

電子地図に基づくビルディングの自動生成

杉原 健一

岐阜経済大学 経営学部 情報メディア学科

概要： 様々な形状の3次元建物モデルを主要な構成物とする3次元都市モデルは、都市計画、まちづくり、景観評価、防災等で利活用が期待される重要な「情報基盤」である。このとき、現状では、3次元建物モデルを製作するには、3次元CGソフトを用いた手作業による3次元モデル化を行い、多大の時間と労力を掛けている。製作プロセスを自動化するために、これまでの研究成果で、「3次元都市モデルの自動生成システム」が、電子地図上の頂角が直角の建物境界線を「長方形の集まり」にまで、分割・分離し、各長方形の上に3次元建物モデルを自動生成した。本研究では、建物境界線の中に上位階や塔屋の建物境界線を内包する境界線から、垂直方向にも複雑な形状をとる建物(ビルディング)の自動生成を行った。

Automatic Generation of 3-D Building Models based on Digital Map

Kenichi Sugihara

Faculty of Information Media, Business Administration, Gifu-Keizai University

Abstract : A 3-D city model including 3-D building models is an important information infrastructure that can be utilized in several fields, e.g., landscape evaluation and city planning, architecture, tourism, and many other business practices. However, in order to realize a 3-D city model, enormous time and labor has to be consumed to design the models. In order to save the laborious process, GIS(Geographic Information System) and CG integrated system is proposed for generating 3-D building models automatically from buildings' contours, i.e., building polygons on a 2-D digital map. Most building polygons' edges meet at right angles (orthogonal polygon). A complicated orthogonal polygon can be partitioned into a set of rectangles. In order to partition an orthogonal polygon, we proposed a useful polygon expression and a partitioning scheme in deciding from which vertex a dividing line (DL) is drawn. After partitioning, the integrated system will place rectangular roofs and box-shaped building bodies on these rectangles. In this paper, we propose a new scheme for creating a complicated shape of building models based on the building polygons surrounded by outer polygons.

1. はじめに

建物を主要な構成物とする3次元都市モデル(図1参照)は、都市計画、まちづくり、防災、景観などのアカデミックな分野から公共事業の情報公開、まちづくりへの住民参加の場、観光案内、企業の広告、営業活動の場としてまで利活用が期待される重要な「情報基盤」である。住民参加型まちづくりでは、現状と整備案の3次元都市モデルを提示するワークショップ等を開催し、住民、地権者、行政、デザイナーなどの専門家が目標とする街の3次元イメージを共有し、改善案や代替案を検討していくことがよりよいまちづくりにつながる。「現実の街並み」を再現する3次元都市モデ



図1 本システムで自動生成した3次元都市モデル(シンガポールの街並み)

ルは、CGやCV(コンピュータビジョン)、リモー

トセンシングなどの技術を用いて、現実世界のものの3次元形状や色などの情報をコンピュータの世界に取り込んで、仮想空間に構築する。「将来あるべき街の姿」あるいは「過去の街並み」を再現するには、それぞれ、想定する街並みの地図や発掘調査結果、古地図などの地図情報に基づき、主にCGを用いて、3次元モデルを製作する。

近年、この仮想空間は、リンデンラボ社のセカンドライフやGoogle社のGoogle Earthの3D表示などで、人々の関心が急速に高まっている。セカンドライフは、現実世界とは異なる世界を構築しているが、Google Earthの3D表示は、現実世界を仮想空間に取り込んで、現実世界を模している。

これらの3次元都市モデルを作成するためには、3D Studio MAXやSketchUpなどの3次元CGソフトを用い、多くの手作業で作成を行う必要があり、多大な時間と労力を掛けている。例えば、3次元モデルをCSG(Constructive Solid Geometry)で作成する場合、次に示す(1)から(5)の労力のかかる手順に従って、モデリングを行っている。

(1)屋根や建物本体など建物の部品となる、適切な大きさの直方体、三角柱、多角柱などの基本立体(プリミティブ)を作成する。(2)これらの基本立体の間で、屋根や窓用に穴を空ける、または、部品を作成するためのブール演算を行う。(3)作成した部品を回転する。(4)正しい位置にそれらを配置する。(5)それらにテクスチャマッピングを施す。

本研究では、この作業を自動化するために、電子地図上の建物境界線(建物ポリゴン)に基づいて、3次元建物モデルを自動生成するGIS(地理情報システム)とCGの統合化システムを提案する。電子地図は、図2に示すように、多くの建物ポリゴンは、その全ての頂角が直角である直角ポリゴン(orthogonal polygon)である。直角ポリゴンは、適切に分割線を引いて分割することで、長方形の集まりとすることができる。本システムは、直角ポリゴンを長方形の集まりに分割して、各長方形

の上に建物本体や屋根等の建物を構成する部品を配置し、3次元建物モデルを自動生成する。この直角ポリゴンを分割するとき、どう分割するか、どの分割線を採用するか、複数の分割スキームが考えられる。

筆者は、直角建物ポリゴンを、ポリゴンを構成する辺の曲がる向き(右:Right 左:Left)で表現し(RL表現)、分割線を引く起点(L頂点:左曲り頂点)と分割線の向きを決定し、分割線の線長と起点前後の辺長に基づいて複数ある分割線の中から適切な分割線を選択し、長方形の集まりまで分割処理するシステムを提案した[1][2]。分割処理後に、システムは各長方形の上に、長方形形状の屋根やCSGを用いて、窓やドア用の穴を空けた建物本体を置いて、3次元建物モデルを自動生成する。

既往の研究では、3次元都市モデルは、広範囲の利活用が期待される重要な「情報基盤」であるため、3次元建物モデルを自動的にあるいは半自動的に構築する研究がさかんである[3][4][5]。

これまでの研究成果[1][2]で、「3次元都市モデルの自動生成システム」が、電子地図上の頂角が直角の建物境界線(直角ポリゴン)を「長方形の集まり」にまで、分割・分離し、各長方形の上に3次元建物モデルを自動生成した。本研究では、建物ポリゴンを「長方形の集まり」にまで、分割・分離するプロセスを明らかにし、複数の建物境界線を内包する建物境界線に基づいて、図1に示すように、建物の高さ方向に複雑な形状となる3次元建物モデルを自動生成する手順を提案する。

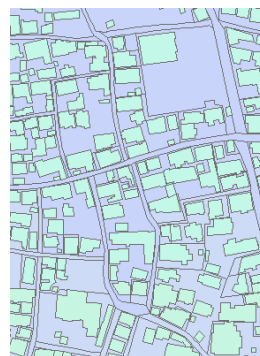


図2 電子地図上の建物ポリゴン



図3 電子地図に基づいて自動生成された3次元都市モデル

2. 建物ポリゴンに対する処理

2.1 建物ポリゴンの表現法

地図製作会社が作成した電子住宅地図を図2に示す。図2に示すように、多くの建物境界線(建物ポリゴン)はその頂角が直角である「直角ポリゴン」である。直角ポリゴンの頂点を時計回りに辿っていくとき、各頂点での辺の曲がる向きは、前の辺の向きに対して、直角に右に曲る頂点(内角が90度)か、左に曲る頂点(内角が270度)かのどちらかである。そこで、直角ポリゴンを、各頂点での、辺の曲がる向き、即ち、右曲り(R)か左曲り(L)の集まりで表現することができる。これを「RL表現」とする。次の図4の右上に示す8頂点の直角建物ポリゴンの場合、「LRLRRRRR」と表現できる。この「RL表現」の利点を次に挙げる。

(1)頂角が直角のポリゴンの「辺長に依存しない形状パターン」を特定できる。

(2)分割線を引ける頂点を決定できる。

ここで、直角ポリゴンにおいて、「頂点数： n_v 」、「右曲り辺の数： n_R 」、「左曲り辺の数： n_L 」の間には、ポリゴンは閉じているので、「右曲り辺の数」は「左曲り辺の数」より4つ(360度分)多くなるという次の関係が成り立つ。

$$n_R(\text{右曲り辺の数}) + n_L(\text{左曲り辺の数}) = n_v(\text{頂点数})$$

$$n_R(\text{右曲り辺の数}) - n_L(\text{左曲り辺の数}) = 4 \quad (1)$$

頂点数が6のポリゴンを、RL表現で表現すると、図4の左上に示すように、左曲り辺の数は1

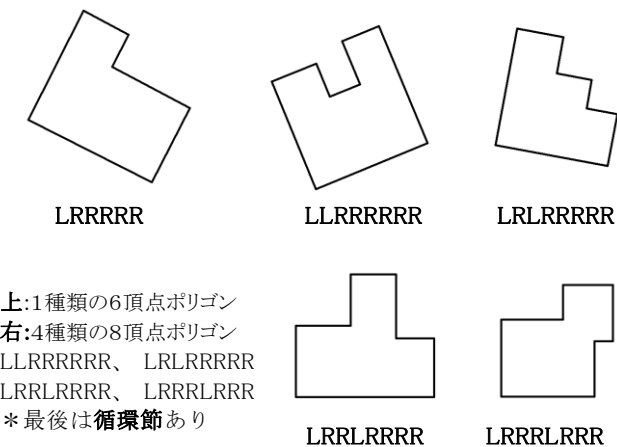


図4 1種類の6頂点ポリゴンと4種類の8頂点ポリゴン

つだけで、「LRRRRR」となる。ポリゴンがとりうる「辺長には依存しない形状」の数は、L字型、1種類となる。

頂点数が8のポリゴンを、同様にRL表現すると、図4の右に示すように、「LLRRRRRR」、「LRLRRRRR」、「LRLRRRRR」、「LRRRLRRR」の4種類となる。この4種類は、同じものを含む円順列の公式を用いて、以下のように算出できる。

8点ポリゴン: 循環節なし 循環節あり

$$\left(\frac{8!}{6!2!} - \frac{4!}{3!1!}\right) \div 8 = 3 \quad \frac{4!}{3!1!} \div 4 = 1 \quad (2)$$

合計: 3 + 1 = 4通り

ここで、循環節とは、「LRRRLRRR」のパターンに見られるように、同じパターンとなる最初の4つの「LRRR」パターンが繰り返す円順列のことである。「循環節なし」の場合は、「循環節あり」の順列の数を引いて、算出する。頂点数が多くなると、順列の数は幾何級数的に増加する。以下に12頂点の建物ポリゴンのとりうる形状パターンの数を算出する。

12点ポリゴン:

4つの循環節: 2つの循環節: 循環節がない場合:

$$\frac{3!}{2!1!} \div 3 = 1 \quad \left(\frac{6!}{4!2!} - \frac{3!}{2!1!}\right) \div 6 = 2 \quad \left(\frac{12!}{8!4!} - \frac{6!}{4!2!}\right) \div 12 = 40$$

合計: 1 + 2 + 40 = 43通り (3)

2.2 ポリゴン分割手法

直角ポリゴンをRL表現するとき、右曲り頂点をR頂点、左曲り頂点をL頂点とする。R頂点は内角が90度であるので、分割線を引くことはできないが、L頂点の内角は270度であるので、L頂点からポリゴン内部に向かって、分割線を2本引くことが可能である。頂点数が n_v 個の直角ポリゴン(n_v 点ポリゴンとする)の場合、「可能な分割線」の数は、L頂点数(n_L)の2倍となるので、式(1)から、 $(n_v - 4)$ 本と算出される。この「可能な分割線」を、各L頂点から引いた建物直角ポリゴンを、図5の上中図に示す。これらの分割線の中から、どの分割線を採用するかによって、複数の「分割スキーム」が考えられる[3]。これまでの研究成果[1][2]で、「分割スキーム」として、複数考えられる分割線の候補の中で、分割線の辺長

に基づく、次の条件 A を満たす分割線を選択する分割スキームを提案した。

分割処理を行う分割線が満たす条件 A

- (1)「切り取られる図形が長方形」となる分割線。
- (2) L 頂点から、条件(1)を満たす 2 本の分割線が引ける場合、短い方の分割線。
- (3)分割線の線長が、伸ばす相手となる「主屋根」の幅より短い。

ここで、通常の「屋根付き建物モデル」の形態は、建物の全ての屋根は同じ傾きを持ち、従って、幅広の屋根は幅狭の屋根より高くなるとする。また、「主屋根」とは、条件 A の(2)において、2 本の分割線のうちで採用されない「長い方の分割線の長さ」と等しい幅となり、「枝屋根」が伸びてくる屋根とする。「枝屋根」とは、分割線で分割される長方形で、分割線と同じ長さの幅を持ち、「主屋根」の中心線まで伸びていく屋根とする。図 5 の上中図において、L 頂点から引かれる $(n_v - 4)$ 本の分割線を細破線で、条件 A の(1)、(2)を満たす分割線を太破線で示した。図 5 では、条件を満たす分割線を採用し分割処理を行い、建物ポリゴンを長方形の集まりまで分割し、3 次元建物モデルを自動生成

するプロセスを示す。

図 6 では、提案した分割スキームを用いて、様々な形の直角建物ポリゴンに対して、分割処理を行い、3 次元建物モデルを自動生成した例を示す。

3. 自動生成システムの構成と流れ

本研究における自動生成のシステム構成と 3 次元建物モデルの自動生成のプロセスを図 7 に示す。建物の 3 次元モデルの情報源になるものは、図 2 に示すような電子地図である。電子地図は、汎用 GIS (ArcGIS など) によって、蓄積・管理される。電子地図上の建物ポリゴンは、GIS のソフトウェア部品 (MapObjects) を用いてプログラム開発した GIS モジュールにて、①直角ポリゴンを「長方形の集まり」にまで、分割・分離する。②建物ポリゴン上の不要な頂点をフィルタリングする。③建物境界線よりセットバックした所にある窓やドアを配置するため内側境界線を生成する、などの「前処理」を行う。

前処理したデータを、3 次元 CG ソフト (3D Studio MAX) をコントロールする CG モジュール (MaxScript でプログラム開発) が取込み、以下の処理を自動的に行い、3 次元建物モデルを自動生成する。①屋根や建物本体、窓など建物の部品となる、適切な大きさの直方体、三角柱、多角柱などの基本

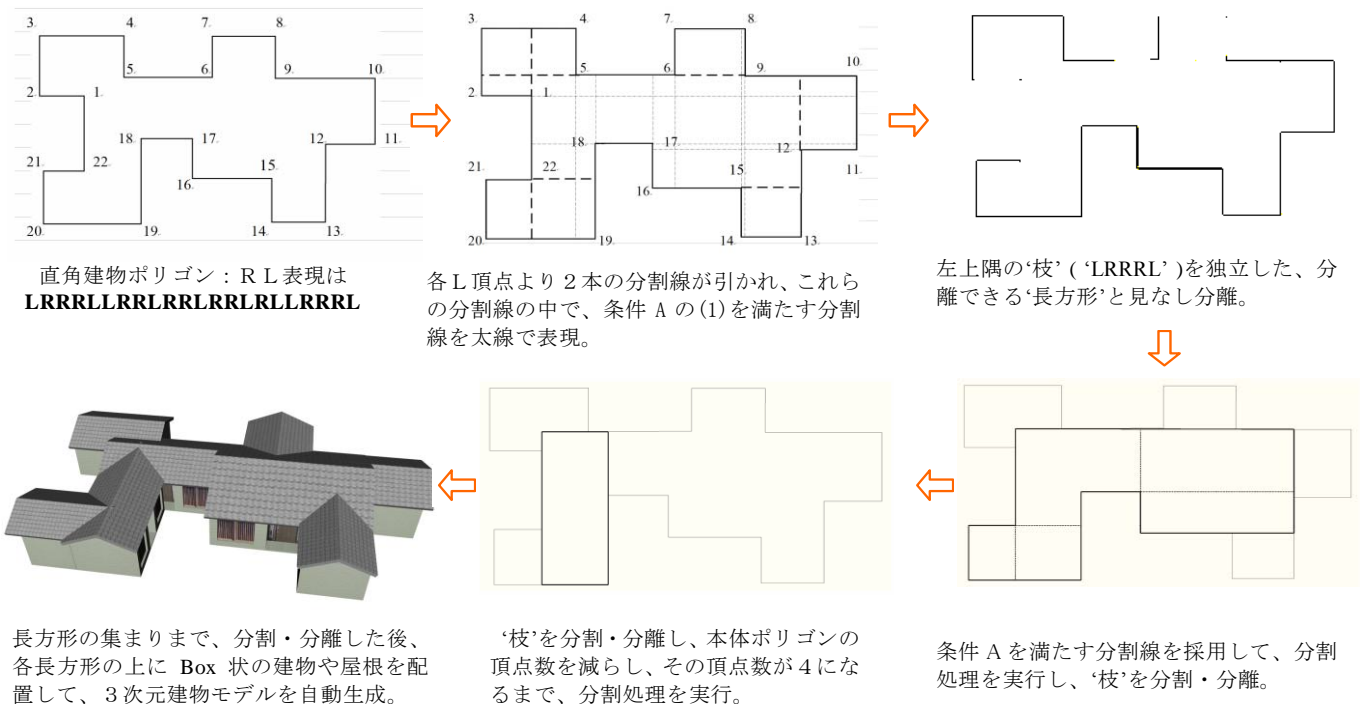


図 5 直角建物ポリゴンの分割プロセス

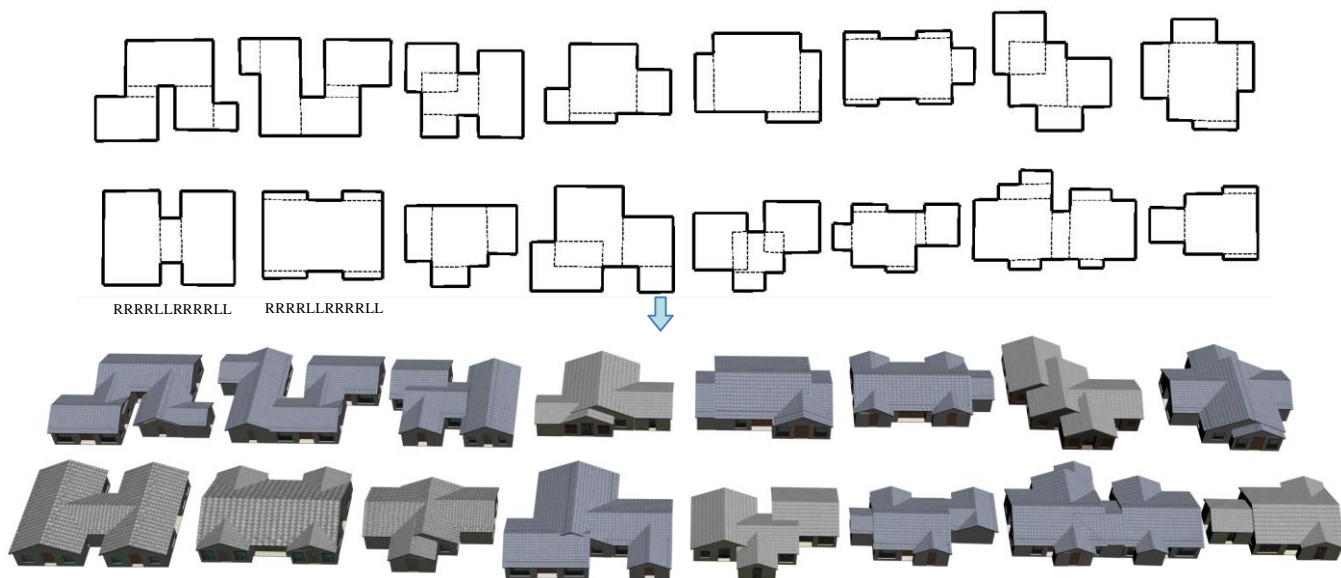


図6 様々な形態をとる建物直角ポリゴンに対する分割処理と3次元建物モデルの自動生成

立体(プリミティブ)を作成する。②これらの基本立体の間で、屋根や窓用に穴を空ける、または、部品を作成するためのブール演算を行う。③作成した部品を回転する。④正しい位置にそれらを配置する。⑤それらにテクスチャマッピングを施す。

このGISモジュールとCGモジュールでの処理は、本研究で開発したプログラムによって、全て自動的に処理される。例えば、図3に示すような3次元建物モデルが約300軒存在する「3次元都市モデル」を自動生成する場合、元になる建物ポリゴンの形状、コンピュータの性能にもよるが、コンピュータ(CPU:インテル Core2 Duo 2GHz)を用いて、GISモジュールでの、処理時間は約30秒、CGモジュールでの処理時間は、3分から5分の間であった。

3. 自動生成システムの構成と流れ

現実の高層ビルには、図9に示すように建物の高さ方向(グラウンドに対して垂直方向)に、階毎に同じ形状を繰り返す建物だけでなく、高さ方向に、階別に異なる形状をとる、複雑な形態となる高層ビルも数多く存在する。本研究では、こうした階別に異なる形態となる建物の3次元モデルを、図8の電子地図に示すような、建物の異なる形状となる「階ごとの境界線」を内部に持つ建物ポリゴンに基づいて、自動生成することに成功した。建物ポリゴンに内包され、異なる形状となる「階ごとの境界線」は、地図の等高線のように、その境界線の高さは一定で、交差することがないこととした。ここで、等高線は、崖などにおいて、その傾斜が急になれば等高線の間隔は狭くなり、垂直になると重なるが、同じ高さの等高線が交叉することはない。これは、地形をグラウンドに



図7 自動生成システムの構成と3次元建物モデルの自動生成のプロセス

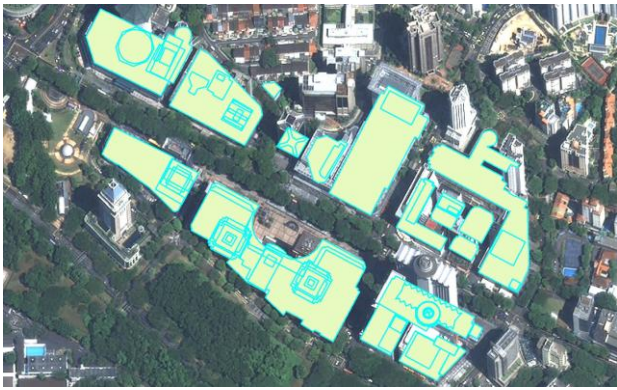


図8 自動生成システムの構成と3次元建物モデルの自動生成のプロセス

平行な面で切った場合、空気と大地を分けるこれらの間の境界線は1本であり、その境界線が交叉したり、開いた境界線になることはなく、もし交叉している境界線があれば、それらは論理和され、閉じた境界線となる。ところが、本研究では、管理のしやすさのために、GIS上の1層の電子地図を取り扱っているため、境界線は交叉する可能性がある。もし、交叉する境界線ある場合は、含むか含まれるよう修正する必要がある。

内包された建物ポリゴンは、どの建物ポリゴンに含まれているかを探索し、自分を囲む建物ポリゴンの高さデータを取得する。囲む建物ポリゴンが複数の場合は、これらの高さデータの合計を求め、建物の垂直位置を決定する。以下にそのアルゴリズムをまとめる。

- (1) 「内包されている建物ポリゴン(自分)」の頂点のどれか1点を取り出し、他のどの建物ポリゴンに含まれるかを探索する。
- (2) 「自分を内包する建物ポリゴン」が見つかった場合、その「タイプ」、「高さデータ」、「頂点位置」、「頂点数」などを取得する。もし、そのタイプが建物の「最上部に付ける屋根」であるのであれば、その高さデータは取得しない。
- (3) 「自分を内包する建物ポリゴン」が複数ある場合は、それらの高さデータの合計を算出する。ここで、塔屋などの屋上構造物の場合は、1階から0.5階とする。
- (4) 算出された高さデータに基づいて、「内包されている建物ポリゴン」から自動生成される3次元モデルの垂直位置を決定する。

図10 内包されている建物ポリゴンの垂直位置を算出する手順

ここで、「自分を内包する建物ポリゴン」のタイプが建物の「最上部に付ける屋根」であるのであれば、その「屋根」は自分を囲むほど大きいものであ

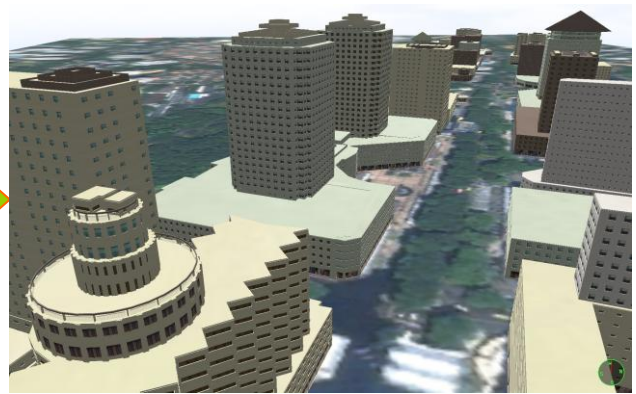


図9 自動生成システムの構成と3次元建物モデルの自動生成のプロセス

っても、最上部に配置されるので、その高さデータを自分の高さデータに加えることは出来ない。

5 まとめ

まちづくりや都市計画において、デザイナーやプランナーなどの専門家が、将来の街の姿を考えると、一般的に、地図を描いて、計画案、代替案を検討する。この地図が、素速く街の3次元モデルに変換できれば、プランニングの効率を上げることができる。本システムは、デザイナー等が描き、将来の街の案となる電子地図に基づいて、様々な形態となる3次元建物モデルを自動的に造り出す機能を持つ。この機能は国内外の既往の研究には見られない。本研究では、階別に異なる形態となる建物の3次元モデルを、建物の「階ごとの境界線」を内部に持つ建物ポリゴンに基づいて、自動生成する手法を提案した。

参考文献

- [1] Kenichi SUGIHARA : Automatic Generation of 3-D Building Model from Divided Building Polygon, ACM SIGGRAPH 2005, Posters Session, Geometry & Modeling
- [2] Kenichi SUGIHARA : Generalized Building Polygon Partitioning for Automatic Generation of 3-D Building Models, ACM SIGGRAPH 2006, Posters Session Virtual & Augmented & Mixed Reality & Environments
- [3] Gruen, A. and et al. (2002) Generation and visualization of 3D-city and facility models using CyberCity Modeler. MapAsia, 8.
- [4] Suveg, I. and Vosselman, G. (2002) Automatic 3D Building Reconstruction. Proceedings of SPIE, 4661, 59-69.
- [5] Fischer, A., Kolbe, T. H., Lang, F. (1997) Integration of 2D and 3D Reasoning for Building Reconstruction using a Generic Hierarchical Model. Workshop on Semantic Modeling for the Acquisition of Topographic Information from Images and Maps SMATI, 5/97, 1-21