

人工現実感手術室

1 医療と人工現実感

京都大学医学部附属病院医療情報部

小山 博史 hoyama@kuhp.kyoto-u.ac.jp

京都大学医学部附属病院医療情報部

堀 謙太 hori@kuhp.kyoto-u.ac.jp

京都大学医学部附属病院医療情報部

黒田 知宏 tkuroda@kuhp.kyoto-u.ac.jp

京都大学医学部附属病院医療情報部

高橋 隆 tak@kuhp.kyoto-u.ac.jp

はじめに

人工現実感 Virtual Reality (以下VR) は、計算機科学と知覚提示工学、実時間生体計測工学を利用した現実空間とは異なる人工的空間を人間に認知させる技術である。このために医学との関連がきわめて深い。

近年、コンピュータ画像処理能力の飛躍的向上によりVRの医療分野への応用が盛んになっている。特に、医学教育用シミュレータ¹⁾、画像診断支援システム²⁾、手術計画支援システム³⁾、術中手術ナビゲーションシステム⁴⁾、恐怖症に対する脱感作療法⁵⁾、神経食思不振症のボディイメージの矯正療法⁶⁾、小児がん患者の痛みに対するディストラクション療法⁷⁾、がん患者の闘病緩和医療支援システム⁸⁾などが報告されている。

一方、医療分野では、医療の変革の柱の1つとして患者のQOL (Quality of Life) を支援する医学 (QOL医学) が注目されるようになった。その中でも、特記すべきものとして低侵襲手術^{☆1}用のマスタ・スレーブ型手術ロボット装置が心臓外科や腹部外科領域で臨床応用されている。この技術は、術者による手ぶれを除去した手術操作を行う「フィルタリング」機構と微細血管や神経の吻合(接合)などの細かい操作を行う上で稼働域を実操作の20分の1以下にしたりする「スケーリング」機構を有することを特徴としている。

このような利点がある反面、術野^{☆2}が小さいことや操作範囲が制限されるために、実際の術野周辺の正常組織が把握できにくく、出血点の把握や止血が難しい場合があること、患者の麻酔の状態や出血量を術者が把握しにくいことなどの不利点もある。また、今まで学習したことがない新しい操作を要する手術であるために、熟練した外科医でも再訓練が必要であり、術者に今まで以上のストレスがかかる。我々は、このような問題の多くが術者への各種情報の不足から生じるものと考え、マスタ・スレーブ型ロボット手術に必要な情報融合技術として分散協調感覚情報の統合に関する

研究を行いSurgical Cockpit Systemを提案している。

本稿では、まず手術に関するVRの応用例について紹介し、手術室の情報処理の現状と今後発展が期待されているマスタ・スレーブ型低侵襲手術を実現する上での感覚情報処理の統合・標準化の必要性と人間の機能の拡張に基づいた手術支援システム設計の重要性について述べる。

外科手術へのVRの応用

外科手術に関連したVRの応用分野は広く、医学教育に関する応用、家族や患者本人に対する手術の説明と同意(インフォームド・コンセント)への応用、手術前の手術計画への応用、手術中の支援に関する応用、術後の評価、手術後のご家族や患者ご本人に対する応用がある。以下各分野への応用事例と技術要素について述べる。

医学教育への応用

医学教育への応用には、医学部卒業前の体験型学習法としての応用と臨床研修医も含めた基本的な手術手順と操作法の訓練の2分野がある。図-1に顕微鏡手術シミュレータの概観を示す。本システムの特徴は、手術学習に必要な触覚を体験できる点にある。システムは、大きくシミュレーション部分と反力提示部分、顕微鏡部分に分かれる。現在、医学生の実習の一環としてこのシミュレーションシステムを用いたシステムの有用性と適正の評価法の開発に向けた研究を行っている。図-2に黄斑前膜症手術における膜剥離シミュレーションに対する手術時間と出血点数の相関解析の結果を示す。手術時間が短い学生ほど網膜を触り、出血点数を増加

☆1 人体へのダメージを最小に抑える手術の総称。

☆2 手術中の患部の視界。

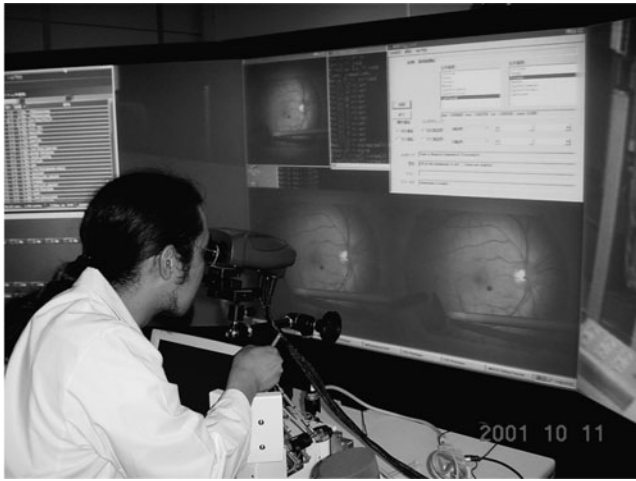


図-1 医学教育用手術シミュレータでの体験の様子

医学生にバーチャル手術顕微鏡内の手術空間を見せながら触覚を提示する機器と手術シミュレーション用ソフトを用いて学習を行っているところ。京大医学部では、医学部教育の中でこのような体験型学習法を取り入れている。

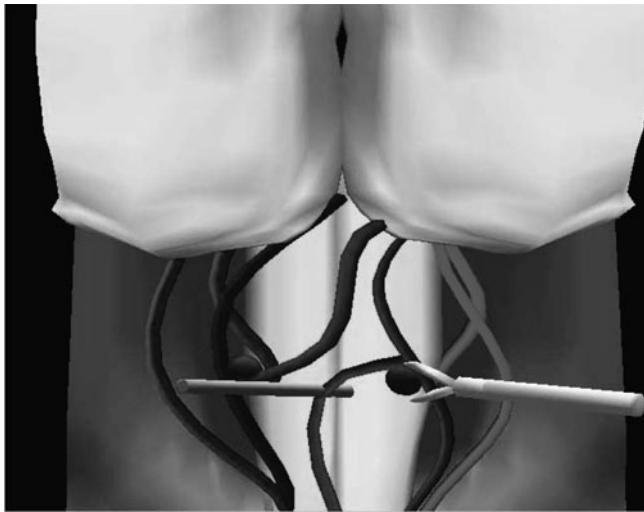


図-3 脳動脈瘤クリッピング手術の訓練用のVR空間

(三菱電機(株) 情報技術総合研究所表示システム技術部
向井信彦氏, 原田雅之氏より資料提供)

させる傾向がある。また、手術時間が短時間で出血させない学生群、操作時間も長く出血点数の多い不器用と思われる学生群、操作時間は短い出血点数の多い粗雑な学生群、操作時間は長い出血点数の少ない慎重な学生群に大きく分かれる。志望する科との関連性は、医学部5年生の段階ではまだ決めていない学生がほとんどであり、統計学的な評価は現段階では困難であった。卒業後に訓練して手術を上達させることは外科医として当然のことであるが、卒業前に本システムのようなシミュレーションシステムを利用し、自己の特性の評価や理解を支援する可能性を認めている。

医学教育へのもう1つの応用には、手術手順と手術手技の体得する訓練への利用がある。図-3は、同システムを用いた膜下手術のクリッピング手術の訓練用シミュレーション空間である。これは、外科解剖学アト

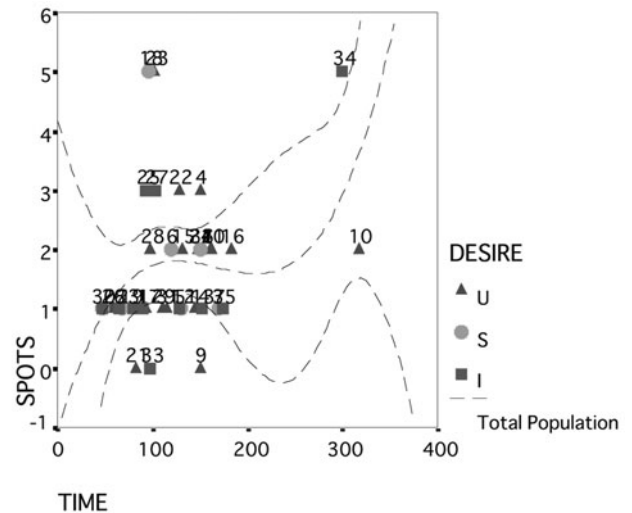


図-2 手術操作時間(秒/TIME)と網膜を操作中傷つけたときの網膜の出血点の数(SPOTS)の医学生34人での相関解析の結果

Iは内科小児科志望の医学生。Sは外科志望の医学生。Uは志望が決まっていない学生。破線の中心は、3次相関曲線。上下点線内はその95%の範囲を示す。数字は、医学生の体験番号を示す。

ラスをもとに3D CADソフトで脳幹、小脳、脳血管(動脈・静脈)を作成し、シミュレーションモデルとしたものである。

通常外科医は、手術書で手術手順と手術法を記載した図や写真で学習する。その後、助手として手術を直視下に見ながら手術を頭の中で再構成していく。そして本番の手術を指導医のもとで施行し、不具合が起ころうな場合にはすぐに指導医が対処できるような体制のもとで上達していく。しかし、手術の件数が多い場合には当然ながら手術の上達を期待できるが、稀な症例については手術を経験する機会は少なくリスクが向上する。また、前述したように、近年の内視鏡手術^{☆3}などの低侵襲手術法を中心とする新しい手術法の増加は、既存手術の学習に加え新手術法の習得が必要となっている。これは、時間的な制限が多い外科医にとってきわめて対応が困難な状況を作り出している。この解決策の1つが体験型手術シミュレータの利用である。

このように、体験型学習システムとしての手術シミュレーションシステムの開発は、リスクの高い疾患の手術について重点的に訓練できる機会を増加させる。これにより、リスク管理法としても重要性が高まり、新しい医学教育手法として早期に臨床の現場に導入されることが望ましいと考える。

インフォームドコンセントへの応用

現代医療においてインフォームドコンセントは必須

☆3 体内に小型カメラを挿入して行う手術の総称。



図4 生活工学アプリケーションでの遠隔コンサルテーションツールの概要

である。しかし、現実の診療の場面では、専門的な情報をいかに分かりやすく説明できるかが課題となる。医療者側からは、十分な説明を行っているつもりでも説明後医療者側が期待した情報を完全に理解していただいているかどうか心配である場合も少なくない。その原因は、医学という専門知識の深さと量に起因する。医療者とご家族と患者ご本人の情報格差という溝を埋めることはなかなか難しい。このために医師は、説明を行う場合簡単な図や絵を描き、既存のイラストを用いてできるだけ分かりやすいように話をする。

図-4は、VRを用いた脳腫瘍や脳梗塞患者に対するインターネット上での利用を想定したアプリケーションの一例である。インフォームドコンセントで表示する画像に該当する臓器の3Dモデルを選択し、表示しながら脳の機能や障害が起こる原因、手術の必要性や手術により生じる障害の可能性についての説明が容易なように、マウス操作を行いながら説明内容に合わせて該当する人体の箇所を赤く点灯させたり、3D臓器の回転、スケール調整を可能としながら説明することを想定している。また、画像データの表示には、3D臓器の該当箇所の表示だけでなく、CT (Computed Tomography) 画像や超音波検査画像など該当部位断面をあらゆる人体の平面が表示できる仕様となっている。実臨床での有効性の証明にまでは至っていないが、このような医療用アプリケーションは今後のブロードバンドネットワーク社会の中では必須のものとなる。

インターネット上で癌患者への診療を支援する目的で、VRMLで作成した脳と神経の形状モデルと標準的な治療に関するテキストデータを参照できるシステム。形状データは、マウス操作により臓器を動かしたり、発生部位に応じて癌の形状モデルを動かすこともできる。

(国立がんセンター中央病院 若尾文彦先生、三菱総合研究所ビジネスソリューション事業本部 鶴戸口志郎氏より資料提供)

術前計画

多くの手術の術前計画にコンピュータ画像処理技術が用いられるようになってきている。特に、整形外科分野でのロボット手術の手術計画⁹⁾や脳神経外科の腫瘍摘出手術の計画装置が製品化されている。これらは、CTやMR画像を立体展開映像として正面、側面、上方図のように提示しながら、針の穿刺位置や皮膚や頭蓋骨の切開位置や腫瘍の摘出範囲を表示することが主な機能となっている。

VR空間を構築し、あたかも実際の手術を行っているかのように立体的に術野を表現するような術前計画支援訓練システムはまだ少ない。

術中ナビゲーション

究極の手術ナビゲーションとは、実際の手術に最も近いVR空間を構築し、最も手術侵襲が少なく、安全かつ正確な操作と手術時間が短い手術法を選択することにある。この手術計画に基づき、VR空間で想定した操作を実際の手術空間に合わせながら予定した手術を行う。術前計画と手術ナビゲーションシステムに必要な情報処理の概要を表-1に示す。

このためには、限りなく実際の術野に近い現象を再現する高いリアリティを必要とする。また、同時にVR

- 1 個々の手術対象症例のCTあるいはMRなどの画像データの取得.
- 2 手術に必要な部位の3次元再構成画像処理を行い、シミュレーションに使用する形状データの作成.
- 3 形状データに臓器特性, 生理学的自動運動, 弾性, 音響などの属性の追加.
- 4 外科操作にともなう臓器の変形, 血管の移動, 切断時の変化などのアルゴリズムをVR空間内に適応.
- 5 手術訓練をVR空間内で施行.
- 6 VR空間座標と現実空間の術野座標, 操作するメスやハサミ, 開創器などの手術器具の位置座標を同一空間内に表示.
- 7 手術の手順に合わせて, 実空間座標とVR空間座標を実時間で融合.
- 8 切開の位置, 範囲など術前計画で設計した映像を実写映像に投影.
- 9 危険な場所や操作, 患者の状態の急変などの状況に応じた情報を術者に提示.
- 10 計画通りにいかない場合, データベースから適合する症例と状態を推定して最適な処置あるいは手技を提示.

表-1 術前の手術計画を行ううえで必要なシミュレーションと術中の手術支援に必要なナビゲーションの機能要件

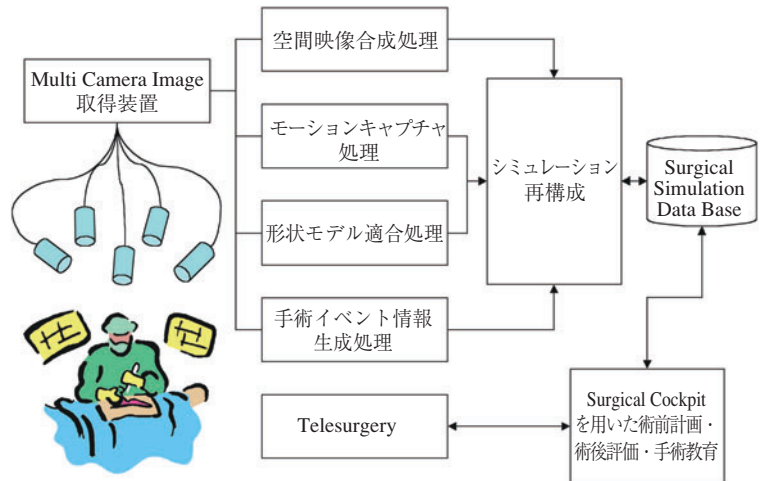


図-5 手術映像を複数カメラで取得し、その映像から画像処理を行いシミュレーションを作成しSurgical Cockpit Systemを用いて術前計画・術後評価・手術教育に使用するシステムの概要

空間座標と実空間座標, 操作デバイスの位置座標などの座標を同一空間内に合わせて表示する必要がある。

術後の手術評価

手術施行後の手術の技術評価法は, 手術中に録ったビデオや手術記録をもとにカンファレンスで検討されている。術後合併症が生じたりした場合に, その原因の検討は今後手術でのリスク管理を行う上で必須のことになる。そのためには, 実際の手術操作の立体的な映像取得とそのデータベース化, 再生技術の確立が必要となる。

図-5に, そのシステム概要図を示す。まず, 複数のカメラで手術操作の状況映像データを取得する。取得した映像をカメラの取得座標および取得方向・倍率から空間映像データとする。そのデータから映像上に登場している術者の手や臓器などのモデルを画像認識して, それに対応した形状モデルデータを取得あるいは作成・生成する。映像に登場する外科医の手や手術器具などのモデルの動きを形状データの動きへマッピングする。形状モデルに対してテクスチャを貼る。映像データでの処理内容を解析して, 手術手技のイベント情報を作成する。これらを統合してデータベースに格納する。シミュレーションは, 術式別の標準的な手術手順を基本として系統樹として外科手術の変法に関するデータを管理する。これらのデータベースのデータを基に体験型シミュレータとしてナビゲーションで利用したSurgical Cockpit Systemを用いる。

実際の手術支援システムの開発も必要であるが, 上記のような実手術手技を立体的動的データとして保存し, 再利用するシステムの開発が必要である。これら

のデータの蓄積は, 当然ながら手術中のモニタ映像の画像処理を行うことにより, 危機の予測と警報などの安全管理対策としても重要であることは間違いない。手術の安全性, 教育効果の向上をはかる上で早期の研究・開発が望まれる。

Surgical Cockpit Systemの病院設備としての必要性

手術におけるリスク管理には, 手術情報を分散的に処理するのではなく, 集中的に処理したり管理することが必要となる。当研究室では, 統合的な手術支援環境を実現するためのシステムとしてSurgical Cockpit Systemを提案し, そのプロトタイプシステムを構築した¹⁰⁾。ここでは, まず現在の手術室内での情報処理について述べ, それらの情報を統合するシステム設計の概要と必要性を示す。

現在の手術室内の情報処理

手術の種類は, 分野により多種多様であるが, 手術の術式に応じて手術室の機能も変わる場合も少なくない。ここでは現在研究を進めている遠隔ロボット手術(Telerobotic surgery)における手術室を想定し, その中で情報処理について分析する。表-2に手術室内で生じる情報の種別を示す。大きく手術室内の環境を管理する情報システム, 麻酔や手術による患者の状態をモニタリングするシステム, 手術器具や手術装置関連システム, 中央手術管理室や手術中の迅速病理診断^{☆4)}のための通話システム, 手術中の血液検査や尿検査の結果

☆4 手術中に組織の悪性度を判断する病理検査。

情報項目	情報を発生する装置・システム
手術室環境管理情報	1. 滅菌装置 (空調) 2. 環境ガス監視システム 3. 過電流警報装置 4. 手術室監視モニタ 5. その他
患者情報	1. 麻酔器情報 2. 血圧測定装置 3. 動脈血酸素飽和度測定装置 4. 体温測定装置 5. 出血量計測装置 6. 尿量計測装置 7. 心電図監視装置 8. その他
手術機器情報	1. 无影灯 2. 電動手術ベッド 3. 電気メス 4. 吸引装置 5. 術中超音波検査機器 6. 人工心肺装置 7. 手術顕微鏡装置 8. TVモニタ 9. 手術ナビゲーション装置 10. その他
通話システム	1. 電話 2. インターフォン 3. TV会議システム 4. その他
患者診療情報処理端末	1. 患者診療情報処理端末 2. その他

表-2 手術室内で発生する情報

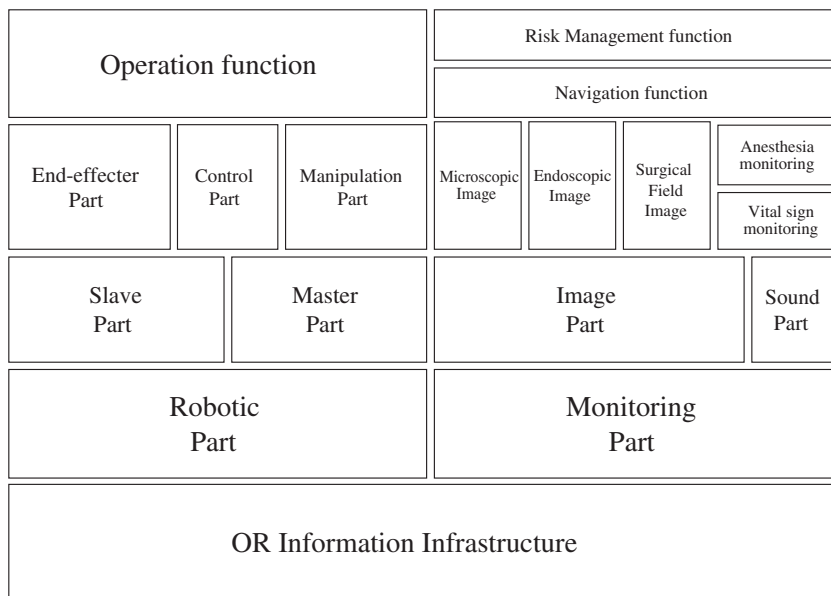


図-6 低侵襲ロボット手術の実施に必要なInformation Intelligent Operation Room機能要件の概要図

の参照や手術に必要な診療記録や画像データを取得するための診療情報処理端末システムの5つに分類できる。

管腔手術^{☆5}やロボット手術のような低侵襲手術法の導入により、手術操作機器の高機能化による情報処理量が急増してきている。特に、マスタ・スレーブ型手術ロボットの場合、手術を実施するエンド・エフェクタを制御するための情報処理と術者側の操作をエンド・エフェクタに伝達するための情報処理が必要となる。また、手術操作以外にも術者が手術操作しながら監視している術野周辺の状況や麻酔下の患者の状態を総合的に把握して手術を進行させることが必要となる。

しかし、現在の手術室の設計は上記の情報処理を統合的に処理する情報基盤システムの導入という設計思想で構築されている場合は少ない。

Information Intelligent Operation Room (IIOR) の概念設計

図-6に現在盛んになっている低侵襲手術用のマスタ・スレーブ型ロボット手術を施行する上で必要な機能概要を示す。

現状のロボット手術やナビゲーション装置の最大の難点は、電源やネットワークや機器の制御信号を送るためのケーブルの多さにある。この問題を解決するた

めには、高速無線LANを用いた設計が必要となる。

低侵襲ロボット外科手術を行う上での問題は、執刀医が直視下に術野をみることができないことや術野周辺の状況の把握、麻酔下の患者の状態や手術装置の状態の把握が困難であることにある。このために情報システムの設計上モニタリング機能とロボット機能に分ける。モニタリング機能には、映像データと音データで構成し、ロボット機能は通常のようにマスタとスレーブに分ける。さらにエンド・エフェクタと操作部分のManipulation部分に分け、両者を調整・制御するControl機能に分けることができる。エンド・エフェクタは、術式により装置が異なるが、Control PartとManipulation Partの仕様はできる限り標準化されたほうが術者側の操作法に対するリスクの軽減が期待できる。

Monitoring Partは、執刀医が手術全体を管理するために必要な機能の集合とする。Microscopic Imageは、手術顕微鏡を用い手術映像を提示する機能であり、Endoscopic Imageは管腔鏡手術や内視鏡手術の映像を提示する機能、Surgical Field Imageは開創術野映像を提示する機能に分けることができる。これら以外にも、心電図の波形や尿量、出血量などの麻酔下の患者の状態を示す画像の提示や術中の迅速病理画像、手術前のナビゲーション映像や医用画像、以前の手術記録、術中の血液検査データを表示する機能を有する。さらにその上層に現在のカーナビのように標準的な手術のシナリオに応じて次の操作や注意すべき操作など手術をナビゲーションするNavigation functionとRisk Management functionを追加・統合することで全体システムとする。図-7に現在までに構築したSCSの全景を示す。

☆5 消化管手術の総称。

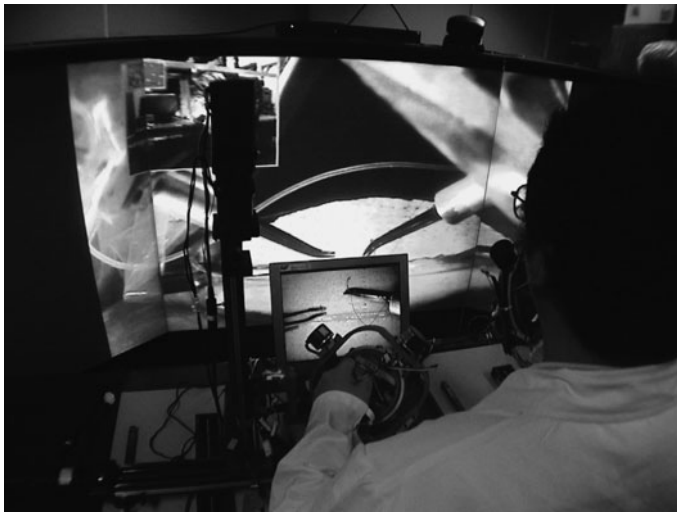


図7 Surgical Cockpit Systemのプロトタイプシステム

手術用マニピュレータは東京大学工学部光石・割澤研究室で開発されたものをCockpit内に設置し、脳外科医が操作している状態。

図-8に現在研究中のNeo Surgical Cockpit Systemのシステム概念図を示す。現在の遠隔ロボット手術の問題は、術野の裸眼立体視を行うために両眼で別々のレンズを覗き込む方式となっている場合が多い。このために術者は、手術に必要となる他の映像を必要に応じて見ることができず大きなストレスとなっている。この問題の解決のためには、高精細の裸眼立体視できる映像提示装置が必要である。また、手術操作を行うMaster Manipulation装置とフットスイッチおよび音声ナビゲーション、肘用のパッドが一体となったシステムの開発に向けた研究を進めている。

人間の機能を拡張させるロボットとしてエクゾスケルトン(外骨格)という概念があったが本システムは、情報収集、分析、解析、判断、操作・行動、制御、評価など人が必要とする処理を現有する人の処理機能をコンピュータによる情報処理の高速化だけでなく、操作や行動においても高速かつ精密処理できること、つまり、人間の多様な処理機能をVR技術を用い拡張させる新しい装置(Human Enhancer)の開発を目指し研究を進めている。

まとめ

医療とVR技術との関連する分野と現在研究を進めているIIORプロジェクトと其中でのSurgical Cockpit Systemの概要について述べた。その目的は、安全で正確で侵襲の少ない手術の実現にある。VRの大きな利点は、人間の知覚機能を拡張することで人間の情報処理速度を向上させ、最終的には人間の通常操作や行動を高速化あるいは精密化できる可能性を有することにある。この特徴は、今後の外科手術法を大きく変える可能性を有している。そのためには単に手術支援装置だけでなくIIORプロジェクトのように手術室自体を高

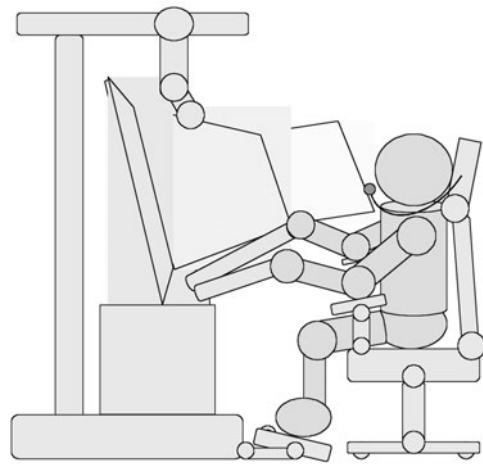


図-8 状況判断や意思決定、操作などの人間の能力を拡張するHuman Enhancerの概念図

度な情報システムとして考え設計することが必要であり、Surgical Cockpit Systemのように人間の機能を拡張させるシステムの開発も必要となる。そういう意味で、現在は既存の研究開発のコンセプトから新たにVRをとり入れた「人間の機能の拡張」という次世代の手術支援環境設計と其中での統合的支援装置の研究開発という新しい方向性をもとにした研究開発を進める時期にきているといえよう。

謝辞 本研究の一部は、厚生科学研究補助金がん克服新10カ年戦略事業および文部科学省振興調整費、日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業JSPS-RFTF99I00905(分野名:外科領域を中心とするロボティックシステムの開発, プロジェクト名: Telesurgeryにおける通信システムと情報支援ネットワークの開発)および通信放送機構の助成による。関係者に深謝申し上げる。

参考文献

- 1) Mukai, N. et al.: New Graphics Models for PC Based Ocular Surgery Simulator, Stud Health Technol Inform, 81, pp.329-335 (2001).
- 2) Seipel, S., Wagner, I.V. and Schneider, W.: Design of a 3D Workbench Interface for Training in Dental Implantology, Medinfo, 9 (Pt 2), pp.907-911 (1998).
- 3) Mastrangelo, M.J., Jr. et al.: Using Immersive VR as a Tool for Pre-operative Planning for Minimally Invasive Donor Nephrectomy, Stud. Health. Technol. Inform., 81, pp.298-304 (2001).
- 4) Wapler, M. et al.: Motion Feedback as a Navigation Aid in Robot Assisted Neurosurgery, Stud. Health. Technol. Inform., 50, pp.215-219 (1998).
- 5) Rothbaum, B.O. et al.: Effectiveness of Computer-generated (Virtual Reality) Graded Exposure in the Treatment of Acrophobia, Am. J. Psychiatry, 152 (4), pp.626-628 (1995).
- 6) Riva, G. et al.: Experiential Cognitive Therapy: a VR Based Approach for the Assessment and Treatment of Eating Disorders, Stud. Health. Technol. Inform., 58, pp.120-135 (1998).
- 7) Hoffman, H.G. et al.: Effectiveness of Virtual Reality-based Pain Control with Multiple Treatments, Clin. J. Pain, 17 (3) : pp.229-235 (2001).
- 8) Ohsuga, M. et al.: Bedside Wellness-Development of a Virtual Forest Rehabilitation System, Stud. Health. Technol. Inform., 50, pp.168-174 (1998).
- 9) Muller, W. et al.: Planning System for Computer Assisted Total Knee Replacement, Stud. Health. Technol. Inform., 70, pp.214-219 (2000).
- 10) Hori, K. et al.: Surgical Cockpit System and Effectiveness of Its Immersive Environment, Computer Assisted Radiology and Surgery 2001, Berlin German (June 2001).

(平成14年4月2日受付)