

B-30

## ゴルフパッティング動作における運動学的解析およびシミュレーション

木村 健登<sup>\*1</sup>, Todd C. Pataky<sup>\*2</sup>

## Analysis and simulation of body and club kinematics during golf putting

Kento KIMURA<sup>\*1</sup> and Todd C. PATAKY<sup>\*1</sup> Shinshu Univ. Division of Mechanical Engineering and Robotics  
Tokida 3-15-1, Ueda city, Nagano, 386-8567 Japan

The purposes of this research were to analyze body and club kinematics during golf putting and to simulate key features of that motion. The force differences between right foot and left foot at impact were analyzed between skilled and unskilled subjects, and these had significant differences ( $p < 0.001$ ): skilled subject had more evenly shared weight and smaller variability across putts. Before impact, skilled subjects had significantly different kinematics in the vertical trajectory from a simple pendulum, which was simulated in Simulink based on experimental data for club-head trajectory. We will investigate face angle stability to small kinematic perturbations when the dynamic putter model follows the experimentally measured trajectories of novice and experienced golfers.

**Key Words** : Golf Putting, Plantar pressure, Face-angle, Simulink, PuttLab,

## 1. 緒 言

ゴルフパッティング（以下、GP と表記する）は、他のゴルフスイングに比べて小さい動作ではあるが、ゴルファーのパフォーマンスを評価する 1 ラウンドの打数のうち約 43% を GP が占めている<sup>(1)</sup>。そのため GP は非常に重要な要素であるといえる。GP を行う際に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。

GP について研究している例は多く、打法や心理状況が及ぼす影響などはすでに多く存在している。一方で実際の筋肉の動きなど運動学的視点からの GP の再現性向上自体を目的とした研究はほとんど行われていないのが現状であり問題である。そのため、今日に至っても GP 動作において未熟者および熟達者における運動学的な明確な差異の発見はなされておらず、統計学的な証明が欠如しているものが多くみられるのが現状である<sup>(2)</sup>。つまり、GP 動作の技術的な向上を目的としたトレーニングを行うために、統計学的に証明された運動学的視点の方法を模索する研究が必要である。

そこで本研究では、GP 動作時の身体運動を表す足底圧力分布（以下、足圧と表記する）およびパターの運動を解析する。ゴルフにおいて、スイング時の体重移動は非常に重要な要素の一つである。より良いパフォーマンスを成し遂げるためには、体重移動は非常に重要であり、体重移動の失敗は、パフォーマンスの低下に直結することはすでに確認されている<sup>(3)</sup>。つまり、この体重移動を詳細に調べることができる足圧解析は GP 動作解析に非常に適した方法の一つと言える。スポーツ研究の分野で、従来多くの研究で行われているモーションキャプチャを用いた場合に得られる外的な要因だけでなく、内的な要因も知ることができることが大きなメリットである。足圧測定器からは GP 動作の一連の流れが足底圧力分布データとして取得でき、動作全体を可視化することが可能である。これより、筋肉の動きの情報を取得できることが非常に大きなメリットであるといえる。これを解析することで熟達・未熟間の GP 動作の差異を発見できることが可能であると推測される。その後得られた熟達者のデータを解析、標準化し、未熟者にフィードバックすることで GP 動作の技術の向上を目的としたトレーニングシステムを構築することが本研究の最終目標である。本稿では、この初期段階として足圧を用いた熟達・

<sup>\*1</sup> 学生員, 信州大学 理工学系研究科

<sup>\*2</sup> 正員, 信州大学 (〒386-8567 長野県上田市常田 3-15-1)  
E-mail: 14fm311k@shinshu-u.ac.jp

未熟間の差異を発見することで、GP動作における足圧解析の応用の可能性を示唆する。

また、ゴルフはテニスや野球と同様、ラケットやバットを自らの筋肉を緻密に制御しボールを目的の場所へ打つ必要がある。つまり、足圧解析によって筋肉の動きを解析するだけでは十分ではない。そこで、SAM PuttLabという装置を用いてパティングクラブのヘッドの軌跡を3次元データとして取得し、このデータも熟達・未熟間で比較、解析し上記の問題を解決する。以上の2点を本稿の目的とする。

## 2. 身体運動実験

### 2.1 計測機器

今回、足圧計測機器としてPedar X (NOVEL, Munich, Germany)を用いた (図1)。Pedar Xはシューズの中敷き状の圧力センサからBluetoothによってPCにデータを送信する。Pedar Xのサンプリングレートは50Hzであり、これは2秒前後を動作時間として要するGP動作の計測において十分である。

身体運動がGP動作へ及ぼす影響を検討するために、パタークラブのヘッドに装着することでインパクト時のクラブヘッドの角度や速度などが測定可能であるGSA PUTT (BAYS New Territories, Hong Kong)を用いてクラブヘッドのフェイスアングルを計測した (図2)。



Fig.1 Pedar X (plantar pressure measurement)



Fig.2 GSA PUTT (face-angle measurement)

### 2.2 実験方法・被験者

被験者は、距離360cmのホールに向かって10回パティングを打ってもらう。実験前に実験に慣れるための練習を数球行った。実験にはGP練習用の人工芝のマットを用いた。

熟達な被験者5名、未熟な被験者6名をそれぞれ募った。いずれの被験者も身体的疾患を持たず、GP動作に支障をきたさない人である。全ての被験者が右手を利き手としている。以下に被験者の情報を示す (表1)。

Table1 Subject information. Averages, with SD in parentheses.

	skilled	unskilled
Number of subjects	5	6
age[years]	60.0(13.56)	44.5(25.03)
mass[kg]	63.2(5.17)	65.3(5.85)
height[cm]	164.0(5.05)	172.2(4.26)
shoe size[cm]	27.0(0.84)	27.0(0.63)

### 2.3 解析方法

熟達者 (Skilledグループ) と未熟者 (Unskilledグループ) の比較において、今回は特に上向き床反力 (足圧の総計圧力) やその周辺要素に有意差が見られるかを解析した。有意差の有無の判断はt検定によって行った (有意水準 $p = 0.05$ )。GP動作のみを解析するため、クラブがボールを打ち出した瞬間 (以下、インパクト時間と表記) から前後1秒を解析対象とする。

得られたデータをより視覚的に分かりやすくするために被験者ごとに正規化を行った。被験者ごとに各体重で全体を除してもよいが、自己申告であるがゆえ正確な値が得られるかは不透明である。そこで、得られ

たデータの左右の足底の平均圧力（図3の黒線）で全体を除することで正規化(normalized Ground Reaction Force 以下 nGRF と表記する)し、この時の単位を[BW]とする。

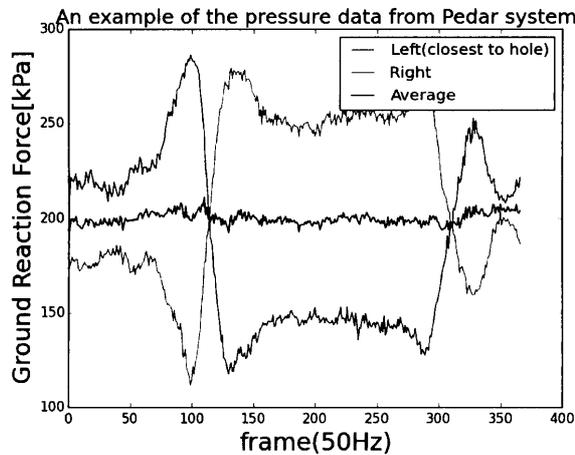


Fig.3 An example of data form Pedar X (One subject, one trial)

①熟達・未熟グループの平均足圧の比較 Pedar システムから取得したデータを熟達者、未熟者のグループに分け、それぞれの平均 nGRF データを解析したものを図4に示す。同時にそれぞれのばらつきも誤差範囲データとして表示している。全てのグラフにおいて、青い線が左足、赤い線が右足を示している。0秒の時間がインパクトタイミングであり、その前後1秒を表示している。インパクト前、左右の nGRF グラフが熟達者では交差し、未熟者では交差していない。これは、熟達者はボールをスタンスの中心に置かず、少し左足寄りにボールを置いていると思われ逆に、未熟者はボールをスタンスの中心または右足寄りに置いていると思われる。

②左右の足の nGRF の差 図4の解析においてインパクト時において両グループを解析した際に、左足と右足の圧力に大きな違いが表れるという差異を発見したためこれを詳しく調べるべく熟達・未熟間で左足と右足の nGRF の差をとるという解析を行った。これを図5に示す。図5は正規化を行っているため、Normalized force = 0 は左右の足の床反力が等しい状態にあることを意味している。熟達者グループは GP 動作がコンパクトに行われており、SD が小さいことから、未熟者に比べて GP 動作の再現性が高いと考えることができる。さらに、インパクト前-0.3秒付近では熟達者は最大で体重の約30%が右足に、未熟者では最大で約80%が右足に加わっていることが見て取れことから、未熟者ほどボールインパクトのために大きな体の反動を利用していることが分かった。

③フェイスアングルと足圧の関係 パッティングの成功率を高めるためのフィードバックシステムを構築する際、足圧とフェイスアングルに相関があることを示すことができれば、足圧だけの測定で十分なシステムとすることができる。そこで、フェイスアングルの SD と図5の解析の相関を求めた。縦軸に全被験者のインパクト時の左右の足の nGRF の差をとり、横軸に全被験者のフェイスアングルの SD をとった。同時に相関係数 R と、P 値も求めた。結果を図6に示す。熟達グループ (SD < 1.0) は 0.0[BW]付近に位置し、未熟グループ (SD < 1.0) は全て右足荷重が大きいことを示す負の値であった。また、相関係数 R = -0.842, P = 0.001 という非常に強い相関を得た。

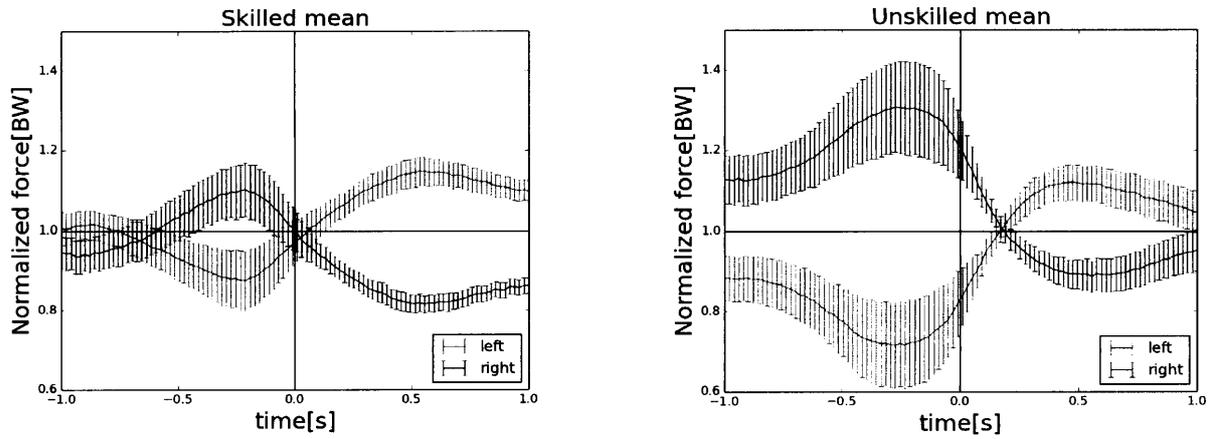


Fig.4 The mean force trajectories of skilled and unskilled groups

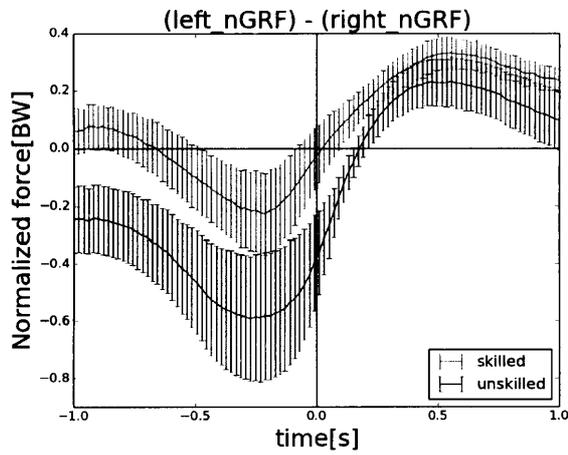


Fig.5 The mean difference trajectory between left and right foot forces in skilled vs. unskilled

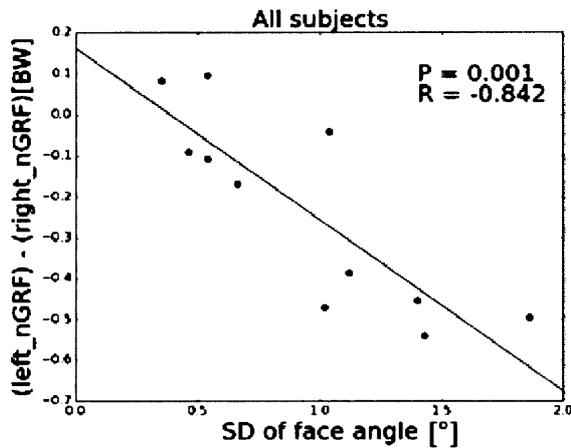


Fig.6 Relation between SD of face-angle and nGRF difference at impact for all subjects

## 2・4 結果・考察

### GSA PUTT から得られたフェイスアングルの SD

GSA PUTT から取得したフェイスアングル (図 7) のデータは, 全 10 回の試行の標準偏差 (以下, SD と表記する) を求めることで被験者の熟達, 未熟を選別するために使用した. 以下にその結果を示す (表 2). この結果は, GP 動作の精度向上を評価するうえで, 非常に重要な要因であると考えられる.

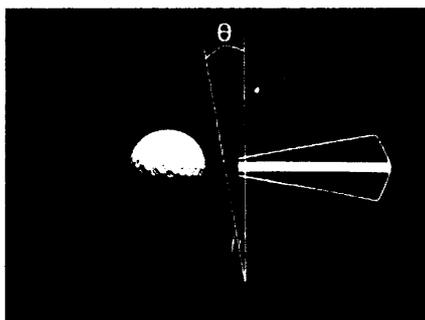


Fig.7 Putter face angle

Table2 SD of the face angle at impact : skilled(subj000~subj004), unskilled(subj005~subj010)

	SD of face angle
subj000	0.54
subj001	0.66
subj002	0.46
subj003	0.54
subj004	0.35
subj005	1.04
subj006	1.86
subj007	1.40
subj008	1.43
subj009	1.02
subj010	1.12

表 2 を用いて全 10 試行の SD が 1 未満 (他と比較してばらつきが小さい) の方を熟達者 (赤字), それ以外を未熟者 (黒字) とし以下 3 つの解析結果を示す.

①熟達・未熟グループの平均足圧の比較 プロゴルファーは, GP 動作の際に自分のスタンスの少し左側にボールを置くことが一般的である<sup>(4)</sup>. このことが図 4 の 2 つのグラフの大きな違いを示す主たる理由であると考えられる. 足圧解析によって GP 動作にとって一般的なことが示されたことで, 足圧解析による GP 動作の解析の有効性の証明になったと考えられる.

②左右の足の nGRF の差 図 5 の結果に関して, 熟達者は未熟者に比べて体の反動をほとんど利用せずにボールを打っていることが分かった. このことから, GP 動作のインパクト前は反動をつけて大きな動作を行うより, コンパクトな動作を行ったほうが技術的に熟達であると考察できる.

③フェイスアングルと足圧の関係 非常に強い相関かつ, 有意差も得られたことから, 足圧とフェイスアングル

のSDには強い関係があることが明らかとなった。この解析によって足圧の解析だけでのフィードバックシステムの構築が現実的になった。

### 3 パター運動の精密計測実験

#### 3・1 計測機器

SAM PuttLab(Science and Motion, Munich, Germany)という装置を用いた(図8)。この装置は、超音波を利用したパッティング分析システムで、約0.1 mm単位でパターの動きを測定できる精度の高さが特徴であり、ゴルフ用品メーカーが研究開発等に利用している。

データ処理や解析にはオープンソースのプログラミング言語Pythonを用いた。編集エディタは(Canopy v.1.5.2, Enthought, Austin, USA)である。

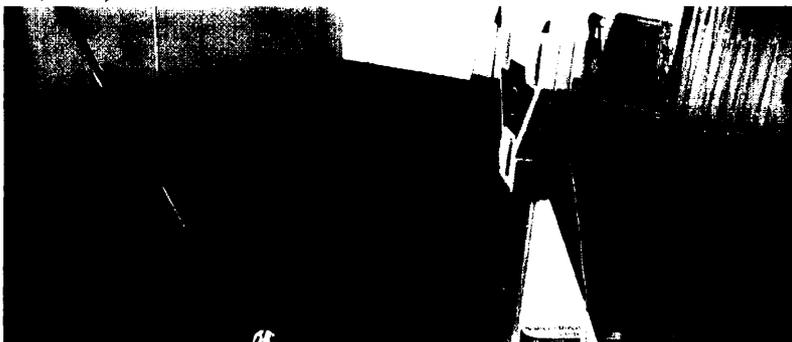


Fig.8 SAM PuttLab (club-head position measurement)

#### 3・2 実験方法・被験者

被験者は5 mのホールに向かって普段通りに20球GPを打つ。こちらの実験も実験環境に慣れるための練習を数球行った。本実験では、縦5 m、横5 mのL字型のGP練習用の装置を用いた。表面はグリーンを模した順目、逆目を持つ人工芝である。

熟達者1名、未熟者4名を募った。いずれの被験者も身体的疾患を持たず、GP動作に支障をきたさない。

#### 3・3 解析方法

得られたデータを全てインパクトタイミングで合わせたのち各種の解析を行った。本解析も熟達者と未熟者を比較しt検定(有意水準 $p = 0.05$ )を行った。熟達者と未熟者の軌跡を比較したとき、最も違いが見られたのが地面と垂直方向(z方向)であった。図9に熟達者1名と未熟者1名のz方向の平均軌跡を示す。未熟者の軌跡は単純に振り子のような動作をするのに対し、熟達者ではインパクト前のクラブヘッドの上昇がほとんど見られなかった。このことは熟達・未熟を区別するうえで重要な要素になる可能性がある。

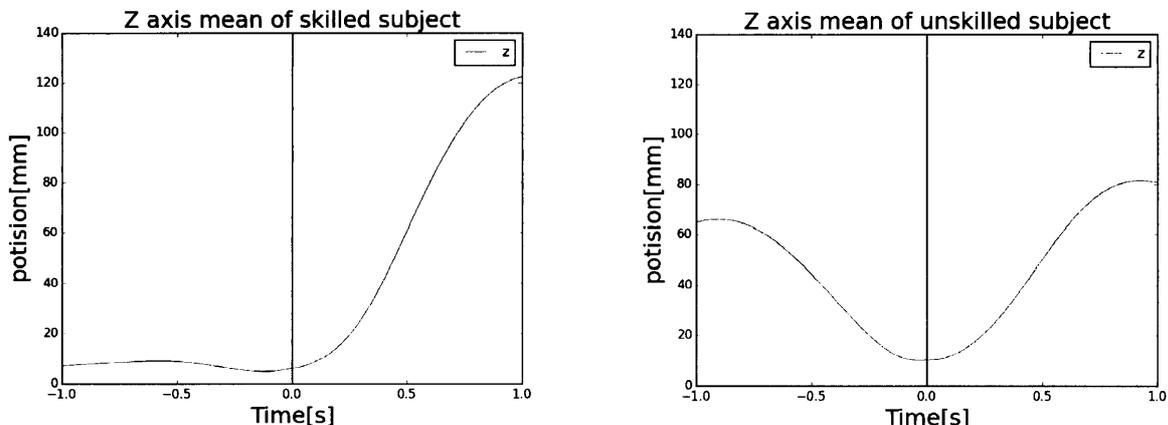


Fig.9 The mean vertically axis trajectory of skilled subject (left figure) and unskilled subject (right figure)

### 3・4 結果・考察

得られたデータに関して、熟達者1名と未熟者4名の間でt検定を行った結果、全てのt検定で有意差を確認した。このことからz軸方向のクラブヘッドの軌跡は熟達者と未熟者の間で有意に異なっていることが分かった。さらに表3から分かるように、特にインパクト前における熟達者の軌道のSDは未熟者と比べて小さく、GP動作の再現性の高さもうかがえる結果となった。

Table3 The SD mean of z axis trajectory before impact

	Mean of z axis SD
skilled	1.08
unskilled1	8.29
unskilled2	5.03
unskilled3	10.40
unskilled4	8.74

## 4 GPの力学シミュレーション

### 4・1 実験方法

GP動作を改善するにはまだまだ未知の要素が存在する可能性がある。しかし、その測定には多数の被験者を募り、様々な装置を用いた測定が必要となり現実的ではない。そこで、GP動作の力学モデルを構築し、数値シミュレーションによって新たな要素の発見を目指そうと考えた。これも複雑な力学モデルを構築するのではなく、単純振り子を模した簡易的なモデルを用いて、より簡単な要素発見の可能性を模索した。

そこで、GP動作の力学的要素を詳細に調べるために、MATLAB/Simulinkを用いたGP動作のシミュレーション手法を提案する。90 cmの剛体を角度 $30^\circ$ から下ろす自由振り子に模したものを今回使用した。質量や慣性モーメントは実物とほぼ同じに設定した。ここから得られたデータとPuttLabから得られたデータを比較し、t検定を行い有意差の有無を確認した（有意水準 $p = 0.05$ ）。

### 4・2 結果・考察

単純振り子を模したシミュレーションから得られたz軸方向の軌跡と、PuttLabから得られた熟達者および未熟者のz軸方向の軌跡のデータを図10に示す。

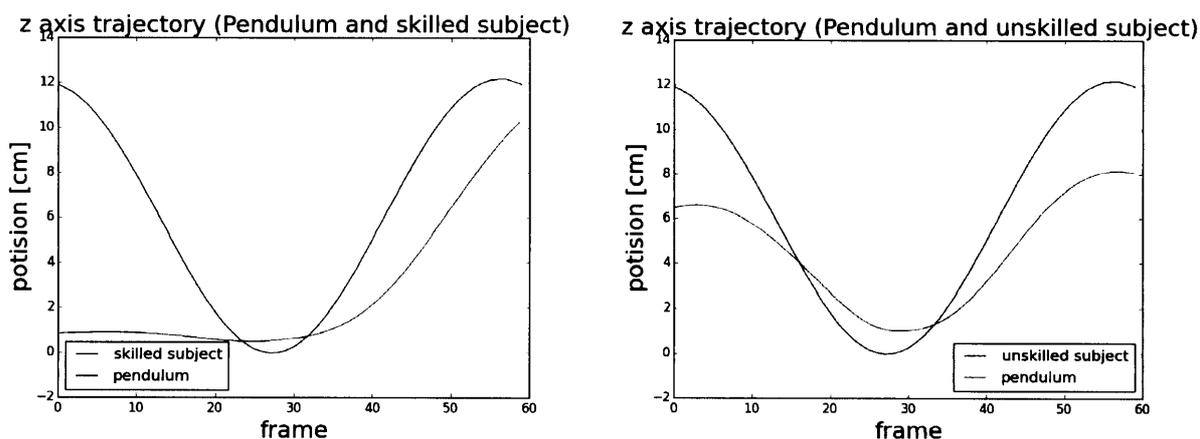


Fig.10 The z axis trajectory skilled subject vs. pendulum and unskilled vs. pendulum

単純振り子と全ての被験者とのt検定を行った結果、インパクト後に関しては全ての被験者で有意差が見られなかったのに対し、インパクト前では熟達者と単純振り子との間にのみ有意差が見られ、未熟者との間では有意

差が見られなかった。このことから、未熟者は単純振り子のようにクラブヘッドをただ単に持ち上げインパクトするのに対し、熟達者ではクラブヘッドの軌道が単純振り子とは有意に差があり、打者が意図してこのような打ち方をしていると考えられ、これが熟達・未熟を分ける大きな要素になりうる可能性を示唆する結果となった。

## 5 今後の展望

### 5.1 より詳細な実験

今回の実験は、熟達者1名と未熟者4名を比較した実験だった。この被験者数は統計学的にも十分な人数とはいえ、さらに多くの熟達者を募る必要がある。より信頼できるデータを得るためにプロゴルファーの方に実験をお願いしたいと考えている。また、全国大会に出場経験のある高校生を被験者とすることで多くの熟達者のデータを得ることも現在模索中である。多くの熟達者のデータを得られれば、本研究の説得力が増すであろう。

### 5.2 力学シミュレーション

今回の実験の結果から、単純振り子によって未熟者のクラブヘッドの軌跡をモデル化できる可能性を示唆できた。今後は熟達者の力学モデルの作成も随時進めていく予定である。これが達成できればより簡単にかつ安価に熟達者と未熟者の差異を発見できるようになり、GP動作評価の応用可能性が広がると思われる。

また、PuttLabから得られたデータと足圧の関係も相関関係を得られればトレーニングシステムへの応用が広がる。

### 5.3 GPトレーニングシステムへの応用

足圧解析およびPuttLabのGP動作の解析が完了した後、トレーニングシステムへの応用を行う予定である。以下にシステムの概要を示す。トレーニングシステムには持ち運び便利なスマートフォンをプラットフォームとしたアプリケーションを用いるのが好ましいと思われる。システムにはあらかじめ理想的なモデルの足圧パラメータやクラブヘッドの軌跡をインプットしておく。利用者は足圧計測シューズを履きGP動作を行い、圧力データはリアルタイムでスマートフォンに送信される。そのデータが書くパラメータについて理想的なモデルとどの程度差異があるか数値化、あるいは可視化を行うことで、改善点を逐一利用者にフィードバックするシステムである。これによって利用者は自らのGP動作の問題点を客観的に把握することができ、GP動作の向上をスムーズに行うことができる。

## 6 結 論

今回の実験ではGP熟達者と未熟者の2グループ間における足圧解析およびPuttLabを用いたクラブヘッドの軌跡計測、Simulinkを用いた力学シミュレーションを行った。足圧解析では、2グループ間におけるGP動作の詳細を視覚化することに成功し、差異を発見することができた。また、フェイスアングルのSDと足圧の間に強い相関を得ることに成功した。クラブヘッドの軌跡計測では2グループ間において有意差を確認した。熟達者に関しては、動作のばらつきが小さく、GP動作の再現性が高いという結果となった。力学シミュレーションでは、単純振り子という簡易なモデルで未熟者のクラブヘッドの軌跡をモデル化できる可能性を示唆する結果となった。今後、さらに詳細に解析を行い、2グループ間の差異を明らかにしていく予定である。

## 参 考 文 献

- (1) Burchifield, R., and Venkatesan, S., "A Framework for Golf Training Using Low-Cost Inertial Sensors", Proc. Of the International Conference on Body Sensor Network, (2010), pp.267-272.
- (2) Ball, K. A., and Best, R. J., "Difference centre of pressure patterns within the golf stroke II: group-based analysis", Journal of Sports Sciences, (2007), 25(7), pp.771--779
- (3) Ball, K. A., and Best, R. J., "Golf styles and centre of pressure patterns when using different golf club", Journal of Sports Science, (2011), 29(6), pp587-590.
- (4) Tiger Woods, "How I play Golf", Grand Central Publishing, USA(2011)