

GPS を用いた陸上競技者の  
ピッチ・ストライド精密計測装置の開発  
-陸上競技者に配慮した計測装置と取り付け位置の検討-

Development of a precision pitch and stride  
measurement system for athletes using GPS  
-Investigation of comfortable device  
and its mounting position for athletes-

鳥居洋介, 高橋隆行

Yosuke Torii, Takayuki Takahashi

福島大学

Fukushima University

キーワード : GPS (Global Positioning System), 加速度センサ (Accelerometer), 陸上競技 (Athletics), ピッチ (Pitch), ストライド (Stride)

連絡先 : 〒 960-1296 福島県福島市金谷川 1 福島大学 理工学群共生システム理工学類 高橋研究室  
鳥居洋介, Tel.: (024)548-5259, Fax.: (024)548-5259, E-mail: torii@rb.sss.fukushima-u.ac.jp

## 1. 緒言

近年, スポーツ科学の発展により様々なスポーツにおいて科学的な解析が行われている。しかし, 陸上競技におけるトレーニングや指導法は, 未だ指導者および競技者の経験や感覚に大きく依存しているのが現状である。そこで, 指導者の指導法を科学的に解明することや, 競技者個人の特徴を考慮し, それに応じた最適な練習法を提供する必要があると考えられる。

陸上競技における短距離走において, 従来のピッチ・ストライド計測手法としてはカメラと画像処理を用いる手法やレーザー測定器を用いる手法, トレッドミル上を走行して計測する手

法などが提案されている。しかし, これらの手法は装置が大型であり, 一般的に高価であることや, 直線などの限定的な部分でしか測定できないこと, 実際の競技環境と同じ条件で計測できないことなどが欠点として挙げられる。

そこで本研究では, 陸上競技場の様々な地点でピッチ・ストライドを精密に計測できる身体密着型計測システムを開発することを目標とした。計測対象となる陸上競技者は走行ピッチ 4[step/s] 程度, ストライド 2.5[m] 程度で 100[m] を 10[s] で走行すると仮定し, 0.01[s] オーダーで競うトップレベルでの使用を想定する。この仮定により, 計測対象は 1 秒あたり 10[m] 移動することになる。それを 0.01[s] オーダーでの変化を確認する

ためには10[cm]未満の精度で位置を測定する必要がある。したがって、本論文ではストライドの計測精度すなわち位置計測精度10[cm]未満を目標性能として設定する。また、陸上競技者の走行の妨げにならない計測装置の取り付け位置の検討について述べる。

## 2. GPS測位の方法<sup>1)</sup>

GPSによる測位は、複数衛星から送信されてくる測距信号を地上の受信機が受信することで行われる。GPSの測距信号には航法メッセージ、PRN(Pseudo-Random Noise)コード、搬送波が含まれ、これらの情報を用いて受信機の位置を求めることができる。

GPS測位を測位に使用する受信機の数によって分類すると、ひとつの受信機で測位する単独測位と、基準局と移動局など複数の受信機で測位する相対測位に分類することができる。

### 2.1 単独測位

コード測位方式を用いた単独測位について述べる。GPS衛星にはそれぞれ固有のPRNコードが割り当てられており、受信機は各衛星のPRNコードのレプリカを持つ。同じPRNコードでタイミングにずれがない場合のみ相互相関値は1をとる。この性質を利用し、受信機では受信した信号にPRNコードの相関をとることにより、発信衛星とタイミングのずれを検出し、相関値がピークになるようにタイミングを調整する。これによって送信と受信の時間差を求め、送受信機間の距離(擬似距離)を測定する。擬似距離はPRNコードより測定された衛星と受信機間の測位信号伝搬時間に光速を掛けたものと定義される。測位を行う際は、4機以上の衛星を用いて擬似距離を測定し、受信機の3次元位置と受信機時計の誤差の計4つの未知量を決定する。

Table 1 Meaning of symbols on Carrier phase

Symbol	Meaning
$c$	Speed of light
$\rho$	Geometric distance
$dt$	Receiver clock error
$dT$	Satellite clock error
$I$	Ionospheric delay
$T$	Tropospheric delay
$\varepsilon_L$	Carrier phase observation error
$\lambda$	Carrier wave length
$N$	Carrier phase bias
$\phi_{0r}$	Receiver initial phase
$\phi_0^s$	Satellite initial phase
$n$	Integer ambiguity

### 2.2 相対測位

相対測位は基準局(Base)と移動局(Rover)の2つの受信機が必要となる。搬送波位相とは受信機で復調した測距信号の搬送波の位相角を連続的に測定したものであり、搬送波位相には疑似距離と同様に衛星と観測点間の距離情報が含まれている。疑似距離と比較して高精度な測定が可能のため精密測位に適している。搬送波位相の観測モデル $L$ は式(1)で示される。なお、各パラメータをTable 1に示す。

$$L = \lambda\Phi = \rho + c(dt - dT) - I + T + \lambda N + \varepsilon_L \quad (1)$$

また、搬送波位相バイアス $N$ は式(2)で示される。

$$N = \phi_{0r} - \phi_0^s + n \quad (2)$$

相対測位は搬送波位相測定値を使った最も一般的な精密測位法であり、搬送波位相の二重差を基本観測量として推定を行う。 $L_a^A, L_a^B, L_b^A, L_b^B$ を2つの観測点 $a, b$ で同時に測定した衛星 $A, B$ の搬送波位相とすると搬送波位相二重差は式(3)の $L_{ab}^{AB}$ で表される。

$$L_{ab}^{AB} \equiv (L_a^A - L_a^B) - (L_b^A - L_b^B) \quad (3)$$

ここで、各受信機で搬送波位相は同時測定され、測位信号の衛星送信時刻がほぼ同時である、ま

た短い時間では衛星時計は十分安定であることから以下が成り立つ．

$$\begin{aligned} dt_{ab}^{AB} &= (dt_a^A - dt_a^B) - (dt_b^A - dt_b^B) = 0 \\ dT_{ab}^{AB} &= (dT_a^A - dT_a^B) - (dT_b^A - dT_b^B) = 0 \\ N_{ab}^{AB} &= (N_a^A - N_a^B) - (N_b^A - N_b^B) = n_{ab}^{AB} \end{aligned}$$

以上により，長基線における搬送波位相二重差は式 (4) で表される．

$$L_{ab}^{AB} = \rho_{ab}^{AB} - I_{ab}^{AB} + T_{ab}^{AB} + \lambda n_{ab}^{AB} + \varepsilon_{ab}^{AB} \quad (4)$$

さらに，2つの観測点間のベクトルである基線  $a-b$  が十分に短く，2つの観測点からほぼ同時に同一衛星を観測した場合，電離層遅延，対流圏遅延はほぼ同一の値となるため，短基線において以下が成り立つ．

$$\begin{aligned} I_a^A &\approx I_b^A, I_a^B \approx I_b^B, T_a^A \approx T_b^A, T_a^B \approx T_b^B \\ I_{ab}^{AB} &= (I_a^A - I_a^B) - (I_b^A - I_b^B) \approx 0 \\ T_{ab}^{AB} &= (T_a^A - T_a^B) - (T_b^A - T_b^B) \approx 0 \end{aligned}$$

以上により，短基線における搬送波位相二重差は式 (5) で表される．

$$L_{ab}^{AB} = \rho_{ab}^{AB} + \lambda n_{ab}^{AB} + \varepsilon_{ab}^{AB} \quad (5)$$

相対測位における搬送波位相バイアスの二重差には整数不定性のみが残るため，搬送波位相バイアス二重差は整数となる．ここで，整数不定性決定 (AR; Ambiguity Resolution) について述べる．最小二乗法などを用いてパラメータ推定を行い，得られた搬送波位相バイアス二重差の推定値は一般に実数であり，同時に得られる測位解を Float 解と呼ぶ．搬送波位相バイアス二重差の整数条件を利用して，適当な統計的妥当性を仮定し，推定値を整数に固定することにより，測位解の精度を改良する．これを整数不定性を解く，または Fix するといい，得られた測位解のことを Fix 解と呼ぶ．相対測位による GPS 測位は，計測開始から測位解が Fix するまでに多少の時間を要するが，単独測位に比べて非常に小さい誤差で測位することができる．

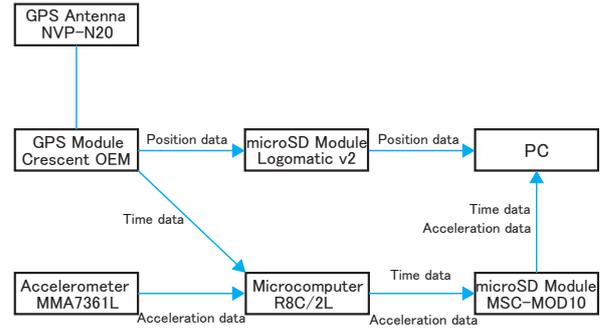


Fig. 1 System block diagram

### 3. 計測装置

計測装置の構成部品を Table 2 に示す．計測装置は，位置情報を得るための GPS モジュール，足の接地を検出するための加速度センサ，データを保存するための microSD データロガー，それらを制御するための R8C/2L マイコンから構成される．なお，加速度センサからの出力は R8C/2L マイコンの 8bit 分解能 A/D コンバータでデジタルデータに変換する．GPS のデータ更新レートは 10[Hz]，加速度センサのサンプリング周期は 200[Hz] とした．本システムの構成を Fig.1 に示す．

### 4. 計測装置取り付け位置の改良

筆者らはこれまで，腰部に GPS モジュール及び加速度センサを装着し，頭頂部に GPS アンテナを取り付ける計測システムを提案してきた<sup>2)</sup>．しかしこの手法では，計測装置を固定するためにベルトを腰部に巻くことで陸上競技者に走行時の違和感を与えてしまうことや，計測システムが頭頂部と腰部に分かれているため，双方を長いケーブルでつなぐ必要があり，走行の妨げとなるといった問題があった．

そこで，本論文では計測装置の取り付け位置を体幹に近く，装着時に違和感の少ない上背部分に変更する方法を検討した．計測装置の固定には Fig.2 に示すショルダブレードを用いることで，走行中にも計測装置が身体と密着する

Table 2 Components of measurement system

Object	Main factor	Weight[g]
Cap antenna	NVP-N20(SANYO)	70
Control circuit	R8C/2L(Renesas Electronics)	30
Data logger	Logomatic v2(sparkfun ELECTRONICS)	10
	MSC-MOD10(microtechnica)	4
GPS Module	Crescent OEM Board(Hemisphere GPS)	21
Accelerometer	MMA7361LC(Freescale Semiconductor)	5
Stationary plane	Transparent resin plate	190
Battery	Polymer Lithium Ion Battery(sparkfun ELECTRONICS)	15



Fig. 2 Shoulder blade

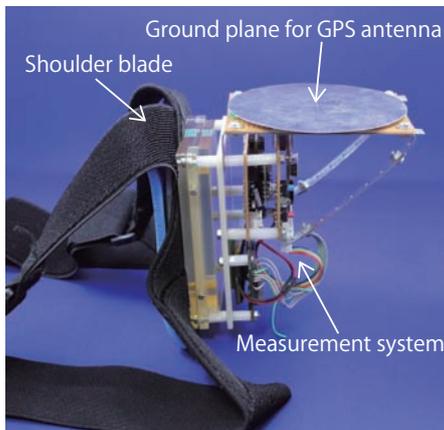


Fig. 3 Integrated measurement system

ようにした。また，GPS モジュールや加速度センサを含む計測装置とアンテナを一体化させることで，ケーブルの短縮化と装着感の改良を行うことができると考えた。一体化した計測装置を Fig.3 に示す。

被験者である陸上競技者に装着感について聞きとり調査を行なったところ，重量感を感じることなく走行することができるなどの高い評価を得ることができた。

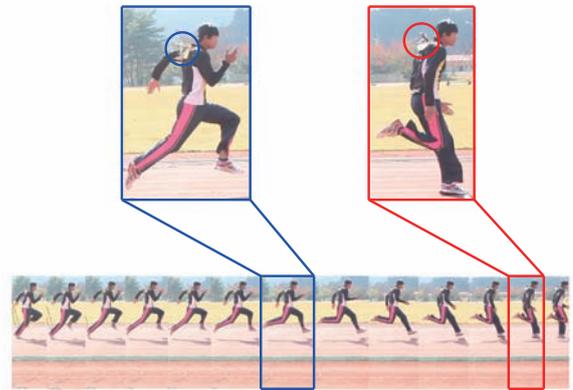


Fig. 4 Athlete running with measurement system



Fig. 5 GPS antenna is mounted on the top of head

しかし，この計測システムでは Fig.4 に示すように装置が振動し，GPS アンテナが人体方向へ向くことが多くなることがわかった。これにより GPS アンテナが受信する電波を人体が遮ってしまい，正確な位置情報を得ることはできなかった。

そこで、GPS アンテナの取り付け位置は人体によって電波が遮られることなく、走行の妨げになりにくい頭頂部とした。改良した計測システムの取り付け位置について Fig.5 に示す。キャップアンテナには、ステンレスメッシュで製作した軽量グランドプレーンに GPS アンテナを取り付けたスイミングキャップを用いた。また、加速度センサ等を含む計測装置に関しては、キャップアンテナに近い上背部に取り付ける。よって、従来の腰部に計測装置を取り付ける手法に比べ、双方をつなぐケーブルの長さを短くすることができ、走行の妨げにならないようにすることができる。

## 5. GPS による位置情報の取得

走行中の陸上競技者の位置情報は、陸上競技者の頭頂部に装着したキャップアンテナに取り付けられた GPS アンテナによって得る。測位方法としては、移動測位の場合でも低速度から高速度まで誤差 20[mm] 程度で測位できる搬送波位相測位<sup>4)</sup>を採用する。搬送波位相測位によって得られたデータは GPS 用ソフトウェアライブラリである RTKLIB<sup>5)</sup>に含まれる基線解析ソフトウェア rtkpost を用いて後処理基線解析を行った。頭頂部に取り付けたキャップアンテナにより、Fix 解における走行中の位置情報を取得することができた。

## 6. 接地検出

### 6.1 上背加速度による接地検出について

本システムでは、足の接地を加速度センサを用いて検出する手法を用いる。そこで、上背部に固定された計測装置を用いて足の接地を検出可能であるか確認を行った。Fig.6 に示すように接地を検出するためのリミットスイッチをシューズに取り付け、上背部の加速度とリミットスイッ



Fig. 6 Attaching the limit switch

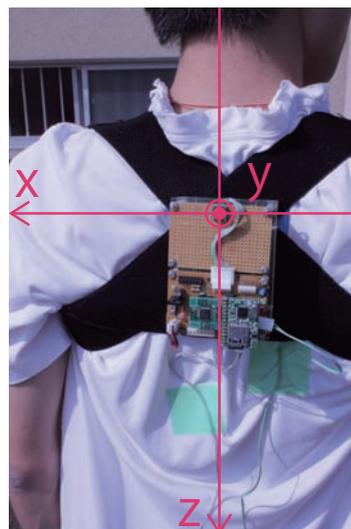


Fig. 7 Attaching the measurement system and its coordinate axis

チの出力を取得する実験装置を製作し、Fig.7 に示すように取り付けた。

被験者は陸上競技経験のない一般の男子学生 3 名とし、走行する地面の状態が変化した場合の違いを確認するため、被験者にはコンクリート上および土の上の 2 つの環境で 50[m] 走行させた。コンクリート上および土の上における走行環境をそれぞれ Fig.8 に示す。また、50[m] を走行した際のタイムを Table 3 に示す。

Table 3 Sprint times of three students

Subject	Concrete[s]	Soil[s]
A	7.65	7.60
B	8.16	8.22
C	9.16	10.19

コンクリート上で走行した際の被験者 A の  $x$



(a) Concrete



(b) Soil

Fig. 8 Running environment

軸方向 (左右方向),  $y$  軸方向 (進行方向),  $z$  軸方向 (鉛直方向) の加速度変化をそれぞれ Fig.10 に, 土の上で走行した際の被験者 A の実験結果を Fig.11 に示す. また, リミットスイッチの立ち上がり点と各方向成分における接地時の特徴点の差の値を各図に示す. なお, 3 名とも同様の結果が得られたため, ここでは被験者 A の結果のみを示す.

$x$  方向 (左右方向) の加速度変化は, 右足接地時に負方向へ急激な変化があり, 左足接地時に正方向へ急激な変化があることがわかる. これは, 被験者が走行時に腕を振る動作を行うことにより左右の肩甲骨が動き, それに応じて計測装置が左右に動くためであると考えられる.

$y$  方向 (進行方向) の加速度変化は, 接地時に正方向へ変化し, その後, 急激に負方向へ変化していることがわかる. これは接地時のブレー

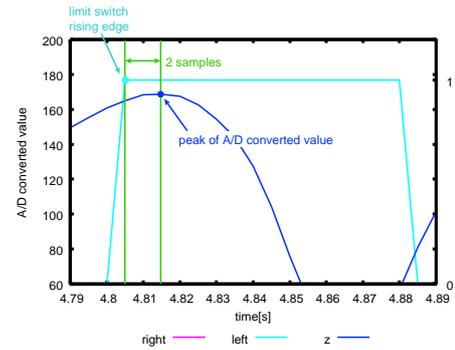


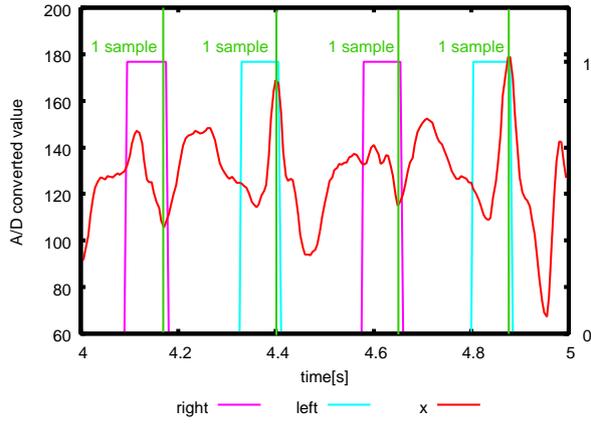
Fig. 9 Expanded graph of accelerometer and limit switch rising edge

キおよび離地時の加速によるものであると考えられる.

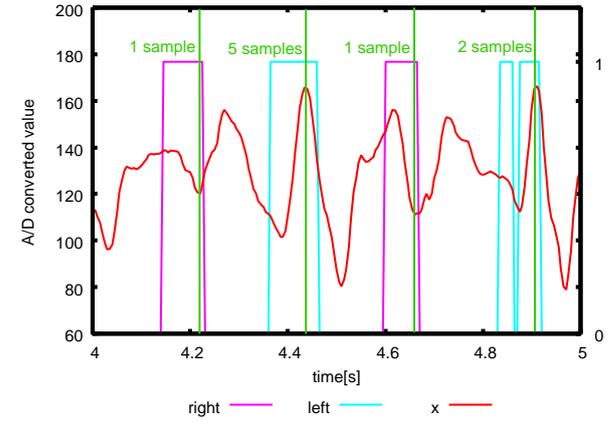
$z$  方向 (鉛直方向) の加速度変化は, 接地時に正方向へ変化し, その後, 急激に負方向へ変化していることがわかる. これは, 接地時に上体が鉛直下方向に変化し, 離地時に鉛直上方向へ変化するという走行の特徴を表しているものと考えられる.

3 名の被験者全員において, 地面の状態に関わらず,  $x$  軸方向 (左右方向) および  $y$  軸方向 (進行方向) では周期的な波形を得ることができるが, このデータのみを用いて接地を確認することは困難である. 一方,  $z$  軸方向 (鉛直方向) では接地時に大きなピークがあり接地を確認することができる.

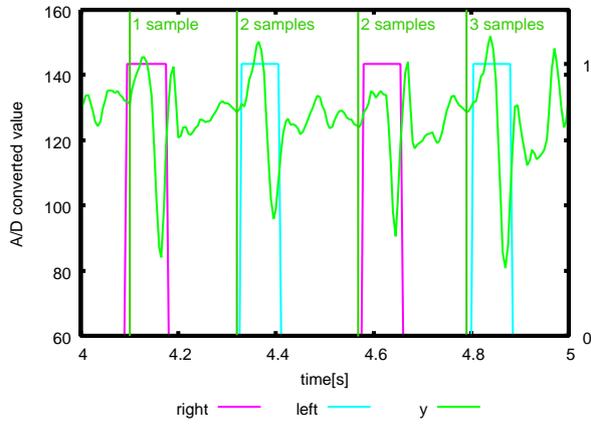
しかし, 本研究で対象とする陸上競技者は, 0.01[s] オーダーの精度を要求しているため, ストライド計測誤差は 10[cm] 未満でなければならない. 今回行った実験は, 加速度センサのサンプリング周期が 200[Hz] であるため, 1 サンプルのずれにより 0.005[s] の接地検出誤差が生じることを意味する. 被験者は Table 3 に示す速度で走行することを踏まえ, 50[m] を 10[s] で走行すると仮定した場合, 1 サンプルのずれにより 2.5[cm] の接地検出誤差が生じる. 同様にして 100[m] を 10[s] で走行する陸上競技者においては, 1 サンプルのずれによる接地検出誤差は 5[cm] となる.



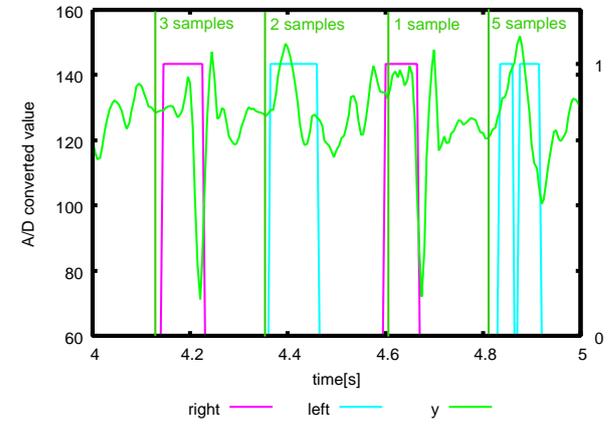
(a) Horizontal direction( $x$ )



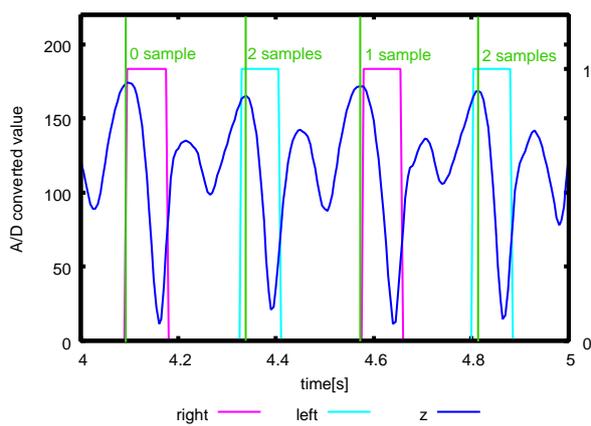
(a) Horizontal direction( $x$ )



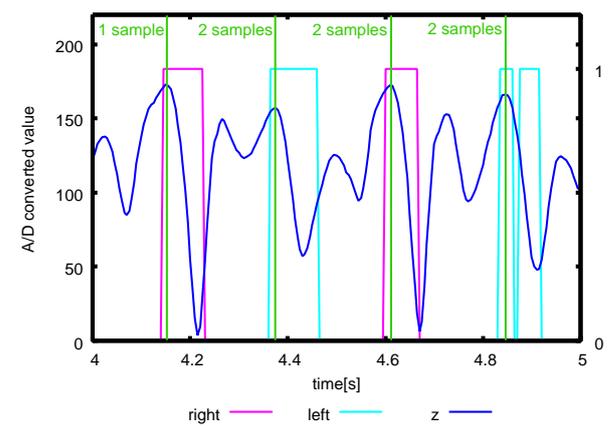
(b) Traveling direction( $y$ )



(b) Traveling direction( $y$ )



(c) Vertical direction( $z$ )



(c) Vertical direction( $z$ )

Fig. 10 Acceleration and limit switch data for concrete

Fig. 11 Acceleration and limit switch data for soil

Fig.9にFig.10(c)の拡大図を示す．走行時の加速度のピークによって接地を検出するとき，リミットスイッチと加速度のピークが数サンプル分ずれて出力される場合がある．Fig.9では4.805[s]のときにリミットスイッチがONになり，1が出力されているが，加速度のピークは4.815[s]に現れている．加速度センサは200[Hz]のサンプリング周期でデータをとっているのので，このときの加速度センサは2サンプルだけずれて接地を検出している．今後，図中の0 sampleや1 sample，2 samplesなどの表記は，リミットスイッチの立ち上がりと加速度のピークとのずれの大きさを表す．

Fig.10に示すように上背部に取り付けられた加速度センサのz軸方向(鉛直方向)の加速度のピークを用いて接地の確認を試みた場合，正確な接地検出をすることが困難となる．

## 6.2 正確な接地検出のための加速度センサ取り付け位置について

加速度センサにより接地検出を行う上で，体のどの部位に加速度センサを装着すると正確な接地検出を行うことができるか検証を行なった．加速度センサの取り付け位置を上背部，腰部，右腰部，右大腿部の4か所とし，各部位での加速度と，両足に装着したリミットスイッチの出力を用いて，接地のタイミングを比較した．なお，計測部位の正確な加速度を計測するため，加速度センサを搭載した基板にクッション材を挟み，それらを皮膚に直接貼り付け，可能な限り身体と密着させた．なお，上背部の加速度センサは，身体に加速度センサを密着させた上で，ショルダブレードで押さえつけるようにして取り付けた．Fig.12にFig.13(a)の拡大図を示す．上背部に密着させた加速度センサデータにおける4.440[s]のとき，リミットスイッチの立ち上がりと加速度の負方向のピークが一致していることがわかる．各部位のz軸方向(鉛直方向)の加速度変化をFig.13に示す．

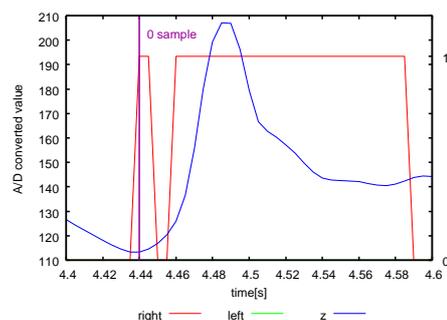


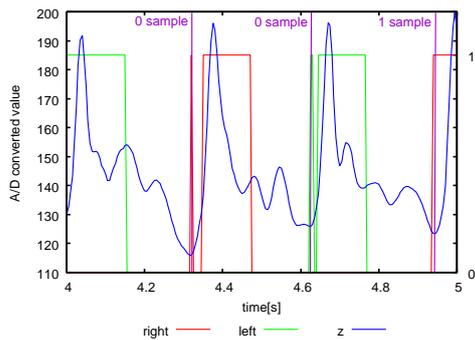
Fig. 12 Expanded graph of accelerometer and limit switch rising edge(upper back)

各部位において，接地の瞬間に正方向の加速度の変化が確認された．特に，中間疾走区間での上背部における加速度変化は，最大1サンプルのずれでリミットスイッチと加速度のピークが一致した．身体に加速度センサを密着させ，ショルダブレードで押さえつけることで，計測装置の外側に加速度センサを取り付けた時よりも接地検出の精度が向上していることがわかる．しかし，上背部，腰部，右腰部，右大腿部のすべての部位で加速度の変化とリミットスイッチの出力のタイミングが一部一致しない結果となった．

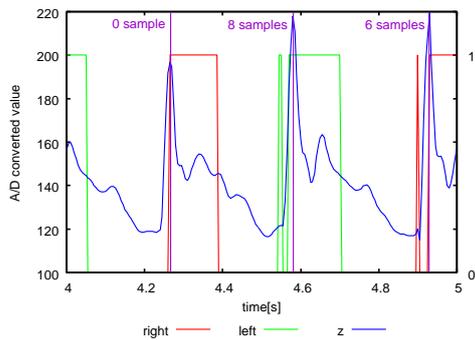
## 6.3 足部加速度データによる接地検出

接地を最も検出しやすいと考えられる足の甲に加速度センサを取り付け，接地検出実験を行った．なお，足の接地位置による接地タイミングの違いを確認するため，Fig.14に示すように片足に2つのリミットスイッチを装着する改良を行った．

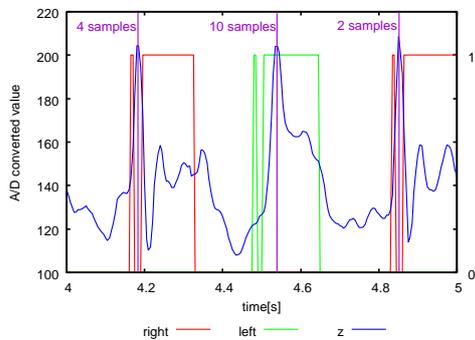
z方向(鉛直方向)の加速度変化をFig.15に示す．なお，得られたデータを平滑化するとピークが正確に確認できないため，この実験に限り平滑化を行わず結果を示す．実験結果より，接地の瞬間に大きな加速度のピークが現れたことに加え，Fig.15(a)の円に含まれる区間で，足が接地している間は加速度の値はある値でとどまっていることがわかる．他の時刻でも同様に，あ



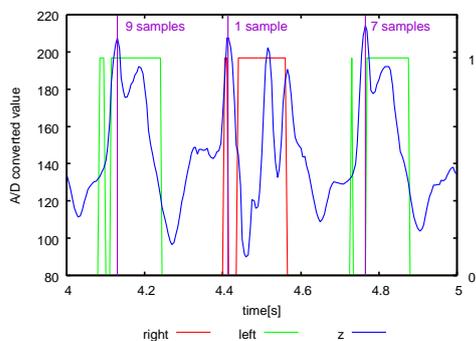
(a) Upper back



(b) Lumbar



(c) Right lumbar



(d) Right thigh

Fig. 13 Vertical acceleration of each part of the body

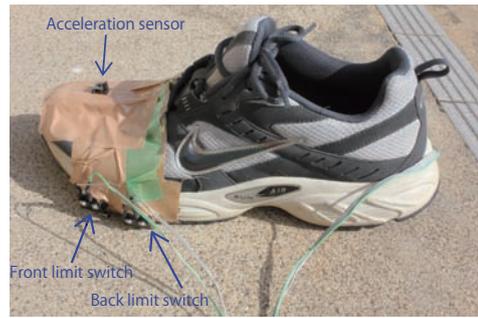


Fig. 14 Attachment of acceleration sensor and limit switch

る値でとどまる前の加速度のピークとリミットスイッチの出力のタイミングが一致していることから，正確な接地を検出できていると考えられる．

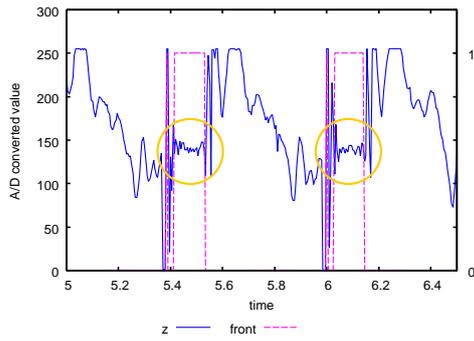
## 7. 結言

本論文では陸上競技者に配慮した計測装置の新しい取り付け位置として上背部を提案し，接地検出を行う際の加速度センサ取り付け位置について検証を行なった．実験の結果より，短距離走行時の計測装置の取り付け位置は上背部が適していると考えられ，GPS アンテナの取り付け位置については頭頂部，加速度センサの取り付け位置については足部が，最も精度よく位置情報と接地情報を得ることができると示唆された．なお，足部以外の部位の加速度データを用いて接地を検出について，身体と密着させることで精度が向上することを示し，上背部の加速度により接地を検出することの可能性を示した．

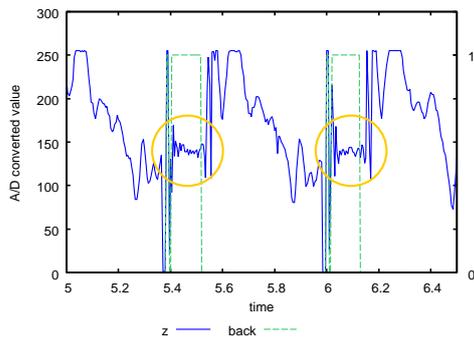
今後は，走行時の陸上競技者の動きに配慮し，より自然な状態で走行できるような計測装置の改良を行うとともに，正確な接地検出と位置情報の取得についての調査を行う．また，さらに安定で精密なピッチ・ストライド計測が可能なシステム改良を行う予定である．

## 参考文献

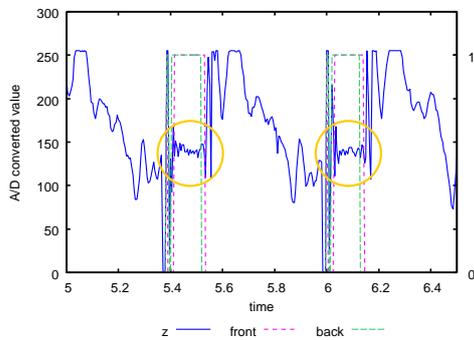
- 1) 測位衛星による高精度測位技術の研究開発  
<http://gpspp.sakura.ne.jp/index.shtml>  
 Access:2012/10/25
- 2) 精密単独測位 (PPP) によるスタティック・キネマティック測位精度の評価  
<http://gpspp.sakura.ne.jp/evapp2.htm>  
 Access:2012/10/25
- 3) 長嶋拓哉 高橋隆行: GPS 搬送波位相測位を用いた計測システムによる短距離走者のピッチ・ストライド精密計測, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012 予稿集 DVD-ROM, 2A2-A02(2012)
- 4) 長嶋拓哉 高橋隆行:GPS 搬送波位相測位を用いた陸上競技者ピッチ・ストライド計測システムの開発, 第 21 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 DVD-ROM, IN2-3(2011)
- 5) RTK-LIB <http://www.rtklib.com> Access:2012/10/25
- 6) 坂井文泰: GPS 技術入門, 17-41, 東京電機大学出版局 (2003)
- 7) Paratap Misra and Per Enge 著, 測位航法学会 訳: 精説 GPS, 27-62,137-283, 松香堂書店 (2010)



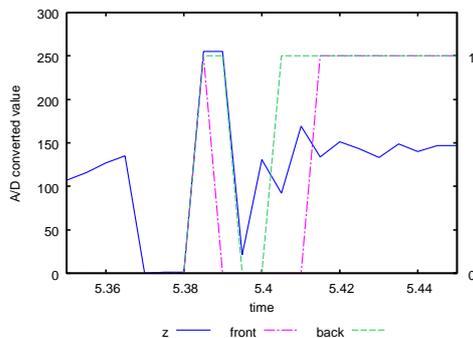
(a) Front limit switch



(b) Back limit switch



(c) Accelerometer and limit switch rising edge



(d) Expanded graph of accelerometer and limit switch rising edge(toe)

Fig. 15 Accelerometer and limit switch data <sub>10</sub> with both attached to toe