キネマティック測位と仮想基準点方式

An Explanation on Kinematic Positioning and Virtual Reference Station

小白井亮一*

Ryoichi KOJIROI

本小論は、3回に分けて掲載するGPS干渉測位に関する考察及び解説のうちの第3回目である。

10. 静から動へ

本項では、もう一つの重要な干渉測位手法であるキネマティック測位について説明する。

10.1 キネマティック測位の考え方

事柄の本質を明確にするため、「6. 観測データから行路差を求める」と同様、各受信機の時計が完全に合っている（二重位相差を使わない）などの条件下で、キネマティック測位の考え方について考察する。

まず、「行路差における整数値バイアスが確定した状態とは何か」、このことから確認する。これは、すでに「6. 観測データから行路差を求める」で示した（例えば、図10b参照）。繰り返すと、整数値バイアスが確定したとは、ある瞬間において両地点で観測される電波の（波数の）絶対的な対応関係がとれた状態になったことである（図26）。したがって、この“ある瞬間”以後、受信機が衛星からの電波を連続的に観測して波数をカウントしていれば、常に整数値バイアスが確定した状態（絶対的な対応関係がとれた状態）を保ち続ける。このとき、たとえ、受信機（アンテナ）が多少ふらつこうとも、瞬間々の対応関係はとれているはずであるし、もし、その瞬間ごとに基線解析を行ったなら

ば、アンテナのふらついた軌跡が浮かび上がるだろう。

さて、この「多少ふらつくこと」をもっと拡大的に解釈すると「移動させること」に行き着く。最初に整数値バイアスを確定し、連続的に観測しながら移動させること、これがキネマティック測位の基本的な考え方である。つまり、観測点間で整数値バイアスを最初に確定してしまえば、後は連続的に観測することにより、一方の観測点を移動させても整数値バイアスは確定し続け（波数の絶対的な対応関係はとれ続け）、この状態にあっては、どこにいても波数の差（位相差）から行路差が決まり、基線解析をして、その位置が求まることになる。

図26のように絶対的な対応関係がとれて一度正しい

図26 絶対的な対応関係

*国土地理院

Geographical Survey Institute

〒305-0811 つくば市北郷1番

「写真測量とリモートセンシング」VOL. 42, NO. 4, 2003

行路差が求まれば、以降連続観測していれば、たとえ観測点が動いてもその観測結果から正しい行路差が求まり続ける。このことは、二重位相差を用いる実際の場合には、「二重位相差の整数値バイアスを一度確定してしまえば、正しい行路差の差が求まり、以降連続観測をしていけば、たとえ観測点が動いてもその観測結果から正しい行路差の差が求まり続ける」といえる。もちろん、正しい行路差の差が求まり続けている限り、それによる双曲線（三次元の場合は回転双曲面）どうしの交点としての移動点の位置は決まり続ける（8.2 二重位相差の意味とそれによる未知点の決定」参照）。

10.2 いろいろなキネマティック測位

通常キネマティック測位では、基準となる一方の受信機を既知点に置き、何らかの方法で整数値バイアスを短時間に確定させた後、もう一方の受信機を移動させて測位する。このとき、測位したい地点において、数秒間であるが、受信機を静止させる。このため、この測位方法を「ストップアンドゴー（stop and go）方式」と呼ぶことがある。

また、上述の説明では「アンテナの揺れの軌跡」を例示したが、キネマティック測位では、波数の読み出しごとに基線を求めるといふ、連続的な測位（「連続キネマティック測位」）も実用化されている。

さらに、無線などの通信機器を使って、波数のカウンタ値を送信して処理すれば、リアルタイムでの干渉測位が可能となる。この方法は、「RTK（Real Time Kinematic）-GPS」と呼ばれる。

ところで、キネマティック測位は原理的にはスタティック測位と同じである。したがって、その精度もほぼ同じものと考えられる。しかし、スタティック測位の場合、長時間の観測により多数のデータが得られ、これらを使うことで、電離層や水蒸気などによる誤差要因が平均化され、より高い精度が出るとされている。一方、キネマティック測位は一発勝負である。このため、測位の精度はやや落ちるといわれている。

キネマティック測位では、最初に短時間で整数値バイアスを確定するために、いろいろな工夫がなされる。一番単純な方法は、移動させる受信機も既知点に持ってくることである。基準となる受信機と移動させる受信機が共に既知点にあれば、基線ベクトルが事前に判明していることと同じである。この基線ベクトルを使えば、ごく短時間の観測で多重解から真の解を見つけ

ることができ、求めたい整数値バイアスも決まる。

整数値バイアス確定の短時間化は、なかなか奥が深い。次に説明する OTF は、このための究極の手法といわれている。

なお、キネマティック測位において、最初に行う整数値バイアスの確定のことを、「初期化」ないしは「初期設定」と呼ぶことがある。

10.3 何でもありの OTF

キネマティック測位を語るとき、今や必ず耳にするものが「オンザフライ（OTF：On The Fly）」である。英語としてのオンザフライには、読んで文字通りの「飛行中」のほかに、「急いで」という意味もある。“（あちこちで）急いで” 整数値バイアスを決められることから命名されたのであろう。ところで、この OTF 自体は、キネマティック測位そのものではない。短時間で整数値バイアスを決定する手法である。

OTF では、これまでに開発された、あらゆる手段を使って、短時間のうちに整数値バイアスを決定する。もちろん、「短時間に整数値バイアスを決定する」とは、「短時間に多重解の中から真の解を見つける」ことと同じである。

この方法では、まずは、衛星から送られてくるコードを使う。具体的には、DGPS を行う。これにより、真の解の探索範囲を数 m くらいにまで絞り込む。最近では、DGPS の精度が向上し、条件がよければ 1 m くらいまで絞り込めるようである。

DGPS で範囲を絞った後で効率的に整数値バイアスを決める手法として、「高速スタティック法」が挙げられる（コラム参照）。OTF では、もちろん、高速スタティック法も使われている。そして、短時間化という観点から、実はもっと強力な方法も実用化されているのである。

10.4 L2帯の活用

この強力な手法について説明する。これには、L1帯と L2帯の電波、すなわち 2 周波の観測が必要となる。先に、L2帯は、電離層補正に必要であると説明したが、実は整数値バイアス決定の短時間化にも有効なのである。

この説明の前段として、多重解の間隔について知ることが必要である。この間隔は、用いている電波の波長が関係する。すなわち、二重位相差を用いた場合、

コラム 高速スタティック法

24個の衛星の配置が完了した現在、より短時間に整数値バイアス（真の解）を決める方法がある。実際の干渉測位には上空に四つの衛星が必要であるが、今ではそれ以上の数の衛星が望めることがある。話を簡単にするために、仮に八つの衛星が利用できる状況を考える。この八つの衛星を適当に四つずつ、A、B という二つのグループに分ける。このとき、A グループによる多重解も計算できるし、また B グループによる多重解も計算できる。計算した両グループの多重解が同じ位置にあるという保証は全くないが、唯一例外がある。真の解である。これは A グループの多重解にも B グループのそれにも同一の位置にある解として存在するはずである。したがって、両グループの多重解の中で位置の一致するものが求める未知点となる。以上のことは、「6. 観測データから行路差を求める」における説明に則せば、A グループの衛星を移動前、B グループのそれを移動後のものと見なして、解を特定すると解釈できる。

この方法であれば、短時間の観測（原理的には1回の観測）で測位ができる。この方法は「高速スタティック法」と呼ばれている。ただし、この方法を実際に用いる場合には、解の特定の確実性を高めるために、あらかじめ DGPS など真の解の存在範囲を絞った上で探し出すといった工夫がなされている。

高速スタティック法は、その原理から考えて、必ずしも八つの衛星を同時に補足する必要はなく、それより少ない場合でも（オーバーラップを許容して）複数のグループを括ることができれば可能である。また、グループ数も二つではなくそれ以上の数で括れば、それだけ真の解を見つけ易くなる。

互いの多重解は一致することはない。しかし、真の解は別である。真の解は、L1帯の多重解の一つであるとともに L2帯の多重解の一つでもある。したがって、真の解では、両者の多重解が一致していなければならない。逆に、両者の多重解のなかで一致したものを見つければ、それが真の解である。L1帯と L2帯は同時に受信できるので、この方法を使えば、非常に短時間のうちに真の解を特定して、整数値バイアスを決定することができる。

これで一件落着、と言いたいだが、実際には問題がある。L1帯と L2帯の波長は、それぞれ19cm と24.4cm でありかなり近い値である。したがって、これらによる多重解の間隔は似通った大きさとなり、一致するもの（真の解）を速やかに間違いなく見出すことは難しい（図27 a）。真の解を短時間かつ確実に同定するには、それぞれの多重解の間隔をより異なるようにすべきである。このためには、波長がかなり異なる電波どうしを使う必要がある（図27 b）。

10.5 幻の電波

さて、せっかく受信できる L1帯と L2帯の電波である。この二つを上手に使うて、整数値バイアスの決定に役立てたい。実は、ある工夫によりこれらを巧妙に活用できる。この二つの電波から、計算上ではあるが、実際の電波の波長より長い、あるいは短い、いわば仮想の電波ともいべきものを作り出すことができるのである。

これを理解するには、位相変化の速さと波長（ないしは周波数）の関係を知る必要がある。この関係は、基本的には図3に示したとおりである。この図の右側にある円内のバーの回転で示したように、波（電波）の位相変化は、回転角の変化として捉えることができる。波の速度が一定とした場合、回転角が早く変化する場合は、波長の短い（周波数の高い）波になるし、それが遅い場合には、波長の長い（周波数の低い）波

a 電波の波長にあまり差異がない場合（L1とL2帯）

b 電波の波長に差異がある場合（L1帯とワイドレーン）

図27 電波の波長と多重解

右の円中のバーを左回転させれば、それに応じて電波が振動するものとする。
このとき、1秒間に電波が進む距離(速さ) c は一定とする。

1秒間に電波が進む距離(速さ)を一定値 c とするならば、a の場合の波長は、 $c/2$ であり、b の場合のそれは、 $2c$ である。
周波数は、1秒間の波の振動回数であり、a の場合は、2 回／秒、b のそれは、0.5 回／秒であり、それぞれのバーの回転速度に等しい。波の波長 λ 、周波数 f 、速さ c の間には、 $f = c/\lambda$ が成り立つ。

図28 電波の波長，周波数，速度の関係

となる。簡単な例を示す。図28 a は、角度が1秒間に2回転(720°)変化する場合の波である。一方、図28 b は、1秒間に1/2回転(180°)変化する場合である。両図から前者の方が、より短い波長(より高い周波数)の波になることが分かる。

以上のことをまとめる。波の速度が一定の場合、短時間で位相が変化するということは、波長の短い(周波数の高い)波であることと同じであり、逆に、波長の短い波では、位相がより速く変化する。また、長い時間で位相が変化するということは、波長の長い(周波数の低い)波であることと同じであり、逆に、波長の長い波では、位相がより遅く変化する。

L1帯とL2帯の話に戻す。L1帯(波長19cm)の方がL2帯(波長24.4cm)より波長が短いので、より速く位相を変化させている。ここで、新たな発想をする。L1帯とL2帯の電波、それぞれの位相を足し合わせた新たな位相の電波(以下、仮称としてNL帯(の電波)と呼ぶ)を考えるのである。このNL帯は、L1帯やL2帯よりも速く位相を変化させることは容易に想像できるであろう。図28の右側、回転角を変化させるイメージで考えた場合、NL帯は、L1帯とL2帯のそれぞれの回転速度を足し合わせた速度で回転することになる。

足し算といえば、引き算とくのが世の常である。そこで、L1帯とL2帯の位相の差を考える(これを仮りにWL帯(の電波)と呼ぶ)。このWL帯は、L1帯やL2帯よりも遅く位相を変化させる。回転角を変化させるイメージで考えれば、L1帯とL2帯のそれぞれの回転速度の差がWL帯のそれになる。

10.6 幻の電波の波長

それでは、NL帯とWL帯の波長がどの程度になるかを計算してみる。図28から分かるように、円内のバーの回転速度と波(電波)の周波数は同じである。そこでまず、NL帯とWL帯のバーの回転速度(すなわち周波数)を求める。このとき、基本となる式は波長、波の速度、周波数の関係を表す式である。波長を λ 、波の速度を c 、周波数を f とすると、

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (19)$$

あるいは

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (20)$$

が成り立つ。

L1帯の周波数(回転速度)を求める。L1帯の波長は、

コラム 電子基準点と地殻変動の検出

電子基準点は、日本列島の地殻変動の監視などを目的として、国土地理院によって整備された常設のGPS受信機である。高さが5mほどのステンレス製タワーの頂部に受信アンテナが取り付けられている(写真参照)。電子基準点は、衛星からの電波を24時間受信しており、観測データは、茨城県つくば市にある国土地理院測地観測センターへ送信され、ここで解析が行われる。この結果は、国土地理院のホームページ (<http://www.gsi.go.jp>) で公開されている。現在、日本全国で約1000点の電子基準点が稼働しており、近い将来、1200点程度まで増設される予定である。

電子基準点によって検出された地殻変動の例を紹介する。伊豆半島東部の伊東市の沖合では、1978年頃から群発地震が繰り返し発生するようになった。1989年7月の活動では海底噴火(手石海丘の噴火)も発生した。1990年代に入っても群発地震は頻発した。

一方、90年代中頃からこの地域の地殻変動が電子基準点のデータによって補足できるようになった。下記グラ

フは、1996年10月1日～1997年4月1日までの観測結果である。この間、1996年10月中～下旬と1997年3月上～中旬に群発地震があった(前者の活動での地震回数:約6000回、後者の回数:約9300回)¹⁰⁾。グラフから群発地震時に初島と小室山間の基線が伸びていることが見てとれる(この基線は手石海丘付近を横切る)。

この付近の群発地震はマグマが地下浅所に貫入したために発生すると考えられている¹¹⁾。多くの基線で観測されたデータなどを使うことにより、マグマ貫入の形状や量などがモデル計算され、この地域のテクトニクスを理解する上で役立っている。

群発地震が発生すると、活動の推移、特にその終息に関する評価が社会的に求められる。電子基準点のデータは、このような評価の際にも重要な役割を果たしている。

下記グラフにおいて、斜距離(ほぼ水平方向)に比べて比高(高さ方向)の方がデータのばらつきが大きい。これは、「9. 二重位相差に関する考察」で記した原因によるものと考えられる。

受信アンテナは、ステンレス製タワー頂部の白いドーム状のカバー内にある。

電子基準点

基線長変化グラフの測線位置図

19.029…cm であるので、これを0.19029m とする。電波の速度（光速）は、 3×10^8 m/s とする。(20)式から L1 帯の周波数（回転速度） f_{L1} は、次のように求まる。

$$f_{L1} = \frac{3 \times 10^8}{0.19029} = 15.765 \times 10^8 \text{ 回/秒}$$

L2 帯の周波数（回転速度） f_{L2} は、その波長が24.421…cm であるので、これを0.24421m とすると、次のようになる。

$$f_{L2} = \frac{3 \times 10^8}{0.24421} = 12.284 \times 10^8 \text{ 回/秒}$$

NL 帯の周波数（回転速度） f_{NL} は、 f_{L1} と f_{L2} の和である。両者の和をとる。

$$f_{NL} = (15.765 + 12.284) \times 10^8 = 28.049 \times 10^8 \text{ 回/秒}$$

(19)式から NL 帯の波長 λ_{NL} は、

$$\lambda_{NL} = \frac{3 \times 10^8}{28.049 \times 10^8} = 0.1069 \text{ m} = 10.69 \text{ cm}$$

となる。

両者の差である WL 帯の波長も同様にして求まる。

すなわち、WL 帯の周波数（回転速度） f_{WL} は、

$$f_{WL} = (15.765 - 12.284) \times 10^8 = 3.481 \times 10^8 \text{ 回/秒}$$

であり、波長 λ_{WL} は、

$$\lambda_{WL} = \frac{3 \times 10^8}{3.481 \times 10^8} = 0.8618 \text{ m} = 86.18 \text{ cm}$$

となる。

結局のところ、NL 帯の波長は、約11cm、WL 帯のそれは、約86cm である。両者のうちで、特に WL 帯については、その波長が86cm と長い。このため、二重位相差をとった場合、WL 帯の多重解の間隔は、1 m 以上になるだろう。これは、ちょうど図27 b に示した状態である。これであれば、直ちに真の解を見出すことが可能となる。なお、正式には、WL 帯を「ワイドレーン」、NL 帯を「ナローレーン」という。

説明が長くなったが、OTF では、初期化を短時間で確実にを行うために、このようなワイドレーンも使われている。

11. 仮想基準点方式

11.1 仮想基準点方式の必要性

最近、電子基準点を既知点（基準局）として使った RTK-GPS が注目されている（電子基準点についてはコラム参照）。これを行えば、リアルタイムで数 cm 以上の精度での測位が可能となる。

電子基準点は、平均20～30km 間隔で設置されている。ところが、RTK-GPS を精度よく効率的に行うためには、電子基準点からの距離が10km 程度以内であることが必要とされる。これ以上電子基準点から離れると、上空の影響（電離層や水蒸気の影響）など、様々な誤差要因が入ってくるため、測位精度が低下するといわれている。また、初期化にも時間がかかる。

この問題を解決してくれる技術が、「仮想基準点方式」である¹²⁾。この方式では、複数の基準局（電子基準点）における観測データを計算機処理することにより、RTK-GPS の移動観測点近傍に仮想基準点を作り出す。つまり、実在の観測データ（電子基準点のデータ）から、仮想基準点で観測されるであろうデータを計算するのである。そして、この計算されたデータと移動観測点での観測データを使って干渉測位を行う。仮想基準点の設置位置は、通常、移動観測点で単独測位を行うことで求める。単独測位は通常10m 程度の誤差を有する。したがって、移動観測点から10m 程度以内のところに仮想基準点を設置できることになる。ただし、仮想基準点の位置決定に必ずしも単独測位を用いる必要はない。仮想基準点は、移動観測点付近の座標を持てば、どこに設置してもよい。現地において、すぐに適当な座標を求められるということで単独測位を使うのである。

11.2 仮想基準点方式の手順

地上が1次元空間の場合で、仮想基準点方式を考える（図29）。簡単のため、以下の考察では各受信機の時計が完全に合っている（すなわち二重位相差を使わない）ものとする。地上が1次元空間であれば、この方式の計算に必要な基準局（以下、基準局を電子基準点の場合とする）は1点で済む。この電子基準点が地点 A にある。一方、移動観測点は地点 A' にある。そして、地点 A' で単独測位を行ったところ、地点 A'' の座標が求まったものとする。もちろん、単独測位の誤差のため、地点 A'' の座標と地点 A' のそれは一致しない。この地点 A'' に仮想基準点を設定する。

このとき、地点 A'' の座標と地点 A の座標を使えば、この2点間の距離 a が求まる。この a は、基線ベクトルと見ることができる。地点 A において、ある位相を観測した時刻を T とすれば、「時刻 T に地点 A で観測される位相を発射したときの衛星の位置」、「基線ベクトル a」、そして「地点 A の座標」を使って、(1)式から

図29 仮想基準点方式

地点AとA''における行路差 Δd が求まる。

説明が逸れるが、時刻Tに地点Aで観測される位相を発射したときの衛星の位置は、仮想基準点方式のみならず、通常の干渉測位においても必要なものである（「7. もう一つのアプローチ」参照）。この位置を決めるためには時刻Tでの衛星の位置を使う。具体的には、この求めるべき衛星の位置から地上の観測点までにかかった電波の到達時間を計算して、その時間分だけ、時刻Tでの衛星の位置を補正する（引きもどす）。曆により衛星の位置は時刻の関数として表すことができるため、このような計算が可能となる。この計算の出発点で必要となる、求めるべき衛星の位置はもちろん未知である。このため、この近似値を最初に与えた上で繰り返し計算を行い適切な値へと収束させて解としている（詳細は、文献4）ないしは6）の「光路差方程式」の説明参照）。

さて、行路差 Δd が求まれば、これと地点Aの位相から地点A''において時刻Tに観測されるであろう位相が計算できる。すなわち、仮想基準点での位相が計算されるのである。

最後に、この計算された位相と移動観測点で観測された位相を使って干渉測位を行い、地点A'の位置を求める。これが仮想基準点方式の考え方と手順である。

実際の地上は3次元空間である。したがって、この場合の仮想基準点方式には、電子基準点が最低3点必要となる。

11.3 仮想基準点方式の利点

ところで、これまでの説明では、図29を使って、いわば仮想基準点方式の手順を示しただけである。この説明では、なぜわざわざ仮想基準点を設置するのか、特にその利点が必ずしも明確ではない。実は、仮想基準点方式を使うと、電子基準点から離れていても、上空の影響（電離層や水蒸気の影響）がある程度補正され、測位精度がそれなりに確保されるのである。

水蒸気の影響を例にして、補正の考え方を説明する。地上が1次元空間の場合、仮想基準点方式に必要な電子基準点の数は1である。ここでは、この方式の利点を説明するため、二つの電子基準点を使うことを考える（この理由は、以下で明らかになる）。これらが地点AとBにあるとし、また大気中の水蒸気量は、電子基準点の間隔（20～30km）以上の範囲で一様に変化しているものとする（図30）。

地点Aの上空には、湿った空気があり、ここで観測された位相はその影響を受けている。このため、これを使って計算される仮想基準点（地点A''）の位相は、地点Aでの状況を反映したものになる（図30 a）。一方、地点Bの上空には乾いた空気があり、ここで観測された位相は水蒸気の影響をあまり受けていない。このため、これを使って計算される仮想基準点の位相は、地点Bの状況を反映したものとなり、先の結果とは異なる（図30 b）。

これら二つの結果を調整して仮想基準点の位相を求

図30 仮想基準点方式の利点（水蒸気の場合）

める。例えば、距離 a , b に応じたウェイトをおいて平均化すれば、地点 A, B での影響をうまく加味した位相が得られるであろう。図30の場合であれば、空気の状態について、地点 A と B の中間くらいの影響を受けた位相が計算され、仮想基準点付近の上空の状況が反映されたものとなる。このように計算された仮想基準点の位相を使えば、地点 A' 付近で行う干渉測位の精度は高くなる。

もちろん、このような恩恵を受けるのは、水蒸気量の変化が電子基準点の配置間隔以上に及び、なおかつその変化の割合がほぼ一様な場合である。局所的な変化、例えば地点 A の上空付近のみに非常に湿った空気がある場合などの影響は補正できない(水蒸気の場合、往々にしてこのようなことがある)。

電離層の補正の考え方についても、水蒸気量を電子密度に置き換えれば、ほぼ同様である。もちろん、局所的な電離層の不均質は補正できない。

現実の世界における仮想基準点方式では、最低3点の電子基準点を使う。このため、これらの電子基準点の間隔を越えた広範囲に及ぶ上空の影響は、ほぼ補正されるであろう。つまり、点在する電子基準点における観測値でうまく内挿補間できるような、規模と変化を有する影響であればうまく対応できる。しかし、そうではない局所的な影響には対応できない¹³⁾。

12. おわりに

測量技術の急速な進展に伴い、測量技術者が新技術の考え方を十分に把握できないまま使用するという状況、いわゆる技術のブラックボックス化が広がっている。もちろん、測量技術者は技術の開発者ではない。しかし、その一方で全くのユーザに留まってもいけない。新技術の改良や適用分野の開拓などには、その考え方、特に計測の幾何学を中心とした部分について、ある程度の理解が必要である。

測量に関する新技術や旧来知見について、できるだけ新たな切り口で平易に解説すること、この探求も測量分野における重要な研究課題であろう。

謝 辞

一連の小論を起こすにあたり、国土地理院測地観測センターの畑中雄樹地震調査官、地理地殻活動研究センターの神谷泉主任研究官、宗包浩志研究官には素稿を読んでいただくと同時に有益な議論をしていただいた。また、同研究センターの飛田幹男主任研究官には、干渉 SAR について、いろいろと教示をいただいた。さらに、査読者からは構成等について有用な意見をいただいた。以上の方々に、心よりの謝意を表する。

参考文献

- 10) 気象庁地震予知情報課：伊豆半島およびその周辺の地震活動，地震予知連絡会会報第58巻，1997.
- 11) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：伊豆半島東方沖の群発地震活動について，地震調査委員会報告集－1995年7月～1996年12月－，1997.
- 12) 「測量」編集委員会 GPS 小委員会編：GPS フロントティア VRS 方式によるリアルタイム測位，測量7月号，2001.
- 13) 「測量」編集委員会 GPS 小委員会編：GPS フロントティアやってみよう！後処理仮想基準点方式，測量4月号，2002.