

複数衛星測位システムの複合による
都市部での測位精度・利用率向上手法の研究

**Accuracy and Availability Enhancement of Positioning
in Urban Environment by Multi-Global Navigation Satellite System**

2015年2月

北村 光教

Mitsunori KITAMURA

複数衛星測位システムの複合による
都市部での測位精度・利用率向上手法の研究

**Accuracy and Availability Enhancement of Positioning
in Urban Environment by Multi-Global Navigation Satellite System**

2015 年 2 月

早稲田大学理工学術院 基幹理工学研究科
機械科学専攻 動力・エネルギー工学研究

北村 光教

Mitsunori KITAMURA

**Accuracy and Availability Enhancement of Positioning
in Urban Environment by Multi-Global Navigation Satellite System**

Aproved by:

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Yoshiharu Amano', written in a cursive style.

Dr. Yoshiharu Amano, Supervisor
Department of Applied Mechanics and Aerospace Engineering
Waseda University

Date Approved:

2, 6, 2015

記号表

b	受信機時計誤差 ($=C \cdot \delta t$)	m
ch	GLONASS 衛星の周波数チャンネル番号	
C	光速 ($=299,792,458$ [m/s])	m/s
dt	受信機時計誤差	sec
$d\tau$	衛星時計誤差	sec
epoch	観測単位	
EF	LMS 法の評価関数 (E の二乗和)	cycle ²
I	電離層伝搬遅延	m
K	受信した衛星数	
l	主衛星の衛星番号	
M	マルチパス誤差	m
n_{sv}	受信した衛星数	
N	波数不確定性, アンビギュイティ	cycle
O	衛星軌道予測誤差	m
r	衛星と受信機間の幾何学的な距離	m
$SIGN$	受信信号	
T	対流圏伝搬遅延	m
x, y, z	受信機位置	m
X, Y, Z	衛星位置	m
δb	受信機時計誤差の微小変化	
$\delta\phi$	マルチパス誤差の位相変位	cycle
Δf	ドップラ周波数	cycle/s
$\Delta\phi$	マルチパス波の搬送波位相遅れ	cycle
ε	擬似距離誤差	m
ϕ	搬送波位相	cycle
λ	搬送波の波長	m
ρ	擬似距離	m
$\dot{\rho}$	擬似距離の時間変化率, デルタレンジ	m/s
\mathbf{b}_{BR}	基準局受信機から移動局受信機までの基線ベクトル	m
\mathbf{E}	LMS 法の残差ベクトル	cycle
\mathbf{G}	幾何行列	
\mathbf{I}	単位行列	
\mathbf{l}	受信機からみた衛星の視線方向ベクトル	
\mathbf{L}	下三角行列	
\mathbf{N}	受信した衛星の二重差整数アンビギュイティベクトル	cycle
\mathbf{U}	上三角行列	
\mathbf{W}	受信した衛星の重み行列	
\mathbf{x}	受信機位置ベクトル ($= (x, y, z)$)	m

\mathbf{X}	衛星位置ベクトル ($= (X, Y, Z)$)	m
$\delta\mathbf{x}$	受信機位置ベクトルの微小変化	m
$\delta\rho$	受信した衛星の擬似距離ベクトルの微小変化	m
$\boldsymbol{\varepsilon}$	受信した衛星の誤差ベクトル	m
ϕ	搬送波位相擬似距離	m
$\boldsymbol{\varphi}$	受信した衛星の二重差搬送波位相ベクトル	cycle
ρ	受信した衛星の擬似距離ベクトル	m
$\sigma(x)$	揺らぐ値 x の標準偏差	
$[x]_{\text{roundoff}}$	x の四捨五入	

添字表

上付き

i	i 番衛星
j	j 番衛星
k	k 番衛星
l	主衛星番号

下付き

0	ニュートンラフソン法における初期値
B	基準局, Base
BR	基準局と移動局の差, Base-Rover
c	補正值
ch	GLONASS 衛星の周波数チャンネル番号
Int	整数
$least$	最小二乗法による最適解
$L1$	L1 周波数帯
$L2$	L2 周波数帯
$L5$	L5 波数帯
R	移動局もしくは観測局, Rover
φ	搬送波位相の要素
ρ	擬似距離の要素

略語表

BeiDou	BeiDou Navigation Satellite System (北斗衛星導航系統)
DD	Double Difference (観測値の二重差)
Galileo	Galileo
GLONASS	Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema
GNSS	Global Navigation Satellite Systems
GPS	Global Positioning System
IFB	Inter Frequency Bias (周波数間バイアス)
IR-ODV	Infrared Omni-Directional Vision (赤外全周カメラ)
ISB	Inter System Bias (システム間バイアス)
LMS 法	Local-Minima Search algorithm (局所的最小値探索法)
LOS 衛星	Line-of-Sight 衛星 (障害物で信号が遮蔽されていない衛星)
MMS	Mobile Mapping System
NLOS 衛星	Non-Line-of-Sight 衛星 (障害物で信号が遮蔽されている衛星)
PRN	Pseudo Random Noise (擬似ランダム雑音, 衛星番号)
QZSS	Quasi-Zenith Satellites System (準天頂衛星システム)
RTKLIB	オープンソースの汎用マルチ GNSS 高精度測位エンジン
SD	Single Difference (観測値の一重差)

目次

記号表
添字表
略語表

1. 序論	1
1・1 はじめに	1
1・2 衛星測位アプリケーション	1
1・3 都市部における測位の現状	3
1・4 都市部測位の高精度化に関する従来手法	4
1・4・1 受信機による NLOS 衛星判別	4
1・4・2 赤外全周カメラを用いた NLOS 衛星判別	5
1・4・3 複数の衛星測位システムを利用した複合測位（マルチ GNSS）	5
1・4・4 赤外全周カメラによる NLOS 衛星判別手法の評価試験	8
1・4・5 まとめ	10
1・5 目的	13
1・6 方針と論文の構成	13
2. 衛星測位システム	15
2・1 衛星測位概要	15
2・1・1 単独測位	15
2・1・2 相対測位	19
2・1・3 局所的最小値探索法（LMS 法）	25
2・1・4 ワイドレーン法	28
2・2 マルチ GNSS	33
2・2・1 GPS	33
2・2・2 GLONASS	34
2・2・3 Galileo	35
2・2・4 BeiDou	35
2・2・5 QZSS	35
2・2・6 システム間バイアス（ISB）	37
2・3 NLOS 衛星	37
2・4 マルチパス	37
3. 魚眼カメラを用いた NLOS 衛星判別	39
3・1 概要	39
3・2 マルチ GNSS 測位における NLOS 衛星判別手法の評価	40
3・2・1 NLOS 衛星判別	40
3・2・2 評価試験	41
3・3 魚眼カメラを用いた NLOS 衛星判別	44
3・3・1 画像の領域分割	44

3・3・2 NLOS 衛星判別	45
3・3・3 評価試験	46
3・4 まとめ	51
4. 準天頂衛星を用いたマルチ衛星測位の利用性と精度の向上	52
4・1 概要	52
4・2 ワイドレーン法による QZSS 一重差アンビギュイティの決定	53
4・2・1 ワイドレーン法による QZSS 一重差アンビギュイティの決定	53
4・2・2 LEX 信号を用いた 4 周波ワイドレーン法	54
4・3 システム間バイアス (ISB) の推定	57
4・3・1 推定手法	57
4・3・2 移動体測位で運用する場合の補正	60
4・4 評価試験	61
4・4・1 概要と試験環境	61
4・4・2 試験環境	61
4・4・3 評価試験結果 (Open sky)	66
4・4・4 評価試験結果 (Narrow sky)	69
4・5 まとめ	74
5. 結論	75
5・1 本論文の成果	75
5・2 今後の課題	76

謝辞

参考文献

1. 序論

1・1 はじめに

高度に情報化現代では、位置情報に関する重要性が高まりつつある。位置情報とは、利用者がいつ、どこにいるかを記述する情報である。身近な利用法は、自動車の運転において目的地までの経路選択を支援するカーナビゲーションシステムや、歩行者を対象として携帯端末等のパーソナルデバイスを用いたパーソナルナビゲーションシステムが一般的である。

また、特に高精度な位置情報は、測量や情報化施工（IT 施工）、自動計測等のインフラストラクチャ（インフラ）整備の分野で重要である。これらの位置情報の取得方法として、従来、米国の GPS（Global Positioning System）等の全地球航法衛星システム（GNSS: Global Navigation Satellite Systems）が広く利用されている。GNSS は位置情報を、地球を基準とした絶対位置として取得することが可能であり、また、広範囲かつ高精度な位置計測が可能であるため、インフラ整備等の分野で有用である。

しかしながら、上記のインフラ整備の分野は人口の集中から都市部において需要が高いのに対して、GNSS は都市部での高精度な測位が困難であるという課題がある。その原因は、主に衛星から配信されている信号が建物等の障害物によって遮蔽されることにより発生する衛星数の不足であり、また、回折・反射した信号を受信する事によって発生する測位誤差も GNSS が都市部で高精度な測位が困難である重大な原因である。

そこで近年、都市部における GNSS 測位の高精度化を目的として、米国の GPS に加えて、露国の GLONASS（Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema）や欧州の Galileo、中国の北斗衛星導航系統（BeiDou: BeiDou Navigation Satellite System）、日本の準天頂衛星システム（QZSS: Quasi-Zenith Satellites System）等、複数の GNSS を複合的に利用して測位を行う、マルチ GNSS 測位⁽¹⁾⁽²⁾に関する研究が活発である。

本論文では、マルチ GNSS 測位を用いた都市部環境下における効果的な測位手法について論じる。

1・2 衛星測位アプリケーション

GNSS を利用した衛星測位は、利用者の地球上の絶対位置を取得できるため、位置情報を利用するアプリケーションに広く利用されている。具体的に一般的に広く利用されているアプリケーションとして、車両の目的地までの経路選択を支援するカーナビゲーションシステムや、携帯端末等のパーソナルデバイスを利用した歩行者の経路選択や、近隣の地理、施設等の情報収集を支援するパーソナルナビゲーションシステムが代表的である。これらのシステムでは、利用者、すなわち人間が与えられた位置情報を参考として利用し、人が自律的に車両の運転や歩行をする。そのため、要求される位置推定精度は、路上での運用を想定するなら、現在の経路を判別することができる精度（2～5[m]）で十分である。この位置推定精度を実現するために、GNSS では一般的に単独測位と呼ばれる測位手法（第 2・1・1 項で詳述）を用いている。単独測位は安価かつ容易に利用できるため、今日広く利用されている。

また、将来的な GNSS 測位の利用法として、鉄道分野における GNSS 測位の利用が求められている⁽³⁾。鉄道車両はレールガイドされているため、対向列車、もしくは先行列車と

の衝突回避行動が取れない。そのため、車両位置情報を利用した列車間隔制御が必須である。そこで、現状、線路を一定区間（閉そく区間）に区切って1区間を1個の列車のみの運行に占有させ、完全に通過し終わるまでは続行列車または対向列車をその区間に侵入させない方式（閉そく方式）が採られる。ここで車両の位置は、区間毎に絶縁された左右のレールの上を列車が通過することで車輪により短絡させ、車両検出を行っている。しかし、この従来手法では、車両位置の検出分解能が低く、一般的な通勤線区で数百[m]以上、閑散線区では10[km]以上に及ぶ。加えてこれらの線路の保守作業も重労働である。そこで、より効率的な車両運用を実現するために、GNSSによる車両位置管理システムが求められている。

また、測位アプリケーションの中には、上記の単独測位では測位精度の要求を満たせず、より高精度な測位が求められるアプリケーションがある。そのようなアプリケーションでは、多くがセンチメートル級の位置情報を求めており、GNSSは相対測位（第2・1・2項で詳述）と呼ばれる測位手法が利用される。相対測位が広く利用されている分野の一つに、測量分野がある。GNSS測位は広範な領域を短時間で計測できるため、測量において有用である。また、火山による隆起やプレートテクトニクス、地球回転の観測等、長期の地球力学現象の経年変化監視に有用である⁽⁴⁾⁽⁵⁾。加えて近年では、相対測位の基準局として利用することができるGPS連続観測点（電子基準点）が、国土地理院により全国で1200点もの設置（電子基準点網、GEONET）⁽⁶⁾が行われ、容易に測量することが可能となっている。

加えて、GNSS測位を用いた測量アプリケーションとして、近年、情報化（IT）施工や自動計測車両（MMS: Mobile Mapping System）等に関する研究が進められている。

IT施工とは、建機の自動化や施工管理の効率化により、工期の短縮等を図る手法である。従来の施工法では、設計図作成から完成までの間に、測量、丁張り、施工、検測を繰り返すことを行うことで施工の品質を保っている。それに対して、IT施工では、測量をしながら施工を行うことができるため、丁張り、検測の必要がなく、短期の施工が可能である。そのため、効率的な施工手法として、近年注目されている⁽⁷⁾。

自動計測車両とは、GNSSや慣性センサ等の測位センサ群とレーザスキャナやカメラ等の観測センサ群を搭載した車両であり、自動計測車両によって市街地等を走行するだけで、車両周辺の三次元地図を自動作成することが可能なシステムである⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。IT施工やその他の位置情報を利用したアプリケーションは、単純に利用者の位置情報が取得できるだけでは十分なサービスとして利用することは困難である。測位アプリケーションを十分に利用するためには、利用者の周囲の地図情報（特に基盤地図情報⁽¹²⁾）が必要である。自動計測車両ではこのような地図情報を高精度かつ高速に作成することが可能である。

また、高精度な位置情報の将来的な利用法として、車両の自動運転⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾に関する期待が高まっている。近年の世界的な自動車保有車両数の増加にともない発生している、都市部の深刻な渋滞問題の解消や、都市機能の多極分散型ネットワーク構造構築⁽¹⁶⁾のための遠隔地への物資の輸送等、車両の位置情報を利用した効率的な車両運用が求められる。

1・3 都市部における測位の現状

第1・2節で述べるような測位アプリケーションは、人口の集中から、都市部において高い需要がある。しかしながら、都市部におけるGNSS測位は高精度な測位が困難であり、また測位の利用性が低い、すなわち測位が困難な環境が多いことが課題である。

この課題の主たる原因は、都市部で頻繁に発生する、障害物による衛星信号の遮蔽である。障害物によって測位信号が遮蔽された衛星はNLOS (Non-Line-of-Sight)衛星と呼ばれ、都市部における高精度測位の大きな障害となっている。また、測位信号が遮蔽されずに直接測位信号を受信することができる衛星をLOS (Line-of-Sight)衛星と呼ぶ。NLOS衛星とLOS衛星の関係を図1.1に示す。

GNSS測位では、衛星から発信された信号を受信することで、衛星とアンテナ間の距離を計測して、受信機の位置を計算している。しかしNLOS衛星のように、衛星とアンテナ間に障害物がある場合、信号を受信することができないため、測位に利用することができない。この時、衛星数が測位に最低限必要な4基を下回ると測位が不可能になるため、NLOS衛星が頻出する都市部では測位の利用性が損なわれる。

またNLOS衛星は、衛星から発信された信号が障害物によって遮蔽されたにもかかわらず、遮蔽した障害物を回折 (Diffraction) した信号や、アンテナ周辺の障害物に反射 (Reflection) した信号を受信する場合は都市部では頻繁に発生する。このような信号は、信号の経路長が変化するため、正確な衛星とアンテナ間の距離を計測することができない。このように回折・反射した信号はマルチパス波 (Multipath signal) と呼ばれており、この信号によって生じる誤差はマルチパス誤差と呼ばれている。また、反射、回折することなくLOS衛星から受信する信号は直接波 (Direct signal) と呼ばれる。このようなマルチパス誤差によって、測位結果に重大な誤差が頻繁に生じるため、都市部では高精度な測位が困難である⁽¹⁷⁾。

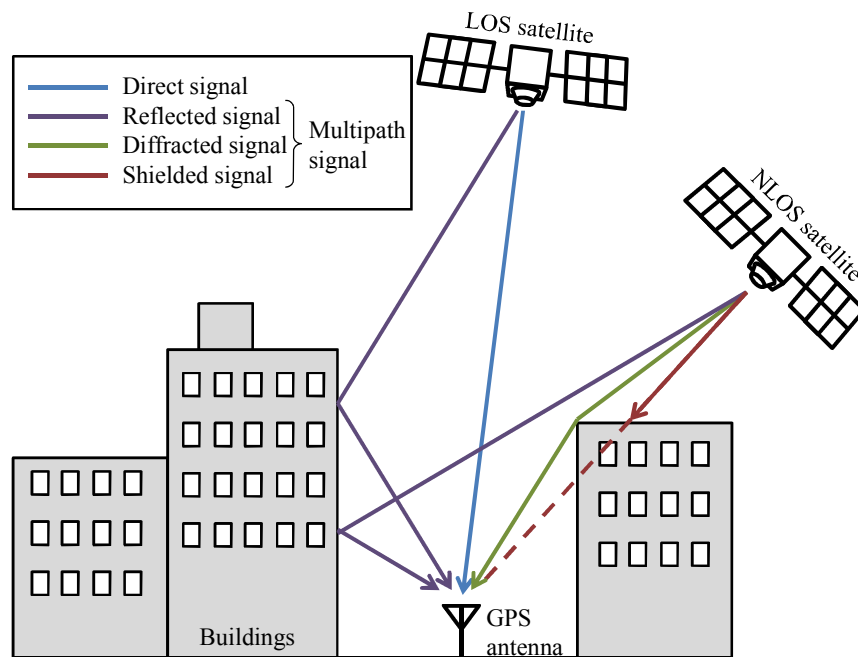


Fig. 1.1 LOS and NLOS satellites in urban canyon.

1・4 都市部測位の高精度化に関する従来手法

都市部で高精度測位を行う上で障害となる NLOS 衛星についてまとめると、大きな課題は 2 つ、マルチパス誤差による測位精度の劣化と衛星数の減少である。これらの問題について、従来 NLOS 衛星を判別する手法や測位衛星の絶対数を増加させるマルチ GNSS 測位に関する研究が行われている。

1・4・1 受信機による NLOS 衛星判別

マルチパス誤差を受信機内部で低減する手法は従来広く研究されており、Double-delta discriminator⁽¹⁸⁾や Strobe correlator⁽¹⁹⁾、High-resolution correlator⁽²⁰⁾等の有用な手法が数多く発表されている⁽²¹⁾。しかしながら、その多くは、マルチパス波と同時に直接波の受信を前提としている。そのため、これらの方法で扱う信号は、LOS 衛星のもので有り、本質的に NLOS 衛星を判別することには利用できない方法である。したがって、それらの手法を利用することで、NLOS 衛星によって発生するマルチパス誤差を低減することは不可能である。一方で、マルチパス波と直接波とが合成されて受信する場合には、直接波のみを取り出すことは困難であるものの、可能な限り直接波のみの成分を取り出す工夫が、上記 3 研究である。すなわち、LOS 衛星からの信号確度を向上させる方法であると言える。つまり、LOS 衛星から受信した信号からマルチパス誤差を低減する手法では、本質的に NLOS 衛星からのマルチパスの影響を排除することができないため、NLOS 衛星の信号を判別して、これを排除する手法が必要である。NLOS 衛星の信号は、測位演算から除去することで、測位精度の向上を図ることができる⁽²²⁾。

そこで、以下では NLOS 衛星を判別する手法として、特に GNSS 受信機で受信した信号から得られる情報を利用して NLOS 衛星を判別する手法について述べる。受信した信号から NLOS 衛星のマルチパス波を判別する最も容易な方法は、受信した信号の対雑音比（信号強度）を検証する方法である⁽²³⁾。つまり、直接波を受信せずマルチパス波のみを受信する NLOS 衛星を、マルチパス波に含まれる信号が周辺の障害物によって回折・反射されることで減衰し、直接波と比較して信号強度が低下するという性質を利用して判別する方法である。つまり、直接波を受信する際に得られる信号強度を事前に予測し、実際に得られた信号強度が予測値に対して極端に小さい場合にその衛星を NLOS 衛星として判別する手法である。しかしながら特定の場合において、回折波の信号減衰率は小さく、また反射波についても、信号が電波反射率の高い材質の障害物に反射された場合の信号減衰率は小さいため、このような信号は NLOS 衛星の判別が困難であることが課題として挙げられる。また他の手法として、指向性のあるアレーアンテナを利用して NLOS 衛星の信号受信を防ぐ手法⁽²⁴⁾がある。NLOS 衛星から受信する信号は反射・回折波であるため、受信機から見た衛星の方向とは異なる方向から信号が入射することを利用した手法である。また、同時に受信する複数の衛星の信号を比較する手法⁽²⁵⁾では、受信した全衛星の内、ほとんどの衛星がマルチパス誤差の小さな LOS 衛星の場合、NLOS 衛星が判別できる。しかしながら、都市部のような周辺障害物の多い GNSS 測位にとって挑戦的な環境では NLOS 衛星が多くなるため、マルチパス誤差の小さな NLOS 衛星を十分な数受信することができず、NLOS 衛星判別の信頼性が低くなることが課題として挙げられている。また、dual-polarisation アンテナを用いた NLOS 衛星判別⁽²²⁾⁽²⁶⁾⁽²⁷⁾⁽²⁸⁾⁽²⁹⁾では、GNSS の測位信号の搬送波が、電離層

や地磁気によって発生するファラデー回転を抑制するために、右旋円偏波であることを利用している⁽³⁰⁾。そのため、通常 GNSS アンテナには右旋円偏波アンテナが利用されている。これは、建物などによる反射波の搬送波が、入射角が偏光角（Brewster's angle）以下で反射した場合左旋円偏波になる⁽³¹⁾ため、右旋円偏波アンテナを利用することで、左旋円偏波の信号を、理想的な反射波で約 10dB、ラフな反射面で反射した信号については約 3dB 反射マルチパス波を低減することができるためである。そこでこの手法では、同一軸上に右旋円偏波アンテナと左旋円偏波アンテナを組み合わせた dual-polarization アンテナを用い、反射波は左旋円偏波になると仮定して、それぞれの円偏波アンテナで受信した測位信号の信号強度を比較することで、NLOS 衛星の判別を行っている。しかしながらこの手法では、反射波の入射を前提としており、回折波の影響について検出することが不可能であることが課題として挙げられる。

以上に示すように、NLOS 衛星判別に関する従来手法とその課題に対して、反射波や回折波が多く入射する挑戦的な環境で、より頑健に NLOS 衛星を判別する手法が必要である。

1・4・2 赤外全周カメラを用いた NLOS 衛星判別

NLOS 衛星を判別する最も容易な方法として、第 1・4・1 項で述べるように受信した信号の信号強度を検証する方法がある。しかし、この方法では、回折波や反射率高い材質で反射された反射波の判別が困難である。そこで、GNSS 受信機以外の外部センサを利用して実際に障害物を観測することで NLOS 衛星を判別する手法が目黒らにより提案されている⁽⁵⁷⁾。赤外全周カメラ（IR-ODV: Infrared Omni-Directional Vision）と呼ばれる特殊なカメラを用いて NLOS 衛星を判別する本手法は、直接アンテナ天頂の障害物を検出する手法であるため、障害物と衛星の位置関係から容易に NLOS 衛星を判別することが可能である。

赤外全周カメラの外観と光学系を図 1.2 に示す。赤外全周カメラは、利用者の全周（360[deg]）を遠赤外線領域で撮影可能なカメラである。遠赤外線領域の光は、大気透過率が高く、また、温度を持った物体が放射するという特性を持っている。そのため、図 1.3 に示す用に、空は黒く、建物等の障害物は白く撮影される。そこで、図 1.3 を単純に二値化することで、容易に障害物情報が取得でき、画像上に受信した衛星の位置を配置することで、その衛星が NLOS 衛星かどうかの判別ができる（図 1.4）。

目黒らによる研究では、GPS による測位に赤外全周カメラを用いた NLOS 衛星判別を適用しており、都市部における GPS 測位の測位精度向上を実現している。しかしながら課題として、都市部環境下における GPS 測位で NLOS 衛星判別を行った場合、一部で、NLOS 衛星を除去したために、衛星数が不足し、測位不能、または測位精度がかえって悪化する場合は考えられる。また、赤外全周カメラは特殊なカメラであるため、一般的に利用が困難であることも課題である。

1・4・3 複数の衛星測位システムを利用した複合測位（マルチ GNSS）

都市部のような環境では、GPS のような単一の GNSS による測位では衛星遮蔽による衛星数の減少が重大な問題となる。具体的には、測位に利用可能な衛星数が減少すると衛星の幾何配置が悪化し、測位精度が低下する。更に悪い場合には、測位に最低限必要な衛星数 4 基を下回り測位不能になることも珍しくない。

そのような中、GPS に GLONASS 等の他の GNSS を複合する手法が提案されている⁽⁶⁷⁾。この手法では、受信機と衛星間の計測距離である擬似距離を利用した単独測位を行っており、GLONASS を複合することで測位衛星を増加させ、測位精度の向上を実現している。また同時期に、搬送波位相を利用した高精度相対測位においても GPS と GLONASS を複合する手法が提案されている⁽⁶⁸⁾。この手法では、GLONASS の複合により相対測位の高精度化を実現している。しかしながら、GPS と GLONASS では搬送波の周波数が異なるため、それぞれの搬送波位相を用いた線形結合により二重差(DD: Double Difference) と呼ぶ観測値を作成した場合、相対測位において重要な観測値要素であるアンビギュイティが整数性を失うことを指摘している。そして、この手法では、搬送波位相の線形結合を工夫し仮想の波長を作成することで、アンビギュイティの整数性の保存を図っている。しかしながら、上記により作成した仮想の波長は極端に短い(880-890 [nm]) ため、アンビギュイティの整数決定が困難であることも同時に述べている。また、Pratt 等の研究⁽⁶⁹⁾⁽⁷⁰⁾によると、GPS-GLONASS 間の DD 観測値はバイアス誤差を持つことを明らかにしており、DD 観測値にバイアス誤差が含まれる場合、DD アンビギュイティの整数決定が困難であるとしている。そこで、Pratt 等は同研究において、GPS-GLONASS 間の DD 観測値に含まれるバイアス誤差を事前のキャリブレーションによって除去する手法を提案している。このキャリブレーション手法を用いることで、GPS-GLONASS 間のバイアス誤差を除去することが可能となる。しかしながら、同研究において GPS-GLONASS 間のバイアス誤差は実験毎に異なる値を示していたため、上記キャリブレーションによるバイアス誤差除去は実際には困難であった。そこで、各 GNSS でそれぞれ DD 観測値を作成することで、上記バイアス誤差は生じないため、GPS と GLONASS でそれぞれ規準となる衛星（主衛星）を定義して DD 観測値を作成している。

つまり、従来のマルチ GNSS 測位では、衛星システム間のバイアス誤差を除去することを目的として、各 GNSS にそれぞれ 1 基ずつ主衛星と呼ばれる衛星を定義している。そのため、この主衛星の定義により、測位に利用可能な衛星数が減少してしまい、マルチ GNSS による衛星数増加効果が十分に得られていないという課題がある。具体的な例として、GPS、GLONASS、Galileo、BeiDou、QZSS を利用したマルチ GNSS 測位の場合を考える。QZSS については、GPS と互換性を持つように設計されているため、GPS と同一のシステムとみなすことができるとすると、主衛星の定義によって減少する衛星数は、GPS、GLONASS、Galileo、BeiDou でそれぞれ 1 基ずつ、すなわち 4 基である。この 4 基もの衛星が利用できなくなることは重大な課題である。これは、遮蔽物の多い都市部のような挑戦的な環境では、上記全ての GNSS を利用しても 8 基を超える LOS 衛星を受信することは困難であるため、主衛星の定義によって観測数が 4 つを下回り、マルチ GNSS 複合を行ってもなお、測位不能となる場合が頻発するためである。

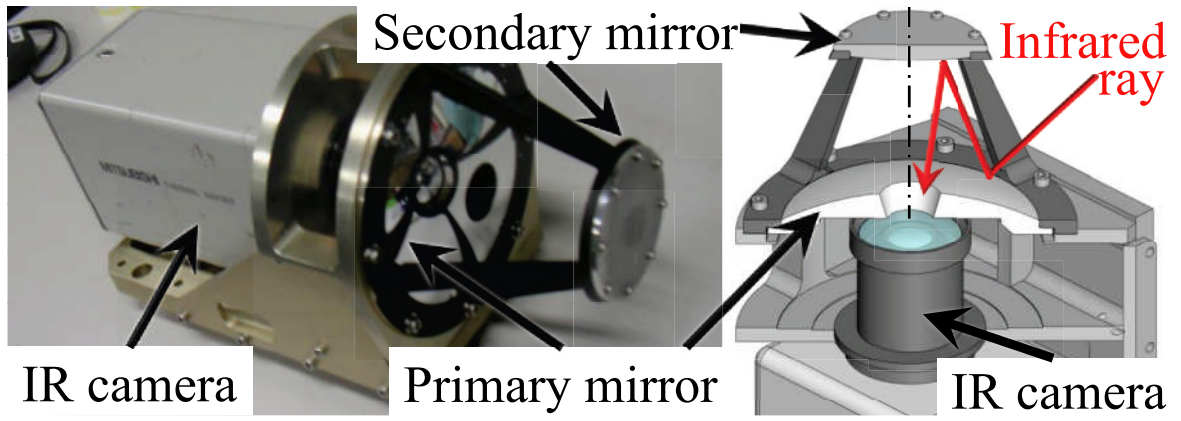


Fig. 1.2 Infrared Omni-Directional Vision.

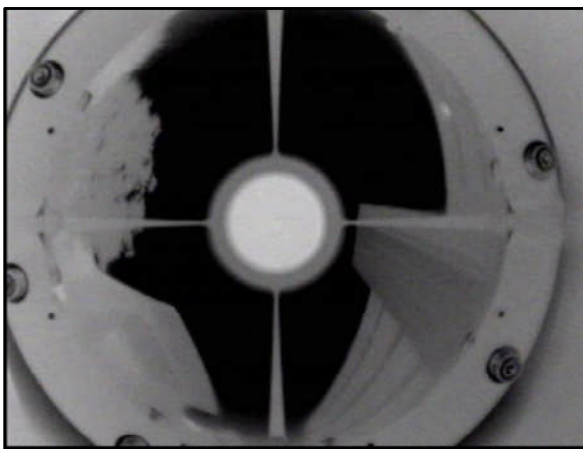


Fig. 1.3 Zenith view by IR-ODV.

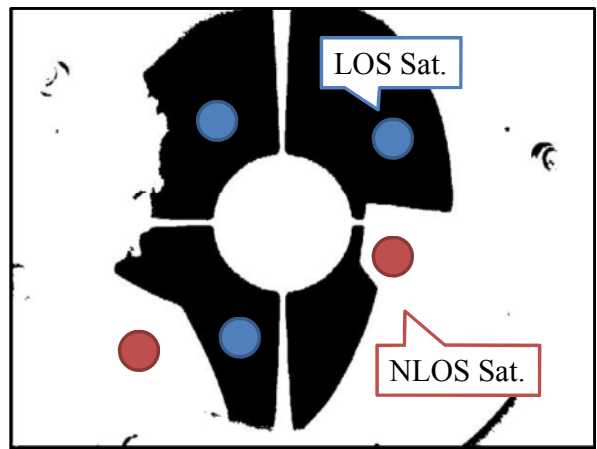


Fig. 1.4 NLOS sat. detection.

1・4・4 赤外全周カメラによる NLOS 衛星判別手法の評価試験

a. 概要

第1・4・1項から第1・4・3項では、都市部における測位の高精度化を目的とした NLOS 衛星判別手法に関する従来研究を示している。そのなかで本研究では、実際にアンテナ周辺に存在する障害物情報を取得することで NLOS 衛星を判別することが可能な、赤外全周カメラという外部センサを用いた NLOS 衛星判別手法が最も効果的であると考えられる。そこで本項では、実際に赤外全周カメラを用いた NLOS 衛星判別手法を実施し評価する。具体的には、周辺に障害物が多数存在する環境で GPS の静止観測を行い、赤外全周カメラを利用して NLOS 衛星の判別を行う。そして、LOS 衛星と NLOS 衛星に判別した衛星の信号強度とマルチパス誤差を評価する。

本試験に用いる受信機は基準局、観測局共に JAVAD 社の DELTA-G2T を使用する。受信機の仕様を表 1.1 に示す。また、基準局は観測局の近傍約 30[m]地点の上空が開けた理想的な環境に設置し、観測周期は 1[Hz]、観測時間は 1 時間とする。

Table 1.1 Specification of GNSS receivers.

Receiver name		DELTA-G2T
Provider		JAVAD
Max. tracking	Channel	216
Signal type	GPS	L1, L2
	GLONASS	G1, G2

b. マルチパス誤差の抽出

本手法によって判別した NLOS 衛星のマルチパス誤差を評価するために、観測した擬似距離 ρ に含まれるマルチパス誤差の抽出方法を述べる。

まず前提として本評価試験は、事前の長時間観測によって観測局の位置がセンチメートル級 (RMS 誤差 2[cm]以内) で求まっているものとし、また、基準局の設置により、2 地点で観測を行うものとする。また、評価するマルチパス誤差は、コード擬似距離に含まれるマルチパス誤差 (コードマルチパス誤差) とする。

観測局 R (Rover) で観測する衛星 k のコード擬似距離 ρ_R^k について、観測モデルを式(1.1)に示す。

$$\rho_R^k = r_R^k + I^k + T^k + c(\delta t_R - \delta \tau^k) + \varepsilon_R^k \quad (1.1)$$

ここで、 ε_R^k はコードマルチパス誤差等の雑音誤差を表し、 r_R^k は衛星-受信機間の幾何学的な距離 (幾何距離)、 I^k は電離層遅延、 T^k は対流圏遅延、 δt_R は受信機時計誤差、 $\delta \tau^k$ は衛星時計誤差を表す。 ε_R^k は周辺に障害物が存在する観測局のマルチパス誤差であるため、数メートル級の大きな誤差が発生しているものだと予測できる。それに対して、式(1.2)に示す基準局 B (Base) で観測した衛星 k のマルチパス誤差 ε_B^k は、天頂が開けた理想的な測

位環境であるため、50[cm]程度の十分無視できるほど小さな誤差である。そこで本研究では、観測局 R のマルチパス誤差 ε_R^k と基準局 B のマルチパス誤差 ε_B^k を比較することで、観測局 R のマルチパス誤差 ε_R^k を抽出する。

具体的には、式(1.3)のように観測局 B の擬似距離 ρ_B^k と観測局 R の擬似距離 ρ_R^k の差を取る。すなわち、受信機間一重差擬似距離 ρ_{BR}^k を取る。

$$\rho_B^k = r_B^k + I^k + T^k + c(\delta t_B - \delta t^k) + \varepsilon_B^k \quad (1.2)$$

$$\rho_{BR}^k = r_{BR}^k + c\delta t_{BR} + \varepsilon_{BR}^k \quad (1.3)$$

ここで、 ρ_{BR}^k は擬似距離の差 ($\rho_B^k - \rho_R^k$)、 r_{BR}^k は幾何距離の差 ($r_B^k - r_R^k$)、 δt_{BR} は受信機時計誤差の差 ($\delta t_B - \delta t_R$)、 ε_{BR}^k はマルチパス誤差の差 ($\varepsilon_B^k - \varepsilon_R^k$) を表している。また、観測局 R と基準局 B で衛星 k に共通に含まれる電離層遅延 I^k 、対流圏遅延 T^k 、衛星時計誤差 δt^k は差を取ることで除去される。さらに式(1.4)に示すようにある主衛星 l について式(1.3)と同様に差を取り、式(1.5)のように式(1.4)と式(1.3)の差、すなわち二重差擬似距離 ρ_{BR}^{kl} を取る。主衛星 l はなるべく仰角が高く、マルチパス誤差が生じにくい衛星を選択する。

$$\rho_{BR}^l = r_{BR}^l + c\delta t_{BR} + \varepsilon_{BR}^l \quad (1.4)$$

$$\rho_{BR}^{kl} = r_{BR}^{kl} + \varepsilon_{BR}^{kl} \quad (1.5)$$

ここで、 ρ_{BR}^{kl} は擬似距離の差 ($\rho_{BR}^k - \rho_{BR}^l$)、 r_{BR}^{kl} は二重差幾何距離 ($r_{BR}^k - r_{BR}^l$)、 ε_{BR}^{kl} は二重差マルチパス誤差 ($\varepsilon_{BR}^k - \varepsilon_{BR}^l$) を表している。

式(1.5)は観測値の二重差擬似距離 ρ_{BR}^{kl} と、観測局と基準局の位置を事前に計測しているため既知である二重差幾何距離 r_{BR}^{kl} と二重差マルチパス誤差 ε_{BR}^{kl} が含まれる。すなわち、式(1.6)のようにすることで二重差マルチパス誤差 ε_{BR}^{kl} を求めることができる。

$$\varepsilon_{BR}^{kl} = \rho_{BR}^{kl} - r_{BR}^{kl} \quad (1.6)$$

ここで、二重差マルチパス誤差 ε_{BR}^{kl} には、観測局 R と基準局 B の衛星 k と主衛星 l についてのマルチパス誤差が含まれている。しかし、観測局 R の衛星 k についてのマルチパス誤差 ε_R^k と比較して、その他のマルチパス誤差は無視できるほど十分小さい。そこで、式(1.6)で求める二重差マルチパス誤差 ε_{BR}^{kl} を観測局 R の衛星 k についてのマルチパス誤差 ε_R^k とみなすことで、衛星 k のマルチパス誤差の抽出を行う。

c. 結果

赤外全周カメラによって判別した LOS 衛星と NLOS について、マルチパス誤差と信号強度を評価した結果を以下に示す。なお、マルチパス誤差と信号強度は衛星の仰角に依存する傾向にあるため、評価に利用する LOS 衛星と NLOS 衛星は異なる時刻で仰角に近い 2 基の衛星を利用した。

・ LOS衛星 (GPS PRN5)

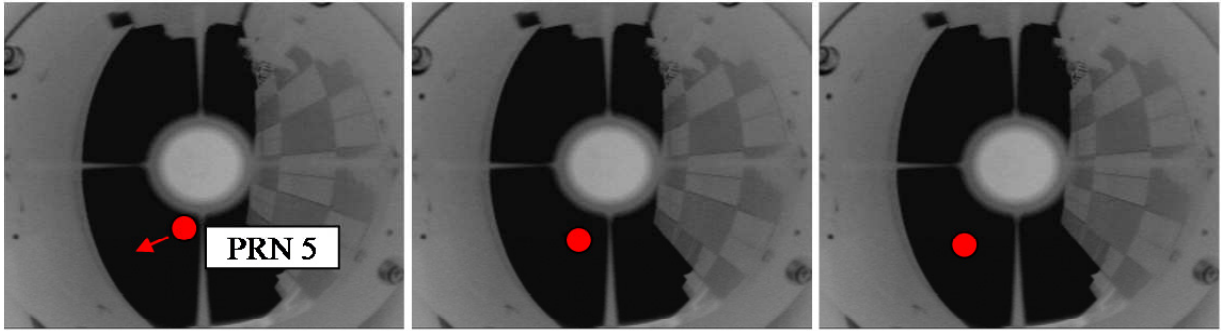
本衛星は赤外全周カメラによって LOS 衛星として判別された GPS の 5 番衛星 (PRN5: Pseudo random noise 5) を、GPS 時刻系で 133178[sec] から 136778[sec] の 1 時間分観測したものである。図 1.5(a) に赤外全周カメラ画像と LOS 衛星の軌跡を示し、図 1.5(b) に LOS 衛星の信号強度 (CNR: carrier-to-noise ratio) と式 (1.6) で求めたマルチパス誤差を示す。図 1.5(b) から、LOS 衛星の信号強度について、反射波の受信によって乱れが確認できるが、マルチパス誤差が小さい (RMS 約 3[m]) ことがわかる。

・ NLOS衛星 (GPS PRN11)

本衛星は赤外全周カメラによって NLOS 衛星として判別された GPS の 11 番衛星 (PRN11) を、GPS 時刻系で 197978 [sec] から 201578 [sec] の 1 時間分観測したものである。図 1.6(a) に赤外全周カメラ画像と NLOS 衛星の軌跡を示し、図 1.6(b) に LOS 衛星の信号強度と式 (1.6) で求めたマルチパス誤差を示す。図 1.6(b) から、前半の観測では、衛星からの信号が遮蔽されているにもかかわらず、大きな信号強度を示しており、信号減衰の少ない回折波や反射波を受信していることが確認できる。この結果から、第 1・4・1 項で述べるように信号強度を利用した NLOS 衛星判別が困難であることが確認できる。また、マルチパス誤差について、LOS 衛星と比較して非常に大きな誤差 (最大約 60[m]) を持つことが確認できる。つまり、NLOS 衛星を利用することで測位誤差が大きくなることが予想でき、NLOS 衛星を測位演算から除外することで測位精度の向上が期待できる。

1・4・5 まとめ

赤外全周カメラによって判別した NLOS 衛星について、実際に発生するマルチパス誤差の評価を行った。評価試験の結果、赤外全周カメラによって判別した NLOS 衛星が確かに大きな誤差を持つことを確認した。そのため、本手法を利用することで、測位精度の向上が実現できる。しかしながら課題として、都市部のような環境では、一部の環境で NLOS 衛星を除去したために、衛星数が不足し、測位不能、または測位精度の悪化をまねく場合が考えられる。また、赤外全周カメラは二枚の鏡による反射型光学系を利用しているため、画像中央に副鏡が映り込み、仰角 70[deg] 以上を観測することができない。そのため、超高層ビル街や建物隣接地点のように障害物が仰角 70[deg] 以上に存在する環境では、正確な障害物検出とそれによる NLOS 衛星判別が困難であることが課題としてあげられる。加えて、赤外全周カメラは特殊なカメラであるため、一般的に利用が困難であることも課題としてあげられる。

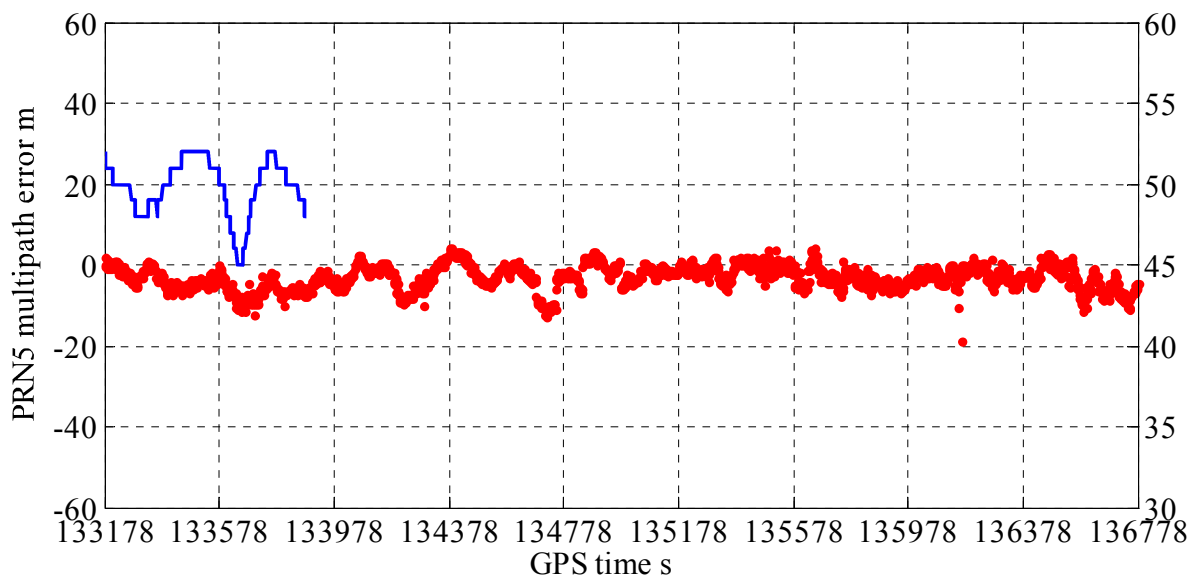


GPS time is 133178 sec

GPS time is 134978 sec

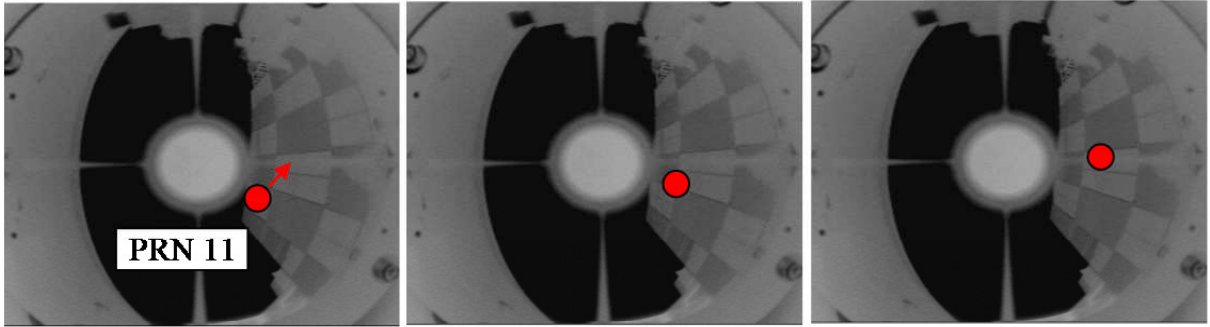
GPS time is 136778 sec

(a) Satellite movement on IR-image at GPS time



(b) C/N ratio and multipath error

Fig. 1.5 C/N ratio and multipath error of PRN 5 satellite (LOS satellite).

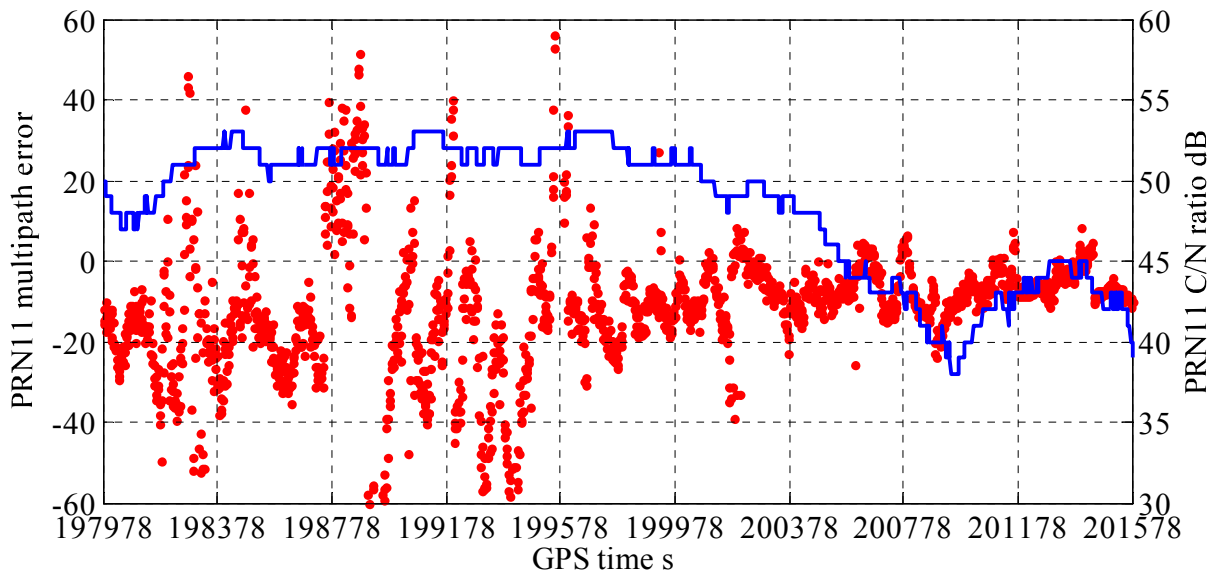


GPS time is 197978 sec

GPS time is 199778 sec

GPS time is 201578 sec

(a) Satellite movement on IR-image at GPS time



(b) C/N ratio and multipath error

Fig. 1.6 C/N ratio and multipath error of PRN 11 satellite (NLOS satellite).

1・5 目的

本研究では、都市部において利用性が高く、高精度な測位の実現を目的とする。具体的には、NLOS 衛星を判別することでマルチパス誤差の影響を低減し、加えて、マルチ GNSS 測位を利用することで都市部における衛星数減少を緩和する。

NLOS 衛星判別では、赤外全周カメラという特殊なカメラを利用した手法と、一般的な魚眼カメラを用いた手法を提示する。加えて、マルチ GNSS 測位の課題である複数システム毎に定義する主衛星について、ただ一つの主衛星を定義する測位手法を提案することで、都市部における測位の高精度化と利用性向上の実現を図る。

1・6 方針と論文の構成

都市部では多数の障害物によって衛星が遮蔽されるため、LOS 衛星が極端に少なくなり、測位精度の劣化や測位自体が不可能な場合が頻発する。そこで都市部における測位では、複数の GNSS を複合することで衛星の絶対数の増加を図るマルチ GNSS 測位が有効である。しかしながら従来のマルチ GNSS 測位では、各 GNSS にそれぞれ主衛星を定義するため、衛星数が減少し、複数 GNSS 複合による十分な衛星数増加効果が得られないという課題がある。そこで本研究では、QZSS をただ一つの主衛星として定義する手法を提案する。加えて、NLOS 衛星によるマルチパス誤差の影響を除去することを目的として、魚眼カメラを用いた NLOS 衛星を判別し、LOS 衛星のみを用いた測位を行う。

本論文は全 5 章で構成される。第 1 章では、本論文の背景として都市部における GNSS 測位の現状と、課題について述べる。特に課題では、NLOS 衛星についてとりあげ、NLOS 衛星に関する従来研究として、NLOS 衛星を判別する手法と、複数の GNSS を複合することで LOS 衛星の増加を図るマルチ GNSS 測位手法を紹介する。紹介する NLOS 衛星判別手法の中で、本論文では赤外全周カメラを用いた手法が有効であると考えている。そこで第 1・4・4 項では、赤外全周カメラを用いた NLOS 衛星判別手法の評価を行い、赤外全周カメラを用いた NLOS 衛星判別手法が有効であることを確認する。また、従来のマルチ GNSS 測位の課題についても述べる。具体的には、従来のマルチ GNSS 測位が、主衛星と呼ばれる規準とする衛星を各 GNSS にそれぞれ定義するという手法を用いているため、主衛星の定義によって測位に利用可能な衛星数が減少するという課題について述べる。

第 2 章では、本論文で対象とする GNSS について、詳細と本論文で必要な技術について述べる。具体的には第 2・1 節では、衛星測位の概要として、単独測位と、相対測位について述べる。単独測位はメートル級の測位精度を持っており、更に利用が容易な測位手法であるため、一般的に広く利用されている。それに対して、相対測位はセンチメートル級の高精度な測位を実現することが可能であるが、専門的な知識が必要であることや、単独測位と比較して利用者のシステムが複雑になるため、測量等の専門的な分野で広く利用されている測位手法である。本論文で提案する測位手法は、高精度な測位が可能な相対測位に関する新しい測位手法である。加えて本節では、提案手法で利用する測位技術として、局所的最小値探索 (LMS: Local Minima Search) 法とワイドレーン法をについて述べる。次に、第 2・2 節ではマルチ GNSS 測位について詳細に述べ、また第 2・3 節、第 2・4 節では、都市部における GNSS 測位の課題として、それぞれ NLOS 衛星とマルチパス誤差について詳細に述べる。

第3章では、可視光魚眼カメラを用いた NLOS 衛星判別手法について述べる。本章では、従来研究で利用されている赤外全周カメラに替わり、可視光魚眼カメラを用いてアンテナ周辺の障害物を検出する手法について述べ、都市部における本 NLOS 衛星判別手法の有効性評価を行う。

第4章では、ただ一つの主衛星を定義するマルチ GNSS 測位手法について述べる。従来のマルチ GNSS 測位が各 GNSS にそれぞれ主衛星を定義することで衛星数が減少しているのに対し、本提案手法は QZSS をただ一つの主衛星とすることで衛星数の減少の緩和を図る。QZSS をただ一つの主衛星として定義する場合、二重差アンビギュイティが整数性を失うことと、システム間バイアス誤差が存在することが課題となる。そこで本提案手法では、QZSS の LEX 信号を利用した新しいワイドレーン法を提案・利用することで、QZSS の一重差アンビギュイティを既知として扱い二重差アンビギュイティの整数性を保存する。また、GPS 等の単一システムによる測位の FIX 解を利用することでシステム間バイアスの推定し、除去する手法を提案する。本章では、ただ一つの主衛星を定義するマルチ GNSS 測位手法について評価試験を行い、本手法により都市部環境下における測位の利用性と精度が向上することを確認する。評価試験では、NLOS 衛星による測位誤差を低減することを目的として NLOS 衛星の判別を行うが、第1・4・4節で有効性を示した赤外全周カメラによる NLOS 衛星判別手法は周辺障害物の仰角が高いため利用が困難である。そこで、第3章で提案する魚眼カメラを用いた NLOS 衛星判別を行うことで、仰角の高い NLOS 衛星についても正確に判別する。

最後に第5章では、結論として本論文で提案する測位手法についてまとめ、得られた知見とその成果、およびそれらを踏まえた今後の課題と展望について述べる。

2. 衛星測位システム

2・1 衛星測位概要

GNSS を利用した衛星測位の概要について述べる。GNSS 測位は大きく単独測位 (Single point positioning) と相対測位 (Differential positioning) に分けることができる。本節では、単独測位と相対測位についてそれぞれ紹介し、続いて本論文で利用する相対測位の技術として、ワイドレーン法と LMS 法について述べる。

2・1・1 単独測位

GNSS の一般的な単独測位手法として、以下では GPS を用いた単独測位について述べる。GPS に関する詳細は第 2・2・1 項で述べる。GPS は測距信号を利用して、衛星と受信機間の距離を計測する。一般的には、測距コードには L1C/A 信号が利用される。L1C/A 信号は衛星の時刻に同期して送信されており、GPS 受信機は受信した信号の、衛星からの送信時刻をナノ秒級で正確に読み取ることが可能である。そこで、受信機の受信時刻と信号の送信時刻を比較することにより、電波の伝搬時間を求める。そして、伝搬時間に光速 $C[m/s]$ ($299,792,458[m/s]$) を乗じることで、衛星と受信機間の距離として計測する。しかし、この距離計測法には受信機と衛星の高精度な時刻同期が必要となる。GPS 衛星はルビジウム (Rb) またはセシウム (Cs) 原子時計等の高精度な時計を搭載しており、また、衛星時計誤差 (クロックバイアス: Clock bias) も航法データにより高精度に補正可能である。そのため、衛星の時刻は GPS が準拠する時刻系 (GPS 時刻系) に二乗平均平方根 (RMS: Root Mean Square) 誤差が $5[ns]$ 以下の高精度な同期を実現している。問題となるのは、GPS 受信機に搭載されている時計誤差である。近年の著しいマイクロエレクトロニクス技術の進歩により、小型軽量なチップセット型原子時計 (CSAC: Chip-Scale Atomic Clock)⁽³²⁾ など開発されているが、すべての GPS 受信機でこれを利用することは現実的ではない。そのため実際の GPS 受信機には、多くが水晶発振器 (Crystal oscillator) を時計の周波数源に利用している。水晶発振器には CSAC ほどの周波数安定性は望めないが、水晶発振器の周波数安定性による場合でも、GPS 受信機の GPS 時刻に対する同期という困難な要求を満たすことができる。受信機が測定する瞬間の受信機クロックのバイアス誤差は、すべての衛星の測距信号の伝達時間に等しく影響する。つまり、計測された衛星、受信機間の距離は、すべての衛星に対して長過ぎるか、短すぎるかである。そこで、GPS は受信機座標の 3 つの未知数に加え、受信機クロックバイアスを第 4 の未知数とすることで、この問題の解決を図っている。このように、測距信号により計測された信号は、受信機クロックバイアスの影響を受け、実際の長さとは大きく異なる。そのため、この距離は擬似距離 (Pseudorange) と呼ばれ、GPS の重要な観測量の一つである。ある衛星 k に対する擬似距離 $\rho [m]$ は式(2.1) のように表せる。

$$\rho^k = r^k - C \cdot dt + \varepsilon^k \quad (2.1)$$

ここに,

$$r^k = \sqrt{(X^k - x)^2 + (Y^k - y)^2 + (Z^k - z)^2}$$

r^k : Geometric distance to the satellite k from a receiver [m]

X, Y, Z : Satellite position [m]

x, y, z : Receiver position [m]

dt : Receiver clock bias [sec]

ε : Ranging errors [m]

実際の擬似距離では、伝搬経路上の電離層や対流圏を通過する際の伝搬遅延や、受信機雑音、マルチパス等が生じるため、これらを考慮する必要がある。しかし、本項では、簡単のため誤差項 ε [m]としてまとめ、式(2.1)を擬似距離モデルとして取り扱う。以下では、式(2.1)でモデル化する擬似距離を用いた測位演算について述べる。まず、ユーザ位置と衛星位置をそれぞれベクトルで表記すると、式(2.1)は式(2.2)で表せる。ただし、受信機クロックバイアス項 $C \cdot dt$ は、簡潔に b と置き換え、単位をメートルとする。

$$\rho^k = \|\mathbf{X}^k - \mathbf{x}\| - b + \varepsilon^k \quad (2.2)$$

ここに,

$\mathbf{X} = (X, Y, Z)$: the vector of satellite position [m]

$\mathbf{x} = (x, y, z)$: the vector of receiver position [m]

$b = C \cdot \delta t$: receiver clock bias [m]

非線形方程式(2.2)としてモデル化される擬似距離 ρ は、受信機クロックバイアス b と受信機座標ベクトル \mathbf{x} の3要素である4個の未知数を持っている。そのため、この未知数を求めるためには、少なくとも4本以上の方程式が必要となる。言い換えれば、位置が既知である4基以上の衛星から測距信号を受信することで、ユーザは瞬時に受信機の位置を推定可能である。衛星位置の計算については、測位信号に重畳されている航法メッセージから得ることができる。以下では、衛星位置は既知であるという前提のもと、非線形方程式(2.2)の解法を示す。

まず、 K 基の衛星を受信したと仮定して、 K 本の方程式(2.2)を解く簡潔な方法は、近似したユーザ位置の周りで式を線形化し、逐次的に解くことである。ユーザ位置とクロックバイアスについて大まかな推定値からはじめ、次の反復で推定値を更新するという手法には、以下に述べるニュートンラフソン法 (Newton-Raphson method)が広く利用されている。

まず、 k 番衛星の擬似距離の初期値 ρ_0^k を式(2.3)で表す。

$$\rho_0^k = \|\mathbf{X}^k - \mathbf{x}_0\| - b_0 \quad (2.3)$$

ここに,

\mathbf{x}_0 : the initial guesses of receiver position [m]

b_0 : the initial guesses of receiver clock bias [m]

ここで, 仮に受信機の真の位置 \mathbf{x} と真のクロックバイアス b を式(2.4)とすると, 受信機の位置とクロックバイアスの微小変化 $\delta\mathbf{x}, \delta b$ を未知数とする連立方程式(2.5)が立てられる. ただし, $\mathbf{l}^{(k)}$ の要素は, 受信機の推定位置から衛星へ向かうベクトルの方向余弦であり, 式(2.6)のように表せる.

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_0 + \delta\mathbf{x} \quad (2.4)$$

$$b = b_0 + \delta b$$

ここに,

$\delta\mathbf{x}, \delta b$: the unknown corrections to be applied to the initial estimates [m]

$$\begin{aligned} \delta\rho^k &= \rho_c^k - \rho_0^k \\ &= \|\mathbf{x}^k - \mathbf{x}_0 + \delta\mathbf{x}\| - \|\mathbf{x}^k - \mathbf{x}_0\| + (b - b_0) + \varepsilon^k \\ &\approx -\frac{(\mathbf{x}^k - \mathbf{x}_0)}{\|\mathbf{x}^k - \mathbf{x}_0\|} \cdot \delta\mathbf{x} + \delta b + \varepsilon^k \\ &= -\mathbf{l}^k \cdot \delta\mathbf{x} + \delta b + \varepsilon^k \end{aligned} \quad (2.5)$$

ここに,

ρ_c^k : the corrected pseudorange measurement from satellite k [m]

$$\mathbf{l}^k = \frac{1}{\|\mathbf{x}^k - \mathbf{x}_0\|} (x^k - x_0, y^k - y_0, z^k - z_0) \quad (2.6)$$

さらに, K 本の連立方程式(2.5)は, 行列の形で式(2.7)と書くことができる.

$$\delta\mathbf{p} = \begin{bmatrix} \delta\rho^1 \\ \delta\rho^2 \\ \vdots \\ \delta\rho^K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{l}^1 & 1 \\ -\mathbf{l}^2 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\mathbf{l}^K & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta\mathbf{x} \\ \delta b \end{bmatrix} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (2.7)$$

さらに簡潔に書くと, 式(2.7)は, ユーザの衛星配置を特徴付ける ($K \times 4$)の幾何行列 \mathbf{G} により式(2.8)となる.

$$\delta\mathbf{p} = \mathbf{G} \begin{bmatrix} \delta\mathbf{x} \\ \delta b \end{bmatrix} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (2.8)$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} -\mathbf{1}^1 & 1 \\ -\mathbf{1}^2 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\mathbf{1}^K & 1 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$K=4$ の時, 4 個の未知数を持つ 4 つの連立方程式 (式(2.10)) は直接解くことができる.

$$\begin{bmatrix} \delta\mathbf{x} \\ \delta b \end{bmatrix} = \mathbf{G}^{-1} \delta\mathbf{p} \quad (2.10)$$

しかし, 受信機上空が遮られないとき, 多くの場合で $K>4$ となり, 連立方程式は過決定 (over-determined) となる. この場合, よく使われるのは, 最小二乗法による解の探索である. 最小二乗法による最適解 ($\delta\mathbf{x}_{\text{least}}$, δb_{least}) を式(2.11)に示す.

$$\begin{bmatrix} \delta\mathbf{x}_{\text{least}} \\ \delta b_{\text{least}} \end{bmatrix} = (\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \delta\mathbf{p} \quad (2.11)$$

式(2.8)は式(2.11)により求めた最適解 ($\delta\mathbf{x}_{\text{least}}$, δb_{least}) により補正され, ユーザ位置とクロックバイアスを更新した新しい推定位置は式(2.12)で表せる.

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{\text{least}} &= \mathbf{x}_0 + \delta\mathbf{x}_{\text{least}} \\ b_{\text{least}} &= b_0 + \delta b_{\text{least}} \end{aligned} \quad (2.12)$$

解は推定値の変化が十分小さくなるまで繰り返され, 測位解を得る.

上記に示した最小二乗法には, K 個のすべての観測の質が等しいという暗黙の仮定がある. しかし, この仮定は, 多くの場合正しくない. 例えば, 衛星仰角の低い衛星は, 仰角の高い衛星に比べて誤差は大きい. そこで, 衛星仰角による重みを利用した重み付き最小二乗法がよく利用される. 式(2.11)に重み \mathbf{W} を使った場合の重み付き最小二乗解は式(2.13)となる.

$$\begin{bmatrix} \delta\mathbf{x}_{\text{least}} \\ \delta b_{\text{least}} \end{bmatrix} = (\mathbf{G}^T \mathbf{W} \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{W} \delta\mathbf{p} \quad (2.13)$$

2・1・2 相対測位

GPS による測位精度の向上は、測距誤差の低減によって図られる。測距誤差において、電離層や対流圏を信号が通過した時に発生する誤差や衛星軌道の誤差等の系統的な誤差（系統誤差: **Systematic errors**）は、互いに大きく離れていないユーザ間で良く似ており、また時間に対して緩やかに変化する。言い換えると、GPS による系統誤差は、時間的、空間的な相関を有している。仮に、受信機位置が既知であれば、逆にこれらの系統誤差を精度良く推定することができる。そのような推定された系統誤差を、付近の GPS ユーザに送信すれば、非常に正確な系統誤差の補正により、高精度な測位が可能となる。このように測位精度を向上させる手法を相対測位（DGPS: **Differential GPS**）と呼ぶ。

ここで、GPS 測位に要求される精度についてみると、数百メートルから数センチメートルまで多岐にわたる。しかし、L1C/A 等の測距コードを利用した擬似距離による相対測位では、達成される測位精度はせいぜい数十センチメートルから数メートルである。そこで、センチメートル級の測位を実現するために、擬似距離よりも精度の良い観測値として、測距信号が重畳されている搬送波の位相測定値を導入する。搬送波は、衛星が測距信号を送信するために利用する正弦波状の電波である。適当に強い正弦波信号の位相を、1 サイクルの 0.5~1%の精度で測定することは受信機技術にとっては困難なことではない⁽³³⁾。L1 帯周波数の波長 λ_{L1} は約 0.19[m]なので、非常に高精度な距離情報として利用可能である。

また、搬送波位相測定値が非常に高精度に測距可能であることを述べてきたが、搬送波位相測定値には、解決しなければならない重大な課題がある。それは、搬送波位相測定値が不確実性を持つということである。搬送波位相測定値は高精度ではあるが、単純な位相の測定値であるため、測位に利用するためには、すなわち、衛星-受信機間の距離を計測するためには、衛星-受信機間に存在する搬送波の波の数を知る必要がある。通常、この波数は計測不可能であるため、搬送波位相の有する波数不確実性またはアンビギュイティ（**ambiguity**）と呼ばれ、この決定は搬送波位相を利用した測位の主題である。通常、アンビギュイティは図 2.1 に示すように実数（**Real ambiguity**）であるため、その推定が非常に困難である。しかしここで、相対測位として 2 台の受信機を利用することにより、アンビギュイティ探索の難易度は大きく低減される。なぜなら図 2.2 に示すように、2 台の受信機を利用し、それぞれの搬送波位相測定値 ϕ_R 、 ϕ_B の差分を取ることで、アンビギュイティは整数のサイクル N_{Int} となるためである。この整数化したアンビギュイティを整数不確実性または整数アンビギュイティ（**Integer ambiguity**）という。搬送波位相を利用した相対測位では、この整数拘束を持つアンビギュイティを探索することで、高精度な擬似距離を作成し、非常に高精度なセンチメートル級の測位を可能にしている。

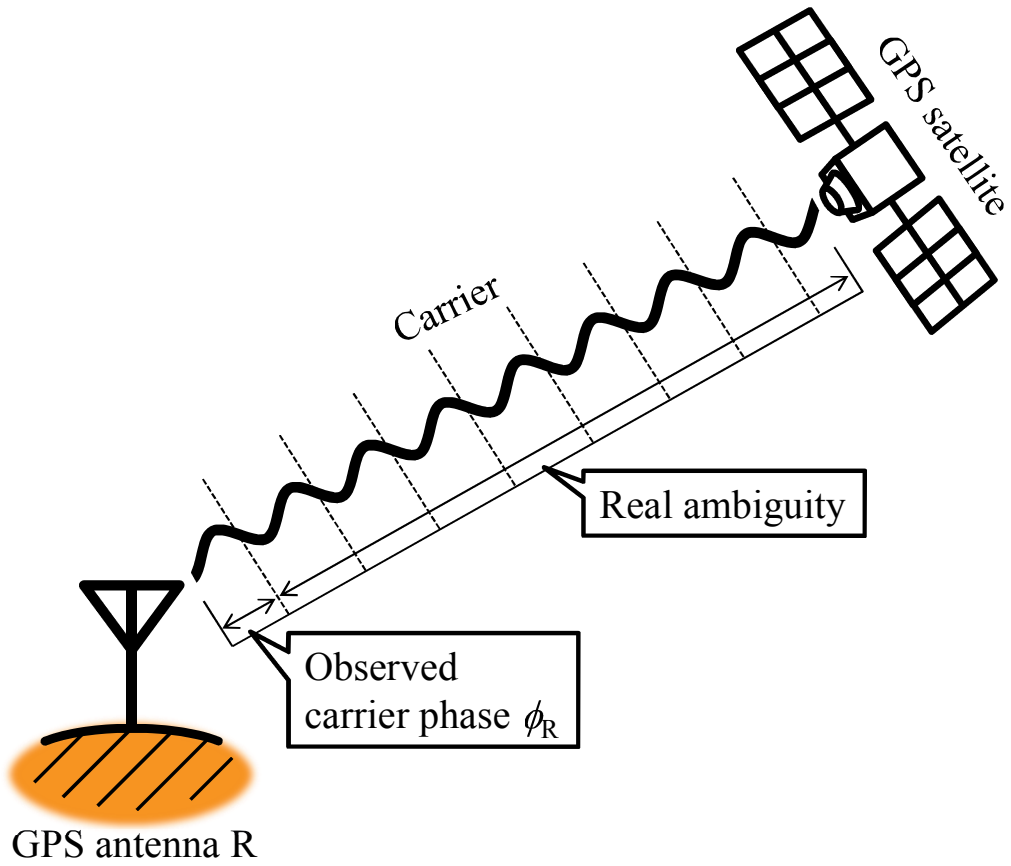


Fig. 2.1 Real ambiguity. (Single positioning).

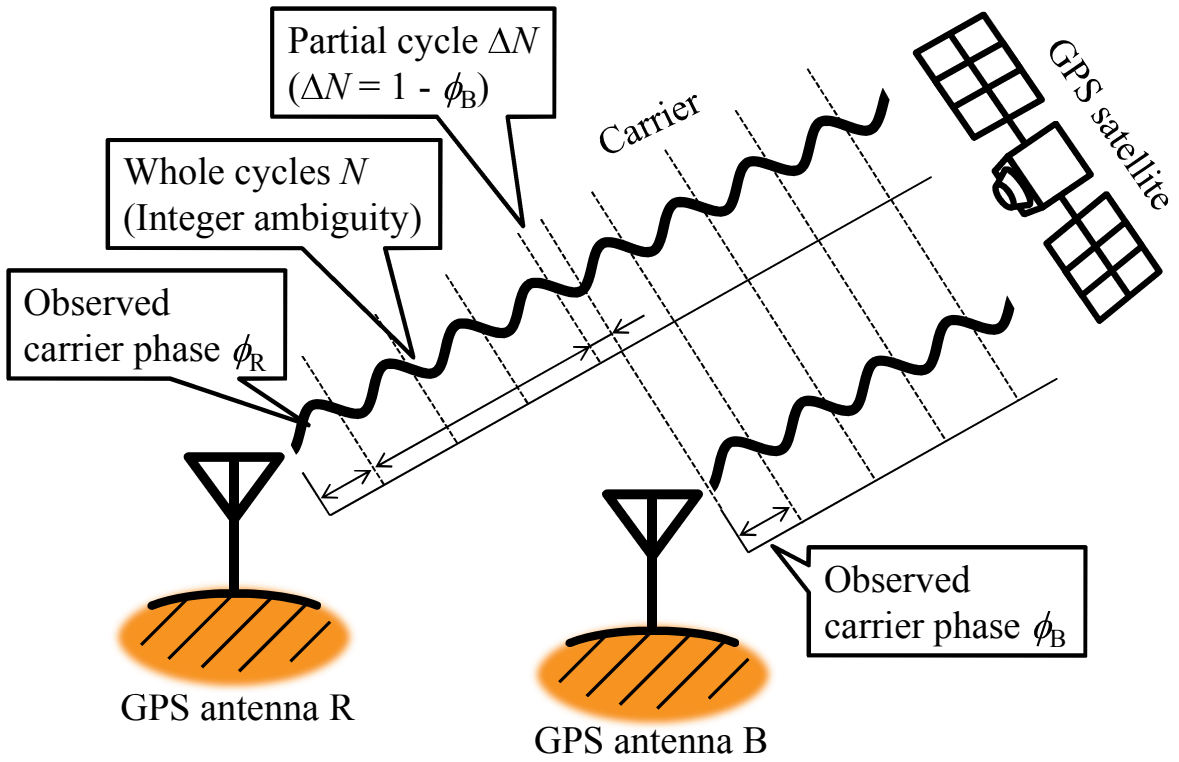


Fig. 2.2 Integer ambiguity. (Differential positioning).

以下では、相対測位の方法について説明する。GPS 受信機では、擬似距離 ρ^i の他にドップラ周波数 Δf^i も観測される。ドップラ周波数 Δf^i に搬送波の波長 λ を乗じた量は擬似距離の時間変化率を表し、デルタレンジ $\dot{\rho}^i$ と呼ばれる。

$$\dot{\rho}^i = \lambda \Delta f^i \quad (2.14)$$

ドップラ周波数 Δf^i を時間積算することにより、搬送波位相 ϕ とみなす事ができる。搬送波位相 ϕ に波長 λ を乗じた量は搬送波擬似距離 Φ と呼ばれ、擬似距離 ρ^i と同様に、衛星とGPSアンテナ間の距離に相当する情報を有している。誤差を含む観測方程式は式(2.15)で定義できる。

$$\lambda \phi^i = \Phi^i = r^i + \lambda N^i + C \cdot (dt^i - d\tau^i) + O^i - I^i + T^i + M_\phi^i + \varepsilon_\phi^i \quad (2.15)$$

ここで、 $d\tau^i$ はGPS衛星クロックバイアス、 O^i は放送歴に含まれるGPS衛星の軌道誤差、 I^i は電離層遅延(Ionospheric delay)、 T^i は対流圏遅延(Tropospheric delay)、 M_ϕ^i および ε_ϕ^i は、それぞれ搬送波位相に関するマルチパス誤差、受信機雑音誤差を表す。また、 N^i は搬送波位相が積分値であることによるバイアス値であり、アンビギュイティ(Ambiguity)と呼ばれ、整数の値を有している。アンビギュイティは、良好な観測条件で継続的な観測を行う場合、変化しない。また、搬送波位相に含まれる観測ノイズは、擬似距離に比べて1/100程度で、数mm程度である。また、観測量に含まれるマルチパスに関しても、搬送波位相では最大約5[cm]の誤差⁽³³⁾であり、典型的な擬似距離誤差1[m]と比較して大幅に小さい。このため、搬送波位相は、精密測位において、擬似距離の代わりに使用されている。ただし、搬送波位相を測距情報として使用するためには、アンビギュイティ N^i を何らかの手法により決定する必要がある。アンビギュイティ N^i は一般に求めることが困難であり、また、信号の追尾が中断したり、観測が不安定となった場合に変化したりするため、高速かつ正しくアンビギュイティを求める手法が課題である。

二重差観測値の作成

アンビギュイティを決定するにあたり、まずは式(2.15)に含まれる誤差項目を除去する。GPS測位の誤差要因のうち、GNSS衛星の軌道誤差 O およびクロック誤差 $d\tau$ 、電離層遅延誤差 I 、対流圏遅延誤差 T は、信号の伝搬経路に依存する。そこで、2台のGPS受信機を使用し、同一時刻に得られた観測量について、2台の受信機間で差分を作成する。この時、2台の受信機の距離が十分近いと、受信する信号の伝搬経路が類似し、電離層遅延誤差および対流圏遅延誤差が同一とみなせるため、これらの誤差項目を除去する事ができる。電離層遅延誤差および対流圏遅延誤差を同一とするには、一般的に誤差の除去に用いる2台の受信機間距離が、10[km]以内であることが目安とされている。この観測量の差分を受信機間一重差(SD: Single difference)と呼び、擬似距離と搬送波位相の一重差は、式(2.16)、式(2.17)に定義できる。

$$\rho_{BR}^i = r_{BR}^i + c(dt_{BR}^i - d\tau_{BR}^i) + O_{BR}^i + I_{BR}^i + T_{BR}^i + M_{\rho, BR}^i + \varepsilon_{\rho, BR}^i \quad (2.16)$$

$$\Phi_{BR}^i = r_{BR}^i + \lambda N_{BR}^i + c(dt_{BR}^i - d\tau_{BR}^i) + O_{BR}^i - I_{BR}^i + T_{BR}^i + M_{\phi, BR}^i + \varepsilon_{\phi, BR}^i \quad (2.17)$$

ただし、2つの受信機（Base, Rover）間の擬似距離観測の差分を $\rho_{BR}^i = \rho_{Base}^i - \rho_{Rover}^i$ のように表記し、式(2.16)、式(2.17)を単純化し、式(2.18)、式(2.19)で表す。

$$\rho_{BR}^i = r_{BR}^i + cdt_{BR}^i + M_{\rho, BR}^i + \varepsilon_{\rho, BR}^i \quad (2.18)$$

$$\Phi_{BR}^i = r_{BR}^i + \lambda N_{BR}^i + cdt_{BR}^i + M_{\phi, BR}^i + \varepsilon_{\phi, BR}^i \quad (2.19)$$

受信機や受信機の近傍の環境に固有の受信機雑音やマルチパスに関する誤差は、受信機ごとに独立であるため、重差をとることで一般に増加する。しかし、大気遅延の補正誤差などの支配要因が除去されるため、最終的な測位精度は改善される。

さらに、搬送波位相を用いる測位では、アンビギュイティを求めることを容易にするために、受信機のクロックバイアスを除去する処理が行われる。受信機クロックバイアスは、受信機によりある時刻に観測した観測データの各衛星に対する観測量、および全ての衛星に対する一重差に共通に含まれる誤差である。したがってこの項は、受信機間に加えて衛星間の差分も行う、二重差測定値をつくることによって除去できる。これを一般に、二重差（DD: Double difference）と呼ぶ。これは、式(2.18)、式(2.19)において、主衛星の一重差をそれ以外の衛星の一重差から引くことで、式(2.20)、式(2.21)で定義できる。

$$\rho_{BR}^{i,j} = r_{BR}^{i,j} + \varepsilon_{\rho, BR}^{i,j} \quad (2.20)$$

$$\Phi_{BR}^{i,j} = r_{BR}^{i,j} + \lambda N_{BR}^{i,j} + \varepsilon_{\phi, BR}^{i,j} \quad (2.21)$$

i 番目の衛星に対して j 番衛星（主衛星）により二重差を作るとき、二重差をとった観測量を上付き添字 i,j で表す。すなわち、観測量 x に対し、 i, j 番目のそれぞれの衛星に対するGPS受信機B, Rの観測量 x_B と x_R で二重差をとったものは式(2.22)で定義する。

$$x_{BR}^{i,j} = (x_B^i - x_R^i) - (x_B^j - x_R^j) \quad (1 < i < n_{sv} - 1) \quad (2.22)$$

ただし、 n_{sv} を観測衛星数とし、主衛星には一般的に仰角最大のGNSS衛星を選択する。

また、良好な条件での観測を想定してマルチパスに関する誤差は省略する。

次に、基線ベクトルに関する定義を行う。基線ベクトル (Baseline vector) とは、GNSS 受信機間の相対位置ベクトルのことである。ここで、この基線ベクトルと二重差の関係を 図 2.1 に示し、誤差成分を省略した場合の関係式を式(2.23)に示す。

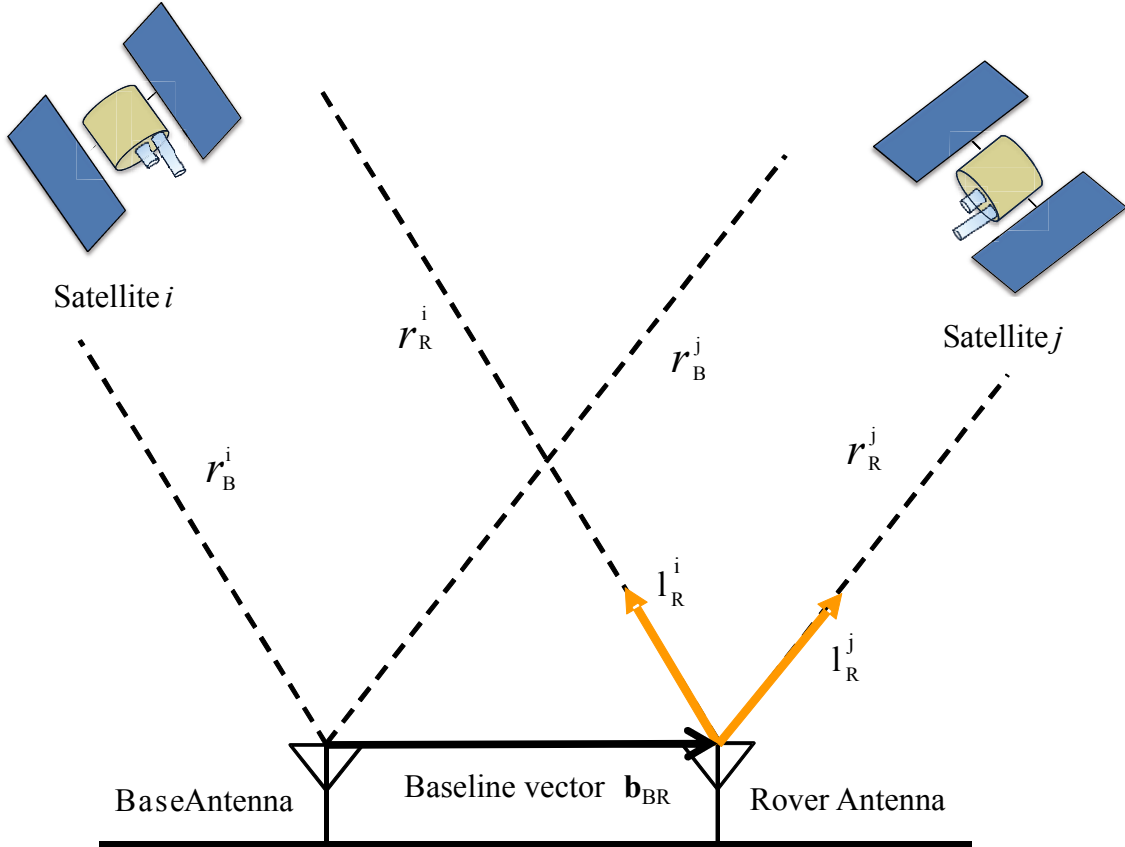


Fig. 2.1 Double difference and Baseline vector.

$$\begin{aligned}
 r_{BR}^{i,j} &= (r_B^j - r_R^j) - (r_B^i - r_R^i) \\
 &= \phi_{BR}^{i,j} - \lambda N_{BR}^{i,j} \\
 &= -(\mathbf{l}_R^j - \mathbf{l}_R^i) \mathbf{b}_{BR} \\
 \mathbf{b}_{BR} &= -(\mathbf{l}_R^j - \mathbf{l}_R^i)^{-1} (\phi_{BR}^{i,j} - \lambda N_{BR}^{i,j})
 \end{aligned} \tag{2.23}$$

ここで、 \mathbf{l}^i は受信機の位置から衛星 i の位置へ向かう単位ベクトル (視線ベクトル: Line of sight vector) である。 \mathbf{b}_{BR} はベース受信機からローバ受信機への基線ベクトルである。視線ベクトルは、衛星から送信される航法メッセージより既知である。 $\phi_{BR}^{i,j}$ は搬送波位相観測値から算出されたものであることから、搬送波位相の二重差のアンビギュイティである $N_{BR}^{i,j}$ を解くことで、基線ベクトル \mathbf{b}_{BR} を高精度に求めることができる。この二重差を用いて基線ベクトルを算出する手法は、相対測位 (DGPS: Differential GPS) とよばれる。相対測位では、一方のアンテナ位置が既知であるという仮定のもと、基線ベクトルを高精度に求めることで、もう一方のアンテナ位置を決定する。

以上のように、精密測位を行う為には、搬送波位相の二重差のアンビギュイティを求め

る必要があることがわかる．式(2.20)，式(2.21)は同値を示していることから，二重差アンビギュイティは式(2.24)で表される．

$$N_{BR}^{i,j} = \frac{\Phi_{BR}^{i,j} - \varepsilon_{\phi,BR}^{i,j}}{\lambda} - \frac{\rho_{BR}^{i,j} - \varepsilon_{\rho,BR}^{i,j}}{\lambda} [\text{cycle}] \quad (2.24)$$

ここで，式(2.24)は整数という条件から，四捨五入をすることによって式(2.25)が得られる．

$$N_{BR}^{i,j} = \left[\frac{\Phi_{BR}^{i,j}}{\lambda} - \frac{\rho_{BR}^{i,j}}{\lambda} \right]_{\text{roundoff}} \quad (2.25)$$

ここで，式(2.25)が正しく求まるためには，式(2.24)における誤差量は十分に小さくなくてはならない．一般的な搬送波位相と擬似距離の誤差量は式(2.26)程度とされている．

$$\sigma \left(\frac{\varepsilon_{\phi,BR}^{i,j}}{\lambda} \right) \approx 0.05 [\text{cycle}] \quad (2.26)$$

$$\sigma(\varepsilon_{\rho,BR}^{i,j}) \approx 1 [\text{m}]$$

以降， $\sigma(x)$ は x の標準偏差を表す．ここで，例として GPS の配信している L1 信号の二重差アンビギュイティを求める．L1 信号波長はおよそ 0.2[m]であることから，擬似距離二重差誤差の標準偏差は式(2.27)となる．

$$\sigma \left(\frac{\varepsilon_{\rho,BR}^{i,j}}{\lambda} \right) \approx 5 [\text{cycle}] \quad (2.27)$$

よって，四捨五入で式(2.24)を決定するには，式(2.27)は不十分な精度であることがわかる．

実際の運用において式(2.25)を用いたアンビギュイティ決定には，長時間の観測を行い擬似距離の平均値を使用する，もしくはカルマンフィルタ (Kalman Filter) ⁽³⁴⁾のような確率フィルタを使用し， $\sigma(\varepsilon_{\rho,BR}^{ij})$ のノイズ誤差項を低減することで行われる．しかしそのためには，確率的に絞り込むのに十分な観測量が得られるまで，衛星を継続的に観測し続けなければならないという制約がある．これは，継続的に観測された信号のアンビギュイティは基本的に変化しない性質を利用しているためである．そのため，都市部などの継続的な衛星観測が困難な状況では，正しいアンビギュイティを決定することが非常に困難である．よって，長時間の継続的衛星観測を必要とせず，一度の観測 (1 epoch) でアンビギュイティを決定する手法が求められる．

2・1・3 局所的最小値探索法（LMS 法）

アンビギュイティを決定する際、同時に観測したすべての衛星信号について、アンビギュイティは完全に独立ではなく、受信機座標である3自由度の拘束を持っている。そこで局所的最小値探索（LMS: Local Minima Search）法は、3つの信号について効率よくアンビギュイティを探索し、その他の信号について検定することで、全信号のアンビギュイティを同時に求める手法である⁽³⁵⁾⁽³⁶⁾。本節では、LMS法のアルゴリズムや課題を説明する。

本項ではLMS法のアルゴリズムについて説明する。まず、式(2.23)を以下のように書き換える。

$$\lambda^{-1} \Phi_{BR}^{i,j} - N_{BR}^{i,j} = -\lambda^{-1} (\mathbf{I}_S^j - \mathbf{I}_S^i) \mathbf{b}_{BR} \quad (2.28)$$

ここで、同時に観測される K 個の二重差観測値および変数について、行列表記でまとめて簡略化し、式(2.29)を得る。

$$\boldsymbol{\varphi} - \mathbf{N} = \mathbf{G} \mathbf{b}_{BR} \quad (2.29)$$

この時簡略化は式(2.30)によって行う。

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\varphi} &= \lambda^{-1} \Phi_{BR}^{i,j} \\ \mathbf{N} &= N_{BR}^{i,j} \\ \mathbf{G} &= -\lambda^{-1} (\mathbf{I}_S^j - \mathbf{I}_S^i) \end{aligned} \quad (2.30)$$

この時、観測値 $\boldsymbol{\varphi}$ が4つ以上ある場合、 \mathbf{b}_{BR} についての最小二乗解は、 \mathbf{G} の擬似逆行列を用いて式(2.31)で表される。

$$\mathbf{b}_{BR} = (\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T (\boldsymbol{\varphi} - \mathbf{N}) \quad (2.31)$$

これを式(2.29)に代入することで、 \mathbf{N} について残差ベクトル \mathbf{E} を得る。

$$\mathbf{E} = (\boldsymbol{\varphi} - \mathbf{N}) - \mathbf{G} (\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T (\boldsymbol{\varphi} - \mathbf{N}) \quad (2.32)$$

ここで、この残差ベクトル \mathbf{E} の二乗和を評価関数 EF とすると、正しいアンビギュイティ行列 \mathbf{N} は、評価関数を最小とすることが予想される。この時、 \mathbf{P} の導入により式(2.32)を簡略化する。

$$\mathbf{E} = (\boldsymbol{\varphi} - \mathbf{N}) - \mathbf{P}(\boldsymbol{\varphi} - \mathbf{N}) \quad (2.33)$$

$$\mathbf{P} = \mathbf{G}(\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \quad (2.34)$$

さらに， \mathbf{Q} を導入することによって，評価関数 EF を以下のように表す事ができる．

$$EF = (\boldsymbol{\varphi} - \mathbf{N})^T \mathbf{Q}(\boldsymbol{\varphi} - \mathbf{N}) \quad (2.35)$$

$$\mathbf{Q} = \mathbf{I} - \mathbf{P} \quad (2.36)$$

最終的に，評価関数 EF を最小にするアンビギュイティ \mathbf{N} は，式(2.37)を解くことによって得られる．

$$\mathbf{Q}\mathbf{N} = \mathbf{Q}\boldsymbol{\varphi} \quad (2.37)$$

ここで， \mathbf{P} および \mathbf{Q} の性質について触れる． \mathbf{P} は， \mathbf{G} の値域の空間（ \mathbf{G} の列ベクトルを用いて張られた部分空間）へ，ベクトルを射影する射影行列である．また， $\mathbf{Q} = \mathbf{I} - \mathbf{P}$ も射影行列であり， \mathbf{G} の値域の空間に直交する部分空間へ，ベクトルを射影する．この時，式(2.29)より， \mathbf{G} は K 行 3 列であり，ランクが 3 であることに注目すると， \mathbf{G} の値域の空間は 3 次元であり，これに直交する \mathbf{Q} の値域の空間は $K-3$ 次元である．つまり \mathbf{Q} のランクは $K-3$ であることがわかる．そこで， \mathbf{Q} を LU 分解し，式(2.37)を変形する．

$$\mathbf{U}\mathbf{N} = \mathbf{L}^{-1} \mathbf{Q}\boldsymbol{\varphi} \quad (2.38)$$

今， \mathbf{Q} のランクが $K-3$ であることから，上三角行列 \mathbf{U} の右下隅 3 行 3 列の区間は全て 0 になる．また，下三角行列をとる \mathbf{L}^{-1} についても，最後の 3 行については全て 0 を示す．つまり \mathbf{N} ベクトルの下から 3 要素は式(2.38)の等式の拘束を受けず，自由な値を取りうる．残りの \mathbf{N} ベクトルの要素については，式(2.38)より，後退代入かつ四捨五入することによって一意に求まる．

次に，LMS 法の探索に重要な性質として，評価関数が凹凸型であることを説明する．今，あるアンビギュイティの組み合わせ \mathbf{N} が評価関数の極小値であるとする．すると， \mathbf{N} のどれか一つの要素が増減（ ± 1 ）するとき，評価関数は増大する．このことから， \mathbf{N} が評価関数の極小値を取るための条件は，式(2.39)で示される．

$$\mathbf{Q}\boldsymbol{\varphi} - \frac{1}{2}\mathbf{d} < \mathbf{Q}\mathbf{N} < \mathbf{Q}\boldsymbol{\varphi} + \frac{1}{2}\mathbf{d} \quad (2.39)$$

この時、 \mathbf{d} は \mathbf{Q} の対角成分ベクトルである。ここで、新たに式(2.40)を満たす自明でないベクトル \mathbf{M} を考える。

$$\mathbf{QM} \approx 0 \quad (2.40)$$

すると、式(2.41)も同様に式(2.39)を満たす。

$$\bar{\mathbf{N}} = \mathbf{N} + \mathbf{M} \quad (2.41)$$

よって、 $\bar{\mathbf{N}}$ は評価関数の極小値を取る。つまり、評価関数 EF はステップサイズ \mathbf{M} ごとに極小値を示す凹凸型の関数である。この時、 \mathbf{M} は式(2.40)より 3 自由度である。同時に、式(2.42)が成り立つ。

$$\begin{aligned} \mathbf{Q}(\mathbf{N} + \mathbf{M}) &= \mathbf{Q}\boldsymbol{\phi} \\ \mathbf{U}(\mathbf{N} + \mathbf{M}) &= \mathbf{L}^{-1} \mathbf{Q}\boldsymbol{\phi} \end{aligned} \quad (2.42)$$

よって、評価関数を最小にする \mathbf{N} の探索において、 \mathbf{N} ベクトルの下から 3 要素の探索および、式(2.38)による後退代入を行うことは、ステップサイズ \mathbf{M} ごとに全ての評価関数極小値を探索する事と同義である。

まとめると、LMS 法は、アンビギュイティ \mathbf{N} ベクトルについて下 3 要素を徹底的に探索し、式(2.38)によりその他 \mathbf{N} ベクトルの要素を算出し、後退代入時の四捨五入誤差により発生する誤った組み合わせを式(2.39)によって除外し、式(2.40)の評価関数を最小とするアンビギュイティの組み合わせを探索する手法である。

また、最小二乗解の残差を評価関数としているため、測位に必要な衛星数は 5 基以上であり、単独測位等に比べて測位可能条件が厳しくなる。これは、可視衛星確保の難しい都市部のような narrow sky 環境では問題となるケースが発生する。

測位解の検定 (レシオテスト)

ここで、凹凸型の関数である評価関数 EF は、複数の極小値を持つ。そのため、搬送波や擬似距離に含まれる誤差によって、真値とは異なる座標の候補点を評価関数 EF の最小値として決定してしまう場合がある。この場合、推定したアンビギュイティは誤りであり、測位誤差が生じる。そこで、推定した解が信頼性の高い解であるかの判別を行う。この評価はレシオテストと呼ばれており、具体的には、評価関数 EF が最小となった点と、それ以外の中で最小である点とで、評価関数 EF の比を作成する。この評価関数 EF の比が閾値を超えた場合、信頼性の低い測位解 (Float 解) であると判別する。本研究では、レシオテストにおける評価関数 EF の閾値を 0.3 として、解の検定を行う。

2・1・4 ワイドレーン法

式(2.25)を利用したアンビギュイティ決定を検討する．式(2.24)，式(2.26)に注目すると，アンビギュイティ決定の確実性に対する程度は，対象とする信号の波長と，衛星受信機間推定距離（以下保有距離と呼ぶ）の誤差に依存しており，波長が長いほど，もしくは保有距離誤差が小さいほど，推定されるアンビギュイティは確実になることがわかる．しかし，例えば GPS の配信する測位用信号（L1 帯，L2 帯，L5 帯信号）の中で，最も波長の長い L5 信号を用いても，式(2.27)における誤差項の標準偏差は 4 [cycle] 程度であり，四捨五入による一意的なアンビギュイティの決定には不十分である．そこで，GPS 衛星が複数の異なる周波数帯の信号を同時配信していることを利用して，波長の違う信号を組み合わせることで疑似的に波長の長い信号（ワイドレーン: Wide-Lane）を作成し，アンビギュイティを解くという手法が提案されている⁽³⁷⁾⁽³⁸⁾．

ワイドレーンと呼ばれる長波長の疑似信号は，式(2.44)によって作成される．

$$\begin{aligned}\lambda_{L1L2} &= \frac{C}{f_{L1} - f_{L2}} \\ &= \frac{\lambda_{L2} - \lambda_{L1}}{\lambda_{L1}\lambda_{L2}} = \left(\frac{1}{\lambda_{L1}} - \frac{1}{\lambda_{L2}} \right)^{-1}\end{aligned}\quad (2.43)$$

$$\begin{aligned}\Phi_{BR,L1L2}^{i,j} &= \frac{f_{L1}}{f_{L1} - f_{L2}} \Phi_{BR,L1}^{i,j} - \frac{f_{L2}}{f_{L1} - f_{L2}} \Phi_{BR,L2}^{i,j} \\ &= \lambda_{L1L2} \frac{f_{L1}}{c} \Phi_{BR,L1}^{i,j} - \lambda_{L1L2} \frac{f_{L2}}{c} \Phi_{BR,L2}^{i,j} \\ &= \lambda_{L1L2} \left(\frac{\Phi_{BR,L1}^{i,j}}{\lambda_{L1}} - \frac{\Phi_{BR,L2}^{i,j}}{\lambda_{L2}} \right) \\ &= \lambda_{L1L2} \left[\rho_{BR}^{i,j} \left(\frac{1}{\lambda_{L1}} - \frac{1}{\lambda_{L2}} \right) + \left(N_{BR,L1}^{i,j} - N_{BR,L2}^{i,j} \right) + \left(\frac{\varepsilon_{\phi,BR,L1}^{i,j}}{\lambda_{L1}} - \frac{\varepsilon_{\phi,BR,L2}^{i,j}}{\lambda_{L2}} \right) \right] \\ &= r_{BR}^{i,j} + \lambda_{L1L2} N_{BR,L1L2}^{i,j} + \varepsilon_{\phi,BR,L1L2}^{i,j}\end{aligned}\quad (2.44)$$

ここで，添え字 L1，L2 は，疑似信号の作成に使用した，GPS が配信する信号の種類を示すものとする．GPS の配信する，L1 帯，L2 帯，L5 帯信号により作成される疑似信号を表 2.1 に示す．

Table 2.1 Wide lane signals of GPS.

Used signal	Carrier frequency MHz	Wave length m	Signal name
L1 only	1575.42	0.190	
L2 only	1227.60	0.244	
L5 only	1176.45	0.255	
L1-L5	398.97	0.751	middle lane
L1-L2	347.82	0.862	wide lane
L2-L5	51.15	5.861	extra wide lane

新たに作成される擬似距離信号を，エクストラワイドレーン信号，ワイドレーン信号，ミドルレーン信号とする．表 2.1 より，新たに作成される疑似信号の波長はもとの信号の波長より長く，擬似距離から二重差アンビギュイティを決定する際，元の信号のみを使った手法に比べ容易に求まるようになる．しかし一方で，作成された疑似信号は大きなノイズを持つという特徴がある．式(2.44)の誤差項に注目すると，誤差項は式(2.45)で表される．

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{\varphi, BR, L1L2}^{i,j} &= \lambda_{L1L2} \left(\frac{\varepsilon_{\varphi, BR, L1}^{i,j}}{\lambda_{L1}} - \frac{\varepsilon_{\varphi, BR, L2}^{i,j}}{\lambda_{L2}} \right) \\
&= \frac{c}{f_{L1} - f_{L2}} \left(\frac{f_{L1} \varepsilon_{\varphi, BR, L1}^{i,j}}{c} - \frac{f_{L2} \varepsilon_{\varphi, BR, L2}^{i,j}}{c} \right) \\
&= \frac{f_{L1}}{f_{L1} - f_{L2}} \varepsilon_{\varphi, BR, L1}^{i,j} - \frac{f_{L2}}{f_{L1} - f_{L2}} \varepsilon_{\varphi, BR, L2}^{i,j} \\
&= 4.53 \varepsilon_{\varphi, BR, L1}^{i,j} - 3.53 \varepsilon_{\varphi, BR, L2}^{i,j}
\end{aligned} \tag{2.45}$$

これにより，疑似信号作成に使われたそれぞれの誤差は増幅して足し合されており，擬似信号の誤差項の分散も，元信号の誤差分散に対し増大することが確認できる．

作成された疑似信号を利用して，二重差アンビギュイティを決定していく．式(2.25)より，作成された疑似信号，もしくは L1 帯，L2 帯，L5 帯信号は，それぞれの波長に対して保有距離の誤差が十分小さいとき，それぞれのアンビギュイティが正しく決定する事がわかる．また，正しくアンビギュイティが決定できると，保有距離も更新することができる．つまり，長波長のアンビギュイティを決定し，保有距離を更新し，徐々に短い波長のアンビギュイティを逐次的に決定するという手法が提案されており，これを本論ではワイドレーン法と呼ぶ．具体的には，以下の手順を行う．

Step 1: 直接観測できる信号のうち，最もマルチパス耐性の強いとされている，L5 信号の擬似距離測定値の二重差を，保有距離 ρ [m] の初期値とする．なお，この時の二重差誤差量は式(2.26)に準ずるものとする．

Step 2 : ρ を使用して, 式(2.25)によって, エクストラワイドレーン信号の二重差アンビギュイティを決定する.

$$N_{BR,L2L5}^{i,j} = \left[\frac{\Phi_{BR,L2L5}^{i,j}}{\lambda_{L2L5}} - \frac{\rho}{\lambda_{L2L5}} \right]_{\text{roundoff}} \quad (2.46)$$

ここで, エクストラワイドレーン信号の式(2.46)の標準偏差は式(2.47)となる.

$$\sigma \left(\frac{\varepsilon_{\rho, BR, L5}^{i,j}}{\lambda_{L2L5}} \right) \approx 0.17 \text{ [cycle]} \quad (2.47)$$

式(2.47)により, 高確率で正しいアンビギュイティを決定することが期待される.

Step 3 : 算出されたエクストラワイドレーン信号の二重差アンビギュイティより, 保有距離 ρ を更新する.

$$\begin{aligned} \rho_{BR,L2L5}^{i,j} &= \Phi_{BR,L2L5}^{i,j} - \lambda_{L2L5} N_{BR,L2L5}^{i,j} \\ &= \rho \end{aligned} \quad (2.48)$$

また, 新たに得られた保有距離の誤差量は, 式(2.45)より, 式(2.49), 式(2.50)で表される.

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\phi, BR, L2L5}^{i,j} &= \frac{f_{L2}}{f_{L2} - f_{L5}} \varepsilon_{\phi, BR, L2}^{i,j} - \frac{f_{L5}}{f_{L2} - f_{L5}} \varepsilon_{\phi, BR, L5}^{i,j} \\ &= \frac{120}{5} \varepsilon_{\phi, BR, L2}^{i,j} - \frac{115}{5} \varepsilon_{\phi, BR, L5}^{i,j} \end{aligned} \quad (2.49)$$

$$\begin{aligned} \sigma(\varepsilon_{\phi, BR, L2L5}^{i,j}) &= \sqrt{\left[\frac{120}{5} (0.05 \times 0.244) \right]^2 + \left[\frac{115}{5} (0.05 \times 0.255) \right]^2} \\ &= 0.414 \text{ [m]} \end{aligned} \quad (2.50)$$

Step 4 : step 3 で更新された保有距離 ρ を用いて，ワイドレーン信号の二重差アンビギュイティを決定する．

$$N_{BR,L1L2}^{i,j} = \left[\frac{\Phi_{BR,L1L2}^{i,j}}{\lambda_{L1L2}} - \frac{\rho}{\lambda_{L1L2}} \right]_{\text{roundoff}} \quad (2.51)$$

ここで，ワイドレーン信号の二重差アンビギュイティの標準偏差は式(2.52)となる．

$$\sigma \left(\frac{\varepsilon_{\rho,BR,L2L5}^{i,j}}{\lambda_{L1L2}} \right) \approx 0.48 \text{ [cycle]} \quad (2.52)$$

このとき式(2.52)は，正しいアンビギュイティを決定するには望ましくない水準であることがわかる．これを解決する手法は，第4・2・2項で述べる．

Step 5 : 算出されたワイドレーン信号の二重差アンビギュイティより，保有距離 ρ を更新する．

$$\begin{aligned} \rho_{BR,L1L2}^{i,j} &= \Phi_{BR,L1L2}^{i,j} - \lambda_{L1L2} N_{BR,L1L2}^{i,j} \\ &= \rho \end{aligned} \quad (2.53)$$

また，新たに得られた保有距離の誤差量は，式(2.45)より，式(2.54)，式(2.55)で表される．

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\phi,BR,L1L2}^{i,j} &= \frac{f_{L1}}{f_{L1} - f_{L2}} \varepsilon_{\phi,BR,L1}^{i,j} - \frac{f_{L2}}{f_{L1} - f_{L2}} \varepsilon_{\phi,BR,L2}^{i,j} \\ &= \frac{154}{34} \varepsilon_{\phi,BR,L1}^{i,j} - \frac{120}{34} \varepsilon_{\phi,BR,L2}^{i,j} \end{aligned} \quad (2.54)$$

$$\begin{aligned} \sigma(\varepsilon_{\phi,BR,L1L2}^{i,j}) &= \sqrt{\left[\frac{154}{34} (0.05 \times 0.190) \right]^2 + \left[\frac{120}{34} (0.05 \times 0.244) \right]^2} \\ &= 0.06 \text{ [m]} \end{aligned} \quad (2.55)$$

Step 6 : step 5 で更新された保有距離 ρ を用いて, L1 信号の二重差アンビギュイティを決定する.

$$N_{BR,L1}^{i,j} = \left[\frac{\Phi_{BR,L1}^{i,j}}{\lambda_{L1}} - \frac{\rho}{\lambda_{L1}} \right]_{\text{roundoff}} \quad (2.56)$$

ここで, L1 信号の二重差アンビギュイティの標準偏差は, 式(2.57)で表される.

$$\sigma \left(\frac{\varepsilon_{\rho, BR, L1}^{i,j}}{\lambda_{L1}} \right) \approx 0.32 \text{ [cycle]} \quad (2.57)$$

このとき式(2.57)より, 式(2.56)は正しいアンビギュイティを決定することが期待できる.

Step 7 : 算出された L1 信号の二重差アンビギュイティより, 保有距離 ρ を更新する.

$$\begin{aligned} \hat{\rho}_{BR,L1}^{ij} &= \Phi_{BR,L1}^{i,j} - \lambda_{L1} N_{BR,L1}^{i,j} \\ &= \rho \end{aligned} \quad (2.58)$$

また, 新たに得られた保有距離の誤差量は, 仮定より式(2.59)で表される.

$$\begin{aligned} \sigma \left(\varepsilon_{\rho, BR, L1}^{i,j} \right) &= 0.05 \times 0.190 \\ &= 0.0095 \text{ [m]} \end{aligned} \quad (2.59)$$

以上のようにワイドレーン法を用いて衛星受信機間距離をセンチメートル級の精度で算出することで, 位置推定もセンチメートル級の精度で算出することが可能である.

2・2 マルチ GNSS

GNSSは世界中で複数のシステムが運用されている。その中でも代表的なGNSSとして、GPS、GLONASS、Galileo、BeiDou、QZSSについて本節では紹介する。加えて、マルチGNSSで課題となるシステム間バイアス（ISB: Inter System Bias）について紹介する。

2・2・1 GPS

GPSは米国が管理運用する測位システム⁽³⁹⁾であり、正式にはNAVSTAR/GPS (NAVigation System with Timing And Ranging / Global Positioning System) と呼ばれる。

GPSは、基本的には24基の衛星により構成される。これらの各衛星は、周期を0.5恒星日（11時間58分）、軌道半径を約26,560[km]とする楕円軌道で、地球を周回し、軌道傾斜角（inclination angle）55[deg]のA軌道～F軌道と呼ばれる6つの軌道面に4基ずつ（実際の運用では、予備の衛星を投入するため時期により変動する。2014年8月現在、32基の衛星が運用中）不均一に配置されている。これにより、天頂が開けている場所であれば、世界中で、最低4基以上の衛星を視野に入れることが可能である。予備機も配備された現在では、8基以上の衛星を視野に入れることも少なくない。衛星は航法データと測距信号を送信しており、これを受信することでユーザは位置を推定することができる。

また、GPSは測位サービスとして大きく2種類のサービスを提供している。平和的な民間利用のための標準測位サービス（SPS: Standard Positioning Service)⁽⁴⁰⁾と、米国防総省（DOD: Department of Defense）が許可したユーザのための高精度測位サービス（PPS: Precise Positioning Service)⁽⁴¹⁾である。PPSは、適切な暗号化キーを持つユーザに向けて暗号化した測距信号を送信している。そのため、一般には利用することができず、軍用として利用されている。さらに、GPSはリンク1（L1: Link 1）、リンク2（L2: Link 2）、リンク5（L5: Link 5）と呼ばれるL帯の無線周波数（RF: radio frequency）を使用して、連続的に電波を送信している。L帯は1[GHz]から2[GHz]の間の周波数であり、極超短波（UHF: Ultra High Frequency）帯の一部である。L1、L2、L5帯の搬送波の中心周波数を表2.2に示す⁽⁴²⁾⁽⁴³⁾⁽⁴⁴⁾。SPSにより送信されている信号は、L1、L2、L5帯のそれぞれで送信されている。特に、L1帯ではL1C/Aコードと呼ばれる測距信号が送信されている。これは粗い/捕捉コード（C/A: Coarse/Acquisition code）と呼ばれており、一般的なGPSによる単独測位に利用される。またL2帯では、L2CM（civil-moderate）、L2CL（civil-long）と呼ばれる測距信号が送信されているが、これらはまとめてL2Cコードと呼ばれる。このL2帯のCコードは、従来軍用のPコードのみが送信されていたL2帯に民生用信号が新たに送信されるものであり、民間における測位の利便性を向上させている。また、L5帯のL5コードは、GPSの近代化にともない、新たに導入された信号であり、同じ周波数に軍用コードを持たない。そのため、信号送信用の電力を全て民生用に利用できることがその特徴として挙げられる。また、PPSにより送信される信号はP(Y)コード（Precision code）と呼ばれており、極めて長い測距信号を送信している。表2.2に、コードの波長（wave length）、コード周波数（chip rate）、コード長さ（chip length）、コード周期（code sequence time）を併せて示す。

GPS衛星は、測距信号と同時に航法データも送信している。航法データは、衛星の健康状態、エフェメリス（ephemeris: 衛星の位置・速度を計算するためのケプラー軌道要素）、クロックバイアスパラメータ、軌道上の全衛星のアルマナック（almanac: 精度を落とした

エフェメリス) から構成されており, 送信速度は 50[bps]である. そして, これら信号の 2 つの構成要素(測距信号, 航法データ)は搬送波に二位相偏移変調(BPSK: Binary Phase Shift Keying)により重畳され送信される.

Table 2.2 GPS signal specifications.

Band name		L1		L2			L5
Frequency	MHz	1575.42		1227.60			1176.45
Wave length	m	0.190		0.244			0.255
Signal name		L1C/A	L1P(Y)	L2P(Y)	L2CM	L2CL	L5
Chip rate	Mbps	1.023	10.23	10.23	0.5115	0.5115	10.23
Chip length	Chips	1023	15345000	15345000	10230	767250	10230
Code sequence time		1 [ms]	7 [day]	7 [day]	20 [ms]	1.5 [s]	1 [ms]

2・2・2 GLONASS

GLONASS (Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema) は露国が管理運用する測位システム⁽⁴⁵⁾であり, システム構成, 軍用システムとしての起源と, C/A コード, P コード, SPS, PPS 等 GPS と共通点が多い. GLONASS は GPS と同様に GNSS の一種である. しかしながら, GPS と最も大きく異なる点は, 通信方式である. GPS が CDMA (符号分割多元接続) 方式と呼ばれる通信方式を用いることによって同一周波数内で各衛星が独立性を確保しているのに対し, GLONASS の通信方式は FDMA (周波数分割多重) 方式である. すなわち, GPS が全ての衛星が固有の PRN コードを持つのに対し, GLONASS の FDMA 方式は各衛星で同一の PRN コードを持ち, 衛星ごとに異なる周波数の搬送波を利用することで, それぞれの衛星の独立性を保つ変調方式である. そのため GLONASS 衛星は同一周波数帯に複数の周波数を持ち, それぞれの衛星で異なる搬送波周波数を利用している. 周波数分割の例として, G1 で ch 番チャンネルの搬送波周波数 f_{ch} [MHz]は式(2.60)で表せる.

$$f_{ch} = 1602 + ch \cdot 0.5625 \text{ MHz} \quad ch = -7, -6, \dots, -1, 0, 1, \dots, 6 \quad (2.60)$$

ここで, 高精度測位では周波数間バイアス (IFB: Inter Frequency Bias) が問題になっている.

GLONASS は, 基本的には 24 基の衛星により構成される. これらの各衛星は, 周期を 0.5 恒星日 (11 時間 15 分) 地上軌跡は 8 日で繰り返す, 軌道半径を約 25,510[km]とする楕円軌道で, 地球を周回し, 軌道傾斜角 64.8[deg]の 3 つの軌道面に 8 基ずつ等間隔に配置されている.

2・2・3 Galileo

Galileo は欧州が管理運用する測位システムである。新しい GNSS であるため、近代化 GPS に先駆け、先進的な技術を多く取り入れている。

Galileo は、27 基の衛星により構成される計画であるが、2014 年 8 月現在運用されている衛星は 4 基である。これらの各衛星は、周期を 14 時間 4 分地上軌跡は 10 日ごとに繰り返す、軌道半径を約 29,994[km]とする楕円軌道で、地球を周回し、軌道傾斜角 (inclination angle) 56[deg]の 3 つの軌道面に投入される。⁽⁴⁶⁾

2・2・4 BeiDou

BeiDou は中国が管理運用する測位システム⁽⁴⁷⁾である。BeiDou は静止軌道にある衛星と GPS のような地球との準同期軌道にある衛星から構成されている。この内、静止衛星は中国で最も観測が容易に配置されているため、日本を含めた東アジアや東南アジアで有効に利用することができる。

2・2・5 QZSS

準天頂衛星システム(QZSS : Quasi-Zenith Satellite System)は、日本が管理運用する測位衛星システムである。そのため、日本独自の機能や仕様などがある⁽⁴⁸⁾。これらを適切に利用することで、GPS の測位精度を向上させる効果が期待されている。2014 年 8 月現在は、2010 年 9 月に打ち上げられた QZSS 初号機「みちびき」のみが稼働中であるが、2010 年代後半を目途に 4 基体制を整備し、将来的には、持続測位が可能となる 7 基体制を目指して開発が進められている⁽⁴⁹⁾。また、QZSS は GPS と互換性を持つように設計されており、QZSS を受信した場合、GPS 衛星と同様に扱うことができる。

以下では準天頂衛星システム初号機「みちびき」について述べる。QZSS は、約 1 恒星日 (約 23 時間 56 分)周期で地球を周回し、軌道長半径約 42,164 [km]、軌道傾斜角 (inclination angle) 43[deg]の楕円軌道を通ることで、図 2.3 に示すような 8 の字型の軌道軌跡を描く。特に、楕円軌道の遠地点 (apogee) が日本上空に来るように設計しているため、QZSS は日本上空で非常に長い時間高仰角 (東京の場合、仰角 70[deg]以上が 8[h]) に衛星が滞空するという特徴がある。衛星の仰角は低いほどマルチパスによる誤差が生じやすくなり、また、障害物などにより遮蔽されやすい。そのため、非常に高い仰角を有する QZSS を利用することで、測位の高精度化が期待されている。

また、QZSS は GPS と同等の信号を送信する事により、GPS 衛星が 1 基増えたことと同じ効果をもたらす。この機能を GPS 補完機能 (Availability enhancement) という。補完機能において、QZSS は、民生用信号に限れば、今後投入予定の近代化 GPS (Block III) と同等数の測位信号を送信している。QZSS と近代化 GPS (Block III) が送信する信号を表 2.3 に示す。送信信号の多様化により、電離層伝搬遅延の高精度な補正や、エクストラワイドレーン (extra wide lane) 信号を作成する事によるアンビギュイティ決定手法⁽³⁷⁾を適用することも可能となり、補完機能による測位の高精度化が期待されている。

そして、QZSS の機能として最も特筆すべきものとして、GPS 補強機能 (Performance enhancement) がある。補強機能とは、端的にいえば、GPS の系統誤差を送信する機能である。補強機能ユーザは、QZSS の補強機能を受信し、適切に処理することによって、単独

で測位精度を向上させることが可能である。すなわち、補強機能とは、GPS 単独測位の高精度化を図る機能である。具体的な補強機能の信号として、サブメートル級測位補強信号（L1-SAIF : L1-Submeter-class Augmentation with Integrity Function）とセンチメートル級測位補強信号（LEX : L-Band Experimental Signal）の2種類の信号を送信している。特に LEX は、利用することでセンチメートル級の測位が可能となることが実際に報告されている⁽⁵⁰⁾⁽⁵¹⁾⁽⁵²⁾⁽⁵³⁾。そのため、非常に高精度な単独測位の実現が期待されている。

また、L1-SAIF はサブメートル級、すなわち、約 0.5~1[m]まで単独測位精度を向上させる⁽⁵⁴⁾ように設計されている。そのため、詳細なマンナビゲーションやカーナビゲーションには十分な精度を実現する。

このように、多くの有用な特徴を持つ QZSS は、今後の GPS を利用した衛星測位の精度を向上させる⁽⁵⁵⁾ことが期待されている。

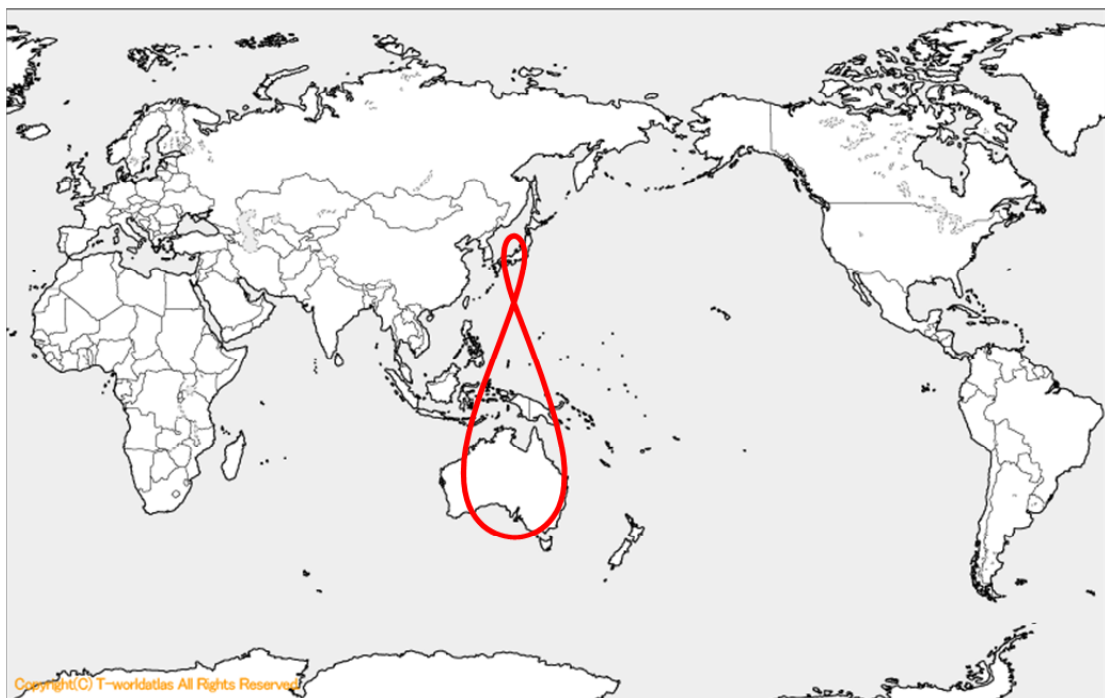


Fig. 2.3 QZSS orbit ground tracks.

Table 2.3 GPS and QZSS signal specifications.

Satellite system		QZSS	GPS
L1	Civil	L1C/A	L1C/A
	Military	-	L1P(Y)
L2	Civil	L2C	L2C
	Military	-	L2P(Y)
L5	Civil	L5	L5
Performance enhancement		L1-SAIF	-
		LEX	-

2・2・6 システム間バイアス (ISB)

マルチ GNSS 測位では、複数の GNSS を複合的に利用する。そのため、しばしば各 GNSS 間のシステム的な差が問題となることがある。代表的なシステム間の差はそれぞれのシステムが準拠する座標系や時刻系が挙げられる。しかし、このようなシステム間の差は、システム自体が持っている差であるため、第 2・1・2 項で述べる相対測位を行うことで大半が除去可能である。

しかしながら、ここで述べる ISB は相対測位によって除去することが困難なシステム間の差である。この ISB はシステム自体が持つ差ではなく、GNSS 受信機が各 GNSS 衛星を観測するときが発生する機械的な差である。そのため、ISB は受信機に対して固有であり、相対測位による除去、すなわち複数の受信機によって相殺することができない要素である。相対測位において ISB の受信機ごとのパターンテーブルを作成することで ISB を相殺する手法が考えられるが、この手法の実現は困難である。受信機の機種に依存するが、ISB は受信機の再起動や時間経過によってその大きさが遷移するためである。

従来、ISB を除去するために、各 GNSS にそれぞれ主衛星を定義する手法が利用されている。各 GNSS でそれぞれの主衛星と二重差を作成することで、ISB は除去され、高精度な測位が可能になる。

2・3 NLOS 衛星

NLOS 衛星は建物等の障害物によって衛星から配信されている信号が遮蔽されてしまう衛星である。NLOS 衛星について、信号が遮蔽されるという状況は、それだけであれば、測位に利用可能な衛星が減少するという問題はあるものの、重大な問題ではない。しかしながら、信号が遮蔽された NLOS 衛星から配信されている信号は、遮蔽した障害物による回折や周辺地物による反射した信号を受信する可能性がある。マルチパス波と呼ばれるこれらの信号は重大な測位誤差を発生させる要因となる。すなわち、NLOS 衛星のうち、回折や反射等によって測位信号を受信することができてしまう衛星が特に問題である。そのため、このような測位信号を受信してしまう NLOS 衛星を判別することが重要である。

2・4 マルチパス

マルチパスとは、信号が 2 つ以上の経路を通過してアンテナに到達する現象である。一般的には、直接受信する信号（直接波：direct signal）と周囲の障害物に反射しアンテナに入射する信号（反射波：reflected signal）によって生じる。特別な場合には、例えば、直接波が遮蔽（shielded）され、衛星が NLOS 衛星となった場合には、回折した信号（回折波：diffracted signal）の受信や、直接波を受信せず、反射波のみを受信することがあるが、これらもマルチパスと呼ばれる。以降、簡単のために、直接波に対して、反射波および回折波をマルチパス波（multipath signal）と呼ぶ。

マルチパス誤差は、直接波とマルチパス波の合成によって発生し、直接波に対するマルチパス波の信号の強さと遅延時間に依存している。また、マルチパス誤差は、擬似距離、搬送波位相測定値の両方に影響を及ぼすが、その誤差の大きさは著しく異なるという特徴を持っている。直接波が入射した場合の擬似距離のマルチパス誤差は最大約 50[m] と非常に大きな誤差を生じる⁽⁵⁶⁾。それに対して、マルチパスによる位相測定値の誤差は搬送波長

の1周期分以上悪くなることはないが、実際には、以下の式に示すように、1/4[cycle] (L1帯の場合約5[cm])以内に収まる。

簡単なモデルを考えると、受信信号 $SIGN$ は、直接波 (line-of-sight signal) の搬送波位相 ϕ とマルチパス波 (multipath signal) の搬送波位相 $\phi + \Delta\phi$ により、式(2.61)のように表せる。

$$SIGN = A \cos \phi + \alpha A \cos(\phi + \Delta\phi) \quad (2.61)$$

ここに、

- A : amplitude of line-of-sight signal
- ϕ : carrier phase of line-of-sight signal
- α : amplitude attenuation of multipath signal
- $\Delta\phi$: shifted phase of multipath signal

ここで、三角関数の加法定理と合成により式(2.62)、式(2.63)を得る。

$$\begin{aligned} SIGN &= -\alpha A \sin \Delta\phi \sin \phi + A(1 + \alpha \cos \Delta\phi) \cos \phi \\ &= \sqrt{(\alpha \sin \Delta\phi)^2 + (1 + \alpha \cos \Delta\phi)^2} A \cos(\phi + \delta\phi) \end{aligned} \quad (2.62)$$

$$\delta\phi = \arctan\left(\frac{\sin \Delta\phi}{\alpha^{-1} + \cos \Delta\phi}\right) \quad (2.63)$$

ここで、式(2.63)により得られる位相変位 $\delta\phi$ は、マルチパス波の入射によって生じる、観測位相と直接波の位相変位を表す。仮に、マルチパス波の信号減衰率が $\alpha < 1$ の場合、位相変位 $\delta\phi$ は、マルチパス波の位相変位 $\Delta\phi = 90[\text{deg}]$ の時に最大となる。すなわち、言い換えると、搬送波位相測定値におけるマルチパス誤差は、マルチパス波の振幅が直接波よりも小さい場合、1/4 波長を超えることはないと言える。多くの場合、マルチパス波が直接波よりも大きな振幅を持つことはないため、ほぼ普遍的に成り立ち、搬送波位相測定値は非常に高精度に観測される。

ただし、マルチパス誤差に関する以上の議論は、直接波と同時にマルチパス波を受信した場合、すなわち LOS 衛星を想定している。それに対して、直接波を受信しない NLOS 衛星では、発生するマルチパス誤差は、回折や反射によって生じた幾何学的な経路長の変化分に相当する。そのため、一般的に NLOS 衛星のマルチパス誤差は LOS 衛星のマルチパス誤差よりも大きくなる。

3. 魚眼カメラを用いた NLOS 衛星判別

3・1 概要

第 1・4・2 項で述べた赤外全周カメラを用いた NLOS 衛星判別手法は、遠赤外カメラを用いて直接障害物を観測することができるため、容易かつ効果的に NLOS 衛星を判別することが可能である。しかしながら、GPS のみを利用した測位に NLOS 衛星判別を適用しているため、もともと少ない受信衛星数がさらに減少することで衛星配置の悪化や衛星数の不足し、測位精度がかえって低下する可能性があることが課題としてあげられる。すなわち、衛星の遮蔽が深刻な都市部では NLOS 衛星判別による測位精度の向上効果は利用性が低い。これに対して、第 3・2 節では、従来研究において GPS 測位で NLOS 衛星判別を行っているのに対し、マルチ GNSS 測位に NLOS 衛星判別を適用することで測位衛星の絶対数の増加を図り、衛星の遮蔽が深刻な都市部における NLOS 衛星判別手法による測位精度改善効果を再評価する。

また、上述の赤外全周カメラは第 1・4・4 項で述べたように、副鏡によって仰角 70[deg]以上に NLOS 衛星判別が不能な領域を持っている。これに対して、本研究は仰角 70[deg]を超える障害物が多く存在する都市部環境下で測位を行うことを想定しているため、本赤外全周カメラを利用した NLOS 衛星判別を利用することは困難である。さらに、赤外全周カメラは遠赤外線カメラと反射型光学系を組み合わせた特殊なセンサであるため、一般的に利用は困難である。そこで第 3・3 節では、70[deg]以上の高仰角の障害物の観測が可能であり、またより一般的に利用が容易なセンサとして、可視光領域を撮影するの魚眼カメラを用いてアンテナ天頂の障害物を識別し、NLOS 衛星を判別する手法を提案する。

提案する可視光魚眼カメラを用いた NLOS 衛星判別手法は、大きく画像の領域分割と分割した領域の識別の 2 つに分けられる。具体的には、天頂を撮影した魚眼カメラの画像から、障害物と空の領域を分離することを目的として、魚眼カメラの撮影画像を色情報に基づいてクラスタリングを行う。ここで、分割した魚眼カメラ画像中の空の領域と障害物の領域には複数のクラスタが存在しており、また、そのクラスタが空の領域を示すのか障害物の領域を示すのかは定義されていない。そこで、魚眼カメラ画像中の各クラスタが空領域なのか障害物領域なのかを識別する。識別する手法としては、本手法が車両に適用されると想定して、連続して撮影した魚眼カメラ画像中の特徴点を追跡する。すなわち、雲等の空の物体と比較して、カメラ位置に近い障害物は、カメラの移動に対して画像中で顕著に移動する。そこで、移動量の大きい特徴点を含むクラスタをカメラの近接物体、すなわち障害物として識別する。これにより魚眼カメラ画像を障害物領域と空領域に識別することができる。そして、その画像上に実際の衛星位置を配置することで、その衛星が NLOS 衛星であるかを判別する。本章では、上記の画像分割手法と分割した領域の識別手法について詳述する。

3・2 マルチ GNSS 測位における NLOS 衛星判別手法の評価

NLOS 衛星判別手法をマルチ GNSS 測位に適用することで、衛星数の過剰な減少による測位精度の悪化を低減させ、都市部環境下における NLOS 衛星判別手法による測位精度の向上効果を再評価する。本節で評価する NLOS 衛星判別手法は第 1・4・2 項で述べる赤外全周カメラを用いた NLOS 衛星判別手法を利用し、赤外全周カメラも同一の物 (図 1.2) を利用する。

3・2・1 NLOS 衛星判別

赤外全周カメラは図 1.2 に示すように、主鏡 (Primary mirror) と副鏡 (Secondary mirror) による反射型光学系を用いている。そのため図 1.3 のように、画像の中心とその周辺の十字状に副鏡とその支柱が写り、その領域の衛星について、NLOS 衛星判別ができない。そこで、以下の方法でこの領域の NLOS 衛星判別を行う。

i) 副鏡領域の NLOS 衛星判別

副鏡は仰角 70deg 以上の領域である。そこで、70[deg]を超える高仰角に障害物はほとんど存在しないと仮定して、副鏡領域に存在する衛星は全て LOS 衛星であると判別する。

ii) 支柱領域の NLOS 衛星判別

支柱領域上に衛星が存在する場合、支柱に対してカメラの円周方向両側の領域属性で判別する。具体的には、衛星の両側が空領域の場合、その衛星を LOS 衛星として判別し、また、衛星の両側かもしくは片側だけでも障害物領域が存在する場合、その衛星を NLOS 衛星として判別する (図 3.1)。

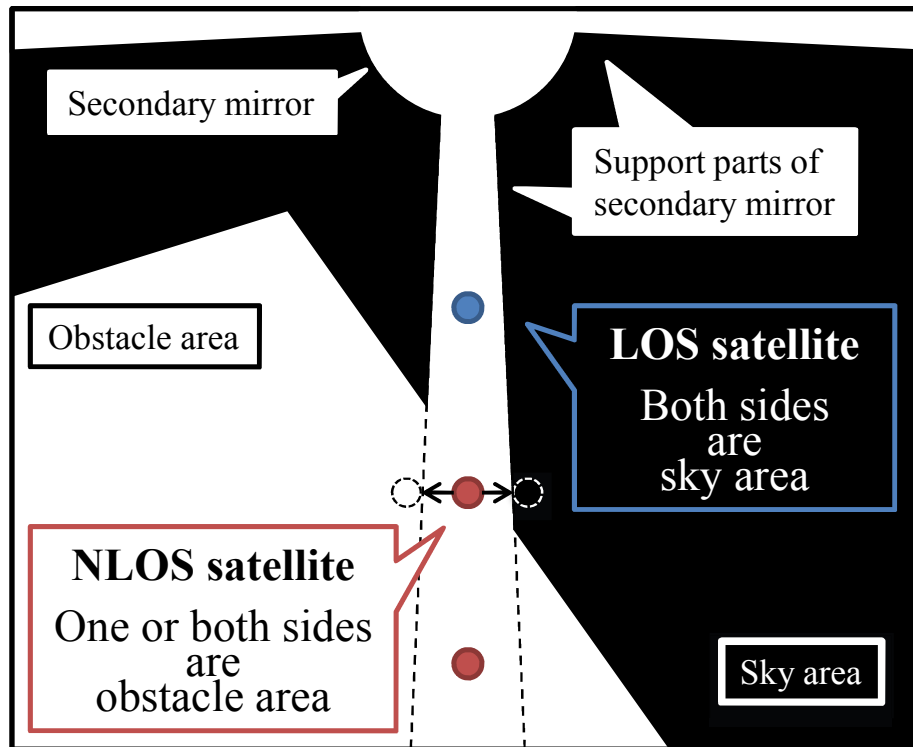


Fig. 3.1 NLOS sat. detection on support parts.

3・2・2 評価試験

a. 概要

マルチ GNSS 測位において NLOS 衛星判別手法の測位精度向上効果を評価し、都市部環境下における NLOS 衛星判別手法の利用性を評価する。本評価試験においてマルチ GNSS は、GPS と GLONASS を利用する。評価試験は図 3.2 に示す環境で行い、図中の複数の座標既知点（Ground control point）を結ぶ経路上を手動制御により走行する。走行する試験車両は GNSS 受信機と赤外全周カメラを搭載しており、赤外全周カメラ画像から図 3.3 のように NLOS 衛星を判別することが可能である。

また評価は、GPS 測位とマルチ GNSS 測位に対して全ての衛星を利用した単独測位と、NLOS 衛星を棄却し、LOS 衛星のみを利用した単独測位をそれぞれ行ない、図 3.2 に示す経路（Reference path）からの水平距離残差の比較を行うことで、測位精度の評価を行う。ここで、試験経路上の座標既知点は事前の長時間 GPS 静止測位によって誤差 2[cm]以内で座標が得られているものとし、また手動による試験車両の経路追従性も、経路からの外れ距離 5[cm]以内で実現できているものとする。そのため、リファレンスとする経路の位置精度は 10[cm]以内を保障できるものとする。このリファレンスの位置精度は、本試験で評価する単独測位精度がメートル級の誤差を持つため、十分な精度であると考えられる。

b. 結果

GPS のみを用いた測位における本評価試験の結果を図 3.4 に示す。図中赤の実線は NLOS 衛星判別を行わずに全ての衛星を利用した GPS 測位による測位結果と評価経路との距離残差を表し、また青の実線は NLOS 衛星を棄却し、LOS 衛星のみを利用した GPS 測位結果と評価経路との水平距離残差を表している。また、表 3.1 に水平距離残差の RMS を示す。図 3.4 と表 3.1 から、GPS のみを用いた測位において NLOS 衛星判別を行った場合、測位精度の低下が頻繁に発生していることがわかる。この結果は、受信可能な衛星数が極端に少ない環境では、NLOS 衛星のマルチパス誤差を除去することによる測位精度の改善効果よりも、NLOS 衛星除去にともなう衛星数減少による測位精度劣化効果が大きかったことを示している。

それに対して、GPS と GLONASS を利用したマルチ GNSS 測位における本評価試験の結果を図 3.5 に示す。また、表 3.1 に水平距離残差の RMS を合わせて示す。図 3.5 と表 3.1 から、マルチ GNSS 測位において NLOS 衛星判別を行った場合、一部の時刻において測位精度の低下が見られるものの、多くの時刻で測位精度の改善が見られ、水平距離残差の RMS が向上することが確認できる。この結果は、上記の GPS のみを用いた測位と比較して受信可能な衛星数が多いため、NLOS 衛星除去にともなう衛星数減少の測位精度劣化効果が小さく、NLOS 衛星のマルチパス誤差を除去することによる測位精度の改善効果の方が大きかったことを示している。つまり、受信可能な衛星数が多いほど NLOS 衛星判別による測位精度改善効果が得られることがわかる。

以上の結果から、都市部における NLOS 衛星判別による測位精度の向上手法は、衛星の絶対数を増加させるマルチ GNSS 測位に適用することでより利用性の高い測位精度向上手法となることがわかる。

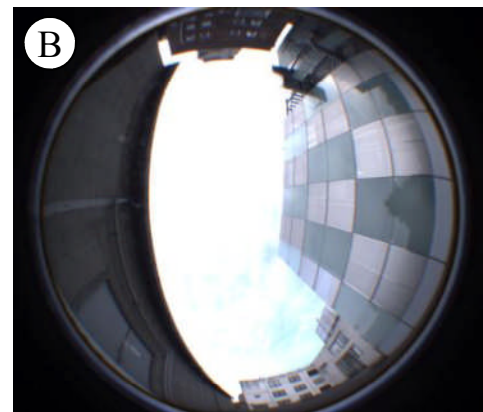
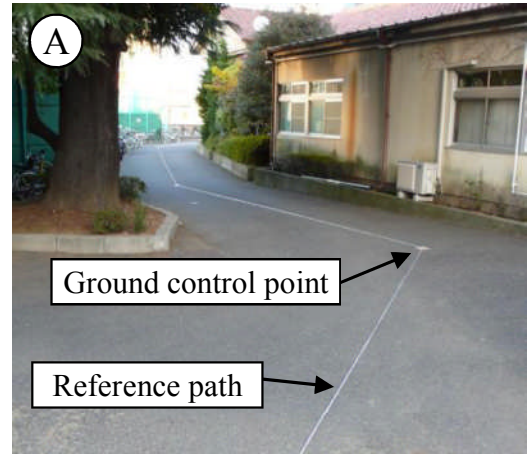
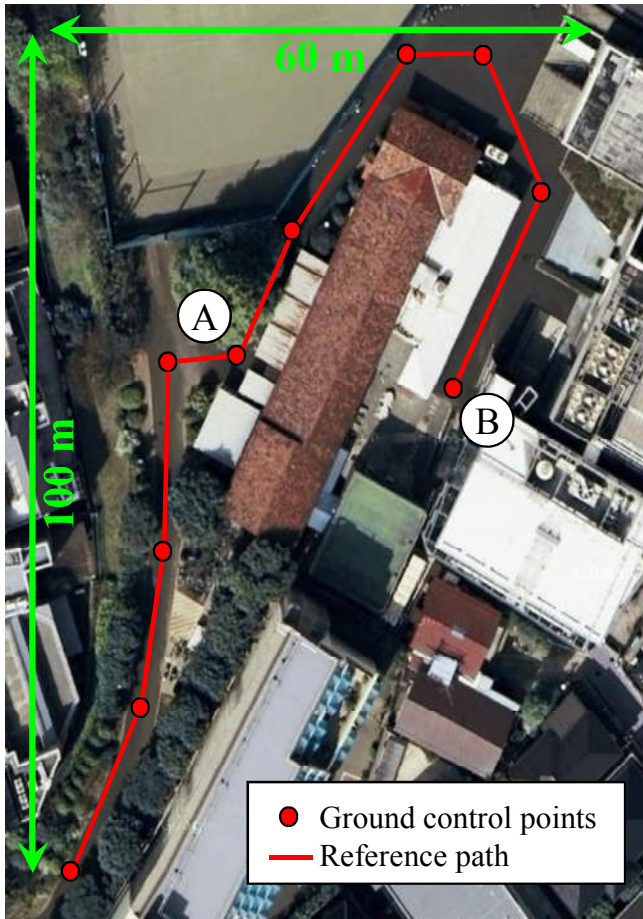


Fig. 3.2 Environment of evaluation test for NLOS sat. detection.

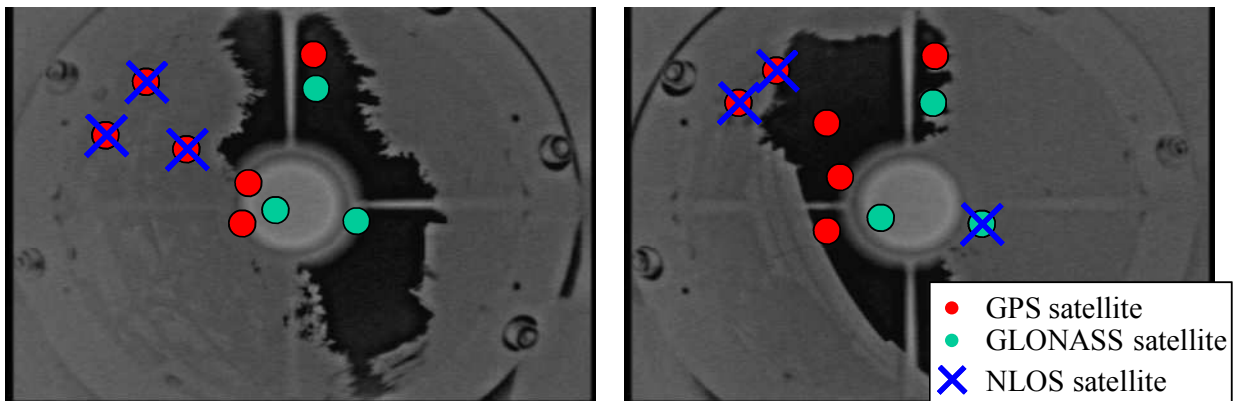


Fig. 3.3 NLOS satellites detection for GPS and GLONASS.

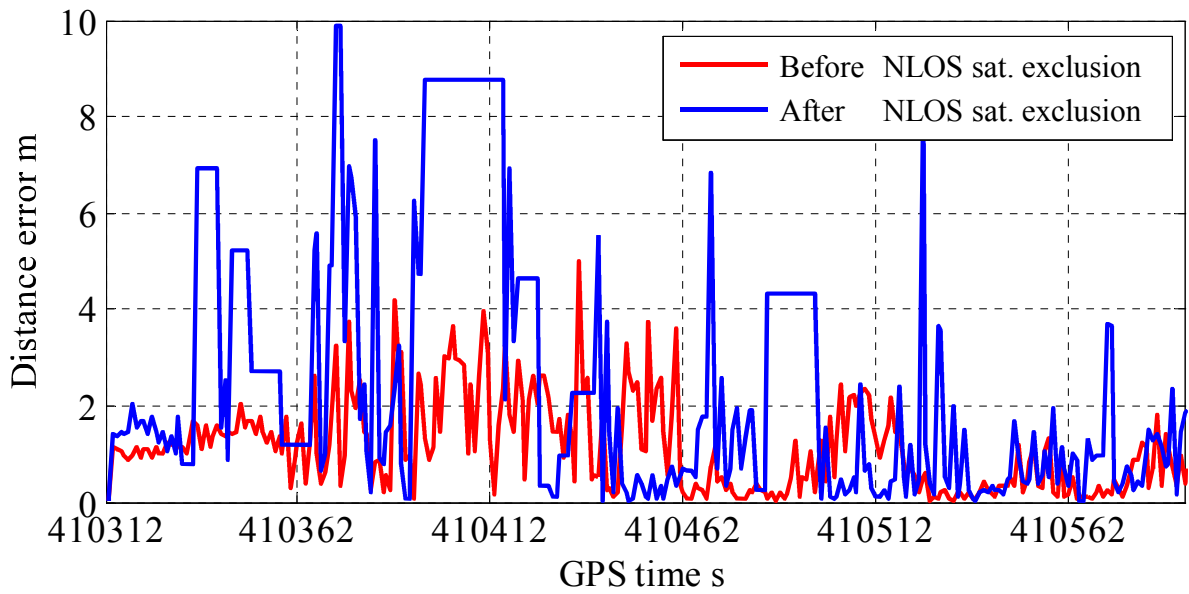


Fig. 3.4 Positioning residual of GPS.

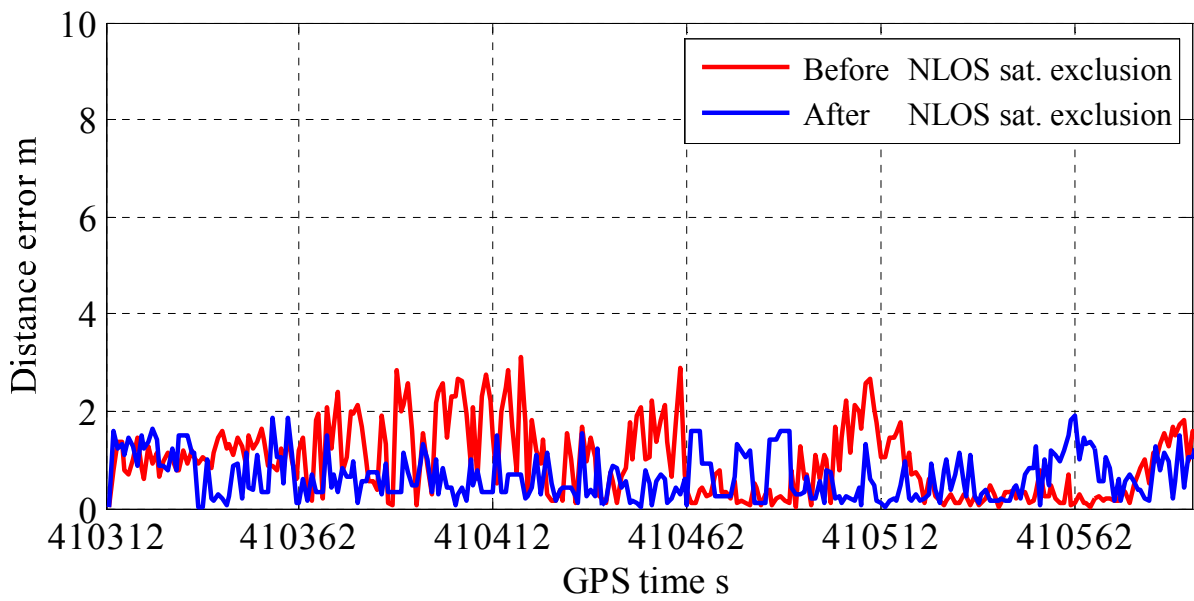


Fig. 3.5 Positioning residual of GPS and GLONASS.

Table 3.1 Distance residual of NLOS satellites detection.

Satellite systems	Horizontal RMS of distance residual m	
	Using all sat.	Using only LOS sat.
GPS	1.56	3.89
GPS and GLONASS	1.17	0.72

3・3 魚眼カメラを用いた NLOS 衛星判別

3・3・1 画像の領域分割

画像の領域分割について、本研究では、K-means 法を利用する⁽⁵⁸⁾⁽⁵⁹⁾⁽⁶⁰⁾。K-means 法は特定の指標に基づいてサンプルデータを複数のクラスターに分割する手法である。本研究では、クラスターの数 k を 6 とし、画素をその色情報に基づいて分割する。図 3.6 に示す魚眼カメラ画像を K-means 法によってクラスターに分割し、クラスターを色分けした例を図 3.7 に示す。また、分割する魚眼カメラ画像の色情報について、一般的な画像処理では画素の色は RGB 色空間で表現される。しかしながら、RGB 色空間による表現では、明度変化に対して画素の色情報が大きく変化することが、本手法では問題である。本研究で対象とする車両天頂の障害物は、同一物体を観測した場合でも、車両の移動による影の発生や太陽との位置関係の変化によって明度が大きく変化するためである。そこで、本手法では、画像の色空間として、明度を表現可能な Lab 色空間を採用する。Lab 色空間は明度を表す次元 L と補色次元の a および b を持っており、K-means 法によって画素を分割する際には ab 次元のみに基づいて分割することで、明度変化に頑健な画像分割を図る。



Fig. 3.6 Fish-eye camera image.

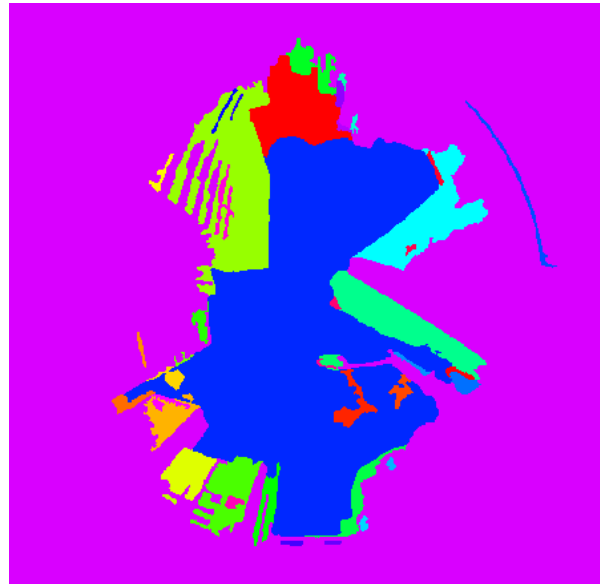


Fig. 3.7 Clustering image by K-means.

3・3・2 NLOS 衛星判別

図 3.7 からわかるように，空の領域と障害物の領域にそれぞれ複数のクラスタが含まれる．NLOS 衛星判別を行うためには，これらそれぞれのクラスタが空領域を示すクラスタであるのか，または障害物領域を示すクラスタであるのかを識別する必要がある．本研究では，本手法が車両に適用されると想定して，連続して撮影した魚眼カメラ画像中の特徴点を追跡する．すなわち，雲等の空の物体と比較して，カメラ位置に非常に近い障害物は，カメラの移動に対して画像中で顕著に移動する．そこで，移動量の大きい特徴点を含むクラスタをカメラの近接物体，すなわち障害物として識別する．これにより魚眼カメラ画像を障害物領域と空領域に識別することができる．本研究では，特徴点の抽出に SIFT 特徴量を利用する．図 3.7 の領域分割した魚眼カメラ画像上に，特徴点を配したものを図 3.8 に示す．なお，図 3.8 は視認性を考慮して，クラスタをグレースケールで色分けし，移動量の大きい特徴点を赤く，移動量の小さい特徴点を青で示す．建物上に存在する特徴点は移動量が大きく，空の特徴点は移動量が小さいことが確認できる．そして，特徴点の移動量を基に障害物領域と空領域を識別する（図 3.9）．最後に，図 3.9 上に衛星位置を配置することで，NLOS 衛星を判別する．

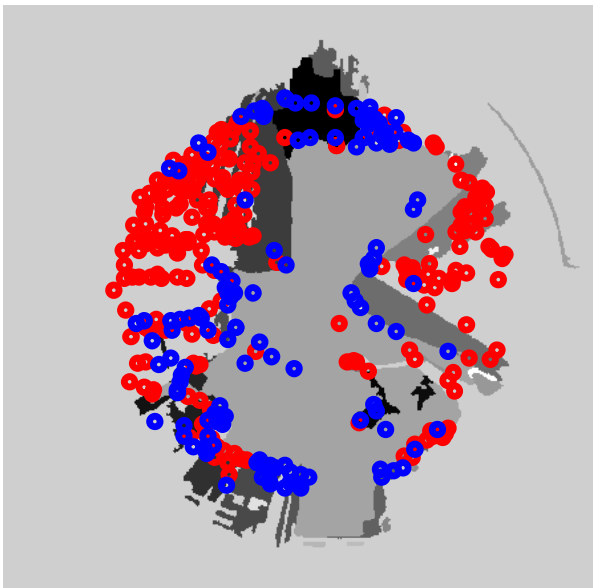


Fig. 3.8 SIFT points image.

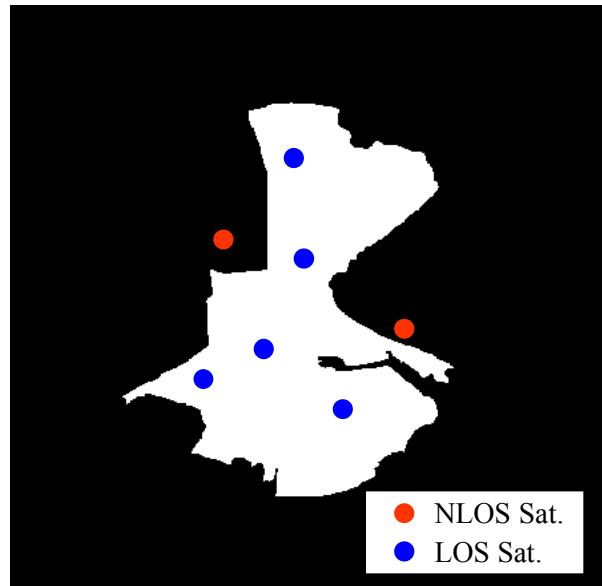


Fig. 3.9 Detection sky area and NLOS satellites.

3・3・3 評価試験

a. 概要

魚眼カメラを用いた NLOS 衛星判別手法を評価することを目的として、本手法による障害物抽出精度の評価を行う。具体的には、図 3.10 に赤で示す名古屋駅周辺の市街地経路を、図 3.11 のように魚眼カメラを天頂に搭載した車両で走行し、車両天頂の障害物情報を取得する。この時、魚眼カメラと同様に、赤外全周カメラも搭載し、従来研究で有効性が示された赤外全周カメラによる障害物の抽出情報を、本手法による障害物抽出のリファレンスとして評価を行う。

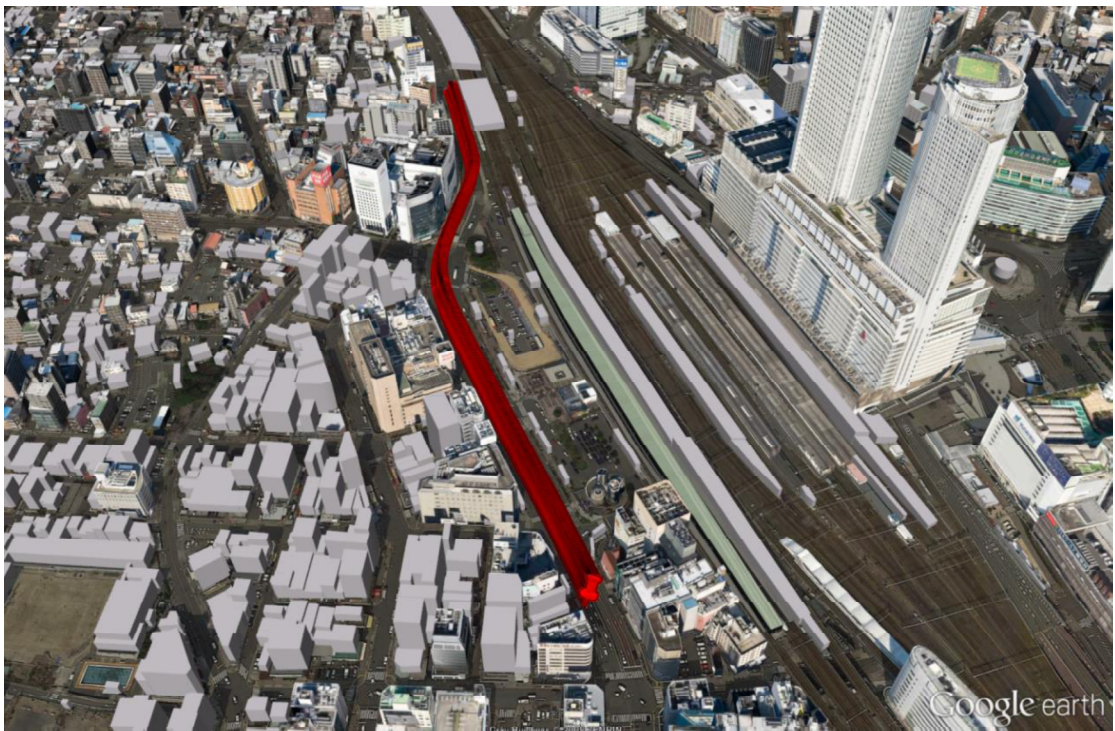


Fig. 3.10 Evaluation test course.

(Gray buildings © 2008 ZENRIN, Google earth)



Fig. 3.11 Fish-eye camera and IR-ODV on evaluation test car.

b. 試験条件

試験は2014年6月23日の17時に行い、約500[m]のコースを走行、画像取得周期10[Hz]で872枚の魚眼カメラ画像を取得した。これらの画像について障害物抽出を行い、赤外全周カメラで抽出した障害物情報と比較する。比較の際は式(3.1)で示す領域一致率 R_{area} を用いて評価する。

$$R_{\text{area}} = \frac{S_{\text{all}} - (S_{\text{odv}} \oplus S_{\text{cam}})}{S_{\text{all}}} \times 100 \quad \% \quad (3.1)$$

ここで、以下とする。

S_{all} : 画像の全ピクセル数

S_{odv} : 赤外全周カメラによって障害物抽出した二値画像 (1 : 障害物, 0 : 空)

S_{cam} : 魚眼カメラによって障害物抽出した二値画像 (1 : 障害物, 0 : 空)

つまり、赤外全周カメラと魚眼カメラからそれぞれ求めた障害物と空の情報が同じ画素の総数と、画像全体の画素数との比で領域一致率 R_{area} を求める。

c. 結果

評価試験で取得した各画像の領域一致率 R_{area} を求めた結果について、領域一致率 R_{area} と画像数の関係のヒストグラムを図3.12に示す。図3.12によると、大きく分けて領域一致率 R_{area} が40~50%と約80%以上の結果に分かれている。前者については、魚眼カメラによる障害物抽出が明らかに失敗しており、画像全体が障害物、または空として判別されている。また、後者の結果について、領域一致率85, 86, 90, 95%の結果の一部を図3.13~図3.16に示す。これらの図は、それぞれ(a)に赤外全周カメラで取得した障害物情報を示し、(b)に魚眼カメラを用いて取得した障害物情報、(c)に(a)と(b)の排他的論理和 $((a) \oplus (b))$ を示す。(c)を参照することで、赤外全周カメラと魚眼カメラで取得した障害物情報の一致度を俯瞰することができる。また(d)には、参考として魚眼カメラで撮影した天頂画像を示す。

図3.13に示すように、80%前後の結果では、空の一部を障害物として誤認識するケースが多くみられる。また、図3.15、図3.16の90, 95%の結果においては、(b)、(d)に示すそれぞれ領域抽出結果と元画像を見比べるとほぼ同じ形状で障害物領域抽出できている。これに対し、図3.14の一致率86%の結果では、(a)リファレンスと(b)魚眼カメラの画像を比較して分かるように、魚眼カメラによる障害物抽出では、図中左下の障害物の一部を空として誤認識している部分が見られる。また、その他の障害物抽出結果についても、領域一致率 R_{area} が86.9%を超えるものはご認識がほとんど見られなかった。そこで、図3.12のヒストグラムの結果と併せて領域一致率86.9%以上の画像を障害物領域抽出の成功基準とする。この場合、86.9%以上の画像は全872枚中792枚であり、成功率は90.8%であった。また、上記の基準で成功と判断した画像について領域一致率 R_{area} を見ると、90.0%という結果が得られた。

以上から、本提案手法を利用することで、赤外全周カメラによる障害物抽出を基準にとると、90.8%の画像に対して障害物抽出が利用可能であり、またその精度は90.0%であるとい

える。この結果は、本手法による NLOS 衛星判別が可能であり、都市部における測位精度向上が期待できることを示している。しかしながら、約 10%の画像については障害物抽出が失敗しているため、より頑健かつ利用性の高い測位のためには、本手法の障害物抽出率をより向上していく必要がある。

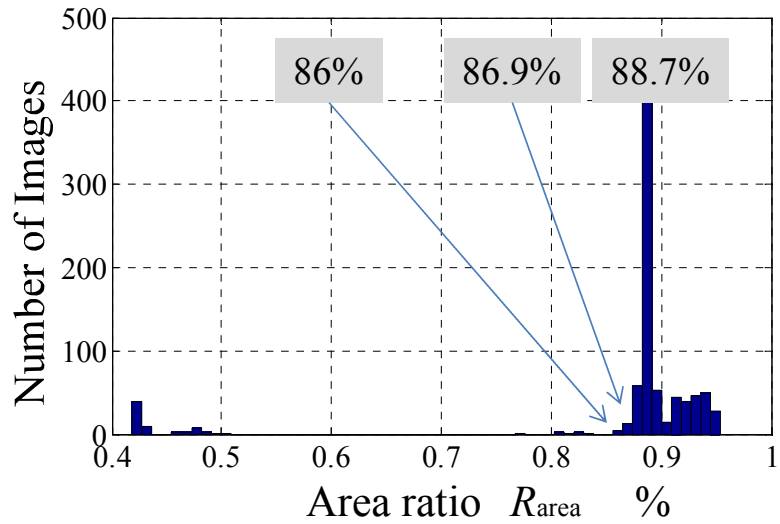


Fig. 3.12 Histogram of area matching ratio.



(a) Obstacle reference



(b) Obstacle from camera



(c) $S_{odv} \oplus S_{cam}$



(d) Original image

Fig. 3.13 Result (Rarea=85%).



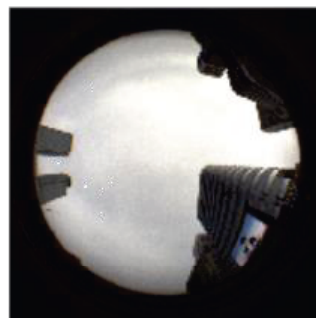
(a) Obstacle reference



(b) Obstacle from camera



(c) $S_{odv} \oplus S_{cam}$



(d) Original image

Fig. 3.14 Result (Rarea=86%).



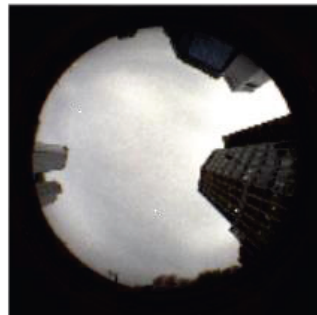
(a) Obstacle reference



(b) Obstacle from camera



(c) $S_{odv} \oplus S_{cam}$



(d) Original image

Fig. 3.15 Result ($R_{area}=90\%$).



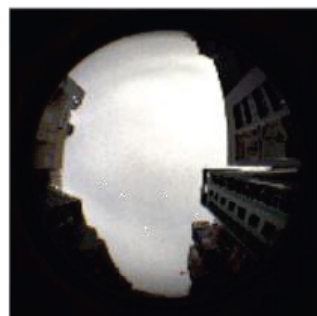
(a) Obstacle reference



(b) Obstacle from camera



(c) $S_{odv} \oplus S_{cam}$



(d) Original image

Fig. 3.16 Result ($R_{area}=95\%$)

3・4 まとめ

従来、NLOS 衛星判別による測位精度向上手法は、GPS のみを用いた測位では都市部環境下においてかえって測位精度が低下する場合があるという課題があった。そこで第3・2節では、マルチ GNSS 測位における NLOS 衛星判別による測位精度向上手法の評価を行った。その結果、GPS のみを用いた測位では NLOS 衛星判別によって測位精度が低下する場合も、マルチ GNSS 測位を利用することで、NLOS 衛星判別によって測位精度が向上することを明らかにした。すなわち、都市部における衛星測位において高精度化を目的として NLOS 衛星判別を行う場合、マルチ GNSS 測位を行うことが適切であることを明らかにした。

また第3・3節では、従来の赤外全周カメラによる NLOS 衛星判別手法では、仰角 70[deg]以上の衛星について NLOS 衛星判別が不可能であるという課題と、赤外全周カメラという特殊なセンサを利用しているため、利用性が低かったという課題に対して、副鏡を使用せず、より利用が容易な可視光魚眼カメラによる NLOS 衛星判別手法を提案した。具体的には、魚眼カメラ画像を K-means 法を用いて複数の小さなクラスターに分割し、その領域の移動量を、SIFT 特徴量を用いて追跡し、移動量の大きなクラスターを障害物として抽出した。本手法の評価試験を行った結果、障害物情報抽出の成功率が 90.8%、抽出精度 90.0%という結果が得られた。

この結果から、魚眼カメラを用いた NLOS 衛星判別手法が十分機能し、本手法を適用することで測位精度の向上が期待できることがわかった。しかしながら、障害物抽出の失敗率は 9.2%であるため、より頑健で利用性の高い測位を実現するためには、本手法の障害物抽出の成功率向上が必要である。

また本手法は、車両の移動により、障害物が相対的に移動することを利用した手法である。そのため、車両が静止している際には利用することができず、特に車両の始動時には本手法を適用することができない。そのため、車両静止時にも利用可能な魚眼カメラを用いた NLOS 衛星判別手法の提案が課題である。

4. 準天頂衛星を用いたマルチ衛星測位の利用性と精度の向上

4・1 概要

従来マルチ GNSS 測位では、システム間バイアス (ISB) を除去することを目的として、複合する各 GNSS にそれぞれ主衛星を定義している。主衛星の定義によって測位に利用可能な衛星は減少するため、従来マルチ GNSS 測位は複数の GNSS 複合による衛星数の増加効果が十分に得られていないことが課題としてあげられる。特に、都市部のような衛星が遮蔽されやすい環境では主衛星選択による衛星数減少の影響が大きく、マルチ GNSS 複合による十分な測位精度改善効果が得られていない。

そこで本研究では、複合する各 GNSS にそれぞれ主衛星を定義することなく、ただ一つの主衛星を定義する測位手法を提案する。具体的には、本手法は大きく4つのアイデアで構成される。一つは、QZSS をただ一つの主衛星にすることによって、マルチ GNSS 測位が各 GNSS に主衛星を定義することで衛星数が減少するという課題を解消する点。次に、主衛星の一重差アンビギュイティの決定に QZSS の情報配信用信号である LEX 信号の搬送波位相を使う点。次に、従衛星との二重差アンビギュイティの整数性を保存する点。また、二重差アンビギュイティの整数性を保存することで、従来の多様なアンビギュイティ決定 (AR: ambiguity resolution) 法が利用可能である点である。最後に、異なる GNSS 間で二重差観測値を作成した際に問題になる ISB を推定する点である。具体的な手法の流れを以下に示し、i), ii), について第4・2節で述べ、iv)について第0節で詳細に述べる。

i) ワイドレーン法による QZSS 一重差アンビギュイティの決定

主衛星 (QZSS) の一重差アンビギュイティを、ワイドレーン法を用いて決定し、既知とする。これによって、主衛星の一重差観測値は幾何距離と時計誤差のみを要素として持つ。そのため、異なる GNSS 間で二重差を作成しても、二重差アンビギュイティは従衛星の一重差アンビギュイティのみを要素として持ち、整数性を保存することができる。またこの時、ワイドレーン法では LEX 信号の搬送波位相を利用することで高精度な AR を図る。

ii) 二重差観測値を作成 (主衛星:QZSS, 従衛星:他の GNSS)

i)で一重差アンビギュイティを決定した QZSS を主衛星、その他の GNSS 衛星を従衛星とした二重差観測値を作成する。ここで、この二重差観測値は、QZSS の整数アンビギュイティが既知のため、QZSS - 従衛星 - 受信機間の幾何配置と従衛星の整数アンビギュイティのみを要素としてもつ。すなわち、従衛星が QZSS と異なる GNSS でも二重差アンビギュイティの整数性が保持される (第4・2節で詳述)。そのため、システムごとに主衛星を定義する必要がなく、マルチ GNSS 複合による衛星数増加効果を十分に得ることができる。

iii) 整数性が保存されたアンビギュイティを探索決定する

ii)で整数性が保持された二重差観測値は、その整数アンビギュイティの決定に従来の多様な AR 法が利用可能である。本研究では、LMS 法(第2・1・3項で詳述)を用いて、衛星の二重差アンビギュイティを決定する。整数アンビギュイティを決定することで、高精度な測位が可能になる。

iv) システム間バイアス(ISB)の推定

従来マルチ GNSS 測位では各 GNSS にそれぞれ主衛星を定義することで除去している ISB について、本提案手法では QZSS をただ一つの主衛星として利用しているため、除去することができない。そこで、本提案手法では ISB を推定する。具体的には、測位を行い FIX 解が得られた場合に、アンテナ位置がセンチメートル級で得られることを利用して、衛星-受信機間の幾何学的な配置から推定する。

4・2 ワイドレーン法による QZSS 一重差アンビギュイティの決定

主衛星として利用する QZSS の一重差アンビギュイティの決定に第 2・1・3 項で述べるワイドレーン法を利用する。ただし、第 2・1・3 項で述べるワイドレーン法は二重差アンビギュイティの決定について議論したものである。そこで本節では、ワイドレーン法を用いた一重差アンビギュイティの決定方法について述べる。また、QZSS のワイドレーン法によるアンビギュイティ決定の精度向上のために、LEX 信号の搬送波位相を利用する新しいワイドレーン法を第 4・2・2 項で提案する。

4・2・1 ワイドレーン法による QZSS 一重差アンビギュイティの決定

第 2・1・4 項で述べるように、一般的なワイドレーン法は二重差観測値を用いて二重差アンビギュイティを決定する。しかしながら本研究では、一重差アンビギュイティをワイドレーン法で決定する必要がある。そこで本項では、受信機間一重差を用いたワイドレーン法について述べる。まず、擬似距離及び搬送波位相一重差を式(4.1)、式(4.2)で示す。

$$\rho_{BR}^i = r_{BR}^i + C dt_{BR}^i + M_{\rho_{BR}}^i + \varepsilon_{\rho_{BR}}^i \quad (4.1)$$

$$\Phi_{BR}^i = r_{BR}^i + \lambda N_{BR}^i + C dt_{BR}^i + M_{\Phi_{BR}}^i + \varepsilon_{\Phi_{BR}}^i \quad (4.2)$$

また、式(4.2)に示す搬送波位相受信機間一重差について、同一衛星から同時に受信した、異なる周波数の信号の線形結合、つまり受信機間一重差ワイドレーンを、式(4.3)に示す。

$$\begin{aligned} \Phi_{BR_{\Pi 12}}^i &= \lambda_{\Pi 12} \left(\frac{\Phi_{BR_{\Pi 1}}^i}{\lambda_{\Pi 1}} - \frac{\Phi_{BR_{\Pi 2}}^i}{\lambda_{\Pi 2}} \right) \\ &= \lambda_{\Pi 12} \left[\rho_{BR}^i \left(\frac{1}{\lambda_{\Pi 1}} - \frac{1}{\lambda_{\Pi 2}} \right) + (N_{BR_{\Pi 1}}^i - N_{BR_{\Pi 2}}^i) + c \left(\frac{dt_{BR_{\Pi 1}}^i}{\lambda_{\Pi 1}} - \frac{dt_{BR_{\Pi 2}}^i}{\lambda_{\Pi 2}} \right) + \left(\frac{\varepsilon_{\Phi_{BR_{\Pi 1}}}^i}{\lambda_{\Pi 1}} - \frac{\varepsilon_{\Phi_{BR_{\Pi 2}}}^i}{\lambda_{\Pi 2}} \right) \right] \quad (4.3) \\ &= r_{BR}^i + \lambda_{\Pi 12} N_{BR_{\Pi 12}}^i + c dt_{BR_{\Pi 12}}^i + \varepsilon_{\Phi_{BR_{\Pi 12}}}^i \end{aligned}$$

これらの受信機間搬送波位相一重差を使い、ワイドレーン法を行う場合、ワイドレーンに用いるすべての信号、疑似信号には、同じ値の誤差 $C dt_{BR_{\Pi 12}}^i$ が含まれている。これは、二台の受信機の時刻差による誤差である。ここで、ワイドレーン法での各段階の保有距離 ρ を、式(4.4)と置くと、ワイドレーン法における各ステップでのアンビギュイティの算出は、

式(4.5)と表現される.

$$\rho = r_{BR}^i + C dt_{BR}^i + \varepsilon_{\varphi_BR}^i \quad (4.4)$$

$$\begin{aligned} N_{BR}^i &= \left[\frac{\Phi_{BR}^i}{\lambda} - \frac{r_{BR}^i + C dt_{BR}^i + \varepsilon_{\varphi_BR}^i}{\lambda} \right]_{\text{roundoff}} \\ &= \left[\frac{\Phi_{BR}^i}{\lambda} - \frac{\rho}{\lambda} \right]_{\text{roundoff}} \end{aligned} \quad (4.5)$$

これは式(2.46)で表される二重差ワイドレーン法の基本式と同形を示している. また, 更新される保有距離 ρ は式(4.6)で更新される.

$$\begin{aligned} \rho_{\text{new}} &= \Phi_{BR}^i - \lambda N_{BR}^i \\ &= \rho + C dt_{BR}^i \end{aligned} \quad (4.6)$$

更新されて得た保有距離もまた, 同じ値の誤差 $C dt_{BR_f12}^i$ が含まれている. このことから, 式(4.5), 式(4.6)を交互に行うことで, 二重差ワイドレーン法と同様の計算ステップにより, 一重差ワイドレーンを取り扱う事ができる.

ただし, 最終的に得られた保有距離には, 式(4.6)のように受信機時計誤差 $C dt_{BR}^i$ が残っているという事に注意しなければならない. 測位をするためには, この受信機時計誤差を除去または推定する必要がある. この点が二重差搬送波位相を利用したワイドレーン法によるアンビギュイティ決定と異なる点である.

4・2・2 LEX 信号を用いた 4 周波ワイドレーン法

本項では, QZSS が配信する L1 帯, L2 帯, L5 帯及び, LEX 信号帯を使用した 4 周波数帯域信号によるワイドレーン法を提案する. また本論文中では, この手法を特別に, 4 周波ワイドレーン法と呼ぶこととする. 同時にこれと対比するため, 測位用信号である L1 帯, L2 帯及び, L5 帯を使用した従来の 3 周波数帯域信号によるワイドレーン法を, 3 周波ワイドレーン法と呼ぶこととする.

まず, 4 周波ワイドレーンの実装により期待される効果について述べる. L1 帯, L2 帯, L5 帯, LEX 帯(L6 帯)信号により作成される疑似信号の周波数, 波長, 誤差量を, 表 4.1 に示す. このとき, 観測環境は良好であるとし, L1 帯, L2 帯, L5 帯, L6 帯各観測誤差量は第 2・1・2 項の式(2.26)に準ずると仮定する. 表 4.1 より, 5.8[m]波長のエクストラワイドレーン信号と, 0.9[m]波長のワイドレーン信号の, 中間にあたる 2.9[m]波長を持つ疑似信号が作成可能である事が確認できる. ここで, 疑似距離観測量誤差, 搬送波位相観測量誤差を正規分布と仮定する. この時, 4 周波ワイドレーン法を行った際の, 使用信号, 二重差アンビギュイティの標準偏差 $\sigma(N)$, 保有疑似距離の標準偏差 $\sigma(\rho)$, 波長, 四捨五入によるアンビギュイティ推定の正確さ (AR: ambiguity resolution) について, 表 4.2 に示す.

ここで、表 4.2 に示すステップは、長い波長の信号から徐々にアンビギュイティを絞り込んでいく各段階を示す。この時、正解率 Cr は式(4.7)で表される。

$$Cr = \int_{-a}^a N(0,1)$$

$$a = \frac{0.5}{\sqrt{\left(\frac{\epsilon_{\phi, BR}^{i,j}}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{\epsilon_{p, BR}^{i,j}}{\lambda}\right)^2}} \quad (4.7)$$

ここで、 $N(0,1)$ は平均 0、分散 1 の標準正規分布である。また、 a は観測誤差の標準偏差が 0.5[cycle]以下を取る範囲であり、観測誤差の標準偏差を a 倍したものが、式(2.25)での四捨五入による、アンビギュイティ決定が正解するための境界である。つまり Cr は、確率分布 $N(0,1)$ において、任意の値が $-a$ から a に含まれる確率を示しており、式(2.25)での四捨五入による、アンビギュイティ決定が正解する確率を示している。また、表 4.2 の総合的な正解率は、各段階の正解率の積である。表 4.2 より、総合的正解率に注目すると、理想環境下での 4 周波ワイドレーン法は総合的な正解率が 95.7%と、非常に安定した二重差アンビギュイティ決定を行えることが確認できる。ここで、表 4.3 に、3 周波ワイドレーン法を行った場合の同様の予測値について示す。理想環境下では 3 周波ワイドレーン法の総合的正解率は 68%と、4 周波ワイドレーン法に比べ不安定であることがわかる。これは、3 周波ワイドレーン法では、第 3・4・2 項で述べたように、エクストラワイドレーン信号からワイドレーン信号へ波長のステップ幅が大きく、二重差アンビギュイティの絞込みが安定しないことが原因であり、表 4.3 から、該当ステップの正解率が 69.9%と低いことが確認できる。

Table 4.1 Wide lane signals.

Used signal	Carrier frequency MHz	Wave length m	Standard deviation m	
L1 only	1575.42	0.190	0.0095	
L2 only	1227.60	0.244	0.0122	
L5 only	1176.45	0.255	0.0127	
LEX only	1278.75	0.235	0.0112	
L1-L5	398.97	0.751	0.0531	middle wide lane
L1-L2	347.82	0.862	0.0608	wide lane
L1-LEX	296.67	1.011	0.0715	new signal
LEX-L5	102.3	2.933	0.2075	new signal
L2-L5	51.15	5.861	0.4144	extra wide lane
LEX-L2	51.15	5.861	0.4148	new signal

Table 4.2 Sample of wide lane method with 4 signals.

Step	Used signal	$\sigma(N)$ cycle	$\sigma(\rho)$ m	Wave length m	ratio of accurate AR %
1	L2-L5	0.178	0.4144	5.861	99.51
2	LEX-L5	0.150	0.2075	2.933	99.92
3	L1-LEX	0.211	0.0715	1.011	98.21
4	L1-L2	0.097	0.0608	0.862	100.00
5	L1-L5	0.095	0.0531	0.751	100.00
6	L5 only	0.214	0.0127	0.255	98.04
7	L1 only	0.083	0.0095	0.190	100.00
Total					95.73

Table 4.3 Sample of wide lane method with 3 signals.

Step	Used signal	$\sigma(N)$ cycle	$\sigma(\rho)$ m	Wave length m	ratio of accurate AR %
1	L2-L5	0.178	0.4144	5.861	99.51
2	L1-L2	0.483	0.0608	0.862	69.91
3	L1-L5	0.095	0.0531	0.751	100.00
4	L5 only	0.214	0.0127	0.255	98.04
5	L1 only	0.083	0.0095	0.190	100.00
Total					68.20

Table 5 Wave length of wide-lane signals.

(a) GPS wide-lane signals

Step	Signal	Wave Length m	Accurate AR ratio %
1	L2-L5	5.861	99.5
2	L1-L2	0.862	69.9
3	L1-L5	0.751	100.0
4	L5	0.255	98.0
5	L2	0.244	100.0
6	L1	0.190	100.0
Totally accurate AR ratio			68.2

(b) QZSS wide-lane signals

Step	Signal	Wave Length m	Accurate AR ratio %
1	L2-L5	5.861	99.5
2	L6-L5	2.933	99.9
3	L1-L6	1.011	98.2
4	L1-L2	0.862	100.0
5	L1-L5	0.751	100.0
6	L5	0.255	98.04
7	L2	0.244	100.0
8	L6	0.235	100.0
9	L1	0.190	100.0
Totally accurate AR ratio			95.7

4・3 システム間バイアス (ISB) の推定

4・3・1 推定手法

従来マルチ GNSS 測位では各 GNSS にそれぞれ主衛星を定義することで ISB を除去している。しかしながら、本提案手法では QZSS をただ一つの主衛星として利用しているため、除去することができない。そこで、本提案手法では ISB を推定する。具体的には、測位を行い FIX 解が得られた場合に、アンテナ位置がセンチメートル級で得られることを利用して、衛星-受信機間の幾何学的な配置から推定する。

ISB は、異なる衛星システムの信号を処理する際に、受信機内で発生する時刻系のバイアス誤差であり、衛星システムごとに同量である。ISB を考慮すると、GNSS の搬送波位相観測値は式(4.8)で表される。

$$\lambda\Phi^i = r^i + \lambda N^i + c(dt^i - dT^i) + O^i - I^i + T^i + M_{\phi}^i + \varepsilon_{\phi}^i + \text{ISB} \quad (4.8)$$

ISB は、受信機ごとに独立であり、24 時間で最大 10cm 程の変化が生じるとされる⁽¹⁾。そこで、ISB がある一定時間内では一定であると仮定し、測位が成功したタイミングで ISB を算出、次に ISB 算出の機会を得るまでこれを使用し続けることで、問題解決を図る。ISB を考慮したうえで、GPS と Galileo で作成した搬送波位相二重差を、式(4.9)に示す。式(4.9)において、各変数の上付き添字は、E:Galileo と G:GPS の信号の差を取っている事を表す。

$$\Phi_{\text{BR}}^{\text{E,G}} = r_{\text{BR}}^{\text{E,G}} + \lambda N_{\text{BR}}^{\text{E,G}} + \varepsilon_{\phi,\text{BR}}^{\text{E,G}} + \text{ISB}_{\text{BR}}^{\text{E,G}} \quad (4.9)$$

ここで、ISB の二重差である $\text{ISB}_{\text{BR}}^{\text{E,G}}$ に注目する。ISB は、受信機ごとに短時間で一定であり、また各種衛星システムごとに一定である。つまり、同一受信機で確認した同一システムの観測量には、全て同量の ISB が発生する。よって、ISB の受信機間一重差 $\text{ISB}_{\text{BR}}^{\text{E}}$ 、 $\text{ISB}_{\text{BR}}^{\text{G}}$ も短時間で一定であり、かつそれぞれの衛星システム間ではどの衛星信号にも同値である。つまり同様に、GPS と Galileo の搬送波位相二重差を作成することで発生する $\text{ISB}_{\text{BR}}^{\text{E,G}}$ は、短時間においてどの GPS と Galileo の組み合わせで作成する二重差についても、同値である。今、良環境において GPS のみによる精密測位解 \mathbf{b}_{BR} を得ているとする。すると、任意の幾何距離二重差について式(4.10)で与える事ができる。

$$\lambda^{-1} r_{\text{BR}}^{i,j} = -\lambda^{-1} (\mathbf{I}_{\text{B}}^j - \mathbf{I}_{\text{B}}^i) \mathbf{b}_{\text{BR}} \quad (4.10)$$

ここで、ワイドレーン法によってアンビギュイティの求まっている QZSS の搬送波位相一重差と、Galileo の E1 搬送波位相一重差から、搬送波二重差を作成し、式(4.11)を作成する。

$$\lambda_{\text{E1}}^{-1} \overline{\Phi_{\text{BR}}^{\text{Ei,QZSS}}} - N_{\text{BR}}^{\text{Ei}} = \lambda_{\text{E1}}^{-1} r_{\text{BR}}^{\text{Ei,QZSS}} - \lambda_{\text{E1}}^{-1} \text{ISB}_{\text{BR}}^{\text{E,QZSS}} \quad (4.11)$$

すると、式(4.10)と式(4.11)から、式(4.12)を得る。

$$\lambda_{E1}^{-1} \overline{\Phi_{BR}^{Ei,QZSS}} - N_{BR}^{Ei} = -\lambda_{E1}^{-1} (\mathbf{I}_B^{Ei} - \mathbf{I}_B^{QZSS}) \mathbf{b}_{BR} - \lambda_{E1}^{-1} \text{ISB}_{BR}^{E,QZSS} \quad (4.12)$$

式(4.12)の左辺に既知の変数、右辺に未知数を移行すると、式(4.13)を得る。

$$\lambda_{E1}^{-1} \overline{\Phi_{BR}^{Ei,QZSS}} + \lambda_{E1}^{-1} (\mathbf{I}_B^{Ei} - \mathbf{I}_B^{QZSS}) \mathbf{b}_{BR} = N_{BR}^{Ei} - \lambda_{E1}^{-1} \text{ISB}_{BR}^{E,QZSS} \quad (4.13)$$

式(4.13)の形にすることで、 $\text{ISB}_{BR}^{E,QZSS}$ について、整数バイアスを除いた形を得る事ができる。つまり、 $\text{ISB}_{BR}^{E,QZSS}$ について、式(4.14)の形に式変形できる。

$$\begin{aligned} \lambda_{E1}^{-1} \text{ISB}_{BR}^{E,QZSS} &= -\lambda_{E1}^{-1} \overline{\Phi_{BR}^{Ei,QZSS}} - \lambda_{E1}^{-1} (\mathbf{I}_B^{Ei} - \mathbf{I}_B^{QZSS}) \mathbf{b}_{BR} + N_{BR}^{Ei} \\ &= \text{ISB}_{BR,0,E1}^{E,QZSS} + N_{BR}^{E,i} \end{aligned} \quad (4.14)$$

ただし

$$\text{ISB}_{BR,0,E1}^{E,QZSS} = -\lambda_{E1}^{-1} \overline{\Phi_{BR}^{Ei,QZSS}} + \lambda_{E1}^{-1} (\mathbf{I}_B^{Ei} - \mathbf{I}_B^{QZSS}) \mathbf{b}_{BR} \quad (4.15)$$

$\text{ISB}_{BR,0,E1}^{E,QZSS}$ は、E1信号における、Galileo-QZSSの二重差ISBである。ここで、 $\text{ISB}_{BR,0,E1}^{E,QZSS}$ の利用について検討してみる。今、適当な時間のQZSSとGalileoの搬送波位相二重差について、式(4.14)を用いて式(4.11)を次のように変形する。

$$\begin{aligned} \lambda_{E1}^{-1} \overline{\Phi_{BR}^{Ei,QZSS}} - N_{BR,1}^{Ei} &= \lambda_{E1}^{-1} r_{BR}^{Ei,QZSS} - \lambda_{E1}^{-1} \text{ISB}_{BR}^{E,QZSS} \\ &= \lambda_{E1}^{-1} r_{BR}^{Ei,QZSS} - \text{ISB}_{BR,0,E1}^{E,QZSS} - N_{BR,2}^{E,i} \end{aligned} \quad (4.16)$$

$$\begin{aligned} r_{BR}^{Ei,QZSS} &= \overline{\Phi_{BR}^{Ei,QZSS}} + \lambda_{E1} \text{ISB}_{BR,0,E1}^{E,QZSS} - \lambda_{E1} (N_{BR,1}^{Ei} + N_{BR,2}^{E,i}) \\ &= \overline{\Phi_{BR}^{Ei,QZSS}} - \lambda_{E1} \overline{N_{BR}^{Ei}} \end{aligned} \quad (4.17)$$

ただし

$$\begin{aligned} \overline{N_{BR}^{Ei}} &= N_{BR,1}^{Ei} + N_{BR,2}^{E,i} \\ \overline{\Phi_{BR}^{Ei,QZSS}} &= \overline{\Phi_{BR}^{Ei,QZSS}} + \lambda_{E1} \text{ISB}_{BR,0,E1}^{E,QZSS} \end{aligned} \quad (4.18)$$

式(4.17)は、幾何距離二重差と、搬送波位相観測値二重差、整数アンビギュイティからなる、搬送波位相二重差の基本式である。これにより、QZSSとGalileoE1からなる二重差について

て、ISB を推定し、二重差搬送波位相の ISB を整数化することで、提案手法におけるワイドレーン法や、LMS 法で利用できることが示された。

算出された ISB は、整数バイアスを残しているが、二重差を式(4.17)の形で利用することによって、提案手法におけるマルチ GNSS を可能とした。また、提案手法では、全ての搬送波位相二重差について、ワイドレーン法によりアンビギュイティを求めた QZSS を主衛星としている。これにより、本節と同様の手順を行うことにより、Galileo、BeiDou の配信する全ての信号に対応することができる。

図 4.1 は、open sky での静止試験にて求めた、BeiDou の ISB における小数部分である。本手法にて求まる ISB は、整数バイアスを含んでいるため、小数部分のみを確認する。この時、ISB の変化が大きい衛星番号 12 の BeiDou 衛星について注目する。図 4.1 中の、衛星番号 12 衛星の ISB について 1 次の最小二乗近似を行い、ISB の時間変化を確認する。得られた ISB の時間変化の 1 次近似式を式(4.19)に示す。

$$\text{ISB} = -0.283 \times 10^{-4} \times t + 0.29 \quad (4.19)$$

つまり、1 秒あたり $-0.283 \times 10^{-4} [\text{cycle}]$ の変化であり、およそ 30 分で $0.05 \text{ cycle} = 1 [\text{cm}]$ の誤差が生じることがわかり、短時間であれば観測精度と同程度の誤差で ISB の補正が可能であることが確認できる。

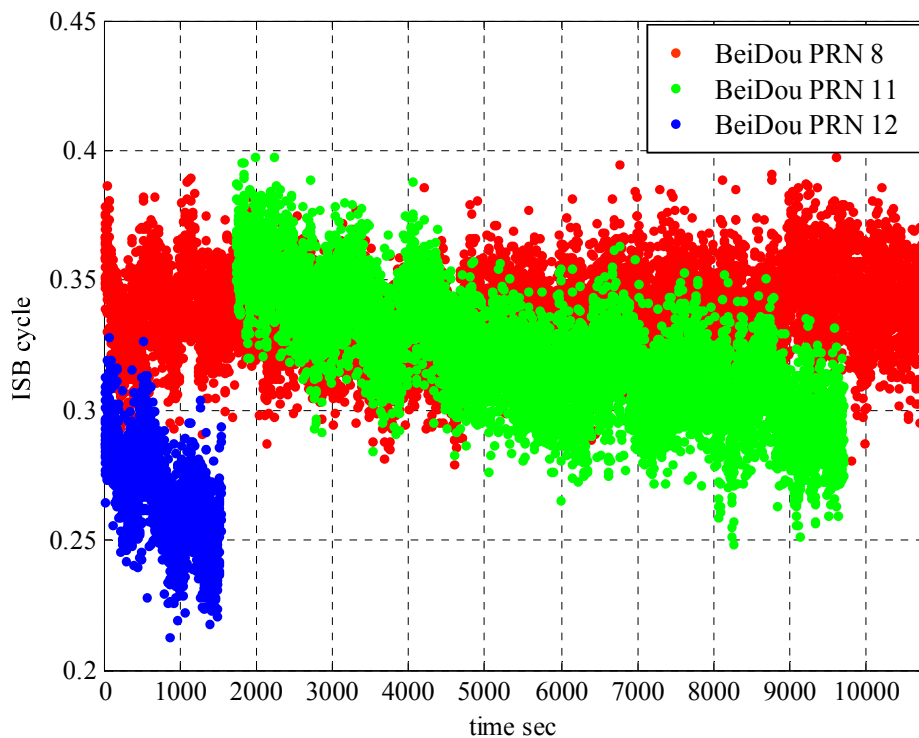


Fig. 4.1 ISB by BeiDou.

4・3・2 移動体測位で運用する場合の補正

ISB, IFB が固定値でない事から, 一度求めた ISB, IFB を長時間使用することは難しいと考えられる. そのため Open sky 環境であれば, GPS などの単一システムによる測位を行う事が単純な解決策として有効である. また, その測位結果から, 本章で解説した手法により ISB, IFB を更新することができる. しかし, 長時間の narrow sky 環境での測位が必要であった場合, 単一システムでの測位が困難である可能性が高い.

そこで, narrow sky 環境でのマルチ GNSS 測位でも, 提案手法における測位が成功と判断された場合, 本手法により ISB, IFB を更新する. この時, 測位の成功判断は, LMS 法のレシオテストによって行う. 具体的には, LMS 法によって算出された最尤評価値と, 次点の評価値の比が, 一定値以下になる場合, LMS 法による測位が成功したと判断する. 提案手法では, この時の解を特別に, FIX 解と呼ぶ. 本論文では閾値を 0.3 とし, 最尤点の評価値が次点の 3 分の 1 以下である時, 求めたアンビギュイティを FIX 解であるとし, ISB, IFB の更新を行う. これにより, 長時間の narrow sky 環境におけるマルチ GNSS を継続する.

4・4 評価試験

4・4・1 概要と試験環境

本提案手法による、測位精度と利用性の向上効果の評価を行う。評価試験は、静止環境で行い、提案手法適用による衛星数の変化と、測位率及び測位精度について評価する。また、測位率については、信頼度が高い FIX 解と呼ばれる測位解の取得率（FIX 率）として算出する。

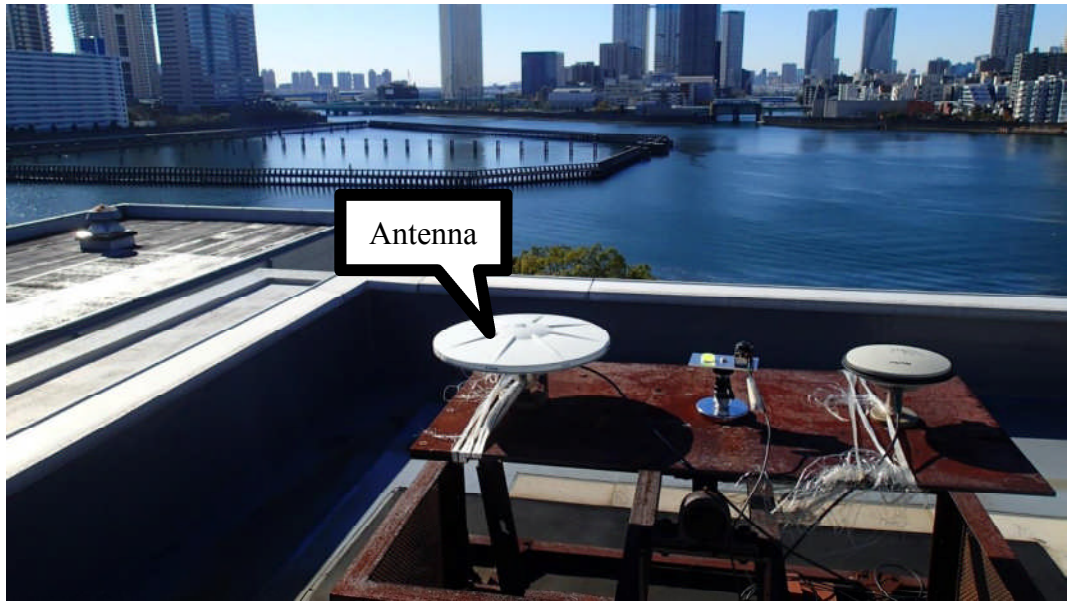
4・4・2 試験環境

試験環境は、アンテナ周辺に遮蔽物がない理想的な環境（Open sky）と、都市部を想定した、アンテナ周辺に障害物が多く、衛星が遮蔽されやすい環境（Narrow sky）とし、東京海洋大学越中島キャンパス内で行う。Open sky 環境で評価することで、本提案手法の理想的な測位精度を評価し、また Narrow sky 環境で評価することで、都市部における本提案手法の有効性を評価する。また Open sky 環境では、1[Hz]で 60 分間の測位を行い、Narrow sky 環境では 1[Hz]で 30 分間の測位を行う。

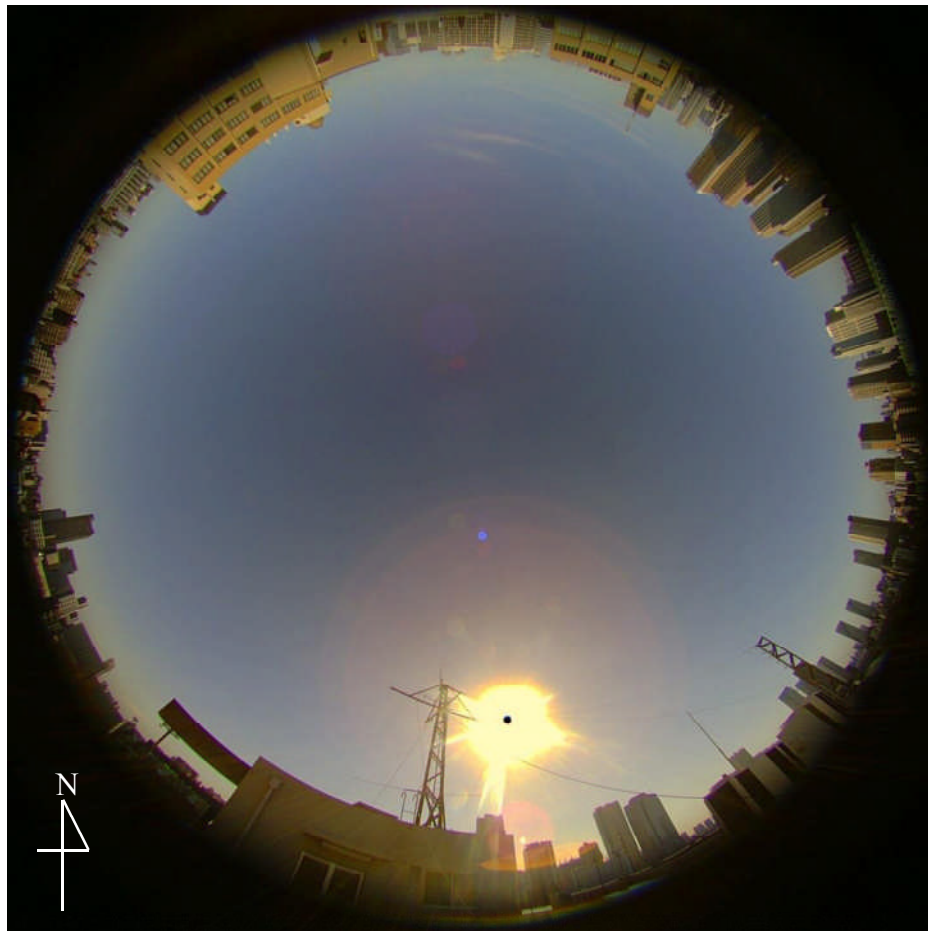
試験では、図 4.2 に示す東京海洋大学構内の屋上に私設基準点を設置し、基線長 30[m]の open sky 環境と、基線長 150[m]の narrow sky 環境に測位の評価対象とする移動局アンテナを設置する。それぞれの移動局アンテナ周辺の環境を、図 4.3 と図 4.4 に示す。

また、本試験に用いたアンテナ、受信機の写真を、図 4.5、図 4.6 に示す。使用した受信機は基準局、移動局共に Trimble 社の NetR9 を使用し、アンテナについても基準局、移動局共に Trimble 社の Trimble Zephyr Geodetic 2 Antenna を使用する。受信機、アンテナの仕様について表 4.4、表 4.5 に示す。

測位精度評価のリファレンスには、GNSS に関する研究で広く用いられている精密測位エンジンである、RTKLIB⁽⁶¹⁾を用いて、長時間の静止試験により求める。評価試験の環境は RTKLIB による高精度測位が困難な環境である。しかしながら、長時間の静止試験という拘束を利用することで、Open sky 環境ではリファレンスは誤差 2[mm]以内で求まっており、Narrow sky 環境ではリファレンスは誤差 1[cm]以内で得られているものとする。試験によって得られる測位結果は Open sky 環境下で数ミリメートル～数センチメートル級であり、Narrow sky 環境下では数センチメートル～数メートル級であると予想できる。そのため、提案手法および RTKLIB による測位精度を評価する上で、上記のリファレンスの精度は十分であると考ええる。加えて本提案手法の評価と同時に、同じく RTKLIB による GPS と QZSS の複合測位を行うことで、一般的に利用されている手法と本提案手法との、測位精度と測位率の比較を行う。

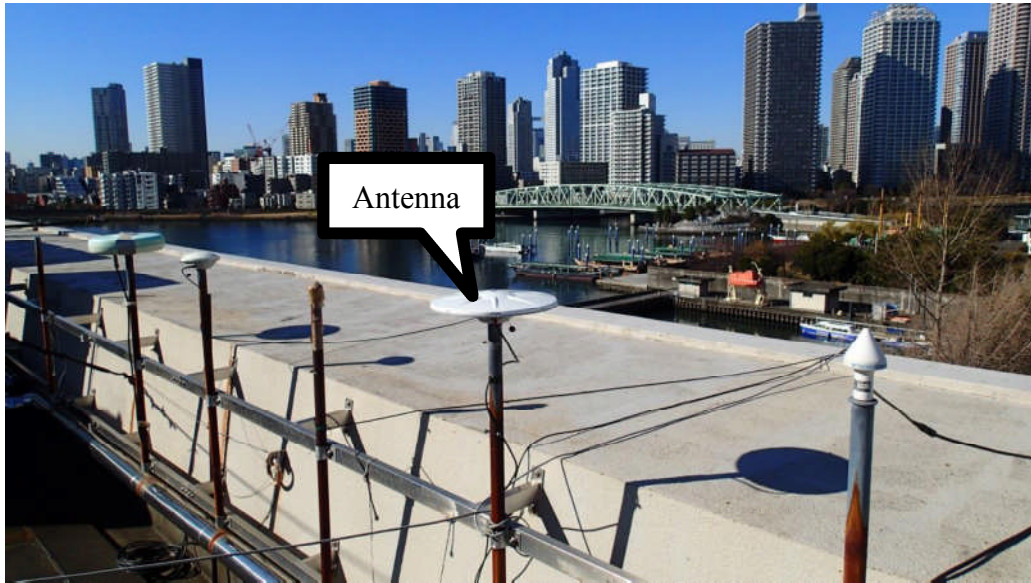


(a) Positioning place.

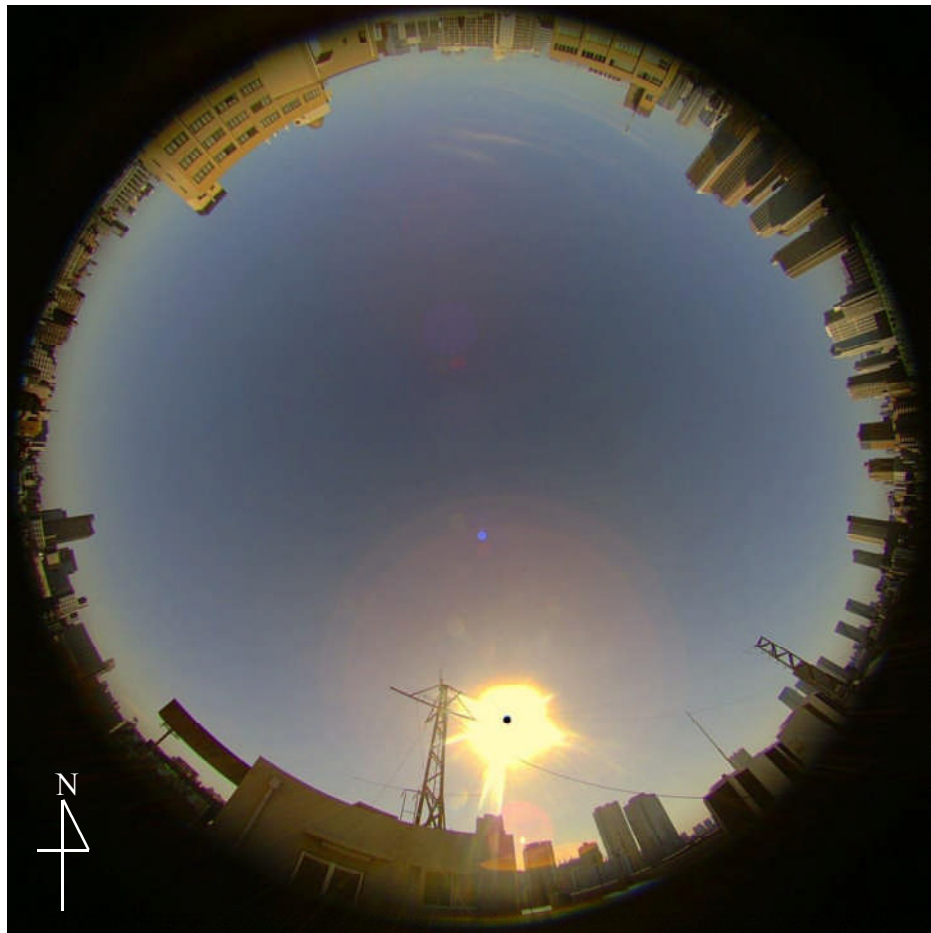


(b) Sky image.

Fig. 4.2 Base station.



(a) Positioning place.



(b) Sky image.

Fig. 4.3 Open sky evaluation test environment.



(a) Positioning place.



(b) Sky image.

Fig. 4.4 Narrow sky evaluation test environment.



Fig. 4.5 GNSS antenna.



Fig. 4.6 GNSS receiver.

Table 4.4 Specification of GNSS antennas.

Antenna model	Zephyr Geodetic 2 Antenna	
Provider	Trimble	
Size	mm	343 × 343 × 76
Weight	g	1360
Gain without cable	dB	50

Table 4.5 Specification of GNSS receivers.

Receiver name		NetR9
Provider		Trimble
Max. tracking	Channel	440
Signal type	GPS	L1 C/A, L2C, L2P, L5
	QZSS	L1 C/A, L1C, L1-SAIF, L2C, L5, LEX
	Galileo	E1 CBOC, E5A, E5B, E5AltBOC
	BeiDou	B1, B2, B3
	GLONASS	G1, G2

4・4・3 評価試験結果 (Open sky)

本試験は Open sky 環境で静止状態の測位を行った。試験時の衛星配置と試験時間中の LOS 衛星数について、図 4.7, 図 4.8 にそれぞれ示す。図 4.7, 図 4.8 に示すように、本環境は衛星を遮蔽するものが少なく、観測した衛星の数も、測位に必要な衛星数 4 基を大きく上回っており、GNSS 測位にとって理想的な環境である。この時試験条件として、衛星仰角 30[deg]を下回る衛星は測位に利用していない (仰角マスク 30[deg])。

Open sky 環境における提案手法を用いた測位結果と、比較として RTKLIB による測位結果の、東西方向のリファレンスとの残差を図 4.9 に示す。この時、図 4.9 はリファレンスを原点とした East-North 二軸平面での残差量である。また、FIX 解の残差の標準偏差 (STD: Standard deviation), および二乗平均平方根 (RMS: Root mean square) を表 4.6 に示す。図 4.9, 表 4.6 によると、本提案手法は RTKLIB と比較して、若干測位精度が劣るものの、本提案手法の水平 RMS は 16[mm]であり、十分センチメートル級の高精度測位ができていることが確認できる。それに対して、RTKLIB による測位結果は、水平 RMS で 4.5[mm]と、非常に高精度であった。

また、本試験はリファレンスの位置がセンチメートル級で得られているため、LMS 法による AR の正解値を、基準局と移動局の位置関係から計算することが可能である。そこで、本試験の間の FLOAT 解を含む全て測位解について AR の正解値を計算すると、LMS 法によるアンビギュイティ決定の正解率 (AR success ratio) は 100%であった。また、第 2・1・3 項で述べるレシオテストによって測位解の信頼性を評価した結果、本提案手法の FIX 率は 99.91%であり、高い利用性が確認できる。表 4.7 に本提案手法と RTKLIB による FIX 率と、本提案手法のアンビギュイティ決定の正解率を示す。以上の結果より、open sky 環境のような理想的な環境で、提案手法が十分に機能し、高精度測位が可能であることが確認できた。

また、図 4.9, 表 4.6 によると、Open sky での提案手法による測位誤差は、RTKLIB を用いた測位誤差の約 4 倍である。これは、本提案手法における測位では、GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou 間で ISB を持ち、これらを推定することで測位を行っているため、図 4.9 に現れる誤差は ISB の推定誤差であると考えられる。それに対して RTKLIB による測位は、GPS と QZSS のみを用いた測位を行っている。QZSS は GPS に対して互換性を持っており同一のシステムとしてみなせるため、ISB が存在しない測位が可能である。そのため、RTKLIB による測位は提案手法と比較して精度が良いと考える。

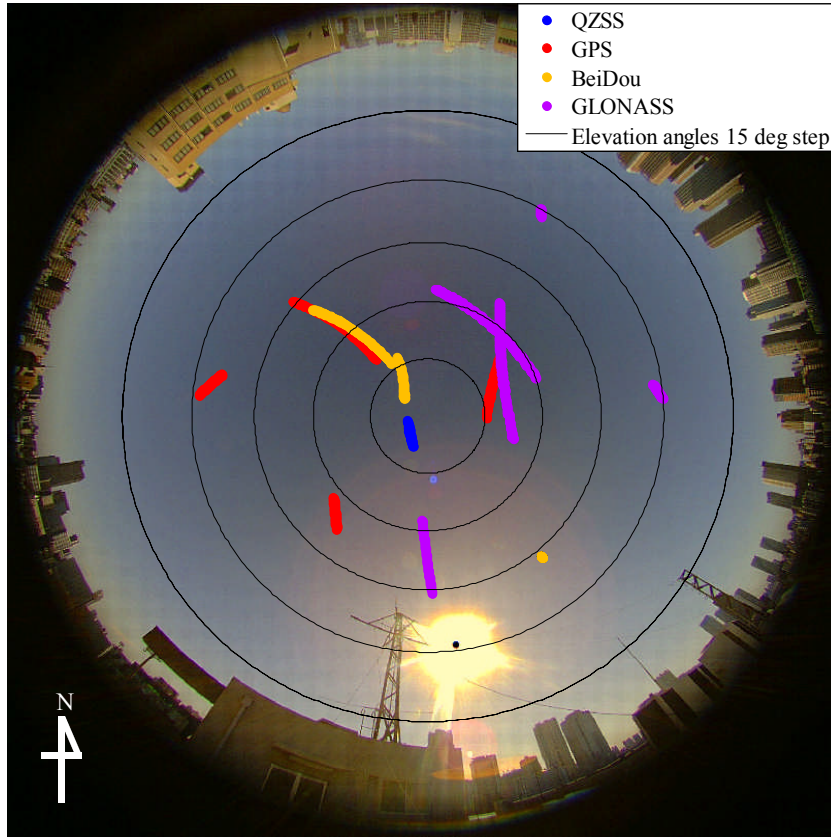


Fig. 4.7 Satellites position (Open sky).

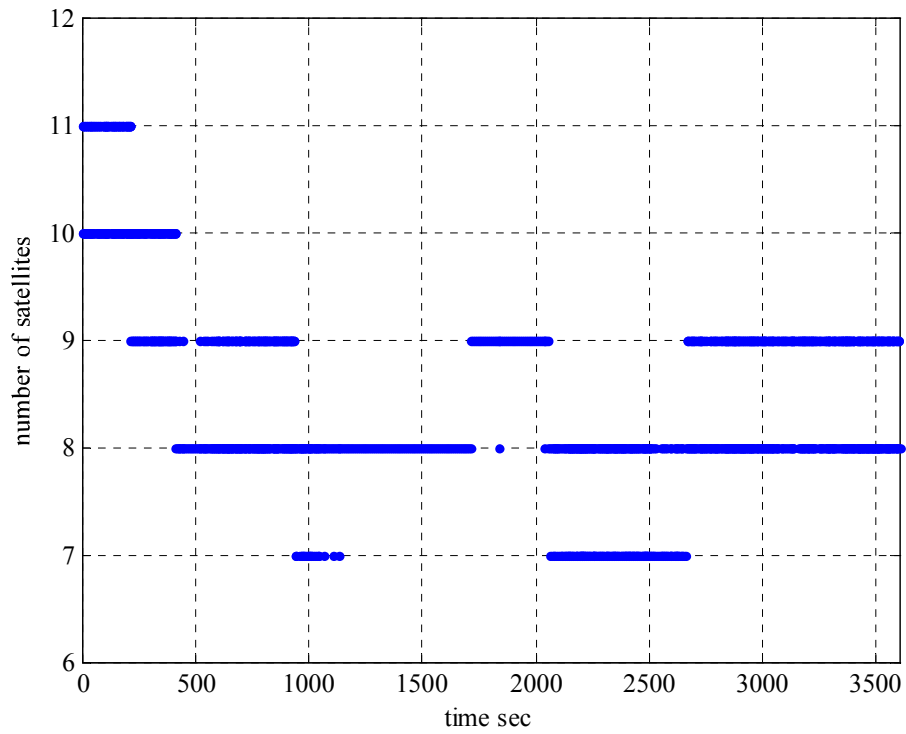


Fig. 4.8 Number of LOS satellites.

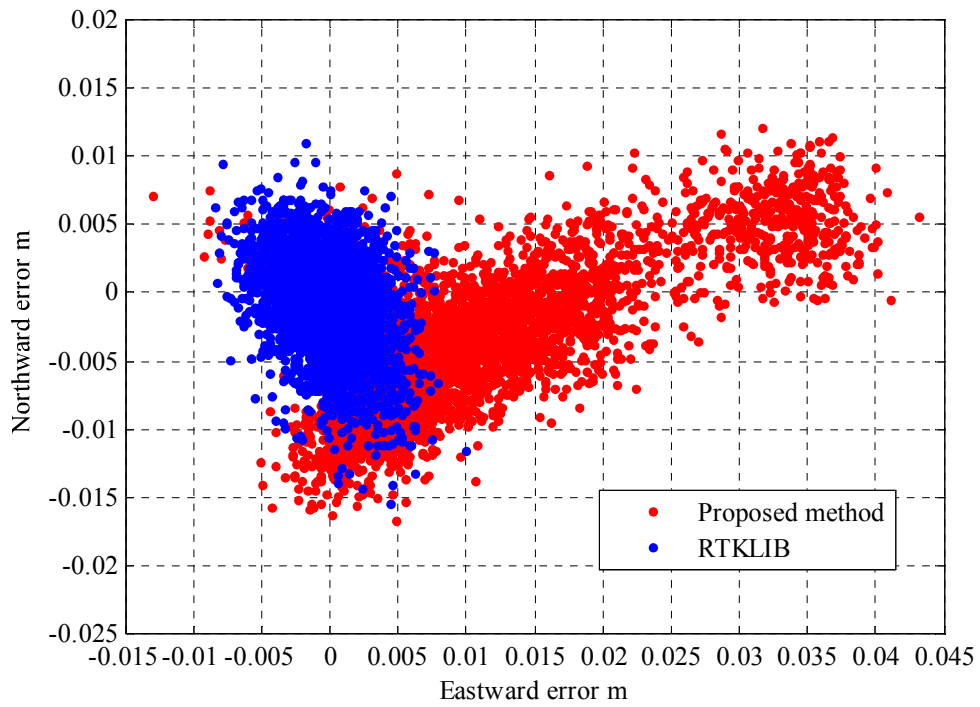


Fig. 4.9 Positioning error by proposed method and RTKLIB.

Table 4.6 Positioning error by proposed method and RTKLIB.

Method			Proposed	RTKLIB
Solution	Measure	Direction	Error mm	Error mm
FIX	STD	East	9.8	2.6
		North	5.3	3.4
		Altitude	13.8	7.9
	RMS	East	15.0	2.6
		North	6.2	3.6
		Altitude	36.3	8.1
		Horizontal DRMS	16.3	4.5

Table 4.7 FIX and AR success ratio by proposed method and RTKLIB.

Method		Proposed	RTKLIB
FIX ratio	%	99.9	100.0
AR success ratio	%	100.0	—

4・4・4 評価試験結果 (Narrow sky)

Narrow sky 環境での試験について述べる。試験時の衛星配置，試験時間中の可視衛星数について，図 4.10，図 4.12 にそれぞれ示す。Narrow sky での実験では，短時間の経過でも衛星が建物の影に入ってしまうため，本評価試験では NLOS 衛星判別を行う。ここで，図 4.10 からわかるように，周辺障害物は仰角が高く，赤外全周カメラでは副鏡があるため，本環境では正確な NLOS 衛星判別ができない。そこで，本評価試験では，魚眼カメラによる障害物抽出を行う。本試験は静止しているため，第 3 章で述べる手法をそのまま適用することはできないが，k-means 法を用いて分割したクラスタを手作業で空領域と障害物領域識別することで障害物情報を抽出する（図 4.11）。図 4.12 に示す衛星数は，図 4.11 による NLOS 衛星判別後の衛星数である。また，従来のマルチ GNSS 測位と本提案手法による，主衛星として定義されていない衛星数，すなわち，測位に利用可能な衛星数について，図 4.13，図 4.14 に示す。

図 4.10，図 4.12 からわかるように，本環境は空の多くを建物に囲まれているために，LOS 衛星の確保が困難である。そのため，図 4.8 に示す Open sky に比べ，全体を通じて LOS 衛星が少なくなっている。また，測位に利用可能な衛星について図 4.13 によると，従来のマルチ GNSS 測位では，各 GNSS にそれぞれ主衛星を定義しているため，図 4.12 の受信した衛星数と比較して非常に少なくなっている。特に，測位に利用可能な衛星数が全ての時間で 4 基未満であるため，従来のマルチ GNSS 測位では測位不可能であることがわかる。それに対して本提案手法では，図 4.14 によると全ての時間が 4 基以上となっており，本提案手法を利用することで，測位の利用性向上が期待できることがわかる。

次に，提案手法と RTKLIB による測位結果を，リファレンスを中心とした East-North 二軸平面での残差量で図 4.15 に示し，リファレンス付近の拡大図を図 4.16 に示す。また，測位結果を表 4.8 に示す。表 4.8 に示すように，本提案手法による測位の結果は水平 RMS で 42[mm]であり，Narrow sky 環境としては非常に高精度に測位ができている。また，FIX 率について，RTKLIB が 0%となるような厳しい測位環境であるにもかかわらず，本提案手法の FIX 率は 92.7%であり，測位の利用性向上が実現できている。加えて，LMS によって求めたアンビギュイティの内，アンビギュイティ決定の正解率は 98.3%であった。つまり，1.7%のアンビギュイティ誤決定があり，ミス FIX が生じた。図 4.15 内の提案手法について確認できる外れ値 (outlier) が上記のミス FIX である。これらのミス FIX 解については，メートル級の非常に大きな測位誤差が発生しているため，実運用下では慣性センサ系等と複合することで除去可能であるため，大きな問題にならないと考える。

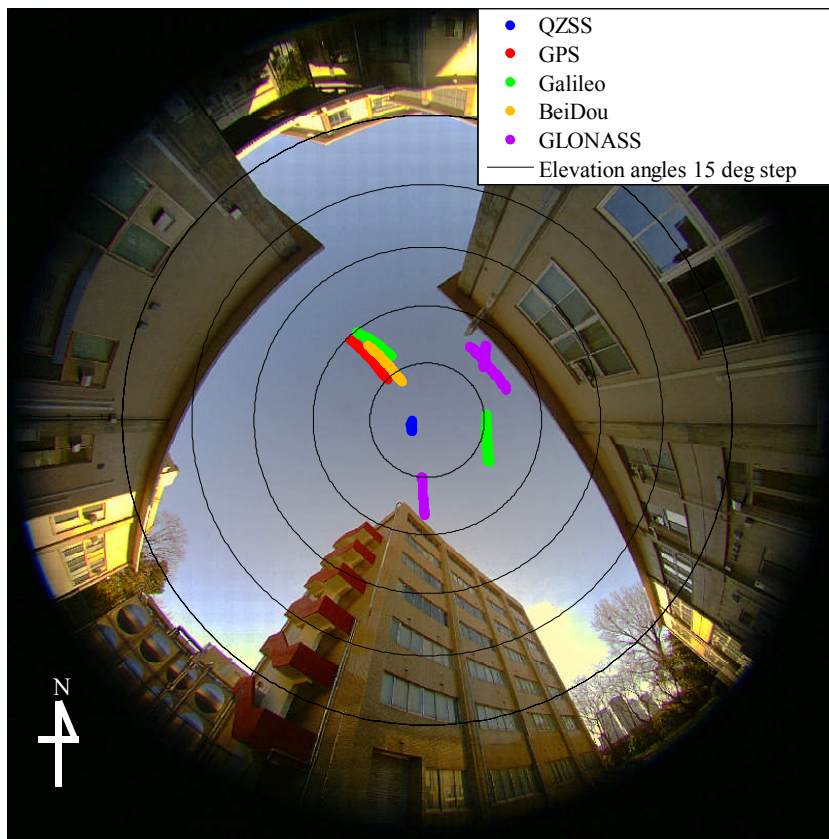


Fig. 4.10 Satellites position (Narrow sky).

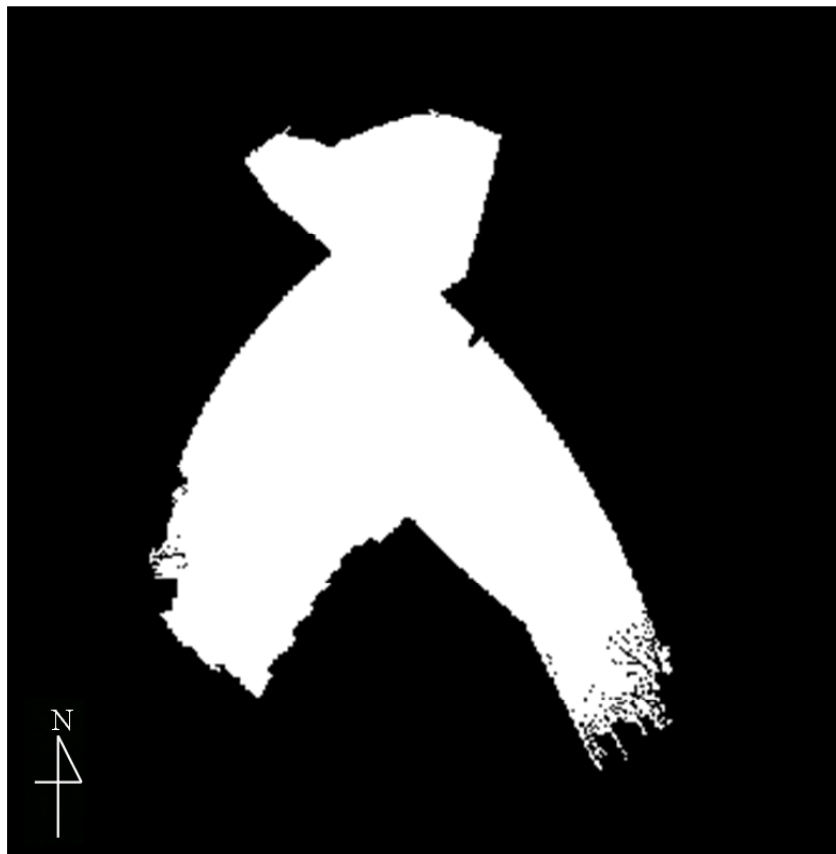


Fig. 4.11 Obstacles detection by fish-eye camera.

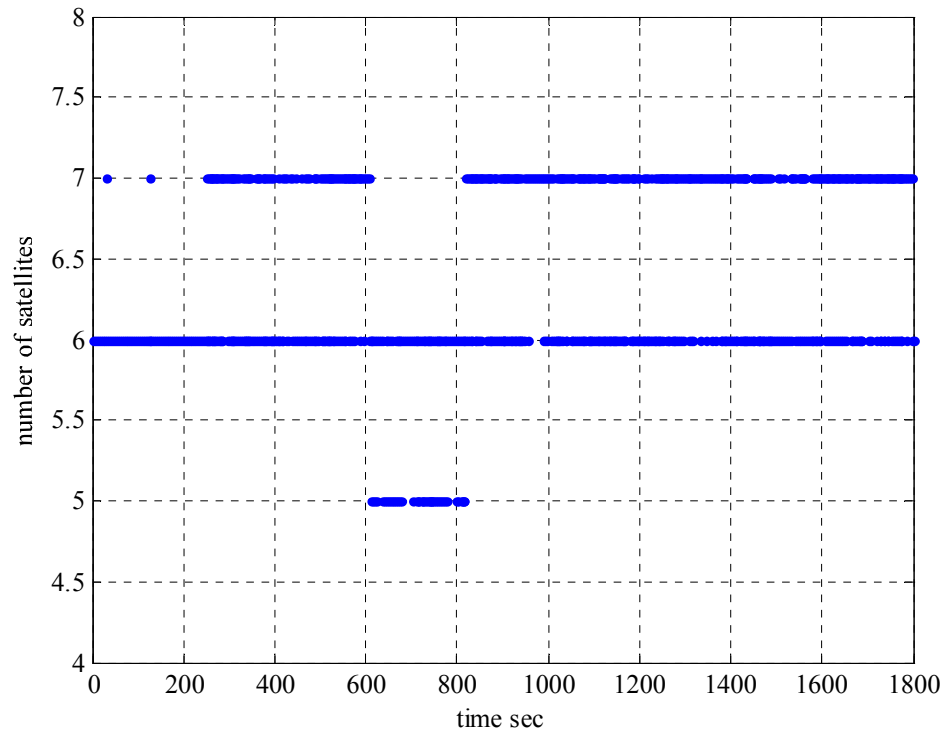


Fig. 4.12 Number of LOS satellites.

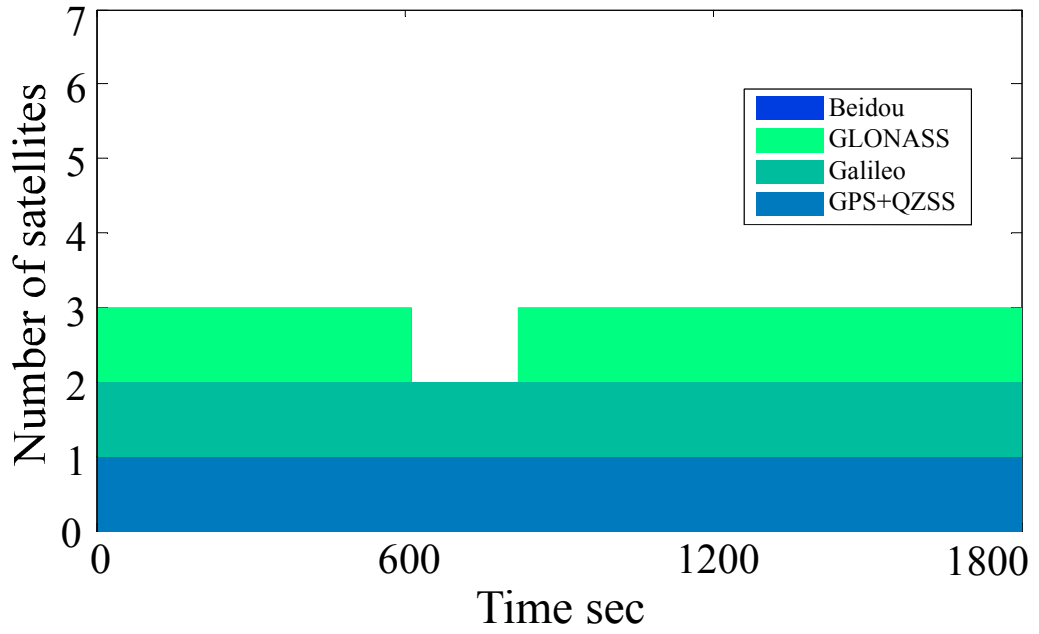


Fig. 4.13 Number of positioning satellites in conventional Multi-GNSS.

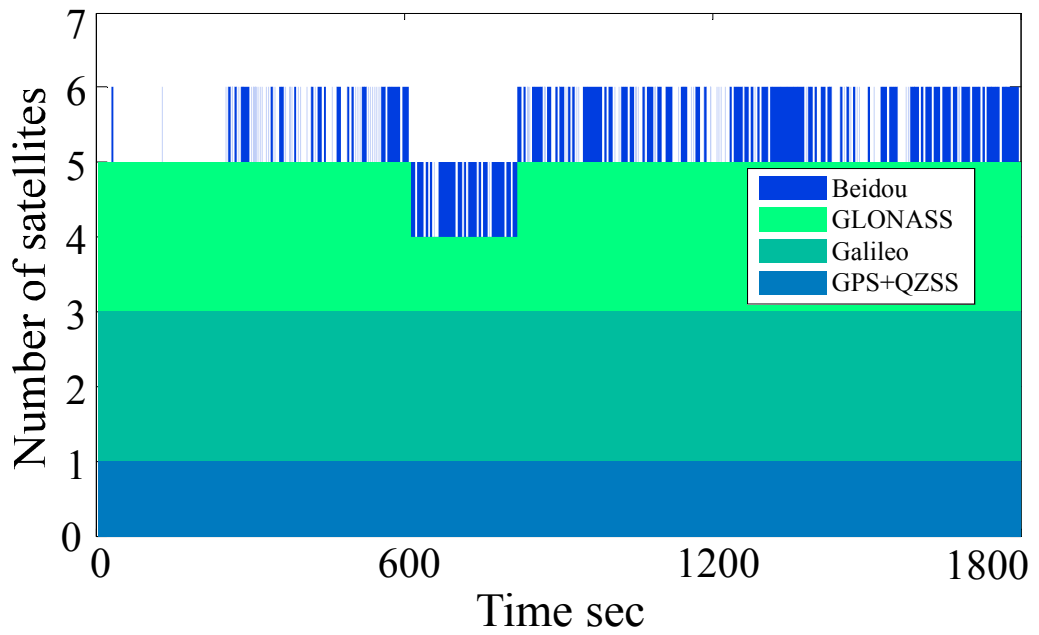


Fig. 4.14 Number of positioning satellites in the proposed multi-GNSS.

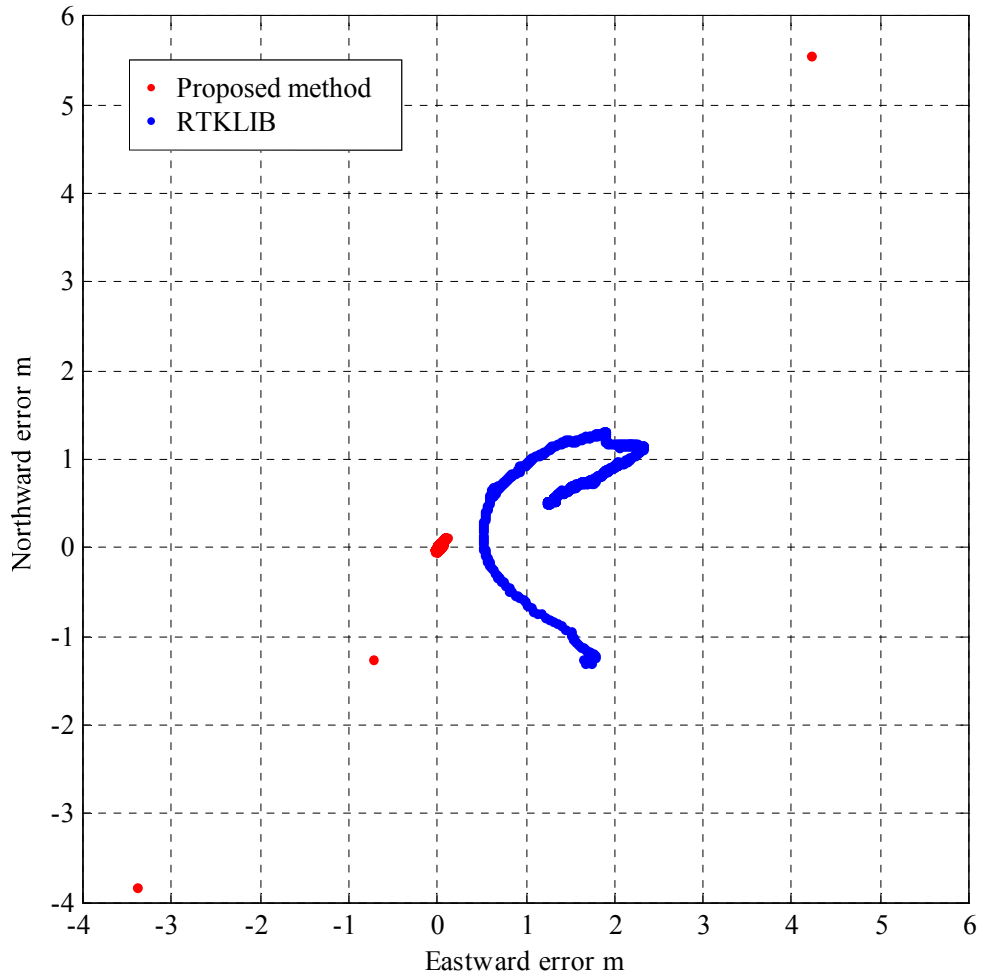


Fig. 4.15 Positioning error by proposed method and RTKLIB.

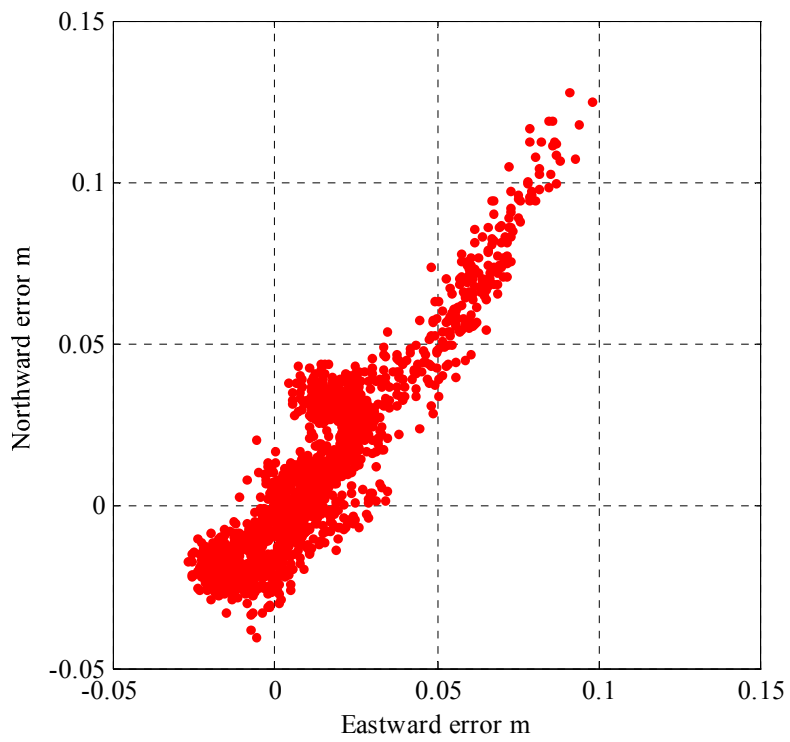


Fig. 4.16 Positioning error by proposed method.

Table 4.8 Positioning error by proposed method and RTKLIB.

Method			Proposed	RTKLIB
Solution	Measure	Direction	Error mm	Error mm
FIX	STD	East	24.2	434.5
		North	30.3	424.7
		Altitude	136.9	924.3
	RMS	East	26.8	1626.6
		North	32.1	860.6
		Altitude	182.7	1001.5
		Horizontal DRMS	41.9	1842.8

Table 4.9 FIX and AR success ratio by proposed method and RTKLIB.

Method		Proposed	RTKLIB
FIX ratio	%	92.7	0.0
AR success ratio	%	98.3	—

4・5 まとめ

従来のマルチ GNSS 測位では、各 GNSS にそれぞれ主衛星を定義するため、測位に利用可能な衛星数が減少するという課題があった、そこで本提案手法では、QZSS をただ一つの主衛星とする測位手法を提案することで、衛星数減少の低減を図った。この手法のための要点は、QZSS を主衛星にすること、二重差を作る際に事前に主衛星の一重差アンビギュイティを推定しておくこと、主衛星の一重差アンビギュイティの推定には LEX 信号を利用した新しいワイドレーン法を利用すること、ISB を推定することである。

評価試験では、理想的な測位環境である Open sky 環境と、都市部と同様に衛星が遮蔽されやすい Narrow sky 環境において静止測位を行った。その結果、Open sky 環境で、本提案手法がセンチメートル級の高精度測位手法として十分な測位精度を持っていることを確認した。また、Narrow sky 環境では、NLOS 衛星による測位精度の劣化を避けるため、魚眼カメラを用いた NLOS 衛星判別手法を適用した。その結果 Narrow sky 環境では、本提案手法による衛星数の減少を低減する効果を確認し、また Narrow sky のような高精度測位が困難な環境でも高い測位精度（水平 RMS: 4.2[cm]）と利用性（FIX 率: 92.7%）を持つことを確認した。

以上によって、本論文で提案した都市部環境下における高精度かつ利用性のある測位手法の有効性を、評価試験により確認した。

5. 結論

5・1 本論文の成果

本研究では、都市部における高精度かつ利用性の高いGNSS測位を実現することを目的として、マルチGNSS測位の効果的な測位手法について述べた。

GNSS測位は地球上の絶対位置を高精度に取得することができることから、カーナビゲーションシステムやパーソナルナビゲーションシステムをはじめとして、様々な測位アプリケーションとして利用されている。特に相対測位等の高精度測位は、測量やIT施工、自動計測車両等のインフラ整備分野での活躍が期待されている。しかしながら、インフラ整備に関する需要が大きい都市部において、すなわち、高い建物等により囲まれた環境では直接波を受信できるLOS衛星数が極端に減少して測位精度が悪化する。この課題の大きな原因は、建物等の障害物によって測位信号が遮蔽されるNLOS衛星が頻出し、NLOS衛星を適切に判別して、測位演算からその信号を除外することが困難であることに起因する。また、複数のGNSSを複合する場合にも、従来手法では、システム毎に主衛星を定義してシステム間誤差を補正する必要があったため、システム数が増えても、利用可能な衛星数が十分に増加しない課題があった。この結果、従来手法では、たとえ複数GNSSを用いた場合でも、都市部では高精度な測位は困難なままであった。

そこで本研究では、主衛星を各GNSSにそれぞれ定義することなく、ただ一つの主衛星としてQZSSを利用した測位手法を提案することで、都市部におけるマルチGNSS測位の精度と利用性の向上を図った。

加えて本手法では、NLOS衛星のマルチパス誤差による測位精度の悪化を防ぐことを目的として、NLOS衛星を判別する手法を測位に適用している。NLOS衛星を判別する手法として、従来赤外全周カメラを用いたNLOS衛星判別が提案されており、この手法はアンテナ周辺の障害物情報を直接検出することが可能であるため、本手法に適用することで測位精度の向上が見込める。しかしながら、赤外全周カメラは反射型の光学系を利用しているため、高仰角の衛星に対してNLOS衛星判別を適用することができないことが課題であった。そこで本研究では、反射型の光学系を利用しない可視光魚眼カメラを用いたNLOS衛星判別手法を提案することで、超高層ビル街や建物隣接地点のような障害物の仰角が非常に高くなる環境でもNLOS衛星判別を可能にした。

まず第3章では、NLOS衛星判別手法について述べた。従来手法である赤外全周カメラを用いたNLOS衛星判別手法に限らず、NLOS衛星判別手法全般に共通する課題として、単一のGNSSを利用した測位の場合、NLOS衛星棄却による過剰な衛星数の低下が測位精度をかえって悪化させる場合があった。そこで本研究では、マルチGNSS複合による衛星数増加によって、この課題を低減することが可能であることを示した。

加えて、赤外全周カメラが特殊なセンサを用いているため一般的な利用が困難であるという課題と、反射型光学系の副鏡によって障害物の観測不可能領域が存在しているため、高仰角のNLOS衛星の判別が不可能であり、周辺障害物の仰角が高い都市部での測位を対象とした本研究では利用することができないという課題があった。そこで本研究では、一般的に利用が容易であり、反射型光学系の副鏡による観測不可能領域を持たない可視光魚眼カメラを用いたNLOS衛星判別手法を提案した。魚眼カメラを用いる本手法は、赤外全周カメラと異なり、カメラ画像上から建物等の障害物を識別する必要があった。そこで、

本手法では、カメラ画像の色情報に基づくクラスタリングと、SIFT 特徴点の追跡による識別を行った。つまり、クラスタリングによって画像を大まかに領域分割し、カメラが移動した際に空と比較して距離の近い障害物の移動量が大きいことを利用して、空と障害物の領域を識別した。同時に行った評価試験では、市街地において本手法による障害物識別が動作することを確認し、NLOS 衛星判別が行えることを確認した。

次に第4章では、準天頂衛星を主衛星として用いたマルチ GNSS 測位の効果的な測位手法の提案について述べた。従来、マルチ GNSS 測位は、システム間の誤差を除去することを目的として、各 GNSS にそれぞれ1基ずつ主衛星を定義していた。そのため、測位に利用可能な衛星数が減少してしまうという課題があった。そこで本研究では、QZSS をただ一つの主衛星とする測位手法を提案することで、主衛星定義による衛星数の減少を緩和し、測位の利用性向上を図った。加えて、提案手法の中で QZSS の一重差アンビギュイティの決定に QZSS の LEX 信号を利用する新しいワイドレーン法を提案することで、測位精度の向上を図った。また、静止評価試験では、NLOS 衛星からのマルチパス波の混入による測位精度の悪化を防ぐことを目的として、NLOS 衛星判別を行った。利用する NLOS 衛星判別手法は、試験環境に高仰角の障害物が存在したため、第3章で提案す可視光魚眼カメラを用いた NLOS 衛星判別手法を利用した。評価試験の結果、本手法を適用することで、準天頂衛星を主衛星とすることでマルチ GNSS 測位の都市部環境下における衛星数が向上し、測位の利用性と精度の向上を実現した。

5・2 今後の課題

本研究では、魚眼カメラを用いた NLOS 衛星判別とマルチ GNSS 測位を行うことで、都市部における GNSS 測位の利用性と精度の向上を実現した。本論文によって得られた成果をもとに、今後の課題と展望を述べる。

(a) NLOS 衛星判別の改良

本研究では、NLOS 衛星判別を一般的な可視光魚眼カメラを用いて行っている。そのため、従来の赤外全周カメラを用いた NLOS 衛星判別手法と比較して、カメラ画像中から障害物領域を識別するプロセスが重要である。本研究では障害物領域の識別方法として、カメラの移動による障害物の視差を特徴点の追跡によって求めている。そのため、カメラが移動中においてのみ NLOS 判別が可能である。停止中にはこの方法は利用出来ないが、一時停止などでは停止前に事前に撮影した画像から視差が得られるため、本質的には大きな問題とはならない。しかしながら、車両などの停止前に事前に撮影した画像がない場合の走行開始時には視差を得ることは不可能であるため、本手法を適用することができない。人が運転する自動計測車両等では、走行開始時は人間の判断で走行することができるため大きな問題にならないが、人間が全く関与しない場合、自動運転等の車両が始めから自律的に移動しようとする場合に、高精度な自己位置を GNSS から取得しなければならない場合には、何らかの方法で初期位置における予め NLOS 衛星の判別情報を与える必要がある。そのため、移動による障害物の視差を利用しない、車両静止時にも適用可能な NLOS 衛星判別手法が望まれる。

例えば、環境の三次元地図と魚眼カメラ画像のマッチングによって魚眼カメラ画像中の

障害物領域を判別する手法が考えられる。この手法では三次元地図中の魚眼カメラの位置推定にパーティクルフィルタ⁽⁶²⁾を用い、クラスタリングしたカメラ画像と三次元地図の重なり度からパーティクルの尤度を決定することで、三次元地図中の魚眼カメラの位置を推定する。そしてその位置から再度魚眼カメラ画像と三次元地図を比較し、魚眼カメラ画像中の障害物クラスタを特定する。ここで、この手法はあくまで画像ベースで障害物を判定する手法であるため、パーティクルフィルタによる三次元地図内におけるカメラ位置の推定に多少誤差が発生したとしても、魚眼カメラ画像内の障害物クラスタさえ正確に識別することができれば問題とならない。同様の理由から、利用する三次元地図に関する精度の要求も低い。三次元地図の建物の高さに関する情報に多少（1[m]程度）の誤差があったとしても、魚眼カメラ画像上に投影する際には数[*pixel*]程度にしかならず、あくまでクラスタの障害物識別さえ正確に行うことができれば問題とならない。そこで、この環境の三次元地図に Google Earth⁽⁶³⁾等の建物モデルが利用できると考える。つまりこの手法であれば、インターネット回線と魚眼カメラによって容易に NLOS 衛星が判別可能であると考えられる。

(b) 主衛星選択のマルチシステム化

本研究では、主衛星を QZSS に限定している。その理由は、QZSS が搭載している LEX 信号を利用することで、新しいワイドレーン法を利用するためであった。しかしながら、主衛星を QZSS に限定していると、QZSS が観測できないタイミングや、アジア・オセアニア地域以外では QZSS を観測することができないため、本手法を利用することができない。そのため、QZSS 以外の GNSS も本手法で主衛星として利用することができるようにすることが望ましい。QZSS 以外の主衛星として、GNSS の中で有力な候補は、欧州の Galileo である。Galileo は、一般に利用可能な E1, E5a, E5b, E5a-b 信号の他に、商業目的の E6 帯信号の配信が予定されている。商業目的であるため、課金者以外は信号内の情報を利用することはできないと思われるが、しかし E6 帯測位信号の補足自体は可能であり、その搬送波位相観測値も利用することができると思われる。すると、E6 信号を利用した新しいワイドレーン法を利用することができるようになるため、本手法の主衛星選択において、QZSS の代替としての利用が期待できる。Galileo を代替として利用することが可能になれば、本手法は地域や時間に限定されず、より一般的な手法として利用することができるようになる。このように、今後も発展の余地のある他の GNSS を積極的に利用することで、本手法はより有用になると考える。

(c) 従来手法との複合

第 4 章の QZSS を用いたマルチ GNSS 測位の利用性と精度の向上手法は、主衛星の選択方法、すなわち、二重差観測値の作成方法が主要な点である。そのため、二重差観測値を作成したあとの二重差アンビギュイティの決定や測位演算について、従来のような手法⁽⁶⁴⁾を適用することが可能である。そのため、本手法は従来のような多様な測位手法の向上に貢献することができる。さらに、本研究では、二重差アンビギュイティの決定に LMS 法を用いたが、最小二乗不確定性無相関化調整 (LAMBDA: Least-Squares Ambiguity Decorrelation Adjustment) 法⁽⁶⁵⁾⁽⁶⁶⁾等の従来のような有用なアンビギュイティ決定法を利用することで、本手法は更に高精度化が期待できる。

本論文では魚眼カメラを用いた NOLS 衛星判別手法と QZSS を用いたマルチ GNSS 測位の効果的な測位手法の提案を行った。GNSS は今後もさらに新しい衛星が打ち上がり、また新しい手法が提案されることが期待できる分野である。そのため、マルチ GNSS を利用したアプリケーションは今後更に増えていくことが予想され、今後もさらなる発展が望まれる。

謝辞

本論文をまとめるに当たり、指導と助言を頂いた多くの方に厚くお礼申し上げます。ここに、研究を進めるにあたり終始助言をして頂いた株式会社豊田中央研究所 目黒 淳一氏を始めとする皆様方に深くお礼申し上げます。ここに列挙できなかった関係者の方々にも、この場を借りて深く感謝の意を表します。

また、本論文の作成にあたり、終始ご指導を賜りました早稲田大学理工学術院 天野 嘉春教授に厚くお礼申し上げます。加えて、論文審査にあたり、ご助言を頂きました早稲田大学 河合 素直名誉教授、早稲田大学理工学術院 武藤 寛准教授、東京海洋大学 久保 信明准教授に厚くお礼申し上げます。さらに、共に研究を進め、苦楽を共にした、早稲田大学理工学術院総合研究所（理工研）天野嘉春研究室の皆様にも深く感謝致します。

参考文献

- (1) Lei Wang, Paul D. Groves, and Marek K. Ziebart, "Multi-Constellation GNSS Performance Evaluation for Urban Canyons Using Large Virtual Reality City Models," *Journal of Navigation*, Volume 65, Issue 03, July 2012, pp 459-476.
- (2) Erik Schonemann, Matthias Becker, Tim Springer, "A new Approach for GNSS Analysis in a Multi-GNSS and Multi-Signal Environment," *Journal of Geodetic Science*, Volume 1, Number 3, September 2011, pp. 204-214.
- (3) 山本 春生, 鉄道分野における衛星測位の現状と QZSS への期待, 測位航法学会, GPS/GNSS STMPOSIUM 2011, 2011, pp. 69-75.
- (4) Gerhard Beutler, "The GPS as a tool in global geodynamics," *GPS for Geodesy, Lecture Notes in Earth Sciences* Volume 60, 1996, pp 379-407
- (5) 岡本 修, 除染工事における GNSS の利用, 測位航法学会, GPS/GNSS STMPOSIUM 2012, 2012, pp. 163-166.
- (6) GEONET (GNSS 連続観測システム), 国土地理院
http://terras.gsi.go.jp/geo_info/geonet_top.html
- (7) 国土交通省, T S ・ G N S S を用いた盛土の締固め 管理要領, 平成 24 年 3 月.
- (8) Dinesh MANANDHAR, Ryosuke SHIBASAKI, "VEHICLE-BORNE LASER MAPPING SYSTEM (VLMS) FOR 3-D GIS," *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2001. IGARSS '01. IEEE 2001 International, Volume 5, July 2001, pp. 2073-2075.
- (9) Christian Frueh, Siddharth Jain, and Avidesh Zakhori, "Data Processing Algorithms for Generating Textured 3D Building Facade Meshes from Laser Scans and Camera Images," *International Journal of Computer Vision*, Volume 61, Issue 2, February 2005, pp 159-184.
- (10) 辻 求, 入澤 元, 下垣 豊, 今野 達夫, 柴崎 亮介, 趙 卉菁, 東明 佐久良, 山崎 由喜, 吉原 章博, 羽山 和紀, 車両搭載型センサを用いた 3 次元都市空間モデルの自動構築, *GIS-理論と応用*, Vol. 13 No. 1, 2005, pp. 91-98.
- (11) 石川 喜一郎, 屋外環境下における GPS を用いた移動式三次元計測システムに関する研究, 2010.
- (12) 地理空間情報活用推進基本法, 平成 19 年 5 月.
- (13) Eric Abbott, and David Powell, "Land-vehicle navigation using GPS," *Proceedings of the IEEE*, Volume 87, Issue 1, January 1999, pp. 145-162.
- (14) Sebastian Thrun, et al, "Stanley: The robot that won the DARPA Grand Challenge," *Journal of Field Robotics*, Volume 23, Issue 9, September 2006, pp. 661-692.
- (15) Michael Montemerlo, et al, "Junior: The Stanford entry in the Urban Challenge," *Journal of Field Robotics*, Volume 25, Issue 9, September 2008, pp. 569-597.
- (16) 国土庁, 第 5 次 首都圏基本計画, 平成 11 年 3 月.
- (17) Michael S. Braasch, "GPS Multipath Model Validation," *Position Location and Navigation Symposium*, IEEE 1996, April 1996, pp. 672-678.
- (18) Gary A. McGraw, Ryan S.Y. Young, Kristen Reichenauer, Jeff Stevens, and Fred Ventrone, "GPS Multipath Mitigation Assessment of Digital Beam Forming Antenna Technology in a JPALS Dual Frequency Smoothing Architecture," *Proceedings of the 2004 National*

- Technical Meeting of The Institute of Navigation, San Diego, CA, January 2004, pp. 561-572.
- (19) Lionel Garin, Jean-Michel Rousseau, "Enhanced Strobe Correlator Multipath Rejection for Code & Carrier," Proceedings of the 10th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 1997), Kansas City, MO, September 1997, pp. 559-568.
 - (20) Gary A. McGraw, Michael S. Braasch, "GNSS Multipath Mitigation Using Gated and High Resolution Correlator Concepts," Proceedings of the 1999 National Technical Meeting of The Institute of Navigation, San Diego, CA, January 1999, pp. 333-342.
 - (21) M. Irsigler, B. Eissfeller, "Comparison of Multipath Mitigation Techniques with Consideration of Future Signal Structures," Proceedings of the 16th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS/GNSS 2003), Portland, OR, September 2003, pp. 2584-2592.
 - (22) Ziyi Jiang, Paul D. Groves, "NLOS GPS signal detection using a dual-polarisation antenna," GPS solutions, vol. 18 issue 1, January 2014, pp. 15-26.
 - (23) Elliott D. Kaplan, Christopher J. Hegarty, "Understanding GPS: Principles and Applications second Edition", Artech House 2006.
 - (24) Alison Brown and Neil Gerein, "Test Results from a Digital P(Y) Code Beamsteering Receiver for Multipath Minimization," Proceedings of the 57th Annual Meeting of The Institute of Navigation, Albuquerque, NM, June 2001, pp. 872-878.
 - (25) Ziyi Jiang, Paul D. Groves, Washington Y. Ochieng, Shaojun Feng, Carl D. Milner, Philip G. Mattos, "Multi-Constellation GNSS Multipath Mitigation Using Consistency Checking," Proceedings of the 24th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2011), Portland, OR, September 2011, pp. 3889-3902.
 - (26) Dinesh Manandhar, Ryosuke Shibasaki, and Per-Ludvig Normark, "GPS Signal Analysis using LHCP / RHCP Antenna and Software GPS Receiver," Proceedings of the 17th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2004), Long Beach, CA, September 2004, pp. 2489-2498.
 - (27) Ashkan Izadpanah, Cillian O'Driscoll, and Gerard Lachapelle, "GPS Multipath Parameterization using the Extended Kalman Filter and a Dual LHCP/RHCP Antenna," Proceedings of the 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2008), Savannah, GA, September 2008, pp. 689-697.
 - (28) Chun Yang, Alec Porter, "GPS Multipath Estimation and Mitigation Via Polarization Sensing Diversity: Parallel Iterative Cross Cancellation," Proceedings of the 18th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2005), Long Beach, CA, September 2005, pp. 2707-2719.
 - (29) P.D. Groves, Z. Jiang, B. Skelton, P.A. Cross, L. Lau, Y. Adane, I. Kale, "Novel Multipath Mitigation Methods using a Dual-Polarization Antenna," Proceedings of the 23rd International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2010), Portland, OR, September 2010, pp. 140-151.

- (30) Bernhard Hofmann-Wellenhof, Herbert Lichtenegger, Elmar Wasle, "GNSS - Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more," SpringerWienNewYork, 2008.
- (31) Matthew Brenneken, Jade Morton, Chun Yang, and Frank van Graas, "Mitigation of GPS Multipath Using Polarization and Spatial Diversities," Proceedings of the 20th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2007), Fort Worth, TX, September 2007, pp. 1221-1229.
- (32) Maddalena Violetti, Francesco Merli, "New miniaturized microwave cavity for Rubidium atomic clocks," Proceedings of IEEE Sensors 2012, October 2012, pp. 315-318.
- (33) John Nolan, Sergei Gourevitch, and John Ladd, "Geodetic Processing Using Full Dual Band Observables," Proceedings of the 5th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 1992), Albuquerque, NM, September 1992, pp. 1033-1041.
- (34) R. E. Kalman, "A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems," Journal of Basic Engineering, No. 82, Series D, 1960, pp. 35-45.
- (35) M. Pratt, B. Burke, and P. Misra, "Single-Epoch Integer Ambiguity Resolution with GPS-GLONASS L1 Data," Proceedings of the 53rd Annual Meeting of The Institute of Navigation, Albuquerque, NM, June 1997, pp. 691-699.
- (36) M. Pratt, B. Burke, and P. Misra, "Single-Epoch Integer Ambiguity Resolution with GPS L1-L2 Carrier Phase Measurements," Proceedings of the 10th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 1997), Kansas City, MO, September 1997, pp. 1737-1746.
- (37) J. P. Collins, An overview of GPS inter-frequency carrier phase combinations, UNB/GSD, October 1999.
- (38) George Dedes and Clyde Goad, "Real-Time cm-level GPS Positioning of Cutting Blade and Earth Moving Equipment," Proceedings of the 1994 National Technical Meeting of The Institute of Navigation, San Diego, CA, January 1994, pp. 587-594.
- (39) Official U.S. Government information about the Global Positioning System (GPS)
<http://www.gps.gov/>
- (40) GLOBAL POSITIONING SYSTEM STANDARD POSITIONING SERVICE PERFORMANCE STANDARD 4th Edition, September 2008.
<http://www.gps.gov/technical/ps/2007-PPS-performance-standard.pdf>
- (41) GLOBAL POSITIONING SYSTEM PRECISE POSITIONING SERVICE PERFORMANCE STANDARD 1st Edition, February 2007.
<http://www.gps.gov/technical/ps/2007-PPS-performance-standard.pdf>
- (42) IS-GPS-200 Revision H, Navstar GPS Space Segment/Navigation User Interfaces, September 2013.
<http://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-200H.pdf>
- (43) IS-GPS-705 Revision D, Navstar GPS Space Segment/Navigation User Segment L5 Interfaces, September 2013.

- <http://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-705D.pdf>
- (44) IS-GPS-800 Revision D, Navstar GPS Space Segment/Navigation User Segment L1C Interfaces, September 2013.
<http://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-800D.pdf>
- (45) GLONASS Information-analytical centre
<http://glonass-iac.ru/>
- (46) Hein, Guenter W., Wallner, Stefan, "Development and Design of Galileo," Proceedings of the 61st Annual Meeting of The Institute of Navigation, Cambridge, MA, June 2005, pp. 94-142.
- (47) BeiDou Navigation Satellite System
<http://en.beidou.gov.cn/>
- (48) Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), Quasi Zenith Satellite System Navigation Service: Interface Specifications for QZSS (IS-QZSS), ver.1.5, March 2013.
http://qz-vision.jaxa.jp/USE/is-qzss/DOCS/IS-QZSS_15_E.pdf
- (49) 実用準天頂衛星システム事業の推進の基本的な考え方(平成23年9月30日閣議決定)
http://www.kantei.go.jp/jp/singi/utyuu/pdf/kakugi_jun.pdf
- (50) 矢来博司, 準天頂衛星「みちびき」による高精度測位補正技術, 国土地理院, 2010.
- (51) JCMA 情報化施工委員会 みちびき実証 WG, 準天頂衛星(みちびき)の民間利用実証実験, 平成23年6月.
- (52) 株式会社デンソー, 車両用途(運転支援)応用における効果確認に関する実証, 利用実証報告書, 平成23年2月.
- (53) 浪江宏宗, 安田明生, 定点および移動体におけるセンチメートル級の測位の実証, 利用実証報告書, 平成23年11月.
- (54) Mitsunori Kitamura, Taro Suzuki, Yoshiharu Amano, and Takumi Hashizume, "Evaluation for Vehicle Positioning in Urban Environment Using QZSS Enhancement Function," Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.24 No.5, 2012, pp. 894-901.
- (55) Mitsunori Kitamura, Yoichi Yasuoka, Taro Suzuki, Yoshiharu Amano, and Takumi Hashizume, "Path Planning for Autonomous Vehicles Using QZSS and Satellite Visibility Map," Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.25 No.2, 2013, pp. 400-407.
- (56) Richard D. J. van Nee, "GPS Multipath and Satellite Interference," Proceedings of the 48th Annual Meeting of The Institute of Navigation, Dayton, OH, June 1992, pp. 167-178.
- (57) J. Meguro, T. Murata, J. Takiguchi, Y. Amano, and T. Hashizume, "GPS Multipath Mitigation for Urban Area Using Omnidirectional Infrared Camera," IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol.10 Issue 1, Mar. 2009, pp. 22-30.
- (58) J. A. Hartigan, M. A. Wong, "Algorithm AS 136: A K-Means Clustering Algorithm," Journal of the Royal Statistical Society, Series C, Vol. 28 No. 1, 1979, pp. 100-108.
- (59) Chinki Chandhok, Soni Chaturvedi, and A.A Khurshid, "An Approach to Image Segmentation using K-means Clustering Algorithm," International Journal of Information Technology, Volume 1, Issue 1, August 2012, pp. 11-17.
- (60) Tapas Kanungo, David M. Mount, Nathan S. Netanyahu, Christine D. Piatko, Ruth

Silverman, and Angela Y. Wu, "An efficient k-means clustering algorithm: analysis and implementation," *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Volume 24, Issue 7, July 2002, pp. 881-892.

- (61) RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning
<http://www.rtklib.com/>
- (62) Frank Dellaert, Dieter Fox, Wolfram Burgard, and Sebastian Thrun, "Monte Carlo localization for mobile robots," *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Volume 2, May 1999, pp. 1322-1328.
- (63) Google Earth
<http://www.google.co.jp/earth/>
- (64) Peter Teunissen, Peter Joosten, and Christian Tiberius, "A Comparison of TCAR, CIR and LAMBDA GNSS Ambiguity Resolution," *Proceedings of the 15th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 2002)*, Portland, OR, September 2002, pp. 2799-2808.
- (65) Peter J. G. Teunissen, "GPS Carrier Phase Ambiguity Fixing Concepts," *GPS for Geodesy*, 1998, pp. 319-388.
- (66) P. J. Teunissen, P. J. De Jonge, and C. C. J. M. Tiberius, "PERFORMANCE OF THE LAMBDA METHOD FOR FAST GPS AMBIGUITY RESOLUTION", *NAVIGATION, Journal of The Institute of Navigation*, Vol. 44, No. 3, Fall 1997, pp. 373-400.
- (67) Udo Roßbach, Günter W. Hein, Bernd Eissfeller, "Experiences in DGPS/DGLONASS Combination" *GPS Trends in Precise Terrestrial, Airborne, and Spaceborne Applications*, *International Association of Geodesy Symposia Volume 115*, 1996, pp 197-201
- (68) Udo Rossbach and Gunter W. Hein, "Treatment of Integer Ambiguities in DGPS/DGLONASS Double Difference Carrier Phase Solutions," *Proceedings of the 9th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 1996)*, pp. 909 - 916, September 1996.
- (69) M. Pratt, B. Burke, P. Misra, "Single-Epoch Integer Ambiguity Resolution with GPS-GLONASS L1 Data," *Proceedings of the 53rd Annual Meeting of The Institute of Navigation*, Albuquerque, NM, June 1997, pp. 691-699.
- (70) M. Pratt, B. Burke, P. Misra, "Single-Epoch Integer Ambiguity Resolution with GPS-GLONASS L1-L2 Data," *Proceedings of the 11th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 1998)*, Nashville, TN, September 1998, pp. 389-398.

研究業績

学術誌掲載論文	○Mitsunori Kitamura, Taro Suzuki, Yoshiharu Amano, and Takumi Hashizume, Improvement of GPS and GLONASS Positioning Accuracy by Multipath Mitigation Using Omnidirectional Infrared Camera, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.23 No.6, pp. 1125-1131, 2011
	○Mitsunori Kitamura, Taro Suzuki, Yoshiharu Amano, and Takumi Hashizume, Evaluation for Vehicle Positioning in Urban Environment Using QZSS Enhancement Function, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.24 No.5, pp. 894-901, 2012
	鈴木太郎, 北村光教, 天野嘉春, 橋詰匠, GNSS マルチパス波判別を複合した精密単独測位による屋外移動ロボットの位置推定, 計測自動制御学会論文集, Vol.48, No.7, pp.399-405, July 2012
	○Mitsunori Kitamura, Yoichi Yasuoka, Taro Suzuki, Yoshiharu Amano, and Takumi Hashizume, Path Planning for Autonomous Vehicles Using QZSS and Satellite Visibility Map, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.25 No.2, pp. 400-407, 2013
国際会議発表論文	Taro Suzuki, Mitsunori Kitamura, Yoshiharu Amano, and Takumi Hashizume, High-Accuracy GPS and GLONASS Positioning by Multipath Mitigation using Omnidirectional Infrared Camera, Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 311-316, May 2011
	○Mitsunori Kitamura, Taro Suzuki, Yoshiharu Amano, and Takumi Hashizume, Evaluation for vehicle positioning in urban environment using QZSS L1-SAIF augmentation, Proceedings of SICE Annual Conference (SICE) 2011, pp.491-494, 13-18 September 2011
	Taro Suzuki, Mitsunori Kitamura, Yoshiharu Amano, and Takumi Hashizume, Multipath Mitigation Using Omnidirectional Infrared Camera for Tightly Coupled GPS/INS Integration in Urban Environments, Proceedings of the 24th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2011), Portland, OR, pp. 2914-2922, September 2011
国内会議発表論文	○北村 光教, 鈴木 太郎, 天野 嘉春, 橋詰 匠, 環境の三次元地図と赤外全周カメラを用いたパーティクルフィルタによる屋外位置推定, 第 28 回日本ロボット学会学術講演会, 2010/09
	鈴木 太郎, 北村 光教, 天野 嘉春, 橋詰 匠, 赤外全周カメラを用いたマルチパス削減による GPS/GLONASS 複合測位の高精度化, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2010 講演論文集, 1A1-D19, 2010/05
	○北村 光教, 鈴木 太郎, 天野 嘉春, 橋詰 匠, 準天頂衛星(みちびき)を利用した都市部環境下における移動体測位精度評価, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2011, 2A1-M01, 2011/05
	○北村 光教, 鈴木 太郎, 天野 嘉春, 橋詰 匠, 三次元地図と赤外全周カメラを用いた屋外環境における車両の三次元位置姿勢推定, 第 16 回ロボティクスシンポジウム, 2011/03
	鈴木 太郎, 北村 光教, 天野 嘉春, 橋詰 匠, マルチパス判別を複合したタイトカップリング GPS/INS 複合航法による移動体位置推定, 第 29 回日本ロボット学会学術講演会 講演予稿集, 3I2-6, 2011/09
	大西 正光, 北村 光教, 鈴木 太郎, 天野 嘉春, 橋詰 匠, 金子 幸司, GPS と GLONASS 複合による移動体測位の信頼性の向上に関する研究, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012, 2P1-R09, 2012/05
	鈴木 太郎, 間野 直哉, 北村 光教, 天野 嘉春, 橋詰 匠, 複数の一周期 GPS 受信機を用いた小型 UAV の高精度姿勢計測, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012 講演論文集, 1A2-B08, 2012/05
	○北村 光教, 安岡 洋一, 鈴木 太郎, 天野 嘉春, 橋詰 匠, 準天頂衛星と可視衛星数地図を用いた自律移動システムの経路計画, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012 講演論文集, 1A2-F10, 2012/05

国内会議発表論文	○北村 光教, 鈴木 太郎, 天野 嘉春, 橋詰 匠, 準天頂衛星の L1-SAIF を利用した GPS 単独測位の高精度化, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012 講演論文集, 2A1-J09, 2012/05
	○北村 光教, 太田 哲平, 渡邊 研, 明比 建, 天野 嘉春, つくばチャレンジ 2013 における自律移動ロボットの開発, 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門 講演会 SI2013, 1A1-4, 神戸, 2013/12
	太田 哲平, 北村 光教, 石川 貴一郎, 天野 嘉春, 稜線画像と数値標高モデルを用いたスカイラインマッチングによるローバの自己位置同定手法, 第 13 回「運動と振動の制御」シンポジウム講演論文集, A02, 2013/08,
	渡邊 研, 太田 哲平, 北村 光教, 天野 嘉春, 橋詰 匠, 小型 UAV における GPS ジャイロ/IMU 複合を用いた姿勢計測手法の構築, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013 講演論文集, 1P1-H02, 筑波, 2013/05
	○北村 光教, 渡邊 輝, 天野 嘉春, 橋詰 匠, 準天頂衛星 LEX 信号を用いたタイトカップリング型 GNSS/IMU 複合航法の構築, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013 講演論文集, 1P1-H04, 筑波, 2013/05
	○北村 光教, 竹下 知宏, 大西 正光, 天野 嘉春, 橋詰 匠, 樹木隣接環境下における GPS マルチパス誤差調査に関する研究, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013 講演論文集, 1P1-H05, 筑波, 2013/05
	○北村 光教, 太田 哲平, 渡邊 研, 明比 建, 天野 嘉春, 早稲田大学 天野研究室 つくばチャレンジ 2013 における自律移動ロボットの開発, つくばチャレンジシンポジウム 2013, 筑波, 2014/1
	○北村 光教, 渡邊 研, 太田 哲平, 天野 嘉春, 準天頂衛星を利用した都市部環境下における マルチ GNSS 複合測位の利用率向上, 平成 26 年度 測位航法学会 全国大会, 2014/04
	渡邊 研, 太田 哲平, 北村 光教, 天野 嘉春, GPS 不可視衛星棄却のための可視光魚眼カメラ画像を用いた障害物抽出, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014 講演論文集, 1P1-W08, 2014/05
明比 建, 北村 光教, 大津 恭平, 大槻 真嗣, 正 天野 嘉春, スカイラインマッチングによる方位角推定を用いた惑星探査ローバの自己位置補正, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014 講演論文集, 1P2-L06, 2014/05	