

両グループの被験者において、訓練時の楽しさ、操作の疲れについて、5点スケール(1,2,3,4,5)で回答させた。その結果、楽しさは平均 4.34 (5:楽しい)、疲れは平均 2.89 (5:疲れた)であった。グループ間で有意な差はなかった。従って、両グループで提案システムによる訓練が楽しく、ひどい疲れはなかったことが判明した。

5.4 医師の試用による有効性の評価

5.2 節の操作感覚の評価に加えて、提案システムの有効性について3名の外科医により主観評価を得た。評価環境は、5.2 節と同様である。肝臓圧排を試みてもらった後、アンケートを行った。アンケート内容は、「臓器感覚を提示できている」、「臓器圧排の訓練に使える」、「応力表示は役に立つ」という三つの項目であり、5点スケール(-2,-1,0,1,2)で回答を得た。図 16 にアンケート結果を示す。

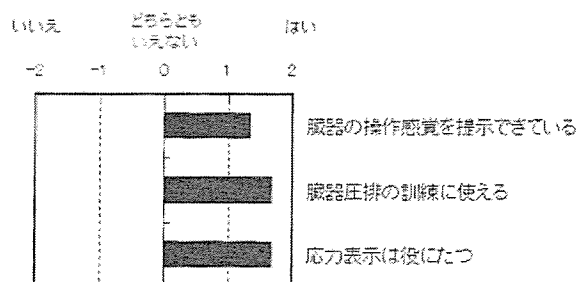


図 16 医師による臓器圧排シミュレータの試用評価
Fig.16 Subjective evaluation of exclusion simulator by medical doctors

アンケートの結果から、臓器感覚の提示に関しては若干の違和感があるものの、本システムの臓器圧排訓練への有効性、応力表示の有効性について高い評価が得られた。また、以下のコメントが得られた。臓器の操作感覚に対するコメント

- 臓器の立体感があり、硬さも本物に近い
- 指先だけなので操作感覚といわれると難しいかも知れない

臓器圧排の訓練への有効性に対するコメント

- 圧排の例として、消化器外科では他に大動脈や大静脈などを扱う。肝臓では手のひら全体を用いる場合もある
- かなり有効である。学生の OSCE や研修医の訓練に最適

応力表示の有効性に対するコメント

- 肝臓が裏側で接続している結合組織の中には血管や神経が通っており、圧排時には注意が必要。このシステムを用いてどの部位

に力が集中しやすいかを知ることが非常に有効。

- 力がこれ以上加わってはいけない部位がわかることは非常に有効である
- 非常に有効に感じたが、操作感覚に集中してしまい、あまり見ていなかった

その他のコメント

- 指先の感覚が非常に有効。乳がん検診での乳がんの識別等に使用できると広い範囲での応用が可能
- 乳がん、肺がんへの応用が可能

6. 考察

5.1 節のシミュレーション結果により、提案システムにより任意形状をもつ臓器オブジェクトに対して様々な操作を対話的に行えることが示された。実時間処理の面では、単体の汎用 PC を用いて任意の 4 本以内の指での臓器との同時接触を許し、弾性分布に基づく高精度な反力提示と変形計算が可能であることが分かった。

5.2 節では、肝臓圧排シミュレータを用いて医師による操作感覚の主観評価を行った。実際の手形状と VR 環境での手モデルとが完全に一致していない点、指先にのみ力を提示可能といった点から、操作感覚については完全に違和感のない状況までは得られていないことが明らかになった。一方、臨場感が高く臓器の操作感覚をある程度実現しており、医師の試用に耐えるものであることが明らかになった。手モデルの改善による操作感の向上が期待できる。

5.3 節における試作システムを用いた模擬訓練について詳細に考察を行う。模擬訓練の結果、応力表示を行うことにより訓練初期において応力値が小さくなる傾向がみられ、初期の訓練効果が示唆された。したがって、提案システムでは訓練初期において、効率的な訓練が行えた可能性があるといえる。現在の医療現場における患者を治療しながらの訓練(OJT)では、十分な技能をもたない訓練初期の医師による不適切な処置により重大な事故が引き起こされている。訓練システムによって、訓練初期において効率的な訓練が行うことができれば、現状で引き起こされている多くの医療事故を未然に防ぐことができる可能性がある。

一般的に訓練で重要なことは、意味と動きを結びつけ、関係を体得することである。1、2、3 日目の応力表示を行ったグループが、応力表示があることによって操作が早く上達したことについて、上記の意味と動きの関係を体得することが訓練であるとい

観点から考察する。応力表示を行わない場合は、破断点の状況や変形・反力の情報により応力値を推測していると考えられる。本システムの応力表示により、応力が小さくなる傾向が生じる結果になったことには、2つの要因が考えられる。1つは、応力という本来は目で見えないものを、メディア変換し視覚的に表示することで、訓練者が理解しやすい情報として示していることである。もう1つは、リアルタイムに応力を視覚提示することで、操作途中のある時点での、意味と動きの関係を示していることである。リアルタイムに応力を参照させることにより、操作と応力の関係を早く理解させ、応力が小さく保つことが可能になったと考えられる。

CyberForce を装着して腕を上げて訓練している時間が20分ほどある。CyberForce は軽くはないため、20分間、腕を上げていれば、疲れるはずであるが、アンケートの結果、それほど疲れないことがわかった。訓練環境が、操作のコツがわかると最大応力値が減少するというゲーム性を含んでおり、被験者は熱中して操作を行ったため、疲れをあまり感じなかったと考えられる。アンケートでも「ゲーム性が高く、楽しく訓練できました。デバイスが結構重たいので、初め結構疲れるかなと思いましたが、熱中すると重さは気になりませんでした」というコメントがあった。訓練を疲れず、楽しみながら行うことができることは、訓練者のモチベーションを高め、訓練時間を長くとることが可能であり、訓練システムとして非常に重要な要素である。また、アンケートにより応力表示が理解しやすく操作の邪魔にならないことも明らかになった。応力分布は色で表示しているため、物体の形状を確認するのに妨げとならなかったと考えられる。

以上のことから、応力分布を表示することは、訓練の楽しさを向上させつつ、必要な情報を即座に伝えることに繋がり、訓練効果の向上に効果的であったと考えられる。

5.4節では、医師により圧排訓練への有効性については全ての医師が肯定的であり、応力表示の具体的な適用部位に関する示唆も得られた。手のひら全体を使った圧排について一部指摘があったが、訓練の必要性、現状の力覚提示装置による表現力、実時間性などについて検討する必要がある。

7. おわりに

本研究では、外科手術における臓器圧排の訓練環境実現を目的とし、多指力覚提示装置と実時間臓器変形シミュレーションを用いた圧排訓練シミュレー

タの構築、および応力可視化による効率的な訓練環境の実現を試みた。複数指による弾性体インタラクション手法を開発し、広いワークスペースで自由な操作を可能とする外骨格型力覚提示装置CyberForceを用いてシステムを構築した。構築システムでは、4本以内の指での臓器モデルとの同時接触を実現した。模擬訓練の結果、応力の対話的提示により訓練初期における効率的な圧排訓練の可能性が示唆された。また、試作した肝臓圧排シミュレータの医師の主観評価により、本システムの高い操作性と圧排訓練への有効性が明らかになった。

本研究により開腹・開胸手術の訓練シミュレータ実現につながることを期待される。

謝辞

本研究は、日本学術振興会 基礎研究(S)(課題番号:16190001)、文部科学省科学研究費補助金 若手研究 A (課題番号:18680043)、萌芽研究 (課題番号:18659148)、厚生労働省科学研究費補助金 (H18-医療-一般-032)、中島記念国際交流財団、倉田奨励金の助成による。

参考文献

- [1] MIST, Mentice, www.mentice.com
- [2] LapSim, Surgical Science, www.surgical-science.com
- [3] LapMentor, Simbionix, www.simbionix.com
- [4] N.Seymour, A.Gallagher, S.Roman, M.O'Brien, V.Bansal, D.Andersen, R.Satava, "Virtual Reality Training Improves Operating Room Performance: Results of a Randomized Doubleblinded Study", *Ann Surg*, 236(4), pp.458-463, 2002.
- [5] K.Montgomery, C.Brannan, J.Brown, S.Sorkin, F.Mazzella, G.Thonier, A.Tellier, B.Lerman and A.Menon, "Spring: A General Framework for Collaborative, Realtime Surgical Simulation", *Proc. of Medicine Meets Virtual Reality 2002*, 296-303, 2002.
- [6] M.Cavusoglu, T.Goktekin and F.Tendick, "GiPSi: A Framework for Open Source/Open Architecture Software Development for Organ Level Surgical Simulation", *IEEE Transaction on Information Technology in Biomedicine*, 10(2), pp.312-322, 2006.
- [7] 黒田嘉宏, 中尾恵, 黒田知宏, 小山博史, 松田哲也, 吉原博幸, "MVL:実時間医用VRシミュレーションライブラリの開発", 日本バーチャルリアリティ学会 第9回大会論文集, pp.533-536, 2004.
- [8] 黒田嘉宏, 竹村匡三, 桑重人, 岡本和也, 堀謙太, 中尾恵, 黒田知宏, 吉原博幸, "手術書から抽出されたメタ言語データからの手術シミュレータ構築機構の設計", 医療情報連合大会, pp.1154-1156, 2006.
- [9] ESI: European Surgical Institute, <http://www.esi-online.de/>
- [10] Bristol Medical Simulation Centre, www.bris.ac.uk/Depts/BMSC/
- [11] Karolinska Center for Advanced Medical simulation, www.simulatorencentrum.se
- [12] 山本恭弘, 中尾恵, 黒田知宏, 小山博史, 小森優, 松田哲也, 坂口元一, 米田正始, 高橋隆, "心臓血管外科における拍動を伴う大動脈触診シミュレーションシステム", 電気学会論文誌E, 123(3), pp.85-92, 2003.
- [13] Y.Kuroda, M.Nakao, T.Kuroda, H.Oyama and M.Komori, "Interaction Model between Elastic Objects for Haptic Feedback

considering Collisions of Soft tissue”, Computer Methods and Programs in Biomedicine, 80(3), pp.216-224, 2005.

[14] 中尾恵, 黒田知宏, 小山博史, 小森優, 松田哲也, 高橋隆, “物理特性に基づいた高精細かつ対話的な軟組織切開手法”, 情報処理学会論文誌, 44(8), pp.2255-2265, 2003.

[15] J.Berkley, G.Turkiyyah, D.Berg, M.Ganter and S.Weghorst, “Real-Time Finite Element Modeling for Surgery Simulation: An Application to Virtual Suturing”, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 10(3), pp.1-12, 2004.

[16] S.DiMaio and S.Salcudean. “Needle Insertion Modelling and Simulation”, Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.2098-2105, 2002.

[17] M.Cutkosky and R.Howe, “Human Grasp Choice and Robotic Grasp Analysis”, Dextrous Robot Hands, Springer Verlag, New York, pp.68-75, 1990.

[18] 佐藤正明ほか, バイオメカニクスシリーズ 生体力学, 日本機学会編, オーム社, 1991.

[19] 天野晃, 松田哲也, 野間昭典, “細胞・生体機能シミュレーションプロジェクト”, ヒューマンインタフェース学会誌, 6, pp.39-44, 2004.

[20] G.Burdea and P.Coiffet, “Virtual Reality Technology”, Wiley Interscience, 2003.

[21] アルハラビオサマ, ダヌラティスビタウタス, 川崎晴久, 毛利哲也, “5指ハプティックインターフェイスによる乳癌触診訓練システムの研究”, VR 医学, 4(1), pp.5-11, 2006.

[22] 鈴木直樹, 服部麻木, 江積剛, 熊野宣弘, 池本 明夫, 足立吉隆, 高津光洋, “触覚を伴った手術作業が可能なバーチャル手術システムの開発”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 3(4), 1998.

[23] SensAble Technologies, Inc., www.sensable.com

[24] S.Gibson and B.Mitrich, “A Survey of Deformable Modeling in Computer Graphics”, Technical report, http://www.merl.com, TR-97-19. MERL, 1997.

[25] S.Cotin, H.Delingette and N.Ayache, “Real-Time Elastic Deformations of Soft Tissues for Surgery Simulation”, IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics, 5(1), pp. 62-73, 1999.

[26] M.Bro-Nielsen, “Finite Element Modeling in Surgery Simulation”, Journal of the IEEE, 86(3), pp.490-503, 1998.

[27] K.Hirota and T.Kaneko, “Haptic Representation of Elastic Objects”, Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 10(5), pp.525-536, 2001.

[28] C.Zilles and J.Salisbury, “A Constraint-based God-object Method for Haptic Display”, Proc. of IEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Human Robot Interaction, and Cooperative Robots, 3, pp.146-151, 1995.

[29] Immersion, http://www.immersion.com

[30] 中尾恵, 黒田知宏, 渡小太郎, “ボリュームインタラクションのためのマスキングとその実時間処理方法”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 10(4), pp. 591-598, 2005.

(2006年7月7日受付)

著者紹介

黒田 嘉宏 (正会員)



2003年京都大学大学院情報学研究科 修士課程修了。2005年 同博士後期課程修了。同年京都大学医学研究科 特任助手。2006年大阪大学基礎工学研究科 助手。現在に至る。医用 VR, 触力覚モデリング, 教育訓練システムに関する研究に従事。博士(情報学)。

平井 真 (非会員)



2006年京都大学大学院情報学研究科 修士課程修了。同年神戸製鋼所 生産システム研究所 研究員。現在に至る。医用 VR, グローブ型力覚提示装置を用いた力覚提示, 外科手術手技における教育訓練システムに関する研究に従事。修士(情報学)

中尾 恵 (正会員)



2003年京都大学大学院情報学研究科修士。同年同大学大学院医学研究科 特任助手を経て, 2004年奈良先端科学技術大学院大学助手, 現在に至る。医用バーチャルリアリティ, 物理法則モデリング, 視覚・力覚提示に関する研究に従事。博士(情報学)。

佐藤 寿彦 (非会員)



1997年京都大学医学部卒業。同年京都大学医学部胸部疾患研究所付属病院臨床研修医。京都桂病院呼吸器センター, 国立療養所岐阜病院外科, 兵庫医科大学助手を経て, 2005年京都大学医学部医学研究科博士課程入学, 現在に至る。日本外科学会外科認定医, 呼吸器外科専門医, 日本医師会認定健康増進スポーツ医。

黒田 知宏 (正会員)



1998年 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科修了。同助手, オウル大学 情報処理学部 客員教授を経て, 2001年 京都大学医学部附属病院講師。2006年2月オウル大学 情報処理学部客員教授(兼任), 現在に至る。仮想・強調現実感, 福祉情報学, 医療情報学等の研究に従事。博士(工学)。

長瀬 啓介 (非会員)



1991年筑波大学医学専門学群卒業。1998年筑波大学臨床医学系講師を経て, 2003年京都大学医学部助教授着任。現在に至る。日本内科学会認定内科医, 日本呼吸器学会呼吸器専門医。

吉原 博幸 (非会員)



1973年大阪大学基礎工学部合成化学科卒業。1980年宮崎医科大学医学部卒業。宮崎医科大学教授, ハーバード大学医学部, マサチューセッツ工科大学客員准教授, 熊本大学教授を経て2003年京都大学教授(医学部附属病院医療情報部)。現在に至る。電子カルテユーザーインターフェイス, 医療情報交換規格, 地域連携医療システムなどを専門とする。医学博士。

外科手術教育を目的とした 注釈つき VR シミュレーション記録の研究 - 力のかけ方の実時間可視化における利点の評価 -

ミッコ・リッサネン^{*1}, 黒田 嘉宏^{*2}, 中尾 恵^{*3}, 糸 直人^{*4},
黒田 知宏^{*5}, 長瀬 啓介^{*5}, 吉原 博幸^{*5}

**Annotated VR Simulation Records for Surgical Education
- Evaluating the Benefits of Real-Time Visualization of Force Exertion -**

Mikko Rissanen^{*1}, Yoshihiro Kuroda^{*2}, Megumi Nakao^{*3}, Naoto Kume^{*4},
Tomohiro Kuroda^{*5}, Keisuke Nagase^{*5} and Hiroyuki Yoshihara^{*5}

Abstract — To become a surgeon, theoretical knowledge has to be combined with practice through extensive experience in variations of the text-book case. A number of simulators have been developed for surgical training over the past decade. This paper describes an approach based on recorded surgical simulation and its playback as Annotated Simulation Records (ASR). Process for making and using ASRs in training consists of recording and editing of recorded manipulation, annotation of success factors of the manipulation and finally replaying the ASR with visualized success factors. The ASR-based approach promotes surgical education by reducing constraints of time, space and number of people involved, as well as by offering the possibility of flexible learning strategies and integrated assessment of surgical skills. The ASRs are demonstrated in the case of force exertion, which is a fundamental part of surgical manipulation and nowadays modelled in simulators with haptic feedback. Visualization of force exertion can present future, present and past states of the example interaction, and present and past states of the user's interaction.

Keywords: Annotation, Surgical Simulation, Haptics, Surgical Training.

1. はじめに

外科手技の訓練では、実際の患者を危険にさらさないように模型や動物が用いられているが、臨床において十分な質の訓練を行うことはできない。これまでの手術シミュレータの研究開発では、リアリティの向上を主眼として行われてきた[1,2,3,4]。リアリティが高いシミュレータは良いシミュレータであることは、外科医と同様にシミュレータ開発者もよく理解しているが、単に現実を模倣するだけでは

バーチャルリアリティ技術（Virtual Reality, 以降 VR）の本当の利点を活かすことはできない。今日まで、シミュレーションをベースとした外科手技訓練を医学部のカリキュラムに一貫して導入した例[5]は数少ない。教育・訓練という観点では、医学が生まれた当初から、徒弟制度に基づく手術手技の訓練が行われてきた。訓練の大部分は実際の患者を通じた実地訓練（OJT: On the Job Training）であり、現状では OJT 以外に執刀医を担当するために十分な技能を身につける方法は存在しない。特に触力覚に基づく操作技能は他者から口頭で教わることも困難なため、多くの訓練が必要とされる。

操作技能について、数人の研修医を同時に効率的に教えることは難しい。執刀医になるためには約 10 年間の訓練が必要とされ、熟練医でさえ、最新の外科手技テクニックを体得するために日々訓練を行わなければならない。熟練医から研修医に容易かつ安全に技能伝達可能な環境が強く求められている。

*1: 京都大学大学院 情報学研究科

*2: 大阪大学大学院 基礎工学研究科

*3: 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科

*4: 日本学術振興会特別研究員 PD (京都大学大学院医学研究科)

*5: 京都大学医学部附属病院 医療情報部

*1: Graduate School of Informatics, Kyoto University

*2: Graduate School of Engineering Science, Osaka University

*3: Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology

*4: JSPS Research Fellow (Dept. of Medicine, Kyoto University)

*5: Department of Medical Informatics, Kyoto University Hospital

VR 技術が発展しつつある現在において、「どのようにすれば外科手術シミュレータを技能伝達メディアとしてうまく用いることができるか」ということが一つの大きな課題であるといえる。

手術シミュレーションシステム上のデータは全て記録し、再生することができる。近年の力覚提示インタフェースを用いた技能伝達手法のアプローチ [6,7,8] では、コンピュータシステムを介した人から人への手の運動技能の伝達が行われている。これまでは、例えば書道のように操作が厳密に定義できる課題を対象として運動技能伝達の方法が検討されてきた。一方、外科手術の術野や手技は、より複雑で様々なケースが存在する。記録されたシミュレーションデータ内に手術プロセスを記述することで、外科手技の技能を間接的に伝達することができ、VR ベースの技能伝達が可能になると考えられる。本研究は、外科医の技能を自動的に記録することを主題とするのではなく、熟練医と研修医間の教育メディアとして注釈つきシミュレーション記録 (Annotated Simulation Record, 以降 ASR) を扱う点が新しい。本研究によって、運動技能の習得以前のプロセスにおける、操作の因子を分かりやすく伝達することを目的とする。既に高い技術をもつ外科医にとっても、新たな技術をネットワーク越しで学ぶことができるという利点がある。

記録された操作を用いる幾つかの利点は Solis ら [6] と Teo ら [7] が指摘している。最大の利点は、関わる人々の時間的、空間的制約を無くすという点である。さらに、学習方法の柔軟性が向上する。本論文で提案する注釈フレームワークの目的は、外科手技の技能訓練に上記の利点を組み込むことである。ASR の処理を次のように定義する。

- 手本シミュレーションの記録
- 記録されたシミュレーションの編集 (ミスの修正と既に作成された手本からの様々なパリエーションの作成)
- シミュレーション記録への注釈 (各操作の重要な観点に対する優先度づけ)
- 手本操作の成功要素を学ぶための記録再生

本論文では、触診や切断といった多くの基本外科手技の技能において不可欠な部分である力の加え方に焦点を当てる。

2. 関連研究

注釈は、新たな情報を強調し、既存の知識にリンクすることで事項を説明する方法である。教科書に記載されたコメントと絵により内容の深い理解が得られるのと同様に、ハイパーテキストの注釈はデジタル文書を拡張する。さらに、デジタル化することでデジタル環境に慣れ親しんだユーザ、特に若い世代の人間に対して高い利用価値を与える [9]。

外科手術における技能伝達としては、Shaffer ら [10] が Virtual Rounds の概念を設計した。Virtual Rounds は、現実に近い VR 外科手術環境をシミュレーションしており、運動能力の訓練にとどまらないより高次の学習を目的としている。Virtual Rounds のシステムは、同期コミュニケーションに加えて注釈を通じた非同期コミュニケーションを可能とする。シミュレータを用いた学習過程には、学習者の動作に基づくフィードバック、あるいは学習者自身による記述に対する応答としてのフィードバックという形での応答が必要とされる。注釈は人の学習過程の反射的思考を可能とする。また、有効なシミュレーションエンジンは、学習が行われる環境を複製するだけでなく、臨床の環境を越えた拡張した機能を含むことも述べられている。心臓外科手術のトレーニングシミュレータ [11] は、手術手順を記録し、Undo と Pause が可能な教材を構築した。これらの機能は、学習過程で有効な場合があるが、どのように操作を実施すればよいか、あるいは何を優先して学ぶべきかといった事項を伝えることはできない。

Kommers ら [12] は VR における経験に基づく腹腔鏡手術の自己習得のために TwoCents 環境を提案した。TwoCents 環境は、解剖学、生理学、病理学、各論、外科的テクニック、およびアニメーションのライブラリに接続した VR 手術室をもつ。しかし、システムを有効に利用した例はみられない。

没入型電子本 (IEBook: Immersive Electronic Book) システム [13] は、数個のビデオカメラによって記録された過去の外科手術手順を見るための没入型 VR 環境である。IEBook システムは、意志決定の環境として設計されており、対話的な臓器モデルを用いた外科手技操作の訓練は行えない。

従来の研究においても、記録されたシミュレーションデータに対して外科手術手順の注釈は有益であることが分かっているが、シミュレーション環境あるいはインタラクティブな操作に対して注釈を行う方法論については明らかになっていない。

3. 注釈フレームワーク

注釈フレームワークは、操作の因子をシミュレータに結びつけるメディアであるといえる。本フレームワークは、外科医の知識や判断やインタラクションを自動的に抽出することを試みるのではなく、むしろ臓器とのインタラクティブな操作を外科医から取り出し、注釈作業を通して手技の因子を研修医に伝えることを可能とする。操作を記録・再生可能なアプリケーションレベルでの遠隔教育、自己学習ツールである。ユーザはシミュレーション環境を用いた運動技能訓練フェーズにも進むことができる。図1は、ASRの概要と利用形態を示している。次に、各処理を詳述する。

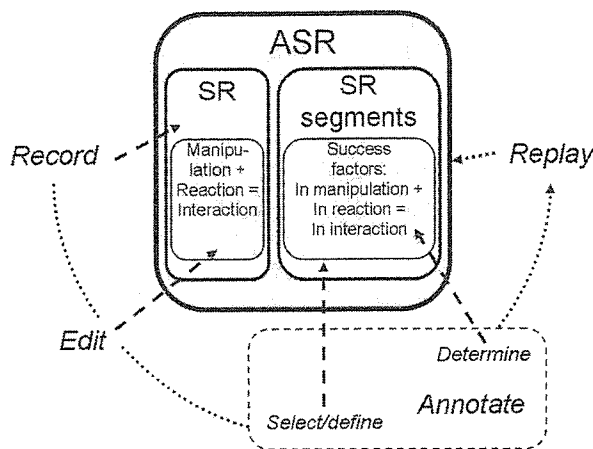


図1 注釈つきシミュレーション記録(ASR:

Annotated Simulation Record)。a)シミュレーション上の全てのインタラクション記録(SR: Simulation Record)。b)分割されたインタラクション記録における操作レベルでの因子。因子は優先度リストによって管理される。

Fig.1 Annotated Simulation Record (ASR) consists of a) Simulation Record (SR) that covers all interaction in the simulation and b) manipulation level success factors in the segmented interaction. The success factors are organized into priority lists.

3.1 記録

ASRを作成するにあたっての第一ステップはシミュレーションを記録することである。操作とシミュレータの反応(臓器の変形など)を適切な詳細度で記録しなければならない。特にユーザの入力、つまり外科手技の操作は入力データの違いが比較できるように、可能な限り高い精度で記録されなければならない。記録されたデータは、熟練医と研修医と

いった異なるユーザ間や、一人のユーザにおける異なる時間におけるパフォーマンス比較に用いられる。

3.2 編集

注釈を行う前に、記録された手本操作が洗練されたものになっていることが重要である。シミュレーション記録(SR: Simulation Record)の編集はASRにおいて重要な役割を果たす。編集の種類として、ミスの修正とバリエーションの作成の二つが挙げられる。

操作レベルでの編集機能はVRによって初めて実現し、「何がなされたか」と「何がなされるべきであったか」の違いを改めて注釈する手間が必要なくなる。ミスを修正可能なため、記録する際も外科医はまるで手術室にいるかのように手技に集中することができる。ミスは編集作業によって修正されるが、編集作業は臨床で多忙な外科医以外の方が替わって担当することも可能である。

既に作成された手本シミュレーション記録から様々なバリエーションを作成することができれば、シミュレーション環境においても現実の手術環境のように毎回異なる患者に対して処置を行うという訓練機会を作ることができるであろう。患者には個体差があり、外科医は解剖学的な違いによって標準的な術式とはかなり異なった方法を取らざるを得ない場合もある。

3.3 注釈

テキストに対する注釈の伝統的な方法として、下線をひく、スケッチする、コメントを書くなどがある。メモ書きは、学問知識として形成された内容を個人が学習するのに役立つ。さらに、個人的な注釈は他者にも有益になりうる。また、注釈は読者間での明確な共通認識を作ることができる[9]。今日、マルチメディアに対する情報注釈が可能である。VR環境に対する注釈も検討され、協調VR環境において検討がなされている[14]。VR環境における従来の注釈方法を注釈つきアノテーション記録(ASR)に適用することも可能である。既存のデジタル教材はASRの一部に関連している。従来の注釈は対話性を高めるために用いられるメタデータに近く[9]、ビデオの注釈ソフトなどが一般に知られている[15]。本論文ではこれらの注釈は扱わない。

3.3.2 提案フレームワークにおける注釈

注釈フレームワークでは、シミュレーション対象の関連を定義づける際に注釈が用いられる。物体とのインタラクションにおける操作者の動作特性と意図は、研修医にとって分かりづらい。従って、手術

手技の注釈システムとしては、学ぶべき動作特性に関する定義づけを支援する必要がある。成功例の手順を実施するために、最も重要な特性にまず注目させ、他の特性については後ほど完璧にさせる。本フレームワークでは、外科医の手指あるいは術具と臓器とのインタラクションを注釈対象として最も考慮している。注釈では、まず初めに、記録されたシミュレーションデータのうち意味のあるセグメントを選択する。そして、動作特性について優先度と評価基準値を定義する。たとえば、力の大きさを優先度の高い特性とし、ある力以上をかけてはいけないといった評価基準値を決める。選択された動作特性は各セグメントにおける因子となる。因子はユーザーに学習させなければならないため、評価基準値と対応付ける。最近の幾つかの研究では、外科手技技能における評価基準が提案されている[16,17]。

3.4 注釈つきシミュレーション記録の再生

記録されたシミュレーションデータを単に視覚的に再生するだけでは、操作技能を学ぶ上で最も効果的な方法とはいえない。VR 技術が登場する前は、外科手技操作を記録し再生する最も一般的な手段はビデオであった。VR の再生の利点は、二次元のビデオに対して三次元情報をもつことが挙げられる。再生を一時停止させた際の物体の角度情報からユーザーの興味を推定する研究などがなされている[11]。しかし、外科手術シミュレーション記録の再生における潜在的な可能性は、注釈を統合することで初めて明らかになる。自由記述形式の文字や解剖学部位のラベル付けなどの注釈は標準的な技術であるが、操作に対してどのように注釈するかはチャレンジングな課題である。操作の因子を定義することで、再生された操作を理解しやすくすることができる。操作を単純に視覚的あるいは力覚的に再生した場合、わずかな操作の違いを知覚することは困難であることが報告されている[8]。

4. 注釈フレームワーク - 設計と実装 -

注釈フレームワークの基本設計についてまず議論し、ASR の作成と利用の手順を説明する。5 節では一つの応用例を述べる。

4.1 プラットフォーム

医用 VR シミュレーションライブラリ(MVL: Medical Virtual reality simulation Library)[18]は有限要素法に基づく実時間臓器変形手法と力覚インタラクション手法のモジュールを備えたライブラリである。実時間処理のため、線形弾性を仮定している。

Dual CPU Xeon 3.2GHz、メインメモリ 4GB をもつ PC 上で MVL を動作させた。力覚提示装置には SensAble 社の PHANTOM[®] Desktop などを用いる。

4.2 記録

記録では、シミュレーション環境のキャプチャーとリプレイといった基本的な概念を用いる[19]。ユーザーの入力データ（力覚提示装置の位置、姿勢の時間変化）が記録され、シミュレーションを再実行するためにシステムにフィードバックされる。しかし、記録に膨大な計算機資源を費やすため、記録メディアと再生用メディアとを分離した。注釈フレームワークでは、シミュレーションエンジンに対する入力データ（力覚提示装置のマニピュレータ位置、姿勢など）は記録メディア内にある。再生メディアは変形後の物体形状のデータをもっている。記録メディアから入力されたデータをシステム上で再シミュレーションを行い、物体形状データを再生メディアへ出力する。実際のところ、再生メディアは 25fps で変形モデルの変位を記録した結果を持っている。

4.3 構造の編集

図 2 はフレームワークの編集モデルを示している。破壊を伴うような非可逆の現象が起きるシミュレーションでは一部の編集結果が後続のシミュレーション記録に影響しうる。従って、再生メディアにおける未来の状態に変化を反映させる必要があるが、非常に難しくチャレンジングな課題といえる。例えば、メスで組織を切開するようなシミュレーションを含む場合などでは、その後のデータに対しても組織は切開された後の状態にする必要がある。従って、シミュレーションをシリアル化した状態を別途用意することが考えられる。ユーザーは再生内容を見直し、編集セグメントの開始時間 T_s と編集セグメントの終了時間 T_e を指定することで、編集可能なセグメントを選択することができる。シミュレーションは、 T_s の前にあるシリアル化された状況 T_3 を読み込むことができる。編集後、状況を更新するために再シミュレーションを行う。従って、再生を更新するために必要な時間は約 $T_s - T_3$ である。残った再生セクションとシリアル化された状態の再生には $T_n - T_e$ が必要となる。編集モデルに関しては[20]に詳細が記載されている。

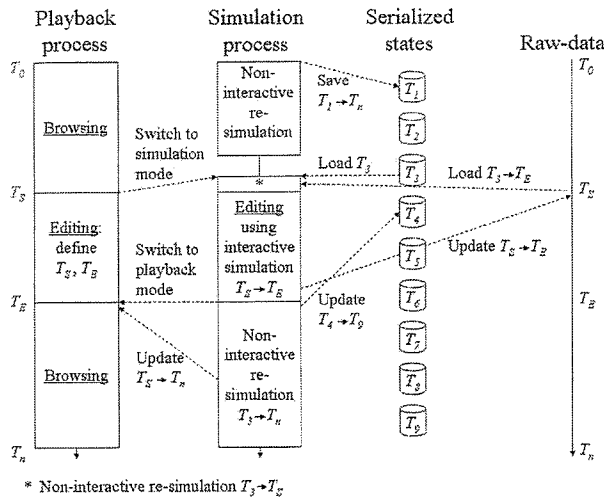


図2 シミュレーション記録の対話的編集データモデル。下線部はユーザーによる行動を示す。

Fig.2 Data model for interactive editing of SR.

Underlined parts represent user's actions.

4.4 編集手法

二つの基本的な編集機能を提供する。一つは再度記録する方法であり、もう一つはキー値を用いて編集する方法である。再度記録することにより、元のセグメントは新たな操作によって置き換えられる。再度記録する方法は全体的に失敗した場合やオリジナルと全く異なった操作が必要な場合に適している。

キー値を用いた編集方法について述べる。キー値は、力学的プロパティの値を GUI で編集することにより数値的に与えることができる。あるいは、シミュレーションを用いて物体とインタラクションすることで、その際のキー値を取り出して与えることもできる。後者の場合、セグメントの開始においてユーザーに対してシミュレーションの制御権が与えられ、操作の状況が記録される。その状況は新たなキー値として考慮される。本アプローチでは個人に依存した性質（例えば、軌跡の滑らかさや速度など）を保持したまま他者の操作を編集することを可能とする。また、このような数値的な編集方法は最も正確な編集を可能とする。これは操作の細部を調整する場合やセグメントを正規化するなど数値的なタスクの調整を行う場合に適している方法である。正規化の例としては、たとえばあるセグメント内で組織破壊を引き起こすような過剰な力を避けるように僅かな力を制限値として設定するような場合を指す。シミュレーション記録エディタ SiRE (図3) は、上述したとおり再度記録することによる編集、あるいは数値的な編集を可能とする。

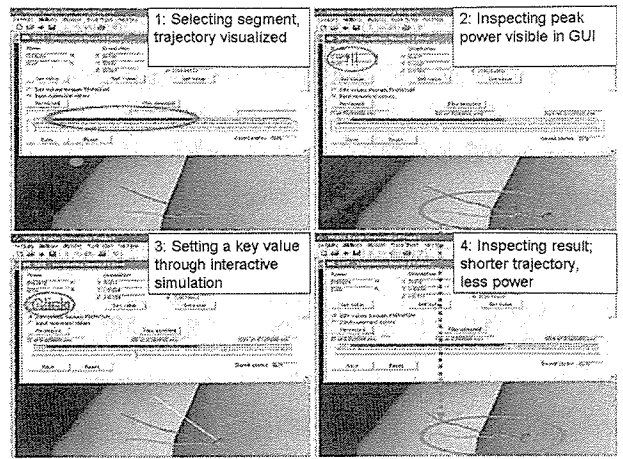


図3 シミュレーション記録エディタ SiRE を用いたシミュレーション記録の編集

Fig. 3. Editing SR with SiRE.

4.5 注釈

図4は、注釈フレームワークのデータモデルを示す。セグメント間の境界を例えば三次元構造の変形や操作点の位置に基づいて定義することにより、1000Hz で記録された生データが注釈される。さらに、シミュレーション記録における動作特性は注釈ソフトウェアの GUI 上で数値情報として提示される。

VideoAnnEx[15]など幾つかの注釈プログラムが開発されているため、特定のユーザインタフェースによる解決方法についてはここでは述べない。

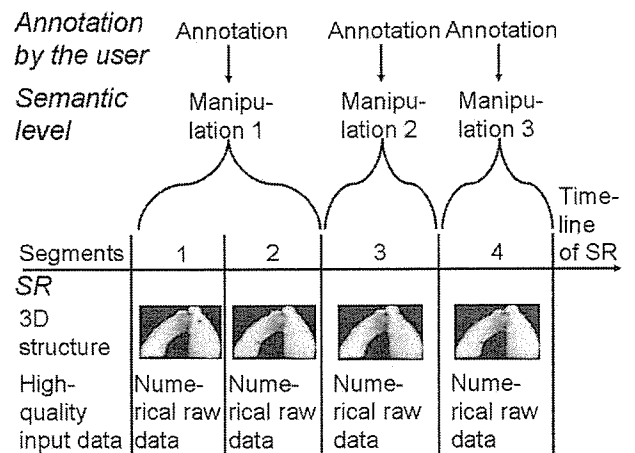


図4 シミュレーション記録の視覚的要素を通じた高品質入力データの注釈 - 三次元構造の再生

Fig.4 Annotation of high-quality input data through visual elements of the SR - playback of the 3D structure.

4.6 再生

時系列の三次元構造と操作点の軌跡を再生することは、記録されたインタラクションの三次元アニメーションと捉えることができる。動作特性の可視化は、操作点の軌跡を三次元空間上にプロットすることによってシミュレーション環境上に重ね合わせて提示される。

5. 力のかけ方の教育への ASR の適用

ASR から正しい力のかけ方を学ぶために、シミュレーション画面上に反力曲線を重ね合わせ、手本操作と自らの操作に対する反力曲線を同期させて表示する。手本と自分自身の反力曲線を目視で比較することで、訓練者による主体的な操作によって手本の操作がいかんして作られたかを身をもって知ることができる。図 5 は力のかけ方の場合における注釈つきシミュレーション記録を作成する手順を示す。詳細は後述する。

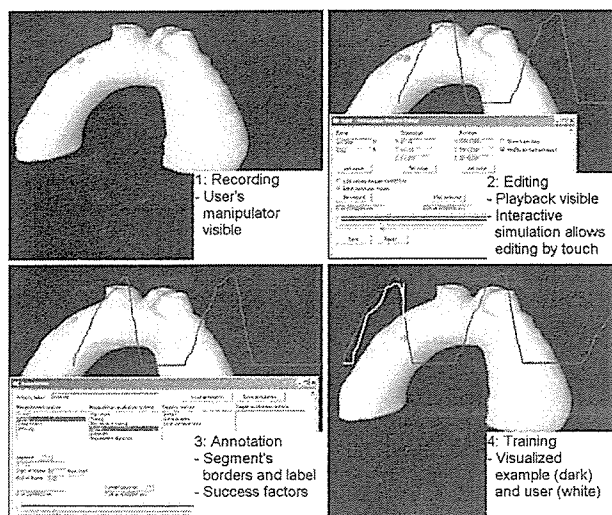


図 5 力のかけ方に関する注釈つきシミュレーション記録 ASR の作成 (4 ステップ)

Fig. 5 Making of ASRs for force exertion in 4 steps.

5.1 事例: 大動脈触診における注釈上の因子

力のかけ方について幾つかの観点が含まれるため、力のかけ方の例として、外科手術の一例である大動脈触診を選んだ。大動脈触診では、外科医は血の塊である血栓ができた場合の硬さを触診で特定する。しかし、力を過剰に加えると組織破壊による大出血を引き起こし深刻な事態を招きかねない危険性をもつ。

患者を危険にさらす可能性があるため、大動脈の触診において、力の大きさは最も優先度の高い要素である。従って、力の大きさの優先度は最も高い 1 に設定され、力の方向は次に高い優先度 2 にセットされる。触っている大まかな位置は重要であるが、厳密な位置はそれほど重要ではない。しかし、血栓を見落とさない操作手順における大まかな位置を知ることが必要である。従って、触った位置の優先度は 3 とする。今回は、対象を限定し、操作点が物体に接触してから離れるまでの一つのセグメントを扱うこととした。

5.2 力のかけ方の記録と編集

4.1 節に記述したようにシミュレーションライブラリ MVL を用いてシミュレーションシステムを構築し、手本となる操作を行った際の時系列反力データが記録された。シミュレーション記録エディタ (SiRE) を用いることで、異なるピークをもつ反力曲線が作られた。

5.3 力の可視化

図 6 は三つの特性 (大きさ、方向、接触領域) の可視化に関する設計を示している。優先的な事項である力の大きさに関して、中央にある線を通して手本の反力曲線と合うようにユーザは操作しようとする。反力曲線の可視化により、未来、現在、過去の状態を知覚することができる。第 2 の要素である力の方向については、ユーザが力方向の変化に対応できるように未来の状態が 1 秒前に視覚提示される。手本での接触領域は色つきのシンプルな三角形で表示される。ここで、位置に関しては、精度は求めないため大まかな手がかりを提示している。

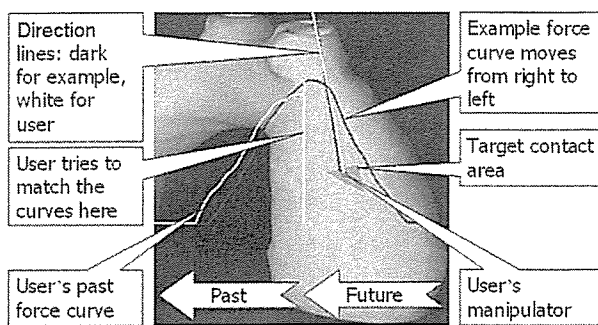


図 6 反力曲線、方向ベクトル、接触領域の可視化。手本の反力曲線の高さは 200 ピクセルに制限。

Fig.6 Visualized force curves, direction lines and contact area. Height of the example curve was limited to 200 pixels.

本手法はユーザの操作に対するフィードバックと同様、視点に関わらず手本に関して明快な手がかりを与えることが期待される。さらに、図7で示されるように、本手法は二つの操作におけるタイミングの違いを連続的に提示することができる。反力曲線の位置は、接触点に重ならず、かつ接触点に近い場所にセットされる。反力曲線の位置は、手本操作において力が加えられている間は変化しないこととした。

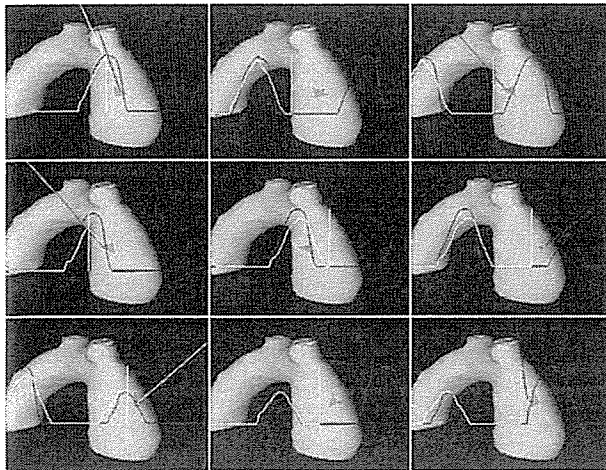


図7 移動する反力曲線の様子 (1秒間隔のスクリーンキャプチャ結果)

Fig.7 Screen captures at about 1 sec interval demonstrating moving force curves.

図8は、反力曲線の中で知覚可能な要素を示す。ピーク時の力、速度、加速度、タイミングといった単純かつ直感的な情報が知覚される。各セグメントにおいて優先度の高い要素を定義することができ、各セグメントの評価はその要素に基づいて行われる。

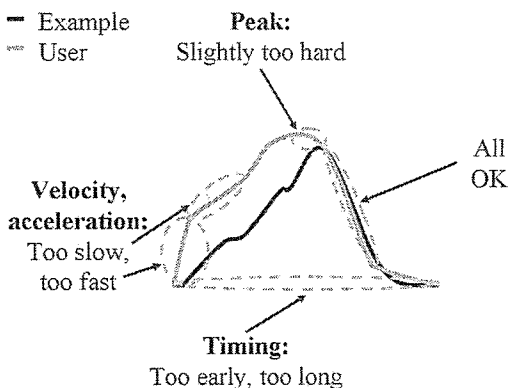


図8 知覚可能な要素に分解された曲線としての力のかけ方の可視化

Fig.8 Visualization of force exertion as a curve decomposed to perceivable elements.

6. 力のかけ方における ASR の試用評価

実際に力を加える課題において、ASR ベースのアプローチと従来のアプローチによるシミュレーション記録の再生における効果の差を調査する実験を行った。実験課題としては5節で述べた大動脈触診を対象とした。ユーザが事前の知識なしで ASR を用いた場合に従来の方法を用いた場合よりも手本操作に対して良好に追従できたとすると、ASR ベースのアプローチがユーザに対してより明確で即時性の高い情報を与えることができていると考えられる。操作における優先度の高い動作特性について明確で直感的な情報提示が達成されているといえる。可視化における本手法の特徴的で重要な点は、手本操作の未来の状態を提示可能な点であるため、現在の状態のみを提示可能な従来手法との対比を行う。

6.1 条件

図9に実験における二つの条件を示す。一つは反力ベクトルの可視化による従来の再生方法 (C1) であり、もう一つは反力曲線と方向ベクトルが可視化された本提案による ASR の再生方法 (C2) である。C1 では、透過された臓器モデル上に示された手本操作にユーザは追従しようとする。臓器モデルを透過させた理由は、手本操作が現在提示されている臓器モデルによって隠れてしまうことを防ぐためである。手本の操作点とユーザの操作点と合計二つの操作点が表示され、手本の反力ベクトルと自分自身の操作による反力ベクトルが視覚化される。反力曲線と方向ベクトルで構成される C2 では、表示されるベクトルは大きさではなく方向を示すものであるためベクトルの長さは一定とした。

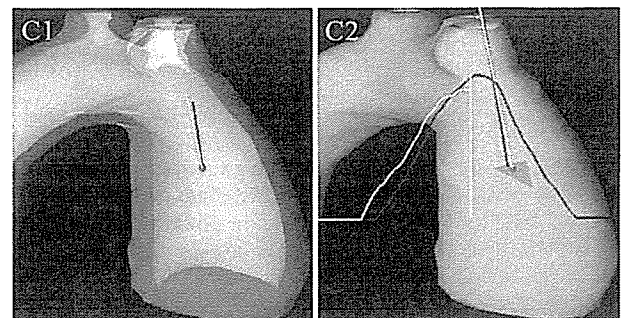


図9 大動脈触診における力を加える実験条件。C1: 従来手法 (反力ベクトル)、C2: 提案手法 (反力曲線と方向ベクトル)

Fig.9 Conditions of a force exertion experiment in simulation of palpation of the aorta. C1: Previous method (vector of reaction force), C2: Proposed method (force curve and orientation vector)

6.2 実験プロトコル

触診経験をもたない 12 人のボランティア被験者の母集団を二つのグループに分けた。グループ A の被験者には、実験条件 C1、C2 の順で課題を行わせた。グループ B の被験者には、実験条件 C2、C1 の順で課題を行わせた。

環境に慣れるため、各条件において被験者に二度ずつ課題を行わせた。連続的に加えている力を測定するため、それぞれの課題を四つの連続した課題にまとめた。被験者は四つの連続課題を 8 セット行うこととした。各セットの手本は、大動脈モデルの異なる場所において異なるタイミング、力の方向、大きさで力を加える操作を行ったものとした。順序効果をなくすため、課題は二つのグループにおいて異なる順序で行うこととした。グループ A と B において結果の平均について有意な差が見られなかった場合、順序効果はないと考える。手本操作における最大の力の範囲は 1 から 2.9N であり、四つの課題は 6.5 秒から 19 秒の長さであった。全体において、2 回のリハーサルを除いて各課題について 32 の課題を与えた。シミュレーション記録の読み出しにより、各課題の間には約 20 秒間の間隔があいた。全ての課題において三次元環境の視点は同様であった。

各条件での試行後に、力の大きさと方向について 1 から 5 のスケールで評価するアンケートを被験者に求めた。1 は全く理解できなかったことを示し、5 は完全に理解できたことを示す。

6.3 データと評価

反力データは三次元 x, y, z の値をもつ時系列データである。従って、力の大きさや長さ、二つの反力ベクトルの間の方向の違いはベクトルの内積で計算することができる。

被験者が行った全タスクにおいて、反力データは 100Hz で記録された。記録容量の問題から、デバイスから得られる 1000Hz のデータから一定の間隔でデータを取得する単純なサンプリングを行った。サンプリングによって除かれたデータのほとんどは大差のないものであった。四つの連続課題のそれぞれは手本の四つの課題と比較させた。力の大きさの手本との差異の平均値を計算することで操作データを評価した。その結果、いつの場合においても被験者の力の大きさは手本と異なることになり、力の大きさの差異はますます大きくなった。反力方向は手本とユーザとが共に力が存在しているときのみ比較し、四つの連続課題において手本との差異の平均を計算することとした。

力の大きさに関しては、力の大きさが視点によらず明確であるという理由から C2 が C1 よりも差異が小さいという結果が得られることが予想される。力の方向に関しては、三次元情報を二次元スクリーンで表現する制約があるため、ほぼ結果は同じであることが予想される。C2 が C1 よりも明らかに悪い結果を出さないことが重要である。C1 と C2 での実験結果について、T 検定（有意確率 5%）を用いて有意差を評価した。接触した位置を追従できるかについては、今回のケースでは優先度が最も低いため評価しなかった。

6.4 結果と考察

四つの連続課題および条件間において、順序を入れ替えることや、タイミング、時間、力の大きさ、力の方向を変化させることで、順序効果は生じなかった。グループ間で違いが見られなかったため、データの評価はグループ間の違いを考慮せずに行った。また、本実験期間内の限られた回数での試行の中では明確な学習曲線は見られなかったため、本実験期間内での学習効果は無視できると考え、試行順序にかかわらず評価値を同様に扱った。実験結果のまとめを図 10 に示す。

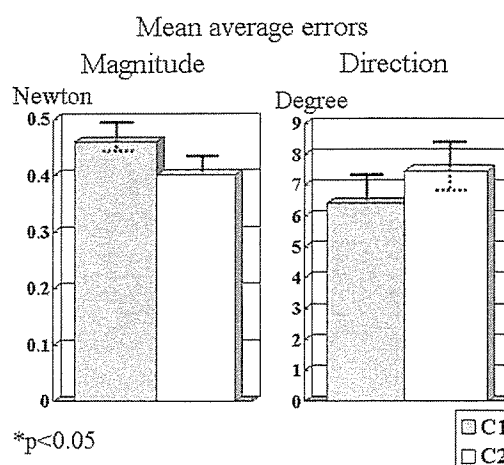


図 10 力のかけ方における実験結果

Fig.10 Results of the force exertion task experiment.

条件 C2 における力の大きさの誤差平均は 0.40N であり、条件 C1 における 0.46N よりも低く、有意な差がみられた（最小有意差：0.058N）。反力曲線により、知覚できる違いが C1 に比べて C2 が大きいため、小さな力の違いも理解しやすかったと考えられる。しかし、被験者の中で数人は動きを追跡する従来の提示方法を好んだ。反応時間については、二つの条件共に被験者ごとに課題に対する注意

などによって変わり、明確な傾向はみられなかった。アンケートにより、力の大きさの理解について C1 は 3.70、C2 は 4.08 という評価をつけた。これにより、全体的な印象としては反力ベクトルの追跡よりも反力曲線の方が若干理解するのが容易であると感じたようである。評価値のパラツキとしては、C1 では 2 から 5 まで C2 では 3 から 5 までであった。力の方向に関する差異の平均は、C1 で 6.43 度であり、C2 で 7.47 度であった。C1 に比べて C2 の方が差異が大きかったが、有意な差はみられなかった（最小有意差：1.58 度）。

今回の評価では、評価基準が注釈を通して決定されたが、考える全ての優先度の高い動作特性に対する提示手法や評価手法は決定できていない。今後の課題としては、Cotin ら[16]が提案している評価基準を含んだ評価システムを提案フレームワークに統合すること等を検討している。

7. おわりに

本論文では、VR シミュレーションに基づく手術手技技能伝達手法と注釈フレームワークを提案し、外科手術における臓器とのインタラクションにおいて重要な力のかけ方を対象に評価を行った。力の大きさと方向といった特性が ASR で注釈され、再生時にユーザに視覚提示された。実験の結果、注釈つきシミュレーション記録に基づいて力のかけ方を反力曲線で可視化することで、手本やユーザ自身の操作についてより明確な情報提示を可能とすることが示された。力のかけ方というタスクにおいて、従来手法と比較して提案手法の利点が示された。

今後はより複雑な手術手順を対象とした評価を行い、また遠隔教育や自己学習システムとしての有効性を検証する。

謝辞

本研究は、日本学術振興会 基盤研究(S)(課題番号：16100001)、文部科学省科学研究費補助金 若手研究 A (課題番号：18680043)、萌芽研究 (課題番号：18659148)、厚生労働科学研究費補助金 (H18-医療-一般-032)、中島記念国際交流財団、倉田奨励金の助成による。

参考文献

- [1] Kühnapfel UG, Çakmak HK, Maaß H (2000) Endoscopic surgery training using virtual reality and deformable tissue simulation. *Computers & Graphics* 24(5):671-682 DOI 10.1016/S0097-8493(00)00070-4
- [2] Berkley J, Turkiyyah GM, Berg D, Ganter MA, Weghorst S (2004) Real-time finite element modeling for surgery simulation: an application to virtual suturing. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 10(3):314-325 DOI 10.1109/TVCG.2004.1272730
- [3] Nakao M, Kuroda T, Komori M, Oyama H (2003) Evaluation and user study of haptic simulator for learning palpation in cardiovascular surgery. In: ICAT. Tokyo: The Virtual Reality Society of Japan
- [4] Kuroda Y, Nakao M, Kuroda T, Oyama H, Komori M (2005) Interaction model between elastic objects for haptic feedback considering collisions of soft tissue. *Computer Methods and Programs in Biomedicine* 80(3):216-224. Elsevier Science European Surgical Institute. <http://www.esi-online.de> (Referred June 25th 2006)
- [5] Teo CL, Burdet E, Lim HP (2002) A robotic teacher of Chinese handwriting. In: Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. IEEE Computer Society
- [6] Solis J, Avizzano C, Bergamasco M (2002) Teaching to write Japanese characters using a haptic interface. In: Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. IEEE Computer Society
- [7] 嵯峨 智, 川上 直樹, 籠 暲 (2005) 力覚の主体性を活用した教示手法に関する研究. *日本バーチャルリアリティ学会論文誌* 10(3): 363-369
- [8] Marshall C (1998) Toward an ecology of hypertext annotation. In: ACM Hypertext '98. New York: ACM Press
- [9] Shaffer DW, Meglan D, Ferrell M, Dawson SL (1999) Virtual Rounds: simulation-based education in procedural medicine. In: SPIE Vol. 3712: Battlefield Biomedical Technologies. Pien HH ed. Bellingham: SPIE DOI 10.1117/12.353016
- [10] Dawson SL, Cotin S, Meglan D, Shaffer DW, Ferrell M (2000) Designing a computer-based simulator for interventional cardiology training. *Catheterization and Cardiovascular Interventions* 51:522-527 DOI 10.1002/1522-726X(200012)51:4<522::AID-CCD30>3.0.CO;2-7
- [11] Kommers P, Rödel S, Luursema J-M, Geelkerken B, Kunst E (2003) Virtual Reality for medical competences. *JAPIT - Scientific journal on applied information technology* 2(1). <http://www.japit.org/> (Referred June 26th 2006)
- [12] Welch G, State A, Ilie A, Low K-L, Lastra A, Cairns B, Towles H, Fuchs H, Yang R, Becker S, Russo D, Funaro J, van Dam A (2005) Immersive electronic books for surgical training. *IEEE Multimedia* 12(3):22-35 DOI doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/MMUL.2005.48. IEEE Computer Society
- [13] Aubry S, Lenne D, Thouvenin I, Guénand A (2005) VR Annotations for collaborative design. In: HCII. Lawrence Erlbaum Associates. CD-ROM.

- [15] VideoAnnEx Annotation Tool. <http://www.research.ibm.com/VideoAnnEx> (Referred June 28th 2006)
- [16] Cotin S, Stylopoulos N, Ottensmeyer M, Neumann P, Rattner D, Dawson S (2002) Metrics for laparoscopic skills trainers: The weakest link! LNCS Vol. 2488: MICCAI. Dohi T, Kikinis R eds. London: Springer-Verlag
- [17] Yamauchi Y, Yamashita J, Morikawa O, Hashimoto R, Mochimaru M, Fukui Y, Uno H, Yokoyama K (2002) Surgical skill evaluation by force data for endoscopic sinus surgery training system. LNCS Vol. 2488: MICCAI. Dohi T, Kikinis R eds. London: Springer-Verlag
- [18] Kuroda Y, Nakao M, Kuroda T, Oyama H, Yoshihara H (2005) MVL: Medical VR simulation library. In: Medicine Meets Virtual Reality (MMVR13). Westwood JD *et al.* eds. IOS Press
- [19] Manohar NR, Prakash A (1995) The session capture and replay paradigm for asynchronous collaboration. In: ECSCW. Marmolin H *et al.* eds. Dordrecht: Kluwer
- [20] Rissanen MJ, Kuroda Y, Kume N, Nakao M, Kuroda T, Yoshihara H (2006) Interactive authoring of example surgical procedures from recorded physics-based simulation. In: CARS. Lemke HU *et al.* eds. Amsterdam: Elsevier

(2006年7月7日受付)

著者紹介

ミッコ・リッサナン (正会員)



2003年オウル大学 情報処理科学部 修士課程修了。同年オウルでソフトウェア会社のSEとして勤務。2004年同大学リサーチアシスタント。同年、京都大学大学院 情報学研究科博士課程に入学、現在に至る。医用VR、教育訓練システム、注釈システムに関する研究に従事。修士(情報処理科学)。

黒田 嘉宏 (正会員)



2003年京都大学 大学院情報学研究科 修士課程修了。2005年 同博士後期課程修了。同年京都大学医学研究科 特任助手。2006年大阪大学 基礎工学研究科 助手。現在に至る。医用VR、触力覚モデリング、教育訓練システムに関する研究に従事。博士(情報学)。

中尾 恵 (正会員)



2003年京都大学 大学院情報学研究科修了。同年同大学大学院医学研究科 特任助手を経て、2004年奈良先端科学技術大学院大学助手、現在に至る。医用VR、物理法則モデリング、視覚・力覚提示に関する研究に従事。博士(情報学)。

衆 直人 (正会員)



2004年京都大学大学院 情報学研究科修了。2006年同博士後期課程修了。同年 日本学術振興会特別研究員PD、現在に至る。医用VR、人体モデリング、視覚・力覚提示、並列計算機システムに関する研究に従事。博士(情報学)。

黒田 知宏 (正会員)



1998年奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科修了。同助手、オウル大学 情報処理科学部 客員教授を経て、2001年 京都大学医学部附属病院講師。2006年2月オウル大学 情報処理科客員教授(兼任)、現在に至る。仮想・強調現実感、福祉情報学、医療情報学等の研究に従事。博士(工学)

長瀬 啓介 (非会員)



1991年筑波大学医学専門学群卒業。1998年筑波大学臨床医学系講師を経て、2003年京都大学医学部助教授着任。現在に至る。日本内科学会認定内科医、日本呼吸器学会呼吸器専門医。博士(医学)。

吉原 博幸 (非会員)



1973年大阪大学 基礎工学部合成化学科卒業。1980年宮崎医科大学 医学部卒業。宮崎医科大学教授、ハーバード大学 医学部、マサチューセッツ工科大学客員准教授、熊本大学教授を経て2003年京都大学教授(医学部附属病院医療情報部)。現在に至る。電子カルテユーザーインターフェイス、医療情報交換規格、地域連携医療システムなどを専門とする。博士(医学)。

■原著■

手術手順書からの知識抽出による教育用手術VR環境の要件抽出

竹村匡正 黒田嘉宏 桑 直人 岡本和也
堀 謙太 中尾 恵 黒田知宏 吉原博幸

医療情報学 第25巻 第6号 (2005)

Japan Journal of Medical Informatics Vol.25 No.6 2005

日本医療情報学会/篠原出版新社

原著

手術手順書からの知識抽出による教育用手術 VR環境の要件抽出

竹村 匡正^{*1} 黒田 嘉宏^{*2} 桑 直人^{*3} 岡本 和也^{*3}
堀 謙太^{*4} 中尾 恵^{*5} 黒田 知宏^{*1} 吉原 博幸^{*1}

医療における手術手技の教育は、教科書的な知識と今までの実践に基づく経験主義的な方法から、VR (Virtual Reality) 技術を用いた仮想現実の環境下における実技を伴った教育へと変遷しつつある。一方、手術手技の知識ソースとして手術手順書がある。医師はこれらの情報を参考に知識を獲得する。これと VR シミュレータが組み合わさることで、明文化された知識と実技とが体得できる。

手術手技の訓練としては、手術手順書を含めた言語的な知識と VR を用いた実技シミュレータを組み合わせることで、教科書的な知識と実技とが体得できると考えられる。ゆえに、教科書的な知識と実技が同時に学べることが望ましい。そのためには、ある手術を知識として表現するために、暗黙知を前提とした言語情報としての手術手順書と VR 環境が共有できる概念構造、すなわちオントロジが必要になる。このオントロジを媒介として手術手順書からの VR 環境に要件を提示することが可能になる。

本論文では、手術手順に対して医用 VR 環境と手術手順書が共通にもつ概念構造を分析し、手術 VR オントロジの構築を試みた。また、このオントロジを利用して、手術手順書を自然言語処理を用いて解析することで、VR 環境が要請する要件を自動的に抽出し、VR 環境を呼び出すことを試みた。

■キーワード：バーチャルリアリティ、手術手順書、オントロジ、SSML

Requirement Extraction from Surgical Textbook using Natural Language Processing for Educational Virtual Reality Simulator : Takemura T^{*1}, Kuroda Y^{*2}, Kume N^{*3}, Okamoto K^{*3}, Hori K^{*4}, Nakao M^{*5}, Kuroda T^{*1}, Yoshihara H^{*1}

Learning for surgical procedures has been changing from experimental learning or textural learning to skill learning using virtual reality (VR) simulation. VR simulation is very useful to learn for surgical procedures but it is very difficult to make VR simulation environment. Therefore a simulation library which named MVL (Medical Virtual Reality Library) is build for developing VR environment very efficiently. On the other hand, textbooks on surgery have amount knowledge for VR simulation developing. In this paper, we suggest a new

^{*1} 京都大学医学部附属病院 医療情報部

^{*2} 京都大学大学院医学研究科

^{*3} 京都大学大学院情報学研究科

〒 606-8507 京都市左京区聖護院川原町 54

^{*4} 群馬県立県民健康科学大学

〒 371-0052 前橋市上沖町 323-1

^{*5} 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科

〒 630-0192 生駒市高山町 8916-5 (けいはんな学研都市)

E-mail : takemura@kuhp.kyoto-u.ac.jp

受付日：平成 18 年 2 月 16 日

^{*1}Department of Medical Informatics, Kyoto University Hospital

^{*2}Graduate School of Medicine, Kyoto University

^{*3}Graduate School of Informatics, Kyoto University

54 Shogoinkawaramachi, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8507, Japan

^{*4}Gunma Prefectural College of Health Sciences

323-1 Kamioki-cho, Maebashi-city, Gunma, 371-0052, Japan

^{*5}Graduate School of Information Science, Nara, Institute of Science and Technology

8916-5 Takayama-cho, Ikoma-city, Nara, 630-0192, Japan

ontology between medical VR simulations and textbooks on surgery. If this ontology is developed, we can connect two knowledge.

Concretely, knowledge as surgical procedure on textbooks can make a VR simulation environment through MVL with machine learning automatically.

Key words : Virtual reality, Surgical textbook, Ontology, SSML

1. はじめに

医療において手術手技の教育は、教科書的な知識と今までの実践に基づく経験主義的な方法から、VR (Virtual Reality) 技術を応用した教育システムの開発が進んでいる¹⁾。そのためには、三次元仮想物体を用いた視覚的な現実感の追求ばかりではなく、力覚フィードバック技術などを利用した可触化技術を含めた種々の物理現象の実装が求められ、多大な手間がかかる。これらの問題に対して、黒田ら²⁾はMVL (Medical Virtual Reality Simulation Library) を構築し、ユーザが構築したいシミュレーションモデルとデータを用意することができれば、容易にVR訓練環境を構築することができる環境を構築している。

一方、手術手技の知識ソースとして手術手順書がある。医師はこれらの情報を参考に手術に関する知識を獲得する。手術手順書は、医師でない人間はもちろんのこと、たとえ医師であっても基本的に手術と関係のない内科医や、外科医であっても自身の専門と異なる分野の場合には必ずしも理解できるものではない。これは、手術手順書が高い専門性の上に成立しているからであり、多くの専門的な知識が暗黙知として前提になっているためである。そのため、当然ながら手術のすべての状況が記述されるというわけではない。

手術手技の訓練としては、手術手順書を含めた言語的な知識とVRを用いた実技シミュレータを組み合わせることで、教科書的な知識と実技とが体得できると考えられる。ゆえに、教科書的な知識と実技が同時に学べることが望ましい。そのためには、メディアの異なる手術手順書などの言語的な知識と、その手術手順を表現するVR環境の知識の両方から、あるひとつの手術手技を表現する必要がある。

具体的には、手術手順書からVRシミュレータ

を構築するための必要条件を抽出し、物理モデルや臓器などの実現すべきVR環境の構成要素³⁾を抽出することで、ある手術手技を訓練し得るVRシミュレータを構築することが考えられる。また、手術手順書から目的に応じたVRシミュレータを動的に呼び出すことも可能になる。そのためには、ある手術を知識として表現するために、暗黙知を前提とした言語情報としての手術手順書とVR環境が共有できる概念構造、すなわちオントロジが必要になる。このオントロジを媒介として手術手順書からのVR環境に要件を提示することが可能になる。

本論文では、手術手順に対して医用VR環境と手術手順書が共通にもつ概念構造を分析し、手術VRオントロジの構築を試みた。また、このオントロジを利用して、手術手順書に対して自然言語処理を用いて解析することで、VR環境が要請する要件を自動的に抽出し、VR環境を呼び出すことを試みた。

2. 方法

本章では、医用VRシミュレータの現状および実用までの具体的な問題について考察し、その問題を解決するための知識を補完する方法として、自然言語処理に基づく手術手順書からの知識抽出の手順を説明する。具体的には、手術シミュレータを合理的に構築する手段として先進的に進められているMVLに対して、医用VRシミュレータを構築するために必要な情報を定義した上で、手術手順書とも共通の概念体系表現するための手術用VRオントロジであるSSML (Surgical Simulation Markup Language) をXML (eXtended Markup Language) を用いて作成した。そして、この手術用VRオントロジを利用して、手術手順書から実際に医用VRシミュレータ環境を構築するための情報を抽出できるのかにつ

いて、SVM (Support Vector Machine) を用いて機械学習を行った上で手術手順書から情報を抽出し、手術用 VR オントロジおよび MVL を経由して、自動的に医用 VR 環境が構築できるかを検証した。

1) 医用 VR

医用 VR シミュレータを構築する要件として、臓器モデル、感覚提示インタフェース、実時間応答が挙げられる⁴⁾。臓器モデルが採用する形状表現や変形計算アルゴリズムの精度により臓器モデルの挙動が決定される。有限要素モデル、充填球モデル、バネ質点モデルといった手法があり、計算精度や計算時間などの違いにより、対象とする手技に応じて採用される³⁾。手術シミュレーションでは特に、仮想臓器の挙動を視覚提示するのみならず、触力覚を提示して直接接触時の感覚を伝えることが重要とされる⁵⁾。仮想臓器を操作した際の力感覚をユーザに返すインタフェースとして、PHANToM⁶⁾、CyberForce⁷⁾、Impulse Engine⁸⁾といった反力提示が可能なデバイスが開発され、市販されている。VR のインタラクティブな操作を実現するために、実時間処理が可能な臓器モデルとインタフェースを選択する必要がある。コンピュータの計算能力の制約から、従来のシミュレータでは主に触診を代表とする非侵襲的手技のシミュレータ開発が行われてきた。今後、剥離などの侵襲的手技において物理法則に則ったりリアルタイムシミュレーションに関する研究開発が進められている。

しかし、VR シミュレーションを単一手技ごとに構築することは多大な労力が必要であり、単一手技の集合体である術式ならばなおさらである。現在、単一手技を対象としたライブラリを作成し、シミュレータの構築を容易にする試みが始まっており、具体的には MVL、GiPSi⁹⁾ といったライブラリ群が提供されつつある。今後は、これらのライブラリを用いて、術式という一連の手技の流れを体系的に扱うことがますます重要になる。

よって、ひとつの術式全体の再現を目的とした VR 手術訓練環境を構築するためには、ある術式における手術手順をあらかじめ用意されたシナリオに基づいて記述しておき、最適な臓器モデルを採用した上で個々の手術手技 VR シミュレーショ

ンを動的に呼び出す仕組みが必要である。

2) 医療における自然言語処理

医療における自然言語処理は多くの試みがなされてきたが、昨今のコンピュータの性能向上により、コーパス (文集積体) を用いた自然言語処理、すなわち大規模な文章集合からの知識抽出が盛んである¹⁰⁾。また、医療において対象とする文章は、多くの場合専門性を持ったものであり、また使用される話題や用語なども分野依存性であるといえる。これらの専門性、分野依存性を利用して、その分野 (クラス) に特徴的に利用されている用語の統計的な偏在情報を利用して、文章をベクトル空間に配置し、自動的に対象文章をあるクラスに分類する研究、またクラスそのものを知識として抽出する研究が行われている¹⁰⁾。自動分類には、用語の偏在性を表す指標として TF/IDF ヒューリスティクスが主に用いられることが多い。一方、コーパスに任意のタグをつけることで、意味を抽出しようという試みもなされている¹²⁾。

この場合も、より多くの文章に任意のタグを付与し、それを学習することで特定の意味を抽出できるタグを自動的に付与することが可能になる。

用語の偏在性の利用にしても、文章に対して任意のタグを自動的に付与するにしても基本となる技術は形態素解析で、形態素解析の精度が大きく関連する。形態素解析に関しては、Chasen¹³⁾ や Juman¹⁴⁾ など多くの高精度なツールが提供されており、形態素解析の精度不足に基づく不具合はほとんど聞かれなくなった。もっとも、医療分野の文章を形態素解析する場合には、形態素解析器に医療用語集を搭載する必要がある。また、次のアプローチとして、形態素解析の次の段階である統語解析を利用する試みもなされている¹⁵⁾。

3) 手術手順書と医用 VR 環境

2-1) において、外科手術の知識・技術を効率的に獲得するには VR システムが有効であることは述べたが、一方で手術手順、手術手技の知識を獲得する知識ソースとして手術手順書がある。手術手順書は、言語情報とイラストまたは写真によって手術手技を説明するものであり、基本的な術式から、臓器別の高度な術式、またピットフォール (落とし穴) 集に至るまで多くが出版されてい

る。手術手順書は、高度な医学知識に基づいて記載されており、多くの知識が前提となっている場合が多い。一方、医用 VR シミュレータを構築する場合には、実現したい手術手技を手術手順書等より抽出し、その手術手技を実現するための臓器モデルや手技モデルを決定する必要がある。しかし、先述したように手術手順書自身は高度な医学知識のもと断片的に情報が記載されており、医学の専門知識のない人間がそれを読み理解したうえで医用 VR シミュレータの要件を抽出するのは困難である。そこで、手術手順書から作成すべき医用 VR シミュレータを構築するための要件を自動的に抽出することができれば、手術手順書を入力するだけで VR シミュレータの構築が可能になる。

手術手順書から医用 VR シミュレータ構築のための要件を抽出する場合は、次のような作業過程となる。

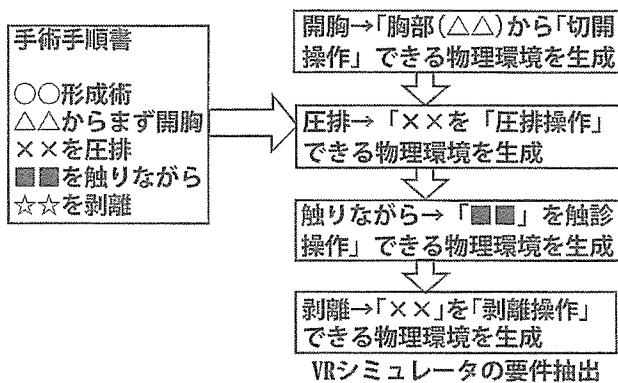


図1 手術手順書から VR シミュレーション環境構築の流れ (例)

4) 手術用 VR オントロジ

先述したとおり、医用 VR シミュレータの構築には、手術手順書からの知識抽出過程があるが、図1で見るとおり、これらの過程は手術手順書で書かれているある手技に関する情報を、VRの世界に翻訳しているとも考えられる。すなわち、同じ手術を表現する場合であっても、言語を用いた知識として表現する場合と、仮想現実感を提示するための表現とは、表層的には全く異なる表現をしている。しかし、両方共にあくまでも同じ手術を表現しており、共通の概念化された世界を保持しているはずである。

オントロジとは、「対象世界を形造る根源的な

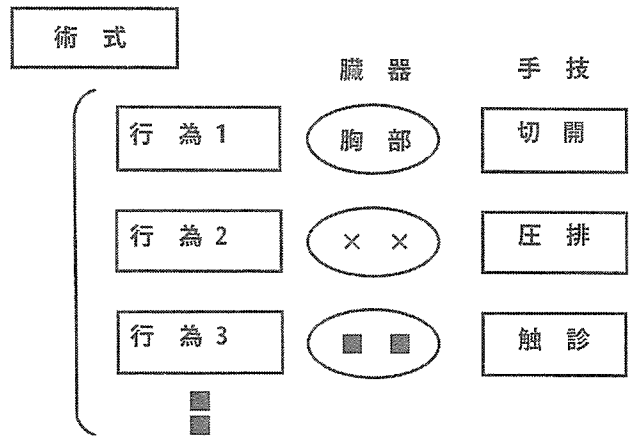


図2 手術用 VR オントロジの構造 (例)

概念体系の考察から始める」という基本姿勢のもと、「人工システムを構築する際のビルディングブロックとして用いられる基本概念 / 語彙の体系 (理論)」という定義づけがなされている¹⁶⁾。今回の例で言えば、手術手順書に書かれている情報は VR の世界と共通の概念体系の中で表現されるのであり、逆に構築された VR 環境もその手術における何らかの概念世界の一部もしくはすべてを表しているはずである。

図1を参考に詳細に考察する。手術手順書における「○○形成術」とは、そこで説明されている各手技によってあるストーリーに基づいて構成され

```

<operation>
  <scene>
    <action>
      <manipulation>開胸</manipulation>
      <organ>胸部体腔</organ>
      <init>胸部切開</init>
      <goal>開胸器開口</goal>
      <pitfall>裂傷</pitfall>
    </action>
    <action>
      <manipulation>切開</manipulation>
      <organ>胸部体表・肋骨</organ>
      <init>切開ライン表示</init>
      <goal>正中切開</goal>
      <pitfall>内胸動脈損傷</pitfall>
    </action>
  </scene>
  <scene>
    <action>
      <manipulation>触診</manipulation>
      <organ>大動脈弓</organ>
      <init>触動</init>
      <goal>正常硬さ</goal>
      <pitfall>大動脈損傷</pitfall>
    </action>
  </scene>
</operation>
  
```

図3 SSML タグ (例)

ている。各手技は、対象臓器とその臓器への行為によって表現される。それは、VRの世界では、例えば「開胸」は「胸部」の「切開」と標準化されるにしても、各手技を別の形で表現し、同じストーリーに基づいて表現されている。すなわち、手術用VRオントロジは、以下のように表現することができる。

VRシミュレータの表現する種々の情報（可視化情報、力学情報等）は図2の構造の下位情報として位置づけることが可能である。

今回、これらの構造に基づいて、XML(eXtended Markup Language)を用いて、手術VR用オントロジである、SSML(Surgical Simulation Markup Language)を開発した。SSMLは手術手順書などの自然言語的な知識とVRの知識の間での中間言語的な役割であり、ひとつの手術は例えば図3のように表現される。

SSMLによって、手術手順書の知識体系とVR環境を同じ概念体系化で表現することが可能になり、SSMLから一連の単一手技の集合である術式も表現できるようになった。

5) 実験

SSMLは手術手順書などの教科書的な知識とVR環境を表現しうるが、ある手術手順書を人手でSSML化するのは多大な手間であると考えられる。よって、自然言語処理を利用して、手術手順書の文章から自動的にSSMLタグを付与できるこ

とが望ましい。

本節では、機械学習の手法を用いて自動タグ付与が可能かどうか、また自動的にタグを付与した結果、医用VRシミュレーション環境としてMVLを用いて、手術シミュレータを自動的に呼び出すことが可能かどうかを検証した。

まず、機械学習のために手術手順書の文書に対してSSMLタグを付与したデータを作成した。具体的には、まず任意の手術手順書に対して、VRの臓器モデル、手技が明らかに意識できる部分に対して、術式単位で<organ>, <manipulation>タグを付与した。

次にタグをつけた文章において、すべての文書に対して、対象文書以外のデータを教師データとしてSVM(Support Vector Machine)によって機械学習を行い、ある術式の手術手順書を入力することで、MVLから実際にシミュレータ環境が呼び出せるかの検証を行った。

学習したデータは400手技であった。手技には、「胸壁」「肝臓」「気管支」などの10臓器と「切開」「触診」などの7つの手技によってタグ付けを行った。

この上で、胸壁を切開する術式(42例)を入力して、実際に胸壁を切開する術式と判断できるかを検証した。正確に術式と判断できた場合には、MVLからVR環境を呼び出すこととした。評価システムの概要を図4に示す。

3. 結果

胸壁を切開する術式42例に対して、SVMを用いた自動分類器は<organ>タグ、<manipulation>タグを自動的に付与させた。結果、そのうち、25例(60%)が正確に<organ>タグに「胸壁」を付与し、<manipulation>タグに「切開」を付与することができた。この結果SSML化されたドキュメントを利用して、MVLによって胸部切開シミュレータを呼び出すことができた。

4. まとめ

医用VR環境の構築にあたり、手術手順をシミュレートするVR環境のもつ概念世界と、手術手順を表現している手術手順書における自然言

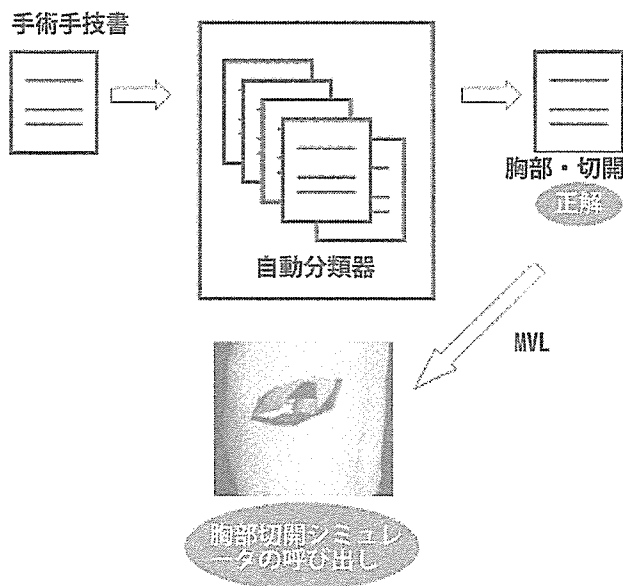


図4 評価システムの概要(例)

語文の概念世界を考慮して、両方の共通概念を表現し得る手術 VR オントロジを考察し、SSML を構築した。また、SVM による機械学習を用いて、手術手技書の文章に対して対象臓器、手技などの SSML タグを自動的に付与することを試み、タグの付与情報に基づいて実際の VR シミュレーション環境を呼び出した。結果として、60% の手術手技の文章に対して、正しく VR シミュレーション環境を呼び出すことができた。60% という数値は、400 手技という学習例が少ないからだと考えられるため、今後は学習データを増やすことで、自動的なタグ付けの性能を上げてゆきたい。

多くの手術手順書を SSML に落としていくことで、逆に必要となる VR シミュレータの種類、今回でいえば MVL のコンテンツも明らかになると考えられる。このように教科書的な知識と医用 VR が密接に関わることで、より合理的な手術手技教育の実現が可能になると考えられる。

謝 辞

本研究は、文部科学省科学研究費補助金 萌芽研究「言語解析による手術書からの仮想手術環境の自動構築」(課題番号: 18659148) の助成による。

参 考 文 献

- 1) Kuhnafel U, Cakmak HK, Maa H. Endoscopic surgery training using virtual reality and deformable tissue simulation. *Computer & Graphics* 2000; 24 : 671-682
- 2) 黒田嘉宏, 中尾 恵, 黒田知宏, 小山博史, 小森 優, 松田哲也, 吉原博幸. MVL:実時間医用 VRシミュレーションライブラリの開発. 日本バーチャルリアリティ学会第9回大会論文集 2004; 533-536
- 3) Meier U, Lopez O, Monserrat C, Juan MC, Alcaniz M. Real-time deformable models for surgery simulation. *A survey, Comp. Meth. Program. Biomed.* 2005; 77 (3):183-197

- 4) 糸 直人, 中尾 恵, 黒田知宏, 吉原博幸, 小森 優. VRシミュレータを目指した生体軟組織の剥離シミュレーション. *生体医工学* 2005; 43 (1) : 76-84
- 5) Burdea G. *Force and Touch Feedback for Virtual Reality*. Wiley interscience 1996
- 6) [PHANToM]. <http://www.sensable.com/> SensAble technologies, Inc.
- 7) [CyberForce]. <http://www.immersion.com/> Immersion Corp.
- 8) [Laparoscopic Impulse Engine]. <http://www.immersion.com/Immersion Corp.>
- 9) Cavusoglu MC, Goktekin TG, Tendick F, Sastry SS. GiPSi:An Open Source/Open Architecture Software Development Framework for Surgical Simulation. *Proc. of Medicine Meets Virtual Reality* 2004; 46-48
- 10) Takemura T, Ashida N. A concept of medical corpus for natural language processing in medicine. *Proceedings of the 3rd International Workshop on Enterprise Networking and Computing in Health Care Industry* 2001; 23-36
- 11) 竹村匡正, 松井弘子, 芦田信之. 用例に基づく医療用語知識の体系化について. *医療情報学* 2004; 24 (1) ;139-145
- 12) 今井 健, 小野木雄三. 放射線読影レポートからの肯定・否定フレーム抽出の試み. 第 24回医療情報学連合大会論文集 2004
- 13) [ChaSen].<http://chasen.naist.jp/hiki/ChaSen/>
- 14) [Juman].<http://www.kc.t.u-tokyo.ac.jp/nl-resource/juman.html>
- 15) 今井 健, 荒牧英治, 柏木聖代, 梶野正幸, 美代賢吾, 大江和彦. 自然言語処理を用いた画像診断所見オントロジー構築の試み. 第 25回医療情報学連合大会論文集 2005
- 16) 溝口理一郎. *オントロジー工学*. オーム社, 2005