状態を持つ描画点による多様なファサードを有する３次元建物モデルの自動生成

村瀬　孝宏*・杉原　健一**・沈　振江***・滕　瀟****

Automatic Generation of 3D Building Models with Diverse Facades Using State-Based Drawing Point

Takahiro Murase *, Kenichi Sugihara **, Zhenjiang Shen ***, Xiaoruy Tang ****

Abstract: In this paper we show automatic generation of the buildings whose façade are versatile and uneven, being added detailed undulations to the façade. To draw these detailed undulations, this study is introducing the concept of "drawing points" with "statuses". When the status of a point changes, an action of "drawing a line segment" is triggered. This concept, based on a "state transition diagram," is programmed to automatically draw the detailed undulations of the façade. In our previous work, a 3D building model was automatically generated based on the building polygon (building footprint) on digital maps, being extruded according to its associated number of floors. Although this method can create substantial building volumes, it cannot generate buildings with diverse vertical shapes. Such buildings can be provided with fully greened balconies.

Keywords: 自動生成（automatic generation），３次元建物モデル（3D building model），凸凹ファサード（uneven facade），ステータスを有する描画点（drawing point with status），緑化バルコニー（greened balcony）

１．はじめに

「建物の３Ｄモデル」（図１右参照）は，まちづくりの案を検討する際，関係者で計画案の出来上がりのイメージを共有でき，合意形成に役立つ．例えば，建物の３Ｄモデルはソーラーパネルを備え，どれぐらいパネルが太陽光を受け止められるのか．さらに，３Ｄモデルの部屋に入り，建物形状と季節に応じて，太陽光がどのように導かれるのかをシミュレーションできれば，よりよい持続可能な建物の設計につながる．そのため，建物の３Ｄモデルを効率よく作ることが求められている．しかし，現状では，３Ｄモデルを構築するには，専門家が描く「建物境界線や平面図」に基づき，３次元ＣＧやＣＡＤソフトを用いて，膨大な手作業にて，建物の３Ｄモデルを製作する．

これまでの著者らの研究で，電子地図上の建物境界線(建物ポリゴン)が，その頂角がほぼ直角である場合(直角建物ポリゴン)，それを四角形の集まりまで分割し，四角形の集まりを「互いに直交する長方形の集まり」まで「整形」し，各長方形の上に Box 形状の建物本体と屋根を配置して３次元建物モデルを自動生成した(杉原・沈, 2013; 杉原・村瀬, 2016, Sugihara,K.・Kikata,J, 2013) ．

この分割処理では，ポリゴンの Reflex 頂点(内角が 180 度以上の頂点)から分割線の候補を引き，分割線の優先度の高い順に分割処理を実行した．分割された四角形の集まりを互いに直交する長方形の集まりとして再構築するために，分割四角形は「どの四角形のどの辺にどのように接していたか」という「隣接情報」を分割四角形に保存する．「どのように接していたか」は，分割線がどの様に引かれるかで判明し，「どの四角形のどの辺」かは，分割四角形の隣接辺がどの四角形の，次にその四角形のどの辺に含まれるかを順次探索して調べる．

ここで，分割四角形の形状，即ち，本体ポリゴンの「内角が９０度の頂点」をどれだけ(３頂点以上かそれ未満か)含んだ分割四角形であるかに応じて，分割四角形から枝屋根を延長させるかどうかを決める．これは，長方形がその３頂点（P1,P2,P3）の位置が決まると，第４点(P4)の位置が（P1+P3-P2）で決まり，独立した四角形として，独立した屋根が載ることになるからである．

また．これまでの高層ビルを自動生成する研究においても，電子地図上の建物境界線である建物ポリゴンに関連付けている階数に応じて，建物ポリゴン全体を，その階数分，「押し出し(extrude)」処理し，建物を自動生成してきた．さらに．建物の垂直方向に多様性のある形状の建物を自動生成するために．建物境界線の中に別の建物境

*　正会員　中京学院大学　経営学部 (Chukyo Gakuin University)
〒509-9195 岐阜県中津川市千旦林：E-mail: murase@chukyogakuin-u.ac.jp
**　正会員　金沢大学　理工研究域　環境デザイン学系 (Kanazawa University)　mjsbp812@yahoo.co.jp
***　非会員　金沢大学　理工研究域　環境デザイン学系 (Kanazawa University)　shenzhe@t.kanazawa-u.ac.jp
****　非会員　金沢大学　理工研究域　環境デザイン学系 (Kanazawa University)　tang.xiaoruy@gmail.com

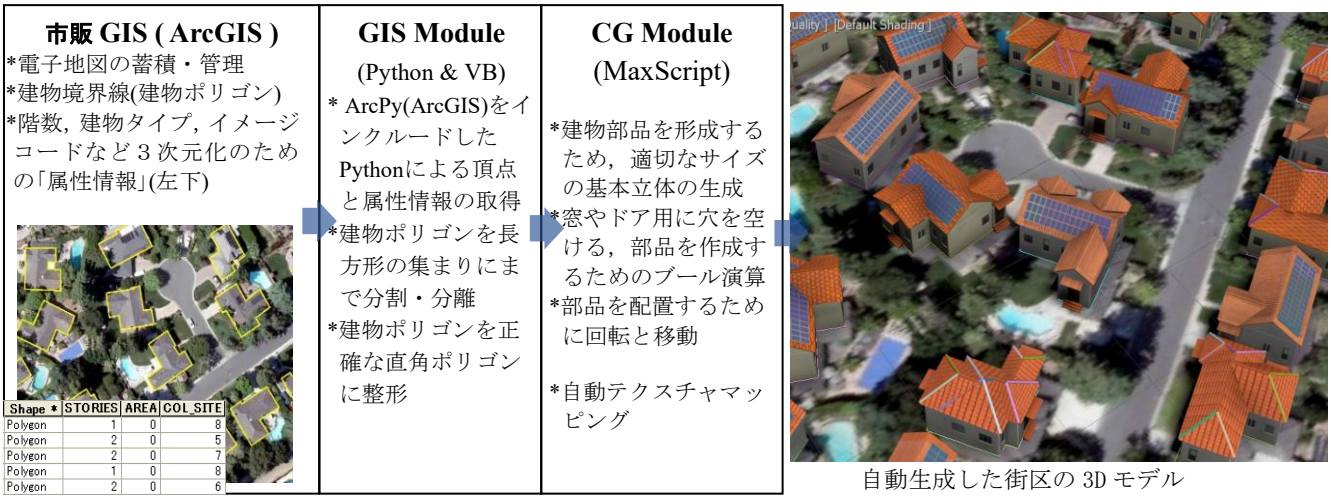


図 1　自動生成システムの構成と 3D モデルの自動生成のプロセス

界線を含む「多重建物ポリゴン」からの，「階段状建物」の自動生成，「建物ファサードの凸凹」を実現した３次元建物モデルの自動生成も行ってきた．

本研究では，これまでの研究を発展させ．「建物ファサードに凸凹」をもたせ，緑バルコニーを多く持つ多様なファサードを有する３次元建物モデルの自動生成を目指した．本手法で生成される建物には，屋上やベランダの緑化，ソーラーパネルなどの設置が可能で持続可能な建物の有力な候補となりうる．

２．既往の研究

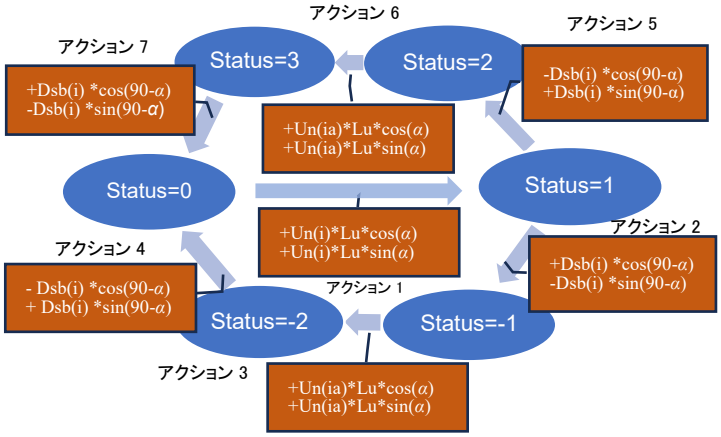
都市の３次元モデルは，都市計画や景観評価，防災まちづくりのシミュレーション等，広範囲に利活用が期待される情報基盤であるため，自動的に都市の３次元モデルを構築する研究が盛んである．現存する３次元都市モデルは，ステレオ画像の航空写真や衛星写真からＣＶ(コンピュータビジョン)や写真測量，リモートセンシングの技術を用いて，観測する地物の３次元形状を復元する．これらの測量法では，得られた点群を面付けし，撮影した画像を割り当て，都市の「表面モデル(Surface Model)」を作成する．これらは正確なサイズの建物概形の３次元表面モデルであるが，窓や玄関，柱，壁といった建築部材を持たず，力学や建物内の太陽光，温熱環境，気流などのエンジニアリング･シミュレーションが困難な，現状把握や景観を重視する３Ｄモデルである．但し，これらリモートセンシングの技術を用いて作られる３次元都市モデルは，Google Earth や PLATEAU に見られるように非常に広範囲に正確な表面モデルを提供するので，現状の都市を仮想空間内に再現するというような場合に必要で，普遍的な価値を持つといえる．

まだ，存在しない，これから作る計画案の街並みの建物の３次元形状をドローン等で取得することはできないが，詳細を有し現状ありうる形状の３次元建物モデルを，製作ルールで自動生成する「手続き型モデリング(Procedural Modeling)」が，Müller ら(2006)によって研究されている．これは，「形状文法 (shape grammars)」を用いることで，任意の方向を向いた建物本体となる複数の「多角体(mass model)」を接合して建物を形成していくとき，その接合面には，当然，窓やドアを設置できないが，多角体を接合して窓やドアが接合部で欠けてしまうこと(論文では unwanted intersections)を正し，詳細な装飾物まで持つようなファサードを有する３次元建物モデルの自動生成に成功した．これは ArcGIS CityEngine として，商品化もされた．この手続き型モデリング手法を使い，Fan Bao ら(2013)は，イメージや概形図をファサードの入力とし，イメージを解析し，そのイメージだけを再構築する「形状文法」を書き出し，そのイメージだけのファサードを自動生成する．但し，そのファサードに少しの形状変更を施すとき，形状文法のインタラクティブな大幅な変更を必要とし，モデリング時間が長時間になってしまうとされる．当該手法で生成されるモデルは「外皮(shell)」で成り立つ表面モデルであり，柱や壁板，屋根板，屋根下構造物など建物部材を持たない．

本研究で自動生成する建物の３Ｄモデルは，リモートセンシングや手続き型モデリングで得られる表面モデルと異なり，３Ｄモデルの各部材は中身の詰まった CSG のモデルであり３Ｄモデルの内部に入って，太陽光がどのように差し込むか，あるいは，屋根下構造物を持っているので，力学シミュレーションを行うことができる．

３．ファサードに凸凹付加し変化を持たせる手法

これまで自動生成した建物はファサードに詳細な変化を持たせることができなかった．本研究では，図 4 に示すようにファサードに詳細な凸凹を持たせることを可能にした．この詳細な凸凹を描くために，本研究では，図 2 に示すように，「描画点」に「状態(status)」を持たせ，点の



ここで，α は整形後の辺の傾き，Un(i)はi番目の Unit 数，Lu は Unit 長，Dsb(i) はi番目の setBack 長．状態が遷移するとき，四角内の式の増分値(x座標，y 座標)だけ，点の位置を移動．これらが状態が遷移するときのアクション．

図 2 ファサードの詳細な凹凸の線分を描く，ステータスを持つ描画点の状態遷移図

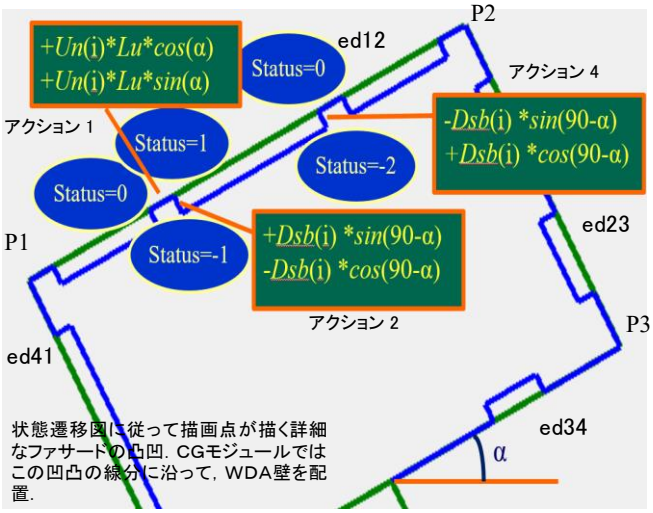


図 3 ステータスを持つ描画点が描く具体的な詳細なファサードの凸凹

状態が遷移するとき，「線分を描く」という「動作(Action)」を発生させる「状態遷移図」を考え，それをプログラム化して，ファサードに詳細な凸凹の線分を描くこととした．本プログラムでは，「状態を持つ描画点」がその状態を変えるときに，前の状態で決められた「点位置の変化量」に従って，「描画点が線を描く」という「動作」を発生させ，次の状態に遷移する．次に，次の状態で決められた，前の状態とは異なる「点位置の変化量」に従って，描画点が線を描いて行く．これを描画点が最終点に達するまで繰り返す．

具体的に，建物ポリゴンに対して，本手法を適用した事例を図 3 に示す．本システムでは，四角の「辺」を一つのオブジェクトとしてとらえ，この場合，辺 ed12 を構造体として定義し，前述した枝部の「切り口の痕跡」などを記憶する．この辺 ed12 において，原点(始点)は点 P1，終点は点 P2 となる．WDA 壁(窓やドアが設置可能な壁)に対して，本手法を適用し，「凸凹の詳細」を描く．即ち，図 4 では，枝部のない辺全体である辺 ed12 や WDA 壁に対して状態遷移プログラムを働かせる．

そこでは，「凸凹軌跡」の始点と終点を WDA 壁両端の点に合わせるために，WDA 壁を「単位(Unit)」に分け，その単位を「いくつ繋げて」セットバックの壁にするか，そして，「いくつ繋げて」非セットバックの壁にするかを決め，凸凹軌跡を形成していく．まず，WDA 長(len_WDA)を「Unit の基準の長さ(fac_st_u_wid)」で割り，WDA 壁両端の点に合わせるため，「単位の個数(num_unit)」，「実際の単位(Unit)の長さ(act_u_L)」を以下の式で求める．

$$um_unit = \mathrm{Int}\frac{len_wda}{fac_st_u_wid}$$

$$act_u_L = \frac{len_wda}{num_unit}\mathrm{t}$$

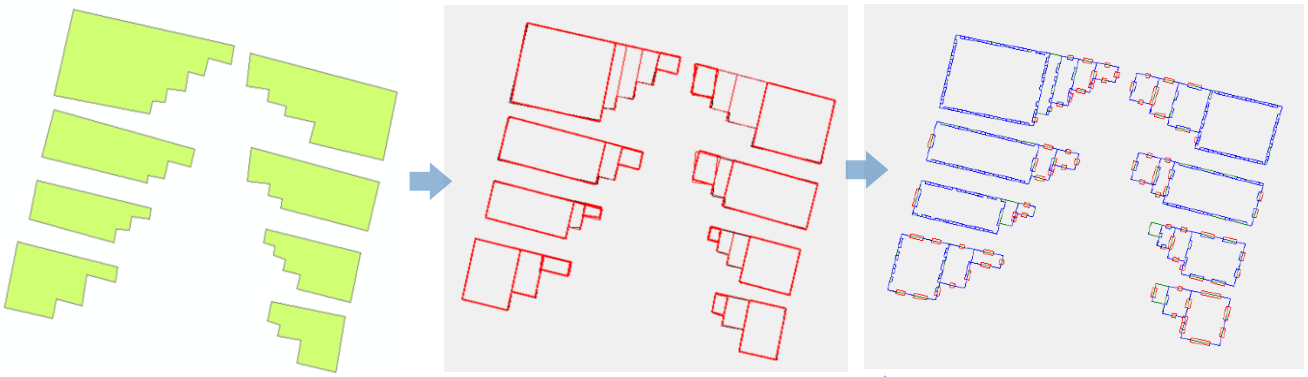
ここで，Int()は括弧内の値を超えない最大の整数．

fac_st_u_wid=2.2，len_WDA＝16.3　の場合，
num_unit=Int(len_WDA / fac_st_u_wid)=Int(16.3/2.2)=7
実際の単位長は　act_u_L＝16.3 / 7=2.3　となる．

プログラム中の配列 fac_ary()には，この単位長の「単位(Unit)」を「いくつ繋げて」セットバックの壁，「いくつ繋げて」非セットバックの壁とするかの「繋げる個数」を格納する．「凸凹軌跡」の始点と終点を WDA 壁両端の点に合わせるために，配列 fac_ary()は，その要素の値の合計が Unit 総数(num_unit)，その要素数は奇数となるような「制約条件」を課している．例えば，num_unit=18 の場合，fac_ary＝{1, 1, 3, 1, 2, 2, 1, 3, 1, 2, 1}，要素値の合計は 18，要素数は 11 で奇数．

図 2 と図 3 のアクションで，Un(i)は配列 fac_ary()の i 番目の Unit 数，Lu は Unit 長(act_u_L)であり，Un(i)* Lu は凸凹ファサードで，セットバックの壁か非セットバックの壁の長さとなる．‘status=0’から‘status=1’への状態遷移において，そのアクションは，非セットバックの壁の長さ(Un(i)*Lu)に cos(α)や sin(α)を掛ければ，描画点の x 軸方向と y 軸方向の増分が計算できる．

図 1 のＣＧモジュールでは，ＧＩＳモジュールからこの「凸凹軌跡」を受け取って，軌跡の線分上に WDA 壁を載せて．WDA 壁に窓を開け，詳細な凸凹のあるファサードを構築する．ここで，辺 ed12 に平行なセットバック壁だけでなく，辺に垂直な非セットバック壁とセットバック壁の間の壁も形成しなければならないので，凸凹の軌跡の線分数は状態遷移の１サイクルで２枚追加となる．また，玄関やエントランスでは，単位長やセットバック値も異なると考えられるので，異なる配列 fac_ary()を用意している．「Unit 数を並べた配列 fac_ary()」は奇数番目の要素が「非セットバック壁長」，偶数番目の要素が「セットバック壁長」を表し，「ファサードの設計値」ともいえる．建物階数によって，この「ファサードの設計値」を変える



(a) 元の建物ポリゴン　(b) 四角の集まりに分割・整形　(c) ファサードに詳細な凸凹付加



(d) 状態遷移手法によるファサードに詳細な凹凸付加　(e) ファサードに凹凸の詳細を持つ３次元建物モデル

図４　ポリゴン分割，四角形整形と直交化，自動生成したファサードに凹凸の詳細を持つ３次元建物モデル

ことで色々なパターンのファサードの設計が可能である．今回のモデルでは前記「制約条件」を満たす複数の配列を用意し，この複数の配列からランダムに「設計値」を選択し，ランダムな変化のファサードを実現した．

４．まとめ

本研究では，建物ポリゴン全体を一律に押し出し，作成するような建物ではなく，建物ポリゴンを四角形の集まりに分割し，各四角形には，異なる階数を与え，階段状建物モデルの生成，さらに，建物ポリゴンの中に別のポリゴンを含む多重建物ポリゴンから垂直方向に多様性がある３Ｄ建物モデルの自動生成，そして自動生成した建物はファサードに詳細な凸凹を持たせることを可能にした．この詳細な凸凹を描くために，本研究では，「描画点」に「状態(status)」を持たせ，点の状態が遷移するとき，「線分を描く」というアクションを発生させる「状態遷移図」を考え，それをプログラム化して，ファサードの詳細な凸凹を自動描画した．凸凹のセットバック壁の長さ，セットバックの距離などは，プログラム中のデータテーブルから取り出し，詳細な凸凹を形成していく．本手法で生成される建物には，屋上やベランダの緑化，ソーラーパネルなどの設置が可能で持続可能な建物の有力な候補となりうる．

謝辞

本研究は，JSPS 科研費の研究課題番号：23K04156 と 24K06249 の助成を受けて遂行された．ここに謝意を表する．

参考文献

杉原健一・沈 振江 (2013) ３次元建物モデルの自動生成システムで用いる Straight Skeleton 手法，「地理情報システム学会 講演論文集」，22.

杉原健一・村瀬孝宏 (2016) 3 次元建物モデルの自動生成のための建物境界線のポリゴン整形，「土木学会論文集 F3（土木情報学）」，72(2), I_167-I_174.

Fan Bao, Michael Schwarz (2013) Peter Wonka: Procedural Facade Variations from a Single Layout, *ACM Transactions on Graphics*.

Müller, P., Wonka, P., Haegler, S., Ulmer, A., and VanGool, L. (2006) Procedural modeling of buildings, *ACM Transactions on Graphics*, 614-623.

Sugihara,K. and Kikata,J. (2013) Automatic Generation of 3D Building Models from Complicated Building Polygons, *Journal of Computing in Civil Engineering ASCE (American Society of Civil Engineers)*, 27, 476-488. DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000192.