

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 30 日現在

機関番号：32665

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K18139

研究課題名(和文)複数衛星系を用いた高精度測位のための誤差電波検知による衛星選択手法の構築

研究課題名(英文) Construction of Satellite Selection Method by Error Signal Detection for Precise Positioning using Multiple Satellite System

研究代表者

池田 隆博 (IKEDA, Takahiro)

日本大学・理工学部・助教

研究者番号：60733227

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,800,000円

研究成果の概要(和文)：現在、衛星測位はGPS、GLONASS、QZSS、Galileoといった複数のシステムの登場により、周囲に遮蔽物が存在する環境でも測位に必要な衛星数を確保しつつある。これにより、回折や反射によるマルチパスの影響を受ける衛星を排除しても高精度な測位結果が得られる可能性がある。本研究では、受信機から得られる各衛星の信号強度と搬送波位相からマルチパスの影響を受ける衛星を検知する手法を提案し、測位に使用する衛星を選択する手法の構築を行った。その結果、信号強度および信号の異なる2種類の搬送波位相変化量の差を指標とすることで、静止時、移動時の測位における厳密解(Fix解)の取得率の改善が確認された。

研究成果の概要(英文)：GPS and GLONASS has been used mainly by Satellite based positioning system, then QZSS and Galileo has launching the satellite in recent years. Therefore, there is a possibility of securing the necessary number of satellites even if surroundings of the positioning point are surrounded by vicinity of a shield. As the result, there is a possibility of precise positioning accuracy by remove the satellite signal including the multipath of diffraction wave and reflection wave. In this study, investigated the detection method of multipath satellite using the difference of signal strength and the difference of carrier phase change, then verified the discrimination of satellite not including multipath. As a result, the satellite affected by the multipath can be determined by the tendency of the index value due to proposed satellite selection method. And, the effect of satellite selection method was verified by the percentage of fix solution in the static positioning and moving positioning.

研究分野：空間情報工学

キーワード：衛星測位 GPS GLONASS QZSS Galileo マルチパス 搬送波位相 信号強度

## 1. 研究開始当初の背景

現在、運転支援システムを搭載した車両が急速に普及しつつあるが、車線維持制御等の車両位置に応じたシステムの実現には、カメラ画像から得られる車両周囲の情報に加えて、cm オーダーの高精度な車両位置情報が必要となる。車両位置情報の取得については、米国の GPS を中心とする衛星測位が挙げられ、中でも干渉測位による方式では、移動体をリアルタイムに cm オーダーで測位可能な RTK 方式があり、車両位置を必要とするシステムに適しているといえる。

一方、衛星測位システムについては、現在 GPS に加えて、ロシアの GLONASS が運用中であり、異なる測位システムを併用した測位が可能である。これにより、上空視界の悪い都市部等においても、測位に必要な 5 衛星以上からの電波受信が可能となる時間帯が増加するものと考えられる。しかしながら、利用可能な衛星が増加しても解決困難な問題として、電離層遅延による誤差のほかに、回折波や反射波といったマルチパスの影響による誤差電波の受信が挙げられ、5 衛星以上が観測可能な条件でも測位が困難となる場合がある。

高精度な衛星測位を上空視界の条件に関わらず持続して行うためには、誤差電波を送信する衛星の除去が必要であるといえる。そのためには、電離層遅延、マルチパスの影響を受ける衛星電波を検知する手法を検討し、測位計算に使用する衛星を選択する手法を構築する必要があると結論づけた。

## 2. 研究の目的

上空視界の条件に関わらず、高精度な測位を持続して行うには、電離層遅延やマルチパスによる影響を受ける衛星を除去する手法が求められる。誤差となる衛星電波を除去する手法としては、申請者が電離層遅延やマルチパスの影響を受ける衛星を検知する手法として、電波受信による観測データから得られる信号強度や搬送波位相測定値から、誤差電波の検知に有効な指標の算出が可能であることを確認している<sup>1) 2)</sup>。また、先行研究において、回折波によるマルチパスの影響を受ける衛星を検知する手法が提案されている。回折波の影響を受ける電波を送信する衛星は、地物の影に隠れる不可視衛星であるため、衛星と地物の仰角を比較することで判別を可能としている<sup>3)</sup>。しかしながら、反射波の影響を受ける衛星については、衛星仰角が地物仰角よりも高い可視衛星でも生じるため、衛星の可視性のみでの検知は困難である。

そこで本研究では、反射波の影響を受ける衛星にも対処するため、衛星電波受信による観測データに含まれる信号強度と搬送波位相測定値を基にマルチパスおよび電離層遅延の影響を受ける衛星の検知を行い、測位に使用する衛星を選択する手法の構築を行うことを目的とする。また、現在衛星測位シ

テムは GPS と GLONASS に加えて、日本の QZSS と欧州の Galileo が試験運用中であり、今後も新たな電波の放送開始が想定される。そこで、マルチパスの影響を受ける衛星の検知については、上記の計 4 種類の衛星系を対象に行うものとし、従来よりも高精度な衛星測位を持続して行える衛星選択手法を構築するものとする。

## 3. 研究の方法

衛星選択手法の構築は、GPS、GLONASS、QZSS、Galileo の 4 つの衛星系を対象に行うものとし、各衛星の観測データに含まれる信号強度の搬送波位相測定値を用いて、電離層遅延やマルチパスの影響を受ける衛星の検知を行い、測位に利用する衛星の選択を行うものとする。

誤差の影響を受ける衛星を検知する手法の検証方法としては、周囲に建物のない観測点と、周囲に建物や樹木が存在する観測点上に受信機を設置して衛星電波受信による観測データの同時取得を行う。得られた観測データより各衛星の信号強度と搬送波位相測定値を抽出し、マルチパス等の誤差の影響を受ける衛星の検知に必要な指標を算出するものとする。なお、観測点周囲の建物や樹木による遮蔽物については、3D レーザースキャナを用いて 3 次元モデルを作成し、回折波や反射波によるマルチパスの影響を受ける衛星と遮蔽物位置に対する指標値の算出結果について確認を行うものとする。

指標値の算出方法については、遮蔽物のない観測点上で得られたデータを基準局、遮蔽物を含む観測点上で得られたデータを移動局として、受信機間の信号強度の差および搬送波位相変化量の差の較差を求めるものとする。計算方法としては、移動局で得られた信号強度と搬送波位相変化量の差から、同時時間帯で得られた基準局の結果を差し引くことで求めるものとする。信号強度については、マルチパスの影響を受ける場合、伝搬距離が直接受信機に到達する電波よりも長くなるため、減衰が生じることになる。そのため、マルチパスによる影響が含まれていれば、受信機間で信号強度の差を求めた場合、差分は大きくなるものと想定される。一方、搬送波位相測定値については、各衛星からは測位システムに関わらず、強度および周波数の異なる信号を 2 種類以上送信しており、マルチパスや電離層遅延の影響を受けた場合、信号毎に異なる誤差が生じることになる。そこで、搬送波位相測定値の変化量を信号毎に算出し、変化量の差を求めることで、誤差の影響を受ける衛星の検知が可能となる。さらに、受信機間で変化量の較差を求めることで、一方の受信機がマルチパスの影響を受けている場合、較差は大きくなるものと想定される。

衛星選択手法の構築については、誤差の影響を受ける衛星の検知手法の結果を基に、解析に使用する衛星を判別する基準値を信号

強度の差および搬送波位相変化量の差の較差の双方に設定し、観測データから該当する衛星を排除するものとする。衛星選択による効果の検証方法としては、静止測位と移動測位で得られた観測データに対して誤差の影響を受けていると判断された衛星を排除しない場合と排除する場合で基線解析を実施し、得られるFix解の取得率や分布の比較を行うものとする。

#### 4. 研究成果

##### (1) 誤差の影響を受ける衛星の検知

受信機間の信号強度の差および搬送波位相変化量の差の較差による誤差の影響を受ける衛星の検知手法について検証するため、図1に示すように周囲遮蔽物がない観測点を基準局、各方向が遮蔽物で上空視界が遮られる観測点を移動局として受信機を設置し同時間帯による観測データの取得を行った。

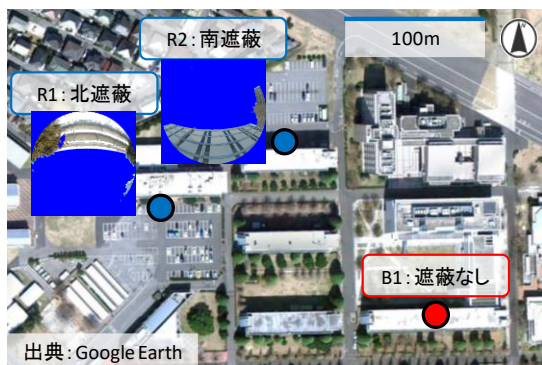


図1 観測データ取得位置と遮蔽状況

信号強度の差による指標値の傾向を衛星系別に図2に示す。移動局で受信される衛星が不可視となり回折波による影響を受ける場合、可視時よりも指標値が小さくなる傾向が見られた。これは、回折により移動局側の信号強度が低下し、差分が大きくなったものと考えられる。また、この傾向は衛星系に関わらず確認でき、さらに、可視時と不可視時で指標値が推移する範囲が異なることから回折によるマルチパスの影響を受ける衛星を検知できるものと考えられる。

次に、搬送波位相変化量の差の較差による指標値の傾向を衛星系別に図3に示す。こちらは衛星が可視時の場合、指標値は0mmを中心に分布する傾向が見られ、不可視時では正の値を中心に推移する傾向が見られた。マルチパスの影響が生じる場合、信号毎に異なる誤差が生じるため、移動局側の搬送波位相変化量の差が大きくなったものと考えられる。この傾向は、信号強度の差による結果と同様に衛星系に関わらず確認でき、マルチパスの影響を受ける衛星の検知が可能であると考えられる。また、衛星の仰角が低くなる際の指標値の傾向を確認すると、分布が大きくなることが確認できる。電離層遅延については、周波数の異なる信号毎に異なる傾向を示し、さらに低仰角では衛星電波が電離層を通過

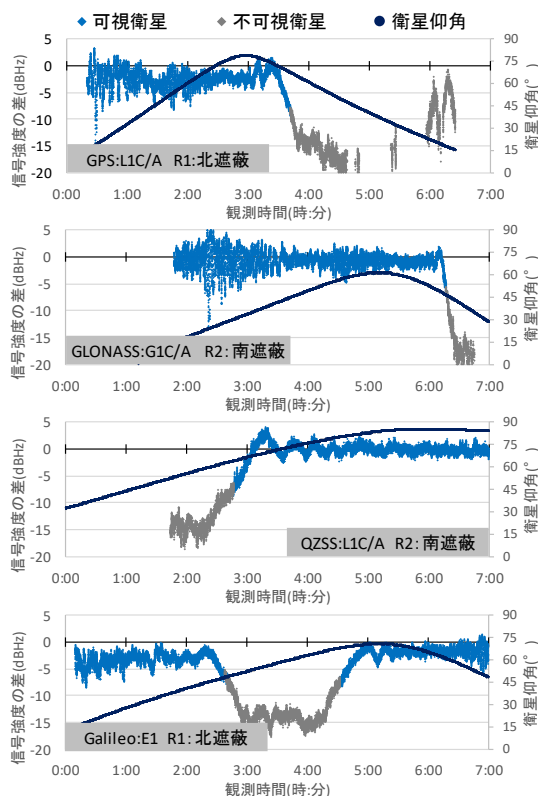


図2 信号強度の差による検証結果

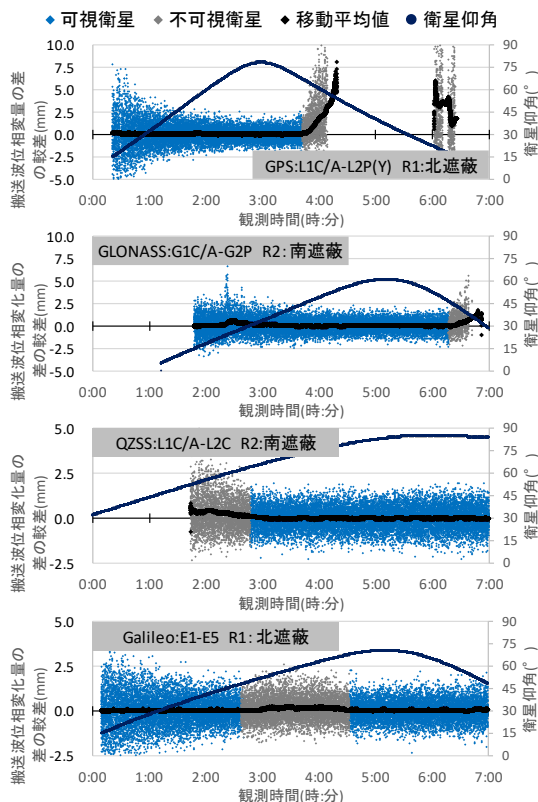


図3 搬送波位相変化量の差の較差による検証

する距離が長くなるので誤差の影響が大きくなる。よって、搬送波位相変化量の差を求めることで、信号間の電離層遅延の影響を確認できるといえる。

これらの検証結果より、信号強度の差および搬送波位相変化量の差の較差で得られる



指標値を使用することで、誤差の影響を受ける衛星の検知が可能であると考えられる。

### (2) 静止測位における衛星選択効果

誤差の影響を受ける衛星を排除した場合の効果について検証するため、信号強度の差と搬送波位相変化量の差の較差による指標において、衛星の排除を判断する基準値を設定し、観測データに適用した指標別に基線解析を実施した。なお、検証に使用する観測データについては、図1で示した周囲に遮蔽物のない観測点と周囲に遮蔽物が存在する観測点で同時取得したものを使用した。

適用した指標別によるFix解の取得率を図4に示す。観測点別に比較すると、誤差の影響を受ける衛星を排除しない場合にFix解の取得率が0%となる時間帯でも、指標値により該当する衛星を排除することでFix解の取得率が向上することが確認された。なお、北遮蔽において、4:00以降の観測においてFix解の取得率が低下する場合が見られたが、解析に使用した衛星数を確認すると、基線解析に必要な衛星数を下回る場合が確認され、衛星数不足によりFix解の取得ができなかったものと考えられる。

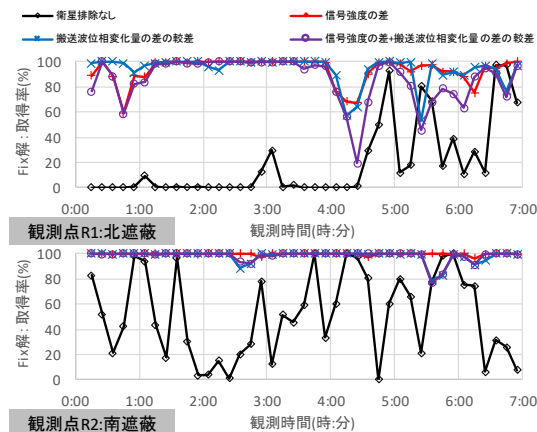


図4 観測時間帯別によるFix解の取得率

次に、Fix解の2-D RMSの算出結果を図5に示す。北遮蔽条件では、Fix解の取得率が低下する4:00以降で2-D RMSが高くなる傾向が確認でき、信号強度の差と搬送波位相変化量の差の較差による手法別に比較した場合、信号強度の差のほうが2-D RMSは小さくなる傾向が見られた。この時間帯のFix解の取得率については、信号強度の差による手法のほうが高くなる傾向が確認できるため、搬送波位相変化量の差の較差による手法では、継続したFix解が得られず、ミスFixが発生した可能性が考えられる。南遮蔽条件では、衛星を排除した条件では20mm以内で2-D RMSが推移する傾向が確認でき、衛星を排除しない場合よりも値が低下することがわかった。しかしながら、2:30~3:00の時間帯において、搬送波位相変化量の差の較差による手法でFix解の取得率が低下する場合、2-D RMSは大きくなる傾向が見られた。このとき解析に

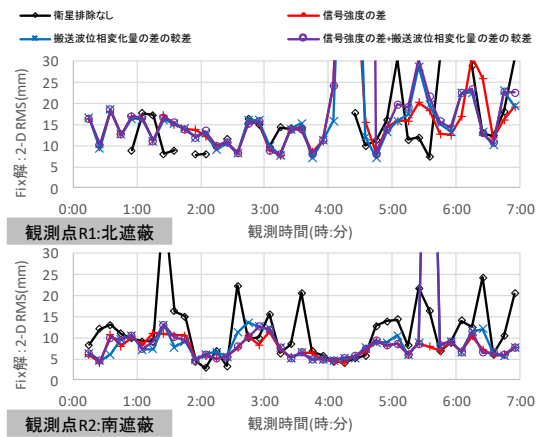


図5 観測時間帯別によるFix解の2-D RMS

使用された衛星数は、信号強度の差で衛星を排除した条件よりも多く確認されており、さらに、不可視衛星の指標値の傾向を確認すると、搬送波位相変化量の差の較差では、可視時の場合とほとんど違いが見られず、誤差の影響を受ける衛星の排除が不十分であったものと考えられる。

### (3) 移動測位における衛星選択効果

移動測位においても同様に誤差の影響を受ける衛星を排除した場合の効果を検証するため、図6に示す2つの走行区間で車両による移動時の観測データを4セット取得し、適用した指標別に基線解析を実施した。なお、A区間では、道路周辺の建物等で上空視界が遮蔽され、B区間では、樹木等で天頂付近を含む上空視界が遮蔽される。

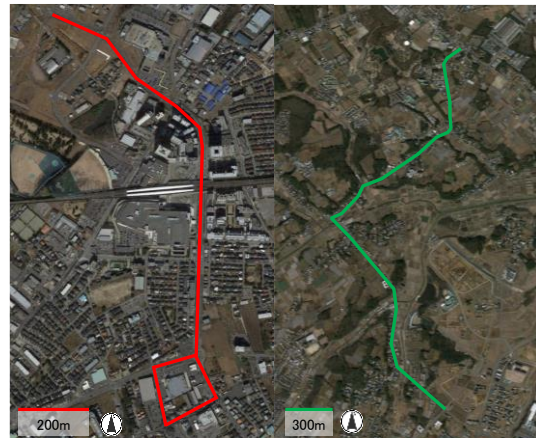


図6 車両走行区間 (左: A区間 右: B区間)

各走行区間での指標別によるFix解の取得率を表1および表2に示す。静止測位時と同様に指標値により誤差の影響を受ける衛星

表1 A区間におけるFix解の取得率 (単位:%)

セッション	衛星排除なし	信号強度の差	搬送波位相変化量の差の較差	信号強度+搬送波位相変化量の差の較差
1	77.0	91.4	81.4	95.4
2	68.5	85.3	76.2	85.8
3	88.0	93.9	88.5	94.8
4	72.4	92.4	78.6	93.8

表2 B区間におけるFix解の取得率(単位:%)

セッション	衛星排除なし	信号強度の差	搬送波位相変化量の差の較差	信号強度+搬送波位相変化量の差の較差
1	84.1	88.2	86.3	95.7
2	91.0	91.7	89.2	94.0
3	88.4	89.9	89.6	93.3
4	84.8	89.6	85.8	92.4

を排除することでFix解の取得率が向上することが確認された。一方で、搬送波位相変化量の差の較差による手法では、全てのセッションで信号強度の差による手法よりもFix解の取得率が低くなる傾向が見られ、静止測位時と同様に誤差の影響を受ける衛星の検知が不十分である可能性が考えられる。

(4) 搬送波位相変化量の差による不可視衛星の検知精度の向上

静止測位および移動測位において、搬送波位相変化量の差の較差による手法では、信号強度の差を用いた手法よりもFix解の取得率が低下する傾向が見られた。これは、回折波の影響を受ける不可視衛星の検知率が信号強度の差による手法よりも低く、Fix解の取得が不安定となるためである。このとき、提案した搬送波位相変化量の差の較差による手法では、信号間の変化量の差の大きさのみを考慮しており、どちらの信号の変化量が大きいを示す符号の要素については考慮していなかった。そこで、信号別の変化量の大きさも考慮して再度手法の検証を行った。

基準局と移動局の搬送波位相変化量の差の傾向を図7と図8に示す。衛星系に関わら

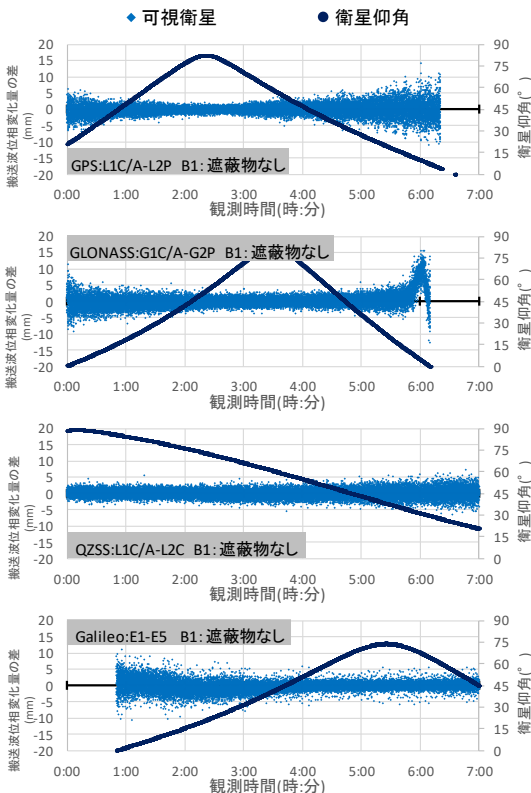


図7 基準局における搬送波位相変化量の差

ず可視時においては、基準局と移動局ともに0mm付近を中心に同程度の範囲で分布する傾向が見られた。一方、移動局が不可視となる場合、基準局と比較し分布範囲が広がることわかる。以前の手法と比較し、不可視直後でも可視時と分布範囲の大きさが異なるため、基準局と移動局の指標の分布範囲を比較することで、回折波の影響を受ける衛星の検知率が向上する可能性がある。

この指標値の傾向を基に、以前と同様に静止測位における衛星選択効果の検証を実施した。観測データに適用した指標別に基線解析を実施しFix解の取得率を比較した結果を図9に示す。北遮蔽、南遮蔽ともに信号強度の差による手法では、Fix解の取得率が全時間帯で約100%となり、搬送波位相変化量の差の分布を比較した手法でも同様の傾向が確認された。

これらの結果より、衛星選択手法としては、

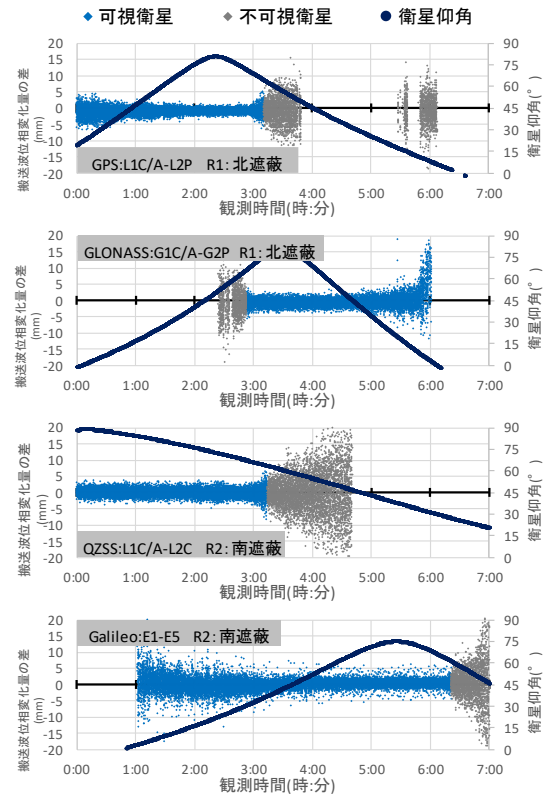


図8 移動局における搬送波位相変化量の差

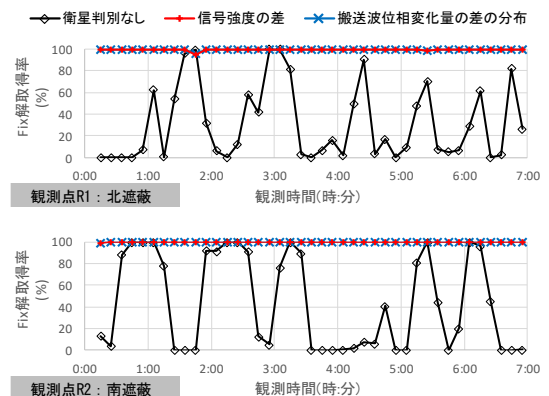


図9 指標別によるFix解の取得率

信号強度および搬送波位相変化量の差から得られる誤差電波の検知手法を用いて、誤差の影響を含む衛星を排除することでFix解を継続して取得できることが確認された。本手法は、受信機から得られる観測データのみで実施可能なため、高精度な位置情報を必要とするシステムに対して、容易に適合できるものと考えられる。

#### <引用文献>

- 1) 池田隆博、佐田達典：GPS と GLONASS における高精度測位の利用衛星選択効果に関する研究、土木学会論文集 F3、68 巻、2013、I\_101-I\_116
- 2) 池田隆博、佐田達典：静止時の高精度測位における GPS と GLONASS を用いた衛星選択効果に関する研究、土木学会論文集 F3、69 巻、2014、I\_98-I\_109
- 3) Taro Suzuki, Mitsunori Kitamura, Yoshiharu Amano and Takumi Hashizume: High-Accuracy GPS and GLONASS Positioning by Multi-path Mitigation using Omnidirectional Infrared Camera, IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2011, 311-316

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① 池田隆博、移動時の高精度測位におけるマルチパス判別手法を用いた衛星除去効果に関する研究、土木学会論文集 F3、査読有、72 巻、2017、I\_200-I\_208
- ② 池田隆博、佐田達典、複数衛星系における信号強度と搬送波位相変化量を用いたマルチパス検知手法に関する研究、応用測量論文集、査読有、27 巻、2016、55-56

[学会発表] (計 2 件)

- ① 池田隆博、GNSS 測位の搬送波位相積算値を用いたマルチパス判別手法の有効性と課題、写真測量学会、2017
- ② 池田隆博、移動時の GNSS 測位における誤差電波の除去効果に関する研究、土木情報学シンポジウム、2016

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

池田 隆博 (IKEDA, Takahiro)

日本大学理工学部・助教

研究者番号：60733227