

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 5 月 22 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25282096

研究課題名(和文)地震倒壊家屋からのレスキュー救助活動支援を目的としたデジタルがれきアーカイブ

研究課題名(英文)A study on a digital rubble archive for rescue activities from earthquake collapsed houses

研究代表者

小野里 雅彦(Onosato, Masahiko)

北海道大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：80177279

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は地震により倒壊した木造家屋のがれきをコンピュータ内に構築し、レスキューロボットの開発や救助活動の支援に用いる技術開発を目的とする。コンピュータ内に実際の木造家屋と同様な構造を持った家屋モデルを定義し、地震動を加えて家屋倒壊をシミュレーションする。本研究により家屋1軒規模ならばリアルタイムで倒壊をシミュレーションすることを可能とした。また、直方体要素からなる評価用がれきを三次元計測により仮想がれきを構築するシステムを開発した。これらの研究成果により、デジタルがれきアーカイブを構築する技術基盤を確立した。

研究成果の概要(英文)：This research aims at modeling the rubbles of the wooden house collapsed by the earthquake in the computer, and developing the technology to use for rescue robot development and rescue activities. A user defines a house model with the same structure as the actual wooden house in a computer and simulates house collapse by adding seismic motion. By this research it is possible to simulate collapse in real time if it is one house size. In addition, a system of three-dimensional measurement was developed that constructs virtual rubbles for evaluation consisting of rectangular parallelepiped elements. Through these research results, the technical foundation for building digital rubble archive has been established.

研究分野：フィールド情報学

キーワード：がれき シミュレーション デジタルモデル アーカイブ 木造家屋 地震 レスキュー

1. 研究開始当初の背景

(1) 地震災害の人的被害においては、老朽化した木造家屋が地震動で倒壊し、がれきの下敷きになることが原因の中心を占める。1995年に発生した阪神淡路大震災以降、建造物の耐震性能の向上に対する意識が向上し、公的施設を中心に耐震補強等が進められてきた。その一方でまだ多くの老朽化した木造家屋が耐震性が欠如した状態で残されている。今後予想される強い地震の揺れに対して多くの木造家屋が破壊・倒壊し、多大な人的被害が危惧されていた。

(2) 震災による人的被害の軽減のために、レスキュー活動を効果的に支援する機材の必要性が認識され、レスキューロボットなどの研究開発が国内外で進められた。しかしながらそうした機器を用いたレスキュー活動の場である倒壊木造家屋のがれきに対して、われわれの社会が持つ理解と知見の蓄積は不十分である。評価フィールドについても米国 NIST の定めた標準テストフィールドでの非平坦環境での走行評価が主流となっている。

(3) 研究代表者はこうした状況に対して、がれき工学の確立の必要性と、活動現場であるがれきに対する知見集積の重要性を主張し、デジタルがれきを生成するコンピュータソフトウェアの開発を行っていた。しかしながら、長い計算時間、モデル作成の大きな労力、シミュレーション条件設定の難しさなどもあり、広範な利用を進める上での障害となっていた。

2. 研究の目的

(1) 倒壊木造家屋のがれきを持つ構造と性質を情報空間の中に表現するデジタルがれきモデルの生成手法を提示する。具体的には木造家屋デジタルモデルの構築、地震動を模した外力の付加、構造要素の破断と衝突の過程を計算する倒壊プロセスシミュレーションについての手法を調査・比較・考案・評価の上、提示を行う。

(2) 木造家屋構造の多様性、加わる地震波形の多様性、家屋間の近接関係の多様性など、様々なパターンを考慮したデジタルがれきモデルの生成と集積を行い、仮想的ながれき事例集としてのデジタルがれきアーカイブを構築する。

(3) デジタルがれきモデルを用いて、レスキューロボットのがれき走破性能等の能力評価を行うための手法を開発するとともに、リアルタイムシミュレーションでのレスキューロボット操作環境を提供し、レスキューロボット操縦の訓練等に適用できるシステム環境を実現する

(4) がれきに関する学術的研究の必要性、重

要性を、レスキューロボット開発者、防災関係者、レスキュー業務関係者ならびに一般市民に広く認識してもらえるように、研究成果の論文発表や講演に加えて、Web や各種の展示会等での情報発信に務める。

3. 研究の方法

(1) 本研究課題に関して行われる各研究項目の位置付けや相互の関連を明確化するため、研究のフレームワークを定める。フレームワークは、現実（物理）世界と仮想（情報）世界の切り分けと、被災家屋を模した家屋がれきと、評価フィールドに使われるテストがれきの切り分けの2軸からなり、2×2の4区分のマトリックスとして図式化される。

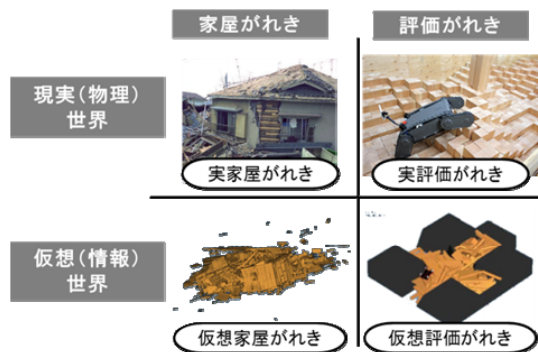


図1 がれきのタイプ分けマトリックス

(2) 詳細さと効率性を両立した木造家屋のモデル化手法を開発する。倒壊シミュレーションでは木造家屋を構成する柱、床、天井、屋根、土台、階段、窓、家具といった多様な要素を適切な空間配置と接続関係で定義する。また、構成要素の破断、破壊を効率的に再現する。

(3) 家屋の構造要素を模した多数の剛体要素の運動と衝突による相互作用を効率的に計算し、木造家屋の倒壊プロセスをシミュレーションする際の中核となる物理エンジンについて、主要な物理エンジンの比較評価と効果的な利用に向けた推奨環境について分析を行う。

(4) 実評価がれきを用いたレスキューロボットの走行が、がれきに与える影響（変位）を、複数の計測装置からなる死角を抑えた3次元形状計測技術によりデジタル化し、仮想評価がれきを構築することにより定量的評価する手法を確立する。これにより、がれき下の要救助者に危害を加えないレスキューロボットの選択や操作方法に役立つ。

(5) がれきとがれき工学への関心を広く喚起し、地震災害の被害軽減におけるがれき理解の重要性を社会に広報していく。また、がれきの構造や性質に対する具体的なイメージ共有を進める。

#### 4. 研究成果

(1) 木造家屋モデルの定義に関して、レイヤー構造とワイヤフレームモデルに基づく簡易入力手法を開発した。これにより、従来は定義入力に1カ月ほど要した木造家屋モデル(要素数約7千)を数日で作成できるようになり、大幅に時間が短縮された。これにより、多様な木造家屋のモデル(総二階、文化住宅、御神楽住宅など)を作成し、地震動で倒壊したがれきモデルを収集することが容易となった。

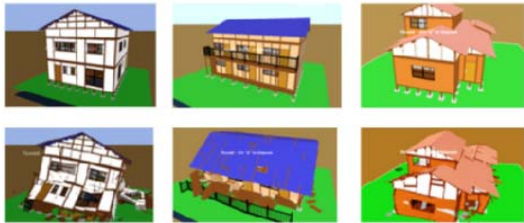


図2 3つの家屋モデルと倒壊例

(2) 倒壊プロセスのシミュレーションに使用する物理エンジンについて、入手が容易なOpen Dynamics Engine, Bullet, PhysXの3つの性能比較試験を行い、ジョイント結合された剛体群の衝突計算にはPhysXが最も高速であることがわかった。また、PhysXに関してマルチコアならびにGPU使用の性能評価を行い、高性能GPUの使用により家屋1軒分の倒壊プロセスをほぼリアルタイムでシミュレーション可能であることを示した。家屋モデルの規模に関しては、リアルタイム性を求めなければ、家屋30軒程度からなる住宅街区の倒壊プロセスのシミュレーションが可能であることを示した。さらに安定で自然なシミュレーションを行うためのパラメータ設定について調査実験を行い、安定性と効率のバランスした推奨値を求めた。(雑誌論文①)

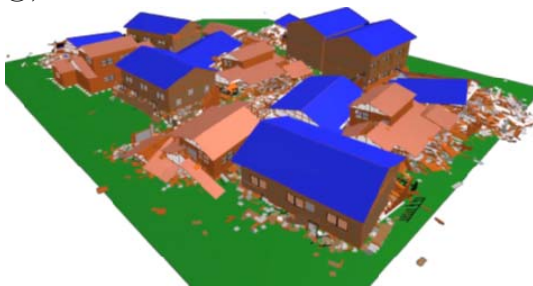


図3 15軒街区の倒壊評価例

(3) 規格化された直方体要素から構成される仮想評価がれきを対象に、がれき表面の乱雑さの程度を二次元フーリエ解析により定量的に評価する手法を提案し、それに基づき、レスキューロボットの走破性能との関係を定量的に評価することを行った。また、がれき表面で活動するクローラ型ロボットのシミュレーションモデルの構成手法を開発し、実機との走行比較を行いその有効性を提示した。(雑誌論文②, 学会発表⑥)

(4) 規格化された直方体要素から構成される実評価がれきの3次元形状を4台のデプスカメラ(Kinect)により計測し、要素の寸法・位置・姿勢を推定して仮想評価がれきを構築するシステムを開発した。仮想評価がれきは物理エンジンPhysXにより妥当な位置・姿勢に調整され配置される。これにより、実評価がれきに対して、レスキューロボットの走行ががれき配置に与える力学的影響を定量的に評価できる。(学会発表②)

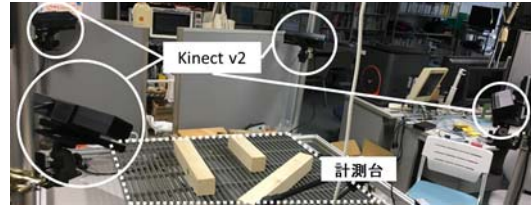
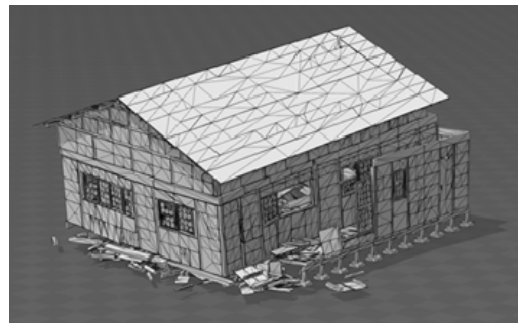
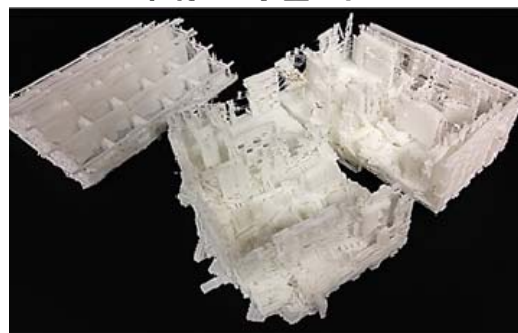


図4 実評価がれき計測システム外観

(5) がれきは複雑で不規則な空間構造を持つため、その内部構造を感覚的に理解することは大変に難しい。本研究では、仮想世界に構築されたがれきの構造モデルをコンピュータグラフィックスの手法で様々な位置・方向から観察することに加えて、裸眼立体視と触力覚提示によるVR技術による感覚提示や、3Dプリンタを用いたがれきミニチュアモデルの作成などを行い、より直観的にがれきを知覚できる手法を開発した。



印刷した家屋モデル



3Dプリンタ印刷結果

図5 家屋がれきの3Dプリント(3分割)

(6) がれきとがれき工学に関して、通常の学術会議に加えて、レスキューロボット開発者や防災関係者があつまる会合等で積極的に情報発信を行った。(例えば、学会発表③④⑤) また、本研究課題で開発したソフトウェア

ア、家屋モデル、レスキューロボットモデル、がれきモデルに関してはインターネットで順次公開をしていく予定であり、その準備を進めている。

(7) 本研究の今後の主な課題としては、がれき構造の力学的安定性の評価と安全ながれきハンドリングの指針作成、倒壊家屋の外部観測データからの内部空間の推定、探査ロボットの SLAM データとの統合などが挙げられる。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

①Takuto Hamano, Masahiko Onosato, Fumiki Tanaka, Performance comparison of physics engines to accelerate house-collapsing simulations, 査読有, IEEE Xplore, 2016, pp. 358-363, <https://doi.org/10.1109/SSRR.2016.7784327>

②川尻将大, 小野里雅彦, 田中文基, がれき特徴に対するレスキューロボットの踏破性能評価に関する研究, 計測自動制御学会論文集, 査読有, Vol. 51, No. 1, 2015, pp. 16-23, <http://doi.org/10.9746/sicetr.51.16>

[学会発表] (計13件)

①濱野拓人, 小野里雅彦, 田中文基, レスキューロボットとがれきの相互作用を評価可能なリアルタイムシミュレーション環境の構築, (社)日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'17, 2017.5.11, ビッグパレット福島 (福島県・郡山市)

②青山弘季, 小野里雅彦, 田中文基, 模擬がれきフィールドにおける多視点点群計測での直方体検出と位置・姿勢・寸法推定, 2017年度精密工学会春季大会学術講演会, 2017.3.13, 慶應義塾大学 (神奈川県・横浜市)

③小野里雅彦, がれき工学・情報気球・四次元モデルー減災に向けた三つの取り組みー, 減災情報システム第三回合同研究会, 2015.3.9, 立命館大学 (滋賀県・草津市)

④小野里雅彦, がれき・係留気球・四次元一災害情報システムに向けた三つの取り組みー, 2014年度東京大学空間情報科学研究センター全国共同利用研究発表大会 (CSIS DAYS 2014), 2014.11.23, 東京大学 (千葉県・柏市)

⑤小野里雅彦, 地震倒壊家屋におけるレスキュー活動支援を目的としたがれきの工学研究ー研究のアプローチ, これまでの主な

研究成果と今後の課題ー (社)日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'14, 2014.5.26, 富山市総合体育館 (富山県・富山市)

⑥川尻将大, 小野里雅彦, 田中文基, がれき特徴に対するレスキューロボットの踏破性能評価に関する研究, 第14回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2013.12.18, 神戸国際会議場 (兵庫県・神戸市)

[その他]

ホームページ等

<http://dse.ssi.ist.hokudai.ac.jp/~onosato/GarekiEng/>

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

小野里 雅彦 (ONOSATO, Masahiko)

北海道大学・大学院情報科学研究科・教授  
研究者番号：80177279