

氏 名	郷 右 近 英 臣
授 与 学 位	郷 右 近 英 臣
学 位 授 与 年 月 日	平 成 2 7 年 3 月 2 5 日
学 位 授 与 の 根 拠 法 規	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項
研 究 科 , 専 攻 の 名 称	東 北 大 学 大 学 院 工 学 研 究 科 (博 士 課 程) 土 木 工 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	Estimation of Tsunami-induced Damage Using Synthetic Aperture Radar
指 導 教 員	東 北 大 学 教 授 越 村 俊 一
論 文 審 査 委 員	主 査 東 北 大 学 教 授 越 村 俊 一 東 北 大 学 教 授 風 間 聡 東 北 大 学 准 教 授 有 働 恵 子

論文内容要旨

1. 序論

2010年チリ地震津波や、2011年東北地方太平洋沖地震津波のような、大規模地震津波災害が発生すると、広域に甚大な被害が生じる。また、情報通信手段や、瓦礫等による被災地への交通網の遮断により、被災地は孤立する（情報空白期）。このような状況において、迅速かつ効率的な緊急救援活動を展開するためには、津波により浸水した範囲と、被害の量をできる限り早く把握する必要がある。このような社会的要請に対し、広域の情報を短時間で取得可能なリモートセンシング技術は有効である。特に、合成開口レーダ（Synthetic Aperture Radar : SAR）というセンサは、雲等を透過するマイクロ波を、衛星や航空機などから能動的に地表面へ照射し、その反射波を観測するシステムを採用している。そのため、昼夜天候に関わらず被災地を観測する事が可能であり、実際の災害対応時に大きな力を発揮する。これまでに、衛星・航空機SARにより観測した津波被災地のデータを基に、浸水域を把握する研究や、建物被害棟数を推計する手法について、多くの研究がなされてきた。しかし、これらの研究は、解析の精度や簡便さ、汎用性のいずれかに課題を抱えており、実際の災害対応に適用可能な水準まで達していなかった。そこで本研究では、高分解能SAR画像による津波被災地の浸水域抽出と建物被害推計を行う手法を開発する事により、これらの課題を解決する事を目的とする。

2. 本論文で取り組んだ各種課題

本論文では、1) 津波浸水域を半自動抽出する手法の開発、2) 被災前後の高分解能SAR画像による建物一棟毎の流失被害把握手法の開発、3) 被災前後の高分解能SAR画像による解析区画毎の流失建物推計手法の開発、4) 被災後の高分解能SAR画像による建物壁面被害把握手法の開発、の4つの研究課題に取り組んだ。以下に各研究課題の概要を示す。

2.1 津波浸水域を半自動抽出する手法の開発

研究の背景・目的

これまでに洪水災害や津波災害の被災地を対象とし、SARによる浸水域抽出手法について多くの研究がなされてきた（例えば、Martinis et al., 2009; Liu et al., 2013）。しかし、既往研究の手法は、緊急災害対応の枠組に十分活かされてこなかった。その要因として、

SAR画像の処理と解釈が難しいことや、提案された手法が複雑である事などが挙げられる。そこで本研究課題では、高分解能 SAR(TerraSAR-X)を使用し、GIS上の簡便なインターフェース上で動作する、津波浸水ライン半自動抽出ツールを開発する事を目的とする。

研究手法の概要

SAR画像中の水域の後方散乱係数は、マイクロ波の鏡面反射という現象により、他の地表物よりも低い値を示す。本特性に着目し、被災前後のSAR画像において、閾値処理により低い後方散乱係数を示す地域を水域として抽出し、それらの変化抽出と後処理により、津波浸水ラインの抽出を行う。そして、最後にこれら一連のプロセスを、ArcGIS上で半自動化し、そのモデルの評価を行う

主要な結論

本研究課題の主要な結論を以下に挙げる。1) 津波被災前後のTerraSAR-X画像と、標高データ(DEM)を入力データ、津波浸水ラインを出力データとする、半自動浸水域抽出ツールを開発した。2) 開発したツールを対象領域全域に適用したところ、網羅率 : 88.3 %、的中率 : 93.6 %と、良好な精度で浸水域を抽出することができた。3) 半自動抽出ツールを対象領域のSAR画像へ適用したところ、8.9 km×13.2 kmの対象領域において、およそ5分で解析を終える事ができた (データサイズ : 277MB, CPU : 3.7 GHz, メモリ : 8GB)。

2.2 被災前後の高分解能SAR画像による建物一棟毎の流失被害把握手法の開発

研究の背景・目的

近年のSAR画像の高分解能化に伴い、地震・津波災害の被災地において、建物一棟毎の被害把握を実施する研究が行われてきた (例えば, Brunner et al., 2010, 2011; Liu et al., 2013)。しかし、これまでの既往研究では、「解析に使用した建物棟数が少ない」という課題や、「建物輪郭内の狭い領域の変化のみに着目し、建物流失により生じる後方散乱係数の変化を十分に考慮しきれていない」、「他地域での検討を実施していない」などの課題があった。そこで、これらの課題を解決し、新しい流失建物一棟毎の抽出手法を開発する事を目的とする。

研究手法の概要

合成開口レーダ画像上では、建物壁面部の後方散乱係数が高い値を示す事が知られている。一方、流失などにより、建物に幾何学的な変化が生じると、建物壁面部の倒れ込み範囲 (レイオーバーエリア) の後方散乱係数は変化する。本特性に着目し、「流失」もしくは「残存」の二種類の建物被害と、各建物近傍内の被災前後の後方散乱係数の変化を関連づける事により、流失建物被害を分類する手法を新しく開発し、その検証を行う。

主要な結論

本研究課題の主要な結論を、以下に挙げる。1) 被災前後の建物一棟毎のレイオーバーエリアの変化率に着目した、新しい流失建物抽出手法を開発した。2) 開発した手法を、対象領域・他地域へそれぞれ適用したところ、対象領域では総合精度82.5 %、他地域では総合精度81.4 %と、概ね良好な結果を得る事ができた。3) 津波により建物域へ堆積した瓦礫が、複雑な後方散乱を引き起こし、誤分類の主要因になる事が分かった。

2.3 被災前後の高分解能SAR画像による解析区画毎の流失建物推計手法の開発

研究の背景・目的

これまでに開発されてきた高分解能SARによる建物一棟毎の流失被害把握手法は、瓦礫を多く含むような、複雑な後方散乱係数の分布を示す被災地への適用が困難であった。これは、各建物が流失、残存するに関わらず、瓦礫が建物の周りに堆積すると、建物近傍内の後方散乱係数が大きく変化する事によるものである。そこで本研究課題では、建物一棟毎の変化ではなく、さらに広い範囲の変化に着目し、ある一定以上の広さを持つ区画全体の変化と建物流失率の関係を統計的に明らかにする事により、新しい建物被害推計手法を開発する事を目的とする。

研究手法の概要

津波により引き起こされた変化の小さな建物域では、被災前後のSAR画像の相関係数が高い値を示す。一方、ほとんどの建物が流失するなど、大きな変化の生じた建物域では、相関係数の値が小さくなる。これらの地表面の変化と、その変化により引き起こされる後方散乱係数の変化の特性を関連づけることにより、ある一定以上の広さを有する解析区画内の、相関係数の平均値と実際の建物流失率の関係を統計的に明らかにする。そしてこれらの解析結果を基に、相関係数の平均値を入力値、建物流失率を出力値とする建物被害率推計式を構築し、その検証を行う。

主要な結論

本研究課題の主要な結論を、以下に挙げる。1) 津波被災前後の高分解能SAR画像により、建物被害を高精度に推計する手法を開発した。2) 従来の建物一棟毎の流失被害把握手法では困難であった、瓦礫域における被害推計精度を改善した。3) 最終的に得られた流失建物棟数の推計結果と実被害データの間には、対象領域・他地域の両者において、良好な整合性を確認する事ができた（対象領域： $R=0.99$ 、他地域： $R=0.98$ ）。4) 緊急時に備えて、建物輪郭データを必要としない、被災前後の高分解能SAR画像のみにより被害推計可能なモデルを構築した。

2.4 被災後の高分解能SAR画像による建物壁面被害把握手法の開発

研究の背景・目的

これまでに取り組まれてきた高分解能SARによる建物壁面部の被害把握の研究では、被災前後のSAR画像の変化抽出により解析を行うため、被災前の画像が使用できない条件下では、手法を適用する事ができないという課題があった。そこで、本研究課題では、被災後の多偏波高分解能SAR画像により、建物壁面被害を把握する手法を開発し、既往研究の課題を解決する事を目的とする。

研究手法の概要

通常、衛星・航空機から地表面に照射されたマイクロ波は、建物壁面部において二回反射を引き起こす。一方、壁面部に大きな被害を受けた建物では、二回反射は発生しない。本特性に着目し、SAR画像の4偏波成分より建物壁面部の全反射電力と二回反射電力を計算し、その比率を実際の建物壁面被害調査結果と関連づけ、機械学習の理論を適用する事により新しい建物壁面被害分類基準を構築する。

主要な結論

本研究課題で得られた主要な結論を、以下に挙げる。1) 被災後の多偏波高分解能SAR画像による、建物壁面部抽出手法を開発した。2) 建物壁面倒れ込み部分（レイオーバーエリア内）において、全反射電力と二回反射成分の電力の比率が、建物壁面の被害と関係する事がわかった。3) 本関係を基に、機械学習により建物壁面被害の分類基準を新たに構築した。4) 仙台市荒浜地区の建物48壁面を本研究手法により分類したところ、総合精度77.1%で被害分類を実施する事ができた。

3. 研究のオリジナリティ

本論文の一番のオリジナリティは、「2.3 被災前後の高分解能SAR画像による解析区画毎の流失建物推計手法の開発」にある。本章では、近年のSAR画像の高分解能化に伴い建物一棟毎の被害把握に関する研究事例が増える中で、あえて空間スケールを落とした解析を実施する事により、従来法では被害把握が困難であった、瓦礫を多く含む被災地にも適用可能な量的被害把握手法を新しく提案した。そして、建物流失被害棟数の推計精度を、従来法から大きく改善した ($R=0.99$)。

4. まとめ

合成開口レーダ画像による、浸水域抽出手法と建物被害の量的把握手法を開発し、精度・簡便さ・汎用性の3つについて、それぞれ既往研究の課題を解決した。精度に関しては、いずれの提案手法についても従来法と同等、もしくは高い精度で被害を推計する手法を提案した。簡便さについては、ArcGIS上において半自動で動作するツールを構築する事により、従来法の課題を解決した。また、汎用性については、一つの地域で構築した手法を他地域へ適用し、その有効性について検証を行った。

参考文献

- [1] Brunner D., G. Lemoine and L. Bruzzone (2010) : Earthquake Damage Assessment of Buildings Using VHR Optical and SAR Imagery, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 48, No. 5, May 2010
- [2] Brunner D., K. Shulz and T. Brehm (2011) : Building Damage Assessment in Decimeter Resolution SAR imagery: A Future Perspective, Joint Urban Remote Sensing Event, Munich, Germany, April 11-13, 2011
- [3] Liu W., F. Yamazaki, H. Gokon and S. Koshimura (2013) : Extraction of Tsunami- flooded Areas and Damaged Buildings in the 2011 Tohoku-oki Earthquake from TerraSAR-X Intensity Images, Earthquake Spectra, Vol. 29, No. S1, pp. S183-S200, March 2013
- [4] Martinis S., A. André and S. Voigt (2009) : Towards Operational Near Real-time Flood Detection Using a Split-based Automatic Thresholding Procedure on High Resolution TerraSAR-X Data, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 9, pp. 303-314, 2009

論文審査結果の要旨

東日本大震災で経験したように、巨大災害発生後には、全ての対応において必要となる被害情報の取得が極めて困難になる。本研究では、大規模地震津波災害発生後の緊急対応時に、広域に及ぶ被災地の範囲と建物被害の量を、合成開口レーダを用いたリモートセンシング技術により、短時間で高精度に把握する手法を開発した。本博士論文は全8章で構成され、その内容を以下に示す。

第1章および2章では、序論として研究の背景、目的および本研究の位置づけについて述べた。

第3章では、まず被災前後の高分解能合成開口レーダ画像の半自動処理により、津波浸水域を高精度かつ短時間で、簡便に抽出する手法を新たに提案した。従来法では、浸水域の抽出精度は高かったものの、提案された手法の複雑さのために、実際の災害対応への適用が困難であった。本課題を解決するために、簡便に操作可能な津波浸水域半自動抽出ツールを開発し、最も利用されている商用 GIS ソフトウェア (ArcGIS) 上に実装した。

第4章では、被災前後の高分解能 SAR 画像により、前後の後方散乱係数の変化に着目し、流失建物を一棟毎に抽出する手法を新たに開発した。従来法では、使用したデータサンプル数が少ないことや、開発手法の他地域での検証を行っていなかったため、その汎用性に課題があった。本研究では、そのような課題を解決し、より汎用性の高い手法を獲得することができた。

第5章では、被災前後の高分解能 SAR 画像により、解析区画毎に流失建物棟数を高精度に推計する手法を開発した。瓦礫域において適用が困難であった従来法に対し、高分解能 SAR 最大の利点である「高い分解能」をあえて落とし、ある一定以上の広さを有する空間全体の変化と、実際の建物被害の量的な関係を統計的に解明するというアプローチにより、瓦礫を多く含む被災地での被害把握の精度を大きく向上させた。

第6章では、被災後の航空機 SAR 画像のみを用いて、建物壁面被害を抽出する手法を開発した。従来法では、解析に被災前の SAR 画像が必要であり、被災後の画像のみでは解析を行えないという課題があった。本研究では、マイクロ波の建物特有の反射特性に着目し、被災後に取得された航空機 SAR の多偏波データから壁面への多重反射に関連した散乱成分を抽出することで、建物被害を把握する手法を新たに提案した。

第7章では、提案した手法の精度、適用限界および活用方法についての議論を展開した。

第8章では、本研究の結論を示した。

以上の研究成果はいずれもオリジナリティが高く、既に国内・国外の査読付き学術誌に掲載されており、学術的にも高い評価を得ている。本研究の成果の最大の意義は、広域被害把握技術の研究を社会への実装段階へ発展させていく上での貢献であり、震災の教訓を経て、巨大災害の早期被害把握技術の発展に寄与できると評価された。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。