

今回の作品では、鉄道ユーザのスマートフォンを利用して、ユーザの乗車した列車の特定を目的とします。また、アプリケーションのアイデアの概要も最後に記述させていただきます。

首都圏の地下鉄駅を調査した所、2路線以上ある大部分の駅では路線が階ごとに分かっている事が分かりました。例として、図1に1駅2路線の場合の分類を示します。今回の場合では、プラットフォームが全て地下にある駅を地下鉄駅として数えています。また、仲御徒町駅、上野広小路駅のように同じ施設内で繋がっている駅は除いています。

a)異なる階に2路線(21駅中18駅)



b)同じ階に2路線(21駅中3駅)

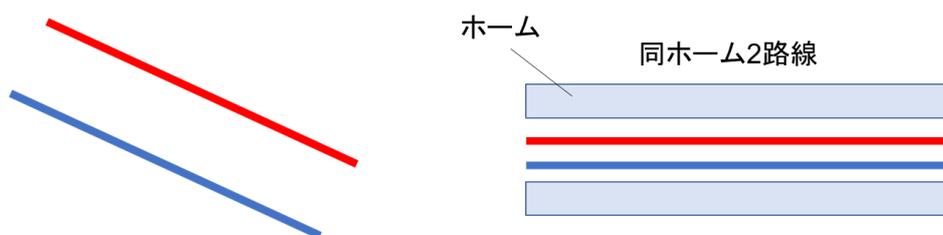


図1 1駅2路線の駅の分類

図1に示すように、1駅2路線の地下鉄駅は21駅あり、異なる階に路線がある駅が18駅、同じ階に路線がある駅が3駅あります。異なる階では路線が階によって完全に分かれている駅と同じ路線でも上下線によって階が分かれているものがあります。具体的な駅を以下に挙げます。

・異なる階に2路線

⇒蔵前駅、清澄白河駅、月島駅、三田駅、巣鴨駅、八丁堀駅、中野坂上駅、麻布十番駅、本郷三丁目駅、森下駅、門前仲町駅、東銀座駅、大門駅、茅場町駅、住吉駅、東新宿駅、六本木駅、新御徒町駅

・同じ階に2路線

⇒白金台駅、白金高輪駅、御茶ノ水駅

今回は路線が階ごとに分かれている地下鉄駅に着目しますが、以降に記述する【上下線推定】の方法を用いることで同一階に複数路線がある場合でも正しくユーザの乗車した列車の特定が行なえると考えます。今回提案する手法では主に以下の流れでユーザの乗車した列車を特定します。

- ①利用駅推定
- ②利用路線推定
- ③上下線推定

【利用駅推定】

利用駅推定では、地下鉄駅の入り口が地上にある事を利用します。地上では GPS を正確に使用することができるため、GPS の精度が落ち現在位置を取得できなくなる直前にいた場所に最も近い駅を利用駅とします。

【利用路線推定】

前述の通り、路線は階ごとに分かれているため、ユーザが列車に乗車したと判定される直前にいた階を推定することで利用路線を推定することが可能です。以下に、利用路線推定（階推定）について記述します。

・利用路線推定（階推定）

利用路線推定は階推定から行ないます。階推定は階段、エスカレータ、エレベータの特徴を用いて行ないます。駅利用時には、歩行、静止、階段降下、エスカレータ利用、エレベータ利用の主に5つの行動が想定されますが、これらの状態の区別については後述します。

a) 階段

階段降下状態では鉛直方向の加速度に閾値を設けることで降りた階段の段数を推定することができます。図2に階段降下時の加速度のグラフを示します。

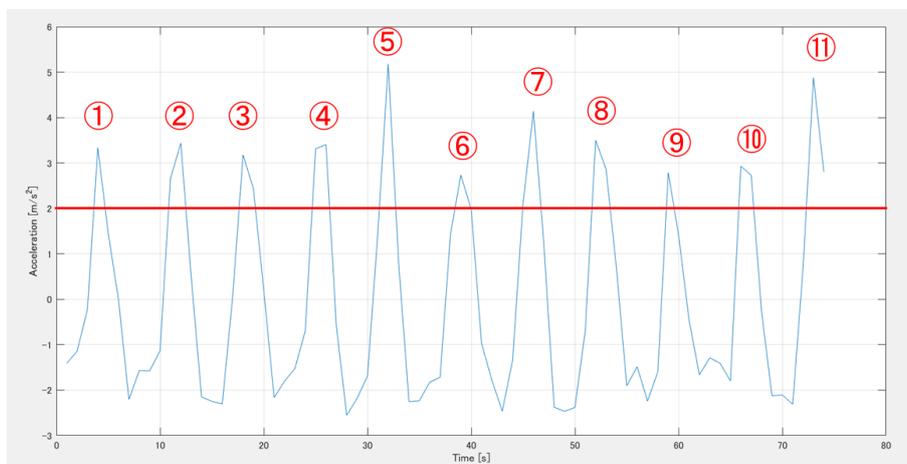
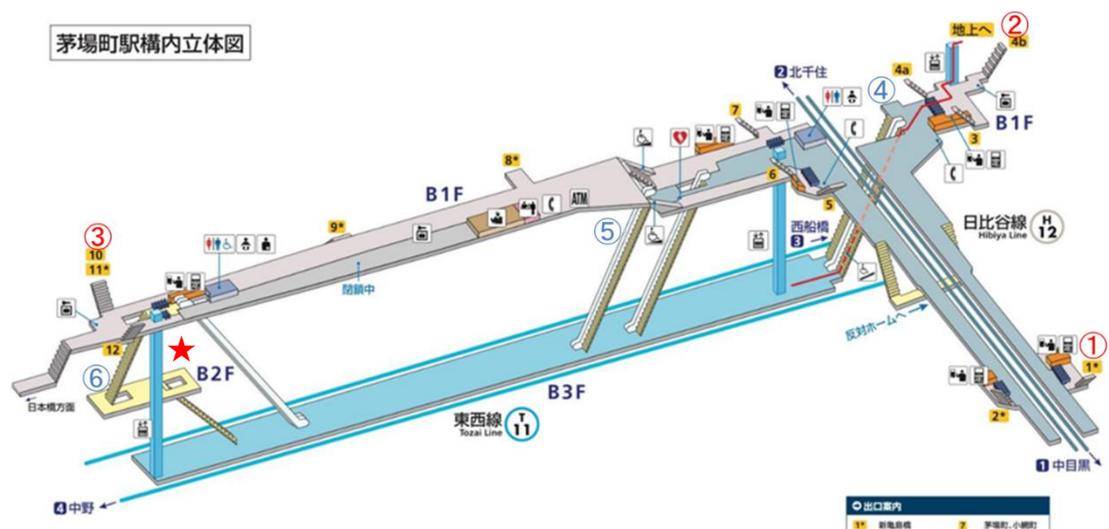


図2 階段降下時の加速度のグラフ

図2は11段の階段を降りた時の加速度のグラフであり、図2より降りた階段の段数が正しく推定されてることが分かります。ここで、この手法の評価として実際の駅の階段を降りた際の鉛直方向の加速度の時系列データを計測し、段数推定を行ないました。評価は東京メトロ茅場町駅で行ないました。評価を行なった階段を図3に示します。また、各階段の実測段数を表1に、評価結果を表2～表7に示します。



①②③: 1F→B1F ④⑤⑥: B1F→B3F

図3 茅場町駅において評価を行なった階段

表1 各階段の実測段数

階段	実測段数
階段①	41 段
階段②	46 段
階段③	43 段
階段④	38 段
階段⑤	40 段
階段⑥	45 段

表 2 階段①の評価結果

	推定段数	実測段数との差
1回目	44段	+3段
2回目	43段	+2段
3回目	43段	+2段
4回目	41段	±0段
5回目	44段	+3段

表 3 階段②の評価結果

	推定段数	実測段数との差
1回目	46段	±0段
2回目	48段	+2段
3回目	46段	±0段
4回目	48段	+2段
5回目	46段	±0段

表 4 階段③の評価結果

	推定段数	実測段数との差
1回目	45段	+2段
2回目	46段	+3段
3回目	45段	+2段
4回目	46段	+3段
5回目	46段	+3段

表 5 階段④の評価結果

	推定段数	実測段数との差
1回目	40段	+2段
2回目	40段	+2段
3回目	38段	±0段
4回目	40段	+2段
5回目	39段	+1段

表 6 階段⑤の評価結果

	推定段数	実測段数との差
1回目	40段	±0段
2回目	42段	+2段
3回目	42段	+2段
4回目	41段	+1段
5回目	42段	+2段

表 7 階段⑥の評価結果

	推定段数	実測段数との差
1回目	46段	+1段
2回目	45段	±0段
3回目	45段	±0段
4回目	44段	-1段
5回目	44段	-1段

表 2～表 7 より実測段数との差は 3 段が最大であり、段数による階推定にこの手法が利用可能であると考えます。降りた階段の段数を用いた階推定の方法をつけばエクスプレス線新御徒町駅を例に取り、以下に記述します。例として用いる階段 (①、②) を図 4 に示します。また、各階段の実測段数を表 8 に示します。

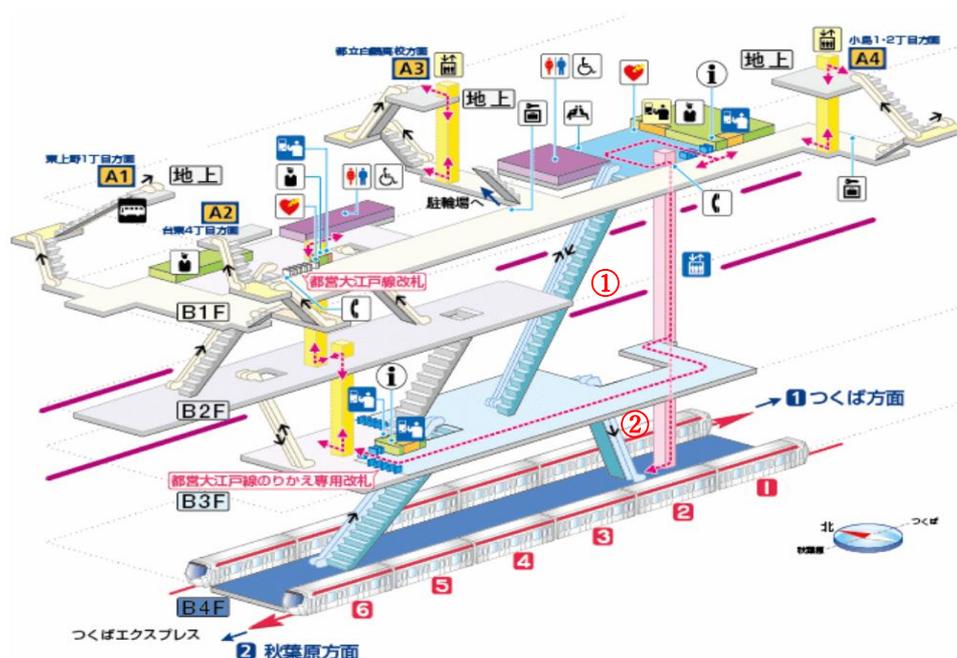


図 4 新御徒町駅で例として用いる階段

表 8 新御徒町駅の各階段の実測段数

階段	実測段数
階段① (B1F⇒B3F)	85 段
階段② (B3F⇒B4F)	33 段

階段降下状態における鉛直方向の加速度から推定された階段の段数を N 段とします。階段降下時における降りた段数推定は、列車に乗車したと判定されるまで計測された鉛直方向の加速度の時系列データを用いて最終的な段数から階推定を行ないます。列車に乗車したと判定する方法は後述します。

① $|N - 0| < |N - 33|$ かつ $|N - 0| < |N - 85|$ かつ $|N - 0| < |N - 118|$
 ⇒階段を利用していない

② $|N - 33| < |N - 0|$ かつ $|N - 33| < |N - 85|$ かつ $|N - 33| < |N - 118|$
 ⇒階段によって 1 階降りた

③ $|N - 85| < |N - 0|$ かつ $|N - 85| < |N - 33|$ かつ $|N - 85| < |N - 118|$
 ⇒階段によって 2 階降りた

④ $|N - 118| < |N - 0|$ かつ $|N - 118| < |N - 33|$ かつ $|N - 118| < |N - 85|$
 ⇒階段によって 3 階降りた

上記の様に、推定された階段の段数と階段を利用していない段数 (0 段)、1 階分降りた段数 (33 段)、2 階分降りた段数 (85 段)、3 階分降りた段数 (118 段) の絶対値の差を取り、最も値が小さいものを採用し、階段によって降りた階数を推定します。

b) エスカレーター

前提としてエスカレーター乗車時は歩行をしないものとします。図 4 の階段①、②には下りエスカレーターもついています。図 4 の①、②の階段横にあるエスカレータをエスカレーター①、エスカレーター②とします。エスカレータの実測乗車時間を表 9 に示します。

表 9 エスカレータの実測乗車時間

エスカレータ	乗車時間 [s]
エスカレータ① (B1F⇒B3F)	60.96
エスカレータ② (B3F⇒B4F)	26.39

表9より乗車秒数から降りた階数を推定することが可能です。以下に乗車秒数を用いた階推定の方法を記述します。

推定されたエスカレータ乗車時間を $T[s]$ とします。

① $|T - 0| < |T - 26|$ かつ $|T - 0| < |T - 61|$

⇒ エスカレータを利用していない

② $|T - 26| < |T - 0|$ かつ $|T - 26| < |T - 61|$

⇒ B3F⇒B4Fでエスカレータを利用

③ $|T - 61| < |T - 0|$ かつ $|T - 61| < |T - 26|$

⇒ B1F⇒B3Fでエスカレータを利用

上記の様に、推定されたエスカレータの乗車秒数とエスカレータを利用していない秒数（0秒）、1階分降りた秒数（26秒）、2階分降りた秒数（61秒）の絶対値の差を取り、最も値が小さいものを採用し、エスカレータによって降りた階数を推定します。

c) エレベータ

エレベータにおいてもエスカレータ同様、基本的にはエレベータに乗車している秒数から階推定を行いません。しかし、エレベータでは乗客の乗降により乗車時間が一定でないことや2階分以上の移動では各階で止まるか否かで乗車時間が異なるという問題があります。ここで、図3★のエレベータ乗車時の鉛直方向の加速度のグラフを図5に示します。

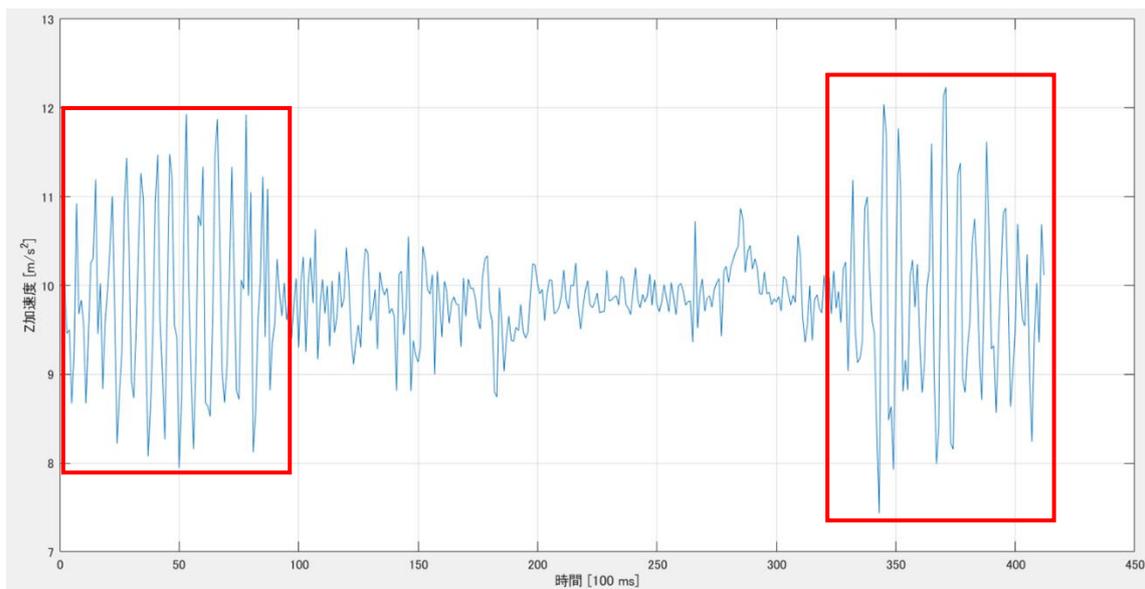


図5 エレベータ乗車時の鉛直方向の加速度

図5よりエレベータ発車時と停車時の鉛直方向の加速度の時系列データには特徴があることが分かります。そのため、エレベータの発車時と停車時の鉛直方向の加速度のデータベースを用意し、照合することで乗降時間等に影響されないエレベータの乗車時間を推定することができますと考えます。今回、データベースとの照合には正規化相互相関関数を用います。相互相関関数は2つの時系列のデータの類似性を時間のずれに関係なく判定することができます。図6に相互相関関数の概要図を示します。

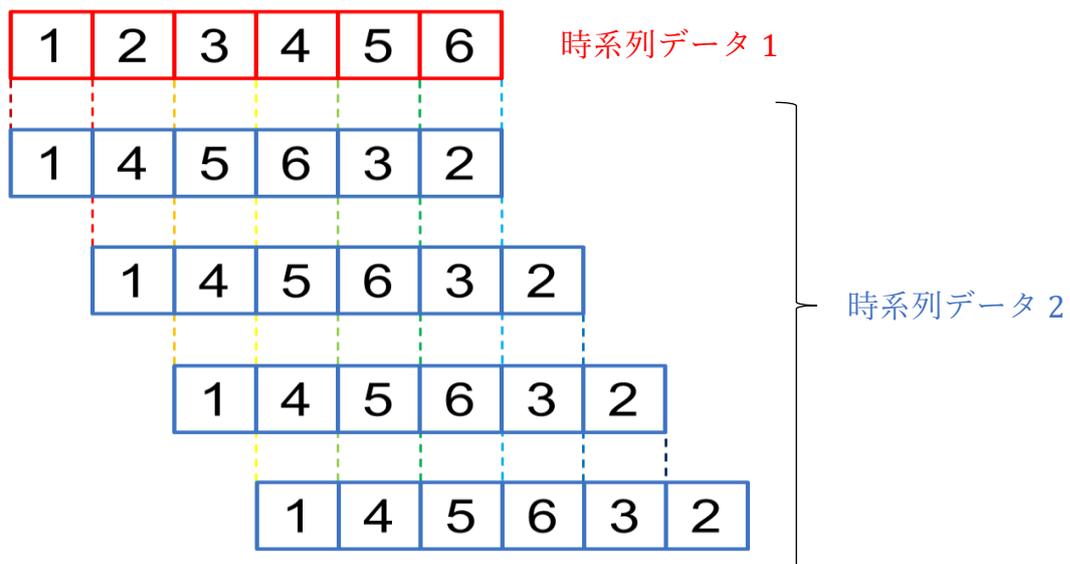


図6 相互相関関数の概要図

図6より、時系列データを1つずつずらしていき、各々の場合について相関係数を導出します。それらの集まりが相互相関関数となり、特に正規化されているものを正規化相互相関関数と呼びます。図7にエレベータの実測加速度とデータベースとの照合方法について示します。

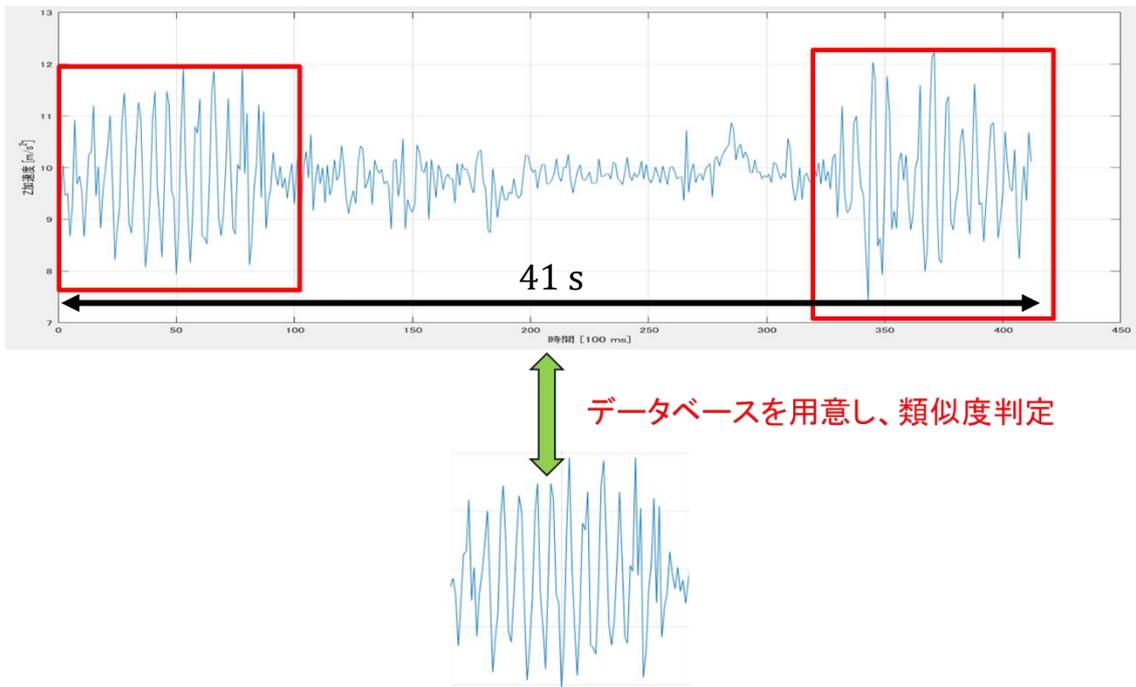


図7 エレベータの実測加速度とデータベースとの照合方法

図7のように実測のエレベータの鉛直方向の加速度の時系列データとデータベース間で正規化相互相関を行ない、相関係数に閾値を設けることでエレベータの終始時刻を推定します。推定時刻からエレベータの乗車時間推定を行なうことで乗降時間等に影響を受けないエレベータ乗車時間推定が可能になります。例として、図8にエレベータ乗車時の実測鉛直方向加速度とデータベースの正規化相互相関関数を示します。

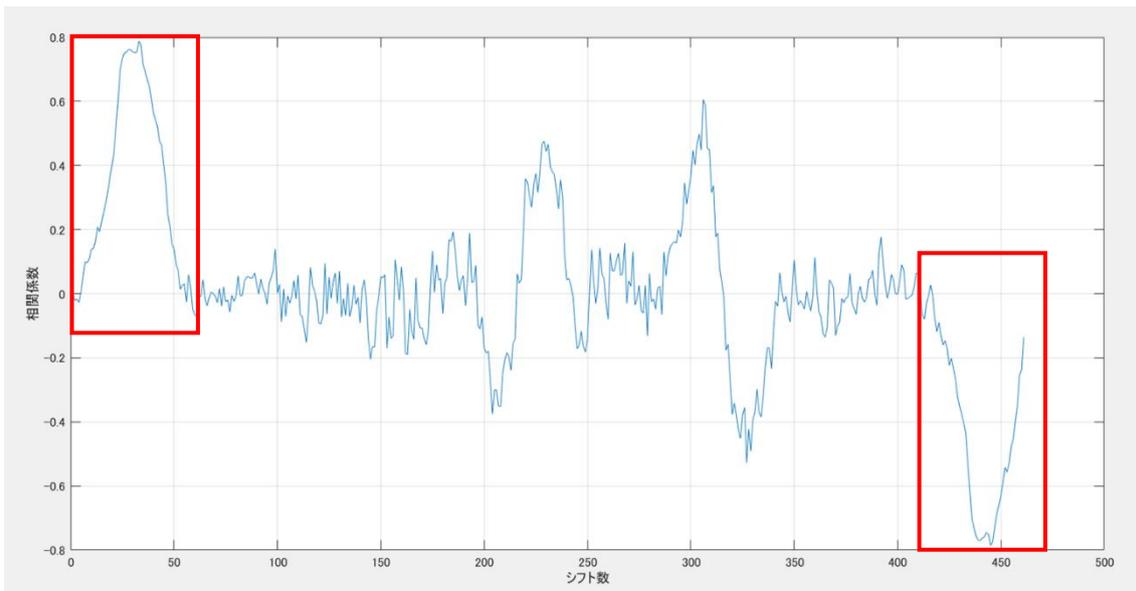


図8 エレベータ乗車時の実測鉛直方向加速度とデータベースの正規化相互相関関数

図 8 における加速度のデータベースはエレベータ発車時のものとしています。エレベータ発車時と停止時の加速度の方向は逆であるため、停止時には負の相関を持つことが図 8 から分かります。今回の場合、相関係数の絶対値で閾値を設ける事でエレベータの終始時刻を推定することができます。また、図 8 の横軸はいくつデータをずらしたのかを示すシフト数であり、データは 100 ms 毎に計測しています。そのため、図 8 より、相関係数の絶対値が 0.6 を閾値とした場合、2000 ms ずらしたときと 43000 ms ずらしたときで相関係数が閾値を越える事からエレベータ乗車時間は 41000 ms、つまり 41 秒であることが推定できます。また、図 7 より正しく推定が行なえていることも分かります。ここで、図 3★のエレベータでは B1F⇒B3F の移動しかしないため、説明のために図 4③のエレベータの実測乗車時間を表 10 に示します。

表 10 エレベータの実測乗車時間

エレベータ	実測乗車時間 [s]
エレベータ③ (B1F⇒B3F)	21.14
エレベータ③ (B3F⇒B4F)	9.21
エレベータ③ (B1F⇒B4F)	30.35

表 10 よりエスカレータの場合同様、乗車秒数から降りた階数を推定することが可能です。以下に乗車秒数を用いた階推定の方法を記述します。
推定されたエスカレータ乗車時間を $T[s]$ とします。

$$\textcircled{1} |T - 0| < |T - 21| \text{ かつ } |T - 0| < |T - 9| \text{ かつ } |T - 0| < |N - 30|$$

⇒エレベータを利用していない

$$\textcircled{2} |T - 21| < |T - 0| \text{ かつ } |T - 21| < |T - 9| \text{ かつ } |T - 21| < |N - 30|$$

⇒B1F⇒B3F でエレベータを利用

$$\textcircled{3} |T - 9| < |T - 0| \text{ かつ } |T - 9| < |T - 21| \text{ かつ } |T - 9| < |N - 30|$$

⇒B3F⇒B4F でエレベータを利用

$$\textcircled{4} |T - 30| < |T - 0| \text{ かつ } |T - 30| < |T - 21| \text{ かつ } |T - 30| < |N - 9|$$

⇒B1F⇒B4F でエレベータを利用

上記の様に、推定されたエレベータの乗車秒数とエレベータを利用していない秒数（0秒）、1階分降りた秒数（9秒）、2階分降りた秒数（21秒）、3階分降りた秒数（30秒）絶対値の差を取り、最も値が小さいものを採用し、エレベータによって降りた階数を推定します。

この様に、a)、b)、c) を組み合わせることで列車に乗車する直前にいた階を推定し、利用路線を推定することができます。

【上下線推定】

上下線推定ではユーザのスマートフォンのマイクロフォンセンサを用います。列車に乗車したと判定した後、車内音を30秒間計測し、各区間のデータベースとの相関をとることで推定します。相関として用いるのはエレベータ同様、正規化相互相関関数を用います。この手法の評価として、東京メトロ日比谷線の南千住駅、三ノ輪駅、入谷駅、上野駅で評価を行いました（図9）。各駅の評価結果を表11~14に示します。

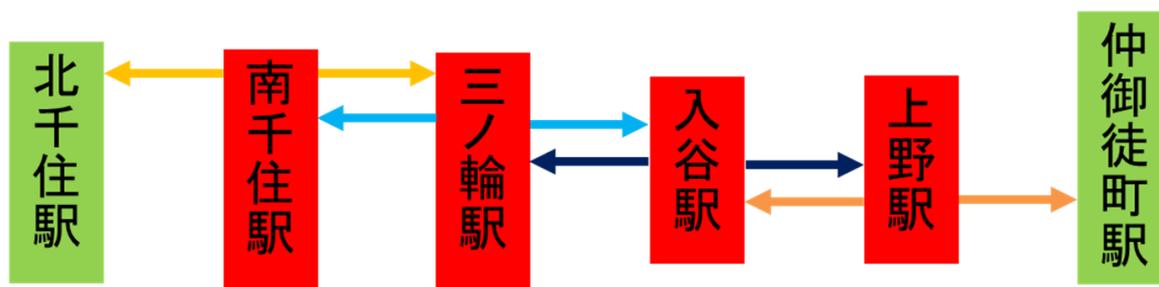


図9 上下線推定方法の評価駅

表11 南千住駅における上下線推定結果

	南三 1	南三 2	南北 1	南北 2
南三 1		0.2522	0.0320	0.0247
南三 2	0.2522		0.0273	0.0385
南北 1	0.0320	0.0273		0.3237
南北 2	0.0247	0.0385	0.3237	

※南三：南千住駅⇒三ノ輪駅

南北：南千住駅⇒北千住駅

(以降同様)

表 12 三ノ輪駅における上下線推定結果

	三入 1	三入 2	三南 1	三南 2
三入 1		0.2702	0.0188	0.0176
三入 2	0.2702		0.0249	0.0306
三南 1	0.0188	0.0249		0.3185
三南 2	0.0176	0.0306	0.3185	

表 13 入谷駅における上下線推定結果

	入上 1	入上 2	入三 1	入三 2
入上 1		0.2027	0.0145	0.0180
入上 2	0.2027		0.0187	0.0351
入三 1	0.0145	0.0187		0.3342
入三 2	0.0180	0.0351	0.3342	

表 14 上野駅における上下線推定結果

	上仲 1	上仲 2	上入 1	上入 2
上仲 1		0.4079	0.0212	0.0176
上仲 2	0.4079		0.0243	0.0236
上入 1	0.0212	0.0243		0.2948
上入 2	0.0176	0.0236	0.2948	

表 11～表 14 では最も高い相関係数を記載しており、各表から正しく上下線の推定が行なえていることが分かります。また、今回は試していませんが、車内音の周波数帯からアナウンス音とそれ以外の音を抜き出し、各々について相関をとることにより相関係数が大きくなること等も考えられます。

【状態区別】

上記の通り、利用駅推定、利用路線推定、上下線推定については正しく行うことができませんでした。しかし、上記の手法を行なうためには現在の自分の状態がどの状態に当てはまっているのか分かっていることが前提となります。ここでは、駅利用時の各状態の区別の方法について記載します。各状態の区別のために、2つの時系列データの類似度を計算する DTW (Dynamic Time Warping) を用います。以下に DTW の説明を記します。

①パターンの長さが同じとき (図 10)

時系列データの N 番目同士の距離を DTW 距離と定義します。

Ex1) パターン 1 = $[x_1 x_2 x_3]$

パターン 2 = $[y_1 y_2 y_3]$ とすると、

$$dist = \sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2 + (x_3 - y_3)^2}$$



図 10 パターン長が同じときの DTW 距離

②パターンの長さが異なるとき

各対応パターンで DTW 距離を算出し、最小の DTW 距離を DTW 距離として定義します。

Ex2) パターン 1 = $[x_1 x_2]$

パターン 2 = $[y_1 y_2 y_3]$ とすると、

a) x_1 が $y_1 y_2$ と対応する場合 (図 11)

パターン 1' = $[x_1 x_1 x_2]$

パターン 2 = $[y_1 y_2 y_3]$

$$dist1 = \sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_1 - y_2)^2 + (x_2 - y_3)^2}$$

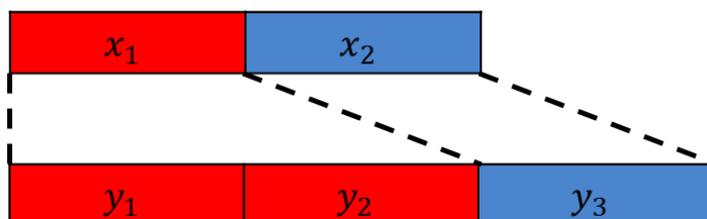


図 11 パターン長が異なるときの DTW 距離 (a)

b) x_2 が $y_2 y_3$ と対応する場合 (図 12)

パターン 1 = $[x_1 x_2 x_2]$

パターン 2 = $[y_1 y_2 y_3]$

$$dist2 = \sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2 + (x_2 - y_3)^2}$$

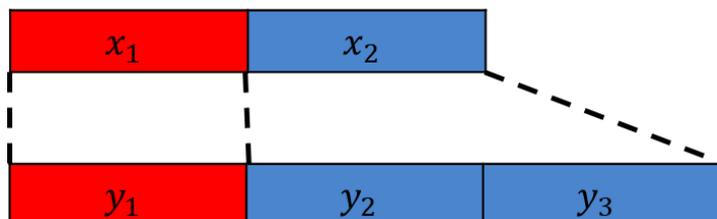


図 12 パターン長が異なるときの DTW 距離 (b)

a)、b) において $dist1$ と $dist2$ のうち距離が小さいものが DTW 距離となります。DTW 距離が小さい程、類似度が高くなります。DTW 距離を用いた状態の区別方法を図 13 に示します。結論から述べると、鉛直方向の加速度の時系列データにおいて DTW を適用することで階段降下状態、歩行状態、静止状態を区別することができます。また、静止状態のときには磁力の大きさに DTW を適用することでエスカレータ、エレベータ、静止状態を区別することができます。

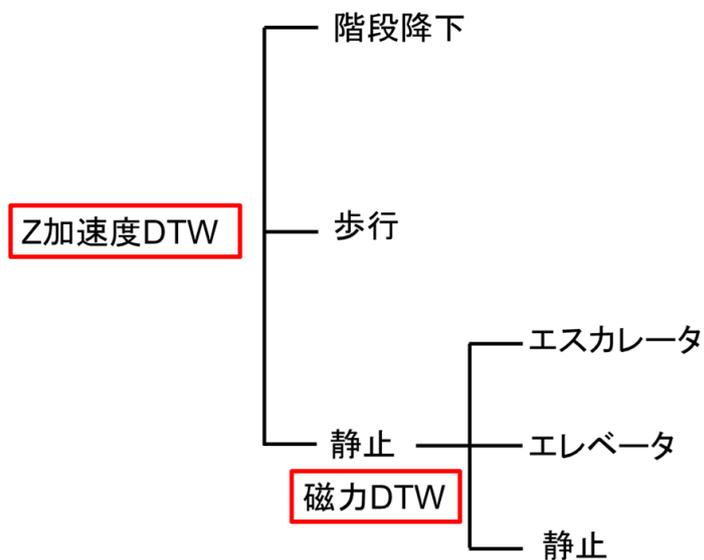


図 13 DTW 距離を用いた状態の区別方法

まず、階段降下状態、歩行状態、静止状態の評価結果を表 15 に示します。各状態 5 秒ずつ、鉛直方向加速度の時系列データを 2 回ずつ計測しました。

表 15 階段降下状態、歩行状態、静止状態の評価結果

	静止 1	静止 2	歩行 1	歩行 2	階段降下 1	階段降下 2
静止 1		2.5410	25.440	21.223	81.517	71.693
静止 2	2.5410		24.903	21.985	81.872	71.743
歩行 1	25.440	24.903		15.606	63.230	48.137
歩行 2	21.223	21.985	15.606		63.976	49.563
階段降下 1	81.517	81.872	63.230	63.976		38.931
階段降下 2	71.693	71.743	48.137	49.563	38.931	

表 15 より、階段降下状態、歩行状態、静止状態が鉛直方向加速度の時系列データに DTW を適用する事で区別可能であることが分かります。また、加速度データを用いた DTW で静止と判定された場合、磁力の大きさに DTW を適用してエスカレータ、エレベータを区別します。エスカレータとエレベータは DTW 距離の大きさに区別し、静止状態は磁力変化の閾値や駅毎のデータベースを用意することで区別することができます。表 16 にエスカレータとエレベータの区別の評価結果を示します。

表 16 エスカレータとエレベータの区別の評価結果

	エスカレータ 1	エスカレータ 2	エレベータ 1	エレベータ 2
エスカレータ 1		8.4773	147.62	99.922
エスカレータ 2	8.4773		157.39	109.70
エレベータ 1	147.62	157.39		38.850
エレベータ 2	99.922	109.70	38.850	

表 16 より、エスカレータ利用時とエレベータ利用時が磁力の大きさの時系列データに DTW を適用する事で区別可能であることが分かります。

【列車乗車判定】

列車乗車判定は、階推定、上下線推定の切り替えとなります。ここで、列車発車時の列車の進行方向の加速度の時系列データのグラフを図 14 に示します。

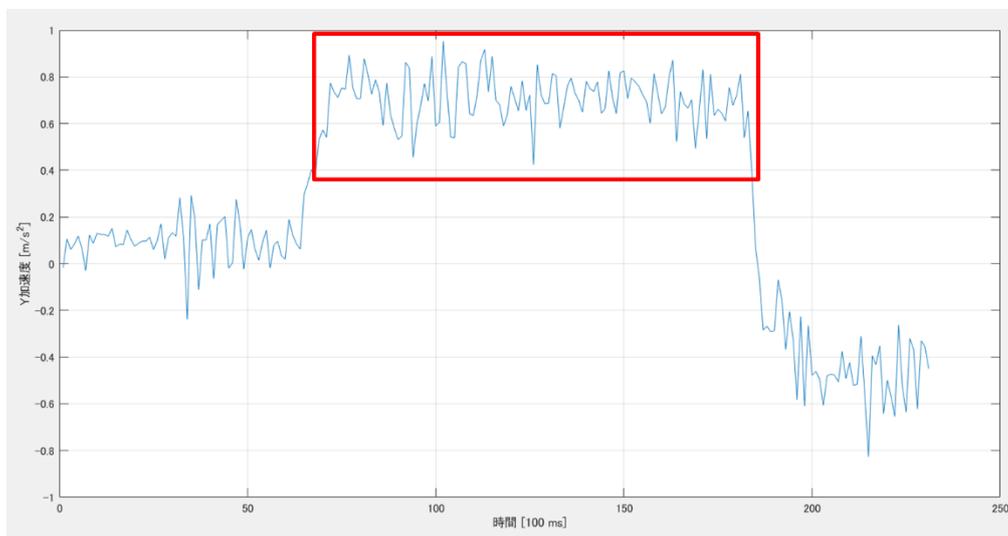


図 14 列車発車時の列車の進行方向の加速度の時系列データのグラフ

図 14 より列車発車時の列車の進行方向の加速度の時系列データには特徴がある事が分かります。そのため、エレベータの場合同様、加速度のデータベースを用意し、正規相互相関関数を用いて、相関係数に閾値を設けることで列車の発車判定を行います。概要図を図 15 に示します。



図 15 列車出発判定の概要図

【アプリケーション概要】

上述の内容を踏まえて、アプリケーションのアイデアの概要を記載します。提案するアプリケーションは以下の流れで行ないます。図 13 を参考にしてください。

①ユーザの階段降下状態、歩行状態、静止状態推定

階段降下状態、歩行状態、静止状態のデータベースをそれぞれ 5 秒間ずつ用意し、5 秒ずつの実測の鉛直方向加速度と DTW を用いて状態を判定します。5 秒ずつの状態推定を 1 秒ずつずらして行なっていきます。

Ex) 0 秒～5 秒⇒歩行

1 秒～6 秒⇒歩行

2 秒～7 秒⇒静止

上記の様に各状態が実測時間のどこに当たるかを分類します。概要を図 16 に示します。



図 16 各状態と実測時間の対応図

図 16 のように各状態が分布している場合、各状態の配列を用意し、始終秒を入れます。

Ex) 歩行状態⇒[0,30]

階段降下状態⇒[30,60]

静止状態⇒[60,70]

②路線推定 (階推定)

①における配列から各々の場合について以下の処理をします。

a) 歩行状態⇒何もしない

b) 階段降下状態⇒・降りた階段の段数推定

・何階分降りたか推定

c) 静止状態⇒静止、エスカレータ、エレベータを区別

c-1) 静止⇒何もしない

c-2) エスカレータ⇒乗車秒数から何階分降りたか推定

c-3) エレベータ⇒・エレベータ乗車時の時刻を推定

・乗車秒数から何階分降りたかを推定

a)、b)、c) を合わせて列車が発車判定される前に何階にいたかを判定し、路線特定

③列車発車推定

列車の進行方向の加速度の時系列データから判定

④上下線推定

- ・列車の乗車判定がされた後、車内音を記録
- ・車内音のデータベースと実測車内音に相互相関関数を適用し、上下線区別
- ・列車発車時刻を時刻表から取得

①～④より、利用路線、上下線、列車発車時刻からユーザの乗車している列車を特定