

深層学習を用いた PSInSAR 解析の対流圏遅延誤差除去

下里 航大^{1,a)} 浮田 宗泊^{1,b)}

概要：地表は日常的に様々な変動が生じている。変動の一つとして地盤沈下がある。一度地盤沈下すると元に戻ることはほとんど無く、建造物やライフラインの損壊、洪水による浸水増大などの被害をもたらすため、地盤沈下を把握し、対策することが重要である。地盤沈下を把握する手段として水準測量、全球測位衛星システム測量、合成開口レーダ (Synthetic Aperture Radar ; SAR) 画像を用いた干渉 SAR 解析の3つが主に挙げられる。水準測量と全球測位衛星システム測量はどちらも、ある点でしか変動量が観測できないが、干渉 SAR 解析は広範囲を面的に観測できる特徴がある。この特徴により地盤変動の中心や範囲を簡単に推定でき、新たな地盤沈下の検出も可能となる。しかし、水準測量の測量精度が mm 単位なのに対し、干渉 SAR 解析は観測時の誤差により理論上は mm 単位の精度であるが cm 単位の精度が現状である。また、観測時の誤差の中で特に影響を与えるのが大気中の水蒸気量による対流圏遅延誤差である。従来手法では、SAR 画像中のピクセル毎に誤差除去を行ったため誤差により隣接するピクセル同士で大きく地盤変動量が変わるという問題がある。提案手法では、従来手法を用いて誤差除去をした干渉 SAR 画像と誤差除去の際に推定された対流圏遅延量のデータを深層学習モデルに与え、注目領域内とその周辺を考慮することで誤差が大きいピクセルに対しても周辺のピクセル情報から適切に誤差除去を行い、測量精度の向上を図る。検証結果は、従来手法と比べ二乗平均平方根誤差を 10.3 [mm] から 5.05 [mm] へと低減することができ、測量精度が向上した。

キーワード：PSInSAR 解析, 対流圏遅延, 深層学習

1. はじめに

近年、日本では台風による大雨や集中豪雨などの自然災害により家屋や建物の浸水被害が多く発生している。浸水被害の原因は多様に渡るがその原因の一つとして地盤沈下があげられる。地盤沈下の対策はされつつあるが、今もなお進行している地域があり、さらなる対策を講じなければ今後も地盤沈下が進行する可能性がある [1]。そのため、地盤沈下が発生している地域に対して継続的な監視・調査を行い、原因特定ならびに被害が大きくなる前に対策を講じることが重要である。

地盤沈下を観測する方法として水準測量、全球測位衛星システム (Global Navigation Satellite System ; GNSS) 測量、合成開口レーダ (Synthetic Aperture Radar ; SAR) 画像を用いた干渉 SAR 解析の3つが主に挙げられる。

1つ目の水準測量は、現地へ調査員が出向き、地上の2点間の高低差や任意の地点の標高を水準儀と標尺を用いて求める測量のことであり、国及び地方公共団体により水準

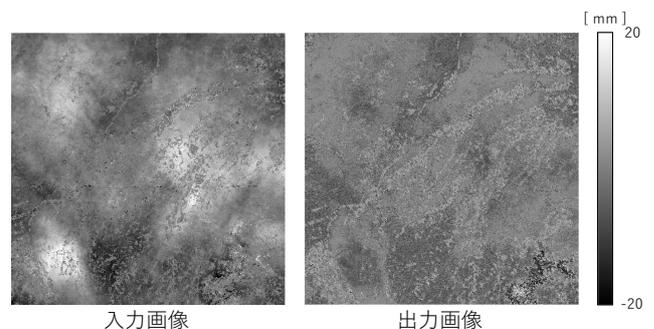


図1 入力画像と出力画像における地盤変動推定量の違い。入力画像と出力画像は、日本の一部地域を撮影した干渉 SAR 画像から、地盤変動推定量を表現した画像である。右端のバーは地盤変動推定量を示している。StaMPS/MTI[2], [3] を用いて生成した入力画像をネットワークに入力することで、誤差が除去された出力画像が生成される。入力画像の白い箇所は誤差が特に大きい箇所であったが、出力画像では誤差除去され精度が改善している。

測量が実施されている。

2つ目の GNSS とは Global Positioning System (GPS) や GLOBal'naya NAVigatsionnaya Sputnikovaya Sistema (GLONASS), Galileo, 準天頂衛星システム (Quasi-Zenith

¹ 豊田工業大学
Toyota Technological Institute
a) sd20425@toyota-ti.ac.jp
b) ukita@toyota-ti.ac.jp

表 1 水準測量, GNSS 測量, 干渉 SAR 解析の特徴. 地盤沈下を観測する方法として挙げた 3 つの方法について, 特徴をまとめたものである. 利点となるものは赤文字で示す.

	水準測量	GNSS 測量	干渉 SAR 解析
測量精度	~ 数 mm	~ 数 cm	~ 数 cm
測定量の次元	1 次元	3 次元	1 次元
地上の観測機器	水準儀/標尺等	GNSS 機器	不要
情報の広がり	点・線的	点・線的	面的
観測周期	年単位	24 時間	数十日
一度の観測範囲	狭域	広範囲	広範囲

Satellite System ; QZSS) 等の衛星測位システムの総称であり, GNSS 測量は GNSS 機器を地上に設置することで人工衛星から地盤変動を測量する方法である.

3 つ目の干渉 SAR 解析で用いられる SAR は, 空間分解能の高いマイクロ波レーダであり, 人工衛星から照射して地表の対象物からのレーダ反射波の強度に加えて反射波の位相情報を得ることができる. そして, 位相情報から位相差を計算することによって観測期間に発生した地表の変動量を測量する方法である.

これら 3 つの特徴を表 1 にまとめる. 地盤変動量の観測の応用に適切であるのが干渉 SAR 解析である. 広範囲を面的に観測できるという特徴により地盤沈下の変動中心やその範囲を推定することができ, 水準測量が実施されていなかった地域において干渉 SAR 解析を行ったところ地盤沈下が新たに検出された [4]. しかし, この事例では測量精度のために干渉 SAR 解析によって検出された後に水準測量で測量を行っている. これは干渉 SAR 解析の測量精度が水準測量よりも劣っていることに起因する.

そこで, 本研究では干渉 SAR 解析にて出力される干渉 SAR 画像に対して完全に除去をしきれていない誤差を, 深層学習を用いることでさらに誤差を低減する手法を提案する. 図 1 に示すように大きな誤差 (白い箇所) を含む入力画像が深層学習によって出力画像のようになり, 精度が改善された. このように干渉 SAR 解析の欠点である測量精度を向上させることで水準測量と同等の数 mm 単位を実現する.

2. 関連研究

本研究に関する技術, 研究を紹介する. まずリモートセンシング技術である SAR を述べ, 次に SAR を用いた応用技術の干渉 SAR について説明する.

2.1 合成開口レーダ (SAR)

合成開口レーダ (SAR) とは, 人工衛星や航空機に搭載したアンテナを用いて, 地表に対してマイクロ波の照射と反射波の受信を連続的に行い, 空間上に仮想的に巨大なアンテナが存在しているかのような状態を作り出すことで,

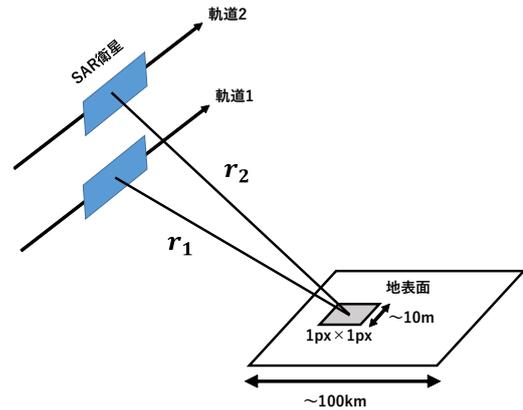


図 2 衛星-地表間の関係図. r は SAR 衛星と地表の片道の距離を示す. 軌道 1, 軌道 2 はそれぞれ地表面の同一地点を 1 度目の観測で衛星が通った軌跡と 2 度目の観測で衛星が通った軌跡である. また, SAR 衛星は 1 度の観測で ~100km 幅を撮影することができ, 地表面に灰色で描かれた台形は撮影された範囲の中の 1 ピクセルを示す. 解像度は 1 ピクセルあたり約 10m である.



図 3 光学画像 (左図) と SAR 画像 (右図) の比較. 愛知県常滑市にある中部国際空港周辺の同範囲を撮影したものである. SAR 画像はマイクロ波の反射強度を表すモノクロ画像であり, 反射強度が高いほど白くなる. 人工構造物 (建物など) や岩石は反射強度が高い.

高い空間分解能で地表の画像を得ることができる技術である. 図 3 は愛知県常滑市にある中部国際空港周辺を光学画像 (左図) と SAR 画像 (右図) で示したものである. 地表の対象物から反射される電波の強さから対象物の大きさや表面の性質を測ることができる.

2.2 干渉 SAR (Interferometric SAR ; InSAR)

干渉 SAR (Interferometric SAR ; InSAR) とは, 地表の同一地点において複数回における SAR 観測を行って得ることができた SAR 画像を干渉させた後に差分を取ることによって衛星と地表間の視線方向での変化を知ることができる技術である. 図 2 に示した衛星-地表間の関係が成り立っているときに, 以下の式が成り立つ [5], [6], [7], [8].

$$2r_1 = n_1\lambda + \Delta x_1 \quad (1)$$

$$2r_2 = n_2\lambda + \Delta x_2 \quad (2)$$

式 (1) が 1 回目の SAR 観測, 式 (2) が 2 回目の SAR 観測における関係式である. λ は衛星からの SAR マイクロ波の波長, n は SAR のマイクロ波の波数と Δx 端数が決まる ($0 \leq \Delta x < \lambda$). 添え字 1, 2 は観測回を示す.

2 回の観測期間中に発生した衛星と地表間における距離の変化量は式 (2) から式 (1) の差分を取ることで求められる. この時, 2 回の観測時における衛星軌道は完全に一致しているものとする.

$$\begin{aligned} 2(r_2 - r_1) &= \Delta x_2 - \Delta x_1 \\ &= \frac{\lambda(\phi_1 - \phi_2)}{2\pi} \end{aligned}$$

ϕ_1, ϕ_2 はそれぞれ位相である. 位相の差をとることによって r_1 と r_2 に共通に含まれていた地形スケールの影響が大部分取り除かれ, 変動の差が波長のスケールで検出できる. これが InSAR の仕組みであり, このとき出力されるのが初期干渉画像である. 初期干渉画像とは干渉処理を行っただけの画像である. これには地表の変動による変動縞だけでなく, 複数回観測時に衛星軌道が一致していないために生じる軌道縞や地形縞など, 複数の誤差が重なっている.

初期干渉画像中の位相残差 (residual phase) $\phi = \phi_1 - \phi_2$ は, 次式に示す 5 つの項で表すことができる [9].

$$\phi = \phi_{def} + \phi_{atm} + \phi_{orb} + \phi_{DEM} + \phi_n \quad (3)$$

ここで, ϕ は初期干渉画像に見られる全ての縞の和を指しており, ϕ_{def} は衛星と地表面との視線方向の変位による位相変化であり, 地盤変動推定量である. ϕ_{atm} は 2 回の観測時の対流圏遅延誤差に相当する位相, ϕ_{orb} は衛星の軌道データ誤差に起因する位相, 干渉画像を作成する過程で地形縞を含んだ画像が生成される. これを除去するために地表面の地形をデジタル表現にした数値標高モデル (DEM) を用いる. しかし, DEM の解像度の影響により生じる誤差からなる位相が ϕ_{DEM} である, ϕ_n はノイズによる位相である. したがって, 初期干渉画像から ϕ_{def} 以外の全ての誤差要因となり得る位相を除去する必要がある. InSAR では, 衛星軌道データや DEM などの外部データを用いて, 初期干渉画像の位相に含まれる衛星軌道や標高の寄与を推定し, 差し引くことによって地表変動のみに起因する位相を推定する. InSAR では, ノイズ量の多いピクセルの影響により正確な変動量を把握するのが難しい. そこでノイズ量の少ないピクセルで解析するように改良されたのが, 次節で紹介する PSInSAR である.

2.3 Persistent Scatterer InSAR (PSInSAR)

PSInSAR では, 図 4 で示すように時系列で観測された複数の SAR 画像から PS 点と呼ばれる干渉性の良いピクセルを統計的に選定する. これらの点に限定すると, InSAR 解析で除去できなかった大気の影響による誤差や散乱対象物の形状変化による悪影響の誤差を抑制することができ

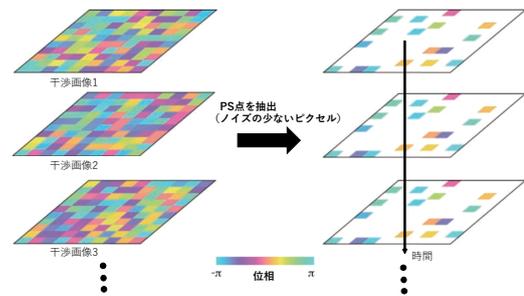


図 4 PS 点抽出の概念図. 干渉画像 1, 2... と時系列で並んでいる. 左図のように位相が一見ランダムに見える干渉 SAR 画像においても, PS 点を抽出すると右図のように共通値が含まれていることを示す.

る. これが PSInSAR である [10], [11], [12]. PS 点は物理的に強い反射を作り出している点であり, 主に人工構造物や岩石等に対応する. このような対象物がピクセル内に存在する場合, マイクロ波を安定して反射する傾向を示し, そのような地点での位相はノイズ量が少ないことが知られている [13]. Ferretti ら [14] は式 (4) に示す分散指標 D_A を定義し, この指標がしきい値より小さいピクセルを PS 点 (位相の安定したピクセル) とみなした.

$$D_A = \frac{\sigma_A}{\mu_A} \quad (4)$$

ここで, σ_A と μ_A は, あるピクセル A における全ての干渉 SAR 画像の振幅値の標準偏差と平均である. このように, ノイズ量の少ない, すなわち位相の安定したピクセルのみを利用して InSAR を行う手法を PSInSAR という. SAR データ数や SAR レーダのマイクロ波の波長, 対象地域などによるが条件が良ければ PSInSAR による地盤沈下の変動値の測量精度は 1mm/year 程度を達成可能であるという報告がある [15].

しかし, 大気中に含まれる水蒸気が多い地域では観測される位相に大気中の水蒸気による遅延量 (式 (3) の ϕ_{atm}) が含まれ, それらが地盤変動計測においてはより大きな誤差となる [16]. この誤差が, 対流圏遅延誤差である. 対流圏遅延誤差を除去するために大気の屈折率の変化の寄与も推定し, 取り除く必要があるが, 現時点では汎用的な方法は無く, 地形に related した寄与を近似的に推定する方法や数値気象モデルを用いて寄与を推定する方法などが提案されている [17], [18]. しかし, これらの外部データは, SAR データと空間分解能, 時間分解能が異なり, 適用したとしても一定の誤差が残ってしまい, 全ての位相の寄与を mm の精度で推定するのは難しい.

3. 提案手法

まず, 本研究で用いる入力画像を生成するため, 図 5 に示すように SAR 画像を Sentinels Application Platform (SNAP) [20] によって InSAR 解析する. PSInSAR 解析には, Hooper ら [2], [3] が開発した Stanford Method for

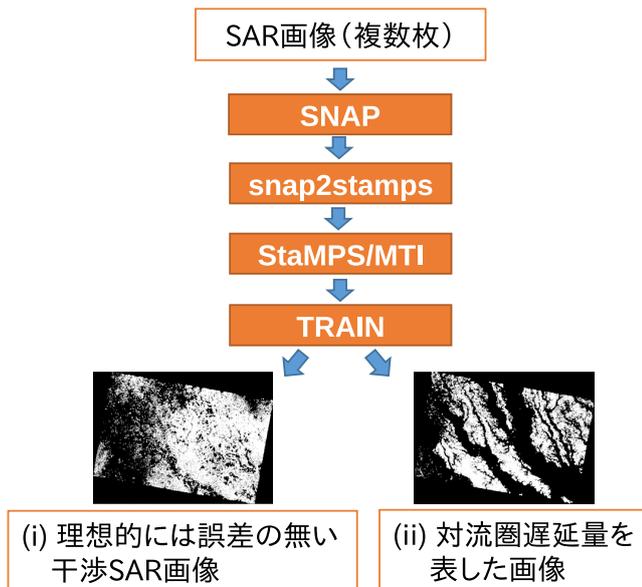


図5 SAR画像から干渉SAR画像生成までのフロー．同地点で撮像の時期が異なる2枚のSAR画像からSNAPでInSAR解析を行い，snap2stampsでStaMPS/MTIの形式に変換し，StaMPS/MTIでPSInSAR解析する．式(3)の対流圏遅延誤差 ϕ_{atm} はStaMPS / MTI[2], [3]だけでは除去が不完全なため対流圏遅延誤差除去に特化したTRAIN[19]を用いてさらに対流圏遅延誤差除去を行っている．以上のフローから(i)理想的には誤差の無い干渉SAR画像と(ii)対流圏遅延量を表した画像を生成する．

Persistent Scatterers / Multi-Temporal InSAR (StaMPS / MTI)を用いた．PSInSAR解析の後にThe Toolbox for Reducing Atmospheric InSAR Noise (TRAIN) [19]を用いて対流圏遅延誤差除去を行う．これは，対流圏遅延誤差が標高に相関関係があるという仮定に基づいて誤差除去をするものである．そして出力されるのが，(i)理想的には誤差の無い干渉SAR画像と，(ii)対流圏遅延量を表した画像である．2つの画像はそれぞれの緯度経度で小数を含む値((i)では地盤変動推定値，(ii)では対流圏遅延量)が記された配列データである．

対流圏遅延による誤差をより正確に推定するためには，広範囲を考慮する方が対流圏の傾向が把握できると考えられる．しかし，TRAINによる対流圏遅延誤差除去ではピクセル毎に誤差の推定をするため周りのピクセルの状態を考慮していない．そこで，誤差除去するピクセルに加え，周りのピクセルも考慮することで対流圏遅延誤差を推定する手法を提案する．

以降，3.1節では，学習に用いるネットワークに入力する干渉SAR画像の変換処理について述べる．3.2では，対流圏遅延誤差除去を行う深層学習モデルについて説明する．

3.1 干渉SAR画像の変換と対流圏遅延誤差の推定画像の生成

対流圏遅延誤差除去を行う深層学習モデルには，以下の

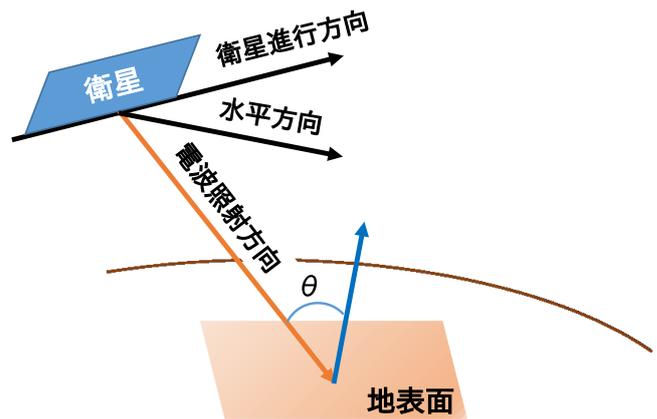


図6 衛星と地表間の視線方向での変化と鉛直方向での変化の関係図． θ はSAR衛星が放つマイクロ波の入射角である．橙色の線が衛星と地表間の視線方向での変化を示しており，干渉SAR解析によって得られる変動量はこれに相当する．しかし，水準測量の結果から得られる変動量は青色で示す線であるため入射角を用いて視線方向の変動量を鉛直方向の変動量に変換する必要がある．

2つのデータを入力とする．

- (i) 理想的には誤差の無い干渉SAR画像(図5の出力画像(i))
- (ii) TRAINによって推定される対流圏遅延量を表した画像(図5の出力画像(ii))

深層学習モデルに画像を2つ入力するのは，(i)の画像はTRAINによって対流圏遅延誤差がある程度除去されているため，どの箇所が対流圏遅延誤差によるものか判別できないことから(ii)の対流圏遅延誤差推定量の画像を与えることで，どの箇所が間違っているのかという判断材料とするためである．

(i)の画像は，PSInSAR解析，TRAINによって式(3)の ϕ_{def} の項，すなわち地盤変動推定量のみが残り，その他の誤差の項が理想的には除去された状態である．しかし，実際には誤差除去しきれていない．この画像(i)が示すのは，1年間における衛星と地表間の視線方向での地盤変動推定量である．これは，図6の橙色の矢印の方向に相当する．しかし，水準測量の結果は地表面に対して鉛直方向における地盤変動量である．これは，図6の青色の線分の方に相当する．干渉SAR画像と水準測量との結果が比較できるように干渉SAR画像を変換する必要がある．この変換は，図6に示すようにSAR画像が撮影されたときの衛星と地表面における入射角 θ を求める必要がある[21]．しかし，各SAR画像には入射角の情報がないためSentinel-1の運営元であるESAで公表されている入射角の変動範囲の中央値を用いて計算した．これにより，視線方向の地盤変動量を鉛直方向における変動量に変換することができる．これが，ネットワークの入力の1つ目となる．

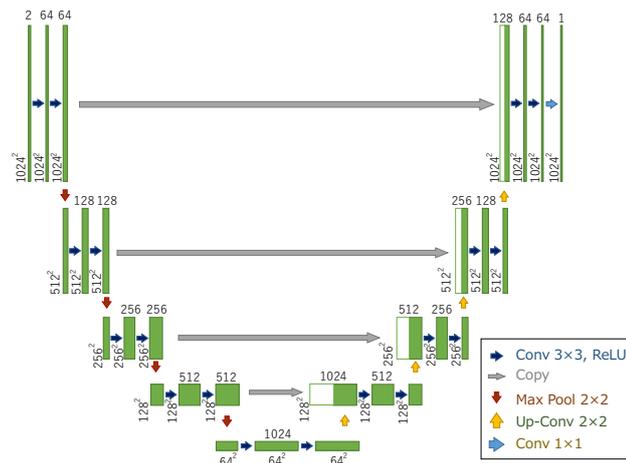


図 7 対流圏遅延誤差除去を行う UNet[22] の模式図．一般に，プーリングによる画像サイズの圧縮を行う CNN では，局所的特徴が失われてしまう．そこで，プーリングによる画像サイズの圧縮が行われていない初期の畳み込み層の出力を，対応するサイズの逆畳み込み層の入力へと結合することによって，プーリングによる局所的特徴の喪失を防ぐ．

(ii) の画像は，TRAIN が対流圏遅延誤差を除去する際に遅延量がどれくらいあるかを推定した画像である．式 (3) の対流圏遅延誤差 ϕ_{atm} による測量精度への影響が強く，その他の誤差は PSInSAR 解析で除去され，取り除けていないとしても対流圏遅延誤差より影響が小さい．すなわち，(i) の画像で水準測量の結果と比較した際に生じる誤差は対流圏遅延誤差によるものとみなせる．

この対流圏遅延量を表した画像は同じ SAR 衛星から得られるデータであるため，衛星と地表間の視線方向となっている．図 6 の橙色の矢印の方向に相当する．これを (i) と同様に入射角を用いて鉛直方向にすることで，ネットワークの入力の 2 つ目が得られる．また，これもネットワークの 1 つ目と同じく，図 5 の (ii) の画像の全てのピクセルに対して変換を行ったものであるため正規化した (i) の画像と値は異なるが見た目は同じとなる．

3.2 対流圏遅延誤差除去を行う深層学習モデル

対流圏遅延誤差除去を行う深層学習モデルとして，今回は，画像生成するネットワークのベースの 1 つであり，生成する精度が高く，ネットワークが軽く，重いネットワークに比べて広範囲の干渉 SAR 画像を入力することが可能な UNet[22] を利用する．Unet は，局所的特徴と大域的特徴の両方を同時に認識可能な構造を持つ．UNet の構造を図 7 に示す．局所的特徴とは，注目領域における地盤変動量の数値そのものや同領域内での変化量など，画像中の細かな情報を捉える特徴である．局所的特徴により，注目領域内の地盤変動量の大きさや変化量などの特徴を学習できる．大域的特徴とは，注目領域の内外含め，地盤変動量の特徴や変化の傾向など，広範囲な画像情報を捉える特徴で

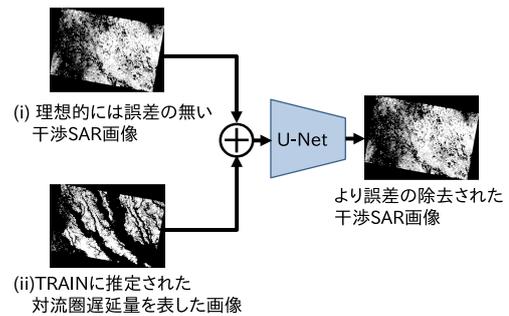


図 8 提案手法の概略図．3.1 節で述べた 2 つのデータ (i)，(ii) をチャンネル方向に結合してから UNet に入力する．(ii) の推定された対流圏遅延誤差を訂正するように学習することで，出力結果の干渉 SAR 画像は TRAIN で除去しきれなかった対流圏遅延誤差の除去がされた干渉 SAR 画像となる．

ある．大域的特徴により，全体的な地盤変動や対流圏遅延の変化の傾向などが学習できる．このような大域的特徴と局所的特徴の両方を考慮することで，例えば狭い範囲においては地盤変動量に急激な変化が生じている場合でも，広範囲で見ると一定の変化の傾向があることが分かることから，その急激な変化は誤差による可能性があるといった判断が可能になる．

提案手法の概念図を図 8 に示す．まず，3.1 節の (i)，(ii) のデータはそれぞれ 1 チャンルのグレースケール画像であり，これらをチャンネル方向に結合する．これにより元々 1 チャンルの干渉 SAR 画像 2 つを結合することで 2 チャンネルとなる．この干渉 SAR 画像を UNet に入力する．

次に，真値として比較する水準測量の結果を干渉 SAR 画像と比較する方法について説明する．水準測量の結果は各水準点の緯度と経度，地盤変動量のデータの集まりである．入力する干渉 SAR 画像と同じ画素数となるように全ての値が 0 で埋められた 2 次元配列を作成する．その配列にて各水準点の緯度経度の箇所のみ地盤変動量を入力する．これにより水準測量の結果を干渉 SAR 画像と同じ大きさの 2 次元配列にすることができる．さらに，作成した 2 次元配列からデータの有無が記された配列を作る．データの有無が記された配列とは，作成した 2 次元配列と同じ範囲の配列を用意し，地盤変動量が入力されている箇所は値が 1，入力されていない箇所は値が 0 となるような配列である．このデータの有無が記された配列を干渉 SAR 画像に乗算することで，水準点のある箇所のみ干渉 SAR 解析によって推定された地盤変動量の値が残り，水準点がない箇所は全て値が 0 となる．水準点のある箇所のみ地盤変動量の値が残っている干渉 SAR 画像と水準測量の結果の 2 次元配列にて，平均二乗誤差 (Mean Squared Error; MSE) を計算することで，水準点のみで干渉 SAR 解析の推定した地盤変動量と水準測量の結果の値の差が分かる．UNet では，この値の差が 0 になるように学習する．これにより，UNet から出力される干渉 SAR 画像から推定され

る地盤変動量は、水準測量の結果と近い値となる。すなわち、誤差が除去された干渉 SAR 画像である。

4. 実験

4.1 使用したデータ

4.1.1 節で水準測量データについて述べ、4.1.2 節で SAR データについて説明する。

4.1.1 水準測量データ

環境省 水・大気環境局は地方公共団体から地盤沈下の測量結果等の情報提供を受けて「全国の地盤沈下地域の概況」を取りまとめて公表している [23]。公表された中で最新の平成 29 年度の資料によると平成 29 年度に地盤沈下を測定するために水準測量が実施された地域は、24 都道府県 33 地域である。精密な水準測量では高低差を 0.1mm まで求めているため [24]、測量精度は 0.1mm である。よって本研究では水準測量の結果を真値とする。この測量結果は各水準点の水準点番号、住所、年間の地盤変動量が mm 単位で記載されている。また、PSInSAR 解析結果と比較するために水準点番号と住所から国土地理院の基準点成果等閲覧サービス [25] を用いて各水準点に対して緯度経度情報を与えた。全ての水準点の個数は 1025 個であるが、水準点によっては隔年周期で測量を行ったり、埋没や移動によって同じ緯度経度による 1 年周期の地盤変動量が分からない点が存在する。今回の研究ではそれらの点は事前に除外した。実際に使用するデータ数は水準点の個数を使用可能な年数分掛け合わせた数であり、これは 2900 個である。次に、テスト時にトレーニングデータで使用された水準点付近の水準点を用いると、水準点は異なったとしても干渉 SAR 画像が同じであるため地盤沈下を推定しやすくなってしまふ。これを回避するためにトレーニングに用いるデータとテストに用いるデータを都道府県単位、すなわち干渉 SAR 画像が異なるように分ける必要がある。テストデータ数がトレーニングデータ数の約 1 割となるように都道府県を選定した。これによってトレーニングデータ数は、2616 個、テストデータ数は 284 個となる。

4.1.2 SAR データ

人工衛星によって観測された SAR データは、日本を初めとして様々な国や機関によって収集および配布されている。日本では、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) のだいち (ALOS) やだいち 2 号 (ALOS-2) といった衛星を打ち上げている。ヨーロッパ宇宙機関 (ESA) では、コペルニクス計画 (2012 年) の一環として地球観測する人工衛星 Sentinel-1 シリーズの継続的な打ち上げと運用および観測データの無償提供を宣言した。しかし、Sentinel-1 以外の全ての衛星のデータは商用販売されている。ネットワークによる学習をより正確に行うためには大量のデータが必要となるが、大量のデータを揃えるにはコスト面で難しい。そこで本研究では、ESA によって運用およびデータ

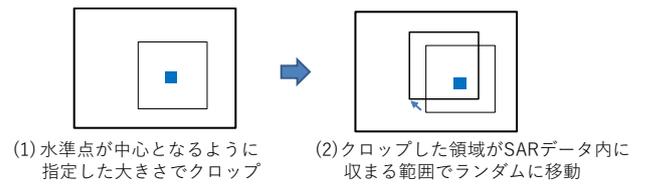


図 9 ランダムクロップの手順。まず、干渉 SAR 画像内で 1 つの水準点を中心となるように指定した大きさをクロップする。そして、クロップした領域が SAR データ内に収まる範囲でランダムに移動させる。これを全ての水準点に対して行う。

の無償提供されている人工衛星 Sentinel-1 によって取得された SAR データを利用する。4.1.1 節で述べた水準測量結果が得られた範囲を網羅できるように SAR データを選別した。ESA が運営している Open Access Hub [26] からダウンロードした。PSInSAR 解析では同じ地点で時期が異なる SAR データが必要である。同一地点にて最低 2 個の SAR データから PSInSAR 解析はできるが、解析精度を高めるためにはデータ数が多ければ多いほどよい。今回は各都道府県で平均して 10 個の SAR データから PSInSAR 解析を行った。最終的に使用する SAR データ数は 346 個であるが、PSInSAR 解析後の干渉 SAR 画像の個数は水準測量が得られた都道府県の個数に合わせているため 13 個である。

4.2 データセット作成

ダウンロードした SAR データのサイズは約 20000 ピクセル × 10000 ピクセルと大きい。そのため各都道府県での水準点全ての緯度経度が含まれるような範囲内において 3.1 節で説明した手順により干渉 SAR 画像を生成する。このとき生成された干渉 SAR 画像は約 15000 ピクセル × 10000 ピクセルである。しかし、GPU のメモリに乗せるには大きすぎるため図 9 に示すようにランダムクロップを行い画像サイズを小さくする。干渉 SAR 画像と水準測量の結果が比較できるように、1 枚の干渉 SAR 画像には最低 1 点以上の水準点が含まれるようにクロップを行った。このクロップは水準点ごとに行う。例えば、1 個の干渉 SAR 画像内に 20 個水準点があると 20 点全ての水準点に対してランダムクロップするため 20 個のクロップされた画像が生成される。このようにして生成された干渉 SAR 画像は 4,396 個となった。また、クロップ後の干渉 SAR 画像のサイズは 512 ピクセル × 512 ピクセルで実験をしたが対流圏遅延誤差を考慮できるほどの大きさでなかったため学習が進まず、2024 × 2024 では GPU のメモリに乗らなかったため、今回は 1024 ピクセル × 1024 ピクセルとした。

4.3 UNet の学習

UNet の学習アルゴリズムには Adaptive moment estimation (Adam) [27] を利用した。4.2 節のランダムクロッ

プを4回実行,すなわち同一の水準点に対して4つの異なる画像が生成する.これによりトレーニングデータ数は10,464個となった.1回の学習で,どれだけ学習すべきか,どれだけパラメータを更新するかを決める学習率は $5e-5$,データセットを幾つかのバッチに分割したときの1バッチに含まれるデータ数であるバッチサイズは12で,1つのトレーニングデータを何回繰り返して学習させるかを表すエポックは200で学習を行いフィルタのパラメータを最適化した.学習終了後は3.1節で生成した干渉SAR画像をそのまま入力することにより評価する.

4.4 地盤沈下推定の性能評価法

提案手法の有用性の確認のため二乗平均平方根誤差(Root Mean Squared Error; RMSE)と平均絶対誤差(Mean Absolute Error; MAE)による定量的評価を行う. RMSE, MAEは回帰モデルの誤差を評価する指標の一つである.

RMSEは,水準測定の測量値を $y_{obs,i}$ ($i=1,2,3,\dots,n$),モデルから計算された予測値を $y_{pred,i}$ とすると,次の式によって定義される.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{obs,i} - y_{pred,i})^2} \quad (5)$$

式(5)より測量値と予測値が近づくほどRMSEは小さくなる.すなわち予測精度が高いことを表す.逆に測量値と予測値が遠くなるとRMSEが大きくなる.

RMSEと同様に,MAEは次の式によって定義される.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_{obs,i} - y_{pred,i}| \quad (6)$$

式(6)より測量値と予測値が近づくほどMAEは小さくなる.すなわち予測精度が高いことを表す.逆に測量値と予測値が遠くなるとMAEが大きくなる.

多くの外れ値が観測されることから,多くの外れ値が存在するデータの誤差を評価するときや,外れ値にあまり影響されない評価を行いたいときはRMSEよりMAEの方が優れた指標と言える[28].今回は,この2つの指標を用いて両指標共に従来手法よりも提案手法が小さい値となれば,外れ値がほとんど無いデータまたは外れ値があるとしてもモデル自体に影響を与えていないことが分かる.

4.5 実験結果と考察

4.2節でランダムクロップを複数回実施し,4回の時,誤差除去の精度が1番高くなったため,この状態で,4.3節のUNetの学習をし,パラメータが最適化されたモデルにテストデータを入力し,各水準点における地盤沈下量を推定した結果と水準測定の結果の数値をRMSE,MAEにて評価を行った.表2は評価結果である.

表2 RMSE, MAEによる評価結果.学習後のモデルを用いてテスト用の干渉SAR画像284枚から推定された結果をRMSE, MAEにより評価する. RMSE, MAEはともに値が小さいほど良い.

	RMSE [mm]	MAE [mm]
従来手法	10.3	9.23
提案手法	5.05	4.72

表3 受容野の変更による評価結果. UNetの初期状態では受容野は141ピクセルだが,これを約2倍の範囲を考慮できるようにして実験を行った.

受容野 [px]	RMSE [mm]	MAE [mm]
141	5.21	4.81
285	5.15	4.89

表4 入力画像として(i)のみ,(i)と(ii)で学習させたモデルの評価結果. 3.1節で述べた提案手法では(i)と(ii)を入力画像としている.

入力画像	RMSE [mm]	MAE [mm]
(i)	5.41	5.12
(i)と(ii)	5.21	4.81

RMSEは従来手法が10.3[mm]の誤差であるのに対して,提案手法では5.05[mm]と,5.23[mm]誤差を減らせた.また,MAEは従来手法が9.23[mm]に対して,提案手法では4.72[mm]と,4.51[mm]誤差を減らせた.

また,表3では,受容野を変更して誤差除去精度に変化があるかを実験した結果である.これから,受容野を広くすることでRMSEの数値は減少した.しかし,MAEの数値は僅かに増加した. MAEが増加した原因としては考慮する範囲が広がった分,外れ値の数も受容野を広げる前に比べて増加したことが考えられる.

これより誤差除去する際にピクセル毎でなく,注目するピクセルとその周辺領域と,より広範囲を考慮することで誤差が大きいピクセルに対しても周辺のピクセル情報から実際の地盤沈下の傾向に応じて適切に誤差除去できたからだと考えられる.また,実際の変動量を学習する深層学習を用いてモデルを生成するため状況に応じて誤差除去が可能となったと考えられる.

次に,提案手法では,3.1節の(i)と(ii)を,チャンネル方向に結合した2チャンネルの画像を入力としていた.そこで,理想的には誤差の無い干渉SAR画像である(i)のみを用いて学習を行う実験をした.その結果が表4である.

表4から(i)のみで学習させたモデルよりも(i)と(ii)の画像で学習する方が誤差が小さいことが分かる.これは,(ii)が(i)にある誤差の箇所を示すという補助的な役割を果たしているからであると考えられる.

5. まとめと今後の課題

本研究では,PSInSAR解析をするStaMPSと対流圏遅延誤差除去をするTRAINから得られた干渉SAR画像と,

対流圏遅延量を推定した画像を深層学習モデルの入力とすることで、従来手法では取り除くことのできなかった誤差を適切に除去するように学習させた。実験の結果は、従来手法より RMSE と MAE が約半分に小さくなったことから誤差除去の精度が向上したことが分かった。

今後の方針としては、今回は UNet[22] を利用したが、UNet 以外のネットワークについて調査を行い、そのネットワークを用いて実験をすることで今回の事例に適したネットワークを見つけ、さらなる誤差除去精度の改善を行う。

さらに、損失関数を新たに設計する必要がある。今回の実験では干渉 SAR 画像と水準測量の結果の 2 次元配列を MSE によって計算して損失を求めた。この損失に加えて例えば、隣接領域では地盤沈下量は滑らかに変動するのか、または急激に変化する箇所も存在するのかなど実世界における制約を損失関数として設計することで提案手法で除去できなかった誤差についても除去できる可能性がある。

参考文献

- [1] 上田健二：わが国の広域地盤沈下対策と地下水の適正利用について、地下水学会誌，Vol. 57, No. 1, pp. 3-7 (オンライン)，DOI: 10.5917/jagh.57.3 (2015)。
- [2] Hooper, A., Bekaert, D., Spaans, K. and Ar\ikan, M.: Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation, *Tectonophysics*, Vol. 514, pp. 1-13 (2012)。
- [3] Hooper, A.: A Multi-Temporal {InSAR} Method Incorporating Both Persistent Scatterer and Small Baseline Approaches, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 35, p. L16302 (online), DOI: 10.1029/2008GL03465 (2008)。
- [4] 森下遊，鈴木啓，雨貝知美：干渉 SAR を活用した効率的な水準測量の実施へ向けた取り組み，国土地理院時報，No. 120, pp. 17-22 (2010)。
- [5] ISHITSUKA, K. and MATSUOKA, T.: Accuracy Evaluation of Persistent Scatterer Interferometry Using ALOS/PALSAR Data: A Case Study of Surface Displacement in the Kujukuri Plain, Chiba Prefecture, *Journal of The Remote Sensing Society of Japan*, Vol. 36, No. 4, pp. 328-337 (online), DOI: 10.11440/rssj.36.328 (2016)。
- [6] Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Feigl, K. and Rabaute, T.: The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry, *Nature*, Vol. 364, No. 6433, p. 138 (1993)。
- [7] Simons, M. and Rosen, P.: Interferometric synthetic aperture radar geodesy (2007)。
- [8] 葛西あやか：ALOS / PALSAR を用いた地殻変動の時空間変化の検出 伊豆大島火山の事例，博士論文 (2010)。
- [9] Hooper, A., Zebker, H., Segall, P. and Kampes, B.: A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers, *Geophysical research letters*, Vol. 31, No. 23 (2004)。
- [10] 福島洋：StaMPS パッケージを用いた PS 干渉 SAR 解析，測地学会誌，Vol. 57, No. 2, pp. 41-48 (2010)。
- [11] 宮下智一，中山裕則：時系列複数 SAR データの干渉解析による地盤沈下モニタリング：青森県・津軽平野の解析を例として，日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要=Proceedings of the Institute of Natural Sciences, Nihon University, No. 52, pp. 213-224 (2017)。
- [12] 石塚師也，松岡俊文：ALOS/PALSAR データを用いた PS 干渉 SAR 解析の精度評価 千葉県九十九里地域の地殻変動を例として，日本リモートセンシング学会誌，Vol. 36, No. 4, pp. 328-337 (2016)。
- [13] Ferretti, A.: *Satellite InSAR data: reservoir monitoring from space*, EAGE publications (2014)。
- [14] Ferretti, A., Prati, C. and Rocca, F.: Permanent scatterers in SAR interferometry, *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, Vol. 39, No. 1, pp. 8-20 (2001)。
- [15] Crosetto, M., Monserrat, O., Adam, N., Parizzi, A., Bremmer, C., Dortland, S., Hanssen, R. and Van Leijen, F.: Validation of existing processing chains in TerraFirma stage 2, *Process Analysis Report, IG Inter-comparison* (2008)。
- [16] 島田政信：SAR 干渉処理における軌道誤差と大気位相遅延の補正方法，測地学会誌，Vol. 45, No. 4, pp. 327-346 (1999)。
- [17] 小澤拓，清水慎吾：数値気象モデルを用いた SAR 干渉解析における大気遅延誤差の軽減，測地学会誌，Vol. 56, No. 4, pp. 137-147 (2010)。
- [18] Kinoshita, Y., Shimada, M. and Furuya, M.: InSAR observation and numerical modeling of the water vapor signal during a heavy rain: A case study of the 2008 Seino event, central Japan, *Geophysical research letters*, Vol. 40, No. 17, pp. 4740-4744 (2013)。
- [19] Bekaert, D. P. S., Walters, R. J., Wright, T. J., Hooper, A. J. and Parker, D. J.: Statistical comparison of InSAR tropospheric correction techniques, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 170, pp. 40-47 (online), DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2015.08.035> (2015)。
- [20] Fomelis, M., Blasco, J. M. D., Desnos, Y.-L., Engdahl, M., Fernández, D., Veci, L., Lu, J. and Wong, C.: ESA SNAP-StaMPS Integrated Processing for Sentinel-1 Persistent Scatterer Interferometry, *IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, IEEE, pp. 1364-1367 (2018)。
- [21] Lu, Z. and Dzurisin, D.: InSAR imaging of Aleutian volcanoes, *InSAR Imaging of Aleutian Volcanoes*, Springer, pp. 87-345 (2014)。
- [22] Ronneberger, O., Fischer, P. and Brox, T.: U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation, *International Conference on Medical image computing and computer-assisted intervention*, Springer, pp. 234-241 (2015)。
- [23] 「平成 29 年度全国の地盤沈下地域の概況」(環境省)：<https://www.env.go.jp/water/jiban/gaikyo/gaikyo29.pdf>。
- [24] 水準点の測量(国土地理院)：<https://www.gsi.go.jp/sokuchikijun/suijun-survey.html>。
- [25] 基準点成果等閲覧サービス(国土地理院)：<https://sokuseikagis1.gsi.go.jp/top.html>。
- [26] Copernicus Open Access Hub: <https://scihub.copernicus.eu/>。
- [27] Kingma, D. P. and Ba, J.: Adam: A method for stochastic optimization, *arXiv preprint arXiv:1412.6980* (2014)。
- [28] 精度評価指標と回帰モデルの評価 — Instruction of chemoinformatics by funatsu-lab: <https://funatsu-lab.github.io/open-course-ware/basic-theory/accuracy-index/>。