3次元仮想空間を用いた都市設備管理システム

非会員 玉 田 隆 史 (三菱電機)

非会員 寺 岡 照 彦 (三菱電機)

非会員 丸 山 稔 (信 州 大)

正 員 西 田 正 吾 (阪 大)

A Facility Management System Based on 3D Virtual City Environment

Takashi Tamada, Non-member, Teruhiko Teraoka, Non-member, (Mitsubishi Electric Corporation),
Minoru Maruyama, Non-member (Shinshu University), Shogo Nishida, Member (Osaka University)

A computer aided facility management systems are now used extensively in many areas such as maintenance of electric power equipment. However most of these systems possess data management structures that deal with only 2 dimensional space. The 3D graphic system that enables users to explore the 3D space interactively and examine 3D spatial views of the environments would be very useful for facility management. In this paper, we describe about a facility management system based on computer generated 3D virtual city environment. This prototype system supplies the user interactive operations even if the virtual city is very large. Moreover, this system can deal with not only 3D spatial information but also temporal information. Using this system, the user can get the facility management environment that is very useful for management, analysis and planning etc.

キーワード：設備管理システム，仮想世界，3次元グラフィックス，時空間管理

1. ま え が き

電力設備，下水道施設等は，非常に重要な都市基盤である。これら都市設備を十分に活用するためには，タイムリーな維持管理を行い，常に最新の現状把握をしておかなければならない⁽¹⁾。近年，計算機を利用して，これら設備情報と地図情報を一元的に管理することで，都市設備の管理・メンテナンス，拡張計画の検討等の業務の効率化を目的とするコンピュータマッピングシステムが提案され，実用化の段階を迎えている^{(2),(3)}。現在運用されているマッピングシステムは，2次元の住宅地図データベース上に，各種設備データベースをリンクすることで，2次元的に設備の管理を行う。すなわち，従来，住宅地図や設備台帳といった紙面を中心に行っていた業務をそのまま計算機上に移行し，高度なデータ管理，検索機能を付加したシステムであると考えることができる。しかしながら，都市にはさまざまな施設があり，高層ビル，地下街，高架線といったものは，地表の上下に存在している。これらの相対的な関係を把握することは，都市設備のメンテナンス，災害時の復旧作業，拡張計画の検討を行う際に非常に有用である。また，物理的もしくは美観的観点から，近年多くの都市設備

が地下に埋め込まれるようになり，それらが地下で複雑に輻輳してきたことから，都市設備を含めた都市空間の3次元的な相対関係の把握が必要不可欠になってくるものと思われる⁽⁴⁾。

マッピングシステムの3次元化については，2次元マッピングシステムの実用化・高機能化と並行して以前からその検討がなされていた⁽⁴⁾。しかしながら，主に3次元化にともなう描画処理速度，データ量が問題となり，本格的な研究・開発はなされていない。近年，グラフィックスハードウェアやソフトウェアの進歩にともない，3次元描画処理が飛躍的な高速化をみせ，3次元グラフィックスを利用したアプリケーションの開発環境も，コンピュータグラフィックス，人工現実感といった分野を中心に整備されてきた。また，マッピングシステムでは，実規模の都市空間を対象とするため，3次元描画を行う際には，グラフィックスハードウェアの描画処理コストを軽減するようなソフトウェアによる工夫が必要となるが，広域な仮想都市空間に対してもリアルタイムなウォークスルーを実現する手法も提案されている^{(5),(10)}。

上記背景のもと，著者らは，コンピュータグラフィックス技術により3次元的に表示された現実の都市空間に即し

た仮想空間（仮想都市空間）を利用したマッピングシステム（3次元マッピングシステム）について検討し、今回、そのプロトタイプシステムの開発を行った。本論文では、マッピングシステムの3次元化における背景の詳細について述べたのち、プロトタイプシステムの実現方式と各種機能について述べる。さらに、実データに対して本プロトタイプシステムを適用しその評価を行う。

2. マッピングシステムの3次元化

現在実用化されているマッピングシステムの多くは、建築物、道路、各種都市設備などを、2次元的に表現する方法をとっている。しかし、マッピングシステムが提示する情報の意味をユーザにわかりやすく表示するという観点からは、2次元の表示のみでは、実際の都市設備と建築物の3次元的な相対関係、景観などを直観的に把握するのは困難である。また、都市部では設備が輻輳しているため、これらを2次元的に表示していたのでは、表示内容が複雑となる。特に、地上と地下の両方に設備が存在するような場所においては、これらを同時に2次元的に表示していたのでは、判読が困難となるものと考えられる⁽⁶⁾。

そこで、著者らは3次元コンピュータグラフィックス技術を用いて、マッピングシステムの3次元化を行うことを考えた。これまで、コンピュータグラフィックスを利用した地図情報の高度利用として、都市開発計画などにおけるプレゼンテーションとしての景観シミュレーションシステムがある^{(7),(8)}。これらシステムでは、3次元コンピュータグラフィックスの技法を用いて、より現実感のある表示を行うことで、あたかも地図の世界の中にユーザが存在し、周囲の景観を眺めているような3次元画像を得ることができ。しかしながら、現実感のある3次元画像の生成に重点がおかれているため、画像生成に数秒要してしまう。すなわち、システムの対話性に関しては、あまり考慮されておらず、高速ウォークスルーやピッキング機能、各種シミュレーション機能に乏しい。また、比較的限られた小規模のエリアを対象としたものが多い。

マッピングシステムでは、数km四方におよぶ広範かつ膨大なデータを、その位置情報とともに管理し、オペレータの要求に対して適切な該当部分を即座に表示する必要があるため、インタラクティブな操作環境が要求される⁽⁹⁾。また、都市においては日々刻々と設備状況は変化しており、より現実の都市空間に即したマッピングシステムの構築という観点からは、3次元空間+時間的変化にも対応した時空間の管理が必要となる。一方、システムの3次元化にあたっては2次元マッピングシステムが、データベースシステム、CADシステム、ネットワーク技術等を統合した大規模システムであるため、これら資産が有効的に活用されるようなシステム構成とする必要がある⁽⁹⁾。

以上をふまえ、今回我々は、以下に示す特長を有する3次元設備管理システムの構築を行った。

- 独自の仮想空間管理・描画手法によるインタラクティブな操作環境

ブな操作環境

- 時空間データ管理構造の導入による時系列シミュレーション機能
- コンピュータグラフィックスの特殊表示技術の利用によるシステムの高機能化
- 2次元マッピングシステムをベースとしたシステムの3次元化

以下では、上記特長に関し詳細を述べる。

3. 広域な3次元仮想都市空間上でのインタラクティブな操作環境の実現方式

マッピングシステムの3次元化において問題となるのが、システムの応答性（操作性）である。これは、ポリゴンを用いた3次元描画が、点・線等による2次元描画に比べ多大な計算コストを要することによる。インタラクティブな操作環境を実現するには、少なくとも10 frame/sec程度の描画更新速度が必要となる。

近年、グラフィックスハードウェアの進歩には著しいものがあり、数千ポリゴンで構成されるような小規模な空間であれば、リアルタイムな描画（10 frame/sec）が可能となってきた。しかしながら、マッピングシステムは実規模の都市空間を管理する必要があるため、現在のハードウェア性能では、ソフトウェアによるハードウェアの描画処理コストを軽減するような工夫なしには、リアルタイムな描画を実現することはできない。我々は、広域な仮想都市空間（地上部分のみ対象）を描画シーンのリアリティを損なうことなく一定の描画更新速度でリアルタイムに描画するための手法を開発しており、本手法をシステムに導入する。

都市空間内をウォークスルーする場合には、通常視野領域内に存在するオブジェクトの数は、オブジェクトの総数に比べて非常に少ない。したがって、視野領域内に存在する描画対象オブジェクトのみを高速に検索できれば、不要な描画を大幅に抑制でき、描画コストの低減につながると思われる。高速な検索を実現するために、本手法では、空間分割に基づく多次元データ構造を用いる。このとき、広域な都市空間では、領域（XY平面）の広がりと比較して、高さ方向の広がり是小さいという特徴がある。

そこで、本手法は、空間内に存在するオブジェクトの平面図形（2次元投影図形）を2次元の木構造で管理し、オブジェクトの高さに応じて2層にレイヤ分けする空間管理法により視野領域内に存在する描画対象オブジェクトを高速に検索することで、ハードウェアのクリッピング処理コストを軽減する。さらに、リアリティ係数による簡略化描画を併用⁽⁹⁾することで、画質の劣化を抑制しながらグラフィックスハードウェアの描画処理コストを一定化し、リアルタイムな描画処理を実現する。今回、本手法を導入するにおいて、地下埋設物をも管理する必要があることから、新たに地下に存在するオブジェクトのみを管理するレイヤを加えた3層レイヤ構造とした（図1）。

図1においてレイヤ T_0 はすべての地上構造物の平面図

図 1 2次元木構造のレイヤ構造によるオブジェクト管理
Fig.1. Object management by multiple 2D-trees
based on the height.

形を、レイヤ T_1 はある高さ z_0 以上のオブジェクトの平面図形を、レイヤ T_2 は地下埋設物の平面図形を管理する。ここで、 z_0 の値はレイヤ T_1 に属すオブジェクト数の割合 p を決めておき、全地上オブジェクト数 N のうち、 $N \cdot p$ 個がレイヤ T_1 に入るように定めるものとした。 p の値は管理対象となる空間に応じて決める必要がある。適切な p の値は都市の規模によって異なると考えられ、実際にモデル化を行う都市に応じて決定する必要がある。本論文では、いくつかの都市データ（大都市）に対して予備実験を行った結果、大都市を対象とする場合においては $p=0.2 \sim 0.3$ 程度が適切であると判断し、以下では $p=0.2$ を用いた。上記空間管理法のもと、描画対象オブジェクトの検索は視野領域の平面図形を用いて、視点の位置（地上 or 地下）に応じて以下のように実行する。

〔視点地上に存在する場合〕

視野領域の投影図形を近景に対応する部分と遠景に対応する部分とに二分し、近景に対応する部分に存在するオブジェクトの平面図形をレイヤ T_0 を用いて検索し、遠景に対応する部分に存在するオブジェクトの平面図形をレイヤ T_1 を用いて検索する。これは、視点の遠方ではほとんどの場合において、高層なオブジェクトのみしか見えず、また、視点地上に存在するので地下埋設物は不可視となることによる。

〔視点地下に存在する場合〕

視野領域の投影図形内に存在するオブジェクトの平面図形をレイヤ T_0 、 T_1 を用いて検索する。

上記手法により検索した平面図形に対応したオブジェクトを、リアリティ係数⁽¹⁰⁾の値に応じて簡略化描画することで、任意視点においてリアルタイムな描画速度を実現し、下記に示すようなインタラクティブな操作環境をユーザに提供する。

- 視点の連続移動による高速ウォークスルー機能
- 登録された視点への高速切り替え機能
- インタラクティブな3Dピッキング機能

図 2 3Dピッキングによる設備情報の検索
Fig.2. Information retrieving by 3D picking.

本論文においては、あらかじめリアリティ係数に対応した複数の簡略化形状を作成しておき、描画時にリアリティ係数に対応した形状を選択し、表示させている。

図2に、3Dピッキングを行った際の画面例を示す。図2は地中にある管路を下から見上げた画面であり、3Dピッキング操作による管路の詳細情報がポップアップウィンドウ上に表示されている。

4. 時空間データ管理構造の導入による時系列シミュレーション機能

現実の都市空間においては、大量の設備工事により設備の設置状況が日々刻々と変化していく。したがって、3次元的な都市空間の管理に加えて設備の設置あるいは更新履歴といった時間情報を管理することも重要である。そこで、時間情報をもつ仮想都市空間を管理するために、本システムに著者らの提案した多次元 Persistent Tree (MP

木)を適用する。MP木は、従来の多次元データ構造を persistent search tree の方法を用いて拡張したものである⁽¹¹⁾。

MP木の構成法を簡単な例を用いて説明する(図3)。ここで、バケットサイズは3、データは2次元の点とし、拡張の対象となるデータ構造としてk-d木を用いる。

時刻0において、データ1, 2, 3, 4, 5が順次投入され、初期の木構造が構成される。次に時刻1において、データ6, 7, 8が投入される場合を考える。データ6を投入したとき、葉ノード L_1 は二つに分割され、新たにノード n_2 および葉ノード L_3, L_4 が生成される。従来の方法ならば葉ノード L_1 は消滅し、ノード n_1 の左ポインタ l_c をノード n_2 に接続する。これに対してMP木では、葉ノード L_1 を消去せずに第3のポインタ p_c に接続して残し、解放されたポインタ l_c に新たなノード n_2 を接続する。よって、更新後の構造には現在の状態と過去の状態に対応する木構造が存続し、最新の状態はもちろん過去の空間状態も効率よく管理できるようになっている。

MP木を用いたデータ管理構造を前節で述べた各レイヤすべてに適用することにより、

- 空間を固定した設備の履歴シミュレーション
- 時間を固定した仮想都市空間内での高速ウォークスルー

といった機能を実現することができる。図4に設備の履歴シミュレーションを行った際の画面例を示す。

5. 特殊表示技術の利用によるシステムの高機能化

コンピュータグラフィックスによる3次元描画を行うことにより、コンピュータグラフィックス特有の特殊表示技術を利用することができる。このような表示技術として、アルファ・ブレンディングによる半透明表示、デプス・キューイングによる奥行き感の表現、テクスチャマッピングによるリアリティのあるシーンの描画機能等がある。本システムでは、これら特殊表示技術を取り入れることで、システムの高機能化を図る。

マッピングシステムでは、住宅、オフィスビル、道路等の都市空間のベースとなる都市施設データに加えて、例えば地下埋設物の管理システムでは、電気、水道、下水といった施設、管路データを管理しなければならない。これらのものを単純にすべて画面上に同時に描画したのでは、地下構造物が地上構造物に遮られてしまい、地下構造物のほとんどが不可視となる。

このような場合、2次元マッピングシステムでは、レイヤ構造によりデータをカテゴライズし、目的に応じて必要な種類のデータのみを表示することで対処してきた(選択表示機能)。この方式をそのまま3次元描画の際にも適用していたのでは、マッピングシステムの3次元化の目的の一つである、都市ユーティリティを含めた都市空間の3次元的な相対関係の把握が困難となる。

そこで、オブジェクトの種類ごとに目的に応じてアルファ値(透過率を表わし、この値がゼロの場合には完全に透過)を適応的に変更して半透明描画を行う機能を設けた。例えば、地上構造物のアルファ値を小さくして半透明描画を行うことで、地上構造物と地下埋設物の相対的な位置関係を把握することができる。図5(a)に地上構造物をすべて半透明にした場合の画面例を、(b)に設備オブジェクト以外をすべて半透明にした場合の画面例を示す。

選択的半透明表示機能を実行する際には、視点が地上に

図3 MP木におけるデータ投入例
Fig. 3. Creating process of a MP-tree.

図4 設備の履歴シミュレーション
Fig. 4. Historical simulation of facilities.

(a)

(b)

図 5 選択的半透明表示機能

Fig. 5. Selective semi-transparent displaying.

存在する場合にも地下埋設物を表示しなければならない。また、視点の遠方に存在するオブジェクトから描画していく必要もある。したがってこのような場合には、3章で述べた「視点が地上に存在する場合」の描画対象オブジェクトの検索方式において、新たにレイヤ T_2 を用いて視野領域の平面図形内に存在するオブジェクトを検索し、レイヤ T_2 , T_0 , T_1 で得られた描画対象オブジェクトの順に描画していく。

上記半透明表示技術に加え、本システムでは、テクスチャマッピング技術を地上構造物、道路、背景等に適用することで、少ないポリゴンデータでよりリアルな3次元シーンを生成する。ユーザは自由にテクスチャパターンを変更することができ、簡単な景観編集を実行することができる。

6. 2次元マッピングシステムをベースとしたシステムの3次元化

2次元マッピングシステムは、さまざまなシステムを統合した大規模システムであるため、そのためのハードウェア、ソフトウェア資産は大きく、システムの3次元化においては、これら資産が有効に活用されるようなシステム構成とする必要がある。また、詳細な3次元描画よりも抽象度の高い2次元的な情報提示の方が、ユーザに的確な状況把握、瞬時の状況判断をもたらす場合もあると考えられ、2次元マッピングシステムとしての機能を継承する必要があると思われる。以上の点を考慮し、我々は2次元マッピ

表 1 次元と描画属性の関係

Table 1. The relation between dimension and drawing attribute.

	描画データ	投影法
2次元モード	ベクトル	直交投影
3次元モード	ポリゴン	透視投影

(a) 2D-mode

(b) 3D-mode

図 6 各次元モードでの同一エリア描画例

Fig. 6. Screen example of the same area in each dimension mode.

ングシステムをベースとしたシステムの3次元化を目指す。

本システムでは、次元を表わすモード（次元モード）を設け、次元モードの値（3次元 or 2次元）に応じて描画方法を切り替えることにより、3次元描画と2次元描画の併用が可能となるようにした。描画方法の切り替えは、描画データ、投影法の2つの項目（描画属性）を表1に示すように次元に応じて切り替えることにより実現する。描画データは、2次元に対しては既存の2次元マッピングシステムで使用しているベクトルデータ等を利用し、3次元に対しては新たに作成したポリゴンデータを使用する。

3次元モードの場合には、3次元描画関数を用いて透視投影によりオブジェクトの3次元形状の描画を行い、2次元モードの場合には、2次元描画関数を用いて直交投影によるオブジェクトのシンボル表示を行うことで既存の2次元マッピングシステム同様の描画を行う。このような次元に応じた描画属性の切り替え方式をとることにより、既存の2次元マッピングシステムに、新たに3次元形状データ

と3次元描画関数を追加・定義するだけでシステムの3次元化が実現できる。本システムでは、3次元ポリゴンデータを3次元仮想空間に配置する際に、その位置と大きさを2次元の輪郭図形をもとに決定することで、2次元の情報資産を活用する。また、次元モードの値を変更することにより、同一シーンに対する3次元描画と2次元描画を瞬時に切り替えることができ、3次元表示に加え、ユーザはいつでも従来の2次元表示による抽象度の高い設備情報の確認を行うことができる。図6に同一エリアにおける各次元ごとの画面例を示す。

7. 実データへの適用

本システムをシリコングラフィックス社のCrimson Reality Engine上に実装し、実際の都市データに対して適用し、その評価を行った。対象データは、ある都市部の約1.5 km四方に対応しており、オブジェクトの数は、地上構造物、地下構造物を合わせて約十万個存在する。図7に管理対象領域（地上のみ）全景を示す。3次元仮想都市空間の構築は、まず、各オブジェクトの基本形状を形状定義言語によりオブジェクト形状定義ファイルに記述する。そして、それらを2次元地図情報をもとに作成したオブジェクト配置ファイルの内容に従って適切な場所に配置することで実現した。オブジェクト配置ファイルには、高さ情報や、2次元輪郭図形の情報を利用して、基本形状に対するtranslate, scale, rotateといったモデリング変換を行うための情報を記述する。

表2に仮想都市空間内に存在する主要なオブジェクトのポリゴン数を示す。現在のグラフィックスハードウェアの

図 7 管理対象領域（地上のみ）全景
Fig. 7. An entire scene of management space.

表 2 主要オブジェクトのポリゴン数
Table 2. Number of polygons of each object.

オブジェクト	ポリゴン数
電 柱	200~500
マンホール	50~100
管 路	50~200
ビル, 家屋	10~ 50

性能により、各オブジェクトのポリゴン数は数十～数百個程度となるように設計した。

本適用例において、仮想都市空間を構築するのに要したオブジェクト形状定義ファイルとオブジェクト配置ファイルのデータサイズは、両方で約5 MBとなった。また、ビル・家屋の壁面、道路、背景等にテクスチャマッピングを行っており、テクスチャの種類は5種類である。

上記データに対し本システムを稼働したところ、描画処理速度は8~10 frame/secとなり、実規模の広域な仮想都市空間においてもインタラクティブな操作環境をユーザに提供できることを確認することができた。

8. む す び

本論文では、都市空間の3次元モデルをコンピュータグラフィックス技術により3次元的に表示した仮想都市空間を利用したマッピングシステムの検討を行い、そのプロトタイプシステムである3次元設備管理システムの実現方式と各種機能について述べた。一般的に、マッピングシステムにおいてはインタラクティブな操作環境が必須となるが、本プロトタイプシステムを、実際の都市データに対して適用したところ、約8~10 frame/secの描画処理速度となり、広域な仮想都市空間においてもインタラクティブな操作環境を提供できることを確認した。3次元仮想都市空間を利用することで、都市設備と都市建築物の3次元的な相対関係の把握、地上および地下に存在する都市設備の一元的な管理、景観シミュレーション等の実現が可能となる。さらに、時間情報をも効率的に管理することができるデータ構造を導入することにより、設備の取り付け年月日や建て替え年月日等の時間属性をキーとした時系列シミュレーションが可能となる。3次元空間+時間的変化を考慮することで、より現実世界に即したマッピングシステムを構築することができる。

今後は、システムの改善や機能の充実を図るとともに、3次元都市データの作成コストを軽減するようなツールの開発について検討を進めていく予定である。

(平成7年5月8日受付, 同年10月16日再受付)

文 献

(1) 特集：電力業界における情報システム, 電学誌 No.2 (1994)
(2) 東明：「地下埋設物管理のためのコンピュータマッピングシステム」, PIXEL, No. 39, p. 131
(3) 亀井・中村・阿部：「電力設備の計画・設計・監視に適した大規模グラフィックデータ管理方式」, 電学論 (1992)
(4) 坂内・角本・太田・林：「コンピュータマッピング」, 昭晃堂 (1992)
(5) 玉田・中村：「広域3次元オブジェクト管理システム-ワークスルーのための高速検索と描画-」, 信学技報, HC 93-11 (1993)
(6) 角本：「立体地図情報システムで地図の限界を超える」, 情報管理, 35, No. 12, p. 1039 (1993)
(7) 吉川・金子・黒木・牧之内：「3次元地図情報データベースの構築とその3次元動画画像道案内への応用」, 第4回機能図形情報システムシンポジウム講演論文集 (1993)
(8) 藤井・安田・横井・鳥脇：「仮想都市空間のインタラクティブな映像体験システム」, NICOGRAPH 論文集 (1994)
(9) 中村・玉田：「電力マッピングのための三次元データ管理」, 平

- 成5年電気学会全国大会(1993)
- (10) 玉田・中村:「多次元データ構造に基づく3次元仮想都市空間の管理と高速描画」, 信学論(D), J 78-D, 8, p. 1205 (1995)
 - (11) 寺岡・丸山・中村・西田:「木構造による時間情報をもつ多次元データの管理-多次元 Persistent Tree-」, 信学技報, IE 93-132 (1994)

玉田 隆史 (非会員) 1968年3月11日生。1990年大阪大学理学部数学学科卒業。同年三菱電機(株)入社。同社中央研究所にてコンピュータグラフィックス, 地理情報システム等の研究に従事。現在, 同社先端技術総合研究所情報科学部人間機械交流研究チーム所属。情報処理学会会員。

寺岡 照彦 (非会員) 1966年9月20日生。1990年大阪大学工学部精密工学科卒業。1992年同大学大学院修士課程了。同年三菱電機(株)入社。同社中央研究所にて3次元物体認識, 多次元データ構造等の研究に従事。現在, 同社先端技術総合研究所情報科学部人間機械交流研究チーム所属。電子情報通信学会, 情報処理学会, 人工知能学会, IEEE-CS各会員。

丸山 稔 (非会員) 1959年12月17日生。1982年3月東京大学工学部計数工学科卒業。同年4月三菱電機(株)入社。同社中央研究所にてコンピュータビジョン, 学習, 地理情報処理等の研究に従事。工学博士。1990~91年MIT人工知能研究所客員研究員。同社先端技術総合研究所システム情報研究部を経て, 1996年4月より信州大学工学部情報工学科助教授, 現在に至る。電子情報通信学会, 情報処理学会, IEEE, ACM, INNS会員。

西田 正吾 (正員) 1952年1月5日生。1974年3月東京大学工学部電子工学科卒業。1976年3月同大学大学院修士課程修了。同年4月三菱電機(株)入社。同社中央研究所システム基礎研究部を経て, 1995年4月大阪大学基礎工学部システム工学科教授, システム技術, ヒューマンインタフェース技術, メディア技術の研究開発に従事。工学博士。1984~85年MITメディアラボ客員研究員。1986年度, 1993年度電気学会論文賞, 1992年度電気学会著作賞, 1995年度電気学会進歩賞受賞。IEEE会員。