スマートフォン搭載気圧センサを用いた移動経路推定手法における気圧センサ値の評価と補正手法の検討

岩波慶一朗[1]　新井イスマイル[2]　田中誠一[3]　下原寿々花[3]　村田将宏[3]

概要：スマートフォンの普及を背景として種々の行動をセンサなどにより記録するライフログが盛んに研究されている．このライフログの中では，ユーザの位置情報を用いて移動の履歴を記録する移動経路ライフログが最も広く使われているが，現在は GPS 受信機を用いた手法が主流である．一方で，GPS 受信機によって移動経路ライフログを記録するためには GPS 受信機を常時使用する必要があるが，スマートフォンのバッテリー消耗を激しくする．そこで，気圧センサ値を用いて GPS 受信機の稼働時間を削減し，補完するような移動経路推定手法を研究している．本稿ではその手法中において高度導出を行う際に誤差の原因となる気圧センサ値のスパイクに対して対処を行った．スパイクを観測した気圧センサのログに対して，移動平均とメディアンフィルタをそれぞれ適用し，スパイクを除去するウィンドウ幅を選定し，検証した．この補正処理においては，日常生活では発生しないと思われる 0.5hPa 以上の突発的な気圧変化の除去を目指し，移動平均ではウィンドウ幅 n=40 以上，メディアンフィルタではウィンドウ幅 n=7 以上に設定することで 0.5hPa を超えるスパイクの除去を確認できた．そして，補正後の気圧センサ値において再現性向上を確認でき，基準とした一般的な気圧ロガーとのオフセット誤差補正後における気圧変化量の誤差が効果が高いもので約 1.0Pa 程度削減されていることを確認した．

A Study of Smartphones' Air Pressure Sensor Data Correction Method for the Trajectory Reasoning System Utilizing Altitude Log

Keiichirou Iwanami[1]　Ismail Arai[2]　Seiichi Tanaka[3]　Suzuka Shimohara[3]　Masahiro Murata[3]

1. はじめに

2014 年 5 月現在，スマートフォンは携帯電話全体の半数以上を占める他，10 代と 20 代のシェアに限れば全体の 8 割程度がスマートフォン所持者となっている [1]．スマートフォンには従来の携帯電話の機能の他，加速度センサ，ジャイロセンサ，地磁気センサ，温度センサや気圧センサなどの多種多様なセンサの他に，GPS 受信機や無線 LAN 送受信機，Bluetooth 送受信機など多くの通信インタフェースも備えている．このことから，スマートフォンを持ち歩くことは小型のセンシングツールを持ち歩くことに等しい．よってユーザが日常的にスマートフォン環境を利用することを前提とした種々のセンシング，行動ロギングに関するアプリケーションなどの研究開発が行われており，一般的なものとなってきている．スマートフォンに内蔵されたセンサを利用することで，従来のセンサロギングのようにユーザが専用のセンサ類を身につける負担を軽減することが出来，より日常的に用いる事が容易であるといった利点が挙げられる．また，スマートフォンを用いた日常の行動ロギングにおいて現在，特に需要が高く，最も汎用的に用いられているのが GPS 受信機によって推定された位置情報である．位置情報を用いて現在地を地図上にプロットしたり，ナビを行う[*1]といったことは以前から広く使われていた他，現在では歩行者の移動経路をライフログとして常

1 明石工業高等専門学校 専攻科 機械・電子システム工学専攻,Advanced Course of Mechanical and Electronic System Engineering, Akashi National College of Technology
2 明石工業高等専門学校 電気情報工学科,Department of Electrical and Computer Engineering, Akashi National College of Technology
3 明石工業高等専門学校 機械工学科,Department of Mechanical Engineering, Akashi National College of Technology

*1 Google Map(https://play.google.com/store/apps/details?id=com.google.android.apps.maps)

時記録するといった用途にも用いられている[*2]．また，スマートフォンを用いた位置情報の利用は前述の歩行者に限定されない点も特徴として挙げられる．スマートフォンはユーザが日常的に携帯し，歩行，走行，自転車などの比較的低速な移動から，自動車，電車などの比較的高速な移動まで様々な移動形態において移動中の利用が期待できる．これらのことから，スマートフォンにおける位置情報利用は，単純にナビゲーションシステムに用いられるだけではなく，ランニング中の消費カロリーやサイクリング中の標高変化記録など，それぞれの移動形態に特化した利用が見込まれる．また，GPS 受信機によって得られる位置情報を活用し，照度データを組み合わせることで夜道の安全性を判定出来る [2]．このように，移動情報の他に種々の情報を組み合わせる応用なども成されている．

一方，現状での GPS 受信機を用いた位置情報の取得では GPS 受信機を常に稼働させ続けている事で確率推定演算が常時行われ，それを理由として消費電力が増大する．スマートフォンではバッテリー容量に限りがあり，これが記録期間の短期間化を招く原因となりやすい．この問題に対処するため，GPS 受信機の稼働頻度を減らし，省電力性を高めた手法の需要が高まっている．そこで，歩行者の移動経路ログに関して，気圧センサ値と数値標高モデルを利用し，GPS 受信機の稼働頻度を減らした省電力な手法の実現を目指し，気圧センサ値による移動経路判定を研究している [5]．気圧センサ値をロギングすることで，標高変化を導出し，移動中の高度変化を推定する．現在までに，一般道路の判定を目標に研究を進めてきたが，その中で取得した気圧センサ値の補正が必要であると判明した．この補正を必要とする特性は，気圧センサが突発的に観測するスパイクのことであり，0.5hPa 以上の唐突な気圧変化のことを言う．これは高度に換算すると，約 4m の高度変化が発生した場合の気圧変化である．以降，2 章で関連研究，3 章にて現状の気圧値と標高値による経路推定の手法について説明し，4 章で気圧センサ値の特徴と補正，5 章で気圧センサのスパイクの除去手法，6 章でその考察を述べ，7 章で本稿をまとめる．

2. 関連研究

現在，位置情報の取得は主に GPS を用いた手法が主流である．この手法は民間用の一般的な GPS 受信機を用いた場合で誤差 10m 以内の高精度測位が可能で，ナビゲーションや移動経路ログに用いられている．一方で 1 章で述べたように GPS 受信機が衛星からの信号を受け取れない場合でも受信を試みて確率推定演算を常時繰り返すため，消費電力が増大する．スマートフォンに搭載されているセンサ類の中では，GPS 受信機の消費電力が最も大きい．

[*2] 僕の来た道 (https://play.google.com/store/apps/details?id=jp.co.yahoo.android.locationlog)

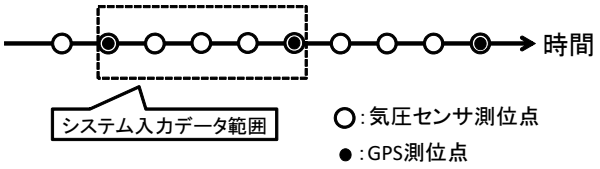

図 1 研究手法におけるデータロギングイメージ

よって，ライフログなど長期間の稼働を要する用途においては，GPS 受信機を常時用いることは不向きである．そこで，電力消費を抑えた測位手法として無線 LAN 測位 [3] やデッドレコニング [4] などがよく知られているが，前者は無線 LAN 基地局の数に測位精度が依存し，後者は種々の移動形態に未対応であることなどの問題が存在する．

3. 気圧値と標高データによる移動経路推定手法

2 章で述べたような問題点を解決するため，我々が研究を行なっているのが気圧計と標高データによる移動経路推定である [5]．この手法では，まず携帯端末によるデータロギングを行う．この時のデータロギングをイメージとして表したものが**図 1** である．

ユーザの移動中，単位時間ごとに携帯端末は気圧センサ値を常に記録し続け，加えて GPS を一定時間ごとに間欠動作させることで，GPS 測位点が定期的に得られる．測定開始から一定時間が経過し，ある GPS 測位点が得られた時，その GPS 測位点及びひとつ前の GPS 測位点，二点が記録されるまでの間の気圧センサ値が測位に用いられるデータ範囲であり，古い GPS 測位点を移動における始点，新しい GPS 測位点を移動における終点とみなす．

始点と終点が定まれば，始点の座標が観測された時刻を時刻 0 として，移動中のある時刻 n における標高値を H_n とする．n=0 である時の標高値は時刻 0 における始点の標高値とする．H_n の標高値と気圧センサ値から移動中の時刻 $n+1$ の標高値 H_{n+1} を求めるには，以下の式 (1) で，相対高度導出を行い，H_n との相対高度 Δz を求める．求められた相対誤差 Δz と一つ前の時刻における標高値 H_n より，式 (2) を用いて H_{n+1} が推定される．また，相対高度を導出する式 (1) は，移動対象が持つ気圧計の測定値と，測定エリア内に設置された基準気圧計の測定値から相対高度を求める研究を行なっている森下らの手法 [6] を参考としている．我々の手法では，2 章で述べた省電力性のある測位に加えて，森下らの手法における基準気圧計の制約解消を図っている．

$$\Delta z = \frac{T_f}{\gamma}\left(1-\left(\frac{P}{P_f}\right)^{\frac{R\gamma}{g}}\right) \tag{1}$$

$$H_{n+1} = H_n + \Delta z \tag{2}$$

(1) 式における T_f は現地気温，γ は気温減率 [K/m]，g は重力加速度 [m/s^2]，R は空気の気体定数 [J/kgK]，P は各時刻 n+1 の気圧，P_f は時刻 n の気圧である．この式から求めた相対高度を始点の標高値に足しあわせていくことによって，高度変化ログを取得する．そして，移動経路における高度変化の軌跡は車道・歩道ごとに固有のものであり，得られた高度ログと道自体の高度変化軌跡を事後比較することで，対象が移動してきたルートが判別できる．また，この式においては絶対気圧を基準にして高度導出を行うのではなく，移動前と移動後の気圧値の相対変化から高さを導出するため，各端末の気圧センサ値のオフセット誤差には影響されにくいという利点がある．これが気圧・標高を用いた移動経路推定の基本的な理論である．また，この手法では移動終了後，事後にどのルートを移動したかをルートの標高特性を基に判別している．従って，得られた始点と終点以外は，ある時間にルート上のどの位置にいたかを詳細に判別する事は出来ない．

4. 気圧センサ値の特徴と補正

3 章で，気圧センサを用いた移動経路推定手法の基本的な動作について述べたが，この手法では最初に GPS から得た高さの分かる移動の始点から，気圧センサ値で如何に相対高度変化を精度よく求められるかが重要となってくる．気圧値は高さによって激しく変化するが，一方で太陽熱や重力波などの様々な大気状態・大気活動によって微細な変動が発生することが確認されており [7]，同一地点においても絶えず気圧が変化する．スマートフォン所持者の移動形態としては，歩行や走行などの低速移動と，車や電車などの高速移動に分けて考えられるが，高速移動時においては，高度変化が短期間で大きく現れるため，気圧センサ値の揺らぎを原因とする影響は小さくなると考えられる．高速移動時における実験として，スマートフォンを車載し，高度変化が大きいエリア (鈴鹿サーキット東コース) を走った場合にどのような気圧センサ値の特性が発生し，それをどのように補正するかという検証を行っている [8]．この検証によれば，短期間で高度変化が大きく現れる場合，気圧変化が顕著となることが確認でき，また，坂道の上昇における高度変化を気圧センサ値から導出したところ，高さの真値である鈴鹿サーキットのコースデータと比較して約 18%の誤差があることが判明した．そのため，加速度センサと地磁気センサを用いて上昇・下降判定を行い，上昇時にのみ気圧センサ値から求めた高度変化量に対して補正を行うことで正しく高度変化が捉えられると確認できた．**図 2** と **図 3** が，高速かつ高度変化が大きい時のセンサ値の特性及び補正結果について，真値である鈴鹿サーキット東コースのコースデータと比較したグラフである．また，高速移動時の補正手法によって補正された気圧センサ値から求めた推定高度変化と，真値との差を示したものが**表 1** である．

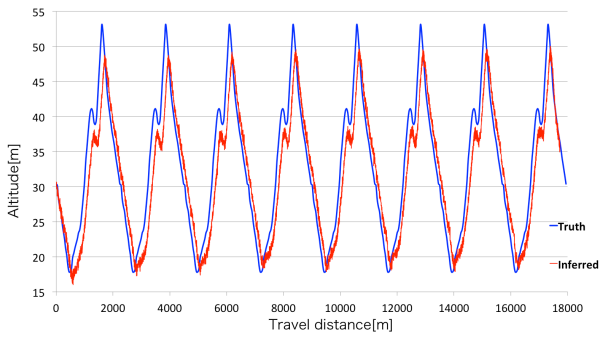

図 2 鈴鹿サーキット高度変化データと推定された高度変化

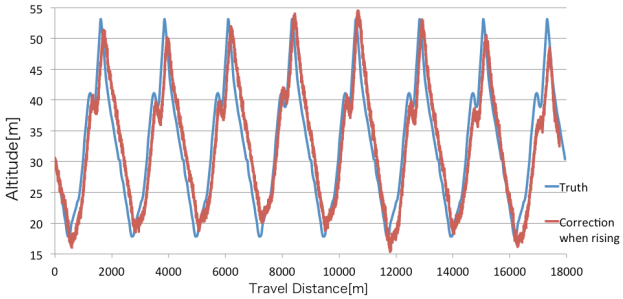

図 3 補正を行った推定高度変化

表 1 高速移動時における推定標高誤差補正手法の真値との差

	補正なし	全変化補正	上昇時補正
導出高度平均誤差 [m]	1.59	1.17	1.04

表 1 に示す通り，補正が無い状態で高度変化導出を行うと 1.59[m] の高度誤差が平均して真値との間に表れる．

対して，得られたセンサ値に補正を行うとその影響を 1.17[m] まで減少させることが出来る．一方で，気圧センサ値は下降時にはそれほど大きな誤差を発生しないので，上昇時の気圧センサ値が補正される代わりに下降時において誤差が大きくなる．そこで，上昇・下降判定機能を加えて補正範囲を限定することで気圧センサ値の誤差による高度誤差を平均 1.04[m] まで削減することが出来た．

一方，低速移動を行っている場合は，歩行者の時間あたりに現れる高度変化量が高速移動時に比べて少ない．この時に大きな問題となるのが気圧測定中に唐突に発生するスパイクである．気圧センサ値を用いた移動経路推定手法では，ある時刻 i から見て時刻 i-1 からの相対気圧変化量を元に移動者の高度変化を導出するが，スパイクを放置したままにすると通常時は小さな高度変化しかしないユーザが唐突に巨大な高度変化をしたと判定されてしまい，正しい移動経路推定が不可能となる．そこで本稿では，気圧センサ値によって得られた気圧ログに対して補正を行い，スパイクの除去を目指す．

まず，その事前準備として気圧センサ値の詳細な特徴を把握するために気圧センサを搭載した幾つかの端末で気圧

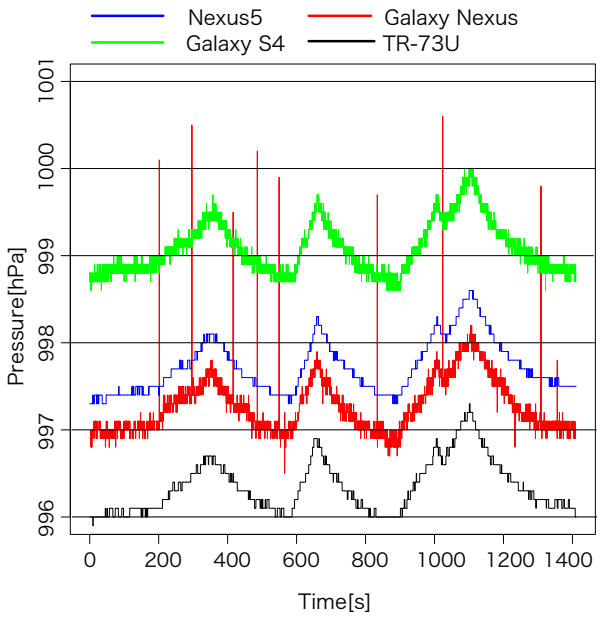

図 4　各端末の絶対気圧値の測定結果

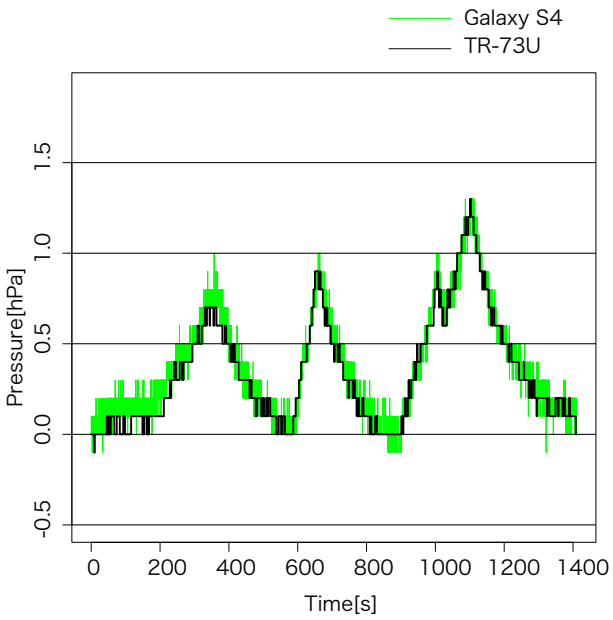

図 5　Galaxy S4 と TR-73U の気圧変化ログ

値の測定実験を行った．用いた端末は，Samsung 電子製の Galaxy Nexus，Galaxy S4，LG 電子製の Nexus5 である．また，比較の基準となる気圧値の測定のために別途気圧ロガーを用いた．ティアンドデイ株式会社製のおんどとり (TR-73U) である．これらを気密性の高い密閉した容器内に入れ，ピストン注射器でゆっくりと加圧した．この時の加圧は，人が歩行などの低速移動を行っていると考え，約 1hPa をゆっくりと加圧し，ゆっくりと減圧するという形で行った．その時の，気圧値の絶対値を測定した結果を**図 4** に示す．Galaxy Nexus によって突発的な上下の気圧スパイクが観測されているが，これを標高変化導出時に放置すると唐突に数十メートル単位の高度変化を 0.1 秒間隔で行っていることになり，現実的ではない．そのため，スパイクに対する処理を行う必要があると考えられる．

次に，TR-73U を基準にしてオフセット補正を行い，各端末の気圧センサ値の変化を比較した場合にどうなるかをそれぞれ**図 5**，**図 6**，**図 7** に示す．

各図より，相対気圧値の変化を比べてみると絶対気圧値を測定した場合と比べて，各端末間で差が少なくなっていることが分かる．加えて，高速移動時に見られたような最高点での食い違いが起きていない．また，図 6 より，Nexus5 の相対気圧変化を観測した値が基準値である TR-73U のものと近く，加えて信号にやや遅延が含まれている事がわかる．これは Nexus5 が内部で気圧センサ値を出力する前に独自のフィルタリング処理を行っているからである．Nexus5 が行っているフィルタリングの内容としては，出力された気圧センサ値に遅延が含まれることから，移動平均などの平滑化処理ではないかと考えられる．また，Nexus5 が出力した気圧センサ値には，通常観測される微細な気圧値の揺らぎが殆ど含まれていなかった為，リサンプリング処理も合わせて行われていると思われる．

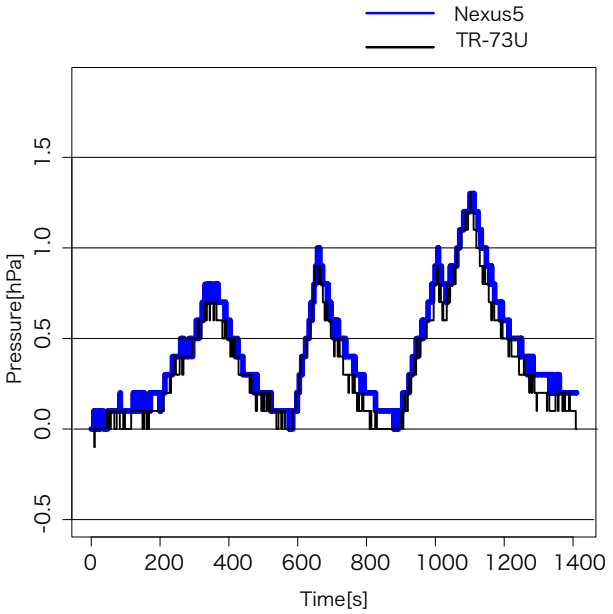

図 6　Nexus5 と TR-73U の気圧変化ログ

一方，図 7 より，Galaxy Nexus はやはりスパイクの影響が大きく，測定値に時折 3hPa 以上の巨大な気圧変化が現れる事がある．また，小さいものでもスパイクは 0.5hPa 以上になる．1hPa の気圧変化はおおよそにして 8m の高度変化に相当するが，このスパイクを放置することで高度変化導出時に歩行者が，最低でも 4m 以上，大きい場合になると 24m 以上の高度上昇・下降を極めて短い時間に果たした事になり，正しい経路推定は不可能となる．

そこで，各端末の測定結果に補正を行い，スパイクを除

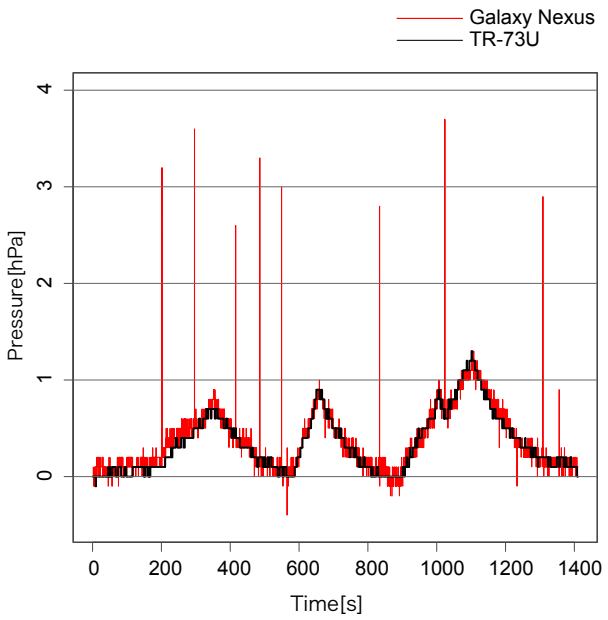

図 7　Galaxy Nexus と TR-73U の気圧変化ログ

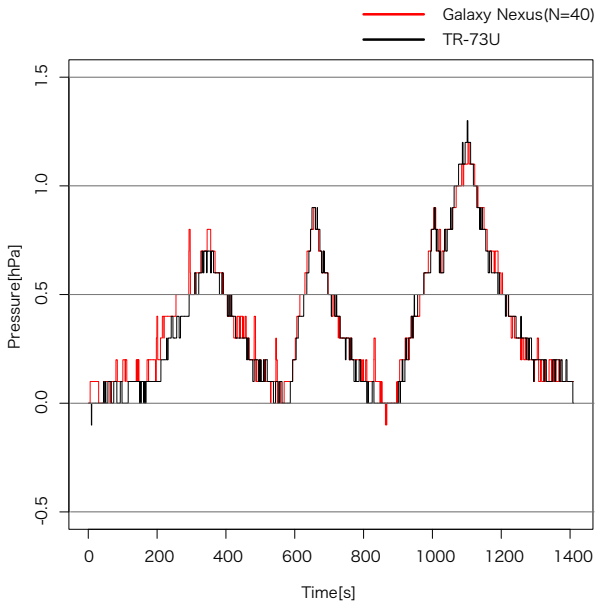

図 8　Galaxy Nexus の移動平均 (N=40) と TR-73U の気圧変化ログ

去し誤差を小さくすることを目的に幾つかの手法を試す．

5.　気圧センサログ内のスパイク除去手法

まず，移動平均を気圧センサ値の補正として試行する．移動平均は時系列データを平滑化する一般的な手法であり，気象データの計測にも用いられている．その中でも今回は単純移動平均を用いる．単純移動平均はウィンドウ幅を n とした時に n 個のデータを重み付けせず単純な平均を取る手法である．本稿では，特にスパイクが顕著に現れた Galaxy Nexus の 0.1 秒刻みの気圧センサ値に対してウィンドウ幅 n=2 から徐々に増加して試行し，n=40 以上で 0.5hPa を超えるスパイクが除去出来た，ここでは一例として，n=40，50 の時の単純移動平均を求めた．それぞれ導出した気圧変化量を，TR-73U のものと比較して次の**図 8**，**図 9** に示す．

次に，メディアンフィルタを導入する．メディアンフィルタは主に画像処理で用いられるようなノイズ除去手法であり，対象中に存在する雑音を除去出来る．画像処理の場合においては，画像中に存在するゴマ塩状のノイズ除去などに利用されており，平滑化を行った場合は特徴量にボケを生じさせるのに対して，メディアンフィルタ処理を行うと特徴量をある程度保持したままノイズの除去が出来る．本稿では，取得した気圧ログに対して，ウィンドウ幅を n とした時に，n 個のデータの中から中央値を発見するという手順でメディアンフィルタ処理を行った．Galaxy Nexus の 0.1 秒刻みの気圧センサ値に対して，ウィンドウ幅 n を 2 から順に増やして試行し，7 以上で 0.5hPa を超えるスパイクが除去可能となった．ここでは，一例として n=7，9 としてメディアンフィルタ処理を行い中央値を導出する．

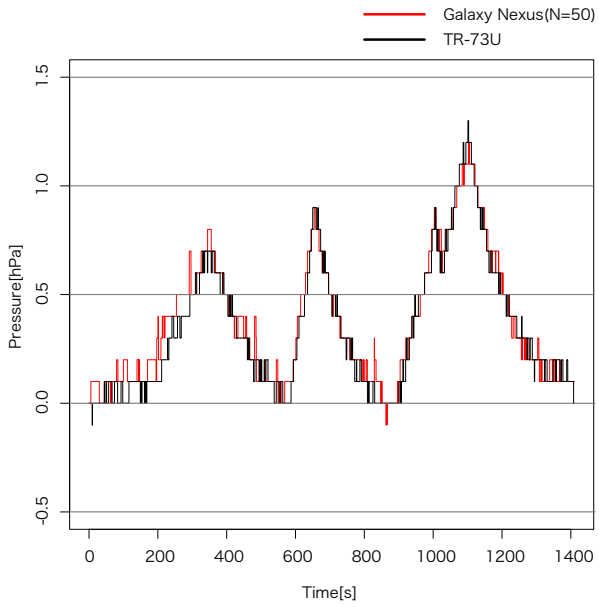

図 9　Galaxy Nexus の移動平均 (N=50) と TR-73U の気圧変化ログ

それぞれ導出した相対気圧変化量を，TR-73U のものと比較して次の**図 10**，**図 11** に示す．

また，これらの結果を元にして次の章にて考察を行う．

6.　結果に関する考察

5 章にて測定された気圧センサ値の変化量に対して移動平均による平滑化及びメディアンフィルタによるノイズ除去を導入し，スパイクの除去を試みた．その結果について考察する．まず，図 8 と図 9 より，図 7 と比べた場合，スパイクが除去出来ていることが分かる．また，移動平均と

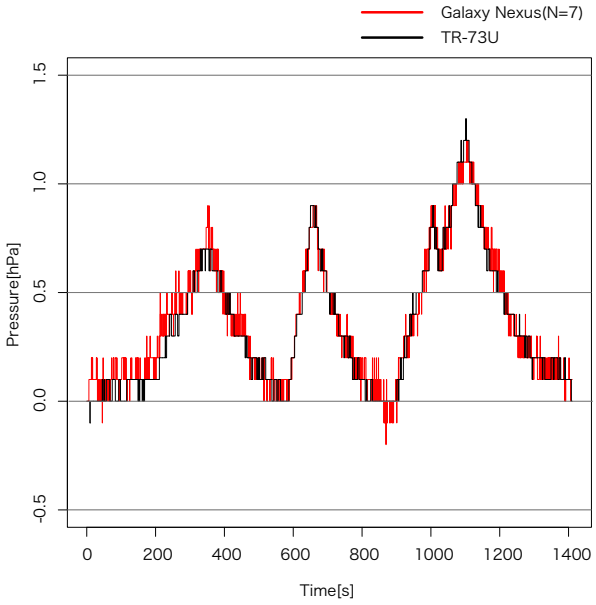

図 10　Galaxy Nexus のメディアンフィルタ (N=7) 処理後と TR-73U の気圧変化ログ

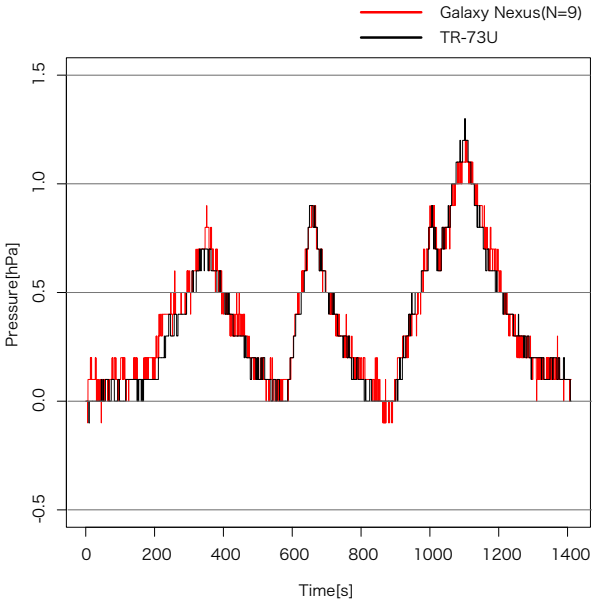

図 11　Galaxy Nexus のメディアンフィルタ (N=9) 処理後と TR-73U の気圧変化ログ

メディアンフィルタのそれぞれの場合において，n=40 以下，n=7 以下では 0.5hPa を超えるスパイクが残留していた．よって，移動平均及びメディアンフィルタを用いて気圧センサが観測する突発的なスパイクを除去するためには，低速移動時において移動平均のウィンドウ幅 n=40 以上，メディアンフィルタのウィンドウ幅 n=7 以上で処理を行えばよいと考えられる．また，これらの処理を行うことで処理後の波形には移動平均及びメディアンフィルタによるデータの遅延が発生している．スパイクの除去を行った場合，Galaxy Nexus は 0.1 秒間隔で気圧センサ値を記録していたので，移動平均の場合は 4.0 秒，メディアンフィルタの場合は 0.7 秒の遅延がそれぞれ補正後の波形に含まれる．気圧センサ値を用いた移動経路推定手法においては，移動者の高度変化軌跡と候補ルートの高度変化軌跡を比較するため，あまり遅延が大きくなると軌跡の形が損なわれることになって判定が狂い，移動経路推定に影響をおよぼすと考えられる為，遅延は少なければ少ない方がよい．よって，今回の例で言えばスパイクの除去を目指し，かつ波形の再現性を出来るだけ損なわない為には，メディアンフィルタを導入するのが望ましいと考えられる．以下に Galaxy Nexus の他，Galaxy S4 と Nexus5 にメディアンフィルタによる処理を導入した場合の TR-73U を基準としオフセット誤差を補正した気圧変化量の誤差について**表 2** にして示す．

表 2　各種法適用時の TR-73U との気圧変化量の誤差

	Galaxy Nexus	Galaxy S4	Nexus5
補正なし [Pa]	6.46	5.97	7.96
移動平均法 (n=40)[Pa]	5.50	4.74	7.80
移動平均法 (n=50)[Pa]	5.52	4.70	7.85
メディアンフィルタ (n=7)[Pa]	6.34	5.44	7.93
メディアンフィルタ (n=9)[Pa]	5.52	5.29	7.91

各端末で得られた気圧センサ値に対して，移動平均及びメディアンフィルタを適用することにより，補正なしの場合と比べて気圧変化量の誤差が少なくなることが確認できる．今回適用した手法であれば，移動平均のほうがスパイクを除去するのに必要なウィンドウ幅が大きい為に誤差量が少なくなる傾向があるが，その分，遅延が大きい．一方，メディアンフィルタ (n=9) を用いると，スパイクが顕著に見られた Galaxy Nexus の場合で，遅延が約 5 分の 1 で移動平均法 (n=50) の場合と同じだけの補正効果が得られている．このことより，スパイクを除去し，誤差量を減らしつつ遅延を少なく抑えるためにはメディアンフィルタを導入することが適切だと考えられる．また，Galaxy S4 及び Nexus5 に対してもメディアンフィルタを適用することで気圧変化量の誤差が減少しており，気圧に対する再現性が向上したと言える．Nexus5 に注目すれば，補正を行わなかった場合と行った場合で効果が他の端末に比べて小さいが，これは既に Nexus5 自身がフィルタリングを行い遅延が発生していた気圧センサ値に対して更にフィルタリング処理を行ったためだと考えられる．しかし，Nexus5 に対しても誤差の低減は見られるために有効であると考えられる．

7. まとめ

本稿では，スマートフォンに搭載された気圧センサによって記録された気圧センサ値を元にして，GPS の利用頻度を減らしながら移動経路を推定する手法を説明し，またその時に問題となる気圧センサ値の種々の誤差について検証を行った．その中で，高度変化導出を行った時に通常では考えられない高度変化を導出する原因となる突発的なスパイクに対して，移動平均とメディアンフィルタを用いてそれぞれノイズ処理を行った．結果，両者ともにスパイクの除去を行うことが出来，また TR-73U を基準とした気圧変化の誤差を減少させることにより，気圧センサ値測定後の波形再現性の上昇を確認できた．更に，両者のスパイク除去に必要なウィンドウ幅の値から波形に含まれる遅れを検証した時，メディアンフィルタを用いた方が遅延が少なく，移動経路推定手法における標高変化軌跡の判定において誤りが少なくなるため，本手法においては有用であると判明した．本稿までに，移動形態によらず気圧センサから得た気圧値の記録から高度変化を導出することが可能となり，また，それらに対する補正手法についても検証を行った．

今後は，これら補正後の気圧センサ値を用いることで困難であった類似のルート候補が含まれる移動経路判定を行い，GPS 使用を抑えた省電力な移動経路推定手法を開発し，実現を目指す．

参考文献

[1] 博報堂 DY グループ・スマート・デバイス・ビジネスセンター：全国スマートフォンユーザ 1000 人定期調査 第 8 回分析結果，入手先 ⟨http://www.ipsj.or.jp/journal/submit/ronbun_j_prms.html⟩ (2014.05.16).

[2] 松田裕貴，新井イスマイル：スマートフォン搭載照度センサの集合知による街灯照度安全性判定システムの開発，情報処理学会研究報告 (2013-UBI-37(52)), pp.1–8, (2013)

[3] 暦本純一，塩野崎敦, 松木隆彦, 味八木崇：PlaceEngine–実世界集合知に基づく WiFi 位置情報基盤，インターネットコンファレンス 2006，PP95-104，(2006)

[4] 上坂大輔，村松茂樹，岩本健嗣，横山浩之：手に保持されたセンサを用いた歩行者向けデッドレコニング手法の提案，情報処理学会論文誌 Vol.52，PP558-570，(2011)

[5] 岩波慶一朗，新井イスマイル：気圧センサ値と数値標高モデルを用いた移動経路推定手法の提案と評価，情報処理学会研究報告 (2013-UBI-37(46)), pp.1–8, (2013)

[6] 森下功啓，三田長久：GPS と気圧計を組み合わせた移動経路推定手法の開発，GPS/GNSS シンポジウム 2011，(2011)

[7] 森下功啓，三田長久：衛星測位の補間のための気圧高度履歴に基づく移動経路推定，測位広報学会論文誌 Vol.4 No.1 PP1-10，(2013)

[8] 岩波慶一朗，新井イスマイル，田中誠一：気圧・姿勢情報を用いた測位システムの鈴鹿サーキットにおける有用性検証，第 12 回科学技術フォーラム講演論文集第 4 分冊, pp.311–318, (2013)