情報処理学会論文誌 Vol.56 No.1 260–272 (Jan. 2015)

気圧センシング技術を用いた行動認識手法

米田 圭佑[1,†1,a)] 望月 祐洋[2,b)] 西尾 信彦[3,c)]

受付日 2014年5月2日, 採録日 2014年10月8日

概要：スマートフォンの搭載デバイス群から得たデータ解析による趣味嗜好抽出やコンテキスト認識の研究がさかんである．気圧センサは標高に関係する情報を取得でき，低消費電力でありながら行動認識に利用できるセンサとして期待されている．本論文ではユーザの状態を屋内状態と屋外状態に大別し，それぞれの状態において気圧センサを用いた行動認識手法を提案する．屋内状態では気圧変化量に着目した滞在階層推定を，屋外状態では軌道上移動の気圧推移に着目した現在地推定を行う．評価実験より，1 度に+18 階の階層移動の場合であっても正常に階層推定できていることを確認した．軌道上移動における現在地推定では，推定結果の 75%において GPS 測位による位置情報との誤差が 0.5 km 未満で推定できたことを確認した．

キーワード：行動認識，気圧，階層推定，位置推定，ライフログ，GPS 測位

Activity Recognition Method Based on Atmospheric Pressure Sensing

Keisuke Komeda[1,†1,a)] Masahiro Mochizuki[2,b)] Nobuhiko Nishio[3,c)]

Received: May 2, 2014, Accepted: October 8, 2014

Abstract: A variety of studies have been conducted on context recognition as well as hobby and preference extraction by analyzing the data obtained from the sensors in a smartphone. As a smartphone component, a barometer is expected to be useful for activity recognition because of its low power consumption. In this work, we propose an activity recognition method of classifying a user's state into indoor and outdoor states and using a barometer at each state. In the proposed method, the floor of a building on which a user is located is estimated by determining atmospheric pressure variations sensed in the indoor state, and the user's location is estimated by determining atmospheric pressure variations according to the user movement along a track in the outdoor state. We confirmed that it is possible to closely estimate the current floor-level of the building in the case of user movement among eighteen floors at a time. On the other hand, we confirmed that in 75% of the results of the user's location estimation, the difference between the estimated location information and GPS location information is less than 0.5 km.

Keywords: activity recognition, atmospheric pressure, floor-level estimation, location estimation, life-log, GPS

[1] 立命館大学大学院情報理工学研究科
Graduate School of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University, Kusatsu, Shiga 525–8577, Japan
[2] 立命館大学総合科学技術研究機構
Research Organization of Science and Technology, Ritsumeikan University, Kusatsu, Shiga 525–8577, Japan
[3] 立命館大学情報理工学部
College of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University, Kusatsu, Shiga 525–8577, Japan
[†1] 現在，株式会社ミクシィ
Presently with Mixi, Inc.
[a)] kome@ubi.cs.ritsumei.ac.jp
[b)] moma@ubi.cs.ritsumei.ac.jp
[c)] nishio@cs.ritsumei.ac.jp

1. はじめに

スマートフォンには Wi-Fi のような無線通信デバイス，GPS 受信機などの測位デバイス，加速度計や気圧計のようなセンサデバイスなど，多様なデバイスが搭載されている．スマートフォンはユーザが普段から持ち歩くことができ，搭載されたデバイスを用いてユーザの行動に関係する様々なデータをリアルタイムに収集できるセンシング携帯端末（**センシングモバイル**）として期待されている．最近ではセンシングモバイルにより収集されたデータを解析するこ

© 2015 Information Processing Society of Japan

表 1 各センサ駆動時の消費電力
Table 1 Power consumption of each smartphone component in operation.

センサの種類	GPS	Wi-Fi	加速度	気圧
時間あたりの消費電力 [%/h]	5.28	3.41	3.64	1.79

とによる情報抽出に関する研究も活発に行われており，個人特化されたサービス提供など様々な応用が期待されている．我々も個人特化された行動認識を目的に，センシングモバイルに搭載されたデバイス群を用いて常時センシングを行う**ライフログセンシング**の運用を続けてきた．

近年，センシングモバイルへの搭載が進んできたセンサの 1 つとして気圧センサがあげられる．**表 1** に行動認識に用いられる代表的なセンサ別のセンシング時の消費電力を調査したデータ[*1]を示す．気圧センサは GPS 測位や加速度センサよりも低消費電力で駆動し，標高や天候に相関する気圧を取得できるセンサとして注目を浴びている．これまでにも気圧センサに着目した研究は数多くなされてきた．気圧を用いた行動認識の研究例として，階層移動にともない気圧が変化することを利用し，階層移動状態や現在の標高を認識する研究があげられる [1], [2], [3]．しかし，これらの研究では建造物において重要な認識の粒度である階層を認識することが困難である．別の研究例として，地形の標高に合わせて気圧が変化することを利用し，移動経路を推定する研究があげられる [4], [5]．これらの研究では気圧センサによる移動経路の推定によって GPS 測位の頻度を低減させることで消費電力の削減を図っているが，文献 [4] については固定局の設置コスト，文献 [5] については特徴量の類似する経路の推定精度に課題をかかえている．本論文では，低消費電力の気圧センサを利用した行動認識によってライフログセンシングの省電力化を図ることを目的に，ユーザの屋内状態と屋外状態それぞれに対して気圧に着目した行動認識手法を提案する．屋内状態では気圧変化量に基づく階層移動抽出による滞在階層推定を，屋外状態では軌道上移動の気圧推移比較による現在地推定を適用する．屋外状態における現在地推定手法は，同一軌道上の移動では毎回同様の気圧推移が見られるという観測結果に基づいており，特にトンネル進入時の気圧変化を特徴量の 1 つとして利用している．このため適用範囲は限定されるものの，省電力化の一手法として他の関連手法と併用可能である．

2. 関連研究と要件

2.1 関連研究

本章ではセンシングモバイルにおける省電力化および気圧を用いた行動認識の研究についてあげ，本研究の目的を達成するための現状の問題点を明確にする．

2.2 省電力センシングに関する関連研究

これまでにも，消費電力の大きい GPS 測位に関して省電力化を試みる研究は数多くされてきた．中川ら [6] はコンテクストアウェア・サービスのための間欠的切替測位による省電力入圏検出方式を提案している．リソース消費と測位精度のトレードオフを考慮して，GPS 測位や基地局測位などの複数の測位手段から最適な手段を選択し，間欠的測位方式で測位するアプローチを採用することにより，低消費電力の入圏検出を実現している．しかし，この手法では測位していない期間の位置情報に関しては完全に欠落することとなってしまい，ライフログセンシングの観点では取得できるライフログが減ってしまうという問題がある．勝田ら [7] は S/N 比などの GPS 測位状態を用いた屋内外判定手法を提案している．しかし，屋内屋外の判断に GPS 測位状態を用いるため，屋内においても GPS 測位を止めることができず，省電力制御への適用には適していないと考えられる．屋内での GPS 測位停止による省電力化については，我々もこれまでに取り組んできた [8]．屋内では，一般的に GPS 測位は動作せず，どのユーザにとっても測位は意味をなさず，消費電力の観点から測位そのものを停止すべきである．武田らは，GPS 測位状態により屋内進入を，加速度を用いた移動停留認識により屋内退出の可能性を見つけ出し，屋内外それぞれで GPS 測位を停止・復帰させる省電力測位手法を提案している．しかし，屋内で完結する移動を行った場合，屋内に滞在し続けるにもかかわらず GPS 測位再開が多発してしまい，十分に省電力化が望めないという問題がある．加藤ら [9] は低消費電力のセンサを用いて，スマートフォンの状態を判断し，GPS 測位が必要のない状況において GPS 測位を制御するという省電力 GPS 測位手法を提案している．武田らと同様に屋内における GPS 測位の必要性の低さをあげ，屋内判定により GPS 測位を停止させている．しかし，加藤らの手法も屋内状態間の移動において GPS 測位が復帰する可能性があり，加えて，状態認識に必要なセンサが多いため十分に省電力化が望めないと考えられる．ソフトウェア側からセンシングの省電力化に貢献する方法として，低消費電力のセンサを用いた行動認識により，消費電力の高いセンサの必要性の有無を発見し制御することで省電力化を試みる手法が考えられる．低消費電力の気圧センサを用いた行動認識をもって高消費電力の GPS 測位の必要な機会を減らすことにより，ライフログセンシング本来の目的を保ったまま省電力化を実現できると考えられる．次の節では，気圧を用いた行動認識に関する関連研究を取り上げる．

*1 Galaxy Nexus（Android 4.2.2）上で ALC（AndroidLogger-Client）で対象センサのみをオンにした状態で測定．サーバへのアップロード機能はオフのため，各センサのセンシングとロギングの使用電力が反映されている．

© 2015 Information Processing Society of Japan

2.3　気圧を用いた行動認識に関する関連研究

気圧と標高は，強い相関関係にある．一般的にはユーザの現在地における標高が変化するに従って，気圧も相関関係に従って変化する．近年では気圧センサがスマートフォンにも搭載されつつあり，気圧センサによって得られるデータを用いた行動認識の研究がされている [10], [11]．並木ら [1] は，気圧データを用いた標高推定において，大きな誤差の要因は海面気圧と海面気温の変動であると調査し，これらに対処した標高推定手法を提案している．誤差要因への対処として，ネット百葉箱と呼ばれる気象観測装置から得られるデータと気象台が提供するデータを用いて誤差を補正している．しかし，並木らの手法では標高推定を行う場所の付近にネット百葉箱がないと補正を十分に行うことができない．気象台のデータのみを用いた補正における推定標高誤差は平均約 3 m であり，これは一般的な建造物における 1 階層あたりの高さとほぼ同等のものである．建造物において重要な意味を持つ「階層」という粒度でユーザの状況を推定するためには，この手法の推定結果では誤差が大きく，違った階層であると誤判定されてしまう可能性が高いと考えられる．渡邉ら [2] や五百蔵 [3] らは，建造物滞在において階層移動という行動認識が重要であると考え，気圧を用いた階層移動認識を目的とした研究を行っている．これらの研究は階層移動および階層認識を行うために気圧センサのほかに加速度センサを用いており，消費電力の観点では，低消費電力の気圧センサの良さを必ずしも活かしきれていない．また，これらの研究における評価は，主に階層移動という行動認識のみで，階層推定の部分までは十分になされていない．

気圧を用いた行動認識に関しては，階層移動のみではなく，位置情報に関するものも存在する．森下ら [4] は野生動物の追跡を目的に，野生動物に取り付けた GPS 受信機・気圧センサ，追跡範囲内に設置した固定気圧観測基地局を用いて，野生動物の移動経路を推定する研究を行っている．観測気圧を用いた標高推定結果と土地の数値標高モデルとの比較により，広い間隔での GPS 測位点間の移動経路を推定し，省電力化と移動経路の推定を両立させた移動経路推定手法である．提案手法では移動経路の推定には移動の開始点と終了点の位置情報と気圧が必要であり，移動が完了した後に前回の GPS 測位点からの移動経路推定が行われる．この手法では移動範囲内において固定基地局を設置する必要があるため，多くの人々が行動認識を実施するライフログセンシングにおいては固定基地局の設置エリアも広がり，コストも増加してしまう．この問題に対して，岩波ら [5] は固定局を用いないスマートフォン単体で行う移動経路推定手法を提案している．始点で観測された気圧を基準とし，始点から終点までにおける基準からの気圧推移の観測を行うことで，実際に移動した経路の推測を試みている．しかし，高度変化に富んだ経路については経路判定を行えるものの，現状では特徴量の類似する移動経路の推定精度に課題をかかえており，同手法をリアルタイムの位置情報取得に適用する場合にも，気圧データの収集間隔と経路推定実行のタイミングと推定精度の調整には困難がともなうと予想される．

2.4　要件

本研究では，低消費電力の気圧センサを用いた行動認識を目的とする．屋内状態における気圧を用いた行動認識において，重要な意味を持つ階層を推定できることが要件となる．階層推定の要件を満たすことで，ユーザが現在滞在する階層を認識することができ，より高度な屋内行動認識の実現につながると考えられる．一方で，屋外状態における気圧を用いた行動認識においては，リアルタイムで位置情報を推定できることが要件となる．本要件を満たすことで，気圧センサのみを用いた位置推定が可能となり，低消費電力な位置情報取得の 1 つとして利用されることが期待される．

3.　気圧センシングを用いた行動認識手法

3.1　気圧変化量を用いた階層移動抽出・階層推定手法

気圧は標高と相関関係を持つため，屋内状態におけるユーザの階層移動にともなって気圧も急激に変化する．提案手法では，時間あたりの気圧変化量を観測し，変化量が一定以上を超えた時点で階層移動として検知・抽出し，階層移動期間における気圧変化量を用いて階層推定を実施する．階層移動検知から階層推定までの流れを**図 1** に示す．また，各項目に関して以下に詳細を記述する．

(1) 気圧データのスムージング

センシングモバイルに搭載された気圧センサはノイズが大きいため，気圧データを取得するたびにスムージング処理を施す．この際，階層移動による気圧変化を正確に

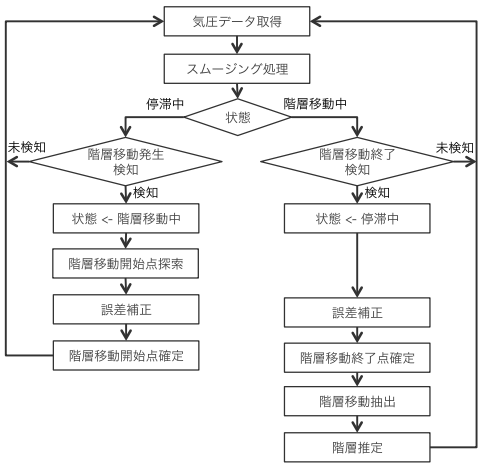


図 1　気圧変化量を用いた階層移動抽出の流れ

Fig. 1　Flowchart of extraction of user movement between floors using atmospheric pressure variations.

© 2015 Information Processing Society of Japan

検知するためにノイズを強く除去した**検知用データ**と，正確な階層移動の期間を抽出するために波形の遅延や鈍化を抑えて平滑化した**抽出用データ**を用意する．なお，検知用データには過去のデータのみを用いた指数移動平均（EMA）を，抽出用データには各時点での過去と将来のデータを同サンプル数用いた単純移動平均（SMA）を適用する．

(2) 階層移動発生の検知

外乱となる気圧変動の影響を排除し，階層移動時の気圧変化量のみを用いて階層推定を行うためには，気圧データの中から階層移動に該当する部分を特定する必要がある．**図 2** (a) に示すように，検知用データでの気圧変化量が一定の値を連続して一定時間超えた時点で階層移動が発生したとして検知する．検知の条件に時間あたりの気圧変化量と連続観測時間を設けることにより，天候変動やノイズによる気圧変化での誤検知を排除する．具体的には，気圧データの観測の結果，0.018 hPa/s 以上の気圧変化が連続で 3 秒観測された際に階層移動の発生を検知する．

(3) 階層移動の抽出

階層移動発生を検知した時点は，実際の階層移動による気圧変化が発生してしばらく経過した時点である．提案手法では図 2 (b) に示すように，抽出用データの時間あたりの気圧変化量を観測し，階層移動検知時点前後の正負の変わり目を探索し，それぞれを階層移動の開始点・終了点とする．このようにして発見された階層移動開始点から終了点までの間を階層移動として抽出する．

(4) 抽出階層移動の補正

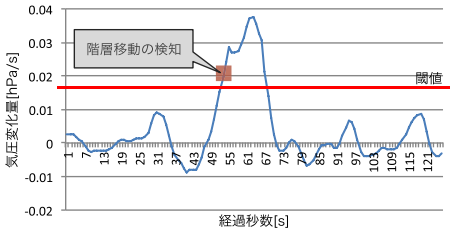
階層移動時の気圧データを調査した結果，階層移動時の気圧変化量を抽出する際に発生する誤差の要因が 2 点判明した．以下で，誤差の要因とそれに対する補正手法を記述する．

- **階層移動中における天候変化による気圧変化**

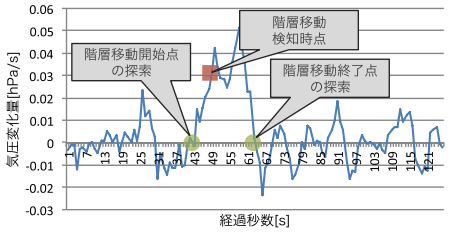
  1 点目の要因は，天候変動による気圧変化である．海面気圧や海面温度などの変化が激しい場合，**図 3** (a) に示すように，標高に変化がなくても気圧変化が発生する．この状況下では，階層移動による純粋な気圧変化量を抽出できない．これに対して，図 3 (b) に示すように，階層移動直前における一定期間の気圧データを用いて回帰直線を求めることで，天候変動による気圧変化の傾きを算出できる．回帰直線の算出に用いる期間として，最も補正結果が良かった 60 秒を採用し，各時点での補正前の気圧に対して回帰係数を時間積分した値を加減算することで傾きを補正して天候変動の影響を除去する．

- **階層移動前後と重なるノイズの発生**

  2 点目の要因は，観測される気圧データにおけるノイズの発生である．**図 4** (a) に示すように，階層移動の前後にノイズが発生することで，階層移動前後の階層における尤もらしい気圧値とは異なる時点で，階層移動の開始点・終了点を抽出してしまう．図 4 (b) に示すように，階層移動前後一定期間のデータの平均値により各階層の尤もらしい気圧を算出することでノイズの影響を除去する．平均値の算出に用いる期間として，最も補正結果が良好であった 10 秒を定数値として採用している．なお，平均値の算出期間中に階層移動が行われると補正処理を適用できないという制約がある．また，リアルタイム性を重視して平均値の算出期間を短く設定した場合もノイズの影響の除去は難しい．このた



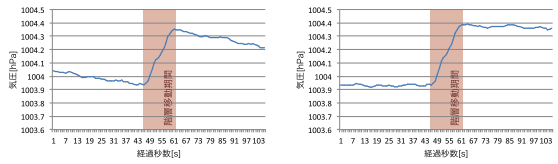
(a) 階層移動発生の検知 (検知用データ使用)



(b) 階層移動開始・終了点の探索 (抽出用データ使用)

図 2　階層移動の抽出

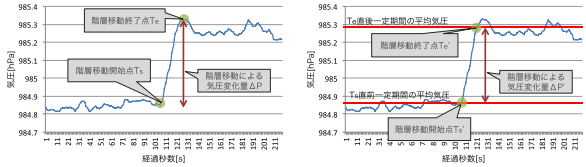
Fig. 2　Extraction of user movement between floors.



(a) オリジナルデータ　(b) 補正後データ

図 3　天候変動による気圧変化に対する補正の適用

Fig. 3　Correction for atmospheric pressure change due to changes in climate.



(a) オリジナルデータ　(b) 補正後データ

図 4　ノイズに対する補正の適用

Fig. 4　Correction of noise.

© 2015 Information Processing Society of Japan

め，実用上はたとえば利用者の行動認識結果のフィードバックに基づく適応的なパラメータ設定手法などの検討の余地がある．

(5)抽出階層移動の確定

検知・抽出・補正の過程を経て，階層移動の抽出を確定する．抽出された階層移動は，階層移動開始点・終了点の時刻，階層移動による気圧変化量の情報を有する．

(6)滞在階層推定

抽出された階層移動による気圧変化量と滞在建造物における各階層間の尤もらしい気圧変化量（**基準値**）とを比較することにより，階層移動によりどれだけの階層を移動したかを判断する．なお，基準値の算出については以下で別項目を設けて説明する．**図 5** に具体的な階層推定アルゴリズムのフローチャートを示した．推定された移動階層を，建造物の進入時から現在まで累積していくことで，現在階層を進入時点からの相対値で表すことができる．

基準値の算出

階層推定には，階層移動による気圧変化量に加え，滞在建造物における各階層間の気圧差，すなわち正解となる基準値が必要である．建造物によっては階層ごとで階層間の標高差が違うこともあるため，各階層に合わせて基準値を算出する手法を採用する．**図 6** に示したように，各階層における気圧が分かれば，基準値となる各階層間の気圧差を算出できる．各階層 F における気圧 P_F は，文献 [3] で報告されている気圧と標高と気温の関係式を援用し，海面気圧 P_0・各階層における気温 T_F・各階層における標高 Z_F を用いて算出可能である（式 (1)）．

$$P_F = P_0\left(1 - \frac{0.0065 Z_F}{T_F + 0.0065 Z_F + 273.15}\right)^{5.257} \tag{1}$$

海面気圧・現地気温はそのときどきによって変化するため，実際の環境に近いパラメータを用いることでより正しい基準値を算出できる．利用するパラメータのデータソースとしては，標準大気モデルやセンシングモバイルによる観測値，気象台による提供データなどが考えられる．**表 2** に各データソースにおいて取得できるパラメータを示す．必要に応じて各種関係式（式 (2)，式 (3)，式 (4)）を用いることで，取得データから海面気圧 P_0・各階層における気温 T_F を算出することができる．なお，Z は現地標高 [m]，L は気温減率であり，標高 11 km 以下の環境では $-0.0065\,\mathrm{K/m}$ という値をとる．

$$P_0 = \frac{P_F}{\left(1 - \frac{0.0065 Z_F}{T_F + 0.0065 Z_F + 273.15}\right)^{5.257}} \tag{2}$$

$$T_0 = T - LZ \tag{3}$$

$$T_F = T_0 + LZ_F \tag{4}$$

なお，センシングモバイルでは一般的に温度を計る機能を備えておらず，気温は標準大気に準拠するものとする．算出した各階層間の気圧の差分 $(P_{F+1} - P_F)$ をとることにより，基準値となる各階層間の気圧差 ΔP_F を計算する．屋内での階層推定に利用する基準値算出のためのパラメータのデータソースとして，いずれが適しているのかを各種評価を通じて明らかにする．

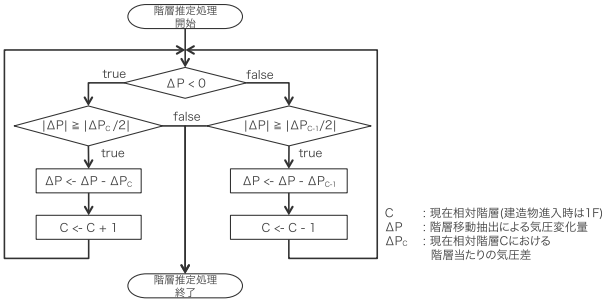


図 5　階層推定アルゴリズム

Fig. 5　Flowchart of floor-level estimation algorithm.

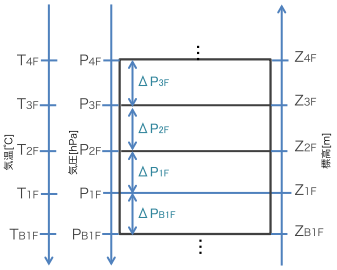


図 6　基準値の算出イメージ

Fig. 6　Schematic of reference value calculation.

3.2　軌道上移動における気圧推移比較を用いた現在地推定

1 日の屋外状態における行動の中には，通勤などの規則的な移動が存在していることがある．このような規則的な移動において，電車などの，歩行などに見られる後戻りを考慮する必要がなく，かつ，毎回同様の速度で進行する移動を本研究では**軌道上移動**と呼ぶ．移動にともなう標高の移り変わりが気圧に影響し，また，同一軌道上における移動では観測される気圧の推移は毎回非常に近い波形を示すことが分かっている．軌道上移動に関して，事前に取得しておいた気圧データの推移（**事前気圧データ**）を位置情報に対応づけておくことによって，リアルタイムで観測される気圧の推移（**観測気圧データ**）と事前に取得しておいた気圧値を比較することで，軌道上移動の気圧推移の中で

表 2　各データソースにおける取得パラメータ

Table 2　Parameters obtained from each data source.

	取得できるパラメータ
標準大気	海面気圧 P_0:1013.25 [hPa]， 海面気温 T_0:288.15 [K]
センシングモバイル観測	現地気圧 P
気象台	海面気圧 P_0， 現地気温 T（毎時 0 分に更新）

© 2015 Information Processing Society of Japan

どの部分に現在位置しているのかの判定が可能である．また，事前に収集した気圧データに対して，その時点で取得された位置情報を紐付けることにより，気圧比較による現在地推定が可能であると考えられる．**図 7** に軌道上移動における気圧値推移認識を用いた現在地推定の流れを示し，以下で各項目について詳しく述べる．

事前データの生成

(1) 気圧データの事前処理

気圧推移比較による位置推定を行うためには，事前にライフログセンシングで収集しておいたデータを用いて，比較のための事前データを生成する必要がある．事前に収集した軌道上移動の気圧データに対して，スムージング処理を施した後，一定間隔でサンプリングする．スムージング処理とサンプリングによって，細かなノイズの影響を低減させる．具体的には指数移動平均を用いて平滑化処理を行った後，5 秒間隔でサンプリングする．

(2) トンネル区間の切り出し

軌道上移動の代表例である電車での移動においては，移動中にトンネルを通過する場合が想定される．**図 8** の 9 時 20 分・9 時 25 分付近における観測された気圧データのように，トンネル進入時の気圧は急激な変化を示す．そこで，提案手法ではトンネル進入時の気圧変化が急であるという特徴に着目し，トンネルを抽出することにより気圧データの推移をトンネルを区切りとした区間に分ける（図 8）．これにより，事前データと観測データの気圧推移の比較を行う際に，トンネルを 1 つの指標として利用できる．気圧データの観測の結果から，0.1 hPa/s 以上の気圧変化が観測されてから，0.1 hPa/s 以下の気圧変化が連続で 10 秒観測されるまでの区間をトンネルとして抽出するように設定している．なお，現状ではトンネル進入時の気圧変化の特徴が顕著であるため，階層推定で行ったような補正処理をトンネル区間の切り出し時には適用していない．また，電車は一定の方向に一定の速度で軌道上移動を行うという前提をおいているため，ダイヤの乱れなどで電車の速度が変化して気圧変化が通常より緩やかになるような場合については考慮しきれていない．

(3) 気圧データと位置情報との紐付け

上記の行程により生成された気圧データの推移（図 8）に対して，同時刻に取得された位置情報（**図 9**）を紐付けていく．観測気圧データとの比較の際に，特定の事前気圧データと一致した際に，その気圧データに紐付いた位置情報を比較時点における推定現在位置として利用する．なお，事前データを基にして現在地推測を行うために，事前データとして利用するデータは GPS 測位が良好なサンプルを選ぶ方が望ましい．

観測データと事前データの比較による現在地推測

(1) 気圧データの事前処理

現在地推定の際には気圧データを観測するたびに，事前データ生成時と同様にスムージング処理と一定間隔のサンプリングを行う．

(2) トンネル区間の切り出し

観測気圧データに対しても事前データ生成時と同様にしてトンネルの認識を行う．トンネルにおける気圧変化は急であり，トンネル認識中には気圧推移の比較を実施し

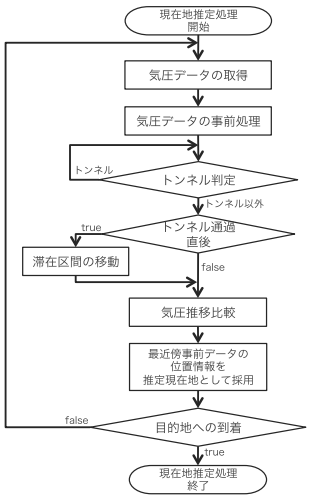


図 7　気圧推移比較を用いた現在地推定の流れ

Fig. 7　Flowchart of the current location estimation by comparing atmospheric pressure variations.

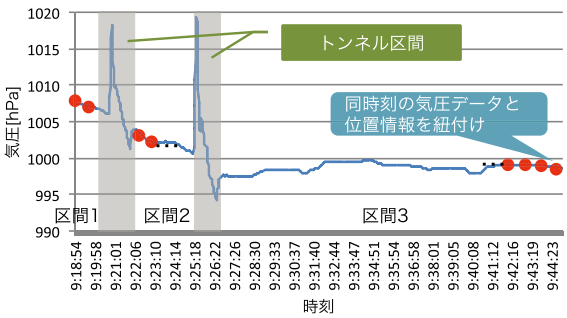


図 8　気圧推移（事前データ）

Fig. 8　Transition of atmospheric pressure (prior data).

図 9　位置情報（事前データ）

Fig. 9　Location information (prior data).

© 2015 Information Processing Society of Japan

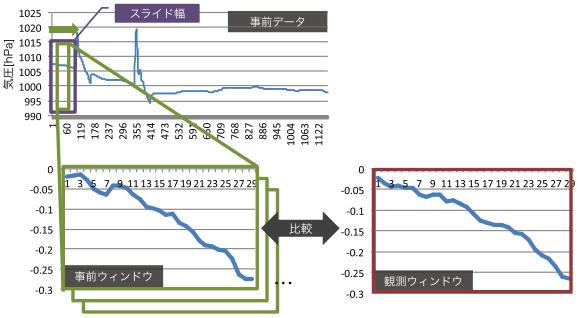


図 10　事前データと観測ウィンドウの比較イメージ
Fig. 10　Comparison of observation window and prior data.

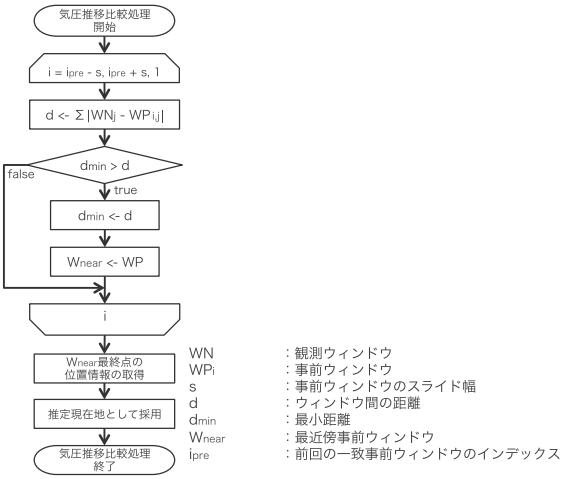


図 11　事前データと観測ウィンドウの比較アルゴリズム
Fig. 11　Flowchart of the algorithm comparing observation window and prior data.

ない．トンネル通過を認識した時点で，トンネル通過前のデータに関しては以降の比較対象から除外し，トンネル通過後の滞在区間のみのデータを用いた現在地推移を新たに開始する．これはトンネルの認識は必ず成功し，かつトンネル通過後にはトンネル通過前に戻ることは軌道上移動の特性上ありえないためである．

(3) 事前データと観測データとの比較による位置推定

観測気圧データと事前気圧データを比較し，現時点の気圧推移は事前データにおけるどの時点の気圧推移にあたるのかを判定する．**図 10** に示すように，一定幅のウィンドウを設け，観測データのウィンドウ（**観測ウィンドウ**）と事前データのウィンドウ（**事前ウィンドウ**）を比較することにより，ウィンドウ間の類似度を算出する．**図 11** に示すように，同一インデックスの気圧値どうしの減算の絶対値の総和（SAD）によってウィンドウ間の類似度を求める．事前データのウィンドウをずらし，観測ウィンドウと各事前ウィンドウ間で類似度を求め，最も類似度の高い事前ウィンドウを選出する．選出された事前気圧データに紐づいた位置情報を現在の推定位置として採用することで，気圧推移を用いた現在地推定を実現する．なお，ウィンドウサイズとしては実験を通じて

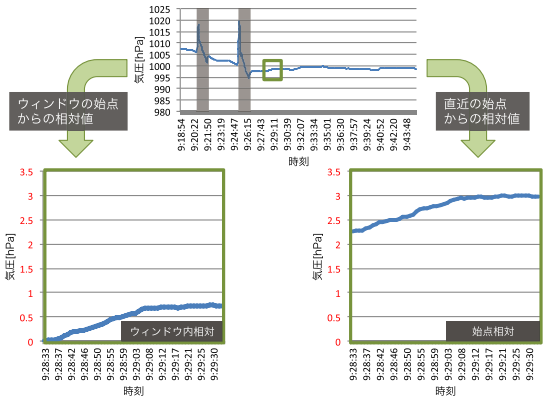


図 12　ウィンドウ内相対形式と始点相対形式
Fig. 12　Intra-window-relative format and source-relative format.

良好な結果を得られた 30 秒を採用している．

比較対象気圧値の形式

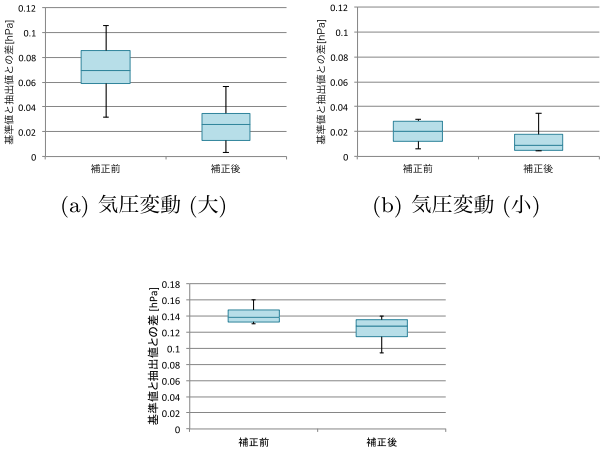
比較する気圧値に関して，本研究では以下の 2 つの形式を採用する．1 つは過去の気圧推移を考慮せずウィンドウ内の始点を基準にしたもの（**ウィンドウ内相対**），もう 1 つは特定の時点での気圧値を基準にし現時点までの気圧推移の累積を考慮したもの（**始点相対**）である．**図 12** にそれぞれのイメージを示す．ウィンドウ内相対は過去の気圧推移に依存せず，天候変動による気圧変化の影響が少なく済むことが期待される．一方で，始点相対は直近の特定の時点からの相対値を考慮することで，ウィンドウ内相対では同様に見える波形においても，違いを判断できる場面があると期待される．なお，上述した「特定の時点」とは，現在地推定の開始点やトンネルの終了点を指し，各時点通過時にその時点を基準として据える．図 12 の例では後者のトンネルの通過時点からの相対値となっている．現時点では，評価実験を通じて最終的にどちらか一方の形式を採用するというよりも，今後の研究を通じてどのような条件下でどちらの形式が適しているかを見極める方針である．

4.　評価

4.1　評価環境

本評価実験にあたって使用した Android 端末の機種名は Samsung GALAXY S4，OS は Android OS 4.2.2，バッテリ容量は 2100 mAh である．また，GALAXY S4 に搭載される気圧センサの型番は Bosch Sensortec 社製の BMP180 である．さらに，Android 端末上で搭載センサのデータを持続的に収集し続けるライフログセンシングフレームワーク（KUBIWA システム）[12] を使用し，KUBIWA システムにおいてロガー機能を担う AndroidLoggerClient をベースに各種提案手法の実装を行い，評価実験に利用した．気圧センサからのデータ取得頻度として，Android API で定義される定数 SENSOR_DELAY_FASTEST を設定してい

© 2015 Information Processing Society of Japan



(a) 気圧変動 (大)　(b) 気圧変動 (小)

(c) 階層当たり標高差 (3.1 m)

図 13　補正の効果
Fig. 13　The effect of correction.

る[*2].

4.2　滞在階層推定に関する評価

4.2.1　補正効果の検証

3.1 節で述べた補正手法（図 3）に関して評価を行う．事前に収集したデータに対して，補正の有無それぞれで階層移動の抽出を行い，基準値との差を比較することで効果を確認する．データは研究棟（階層あたりの標高差 4 m）において，階段を用いて 1 階層分の階層移動を行った際に収集した．試行環境として，天候による気圧変動が顕著な場合とそうでない場合に大別し，環境ごとで各 4 回の階層移動を行った．また，賃貸マンション（階層あたりの標高差 3.1 m）においても階段を用いた 1 階層分の階層移動を 4 回繰り返しデータを収集した．**図 13** に補正有無における結果を示す．なお，箱ひげ図のひげの両端は最大値と最小値，箱の上下は第 3，第 1 四分位数，箱の中央は中央値を示している．

図 13 (a) は気圧変動が顕著である場合における試行で，補正前後で大きく基準値との差が減少していることが確認できた．図 13 (b) は気圧変動が小さい場合における試行で，補正の余地が少ないため補正前後での変化は小さいことが分かる．また，今回の実験では補正前と比べて最大値が大きくなったが，元より差が小さく階層推定への支障はきわめて小さい．図 13 (c) は階層あたり標高差 3.1 m の環境で気圧変動に顕著な特徴が見られない場合での試行結果だが，補正余地が少ないため補正前後での変化は小さいものの，補正の効果を確認できる．なお，提案手法における階層推定のためには，図 5 の階層推定アルゴリズムに示したとおり，階層あたり気圧差の 2 分の 1 を閾値としているため，実験環境において階層あたりの標高差 4 m の場合には気圧差が約 0.48 hPa であるため，その半分である約 0.24 hPa を許容誤差とし，階層あたりの標高差 3 m の場合には気圧差が約 0.36 hPa であるため，許容誤差を約 0.18 hPa としている．

*2　ある 150 分間のデータ収集に際して平均データ取得間隔は約 201 ミリ秒（標準偏差 7.55）であった．取得したデータを 1 秒間隔でリサンプリングした後に各種処理を適用している．

表 3　建造物の環境
Table 3　Building environment.

建造物	各階層の高さ	地上の標高
研究棟 (CC)	4.0 m (1F–2F) 4.3 m (3F–7F)	154.2 m
大阪富国生命ビル (FS)	5.9 m (1F) 4.9 m (2F–6F) 4.1 m (7F–14F) 4.2 m (15F–19F)	0.4 m
賃貸マンション (RA)	3.1 m (1F) 2.9 m (2F–6F)	127.2 m

表 4　各試行の詳細
Table 4　Details of each trial.

試行の種類	建造物	移動階層	試行回数
時間帯別	CC	+1F	各時間帯 8 回ずつ
移動階層別	CC	+1F–+6F	各移動階層 6 回ずつ
	RA	+1F–+5F	各移動階層 6 回ずつ
移動階層：大	FS	+18F	3 回

4.2.2　階層移動抽出における階層推定のための誤差の評価

3.1 節で述べた階層推定手法に関して，抽出された階層移動における気圧変化量（**抽出値**）と，正解の移動階層における基準値との差を比較することで階層移動抽出・階層推定の精度を確認する．また，各データソースを用いた基準値算出を比較し，基準値算出に用いるデータソースに関しても評価を行う．以下で，大きく 3 つのパターンに分けてそれぞれ階層移動を行い，抽出された気圧変化量と基準値との差を示す．評価実験を実施した建造物に関しては**表 3** に，各試行パターンの詳細に関しては**表 4** に示す．なお，移動手段として移動階層+1F の場合には階段を，移動階層が+2F 以上の場合にはエレベータを使用した．推定移動階層数は総気圧変化量であるため移動手段に影響されないが，エレベータによる移動の方が気圧の時間変化率が大きいため階層移動を検知しやすく，階段での極端に低速での移動では階層移動が分断されるという制約がある．

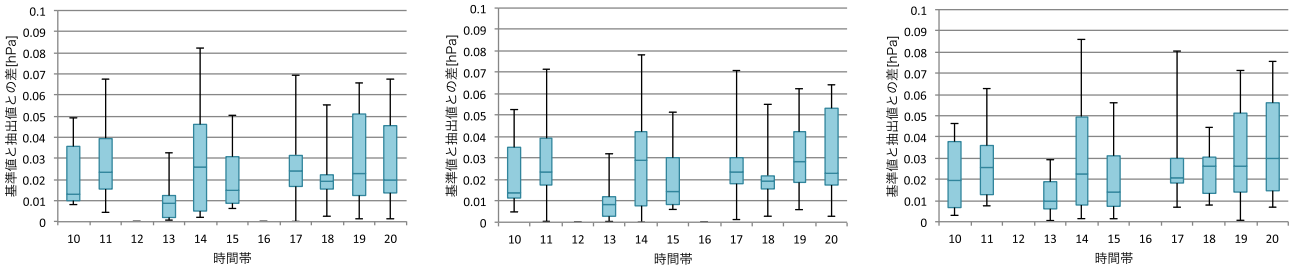
- **時間帯別の階層推定**

  時間帯によらず階層推定が可能かどうかを確認するため試行を行った結果を，**図 14** に示す．

- **移動階層別の階層推定**

  移動階層の度合いを変化させた階層移動における階層推定の可否と精度への影響の評価を行う．**図 15** に建造物 CC における各移動階層・各基準値での結果を，**図 16** に建造物 RA における各移動階層・各基準値での結果を示す．

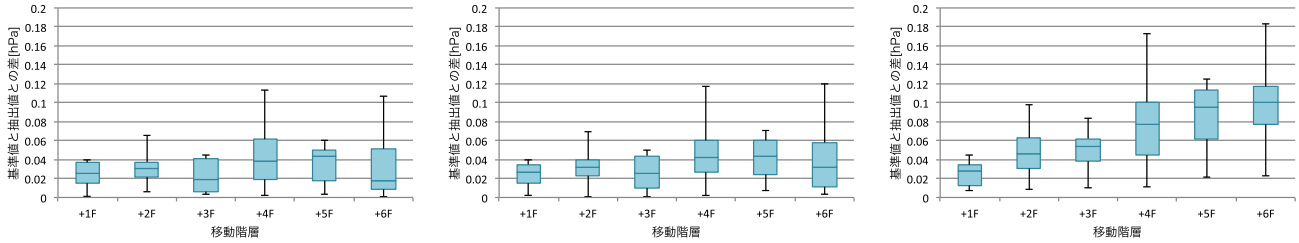
© 2015 Information Processing Society of Japan



(a) 基準値: 標準大気　(b) 基準値: センシングモバイル観測値　(c) 基準値: 気象台

図 14　抽出値と基準値との差（時間帯別）

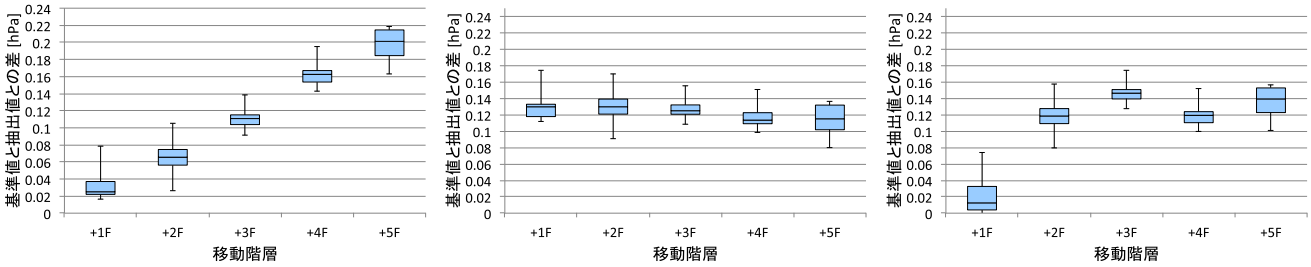
Fig. 14　The difference between extracted values and reference values (by time period).



(a) 基準値：標準大気　(b) 基準値：センシングモバイル観測値　(c) 基準値：気象台

図 15　抽出値と基準値との差（移動階層別，建造物 CC）

Fig. 15　The difference between extracted values and reference values (by total number of floors moved).



(a) 基準値：標準大気　(b) 基準値：センシングモバイル観測値　(c) 基準値：気象台

図 16　抽出値と基準値との差（移動階層別，建造物 RA）

Fig. 16　The difference between extracted values and reference values (by total number of floors moved).

- **移動階層の度合いが大きい場合における階層推定**

移動階層が大きい階層移動における階層推定の可否と精度への影響の評価を行う．1 階層単位の移動ではなく，1 度に複数階層移動するといった抽出値と基準値による差の累積が大きくなるような階層移動の試行により，各基準値による階層移動の精度の確認が目的である．具体的には表 4 に示したとおり，エレベータを使用して 1 度に 18 階層を移動する試行を 3 回繰り返した．**図 17** に各基準値算出方法における結果を示す．

各試行の結果より，すべての場合（最大移動階層+18F）において，抽出値と基準値との差が実験環境での許容誤差内に収まっており，正常に階層推定ができていることが分かる．移動階層が大きくなった際には，特に気象台準拠による基準値の場合には差が大きくなることを確認した．気

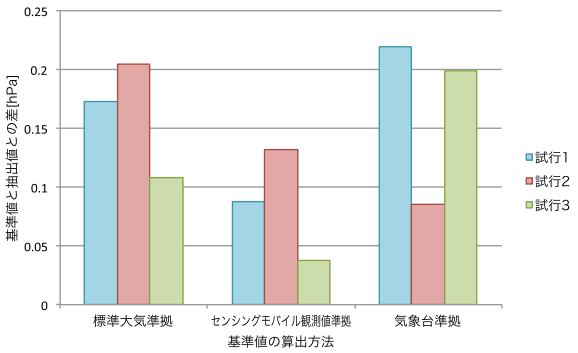


図 17　抽出値と基準値との差（移動階層：大）

Fig. 17　The difference between extracted values and reference values (large number of floors moved).

© 2015 Information Processing Society of Japan

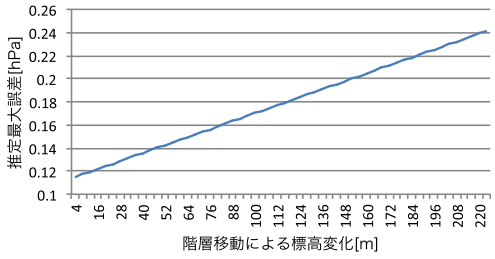


図 18　推定最大誤差
Fig. 18　Estimated maximum error.

象台による観測気温が屋内環境での気温と乖離しており，移動階層の度合いが大きくなるごとに本来の気圧変化量との誤差が累積されたためだと考えられる．誤差が顕著に現れる移動階層の度合いの大きな階層推定において，センシングモバイル観測値準拠による基準値を利用した結果が最も良い結果となった．これは，屋内環境における気温が標準大気モデルに近いこと，端末で観測された気圧によって実環境に近い海面気圧を適用できているためだと思われる．これらの結果より，屋内における階層推定にはセンシングモバイル観測値準拠の基準値算出が適していると考えられる．

図 18 に，センシングモバイル観測値準拠による基準値を利用した場合における，階層移動時の標高変化増加にともなう誤差増加の推測を示す．推定最大誤差の直線式は，試行結果から観測された移動階層増加にともなう誤差の中央値の増加を傾きに，観測された誤差最大値と中央値までの差を切片にした式によって算出している．図 18 より，今回の実験結果に基づくと，1 度の階層移動にあたって，階層あたり 3 m の建造物（許容誤差：約 0.18 hPa）であれば約 37 階（約 111 m）まで，階層あたり 4 m の建造物（許容誤差：約 0.24 hPa）であれば約 53 階（約 212 m）までの階層推定が可能である見込みが得られた．建造物の高さが 200 m を超す建造物は日本では数が限られており，本手法を用いることで大半の建造物において階層推定ができると考えられる．階層推定の性能は気圧センサの精度が大きく影響しているため，センサの性能が良くなれば，本手法を用いてさらに精度の高い階層推定が可能になると期待される．

4.2.3　階層移動認識の粒度の検証

提案手法では，時間あたりの気圧変化量を観測することで階層移動を認識し，階層移動の端点の抽出には時間あたりの気圧変化量の正負の変わり目を利用している．利用する気圧データはスムージング処理により波形が平滑化されているため，細粒度で見ると複数の階層移動であっても，1 つの階層移動として認識される場合がある．ここでは，階段を用いた階層移動を行い，踊り場での滞在時間を変えることにより，提案手法において個々の階層移動を認識するために必要な時間の検証を行う．**表 5** に示した検証結果より，踊り場での滞在が 9 秒以上になれば，分離した階層移動として認識できることが分かった．なお，滞在が 9 秒以下の場合には，複数の階層移動が 1 つの階層移動として認識される可能性が高くなる．移動階数については気圧変化によって認識可能であるため影響はないが，建造物の構造認識において差異が出てくると考えられる．たとえば，踊り場の存在を認識することで，建造物内での通過経路を識別するための情報として貢献できる．

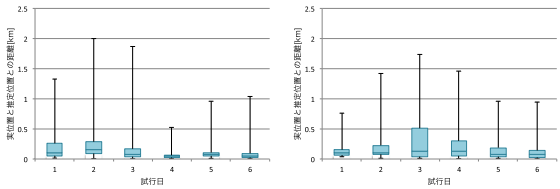
表 5　踊り場での滞在時間と個々の階層移動の認識率
Table 5　Staying time at a stair landing and the recognition rate of each movement between floors.

踊り場での滞在時間	9 秒	8 秒	7 秒	6 秒	5 秒	4 秒
階層移動の認識率	100%	90%	80%	70%	40%	0%

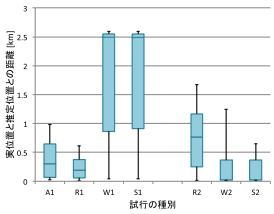
4.3　軌道上移動における現在地推定に関する評価

3.2 節で述べた現在地推定手法の精度について評価する．本評価では，電車（新快速）を用いた京都駅から南草津駅までの軌道上移動時のデータを 1 週間分用いた．なお，京都駅と南草津駅間の軌道の全長は 19.7 km，移動所要時間は 17 分，京都駅の標高は 30.0 m，南草津駅の標高は 95.8 m である．1 日分を事前データに，残りを観測データとして，合計 6 回の軌道上移動における気圧推移比較による現在地推定を実施した．なお，本評価では実環境であらかじめ収集したセンサデータをシミュレーションプログラムに時系列順に入力して提案手法の動作を確認した．事前データは GPS の位置情報で始点・終点を区切ったうえで手動で設定している．使用する事前データとしては安定した天候で GPS の測位精度が良好な状態で収集したデータが望ましい．実際の使用方法としては，たとえば現在地推定開始処理時に，まずは GPS の緯度・経度情報をもとに対象となる軌道の事前データを自動選択し，その後 GPS をオフにして気圧データの取得を開始するという運用を想定している．推定された位置情報と同時刻に取得された GPS 測位による位置情報との距離を比較し，提案手法の推定位置の精度を評価する．**図 19** に，各試行における推定位置と GPS 測位による位置情報との差を示す．図 19 (a)，図 19 (b) より各試行において全体の 75%の推定結果は誤差 0.5 km 未満に収まっており，位置情報取得の一手法として気圧のみを用いた位置推定が有用であることを確認した．また，誤差の原因として，本来同一である区間とは別の区間における事前データと観測データが類似していると誤判定されたため，推定位置が本来の位置と大きく離れてしまったことが確認された．誤判定の原因として，気圧変化が乏しく波形に特徴が見られなかった区間，試行時の環境による気圧変化量の違いによる原因が多く見られた．図 19 (c) に，時刻情報のみを用いた現在地推定および気圧データを用いた現在地推定との比較結果を示す．試行の種別における A1

© 2015 Information Processing Society of Japan



(a) 比較手法：ウィンドウ内相対　(b) 比較手法：始点相対



(c) 時刻比較と気圧推移比較

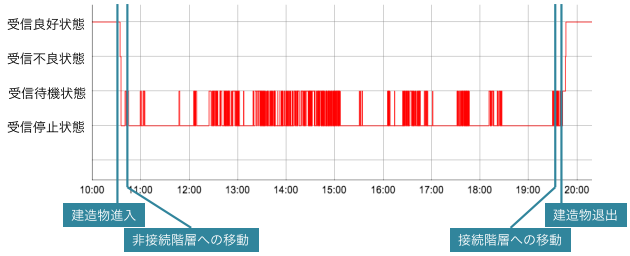
図 19　推定位置と実位置との距離
Fig. 19　Distance between the estimated and actual position.

は，時刻情報のみを用いて事前データおよびある試行日 1 の観測データとを比較することで現在地推定を行った結果を示す．また，R1・R2 は，ある起点からの相対時刻情報のみを用いて共通の事前データおよびそれぞれ試行日 1，2 の観測データとを比較した現在地推定結果を，W1・W2 はウィンドウ内相対形式による気圧推移の比較による現在地推定結果を，S1・S2 は始点相対形式による気圧推移の比較による現在地推定結果を表している．なお，試行日 1 の観測データは，事前データとほぼ同一の時間帯に新快速電車乗車時に収集されたもの，試行日 2 の観測データは，昼間の時間帯に普通電車乗車時に収集されたものである．本比較結果から，通勤のように毎日ほぼ同じ時刻に決まった路線の電車で軌道上移動するような場合には，日本のように電車が正確なダイヤに基づいて運行されているという前提では，時刻情報のみを用いた比較によって小さな誤差で現在地推定が可能であることを確認した．一方，時間帯や列車種別その他の条件の違いによっては，気圧推移の比較による手法の方が小さな誤差で現在地推定を行えることを確認した．

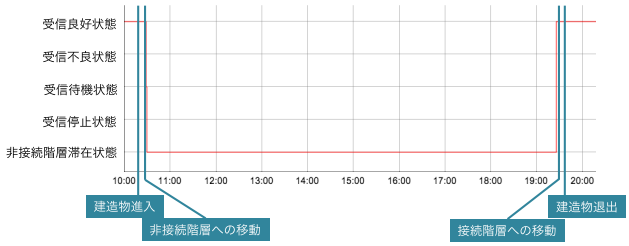
4.4　省電力化への貢献度評価

4.4.1　プロトタイプの実運用による消費電力比較

提案手法および武田ら [8] の従来手法をそれぞれ適用したプロトタイプを用いて，研究棟に進入してから退出するまでの 10 時 30 分から 19 時 30 分までの約 9 時間のデータを収集し，バッテリ消費の比較を行った．**図 20** に従来手法と提案手法それぞれを用いたライフログセンシング時の状態遷移の一例を示す．従来手法では GPS 測位制御省電力機構によって測位状況に応じてセンシングモバイルが受信良好状態，受信不良状態，受信待機状態，受信停止状態



(a) 状態遷移の様子 (従来手法)



(b) 状態遷移の様子 (提案手法)

図 20　センシングモバイルの状態遷移の様子
Fig. 20　State transition of a sensing mobile.

表 6　各状態でのセンサの状況
Table 6　Status of sensors at each state.

	GPS	加速度	気圧センサ
受信良好状態	ON（測位間隔：狭）	OFF	ON/OFF
受信不良状態	ON（測位間隔：広）	ON	ON/OFF
受信待機状態	ON（測位間隔：広）	ON	ON/OFF
受信停止状態	OFF	ON	ON/OFF
非接続階層滞在状態	OFF	OFF	ON

間を遷移する．これに対して，提案手法では階層移動検知および滞在階層推定手法の適用によって非接続階層滞在状態への遷移を追加している．**表 6** に各状態におけるセンサの ON/OFF の状況を示す．各状態間の遷移はライフログセンシングフレームワークが提供するイベント検知機構からの通知をトリガとして実行される．なお，イベント通知は，GPS の受信精度の値による受信良好/不良の判定，加速度センサによる端末の放置/非放置の判定，気圧センサによる接続階層/非接続階層滞在判定などの結果に基づいて行われる．また，センサの ON/OFF の切替えについてもライフログセンシングフレームワークの提供するセンシング制御機構 API を通じて実行する．従来手法では，屋内進入後に屋外に退出するための移動でない場合でも移動のたびに GPS 測位復帰のために状態遷移している様子が分かる．これに対し，提案手法では屋内進入後に非接続階層に移動していることを認識できているため，再び接続階層に戻ったことを認識するまで状態遷移による無駄なセンサの稼働がなく，効率的に省電力化できていることが分かる．図 20 に示した状況のように，屋内滞在時の移動頻度が高い場合には大きな省電力効果を期待できる．**図 21** に示すように，今回の場合において従来手法と比べ約 2.82[%/h]

© 2015 Information Processing Society of Japan

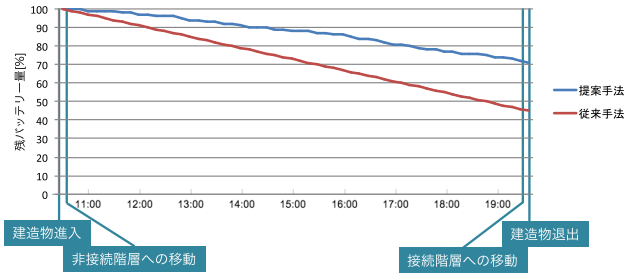


図 21　各手法を適用した際のバッテリ消費の比較

Fig. 21　Comparison of remaining battery capacity between two approaches.

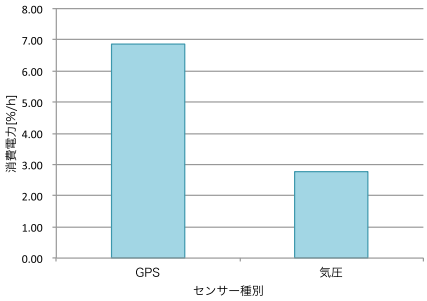


図 22　現在地取得手段別の電力消費の比較

Fig. 22　Comparison of power consumption for location sensors.

の省電力効果が見られ，これは約 4.7 割の消費電力の削減となっている．

4.5　気圧推移比較を用いた現在地推定による消費電力評価

図 22 に，GPS 測位と気圧センサを動作させた際のライフログセンシング時におけるセンシングモバイルの消費電力を示す．図 22 より，軌道上の移動において気圧推移比較を用いた現在地推測を行うことで，約 4 割の消費電力の低減化を実現しつつ現在地を推測できると考えられる．

5.　おわりに

本論文では，屋内状態における階層推定を用いた屋内滞在認識，および，屋外状態における軌道上移動の気圧推移比較を用いた現在地推定を提案した．屋内状態における急激な気圧変化は階層移動に起因することに着目し，気圧値の観測による階層推定手法を提案した．一方で，屋外状態における軌道上の移動に関しては，同一軌道上の移動において，毎回同様の気圧推移が観測されるということに着目し，気圧推移比較による現在地推定手法を提案した．評価の結果として，+18 階分の階層移動においても正常に階層推定が行えていることを確認した．一方で，軌道上の移動では，推定結果の 75%において，推定位置と GPS 測位による位置との距離が 0.5 km 以内で推定できていることを確認した．今後は，より悪環境での階層推定の性能調査を行う．また，軌道上移動の位置推定に関しては，より高度な比較アルゴリズムを採用することで精度向上を図りたい．同時に，様々な場面でも気圧を用いた位置推定を実施できるよう手法の改良に取り組みたい．

謝辞　本論文の執筆にあたり，匿名の査読者から数々の的確かつ有益な指摘・助言を頂戴した．ここに記して深謝する．本研究の一部は総務省の「戦略的情報通信研究開発推進制度（SCOPE）」（受付番号 132307011）の支援を受けて実施された．

参考文献

[1]　並木　渉，市野将嗣，笠原弘樹，吉井英樹，吉浦　裕：スマートフォンの気圧センサと気象情報を用いた高度推定手法，マルチメディア，分散，協調とモバイル（DICOMO 2013）シンポジウム，pp.1133–1139 (2013).

[2]　渡邉孝文，上坂大輔，村松茂樹，小林亜令，横山浩之：気圧センサを利用した昇降状態を含む移動状態推定，電子情報通信学会技術研究報告．MoMuC，モバイルマルチメディア通信，Vol.111, No.296, pp.19–23（オンライン），入手先 ⟨http://ci.nii.ac.jp/naid/110009465895/⟩ (2011).

[3]　五百蔵重典，鈴木孝幸，田中　博：スマートフォン内蔵センサーを用いた複数フロアーデッドレコニング，マルチメディア，分散，協調とモバイル（DICOMO 2013）シンポジウム，pp.723–735 (2013).

[4]　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，*Journal of the Institute of Positioning, Navigation and Timing of Japan*, Vol.4, No.1, pp.1–10（オンライン），DOI: 10.5266/ipntj.4.1 (2013).

[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，電子情報通信学会技術研究報告：信学技報，Vol.112, No.494, pp.299–305（オンライン），入手先 ⟨http://ci.nii.ac.jp/naid/40019633141/⟩ (2013).

[6]　中川智尋，土井千章，太田　賢，稲村　浩：コンテクストアウェア・サービスのための間欠的切替測位による省電力入圏検出方式，マルチメディア，分散，協調とモバイル（DICOMO 2012）シンポジウム，pp.349–354 (2012).

[7]　勝田悦子，内山　彰，山口弘純，東野輝夫：GPS 受信状態を用いた屋内外判定法，情報処理学会研究報告．MBL，[モバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会研究報告]，Vol.2011, No.18, pp.1–8（オンライン），入手先 ⟨http://ci.nii.ac.jp/naid/110008682606/⟩ (2011).

[8]　武田恭典，安積卓也，西尾信彦：端末ローカル情報のみで実現する GPS センシング省電力機構，マルチメディア，分散，協調とモバイル（DICOMO 2010）シンポジウム，pp.1467–1475 (2010).

[9]　加藤大智，竹腰昇太，大野雄基，鈴木秀和，旭　健作，渡邊晃：TLIFES における省電力化を目的とした位置測位手法の提案と実装，情報処理学会研究報告．GN，[グループウェアとネットワークサービス]，Vol.2013, No.13, pp.1–6（オンライン），入手先 ⟨http://ci.nii.ac.jp/naid/110009509283/⟩ (2013).

[10]　渡邉孝文，上坂大輔，村松茂樹，横山浩之：気圧変化を利用した地下鉄路線内の停車駅の推定，電子情報通信学会総合大会講演論文集，Vol.2012, No.1, p.585（オンライン），入手先 ⟨http://ci.nii.ac.jp/naid/110009463982/⟩ (2012).

[11]　煤孫光俊，大瀧保明，鈴木明宏，佐川貢一，石原　正，猪岡光：移動形態と歩行速度を考慮した消費カロリーの無拘束推定，計測自動制御学会 (2002).

[12]　坂本憲昭，市川昌宏，坂本一樹，新井イスマイル，名生貴昭，西尾信彦：同期シナリオを用いてセンシング携帯端末と協調連携するアプリケーションフレームワークの提案，マルチメディア，分散，協調とモバイル（DICOMO 2010）シンポジウム，pp.591–601 (2010).

© 2015 Information Processing Society of Japan

米田 圭佑

2012 年立命館大学情報理工学部情報システム学科卒業．2014 年立命館大学大学院情報理工学研究科博士課程前期課程修了．同年株式会社ミクシィ入社．

望月 祐洋　（正会員）

立命館大学総合科学技術研究機構専門研究員．2000 年慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科博士課程修了．博士（政策・メディア）．2013 年より現職．ユビキタスコンピューティング，分散コンポーネントシステム等の研究に従事．

西尾 信彦　（正会員）

1986 年東京大学工学部計数工学科数理工学コース卒業．1988 年同大学大学院理学系研究科情報学専攻修士課程修了．同博士課程単位取得退学後，1992 年より（有）アクセス研究開発室，1993 年より慶應義塾大学環境情報学部および政策・メディア研究科に勤務．博士（政策・メディア）．2003 年より立命館大学に勤務．現在，同大学情報理工学部教授．2000～2004 年 JST さきがけ研究 21「協調と制御」領域研究者．2007～2008 年 Google Inc. Visiting Scientist．自律分散協調システム，ユビキタスコンピューティングとセンシングネットワークの研究開発に従事．1994 年山下記念研究賞．ACM，IEEE 各会員．

© 2015 Information Processing Society of Japan