

## リモートセンシングによるインフラヘルスマonitoringの実装について

## On the Implementation of Remote Sensing for Infrastructure Health Monitoring

中園悦子\*・竹内 渉\*  
Etsuko NAKAZONO and Wataru TAKEUCHI

## 1. はじめに

近年、日本のインフラの老朽化が問題となっている。日本のインフラの多くが高度経済成長期に集中的に整備されているため、国土交通省によると、2033年までに道路橋の約63%、河川管理施設の約62%が建設後50年を経過することになる<sup>1)</sup>。その一方で現在のインフラ点検方法の多くは目視点検や打音調査が基本であり、熟練点検員の減少による人員不足は深刻な問題となっている。これらの問題を改善するために、産学官挙げてインフラ維持・管理に対して既存のIoT技術を有効に活用することで、点検員の業務を効率化することを試みている<sup>2)</sup>。

このような既存の技術の一つとして、近年注目されているものに、リモートセンシングが挙げられる。特にここ数年、日本でも、低コスト・短期間で制作可能な高解像度の超小型衛星(100 kg以下)が、ベンチャー企業にて打ち上げられていることから、これ以降も技術・精度共に向上していくと考えられる。

そこで本稿では、リモートセンシング技術のうち、既に社会に実装され、インフラ維持・管理に使用されている技術について紹介していこうと思う。

## 2. Mobile Mapping System

モバイルマッピングシステム(MMS)は、自動車等地上走行を行う車両の屋根上にレーザー計測器やカメラ、

GNSS装置を取り付け、周辺の3次元データと連続写真を取得する車両搭載型計測装置のことである。その撮影範囲は道路そのものに加えて道路周辺を含み、高精度の3次元周辺地図を作成可能である。

この技術をインフラ維持・管理に適用するサービスを分類したものが表1である。

まず、道路表面のひび割れ等の検知についてのサービスが挙げられる。取得データからひび割れをディープラーニングにより検出し、ひび割れ率を自動算出する<sup>3)</sup>、3D情報を元に路面のわだち掘れと舗装の切削量を推定する<sup>4)</sup>等のサービスを複数の企業が提供している。またMMS車両に地中レーダーを組み合わせることで道路地下の異常を探すシステムも開発されている<sup>5)</sup>。また路面異常の一つであるポットホールの情報を得るための車両の走行条件についても研究されている<sup>6)</sup>。

次に、MMSによる道路とその周辺の3次元地図は、道路維持業務の効率化・施設設計の支援として使用されている。代表的なものとして、首都高が2017年から運用を開始した、「i-DREAMs(アイドリームス)」のコア機能であるInfraDoctor<sup>7)</sup>が挙げられる。これは既存のGISと3次元点群データを活用したインフラ・構造物の維持管理を支援するシステムである。また3次元地図情報は、官民共同で早期実現が望まれている自動運転技術に不可欠である<sup>8)9)</sup>。

走行路周辺の特殊な環境としてトンネルがある。複数の高解像度ビデオカメラ+LED照明とレーザー測量機を使

表1 MMSによるサービス例(番号は参考文献に対応)

| 対象地     | 機器                            | 内容  |
|---------|-------------------------------|---|
| 道路とその周辺 | MMS+同車両に搭載機器                  | 道路面のえぐれ・ひび割れ等の検知+その自動化 3)4)6)   |
|         |                               | 道路面のひび割れ等の検知+路面下空洞探査 5)   |
|         |                               | 道路とその周辺の3次元地図作成 道路維持業務の効率化・施設設計の支援 7) 自動運転の為に地図 8)9)                        |
|         |                               | トンネル内のひび割れの確認 (道路トンネル 10) 電鉄トンネル 11))                                       |
| その他     | MMS+他機器(UAV・航空機等)による3Dデータ統合管理 | 河川に沿った堤防の天端・横断の形状を把握・越水の危険個所の判断 12)13)14)15) 大型構造物の管理(空港・大規模橋梁・道路周辺) 16)17) |

\*東京大学生産技術研究所 人間・社会系部門

## 研究速報

用したトンネル内のひび割れの解析からトンネルにかかる外力の影響を検出した報告がある<sup>10)</sup>。またMMSを電鉄の計測車両に設置し、鉄道トンネル内のひび割れを検出し、補修作業用の情報を提供することが可能である<sup>11)</sup>。

MMSはまた、河川管理の一部に使用されている。河川沿いの道から計測されたMMSデータの河川管理への利活用事例が国土交通省によりまとめられている<sup>10)11)</sup>。但しMMSによるデータ取得範囲は道路とその周辺の積載車両周辺に限られている。そこでMMSだけでは得られない河川の横断面や河床情報をドローンや航空機に搭載したレーザー計測システムから取得し、河川管理データを統合管理するシステムも提供されている<sup>12)</sup>。また堤防の除草機にMMSを搭載し、除草と堤防の測定を同時に行う機器の開発もされている<sup>13)</sup>。

このように別の機器によるレーザー測量結果とMMSを組み合わせることで、より大規模なインフラの管理を行うためのシステムもまた開発されている。河川管理の他にも空港基本施設の法面、構造物、舗装等の異変を自動で検知、記録できる技術が提供されている<sup>14)</sup>。また、MMSとヘリレーザーを組み合わせることで、レインボーブリッジのような巨大建造物や道路周辺の地すべり地形などを把握することも可能である<sup>15)</sup>。

また、MMSで取得される3次元データは、複数分野で利用可能である。災害発生時には被災前後の3次元データを比較することで、被害の大きさや復旧方針を把握することができる。そこで南海トラフ地震被害を想定する静岡県<sup>16)</sup>を皮切りに、国土交通省によるPLATEAU<sup>19)</sup>、また国土交通データプラットフォーム<sup>20)</sup>で収集された3次元データが無料公開されつつあり、同時にQGISなどGISフリーソフトでも3Dデータが閲覧・簡単な計算が可能になっている。特に静岡県では、これまでの公開データに加えて2021年4月より伊豆半島の約15TBの点群データ<sup>21)</sup>を公開しており、先日の土石流被害地もその範囲に含まれている。

### 3. SAR 衛星

#### 3.1 InSAR 処理

マイクロ波を地上に向けて発射し、地上で反射されて戻った波（後方散乱波）から地上を観測するのがSAR衛星である。後方散乱波は、強度と位相の2つの成分を持つが、そのうち、2時期の位相情報を比較し、その差から対象の地表面と衛星との距離変化を推定するのがInSAR解析である。この手法ではmm～cm単位で地盤の変動を把握することが可能である。

SAR技術が長らく『軍事機密』として扱われてきたため、SARの実用化は遅れていた。しかし2016年にアメリカがSAR衛星の商用利用を解禁したことが大きな転機となり、現在SSTL(UK)、Capella Space(US)、ICEYE(Finland)などの海外企業に並び、日本でもSynspective、QPS研究所など

が既にSAR衛星を打ち上げている。これらのSARデータの解像度は1mかそれ以下であり、個々の建築物の状態を解析可能である。

また、これまで政府主導で打ち上げられてきた中程度（～10m）の解像度のSARデータについても妥当な価格で提供されるようになってきている。特に2014年にEU/ESAにより打ち上げられたSentinel1と、Sentinel1のInSAR処理も含めた解析に適したSNAPは無料で提供されており、研究や解析に取り組む敷居を大幅に下げたと言って良い。ただ、画像を見るだけで判読しやすい光学衛星データとは違い、SARデータやInSAR解析はまだ敷居が高い傾向がある。

Sigma-SAR Cloud Platform<sup>22)</sup>は、そういったまだ敷居の高いSARの画像解析に特化されたプラットフォームである。処理対象となるデータはALOS、ALOS2や高解像度データであるTerraSAR-XやASAR2等を含む。データ入手（一途データを除く）や処理後の解析は行わない代わり、処理価格は比較的安価である（月50,000円～）。

JAXAの開発したANATISは、ALOS、ALOS2、TerraSAR-Xを対象としており、土木インフラ構造物の時系列変位を検出する為のソフトである<sup>23)</sup>。時系列解析を高精度で行う必要性から最初の段階で同一軌道上の15シーンを必要とするが、それ以降、同じ個所の時系列変化を継続して調べる場合、1シーンずつの追加で追うことが可能である。

このソフトを使用し、空港や河川堤防の変位を検出した結果が報告されている<sup>24)</sup>。特に河川堤防の点検に対するInSAR解析と既存の手法のコスト試算についても記しており、InSAR解析のコストは従来の半分～1/3であることが示されている。

また、無料配布データであるSentinel1を用いた自動InSAR解析システムがLiCSARである。自動作成なのでペアになるデータについては選択できないが、作成されたInSAR画像は位相画像（フィルタあり・なし）アンラップ画像と三種類揃っており、専用のポータルからダウンロード可能である<sup>25)</sup>。また、LiCSARと連携したオープンソースの時系列解析パッケージ「LiCSBAS<sup>26)</sup>」を用いて地盤変動の時系列や速度を計算することが可能である。

このシステムを使用して、2014～2020年の日本の主要都市地域の地盤沈下の時系列や速度を算出した結果が報告されている<sup>27)</sup>。結果、様々な時空間的特性を持つ変動が詳細に検出された。その結果と変動速度については、オープンリポジトリとウェブ地図上で公開されている。

地理院地図<sup>28)</sup>でも、ALOSとALOS2のInSAR処理の結果を見ることが出来る。ここで紹介されているInSAR画像は、地震や火山による地盤の変動を示すものが殆どであるが、ALOSの解析結果については都市部分を含む地盤沈下について示すものがある。

ここまでで分かるように、InSAR処理はこれまで、地震や都市部の地盤沈下など、比較的広範囲に渡る地盤の変位

を検出するために使用されてきた。例えば環境省は『地盤沈下観測等における衛星活用マニュアル』<sup>29)</sup>を公表し、これまで水準点の測量のみで検出していた地盤沈下の様子を面的に示すための具体的な手法について述べている。しかし道路や橋梁など、建造物について、例えば橋梁の変位の特異点などの検出には解像度が十分ではないとされていた。

しかし RESTEC の『干渉 SAR を用いた交通インフラ監視の取り組み』<sup>30)</sup>に於いて、高速道路に対して PALSAR2 と Sentinel1 による InSAR 解析を適用した結果が記されている。その結果を GNSS による変位と比較したところ、空間解像度が 15 m 程度の Sentinel1 データを使用した場合でも、最低 2 カ月に 1 回の計測を行うことで、GNSS 連続計測と同程度の精度で年に 1 cm 以下の道路表面の変位を検出できることが示されている。

このように、これまで地盤沈下に使用していた InSAR 処理による人工構造物の経年変位の検出技術は、老朽化の進んだ橋梁や道路の異常点を検出し、検査員による点検の順位を決定するのに必要な技術であり、建設会社との共同研究も行われている<sup>31)</sup>。また変位を抽出し、時系列に開発するサービスを提供する企業もある<sup>32)</sup>。

また、技術の向上により、面的な変動もより詳細に捉えられることがわかってきている。シールドトンネル工事は、地表面への影響を最小に抑えながら進めるため、微小な変化を検出する必要があるが、実際には現場の上には道路や住宅地があり、測量器を据えて測定することが困難な場合もある。そこで InSAR 処理技術を使用して広範囲の地表面変化を検出する手法が開発されている<sup>33)</sup>。京都市の工事現場に適用し、地上での測量結果と比較したところ、誤差は 1 mm 以下であるとの結果が出ている。

InSAR 専門の技術開発企業であるイタリアの TRE-Altamira 社では最新 InSAR 技術である SqueeSAR™ をインフラ管理の様々な分野に適用している。インフラに関する解析事例紹介として、過去の SAR データを使った、既存の構造物の建築位置の安定性の確認や、空間解像度 1 m

の TerraSAR-X (ドイツ) を使用した建造物の変位の検出などが挙げられている。特に解像度 1 m の SAR データを用いた場合、羽田空港施設の変化の検出、高層建築物の変位の異常の検知、橋梁の部位ごとの変位検知等、インフラ維持管理に必要な解像度での変位の検知が可能であることが示されている<sup>34)</sup>。1 m 解像度の SAR データによってインフラがどのように見えるかを確認するには、日本の衛星プラットフォームである Tellus<sup>35)</sup> が適している。登録の必要はあるが、1 m 解像度の SAR 衛星である ASARCO-2 データで建築物がどのように見えるかを確認することが出来る。なお、解析を行いたい場合はそのための登録を行う必要があるが、無料配布されているツールを使用することで、PALSAR-2 による InSAR 処理をプラットフォーム内で行うことが可能である。

解像度 1 m かそれ以下の SAR 衛星は、小型商業衛星の打ち上げにより増加することは確実であり、これらのデータをインフラ維持・管理に使用することで、InSAR 技術の適用範囲は拡大すると考えられる。実際、既に衛星打ち上げに成功した Synspective 社では、データそのものの提供に加えて、『Land Displacement Monitoring』サービスで InSAR 時系列処理を行い、広域な地表面の変動量を mm 単位で検出・時系列で表示した結果を提供している<sup>36)</sup>。

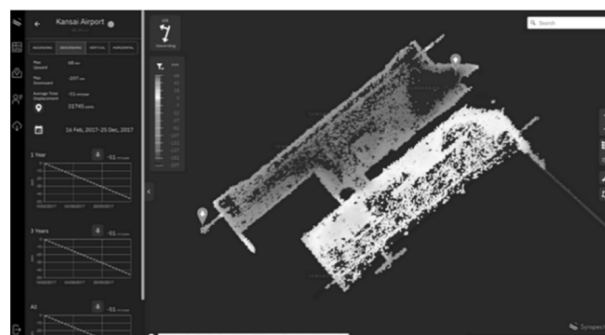


図1 Land Displacement Monitoring の例 (Synspective 社 HP より引用)

表2 SAR を使用したサービス例 (番号は参考文献に対応)

| 技術    | サービス  | 対象データ                                       |   |
|-------|-------|---|---|
| InSAR | 解析ソフト | Sentinel1 SNAP LiCSBAS 26)                  |   |
|       |       | その他 ANATIS 23)                              |   |
|       | 画像処理  | Sentinel1 LiCSAR 25)                        |   |
|       |       | その他 Sigma-SAR Cloud Platform 22) Tellus 35) |   |
|       |       | 解析  | Sentinel1 日本主要地域変化検出 27)                  |
|       |       |   | その他 変位抽出 31)・時系列変化 32) 34) 36)・トンネル工事 33) |
| SAR画像 | AI解析  | ALOS2 漏水位置推定 37)                            |   |

### 3.2 SAR の画像処理

既に述べたとおり、後方散乱波は強度と位相の2つの情報を持つ。InSAR 処理 (位相) だけではなく、強度 (後方散乱係数) もインフラ維持に使用される例がある。

地中の土壌水分は、マイクロ波の後方散乱係数と土壌誘電率の関係から位置の推定が可能であるとされている。従って理論的にはある程度浅い地下水ならば SAR 衛星からも地下水表面の変動が捉えられるとされるが、実際に測定することは困難である。

しかし SAR データの後方散乱係数画像から、水道水の反射特性を AI 技術で解析することで、水道管からの漏水を見つける技術が提供されている。実際に愛知県豊田市の山間部を調査地域としてこの技術は適用されており、結果、

## 研究速報

漏水可能性区域 556 区域に対し、漏水発見区域は 154、うち漏水発見箇所数は 259 箇所、うち修繕済みが 166 箇所、未修繕が 93 箇所という結果が公表されている（区域：直径 200 m 範囲）<sup>37)</sup>。

漏水発見の確率は 1/5 程度であり、決して高い確率ではない。また対象地域は山間部に限られており、都市部では技術が通用しない可能性はある。しかしこれまで水道管の漏水は現地で漏水音を確認する作業が必要であるため、その範囲が絞られるだけでも作業効率が上がり、これまでは 5 年かかった作業期間が 7 か月に短縮されている。広域内の複数の変位の異常点などを検知し、作業の優先順位を示すことで、効率化を測ることが可能である。

## 4. おわりに

本稿を書いている途中、インターステラテクノロジズ社（北海道）が小型ロケット MOMO の打ち上げに成功したとのニュースが入った。同社は超小型人工衛星打ち上げロケット「ZERO」の開発も進めている。センサーの打ち上げの低価格化が進むにしたがって、インフラヘルスの観測特化のセンサーを打ち上げることも容易になると考えられる。

MMS で計測・収集した 3D データが自動操縦・防災・既存のインフラの管理、と複数の分野で使用できるように、新しい衛星からのデータも様々な分野に応用可能なものであると予測できる。増大していくデータを適用しつつ、これまでの技術の精度を上げてゆくことで、リモートセンシング技術はインフラヘルス維持管理に、より役立つものになることと思われる。

(2021 年 8 月 6 日受理)

## 参考文献

- 1) 社会資本の老朽化の現状と将来  
[https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/maintenance/02research/02\\_01.html](https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/maintenance/02research/02_01.html)
- 2) 平成 28 年度 IoT 推進のための新産業モデル創出基盤整備事業 (IoT 技術を活用した社会インフラの効率的点検・管理手法等調査)  
[https://www.meti.go.jp/medi\\_lib/report/H28FY/000102.pdf](https://www.meti.go.jp/medi_lib/report/H28FY/000102.pdf)
- 3) アスファルト舗装のひび割れ領域自動検出システム  
<https://sanei.co.jp/%E8%88%97%E8%A3%85%E9%81%93%E8%B7%AF%E7%82%B9%E6%A4%9C/>
- 4) 車載 3D スキャナを用いた舗装切削量等計算システム  
<https://www.netis.mlit.go.jp/netis/pubsearch/details?regNo=HK-180003%20>
- 5) モービルマッピングシステムと 3D 地中レーダを組み合わせた 3 次元図化システム  
<https://www.netis.mlit.go.jp/netis/pubsearch/details?regNo=KK-150007%20>
- 6) 糸氏敏郎, 今野新, 関谷浩孝, 点群データの取得条件と検知可能なポットホール規模との関係の基礎分析, 土木技術資料: 土木技術の総合情報誌 61(12), 48-51, 2019
- 7) InfraDoctor/ インフラドクター

- <https://www.shutoko-eng.jp/technology/infradoctor.php>
- 8) 姜文淵, 山本雄平, 中村健二, 田中成典, MMS を用いた道路中心線形の自動生成技術の実証研究. 土木学会論文集 F3, 73(2), p327-337, 2017
  - 9) 村上貴哉, 橋川雄樹, 竹内栄二郎, 二宮芳樹, 目黒淳一, 自動運転に適用する三次元点群の評価に関する研究 (位置ずれの検出のための三次元点群の評価指標の提案). 日本機械学会論文集 86(892), p20-00151, 2020
  - 10) 走行型計測 (MIMM) による道路トンネル健全性評価技術  
<https://www.newjec.co.jp/gijutsu/tn-kenzen/tn-kenzen01.html>
  - 11) 社会インフラモニタリングシステム MMSD  
<https://www.netis.mlit.go.jp/netis/pubsearch/details?regNo=HR-180004%20>
  - 12) 河川管理における MMS 利活用事例集  
[https://www.ktr.mlit.go.jp/ijikanri/content/07\\_001.pdf](https://www.ktr.mlit.go.jp/ijikanri/content/07_001.pdf)
  - 13) MMS を用いた河川管理への利活用検討  
[https://www.ktr.mlit.go.jp/ktr\\_content/content/000676505.pdf](https://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000676505.pdf)
  - 14) 河川 CIM  
<https://www.pasco.co.jp/cim/river/>
  - 15) 除草しながら堤防を三次元計測! SIP 開発技術で円山川堤防点検にチャレンジ!  
<https://www.mlit.go.jp/common/001230124.pdf>
  - 16) i-Construction <https://www.ajiko.co.jp/icon/sencing.html>
  - 17) ヘリレーザと MMS の融合  
<https://www.ajiko.co.jp/products/detail/78>
  - 18) Shizuoka Point Cloud DB  
<https://pointcloud.pref.shizuoka.jp/>
  - 19) PLATEAU <https://www.geospatial.jp/ckan/dataset/plateau>
  - 20) 国土交通データプラットフォーム Ver.1.4  
<https://www.mlit-data.jp/platform/>
  - 21) 静岡県 富士山南東部・伊豆東部 点群データ  
<https://www.geospatial.jp/ckan/dataset/shizuoka-2019-pointcloud>
  - 22) Sigma-SAR Cloud Platform <https://sigma-sar.com/index.php>
  - 23) ANATIS <https://www.netis.mlit.go.jp/netis/pubsearch/details?regNo=KT-190029%20>
  - 24) 衛星を活用したインフラ点検作業の効率化について [https://www.jaxa.jp/press/2019/04/files/20190418b\\_01.pdf](https://www.jaxa.jp/press/2019/04/files/20190418b_01.pdf)
  - 25) COMET-LiCS Sentinel-1 InSAR portal  
<https://comet.nerc.ac.uk/COMET-LiCS-portal/>
  - 26) LiCSBAS <https://github.com/yumorishita/LiCSBAS>
  - 27) Sentinel-1 干渉 SAR 時系列解析による全国都市域地表変動監視 [http://progearthplanetsci.org/highlights\\_j/381.html](http://progearthplanetsci.org/highlights_j/381.html)
  - 28) 地理院地図 (基準点・地磁気・地殻変動→干渉 SAR) <https://maps.gsi.go.jp>
  - 29) 地盤沈下観測等における衛星活用マニュアル  
<http://www.env.go.jp/press/files/jp/105895.pdf>
  - 30) 干渉 SAR を用いた交通インフラ監視の取り組み  
[https://www.harrisgeospatial.co.jp/Portals/74/VIS\\_Japan/documents/4\\_ENVI2017\\_CaseStudy\\_Furuta.pdf?ver=2017-10-06-102918-000](https://www.harrisgeospatial.co.jp/Portals/74/VIS_Japan/documents/4_ENVI2017_CaseStudy_Furuta.pdf?ver=2017-10-06-102918-000)
  - 31) 衛星 SAR によるインフラモニタリング  
<https://www.jst.go.jp/sip/dl/k07/kadai/k07-25.pdf>
  - 32) 衛星データを活用した変位モニタリングサービス  
<https://www.jsat.net/jp/spatio-i-infra.html>
  - 33) 地表の沈下を面で捉える「衛星による変動モニタリング(地

- 下工事及び埋立地の変動監視」  
[https://www.pasco.co.jp/products/stc\\_monitor/](https://www.pasco.co.jp/products/stc_monitor/)
- 34) CIVIL ENGINEERING (TRE ALTAMIRA)  
<https://site.tre-altamira.com/industry/civil-engineering/>
- 35) Tellus <https://www.tellusdp.com/>
- 36) Land Displacement Monitoring <https://synspective.com/jp/solutions/land-displacement/>
- 37) 人工衛星と AI で宇宙から水道管の漏水を検知 世界で実績の技術が愛知県豊田市で国内初採用  
<https://www.japan21.co.jp/2021-06-16-utilis-toyota-city/>  
(全ウェブリンクについて 2021 年 8 月 6 日閲覧を確認)