

## テニスラケットスイング時の手関節角度の計測方法

前田 寛<sup>\*1</sup>, 岡内 優明<sup>\*1</sup>

### The measurement method of the wrist joint angle during tennis racket swing

Hiroshi MAEDA<sup>\*1</sup> and Masaaki OKAUCHI<sup>\*1</sup>

<sup>\*1</sup> Oita University, Dept. of Engineering  
DannoHaru 700, Oita City, Oita, 870-1192 Japan

As topspin has been becoming a vital component for modern-day tennis, precise researches of friction between the string-bed and ball were carried out. However, from another viewpoint, it is necessary to clarify the relation between the grip angle and topspin in order to acquire the technique quickly or to prevent the wrist injury that occurs by taking a swing of topspin. The aim of this research is to make the measuring system that acquires the angle of wrist joint during the racket swing of topspin. In order to measure hand and forearm posture in inertial frame of reference during racket swing, two inertial sensors were attached to the back of hand and forearm. The angular velocity and acceleration were acquired from these sensors, and from the data, Euler angles were calculated in three-dimensions. From these Euler angles, the wrist angle was computed, and the difference of wrist angle during the swing between the Western grip and the Eastern grip was compared. These results showed that this measuring method expressed the characteristic of topspin precisely.

**Key Words** : Tennis Racket, Topspin, Euler angle, Western Grip, Eastern Grip

### 1. 緒 言

最近の大きなテニストーナメントでは、どんなに速度の速いボールを打っても、トップスピンをかけて相手のコート内にボールを落とすことが勝敗の鍵を握っているように思う。この、トップスピンのボールを打てるようになることは技術の上達に欠かせなくなっており、特に若い世代のプレイヤーにおいては、スイング速度を大きくしスピンの回転を挙げることにしのぎを削っているように見受けられる。しかし、飛来してくるボールに対してフラットに打ったほうがボールの反発速度は速くなる。また同じスイングのフォームでフラットなボールやトップスピンのボールを打ち分けるには、わずかでもグリップの角度が変わっているのではないかとと思われる。このグリップの角度と技術の上達にはなんらかの関連があるであろう。また始めからフラットに打つことを教わったプレイヤーが、そのグリップのままトップスピンをかけようとする、手首に負担がかかり、手関節の障害を引き起こす場合が増えているようだ。

これまで、グリップ角度、特に所謂ウエスタングリップとイースタングリップの違いによって、ボールの回転やラケットに加わる撓みや振動、また、手部や前腕の回転の速度等について報告してきた<sup>(1)</sup>。ボールの回転については、ボールとラケットが衝突する際の入射角度や摩擦による違いによって、どのようにボールが回転するかなど、詳細な研究が行われている<sup>(2)(3)(4)(5)(6)</sup>。その他ボールが衝突した際のラケットの変形を、有限要素法を用いてモデリングした研究<sup>(7)(8)</sup>やストリングの張り方や、その特性に関する研究<sup>(9)(10)</sup>、手部や前腕の運動などプレイヤーの上肢の運動に関する研究や、手関節まわりの角度変化の特性を示す手部と前腕の運動に関する研究は少

<sup>\*1</sup> 正員, 大分大学 (〒870-1192 大分県大分市旦野原 700)  
E-mail: hmaeda@oita-u.ac.jp

ない。そこで本研究では、ウエスタンとイースタンのグリップの違いに焦点を絞り、ラケットをテイクバックしてからボールを打突し、フォロースルーまで、手部と前腕部の運動がどのような角度変化で行われているのかを、慣性センサを用いて計測する方法を確立することを目的とする。

## 2. 方 法

### 2.1 実験方法

図1に実験の概要を示す。被験者は天井から吊り下げられ静止したボールをトップスピンがかかるようにラケットをスイングして打つ。その際グリップは図2に示すウエスタングリップとイースタングリップの2種類で行った。

スイング中のグリップ部を握る手と前腕の角度変化を見るために、手背部と前腕中部伸展側に慣性センサを装着する。このセンサーはロジカルプロダクト社製の小型9軸センサーで、加速度、角速度、地磁気をそれぞれ3軸検出できる。これらのセンサーから送信された信号は、レシーバで受信し、サンプリング周波数1KHzのA/D変換器を通して計算機に収録される。

また、ラケットのスロート部にストリング面に対して垂直方向と接線方向の2方向の歪み・振動を検出するために、ストレインゲージを接着した。この歪みの大きさから、ラケットをスイングしようとする際のグリップ部にかかるトルクを推測できる。また振動の状態から、ラケットの中心近くのいわゆるスイートスポットに衝突したか否かをおおよそ判断できる。これらのスロート部に接着したストレインゲージから検出される信号は、シグナルコンディショナーで増幅され、A/D変換器を通してコンピュータに電圧として収録される。その時のサンプリング周波数は20KHzである。

慣性センサの信号と、歪みゲージから検出された信号は、サンプリング周波数が異なるが、トリガ信号を入力することにより同期されている。

使用したラケットは、東亜ストリング社製のFortyLove Delfino，ストリングは同じく東亜ストリング社製のアスタリズムで張力は58ポンドである。

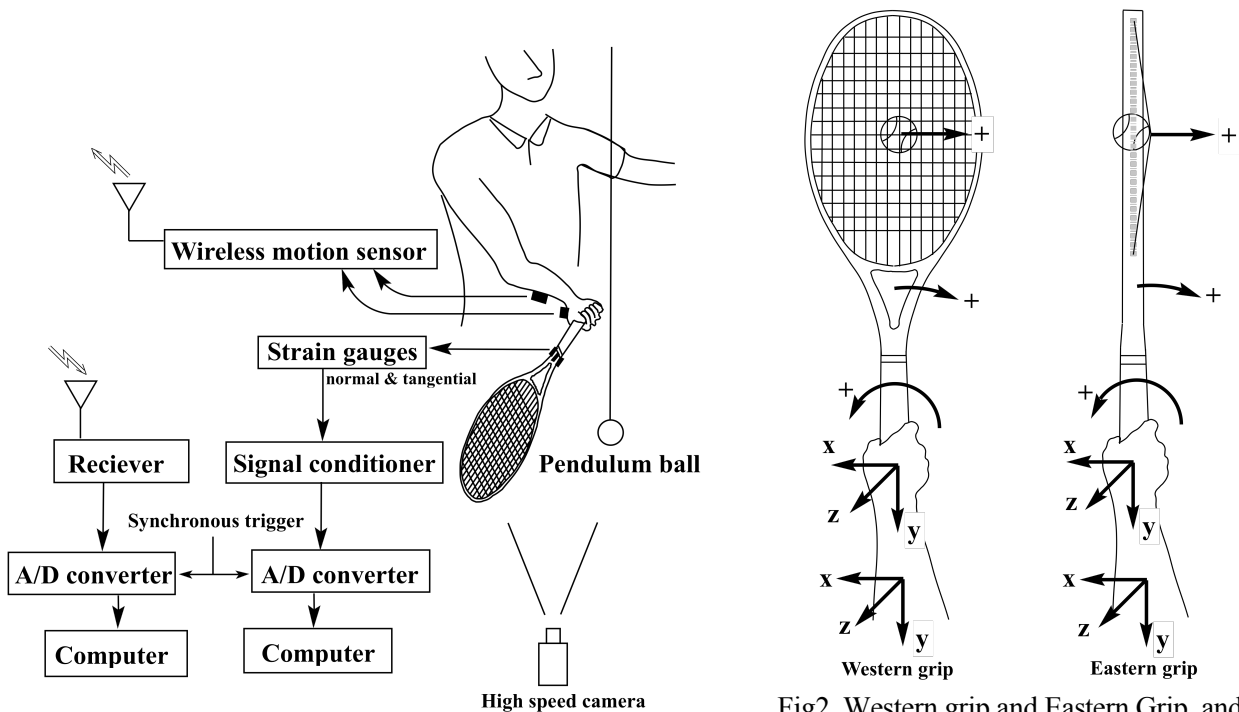


Fig.1. Schematic diagram of the

Fig2. Western grip and Eastern Grip, and each direction of, throat strain, hand's and forearm's euler angle.

x: pitch, y: roll, z: yaw

## 2・2 分析方法

図2の左にウエスタングリップを、右にイースタングリップの標準的な握り方を示す。ウエスタングリップは、ラケットのストリング面を下にして、グリップ部を上から握った状態で、米国西部のハードコートでプレイするときに用いられていた。ハードコートではボールがよく跳ね返るので、高い打点でも打てるように厚く持つようになったが、同時にトップスピンもかけやすい。すのため、現在のほとんどのプレイヤー、特に若年層ではさらに厚い持ち方が多いようだ。イースタングリップはラケットを水平面に対して垂直に置いたラケットを握る持ち方で、米国東部のコートで用いられていたためイースタンと呼ばれている

ラケットスロート部に接着したストレインゲージから得られる撓み信号は、グリップ部のトルクに換算した。Fig. 2のウエスタングリップのラケットスロート部に示すように、ストリング面に対して接線方向では矢印の方向に撓み信号がプラスとなるように設定した。すなわちラケットを左回りに回転させたときにトルクが+となる。同様に、イースタングリップのスロート部に示す矢印の方向に撓み信号がプラスに現れる。すなわち、ボールを打つ方向、左回りにグリップ部を回転したときに生じるトルクを+とする。

## 2・3 オイラー角の算出

また慣性センサの3軸方向の正負を、図2の手背部と前腕部に示した矢印のように設定した。回転角度の向きは矢印に対して右ネジの方向を+とする。x軸, y軸, z軸をオイラー角では一般にピッチ, ロール, ヨー角と呼ぶ。手関節まわりの角度で表すと、ピッチ角 $\phi$ は掌屈が正, 背屈が負, ロール角 $\theta$ は回内が正, 回外が負, ヨー角 $\psi$ では尺屈が正, 撓屈が負となる。これらのオイラー角は、ロジカルプロダクト社製、姿勢推定アプリケーションで求めている。その算出方法は、まず慣性センサから得られる角速度を、加速度センサの値で補正しながらフィードバック制御アルゴリズムを用いて積分し、姿勢行列へ変換し、3行3列の方向余弦行列 $E$ を算出する。次にこの方向余弦行列 $E$ から次の式によりオイラー角、 $\phi$ 、 $\theta$ 、 $\psi$ を算出した。

$$\phi = \tan^{-1} \frac{E_{23}}{E_{33}} \quad (1)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{-E_{13}}{\sqrt{E_{23}^2 + E_{33}^2}} \quad (2)$$

$$\psi = \tan^{-1} \frac{E_{12}}{E_{11}} \quad (3)$$

図3は慣性センサを机上でx軸( $\phi$ )まわりとz軸( $\psi$ )まわりに、90度回転させ、若干90度以上傾けた後、もとの姿勢である0度となるように、机上に戻したときの算出結果であるが、ほぼ精度良く回転角度を示している。

図4は慣性センサを手で水平に保持し、ピッチ, ロール, ヨー, の順に90度ずつ回転させたときの算出結果である。手で保持しているため、若干揺れているが、各軸ともほぼ精度良く90度を示していた。

また図5は同様に360度回転させた時の算出結果であるが、計算中に三角関数を用いているため、180度を越

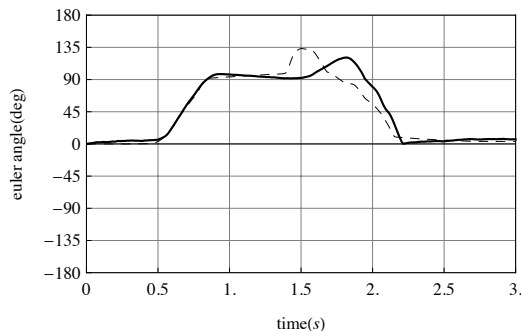


Fig.3. Precision of euler angle

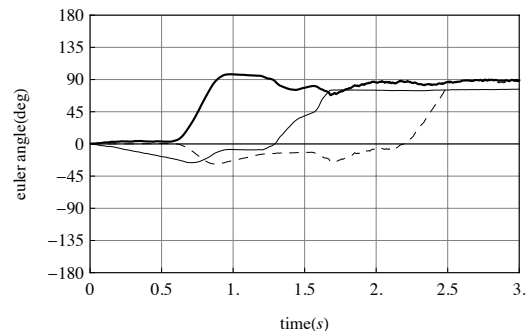


Fig.4. Euler angle of motion sensor rotating with hand.

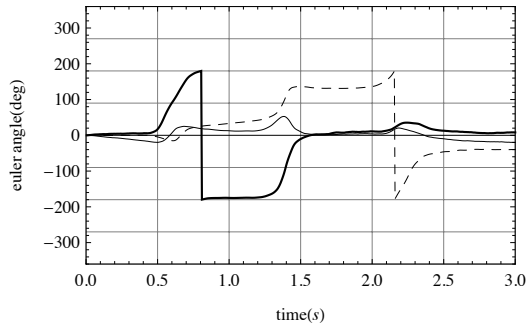


Fig.5 Euler angle of motion sensor rotating over 180 deg.

えると、データが正負逆転し、計算結果と慣性センサの動きが一致しなくなる。そのため、計測にあたっては、初期値から 180 度を越えないような運動に制限されることに留意しなければならない。

### 3. 結 果

#### 3・1 ウェスタングリップの実験例

ウェスタングリップでの実験結果を Fig.6 に示す。被験者は始めラケットでボールを打つ瞬間の姿勢を想定して静止し、その姿勢を初期値とする。従って、用意はじめの合図でラケットを一旦テイクバックし、それからボールを打突しようとする時、ほぼもとの姿勢と同じ位置でボールとラケットが衝突する。そうすることによって、手部と前腕部に装着した慣性センサの角度変化の範囲が 180 度以下になると考えた。被験者は初期の姿勢からラケットをテイクバックし、トップスピがかかるような打ち方で、ボールを打突する。

図 6 は上から、慣性座標系における手の姿勢、次に前腕の姿勢、3 番目は前腕を基準としたときの手の姿勢をオイラー角で示している。実線がピッチ、細線がロール、破線がヨー角である。また、横軸は時間軸であり、0 秒がラケットとボールが衝突した瞬間である。被験者は約-0.75 秒でラケットを引き始め、-0.2 秒前後でラケットが前方に振り出され、0 秒で衝突後、ラケットを振りかぶりながらフォロースルーしている。

図 6 の最下段の図は、手関節の角度変化について、ラケットをテイクバックしてから前方向（ボールを打つ方向）にスイングしている約-0.2~0.1 秒を、時間的に引き伸ばして示している。

手部のオイラー角から姿勢を細かくみてみると、ピッチ角が約-0.2 秒まで負に減少しており、手首を背屈している。ロール角もテイクバックで正となるが(-0.75~-0.4s)その後、負となり減少し、回内している。ヨー角はテイクバック始めてから-0.2 まで負、すなわち撓屈し、スイングが前方に向かい始めてから正に転じ、すなわち尺屈し衝突する時点で急激に 0 度付近に戻っている。その後、フォロースルーでラケットを首に巻き付けるような動作をするため、ヨー角が-180 度を越え、値が+180 へと飛んでしまっているのがわかる。

前腕のオイラー角からも手部と同様な分析ができる。図 6, Wrist joint(上から 3 番目の図)は、前腕の姿勢を基準にした、手部のオイラー角を示しており、手関節の角度変化を表している。-0.75 秒でテイクバックを開始してから、約-0.2 秒前後でラケットを前方にスイングし始めている。そこで、-0.2 秒から衝突後 0.1 秒までを拡大して見たのが、4 番目（最下段）の図である。0 秒で衝突するまで、ロール角（細線）が減少しており、すなわち前腕部を回内させると同時に、手関節を撓屈させてボールにトップスピをかけようとしている様子が窺える。

ウェスタングリップでのラケットスロート部に表れる歪みから推定したグリップ部のトルクを図 7 に示す。上段の図はラケット面に対して垂直方向、下段が接線方向のトルクである。横軸は時間軸であるが、ラケットを前方に振り始めた-0.2 秒から 0 秒で衝突後、0.1 秒までを示している。ラケット面に垂直方向では正の方向にトルクが生じているが、衝突の直前には負に転じている。これはラケットの回転にブレーキがかかっていることを示している。また、接線方向のトルクでは正のまま、ラケットを上方向に振り上げているものと考えられる。

### 3・2 イースタングリップの実験例

イースタングリップでの実験結果を図8に示す。図の縦軸、横軸はFig.6と同じである。ウエスタングリップと比べると全体的にみて、手部（最上段 Hand）と前腕（2段目 Forearm）のオイラー角が、両者とも同じ位相を

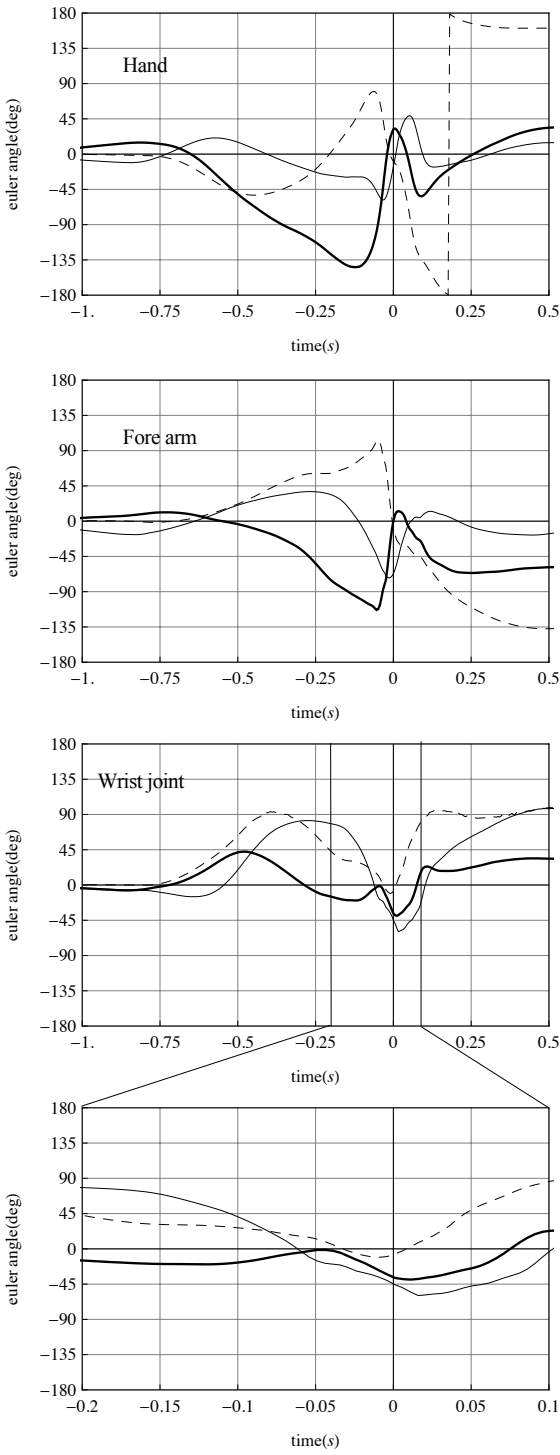


Fig.6 Euler angle of hand, forearm and wrist joint at Western swing.

———— pitch, ———— roll, - - - - - yaw

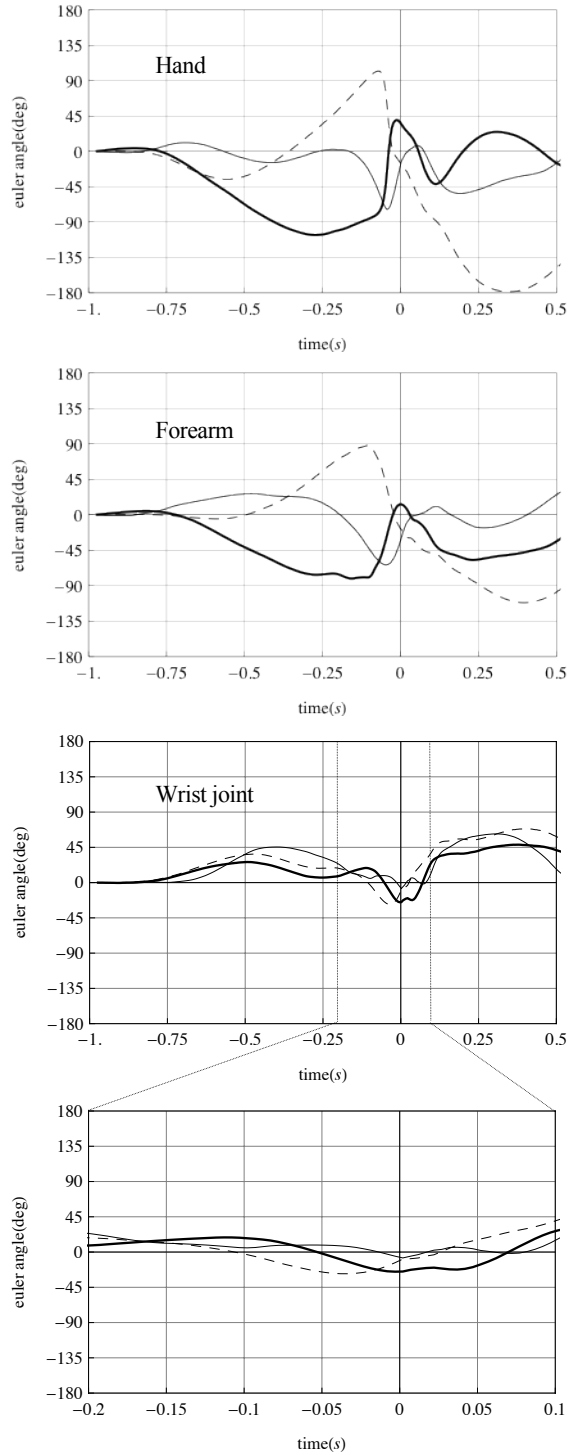


Fig.8 Euler angle of hand, forearm and wrist joint at Eastern swing.

———— pitch, ———— roll, - - - - - yaw

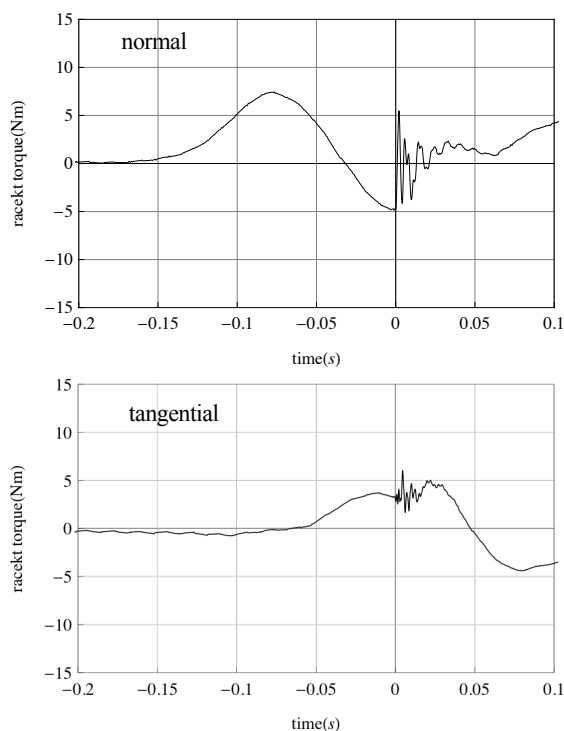


Fig.7 Torque generated on the racket shaft during the western swing

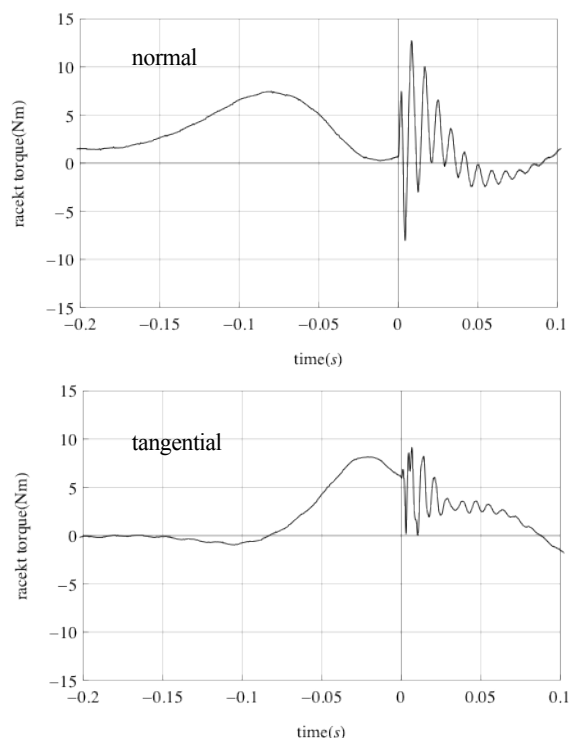


Fig.9 Torque generated on the racket shaft during the eastern swing

示し、手部と前腕の姿勢、角度が同時に運動している傾向を示しているように見受けられる。そのため、上から3・4段目の図に示したように、ウエスタングリップの結果と比べて手関節のオイラー角の変化が少なく、手首を固定したスイングをしていると考えられる。

図9はイースタングリップでスイングした際のグリップ部に表れるトルクを示す。0秒でボールが衝突した後の振動は、図8の衝突後の衝撃振動と比べて振幅が大きく、若干、ラケットの振動の節を外れていることがわかる。ラケット面にたいして垂直方向のトルク（上段 normal）は、スイングを開始してから最大で約7.5 [Nm] の値を示し、ウエスタングリップの値とほぼ同じであったが、衝突直前には0 [Nm]に戻っている。しかしラケット面に対して接線方向の歪みから推測したトルク（下段 tangential）の値は、ウエスタンの時と比べて最大で約8 [Nm]とおおきく、その正の面積、すなわち回転の力積も大きい。これらのことから、イースタングリップでは、手関節を固定して前腕と手部全体でボールに回転を加えようとしているものと考えられる。

### 3・3 姿勢推定の考察

ウエスタングリップとイースタングリップによるスイングの違いを、手背部と前腕伸展部に装着した二つの慣性センサと、ラケットスロート部に接着した動歪みゲージを用いて分析しようとした。そしてスイング中の手部と前腕部の姿勢や、前腕部からみた手部の姿勢をオイラー角で、また、グリップ部に表れるラケットを回転させようとするトルクを推定した。その結果、ウエスタンとイースタングリップのスイングの慣性センサの回転角度が180度を越えなければ、慣性座標系における手や前腕の姿勢を推定でき、そのオイラー角を用いて前腕からみた手の、すなわち手関節まわりの3軸まわりの運動も算出できた。今回はウエスタンとイースタングリップによるスイングの違いを題材にして、慣性座標系における手や前腕の姿勢を計測する方法、その際の留意点など知ることができた。

今後、この計測方法を用いて、ラケットの摩擦力も測定項目に加え、被験者数を増やすことにより、グリップ角度の違いとボールのスピンの回転速度との関係を明らかにする。そうすれば、手関節への負担の少ない安全なスイング技術や、スピーディな技術の上達方法等について考察できると考えられる。

## 4. 結 語

本研究では、テニスラケットをスイングする際の手部や前腕の姿勢，ならびに手関節角度を，オイラー角を用いて計測する方法について考察した．結果を以下に示す．

- (1) 慣性センサを用いてテニスラケットをスイングしたときの手と前腕の慣性座標系におけるオイラー角を推定しようとした．回転角度が 180 度以内であれば，精度良く推定できた．
- (2) 特にウェスタングリップとイースタングリップでラケットをスイングしたときの手と前腕の姿勢をオイラー角により推定した．
- (3) さらに前腕を基準とした手のオイラー角，すなわち手関節角度の変化を推定した．
- (4) ラケットスロート部に接着した動歪みゲージからグリップ部のトルクを推定し，手関節角度の変化と比較した．
- (5) 以上の結果からラケットをスイングしたときの前腕，手の運動計測が可能であると考えられた．

本研究の一部は JSPS 科研費 No. 23500739 の助成を受けたものである．

## 文 献

- (1) 前田寛，岡内優明，“テニスにおけるトップスピン技術の分析方法”，シンポジウム：スポーツ・アンド・ニューマンダイナミクス 2012 講演論文集、pp. 34-39
- (2) Cross, R., (2000) Effects of friction between the ball and strings in tennis. *Sports Engineering* 3:85-97
- (3) Goodwill, S.R., Haake, S.J. (2004) Ball Spin Generation for Oblique Impacts with a Tennis Racket. *Experimental Mechanics* vol.44, No.2 :195-206
- (4) Maeda, H., Okauchi, M., (2010) Properties of friction during the impact between tennis racket surface and ball. *The engineering of sports* 8:2973-2978
- (5) Maeda, H., Okauchi, M., (2012) Friction properties of the face of a hand-held tennis racket. *The engineering of sports* 9:544-549
- (6) Allen, T., Haake, S., Goodwill, S. (2010) Effect of friction on tennis ball impacts. *Proc. IMechE* vol.224 Part P; *J. Sports Engineering and Technology*:229-236
- (7) Allen, T., Hart, J., Spurr, J., Haake, S., Goodwill, S. (2010) Validated dynamics of real sports equipment using finite element; a case study using tennis rackets. *Procedia Engineering* 2 3275-3280
- (8) Allen, T., Haake, S., Goodwill, S. (2010) Comparison of a finite element model of a tennis racket to experimental data. *Sports Engineering* 12 :87-98
- (9) Nicolaidis, A., Elliott, N., Kelley, J., Pinaffo, M., Allen, T., “Effect of string pattern on ball spin generation from tennis racket”, *Sports Engineering*, Vol.16, No.3, (2013), pp.181-188.
- (10) 川副嘉彦，中川慎理 (2010) ; テニスにおけるスピニングの変革とラケット性能についての考察. シンポジウム：スポーツ・アンド・ニューマンダイナミクス 2010 講演論文集、147-152