

GISベースの3次元都市モデルの自動生成システムとその活用

GIS based System for Automatic Generation of 3D-CG City Model and its application

杉原 健一*・ハンマード アミン**・林 良嗣***

Kenichi Sugihara and Amin Hammad and Yoshitugu Hayashi

3D-CG model for real city space is the important information infrastructure that can be used for various purposes, such as, simulator for landscape evaluation, city planning, transportation engineering. However, in order to realize 3D-CG City, the enormous time and money have to be consumed to design the model and to acquire the data for the model.

In this paper, we propose the method to generate 3D-CG City automatically, utilizing and integrating GIS and CG. We also present the case study of 3D-CG City Landscape simulation by assuming the land use system and construction regulations.

3D-CG, GIS, 3D City Model, Automatic Generation, Simulation

3次元CG、地理情報システム、3次元都市モデル、自動生成、シミュレーション

1. 3次元都市モデルと既往の研究

CGによる「3次元都市モデル」等の空間データ基盤は、広範囲の分野での様々な利活用が期待される重要な「情報基盤」である。例えば、都市計画や景観分析、交通工学、教育といったアカデミックな分野の活用から公共事業の情報公開、まちづくりへの市民参加の場としての利用が考えられる。例えば、住民参加を基調とする改善型まちづくりでは、住民・地権者と行政、専門家が目標とするまちの3次元イメージを共有し、検討することが必要である。関係者間で、まちの3次元イメージを形成する道具として、模型やスケッチ、CGによる3次元モデルが考えられる。まちの規模が大きい、あるいは丘陵地にあるまちを再現する必要がある場合は、特にCGによる3次元モデルを作成することが有効である。3次元CGモデルは、色々な角度からモデルを眺めること、各種のイメージ操作をすること、変更・編集が容易であること、作成したものが再利用可能であることなど有利な点が多い。CGによって、まちの3次元モデルを作り、たたき台として使うことは、ものづくり、即ち、製品開発において、製品の出来上がりをCADで作る、デザインや性能を検討することと同じである。ものづくりにおいて、基本的なプロセスとなっているコンピュータ上で製品を試作することは、よりよい製品を開発するのに必要不可欠で、この出来上がりを仮にコンピュータで作ってみるというプロセスをまちづくりにも生かすことはよりよいまちづくりに有効である。

しかし、現状では、その3次元モデル作成のためのデータ取得やモデル制作には、3次元CGソフトを使った多くの手作業を行う必要があり、多大な時間とコストがかか

る。住宅1軒の簡単なモデルを作るのに30分かかるとして、数千軒の建物より成り立つ街並みを再現するのに数千時間も時間を必要とする。

イメージデータを利用するリモートセンシングの分野では、マルチセンサーシステムを備えた衛星や航空機、乗用車を使って、空間データを取得する。都市モデルを構築するには、建物など都市を構成するものからイメージデータを取得し、それから空間データを抽出する。レーザーやデジタルカメラ、CCDなどのセンサー技術は急速に進歩し、また、衛星写真を個人が入手することもできるようになり、都市のイメージデータを利用して、都市モデルを構築する試みがなされている¹⁾。しかし、これらリモートセンシング技術で得られる3次元形状データから広範囲で精緻な都市モデルは得られていないのが現状である。

本研究での都市モデルの構築は、まず、建物や道路といった都市の構成要素の姿を決める属性データをデータベースであるGISに蓄積する。この蓄積したデータに基づいて3次元CGソフトで都市モデルを自動生成する方法をとる。次に、開発した自動生成システムを活用する事例として、容積率や斜線制限等の諸形態制限を現実の3次元の世界に適用するシミュレーションを行った。本システムを使えば、建築の規制や制度を変えると、街並みがどう変わるか、あるいは、公共事業で新設される建物を3次元都市モデル上に仮に実現し、色々な代替案の検討を行うことができる。

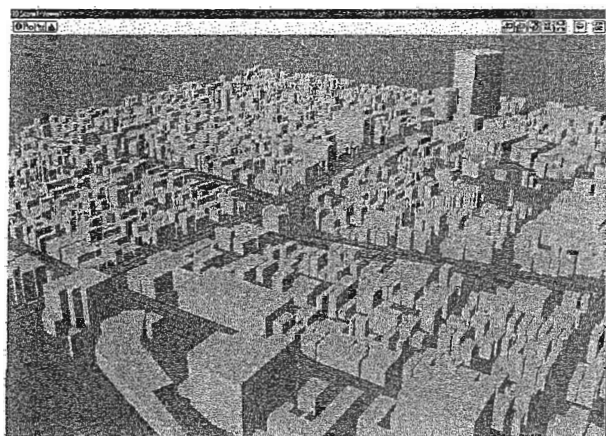
この3次元都市モデルを作る試みとして、カーナビゲーションシステムにおける地図の3次元表示、電子地図ソフトにおける立体表示機能、GISの3次元表示機能拡張

*正会員 岐阜経済大学 経営学部 経営情報学科 (Gifu Keizai University)

**正会員 名古屋大学 工学研究科 土木工学専攻 (Nagoya University)

***正会員 名古屋大学大学院 工学研究科 地圏環境工学 (Nagoya University)

への取り組みが行われている。例えば、ESRI社のGISは3次元表示機能を付加すれば、建物ポリゴンを建物の階数データに基づいて押し出し(extrude)して、3次元都市モデルを作成できる(下図参照)。



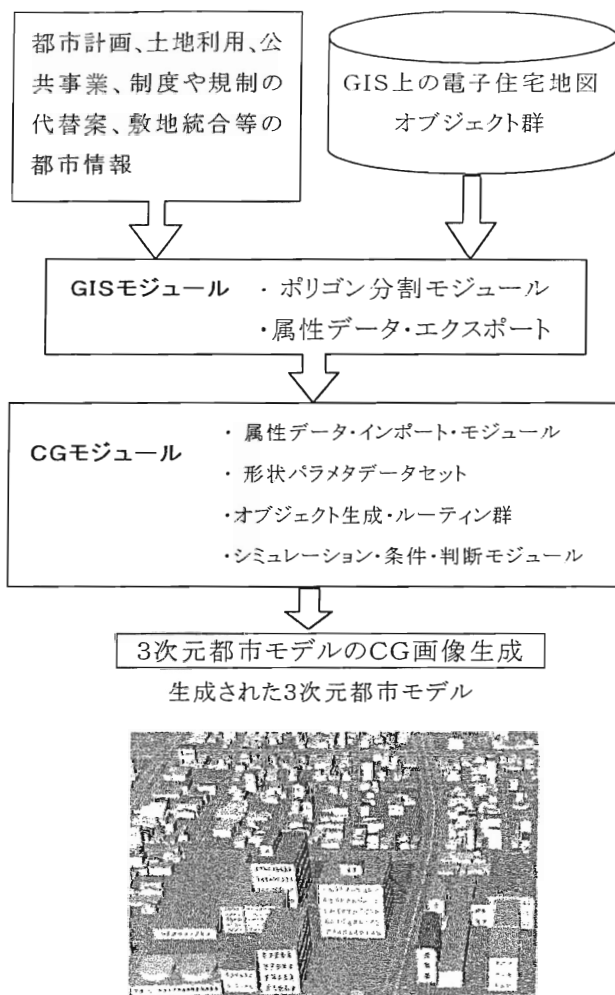
図ー1 GISに3次元表示機能を付加し3次元化して生成した3次元都市モデル

このようにポリゴンの押し出しで、3次元化は可能であるが、都市を構成する主要なものである道路や公園等はなく、また、建物の屋根や窓などのディテールにも欠けている。これはカーナビや電子地図ソフトにおける3次元表示でも同様である。

3次元都市モデルの構築は、リモートセンシングでのモデル獲得以外には、主にCADやCGソフトを使って、手作業でオブジェクトを制作している。新しい試みとして、Gruber²⁾はCADとGISを統合して、3次元都市モデルを構築した。また、上田³⁾らはGISデータをもとにOpenGL等のグラフィックライブラリを使って、3D-CGの建物データ群を自動生成しようという試みもある。しかし、OpenGL等のグラフィックライブラリを使って、3次元都市モデルを自動生成する試みは原理的には可能でも、多大のプログラミング、システム開発が必要で、現在のところ、大規模で精緻な3次元都市モデルを生成するシステムは完成していない。

2. 本研究での都市モデル自動生成の流れ

3次元都市モデルを実現するには、都市の建築やその他のオブジェクトの3次元形状やサーフィス、材質の属性を再構築しなければならない。3次元都市モデルを構成するオブジェクトの形状やマッピングデータの制作は手作業に依存し、莫大なコストと時間が必要とされるのが実状である。そこでGIS用のソフト部品を使って、それが管理するオブジェクト、主に建物境界線のポリゴンに注目して、ポリゴンの頂点群の位置情報を属性データと共にエクスポートするモジュールを開発した。本システムのデータ処理のプロセスを図2に示す。



図ー2 本システムのデータ処理の流れ

GISのモジュールから位置情報や属性データを3次元CGモジュールは受け取り、それらに基づいて、3次元CGオブジェクトを自動生成する。モデルのソースとなるものは、国土地理院の空間データ基盤である数値地図、ゼンリン等の住宅地図会社の電子住宅地図となる。それらをGISで取り込み空間データ基盤とする。それに都市計画、土地利用、建築基準法の規制等の行政情報を属性データとして付加して、GISを構築する。その上で、制度や規制の代替案となる容積率や建ぺい率、各種の規制値をGISに蓄積し、代替案となる3次元都市モデルを作り上げる。あるいは、公共事業等において、新設される土木建築物についての情報をGISに入れ込み、公共事業の代替案のシミュレーションを行うことができる。

3. GISモジュール

3-1 本研究の根拠とポリゴンデータ表現

CGソフトの方で取り込めるような形式で、市販の2次元GISが地図上のオブジェクトの位置情報や属性データを

エクスポートする機能はない。そこで、GISを構成するGISソフト部品(ESRI社のMapObjects2.0)を使って、データをエクスポートするモジュールを開発した。



図-3 電子住宅地図の例(ゼンリン、大垣市内)

建物形状線である建物のポリゴンは図-3のマップに示すように、頂点の角度の大半は90度前後である。このことはポリゴンの辺が曲がる時、その曲がる向きは元の辺に対して右に90度曲がるか、左に90度曲がるのかの2通りに限定されることを意味する。辺の曲がり方が2種類しかないことは、ポリゴンの頂点数によって、ポリゴンがとる形状のパターンが決まり、その数を計算できる。また、頂点の角度が90度前後であるというのは、多くの建物は直方体を組み合わせた形状をしていると判断できる。建物は3次元CGソフトで生成するので、この建物ポリゴンに建物を割り当てる際に、CGの基本オブジェクトである直方体等のプリミティブ図形を割り当てられるようにGIS上の建物ポリゴンを分割する必要がある。そこで、本研究では、次の2つの仮定の元にシステムを開発した。

- (1) ポリゴン頂点の角度は90度である。
- (2) ポリゴン頂点の数は4から10数点までの少ない数が大半である。

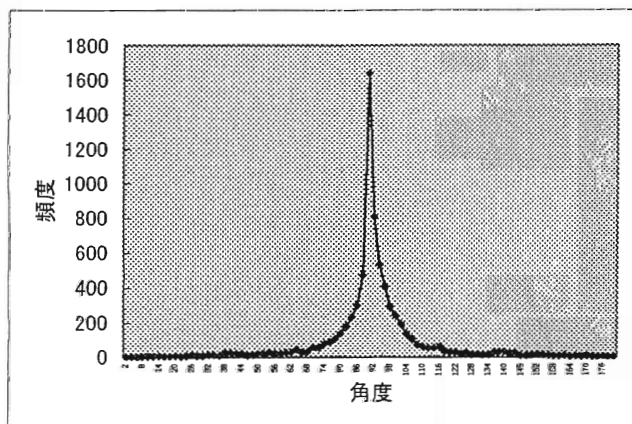


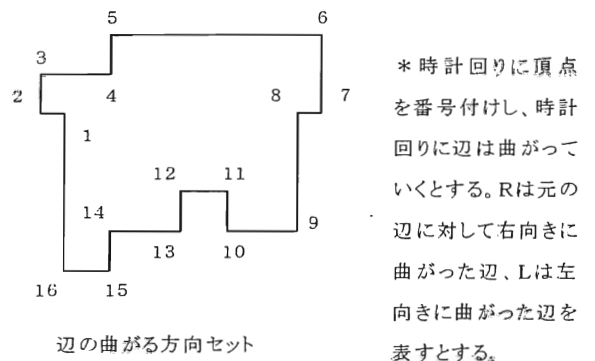
図-4 建物ポリゴンの各頂点の角度

上記仮定を検証するために、建物ポリゴンの各頂点の角度を計算した。建物ポリゴン上の隣り合う2辺(segment)

の内積を使って、以下の計算式で角度を求めた。各頂点の角度の頻度を図-4のヒストグラムにまとめる。

$$\theta = \arctan \sqrt{\frac{(\text{length of segment1})^2 (\text{length of segment2})^2}{(\text{inner product of 2 segments})^2} - 1}$$

大垣市内の住宅地において、1500ポリゴンについて調べた結果、建物の曲がり角がほぼ90度前後であった。また、ポリゴン頂点数は建物形状がとりうるパターンの種類の数に影響するので、建物ポリゴンの頂点数についても、同じ地域で調べた。頂点数は10点までで、全体のポリゴンの94.9%を占める。このことは本研究の仮定が成り立つ根拠となる。建物ポリゴンを2種類の辺の曲がる方向の集合で表現することが可能であると考える。



辺の曲がる方向セット

LRRLRRRLRRLRLRLR

図-5 建物ポリゴンの例と辺の方向セット

ここで、ポリゴンの頂点数と右曲がり辺の数と左曲がり辺の数の間には以下の関係が成り立つ。

- (1) 頂点数=(右曲がり辺の数)+(左曲がり辺の数)
- (2) (右曲がり辺の数)-(左曲がり辺の数)=4

ポリゴンの頂点数によって、ポリゴンの取りうる形状は決まる。6点の頂点のポリゴン(以下6点ポリゴンとする)の場合、左曲がりの辺は1つしかないので、辺の長さや相対的な辺の比を無視すると、形状パターンは1種類である。次に、8点の頂点のポリゴンは以下の4種類ある。

LLRRRRRR, LRLRRRRR, LRRLRRRR, LRRRLRRR

以下、頂点数の多い建物ポリゴンの取りうる形状の数は、同じものを含む円順列の式で与えられる。

- (1) 10頂点ポリゴン

$$\frac{10!}{7!3!} \times \frac{1}{10} = 12 \text{通り}$$

- (2) 12頂点ポリゴン

・3個の循環節がある場合 ・6個の循環節がある場合

$$\frac{3!}{2!1!} \div 3 = 1 \text{通り}$$

$$\left(\frac{6!}{4!2!} - \frac{3!}{2!} \right) \div 6 = 2 \text{通り}$$

・循環節がない場合

$$\left(\frac{12!}{8!4!} - \frac{6!}{4!2!}\right) + 12 = 40 \text{通り}$$

合計 1+2+40=43通り

頂点数が増えると、幾何級数的に場合の数は増える。

3-2 GISモジュールからのエクスポートデータ

3次元CGソフトは、GISモジュールから受け取るデータに基づいて、都市モデルの構成物を自動生成する。以下の属性データをGISモジュールはエクスポートする。

(1)ポリゴンの頂点数	(9)建物のタイプ
(2)各頂点の座標	(10)基準容積率
(3)ポリゴンの各辺の長さ	(11)前面道路の幅員による
(4)ポリゴンの各頂点の角度	容積率
(5)辺の曲がる向き(RL情報)	(12)斜線制限を受ける道路
(6)建物の階数	の番号
(7)建物の色、テクスチャ	(13)6点ポリゴンの頂点の座
(8)屋根の色、テクスチャ	標(可変長)

最後の(13)のデータは、8点以上の頂点からなるポリゴンを、後述するポリゴン分割アルゴリズムによって、枝を分割して、6点ポリゴンまでブレイクダウンした6頂点のセットである。枝の分割の仕方によって、6頂点のセットの数は変わるので、可変長となる。

4. CGモジュール

4-1 ポリゴンへのプリミティブ割当

3次元CGソフトを使っのCG制作では、プリミティブ図形のブール演算を行うことでCG作成を行うことが多い。本研究でも、建物ポリゴン上に載せるCGオブジェクトとして、プリミティブ図形をマウント(割当て、上に載せること)する。そのために、建物ポリゴンをプリミティブ図形(この場合、長方形)に分割する必要がある。プリミティブ図形のブール演算で建物CGを生成する理由を次に示す。

- (1)各辺の長さやセグメント等のプロパティが取得できて、制御しやすくなる。
- (2)プリミティブの制御点が明確で、位置や方向を容易に制御できる。
- (3)プリミティブ図形は通常、数式で表現することができて、データ量を削減できる。これは、建物の数が増えてきたとき、特に重要である。
- (4)建物ポリゴンデータ作成時の測定誤差が形状をプリミティブにすることで削除できる。

(5)プリミティブ図形は、NURBS(非定型論理的Bスプライン)変換して、複雑なモデリングができる。

4-2 ポリゴンへの建物割当アルゴリズム

本研究で利用したGISでは、取り扱うポリゴンの頂点群は、次の条件が成り立つ。

- (1) 各辺の両端の頂点は他の辺の上に存在しない。
- (2) 任意の2辺は頂点以外で交差していない。
- (3) 各頂点は2本の辺に接続している。

上の条件が成り立つ建物ポリゴンへの建物と屋根をマウントする。建物と屋根をマウントする基本単位となる6点ポリゴンにマウントするアルゴリズムを次のように考えた。ポリゴンを2つの長方形に分割し、その上に直方体プリミティブ(Box1とBox2)、屋根(Roof1とRoof2)をマウントして建物を生成する。ここで、長方形の長辺をその長方形の長さ、長辺の向きをその長方形の向きとする。

- (1) 6辺の中で最長の辺(Lmax)を見つけ、それを Box1 の長さとその方向とする。
- (2) Lmax に隣合う辺で、長い方の辺の長さ(と向き)を2つ目の直方体(Box2)の長さ(L_box2)、Box2 の方向とする。
- (3) 短い方の辺を Box1 の幅(W_box1)とする。
- (4) L_box2 の隣で、Lmax ではない側の辺を W_box2 とする。
- (5) Box2 の長さは最終的に(L_box2 - W_box1)

$$(6) \text{Roof2 の長さは} (L_{\text{box2}} - \frac{W_{\text{box1}}}{2})$$

- (7) Roof2 の端の位置を決める点 Prf2 は次の式で求める。

distance of P(1)&P(2) >= distance of P(3)&P(4) の場合

$$\text{Prf2} = P(1) + (P(2) - P(1)) \times \frac{L_{\text{box2}} - 0.5 \times W_{\text{box1}}}{L_{\text{box2}}}$$

distance of P(1)&P(2) < distance of P(3)&P(4) の場合

$$\text{Prf2} = P(1) + (P(2) - P(1)) \times \frac{0.5 \times W_{\text{box1}}}{L_{\text{box2}}}$$

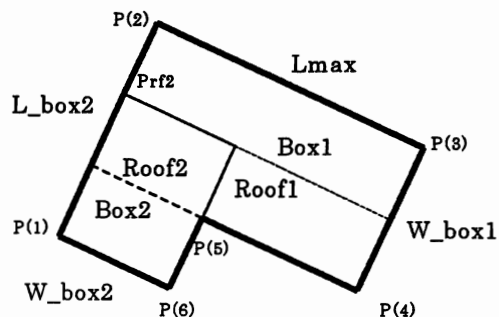


図-6 6点ポリゴンへ建物&屋根マウントアルゴリズム

6点以上の頂点から成り立つポリゴンについては、中心となる領域とそれに付着した枝に分割して、6点ポリゴンにブレイクダウンし、6点ポリゴンへの建物&屋根マウントアルゴリズムを適用する。ポリゴンを辺の曲がる向き(データセットで表現できるとしたが、「枝」の部分でR(右曲がり)が続いた後のL(左曲がり)までとみなす。つまり、辺が逆向きに曲がる頂点に注目し、その頂点から逆向き(時計回りに対して)に線を伸ばして、枝を分割する方法を考えた。8点ポリゴンについて、枝を分割するアルゴリズムを適用した。循環節のない型では、連続したRの後となるLの頂点にて、L曲がりとなった辺を逆向きに線を伸ばして、枝を分割する。分割されて、6点となったポリゴンに対して、「建物&屋根マウントアルゴリズム」を適用して、建物と屋根を配置する。次に、もう1つのL曲がりとなる頂点では、測定する向きと同じ向きに、Lの直前のR曲がりとなる辺を伸ばして、枝を分割する。やはり、6点のポリゴン頂点セットが得られるので、それに対して、アルゴリズムを適用する。循環節のあるLRRLRRRの型では、両Lの頂点で、L曲がりとなった辺を逆向きに線を伸ばして、枝を分割する。

4-3 建物生成モジュール

GISモジュールから渡されるデータに基づいて、3次元CGソフトをコントロールするCGモジュールが都市モデルの構成物を自動生成する。建物のタイプ(ビルディング、切り妻屋根の住宅、寄せ棟屋根の住宅など)、ポリゴンの頂点数で場合分けして、建物を生成していく。建物の形状を決める形状パラメタは膨大であるが、建物を数千軒生成して、街並みを形成するには、GISにおけるフィールド数を膨大にできないために、パラメタを限ったラフな建物の生成に絞った。切り妻屋根の建物に対して、以下のようなパラメタを指定して、形状を決めた。

切り妻屋根の建物に対する形状パラメタ

- | | |
|---------------------------------|----------------|
| (1)建物ユニット(Box1 等)の高さ | |
| (2)建物ユニットの長辺に対する基準窓間隔 | |
| (3)建物ユニットの短辺に対する基準窓間隔 | |
| (4) 基準窓間隔に対する長辺での水平と垂直方向の窓の割合 | |
| (5) 基準窓間隔に対する短辺での水平と垂直方向の窓の割合 | |
| (6)窓の垂直方向の位置 | |
| (7)屋根の勾配 | (8)寄せ棟屋根の頂線の比率 |
| (9)2階部(Box3)の長辺の Box1 の長辺に対する割合 | |
| (10)2階部の短辺の Box1 の短辺に対する割合 | |
| (11)2階部の位置 | |

建物を構成する建物ユニット(この場合、Box1、Box2、Box3)に対して、上の(1)~(8)のパラメタをそれぞれ持た

なければならぬので、パラメタの数は多くなる。そこで、パラメタ群をテーブルとして、プログラム中に配置し、GISから受け取る建物タイプに応じて、テーブルからパラメタ群を持ってくることにした。最終的に建物はフィールドワークあるいは上空からの写真を調べることで、その形状を決定する。そのとき調査者は、形状で分類された建物群の中から最も近いものを選んで、建物タイプを決めていく。例えば、同一の6点ポリゴンの敷地に対して、異なるパラメタセットを与え、建物候補群を自動生成し、フィールド調査時に、調査者はこの中から、現実の建物に最も近いモデルを選択する。



図-7 同一の6点ポリゴンの敷地に対して異なるパラメタセットを使って自動生成した建物群

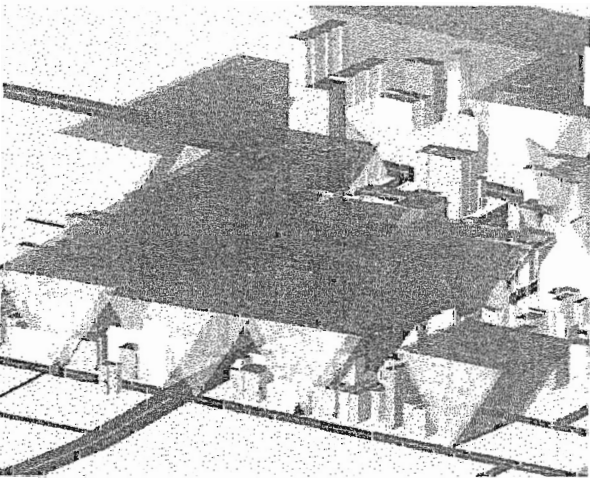


図-8 自動生成した3次元都市モデル

5. 3次元都市モデルの活用事例

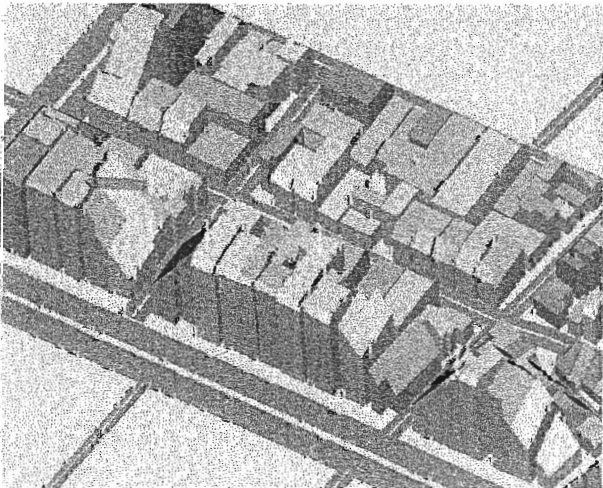
建築物の形態を決める制度や規制として、「用途地域制」、「建築基準法」が存在する。これらの制度や規制により、建物が建てもよい最大限の閉面(エンベロップ)は決定される。例えば、道路や隣地から斜線制限の形状そのままが建物の姿になった「斜線ビル」が都心でよくみられる。容積率の最大を目指して建物が建てられるような地域では、各建物の「エンベロップ」が描く閉曲面群は、ある程度、都市の概観を形づくるものとなる。

本研究で自動生成する3次元都市モデルは、パッチャルな3次元都市空間に規制や制度を適用して実験する「3次元のたたき台」として活用できる。通常、2次元の図面で描かれ、説明されているこうした規制や制度を3次元空間でシミュレーションして、3次元空間にて、制度や規制の認識を支援するとともに、3次元都市モデルは複数ある規制や制度を実際の都市のエンベロップ群に適用した結果、全体として街並みはどういう姿になるのかを示すことができる。規制の中で建物の形態を大きく制限するものである道路斜線制限は、建物と反対側の前面道路境界線から適用距離の範囲内で、当該建物側の上空に向かう一定の勾配の斜面より上での建築を禁止する。禁止領域を作るために、境界線を頂線とする下向きのプリズムを生成し、規制が適用されるエンベロップと差のブール演算を行った。



図－9 建物と斜線制限となるプリズムの関係

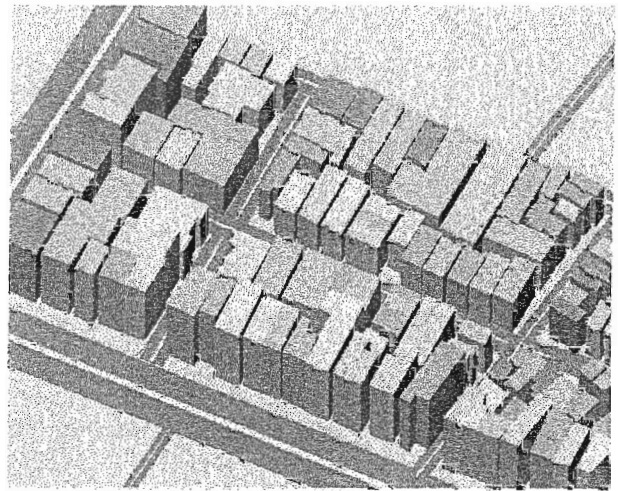
下向きのプリズムとエンベロップの関係を図－9、その結果制限されたエンベロップを図－10に示す。図－10は広幅員道路と幅員4mの道路が交差する地域である。



図－10 斜線制限されたエンベロップ

図－10は現行規制となる前面道路による勾配 1.5 の斜線制限(適用距離30m内)と前面道路幅員容積率制

限(4m×0.4=160%)を適用した結果である。道路幅員による容積率の差によって、いわゆる「裏地」と「表地」の大きな差が現れている。また、細街路の斜線制限によって、エンベロップが削り取られてしまう姿もシミュレートしている。こうした「裏地」と「表地」に分けられた市街地は、国内のいたるところに見られ、街並みを整えることを阻害している。こうした街並みを改善する制度の1つとして、「街並み誘導型地区計画(94)」が制度化された。この地区計画では、建物の壁面の位置や高さを揃えて街並みを整え、良好な居住環境を確保する場合に、斜線制限、前面道路幅員容積率制限を緩和する。この地区計画の条件を満たし、諸規制を緩和した場合のシミュレーションを行った(図－11)。



図－11 規制緩和のシミュレーション

6. むすび

3次元都市モデルは、従来の2次元の地図と異なり、現実の3次元の世界を写像するものである。規制や制度のシミュレーション、区画整理、地区計画、市民によるまちづくりの試みにおいて、出来上がりのイメージを描き、また、色々な代替案を実現できるたたき台とすることなど、都市計画の専門家だけにとどまらず、住民や一般市民、学生に対しても「わかりやすい」、「検討しやすい」モデルを提供することになる。

参考・引用文献

- 1) 納富 幹人、小澤史朗(1998): 移動体観測による都市モデル構築、電子情報通信学会誌、Vol.J81-D-2, No.5, pp872-879、電子情報通信学会
- 2) Michael GRUBER(1998): The Cyber-City Concept from 2D GIS to the Hypermedia Database, UM3(Urban Multi-Media/3D Mapping)'98, pp1-6, UM3
- 3) 上田 穰、豊 仰(1999): 市街地景観シミュレーション用データの効率的な収集とそのGISデータベース、土木情報システム論文集 Vol.8, (社)土木学会。