

- 19 環境デザインを支援する三次元 VR システムでの土量計算機能の開発

Development of Soil Calculation Function in 3-D VR System for Environmental Design

福田知弘¹・加賀有津子²・呂煜鉉³・河口将弘⁴

Fukuda Tomohiro, Kaga Atsuko, Yeo Wookhyun and Kawaguchi Masahiro

抄録: 地形が複雑である道路計画、地域計画を行う場合、切土量と盛土量の土量バランスを検討するが、近年では環境負荷の少ない建設活動が求められており排出残土を抑える必要がある。また土量計算の結果によっては完成後の景観が大きく変わる可能性があり、土量計算と景観を同時に検討できるシステムが求められる。さらに、参加型デザインプロセスに対応するためには、専門知識を有しない関係者でも計画内容を理解できるシステムが必要となる。これらの課題を受け本研究では、景観と土量計算の検討がシームレスに可能なシステムの構築を目指し、環境デザインを検討する 3DVR システムを拡張して、高精度計算且つビジュアル表現が可能な土量計算機能を開発する。

Abstract: When performing a road plan or a regional plan with complicated geographical feature, soil calculation is needed to study the soil balance between the amount of cut and the amount of bank. In recent years, the construction activities by little environmental load are called for. Therefore, stopping discharge surplus soil is called for. Moreover, by the result of soil calculation, landscape after completion may change a lot. A system which can study soil calculation and a landscape simultaneously is called for. Furthermore, to correspond to a citizen participation type design process, the system which can understand a plan also by stakeholders who don't have professional knowledge is called for. In this research, study of a landscape and soil calculation aims at development of a possible system seamlessly. A 3DVR system which studies an environmental design is extended and the soil calculation function in which high precision calculation and visual expression are possible is developed.

キーワード: 土量計算, 切土量, 盛土量, 景観評価, 環境デザイン, デザイン検討, 三次元 VR システム, リアルタイムシミュレーション

Keywords: Soil Calculation, Amount of cut, Amount of bank, Landscape evaluation, Environmental Design, Design study, 3-D Virtual Reality, Real-time Simulation

1. はじめに

土木施設、建築、都市、ランドスケープなどの様々な屋外空間を統合的にデザインする環境デザイン企画段階においては、まず対象地とその周辺環境を分析するフェーズ、次に対象地における人々の活動を検討するフェーズ、そしてその活動を実現する場を計画するフェーズの大きく3つに分類される。またこれらのフェーズはそれぞれ個別にあるのではなく、計画の連続的な思考の中で検討しており、各フェーズで専門家である設計者とクライアントや市民などの関係者が合意を形成しながら検討することが必要である¹⁾。

これらの知見に基づき景観を中心とするデザイン評価手法に展開するため、筆者らはこれまで三次元バーチャルリアリティ(3-Dimensional Virtual Reality, 3DVR)システムの開発を行ってきた。3DVRによる景観評価手法は国土交通省による「国土交通省所管公共事業における景観評価の基本方針(案)」の中にも位置づ

けられており²⁾、任意の静止視点、動視点から得られる景観をリアルタイムに再現することが可能である。これまでに開発した3DVRシステムの内容については2章で詳述することとし本章では概要を述べる。まず、デザイン検討会議の場において、検討者から要求のあった任意の視点場に移動できるよう、フライスルーやウォークスルーする視点移動機能を有している。加えて、現状及び複数のデザイン案の比較検討機能、日照や夜間照明シミュレーションによる昼夜景観検討機能、ある景観構成要素をインタラクティブな操作で移動・回転・拡大縮小させる編集機能などを有している。

一方複雑な地形を扱う造成計画や道路計画、地域計画を行う場合、設計条件に応じて切土と盛土の土量バランスを調整することが求められ土量計算が必要となる。土量計算結果によっては計画後の景観が大きく変わる可能性があり、土量計算と景観検討を同時に行えるシステムが求められる。設計者が検討するための土量計算システムは実用化されているが、景観を同時に

1: 正会員 工博 大阪大学大学院 助教授 工学研究科環境・エネルギー工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1, Tel:06-6879-7661, E-mail: fukuda@see.eng.osaka-u.ac.jp)

2: 正会員 工博 大阪大学大学院 助教授 工学研究科ビジネスエンジニアリング専攻

3: 非会員 工博 大阪大学大学院 特任助手 工学研究科環境・エネルギー工学専攻

4: 非会員 工修 大阪大学大学院 経済学研究科経営学系専攻 博士前期課程



図-1 3DVR システムの例。左上：建築設計、右上：道路設計、左下：周辺環境・活動・場の統合デザイン⁸⁾、右下：地域計画

検討できるシステムは十分ではない。また、パブリックインボルブメントをはじめとして参加型デザインプロセスが、今後ますます増えてくることが期待されており、専門知識を有しない非専門家でも計画内容を理解できるシステムが求められる。

そこで本研究では、景観と土量計算のシミュレーションがシームレスに可能なシステムの開発を目指し、先に述べた 3DVR システムを拡張して、高精度且つビジュアル表現が可能な土量計算機能を開発する。

2. 開発の経緯

現在までに開発した 3DVR システムの機能を明らかにするため、これまでの開発の経緯について述べる。当初は VRML (Virtual Reality Modeling Language) と Java をツールキットとした橋梁環境デザインシステム³⁾や、夜間景観デザインシステム⁴⁾等を開発した。これらのシステムは、Windows を OS とするノート PC で稼動するが当時のハードウェア、ソフトウェアの限界もあり、景観評価に必要な表現の質を維持するためにはフレームレートを 1~2fps (frames per second) 程度にする必要があり、10fps 以上が必要^{注1)}とされるリアルタイムシミュレーションとは一線を画している。しかしながら当時は CG 静止画やアニメーション、フォトモンタージュ、模型による景観評価が殆どであり、本システムは景観評価システムとしては革新的であった。近年では、VRML よりもシステム開発期間短縮、コンテンツ作成期間短縮、データ構造の最適化によるデータロード時間短縮など様々な点で優位性のある Virtools™ Dev^{注2)}をツールキットとして開発を進めており、道路環境デザインシステム⁵⁾、スケッチ等のオーバーレイやパーティクルを用いてコンセプトを可視



図-2 3DVR システムによる環境デザイン検討の様子（左：ノート PC でのシステム、右：等身大スケール表示システム⁷⁾）

化するシステム⁶⁾、ドーム型スクリーンを用い等身大スケールで検討可能なシステム⁷⁾、3次元モデルで構築された周辺環境と計画対象地と活動画像をリンクすることで「環境」・「活動」・「場」を統合的に扱えるシステム⁸⁾、GPS カメラ付携帯電話を使用した景観評価システム⁹⁾などを開発している（図-1）。これらのシステムの評価を行うため、実際の環境デザインプロジェクトで有効性を検証している（図-2）。

類似システムとして、フォーラムエイトの道路景観評価システム¹⁰⁾、小林らの緑地景観評価システム¹¹⁾、田上らのまちづくりワークショップのためのシステム¹²⁾などが発表されている。しかし、本研究の目指す高精度且つビジュアル表現が可能な土量計算機能について考察すると、フォーラムエイトによるシステムは、土量計算する機能を有し、計算結果に基づき景観評価を行うことができる。しかし、VR システム上でビジュアルに土量計算結果を表現する機能は有していない。また、小林らのシステムと田上らのシステムは VR システムを用いて景観評価に利用されているが土量計算機能をはじめとする土木設計機能は有していない。

3. システム開発の考え方

設計者が景観と土量バランスに配慮した設計を行うことを支援するシステムとして、以下が重要な要件である。

(1) 設計者自らが設計行為の中で作成した CAD モデルから直接シミュレーションできること

設計者の利用を想定すると、土量計算用に新たにモデルを作成するのではなく、景観検討で用いる 3次元 CAD モデルからシームレスな操作でシミュレーション用のモデルを生成する必要がある。

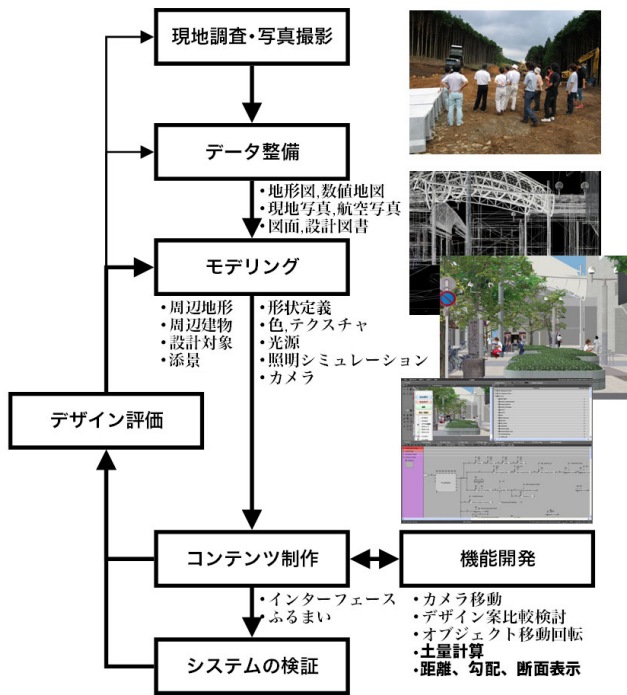


図-3 3DVR システムのフロー

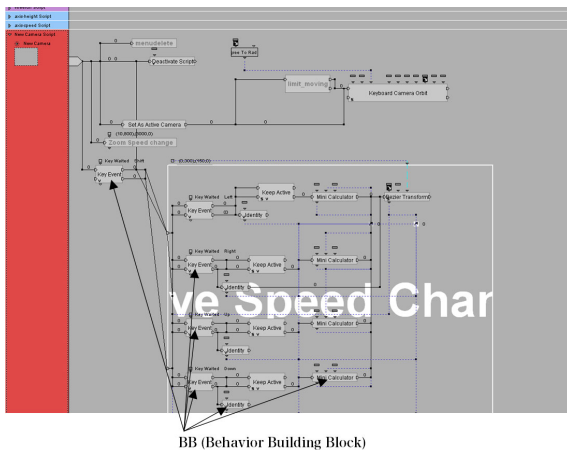


図-4 3DVR ソフトウェアでのビジュアルプログラミング

(2) 高い精度で多面的にシミュレーションできること

環境負荷の少ない建設活動の取り組みの一つとして排出残土をできるだけ抑えることが設計時に求められる。土量計算は通常 20m メッシュ精度で行われる。設計段階や作成するモデルの精度にも依るが、より高い精度でシミュレーションできるシステムが求められる。また見た目だけでなく、地形の距離や勾配を測定したり断面表示するなど多面的に検討できる機能が求められる。

(3) 設計者自身、また事業主体や市民などの設計関係者が結果を視覚的に閲覧でき、設計案の評価ができること

シミュレーション結果の視覚的な出力表現は、設計者が結果を理解して設計の良し悪しや改良点を判断するのに役立つことができる。また、事業主体と設計者、もしくは事業主体と市民などによる様々な検討会議において、関係者が設計内容を共有しコミュニケーションを円滑にするのにも有効である。

4. システム開発

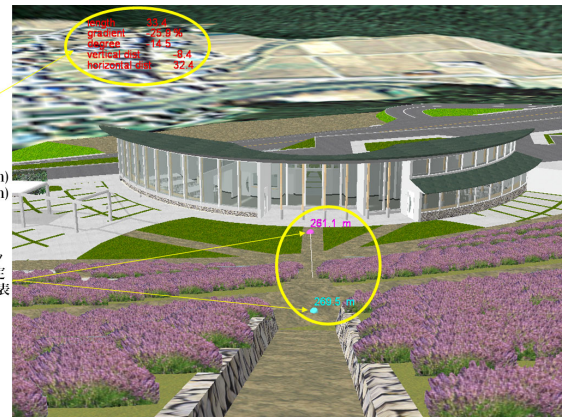
(1) 既往システムのシミュレーションフロー

既往システムのシミュレーションフローは図-3に示す通りである。現地調査及びデータ整備を行った後、周辺データの作成を行う。3次元地形データは、近景エリアについては地形図より等高線をトレースして3D-CADを用いて10mメッシュで作成し、中・遠景エリアについては国土院の数値地図50mメッシュ又は250mメッシュを用いて作成した形状データに、航空写真をマッピングする。一方周辺建物データは、地形図や道路管理台帳などの紙媒体もしくはデジタルデータより入力した平面形状データに、各建物の階数に基準階高を乗じた高さを与えて形状を定義する。設計対象に近い建物やランドマークとなる建物については、さらにファサード写真をマッピングする。設計対象については、設計行為を行いながら3D-CADを用いて対象となる公園、道路、建物等の形状、色、テクスチャを定義する。これまでに述べた一連のモデリング作業を、例えば筆者らのグループは汎用3DCGソフトウェア3D Studio MAXを用いて制作している。

次に、モデリングされた設計対象データ及び周辺データを、3DVRシステムに取り込みVRオーサリングを行う。VRオーサリング作業について、例えば筆者らのグループは汎用3DVRソフトウェアVirtools™ Devを用いて制作している。Virtools™ DevはDirectX APIを採用しておりPC上での動作が可能である。また、オーサリング工数短縮のためビジュアルプログラミング手法を採用しており、BB(Behavior Building Block)と呼ばれる様々な関数群を論理的に組み合わせることで機能開発が可能である(図-4)。本研究で開発する土量計算、距離計算、断面計算機能は本段階に位置づけられる。既に開発した視点・基本操作・デザイン案検討などのVR機能は、コンテンツ毎にカスタマイズが生じる場合があるが再利用することができる。加えて3DVRソフトウェア上で、モデリングデータにミップマップやバンプマップ、ビルボードなどシステム固有の機能を付加してデザイン検討用のコンテンツは完成する。最終的にはweb公開形式として保存することでインターネット上での公開が可能である。



図-5 開発した土方計算インターフェース



- ・直線距離
- ・勾配(%)
- ・勾配度
- ・鉛直距離(m)
- ・水平距離(m)

図-7 開発した距離・勾配計算機能

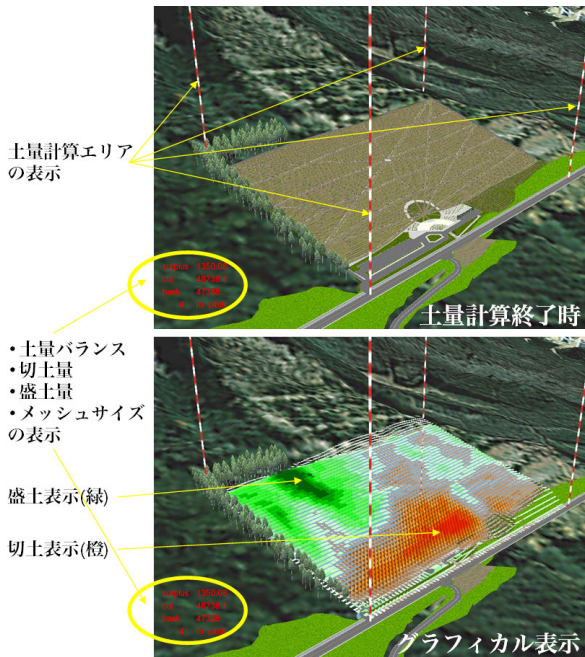


図-6 開発した土方計算機能

(2) 土方計算アルゴリズムの開発

土方計算機能はメッシュ法を用いて開発した。具体的には、3DVR ソフトウェア上で、まず無限遠から垂直方向に光線(Ray)を照射し、その光線と現状地形オブジェクトと造成計画オブジェクトそれぞれが交差する点を取得する。次に、両標高の差から盛土・切土高さを求める。さらに各格子の水平投影面積に、四隅の格子交点の埋立て高さの平均値を乗じて、各格子の容量を算出する。

盛土量、切土量、及びトータル土量バランスを算出して数値を画面上に表示すると同時に、盛土量は緑色にて、切土量はオレンジ色にてポリゴンによるグラフィック表示を行う。さらに変化量に応じて彩度を変更することで変化量のグラデーション表示も可能としている。

(3) 土方計算機能のインターフェースの開発

土方計算用インターフェースとしては、まず「土方計算」ボタン、「計算」ボタン、「切盛表示」ボタン

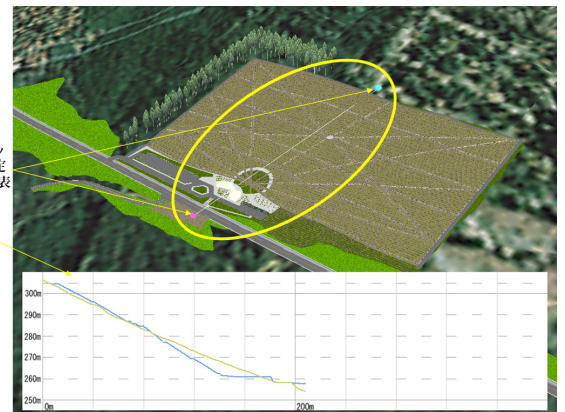


図-8 開発した断面計算機能

を含む土方計算パネルである。「土方計算」ボタンをクリックすることでカメラ操作など他の機能を停止すると共に土方計算機能説明パネルを表示する。「計算」ボタンにより土方計算を開始する。計算するメッシュサイズは必要に応じて変更可能である。土方計算終了後、土方計算結果表示パネル上にはトータルバランス量、盛土量、切土量、計算精度が数値で表示される(図-5)。「切盛表示」ボタンをクリックすることで切土・盛土分布がグラフィカルに表示され、設計案を視覚的に理解しながら評価できる(図-6)。

(4) 距離・断面計算機能の内部アルゴリズムの開発

距離計算アルゴリズムは、指定された二点のY座標地を取得して距離・勾配・高低差の計算を行う(図-7)。断面計算アルゴリズムは、二点間を結んだ直線からあるピッチでY座標値を取得し、断面表示プレート上で各点を配置し点の集合として線分表現を行う(図-8)。

(5) 断面計算機能のインターフェースの開発

断面計算用インターフェースとしては、キーアサイン(本開発では「N」キーを使用)しながら対象地の2地点をクリックすることで断面図を表示する。

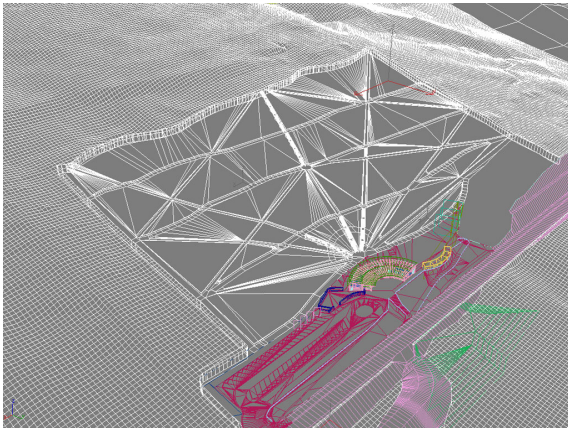
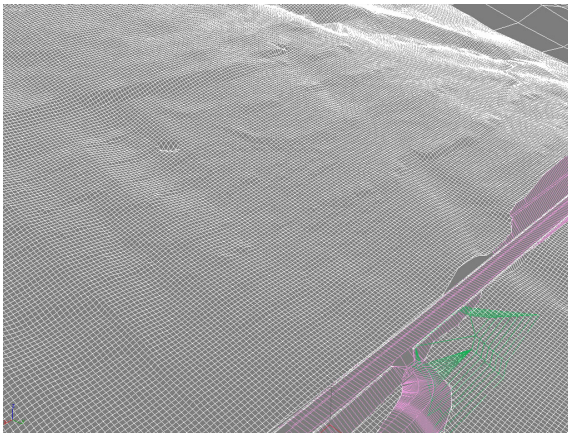


図-9 多可町ラベンダー園計画の現状データ（上）と設計データ（下）

5. システム適用例：多可町ラベンダー園計画

本システムは、造成計画や道路計画や公園計画において使用されることを想定している。そこで、兵庫県多可郡多可町(旧加美町)ラベンダー園計画に適用した例を示す。本計画は、県道氷上加美線の整備事業に伴い地域の活性化を図ることを目的とし沿道の丘陵地(大河丘陵)を活用したラベンダー園(道路軸線方向288m×斜面軸線方向180m、約5ha、高低差45m)及び休憩施設、育苗施設の計画である。約3.2kmの計画道路とその周辺地形、そして計画施設の設計行為ともに3次元モデルを作成して3DVRシステム上で検討を進めた。設計条件としては、ラベンダー園造成時の土量バランスとして切土量、及び盛土量をできるだけ少なくし且つ排出残土を抑えること、車椅子用園路の勾配(最大8%)の維持などである。

作成した3次元モデルの精度は、詳細な設計検討を行うために計画対象地の現状をメッシュサイズ1mで、計画案については散策路や石垣、畝などの詳細度まで作成した。計画モデルの精度としては10cm程度である(図-9)。

筆者らは開発したシステムを用いて、メッシュサイズ4mで土量計算を行いながら計画案の検討を行い、景観検討と土量検討を同じ3DVRシステム上で検討する

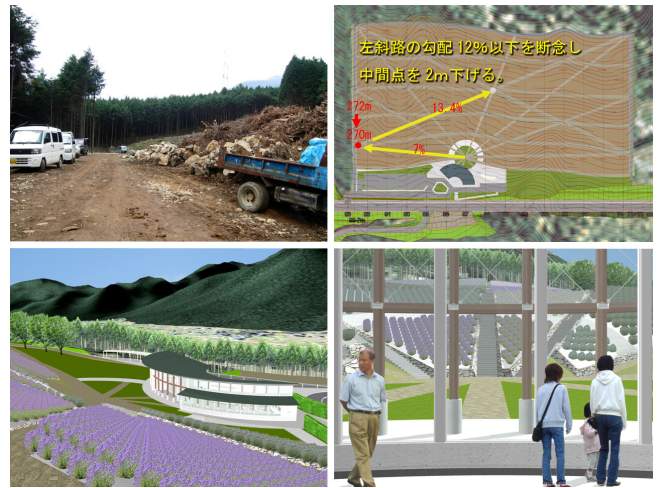


図-10 多可町ラベンダー園計画。左上：現状写真、右上：設計検討資料：左下・右下：3DVRカット

表-1 ラベンダー園コンテンツでの計算時間

メッシュサイズ(m)	20	10	4
メッシュ数	150	600	3600
土量計算時間(s)	20	105	690
1メッシュ当り計算時間(s)	0.13	0.175	0.192

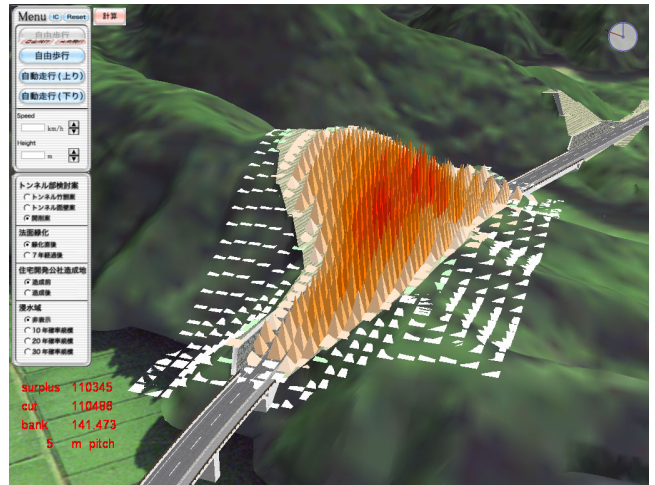


図-11 他のプロジェクトでの適用

ことができた。検討した結果を基に代替案の作成を行うことでより最適な案の検討を行い、一日5案程度の代替案を検討した。シミュレーション結果はグラフィカルに表示され、自由な視点からの出力やフライスルー、ウォークスルーなどにより確認することができる。また筆者らの設計チーム内における検討会議のみならず、予算面や施工性を検討する土木コンサルタントや休憩施設を設計する建築家との検討会議においても、複数の代替案を提示、検討することで一度の会議で多くの協議事項を確認できたといえる(図-10)。

メッシュサイズを20m、10m、4mと変更した際の土量

計算時間はそれぞれ20秒、105秒、690秒であった(CPU: Intel Pentium4 3.40GHz、メモリー2Gbyte、OS: Microsoft Windows XP Service Pack2を使用)。本適用例におけるメッシュサイズ、メッシュ数、土量計算時間、1メッシュ当りの計算時間を表-1に示す。メッシュが高精度になるほど、1メッシュ当りの計算時間も長くなることを確認できた。

また、開発したシステムを他の道路設計プロジェクトに適用した。図-11は、山地を切り開いて法面造成する際の切土量を示した様子である。1メッシュの処理速度はメッシュの数によって変化はあるが0.1~0.25秒であることが確認できた。

いずれの計画においてもメッシュ精度を高くすると計算時間がかかることが確認された。そのため、設計プロセスにおいて、当初は20mメッシュサイズでラフ検討を行い、設計条件を絞りこんでいくと共にメッシュ精度を上げ、最終的には4mメッシュ精度を最高として検討する手法とした。

6. まとめ

景観と土量計算のシミュレーションがシームレスに可能な3DVRシステムの開発を行った。設計者が従来の設計行為の延長線上で使用できるよう、汎用VRソフトウェア上に開発した。土量計算結果は数値情報だけでなくグラフィカルに表示された画面上で直感的に理解することができ、設計案の素早い評価が可能であると共に、市民など専門家でない非専門家も設計内容を容易に理解することができる。3DVRシステムなので、土量計算結果表示状態で、フライスルーやウォークスルーすることも可能である。

今後は、ツールの実用化に供するため、本研究で適用した計画に止まらず、更なる土木設計機能の整備を行うと共に、ヘルプ機能の充実を図る。さらに、実際の設計がこのツールを用いてどのように設計を進めていくのかを調査し、開発にもフィードバックさせていく必要がある。

謝辞: 本研究の一部は、日本学術振興会平成17年度科学研究費補助金 若手研究A「リアルタイムシミュレーション技術による環境設計システムの開発」(課題番号17686052)の助成を受けた。

注記

注1) スムースで連続的な知覚に必要なフレームレートは諸説あるが、例えば柴野¹³⁾は、「描画速度が10fps以下になると、描画の遅れが気になり、3fps以下になると、体験者は苦痛を感じるようになる。」と述べている。本稿ではこの記述に基づき10fpsを最低値として評価した。

注2) Virtools™ Devは、仏Virtools社が開発し三徳商事株式会社が販売している3DVRソフトウェアである。

参考文献

- 1) 加賀有津子, 呉受妍, 本井敏雄, 福田知弘, 笹田剛史: 環境設計システムのフレームワークと定義モデルに関する考察, 日本建築学会第27回情報・システム・利用技術シンポジウム, pp.199-204, 2004年12月.
- 2) 国土交通省: 公共事業における景観アセスメント(景観評価)の試行について, <http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha04/13/130625_.html>, (入手2006.5.18).
- 3) 禹成浩, 福田知弘, 草間晴幸, 笹田剛史: 橋梁環境デザインにおけるVRMLの利用, 土木情報システム論文集, Vol.5, pp.91-98, 1996年10月.
- 4) 福田知弘, 長濱龍一郎, 加賀有津子, 笹田剛史: 夜間景観デザインのための協調設計支援システム, 日本建築学会第23回情報・システム・利用技術シンポジウム, pp.31-36, 2000年12月.
- 5) 加賀有津子, 赤城慎太郎, 福田知弘, 廬祥偉, 上善恒雄, 笹田剛史: 環境デザインにおけるリアルタイム・シミュレーションシステムの考察—道路環境デザインのためのシステム構築方法の検討を通じて—, 日本建築学会第24回情報・システム・利用技術シンポジウム, pp.73-78, 2001年12月.
- 6) 加賀有津子, 呉受妍, 呂煜鉉, 笹田剛史: 3次元環境設計システムに関する考察—デザイン初期段階の環境設計手法e-sketchに関する研究(2)—, 日本建築学会第26回情報・システム・利用技術シンポジウム, pp.49-54, 2003年12月.
- 7) 福田知弘, 長濱龍一郎, 柴野伸之, 澤田一哉, 加賀有津子, 笹田剛史: 協調設計のためのドーム型等身大・広視野角表示VRシステムの開発と適用, 日本建築学会第27回情報・システム・利用技術シンポジウム, pp.61-66, 2004年12月.
- 8) 呉受妍, 根津曉子, 福田知弘, 加賀有津子, 笹田剛史: 実空間3次元モデルと活動画像に基づく環境デザイン企画段階のインタラクティブなデザインツール, 日本建築学会第27回情報・システム・利用技術シンポジウム, pp.49-54, 2004年12月.
- 9) 加賀有津子, 宮川淳, 河口将弘, 呂煜鉉, 福田知弘: GPSカメラ付き携帯電話を利用した地域景観評価システムの構築, 日本建築学会第27回情報・システム・利用技術シンポジウム, pp.55-60, 2005年12月.
- 10) フォーラムエイト: UC-win/Road, <<http://www.forum8.co.jp/>>, (入手2006.5.18).
- 11) 小林祐司, 佐藤誠治, 姫野由香: Virtual Realityを利用した緑地景観評価システムの構築と検証, 日本建築学会第27回情報・システム・利用技術シンポジウム, pp.85-90, 2004年12月.
- 12) 田上恭也, 有馬隆文: まちづくりワークショップにおけるイメージ共有のためのVRシステムの開発, 日本建築学会第28回情報・システム・利用技術シンポジウム, pp.49-54, 2005年12月.
- 13) 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・インターフェース・シンポジウム論文集, 1994.

(2006.5.19受付)