

令和 2 年 6 月 18 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K06550

研究課題名(和文) 劣悪な電波環境における高精度GNSS/INS航法技術の研究開発

研究課題名(英文) Research and development of high-accuracy GNSS/INS navigation technology in a harsh electromagnetic environment

研究代表者

辻井 利昭 (Tsujii, Toshiaki)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60344256

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：劣悪な電波環境において脆弱なGNSS航法システムをロバスト化するため、電波によらない慣性航法装置(INS)と複合するとともに、アレーアンテナによって衛星の選択/排除機能を備えた航法技術の研究を行った。アレーアンテナからの信号をソフトウェア受信機で処理してビームフォーミングを行い、疑似距離および搬送波のマルチパス誤差が低減可能なことを確認した。

また、電波環境の変化に応じたビームフォーミングを目指し、様々な環境で信号特性把握実験および評価を行った。通常の右旋偏波に加えて左旋偏波アンテナを用いて、直接波、反射波、マルチパスの同定手法を考案し、衛星信号選択/排除方法に目途をつけることが出来た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

衛星航法(GNSS)は、何時でも何処でも簡便に測位が可能なシステムとして広く利用されているが、その電波の微弱さのため、多重伝搬(マルチパス)、電離圏異常、電波干渉等の環境におけるシステムの脆弱性が常に懸念されている。そこで、電波によらない慣性航法装置との複合や、アレーアンテナによる信号増幅および衛星の選択/排除機能を備えたロバスト航法の要素技術の研究を行い、マルチパス環境において性能向上を確認した。本技術を発展させれば、土木・建築車両の高精度運用や都市部道路での自動走行・停車、航空機の着陸から旅客ターミナルへの自動走行等、高い信頼性が必要とされる幅広い分野での利用が期待できる。

研究成果の概要(英文)：A navigation system utilizing GNSS and inertial navigation system has been investigated in order to achieve robust and high accuracy positioning performance in a harsh radio wave environment. One of key technologies is a beamforming using GNSS array antenna which realize multipath error mitigation. The digital intermediate frequency data from multiple RF front end, which were connected to each antenna element, were weighted and combined so that the directional beam would be formed toward the aimed satellite. The results of experiments nearby buildings showed multipath reduction by beamforming and higher positioning accuracy. Also, a GNSS signal identification method using left-handed circular polarization antenna in addition to usual right-handed circular polarization antenna was developed in order to classify line-of-sight, multipath, and non-line-of-sight signals. The method was applied for GNSS positioning in urban environment and a superior performance was evaluated.

研究分野：衛星航法測位

キーワード：GNSS(衛星航法) アレーアンテナ マルチパス 電波干渉 ソフトウェア受信機 INS(慣性航法装置)

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

衛星航法 (GNSS) の電波は微弱なため、電離圏異常のような自然現象、マルチパスや電波干渉の影響を受けやすい。例えば米国の或る空港では、試験運用中のGNSS進入着陸システムが、付近の高速道路を通るトラック等からの電波の影響を受けてシステムダウンしたという事例が、報告されている。これは、トラックの運転手が自社の運航管理を避けるために、PPD (Personal Privacy Device) と呼ばれる市販の廉価な発信器によるGNSSに対しては非意図的な妨害電波が原因であった。また、建造物の多い都市環境ではマルチパスによる測距誤差やフェージングによる信号強度の低下が発生し、測位精度が劣化する。このように衛星航法の都市部での高度利用のためには、劣悪な電波環境の中で高い測位精度が安定して得られる技術の研究開発が必須とされてきた。

### 2. 研究の目的

都市環境での高信頼高精度航法システムの実現のため、特にマルチパス誤差低減に注力し、本研究では

- A)アレーアンテナ技術の適用とその効果の検証
- B)マルチパス環境でのGNSSデータによる性能検証
- C)衛星選択・排除アルゴリズムの開発とその効果の検証

を行うことを目的とする。

### 3. 研究の方法

複数のGNSSアンテナ素子からなるアレーアンテナを用い、時刻同期した複数のRFフロントエンドを接続してデジタル中間周波数 (DIF) データを取得する。指向性調整アルゴリズムの研究開発を行い各素子のDIFデータを重み付け合成し、ソフトウェア受信機によって測距・測位解析を行う。GNSS衛星の方向にビーム形成することによりマルチパス誤差の抑制が期待でき、オープンスカイおよび建造物近傍での実験によりその効果を検証する。都市部でのGNSS信号は直接波 (LOS)、直接波と反射波の合成波 (マルチパス)、見通し外の反射波 (NLOS) に大きく分類される。高精度測位のためには受信信号の種類を同定して選択・排除することが有効と考えられ、通常の右旋偏波アンテナに加えて左遷偏波アンテナを用い信号同定や、機械学習の適用を検討する。また、MEMSローコストINSと複合化して実マルチパス環境で移動体による計測実験を行い、試作システムの性能評価および改修・改良を実施する。

### 4. 研究成果

ビームフォーミング実験に使用したアレーアンテナを図1に示す。DIFデータを取得する市販RFフロントエンドの制約から、7素子のうち3素子を用いた。アレーアンテナ技術は情報通信や気象レーダ等の分野で広く使われているが、測位に用いるためにはセンチメートルレベルでアンテナ素子およびRFフロントエンド内の遅延)ハードウェアバイアスを補正することが重要であり、本研究では予めオープンスカイ環境で静止測位を行うことによりバイアスを推定している。

この3素子アレーアンテナを図2(左)のように、3階建て建物脇に設置して評価実験を行った。ここではマルチパス誤差を疑似距離と搬送波位相から求まる距離の差分により推定した。疑似距離ではマルチパスによってメートルオーダーの誤差を生じるのに対し、搬送波位相では数cmの誤差しか生じないため、この差分は主に疑似距離のマルチパス誤差を示すと考えられる。本実験ではアンテナの西側が壁で遮蔽されており、東に位置していた衛星 (GPS18) にビームを向けた例を示している。図2(右)で

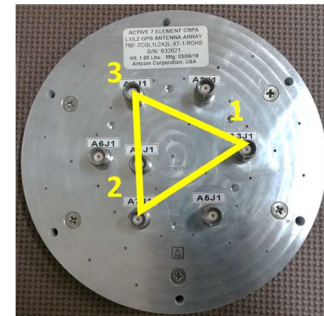


図1 アレーアンテナ (7素子のうち3素子を使用)

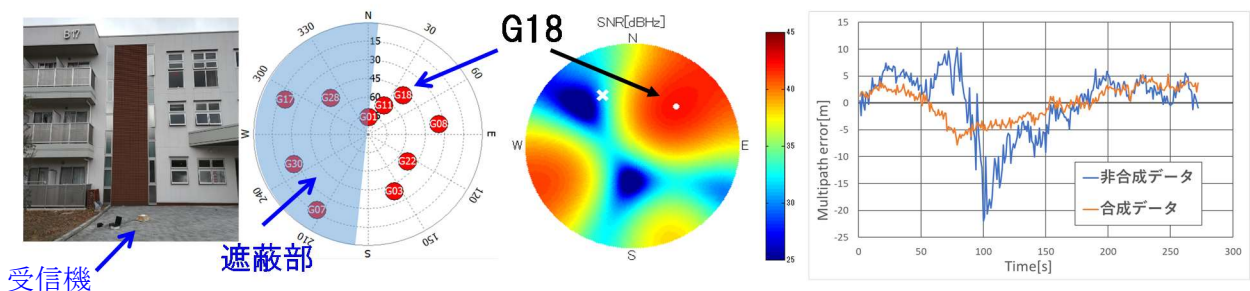


図2 マルチパス誤差低減実験

(左より、実験環境、GPS衛星の配置、調整した指向特性、マルチパス誤差の比較)

はアレーアンテナの1素子で受信した非合成データと、3素子によるビームを衛星に向けて合成したデータのマルチパス誤差を比較しており、約50%の誤差低減が見られた。また、観測可能衛星6衛星すべてにおいて、マルチパス誤差を24~50%低減出来ることを確認しており、本手法の有効性が検証できた。次に、搬送波位相データにおけるマルチパス誤差低減について検討した。図3は、搬送波位相によって平滑化した疑似距離におけるマルチパス誤差の変動を示す。マルチパス誤差の真値は本解析では分からないため変動部分のみに着目すると、3素子アレー・ビームフォーミングにおいて平滑化開始100秒後は変動が極めて小さいことが分かり、搬送波位相においてもビームフォーミングの効果があると推察できる。また、この時の測位結果を図4に示す。搬送波位相データを利用した測位によって精度が大幅に改善していることがわかる。

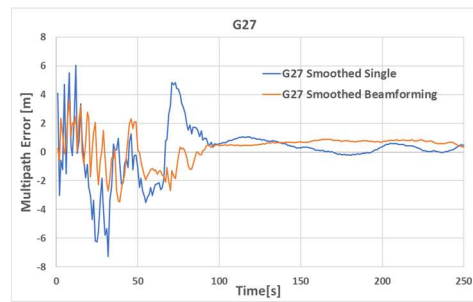


図3 搬送波平滑化疑似距離におけるマルチパス誤差の変動（単一およびアレーアンテナの比較）

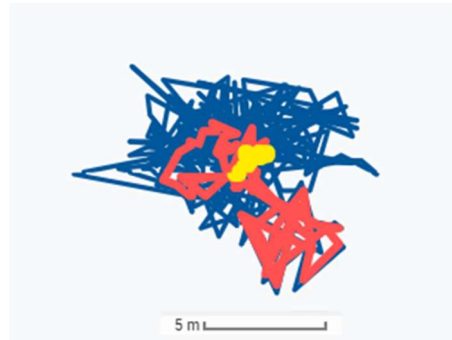


図4 ビームフォーミングデータによる測位結果（青:疑似距離、赤:平滑化疑似距離、黄:平滑化疑似距離（100秒以降））

次に、測位の高精度化を目指した衛星の選択・排除機能のため、信号特性抽出実験を行った。図5はオープンスカイ環境において、右旋偏波アンテナ (RHCP)、左旋偏波アンテナ (LHCP) を用いて受信した GNSS 信号の強度、およびその差分 (RHCP-LHCP) を示している。GNSS 信号の直接波は右旋偏波で、反射波は左旋偏波となる。従って、オープンスカイ環境では上記差分は正となる。この特性を利用して、LOS、マルチパス、および NLOS に分類する閾値を設定したのが図5（下）である。次に、両側を建物に遮られたマルチパス環境において測位実験を実施し、図5のモデルに従って信号分類を行った。マルチパス・NLOS 信号を除外した効果を図6に示す。衛星数が半数程度になったにも関わらず、測位精度が大幅に向上することが確認された。一方、本手法では特殊な RHCP/LHCP 両アンテナを必要とするため、一般の GNSS ユーザが利用することは難しい。そこで、RHCP アンテナを用いて通常の GNSS 受信機が出力するデータ（信号強度、衛星仰角、ドップラ）のみを使用して機械学習によって信号分類を行う手法を検討した。ただし、教師データは RHCP/LHCP アンテナのデータを使用して作成している。ランダムフォレスト法により機械学習を行い、NLOS 信号を除外することで測位精度が向上することが確認できた。これにより、一般の RHCP アンテナを用いた衛星選択・排除機能に目途をつけることが出来た。

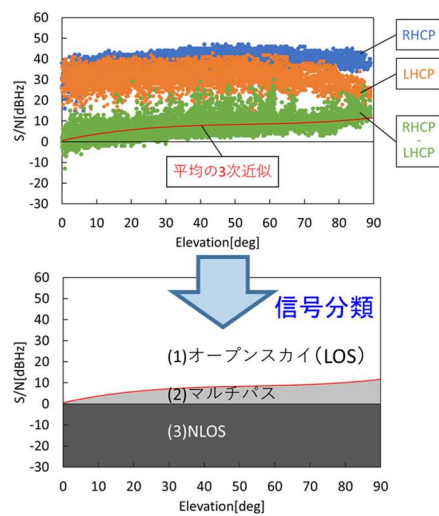


図5 オープンスカイでの信号強度（青：RHCP、橙：LHCP、緑：その差分）と、信号分類

また、廉価な慣性航法装置 (INS) と GNSS を複合し、車両やドローンなど移動体での航法実験・性能評価を行ったが、アレーアンテナとの複合には至らなかった。このように、アレーアンテナを備えた GNSS / INS の全体システムとしての性能確認には至らなかったが、各要素技術において性能向上を確認しており概ね目標は達成できた。

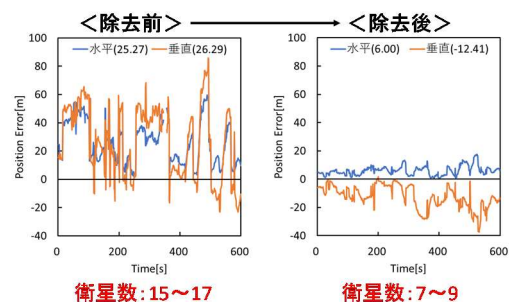


図6 マルチパス・NLOS 信号の除外による測位精度の向上

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

|  |                 |
|--|-----------------|
| 1. 著者名<br>V. Uaratanawong, C. Satirapod and T. Tsujii  | 4. 巻<br>-       |
| 2. 論文標題<br>Optimisation Technique for Pseudorange Multipath Mitigation Using Different Signal Selection Method | 5. 発行年<br>2020年 |
| 3. 雑誌名<br>ARTIFICIAL SATELLITES, Journal of Planetary Geodesy  | 6. 最初と最後の頁<br>- |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>なし  | 査読の有無<br>有      |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難   | 国際共著<br>該当する    |

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>大澤 壮志、藤原 健、辻井 利昭            |
| 2. 発表標題<br>CRPA技術による衛星航法のマルチパス誤差低減（続報） |
| 3. 学会等名<br>日本航空宇宙学会 第57回飛行機シンポジウム      |
| 4. 発表年<br>2019年                        |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>粟井 睦                                     |
| 2. 発表標題<br>アレーアンテナによるマルチパス誤差低減のためのハードウェアバイアス較正方法の研究 |
| 3. 学会等名<br>日本航空宇宙学会 第57回飛行機シンポジウム                   |
| 4. 発表年<br>2019年                                     |

|                                      |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>吉田 柊生、辻井利昭、粟井 睦           |
| 2. 発表標題<br>両円偏波アンテナを用いたGNSSマルチパス誤差低減 |
| 3. 学会等名<br>日本航空宇宙学会 第57回飛行機シンポジウム    |
| 4. 発表年<br>2019年                      |

|                                   |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名<br>田中晋平                   |
| 2. 発表標題<br>機械学習を利用したGPSの信号特性の分類   |
| 3. 学会等名<br>日本航空宇宙学会 第57回飛行機シンポジウム |
| 4. 発表年<br>2019年                   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>米林健太、藤原健、辻井利昭                  |
| 2. 発表標題<br>GNSSアレーアンテナのハードウェアバイアス較正に関する研究 |
| 3. 学会等名<br>測位航法学会 全国大会                    |
| 4. 発表年<br>2018年                           |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>米林健太、藤原健、大澤壮志、辻井利昭              |
| 2. 発表標題<br>CRPAにおける搬送波位相を移用したハードウェアバイアスの較正 |
| 3. 学会等名<br>測位航法学会 GPS/GNSSシンポジウム2018       |
| 4. 発表年<br>2018年                            |

|                                    |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>米林健太、藤原健、大澤壮志、辻井利昭      |
| 2. 発表標題<br>CRPA技術による衛星航法のマルチパス誤差低減 |
| 3. 学会等名<br>日本航空宇宙学会 第56回飛行機シンポジウム  |
| 4. 発表年<br>2018年                    |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>T. Tsujii, K. Yonebayashi, T. Fujiwara and S. Ohsawa                    |
| 2. 発表標題<br>GNSS Array Antenna for Mitigating Multipath Errors in Urban Environment |
| 3. 学会等名<br>International Symposium on GNSS 2018 (国際学会)                             |
| 4. 発表年<br>2018年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>米林健太, 辻井利昭, 藤原健, 清水悠介               |
| 2. 発表標題<br>ソフトウェア受信機によるGNSSアレーアンテナの指向性操作に関する研究 |
| 3. 学会等名<br>測位航法学会第22回GPS/GNSSシンポジウム2017        |
| 4. 発表年<br>2017年                                |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>米林健太                              |
| 2. 発表標題<br>GNSSマルチパス誤差軽減のためのアレーアンテナに関する実験的研究 |
| 3. 学会等名<br>日本航空宇宙学会第55回飛行機シンポジウム             |
| 4. 発表年<br>2017年                              |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

大阪府立大学・衛星航法研究室・研究テーマ  
<http://www2.aero.osakafu-u.ac.jp/as/tsujii/entry2.html>

## 6. 研究組織

|       | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                         | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)                                    | 備考 |
|-------|---|--|----|
| 研究分担者 | 成岡 優<br><br>(Naruoka Masaru)<br><br>(10649073)    | 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・航空技術部門・主任研究開発員<br><br><br><br>(82645) |    |
| 研究分担者 | 藤原 健<br><br>(Fujiwara Takeshi)<br><br>(40358651)  | 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・航空技術部門・主任研究開発員<br><br><br><br>(82645) |    |
| 研究分担者 | 清水 悠介<br><br>(Shimizu Yusuke)<br><br>(60773942)   | 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・航空技術部門・研究開発員<br><br><br><br>(82645)   |    |
| 研究分担者 | 吉川 栄一<br><br>(Yoshikawa Eiichi)<br><br>(70619395) | 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・航空技術部門・研究開発員<br><br><br><br>(82645)   |    |
| 研究協力者 | 米林 健太<br><br>(Yonebayashi Kenta)                  |  |    |
| 研究協力者 | 田中 晋平<br><br>(Tanaka Shinpei)                     |  |    |
| 研究協力者 | 粟井 睦<br><br>(Awai Mutsumi)                        |  |    |