

CGによる江戸城の復元

杉本 和敏 * 木原 利幸 ***

* 日本アイ・ビー・エム(株) 東京基礎研究所

*** フジタ工業(株) 設計統括部

NHK大河ドラマ「春日局」の冒頭において、コンピュータ・グラフィクス(CG)を用いて、当時の江戸城や江戸の町の発展の変遷を紹介した。過去の多くの資料をもとに、実在しない歴史上重要な建物をCGにより忠実に復元することは、人文科学、歴史学や教育など多くの分野で非常に有効であることを示すことができた。ここでは、江戸城の復元のためのモデリングおよびレンダリング手法について紹介すると共に、CGにおける今後の課題について考察する。

The Restoration of The Edo Castle By Computer Graphics

Kazutoshi Sugimoto * Toshiyuki Kihara ***

* IBM Research, Tokyo Research Laboratory

*** Fujita Corporation, Architectural & Engineer Division

We faithfully restored Edo Castle of about 380 years ago by computer graphics (CG), and showed it at the "Kasuga-no-tsubone" NHK TV series program in 1989. It is very effective and useful in cultural science, history and education to represent historical objects by using CG technologies. This paper describes modeling and rendering technologies for the restoration of Edo Castle, and give some considerations in the restoration of historical objects by CG.

1. はじめに

NHK大河ドラマ「春日局」の冒頭において、コンピュータ・グラフィクス（CG）を用いて、当時の江戸城や江戸の町の発展の変遷を紹介した。過去の多くの資料をもとに、実在しない歴史上重要な建物をCGにより忠実に復元することは、人文科学、歴史学や教育など多くの分野で非常に有効であることを示すことができた。ここでは、江戸城の復元のためのモデリングおよびレンダリング手法について紹介すると共に、CGにおける今後の課題について考察する。

2. CGによる江戸城の復元の目的

「春日局」は、天正18年（1590年）に家康が江戸に来た頃から三代将軍家光の頃までが番組のテーマであったが、その番組の冒頭でその時代背景を視聴者に判りやすく説明するための方法が検討された。家康が入城した頃の江戸は、芦原と遠浅の入江に囲まれた田舎であったが、家光の代までに江戸城の総構えや江戸の町を築きあげてきており、その間に江戸の町は大きく変化した。この時間の経過による空間の広がりをスタジオやロケーションで表現したり、絵を描いたりミニチュアを製作して表現するのは非常に困難であり、しかも自由な視点から江戸城や江戸の町を紹介するとなると上記の方法では至難の業であった。そこで、これらの要求を満たす方法としてあげられたのがCGの利用であった。

最終的に、江戸城や江戸の町の発展の変遷を紹介する目的で以下の8本のCG映像が放映された。

- (1) 江戸の町と江戸城西の丸 (4/30/1989)
- (2) 江戸の地形の移り変わりとは日比谷の埋め立ての様子 (5/7/1989)
- (3) 江戸城本丸と慶長期の天守閣 (5/28/1989)
- (4) 日本橋周辺の賑わい (6/25/1989)
- (5) 江戸城本丸の大広間 (8/27/1989)
- (6) 江戸城松の廊下 (9/3/1989)
- (7) 慶長期と寛永期の天守閣の違い (9/24/1989)
- (8) 江戸城大奥の長局 (11/19/1989)

3. CGによる江戸城復元作業での考慮点

番組の放送日に合わせてCGを製作していかねばならないという重圧と時間の制約の中で、できるだけ効率的に、かつ高品質なCG映像を制作するかを考えなければならなかった。しかもできあがったCGは、過去の資料にできるだけ忠実であることが要求されていた。また、江戸の町の変化を表現するには、その空間に存在する建物の数や形が時間と共に変化するの膨大なデータをモデリングしなければならなかった。したがって、筆者らは、多くの妥協をしながらも以下の点を考慮してCGの制作を行うことにした。

- (1) 時代考証にできるだけ忠実な表現
- (2) 幾何データの効率よい入力および時代の変化に対応するために幾何データの変更、管理が容易
- (3) 高速なレンダリングと高品質なレンダリングとの組合せ
- (4) テクスチャー・マッピングの利用（特に属性マッピングの有効利用）

4. CGシステムの概要

江戸城復元作業に利用したCGハードウェア・システムの概要を図1に示し、以下にソフトウェア・システムについて述べる。

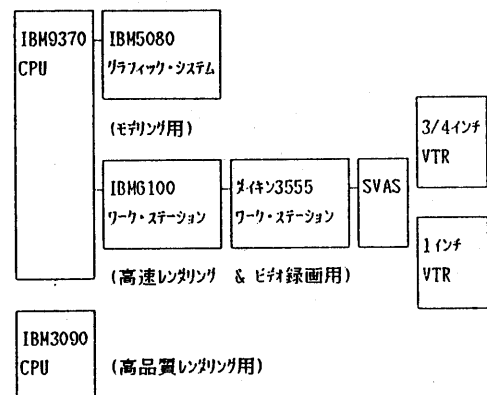


図1. CGシステムの概要

4.1 モデリング

江戸の地形、町、江戸城の各構成部材の幾何データのモデリングには、フジタ工業が1984年から開発を進めてきた建築統合システム「COMputer aided Planning And Simulation System : COMPASS」^{11) 12)}を利用した。COMPASSは、図面作成の効率化だけをねらったものではなく、建築データ・ベースを構築することで設計段階で必要とする全ての図面と積算やパースまでを出力できる統合化システムを目指して開発されたものである。データ・ベースには、敷地(形状、種別、高低段差)、建物(位置、種別)、階(階高さ)、構成要素(床、天井、壁などの形状)など階層的にデータが管理されている。このデータ管理により、時代の変化に応じて新しい建物が建てられたり、江戸城が違った場所に建て替えられたりしても敷地や建物の関係などを変更することで比較的容易に対処することができた。ただし、COMPASSは、現代建築のモデリングを前提に開発されたため、今回のような古建築で見られる屋根などのそりなどの微妙な形状をモデリングするには従来の基本形状入力方法だけでは対応できなかったため、特別に屋根生成、石垣生成、掘生成などのための部品入力機能を付加した。

4.2 レンダリング

レンダリングには、高速なレンダリング用としてダイキンCOMTEC3555グラフィック・ターミナルのハードウェアによるシェーディングを利用し、高品質なレンダリング用として日本アイ・ビー・エム(株)東京基礎研究所で開発し、製品化したレンダリング・ソフトウェア「Rendering Subroutine Package : RSP」¹³⁾を利用した。

RSPは、より現実の世界に近い高品質な画像を段階的に生成していくことのできる手段を提供しており、その主な特徴は、

- 1) 要求される画像の品質や処理時間に応じて、使い分けのできる三種類(リスト・プライオリティ法、スキャン・ライン法、レイ・トレーシ

ング法)のレンダリング手法の提供、

- 2) 複雑な物体表面の模様や材質感を表現するための属性マッピング¹⁴⁾の提供(属性マッピングは、テクスチャー・マッピングの一般化されたもので、面にテクスチャーを貼り付けるだけでなく、光学属性、凹凸属性、シェーディング・モデルなど様々な属性を束にしたインデックスをマッピングする手法)、
- 3) 応用性の広い多角形ポリゴンの採用、
- 4) CGにより生成した画像と写真などの画像とを合成する(モンタージュ)機能の提供、
- 5) 同時表示色の限られた表示装置に対して、できるだけ画像の品質を劣化させずに限定色で表示することを可能にする機能などが挙げられる。

5. 復元作業

江戸城を復元するまでの過程を1)資料収集および時代考証、2)モデリング、3)レンダリング、4)アニメーションの順に述べる。

5.1 時代考証

考証作業は、東京工業大学の平井教授とNHK美術部の内藤氏によって行なわれた。復元の対象となった時代は、天正18年(1590年)から寛永17年(1640年)頃までの約50年間で、家康、秀忠、家光の3代にわたる壮大な都市改造計画が行なわれた。

考証に必要な資料は、寛永期以後はかなり多く残っているが、天正、文禄、慶長期のものはほとんどなく、あっても信憑性に欠けるものばかりであった。結局、慶長江戸図(写)、慶長江戸絵図(写)、武州豊島郡江戸庄図(写)、江戸図屏風などを参考資料として当時の地形と建物を類推する一方で、明治地形測量図、ランドサット衛星写真、地質調査図などからさらに正確なものに近づけていった。以下に地形と建物の考証作業について示す。

- 1) 地形 : いきなり当時の地形を復元することは難しく、正確な測量図としては最古の明治16、17年測量の参謀本部陸軍部測量局による「五

千分一東京図」を元に、明治期の東京の地形をCAD入力した。その地形データを下敷として、慶長江戸図の地形を川や堀を頼りに上書きしながらCADデータ〔図2〕を作成した。さらに文献を頼りに各時代に遡って、ようやく天正期の地形が想定できた。

- 2) 建物：江戸城50年間の変遷だけでも、太田道灌時代の江戸城、西の丸の建設、本丸の建設、天守閣の建設、西の丸の修築、新天守閣の建設、本丸の改築、二の丸の建設などと続く。建設・改築の時期ははっきりしていても、どういふ建物がどういふ配置だったかは図面もなく困難を極めた。当時の建物様式や社会規模から平井先生の考察と内藤氏のイラスト〔図3〕により何とか概要がつかめた。

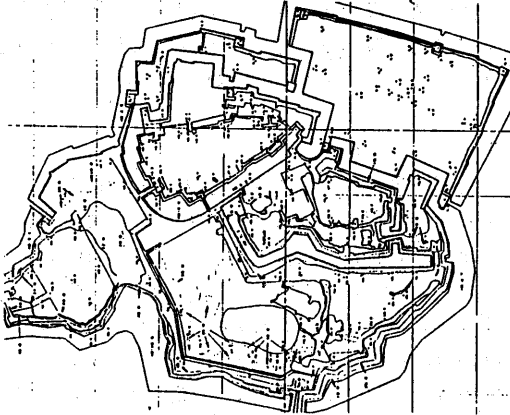


図2. 地形CADデータ

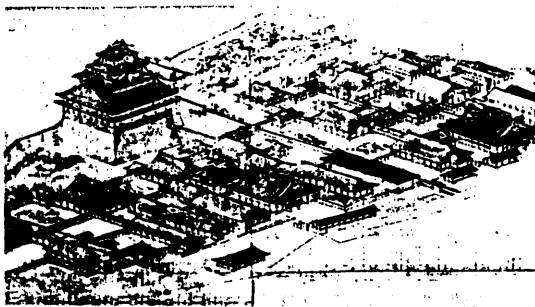


図3. 本丸イラスト

5. 2 モデリング

CGで再現する江戸の町も単に一時期の町の広がり表現するだけでなく、この間の町の移り変わりを表現するということは、つまり都市が変わる度に1つのモデルを作っていかなければならなかった。これは、空間を表現するための次元に時間の次元を加えた4次元とも言える膨大なデータを扱わなければならない大変な作業であった。以下に敷地、町並み、屋根、石垣、堀、山、森などの入力について示す。

- 1) 敷地入力：CADの線分データをCOMPASSの敷地形状データに変換して高低差を与え、町並み部品・森部品・山部品などを配置して登録〔図4〕
- 2) 町並み入力：建物部品を呼び込んで扉・樹木を配置して「町並み部品」として登録
- 3) 建物入力：柱・梁・壁・建具などを3次元入力し、屋根部品などと組み合わせて「建物部品」として登録〔図5〕
- 4) 屋根入力：形状タイプ・大きさ・高さなどのパラメータを入力して「屋根部品」として登録
- 5) 石垣入力：形状タイプ・大きさ・高さなどのパラメータを入力して「石垣部品」として登録
- 6) 堀入力：断面形状・始点・終点を画面入力して「堀部品」として登録
- 7) 山入力：山の範囲・等高線を画面入力して「山部品」として登録



図4. 敷地モデリング画面

- 8) 森入力 : 樹木パターン・密度などのパラメータを入力して「森部品」として登録

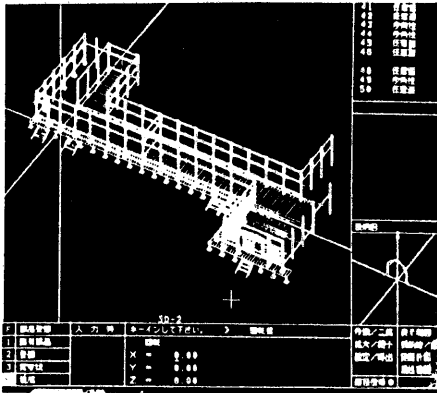


図5. 建物モデリング画面

以上のモデリングにより、一時期の江戸の町を表現するために面データ(ポリゴン)で約10万面から15万面となった。しかし、これだけのデータ量でも江戸の町を表すには十分でなく、近景用と遠景用に別個に作成したCG画像をビデオ技術で合成し20万面以上の表現も可能とした。

5.3 レンダリング

レンダリングは、ハードウェアのシェーディングに頼らず、高品質な画像が得られるレンダリング手法を用いたかったが製作時間の関係や扱っている幾何データが非常に膨大であったことから以下に示す2種類の手法を利用した。

- 1) Zバッファ法(ハードウェアのシェーディング機能) :

江戸城を中心に約5km四方の江戸の町を表現しようとするとその幾何データは、江戸城だけでも10万以上のポリゴン・データとなり、さらにその周辺の町を含めると20万をかるく越えてしまった。江戸城や江戸の町を上空から表現しようとする時、スキャン・ライン法やレイ・トレーシング法で画像生成すると大型計算機を用いても膨大な時間がかかるため、ハードウェアのシェーディ

ング機能を利用することにした。本手法は、一つ一つの面を濃淡で表現するため物体表面の材質感の表現に乏しく生成した画像が単調になる反面、非常に高速に画像を生成することができるので短時間でビデオに収録するには最適であった。図6にその一例を示す。



図6. 江戸の町

- 2) スキャンライン法+属性マッピング

江戸城本丸の大広間や忠臣蔵でも有名な松の廊下の復元には豪華な障壁画や欄間の模様をできるだけ忠実に表現する必要があった。これらの表現にはRSPで提供している3種類のレンダリング手法からスキャン・ライン法を利用することにした。製作時間の関係で影の生成は断念したが壁画や欄間の模様の表現にはRSPの特徴でもある属性マッピングを有効に利用した。図7に示す「大広間」の復元には、幾何データとして数千のポリゴン・データを使用し、襖、障子、天井、欄間などの表現のために百種類以上にのびるイメージ・データを使用し、それぞれのポリゴン・データにマッピングした。特に、属性マッピングの有効性を欄間の表現を例にあげながら示す。

- a) データ量の削減 : 欄間の格子を通して隣の部屋の天井が透けて見えているが、この格子を幾何データとして表現するとそのデータは膨大になってしまう。その結果、モデリングにも時間がかかる上にレンダリングでも膨大な時間がか

かってしまう。属性マッピングを利用すると、この欄間は、一枚のポリゴン・データと一枚の絵からのみ生成することができる。

- b) リアリズムの向上：属性マッピングでは貼りたい画像の一部分の領域の光学属性、凹凸属性などを変更することができるため、複雑な物体表面の模様や材質感をすることができる。欄間の表現では部分的に光の透過率を変更することで格子を透かすことができた。
- c) 属性の変更が容易：属性マッピングでは物理属性が同一の属性領域に固有のインデックスが与えられており、そのインデックスがいろいろ属性をポイントしている。このため、属性の変更が生じてても簡単に変更が可能である。たとえば、欄間の透けた部分を鏡に変更することも簡単にできる。

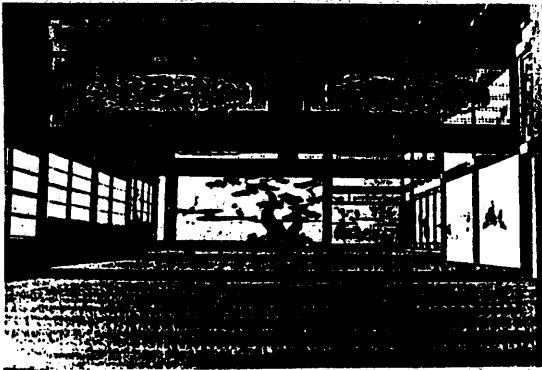


図7. 大広間

ここで、図8にRSPで扱っている面属性データの概略図を示す。属性データには幾何データに依存する属性と依存しない属性に分けられる。

幾何データに依存する属性で属性マッピングに関係するものとして写像データとスムーズ・シェーディング用がある。写像データは、モデリング座標系で記述された幾何データと写像を行うための仮想的な座標系（UV座標）との対応をとるためのパラメータである。スムーズ・シェーディング用のデータは、フォン・シェーディングなら頂点

とその法線ベクトルの対応関係を表している。一方、幾何データに依存しない属性として「属性領域」と「レンダリング属性」がある。属性領域の種類は、単一面単位、画素パターン単位、タイル・パターン単位、煉瓦パターン単位があり、その定義は、単一面単位を除いた領域は先のUV座標で行なわれる。各々属性単位から属性インデックスによりレンダリング属性が指し示めされている。レンダリング属性には、「色属性」、「光学属性」、「凹凸属性」がある。光学属性には、シェーディング・モデルや鏡面反射モデルのタイプおよびそれらにともなう光学係数のパラメータなどを指定する。現在、シェーディング・モデルとして、(1) Phong、(2) Whitted、(3) Hallを利用することができ、鏡面反射モデルとして、(1) Phong、(2) Blinn、(3) Torrance & Sparrowを利用することができる。

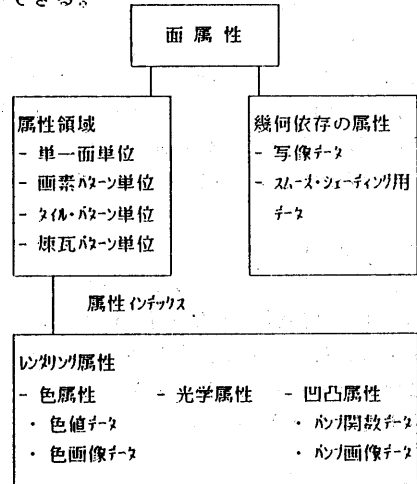


図8. RSPの面属性データ

5.4 アニメーション

CG画像は、1280×1024のサイズで生成し、NTSC規格のVTRで録画を行った。NTSC規格では1秒間に30フレームの画像が必要とするが、例えば1分のCGアニメーションを作ろうとすると1800枚の画像を生成しなければならない、制作時間の関係から15フレーム/秒

で制作することになった。

CGアニメーションでは視点位置、照明、視点および物体の移動などの演出方法により印象がかなり違ってくるので、満足できる映像を得るまでには何度もテスト版でチェックをしなければならなかった。まずおおまかな動きを決め、ポイントとなるフレームでの見え方、色、照明を調整し、次に動きのチェックを計算速度の速いワイヤフレームモデルで15フレーム/秒のアニメーションを作って確認した。なめらかな動き、スピード、加速度などのデータをフレームシート[図9]に書き込んでチェックした。

フレームシート	89/04/97										
タイトル	江戸城の石垣										
プロジェクト名	EDO-HON										
制作フレーム数	1										
制作機	多機編成/標準機										
制作速度	制作時=2.0/3.0/4.0/5.0/6.0/7.0/8.0/9.0/10.0/11.0/12.0/13.0/14.0/15.0										
制作フレーム	制作時=2.0/3.0/4.0/5.0/6.0/7.0/8.0/9.0/10.0/11.0/12.0/13.0/14.0/15.0										
フレーム	X座標	Y座標	Z座標	回転X	回転Y	回転Z	速度	加速度	位置	時間	
1	-50.0	-50.0	70.0	-110.0	300.0	50.0	51.5	1.2	90	110.0	1.3
2	0.0	-100.0	70.0	-110.0	300.0	50.0	150.7	1.2	137	110.0	5.2
3	100.0	0.0	70.0	-90.0	500.0	10.0	200.0	1.2	51	110.0	1.7
4	170.0	00.0	70.0	-90.0	500.0	10.0	400.4	1.2	412	110.0	12.7
5	35.0	310.0	12.0	-90.0	500.0	10.0	10.1	0.0	30	50.0	1.0
6	15.0	355.0	40.0	-90.0	500.0	10.0	102.5	0.0	171	50.0	5.7
7	50.0	321.0	20.0	-90.0	500.0	10.0	0.0	0.0	0	0.0	0.0
8							0.0	0.0	0	0.0	0.0
9											
0											

図9. フレームシート

6. CGの有効性と今後の問題点

今回のCGによる江戸城復元作業はNHKからの動機づけによって初めて成し遂げられたプロジェクトであった。このプロジェクトを通じて、実在しない歴史上重要な過去の建物を3次元的に復元し、視点の位置を変更することで自由にその建物を観察することを可能とするCGは、今後人文科学、歴史学、教育などの学術的な分野のみならず博物館などで展示されている絵図などを3次元的に表示することで一般の人達にもその時代を理解してもらうのに非常に有効であると言える。ただし、このような作業は一企業のみで成しえるものではなく、官民一体となって進めなければならない問題と言えるだろう。もちろん技術面でも問題

点は多く残されている。たとえば、

- (1) モデリング手法の効率化
 - (2) レンダリングの高速化
 - (3) 一般の人でも簡単に操作できるためのユーザ・インターフェース
 - (4) 時間変化を考えたデータ・ベース
- などは今後さらに改善を進めなければならないだろう。

おわりに

本プロジェクトの経験を生かして新に制作したCG映像「江戸」がSIGGRAPH'90のAnimation Screening Roomで採択された。また、春日局のプロジェクトがスタートしたと同時に研究を始めた「石垣パターンの生成法」は、NHKの放送やCG映像「江戸」に現れる江戸城の石垣パターンとしては間に合わなかったもののSIGGRAPH'90で宮田一乘氏により論文発表し、さらに「江戸城の石垣」のCGイメージが論文集の表紙に採用されたことをここに報告する。

最後に、本プロジェクトで時代考証を担当された東京工業大学の平井聖教授とNHK美術部の内藤政市氏ならびにモデリングおよびレンダリング作業で多大な努力をしていただいた関係各位に感謝いたします。

参考文献

- [1] 松林隆道, 他: 「建築CAEシステム COMPASS」, 日本建築学会, 第10回情報システム利用技術シンポジウム, 1988
- [2] 木原利幸, 他: 「設計ツール COMPASS」, 日本建築学会, 第12回情報システム利用技術シンポジウム, 1989
- [3] 「RSPレンダリング・サブルーチン・パッケージ ユーザ・ガイド 解説編」, 日本アイ・ビー・エム(株), N:SB18-0379, 1989
- [4] 青野雅樹: 「属性マッピングの方法論とその適用例」, グラフィックスとCAD研究会, 31-8, 1988