GPS による洋上波浪計測（第1報）

— トrend予測フィルターTPF（実時間フィルター）の開発 —

正員 一色 浩*

Ocean Wave Measurements by GPS (The 1st Report)

— Development of Trend Prediction Filter TPF (Real Time Filter) —

by Hiroshi Isshiki, Member

Summary

High precision GPS can measure position in centimeter order. So, it may be utilized to measure waves at sea. However, there are some problems in high precision GPS measurements. For an example, it is impossible to measure waves at sea far from shore in quasi real time. And amounts of communication between the reference and observation points are quite big, and the communication cost is rather expensive. The author and others have developed a convenient method to measure ocean waves in quasi real time manner. In the present paper, a method to make real time measurements possible is discussed.

1. 緒 言

高精度 GPS は、センチメートルのオーダーで位置を計測することができる。論文末尾の Fig. A に示すように、ブイに高精度 GPS 受信機のアンテナを搭載すれば、海上の波浪を高精度で計測することが可能である。

現在の技術では、高精度計測は、観測点の外に基準点での計測を必要とする相対測位法（キネマチック法）に依らねばならない。しかし、実時間計測を行うためには、基線距離（基準点と観測点との間の距離）を 10km 程度しか取れない。電離層の影響を受けない2周波数方式の場合でも、100km を越える計測は難しい⁸⁾。単独計測はこのような制限を受けないが、現状では、衛星時計および電波伝播路に起因するノイズを除去するのに有効な技術および仕組みが十分に開発されていない。その

ため、上述のノイズが特に大きくなる長周期成分の計測には向かない。

陸岸から遠く離れた海上での波浪の GPS 計測を可能とするためには、まず基線長の制約を克服する必要がある。著者外はこの問題に応える技術開発を行い、VD (Variance Detection) 法を開発した^{1~3), 6~7)}。波浪などの変動成分のみを計測の対象とするならば、直流成分である波数アンビギュイティを解く必要がなくなるので、基線長を 1000km オーダーに延ばすことが可能となる。その際、生データをハイパス・フィルターに通して、計測範囲外の長周期成分を除去する必要がある。そのために時間遅れが発生してしまうので、準実時間になってしまう。周期の長い変動を計測するときには、時間遅れが大きくなって困った問題になりかねない。

以下においては、時間遅れのない実時間フィルターを開発して、GPS の信号処理に適用する。

直流に近い変位成分の計測や、単独測位の精度向上については、今後の課題としたい。

*日立造船(株) 技術研究所

原稿受理 平成 13 年 1 月 10 日

春季講演会において講演 平成 13 年 5 月 17, 18 日

2. VD 法の紹介と問題点の指摘

GPS搬送波の位相を用いる高精度GPS計測法における最大の問題は、初期位相不定性（波数不定性）である。搬送波の位相を用いる計測法では、搬送波の波数を計測して、衛星の送信アンテナ中心と受信機のアンテナ中心間の距離を求める。衛星が電波の発射を開始したときに合わせて、受信機での波数計測を開始していれば問題はない。衛星が発射した波数から受信機が受け取った波数を引けば、衛星アンテナと受信機アンテナとの間にある波数になるから、これに搬送波の波長を掛ければ距離になる。しかし、受信機が計測を開始するのは、ユーザーが計測を始める時刻であって、衛星が電波の放射を始める時刻ではないので、その時点で本来受け取っているべき波数の分が不定になってしまう。この不定分を冗長度を持たせた計測と測位アルゴリズム上の工夫を行って求めねばならない。これが初期位相不定性の問題である。コード方式では、搬送波にコードを乗せることにより、いわば電波に目印を付けるが、1ビットを表わすのに数波を使うので、必然的に測位精度が下がってしまう。

GPS搬送波の波長は20cmと小さい。受信機時計、衛星時計、衛星位置、電波伝播路、多重反射に起因するノイズを落とせる相対計測（キネマチック）法で十分にノイズを落として、観測量に入り込んでいるノイズの大きさを波長以下にしないと、初期位相不定性を解けない。しかし、基線長を大きくするとどうしてもノイズが大きくなってしまい、初期位相不定性を実時間的に解くことが不可能になってしまう。

変動成分のみを計測対象とすると、初期位相不定性を解かなくてもよい。何故ならば、初期位相不定性は直流成分であるので、変動成分だけを対象とするならば、必要がなくなるからである。著者外が開発したVD（Variance Detection）法は、この点に着目したものである^{1-3), 6-7)}。しかし、緒言で述べたように、変動成分をフィルターで抽出するために、フィルターの時間遅れが発生してしまう。実時間性に対する要求が厳しいときには、新たな問題となる恐れがある。

VD法の研究の端緒となったのは、1999年3月に三浦半島の油壺湾で行ったGPS搭載ブイによる波浪計測実験であった⁴⁾。この実験では、ブイから900mほど離れた場所に基準点を設置した。その後、主として基線距離の影響を見るための実験を2000年8月に実施した。今回は、加振機を用いて受信機アンテナを正確に加振した⁵⁾。

Table 1a List of reference points

	Notation	Baseline length
Osaka(1)	Lab	100m
Osaka(2)	Kdc	10km
Nagoya	Hna	140km
Tokyo(Kamata)	Hka	420km

Table 1b Characteristic of mechanical oscillator

	Notation	Characteristic		
		amplitude	period	type of motion
Mechanical oscillator(1)	S2a	$\pm 2.5\text{cm}$	6sec	Sinusoidal
Mechanical oscillator(2)	S1b	$\pm 10\text{cm}$	90sec	saw tooth

その際に得られた結果を用いて、VD法の内、KVD（Kinematics for precise Variance Detection）法による結果を以下に示し、概要を紹介する。

観測点に置かれた加振機特性および基準点の位置をTable 1に示す。Fig. 1は観測点S2aでのL1波（衛星はL1波の外にL2波を放射している）による位相距離の計測量である。衛星は高度2万kmを周回しているので、非常に大きな値となっている。

Fig. 1 L1 phase distance.

Fig. 2 High frequency components L1h obtained by 21-point running average of L1 phase distances.

生データL1の21点の移動平均（低周波成分）をL1から引いた高周波成分L1hを、観測点および基準点のそれぞれについてFig. 2に示す。図中には、衛星番号01, 02, 04, 07, 20の5衛星のデータが示されている。図に示されているデータのほとんどは受信機時計のノイズ

で、信号成分はその中に埋まっている。衛星間で1重差を取って、受信機時計のノイズを除去したものをFig. 3に示す。観測点のデータには、信号成分が浮かび上がっている。当然のことながら、静止点である基準点の変動は小さい。基準点データに残っているのは、主として、衛星および電波伝播路に起因するものである。これらを落とすために、さらに受信機間の1重差を取ったものがFig. 4である。

(a) Data at the observation point S2a.

(b) Data at the reference point Lab.

Fig. 3 Satellite-satellite single differences of high frequency components L1h obtained by 21-point running average of L1 phase distances.

参考文献2)に示されている、2重差より受信機アンテナの変位変動成分を求める観測方程式を解いたものをFig. 5に示す。ただし、この図の結果は、フィルターとして7点移動平均を用いた結果である。黒丸の線がGPS測位結果であり、白丸の線が加振機 S2a の運動を示す。±1cm 程度の精度に収まっていることが分かる。

この結果は基線長が 500km 程度とする場合であり、基線長 100m の場合と大差のない結果が得られており、KVD 法の基線長を大幅に延長できることを示している。

Fig. 5 は短周期の狭帯域信号に対する結果であるが、Fig. 6 に長周期の広帯域信号に対する結果を示す。Fig.

5 と同様の結果が得られている。Fig. 6 の長基線に対する結果も満足すべきものとする。

Fig. 4 Satellite-satellite and receiver-receiver double differences of high frequency component L1h obtained by 21-point running average of L1 phase distances.

Fig. 5 Comparison between vertical displacement z obtained by KVD method with the reference point Hka and that of the oscillator S2a. The GPS Data are processed by 7-point running average.

Fig. 6 Comparison between vertical displacement z obtained by KVD method with the reference point Hka and that of the oscillator S1b. The GPS Data are processed by 99-point running average.

3. トレンド予測フィルタ (TPF: Trend Prediction Filter) による長周期成分の除去

GPS 衛星は、高度 20000km の上空を約 12 時間で周回しているため、衛星が地平線に現れてから頭上を通過して再び地平線に没することを繰り返す。そのため、衛星アンテナと受信機アンテナの距離は、概略 Fig. 7 に示されるように変動する。放物線状の長周期変動は衛星の移動に基づくものであり、これに乗っている細かい変動は受信機アンテナの変位変動による信号である。この場合には、振幅が $\pm 10\text{m}$ で周期が 40sec の正弦波信号が乗っている。

Fig. 7 の生データ $x(t)$ から信号 $y(t)$ を取り出すためには、フィルターを用いねばよい。一番簡単なのは、移動平均を用いることである。移動平均は一種のローパス・フィルターで、大雑把にいうと、移動平均を取る区間の長さよりも長い周期の成分が通過する。原信号から移動平均を差し引いたものは一種のハイパス・フィルターであるので、移動平均を用いてハイパス・フィルターを構成することが可能である。しかし、移動平均フィルターでは、平均値を取る区間の中央点の値が出力となるので、区間長の半分の時間遅れを発生してしまう。

そこで、以下に述べるような時間遅れのないハイパス・フィルターであるトレンド予測フィルタ (TPF: Trend Prediction Filter) を考えることにする。すなわち、過去 $N+1$ 点のデータに多項式 (この場合は 2 次の多項式) を当てはめて、長周期成分を推定して原信号よりこれを引く。数式で示すと、下記のアルゴリズムになる。

$$\sum_{j=0}^N \left\{ a_0(i) + a_1(i)[(N-j)\Delta t] + a_2(i)[(N-j)\Delta t]^2 + a_3(i)[(N-j)\Delta t]^3 - x_{i-j} \right\}^2 = \min \quad (1)$$

$$y_i^{low} = a_0(i) + a_1(i)(N\Delta t) + a_2(i)(N\Delta t)^2 + a_3(i)(N\Delta t)^3 \quad (2)$$

$$y_i^{high} = x_i - y_i^{low} \quad (3)$$

ここで

Δt : 時間刻み

$(N+1)\Delta t$: 時間刻み

$x(t)$: ノイズを含んだ原信号

$y(t)$: ノイズが除去された信号

$y^{high}(t)$: $x(t)$ の高周波数成分 (この場合は信号)

$y^{low}(t)$: $x(t)$ の低周波数成分 (この場合はノイズ)

$a_0(t), a_1(t), \dots$: 当てはめに用いる多項式の係数

とする。

Fig. 7 Raw datum.

Fig. 8 Coefficients of a 2nd order polynomial used to fit raw datum.

Fig. 9 Signal extracted from raw datum in Fig. 7.

$N = 600$ とした場合の TPF による処理結果を Fig. 8 と Fig. 9 に示す。Fig. 8 は多項式当てはめの係数の時間変化を示している。Fig. 9 を見ると、原信号から十分な精度で信号が抽出されていることが分かる。

Fig. 10 に曲線当てはめ区間長とフィルターの応答を示す。当然のことながら TPF には位相遅れはない。

Fig. 11 に、広帯域信号である鋸歯状の信号に対する結果を示す。

Fig. 10 Relationship between response of TPF and length of curve fitting. Period of signal is 40s.

Fig. 11 Response of TPF to saw tooth signal.

4. TPF の KVD 法への応用

TPF (トレンド予測フィルター: Trend Prediction Filter) を KVD (Kinematics for precise Variance Detection) 法に応用する。Fig. 1 の生データ L1 に TPF を適用する。Table 1 に示すように、このデータには周期 6sec, 振幅 ± 2.5 cm の正弦波信号が乗っている。

(a) Data at the observation point S2a.

(b) Data at the reference point Lab.

Fig. 12 High frequency components L1h obtained by curve fitting of phase distances L1.

(a) Data at the observation point S2a.

(b) Data at the reference point Lab.

Fig. 13 Satellite-satellite single difference of high frequency components L1h obtained by curve fitting of phase distance L1.

当てはめ区間長 N を 128 点に取った場合の TPF の高周波数成分出力 L1h を Fig. 12 に示す。Fig. 12 の L1h には、受信機時計、衛星時計、衛星位置、電波伝播路、多重反射によるノイズが乗っている。受信機時計のノイ

ズを落とすために、衛星間1重差を取った結果をFig. 13に示す。静止点である基準点Labのデータを見れば分かるように、衛星や伝播路に対するノイズが消えていないことが分かる。そこで、さらに受信機間1重差を取ると、Fig. 14の結果が得られる。これは、移動平均フィルターを用いたFig. 4に対応するものである。ほぼ同じ結果が得られていることが分かる。

Fig. 14をデータとする観測方程式²⁾を解いて、受信機アンテナの変位変動成分 x, y, z を求めたものがFig. 15である。これは、基準点は異なるが移動平均フィルターを用いたFig. 5に対応するものであり、多少精度は落ちるがまずまずの結果が得られていることが分かる。

Fig. 14 Satellite-satellite and receiver-receiver double difference of high frequency components L1h obtained by curve fitting of phase distance L1.

Fig. 15 Vertical displacement Z of the oscillator S2a obtained by KVD method with the reference point Lab. The GPS Data are processed by 128-point curve fitting.

Fig. 15は基線長が100m程度の場合であるが、基線長を400km程度にとった場合の結果をFig. 16に示す。これは、移動平均フィルターを使った場合のFig. 5に対応するものである。通常、RTK (Real Time Kinematics) 法の鉛直方向の精度は $\pm 2\text{cm}$ といわれているので、まず

まずの結果と思われるが、精度的には改善の余地があると考えられる。

Fig. 16 Vertical displacement Z of the oscillator S2a obtained by KVD method with the reference point Hka. The GPS Data are processed by 128-point curve fitting.

Fig. 17に広帯域信号の場合の例を示す。移動平均フィルターを使った場合のFig. 6に対応するものである。まずまずの結果と思われる。

Fig. 17 Vertical displacement Z of the oscillator S1b obtained by KVD method with the reference point Lab. The GPS Data are processed by 128-point curve fitting.

5. 結 論

本研究により、以下の結論を得た。

- (1) 高精度 GPS による洋上波浪計測の可能性について検討した。
- (2) 長基線計測を可能とする VD (Variance Detection) 法の性能向上に必要な時間遅れ対策について検討して、時間遅れの無いトレンド予測フィルター (TPF: Trend Prediction Filter) を開発した。
- (3) 上述の実時間フィルターをGPS信号処理に適用し、その有効性を確認した。VD法の実時間処理に一つの解決

策を提案した。

謝 辞

本研究にあたり、種種有益な協力を頂いた(社)日本測量協会・土屋 淳 博士、東京大学地震研究所・加藤照之教授、日立造船(株)技術研究所・寺田幸博博士外の皆様に深謝します。また、有益な討論と励ましを頂いた(株)日本海洋科学・小山健夫博士(東京大学名誉教授)にお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Isshiki, H., Tsuchiya A., Kato, T., Terada, Y., Kakimoto, H., Kinoshita, M., Kanzaki, M. and Tanno, T.: Precise Variance Detection by a Single GPS-Receiver --- PVD (Point precise Variance Detection) Method, **46, 4**, J. Geod. Soc. Japan, (2000).
- 2) Isshiki, H., Tsuchiya A., Kato, T., Terada, Y., Kakimoto, H., Kinoshita, M., Kanzaki, M. and Tanno, T.: Precise Variance Detection by Simplified Kinematic GPS Measurements --- KVD (Kinematics for precise Variance Detection) Method, **46, 4**, J. Geod. Soc. Japan (2000).
- 3) Isshiki, H., Terada, Y., Ito, K., Tsuchiya A. and Kato, T.: Variation measurements by VD/GPS method over very long baseline, Proceedings of ION NTM 2001, The Institute of Navigation, (2001).
- 4) Kato, T., Terada, Y., Kinoshita, M., Kakimoto, H., Isshiki, H., Matsuishi, M., Yokoyama, A. and Tanno, T.: Realtime Observation of Tsunami by RTK-GPS, Earth Planets Space, **52**, (2000), pp. 841-845.
- 5) Teunissen, P. J. G. and Kleusberg, A. (Eds), GPS for Geodesy, 2nd edition, Springer, (1998)
- 6) Tsuchiya, A., Isshiki, H., Terada, Y., Kinoshita, M., Kakimoto, H., Kanzaki, M., Tanno, T. and Kato, T.: Precise Variance Detection by a Single GPS-Receiver - PVD, (Abstr. 2000 Western Pacific Geophysics Meeting), (2000), 89 p.
- 7) Tsuchiya, A., Isshiki, H., Terada, Y., Kinoshita, M., Kakimoto, H., Kanzaki, M., Tanno, T. and Kato, T.: Precise Variance Detection by Simplified Kinematic GPS Measurements - KVD, (Abstr. 2000 Western Pacific Geophysics Meeting), (2000), 89 p.
- 8) Tsujii, T., Murata, M., Harigae, M., Ono, T. and Inagaki, T.: Development of Kinematic GPS Software, KINGS, and Flight Test Evaluation, National Aerospace Laboratory, TR-1357T, (1998).

Fig. A Measurements of surface movements by a buoy with a GPS antenna. Buoy motions are measured by high precision GPS.