

# マルチパス誤差の空間相関性を利用した 歩行者測位手法と性能評価

パトウイヤロ 小花貞夫 湯素華

**概要:** 歩行者事故を防止するために、GPSによる歩行者の位置情報を歩車間通信により車両に通知し、位置から算出される歩車間距離によって接近警告する歩者間通信が注目されている。ここでGPSの測位精度が重要となるが、従来のGPS単独測位では、都市部においてはマルチパス誤差の影響により十分な精度が得られないという問題がある。本稿では、GPSの測位精度を改善するために、周辺に走行する車両のマルチパス誤差情報を活用し、線形回帰モデルにより歩行者のマルチパス誤差を推測し、疑似距離から推測したマルチパス誤差を取り除いて最適な位置を探索する手法を提案する。3D mapを活用したレイトレーシングシミュレーション評価により、提案手法の平均測位誤差が約2.24mであり、単独測位方式の測位誤差を89%削減できることを確認した。

## Improvement and Evaluation of Pedestrian Positioning Precision by Using Spatial Correlation of Multipath Error

YEARLOR PATOU SADA O OBANA SUHUA TANG

### 1. はじめに

近年、歩行者事故を減らすために、歩行者の位置情報を無線で車両に通知し車両の位置と歩行者の位置から算出された歩車間距離が一定閾値以下になると注意喚起を行う、歩車間通信[1]が注目されている。その性能は位置精度に大いに依存する。

車両の場合はGPSに加え、車速パルスによる走行距離測定、マップマッチングによる位置の補正やカメラ等による車線の認識など様々な技術を併用して、位置を高い精度で測定することが可能である。しかし、歩行者の位置は主にスマートフォンに搭載される簡易GPS受信機により測位を行うため、都市部ではマルチパス誤差の影響により測位誤差が数十メートルになる場合がある。仰角の高い衛星からの電波は直接波を受信することができ、誤差が生じない。一方、仰角の低い衛星は高層ビルなどの建造物の遮蔽により直接波を受信できず、反射又は回折した電波を受信することにより、受信アンテナと衛星間の真距離と実際に受信された電波のパス長(電波伝搬経路長)に差が生じ、それをマルチパス誤差と呼ぶ。

マルチパス誤差の影響を低減する従来方式として、マルチパス誤差が含まれる衛星を識別し測位計算から除外する方法[2]とマルチパス誤差を推測し取り除く方法が挙げられる。しかし、都市部では受信可能な衛星数が減少し、マルチパス誤差が含まれる衛星を取り除くことにより測位計算に必要な衛星数を確保できない場合がある。また、マルチパス誤差

を推測する方法では信号強度とコリレータ技術によりマルチパス誤差を推測する方法[3]が提案されているが、マルチパス誤差を完全に削減することがまだ難しい。

本稿では、近接する受信機どうしでのマルチパス誤差の空間相関性を調査し、歩行者の周辺にある車両のマルチパス誤差情報から歩行者のマルチパス誤差を推測する手法、及び、推測した歩行者のマルチパス誤差を取り除いて歩行者の位置を高精度に測位する手法を提案し、測位誤差を約2mまで削減することを目標とする。

以降、第2章では関連技術を説明する。第3章ではマルチパス誤差の特徴を述べる。第4章ではマルチパス誤差の空間相関性を確認するための予備実験について述べる。第5章では提案手法を述べ、第6章では提案手法の評価実験を述べる。第7章では考察を述べる。第8章では24時間のマルチパス誤差の使用、最後の第9章では結論を述べる。

### 2. 関連技術

#### 2.1 3D map を利用したマルチパス誤差の推測

Miuraら[4]は、3D mapとレイトレーシングを利用し、マルチパスの有無の識別に加えマルチパス誤差を推測する手法を提案した。しかし、レイトレーシングによるマルチパス誤差の推測は計算量が多く、歩行者用の携帯端末では処理能力の問題から測位は難しい。また、高精度な3D mapを作成することが困難である。

#### 2.2 マルチパス誤差の空間相関性

マルチパス誤差は道路の両側に存在するビルや建物の反射によって生じる。Tangら[5]は、同じ車線を走行する近接車両どうしが同じ建物からの反射電波を受信する際、マルチ

パス誤差がほぼ同じで、マルチパス誤差の空間相関性が高いことを示した。本稿では同じ車線だけでなく、他の方向の空間相関性も確認し、測位に使用する。

### 3. マルチパス誤差の特徴

GPSによる測位誤差の要因として挙げられる電離層誤差と対流圏誤差は広範囲に渡り共通に現れるため、DGPS(Differential GPS)により補正することが可能である。DGPSでは位置が既知である基準局において、衛星から基準局までの電波伝搬時間に光速を乗じることにより求められる擬似距離から、真距離との差分を取ることで電離層誤差や対流圏誤差を計算することが可能である[6]。一方、マルチパス誤差は局所的に生じる誤差であり、周囲の建造物の高さや反射面と受信機との距離等により受けるマルチパス誤差の影響が異なるため、DGPSによる誤差の補正は適用できない。しかし、狭い範囲で考える場合、マルチパス誤差も電離層誤差や対流圏誤差と同様に、共通に生じると考えられる。近接する受信機どうしでは、同じ建造物等から反射又は回折した電波を受信するため、受信機が受けるマルチパス誤差の影響も共通である。本稿ではこのような空間的に共通に現れるマルチパス誤差をマルチパス誤差の空間相関性と呼ぶ。この空間相関性を確認するために、3D mapを用い、レイトレーシングシミュレーション実験を行った。第4章に予備実験の詳細を述べる。

### 4. マルチパス誤差の空間相関性を確認するための予備実験

#### 4.1 実験概要

第3章に述べた空間的相関性を確認するためにシミュレーション実験を行った。マルチパス誤差を求めるために3D mapを使用し、レイトレーシングにより衛星から到来するパスの方向の追跡及びパス長を計算する。レイトレーシングによって計算されたパス長と衛星・受信機間の真距離との差分をマルチパス誤差として評価する。

#### 4.2 シミュレーション内容

マルチパス誤差の空間相関性を確認するために、マルチパス誤差が発生すると思われる新宿駅周辺の3D mapを使ってシミュレーション実験を行った。図1は実験環境を示し、赤線の範囲内に配置した受信機は高層ビルに囲まれ、衛星からの電波が周囲のビルから反射又は回折して受信機に届くと思われる。実験では衛星測位解析ツールであるGPS-Studio(構造計画研究所社製)を利用した。GPS-Studioの関数であるRcvPos Creatorを用い、衛星の配置情報をRINEX形式で取得した。取得した衛星の配置情報をGPS-Studio Mainに入力し、電波伝搬受受信機設定ファイルを得た。また、電波伝搬受受信機の設定ファイルと新宿駅周辺の3D map情報(NTTデータ社製)を用い、レイトレーシングを行った。レイトレーシングによりパスを追跡し、各パ

スの長さや伝搬時間などの情報が含まれた電波伝搬結果ファイルが得られる。レイトレーシングツール RapLabでのパラメータの設定を表1に示す。図2のように95台のGPS受信機を配置し、8車線に沿って10m間隔、道路の両側の歩道に沿って20m間隔で配置した。

表1 シミュレーション条件

パラメータ	設定内容
最大電波反射回数	1回
最大電波回折回数	1回
最大電波透過回数	0回
計算対象建物範囲	100m



図1 実験場所と電波の経路

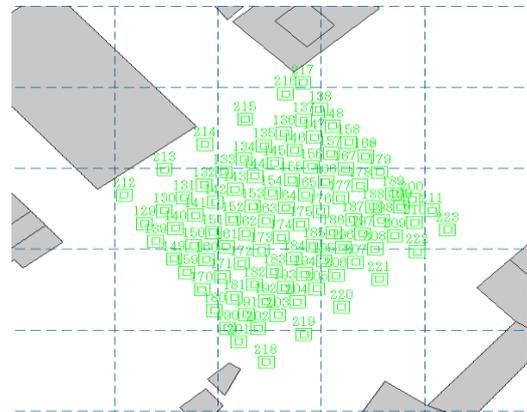


図2 RapLab上の受信機配置

#### 4.3 予備実験の結果

同じ環境下に配置した95台の受信機におけるマルチパス誤差の空間相関性を確認するために、ある時刻における1機の衛星とのマルチパス誤差とENU座標系で表した受信機の位置の関係を図4に示す。横軸のEは東方向を正、縦軸のNは北方向を正とする。高さ軸はマルチパス誤差を示す。マルチパス誤差は右下から左上に向かって共通に増加することが分かる。図1のように衛星が北西方向にあるため、衛星からの電波が道路の右下にあるビルから反射され、受信機に届くと考えられる。ビルから離れるに伴い、

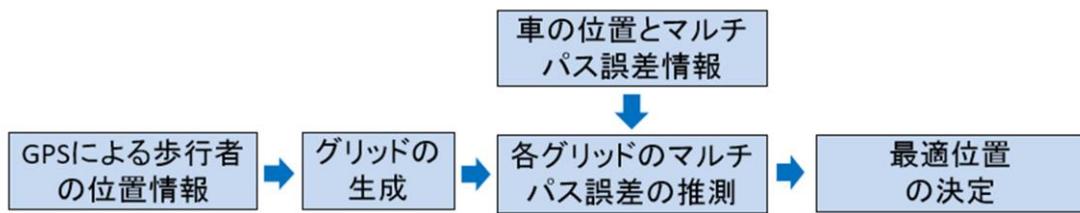


図 3 提案手法の概要

反射距離が長くなり、マルチパス誤差も増加する。そのため、マルチパス誤差が右下から左上に向かって増加する。これにより、マルチパス誤差は空間的に相関性があり、一部の位置におけるマルチパス誤差の値が既知であれば増加又は減少の傾向から、ある位置のマルチパス誤差の値を推測することが可能と考えられる。

また、マルチパス誤差は道路の両側に存在するビルや建物からの反射電波によって生じるため、図 4 に示すように道路の進行方向と、進行方向に直交する方向の 2 方向に相関性が高いということが分かる。

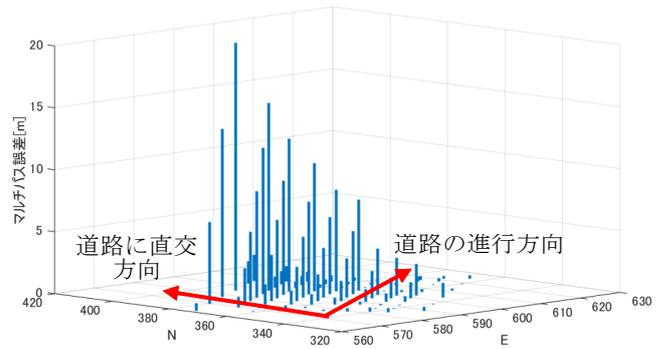


図 4 マルチパス誤差と位置の関係

## 5. 周辺車両のマルチパス誤差情報を利用した歩行者位置推定手法の提案

### 5.1 前提条件

歩行者のマルチパス誤差を推測するために、周囲のマルチパス誤差情報が必要である。そのため、歩行者は自分の周辺に走行する車両から車両の位置とマルチパス誤差の情報を歩者間通信により取得することが可能であること及び車両の位置情報には誤差が小さいことを前提とする。

### 5.2 提案手法の概要

予備実験の結果により近くの受信機どうしが受けるマルチパス誤差の影響は相関性が高いということを確認した。また、図 4 に示すように道路の進行方向と、進行方向に直行する方向ではマルチパス誤差の空間相関性が高いということが分かった。つまり、この 2 つの方向に沿って、複数の位置とマルチパス誤差の関係が既知であれば、ある位置のマルチパス誤差を推測することが可能と考えられる。この性質を用い、歩行者の周辺に走行する車両の位置とマルチパス誤差から、自分のマルチパス誤差を推測することが可能である。しかし、マルチパス誤差を推測するには歩行者の真位置が必要であるが、通常では真位置は未知である。そのため、本提案手法では図 5 のように、GPS により推定された歩行者の位置を中心とし、探索する範囲を作成する。探索範囲は等間隔の位置から構成され、グリッドと呼ぶ。各グリッドポイントの位置を真位置と仮定してマルチパス誤差を推測し、擬似距離から推測したマルチパス誤差を取り除き、補正擬似距離を求める。グリッドポイント・衛星間の距離と補正擬似距離の差を残差とする。全衛星との残差の平均値を求め、グリッドの中から残差の平均値が最小のグリッドポイントを最適な位置とする。

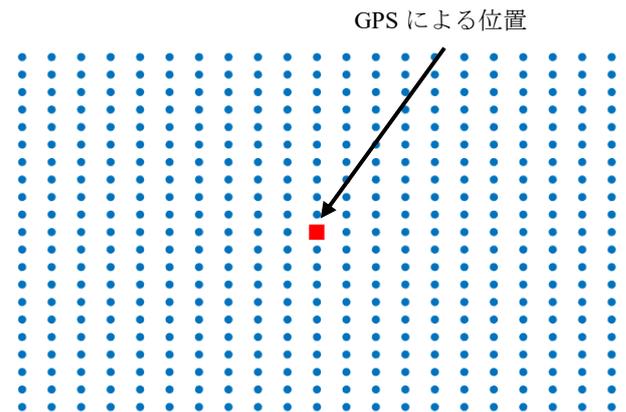


図 5 GPS による位置を中心に生成したグリッドの例

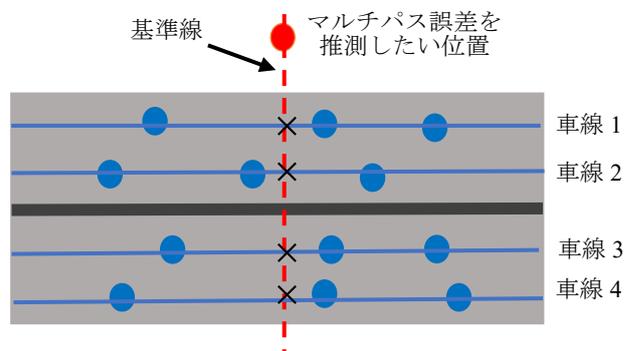


図 6 推測対象位置と車両のイメージ図

### 5.3 歩行者の位置決定手順

図 3 はグリッドから歩行者の最適な位置を決定する手順を示す。歩行者の最適な位置を推定するため、GPS によ

る位置を初期位置として、グリッドを生成する。生成したグリッドに対し、取得した周囲の車両のマルチパス誤差情報から各グリッドポイントのマルチパス誤差を推測する。最後に、各グリッドポイントから、残差によって最適な位置を決定する。図 3 の各手順の詳細を次に述べる。

### 5.3.1 グリッドの生成

グリッドを生成する目的は、歩行者の真位置が未知であるため、歩行者の真位置が各グリッドポイントであることと仮定し、そのグリッドポイントにおけるマルチパス誤差を推測することである。グリッドポイントの生成は GPS による位置を中心とし、1メートルの等間隔で決められた範囲内に生成される。各グリッドポイントはその位置  $(x, y, z)$  とマルチパス誤差を推測した後に格納するための変数  $e$  から構成する。

### 5.3.2 使用する周辺車両のマルチパス誤差情報

第 4 章で道路の進行方向と、進行方向に直交する方向の 2 つの方向においてマルチパス誤差の空間相関性が高いと述べた。そのため、歩行者のマルチパス誤差を推測する際はこの 2 つの方向に沿ってマルチパス誤差を推測する必要がある。図 6 に示すようにマルチパス誤差を推測したい位置から道路に向かって基準線を描き、基準線と各車線との交点を求める。各車線のマルチパス誤差情報を用いて進行方向の空間相関性から各交点のマルチパス誤差を推測する。そして、進行方向に直交する方向の空間相関性を使用し、推測した交点のマルチパス誤差情報から、推測したい位置のマルチパス誤差を推測する。しかし、車両台数が少ない道路では各車線のマルチパス誤差情報を確保できない場合があると考えられる。図 7 は静止状態で配置した 2 台の GPS 受信機と 1 機の衛星とのマルチパス誤差を示し、横軸は経過秒数、縦軸はマルチパス誤差の大きさを示す。30 秒間のマルチパス誤差は変化がなく一定であることが分かる。この結果から、現在時刻において車両のマルチパス誤差情報がない場合は数秒前に受信したマルチパス誤差情報を使用する。また、ある時刻のマルチパス誤差情報に有効期限を与え、有効期限を過ぎたらそのマルチパス誤差情報を廃棄する。

### 5.3.3 マルチパス誤差の推測

マルチパス誤差を推測するために、MATLAB の線形回帰モデル[7]を使用する。線形回帰モデルは式(1)から生成する。

$$\text{mdl} = \text{fitlm}(X, Y). \quad (1)$$

式(1)の  $X$  は入力であり、 $Y$  は入力に対する応答である。入力のデータ行列  $X$  と応答のデータ行列  $Y$  を与えることにより線形回帰モデルを生成することができる。式(1)から生成したモデル  $\text{mdl}$  に対し、式(2)のように、新しい入力である  $X_{\text{new}}$  のデータ行列を与え、 $\text{predict}$  関数によってその応答のデータ行列  $Y_{\text{pred}}$  を得ることができる。

$$Y_{\text{pred}} = \text{predict}(\text{mdl}, X_{\text{new}}). \quad (2)$$

上記の線形回帰モデルに対し、入力  $X$  に車両の位置のデータ行列、 $Y$  にその位置のマルチパス誤差のデータ行列を与えてモデルを生成する。図 8 はある衛星  $k$  とのマルチパス誤差と位置の関係の例を示し、この場合は入力データ行列  $X$  が  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$ ,  $(x_3, y_3)$ , その応答  $Y$  のデータ行列がそれぞれ  $e_{1k}$ ,  $e_{2k}$ ,  $e_{3k}$  となる。このような入力と応答からモデルを生成し、ある位置  $(x, y)$  を与えることにより、 $(x, y)$  におけるマルチパス誤差の値が推測される。

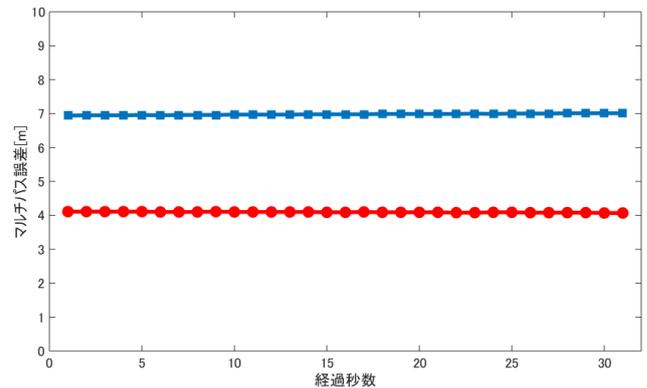


図 7 マルチパス誤差の時間的変化

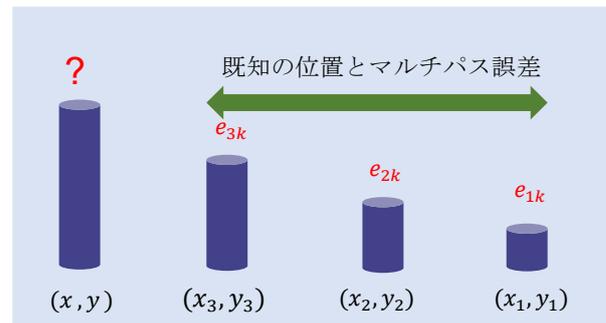


図 8 線形回帰モデルによるマルチパス誤差の推測

### 5.3.4 最適な位置の決定

ある時刻において、歩行者の受信機が  $n$  機の衛星の電波が受信される場合、推測されるマルチパス誤差の数も  $n$  個となる。実際に電波伝搬時間から算出された受信機と各衛星との擬似距離から推測されたそれぞれのマルチパス誤差を取り除き、補正された擬似距離を求める。衛星  $k$  とグリッドポイント  $i$  の補正擬似距離  $\rho_{ik}$  を式(3)から計算する。

$$\rho_{ik} = \tilde{\rho}_{ik} - e_{ik}. \quad (3)$$

ただし、 $\tilde{\rho}_{ik}$  は電波伝搬時間から算出される衛星  $k$  とグリッドポイント  $i$  との擬似距離、 $e_{ik}$  は線形回帰モデルにより推測される衛星  $k$  とグリッドポイント  $i$  のマルチパス誤差を示す。

式(3)により求めた補正擬似距離と真距離の差分を残差とする。真距離はグリッドポイントの位置と衛星位置から計算する。衛星  $k$  とグリッドポイント  $i$  の残差  $\Delta_{ik}$  は補正擬似距離  $\rho_{ik}$  と真距離  $r_{ik}$  から式(4)により求める。

$$\Delta_{ik} = |\rho_{ik} - r_{ik}|. \quad (4)$$

グリッドポイント*i*において、全ての*n*機の衛星との残差の平均値 $\bar{\Delta}_i$ を式(5)から計算する。

$$\bar{\Delta}_i = \frac{\Delta_{i1} + \Delta_{i2} + \dots + \Delta_{in}}{n}. \quad (5)$$

式(5)により求めた平均残差が小さいほど真距離と補正擬似距離の差分が小さく、そのグリッドポイントが真位置に近いと考えられる。そのため、生成した全てのグリッドポイントにおける平均残差を計算した後、平均残差 $\bar{\Delta}_i$ が最も小さいグリッドポイントを歩行者の最適な位置と決定する。図 9 は生成したグリッドと各グリッドポイントにおける平均残差を示し、横軸の E は東方向を正、縦軸の N は北方向を正とする。高さ軸は平均残差を示す。円で囲まれる部分は平均残差が最も低く、最適な位置はこの部分に含まれると考えられる。

## 6. シミュレーション評価

### 6.1 シミュレーション概要

シミュレーション実験により提案手法を評価した。車両側のマルチパス誤差を計算するため、予備実験と同様に、3D map とレイトレーシングを用い、衛星からのパスの到来方向を追跡し、各パスの情報を取得した。得られたパス情報から、パス長と衛星・受信機間の真距離との差分をマルチパス誤差とする。算出されたマルチパス誤差情報を使用し、歩行者の端末に想定した受信機のマルチパス誤差を推測する。また、歩行者が周囲に走行する車両のマルチパス誤差情報を無線通信によりリアルタイムで取得すると想定する。

### 6.2 シミュレーション内容

予備実験と同様に衛星測位解析ツールである GPS-Studio を使用してシミュレーション実験を行った。また、シミュレーション実験ではレイトレーシングによりパスの追跡を行うため、マルチパス誤差が発生すると思われる銀座の 3D map を使用した。図 10 に示す赤線の範囲内に車両を想定した受信機 301 台を 4 車線に沿って 5m 間隔で配置し、歩行者の端末に想定した受信機 100 台を道路沿いの歩道に沿って 2m 間隔で配置した。

本提案手法の有効性を評価するために、単独測位方式の測位結果と比較する。単独測位方式では衛星の電波伝搬時間により算出された疑似距離と衛星位置から、受信機的位置( $x, y, z$ )を計算する。衛星*k*の位置を( $x_k, y_k, z_k$ )、疑似距離を $\tilde{\rho}_k$ とすると、受信機位置、衛星位置と疑似距離の関係は式(6)のように表せる。なお、 $c$ は光速、 $\Delta t$ は時刻誤差とし、疑似距離には時刻誤差のみを考慮する。

$$\sqrt{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2 + (z - z_k)^2} = \tilde{\rho}_k - c\Delta t. \quad (6)$$

疑似距離にはマルチパス誤差が含まれるため、マルチパ

ス誤差が含まれた測位結果となる。単独測位方式の結果と比較することにより提案手法において、マルチパス誤差の削減効果を確認することが可能である。

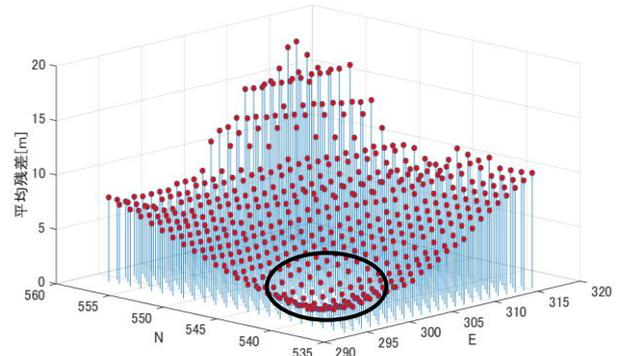


図 9 グリッドポイントと平均残差の結果

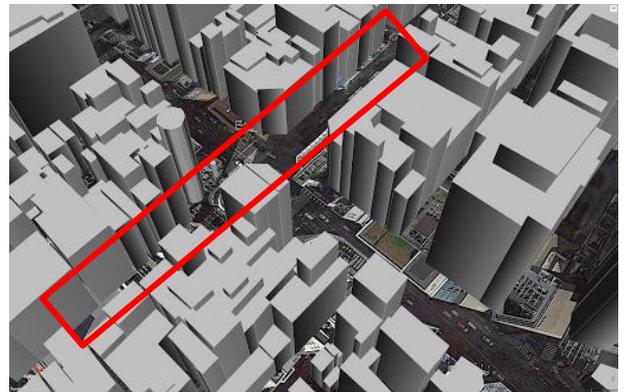


図 10 実験に使用する 3D map (銀座)

### 6.3 シミュレーション結果

#### 6.3.1 線形回帰モデルによるマルチパス誤差の推測精度

線形回帰モデルによるマルチパス誤差の推測精度を図 11 と図 12 に示す。四角マーカである青線は線形回帰モデルによる推測値、丸マーカである赤線は真距離とパス長から求めたマルチパス誤差の値を示す。図 11 ではある 1 機の衛星とすべての受信機 52 台における推測値と真値の結果を示し、線形回帰モデルにより推測したマルチパス誤差が真値に近いことが分かる。しかし、32 番、33 番と 59 番の受信機はマルチパス誤差の推測値と真値が大きく異なる結果となっている。その理由は、交点のマルチパス誤差を推測する際、各車線に走行する車両のマルチパス誤差情報において空間相関性が低かったことが原因だと考えられる。また、図 12 はある受信機におけるすべての衛星とのマルチパス誤差の推測値と真値を示す。衛星数は 10 基であり、すべての衛星において線形回帰モデルによって推測されるマルチパス誤差の値は真値に近いと確認できる。特にマルチパス誤差が最も大きい 4 番目、7 番目と 10 番目の衛星の真値が約 10m のに対し、推測値がほぼ等しい結果になっている。この結果から、道路の進行方向と、進行方向

に直交する方向のマルチパス誤差の空間相関性を利用し、周囲の車両のマルチパス誤差情報から、線形回帰モデルによって歩行者のマルチパス誤差を推測することが可能であると分かる。

### 6.3.2 水平測位誤差と2次元上のプロット結果

測位誤差は受信機を配置した際の真位置と実際に測位した位置との距離とする。表 2 は水平測位誤差の平均値を示し、単独測位方式により測位した結果は、平均誤差が 21.22m となっている。一方、提案手法の測位結果では平均誤差が 2.24m となっており、単独測位方式に比べて測位精度が約 89%改善された。図 13 は提案手法による測位結果と単独測位による測位結果を 2 次元上の ENU 座標系にプロットした結果を示す。丸い緑マーカーは単独測位方式の結果を示し、真位置である青い四角マーカーとの距離の変動が大きい。一方、赤い菱形マーカーは提案手法の結果を示し、真位置に近いと確認できる。また、水平測位誤差の累積分布を図 14 に示す。横軸は誤差の値、縦軸は測位誤差が既定誤差値以下の割合を表す。単独測位の結果では水平測位誤差が 5m 以下の結果がほぼないのに対し、提案手法では水平誤差が 5m 以下の割合が約 93%である。

## 7. 考察

### 7.1 提案手法による歩行者の位置推定精度

表 2 に示す 2 つの測位方式の結果により単独測位に比べて、提案手法の平均測位誤差が大幅に削減されていることが確認でき、目標であった測位誤差を約 2m まで削減することができた。また、提案手法では水平測位誤差が 5m 以下の割合が 93%であることから、周囲のマルチパス誤差情報から歩行者のマルチパス誤差を推測することが可能であるということが分かった。

### 7.2 マルチパス誤差の推測

マルチパス誤差の推測精度は図 11 と図 12 に示すように真値とほぼ近い値が推測されるということが分かる。マルチパス誤差を推測する際、線形回帰モデルでは車両の位置とマルチパス誤差の増加傾向又は減少傾向から推測される。そのため、図 8 に示した例のような場合は線形回帰モデルにより増加傾向から、 $(x, y)$ におけるマルチパス誤差の値が既知のマルチパス誤差の値より大きい値が推測され、真値に近い値になると考えられる。しかし、 $(x, y)$ が図 8 の右側にある場合、減少傾向から推測されるため、推測されるマルチパス誤差の値は距離により負の値になる場合がある。反射波又は回折波のパス長は真距離より長く、マルチパス誤差の値が負になることはないと考えられる。すなわち、推測されたマルチパス誤差の値が負の場合はマルチパス誤差の値を零にし、その位置にはマルチパス誤差の影響を受けないようにする必要がある。

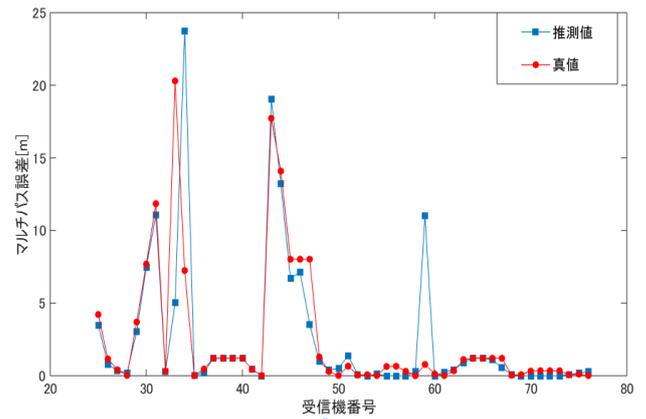


図 11 マルチパス誤差の推測値と真値の比較

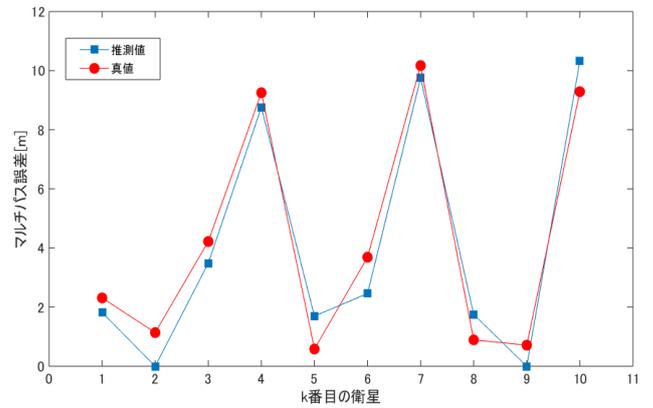


図 12 マルチパス誤差の推測値と真値の比較(全衛星)

表 2 水平平均測位誤差

測位方式	平均水平測位誤差[m]
単独測位	21.22
提案手法	2.24

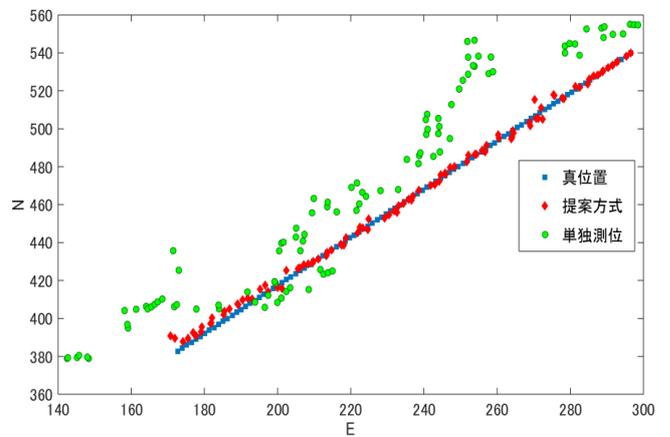


図 13 2次元上のプロット結果 (ENU 座標系)

### 7.3 使用する車両のマルチパス誤差情報

シミュレーション評価実験では歩行者がリアルタイムに周囲の車両のマルチパス誤差を取得することを想定した。取得したマルチパス誤差情報から歩行者のマルチパス誤差を推測する際、車線毎に分けて基準線と車線の交点のマルチパス誤差を推測し、推測したすべての交点のマルチパス誤差から歩行者のマルチパス誤差を推測する。この際、高い推測精度を得るためには、多くの車両情報を利用することが望ましい。しかし、現在時刻において道路に走行する車両がない又は必要なマルチパス誤差の数を確保できない場合がある。また、数秒前のマルチパス誤差情報を使用しても、ある車線には必要なマルチパス誤差情報を確保できない場合が考えられる。そのような場合は線形回帰モデルにより歩行者のマルチパス誤差を推測することが不可能である。実際の道路環境では、走行する車両台数が少ない場合にはこの問題が起これと考える。この課題を解決するために、著者らは走行する車両の位置とマルチパス誤差情報を24時間分観測し、サーバーに保存する方法を検討した。歩行者は必要な場所と時間のマルチパス誤差情報をサーバーから取得して使用することにより交点に近いマルチパス誤差情報が常に確保できるようになる。次章に24時間のマルチパス誤差情報を観測し、測位に活用することについてその詳細を述べる。

### 8. 24時間のマルチパス誤差情報の活用

本提案手法では歩行者の周囲に走行する車両からリアルタイムでマルチパス誤差情報を取得することを想定し、評価を行った。しかし、GPS衛星は同じ軌道で地球を周回し、周期的に同じ場所に戻ってくる。従って、ある場所において、24時間のマルチパス誤差を観測し、データベース化することにより、永続的に再利用することが可能だと考えられる。GPS衛星が地球を周回する時間と地球自転の周期は図15に示す。GPS衛星が地球を周回する周期は11時間58分02秒である[8]。そのため、現在の時刻から1周期後は同じ衛星が同じ位置に戻ってくることになる。また、地球が自転軸を周回する周期は23時間56分04秒である[9]。そのため、衛星が元の位置に戻っても地球はまだ元の位置に戻らない。しかし、地球の周期は衛星の周期の2倍であることから、衛星が地球を2周期周回すると衛星と地球ともに元の位置に戻ってくる。従って、同じ場所において現在の時刻のマルチパス誤差と衛星が2周期周回した後のマルチパス誤差が同じと考えられる。この現象から、ある時刻のマルチパス誤差を補正するために、23時間56分04秒前のマルチパス誤差情報を使用することが可能である。実際に衛星の2周期前のマルチパス誤差を再利用することが可能であるかを検証するためには、シミュレーション実験により確認を行った。

### 8.1 現在と2周期前のマルチパス誤差の確認

現在時刻と2周期前の衛星は地球から見た際、同じ位置にあると述べた。ある衛星とある位置において現時刻と2周期前のマルチパス誤差が同じかどうかを確認するためにシミュレーション実験を行った。実験では、同じ位置に配置した受信機において、2016年01月01日の08:30:00-08:59:00の衛星の配置情報とその2周期後である2016年01月02日の08:26:00-08:55:00の配置情報を1分間隔で取得した。また、マルチパス誤差を計算するために予備実験と同様にレイトレーシングを使用し、パスの到来方向の追跡を行った。真距離とレイトレーシングによって計算されるパス長の差分をマルチパス誤差とする。図16は1分間隔で計算した30エポックのマルチパス誤差を示す。現在のマルチパス誤差は青線、2周期前のマルチパス誤差は赤線で示し、マルチパス誤差の変化傾向が同様であることが分かる。また、マルチパス誤差が少し異なる部分が見れているが、その差は小さいということが確認できる。

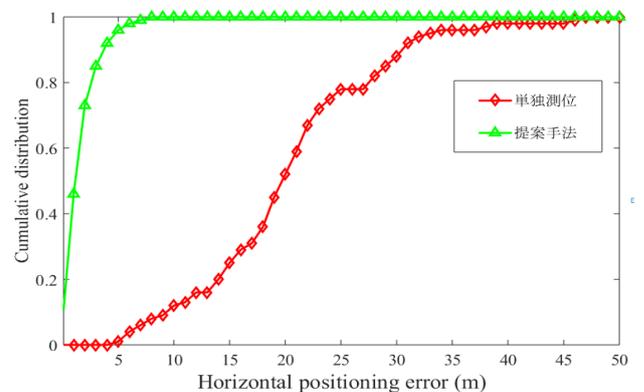


図14 水平測位誤差の累積分布

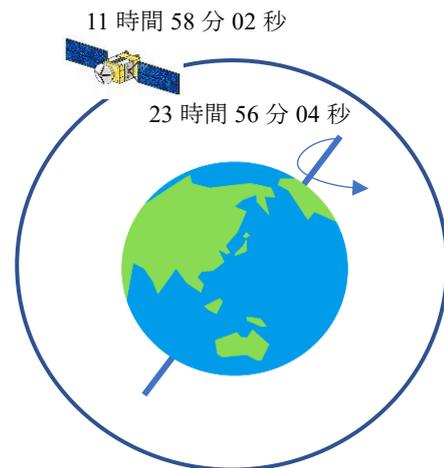


図15 地球自転周期とGPS衛星の周期

### 8.2 2周期前のマルチパス誤差を利用した評価実験

図16に示すように、現在と2周期前のマルチパス誤差はほぼ同じであることを確認した。そのため、実際に2周期前のマルチパス誤差を使用した現在のマルチパス誤差の

補正効果を検証するためにシミュレーション実験を行った。測位対象の受信機を新たに図 10 の赤線の範囲内に 50 台配置し、レイトレーシングによりパスの情報を取得した。グリッドの生成から最適な位置を決定するまでは第 6 章と同様な手順で行った。ただし、車両のマルチパス誤差情報は第 6 章で行った実験データから、車両に想定した 301 台のマルチパス誤差情報を取得し、2 周期前のマルチパス誤差情報として使用した。図 17 は配置した 50 台の受信機の真位置と 2 周期前のマルチパス誤差情報を利用した測位結果を二次元上にプロットした結果を示す。受信機の位置は ENU 座標系で表し、E は東方向、N は北方向を示す。

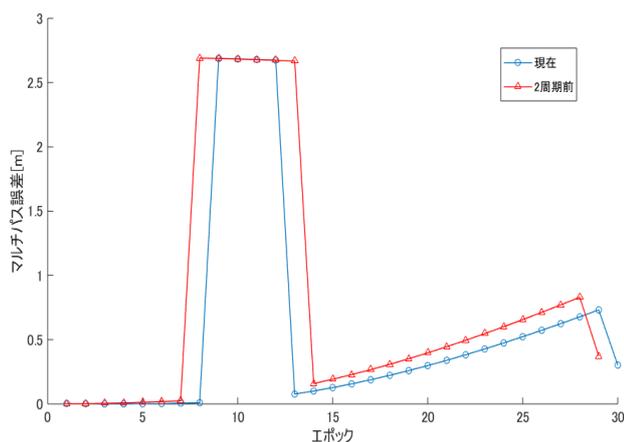


図 16 現在時刻と 2 周期前のマルチパス誤差比較

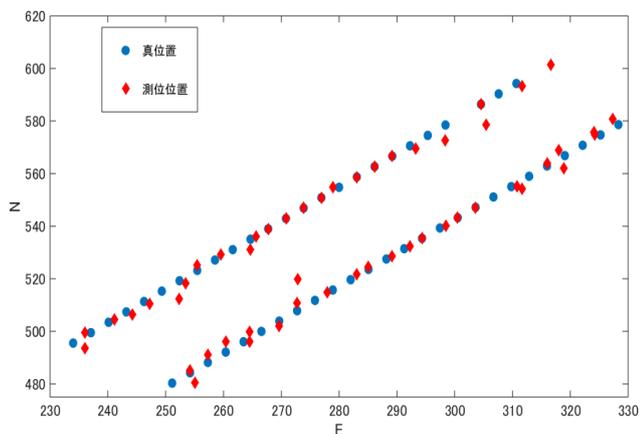


図 17 真位置と測位位置のプロット結果

また、真位置は丸、測位結果は菱形マーカーで示す。図 17 により、測位結果の位置が少し真位置からずれる部分があるが、割合の多くは真位置に近いということが分かる。また、測位位置と真位置間の距離を測位誤差とし、その平均誤差を求めた。その結果、平均測位誤差が 2.23m となり、リアルタイムのマルチパス誤差情報を利用した評価実験の結果と同等な測位精度が得られると分かった。

## 9. おわりに

都市部における GPS 測位ではマルチパス誤差の影響により測位精度が大幅に低下してしまい、事故防止システム

で GPS による位置情報を使用するにはさらに精度を向上させる必要がある。本稿では、マルチパス誤差の空間相関性を利用した歩行者の測位方法を提案し、GPS 単独測位方式より測位精度を大幅に改善できることを確認した。また、リアルタイムで車両からマルチパス誤差を取得するのではなく、24 時間分のマルチパス誤差を観測し、データベース化することにより、永続的に使用可能であることを検証した。

今後は、提案手法の測位精度のさらに向上させるために、道路の進行方向と、進行方向に直交する方法のマルチパス誤差の空間相関性のみを使用するのではなく、より一般的な空間相関性の利用を検討。また、建物が道路に平行しない場合は他の方法の相関性もあれと考えられ、今後の課題としたい。

## 参考文献

- [1] Suhua Tang, Kiyoshi Saito, and Sadao Obana, "Transmission control for reliable pedestrian-to-vehicle communication by using context of pedestrians," in *Proc. IEEE ICVES'15*, pp. 41-47, 2015.
- [2] Li-Ta HSU, "GNSS Multipath Detection Using a Machine Learning Approach," 2017 *IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation System*, pp.1414-1419, 2017.
- [3] Nobuaki Kubo, Akio Yasuda, and Takashi Suzuki, "The Possibility of the Positioning and Multipath Error Mitigation," *The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers*, 2004.
- [4] Shunsuke Miura, Shoma Hisaka, and Shunsuke Kamijo, "GPS Multipath Detection and Rectification using 3D Maps," in *Proc. ITSC2013*, 2013.
- [5] Suhua Tang, Nobuaki Kubo, Nao Kawanishi, Rei Furukara, Akio Hasegawa, and Yoshio Takeuchi, "Cooperative Relative Positioning for Intelligent Transportation System," *Int. J. ITS Res.* vol. 13, no.3, pp.131-142, 2015.
- [6] Toshiharu Kakihara, Seiichi Takeda, Yoshinori Miyamoto, Akira Noda, and Yuji Mine, "Influence of Distance between Reference Station and User Station on DGPS Positioning Accuracy," *The Journal of Japan Institute of Navigation*. No.534/VI-30, pp.19-30, 1995.
- [7] "fitlm - MATLAB & Simulink - MathWorks United Kingdom," Jp.mathworks.com, 2017. [Online]. Available: <https://jp.mathworks.com/help/stats/fitlm.html>. [Accessed: 13-May-2018].
- [8] 浜田 賢二, 外析 保勝, 中井 修, 林忠 夫, 清水 則, 中川 浩二, "リアルタイム GPS 海上測位システムの実海域実験と実用性の検証," *土木学会論文集*. vol. 1996, no.534, pp.19-30, 1996.
- [9] "自転周期," ja.wikipedia.org, 2017.[online]. Available: <https://ja.wikipedia.org/wiki/自転周期>. [Accessed: 13-May-2018].