

VR 的交通環境シミュレーションシステム

向 井 利 光[†]

この論文は、3次元コンピュータ・グラフィックスで構成される仮想空間（都市、道路）を、擬似的なハンドル、アクセル、ブレーキによって操作できる車輛に視点を置いてリアルタイム走行シミュレーションを行い、設計の評価、改良に資するためのシステムのコンセプト、技術的な工夫、ユーザインタフェース、実務への応用等について報告するものである。近年、3次元コンピュータ・グラフィックスは景観設計にも広く用いられるようになってきたが、リアルな画像を生成するには多大な計算時間を要するため、実時間によるシミュレーションは困難で、これまでは静止画で済ませたり、あらかじめ長時間かけて計算された動画データを再生表示またはビデオ編集して表示しているのが実状であった。本研究では、ハードウェアとして Silicon Graphics 社製、ONYX/Infinite Reality を使用し、描画速度を上げるために LOD 等のテクニックを採用し、データ構造にも工夫を加えた結果、10万ポリゴンの仮想空間を 1280 × 1024 の解像度で 15~30 フレーム/秒の描画レートを実現することができた。実務に応用した例では、高速道路のインタージャンクションで、片側 2 車線、ランプ数が 13、ランプ延長 12km、最大高低差 26m、道路標識の数が 35、総ポリゴン数 10 万のモデルの実時間シミュレーションを行うことができた。

Virtual Reality System for Traffic Environment Simulation

TOSHIMITSU MUKAI[†]

In this paper, I describe the real time driving simulation system, which leads to evaluate or to improve the design of city and roads. This system produces the virtual space (consisted of virtual city and roads) on the three dimensional computer graphics platform, using the vehicle model operated through a cockpit with a steering wheel, an accelerator and a brake pedal, and I propose the concept, how to realize it, original technologies and user interface of this system. Recently, three dimensional computer graphics has been becoming practical for landscape design. However, since the real time simulation requires a long time calculation to produce real image, the still image or the animation data already calculated or edited is generally used. Through this study, I made it realized that 100 thousand polygon virtual space with the pixel density of 1280 × 1024 and the drawing rate of thirty frames/second by using ONYX/Infinite Reality made by Silicon Graphics as a hardware with techniques such as LOD to accelerate the drawing speed, and by improving the data structure. As a practical example, the real time simulation of the high way inter-junction with two lanes per one way, thirteen lamps of twelve kilometer length in total, twenty-six meter of the maximum difference of altitude, thirty-five road signs, 100 thousand polygons is realized.

1. はじめに

道路の設計段階において、3次元コンピュータ・グラフィックスによるシミュレーションを行い、完成時の状況を疑似体験して、景観や走りやすさや問題点を検討することができれば便利であろう。

このようなシミュレーションは、建設業界ではすでに広く用いられ、実施例も報告されている。しかし、実務に耐えうる精密なモデルを高画質で描画するには多大な計算時間がかかるため、実時間表示は困難で、

あらかじめ計算しておいた結果をビデオ等に収録しておいて見せるのが普通である。

それに対し本研究は実時間シミュレーションを目指し、ハンドル、アクセル、ブレーキを操作して自由に走行できることを目標にした。これを実現するため、高性能のグラフィックワークステーションを使用し、モデリングやレンダリング技術に工夫を加えて高速化を図った結果、10万ポリゴンの仮想空間の実時間シミュレーションに成功した。ここで試作したシステムは、ゲームセンタや自動車教習所等にあるドライビング・シミュレータと異なり、CAD データをもとに精密なモデリングを行い、自動車の動的特性もできる限り取り入れて、実務に耐えうるクオリティを実現した

[†] 株式会社ビジュアルサイエンス研究所
VISUAL SCIENCE LABORATORY, INC.

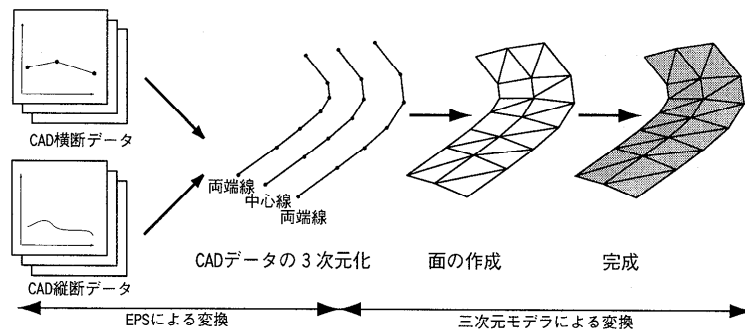


図1 道路データ作成方法

Fig. 1 Generation of road data.

ものである。

この研究に着手したのは4年前で、最初のバージョン^{1),2)}に毎年改良を加えて今日に至っている。その間、数々の設計実務に利用され有用性が実証されている。ここで考案したテクニックは道路設計のみならず、都市の景観設計をはじめ、他の諸分野にも応用できると考えられる。

2. システムの概要

交通環境のシミュレーションで利用する形状モデルは、検討内容によって様々ではあるが、平均的には4万ポリゴン、最大で10万ポリゴン程度になることがある。

この形状データを毎秒30フレームの速さで描画するには、毎秒300万ポリゴンの描画のできるマシンが必要になるが、普通、カタログに書かれている描画速度は高速描画に最も適した条件での値であり、実効速度はその1/2ないし1/5になることが経験的に知られている。したがって、前記の性能を出すにはカタログ性能が毎秒1,000万ポリゴン以上のマシンが必要ということになる。

そこで本研究では、ハードウェアとして Silicon Graphics 社製、ONYX/Infinite Reality を採用した。これは2つのCPUと毎秒1,100万ポリゴンの描画能力を持つグラフィックエンジンを実装している。運転操作のためのユーザインタフェースとしては、ハンドル、アクセル、ブレーキを用意し、A/D変換器を介してONYXに接続した。ソフトウェアとしては Performa 2.0 を使用した。Performa 2.0 ソフトウェア開発環境は、OpenGL の上位ライブラリーであり、しかも ONYX/Infinite Reality が持っている描画性能（サーフェスモデル、グーロシェーディング、アンチエイリアシング等）をそのまま利用できる。また FLT,

IV 等の実時間処理系で良く用いられるデータフォーマットが利用できる。さらに OS (IRIX6.2) との連携による複数の CPU の自動制御と描画タイミングの調整機能を持っている。そのため、実時間表示を絶対条件とした本研究の開発には最適であると判断した。シミュレーションのプログラムは自作し、開発言語は C++ で約 17,000 行になった。

3. 道路のモデリング

道路の3次元CGモデルはCADデータをもとに生成した。まず、道路の中心線の3次元座標をCADデータから取得し、これと道路横断面の傾きを与えて、道路線形計画用のソフトウェア(MTC社のEPS)によって道路の端点の座標が計算しポリゴンメッシュを生成する(図1)。ポリゴンメッシュの間隔は、縦方向は、カーブや起伏が激しいところで4m、変化が少ないところで20mとした。また、横方向は図1に示したように、中心線の片側を2つの三角形ポリゴンで扱った。これでも1kmあたり200~1,000ポリゴンのデータ量となる。白線の表現は、当初、テクスチャマッピングで行ってきたが、道路の白線は道路設計の評価検討で特に重要な要素であり、表示に曖昧さがあつてはならないという理由からポリゴンによる表現に変更した。ポリゴンによって白線を作成するには、白線の中心位置を示す線のデータに適当な断面形状を与え、3次元モデルが持つスイープ(sweep)機能によって作成した。同様に、中央分離帯、ガードレール、植込み等のモデルを作成した。これら道路関連設備(白線、中央分離帯、フェンス、ガードレール、植込み等)がデータ量全体の50%以上を占めている。地形データは、地図をスキャナで読み込み、等高線をトレースし、3次元モデル formZ の3次元化機能を用いて作成した。CADで作成した構造物のデータはVR用の

データとしては冗長であるので、デザイナーが建築計画図面をもとに再構築することが多い。特に交通環境シミュレーションにおいては、個々の建物の細部の構造は重要ではないので、細部はテクスチャマッピングによって表現し、1つの建物を5~20ポリゴン程度、橋や高架等は1,000~3,000ポリゴン程度に抑えた³⁾。

道路標識はテクスチャマッピングで表現した。その解像度は表示内容によって変えているが、標準的には1m四方の道路標識に対して100~150ピクセル四方のテクスチャデータを利用した。解像度をこれよりも下げると標識内の文字等の不鮮明さが目立つことがシミュレーションから分かった。

4. 走行環境

シミュレーションでは、ハンドル、アクセル、ブレーキの入力から、運動力学に基づいて仮想車輦の位置を計算し^{4),5)}、仮想車輦上の視点から見た景観を画面に表示する。今回使用した運転席の模様を図2に示す。ハンドルはHAPP Controls社製50-0194-06を使用した。変換方式はポテンシオメータで、ハンドルの回転角は ± 135 度までとれる。誤差は4%以下で、操縦の目的には十分である。

ポテンシオメータの出力をA/Dコンバータ(12bit, 50Hz)で変換し、シリアル回線(RS-422,

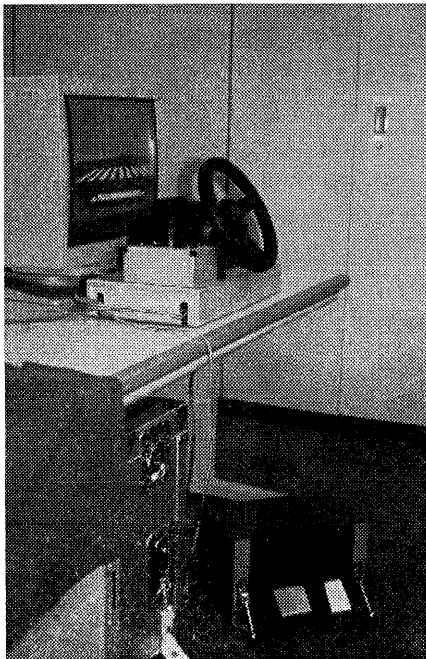


図2 操作環境

Fig. 2 Operation environment.

14400 BPS)を介してGWSに入力した。入力されたデータはまず入力専用のプロセスで処理され、その結果がシェアードメモリに書き込まれて、メインプロセスに引き渡されるようにした。これによって、メインプロセスは入力プロセスのタイミングに影響を受けることなく、いつでも必要なときに情報を利用することができた。

使用したハンドルにはほとんど遊びがないため、ソフトウェア的に3度の遊びを入れた。自動車の位置や方向は、ハンドルの角度をもとに、ホイールベース(wheel base)、トレッド(tread)、前輪操舵角度を考慮した計算式により算出した。アクセルとブレーキに関しては、それぞれ最大加速値、最大減速値をパラメータとして設定できるようにした。シフトノブに関しては変速によって加速が可能な速度の幅を1速~5速に対して0~30, 30~50, 50~70, 70~100, 100~150の範囲とした。画面内には、速度、位置座標、ギア値等を表示し、視野角、光源の強さ、表示方法(ポリゴン表示、ワイヤーフレーム表示等)の変更ができるようにした。

5. 自動車のモデリング

走行シミュレーションにおいては、他車輦の表示も重要な要素の1つである。というのは、すぐ前を走行する自動車のために標識や信号機が見にくくなることがあり、設計の評価に影響があるからである。追越していく車、対向車線の車等の表示も評価に重要である。車輦の表示において、描画を速くするためには自動車形状モデルのデータ量(ポリゴン数)を極力少なくする必要がある。しかし、あまり単純化しすぎると表現力が乏しくなり、現実感を損うおそれがあるので、両者のバランスをとる必要がある。

今回は一般乗用車のモデルを3種類、大型車輦のモデルを2種類用意した。自動車は簡単そうに見えるが、曲面で構成されているので(特にフェンダー、バンパー、タイヤ)ポリゴン数はどうしても多くなる。そこで、現実感を低下させない範囲内で、できるだけポリゴン数の少ないモデルを追求して完成したのが図3、図4で、ポリゴン数は800~1,000である。

6. 高速化のための工夫

現在入手できる最高速のマシンを使っても、設計実務の要求に応えられる規模と画質で実時間シミュレーションを行うことはかなり困難である。そこで今回のシステムの開発に際しても、高速化のために、いろいろな工夫をした。

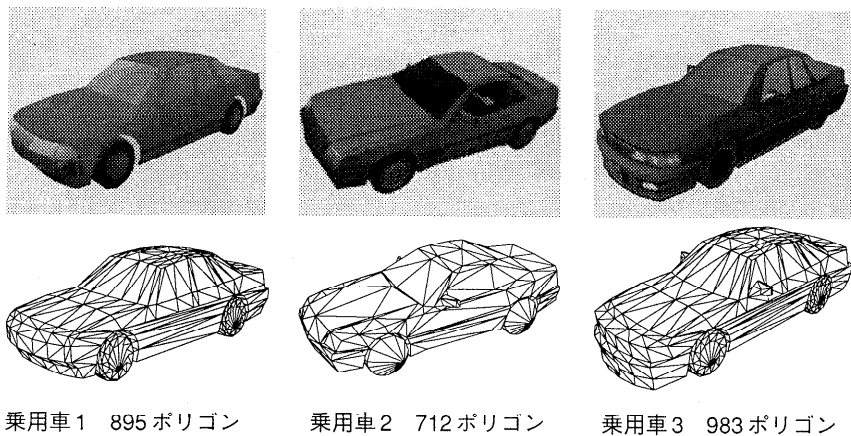


図 3 乗用車モデル
Fig. 3 Vehicle model.

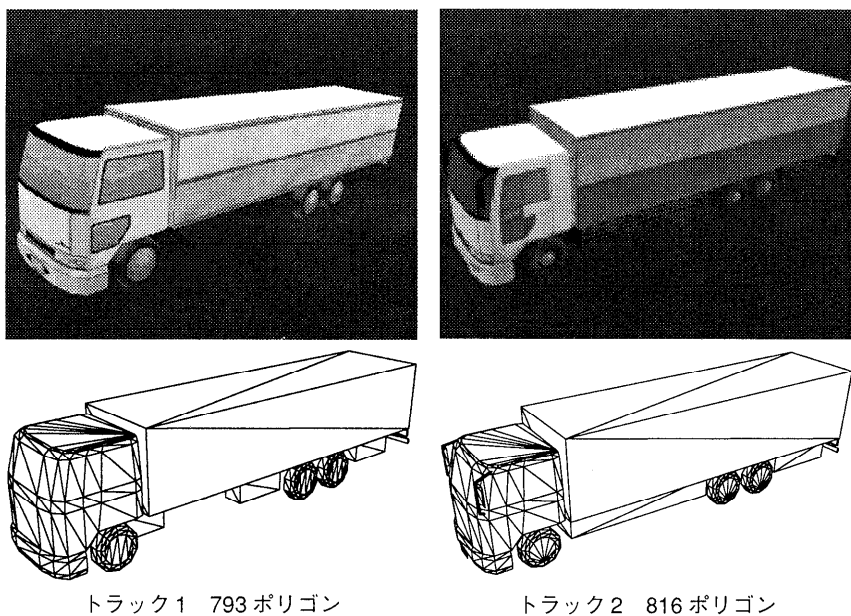


図 4 トラックモデル
Fig. 4 Truck model.

6.1 モデルの空間的分割

CG における描画速度を左右する最大の要素はモデルのポリゴン数であるが、さらに詳細に定義するなら「描画計算の対象となるデータ量」が重要であり、実際に画面に表示される画素数も描画速度に影響する。そこで仮想空間を構成するデータを空間的に分割し、視点と視野が作るビューボリューム内から外れた構造物を描画計算の対象外として描画速度を上げることを試みた。その効果はケースにより異なるが、シミュレーションの規模が大きくなるほど効果が大きく、比較的

大規模な例で、計算時間を約 30% 短縮することができた。

6.2 LOD の採用

視点から離れた物体は小さく見えるので、画面上の対応するピクセル数が少なく、詳細なモデルを使用しても精密な描画はできない。これを考慮して、視点から遠いモデルの詳細度 (detail) を落とし、ポリゴン数とテクスチャデータの少ないモデルを利用することで高速化を図るテクニックを LOD (level of detail) という^{6)~8)}。これを実現するため、仮想空間内に構築

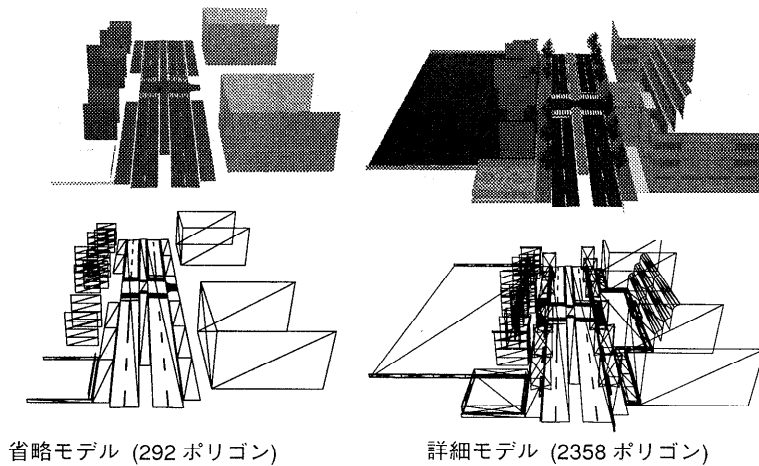


図 5 詳細度の異なるモデル
Fig.5 Different detail models.

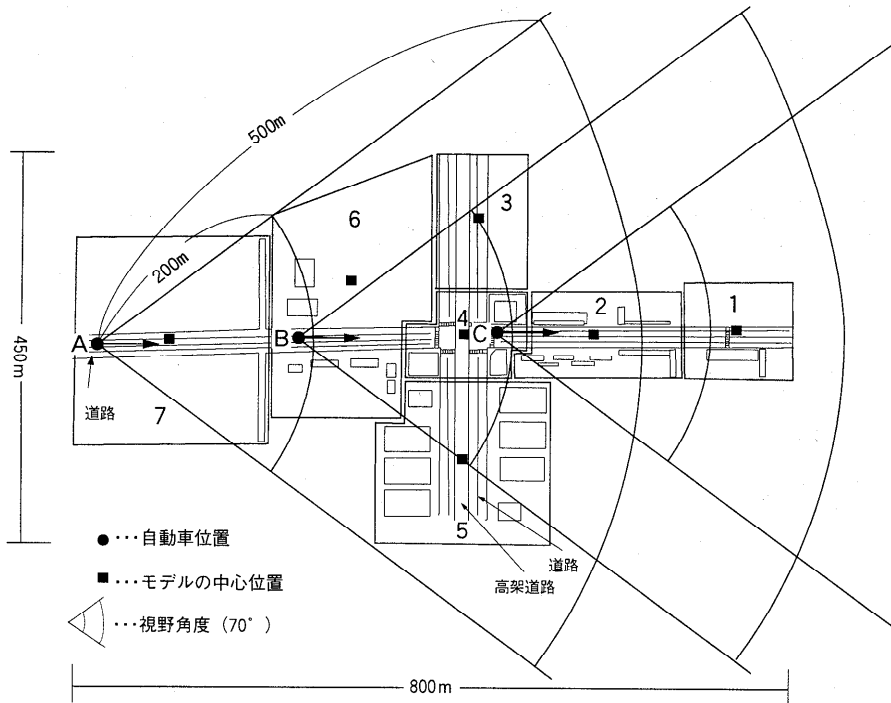


図 6 LOD の検討に用いた仮想都市モデル
Fig.6 Virtual city model utilizing for studying LOD.

されたモデル全体を空間的に分割し、さらに分割された各モデルに関して詳細度の異なるモデルをいくつか用意しておき(図5)、モデルに対する視点からの距離に応じてモデルの詳細度を変える。たとえば、図6に示すような長さ800m、幅450m、およそ30,000ポリゴンで構成された仮想都市空間の表示のために、モ

デルの空間的分割とLODを利用した場合、図6中の1~7のように空間を分割し、モデルはそれぞれ2種類の詳細度の異なるものを用意し、

- (1) 視点から200m以内の物体は、詳細なモデルを使用し、テクスチャマッピングをする。
- (2) 視点から200m以遠500m以内の物体は、ポ

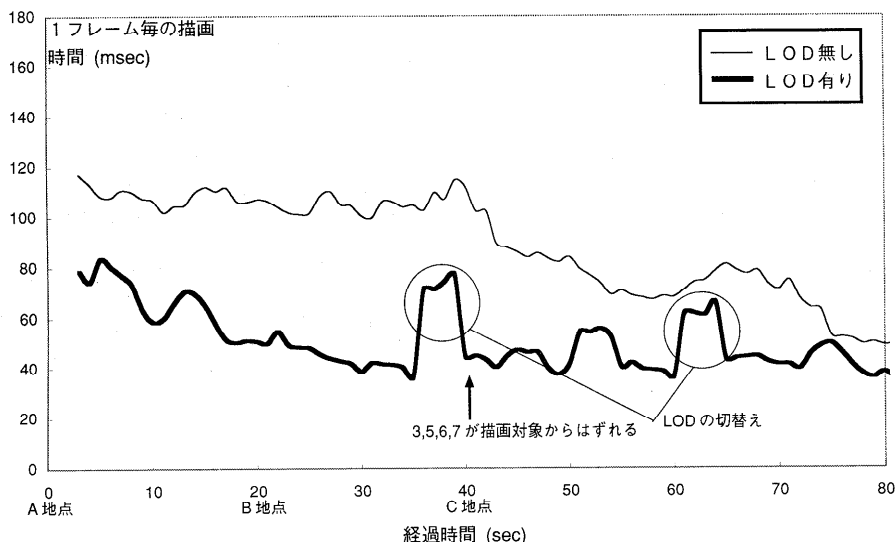


図 7 時間変化による描画時間の比較

Fig. 7 Comparison of drawing speed with the lapse of time.

リゴン数を(1)よりも3~4割減らしたモデルを使用しテクスチャマッピングを省略する。

(3) 視点から500m以上離れた物体は描画しない。というように切り替える。その効果を調べるため、図6のA地点から視野角度70度の視点の設定された仮想自動車を40km/hで道路上を走行させてみた場合の描画速度の変化を図7に示す。グラフの横軸は時間軸、縦軸は1フレームを描画するに要した時間(単位:msec)である。空間分割とLODを採用したモデルの場合には、A地点では距離が200m以内にある7番のモデルが(1)の詳細度レベルで表示され、距離が200~500mの3, 4, 5, 6のモデルは(2)の詳細度で表示され、距離が500m以上の1, 2番のモデルは表示されない。また20秒後のB地点では、7番のモデルは完全にビューボリュームの外になるため描画対象から外れる。同様にA地点から40秒後のC地点では3, 5, 6, 7が描画対象から外れる。このようにして、空間分割とLODの採用によって平均して2~3割程度、描画速度が向上している。ただしLOD等を採用した場合には、モデルが切り替わるときに一時的に描画速度が下がることも確認されたが、採用しなかった場合を上回ることはなかったので問題にはならない。後述の応用例(1)ではモデルを200~250m四方で空間的に17個に分割し、データの6割を占める白線、ガードレール、高欄を150m, 400mで切り替えて使用した。

6.3 検索時間の短縮

仮想自動車が路面に正確に接するような計算をする

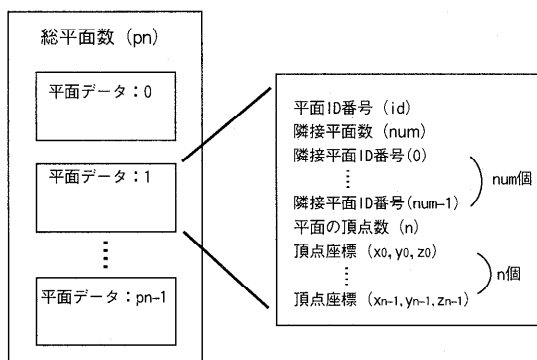


図 8 路面データ構造

Fig. 8 Structure of road data.

ためには、仮想自動車が移動する度に道路面との交点計算をしなくてはならず、道路データを構成する多数の平面の中から、どの面の上に自動車が存在するかを検索しなくてはならない。この検索を高速化するために道路面を構成する各平面に識別番号を付け、各平面に対して、その平面と隣接している平面の識別番号を保持するようにした。このデータ構造を図8に示す。たとえば、平面番号1番から自動車が始動したとすると、仮想自動車の移動距離が十分短いとすると、次の瞬間に自動車が存在する可能性のある面は1番または2番であるから、2つのポリゴンに対する検索で済み、検索効率が大幅に向上する。また、図9のように空間的に交差する路面でも、1番の平面上にあった仮想自動車が次の瞬間に5番の平面上にある可能性はないことを利用して、解を1つに決定することが可能と

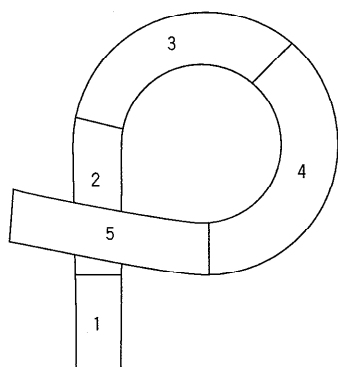


図9 道路データ例
Fig. 9 Sample of road data.

なった。

7. レンダリングとアニメーション

7.1 光 源

使用した GWS では、光源として点光源と平行光源の設定が可能である。ただし、光源の数の増大はそのままシステムへの負荷となるため、自動車のヘッドライトや外灯等の表現は明るい色のテクスチャやポリゴンで表現した。ハードウェアのグーロシェーディングを使用して陰影の表現も可能である。昼夜の表現は、光源の強さを変えることによって行った。

7.2 樹木の扱い

樹木等は、従来は十字に重ね合わされた 2 枚のポリゴン上にテクスチャマッピングの手法で表現するのが普通であった。今回のシステムでは、観察者に対してつねに正面を向くように動的に回転する 1 枚のポリゴン上にテクスチャマッピングの手法で表現するビルボード (billboard) と呼ばれる方法を用いて、データ量を半分に減らすことができた。この方法では、樹木はつねに観察者の方を向くので、不自然な感じも軽減することができた。

7.3 描画レートの維持

起動時に指定された描画レートが維持できない場合、その描画をあらかじめ次の描画処理を行うようにして、計算処理は常に描画レートで行われるようにした。

8. 実務への応用例 (1)

本システムの応用例の 1 つとして、現在設計内容の検討が進んでいる高速道路ジャンクションの事例を紹介する (図 10)。これはフルアクセスが可能なインタージャンクションで、片側最大 2 車線、ランプ数が 13、ランプ延長 12 km、最大高低差 26 m、総延長

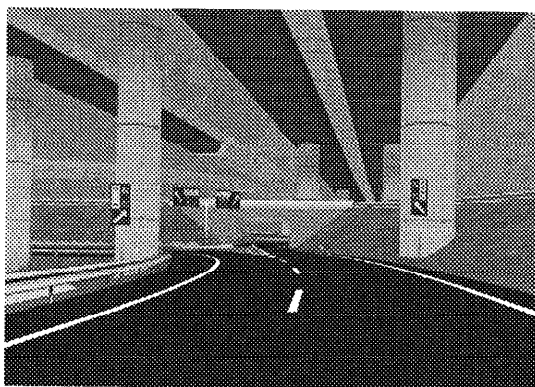


図 10 ジャンクション検討
Fig. 10 Study of highway junction.

14 km、平均的な大きさが 2 m×3 m の道路標識の数が 35 という規模で、総ポリゴン数は 10 万に達した。描画条件は解像度が 1280×1024 の CRT に対してフルカラー表示とし、水平視野角を 70 度に設定した。この視野角の設定値は、過去の実務において最も評価の高かった値である。シミュレーションの目的は、次のような問題点に関して検討をすることであった。

(1) 道路標識の検討

利用者が安全かつ正確に目的地に進路を変更できるかどうかを検討する。

(2) 道路形状の検討

走行上の問題点を洗い出す。

緩やかなカーブが長く続くときに運転者にどのような印象を与えるかを検討する。また合流/分流点での安全性を確認する。さらに橋脚等が運転者の視野を妨げているので、その影響を調べる必要がある。

8~15 フレーム/秒の描画速度が限界であったモデルに、空間分割と LOD の利用によって 15~30 フレーム/秒となり、目標とした 15 フレーム/秒以上の描画速度が実現できた。また検討内容が日本国内では誰も経験したことのない規模のインタージャンクションであるため、運転者が進路選択を間違える可能性は非常に高い。そこで当初あったすべての道路標識の表示内容と位置がシミュレーションによって再確認されすべてに変更が施された。特にすべての分岐の手前に 2 か所以上の道路標識が設置される設計内容にいったん修正されたが、何か所かで依然として進路選択の誤りが減らないところがあった。これは複雑なインタージャンクション内で、運転者がカーブ内を走行しているときには道路標識を見落とすことがあるからであった。カーブ内では道路の上、高所の標識は見落とされがちであり、むしろ道路脇にある標識の認識率が高いこと

が分かったが、道路脇の標識をあまり大きくすることはカーブの視界を妨げる可能性があることも判明してしまった。そこで、道路脇の標識は進路選択が誤りであった場合にのみ有効な内容を選んだ。図 10 では左を走行している自動車が実は右に行かなければならないときに、右が正しい進路選択であることを知らせる内容となっている（矢印が右を向いている）。この場合、進路選択が正しい運転者には表示内容は何ら影響を与えず、またカーブ内での視野の妨げを最小限にしておき問題はなかった。また図 10 に示すような橋脚が進路を隠すような場合は、運転者は心理的に不安感を抱くことが分かったため、橋脚の位置や大きさが再度検討された。

実時間シミュレーションの場合、被験者は実際に運転しているときと同様に、カーブでは視点をその内側に移動させるが、ビデオ映像では視点は中央部分からほとんど動かないことが分かった。また、運転者の心理的な影響に関しても実際に運転することによってのみ明らかにされることであり、本システムの実時間表示とハンドル等のユーザインターフェースの有用性を証明するものと考えられる。

9. 実務への応用例（2）

9.1 トンネル内の設計検討

このシミュレーションでは長さ 2km のトンネル内の改修工事にともなう設計検討を行った。地形的な問題から、設計の内容がトンネル内で道が大きくカーブしており、そのカーブの部分で対向車とのすれ違いが安全に行えるか（図 11）、視界は十分確保されているか、中央分離帯の設計はどのようにしたらよいか（比

較検討）等を評価した。計画当初は中央分離帯の設置は、狭いトンネル内をさらに狭くし、運転者に圧迫感を与えてしまうので、中央分離帯を設置せず、制限速度を下げて安全を確保する方針であった。ところが実際にシミュレーション走行をしてみると、狭いトンネル内の急なカーブでのすれ違いでは、逆に中央分離帯によって安心感を得ることができ、狭いからといって中央分離帯に接触する車輛はなかった。ところが中央分離帯がない場合は、運転者は安心してカーブを通過できず、わずかな速度超過で対向車と接触する可能性があり、危険な状態であることが分かった。本システムの利用によって、より安全な設計内容に変更することができた。

9.2 大型車輛が安全に右左折できる交差点の設計検討

平均走行速度が 80 km/h 以上と高速道路並みの交通流となっている片側 2 車線の国道において、国道に比べて極端に狭い道路に右左折するために大型車輛が急減速することによって引き起こされる後続車輛の追突事故の再現（図 12）と、大型車輛が減速と右左折を安全に行うための交差点設計の検討を行った。変更計画の当初は左折レーンを新たに施工することによって対応する方向で検討が進んだが、途中からシミュレーションによる検討も加えた結果、左折レーンを使つての大型車輛の左折は困難であり、ほとんどの運転者は従来通り直進レーンからの左折を行うことが分かった。これは左折レーンの長さや間隔が不十分であることが原因であった。そのため、不十分な左折レーンは無用であるばかりか、左折レーンの設置によって一般乗用車が左折レーンに入ってきてしまい、それを左折する大型車輛が巻き込んでしまう事故の発生の可能性が

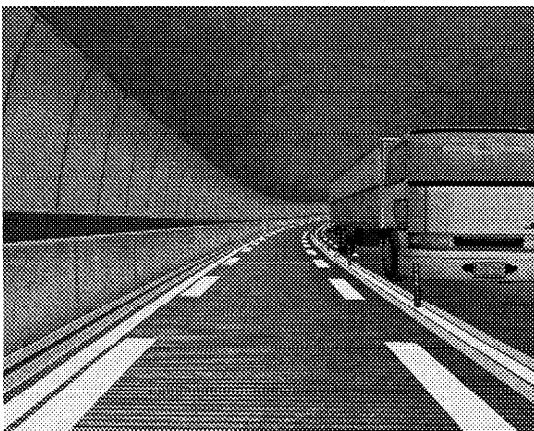


図 11 トンネル内検討

Fig. 11 Study of tunnel safety.

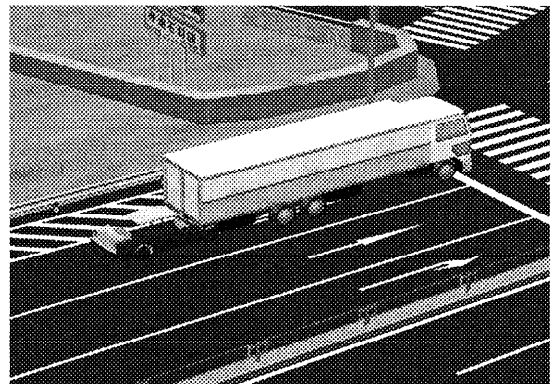


図 12 衝突事故例

Fig. 12 Sample of clash accident.

あることが分かった。一般的に左折レーンは直進する後続車とレーンを分けることによって安全を確保するものだが、その設計に問題があればかえって危険が増すことが、施工前のシミュレーションで明らかにすることができた。これは設計者が実際に大型車輛の運転者となり、何度もシミュレーションを行って事故体験等から得られた結果で、他のシステムでこのエラーを見つけることは困難であり設計者に有用な情報を提供できた。またシミュレーションによって大型車輛でも安全に曲がれる、大きな交差点に設計が変更されることになった。

10. システムの評価

本システムの有効性を確認するため、応用例(1)について、実際にジャンクションの設計者を含めた道路設計者9人に対してアンケート調査を行った。アンケート調査を行う前に10分間、システムを使用してもらい、システムを評価してもらった。アンケートの結果を図13に示す。評価項目〈興味〉、〈映像の現実感〉、〈将来性〉、〈有効性〉、〈総合評価〉に関しては半数以上の被験者が肯定的な回答をしている。これは、このシステムが十分道路設計者に受け入れられたことを示している。

またアンケートと別に行った聞き取り調査によれば、ハンドル等のユーザインタフェースは現実感を上げるために、さらに自動車内に近いものが要求されたが機能的には十分であるといった話が多かった。また、より複雑なモデルを使って、さらに現実感を上げたいといった意見もあったが、現実感が不足しているといった意味ではないとのことであった。ハンドル等のユーザインタフェースを使った実時間シミュレーションシステムは設計者が運転者となり設計内容の検討ができるため、実際の道路景観や勾配を体験できるうえに、8~9章の実務作業の報告にもあるように、実際に走るまでは明らかにされない問題点を唯一施工前に見つける方法となる。また大手建設会社においてはCGによるシミュレーションは行われているものの、コマ撮りビデオによるものがほとんどで、決して運転者の立場から設計内容の評価できるものではなく、特に視点の移動に関しては実時間シミュレーションとビデオ映像によるシミュレーションに大きな差があることが分かった。

ビデオによる評価は、安全性よりは視覚的なデザインの検討に利用されることが多いようである。これは主にCGの有用性は認識されているものの、実時間シミュレーションの有用性までは今まで認識されてい

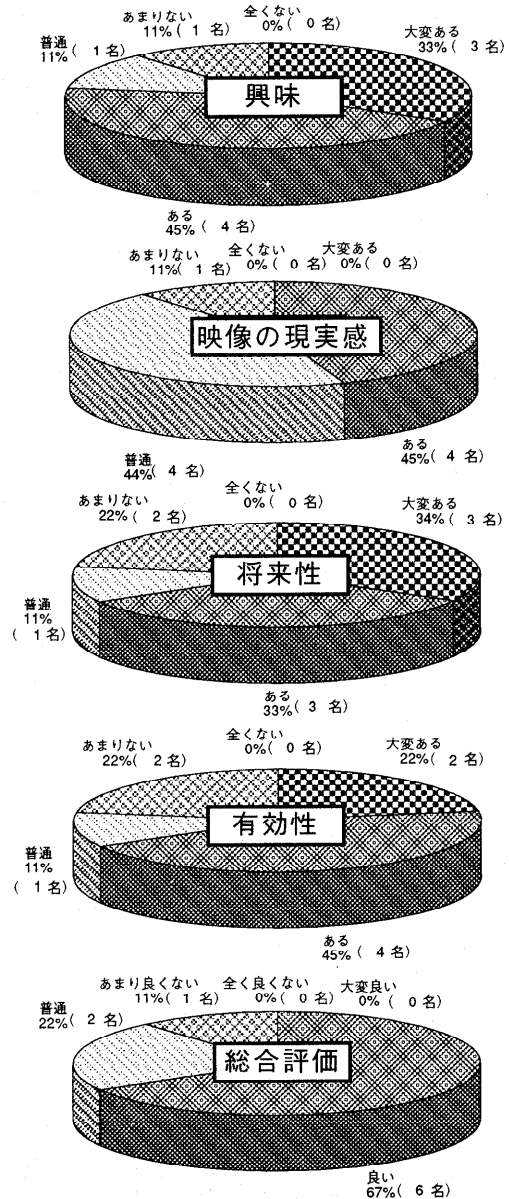


図 13 アンケート結果
Fig. 13 Questionnaire findings.

ないからであり、本システムの利用によって設計者に新たなCGの利用の可能性を広げられた。

11. 従来のシステムとの比較

道路景観シミュレーションシステムのためのソフトウェアとしてはStephen Dedalus社(米国)のMetaSite, および三英技研(日本)のSTRAX.RPが知られているが、これらは本論文で検討したような大規模、複雑なデータを扱う実時間シミュレーションは困

難である。また精度に関しては、走行シミュレーションが道路の中心位置からの視点として扱われているため正確な自動車の挙動が表現されているわけではない。よって実際の自動車の走行結果とは事実上異なった映像が表示されてしまうので、シミュレーションによる安全検討を行うという目的に十分に耐えうるものではない⁹⁾。

一方 Bayarri ら¹⁰⁾は CG による実時間表示が可能なドライビングシミュレータを提案しているが、実時間表示を実現させるために表示される映像の品質は低く、臨場感に欠けるため、道路標識等の安全設備の認識率が低く、道路計画の検討に利用することはできない。中山ら^{11),12)}は精度の高い自動車モデルを作成しているものの、あくまでも自動車の走行シミュレーションが目的となっており、ビジュアライゼーションへの配慮はされていない。Nakamae ら¹³⁾は精度や映像の品質が非常に高いシミュレーションを行っているが、実時間表示を目的とはしていなかった。したがって、仮想空間を品質の高い映像と実時間表示で実現した走行シミュレーションは、本論文が最初のものであると考えられる。

12. おわりに

自動車および構造物モデルの省力化や空間的分割、LOD の利用、道路データ構造の改良、CPU の並列処理を行った結果、わが国有数の大規模なインタージャンクションの実際の設計用モデルを用いて VR 的なシミュレーションを行い、その有用性を実証することができた。VR には現実感 (Reality)、実時間 (Real-time)、双方向性 (Interactive) という 3 つの重要な要素がある。しかし実際には、これら要素は相反することが多く最適なバランスをとることが大変困難で、これが今回最も苦労した点である。実務レベルではコストも重要な要素であり、最大限のモデル量で最大限の画質を実現するために、設計者やモデルの作成者と度々議論して改良を重ね、ようやく満足できる性能を実現することができた。実務処理の経験から、今後はトンネル内での照明・影等の効果、逆光や路面や他の構造物からの反射の表現を検討し、また高速道路における旋回運動中の重力等の外力による影響の考慮、速度の違いによる自動車の旋回運動の差について等の表現といった処理においても実時間表示の中でどこまで可能かを検討していきたい。また、VR システムとして「音」と「フォースフィードバック」も重要な項目であるので、今後の検討項目としたい。さらに、今回行ったアンケートから得られた情報をもとに、道路設

計業務に必要な機能の充実と使いやすいシステム構築を考えていき、より実用的な VR システムの構築に関する研究を継続していきたい。

謝辞 本論文作成に関して、特にアンケート調査にご協力いただいた (株) 片平エンジニアリングに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 向井利光, 杉山知之, 岩田全弘, 柳沢祥子: リアルタイム景観シミュレーションシステムにおける交通環境の再現手法に関する検討, 日本建築学会大会学術講演集梗概集, pp.1777-1778 (1994).
- 2) 向井利光, 杉山知之, 岩田全弘, 柳沢祥子: 都市 VR 空間における交通環境の再現に関する検討, 第 49 回情報処理学会全国大会論文集, 第 1 分冊, p.413 (1994).
- 3) 吉 鴻賓, 劉 真, 青木由直: 測量データに基づく河川の三次元モデルと描画アルゴリズムの研究, 情報処理学会論文誌, Vol.37, No.2, pp.259-268 (1996).
- 4) 茄子川捷久, 宮下義孝, 汐川満則: 自動車の走行性能と試験法, 山海堂 (1993).
- 5) 越 正毅: 交通工学通論, 技術書院 (1993).
- 6) 小林広美: バーチャル・リアリティの実用化における課題と参考アプリケーション, *PIXEL*, No.1, pp.70-76 (1995).
- 7) Foley, J.D., van Dam, A., Feiner, S.K., Hughes, J.F. and Phillips, R.L.: *Introduction to Computer Graphics*, Addison-Wesley (1994).
- 8) 原島 博, 廣瀬通孝, 下條信輔 (編): 仮想現実学への序曲—バーチャルリアリティドリーム, 共立出版 (1996).
- 9) 河内隆幸: *TREND, PIXEL*, No.4, pp.53-57 (1991).
- 10) Bayarri, S., Fernandez M. and Perez, M.: Virtual Reality for Driving Simulation, *Comm. ACM*, Vol.39, No.5, pp.72-76 (1996).
- 11) 中山晴幸, 市川孝太郎: 高速道路における車線変更時の車輻挙動モデルについて, 第 38 回日本大学理工学部学術講演会講演論文集, pp.967-968 (1994).
- 12) 中山晴幸, 和田幹彦, 市川孝太郎: スパイラル曲線を用いた交通流シミュレーション・モデルの検討, 第 13 回交通工学研究発表会論文集, pp.25-28 (1993).
- 13) Nakamae, E and Kaneda, K.: A Light Model Aiming at Drive Simulators, *ACM SIGGRAPH 90 Conference Proceedings*, pp.395-404 (1990).

(平成 9 年 4 月 1 日受付)

(平成 9 年 11 月 5 日採録)

**向井 利光（正会員）**

1960年生。1985年日本大学大学院理工学研究科建築学科専攻修士課程修了。同年日本無線株式会社入社。1992年日本大学理工学部助手。同年東京造形大学非常勤講師。同年（株）ビジュアルサイエンス研究所非常勤研究員。1994年（株）ビジュアルサイエンス研究所入社。同年日本大学理工学部情報科学専攻博士課程入学。主としてリアルタイムCGに関するソフトウェアの研究/開発に従事。日本建築学会，交通工学研究会，可視化情報学会，VR学会，ACM（SIGGRAPH）。
