

Utah Teapot の CG 進展への貢献

西田 友是^{† ‡}

[†] 広島修道大学経済情報学部 〒731-3195 広島市安佐南区大塚東 1-1-1

[‡] UEI リサーチ 〒113-0034 東京都文京区湯島 3-1-3 MS ビル

E-mail: [†] nishita@shudo-u.ac.jp

あらまし コンピュータグラフィックスの分野では Utah teapot が有名である。これは曲面を含む代表的な形状モデルで、Newell teapot と呼ばれ、多くの論文の評価用に利用され、多くの CG 教科書でこのモデルを利用した CG 画像が紹介されている。著者も多くの論文でこの Utah teapot を利用させてもらった。このモデルとなった本物が展示されているシリコンバレーにある計算機歴史博物館を最近再訪した。その際展示で、計算機の進展、特に CG 技術の進展への Utah teapot の貢献度を再認識した。そこで、Utah teapot の CG 分野での利用についてサーベイしたので報告する。

キーワード Utah teapot、形状モデル、ベジエ曲面、テストベッド

Contribution of Utah Teapot to CG Evolution

Tomoyuki NISHITA^{† ‡}

[†] Faculty of Economic Sciences, Hiroshima Shudo University

1-1-1, Ozukahigashi, Asaminami-ku, Hiroshima 731-3195 Japan

[‡] UEI Research MS Bldg 3-13 Yushima, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-0034 Japan

E-mail: [†] nishita@shudo-u.ac.jp,

Abstract In computer graphics field, the geometric model of Utah teapot is a famous standard primitive. This is represented geometric model including curved surfaces, which is called as Newell teapot. The model is used for evaluation examples on research papers, and the CG images of this teapot are introduced on many text books. The author also used computer generated Utah teapot in our papers. Recently I have visited the Computer history museum in Silicon Valley. The original teapot and its CG images are displayed as a contributed model to the evolution of computers and CG technologies'. I recognized the contribution of the Utah teapot again, so I surveyed the papers which used Utah teapot, and would like to report the contribution of the Utah teapot to CG evolution.

Keyword Utah teapot, geometric model, Bezier surfaces, test bed

1. はじめに

著者は 5 年前、本学会の会誌において CG 界における Utah teapot について解説した [1]。新職場で新たに担当した計算機の入門の講義に必要な情報を得るため、2013 年に、シリコンバレーにある計算機博物館を再度訪ねた。そこで多くの歴史的な計算機と同様に Utah teapot が展示してあるのを見て、Utah teapot がいかに CG のみでなく計算機の進展に貢献したかを再認識した。そうしたことから、本稿では Utah teapot の利用状況や貢献についてサーベイ・分析したので、報告する次第です。

なぜ Utah teapot が歴史的に重要なかは下記の点があげ

られる。

(1) Utah teapot は、CG 研究の test bed, symbol, mascot、標準の 3 次元形状モデルである。

(2) 曲面のモデルの代表例である。

(3) OpenGL などの多くのグラフィックス・ライブラリ (AutoCAD、Lightwave 3D、POV-Ray、OpenGL、Direct3D、3D Studio Max など) の標準部品として準備されている。

(4) 権威ある学会 SIGGRAPH のロゴマークに使用された。

(5) 形状データの測定に利用された本物とともに多

くのCG作品が計算機歴史博物館に展示されている (CGの進展に貢献した3Dモデルとして展示)。

Utah teapotの形状モデルは1987年以来、CGのトップコンファレンス (SIGGRAPH, EUROGRAPHICS)での論文に利用されてきた。著者も、1990年のSIGGRAPH論文[7]以後40近い論文で使用した。

多くの論文にユタティーポットを利用したCG画像があるが、著作権の関係もあり多くは掲載できないので、著者の研究室での画像例を主に使い説明する。

2. 形状モデルとしてユタティーポットの意義

ユタティーポットの形状モデルとしての意義は次の点である。

- ・誰もすぐに認識できる典型的な曲面形状である。
- ・複雑なトポロジーである。
- ・セルフシャドウ (形状が凸でないため自分自身に影を落とす)を生じるので照明の問題にも適切である。
- ・凸の部分と凹の部分を持つ曲面 (特にサドルポイントも含む) である。
- ・曲面なので隠面消去問題が複雑である。
- ・Bezier曲面としてティーポットを表現する際、制御点のみで表現できメモリが少なく済む。

すなわち、ティーポットは丸みを帯び、くびれを含み、取っ手には穴が開いている (数学的には0よりも大きな種数を持っている)。また、自身に影を投影でき、また複雑な表面テクスチャなしに見た目もよく表示できる。

一方、問題もある。最初は底のデータがなく追加されたものである (1987年に、底を定義する4つのパッチをFrank Crowが追加)。

- ・ふたとボディの間は隙間がある。
- ・注ぎ口はボディに貫通 (侵入) しており、交差曲線の解析解は解明されてない。
- ・Bezier曲面を組み合わせたものなので、上から見た際、ボディーやふたは正確には円になっていない。

このポットに水を入れると水がもれる欠陥品である。そのおかげで、曲面同士の交線を求める問題などの新たな論文を創出する要因となった。

以上のような特性を持ち合わせた3Dモデルは、CGの実験を行うために理想的であり、多くのCG研究者たちが必要としていた。

3. ユタ大学および博物館における歴史

3.1 Newell とティーポット

英国から留学生であるマーティン・ニューウェル (Martin Newell) は、グラフィックス・プログラミングのパイオニアのひとりである。1975年当時、彼は研究で使う数学的モデルとして、適度に単純で親しみやすい物体を求めている。それで1974年に奥さんが近くのスーパー (ZCMI: ユタ州ソルトレイクシティにあるデパート) で購入したポット (メリタ社製) を利用した。NewellのOriginal Teapotは、初めて彼の博士論文のFigure 29で発表された[2]。図1はNewellが作成した形状データである。



図1 Newellの作成した形状データ

Newellがティーポットのデータ (3次元座標の組) を公開したため、他のCG研究者によってこのデータがたちまち使われるようになった

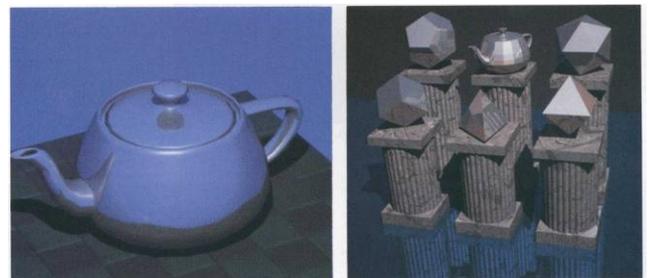


図2 初期に発表されたティーポットの表示例

1987年、Jim Arvo と David Kirk (SIGGRAPHアチーブメントアワード受賞者) は、レイトレーシングに関する論文 "Fast Ray Tracing by Ray Classification" をSIGGRAPHで発表した[3]。そのFigure 8として掲げられた「プラトンの立体」と題された画像には (図2右図参照)、6つの石柱が描かれ、その上に5つの正多面体 (正四面体、正六面体、正八面体、正十二面体、正二十面体) と、ティーポットが乗せられている。この図のティーポットは *Teapotahedron* (正ティーポット体) と呼ばれ、画像はいくつかの本や学術雑誌の表紙を飾った。SIGGRAPH1987プロシーディングスの裏表紙にも掲載されたが、これが著者の作品 (煙の表示)

の隣に掲載されたのも灌漑である。ジム・ブリン (SIGGRAPH アチーブメントアワード受賞者) が Teapotahedron について、「6 番めの正多面体が発見された」と IEEE の学会誌 CG&A の 87 年 11 月号のコラムにジョークとして書いた。ジム・ブリンのコラムについては単行本に再録されており、さらに、この本は『Jim Blinn's Corner 日本語版』として西田らの訳で出版されている[4]。

より進化したグラフィックス技術を試すためのサンプルとして、ティーポットは今でも使われ続けている。ワイヤフレーム表示、スムーズシェーディング、テクスチャマッピング、パンプマッピング、半透明表示、毛状のものなど様々な技法の効果を表示する標準形状モデルとなった。

3.2 計算機歴史博物館と Utah Teapot

当初本物のティーポットはユタ大学にあったが、1984 年にボストンの計算機博物館に寄贈され、1990 年まで展示されていた。しかし、この計算機博物館が破産したため、1990 年からカリフォルニア州のマウンテンビューにある計算機歴史博物館(Computer History Museum)に展示された。このポットは「コンピュータグラフィックスのレンダリングに使われたティーポット」として展示され、さらに同館のカタログに載っている。また、ニューエルが本物をスケッチして、Bezier 曲面で表現した際のメモも保管されている[5]。図 3 に筆者が訪問した際のティーポットを示す(左は初期の展示、右は 2013 年での展示)。最初は単に網のラックの上に展示されていたが、最近はガラス箱の中に展示され、ティーポットの歴史の動画も流すなど扱いが向上していた。



図 3 計算機歴史博物館に展示されてる
ティーポット

いまでは、ユタ大学の卒業生用に NEWS Letter のタイトルは「The Utah teapot」が発刊されている。それほど、ユタ大学にもこのティーポットは重要なものになっている。また、SIGGRAPH98 では紙で作る Utah teapot の模型の紙型も配布した[6]。

3.3 ピクサー社とレンダーマン walking teapot

ユタ大の Sutherland の研究室を出た、Ed. Cutmall (SIGGRAPH クーンズ賞受賞者) がピクサー社を設立した。その意味で、ピクサー社にとっては Utah teapot は重要である。したがって、同社のいくつかの作品 (ト

イストーリーなど) には目立たないけどこの Utah teapot が出てきている。また、この 10 年ピクサー社は SIGGRAPH 会場で、レンダーマン walking teapot (図 4 参照) を配布している (毎日 1000 個)。これを得るため、SIGGRAPH 会場では長蛇の列が続き、名物になっている (著者も何回か並んだが、2 時間以上並んでも品切れになったこともある)。図 4 左は計算機博物館に展示されているもので、右は著者の保有のものである。



図 4 Renderman walking teapot

この Walking teapot の競技会も開催されており、Walking teapot を持参し南極点で写真を撮った人もある。(人気があり競売で高値になっている噂もあります。) ユーチューブでも「Amazing Computer Graphics from the Utah Teapot to Pixar」として、ティーポットとピクサー社の関係を見ることが出来る[7]。また本学会会長の近藤先生も集めておられます。

4. 著者と Utah Teapot とのかかわり

1986 年にユタ大学を訪問した際、廊下に teapot の CG 画像が展示されているのを見たのが最初である。その後、1987 年にボストンでの学会の際、幸い計算機博物館で本物の teapot を発見した。



図 5 Bezier Clipping 法による
レイトレーシング

1989 年に 留学先のユタ州の大学 B Y U の Sederberg 博士から teapot のデータを頂き、そのデータも利用し、Bezier 曲面のレイトレーシング法を 1990 年に SIGGRAPH で発表した[8]、以後、曲面のレンダリング、照明問題など多数の論文にも teapot モデルを利用した。

2006 年に、著者はサバティカルでカリフォルニア大に滞在するチャンスがあった。その際、シリコンバレーにある計算機歴史博物館の Utah teapot の展示を見学した。さらに 2009 年には、本物を購入したソルトレーク

シティーの店 ZCMI の訪問を試みましたが、その 2 年前に店は廃業したようでした。

最近、展示が変更されたというので計算機歴史博物館を 2013 年に再訪し、展示がより本格的になっており、teapot の偉大さを認識するに至りました。

また、1985 年以来、著者は世界中の実物のティーポットを収集し、今では 100 点以上のコレクションになっており、ネットに公開しています[9]。

5. CG教材としての利用

CGに関連する国内外の書籍において、ティーポットを材料に種々の技法を解説してある。国内ではCGARTS 協会の標準テキストブック[10]においては、形状モデル、マッピングの例とし、本学会編さんの書籍「ビジュアルコンピューティング - 3次元CGによる画像生成-」ではNPR(Non Photorealistic Rendering)やバンプマッピングの例として紹介してある[11]。

海外においては、SIGGRAPH で発売した教育用スライドにレンダリングの解説に使用された。前述のプリン著書[4]においては、ふたやボディなどの各部件のBezier 曲線の制御点が紹介されている。



図 6 enchant.js によるティーポット表示

書籍[12] に代表されるものでは(他に書籍[13,14,15]でも)、制御多角形の描画、変形の例など OpenGL の解説書でマッピングの例などに利用されている。

また、講義用としては、Sederberg 教授の講義資料(2曲面の連続性)の例としても利用している。なお、著者は、彼の講義に半年間出席した経験がある。

筆者は、遠隔講義用に、100 ページ程度の教科書を公開しており、その中でもポットを利用してCG技術を解説している[16]。さらに体験学習をするため Java アプレットを使用した教材も準備し、WEB 上でポットをリアルタイム表示できるようにしている[17]。Java はバージョンがいろいろありブラウザによっては動作できない問題も生じる。そこで最近の携帯端末・スマートフォンでも動作できるように HTML5 と Java スクリプトに対応したゲームエンジンである enchant.js が UEI 社により提供されている[18]。それを使用して、

著者はティーポットをレンダリングできるプログラムを幾つか公開している[19]。図 6 のように、ブラウザ上に、画像表示部分とプログラム部分が同時表示されるので、プログラミングの勉強にも有用である。

6. UtahTeapot の研究論文への利用

多くの論文で Utah Teapot は利用されているが、分野別に列記したく思います。特にトップコンファレンスの論文でかなり多く利用されており、論文名までを書くスペースがないので、すべてを紹介はできない。ここでは、学会、年度および第一著者を書く程度とする。SIGGRAPH は SIG97 のように、SIGGRAPH ASIA は SIGA, EUROGRAPHICS は EG のように略記することにする。なお、本稿では、30 年以上分のトップコンファレンスの論文から Utah Teapot を探した結果の一部を紹介するものである。

6.1 形状モデリングへの利用

形状モデリングでは、形状の表現形式、形状の分割表現、形状の編集・融合、形状の変形、形状作成などが主要要素技術であり、下記の論文が Utah Teapot を利用している。

形状変形； ある形状から他の形状に変化できるポリウムモーフィング (SIG92, J. Huges)

形状の再分割；再分割曲面 (SIG94, H. Hope)、 GPU を用いた曲面の適応的再分割 (SIG07, K. Zou)、 リアルタイムの適応的再分割 (SIGA08, A. Pateny)

形状の編集； 曲面の編集(SIG2000, K. Museth)、 ポアソンベースの形状の編集(SIG04, Y. Yu)、ポリゴンメッシュの圧縮(SIG2000, M. Isenberg)

形状の解析・変換； 水漏れしない NURBS への変換 (SIG08, T.Sederberg)、 モース関数の抽出(SIG04, X. Ni)

形状の加工； G バッファを使ってNC加工したポットの作成 (SIG91,T. Saito) [20]、図 7 に加工の過程を示す論文中の写真画像と、制作されたものの写真(筆者が頂いたもの)を示す。曲面形状を包含する袋の作成(PG08, Y. Igarashi)

6.2 隠面消去などレンダリングへの利用

レンダリングは、レイトレーシングなどの隠面消去、照明モデル(光源のタイプ、面の反射特性、散乱、影)、テクスチャなどの表面の表現に分類できる。

隠面消去； メッシュで表現されたティーポットのレイトレーシング (SIG87, J. Arvo)、表示処理システム G R A P E (SIG87, T. Nadus)、曲面の再分割を含むレイトレーシング(SIG87, J. Snyder)、前進差分法によるレンダリング(SIG87, S. Lien)、 双 3 次曲面としてのレンダリング (SIG87, M. Shaniz)、 エリアシングのないレイトレーシング(SIG89, J. Painter)、曲面をメッシ

に分割しなくて高精度にレイトレーシングする方法 (SIG90, T. Nishita) (Bezier Clipping 法とよばれた[7])。Bezier Clipping 法を利用した、曲面の隠線消去法 (CGI92, T. Nishita)、スキャンライン法 (CGI93, T. Nishita) に発展した。プログラマブルシェーダーによるレンダリング法 (SIG2000) も開発された。

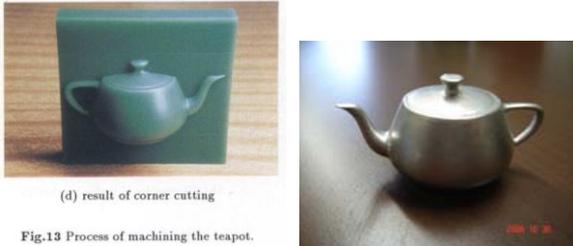


図 7 GバッファによるNC加工



図 8 散乱光の表示、相互反射光の計算例

照明効果やBRDF ; 波長を考慮した表面の表示法 (SIG94, J. Kondec)、表面の水滴(PG96, K. Kaneda)、水中のポットに生じる光跡やコーステックの表現 (PG01, T. Nishita). 仮想の光源で照射されたポットのレンダリング(SIG97, H. Walter)、メトロポリス法を用いた対局照明 (SIG97, E. Veach)、透明なポットによるコーステックの表示(K. Iwasaki)、ポット間の相互反射も考慮したレンダリング (EGSR07, K. Iwasaki)、因数分解表現した BRDF による照明計算 (SIG02, L. Latta)、鏡面調和関数を用いた PRT (SIG, Y. Tsai)、BRDF のリアルタイム編集(SIG, A. Artzi)、物体中の散乱効果 (SIG09, D. Lanman)、表面下散乱を考慮した表現 (IIEJ09, M. Sinya)、散乱を考慮した半透明物体 (SIG, H. Jensen)、プログラマブルシェーディング(SIG00, M. Peercy)、データ駆動反射モデル (SIG03, W. Matsusik)、さらに相互反射も計算できる方法 (EG93, T. Nishira) [21]。PRT(SIG02, P. Sloan), 動的に変化する反射特性 (SIGA09, J. Wangi)、環境光源による影の計算 (CW10, Iwasaki) ,インタラクティブ照明 (SIGA12, K. Iwasaki) [22](図 9 参照). 最近では,環境光源による布の表示 (EG14, K. Iwasaki)[23]. 図 8 左はエアシングのない散乱光の表示(CGI07, Imagine),右は効率的な相互反射計算 (Pg07, Y. YUe)

表面の処理 ; テクスチャー表現 (SIG84.), レリーフマッピング (SIG05, F. Policarpo)



図 9 環境光による照射

6.3. NPR その他への利用

NPR (非写実表現) は絵画風のスタイルの画像を得る方法であり。これは鉛筆やペンを利用する方法から、油絵風な表現法がある。

ペンアンドインク表現; 図 10 のようにペン画風にポットを表現した(GCAD01, Haga)。また、ラインアートとして鏡面反射部分までリアルに表現する方法 (SIGA08, Y. Kim)



図 10 ペンアンドインクスタイル

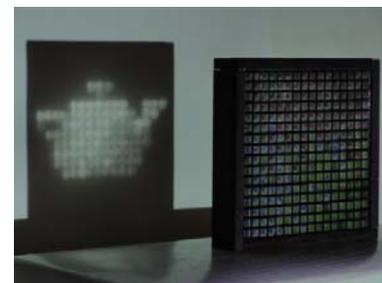


図 11 投影されたピクセルアート

繰り返しパターン; 同じ画像を充てんするエッチャライズスの例として、ポットを敷き詰める方法 (SIG00, C. Kaplan)。

その他 ; ランダムドットを利用したステレオ表示の例(CW08, Tsuda)、屈折光を利用しピクセルアートを表現(EG12, Y. Yue) [24]。図 11 に、アクリルのピースを組み合わせ、屈折光を利用した所望のピクセルパターン(この例ではティーポット)を壁に表示する例を示す。

7. おわりに

ほぼ 40 年前に留学生の奥さんが購入したティーポットを形状モデルとして使ったことがきっかけで、多くの論文で使われるのみでなく、教材としても広く使われ、グラフィックライブラリでも標準的に使われ、

CG 研究の進展に大きく貢献した。著者の場合、形状変形、物体間相互反射光、コースティック(集光効果)、NPR 画像 (ペンアンドインク風、油絵風)、大気散乱光の遮蔽物体、散乱・拡散効果 (表面下多重散乱) などの多くの計算例に Utah Teapot を使用した(表 1 参照)。このように Utah Teapot は著者の研究論文に多大に貢献した。

本稿で名前を挙げた Catmull を始め CG 研究者は世界を代表する人で、多くは ACM SIGGRAPH から何らかの賞を受賞されているほどである。Utah Teapot を使いこなすというのも、論文採択の重要な要素であろう。

Utah Teapot は CG コミュニティを結びつけ、Utah Teapot に関わることは何かいいこと(成果を得る)があると信じている。

文 献

[1] 西田、「ティーポット・コレクション」画像電子学会誌, Vol.38, No.6, pp.909-912., 2009

[2] <http://search.proquest.com/docview/302791043>

[3] Jim Arvo, David Kirk, "Fast Ray Tracing by Ray Classification", SIGGRAPH 1987

[4] 西田,三浦監訳,「Jim Blinn's Corner 日本語版(1) A Trip Down the Graphics Pipeline」,オーム社,2004-4

[5] <http://www.computerhistory.org/revolution/computer-graphics-music-and-art/15/206>

[6] <http://www.siggraph.org/s98/conference/teapot/>

[7] <http://youtu.be/iITa-uyx-xA>

[8] T. Nishita, T. Sederberg, M. Kakimoto, "Ray Tracing Trimmed Rational Surface Patches," Computer Graphics, Vol.24, No.4, 1990-8, pp.337-345

[9] <http://nishitalab.org/user/nis/ourworks/tpot/tpot.htm>

[10] 画像情報教育振興会 (CGARTS),「コンピュータグラフィックス技術系 CG 標準テキスト 改定版」, 1995-4

[11] 西田・近藤・藤代監修「ビジュアルコンピューティング - 3次元CGによる画像生成」, 東京電機大出版局, 2006-9

[12] A.Watt, "3D Computer Graphics 3rd Ed." Addison Wesley, 2000

[13] A.Watt, M.Watt, "Advanced Animation and Rendering Techniques", Addison Wseley, 1992:

[14] Foly, Van Dam, Feiner, Huges, "Computer Graphics Principles and Practice 2nd ed.", Addison-Wesley Pub. Co., 1994

[15] N. Kurachi, "The Magic of Computer Graphics: Landmarks in Rendering" A K Peters/CRC Press, 2011-7

[16] <http://alpha.shudo-u.ac.jp/~nishita/CG/cgtxt/index2.htm>

[17] <http://nishitalab.org/user/nis/ourworks/tpot/tpotjava/pot.html>

[18] <http://enchantjs.com/ja/>

[19] <http://nishitalab.org/user/nis/ourworks/tpot/enchantjs.htm>

[20] T. Saito, T. Takahashi "Comprehensible Rendering of 3-D Shapes", Computer Graphics, Vol.24, No.4, 1990

[21] T. Nishita, E. Nakamae, "A New Radiosity Approach Using Area Sampling for Parametric Patches," Computer Graphics Forum, Vol.12, No.3, 1993, pp.385-393

[22] K. Iwasaki, Y. Dobashi, T. Nishita, "A Fast Rendering Method for Refractive and Reflective Caustics Due to Water Surfaces," Computer Graphics Forum, Vol.23, No.3, 2003-9, pp.601-609

[23] K. Iwasaki, K. Mizutani, Y. Dobashi, T. Nishita, "Interactive Cloth Rendering of Microcylinder Appearance Model under Environment Lighting," Computer Graphics Forum, (Proc. of Eurographics2014)(to be appear),

[24] Y. Yue, K. Iwasaki, B.Y. Chen, Y. Dobashi, T. Nishita, "Pixel Art with Refracted Light by Rearrangeable Sticks" Computer Graphics Forum (Proc. of Eurographics2012), pp.575-582, 2012-5

表 1 著者の論文でのティーポットの計算例

