中国･福建省･古城の３Ｄモデルの自動生成

杉原　健一*･沈　振江･滕　瀟***，村瀬　孝宏*****

Automatic Generation of a 3D Model of an Ancient Castle in Fujian, China

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

Abstract: In this study, we focus on the automatic generation of architectural structures with curved roofs, which are commonly found in many temples and castles in Japan and China. It is said that, at the time, such curved roofs were constructed by master carpenters using the catenary curve formed by hanging a string as a reference. In previous studies, curved roofs were automatically generated by combining multiple roof boards—thin, rectangular, flat elements—into an overall curved shape. However, the program required to compute the width, inclination, and control point positions of each roof board became enormous and highly complex. In this study, in order to generate small-scale castle architecture in China, we propose constructing the roof using only two roof boards, which are controlled by four "control points" located at the edges of the boards. By adjusting the heights of the supporting columns and walls in the longitudinal direction according to these control points, we successfully generate a roof curved along the longitudinal axis and realize a seamless structure without gaps.

Keywords: 自動生成（automatic generation），３Ｄモデル（3D model），古代建築（ancient building），湾曲屋根（curved roof），中国古代城（Chinese vernacular castle）

１．はじめに

本研究では，図１に示すようなプロセスで，中国福建省の古城，特に「湾曲した屋根を持ち，中央に扉のない広間と祭壇のある古代建築」を自動生成するプログラムを開発した．これまでの研究(2013, 2016)と同様に，この３次元モデルの元になるのは図-１左の城全体を上空から撮影したオルソ画像である．GIS 上でオルソ画像上に建物境界線を描き，それに建物階数，種別などの属性情報を関連付け，自動生成の第二のプロセスである「GIS モジュール」にて，建物境界線が直角建物ポリゴンの場合は，それを互いに直交する長方形の集まりにまで分割，整形し，「CG モジュール」にて，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する．ここで，３次元モデルを生成する意義として，発掘調査，考古学において，掘立柱の遺構と他の断片的な物証である遺物を分析し，建物などの上部構造である「上物」を推定，復元するが，そのとき，復元案が研究者によって異なり，往々にして，正確さを欠き，誤った思いこみの原因につながる．そこで，３次元ＣＧを用いて，上物の３次元モデル化を行い，議論を重ねれば，よりよい復元案につながる．また，遺跡や遺構は公共財であり，その情報公開は行政にとって必要なことであり，発掘調査の地図だけでなく，上物を復元する３次元モデルは分かりやすく，観光促進にも役立つと考えられる．このとき，「古代建築物」を復元するには，調査発掘企業が製作する地図や航空写真，古地図などの地図情報に基づき，主に，Maya，3dsMax や Rhino などの３次元ＣＧソフトを用いて，膨大な手作業にて，古代建築物を製作する．そこで，本研究では，その膨大な手作業を省くために，地図情報に基づき「古代の３次元モデルを自動生成するシステム」の開発を行うこととした．

２．既往の研究

現在，存在しない古代建築物を，ドローンなどのリモートセンシングの技術を用いて，その３次元モデルを復元することはできない．そこで，製作ルールで建物モデルを自動生成する「手続き型モデリング(Procedural Modeling) 」が，Müller ら(2006)によって研究され，ArcGIS CityEngine として，商品化もされた. Saldana(2015)は，この CityEngine を使って，ローマやヘレニズム時代の都市環境を３次元復元した．CityEngine では，モデリングを手順化，プログラミングすることで行われ，「ローマ都市製作ルール(Roman City Ruleset)」を構築し，古代ローマの自由民が住んだ住宅“ドムス（domus)”を街路に沿って，街路にあうように敷地や建物を生成した．ローマ都市の３次元復元では，都市を構成するもの(Temple,

*　会員　　金沢大学　理工研究域　環境デザイン学系　研究協力員 (Kanazawa University)
〒920-1192 金沢市角間町 E-mail: 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
****会員　中京学院大学　経営学部 (Chukyo Gakuin University)　murase@chukyogakuin-u.ac.jp

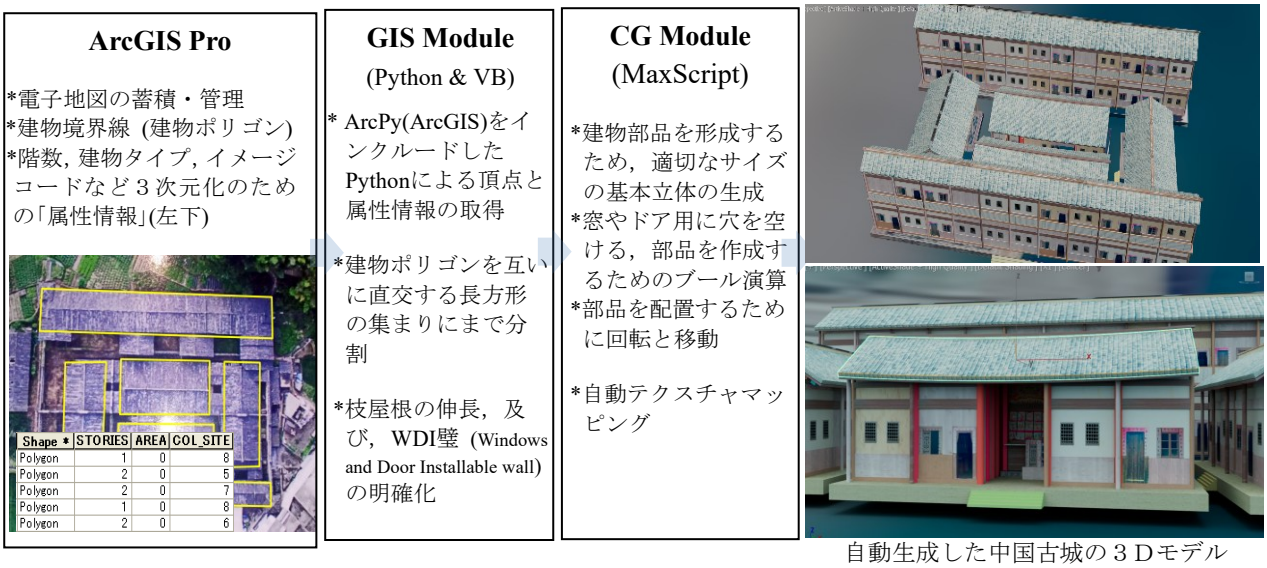


図１　自動生成システムの構成と３Ｄモデルの自動生成のプロセス

basilica，portico，Stadium/Theater 等)を全て復元し，その復元案が考古学者，建築史学者の考察や議論を引き起こし，よりよい復元案を導いた．

この手続き型モデリングにおいて，GIS が蓄積管理する電子地図から「建物境界線」を取り込んで，彼らの製作ルールにおいて，基本製作ルールに分類する．もし，「非直角建物ポリゴン」など，それができない形状であれば，ポリゴンの各辺がポリゴン内部方向に，自分自身に平行に一定速度で縮小するとき，各頂点の軌跡を辿ることで得られる「直線状の骨格(straight skeleton)」を利用するストレートスケルトン手法(1995)を用いて，非直角建物ポリゴンに対しても，屋根付き３次元建物モデルを自動生成する．但し，生成されるモデルは２次元図形を押し出し，スイープして得られる３次元モデルなため，柱や壁板，屋根板，屋根下構造物などを持たない表面モデル(surface model)である．

３．湾曲した屋根の自動生成

図 2(a)，(b)は，中国 福建省東部の湾曲した屋根を持つ古城の正面の写真と柱と柱の間の単位壁で右にドア，左にドアがある場合の写真と自動生成した３次元建物モデルを示す．中国古城の屋根は「平ら」ではなく，わずかに「湾曲」している．屋根の上部は傾斜が急で，下部はより緩やかな傾斜で，雨水がすばやく流れ落ちるようになっている．昔の職人たちは，このわずかに湾曲した屋根の断面形状を，両端を固定して垂らした糸の曲線を目安として決めたとされる(糸張り法)．この曲線は「カテナリー(懸垂曲線)」(2025)と呼ばれ，建築や土木において，例えば，橋やアーチの設計において，力が曲げモーメントを生じさせないようにするため使用されている．

この城の屋根の頂部にある「大棟(main ridge)」は，「桁行方向(長手方向)」に「湾曲」している．ここで「桁行方向」とは，建物を上から見たときに，その長方形の建物境界線の長辺に平行な方向を指し，それに垂直な方向は「梁行方向(短手方向)」としている．このように中国の伝統建築物の「大棟」は上向きに湾曲しており，それに伴って屋根も上向きに湾曲している．特に紫禁城などに見られる屋根は，縁に向かって上に反った独特の湾曲を特徴とし，その造形美が重視されている．

屋根は桁行方向に湾曲しているので，支える柱や壁の高さが同じであるとすると，湾曲によって隙間ができてしまう．これを是正するため，建物の東端および西端で屋根を支える柱や壁の高さを，中央部分の柱や壁よりもわずかに高くして隙間ができないようにする必要がある．自動生成プログラムにおいては，湾曲の度合いに応じて両端の柱および壁の高さに「補正値」を加え，湾曲した屋根板の最も低い部分が柱や壁の頂部と正確に合うようにしている．「補正値」は以下のように算出する．

図 3 では，長さ 10m で厚さ 2cmの薄い直方体に３次元ＣＧソフトである 3ds Max において，「ベンド(Bend)」モディファイヤを適用し，X 軸(桁行方向)に沿って曲げ角度

表 1『曲げ角度(BendAngle) 』に対する『屋根端の中心位置の測定 Z 値』，および『柱の高さ補正値』

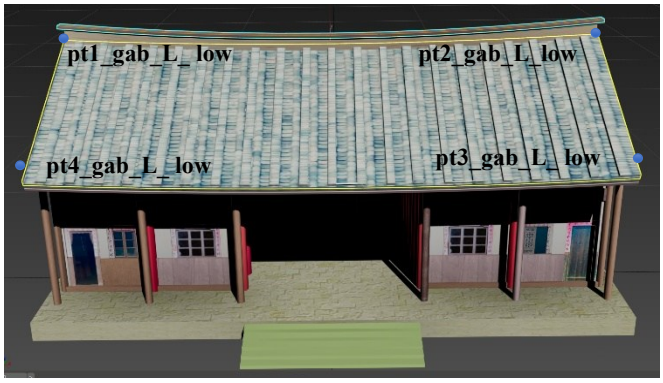
曲げ角度 (BendAngle)	屋根端の測定 Z 値 (Z value of the measured center of the roof end)	柱長の補正値 (Pillar height correction value)	補正値の変化 (The change in the correction value)
0	0.011		
2	0.055	0.044	
4	0.097	0.086	0.042
6	0.141	0.13	0.044
8	0.185	0.174	0.044
10	0.229	0.218	0.044
12	0.272	0.261	0.043
14	0.316	0.305	0.044



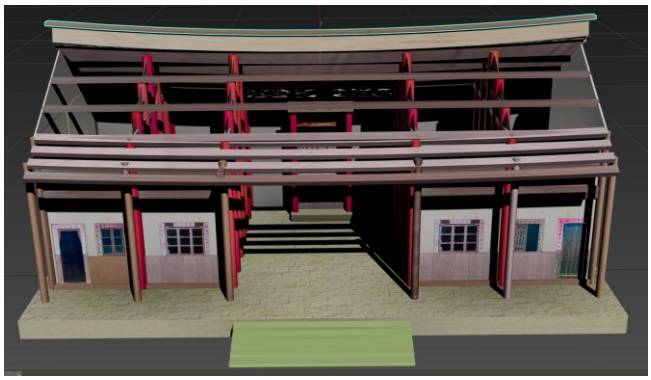
(a) 中国 福建省 東部の屋根が湾曲した古城の写真



(b) 柱と柱の間の単位壁で右にドア，左にドアがある場合



(c) 上から見て下側の切妻屋根板の４つの制御点(pt1,2,3,4)



(d) 屋根板を消して，柱，梁，桁，壁を表示した図

図２　中国 福建省東部の古城の写真と自動生成された３次元建物モデル

を 0 度から 150 度まで 5 度刻みで変化させた結果を示す．図 3(a)は「ベンド」モディファイヤを適用した一連の薄い直方体の透視投影図を示しており，図 3(b)は直方体群の正面図を示している．

湾曲屋根の東西両側を支える柱の高さを補正するためのデータを表 1 に示す．図中には，「ベンド」モディファイヤによる「BendAngle(曲げ角度)」，図 3(b)における屋根端の中心位置の測定 Z 値(高さ), そして「柱の高さ補正値」が次のように計算されている：

0.044 = 0.055 - 0.011，0.086 = 0.097 - 0.011，….

ここで，「0.011」は屋根板の厚さの半分を表している．

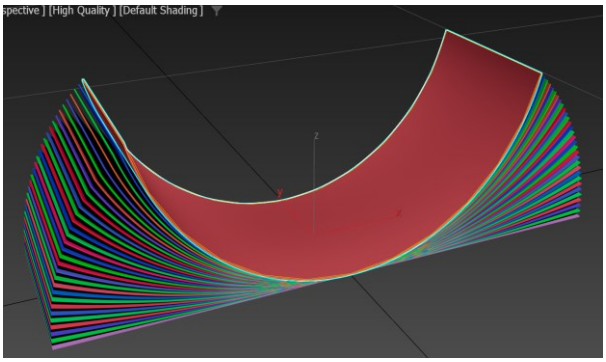
４．４つの制御点で屋根板の位置決め

これまでの研究(2009)で, 仮想空間上に屋根が湾曲した古代建築物である美濃国分寺を復元する３次元モデルを自動生成した．その大きな屋根は，湾曲していない薄い複数の直方体の屋根板を組み合わせて構築した．実際の古代建築物も湾曲した屋根は，湾曲していない薄く，幅が狭い複数の屋根板を巧みに組み合わせて製作される．しかし，３次元モデル生成のプログラミング(2009)において，この「複数の直方体の屋根板の組み合わせ」で，湾曲した屋根を構築するには，隣りあう屋根板が調和するように，個々の屋根板の幅，傾き，制御点の位置を調整する必要があり，調整するものの数が増えて，制御が複雑になる．そこで，本研究では，特に小規模な城の屋根を，複数枚の屋根板で構成するのではなく，南向き，北向きの屋根板をそれぞれ１枚で構成し，また，制御を複雑にしないよう，屋根板をその４つの端点で位置決めするようにした．

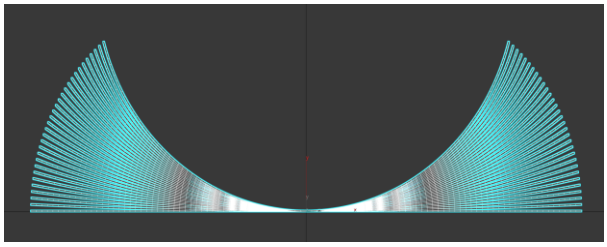
図 2(c)は，2 枚の屋根板を接合して構成する切妻屋根(gable roof)の南向きの屋根板を示す. 屋根板の位置と向きは 4 つの「制御点」(pt1,2,3,4_gab_L_low)によって制御される．ここで「pt1_gab_L_low」とは，切妻屋根板を上から見たとき(即ち，平面図上で)，「下側(_low)」に配置される屋根板の制御点 pt1 を指す．この屋根板は複数の重ね合わせた板で構成され，「pt1_gab_L_low」はそれらの中で最も下にあるもの(_L)を特に指す．これらの点(図 2(c))の座標値は，以下のような３次元位置データ([x , y , z])に設定する．

$$
\begin{aligned}
&pt1_gab_L_low=[-0.5*w_L,\ ext_ed23_41_L*cos(th_rf),\ gab_L_up_p1p2_z]\\
&pt2_gab_L_low=[0.5*w_L,\ ext_ed23_41_L*cos(th_rf),\ gab_L_up_p1p2_z]\\
&pt3_gab_L_low=[0.5*w_L,\ -0.5*w_S,\ h_st]\\
&pt4_gab_L_low=[-0.5*w_L,\ -0.5*w_S,\ h_st] \qquad (1)
\end{aligned}
$$

ここで，$ext_ed23_41_L = thick_L_rf * tan(th_rf)$ とし，辺である edge23 と edge41 は，上部および下部の屋根板間の隙間を埋めるように延長される. *th_rf* は屋根の傾斜角，*thick_L_rf* は最下層の屋根板の厚み，*h_st* は柱の高さ．これまでの研究(2013, 2016)で，分割された四角形の辺は，



(a)「ベンド」モディファイヤを適用した一連の薄い直方体の透視図



(b)「ベンド」モディファイヤを適用した一連の薄い直方体の正面図

図 3　長さ 10m の厚さ 0.02mの直方体に「ベンド(Bend)」モディファイヤを適用，曲げ角度を 0 度から 150 度まで 5 度刻みで変化

長辺(*w_L*)と短辺(*w_S*)に分類し，四角形の頂点は長辺の左上の頂点を「pt1」として，図 2(c)のように時計回りに番号を付ける．

また，式(1)において，

gab_L_up_p1p2_z = tan(th_rf)(0.5*w_S) + h_st + ext_ed23_41_L*sin(th_rf)*

とし，*pt1_gab_L_low* および *pt2_gab_L_low* は最も高い点を示し，*gab_L_up_p1p2_z* はその高さを表わす．

屋根板の位置は 4 つの制御点によって決定されるが，屋根板自体(box オブジェクト)には底面の中心に 1 つだけ制御点があるだけで，簡単に計算できる．

屋根モデルは，その屋根部材を作成し，配置するとき屋根モデルのローカル座標とその中心を 3ds Max の仮想空間の原点および座標軸に合わせて，部材を適切な位置に配置してモデル構築する．そして，屋根モデルは，それが建てられる「基壇」を「親」として設定すると，「子」である屋根モデルの部材は，「親」である基壇に対する相対位置と向きを維持し，「親」に追従して移動･回転できる．図 2(d)は，屋根板を消して，柱，梁，桁，壁などの城の構成要素が自動的に生成され，屋根板の下に正しく配置されていることを示す．

５．まとめ

これまでの研究(2009)で, 美濃国分寺を復元する３次元建物モデルでは，湾曲した屋根は，実在する屋根の構造と同じように複数枚の湾曲していない薄い直方体である屋根板を組み合わせて，自動生成した．しかしながら，屋根を構成する複数枚の屋根板の幅，傾き，屋根板の位置を決める制御点の位置をコントロールするプログラムは膨大で複雑になる．例えば，カテナリー(懸垂曲線)を x 軸方向に等間隔でサンプリングして，屋根板の幅と傾きを算出して，プログラムにデータテーブルとして格納し，それに基づいて，屋根板となる薄い直方体を生成する．次に, 平面図上でこれら屋根板をどう配置するか, 即ち，その制御点をどの線分上に，どう線分を分割する点に置くのかを算出する．特に最下部にある屋根板は，軒部のため延長する必要があり，その場合どのようにその制御点を持ってくればいいのか．これは，軒長として延長する長さを分割する線分の長さで割った値を分割比に加える．さらに，側面図で，その制御点の高さをどのように設定するかなど, プログラミングは複雑となる. そこで，本研究では，屋根を複数枚の屋根板で構成するのではなく，例えば，南向き，北向きの屋根はそれぞれ一枚の屋根板で構成し，一枚の大きな屋根板を，その４つの端点を制御点として，屋根板の平面図上での位置，側面図上での位置を決めることで，中国古城の３次元モデルを自動生成した．

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･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.

Marie Saldaña (2015) An Integrated Approach to the Procedural Modeling of Ancient Cities and Buildings, *Digital Scholarship in the Humanities*, Vol30, Pages i148‑i163, https://doi.org/10.1093/llc/fqv013

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

O. Aichholzer, F. Aurenhammer and D. Alberts, B.Gärtner (1995) A novel type of skeleton for polygons, *Journal of Universal Computer Science*, 1 (12), 752‑761.

Sugihara,K. (2009) : Automatic Generation of 3-D Ancient Building Models Based on a Digital Map, *22th CIPA The International Sci-entific Committee for Documentation of Cultural Heritage.*

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.

Catenary From Wikipedia, the free encyclopedia,(2025) : <https://en.wikipedia.org/wiki/Catenary>