

小人数・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

石川 裕治[†] 宮川 勲[†] 小澤 史朗[†]
若林 佳織[†] 荒川 賢一[†]

あらまし：本稿では、空撮映像から市街地空間モデルを自動構築して広域の市街地景観を再現するシステムを提案する。広域の構築処理において入出力データや処理パラメータを管理する作業はオペレータに大きな負担となる。提案システムでは、設定情報の管理ファイル（プロファイル）による管理機構を備え、プロファイルの自動生成機能および階層的なプロファイルの管理機構により、作業負担を軽減し、構築作業全体を省力化する。さらに、Web インターフェースを通じたプロファイルおよび処理レポートへのアクセス機能により、オペレータが処理経過や出力結果を任意の端末で簡易に確認することを可能にし、異常発生時の対処を容易にする。これらの機能により、オペレータに作業スキルや専門知識が無い場合でも Web 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している。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空間モデルを構築する。その結果、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な見通しを得る。

キーワード：市街地空間モデル、市街地構造、空撮映像、空間情報、自動化システム

An automatic reconstruction system of wide urban structures with a few and unskilled operators

YUJI ISHIKAWA,[†] ISAO MIYAGAWA,[†] SHIRO OZAWA,[†]
KAORU WAKABAYASHI[†] and KENICHI ARAKAWA[†]

Abstract: In this paper, we introduce an automatic reconstruction system for wide urban structures using aerial image sequences. For large scale reconstruction, it is needed to hold down operation complexity and data management cost. The proposed system reduces the complexity by a management function based on configuration record files (Profiles), and provides functions for operators to generate Profiles automatically and to manage profiles hierarchically. The operators can access the Profiles and process reports through Web interface on almost all computers, and deal with troubles on reconstruction processes easily. These system features enable a few and unskilled operators to reconstruct wide urban structures with simple operations on a Web browser. As an experiment, a single inexperienced operator reconstructs about 5 kilometer urban structures in 10 days, and we confirm the possibility of urban structure reconstruction over 10 square kilometers from both standpoints of processing cost and operation complexity.

Keywords: 3D city model, Urban structure, Aerial image sequence, Spatial Data, Automatic system

1. はじめに

現実の都市構造を 3 次元化したモデルデータ（以下、市街地空間モデル）は、都市部の電波伝搬や災害時の被害をシミュレーションする際の基礎データとして利用されてきた¹⁾。現在では都市計画やナビゲーションへ市街地空間モデルの利用領域が拡大し、情報化社会の基盤データとして、その重要性が認識されている²⁾。

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、航空写真を用いた構築システムとしては CC-

MODELER³⁾、RADIUS⁴⁾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。オペレータは専用の操作端末で長時間の作業を強いられ、また、手法に関する専門知識、スキル、経験が要求される。その結果、オペレータの人数、作業時間、作業場所が限定されてしまい、ソフトウェアおよびハードウェアの性能が向上しても、システム全体として構築時間を短縮することができない。

これに対し、近年の空撮映像システムの高機能化により、時空間分解能が高く、かつ、シームレスな映像が容

[†] 日本電信電話株式会社 NTT サイバースペース研究所
NTT Cyber Space Laboratories, NTT Corporation

易に取得できる環境が整いつつある。空撮映像ではオプティカルフローを適用することで高密度の対応点探索が可能になる。筆者らはこの点に着目し、空撮映像から市街地空間モデルを構築することを目的として、以下の自動化手法を提案してきた。

- (1) 空間連鎖復元法⁵⁾により、空撮映像から空間的に連続な3次元座標値データ(以下、空間情報)を復元
- (2) 市街地構造復元法⁶⁾により、空間情報から市街地の3次元形状モデル(以下、市街地構造)を復元
- (3) 市街地構造を地表面データと統合し、市街地空間モデルとして構築⁷⁾

市街地空間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。一度に処理できる領域は限られるため、広域の構築領域は多数に分割され、入出力データや処理パラメータを管理する作業はオペレータに大きな負担となる。そのため、各分割領域あるいは各段階の処理を自動化しただけでは、上記の半自動化システムと同様の問題を抱えることになる。

提案するシステムでは、専門知識やスキルを持たない少数のオペレータが広域の構築作業を円滑に進められるようにすることを目的とする。具体的には以下の方針で構築処理のシステム化を行う。

- コンピュータビジョンや測量などの専門知識のないオペレータが簡易な設定操作を行うだけで、構築処理を実行できる
- 処理全体を適切なステップに分割し、かつ、一度に処理するデータを適切な単位に分割することで、処理結果を逐次確認しながら広域の構築作業を進められる
- 3次元情報の復元に失敗した場合でも簡単な操作による対処手段をオペレータに提供する

つまり、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、専門知識の無いオペレータが適切なタイミングで簡単な設定・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。提案するシステムはプロフィールと呼ばれるデータ管理ファイルを利用して、構築処理に関連する様々なデータを一元的に管理する。さらに、作業インターフェースをWebブラウザを利用して統一することによってオペレータ作業の簡素化を図り、上記の方針を実現する。市街地空間モデルの構築実験では約5平方キロメートルの構築作業を、作業経験の無い1名のオペレータによって円滑に進められることを示す。

2. 市街地空間モデル構築システム

2.1 構築処理の流れ

市街地空間モデルの構築処理の流れを図1にしたがって説明する。なお、各ステップの詳細については文献⁵⁾、

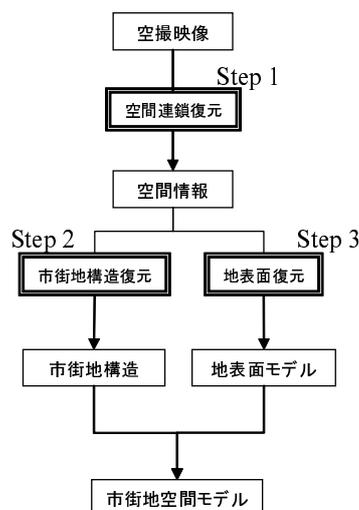


図1 市街地空間モデル構築処理の流れ
Fig.1 Outline of reconstruction process

6)を参照していただきたい。

空撮映像は構築対象領域の全域をカバーするために、複数のコースに分けて撮影する。Step 1: 1コース分の空撮映像を枚数一定の画像列(画像系列)に分割し、各画像系列に対して特徴点追跡および3次元点群獲得を行う。各画像系列から獲得した3次元点群に空間連鎖復元法を適用し、空間的にシームレスな空間情報を復元する。この空間情報を地表面にある部分と建物上面にある部分に分離する。Step 2: 建物上面にある部分に対して市街地構造復元法を適用し、地上建造物の3次元形状を抽出して市街地構造を復元する。さらに、地上建造物の上面形状を画像フレームに投影してテクスチャを獲得する。復元された市街地構造は地理情報システム(Geographic Information System: GIS)が管理するのに適したメッシュ単位に分割して格納する。Step 3: 地表面部分の空間情報に対して平滑化処理を行って地表面モデルを生成する。最後に、テクスチャ付きの市街地構造を地表面モデル上に配置することで市街地空間モデルを構築する。以上の各処理ではオペレータによる教示情報を必要とせず、自動処理が可能である。

2.2 構築作業を実施する上での問題点

上記で述べたように、オペレータは様々な処理を段階的に実行して市街地空間モデルを構築する。構築処理がシステム化されていない状態では図2のようなソフトウェア構成となる。オペレータは各処理のプログラムをコンソールから順に実行し、処理経過や出力結果を確認しながら構築作業を進める。処理ごとに管理しなければならない情報として、例えば特徴点追跡では画像系列の先頭フレームや追跡処理時の探索窓のサイズ、追跡結果のファイル名などがあり、10項目以上になる場合がある。入出力データのファイル名や処理パラメータといっ

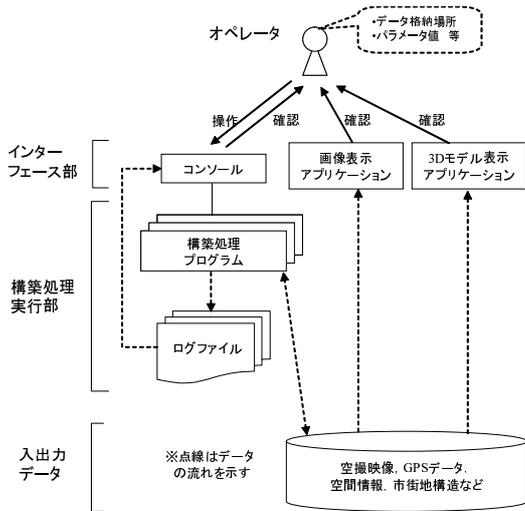


図2 ソフトウェア構成とデータの流れ (システム導入前)
Fig. 2 Software components and data flow without proposed system

た設定情報は、プログラム実行時に毎回正しく設定されなくてはならないばかりでなく、処理結果の確認などで処理終了後も随時必要とされる。複雑かつ広域の構築作業においては設定情報の管理がオペレータの大きな負担となる。

もう一つの問題として、各ステップの処理が自動化されているため処理経過や処理結果の確認がオペレータの重要な作業になるが、図2の構成ではインターフェースが統一されていないため、煩雑な作業が必要となる。具体的には、入出力データやログファイルの格納場所を特定し、データの種別に応じて異なるアプリケーションで表示しなくてはならず、異常発生時のトラブルシューティングも困難である。

統一したインターフェースを提供するために、オペレータ作業のための統合環境を専用ツールを作成して実現する方法も考えられる。この場合、一つのツールに様々な機能が盛り込まれることになり、システムの拡張や変更が難しく、また、操作に習熟した専門のオペレータが必要となる。さらに、ソフトウェアをインストールした端末の前に待機するという作業形態になりやすく、作業環境の柔軟性に乏しい。

2.3 設定情報の管理機構および統一インターフェース

本稿で提案する市街地空間モデル構築システムの構成を図3に示す。システムは各処理の設定情報を保存するファイル(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)を生成し、これら2種類のファイルと入出力データをすべてWeb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。

オペレータは最初にWebブラウザ上でプロファイルを作成し、構築処理に必要な情報を設定する。プロファ

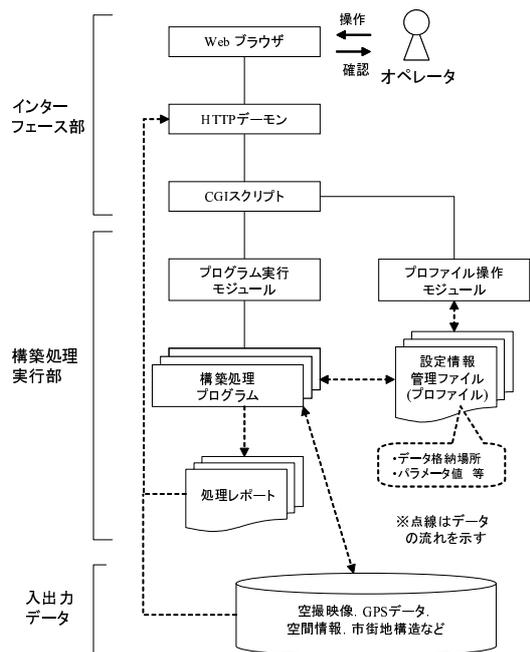


図3 ソフトウェア構成とデータの流れ (システム導入後)
Fig. 3 Software components and data flow on proposed system

イル操作モジュールは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い、最小限の設定作業でプログラムの実行を可能にする。次に各構築処理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。

プロファイルは設定項目と設定値の対を列挙したテキストファイルとして保存されている。Webブラウザに内容を表示する際には、プロファイル操作モジュールは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)。Web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(空間情報、市街地構造)をすべてWebブラウザ上で確認できる。

プログラム実行モジュールおよび各構築処理プログラムは図2のログファイルの代わりに、HTML形式で処理経過をWebサーバ上の一定の場所に出力する。このHTMLファイルを処理レポートと呼び、オペレータはプロファイルごとに一意に決まるURLによっていつでも表示できる(図5)。処理レポートにはHTMLの自動リロード命令が埋め込まれており、表示しておくだけで自動的に更新される。プログラム実行モジュールは、処理終了時の処理レポートに処理結果の内容と共にパラメータの変更指定や再実行命令を行うためのHTML記述を含める。この機能により、システムは処理終了時の処理レポート表示画面において、トラブルシューティングた

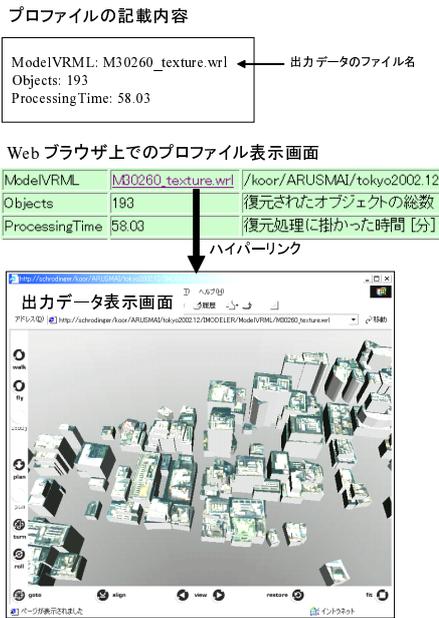


図 4 Web ブラウザ上でのプロファイル表示
Fig. 4 Displaying Profile on Web browser



図 5 処理経過の確認画面 (処理レポートの表示)
Fig. 5 Monitoring display (report viewing)

ID	状態	特徴点数(実行後)	特徴点数(追跡後)	スコア	終了時刻	処理時間(分)	再実行	モデル	閾値 (gamma)
I301_051	終了	8308	8308	1.80	Tue Mar 25 11:18:45 2003	14.9	<input type="checkbox"/>	R3	0.0
I301_052	終了	8520	8520	12.56	Tue Mar 25 11:32:40 2003	13.9	<input checked="" type="checkbox"/>	R3	0.5
I301_053	終了	7914	7914	3.00	Tue Mar 25 11:45:30 2003	12.8	<input type="checkbox"/>	R3	0.0
I301_054	終了	8476	8476	3.14	Tue Mar 25 11:45:30 2003	12.0	<input type="checkbox"/>	R3	0.0

図 6 処理終了時の結果一覧表示画面
Fig. 6 Result list after 3D shape acquisition process

めのユーザーインターフェースをオペレータに提供する。

図 6 は複数のプロファイルに対する 3 次元点群獲得結果の一覧表示画面である。獲得誤差 (図 6 では 'スコア' と表示) が大きなプロファイルを再実行対象として選択し、獲得手法や処理パラメータを変更することができる。入力された新しい設定値は自動的にプロファイルに更新され、プログラムが再実行される際に利用される。

2.4 階層的なプロファイルの管理と自動生成機能

各処理で扱うデータの処理単位や設定項目はそれぞれ異なっているため、最小限必要な複数種類のプロファイルを使い分ける必要がある。空間情報の復元処理 (Step 1) および市街地構造の復元処理 (Step 2) では共通の設定項目が少ない。そのためステップごとにコースプロファイル、モデルプロファイルと呼ぶ 2 種類のプロファイル

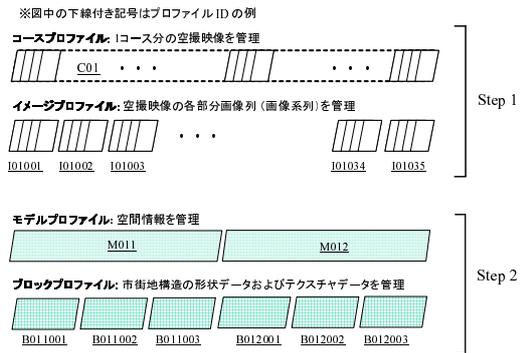


図 7 4 種のプロファイルが管理するデータ
Fig. 7 Relations of 4 kinds of Profiles and data

ルに設定項目をまとめる。さらに Step 1 では分割された画像系列ごとに、Step 2 では GIS の管理単位であるメッシュ領域ごとにデータの管理が必要となるため、それぞれイメージプロファイル、ブロックプロファイルと呼ぶプロファイルを用いる。以上、4 種類のプロファイルが管理するデータを 図 7 に示す。なお、プロファイル操作モジュールが提供する作成・表示・変更といった基本操作のインターフェースは全種類のプロファイルで共通化する。

イメージプロファイルに対するコースプロファイル、ブロックプロファイルに対するモデルプロファイルをそれぞれ上位プロファイルと呼ぶことにする。オペレータは上位プロファイルに設定を行えば、対応する下位のプロファイルはプログラム実行モジュールによって自動的に生成される。上位プロファイルでは生成した下位プロファイルの先頭 ID および最終 ID (図 7 の C01 では I01001 と I01035) を記録するための設定項目を備えている。プログラム実行モジュールはこれらの設定値を参照し、下位プロファイルを自動的に生成して各プロファイルに対して処理を進める。広域の構築作業では下位のプロファイルが多数生成されるが、下位プロファイル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上位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。

2.5 オペレータ作業および構築処理の詳細

本節ではオペレータの作業およびシステムの処理について詳細を述べる。オペレータはすべての操作を Web ブラウザ上で行う。Step 1 と Step 2 はどちらも (1) プロファイルの設定、(2) プログラムの実行、(3) 処理レポート表示画面におけるトラブルシューティング、という流れで作業を行う。

Step 1-1: コースプロファイルの設定

オペレータは空間情報を復元する撮影コースを選択し、コースプロファイルを作成する。パラメータの設定項目には事前に構築処理の専門家によって決定されたデフォルト値が入れられており、オペレータは一部の項目を設定す

ればよい。具体的には、先頭フレーム StartFrame、終了フレーム EndFrame(または全体のフレーム数 Frames)、生成するイメージプロファイルの先頭 ID StartProfileID の3つだけである。設定終了後、オペレータはコースプロファイル表示画面で Step 1 の実行ボタンを押す。

Step 1-2: イメージプロファイルの自動生成とプログラムの実行

Step 1-2 はシステムの処理のみであり、オペレータの作業は発生しない。以下の説明では、各設定値を設定項目名のイタリック体で示す。プログラム実行モジュールは StartFrame から EndFrame までの画像列を Frames 枚ごとに画像系列に分割し、各画像系列に対して StartProfileID から連続的に ID を割り振ってイメージプロファイルを生成する。最後のイメージプロファイルの ID は設定項目 EndProfileID に保存される。各イメージプロファイルにはコースプロファイルに設定されている処理パラメータがコピーされ、また、各画像系列の先頭フレームが設定される。プログラム実行モジュールは StartProfileID のイメージプロファイルから順番に特徴点追跡および3次元点群獲得を実行する。

Step 1-3: 処理レポート表示画面における再実行

3次元点群獲得処理が終了すると各イメージプロファイルには獲得精度が保存され、処理レポートには StartProfileID から EndProfileID までの獲得精度が一覧表示される(図6)。オペレータは一覧表示画面において、精度の低いイメージプロファイルのパラメータおよび獲得手法を変更して3次元点群の獲得処理を再実行する。

Step 1-4: 連鎖復元処理による空間情報の生成

通常は StartProfileID から EndProfileID までの3次元点群を一つのシームレスな空間情報として復元する。しかし、河川や空地を含む空撮シーンでは Step 1-3 で設定を変更しても十分な精度を得られない場合が多い。オペレータは処理レポート表示画面において、精度の高いイメージプロファイルのみを選択して連鎖復元処理を実行する。復元後、空間情報ごとにモデルプロファイルが自動生成され、空間情報のファイル名や特徴点数などが保存される。

Step 2-1: モデルプロファイルの設定

モデルプロファイルには市街地構造復元プログラムのパラメータを設定する必要があるが、コースプロファイルと同様に、プロファイル生成時にデフォルト値がセットされる。連鎖復元処理の処理結果を示す処理レポート画面において、オペレータは生成されたモデルプロファイルへのハイパーリンクを通じてモデルプロファイルを表示し、設定を確認する。さらに、ブロックプロファイルの先頭 ID を設定項目 StartProfileID に設定し、市街地構造復元処理の実行ボタンを押す。

Step 2-2: 処理レポート表示画面における再実行

処理終了後は市街地構造の形状モデルのファイル名がモ

デルプロファイルに登録される。図4に示すように、オペレータはモデルプロファイルの表示画面から形状を表示して確認できる。形状全体に問題があればパラメータを変更して再度復元処理を行う。復元形状に部分的な異常が見られる場合には、処理レポートを表示して、形状モデルに含まれるオブジェクトごとに空間情報への適合度(3次元の点群に対する3次元形状のずれ)を一覧する。そして、適合度の低いオブジェクトに対して設定を変更して再度復元する。復元形状に問題が無ければ市街地構造の出力ボタンを押す。

Step 2-3: ブロックプロファイルの自動生成

プログラム実行モジュールは、出力された形状モデルデータを GIS の管理単位であるメッシュ領域ごとに分割し、各領域に対してブロックプロファイルを生成して形状モデルデータと上面テクスチャデータの管理情報を登録する。モデルプロファイルの設定項目 StartProfileID および EndProfileID は Step 1-2 と同様に利用される。

Step 3: 地表面モデルの生成

Step 3 は全コースの空間情報を復元した段階で実行するため、構築処理全体で1度しか行われず、オペレータ作業はほとんど発生しない。空間情報は空撮時の GPS データによってカメラ座標系から地理的な座標系(世界測地系⁸⁾)に変換されている。空間情報に含まれる特徴点で閾値よりも低い標高を持つ点を、モデルプロファイルに登録されたすべての空間情報から集める。地表面の空間情報に対して平滑化およびサンプリング処理を行い、格子状に配置された標高データとして地表面モデルを得る。

地表面モデルおよび市街地構造の形状モデルは VRML 形式で保存される。市街地空間モデルのメイン VRML ファイルから、各ブロックプロファイルに登録された VRML ファイルと地表面モデルの VRML ファイルが読み込まれ、世界測地系に従って一体の市街地空間モデルとして Web ブラウザ上に表示される。

3. 市街地空間モデル構築実験

3.1 実験概要

構築実験では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。

図8に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3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: Pentium 4/2.8GHz, メモリ: 1GB, OS: Linux)に処理を振り分けて実行した。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

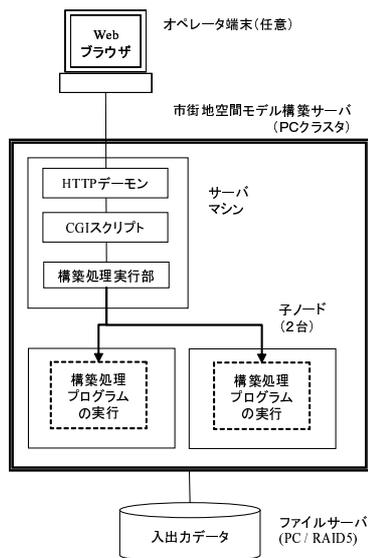


図 8 構築システムのハードウェア構成

Fig. 8 Hardware components of the proposed system on our reconstruction experiment

上でい、オペレータへの迅速なレスポンスを確保した。一方で、オペレータは作業しやすい端末を任意に選択し、Web ブラウザを通じてシステムにアクセスした。

3.2 市街地空間モデルの構築結果

図 9 に 1 コース分の空撮映像から空間情報および市街地構造を復元した結果を示す。この例では 1 つのコースプロファイルから 35 のイメージプロファイルが生成されて 3 次元点群の獲得が行われた。その結果、中間の連続する 2 つのプロファイルにおいて目標とする獲得精度を得られなかったため、2 つの空間情報に分割して Step 2 以降の処理を実行した。構築処理の専門家は処理レポートの表示画面 (図 5) から問題のイメージプロファイルおよび入力画像を表示して大きな河川と高速道路があることを確認し、精度低下の原因説明を短時間に行うことができた。2 つのモデルプロファイルから復元された市街地構造 1 と 2 はそれぞれ 4 個および 2 個のブロックプロファイルに分割管理された。

次に 2 つの地区において構築した全域の市街地空間モデルを図 10 に示す。構築した市街地空間モデル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。ここにテキスト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。地表面モデルのテキストチャには航空写真を用いた。復元した市街地構造と地表面のテキスト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を確認した。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。

各地区の構築処理において生成されたデータおよび処

表 1 生成されたデータと処理時間

Table 1 The amount of data and processing time on reconstruction process

地区名	A	B
構築面積	約 1 km ²	約 4 km ²
コースプロファイル数	9	24
イメージプロファイル数	131	821
空間情報の点数	1,196,038	7,037,858
モデルプロファイル数	10	51
ブロックプロファイル数	26	134
オブジェクト数	2,127	11,095
処理時間 [時間]	56.5 (2 日と 8.5 時間)	181 (7 日と 13 時間)

理時間を表 1 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空間モデルを 10 日で構築できた。5 平方キロメートルで 10 日間という構築時間は、平常の市街地構造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をあまり必要としないため実用化に問題がないと考える。

構築処理は Step 1 では飛行コースごと、Step 2 では空間情報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る。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できた。生成されたイメージプロファイルおよびモデルプロファイルの総数はそれぞれ 952 個および 160 個であった。2.4 節で述べた自動生成機能が無ければオペレータによるプロファイルの設定作業に膨大な時間がかかり、子ノードに対するジョブの投入が遅れることで構築時間が増大していたと考えられる。また、下位プロファイルに対する上位プロファイルの個数は Step 1 では約 1/30、Step 2 では約 1/3 になっており、特に Step 1 においてプロファイルの階層的な管理が作業の効率化に大きな効果を発揮した。

3.3 オペレータの作業量

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。なお、今回の実験では Step 2-2 においてオブジェクト単位で復元処理を再実行する機能を実装していないため、Step 2-2 の作業時間はモデルプロファイルの設定を変更して市街地構造全体の復元処理を再実行した部分のみとなる。

本システムでの構築作業は作業時間よりも処理時間の方が圧倒的に長い。そのため、オペレータは 1 時間程度の概要説明後すぐに Step 1-1 を実施し、他の作業の説明は処理実行中に受けることができた。説明時間は Step 1-3、Step 1-4、Step 2-1、Step 2-2 にそれぞれ 30 分程度であったが、プロファイルの設定→実行→結果確認という Step 1 と Step 2 に共通の枠組みにより、短時間に作業を理解することができた。

2 地区合計の作業量を各ステップ毎に表 2 にまとめ

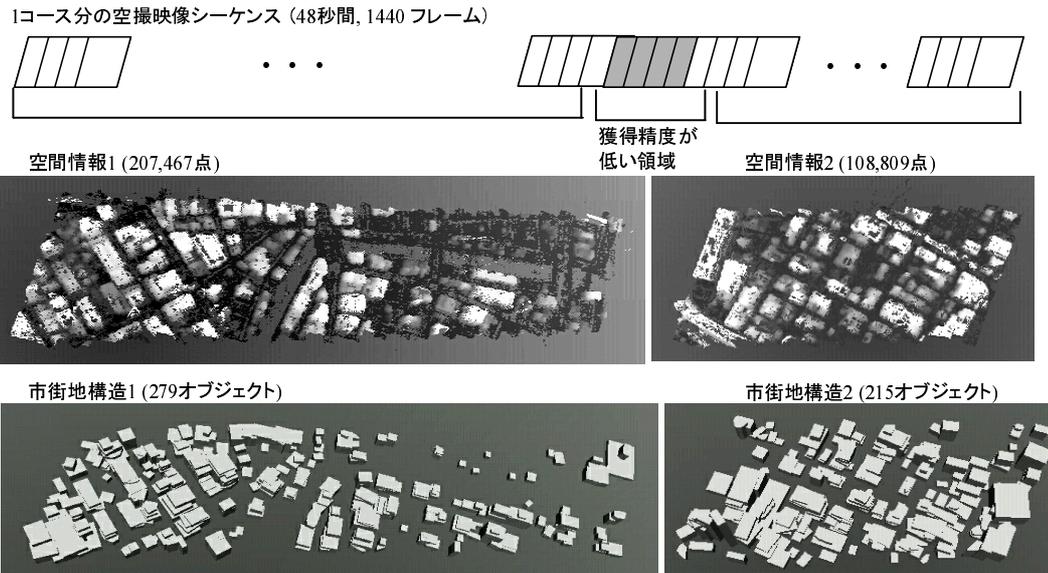


図 9 1 コース分の復元過程
Fig. 9 Recovery process on a single course

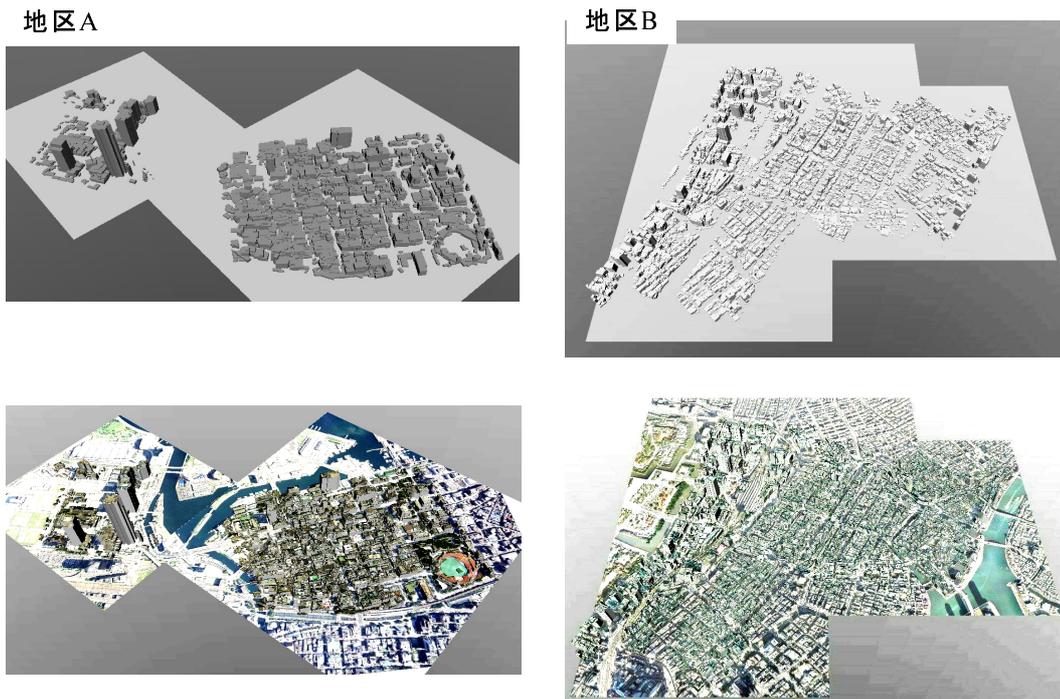


図 10 市街地空間モデル構築結果 (上段: テクスチャ無し, 下段: テクスチャ有り)
Fig. 10 Reconstruction results in wide urban areas

た. 作業回数としては Step 1-3 が 44.5 % を占め, トラブルシューティングの手段をオペレータに提供することが構築作業を円滑に進める上で重要であることが分かった. それと同時に, 処理レポート表示画面 (図 6) において再設定のインターフェースを用意したことにより Step 1-3 の 1 回分の作業時間を低減でき, 全体の作業時間を抑えるのに効果的であった.

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. 現状のシステムは PC クラスタとしては最小の構成であり, 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. その場合でもオペレータの作業量にはまだ十分な余裕があり, 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を超える規模の市街地空間モデルを構築で

表 2 オペレータの作業時間

Table 2 Summary of manual operation time

Step	1-1	1-3	1-4	2-1	2-2	合計
回数 (A)	33	102	33	61	8	229
作業時間 (単位は分)						
1 回分 (B)	5	3	2	3	2	15
A × B	165	306	66	183	16	736

きる見通しを得ることができた。

本実験では 1 日の作業時間が約 1 時間だったため、オペレータは処理の終了を監視しながら構築以外の作業を行うことができた。本システムでは 図 5 の処理レポート表示によって処理経過を常時確認でき、かつ、すべての作業を Web 画面上で実施できる。Web ブラウザの起動・終了はシステムの処理に影響がなく、Web ブラウザが動作する任意の端末から複数のオペレータがプロフィー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し、処理の待ち時間を有効に利用することができた。

Step 1 に比べ Step 2 の作業量が少ないのは、Step 2-2 において復元精度の低いオブジェクトに対し、個別に復元処理を再実行する作業を行わなかったためである。本実験では、Step 1-3 で 3 次元点群の再投影誤差によって獲得精度をオペレータに提示したが、Step 2-2 において空間情報と形状データの適合度が必ずしも形状の良否と合致していないことが多く、オペレータに客観的な判断基準を提示することは困難であった。また、高速道路の高架など特殊な構造物が含まれる領域では、復元処理のパラメータを変更して再度復元処理を行うよりも、モデリングツールを起動して個別に修正を行うほうが効果的なケースも見られた。

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-Modeler³⁾ 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が、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 倍の生成速度を達成している。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. おわりに

本稿では、空撮映像から市街地空間モデルを構築して広域の市街地景観を再現するシステムを提案した。システムでは、プロフィールの自動生成機能および階層的なプロフィールの管理手段により、オペレータが入出力データや処理パラメータを管理する負担を軽減し、構築作業全体を簡素化した。さらに、Web インターフェースを通じたプロフィールおよび処理レポートへのアクセス機能

により、オペレータが処理経過や出力結果を任意の端末で簡単に確認することができ、異常発生時の対処を容易にした。これらの機能により、オペレータに作業スキルや専門知識が無い場合でも Web 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空間モデルを構築した。その結果、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な見通しを得ることができた。

現状の構築結果は VRML ファイルとして保存され、Web ブラウザ上で 3 次元モデルの表示・確認を行っているが、より広域なモデル構築では作業の進捗把握や作業領域の設定ミスを避けるために、構築エリア全体のデータ管理や可視化機能を充実させる必要がある。また、市街地構造の 3 次元形状の品質は市街地空間モデルを利用するユーザの印象に大きな影響を与える。そのため、Step 2-2 における異常形状の検出および対処は重要な課題であり、自動化する部分と手動で行う部分を整理して、形状が異常なオブジェクトへの対処手段を提供することが今後の課題となる。

参 考 文 献

- 1) 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, 情報研報 97-MPS-16, Vol. 97, No. 113, pp. 1-6 (1997).
- 2) 総務省: 「GIS 構築のための情報通信技術の研究開発」報告書 (2003). <http://www.3dgis.jp>.
- 3) Gruen, A. and Wang, X.: CC-MODELER: A TOPOLOGY GENERATOR FOR 3-D CITY MODELS, *ISPRS Journal*, Vol. 53, No. 5, pp. 286-295 (1999).
- 4) Heller, A., Fua, P. and Connolly, C.: The Site-Model Construction Component of the RADIUS Testbed System, *Proc. of ARPA*, pp. 345-356 (1996).
- 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 (掲載予定), Vol. J87-D-II, No. 4 (2004).
- 6) 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).
- 7) Ozawa, S., Miyagawa, I., Nagai, S. and Arikawa, T.: Constructing Wide Area 3D Digital City, *Proc. of International Workshop Urban 3D and Multi-Media Mapping*, Tokyo, Japan, Tokyo University (2000).
- 8) 国土地理院: 日本の測地座標系. <http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/datum/>.