

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 29 日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23500566

研究課題名(和文) 医学教育訓練に用いる疑似人体組織造形方法の研究

研究課題名(英文) Modeling method of pseudo human anatomy for medical education and training

研究代表者

足立 吉隆 (Adachi, Yoshitaka)

芝浦工業大学・システム工学部・教授

研究者番号：70407229

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円、(間接経費) 1,170,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では医学教育訓練で使用可能な、人体内部の色と硬さの両方を再現した人体模型を造形するための基礎技術として、そのベースとなる疑似人体組織の製作を試みる。メタクリルシリコン、ジメチルシリコン、光架橋剤を混合したシリコンオイルを紫外線で硬化させることで、0.33mmピッチの窪みがある厚さ0.33mmのパレットを作製し、シリコンオイルに顔料と分散剤を混入した紫外線硬化ゲルを窪みに滴下することで適当な色に着色する。これを紫外線で硬化させた後、積層・接着することで疑似人体組織を作製することができた。

研究成果の概要(英文)：An anatomical model of human body which can be used by medical education and training is required, reproducing both colors and hardness of human body. As basic technologies for this, modeling method of pseudo human anatomy was tried in this research. A palette which is 0.33mm in thickness with small hollows of 0.33mm pitch is produced by stiffening the silicone oil which mixed methacryl silicone fluid, dimethyl silicone fluid and an optical crosslinking agent by using ultraviolet rays. This is colored a suitable color by the ultraviolet curing gel which mixed paints and the silicone oil being dropped at hollows. After stiffening this by using ultraviolet rays, a pseudo human anatomy was made by laminating and adhesion.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：人間医工学・医用システム

キーワード：人体模型 マネキン 疑似人体組織 トレーニング 外科手術 触診 紫外線硬化ゲル 造形

1. 研究開始当初の背景

外科領域における内視鏡下手術や顕微鏡下手術の適応拡大に伴い、外科手術の安全性の向上が社会的課題となっている。その解決策の一つとして、手術シミュレータなどの教育訓練装置が国内外の多くの研究機関で開発されている。それら課題を挙げると以下ようになる。

- a) バーチャルリアリティ技術を用いた手術シミュレータは臓器に手術操作を加えた際の変形アルゴリズムや、手ごたえの提示技術は未だ研究途上である。
- b) 一般に医学教育で用いられる人体模型(マネキン)は外側から「観察する」ためのもので、臓器内部の色や硬さは手術操作による切開や切離などを想定していない。
- c) 三次元粉末積層造形装置により内部まで着色された模型の医用応用が研究されている。しかし、材質が石膏であるため硬い模型しか実現できず、柔らかい模型が期待されている。
- d) 産業技術総合研究所にて開発されたヒト鼻腔モデルは精巧にできている。しかし骨格部分と粘膜部分という二つ部分で硬さと色の違いを実現しているだけで、他の部位への転用が難しい。

以上のようなことから、外科領域における教育訓練装置の実現性について検討した結果、形状だけでなく、内部の色や硬さも本物に忠実に作った人体模型の利用が、現状では最善の解決策であるとの結論に至った。このような精巧に作られた人体模型は国内外で例がない。

2. 研究の目的

本研究では医学教育訓練で使用可能な、人体内部の色と硬さの両方を再現した人体模型を造形するための基礎技術として、そのベースとなる疑似人体組織の製作を試みる。



図1 人体模型 (案)

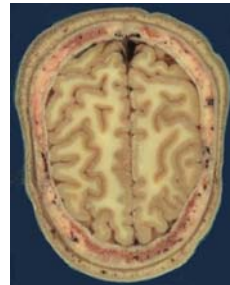


図2 断面 (案)

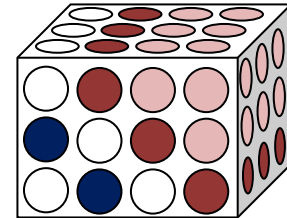


図3 疑似人体組織

図1に示す人体模型を切開した時の断面が、図2に示すような本物の人体を切開した時の断面と同じになるためには、図3に示すように、あたかも細胞を積み上げて人体組織を作り上げるような疑似人体組織の造形方法が必要となる。

本研究を実施する前に行った疑似人体組織の素材を検討する予備実験では、1)ナイロンカプセル、2)ゼラチン粒子、3)寒天粒子などの素材について検討した。1)ナイロンカプセルはジアンミン水溶液と酸クロライド溶液の界面にナイロンが生成されることを利用して球状のカプセルを作るものである。この実験では溶液中で球状カプセルを作製することには成功したが、空気中に取り出すと形状を保てないことが分かり断念した。2)ゼラチン粒子は、加熱溶解したゼラチンをシクロヘキサン溶液中に滴下して球状ゼラチンを作るものである。この方法では球状ゼラチンを作ることに成功したが、連続的に安定して粒子を作ることが難しいことが分かり断念した。3)寒天粒子は、加熱溶解した寒天をシリコンオイルの中に滴下して粒子を作るものである。シリコンオイルに光架橋剤を混合しておくことで、作製した粒子をそのままの形状でゲル化できる。この方法では粒子を作製することに成功したが、粒子を適当な間隔に並べ、さらにそれらを積層することが難しかった。これらの実験から、粒子が

入る窪みがあるパレットを作成し、それを積層する方法が擬似人体組織の作製に相応しいという結論に至った。

一方、作製する粒子の大きさについても事前検討を行った。インクジェットプリンタの吐出量が1~2plで人間の細胞のサイズに近い。しかし、このような小さな粒子を所定の位置に並べることは極めて難しい。そこで、どれだけのサイズが人間にとって違和感なく見ることができるかを調査した。Apple社のMacというコンピュータの画面解像度が72dpiであるため、0.35mm以下で粒子を並べるのが適当であるという結論に至った。

さらに人体模型を切断したときには、人間と同じ断面が見られないといけな。このためには予めすべての粒子を着色する必要がある。人体内部の画像データを公開しているVisible Human Projectの女性データは0.33mmピッチのスライスであるため、人体模型の画像データとして相応しいことが確認された。

以上の予備実験の結果から、本研究では紫外光により任意の柔らかさに硬化可能な着色ポリマー溶液を、0.33mmピッチの微小な窪みのある、厚さ0.33mmのパレットに滴下した後に硬化させ、パレットを三次元に積層することにより、本物の人体組織の色と硬さに近い疑似人体組織を作製するという、これまでにない造形方法を研究する。

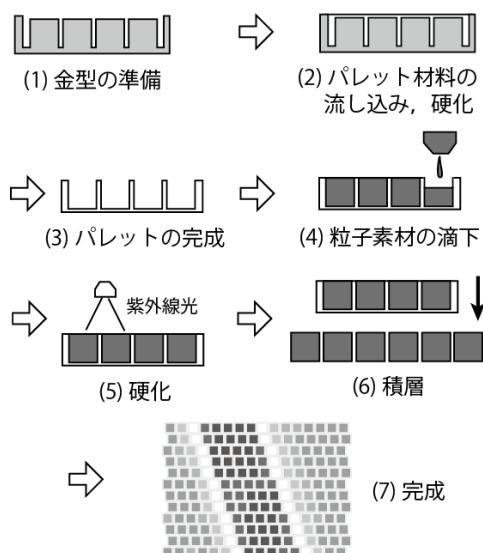


図4 擬似人体組織の造形方法(案)

3. 研究の方法

本研究で想定する擬似人体組織の造形手順を下記に示す。

- ① あらかじめ準備した金型を用いて、パレットを作成する(図4(1)-(3))。
- ② パレットのくぼみに、着色した粒子素材(モノマー、光重合開始剤、顔料などを混合したものを)を滴下する(図4(4))。
- ③ 紫外光を照射することにより粒子素材を硬化させる(図4(5))。
- ④ パレットを接着、積層する(図4(6))。
- ⑤ 積層を繰り返すことで所定の形状に造形する(図4(7))。

上記の造形方法で擬似人体組織を作製するために、本研究では下記に示す要素研究を実施する。

- 1) 金型の作製方法の研究
パレットの窪み部分を造形するための金型を作製する。金型の材質およびその加工方法の研究を行う。
- 2) パレットの製作方法の研究
パレットは擬似人体組織の一部となるため、その硬さを調節できる必要がある。パレットの素材および成型方法の研究を行う。
- 3) 粒子素材の滴下方法の研究
パレット上の窪みに適量の粒子素材を滴下する方法の研究を行う。
- 4) 粒子素材の着色方法の研究
粒子素材を紫外線光で硬化させるため、紫外線光で脱色などを起こさない着色剤を研究する。
- 5) 粒子素材の硬さ制御の研究
擬似人体組織が人体と同等の硬さを実現するための硬さ制御の方法を研究する。
- 6) パレットの積層方法の研究
1枚ごと着色したパレットを接着しながら積層する方法を研究する。

4. 研究成果

(1) 金型の作製方法の研究

微小な粒子を作成し、それらを0.33mmピッチで立体的に積み上げるには、紫外線硬化ゲルを使用して、表面に縦・横・深さが0.33mmより小さい窪みがあるパレットを作製する必要がある。このようなパレットを作製するには型(メス型)が必要となる。型の作製方法を確立するためにいくつかの実験を行った。塩化第二鉄と銅版を使用するエッチング手法により型を作製する方法では、目標の形状に窪みを作製することができなかった。マイクロエレクトロニクス分野で使用されるSU-8を使用した方法では、窪みの深さが0.02mmまでしかできなかった。超硬(タングステンカーバイド)に幅0.07mm、深さ0.26mmの溝を掘り金型を作製したところ、パレットのメス型として使用できることが確認できた。この金型では溝幅が狭く、離型が難しいため、最終的には0.33mmピッチで幅0.106mm、深さ0.26mmの窪みのある金型を作製した(図5)。

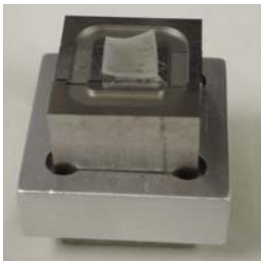


図5 金型

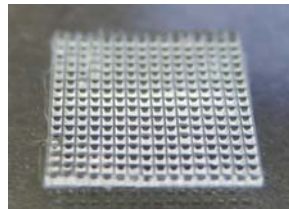


図6 パレット

(2) パレットの製作方法の研究

前述の金型を使用して、厚さ0.33mmで5mm四方のパレットを作製する。メタクリルシリコン、ジメチルシリコン、光架橋剤を混合した紫外線硬化ゲルを金型に流し込み、紫外線光を照射して紫外線硬化ゲルを硬化させた後、これを金型から取り外すことによりパレットを作製する。擬似人体組織の一部となるパレットも硬度を調節できる必要がある。メタクリルシリコンとジメチルシリコンの混合比を変更することで、硬度の違いを実現できることが実験により確かめられた。ここでの問

題はパレットをメス型から離型できるかどうかである。パレットと金型との間に空気を入れて強制的に離形させる方法やシリコン系離型剤、フッ素系離型剤など塗布する方法を実験した。最終的には金型にフッ素系離型剤を塗布することでパレットと金型との摩擦を減らし、アセトン溶液の中で超音波振動を加えることにより離型させた(図6)。現状では分子量2370g/molのメタクリルシリコンでできた硬いパレットならば離型できるが、3900g/molの柔らかいパレットは離型することが難しいことが分かった。

(3) 粒子素材の滴下方法の研究

着色した紫外線硬化ゲルをパレットの窪みに滴下するには、窪みの体積である15.1ナノリットルを正確に滴下する必要がある。このためには紫外線硬化ゲルを射出する方法が相応しいと考え、最初にピエゾ素子を使用したインクジェットの原理を応用した射出方法について実験を行った。市販のインクジェットプリンタを用いて様々な条件で実験を行ったが、吐出する位置精度が悪く、同じ位置に紫外線硬化ゲルを吐出できないことが分かった。

そこでディスペンサを用いる方法について実験を行った。紫外線硬化ゲルの粘度を測定した結果、90~100mPa・sであることが判明したため、この粘度に対応するディスペンサ(図7)を用いて滴下することにした。パレットの窪みとディスペンサの先端の位置

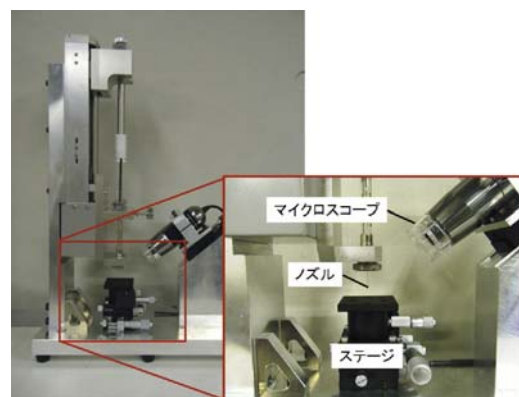


図7 ディスペンサ

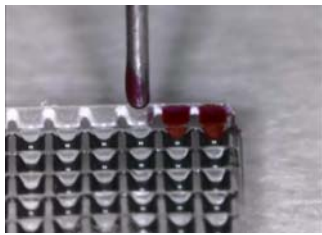


図8 窪みへの滴下

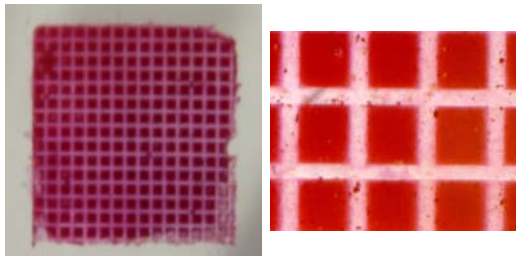


図9 着色シート(左)と顕微鏡写真

合わせ(図8)は目視による手動で行い滴下実験を行ったところ、窪みの中に適量が滴下できることが確認できた(図9)。

(4) 粒子素材の着色方法の研究

粒子素材である紫外線硬化ゲルに着色するためにシアン(C)、マゼンタ(M)、イエロー(Y)、白(W、酸化チタン)、黒(K、カーボンブラック)の5色の着色剤を最初に作製した(図10)。これらは紫外線光に強い顔料を使用することで、60分の紫外線照射でも脱色などの問題は発生しなかった。一方、顔料の粒子径がシアン 100~150nm、マゼンタ 80~200nm、イエロー30~50nm、黒 29nm、白 250nm であるにも係わらず、直径が 100 μ m のディスペンサのノズルに詰まってしまうという問題が発生した。調査の結果、シリコンオイル中で顔料が凝集していることが分かったため、分散機(ビーズミル)と分散剤により分散させることにした。これによりノズルの詰まりが解消された。

前述の基本5色からVisible Human Projectの画像データで使用されている色を作製す



図10 基本5色

る実験を行った。作製する色は脳の色で、画像のRGBに対応するCMYKの割合を求め、基本5色を混合することで表1に示す7色を作ることができた。またJIS8723で規定されている方法で色の一致を確認した。

表1 脳の色(最も明るい色から濃い色まで)

	1	2	3	4	5	6	7
色							
シアン	0.22	0.39	0.45	0.44	0	0	0
マゼンタ	0.48	1.85	2.80	6.37	7.95	27.78	25.96
イエロー	7.71	13.86	19.59	20.03	22.73	27.78	25.96
カーボンブラック	0	0.76	2.54	4.88	12.50	25.93	48.08
酸化チタン	91.59	83.15	74.62	68.28	56.82	18.52	0

(5) 粒子素材の硬さ制御の研究

粒子およびパレットの硬さを調整して人体の硬さと同じにする必要がある。ここでは2種類のシリコン、ジメチルシリコンとメタクリルシリコンを用いた。ジメチルシリコンに光架橋剤を加えて紫外線を照射すると硬化するが、メタクリルシリコンに光架橋剤を加えて紫外線を照射しても硬化しない。この特徴を利用すると、メタクリルシリコンとジメチルシリコンの混合比を変えた溶液に光架橋剤を混合して紫外線を照射することで、硬度の違いを実現できることが実験により確かめられた。

一方、人体の硬さ測定にはデュロメータ(JIS K 6253)を用いた。掌、上腕、肩、腹、大腿、頬の6箇所を測定した結果、最も硬い部位が80(デュロメータ)、最も軟らかい部位が36であった。ジメチルシリコンに対するメタクリルシリコンの比を、1:0、1:1、1:2とすると、そのデュロメータ硬さは92、52、30となり、メタクリルシリコンとジメチルシリコンの混合比を変えることにより、人体の硬さを再現できることを確認した。

(6) パレットの積層方法の研究

窪みに着色粒子を滴下して硬化させたパレットを積層するには、上下のパレットを接着させる必要がある。この時に接着剤などを使用すると、擬似人体組織の硬さが変わってしまう恐れがある。そこで同じ素材での接着を試みた。

液体の紫外線硬化ゲルの中に硬化した紫外線硬化ゲルを入れて、表面に紫外線硬化ゲルを拡散浸透させた後に硬化した紫外線硬化ゲルを貼り合わせて紫外線を照射する実験を行った。1日ほど時間をかけて拡散浸透させたが接着することができなかつた。この原因は光架橋剤に対する酸素阻害と考え、空気中ではなくメタノール中で拡散浸透をさせることにした。この結果、30分ほどの拡散浸透時間でも硬化した紫外線硬化ゲルを接着することができた。

前述の脳の色で着色した 0.33m 厚のパレット (5mm 四方) を積層させて作製した擬似人体組織を図 11 に示す。ハンドメイドのため現状では小さなものしかできない。より大きな擬似人体組織を作製して、硬度の確認を行う予定である。

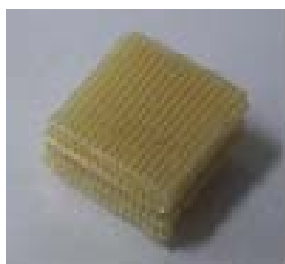


図 11 擬似人体組織

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 13 件)

- ① 田中勇介, 足立吉隆, 中村朝夫, 小山博史, 手術の教育訓練用マネキンの造形方法に関する研究, 日本VR学会力触覚の提示と計算研究会第 11 回研究会, 2013 年 11 月 8 日, 芝浦工業大学大宮校舎.
- ② 田中勇介, 足立吉隆, 中村朝夫, 小山博史, 紫外線硬化ゲルを用いた人体模型の積層造形法に関する研究, 日本機械学会 2013 年度年次大会, 2013 年 9 月 8 日, 岡山大学津島キャンパス.
- ③ 田中勇介, 足立吉隆, 中村朝夫, 小山博史, 紫外線硬化ゲルを用いた人体模型の積層造形法に関する研究, 第 13 回日本 VR 医学会学術大会, 2013 年 8 月 31 日, 大阪電気通信大学駅前キャンパス.
- ④ 足立吉隆, 岡本弘, 田中勇介, 中村朝夫, 小山博史, 医学教育訓練用マネキンの造形方法に関する基礎的研究, 日本バーチャリアリティ学会力触覚の提示と計算研究会第 10 回研究会, 2013 年 3 月 13 日, 沖縄産業支援センター.
- ⑤ 田中勇介, 足立吉隆, 岡本弘, 中村朝夫, 小山博史, 紫外線硬化ゲルを用いた人体模型の積層造形法に関する研究, 2013

- 年度精密工学会春季大会, 2013 年 3 月 13 日, 東京工業大学大岡山キャンパス.
- ⑥ 岡本弘, 足立吉隆, 中村朝夫, 小山博史, 紫外線硬化ゲルを用いた人体模型の積層造形法に関する研究, 第 13 回計測自動制御学会 SI 部門講演会, 2012 年 12 月 18 日, 福岡国際会議場.
- ⑦ 岡本弘, 足立吉隆, 中村朝夫, 小山博史, 紫外線硬化ゲルを用いた人体模型の積層造形法に関する研究, 第 12 回日本 VR 医学会学術大会, 2012 年 8 月 25 日, 千葉大学医学部付属病院.
- ⑧ 岡本弘, 足立吉隆, 中村朝夫, 紫外線硬化ゲルを用いた人体模型の着色方法の研究, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012 講演論文集, 2012 年 5 月 27 日, アクティシティ浜松.
- ⑨ 水野貴義, 足立吉隆, 中村朝夫, 小山博史, 長谷川忠大, 疑似人体組織造形法の研究 (金型を用いた紫外線硬化ゲルシートの作製法), 計測自動制御学会 S I 部門 VR 工学部会秋季研究会, 2011 年 12 月 17 日, 東京医療保険大学.
- ⑩ 桜井素之, 足立吉隆, 疑似人体組織造形法の研究 (疑似人体組織の着色方法), 計測自動制御学会 S I 部門 VR 工学部会秋季研究会, 2011 年 12 月 17 日, 東京医療保険大学.
- ⑪ 高野大輝, 足立吉隆, 疑似人体組織造形法の研究 (疑似人体組織の造形における紫外光の制御法), 計測自動制御学会 S I 部門 VR 工学部会秋季研究会, 2011 年 12 月 17 日, 東京医療保険大学.
- ⑫ 水野貴義, 足立吉隆, 中村朝夫, 小山博史, 長谷川忠大, 紫外線硬化ゲルを用いた人体模型造形法に関する研究, 日本 VR 学会第 16 回大会, 2011 年 9 月 20 日, 公立はこだて未来大学.
- ⑬ 水野貴義, 足立吉隆, 中村朝夫, 小山博史, “紫外線硬化ゲルを用いた人体模型の積層造形法に関する研究”, 第 11 回日本 VR 医学会学術大会, 2011 年 8 月 27 日, 奈良先端科学技術大学.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.web.se.shibaura-it.ac.jp/y-adachi/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

足立 吉隆 (ADACHI, Yoshitaka)
芝浦工業大学・システム理工学部・教授
研究者番号: 70407229

(2) 研究分担者

中村 朝夫 (NAKAMURA, Asao)
芝浦工業大学・工学部・教授
研究者番号: 50155818