G-13

B-スプライン表現された陰関数曲面の高効率圧縮

High rate compression for the implicit surface using B-spline

中野　哲寛†　　仲田　晋‡
Akihiro Nakano　Susumu Nakata

Abstract In this study, a new compression method for implicit surface using B-Spline is proposed. In our approach, implicit surface using B-Spline get the high and efficient compression rate through shape of the three-dimensional form applying lossy compression method.

1. 序論

近年レーザー計測などの計測によって文化財を保存する取り組みが行われている．コンピュータグラフィックス(以下 CG)によって実際に計測された文化財を表現する研究[1]が行われており，代表的な手法としてポリゴンモデルを用いて 3 次元形状モデルを表現する手法が挙げられる．しかしポリゴンモデルを用いた手法では，計測データ中に凹凸や曲面形状を含む場合正確な形状を表現することが難しいという欠点を含んでいた．これにより問題解決のため陰関数曲面を用いて 3 次元形状モデルを表現する手法[2][3]が用いられるようになった．実際に陰関数曲面を用いて 3 次元形状モデルを表現するにあたり，よりなめらかで正確な 3 次元形状モデルを生成するための研究が行われている．

近年ではよりなめらかに 3 次元形状モデルを表現するための手法として,B-スプライン表現された陰関数曲面によって 3 次元形状モデルを生成する手法[4][5][6]が提案されている．この手法によって陰関数曲面を用いた手法よりもなめらかな形状を表現することが可能となった．その一方で,B-スプライン表現された陰関数曲面を用いて 3 次元形状モデルを表現するためには，多くのデータ量を必要とするためインターネットなどの通信を用いたデータの受け渡しが，非常に困難となった．

そのため陰関数曲面で表現された 3 次元形状モデルに対してデータ圧縮を行うことによって，データ量を小さくするためのデータ圧縮の手法が提案されている．陰関数曲面に対する圧縮は行われていたが，ポリゴンモデルに対して圧縮を行う手法がより一般的であった．なぜなら陰関数曲面で表現していた 3 次元形状モデルに対して，マーチングキューブ法[7]を用いることでポリゴンメッシュに変換できるため，ポリゴンデータに対しての圧縮[8][9]が主流とされてきたからであった．

もう一方陰関数曲面に対する圧縮手法として Laney ら[10]の手法や中島ら[11]の手法があげられる．これらの手法では陰関数曲面の各係数に対して圧縮を行っているため，陰関数曲面として 3 次元形状モデルを表現できるという強みを持っている．これらの手法の共通点としてあげられるのがすべての係数情報に対して均一のデータ圧縮を行っていることであった．この手法では 3 次元形状モデルの形成に不要と必要な情報を区別することなくデータ圧縮を行っているため，陰関数曲面の生成の際に不要な情報も保存されていた．しかし B-スプライン表現された陰関数曲面ではより多くのデータを必要とすることや，陰関数曲面にとって曲面付近のデータは，曲面から離れた箇所でのデータよりも 3 次元形状の形成に大きな役割を果たすということから，全てのデータに対して同等の処理を行う手法では，B-スプライン表現された陰関数曲面に対するデータ圧縮としては不十分であることがあげられる．

そのため本研究では,B-スプライン表現された陰関数曲面の高効率な圧縮によるデータ圧縮を提案する．この手法では，陰関数曲面で表現されている 3 次元形状モデルに対して圧縮を行う際に現存している Laney ら[10]や中島ら[11]の手法とは違い,3 次元形状モデルを形成する際に発生する不要となる曲面から離れた箇所と必要な曲面付近の 2 か所に分けることによって，不要となる曲面から離れた箇所に対してデータの削減を行い，必要となる曲面付近の箇所に対してはデータをしっかりと保存することで高効率な圧縮を達成している．

2. 陰関数曲面における曲面情報

B-スプライン表現された陰関数曲面のデータ圧縮を行う際にどのような特徴を対象の陰関数曲面が持っているのかを説明する．

2.1 B-スプライン表現された陰関数曲面

本研究では,B-スプライン表現された陰関数曲面を対象にしており $f(\boldsymbol{x})=0$ で 3 次元形状モデルは表現されている．この時 $f(\boldsymbol{x})$ の値は以下の式によって表現されている．

$$f(\boldsymbol{x})=\sum_{i=0}^{L-1}\sum_{j=0}^{M-1}\sum_{k=0}^{N-1}c_{ijk}\varphi_i(x)\varphi_j(y)\varphi_k(z)$$

$$\varphi_i(t)=\begin{cases}\frac{1}{2}t^2+(-i+1)t+\frac{1}{2}(i-1)^2 & (i-1\le t<i)\\ -t^2+(2i+1)t+\left(-i^2-i+\frac{1}{2}\right) & (i\le t<i+1)\\ \frac{1}{2}t^2+(-i-2)t+\frac{1}{2}(i+2)^2 & (i+1\le t<i+2)\\ 0 & (otherwise)\end{cases}$$

上記の式中の i,j,k の各値がそれぞれ x,y,z 軸上の位置情報を表現している．また $\varphi_i(x),\varphi_j(y),\varphi_k(z)$ はそれぞれ 3 次 B-スプラインの基底の値である．また各 x,y,z 軸の最大値がそれぞれ L,M,N であることより，B-スプライン表現された陰関数曲面は各軸に対してそれぞれ L,M,N 分割した結果が保存されていることになる．このように分割した 1 つの格子をセルと呼び，セルごとに値が保存されていることになり各セルの値は c_{ijk} で表現されている．図 1 では実際の B-スプライン表現された陰関数曲面の値である c_{ijk} の分布を色で表現している． また B-スプライン表現された陰関数曲面がセルを持つことの特徴として，セルごとに独立した値を持っていることがあげられる．実際に B-スプライン表現された陰関数曲面は各セルの値の集合によって構成されているため，隣接したセル同士の値が連動している場合では一か所のセルに対して大きな変化を

† 京都工芸繊維大学大学院, Kyoto Institute of Technology

‡ 立命館大学, Ritsumeikan University

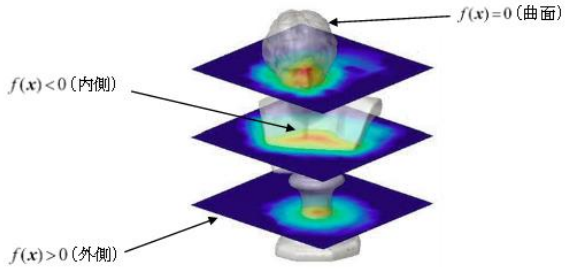


図 1 B-スプライン表現された陰関数曲面の例

加えるとまわりのセルも同様に変化してしまう．しかし隣接したセル同士の値が連動していない場合では，一か所のセルの値に対して大きな変化を与えても隣接したセルの値に変化が起こらないため，重要度に応じて局所的に変化を与えることができるため局所的なデータ削減をすることができる．このような違いがあり今回扱う B-スプライン表現された陰関数曲面では，セルごとに独立した値を保持しているため局所的なデータの削減や保存を行うことができる．

2.2 曲面判定

B-スプライン表現された陰関数曲面における特徴として，位置情報や各セルが独立した値を保持しているのが大きな特徴であった．位置情報を知ることができるため各セルの値を調べることで，そのセルの値が陰関数曲面付近にあるかどうかを判定することができる．これにより位置情報に応じてデータ削減やデータの保存をすることができる．実際に 3 次元形状モデルを構成する際は陰関数曲面の値である $f(\boldsymbol{x})=0$ となる部分に曲面が構成されるため，それよりも $f(\boldsymbol{x})$ の値が離れた箇所にあるデータは曲面形成の際に不要なデータである．さらに曲面から離れた箇所のデータもすべて $f(\boldsymbol{x})$ であるために，絶対値の大きな値として保存されている．これらの値をそのまま保存してしまうと大きなデータの損失になってしまうため，これらのデータを積極的に削減し曲面付近のデータをなるべく圧縮せずに保存することで，曲面劣化のおこりにくい圧縮を達成している．このような局所的な変化を与えることが出来るのは，セルごとに独立した値を保持しているからである．

またこのように曲面からの距離に応じたデータ圧縮を行うとデータを復元する際には，各セルにどのような処理を施したのかを記憶しておく必要がある．しかし複数の圧縮率を記憶しておくようなデータをつくる必要があり，このようなデータは大きなデータ量を要するため保存の際のデータ量が大きくなってしまう．そのため本手法では，距離に応じた圧縮率を記憶しておくようなデータを 2 値データとして保存することでこのような問題を解決している．2 値データとして曲面付近のデータかどうかを判定するにあたり，今回は陰関数局面の値を保有している各セルの値に基づいた閾値 α を設定している．実際に比較をする各セルの値が α を含む小さな値の場合は曲面付近のデータとして扱い，α よりも大きな値の場合は曲面から離れた箇所とすることで，陰関数曲面の曲面を形成する部分である $f(\boldsymbol{x})=0$ から十分に曲面から離れた箇所かどうかを判定することができる．このような方法をとることで，保存するに複数の圧縮率を記憶しておくことがなくデータ量を抑えられた圧縮手法を提案している．

3. 適切な量子化値の提案

3.1 曲面判定

陰関数曲面に対する圧縮として周波数解析の 1 種であるウェーブレット変換を用いた手法[10][11]があげられる．これらの手法では，どちらも n 次 B-スプラインウェーブレット変換を用いた陰関数曲面に対する圧縮を行っていた．本手法ではハールウェーブレット変換を用いたデータ圧縮を行っている．ウェーブレット変換の詳しい説明は[12][13][14]に任すが大きな違いは，局所的な変化を与えられるかどうかである．実際に n 次 B-スプラインウェーブレット変換では，圧縮対象である陰関数曲面の最大の特徴のなめらかさを損なわないようなデータ圧縮を行うことができる．これは周囲の値に対しても変換を行っているためであり，局所的な変化を与えることを苦手としている変換であるということができる．本手法で用いた B-スプライン表現された陰関数曲面に対しては，セルごとに独立した値を持っているため，高効率な圧縮を行う場合には n 次 B-スプライン変換が十分に適した手法とはいえない．一方ハールウェーブレット変換では局所的な変化を与えることができるが，周りの点に対して変換を行わないため陰関数曲面のなめらかさを失ってしまう変換であった．しかし本手法では B-スプライン表現された陰関数曲面に対して変換を行うため，曲面のなめらかさについてはセルの特性や B-スプライン基底によって補正されることからも，陰関数曲面の特性であるなめらかさが失われにくいといえる．そのため局所的なデータ変換が行えるハールウェーブレット変換を用いて今回はデータ圧縮を行っている．

3.2 線形量子化について

本手法では,Laney ら[10]や中島ら[11]での手法と同様に周波数変換された周波数ごとに量子化を行っている．ここで紹介している量子化とは，データの情報量であるビット数を各周波数成分に応じて制限する手法である．これにより近似された値を保存することができ，制限されたデータ量で 3 次元形状モデルを保存することができるというものであった．本手法ではこの量子化の際の手法として線形量子化を用いて圧縮を行っている．線形量子化は，各セルに値に対してウェーブレット変換した各周波数成分の値に対して行い，これらの値を量子化する際にそれぞれ値を近似した値に変換してデータを保存している．実際に量子化される各周波数成分は以下のように分けられる．

$$d_{ijk}^{LLH}, d_{ijk}^{LHL}, d_{ijk}^{LHL}, d_{ijk}^{HLL}, d_{ijk}^{HLH}, d_{ijk}^{HHL}, d_{ijk}^{HHH}$$

上記の各値は各セルにおける周波数成分の値を示しおり，図 2 のようにこれらの周波数成分に対して量子化の際に保存する情報量を決定する．その際に最大値と最小値を 0 から 2 の n 乗を示す n ビットで表現するため四捨五入によって各周波数成分におけるデータ量を制限している．図 2 では各軸にそれぞれ低周波を含んだ変数に 12bit を与え，各軸にそれぞれ高周波成分を含んだ変数に 4bit を与えており，その他の周波数成分に対しては 8bit ずつ与えるような量子化を行っている．

実際に線形量子化と非線形量子化の違いは，このような四捨五入を線形の変換で行うのかまた，非線形量子化ではデータ集中している箇所に対して細かく区切った区

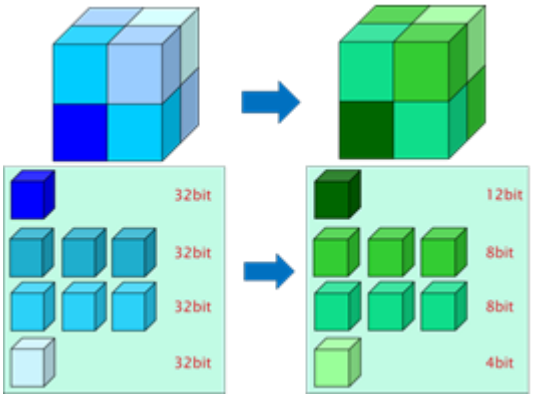


図 2 量子化された陰関数曲面の値

間で量子化を行い，データが疎な箇所には区切るべき区間を粗く取ることで，量子化の際に発生する誤差が大きな値にならないような工夫を中島ら[11]の手法では行っている．本手法では，非線形量子化を行わず線形量子化をおこなっている．これは本手法では量子化については対象としていないため，線形量子化を用いた圧縮を行っている．

3.3 量子化値の自動設定

量子化を用いた陰関数曲面に対する圧縮手法として Laney ら[10]や中島ら[11]の手法が挙げられる．実際にこれらの手法では経験に基づいて各周波数成分における量子化値を決めていたが，中島ら[11]や Gabriel ら[15]の論文ではこのように経験で基づいて決める手法では，各 3 次元形状モデルに適切な量子化値を設定することがユーザ側に知識が必要なことや，各 3 次元形状モデルによって適切な量子化値の設定が困難であることがあげられている．そのため本手法では量子化の際に各 3 次元形状モデルに対して適切な量子化値を設定できるような量子化値の自動設定法を提案している．このような量子化値の自動設定を行ううえで重要となるのは，各モデルに適した量子化値を設定するためにどのような手順を踏むのかである．

本手法では量子化を行い復元されたセルの値と量子化前の各セルの陰関数曲面の値を調べることによって達成している．最初に陰関数曲面の値を調べるにあたり，量子化復元後の各周波数成分の値と量子化前の各周波数成分の値を比べている．

$$E_m = MAX\left\{\sum_{i=0}^{L-1}\sum_{j=0}^{M-1}\sum_{k=0}^{N-1}\left(\left|c_{ijk}\right|-\left|c'_{ijk}\right|\right)\right\} \quad (n=0,1,\ldots,7)$$

上記の式に当てはめて図 3 のように一定の各周波数成分の量子化値の集合を量子化テーブルと呼ばれる．これらの量子化テーブルの値を一定値に定めており，この一定値の量子化テーブルの量子化値を周波数成分ごとに 1bit 減らすことで，各周波数成分の量子化の際の重要度を検出している．

$$L_m = \frac{E_m}{\sum_{n=0}^{7} E_n}$$

各周波数成分における重要度が決定したのちに、上記の式に従って図 4 のように検出された誤差値の大きさに比例した bit 数で情報を保存できるようになっており，さらにユーザが指定したデータ量に保存できるように各周波数成分における量子化テーブルの bit 数の総和を変化させることで，量子化した際に起こる量子化誤差がなるべく少ないような量子化テーブルが自動を決定している．これによりユーザ側が保存したいデータ量に応じて各 3 次元形状モデルの量子化テーブルが決定されることになる．

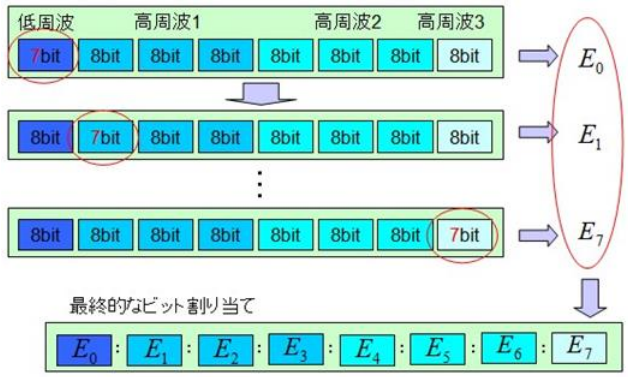


図 3 量子化時の自動決定の概念

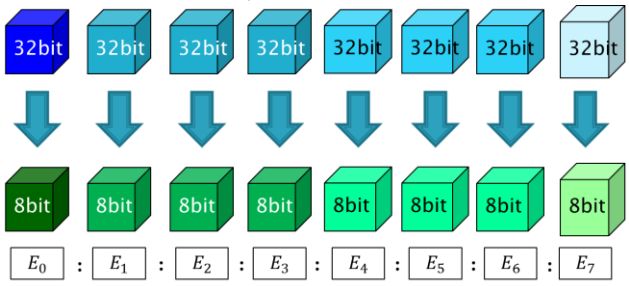


図 4 量子化誤差による自動決定の概念

4. 結果

今回実験対象となる 3 次元形状モデルは，実際に点群データとして計測された符号付距離場をもつ 3 次元形状モデルである haydn,lucy の 2 種類に対して B-スプライン変換を行うことで，陰関数曲面形状モデルへと変換したモデルを対象にしている．また Nakata ら[6]の手法により B-スプライン表現された陰関数曲面を用いた 3 次元形状モデルに対してデータ圧縮を行い，マーチングキューブ法によってポリゴンモデルとして表示している．また B-スプライン表現された陰関数曲面の各軸におけるセルの分割数は 100,128,200 の 3 種類を用いており，元データはそれぞれ 4000,8400,32000KB となっている．

また本手法では圧縮後の形状劣化の度合いは現存手法のデータ量の差と形状劣化の度合いを目視によって比較しており，従来法を用いた際に保存されるデータは量子化された各周波数成分の値と量子化テーブルに対して，提案手法では量子化された各周波数成分に加えて曲面からの距離に応じた圧縮度合いを示した位置情報を 2 値化したものと曲面からの距離に応じた 2 種類の量子化テーブルを保存している．図 5,6 に圧縮対象となる 3 次元形状モデルを表現しており，表 1 に従来法と提案手法による圧縮後のデータ量(KB)の違いを示している．また図 7,8 に従来法と提案手法による圧縮の結果を示す．

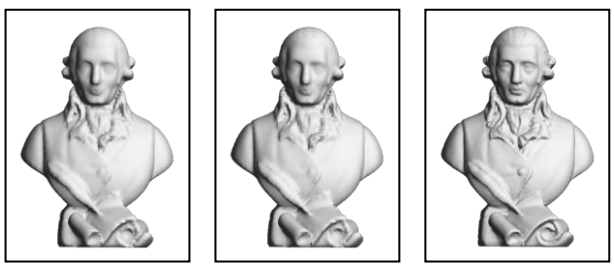


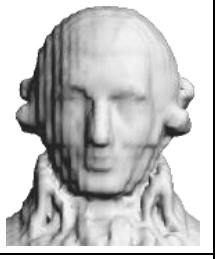
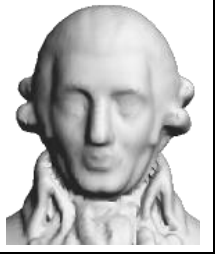
図 5 haydn(分割数 左:100 中央:128 右:200)



図 6 lucy(分割数 左:100 中央:128 右:200)

表 1:データ圧縮後のデータ量

	データ量 (100 分割)	データ量 (128 分割)	データ量 (200 分割)
haydn 従来法	1125	2359	9000
haydn 提案手法	1071.02	2252.95	8545.14
lucy 従来法	1125	2359	9000
lucy 提案手法	1023,3	2127.09	8027.45

分割数および手法	全体画像	拡大画像
分割数 100 現存手法		
分割数 100 提案手法		
分割数 128 現存手法		
分割数 128 提案手法		

分割数 200 現存手法		
分割数 200 提案手法		

図 7 haydn の圧縮結果

分割数および手法	全体画像	拡大画像
分割数 100 現存手法		
分割数 100 提案手法		
分割数 128 現存手法		
分割数 128 提案手法		

分割数 200 現存手法		
分割数 200 提案手法		

図 8 lucy の圧縮結果

表 2:データ圧縮後のデータ量

	データ量 (100 分割)	データ量 (128 分割)	データ量 (200 分割)
haydn 従来法	1125	2359	9000
haydn 提案手法	1357.41	2844.73	10808.8
lucy 従来法	1125	2359	9000
lucy 提案手法	11308.75	2727.6	10325.4

上記のような結果が得られた．また曲面からの距離に応じて曲面付近と曲面から離れた箇所とする判定する閾値の α を，変化させて 3 次元形状モデルに対するデータ圧縮を行った．表 1 では閾値を 0.1 として行っていたが表 2 では閾値を 0.2 として，データ圧縮を行なった結果を示している．結果的に同様に形状劣化の発生していない 3 次元形状モデルは生成されたが，データ量は閾値を 0.1 とする場合のほうが圧倒的小さくなることが分かる．これは不要な部分まで保存してしまっていることを指すため，各 3 次元形状モデルに最適な閾値を設定することでより大きなデータ圧縮ができることが想定される．

5. まとめ

本手法では，曲面からの距離に応じたデータ圧縮および各 3 次元形状モデルにおける自動量子化決定法を提案した．主な処理として，各セルにおける B-スプライン表現された陰関数曲面の値によって曲面付近のデータかどうかを判定し，それぞれのデータに対して量子化を行い効率的な圧縮を行った．また量子化の際には，各周波数成分の重要度は，量子化し復元されたデータと圧縮する前のデータとの誤差値によって設定することで，各 3 次元形状モデルに応じた量子化テーブルを作成し量子化を行っている．その結果元データの形状劣化を発生させることなく圧縮することができた．

今後の展望としては，モデルごとに違う曲面付近のデータに対して判定を自動的に行えるようにすることまた，量子化する際に線形量子化ではなく非線形量子化を用いることがあげられる．また本研究では，符号化処理を行っていないため符号化処理を加えるとさらに圧縮効果が期待できる．

参考文献

[1] M. Levoy, K. Pulli, B. Curless, S. Rusinkiewicz, D. Koller, L. Pereira, M.Ginzton, S. Anderson, J. Davis, J. Ginsberg, J. Shade and D. Fulk: “The Digital Michelangelo Project: 3D Scanning of Large Statues,” in proceedings of ACM SIGGRAPH, New York, USA, pp. 131-144, 2000.

[2] M. Bolitho, M. Kazhdan, R. Burns and H. Hoppe: “Parallel Posson Surface Reconstruction,” Advances in Visual Computing, Vol. 5875, pp. 678-689, 2009.

[3] M. Kazhdan and H. Hoppe: ”Screened poisson surface reconstruction,” ACM Transactions on Graphics, Vol. 32, No. 3 pp. Article No. 29, 2013.

[4] B. S. Morse, T. S. Yoo, D. T. Chen, P. Rheingans and K. R. Subramanian:"High-quality rendering of varying isosurfaces with cubic trivariate C1-continuous splines," In Proceedings of ISVC 2009, pp. 596-607, 2009.

[5] F. Wei and J. Feng: “Real-time ray casting of algebraic B-spline surfaces,” Computers & Graphics, Vol. 35, No. 4, pp. 800-809, 2011.

[6] Nakata, S. Aoyama, R. Makino, K. Hasegawa and S. Tanaka: “Real-time isosurface rendering of smooth fields,” Journal of Visualization, Vol. 15, No. 2, pp. 179-187, 2012.

[7] W. E. Lorensen and H. E. Cline:”Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm,” ACM SIGGRAPH Computer Graphics, Vol. 21, Issue 4, pp. 163-169, 1987.

[8] C. Su, Y. Shengquan: “Post-Forecast OT: A Novel Method of 3D Model Compression,” In Computational Intelligence and Software Engineering, Wuhan, China, pp. 1-4, 2009.

[9] J. Smith, G. Petrova and S. Schaefer: “Progressive Encoding and Compression of Surfaces Generated from Point Cloud Data,” Computers & Graphics, Vol. 36, Issue. 5, pp. 341-348, 2012.

[10] D. Laney, M. Bertram, M. neau and N. Max: “Multiresolution Distance Volumes for Progressive Surface Compression,” International Symposium on 3D Data Processing Visualization and Transmission, pp. 470-479, 2002.

[11] 中島卓哉，戸澤健文，森功一，長谷川恭子，仲田晋，田中覚，“ウェーブレット変換を用いた陰関数曲面のデータ圧縮”，映像情報メディア学会メディア工学研究会, pp147‐150, 神奈川，February, 19, 2011.

[12] E. J. Stollnitz, T. D. DeRose and D. H. Salesin:”Wavelets for Computer Graphics: A Primer Part 1,” Computer Graphics and Applications, Vol. 15, Issue 3, pp. 76-84, 1995.

[13] E. J. Stollnitz, T. D. DeRose and D. H. Salesin:”Wavelets for Computer Graphics: A Primer Part 2,” Computer Graphics and Applications, Vol. 15, Issue 4, pp. 75-85, 1995.

[14] M. C. Stamm and K. J. Ray. Liu:”Wavelet-based image compression anti-forensics,” In Image Processing(ICIP), 2010 17th IEEE International Conference, Hong Kong, Hong Kong, pp.1737-1740, 2010.

[15] P. Gabriel, M. Stéphane:“Surface compression with geometric bandelets,” ACM Transactions on Graphics, Vol. 24, Issue 3, pp. 601-608, 2005.