産経新聞社賞

衛星合成開口レーダ画像を用いたインフラ構造物の 微小変位解析自動化技術の開発

> ¹日本電気株式会社 データサイエンス研究所 ²日本電気株式会社 電波・誘導事業部

田中 大地¹ 生藤 大典¹ 宝珠山 治¹ 大野 翔平² 冨田 英也² 平田 寛道² 石井 孝和² 木村 恒一²

1. 緒 言

建物や橋梁、道路などのインフラ構造物は、老朽化や欠陥、地震などによる損傷、トンネル掘削や自然災害による地盤変動など、常に安全性に関わるリスクに晒されている。従来、インフラ構造物のリスクを把握するための「点検・検査・モニタリング」は人手に頼っており、点検が必要な構造物が増えるにつれ、点検熟練者の不足が深刻な問題となっている。内閣府が主導する戦略的イノベーション創造プログラム(Strategic Innovation Promotion Program: SIP)では、IoT センサ、ロボット、レーザなどを使った、非熟練者でも高精度かつ効率的に行える点検・検査方法の技術開発が進められている[1][2]。しかし、このような詳細な点検を全てのインフラ構造物に適用すると、時間やコストの負担が大きい。そこで、精密検査を行う対象物を絞り込む、スクリーニング点検が求められている。スクリーニング点検には、定期的に広域を網羅的に点検し、詳細点検の必要性を判断できるレベルの正確さが必要である。

インフラ構造物をスクリーニング点検する技術として、衛星合成開口レーダ(Synthetic Aperture Radar: SAR)画像を用いた PSI (Persistent Scatterer Interferometry) に基づく変位解析手法がある。衛星 SAR は、レーダの一種で、移動する衛星から地表に向けてマイクロ波を照射し、地表にある地盤や道路などの構造物からの反射を受信し、合成開口処理により、数 km から数十 km 四方という広域に渡って、反射点が並ぶ画像を得る技術である。PSI は、衛星 SAR 画像を年オーダの期間で数十枚蓄積し、時系列解析することにより、一年あたり、ミリ程度の精度で構造物の微小な変位を計測できる[3]。前出の SIP においても、スクリーニング点検用に、いち早く社会実装に進んだプロジェクトとして評価されている[4][5]。

しかし、反射点と実際の構造物との対応付けが難しく、対応付けを誤ると精度が落ちてしまう問題が明らかとなっている。衛星 SAR 画像は、原理上、画像にひずみが生じており、光学画像で構造物を確認しながらの反射点との対応付けは難しい作業であり、熟練者でも時間を要する。さらに、PSI を発展させた2次元解析では、観測方向の異なる衛星 SAR 画像から反射点の対応付けを行うが、観測方向が異なると、反射点の出方が異なり、構造物の対応付けはさらに難しくなる。

本論文では、衛星 SAR 画像における反射点と構造物を対応付ける技術と、それを用いたインフラのスクリーニング点検の自動化について紹介する。この技術が、インフラ構造物のスクリーニング点検やモニタリングの効率化に大きく貢献できることを示す。

2. 衛星 SAR による微小変位解析技術と課題

衛星 SAR は、人工衛星に搭載したマイクロ波レーダを用いて、衛星の移動を利用し、巨大なアンテナと等価な計測、すなわち、高解像な計測を行う技術である(図1)。SAR を搭載した衛星は、地上数百 km の上空を周回し、10m から1m 程度の解像度の衛星 SAR 画像を数 km から数十 km 四方の広さで取得できる。同じ方向から観測できる周期は10日から20日程度である。衛星 SAR 画像は反射波信号が並ぶ画像であり、その振幅に反射強度が、位相に波長以下の距離の情報が含まれる。異なる時期に観測した2枚の衛星 SAR 画像の位相を比較して、波長程度のセンチオーダの変位を把握する技術は、干渉 SAR (Interferometry

SAR)と呼ばれ、国土地理院を中心に災害時などの被害状況把握に利用されている。

PSIでは、数十枚の衛星 SAR 画像を用いた時系列解析により、ミリオーダの変位解析を可能としている。衛星 SAR 画像に記録される位相には、衛星軌道の差異、大気や雑音の影響が避けられない。そこで、年オーダで観測した数十枚の衛星 SAR 画像に安定して現れる安定反射点 (Persistent Scatterer: PS点)を抽出し、統計処理により、大気や雑音の影響を差し引いた成分のうち、観測期間にわたってゆっくりと単調で直線的に変化する成分 (トレンド)が、変位に由来する位相変化で解釈する [3]。 PSI による変位解析は、干渉 SAR では計測できない微小な兆候を把握する技術として利用され始めている [4]。

しかし、図2に示すように、安定反射点が属する構造物を判定するには、これまで人が多くの時間を割いていた。衛星 SAR 画像は一見、光学画像を粗い白黒にしただけに見えるが、光と電波では反射の原理が異なるうえ、等距離の反射点が同じ平面に射影されるので、光学画像とは異なる画像となる。図3に示すように、高い場所にある反射点は近く見えるため、複数の構造物からの反射点が入り混じるレイオーバと呼ばれる現象や、ひずんで近く見えるフォアショートニングと呼ばれる現象がある。構造物の高さや形までを考慮に入れた反射点の出現位置推定は、熟練と時間を要する作業である。特に構造物が混みいった都市部では、これまで自動化は困難とされていた。

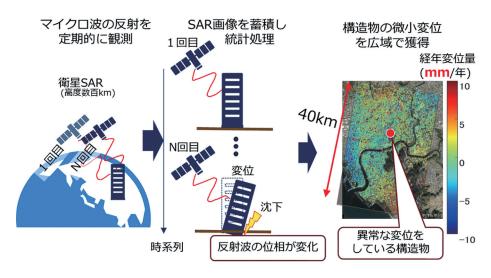


図1: PSI による微小変位解析のイメージ.

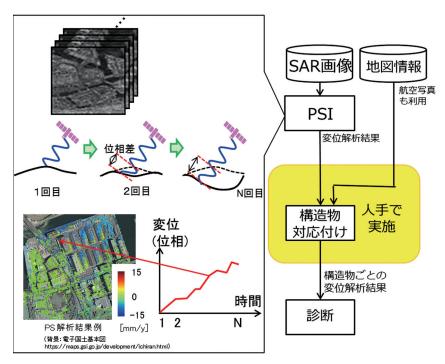


図2: PSI による微小変位解析を用いたインフラ診断の手順.

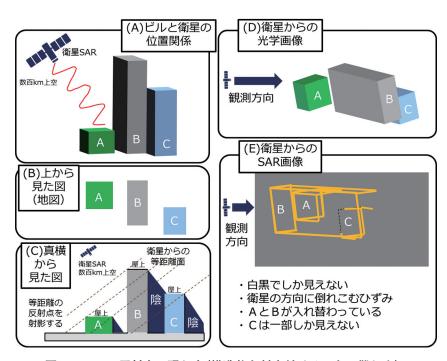


図3: SAR 反射点の現れ方(構造物と対応付けることの難しさ).

SAR 反射点は、衛星からの等距離の反射を区別できない。衛星とビルが (A) (B) (C) の位置関係にある場合には、(D) のような光学画像と (E) のような SAR 画像が得られるが、この簡単な例でも、位置の入れ替わりを含むひずみのため、構造物と SAR 反射点の対応付けは難しい。

3. 反射点と構造物の対応付け自動化技術

我々が開発した反射点と構造物の対応付け自動化技術を含む、診断手順を図4に示す。最も時間を要する対応付け作業が自動化され、点検したい構造物ごとに変位が得られる。広域を解析した場合には、変位の大きな構造物が一目でわかる。最後に、構造物ごとの変位から、詳細点検の必要性を判断すればよい。我々は、反射点と構造物の対応付けを自動化するために、統計と機械学習的なアプローチを導入し、反射点をクラスタリングする技術と、その反射点クラスタから得られる反射点配置情報を地図情報と対応付けする技術を開発した。

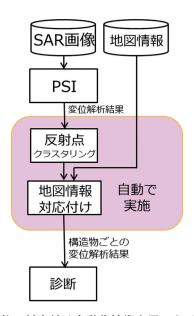


図4:反射点と構造物の対応付け自動化技術を用いたインフラ診断の手順.

3.1 剛体仮定に基づく反射点クラスタリング

反射点と構造物の対応付けを一点ずつ判断するのではなく、反射点の統計量の性質が似た 反射点をクラスタリングして、構造物と対応付ける手法を考案した。まず、次のような仮定 をする:「ビルや道路などの構造物は、構造物は剛体(例えばコンクリートの塊)の組み合わせで構成されている」「安定反射点は、剛体上にある」。次に、同じ剛体上の反射点同士は「(1)位置が近い」、「(2)反射点の位相変化に相関がある(変位が類似している)」という2つの性質 が同時にあると仮定し(図5)、機械学習技術を導入して、反射点をクラスタリングする。クラスタリングするための指標が次の式である。

クラスタリング指標= (1 - 位相の相関係数) × 反射点間の距離 位相変化が類似している

右辺の第1項は、位相の変化の相関係数が1、すなわち変化が同一に近づくと小さくなり、第2項は位置が近いと小さくなる。この指標が最小化されるようにクラスタリングを行うことにより、隣接した反射点が別の構造物に由来する場合でも分離できるようになった[6][7]。

クラスタリングされた反射点群からは、位置や配置形など新たな情報が得られるため、剛体から構成される構造物への対応付けは、反射点ごとに対応付けるよりも遥かに容易になる。

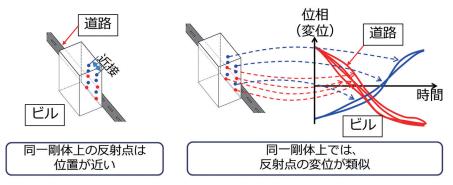


図5:反射点クラスタリングのアイデア.

本クラスタリング手法を適用した結果を図6に示す。左上が対象の光学写真、右上に安定 反射点について解析された変位情報、右下にクラスタリングされた反射点を示す。このビルは、エレベータホールと本体と屋上駐車場などいくつかの剛体から構成されている。変位情報では、上昇点と下降点が入り混じっており、建造物のどこが上昇下降しているか判別できない。反射点をクラスタリングした結果では変位情報ではなく、クラスタ別に色づけを行っている。ここでエレベータホールに対応する点と屋上駐車場に対応する点が分けられていることがわかる。

図6の反射点クラスタごとの、変位解析結果を図7に示す。エレベータホールはわずかに 上昇しており、屋上駐車場はわずかに下降していることが容易に分かる。いずれも問題ない 変位であるが、わずかな違いで反射点を剛体ごとに分離し、変位解析ができていることを示 している。

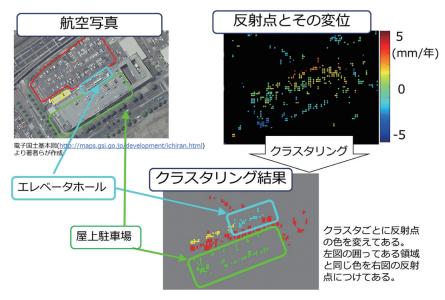


図6:反射点クラスタリングの結果.

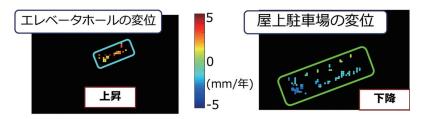


図7:反射点クラスタの変位解析結果.

3.2 地図情報と反射点クラスタの対応付け技術

クラスタリングされた反射点群について、得られた位置や配置形についての情報を、地図 情報における構造物の情報と照合し、対応付ける。

反射点クラスタと地図情報における構造物情報を対応付けるために考案した対応度指標の概要を図8に示す。反射点クラスタから構造物までの距離と、反射点クラスタ配置の形状と構造物形状の類似度の両方を適切に反映する対応度指標として、各反射点から構造物までの最小距離の中央値とその分散値を乗じた値を用いる。

対応度指標=距離の中央値×距離の分散値

クラスタと構造物の近さ クラスタと構造物の 形状の類似度

この対応度指標は、反射点クラスタが構造物に近いほど、右辺1項の「距離の中央値」が小さくなる。また反射点クラスタの配置形が構造物の外周の形に沿っている場合には、距離のばらつきがなくなり、右辺2項の「距離の分散値」が小さくなる。したがって、この対応度指標が小さくなるような、反射点クラスタと構造物の組み合わせを見つければよい。

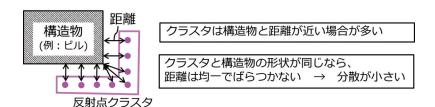


図8:反射点クラスタと地図情報の対応度指標.

本反射点クラスタリングと、それを利用した構造物との対応付け自動化技術により、図9に示すように、地図上の建物のどこに問題が発生しているかをすぐに知ることができる。広域を管理する自治体は、異常があるように見える反射点がどの構造物からのものかが分かり、検査を手配するか等の判断がしやすくなる。

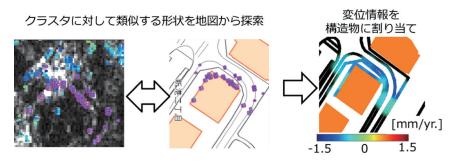


図9:反射点と地図情報との対応付けによる構造物の部分ごとの変位解析.

(背景 SAR 画像: COSMO-SkyMed Product - © ASI 2015-2016 processed under license from ASI-Agenzia Spaziale Italiana. All Rights Reserved. Distributed by e-GEOS, 地図:電子国土基本図 (https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html), および基盤地図情報 (http://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html) を加工)

3.3 対応付け技術の2次元変位解析技術への展開

我々の反射点と構造物の対応付け技術の効果が大きい例として、SAR 微小変位解析の結果を2つ統合する2次元変位解析技術について説明する[8]。

2次元変位解析は、図10のように、2つの異なる方向からの衛星 SAR 画像をそれぞれ1次元解析した結果をベクトルとして統合し、疑似立体的な測量を行う技術で、PSI の変位解析性能をさらに高める技術として期待されている[9]。2つの観測方向からの解析結果を統合するだけでは2次元であるが、表示としては3次元に近いことから、2.5次元解析とも呼ばれる。一方向からの1次元解析では、観測方向に変位を無理やり射影するため、観測方向に直交する方向の変位に対しては解析できない。2次元解析では、直交する方向の変位も解析できるので精度が上がる。

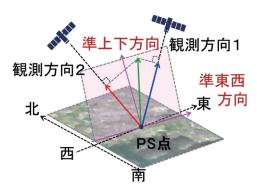


図10:2次元変位解析の原理イメージ.

2次元変位解析では、異なる方向からの衛星 SAR 画像について、変位解析できた安定反射点を構造物と対応付ける必要がある。同じ構造物でも、観測方向によって反射する箇所は異なり、ビルの場合、安定反射点が現れるのは、角のあるビルの根元や、観測方向を向いている金属窓枠などである。図11のように、同じ構造物でも、出現位置の全く異なる反射点

同士を対応付けするのは難しい。

観測方向2



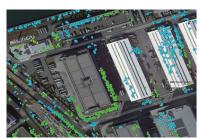


観測方向1

図11:観測方向による反射点出現位置の違い.

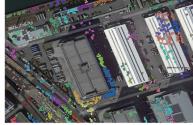
(背景は電子国土基本図: https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html)

我々の対応付け技術では、観測方向が異なるために反射点群が全く異なる位置に出現しても、クラスタリングした反射点群を地図情報上の構造物を経由して対応付けられる。図12に示すように、反射点クラスタは構造物の形に沿い、構造物と対応づけできる。本手法の対応付けを用いた2次元変位解析の概要を図13に示す。ここでは道路とビルが同時にある状況を想定している。反射点はビルの根元や道路の縁石で発生している。観測方向1について青い点を赤い枠で囲った反射点クラスタは、ビルの形の一部と類似しており、またビルから近く、この反射点クラスタはビルに属すると判定できる。また他の反射点クラスタも道路にあると判定できる。同様に観測方向2でピンクの点を青い枠で囲んだ反射点クラスタもビルに属すると判定できる。



反射点分布画像 (計測利用できる反射点のみ)





クラスタリング結果画像

反射点クラスタをいくつか集めると、 構造物(建物や道路など)の形になる

図12:反射点クラスタと構造物の関係.

(背景は電子国土基本図: https://maps.gsi.go.ip/development/ichiran.html)

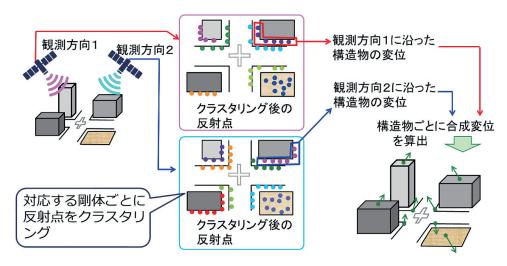


図13:本手法で対応付けを行った2次元解析のイメージ.

4. 実証実験と評価

対応付け技術により変位解析した実証実験結果を紹介する。

■広域の自動変位解析

対応付け技術を用いて、衛星 SAR 画像全体 (ここでは数 km 四方)を一挙に自動で2次元変位解析した例を図14に示す。PSI により得られた安定反射点 (a) がクラスタリングされ (b) (c)、地図情報と対応付けたことにより、構造物と対応付けられる (d)。構造物ごとに2次元変位解析を行った結果、 (e) (f) のように垂直と東西 (水平) 方向の変位が、観測域内のほぼ任意の構造物について解析できる。 (e) (f) では、赤い四角で囲った変位が大きい構造物が要注意であることが分かる。

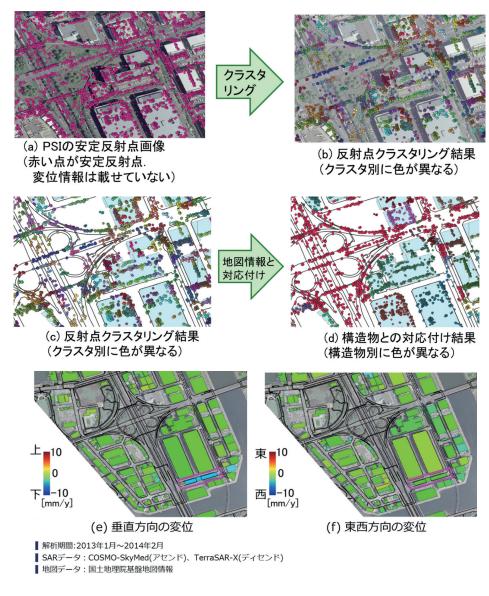


図14: 広域の自動2次元変位解析. (数百mを拡大表示. 電子国土基本図 (http://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html)および基盤地図情報 (https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php)より著者らが作成)

■埋立地の地盤沈下

運河をはさんだ埋立地について、1年間のデータから2次元変位解析を行い、水準点(定期的に測量を行う基準点)近傍について従来法との比較評価を行った。まず定性的な結果を図15に示す。緑の球がある地点は、水準点の近傍にある安定反射点である。矢印が変位の方向と大きさを表し、矢印が長いほど変位が大きい。ここでの解析で得られた最大変位量は約6mmであった。従来法1や2では対応付けを誤っているため、一部の地点で上昇を示す

赤い矢印がある。一方、新手法で対応付けを行った図中右には、周囲と異なる動きはなく、 全体がわずかに沈んでいるだけで、異常は見つからない。

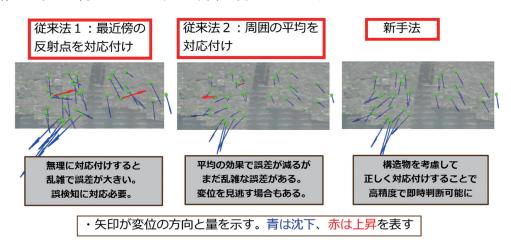


図15: 運河をはさむ埋立地の解析結果.

■解析精度向上

前節の埋立地にある水準点近傍の安定反射点について、人手による水準点測量結果を正解として、変位解析の精度を定量評価した。図16における比較対象の従来法は、郊外平地域における地盤変位解析向けに開発された自動対応付け手法(図15における従来法2)[10]である。平地域と建物が密集した都市域に分けて評価を行ったところ、郊外、都市部とも従来法と比較して、提案法では約40%誤差が低減された。人手による測量の誤差は、2mm以下(熟達者でも1mm程度)といわれており、平地域においてはこれに匹敵するレベルに到達している。提案法は都市域においても誤差が4mm程度まで低減され、簡易な測量としては役立つレベルに到達している。

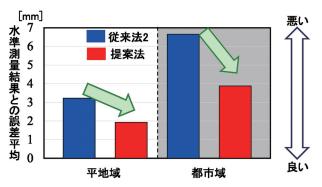


図16:本手法を用いた対応付けによる誤差低減.

■地下工事による地上地盤沈下の事例

2016年11月の博多駅前道路の陥没について、陥没事故までの1年間と最近の1年間の変位解析を行った結果を紹介する。この事故は、地下鉄延伸工事において、地盤が事前調査から

の見込みよりも著しく弱かったために大規模陥没が発生したものである[11]。事前に設置した GNSS(GPS 衛星等を利用した高精度位置計測システム) により計測された変位は数 cm 以下であった。

この工事個所周辺を事故直前の1年間に観測した衛星 SAR 画像を用いて、2次元変位解析した結果を図17に示す。ここでは交差点を構造物と指定して解析した。参考に、駅前施設工事のために他の区画と異なる工法(ナトム工法)を採用した部分を黄色矩形で、陥没した個所を黄色円で示している。この図の交差点ごとにある矢印が変位の方向と量を表しており、黄色矩形内にある交差点は周囲より1年間に数 cm 沈下していることが分かる。この解析結果は GNSS による測量とほぼ合致しており、衛星 SAR を用いた変位解析が、GNSS と同等の計測が行えることを示唆している。事故後2017年末から2018年末にかけて地盤改良工事を実施しており、その期間の変位解析も行ったところ、図18に示すように、沈下は確認されていない。

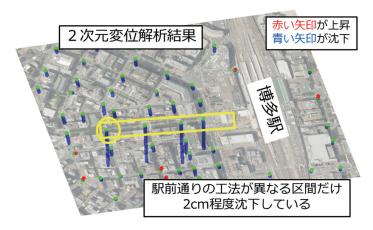


図17:事故前1年間の変位解析結果. (電子国土基本図 (http://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html)より著者らが作成)



図18:最近1年間の変位解析結果. (電子国土基本図 (http://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html)より著者らが作成)

5. 衛星 SAR 画像による微小変位解析技術の展開

NEC の衛星 SAR 画像による微小変位解析技術は、SIP からいち早く社会実装へと進み、図19に示すように、地盤沈下監視、斜面管理、構造物管理、地下工事施工管理などで利用され始めている。例えば、地盤沈下の管理では、SAR 画像を収集・蓄積し、指定された構造物や領域を解析した結果を、モニタリング報告書として管理者に提供するインフラモニタリング事業を開始している。

トンネルなどの地下工事管理では、工事の影響をモニタリングし、地上に現れた場合には、即対応が義務付けられている。大深度の地下工事では、地盤への影響が直上だけでなく、より広域に及ぶ可能性が指摘されており、SAR変位解析とGNSSを併用したモニタリングは、効率的な解となる。今後、SAR微小変位解析が、公式の測量手段として国から承認されれば、低コストで効率的なインフラモニタリング手段としての利用が見込まれ、社会の安心・安全に貢献できる。

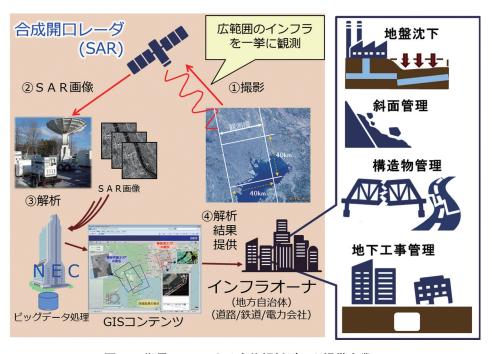


図19: 衛星 SAR による変位解析データ提供事業.

6. 結 言

衛星 SAR 画像を用いたインフラ構造物の微小変位解析における、反射点と構造物の対応付け自動化技術を紹介した。本技術により、インフラ構造物の変位解析がミリオーダの精度で、広域にかつ、自動でできるようになった。実証実験の結果、従来法と比べて、本方式は精度が高く、信頼性も高いことが確認された。SAR 画像を用いた微小変位解析は、インフラ構造物を広域モニタリングする手段としての利用が期待されており、国の承認があれば、

低コストで、インフラ診断、地盤管理、施工管理ができる。我々はインフラモニタリングサービスを拡大し、安全・安心・効率・公平な社会に貢献する所存である。

謝辞

本研究開発の初期に御指導をいただきました、元 NEC 村田稔氏、故 山片茂樹氏に感謝いたします。

参考文献

- [1] 戦略的イノベーション創造プログラム インフラ維持管理・更新・マネジメント技術 http://www.jst.go.jp/sip/k07.html (2019年2月5日確認)
- [2] 戦略的イノベーション創造プログラム インフラ維持管理・更新・マネジメント技術開発技術チームの概要 http://www.jst.go.jp/sip/k07_kadai_dl.html (2019年2月5日確認)
- [3] A. Ferretti, "Permanent scatterers in SAR interferometry," IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, Vol. 39, No. 1, pp. 8–20, 2001.
- [4] 村田稔, "高精度かつ高効率で人工構造物の経年変位をモニタリングする技術," 戦略的 イノベーション創造プログラム インフラ維持管理・更新・マネジメント技術. http://www.jst.go.jp/sip/dl/k07/booklet/25 murata.pdf (2019年2月5日確認)
- [5] NHK サイエンスゼロ「リスクをあぶりだせ! インフラ点検最前線」2017年8月5日放送.
- [6] T. Tanaka and O. Hoshuyama, "Persistent scatterer clustering for structure displacement analysis based on phase correlation network," IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2017.
- [7] T. Tanaka and O. Hoshuyama, "Persistent scatterer clustering for structure displacement analysis based on phase correlation kernel," EUSAR 2018.
- [8] D. Ikefuji, T. Tanaka and O. Hoshuyama, "Two-Dimensional Displacement Analysis with SAR images based on persistent scatterer clustering," IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2018.
- [9] R. Kwok I. R. Joughin and M. A. Fahnestock, "Interferometric estimation of three-dimensional ice-flow using as-cending and descending passes," IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, vol. Vol. 36, No. 1, pp. 25–37, 1998.
- [10] S. Fujiwara T. Nishimura H. Nakagawa M. Murakami, M. Tobita and P. A. Rosen, "2.5-d surface deformation of m 6.1 earthquake near mt. Iwate detected by SAR interferometry," Geophysical Research Letters, vol. Vol. 27, No. 14, pp. 2049–2052, 2000.
- [11] 福岡市地下鉄, "工事の進捗状況及び進め方 地下鉄七隈線延伸工事に伴う道路陥没事故 について," https://subway.city.fukuoka.lg.jp/hakata/ (2019年2月5日確認)