

02 患者の心理・生理・物理モデル



患者モデルといえば、バーチャル・リアリティ技術を用いた臓器モデルや、麻酔学研修用のシミュレータなどが挙げられる。しかし、医療現場では患者の心理状態の変化が、治療や手術の進行に影響を与える場面は少なからずある。本稿では、緊張で心拍数が上昇したり、痛みで足をばたつかせたりといった患者の心理・生理反応を模擬する患者モデルについて紹介し、患者の物理モデルと心理・生理モデルを統合した手術シミュレータの展望について述べる。

酒井健作

産業技術総合研究所デジタルヒューマン
研究センター
kensaku.sakai@aist.go.jp

ドキドキする患者

人間は、自分の置かれている環境や他の人間からの刺激によって、心理状態や生理反応を変化させる機能を持っている。緊張状態に置かれた場合は心拍数や血圧が上昇するし、極端な場面では反対に血圧が急降下し卒倒してしまう場合もある。

医療における身近な例を挙げてみよう。健康診断などの採血の際に、「以前に気分が悪くなったことはありませんか？」と看護師に尋ねられたことはないだろうか。これは、採血中に極度の緊張状態に陥り、卒倒してしまう患者さんがいるからである。看護師は、そのような事態が生じないようにあらかじめ患者に確認し、緊張していれば、「大丈夫ですよ」などと声を掛けて患者を落ち着かせる。このように、患者の心理状態の変化が、治療や手術の進行に影響を与える場面は少なからずある。

実際、筆者らが研究対象としている局所麻酔下での手術では、患者が意識を保持したまま手術が行われるため、手術の進行状況や種々の手術操作を知覚し、怖がったり痛みを訴えたりしてしまう。そのため、医師は患者の体を不用意に傷つけないように細心の注意を払うだけでなく、患者の血圧や心拍が極端に変動しないよう適宜鎮静剤を追加したり、休憩を取ったりしている。これは、患者の心理的・体力的負担を低減するだけでなく、手術の円滑な進行を妨げるような循環動態の悪化や出血増加などを低減する意味を持っている¹⁾。

しかしながら、医師の手術操作と患者の心理状態・生

理反応との関連はこれまでのところ明らかにされていない。したがって、(1) 医師の手術操作と患者の心理状態・生理反応との関連を定性的・定量的に解析すること。また、(2) それらを予測・シミュレート可能な数学モデルを構築することが必要となる。

患者の物理・心理・生理モデル

患者の物理モデルといえば、まず、心肺蘇生術や気管内挿管研修のためのダミーモデルが挙げられる。また、近年の計算機能力の向上とともに医療教育技術の高度化もめざましく、臓器や筋・骨格といった人間の各部位の形状と物理特性を計算機上にモデル化し、力覚提示装置や3次元視覚提示装置といったバーチャル・リアリティ(VR)技術を用いた内視鏡下手術や関節置換手術などのシミュレータが普及しはじめている²⁾。また、患者の生理モデルとしては、循環器系機能を模擬する数理モデルや、麻酔研修に用いる薬物動態モデルなどの計算機モデルが挙げられる³⁾。

患者の心理モデルはどうであろうか。麻酔薬や鎮静剤の効用を評価するという観点で、手術中の患者の心的負担を評価する研究は多く見られる。しかし、時々刻々変化する手術状況や個々の手術操作に対する患者の心理・生理変化を模擬する計算機モデルの研究は皆無である。一方、人間工学の分野では、車の運転や機器の操作といった外部刺激によって、人間の認知・心理・生理・行動系がどのような影響を受けるか計測・評価する研究

が数多く行われてきた。また、それらの振る舞いを模擬するものとして、心理状態を考慮した避難行動シミュレーションのモデルや、興味深いものとしてテロリストの心理・行動モデルなどの研究がある。さらに、ロボット工学の分野では、ロボットに感情を持たせるという観点から、種々の外部刺激とそれらに対する反応（表情や動作）とをマッピングするための感情モデルが提案されており、非常に興味深い。

さて、話を患者に戻そう。先に触れたとおり、筆者らが研究対象としている手術は局所麻酔下で行われる。また、この手術は内視鏡下で行われるため、高度な手術操作技術が求められる。ただし、局所麻酔を用いて内視鏡下で行う手術トレーニングを総合的に支援するためには、患部の解剖構造と材料特性を反映した物理モデルだけではだめで、手術操作に応じた患者の心理・生理反応を模擬・提示するソフトウェアシステムが必要になる。これを自動車の教習に例えるならば、前者が自動車教習所内で、走る・曲がる・止まるといった自動車の基本操作を習得する段階であろう。これは、内視鏡や鉗子の使用方法を習得することにあたる。後者は路上教習である。自動車教習の場合、実際に路上に出て、歩行者や他の車の動きを把握・予測し、安全に走行する技術を学ぶ。これは手術トレーニングにおいても同様で、患者の状態を的確に把握・予測し、適切なケアを施す技術を身につけることにあたる。

手術の実際

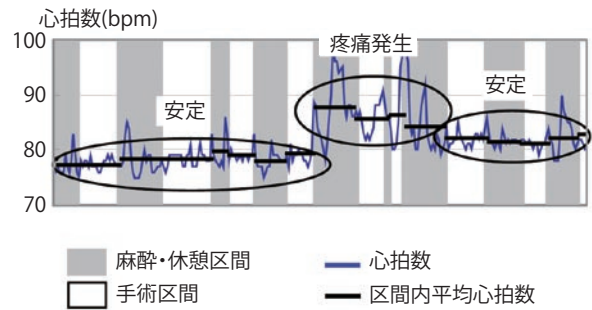
器具操作の難しさ

鼻腔内は非常に狭く構造もきわめて複雑である。この中に直径約5mmの内視鏡と鉗子を同時に挿入して操作を行わなければならないため、視野・操作空間が著しく制約される。その上、薄い骨壁を隔てて視神経・頭蓋底・動脈等の重要臓器が隣接しているため、不用意な操作で重要臓器を傷つけてしまう可能性は非常に高い。

最も重要なのは、鼻腔内では内視鏡と鉗子が常に干渉しているという点である。このため、内視鏡と鉗子の位置関係を上手く調整しないと操作部位と鉗子先端を同時に内視鏡画像内におさめることができない。それどころか、無理におさめようと必要以上の力を加えてしまうと、鉗子のはじかれ、弾みで重要臓器を損傷してしまう場合もある。

患者ケアの難しさ

局所麻酔下の患者は、鎮静剤を投与されているものの、医師や看護師と会話できる程度の意識レベルを保持している。したがって、手術操作による圧や音、さらには麻



■ 図-1 手術進行と患者の心拍変化

酔で抑えきれない疼痛を知覚している。骨壁破壊時にはバキッという痛々しい音が手術室内に響き渡り、疼痛や力みで汗だくになる時もある。これら心的負担や疼痛の影響により、血圧の上昇や急な低下（卒倒）、出血量の増加などが生じるし、疼痛が著しい場合は、患者が耐えられずに手術を途中で中止する場合もある。

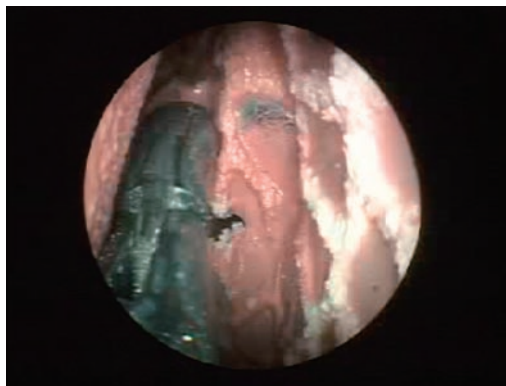
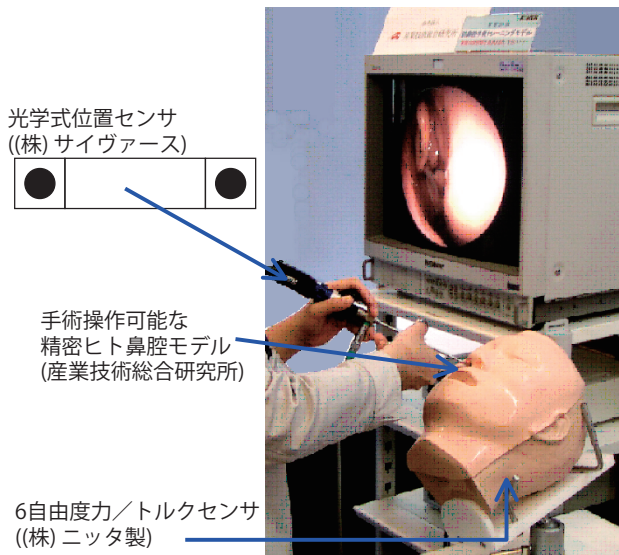
このような事態を未然に防ぐためには、常に患者の状態を把握し予測しながら麻酔を施さなければならない。また、疼痛が発生してしまった時には、即座に操作を中断し、疼痛の度合いに応じて麻酔追加と休憩を入れる。血圧上昇や出血が著しい場合は、降圧剤や止血剤を投与し休憩時間を調整しなければならない。図-1は手術中の心拍数変化グラフであり、グラフ内の白地部分は手術区間、灰色部分は麻酔追加後の休憩区間を示している。休憩挿入のタイミングや長さは一定ではなく、疼痛が生じた場合は短い休憩が頻繁に挿入されるなど、医師が患者状態に応じて調整していることが分かる。

頭部模型

近年、VR技術による手術シミュレーション・システムが注目されている。これに対し、山下らはシリコンや石膏粉を用いた実物模型（図-2）を開発している⁴⁾。

残念ながら現在のVR技術では、硬い骨、薄い骨壁や粘膜組織、ポリープなどが混在する患部の組織変形・破断、常に多点で干渉しあう手術器具と鼻腔との干渉計算などソフトウェア面の難しさがある。また、一般の力覚提示装置はリンク構造で制御されているため、内視鏡と鉗子が絡み合うような鼻腔内操作を行ってしまうと、2つの装置のリンクが干渉しあってしまうというハードウェア面での問題も挙げられる。

一方、実物模型の場合、模型を構成する材料特性を人間のものに近づけることで前述の問題を回避できる。開発された頭部模型では、石膏材料と酢酸セルロース樹脂を使用している。作成方法は、まず、鼻腔周辺のCT画像と専門医師の解剖学的知見に基づいて鼻腔内骨格と粘膜の3次元形状を計算機上に構築する。次に、粉体ラ



鼻腔モデル内での手術操作の様子

■図-2 精密ヒト鼻腔モデル

ピッドプロトタイプ造形装置 (Z406, Z Corp 社製) を用いて副鼻腔形状を再現する。また、造形装置の解像度限界 (約 0.5mm) 以下の部分構造 (副鼻腔内の薄い骨壁部分など) は、樹脂膜の被覆を組み合わせることで構築している。

本模型の特徴として、実際の手術での内視鏡画像と比較しても、出血の有無以外は非常によく似た内部構造が再現できているという感想を得ている。また、厳密な材料特性の検証は今後の課題として残るが、複数の耳鼻科医の主観評価として、骨壁破壊や粘膜切開などについて生体に近い手応えを再現できているという評価を得た。手術操作で破壊・切開の対象となる部分は交換可能な部品として設計してある。さらに、本模型は通常の手術器具を使用できる上に、新しい手術器具や術式の開発にも用いることができる。

操作技術の評価

手術操作技術の評価は、指導医の主観評価だけでなく、たとえば操作力や操作時間といった客観評価指標が

必要である。山下らは、ビデオカメラ、6軸の力覚センサ (ニッタ (株)) および3次元位置測定装置 ((株)サイヴァース) と頭部模型を組み合わせることにより、手術操作データの解析および客観的な手術操作評価指標の抽出を試みている。このシステム上では、客観指標として、操作時間 (短い方が患者に負担がかからない)、削開範囲 (必要以上に粘膜を取らない)、力/トルク量 (痛みの可能性)、内視鏡画像・位置や角度 (視野の確保) が計測できる。例として、麻酔ガーゼの詰込み・取出しというタスクを対象とし、操作時間、力/トルクの平均値、最大値 (グラフ上の円の直径) について、学生、研修医、若手医師と熟練医との比較結果を示す (図-3)。なお、計測は3回行い、試行順に矢印で結んである。

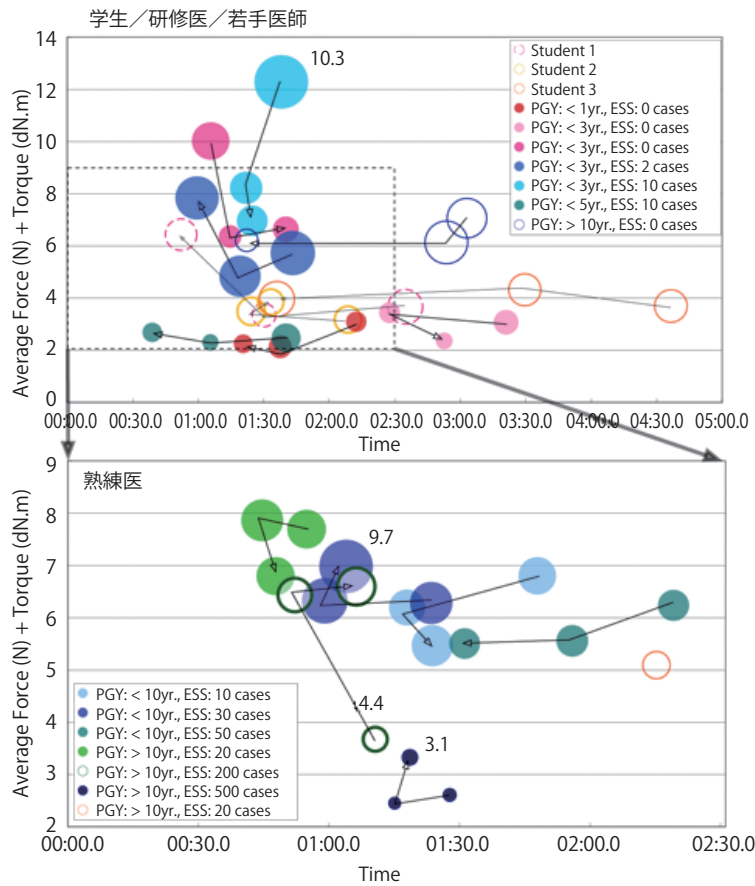
グラフから、熟練医は「安定している」といえる。円の大きさが揃っている点は、いつも同じ最大力であることを示し、円の位置が近い点は、平均力と操作時間が試行ごとにばらつかないことを示している。一方、非熟練者の場合は、試行ごとの円の大きさ・位置ともばらつきが大きく、これらの結果から、非熟練医は「安定しない」といえる。特に操作時間の短縮が目立つが、山下らは、試行ごとに学習が進んでいると考察している。

このように、今回紹介した頭部模型を用いることで、同一形状の患者モデル上で、異なる研修者のデータ比較が容易に行えるようになった。これは献体や動物を用いた場合と大きく異なる点であり、熟練医と非熟練医との違いを定量的に比較・検討することが可能となる。また、通常の手術器具を使用できることから、実際の手術との違いも小さいという利点もある。

患者の心理・生理モデルの構築⁵⁾

この手術で医師が施す操作には、粘膜剥離や骨壁破壊などの“開放操作”，出血や破片を除去する“吸引操作”などの侵襲的な操作や，“休憩の挿入”や“鎮静剤・抗生物質の投与”といった患者ケアを意図した操作がある。また、同じ操作であっても、使用する器具の種類や動作などの操作属性によって患者に与える影響が異なる。たとえば、開放操作では掴み系やパンチ系などタイプの異なる器具が用いられ、引き剥がし動作や押す動作、さらに動作の強弱にも違いがある。

一方、患者の心理状態・生理反応の指標としては、患者の口頭での訴え (痛みや不快感など)、出血量、心拍、呼吸運動、連続血圧、発汗量、手術枕圧に注目し、ビデオカメラや各種患者モニタを用いて計測している。なお、現段階でモデル構築に用いているのは、患者の訴えおよび心負担・疼痛の生理学的指標である心拍変動と呼吸運動である。これらの指標が、個々の手術操作によって、



■ 図-3 操作時間, 平均力, 最大力の比較結果

どのように影響を受けているかを解析し、これをモデル化することが本研究の目的となる。

このモデルの特徴は、多くの人間機能モデルが、数理モデルやニューラルネットワークを用いて構築されている一方で、確率モデルの1つであるベイズ理論に基づくベイジアン・ネットワーク⁶⁾を用いている点である。これは、(1) 対象としている患者の認知・心理的振舞いは、感覚や感情という不確実性を多分に含む問題である。(2) 研修者が習得すべき技術は、患者に起こり得る変化の候補を列挙し、可能性(確率)の高い変化に対処していく意思決定能力であり、実際の手術において、存在し得る患者について、起こり得る変化を確率値という属性を持たせて記述する方が有効そうである。また、(3) 変化を導き出す因果関係の構造が可視化されていることで、変化の理由を学ぶ教育効果もあると考えている。

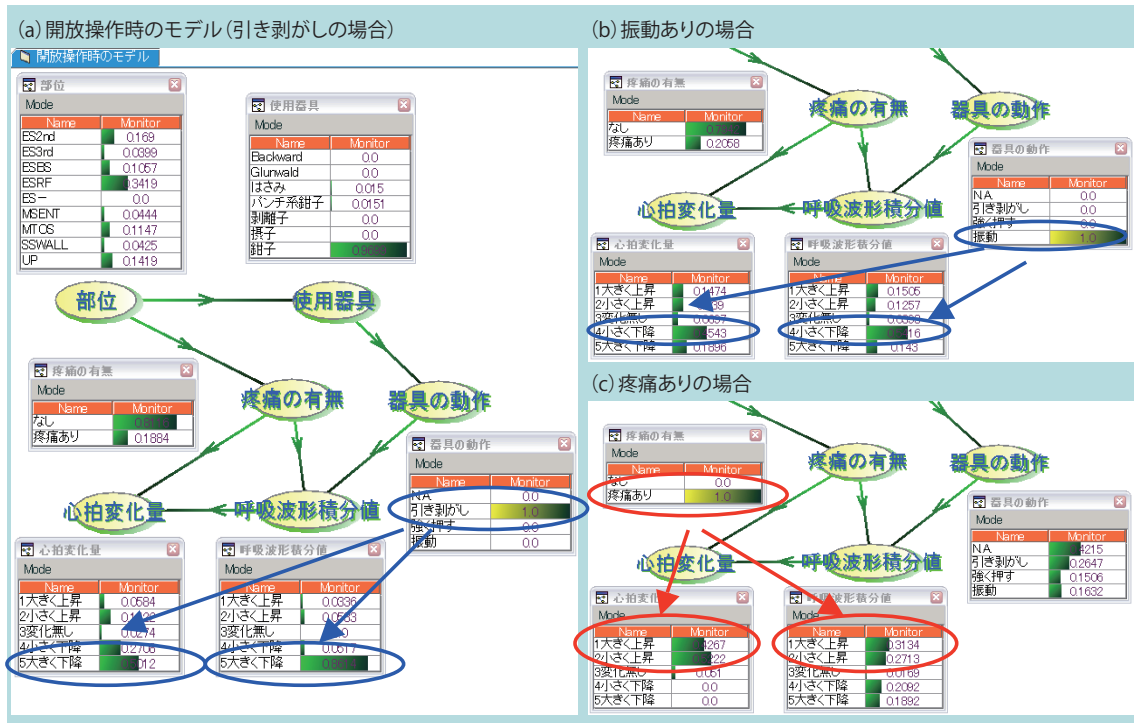
次に、モデル構築について述べる。ベイジアン・ネットワークは、事象を表すノードと事象間の因果関係を示すリンクで構成される。これを構築するためには、まずノードとなる事象を問題から抽出しなければならない。人間の心理・生理反応の特性については多くの知見がある。しかし、手術という具体的場面において、どのような外部刺激が心理・生理反応に影響を与えているかとい

う知見は皆無である。そこで、患者の心理・生理指標のプロットと、ビデオカメラで記録した内視鏡映像と手術室内映像を見比べながら、とにかく患者に影響を与えていそうな事象を抽出することから作業を始めた。次に、抽出された操作種別や器具種別、動作種別などを説明変数群とし、患者の訴えの有無、心拍変動方向と呼吸運動変化方向を目的変数群としておき、両変数(ノード)群の全組合せについて、因果関係(リンク)の有無を情報量基準のスコア値に基づいて判別した。なお、情報量基準値はMDLおよびAICを用いている。また、全組合せのうち、専門医や生理学の知見からみて明らかにリンクが張られない組については探索から排除している。

患者反応の再現

今回のモデル構築作業により、大まかな患者反応パターンを明らかにすることができた。ここで、その一部を紹介する。

図-4 (a) に示すのは、開放操作に対する患者反応を再現するモデルである。この構造が示すように、開放操作時において使用される“器具”は、開放しようとする“部位”によって求められる。次に、“疼痛の有無”および“器具の動作”は、それぞれ“部位”と“使用器具”



■ 図-4 モデル構築結果（開放操作時）と確率推論の例

によって求められる。この時、患者の“呼吸波形積分値”は、“疼痛の有無”と現在の“器具の動作”タイプによって求められ、最終的に“心拍変化量”は、“疼痛の有無”と“呼吸波形積分値”の状態により決まる。

同図 (a) では、“器具の動作”が「引き剥がし」動作である場合の推論結果を示している。この結果，“呼吸波形積分値”と“心拍変化量”は、ともに「大きく下降」する確率が最も高くなる。これに対し、同図 (b) では、「振動」動作である場合の推論結果を示している。この場合は、ともに「小さく下降」する確率が最も高くなる。さらに、同図 (c) に「疼痛あり」の場合の推論結果を示した。患者が痛みを感じた場合、やはり呼吸運動が亢進し、心拍も上昇傾向にあることを示している。これらの患者反応を考察すると、開放操作時は、緊張による交感神経亢進よりも、むしろ、身構え動作と呼吸抑制による心拍下降が見られた。本稿では触れていないが、逆に、開放操作が終了し、手術器具が鼻腔内から取り出されると、リラックス状態に移行することによる呼吸運動亢進と、それによる心拍促進が観察された。これら呼吸運動と心拍数の関係は、生理学的知見とも一致するが、操作中に心拍が下降するというのは筆者にとって意外な結果であった。

さて、このモデルを用い、開放操作時に観測される操作属性を設定することによって、その時点での患者状態を再現することができる。しかし、実際の患者反応はより複雑であり、モデルのさらなる詳細化が必要である。また、たとえば、患者が痛みを訴えた部位を再度触る場

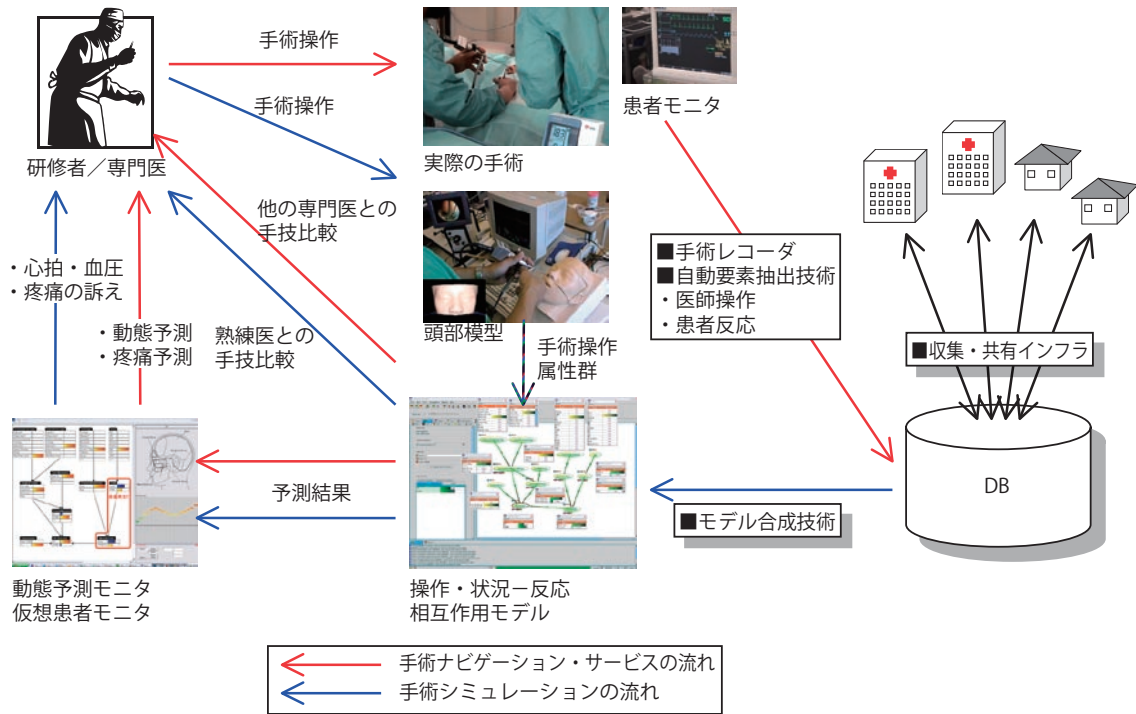
合、患者が痛みを訴える確率が高くなるように、手術進行の履歴を記述する変数群の抽出を進めている。

今後の展開

この研究の第1のゴールは、先に紹介した頭部模型との統合による手術シミュレータの構築である(図-5)。ただ、両者を1つの統合シミュレータとして構成することは、それほど難しいことではない。ここでの1つの問題は、患者の鼻腔構造や心理・生理反応の個人差に対応するため、また、さまざまな手術シナリオを提供するために、より多数の手術データを収集しなければならない点である。

これに必要な要素技術として、手術レコーダが挙げられる。トレーニングや実際の手術での手術過程と患者状態変化の過程を記録する、いわば手術室のフライトレコーダである。これは、医療過誤の検証に用いられるだけでなく、術式や手術過程の検証、新しい手術器具の評価などに用いられる。近年、これらの技術について注目され始めており、今年のCARS(コンピュータ支援手術や画像診断等の国際会議)でも、Digital Operating Roomというセッションが設けられ、内視鏡下副鼻腔手術における手術ワークフローの収集・評価に関する発表があった。

さて、これらの手術データは、単に収集するだけでなく、有効な情報を抽出し活用する枠組みが必要である。その1つとして、手術ナビゲーションが挙げられる。



■図-5 手術シミュレータとナビゲーション・サービスの概要

一般に手術ナビゲーションというと、患部に対する手術器具の方向や位置を医師に提示し、正確な手術操作を支援するものであるが、筆者らが考えているのは、医師の手術の進め方を支援するナビゲーションである。

現在でも、手術中に心拍や血圧を計測し、医師に提示する仕組みはある。しかし、手術操作に集中するあまり、手や目や耳がそちらに回らないというのが実情である。指導医の経験談として、研修医が内視鏡のモニターだけに注目して、患者が痛みで足をばたつかせているのにまったく気づかないという話もある。また、このような問題は経験の浅い医師だけに当てはまるものではない。心拍や血圧そのものでは理解されにくく、よほどの異常値にならない限り気づかないといったこともある。小さな心拍上昇が、あるとき急速に変化し、突然状態が悪化することもあるわけで、わずかな変化がその先のどのような異常につながるかの予測は、多数の臨床経験を積んでも難しい作業である。実際、経験豊富な熟練医からも、手術の進行状況や患者の動態変化傾向に基づいて、患者の将来の動態変化が予測できないか？ さらに、どのタイミングで麻酔を追加すべきか？といったナビゲーションが実現できないものかという要望はあるし、筆者らがこの研究を始めた動機の一つは、このような熟練医からの要望でもあった。

筆者らは現在、手術操作と患者反応の因果の構造を明らかにしようとしている。これらのモデルは、患者の動態予測を行うための基礎となるであろう。これに加えて、現在手作業で進めているモデル構築の自動化、従来個々

の熟練医の中にもみ蓄積され、散在している重要な経験知を共有データとして分析・利用できる体制を構築することが必要である。これらが実現されれば、多数の手術データとの比較によって、患者の動態予測や疼痛発生を予測するだけでなく、麻酔追加や投薬のタイミングをアドバイスするといった手術進行のナビゲーションを提供することができる。これは、医療過誤を未然に防いだり、患者の負担を抑えたりするだけでなく、個々の患者に適した術式を提供するといった、いわゆる“あなたに合わせた医療＝個人適合医療”の提供を実現するための第一歩となるであろう。

参考文献

- 1) Kim, M. S. et al.: Effects of Hand Massage on Anxiety in Cataract Surgery using Local Anesthesia, Journal of Cataract and Refract Surgery, Vol.27, pp.884-890 (2001).
- 2) Westwood, J. D. et al. (ed.): Medicine Meets Virtual Reality 12: Building a Better You : The Next Tools for Medical Education, Diagnosis, and Care, IOS Press, Netherlands (2004).
- 3) Doyle, D. J.: Simulation in Medical Education: Focus on Anesthesiology, Medical Education Online, Vol.7, No.16 (2002). <http://www.med-ed-online.org/>.
- 4) 山下, 横山, 森川ほか: 内視鏡下鼻内手術手技研修用精密ヒト鼻腔模型の開発, 日本コンピュータ外科学会誌, Vol.5, No.3, pp.187-188 (2003).
- 5) 酒井, 持丸, 横山: 局所麻酔下副鼻腔手術における手術進行と患者反応モデル構築のための生理指標解析, 生体医工学, Vol.41, No.4 pp.483-492 (2004).
- 6) 本村陽一: ベイジアンネットによる確率推論技術, 計測と制御, Vol.42, No.8, pp.649-654 (2003).

(平成 17 年 11 月 11 日受付)