

携帯基地局情報を用いた地下鉄内測位システムの検討

松原剛¹ 金杉洋² 熊谷潤¹ 柴崎亮介¹

概要: 平常時から継続的に人々の流動や分布を把握することは、様々な分野の基盤情報として需要が拡大しつつある。人々の流動を把握する手段として、屋外においてはGPSを利用した衛星測位技術が確立しているが、地下や屋内等GPSが利用できない場所では、様々な屋内測位手法が提案されており、施設ごとに独立して設置されている。人々の流動や分布の変化を屋内施設・地下空間に渡って捉えるには、少なくとも施設単位の粒度で位置を特定する必要がある。本論文では東京都内の地下鉄駅を対象に、携帯電話網の通信で参照される基地局セルIDと各地下鉄駅の対応表を作成し、地下鉄利用時の利用駅の推定を試みた。

Positioning System for Subway Line Environment Using Mobile Phone Cell-IDs

GO MATSUBARA¹ HIROSHI KANASUGI²
JUN KUMAGAI¹ RYOSUKE SHIBASAKI¹

1. はじめに

刻々と変化する人やモノの流れや分布を把握することは、都市計画・交通計画をはじめ、観光、広告、防災・減災、感染症のシミュレーションなど、人々の活動に関わる幅広い分野の基盤情報として需要が拡大しつつある。特に大規模災害や大規模イベント等により大きく変化する人々の流動や、それが周囲の施設・交通機関に与える影響を測る上で、平常時から継続的に人々の流動や分布を把握することが重要である。

人々の流動(位置情報)を測る手段として、屋外においてはGPSに代表される衛星測位技術が一般的となっており、高精度に位置情報が得られることから、近年ではスマートフォン等の普及に伴い様々なアプリケーションで利用されている。一方で、建物内や地下空間等の屋内における測位技術はこれまでにWi-Fi, iBeacon(BLE), PDR, およびIMESなど複数の方式が提案されており、制約の多い屋内環境の影響を考慮しながら、それぞれの方式の利点と設置環境の状況を勘案した上での利活用が検討されている。屋内測位技術はその性質上、施設単位で設置されることが一般的であり、測位対象となる領域は当該施設内に限定されるため屋内外の測位技術をシームレスに繋ぐ方法が課題となり、検討されてきている[1]。

しかし、人々の流動や分布の変化をシームレスに捉えるには、屋内施設同士・地下空間施設同士の連続的な移動についても捉える必要がある。その際には、必ずしも個別施設内における位置情報を高精度に求める必要はなく、地下

鉄駅やビルなどの施設単位の粒度で特定することが最低限の要件となる。特に、都市圏における主要公共交通機関である地下鉄においては、滞在駅施設を特定するだけでも、乗換案内や電車遅延情報の提供だけでなく、災害時の避難情報提供などに応用できる可能性がある。

そこで本論文では、昨今の地下鉄や地下街等のほぼ全域を網羅している携帯電話通信網に着目し、携帯電話での通信で参照される基地局セルIDの情報を、その位置情報(駅名など)と合わせて蓄積することで、地下鉄における利用路線や利用駅の推定方法を検討した。具体的には、東京都内の地下鉄駅274駅(東京メトロ・都営地下鉄)において、国内3キャリアのAndroid端末を用いて基地局セルIDを収集した上で各駅と基地局セルIDとの対応表を含むDBを構築し、各駅で捕捉される基地局セルIDから、現在位置(駅)の特定を試みた。

以下、2.において現在実用されている屋内測位手法の整理と比較を行い、3.において本論文で提案する手法と検証を行い、課題と今後の展開を述べ、4.においてまとめを述べる。

2. 関連研究

本章ではGPSの利用が困難な環境で用いられる屋内測位方法を整理し、本論文の位置付けと方針について述べる。

現在、主流となりつつある手法は、あらかじめ位置座標を付与した基準点となる装置から電波を発信し、スマートフォン等の受信機にて、位置を推定する手法である。一方で、地下鉄に特化した分野では、地下や電車特有の特徴を利用した方式も存在する。

¹ 東京大学 空間情報科学研究センター

² 東京大学 地球観測データ統融合連携研究機構

2.1 各種屋内測位方式

表 2-1 に現在の主な屋内測位方式の特徴をまとめた。

表 2-1 各屋内測位方式

方式名称	概要	精度
Wi-Fi 測位	Wi-Fi アクセスポイントを利用した三点測位方式	○/◎
基地局測位	携帯電話基地局を利用した三点測位方式	△
iBeacon (BLE)	Bluetooth の発信機を要所に配置した測位方式	◎
PDR	加速度センサ・ジャイロセンサを利用し、基準点からの相対的な移動を計算する測位方式	○
IMES	GPS と同規格の電波を発信する発信機を設置した測位方式	○
気圧センサ方式	地下鉄坑内の深度情報を利用して気圧との対比から測位する方式	○
超音波方式	電車車両内に設置された発信機から超音波を使って情報を送る方式	◎

◎：高精度 ○：中程度の精度 △：精度は低い

Wi-Fi 測位方式は PlaceEngine[2]に代表される手法であり、既設の Wi-Fi アクセスポイントの固有情報(MacAddress)と位置座標情報のマッチングテーブルを集合知により作成し、電波強度(RSSI)を利用した三点測位により、屋内等でのおよその位置を把握する手法である。あるいは、既存のアクセスポイントが十分に配置されていないエリアでは、測位用に新たにアクセスポイントを増設するケースもある。設置間隔や電波強度を調整することにより、数十 cm 単位での測位も可能となり、屋内測位手法の主流となっている。

基地局測位方式も基本の仕組みは Wi-Fi 測位と同様ではあるが、基地局からの電波到達距離が長い為、測位精度は数 km～数十 km オーダになるケースもある。一方で、Wi-Fi インフラが整備されていない地下や、山中等でも、携帯で通信が可能な場所であれば、ある程度の場所の特定が可能である。携帯キャリア側では常にユーザが直近に接続した基地局を把握しているため、遭難対策等に利用される。Google や NTTdocomo が基地局セル ID から位置座標を推定する API を提供している[3][4]他、OpenCellID[5]等、クラウドソーシングを利用して基地局情報を収集するサイトも存在する。

iBeacon(BLE)方式は基準点となる Bluetooth 発信機を要所に設置し、チェックイン方式でピンポイントに座標を特定することが可能である。電波到達距離を短めに調節する

ことにより、比較的正確な位置測位が可能であり、使用目的としては屋内ナビやチェックイン広告等に利用される。発信機の設置調整と新規整備が課題となる。

PDR[6]方式はスマートフォンの各種センサを利用し、基準点からの相対的な移動ベクトルを算出し、おおよその現在位置を把握する手法である。基準点となる場所を推測するために他の方式 (iBeacon 等) と併用されることが多い。

IMES[7]方式は GPS と同規格の電波を発信する発信機を要所に設置することにより、位置測位を実現する。また、屋外の GPS 情報との連携も容易であるため、屋内外でのシームレスな測位を実現する際には相性が良いが、iBeacon と同様に発信機の整備が課題となる。

気圧センサ方式[8]は地下鉄に特化した測位方法であり、地下鉄坑内の深度と気圧の相関関係を利用する方式である。

また、鉄道事業者各社によって提供されている位置情報提供サービス[9]もある。車両内に設置された情報掲示板等から超音波により、情報を発信し、車両単位での精度の高い情報を提要する方式である。

2.2 Android SDK による実測

前述に記載の方式の内、Android スマートフォンには標準ライブラリとして Wi-Fi 測位と基地局測位が実装されており、ほぼ全ての端末において利用できるため、実際に地下鉄利用時の測位を行い、その移動軌跡から位置測位の検証を行った。



図 2-1 Android SDK 標準機能(Wi-Fi 測位)での地下鉄測位

図 2-1 は、東京メトロ千代田線の北千住駅～代々木公園駅 (17 駅) を地下鉄車両に乗車して移動した際に、3 分間隔で Android 標準の測位ライブラリを呼び出して計測した測位結果をプロットしたものである (基地局測位には NTT docomo の携帯電話網を使用した)。

駅単位で正しく計測できたものは 17 駅中、北千住駅、根津駅、および日比谷駅のわずか 3 駅となっている。(A) 点では、Wi-Fi アクセスポイントの移動等に起因する測位

ノイズにより、測位点が大きく外れている。また、(B)区間では位置情報が得られる Wi-Fi アクセスポイントも基地局も捕捉できなかったため、長時間正しい場所を計測できなかった。

以上の結果から、Android SDK の標準機能では、Wi-Fi アクセスポイントおよび、NTT docomo の携帯電話セル ID と駅情報を紐付けるテーブルの蓄積が充分ではなく、機種や OS バージョンにより多少捕捉できる駅数は異なるものの、実用に足る測位ができないことが解る。なお、iPhone SDK でも同様のライブラリが提供されているが、使用している DB の差異により、結果は異なる可能性がある。

2.3 各方式の比較と本論文の位置付け

以上のように、GPS が利用できない場所では様々な測位方式が検討されているが、それぞれの方式のメリットデメリットを勘案した上で、用途によって適切な方式を選択する必要がある。

Wi-Fi 測位方式、基地局測位方式において、地下での測位があまり正確でない理由として、指標となるデータ (MacAddress/CellID) と実座標のマッピングテーブルの作成が困難であるという点が挙げられる。GPS が利用できないため、観測者の絶対的な位置を知る方法は、観測者自身による現在位置の自己申告のみに頼らざるを得ないため、集合知的な手法が取りにくく、データの蓄積がしにくいためである。

一方で、iBeacon, PDR, IMES, 超音波方式においては専用の発信機を設置する必要があり、広範囲においてインフラを整備するためには組織的な計画が必要不可欠である。

気圧センサを用いた方式は、Android 端末には気圧計を搭載した機種がまだ少ないという点で短期的には普及に不利である。

本論文では、測位精度では劣る一方で、ユーザカバー率、既存インフラをそのまま活用できるコストパフォーマンス、および国内外での汎用性に重点を置き、基地局測位方式の利便性を向上させる方針を選択した。東京都内の地下鉄ではほぼ全域で携帯電話の通信が可能なインフラが十分に整っており、特殊な発信機の追加設置も不要な上、スマートフォンの標準機能のみを使用して測位が実現可能な方式のため、最も導入しやすくコストパフォーマンスが高いと判断した。また、基地局の規格は全世界で共通であり、国外展開も見据えた選択でもある。

3. 提案手法

本章では、まず本論文で提案する地下施設レベル位置測位の手法について述べる。主な流れとしては下記 2 つの手順となる。

- (1) 基地局情報と地下鉄駅のマッチングテーブル作成

(2) そのテーブルを利用した駅測位アプリの作成
次に、基地局情報を収集するアプリと、位置情報を推定するアプリのプロトタイプを開発し、収集結果、および位置計測結果を評価したのち、課題と今後の展望について述べる。

3.1 地下鉄駅と基地局 ID テーブルの作成

本節では基地局セル ID と駅のマッチングテーブルの作成方法を述べる。

3.1.1 収集内容

本手法を適用するにあたり、今回は基地局セル ID 収集対象駅を都内の主要地下鉄 274 駅(表 3-1)に絞ってテーブルを作成した。

表 3-1 計測路線一覧

路線名	駅数	運営	路線名	駅数	運営
浅草線	20	○	日比谷線	21	●
新宿線	21	○	南北線	16	●
大江戸線	38	○	半蔵門線	13	●
三田線	24	○	千代田線	20	●
銀座線	19	●	副都心線	7	●
東西線	23	●	丸の内線	28	●
有楽町線	24	●	合計	274	

○：都営地下鉄 ●：東京メトロ

計測は 2016 年 03 月 22 日 から 2016 年 03 月 30 日の期間に行い、過度に駅や電車が混雑する時間帯は基地局電波が十分に捕捉できない可能性があるため、通勤・通学・帰宅時のラッシュ時を避けて計測を実施した。

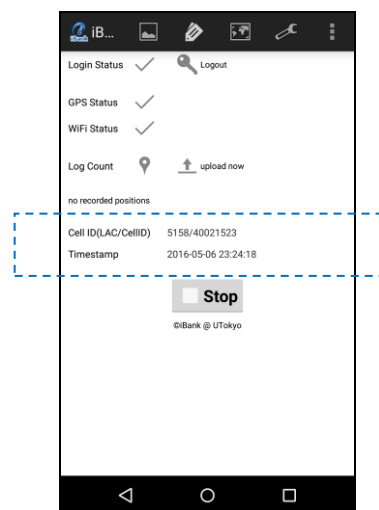


図 3-1 基地局情報収集アプリ

計測には、スマートフォンがその時点で捕捉している

CellTowerID(CellID), LocationAreaCode(LAC)を表示する Android アプリ図 3-1 を作成し, NTTdocomo, Softbank, au の3キャリアそれぞれの基地局セル ID を記録した。

3.1.2 収集方法

事前準備として各携帯電話キャリアの Android 端末を1台ずつ, 計3台を用意し, 全ての端末時間を秒単位で合わせ, 前述の Android アプリをインストールし, 3台同時に携行し計測した。

各地下鉄駅で捕捉される基地局セル ID のテーブルを作成するにあたり, 最も課題となる点は, 前述の通り, 計測者が現在滞在している駅を正確に把握することにある。乗車した車両と時刻表を参照し, ある程度の把握は可能であるが, 時刻表は分単位での記載であり, また列車遅延等の運行状況によっては正確な時刻と位置の把握ができない。そのため, より正確に基地局 ID を収集するため, 実際に各地下鉄駅に降り, ある程度の時間をかけて滞在し, 基地局 ID を収集する方針とした。

1. 地下鉄車両が各駅に停車後, ホームの端に降車, 時刻と, 現在捕捉している基地局セル ID, LAC 等を記録
2. 地下鉄ホームの端から端まで歩き, 捕捉している基地局セル ID が変化した場合に全て記録(アプリが記録)。
3. 次の車両が来るまで2を続ける
4. 次の車両に乗車した時刻を記録

この手順を表 3-1 に記載の全路線・全駅において実施した。

3.1.3 収集結果

捕捉している基地局情報は数秒に1回程度の頻度で更新される場合もあり, 数分間固定される場合もあった。また, 274 駅に対し, ユニークな基地局セル ID 数は1携帯キャリアにつき, 500 個程度であった。収集漏れや, 計測期間後に設置された基地局セル ID も存在する可能性もあるが, このオーダであればデータ量は 16KB 程度であったため, 全てのデータを事前に端末に搭載することが可能であり, 測位時はネットワーク通信を使用せずに, 端末内で完結して駅推定が可能である。

例として千代田線の計測結果(一部抜粋)を表 3-2 に示す(各種記号は, 同一の基地局セル ID を示す)。一部の駅では8種類以上もの基地局セル ID が捕捉できるケースがある一方で, 複数の駅で同一の基地局セル ID が捕捉できるケース(表参道駅, 乃木坂駅, および赤坂駅●)もある。このような基地局が捕捉された際には, 1件のみの計測では一意に現在位置(駅)を特定できない。

3.2 地下鉄駅推定アプリの作成

3.1 で収集したテーブルを参照し, 現在位置(地下鉄駅)

を推測する Android アプリを作成した。複数駅が候補の場合を加味した推定アルゴリズムを図 3-2 に示す。

現在位置を視認し易くするために, GoogleMap 上にマーカーを配置したが, 駅を特定するだけならば地図は不要である。駅座標は「駅データ.jp」[10]のデータを参照した。

開発環境: Android Studio 2.1

対象 OS: Android 4.3 以降

なお, 今回は基地局セル ID 計測アプリ, 位置測位アプリ双方を Android OS 用に作成したが, 基地局セル ID の規格は共通のため, iOS でも同等のアプリを作成することが可能である。

表 3-2 千代田線 CellID テーブル(一部抜粋)

駅名	CellID / LAC	駅名	CellID / LAC	
明治神宮前	33578242 / 5192	赤坂	33578256 / 5157	
	33578242 / 5157		33578256 / 5192	
	33578258 / 5192		33578240 / 5157	
	48047363 / 5157		33578240 / 5192	
	48047379 / 5192		40891666 / 5157	△
	48047379 / 5157		48047360 / 5192	
表参道	33579264 / 5192	国会 議事堂前	48047376 / 5192	
	33579264 / 5157		48047376 / 5157	●
	33579280 / 5192		33579024 / 5157	
	48047360 / 5157		33579024 / 5192	
乃木坂	48047376 / 5157	霞ヶ関	40891650 / 5192	
	33579267 / 5192		40891666 / 5157	△
	33579285 / 5192		33579540 / 5192	
	33579269 / 5157		33579524 / 5157	
	48047360 / 5157		40891666 / 5192	
	48047376 / 5192		48048384 / 5161	
48047376 / 5157	48048400 / 5161			

○●△ 記号は複数駅で捕捉される基地局セル ID

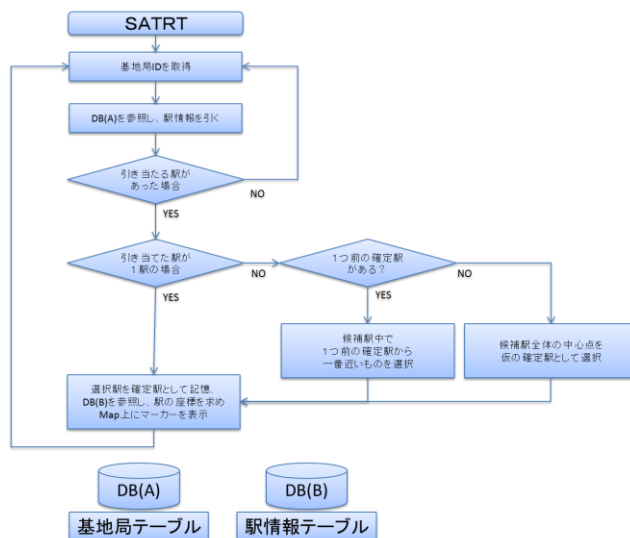


図 3-2 複数駅が候補の場合の推定アルゴリズム

3.3 評価

本節では, 実際に地下鉄を利用しながら, このアプリを使

用し、駅位置の推定結果を検証した。

3.3.1 評価手法

東京メトロ千代田線の綾瀬駅から代々木上原駅にかけて実際に地下鉄車両に乗りし、本アプリを起動しつつ、各駅の到着時に、正しく現在の停車駅を示しているかを記録した。

3.3.2 計測結果

東京メトロ千代田線の綾瀬駅から代々木上原駅まで移動して正しく駅を捕捉できているかどうかを検証した(表 3-3, 図 3-3)。結果として、19 駅中、11 駅に関しては正しく判定できた(○)。図 3-36 駅に関しては当該駅を捕捉してはいたものの、一意には特定できなかった(△)(図 3-4)。2 駅に関しては違う駅を指しており、捕捉できなかった(×)。

表 3-3 千代田線での検証結果

駅名	結果	備考
綾瀬	○	(地上駅)
北千住	○	
町屋	×	北千住のまま動かず
西日暮里	△	町屋～千駄木 区間を取得
千駄木	△	町屋～千駄木 区間を取得
根津	○	
湯島	○	
新御茶ノ水	○	
大手町	△	二重橋前か大手町を取得
二重橋前	○	
日比谷	○	
霞ヶ関	△	二重橋前か霞ヶ関を取得
国会議事堂前	○	
赤坂	○	
乃木坂	△	赤坂～乃木坂 区間を取得
表参道	○	
明治神宮前	○	
代々木公園	△	明治神宮前～代々木公園 区間を取得
代々木上原	×	(地上駅)



図 3-3 千代田線での移動軌跡



図 3-4 3 駅で捕捉される基地局の例

3.4 考察

千代田線においては、約 8 割(17/19)の駅において、電車停車中の現在位置(駅)を検出することができた。しかし、複数駅にまたがって捕捉される基地局セル ID を捕捉した場合には、稀に一意に駅を特定することができなかった。

また、地域と携帯キャリアを絞った場合(今回は首都圏の地下鉄)には基地局セル ID 数はさほど多くなく、アプリに内包できるサイズ(apk サイズ 3MB に対し、16KB 程度)であることが分かった。そのため、本手法ではネットワーク通信を発生させることなく現在位置(駅)を推定することが可能であり、パケット通信が重量課金体系の国へ適用する場合には通信料金面で有効であることが分かった。

3.5 課題と展望

本実験結果において、浮き彫りとなった課題と今後の拡張プランについて述べる。

(1) 基地局テーブルの更新方法の確立、および拡充

基地局セル ID は、各携帯キャリアの設置方針により、追加や撤去等が行われ、変更される可能性がある。定期的、継続的なデータ収集、および簡便なデータ修正方法の確立が必要である。具体的な手法としては、第一段階として、テーブルに載っていない未知の基地局セル ID を捕捉した場合には、管理サーバに送信してテーブルの追加を行うインタフェースを検討する。第二段階として、未知の基地局セル ID を捕捉した場合には、前後の確定している基地局情報から推測して自動的にデータベースを補正することを検討する。合わせて、スマートフォン上のデータベースを

更新する仕組みも作成する。

(2) 複数候補駅からの選択

今回の調査により、複数駅にまたがって捕捉される基地局セル ID が想定よりも多いことが判明したため、候補の中から一意に現在駅を選択する方法を検討する必要がある。今回は簡易的に、前回捕捉された駅から最も近い駅を選択しているが、不正確な推定結果になる場合があったため、機械学習などをはじめとした別の手法や移動履歴を勘案したアルゴリズムの検討が必要となる。

(3) 駅間の推定

今回は地下鉄駅のみを対象として、システム構築を行ったが、経路探索可能なネットワークデータ[11]と併用することで駅間の位置推定も可能と考える。また、東京メトロでは、列車の現在位置を提供する API[12]を公開している。これらの情報を併用することにより、乗車中の地下鉄車両を特定し、より正確な駅間での位置情報を把握することが可能と考える。

(4) 他路線、他施設への拡大

今回は東京都内の地下鉄に限ってテーブルを作成したが、スマートフォンの標準的な機能のみを使用しているため、国内外の地下鉄においても同様の手法を適用可能であると考える。都内の地下鉄において前述の課題を解決したのち、他地域への拡充を図る。また、地下鉄駅のみならず、他の屋内空間として特定のビルの地下階や地下街等での位置特定にも本手法は有効と考える。

4. まとめ

本論文では、人々の現在位置を知ることは極めて重要であるが、GPS が使えない環境（主に地下）においては、標準的な方法では位置測位が充分に行えない現状を鑑み、新たな機器（発信機等）の設置を必要とせず、また、一般的に普及しているスマートフォンのみを使って駅等の施設単位での大まかな位置を把握することに重点をおき、携帯基地局情報を利用した測位方法を提案し、東京都内の地下鉄を対象に検証した。

検証の結果、一定の精度で駅の設定が可能であったものの、基地局セル ID 情報の不足による測位不能箇所があること、および、複数駅で捕捉される基地局の場合は一意に駅が特定できないといった課題も浮き彫りになった。今後、基地局情報の拡充を図るとともに、推定アルゴリズムの改善を行い、さらなる利便性の向上を図る。

参考文献

- [1] 国土交通省:東京駅周辺屋内外シームレス測位サービス実証実験, 入手先 <http://www.mlit.go.jp/kokudoseisaku/kokudoseisaku_tk1_000084.html> (参照 2016-05-09).
- [2] 暦本純一, 塩野崎敦, 末吉隆彦, 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論文集 2006, 95-104, 2006
- [3] Google: Google Maps Geolocation API, 入手先<<https://developers.google.com/maps/documentation/geolocation/intro>> (参照 2016-05-09).
- [4] NTTdocomo: 基地局を利用した位置情報提供 インタフェース仕様書,入手先<https://www.nttdocomo.co.jp/binary/pdf/service/developer/smart_phone/base_station/location/location_interface_v1.1.pdf> (参照 2016-05-09).
- [5] Johan Alexander Nordstrand Rusvik.: Localizing Cell Towers from Crowdsourced Measurements (2015), available from <http://wiki.opencellid.org/images/e/ea/Localizing_Cell_Towers_from_Crowdsourced_Measurements_-_Johan_Alexander_Nordstrand_-_Master_Thesis.pdf> (accessed 2016-05-09).
- [6] 梶克彦, 河口信夫: Ubicomp/ISWC 2015 PDR Challenge 開催報告, HCG シンポジウム 2015, 161-165, 2015
- [7] D. Manandhar, S. Kawaguchi, and H. Torimoto: Results of IMES (Indoor Messaging System) Implementation for Seamless Indoor Navigation and Social Infrastructure Platform, ION GNSS 2010, 1184-1191, 2010
- [8] S. Hyuga, M. Ito, M. Iwai, and K. Sezaki: Estimate a User's Location Using Smartphone's Barometer on a Subway, 5th International Workshop on Mobile Entity Localization and Tracking in GPS-less Environments (MELT 2015), 2015, 入手先<[doi 10.1145/2830571.2830576](https://doi.org/10.1145/2830571.2830576)>.
- [9] JR 東日本: JR 東日本アプリでの列車位置情報サービスがさらに進化します, 入手先 <<https://www.jreast.co.jp/press/2015/20160203.pdf>> (参照 2016-05-09).
- [10] 株式会社コードプラス: 駅データ 無料ダウンロード 『駅データ.jp』, 入手先 <<http://www.ekidata.jp/doc/station.php>> (参照 2016-05-09).
- [11] 金杉洋, 関本義秀, 檜山武浩: 人々の流動再現へ向けたオープンな鉄道インフラデータの構築, 地理情報システム学会講演論文集 CD-ROM, Vol.22, 2013.
- [12] 東京メトロ: 東京メトロオープンデータ開発者サイト, 「オープンデータとして提供するデータ」, 入手先 <https://developer.tokyometroapp.jp/update_term_of_use> (参照 2016-05-09).