がれき内部空間の構造分析に関する研究

小野里 雅彦 Masahiko ONOSATO 増田 寿信 Hisanobu MASUDA 毛利 健二 Kenji MOURI

伊達 宏昭 Hiroaki DATE 田中 文基 Fumiki TANAKA

概要:大地震等で倒壊した家屋から被災者を救助するためのレスキュー機器の研究開発が重要な課題となっている。しかしながら救助の場であるがれきに対する学術的知見が不足しており、がれきに対する研究が求められている。本研究グループでは工学的アプローチのひとつとして、がれきの形態解析をこれまで行っており、本報告では、物理シミュレータを用いて形成した模擬的ながれきのモデルを対象に、がれきの定量的なパラメータの分類と、がれきの形成する内部空間の構造を離散ボロノイ分割に基づき分析する手法の提案を行っている。これによりがれきの内部自由空間は分散する局所最大空球とそれらを結ぶネットワークにより特徴付けられることを示した。こうした空間の構造分析手法によりレスキューロボット等の開発に必要となる内部自由空間に関する特徴量を得ることが可能となった。

キーワード:空間幾何学／がれき／構造分析

1. はじめに

大地震等により倒壊した家屋から、被災者を安全かつ迅速に発見し救助するためのレスキュー機器の研究開発が、1995 年の阪神淡路大震災の後、全国各所において行われている^[1]。しかしながら、こうしたレスキュー機器を使用する場である”がれき”に関しては、これまで学術的な研究がほとんどなされていない^[2]。一般にがれきとは、建築物が破壊されて形成される構造であり、人間の意図しない人工物である。建築の分野においては、建造物の倒壊限界までの挙動が研究上の対象であり、倒壊後の状態は、研究対象の外となる。がれきに関する知識は、おもにビルの解体・撤去作業などの業務の中で作業者の経験として蓄積されており、学術的な知見とはなっていないのが現状である。

こうした救助機器開発などでの実的な必要性に加えて、がれきは学術的に興味深い研究対象でもある。様々な形状や寸法の立体要素が乱雑に積み重なってできる空間的構造が、いかなる統計的性質を持つのか、という問題(3次元のランダムパッキング^[3])は、近年の大規模なデータを処理できるコンピュータと物理エンジンをを用いたシミュレーションにより統計的に取り組むことが可能となった。

本報告では、がれきの空間的性質を考えるためのパラメータの基本的な性質と、離散ボロノイ分割に基づく内部空間の構造化手法について述べ、物理シミュレーションで形成した模擬的ながれきモデルに対して行った統計的な分析の例を紹介する。

表 1 がれきパラメータの3タイプとそれらの代表例

タイプ	パラメータ		説明
タイプⅠ がれき 規模	要素数	N[U]	体積 U 以上の要素総数
	投影面積	S[L]	長さ L 格子での投影面積
	包絡体積	V[L]	長さ L 格子での包絡体積
	高さ	HG	ベース面からの最大高さ
	重量	WG	がれきの総重量
	体積	VG	がれき要素の体積総和
タイプⅡ がれき 大域的 特徴量	占有率	rg	$rg=VG/V[L]$
	空間率	rs	$rs=1-rg$
	平均重量	wg	$wg=WG/N[U]$
	最大重量	wmax	要素の最大重量
	最大体積	vmax	要素の最大体積
	建物体積	BCR	倒壊前の建物体積 V _{org}
	倒壊比		に対して $V[L]/V_{org}$
タイプⅢ がれき 局所的 特徴量	生活空間	LSRR	倒壊前の生活空間 V _{live}
	圧縮比		に対して $(V[L]-VG)/V_{live}$
	最大空球の径	R _m (p)	がれき内の点 p を中心とする空球の最大径
	局所最大空球径	$\underline{R}_m(p)$	点 p の属する領域での空球の最大径
	経路最大空球径	$\underline{R}_m(P)$	経路 P を通過できる空球の最大径

2. がれき分析のためのパラメータ設定

2.1. がれきパラメータのタイプ分け

がれきを定量的にとらえるために本研究においては、がれきに関する3つの異なるタイプのパラメータを考えた。まず、がれき全体の規模に関する量(規模:タイプⅠ)、最大・平均・比率といった量(大域的特徴量:タイプⅡ)、そしてがれきのある局所に関する量(局所的特徴量:タイプⅢ)である。こうした3つのタイプ分けを行った際の、代表的なパラメータの例を表1に示す。以下に各タイプの内容について順に説明を加える。

ただし、ここで示すパラメータは、がれきを外部から観測することで取得できることを保証していないことに留意されたい。現実のがれきから得ることのできる定量値は多くの場合、非常に限定的である。

2.2. タイプⅠ: がれきの規模

このタイプのパラメータはがれきの規模(大きさ)を表すが、がれきの大きさを考える際に問題となるのは、がれきの要素の多さと形状の複雑さである。実際のがれきにおいては、柱のような大きなものから、砂粒のような大き

図1 がれきの包絡体

さのものまで、多種多様であり、それらを同じ1つと数えるのは適切ではない。そこで本研究では、がれき要素を数える際に、対象とする要素の体積の下限 U を定め、それよりも小さな体積を持つものを無視するという、閾値を導入する。よって、 U の値を変えると、がれきの数も変化するが、 U の値はがれき内を移動したりがれきをハンドリングしたりする機器の特性などを考えて設定する。

がれきの投影面積に関してもグリッド長 L を導入する。すなわち、地面を長さ L の正方形領域に分割し、がれきを地面に投影したときに、その正方形にがれきが(一部でも)投影されれば、その正方形にがれきが存在する面積として判定する。また、包絡体積は図1に示すように、この正方形を高さ方向に伸ばして、その領域でのがれき最大高による角柱を作り、そうした角柱の体積の総和として定義している。こうした方法をとる理由としては、レスキュー機器においては、がれきのある一定の近傍には接近できない行動制約があること、鉛直方向は重力を利用したアクセス性に影響することなどが挙げられる。

2.3. タイプ II：がれきの大域的特徴量

タイプ II には、がれき全体に対しての最大、平均、比率といった、大域的特徴量が含まれる。例えば、どのくらいがれきが密に詰まっているか、というがれき占有率やそれを 1 から引いた空間率、がれき要素の1つあたりの平均重量や平均体積、がれき要素の中の最大重量や最大体積などがある。また、倒壊前の家屋のデータが利用出来る場合には、倒壊前と倒壊後の2つの体積を用いて算出される倒壊比、家屋の中の居住空間(自由空間)の縮小率を表す生活空間圧縮比なども、こうしたタイプ II の大域的特徴量に含まれる。

図2 統計的がれきモデル(上)と倒壊がれきモデル(下)

2.4. タイプ III：がれきの局所的特徴量

タイプ III のパラメータは、がれきの指定部分における部分的な特徴量を表している。ここでは最大空球を元にした特徴量を例に説明する。まず、がれきの内部空間の点 p において、そこを中心としたがれきと接触しない最大の球の径がある。これはその点から最も近いがれきまでの距離を表している。また、中心の移動を許しながら連続的に空球の径を増加させた時の最大径(局所最大空球)や、がれきの中の2点を結ぶパスを通過できる最大球の径、といったものがこのタイプの量として考えられる。これらのパラメータに関しては、後に詳しく述べる。

3. がれき形成シミュレーション

3.1. デジタルがれきモデル

がれきを分析するアプローチとして実がれきを計測してデータを収集する方法と、シミュレーションによりコンピュータ内部にがれきのモデルを構築する方法が考えられる。現在の技術では実がれきを計測してモデル構築する前者のアプローチは難しい。そこで、本研究グループでは A) 乱数に従って生成したがれき要素を落下させて力学的平衡状態を作り出す方法【統計的がれきモデル】(図2上)と、B) 木造家屋のモデルを構築し、地震動を加えることで破壊・倒壊させてがれきを形成する方法【倒壊がれきモデル】(図2下)の開発を行ってきた。

統計的がれきモデルでは、乱数の分布を変化させることで様々な性質を持ったがれきモデルを生成できるが、実がれきと必ずしも対応しない。他方、倒壊がれきモデルでは実がれきと近い性質を持つがれきを形成できるが、家屋のモデルを構築するのに労力が必要である。

3.2. 物理エンジンによるがれき形成

一般にがれきのような多数の要素が相互作用を及ぼし合う系の力学的平衡状態を計算することは容易なことではないが、近年では物理エンジンを利用することで、あ

る精度をもって計算することができるようになった。

本研究グループでは米国 AGEIA 社の提供する物理エンジン PhysX を使用している。PhysX は物理計算に関するライブラリとして提供されており、専用の PhysX ボードを装着することで、ハードウェアによる高速化を行うことができる。また直方体や球といった基本的な形状に加え、三角形メッシュで定義された任意の3次元形状を扱うことが可能であるが、複雑形状では干渉計算などの負荷が大きく、また、2つの形状をつなげるジョイント要素が用意されており、外力により破断する条件を定義できるため、倒壊家屋の破壊を模擬することが可能である。

統計的がれきモデルにおいては、プログラムの中で乱数的に寸法や位置・姿勢を与えた要素を上から落とすことで模擬的ながれきモデルを形成する。また、倒壊がれきモデルでは、家屋の柱や梁、壁、床などの構成要素を定義した家屋構造定義ファイルを読み込んで仮想的な加震プレート上に家屋モデルを構築し、地震動を加えることで倒壊させ、がれきモデルを形成する。家屋モデルに関しては、現在、約1万要素からなるモデルの構築を進めている。

4. がれきの内部空間の構造化

4.1. がれきの内部空間の特徴

次に、がれきの内部空間の有する性質について考察を加える。本研究では、がれき要素で占められていない自由空間に分析の中心を置いている。これは、レスキュー隊が中に入ったり、探索のためのレスキュー機器を投入したりする際に、人や機材が入って行動できるかどうかを評価することが当面の目標であり、自由空間の評価が必要となるからである。今後、がれきの撤去や操作に対する力学的安定を考える際には、空間内に配置されたがれき要素そのものが考察の対象となる。

がれき内部の自由空間は、多くの場合、相互に連結している。すなわち、がれき内は多くの障害物が存在しているが、それらにより密閉されるほどの稠密さはなく、また、壁や床で明確に区分けされている部屋は、倒壊でしきりが破損し、つながりを持つことが多い。

がれきの内部空間を構造化する上で、全体として連結している自由空間を、いかにして分節化するか、ということが課題となる。本研究では以下にのべる局所最大空球という概念を用いて、分節化を行い、がれきの内部空間をネットワーク構造として表す手法を提案する。

4.2. 局所最大空球

まず、がれき内部の自由空間の一点 p に“風船の種”を置くことを考える。ここでいう“風船の種”とは、空気を入れると真球の形で膨張していくものとする。この“風船の種”を半径 0 から徐々に膨らませて行くと、ある半径になったときに風船の表面上の一点でがれき要素と接触をする。中心を移動しない場合、これ以上、風船を膨らま

図3 風船の種の拡張による局所最大空球の構成
(次元を2次元に縮退した例。0 からスタートして、2 で1点接触、4 で2点接触、7 で3点接触)

図4 局所最大空球の連結(左)と4近傍(右)

せることはできない。このときの風船の径が前出の表1に述べた最大空球の径 $R_m(p)$ である。

次に、風船の中心を徐々に動かすことを許すと、風船はさらに膨らませることができる。すると風船表面と接触するがれき要素が2つ、3つと増えていき、4つ目の点で接触した時に、風船をそれ以上大きく膨らませることができなくなる。この状態の風船を、局所最大空球と呼ぶことにする。局所最大空球の中心は、4つのがれき要素上の点から等距離の点となっている。図3は局所最大空球の概念を2次元の場合に縮退して説明したものである。

局所最大空球は、がれきの内部自由空間の中に分散して存在し、がれき内部の局所的な「すき間」を代表していると考えることができる。2次元の場合には領域は容易に分割することができるが、3次元の場合には、任意の4つのがれき要素は空間的にねじれの関係にあり、空間の分割は容易ではない。本研究では後述する離散ポロノイ分割によりこれを求めている。

4.2. 局所最大空球のネットワーク構造

次に、局所最大空球の隣接関係について考察を加える。図4に示すように、がれき要素 1,2,3,4 に接触する局所最大空球 A とがれき要素 2,3,4,5 に接触する局所最大空球 B を考える。A のがれき要素 1 との接触を解く形で径を徐々に小さくしながら B に近づけていくと、3点での接触を維持したまま、ある点 C において、球の大円ががれき要素 2,3,4 と接触した状態となる。この時の球径が、先に挙げた表1の経路最大空球径を求める際に使用される。ここから徐々に今度は径を大きくしながら B に近づけていくと、がれき要素 5 と接触して膨張が停止し、局所最大空球 B に一致する。このように接触する4つのがれき要素のうち、1つを別のがれき要素と入れ替える

図5 統計的がれきモデル(左)とその局所最大空球のネットワーク構造

ことで、各局所最大球には4つの隣接する局所最大空球が存在する。ただし、がれきの外部には無限大の径を持つ局所最大空球 LMVSaux の存在を仮定しておく。すなわち、がれき表面の局所最大空球はこの LMVSaux との隣接関係を持つことになる。こうした隣接関係で局所最大空球を相互に結合することで、がれきの内部自由空間の構造に関するネットワークを構成することができる。このネットワークは、レスキュー機器の移動経路探索などの計画問題に対して有用な情報を含んでいる。

4.2. 離散ボロノイ分割によるネットワーク構築

具体的なデジタルがれきモデルに対し、局所最大空球のネットワーク構造を得る方法について次に述べる。

局所最大空球を求める方法として、本研究では離散ボロノイ分割を用いている。デジタルがれきモデルの存在する3次元領域をボクセルに分割をして、各ボクセルごとに最も近いがれき要素とその距離を算出しておく。これにより、あるがれき要素に関して、それが最も近くのがれき要素となるボクセルの集合(領域)を得ることができる。そこでは局所最大空球の中心は、異なる4つの領域が接する点となる。また、異なる3つの領域が接する線が、前述した局所最大空球を結ぶ隣接線となる。

図5に離散ボロノイ分割に基づいて求めた局所最大空球のネットワーク例を示す。(約 6700 万ボクセル)

5. 確率的シミュレーションによるパラメータ分析

現在、以上に述べてきたがれきの空間構造化手法とシミュレーション手法に基づいて、さまざまに条件を変えたときのパラメータの変化を分析した。ここではがれきの要素の形状を柱状、箱状、板状に変えたときに、それらが積み重なってできるがれきの空間占有率と、局所最大空球の数とその径を例として紹介する。

表2で示したものは、要素 500 個の位置・姿勢を乱数で与えて落下させて積み上げることを、500 回試行した結果の平均値である。空間占有率では箱状(立方体)が高く、すき間の少ない内部空間を形成している。また、柱状と板状とでは空間占有率では大きな差はないが、局所最大空球数では柱状の方が大きな数となっている。これは、自由空間がより複雑なネットワークを持ち、他と比べて入り組んだ構造をもっていることを意味している。

表2 統計的がれきモデルによるパラメータ算出

(500 個のがれき要素を乱数で位置姿勢変化させてがれき形成することを 500 回試行した平均値)

形状	がれき要素寸法(m)	平均空間占有率	LMVS数	LMVS平均径
柱状	1.6/0.2/0.2	0.43	2.83E+3	0.14
箱状	0.4/0.4/0.4	0.67	1.66E+3	0.11
板状	0.8/0.8/0.1	0.49	1.83E+3	0.12

LVMS: 局所最大空球

6. おわりに

以上、がれきの幾何学的なパラメータの概要と、内部自由空間を局所最大空球によって構造化する手法について述べた。本研究の研究成果により、3次的に乱雑な配置を持つがれきを定量的に評価することが可能となった。今後は実際のがれきにおいて外部から観測可能な量を用いて、今回、照会したような内部空間に関する量を推定する手法の検討を行い、レスキュー活動の計画支援などを検討していく予定である。

なお、本研究の一部は、科学研究費補助金萌芽研究「がれき工学—倒壊家屋からの人命救助のためのエンジニアリングの確立」(H17-18)ならびに文部科学省大都市大震災軽減化特別プロジェクト(大大特プロジェクト)として実施されたことを最後に記す。

参考文献

- [1] 田所 諭, “大大特プロジェクトの目的と概要“, 日本ロボット学会誌 Vol. 22, No. 5 (2004), pp. 2-3.
- [2] 小野里雅彦, 小南 寛幸, “がれき工学の提案—レスキューのためのがれき研究のフレームワーク—“, (社)日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (2000), 0P1-06-014 (CD-ROM).
- [3] 伊藤 栄明, “ランダムパッキングの数理と応用“, システム/制御/情報 Vol. 52, No. 2 (2008), pp. 35-40.

著者紹介

おのさと まさひこ : 北海道大学大学院情報科学研究科システム情報科学専攻システム環境情報学研究室, 教授。サイバーフィールド情報学, レスキュー工学, 生産システムの研究に従事。〒060-0814 札幌市北区北14条西9丁目 <http://dse.ssi.ist.hokudai.ac.jp>
 ますだ ひさのぶ : 所属同上 修士課程学生
 もうり けんじ : 所属同上 修士課程学生
 だて ひろあき : 所属同上 助教
 たなか ふみき : 所属同上 准教授