

GNSS 座標時系列データに含まれる common-mode error 除去手法の開発

Development of a method of common-mode error reduction from GNSS displacement time-series data

廣瀬 仁¹⁾

Hitoshi Hirose

概要: GNSS 座標時系列データに含まれる common-mode error 除去のための手法を開発した。測地系 (座標系) の変換に用いられている Helmert 変換の考え方を応用し、観測網全体の並進・回転・スケールファクターを各時刻で求めるという方法である。この手法を西南日本の豊後水道周辺の国土地理院 GNSS 観測点に適用し、日々のばらつきが低減したことを確認した。よい結果を得るための重要な点の一つに、common-mode error 推定のための前処理で、地殻変動のシグナルなどノイズ以外の成分を十分に取り除いておくことがある。その前処理で、よりロバストな方法の適用が望まれる。

キーワード: 地殻変動, スロースリップイベント, 空間フィルタリング, Helmert 変換

1 はじめに

GPS (Global Positioning System) に代表される、GNSS (Global Navigation Satellite System) を用いた地殻変動観測が 1980 年代後半より広く行われている。日本においても、特に 1990 年代半ばからの国土地理院 GEONET (例えば, 中川・他, 2009) の運用開始以来、地震時変位の即時的把握、大地震の余効すべり、スロースリップイベント (SSE) の発見など、様々な地球科学的な知見が得られてきている (例えば, *Nishimura et al.*, 2014)。

GNSS 観測は、人工衛星からの送信電波を専用のアンテナおよび受信機で受信することで成り立っている。この観測を複数の場所で同時に実施することにより、研究対象とする地殻変動の空間的な変位分布を mm 単位で測定することができる。この際、個々の観測点ではそれぞれ独立に観測を行なっているが、共通の人工衛星からの信号を受信していること、基線解析の際に多くの場合で複数観測点間の相対測位解析を行なっていること、などの理由により、一般に、得られる測位解 (観測点の座標値) は各観測点で独立にはならず相関をもつ。ある観測点で測定された日々の座標時系列は通常数 mm の大きさのばらつきをもつが、この一部はその観測点に固有のノイズではなく、上記の理由により、他の観測点も含めた観測網に共通的なノイズを含む場合が多い。この成分 (common-mode error などと呼ばれる) を推定して除去することができれば、よりばらつきの少ない地殻変動データが得られる可能性がある。

このような観点から、この common-mode を推定して元のデータから差し引く「空間フィルタリング」の手法が提案され、しばしば用いられている。代表的なものは *Wdowinski et al.* (1997) で行われた方法である。これは (1) 各観測点・各方位成分毎に座標時系列の長期トレンド成分を推定し、その成分を元の時系列データから差し引くことで残差時系列を得る; (2) 各観測点・各方位成分の残差時系列を、成分毎に全ての観測点で足し合わせ、観測点数で割ることで平均時系列 (common-mode error) を得る; (3) 得られた common-mode error を各観測点・各方位成分の元データから差し引く; という処理を行うことで、座標時系列データに見られる日々のばらつきをある程度低減することが示されている。例えば, *Nishimura et al.* (2013) はこの手法を西南日本の GNSS 座標データに適用し、短期的 SSE による 1-2 mm 程度の地表変位を抽出することに用いている。なお後述の *Miyazaki et al.* (2003) の方法と対比させた場合、以上の処理は、主たるデータ解析のための「前処理」として行われている。

一方、同様な考え方を、地殻変動データのインバージョンによる断層すべり過程推定に組み込んだ研究も行われている。*Miyazaki et al.* (2003) は豊後水道周辺の GNSS 座標時系列データに Network Inversion Filter (*Segall and Matthews*, 1997) と呼ばれる Kalman Filter に基づく手法を適用して 1996-1997 豊後水道スロースリップイベントのすべりの時間発展を求めた。この際、観測方程式に「基準座標系誤差」(reference frame error) と呼ぶ成分の項を加えて、断層すべりなどとともに観測網全体の並進 (translation)・回転 (rotation)・スケール (scale) も未知パラメータに加えて同時に推定した。上記の *Wdowinski et al.* (1997) などの方法と対比させると、こちららは主たるデータ解析に common-mode error の推定も組み込んだものと考えられる。なお、上記の *Wdowinski et al.* (1997) の方法は、この観点からは、基準座標系誤差のうち並進成分のみを求めることに対応すると考えられる。すなわち、より多いパラメータ数で基準座標系誤差を表現する *Miyazaki et al.* (2003) の方法は、より効果的に GNSS 座標時系列のノイズ低減に役立つ可能性がある。

本研究では、common-mode error の除去を様々な地殻変動の研究に適用するため、*Miyazaki et al.* (2003) で導入された基準座標系誤差成分の推定のみを前処理として行えるようなプログラムの開発を行った。その手法を豊後水道周辺の GEONET 観測点での座標時系列データに適用し、効果を確かめた。なお、以下では、上記の基準座標系誤差成分のことを、簡単のため「common-mode」と呼ぶ。

2 方法

GNSS 観測点の座標値に含まれる common-mode を表現するため、以下のような観測方程式を考える。

$$\mathbf{d}(t) = A \mathbf{p}(t) \quad (1)$$

ここで $\mathbf{d}(t)$ は時刻 t での全観測点 (観測点数を n とする) の 3 成分の直交座標系における座標値を含むベクトル (長さ $3n$)、 A はデザイン行列、 $\mathbf{p}(t)$ は時刻 t での全観測点からなる観測網の並進、回転、スケールファクターを含むベクトル (長さ 7) である。 $\mathbf{d}(t)$ は以下のような要素からなるベクトルである:

$$\mathbf{d}(t) = [x_1(t), y_1(t), z_1(t), \dots, x_i(t), y_i(t), z_i(t), \dots, x_n(t), y_n(t), z_n(t)]^T \quad (2)$$

ここで $x_i(t)$, $y_i(t)$, $z_i(t)$ は、時刻 t における i 番目の観測点の座標値である。 T は転置を表す。すなわち $\mathbf{d}(t)$ は列ベクトルである。ここでの座標値は ITRF (International Terrestrial Reference Frame) のような直交座標系での値とし、各時刻におけるその観測点の平均位置からの差を表す:

$$\begin{aligned} x_i(t) &= X_i(t) - \bar{X}_i \\ y_i(t) &= Y_i(t) - \bar{Y}_i \\ z_i(t) &= Z_i(t) - \bar{Z}_i \end{aligned} \quad (3)$$

ここで $X_i(t)$, $Y_i(t)$, $Z_i(t)$ は時刻 t における観測点 i の直交座標系における 3 成分の座標値、 $\bar{X}_i$, $\bar{Y}_i$, $\bar{Z}_i$ は観測点 i の平均的な座標値である。

つぎに $\mathbf{p}(t)$ は以下のような要素からなる:

$$\mathbf{p}(t) = [x_c(t), y_c(t), z_c(t), \mu(t), \epsilon_1(t), \epsilon_2(t), \epsilon_3(t)]^T \quad (4)$$

ここで $x_c(t)$, $y_c(t)$, $z_c(t)$ は n 点の観測点からなる観測網の、時刻 t における中心位置で、平均的な位置からの差:

$$\begin{aligned} x_c(t) &= X_c(t) - \bar{X}_c \\ y_c(t) &= Y_c(t) - \bar{Y}_c \\ z_c(t) &= Z_c(t) - \bar{Z}_c \end{aligned} \quad (5)$$

(シンボルの意味は式 (3) と同様)、 $\mu(t)$ はスケールファクター、 $\epsilon_1(t)$, $\epsilon_2(t)$, $\epsilon_3(t)$ はそれぞれ X 軸, Y 軸, Z 軸まわりの回転角である。

さらに A は線形化 Helmert 変換 (*Hofmann-Wellenhof and Moritz*, 2006) を表し、以下のような $3n \times 7$ の行列である:

$$A = \begin{bmatrix} A_1 \\ \vdots \\ A_i \\ \vdots \\ A_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

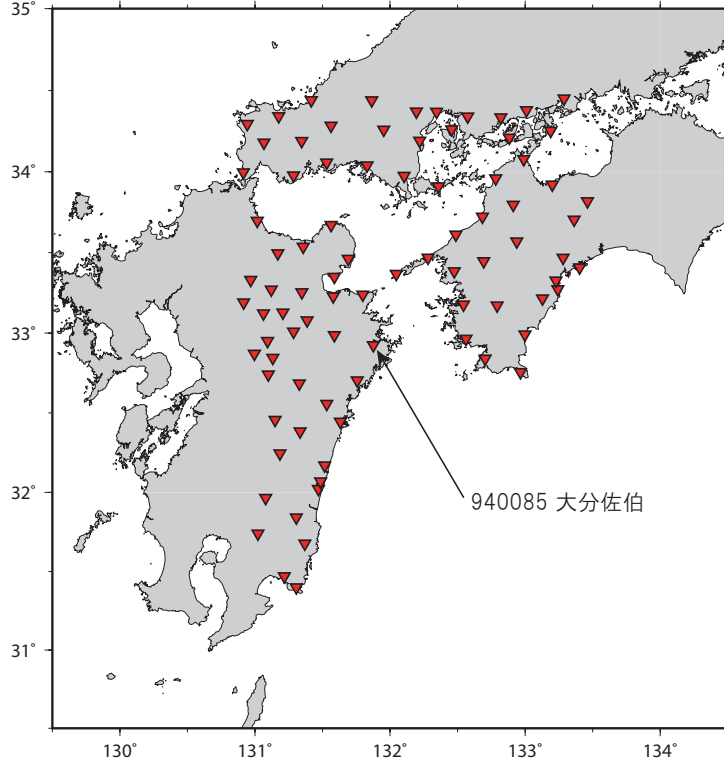


図 1: 解析対象とした観測点の分布.

$$A_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X_i & 0 & -Z_i & Y_i \\ 0 & 1 & 0 & Y_i & Z_i & 0 & -X_i \\ 0 & 0 & 1 & Z_i & -Y_i & X_i & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

ここで X_i, Y_i, Z_i は、観測網の中心を基準とした観測点 i の位置:

$$\begin{aligned} X_i &= \bar{X}_i - \bar{X}_c \\ Y_i &= \bar{Y}_i - \bar{Y}_c \\ Z_i &= \bar{Z}_i - \bar{Z}_c \end{aligned} \quad (8)$$

である。

観測方程式 (1) は十分な観測点数がある場合に最小二乗法で解 $\mathbf{p}(t)$ を求めることができる。この際の前提として、入力となるデータ $\mathbf{d}(t)$ は、興味のある地殻変動成分を含まないものである必要がある。すなわち、プレート運動や地震、SSE などに起因すると思われる変動をあらかじめ除いたあとの残差時系列（ノイズ）を入力する。

3 豊後水道周辺の観測点への適用例

ここでは、豊後水道 SSE による地殻変動を含む GNSS データへの適用を念頭に、GEONET の観測点のうち図 1 に示すような 86 点の 2000 年 1 月から 2007 年 12 月までの 8 年間の座標時系列データを用いた。この期間には、2003 年豊後水道 SSE (Ozawa *et al.*, 2004; Hirose and Obara, 2005) による地殻変動が含まれる。使用したデータは国土地理院により提供されている F3 解 (中川・他, 2009) (日々の座標値) である。F3 解はサンプリング間隔 1 日の ITRF2005 に準拠した座標値である。

これらのデータから前節で述べた common-mode を推定するため、まず既知の変動を取り除いた。具体的には、(1) 観測点保守や地震時のステップ的な変動; (2) プレート運動や SSE などに起因するやや長期的な変動成分; の 2 種類である。(1) は、国土地理院の WEB サイト (<http://terras.gsi.go.jp/>) で公開されている「保守作業リスト」を参照して、アンテナ交換や樹木の伐採など何らかの作業が行われた日付を観測点毎にリストアップし、その日付の前と後のそれぞれ 7 日間の平均値を求め、その平均値の差を保守作業によるステップ的な変化と

して取り除いた。地震時のステップ的な変動に対しても同様な補正を行った。考慮した地震は、2000 年 10 月 6 日鳥取県西部地震、2001 年 3 月 24 日芸予地震、2005 年 3 月 20 日福岡県西方沖地震の 3 つである。(2) は、時間の多項式で表される関数を時系列データにフィッティングすることで求めた。これによりプレート運動のような一定速度の運動や SSE などの非定常な変動を表現することを意図している。ただし $y(t) = a + bt + ct^2 + \dots$ のような形の多項式を直接最小二乗法に用いると、係数の推定が不安定になりやすいため、Ozawa (2017) と同様 Chebyshev 多項式を適用した。その次数は 20 次まで順次増やしていき AIC (Akaike's Information Criterion, Akaike, 1974) が最小となる次数を選択した。

以上の前処理を行った時系列データに対し、前節に記述した common-mode の推定を行った。その結果得られた common-mode の各パラメータの値を図 2 に示した。まず全体の特徴として、年周期の変化がどの成分にも認められる。GNSS 座標時系列に見られる年周変化の原因として、日本の東北地方での積雪荷重による変化 (Heki, 2001) に代表されるように、実際の地表面の地殻変動を含むことが知られている。しかしながらここに示されたように約 1 cm の振幅の年周変化が並進成分に見られるなど、common-mode にも含まれているということは、座標時系列の年周成分には GNSS の基線解析上の見かけの変動も一定程度含まれていることを意味している。また、common-mode の日々のばらつきの振幅の大きさは、並進成分が ~ 1 cm、回転成分が $\sim 3 \times 10^{-8}$ 、スケールファクターが $\sim 5 \times 10^{-9}$ 程度である。この回転とスケールファクターの大きさを並進と比較するため、例として今回の観測点分布の広がり (図 1) から典型的に 100 km の長さスケールを考える。すると回転成分からは $3 \times 10^{-8} \times 10^5 = 3 \times 10^{-3}$ m、スケールファクターからは $5 \times 10^{-9} \times 10^5 = 5 \times 10^{-4}$ m という変位のオーダーが得られる。すなわち、今回のデータセットからの推定値では、変位に与える影響は並進成分が最も大きく 1 cm 程度、回転が数 mm、スケールファクターは 0.5 mm 程度と概算される。

この common-mode を除去した結果の一例として、図 3 に GEONET 940085 大分佐伯観測点のデータを示す (観測点の位置は図 1 に示されている)。2003-2004 年にかけて、特に東向きに 2 cm ほどゆっくりと変位している SSE の変動が見られる (図 3 中段の赤点)。元データ (赤点) は 3 成分ともに日毎のばらつきが大きく見られるが、このうちのかかなりの部分は緑点で示されている common-mode の並進成分 (式 (4) の $x_c(t)$, $y_c(t)$, $z_c(t)$ を NS, EW, UD 方向に変換したもの) にも現れていることが分かる。common-mode (式 (4) の全成分から式 (1) にてフォワード計算されるこの観測点での計算値) を元データから除去した結果、データに含まれる日毎のばらつきがかなり低減していることが示されている (青点)。特に期間中に 7-8 点含まれる外れ値に関しても、水平成分 (NS, EW) では、ほとんどが common-mode にも現れており、結果的に除去することができている。なおこの外れ値について UD 成分では水平成分ほど顕著には除去できていない。

4 議論と結論

Helmert 変換を応用した common-mode 推定・除去により、GNSS 座標時系列データに含まれる日毎のばらつきがかなり軽減されることが示された。これは SSE など変位の小さい現象 (シグナルがノイズレベルと同程度なほどに小さい場合) の地殻変動を研究する上で非常に有用である。

このような common-mode error 除去手法を効果的に働かせるためには、その前段階での処理で、ノイズ以外の成分を十分にに取り除いておく必要があると考えられる。Wdowski *et al.* (1997) は、南カリフォルニアでの 1992 Landers 地震前後の数か月間のデータに空間フィルタリングを施しており、前段階の処理としては直線トレンドの除去を行なっている。これは、対象期間が短く、より長期の時定数を持つ変動が無視できるためだと考えられる。一方、Nishimura *et al.* (2013) は西南日本の 15 年間以上のデータを対象としており、前処理として 360 日長の時間窓を用いた移動平均を適用して長期トレンド成分を除去している。これらの事例から、対象とする期間・変動源などによって、common-mode 推定のための前処理方法も適切なものを適用しなければならないと考えられる。現段階では、この前処理方法の選択もある程度試行錯誤的に実施する必要があるだろう。本研究では common-mode 推定の前段階の処理として多項式フィッティングを適用したが、適用するデータによっては、フィッティングが不安定になる場合があった。common-mode error の除去を様々な場合に適用するためには、ここで述べた前処理方法もよりロバストな方法が望まれる。

また、ここに結果は示していないが、並進成分のみを除去した場合と、推定された 7 パラメータ全てから計算される common-mode を除去した場合とでは、比較した範囲においてはその効果に顕著な差は見られなかった。このことは、今回の結果を元に前節で概算したように、並進とそれ以外とで座標値に与える影響が 1 オーダー近く異なることから支持される。今回の結果だけから一般化することはできないが、距離スケール 100 km のオーダーの観測網では、観測網全体の回転成分やスケールファクターの変動は、並進成分に比べてそれほど大きくないことを示唆しているかもしれない。そうであれば Wdowski *et al.* (1997) の方法のように、座標値の各

成分での平均時系列を計算するという、より単純なデータ処理方法でも十分な効果があるということになる。すでに数多くの適用事例が *Wdowinski et al.* (1997) の方法の有用性を示しており、上記のことを示唆している。

謝辞:国土地理院 GEONET のデータを利用させていただきました。本研究は、JSPS 科研費 JP16K05542, JP16H06474 の助成を受けたものです。記して感謝いたします。

参考文献

- Akaike, H. (1974), A new look at the statistical model identification. *IEEE Trans. Automatic Control*, 19(6), 716-723. <https://doi.org/10.1109/TAC.1974.1100705>
- Heki, K. (2001), Seasonal Modulation of Interseismic Strain Buildup in Northeastern Japan Driven by Snow Loads, *Science*, 293(5527), 8992. <https://doi.org/10.1126/science.1061056>
- Hirose, H., and Obara, K. (2005), Repeating short- and long-term slow slip events with deep tremor activity around the Bungo channel region, southwest Japan. *Earth Planet. Space*, 57(10), 961-972.
- Hofmann-Wellenhof, B., and Moritz, H. (2006), *Physical Geodesy (2nd ed.)*, Springer-Verlag, Wien.
- Miyazaki, S., McGuire, J. J., and Segall, P. (2003), A transient subduction zone slip episode in southwest Japan observed by the nationwide GPS array. *J. Geophys. Res.*, 108(B2), <https://doi.org/10.1029/2001JB000456>
- 中川弘之・他 (2009), GPS 連続観測システム (GEONET) の新しい解析戦略 (第 4 版) によるルーチン解析システムの構築について, 国土地理院時報, 118, 1-8.
- Nishimura, T., Matsuzawa, T., and Obara, K. (2013), Detection of short-term slow slip events along the Nankai Trough, southwest Japan, using GNSS data. *J. Geophys. Res.*, 118(6), 3112-3125. <https://doi.org/10.1002/jgrb.50222>
- Nishimura, T., Sato, M., and Sagiya, T. (2014), Global Positioning System (GPS) and GPS-Acoustic Observations: Insight into Slip Along the Subduction Zones Around Japan, *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 42(1), 653-674. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-060313-054614>
- Ozawa, S. (2017), Long-term slow slip events along the Nankai trough subduction zone after the 2011 Tohoku earthquake in Japan, *Earth Planet. Space*, 69(1), 56. <https://doi.org/10.1186/s40623-017-0640-4>
- Ozawa, S., Hatanaka, Y., Kaidzu, M., Murakami, M., Imakiire, T., and Ishigaki, Y. (2004), Aseismic slip and low-frequency earthquakes in the Bungo channel, southwestern Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 31(7), <https://doi.org/10.1029/2003GL019381>
- Segall, P., and Matthews, M. (1997). Time dependent inversion of geodetic data. *J. Geophys. Res.*, 102(B10), 22391-22409. <https://doi.org/10.1029/97JB01795>
- Wdowinski, S., Bock, Y., Zhang, J., Fang, P., and Genrich, J. (1997), Southern California permanent GPS geodetic array: Spatial filtering of daily positions for estimating coseismic and postseismic displacements induced by the 1992 Landers earthquake, *J. Geophys. Res.*, 102(B8), 18057-18070. <https://doi.org/10.1029/97JB01378>

著者： 1) 廣瀬仁, 都市安全研究センター, 准教授

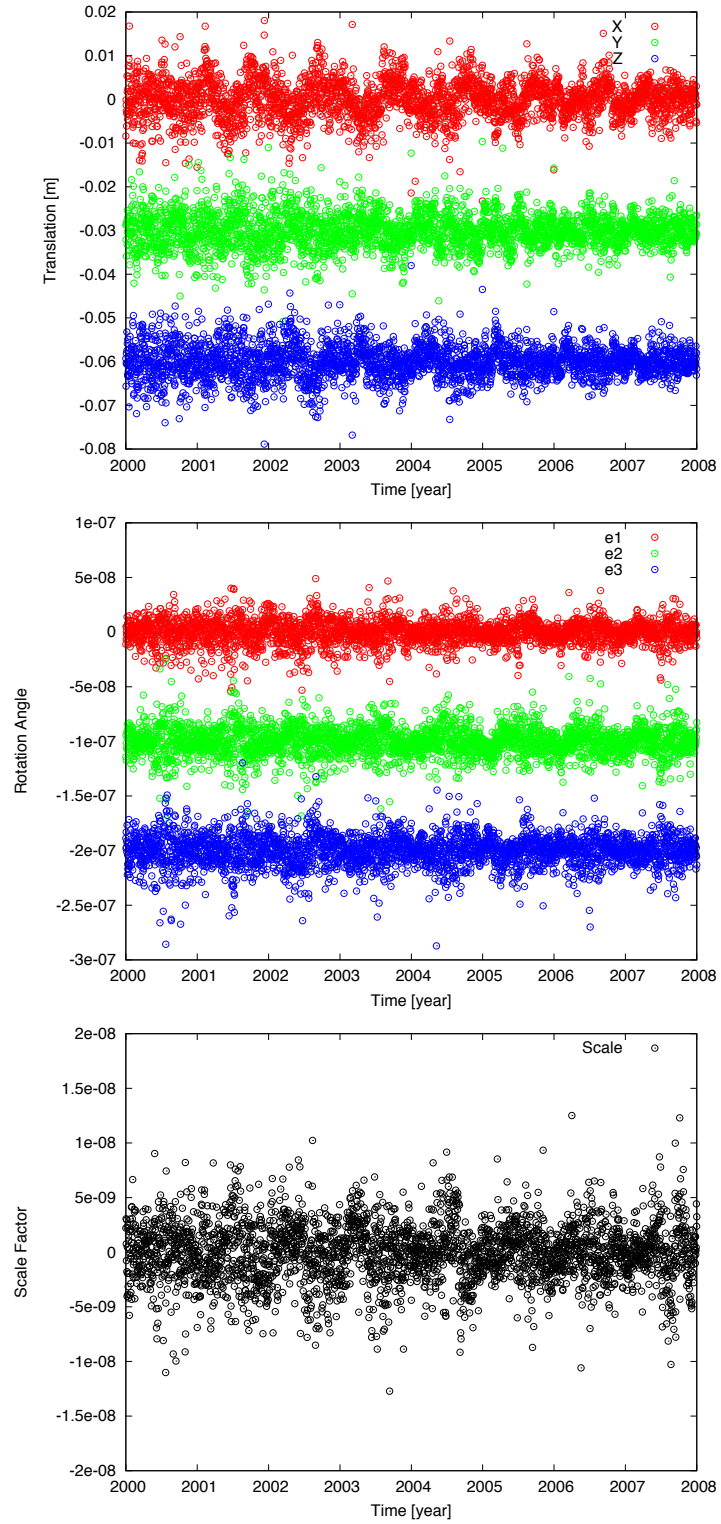


図 2: 推定された common mode の各成分. (上) 並進 3 成分: 赤点が $x_c(t)$, 緑点が $y_c(t)$, 青点が $z_c(t)$. (中) 回転 3 成分: 赤点が $\epsilon_1(t)$, 緑点が $\epsilon_2(t)$, 青点が $\epsilon_3(t)$. (下) スケールファクター $\mu(t)$. (上) と (中) の 3 つのトレースは, それぞれ比較しやすいように縦軸方向に適当にオフセットさせている.

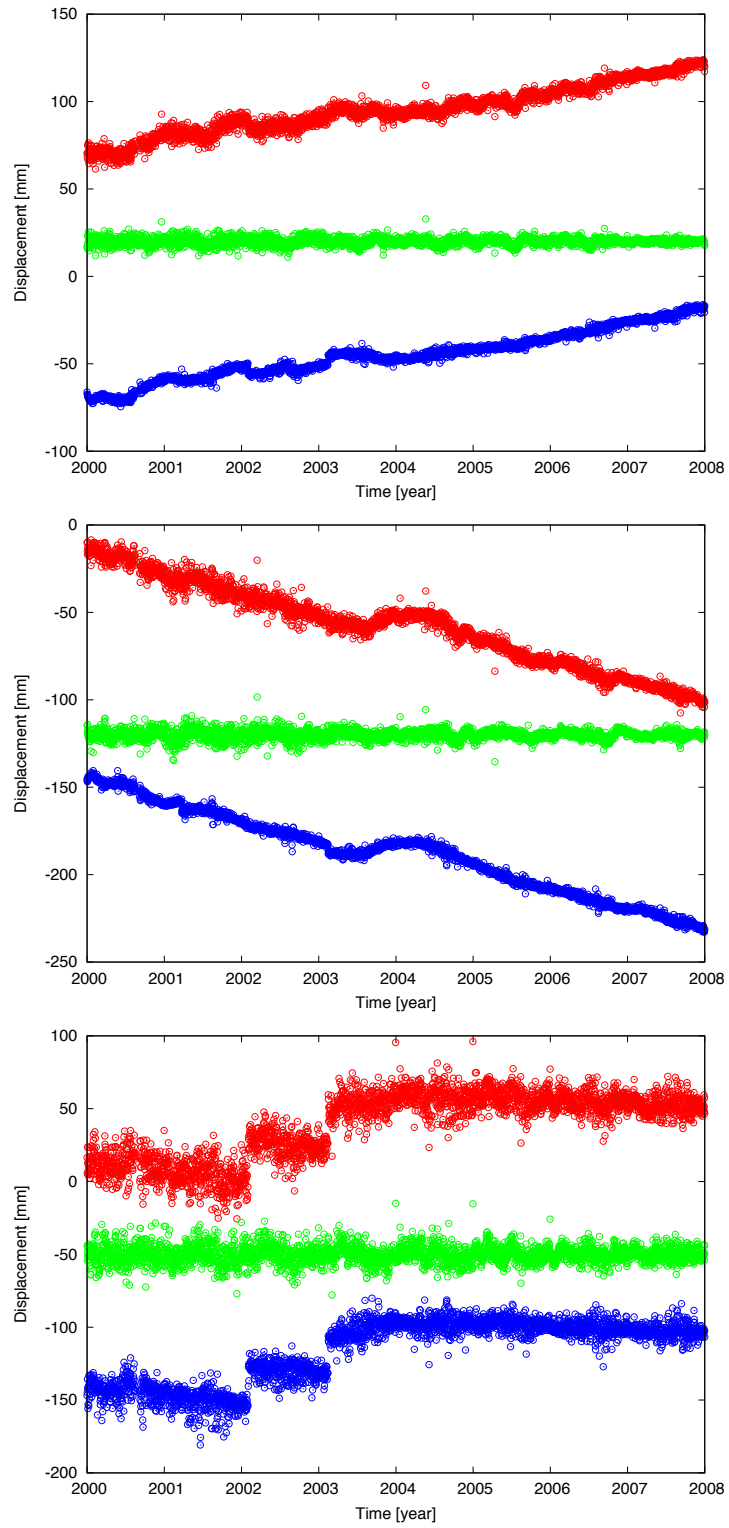


図 3: 観測点 940085 (大分佐伯) の座標時系列データ. (上) NS 成分, (中) EW 成分, (下) UD 成分. 赤点は元の F3 解, 緑点は推定された common-mode のうち並進成分 ($x_c(t)$, $y_c(t)$, $z_c(t)$ を NS, EW, UD 各成分に変換したもの), 青点はこの観測点に対して求められた common-mode 計算値を元データから差し引いたもの. 図 2 と同様に, 縦軸方向に適当にオフセットさせている.

Development of a method of common-mode error reduction from GNSS displacement time-series data

Hitoshi Hirose

Abstract

A method of common-mode error reduction, which is generally contained in GNSS displacement time-series data, is developed. In this method, a translation, a rotation, and a scale factor of a network of GNSS stations (i.e., “common-mode”) are estimated at each time epoch using a linearized Helmert transformation used in a geodetic datum transformation. I apply this method to observed displacement time-series at GNSS stations around the Bungo Channel area, southwest Japan and show that daily scatters seen in the original time-series decrease significantly. An important point for gaining a better result from this data processing is that known signal components, such as crustal deformations due to an earthquake and an SSE other than noise, should be removed sufficiently as a preprocess of the common-mode estimation. A more robust pre-processing technique is required for a wider application of this method.

©2019 Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University, All rights reserved.