

GPS 搬送波位相測位を用いた陸上競技者位置計測システムの開発

Development of a position measurement system for athletes using GPS carrier phase positioning.

○長嶋拓哉, 高橋隆行

○Takuya Nagashima, Takayuki Takahashi

福島大学

Fukushima University

キーワード : GPS (Global Positioning System), 搬送波位相測位 (Carrier phase positioning), 位置計測 (Position measurement), 高精度 (High precision)

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
長嶋拓哉, Tel.: (024)548-5259, Fax.: (024)548-5259, E-mail: naga@rb.sss.fukushima-u.ac.jp

1. はじめに

陸上競技者へのコーチング内容は, 近年のスポーツ科学の発展にも関わらずコーチの経験則や感性に基づいて指導にあたっていることが多い. このような指導方法は, コーチと選手との感覚の相違が生じたり, また, 最善であるかわからない. そのため, このような感覚的なものを定量的に表し, 評価することが必要だと考えられる. この課題に対して筆者らは GPS を用いた陸上競技者計測システムの実現を目指している. 本システムは GPS モジュールと加速度センサを組み込んだ計測ユニットを競技者に装着し, GPS 測位により競技者の位置を正確に計測する. 計測されたデータのうち GPS モジュールから得られる競技者の位置情報と, 加速度センサから得られるピッチ情報を同期させることで, 本研究では走行速度やストライドなども同時に計測できるシステムの開発を目標としている. 本システムを使用して競技者の走りの情報を数値化することにより, コーチや選手は定量的なデータを基に効率的な指導やトレーニングを行うことができると期待できる.

陸上競技者計測システムに関連研究として, カメラによる画像処理を用いる方法¹⁾²⁾や, レーザー測定器を用いる方法²⁾³⁾などの研究がなされている. しかし, これらの方法は競技者に対してカメラを伴走させなければいけないこと, 直線のような限定的な部分での計測しかできないという問題がある. 一方, GPS を用いる方法は競技者に対して伴走させる必要がなく, GPS 衛星からの電波を受信できる環境であれば陸上トラック全周に渡り計測できるというメリットが考えられる. 本論文では短距離走者の位置計測における GPS の有用性を検証するために, GPS 搬送波位相測位の原理, 測位実験とその精度評価, 無線通信とピッチ計測, 計測システムの概要について述べる.

2. GPS 搬送波位相測位

本研究で使用する GPS 搬送波位相測位⁴⁾における測定値と測位方法について述べる.

2.1 測定値

一般的な GPS 受信機では, GPS 衛星から送信された測距信号の伝搬時間 ($t_r - t^s$) に光速 c を乗じて算出した GPS 衛星-受信機の距離を表す疑似距離 r_i (pseudo range) を計測している. 疑似距離 r_i は, 式 (1) で表される.

$$r_i = c(t_r - t^s) = \rho_i + c\delta \quad (1)$$

ここで, t_r は信号の受信時刻, t^s は信号の送信時刻, ρ_i は衛星 i と受信機間の幾何学距離, δ は受信機時計誤差を意味している.

また, 精密測位を目的とする場合には疑似距離に加えて搬送波位相 (carrier phase) を計測する. 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計測したものである. 搬送波位相には疑似距離と同様に GPS 衛星と観測点間の距離情報が含まれている. 搬送波位相 L は式 (2) で表される.

$$L = \lambda\Phi = \rho + c(dt - dT) - I + T + \lambda N + \varepsilon_L \quad (2)$$

また, 搬送波位相バイアス N は式 (3) で示される.

$$N = \phi_{0r} - \phi_0^s + n \quad (3)$$

各パラメータを Table 1 に示す.

搬送波位相測位では, 位置を求めたい観測点である移動局 (Rover) と, 基線の原点となる基準局 (Base) の二つの受信機を用いて式 (4) に示す搬送波位相二

Table 1 Meaning of symbols on carrier phase

| Symbol | Meaning |
|-----------------|---------------------------------|
| c | Light speed |
| Φ | Carrier phase angle |
| ρ | Geometry distance |
| dt | Receiver clock error |
| dT | Satellite clock error |
| I | Ionospheric delay |
| T | Tropospheric delay |
| ε_L | Carrier phase observation error |
| λ | Carrier wave length |
| N | Carrier phase bias |
| ϕ_{0r} | Receiver initial phase |
| ϕ_0^s | Satellite initial phase |
| n | Integer ambiguity |

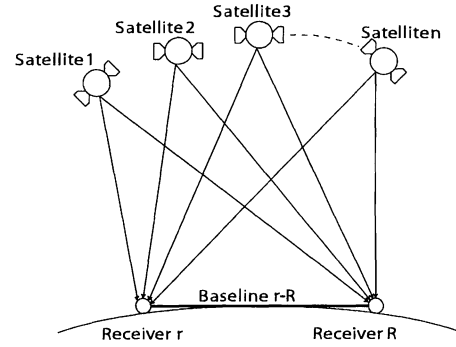


Fig. 1 Interferometric positioning

重差を基本観測量として扱う.

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

このとき上付文字が衛星, 下付文字が観測点を示す. 搬送波位相の二重差を取ることでより時計誤差, 電離層遅延, 対流圏遅延, 初期位相角などの項をキャンセルできる⁴⁾.

2.2 搬送波位相測位の手法

搬送波位相測位の例を Fig. 1 に示す. 十分に短い基線 $r-R$ を考えるとき, 地球固定座標系での観測点 r の位置を r_r として単独測位などを使ってその概略値が r_0 で与えられる. また観測点 R を基線基準点とし, その位置 r_R は十分な精度で既知であるとする. 観測点 r, R においてある時間の間, 衛星 1, 2, ..., n の搬送波位相を測定し, その観測データが得られたとすると, 搬送波位相バイアス二重差 N_{rR}^{12} , N_{rR}^{13} , ..., N_{rR}^{1n} は一定値になる. ここで未知パラメータ x 及びその近似解 x_0 を次のように定義する.

$$x = (r_r^T, N_{rR}^{12}, N_{rR}^{13}, \dots, N_{rR}^{1n})^T \quad (5)$$

$$x_0 = (r_0^T, 0, 0, \dots, 0)^T$$

観測期間中の観測時刻 t_k において測定した搬送波位相の二重差により, 観測量ベクトル

$$z_k = (L_{rR}^{12}, L_{rR}^{13}, \dots, L_{rR}^{1n})^T \quad (6)$$

を作る. $x = x_0$ とおいた時の観測モデル $h_k(x_0)$, 計画行列 H_k 及び観測誤差共分散行列 R_k は式 (4) を

使って以下のように表すことができる。

$$h_k(x_0) = \begin{pmatrix} \rho_{rR}^{12} \\ \rho_{rR}^{13} \\ \vdots \\ \rho_{rR}^{1n} \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$H_k = \begin{pmatrix} \frac{\partial \rho_r^1}{\partial \rho_{r0}} - \frac{\partial \rho_r^2}{\partial \rho_{r0}} & \lambda & 0 & \cdots & 0 \\ \frac{\partial \rho_r^1}{\partial \rho_{r0}} - \frac{\partial \rho_r^3}{\partial \rho_{r0}} & 0 & \lambda & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial \rho_r^1}{\partial \rho_{r0}} - \frac{\partial \rho_r^n}{\partial \rho_{r0}} & 0 & 0 & \cdots & \lambda \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$R_k = \begin{pmatrix} \sigma_{rR}^{12\ 2} & \sigma_{rR}^{1\ 2} & \cdots & \sigma_{rR}^{1\ 2} \\ \sigma_{rR}^{1\ 2} & \sigma_{rR}^{13\ 2} & \cdots & \sigma_{rR}^{1\ 2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{rR}^{1\ 2} & \sigma_{rR}^{1\ 2} & \cdots & \sigma_{rR}^{1n\ 2} \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$\sigma_{ab}^{AB\ 2} = \sigma_a^{A\ 2} + \sigma_a^{B\ 2} + \sigma_b^{A\ 2} + \sigma_b^{B\ 2} = \sigma_a^{A\ 2} + \sigma_b^{A\ 2} \quad (10)$$

ここで、 ρ_r^s は観測点 r の位置を r_0 として計算した衛星 s との幾何学距離、 σ_r^s は観測誤差 ε_r^s の標準偏差である。観測期間中の観測時刻を t_1, \dots, t_m とすると、全観測量 z 、観測モデル $h(x_0)$ 、計画行列 H 及び重み行列 W は、

$$z = (z_1^T, z_2^T, \dots, z_m^T)^T \quad (11)$$

$$h(x_0) = (h_1(x_0)^T, h_2(x_0)^T, \dots, h_m(x_0)^T)^T \quad (12)$$

$$H = (H_1^T, H_n^T, \dots, H_m^T)^T \quad (13)$$

$$W = \begin{pmatrix} R_1^{-1} & & & \\ & R_2^{-1} & & \\ & & \ddots & \\ & & & R_m^{-1} \end{pmatrix} \quad (14)$$

と書くことができる。これらに最小二乗法による推定を適用することにより、未知パラメータの最小二乗推定値 \hat{x} 、すなわち観測点 r の位置及び搬送波位相バイアス二重差の推定値を求めることができる。また、観測点 r の位置を観測時間毎に独立の未知パラメータとおくと、

$$x = (r_r(t_1)^T, r_r(t_2)^T, \dots, r_r(t_m)^T, N_{rR}^{12}, N_{rR}^{13}, \dots, N_{rR}^{1n})^T \quad (15)$$

となり、同様の推定を行うことにより移動体の位置が求められる。

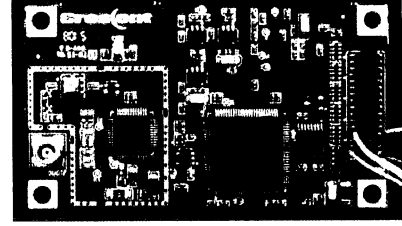


Fig. 2 Overview of GPS module (Hemisphere GPS)

Table 2 Crescent OEM Board specifications

| | |
|--------------------------|--|
| Dimension L×W×H[mm] | 71.1×40.6×12 |
| Weight [g] | 20 |
| Maximum update rate [Hz] | 10 |
| Antenna | MCX connector |
| Position accuracy[m] | Single:2.5(2DRMS) D-GPS:0.6(2DRMS) RTK:0.02(2DRMS) |

3. GPS 測位実験

本研究で提案する計測システムのベースとなる競技者の位置計測を行う方法として、GPS 測位実験を行った。このとき、計測対象となる陸上競技者は走行ピッチ 4step/s 程度、ストライド 2.5m 程度で 100m を 10 秒で走行すると仮定し、それらをおよそ 1/100 秒の精度で計測できることを目標とし、目標測位精度は 10cm 未満とする。本システムは主として短距離競技での計測を目的としているため、測位解が Fix するまでの時間 (First Fix 時間) や安定性、移動体を測位した際の測位精度などが重要である。以上の点を考慮し、定点測位時及び移動測位時の精度評価を行った。

実験では市販されている GPS モジュールの中から、価格や大きさ、重量、測位精度、入手性などの点から Fig. 2 に示す Crescent OEM Board (Hemisphere GPS) を選定した。選定したモジュールの寸法や重量、測位精度などの主要情報を Table 2 に示す。Crescent OEM Board は標準でアンテナを搭載していないため、別途 GPS アンテナ NVP-N20(三洋電機株式会社) を接続することで実験を行った。

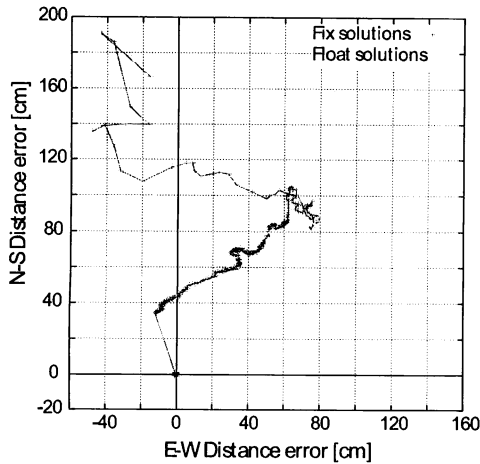


Fig. 3 Fixed point observation

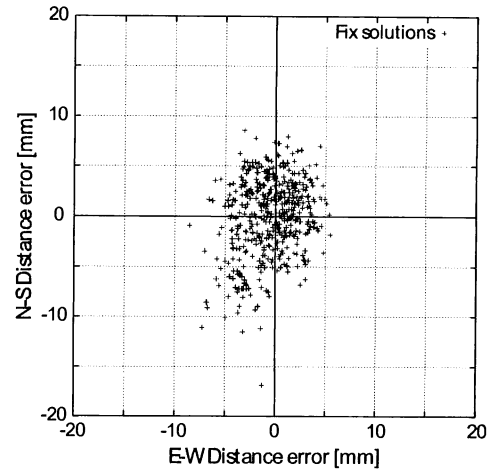


Fig. 4 Fixed solutions

3.1 定点測位実験

搬送波位相測位を用いて固定点で測位を行い、そのとき出力される測位解の First Fix 時間、測位精度の評価を行った。実験は、以下に示す条件で行った。

- 1) データ更新レートを 1Hz 出力に設定する
- 2) アンテナ上空、アンテナ周囲ともに電波を遮るものが少ない場所で観測する
- 3) 15 分間で 900 データ分の搬送波位相測定値及び、各種データのログをとる

実験で取得したデータを RTK-LIB⁵⁾ に含まれる基線解析ソフトウェアである rtkpost を用いて後処理基線解析を行った。基線解析の際、基準局は定点観測点から約 1m 離れた地点に設置した観測点と同様の GPS モジュールとアンテナで構成したシステムを用いた。

GPS モジュールから出力される世界測地系の緯度経度を平面座標系に変換し、真値からの測位解のばらつきをグラフ化した。その際 GPS アンテナの正確な絶対座標は不明なため測位解の Fix 解の平均値を真値とした。真値からの測位解のばらつきを Fig. 3 に、Fix 解のみを取り出し拡大したものを Fig. 4 に示す。また、測位解の時間変化を Fig. 5 に示す。このときの Fix 率、First Fix 時間、Fix 時の測位精度を Table 3 に示す。

実験結果より、測位解が Fix するまで数分の時間を要するが、Fix 解が得られれば 9.2mm 2DRMS という非常に高い精度で測位ができ、位置計測精度 10cm

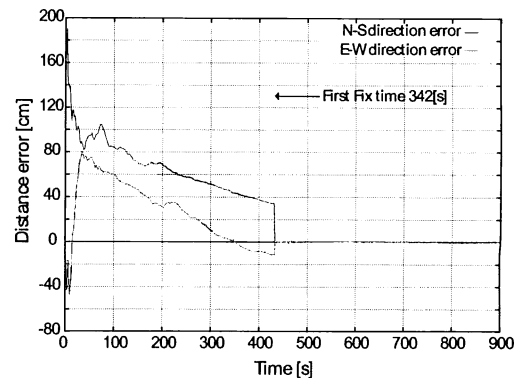


Fig. 5 Temporal change in positioning solution

以下という目標を達成している。First Fix 時間を短縮するためには、2 周波対応の GPS モジュールやアンテナを使用すれば改善が見込めるが、GPS モジュール、アンテナ共に重量が大きくなってしまい目的である陸上競技者計測には適さなくなる。そのため、測位開始から Fix するまでの初期化時間をとることで対応できると考えられる。

3.2 移動測位実験

搬送波位相測位の移動時における測位精度の検証実験を行った。移動測位実験で使用した実験装置を Fig. 6 に示す。計測対象である陸上競技者が取りうる範囲の速度で実験を行うために、計測システムやカメラを手押し台車及び自動車に搭載し、走行中地面に設置したメジャーをカメラで静止画撮影した。GPS の位置情報を静止画撮影したメジャーの目盛と比較することで移動時の精度評価を行った。この時

Table 3 Positioning performance of fixed point observation

| | |
|-------------------------|-----------|
| Fix Rate [%] | 51.9 |
| Time to First Fix [sec] | 432 |
| Position accuracy [mm] | 9.2 2DRMS |

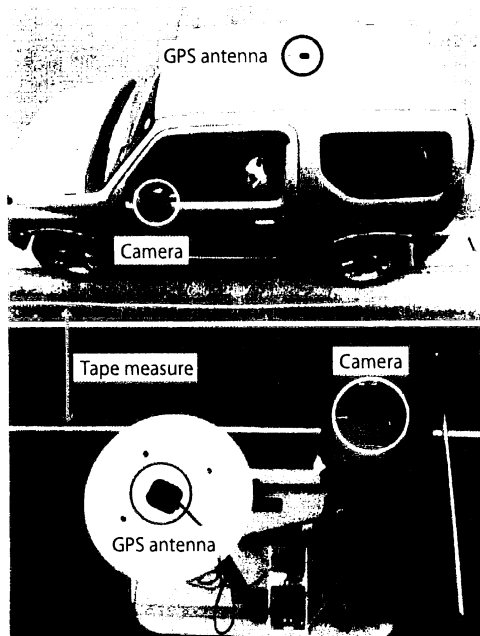


Fig. 6 Experiment system

のカメラ撮影タイミングは、GPS モジュールから出力される GPS の時刻に約 50ns という高い精度で同期した 1PPS 信号をマイコンに入力し、その信号に合わせたシャッター信号をカメラに送信し静止画撮影を行った。

実験は、以下の条件で行い、データ取得後に基線解析を行った。

- 1) データ更新レートを 1Hz 出力に設定する
- 2) アンテナ上空、アンテナ周囲ともに電波を遮るものが少ない場所で観測する
- 3) 十分な初期化時間を取ったの後に移動を開始し、搬送波位相測定値及び各種データのログをする
- 4) 移動速度は約 3.6, 7.2, 20, 30, 40km/h で走行する

本実験ではそれぞれの速度において同等の測位精度が得られたため、例として 40km/h の移動速度で

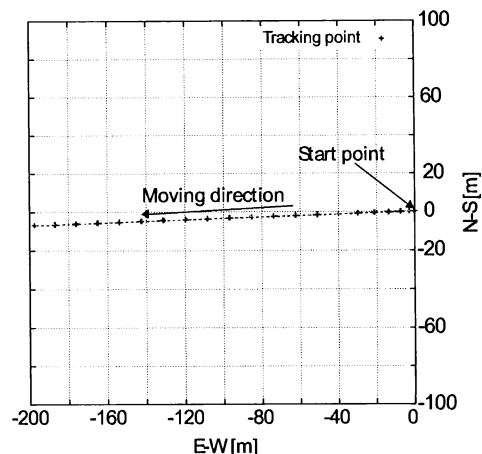


Fig. 7 Ground track in moving observation

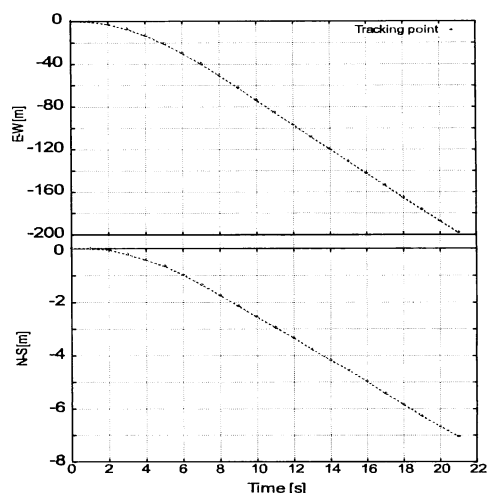


Fig. 8 Temporal change in positioning solution

行った移動測位実験結果を示す。移動開始前の静止時の位置を原点とし、移動測位時の測位解をプロットしたグラフを Fig. 7 に示し、そのときの測位解の時間変化を Fig. 8 に示す。リファレンスとなるカメラを用いた計測データと比較した速度のグラフを Fig. 9 に、誤差のグラフを Fig. 10 に示す。実験結果より、静止状態から移動開始直後には 50mm 程度の誤差が発生している。以降は 20mm 程度の平均誤差の測位精度となり、定点測位実験時より精度が低いという結果が出た。これは、実験装置のリレー回路の接点切り替え遅延や、カメラのシャッターラグなど、常に一定となりえない要因もあるため、実験方法による誤差も含んだ値となる。しかしながら、目標である位置計測精度は十分に満たしているため本システムでは十分に使用可能であると考えられる。

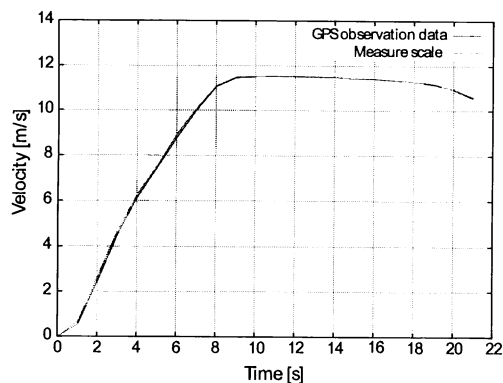


Fig. 9 Temporal change in velocity

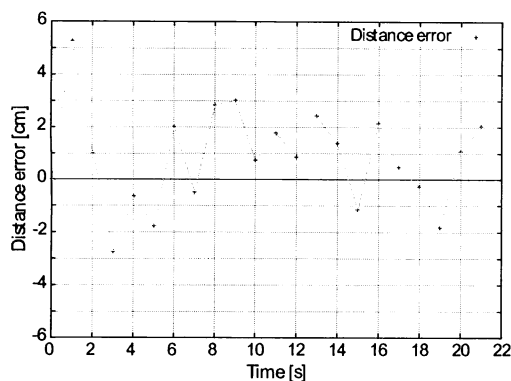


Fig. 10 Temporal change in distance error

4. 陸上競技者計測に向けて

実際に陸上競技者を計測する際に必要となる、無線通信機能やピッチ計測について述べる。

4.1 無線通信実験

GPSを用いて陸上競技者を計測するには、陸上競技者に装着したシステムで計測したデータを基線解析を行うコンピュータまで転送する必要がある。またその際、陸上トラック全域に渡って通信が可能である必要がある。そのような条件のもと、無線通信モジュールには、大きさや重量、通信距離、拡張性などの面から Fig. 11 に示す XBeePro(Digi International) を選定した。XBeePro の外形寸法、重量、通信距離、主要情報を Table 4 に示す。また、本実験では XBee シリーズ用のユーティリティソフトである X-CTU の RangeTest 機能を用いて、以下に示す条件で実験を行った。

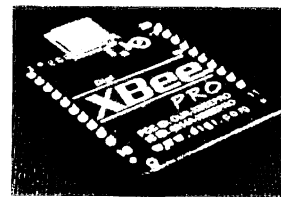


Fig. 11 Over view of XBeePro(Digi International)

Table 4 XBeePro specifications

| | |
|-----------------------------------|---------|
| Dimension L×W×H [mm] | 33×23×3 |
| Weight [g] | 4 |
| RF Data Rate [kbps] | 256 |
| Indoor/Urban Range [m] | 60 |
| Outdoor RF Line-of-Sigt Range [m] | 750 |

- 1) 送信データ 32Bytes, ボーレート 19,200bps に設定する
- 2) 固定側の XBeePro をトラック中央に設置する
- 3) 移動側の XBeePro を常に固定側を向くよう、左腰に装着する
- 4) 陸上トラックの内周と外周で計測する

実験の結果を Table 5 に示す。実験結果より、XBeePro を用いることで陸上トラック全域で無線通信が可能であることが示された。

4.2 ピッチ計測実験

加速度センサとリミットスイッチを用いて競技者のピッチを計測するための実験を行った。実験は以下のような方法で行った。

- 1) 両足首に加速度センサを装着する
- 2) 接地確認用のリミットスイッチをシューズに装着する
- 3) 走行動作を行い加速度とスイッチのデータを取得する

取得したデータをもとに加速度の変化と足の接地の関係について考察する。

Table 5 Result of wireless communication experiment with XBeePro

| Walking lane | Inside | Outside |
|-----------------------------|--------|---------|
| Transmission Times [times] | 4689 | 5162 |
| Receive Error Times [times] | 0 | 0 |
| Success Rate [%] | 100 | 100 |
| Maximam Distance [m] | 90 | 100 |

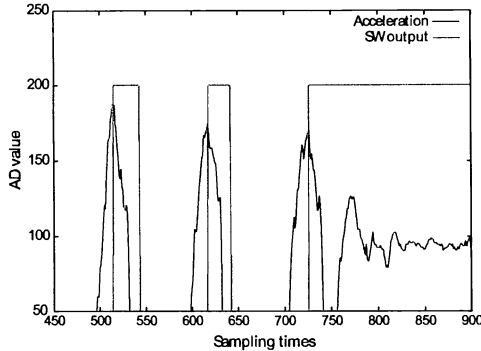


Fig. 12 Peak acceleration at stepping

実験結果を Fig. 12 に示す. 同図から, 加速度がピークをとるタイミングと足が接地するタイミングが一致していることが分かる. したがって, 加速度のピークを正確に計測できれば, 正確にピッチを計測することが可能である.

5. おわりに

GPS 測位実験の結果より, 搬送波位相測位を用いて Fix 解が得られれば, 静止時, 移動時共に目標精度を十分に満たす測位精度で位置計測ができることを確認した. また, XBeePro を用いた無線通信実験により, 実際の使用が想定される陸上トラック全域に渡って無線通信が行えることが確認できた. 加速度センサを用いたピッチ検出実験を行い, 加速度をグラフ化し, ピッチ検出に必須である接地タイミングを確認した.

以上の結果より, 本研究では Fig. 13 に示した計測システムを提案する. 加速度センサで計測した足の接地タイミングに合わせて, 搬送波位相測定値を無線通信で送信する. 取得したデータを元に基線解析を行うことで, 測位解の時間間隔を参照することによりピッチが, 移動距離を参照することによりストライドがそれぞれ分かる. 以上のことより, 本シス

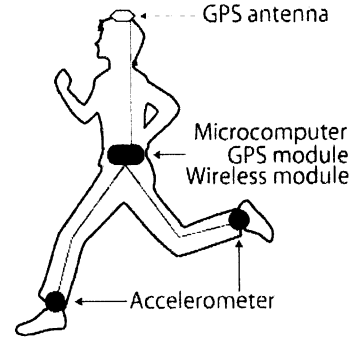


Fig. 13 System summary

テムを用いることで目的である陸上トラック全域での短距離走者の走行位置やピッチ, ストライドの定量的な情報を 1/100 秒の精度で計測が可能になる.

今後は計測システムの試作を行い, 実際に陸上競技者を計測し, システムの評価を行う予定である.

参考文献

- 1) 長谷川 邦洋, 斎藤 英雄:ハンドヘルドカメラを用いた陸上競技選手の接地位置計測に基づく速度・ストライド測定, 動的画像処理実利用ワークショップ, DIA2009, 215/220(2009)
- 2) 金高 宏文, 松田 三笠, 瓜田 吉久:レーザー速度測定器とビデオカメラを利用したスプリント走中のストライド変化の推定, 日本スプリント学会, スプリント研究 第 14 巻, 65/75(2004)
- 3) 櫻田 淳也, 水浦 彩子:ピッチとストライドに着目した 100m 走の指導法に関する一考察 -レーザー式速度測定器 (LAVEG SPORT LDM 300C) を使用して-, 東京女子体育大学紀要, 第 39 号, 43/46(2004)
- 4) 高須知二:搬送波位相測定値による精密測位の理論及び解析処理, GPS/GNSS シンポジウム, チュートリアルセッション, (2005)
- 5) RTK-LAB: <http://www.rtklab.com/>, 19.December(2010)
- 6) Alfred Ledick "GPS Satellite Surveying", John Wiley & Sons Inc., (1995)