

超音波診断装置向け 高品位三次元映像処理技術

—4Dshading—

荻野 昌宏
Ogino Masahiro

柴原 琢磨
Shibahara Takuma

野口 喜実
Noguchi Yoshimi

辻田 剛啓
Tsujita Takehiro

村下 賢
Murashita Masaru

三竹 毅
Mitake Tsuyoshi

産科で使用される超音波診断装置において、光の散乱、陰影を表現する高質感レンダリング技術と、「好ましい色」を表現する肌色補正技術による写実的な胎児三次元映像表示を実現した。また、複数のプロセッサコアを用いた陰影面演算の並列化手法により、実時間動作を達成した。

これらの技術は、2013年4月に発売の超音波診断装置

HI VISIONシリーズの全3機種とデジタル超音波診断装置Noblusに搭載された。その高画質とポータブル機での高品位な三次元映像表示は、直接のユーザーである医療従事者と、その先の受益者である妊婦とその家族に対する新しい付加価値であり、日立アロカメディカル株式会社の製品ブランドイメージの向上に貢献している。

1. はじめに

超音波診断装置は、MRI (Magnetic Resonance Imaging) やCT (Computed Tomography)、X線撮影装置といった他の診断装置と比較して、低侵襲性、リアルタイム性、ベッドサイドでの診断が可能などといった面で特に優位性を持つ、近年の医療現場には欠かせない医用診断装置である。世界の超音波診断装置の市場は約5,800億円、年率5.1%で伸張している。日立アロカメディカル株式会社(以下、「日立アロカ」と記す。)は、国内シェアトップであり、グローバルトップへ向けた製品力強化に取り組んでいる。

昨今の医療現場における三次元超音波映像は、医療従事者が直接診断に用いるだけでなく、他科の医療従事者や受診者に対して分かりやすく説明する用途にも使用されている。

ここでは、産科で使用される超音波診断装置向けに、診断しやすく、かつ妊婦とその家族に対して安心感や感動を与える、写実的で好ましい胎児の三次元映像を提供することを目的とした映像処理として、高質感レンダリング技術と肌色補正技術の開発について述べる。

2. 超音波胎児三次元映像処理

胎児の三次元映像は、二次元画像からは判断の難しい形態情報を映像化することができるため、医療従事者に診断

のしやすさをもたらすことが知られている¹⁾。

一方、妊婦向けの一般雑誌にも盛んに掲載されるように²⁾、妊婦やその家族からは、写実的で好ましい胎児の映像が好まれている。この観点では、医療従事者の側からも、妊婦の感情管理という面で有用との考えもあり、映像を見ることによる両親の感情面の高揚を医療上の有益につなげる試みもある³⁾。

これらを踏まえ、産科で使用される超音波診断装置では、医療従事者、妊婦の双方にとって価値のある三次元映像表示が求められている。

超音波胎児三次元映像を取得する際の手順を図1に示す。プローブ(フリーハンド方式もしくはメカニカル方式)により、胎児を含む三次元空間に対して超音波を送受信し、超音波ボリュームデータを取得する[同図(a)参照]。このボリュームデータに対してボクセル化を行った後[同図(b)参照]、レンダリング処理を施すことにより、二次元平面に投影された胎児の三次元映像が形成される[同図(c)参照]。

以下、このレンダリング処理に関して説明する。

2.1 ボリュームレンダリング

ボリュームレンダリングとは、三次元対象(ボリュームデータ)の内部構造を二次元に投影する手法である。ここ

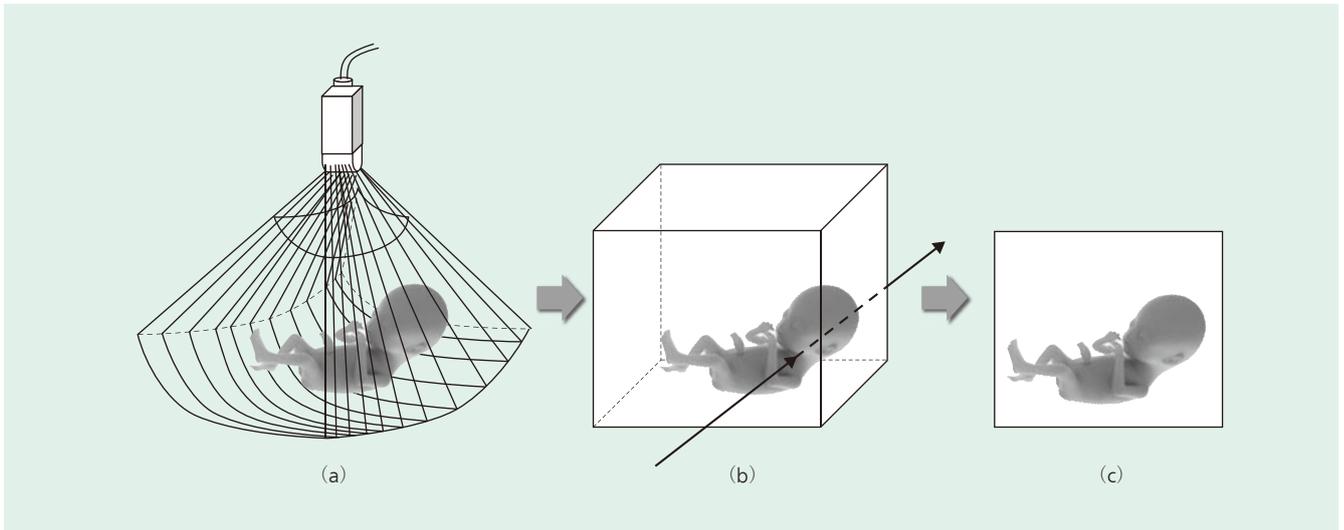


図1 | 超音波胎児三次元映像の取得手順

三次元空間データをプローブによって送受信し(a), 取得したボリュームデータをボクセル化したのち(b), レンダリング処理によって二次元投影画像を得る(c)。

では、一般的に用いられるレイキャスティング法⁴⁾に関して説明する(図2参照)。レイキャスティング法では、視点と投影面上の任意の投影点を結ぶ線であるレイ軌道上のボリュームデータ(ボクセル値)を読み取り、各ボクセル値を加算して各投影点画素値を計算し、表示映像を作成する。この手法によって得られる胎児三次元映像の一例を図3に示す。

同図では、立体感、肌の色、質感の表現力が限定的であるが、自然な光の振る舞いを忠実に再現することで、形態情報を忠実に映像化するとともに、立体感や色、質感を向上することができる。その結果、医療従事者にとって、診断しやすい映像を提供し、かつ妊婦やその家族に好意的な印象を与えられる可能性がある。今回、光の散乱・吸収を表現する新しいレンダリング手法と、機械学習ベースの主

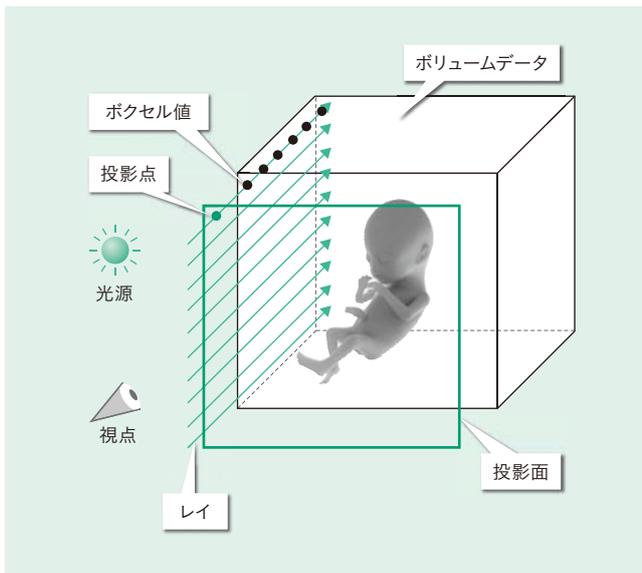


図2 | レイキャスティング法

従来のボリュームレンダリング手法である。



図3 | 従来のレイキャスティング法による胎児三次元映像例

立体感や肌の色、質感の再現性は限定的である。

観定量化手法によって生成される、好ましいと感じる肌色補正手法から成る4Dshadingアルゴリズムを開発した。この手法により、胎児はより写実的に見えるだけでなく、好ましい色で表示される。

2.2 実時間処理

超音波胎児三次元映像表示においては、実時間でのボリュームデータの更新(1秒間に3~4ボリューム)が必須であり、それを越えるレンダリング処理(実時間レンダリング表示)が要求される。レンダリング処理は一般的に演算コストが高く、かつ超音波診断装置搭載の画像処理エンジンのリソースは限られているため、ハードウェア構成を踏まえた演算効率化や並列化などによるアルゴリズム最適化が製品への実装上で必須となる。今回、独自の演算効率化を導入することにより、ハードウェア変更を行うことなく実時間レンダリング表示を実現した。

以下では、開発した4Dshadingアルゴリズムの原理と、製品実装に向けた高速化手法について述べる。

3. 4Dshadingアルゴリズム

人間の肌のような内部散乱を伴う媒質における色の再現には、一般に表面下散乱⁵⁾と呼ばれる非常に複雑な計算が必要である。この表面下散乱を再現することで、写実的な肌の表現が可能となる。4Dshadingでは、この表面下散乱による肌の陰影の表現方法に重点を置いた。

3.1 高質感レンダリング

前述したレイキャスティング法によるレンダリングで陰影を表現する場合、光源と法線ベクトルの成す角度から陰影を生成する。しかし、法線ベクトルを用いた陰影の生成では、間接光や透過光による陰影を再現しにくく、写実性の高い三次元画像を構築することが難しい。さらに、法線ベクトルを求めるための勾配演算は微分処理となるため、一般的にノイズの多い超音波映像に対しては、ノイズを強調してしまい、視認性を低下させる可能性がある。

提案手法では、自然な陰影の表現をするために、光の散乱と吸収を考慮した陰影面を生成する[図4(a)参照]。陰影面は、単位距離当たりの減衰量、周囲からの入射光量、および周囲への射出光量を逐次計算することによって作成し、光源方向から陰影面を逐次更新しながらレイキャスティングを行う(図5参照)。また、陰影面は光源に含まれる波長ごとに生成する。これらの処理の結果、組織表面からの光量は波長ごとに異なる減衰を示す⁶⁾[図4(b)参照]。これにより、肌の表面下散乱の特徴である、陰影部分(暗い部分)の濃い赤(無彩色ではない)を表現することができる。この手法によるレンダリング処理結果の一例を図6に示す。従来手法と比較して陰影表現が向上し、より写実的な胎児三次元映像表示が得られていることが分かる。

3.2 肌色補正

肌色は記憶色と呼ばれ、人が記憶して持っている色であ

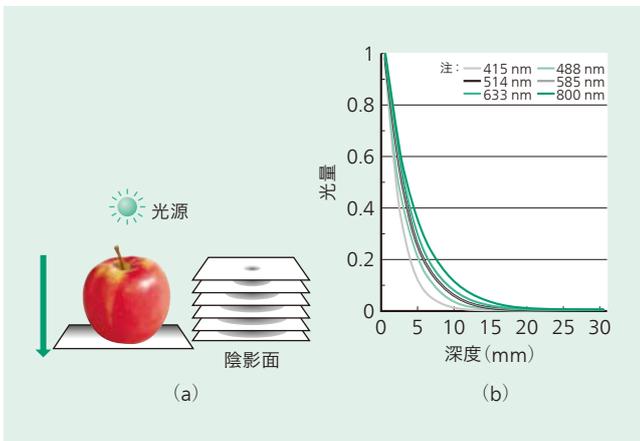


図4 | 陰影面の生成

生成手順を(a)に、生体組織における波長ごとの減衰特性の例⁶⁾を(b)に示す。

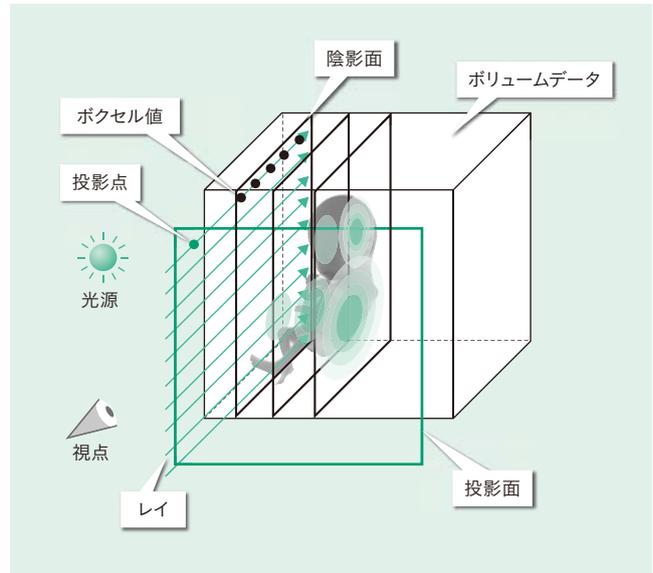


図5 | 新レンダリング手法の概要

光の散乱・吸収を再現した陰影面を生成し、ボクセル値との積を加算処理する。



図6 | 高質感レンダリング

従来レンダリング(左)と提案手法によるレンダリング(右)を示す。

り、好ましい肌色という観点でさまざまな研究がなされている⁷⁾。今回、この肌色表現と胎児が与える印象の関連性に着目し、好ましさと主観を数値化する技術を機械学習ベースの手法によって実現した。

提案手法では、Deep Learning⁸⁾に基づくランキング学習により、胎児の好ましさを評価する(図7参照)。また、学習用の教師データとして、好ましさを主観評価、順位付けを用いる。提案手法は、2つのステップから構成される。最初の特徴量自動生成ステップでは、学習データとなる赤ちゃん画像群からランダムに数百万の小パッチ画像を抽出して、中間層1層のニューラルネット(以下、「NN」と記す)を形成し、入出力誤差がなくなるように学習する(pre-training)。次に、上述のNNを数段組み合わせる再学習(fine-tuning)することにより、抽象度の高い特徴量ベクトルを生成する(図8参照)。次の学習ステップでは、画像ごとに求められた特徴量ベクトルと主観評価による順位付けが合うようにランキング学習のパラメータを最適化する。その際、大小関係がある場合のマージン最大化(引き離す)に加えて、等号関係が成り立っている場合のマ

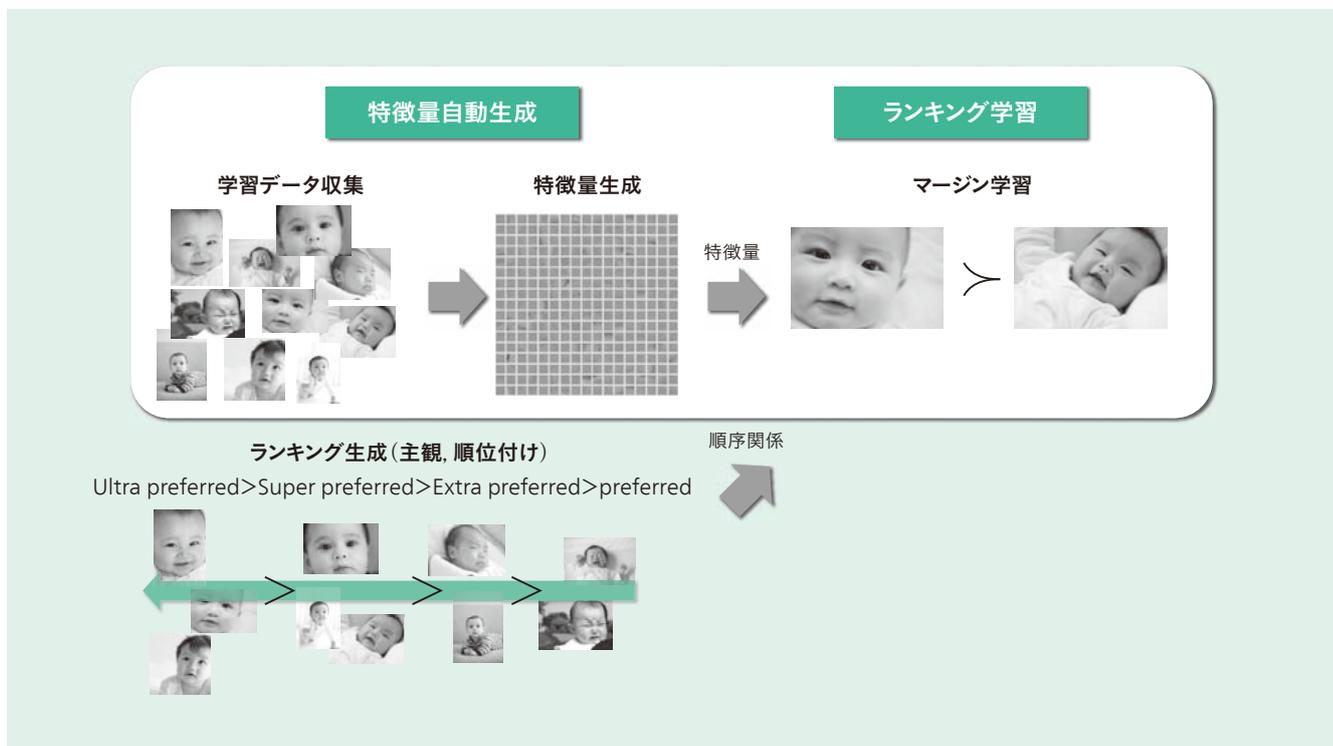


図7 | Deep Learningによる主観解析システム構成

特微量自動生成とランキング学習の2つのステップから成る。

ジン最小化(くつつける)(図9参照)による最適化を行うことで高精度化を実現した。例えば同図において、画像1と画像2の好ましき順位が同じであり、画像3の好ましき順位がそれらよりも下の場合、画像1と画像2がより近い位置にきて、かつ画像3がより離れた位置に配置されるような特微量空間上の軸Aを設定する。

学習条件を表1に示す。

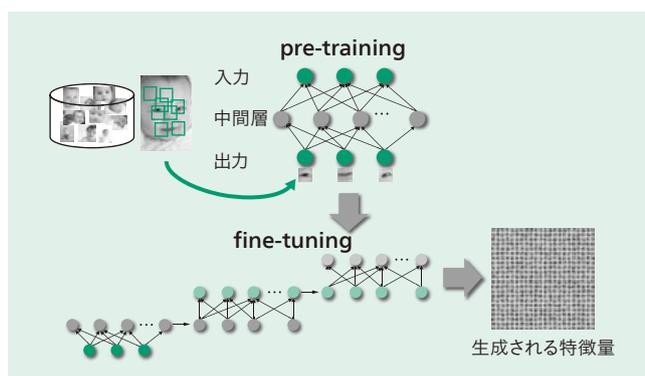


図8 | 特微量自動生成

ニューラルネットを多層に積み上げて学習し、抽象度の高い特微量を自動生成する。

表1 | 特微量自動生成の学習条件

Deep Learningによるランキング学習に用いた学習条件とパラメータを示す。

項目	内容	備考
使用画像数	400枚	Google* Images*より取得
バッチ数	900万	サイズ: 6×6ピクセル
特微量	1,936次元	
ニューラルネット総数	5層	

*Google, Google Imagesは, Google Inc.の登録商標である。

このように学習した主観解析システムの性能を、10-fold Cross Validationによって評価した結果、ランキング上位10位までの識別率に関して94%の精度を達成した。

次に、この主観解析システムに対し、前述の高質感レンダリング処理によって得られた胎児三次元映像について、 $L^*a^*b^*$ 空間で a^*b^* パラメータを調整した約1,000種のカラー画像を入力し、好ましきの順位付けを行った結果を

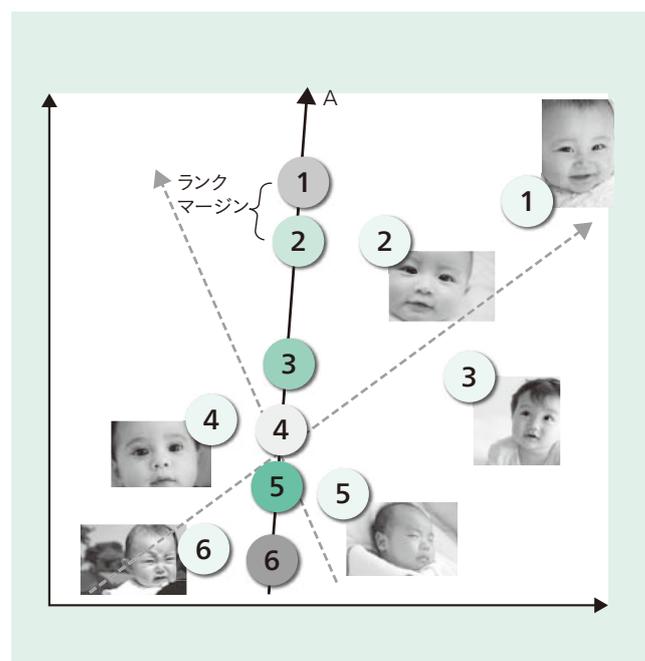


図9 | ランキング学習

主観結果のランキングに合う特微量空間上の軸(A)を設定する。

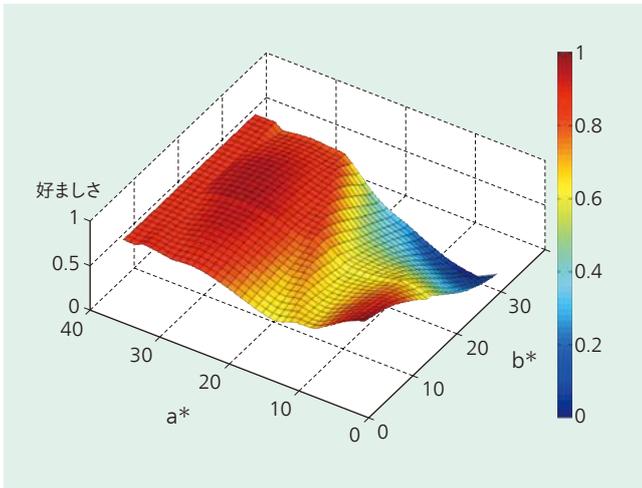


図10 | 好みさカラーマップ

赤い領域ほど好ましいと感じられる傾向があることを示している。



図11 | 肌色レンダリングパターン

好みさカラーマップを基に作成した。

図10に示す。この結果から、より赤みの強い肌色が好ましいという傾向が得られている。この傾向を考慮し、三次元画像の表示色が、適切な a^*b^* パラメータに一致する減衰量を波長ごとに算出し、4種の肌色レンダリングパターンを準備した(図11参照)。

3.3 処理高速化

日立アロカ製超音波診断装置は、マルチコア構成された高速演算プロセッサを搭載しており⁹⁾、三次元超音波映像の実時間レンダリング表示を、専用ハードウェアを用いることなく実現している。

しかし、4Dshadingの演算を行うためには、従来と比較して10倍以上の演算量が必要となる。そこで、光の伝搬経路情報の事前計算と複数のプロセッサコアを用いた陰影面演算の並列処理により、実時間でのレンダリング表示を実現した(図12参照)。陰影面を逐次計算する場合、ランダムなメモリアクセスが発生し、プロセッサの演算効率が低下する。これに対しては、効率的なメモリアクセスを可能とする経路情報をメモリ内に格納し、陰影面演算時は、格納した経路情報を用いることでメモリアクセスのオーバーヘッドを抑え、高速なデータアクセスを実現した。また、陰影面演算を複数のプロセッサコアに分配して並列化

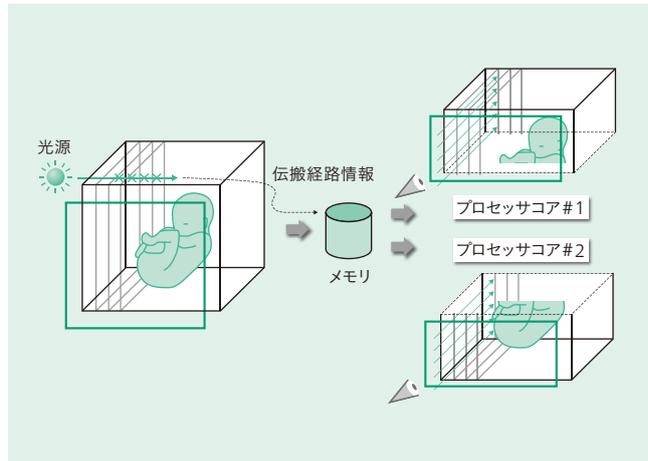


図12 | 経路情報の事前計算と並列化による高速化

メモリアクセス情報を格納し、並列演算を行うことによって演算時間を短縮した。

を図った。

以上により、陰影面演算時間は最適化前に比べて1/6に短縮され、4Dshadingの実時間レンダリング表示が可能となった。

4. 評価および結果

この技術を超音波診断装置HI VISIONシリーズ、デジタル超音波診断装置Noblus^{※)}に搭載し、2013年4月に製品化した。描画レートに関しては、従来比6倍高速化により、実時間でのレンダリング表示を達成した。また、肌色表現に関しては、3.2節で検討した4種類を搭載し、ユーザーによって選択可能とした。

実際の医療現場において臨床評価を実施し、医療従事者と妊婦の双方から好意的な意見を得られた。

※) 販売名：デジタル超音波診断装置Noblus、
医療機器認証番号：224ABBZX00092000



図13 | デジタル超音波診断装置Noblus

ポータブル機において、写実的な胎児三次元表示機能(4Dshading)を搭載した。



図14 | 4Dshading映像の例

立体感と肌の色、質感の再現性が向上している。

また、最上位機種から普及機クラスにいたるすべてのクラスの超音波診断装置に搭載し、特にNoblusへの搭載により(図13参照)、ポータブル超音波診断装置での写実的な三次元胎児映像表示を可能にした。4Dshadingの画像例を図14に示す。

5. おわりに

ここでは、産科で使用される超音波診断装置において、直接のユーザーである医療従事者と、その先の受益者である妊婦とその家族に対して新しい価値を提供するための技術として、写実性の高いボリュームレンダリング技術と、好ましい色を表現する肌色補正技術に関して述べた。この技術は、超音波診断装置HI VISIONシリーズ、およびポータブル型のデジタル超音波診断装置Noblusに搭載され、医療現場で好評を得ている。

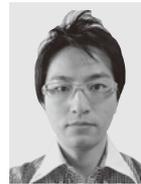
次のステップは、診断への応用である。産科の分野における三次元映像表示は普及しているものの、新たな臨床上の意義を加えることにより、さらなる拡大が見込まれる。医療従事者が求める診断画質に応えるためには、三次元であることの臨床価値を提供することが重要である。画質面では、高精細化やノイズ低減などの基本的な画像処理技術の改善を進める。今回提案した陰影表現技術を深耕して、より複雑な散乱・吸収表現を実現し、その臨床的意味との関連を探究していく。また、今回好ましさの評価に用いた主観定量化技術には、「医療従事者にとっての高画質」を数値化できる可能性があると考えられる。

医療現場との会話を起点とし、引き続き価値あるソリューションを提供していく予定である。

参考文献など

- 1) Merz, E, et al.: Volume scanning in the evaluation of fetal malformations: a new dimension in prenatal diagnosis, *Ultrasound Obstet Gynecol*, 222-227 (1995)
- 2) たまごクラブホームページ,
http://tamago.jp/magazine/tamago.htm?id=thw_top
- 3) 千葉: ママに見せる超音波, 求められる画像, *INNERVISION* (2008)
- 4) A. Appel, et al.: Some techniques for shading machine renderings of solids, In *Proceedings of the spring joint computer conference*, 37-45 (1968)
- 5) H. W. Jensen, et al.: A Practical Model for Subsurface Light Transport, *Proc. SIGGRAPH* (2001)
- 6) V. Tuchin: *Tissue Optics: Light Scattering Methods and Instruments for Medical Diagnosis*, Society of Photo Optical, 166 (2007)
- 7) 小林: 好ましい色再現とその評価: 肌色を例に, *日本印刷学会誌*, 第44巻, 第2号 (2007)
- 8) G. E. Hinton, et al.: A fast learning algorithm for deep belief nets, *Neural Computation*, 18, pp. 1527-1554 (2006)
- 9) 吉田, 外: デジタル超音波診断装置「HI VISION Preirus」の開発—診断能の飛躍的向上をめざして—, *日立評論*, 93, 3, 276~281 (2011.3)

執筆者紹介



荻野 昌宏

日立製作所 横浜研究所 組み込みシステム研究センタ 組み込みソリューション研究部 所属
現在, 医用画像処理の研究開発に従事
情報処理学会会員



柴原 琢磨

日立製作所 横浜研究所 生産技術研究センタ 検査・計測ソリューション研究部 所属
現在, 医療情報処理に関する研究に従事
博士(情報科学)
IEEE会員



野口 喜実

日立製作所 横浜研究所 組み込みシステム研究センタ 組み込みソリューション研究部 所属
現在, 医用画像処理の研究開発に従事



辻田 剛啓

日立アロカメディカル株式会社 技術統括本部 第二メディカルシステム技術本部 第二技術開発部 所属
現在, 超音波診断装置の開発および製品化, 特に三次元超音波画像に関する研究開発に従事
日本超音波医学会会員



村下 賢

日立アロカメディカル株式会社 技術統括本部 第二メディカルシステム技術本部 第一技術開発部 所属
現在, 超音波診断装置のアプリケーション開発および製品化に従事
日本超音波医学会会員, 日本心エコー学会会員



三竹 毅

日立アロカメディカル株式会社 技術統括本部 第二メディカルシステム技術本部 所属
現在, 超音波診断装置のアプリケーション開発に従事
日本超音波医学会会員(工学フェロー), 日本肝臓学会会員