レリーフ調奥行きマップ生成方式

Relief-like Depth Map Generation Algorithm

正会員 能登 肇[†], 正会員 橋本 秋彦^{††}, 正会員 木村 一夫[†], 正会員 中沢 憲二[†]
Hajime Noto[†], Akihiko Hashimoto^{††}, Kazuo Kimura[†] and Kenji Nakazawa[†]

Abstract We propose a new 3D-input method using a relief-like depth map generation algorithm (REAL). REAL is based on the concept of reproducing a depth map, like the relief of a coin, from 3D input. Using REAL, a portable 3D-input system can be achieved using only a monocular camera and a photoflash. REAL is very simple and convenient compared with conventional technology that requires triangulation. In this paper, we describe an overview of the concept and the calculations of the depth map. We also report a subjective test of 3D images generated by REAL. The subjective test results indicated that observers perceive REAL images as natural 3D images.

キーワード：3次元，奥行きマップ，レリーフ，立体

1. ま え が き

近年、「3Dコンソーシアム¹⁾」「立体映像産業推進協議会²⁾」などの団体が設立され、3D映像普及への機運が高まっている。一般への3D映像の普及には、魅力あるコンテンツの提供を可能とするソフト面の整備の他に、写真をカメラで撮るように、自然な3D映像を手軽に入出力できるハード面の整備も課題である。

3D表示技術では、パララックス方式^{3) 4)}、レンチキュラ方式⁵⁾など両眼視差方式に基づく3Dディスプレイが、携帯電話やPC・パチンコなどの民生分野ですでに商品化されている⁶⁾。さらに、立体像観察時の疲労感を低減する方式として、二つの画像を透明な前後2面に重ね合わせて表示し、その前後2面の画像の輝度比を変化させることで、表示物体の奥行きを制御するDFD (Depth-Fused 3-D) 方式⁷⁾による3D表示技術の研究も行われている。

一方、3D撮像技術では、主に三角測量の原理に基づいた入力装置が工業分野⁸⁾で商品化されている。これら工業用途の技術は、被写体形状を正確に再現することを目的としているため、民生用途にそのまま転用するには、「装置の

小型化」，「計測時間の短縮」，「3D撮像環境の整備」といった点で課題が残る。これらの課題解決に向けた研究^{9) ~ 13)}が行われてきたが、いまだ実用化には至っていないのが現状である。

この工業用3D撮像技術は、主に三角測量の原理に基づいており、光切断法やステレオ法がその代表例である。光切断法は、被写体を切断するように投影したスリット状の光を、別の方向から撮像し、スリット光の投影方向と撮像位置から三角測量の原理によって計測を行う方法である。一般的に高い計測精度を持つが、撮像環境の整備が必要となること、また計測時間が長いことが課題である。ステレオ法は、複数の撮像位置の異なるカメラの映像から三角測量の原理によって計測を行う方法である。この方法は、一般的に撮像環境に依存せずに、被写体のリアルタイム計測が可能であるが、計測精度や信頼度に課題があり、これらの課題解決方法として、マルチベースラインステレオ¹⁴⁾が提案され、製品化も図られている^{15) ~ 17)}。しかし、装置の小型化の観点では、ベースラインの数だけカメラが必要になるため、必ずしも好ましくない。また、三角測量を用いる方法の共通課題として、オクルージョンが発生し、奥行き情報が得られない領域が発生する問題もある。

上記以外の技術として、2D画像から3D画像を生成する変換技術^{18) 19)}も研究されているが、計測による情報を使用しないため、自然な立体像であるかどうかの評価には検討の余地がある。

本論文では、三角測量を用いた形状計測を積極的に行わずに、3Dディスプレイ上で知覚的に自然な立体感を再現可能な擬似的奥行き生成手法を提案する。

2004年4月22日受付，2005年2月23日最終受付，2005年7月28日採録

[†] 日本電信電話株式会社 NTTサイバースペース研究所

(〒180-8585 武蔵野市緑町3-9-11 NTT武蔵野研究開発センター，
TEL 0422-59-4591)

^{††} エヌ・ティ・ティ・コミュニケーションズ株式会社

(〒100-8019 東京都千代田区内幸町1-1-7 大和生命ビル，TEL 03-3539-5470)

[†] NTT Cyber Space Laboratories, NTT Corporation

(NTT Musashino Research and Development Center, 3-9-11 Midori-cho, Musashino-shi,
Tokyo, 180-8585, Japan)

^{††} NTT Communications Corporation

(Yamato Seimei Building, 1-1-7 Uchisaiwaicho Chiyoda-ku Tokyo, 100-0011, Japan)

擬似的な立体感が得られる対象として、我々はレリーフが刻まれたコイン（例えば、硬貨やメダル）に注目した。図1²⁰⁾にコインのレリーフの例を示す。コインに刻まれるレリーフは、ほぼ同じ高さに丸みをつけられて刻まれているが、人間は過去の学習による知識があるため、図柄の傾斜や前後関係を認識でき、違和感なく立体感を知覚できる。この現象を利用して、立体化したい部分のみを正確な縮尺を考慮せずに擬似の奥行きを付与する方法を考案した。この薄いレリーフ状の奥行きマップを生成する新たな方式を、ここではレリーフ調奥行きマップ生成方式 (RElief-like depth map generation ALgorithm: REAL) と呼ぶことにする。

図1 コインのレリーフ例
Examples of relief on coins.

2. REALのアルゴリズム

2.1 概要

REALでは、取り込んだ画像にレリーフ状の奥行きを付加し立体化する。我々は3D映像の応用先として、小型のカメラ付き携帯電話を想定し、その撮影条件を参考にした。カメラ付き携帯電話の撮影では、人物を被写体とする場合が多く^{21) 22)}、特に女性は自分の顔をよく撮影している²³⁾。このような撮影条件では、主たる被写体はカメラの近くにあることが多い。そこでREALでは、立体化する主たる被写体は近景領域にあると考え、近景のみにレリーフ状の奥行きを付加することとした。また、主たる被写体以外の遠景と判断された領域は、実際のカメラからの距離に関わらずすべて背景領域とした。

2.2 処理フロー

REALの処理フローは近景・遠景の分離を行う第1ステップと、レリーフ状の擬似奥行きを付加する第2ステップから構成される。図2にREAL処理の概要を示す。以下、各ステップについて説明する。

2.2.1 第1ステップ：近景・遠景の分離

レリーフ化する領域を抽出するために、以下の手順で近景、遠景の分離を行う。

まず通常撮影とフラッシュ撮影によって得た画像それぞれ

図2 REAL処理の概要
Schematic diagram of REAL.

図3 ノイズ除去の例
Example of noise reduction.

れの輝度の差分を取り、一定の閾値と比較し2値化画像を得る。フラッシュ撮影の画像では、光源であるフラッシュに近い被写体ほど、通常撮影の画像に比較してその輝度変化が大きくなるため、この2値化処理により輝度変化の大きい領域を近景として切出す。また、残りの近景以外の領域を遠景とする。この処理が近景と遠景を分離する基本処理である。

次に得られた2値化画像からノイズを除去する。一般に被写体の反射率は一様でなく、得られた2値化画像では必ずしも近景にない被写体を近景として検出する場合もある。例えば、黒い髪の毛や黒いボタンなど被写体に著しく反射率が低い領域があれば、光源から近くにあっても近景として検出されない。逆に、鏡などの反射率が著しく高い被写体があれば、光源から離れていても近景として検出される。これらの問題を解決するために、本手法では誤検出に起因する2値化ノイズを2値化画像のオブジェクトの面積情報を用いて除去した。2値化ノイズ除去処理を「オブジェクトの除去」と「オブジェクトの穴埋め」に分けて、以下に説明する。

「オブジェクトの除去」とは、2値化画像において一定の面積以下のオブジェクト(白領域)を近景領域から取り除く処理である。多くの場合では、主たる被写体は2値化画像内で大きな面積のオブジェクト(白領域)となり、面積の小さいオブジェクトは主たる被写体以外である場合が多い。そこで、ここでは2値化画像において、一定面積以下のオブジェクト(白領域)は近景領域から除去することにした。

「オブジェクトの穴埋め」とは、オブジェクト(白領域)内の一定面積以下の穴(黒領域)を埋め、近景領域とする処理のことである。通常は、主たる被写体は連続した曲面を有していることが多いので、その近景となる主たる被写体のオブジェクト領域内に、背景に相当する穴(黒領域)が散在する可能性は少ない。そこで、オブジェクト内の一定面積以下の穴(黒領域)は除去することにした。

図3に、2値化画像から「オブジェクトの除去」および「オブジェクトの穴埋め」処理を行った結果を示す。図3(a)は、通常撮影画像とフラッシュ撮影画像の輝度差分の2値化画像であり、白領域が近景として抽出されたオブジェクトである。図3(b)は、「オブジェクトの除去」後の画像である。

この処理で、主たる被写体以外は近景から除去されている。図3(c)は、「オブジェクトの穴埋め」後の画像である。この処理で、主たるオブジェクトに存在する穴(黒領域)を除去する。

上記の一連の処理により、撮影画像における近景領域と遠景領域を分離した。

2.2.2 第2ステップ：レリーフ調の奥行き付加

第2ステップでは第1ステップで抽出した領域にレリーフ状の擬似奥行きを付加する。

REALでは、近景と判別されたオブジェクトの中心領域に観察者から最も近い奥行き値を与え、その中心領域からオブジェクトの輪郭線に向かって滑らかに変化するレリーフ状の奥行き値を与える。具体的にはオブジェクトの重心を中心とし、重心から輪郭線に向けて奥行き値 $f(x)$ を式(1)の2次曲線で与える。

$$f(x) = \begin{cases} 0 & (0 \leq x \leq r_0 \cdot l) \\ L \left(\frac{x/l - r_0}{1 - r_0} \right)^2 & (r_0 \cdot l < x \leq l) \end{cases} \quad (1)$$

L : 奥行きマップで表現する奥行き範囲 ($L \geq 0$)

l : 重心と輪郭線の距離の絶対値 ($l \geq 0$)

r_0 : 最も近くなる奥行きを与える割合 ($1 \geq r_0 \geq 0$)

x : 重心を原点とした輪郭線までの位置 ($l \geq x \geq 0$)

割合 r_0 で決まるオブジェクトの重心から輪郭線に向かった一定範囲までは、奥行き($f(x)=0$)を与え、以降、重心から輪郭線までの間2次曲線で奥行きを変化させ、輪郭線上では、最大の奥行き($f(x)=L$)を与える。その奥行き範囲($0 \sim L$)は、利用する3Dディスプレイの奥行き表現範囲から任意に決めることができる。また、割合 r_0 も任意に決められるが、ここでは30%とした。この値は3DディスプレイとしてDFD表示装置を用いた予備実験の結果、効果的な立体感を知覚できる割合として経験的に得たものである。図4にノイズ除去後の2値化画像にレリーフ状の擬似奥行きを付加した例を示す。図4では、明るい領域ほど観察者からの距離が近いことを示している。

次に、レリーフ状の奥行きを付加した奥行きマップの平滑化を行う。これは式(1)の処理を行った奥行きマップに存在する急激な奥行き変化を取り除くために行う。使用し

図4 擬似奥行き付加の例
Adding generated depth by applying quadratic curve.

た平滑化フィルタのサイズは、画像の面積に対して0.05%以上の比較的大きなもの（画像サイズがQVGA場合、 7×7 画素以上）である。このフィルタサイズの値は、経験的に得たものである。

3. 評価実験

いくつかの典型的な3D画像において、REALで生成した奥行きと真の奥行きを比較した結果を図5に示す。真の奥行きとは、計測により得られる被写体の正確な奥行き形状である。REALの奥行きは、被写体の奥行き形状が球であれば真の奥行きに近くなるが、それ以外の場合は必ずしも真の奥行きに一致するとは限らない。例えば、円筒の場合は真の奥行きは横方向のみに丸まるが、REALでは重心からすべての方向に丸くなる。また二つの球が隣接している

場合は、真の奥行きは中心領域が凹むが、REALでは中心領域が凸となる。さらに直方体では、真の奥行きは平面であるが、REALでは全方向に丸くなる。

上記の通りREALで付加した奥行きは、必ずしも被写体の真の奥行きと一致するとは限らない擬似の奥行きであるが、レリーフのように近景と遠景の前後関係が正しく、かつ奥行きが連続的で滑らかであれば、REALの奥行きマップにテクスチャの貼り付けることにより、違和感のない立体感を再現できると考えた。実際にその効果を確認するために、REAL処理した画像をDFD表示装置に表示して、以下の主観評価実験を行った。

3.1 実験方法

評価画像としてREAL画像、書割画像、平面画像の3つのタイプを用意した。書割画像とは、舞台の背景のように近景として切出したオブジェクトを、平面のままで背景よりも前に配置した画像である。また平面画像とは従来の2D画像である。

主観評価実験は平面画像を基準画像として、同時に表示される評価画像を、「立体感」、「自然感」、「画質」、「総合」の4つの項目について、5段階評価（非常に良い、良い、同じ、悪い、非常に悪い）とした。「立体感」は立体の度合い、「自然感」は形状の自然さ、「画質」は画像の鮮明度、「総合」は被験者が感じる好ましさを表す。

図5に示した典型画像を、2インチサイズの評価画像として用意し、観察距離300mmで提示した。画像サイズ、観察距離は、携帯電話用ディスプレイを想定し決定した。また、3D表示装置の奥行き表現範囲は、3.0mmとした。主観評価実験時の装置構成を図6に示す。また、図7にDFD表示装置に提示するREAL画像・書割画像・平面画像の模式図を示す。図8に主観評価の手順を示す。実験では被験者に対して基準画像と比較画像を同時に15秒間ずつ提示した。また、直前の評価の影響を受けないよう各評価画像の提示前には5秒間の無提示時間を設け、各評価画像をランダムな順序

	Sphere	Cylinder	Two spheres	Box
Actual depth map				
REAL depth map				
Examples of actual images with similar shapes				

図5 REALで生成した奥行きと真の奥行きの比較
Depth map comparison of REAL with actual 3-D data.

で提示した。被験者には変動範囲を理解させるために、事前に一度同様の条件で評価を行わせた後、各評価画像をランダムな順序で提示する実験を2回行った。被験者数は9名である。表1に被験者の年齢、性別、視力を示す。

図6 Depth-fused 3-D表示装置を用いた主観評価実験
Setup of subjective test using a depth-fused 3-D display.

3.2 実験結果

各評価項目に関する実験結果を評定尺度法にて分析した結果を図9に示す。表2に、主観評価実験で得られた「立体感」、「自然観」、「画質」、「総合」の評点の平均値、および、実験で使用した評価尺度を示す。各被験者の評点は、REAL画像、書割画像、平面画像で提示したすべての評価画像の評定平均である。今回の主観評価実験結果では、評価画像を平面画像（基準画像は平面画像であるため評価画像と同一）とした場合でも、被験者4のように「非常に悪い」を選択する場合がある一方、被験者9のように「良い」または「非常に良い」を選択する場合も見られた。しかしながら、

表1 被験者
Test subjects.

Test subject	Age(sex)	Eyesight	
		Left	Right
Test subject 1	28 (male)	(1.0)	(1.0)
Test subject 2	46 (male)	(0.6)	(0.7)
Test subject 3	31 (female)	(1.5)	(1.2)
Test subject 4	42 (male)	(1.2)	(1.2)
Test subject 5	29 (male)	(1.2)	(1.2)
Test subject 6	41 (male)	(0.6)	(0.7)
Test subject 7	30 (male)	(1.0)	(1.0)
Test subject 8	29 (male)	(0.8)	(0.7)
Test subject 9	35 (male)	(1.5)	(1.5)

()内の数値は矯正視力

Depth-fused 3-D images generated using REAL depth map are displayed in front and rear screens.

The foreground objects are displayed in the front screen. The background objects are displayed in the rear screen like a stage backdrop.

A 2-D image is displayed in the rear screen alone. The front screen is transparent.

図7 主観評価に用いた評価画像のタイプ
Types of evaluation images used in subjective test.

図8 主観評価の手順
Evaluation procedure for subjective test.

図9 主観評価結果
Results of subjective test.

表2 主観評価結果 (平均値)
Results of subjective test (Average score).
(a) Results of subjective test (Average score).

	REAL	Backdrop	2-D
(a) 3-D impression	4.0	3.9	2.9
(b) Natural impression	3.7	1.8	3.2
(c) Image quality	3.3	2.1	3.4
(d) Overall results	3.9	2.0	3.2

(b) Evaluation scale of subjective test.

Evaluation	Score
Very good	5
Good	4
Same	3
Poor	2
Very poor	1

被験者毎では、各比較画像に対する評価の傾向(評点の優劣の相対関係)は概ね一致しているので、ここでは評定尺度法にて平均値を取り分析した。

各評価項目において、REAL画像が従来画像(平面画像)に比べて被験者にどのように知覚されたかを考察する。なお評点間の差異については、有意差1%でt検定を行い確認した。

立体感の主観評価結果では、平面画像に比べてREAL画像と書割画像の評点が高い。これは、DFD表示装置に用いた3.0mmの奥行き範囲でも、立体感が知覚できることを示している。また立体感では、REAL画像と書割画像の評点の差異はなかった。

自然感の主観評価結果では、平面画像とREAL画像の評点は同等であり、書割画像の評点が低い。すなわち、REAL画像は平面画像と同等の自然な立体感を知覚できることを示している。

画質の主観評価結果では、平面画像とREAL画像の評点は同等であるが、書割画像の評点が低い。すべての画像において解像度は同等であるが、書割画像の場合、前後の画像のずれが画質低下の原因ではないかと考える。

総合の主観評価結果では、平面画像に比べてREAL画像

の評点が高く、書割画像の評点が低い。総合評価は画像の好みに関する評価であり、REAL画像が通常の平面画像に比べて同等以上であることを示した。

上記の結果から、REALを用いれば、3Dディスプレイ(DFD表示装置)において立体表示を行う場合、正確な真の3Dモデルを構築せずとも知覚上は自然な立体像を表現できることが確認できた。

4. む す び

本論文では、3Dディスプレイで立体表示を行う場合において、正確な3Dモデルがなくとも知覚上は自然な立体像が表現できるという新たな概念を提案した。この考え方に従いREAL方式を提案し、DFD表示装置を用いた主観評価実験により、自然な立体像が知覚できることを確認した。

REAL方式では、単眼カメラとフラッシュ光源で3D撮像系を構成できるので、特殊な撮像環境の整備は不要であり、また、オクルージョンの問題も発生しないという特徴がある。さらに、その処理も簡易な画像処理で実現できるので、近い将来、携帯電話やPDAなど携帯型情報装置のCPUでも現実的な時間で処理可能である。また、短い奥行き表現の中で豊かな立体知覚を与えることが可能な点から、既存のステレオ視(パララックス、レンチキュラー方式など)と組合せた場合、輻輳角と焦点距離の矛盾量を減少させ、立体感を維持しながら、疲労感のより少ない3D画像提示が実現できる可能性がある。今後、REAL方式を携帯型情報装置へ応用することにより、3D映像の応用範囲が大幅に拡大することを期待している。

〔文 献〕

- 1) “3D立体表示市場の創造を目指す『3Dコンソーシアム』を設立”, <http://www.3dc.gr.jp/english/index.html>
- 2) 本田: “「立体映像産業推進協議会」の活動について”, 3次元画像コンファレンス2003講演論文集, pp.201-207 (2003)
- 3) 安東, 増谷, 竹本, 東野, 濱岸, 小林: “多視点方式メガネなし3Dディスプレイ”, 画電学研予稿, 02-04, pp.33-36 (2002)
- 4) J.Harrold, A.M.S.Jacobs, G.J.Woodgate and D.Ezra: “3D Display Systems Hardware Research at Sharp Laboratories of Europe: An update”, シャープ技報, 74, pp.24-30 (1999)
- 5) 宮沢: “コンピュータゲームのための3次元映像技術”, 画電学研予稿, 02-04, p.49-52 (2002)
- 6) 小谷: “輝度を落とさず3次元表示かまぼこ状レンズを上下パチンコやケータイを狙う”, 日経エレクトロニクス, 2003年01月06日号, pp.26-27 (2003)
- 7) S. Suyama, H.Takada, K.Uehira, S.Sakai and S.Ohtsuka: “A New Method for Protruding Apparent 3-D Images in the DFD (Depth-Fused 3-D) Display”, SID 01 Digest, 54.1, pp. 1300-1303 (2001)
- 8) “特集: 3次元情報センシング技術”, O plus E 20, 11, pp.1251-1280 (1998)

- 9) 佐藤: “距離センサ”, 映像学誌, 54, 2, pp.157-1159 (2000)
- 10) S.Yoshimura, T.Sugiyama, K.Yonemoto and K.Ueda: “A 48Kframe/s CMOS Image Sensor for Real-time 3-D Sensing and Motion Detection”, ISSCC 2001 Digest of Technical Papers, pp.94-95 (2001)
- 11) 杉山, 吉村, 鈴木, 角: “カラー動画撮像と実時間3次元計測が可能なるCMOSセンサ”, 映像学技報, 26, 26, pp.1-16 (2002)
- 12) 山口, 東海, 伊奥田: “SR法によるモバイル型3D画像入力システムの実現性検討”, 信学論集, pp.152 (2001)
- 13) 能登, 沖村: “空間コードを用いた3次元情報入力技術の研究”, 信学論集, pp.153 (2001)
- 14) M.Okutomi, T.Kanade: “A Multiple-baseline Stereo”, IEEE Trans. Pattern Anal. & Mach. Intell. 15, 4, p.353-363 (1993)
- 15) 木村, 新保, 川村, 山口, 中野: “空間フィルタを活用した新しい実時間多眼ステレオ処理装置”, 信学技報, PRMU97-207, pp.1-8 (1998)
- 16) 桑島: “世界初のPCベース・フルカラーステレオ・ビジョン・システム「COLOR TRICLOPS」”, 映像情報インダストリアル, 31, 4, pp.17-22 (1999)
- 17) 清水, 山本, 王, 佐藤, 棚橋, 丹羽: “全方向ステレオシステム(SOS)を搭載した移動体による同物体検出-全方向動き補償型距離差分法提案-”, 第9回画像センシングシンポジウム講演論文集, pp.531-536 (2003)
- 18) 村田: “2D/3D変換技術”, 映像学誌, 54, 3, pp.10-15 (2000)
- 19) “Sharp Corporation SH251iS”, <http://www.sharp.co.jp/products/sh251is/>
- 20) “Moneymuseum”, http://www.geldauktion.ch/index_english.html
- 21) “きかせて・netー「カメラつき携帯電話」に関するアンケート”, http://www.kikasete.net/marker/mk_tw62.php
- 22) 枝: “モノあふれ時代のヒット商品「自分好き」消費者を取り込め”, 日経エレクトロニクス, 2003.1.20号, pp.59-66 (2003)
- 23) “解説 淘汰か共存か ケータイVSデジカメ第1章ーユーザ動向: 日経BPコンサルティング編 技術を知らないユーザが開発の核心を突く”, 日経メカニカル, 2003.9月号 (No.588), pp.42-43 (2003)

能登 肇 1999年, 関西大学大学院工学研究科管理工学専攻博士課程前期課程修了。同年, 日本電信電話(株)入社。現在, NTTサイバースペース研究所にて, 3次元画像入出力に関する技術の研究開発に従事。正会員。

橋本 秋彦 1985年, 東京工業大学修士課程修了。同年, NTT入社。ヒューマンインタフェース研究所, コミュニケーションサイエンス (CS) 研究所, サイバースペース研究所に勤務し, CGおよびCVの研究に従事。現在, NTTコミュニケーションズソリューション事業部に勤務。正会員。

木村 一夫 1984年, 新潟大学大学院工学研究科電子工学専攻修士課程修了。同年, 日本電信電話公社(現NTT)武蔵野研究所入社。NTT国際本部, NTTコミュニケーションズ(株)を経て, 現在, NTTサイバースペース研究所にて, 高臨場感入出力技術の研究開発に従事。正会員。

中沢 憲二 1983年, 日本電信電話公社入社。フラットパネルディスプレイ, 超高精細大画面表示システムの研究開発, ファイル・映像システムの事業企画, 高臨場感入出力技術の研究開発, 現在, サイバースペース研究所にて画像メディア通信技術の研究開発に従事。学術博士。正会員。