

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	広域災害における防災情報の分析・提供基盤確立に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	石川裕治
Author(English)	unknown unknown
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第7434号, 授与年月日:2008年9月25日, 学位の種別:課程博士, 審査員:小杉 幸夫
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第7434号, Conferred date:2008/9/25, Degree Type:Course doctor, Examiner:
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

広域災害における防災情報の 分析・提供基盤確立に関する研究

指導教員 小杉幸夫教授

物理情報システム専攻 石川裕治

論文要旨

本論文では、甚大な被害が予測される広域市街地での災害発生に対し、迅速かつ的確な災害対策活動を支援する防災情報システムの実現を目的として、現状で比較的拡充が遅れている情報分析機能と情報提供機能について研究課題を挙げ、各機能の実現方式に関する研究成果を示す。具体的な成果として、情報分析機能に関しては防災情報の可視化と被害予測に必要な基盤データとなる3次元市街地モデルの構築方式を、情報提供機能に関しては遅延のない情報提供が可能なHTML文書の放送型伝送方式を、それぞれ提案し、実データを適用した検証実験によって各方式の有効性を示した。

本論文は全7章から構成され、以下に各章の要約を述べる。

第1章「はじめに」では本研究の背景および意義について述べる。

第2章「防災情報システムの課題とシステム構成の提案」では、本研究のテーマである情報分析機能と情報提供機能に関して国内外の事例を挙げて現状の防災情報システムで提供されている機能を概観する。次に各機能の課題を明らかにし、その解決手段として市街地モデルと放送型通信の導入を提案する。そして、情報分析機能における市街地モデルの有用性と、情報提供機能における放送型通信の利用可能性について検討を行い、それらを防災情報システムの各機能に導入した場合の新しいシステム構成を示す。

続いて第3章から第5章までは情報分析機能において必要とされる3次元市街地モデルの構築方式について説明を行う。

第3章「空撮映像からの建物形状復元」では、最初に3次元市街地モデルの構築において空撮映像とレーザレンジデータに共通の問題点を明らかにし、建物形状の復元手法について提案を行う。提案するBRoC法(Building Recovery on Clustering)では観測データから獲得した3次元点集合をクラスタリングによって、同一の建物上面に含まれる点集合に分割していくことで、建物の3次元形状を復元する。この手法を元に、空撮映像を利用する場合に特有の課題を解決する手段を加えて、BRoC法の処理内容を具体化し、復元実験を行う。その課題としては、空撮映像から獲得した点集合は分布が不均一であり、単純に高さが近い点同士をグルーピングしただけでは建物上面の形状を十分に特定できない、という点が挙げられる。そのため、建物上面形状の推定結果に対して点の上下関係を利用した制約条件を利用したグルーピング規則を導入し、建物上面形状の復元精度を向上させる手法を提案する。

第4章「広域市街地モデルの自動構築システム」では、構築対象領域の全域をカバーするために、複数の飛行コースで分割されて撮影された空撮映像を利用し、広域の市街地モデルを構築するためのシステムについて説明する。一般に、レーザレンジデータを利用する場合は航空機を利用して広範囲の高さ情報を一度に取得可能であるが、空撮映

像を利用する場合には、高解像度化のため低空で複数コースに分けて構築領域を飛行および撮影する必要がある。さらに、対応点探索を容易にするため高頻度で画像フレームを取得しなければならない。そのため、広域の市街地モデルの構築時には扱う処理データの数量が膨大になり、データ管理作業の負担が市街地モデル構築の阻害要因となる可能性が高い。そこで、構築処理の経験が無いオペレータでも少ない作業量で広域のモデル構築を可能にするデータ管理機構を提案して実験システムに実装し、5 平方キロメートルのモデル構築実験を行ってオペレータの作業量および計算機の処理時間に関して実用可能性の評価を行う。

第 5 章「レーザレンジデータからの市街地モデル構築」では、第 3 章で提案した BRoC 法に基づいてレーザレンジデータから建物上面形状の特定および建物形状の復元を行い、広域の 3 次元市街地モデルを構築する方法を説明する。レーザレンジデータを利用した場合には、3 次元点集合が同じ密度で分布しているため建物上面単位に点集合を分割することは比較的容易であるが、建物上面の縁で計測誤差が大きく、建物上面形状の推定精度が悪化する問題がある。そのため、建物上面は比較的少数の頂点からなる多角形であるという仮定を置き、Minimal Description Length 原理に基づく最適化によって上面形状を簡素化し、上面形状の推定精度を向上させる手法を提案する。そして、第 4 章で構築実験を行った市街地領域を対象にモデル構築実験を行い、レーザレンジデータからも広域の市街地モデルを自動で構築可能であることを示すと共に、処理時間や復元精度について実用可能性の評価を行う。

第 6 章「防災情報提供のための放送型伝送方式」では、情報提供機能で必要とされる放送型通信の実現方式について提案を行う。現状では WWW サイトを通じた防災情報の提供が普及してきていることから、本研究では防災情報の表現形式として HTML を対象とし、本章で HTML 文書の放送型伝送方式を検討する。HTML では複数のデータを参照して一つの文書を構成することが多いため、被災地域の地図などを文書間でデータを共有した場合に、放送方伝送の効率が低下する問題がある。そこで本章では、HTML 文書間におけるデータの共有関係を考慮して、利用者が HTML 文書を取得するまでの平均待ち時間を最小にする放送データの構成手法を提案する。そして、防災情報提供のために公開されている WWW サイトから HTML 文書を取得し、平均待ち時間を評価することによって、提案手法の有効性を検証する。

第 7 章「結論」では全体を総括し、本研究の成果をまとめる。

目次

第 1 章	序論.....	1
1.1	研究の背景.....	1
1.2	研究の位置付け.....	2
1.2.1	3次元市街地モデルの構築方式の検討.....	3
1.2.2	災害時の情報提供に適した情報伝送方式の検討.....	3
1.3	研究の目的と概要.....	4
1.3.1	3次元市街地モデルの構築方式の検討.....	4
1.3.2	防災情報提供のための放送型伝送方式の検討.....	6
1.4	論文の構成.....	7
	第 1 章参考文献.....	10
第 2 章	防災情報システムの課題とシステム構成の提案.....	12
2.1	防災情報システムの現状.....	12
2.1.1	概要.....	12
2.1.2	情報分析機能.....	13
2.1.3	情報提供機能.....	16
2.1.4	海外の事例.....	18
2.2	現状の防災情報システムにおける課題.....	20
2.2.1	情報分析機能における課題.....	20
2.2.2	情報提供機能における課題.....	20
2.3	課題解決に向けたシステム構成の提案.....	21
2.3.1	情報分析機能.....	21
2.3.2	情報提供機能.....	25
2.4	まとめ.....	28
	第 2 章参考文献.....	29
第 3 章	空撮映像からの建物形状復元.....	32
3.1	市街地モデル構築における問題点と建物形状復元手法の提案.....	32
3.1.1	市街地モデル構築の概要.....	32
3.1.2	従来の建物形状復元における問題点.....	32
3.1.3	建物形状復元手法の提案.....	34
3.1.4	提案手法に対する評価関数の導入.....	36
3.2	空撮映像向け BRoC 法の提案.....	38

3.2.1	クラスタリング手法の検討.....	38
3.2.2	3次元点集合の獲得方法.....	39
3.2.3	段階的なレイヤおよびクラスタの生成.....	40
3.2.4	MDL原理に基づくレイヤ集合の選択.....	43
3.3	実験結果.....	44
3.3.1	空撮映像の取得と3次元点集合の獲得.....	44
3.3.2	建物形状復元結果.....	44
3.3.3	形状復元手法の定量的評価.....	51
3.4	まとめ.....	53
	第3章参考文献.....	54
第4章	広域市街地モデルの自動構築システム.....	56
4.1	空撮映像からの広域市街地モデル構築に向けた課題と提案の概要.....	56
4.2	市街地モデルの構築方式とシステム.....	57
4.2.1	構築方式の概要.....	57
4.2.2	空撮映像の分割とデータ管理.....	58
4.2.3	プロファイルに基づく構築処理.....	60
4.2.4	市街地モデル構築システム.....	64
4.3	市街地モデル構築実験.....	67
4.3.1	実験概要.....	67
4.3.2	建物形状モデルの復元.....	68
4.3.3	市街地モデルの構築結果.....	74
4.3.4	オペレータの作業.....	77
4.4	考察.....	79
4.4.1	構築方式について.....	79
4.4.2	構築システムについて.....	80
4.5	まとめ.....	81
	第4章参考文献.....	82
第5章	レーザレンジデータからの市街地モデル構築.....	83
5.1	レーザレンジデータからの広域市街地モデルの構築に向けた課題と提案の概要.....	83
5.2	建物平面形状の抽出手法.....	84
5.2.1	建物形状復元の流れ.....	84
5.2.2	エッジ点の分類による初期形状の生成.....	85
5.2.3	エッジ点グループの段階的統合と最適形状の選択.....	87
5.3	実験結果.....	90
5.3.1	建物平面形状の抽出.....	90
5.3.2	3次元形状の復元.....	93

5.3.3	定量的評価	96
5.3.4	広域市街地モデルの構築	105
5.4	考察	108
5.4.1	形状抽出結果について	108
5.4.2	広域市街地モデルの構築結果について	109
5.5	まとめ	110
第 5 章参考文献		112
第 6 章 防災情報提供のための放送型伝送方式		114
6.1	防災情報提供に向けた課題と提案の概要	114
6.2	関連研究	116
6.3	放送による HTML 文書の伝送	117
6.3.1	HTML 文書の送信と取得	117
6.3.2	パッケージング方式採用の是非	117
6.3.3	パッケージング方式における取得時間短縮のための課題	119
6.4	データ共有を考慮したパッケージ配置方式	120
6.4.1	準備：取得時間の定式化	120
6.4.2	順序配置方式	123
6.4.3	課題 3： E_m を最小にする m の推定方法	126
6.5	評価	127
6.5.1	統計モデルに基づく評価	127
6.5.2	実データによる評価	131
6.6	まとめ	133
第 6 章参考文献		135
第 7 章 結論		136
謝辞		139
発表論文等		140
付録		143
付録 A	クラスタ集合に対する MDL 符号長の導出	143
付録 B	エッジ点列から抽出した建物平面形状に対する MDL 符号長の導出	145
付録 C	データを共有する HTML 文書に対する取得時間の期待値 E_{si} の導出	146

第1章 序論

1.1 研究の背景

世界的に都市部への人口集中が進行し、大規模かつ高密度な市街地の形成が進行している。その一方で、地震や台風などによる大規模な自然災害が多発しており、これら二つの事象が重なり合ったとき、甚大な被害が発生することは容易に想像できる。その一つの例が阪神・淡路大震災であり、その次の例としては東海地震および東南海地震が今後 30 年で 50% 程度の確率で発生が予測されている[1]。

関東大震災以来の大規模都市災害となった 1995 年の阪神・淡路大震災は、災害対応活動における情報収集・伝達の重要性が明確に認識された災害であった。つまり、関東大震災の 1923 年当時と比較すれば構造物、消防、救助、医療、輸送、通信など災害対処活動に必要な設備や手段は大幅に強化されていたにもかかわらず、それを利用する側の情報収集や情報伝達に対する認識や備えに関しては大きな進展が無かったために、設備や手段の効果的な利用が困難であった。さらに、上記のような設備や手段の近代化によって公共機関が行う「公助」への依存が過大となる一方で、社会状況の変化によって被災地域住民の防災能力である「自助」「共助」の重要性に対する認識は薄らいでいた。しかし、阪神・淡路大震災ほどの広域の同時多発災害はハードウェア的対処能力をはるかに超えているため「公助」の及ぶ範囲は限定的であり、災害に関わる各個人への的確な情報提供によって「自助」「共助」を促進することが被害の低減や早期の復旧に極めて重要である、ということが明らかとなった[2]。

つまり、複数の市街地にわたって被害が同時発生するような広域の大規模災害では、建造物の耐震工事や消防力の増強などハードウェア的な対処では不十分であり、災害に関わる人々すべてに適切な情報を伝え、避難・救助・復旧などの災害対応活動を組織的に効率よく行うためのソフトウェア面における対応策を進めていく必要がある。このようなソフトウェア面での中心となる対応策の一つとして防災情報システムの構築が進められており[3]、その機能は災害対応活動の流れに対応して主に以下の 3 つから構成される。

(1) 情報収集

従来の通報・報告による受動的な情報収集に加えて、各種観測機器による被害発生 の自動検知や広域画像情報の活用によって、迅速に被災地全域の被害状況を収集する。

(2) 情報分析

収集した情報を地理情報システム上で集約して、被災地全体の被害状況や災害対応活動状況を把握できるようにすると共に、被害の進展状況を予測し、効果的な災害対応活動を実施するための支援情報を生成する。

(3) 情報提供

情報分析の機能で得た支援情報を、被災地で災害対応活動を行っている多数の作業員や被災者に広く提供する。

防災情報システムの構築はまず情報収集手段の整備から進められており、高所カメラ画像、空撮映像、航空写真、衛星画像などの広域画像情報の活用や、地震計、水位計、地すべりセンサなどの各種観測機器のネットワーク化が推進されている[4]。その一方で、短時間に多量の情報が収集される「情報の洪水」によって、その後の情報分析や情報提供に支障が生じるという問題が指摘されており[5]、防災情報システムの整備は、これらの機能の拡充に焦点が移ってきている。

情報分析については、人間に代わって解決案を示すような高度な機能ではなく、収集した情報の可視化と被害の予測という基本的な機能が実現されつつある段階である[2]。具体的には、収集した大量の情報を市街地モデル上にマッピングして整理し、被災地の全体状況を直感的に把握可能にする情報可視化[6]と、災害を物理現象として解析することにより高精度な被害予測を可能にする物理シミュレーションである[7]。これら二つの機能を実現するための技術は既にさまざまな形で実用化されているが、その基盤データとなる3次元形状を有する市街地モデルデータの整備が進んでおらず、情報分析機能を実現する上での課題となっている。

一方、情報提供については、従来から利用されてきたラジオ、広報車、防災無線などの音声メディアでは、被害の範囲や被災者リストなど一覧性が重要な情報の提供に適していない。また、新聞や掲示板などの紙メディアでは時々刻々と変化する被害状況や災害対策状況を迅速に提供することが難しい。そのため、近年急速に普及している携帯端末と無線公衆網を利用したデジタルメディアによる情報提供に期待が集まっている[8]。実際、阪神・淡路大震災においては、従来の防災無線や広報車などの音声アナログメディアに加えて、インターネットが災害に初めて本格的に利用され、被災地からの防災情報の発信に利用された[9, 10]。そして現在では、災害時に各関係機関が World Wide Web(WWW)によって防災情報の提供を積極的に行うことが一般的になってきており、被災地の利用者側においても携帯端末による防災情報の取得が増加している。

しかし、これまでの災害事例では災害発生直後から WWW サーバのアクセス集中による通信回線の輻輳が発生し、十分に信頼できる防災情報の提供手段とは認知されていない状況にある[11]。そのため、同時利用者数の急増に対応可能な通信方式の実現が必要とされている。

1.2 研究の位置付け

防災情報システムの実現においては、情報分析機能の基盤データとなる3次元市街地モ

デルの構築と、情報提供機能に適した防災情報の伝送方式の確立が課題となっており、本節ではこの二点について研究テーマの位置付けを明確にする。

1.2.1 3次元市街地モデルの構築方式の検討

3次元市街地モデルの構築に関しては、住宅地図のような2次元の市街地情報と比較して作成手法が十分に確立されているとは言えず、現在も様々な研究開発が行われている状況である。これらの取り組みは、航空機やヘリコプターによって上空から3次元情報を取得する手段[12, 13]と、主に車両によって地上から壁面の情報を取得する手段[14]の二つに大きく分けることができるが、広域の（特に災害直後の）情報取得には上空からのアプローチが有利である。

さらに、上空から建物の高さ情報を計測するために利用されるデータとして、航空写真や空撮映像などの画像・映像系データと、レーザプロファイラから得られるレーザレンジデータの二つが挙げられる。いずれの計測データも市街地を中心に全国的な整備が進められているが、常に両方のデータが利用可能であるわけではない。例えば画像・映像系の計測データは目視確認に有用なため災害後に撮影されることが多いが、夜間や火災発生時には取得できないという問題点がある。つまりモデル構築において真に3次元市街地モデルの整備・普及を図るには、どちらの計測データも利用可能であることが必要と考えられ、本研究では両方の計測データに対して構築方式を検討する。

画像・映像系の計測データについては航空写真[15]や3ラインスキャナ画像[16]を利用した方式が提案されているが、前者については対応点探索が困難で高さ情報が取得できない場合があり、後者についてはハードウェアが特殊で市街地モデルの整備に適していないという問題がある。そこで本研究では、比較的対応点探索が容易で撮影手段が広く整備されている空撮映像に着目する。従来、空撮映像は解像度が低く、また、大量の画像フレームを処理しなければ3次元情報を獲得できないことから計測データとして検討されていなかったが、近年の撮像機器のHD化（いわゆるハイビジョン規格対応）によって解像度が向上し[17]、また、比較的低価格の計算機によって大量の画像データを処理できる状況になってきたため、本研究では画像・映像系の計測データとして空撮映像を利用した市街地モデルの構築方式を検討する。

1.2.2 災害時の情報提供に適した情報伝送方式の検討

情報の伝送方式には大きく分けて、利用者からの要求に基づいて情報を個々の利用者に送信する方式（オンデマンド型）と、情報の提供側が情報を選択して不特定多数の利用者に送信する方式（放送型）の2つがある。WWWに代表される情報提供サービスでは一般的にオンデマンド型の情報伝送が行われている。その理由は、平常時の人々の情報ニーズは多種多様であり、オンデマンド型であれば利用者は希望するタイミングで、希望の情報を格納したWWWサーバにアクセスして情報を取得できるからである。しかし、災害時には被害情報、避難情報、安否情報など特定の情報を提供するサーバに同じタイミングでア

アクセスが集中するため、現状のオンデマンド型の情報伝送方式では利用者に対する応答処理の負荷がサーバの処理性能を超えてしまうという問題がある。

一方、放送型の情報伝送方式であれば同時利用者数に関係なく応答時間を一定にすることが可能である。また、放送型の情報伝送方式では情報の提供側が利用者の情報ニーズに適合した放送内容を選択することが非常に重要であるが、災害時には利用者の情報ニーズを比較的特定しやすいと考えられる。さらにもう一つ重要な観点として、通信ネットワークへの被害を最小限に抑え、また、利用者の機動性を確保するために無線系のネットワークが有効であるが、放送型通信であれば携帯端末からの発信が無く、受信だけであるので電力消費量を極めて低く抑えることが可能である。この点は、被災地において長時間の屋外活動が必要とされ、また、十分な電源の確保が困難であることを考慮すると、大きな優位点であると言える。このように放送型の情報伝送方式は防災情報システムにおける情報提供機能の基盤方式として非常に適した方式であると考えられ、本研究では、その実現に向けた検討を行う。

1.3 研究の目的と概要

本研究の目的は、甚大な被害が予測される広域市街地での災害発生に対し、防災情報システムにおける情報分析機能および情報提供機能を実現するため、防災情報の可視化と被害予測に必要な基盤データとなる3次元市街地モデルの構築方式と、防災情報の提供に必要な伝送方式となる放送型伝送方式の検討を行う。

1.3.1 3次元市街地モデルの構築方式の検討

本研究では、利用する観測データとして空撮映像とレーザレンジデータの両方について3次元市街地モデルの構築方式を検討する。既存の構築方式としては、観測データに加えて2次元地図情報を利用する手法[18]や作業オペレータによる教示情報および修正情報を利用して建物形状を復元する手法[19, 20]が提案されている。しかし、広域の市街地モデルを低コストで整備し、また、建物倒壊や再開発などの市街地の最新状況を迅速に反映するために、本研究では空撮映像とレーザレンジデータのいずれかの計測データのみを利用し、処理パラメータの入力作業のみで自動的に広域市街地モデルを構築する方式を検討する。

一般に形状を復元するにあたって、線分は重要な幾何情報であり、形状復元の基本要素として多くの手法で利用されている[21]。しかし、建物形状の復元においては、画像・映像系データとレーザレンジデータのいずれを利用する場合でも線分情報の利用は困難な面が多い。まず、画像・映像系データを利用した場合、屋外シーンでは建物上面にある様々なマーク、面の継ぎ目、配管など多数の線分が抽出され、真に必要な形状の輪郭を示す線分との判別が非常に困難である。一方、レーザレンジデータを利用した場合には、輪郭部分でレーザが散乱しやすいため計測誤差が比較的大きくなるという問題があり、高精度に

輪郭を示す線分を抽出することが難しい。

そこで本研究では、線分より基本的な幾何情報である 3 次元の点集合を形状復元の基本要素として用いることとした。レーザレンジデータはそのまま 3 次元の点集合と見なすことができるため、この方針は容易に適用可能である。また、画像・映像系データを利用した場合には、線分と同様の理由により建物上面の角や端の点だけでなく面内部からも多数の点を得られるが、そのことは、線分の場合とは反対に、形状復元にとってむしろ好都合であり、点ベースのアプローチが市街地モデルの構築に適していることが分かる。以上の議論をもとにして本研究では、計測データから建物上面および地表面の 3 次元点集合を獲得し(ステップ 1)、次に 3 次元点集合から建物形状を復元する (ステップ 2)、という 2 つのステップから成る構築方式を検討する。

まずステップ 1 の 3 次元点集合の獲得に関して、レーザレンジデータを利用する場合は航空機を利用して広範囲の高さ情報を一度に計測可能なため、構築領域全体の 3 次元点集合を獲得することは比較的容易である。一方、空撮映像を利用する場合には、高さ情報の算出に必要な対応点探索を容易にするために、小領域に分けて高頻度・高解像度で画像フレームを取得しなければならない。そのため、広域の市街地モデルの構築時には扱う処理データの数量が膨大になり、実利用時にはデータ管理作業の負担が市街地モデル構築の阻害要因となる可能性が高い。そこで本研究では、構築処理の経験が無いオペレータでも少ない作業量で広域のモデル構築を可能にすることを目的として、市街地モデルの構築処理におけるデータ管理機構を検討することを第一の研究課題とする。

空撮映像およびレーザレンジデータから獲得した 3 次元点集合には、それぞれ以下の問題がある。

空撮映像：画像・映像系データ共通の問題として、建物上面の縁付近では特徴点を多数得られるが、同一色の建物上面のように画素値の変化が小さな領域では特徴点を得ることができず、均一な分布で 3 次元点集合を獲得できない。

レーザレンジデータ：計測した領域において、ほぼ均一な分布で高さ情報を計測できるが、建物上面の縁付近ではレーザの乱反射が発生し、高さ情報の計測誤差が大きい。

これらの問題はステップ 2 の建物形状復元において復元精度の低下を招くため、以下では具体的に復元手法を検討して、本研究の課題を明確にする。

点集合に基づく形状復元手法としては、3 次元点集合に三角メッシュを生成する方法が広く利用および研究されている[22]。しかし、建物形状は一般的に水平・垂直面で構成されているため、本研究では、3 次元の点集合を高さが近い点の集合(レイヤ)に分割し、次に各レイヤを同一の建物上面に属すると推定される点集合(クラスタ)に分割して、建物上面形状を得る手法を提案する。この手法に対し、空撮映像を利用した場合には、各点の隣接関係だけでクラスタを決定することはできないため、建物毎に正しくクラスタに分割す

ることを第二の研究課題とする。一方、レーザレンジデータを利用した場合には、クラスターの輪郭形状と実際の建物上面形状との間でずれが生じているため、位置誤差の含まれる輪郭形状から建物上面形状を推定することを第三の研究課題とする。

建物形状復元の過程では入力となる計測データのみを利用するため、形状復元の過程で、3次元点の欠損や位置の誤差を補うための情報が無い。そこで本研究では、「点集合に対する形状モデルの適合度」と「形状モデルの簡素さの度合い」の間でバランスのとれた水平・垂直面からなる形状モデルが真のモデルであるという仮定を置き、MDL(Minimum Description Length)原理[23]に基づいて最適なモデルを選択する方法を提案する。そして、実データによる復元精度の検証によって提案手法の有効性を示す。

1.3.2 防災情報提供のための放送型伝送方式の検討

テレビやラジオのような従来の放送型メディアでは、視聴をいつ開始しても短時間で情報を取得できるように、災害時には同一の防災情報を繰り返し放送する。同様に放送型で情報を伝送する際には、一定のコンテンツ（データストリーム）を周期的に繰り返し放送し、利用者が希望する情報を希望のタイミングでデータストリームから取得する方式が提案されている[24, 25]。この方式では利用者がある情報を希望してから、その情報が放送されて来るまでの平均待ち時間はデータストリームの構成によって決まるため、提供する情報のデータ構造を考慮して、データストリームの構成を決定し、平均待ち時間の短縮が図られている[26]。

現在、ほとんどの地方自治体で WWW サイトを公開し、管轄地域の防災情報を提供している。WWW サイトが提供する情報は HTML 文書として提供されており、これはデータの参照関係の特徴とする情報表現形式であるハイパーテキストの一種である。例えば、被害状況の地図と避難文字情報の組み合わせでは、避難情報が記載された HTML ファイルから、地図画像が参照されて1つのページとして表示される。

しかし、放送型伝送方式に関するこれまでの研究では、このようなデータの参照関係はほとんど考慮されておらず、利用者にとって平均待ち時間の長いデータストリームしか構成することができなかった。この問題に対して文献[27]では、WWW サイトにおいてリンクをたどりながら複数の HTML 文書を閲覧する状況を想定し、複数のデータを時間間隔をもって連続的に取得する場合に、データアクセスの相関性に基づいて放送スケジュールを決定する方式を提案している。これに対し、本研究は HTML 文書間の参照関係ではなく、1つの HTML 文書が利用する複数のデータファイルに対する参照関係を検討対象としている点が異なっており、個々の HTML 文書の取得時間を短縮する手法である。本研究では、HTML 文書を構成する複数のファイルを1つの大きなパケット（パッケージ）にまとめて伝送する方法を提案し、平均待ち時間の短縮を実現する。

1.4 論文の構成

本論文は防災情報システムにおける情報分析機能と情報提供機能に必要な市街地モデルの構築と放送型伝送をテーマとして、図 1.1 に示す全 7 章から構成される。以下に各章の要約を述べる。

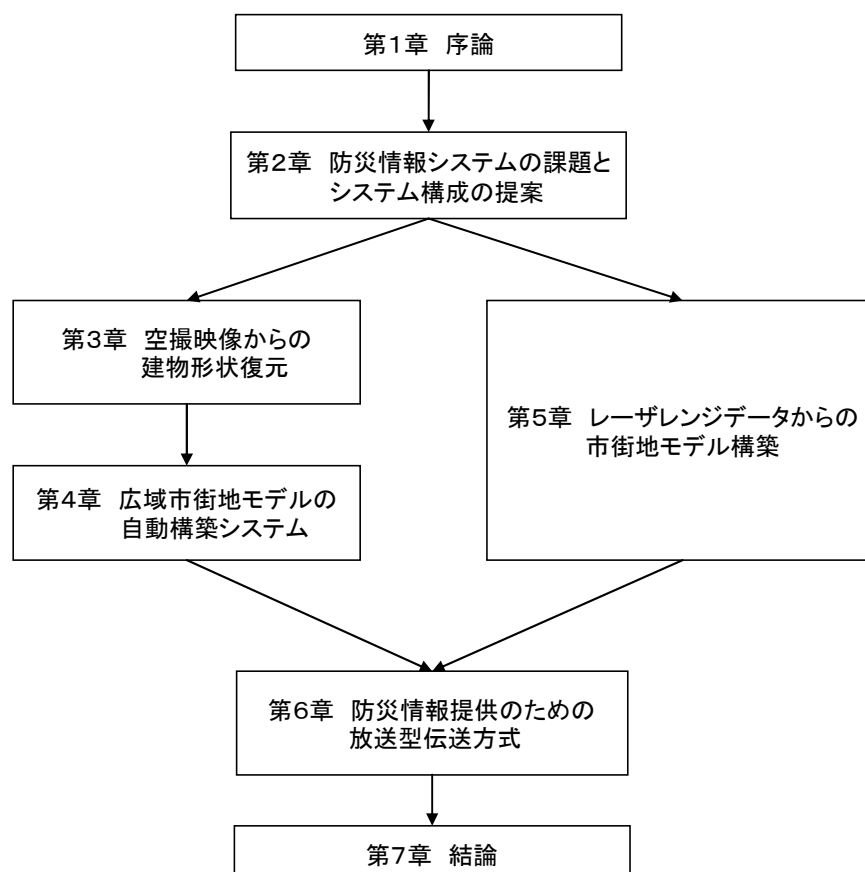


図 1.1 本論文の構成

第 1 章「はじめに」では本研究の背景および意義について述べる。

第 2 章「防災情報システムの課題とシステム構成の提案」では、本研究のテーマである情報分析機能と情報提供機能に関して国内外の事例を挙げて現状の防災情報システムで提供されている機能を概観する。次に各機能の課題を明らかにし、その解決手段として市街地モデルと放送型通信の導入を提案する。そして、情報分析機能における市街地モデルの有用性と、情報提供機能における放送型通信の利用可能性について検討を行い、それらを防災情報システムの各機能に導入した場合の新しいシステム構成を示す。

続いて第 3 章から第 5 章までは情報分析機能において必要とされる 3 次元市街地モデルの構築方式について説明を行う。これら 3 つの章は 1.3.1 節で挙げた 3 つの課題に対応し、各課題の解決案を提示する。

第 3 章「空撮映像からの建物形状復元」では、最初に 3 次元市街地モデルの構築において空撮映像とレーザレンジデータに共通の問題点を明らかにし、建物形状の復元手法について提案を行う。提案する BRoC 法(Building Recovery on Clustering)では観測データから獲得した 3 次元点集合をクラスタリングによって、同一の建物上面に含まれる点集合に分割していくことで、建物の 3 次元形状を復元する。この手法を元に、空撮映像を利用する場合に特有の課題を解決する手段を加えて、BRoC 法の処理内容を具体化し、復元実験を行う。その課題としては、空撮映像から獲得した点集合は分布が不均一であり、単純に高さが近い点同士をグルーピングしただけでは建物上面の形状を十分に特定できない、という点が挙げられる。そのため、建物上面形状の推定結果に対して点の上下関係を利用した制約条件を利用したグルーピング規則を導入し、建物上面形状の復元精度を向上させる手法を提案する。

第 4 章「広域市街地モデルの自動構築システム」では、構築対象領域の全域をカバーするために、複数の飛行コースで分割されて撮影された空撮映像を利用し、広域の市街地モデルを構築するためのシステムについて説明する。一般に、レーザレンジデータを利用する場合は航空機を利用して広範囲の高さ情報を一度に取得可能であるが、空撮映像を利用する場合には、高解像度化のため低空で複数コースに分けて構築領域を飛行および撮影する必要がある。さらに、対応点探索を容易にするため高頻度で画像フレームを取得しなければならない。そのため、広域の市街地モデルの構築時には扱う処理データの数量が膨大になり、データ管理作業の負担が市街地モデル構築の阻害要因となる可能性が高い。そこで、構築処理の経験が無いオペレータでも少ない作業量で広域のモデル構築を可能にするデータ管理機構を提案して実験システムに実装し、5 平方キロメートルのモデル構築実験を行ってオペレータの作業量および計算機の処理時間に関して実用可能性の評価を行う。

第 5 章「レーザレンジデータからの市街地モデル構築」では、第 3 章で提案した BRoC 法に基づいてレーザレンジデータから建物上面形状の特定および建物形状の復元を行い、広域の 3 次元市街地モデルを構築する方法を説明する。レーザレンジデータを利用した場合には、3 次元点集合が同じ密度で分布しているため建物上面単位に点集合を分割することは比較的容易であるが、建物上面の縁で計測誤差が大きくなり、建物上面形状の推定精度が悪化する問題がある。そのため、建物上面は比較的少数の頂点からなる多角形であるという仮定を置き、Minimal Description Length 原理に基づく最適化によって上面形状を簡素化し、上面形状の推定精度を向上させる手法を提案する。そして、第 4 章で構築実験を行った市街地領域を対象にモデル構築実験を行い、レーザレンジデータからも広域の市街地モデルを自動で構築可能であることを示すと共に、処理時間や復元精度について実用可能性の評価を行う。

第 6 章「防災情報提供のための放送型伝送方式」では、情報提供機能で必要とされる放送型通信の実現方式について提案を行う。現状では WWW サイトを通じた防災情報の提供が普及してきていることから、本研究では防災情報の表現形式として HTML を対象とし、本章で HTML 文書の放送型伝送方式を検討する。HTML では複数のデータを参照して一つの文書を構成することが多いため、被災地域の地図などを文書間でデータを共有した場合に、放送方伝送の効率が低下する問題がある。そこで本章では、HTML 文書間におけるデータの共有関係を考慮して、利用者が HTML 文書を取得するまでの平均待ち時間を最小にする放送データの構成手法を提案する。そして、防災情報提供のために公開されている WWW サイトから HTML 文書を取得し、平均待ち時間を評価することによって、提案手法の有効性を検証する。

第 7 章「結論」では全体を総括し、本研究の成果をまとめる。

第 1 章参考文献

- [1] 地震調査研究推進本部 地震調査委員会, "2. 海溝型地震の長期評価の概要", 長期評価結果一覧, 2007.
- [2] 防災情報の共有化に関する専門調査委員会, "1. 防災情報共有の現状と課題", 防災情報の共有化に関する専門調査会報告, 内閣府編, p.1, 2003.
- [3] 内閣府 中央防災会議, "3. 具体的施策", 防災情報システム整備の基本方針, pp.3-6, 2003.
- [4] 内閣府, "1-5 防災情報体制", 平成 19 年度版 防災白書 第 1 部 第 2 章 2007.
- [5] 内閣府 中央防災会議, "防災情報の共有化に関する専門調査会（第一回）資料 2", 片山恒雄編, pp.6-11, 2002.
- [6] 桑田喜隆, 大谷尚通, 井上潮, "地理情報に基づく防災情報のリアルタイム共有システム", GIS - 理論と応用, vol. 2, no. 12, pp.25-34, 2004.
- [7] 大宮善文, 田中哮義, 若松考旺, "可燃物を考慮した区画火災性状予測モデルの構築", 日本建築学会計画系論文集, vol. 487, pp.1-8, 1996.
- [8] 安心・安全な社会の実現に向けた情報通信技術のあり方に関する調査研究会, "第一章 災害対策・危機管理分野", 最終報告書, 齊藤忠夫編, pp.1-78, 2007.
- [9] 阪神・淡路大震災の教訓情報分析・活用調査委員会, "各種マスコミ・メディア等の対応", 阪神・淡路大震災教訓情報資料集, 国土庁, 2000.
- [10] 内閣府中央防災会議事務局, "防災情報の共有化に関する専門調査会（第一回）資料 2", 片山恒雄編, pp.6-11, 2002.
- [11] 中村功, 田中淳, 中森広道, 福田充, 関谷直也, "第 4 章 中越地震と情報伝達の問題", 災害時における携帯メディアの問題点, 中村功編, モバイル社会研究所, pp.99-153, 2004.
- [12] S. Horiguchi, S. Nagai, K. Sugiyama, "Recovering 3D urban model using Range data and Sequential Aerial Images", Proc. of International Workshop Urban 3D and Multi-Media Mapping, Tokyo, Japan, pp.79-84, 1999.
- [13] A. Alharthy, J. Bethel, "Heuristic Filtering and 3D Feature Extraction from Lidar Data", IAPRS, pp.29-34, 2002.
- [14] 納富幹人, 小澤史朗, 全炳東, "移動体観測による都市モデルの構築", 電子情報通信学会論文誌, vol. J81-D-II, no. 5, pp.872-879, 1998.
- [15] G. Vosselman, "Building Reconstruction Using Planarfaces in Very High Density Height Data", IAPRS, vol. 32, no. 3-2W5, pp.87-92, 1999.
- [16] A. Grun, L. Zhang, "Automatic DTM Generation from Three-Line-Scanner (TLS) Images", Proc. of Photogrammetric Computer Vision, pp.131-137, 2002.
- [17] 朝日航洋, "空中ハイビジョン映像計測システム AHVS", http://www.aeroasahi.co.jp/spatial/gizyutu/3d_06.html.
- [18] Y. Takase, N. Sho, A. Sone, K. Shimiya, "Automatic Generation of 3D City Models and Related

- Applications", Proc. of International Workshop on Visualization and Animation of Reality-based 3D Models, 2003.
- [19] A. Gruen, X. Wang, "CC-MODELER: A TOPOLOGY GENERATOR FOR 3-D CITY MODELS", ISPRS Journal, vol. 53, no. 5, pp.286-295, 1999.
 - [20] A. J. Heller, P. Fua, C. I. Connolly, "The Site-Model Construction Component of the RADIUS Testbed System", Proc. of ARPA, pp.345-356, 1996.
 - [21] M. Herman, "Representation and Incremental Construction of a Three-Dimensional Scene Model", Techniques for 3-D Machine Perception, A. Rosenfeld 編, vol. 3, North-Holland, pp.149-183, 1986.
 - [22] D. Terzopoulos, M. Vasilescu, "Sampling and Reconstruction with Adaptive Meshes", Proc. of Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Maui, Hawaii, pp.70-75, 1991.
 - [23] 韓太舜, 小林欣吾, "情報と符号化の数理", 培風館, 1999.
 - [24] S. Acharya, M. Franklin, S. Zdonik, "Disseminationg Updates on Broadcast Disks", Proc. of the 22nd VLDB Conf., Mumbai(Bombay), India, pp.354-365, 1996.
 - [25] T. Imielinski, S. Viswanathan, "Adaptive Wireless Information Systems", 情処技報, vol. 94, no. 86, pp.19-41, 1994.
 - [26] 矢島悦子, 原隆浩, 塚本昌彦, 西尾章治郎, "相関性を持つデータ間の放送時間間隔について", 情報処理学会論文誌, vol. 40, no. 1, pp.188-195, 1999.
 - [27] W. Uchida, T. Hara, S. Nishio, "Scheduling correlated broadcast data considering access frequencies with temporal variations", International Symposium on Network Computing and Applications, pp.89-96, 2003.

第2章 防災情報システムの課題とシステム構成の提案

本章では防災情報システムの現状を概観した上で課題を明らかにし、課題解決に向けたシステム構成を提案する。そして、提案したシステム構成の実現に向けた本研究の取り組み事項を説明し、研究テーマの位置づけを明確にする。

2.1 防災情報システムの現状

2.1.1 概要

広域の大規模災害では、被害は同時多発的に発生し、車両や人員などの防災リソースが不足する。そのため全体の状況を把握し、個々の被害に優先度をつけて対処することで、災害全体として被害を最小限にすることが重要である。災害発生時に情報を集約し、災害全体の状況を把握する活動の中心となるのは被災地の都道府県や市町村であるため、多くの地方自治体の災害対策室に防災情報システムが設置されている。防災情報システムの規模や機能は自治体ごとに異なるが概ね図 2.1 に示す構成を持つ。

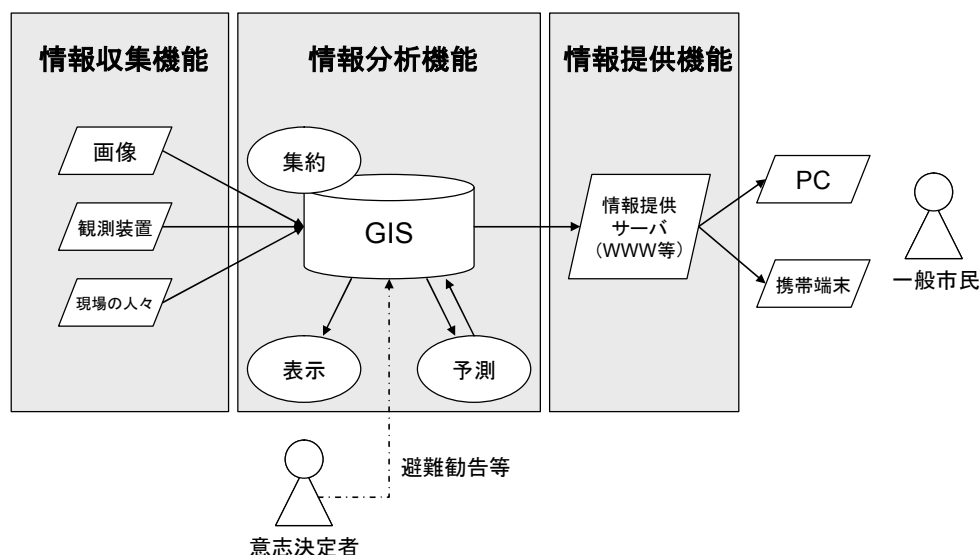


図 2.1 現状の防災情報システムの概要

情報分析機能では被害の最小化を実現する意思決定を支援するため、収集された防災情報を GIS 上に集約し、各自治体の長である意志決定者に現在の災害の状況を提示する。さ

らに災害の種類に応じて被害の予測や推定を実施し、災害の現状と併せて提示することで、よりの確な意志決定を可能としている。

情報提供機能では、一般市民に公開する情報を GIS から抽出し、公衆通信網を通じて WWW やメールによって PC や携帯端末に防災情報を提供する。防災情報システムにおける情報提供機能については、消防署員や自治体職員など災害対応活動を行う人員への情報提供と、一般市民への情報提供では大きく異なる。広域災害では一般市民の自助活動の成否が、被害の拡大・縮小に大きな影響を与えられているため、本節では主に一般市民への情報提供機能について概観する。

以下では、情報分析機能と情報提供機能について事例を挙げて現状の詳細を説明する。

2.1.2 情報分析機能

情報分析機能における意思決定支援の内容を検討すると、図 2.2 に示すような4つのレベルに分けることができる。

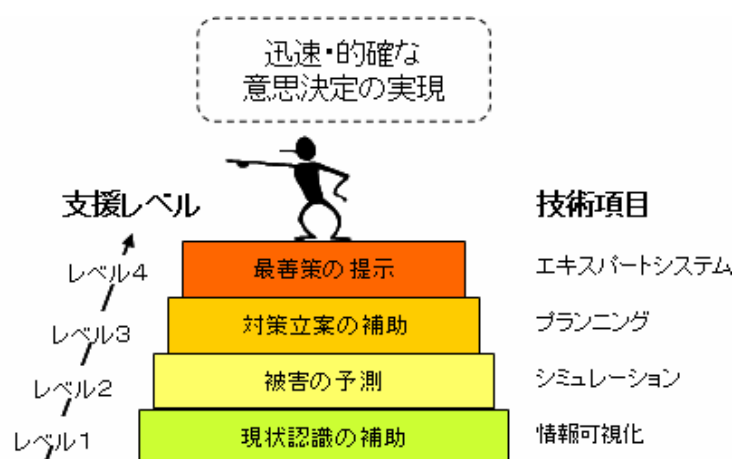


図 2.2 意思決定支援のレベル

現状の防災情報システムにおいては、災害対策に有用な情報を抽出するための分析機能に関する研究開発は開始されたばかりであり[1]、防災情報の的確な表示（レベル1）と被害の予測（レベル2）が主な機能となっている。以下、それぞれの機能に対し、事例に基づいて現状を説明する。

2.1.2.a 防災情報の集約および表示

地方自治体の防災情報システムが取り扱うべき情報は多岐にわたっており、災害観測情報、被害情報、災害対応活動情報、物資・資材情報、安否情報などがある。そのため、内閣府が主導となって推進している防災情報共通プラットフォーム[2](図 2.3)や地震防災情

報システム[3]では、様々な防災情報を GIS 上で統合して意志決定者に提示することを目標としている。

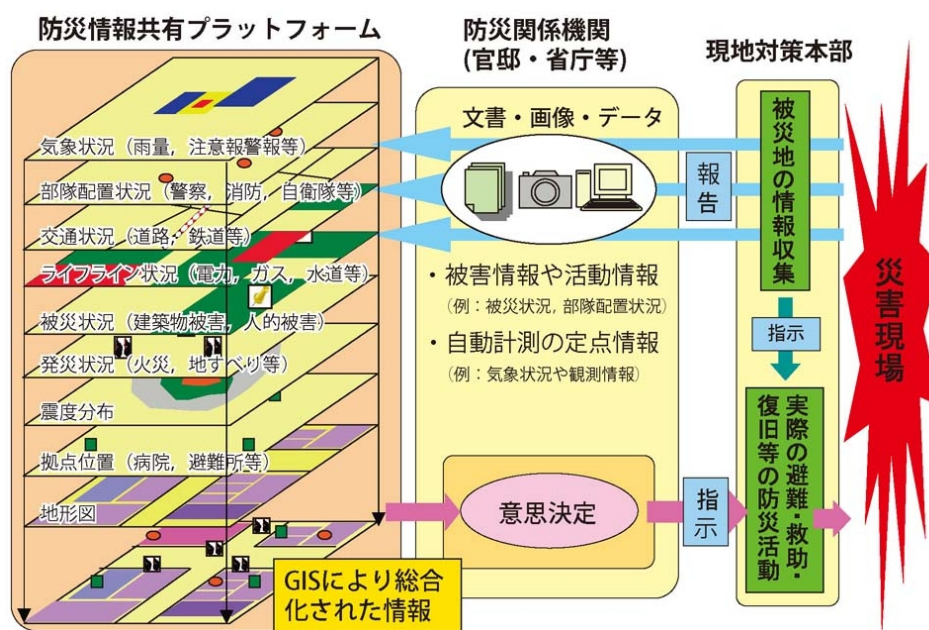


図 2.3 防災共有プラットフォームの概要

例えば土砂災害に対する防災情報システムでは、雨量や水位の情報を自動収集し、集約して表示する仕組みが複数の都道府県で実用化されている[4]。また、行政組織内部の各部門が横断的に利用できる GIS（統合型 GIS）の導入も進んでおり、導入した自治体の約半数が統合型 GIS の利用業務として「消防防災」と回答している[5]。さらに、電力やガス等のライフラインを扱う民間企業と防災情報を共有する実証実験も行われている[6]。

このように各種の防災情報を集約する情報基盤は整備されつつあるが、現状の防災情報システムは災害対策室に大型画面を複数設置して各種の防災情報を並行表示する形式が主流となっており[7]、意思決定者が各種の情報をそれぞれの画面で確認している状況となっている。この状況に対し、文献[8]の研究では実際の土砂災害に対する行政対応を分析し、気象情報、水防情報、土砂災害警戒情報が個別に提示される点を問題として指摘して、表示レベルでのインターフェース統一が確実な意思決定に有効であると述べている。

そこで、2004 年に発生した新潟県の中越地震に対しては、システムの利用者が確認したい防災情報の種別を複数選択した上で、同一の地図上で複数種の防災情報を表示する試みが複数実施された。そのうちの 하나가国土交通省の新潟県中越地震情報集約マップ[9](図 2.4)であり、震度情報、土砂災害、道路や河川の被害、写真情報など 37 種の情報を、情報

収集時点で随時 GIS 上に追加し，WWW ブラウザ上で表示できるようにしている．この取り組みでは情報の提供元が国土交通省管轄の部局に限られているものの，公官庁による統一的な情報提供の仕組みを実現している．もう一つの同様の事例としては新潟県中越地震復旧・復興GISプロジェクト[10]があり，一つの機関に限定せず，産官学の様々な機関から収集した情報を集約して提供している．

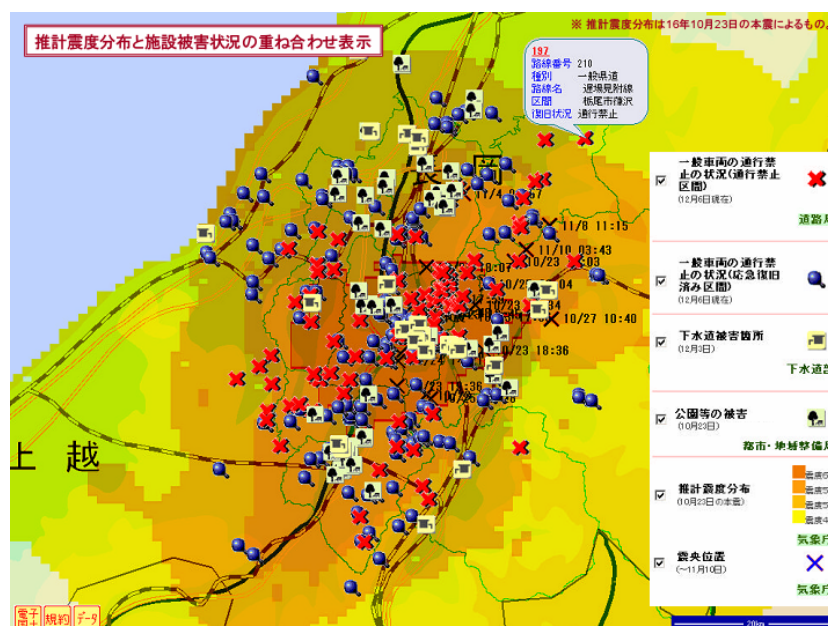


図 2.4 国土交通省 新潟県中越地震情報集約マップの表示例*

2.1.2.b 被害の予測および推定

被害予測と被害推定は災害の進展が突発的であるか否かによって使い分けされる．例えば地震災害は突発的に発生し，予測が困難であるため，防災情報システムでは発災直後に被害推定を行って，災害初期における被害情報の収集不足を補完する．そして，迅速かつ的確な災害対応活動を開始できるようにする．このためには地震の被害推定を発災直後に短時間で完了する必要がある，そのためのシステムが阪神・淡路大震災以後に複数開発された[11]．最も大規模なものが国土庁（現：内閣府）の地震被害早期評価システムであり，地震防災システム[3]と連携して，地震発生直後に 1km メッシュ単位の震度分布，建物被害，人的被害，津波浸水域の推定を行う．また，消防庁の簡易型地震被害想定システムや兵庫県のフェニックス防災システムも同様の機能を提供している．

一方，風水害や土砂災害では災害発生危険度は断続的に変化するため，降水量や河川水位などの観測データから被害発生の予測が可能になる[12，13]．そのため，観測データ

* http://www.mlit.go.jp/river/press/200407_12/041207/pdf/20041207.pdf より引用

の収集システムと連動した警戒情報発令システムが複数の自治体で実用化されている[4]。例えば静岡県 の SIPOS II では、雨量計のデータとレーダを使った雨量データを合成し、短期間降雨量予測を行ったうえで危険度判定を行い、警戒情報や避難命令を発信している。

市街地火災も被害の進展を予測可能な災害であり、神戸市消防局では延焼予測システムの開発を行っている[14]。また、市街地延焼の被害予測を消防隊の運用計画に利用するシステムとしては東京消防庁の地震被害予測システム[15]や大阪市の初動消防活動支援システム[16]などがあり、さらに、避難誘導との連携を行う実証実験システムも開発されている[17]。

2.1.3 情報提供機能

2.1.3.a WWW による情報提供

e-Japan 計画[18]や中央防災会議[19]の答申によって、現状では WWW サイトによる防災情報の提供が国家機関から地方自治体にいたるまで幅広く行われている。その主なものは、地図上に雨量、河川水位、土砂災害警報などをほぼリアルタイムに自動更新して表示し、最新の情報を提供している。例えば、図 2.5 に示す神奈川県の情報提供システムでは、県内の河川に設置された水位計の最新データを 1 時間ごとに更新し、提供している。

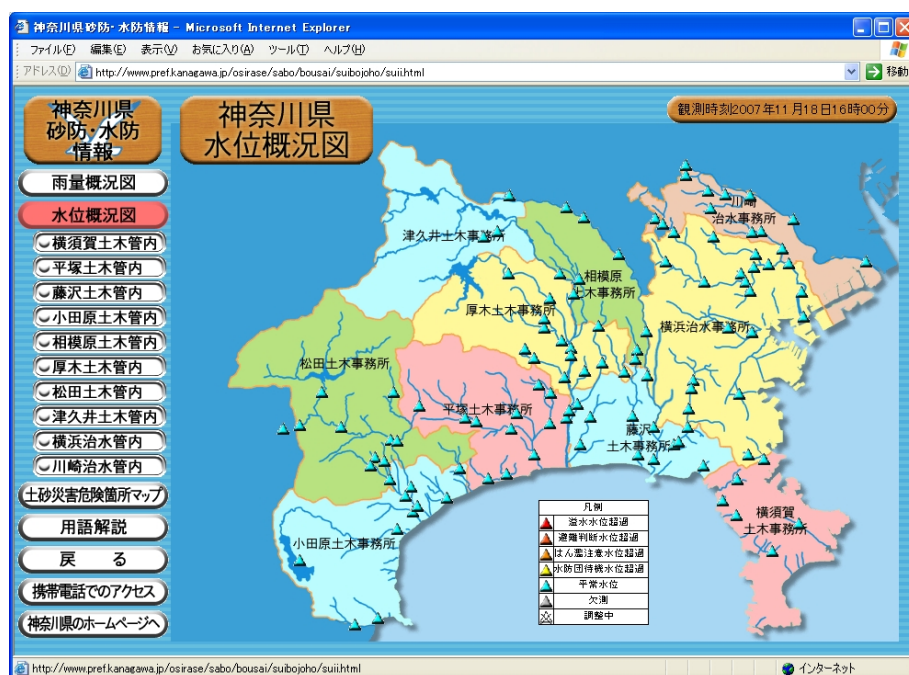


図 2.5 情報提供システムの表示例 (神奈川県水位概況図) †

† <http://www.pref.kanagawa.jp/osirase/sabo/bousai/suibojoho/suii.html> より引用

また、防災情報の集約および表示の項で紹介した新潟県中越地震情報集約マップや新潟県中越地震復旧・復興 GIS プロジェクトは WWW で一般に利用可能であるため、情報提供の手段としても注目すべき事例である。

これらの WWW サイトの情報は PC による比較的大きな画面での閲覧を想定して作成されているが、災害の現場にいる人々が PC を起動して災害情報を閲覧するとは想像しにくい。また、通信回線や電源の確保も問題となる。実際、中越地震の被災者に対する調査[20]では、普段からインターネットを利用している人であっても 80.3%の人が地震当日には利用せず、残りの人々も停電や通信被害で利用できなかったと回答している。しかし、停電回復後は 50%の人が地震関連の WWW サイトを閲覧し、81.8%の人が役に立ったと回答しており、WWW サイトによる防災情報の提供は被災者側の情報取得手段の確保が課題となっていることがわかる。

2.1.3.b 携帯端末への情報提供

このような状況に対し、携帯電話、PHS、通信機能付 Personal Digital Assistants(PDA)などの携帯端末は高い可搬性から被災地においても容易に利用できるため、地方自治体によるもう一つの情報提供手段として注目されている[21]。防災無線のような災害時だけの特別な機器や仕組みによって一般市民への情報提供を行うことはコスト面や利便性の観点から得策ではなく、一般市民が常時携帯かつ利用している端末に直接情報を届けることができる仕組みは大きなメリットがあるといえる。さらに携帯端末の性能や機能も年々向上しており、通話に限らず、携帯電話利用者の 66.2%が WWW サイトの閲覧サービスを利用している[22]。以下、携帯端末向けの情報提供方式として携帯端末向け WWW ページの公開とメール送信の 2 つを説明する。

一つ目の携帯端末向け WWW ページの公開については、先に述べた WWW サイトによる公開情報を携帯端末向けに加工・編集することは比較的容易に対応できることから、既に多くの防災情報提供用の WWW サイトにおいて携帯端末用の WWW ページが用意されている。図 2.6 は横浜市の携帯端末向け WWW ページを表示した例であり、文字情報だけでなく河川の監視カメラ映像も表示することが可能となっている。また、防災情報を地図上に提示するシステムについても地方自治体での実証実験が行われている[23]。



図 2.6 携帯端末への防災情報提供例（横浜市水防災情報）

WWW ページの閲覧は利用者側が情報を取りにいく操作であるが、災害発生時には提供者側が情報をタイミングよく提供できるメール送信が、より効果的な手段となる。図 2.6 の WWW ページにも記載があるように、横浜市の例では市民がメールアドレスを登録し、防災情報のメール配信サービスを受けることが可能となっている。さらに、2007 年 10 月から一般市民への配信が開始された緊急地震速報に対しても携帯キャリア各社が情報提供基盤の構築を行い[24]、2007 年末に配信サービス対応の携帯電話を販売開始している。また一般住民への情報提供だけでなく、非常要員の招集にも大きな効果があり、公官庁だけではなく一般企業でも同様の仕組みを利用している事例がある[25]。さらに、WWW ページの公開とメールの配信という二つの情報提供手段は相互に連携することが可能である。具体的には、メールでは緊急かつ概要的な情報を要約して提供すると共に、メール中に WWW ページへのハイパーリンクを埋め込むことで、詳細情報の取得も可能な仕組みが実現されている。

2.1.4 海外の事例

災害時における防災情報の有効活用は世界共通の課題であり、外国の地震多発地域では日本と同様に震度分布が地震発生直後に WWW サイトによって公開される仕組みが実現されている[26]。日本の気象庁が提供している緊急地震速報はメキシコとカリフォルニアでも実施されており、ガスのパイプラインを閉じたり、救急車両のドアを開けるなどの自動化システムが実現されている[27]。

また、災害は複数の州や国家に及ぶことも多いため、広域の災害情報を収集・集約・配信するシステムが重要となっている。一例として、地中海を中心としたヨーロッパ地域では EMSC[28]が、アメリカ国内では USGS[29]が、それぞれ地震発生情報をリアルタイムに収集し、各州や各国の関係機関に配信する役割を担っている。さらに全世界的な災害情報の集約および発信としては国連の災害情報事務所が行っている[30]。

近年、国際社会がシステム構築を積極的に推進しているものとして津波の早期警報システムが挙げられる。これは死者 30 万人以上を出した 2004 年のインド洋大津波災害に対する取り組みであり、ユネスコの政府間海洋委員会によってインド洋津波警報システムの構築が進められている[31](図 2.7)。津波の場合には住民への迅速な通知が最優先事項であり、このシステムでは情報収集、情報分析、情報提供のプロセスはほぼ全自動で実行される。また、これとは別に津波警報を携帯端末にメール送信する有料サービスが既に提供されている[32]。

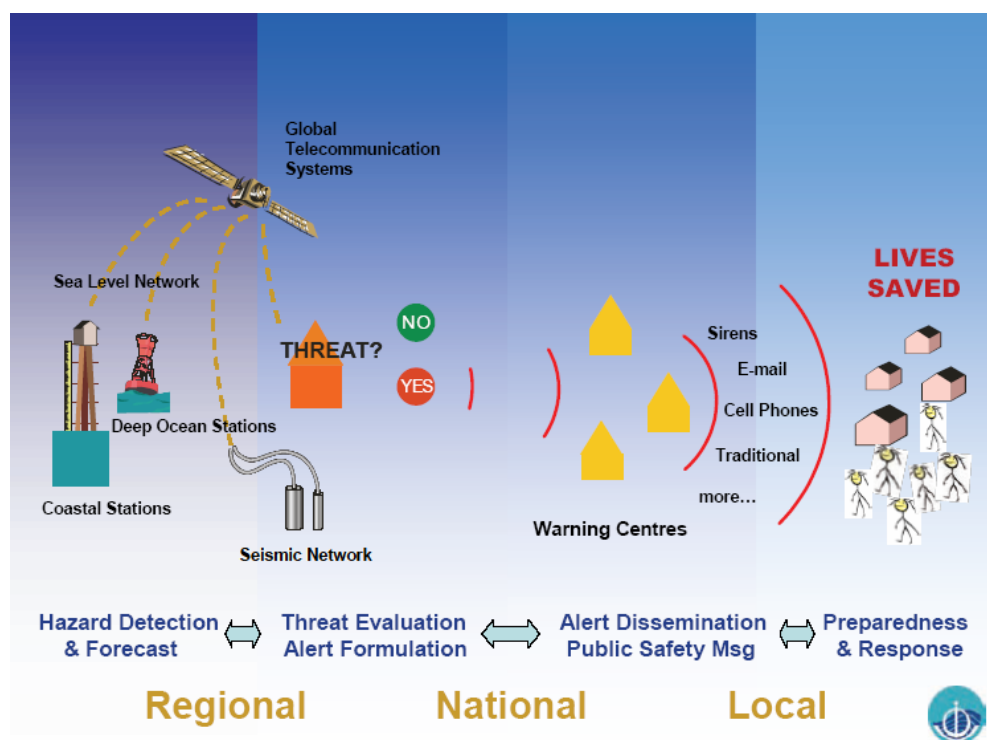


図 2.7 津波警報システムの概要[‡]

[‡] http://ioc3.unesco.org/indotsunami/documents/IOC_TS_71web.pdf pp.1-2 より引用

2.2 現状の防災情報システムにおける課題

2.2.1 情報分析機能における課題

災害時には時々刻々と状況が変化しており，防災情報システムには多種多様な防災情報が継続的に収集される．そのため，意志決定者は集約された情報から災害の現状を短時間での的確に把握する必要がある．こうした状況において，情報分析機能では集めた防災情報を分かりやすく意志決定者に提示することが求められ，より直感的に災害の現状を把握できるようにする「情報視覚化」の機能が不足していると思われる．

特に人的被害の大きい市街地での広域災害では，建物の密集度や高さ，空き地の有無など，具体的な街並みの状況を知らずに，住宅地図等に重畳表示された防災情報のみでの的確な状況判断と意志決定をすることは困難であると考えられる．そのため，通常は監視映像や広域画像が地図情報と併用されるが，意志決定者にとって複数種の情報を統合し，状況を把握する負担が生じることとなる．そこで本研究では，情報分析機能の課題の一つとして，市街地災害における情報視覚化機能の不足を挙げて，検討対象とする．

一方，被害の予測（および推定）に関しては，災害自体を大規模な物理現象として考え，より高精度な被害予測を実現する取り組みが行われている．具体的には，近年の計算機性能の向上により，物理現象を高精度にシミュレーションし，メッシュ単位の予測から建物単位の予測が可能となっている．しかしながら，現状の防災情報システムの GIS では建物に関して 2 次元の形状情報しか格納されていない場合が多く，何らかの仮定に基づいて高さ情報を補完しているのが現状である．そのため，市街地における建物倒壊，市街地延焼，家屋浸水などの被害を高精度にシミュレーションするためには，広域の建物群に対する 3 次元の形状情報が必要となっている．

2.2.2 情報提供機能における課題

公衆通信網の通信速度について，有線では数十 Mbps の通信帯域が利用可能であるのに対し，無線では 2007 年現在で普及している W-CDMA, CDMA2000 の各方式で最大 348Kbps でしかデータ伝送できないのが現状であり，普及が始まった次世代の HSDPA 方式においても最大で 3.6Mbps に留まっている．さらにこれらの伝送方式はベストエフォートと呼ばれ，同時利用者数の増加により通信速度が低下するという問題がある．こうした問題は災害時に顕著となり，2005 年の千葉県を震源とする地震では通話だけではなくメール送受信や Web アクセスも通信規制の対象となったため安否確認や情報収集に支障を来すことになった[33]．

このような同時利用者数の急激な増加による輻輳の発生に対して，通信設備の増強に頼ることは平常時における設備の利用効率を低下させる原因となるため，異なる通信方式の採用を検討する必要がある．つまり，同時利用者数に関係なく応答時間を一定にすることが可能な放送型の情報提供方式が必要と考えられる．

2.3 課題解決に向けたシステム構成の提案

本節では各機能の課題解決に向けた提案を行い，その実現に向けた検討を行う．そして情報分析機能および情報提供機能について提案内容に沿ったシステム構成を示した上で，提案システムにおける本研究の取り組み事項を説明し，研究テーマの位置づけを明確にする．

2.3.1 情報分析機能

情報分析機能における課題解決に向けた提案は，情報視覚化および被害予測シミュレーションに対する市街地モデルの導入である．市街地モデルは被害予測における物理シミュレーションに有用なだけでなく，災害の状況を市街地モデル上に再現することで，防災情報の視覚化にも有効に活用できる．以下，それぞれの有用性を具体例で示す．

2.3.1.a 市街地モデルを利用した防災情報の可視化

本研究では防災情報の可視化機能における市街地モデルの有効性を検証するため，住宅地図から簡易的に作成した市街地モデル上に広域火災発生時の防災情報を表示し，視認性の確認を行った[34]．実験システムの表示例を図 2.8 に示す．



図 2.8 市街地モデルによる防災情報可視化システム

本システムでは，防災情報を静的情報（建物等）と動的情報（建物の被害等）に分離して管理しており，時間的に広がりのある情報を簡単に引き出すことが可能となっている．

具体的には画面下段のスライダーを操作することで、延焼に関する1時間先までの予測および1時間前までの履歴をシームレスに閲覧することができる。また、明示的に表示時刻を指定しない場合には、最新の情報に自動的に表示を更新する。延焼状況および車両活動状況を時系列的に表示している様子を図2.9に示す。



図 2.9 防災情報の時系列表示の例

本システムの情報視覚化手法を従来の2次元地図表示と比較すると、3次元グラフィックスにより自由な視点から地理的、空間的な市街地構造の情報を直観的に把握できる点は、意思決定の迅速性・正確性において大きな優位点であると考えられる。さらに、建物の倒壊状況や浸水被害の把握、および、はしご車や防災ヘリの配備など、3次元グラフィックスによる情報提示が意思決定支援において有効と考えられる点が多い。さらに、防災情報の可視化における市街地モデルの有効性については、アンケートによる定量的評価実験も行われており、80%以上の被験者(N=18)から有効性を認める回答を得たという報告がなされている[35]。

一方、図2.8を市街地火災の実写画像(図2.10)と比較すると、実写画像は迫力はあるものの延焼範囲などの重要な情報が分かり難く、車両位置などの情報を重ねあわせることも難しいことが分かる。このことから緊急時の意思決定を冷静に行うためには、現実の情報をそのまま提示するのではなく、抽象化し、必要な情報だけを提示する必要があることが分かる。つまり、防災情報を視覚化する上での要点はリアリティと抽象化のバランスであると考えられる。例えば、消防車や消火栓を原寸大で配置したとしても市街地の中では位置を確認することが困難であり、また、延焼状況に関して火や煙の再現は視認性を悪化させる原因となる。



図 2.10 市街地火災の実写画像[§]

そこで、本システムでは、消防車や消火栓については大きな目印を付加し、延焼状況に関しては建物の色彩のみで表現しており、市街地モデルを利用することで情報を適度にデフォルメして提供することが可能となる。

2.3.1.b 市街地モデルを利用した被害の予測および推定

本節では被害の予測および推定において、災害種別ごとに建物の 3 次元形状情報を利用する事例を挙げて、本機能における市街地モデルの有用性を示す。まず、市街地延焼予測では壁面間の熱輻射と建物が発生する熱気流が延焼の主要因であるが、輻射熱量の算出には壁面の面積が必要であり、また、建物内部で発生する熱量を算出するためには建物の容積が必要となる[36, 37]。市街地モデルがあれば、物理量に基づいた延焼シミュレーションが可能となる。また、過去の災害事例から建物 3 次元形状間の状態遷移モデルを作成し、延焼シミュレーションを実現している研究もある[38]。

一方、建物倒壊の被害予測に関して建物 3 次元形状の必要性は明らかである[39]。さらに、災害発生前後における建物高さの変化によって倒壊状況を把握する試みも行われており[40]、広域の市街地モデルが整備されていれば被害状況もより詳細に把握することが可能であると考えられる。倒壊予測や推定の精度が、死傷者推定数、市街地延焼速度、交通渋滞量など他の様々な都市災害の被害予測および推定結果に大きな影響を与えるため、その精度向上を実現する意義は大きいと言える。

この他にも、市街地モデルを防災に適した都市設計[41, 42]や災害発生時のイメージトレーニング[43]に活用する試みが提案されており、防災分野における多方面での活用が期

[§]阪神・淡路大震災航空写真集 383 ページ(神戸新聞総合出版センター)より引用

待されている。

2.3.1.c 情報分析機能のシステム構成の提案

最初に、提案した機能に適した防災情報の管理方式について検討を行う。提案するシステムでは防災情報システムが扱う情報を以下のように静的情報と動的情報に分けて管理する[34]。

静的情報：建造物，道路，河川，車両所属状況など
(GIS 上のオブジェクトとして管理)

動的情報：被害状況，車両位置など
(各オブジェクトの状態として管理)

このような管理方式によって、時系列的に収集された情報の管理が容易になると共に、被害のシミュレーションを最新の被害状況と被災している建造物の構造情報に基づいて実行し、算出結果を将来の建造物の状態として保存することが可能となる。

以上の検討を踏まえて、本研究が提案する防災情報システムの情報分析機能のシステム構成を図 2.11 に示す。提案するシステムでは災害発生前に広域の市街地モデルが整備されており、GIS による管理がなされているとする。そして静的情報管理部は GIS の入出力インターフェースとして実装され、建造物や道路，河川などの静的情報を提供する。災害発生後は情報収集機能から動的情報が提供され、GIS に登録されたオブジェクトの「状態」として時系列的に管理される。そして情報可視化部では「状態」を色彩等の手段によって市街地モデル上に表示して最新の防災情報を意志決定者に提供する。また、被害シミュレーション部は動的情報管理部からの情報提供を受けて継続的に被害予測を実施し、「未来の状態」として動的情報管理部に登録する。そして、情報提供機能は適宜必要な情報を動的情報管理部から取得し、最新の情報を提供する。

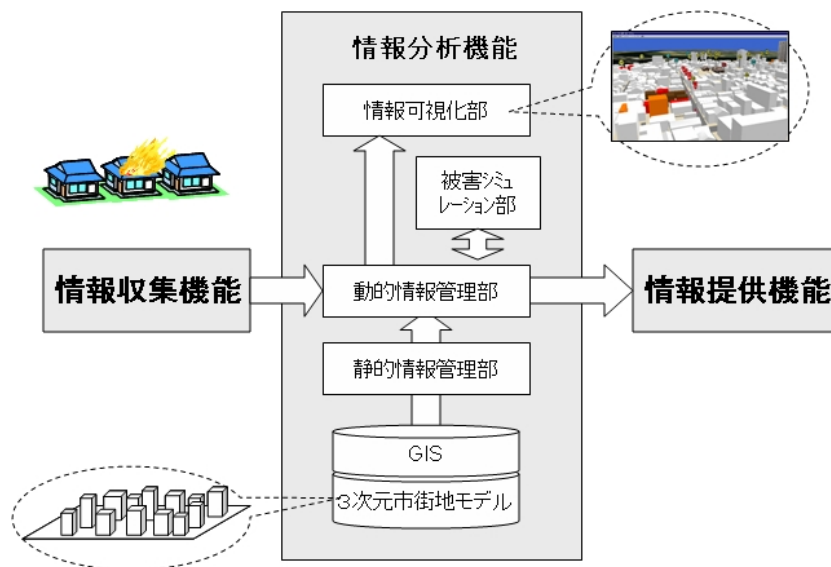


図 2.11 情報分析機能のシステム構成

提案した情報分析機能のシステム構成を実現するにあたっては広域の市街地モデルを各都市において整備していく必要があるが、現状では一部の主要市街地のみが整備されている状況である[44, 45]。その原因としては、複数の計測データを利用しているためにデータ取得や不整合修正のコストが高くなっていることが考えられる。そこで本研究では、単一の計測データから広域の市街地モデルを自動構築する方式を実現することによって、防災情報システムで利用可能なモデルデータの整備を容易にすることを目指す。

2.3.2 情報提供機能

2.3.2.a 放送型通信の導入に向けた検討

携帯端末に向けた放送型通信の具体的手段としては、2006年4月から開始されたデジタル放送サービス「ワンセグ^{**}」が有効と考えられる。その理由としてワンセグではデータ放送が可能であり、ワンセグが受信可能な携帯端末も急速に普及している点が挙げられる。また、総務省の審議委員会では2011年に予定されている放送用周波数の再割り当てにおいて、防災情報提供に用いる周波数帯を確保する方向で検討が進んでおり[46]、同報型の無線通信を利用した住民への防災情報提供を実現する提案がなされている[47, 48]。そのため、携帯端末へ防災情報を放送型通信で提供する通信上の仕組みはほぼ整備されていると言える。そこで、以下では防災情報の提供に放送型通信を利用するに当たっての問題点と検討結果を示す。

第一の問題は、通信方式の変更が利用者への情報提示形態にも影響が及ぶ可能性がある

^{**}正式名称は「携帯電話・移動体端末向けの1セグメント部分受信サービス」

という点である．例えば，データ放送サービスを緊急地震速報と組み合わせた情報提供実験[49]のサービスでは，携帯端末上に地震発生を知らせる画面が自動的に表示される．この方式では警報画面が突然表示されることから，視聴者に的確な防災行動をとらせるためにはどのような画面を提示するかが検討課題となっている[50]．本研究では，放送型通信の導入によって変更するのは通信方式のみとし，情報提供者および情報利用者の双方に対しては従来の WWW による情報提供をそのまま可能にすることを目的とする．つまり，通信形態としてはプッシュ型であるが，利用者に対しては平常時と同様な希望の情報を要求して取得するオンデマンド型のインターフェースを提供することを目指す．

第二の問題として，放送型の情報提供方式では同じ情報をすべての利用者に配信することになるため，利用者がある程度同じ情報を要求していることが前提となる．そのため，災害時における防災情報への利用者ニーズを確認しておく必要がある．文献[33]に拠れば災害発生時に携帯電話によって収集を試みた防災情報として以下の結果が得られている．

(1) 災害の原因・状況に関する情報	73.7%
(2) 公共交通機関の交通情報	43.7%
(3) 身内・知人の安否情報	41.0%
(4) 道路交通情報	36.1%
(5) 各地の被害状況	36.1%

このうち項目(1),(2),(4) は利用者間で共通的な情報であり，放送型の情報提供が有効であると考えられる．一方，項目(3) と項目(5) は問い合わせに基づく情報提供が比較的適しており，オンデマンド型の通信方式を併用する必要があることが分かるが，文献[51, 52]などで提案されている方式およびシステム構成を適用することで 2 つの方式を併用することは可能であると考えられる．このような通信方式が実現されれば，共通的な情報は放送型で受信し，本当に必要な場合にだけオンデマンド型の通信を行うことで，比較的狭い公衆無線網の通信帯域を有効に利用できる．

最後の問題として，放送型の通信では現状の WWW サービスと比べて情報提供者の数が限定されてしまうという点が挙げられる．災害情報を提供する WWW サイトについて検討すると，文献[33]の調査に拠れば，災害発生時に最初に利用した WWW サイトとして以下の 4 つで 75.7%を占めており，防災情報を優先して放送する WWW サイトを限定することは可能と考えられる．

(1) 気象情報サイト	26.9%
(2) 新聞社が提供するニュースサイト	23.7%
(3) 気象・災害情報ページを持つポータルサイト	17.5%
(4) 官公庁，地方自治体が提供するサイト	7.6%

このうち項目(1) と項目(4) は主に公共団体が情報の発信組織となっている一方で，項目(2) と項目(3) は主に民間企業が運営母体となっている．災害時には提供情報の偏りや誤り

が発生しやすいことから、上記のように公共系と民間系の組織が独立に情報を収集および提供し、利用者がそれらを選択できる状況が望ましく、また、利用者のニーズに沿っていると考えられる。そのため、放送型の情報提供を実現するにあたってはデジタル放送における多チャンネル化の仕組み[53]を利用して、NHK と民間放送局の関係と同様に、公共系と民間系の提供情報にデータ放送チャンネルを個別に割り当てて防災情報の提供を行い、利用者が比較・選択しながら両者の情報を利用できる仕組みが必要であると思われる。

2.3.2.b 情報提供機能のシステム構成の提案

以上の検討を踏まえて、本論文で提案する防災情報システムの情報提供機能のシステム構成を図 2.12 に示す。この構成では、情報分析機能が提供する最新の防災情報から WWW コンテンツを HTML 文書として生成し、WWW サーバによって提供する。この部分に関しては、既に地方自治体の防災情報システムでは実現されているものと考えられる。そこで本研究では既存の仕組みを利用し、生成した WWW コンテンツから放送データを構成し、ワンセグ等によるデータ放送を行う構成を想定している。なお、データ放送部では複数の情報提供機関から放送データを受け取り、多チャンネル化して放送することが可能である。

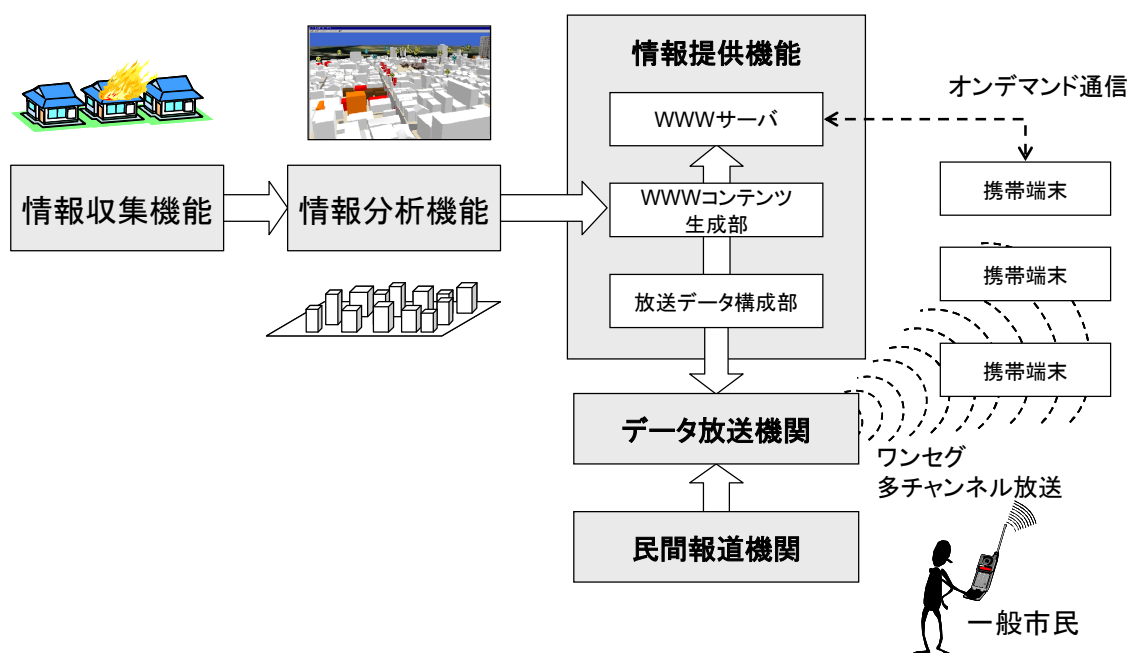


図 2.12 情報提供機能のシステム構成

放送されたデータは被災地域の携帯端末によって受信され、被災者に提供される。放送データの中に希望する情報が無い場合には従来通り無線公衆網によって WWW サーバにアクセスし、オンデマンド通信によって情報を取得する。なお、放送データのコンテンツ

覧を事前配布することでオンデマンド通信への切替を迅速に行うことができる。データ放送によってオンデマンド通信の必要性は低減し、輻輳の発生回避を実現できるものと考えられる。

図 2.12 に示した情報提供機能のシステムを実現するにあたり、WWW のサービスは通常オンデマンド通信で行われるため、現状の防災情報システムでは既に WWW コンテンツ生成部と WWW サーバの機能は実現されている。一方、WWW コンテンツである HTML 文書を放送型通信で提供するサービスは実現されていない。その理由としては、WWW はリンクを選択しながらページを閲覧するインタラクティブなサービスであり、オンデマンド通信による実現が容易であるためである。しかし、災害時の円滑な情報提供には放送型通信の利用が欠かせないものであるため、本研究では放送データの構成方式と携帯端末側での受信手順をセットで提案し、オンデマンド通信と同様のインタラクティブな応答を可能にする方式を提案する。その上で、受信までの待ち時間を短縮するための放送データ構成方式を検討する。

2.4 まとめ

本章では国内外の事例を挙げて現状の防災情報システムにおいて利用されている情報分析機能と情報提供機能の状況を概観した。その結果、情報分析機能では情報を集約して表示する機能と被害を予測・推定する機能が主要な内容であり、本論文ではそれぞれの機能に対して、情報視覚化機能の強化と物理シミュレーションによる予測（あるいは推定）精度の向上を、取り組むべき課題として提示した。一方、情報提供機能に関しては WWW やメールが主要な情報提供手段となっているが、現状で利用されているオンデマンド型の 1 対 1 通信は災害発生直後のアクセス集中によって輻輳が発生しやすいため、防災情報システムの通信方式として不十分であり、放送型通信の利用を改善手段として提案した。

以上の現状分析を踏まえ、それぞれの改善提案項目の実現に向けた検討を行った。具体的には情報分析機能における市街地モデルの有用性と、情報提供機能における放送型通信の利用可能性について検討を行い、その上で、それらを防災情報システムの各機能に導入した場合の新しいシステム構成を示した。最後に、そこで示された防災情報システムのありべき姿を踏まえて本論文における各テーマの位置づけを明確にした。

第2章参考文献

- [1] 防災情報の共有化に関する専門調査委員会, "1. 防災情報共有の現状と課題", 防災情報の共有化に関する専門調査会報告, 内閣府編, p.1, 2003.
- [2] 内閣府, "1-5 防災情報体制", 平成19年度版 防災白書 第1部 第2章 2007.
- [3] 内閣府, "4-1 震災対策", 平成15年度版 防災白書 第1部 第2章 2003.
- [4] 防災情報通信システム研究会, "第4章 土砂災害防止支援通報システムの現状", 防災情報通信システム, 山海堂, pp.84-107, 2003.
- [5] 総務省 自治行政局 地域情報政策室, "1 統合型地理情報システム(統合型GIS)の整備", 地方自治情報管理概要 第2章 第7節, pp.33-34, 2007.
- [6] 秦康範, 末富岩雄, 鈴木猛康, 目黒公郎, "ライフライン情報の共有システムの開発と実証実験による検証", 土木学会地震工学論文集, vol. 29, pp.791-800, 2007.
- [7] 仲谷善雄, "大規模災害に対する減災情報システム(後編)", 情報処理, vol. 45, no. 12, pp.1255-1265, 2004.
- [8] 秦康範, 永松伸吾, 福留邦洋, "2003年7月水俣市土砂災害における情報伝達からみた行政対応に関する考察", 第2回土砂災害に関するシンポジウム, pp.115-120, 2004.
- [9] 国土交通省, "新潟県中越地震情報集約マップ", <http://zgate.gsi.go.jp/chuetsujishin/index2.htm>, 2004.
- [10] 新潟県中越地震復旧・復興 GIS プロジェクト, "WebGISによる情報配信システム", <http://chuetsu-gis.nagaoka-id.ac.jp/>, 2004.
- [11] 廣井脩, "第1章 災害情報の現在", 災害情報と社会心理, 北樹出版, pp.13-34, 2004.
- [12] 荒木義則, 古川浩平, 松井範明, 大木戸孝也, 石川芳治, 水山高久, "ニューラルネットワークを用いた土石流危険渓流における土砂崩壊のリアルタイム発生予測に関する研究", 土木学会論文集, no. 581, pp.107-121, 1997.
- [13] 防災情報通信システム研究会, "第3章 警戒避難基準について", 防災情報通信システム, 山海堂, pp.15-83, 2003.
- [14] 神戸市消防局, "神戸市における地震火災の研究", 東京法令出版, 1996.
- [15] 東京消防庁, "地震被害に備えて", 消防ニュース.
- [16] 大阪市消防局, "初動消防活動支援システム リーフレット".
- [17] 関澤愛, "6.3 地域消防力の最適運用に関する研究", 危機管理対応情報共有技術による減災対策 平成18年度成果報告書, 文部科学省, 2006.
- [18] 高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部, "e-Japan 重点計画-2002", 2002.
- [19] 内閣府 中央防災会議, "3. 具体的施策", 防災情報システム整備の基本方針, pp.3-6, 2003.
- [20] 中村功, 田中淳, 中森広道, 福田充, 関谷直也, "第4章 中越地震と情報伝達の問題", 災害時における携帯メディアの問題点, 中村功編, モバイル社会研究所, pp.99-153, 2004.
- [21] 竹下航, "防災に効果のある市・区の防災情報システム", 日本災害情報学会 第8回研究発

- 表大会, pp.119-124, 2006.
- [22] 村上文洋, 前田由美, "携帯電話利用の広がりと変容", モバイル社会白書 2006, 3-1-2 節, モバイル社会研究所編, pp.42-45, 2006.
- [23] 竹内郁雄, "6.2 減災情報可視化システム", 危機管理対応情報共有技術による減災対策 平成 18 年度成果報告書, 文部科学省, pp.174-184, 2006.
- [24] 株式会社 NTT ドコモ, KDDI 株式会社, "緊急地震速報に対応した一斉同報配信基盤を開発", 株式会社 NTT ドコモ 2007 年 5 月 30 日 報道発表資料, 2007.
- [25] 山内亜希子, 綿引大作, 菜花健一, "都市ガスの災害対応における情報共有マネジメントシステムの活用", 日本災害情報学会 第 8 回研究発表大会, pp.95-100, 2006.
- [26] The Southern California Earthquake Data Center (SCECDC), "Recent earthquakes in California and Nevada", <http://www.scecdc.scec.org/recenteqs.html>.
- [27] UNITED NATIONS, "Global Survey of Early Warning Systems", p.13, 2006.
- [28] European-Mediterranean Seismological Centre, <http://www.emsc-csem.org/>.
- [29] U. S. G. Survey, "Earthquake Center", <http://earthquake.usgs.gov/eqcenter/>.
- [30] 国連 人道問題調整事務所 災害情報事務所, "Relief Web", <http://www.reliefweb.int/>.
- [31] UNESCO, "Indian Ocean Tsunami Warning and Mitigation System IOTWS. Implementation Plan", Third Session of the Intergovernmental Coordination Group for the Indian Ocean Tsunami Warning and Mitigation System (ICG/IOTWS-III) IOC Technical Series No. 71., 2006.
- [32] CWarn, "Tsunami Warning & Alert System", <http://cwarn.org/>.
- [33] 佐藤正典, "防災・防犯への活用", モバイル社会白書 2006 4-3-2 節, モバイル社会研究所編, NTT 出版, pp.198-201, 2006.
- [34] 石川裕治, 大谷尚通, 桑田喜隆, 井上潮, "防災情報システムにおける意思決定支援のための視覚化方式", 第 10 回データ工学ワークショップ, 1999.
- [35] 桑田喜隆, 大谷尚通, 井上潮, "地理情報に基づく防災情報のリアルタイム共有システム", GIS - 理論と応用, vol. 2, no. 12, pp.25-34, 2004.
- [36] 大宮善文, 田中哮義, 若松考旺, "可燃物を考慮した区画火災性状予測モデルの構築", 日本建築学会計画系論文集, vol. 487, pp.1-8, 1996.
- [37] 石川裕治, 田中哮義, 桑田喜隆, "RoboCup-Rescue プロジェクト(第 7 報) 物理モデルにもとづく火災延焼予測", 情報処理学会第 60 回全国大会(5L-07), vol. 4, pp.337-338, 2000.
- [38] 室啓朗, 伊藤永一, 岩村一昭, "立体都市データを用いた空間シミュレーション方式とその火災延焼予測への適用", 数理モデル化と問題解決研究報告, pp.1-6, 1997.
- [39] 村尾修, 田中宏幸, 山崎文雄, 若松加寿江, "兵庫県南部地震の被害データに基づく建物倒壊危険度評価法の提案", 日本建築学会構造系論文集, vol. 527, pp.197-204, 2000.
- [40] アジア航測株式会社総合研究所, "資料 A2-2 3 次元情報を用いた建物 3 次元照合による建物変化抽出の検討", 大都市大震災軽減化特別プロジェクト平成 16 年度成果報告書, vol. III.1.2.3, 2005.

- [41] 村尾修, 山崎文雄, "3 次元 GIS を用いた都市解析手法 MUSE の提案", 地域安全学会梗概集, pp.1-4, 1999.
- [42] 杉原健一, 林良嗣, "3 次元都市モデルを活用する防災まちづくり支援システム", 土木情報利用技術, pp.33-36, 2007.
- [43] 目黒公郎, "大規模地震の動的被害予測モデル", 地学雑誌, vol. 110, no. 6, pp.900-914, 2001.
- [44] インクリメント P(株), (株)キャドセンター, (株)パスコ, "三次元立体地図 MAPCUBE", <http://www.mapcube.jp/product/feature.html>.
- [45] ジクー・データシステムズ(株), "3 次元地図「DiaMap」".
- [46] 電波有効利用方策委員会, "VHF/UHF 帯の電波の有効利用方策の検討", 報告書概要, 土居範久編, pp.14-17, 2007.
- [47] 安心・安全な社会の実現に向けた情報通信技術のあり方に関する調査研究会, "第一章 災害対策・危機管理分野", 最終報告書, 齊藤忠夫編, pp.1-78, 2007.
- [48] "災害に強い消防防災通信ネットワークの整備", 平成 19 年版 情報通信白書, 総務省編, p.305, 2007.
- [49] KDDI 株式会社, "地上デジタル放送を活用した緊急地震速報の実用化試験実施について", KDDI 株式会社 2005 年 2 月 24 日ニュースリリース, 2005.
- [50] 防災科学技術研究所, "3.2.2 住民等への防災情報伝達システム", 大都市大震災軽減化特別プロジェクト 平成 18 年度 成果報告書, pp.248-297, 2006.
- [51] 青野正宏, 黒田正博, 市村洋, 渡辺尚, 水野忠則, "プッシュ型とプル型通信の動的統合による応答時間の短縮", 情報処理学会論文誌, vol. 42, no. 6, pp.1694-1702, 2001.
- [52] 箱守聰, 田辺雅則, 石川裕治, 井上潮, "放送型通信とオンデマンド型通信を統合した情報提供システム", 情報処理学会論文誌, vol. 40, no. 10, pp.3772-3781, 1999.
- [53] デジタル放送研究会, "第 6 章 ワンセグとモバイルの現状", 図解 デジタル放送の技術とサービス, 技術評論社, pp.139-160, 2006.

第3章 空撮映像からの建物形状復元

本論文の3章から5章では、防災情報システムの分析機能に必要となる市街地モデルの構築手法について述べる。本研究では、空撮映像とレーザレンジデータを共通して観測データと呼び、それぞれに対して構築手法を提案する。本章では両者に共通の問題点と提案手法について概要を説明した後、空撮映像に対して具体化した手法を示す。

3.1 市街地モデル構築における問題点と建物形状復元手法の提案

3.1.1 市街地モデル構築の概要

市街地モデルを構築するためのデータ取得には、車両を利用する場合[1]と航空機を利用する場合[2, 3]の2つのアプローチがあるが、広域の市街地モデル構築には上空からのデータ取得が有効である。この場合、観測データから地表面と建物形状の2つのモデルデータを生成し、同一座標系で統合して市街地モデルを構築するのが一般的な流れである。

地表面は計測された3次元点集合のメッシュモデルとして形状の復元[4]が比較的容易であり、また、既存の測量データを援用して高精度なモデルデータを生成可能である。実際、日本の場合には既に地表面のモデルデータが全国的に整備されている状況にある。一方、建物形状は一般に多数の微少な面から成るメッシュモデルではなく、適度に簡素化された多面体モデルとして復元する必要がある、モデルデータの整備が進んでいない。そこで、本研究では建物形状復元に焦点を当てて方式の検討を行う。

3.1.2 従来の建物形状復元における問題点

一般に、建物形状は多面体としてモデル化できることから、図 3.1 に示すように点・線・面といった建物の構成要素を抽出し、それらの構成要素を統合的に組み合わせて全体形状を推定するボトムアップ的なアプローチが多数提案されてきた[5, 6]。このような手法では、構成要素の抽出におけるパターン認識技術、3次元的な相対位置関係を特定するコンピュータビジョン技術、そして、それらの情報を統合して形状を推論する人工知能技術など、様々な研究分野の成果に基づく総合技術として、建物形状復元の研究が展開されてきた。

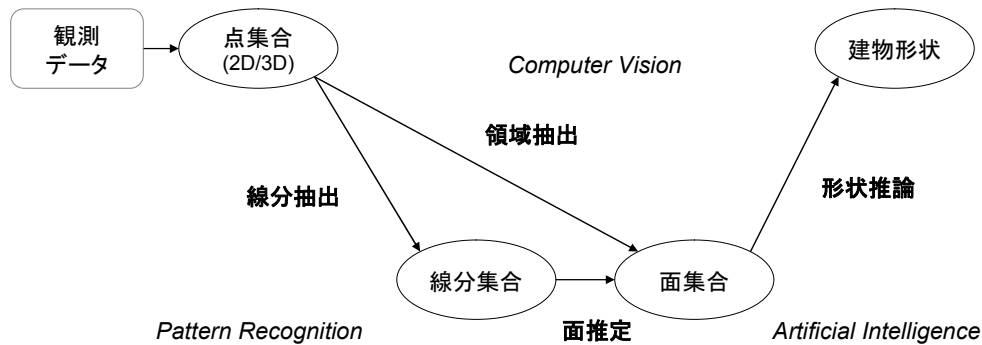


図 3.1 従来の建物形状復元の流れ

しかし、様々な手法の組み合わせとして形状復元手法を実現した場合、手法全体の最適化が困難になることが多い。この問題は、単に使用するパラメータの増加だけに起因するものではなく、途中段階で抽出される構成要素の要否が建物形状全体を復元しないと評価できないことが大きな要因となっている。結果として各段階における手法改善は、部分的な最適化、もしくは最終的な復元結果に基づいた試行錯誤的な最適化になる可能性が高く、入力データの特徴や出力データへの要求が変化した場合に柔軟に対応することが難しい。

たとえば画像情報からの建物形状を復元する場合、線分は建物に限らず形状復元時の構成要素として広く利用されているが、通常の市街地では各建物の上面に様々なマーク、面の繋ぎ目、配管などが存在し、観測シーン全域から輪郭線と混在して多数の線分が抽出される。つまり、物体表面の「模様」と物体の「縁」としての線分が混在しており、建物形状の推定を困難にしている。このような状況では線分抽出能力の最適化よりも、抽出した線分から建物形状を復元できるかどうかについて評価を行い、その評価基準に基づいて最適化を図る必要がある。しかし、基本的な構成要素を段階的に組み合わせていくアプローチでは、初期段階でこのような評価を行うことは困難である。

そのため、下記に示すような様々な支援情報を併用して、抽出した構成要素の要否や組み合わせを早期に正しく判断する実用化技術が提案されてきた。

- (1) 補助情報の利用[7] 住宅地図や広域画像の併用による平面形状の特定
- (2) 教示情報の利用[8] 作業オペレータの手動入力による復元および修正
- (3) 前提情報の利用[9] 形状テンプレートや形状制約（直角に限定等）の導入

しかし、項目(1)のデータは、観測データと高精度に位置合わせが可能で、かつ、同時期にデータが収集されている必要があり、その整備が負担となると思われる。また、項目(2)は人的コストや構築スピード、個人差の影響などが懸念事項として挙げられる。一方、項目(3)は切妻屋根など特定の建物形状には有効であるが、近年の市街地では様々な形状の建物が建てられており、広域の市街地モデルを構築した場合に例外的形状への対処が増加す

る可能性がある。よって、防災情報システム向けに広域の市街地モデルを整備していくために、上記のような支援情報だけに頼ることは難しいと考えられる。

3.1.3 建物形状復元手法の提案

以上のような問題に対し、本研究では最も基本的な構成要素である「点」に着眼し、建物上面に分布する 3 次元点集合のクラスタリングによって建物形状を復元する BRoC 法 (Building Recovery on Clustering) を提案する(図 3.2)。BRoC 法では、入力 of 3 次元点集合全体を段階的に分割することで、徐々に詳細な構造を復元していくアプローチを採用しており、処理結果は常に点集合全体の分割結果という形で統一されている。そのため、処理のプロセスで一貫して同一の評価関数を適用可能としている。本研究では「復元結果としての適切さ」の評価基準として MDL 原理(Minimal Description Length Principle[10])を採用し、点集合の分割結果に対して情報圧縮の理論に基づく評価関数を定義して処理結果の選択を行う。その結果、手法全体で利用者が調整する処理パラメータは評価関数に含まれる一つだけとなり、手法全体の最適化を見通しよく実現できる。

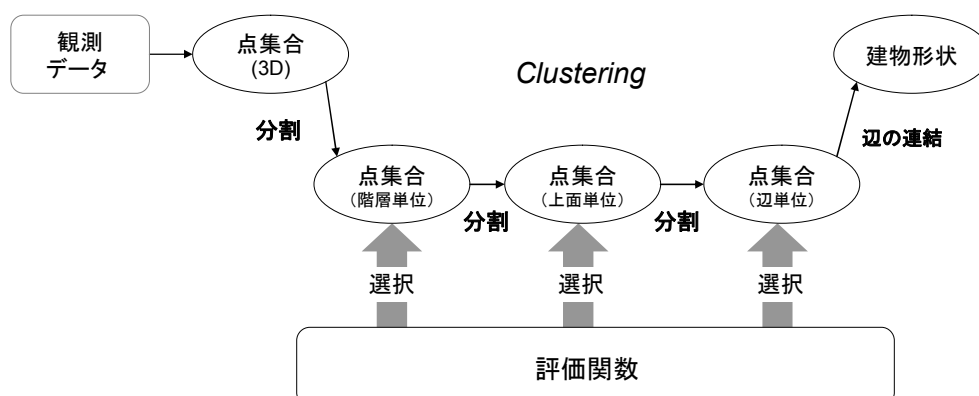


図 3.2 提案する建物形状復元手法（BRoC 法）の概要

本研究では、空撮映像とレーザレンジデータのいずれかから 3 次元点集合を抽出して建物形状復元の入力データとし、2 つの観測データに共通な建物形状復元の基本方式として BRoC 法を提案する。その上で、各観測データの特徴を反映したクラスタリング手法を導入することによって、支援情報を利用しない自動化手法として建物形状復元を実現し、広域の市街地モデルの構築実験を行って復元精度の評価を行う。

BRoC 法の処理の流れを図 3.3 に従って以下に説明する。本手法では建物上面として水平面を復元対象とし、一つの建物が階層的に複数の上面を持つ場合も考慮する。

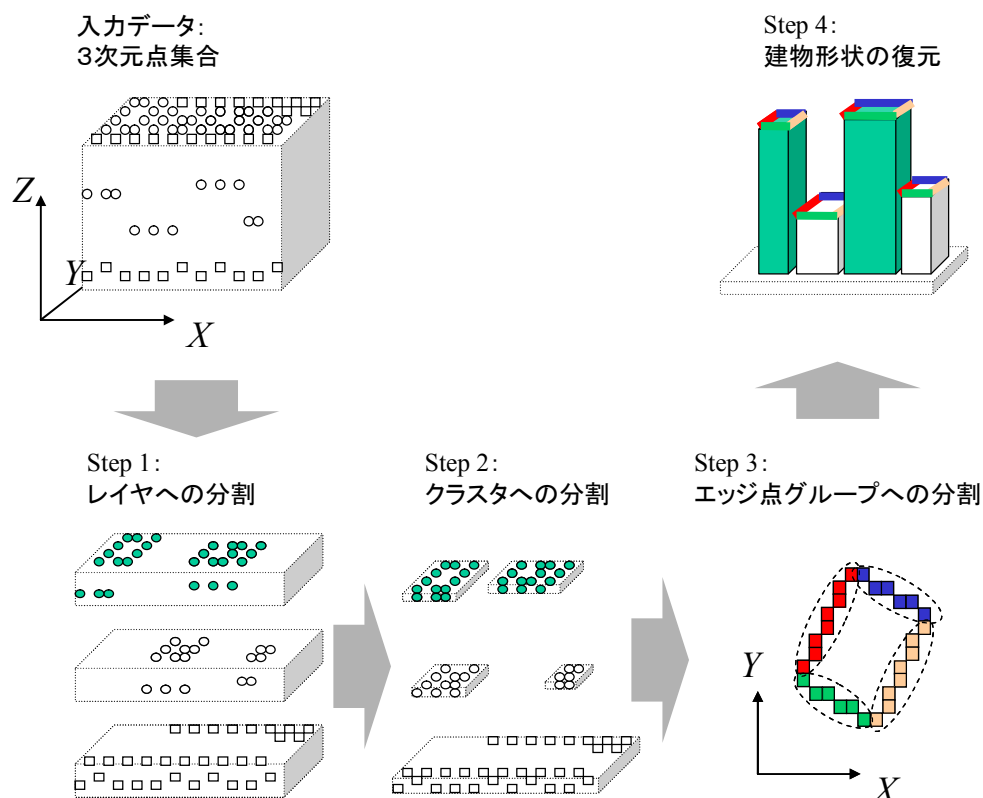


図 3.3 BRoC 法の処理の流れ

Step 1: 入力の 3 次元点集合に対して高さ方向のクラスタリングを行って高さの近い点の集合（レイヤ）に分割する。

Step 2: 各レイヤにおいてクラスタリングを行い、水平方向の距離の近い点の集合（クラスタ）に分割する。

Step 3: 各クラスタの輪郭部の点（エッジ点）をクラスタリングして辺ごとの点集合に分割し、各集合から線分を抽出して建物上面の多角形を作成する。（ただし、空撮映像を利用する場合には建物上面の角点のみが得られることが多いため、クラスタの凸包を建物上面とする。）

Step 4: 建物上面の多角形の各辺から垂直面を下ろすことで建物形状を復元する。

具体的に各観測データに対して利用するクラスタリング手法[11]の組み合わせを表 3-1 に示す。BRoC 法におけるすべてのクラスタリング処理では、処理の打ち切り限界以外に処理パラメータを利用しない構成とし、クラスタリング結果を選択するための評価関数に 1 つだけパラメータを用いることとする。これによって、構築システムの利用者は復元手法の詳細を意識することなく、希望する復元結果を得るためのパラメータ調整を比較的容易

に実施できる．処理パラメータと評価関数については次節で詳細を述べる．

表 3-1 BRoC 法におけるクラスタリング手法の一覧

クラスタリングにより 生成する点集合	レイヤ (同一階層の点集合)	クラスタ (同一建物上面にある点集合)	エッジ点集合 (同一辺に含まれる点集合)
空撮映像		階層的クラスタリング <水平方向の最短距離>	(クラスタの凸包を 建物上面とするため クラスタリングは不要)
	階層的クラスタリング <高さ方向の標準偏差>		
レーザ レンジデータ		隣接関係に基づく領域分割	階層的クラスタリング <線分からのずれの総和>

3.1.4 提案手法に対する評価関数の導入

点集合に基づく形状復元手法としては，3 次元点集合に三角メッシュを生成する方法があり，曲面形状の復元手法として広く研究および利用されている[12]．しかし，防災情報システムの情報分析機能では，以下のような理由から，市街地モデルとして多数の微小面から成るメッシュモデルではなく，頂点数の少ない簡素な形状モデルが求められることが多い．

- (1) 防災情報の視覚化における各建物の視認性の向上[†]
- (2) 防災情報の 3 次元モデル表示におけるレンダリング処理量の削減
- (3) 被害予測の物理シミュレーションにおける計算量の削減

それと同時に，入力データの位置精度が低ければ必然的に簡素な形状しか復元することができない．つまり，復元形状の簡素化はアプリケーション側から必要とされる場合と，入力データの精度に応じて必要とされる場合がある．本研究では 2 つの必要性を区別せず，システムの利用者が簡素化の度合いを評価関数に含まれる 1 つのパラメータによって設定できるようにする．

次に形状評価の基本的な考え方について述べる．入力の 3 次元点集合を少ない情報量で記述したモデルデータが処理結果の復元形状である，と考えると，「形状の簡素化」を「入力データの圧縮」と見なすことができる．このような情報論的立場から「良い簡素化」を定義すると，3 次元点集合の位置情報を残しつつ復元形状の頂点数をできるだけ削減する

[†] 建物形状の簡素化は，地図学では“総描(generalization)”と呼ばれ，地図作製において一般的に行われている．

こと、と言える。例えば、多数のレイヤを生成すると復元形状は詳細になり、復元形状の上面と、その面に含まれる各点の高さとのずれを小さくできる。しかし、3次元点集合に過剰に適合した復元形状は簡潔ではなく、むしろ位置の誤差によって真の形状に対する復元精度が低下している可能性が高い。つまり、頂点数（＝簡潔性）と入力データに対するずれ（＝適合性）の双方のバランスをとって形状を決定することが、真の形状を得るための指針となると考えられる。

このような考え方に対し、Rissanen は「モデルを記述するための符号長 M_m とそのモデルを使って記述したデータの符号長 M_d の和」を MDL 基準として定式化し、MDL 基準が最小となるモデルが最良のモデルである、とする情報符号化の理論を MDL 原理として提案した[10]。以後、MDL 原理は多くの分野で適用され、その有効性が認められている[13, 14]。本研究では MDL 原理を採用し、簡潔性と適合性の 2 つの評価項目を符号長という統一尺度で定式化することで両者を反映した評価関数を定義し、バランスの取れた最適化を図る。

以上のような評価方法を背景として、BRoC 法では線分抽出や面抽出を行って入力データが持つ情報を順次捨ててしまう従来のアプローチを避け、3次元点集合の分割結果という形で入力データ全体を常に保持して MDL 基準を算出し、クラスタリング結果の比較および選択を可能としている。ただし、途中段階では復元形状の頂点が決まらないため、3次元点集合の分割結果に対する「モデル」を具体的に定義し、その符号長を定式化する必要がある。そのため、レイヤとクラスタについては、そこに含まれる3次元点集合の平均高さを持つ水平面を、一方、エッジ点集合については最小二乗直線を、その途中段階での「モデル」とする。そして、点集合の分割に必要な符号長とモデルのパラメータ（水平面の高さ、もしくは直線の傾きと切片）の値を記述するための符号長の和をモデルの符号長 M_m として定式化する。一方、データの符号長 M_d に対しては、入力データの位置ずれに対して標準偏差 σ を含む統計モデルを仮定し、モデルからの位置ずれ量の符号長を M_d とする。そして $M_m + M_d$ によって BRoC 法の評価関数を定義する。

本手法では σ が利用者の調整可能な唯一のパラメータとなり、入力データからの位置ずれを許容して形状の簡素化を図ることを可能とする。本手法のパラメータ調整は JPEG のような不可逆圧縮と同じ考え方で理解できる。つまり、 σ を小さくすれば元の位置情報の大部分が残され、詳細ではあるがデータ量の大きな復元形状データが得られる。一方、 σ を大きくすれば、簡素化されたデータ量の小さな復元結果を得られる。なお、入力データの誤差統計モデルが明らかになっていれば、入力3次元点集合に対して過剰に適合せず、最適な詳細度で建物形状の抽出が可能になる。

本論文では各観測データに対して BRoC 法の詳細を述べる中で、評価関数となる MDL 基準の具体的な式を示すと共に、その評価関数を利用した場合の復元精度を市街地の建物の形状復元実験によって検証する。

3.2 空撮映像向け BRoC 法の提案

3.2.1 クラスタリング手法の検討

レイヤを生成するには高さ別のヒストグラムを使う方法[15](方法 A)があり, またクラスタの生成には点の隣接関係による領域分割に基づく方法[16](方法 B)がある. こうした方法は画像における画素を代表例として, 各点が規則正しく並んでいる場合を適用対象としている. そのような場合, 方法 A では, ヒストグラムの各階級値の大きさがそのまま水平面の大きさと考えることができるため, 階級値に対する閾値設定が容易であり, また方法 B では, 各点および領域の隣接関係が明確かつ短時間に判定できる.

しかし, 点の 3 次元位置を求めるためには複数の画像間で対応付けを行う必要があり, 結果として輝度値の変化率の高い点(特徴点)のみが 3 次元点集合に含まれる. つまり, 本手法で対象としている 3 次元点集合では, 水平面上で規則正しく配列しているとは限らないため, 上記の方法をそのまま利用することが難しい. そこで本手法では, 垂直および水平方向の距離に基づいた階層的クラスタリングの手法を用いてレイヤおよびクラスタを生成することとし, 以下の 3 つの工夫を行った.

(1) 最短距離法によるクラスタ生成

クラスタ生成時のクラスタリングでは, 二つのクラスタの間で最も近い点のペアを見つけ, その距離が小さい順に併合処理を行う. この方法は階層的クラスタリングにおける最短距離法と呼ばれ[11], 一般に帯状の長いクラスタが生成されやすい. 画像から 3 次元点集合を得る場合には, 特徴点が建物上面の縁に連続して分布することが多いため, 最短距離法によって連続する特徴点が同一のクラスタに含まれるようになり, 輪郭抽出と同様の効果が期待できる.

(2) レイヤの上下関係を利用したクラスタ生成

本研究ではクラスタの水平面上での凸包によって建物上面を復元する. よって, その凸包内にクラスタが所属するレイヤよりも低いレイヤの点が含まれていては, 建物形状の上下関係に矛盾が生じる. そのため, このような低い点を含まない制約(下位点排他制約)を導入してクラスタの併合を行うことで正しい建物上面形状の推定が可能となる.

(3) レイヤとクラスタの段階的生成

クラスタを正しく生成するにはレイヤが正しく生成されている必要がある. しかし復元対象領域に, 高さが近い面が多数含まれている場合には, 3 次元点集合全体を一度に正しくレイヤ集合に分割することは難しい. この問題に対し, レイヤの生成後に, いったんクラスタ生成処理によって点集合を平面的に分割し, 改めて各クラスタに対してレイヤの生成を行うことにする. つまり, レイヤ生成およびクラスタ生成を一度で行うのではなく, 段階的に進めていくことで, 小さな領域

までを安定して復元するアプローチを採用している。

レイヤとクラスタの具体的な生成処理については3.2.3節で、MDL原理に基づく最適なレイヤ集合の選択については3.2.4節でそれぞれ説明する。

以下の説明においてX軸およびY軸を互いに直交した向きで水平方向に、Z軸を建物の高さ方向にとることとする。レイヤに含まれる点のZ座標の平均値を「レイヤの高さ」と呼ぶ。「クラスタの高さ」についても同様とし、上面の高さは各クラスタの高さとする。

3.2.2 3次元点集合の獲得方法

本研究では空撮映像から(1)特徴点の設定、(2)特徴点の追跡、(3)3次元位置の獲得、(4)アウトラリアの削除、(5)ワールド座標系への変換、の順に処理を行って3次元点集合を全自動で獲得する。以下、各処理について説明する。

まず始めに、オクルージョンを避けるため画像の中心付近の領域から特徴点を得る(処理1)。特徴点は周辺部と輝度値の差が大きいものから選ぶが、以下の処理に問題がない限り、できるだけ多くの特徴点を発生させる。それらの特徴点を空撮映像において追跡し(処理2)、各フレーム画像間の移動量をもとに各点のカメラ座標系における3次元位置を獲得する(処理3)。このステップでは反復的透視投影型の因子分解法[17, 18]を利用しており、透視投影(perspective)カメラモデルに漸近した条件で3次元位置を獲得することができる。獲得した3次元点集合の各点を、カメラ位置および姿勢情報を用いて、空撮映像の各画像フレームに再投影し、特徴点追跡時の画像座標位置と投影された点の位置とのずれを算出する。このずれは、特徴点追跡における追跡エラーと考えられ、再投影誤差の大きな点(アウトラリア)を削除することにより、位置精度の高い点だけを残すことができる(処理4)。最後に、GPS 測量値などの実世界の測量値と対応づけることで、国家座標系に代表されるようなワールド座標系の3次元座標(X,Y,Z)に変換する(処理5)。

特徴点発生に用いた空撮画像と獲得した3次元点集合(1343点)の例を図3.4に示す。図3.4(a)において白線で囲んだ部分が初期特徴点を発生させた領域である。獲得した1343点の3次元点集合を図3.4(b)に示す。図3.4(b)では各点の高さが地上から高いほど濃い色で示している。

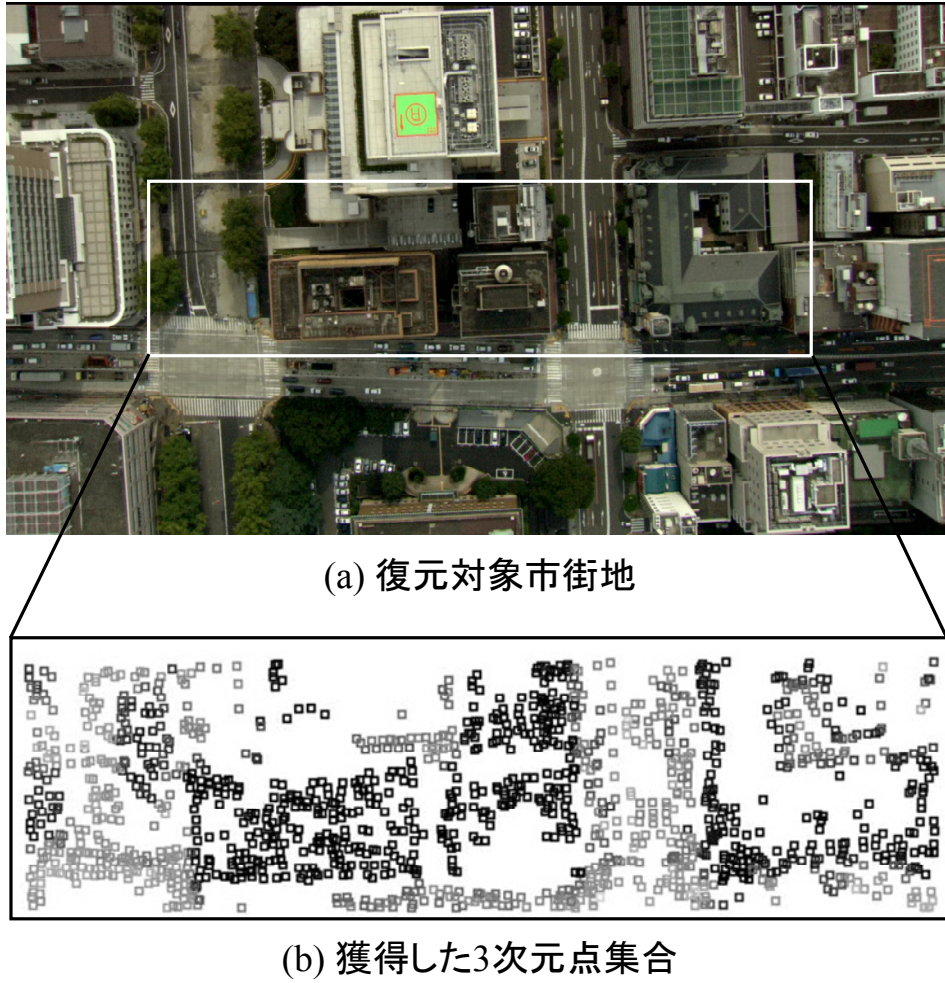


図 3.4 復元対象市街地と獲得した 3 次元点集合の例

3.2.3 段階的なレイヤおよびクラスタの生成

図 3.4 に示すような水平面上の分布が均一でない点集合から、レイヤおよびクラスタを生成するにあたって、本手法では、垂直および水平方向の距離に基づいた階層的クラスタリングを用いることとした。

レイヤ生成：3次元の点集合を入力として以下を行う

- (4) 各点を一つのレイヤとして高い順にレイヤを並べる $\{L_1, \dots, L_n\}$.
- (5) k が n から1まで順に以下を行う.
 - ① レイヤ集合 $\{L_1, \dots, L_k\}$ に対して3.2.4節で述べる方法によりMDL基準 M_k を求める.

- ② $k = n$ または $M_{kmin} \geq M_k$ ならば $L = \{L_1, \dots, L_k\}$, $M_{kmin} = M_k$ とする.
- ③ $i = 1, \dots, k-1$ に対して, 点集合 $L_i \cup L_{i+1}$ のZ座標の標準偏差 σ_i を求める.
- ④ $\sigma_1, \dots, \sigma_{k-1}$ の中から最小値 σ_{min} を選ぶ.
- ⑤ $L_{min} = L_{min} \cup L_{min+1}$ とし, $i = min+1, \dots, k-1$ に対して $L_i = L_{i+1}$ とする (レイヤの併合).
- (6) L を出力する.

次にクラスタの生成では, クラスタ間の距離 D を直接求めること無しに最短距離法の階層的クラスタリングを行う手続きを用いた. 下記の処理では, 距離が短い点の組から順にクラスタの併合処理をしているため, 最短距離法と同じ結果が得られる.

クラスタ生成: 各レイヤ L_i に対して以下を行う.

- (1) L_i に含まれる各点を一つのクラスタとし, 初期のクラスタ集合 $\{C_{ij}\}$ を作成する.
- (2) すべての点のペア $\{(p, q) \mid p, q \in L_i, p \neq q\}$ について距離を求め, 距離が短い順に並べる $\{(p_1, q_1), \dots, (p_n, q_n)\}$.
- (3) k が 1 から n まで順に以下を行う.
 - ① p_k を含むクラスタを C_p , q_k を含むクラスタを C_q とする.
 - ② C_p と C_q が同じならば①に戻る.
 - ③ X-Y平面上で $C_{pq} (= C_p \cup C_q)$ を包含する凸包 P を作成する.
 - ④ P が L_i より低いレイヤの点を包含していないなら, $\{C_{i,j}\}$ から C_p と C_q を除いて C_{pq} を加える (クラスタの併合: 図 3.5).

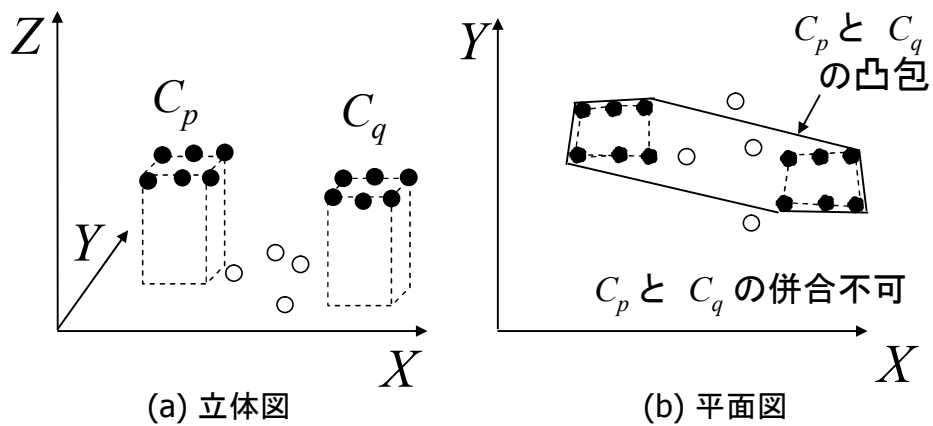


図 3.5 クラスタ併合の制約 (下位点排除制約)

(4) $\{C_{i,j}\}$ を出力する.

クラスタ生成の処理(3)④では、レイヤの上下関係をクラスタ併合時の制約として用いており、この制約を以後、下位点排他制約と呼ぶ。例えば、図 3.5に示すように同じ高さのビルが隣接し、それぞれの上面を形成するクラスタ C_p, C_q が併合されようとしても、その間に低い点（図の白丸）が存在すれば C_p と C_q は併合されず別の上面として分離、復元されるようになる。このようにレイヤ集合の上下関係を利用して、水平方向の点集合分割（クラスタ生成）を行うことが本手法の大きな特徴の一つである。

既に述べたように本手法のもう一つの特徴として、レイヤ生成とクラスタ生成を交互に行い、段階的に小さな領域を復元していく点が挙げられる。以下ではこの処理を説明する。レイヤおよびクラスタの生成処理は点集合全体を含む一つのクラスタから始まり、そのクラスタに対してレイヤ集合 $\{L_1, \dots, L_n\}$ を生成し、生成された各レイヤにおいて、再度クラスタ生成処理を行う。そして、各クラスタがレイヤを一つしか生成しなくなるまでクラスタ生成とレイヤ生成の処理を交互に続ける。以上の処理の結果、レイヤとクラスタは、根から葉までのすべてのパスにレイヤとクラスタが交互に現れるような木構造を構成する(図 3.6)。この木構造を本研究では、Layer-Cluster 木 (LC 木) と呼ぶ。

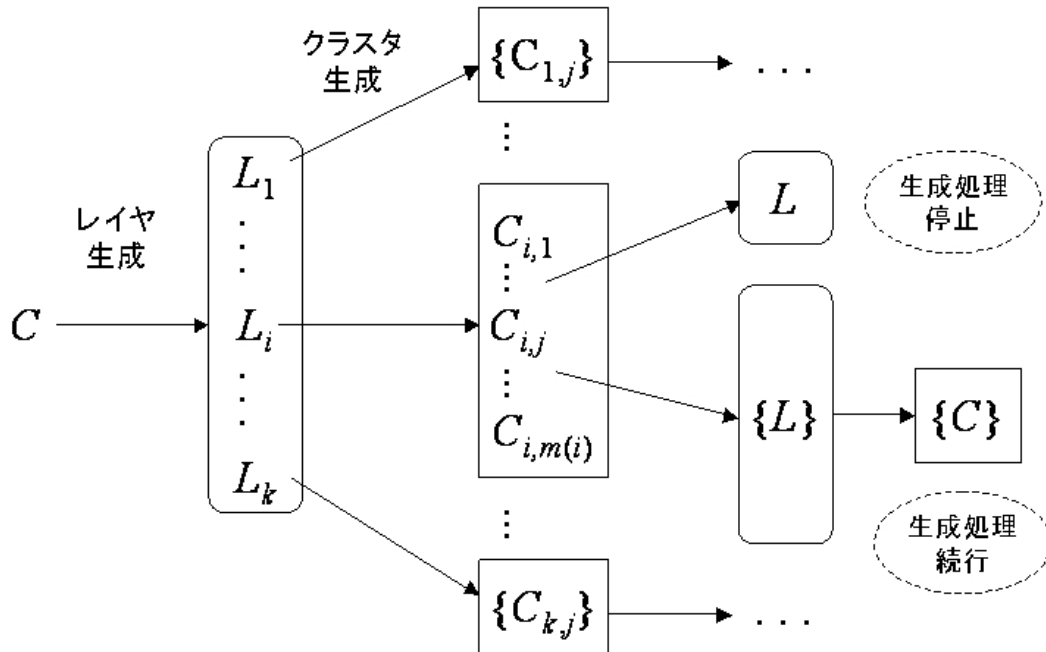


図 3.6 Layer-Cluster 木

LC 木の生成プロセスにおいて、レイヤおよびクラスタ生成処理におけるアルゴリズムおよびパラメータは一貫して同じものを用いるが、次節で述べる MDL 原理により、入力されるクラスタに応じた適切なレイヤ集合が選択される。

3.2.4 MDL 原理に基づくレイヤ集合の選択

一つのクラスタ C が k 個のレイヤ $\{L_1, \dots, L_k\}$ に分割され、さらに各レイヤ L_i から $m(i)$ 個のクラスタ $\{C_{i,1}, \dots, C_{i,m(i)}\}$ が生成されるとすると、一つのクラスタはクラスタ集合 $\{\{C_{i,1}, \dots, C_{i,m(i)}\} \mid i=1, \dots, k\}$ に分割されることになる。このとき点集合 C は、上記のクラスタ集合が表す柱状モデルの集合によってモデル化されたと考えられる。この考え方をもとに、空撮映像向け BRoC 法において MDL 基準を算出するのに用いる符号長 M_m および M_d を示す。なお、いずれも式の導出は本論文の付録 A に示す。

クラスタ集合 $\{\{C_{i,1}, \dots, C_{i,m(i)}\} \mid i=1, \dots, k\}$ を、分割前の点集合 C に含まれる n 個の点を記述するためのモデルとする。クラスタの総数 ($m(i)$ の総和) を m としたとき、モデルの符号長 M_m は

$$M_m = \ln_{n-1} C_{k-1} + \frac{m}{2} \ln n \quad (3.1)$$

となる。ただし ${}_{n-1}C_{k-1}$ は $n-1$ 個から $k-1$ 個のものを取る時の組み合わせの数を表す。

次に、点 p の Z 座標を $Z(p)$ で表し、 p が属するモデルの高さと $Z(p)$ のずれは、標準偏差 σ_d の正規分布に従うとする。クラスタ $C_{i,j}$ に含まれる点の高さの平均値を $Z(C_{i,j})$ で表すとする、データの符号長 M_d は式(3.2)で示される。

$$M_d = \frac{1}{2\sigma_d^2} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{m(i)} \sum_{p \in C_{i,j}} (Z(p) - Z(C_{i,j}))^2 \quad (3.2)$$

よって MDL 基準 M は

$$M = M_m + M_d \quad (3.3)$$

となる。レイヤ生成処理において、式(3.3)の M を最小とするものが最適なレイヤ集合として選択される。本手法において、3 次元点集合獲得後の処理に対して与える必要のあるパラメータは式(3.2)の σ_d のみとなる。

3.3 実験結果

本節では市街地を撮影した空撮映像から建物形状を復元し，定性的および定量的な評価を行う．なお，処理時間やデータ量に関しては，次章で広域の市街地モデル構築実験を行った際に別途評価を行う．

3.3.1 空撮映像の取得と 3 次元点集合の獲得

空撮はヘリコプターで行い，9月の晴天時に正午に近い時間帯を選んで，時速 100 km を維持しながら高度 300 m で撮影を行った．空撮中の平均高度および平均速度からのずれは最大でも 10.34m, 0.93m/s であった．このヘリコプターの空撮カメラ（焦点距離 15.3 mm）では 1920×1080 画素，30 フレーム／秒の HD 映像^{††}が可能である．また，カメラは防振装置を介して設置されており，直下安定の状態で撮影を行った．

実験では建物の分離が難しい密集市街地の空撮 HD 映像を用い，9 シーンから 3 次元点集合を獲得した．特徴点はフレームの中心領域(1320×360 画素，地上で約 220m×60m)に発生させ，そのフレームを画像シーケンスの中心として，前後 80 フレームにわたり特徴点追跡を行った．外れ点の除去には獲得した 3 次元点集合を全フレームに再投影し，平均 3 画素以上の投影誤差を有する点を削除した．以上の処理によって 1 シーン当たり平均 2035.4 点の 3 次元点集合を得た．3 次元点集合の獲得結果の一例は図 3.4 に示した．

3.3.2 建物形状復元結果

3.3.2.a LC 木に基づく復元プロセス

本節では図 3.4 に示した 3 次元点集合の例を元に，LC 木を生成しながら建物形状を自動的に復元するプロセスを，実験結果と共に示す．なお，式(3.4)のパラメータ σ_d は 2.5m とし，クラスタ生成処理では実際の建物の大きさおよび処理時間を考慮して，20m 以上離れた点のペアについては処理をしないこととした．

最初に，1343 点すべての 3 次元点を含むクラスタを LC 木の根とした．今回の実験では地上 5m を境に 2 つのレイヤに分け，低い方のレイヤ(693 点)はそのまま一つのクラスタとして地上面を形成することとした．もう一方のレイヤ(650 点)に対しては，通常のクラスタ生成処理が実行され，20 個のクラスタが生成された．なお，点を 2 個以下しか含まないレイヤおよびクラスタを削除するようにしていたため，12 個のクラスタが残された．ここまでの処理で生成されたクラスタの凸包を図 3.7(a)に示す．

^{††}一般に「ハイビジョン映像」と呼ばれる高品質映像規格

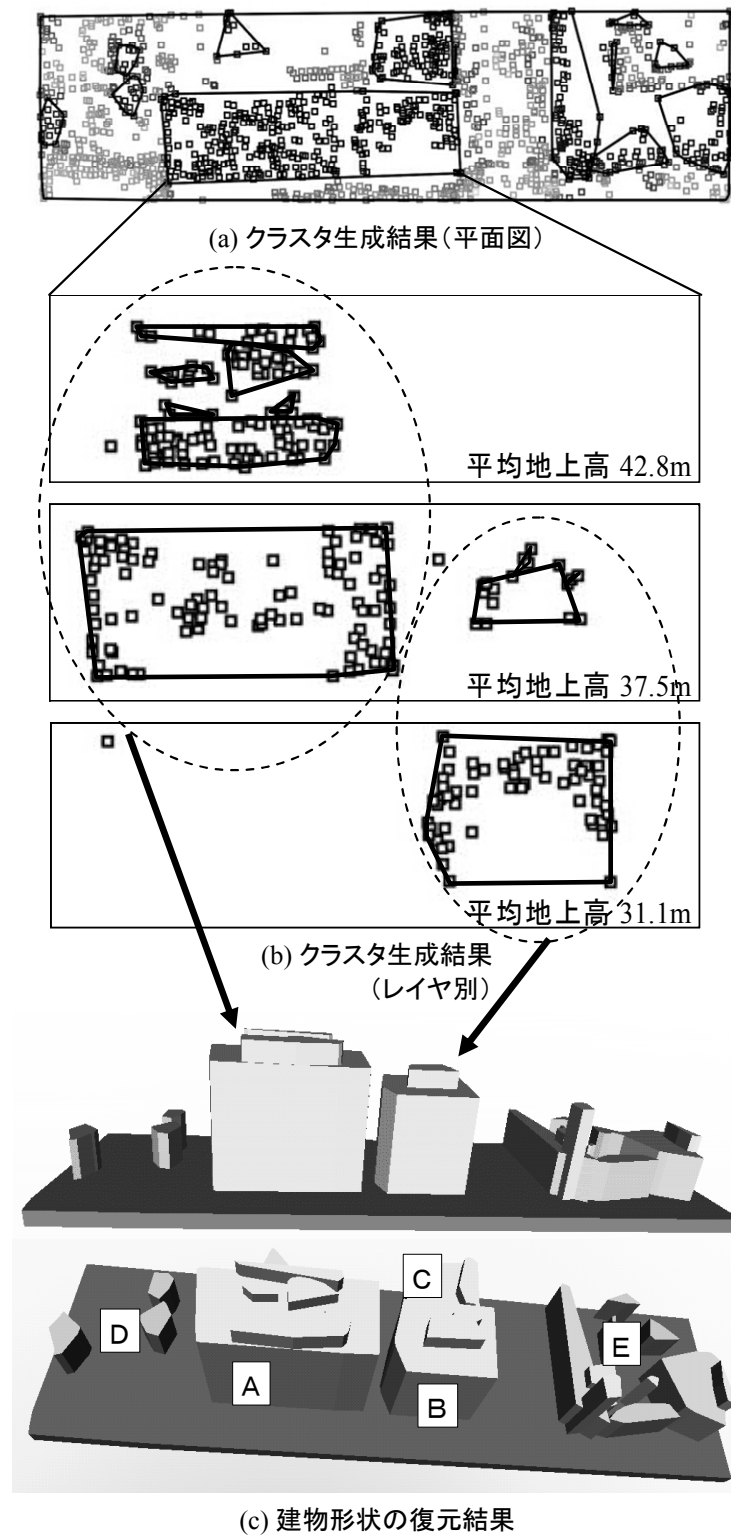


図 3.7 クラスタ生成結果と建物形状の復元結果 (1)

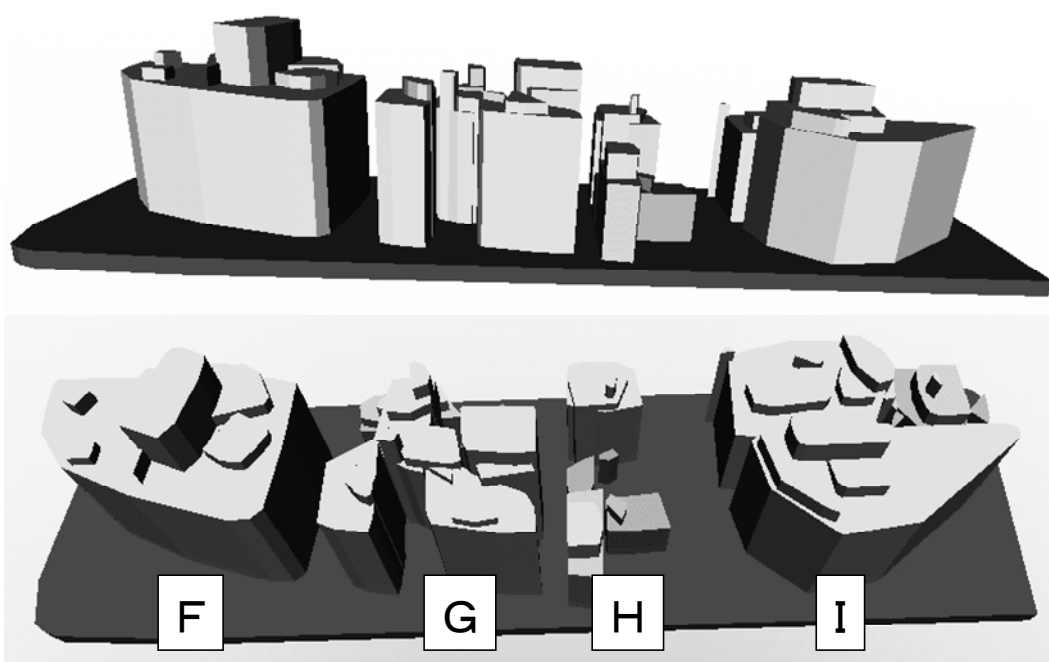
次に、12 個の各クラスタに対してレイヤが生成され、平均 2.0 個のレイヤを得た。ここでは、図 3.7(a)の中央のクラスタにしぼって結果を示す。このクラスタは 7 つのレイヤに分割され、そのうち上位 3 つのレイヤだけが 3 つ以上の点を含んでいた。さらに 3 つの各レイヤに対してクラスタ生成処理が行われた (図 3.7(b))。最終的に、50 個のレイヤおよび 87 個のクラスタから構成される深さ 6 の LC 木が生成され、図 3.7(c)に示す形状モデルを復元することができた。図 3.7 の実験結果を用いて、形状復元のプロセスを詳細に説明したが、提案手法の有効性を検証するため、さらに 2 つの領域に対して建物形状を復元した例を示す。具体的には図 3.7 よりも建物の数が多く、建物間隔も狭い領域に対して本手法を適用した結果を、実験対象領域の空撮画像と並べて図 3.8 および図 3.9 に示す。



(a) 空撮画像

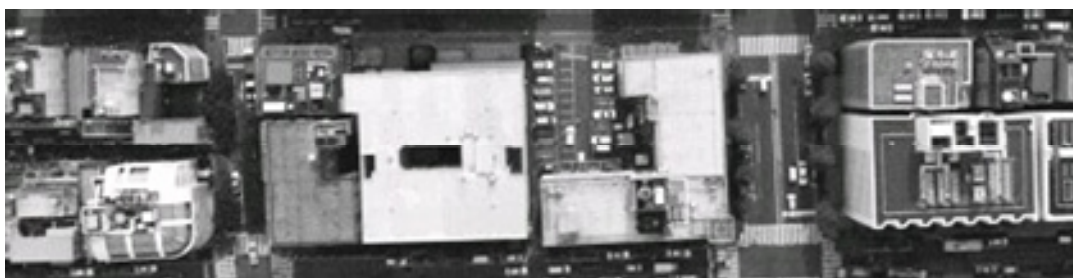


(b) クラスタ生成結果

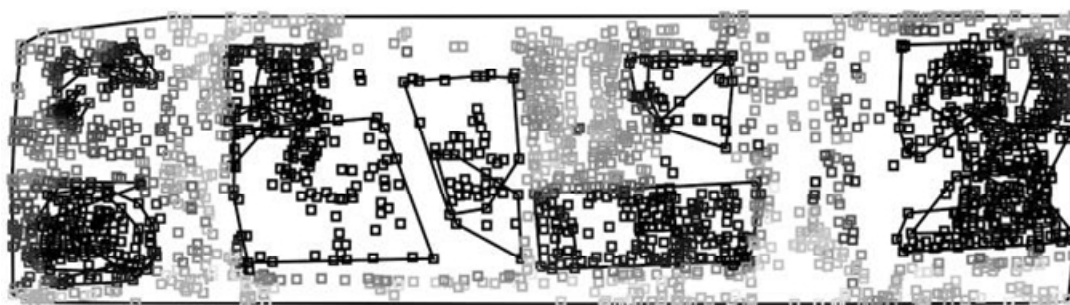


(c) 形状復元結果

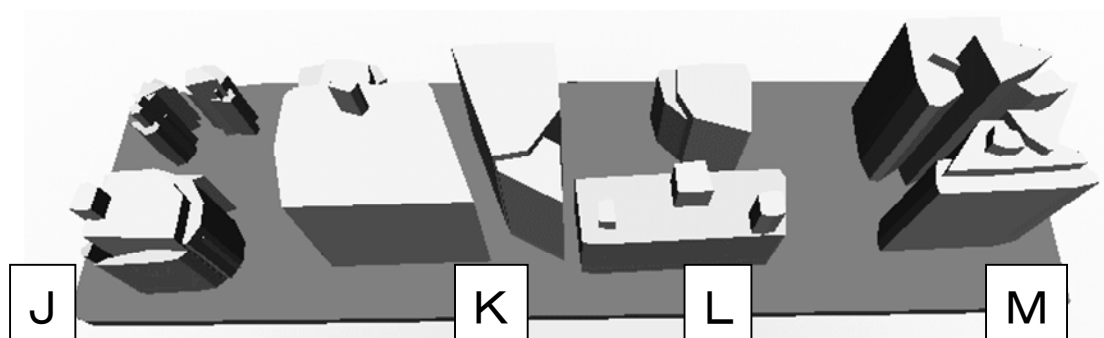
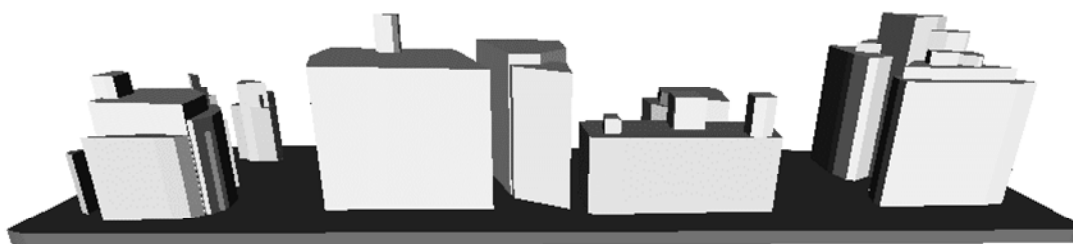
図 3.8 クラスタ生成結果と建物形状の復元結果（例 2）



(a) 空撮画像



(b) クラスタ生成結果



(c) 形状復元結果

図 3.9 クラスタ生成結果と建物形状の復元結果（例 3）

3.3.2.b 形状復元結果の考察

図 3.7(c)の建物 A,B,C および図 3.8 の建物 F,H,I に関しては、提案手法によりほぼ形状を復元できた。これは下位点排他制約が有効に作用し、クラスタがそれぞれの建物に対して適切に生成されたためである。また図 3.7 の D は街路樹に相当するモデルであるが、輪郭の検出が困難で平面形状が比較的複雑な対象物についても、点集合に凸包を生成することにより他の対象物と同じ処理で立体形状を復元できることが分かった。同様に図 3.9 の J のように、曲線の輪郭を持つ建物についても小線分の集合として形状を復元できた。

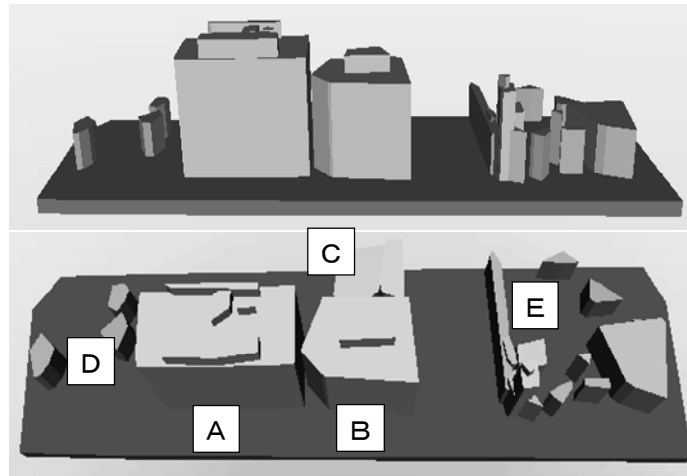
図 3.7(c)の E の建物は、図 3.4 を見ると中庭を持つ建物であることがわかる。この建物に対して生成されたクラスタは対象建物の他のクラスタと併合しようとしたが、併合後のクラスタの凸包が中庭の低い点を包含してしまい、併合に失敗したと考えられる。このように凸でない平面形状を持つ建物に関しては、複数の部分形状を復元するにとどまった。同様の問題は、図 3.9 の建物 L についても生じていることが分かる。

復元された形状の中には、図 3.7 の建物上面にある小さなオブジェクトのように、構成する点の数が少ないために十分な形状を構成できない場合が見られた。また、図 3.8 の建物 G および図 3.9 の建物 K,M では、同じ高さのビルの中に低い点が獲得されなかった、あるいは、点位置の獲得誤差によって低い点が建物内にずれ込んでいた、などの理由により下位点排他制約がうまく作用せず形状を悪化させていた。以上のように 3 次元点集合の不十分および位置の誤差が復元形状の精度を低下させる主な要因であった。

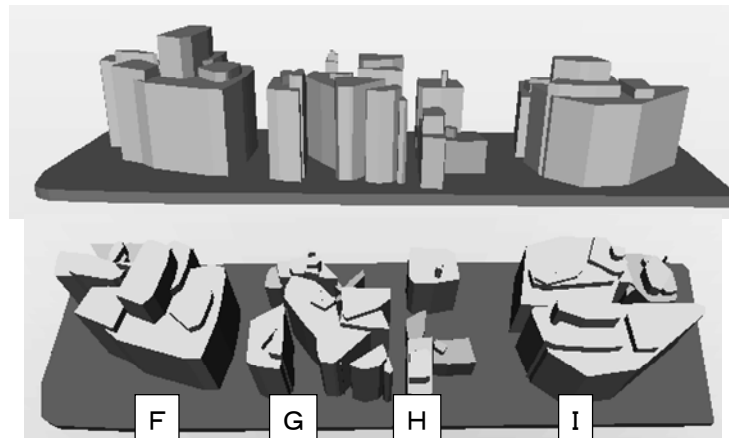
上記の復元例において、3 次元点集合からモデルを復元するまでの処理時間は Xeon1.7GHz で 6.86 秒であった。なお、1 シーン当たりの平均処理時間は 13.15 秒であり、一般に 3 次元都市モデルが時間制約の緩いアプリケーションで使われることと、各シーンを並列に処理できることを考慮すれば、処理時間に大きな問題は生じないと考えられる。

3.3.2.c MDL 原理を用いない手法との比較

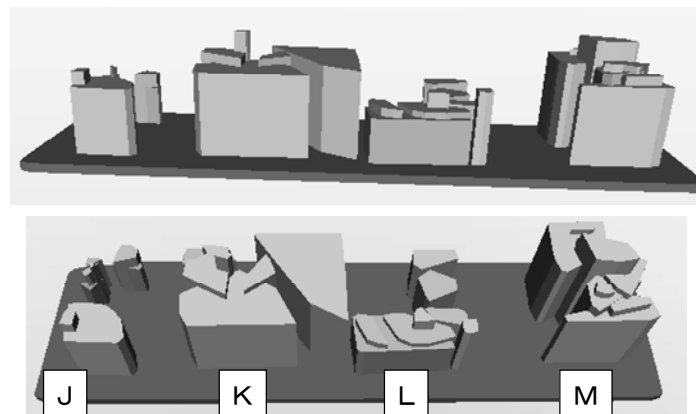
BRoC 法における MDL 原理の導入効果を確かめるため、レイヤの標準偏差にパラメータ σ_t を設けてレイヤ集合の併合処理をうち切る方法を実装し、モデルを復元した。具体的には、レイヤ生成処理の(2.3)において、(a), (b)の処理を行わず、(d)に「 $\sigma_{min} > \sigma_t$ ならば $\{L_1, \dots, L_k\}$ を出力して終了する」という処理を加えたアルゴリズムを用いた。この方法を単に Layer-Cluster 法(以下、LC 法)と呼ぶ。提案手法と同じ実験領域に対し、 $\sigma_t = 2.5m$ として LC 法を用いて建物モデルを復元した。図 3.7, 図 3.8 および図 3.9 に示した領域について、建物の復元結果を図 3.10 に示す。



(a) 例1と同一領域の復元結果



(b) 例2と同一領域の復元結果



(c) 例3と同一領域の復元結果

図 3.10 MLC 法と LC 法による復元結果の比較

図 3.10 の結果を見ると BRoC 法を用いた場合と比較して、建物 G,K,L で形状が断片的に復元されてしまった。この問題に対し σ_t の値を大きくして再度実験を行ったが、その場合は図 3.7 の建物 A,B が結合してしまうなどの不具合が生じた。結果として、LC 法では建物上面の小オブジェクトと建物全体の両方の形状を適切に復元できる値を見つけることが困難であった。

3.3.3 形状復元手法の定量的評価

3.3.3.a 手法の評価方法

本研究では建物平面形状の正解データを用意し、その形状と比較することによって復元手法を定量的に評価した。実験に用いた 9 つのシーンから手動により 3 つの条件(a)平面形状が凸、(b)面積が 1000 画素(約 $28m^2$)以上、(c)地上からの高さが 10m 以上、を満たす地上物体の平面形状をすべて抽出した。作業の結果、全部で 96 の正解データを得た。1 シーン当たりのデータ数は平均 10.7 であり、最大 18、最小 6 であった。

次に、正解データの上面ポリゴン P に対する復元形状の評価値を定義した。 P に対する形状復元結果としてクラスタ C が生成され、その平面ポリゴンを P_c とする。このとき、 P に対する P_c のカバー率は P と P_c の重畳面積を P と P_c を合わせた全体の面積で割ったものとして定義した。具体的には $S_P, S_C, S_{P \cap C}$ をそれぞれ P の面積、 P_c の面積、 P と P_c の重畳面積としたとき、カバー率 E は式(3.5)で定義される。

$$E = \frac{S_{P \cap C}}{S_P + S_C - S_{P \cap C}} \quad (3.5)$$

正解データ P と重なり部分を持つクラスタが複数ある場合には、 E が最大のクラスタを選択し、そのときの E の値を P のカバー率 $E(P)$ とした。正解データのセット $\{P_i\}$ に対するカバー率 $E(\{P_i\})$ として、面積 S_{P_i} に基づく $E(P_i)$ の加重平均 $E(\{P_i\}) = \sum S_{P_i} E(P_i) / \sum S_{P_i}$ を用いることにした。以下の実験ではこの値を用いて建物の復元率を評価した。

3.3.3.b 手法の評価結果

定量的な評価においても 3.2.3 節と同様に、提案手法である BRoC 法を LC 法と比較する。いずれの方法も Z 座標の標準偏差 σ_d, σ_t をパラメータとして用いているため、それらの値を 0.5m 刻みでカバー率を算出した。その結果を図 3.11 に示す。

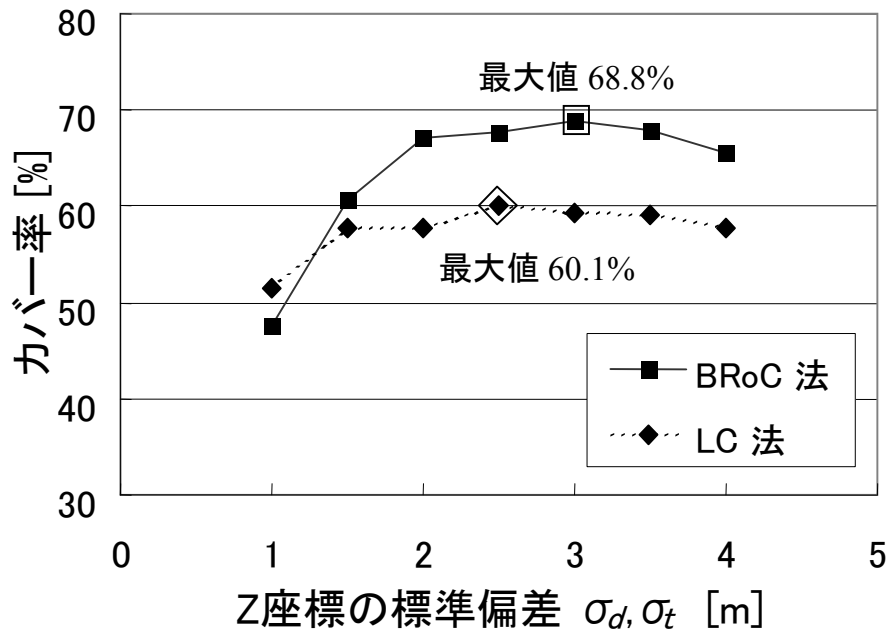


図 3.11 BRoC 法と LC 法のカバー率による比較

BRoC 法では 68.8%, LC 法では 60.1%のカバー率を達成しており, 点の 3 次元位置情報だけから密集市街地の建物形状を復元したことを考慮すれば, この結果は 3 次元点集合の有用性を確認できたと考えられる. さらに, BRoC 法では同じパラメータを用いた場合の LC 法に対して 10%前後の向上が見られ, レイヤ集合の選択において MDL 原理を導入した効果が確認できた.

3.3.3.c 評価結果の考察

日本の代表的な市街地ではビル 1 階分の高さが 4m という調査結果が知られている[19]. これに対し, 評価結果は図 3.11 に示すように, Z 軸方向の標準偏差が 2m から 4m の範囲にわたって高いカバー率を維持している. そのため, 各モデルの建物上面における Z 軸方向の点のばらつきとして妥当な値を得ており, かつ, パラメータの厳密なチューニングは不要になっていると言える. パラメータの決定に多数の正解データを必要とするのでは自動化の意味は薄れるため, 実用化の観点から, パラメータが少なく, かつ, 設定が容易であることは提案手法の重要な特徴であると言える. 一般に, 市街地では建物上面の状態が複雑で多数の画像特徴が得られるため, 形状復元に必要となる特徴を抽出・選択し, それらをグルーピングして個々のオブジェクトを分離する問題は, 入力画像に依存した処理や多数の閾値を必要とすることが多い. 提案手法は, 3 次元点集合を用いることにより, 画像特徴の獲得およびパラメータの設定が比較的容易な特性を持ち, この問題に対する新たな解決手段を提供しているといえる.

3.4 まとめ

本章では、3次元市街地モデル構築を目的として、最初に空撮映像とレーザレンジデータに共通の建物復元手法として BRoC 法の枠組みを提案し、その上で、空撮画像から獲得した 3次元点集合に対して具体的に BRoC 法の処理手順を示した。その中で、空間的な分布が均一でない点集合から、レイヤとクラスタを交互に生成することで、段階的にモデル復元を行う手法を述べた。さらに、形状モデルに対して符号長を定義し、MDL 原理に基づくレイヤ集合の選択方法を提案した。

手法を評価するため、密集市街地を撮影した空撮映像から 3次元点集合と正解データを得て実験を行った。観測したシーンの中から、下位点排他制約が有効に作用することにより、復元対象となる個々のオブジェクトを正しく分離し、形状を復元できることを確認した。さらに、正解データの面積と獲得された形状の面積に基づくカバー率を用いて、手法の定量的な評価を行った。その結果、最大で 68.8%のカバー率を達成し、広い範囲のパラメータ値で高いカバー率が得られることが分かった。同時に、手法の比較評価により MDL 原理に基づくレイヤ集合の選択がカバー率の向上に効果的であることを確認した。以上から、一般には多数の線分が混在して形状解析が複雑になりやすい市街地空撮映像に対し、提案する 3次元点集合に基づく手法が建物形状の安定した復元に有効であることを確認できた。

提案手法は、シーンから個々の復元対象オブジェクトを分離するプロセスでは効果を確認できたが、3次元点の抽出が十分でない場合に復元された形状の精度や隣接する建物の分離に問題が見られた。そのため、形状精度の向上に向けた今後の課題として以下の点に取り組む必要がある。

- (1) 実際の市街地には平面形状が凹の建物も少なからず存在するため、凹形状を考慮したクラスタの生成法へと拡張する。
- (2) 本手法では下位点排他制約によってクラスタを生成しているが、3次元点の位置誤差を考慮して、安定した形状復元手法を確立する。

また、もう一つの検討課題として空撮映像の撮影条件に対する復元手法のロバスト性が挙げられる。つまり、災害時には常に好適な状況で空撮映像を取得できるとは限らず、その結果、入力となる 3次元点集合の精度や密度が低下する可能性がある。そのような状況下でも、本研究の手法では σ を大きく取ることによって簡素な形状モデルを出力することが可能であると考えられる。また、本手法は主に画像の特徴点を利用しているため、線分や色領域を使う方法に比べて画像の劣化にロバストな復元手法であると思われる。しかし、復元精度への影響など定量的な評価や、入力データの品質低下に対する補正／補完手法の検討など、実利用に向けた具体的対策を実施していく必要がある。

第3章参考文献

- [1] 納富幹人, 小澤史朗, 全炳東, "移動体観測による都市モデルの構築", 電子情報通信学会論文誌, vol. J81-D-II, no. 5, pp.872-879, 1998.
- [2] S. Horiguchi, S. Nagai, K. Sugiyama, "Recovering 3D urban model using Range data and Sequential Aerial Images", Proc. of International Workshop Urban 3D and Multi-Media Mapping, Tokyo, Japan, pp.79-84, 1999.
- [3] I. Miyagawa, S. Nagai, K. Sugiyama, "Shape Recovery from Aerial Image using Factorization Method with Sensor Information", Proc. of Asian Conference on Computer Vision (ACCV), Taipei, Taiwan, 2000.
- [4] G. Sohn, I. J. Dowman, "Terrain Surface Reconstruction by the Use of Tetrahedron Model with the MDL Criterion", Proc. of ISPRS Commission III Symposium Photogrammetric Computer Vision '02, pp.336-344, 2002.
- [5] M. Herman, "Repersentation and Incremental Construction of a Three-Dimensional Scene Model", Techniques for 3-D Machine Perception, A. Rosenfeld 編, vol. 3, North-Holland, pp.149-183, 1986.
- [6] N. Paparoditis, "Building Detection and Reconstruction from Mid- and High-Resolution Aerial Imagery", Computer Vision and Image Understanding, vol. 72, no. 2, pp.122-142, 1998.
- [7] Y. Takase, N. Sho, A. Sone, K. Shimiya, "Automatic Generation of 3D City Models and Related Applications", Proc. of International Workshop on Visualization and Animation of Reality-based 3D Models, 2003.
- [8] A. Gruen, X. Wang, "CC-MODELER: A TOPOLOGY GENERATOR FOR 3-D CITY MODELS", ISPRS Journal, vol. 53, no. 5, pp.286-295, 1999.
- [9] A. Alharthy, J. Bethel, "Heuristic Filtering and 3D Feature Extraction from Lide Data", IAPRS, vol. XXXIV, no. 3A, pp.29-34, 2002.
- [10] 韓太舜, 小林欣吾, "情報と符号化の数理", 培風館, 1999.
- [11] 村上征勝, 田村義保, "パソコンによるデータ解析 第1章 クラスター分析", 朝倉書店, 1988.
- [12] D. Terzopoulos, M. Vasilescu, "Sampling and Reconstruction with Adaptive Meshes", Proc. of Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Maui, Hawaii, pp.70-75, 1991.
- [13] 栗田多喜夫, 赤穂昭太郎, "コンピュータビジョン: 技術評論と将来展望 第13章 画像理解における統計的手法", 新技術コミュニケーションズ, 1998.
- [14] H. Zhao, R. Shibasaki, "High accurate positioning and mapping in urban area using laser range scanner", Proc. of International Workshop Urban 3D and Multi-Media Mapping, Tokyo, Japan, 2000.
- [15] R. Ledur, M. Maresch, C. Leshner, "3-D Reconstruction of Urban Environments from Dense Digital Elevation Models", Proc. of Image Understanding Workshop, pp.589-595, 1998.
- [16] T. Kurita, "An Efficient Clustering Algorithm for Region Merging", IEICE Trans. on Information

and Systems, vol. E78-D, no. 12, pp.1546-1551, 1995.

- [17] 宮川勲, 長井茂, 有川知彦, "カメラ運動を拘束した因子分解法による空間情報復元", 電子情報通信学会論文誌, vol. J85-D-II, no. 5, pp.898-966, 2002.
- [18] S. Christy, R. Horaud, "Euclidean Shape and Motion from Multiple Perspective Views by Affine Iterations", IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 18, no. 11, pp.1098-1104, 1996.
- [19] 東京消防庁, "東京消防庁統計書", 2000.

第4章 広域市街地モデルの自動構築システム

本章では、前章で提案した BRoC 法を用いて、広域の市街地モデルを空撮映像から自動構築するシステムについて説明する。具体的には、構築処理の経験が無いオペレータでも少ない作業量で広域のモデル構築を可能にするデータ管理機構を提案して実験システムに実装し、5 平方キロメートルのモデル構築実験を行ってオペレータの作業量および計算機の処理時間に関して実用可能性の評価を行う。

4.1 空撮映像からの広域市街地モデル構築に向けた課題と提案の

概要

広域のモデル構築には上空からの情報獲得が有効であり、航空写真を利用した構築システムとしては CC-MODELER[1]、RADIUS[2]などが提案されている。航空写真のステレオ視による対応点探索および形状抽出は依然として難しい問題であり、これらのシステムではオペレータの教示情報を必要とする。一方、近年の空撮システムの高機能化[3]により、時空間分解能が高くシームレスな映像が容易に取得できる環境が整いつつある。同時に、放送コンテンツ取得や災害情報収集を目的として空撮システムは全国的に整備されており、地上波デジタル放送の普及と共に今後も発展が見込まれる。そのため空撮カメラから市街地の 3 次元モデル構築が可能になれば、その意義は大きい。

空撮映像を利用することによりオプティカルフローを適用して特徴点の対応点探索が可能になる。また、同一の特徴点を多数の画像フレームで観測することにより獲得精度を高めることができる。しかし、広域のモデル構築では飛行コースが長距離となるため多数の部分画像列に分割して処理を行う必要がある。そのため入出力データのファイル名や処理パラメータなどの情報(設定情報)は膨大になり、その管理は構築作業を行うオペレータにとって大きな負担となる。具体的には以下のような問題が生じる。

1. 入出力ファイルや処理パラメータの設定ミスにより、処理のやり直しが発生
2. 処理状況の監視不足により、処理終了後も放置され、構築速度が低下
3. 処理結果の確認不足により、誤った処理結果を次ステップに引継

つまり自動構築システムを実現する上で、設定情報の管理機構は各ステップの処理の自動化と同等の重要性を持っている。

市街地のモデルとしては都市の中心部をカバーするだけでも数平方キロメートルから数十平方キロメートルの規模が必要である。しかし、平方キロメートルの単位で構築実験を行って精度を定量的に評価している研究としては文献[4]が挙げられる程度であり、処理時間やオペレータの作業負荷を含めた広域での多角的な評価はほとんど行われていないのが

実情である。

本章では空撮映像からの市街地モデル構築に関する構築方式を示すと共に構築システムを提案し、大規模な市街地構築実験による評価結果を示す。提案方式では第 3 章で提案した BRoC 法を利用して建物形状復元を行い、オペレータの教示情報や地図データなどを利用せず、空撮映像のみから市街地モデル（建物形状モデルに上面テクスチャと地表面モデルを加えた 3 次元モデル）を構築することができる。一方、提案システムではプロファイルと呼ぶデータ管理ファイルを利用して、データ処理単位ごとに設定情報を管理する。システムが提供するプロファイルの自動生成機能により、専門知識やスキルを持たない少数のオペレータが、WWW ブラウザ上で簡易な設定作業を行うだけで広域の構築作業を可能にする。実験では約 5 平方キロメートルのモデル構築を行い、形状の復元精度、システムの処理時間、オペレータの作業量など多角的に評価を行い、空撮映像による広域な市街地モデル構築の実現可能性を示す。

4.2 市街地モデルの構築方式とシステム

4.2.1 構築方式の概要

図 4.1 に従って市街地モデルの構築方式の概要を説明する。空撮では図 4.1 に示すように複数のコースに分けて構築領域全体の撮影を行う。この空撮映像を入力データとして、提案方式は以下の 3 段階の処理から構成される。

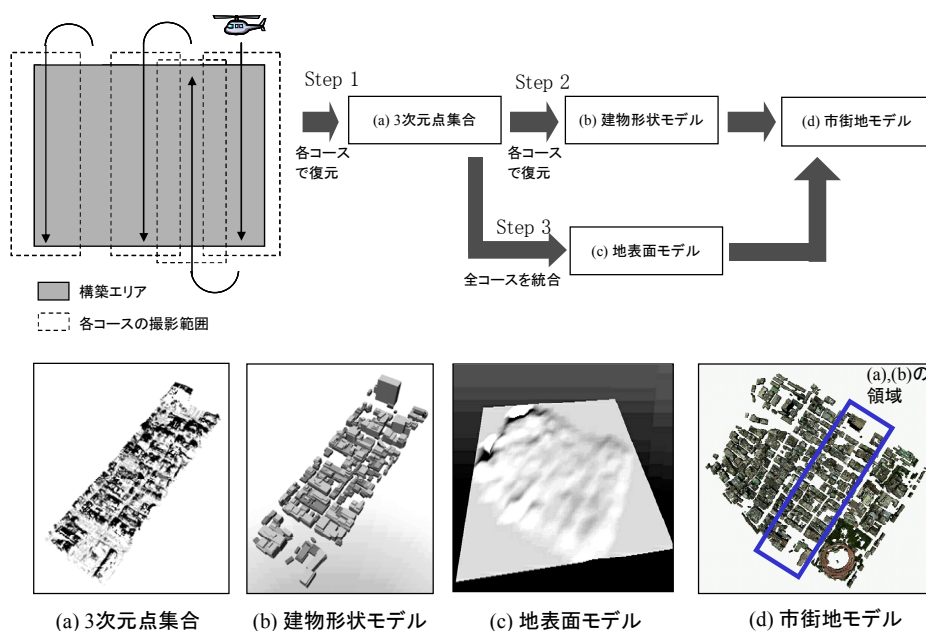


図 4.1 市街地モデル構築方式の概要

Step 1 : 各飛行コースの空撮映像から空間連鎖復元法[5]により 3 次元点集合を復元し、標高によって建物上面部分と地表面部分に分離する。

Step 2 : 建物上面部分に対して BRoC 法により、地上構造物の 3 次元形状を推定して建物形状モデルを復元する。さらに、地上構造物の上面形状を画像フレームに投影して上面テクスチャを獲得する。

Step 3 : 全コースの地表面部分の 3 次元点集合を一つのデータとしてまとめて平滑化処理を行い、地表面モデルを生成する。

Step 4 : 世界測地系[6]に従ってテクスチャ付きの建物形状モデルを地表面モデル上に配置して市街地モデルを構築する。

以上の各ステップの処理ではオペレータによる教示情報を必要としないため自動実行が可能である。

4.2.2 空撮映像の分割とデータ管理

提案方式の処理フローを図 4.2 に示す。空撮映像ではフレームアウトせずに特徴点を追跡できるフレーム数が限られているため、部分的な画像列(画像系列)ごとに処理を行わなければならない。処理の詳細は次節で説明するが、**Step 1** では画像系列ごとに獲得した 3 次元情報を飛行コースごとに一つの 3 次元点集合に統合し、**Step 2** では画像系列ごとに取得した線分情報を 3 次元点集合と組み合わせて BRoC 法により高精度に 3 次元形状を復元する。つまり、提案方式では飛行コース単位の情報と画像系列単位の情報を相互に参照しながら構築処理を進める。したがって、入出力データのファイル名や処理パラメータなどの情報(設定情報)は処理の実行、処理結果の確認、異常時の対処などで随時必要となる。市街地モデルの構築では規模が大きくなるに従って飛行コースの距離が長くなり多数の画像系列に分割される。結果として設定情報は膨大な量になり、各処理が個々に自動化されていても、全体を通じて多大なオペレータ作業を必要としている。

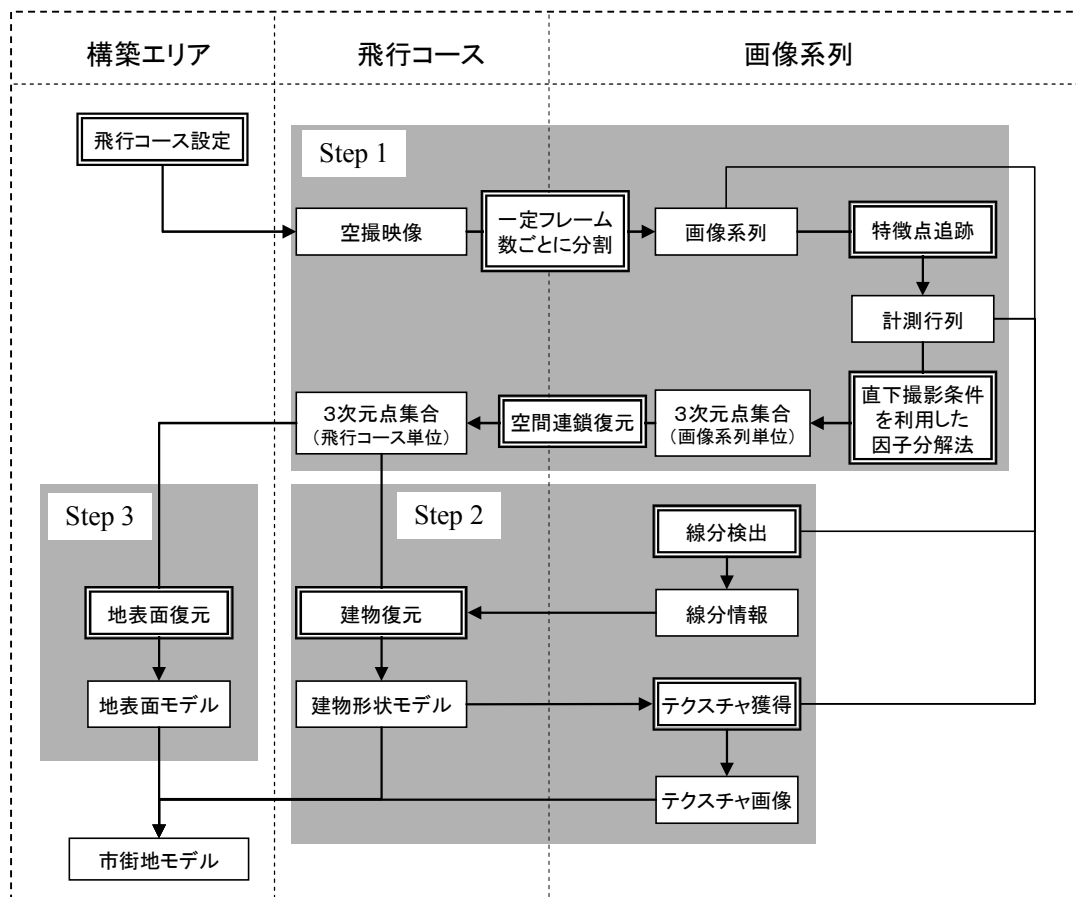


図 4.2 提案する市街地モデル構築方式の処理フロー

提案する構築システムでは提案方式のデータ処理単位に対応して設定情報を保存するファイル(プロファイル)により設定情報の管理を行う。プロファイルは図 4.3 に示す 4 種類を用いる。Step 1 では飛行コース単位の情報と画像系列単位の情報を管理するためにそれぞれコースプロファイルとイメージプロファイルを用いる。また Step 2 では Step 1 と設定情報の共通項目が少ないため別のプロファイル(モデルプロファイル)によって設定情報を管理する。復元した建物形状モデルは防災情報システムが持つ GIS の管理単位領域ごとに分割し、GIS が利用する設定情報をブロックプロファイルにまとめる。

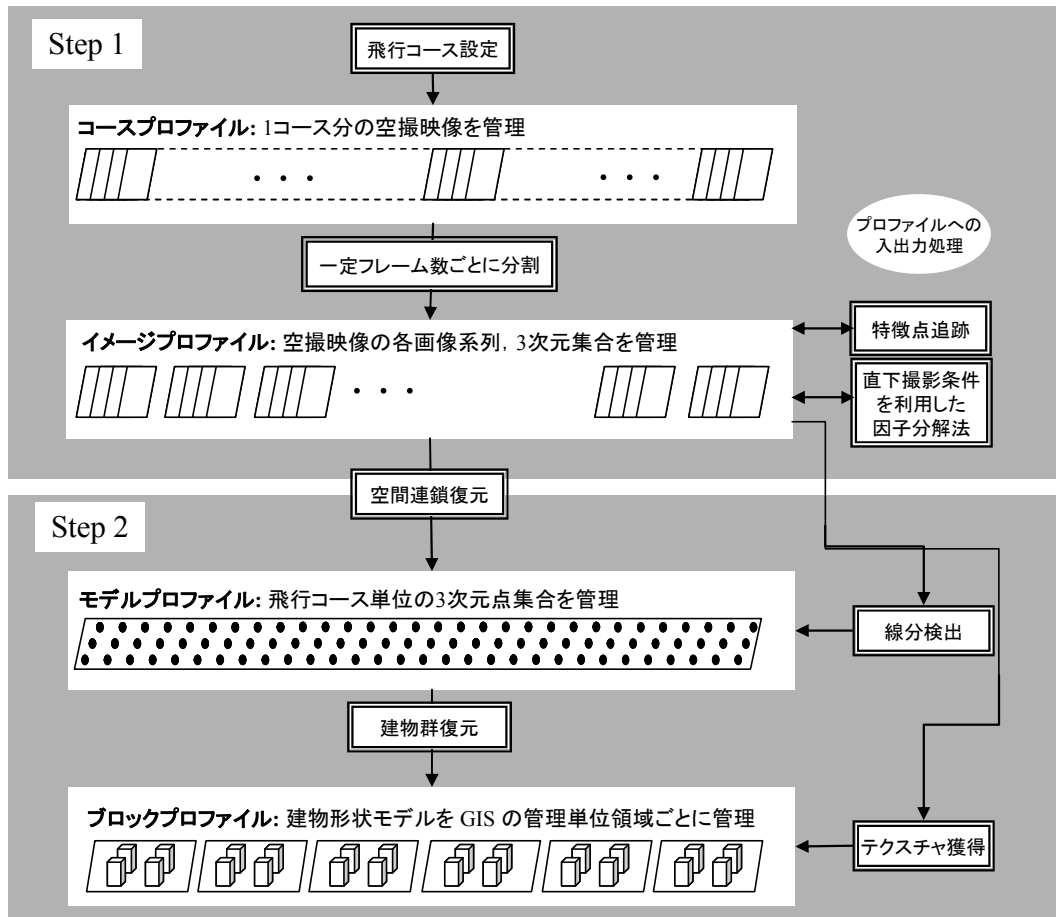


図 4.3 4 種のプロフィールのデータ管理対象

オペレータは最初にコースプロフィールのみを作成し、他の 3 つのプロファイルは処理過程で自動生成される。広域の構築作業ではイメージプロフィールやブロックプロフィールが多数生成されるが、それらにオペレータが直接アクセスする必要は無く、生成元となった少数のプロファイルだけで構築作業を実施し、設定情報を管理することができる。

4.2.3 プロファイルに基づく構築処理

本節では図 4.4 に従って Step 1, 2 の詳細を説明する。なお、図 4.4 では処理フローの説明に必要な属性だけを示し、以下の説明では図中の処理と対応付けて括弧付き番号を記載する。

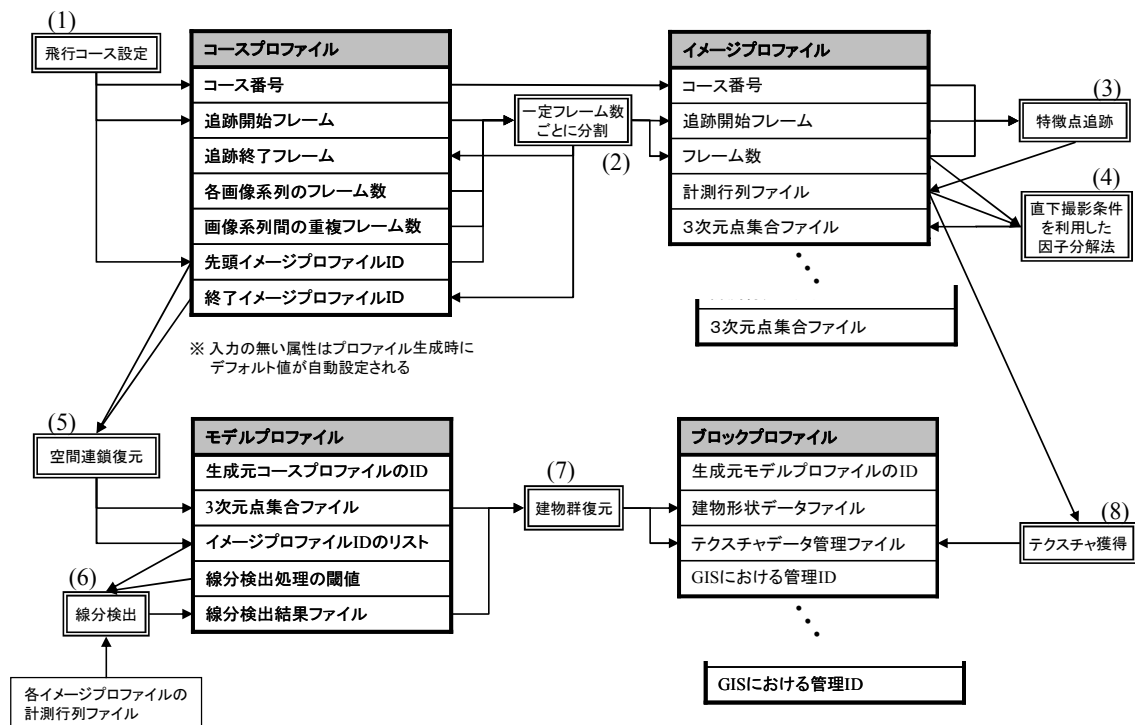


図 4.4 プロファイルにもとづく構築処理の流れ

4.2.3.a 3次元点集合の獲得

(1)Step1 ではオペレータがコースプロフィールに空撮映像の処理対象範囲を設定する。
 (2)Step1 の処理を開始すると構築システムは画像系列への分割とイメージプロフィールの生成を自動的に行う。なお、空撮は速度一定で行うため、各系列の画像枚数を一定とする。イメージプロフィールの生成処理が終了した時点で、コースプロフィールには生成したイメージプロフィールの先頭 ID および最終 ID が設定される。そして、構築システムは先頭 ID から最終 ID までの各イメージプロフィールに対して以下に述べる処理を進める。その際、各処理プログラムはイメージプロフィールから入力ファイル名や処理パラメータを得て、処理結果のファイル名を保存する。

(3)空撮映像は高い解像度で地表面を撮影できるため、フレーム画像中に多数の特徴点を発生することで空間的に密度の高い特徴点群を得ることができる。この特性を利用して、各画像系列に対して特徴点を自動設定し、特徴点追跡を行う図 4.5。(4)得られた 2 次元座標点群(計測行列)から、直下安定の撮影条件を利用した透視投影型の因子分解法[5]により 3 次元集合を獲得する。獲得時には移動物体(主に車両)上の特徴点や誤追跡された特徴点を除去し、位置精度の高い特徴点群を獲得する。得られた計測行列および 3 次元集合は画像系列ごとにイメージプロフィールで管理する。

Back to Main

プロフィールの内容は以下の通りです [変更](#)

Profile ID = [1301_056](#)

/koor/ARUSMAI/tokyo2002.12/Profile/CourseProfile/ImageProfile/1301056.prf

Attribute	Value
General	
Update	Sun Mar 23 20:01:39 2003
Observer	AAC
ImageType	AHVS
CourseNo	2
CameraParameter	AHVS.calib
Sharpness	
Progressive	12p
Tracking	
FeatureTrack	OpneCV-Pyrrn
WindowSize	20
PointsQuality	0.2
MaxDistance	3
InitialFrame	12-08-02-10
Frames	50
FeaturePoints	4986
TrackingScore	
TrackParamFile	1301056.track
InitialImage	1301056.jpg
AMODELER	
InitialFeatures	1301056.ini
GroupFile	

特徴点追跡処理パラメータ

獲得点数

特徴点発生領域

図 4.5 特徴点追跡処理結果の例

(5)地上構造物の位置や大きさはコース上の画像系列の範囲とは無関係であるため、3次元点集合を空間連鎖復元法によって統合し、1コース分の3次元点集合としてシームレスに復元する(図 4.6)。なお、大きな道路や河川がある場合にはオペレータの判断により3次元点集合を分割して復元する。復元処理の結果を保存するためにモデルプロファイルは自動生成され、復元に利用された画像系列を管理するイメージプロファイル ID のリストが保存される。

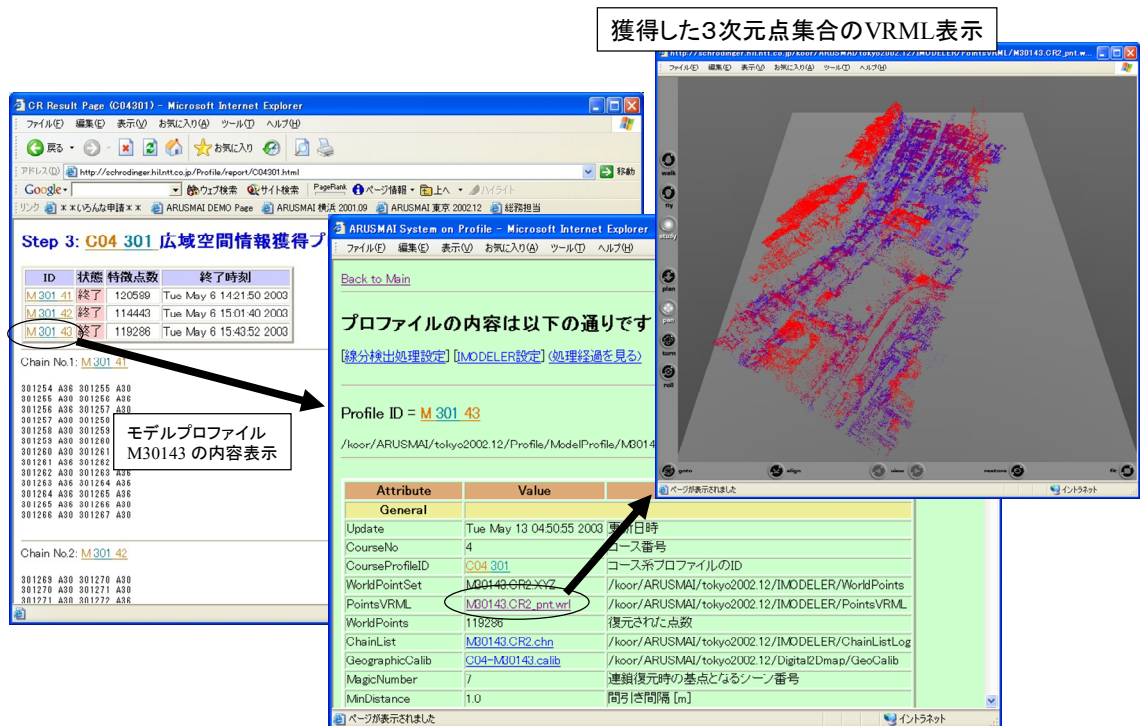


図 4.6 空間連鎖復元処理の実行例

4.2.3.b 建物形状モデルの復元

3次元点集合のシームレスな復元により Step 2 では撮影領域を連続的な一つの市街地構造として復元することができる。BRoC 法では3次元点集合に含まれる同じ高さの3次元点をグルーピングして建物上面を推定する。しかし、画像中の濃淡変化が少ない領域では特徴点が得られず、3次元点が獲得できないため、同一面上の点集合が一つのグループに含まれずに分断されてしまう場合がある。この問題に対しては、高さが同じで同一線分上にある2点は同じ面に含まれるという規則を導入し、フレーム画像から得た線分情報を利用して3次元点集合の欠落領域を補完する手法を用いる[7]。

(6)Step2では最初にイメージプロファイルIDのリストにもとづいて画像系列ごとに線分検出処理を行う。具体的には、各画像系列の中央フレームにおいて、3次元点集合に含まれる特徴点の間で画像上の線分の有無を確認する^{§§}。(7)次に線分情報を利用して第3章のBRoC法により建物形状モデルを復元する。復元時の設定情報はモデルプロファイルから取得する。(8)最後に各上面形状を画像フレームに投影してテクスチャ画像を獲得する。そして、構築システムはGISでの管理に適したメッシュ単位領域に建物形状モデルを分割してテクスチャ画像と共に格納する。同時に、単位領域ごとにブロックプロファイルを生成し

^{§§}一般に呼ばれる線分抽出の処理と異なるため本論文では「線分検出」と呼んでいる。

て形状データのファイル名などの管理情報を記録し、ブロックプロファイルの ID のリストを生成元のモデルプロファイルに登録する。

画像から得られる線分情報は 3 次元点集合の補完に限らず建物形状の復元精度向上に有用な情報である。レンジデータにおいても画像から抽出した線分と組み合わせて建物形状を復元する手法[8]が提案されているが、線分の抽出精度と 3 次元点の位置精度が異なるため、線分と 3 次元点の関連付けを安定して行うことは難しい。提案方式では各特徴点の画像座標はイメージプロファイルで管理された計測行列から取得でき、高さの近い 2 点間において線分の有無を確認すれば良いので、線分と 3 次元点の関連付けは比較的簡単な処理で安定した結果を得られる。また、建物上面のテクスチャ画像を獲得する場合にも、計測行列から上面形状の頂点となる特徴点の 2 次元座標を取得できるため、ずれのないテクスチャ画像を獲得できる。

4.2.4 市街地モデル構築システム

本節ではシステム構成およびオペレータへのインターフェースについて説明する。提案する市街地モデル構築システムの構成を図 4.7 に示す。構築システムはプロファイルと処理経過を出力する HTML ファイル(処理レポート)を生成する。これら 2 種類のファイルを WWW インターフェースによってオペレータに参照可能とすることで、設定情報の管理および処理結果の確認における作業負担を軽減する。

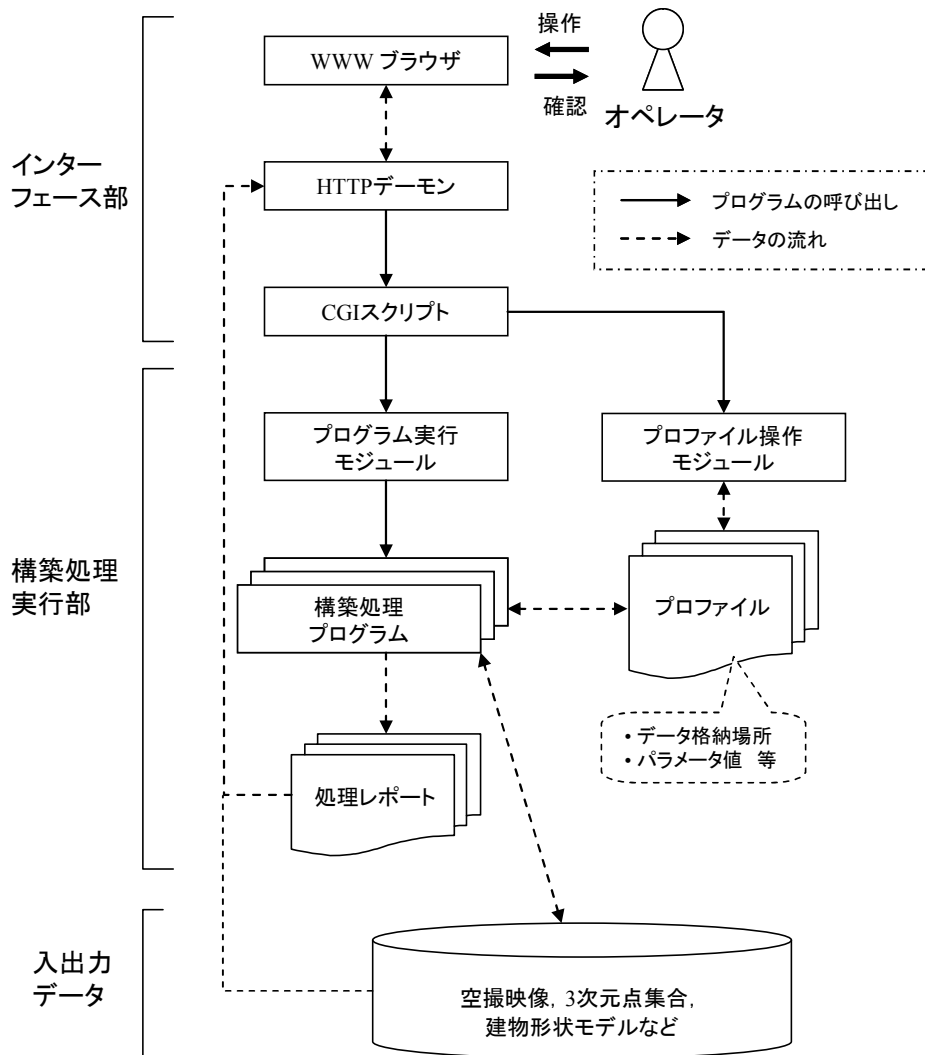


図 4.7 構築システムのプログラム構成とデータの流れ

プロファイル操作モジュールはプロファイルの生成・変更・閲覧・検索・削除の基本機能をオペレータに提供し、全種類のプロファイルにおいて基本機能の操作を共通化している。このモジュールがプロファイル生成時に必要項目の生成とデフォルト値の設定を行うため、オペレータは最小限の設定作業でプログラムの実行が可能になる。一方、プログラム実行モジュールはプロファイルの自動生成を行い、各構築処理プログラムを図 4.2 の処理フローに従って実行する。各プログラムはプロファイルから入力データやパラメータ値を取得し、処理終了後、出力データのファイル名を保存する。そして、あるプログラムが設定した項目を別のプログラムが入力項目として使うことで、各プログラムは連携して処理を行う。

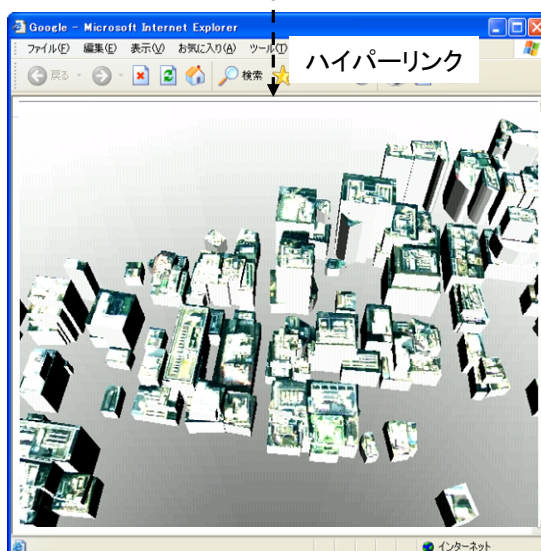
提案システムはボタン一つですべてができ上がるという自動化システムではなく、オペレータが適切なタイミングで確認をしながら構築作業を進められるシステムを目的とする。そのため、画像系列単位および飛行コース単位で 3 次元集合を獲得した時にそれぞれプログラム実行モジュールは構築処理を停止して、オペレータに処理結果を確認する機会を与える。オペレータはプロファイル表示画面から処理結果を確認し、処理結果の品質が低い場合には設定情報を変更して処理を再実行する。プロファイル操作モジュールは WWW ブラウザにプロファイルの内容を表示する際に、プロファイルの設定情報を使って入出力データのファイルを特定し、ファイル名表示部分にデータファイルへのハイパーリンクを付加する(図 4.8)。WWW ブラウザはプラグインによって画像や 3 次元モデルを表示できるため、オペレータはデータ格納場所を意識することなく入力データ(空撮画像)および出力データ(3 次元点集合、建物形状モデル)をすべて WWW ブラウザ上で確認できる。

ModelVRML: M30260_texture.wrl	出力データ(建物形状モデル)のファイル名
Objects: 193	
ProcessingTime: 58.03	

(a) プロファイルの記述内容(一部)

ModelVRML	M30260_texture.wrl	復元された建物形状モデル
Objects	193	復元されたオブジェクトの総数
ProcessingTime	58.03	復元処理に掛かった時間 [分]

(b) WWW ブラウザ上でのプロファイル表示画面



(c) 建物形状モデルの表示画面

図 4.8 WWW ブラウザ上でのプロファイル表示

4.3 市街地モデル構築実験

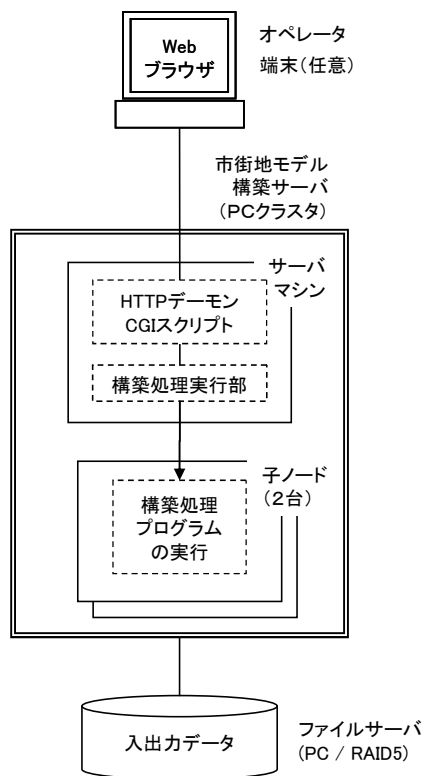
4.3.1 実験概要

本実験の空撮ヘリコプターは高度 300m, 速度 100km/h を維持して直線飛行した。空撮カメラ(焦点距離 15.3mm)は防振機能を持ったスタビライザを介して取り付けられており、直下安定の状態で空撮映像を取得した。本実験で利用した画像系列は 30fps の HD 映像から得た 1920×1080 画素の時系列画像であり、画像フレームごとにレンズ歪みを補正している。

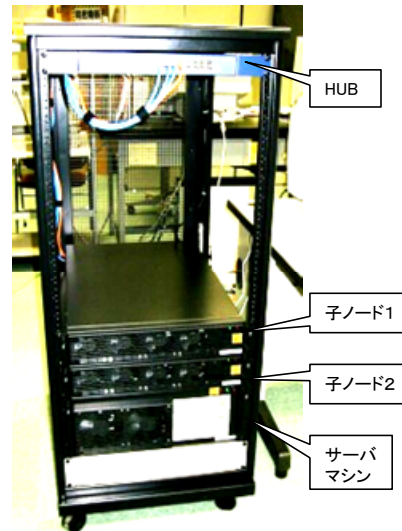
空撮中の平均高度および平均速度からのずれは最大でも 10.34m, 0.93m/s であった。高度の変動によって生じる地上構造物の画像上の拡大／縮小は最大で 3.29%であり、また、一つの画像系列の画像枚数を 80 枚とすると速度変化による撮影距離の伸縮は最大でも $(0.93[\text{m/s}] \times 80 \text{ 枚} / 30[\text{fps}]) = 2.48\text{m}$ である。そのため、一つの画像系列の撮影距離 130m に対して撮影領域の変動はわずかであると見なし、各画像系列の画像枚数を一定(80 枚)とした。

構築実験は 2 つの地区で合わせて約 5 平方キロメートルの地域を対象とした。2 地区の内訳は地区 A が約 1 平方キロメートル、地区 B が約 4 平方キロメートルであり、それぞれ約 1000 軒および約 4000 軒の建物を含んでいる。飛行コースは地区 A で 9 コース、地区 B で 18 コースを設定した。

図 4.9 に実験システムのハードウェア構成を示す。システムの拡張性、低コスト化、近年の CPU パフォーマンスの向上を考慮して、PC クラスタでシステムを構築した。図 4.7 のソフトウェア構成において、構築処理プログラムの実行は計算機の負荷が高いため、高性能な 2 台の子ノード(CPU:Pentium4/2.8GHz, メモリ:1GB, OS:Linux)に処理を振り分けて実行した。一方、プロファイル操作モジュールや HTTP デーモンの処理はサーバマシン上で行い、オペレータへの迅速なレスポンスを確保した。オペレータは作業しやすい端末を任意に選択し、WWW ブラウザを通じてシステムにアクセスした。本システムは全体を 1 台の PC で実現することも可能であり、また、子ノードの追加による拡張も容易である。



(a) システム構成図



(b) 構築サーバ全体図

図 4.9 実験に用いた構築システムのハードウェア構成

4.3.2 建物形状モデルの復元

4.3.2.a 提案方式による復元結果

地区 A の 1 コース分(25 秒間)の空撮映像に Step 1 の処理を適用し, 約 850m×170m の領域を復元した 3 次元点集合を図 4.10 に示す[5]. 図では標高が高い特徴点を濃い色で表している. 図 4.10 の例では 1 つのコースプロファイルから 18 の画像系列およびイメージプロファイルが自動生成され, 169,208 点の 3 次元点集合を復元した. 引き続き Step 2 の処理を行い建物形状モデルを復元した. 画像系列ごとの線分検出結果を連結して図 4.10(b) に示す. 線分情報を利用しない場合(図 4.10(c))では形状が部分的にしか復元できていないが, 提案方式(図 4.10(d))では住宅地図との比較により建物形状を正しく復元できていることが分かる. また, 画像系列間でずれが生じること無く連続的に建物形状モデルが復元されており, 縦横に伸びる街路を明確に確認できる. 比較として空間連鎖復元を行わずに空撮ヘリコプターの測位情報から画像系列単位の 3 次元点集合を連結し, 建物形状モデルを復元する実験も行った. 復元結果では大型建造物の形状にずれが生じたり(図 4.11), 標高方向のずれにより一部の領域で建物がすべて地表面に含まれる状態が生じた(図 4.12).

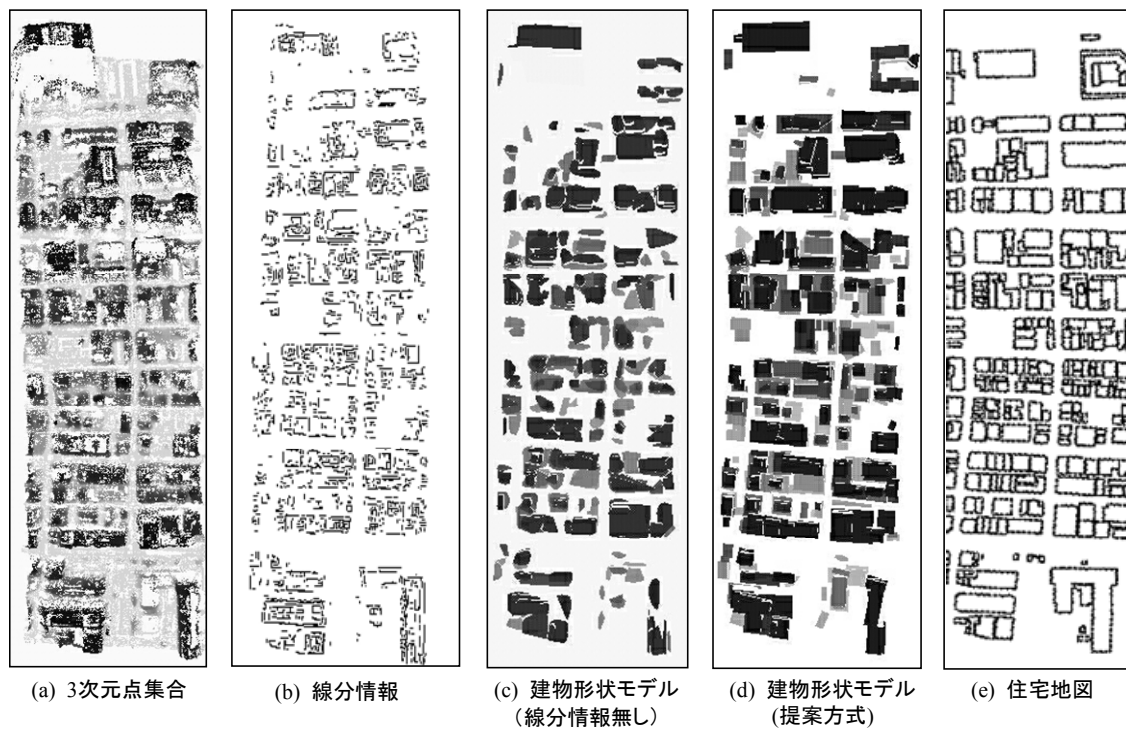


図 4.10 3次元点集合，建物形状モデルおよび住宅地図の比較

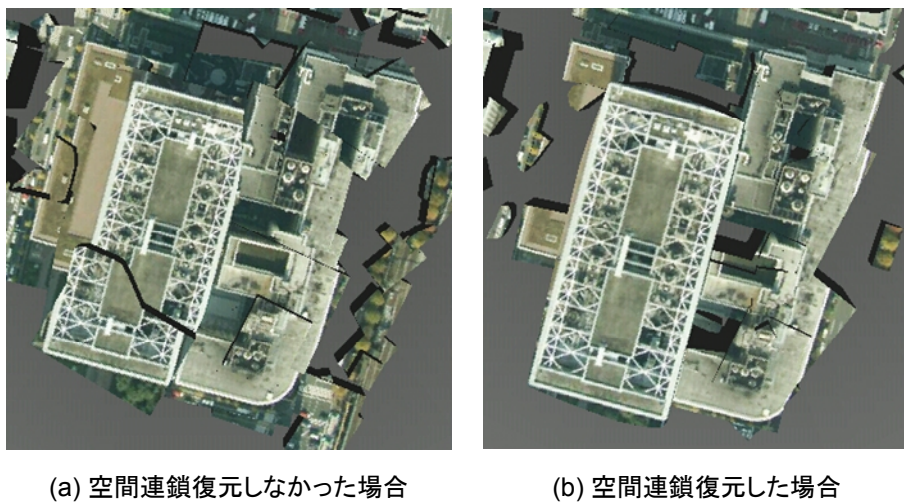
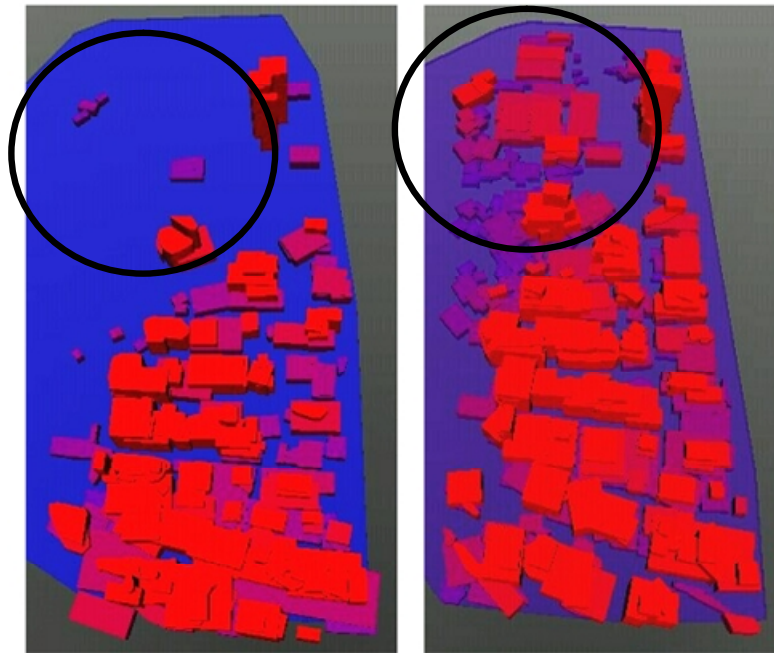


図 4.11 復元形状に対する空間連鎖復元の効果（1）



(a) 空間連鎖復元しなかった場合 (b) 空間連鎖復元した場合

図 4.12 復元形状に対する空間連鎖復元の効果 (2)

続いて空間連鎖復元および線分情報利用の効果について定量的評価を行った。地区 A において住宅地図が入手可能な約 1000m×850m のエリアに対し、図 4.10 のコースを含む 6 コース分の空撮映像を対象に同様の復元実験を行った。評価値としては、復元形状と住宅地図の建物平面形状面積 S_m, S_r およびそれらの重複面積 S_o を求め、適合率 $(100 * \sum S_o / \sum S_m)$ と再現率 $(100 * \sum S_o / \sum S_r)$ の 2 つを用いた。適合率は正解形状からのみ出しが少ないと高い値となり、再現率は正解形状に対して復元された面積の割合が大きいと高い値をとる。

連鎖復元前と連鎖復元後のそれぞれの 3 次元点集合から建物形状モデルを復元し、適合率と再現率を算出した結果を表 4.1 に示す。全体的に適合率が低いのは樹木等の住宅地図には無い地上構造物が存在するためである。

表4.1 建物形状モデルの適合率および再現率

	適合率[%]	再現率[%]
提案方式 E_0	52.08	87.02
連鎖復元無 E_1	45.29	82.79
線分情報無 E_2	58.11	73.43
$E_0 - E_1$	6.79	4.23
$E_0 - E_2$	-6.03	13.59

適合率、再現率ともに連鎖復元無よりも提案方式のほうが高い値を示している。空間連鎖復元により正解形状からはみ出す復元領域が少なくなるため、特に適合率が改善されている。一方、線分情報を利用しない場合に対して提案方式の適合率が6%ほど低下した。これは図 4.10(c) に示したように、線分情報を利用しない場合では部分的にしか復元されなかったために正解形状からはみ出し領域が少ないためである。しかし、提案方式では正解形状の全体を復元できているために再現率は13%以上の向上を示し、87.2%の高い値を達成している。

4.3.2.b レーザレンジデータとの比較

レーザレンジデータに BRoC 法を適用した場合と提案方式の比較を図 4.13 および図 4.14 に示す。図 4.13(a)のレーザレンジデータは0.5m 間隔で格子状に標高が計測されており、異常な標高値は事前に除去されている。3次元点集合(図 4.13(b))はレーザレンジデータと異なり特徴点の分布が画像のテクスチャに依存しているが、形状周辺部に特徴点が多いため建物の上面形状を認識できる。レーザレンジデータからの復元結果(図 4.13(d))と図 4.13(e)および図 4.14 の結果から、提案方式ではレーザレンジデータと同程度の復元結果が得られていることが分かる。さらに提案方式では復元形状と整合性の高いテクスチャを形状情報と同時に獲得でき、形状のリアリティを高めている。参考に、線分情報を利用しない場合(図 4.13(f))では形状を部分的にしか復元できておらず、線分情報を利用することでより正しい形状が得られることが理解できる。

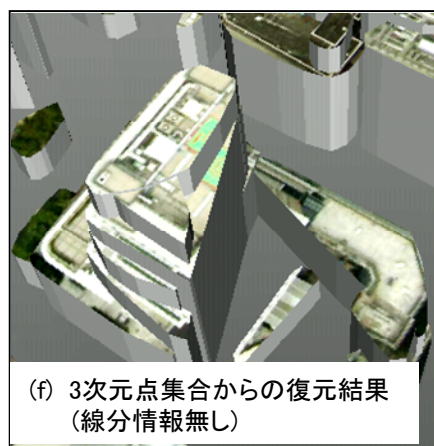
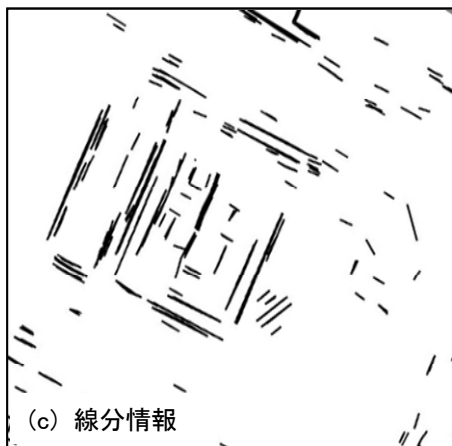
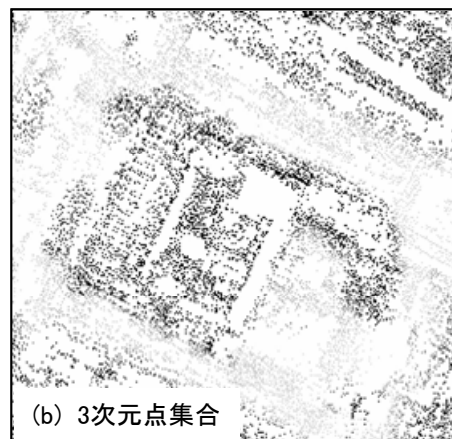
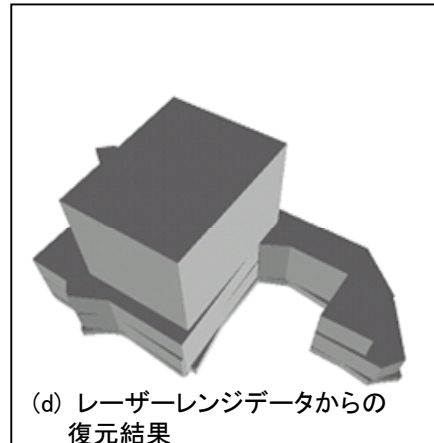
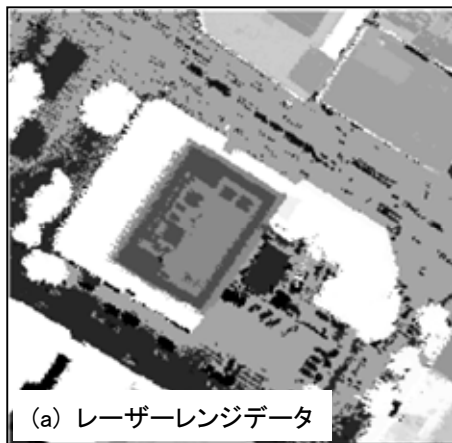
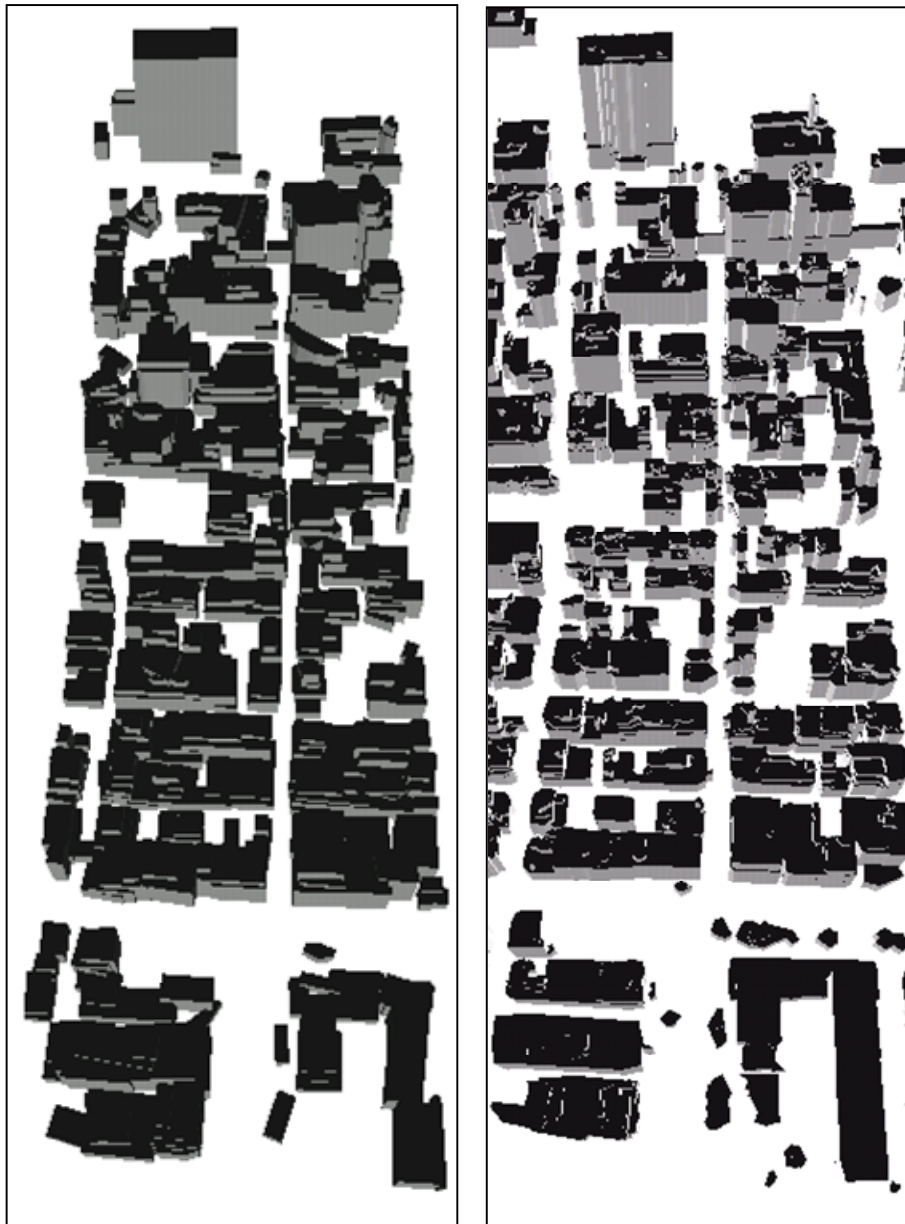


図 4.13 レーザーレンジデータから復元したモデルとの比較



(a) 3次元点集合からの
復元結果

(b) レーザーレンジデータ
からの復元結果

図 4.14 レーザーレンジデータから復元した建物形状モデルとの比較 (飛行コース単位)

さらに、3次元点集合とレーザレンジデータのそれぞれから BRoC 法で復元した形状モデルに対し、レーザレンジデータを正解データとして 3次元形状品質の定量的な評価を行った。レーザレンジデータの各計測点を $0.5\text{m} \times 0.5\text{m}$ の上面を持つ角柱と見なし、復元形状

とこの角柱集合の体積 V_m 、 V_r およびそれらの重複部分の体積 V_o を求め、3次元形状に対する適合率($100 * \Sigma V_o / \Sigma V_m$)と再現率($100 * \Sigma V_o / \Sigma V_r$)を百分率で算出した(表 4.2)。

表4.2 レーザレンジデータを正解データとした場合の適合率および再現率

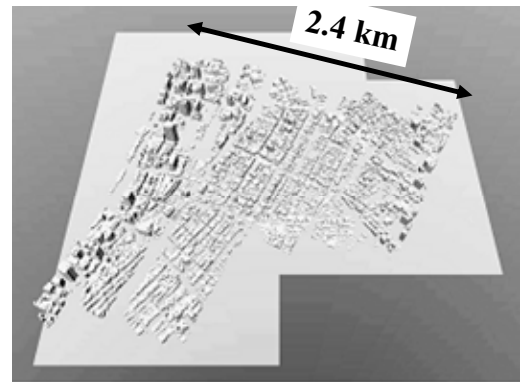
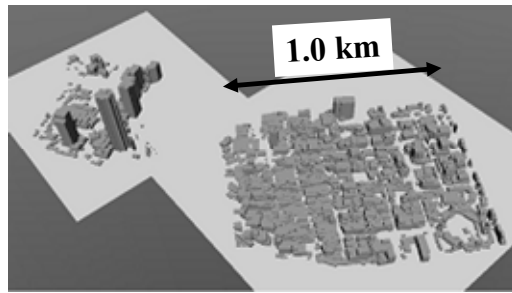
	適合率[%]	再現率[%]
提案方式 F_0	77.83	78.27
DSMからの復元結果 F_1	84.20	73.22
$F_0 - F_1$	-6.37	5.05

レーザレンジデータには地上の3次元構造物がすべて計測されているため、住宅地図と比較した場合(表 4.1)と異なり、適合率も高い値を示している。レーザレンジデータからの復元結果に対し、提案方式では適合率において6%程度の低下が見られるが、再現率では逆に5%向上している。図 4.14 からわかるように、本提案方式のモデルが、レーザレンジデータからのモデルに比べてやや大きめなモデルが生成されたためこのような結果になったと考えられる。

4.3.3 市街地モデルの構築結果

地区 A,B において構築した全域の市街地モデルを図 4.15 に示す。構築結果では個々の建物形状が復元されているだけでなく、それらが一体の市街地構造を形成しているため、街路などの線状構造、高層ビル街、低層ビル密集地帯等が明確に確認できる。ここにテクスチャをマッピングすることで市街地の3次元景観を再現できていることが分かる。復元結果の詳細を図 4.16 および図 4.17 に示す。

テクスチャ無し



テクスチャ有り



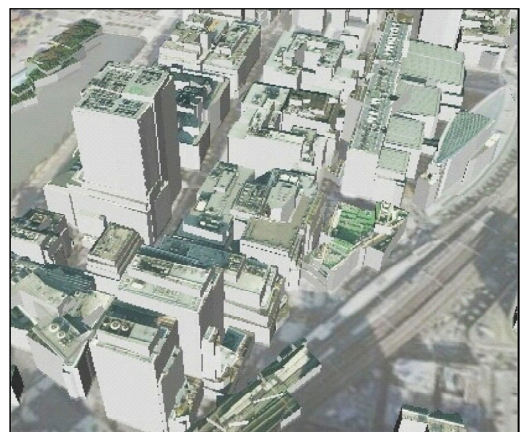
(a) 地区A

(b) 地区B

図 4.15 市街地モデル構築結果



(a) 地区A



(b) 地区B

図 4.16 大規模構造物の復元例

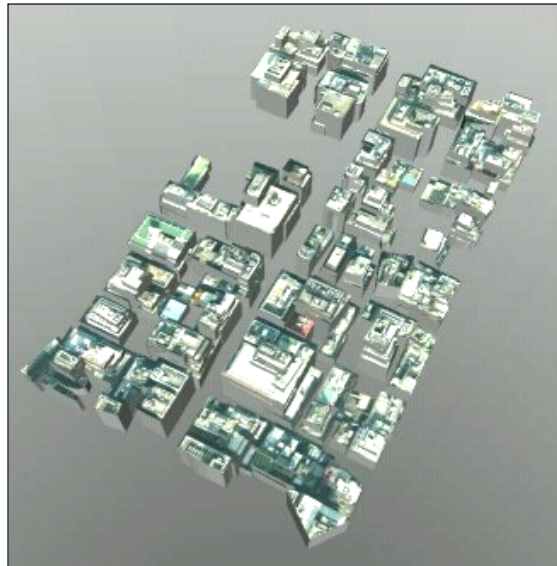
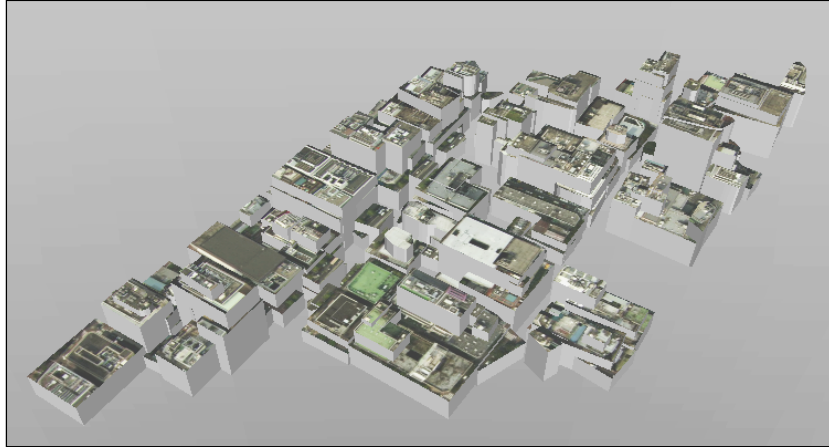


図 4.17 低層のビルが密集するエリアの復元結果

地表面モデルのテクスチャには航空写真を用いた。復元した建物形状モデルと地表面のテクスチャは良く整合しており、モデル全体に歪みが生じていないことが確認できた。なお、航空写真を使わずに空撮映像からオルソモザイクを生成して利用することも可能である[9]。

各地区の構築処理において生成されたデータおよび処理時間を表 4.3 にまとめた。処理時間については、2 地区合計で約 5 平方キロメートルの市街地モデルを 10 日で構築できた。構築処理は Step 1 では飛行コースごと、Step 2 では 3 次元点集合ごとに独立しているため、オペレータは他の領域の処理が終了するのを待たずに処理を開始できた。そのため、常に子ノード 2 台をほぼ 100%稼働させた状態で構築処理を進めることが可能であった。

表4.3 生成されたデータと処理時間

地区名	A	B	合計
構築面積 (km ² , 概算)	1	4	5
コース数	9	18	27
3次元点集合の点数	1,196,038	7,037,858	8,233,896
建物形状モデル数	2,127	11,095	13,222
処理時間(時間)	56.5 (2日と8.5時間)	181.0 (7日と13.0時間)	237.5 (9日と21.5時間)

両方の構築エリアについて図 4.2 に示した各処理に必要とした時間を図 4.18 に示す. この結果から, 処理時間の 80% 以上を 3 次元点集合の獲得処理で占めていることが分かる.

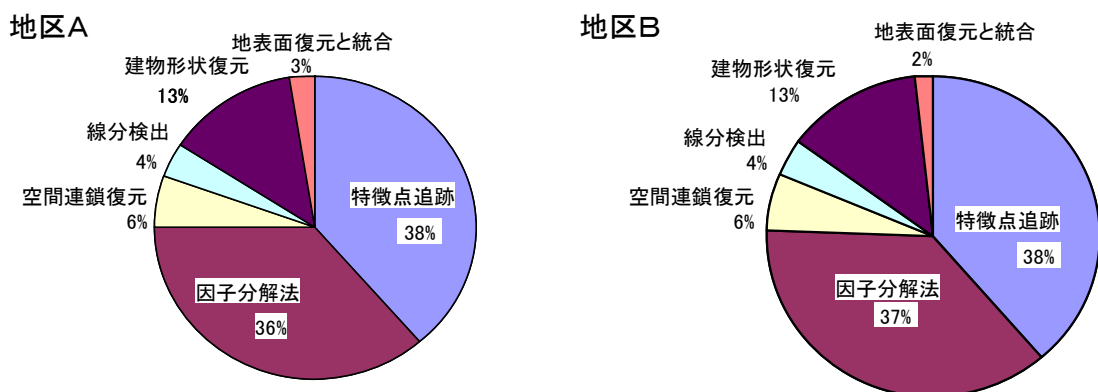


図 4.18 市街地モデル構築処理時間の内訳

4.3.4 オペレータの作業

構築処理で利用された設定情報の量はプロファイル数と各プロファイルの設定項目数によって示すことができる. 各プロファイルは設定項目が定義付けされており, その項目数は固定である. 2つの地区の構築実験で使われたプロファイル項目数を表 4.4 に示す. 今回の実験ではコースプロファイルにおいて処理開始および終了の画像フレームだけが必須の入力項目であり, 他の項目は自動設定された. 4.2.3 節で述べたプロファイルの自動生成機能により, イメージプロファイルはコースプロファイルに対して約 30 倍の 1000 個近い数が生成された. なお, コースプロファイルよりもモデルプロファイルの数が多いのは大きな道路や河川で 3 次元点集合を分割して建物形状モデルを復元したためである.

表4.4 構築処理で利用された設定情報

プロファイル種別	ファイル数	項目数	総項目数
コースプロファイル	33	25	825
イメージプロファイル	952	34	32,368
モデルプロファイル	61	39	2,379
ブロックプロファイル	160	7	1,120

構築作業は、PC の利用経験はあるが画像処理やコンピュータビジョンの専門知識を持たないオペレータ 1 名によって実施した。Step 1 と Step 2 の作業を以下の項目に分割して作業時間の見積もりを行った。なお各作業の詳細は文献[10]に譲る。

Step 1-1 : 特徴点追跡処理の実行

Step 1-2 : 画像系列単位の 3 次元点集合の獲得処理の実行

Step 1-3 : 空間連鎖復元処理の実行

Step 2-1 : 建物復元処理の実行

Step 2-2 : 復元結果の確認と再実行

本システムでは作業時間よりも処理時間の方が圧倒的に長いため、オペレータは 1 時間程度の説明後すぐに Step 1-1 を実施し、処理実行中に他の作業の説明を受けることができた。他の作業項目に対してはそれぞれ 30 分程度の説明を行った。

2 地区合計の作業時間を表 4.5 にまとめた。

表4.5 オペレータの作業時間

Step	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	合計
回数 N	33	102	33	61	8	229
作業時間 (分)						
1回分 T	5	3	2	3	2	15
$N \times T$	165	306	66	183	16	736

総作業時間は 736 分(約 12 時間)となり、1 日平均では 1 時間 14 分であった。Step 1-2 以外の作業はコースプロファイルもしくはモデルプロファイルに設定情報を入力して実行ボタンを押すだけの作業であり、約 10 日間の処理時間と比較してわずかな回数で済んでいる。Step 1-2 の処理結果では画像系列に交通量の多い道路や裸地が含まれると、自動設定された処理パラメータでは獲得精度が不十分な場合があった。これに対し実験システムで

は獲得処理終了時の処理レポート表示画面において獲得精度の確認，設定の変更，処理の再実行を画面上で可能にした(図 4.19)．その結果，Step 1-2 の作業回数は増加したが全体の作業時間は抑えることができた．

獲得処理を再実行する
画像系列の選択

イメージ
プロファイルID 処理結果の確認 設定の変更

ID	状態	特徴点数(追跡後)	特徴点数(獲得後)	獲得精度	終了時刻	処理時間(分)	再実行	モデル	閾値 (gamma)
I 301 051	終了	8308	8308	1.80	Tue Mar 25 11:18:45 2003	14.9	☐	A3	4.0
I 301 052	終了	8520	8520	12.56	Tue Mar 25 11:32:40 2003	13.9	☒	A3	2.5
I 301 053	終了	7914	7914	3.00	Tue Mar 25 11:45:30 2003	12.8	☐	A3 A36 A37	4.0
I 301	終	8170	8170	2.14	Tue Mar 25	16.0	☐	A3	4.0

図 4.19 3次元点集合の獲得処理終了時の結果一覧表示

4.4 考察

4.4.1 構築方式について

図 4.10 および表 4.1 の結果から，提案方式は空間連鎖復元および線分情報の利用によって建物形状モデル全体の復元精度を向上させており，住宅地図との比較から，市街地景観の再現に十分な建物形状モデルを復元することができた．一例として図 4.13 では中央部に画素値が一樣で特徴点を取得できない領域があったが，線分情報を利用することにより建物上面の特徴点が一つのグループとして認識されてレーザレンジデータを利用した場合と同等の復元結果を得ることができた．また，表 4.2 の 3次元形状に対する定量的な評価結果に関しても，一般に適合率と再現率はトレードオフの関係にあるため，適合率の低下分と再現率の向上分がほぼ同じであることから，提案方式は総合的にレーザレンジデータからの復元結果と同程度の品質の 3次元形状モデルを復元できると言える．よって，図 4.14 の結果と合わせ，3次元点集合と線分情報を組み合わせて利用することにより，空撮映像か

らレーザレンジデータと遜色のない建物形状モデルの復元が可能であると考えられる。

次にコース間の接続について考察する。提案方式では3次元点集合および建物形状モデルを世界測地系上に配置することで飛行コースごとのデータを接続している。図 4.15 の構築結果により大局的には高い整合性を持っていることを確認できた。しかし、空撮ヘリコプターの測位誤差により飛行コース間でずれが生じる場合もあった。対策として、全コースの3次元点集合を ICP[11]などの手法によってシームレスに連結した後、道路や河川などの線状構造物で分割することが考えられる。しかし、そのような構造を見つけるには一度は建物形状モデルの復元が必要となる。処理上の観点では、Step 1 から Step 2 の処理が飛行コース間で独立していれば並列実行が可能であり、PC クラスタを利用したシステムにおいて構築時間を短縮できる。つまり飛行コースごとの復元はデータ管理の容易性から見ても現実的な選択であり、ヘリコプター測位とカメラ位置のキャリブレーション精度向上によって飛行コース間のずれを解消することが望ましい。

4.4.2 構築システムについて

5 平方キロメートルで 10 日間という構築時間は、平常の市街地建物の変化速度を考慮すれば、コンテンツ生成に対する時間的制約は緩く、方式やシステムの実現性に問題はないと考える。しかし、都市部全域を構築したい場合や災害時の被害把握などではシステムの構築性能に対する要求が高くなる。これに対し、(1)今回の実験システムは PC クラスタとして最小の構成であり、子ノードの追加によってシステムの処理能力を容易に拡大できる、(2)提案方式はコース単位で独立に作業および処理を行うことができる、(3)現状のオペレータの作業量は 1 日約 1 時間であり、まだ十分な余裕がある。以上の 3 点から、本論文で提案した構築方式および構築システムにより、数十平方キロメートル規模の市街地モデルが実用的な時間内で構築可能であると言える。

次に表 4.4 に示した設定情報の量について考察を行う。設定情報は人的管理が不可能な量であり、プロファイルによる設定情報の管理機構およびプロファイルの自動生成機能が無ければ構築処理はしばしば中断せざるを得なかったと考える。例えば、設定情報の確認に時間がかかり処理の開始が遅れる、設定を間違えることで構築済みの領域を破壊する、など構築時間に大きな影響を与える事態の発生が予想される。また実験では本システムの特徴として、作業量低減という面の他にオペレータの作業環境改善という面も明らかになった。提案システムでは図 4.19 の処理レポートによって処理経過を常時確認でき、かつ、すべての作業を WWW 画面上で実施できる。WWW ブラウザの起動・終了はシステムの処理に影響がなく、WWW ブラウザが動作する任意の端末からプロファイルにアクセスできる。そのため、オペレータは一つの端末の前で待機する必要が無く、作業の時間と場所を自由に選択できた。

最後に他システムとの比較として、代表的な半自動構築システムである CC-Modeler[1]では 1 名の熟練オペレータが 1 日に 500 オブジェクトを作成可能である。これに対し、本システムはそれまで作業経験の無かったオペレータが 1 日約 1 時間の作業で 2.6 倍の構築

性能を達成しており、ハードウェア性能の改善によりさらに性能を向上させることができる。ただし、CC-Modeler ではオペレータの教示情報によって自動処理を行う本システムよりも品質の高い形状モデルを復元しており、利用されるアプリケーションやコストによってシステムを選択すべきである。

4.5 まとめ

本章では、空撮映像から市街地モデルを自動構築する方式およびシステムを提案した。提案方式では、シームレスな 3 次元点集合を線分情報と組み合わせることにより、レーザレンジデータから復元した場合と同等の、市街地景観の再現に十分な建物形状モデルを復元することができた。構築システムはデータの処理単位ごとに 4 種類のプロファイルによって設定情報を管理し、プロファイルの自動生成機能により簡易な設定操作および少ない作業量で広域の構築作業を可能にした。実験では作業経験の無い 1 名のオペレータによって、PC2 台 10 日間の処理で約 5 平方キロメートルの市街地モデルを構築し、処理コストおよびオペレータ作業量の両面において、数十平方キロメートル規模の構築が可能であるとの見通しを得た。

これまで空撮システムの普及および発展が図られていながら、空撮映像は単なる状況確認や放送用のコンテンツとしてしか利用されていなかった。本システムにより既存の空撮システムを市街地の 3 次元モデル構築手段として利用することができ、本研究の重要性は大きいと考える。一方、市街地モデルの 3 次元コンテンツとしての利用を考えるとテクスチャを始めとする建物側面情報のニーズが高く、地上からの市街地情報獲得システムも多数提案されている[12]。そのため、広域のモデル構築が可能な上空系アプローチの長所を活かしながら地上系システムとの連携を検討していく必要がある。

第4章参考文献

- [1] A. Gruen, X. Wang, "CC-MODELER: A TOPOLOGY GENERATOR FOR 3-D CITY MODELS", ISPRS Journal, vol. 53, no. 5, pp.286-295, 1999.
- [2] A. J. Heller, P. Fua, C. I. Connolly, "The Site-Model Construction Component of the RADIUS Testbed System", Proc. of ARPA, pp.345-356, 1996.
- [3] 朝日航洋, "空中ハイビジョン映像計測システム AHVS", http://www.aeroasahi.co.jp/spatial/gizyutu/3d_06.html.
- [4] A. J. Shufelt, "Performance Evaluation and Analysis of Monocular Building Extraction From Aerial Imagery", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 21, no. 4, pp.311-326, 1999.
- [5] 宮川勲, 石川裕治, 若林佳織, 有川知彦, "空撮映像からの透視投影型因子分解法による空間連鎖復元", 電子情報通信学会論文誌, vol. J87-D-II, no. 4, pp.942-957, 2004.
- [6] 国土地理院, "日本の測地座標系", <http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/datum/>.
- [7] 石川裕治, 宮川勲, 若林佳織, 有川知彦, "線分制約を取り入れた3次元点集合からの建物モデル復元手法", pp.61-62, 2003.
- [8] I. Stamos, K. P. Allen, "3-D Model Construction Using Range and Image Data", Proc. of CVPR 2000, pp.531-536, 2000.
- [9] E. M. R. Z. Zhu, A. R. Hanson, "Parallel-Perspective Stereo Mosaics", Proc. of The Eighth IEEE International Conference on Computer Vision, pp.345-352, 2001.
- [10] 石川裕治, 宮川勲, 若林佳織, 荒川賢一, "少人数・非熟練オペレータによる広域な市街地空間モデルの自動構築システム", 2004.
- [11] P. Besl, N. McKay, "A method of registration of 3-D shapes", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 14, no. 2, pp.239-256, 1992.
- [12] "情処研報 2004-CVIM-142: テーマ「街を観る(2)街のモデル化と視覚化」", 2004.

第5章 レーザレンジデータからの市街地モデル構築

本章では、レーザレンジデータから建物平面形状を抽出する手法を提案し、第3章で提案した BRoC 法に基づいて建物形状の復元を行い、広域の3次元市街地モデルを構築する方式を提案する。そして、第4章で構築実験を行った市街地領域を対象にモデル構築実験を行い、レーザレンジデータからも広域の市街地モデルを自動で構築可能であることを示すと共に、処理時間や復元精度について実用可能性の評価を行う。

5.1 レーザレンジデータからの広域市街地モデルの構築に向けた

課題と提案の概要

近年、レーザプロファイラの性能向上が急速に進み、広範囲かつ高密度なメッシュ状の標高データとしてレーザレンジデータを取得できるようになってきており[1]、市街地モデル構築への利用が研究されている[2-4]。レーザレンジデータからはテクスチャ情報を得ることはできないが、画像系の情報収集に比べて以下のようなメリットがある。

- (7) 夜間や真夏等の照明環境が悪い場合においてもデータ取得が可能であり、取得タイミングの自由度が大きい
- (8) 樹木等の3次元情報を除去したデータを得ることが可能
- (9) 高さ情報をメッシュ状に直接的に計測できるため、高密度な3次元点集合の生成が容易

本研究では項番(3)の特徴に着目し、レーザレンジデータに対しても BRoC 法を適用して、建物形状復元を行うことを検討する。

第3章での検討内容が示すように、空撮映像から得られた3次元点集合を利用する場合には、点の密度が一定でないことが大きな問題であった。一方、レーザレンジデータに対して BRoC 法を適用する場合には、メッシュ状に3次元点集合がそろっていることから、レイヤとクラスタの生成は比較的容易に可能であると考えられる。特にクラスタ生成に関しては同一レイヤ内に含まれる3次元点を水平面における2値画像と見なし、隣接関係に基づく領域分割を行えば容易にクラスタの分割を得られる。その一方で、建物上面の輪郭部分ではレーザが散乱しやすいため計測誤差が比較的大きいという問題がある。これに対してレーザレンジデータを航空写真[5, 6]や地図情報[7]と組み合わせる手法が提案されているが、このような外部情報の利用によりデータ間の位置ずれやモデル構築のコスト増加などの問題が生じてしまう。

そこで、本研究では BRoC 法の復元プロセスにおいてクラスタが得られた後、各クラスタから建物上面の平面形状を抽出するステップに焦点を絞って検討を行う。具体的には、クラスタの輪郭を形成する点列（エッジ点列）を階層的クラスタリングによってグループ分けを実施し、各グループから線分を抽出して多角形を得る手法を提案する。グループ分けのプロセスにおいては空撮映像を利用した場合と同様の考え方に基づいて、MDL 基準を利用した評価関数を定義し、簡潔性と適合性の2つの評価基準のバランスを取ることで、クラスタリング結果を選択する。

実験では、住宅地図を正解データとして簡潔性と適合性の両面から提案手法の有効性を定量的に評価し、少ないデータ量で正解形状に高い適合性を持った形状を復元できることを示す。続いて 6.4 平方キロメートルの市街地モデル構築実験を行い、データ量の削減効果を確認するとともに、処理時間の面から広域市街地モデルの自動構築が実用上可能であることを示す。

5.2 建物平面形状の抽出手法

5.2.1 建物形状復元の流れ

レーザレンジデータからの建物の3次元形状復元の概要を、BRoC 法におけるクラスタが1つだけ得られた場合を例に挙げて、図 5.1 に従って説明する。入力データであるレーザレンジデータの例を図 5.1(a)に示す。最初に、クラスタ輪郭部の点（エッジ点）を抽出して建物上面の輪郭を得る（Step 1, 図 5.1(b)）。そして、次節で述べる方法によりエッジ点の列をグループ分けし、各グループから線分を求めて連結することで初期の建物平面形状を得る（Step 2, 図 5.1(c)）。次にエッジ点のグループを段階的に統合することで形状を簡素化する。統合の各段階で得られる形状を MDL 基準により評価して、最適な形状を選択する（Step 3, 図 5.1(d)）。最後に、抽出した建物平面形状に対して形状内部の高さの平均値を算出し、柱状の3次元形状モデルを復元する（Step 4, 図 5.1(e)）。

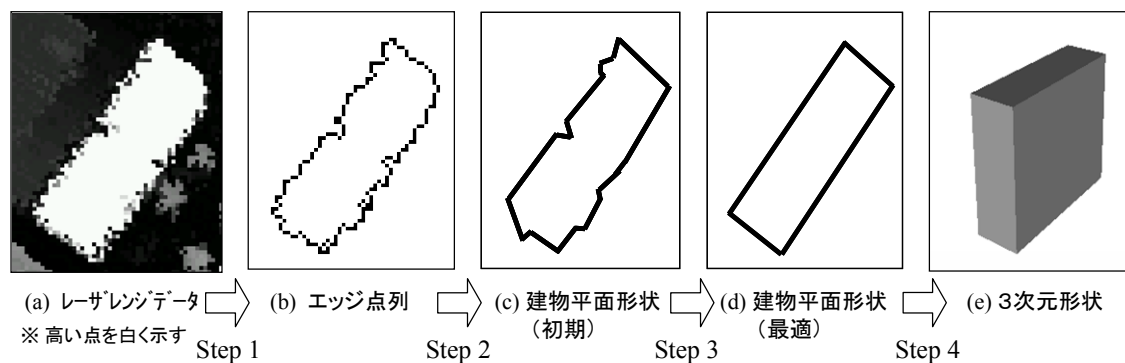


図 5.1 建物の3次元形状復元の流れ

以下では提案内容の主要部分である Step 2 と 3 の処理を詳細に説明する。

5.2.2 エッジ点の分類による初期形状の生成

以下の説明では、クラスタ外部の点を地上点と呼ぶ。2つの地上点に隣接するエッジ点（以下、着目エッジ点と呼ぶ。図 5.2）では点列の向きが変わることが多く、線分で構成される形状の抽出には重要な特徴となる。文献[3]では地上点との隣接関係から着目エッジ点を 4 種類に分類して同じ種類のエッジ点を集め（図 5.2(a)）、各グループから線分を抽出後、線分を連結して建物平面形状を抽出している。しかし実際の市街地から計測したレーザレンジデータでは図 5.2(b)のように、エッジ点列全体としては直線的な構造を持っていたとしても細かい部分では多数の凹凸が存在する。例えば図 5.2 において、(a)では着目エッジ点のグループ分けは容易であるが、(b)では困難であり、文献[3]の方法を単純に適用できない。

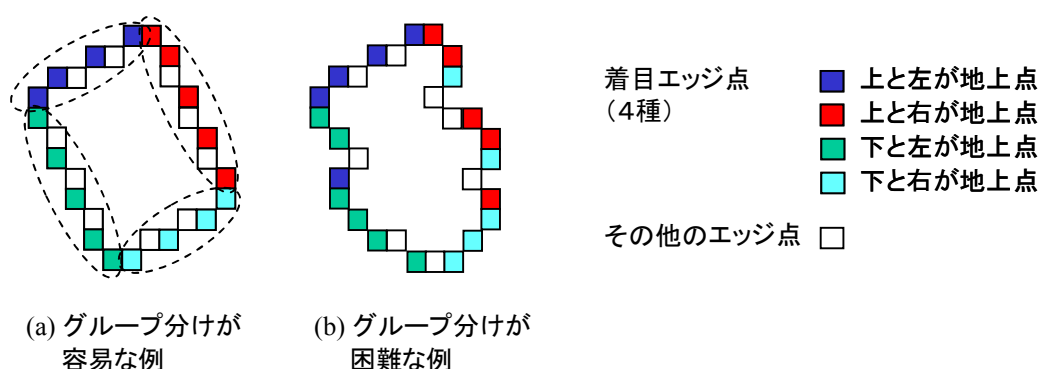


図 5.2 エッジ点の分類

本手法では着目エッジ点の分類結果およびエッジ点の連結関係にもとづいて、すべてのエッジ点を 4 種に分類し、その後、線分の抽出および連結を行う。具体的に Step 2 の処理は以下のようなになる。

Step 2-1: 文献[3]の方法(図 5.2)で着目エッジ点を 4 種に分類する

Step 2-2: 任意に選択した着目エッジ点から、エッジ点が並んでいる順

$p_1, \dots, p_n, p_{n+1}(=p_1)$ に走査していき、 p_i が未分類であるならば p_{i-1} と同じ分類とする。

Step 2-3: 同じ種別で連続しているエッジ点集合を一つのグループにする。なお、エッジ点を一つしか含まないグループ $\{p_i\}$ は p_{i+1} が属するグループに含めておく。

Step 2-4: 各グループから線分を抽出し、グループの並び順に連結することで、(仮

の) 建物平面形状を得る(図 5.3).

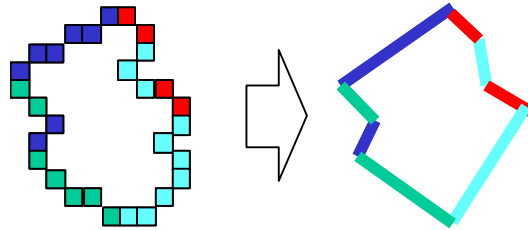


図 5.3 エッジ点のグループ分けによる形状抽出

Step 2-4 における建物平面形状の生成方法を具体的に説明する。各グループから直線を抽出し、その交点を建物平面形状の頂点とすると、隣接する直線の傾きが近い場合には交点の位置がエッジ点から大きく離れてしまう場合がある(図 5.4).

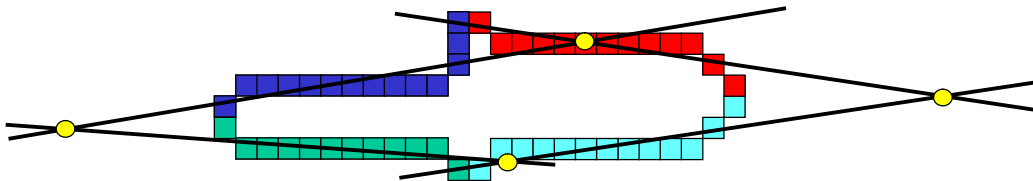


図 5.4 抽出線分の交点を建物平面形状の頂点とした場合

そのため、提案手法では以下に示す方法で頂点を決定する(図 5.5)

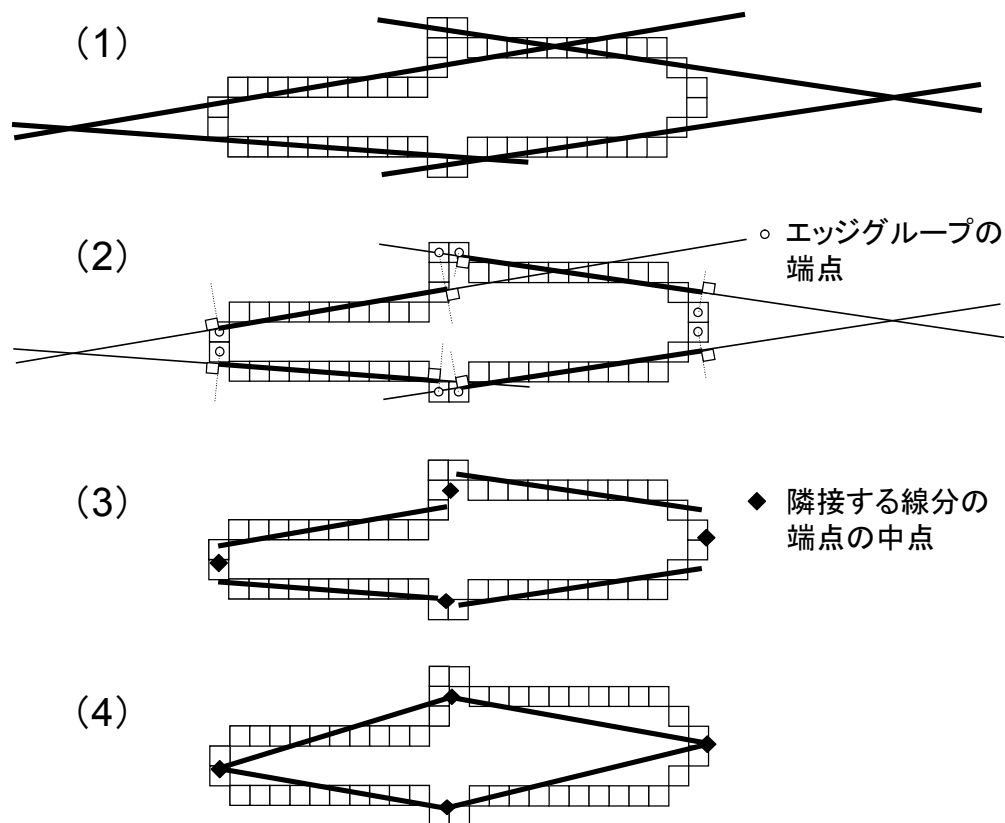


図 5.5 Step 2-4 の線分連結方法

- (1) 各エッジグループから最小二乗法によって直線を抽出する
- (2) 各エッジグループの両端の点から抽出直線に垂線を引いて直線を切断し、線分を得る
- (3) 隣接する線分において端点の midpoint P を求める
- (4) P で線分を連結する (つまり、 P を建物平面形状の頂点とする)。

Step 2 ではすべてのエッジ点の連結性を保持したままグループ分けするため、線分の抽出および連結が容易であり、異常な形状を生成することがない。

5.2.3 エッジ点グループの段階的統合と最適形状の選択

Step 2 で得られた建物平面形状は細かい線分の集合であるため、Step 3 ではエッジ点グループを段階的に統合し、各段階で生成した形状の中から最適な形状を選択する。点列から最適な形状を抽出するには、点列に対する抽出形状の評価関数をどのように定義するか、そして、評価を最大にする形状をどのように探索するか、という 2 つの課題がある。本研究における、それぞれの課題に対する提案を 5.2.3.a 節および 5.2.3.b 節で説明する。

5.2.3.a 抽出形状の評価関数

抽出形状の「良さ」には頂点数（＝簡潔性）と点列に対するずれ（＝適合性），という 2 つの評価項目がある．頂点が多い形状の方が点列に対するずれを小さくできるため，一般に両者は相反する評価項目となっている．多くの既存研究[8-11]では片方の評価項目に上限を設定し，他方を最小化することを目的としている．しかし市街地における建物形状の複雑度は様々であり，さらにエッジ点列の位置情報に誤差が含まれていることから，適切な上限を統一的に設定することは困難である．

本研究では第 3 章と同様に MDL 原理を採用し，簡潔性と適合性の 2 つの評価項目を符号長という統一尺度で定式化することで両者を反映した評価関数を定義し，バランスの取れた最適化を図る．以下，「モデルを記述するための符号長 M_m とそのモデルを使って記述したデータの符号長 M_d の和」である MDL 基準 $M(=M_m+M_d)$ を抽出形状の評価関数とし，符号長 M_m および M_d を示す．なお，いずれも導出は本論文の付録 B に示す．

m 個の頂点からなる抽出形状を n 個のエッジ点に対する記述モデルと考えると，モデルの符号長 M_m は式(5.1)となる．

$$M_m = m \ln n \quad (5.1)$$

この値が抽出形状の簡潔性の評価値となる．

一方，データ（＝エッジ点）はモデル（＝抽出形状）からのずれとして符号化され，その符号長が抽出形状の適合性を示す．「ずれ」の定義としては「各エッジ点と抽出直線の距離」が考えられるが，その定義では図 5.4 に示したように，建物平面形状の頂点の位置がエッジ点から大きく離れても最適な形状と判断される場合がある．これに対し，本研究では「ずれ」を「エッジ点の各グループ G_j と輪郭形状の辺（線分）の間のずれ」とし， G_j に含まれるエッジ点 p_i の線分からのずれ d_i を図 5.6 のように定義する．

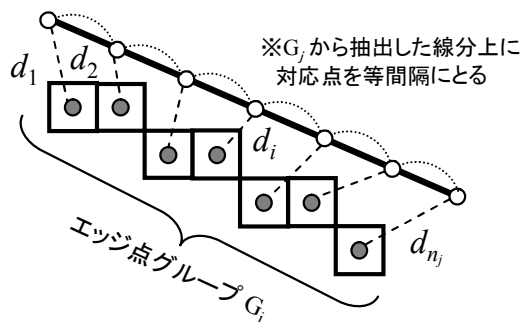


図 5.6 エッジ点の線分からのずれ d_i

各ずれ d_i は絶対標準偏差 σ の指数分布に従うと仮定する．指数分布は $(1/\sigma)\exp(-x/\sigma)$ で表され，正規分布よりもデータの外れ値による影響が少ないとされる[12]．このとき，データの符号長 M_d は式(5.2)となる．

$$M_d = \frac{1}{\sigma} \sum_{j=1}^m \sum_{p_i \in G_j} d_i \quad (5.2)$$

よって，抽出形状の評価関数となる MDL 基準 M は以下のようになる．

$$M = M_m + M_d = m \ln n + \frac{1}{\sigma} \sum_{j=1}^m \sum_{p_i \in G_j} d_i \quad (5.3)$$

本手法の利用者は σ の設定値を変更することにより， M_m （＝簡潔性）と M_d （＝適合性）の重みを変えることができる．例えば σ が大きな場合，点のずれ d_i が増加しても M_d の増加は緩やかであるが， M_m の値（つまり頂点数 m ）の増加が M に大きな影響を与える．つまり，ずれの標準偏差 σ を（例えば）大きくすることで，大きなずれを許容し，より簡素な形状を得られる．以下， σ を簡素化パラメータと呼び，5.3.3.b 節では実験結果に基づいて σ の設定例を示す．

5.2.3.b 形状の生成と選択

Step 2 で抽出される建物平面形状は多数の線分によってエッジ点列を詳細に近似している．そのため， M_d は小さいものの M_m が大きく， M が最小化されているとは限らない．しかし，削減する頂点の選び方は指数オーダであるため最適解の全探索は実用的とは言えない．Step 3 では，階層的クラスタリング[13]を用いた手法によりエッジ点のグループを段階的に併合して， M の最小化に関する準最適解を見つける．具体的な手続きを以下に示す．

Step 3-1： Step2 で得られたエッジ点グループの集合 $\mathbf{G}(m) = \{G_1, \dots, G_m\}$ に対して以下を行う

- ① $j = 1, \dots, m$ に対して， G_j と G_{j+1} を併合した場合の MDL 基準 $M(m, j)$ を求める(ただし $G_{m+1} = G_1$)．
- ② $M(m, j)$ が最小となる $j = j_{min}$ に対して， $G_{j_{min}}$ と $G_{j_{min}+1}$ を併合し $m = m - 1$ とする．
- ③ $M(m) = M(m, j_{min})$ とする．

④ $m > 3$ ならば(1)に戻る.

Step 3-2 : $M(m)$ が最小となる $m = m_{min}$ を見つける.

Step 3-3 : $G(m_{min})$ から建物平面形状を抽出し, 出力する.

点列から評価関数を最小にする近似形状を効率よく探索するために, 動的プログラミングや遺伝的アルゴリズムを利用した準最適解を求める手法[8, 9]が提案されているが, 基本的な計算量は $O(n^2)$ である. 広域な市街地に含まれる多数の建物の復元を考えると, より処理コストの低い手法が求められる. 本手法ではStep 2 の計算量は $O(n)$ である. Step 3-1(1) の $M(m, j)$ の算出では G_j と G_{j+1} だけに対して M_d を再計算すれば良いことから, Step 3-1(1) の計算回数は $2n$ 回であり, Step 3 の計算量は $O(nm)$ となる. つまり, Step 2 で n 個のエッジ点を m 個のグループに統合することでStep 3 の計算量削減が可能となっている.

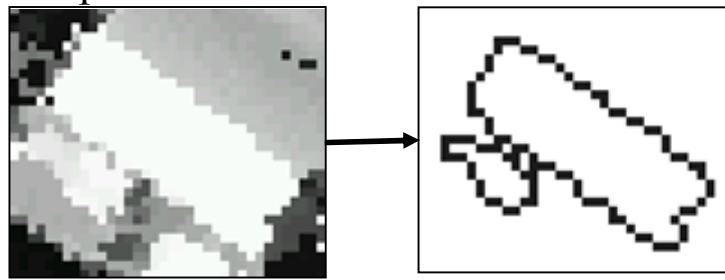
5.3 実験結果

5.3.1 建物平面形状の抽出

レーザプロファイラを搭載したヘリコプタを利用し, 建物が密集した市街地のレンジデータを取得した. このデータに対し重み付き平均による補完を行って, 50cm 間隔のメッシュ状標高データに変換し, レーザレンジデータを作成した.

図 5.7 に提案手法による建物平面形状の抽出過程を示す. 図 5.7(a)のレーザレンジデータは 18m×15m の範囲であり, 平行に並ぶ大小 2 つの長方形の建物を抽出対象とした. 対象領域は平地であったため, Step 1 では標高 6m 以上の点を建物領域とし, その周辺部をエッジ点とした. なお, 起伏がある場合でも, 例えば文献[14]の手法により, 地表面と建物領域の分離は可能である. 領域の形状が点もしくは線状で, エッジ点のみを含むような建物領域に関しては自動で削除した. 図 5.7(b)を見ると建物輪郭部に細かな凹凸が多数生じており, 計測誤差の影響と考えられる.

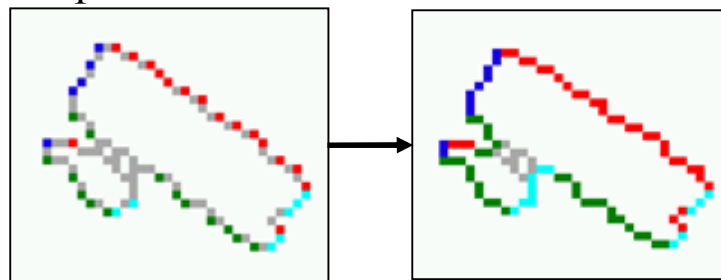
Step 1



(a) レーザレンジデータ

(b) エッジ点列

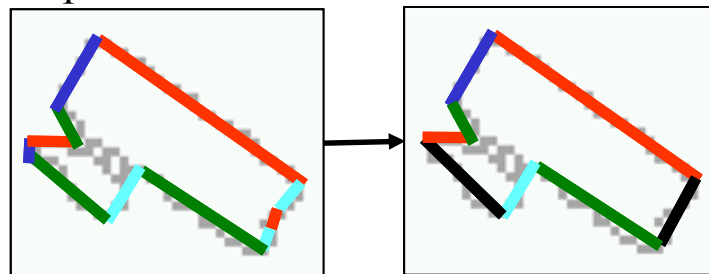
Step 2



(c) 着目エッジ点

(d) エッジ点分類結果

Step 3



(e) 建物平面形状
(初期)

(f) 建物平面形状
(最適)

図 5.7 建物平面形状の抽出結果 (提案手法)

Step 2 の処理により 98 個のエッジ点を 11 のグループに分割した (図 5.7(c),(d)). 各グループから線分を求め、形状を抽出した結果を図 5.7(e)に示す. エッジ点列が形状の頂点となる部分で分割され、元の形状の概形が得られていることが分かる.

続いて Step 3 を実行してグループの段階的の併合を行い、MDL を算出した. その結果、グループ数が 8 の時に MDL が最小となり図 5.7(f)の建物平面形状を出力した. 図 5.7(f)の

黒線はグループを併合した部分を示す．細かな線分を統合することで，不要な頂点が削除され，輪郭を構成する上で主要な頂点だけが残った．左下の小さな建物についてはエッジ点列の生成時点で形状の欠損があり，抽出形状にも同様の影響が生じたが，全体としては最小限の頂点数で，大小2つの建物平面形状をほぼ再現できた．

グループ数 m が8に決定された理由を詳しく見るために，図 5.8 に m に対する MDL の値 $M(=M_m+M_d)$ の変化を示す．簡潔性を示す M_m と適合性を示す M_d の値は相反する変化をしており， M_d をほぼ最低に保ったまま M_m を低減した $m=8$ が最適と選択された．MDL 原理を導入したことで，エッジ点列に適合しつつ，頂点数の少ない簡潔な形状を選択できたことが分かる．

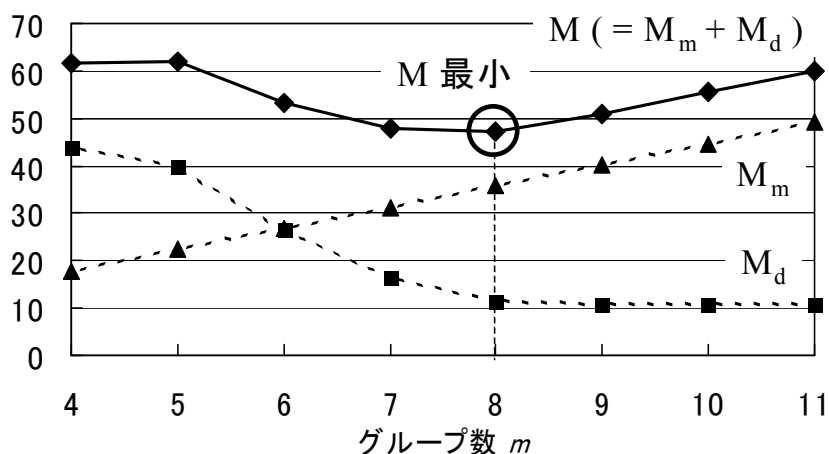


図 5.8 MDL M とグループ数 m の関係

提案手法と比較するために，文献[3]で提案されている着目エッジ点のみから建物平面形状を抽出する手法（以下，従来手法）を，図 5.7(c)に適用した．抽出の過程と結果を(図 5.9)に示す．最初に 1.5m 以内にある同一種別の点を順次同じグループに入れ，図 5.9(b)のグループ分けを得た．各グループから線分を抽出し（図 5.9(c)），最も近い端点同士の中点で線分を連結した．線分の抽出が不足しているため，図 5.9(d)の結果は元のエッジ点列(図 5.7(b))から異なる形状となった．

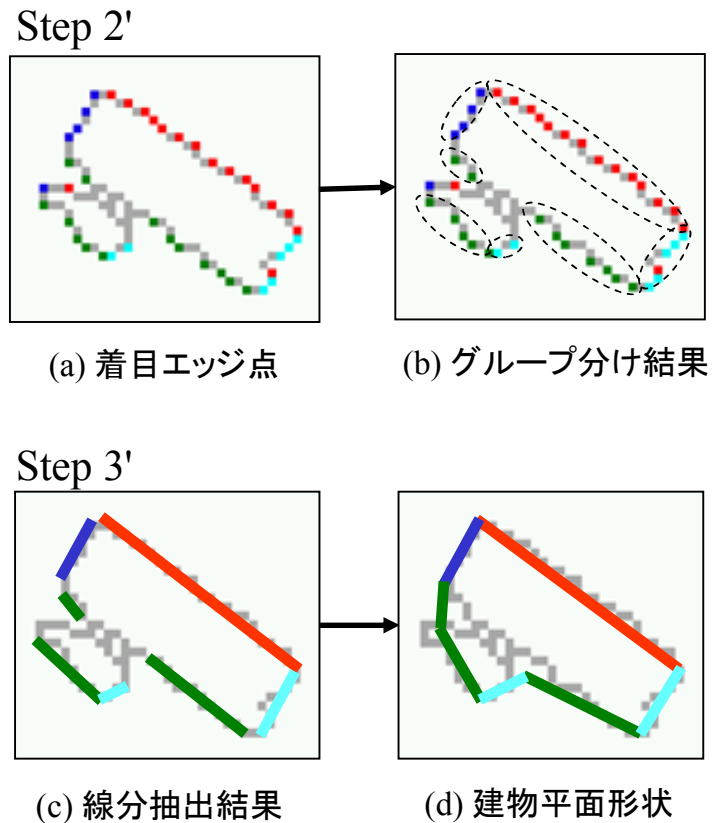
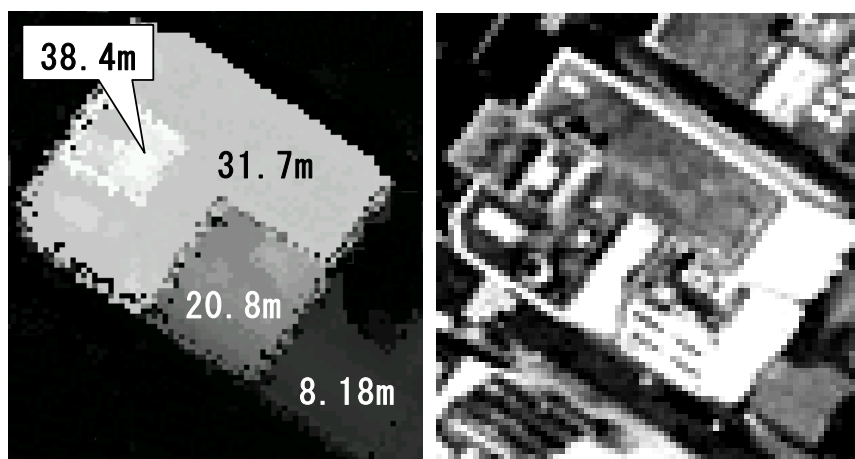


図 5.9 建物平面形状の抽出結果 (従来手法)

5.3.2 3次元形状の復元

提案した建物平面形状の抽出処理を用いて BRoC 法により建物の 3 次元形状を復元する実験を、図 5.10 の領域を対象に行った。復元過程では建物領域（標高 6m 以上の領域）のレーザレンジデータに対して第 3 章と同じ手法により、レーザレンジデータに含まれる標高データを 4 つの階層に分離した(5.11)。階層ごとに、含まれる標高データの平均値を算出し、各階層の標高を決定した。各階層から提案手法によって形状を抽出し、Step 4 の処理で、先に決定した標高をもつ柱状モデルを復元した。その結果、4 つの柱状モデルの複合体として図 5.12 の 3 次元形状モデルを復元できた。



(a) レーザレンジデータ

(b) 航空写真

図 5.10 3次元形状の復元(1) : 復元対象領域のレーザレンジデータと航空写真

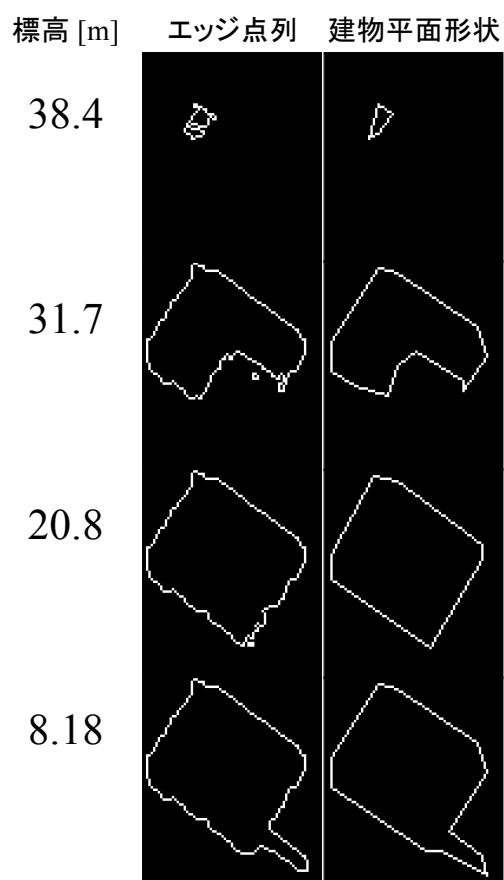


図 5.11 3次元形状の復元(2) : 階層ごとの形状抽出結果

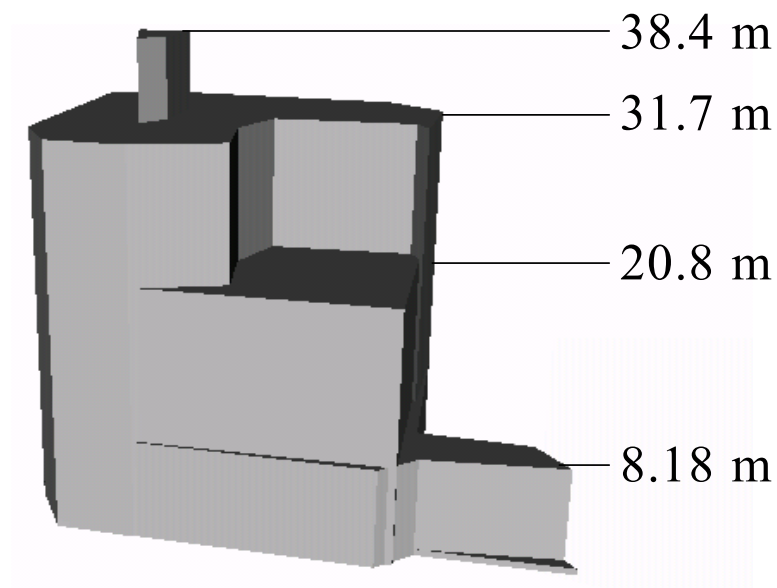


図 5.12 3次元形状の復元(3)：復元結果

続いて，複数の建物がほぼ隙間無く隣接している領域の復元結果を図 5.13 に示す．図中の A,B および a~d は建物ごとの記号であり，それぞれ 2 棟および 4 棟の建物が隣接している．図 5.13 の上段がレーザレンジデータ，中段が建物平面形状の抽出結果，下段が 3 次元形状の復元結果である．建物平面形状では隣接する建物を分離できていないが，階層ごとに形状を抽出することで各建物を分離して復元できていることが分かる．3 次元形状復元によって建物の識別性能が向上する効果に関しては，5.3.3.d 節において定量的に評価を行う．

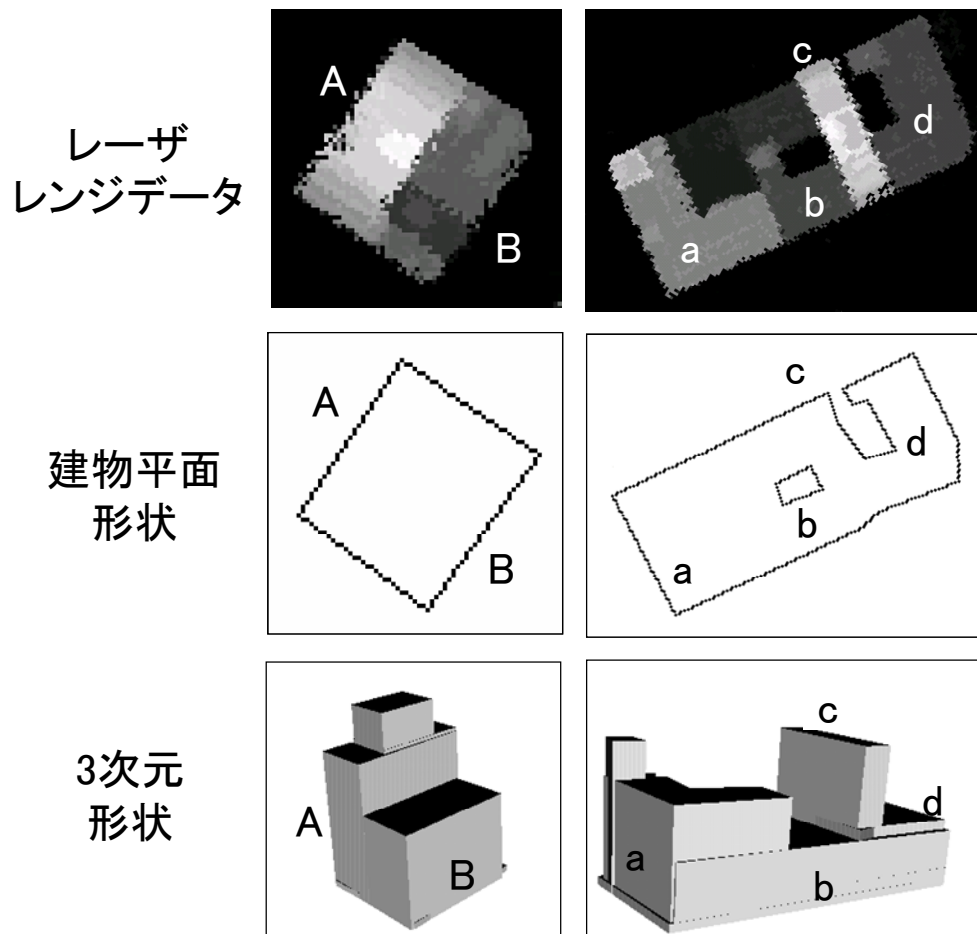


図 5.13 隣接する建物の復元結果

5.3.3 定量的評価

5.3.3.a 正解データと抽出形状の評価値

本論文では抽出した建物形状を評価するための正解データとして以下の二つを用いる.

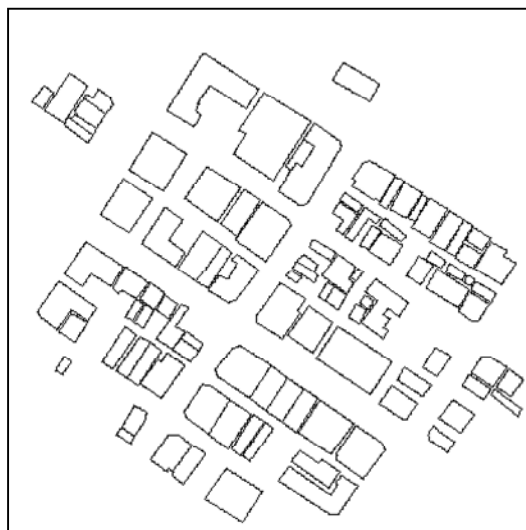
- a) 簡素化を行わずに実際の建物形状に忠実に作成した形状データ（エッジ点列と航空写真を参照し，人手で作成）
- b) 建物形状や位置関係の把握を容易にするために必要十分な簡素化が図られた形状データ（市販品を利用．一般に航空写真を参照し，人手で作成）

住宅地図は簡素化された建物形状データとして広く利用されており，簡素化の程度としてひとつの基準と考えられ，本研究の目的に合致した正解データ(b)と考えられる．一方で，航空写真とレーザレンジデータの取得時期のずれから住宅地図と抽出形状の間で建物の有

無が異なる場合がある．さらに，提案手法の基本的な形状抽出性能やレーザレンジデータデータに含まれるノイズの影響を評価するためには，簡素化を行う前の正解データ(a)が必要となる．これらの理由から詳細正解形状による評価を最初の実施する．本節では 300m 四方の市街地領域に対して形状抽出を行い，抽出形状の品質を定量的に評価した．利用した正解データ(詳細正解形状と住宅地図)を図 5.14に示す．



(a) 詳細正解形状



(b) 住宅地図

図 5.14 抽出形状の評価に用いた正解データ

抽出形状の評価としては，正解データの形状に対して輪郭同士を比較してずれを算出す

べきである。しかし、建物の密集地域では隣接する複数の建物が一体の形状を形成しており、1つの建物として抽出されるため、正解データと抽出形状の間で建物の1対1対応を取って輪郭を比較することが難しい。

参考文献[6]や[15]では正解形状と抽出形状の不一致部分の面積を評価値に用いている。不一致部分の面積は輪郭のずれの積分値であり、輪郭の一致度を図る評価値と見なすことができる。また、面積を使うことで複数の建物が一体となって抽出された場合でも評価が可能である。よって、本研究では抽出形状と住宅地図の建物総面積 S_m , S_r および、それらの重複面積 S_o を求め、評価値として適合率 $100 * S_o / S_m$ と再現率 $100 * S_o / S_r$ の2つを用いた。適合率は正解形状からのはみ出しが少ない(=抽出形状が大きすぎない)と高い値となる。一方、再現率は正解形状に対して未抽出の部分が少ない(=抽出形状が小さすぎない)と高い値をとる。

5.3.3.b 簡素化パラメータ σ と抽出形状の関係

5.2.3.a 節で述べたように、本手法では式(5.3)の簡素化パラメータ σ によって、抽出形状の簡潔性とエッジ点列への適合性のバランスを変更し、抽出形状の簡素化の度合いを設定できる。本節では σ の値を変えて実験を行い、抽出形状の変化を示すと共に、5.14(b)の住宅地図を正解データとしたときの最適値を示す。

σ を1,4,8と変えたときの抽出結果を図5.15に示す。 $\sigma=1$ の場合はエッジ点列にしたがって詳細な形状が抽出された。 $\sigma=4$ では形状の簡素化が進み、 $\sigma=8$ では図中に丸印を付けた部分に形状の欠落が見られた。

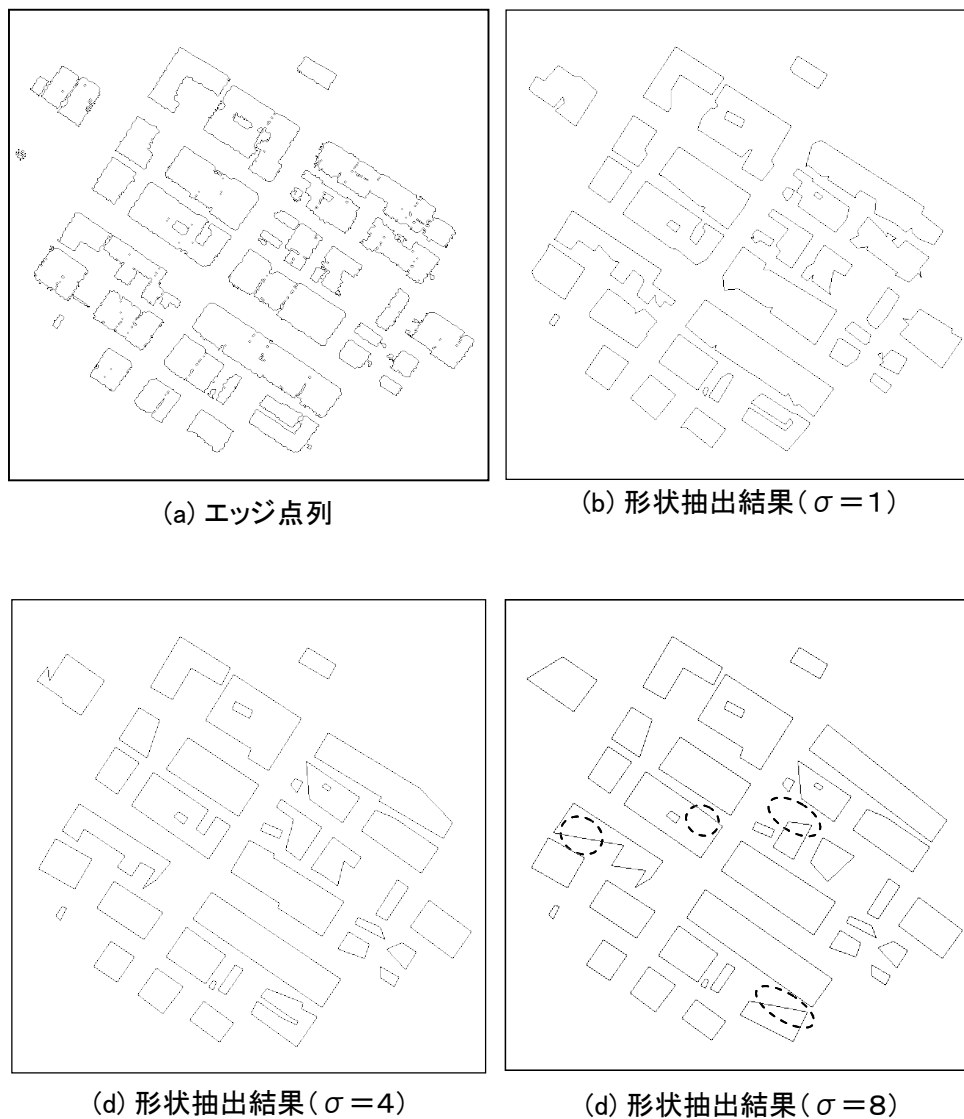


図 5.15 パラメータ σ と抽出形状の関係

σ に対する適合率および再現率を図 5.16 に示す. いずれの正解データに対しても適合率と再現率は同様に増減した. 具体的には, σ の値を大きくするにしたがって再現率は単調に減少した. これは抽出形状の簡素化により抽出されない部分が増加し, 正解形状をカバーできない部分が増加したためであった. 一方, 適合率は $\sigma=4$ の時に最大となり, 住宅地図で評価した場合には再現率とほぼ同じになった. σ が小さなおとときには不要な凸部が残っていたこと, σ が大きなおとときには凹部が再現されなかったことが, それぞれ正解形状からはみ出し増加となり, 適合率が低下した.

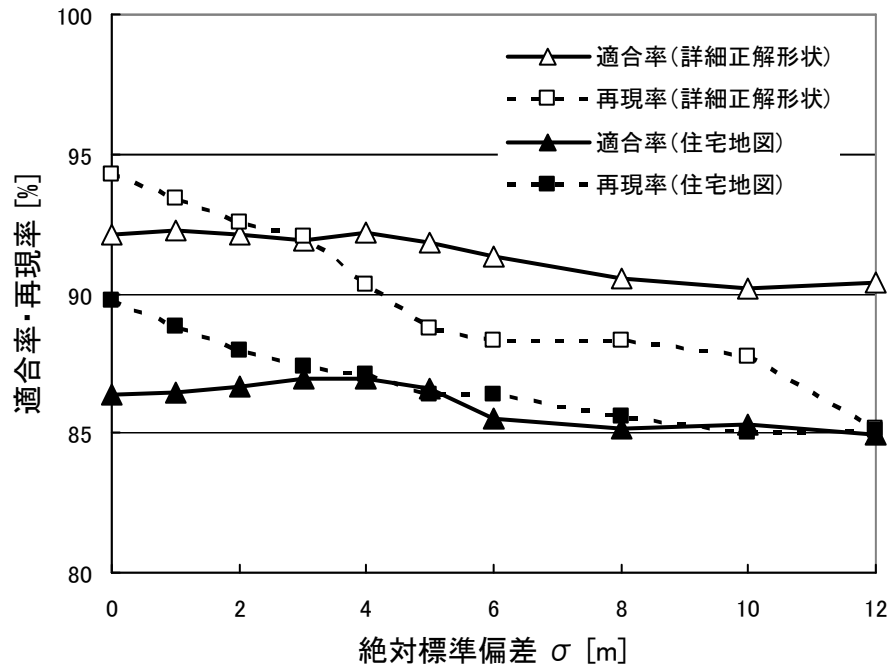
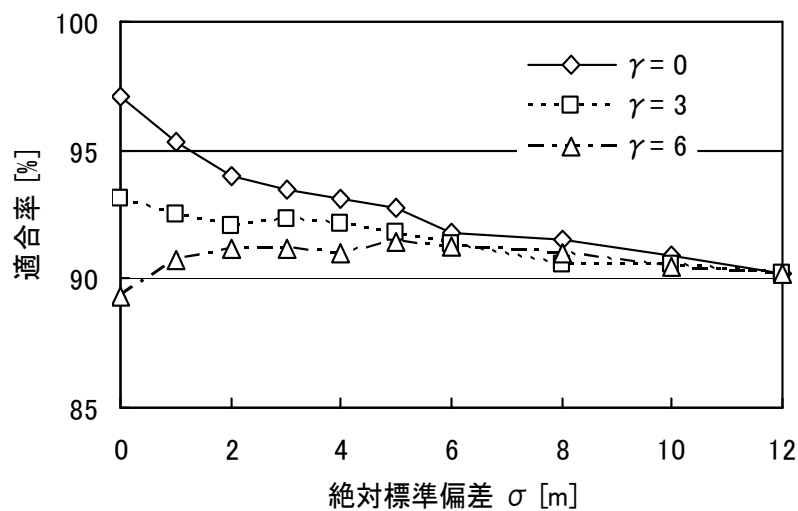


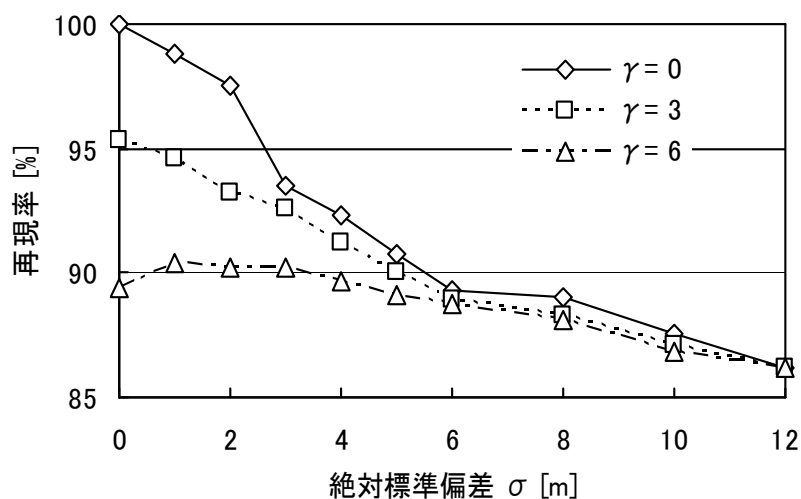
図 5.16 提案方式による抽出形状の適合率と再現率

増減ではなく絶対値としては、詳細正解形状の評価値のほうが $\sigma=0$ の時点で5%ほど高い値を示した。そして σ が大きくなると、適合率ではこの差を保ったまま推移し、再現率では差がなくなった。レーザレンジデータからは住宅地図に無い建物も抽出しており、住宅地図からはみ出しが一定の面積で生じていた。そのため、適合率に一定の差が生じていた。一方の再現率に関しては、 σ が大きくなると抽出形状が簡素化されるため、住宅地図の簡素化が評価値に影響しなくなり、再現率が同じ値になった。

詳細正解形状の評価値は90%前後と高い値であるが、100%にならない原因としては、(a)抽出手法の問題と(b)レーザレンジデータの計測誤差、の二つが考えられる。まず原因 a を検証するために、詳細正解形状から生成したレーザレンジデータに対して形状抽出を行い、元の形状を再現できることを検証した。その結果、再現率 100%、適合率 97.1%となった。適合率低下の原因としては、凹部で着目エッジ点が生じない場合があり、抽出に失敗していた。次に、形状抽出過程においてエッジ点列に位置誤差を発生させ、原因 b が評価値に与える影響を検証した。位置誤差はエッジ点列の直角方向に、各エッジ点に距離 d の位置ずれを発生させた。なお、 d は両側指数分布にしたがってエッジ点ごと異なる値を与えた。その上で、分布の絶対標準偏差 γ の値を0[m]~10[m]に変えて評価値を算出した。図 5.17 に $\gamma=0,3,6$ の場合の結果を示す。



(a) 適合率



(b) 再現率

図 5.17 DSM の位置誤差と評価値の関係

誤差レベルとしては $\gamma=3$ のときが図 5.16 の評価値と近いため、この値(3[m])が今回の実験で利用したレーザレンジデータの誤差レベルであり、評価値を低下させている要因であると推定した。誤差レベルがさらに大きくなる($\gamma=6$)と、 σ が小さい場合には抽出形状に不要な凹凸が残るため評価値も低い、 σ を大きくすることで評価値を改善できることが分かった。

5.1 節で述べたように、市街地モデルの頂点数はモデルデータの伝送帯域や描画処理量に

直接的な影響を与える．そのため，抽出形状の評価基準としては形状の品質（適合率と再現率）と併せて頂点数の少なさも重要である．両方の観点から復元結果を評価するため，提案手法の Step 3 で削減された頂点数の数を横軸に，住宅地図を正解データとした場合の適合率と再現率の調和平均 F-measure*** を縦軸にとったグラフを(図 5.18)に示す．

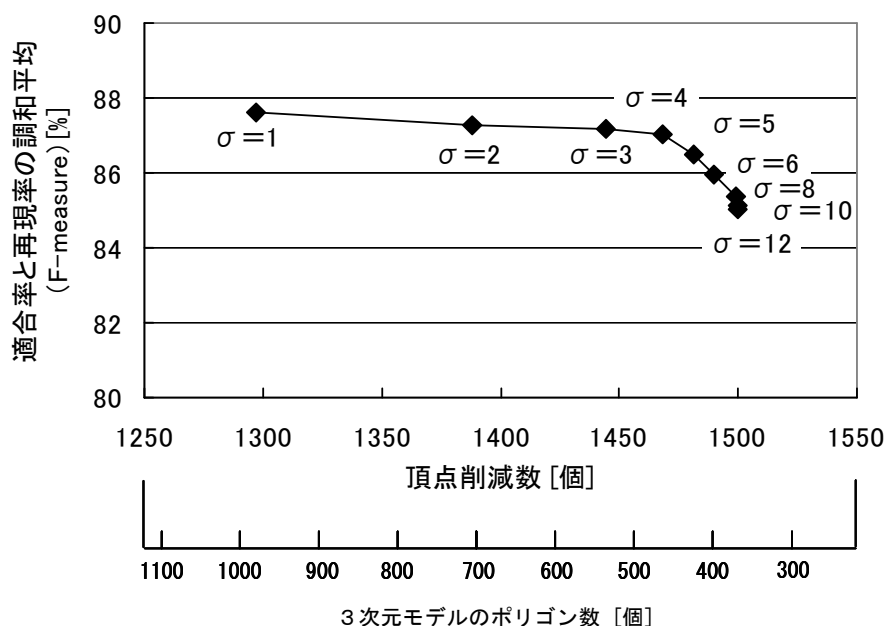


図 5.18 頂点削減数と適合率と再現率の調和平均 (F-measure) の関係

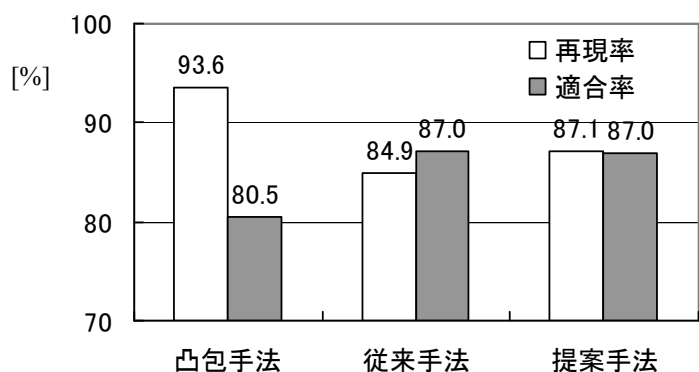
全体的な傾向としては，頂点を削減すると F-measure も低下するため，頂点の少なさと形状の品質を同時に満たすことは難しいことが分かった．ただし σ が 1 から 4 までは F-measure の低下を緩やかに保ったまま，頂点数の大きな削減に成功していた．このことから図 5.14(b) の住宅地図を正解データとした場合には， $\sigma=4$ が両方の基準を最も満足する設定値と考えられる．また，この値はレーザレンジデータの誤差レベル(3m)より少し大きい値であり，住宅地図の簡素化を考慮していると言える．よって，以下の実験ではこの設定値を用いた．

5.3.3.c 形状抽出手法の比較

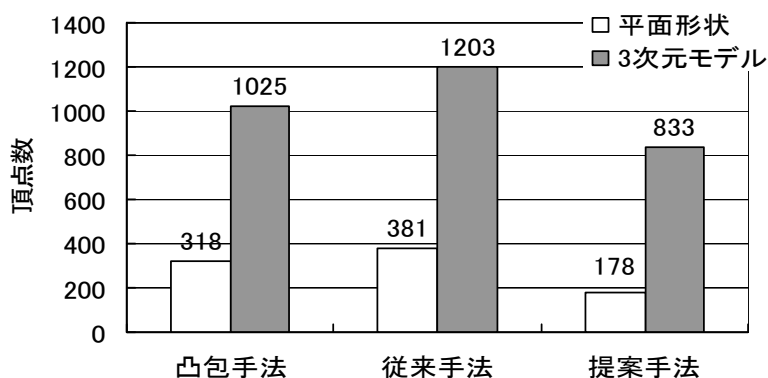
最初に，エッジ点列の凸包を建物平面形状とする簡易的手法（凸包手法）を用いて評価実験を行い，比較基準となる評価値を得た．次に，図 5.9 で述べた従来手法について形状

*** 自然言語処理やデータベース検索の分野で分類結果の客観的評価指標として用いられている．適合率をP，再現率をRとしたときにF-measure は $2PR/(P+R)$ で表される．

抽出と評価値算出を行い、提案手法の結果と比較した。各手法における適合率と再現率を図 5.19(a)に、頂点数を図 5.19(b)にそれぞれ示す。なお、頂点数については 3 次元モデルの結果も示した。



(a) 適合率と再現率



(b) 頂点数

図 5.19 形状抽出方式の比較

凸包手法では建物平面形状が大きくなる傾向にあるため 93.6%の高い再現率を示したが、凹部を無視しているため適合率が非常に低い結果(80.5%)となった。このように再現率のみを上げるのは容易であり、適合率とのバランスが重要である。凸包手法でも再現率が 100%にならないのは住宅地図作成後の建物取り壊しに因るもので、住宅地図の $100 - 93.6 = 7.4\%$ は再現不能領域と考える必要がある。つまり、再現率は 93.6%を上限として、その低下を抑制しながら適合率を 80.5%からどの程度改善できるかが、評価の観点となる。

従来手法と提案手法は共に適合率を 87.0%に改善した。再現率については、従来手法は

84.9%であったが、提案手法では 87.1%として適合率とのバランスを保つことができた。頂点数に関しても提案手法は従来手法に比べて、建物平面形状で 53.3%、3 次元形状で 30.1%の削減を実現した。

5.3.3.d 3次元化による建物識別の効果

5.3.2 節では 3 次元形状モデルの復元結果から、隣接する建物を分離、識別して復元できることを示した。本節では建物識別の効果を定量的に評価する。評価方法としては、住宅地図に含まれる各建物(正解建物)に対し、F-measure が最大となる建物平面形状もしくは 3 次元形状(生成建物)を対応付け、それぞれの正解建物が相異なる生成建物と対応付けされれば、建物が識別されたと評価する。同一の生成建物に対応付けされた正解建物の個数を「重複度」とし、重複度が 1 に近いほど識別の度合いが高いとして、定量的な評価を行う。

建物平面形状と 3 次元モデルの重複度を比較するために、以下の手順で重複度のヒストグラムを作成した。

- (1) 各生成建物に対して重複度を算出する。
- (2) 正解建物のそれぞれに対して、対応する生成建物の重複度を割り当てる。なお、正解建物が、どの生成建物とも重ならない場合には重複度を0とする。
- (3) 各重複度に対して重複度が同じ正解建物の軒数をカウントし、ヒストグラムを作成する。

その結果、重複度の平均は建物平面形状では 4.57、3 次元モデルでは 1.98 となり、ヒストグラムは図 5.20 となった。建物平面形状では重複度が高く十分に建物が分離・識別できていないが、3 次元モデルを復元することによって建物の識別度が向上していることが分かった。

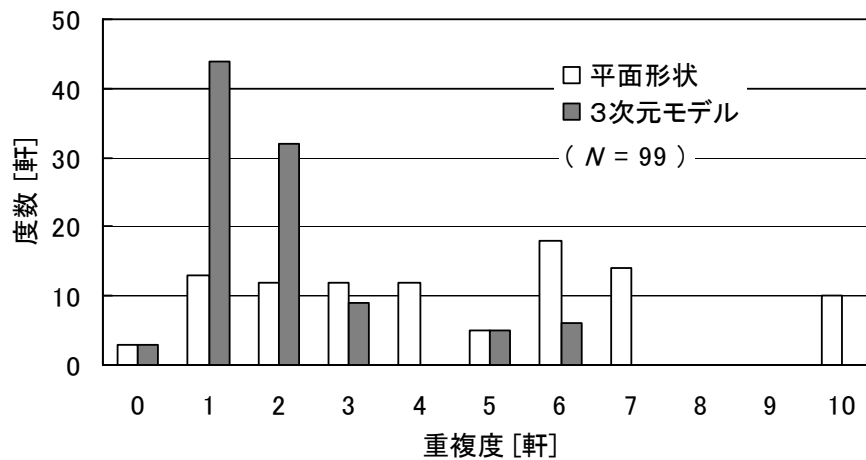


図 5.20 重複度のヒストグラム

5.3.4 広域市街地モデルの構築

広域市街地モデルの構築可能性を検証するため、2つの地区で合計6.4平方キロメートルの地域を対象とした構築実験を行った。2地区の内訳は地区Aが2.7平方キロメートル、地区Bが3.7平方キロメートルであった。なお、実験は1台のPC（Xeon2.6MHz、メモリ1.0GB）で実施し、モデルデータはVRMLフォーマット[16]のテキストファイルとして出力した。提案手法により地区A,Bにおいて構築した市街地モデルを図5.21、図5.22に示す。構築結果では個々の建物形状が復元されているだけでなく、街路の整備状況など整合の取れた市街地構造を明確に確認でき、市街地モデルとして正しく構築できていることが分かる。

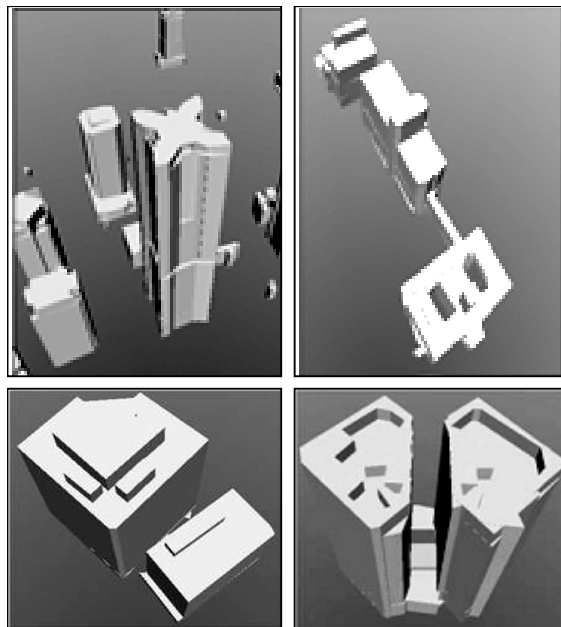
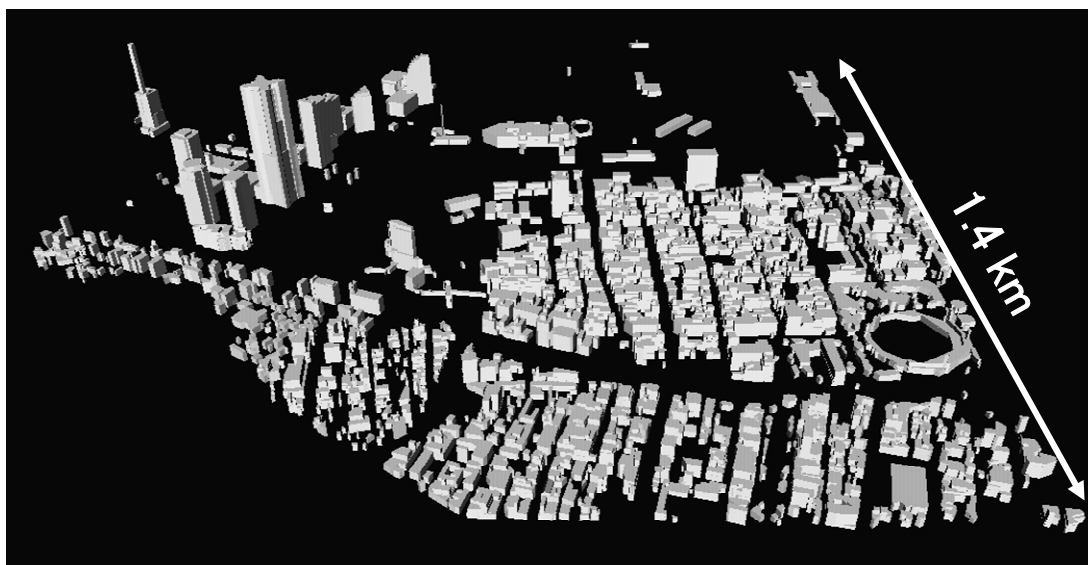
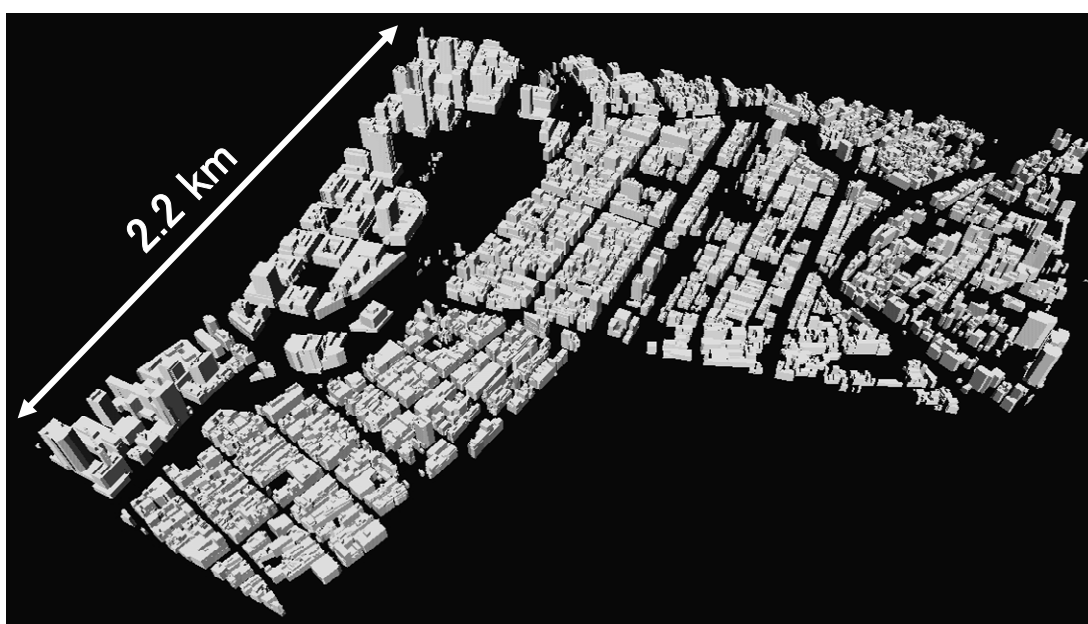


図 5.21 市街地モデル構築結果（建物単位）



(a) 地区A



(b) 地区B

図 5.22 市街地モデル構築結果

表5.1 生成されたデータと処理時間

評価項目	提案手法 α	従来手法 β	α / β (%)
頂点数	17,415	28,238	61.7
モデルデータサイズ (MB)	5.8	10.7	54.2
処理時間 (時間)	2.67	3.5	76.2

(a) 地区A (2.7 km²)

評価項目	提案手法 α	従来手法 β	α / β (%)
頂点数	45,320	122,196	37.1
モデルデータサイズ (MB)	14.5	33.8	42.9
処理時間 (時間)	18	18	100

(b) 地区B (3.7 km²)

処理時間とデータサイズについて提案手法と従来手法による構築実験の結果を比較した (表 5.1). A 地区の頂点数については前節の実験結果(図 5.19(b))と同様の削減効果が確認でき, 同時に形状モデルのデータサイズや計算時間も削減できた. B 地区では計算時間は短縮されなかったが, 頂点数については 37.1%という大幅な削減効果があった.

5.4 考察

5.4.1 形状抽出結果について

本節では 5.3.1 節の形状抽出結果から 5.3.3 節の定量的評価結果が得られた要因について考察する. 最初に提案手法が従来手法に対して再現率と頂点数に関して優位性が示された点について述べる.

従来手法では, 線分を抽出するために, 同一種別の着目エッジ点が連続して並んでいる必要がある. しかし, 形状が複雑になるとエッジ点列上で着目エッジ点の種別は変化しやすい. そのため, 図 5.9 に示したように線分が抽出できない部分が生じ, 形状欠損の原因となる. 形状抽出手法の比較結果(図 5.19)において, 適合率は同じだったものの再現率が提案手法より低下したのは, 形状の抽出不足が要因であったと考えられる.

それに対して提案手法では, Step 2 において, すべてのエッジ点情報を利用して形状を抽出するため形状の欠損が起きにくい. さらに Step 3 では MDL 基準によってエッジ点列からのずれを小さく保ったまま頂点を段階的に削減する. そのため, エッジ点列から大きく外れることなく簡潔な形状を安定して抽出できる. この点が図 5.19 の定量的評価に表れ,

提案手法では再現率を適合率と同程度に維持すると同時に、データ量の大幅な削減に成功したと言える。

次に提案手法において簡素化パラメータ σ の値として4が最適とされた結果(図 5.16)について考察する。 $\sigma \leq 4$ では σ の増加に従って再現率が低下したが適合率は向上した。図 5.15 の抽出結果から分かるように σ の値が増加するに従って細かな凸部から順に除去されていた。その結果、(A)正解形状に含まれる凸部の除去、によって再現率が低下し、(B)正解形状に無い凸部の除去、によって適合率が向上したと考えられる。

形状の簡素化には、(1)計測誤差による凹凸の除去、(2)データ量の削減、の2つの目的がある。(A)は形状品質を低下させるが(2)の目的には必要であり、(B)は両方の目的に合致する。つまり、 $\sigma \leq 4$ では上記の目的に沿った簡素化が行われたと言える。一方、 $\sigma > 4$ では、さらに大きな凹凸が削除されるが、適合率が低下していることから(1)の目的には効果が無く、削除できる頂点の数が限られることから(2)に対しても効果が薄い。以上の議論から、両方の目的に沿った改善を最も良く行った結果が $\sigma = 4$ の簡素化であると言える。

5.2.3.a 節で述べたように σ の値を大きくした場合には、エッジ点列への適合性よりも抽出形状の簡潔性を重視した設定を選択したことになる。本実験のエッジ点列(図 5.15(a))は誤差レベルが3m(図 5.17)と計測誤差の影響が大きく、さらに、正解形状(5.14)も簡潔な形状が多い。そのため、エッジ点のずれの平均値としてはやや大きな値(4m)が簡素化パラメータの最適値になったと考えられる。

5.4.2 広域市街地モデルの構築結果について

B地区は大きな建物が多いため提案手法におけるStep 2の処理によって比較的多数のエッジ点グループが生成された。そのためStep 3のグループ併合が多数行われ、処理時間の短縮効果は無かったものの、頂点数は大幅に削減されたと考えられる。

次に頂点数削減による描画処理の低減効果を考察する。3次元CGの描画処理では3次元モデルを三角面の集合として描画する。市街地モデルの各オブジェクトは上面と側面から構成される角柱として復元され、 N 角柱であれば $3N - 2$ 個の三角面に分割される。つまり、市街地モデルは頂点数のほぼ3倍の三角パッチとして描画されるため、提案手法による頂点数の削減は描画処理の高速化に非常に有効であると言える。例えば、広域のテクスチャ付き市街地モデルをウォークスルーする場合に操作レスポンスの改善効果が高いと考えられる。

描画処理をより高速化するためには、視点からの距離に応じて建物の頂点数を増減する手法Level of Detail (LOD)が有効である。提案手法では簡素化パラメータ σ の変更によって、簡素化の度合い(簡素度)の異なる複数の市街地モデルを作成することは可能である。しかし、視点の変化に従って市街地モデルの簡素度を部分的、可逆的、連続的に変化させる枠組みを持っていない。これにはProgressive Mesh[11]のような多重解像度表現を導入し、描画時に簡素度の異なるモデルを動的に生成することで、LODを実現できると考えられる。

処理時間については、2 地区合計で 6.4 平方キロメートルの市街地モデルを 20.67 時間で構築できた。B 地区の結果に対して述べたように処理時間は建物の大きさにも左右されるが、提案方式により 100 平方キロメートルの市街地でも約 2 週間で構築できると考えられる。構築対象地域を分割して並列に処理できることや、災害復興期（発災後 1 ヶ月以降）での利用を対象とするのであれば、数十平方キロメートル規模の構築に実用上の問題はないと言える。しかしながら、市街地の被害把握に利用する場合には早急な構築が必要とされ、処理の高速化が求められる。その場合には BRoC 法におけるレイヤ生成において、ヒストグラムを利用した $O(n)$ オーダのアルゴリズムを検討することが有効と考えられる。

5.5 まとめ

本論文ではレーザレンジデータから建物平面形状を抽出する手法を提案し、BRoC 法の適用によって市街地モデルを自動構築できることを示した。提案手法ではレーザレンジデータからエッジ点列として得られる輪郭において、エッジ点を段階的に統合することで安定した形状抽出を行う。統合の過程では MDL 原理にもとづいて、抽出形状の「簡潔性」とエッジ点列に対する「適合性」を符号長という統一の評価尺度で最適化を図り、両者のバランスの取れた形状を自動で選択できる。

実験では計測誤差を含むレーザレンジデータから安定的に建物平面形状を抽出できることを示し、高さ別に分割されたレーザレンジデータから建物平面形状を抽出することで、3 次元形状モデルの自動復元が可能であることを示した。住宅地図を用いた定量的評価により、従来手法に対する形状品質の改善とデータ量の削減効果を確認した。さらに、2 つの地区で合計 6.4 平方キロメートルの地域を対象とした構築実験を行い、広域のモデル構築でも同等のデータ量削減効果が得られた。また、処理時間の面から数十平方キロメートル規模の広域市街地モデルの自動構築が実用上可能であるとの見通しを得た。

本研究では航空写真等の外部情報や建物形状の特徴（直角や平行の線分が多いなど）を利用せず、誤差要因が多く含まれるレーザレンジデータから MDL 基準の最小化というルールのみで形状抽出を行った。そのため、小さな部分形状に対しては正解形状を正しく推定するのは困難であり、形状簡素化の目的から一律に削除していた。より積極的に正解形状の推定を行うためには建物形状の特徴を導入することが有用である。従来研究のように直角や平行の線分に限定するのではなく、形状の評価値となる MDL 基準の定義式に上記の特徴を反映することで、小さな部分形状でも特徴に合致すれば正規の建物形状の一部として認識できると考えられる。

もう一つの課題として、提案方式を実システムとして利用する際には、簡素化パラメータの決定方法を利用者に提供する必要がある。簡素化パラメータの値は形状の簡素化をどの程度行うかを決定するものであり、利用者が望む市街地モデルの詳細度によって決まる。ただしレーザレンジデータの計測誤差が大きければ、詳細な形状を復元することは不可能

である．このように入力データが持つ情報量と出力データが必要とする情報量を明確化し，利用者に適切な設定値を提示する枠組みが求められる．

第 5 章参考文献

- [1] 航空レーザ測量 WG, "航空レーザ測量ハンドブック", (財)日本測量調査技術協会, 2004.
- [2] H. Zhao, R. Shibasaki, "High accurate positioning and mapping in urban area using laser range scanner", Proc. of International Workshop Urban 3D and Multi-Media Mapping, Tokyo, Japan, 2000.
- [3] K. Fujii, T. Arikawa, "Urban Object Reconstruction Using Airborne Laser Elevation Image and Aerial Image", IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, vol. 40, no. 10, pp.2234-2240, 2002.
- [4] S. Horiguchi, S. Nagai, K. Sugiyama, "Recovering 3D urban model using Range data and Sequential Aerial Images", Proc. of International Workshop Urban 3D and Multi-Media Mapping, Tokyo, Japan, pp.79-84, 1999.
- [5] I. Stamos, K. P. Allen, "3-D Model Construction Using Range and Image Data", Proc. of CVPR 2000, pp.531-536, 2000.
- [6] 織田和夫, 高野忠, 汪平涛, 大鋸朋夫, 土居原健, 柴崎亮介, "レーザスキャナデータと航空写真のフュージョンによる都市 3 次元モデルの自動構築", 写真測量とリモートセンシング, vol. 43, no. 5, pp.16-23, 2004.
- [7] Y. Takase, N. Sho, A. Sone, K. Shimiya, "Automatic Generation of 3D City Models and Related Applications", Proc. of International Workshop on Visualization and Animation of Reality-based 3D Models, 2003.
- [8] A. Kolesnikov, P. Franti, "A fast near-optimal algorithm for approximation of polygonal curves", Proc. of ICPR2002, Quebec, Canada, pp.335-338, 2002.
- [9] G. R. V. Javier Traver, J. M. Inesta, "Exploring the Performance of Genetic Algorithms as Polygonal Approximations", Proc. of ICPR2000, Barcelona, Spain, pp.774-777, 2000.
- [10] C. H. Teh, R. T. Chin, "On the Detection of Dominant Points on Digital Curves", IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 11, no. 8, pp.859-872, 1989.
- [11] H. Hoppe, "Progressive meshes", Computer Graphics (Proc. of SIGGRAPH), New Orleans, pp.99-108, 1996.
- [12] W. H. Press, B. P. Flannery, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, Numerical Recipes in C [日本語版], Cambridge University Press, p.521, 1988.
- [13] 村上征勝, 田村義保, "パソコンによるデータ解析 第 1 章 クラスタ分析", 朝倉書店, 1988.
- [14] G. Sohn, I. J. Dowman, "Terrain Surface Reconstruction by the Use of Tetrahedron Model with the MDL Criterion", Proc. of ISPRS Commission III Symposium Photogrammetric Computer Vision '02, pp.336-344, 2002.
- [15] A. J. Shufelt, "Performance Evaluation and Analysis of Monocular Building Extraction From Aerial Imagery", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 21, no. 4,

pp.311-326, 1999.

- [16] R. Carey, G. Bell, "注解 VRML 2.0 リファレンスマニュアル", アジソンウェスレイ, 1998.

第6章 防災情報提供のための放送型伝送方式

第2章で提案した防災情報システムは、3次元市街地モデルを基盤とする情報分析機能によって災害の全体像や被害予測結果などの分析情報を獲得した上で、その情報を情報提供機能によって被災地域を中心に広く迅速に提供する。本研究では防災情報の提供手段として一般的になりつつある WWW に着目し、災害発生直後のアクセス集中に強い情報提供機能の実現を目的として、WWW に適応可能な放送型伝送方式を提案する。

6.1 防災情報提供に向けた課題と提案の概要

広域災害時に避難・救助・復旧などの災害対応活動を適切に行って被害を最小限に抑えるためには、災害に関する情報を広い範囲に迅速に提供する必要がある。そのための手段としてはテレビやラジオが利用されているが、このような受動的なメディアでは知りたい情報が流れてくるまで継続的に視聴している必要があり、即座に次の行動に移れないという問題がある。例えば、自宅や避難所において自分の地域の情報が放送されるまで耳を傾けている間に何らかの危機が迫っているとすれば、情報提供手段に問題があると言わざるを得ない。一方、近年インターネットや携帯端末の著しい普及により、公的機関や報道機関が WWW によって防災情報を提供し、一般市民が携帯端末から閲覧することが一般的になりつつある。各個人が必要な情報を必要なタイミングで得ることができる WWW のような能動的メディアによって、個人レベルでの迅速な災害対応活動が可能になる。これは「自助」「共助」が求められる広域災害において、被害の抑制に大きな役割を果たすと考えられる。

しかし、現状の WWW は利用者の要求に応じて情報を提供する通信方式（オンデマンド方式）を採用しているため、実際の災害時にはアクセスの集中によって、レスポンスが大幅に低下するという事態が発生している。一方、テレビやラジオが採用している放送型の伝送方式であれば同時利用者数に関係なく応答時間を一定にすることが可能であるため、通信回線の輻輳を避けることができる。つまり、テレビやラジオが受動的であるという問題は利用しているメディア（映像や音声）の特性に依るものであり、放送という通信方式自体は防災情報の提供に適していると言える。そこで本研究では、現状整備されている防災情報の WWW コンテンツや利用者のインターフェースをそのまま利用し、通信方式のみを放送型の伝送方式に変えることで災害時の迅速な情報提供を実現することを検討する。テレビやラジオのような従来の放送型メディアにおいて災害時に同一の防災情報を繰り返し放送するように、放送型でデータを伝送する場合にも、一定のコンテンツ（データストリーム）を周期的に繰り返し放送し、利用者が希望する情報をデータストリームから取得する方式が提案されている。この方式に基づく放送型の情報提供システムの構成を図 6.1 に示す。

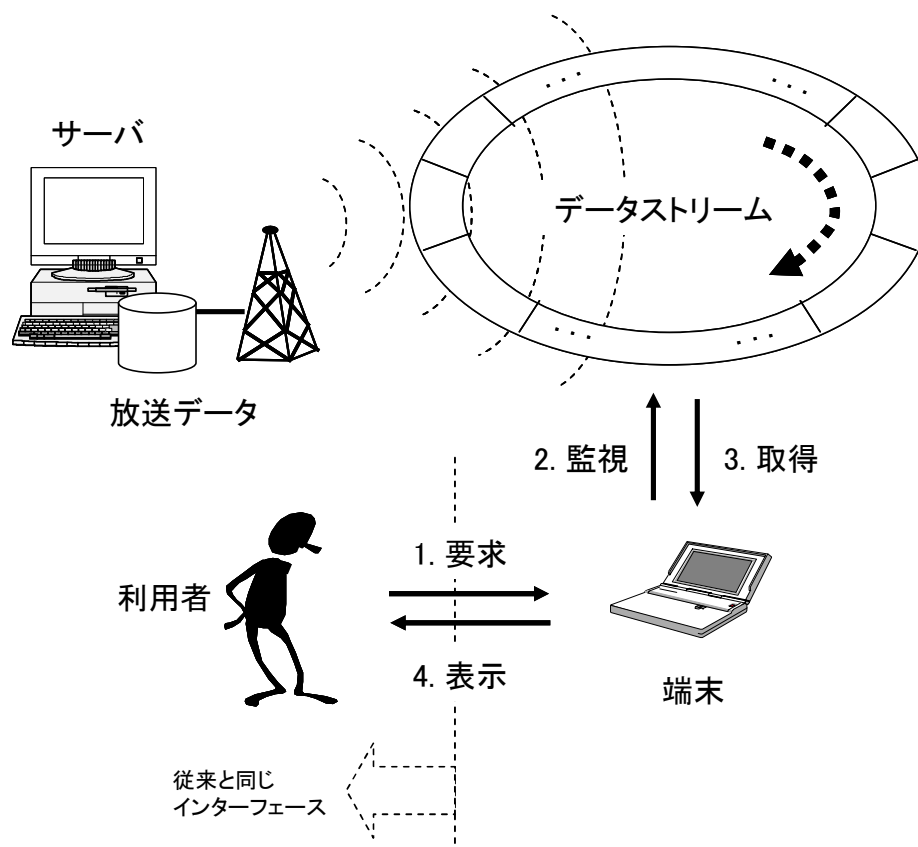


図 6.1 放送型情報提供システムの構成

このシステムにおいて，サーバは放送データを並べてデータストリームを構成し，周期的に繰り返し放送する．一方，端末はデータストリームを監視して利用者が要求したデータを取得し，利用者に対して表示する．このような枠組みにより放送型通信を利用しつつ，利用者に対してはオンデマンド方式と同様のインターフェースを実現することが可能となる．しかし，要求された情報が放送されるまで待たなくてはならない点はテレビやラジオと同様であり，利用者の要求が発生してから情報を提供するまでの平均待ち時間をいかに短縮するかが主要な研究課題となる．

WWW では一般に，利用者への情報提供単位となる 1 ページ分のデータは，HTML ファイルとそこから参照される複数のファイルから構成される．以下，WWW における 1 ページ分のデータを HTML 文書と呼ぶ．放送型伝送方式に関するこれまでの研究ではデータの参照関係はほとんど考慮されておらず，HTML 文書をデータストリームから取得する手順を明確にし，HTML 文書を取得するまでの待ち時間を評価する取り組みが行われていなかった．そこで本研究では HTML 文書の基本的な伝送方式として，文書内のファイルを 1 つにまとめてデータストリーム内に配置する「パッケージング方式」を提案し，利用者が 1

ページ分のデータを取得するのに必要な平均待ち時間の観点から、提案方式の長短所を理論的に検証する。

さらに、検討範囲を広げて HTML 文書間のファイル参照関係についても考慮し、パッケージング方式の問題点を明らかにした上で、その改良によって平均待ち時間を短縮する方法を提案する。具体的には、災害地域の地図画像や情報提供組織のロゴ画像など、多数の HTML 文書が同一のファイルを共有している場合は多々見られるが、各パッケージに同じファイルが含まれていては放送周期が長くなり、平均待ち時間が増加する。この問題に対し、共有ファイルを別のパッケージに分離した上で集約することによって、平均待ち時間がほぼ最小となるパッケージ配置を実用的な時間内で決定するアルゴリズムを提案する。

実験では、提案したアルゴリズムが最適解と同等のパッケージ配置を決定可能なことを示し、その上で、シミュレーションデータと WWW サイトの HTML 文書の両方を用いて平均待ち時間の評価を行い、提案手法の有効性を示す。

以下では 6.2 節で関連研究を紹介し、6.3 節でパッケージング方式の提案と理論的な評価を行う。そして 6.4 節においてファイル共有を考慮したパッケージ配置アルゴリズムについて述べた後、6.5 節で評価実験の結果を示し、結果の考察を行う。最後に 6.6 節で全体のまとめを述べる。

6.2 関連研究

放送型データ通信方式の研究分野では、以下のような研究課題があり、インターネット放送やデジタル放送の発展とともに活発に研究されている。

- (1) データストリームの構成： 平均待ち時間を最小化するデータ構成決定方法。
- (2) キャッシュ戦略： 予め取得しておくデータを決定するプリフェッチ方法。
- (3) マルチチャネル対応： 帯域分割の最適化方法。
- (4) 利用者情報の収集： 非対象通信におけるアクセス確率の推定方法。
- (5) パケット落ちの考慮： 再送要求が難しい状況におけるパケット落ちの対処方法。

本研究は(1)を対象とする。文献[1-5]は同様の問題を扱っており、近年活発に研究されている領域の一つである。これらの研究では、データのアクセス確率に基づいて各データの放送頻度を決定し、取得時間の期待値を最小化する方式を検討している。具体的には、文献[1-3]では放送方式とオンデマンド方式の組合せについて、文献[4]では放送とキャッシュの組合せについて、それぞれ検討している。また文献[5]では待ち行列理論を応用して最適な放送頻度を理論的に示している。これらの研究では放送データを HTML 文書に特化せず、放送頻度の最適化によって取得時間を短縮しており本研究とはアプローチが異なる。

一方、モバイルコンピューティング環境における HTML 文書の伝送方式には

WebExpress[6]がある。この方式では、各端末から送信されるキャッシュデータの内容情報をもとにして、サーバは重複するデータを送らないようにし、通信帯域を節約している。しかし、サーバが個々の端末に応じた処理を行うため、放送型通信には不向きである。一方、デジタル映像の配信方式である DVX[7]は MPEG2 規格の静止画間にリンクを張る機能を持っているため HTML 文書の提供と同等のサービスが可能である。DVX では多くのページで使われるグラフィックスオブジェクトをあらかじめ受信機側に組み込むことで効率化を図っているが、共有されるデータが動的に変わる場合には対応が難しい。

6.3 放送による HTML 文書の伝送

6.3.1 HTML 文書の送信と取得

一般に HTML 文書はハイパーリンクによって関連付けられた複数のファイルから構成される。例えば一般的なWWWのブラウザでは、1つの HTML ファイルと複数の画像ファイルで構成された HTML 文書が1つの画面に表示される。一方、HTML 言語における A タグの HREF オプションによってリンクされるデータファイル g は、 f に対する取得要求とは別に要求しないと取得されないの HTML 文書の構成要素には含めないこととする。この仮定のもとに、本研究では1つの HTML 文書の伝送を、その文書を構成するファイル集合の伝送であるとする。例えば、ある HTML 文書が HTML ファイル e_1 と画像ファイル f_1, f_2 から構成されるとすると、この HTML 文書の伝送とは $\{e_1, f_1, f_2\}$ の3つのファイルを伝送することである。

データストリーム中には各 HTML 文書を重複なく配置し、かつ、1つの HTML 文書を構成するファイルも重複なく配置する。つまり端末は少なくとも1周期待てば、どの HTML 文書に対しても必ず1度はそれを構成するファイルをデータストリームから取得できる。なお、各ファイルはヘッダを付加したパケットの形で放送され、端末はヘッダを検出してファイル取得の可否を決定する。

最悪のケースとして、1つの HTML 文書に含まれるファイルがデータストリーム中に均等間隔で散らばっていると、すべてのファイルを取得するのにほぼ1周期の待ち時間が必要になる。この問題に対し、本研究では1つの HTML 文書を構成する複数のファイルを1つの大きなパケット（パッケージ）にまとめて伝送する方式（パッケージング方式）を提案する[8]。パッケージング方式の採用により、受信装置に負荷のかかるヘッダ検出処理の回数が減るためパケットの取得処理が簡便になるが、データの待ち時間はパケット配置が最適な場合に比べて増加するため、次節において増加量の理論的評価を行って本方式の有効性を検証する。

6.3.2 パッケージング方式採用の是非

n 個のファイル $\{f_1, \dots, f_n\}$ から成る1つの HTML 文書を送信する場合、データストリーム中に n 個のファイルをそれぞれ独立なパケットとして連続して配置すると、平均待ち時間

は最小になる[8]。しかし、 $\{f_i\}$ をまとめて一つのパッケージにするとヘッダの検出回数が1回になる代わりに待ち時間の期待値は増加する。そこで以下では、パッケージング方式による待ち時間の期待値の増加分 ΔW について議論する。

議論を簡単にするため単位時間当たりサイズ1のデータが送信されるとすると、データストリームのサイズは周期と等しくなり、これを T とおく。 $f_i (i=1, \dots, n)$ のデータサイズを u_i 、 u_i の総和を u_s とすると、 ΔW は式(6.1)に表される[9]。

$$\Delta W = \frac{1}{2T} \left\{ u_s^2 - \sum_{i=1}^n u_i^2 \right\} \quad (6.1)$$

ΔW はパケットサイズ u_i の割合によって変わってくるが、すべてのサイズ u_i が等しいときに最大となるので、式(6.2)の値が上限である。

$$\Delta W \leq \frac{1}{2T} \left\{ u_s^2 - \sum_{i=1}^n \left(\frac{u_s}{n} \right)^2 \right\} = \frac{u_s^2}{2T} \left(1 - \frac{1}{n} \right) < \frac{u_s^2}{2T} \quad (6.2)$$

ΔW の上限が周期の1%未満となる条件を求めると式(6.3)のようになる。

$$(\Delta W <) \frac{u_s^2}{2T} < \frac{T}{100} \iff u_s < \frac{\sqrt{2}}{10} T \quad (6.3)$$

つまり、あるHTML文書 h に必要なパケットのサイズの和 u_s がデータストリームのサイズ T の14%以下であれば、 ΔW は周期 T の1%未満である。

一般に、データストリームは多数のHTML文書を含むので u_s に比べて T は非常に大きいと考えられ、パッケージング方式を採用したことによる待ち時間への影響は無視できる。また、ヘッダの検出処理に失敗しパケット落ちすると取得時間が T 増加してしまうが、パッケージを用いないと、パケット落ちの危険が最低 n 回生じることになる。よって、以下ではパッケージング方式によりHTML文書を伝送することとする。

パッケージング方式によってHTML文書を提供する手続きを下記に示す。

- (1) あるHTML文書 h の取得要求を端末が受け付ける。
- (2) 放送データを監視し、ヘッダを見て h のパッケージを取得する。
- (3) パッケージからファイルを取り出して h を利用者に表示する。

(1)と(3)は通常のオンデマンド方式を利用したWWW閲覧処理と同様であり、端末やブラウ

ずの性能で決定される．一方(2)において，放送型通信ではデータストリームに逐次的にしかアクセスできないため，パッケージを送信する順番，つまりデータストリーム中のパッケージ配置が処理時間を決定する．そのため，本研究では(2)におけるヘッダ検出までの待ち時間とパッケージ読み込み時間の和を取得時間と呼び，この取得時間を短縮するためのパッケージ配置方式について議論する．

6.3.3 パッケージング方式における取得時間短縮のための課題

本節では HTML 文書間のファイル参照関係に検討対象を広げ，HTML 文書が同一のファイルを共有している場合について検討する．具体的には，災害地域の地図画像や情報提供組織のロゴ画像など，多数の HTML 文書が同一のデータファイルを共有しているような場合であり，比較的多く見られる参照構造である．この場合，パッケージング方式を採用すると，各パッケージに同じファイルが含まれるため放送周期が長くなり，取得時間の増加を招く結果となる．以下ではデータの共有関係を考慮して取得時間を最小化するためのパッケージ配置を検討する．

一例として図 6.2 に示すように，2つの HTML 文書が同じデータファイルを用いてそれぞれページを構成している場合を考える．図 6.2 の場合， h_1 と h_2 の構成ファイルをそれぞれ1つのパッケージにまとめて伝送すると $\{f_2, f_3\}$ を2回送ってしまうことになる．つまり，データ共有を考慮せずに HTML 文書を個別に伝送すると，データを共有している HTML 文書の数だけ共有データを送信してしまい伝送効率が悪くなる．

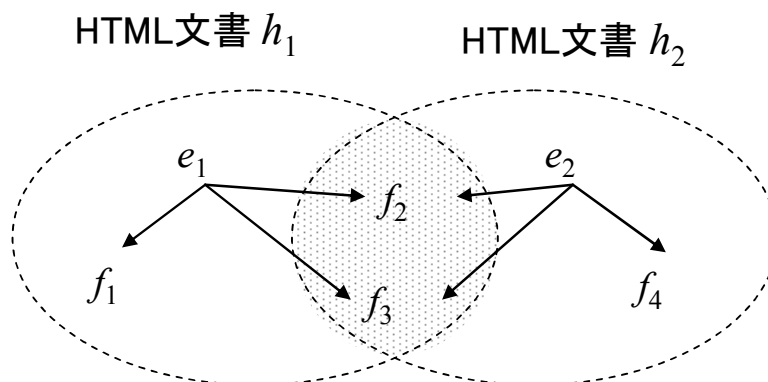


図 6.2 HTML 文書のデータ共有

この問題を解決するには，HTML 文書を共有データとその他のデータ（占有データと呼ぶ）に分け，共有データをまとめて伝送回数を減らせばよい．例えば h_1 なら $\{e_1, f_1\}$ と $\{f_2, f_3\}$ ， h_2 なら $\{e_2, f_4\}$ と $\{f_2, f_3\}$ に分ける．そして $\{e_1, f_1\}$ ， $\{e_2, f_4\}$ および $\{f_2, f_3\}$ から3つのパッケージ H_1, H_2, H_3 を作り，データストリーム中に配置する．これにより共有デ

ータ H_s の伝送は1周期に1度で済む。その結果、周期が短縮され、データが放送されるまでの待ち時間が短くなる。

しかし、端末は1つの HTML 文書を取得するのに2つのパッケージを取得しなければならないため、共有データと占有データがデータストリーム上で離れて配置されていると取得時間が長くなる。つまり、周期を短縮するために共有データをまとめるが、共有データと占有データは近くに配置したい、というトレードオフを解決する必要がある。具体的に、取得時間が最小になるデータストリームの構成を決定するには以下の3つの課題を解決する必要がある。

課題1：共有データが少ないと、すべての占有データを共有データの隣に置くことはできないため、どの占有データを優先して共有データの近くに置くかを決める必要がある。

課題2：共有関係を持たない HTML 文書のパッケージの存在により、共有データと占有データの間隔が広がるため、そのようなパッケージに関しても適切な配置を決める必要がある。

課題3：共有データが多ければ周期が長くなり、少なければ占有データを近くに配置しにくくなるため、共有データの配置数を最適化する必要がある。

次節では、各課題に対する解決策を示し、データ共有を考慮したパッケージの配置方式を提案する。

6.4 データ共有を考慮したパッケージ配置方式

本研究では方式の最適性を取得時間によって評価するため、最初に取得時間を定式化し、それを元に各課題を解決するためのパッケージ配置方式を示す。

6.4.1 準備：取得時間の定式化

取得時間を定式化するにあたって以下の仮定をおく。

- 一般性を失う事なく議論を簡単にするため、単位時間当たりサイズ1のデータが送信されるものとする。つまりデータストリームのサイズが T であるとする、周期も T である。
- 共有ファイルが複数存在する場合、一般には各ファイルを共有する HTML 文書の集合が一致しないので、それらの集合の共通部分 S をとり、 S に含まれる HTML 文書の共有関係のみを考慮する。すべての共有ファイルを考慮すると S が小さくなりすぎるので、共有ファイルを適切に選択する必要があるが、その方法に関しては6.5.2.b項において一例を示すに止め、本研究では議論しない。つまり放送する HTML 文書は、あるデータファイルの集合[10]を共有する n_s 個の HTML 文書 $S = \{h_{si} \mid i = 1, \dots, n_s\}$ と、共有

関係を持たない n_n 個の HTML 文書 $\{h_{ni} | i = 1, \dots, n_n\}$ に分けられる.

- 利用者の要求はランダムに発生する。そのため、データストリームのどの点からも一様な確率でアクセスが開始されるとする。

h_{si} と h_{ni} のアクセス確率をそれぞれ p_{si}, p_{ni} とする。また $\{f_i\}$ のパッケージを H_s , 各 h_{si} の占有データのパッケージを H_{si} , 各 h_{ni} のパッケージを H_{ni} とする(図 6.3).

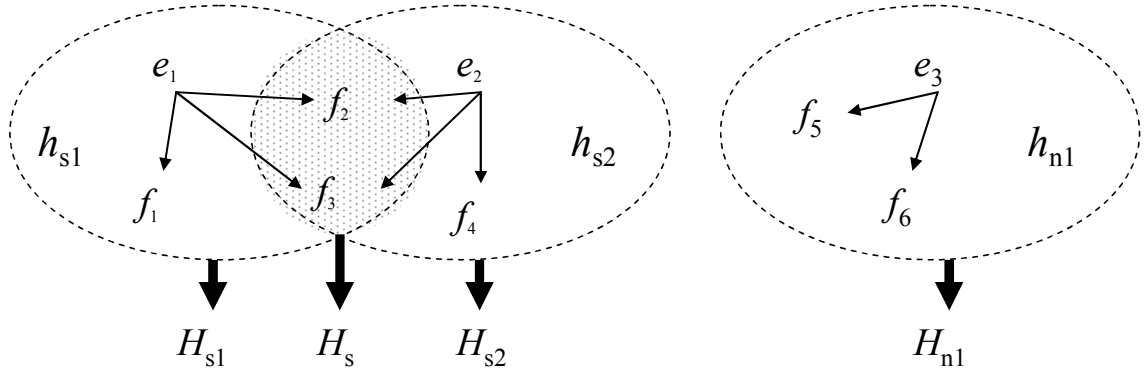
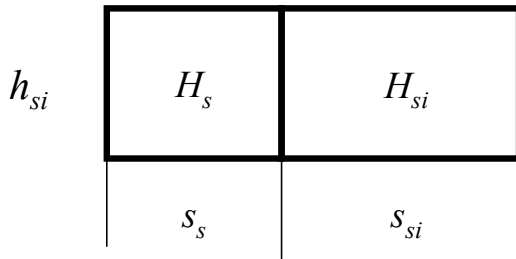
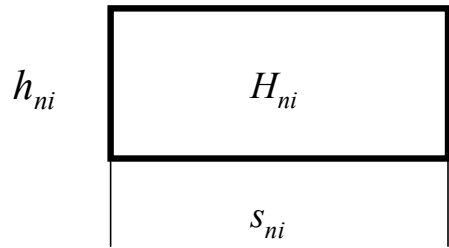


図 6.3 パッケージの記号

また、各パッケージのサイズを(図 6.4)のようにおく。



(a) データを共有するHTML文書



(b) データを共有しないHTML文書

図 6.4 パッケージサイズの記号

データストリーム中に各 H_{si} と H_{ni} は1つだけ、 H_s は m ($1 \leq m \leq n_s$) 個配置することを考える。この場合の周期 T_m は式(6.4)に表される。

$$T_m = \sum_{i=1}^{n_s} s_{si} + \sum_{j=1}^{n_n} s_{nj} + ms_s \quad (6.4)$$

h_{si} を取得するには H_s と H_{si} の2つのパッケージを取得する必要がある．取得時間に影響するのは H_{si} が放送される前に最後に放送された H_s と， H_{si} が放送された後に最初に放送される H_s だけであり，他のパッケージの配置は h_{si} の取得時間とは関係がない．具体的には， H_{si} から最も近い H_s までの距離を d_{1i} ，（その H_s とは反対側の）2番目に近い H_s までの距離を d_{2i} とする（図 6.5）と， h_{si} の取得時間の期待値 E_{si} は式(6.5)の通りとなる．なお，式(6.5)の導出過程は本論文の付録 C に示す．

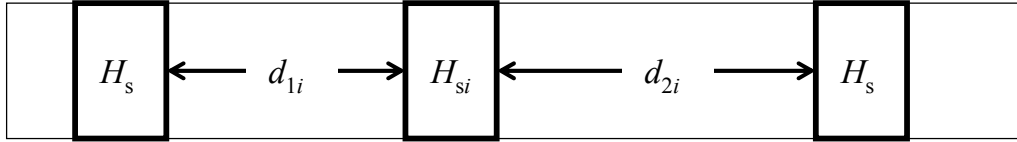


図 6.5 共有データに対する距離

$$E_{si} = \frac{T_m}{2} + s_{si} + \frac{(d_{1i} + s_s)(d_{2i} + s_s)}{T_m} \quad (6.5)$$

一方， h_{ni} を取得する場合， H_{ni} の取得時間の期待値 E_{ni} は式(6.5)において d_{1i} ， d_{2i} ， s_s を0とおくことで $T_m/2 + s_{ni}$ と得られる．明らかに E_{ni} は H_{ni} の配置には無関係である．

以上の結果から， H_s を m 個配置する時の取得時間の期待値 E_m は式(6.6)に表される．

$$E_m = \sum_{i=1}^{n_s} p_{si} E_{si} + \sum_{j=1}^{n_n} p_{nj} E_{nj} \quad (6.6)$$

つまり最適なデータストリームを構成する問題は，アクセス確率 p_{si} ， p_{nj} とデータサイズ s_s, s_{si}, s_{sj} が与えられた時に，式(6.6)の値を最小化する m と $\{H_s, H_{si}, H_{ni}\}$ の配置（すなわち d_{1i}, d_{2i} の値）を見つける，という問題に他ならない．この問題に対し， $1 \sim n_s$ の各 m に対して， $\{H_s, H_{si}, H_{ni}\}$ のすべての配置について E_m の値を求めれば，最適な配置を見つけることができる．しかし，配置の組合せ数は式(6.7)に示す場合の数であり，膨大であるため現実的な手段とは言えない．

$$\sum_{m=1}^{n_s} \frac{(n_s + n_n + m - 1)!}{(m - 1)!(n_s - 1)!} \quad (6.7)$$

そこで、本論文では最適解の必要条件を用いて、実用的な時間で準最適解を求める方式を提案する。

まず0節において m が与えられている場合に準最適なパッケージ配置を $O(n_s \log(n_s))$ で決定する方式として順序配置方式を提案する。その後、6.4.3 節で最適な m を決定する方式を示す。最適な m の決定は単純には $O((n_s)^2 \log(n_s))$ かかるが、 $O(n_s \log(n_s))$ で最適な m を推定する方法を示す。尚、0 節および 6.4.3 節の方式の精度については次の 6.5.1 節で評価を行う。以下では 6.3.3 節の課題を解決しながら、最終的に図 6.6 の構成を持つデータストリームを得るまでを説明する。

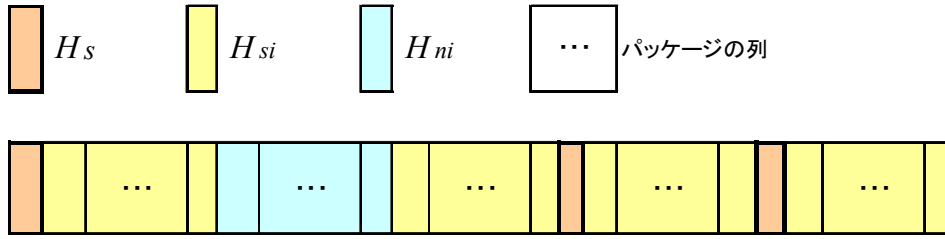


図 6.6 データストリームの構成

6.4.2 順序配置方式

6.4.2.a 課題1：パッケージ H_{si} の列の構成

どの H_{si} を優先して H_s の近くに置くかについて、次の2つの優先順序が考えられる。

- (1) 頻繁にアクセスされる h_{si} のパッケージ H_{si} を優先して近くに配置し、取得時間 E_{si} を短縮する。結果として期待値 $\sum p_{si} E_{si}$ は小さくなる。
- (2) サイズ s_{si} の小さな H_{si} を優先することにより、その後ろに並ぶ他のパッケージがあまり H_s から離れないようにする。

式(6.5)を解析し優先順序を検討した結果[11]、最適な配置に対する以下の必要条件を見つけた。

E_m を最小にするには、 p_{si}/s_{si} の値の大きい H_{si} ほど H_s の近くに配置する必要がある。

なお、証明については各 h_{si} の取得時間を式(6.5)として定式化したことにより、文献[9] 400 ページ、定理 S の証明に帰着できる。

上記の結果をもとに、以下の2つの方針に基づき準最適な d_{li} を決める方式を提案する。

方針 1 : すべての H_{si} を H_s の前後に連続して配置する (各 H_{si} と H_s をできるだけ接近させる).

方針 2 : p_{si}/s_{si} の値に基づいて H_{si} を整列する (上記の必要条件を満たす).

順序配置方式 (前半部)

手順 1 : H_{si} を p_{si}/s_{si} の値の大きい順に並べ, キュー Q を作成する.

手順 2 : パッケージを格納するための空の配列 $\mathbf{H}_{si}$ ($i=1, \dots, 2m$) を用意する. 尚, 各 $\mathbf{H}_{si}$ の長さを $\delta_i = \sum_{H_{sj} \in \mathbf{H}_{si}} s_{sj}$ とする.

手順 3 : Q から先頭の要素 H_{si} を取り出し, 長さ δ_j の最も小さい $\mathbf{H}_{sj}$ に H_{si} を加える. このときの δ_j の値を d_{ji} とする.

手順 4 : $\delta_j = \delta_j + s_{si}$ とする. Q が空でなければ手順 3 に戻る.

この方式には以下の特徴がある.

特徴 1 : 手順 3 において長さ δ_j が最短の列に要素を加えていくので, 各 δ_j はほぼ均等に増加していく. よって最終的に, $2m$ 個の配列 $\mathbf{H}_{sj}$ の長さはほぼ等しく $l = (\sum_{i=1}^{n_s} s_{si})/2m$ となる.

特徴 2 : 手順 3 の処理時間のオーダはヒープ構造を利用することにより $O(\log(m))$ となる. また, 手順 3 は n_s 回実行されるため手順 3 と 4 で $O(n_s \log(m))$ かかる.

$\mathbf{H}_{si}[j]$ を $\mathbf{H}_{si}$ の j 番目のパッケージとすると, 方針 1 より, 各 $\mathbf{H}_{si}$ はデータストリーム中に次のどちらかの状態で配置される.

- (1) $H_s \mathbf{H}_{si}[1] \dots \mathbf{H}_{si}[k]$ ($H_s \mathbf{H}_{si}$ で表す)
- (2) $\mathbf{H}_{si}[k] \dots \mathbf{H}_{si}[1] H_s$ ($\bar{\mathbf{H}}_{si} H_s$ で表す)

つまり, H_s と H_{si} を全体として図 6.7 のように配置する. ただし, 手順 4 までの時点では, まだ, 各パッケージ列 $\mathbf{H}_{si}$ を $i(1)$ から $i(2m)$ のどこに配置するかは特に定めない. その理由としては特徴 1 に述べたように, どのパッケージ列もほぼ同じ長さ l になるので, $i(1)$ から $i(2m)$ のどこに配置しても各 d_{2i} の値に大きな変化はなく, E_m の値に影響は無いと考えるからである.

$$\mathbf{H}_s \mathbf{H}_{si(1)} \bar{\mathbf{H}}_{si(2)} \mathbf{H}_s \mathbf{H}_{si(3)} \bar{\mathbf{H}}_{si(4)} \cdots \mathbf{H}_s \mathbf{H}_{si(2m-1)} \bar{\mathbf{H}}_{si(2m)}$$

図 6.7 $\mathbf{H}_{si}$ と $\mathbf{H}_s$ の配置構成

むしろ d_{2i} に影響を与えるのは $\mathbf{H}_{si}$ ではなく H_{ni} の配置であり、次節でその決定方法を示す。

6.4.2.b 課題 2 : H_{ni} の配置決定

方針 1 から各 H_{ni} は $\mathbf{H}_{sj}$ や $\bar{\mathbf{H}}_{sj'}$ に挿入せずに、 $\mathbf{H}_{sj}$ と $\bar{\mathbf{H}}_{sj'}$ の間、例えば $\mathbf{H}_{si(1)}$ と $\bar{\mathbf{H}}_{si(2)}$ の間に配置する。そのとき H_{ni} を配置することによって $\{d_{2k} \mid H_{sk} \in \mathbf{H}_{si(1)}, \mathbf{H}_{si(2)}\}$ の各 d_{2k} を s_{ni} だけ増加させている。各 $\mathbf{H}_{si}$ に対し、 C_i を式(6.8)のように定める。

$$C_i = \sum_{H_{sj} \in \mathbf{H}_{si}} p_{sj}(d_{1j} + s_s) \quad (6.8)$$

各 d_{2k} が s_{ni} 増加すると取得時間の期待値 E_m は $s_{ni}(C_{i(1)} + C_{i(2)})/T_m$ だけ増加する

以上のことは他の H_{nj} の配置とは無関係に成り立つ。よって C_i の値が 1 番目と 2 番目に小さい H_{si} を $\mathbf{H}_{si(1)}$ と $\bar{\mathbf{H}}_{si(2)}$ の位置に配置し^{*}、その間に H_{ni} をすべて配置する。こうすることにより H_{ni} の配置による H_{si} の取得時間の増加を最小限に抑えることができる。

順序配置方式（後半部）

手順 5 : すべての $\mathbf{H}_{si}$ に対し C_i の値を計算し、 C_i の値が 1 番目および 2 番目に小さい $\mathbf{H}_{sj}, \mathbf{H}_{sk}$ を見つける。

手順 6 : 図 6.7 のように H_s と $\mathbf{H}_{si}$ を配置する。その際 $i(1) = j, i(2) = k$ とする。

手順 7 : $\mathbf{H}_{si(1)}$ と $\bar{\mathbf{H}}_{si(2)}$ の間に H_{ni} をすべて配置する。

以上に示した順序配置方式はそれぞれの m に対して、準最適なパッケージ配置を見つげることができる、それは図 6.6 の構成を持つ。順序配置方式のオーダは手順 1 から $O(n_s \log(n_s))$ である。

^{*} 1 番目と 2 番目というのは手続きの一例であり実際には m 個の組

$\{\mathbf{H}_{si(2j-1)}, \bar{\mathbf{H}}_{si(2j)}\} (j=1, \dots, m)$ のうちのどれでも良い。

6.4.3 課題3： E_m を最小にする m の推定方法

この節では E_m を最小にする m の値 m_{opt} を求める方法について述べる。

単純に考えると、1 から n_s までのそれぞれの m に対して、順序配置方式を適用して配置を決定し、 E_m をすべて求めてしまう方法がある。この場合、順序配置方式の手順1～2は最初に1度だけ行えば良く、手順5～7については $O(n_s)$ で済む。よって、特徴2より、1 から n_s までの全ての m に対して、順序配置方式を実行したときの処理時間のオーダーは式(6.9)のようになる。

$$O\left(\sum_{m=1}^{n_s} n_s \log(m)\right) = O(n_s \log(n_s!)) = O((n_s)^2 \log(n_s)) \quad (6.9)$$

ここではより低いオーダーで各 $E_m (m=1, \dots, n_s)$ の推定値 $\tilde{E}_m$ を求める方法を示す。

式(6.6)において、パッケージを配置しないと決まらないパラメータは d_{1i} と d_{2i} であるが、配置せずに2つのパラメータを推定する。今、 $\{H_{si}\}$ が p_{si}/s_{si} の値により昇順で添え字付けされているとすると、 $j=1$ から $i-1$ までの s_{sj} の和 ($=\Delta_i$ とする) は手順3で H_{si} より先に並べられるパッケージのサイズの総和であり、 $\Delta_i/2m$ は H_{si} を配置する時点における $2m$ 個の H_{si} の平均長である。特徴1からこの平均長 $\Delta_i/2m$ が d_{1i} の推定値 $\tilde{d}_{1i}$ となる。実際には手順3において最短の列に H_{si} を並べるので、 d_{1i} の真値はもう少し小さい。

次に d_{2i} の推定法を示す。順序配置方式では C_i の値により、ある特定の H_s の間隔だけが大きくなる。しかし、各 H_{si} が不明なので H_s の間隔 w は均等であると仮定する。また、 $s_{si} (i=1, \dots, n_s)$ と $s_{ni} (i=1, \dots, n_n)$ の総和を S とすると $w=S/m$ となり、 d_{2i} の推定値 $\tilde{d}_{2i}$ は $w-s_{si}-\tilde{d}_{1i}$ となる。

以上のようにして d_{1i}, d_{2i} を推定する。 $\tilde{d}_{1i}, \tilde{d}_{2i}$ および $T_m = S + ms_s$ を式(6.6)に代入すると、式(6.6)の未知変数は m だけになり、この式を $\tilde{E}_m$ とする。 $\tilde{E}_m$ における m の係数はあらかじめ計算しておけるので、 m が変わる毎に n_s 項の和を再計算する、といった必要がなくなる。

以上をまとめて $O(n_s \log(n_s))$ で m_{opt} の推定値 $\tilde{m}_{opt}$ を求める方法を示す。尚、手順1だけが $O(n_s \log(n_s))$ で、手順2～5までの処理は $O(n_s)$ である。

m_{opt} の推定方法

手順1： $\{H_{si}\}$ を p_{si}/s_{si} の値により昇順で並べる。

手順2： $\{\Delta_i | i=1, \dots, n_s\}$ を求め、 $\{\tilde{d}_{1i}, \tilde{d}_{2i} | i=1, \dots, n_s\}$ を算出する。

手順3： $\tilde{E}_m$ の m の係数を求める。

手順4 : $\{\tilde{E}_m | i = 1, \dots, n_s\}$ を求める.

手順5 : $\tilde{E}_m$ を最小にする m を探し, $\tilde{m}_{opt}$ とする.

つまり, $\tilde{m}_{opt}$ を求め, $m = \tilde{m}_{opt}$ の条件のもとで順序配列方式を用いることにより, 取得時間を最小化するのに準最適なパッケージ配置を $O(n_s \log(n_s))$ のオーダーで求めることができる.

6.5 評価

提案方式の有効性を確認するため, 統計モデルおよび WWW サイトの実データを用いて取得時間の期待値を求め, 方式間の比較を行った. 尚, アルゴリズムの処理時間については実装方法が大きく影響するので, 定量的な評価は行わない.

6.5.1 統計モデルに基づく評価

最初に, 統計モデルに基づいて各パッケージのアクセス確率及びデータサイズを生成して, 提案方式の評価を行った. ここでは次の統計モデルを仮定した.

p_{si}, p_{nj} : 文献[4]と同様に Zipf の法則[9]に従うとする. つまり p_{si} が k 番目に大きい値である時, p_{si} は $1/k$ に比例する. p_{nj} も同様である.

s_s, s_{si}, s_{nj} : s_{si} の平均値および s_s の値を 25 Kbyte, s_{nj} の平均値を 50 Kbyte とする.
つまり h_{si} と h_{ni} のどちらも, それを構成するファイルのパケットサイズの総和の平均値は同じく 50 Kbyte であるとし, これを s_{ave} とおく.

s_{si} と s_{nj} は指数分布に従うものとし, p_{si} と s_{si} , および, p_{nj} と s_{nj} に相関は無いとする.
伝送速度は 1 Mbyte/sec (8 Mbps), 放送によって提供される HTML 文書の総数 n は 200 個とした. つまり, 共有データをまとめなければデータストリームのサイズは (200 個 $\times$ 50 Kbyte =)10 Mbyte, 周期 T は 10 秒である.

6.5.1.a E_m の推定値 $\tilde{E}_m$ の検証

方式の比較を行う前に, m_{opt} の推定に用いられている $\tilde{E}_m$ の値がどの程度正確な推定値であるかを検証する. そのために, 実際に順序配置アルゴリズムにより配置を決定して取得時間の期待値 E_m を算出し, $\tilde{E}_m$ と比較した. この結果を図 6.8 に示す. 図 6.8 の縦軸は $(\tilde{E}_m/E_m - 1) \times 100$ の値である.

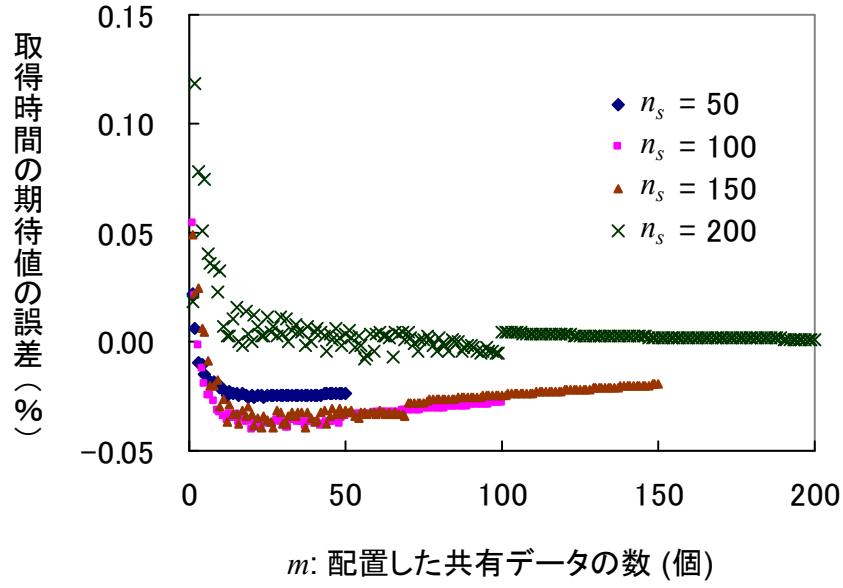


図 6.8 取得時間の期待値の推定値の誤差

図 6.8 ではデータを共有している HTML 文書の割合 n_s/n が高く、また、共有データの配置数 m が少ないほど誤差が増大する傾向にある。しかし、誤差は最大でも 0.12%以下であり、 m_{opt} の推定に問題は無いと考えられる。よって以後、 m の最適値として $\tilde{m}_{opt}$ を用いる。

6.5.1.b 提案方式の評価

提案方式を評価するにあたり、順序配置方式の $m=1$ の場合と $m=\tilde{m}_{opt}$ の場合、および以下の 3 つの場合による計 5 通りの期待値を算出して評価した。

従来方式：データの共有を考慮しない方式。共有データが n_s 個の HTML 文書に共有されていれば、そのデータを n_s 個のパッケージ全部に含めるようにする。この場合、周期が T_{ns} になり、 h_{st} の取得時間の期待値は式(6.5)の第 3 項が s_s になった式で表されるため、従来方式の取得時間の期待値 E_0 は式(6.6)より以下ようになる。

$$E_0 = \frac{T_{n_s}}{2} + \sum_{i=1}^{n_s} p_{si}(s_{si} + s_s) + \sum_{j=1}^{n_n} p_{nj}s_{nj} \quad (6.10)$$

ランダム配置方式：データストリーム中に $H_{si}(i=1, \dots, n_s)$ と m 個の H_s を、間隔を

均等にして配置する． H_{si} の配置順序は無作為に決定する．この方式は，共有データは m 個にまとめるが 6.4.2 節の方針 1・2 は適用しない，という場合である．取得時間の計算式に変更はない．

順序配置方式（キャッシュ利用）：順序配置方式の $m = \tilde{m}_{opt}$ の場合と同様にデータストリームの構成すると共に， H_s をキャッシュし，その取得時間を 0 とする場合である．この場合， h_{si} の取得時間の期待値は式(6.5)の第 3 項が 0 になった式で表されるため，取得時間の期待値 E_c はパッケージを最適に配置した場合よりも更に小さくなる．最適解は実用的な時間では求まらないので，この場合を代わりに比較対象とする．なお， E_c は式(6.6)より以下のようになる．

$$E_c = \frac{T_m}{2} + \sum_{i=1}^{n_s} p_{si} s_{si} + \sum_{j=1}^{n_n} p_{nj} s_{nj} \quad (6.11)$$

図 6.9 に，以上に挙げた各方式の，共有データを持つ HTML 文書の数 n_s と HTML 文書の取得時間の期待値の関係を示す．

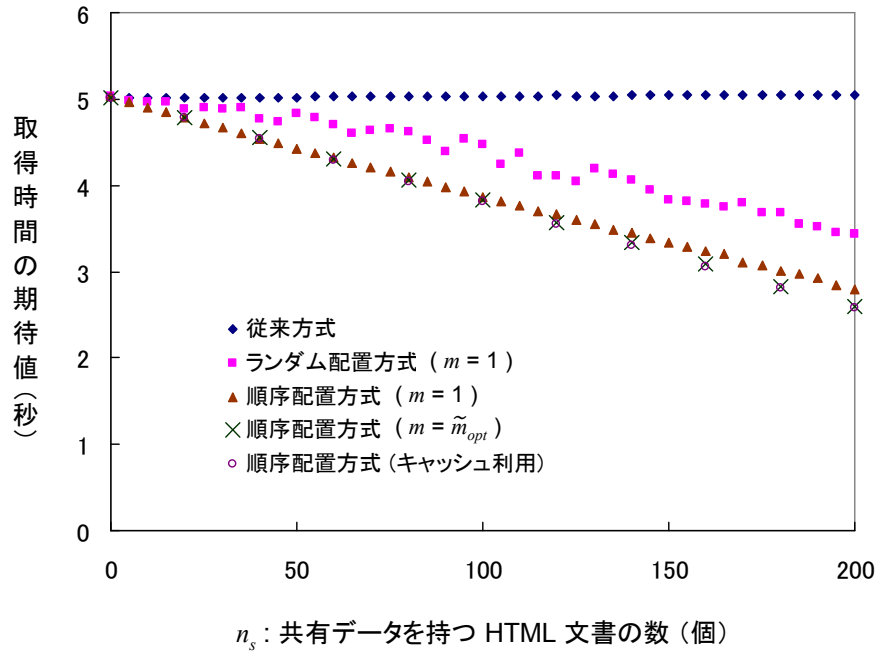


図 6.9 各方式の取得時間の比較

従来方式はデータの共有を考慮しない伝送方式なので n_s の値に関わらず取得時間はほぼ $T/2$ で一定である．それに比べ、 m を最適化した場合の順序配置方式の取得時間が最短であり、 n_s の増加とともに取得時間が大幅に短縮されている．

今まで示してきた各種の工夫が、それぞれどの程度、取得時間を短縮しているかは各方式の差を見ることでわかる．つまり、ランダム配置方式の時間短縮効果は共有データを1つにまとめたことによるものであり、この効果が最も大きい．さらにランダム配置方式と $m=1$ の順序配置方式の差は、単に共有データを1つにまとめるだけでなく、方針1と2を適用することによって得られた効果である．そして最適な m を用いることで取得時間はさらに改善される．

キャッシュ利用の場合の取得時間の期待値は、パッケージを最適に配置した場合よりも小さく、かつ、図 6.9 において $m = \tilde{m}_{opt}$ の場合と差はわずかである．このことから、 $m = \tilde{m}_{opt}$ の場合の順序配置方式はほぼ最適なパッケージ配置を実現していると考えられる．

次に、共有データのサイズ s_s の値を $0.2 \cdot s_{ave}$, $0.5 \cdot s_{ave}$, $0.8 \cdot s_{ave}$ と変えたときの、順序配置方式 ($m = \tilde{m}_{opt}$) の取得時間の期待値を図 6.10 に示す．図 6.10 から s_s の値が大きいほど時間短縮の効果も大きくなることがわかる．

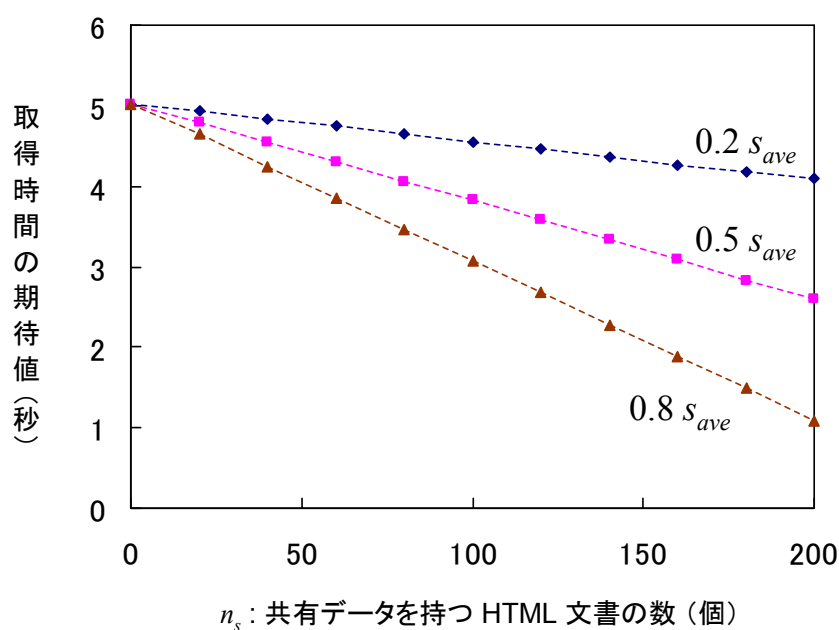


図 6.10 共有データのサイズと取得時間の関係

また、アクセス確率の偏りを変えて順序配置方式 ($m = \tilde{m}_{opt}$) の評価を行ったが、偏りが大きいほど時間短縮の効果が大きかった．アクセス確率が均一の場合、優先順位 (0 節, 方針

2) が低く H_{si} と H_s が離れて配置されている HTML 文書 h_{si} に対しても、他の HTML 文書と同様にアクセスが発生するので、取得時間の短縮効果はランダム配置方式と同程度になる。

6.5.2 実データによる評価

6.5.2.a 実験対象サイトの決定

災害時において WWW を利用して防災情報を提供する組織としては、気象庁、国土交通省、地方自治体のような公共機関と、新聞社のような民間報道機関に分かれ、本研究では両方のカテゴリの WWW サイトに対して実験を行った。

現状では、広域災害時に情報提供主体になると考えられる都道府県の多くで、地図に河川の水位や土砂災害の状況を重畳して常時提供しており、この地図画像ファイルが共有データとなっている。しかし、これらのほとんどの WWW サイトでは JavaScript を利用して動的に HTML 文書を生成しており、評価実験用データセットの取得が困難であった。そこで、防災情報を描き入れた地図を画像ファイルとして提供している以下の2つのサイトを対象に、評価実験を行った。

A-1. 気象庁の地震情報提供ページ(英語)

URL : <http://www.jma.go.jp/en/quake/>

内容 : 震源と各地の震度

A-2. 兵庫県の防災情報提供ページ(日本語)

URL: <http://web.bosai.pref.hyogo.jp/hazardmap/>

内容 : 断層の危険度

これらのサイトでは、同じ地図画像に異なる防災情報を重畳した画像が多数掲載されている。そこで本実験では、それらの画像集合で最小のデータサイズを元の地図画像のデータサイズと仮定し、そのサイズとの差分を防災情報のデータサイズとした。

一方、民間の機関としては、新聞社の WWW サイトが災害に関する情報を多数提供しており、平常時から一般市民の利用も多いと考えられる。これらのサイトは災害発生時には重要な情報提供ソースとなる可能性が高いため、提案方式の有効性を検証した。具体的には 100 万部以上の一般紙を販売する新聞社 4 社 (内 3 社が部数世界ベスト 3) を対象に、災害関係のニュースを掲載する記事カテゴリから HTML 文書を収集し、実験を行った。以下、収集対象とした 4 つの URL を示す。

B-1. YOMIURIONLINE, 社会

<http://www.yomiuri.co.jp/national/>

B-2. asahi.com, 社会

<http://www.asahi.com/national/>

B-3. 毎日 jp, 気象・地震

<http://mainichi.jp/select/weathernews/>

B-4. MSN 産経ニュース, 事故・災害

<http://sankei.jp.msn.com/affairs/disaster/>

6.5.2.b 共有データの決定

実際の HTML 文書では共有されるデータファイルは複数存在し, 各データファイルの共有関係も異なっている. そのため, 共有データのパッケージに含めるデータファイルを適切に選び出す必要がある. 6.5.1 節で示したように, ほぼ n_s と s_s に比例して, 提案方式の時間短縮効果が増大する. そこで本実験では $n_s \times s_s$ の値を最も大きくするデータファイルを順次選択していき, どのデータファイルを選択しても $n_s \times s_s$ の値を大きくすることができなくなったとき, それまで選択したデータファイルをまとめて, 共有データのパッケージとした. また, 各 HTML 文書のアクセス確率および伝送速度については 6.5.1 節と同じ仮定を用いた.

6.5.2.c 取得時間の算出結果

上記 6 つの WWW サイトについて HTML 文書の数とデータサイズを表 6.1 に示す.

表6.1 HTML文書の数とデータサイズ

サイト	T (KB)	n	n_s / n (%)	s_{ave} (KB)	s_s / s_{ave} (%)
A-1	12374	128	24.2	96	61.6
A-2	6410	43	34.8	149	67.7
B-1	26601	134	93.2	198	67.5
B-2	28180	134	91.0	210	88.6
B-3	16434	116	92.2	141	71.2
B-4	18148	53	86.7	342	106.0

公共系の WWW サイト(A-1,A-2)では防災情報の提供に利用されている対象地域全体の地図画像が主な共有データであった. これらの WWW サイトでは各地区の詳細地図を表示する HTML 文書も多く, 共有率(n_s/n)は 30%前後にとどまった. その一方で, 民間系の WWW サイト(B-1~B-4)では, 各ページで共通に利用されているスタイルシートファイルやアイコンの画像ファイルが共有データとなり, 90%前後の高い共有率を示した.

次に従来手法と提案手法の取得時間 (E_0 および E_s) を, 取得時間の改善率($(E_0 - E_s)/E_0 * 100$) と共に表 6.2 に示す.

表6.2 従来手法と提案手法による取得時間

サイト	E_0 (sec)	E_s (sec)	$(E_0 - E_s) / E_0$ (%)
A-1	5.99	5.16	13.87
A-2	3.21	2.54	20.91
B-1	12.87	5.83	54.70
B-2	13.64	3.32	75.68
B-3	7.97	3.42	57.17
B-4	8.98	1.26	85.96

その結果、公共系の WWW サイトでは 20%前後、民間系の WWW サイトでは 50%以上の改善率が得られた。WWW サイトのデータの共有率によって、取得時間の改善率には差が見られたが、公共系と民間系のいずれの防災情報に対しても、ほぼ 5 秒以内のレスポンスを確保し、提案手法の有効性を実データによって示すことができた。

実験対象の防災情報コンテンツは放送型の情報提供を意図せずに作成されたものであるため、将来的に、放送コンテンツとして意図的にデータを共有するように HTML 文書を作成すれば、より大きな改善も可能と考えられる。実験では n_s/n と s_s/s_{ave} の両方の値が高く、改善率の高いサイトは、サイト全体としてページのデザインが統一性を持っているという傾向が見られた。つまり、デザインを統一してデータ共有を積極的に行うようにすれば、提案方式により、限られた帯域でより多くの HTML 文書を提供することができると言える。

テレビCMの製作者が限られた時間にできるだけ多くの情報を詰め込もうとするように、データ放送においても提供者は常に限られた帯域で多くの情報を提供する必要に迫られる。そのような状況では、やはりコンテンツ製作の段階から帯域の節約を意識する必要がある。現状では帯域を節約するために、色数を減らして画像データのサイズを抑えるといった工夫が行われているが、提案方式により、HTML 文書の提供者にはもう一つ別のアプローチが開かれたと言える。

6.6 まとめ

本章では防災情報システムへの適用を目的として、放送による HTML 文書の伝送方式について検討を行った。最初に放送型の伝送方式において WWW サービスを実現可能とする「パッケージング方式」の提案を行った。次に、データの共有がある場合に、利用者の待ち時間を短縮するため、データの共有関係を考慮した放送データの配置決定方式として順序配置方式を提案した。さらに、この方式をもとに共有データの配置数を効率よく最適化する方式を示した。机上評価により、データが共有されている場合、従来方式よりも、順序配置方式のほうがパッケージ取得のための取得時間の期待値が小さくなることを示した。

具体的に、その効果はデータを共有する HTML 文書の数および共有データのサイズにほぼ比例して大きくなることを明らかにした。さらに、実際にインターネット上で公開されている HTML 文書に対して提案方式を適用し、その有効性を示した。

今後は、本研究で示した放送の伝送効率をベースとしてキャッシュやオンデマンド通信方式との最適な組合せを明らかにし、放送・オンデマンド統合型システムとしてレスポンスの向上を目指していく必要がある。また、提案方式は各 HTML 文書のアクセス確率を正しく把握できていることを前提としているが、オンデマンド方式との統合によって、その実態をリアルタイムに把握し、放送データの構成方法に反映していく仕組みが可能になると思われる。

提案方式の有効性はデータの共有度にかかっているが、共有度を上げるための課題としては以下の2つが挙げられる。

- (1) 本研究では $\{h_{si}\}$ と $\{h_{ni}\}$ の2つの集合にしか分けていないが、実際にはデータ A を共有する集合、データ B を共有する集合...といったように多数の集合を扱うことが考えられる。
- (2) 伝送システムの部分だけでなく、コンテンツ作成段階からデータ共有による放送帯域節約のための枠組みを作っていく必要がある。

他の検討項目としては、HTML 文書の間に張られたリンク構造の考慮が挙げられる。具体的には HTML 文書 h_1 から h_2 に対しハイパーリンクが張られ、かつ、利用者の多くがそのリンクを辿るのであれば、 h_1 のパッケージと h_2 のパッケージを、データストリーム上において近くに配置したり、まとめて1つのパッケージにすることが考えられる。このような方式の拡張には HTML 文書のアクセス遷移確率を考慮する必要があり、今後の課題といえる。

第 6 章参考文献

- [1] T. Imielinski, S. Viswanathan, "Adaptive Wireless Information Systems", 情処技報, vol. 94, no. 86, pp.19-41, 1994.
- [2] 箱守聰, 田辺雅則, 石川裕治, 井上潮, "放送型通信 / オンデマンド型通信を統合した情報提供システム", 情報処理学会論文誌, vol. 40, no. 10, pp.3772-3781, 1999.
- [3] 田辺雅則, 箱守聰, 井上潮, "モバイル環境における放送とオンデマンドを組み合わせた情報提供方式", pp.7-12, 1996.
- [4] S. Acharya, M. Franklin, S. Zdonik, "Disseminationg Updates on Broadcast Disks", Proc. of the 22nd VLDB Conf., Mumbai(Bombay), India, pp.354-365, 1996.
- [5] S. Hameed, N. H. Vaidya, "Log-time Algorithms for Scheduling Single and Multiple Channel Data Broadcast", Proc. of MOBICOM '97, Budapest Hungary, pp.90-99, 1997.
- [6] B. C. Housel, D. B. Lindquist, "WebExpress: A System for Optimizing Web Browsing in a Wireless Environment", Proc. of MOBICOM '96, Rye NY USA, pp.108-116, 1996.
- [7] 角谷和俊, 楠見雄規, 岡村和男, "デジタル放送インタラクティブ・データ配信のためのカルーセル型送出方式 DVX とその応用", Proc. of ADBS '97, Tokyo, Japan, pp.23-30, 1997.
- [8] 石川裕治, 田辺雅則, 箱守聰, 井上潮, "放送型情報提供システムにおけるハイパーテキストの伝送方式", 第 5 4 回 全国大会 講演論文集 (3), pp.593-594, 1997.
- [9] D. E. Knuth, "Sorting and Searching", 1st 編, vol. 3, Addison Wesley, 1973.
- [10] G. J. M. Kevin Thompson, R. Wilder, "Wide-Area Internet Traffic Patterns and Characteristics", IEEE Network, vol. 3, no. 6, pp.10-23, 1997.
- [11] 石川裕治, 田辺雅則, 箱守聰, 井上潮, "ハイパーテキスト間のデータ共有を考慮した放送型情報提供方式", データベースシステム研究報告 97-DBS-113, pp.251-256, 1997.

第7章 結論

本論文では、甚大な被害が予測される広域市街地での災害発生に対し、迅速かつ的確な災害対策活動を支援する防災情報システムの実現を目的として、現状で比較的拡充が遅れている情報分析機能と情報提供機能について研究課題を挙げ、その実現方式に関する研究成果を述べた。具体的に情報分析機能に関しては防災情報の可視化と被害予測に必要な基盤データとなる3次元市街地モデルの構築方式を、情報提供機能に関しては遅延のない情報提供が可能なHTML文書の放送型伝送方式を、それぞれ提案し、実データを適用した検証実験によって各方式の有効性を示した。

以下では各章で得られた結論を総括する。

第2章「防災情報システムの課題とシステム構成の提案」では、情報分析機能と情報提供機能に関して国内外の事例を挙げて現状の防災情報システムで提供されている機能を概観した。その結果、情報分析機能では情報を集約して表示する機能と被害を予測・推定する機能が主要な内容であり、本論文では3次元市街地モデルを利用した情報視覚化機能の強化と物理シミュレーションによる予測（あるいは推定）精度の向上を提案した。一方、情報提供機能に関してはWWWやメールが情報提供手段として注目されているが、現状で利用されているオンデマンド型の1対1通信は災害発生直後のアクセス集中によって輻輳が発生しやすいため、一般市民を利用者として想定する防災情報システムの通信方式としては不十分であり、WWWサービスにおける放送型通信の利用を改善手段として提案した。その上で、それらを防災情報システムの各機能に導入した場合の新しいシステム構成を示した。

続く第3章から第5章では、情報分析機能の基盤データとなる市街地モデルの構築方式について提案を行った。なお、現状では上空からの3次元情報の観測データとして画像・映像系データとレーザレンジデータの両方が状況に応じて利用されていることから、本研究では両方のデータに対して市街地モデル構築の実現方式を検討した。なお、画像・映像系データに関しては比較的対応点探索が容易で撮影手段が広く整備されている空撮映像を利用することとした。

第3章「空撮映像からの建物形状復元」では、最初に市街地モデルの構築における両方の観測データに共通の問題点として、現状の建物形状復元が多種多数の手法・パラメータ・データの組み合わせとなり、手法全体の改善やパラメータのチューニングが困難になっている問題を明らかにした。その上で、観測データから獲得した3次元点集合を階層的クラスタリングのみを使って、同一の建物上面に含まれる点集合に分割し、建物の3次元形状を自動復元するBRoC法(Building Recovery on Clustering)を提案した。BRoC法ではクラスタリング結果の最適性をMDL原理によって決定するアプローチを採用し、評価関数であるMDL基準に調整用のパラメータを1つだけ設定することで、利用者が復元手法の詳細を意識することなく、パラメータ調整を比較的容易に実現できるフレームワークを提示した。

実際に BRoC 法を空撮映像から獲得した 3 次元点集合に適用した場合、点集合の分布が不均一であるため、単純に高さが近い点同士をグルーピングしただけでは建物上面の形状を十分に特定できない、という課題が明らかとなった。そのため、最短距離法による階層的クラスタリングに点の上下関係を利用した制約条件（下位点排他制約）を導入し、さらに、段階的に詳細な形状を復元していく枠組み（Layer-Cluster 木）によって、密集市街地においても安定して建物形状を復元できる手法を提案し、形状復元実験によりその有効性を確認した。

第 4 章「広域市街地モデルの自動構築システム」では、第 3 章で提案した BRoC 法を用いて、広域の市街地モデルを空撮映像から構築するシステムを提案した。具体的には、データの処理単位に分けて 4 種類の設定情報（プロファイル）を管理し、プロファイルの自動生成機能によって、構築処理の経験が無いオペレータでも少ない作業量で広域のモデル構築を可能にするデータ管理機構を提案した。そして実験システムに実装し、5 平方キロメートルのモデル構築実験を行ってオペレータの作業量および計算機の処理時間に関して評価を行い、100 平方キロメートル規模のモデル構築実現の見通しを得た。また、同領域のレーザレンジデータを正解データとして適合率および再現率による精度評価を実施し、いずれも 80%近い精度を確認した。

第 5 章「レーザレンジデータからの市街地モデル構築」では、第 3 章で提案した BRoC 法に基づいてレーザレンジデータから建物平面形状の特定および建物形状の復元を行う手法を提案した。レーザレンジデータでは 3 次元点集合がほぼ同じ密度で分布しているため BRoC 法によって建物上面単位に点集合を分割することは比較的容易である。しかし、レーザレンジデータでは建物上面の縁で計測誤差が大きく、建物平面形状の推定精度が低下する。この課題に対し、レーザレンジデータからエッジ点列として得られる輪郭において、エッジ点を段階的に統合することで安定した形状抽出を行う手法を提案した。本手法における統合の過程では MDL 原理にもとづいて、抽出形状の「簡潔性」とエッジ点列に対する「適合性」を符号長という統一の評価尺度で最適化を図り、両者のバランスの取れた形状を自動で選択できる機構を採用した。さらに建物形状の復元実験により手動の抽出形状に対して 90%以上の復元精度を確認すると共に、6.4 平方キロメートルの市街地モデル構築実験を行って、処理時間の観点から 100 平方キロメートル規模のモデル構築に関する実現可能性の見通しを得た。

第 6 章「防災情報提供のための放送型伝送方式」では、情報分析機能によって得られた情報を広く迅速に提供することを目的として、防災情報の提供手段として一般的になりつつある WWW に着目し、放送型伝送方式による WWW サービスの実現方法を提案した。具体的には、HTML 文書内のファイルを 1 つにまとめて伝送する「パッケージング方式」を提案し、放送型伝送方式による HTML 文書の閲覧方法を具体的に示した。さらに、HTML 文書間のデータ共有による待ち時間増加の問題を指摘した上で、利用者待ち時間の期待値を最小化するための必要条件を示し、放送データの配置方式として線形オーダの計算量で

準最適解を算出する「順序配置方式」を提案した。シミュレーション実験により提案手法が最適解に極めて近い放送データ配置を見つけられることを検証した上で、実際の防災情報を提供している WWW サイトに対して提案方式を適用し、HTML 文書を閲覧するまでの待ち時間の短縮に関して有効性を示した。

今後は本研究の成果を活用し、市街地モデルと放送型情報配信の全国的な普及を図ることによって、次世代防災情報システムの確固たる情報基盤を構築することが期待される。そのために、市街地モデルの構築に関しては本研究が想定する 100 平方キロメートルレベルの構築実験を実施して、その上のレベルである数百キロ平方キロメートル規模の広域市街地災害にも対応できることを確認すると共に、日本の市街地全域の構築に対する実用上の見通しをつけることが、実用化における重要なテーマと考えられる。市街地モデルの構築処理では地区を分割して並行処理可能と考えられるが、本研究で実施した実験規模は高々数平方キロメートルであり、その手法や実験結果をそのまま 100 倍以上スケールして適用した場合には、3 次元市街地モデルの格納・表示・検索・統合など異なる側面から様々な課題が想定され、興味深い研究分野を提供すると思われる。

一方、放送型の情報配信についてはオンデマンド型の情報提供について手法提案を行ったが、本来はプッシュ型の通信方式であり、災害発生直後における利用者の情報ニーズが限定的な状況では情報ソース側がプッシュ型で積極的に情報を提供することが有効と考えられる。そのため発災後の情報ニーズを時系列的に分析し、プッシュ型とオンデマンド型を統合した新たな情報提供手法を確立することが必要と思われる。その際には、複数の情報ソースが複数の情報提供手段で様々な小型の携帯端末に情報を提供する、という複雑かつ自由度の高いサービス構成において、効果的な災害対策活動に結びつく情報提供とは何かという点を追求していくことが、災害時に有効な情報提供サービスとして実現するために重要な研究課題となる。

以上に述べた市街地モデルや放送型通信網などの情報基盤は一般市民が直接利用することが可能であり、広域市街地災害、環境問題、テロなど現代社会が直面する様々な危機に関して大きな社会貢献が期待できる。具体的には、市街地モデルの普及によってこれらの危機の発生前後で物理シミュレーションおよび視覚化シミュレーションを詳細に実行することが可能になり、その結果を一般市民に提供することで、危機発生時の状況に関するリアリティの高い認識を社会全体で共有可能になると考えられる。また、放送型情報配信の普及によって携帯端末が情報インフラ化することにより、危機発生時においても各個人が情報を収集することを可能とし、各個人が判断および行動できる自助・共助可能な社会を実現することが期待される。現状では、広域市街地災害、環境問題、テロなどにおいて公的機関の活動だけでは限界があり、今後は個々人の活動に基づく社会全体での対応がより一層重要となっていくと思われるだけに、上記の情報基盤の整備に向けて本研究の成果が活用されることが望まれる。

謝辞

本研究をまとめるにあたり，様々なご指導，ご教示を賜った小杉幸夫教授に深く感謝致します。また，多角的な視点から貴重なご助言を数多く頂きました羽鳥好律教授，佐藤誠教授，長橋宏教授，熊澤逸夫教授に心よりお礼申し上げます。

本研究の一つの柱である放送型通信のテーマに関しては，NTTデータへの入社時より井上潮氏（現在，東京電機大学），箱守聰氏，田辺雅則氏から大変なご指導を頂き，私の最初の論文としてまとめ上げることができました。厚くお礼申し上げます。

もう一つの柱である市街地モデル構築のテーマに関しては，NTTのサイバースペース研究所に転籍後，有川知彦氏（現在，NTTレゾナント株式会社），荒川賢一氏，若林佳織氏，宮川勲氏から有益なご助言と暖かいご支援を頂きました。特に，空撮映像からの市街地モデル構築に関して，宮川氏の知見，研究成果，ビジョンが無ければ本成果の実現は無かったと言えます。ここに深く感謝致します。

社会人博士として本論文をまとめるにあたり，NTTデータ第一公共システム事業本部長の村松充雄氏，および担当の上司である桑田喜隆氏，宮崎早苗氏から暖かいご配慮や励ましを頂きました。また，防災分野での豊富なご経験に基づき，本論文のテーマ確立に大変有益な知見を日々の業務を通じてご教授頂きました。厚くお礼申し上げます。

最後に，長い研究期間を通じて，いつでも支援し，励ましてくれた妻の香織に心からの感謝を捧げます。

発表論文等

論文誌

- [1] 石川裕治, 若林佳織, 有川知彦, 荒川賢一: エッジ点の段階的統合に基づくレーザレンジデータからの市街地モデル構築, 情報処理学会論文誌, Vol. 46, No. 11, pp. 2779--2794 (2005).
- [2] 石川裕治, 宮川 勲, 若林佳織, 荒川 賢一: 空撮映像の分割と統合による広域市街地空間モデルの自動構築, 情報処理学会論文誌, Vol. 45, No. SIG13 (CVIM 10), pp. 21--33 (2004).
- [3] 石川裕治, 宮川勲, 若林佳織, 有川知彦: MDL 原理に基づく 3 次元点集合からの建物モデル復元, 情報処理学会論文誌, Vol. 44, No. SIG 9(CVIM7), pp. 64--74 (2003).
- [4] 石川裕治, 田辺 雅則, 箱守 聰, 井上 潮: HTML 文書間のデータ共有を考慮した放送型情報提供方式, 情報処理学会論文誌, Vol. 40, No. 7, pp. 3051--3062 (1999).

国際会議

- [1] Yuji Ishikawa and Yukio Kosugi: HTML Document Broadcast Method for Disaster Information Systems, 10th International Conference On Advanced Communication Technology, pp.1858-1863, Phoenix Park, Korea (2008).
- [2] Yuji Ishikawa, Isao Miyagawa, Kaoru Wakabayashi, Tomohiko Arikawa : Building Reconstruction Based on MDL Principle from 3D Feature Points, SPRS Commission III Symposium Photogrammetric Computer Vision '02, Vol. XXXIV, No. 3B, pp. 90--95, Graz, Austria (2002).
- [3] Yoshitaka Kuwata, Yuji Ishikawa, and Hisamichi Ohtani : An Architecture for Command and Control in Disaster Response Systems, proc. of 2000 IEEE International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation (IECON-2000), pp. 120--125, Nagoya, JAPAN (2000).

シンポジウムおよびワークショップ

- [1] 石川裕治, 宮川勲, 若林 佳織, 有川知彦: MDL 基準に基づく 3 次元点集合からの形状モデル復元, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU 2002), Vol. 1, pp. 165--170 (2002).
- [2] 大谷尚通, 石川裕治, 桑田善隆: 地図をベースとした現場情報共有システム, 第 11 回機能図形情報システムシンポジウム, (2000).
- [3] 大谷尚通, 石川裕治, 桑田喜隆, 井上潮: 都市 3 次元地図を用いた災害情報提供システム, 第 10 回機能図形情報システムシンポジウム, (1999).

- [4] 石川裕治, 大谷尚通, 桑田喜隆, 井上潮: 防災情報システムにおける意思決定支援のための視覚化方式, 第10回データ工学ワークショップ, (1999).
- [5] 田辺雅則, 石川裕治, 箱守聰, 井上潮: 放送/オンデマンド統合型情報提供システム MobiCaster におけるデータ提供方法の決定方式, マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム予稿集, (1998).
- [6] 箱守聰, 田辺雅則, 石川裕治, 井上潮: 放送型通信/オンデマンド型通信を統合した情報提供システム, マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム予稿集, pp. 55--60 (1997).

国内学会等

- [1] 石川裕治, 宮川勲, 若林佳織, 荒川賢一: 少人数・非熟練オペレータによる広域な市街地空間モデルの自動構築システム, 情処研報 2004-CVIM-142, Vol. 2004, No. 6, pp. 73--80 (2004).
- [2] 石川裕治, 宮川勲, 若林佳織, 荒川賢一: 空撮映像からの広域な市街地空間モデルの構築: 5000 軒規模の自動構築実験, 信学技報 PRMU2003-79, Vol. 103, No. 295, pp. 11--17 (2003).
- [3] 宮川勲, 石川裕治, 若林佳織, 荒川賢一: 空撮画像系列を利用した市街地構造の空間データ復元, 信学技報 PRMU2003-68, Vol. 103, No. 208, pp. 65--70 (2003).
- [4] 橋本香織, 石川裕治, 若林佳織, 有川知彦: ラインセンサステレオ画像からの投票空間分割に基づく建物側面の形状復元手法, 映像情報メディア工学研究会, No. IE2002-190, pp. 41--46 (2003).
- [5] 石川裕治, 宮川勲, 若林佳織, 有川知彦: 線分制約を取り入れた3次元点集合からの建物モデル復元手法, 情処会第65回全国大会講演論文集, Vol. 2, No. 3G-1, pp. 61--62 (2003).
- [6] 宮川勲, 石川裕治, 若林佳織, 有川知彦: 空撮映像からの空間情報獲得のための移動点群除去, 信学会総合大会講演論文集, No. D-12-138, pp. 299 (2003).
- [7] 橋本香織, 石川裕治, 若林佳織, 有川知彦: 高精細長尺実写画像を用いた建造物側面の形状復元手法の検討, 第1回 情報科学技術フォーラム (FIT2002), Vol. 3, pp. 191--192 (2002).
- [8] 宮川勲, 小澤史朗, 穂積寛治, 石川裕治, 若林佳織, 有川知彦: 位置データと車載映像からの2.5次元空間モデル構築の検討, 信学技報 PRMU2001-35, Vol.101, No.125, pp. 31--38 (2001).
- [9] 小澤史朗, 宮川勲, 石川裕治, 長井茂, 有川知彦: 全方位型高精細カメラシステムを用いた建物の側面テクスチャ獲得の検討, 情処研報 2001-CVIM-125, Vol. 2001, No. 4, pp. 87--93 (2001).
- [10] 宮川勲, 小澤史朗, 穂積寛治, 石川裕治, 若林佳織, 有川知彦: 位置データと車載映

像からの 2.5 次元空間モデル構築の検討, 信学技法 PRMU2001-37, Vol. 101, No. 124,125, pp. 31--38 (2001).

- [11] 小澤史朗, 宮川勲, 石川裕治, 若林佳織, 有川知彦: 全方位型高精細画像からの側面都市空間の再構築, 第 14 回 サイバースペースと仮想都市研究会予稿集, pp. 13--18 (2001).
- [12] 石川裕治, 宮川勲, 有川知彦: SCP を用いた航空写真画像のパラメータ推定, 2001 年電子情報通信学会総合大会, No. D-12-152, (2001).
- [13] 石川裕治, 田中哮義, 桑田喜隆: RoboCup-Rescue プロジェクト(第 7 報) 物理モデルにもとづく火災延焼予測, 情報処理学会第 60 回全国大会(5L-07), Vol. 4, pp. 337--338 (2000).
- [14] 桑田喜隆, 石川裕治: RoboCup-Rescue プロジェクト(第 8 報) 災害情報の収集と視覚化, 情報処理学会第 60 回全国大会(5L-08), (2000).
- [15] 田辺雅則, 石川裕治, 箱守聰, 井上潮: 放送/オンデマンド統合型システムにおける放送頻度の最適化手法の検討, 情報処理学会第 55 回全国大会, (1997).
- [16] 石川裕治, 田辺 雅則, 箱守 聰, 井上 潮: ハイパーテキスト間のデータ共有を考慮した放送型情報提供方式, 第 1 1 3 回データベースシステム研究会予稿集, Vol. 1997, No. 64, pp. 251--256 (1997).
- [17] 石川裕治, 田辺 雅則, 箱守 聰, 井上 潮: 放送型情報提供システムにおけるハイパーテキストの伝送方式, 第 5 4 回情報処理学会全国大会, Vol. 3, pp. 593-594 (1997).
- [18] 井上潮, 石川裕治, 田辺雅則, 箱守聰: 放送型情報提供システムにおけるキャッシュ管理方式, 第 1 1 3 回データベースシステム研究会予稿集, Vol. 1997, No. 64, pp. 257--262 (1997).

解説論文

- [1] 若林佳織, 宮川勲, 石川裕治, 荒川賢一: 上空からの 3 次元都市景観情報構築技術, NTT 技術ジャーナル, Vol. 17, No. 2, pp. 8--12 (2005).
- [2] Kaoru Wakabayashi, Isao Miyagawa, Yuji Ishikawa, Kenichi Arakawa: 3-D Urban Environment Model Reconstruction from Aerial Data -- High-definition Video and Airborn Laser Data, NTT Technical Review, Vol. 2, No. 8, pp. 12--20 (2004).

付録

付録 A クラスタ集合に対する MDL 符号長の導出

本節では式(3.1)のモデルの符号長 M_m , および式(3.2)のデータの符号長 M_d の導出について説明する. なお記号は 3.2.4 節に示した定義を用いる.

n 個の点から k 個のレイヤが生成される場合, レイヤ集合を特定するのに必要な符号長は $\log_2({}_{n-1}C_{k-1})$ であり, レイヤ集合が分かればクラスタ集合 $\{C_{i,j}\}$ はクラスタ生成処理によって一意に決定できる. その上で, 各 $C_{i,j}$ が表す柱状モデルの高さ $h_{i,j}$ をモデルのパラメータとし, 文献[1]に従って, m 個のパラメータの最適な符号長は $(m/2)\log_2 n$ となる. よって, モデルの符号長は式(A.1)のように求まる.

$$M_m = \log_2({}_{n-1}C_{k-1}) + \frac{m}{2} \log_2 n \quad (\text{A.1})$$

次にデータの符号長 M_d について説明する. 点 $p(\in C_{i,j})$ の高さのずれ $\delta Z(p) = Z(p) - h_{i,j}$ が現れる確率 $Q(p)$ を, 標準偏差 σ_d の正規分布を仮定し, 式(A.2)で表す.

$$Q(p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_d} \exp\left(-\frac{(Z(p) - h_{i,j})^2}{2\sigma_d^2}\right) \quad (\text{A.2})$$

Shannon の情報量理論[1]によれば, あるデータセットの出現確率が P である場合には $-\log_2 P$ だけの符号長があれば十分である. また, 符号長を最小にするには, $h_{i,j}$ の値として, 正規分布の最尤推定値である平均値 $Z(C_{i,j})$ を用いればよい. 各点 p に対する $\delta Z(p)$ の出現確率は独立とすると, クラスタ $C_{i,j}$ に含まれる点の集合に対する最小の符号長 $M_d(i, j)$ は式(A.3)のように求まる.

$$M_d(i, j) = -\log_2\left(\prod_{p \in C_{i,j}} Q(p)\right) = \frac{1}{2\sigma_d^2 \ln 2} \sum_{p \in C_{i,j}} (Z(p) - Z(C_{i,j}))^2 + \text{const.} \quad (\text{A.3})$$

よってデータの符号長 M_d は, 可変な部分だけを総和し

$$M_d = \frac{1}{2\sigma_d^2 \ln 2} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{m(i)} \sum_{p \in C_{i,j}} (Z(p) - Z(C_{i,j}))^2 \quad (\text{A.4})$$

と得られる． M_m および M_d それぞれに定数を掛けても MDL 基準 $M = M_m + M_d$ の大小関係に無関係であるから，式(A.1)および式(A.4)に $\ln 2$ を掛けて式(3.1)および式(3.2)を得る．

付録 A 参考文献

- [1] 韓太舜, 小林欣吾, "情報と符号化の数理", 培風館, 1999.

付録 B エッジ点列から抽出した建物平面形状に対する MDL 符号長の導出

本節では式(5.1)のモデルの符号長 M_m , および式(5.2)のデータの符号長 M_d の導出について説明する. なお記号は 5.2.3 節に示した定義を用いる.

文献[1]に従えば, n 個のデータから得られた k 個のパラメータを持つモデルの符号長は $(k/2)\log_2 n$ となる. m 個の頂点からなる建物平面形状は, m 個の平面座標つまり $2m$ 個のパラメータによって一意に決定できる. エッジ点の数を n 個とすると, 建物平面形状の最短符号長は式(B.1)となる.

$$M_m = m \log_2 n \quad (\text{B.1})$$

次にデータの符号長 M_d について説明する. 図 5.6 に示した点 p のずれ $d(p)$ が現れる確率 $Q(p)$ は, 絶対標準偏差 σ の指数分布を仮定すると式(B.2)となる.

$$Q(p) = \frac{1}{\sigma} \exp\left(-\frac{d(p)}{\sigma}\right) \quad (\text{B.2})$$

Shannon の情報量理論[1]によれば, あるデータセットの出現確率が P である場合には $-\log_2 P$ だけの符号長があれば十分である. 各点 p に対する $d(p)$ の出現確率は独立とすると, エッジ点グループ G_i に対して $d(p)$ ($p \in G_i$) を記述する最小の符号長 $M_d(i)$ は式(B.3)のように求まる.

$$M_d(i) = -\log_2 \left(\prod_{p \in G_i} Q(p) \right) = \frac{1}{\sigma \ln 2} \sum_{p \in G_i} d(p) + \text{const} \quad (\text{B.3})$$

よってデータの符号長 M_d は, 可変な部分だけを総和して

$$M_d = \frac{1}{\sigma \ln 2} \sum_{i=1}^m \sum_{p \in G_i} d(p) \quad (\text{B.4})$$

と得られる. M_m および M_d それぞれに定数を掛けても MDL 基準 $M = M_m + M_d$ の大小関係に無関係であるから, 式(B.1)および式(B.4)に $\ln 2$ を掛けて式(5.1)および式(5.2)を得る.

付録 B 参考文献

- [1] 韓太舜, 小林欣吾, "情報と符号化の数理", 培風館, 1999.

付録 C データを共有する HTML 文書に対する取得時間の期待値 E_{si} の導出

式(6.5)の E_{si} を導出するにあたって、図 C.1 のように座標軸を定める。なお、記号は 6.4.1 節に示した定義を用いる。

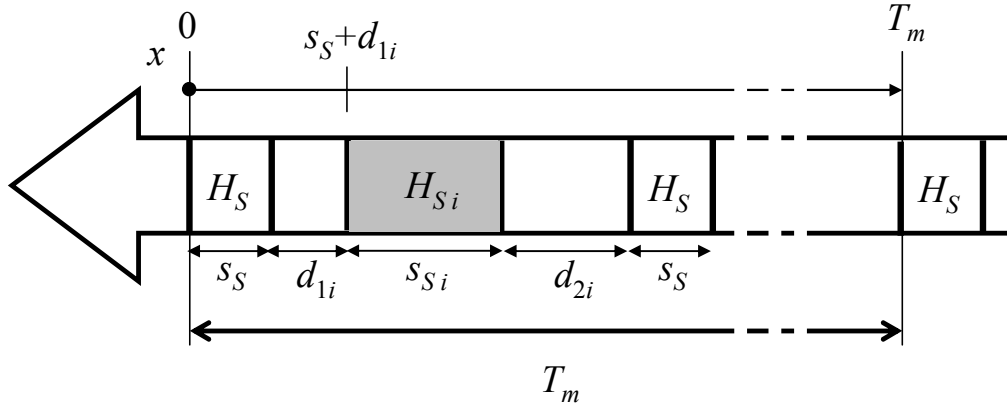


図 C.1 データストリームに対する座標軸の設定

HTML 文書 h_{si} を取得するには H_s と H_{si} の 2 つのパッケージを取得する必要があるが、その際には次の 2 つの場合が考えられる。

場合 1 : 座標 $x(0 < x \leq s_s + d_{1i})$ 地点において端末がアクセスを開始したとすると、 H_{si} の先頭が現れるまで $s_s + d_{1i} - x$ だけ待たねばならない。その後、 $s_{si} + d_{2i} + s_s$ 時間かけて H_{si}, H_s の順にデータを取得して終了する。つまり取得時間は $E = 2s_s + d_{1i} + d_{2i} + s_{si} - x$ 。

場合 2 : 座標 $x(s_s + d_{1i} < x \leq T_m)$ 地点においてアクセスを開始したとすると、 H_{si} の先頭が現れるまで $T_m - x + s_s + d_{1i}$ だけ待たねばならない。この間に少なくとも 1 度 H_s を取得できる。その後、 s_{si} 時間かけて H_{si} を取得して終了する。つまり取得時間は $E = T_m + s_s + d_{1i} + s_{si} - x$ 。

本研究では、利用者の要求はランダムに発生し、データストリームのどの地点からも一様な確率でアクセスが開始されるとする。よって、微小区間 dx からアクセスが開始される確率は dx/T_m であり、 E_{si} は $E \times dx/T_m$ を x について 0 から T_m まで積分することにより、次式で求められる。

$$E_{si} = \frac{1}{T_m} \int_0^{s_s+d_{1i}} (2s_s + d_{1i} + d_{2i} + s_{si} - x) dx + \frac{1}{T_m} \int_{s_s+d_{1i}}^{T_m} (T_m + s_s + d_{1i} + s_{si} - x) dx \quad (\text{C.1})$$