

ボトックス筋肉内注射ナビゲーションのための 重畳表示システムの構築

牛垣 雅人, 諸岡 健一 (九州大学), 宮城 靖 (福岡みらい病院), 倉爪 亮 (九州大学)

Superimposition of Patient Musculo-Skeletal Model onto Images for Navigation of a Botox Injection

Masato Ushigaki, Ken'ichi Morooka(Kyushu University),

Yasushi Miyagi(Fukuoka Mirai Hospital), Ryo Kurazume(Kyushu University)

Abstract : This paper presents a new method for generating superimposed images of the musculo-skeletal model of patients onto their real-time images for the navigation of Botox injection. Our method introduces the knowledge in visual psychology to overlap the model onto the real-time image. The generated superimposed images enable to easily perceive that the musculo-skeletal model is located inside the patient.

1. 緒言

頸部ジストニアや脳卒中の後遺症の一つに、筋肉の過緊張による不随意的な痙縮や異常収縮がある。これらの症状が慢性化すると、顔が正面を向かず正常な歩行が困難になる。さらに症状が悪化すると、脊柱の捻転が生じ、それにより摂食障害や側湾変形、呼吸障害などを引き起こす可能性がある。このような過緊張状態の筋肉(過緊張筋)を要因とする症状に対し、その過緊張筋に、A型ボツリヌス毒素を有効成分とする「ボトックス」を注射することで、過緊張筋を弛緩し症状を和らげる治療法がある。

ボトックス注射を行う際、刺激電極や超音波を使って過緊張筋の位置を同定する手法が用いられている。これらの方法では、皮膚から近い場所にある過緊張筋は同定しやすいが、視診・触診できない深層にある過緊張筋(深層過緊張筋)を同定することは困難である。そのため、深層過緊張筋の治療では、そのほとんどが医師の経験に基いて対象筋肉を同定している。しかし、医師の経験不足やボトックスの投与量の誤判断から、ボトックス注射施術時の医療事故が後を絶たない。例えば、正常筋へ誤注射した場合、不随意運動・肢位姿勢異常の悪化を引き起こす。また、深層筋の周囲にある食道や嚥下に誤注射すると、感染症や嚥下障害になる可能性がある。

この問題を解決するために、施術中に過緊張筋の場所を医師に提示するボトックス注射用ナビゲーションシステムの開発を進めている(Fig. 1)。このシステムは、医師に装着したカメラで顔の位置・姿勢を取得し、その計測データを基に患者頸部の筋肉や骨の形状モデルを、カメラで撮影した患者の映像上に重畳した画像を提示する。この重畳画像は、直接観測できない深層部の過緊張筋を、仮想的に見ることができる。そのため、過緊張筋の位置に基づいて、医師はボトックスを正確に注射できる。

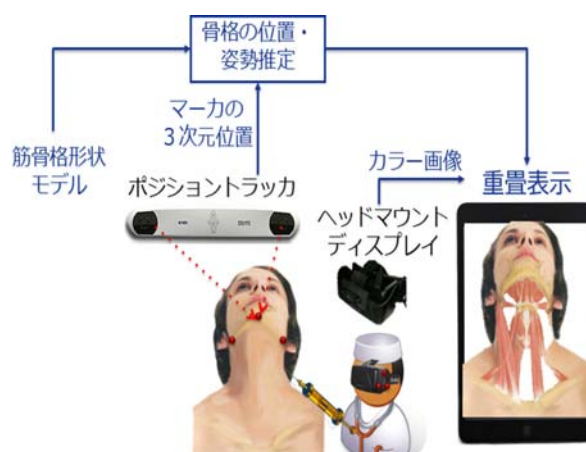


Fig. 1: Our navigation system for a botox injection .

このようなナビゲーションシステムを実現するためには、皮膚や骨、筋肉の空間的位置関係を違和感なく知覚できるように、重畳画像を作成する必要がある。しかし、患者の映像に対して、単純に筋骨格形状モデルを重ねて表示しただけでは、本来皮膚より奥にあるべき筋肉の形状モデルが、逆に皮膚より手前に見えてしまう問題がある。このような重畳画像では、医師が皮膚から筋肉モデルまでの正確な位置を把握することは難しい。

そこで、本研究では、拡張現実技術と共に、視覚心理学の知見を取り入れた、ボトックス注射用ナビゲーションシステムのための重畳画像作成法を提案する。この組み合わせで作成した重畳画像により、各モデルが皮膚内部に存在しているよう、医師が認識しやすくなる。まず、提案するナビゲーションシステムや重畳画像作成法を説明し、実験を通して重畳表示の精度や計算時間など、提案手法の検証結果について報告する。

2. 関連研究

人体組織の形状モデルと実画像の重畳表示を用いる手術ナビゲーションとして、Augmented Reality(AR) マーカを用いた立体内視鏡と超音波画像の重畳表示方法が提案されている [1]。この手法では、直径 3cm 程の AR マーカを超音波検査装置に設置し、立体内視鏡画像から平面 AR マーカを認識することで、そのマーカ上に超音波画像を重畳表示する。この手法を本ナビゲーションに適用する場合、注射器や患者にマーカをつけることが考えられる。手法 [1] では、超音波画像を重畳表示するために、平面マーカ全体が撮影されていなければならない。しかし、注射の際の手の動きなどでマーカの一部が隠れる可能性が高く、常にマーカ全体を撮影することが難しい。手法 [1] では本システムとは異なり、マーカが検出できないことを想定していない。この解決策として、複数のマーカを使用することが考えられるが、注射器の大きさを考慮すると、複数のマーカをつけることは現実的ではない。別の解決策として、患者にマーカを設置することが考えられるが、施術中に患者の姿勢は変化することがあるため、やはりマーカを常に検出できる保証はない。

別のナビゲーションとして、マーカレスで重畳画像を作成する手法 [2][3] がある。この手法では、対象臓器の内部にある腫瘍や血管などの形状モデルを、アルファブレンディングにより重畳表示している。アルファブレンディングとは、画像やモデルの透明度を変更することにより、個々に描画された物体モデルを合成する手法である。従来手法 [2][3] で扱っている、腫瘍や血管は、臓器の一部のみに存在するため、その領域のみをアルファブレンディングすることで、それらが臓器の内部に存在するように提示できる。一方、本研究の対象とする頸部筋肉は、頸部全体にわたって存在するため、アルファブレンディングを適用すると、頸部の大部分が透過されてしまい、筋骨格モデルが皮膚より前に浮き出ているように知覚される可能性がある。

3. ボトックス筋肉内注射ナビゲーションシステム

本システム (Fig. 1) では、まず、コンピュータ断層画像 (Computed Tomography : CT) や、磁気共鳴画像 (Magnetic Resonance imaging : MRI) を使って医用画像を撮影し、その画像から患者頸部の筋骨格形状モデルを抽出・作成する。次に、患者に対して、解剖学的に特徴のある左右の下顎角とオトガイ正中にマーカを設置する (Fig. 2)。下顎角とオトガイ正中をマーカの設置場所として選択した理由は、皮膚の上からも検出しやすいためである。光学式ポジショントラッカ (NDI 社製・Polaris) を用いてマーカの

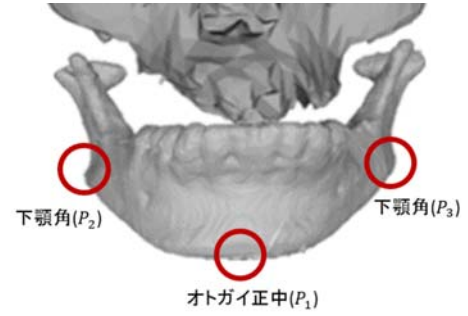


Fig. 2: Makers used to track human face motion .

3次元位置を計測することで、患者顔の位置・姿勢を得る。計測した患者の頭頸部の位置・姿勢を基に、ヘッドマウントディスプレイ (Head Mount Display : HMD) に搭載したカメラから取得した映像内の患者の頭頸部と、筋骨格形状モデルの位置合わせを行う。そして、位置合わせをした筋骨格形状モデルを、患者の映像に重畳表示する。筋骨格モデルと映像内の患者の頭頸部の位置合わせ手法の詳細は、次節で説明する。

3.1 筋骨格形状モデルと画像の位置合わせ

患者の顎に、設置したマーカの位置を、それぞれ P_1 , P_2 , P_3 とする (Fig. 2)。一方、患者の筋骨格形状モデルの下顎骨から、マーカに対応する制御点を3点選択し、それぞれ Q_1 , Q_2 , Q_3 とする。これら6点を使って、ベクトル $i_1, i_2, i_3, j_1, j_2, j_3$ を求める：

$$i_1 = \overrightarrow{Q_1 Q_2}; \quad i_2 = \overrightarrow{Q_1 Q_3}; \quad i_3 = x_1 \times x_2; \quad (1)$$

$$j_1 = \overrightarrow{P_1 P_2}; \quad j_2 = \overrightarrow{P_1 P_3}; \quad j_3 = y_1 \times y_2. \quad (2)$$

求めた6つのベクトルから、行列 $I = [i_1^T, i_2^T]$, $J = [j_1^T, j_2^T]$ を生成し、以下の式より回転行列 A を

$$A = JI^{-1}. \quad (3)$$

と求める。また、平行移動ベクトル b は、

$$b = Q_1 - AP_1. \quad (4)$$

と求める。 A と b を用いて、患者と筋骨格形状モデルの位置合わせを行う。次に、透視投影変換を用いて筋骨格形状モデルを2次元画像面に投影することで、重畳画像を作成する。

4. 筋骨格形状モデルの重畳表示

皮膚と筋骨格形状モデルの位置関係を、医師が正しく認識できるような重畳画像を作成する。提案手法は、一般的

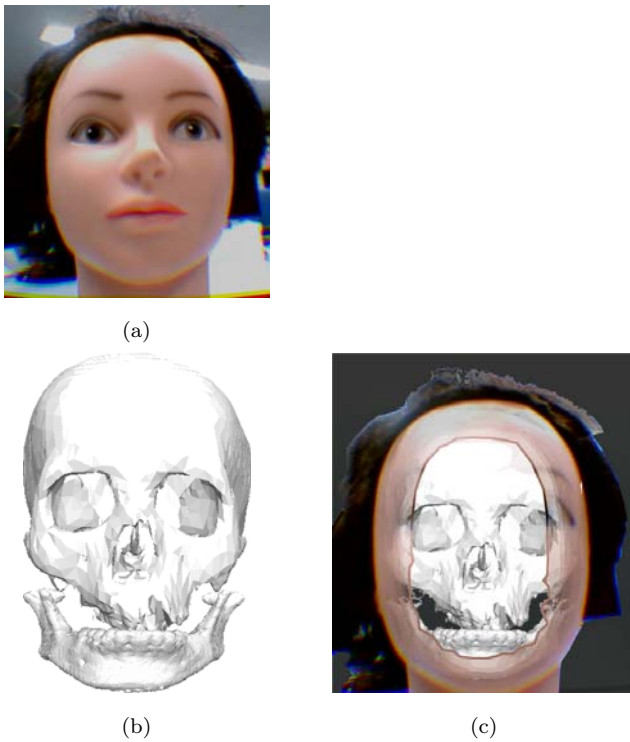


Fig. 3: (a) Background image; (b) Musculo-skeletal model; (c) Superimposed image generated by the background image and the musculo-skeletal model.

な重畳表示技法であるアルファブレンディングだけではなく、額縁効果や錯覚などの視覚心理学に基づく効果を取り入れた。Fig. 3(c) は、背景画像 (Fig. 3(a)) と骨格モデル (Fig. 3(b)) を提案手法により合成した、重畳画像例である。本システムでは頸部を対象としているが、以後では顔を対象として説明する。顔部の筋骨格モデルは顔全体にわたって存在するため、顔部の重畳画像作成でも、頸部の場合と同様の問題がある。そこで、頭部において目標とする重畳表示が実現できれば、頸部においても同様の結果が得られる。また、提案手法は顔に特化しておらず、頸部にも適用可能である。提案手法により作成した、重畳画像における要素技術を、説明する。

4.1 集中力向上を目的とした背景色の変更

背景色が白である画像内に1つの計算式が提示された時、その周囲外の背景を黒色に置き換えることで、その計算に集中しやすい傾向があると報告されている [5]。そこで、筋骨格形状モデルを表示している領域に注目させるために、その領域の周囲の背景を黒色にする。文献 [5] では、注目領域外の背景を全て黒色にしている。一方、本システムでは、医師が HMD を装着したまま注射を行うことを想定しているため、患者やその周囲の情報は HMD を通してのみ

得られる。仮に背景を黒色にすると、医師は背景情報が取得できず、例えば背景部にある注射器が見えなくなる、などの問題が考えられる。そこで、本システムでは、筋骨格形状モデルを表示している領域から一定の範囲内の背景のみ、黒色に置き換える。

4.2 額縁効果

額縁効果とは、対象物を枠で囲い込むことにより、額縁に入れたように切り取って見せる手法であり、美術や風景写真で利用されている。4.1 節で述べた手法と同様に、額縁効果は、その枠内の物体に注目させる効果があり、更に、枠内の物体が、枠よりも奥にあるように知覚しやすくなる効果がある [6]。そこで、筋骨格形状モデルが皮膚より奥にあるように表示するために、額縁効果を取り入れる。

通常、額縁効果で使用する枠は、一定の幅を持つ矩形で、且つその色は単一色である。これに対し、本システムでは、単純に枠で囲むのではなく、2種類の枠を組み合わせる (Fig. 4)。1種類目は、通常の枠と比べ細い単一色の枠であり、この枠を皮膚の断面とみなせる。2種類目の枠は、1種類目の枠の周囲にある皮膚領域の透過度 (以後、アルファ値) を調整することで、一定の幅を持ち、かつ枠の内側から外側へ向かって皮膚が徐々に明確に表示される効果がある。これら2種類の枠の組み合わせによって、筋骨格形状モデルが皮膚より奥にあるように認識しやすくなる。ここで、アルファ値が小さいほど、皮膚を透過した映像を作成できる。額縁効果を用いた処理の詳細を、以下に述べる。

まず、画像内の患者の領域において、筋骨格形状モデルのみを表示する領域を設定する。顔を対象とした場合は、その顔形状を考慮し、表示領域を楕円とする。頸部の場合、楕円や任意の形状とする。以後、楕円の場合について説明する。アルファ値が256階調の場合、楕円内の皮膚のアルファ値は0とする。また、楕円上にある皮膚のアルファ値を255とすることで、縁を設定する。縁の楕円形を同心上に拡張し、拡張した領域のアルファ値を、縁である楕円との距離に応じて変化させる。具体的には、最初に設定した楕円に対する拡張した楕円の大きさの比 r と縁の間にある画素のアルファ値を、 $\alpha = 0.472r - 0.047$ とする。この式は、実験的に決定した。このように、楕円を拡張し、拡張した領域のアルファ値を、縁である楕円との距離に応じて変化させる。

4.3 アルファブレンディング

前節までに述べた要素技術で作成した2枚の画像と、カメラで取得した画像、および筋骨格形状モデル、の計4

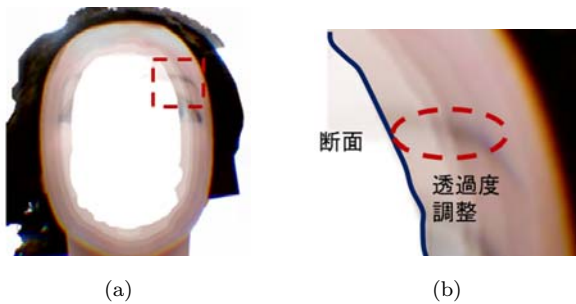


Fig. 4: Face image obtained by using two types of frames derived from the concept of a frame effect . (a) Frame effect image; (b) Enlarged view of the red square frame in (a).

種類の情報をアルファブレンディングを用いて合成することで重畳画像を生成する．本研究では，4層構造のレイヤ (Fig. 5) を考え，最下部から顔部を除く背景画像 (Fig. 3(a))，黒背景画像，筋骨格形状モデル (Fig. 3(c))，額縁効果を取り入れた顔画像 (Fig. 4(a)) である．

各層でそれぞれアルファ値を設定することで，最下部から合成された画像 (ターゲット) の色と，新しく合成するレイヤ (ソース) の色を混合することができる．ターゲットの色の要素を $(R_d, G_d, B_d, \alpha_d)$ ，ソースの色の要素を $(R_s, G_s, B_s, \alpha_s)$ とする．また，ターゲットとソースの混合係数を $w (0 \leq w \leq 1)$ とする．アルファ値は1枚の画像に対する透過率であり，一方，混合係数は，2枚の画像から1枚の画像を合成する時，各画像の混合率を表す．混合後のターゲットの色要素を式 (5) によって得る：

$$\begin{pmatrix} R_d \\ G_d \\ B_d \\ \alpha_d \end{pmatrix} \leftarrow w \begin{pmatrix} R_s \\ G_s \\ B_s \\ \alpha_s \end{pmatrix} + (1-w) \begin{pmatrix} R_d \\ R_d \\ R_d \\ \alpha_d \end{pmatrix} \quad (5)$$

混合処理において，物体の描画順序は，出力結果に影響を及ぼす．つまり，混合処理は，最後に描画した物体の色を基準とし，すでに描画されている物体の色を混合する．また，統合する画像間で奥行き方向の位置が異なる場合，奥にある物体から描画をする必要がある．そのため，本システムでは，背景画像，黒背景画像，筋骨格形状モデル，額縁効果を取り入れた画像の順に，式 (5) を使って合成することで重畳画像を作成する．

5. 実験

提案手法の有効性を検証するために，仮想患者であるマネキンの画像に，骨格モデルを重畳表示する実験を行った．ここで，骨格モデルは，アメリカ国立衛生研究所で公開

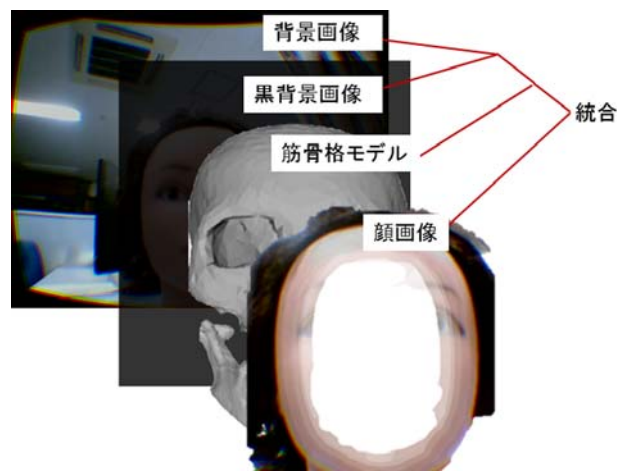


Fig. 5: Superimposed image.

されている人体解剖データ Visible Human[7] から作成した．仮想患者を HMD (Oculus VR 社製：Oculus) に搭載したカメラで撮影し，その画像に対し提案手法を用いて重畳画像を作成した．その結果を Fig. 6(a) から (d) に示す．Fig. 6(b) は，骨格モデルを表示している領域の大きさを変更したものであり，Fig. 6(c) は黒色領域を削除したものである．また，単純なアルファブレンディングのみを用いて作成した重畳画像を Fig. 6(e) に示す．Fig. 6(e) と比較すると，提案手法により作成した重畳画像は，骨格モデルが皮膚よりも奥にあるように認識できる．医師に2つの画像を提示し，骨格モデルと皮膚の奥行き方向の位置関係について評価してもらった．その結果，Fig. 6(a) の重畳画像の場合，骨格モデルが皮膚よりも手前に見え，これに対し，提案手法により作成した重畳画像は，骨格モデルが皮膚よりも奥にあるように認識できると評価した．

今回の実験では，重畳画像作成に関する計算時間は0.048秒 (= 20fps) であった．実際のボトックス注射に本システムを使用するためには，医師に違和感を与えず滑らかな映像を提供しなければならない．一般的な動画のフレームレートが30fpsであることを考慮すると，計算時間の更なる短縮化が必要である．現在，画像の加工を逐次処理で行っており，この処理に時間を要している．そこで，この処理をGPUなどによる並列処理を行うことで，計算時間の短縮化が実現できると考えられる．

6. 結言

本稿では，拡張現実技術と視覚心理学を取り入れた，ボトックス注射用ナビゲーションシステムのための重畳画像作成法を提案した．実験結果より，アルファブレンディングのみの重畳表示と比べ，提案手法による重畳画像は，筋骨格モデルが皮膚の内部にあると認識しやすいことを確認した．本稿では顔を対象としているが，頸部に適用させる

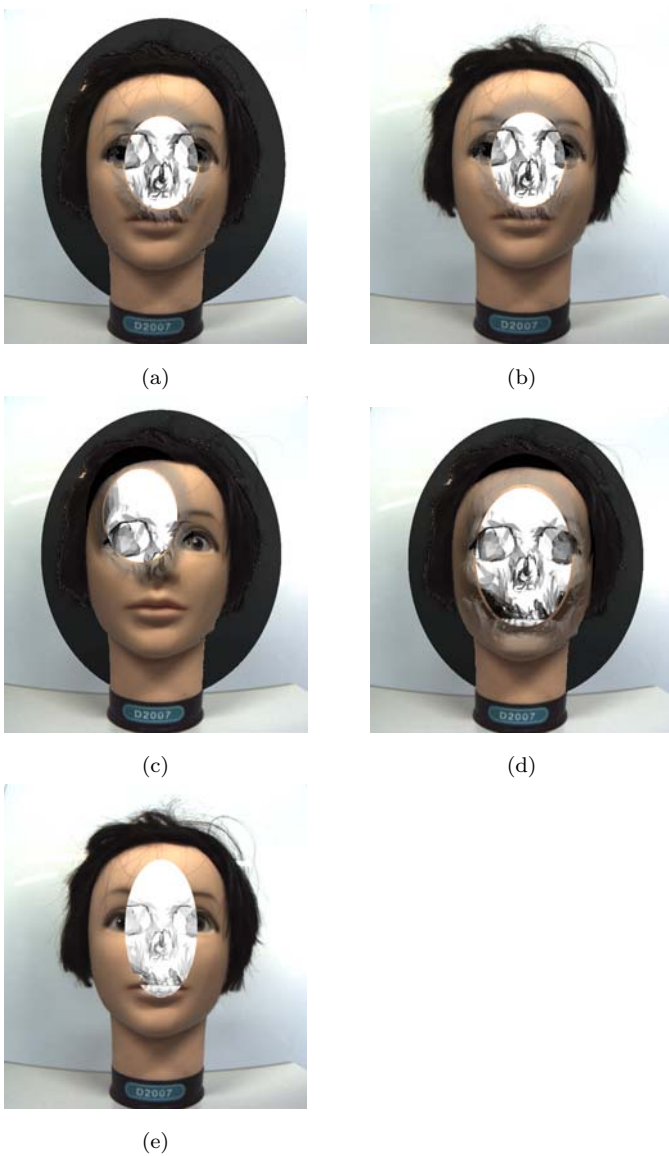


Fig. 6: Superimposed images obtained by (a-d) our proposed method and (e) a conventional method using only alpha blending . The proposed method generates the superimposed images by (a) all four layers , (b) the three layers except black background . Also the proposed method obtain another superimposed images by changing (c) the position and (d) size of the frame .

ことも可能である . 今後は , 頸部への提案手法の適用と共に , 実時間処理に向けた処理の高速化を行う .

7. 謝辞

本研究は、九州大学 QR プログラム・つばさプロジェクト (27818, 2015 ~ 16) , 高橋産業経済研究財団の助成を受けた .

参考文献

- [1] Pratt , Philip , et al . “ Autonomous ultrasound-guided tissue dissection . ” International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention . Springer International Publishing , 2015 , pp . 249-257 .
- [2] Marques , Bruno , et al . “ Improving depth perception during surgical augmented reality . ” ACM SIGGRAPH 2015 Posters . ACM , 2015 , p . 24 .
- [3] Otsuki , et al . “ Please show me inside: improving the depth perception using virtual mask in stereoscopic AR . ” SIGGRAPH Asia 2015 Emerging Technologies . ACM , 2015 , pp.19-22 .
- [4] 画像情報教育振興協会 , “ ビジュアル情報処理 CG ・ 画像処理入門 ” , CG-ARTS 協会 , 2004 .
- [5] 橘 卓見ら , “ 注意領域への集中力向上を目的とした領域外における視覚刺激 ” , 第 16 回日本バーチャルリアリティ学会大会 , 2011 , 4 pp . 1-4 .
- [6] FUJIFILM , “ 風景写真の撮影法 ” , <http://fujifilm.jp/support/information/landscape/index> .
- [7] V . SPITZER et al . “ The Visible Human Male ; A Technical Report ” , J . Am Med . Inform . Assoc . , pp . 118-130 , 1996