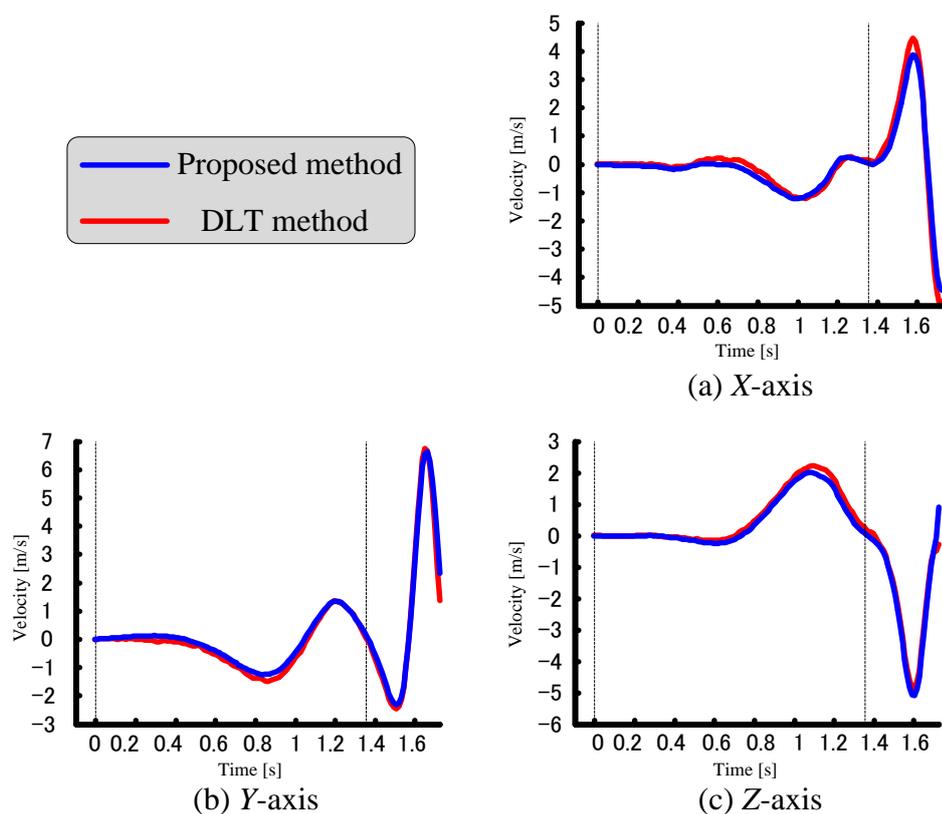


Fig. 23 Result of velocity of subject B's 3rd shot

Table 13 Root mean square error of subject B's estimated velocity

Ball	RMSE of subject B's 10 trial		
	X-axis [m]	Y-axis [m]	Z-axis [m]
1st shot	0.29	0.26	0.18
2nd shot	0.24	0.20	0.18
3rd shot	0.23	0.18	0.16
4th shot	0.24	0.23	0.16
5th shot	0.26	0.23	0.20
6th shot	0.26	0.25	0.17
7th shot	0.24	0.25	0.21
8th shot	0.25	0.18	0.15
9th shot	0.31	0.30	0.27
10th shot	0.22	0.20	0.26
Mean	0.25	0.23	0.19

以下に被験者 C の 7 球目の絶対座標系における速度の結果を示す。青い線が提案手法によって求めた結果，赤い線がモーションキャプチャーシステムによって求めた結果となっている。

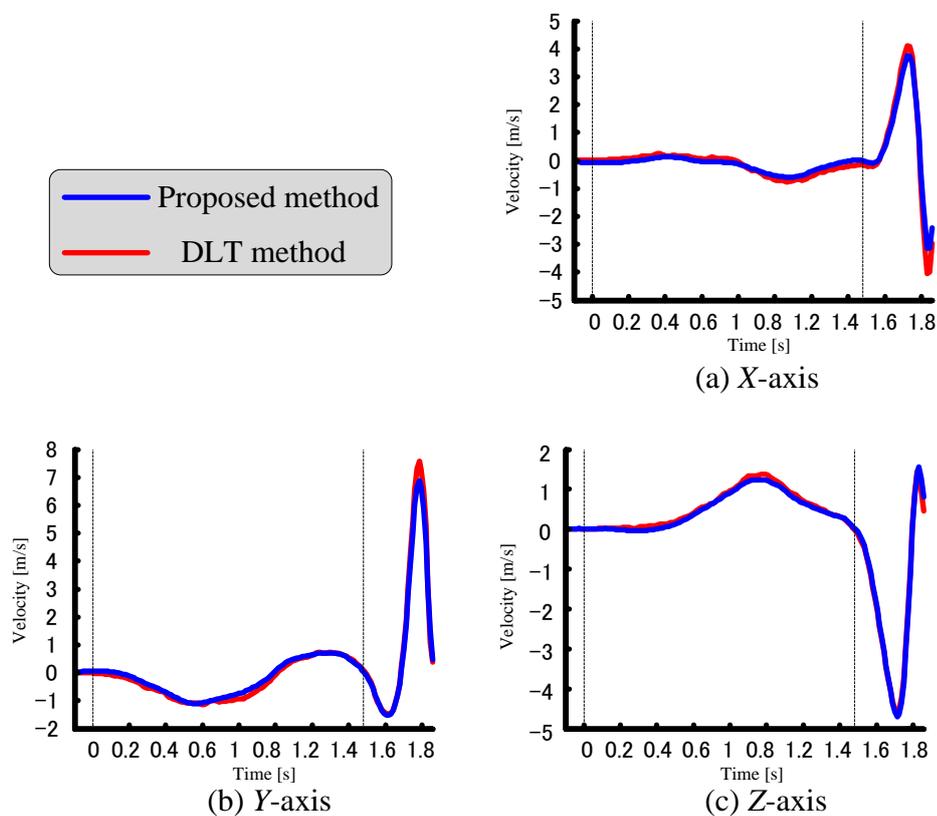


Fig. 24 Result of velocity of subject C's 7th shot

Table 14 Root mean square error of subject E's estimated velocity

Ball	RMSE of subject C's 10 trial		
	X-axis [m]	Y-axis [m]	Z-axis [m]
1st shot	0.22	0.33	0.18
2nd shot	0.26	0.22	0.14
3rd shot	0.25	0.24	0.16
4th shot	0.23	0.16	0.10
5th shot	0.23	0.22	0.27
6th shot	0.28	0.23	0.13
7th shot	0.20	0.16	0.08
8th shot	0.22	0.26	0.22
9th shot	0.22	0.22	0.14
10th shot	0.22	0.20	0.16
Mean	0.23	0.22	0.16

以下に被験者 D の 4 球目の絶対座標系における速度の結果を示す. 青い線が提案手法によって求めた結果, 赤い線がモーションキャプチャーシステムによって求めた結果となっている.

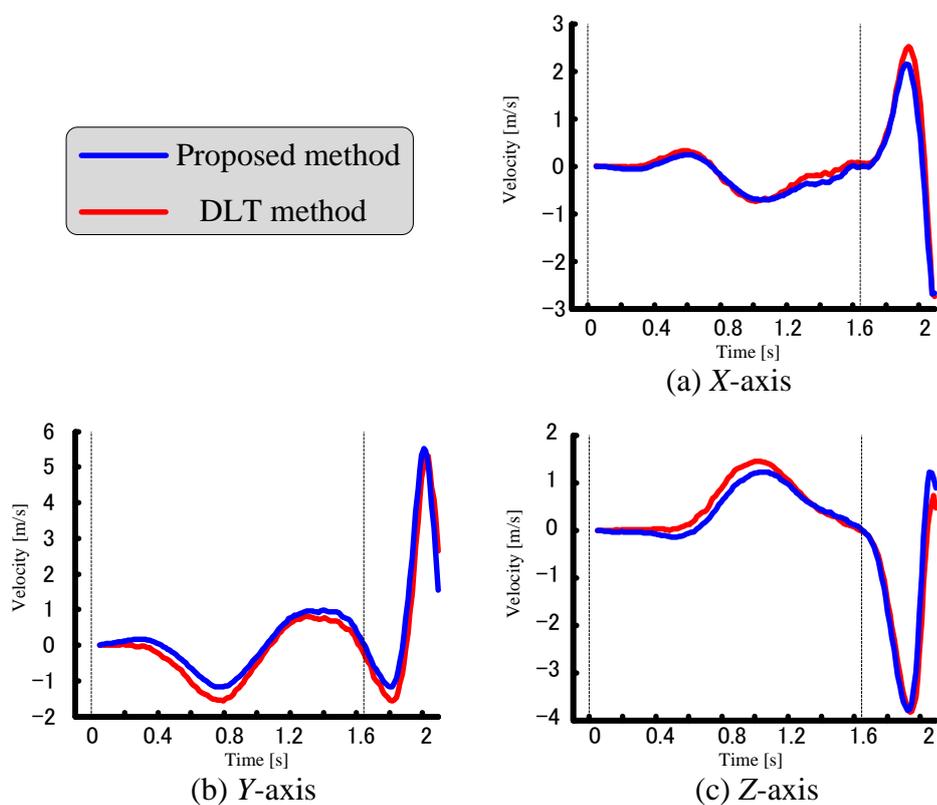


Fig. 25 Result of velocity of subject D's 4th shot

Table 15 Root mean square error of subject D's estimated velocity

Ball	RMSE of subject D's 10 trial		
	X-axis [m]	Y-axis [m]	Z-axis [m]
1st shot	0.13	0.32	0.26
2nd shot	0.12	0.43	0.32
3rd shot	0.13	0.39	0.28
4th shot	0.17	0.37	0.25
5th shot	0.22	0.39	0.31
6th shot	0.18	0.33	0.28
7th shot	0.13	0.33	0.22
8th shot	0.21	0.46	0.33
9th shot	0.20	0.38	0.25
10th shot	0.18	0.29	0.23
Mean	0.17	0.37	0.27

以下に被験者 E の 6 球目の絶対座標系における速度の結果を示す。青い線が提案手法によって求めた結果，赤い線がモーションキャプチャーシステムによって求めた結果となっている。

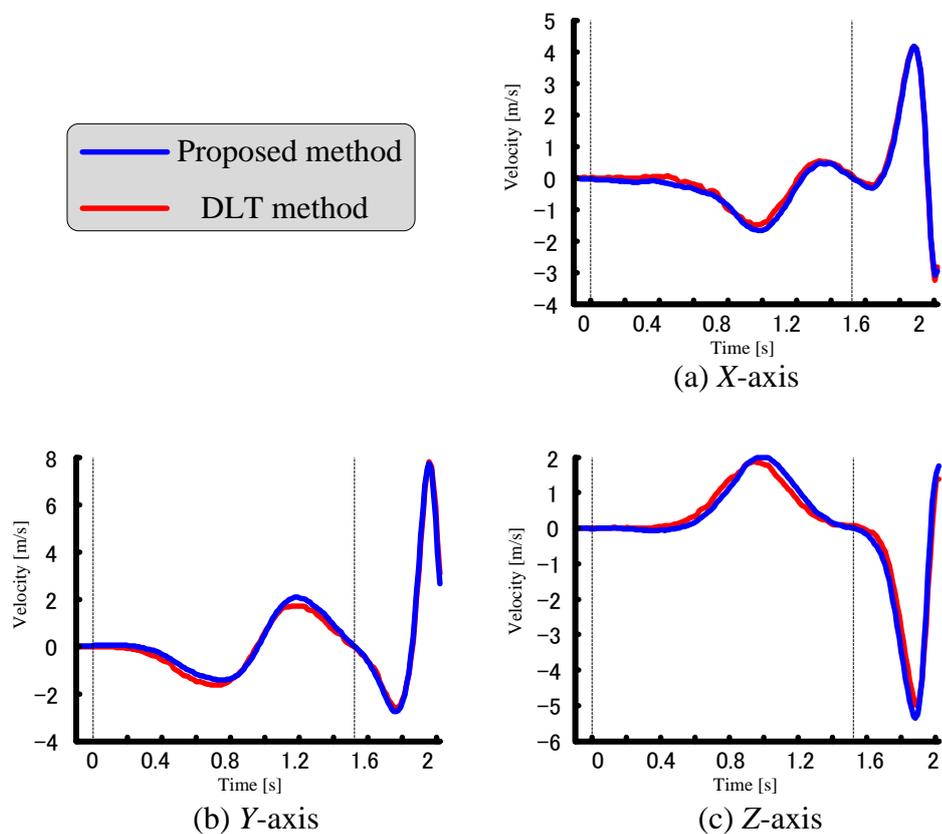


Fig. 26 Result of velocity of subject E's 6th shot

Table 16 Root mean square error of subject E's estimated velocity

Ball	RMSE of subject E's 10 trial		
	X-axis [m]	Y-axis [m]	Z-axis [m]
1st shot	0.19	0.26	0.20
2nd shot	0.15	0.26	0.22
3rd shot	0.14	0.25	0.21
4th shot	0.12	0.29	0.28
5th shot	0.12	0.25	0.20
6th shot	0.13	0.20	0.24
7th shot	0.16	0.20	0.26
8th shot	0.12	0.28	0.30
9th shot	0.14	0.29	0.28
10th shot	0.14	0.25	0.32
Mean	0.14	0.25	0.25

7. 5 考察

トップオブスイング状態の時にゴルフクラブの動きは一瞬静止する．という条件を用いて速度を求めたことによって，従来ドリフト成分などが増幅してしまっていて誤差が大きかったが，提案手法の方法によってモーションキャプチャーシステムで求めた波形と非常に近い波形結果を得ることができている．先行研究においてのグリップスピードの算出の問題点は，加速度から速度へと積分していくときに加速度センサに加わる遠心加速度などの成分を一緒に積分していたために，その誤差が蓄積されることによって速度変換時に速度が大きくなってしまっていたためだと考えられる．そこで本研究の手法を使いグリップ速度を全体座標系に変換したことにより従来の研究における遠心加速度などの影響で速度が大きくなってしまっていたという問題を克服できたと言える．全体座標に変換したときに遠心加速度などの影響を少なくすることができた理由は従来の局座標系では，回転運動しているため並進速度+遠心加速度で考えていたのに対し全体座標系に変換することによって回転を考えなくてよくなったため遠心加速度を考えなくてよくなったためであると考えられる．

第8章 応用実験3 ～変位～

8.1 目的

本実験では、ゴルフスイングにおけるグリップエンド部分の変位を求める。提案手法によって応用実験2で求めた速度を積分し変位を求める。その結果をモーションキャプチャシステムによって求めた結果と比較を行う。

8.2 方法

応用実験1で求めたセンサの出力データを用いてゴルフクラブのグリップエンドの絶対座標系における変位を求める。

8.3 変位の求め方

絶対座標系における変位は(19)式より求めた絶対座標系における速度 $\mathbf{V}(t)$ を積分することによって求めることができる。しかしながら、変位を求めるには加速度を二回積分することになるため、積分誤差が積み重なり大きな誤差になってしまう。そこで、誤差を少なくさせるためにある一点を定めそこに一致するように補正し誤差をなくす。

本研究ではアドレス時のボールの位置とインパクトのボール位置が変わらないことから「アドレス時のクラブヘッドの位置とインパクト時のクラブヘッドの位置は同じ」であると仮定する。

このことからインパクト時刻における変位がアドレス時刻における変位に一致するように補正を行う。

はじめに、アドレス時刻($t = T_{add}$)におけるグリップエンドの角度 $\alpha(T_{add})$, $\beta(T_{add})$, $\gamma(T_{add})$ 及び、ゴルフクラブの長さ($r = 1.26$ m)を用いてアドレス時刻におけるクラブヘッドの位置 \mathbf{H}_{add} をオイラー角を用いて求める。

$$\begin{aligned} H_{add} = & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha(T_{add}) & \sin \alpha(T_{add}) \\ 0 & \sin \alpha(T_{add}) & \cos \alpha(T_{add}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \beta(T_{add}) & 0 & \sin \beta(T_{add}) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta(T_{add}) & 0 & \cos \beta(T_{add}) \end{bmatrix} \\ & \cdot \begin{bmatrix} \cos \gamma(T_{add}) & \sin \gamma(T_{add}) & 0 \\ \sin \gamma(T_{add}) & \cos \gamma(T_{add}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (20)$$

次にインパクト時のクラブのヘッド位置 \mathbf{H}_{imp} を求める。インパクト時刻($t = T_{imp}$)におけるグリップエンドの位置を $\hat{\mathbf{D}}_{imp}$, グリップエンドの角度 $\alpha(T_{imp})$, $\beta(T_{imp})$, $\gamma(T_{imp})$ とする。クラブヘッドの変位はインパクト時刻のグリップエンド角度 $\alpha(T_{imp})$, $\beta(T_{imp})$, $\gamma(T_{imp})$ とクラブの長さ r およびインパクト時刻の変位 $\hat{\mathbf{D}}_{imp}$ を用いて以下のように求めることが出来る。

$$\begin{aligned}
H_{imp} = & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha(T_{imp}) & \sin \alpha(T_{imp}) \\ 0 & \sin \alpha(T_{imp}) & \cos \alpha(T_{imp}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \beta(T_{imp}) & 0 & \sin \beta(T_{imp}) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta(T_{imp}) & 0 & \cos \beta(T_{imp}) \end{bmatrix} \\
& \cdot \begin{bmatrix} \cos \gamma(T_{imp}) & \sin \gamma(T_{imp}) & 0 \\ \sin \gamma(T_{imp}) & \cos \gamma(T_{imp}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \hat{\mathbf{D}}_{imp}
\end{aligned} \tag{21}$$

以上の(20)式と(21)式よりアドレス時刻におけるクラブヘッドの位置とインパクト時刻におけるクラブヘッドの位置を求めることが出来た。

この時インパクト時刻におけるクラブヘッドの位置の誤差はこの二つのヘッド位置の差となり(22)式のように表すことが出来る。

$$\mathbf{H}_{diff} = \mathbf{H}_{imp} - \mathbf{H}_{add} \tag{22}$$

算出した変位データのインパクトからこの誤差を引いて補正することによってインパクトの変位を求めることが出来る。速度を積分して求めた変位を $\hat{\mathbf{D}}(\mathbf{t})$ 、インパクト時刻($\mathbf{t}=\mathbf{T}_{imp}$)の変位を $\hat{\mathbf{D}}_{imp}$ とすると、補正後の変位 $\mathbf{D}(\mathbf{t})$ は以下のように表すことが出来る。

$$\mathbf{D}(\mathbf{t}) = \hat{\mathbf{D}}(\mathbf{t}) - \frac{\hat{\mathbf{D}}_{imp} - \mathbf{H}_{diff}}{\mathbf{T}_{imp}} \tag{23}$$

8. 4 結果

以下に被験者 A の 1 球目の絶対座標系における速度の結果を示す。青い線が提案手法によって求めた結果，赤い線がモーションキャプチャーシステムによって求めた結果，緑野船が応用実験 2 で求めた速度をそのまま積分した結果となっている。

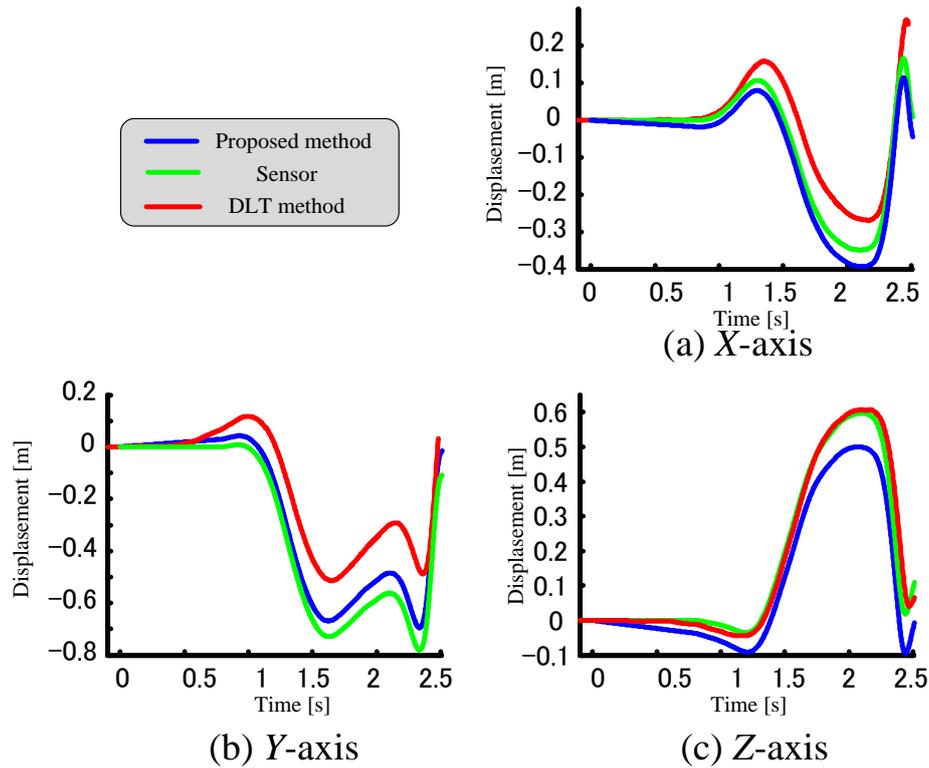


Fig. 27 Result of displacement of subject A's 1st shot

Table 17 Root mean square error of subject E's estimated displacement

Ball	Proposal method			Normal method		
	X-axis [m]	Y-axis [m]	Z-axis [m]	X-axis [m]	Y-axis [m]	Z-axis [m]
1st shot	0.09	0.13	0.08	0.06	0.18	0.03
2nd shot	0.09	0.09	0.07	0.06	0.27	0.04
3rd shot	0.03	0.10	0.05	0.08	0.05	0.03
4th shot	0.18	0.06	0.13	0.14	0.10	0.05
5th shot	0.05	0.04	0.04	0.11	0.10	0.03
6th shot	0.21	0.13	0.13	0.15	0.06	0.05
7th shot	0.22	0.08	0.17	0.16	0.14	0.05
8th shot	0.15	0.06	0.11	0.12	0.13	0.03
9th shot	0.07	0.10	0.05	0.04	0.15	0.04
10th shot	0.08	0.05	0.07	0.09	0.11	0.03
Mean	0.12	0.08	0.09	0.10	0.13	0.04

以下に被験者 B の 3 球目の絶対座標系における速度の結果を示す。青い線が提案手法によって求めた結果，赤い線がモーションキャプチャーシステムによって求めた結果となっている。

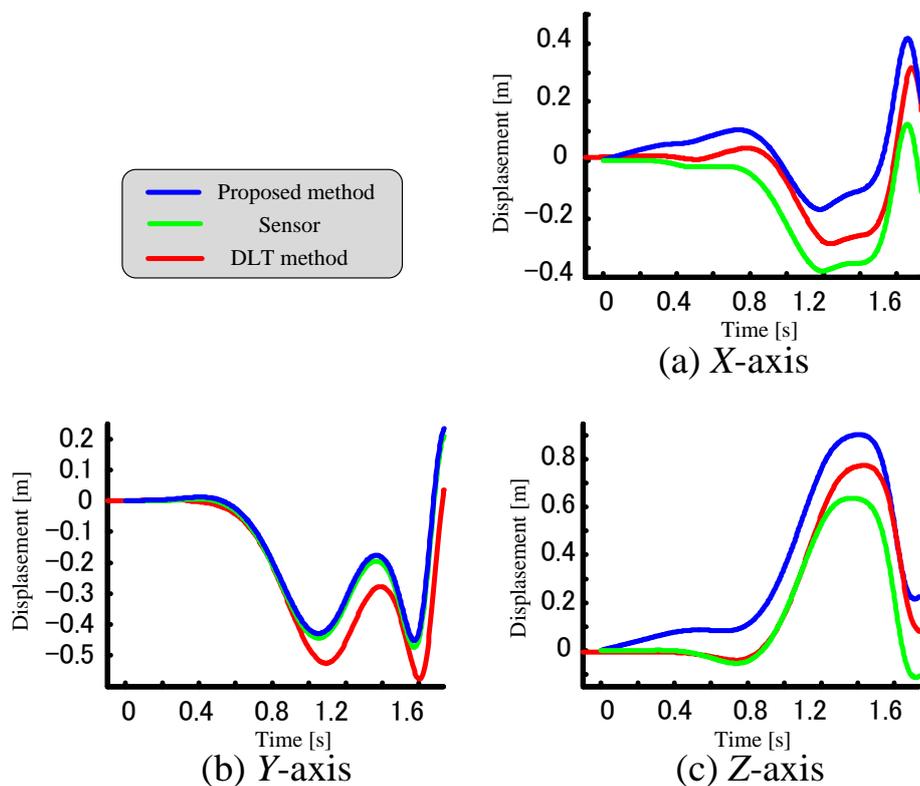


Fig. 28 Result of displacement of subject A's 1st shot

Table 18 Root mean square error of subject E's estimated displacement

Ball	Proposal method			Normal method		
	X-axis [m]	Y-axis [m]	Z-axis [m]	X-axis [m]	Y-axis [m]	Z-axis [m]
1st shot	0.21	0.19	0.23	0.16	0.15	0.11
2nd shot	0.10	0.09	0.12	0.09	0.08	0.10
3rd shot	0.12	0.11	0.13	0.11	0.12	0.11
4th shot	0.13	0.12	0.16	0.12	0.11	0.11
5th shot	0.23	0.16	0.19	0.12	0.13	0.14
6th shot	0.17	0.13	0.17	0.13	0.13	0.11
7th shot	0.22	0.13	0.19	0.11	0.13	0.16
8th shot	0.13	0.10	0.12	0.11	0.09	0.12
9th shot	0.22	0.16	0.22	0.16	0.13	0.16
10th shot	0.13	0.10	0.16	0.08	0.05	0.18
Mean	0.17	0.13	0.17	0.12	0.11	0.13

以下に被験者 C の 7 球目の絶対座標系における速度の結果を示す. 青い線が提案手法によって求めた結果, 赤い線がモーションキャプチャーシステムによって求めた結果となっている.

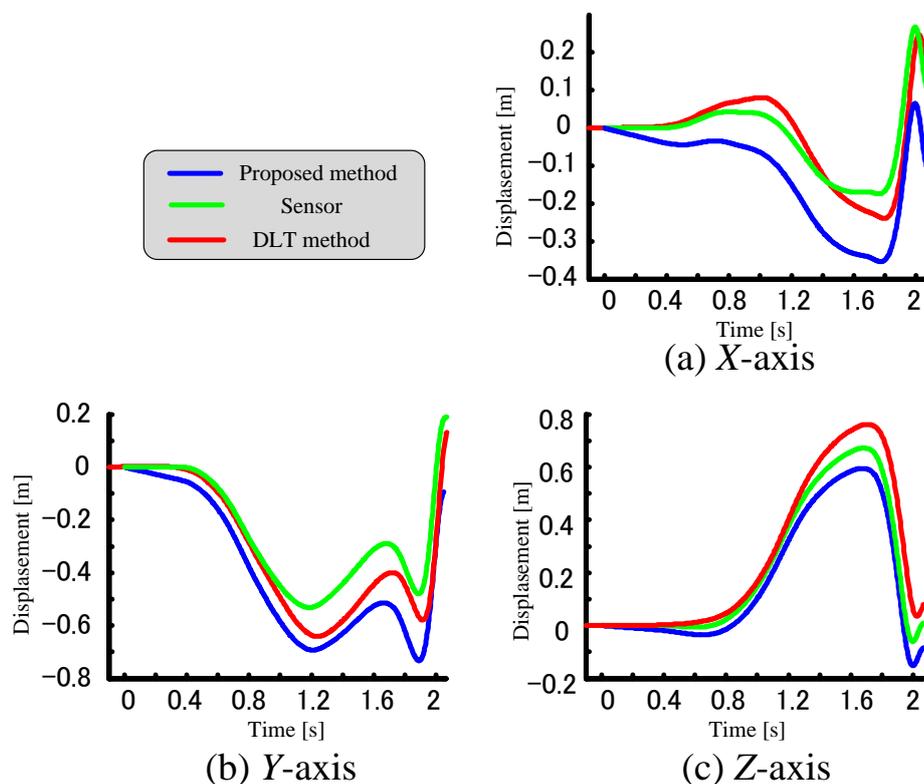


Fig. 29 Result of displacement of subject A's 1st shot

Table 19 Root mean square error of subject E's estimated displacement

Ball	Proposal method			Normal method		
	X-axis [m]	Y-axis [m]	Z-axis [m]	X-axis [m]	Y-axis [m]	Z-axis [m]
1st shot	0.09	0.08	0.17	0.04	0.22	0.17
2nd shot	0.14	0.14	0.18	0.06	0.11	0.12
3rd shot	0.17	0.17	0.22	0.05	0.10	0.04
4th shot	0.15	0.11	0.15	0.06	0.06	0.10
5th shot	0.05	0.07	0.09	0.09	0.14	0.23
6th shot	0.06	0.06	0.09	0.09	0.10	0.09
7th shot	0.12	0.08	0.12	0.04	0.09	0.07
8th shot	0.07	0.11	0.07	0.09	0.23	0.18
9th shot	0.08	0.18	0.15	0.05	0.13	0.07
10th shot	0.05	0.06	0.12	0.06	0.18	0.13
Mean	0.10	0.11	0.14	0.06	0.14	0.12

以下に被験者 D の 4 球目の絶対座標系における速度の結果を示す. 青い線が提案手法によって求めた結果, 赤い線がモーションキャプチャーシステムによって求めた結果となっている.

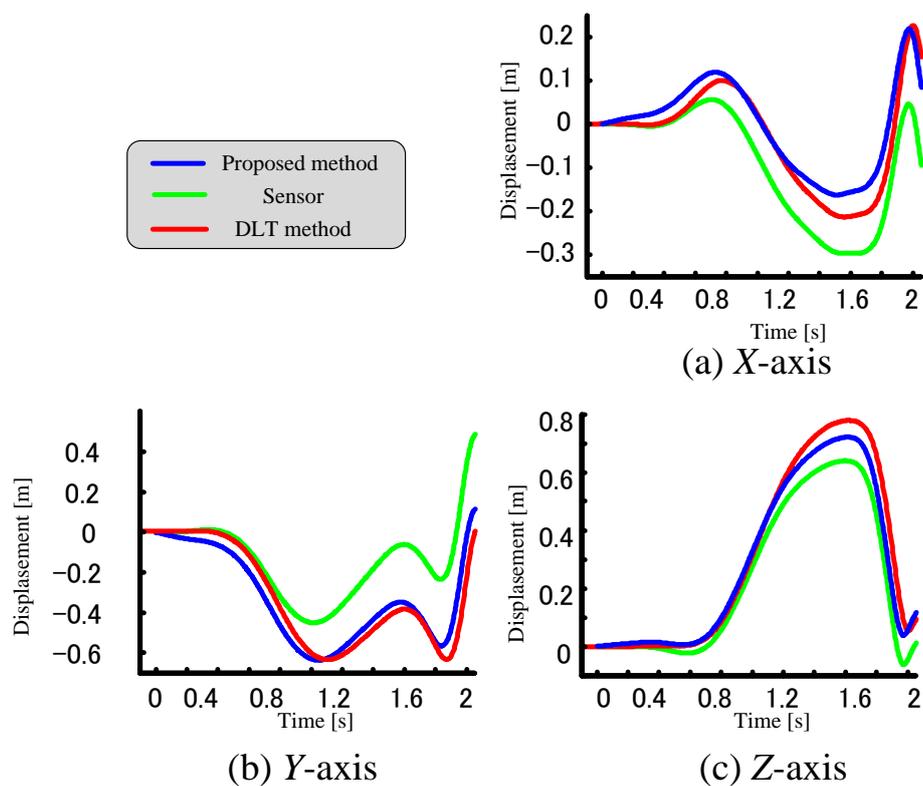


Fig. 30 Result of displacement of subject A's 1st shot

Table 20 Root mean square error of subject E's estimated displacement

Ball	Proposal method			Normal method		
	X-axis [m]	Y-axis [m]	Z-axis [m]	X-axis [m]	Y-axis [m]	Z-axis [m]
1st shot	0.12	0.08	0.17	0.04	0.27	0.07
2nd shot	0.11	0.09	0.17	0.04	0.33	0.04
3rd shot	0.03	0.07	0.08	0.07	0.32	0.06
4th shot	0.04	0.07	0.05	0.08	0.25	0.10
5th shot	0.06	0.08	0.04	0.08	0.19	0.05
6th shot	0.03	0.05	0.09	0.05	0.20	0.14
7th shot	0.06	0.08	0.11	0.04	0.26	0.04
8th shot	0.05	0.08	0.06	0.06	0.29	0.08
9th shot	0.05	0.08	0.04	0.09	0.26	0.13
10th shot	0.07	0.11	0.02	0.10	0.24	0.05
Mean	0.06	0.08	0.08	0.06	0.26	0.08

以下に被験者 E の 6 球目の絶対座標系における速度の結果を示す。青い線が提案手法によって求めた結果，赤い線がモーションキャプチャーシステムによって求めた結果となっている。

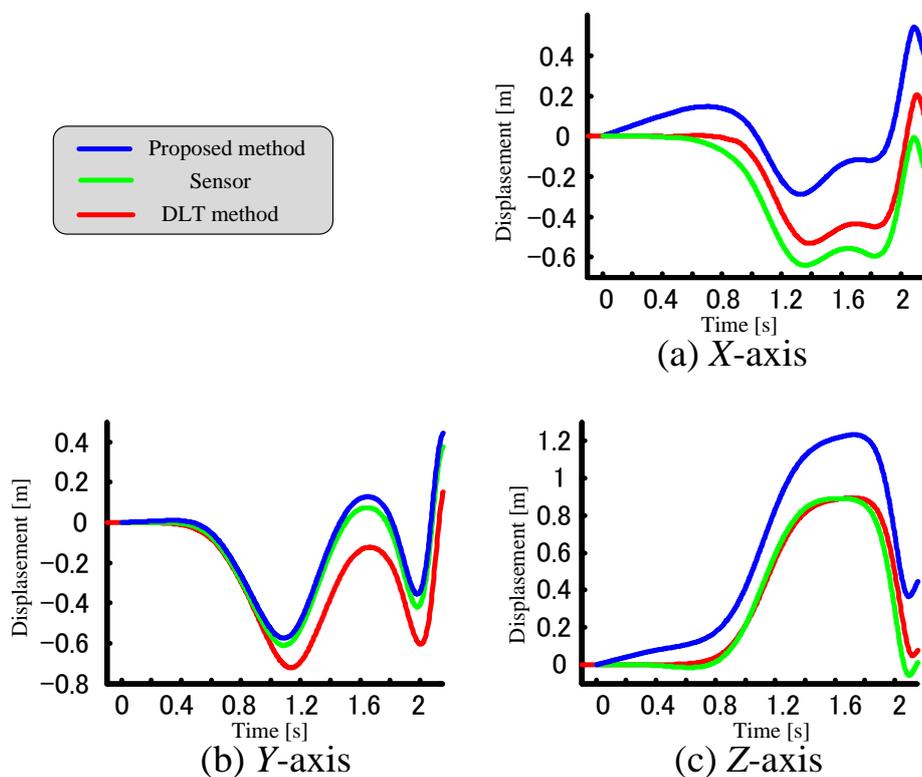


Fig. 31 Result of displacement of subject A's 1st shot

Table 21 Root mean square error of subject E's estimated displacement

Ball	Proposal method			Normal method		
	X-axis [m]	Y-axis [m]	Z-axis [m]	X-axis [m]	Y-axis [m]	Z-axis [m]
1st shot	0.16	0.06	0.06	0.27	0.31	0.29
2nd shot	0.10	0.07	0.05	0.13	0.08	0.14
3rd shot	0.06	0.12	0.06	0.13	0.07	0.11
4th shot	0.06	0.26	0.06	0.10	0.09	0.08
5th shot	0.09	0.05	0.06	0.15	0.15	0.18
6th shot	0.11	0.14	0.05	0.22	0.18	0.22
7th shot	0.13	0.11	0.07	0.26	0.21	0.23
8th shot	0.10	0.07	0.07	0.06	0.07	0.07
9th shot	0.10	0.06	0.05	0.08	0.07	0.06
10th shot	0.08	0.13	0.07	0.14	0.10	0.13
Mean	0.10	0.11	0.06	0.16	0.13	0.15

8. 5 考察

本実験では加速度センサから求めた速度を応用実験2で速度に変換し、その結果を提案手法によって積分し変位を求めた。従来積分を二回行うと誤差が大きくなってしまふことなどから加速度センサから変位を求めることは難しいが本研究ではゴルフ特有の動きであるアドレス状態、トップオブスイング状態、インパクト状態に着目することによってこれらの誤差を減らすことが出来た。

提案手法によって補正した結果は精度が向上した被験者もいるが、被験者によっては精度が逆に悪くなっている被験者もいた。このことはアドレス時における角度に誤差があり、クラブヘッドの位置を求めたときに誤差が出てしまったためであると考えられる。また、求めた速度にも誤差があるため、それを積分した変位の誤差が大きくなってしまったことなどが考えられる。また、アドレス時のクラブヘッドのポジションがボールの位置から離れている場合などもあるため、アドレス時のヘッドのポジションとインパクト時のヘッドのポジションがかなり違う被験者もいると考えられる。

第9章 おわりに

本研究ではゴルフクラブのグリップエンドに装着した加速度センサと角速度センサから絶対座標系における角度と速度及び変位を求める方法を提案した。検証実験として加速度センサと角速度センサを実際にグリップエンドに装着し、絶対座標系におけるグリップ角度、速度と変位を求め、リファレンスとして赤外線反射マーカを設置しカメラで撮影するモーションキャプチャーシステムによる結果と比較した。その結果、角度では二乗平均誤差は 11.54deg、速度では 0.23m/s、変位では 0.12m となった。

本研究の結果から本装置を使うことにより、モーションキャプチャーシステムにおいて問題点であった、高価であること及び設置などの問題点を改善することができた。また、装置を先行研究では有線であり被験者に負担がかかっていたという点が装置を無線化することによって改善することが出来た。このことにより今まで限られた場所ではしかでしか自らのスイングのフォームを客観的に見るができなかったものが、どこでも簡単にアドバイスを受けることが可能になると考えられる。しかしながらグリップエンドに取り付けるため、グリップの長さが若干伸びてしまいスイング中に腕がセンサにあったって取れてしまったことがあった。このことから実用化するには更なる小型化や軽量化が必要であると言える。

今後は、今回使用した加速度センサと角速度センサの他に地磁気センサを使用することを検討していく。磁気センサを使うことによって空間の方向を検出することができ、今回の研究の基礎実験2のアドレス時の姿勢角度を求める時に行ったモーションキャプチャーシステムとの補正式を作る必要がなくなり、より簡単に絶対座標系に変換することができると考えられる。しかしながら、磁気センサはまわりの磁気から方角を定めるためはじめにキャリブレーションを行う必要がある。さらに、野外などではいいが屋内では鉄筋コンクリートなど様々な金属の影響を受けてしまうことなどが課題として挙げられる。しかしながら、地磁気センサを使えば簡単に座標上の空間の位置を把握することができ、ある点の座標系を地磁気センサから求め補正を行っていく方法なども行っていきたい。また、1つのカメラを使用しトップオブスイングの位置情報をそこから取得する方法なども考え、最終的には軌跡を表示させることを目標とする。また、計測したゴルフスイングを解析しその解析結果をプレイヤーへアドバイスを返すシステムを構築し、単に数値や波形などでプレイヤーへ伝えるのではなく、音や矯正方法など正しいスイングになるようなアドバイスを返すシステムを構築していきたい。

参考文献

- 1) ベン・ホーガン, 水谷準訳: モダン・ゴルフ, (株) ベースボール・マガジン社, 1958
- 2) T. Iwatsubo and S. Kawamura: Optimum design of golf club face for enhancement of coefficient restitution, in Sci. Golf 4. London, U.K.: E. F. N. Spon, pp. 426–437, 2002
- 3) K. Miura, “Mapping club head to ball impact and estimating trajectory,” in Sci. Golf 4. London, U.K.: E. F. N. Spon, pp. 438–446, 2002
- 4) K. Kawashima, “Gripping force and golf science,” Jpn. J. Sports Sci., Vol. 1, No. 2, pp. 28–32, 1988
- 5) S. Nishizawa, M. Hokari, Y. Kataoka, and K. Watanabe, “Gripping force in the golf swing with correlation to skill,” J. Jpn. Soc. Sports Ind., Vol. 8, No. 1, pp. 39–47, 1998
- 6) T. Iwatsubo, “Influence of characteristic of golf club head on release velocity and spin velocity of golf ball after impact,” in Sci. Golf 4. London, U.K.: E. F. N. Spon, pp. 112–122, 2002
- 7) K. Ueda, M. Tsunoda, M. Ohnuki, T. Hiroyasu, and M. Miki, “Detection of rotation angle of golf ball with genetic algorithm mechanism,” in Proc. Symp. Sports Eng., Hiroshima, Japan, Vol. 03-12, pp. 23–27, 2003
- 8) K. Watanabe and M. Hokari, “Measurement of 3D Loci and Attitudes of the Golf Driver Head While Swinging,” *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics – Part A: Systems and Humans*, Vol. 36, No. 6, pp. 1161–1169, November 2006.
- 9) K. King, “The Design and Application of Wireless MEMS Inertial Measurement Units for the Measurement and Analysis of Golf Swings.” Ph.D. Thesis, University of Michigan, 2007.
- 10) K. King, S.W. Yoon, N.C. Perkins and K. Najafi, “Wireless MEMS Inertial Sensor System for Golf Swing Dynamics,” *Sensors and Actuators A*, Vol. 141, No. 2, pp.619-630, February 2008.
- 11) 石井雄大: 3次元角速度センサを用いた腰部角速度によるゴルフスイング解析, 法政大学大学院修士論文
- 12) 徳田淳: 加速度及び角速度センサを用いたゴルフスイングの計測とその解析, 法政大学大学院修士論文
- 13) 中島, 仰木, 秋山, 風見: 手首装着型加速度・角速度センサを用いた球泳トレーニング用泳動作表示システムの開発, 日本機会学会シンポジウム公演論文集, No.07-04, pp.200-203, 2007

謝辞

本論文を進めていくにあたり、渡辺嘉二郎教授、小林一行教授には適切なご指導・ご鞭撻をして頂き、誠にありがとうございました。特に、渡辺教授には研究のアドバイスを幾度となくして頂いただけでなく、計測の際にゴルフ練習場等に連れて行って下さったことに加え、被験者にもなって下さったことを深く感謝します。

また、住友ゴム工業株式会社の植田勝彦さんの協力なしでは本研究は行うことができませんでした。大阪での実験時にはモーションキャプチャーシステムを使った実験を行うことができ貴重な体験となりました。3年近く共同研究という形で研究を行えたことで多くのことを学ぶことができました。

そして、何より渡辺・小林研究室の M2, M1, B4 の皆さんに感謝します。

最後になりましたが、4年間、なに不自由なく通わせて下さった両親に心から感謝いたします。