

人工現実感手術室

5 手術シミュレーションシステム

三菱電機（株）情報技術総合研究所
 （現、武蔵工業大学工学部電子情報工学科）
 向井 信彦 mukai@cs.musashi-tech.ac.jp

手術シミュレータって何？

現在では、18歳以上の日本人ならほとんどすべての人たちが運転免許証を持っており、運転免許証を持っていないの方が珍しいくらいであろう。運転免許証を取得する際には、必ず道路交通法の勉強をし、ある程度の知識を得た上で、自動車の運転練習をすることになる。しかしながら、単に道路交通法の知識を持っているだけでは自動車の運転をすることはできない。つまり、実際に車に乗って運転してみないと運転の仕方は分からないのである。ところが、いきなり実車に乗って運転すると、急発進をしたり、急ブレーキをかけたりと、危なかしくって見ていられない。いや、見ていられないだけならまだしも、大怪我をする、あるいは、大怪我をさせる可能性もある。

そこで、運転練習のためのシミュレータが登場するのである。英語ではSimulatorと記述され、辞書によると“まねる（見せかける、偽る）人（物）”となっている。つまり、本物ではないが、本物と同じような機能を持っている人（物）ということであり、自動車の教習所でお目にかかるのは、ドライブシミュレータと呼ばれる。車に乗った時と同じような座席が用意しており、ガイドに従って車を運転すると、前方に備え付けられているディスプレイに映し出される映像が変化し、いかにも車を運転しているかのような気分させてくれる（とはいっても、CG（Computer Graphics）で生成した映像と実写映像とでは現在の技術を持ってしてもかなりの差があるため、まったく同じ感覚を生み出すまでには至っていないが、ゲームと思えば十分な映像である）。

このドライブシミュレータを運転する限りでは、変化するのは前方にある映像のみであり（中には音を発生したり、座席を揺らしたりするものもあるが）、運転座席は常に安全であり、運転免許証を持っていない素人でも安心して車の運転練習をすることができる。信号無視をしても逮捕されないし、事故を起しても誰も傷をつけることはない。これが、シミュレータのメリットである。つまり、実際の環境下で行う動作の前に、

あらかじめ安全な環境下で練習をすることができ、練習した結果を次の練習あるいは本番に活かすことができる。そして、この練習は何度でも繰り返して行うことができるのである（往々にしてシミュレータは高価であるため、稼働させるための費用が必要であり、予算に応じて練習回数が制限される場合もあるが）。

同様なシミュレータとして有名なものには、フライトシミュレータがある。これはパイロットを対象とした航空機の操縦練習機であり、通常のフライト訓練だけでなく、エンジントラブルなどの偶発的 사고を意図的に発生させ、その回避能力を養うという側面も備えている。今やフライトシミュレータはパイロット育成に必須のアイテムとなっており、初心者パイロットだけでなく、ベテランパイロットも定期的にフライトシミュレータによる飛行訓練が義務付けられている。

これらと同じ役割を果たすシミュレータが医療の世界にも必要ではないか、特に人間の生死を預かる外科医にとっては当然あって然るべきではないか、との発想のもとに生まれたのが手術シミュレータである。ドライブシミュレータがドライブ、つまり車の運転練習機、フライトシミュレータがフライト、つまり航空機の操縦訓練機であるのと同様、手術シミュレータとは人間を対象とした外科手術の練習機なのである。

さまざまな医療用シミュレータ

では、現在における外科手術の教育はどのようにして行われているのか？ 医師でもない著者が声を大にして言うことはできないが、いろいろな医師の先生方から伺った話では、大学の医学部、あるいは医科大学に入学して、一般教養のほか、生物、特に人間の医療に関する知識を得た後、実際の手術現場で指導医の先生方が行う手術を見学する。何度も何度も手術を見学した後、執刀医となって実際の手術を任されることになる。もちろん、遺体を用いた解剖の実習や動物を用

対象部位	システム概要
頭部	脳外科手術のための開頭位置を正確に決定するためのものや、脳腫瘍と思われる箇所をピンポイントで抽出する穿刺などの低侵襲手術を行うために、MRIなどにより入手した情報をもとに脳の内部情報をCGで表示するシステムがある。
眼球	白内障手術を対象とし水晶体切除吸引と人工レンズ挿入を目的としたものや、網膜付近に生成する病気の治療を目的とした網膜・硝子体（しょうしたい）手術シミュレータがある。
歯	歯科診療や歯科治療を目的としたもので、歯の切削技量向上のために、手に伝わる反力が重要となる。
食道	MRIなどにより入手した情報をもとに食道を人工的に再現し、内視鏡手術のための練習を行う。食道癌の正確な摘出が目的である。
内臓	肝臓や腎臓などの臓器を摘出する手術の練習が目的であり、臓器に触れた際の触覚を体験できるシステムもある。
腕（血管）	静脈注射の練習システムである。老若男女だけでなく、さまざまな人種のモデルを用意し、各個人ごとに注射針の挿入感覚が異なることを学習する。
脚（骨）	大腿骨や膝関節などの骨の切削や置換にかかわる手術の練習システムである。骨の削り取る部分を正確に計算するとともに、置換した人工骨が障害なく機能するようにシミュレーションする。

表-1 主な手術シミュレータ

いた手術練習の機会はあるが、人間と動物との生体構造の違い、あるいは生体と死体との弾力の違いなどが存在するため、動物や遺体を用いて生体手術の微妙な感覚を体験するのはきわめて困難である。また、手術で扱う症例は多岐に渡り、まったく同じ症例は存在しないし、典型的といわれる病状ですら1つ1つが微妙に異なる。つまり、遺体を用いた解剖の実習や動物を利用した手術練習には限界があり、症例によっては実患者が初めてのケースという場合もあり得る。

医師として神様ではなく生身の人間であるから、過ちを犯さない方が不思議なくらいである。おそらく、医療過誤は永遠の問題なのかもしれない。ただ現在では、医師だけでなく患者の方も以前よりも多くの情報入手することが可能となってきたために、医療側のミスに気づく機会も多くなっているように思われる。X線CT (Computed Tomography) やMRI (Magnetic Resonance Imaging) 装置が発達してきたお陰で、手術に必要な情報を術前に得ることができるようになり、本番の手術を前にして、さまざまな術前検討を行うことが可能となってきた。これだけ詳細な情報があれば、よほどのことがないかぎり手術は失敗しないだろうと考える人も多いかと思うが、知識としての情報を得ることと、実際に手を動かして手術することとは別物である。いくら生体に関する知識を豊富に持っても、手先の不器用な人は繊細な手術には向かない。手術には、ハンド・アイ・コーディネーションと呼ばれる技術、つまり、目で見、脳で考えたとおりの細かな手作業を行える能力が要求されるわけである。そのために手術ロボットなるものも登場するが、これは他の稿で扱うので、別の先生にお任せする。

いずれにせよ、医療に関する知識や生体に関する情報だけがが増えても、実際に手足を動かさなければ手術

はうまくならないのである。そのためには、手術シミュレータが不可欠となってくる。たとえばドライブシミュレータ1つとっても、1種類のシミュレータですべての車の運転練習をすることは不可能である。通常のドライブシミュレータは自家用車用に設計されているため、トラックやバスなどの第二種の車両運転用に対応するためには、座席位置を若干持ち上げ、車体の長さに応じた内輪差を考慮するプログラムに切り換える必要が生ずる。また、走行する道路にしても一般道と高速道路とは周りの環境も異なるから、数種類のプログラムを用意しなければならない。さらに、建設機械や農業機械などの特殊用途向け車両の運転にはハンドルやブレーキ操作など、ユーザインタフェース部分も変更する必要がある。医療用シミュレータも同様であり、人間のどんな部位にも対応した万能型手術シミュレータは現時点では存在しない。そのために、各部位に対応したさまざまな手術シミュレータが研究開発されている(表-1)。

眼科用手術シミュレータ

一例として、筆者らが旭川医科大学眼科教室と共同で開発してきた眼科用手術シミュレータについて紹介する。表-1にも述べているとおり、現在の眼科手術シミュレータとしては白内障手術を対象としているものと、網膜・硝子体手術を対象としているものの2種類に分類することができる。もちろん、眼科手術にはこの2種類だけでなく、緑内障手術や角膜移植などほかにさまざまな症例も存在するが、現在ではそこまでいろいろなシミュレータは用意されていないのが実情である。逆にいえば、手術シミュレータはまだ始まったばかりであり、それだけ最先端なシステムであるともいえる。

さて、ここで少し眼のお話をしておく。

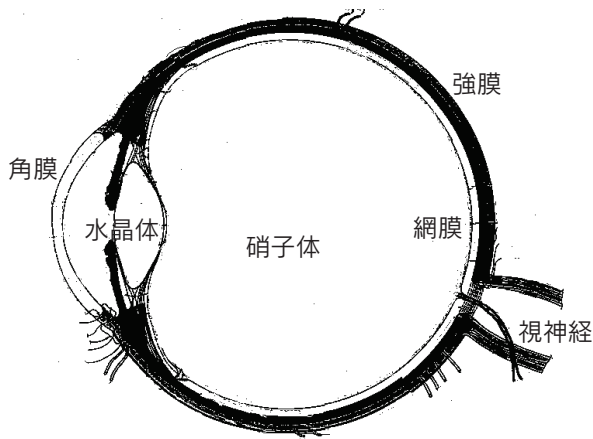


図-1 眼の構造

図-1は眼の構造を示す図である。眼の最も外側にあるのが角膜と呼ばれる組織であり、眼を保護している。この角膜を通して入射してくる光が眼のレンズである水晶体を通して集光し、眼底に存在する網膜上に像を結ぶ。生成された像は視神経を通じて脳に伝達され、脳の働きにより眼前にある対象物を認識することができる。網膜の外側には強膜と呼ばれる組織があり、網膜を保護している。また、眼球中央部には硝子体と呼ばれるゲル状組織が存在し、眼内圧力を一定に保つ働きをしている。

一般によく知られている白内障とは、眼のレンズである水晶体が白濁して徐々に眼が見えなくなる病気であるため、自由自在に収縮できなくなった水晶体の代わりに人工レンズを挿入する手術が、白内障手術である^{1), 2)}。白内障は加齢によるものが多いため、患者の数も多く、また、比較的眼の外側にある組織に対する手術であるため、眼科外科医が最初に取り組む手術の1つになっている。そのため、手術シミュレータとしての要請も多く、国内外で研究されている。しかしながら、白内障手術は眼のレンズである水晶体を切除して眼外に摘出した後、人工レンズを挿入することが目的であるため、動物を利用した練習が可能である。実際、多くの眼科医は動物眼、特に豚眼を用いて手術の練習を行っている。これに対して、網膜上には人間特有の病気が多い。たとえば、網膜剥離や糖尿病網膜症などであり、これらの病気は、眼の大部分を占める硝子体と関連していることが多い。網膜や硝子体に関連した手術は一般に、網膜・硝子体手術と呼ばれている³⁾。これらの病気は人間に特有なものであるために、動物を用いた練習が不可能であり、練習機会がまったくない

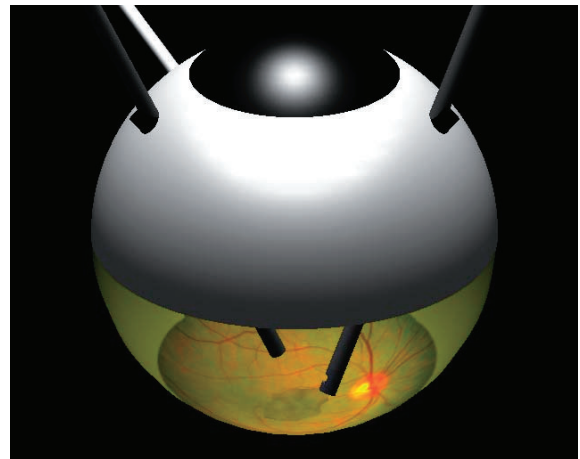


図-2 眼科手術シミュレータ

といっても過言ではない。もちろん、白内障手術などの症例を数多く経験したベテラン医師がこれらの手術に対処するわけであるが、それでも練習機会がないと患者にかなりの負担を強いることも事実である。

そこで、我々は人間特有の病気が多い網膜・硝子体手術を対象に、眼科用手術シミュレータの開発を進めてきた。網膜・硝子体手術と一口にいっても、対象となる症例にはさまざまなものが存在する。ここでは、その1つの症例である黄斑前膜症を取り上げて、手術シミュレータを用いた手術練習の様子を紹介する^{4)~6)}。

図-2は、眼科手術シミュレータを用いた練習の様子を示す図である。シミュレータでは1つの眼球をモデル化し、CGを用いて3次元的に表示している。眼球の上半分は眼球を外側から見た状態を、また眼球の下半分は眼球内部の状態を示している。上半分にある黒い円状のものは角膜であり、他の白い部分は強膜を表している。強膜の内側には網膜が存在する。手術で使用する術具は2種類あり、1つはライトガイドと呼ばれるもので眼内を照らして明るくする道具であり、他の1つは病気を処置するためのさまざまな道具である。図-2には2つの術具以外にもう1つ白い棒が眼球に挿入されている。これは、灌流カニューラと呼ばれるもので、眼内の硝子体を切除吸引して眼外に排出する際、眼圧を一定に保つために生理的食塩水などを眼内に注入するための器具である。

下半分にある眼内の様子を観察すると、明るい円状のものが見える。これが視神経乳頭と呼ばれる視神経の通り道であり、眼底網膜上に結像した映像信号はこの視神経乳頭を介して脳に伝えられる。視神経乳頭から太い血管が伸びており、これらはアーケードと呼ば

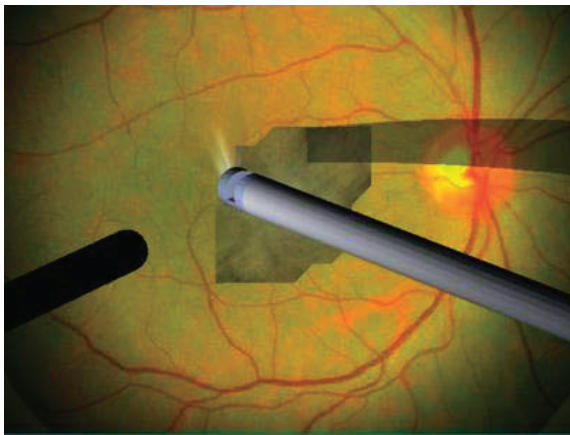


図3 硝子体切除吸引の様子

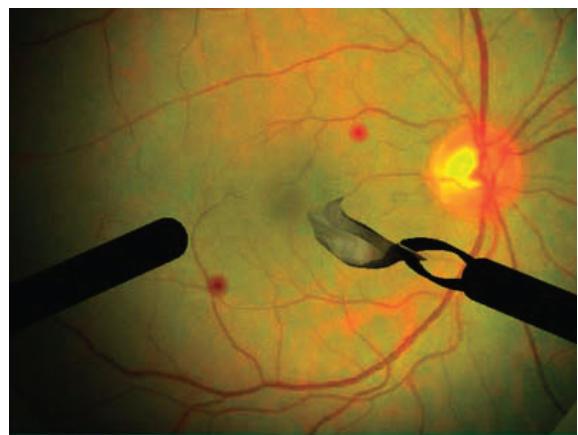


図4 増殖膜剥離の様子

れる。この症例は黄斑前膜症を対象としており、眼底中央部に生成された増殖膜を取り除くことが手術練習の目的となる。

図-3は、手術練習を行う術者と同じ視点からの映像を示している。ただし、シミュレータではこれらの映像を左右両眼に対応して2種類用意し、手術顕微鏡と同等なユーザインタフェースを備える双眼鏡型立体視ディスプレイを覗くことにより、手術映像を立体で観察することができる。図-3は前述したように、術具の1つであるライトガイドを左手に持ち、他の術具である硝子体カッターを右手に持って手術の練習を行っている様子である。左からライトガイドにより眼内を照射しているために、眼底上に右手術具の影が生成されているのが理解できる。眼底中央部には新たに派生した黒っぽい膜があり、この膜を取り除く必要がある。しかしながら、図-1でも説明したように、網膜上には広い範囲に渡って硝子体が存在し、この硝子体が網膜と癒着している。また、生成された増殖膜も網膜と癒着しているため、眼底網膜上に生成された増殖膜を何の前処理もなく剥がそうとすると、硝子体を引っ張ることになり、結果として網膜を剥離する可能性がある。そこで、硝子体手術の前段階として必ず、眼内に存在する硝子体を切除吸引する必要がある。図-3は硝子体切除吸引の様子を示しており、硝子体カッターを使用することで眼内に存在する硝子体はカッターの吸引口に吸い込まれて切除された後、眼外に排出される。同時に、図-2で示す灌流カニューラを通じて生理的食塩水が注入され、眼内の圧力は一定に保たれるようになっている。

図-4は術具を鑷子に切り換えて、増殖膜を摘んで剥がしている様子である。もちろん、硝子体切除吸引後、

すぐに剥がれるものではなく、術者はピーラーという術具を用いて増殖膜の周辺に探りを入れ、膜周辺を徐々に剥がすのであるが、本稿ではこの動作は省略している。剥離された増殖膜は眼外へ摘出されて、手術練習は完了となる。ただし、図-3と図-4を見比べるとよく分かるが、2カ所出血の後がある。本シミュレータでは、術具を用いて眼底網膜に触れると出血するように設定している。もちろん、網膜にも弾力が存在するため、少しくらい触れただけでは出血はしない。網膜の下にある程度の深さまで術具が挿入した際に出血し、出血の大きさは術具の眼底への挿入度合いに依存するように設計している。また、出血は時間の経過とともに色が濃くなるため、きわめてリアルである。

図-5に眼科手術シミュレータの概観を示す。図中左端下にあるPCがメインコンピュータであり、このPCで手術映像を生成している。PCの隣にあるCRTがPCで生成された手術映像を示しており、左右両眼に対応した映像を生成する。これらの映像を図中右端上に存在するスキャンコンバータにより切り出して、図中央上に存在する双眼鏡型立体視ディスプレイに入力することにより、手術映像を立体で観察することができる。双眼鏡型立体視ディスプレイの下にあるのが、手術中に術者が左右両手に持つ術具を模擬するデバイスであり、術具間距離を実際の手術に近づけるために独自開発している。また、図中中央下にある2種類のペダルは手術顕微鏡や術具の操作用フットスイッチであり、これらの信号はメインコンピュータであるPCに送信されて手術映像に反映される。



図-5 眼科手術シミュレータ

何が問題か？

さて、眼科手術シミュレータを例にとって話を進めてきた。網膜・硝子体手術の対象となる症例は人間特有の病気が多く、動物眼を用いても手術の練習をすることは困難であった。その意味では、CGやVR (Virtual Reality) 技術を駆使したシミュレータは有効であり、今までまったく存在しなかった練習の機会を提供できるようになったことはかなりの評価に値する。

しかしながら、現状ではさまざまな問題点も存在する。たとえば、手術シミュレータで生成する映像の品質である。実際の手術で使用する顕微鏡は非常に高性能であり、被写体深度が深く、また、生体の微妙な色を表現することができる。近年、遠隔手術が話題となっているが、術場で得られる映像を量子化してデジタル回線で送信し、受信側で再生してもまったく同じ映像にはならない。量子化のビット数も関係するが、それ以外に映像を映し出すモニタの品質にも依存する。このように、送信画像から元の生体の微妙な色を再現することですら、現状では困難である。我々が開発した手術シミュレータでは、できるだけ生体と同じ映像を生成するために、眼底上に存在する画像は実際の眼底写真を貼り付けている。病気がない正常な人の眼底写真上に病気である増殖膜のモデルを構築し、手術シ

ミュレータの練習症例として使用している。しかしながら、単に画像を貼り付けただけでは問題は解決されない。先ほどの色問題もあるが、実際の眼底では血管は膨らみを持ち、視神経乳頭の部分は陥没している。また、増殖膜を剥離すると膜に癒着している部分の網膜も盛り上がってくるのである。このような状況を再現しようとする、眼球組織のすべてをモデル化し、CGを用いて表現しなければならない。すると、当然のことながら、表示するための処理量が膨大になり、現在のPCではリアルタイムに表示することは困難となる。リアルタイムに表示することができなければ、システムとしての遅延が大きく、とても練習として使用することはできない。つまり、映像品質とリアルタイム性の両側面において、実際の手術と同じ映像を表現することは、現在の技術では困難である。

他の問題として、シミュレーション環境がある。手術シミュレータは手術の練習をする装置なのだから、実際の手術と同じ環境で練習が行えなければならない。しかしながら、市販されているさまざまなVR装置を用いてシステムを構築するとなると、実際の手術とまったく同じ環境を作り出すことが困難となってくる。たとえば、術具を持つ時の操作感覚である。手術には術具を挿入したり、対象部位を切開したりする際の反力

があり、これを模擬する必要がある。近年ではハプティックデバイスと呼ばれる力覚呈示装置が登場し、コンピュータ上で構築したモデルに触れた際に、その反力を発生することができる。しかしながら、実際の生体に触れた場合の反力、あるいは生体の各部位における弾性率はほとんど解明されていない。ドライブシミュレータやフライトシミュレータでも同じことがいえるのだが、最終的には実際に車や航空機を運転しているドライバやパイロットの感覚をもとに、パラメータをチューニングしてシステムを構築している。手術シミュレータも同様に、生体の弾性率が分からない以上、実際に手術を執刀している医師の感覚によりシミュレータの反力を構築することが多い。したがって、人によっては手術時の感覚が異なるため、絶対的な反力を実現することは現状ではきわめて難しいのである。

また、操作環境の話をする、眼球の直径は約24mmと非常に小さく、眼球上における術具の挿入点間距離は約20mmとなる。したがって、市販されている力覚呈示装置を2式購入して左右の術具の模擬をすると、2つの装置が物理的に干渉して術具間距離を20mm以下にすることができない場合がある。実際、我々が開発した手術シミュレータでも、市販のデバイスでは術具間距離を小さくできなかったため、眼球手術シミュレータに特化した術具装置を独自に開発している。このように、実際の手術環境に近づけるためには独自に開発することも多く、その結果としてシステムが高価なものになっていることも事実である。

将来の手術シミュレータはこうなる!?

以上、手術シミュレータの中でも特に、眼科手術シミュレータを取り上げて、練習の様子や問題点などを議論してきた。手術シミュレータ自体はまだ研究開発が始まったばかりであり、世の中の最先端技術なのだから、長所も短所も存在して当然である。むしろ、問題点を明確にすることで今後、さらなる発展を期待することができる。では、今後の手術シミュレータはどのようなようになっていくのであろうか？ 私見を交えながら、将来について少し考えてみたいと思う。

まず、上記にて取り上げた問題はほとんどが解決されるであろう。映像の品質は格段に向上し、実際の手術映像とほとんど変わらない画像がリアルタイムに生成されるようになると思われる。また、実際の手術環境と同じ環境のシミュレータ室が開発され、術場と錯覚するような練習が可能となる。これはむしろ、実際の手術の方がシミュレータの環境に近づいてくる可能

性の方が高い。X線CTやMRI装置の発明により、医学はかなりの進歩を遂げた。そして現在、CGやVR技術を利用した手術シミュレータ、あるいは実際の手術の支援を行う手術ナビゲータが開発されている。おそらく近い将来は、手術シミュレータと手術ナビゲータが融合し、手術シミュレータで練習した環境とまったく同じ環境で手術ナビゲータの支援を受けながら、実際の手術を行うことも可能になると推察される。

そのためには、解決すべき課題がもう1つ存在する。それは実患者の症例をそっくりそのままモデル化することである。現在の手術シミュレータはあくまで手術の練習機であり、ドライブシミュレータやフライトシミュレータと同様、基本的な手術の操作手順を習得するために典型的な症例の練習を行うことができる。もちろん、さまざまなバリエーションを用意しているが、基本的には典型的な症例の集まりである。これに対して、明日まさに手術を受ける患者の診療データから、その患者の症例をモデル化することができれば、実際の手術を前にして仮の手術を行うことができる。仮の手術が成功すれば、この手術と同じ手順で手術を行えば、手術はほぼ間違いなく成功する。仮の手術が失敗した場合でも、他の方法を試すことができ、最も良い方法を選択することにより、手術の成功率を少しでも向上させることが可能となる。

いろいろと勝手な想像を働かせながら、今後の手術に対する予想を行ってきた。医学者から見ればまた別の意見もあると思うが、医学と工学は今後も共に共存しながら発展し、より高度な医療システムが開発されていくと考えられる。そして、それらのシステムを利用して、より多くの医師が手術技量をさらに向上させ、少しでも多くの患者が救われることを願っている。

参考文献

- 1) 臼井正彦, 坪田一男: カラーアトラス眼科手術/Special Technique, 診断と治療社 (1996).
- 2) Hersh, P.S. 著, 増田寛次郎監訳: 眼科手術アトラス, メディカル・サイエンスインターナショナル (1991).
- 3) Freeman, H.M. and Tolentino, F.I. 著, 山中昭夫, 栗本晋二, 壇上眞次, 前田利根監修: アトラス 網膜・硝子体手術, メディカル葵出版 (1995).
- 4) 向井信彦, 原田雅之, 室井克信, 宮本裕仁, 浦谷明宏, 矢野 徹: PCベースリアルタイム手術シミュレータの開発, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J84-D-II, No.6, pp.1213-1221 (2001).
- 5) Mukai, N., Harada, M., Muroi, K., Hikichi, T. and Yoshida, A.: New Graphics Models for PC Based Ocular Surgery Simulator, Medicine Meets Virtual Reality 2001, pp.329-335 (2001).
- 6) Mukai, N., Harada, M., Muroi, K., Hikichi, T. and Yoshida, A.: New Model for Membrane Peeling in Ocular Surgery Simulator, MOD-SIM 2001, pp.2119-2124 (2001).

(平成14年4月2日受付)