

G-34

加速度センサと GPS ログを用いたバス乗車中の起立・着席推定 Estimating Standing and Sitting While Riding a Bus Using Accelerometers and GPS Logs

上別縄 祐也† 勝間 亮†
Yuya Kanbetsunawa Ryo Katsuma

概要

バスの利便性を向上させるには、乗客の状態に応じた高度なサービスを提供することが考えられる。乗客の状態は大きく分けて起立と着席があり、それらを自動で判別することが求められる。

本稿では、乗客の所持するスマートフォンで加速度と位置情報を取得することで、起立と着席のどちらの状態であるかを推定する方式を提案する。乗客が受ける揺れの影響はバスの停車や発車時に大きくなる特徴を利用するため、提案手法では GPS を用いてバスの停車・発車した時刻を推定する。次にバスの停車・発車時の揺れを、加速度センサを用いて計測することでバスの乗客の起立・着席の状態を推定する。

1. はじめに

現在、公共交通機関の代表例として鉄道やバスがある。鉄道に比べてバスは混雑時の乗降者のスムーズさや、加減速などの挙動が安定せず、バスの利便性・安全性の向上を図ることが必要である。

バスの乗客の姿勢には、大きく分けて起立・着席の 2 パターンがある。バスの乗客が起立しているのか、着席しているのかを推定することができれば、それぞれの状態にある人に対して違った情報提供を行うことができる。例えば、起立者のスマートフォンに向けた転倒防止の注意喚起、空席への案内をすることや、車内混雑時の整理誘導によるスムーズな降車や空席管理のために着席者に対する降車場所の提供要請を行うことが挙げられる。これはバスの利便性・安全性の向上につながる。

バスに乗車している際に乗客が受ける揺れの影響は、乗客が起立しているか、着席しているかによって違いがある。特にバスが停車・発車する際には、加速度が大きく変化するため乗客への揺れの影響が大きく、起立状態・着席状態で受ける揺れの影響の違いが大きくなると考えられる。したがって、本稿ではバスの停車・発車時刻の前後 s 秒間の加速度を計測することで、乗客が起立、着席のどちらの状態にあるのかを推定する。また、加速度の計測は一般的に普及されているスマートフォンに搭載された加速度センサを用いて行う。

バスの停車・発車時の加速度を計測するためには、バスの停車・発車の時刻が必要となる。バス停車中の時刻は GPS ログを記録することで、同じ位置にいた時刻として得られる。したがって、本稿ではスマートフォンに搭載された GPS 機能を用いて、停車・発車の時刻を得る。

2. 関連研究

スマートフォンを利用した人の状態、行動を認識するための研究は多い [1][2]。その中でもバスに関する研究において、乗客の携帯電話を利用した手法は多く用いられている。Zhou らは参加型センシングにより、乗客の携帯電話を用いたバス到着時間の予測方法を提案している [3]。携帯電話が接続する基地局の順序を用いて、バスの経路を推定し、位置情報からバス停までの到着時間を推定した。また、携帯電話のマイクを用いて IC カードリーダーの音を検出することで、バスに乗車しているか否かを判定した。結果として、バス停までの到着時間の平均誤差は 80 秒となり、精度の高い推定が行えた。

また、加速度センサを用いて人間の行動を認識する手法は様々なところで使用されている。表らは、スマートフォンに搭載された 3 軸加速度センサを用いた行動認識システムを提案している [4]。座る、立つ、歩く、の 3 つの動作を加速度センサで計測し、加速度の 1 秒間の平均値と、異なる 2 つの加速度データにおける加速度の差の絶対値の平均を用いて推定を行なった。結果として、90% を超える認識率が得られ、行動認識における加速度データの有用性を示している。しかし、本稿では、振動ノイズが非常に多いバス内での姿勢を推定するため、表らのように得られた加速度データを整形するだけでは、精度を得ることは難しい。よって、各姿勢状態のデータにおいて特徴的なデータが現れる時刻を得ることで、必要なデータを選別する必要がある。

また、樋口らはスマートフォンに搭載されたセンサを用いて鉄道乗車中の移動状態を検出する手法を提案する中で、鉄道の停車を判定する方法について検討している [5]。加速度センサのみで鉄道の停車を判定しようとした場合、車両速度が一定に達し惰行を行なっている区間が停車と誤判定されてしまう。これを回避するために、鉄道が惰行を行なっているとき磁気特徴量の差が小さくなることを用いて停車確率を補正した。しかし、本研究で対象とするバスでは磁気量の変化によって停車を判定することは困難であるため、GPS ログを用いて停車区間を識別した。GPS と加速度センサはスマートフォンに標準搭載されていることが多く、これらを併用した研究も複数存在し [6][7]、現実的な想定である。

また、DTW(Dynamic Time Warping) はデータの解析方法として多くの研究で利用されている。内山らは DTW を用いて視角の異なるカメラ映像から自車の位置推定を行うシステムについて提案している [8]。入力画像系列から部分系列を抽出し、データベース画像系列との拡張 DP マッチングを行うことで、大規模なデータベースに対して計算範囲を限定したマッチングを行なった。結果として位置推定精度の向上が確認できた。このように DTW を適用するには特徴的な部分抽出が必要となるため、本研究では停車・発車の時刻を特定することで抽出している。

† 大阪府立大学, *Osaka Prefecture University, Sakai, Osaka*, 599 – 8531, *Japan*

3. 問題設定

バスに乗客が乗っていることを想定する。乗客は起立しているか、着席しているかの2パターンのみに分けられるとする。乗客はスマートフォンをズボンのポケットにいれているか、手に持っているかのどちらかであるとする。

バスは信号、バス停などにより停車と発車を十分に含む。また、ずっと地上を走るとし、乗客の「スマートフォンでGPSは常に働き、位置情報を取得可能とする。乗客は停車・発車時の揺れに影響を受ける。これを乗客の保持するスマートフォンの三軸加速度センサによって $f\text{Hz}$ で計測する。加速度センサで取得する時系列データ A の時刻0から n までのデータは $A = \{a_0, a_1, a_2, \dots, a_n\}$ とする。バスに乗車した瞬間の加速度は計測せず、起立・着席の安定した状態をとってから計測を開始する。また、GPSにより緯度経度で表される位置情報の時系列データを取得する。GPSの位置時系列データ P の時刻0から m までのデータは $P = \{(x_0, y_0), (x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_m, y_m)\}$ とする。GPSの計測についても起立・着席の状態をとってから計測を開始する。

入力加速度時系列データの途中で起立着席の状態は変化しないと、バス乗車時の加速度時系列データ、GPSによる位置の時系列データから、起立状態か着席状態かを判定する。

4. 計測・判定方法

1. GPSによるバスの停車・発車時刻の推定

GPSを用いてバス移動中の位置情報を記録し、バスの位置 (x_t, y_t) からバスの移動速度 v_t を1秒毎に式(1)で示す通り求める。

$$v_t = \sqrt{(x_{t+1} - x_t)^2 + (y_{t+1} - y_t)^2} \quad (1)$$

推定した移動速度のうち移動速度 v_t が 0m/s になっている時刻をバスがとまっていた時刻として推定する。図1に示すように、バスがとまっていた時刻のうち停車開始時刻を t_i 、発車開始時刻を t_{i+1} として、バスの停発車時刻の時系列データ $\{t_0, t_1, t_2, \dots, t_m\}$ を得る。

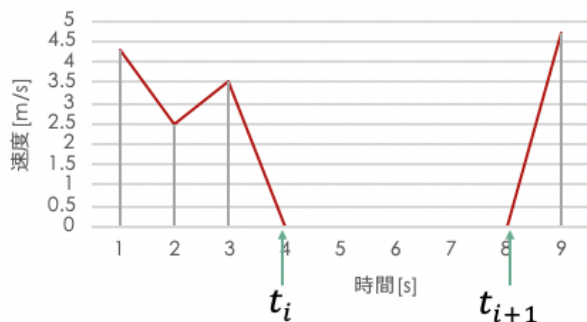


図1 停車開始時刻と発車開始時刻

2. 加速度センサによる計測

加速度センサを用いてバス移動中の加速度を計測し、 t_i の前後 s 秒間の加速度データを収集する。例えば、加速度時系列データ $A = \{a_0, a_1, a_2, \dots, a_n\}$ のうち停車開始時刻 t_i の加速度を a_{t_i} とすると、収集する停発車時の加速度データは、 $A_{t_i} = \{a_{t_i-fs}, \dots, a_{t_i}, \dots, a_{t_i+fs}\}$ となる。以降、停発車時

の加速度データのことを単純にデータと記述する。

3. 姿勢判定方法

1. 閾値による判定

加速度値に閾値 r 設定し、 t_i の前後 s 秒間の加速度値の中に閾値 r 以上の値が1個以上あった場合、起立状態と推定し、なかった場合、着席状態と推定する。

2. DTWを用いた判定

まず、収集した加速度データ間の距離をDTWを用いて計算する[9]。2つのシーケンス間のDTW距離とは、最適にそれらのシーケンス長を調整した後の距離の和である。停車・発車開始時刻 t_{i_v} , t_{i_w} の前後 s 秒間を抜き出した後のデータを $V = (v_1, v_2, \dots, v_l)$, $W = (w_1, w_2, \dots, w_m)$ とすると、DTW距離 $D(V, W)$ は以下のように定義される。

$$D(V, W) = f(l, m)$$

$$g(u, j) = \|v_u - w_j\| + \min \begin{cases} g(u, j-1) \\ g(u-1, j) \\ g(u-1, j-1) \end{cases}$$

$$g(0, 0) = 0, g(u, 0) = f(0, j) = \infty$$

$$(u=1, \dots, l; j=1, \dots, m) \quad (2)$$

次に起立状態、着席状態の代表データをそれぞれ1つ決める。着席状態の代表データの決定方法として、1つの着席状態のデータに対して、他のすべての着席データとの間の距離をDTWを用いて計算する。このときの距離が最も短いデータの組を短い順に n 番目まで求め、各データが出てきた回数をそれぞれ数える。出てきた回数が最も多かったデータを着席状態の代表データとする。これは各状態のデータに対して大きくはずれなかったデータを代表データとしないためである。起立状態の代表データも同様にして求める。着席の代表データ P_r 、起立の代表データ Q_r としたとき、すべての i に対して $D(P_r, A_{t_i})$ および $D(Q_r, A_{t_i})$ を計算する。 $D(P_r, A_{t_i}) < D(Q_r, A_{t_i})$ なら A_{t_i} は着席と判定し、そうでないなら A_{t_i} は起立と判定する。次に、1区間の求め方について説明する。各1区間を構成する停車・発車の半区間データに起立と判定されたものが1つでもあれば1区間の場合も起立と判定し、起立と判定されたものが1つもない場合は、着席と判定する。これは起立時に計測した加速度に特徴的な大きい値が出るため、1度でもその特徴的な値を検知できれば起立状態にある可能性が高いからである。同様の判定方法で2区間、3区間の場合も求める。

5. 実験

1. 実験環境

実験にはXperia X Performance SO-04H 2台(加速度計測用)と、nexus9 1台(GPSログ計測用)を使用した。加速度計測については、スマートフォン1台はズボンのポケットに入れ、もう1台は手に持って行なった。GPS計測は、カバンに入れたタブレットによって行なった。また、実験を行うバスの路線として、南海バスの中百舌鳥駅前[南側]から堺市立総合医療センター北までのエリアを利用した。

2. 実験結果

2.1 GPS での停車・発車時刻の推定

実際に停車・発車した時刻を記録した値と GPS から推測した停車・発車した時刻とのずれは表 1 のようになった。実際に停車・発車した時刻からずれた秒数の平均は 1.79 秒であり、全データのうち 92% が 3 秒以内、72% が 2 秒以内のずれであった。

表 1 推定した停車・発車時刻と実際の時刻とのずれ

ずれた秒数	データ数
0 秒以上 1 秒未満	90 個
1 秒以上 2 秒未満	51 個
2 秒以上 3 秒未満	39 個
3 秒以上 4 秒未満	9 個
4 秒以上 5 秒未満	7 個
5 秒以上	0 個

2.2 状態推定

1. 閾値による判定

加速度の停車開始前後 5 秒間もしくは発車開始前後 5 秒間を 0.5 区間と呼び、連続した二つの 0.5 区間のデータを 1 区間とする。

まず、ポケットで計測した加速度、手で計測した加速度の半区間における加速度の最大値の平均を表 2 に示す。ポケットで計測した値では、着席時に比べて起立時の加速度が大きい、手で計測した値では起立時と着席時の加速度の違いが小さくなった。これは、人が揺れに逆らおうとして、揺れの影響が軽減されるためであると考えられる。

表 2 停発車時の加速度の最大値の平均

姿勢	着席	起立
ポケット	2.15m/s ²	5.80m/s ²
手	2.24m/s ²	3.14m/s ²

次に閾値を 1 から 5 まで 0.1 刻みで変化させて、1 区間毎のデータにおける起立・着席のデータに対する正解数を示したグラフを図 2,3 に示す。図 2 からポケットで計測した値の閾値は 3.6、図 3 から手で計測した値の閾値は 3.0 とする。

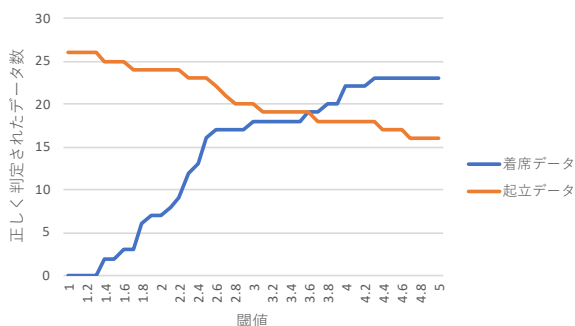


図 2 ポケットで計測したデータ

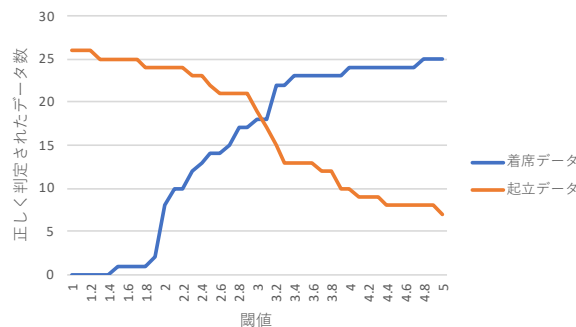


図 3 手で計測したデータ

同様にして、2 区間、3 区間においても閾値を定めると、2 区間の場合、ポケットで計測した値の閾値は 4.3、手で計測した値の閾値は 3.5、3 区間の場合、ポケットで計測した値の閾値は 4.3、手で計測した値の閾値は 3.5 となった。

得られた閾値を用いて起立・着席の推定を行い、Precision, Recall, F-measure の値を表 3、表 4 に示す。

表 3 ポケットで計測した値に対する推定精度

区間数	状態	Precision(%)	Recall(%)	F-measure(%)
0.5 区間	着席	0.66	0.73	0.69
	起立	0.72	0.65	0.69
1 区間	着席	0.73	0.79	0.76
	起立	0.79	0.73	0.76
2 区間	着席	0.84	0.92	0.88
	起立	0.92	0.85	0.88
3 区間	着席	0.86	0.86	0.86
	起立	0.88	0.88	0.88

表 4 手で計測した値に対する推定精度

区間数	状態	Precision(%)	Recall(%)	F-measure(%)
0.5 区間	着席	0.70	0.70	0.70
	起立	0.71	0.71	0.71
1 区間	着席	0.72	0.72	0.72
	起立	0.73	0.73	0.73
2 区間	着席	0.67	0.80	0.73
	起立	0.76	0.62	0.68
3 区間	着席	0.74	0.74	0.74
	起立	0.75	0.75	0.75

ポケットで計測した値については、2 区間ごとに判定したとき最も精度が高くなった。手で計測した値については、どの区間においても高い判定精度は得られなかった。また、ポケットの加速度データでは使用する区間が多くなるにつれて F-measure が増加傾向にあり、精度が高くなるのが分かった。一方で、手

の加速度データは区間による F-measure の値の大きな変化は見られなかった。

2. DTW を用いた判定

停車・発車の半区間の起立データ，着席データそれぞれに対して，DTW を求め，距離が最も短い 20 組をそれぞれ算出し，起立・着席データの代表データを求めることで姿勢判定を行なった。

半区間，1 区間，2 区間，3 区間に対して起立・着席の推定を行い，Precision，Recall，F-measure の値を計算した結果を表 5，表 6 に示す。

表 5 ポケットで計測した値に対する推定精度

区間数	状態	Precision(%)	Recall(%)	F-measure(%)
0.5 区間	着席	0.65	0.91	0.76
	起立	0.86	0.52	0.65
1 区間	着席	0.78	0.82	0.80
	起立	0.82	0.78	0.80
2 区間	着席	1.00	0.68	0.81
	起立	0.77	1.00	0.87
3 区間	着席	1.00	0.56	0.72
	起立	0.71	1.00	0.83

表 6 手で計測した値に対する推定精度

区間数	状態	Precision(%)	Recall(%)	F-measure(%)
0.5 区間	着席	0.61	0.83	0.70
	起立	0.75	0.48	0.59
1 区間	着席	0.74	0.74	0.74
	起立	0.73	0.73	0.73
2 区間	着席	0.92	0.60	0.73
	起立	0.73	0.96	0.83
3 区間	着席	0.78	0.41	0.54
	起立	0.67	0.91	0.77

ポケットで計測した値については，閾値による判定と同様に 2 区間ごとに判定したとき最も高い判定精度が得られた。手で計測した値に対する推定精度については，2 区間において，起立の精度は他の区間に比べて高くなったが，着席の精度の変化は小さかった。

3. 機械学習を用いた判定

特徴量を各データの平均値，最大値，標準偏差として，ランダムフォレストを用いた 10 交差検証を行なった。

停車・発車それぞれ半区間と，1 区間データに対して起立・着席判定を行なった結果を表 7，表 8 に示す。

表 7 ポケットで計測した値に対する推定精度

区間数	状態	Precision(%)	Recall(%)	F-measure(%)
0.5 区間	着席	0.64	0.73	0.68
	起立	0.71	0.61	0.65
1 区間	着席	0.67	0.83	0.74
	起立	0.79	0.60	0.68
2 区間	着席	0.71	0.83	0.77
	起立	0.81	0.68	0.74
3 区間	着席	0.74	0.83	0.78
	起立	0.78	0.72	0.76

表 8 手で計測した値に対する推定精度

区間数	状態	Precision(%)	Recall(%)	F-measure(%)
0.5 区間	着席	0.66	0.62	0.64
	起立	0.66	0.69	0.67
1 区間	着席	0.65	0.60	0.63
	起立	0.64	0.69	0.67
2 区間	着席	0.65	0.68	0.67
	起立	0.68	0.65	0.67
3 区間	着席	0.64	0.64	0.64
	起立	0.65	0.65	0.65

ポケットで計測した値，手で計測した値の両方において閾値による判定，DTW による判定に比べて精度が落ちることが分かった。また，他の 2 手法と同様にポケットで計測したデータでは多区間を用いることで精度が上がるが，手で計測したデータでは区間を増加させても精度に大きな変化がないことが分かった。

6. まとめ

本稿では，加速度センサによって，バスの停車・発車時に受ける乗客の揺れを計測することで，バスの乗客の起立・着席の状態を推定した。ポケットで計測した値に比べて，手で計測した値は，起立と着席での違いが小さいことがわかった。判定方法については，ランダムフォレストを用いた判定では，どの区間においても判定精度が低くなった閾値を用いた判定と DTW を用いた判定では，ポケットで計測した値においては約 80% ほどの判定精度を達成できたが，手で計測した値においては高い精度は得られなかった。

今後の研究で，停車時と発車時でデータを分けた場合の判定方法について検討したい。また，どの判定方法においても手で計測した値に対する判定精度が低く，多区間を利用しても精度が向上しないことが分かったので，ポケットのデータか手のデータかを自動判別し，各所持位置について適切な方法で判定することを検討していく。

参考文献

- [1] Muhammad Arif, Mohsin Bilal, Ahmed Kattan, and S.Iqbal Ahamed: “Better Physical Activity Classifica-

- tion using Smartphone Acceleration Sensor,” *Journal of Medical Systems* 38, Article number: 95 (2014).
- [2] Kangjae Lee, and Mei-Po Kwan: “Physical activity classification in free-living conditions using smartphone accelerometer data and exploration of predicted results,” *Computers, Environment and Urban Systems*, pp. 124–131 (2018).
- [3] Pengfei Zhou, Yuanqing Zheng, and Mo Li, “How Long to Wait?: Predicting Bus Arrival Time with Mobile Phone based Participatory Sensing”, *The 10th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*, pp.379–392 (2012).
- [4] 表宏樹, “スマートフォンの3軸加速度センサを用いた人間の行動認識” 修士論文. 三重大学大学院工学研究科博士前期課程情報工学専攻; 平成24年度, (2012).
- [5] 樋口雄大, 山口弘純, 東野輝夫, “スマートフォン内蔵センサを用いた鉄道乗車コンテキストの推定” 研究報告モバイルコンピューティングとパーベイシブシステム (MBL), pp.1–8 (2015).
- [6] Tao Feng, and Harry J.P.Timmermans: “Transportation mode recognition using GPS and accelerometer data,” *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, pp. 118–130 (2013).
- [7] Bryan D. Martin, Vittorio Addona, Julian Wolfson, Gediminas Adomavicius and Yingling Fan: “Methods for Real-Time Prediction of the Mode of Travel Using Smartphone-Based GPS and Accelerometer Data,” *Sensors*, 17, issue 9, p. 2058 (2017).
- [8] 内山寛之, 出口大輔, 高橋友和, 井手一郎, 村瀬洋, “拡張DPマッチングを用いた視野角の異なるカメラ映像間の時空間対応付けによる自転車位置推定” 電子情報通信学会論文誌, Vol. J93 – D No. 12 (2010).
- [9] 櫻井保志, Faloutsos Christos, and 山室 雅司: “ダイナミックタイムワーピング距離に基づくストリーム処理,” 電子情報通信学会論文誌. D, 情報・システム, 92(3), pp. 338–350 (2009).