

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 23 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25280054

研究課題名(和文) 広域災害の被害状況および復旧・復興を可視化する市街地の時空間モデリング

研究課題名(英文) Spatio-Temporal City Modeling for Visualizing Damages of and Recoveries and Reconstruction from a City-scale Disaster

研究代表者

岡谷 貴之(Okatani, Takayuki)

東北大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：00312637

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,900,000円

研究成果の概要(和文)：車載カメラで市街地を繰り返し撮影したストリート画像系列を主な入力に、市街地の時空間モデリングを行う方法を研究し、用途や入手可能なデータの種類のに応じて使い分け可能な方法を複数実現した。並行して、東日本大震災の被災地を対象に、撮影車両を走行させて映像記録を定期的に取り得し、復興の過程を記録した。得られたデータは、本計画以前のものと併せて約40テラバイトである。また、同データを用いて開発した方法を検証した。以上により、同震災を対象に、震災直後の状況、月単位の復旧、年単位の復興過程それぞれの可視化と、将来起こり得る災害を対象に、被害状況を迅速に把握することの両方について、技術的な道筋を付けた。

研究成果の概要(英文)：We have studied methods for spatio-temporal modeling of a city from image sequences of its streets acquired periodically by a vehicular camera, having developed a number of methods each of which can be selected and used depending on the purpose and the types of available data. Meanwhile, targeting at the disaster areas of the Great East Japan Earthquake, we have periodically run a vehicle with a camera and have created an image archive recording the recovering processes of the disaster area, the amount of which is 40 terabytes including the data we had captured before this project. Additionally, the performance of the developed methods were examined using the same data. These achievements have paved the way to be able to visualize damages right after the incident, monthly recovery process, and yearly reconstruction process seen in the disaster area as well as to quickly grasp damages of future natural disasters.

研究分野：コンピュータビジョン

キーワード：震災 市街地変化 画像認識 車載カメラ

1. 研究開始当初の背景

(1) 学術的背景

研究開始当初、あるシーンの多視点画像を元に、同シーンの形状およびカメラの撮影時の姿勢情報を推定する問題、いわゆる SfM (Structure from Motion) は、長年の研究を経て現在、実用段階を迎えていた。Microsoft 社や Google 社が SfM を基盤とした地図情報サービスを展開する一方で、上空視点映像を元に高品質な 3 次元地図を生成する技術 (C3 technology 社など) が注目を集めていた。

当時、次の時代のテーマとして急速に関心を集めつつあったのが、空間に加えて時間軸も考慮する SfM、4 次元 SfM であった。これは、同一シーンを多視点・多時刻で撮影した画像集合を元に、市街地等の大規模空間の時間変化をモデル化しようとする技術である。

また当時から、SfM は、以前は別々に研究されてきた画像認識 (シーン認識・一般物体認識) との結びつきを強めつつあった。主に未整列画像のマッチングやループクロージングなど、同一地点の同定を目的とするに過ぎないが、4 次元 SfM では、画像認識手法がより重要な意味を持つてくると予想され、幾何学的手法との有機的な連携が主要な課題になると考えられた。

(2) 関連分野の研究状況と本計画の狙い

市街地等の空間形状を計測する方法は、リモートセンシングやロボティクスなどで活発に研究開発が行われてきた。例えば、三菱電機社開発の MMS-X や Google 社の Google Car (で使われている SLAM 技術) は、高い完成度を持っていた。本研究はこれら既存研究に対し、次の 2 つの点で異なる動機に基くものであった。第一に、空間の時間変化の意味的な理解を目指していることである。つまり、どこがどのように変わったのか、そのとき空間で何が (がれきの除去や道路復旧工事中など) 起きているかなど、人々の営みの理解を目指していた。第二に本研究は、東日本大震災被災地を具体的なターゲットとし、扱う空間の規模および変化の大きさが過去例を見なかった。レンジセンサや上空視点情報のみを用いて空間形状計測を行う従来方法では、このような目的は果たせないと考えられた。

(3) 研究代表者らによる東日本大震災被災地の映像アーカイブ活動

研究代表者らのグループは、2011 年 3 月の東日本大震災以降、被災地の映像記録活動を行っていた。これは、図 1 のようにカメラ搭載車両を用いて、同地方沿岸部の状況を映像にて記録する活動で、活動当初から時空間変化を捉えるために、同地域の繰り返し撮影を行っていた。(震災直後～当時のデータ総量は 20 テラバイト程度であった。)

2. 研究の目的

(1) 概要

カメラ搭載車両にて路上走行しながら市街



図 1. 東日本大震災津波被災地の映像記録活動の概要。

地の映像を撮影することを、時期を変えて繰り返し得られる時空間画像列から、その市街地を時空間的にモデリングする方法を研究する。空間の幾何学的な変化を検出することはもちろん、幾何学的手法と画像認識手法を有機的に統合することで、空間の変化の意味的理解を果たすことを目標とした。東日本大震災の被災地を具体的なターゲットとし、応募者らの震災後からこれまでの記録活動で得た約 20 テラバイトの映像データをベースに、本計画でも新たに映像を撮影し、研究に利用する。同震災を対象に、震災直後の被災状況、月単位の復旧、年単位の復興過程それぞれの「見えざる情報」を可視化するとともに、将来起こり得る災害に適用可能な被害状況の迅速な把握を可能にする技術を実現する。

(2) 研究開発の具体的項目

東日本大震災被災地の映像記録活動を継続して実施する他、次の 3 つの研究項目に取り組み、4 次元 SfM の基盤を構築する。

① 幾何学的問題の解決: 異メディア間 (特に、地上視点映像対 GPS、GIS による各種地理空間情報並びに上空視点映像) の位置合わせ、異時刻間の同一シーンの映像マッチング、時空間映像列からの空間変化の自動検出をそれぞれ実現する。

② 意味理解の実現: 空間形状変化の意味 (例えばどの建物がどのように失われたか) を理解し、あるいは空間のアクティビティを認識 (例えば道路復旧中、構造物建設中、日常状態など) できるようにする。

③ 効果的な提示・閲覧方法の実現: 大規模空間の変化 (3 県にまたがる被害状況・復興過程) を「一瞥」で把握できるような、映像表示方法およびユーザインタフェースを実現する。

3. 研究の方法

(1) 幾何学的方法の研究

3 次元 SfM に関する応募者の過去の研究成果を、4 次元 SfM の新しい問題に発展させる。また (3) では、多視点パノラマや拡張現実といった方法を応用することで、各項目の達成を図る。これらと並行して、(4) 東日本大震災被災地の復興過程を映像として記録する。復興の進捗を見ながら、同一地点を 4 か月おきに

繰り返し撮影する。得たデータは、応募者らがこれまで蓄積してきたものと合わせてアーカイブとし、本計画で研究する各手法のテストデータとするほか、これを元に被災地の時空間変化を可視化したもの自体が本計画の成果となる。

(2) 画像の意味理解

上述の(1)によって獲得される条件および情報に基づき、機械学習に基づく画像認識の方法を用いて、市街地の時間変化の意味情報を、撮影した時空間画像列から取り出す方法を研究する。画像認識に関する研究成果を利用する他、ディープラーニングなど最近の発展を取り込む。

(3) 情報提示・閲覧方法

Google Earth 等の地図情報提示プラットフォームを用い、抽出した時空間変化の情報を効率的に可視化する方法を実現する。

(4) 定期的映像記録の取得

計測車両(図1)による被災地の映像記録を実施する。これまでに車のルーフ着脱式の計測システム(全方位カメラ, GPS, バッテリ等からなる)を開発しており、これをレンタルした車両と組み合わせて使用する(過去の記録もこのやり方で実施)。復興のペースを考慮しながら、4か月に一度程度の頻度で同一箇所を撮影する。

4. 研究成果

(1) 市街地変化の検出・認識・可視化

① 異なる時刻の地上視点画像ペアからの市街地変化検出: 同じ道路を異なる時刻に走行して撮影した画像系列を使って、その道路の両脇の市街地構造物の時間変化を高精度に検出する方法を、新たに実現した。この方法の手順は以下の通りである。まず、各時刻の画像列について、それぞれ SfM を実行し、カメラ(車両)の走行軌跡と市街地の3次元点群を得る。次に、GPSによる位置情報と SfMの結果を統合して、2時刻のカメラ軌跡の位置合わせを行う。最後に、こうして位置合わせされた2時刻のカメラ軌跡を用いて、各視点の画像の各画素において、シーンの奥行きが2

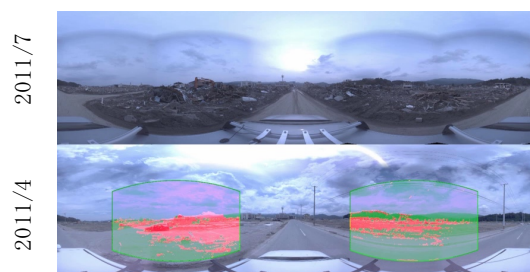


図 2. 異なる時刻の地上視点画像ペアからの市街地変化検出

時刻間で変化したかどうかを判定する。ここでは確率的な定式化を行い、シーンの奥行きを一意に決定することなく、奥行き変化の有無のみを確率的に推定する。これは、シーン

の奥行きを高精度に安定して得ることは、視点変化の乏しさとシーンへの近接度が高い今のような場合には大変難しいが、その難しさを回避するためのアイデアで、変化検出の新しい方法論の提案となった。以上の成果は雑誌論文⑧にて発表した。

② 高速な変化検出: 上述の①の方法は高精度な変化検出を可能にするが、事前に SfM による3次元復元を必要とし、これは膨大な枚数の画像を用いた大規模な計算となることから、変化検出に大きな計算コストを要する。東日本大震災のように被害が広域に渡る場合、入力となる画像データの規模も大きく、より少ないコストで変化検出の計算が行えることが望ましい。そのような動機にもとづき、同じストリートを異なる時刻に撮影した2枚の画像を元に、変化を高速に検出する方法を新たに考案した。問題は、上記①の方法とは異なり、2枚の画像間の2次元比較による変化検出であり、画像からのシーンの変化検出の問題としてはむしろ古典的な部類に属する。問題の難しさは、同じストリートを車両で走行しながら画像を撮影していても、撮影間隔から撮影できることはまずない。さらに、撮影時刻や季節の違いから、2枚の画像間には一定の違い、つまり変化していなくても画像上は変化に見えることが、頻繁に生じる。この問題を解決するため、深層学習をこの種の問

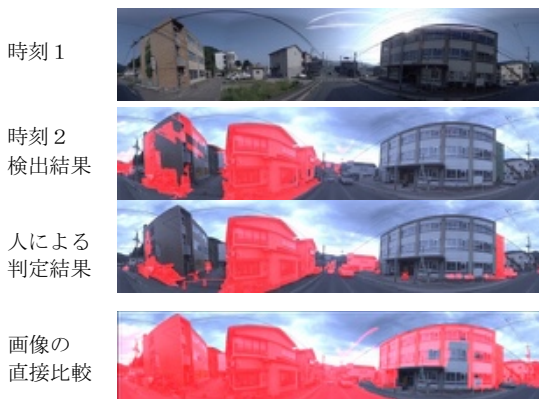


図 3. 多層畳み込みニューラルネットワークを用いた異時刻の画像ペアからの市街地変化の検出。

題に初めて応用し、以上のような外乱に影響されにくい方法を実現した。核となるアイデアは、多層畳み込みニューラルネットワーク(以下 DCNN)をシーンのカテゴリ認識ができるように訓練した後、その中間特徴を、シーンの時間変化の検出に流用するというものである。DCNNは、画像上のわずかな位置変化や見る角度の変化や、照明条件の変化などに影響されにくい、見ているものの本質を表現するような画像特徴を抽出することができる。この長所をうまく利用した形である。この研究のために、あらたにデータセット(Change Detection Dataset)を構築し、全世界の研究者へ向けてウェブ上で公開した。今後、類似の研究を行う研究者は、このデータセットの

利用が標準的になってくると考えられる。以上の成果は雑誌論文③にて発表した。

③ 地図情報と地上視点画像を融合した建物の存在有無の推定: 上記の方法は、2つの時刻、例えば災害発生前と後で、同じ市街地の同じストリートの車載画像列が得られていることを前提としていた。しかし現実には、東日本大震災の被災地がそうであったように、災害発生前の市街地の画像がそもそも存在しない場合がある。一方市街地の変化検出を行う既存手法の中には、市街地の3次元モデル(地図)が得られていることを前提とするものもあるが、地球上の多くの市街地ではそういったデータは完備されておらず、一層適用範囲が狭くなる。このようなことを踏まえ、どの都市でも入手が容易な2次元の地図を利用する方法を考案した。具体的には、ある時刻の地図と、それとは異なる時刻のストリートの画像列を入力とする。それぞれ、災害発生前と後に作られたものであるとする。地図に災害発生前に作られたものを選べば、災害による被害を判定できるし、反対に地図を最新の



図4. 地図情報と地上視点画像を融合した建物の存在有無の推定。

ものとすれば、新たな建物がいつ建てられたかを自動で判定できる。実現した方法は、画像列を用いて SfM を行い、カメラ軌跡と建物の3次元点群を得、これらを GPS 情報にもとづいて地図と位置合わせした後、地図上の各建物の存在有無を判定する。判定は、点群が建物の壁面に十分な数発生しているかどうかに基づいてなされる。撮影車両はいつもすべてのストリートを通れるわけではないことなどを前提に、建物が別の建物に遮蔽される場合でも、安定して各建物の有無を高精度に、効率よく推定できるアルゴリズムを実現した。以上の成果は、雑誌論文⑦にて発表した。さらに現在、国際ジャーナル誌に投稿中(条件付採録判定通知あり)である。

④ 地上視点と上空視点の融合による市街地状態推定: 上述のすべての手法では、画像情報には車載カメラで撮影した画像を用いていた。市街地の変化を検出し状態を推定するための画像情報として、例えば衛星画像や航空画像などの上空視点画像がある。上空視点画

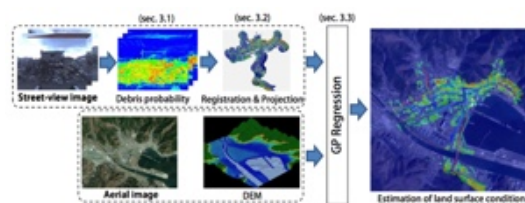


図5. 地図情報と地上視点画像を融合した建物の存在有無の推定。

像と地上視点画像は、互いに相補的な性質を持つ。地上視点画像は、高い解像度と、地上で横向きの視線方向を持つ一方、狭い範囲の情報しか一度に取得出来ない。上空視点画像は、広範囲の情報を一度に取得できるが、視線が上空からであるので、例えば建物のひさしの下などの情報は取得できない。したがって、これら画像の長所を取り出すことができれば、市街地の状態推定をより効率よく、高精度に行うことができるはずである。以上の動機に基づき、両タイプの画像を元にしたハイブリッド型の市街地状態推定の方法を考案した。具体的には、地上視点画像から、画像認識の手法によって視野内の市街地の状態推定を行うが、そこでカバーされていない市街地の領域の状態を、上空視点画像から補間的に推定する方法である。以上の成果は雑誌論文①に発表した。なお同論文の前身となった国際会議発表論文(雑誌論文⑥)は、インダストリアルアプリケーション賞次点を受賞した。

(2) 情報提示・閲覧方法

地図上の地点をクリックすると、その場所の各時刻の画像を閲覧可能なシステム、ちょうどグーグル社のグーグル・マップと同様の機能を持ち、ただし我々の取得した画像データ上で行えるシステムを構築した。同システムは地図データについて著作権上の問題のない Open Street Map を使用しており、色々と利用に制限のかかるグーグル・マップとは一線を画す。

(3) 映像記録の取得

最終的に、2011年から2014年までに約40テラバイトの被災地のストリート画像記録を

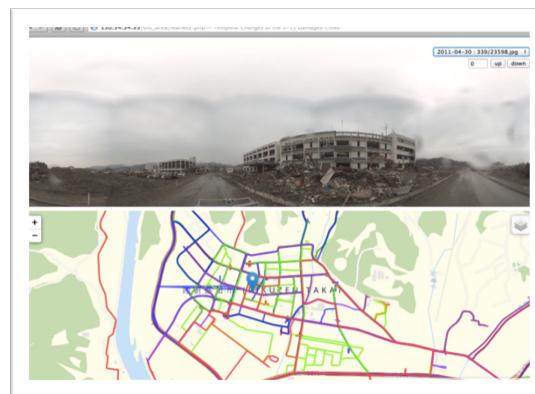


図6. 本計画で構築した Open Street Map に基づく独自の画像閲覧システムの動作の様子。

取得した。上述のようにプライバシーを配慮し、一般公開は行っていないが、研究室内に厳重に保管する他、その大部分は類似のプロジェクトを行っている東北大学災害国際研究所と共有している。本研究計画を立案した当時、被災地のストリート画像を記録するプロジェクトはほとんどなかったため、当初(2014年度ころまで)データ取得を重点的に行っていたが、東北大学災害国際研究所やグーグル社のプロジェクトがあることから、2015年以降は撮影ペースを落とした。ただし、プライバシーの観点から、画像データとともにシステムの一般公開は行っておらず、研究室内ネットワーク上でのみ利用可能な状態としている。外部の研究者から利用の希望があれば、いつでも利用可能である。その他の利用形態については、今後の検討課題である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 10 件)

- ① Ken Sakurada, Takayuki Okatani and Kris M. Kitani, Hybrid macro-micro visual analysis for city-scale state estimation, *Computer Vision and Image Understanding*, 査読有, Vol. 146, 2016, 86-98.
- ② Ken Sakurada and Takayuki Okatani, Change Detection from a Street Image Pair using CNN Features and Superpixel Segmentation, *Proceedings of the British Machine Vision Conference (BMVC)*, 査読有, 2015, 61.1-61.12.
- ③ 岡谷貴之, 東日本大震災被災地を主な対象とする市街地の時空間モデリング, 情報処理学会研究報告, 査読無, Vol. 2015-CVIM-196-1, 2015, 1-8
- ④ 櫻田健, 岡谷貴之, 畳込みニューラルネットワークを用いたシーン変化の検出, 情報処理学会研究報告, 査読無, Vol. 2015-CVIM-196-2, 2015, 1-8
- ⑤ Daiki Tetsuka, Takayuki Okatani, Detecting Building-Level Changes of a City Using Street Images and a 2D City Map, *Proceedings of Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV)*, 査読有, 2015, 349-356.
- ⑥ Ken Sakurada, Takayuki Okatani, Kris Kitani, Massive City-scale Surface Condition Analysis using Ground and Aerial Imagery, *Proceedings of the 12th Asian Conference on Computer Vision*, 査読有, 2014, 49-64.
- ⑦ Ken Sakurada, Takayuki Okatani, and Koichiro Deguchi, Detecting Changes in 3D Structure of a Scene from Multi-view Images Captured by a Vehicle-mounted Camera, *Proceedings of the 2013 IEEE Conference on*

Computer Vision and Pattern Recognition, 査読有, 2013, 137-144.

- ⑧ Masaki Saito, Takayuki Okatani, and Koichiro Deguchi, Discrete Maximum Posterior Marginal Inference for Non-uniformly Discretized Variable Space, *Proceedings of the 2013 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 査読有, 2013, 57-64.
- ⑨ Tomohiro Ushiki, Eisuke Ito, Takayuki Okatani, Improving Accuracy of Planar Tracking by Resolving Resolution Inconsistencies, *IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications*, 査読有, Vol. 5, 2013 109-113.
- ⑩ 手塚大基, 岡谷貴之, 出口光一郎, 車載カメラで撮影した画像列と市街地地図情報を用いた建築物の出現・消失の推定, 情報処理学会研究報告, 査読無, Vol. 2013-CVIM-185 No. 10, 2013, 1-8.

[学会発表] (計 5 件)

- ① Ken Sakurada, Takayuki Okatani, Kris M. Kitani, Hybrid Macro-Micro Visual Analysis for City-Scale State Estimation, MIRU2014 第17回画像の認識・理解シンポジウム, 2014年7月28日, 岡山
- ② Takayuki Okatani, Four-dimensional Modeling of a City: Image Archive and Visualization of the Damages of and Reconstruction from the Great East Japan Earthquake, Microsoft eScience Workshop 2013, October 22-25, 2013, Beijing(China).
- ③ 岡谷貴之, 全方位画像列を用いた市街地形状変化の推定, ビジョン技術の実用ワークショップ, 2013年12月6日, 横浜.
- ④ Ken Sakurada, Takayuki Okatani, and Koichiro Deguchi, Detecting Changes in 3D Structure of a Scene from Multi-view Images Captured by a Vehicle-mounted Camera, 画像の認識・理解シンポジウム招待講演セッション, 2013年7月31日, 東京.
- ⑤ 手塚大基, 岡谷貴之, 車載カメラで撮影した全方位画像系列と地図情報を用いた建築物の存在判定～東日本大震災の被害・復興状況の可視化～, 画像センシングシンポジウム, 2013年6月13日, 横浜.

[図書] (計 1 件)

岡谷貴之, 深層学習 (機械学習プロフェッショナルシリーズ), 全 165 頁, 講談社, 2015 年 4 月 1 日

[その他]

ホームページ等

<http://www.vision.is.tohoku.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡谷 貴之 (Okatani Takayuki)
東北大学・情報科学研究科・教授
研究者番号：00312637

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし