

ラグビーフットボールのコンタクトプレイを対象にする 慣性センサを用いた衝撃力計測

中島 賢治^{*1}, 城野 祐生^{*1}, 川原 貴司^{*2}, 堂平 良一^{*3}, Tim GABBETT^{*4}

Impact Force Measurement using the Inertial Sensor for Contact Play in Rugby Football

Kenji NAKASHIMA^{*1}, Yuuki JOHNO^{*1}, Takashi KAWAHARA^{*2}, Ryoichi DOUHIRA^{*3} and Tim GABBETT^{*4}

^{*1} Sasebo national college of technology
Okishincho 1-1, Sasebo city, Nagasaki, 857-1193 Japan

Micro sensors have begun to be used in the scientific research of safe improvement and technical analysis of rugby. This paper aims to develop a system to measure the impact forces of contact plays using an acceleration and gyro sensor. The acceleration vector provided from a sensor uses a peculiar local coordinate system. Therefore, the acceleration vector of the local coordinate system is converted to the acceleration vector of the absolute coordinate system by Rotation matrix. The displacement and the velocity are calculated by integrating accelerations of the absolute coordinate system. The impact force is calculated from the relationship between the momentum increment and the impulse. This article reports the practical skill experiment that measured the impact forces of the contact plays. The experimental results clarified the quantitative error and problems in the measurement using the inertial sensors. The measurement success rate was 50% with velocity, 40% with impact force and 20% with the coefficient of restitution, respectively.

Key Words : Acceleration sensor, Gyro sensor, Impact force, Rotation matrix, Rugby football

1. 結 言

ラグビーフットボール競技は、走る、当たる、押す、寝転ぶ、起き上がるという動作の連続であり、無酸素運動と有酸素運動が複合する高度な持久力・スタミナが選手に要求される。その能力の向上には、コンタクトフィットネストレーニングが適切と考えられるが、現在よく行われている中等度のランニング速度によるコンタクトフィットネストレーニングは、運動強度の生理学的指標である心拍数において試合形式トレーニングに酷似しているものの、短時間で高エネルギーを発揮するような最大スプリント速度や筋パワーに対してネガティブに作用することが指摘されている⁽¹⁾。そのため、スプリング走速度に配慮したコンタクトフィットネストレーニングプログラムの開発が課題であり、実践的ゲームスキルを対象とした運動解析の重要性が増している。ところで、短時間で高エネルギーを発揮する運動は無酸素運動であり、ラグビー競技においては、サイドステップやチェンジオブペースなどの前後左右への緩急をつけたランニング、タックルやクラッシュなど能動的な身体接触、スクラムやモールラックなどボールの争奪にかかわる持続的な力の発揮などがある。そして、それらの運動特性は選手が発生する加速度に現れていると考えられ、その計測には慣性センサの利用が適切であろう。

著者らは、2010年度から研究を開始、ロジカルプロダクト社製の9軸ワイヤレスモーションセンサ（以後、WMSと記す）を20個準備してセンサ単体の誤差検定実験を繰り返した。卓上でセンサ単体を直線運動させ、移動距離を測定した検定実験⁽²⁾では、加速度の測定値から求めた変位の誤差が最大約30%であることがわかった。また、センサを自由落下させ床と衝突させた際の衝撃力を測定した検定実験⁽³⁾では、加速度の測定値から求めた衝撃力の誤差が約8%であることもわかっている。しかし、自由落下中の加速度を測定した検定実験⁽⁴⁾では加速度自体の誤差が約15%、旋盤で定速回転させたときの角速度を測定した検定実験⁽⁴⁾では角速度自体の誤差が約

^{*1} 正員, 佐世保工業高等専門学校 (〒857-1193 長崎県佐世保市沖新町1-1)

^{*2} 正員, 日本車輛株式会社 ^{*3} 佐世保工業高等専門学校 ^{*4} Australian Catholic University

E-mail: nakash@post.cc.sasebo.ac.jp

2%であることがわかっており、測定値自体の精度は悪くない。そして、2011年度には実践的ゲームスキル計測を目的として、サイドステップとタックル動作における運動軌跡と衝撃力の計測^{(5) (6)}を行った。このとき、実際の選手にWMSを装着して計測が行われたが、センサで計測された値の比較対象がなく、計測結果の精度が疑問視された。そこで、本報告では、計測結果の妥当性を物理的に確認できる実験を行い、選手の速度、衝突時の衝撃力と反発係数を算出し、実践的スキル計測における計測精度を調査した。

2. 実験の内容

2.1 計測装置仕様 本研究では、WMSを計測対象者に装着し運動を解析する。表1はセンサの仕様である。WMS内には、3軸加速度センサ、3軸角速度センサ、3軸地磁気センサが内蔵されている。測定結果はデータ送受信装置を経てPCに送られる。加速度センサと角速度センサの出力信号は、専用のソフトウェアで電圧値から演算データに変換され、演算後のデータ（加速度 [G]、角速度 [deg/sec]、地磁気 [Gauss]）が出力される。

Table 1 Sensor specifications

The whole sensor	
Communication range	About 50 m
Sampling frequency	1~1000 Hz
Outside dimension	40×20×55 mm
Mass	35 g (Include battery)
Measurable range	
Acceleration sensor	Each axis ±50 G
Gyroscope sensor	Each axis ±1500 dps
Geomagnetism sensor	Each axis ±4 Gauss

2.2 選手へのセンサ装着方法 本実験では、センサを装着した計測対象者（今回の実験では、本校ラグビー一部員を対象）がコンタクト動作を行い、センサ信号データから衝撃力を算出する。図1はセンサを装着した選手の状態を示している。ポケット付のベストとスパッツを準備し、重心に近い下腹部、左右肩甲骨の間にそれぞれセンサを装着した。下腹部のセンサをLowerセンサ、肩甲骨間のセンサをUpperセンサとする。進行方向がz軸正方向、鉛直下方向がx軸正方向、進行方向に向かって左がy軸正方向となるようにセンサを装着している。サンプリング周波数は500 Hzに設定した。

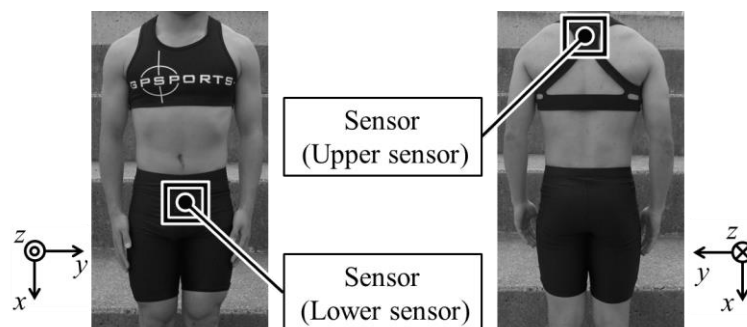


Fig. 1 Wearing position of the sensors

図2は、コンタクトプレイの衝撃力計測実験の概略を示している。左側は図1に従ってセンサを装着した計測対象者（体重が80, 70, 92, 63, 85kgの5名）である。右側はラグビーのゴールポストに吊るしたヒットダミー（直径45cm、長さ1.45m、質量70.85kg）である。ヒットダミーの上下中心にWMSが1個装着されている。センサを装着した計測対象者は、測定開始後5秒間静止し、コンタクトダミーに向かい助走し、コンタクトする。実験の様子はビデオカメラで撮影し、動画から誤差検定に用いる真値を求める。速度と衝撃力、反発係数の計算は、計測対象者の重心に装着したLowerセンサのデータのみで行った。5名の計測対象者は表2の2種類のコンタクト動作を行い、合計で10回の実験を行った。

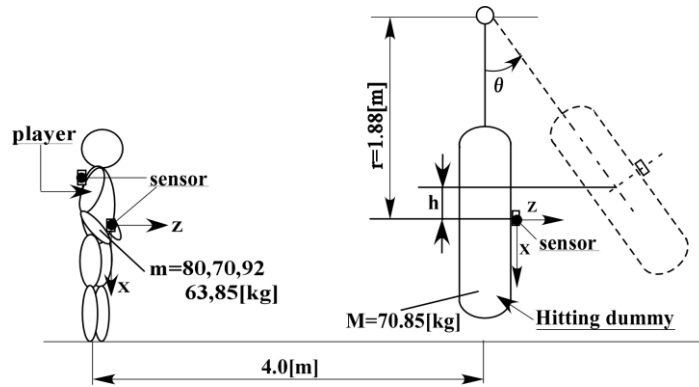


Fig. 2 Outline of the contact action experiment

Table 2 Type of contact action

(I) ドライブ動作	ディフェンス（タックル）を模擬した動作．計測対象者がヒットダミーに向かって走り込み，ダミーをパックしたまま押し込み，最高点でダミーを保持する．
(II) ヒット動作	アタック動作を模擬した動作．計測対象者がボールを持ってヒットダミーに走り込み，瞬間的にヒットし，その後脇にずれる（返ってくるダミーを避けるため）．

3. データ処理の理論

3.1 計測アルゴリズム

図3は、本研究で開発しているシステムのデータ処理の流れを示している。本研究では、計測時に体幹の上部と下部にセンサを取り付けるため、図3では添え字でセンサを識別している。 (a_x, a_y, a_z) 及び $(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ は、それぞれセンサから得られる加速度及び角速度である。始めに、 $(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ を用いて求めた回転行列 $R(\theta)$ を (a_x, a_y, a_z) に対して適用し絶対座標へ変換する。 (a_x, a_y, a_z) は、センサ固有の局所座標における加速度で、測定座標が姿勢に応じて各時刻で変化する。局所座標は絶対座標に比べ、測定者が理解しにくく、力学的にも扱いにくいいため、 $R(\theta)$ を適用することで絶対座標の加速度 (A_x, A_y, A_z) に変換する。 $R(\theta)$ の詳細な説明と導出は次節に記す。 (A_x, A_y, A_z) は、 $R(\theta)$ と (a_x, a_y, a_z) の積で求める。 $R(\theta)$ を適用した後、 (A_x, A_y, A_z) を積分し、速度 (v_x, v_y, v_z) を求める。 (v_x, v_y, v_z) は積分で誤差が累積されているので、スパン誤差補正を行い、補正後の速度 (V_x, V_y, V_z) を求める。さらに (V_x, V_y, V_z) を積分し、変位 (x, y, z) を求める。 (x, y, z) に対してもスパン誤差補正を行い、補正後の変位 (X, Y, Z) を求める。衝撃力 (F_x, F_y, F_z) については運動量変化の式を用い、スパン誤差補正後の速度 (V_x, V_y, V_z) を代入し求める。

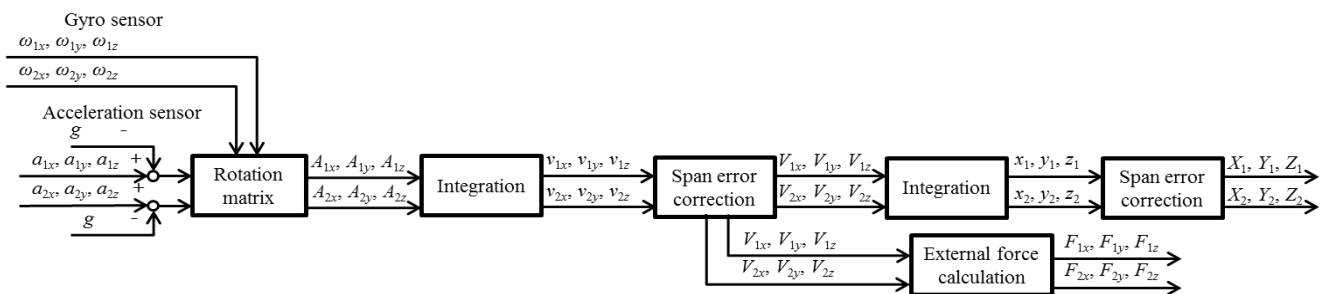


Fig. 3 Block diagram of the data processing

3.2 座標変換に用いる回転行列 センサが持つ局所座標から絶対座標へ姿勢変換する回転行列 $R(\theta)$ を求める．本研究では高専数学の知識のみで導出した．初めに，座標系 xyz 上に任意の単位ベクトル \mathbf{e} を考える． \mathbf{e} の x 軸成分を α ， y 軸成分を β ， z 軸成分を γ とし， \mathbf{e} と z 軸とのなす角を ψ ， \mathbf{e} を xy 平面に射影したベクトルと x 軸とのなす角を ϕ とする．この状態を式で表すと， \mathbf{e} は式 (1) のようになる．ここで， \mathbf{e} を回転軸とし，座標系 xyz を角度 θ 回転した座標系を $x' y' z'$ とすると， xyz と $x' y' z'$ の座標の関係は式 (2) となる．

$$\mathbf{e} = (\alpha, \beta, \gamma) = (\sin\psi \cos\phi, \sin\psi \sin\phi, \cos\psi) \quad (1)$$

$$(x, y, z)^T = R(\theta)(x', y', z')^T \quad (2)$$

\mathbf{e} を回転軸として θ 回転する操作を分解し表現すると， z 軸を回転軸とし $-\phi$ 回転， y 軸を回転軸とし $-\phi$ 回転， z 軸を回転軸とし $+\theta$ 回転， y 軸を回転軸とし $+\phi$ 回転， z 軸を回転軸とし $+\phi$ 回転ということもできる．この変換を数式で表すと式 (3) のようになる．

$$R(\theta) = \begin{pmatrix} \cos\phi & -\sin\phi & 0 \\ \sin\phi & \cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\psi & 0 & \sin\psi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\psi & 0 & \cos\psi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\psi & 0 & -\sin\psi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\psi & 0 & \cos\psi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\phi & \sin\phi & 0 \\ -\sin\phi & \cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$R(\theta) = \begin{pmatrix} \alpha^2(1-\cos\theta)+\cos\theta & \alpha\beta(1-\cos\theta)-\gamma\sin\theta & \alpha\gamma(1-\cos\theta)+\beta\sin\theta \\ \alpha\beta(1-\cos\theta)+\gamma\sin\theta & \beta^2(1-\cos\theta)+\cos\theta & \beta\gamma(1-\cos\theta)-\alpha\sin\theta \\ \alpha\gamma(1-\cos\theta)-\beta\sin\theta & \beta\gamma(1-\cos\theta)+\alpha\sin\theta & \gamma^2(1-\cos\theta)+\cos\theta \end{pmatrix} \quad (4)$$

式 (3) と式 (1) の関係を用いて $\sin\phi$ ， $\cos\phi$ ， $\sin\psi$ ， $\cos\psi$ を α ， β ， γ に置き換えると， $R(\theta)$ は式 (4) になる．式 (4) に変換することで，座標が任意の単位ベクトル \mathbf{e} を中心に角度 θ 回転したと仮定し $R(\theta)$ を導出できた．しかし，式 (4) には未知数 θ ， α ， β ， γ が含まれており，センサから得られる測定値で $R(\theta)$ を求めることができない．実際の測定で使用する場合は，式 (5) に示す角速度ベクトル $\boldsymbol{\omega}$ を中心に座標が回転したと考える．

$$\boldsymbol{\omega} = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)^T \quad (5)$$

$\boldsymbol{\omega}$ を回転軸として座標変換したときの回転行列と \mathbf{e} を回転軸として求めた回転行列である式 (4) は，同様の式であることが証明できる．よって， $\boldsymbol{\omega}$ を中心に θ 回転したとすると，式 (4) の未知数は式 (6) のように表すことができる．これにより，未知数をセンサから得られる角速度の測定値で表すことができ，実際の測定で使用する $R(\theta)$ を得ることができた．

$$\theta = \Delta t \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2 + \omega_z^2} \quad \alpha = \frac{1}{\sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2 + \omega_z^2}} \omega_x \quad (6)$$

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2 + \omega_z^2}} \omega_y \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2 + \omega_z^2}} \omega_z$$

時刻 t における局所座標の加速度ベクトルは，回転行列を用いて時刻 $t - \Delta t$ における座標に戻される．時刻 t の加速度を初期座標まで戻す場合は，式 (7) のようにデータ個数分の回転行列を乗ずる必要がある．なお，以上の方法はクォータニオンの考え方に準じている．

$$\begin{aligned} (A_{x(1)}, A_{y(1)}, A_{z(1)})^T &= R(\theta)_{(1)} (a_{x(1)}, a_{y(1)}, a_{z(1)})^T \\ (A_{x(2)}, A_{y(2)}, A_{z(2)})^T &= R(\theta)_{(1)} R(\theta)_{(2)} (a_{x(2)}, a_{y(2)}, a_{z(2)})^T \\ &\vdots \\ (A_{x(n)}, A_{y(n)}, A_{z(n)})^T &= R(\theta)_{(1)} R(\theta)_{(2)} \cdots R(\theta)_{(n)} (a_{x(n)}, a_{y(n)}, a_{z(n)})^T \end{aligned} \quad (7)$$

4. 実験結果

4.1 ドライブ動作 センサから得られた加速度から衝突前後の速度を求める。なお、本実験はヒットダミーに対し直進して衝突するとして、 z 軸方向のみ計算する。本報告は、Lower センサの結果についてのみ示している。センサから得られる局所座標の加速度 a'_z にキャリブレーションと回転行列を適用し絶対座標の加速度 A_z を求めた。図 3 は絶対座標の加速度 A_z の時間変化を示している。図 3 をみると、 A_z は静止している 0s ~ 約 5 s 及び約 8 s 以降で大きな加速度変化がなく、約 5 ~ 8 s で加速度変動が大きくなる。コンタクトの動作による加速度変化のみが検出されていることから、正しく測定できているとし、この加速度 A_z を積分して、速度 V_z を求める。図 3 の加速度 A_z を積分して求めた速度にスパン誤差補正を適用し、補正後の速度 V_z を求める。 A_z を積分して求めた速度はやはりドリフト誤差を含むため、スパン誤差補正を施している。図 4 は、縦軸にスパン誤差補正後の速度 V_z 、横軸に測定開始からの経過時間を取りプロットしたグラフで、運動をしている区間のみプロットしている。図 4 をみると、運動を終了している約 8 s で、 V_z が 0 m/s になっており、スパン誤差補正が正しく適用できたことがわかる。図 4 のように求めた V_z 及び撮影したビデオカメラの映像から、衝撃力が加わった時間を測定する。ビデオカメラの映像から、ヒットダミーにコンタクトしたのは、測定開始後約 7 s であることがわかった。図 4 の V_z をみると、点 AB 間で大きな速度変化が計測されている。よって、点 AB 間で瞬間的にコンタクトしたとして、衝突前後の速度を求める。

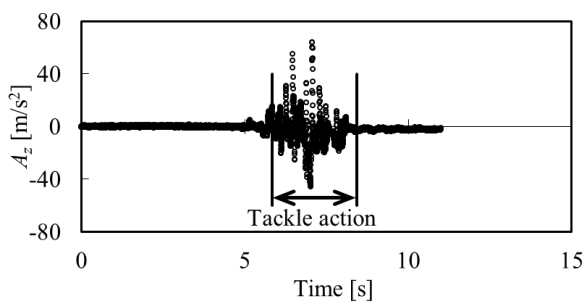


Fig. 3 Relationship between acceleration and the time by drive action.

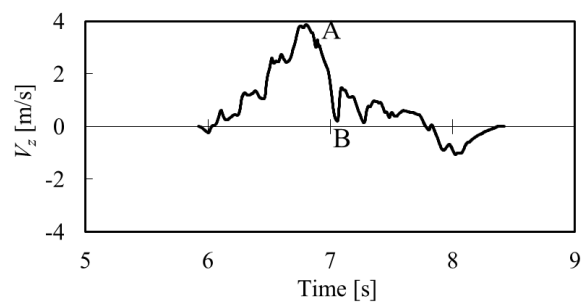


Fig. 4 Relationship between velocity and the time by drive action.

4.2 ヒット動作 次に、ヒット動作のデータを示す。図 5 は絶対座標の加速度 A_z と時間の関係、図 6 は絶対座標の速度 V_z と時間の関係で、前節のドライブ動作実験とまったく同様にしてグラフをプロットした。運動を開始せず静止している約 6 s 及び運動終了した約 9 s では、 V_z は 0 m/s になっている。ビデオカメラの映像から、タックルしたのは約 7 s であることがわかった。図 6 をみると、点 AB 間で速度変化が非常に大きい。そのため、点 AB 間でタックルしたとして、点 A での速度と点 B での速度で速度差を計算すると、3.78 m/s になる。

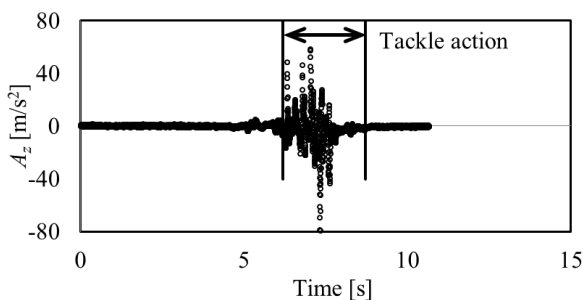


Fig. 5 Relationship between acceleration and the time by hit action.

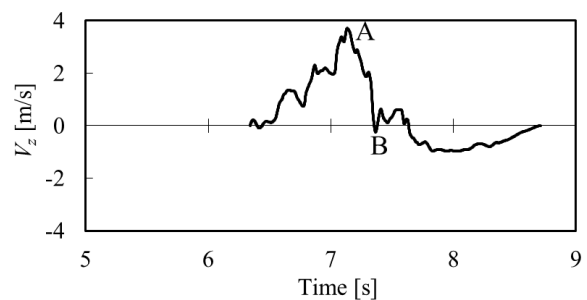


Fig. 6 Relationship between velocity and the time by hit action.

4.3 速度の誤差評価 以上のようにして、5名の選手(A, B, C, D, E)の体重がそれぞれ、80 kg, 70 kg, 92 kg, 63 kg, 85 kg)を測定対象とし、各選手にヒット動作とドライブ動作の2種類の計測(合計で10回の測定)を実施した。衝突直前と直後の速度について、選手に装着したWMSの計測値をビデオ画像の選手の変位から計算した速度と、ヒットダミーに装着されたWMSの計測値を最高到達点から計算された速度と、それぞれ比較した。表3でグレーの網掛けをしている部分は、ほぼ期待通り(誤差が2割以内)に計測できた部分である。速度を基準とする計測においては、約5割の計測成功率である。

Table 3 Error evaluation of velocity measured by inertial sensor

Experiment (Player)	Target for comparison	Measurement procedure	Drive action [m/s]		Hit action [m/s]	
			Before contact	After contact	Before contact	After contact
A	Velocity of player	Lower sensor	3.9	0.2	3.7	-0.2
		Video measurement	3.8	0	3.6	0
	Velocity of hitting dummy	Sensor	0	1.5	0	1.4
		Prediction by the potential energy	0	3.9	0	2.1
B	Velocity of player	Lower sensor	4.8	1.7	4.1	0.9
		Video measurement	3.2	0	3.2	0
	Velocity of hitting dummy	Sensor	0	1.7	0	2.8
		Prediction by the potential energy	0	2.9	0	2.6
C	Velocity of player	Lower sensor	4.1	1.0	3.3	1.4
		Video measurement	3.8	0	3.4	0
	Velocity of hitting dummy	Sensor	0	1.8	0	1.8
		Prediction by the potential energy	0	3.7	0	1.8
D	Velocity of player	Lower sensor	3.3	-0.3	3.2	0.2
		Video measurement	3.5	0	3.2	0
	Velocity of hitting dummy	Sensor	0	1.7	0	2.5
		Prediction by the potential energy	0	4.1	0	3.0
E	Velocity of player	Lower sensor	1.4	-1.7	1.4	-1.7
		Video measurement	2.9	0	3.4	0
	Velocity of hitting dummy	Sensor	0	1.3	0	2.5
		Prediction by the potential energy	0	3.8	0	3.3

4.4 衝撃力と反発係数の計算 次に、表3の計測結果を用いて衝撃力と反発係数を計算した。衝撃力は、選手がヒットダミーにした仕事 W が、ヒットダミーの最高点における位置エネルギーにすべて変わると仮定して計算した。衝撃力 F を求める計算式を導出するため、仕事 W をトルク N と変位した角度 θ で表すと、次式のようになる。

$$W = N\theta \quad (8)$$

仕事の原理から、式(8)の W に位置エネルギー Mgh を代入すると、式(9)になる。

$$Mgh = N\theta \quad (9)$$

また、トルク N は衝撃力 F と F が作用する点までの距離 r の積で表せるので、このトルクを式(9)に代入すると、式(10)のように表せる。

$$Mgh = Fr\theta \quad (10)$$

式 (10) を F の式に書き換えると、式 (11) のようになる。この式 (11) を用いて、衝撃力の計算値を求め、センサから測定した測定値と比較する。

$$F = \frac{Mgh}{r\theta} \quad (11)$$

表 4 は、衝撃力と反発係数の計算結果である。グレーで網掛けしている部分は、ほぼ期待通りに計測できた部分である。期待通りか否かは、表 3 の計測状況で判断した。衝撃力の計測においては、約 4 割の計測成功率である。一方、反発係数の計測においては、約 2 割の計測成功率である。衝撃力の計測においては、WMS 一つの計測データから計算されるが、反発係数の計測においては WMS 二つの相対関係から算出される。そのため、二体衝突における相対的な力学的特性を WMS で計測することは、現段階においては困難が多いと思われる。さらなる MEMS 技術の発達によるハードウェアの進化が必要である。

Table 4 Test calculation of the impact force and the coefficient of restitution

Player	Impact [G]		Coefficient of restitution [-]	
	Drive	Hit	Drive	Hit
A	1.5	1.8	0.95	0.64
B	2.3	3.1	0.25	0.41
C	2.2	1.4	0.67	0.14
D	2.6	3.4	1.3	0.89
E	4.8	4.8	3.9	3.6

5. 結 言

2012 年度の研究では、実際の選手 5 名に WMS を 2 台ずつ装着し、計測結果の誤差を検定できるように実験を企画して誤差検定実験を行った。その結果、衝突前後の速度において 5 割、衝撃力の計測において 4 割、反発係数の計測において 2 割の計測成功率であった。WMS を実践的ゲームの運動計測に利用することを考えると、更なるハードウェアの性能向上が望まれる。また、とくに加速度センサの特性において、大きな加速度変化があった後の計測信号は信頼性が低下することもわかった。

参考文献

- (1) 黒須雅弘, 菅野昌明, "ラグビーフットボールにおけるコンタクトフィットネストレーニングの有効性", 東海学園大学研究紀要, 17, pp. 135-144 (2012)
- (2) 中島賢治, 城野祐生, 川・貴司, 堂平良一, "加速度センサと角速度センサを用いたラグビーにおける接触プレイの計測", 日本機械学会 2011 年度年次大会 DVD-ROM 論文集, (2011)
- (3) 川瀬慧星, 竹内聖, "ラグビーにおけるコンタクトプレイの衝突力学的解析", 平成 23 年度佐世保工業高等専門学校卒業論文, (2012)
- (4) 川原貴司, 喜多剛健, "ラグビー選手の移動軌跡及び人体にかかる外力とモーメントの計測", 平成 22 年度佐世保工業高等専門学校卒業論文, (2011)
- (5) 中島賢治, 城野祐生, 川・貴司, 堂平良一, "加速度センサと角速度センサを用いたラグビー選手の運動解析", 日本機械学会 2012 年度年次大会 DVD-ROM 論文集, (2012)
- (6) 中島賢治・城野祐生・川原貴司・堂平良一・Tim GABBETT, "ラグビーの実践的スキルを対象とする加速度センサと角速度センサによる衝撃力の計測", 日本機械学会 [No. 12-39] シンポジウム: スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2012 講演論文集, pp. 48-53 (2012)