逐次更新型 Image-Based Rendering のための参照画像の効率的選択

濱口 隆子　　向川 康博　　尺長 健

岡山大学 情報工学科

〒700-8530 岡山市津島中 3-1-1

tako@chino.it.okayama-u.ac.jp

あらまし　Image-Based Rendering(IBR) は，写実的な画像が得られるという利点から注目されている．しかし，参照画像の枚数や撮影方向と，生成画像の画質の関係については深く論じられていなかった．本稿では，この関係に着目し，参照画像を加えるごとに生成画像を更新する IBR を提案する．あらかじめ撮影された画像から，生成画像の画質向上に貢献する参照画像を優先して選択し，これに従って任意視点画像を順次生成する．また，画質評価として，S/N 比のように画像を単なる信号ととらえるのではなく，主観評価実験を通して得られる尺度を用いることで，より人間の感性に近い評価が可能となる．

キーワード　Image-Based Rendering，任意視点画像生成，画質評価，内挿画像，3 次元コンテンツ，参照画像選択

Efficient Selection of Reference Images for the Sequential Image-Based Rendering

Takako HAMAGUCHI　　Yasuhiro MUKAIGAWA　　Takeshi SHAKUNAGA

Department of Information Technology,
Okayama University

Tsushimanaka 3-1-1, Okayama,700-8530, Japan

tako@chino.it.okayama-u.ac.jp

Abstract　Although a lot of methods have been proposed for the image-based rendering (IBR), the relation has not been profoundly discussed between the quality of synthesized images and the reference image set. A sequential algorithm is proposed for the IBR, with taking the quality into account. Combining a rough 3d model and a sequence of the reference images, the sequential image-based rendering algorithm gradually refines synthesized images. Detail description of the sequential refinement algorithm is provided with some experimental results. This paper also proposes a human-oriented evaluation function for making the image sequence. Using the function, an appropriate sequence is provided for the sequential image-based rendering.

key words　Image-Based Rendering, arbitrary pose view, quality evaluation, view interpolation, 3D contents, reference image selection

1 はじめに

計算機上に 3D 物体を表示する技術は，CG 分野において重要な課題である．

従来から，3D 物体の任意視点からの見え方を生成する方法として，幾何学的形状や表面反射特性などのモデルを利用する Model-Based Rendering(MBR) が一般的に利用されている．MBR では，少ないデータ量で 3D 物体を表現できるという利点があり，実際にインターネット上での 3D コンテンツは VRML によって記述されることが多い．しかし，物体の持つ質感等を忠実に再現することは難しく，美術品のような品質が要求されるものへの適応は難しい．

一方，実画像を基に画像を生成する手法として，Image-Based Rendering(IBR) があり，近年盛んに研究が行なわれている．この手法は実画像から得られる情報を直接利用するため，写実的な画像の生成が可能であるという利点がある．ところが，IBR によって生成される画像の品質は，参照画像の種類や枚数によって変化するという性質があり，高品質な画像を生成するためには膨大な枚数の参照画像を必要とする．従来の IBR の研究では，より少ない画像枚数で任意視点画像を生成する手法に主眼が置かれており，参照画像の種類や枚数と生成画像の品質の関係については深く論じられいなかった．

近年では 3D コンテンツが身近なものとして一般に広く利用されるようになり，コンテンツへの要求は，画質とデータ量ともに利用者や目的に応じて多様化している．これらの多様な要求を満たす 3D 物体の記述・伝送手段が必要とされる．

そこで，本研究では，順位付けられた参照画像を，初期モデルに対して加えるごとに生成画像を更新し，初期段階から一定の品質を確保しつつ，逐次的に画像品質を向上させる手法として，逐次更新型 IBR を提案する．本手法は，少ないデータ量で任意視点画像の生成が可能であるという MBR の利点と，参照画像の枚数を増やせば限りなく実画像に近付くという IBR の利点を組み合わせた手法である．

ここで，生成画像の画質向上に貢献する参照画像を優先して選択するための画質評価基準が重要になる．生成画像の最終的な受け手は人間であることを考えると，人間が見て自然であるかという観点からの評価が必要である．そこで，本研究では，S/N 比のように画像を単なる信号ととらえるのではなく，主観評価実験を通して得られる評価尺度を基準として用いることで，人間の感性に近い評価を行う．

2 逐次更新型 IBR

IBR は実画像を入力とし，これらに何らかの処理を施すことで，別の見え方を生成する手法である[1]．IBR の大きな特徴として，参照画像の枚数や種類によって，生成画像の品質が変化するという点があげられる．即ち，参照画像の枚数によって画質を自由にコントロールでき，参照画像の枚数を増やすことによって，生成画像を実画像に限りなく近付けていくことも可能である．

本研究では，この利点を活かし，MBR と組み合わせた画像生成法として逐次更新型 IBR を提案する．本手法は，図 1 に示すように，対象物体の 3 次元形状と表面色を持つ簡単な初期モデルに対し，優先順位を付けられた参照画像系列を順次加えていくことにより，生成画像を逐次更新する画像生成法である．初期モデルを用いることで，初期段階から VRML と同程度の画質・データ量・操作性を持ち，さらに参照画像を加えていくことにより，生成画像の画質が向上するという利点を持つ．

本手法を，図 2 に示すように，ネットワーク上での 3D コンテンツの伝送方法として利用した場合[1]，VRML による伝送方法と比較して，参照画像が新しく伝送される度に，生成画像が実画像に近付くという利点がある．各利用者は，希望する画質が得られた時点で打ち切れば良く，高画質を望む場合はより多くの参照画像が伝送されるまで待てば良い．また，3D コンテンツを容量制限のあるメディアに格納する場合にも，データ量ごとに最適な参照画像を選択する必要はない．参照画像は優先順位付けられているため，制限された容量になるまで，上位の画像から選択するだけで良い．このように，逐次更新型 IBR は，ユーザ毎に異なる画質・データ量の要求に応えることができる．

逐次更新型 IBR の実現のためには，

1. 初期モデルの獲得
2. 参照画像が加えられた時の生成画像の更新
3. 画質評価基準の決定
4. 参照画像の並べ換え

が必要となる．以下，3 節では 1,2,4 について述べ，4 節では 3 の画質評価基準について述べる．

---

[1] ここでは各ユーザからのフィードバックのない一方通行の伝送を想定している．WWW 上のコンテンツがこれに当る

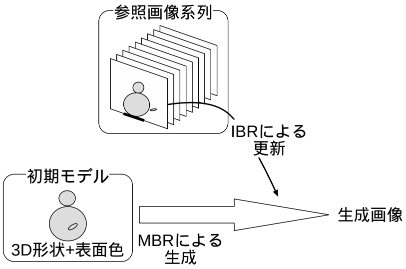


図 1: 逐次更新型 IBR

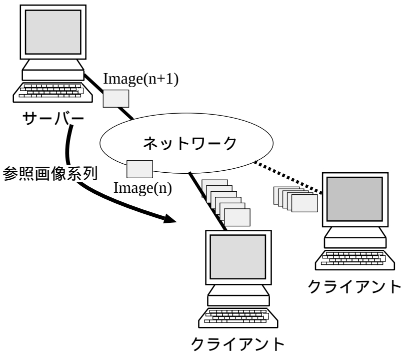


図 2: ネットワークでの利用

3　画像生成法

本節では，まず，初期モデルの獲得方法と，参照画像を加えた時の生成画像の更新方法について述べる．さらに，参照画像の優先画像系列の作成方法について述べる．以下では簡単化のため，物体の回転は 1 軸まわりとする．

3.1　入力画像の撮影

図 3 に示すように，計算機で制御可能な回転台の上に対象物体を置き，一定の角度ずつ回転させ，物体の全周分の画像を撮影し，これを入力画像とする．ここで，カメラと物体の間の距離を十分に大きくとり，望遠レンズを用いて撮影することで，正射影で近似する．また，物体のない背景画像も同時に撮影しておく．

3.2　初期モデルの獲得

本研究では，図 4 に示すように，対象物体を円筒座標系で表現し，これを初期モデルとする．回転台からの高さを y，回転角度をθ とすれば，回転軸と物体表面との距離 は $r(y,\theta)$，また，表面色は$\boldsymbol{c}(y,\theta)$ のように，共に高さと回転角度の関数として表現できる．逐次更新型 IBR においても，初期モデルは正確に復元されることが望ましいが，復元誤差は参照画像によって修正されるため，多少不正確なモデルであっても利用することができる．本研究では，簡単な方法として，背景画像との差分から抽出されたシルエット [2] を用いて初期モデルを獲得する．

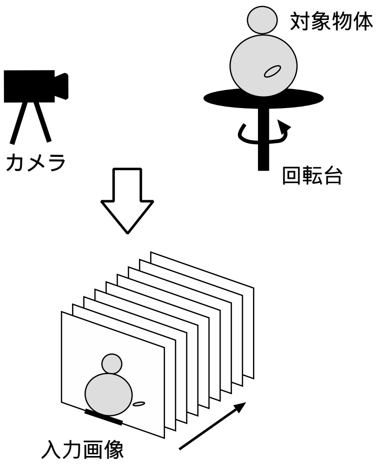


図 3: 撮影環境

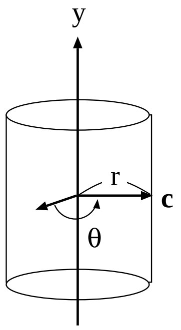


図 4: 円筒座標系による表現

3.3　参照画像を用いた生成画像の更新

本節では，参照画像が新たに加えられた時に，生成画像を更新する方法について述べる．更新は EPI (Epipolar Plane Image) における，画像間の対応関係を利用した画素値の補間に基づいている．EPI とは，図 5 に示すように，入力画像を撮影順に並べ，これを回転軸に垂直な断面で切った画像である．EPI の縦軸は回転角 θに，横軸は入力画像の横軸に対応する．生成画像の更新は EPI ごとに，つまり画像の各走査線ごとに行う．

EPI 上では，参照画像に対応する行と，初期モデ

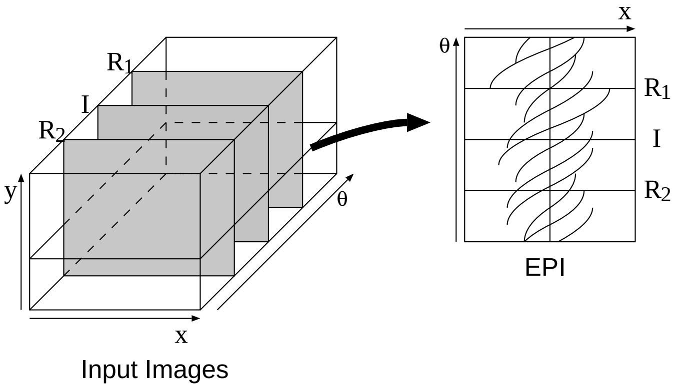
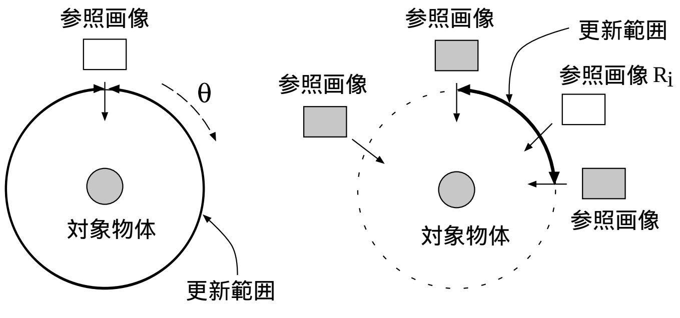
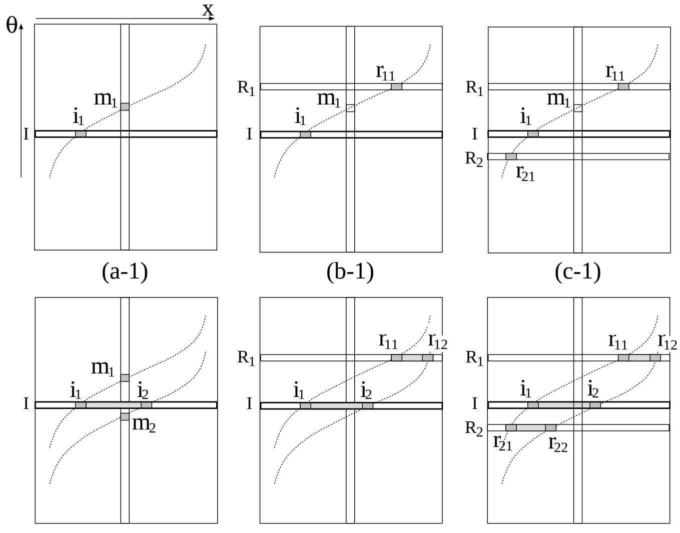


図 5: Epipolar-Plane Image(EPI)



(a) 参照画像1枚　(b) 参照画像3枚以上

図 7: 生成画像が更新される範囲



(a-1)　(b-1)　(c-1)

(a-2)　(b-2)　(c-2)

図 6: 生成画像の更新

ルに対応する中心列のみ，正しい表面色がわかっている．また，各画像の対応点は $\sin$ カーブ上に描かれるという特徴を持つ．周期は一定で，位相は撮影角度 θによって決まり，振幅は半径 r によって決まるため，円筒座標系で記述される表面上の点に関しては，画像間の対応点が容易に求められる．この対応点を手がかりに，EPI 上で画素値が補間される．

参照画像と更新する画像の回転角度の関係によって，補間方法はいくつかのケースに分類できる．それぞれのケースにおける，画像の更新方法の概略を，図 6(a-1)~(c-2) に示す．この図では，更新する画像を I，参照画像を R_1, R_2とする．それぞれのケースでの，画像更新手順を以下に述べる．

1. 対応点の決定
   EPI の中心軸上の各点を通る $\sin$ の軌跡より，更新する画像と参照画像の対応点を決定する．
   (a) 参照画像が近傍にない場合 (図 6(a-1))
   EPI の中心軸上の画素 m_1を対応点とする．
   (b) 1 枚の参照画像がある場合 (図 6(b-1))
   基本的に初期モデルは信頼性が低いため，近傍の参照画像の画素 r_{11}を対応点とする．
   (c) 2 枚の参照画像に挟まれる場合 (図 6(c-1))
   同様に初期モデル上の対応点は利用せず，参照画像の画素 r_{11}, r_{21}を対応点とする．
2. 対応点間の画素値の補間
   更新する画像の全画素について対応点が求まるわけではない．そこで，対応点をもとに，対応点間の画素を補間により埋める．
   (a) 参照画像が近傍にない場合 (図 6(a-2))
   対応点 i_1, i_2の間の画素は，i_1, i_2の画素値の線形補間によって埋める．
   (b) 1 枚の参照画像がある場合 (図 6(b-2))
   参照画像の対応点 r_{11}, r_{12}の間のテクスチャを線形的に伸縮させ，これを i_1, i_2の間の画素とする．
   (c) 2 枚の参照画像に挟まれる場合 (図 6(c-2))
   参照画像 R_1の対応点 r_{11}, r_{12}の間のテクスチャと，参照画像 R_2の対応点 r_{21}, r_{22}の間のテクスチャを，それぞれ線形的に伸縮させた後，更新画像 I と，R_1, R_2の撮影角度差によって内挿したものを，対応点 i_1, i_2の間の画素とする．

この画像更新手順では，参照画像が加えられるたびに，すべての生成画像を更新されるわけではない．図 7 に示すように，初期モデルに対して，参照画像が 1 枚もしくは 2 枚加えられた場合には，すべての生成画像を更新する必要があるが，3 枚目以降の場合

には，新たに加えられた参照画像R_iをはさむ2枚の参照画像の間のみを更新する．

以上の方法により，初期モデルだけでも画像生成が可能であるが，参照画像が新たに加えられるたびに，生成画像は，より実画像に近くなるように更新される．

3.4　画像系列の作成

逐次更新型IBRでは，参照画像の順番が最も重要である．つまり，生成画像の画質の向上に大きく貢献する参照画像を優先して加えることで，より少ない参照画像で生成画像全体の品質を高めることができる．

Hlaváč ら[3]は，生成画像に対する評価値を設定し，この評価値が定められた数値以下になる最適な参照画像の組合せを，最適化問題に帰着して解く方法を提案している．この手法は，入力画像から画質向上に貢献する参照画像を選択するという点で，本手法に関連しているが，要求される画質があらかじめ固定されているという点で大きく異なる．本研究では，逐次的に参照画像を加え，生成画像を逐次更新することを目的としているため，入力画像から，最も適切な画像を順次選択することが必要となる．

本手法では，全ての参照画像について，その画像を加えることによって更新される生成画像の全体の画質を評価し，最も画質が向上する参照画像を優先的に選択する．この処理を，選択されていない残りの参照画像について順次繰り返すことで，画像系列を作成する．

4　画質評価尺度

本節では，画像系列を生成するために用いる画質評価基準の決定法について述べる．

4.1　画質に関する人間の感性評価

従来のIBRによる画像生成の研究では，少ない実画像からの多様な見え方の生成が主に論じられてきたが，生成画像に対する画質評価については，深く議論されていない．片山ら[4]は，仮想視点からの生成画像と実際にその位置から撮影した画像との平均自乗誤差を基に，画質を評価している．また，Hlaváč ら[3]は，隠れのために内挿できなかった画素の個数をも考慮に入れ，評価基準としている．

しかし，生成画像の最終的な受け手は人間であることを考えると，人間が見て自然であるかという観点からの評価が必要である[5][6]．S/N比のように画像を単なる信号ととらえた評価方法では，人間がより知覚しやすい劣化は評価できない．そこで，本研究では，主観評価実験を通して得られる評価尺度を基準として用いることで，人間の感性に近い評価を行う．

4.2　主観評価実験による評価尺度の決定

本研究では，生成画像Iの画質を評価する尺度$F(I)$として，式(1)に示すように，様々な画質劣化要因f_iの線形和を用いる．この尺度が人間の感性に近くなるように，係数α_iを適切に決める．

$$F(I) = \sum_i \alpha_i f_i \tag{1}$$

画質劣化要因として，本研究では以下の6種類を用いる．これらの各劣化要因が，どれほど人間の感性と関係があるかは，この時点ではわからない．しかし，人間の感性と関連の低い要因は係数が小さくなり，逆に関連の高い要因は係数が大きくなる．したがって，劣化要因はこの6種類に限定されるわけではなく，さらに様々な要因を加えることも可能である．なお，劣化要因の算出は，背景を除いた物体領域のみを対象とする．

1. 色空間における誤差
    - f_1: RGB空間における平均自乗誤差
    - f_2: 画像をブロックに分割し，ブロック毎の平均自乗誤差の分散
    - f_3: 画像の横軸方向でのRGB空間における色の変化
    - f_4: 輝度成分の誤差(YUV空間におけるY成分)
2. 形状を変化させる誤差
    - f_5: 物体領域の面積差
    - f_6: 物体の回転半径の誤差

本研究では，人間の感性に近い係数α_iを求めるために，主観評価実験を行なう．条件の異なる複数の生成画像を被験者に提示することで，生成画像は画質によってグループ化される．係数α_iの決定は，グループに分けられた画像組を最も良く分離できるような軸を設定する問題として定式化でき，判別分析法[7]で求めることができる．

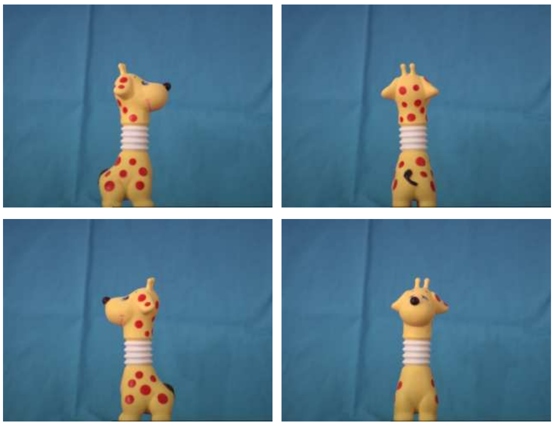
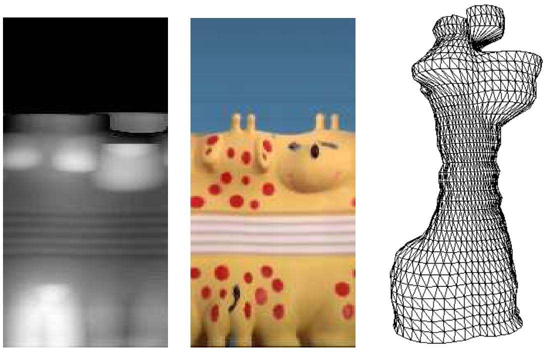


図 8: 入力画像の一部



(a) 回転半径　(b) 表面色　(c) 3次元形状

図 9: 復元された初期モデル

5　実験

上記の手法を用いて，画像系列を作成し，それに基づいて画像を生成した結果を以下に示す．

5.1　初期モデル

入力画像として，対象物体を回転台に置き，3.6 度の回転刻みで合計 100 枚の画像を撮影した．得られた入力画像の一部を図 8 に示す．また，各入力画像と背景画像との差分によって得られたシルエットをもとに復元された初期モデルを図 9 に示す．図 9(a),(b) は，円筒座標系で表現される初期モデルを，横軸を回転角 θ，縦軸を回転台からの高さ y とする画像で表現したものである．図 9(a) では，回転半径を濃淡値で示しており，明るいほど半径が大きいことを示す．また，図 9(c) は，初期モデル上の点をサンプリングし，ワイヤーフレームで表示したものである．もともと，この物体が円筒座標系で表現できない形状であるため，正しく形状が復元されていない場所が存在していることがわかる．

表 1: 主観評価実験条件

評価者数	15 人
使用ディスプレイ	17 インチカラー
表示画像サイズ	320×240
画像提示方法	連続提示
画像提示時間	実画像 (5 秒)→無表示 (3 秒) →評価画像 (5 秒) ×2
評価尺度	3 段階画質劣化尺度
評価画像	別記

5.2　画質評価尺度の決定

本節では画像系列の作成に必要な画質評価尺度を決定する際の条件と，その結果得られた各劣化要因の係数を示す．

5.2.1　評価実験の条件

評価実験は，画像内容に依存しないものが望ましい．そこで，表 1 に示す条件において，評価実験を行なった．この条件は文献 [5] を参考に，事前に予備実験を行ない決定したものである．

5.2.2　評価画像の種類

評価する画像は，3.3 節で生成された画像を用いた．生成された評価画像に対する 2 枚の参照画像の関係は，生成画像に対し等角度に 3.6 度, 7.2 度, 10.8 度の 3 段階である．対象物体の差を考慮するため，2 種類の対象物体 (陶器の置き物，プラスチックの水筒) を用意し，方向による見え方の差を考慮するため，各対象物体についての 4 方向の画像を用意し，合計 24 枚の画像を用いて実験を行なった．

5.2.3　画質評価尺度

以上で示した条件のもとで，主観評価実験を行ない，判別分析法を用いて各劣化要因の係数を算出した．得られた係数α_iを表 2 に示す．各係数の値が大きいほど，劣化要因として重要であることを示す．一般に広く用いられることの多い RGB 空間における平均自乗誤差 f_1は，この結果からも重要であること

表 2: 各α_i

f_i	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6
α_i	32.68	–10.39	10.04	–26.84	5.79	–6.00

がわかる．しかし，他の劣化要因も比較的影響が大きく，これらを総合した評価尺度によって，人間の感性に近い評価ができると考えられる．

5.3 画像系列に基づく画像生成

前節で求められた画質評価尺度を用いて参照画像を並べた．初期モデルに対して参照画像を 1 枚ずつ加えていった時の，画質評価結果の推移を図 10 に示す．この結果から，参照画像が上位 20 枚程度までは，画質が急速に向上し，その後緩やかに変化していることがわかる．つまり，評価尺度により順序付けを行なうことで，早い段階で，質の高い画像を得ることが可能になる．

次に，画像系列の最初の 4 枚の画像を図 11 に示す．画像系列の最初の画像は，全方向にまんべんなく分散するのではなく，特定の方向に集中していることがわかる．これは，実験で用いた対象物体の初期モデルが，この方向に関して誤差が大きかったため，それを参照画像で更新するために集中したと考えられる．このように，参照画像の優先順位は，物体の形状や初期モデルの正確さ，表面テクスチャの分布などによって変わることがわかる．

最後に，参照画像が加えられるたびに，生成画像が更新されていく過程を EPI 上で示す．図 12 に示すように，対象物体の上部と下部に相当する EPI をそれぞれ EPI1, EPI2 とし，それぞれの EPI が更新されていく過程を図 13 に示す．図 13 の 1 段目は入力画像の EPI であり，これと同じ EPI を初期モデルと参照画像から生成することが与えられた問題である．2 段目は，初期モデルのみから生成した EPI であり，入力画像の EPI と著しく異なることがわかる．さらに，3 段目は参照画像を 1 枚追加することで更新された EPI である．図中の矢印によって示されている場所が，追加された参照画像の位置であり，この周辺で画像が更新され，初期モデルのみの EPI に比べ少し変化が見られる．4 段目は，10 枚の参照画像を追加した場合の EPI であり，少し入力画像に近付いていることがわかる．5 段目は，20 枚の参照画像を追加したした場合の EPI であり，入力画像を用いて生成した EPI にかなり近付いたことがわかる．

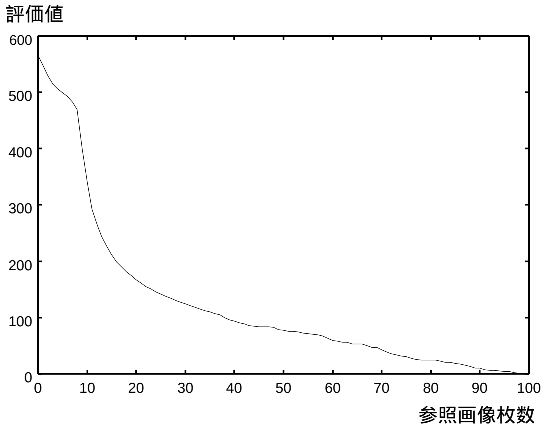


図 10: 評価値の推移

なお，より詳しい実験結果は以下を参照されたい．
http://www.chino.it.okayama-u.ac.jp/research/

6 まとめ

本研究では，要求される画質やデータ量に柔軟に対応可能な 3D 物体の表示方法として，逐次更新型 Image-Based Rendering を提案した．また，主観評価実験を通して得られた，人間の感性に近い画質評価尺度を用いることで，効率的に参照画像を並べ変える方法について述べた．

今後の課題として，主観評価実験の規模を大きくすることによって，画質評価尺度を人間の感性に近付けることや，画像全体ではなく，人間に注目されやすいブロックを優先して並べ変える方法の検討などがあげられる．

参考文献

[1] 中村 裕一, 向川 康博: “画像・映像の知的生成と編集 -CV 技術を用いた新しい画像・映像処理-”, コンピュータビジョン, 松山 隆司, 久野 義徳, 井宮 淳 編, 新技術コミュニケーションズ, 17 章, pp.244-261, 1998.

[2] 福田 岳士, 大田 友一: “シルエット解析と多視点ステレオの統合による画像からの 3 次元形状獲得と表面反射特性の推定”, MIRU’98, Vol.1, pp.207-212, 1998.

(a)第1参照画像　(b)第2参照画像

(c)第3参照画像　(d)第4参照画像

図 11: 画像系列の一部

図 12: EPI の位置

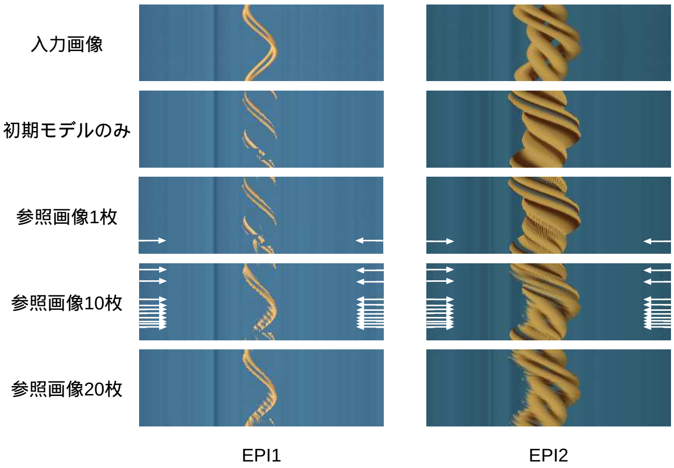


図 13: 生成画像の更新される過程

[3] V.Hlaváč,A.Leonardis,T.Werner: “Automatic Selection of Reference Views for Image-Based Scene Representations”, Proc. ECCV’96, Vol.1, pp.526-535, 1996.

[4] 片山 昭宏, 田中 宏一郎, 押野 隆弘, 田村 秀行: “多視点画像の補間 再構成による視点追従型立体画像表示法”, 信学論 D-II, Vol.J79-D-II, No.5, pp.803-811, 1996.

[5] テレビジョン学会編: “テレビジョン画像の評価技術”, テレビジョン学会, pp.65-101, 1986.

[6] 宮地 悟史, 浜田 高宏, 松本 修一: “人間の視覚特性を考慮した画像品質評価システムの開発”, 信学論 D-II, Vol.J81-D-II, No.6, pp.1084-1094, 1998.

[7] 柳井 晴夫, 高木 廣文 編著: “多変量解析ハンドブック”, 現代数学社, pp.126-150, 1986.