

# 頭部模型と患者の生理心理反応モデルによる 副鼻腔炎手術シミュレータ

酒井健作

産業技術総合研究所



## 1. はじめに

従来、医療技術は実際の現場での経験という形で習得されてきた。しかし、熟練医の指導下とはいえ、技術的に未熟な状態で患者に接することによる潜在的危険性を否定できない。内視鏡のモニタに注視するあまり、患者が痛みで足をばたつかせているのに全く気づかなかったという経験談も聞く。

バーチャル・リアリティ技術は、本物の患者ではないが、本質的に実際の患者と同様の振る舞いを再現できる。本物の患者に苦痛を与えることもないし、失敗や試行錯誤が許されるという点で医療教育が抱えるこの問題の一つの(唯一かもしれない)解決策である。

ところで医療技術というと、手術器具の使い方や速さといった点に注目が集まる。しかし、“流れるような鉗子さばき”だけで手術を完遂することはできない。安全で患者に対する負担の少ない手術を行うためには、鉗子や内視鏡などの手術器具を上手く扱う“機械的スキル”と、患者の状態を的確に把握し、適切な事前・事後処置を施すという“手術構成スキル”の二つを備えている必要がある。優秀な医師は、一流の職人であり、ディレクターでなければならないわけだ。

産業技術総合研究所人間福祉医工学研究部門とデジタルヒューマン研究センターでは、局所麻酔下で行われる副鼻腔炎手術を対象とし、機械的スキル研修のための患者模型開発 [1][2] とスキル評価手法の研究 [3]、手術構成スキル研修のための患者の心理・生理反応モデルの研究

[4] を行っている。このうち本稿では、頭部模型と心理・生理反応モデルについて紹介する。

## 2. 副鼻腔炎と内視鏡下手術

本題に入る前に、“副鼻腔炎”について説明する。この疾患はいわゆる“蓄膿症”のことである。鼻の中は非常に入り組んだ構造を持っており、鼻の穴から喉へ至る通路の脇に副鼻腔(図1)と呼ばれる空洞が複数存在している。これら副鼻腔から鼻の穴に至る通路が塞がれた結果、副鼻腔内に排泄物の停留をきたし、粘膜炎症やポリープが発生する。鼻風邪をひいた時に額が重く感じるのは、頭蓋骨の額的位置にある前頭洞内の粘膜が炎症を起こしているからで、軽度の急性副鼻腔炎と診断される場合もある。

内視鏡下手術では、外径約5mmの内視鏡と鉗子などの

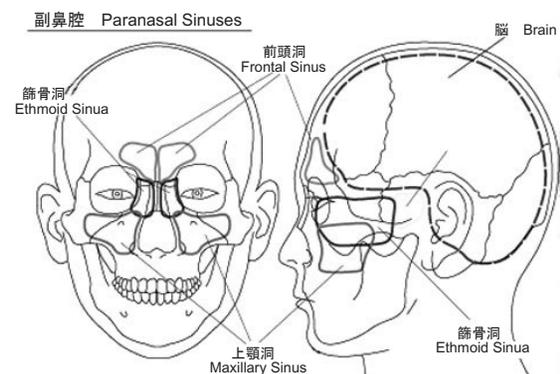


図1 副鼻腔の構造

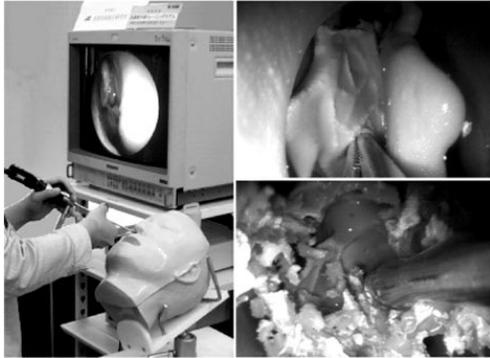


図2 精密副鼻腔モデル

(左図:全体像、右上図:鉗子で穴を開けている様子、右下図:鉗子で穴を広げている様子) 人間福祉医工学研究部門

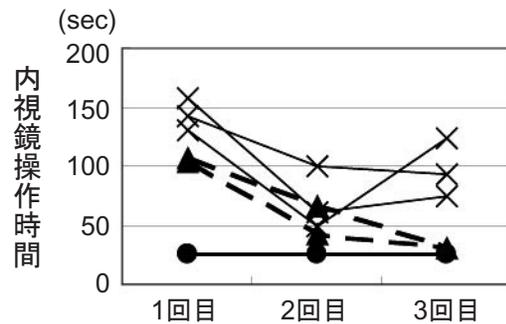


図3 頭部模型を用いたタスク評価例

(●:熟練医、▲:研修医、×:未経験者) 人間福祉医工学研究部門

手術道具を鼻腔内に同時に挿入し、鼻腔内のポリープや鼻腔から副鼻腔へ至る通路を塞いでいる病的粘膜や薄板状の骨壁を除去する。これにより鼻の穴から各副鼻腔への通り(換気と排泄)を改善させ、術後に行う投薬治療時の抗生剤の到達性を向上させる [5]。

### 3. 頭部模型

内視鏡を用いて局所麻酔下で行なう低侵襲手術は、日帰り手術が可能であり、患者にとって体力的・経済的負担が軽減される。一方、医師にとっては、従来の切開手術と比較して、視野・操作空間とも著しく制約されているだけでなく、副鼻腔内の構造が極めて複雑で、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、高度な手術手技の研修が必要となる。

しかし、献体や動物による研修の実施数は十分とは言えず、これらを用いた手術研修は今後実施が困難になることも予想される。また、残念ながらバーチャル・リアリティ技術による手術シミュレータ・モデルは、組織変形・破断を計算するソフトウェア面および反力(手ごたえ)呈示装置というハードウェア面でもいまだ研究開発途上であり、しかも非常に高価である。そこで、解剖学的に正確かつ精密で、破壊なども含む内視鏡手術操作が可能な頭部模型の開発を進めている。

#### 3.1 作成方法

(1) 実際の人間の X 線 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し、(2) ラピッドプロトタイプング (RP) 技術により複雑で内部構造のある副鼻腔形状を再現した。また、RP 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、(3) 樹脂膜の被覆

を組み合わせることで構築している。本模型の試作には、石膏材料による Z406 (Z Corp., U.S.A.) およびナイロン材料による SinterStation 2500 plus (DTM, U.S.A.) の二種の粉体 RP 造形機を用いた。試作機を図 2 に示す。

#### 3.2 特徴と使用例

複数の耳鼻科医の評価として、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良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。特に樹脂膜を用いた部分は、材料と構造の試行錯誤の結果、精密な形状と生体に近い手応えを再現できているという感想を得た。なお、手術操作で切除・開放の対象となる部位は交換可能な部品として設計してある。また、本模型は手術器具を選ばないため、新しい手術器具や術式の開発にも用いることができる。さらに、CT を含む X 線画像の撮影が可能であるため、手術ナビゲーションシステムの研修にも適用可能である。

本模型は 6 軸の力覚センサ (ニッタ株式会社製) を備えており、研修者の操作力を計測することができる。前述のとおり、薄い骨壁を隔てて重要臓器が位置しているため操作力は重要な手技評価指標となる。また、三次元位置測定装置 (POLARIS, Northern Digital 社製) と組み合わせることにより、模型内での内視鏡と鉗子の位置計測も行っている。狭く複雑な空間内で操作を行うため、内視鏡と鉗子の位置関係を上手く調整しないと手術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。また、鼻腔内では内視鏡と鉗子が常に干渉しているため、無理な力を加えた際に鉗子がはじかれ、弾みで重要臓器を損傷してしまう可能性もある。したがって、手術部位と内視鏡、鉗子の位置関係も重要な評価指標となる。

実際の評価例を図 3 に示す。同一タスクを 3 回繰り返

た時の熟練医、研修医と被経験者の操作時間のプロットである。熟練医の操作の速さと研修医の研修の効果が示されている。

#### 4. 患者の心理・生理反応モデル

さて、精密な構造を持ち、破壊も可能な頭部模型ではあるが、この模型は認知機能も心理・生理機能も持っていない。したがって人間であれば悲鳴を上げそうな力を加えても呻き声も上げなければ、緊張による血圧変化も示さない。一方、実際の患者は様々な反応を返してくる。

局所麻酔下の患者は普通に会話できる程度の意識レベルを保持している。その結果、手術操作による圧や音、さらには麻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るし、疼痛や力みで汗だくになる時もある。これら心的ストレスや疼痛は、循環動態に影響を与え、血圧上昇・低下や出血量の増加を招く [5]。また疼痛が著しい場合、患者が耐えられずに手術を途中で中止するケースもある。

一方の医師は、このような患者反応を未然に防ぐために事前に麻酔を施し、疼痛発生時には操作を中断して麻酔追加と休憩を入れる。痛みが強い場合は長めの休憩時間をとる。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する。その他、血圧低下時には体位調整(足を高くする)などの対処を行う。図4は心拍数変化グラフであるが、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おり、これらの繰返しにより手術が進行していることがわかる。

このように、医師は患者の心的ストレスを安定に保ち、心拍・血圧の極度な変化を生じさせないという手術進行スキルが必要となる。またそのためには、医師と患者間の相互のやりとり、すなわち手術操作や対処策が患者に対してどのような影響を与えるか?という因果関係を理解し知識として保持することが必要となる。

そこで筆者らは、個々の手術操作や進行状況に応じて、状態と反応を変化させる患者モデルの研究を進めている。

##### 4.1 手術進行の計測

モデル構築に用いるデータは実際の手術現場で収録している。産業技術総合研究所倫理委員会の承認を受けた同意書を使用し、計測・解析・データ公表の同意を得た患者について計測を行った。

計測項目は、実際の手術中に計測を行うため、手術進行を妨げず、患者に負担の少ない機器を用いる必要がある。医師との検討の結果、患者の反応指標として、心拍数、

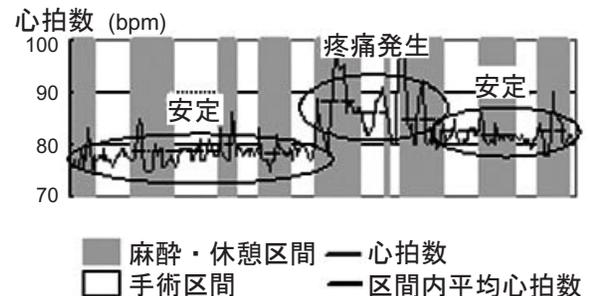


図4 手術進行と患者反応(心拍数)例

連続血圧値、精神性発汗量、脈波、呼吸数と振幅、手術枕圧、医師との会話と疼痛の訴えを記録している。医師側については、手術進行の様子を内視鏡映像と手術室全体の映像を2台のビデオカメラで記録している。

##### 4.2 手術操作と心理・生理指標の解析

医師から患者に与えられる作用は、(1)破壊・切除などの侵襲的な手術操作と(2)患者状態を安定に保つための事前処置・事後対処操作にわけられる。本稿では、(1)が患者に与える影響について示す。

内視鏡映像と手術室映像に基づいて、医師の手術進行をセグメント化した。この作業は専門医の指導のもと手作業で行っている。この結果、各手術区間内は四つの連続する操作段階(準備、開放、後処理、麻酔)に分けられることが示された。これらの操作段階について、患者の反応指標を対応づけ、手術操作が患者に与える影響を解析した。

患者反応指標は、人間工学や生理学の知見 [6][7] に基づき、疼痛および緊張感の指標である心拍数、呼吸数と振幅を用いた。手術操作指標は、操作段階の種別に加え、操作部位、使用器具、操作量(回数)を用いた。ここでは連続する二つの操作段階について患者反応指標値の差(変化量)に注目し、操作段階間で統計的に有意差があるかどうかを二元配置分散分析により調べた。また、有意差が認められたものについては、多重比較検定(Games-Howell法)を行った。すべての分散分析および多重比較検定の有意水準は1%水準とした。なお本稿で示す解析は患者6名分のデータを用いた。

図5に結果を示す。三つの患者反応指標とも、操作段階間で有意差が認められ、患者間の有意差が認められなかった。この結果から、患者反応は操作段階の影響を受けていることが示された。すべての指標値において、開放段階での減少傾向、続く後処理と麻酔段階での増加傾向が顕著である。開放段階では三つの反応指標値とも有

意に減少している。これは、患者が身構える事により生じる“息こらえ動作”を示しており、この影響によって心拍数低下が生じていると考えられる。続く後処理段階では、呼吸振幅・回数とも増加しており、息こらえ状態から解放された状態であると考えられる。さらに麻酔段階では、呼吸数は変わらず呼吸振幅が増加している事から、深い呼吸(リラックス)が行われていると考えられる。

次に、疼痛の有無、操作圧/操作音の有無、操作部位の移動が心拍数に与える影響について示す。図6に各事象における心拍数変化の分散分析結果を示す。このうち“move-in”は、手術器具が鼻腔の奥へ向かって移動した場面を示し、“move-out”は奥側から手前へ移動した場面を示す。

この結果、疼痛時や操作圧・破砕音発生時に、心拍数促進が生じる傾向が強いことが示された。これは交感神経の機能亢進によると考えられる。次に、move-out時の心拍数促進は、手術器具が引き抜かれることによる息こらえ動作の緩和の影響と思われる。逆に、move-in時の心拍数抑制は、手術器具が自分に向かって押し込まれるという圧迫感による息こらえ動作の促進によると思われる。

最後に、部位別の疼痛と操作圧・破砕音の発生頻度(図7)を示す。図中の左側から鼻腔手前、右側が最深部である。中鼻甲介内側(MT-IS)、上鼻甲介(SRT)はともに手術器具を到達させるのが困難な部位であり、大きな操作圧がかかる。篩骨洞(ES)の特に底面は炎症を起こしている場合が多く、麻酔効果が低く比較的疼痛が発生しやすい。医師の経験的知見でも疼痛発生頻度が高いと言われている。また、上顎洞(MS)は構造的に歯神経近傍に位置するため疼痛発生頻度が高い。歯の治療時に神経を触られて痛みを感じることもあるが、これはその神経を上側から刺激されていることになる。

4.3 モデル構築の方針

患者反応モデルの研究は、1960年代後半から進められている[8]。現在では製品化[9][10]も進められ、医療教育に役立てられている。これらは生理学と薬理学的反応を再現するモデルで、主に麻酔医の研修に用いられている[11]。また、1980年代には循環器系モデル[12-14]の研究が見られ、救急救命医の研修[14]や人間工学分野[15]の研究で用いられている。これらのモデルは数理モデルや定性プロセス・モデルを用いて構築されている。

一方、筆者らは確率論に基づくモデル化を進めている。これは、(1)筆者らが対象としている患者の認知・心理的振る舞いは、感覚や感情という不確実性を多分に含む

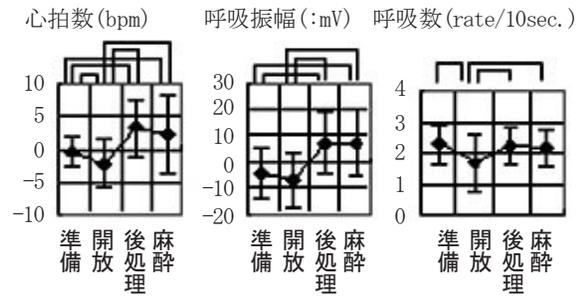
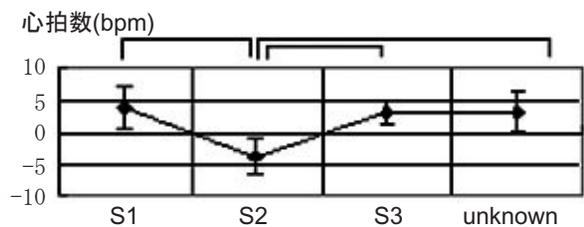


図5 操作段階の影響



S1:疼痛、操作圧/音知覚時  
 S2:move-in (奥方向へ器具移動時)  
 S3:move-out (奥手前方向へ器具移動時)

図6 疼痛、操作圧/音、器具移動の影響

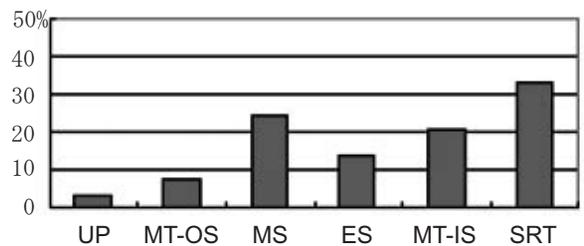


図7 部位毎の疼痛、操作圧/音の発生頻度

問題である。(2)研修者が習得すべきスキルは、患者に起こりう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、あり得る患者について、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。

筆者らは、ベイイズ理論に基づくベイジアン・ネットワーク[16]を用いてモデル構築を進めている。ベイジアン・ネットワークは、複数の確率変数(事象)間の定性的な因果関係をグラフ構造により、また個々の変数間の定量的な関係を条件付確率により表現し、不確実性を含む事象の推論や適切な意思決定に利用される確率モデルである。これにより実現される教育効果は、(1)手術操作と患者反応の因果関係をモデル構築に基づいて学習でき、

その可能性も同時に学習できる。(2)最大確信度に注目することで、通常、最も起こり得る手術シーンや、重要なシーン、例えば疼痛発生率の最も高いシーンなどを重点的に繰り返し学習することが可能となるし、逆にランダム(もちろん妥当な範囲で)な患者反応パターンによる学習も可能となる。

#### 4.4 モデル構築と結果

モデル構築では、BayoNet(開発:産総研,販売:(株)数理システム)[17][18]を用いた。

解析結果に基づいて確率変数の候補を列挙し、確率変数間の因果関係の構造をMDL情報量基準(MinimumDescription Length Principle:最小記述長基準)により求められたスコア値により比較・選択した。

次にモデルの構造について考察する。モデル構造(図8)において、(1)呼吸動作は現在の操作段階と器具の移動方向から予測されることを示す。(2)疼痛と操作圧/音の発生確率は、それぞれ現在の操作部位と操作器具により予測される。(3)心拍数変化方向は、操作段階、呼吸運動と心的ストレスの有無により予測されることが示された。

構築したモデルは、前区間と現区間の操作種、操作部位と器具を観測値(入力値)として与え、疼痛と操作圧/音の有無とそれによる心拍数促進/抑制確率を出力する構造となっている。ベイジアンネットでは確率推論[15]を行うことにより、観測値以外の変数の確率分布を求め、確率値が最も大きい状態をその変数の予測結果(確信度最大値)として得ることができる。

ここでモデルの出力例を示す。図9は解析に用いた患者のデータ(解析データ)と、構築したモデルの出力(確信度最大値)を比較したグラフである。解析データの頻度確率とモデルの確信度最大値との平均誤差は1.6%であり、最大でも9.5%の誤差であった。図10は、今回の解析に用いなかった患者データ(未使用データ)との比較結果である。解析データとの平均誤差は5.9%、未使用データとは7.5%であり、最大でも8.7%の誤差であった。

#### 5. おわりに

頭部模型については、その構造の精密さや破壊可能という点で耳鼻科医の評価を得ている。今後は、手術操作情報(患者に加えた力・内視鏡位置など)の計測・呈示システムなどと統合し、スキル評価[3]が可能な手術手技研修システムとして発展させる予定である。

患者反応モデルに関しては、今回、個々の手術操作に対す

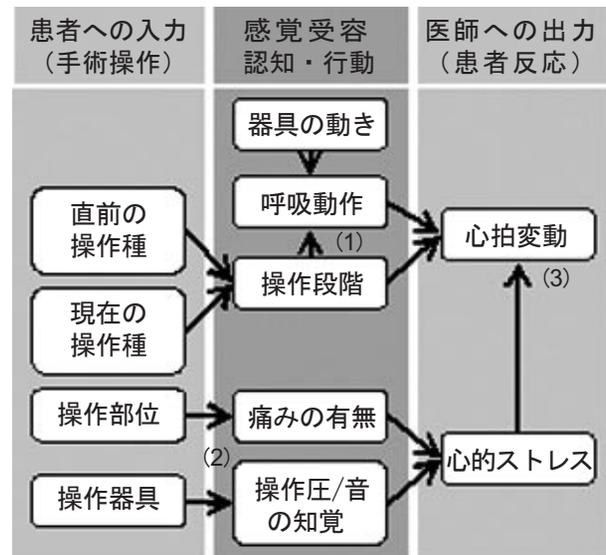


図8 手術操作—患者反応モデルの構造

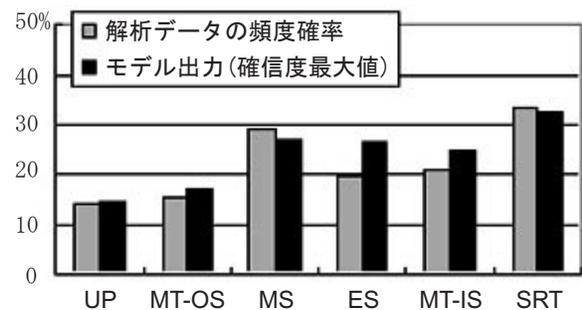


図9 解析データとモデル出力値の比較 (部位別の心拍上昇頻度)

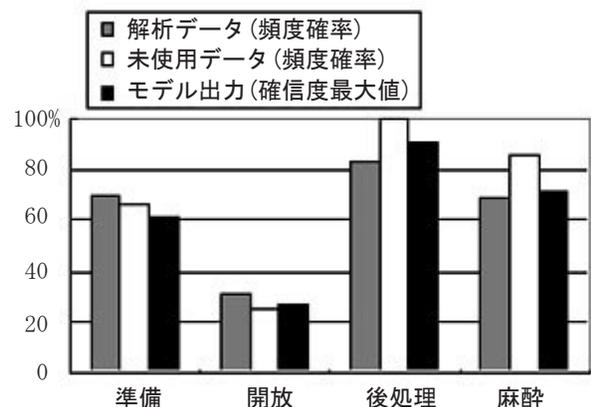


図10 解析データ、未使用データとモデル出力値の比較 (操作段階別の心拍上昇頻度)

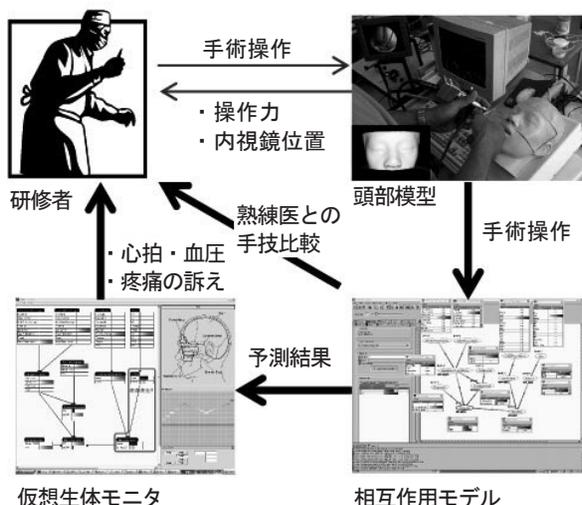


図 11 頭部模型・心理生理反応シミュレータ (構想)

る細かな患者反応という一方のモデルについて紹介した。

次のステップとして、患者反応とそのとき医師が選択した対処策(麻酔追加や休憩挿入), その対処策に対する患者反応というように医師と患者の“相互作用”のモデル構築, また、手術進行という文脈(コンテキスト)と患者反応, すなわちコンテキスト依存性を考慮したモデル構築を進めている。

このような患者反応モデルを、機械的スキルをトレーニングする物理シミュレータ(頭部模型)と統合することにより、手術中の患者反応を研修者に提示できるトレーニング・システム(図11)を構築していきたいと考えている。

## 参考文献

- [1] 持丸ほか：内視鏡下鼻腔手術トレーニング用模型システム「タナカさん」, ヒューマンインタフェースシンポジウム2000 論文集, pp.511-514(2000)
- [2] 山下ほか：内視鏡下鼻内手術手技研修用精密ヒト鼻腔模型の開発, 第12回日本コンピュータ外科学会大会論文集, 名古屋大学(2003)
- [3] 山内ほか：内視鏡下鼻内手術トレーニングシステムによる手術スキル評価手法, 日本コンピュータ外科学会誌, Vol.4, No.1, pp.13-19(2002)
- [4] 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(2003)
- [5] 大西俊郎ほか：内視鏡的副鼻腔手術, メジカルビュー社(1995)

- [6] 下野太海, 大須賀美恵子, 寺下裕美：心拍・呼吸・血圧を用いた緊張・単調作業ストレスの評価手法の検討, 人間工学, Vol.34, No.3, pp.107-115(1998)
- [7] 深井喜代子：痛みを測る - 痛みはどこまでわかるか, 臨床看護, Vol.25, No.3, pp.410-418(1999)
- [8] Denson JS. and Abrahamson S.: A computer-controlled patient simulator, The Journal of the American Medical Association, Vol. 208, No.3, pp.504-508(1969)
- [9] MedSim: <http://www.medsim.com/>.
- [10] GasMan®: <http://www.gasmanweb.com/>.
- [11] Doyle DJ.: Simulation in Medical Education: Focus on Anesthesiology, Med Educ Online, 2002; 7: 16, <http://www.med-ed-online.org/>.
- [12] Van Roon, AM., et al.: Simulation of heart rate and blood pressure effects of mental task load, Proceedings of the 12th annual international conference of the IEEE-EMBS, pp.703-704(1990)
- [13] Kuipers, B. Qualitative Simulation in Medical Physiology: A Progress Report. Technical Report, MIT/LCS/TM-280(1985)
- [14] Cavazza, M. and Simo, A.: A virtual patient based on qualitative simulation, Proceedings of the 8th international conference on Intelligent user interfaces, pp.19-25(2003)
- [15] 大須賀ほか：心臓血管系モデルを用いた自律神経指標の解釈, BME, 11-1, pp.75-85(1997)
- [16] Russel S. and Norvig P.: Artificial Intelligence, A Modern Approach, Prentice Hall(1995)
- [17] 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)
- [18] BayoNet: <http://www.msi.co.jp/BAYONET/index.html>.

## 【略歴】

酒井健作 (SAKAI Kensaku)

(独)産業技術総合研究所デジタルヒューマン研究センター JST-CREST 研究員

2001年, 筑波大学大学院博士課程工学研究科電子・情報工学専攻修了。同年, 博士(工学)。同年, 産業技術総合研究所特別研究員。2002年より科学技術振興機構CREST研究員として産総研デジタルヒューマン研究ラボ(2003年より研究センター)に所属。ユーザインタフェースと知識処理, 人間の心理・生理反応解析とモデル化の研究に従事。