

都市空間における社会基盤の持続可能な開発 のためのプロダクトデータモデルの適用

大阪大学大学院 工学研究科 環境・エネルギー工学専攻
教授 矢吹 信喜

平成21年9月

助成研究者

やぶき のぶよし

矢吹 信喜

現職：大阪大学大学院工学研究科 教授 (Ph.D.)

主な著書・論文：

- 土木情報ガイドブックー土木情報の標準化ー (分担, 建通新聞社 2005年)
- 土木情報ガイドブックー土木技術者のための情報収集と活用ー (分担, 土木学会 2007年)
- グローバル時代における建築情報連携技術ー建築生産情報統合ガイドブック・4ー (分担, 日本建築学会 2008年)
- 橋梁マネジメントー技術・経済・政策・現場の統合ー (B・ヤネフ著, 分担翻訳, 技報堂出版 2009年)
- 土木設備の維持管理体系における巡視点検とICタグの活用(土木学会論文集, No.777/VI-65, 161-173, 2004)
- PC 橋梁の3次元プロダクトモデルの開発と応用 (土木学会論文集, No.784/VI-66, 171-187, 2005)
- サイバーインフラストラクチャ構築による価値創造に向けて (土木学会論文集, No.805/VI-69, 1-13, 2005)
- Cooperative reinforcing bar arrangement and checking by using augmented reality, Cooperative Design, Visualization, and Engineering 2007, Springer-Verlag, 50-57, 2007.
- Representation of caves in a shield tunnel product model, eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction, Taylor & Francis Group, 545-550, 2009.

目次

1. 序論	1
1. 1. 研究の背景と目的	1
1. 2. 本報告書の構成	2
2. 既往研究及び関連事例について	3
2. 1. 従来の VR 作成手法について	3
2. 1. 1. 従来の VR 作成手法	3
2. 1. 2. 従来の手法の問題点	4
2. 1. 3. 既存の 3 次元 CAD データを適用した場合	4
2. 2. ポリゴンリダクション	7
2. 2. 1. ポリゴンリダクションとは	7
2. 2. 2. ポリゴンリダクションの問題点	8
2. 3. BIM	8
2. 3. 1. 2 次元 CAD から BIM	8
2. 3. 2. BIM に関する取り組み	9
3. VR ソフトウェアの動作速度	10
3. 1. 大阪大学モデル	10
3. 2. ニース・コートダジュール空港モデル	14
4. BIM データから VR モデルへの変換手法	18
4. 1. 直方体 VR モデルの作成手法	18
4. 2. 3 つの立体の積集合から VR モデルを作成する手法	23
4. 3. 提案手法が適用可能な建築物の形状	28
4. 4. 評価	31
5. 結論と今後の課題	35
5. 1. 結論	35
5. 2. 今後の課題	35
参考文献	36

1. 序論

1. 1. 研究の背景と目的

土木・建築構造物を建設し共用することや都市計画を実施することは、社会や自然に対して大きな影響（インパクト）を与える。従って、事業者だけで計画や設計を行うことは許されず、周辺住民や関係する市民や機関、企業、NGO、NPO等の利害関係者と合意形成を図ることが必要である。そのため、公聴会などでプロジェクトに関する説明を行い、利害関係者と意見交換を行うことが一般的に行われている。プロジェクトの説明において、通常の2次元の図面と文書を使用したのでは、専門外の利害関係者にとっては理解し難く、誤解が生じることもあって、プロジェクトの推進に負の影響を及ぼしかねない。

そこで、以前から、3次元的なパース図やコンピュータグラフィクス（CG）を用いたモニター写真等が説明に補助的に利用されてきた。最近では、コンピュータ技術の進歩と低価格化によって、仮想現実感（バーチャルリアリティ：Virtual Reality：VR）技術を用いて、より現実に近い画像を、静止画だけでなく、視点を移動させ、画面内の自動車などの物体を動かした動画として見せることが広がりつつある。VRは、完成後の姿を直感的に理解でき、専門家と非専門家との間のコミュニケーションを円滑化することに有用だと評価されている。

VR画像や機能に対する人々の要求水準は、さらに高まり、もっとリアルな画像を見たい、より詳細な部分を見たい、もっと広い範囲を3次元化して欲しい、といった要求の他に、視点を移動させながら見たい、設計変更したらどうなるかを見たい、といったリアルタイムな会話性（インタラクティブティ）が要求されるようになってきた。こうした高度な要求に対応する研究も進められているが、3次元モデルが巨大化するとともに、動画表示するためにコンピュータへの負荷が非常に大きくなり、画面表示に支障を来すことが問題となっている。

一方で、VRで比較的広範囲の都市モデルを作成しようとする、3次元モデルの作成や現地でのデジタル写真の撮影と加工などに相当な時間と労力を費やすこととなり、一つのプロジェクトのために、どこまで高度な要求水準に応じて行くべきなのかは大きな課題と考えられる。簡便にVR都市モデルを作成する方法として、GIS（Geographic Information System）データの建物の輪郭線を高さ情報を元に、鉛直方向にスイープして3次元モデルを作る手法が採用されつつある。しかし、この方法は、都市空間をかなり高い位置から俯瞰するには適しているものの、建物に近づいていくと違和感が生じる。

建築分野では、最近、3次元の建物モデルを中心に、意匠、構造、設備、生産設計に関する異なるソフトウェア間でデータを交換あるいは共有しながら、短期間でビルディングの設計を行うBIM（Building Information Modeling）が注目を浴びている。BIMで設計を行うようになれば、建物は、3次元モデルとして設計され、モデルデータは、3D CADシステムやVRソフトウェアで可視化することができる。建築分野では、近い将来、ビルディン

グの設計や施工は BIM を用いて行われるようになると予想されている。また、既存の建物についても、維持管理や補修などのために、BIM 化が進むと考えられる。そのために、レーザープロファイルスキャナーのポイントクラウドデータから 3 次元モデルを構築する研究が盛んに進められている。従って、そう遠くない将来、都市部のほとんどの建物は、何らかの形で BIM 化され、建物の 3 次元データが入手可能になると考えられる。しかしながら、BIM のデータは通常膨大であり、何千何万と建物がある都市のモデル構築に、そうした膨大な BIM データを、そのままの形で用いることは、将来、コンピュータが高速大容量化したとしても、インタラクティブに動作させることは困難だと考えられる。

そこで、本研究では、通常、実務で構築されている VR による都市モデルを、現状のコンピュータのハードウェアとソフトウェアの技術水準で動作させた場合の動作性能（パフォーマンス）を計測するとともに、計測方法に関する検討を行うことを第一の目的とした。

次に、数多くの建物の BIM データを都市モデル VR でインタラクティブに利用できるようにするために、VR としての要求水準をある程度保ちつつ、建物の BIM データを簡略化させる新しい手法を構築することを第二の目的とした。

1. 2. 本報告書の構成

本報告書の構成について述べる。第 1 章では本研究に関する背景と目的について述べる。第 2 章では従来の VR 作成手法とその問題点、ポリゴンリダクションとその問題点について述べ、さらに BIM とその流れについて述べる。第 3 章では VR のパフォーマンスについて述べる。第 4 章では第 2 章で述べた問題点を踏まえて、本研究で開発した BIM データの簡略化による VR モデルの効率的な作成手法について述べる。第 5 章では、第 4 章で構築した手法についての適用や評価について述べる。第 5 章では結論と今後の課題について述べる。

2. 既往研究及び関連事例について

2. 1. 従来の VR 作成手法について

2. 1. 1. 従来の VR 作成手法

従来の VR データ作成の流れを以下に記す¹⁾。

1. 対象地域の平面データの入手

対象地域の 2 次元 CAD データがあれば入手する。もしない場合は、Google Map や紙の地図などを CAD ソフトでなぞり、CAD のベクターデータを作成する。CAD データのフォーマットは DWG (drawing) や DXF (Drawing Interchange File) が一般的に使用される。

2. 3DCG モデリングソフトウェアに読み込む

1. で作成した 2 次元 CAD データを 3DCG モデリングソフトウェアに読み込み、基礎データとする。山や谷などの凹凸のある地形の場合は、等高線などを参考にしながら、平面的な基礎データの線分などを上げ下げして、3 次元化する。

3. 現地にてデジタル写真撮影

現地にて、対象敷地の建物などのテクスチャデータを得るためにデジタルカメラにて撮影を行なう。建物は基本的に正面から撮影する。また、建物だけでなく、看板、柵、車止め、道路舗装、植樹も撮影する。地図やデータと違う点、建物の高さなどをメモする。

4. 3 次元モデル作成

2. で作成した基礎データを基に、3DCG モデリングソフトウェアを使用して建物や構造物の 3 次元モデルを作成する。建物は、構造平面線形を鉛直上方に引き伸ばし (extrude) したり、ボックス化したりし、屋根は、屋上部分を分割して中央部を引き上げたりして作成する。基礎データに表示されていない、看板や道路標識などは、現地写真を参考にしながら 3 次元モデルを作成する。構造物等の高さや寸法については、図面があれば参考にするが、なければ経験値を使用する。重要な構造物の場合は、現地で測量を行う。

5. デジタル画像データの加工とテクスチャマッピング

3. で撮影したデジタル写真データを、3 次元モデルに貼り付けできるように、画像編集ソフトウェアを使用して、形状補正などの加工を行う。また、グラフィック処理のパフォーマンス向上のため画像の大きさは、256×128 ピクセルや 128×512 ピクセルなどのように、2 のべき乗にする。保存形式は JPEG を基本とする。また、窓や柵などの部分を透過させる場合は BMP 形式とし、透過部分を黒 (RGB=(0.0,0.0,0.0)) とする。VR ソフトウェアによっては TGA 形式などで、アルファチャンネルの機能を利用する。

加工した画像データを4. で作成した3次元モデルの構造物にテクスチャマッピング方式で貼り付ける。貼り付けることにより3DCGモデリングソフトウェアのデータと画像データとはリンクができる。

6. VRソフトウェアへデータをコンバート

5. で作成した3次元モデルをVRソフトウェアが対応している3次元モデルの形式にてエクスポートする。エクスポートした3次元モデルをVRソフトウェア上で編集し、配置や機能の設定を行なう。

2. 1. 2. 従来の手法の問題点

従来の手法では、テクスチャマッピング方式を用いるため、デジタル写真が必要になるが、立地条件や建築物の形状から適切な写真が手に入るとは限らない。例えば、建築物の前面に木々や電線がある場合は、それらを加工して消す作業が必要になる。時間帯によっては周辺の建築物の影があたり、色調が異なる部分も加工する必要がある。高層な建築物に関してはデジタル写真で全体を撮影すること自体が困難である。非常に狭い道路脇の建築物なども正面から撮影することはできない。

上述のような建築物に関してはデジタル写真を画像編集ソフトによって加工することが必要になる。この加工作業は、長い時間を要することが多く、仕上りの品質も影響を与えてしまう。また、写真を撮る季節や時間帯によっては色調が異なり、撮影の季節や時間帯にも配慮が必要である。

ひとつの建築物のVRモデルを作成するためには、経験上、約1時間を要する。仮に1,000個の建築物のVRモデルを作成する場合、約1,000時間を要することになる。1日1人当たりの労働時間を8時間とすると、125日を要する。これらは作成だけに要する時間であり、撮影などの現地調査の時間も必要であるから、かなりの時間がかかることがわかる。

2. 1. 3. 既存の3次元CADデータを適用した場合

建築物や構造物などの既存の3次元CADデータが存在する場合はそれらを利用することが効率的なように見える。しかし、これらのデータはかなり詳細な形状や外部から見えな配管やダクト、室内設備などを表記していることから、相当にデータ量が大きく、VRにおけるリアルタイムレンダリングのパフォーマンスに影響を与えることになる。

そこで、3次元CADデータをそのままVRモデルに適用した場合、どのようなパフォーマンスを示すのかについて検証をした。使用したパソコンの仕様は表1の通りである。使用したモデルはGraphisoft社のサンプルデータ²⁾である。サンプルデータは図1に示すような5階建てのモデルであり、3DS形式でのポリゴン数が472,138である。大きさは幅約32m、奥行き約43m、高さ約34mである。このモデルを平面上に縦16個×横16個(計256個)を配置し、図2に示すような俯瞰するパス(path)で俯瞰する際のfps(frame per second)を測定した。fpsとは1秒間に表示するフレーム(静止画)の数である。

表 1 使用したパソコンの仕様

Name of the computer	SONY VGN-Z90PS
OS	Microsoft Windows XP Professional 5.1.2600 (Japanese)
CPU	Intel(R) Core(TM)2 Duo CPU P8400 @ 2.26GHz
Memory	2048MB (1067MHz)
GPU	NVIDIA GeForce 9300M GS (512MB)
HD	250GB, 5400RPM, SATA-2

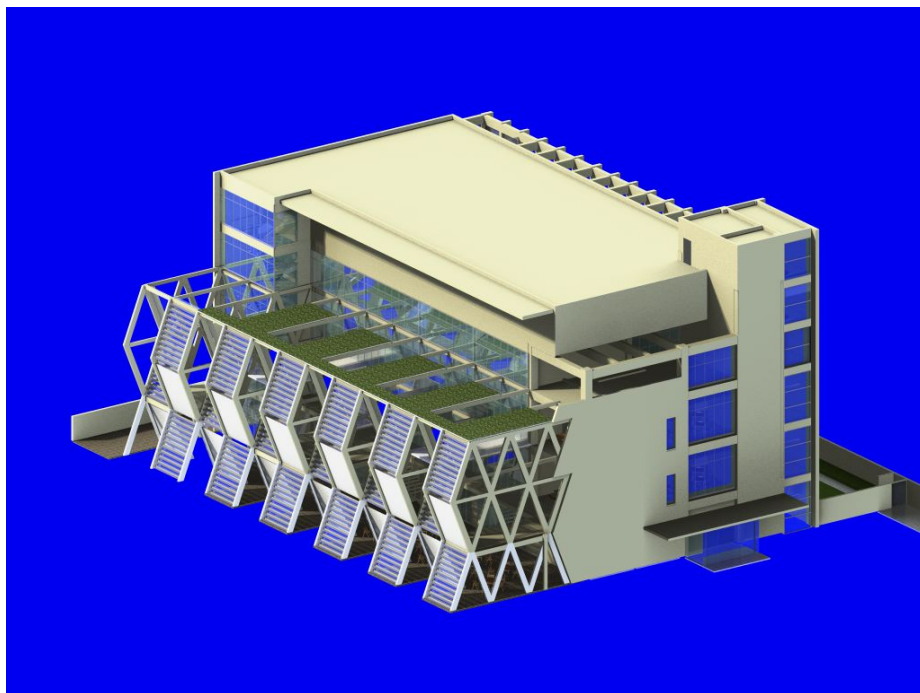


図 1 サンプルデータのパース

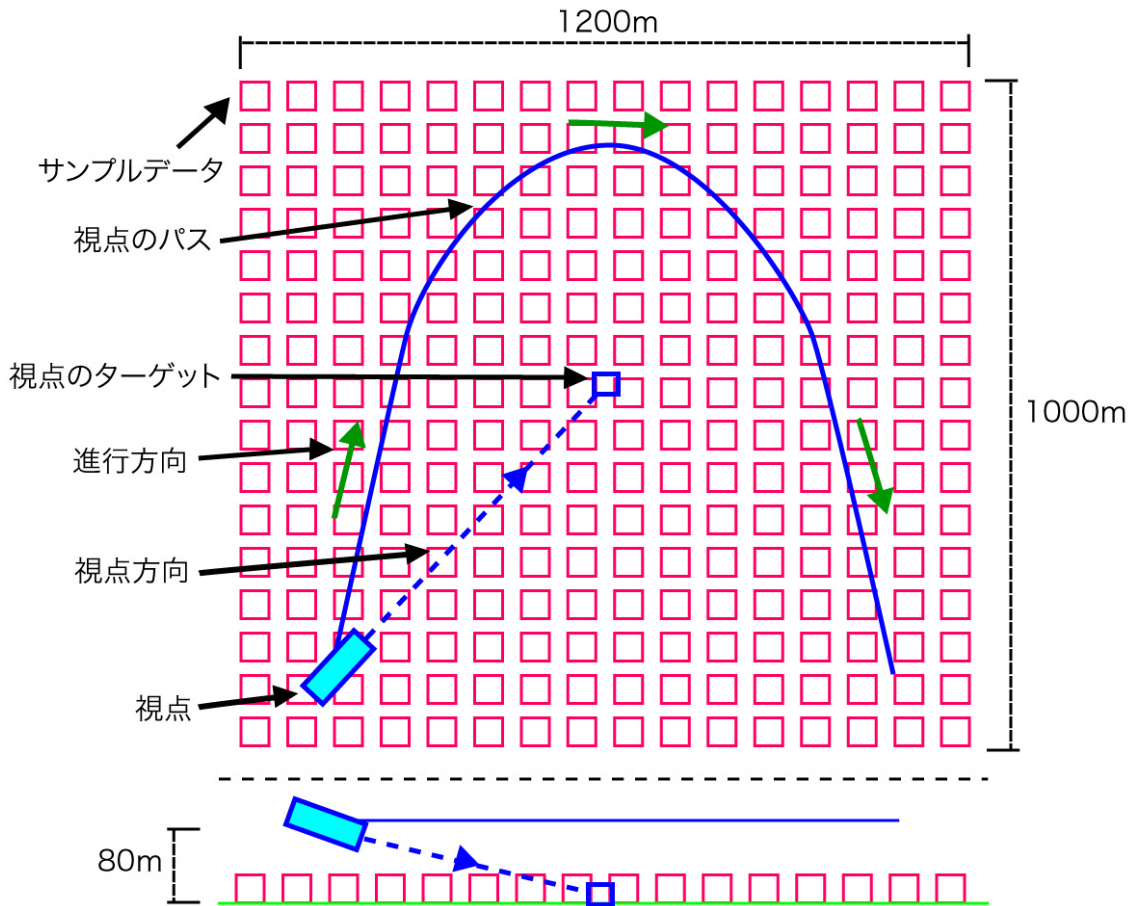


図 2 計測用都市 VR モデルと測定パス

使用した VR ソフトウェアは FORUM8 社の UC-win/Road ver.3.04.05 と DASSAULT SYSTEMES 社の Virtools 4.1 との 2 つである。測定結果を表 2 に記す。UC-win/Road での総データ量は 134MB である。Virtools での総データ量は 37.9MB である。

表 2 fps の測定結果

	最小値	最大値	平均値
UC-win/Road	0	3	0.302
Virtools	0	4	1.151

表 2 に示すように、既存の 3 次元 CAD データを 256 個並べてそのまま使用した場合、fps が 0~3, 4 になってしまい、平均値も約 0.3 と約 1.2 と非常に小さくなった。VR を用いた景観などの円滑な検討には 10fps 以上が必要³⁾とされており、それを満たしていないことがわかる。従って、3DCAD データをそのまま都市 VR モデルに適用することは不適切だと考えられる。

2. 2. ポリゴンリダクション

2. 2. 1. ポリゴンリダクションとは

CG や VR のような 3 次元コンピュータグラフィックス (3DCG) に用いられる形状モデルは、ポリゴンによって表現するのが一般的である。ポリゴンとは元々は多角形という意味であるが、3DCG においては三角形の組み合わせで形状を表現する時の各要素を意味する。アプリケーションによっては四角形などの多角形を扱えるものもあるが、基本的には三角形で構成される。ある部分を表現するポリゴンの数が多いほどより詳細な表現が可能になるが、逆に数が多いほど処理する量が増えるため、パフォーマンスの低下につながる。そのため、用途や使用条件によっては作成した形状モデルのポリゴン数を削減する必要がある。そこで、手作業でするのではなく、数学的処理によって自動的にポリゴン数を削減するポリゴンリダクションの手法がいくつか構築されている。

Edge-collapse 方式はポリゴンの一つの辺を潰して新しい頂点を生成する変換である。Vertex-split 方式は一つの頂点を引き裂いて新たに辺を生成する変換である (図 3)。基本的には図 3 のような操作を繰り返し、ポリゴン数の調整を行なう。Edge-collapse 方式がポリゴンリダクションに主に利用される。

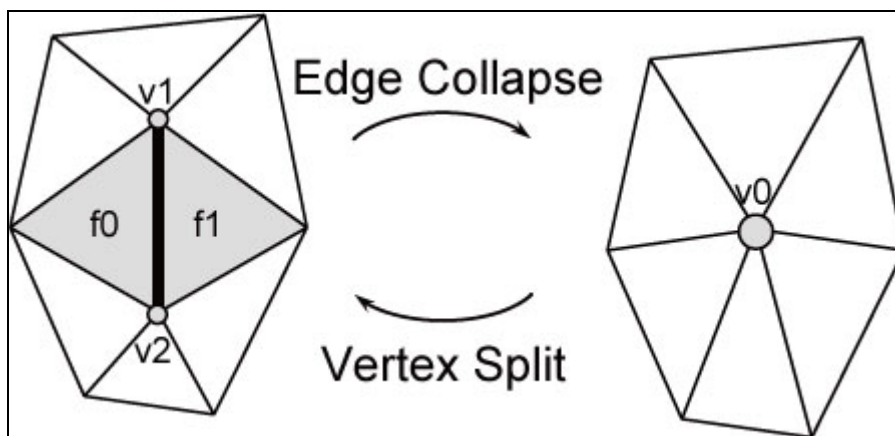


図 3 edge-collapse 方式及び vertex-split 方式

ポリゴンリダクションのアルゴリズムには多数の研究事例がある。

例えば、H.Hoppe ら⁴⁾は、ポリゴン群の各頂点の距離をエネルギーに換算し、そのエネルギーが最小になるようにポリゴンリダクションを行なう手法を提案している。

W.J.Schroeder ら⁵⁾は非三角形領域の再分割を用いている。あるポリゴン群に対して基準となる面や線を生成し、その面や線から各頂点の距離によって削除を行なう。頂点が削除された非三角形領域を基準の面及び線によって再分割を行なう手法である。

J.Rossignac ら⁶⁾は各辺と各頂点の分類など複数の組み合わせを用いている。オブジェクトを構成する主要な頂点や長い辺の格付けをおこないオブジェクトを簡略化していく。

2. 2. 2. ポリゴンリダクションの問題点

ポリゴンリダクションは大容量のポリゴンを保有するモデルを簡略化することはできるが、前項で述べたように数学的処理により行われる。そのため、VR モデルに対してポリゴンリダクションを施す場合、VR モデルの作成者の意図通りの形状にならず、異様な形状になってしまうことがある。

例えば、都市景観の検討を行なう際、建物は外観の形状データしか必要ない。そのため、内観部分の形状データはポリゴンリダクションをする必要がなく削除するだけでよい。また、中景から遠景の検討であれば外観の形状データでも雨樋や細かな凹凸は表現する必要はない。これらは手作業で削除の是非を判断する必要があり、こうした細かい判断はアルゴリズムに自動化することは不可能である。

図 4 に示すような 5 階建ての建築物の形状データにソフトウェア PolyTrans ver4.4.9(Okino Computer Graphics)⁷⁾を使用して、ポリゴンリダクションを適用してみた。図の左が適用前であり、右が適用後となる。元データのポリゴン数が 11,946 であるのに対し、適用後は 300 となった。右の図は形状が大きく損なわれており、VR モデルとして使用することはできない。従って、3DCAD データから VR モデルを作成する新しい手法の構築が必要だと考えられる。

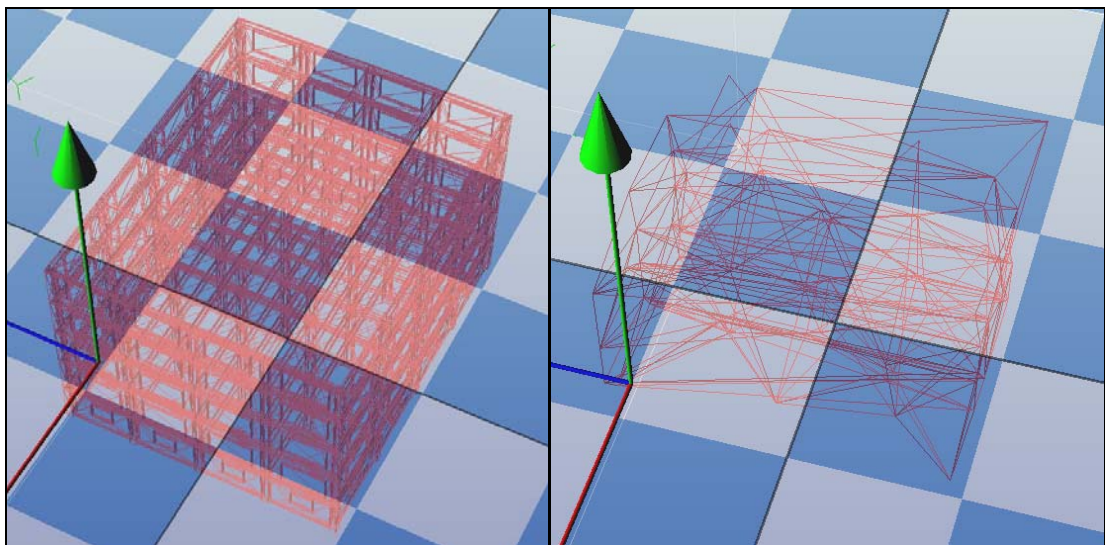


図 4 ポリゴンリダクションの適用前（左）と適用後（右）

2. 3. BIM

2. 3. 1. 2次元 CAD から BIM

建築分野では、現在、かなりの図面が CAD を用いて描かれている。図面には意匠図、構造図、電気設備図、空調設備図、衛生設備図などがある。その中で、立面図や平面図、断

面図，さらに階層図等がある．施工にあたっては躯体図や配筋図などの図面が必要になる．従来の 2 次元 CAD ではそれらの図面内のオブジェクトに関連性がなく，設計ミスや図面の表記ミスなどを自動的に検出することなどはできない．さらにこれらの図面のほとんどは 2 次元で描かれており，専門家であってもミスを完全に発見し，除去することは困難となる．

そこで，オブジェクト指向技術に基づいて 3 次元モデルベースで統合的に設計し，部材の特性や施工に関する属性情報もデータに付加していく考え方が 1980 年代に提唱された．これが，最近，建築の図面に実際に使用されるようになり，BIM として周知されるようになっていった．

BIM の利点は 3 次元設計や属性情報による設計支援だけではない．積算や構造解析，クライアントへのプレゼンテーションなどにも同じデータを有効利用できることである．さらには施工後の FM (Facility Management) にも適用していくことも可能である．すなわち BIM データによるプロダクトモデルデータ(図 5)として活用していこうとされている．

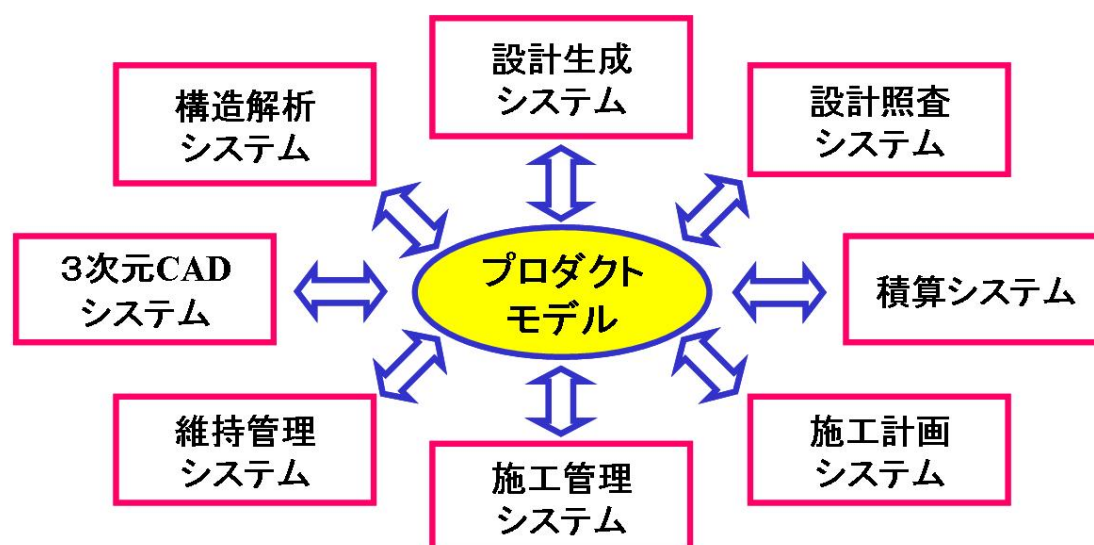


図 5 プロダクトモデル⁸⁾

2. 3. 2. BIMに関する取り組み

前項に述べた BIM に関する取り組みは海外で積極的におこなわれている⁹⁾．日本でも試験的に取り組みがおこなわれ始めている¹⁰⁾．BIM の中核にあるプロダクトモデルとしては IAI(International Alliance for Interoperability)の IFC(Industry Foundation Classes)が業界標準となっており，ISO (International Organization for Standardization) の PAS(Publicly Available Specification)である．また，2011 年には ISO の IS (International Standard) になる予定である．最近の建築用 3 次元 CAD は IFC と互換性がある．

3. VR ソフトウェアの動作速度

3. 1. 大阪大学モデル

第2章で記述したように、建物や道路等の都市環境が3次元モデルで表現されるようになれば、膨大なデータ量となる。そうした膨大な都市環境3次元モデルをVR（バーチャルリアリティ）ソフトウェアを使用して、リアルタイムに視点を移動させたり、登場する人物や自動車類を移動させながら表示させると、1秒間に表示できるフレーム数が少なくなり、ユーザーが動画として快適に見ることが困難となる。その限界値が、10 fps（frame per second）であることを紹介した³⁾。本研究では、大容量のVRモデルをとして2つのVRソフトウェアを用いて動作性能を。

VRソフトウェアの比較を行う際は、同じモデルを対象として、同じ性能のコンピュータを用いて検証する必要がある。そこで、本研究では性能比較に使用できるようなベンチマークモデルとして、データ量の大きな仮想的な都市モデル「大阪大学モデル」を、Autodesk社の3ds Maxを使用して作成した。図6に平面を示す。このモデルは、図の下の方は海になっており、海岸線から上方に向けて、高層ビル群、中低層ビル、マンション、アパート群、住宅地、山へと変わっていくものである。表3にデータ量を示す。図6に示すように、鳥瞰ルート（パス）を3本設定した。本モデルの鳥瞰図を図7～図11に示す。

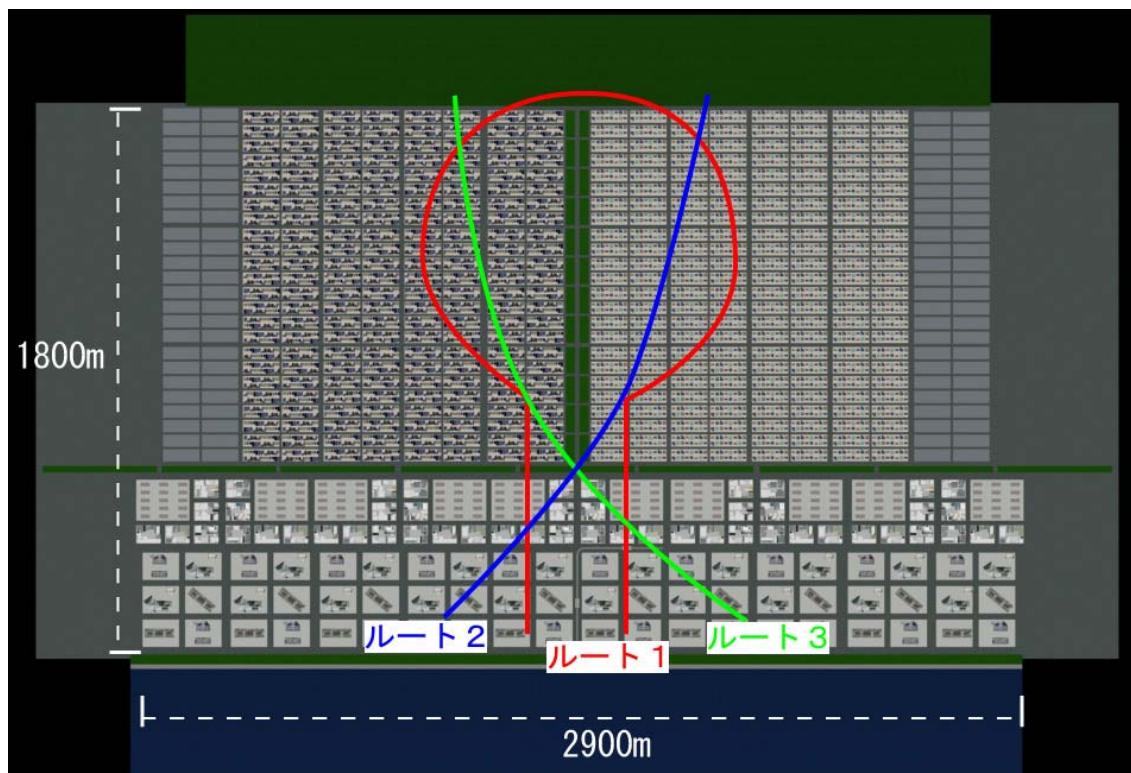


図6 大阪大学モデル

表 3 大阪大学モデルの概要

データ量(MB)	ポリゴン数	オブジェクト数	テクスチャ容量 (MB)	テクスチャ枚数
181	15,183,378	11,206	200	1,680

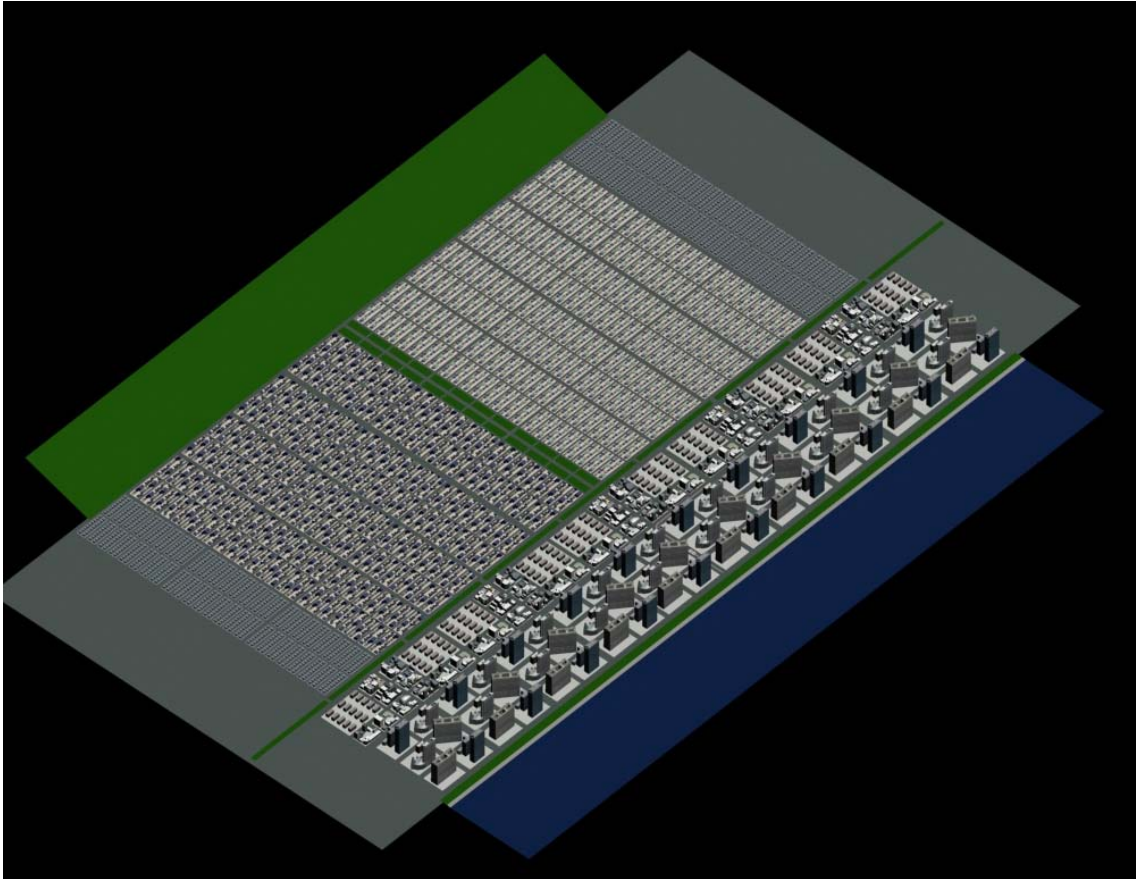


図 7 大阪モデル (鳥瞰図)



図 8 大阪モデル (住宅地)



図 9 大阪大学モデル (中低層ビル, マンション, アパート群)

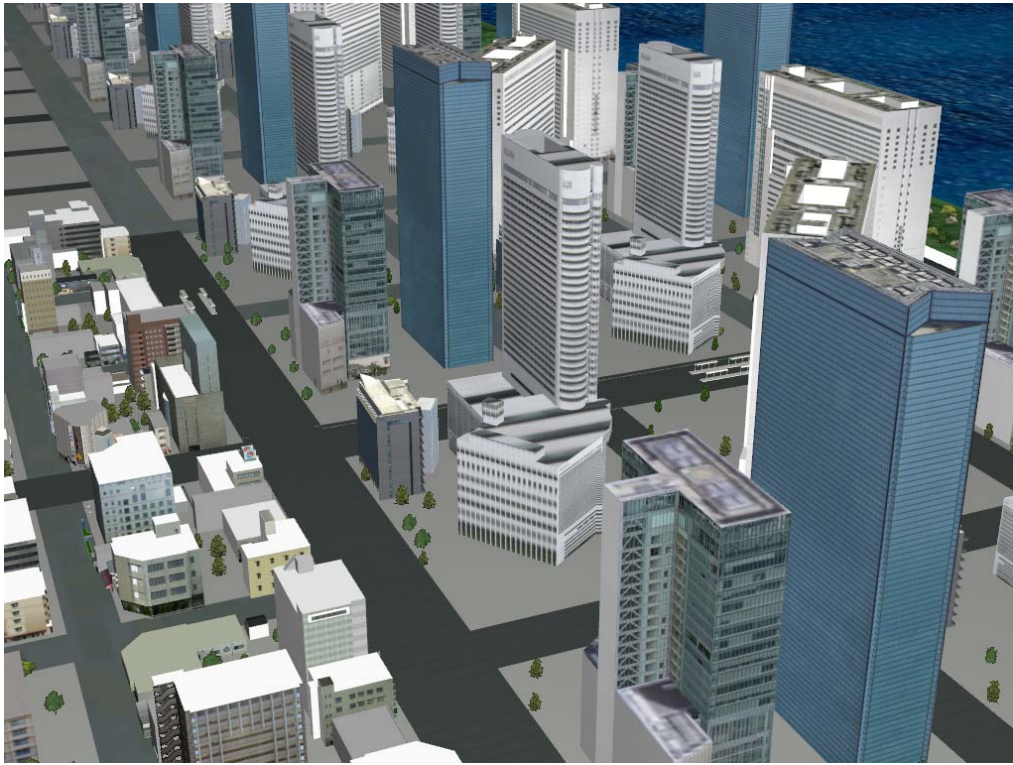


図 10 大阪大学モデル（高層ビル群）



図 11 大阪大学モデル（UC-win/Road で表示）

表 4 大阪モデル測定結果

	最小値	最大値	平均値
ルート1	1	61	23.893
ルート2	1	21	10.105
ルート3	1	18	4.341

3. 2. ニース・コートダジュール空港モデル

大阪大学モデルに加え、フランス国立建築研究所（CSTB）が作成したニース・コートダジュール空港の3次元モデルも、VRソフトウェアの性能評価に用いる。本モデルを図12～図15に示す。評価に使用したVRソフトウェアはCSTBが開発したevePlayer、UC-win/Road、Virtoolsである。データの概要について表5に示す。測定パスを図16に示す。視点の高さは140mであり、視点の方向は図16の上方向で、俯角は15度である。測定結果は表6に示ように、evePlayerではfpsの最大値は58で最も大きい。また、UC-win/Roadは3つのソフトウェアの中でfpsの最小値は13で最も小さい。しかし、fpsは10以上であったことから、このモデルは問題なくリアルタイムレンダリングができたと言える。



図 12 ニース・コートダジュール空港モデル（3dsMaxでの画像）



図 13 ニース・コートダジュール空港モデル (3dsMax での画像)



図 14 ニース・コートダジュール空港モデル (UC-win/Road よりキャプチャー画像)

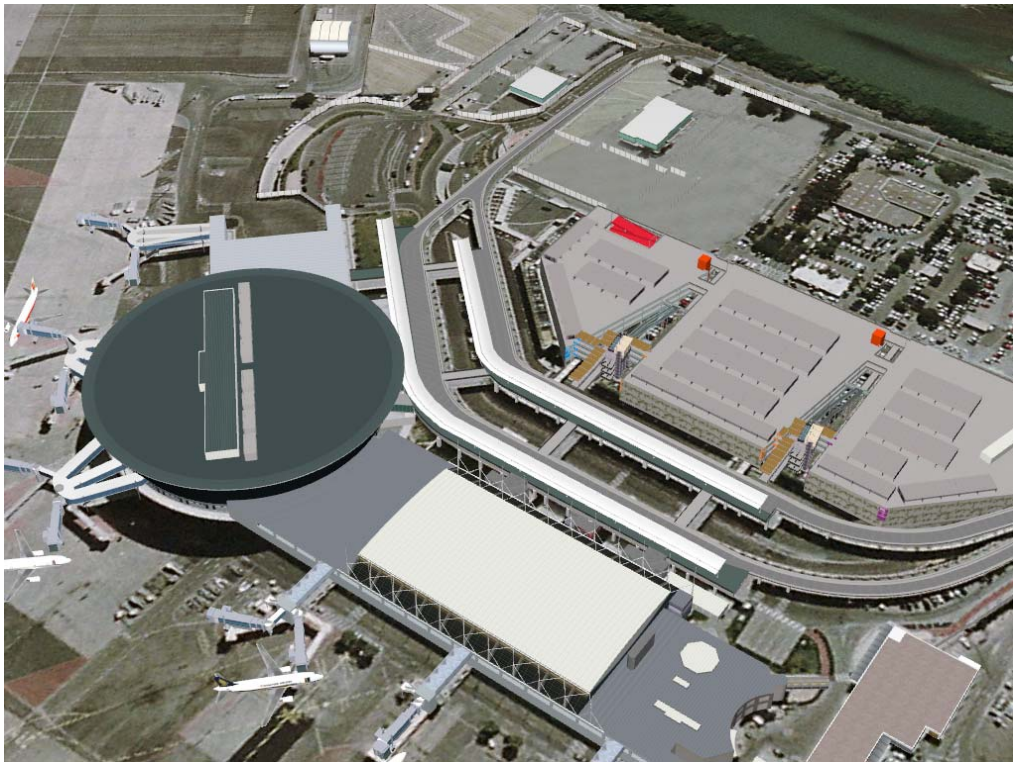


図 15 ニース・コートダジュール空港モデル (UC-win/Road よりキャプチャー画像)

表 5 ニース・コートダジュール空港モデルのデータ概要

データ量(MB)	ポリゴン数	オブジェクト数	テクスチャ容量 (MB)	テクスチャ枚数
37.2	258,842	2,120	192	674

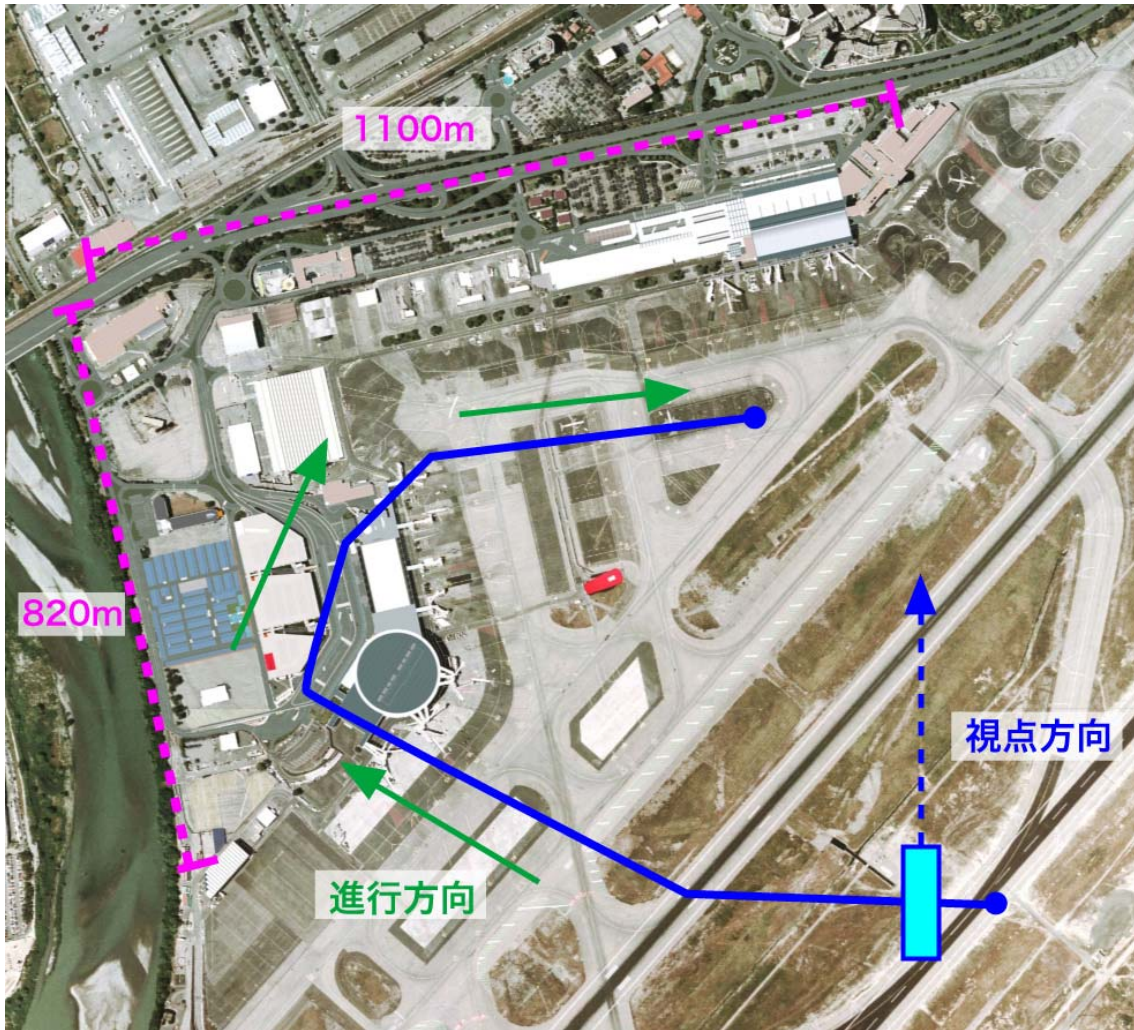


図 16 ニース・コートダジュール空港モデル測定パス

表 6 ニース・コートダジュール空港モデル測定結果

	最小値	最大値	平均値
evePlayer	58	61	59.933
UC-win/Road	13	44	25.967
Virtools	27	61	53.541

4. BIM データから VR モデルへの変換手法

第2章で記したように、BIM データは一つの建物であっても、その量はかなり大きく、2, 3 個程度の建物を対象とした場合の VR であれば、その動画を作成することは可能だが、建物が数十個を超えるような都市モデルを対象とすると FPS が格段に落ちてしまい、実用に耐えられない。前述のように、従来のポリゴンリダクション手法では、建物の BIM データ（CAD データ）を望むような形とデータ量に簡素化することは出来ない。そこで、本研究では、個々の建物の BIM データを、通常の都市 VR モデルにおける建物モデルと同程度にまで簡素化する新しい変換手法を提案する。

4. 1. 直方体 VR モデルの作成手法

直方体 VR モデルに変換する手法を以下に記す。

1. 建築物の BIM データを構築する。

BIM によるデータ構築ができるソフトウェアにて行なう。図 17 に示す事例では、GRAPHISOFT 社の ARCHICAD12 を用いて BIM データを作成した。この BIM データを「ALPHA-1」と名付けた。

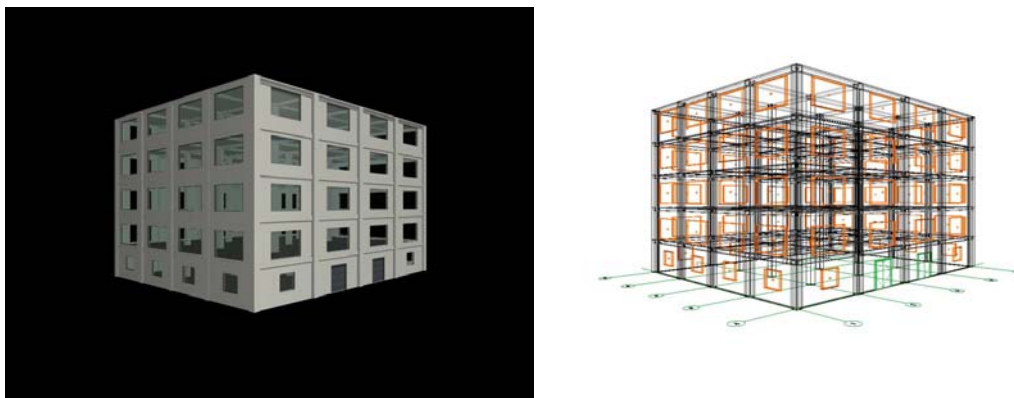


図 17 5階建てのビルの BIM データ (ALPHA-1)

2. BIM データから建築物の正面、右側面、左側面、背面、上面の画像を生成

CAD ソフトウェアのレンダリング機能を利用して正面、右側面、左側面、背面、上面の画像（図 18, 図 19）を生成する。後の加工作業を考慮し、建築物の背景には単色で建築物に存在しない色を適用する。

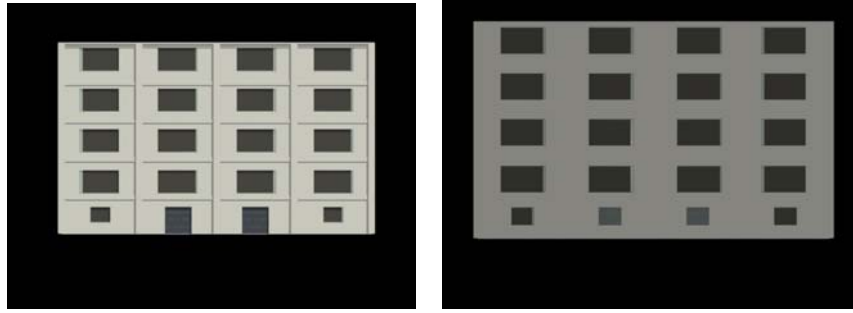


図 18 正面（左）と背面（右）

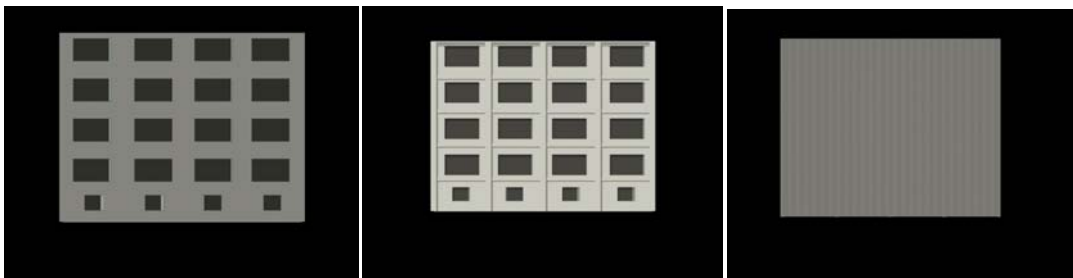


図 19 左側面（左）と右側面（中央）と上面（右）

3. 生成した画像から建築物の部分のみを切り取り，テクスチャマッピング用の画像を生成.

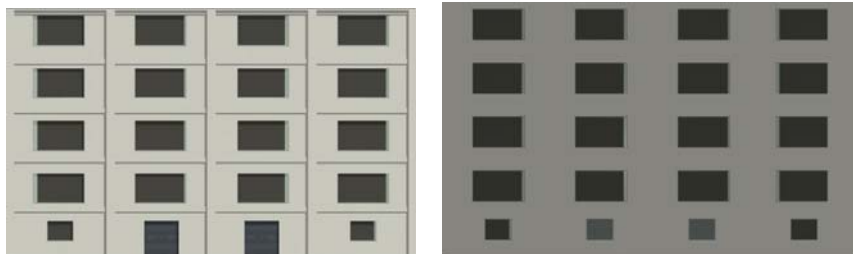


図 20 テクスチャマッピング用の正面（左）と背面（右）



図 21 テクスチャマッピング用の左側面（左）と右側面（中央）と上面（右）

テクスチャマッピング用の画像の生成には画像認識技術を用いる．背景色には2で正

面等の画像を生成した際に、建築物にない色を指定している。その色の領域だけを選択し、その部分を切り取る。市販のアプリケーションでは Adobe®Photoshop® (Photoshop) などで半自動的にこなうことができる。以下に、Photoshop での作業工程を記す。

色域指定により、背景部分を選択する。そして、反転する。

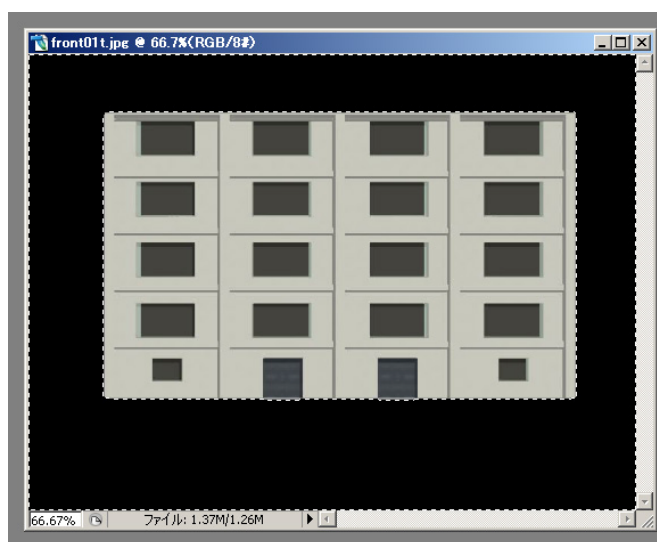


図 22 背景部分の選択

選択した領域だけを切り取り、保存する。

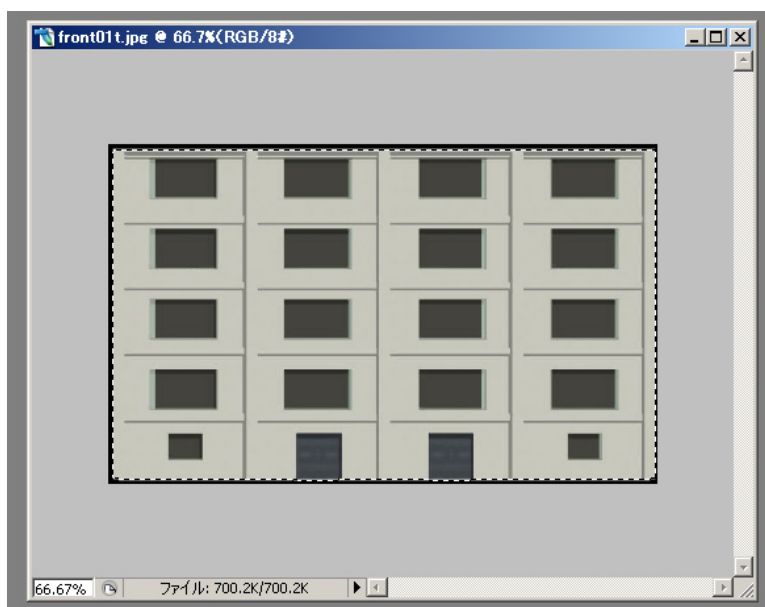


図 23 背景を切り取った後の画像

4. BIM データから建築物の幅、奥行き、高さの長さを読み取る。

IFC のデータ構造から建築物の幅，奥行き，高さの長さを計算する．図 24 のように幅を X，奥行きを Y，高さを Z とする．

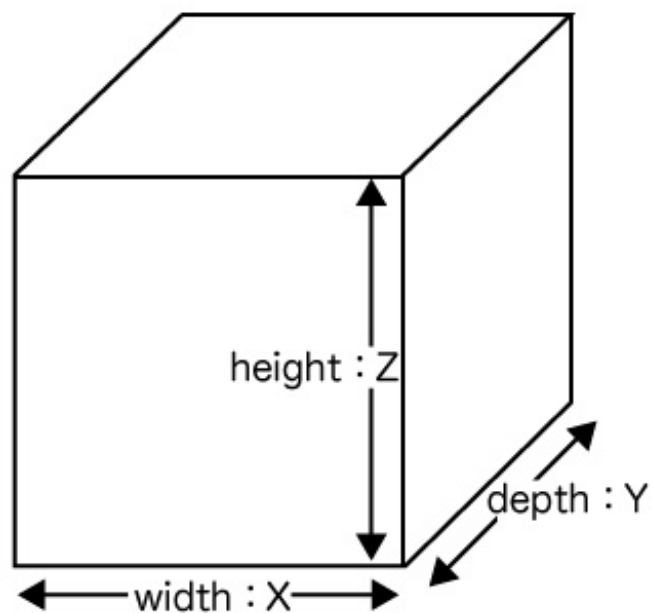


図 24 幅，奥行き，高さの関係

直方体モデルの場合，それぞれの最小値と最大値を求めることによって生成できる．それぞれの最小値と最大値は各部材の座標を検出する．求めた最小値と最大値の差分が縦，横，高さとなる（図 25）．

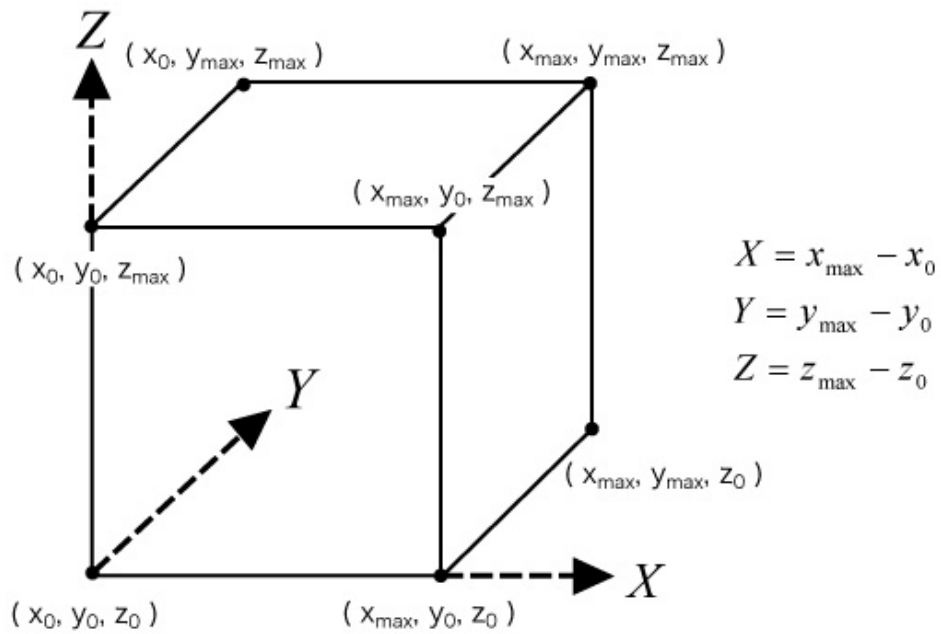


図 25 座標値

5. 読み取った情報から直方体モデルを生成.

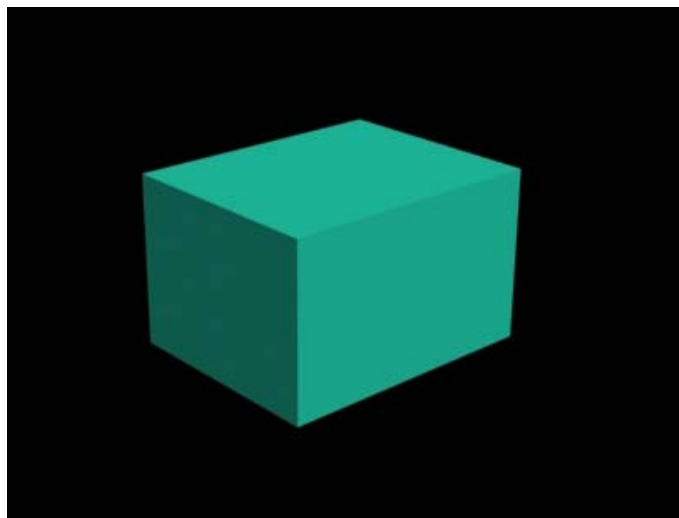


図 26 生成した直方体モデル

6. 直方体モデルにテクスチャマッピングを行なう.

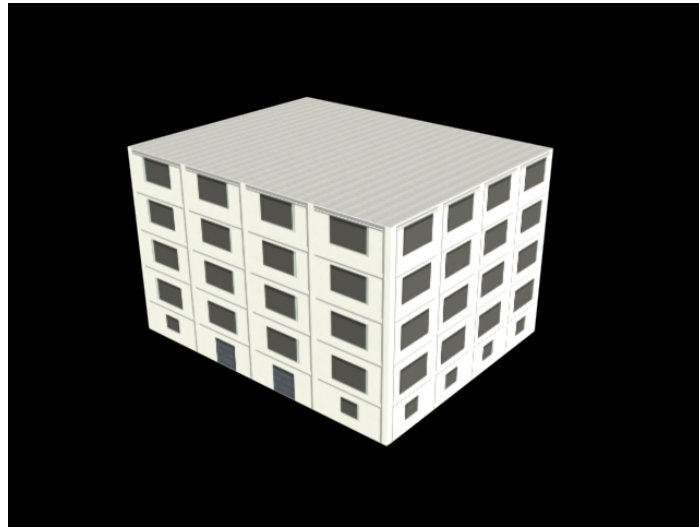


図 27 作成した直方体 VR モデル (ALPHA-2)

テクスチャデータを貼った直方体 VR モデルを「ALPHA-2」と名付ける。元データ，すなわち ALPHA-1 のポリゴン数が 11,946 であったのに対し，この ALPHA-2 のモデルは 6 となり，データ量の削減に成功した。

4. 2. 3つの立体の積集合から VR モデルを作成する手法

次に，図 28 に示すようなやや複雑な形状を持つ建物の BIM データから VR モデルを作成する手法を記す。

1. 建築物の BIM データを構築

図 28, 図 29 に示すような BIM データを構築する。この BIM データを BETA-1 と名付ける。

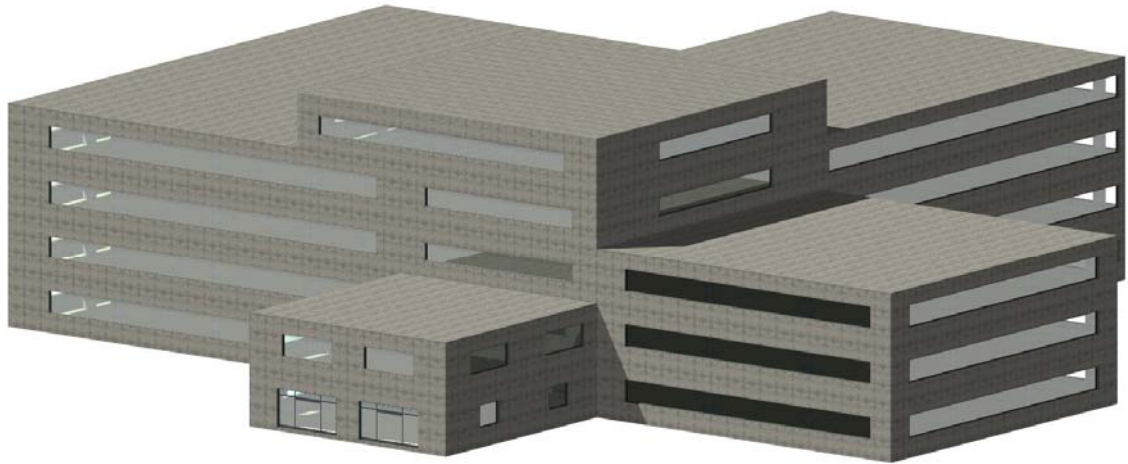


図 28 構築した BIM データのパース (BETA-1)

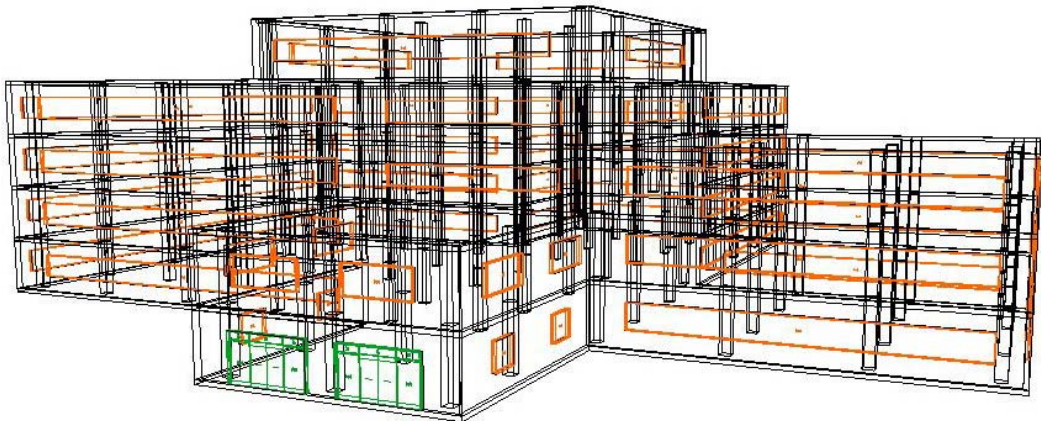


図 29 構築した建築物のワイヤーフレーム

2. BIM データから建築物の正面, 右側面, 左側面, 背面, 上面の画像を生成

図 30 に示すような BIM データから建築物の正面, 右側面, 左側面, 背面, 上面の画像

を抽出し、生成する。

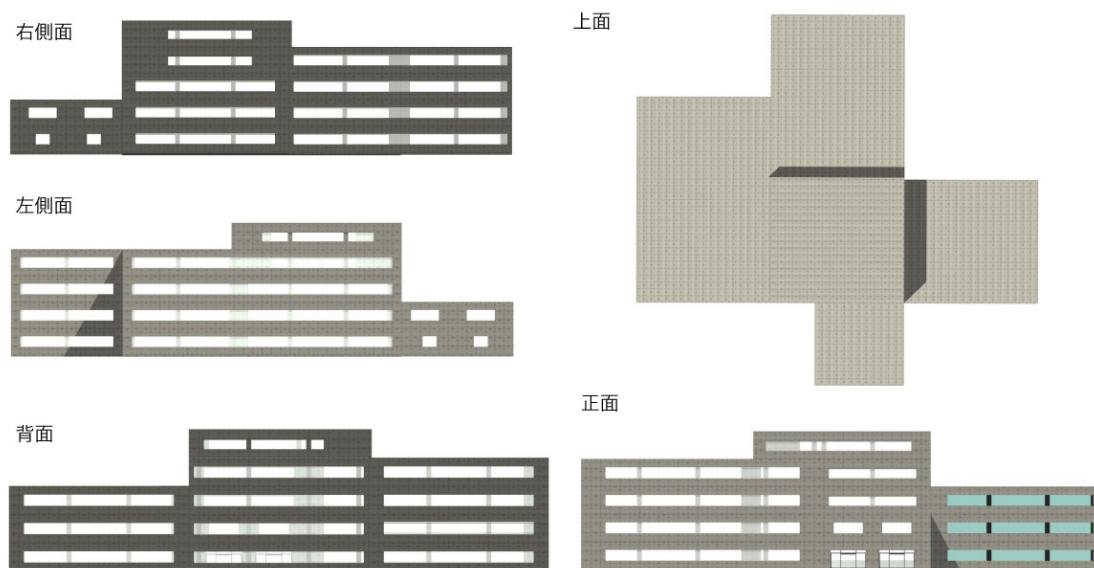


図 30 BIM データの正面，右側面，左側面，背面，上面の画像

3. 画像認識技術を用いて建築物の外観のベクターデータの取得

2 値化し，そしてエッジ検出を行なう．その後ハフ変換¹¹⁾を行なうことで外観の枠を抽出する．図 31 のように上面からの画像に対してハフ変換を行なうことで建築物の外観の枠が抽出できる．

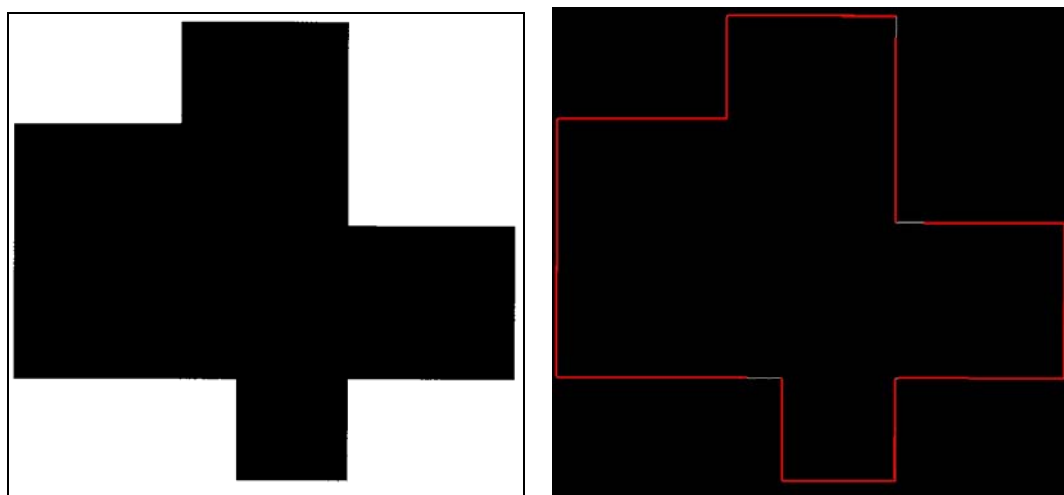


図 31 二値化

この時点では，データはラスタ形式であるため，ベクター形式に変換を行なう．これにより，正面，右側面，左側面，背面，上面の外観のベクタライズされたデータを得

ることができる (図 32).

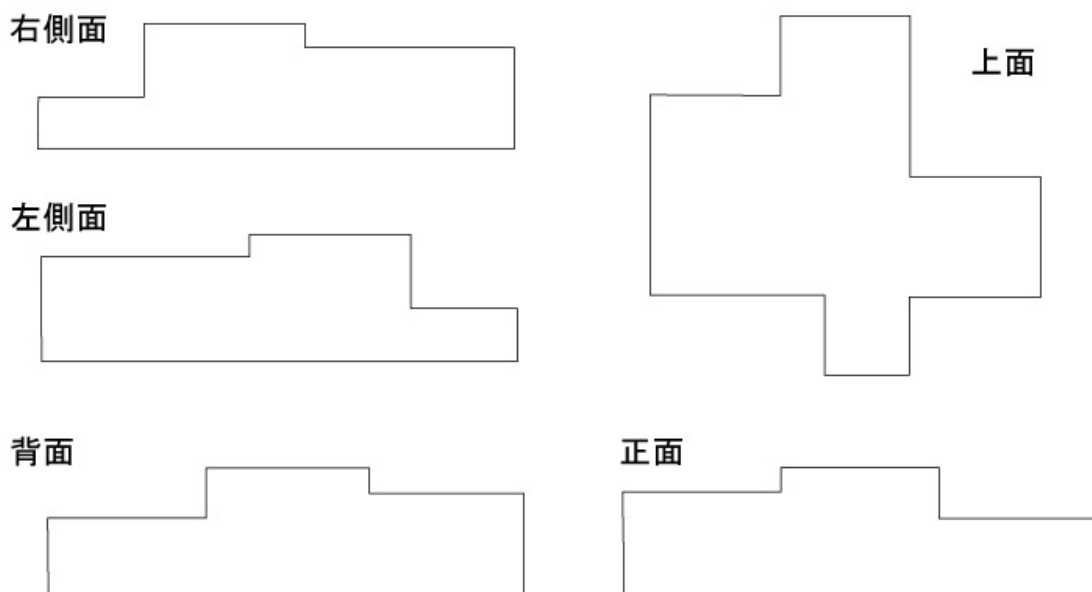


図 32 ベクター化したデータ

4. 画像検出技術を用いて壁面のテクスチャデータの取得

エッジ検出の技術を用いて壁面ごとに画像を切り取り, 生成を行なう. 図 33 の赤枠で囲まれた部分を検出し, それぞれの画像を作成する.



図 33 エッジ検出

5. 各面のベクターデータから 3 次元データの作成

3 で作成したベクターデータに奥行きデータを与えて 3 次元化する. このとき, 前項と同様にモデルの幅, 奥行き, 高さの最大値を求め, これらを奥行きデータとする. 3 次元化したモデルをブーリアン演算によって積集合を構築する. 上面, 正面, 側面から作った立体をそれぞれ A, B, C とすると以下の式で積集合を表すことができる.

$$A \cap B \cap C$$

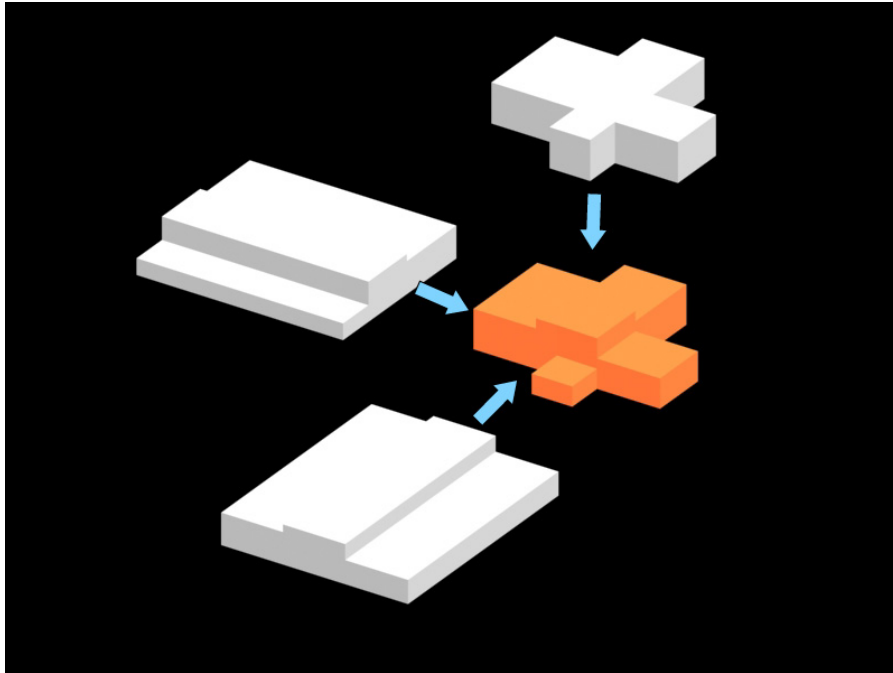


図 34 積集合

6. テクスチャマッピングの貼り付け

5で作成した三次元モデルにテクスチャを貼り付ける．完成した VR モデルを (BETA-2) と名付ける．

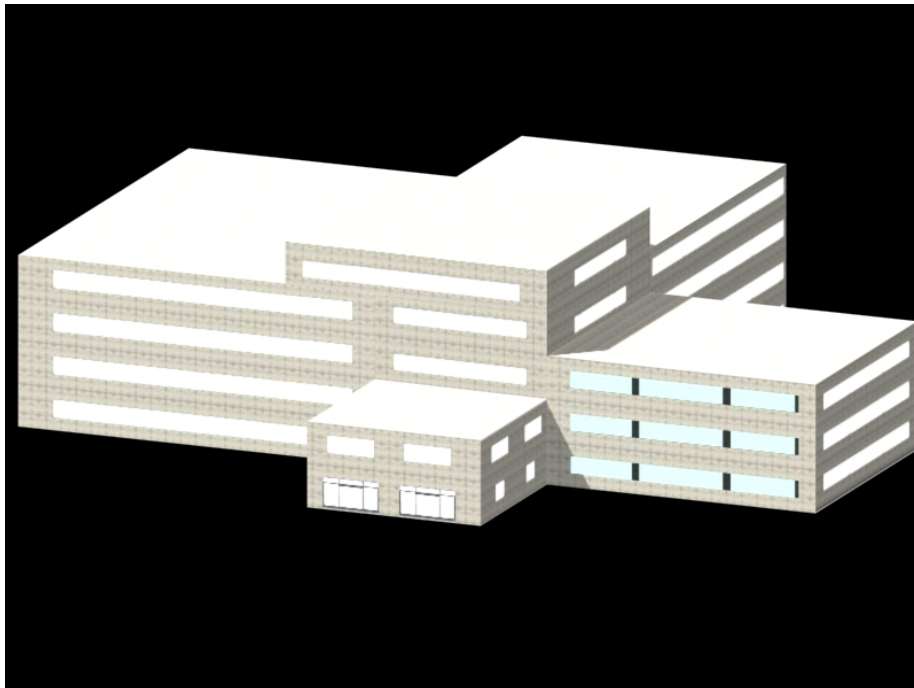


図 35 作成した VR モデル (BETA-2)

4. 3. 提案手法が適用可能な建築物の形状

前節で述べた手法では，直方体を組み合わせたような他に， 図 36 のようなアーチ型の形状の建物についても適用できる．この形状はスポーツ施設などに多く見られる形状である．また， 図 37 のような一部に曲線のある建物に対しても適用することができる．

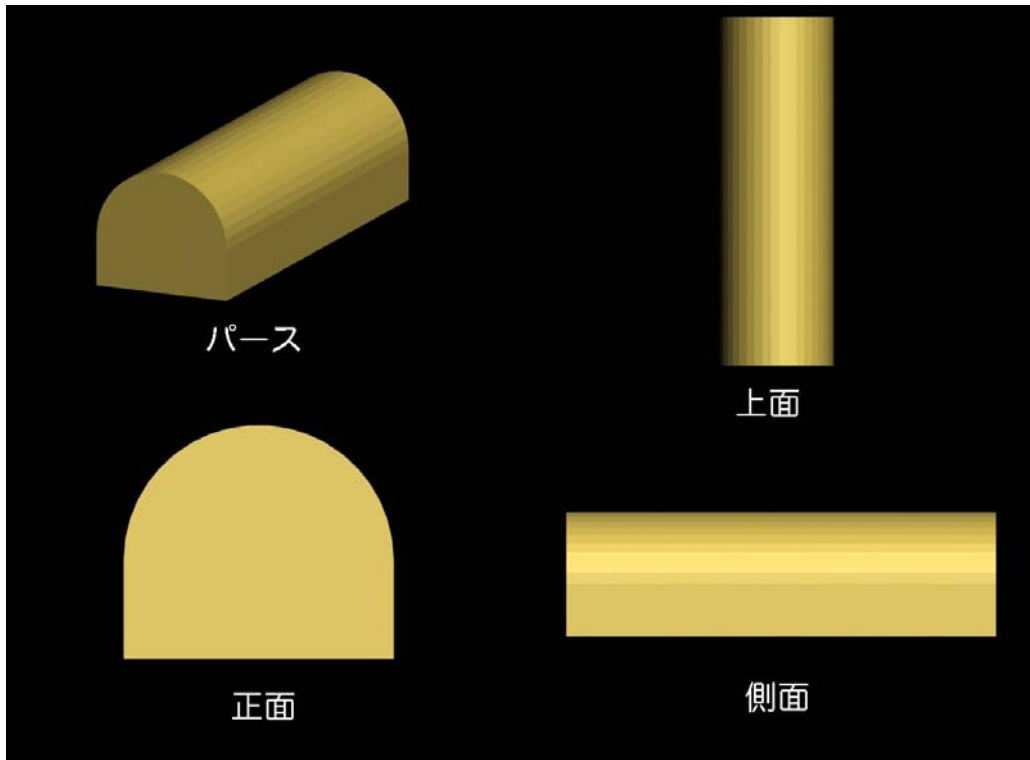


図 36 適応可能な形状その 1

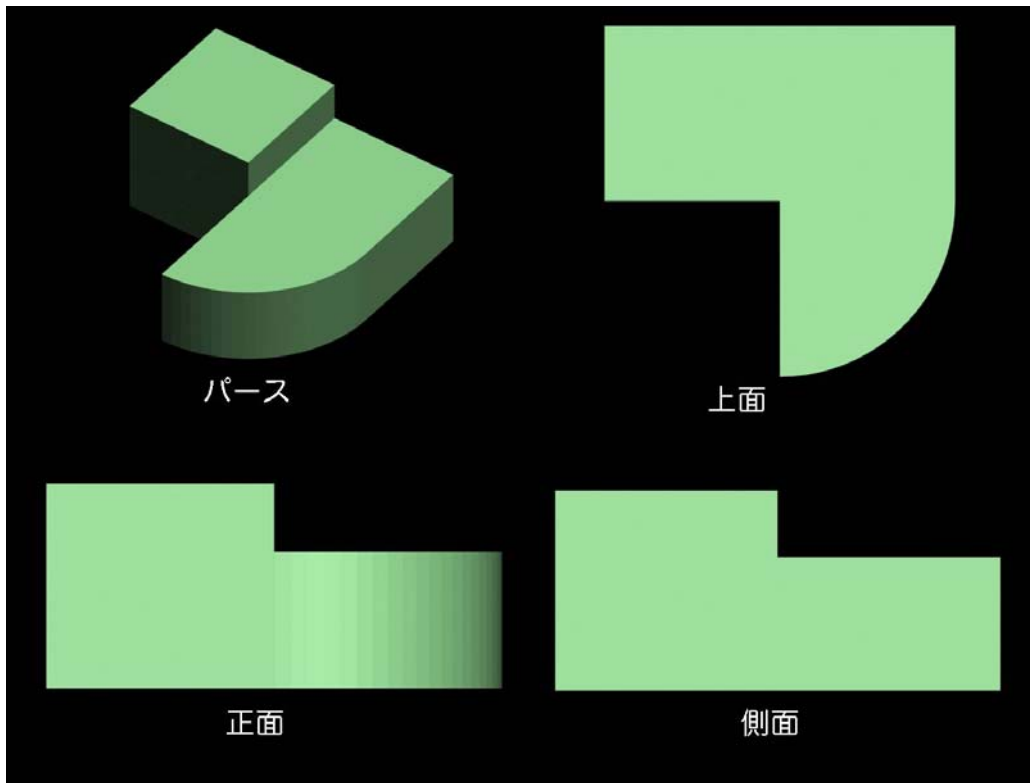


図 37 適応可能な形状その 2

しかし、図 38 のように建物の壁面に凹みがある場合は、本手法ではそれらを表現することはできない。上面、正面、側面の画像から 3 次元モデルを作成し、積集合をおこなっても凹みは表れず直方体のモデルが生成されてしまうからである。

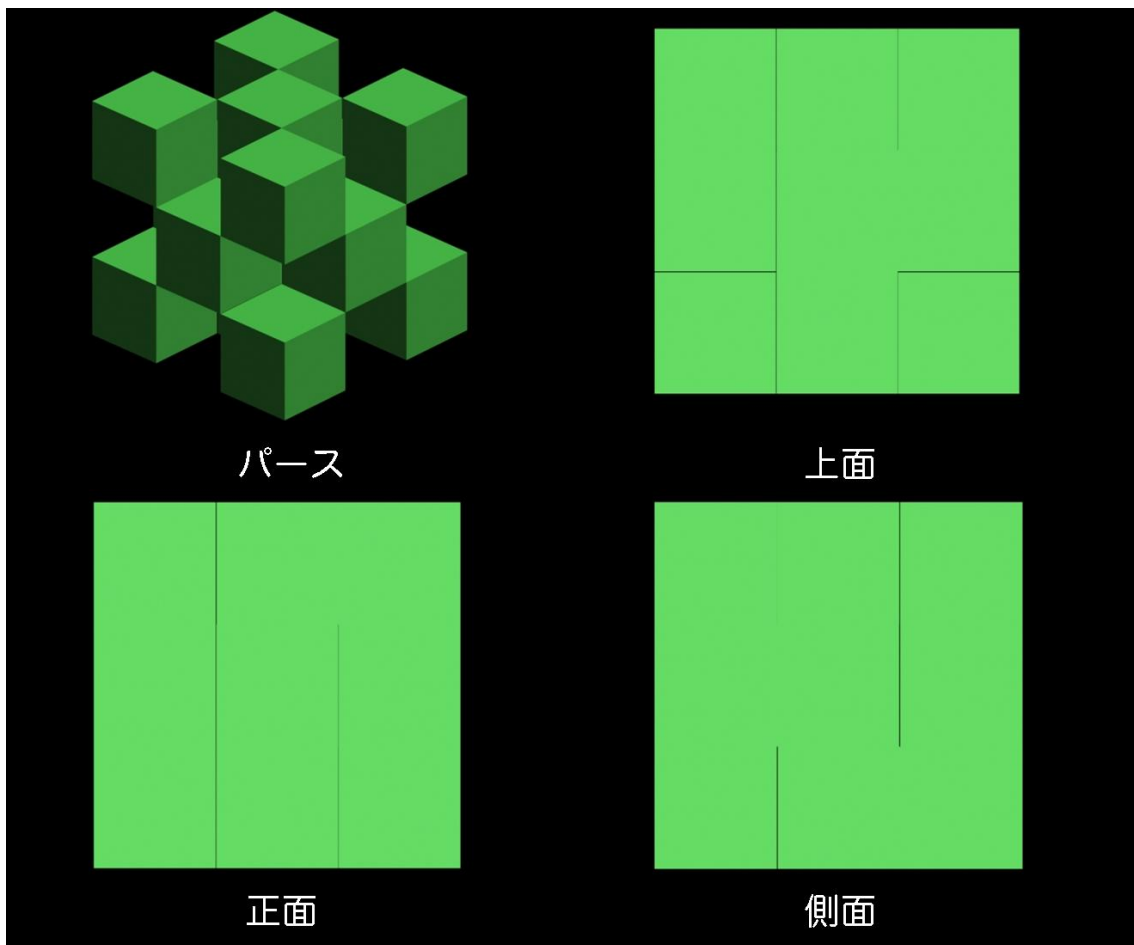


図 38 適用不可能な形状その 1

また, 図 39 のような途中で形状に回転が加わるようなねじれた建築物には適用できない. 先の事例と同様に, 積集合から 3 次元モデルを生成しても単純な直方体モデルが生成される. この形状の特徴を持った建築物としては東京都庁第一庁舎などが考えられる.

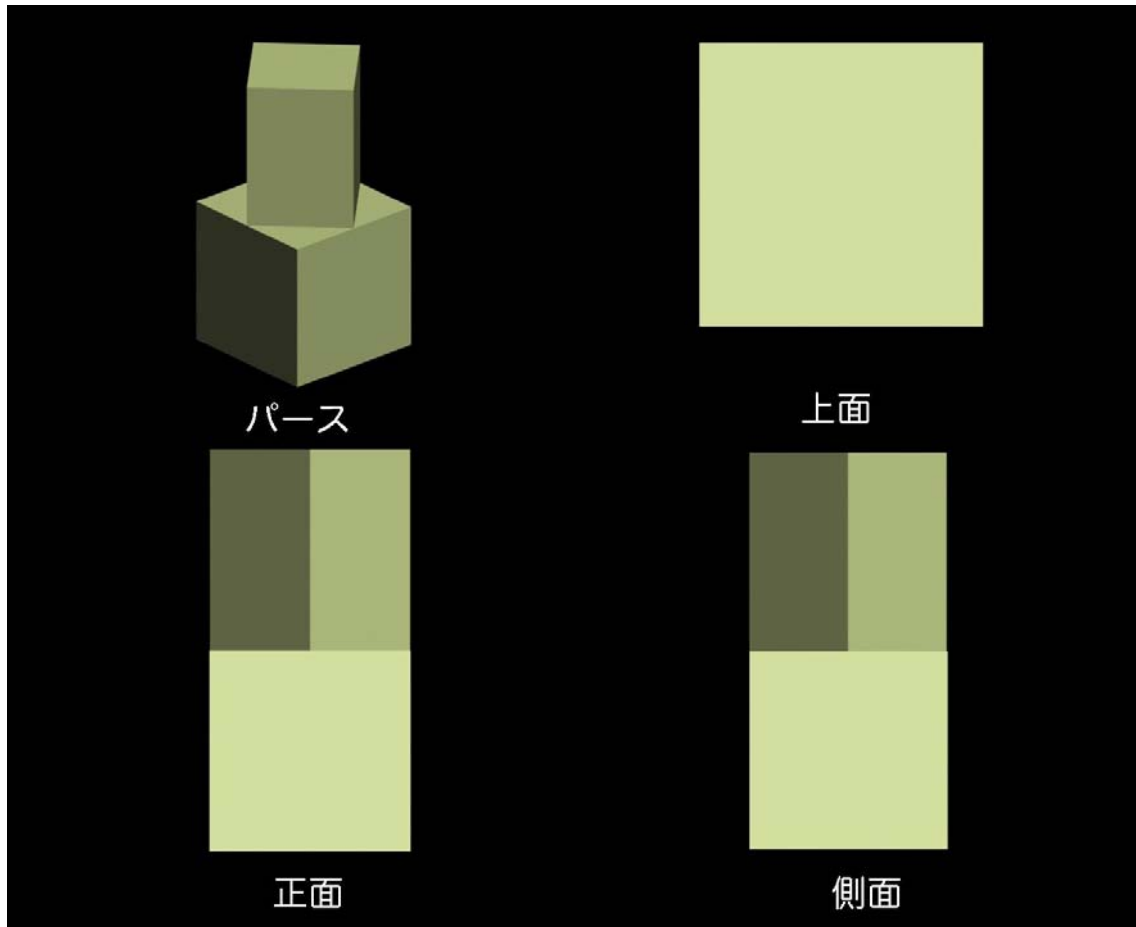


図 39 適用不可能な形状その2

4. 4. 評価

本研究で提案した手法によって VR ソフトウェアのパフォーマンスにどのような影響を与えるか検証した。ALPHA-1, ALPHA-2, BETA-1, BETA-2 をそれぞれ横 8 個, 縦 20 個並べ, 作成した VR 空間内を俯角 15 度で視点を直線で動かして fps を測定した (図 40, 図 41, 図 42)。評価に使用した VR ソフトウェアは UC-win/Road 及び Virtools である。測定結果を表 7, 表 8, 表 9, 表 10 に記す。

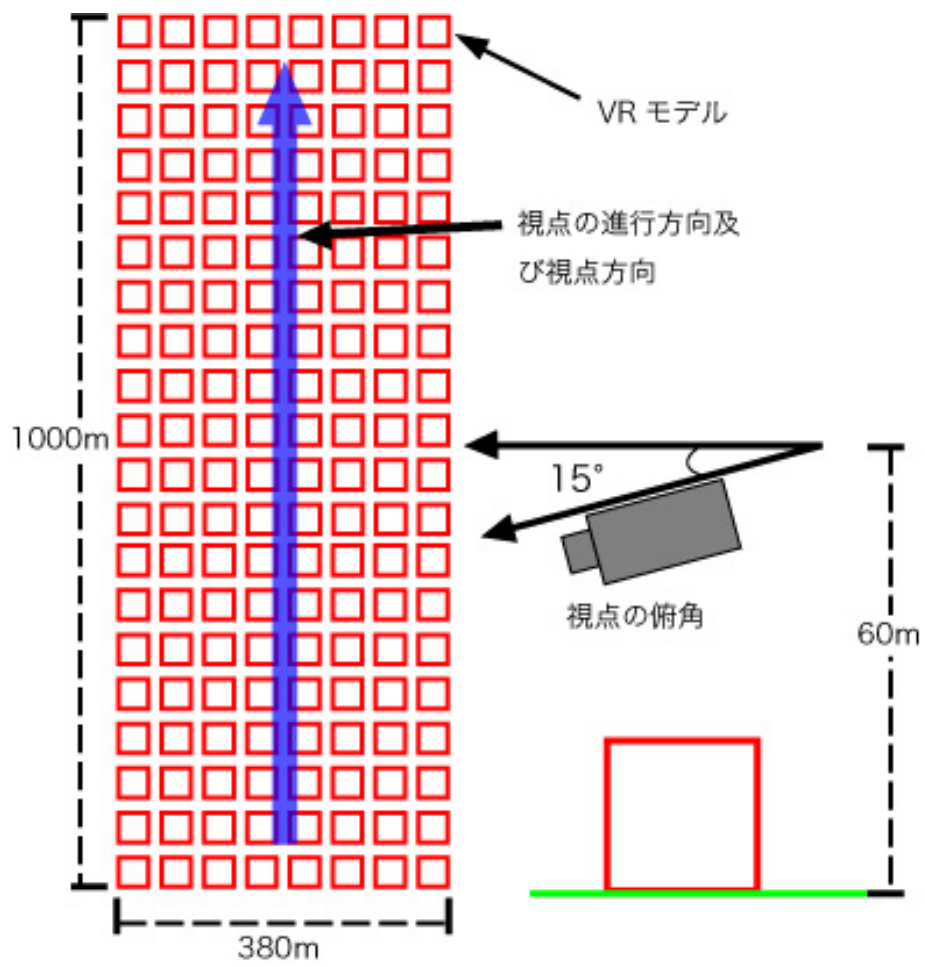


図 40 評価用 VR モデルと測定パス

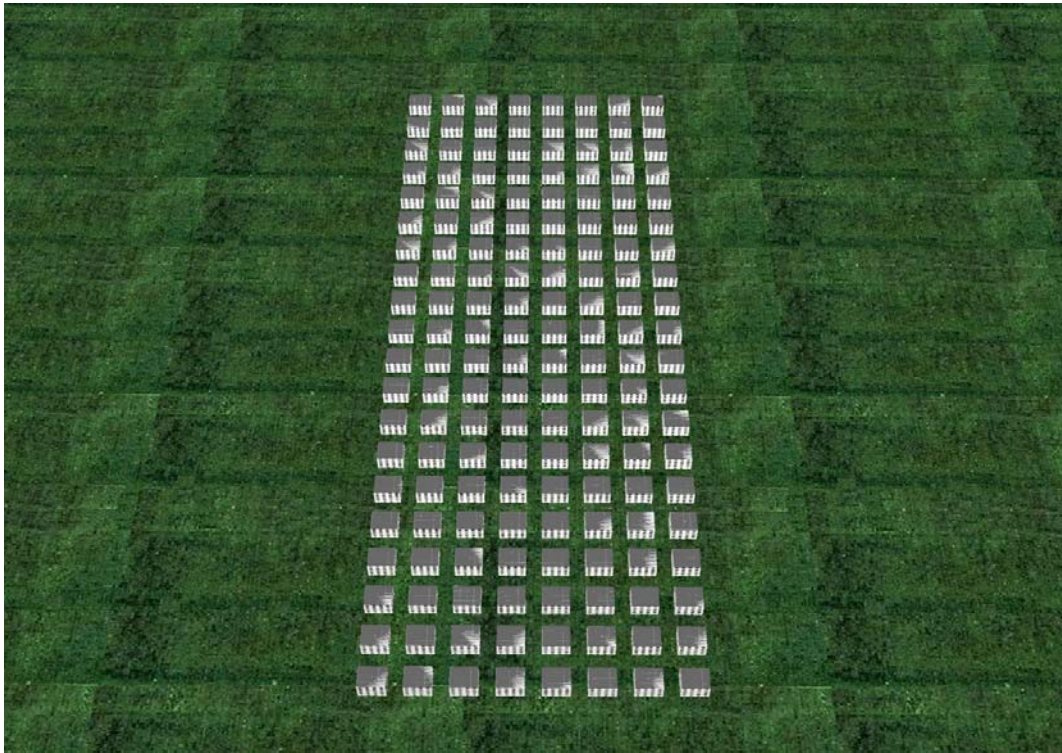


図 41 並べた ALPHA-1 モデル (UC-win/Road)

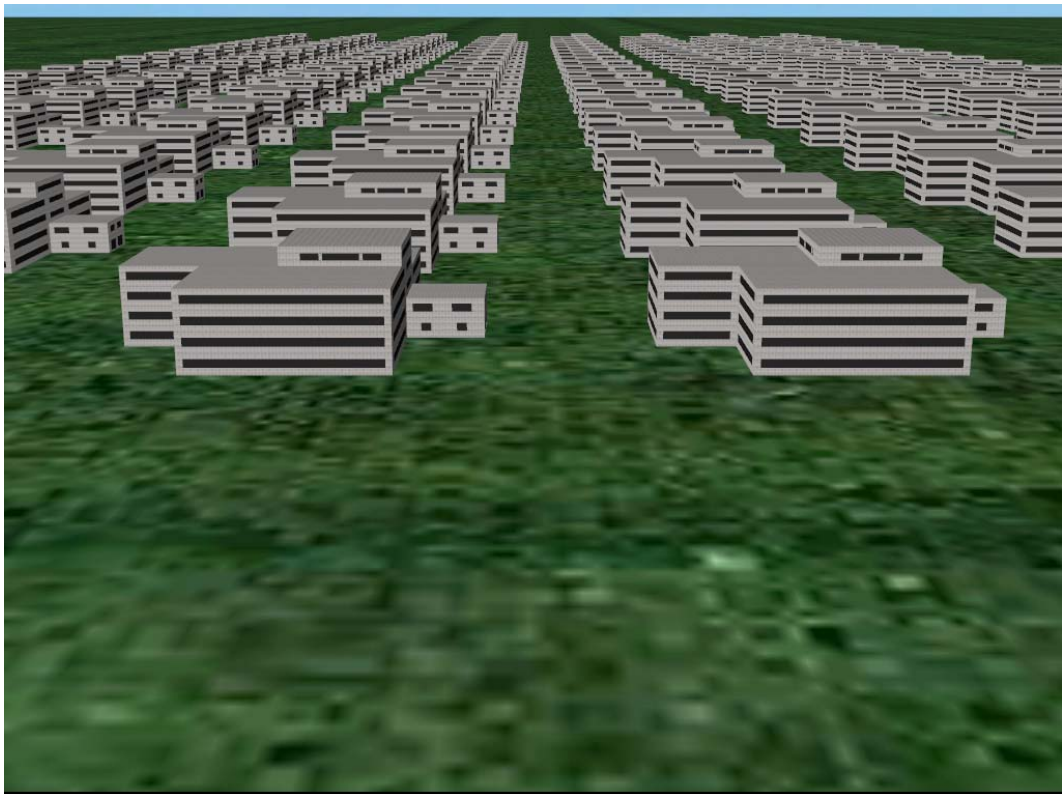


図 42 測定視点から見た BETA-1 モデル (UC-win/Road)

表 7 ALPHA-1 と ALPHA-2 (UC-win/Road)

	最小値	最大値	平均値
ALPHA-1	7	21	9.498
ALPHA-2	59	60	59.965

表 8 ALPHA-1 と ALPHA-2 (Virtools)

	最小値	最大値	平均値
ALPHA-1	0	61	5.282
ALPHA-2	58	62	59.923

表 9 BETA-1 と BETA-2 (UC-win/Road)

	最小値	最大値	平均値
BETA-1	7	61	14.824
BETA-2	29	61	50.512

表 10 BETA-1 と BETA-2 (Virtools)

	最小値	最大値	平均値
BETA-1	11	61	31.496
BETA-2	58	63	59.957

測定結果から、本研究で提案した手法で構築した VR モデルは VR ソフトウェアの負荷を軽減し、パフォーマンスが向上したことが確認された。

5. 結論と今後の課題

5. 1. 結論

人々の生活や環境をより豊かで、安全、安心なものにしていくためには、今後も社会基盤を建設、整備していくことが必要であることは論を待たない。しかし、利害関係者が非常に多く、複雑に絡み合っている都市空間に社会基盤を持続的に開発、整備していくことは困難になりつつある。そこで、3次元モデルを利用したバーチャルリアリティ（VR）技術を用いた合意形成手法が注目を集めている。

本研究では、まず、大規模な都市空間における社会基盤の整備を目的とした広範囲のVRモデルを対象として、現状の標準的なハードウェアとソフトウェアを用いた場合の動作性能を計測する手法を提案した。動作性能を計測する際には、共通のVRモデルを使用しなければ、比較が出来ないことから、ベンチマークモデルである「大阪モデル」を構築した。大阪モデルは、高層ビル、中低層ビル、マンション、団地、一戸建てなどの建物の他に、道路、LRT（新型路面電車）、緑地帯などによって構成されている。大阪モデルとともに、フランスのニース空港のVRモデルを用いて、複数のVRソフトウェアの動作性能を計測した。

次に、プロダクトモデルを中核としたBIMに着目し、BIMデータをそのままVRに使用できるか検討した。その結果、建物の個数やデータ量が少なければ、VRソフトウェアは動作可能であるが、多くなれば、動画として表示することは困難になることを示した。

そこで、本研究では、個々の建物のBIMデータを直方体VRモデルに簡略化する変換手法を開発した。さらに、形状がある程度複雑な建物でも簡略化できる「3つの積集合からVRモデルを作成する手法」を開発した。これらの手法を用いることにより、複雑で大量のデータを持つBIMデータを小さなデータ量のモデルに変換し、VRソフトウェアで広範囲にわたって動画として表示させることが可能であることを示した。

5. 2. 今後の課題

本研究において想定しているVRの使用目的は、都市空間の中で、広範囲にわたる大規模な社会基盤の計画や設計の公聴会や説明会などである。そのため、近景の検討を実施するためには、より詳細なVRなモデルが必要である。そうした詳細モデルと、本研究で開発した簡略化したVRモデルとを混在させる方法を検討することが、今後の課題として挙げられる。

また、BIMデータは、単に3次元CADデータの形状や色に関する情報だけでなく、部材の属性情報や空間利用に関する情報、プロジェクトの情報など、極めて広範囲の情報を含んでいる。そうした多岐にわたるBIMデータを有効に利用し、景観検討だけでなく、他の目的にも利用できるVRシステムを構築することも今後の課題の一つである。

参考文献

- 1) 川口貴之, 西村善博, 福田知弘, 矢吹信喜 : LRT 事業における VR システムの設計, 土木情報利用技術論文集, Vol.17, pp.271-278, 2008.
- 2) http://www.graphisoft.co.jp/user/introduction/sample_projects/sample.html
- 3) 柴野伸之他 : VR を応用した多人数参加型住環境疑似体験システムの開発, 第 10 回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム論文集, 1994.
- 4) H. Hoppe, T. DeRose, T. Duchamp, J. McDonald and W. Stuetzle : Mesh Optimization, ACM SIGGRAPH1993 Conference Proceedings, pp.19-26, 1993.
- 5) William J. Schroeder, Jonathan A. Zarge and William E. Lorensen : Decimation of triangle meshes, ACM SIGGRAPH1992 Proceedings of the 19th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pp.65-70, 1992.
- 6) Jarek Rossignac and Paul Borrel : Multi-resolution 3D approximations for rendering complex scenes, In Geometric Modeling in Computer Graphics'93, pp455-465, 1993.
- 7) <http://www.okino.com/default.htm>
- 8) 矢吹信喜, 志谷倫章 : PC 橋梁の 3 次元プロダクトモデルの開発と応用, 土木学会論文集, No.784/VI-66, pp.171-187, 2005.
- 9) 建築と都市 2009 年 8 月臨時増刊, 株式会社エー・アンド・ユー, 2009.
- 10) 建築と積算 夏号, 社団法人日本建築積算協会, pp.22-25, 2009.
- 11) 奈良先端科学技術大学院大学 : OpenCV プログラミングブック, 毎日コミュニケーションズ, 2007.

PRODUCT DATA MODELS FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF INFRASTRUCTURES IN URBAN SPACES

Yabuki, N.
Osaka University

For safe and secure life, and better quality of life, sustainable development of infrastructures is necessary. Consensus building is particularly important to realize the objective, especially in urban areas where many different kinds of stakeholders exist. Virtual Reality plays an important role in it, and demands for more reality and area coverage are increasing nowadays, which may hinder the computer performance during the public workshops. The time, cost, and efforts for making 3D VR urban models cannot be underestimated. Recently, Building Information Modeling (BIM) has drawn attention in building industry and product model data will be available for almost all buildings in the future. However, the amount of BIM data is so huge that the urban digital model, which will be the collection of BIM data, may not work in the VR environment properly even if the computer hardware will be advancing rapidly.

Thus, in this research, first, we proposed a methodology for measuring the computer performance for the VR model covering a wide urban area. We developed a standardized VR urban model named Osaka-U Model, which consists of skyscrapers, high-rise buildings, apartments, houses, roads, Light Rail Transit (LRT), green areas, etc. We measured the performance of various VR software packages, using the Osaka-U model and Nice Airport model developed by CSTB, France.

Next, since BIM data cannot be used for VR directly in case of the wide urban area, we proposed a new methodology for significantly reducing the amount of data by simplifying the BIM data. This method is making a simplified building model by computing a product (intersection) set of three extruded planes.

KEYWORDS: *product model, virtual reality, sustainable development, urban infrastructure.*

研 究 成 果 の 要 約

助成番号	助 成 研 究 名	研 究 者・所 属
第2008-1号	都市空間における社会基盤の持続的な開発のためのプロダクトデータモデルに関する研究	矢 吹 信 喜 大阪大学大学院工学研究科
<p>人々の生活や環境をより豊かで、安全、安心なものにしていくためには、今後も社会基盤を建設、整備していくことが必要であることは論を待たない。しかし、利害関係者が非常に多く、複雑に絡み合っている都市空間に社会基盤を持続的に開発、整備していくことは困難になりつつある。そこで、3次元モデルを利用したバーチャルリアリティ（VR）技術を用いた合意形成手法が注目を集めている。</p> <p>しかし、VR画像や機能に対する人々の要求水準は、さらに高まり、もっとリアルな画像を見たい、より詳細な部分を見たい、もっと広い範囲を3次元化して欲しい、といった要求の他に、視点を移動させながら見たい、設計変更したらどうなるかを見たい、といったリアルタイムな会話性（インタラクティブティ）が要求されるようになってきた。こうした高度な要求に対応する研究も進められているが、3次元モデルが巨大化するとともに、動画表示するためにコンピュータへの負荷が非常に大きくなり、画面表示に支障を来すことが問題となっている。</p> <p>一方で、VRで比較的広範囲の都市モデルを作成しようとする、3次元モデルの作成や現地でのデジタル写真の撮影と加工などに相当な時間と労力を費やすこととなり、一つのプロジェクトのために、どこまで高度な要求水準に応えて行くべきなのかは大きな課題と考えられる。簡便にVR都市モデルを作成する方法として、GIS（Geographic Information System）データの建物の輪郭線を高さ情報を元に、鉛直方向にスワイプして3次元モデルを作る手法が採用されつつある。しかし、この方法は、都市空間をかなり高い位置から俯瞰するには適しているものの、建物に近づいていくと違和感が生じる。</p> <p>ところで、建築分野ではBIM（Building Information Modeling）が注目され、将来は全ての建物はBIMのプロダクトモデルとしてコンピュータに蓄えられるであろう。しか</p> <p>しながら、3次元プロダクトモデルやCADモデルを並べた都市モデルでは、いくらコンピュータが高速大容量化されても一般市民が要求するようなVRのパフォーマンスを得ることは困難だと考えられる。</p> <p>そこで、本研究では、まず、大規模な都市空間における社会基盤の整備を目的とした広範囲のVRモデルを対象として、現状の標準的なハードウェアとソフトウェアを用いた場合の動作性能を計測する手法を提案した。動作性能を計測する際には、共通のVRモデルを使用しなければ、比較が出来ないことから、ベンチマークモデルである「大阪モデル」を構築した。大阪モデルは、高層ビル、中低層ビル、マンション、団地、一戸建てなどの建物の他に、道路、LRT（新型路面電車）、緑地帯などによって構成されている。大阪モデルとともに、フランスのニース空港のVRモデルを用いて、複数のVRソフトウェアの動作性能を計測した。</p> <p>次に、プロダクトモデルを中核としたBIMに着目し、BIMデータをそのままVRに使用できるか検討した。その結果、建物の個数やデータ量が少なければ、VRソフトウェアは動作可能であるが、多くなれば、動画として表示することは困難になることを示した。</p> <p>そこで、本研究では、個々の建物のBIMデータを直方体VRモデルに簡略化する変換手法を開発した。さらに、形状がある程度複雑な建物でも簡略化できる「3つの積集合からVRモデルを作成する手法」を開発した。これらの手法を用いることにより、複雑で大量のデータを持つBIMデータを小さなデータ量のモデルに変換し、VRソフトウェアで広範囲にわたって動画として表示させることが可能であることを示した。</p>		