

本田財団レポート No. 160

第 36 回本田賞授与式 記念講演 (2015 年 11 月 17 日)

「医療ロボット工学とコンピュータ統合支援治療」

ジョンズ・ホプキンス大学 John C. Malone 冠教授

ラッセル・テイラー博士

Medical Robotics and Computer-Integrated Interventional Medicine

Commemorative lecture at the 36th Honda Prize
Award Ceremony on the 17th November 2015

Dr. Russell H. Taylor

John C. Malone Professor at Johns Hopkins University, U.S.A.

公益財団法人 本田財団
HONDA FOUNDATION

ラッセル・テイラー博士

ジョンズ・ホプキンス大学 John C. Malone 冠教授

John C. Malone Professor at Johns Hopkins University

Dr. Russell H. Taylor



■生まれ

1948年6月 米国バージニア州生（アメリカ国籍）

■学歴

1970年 ジョンズ・ホプキンス大学卒業
1976年 スタンフォード大学 コンピュータサイエンス 博士課程修了（工学博士）

■職歴

1968年～70年 ジョンズ・ホプキンス大学 研究助手
1970年～76年 スタンフォード大学 研究助手
1976年～95年 IBM トーマス・J・ワトソン研究所 研究スタッフ、研究マネージャー
1995年～現在 ジョンズ・ホプキンス大学 コンピュータ科学、放射線学科、機械工学、および外科学兼任教授
（2011年に最初の John C. Malone 冠教授就任）
1998年～現在 同大学 コンピュータ統合外科手術用システム技術工学研究センター（CISST ERC）所長
2013年～現在 同大学 計算センシング・ロボティクス研究所（LCSR）所長

■BORN

June 1948, Virginia, USA (USA citizenship)

■EDUCATION AND TRAINING

1976: Stanford University, Ph.D. in Computer Science (Doctor of Engineering)
1970: Johns Hopkins University

■EMPLOYMENT HISTORY

2013–current: Johns Hopkins University, Director of the Laboratory for Computational Sensing and Robotics (LCSR)
1998–current: Johns Hopkins University, Director of the Engineering Research Center for Computer-Integrated Surgical Systems and Technology (CISST ERC)
1995–current: Johns Hopkins University, Professor of Computer Science with joint appointments in Radiology, Mechanical Engineering, and Surgery (Named first John C. Malone Professor in 2011)
1976–95: IBM T. J. Watson Research Center, Research Staff Member and Research Manager
1970–76: Stanford University, Research Assistant
1968–70: Johns Hopkins University, Research Assistant

■略 歴

ラッセル・テイラー博士はコンピュータ科学、ロボット工学および、コンピュータ統合支援治療の専門分野において38年を超える実績を積んでいます。彼は1970年にジョンズ・ホプキンス大学にて理工学の学士号を取得し、1976年にはスタンフォード大学にてコンピュータ科学の博士号を取得しました。1976年にIBM Research に入社し1995年にジョンズ・ホプキンス大学へ拠点を移すまでに、テイラー博士は AML ロボット言語を開発し、自動化技術部と現コンピュータ支援外科手術グループのマネジメントを行いました。ジョンズ・ホプキンス大学では機械工学、放射線学、および外科学を兼任しながらコンピュータ科学の John C. Malone 冠教授、コンピュータ統合外科手術用システム技術工学研究センター (CISST ERC) と計算センシング・ロボット工学研究所 (LCSR) の所長を務めています。テイラー博士の研究対象はロボット工学、マン・マシン協調システム、医用画像化およびモデリング、そしてコンピュータ統合介入システムです。テイラー博士は400を超える査読付出版物／書籍の著者であり、米国電気電子学会 (IEEE)、米国医用生体工学会 (AIMBE)、コンピュータ医用画像処理ならびにコンピュータ支援治療 (MICCAI) 学会、そして東京大学工学系研究科のフェローです。テイラー博士は IEEE ロボット工学パイオニア賞、MICCAI 学会永続的影響賞、IEEE 医療・生理部会 (EMBS) 技術分野賞および、コンピュータ支援整形外科手術における功績を称えたモーリスミュラー賞をはじめとする数多くの賞の受賞者でもあります。

■主な出版物

Taylor, R.H., S. Lavalley, G. Burdea, and R. Mosges, Editors, **Computer-Integrated Surgery**, 1996, MIT Press: Cambridge, Mass.

Taylor, R. H. and L. Joskowicz, "Computer-Integrated Surgery and Medical Robotics," in **Standard Handbook of Biomedical Engineering and Design**, M. Kutz, Editor, 2002, McGraw Hill.

R. H. Taylor and P. Kazanzides, "Medical Robotics and Computer-Integrated Interventional Medicine," in **Advances in Computers**, vol. 73, M. Zelkowitz, Editor: Elsevier, 2008, pp. 217-258.

■BIOGRAPHICAL SKETCH

Dr. Russell H. Taylor has over 38 years of professional experience in the fields of computer science, robotics, and computer-integrated interventional medicine. He received a Bachelor of Engineering Science degree from Johns Hopkins University in 1970 and a Ph.D. in Computer Science from Stanford University in 1976. He joined IBM Research in 1976, where he developed the AML robot language and managed the Automation Technology Department and (later) the Computer-Assisted Surgery Group before moving in 1995 to Johns Hopkins University, where he is the John C. Malone Professor of Computer Science with joint appointments in Mechanical Engineering, Radiology, and Surgery and is also Director of the Engineering Research Center for Computer-Integrated Surgical Systems and Technology (CISST ERC) and of the Laboratory for Computational Sensing and Robotics (LCSR). Dr. Taylor's research interests include robotics, human-machine cooperative systems, medical imaging & modeling, and computer-integrated interventional systems. He is the author of over 400 peer-reviewed publications and book chapters, a Fellow of the IEEE, of the The American Institute for Medical and Biological Engineering (AIMBE), of the The Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention (MICCAI) Society, and of School of Engineering the University of Tokyo. He is also a recipient of numerous awards, including the IEEE Robotics Pioneer Award, the MICCAI Society Enduring Impact Award, the IEEE EMBS Technical Field Award, and the Maurice Müller Award for Excellence in Computer-Assisted Orthopaedic Surgery.

■MAJOR PUBLICATIONS

Taylor, R.H., S. Lavalley, G. Burdea, and R. Mosges, Editors, **Computer-Integrated Surgery**, 1996, MIT Press: Cambridge, Mass.

Taylor, R. H. and L. Joskowicz, "Computer-Integrated Surgery and Medical Robotics," in **Standard Handbook of Biomedical Engineering and Design**, M. Kutz, Editor, 2002, McGraw Hill.

R. H. Taylor and P. Kazanzides, "Medical Robotics and Computer-Integrated Interventional Medicine," in **Advances in Computers**, vol. 73, M. Zelkowitz, Editor: Elsevier, 2008, pp. 217-258.

医療ロボット工学とコンピュータ統合支援治療

ラッセル・テイラー



はじめに、この賞を頂いたことを誇りに思うとともに、恐縮していることを申し上げたいと思います。

ほんの 3 ヶ月前までは、過去の高名な本田賞受賞者の方々の列に加われるとは思ってもみませんでした。また、石田寛人本田財団理事長、山本雅貴常務理事、他の本田財団の理事とスタッフの方々および選考委員会に対し、私を受賞者にお選び頂いたことを心からお礼を申し上げます。

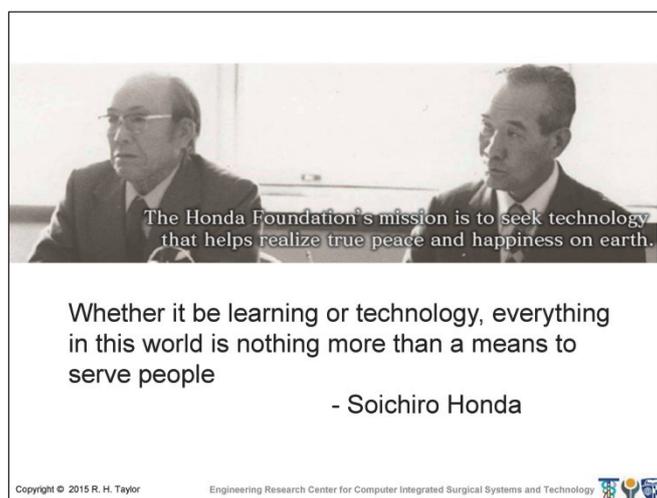


図-1

〈図-1〉 さらに、私は本田宗一郎氏およびご兄弟の弁二郎氏の本田財団を創立した理念に対して深い敬意を払うものです。スライドに書かれている本田宗一郎氏のお考えに、私は深く賛同いたします。氏の精神は、IBM とジョンズ・ホプキンス大学におけるキャリアを通して、私の研究生活の大きな動機づけとなってきたものにも通じます。

Disclosures & Acknowledgments

- **This is the work of many people**
- Some of the work reported in this presentation was supported by fellowship grants from Intuitive Surgical and Philips Research North America to Johns Hopkins graduate students and by equipment loans from Intuitive Surgical, Think Surgical, Philips, Kuka, and Carl Zeiss Meditec.
- Some of the work reported in this talk incorporates intellectual property that is owned by Johns Hopkins University and that has been or may be licensed to outside entities, including including Intuitive Surgical, Varian Medical Systems, Philips Nuclear Medicine, a possible startup company and other corporate entities. Prof. Taylor has received or may receive some portion of the license fees. These arrangements have been reviewed and approved by JHU in accordance with its conflict of interest policy.
- Much of this work has been funded by Government research grants, including NSF grants EEC9731478 and IIS0099770 and NIH grants R01-EB016703, R01-EB007969, R01-CA127144, R42-RR019159, and R21-EB0045457; by Industry Research Contracts, including from Think Surgical; by gifts to Johns Hopkins University from John C. Malone, Richard Swirnow and Paul Maritz; and by Johns Hopkins University internal funds. In addition, the early work was performed while I was an employee of IBM.

Copyright © 2015 R. H. Taylor Engineering Research Center for Computer Integrated Surgical Systems and Technology

図-2

〈図-2〉 最初にお伝えしますが、この講演で多くの方々の業績についてお話するつもりです。私は幸運にも長年にわたり、傑出した才能と熱意あふれる数多くの同僚および指導研究生と一緒に働くことができ、また、この急速に発展している分野で他の方々が得た知識からも多くのものを学びました。それらの方々および研究を続けるにあたり支援いただいた様々な企業、政府機関、慈善団体に深く感謝いたします。個別のスライドでも謝辞を述べるつもりですが、長年にわたり私の研究を支えて頂いたのは、これらの方々および多くの機関であることをまずは申し述べたいと思います。

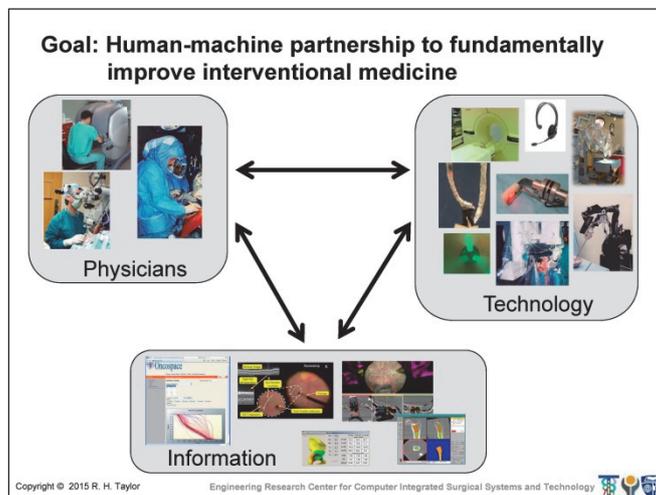


図-3

〈図-3〉 25年余りの私の研究は、医師、テクノロジーおよび情報システムが共同して手術および他の種類の支援治療を、より精密に、安全に、効率的にするシステムを開発することに向けられてきました。

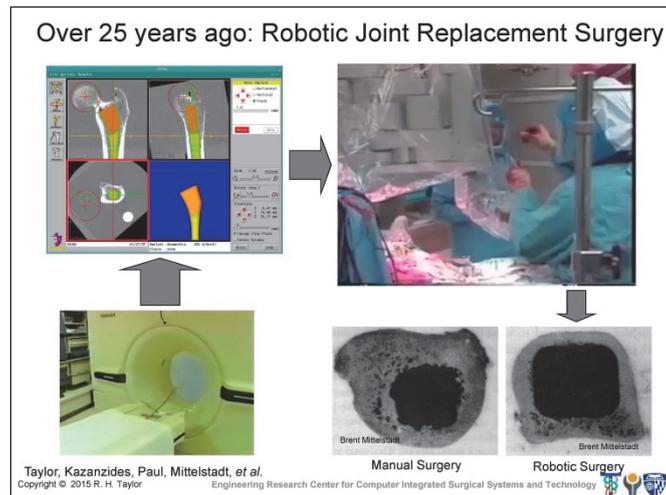


図-4

〈図-4〉 また後に詳しく取り上げる 2 つの例から始めたいと思います。これは人工関節置換手術で外科医を支援するシステムです。

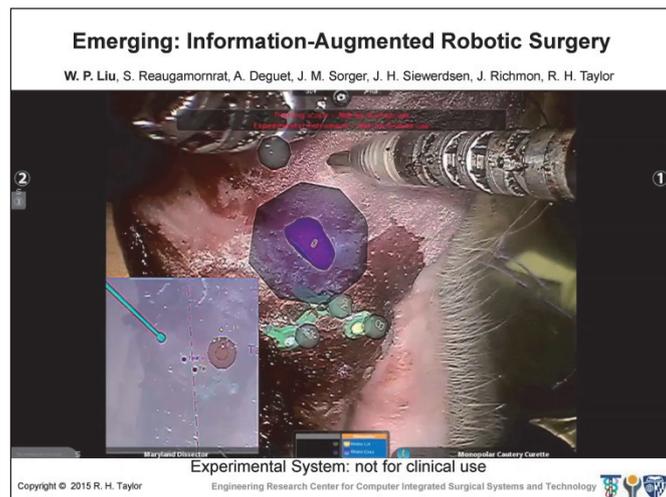


図-5

〈図-5〉 そして、これは舌の根元から腫瘍を切除するために、外科医がロボットを用いて行う手術において利用可能な情報を拡張するシステムです。

これら両方の例で肝心な事は、それらが難易度の高い手術を遂行するのに役立つ情報とテクノロジーを統合するシステムであることです。

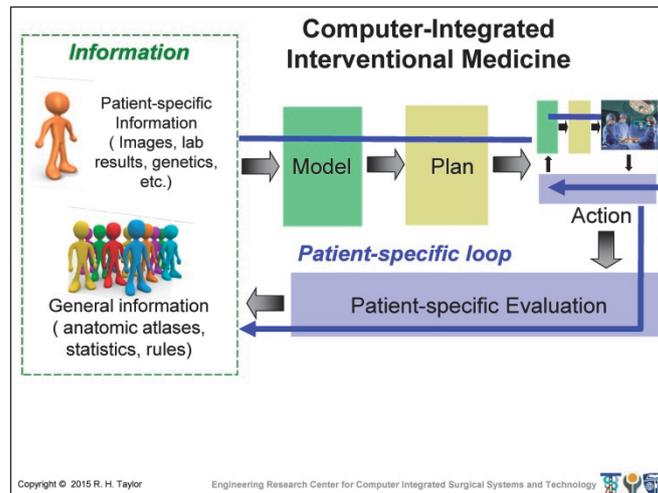


図-6

〈図-6〉 次の2つのスライドを使って、コンピュータ統合支援治療における情報の流れについての私の考えを説明します。

ポイントとなるのが情報です。一人の患者に関して我々が持つ全ての情報からスタートします。手術の場合、この情報の多くは医療画像ですが、他の臨床データも含めることができるようになってきています。この情報は一般の人々に関する情報と結びついて、モデルと呼ばれる一種のコンピュータ表現を生み出し、モデルはその後のプロセスを支援するのに利用することができます。それは患者の状態を診断し、治療計画を策定するのに利用できます。次に、この情報のすべては手術室または治療室にいる実際の患者に登録することができて、外科医が予定された治療を実施し、また、その治療の完了確認を支援するために、適切なテクノロジーが利用できます。

私のような技術者にとって、これは制御ループです。

この図の右上で矢印が折り返していることにご注目ください。これによって、このプロセスは手術室における秒単位までの多くの時間的尺度（タイムスケール）で発生することがわかります。このプロセスは個々の患者に、より安全で、より低侵襲的で、より効率的な、あるいはそれに類した良質の治療をもたらします。

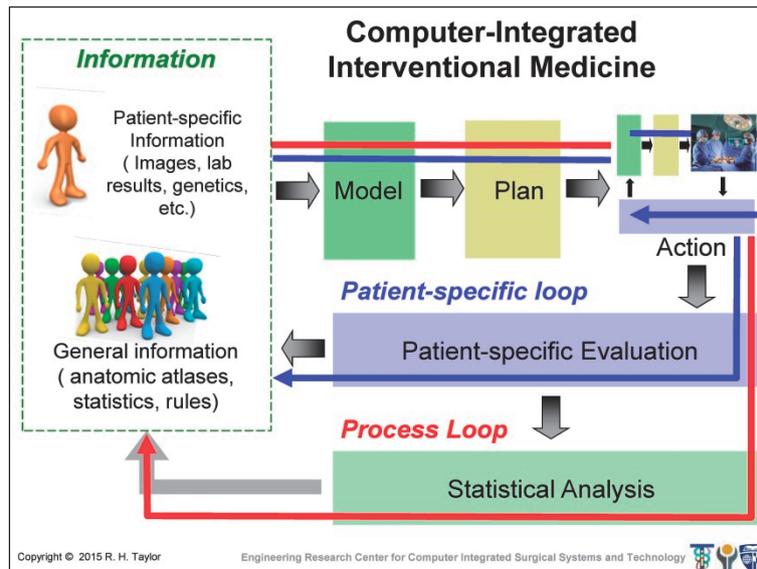


図-7

〈図-7〉 工場におけるコンピュータ統合生産方式と同様に、コンピュータがこのプロセスの全ての段階にかかわっています。コンピュータ統合支援はより一貫性があり、また（決定的なのは）生じた情報を保存できるので、どのように治療がなされたかについて多くのことがわかります。患者の治療結果について最終的に知ることができるので、今後の患者の治療プロセスの改善のために統計的手法が利用できます。

私は青いループと赤いループとのシナジーが、提供する医療の質と費用効果の両面で大きな改善をもたらす可能性があると思っています。

この目標を追求してきた 25 年余りの期間における全ての研究について語る時間はありませんが、いくつかの例をお見せしたいと思います。この講演の準備をしている時に、初期の研究のいくつかと最近の仕事との間の連続性に驚かされました。

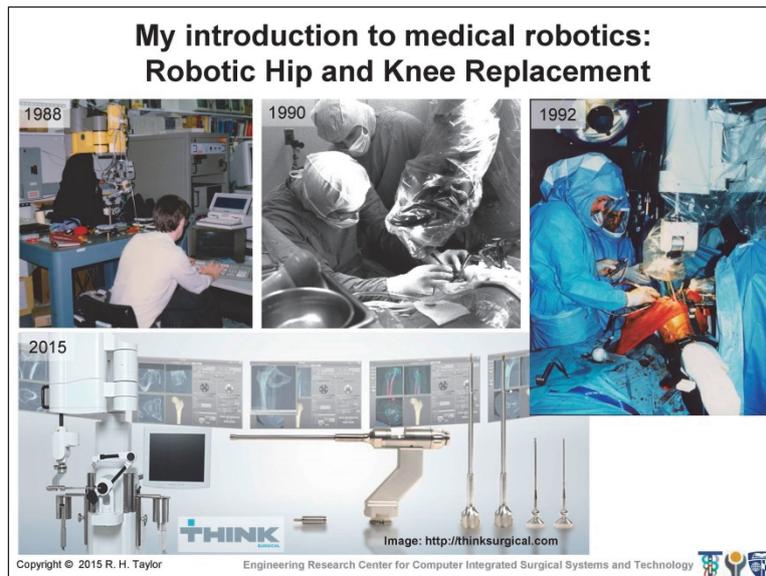


図-8

〈図-8〉 最初に、個々の患者に対する情報主導型支援治療についてお話いたします。

私が医療ロボットにかかわり始めたのは 1980 年代後半で、その頃私は IBM Research の部門管理職でした。私はセメントを使わない股関節移植をする際の、正確な大腿骨処理用ロボットの利用可能性を探求するために、カリフォルニア大学デービス校の 2 人の外科医と小さな共同研究を行いました。研究室でもっと時間を費やせる機会を求めていたところ、上司は実際に手術が行えるシステム構築の可能性を検討するために小さなチームを作ることを認めてくれました。

外科医の一人 (Hap Paul 氏) は獣医だったので、動物を使うことは理にかなったことに思えました。およそ 1 年後に、我々は完全に稼働するシステムを作ることができ、それは「Robodoc」として知られるようになりました。それはカリフォルニア大学デービス校に寄贈され、Hap 氏は 1990 年に犬を対象にした初めての手術を行いました。また Hap 氏は IBM の支援を受けて、人間を対象にした臨床治療システムを開発するスタートアップ企業を設立し、1992 年に初の手術を行いました。いくつかの曲折を経て Robodoc は発展し、今では Think Surgical 社によって開発・販売されています。私は長年にわたって Robodoc の開発チームと交流できたことを幸運に思っています。

また、IBM で私とともに最初のプロトタイプを開発した博士研究員である Peter Kazanzides 氏は、スタートアップ企業の共同創設者で、ジョンズ・ホプキンス大学のセンターに 2002 年に加わってくれました。現在彼はそこで研究教授を務めています。

Robodoc は私が初めて手掛けた医療ロボットなので、そのシステムについて 2,3 付け加えるとともに、この問題に関する最近の研究成果についても述べたいと思います。

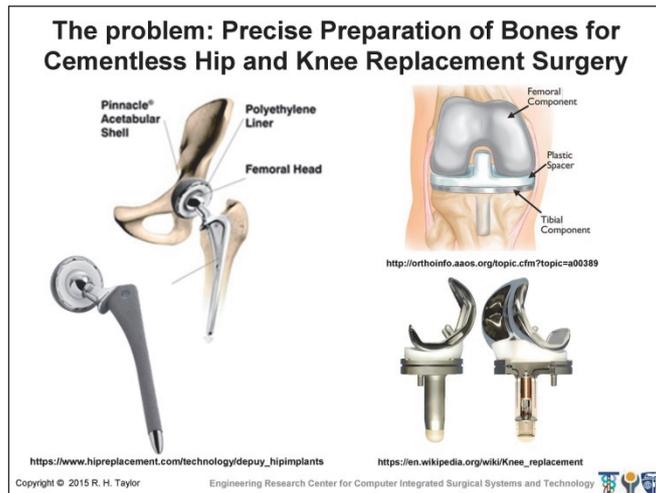


図-9

〈図-9〉 股・膝関節手術において、外科医は問題のある関節を人工関節に代替させます。人工関節が正確に嵌め込まれ、かつ正しい位置にくるように骨はきわめて正確に準備される必要があります。

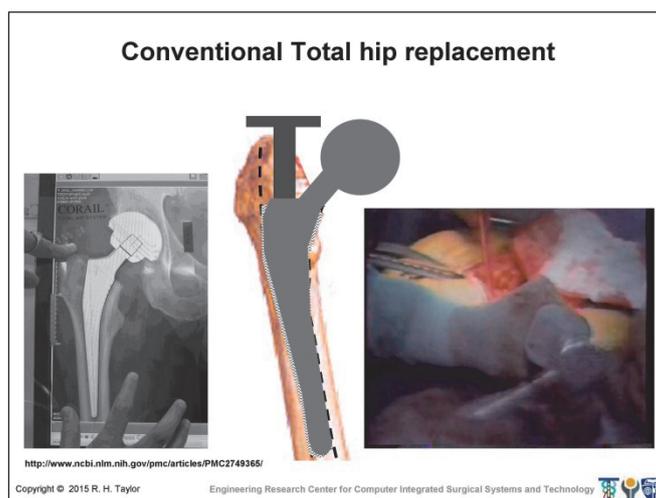


図-10

〈図-10〉 従来からある、人の手に頼る股関節手術では、外科医は透明フィルムのテンプレートを X 線写真に重ねて、サイズの合う人工関節を選びます。手術では大腿骨にはめ込む穴をあけるために、外科医が手動の穿孔機を使用します。

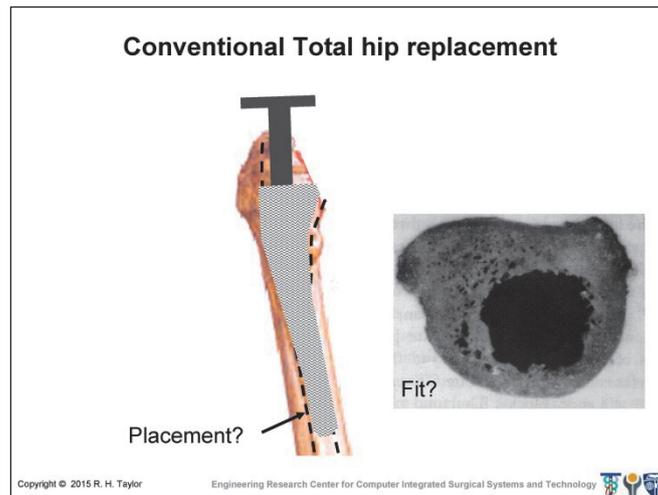


図-11

〈図-11〉 人工関節は穿孔機が作った穴に埋め込まれます。空けた穴は必ずしも外科医が意図したとおりに空くわけではなく、また穴もギザギザなため、うまく嵌っていないこともあります。

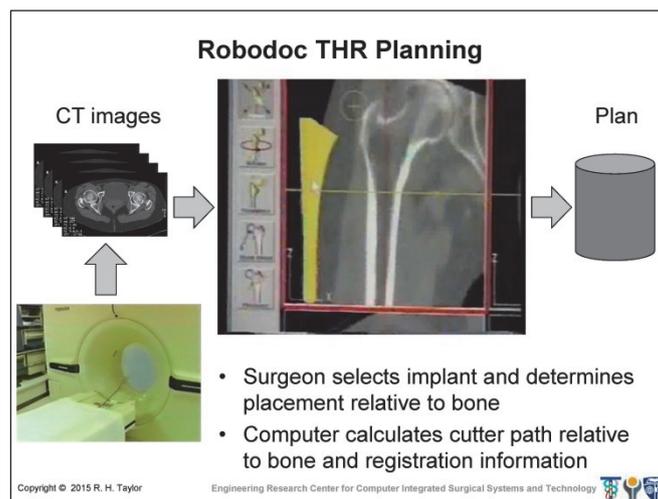


図-12

〈図-12〉 Robodoc を使用する手術の計画策定では、患者の 3D CT スキャン画像を使用します。外科医は選択した人工関節の CAD モデルを、CT 画像に対して正確な位置に配置します。コンピュータは穿孔機の正確な通り道を、CT 座標を考慮して計算します。その際、手術室でロボットが骨を据え付けるために必要な情報も計算します。

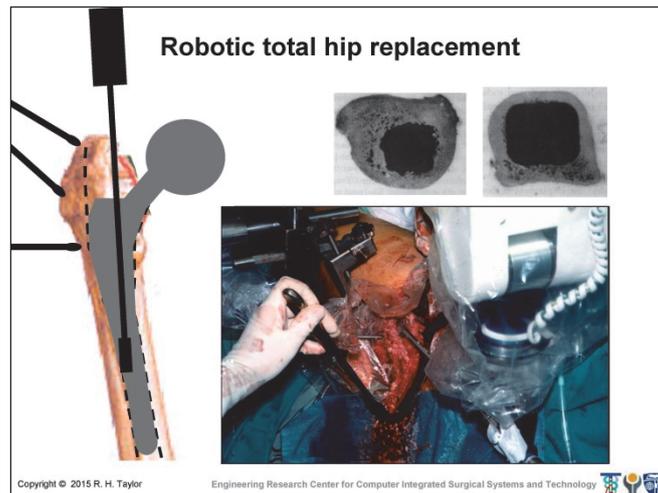


図-13

〈図-13〉 術室では人工関節設置用の穴をあけるところまでは、外科医は通常通りに手術を進めます。骨はロボットに対して固定され、ロボットに対する位置が決定されます。そしてロボットは、要求される人工関節用の形状を加工するためにカッターを使用します。それが終わるとロボットは撤去され、手術は手作業で進められます。

予定された位置に正確に人工関節が装着され、人工関節は特に手作業による穿孔に比べて正確に穴に嵌っています。

長年にわたって、我々はロボットに対する骨の位置を決めるために数々の方法を開発してきました。我々はこの位置決めのプロセスを「登録（registration）」と呼びます。

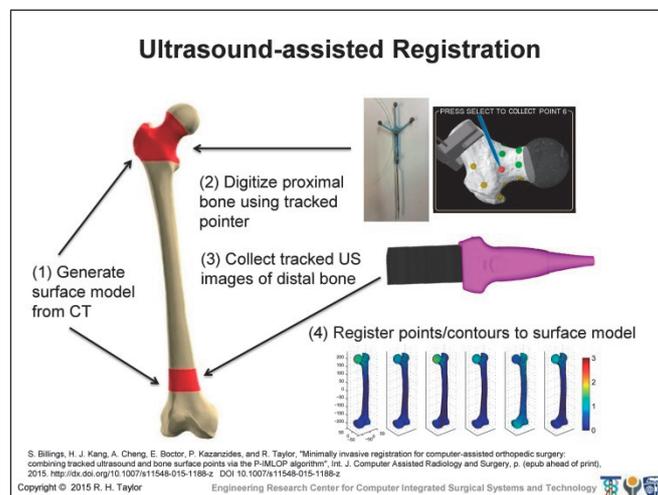


図-14

〈図-14〉 これは、私と同僚である Emad Boctor 氏および Peter Kazanzides 氏ならびに指導研究生である Seth Billings 氏、Hyun Jae Kang 氏および Alexis Cheng 氏が行った最近の研究の一例です。我々は初期の Robodoc による手法よりも、骨の位置を正確にまた低侵襲的にとらえるために、大腿骨遠位部の超音波画像を光学追跡ポインターでサンプリングされたポイントと合

体させます。この例は、Seth Billings 氏の博士論文テーマ研究の中で開発された、新しい登録アルゴリズムを利用しています。

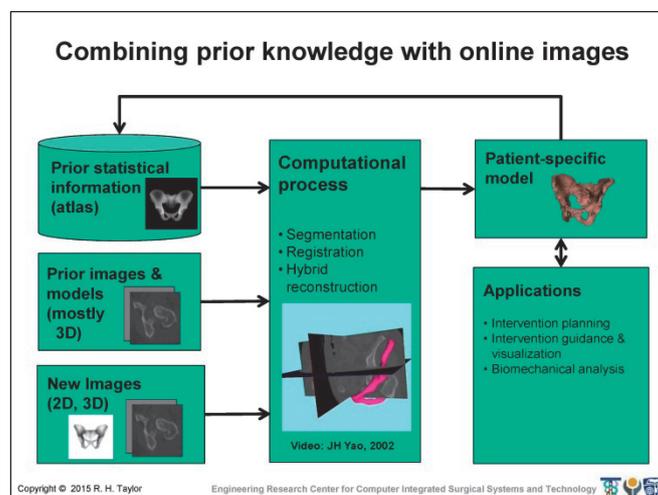


図-15

〈図-15〉 患者ごとに特化した新しいモデルを作るために、患者の画像や患者の母集団の統計モデルから得られた過去の情報を患者の新しい画像と結合することは、ずっと昔からの共通の（私や私以外の方の研究に通じる）テーマでした。この仕組みの詳細は対象となる画像の種類と適用目的により異なります。

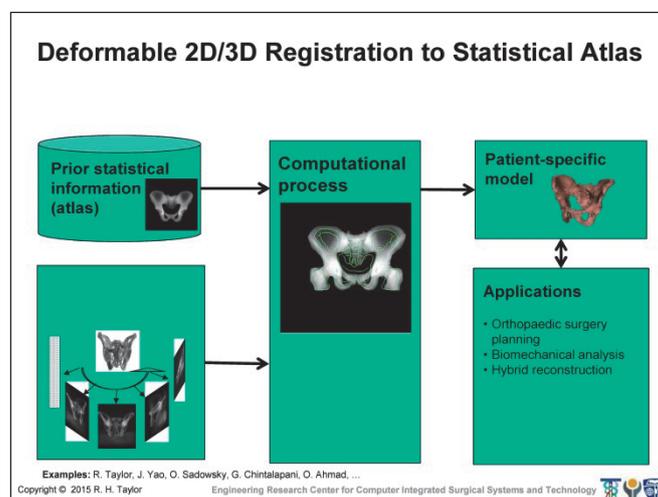


図-16

〈図-16〉 整形手術における一例として、患者の CT スキャンがどのように見えるかを推測するために、多くの患者の CT 画像から導き出した統計的モデルとともに、その患者の X 線画像の何枚かを（それらが利用可能な場合は）利用する方法があります。

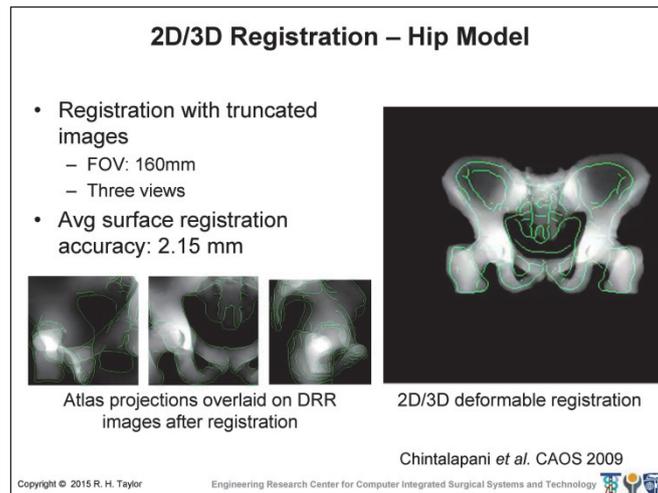


図-17

〈図-17〉 ここでは、私の指導研究生である Gouthami Chintalapani 氏が手術を計画するに足りうる正確な骨盤と腰の 3D モデルを作成するために、3 枚の X 線画像と統計的モデルを使用しました。

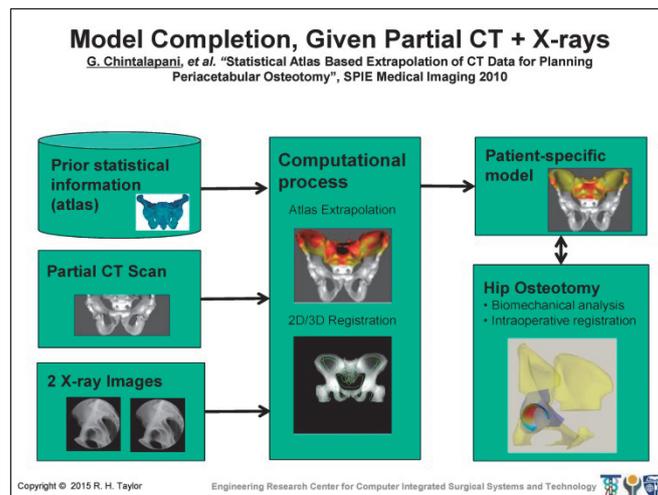


図-18

〈図-18〉 この例において、股臼周囲切断手術の計画を立てるための非常に正確な腰部軟骨モデル提供には CT スキャン画像が必要でしたが、他の部分では正確さが落ちて構いません。患者が受ける放射線の総量を軽減するために、Gouthami 氏は骨盤の股臼（ヒップ・ソケット）部位の CT スキャン、2 枚の X 線画像および手術計画モデル策定のための統計的モデルを利用しました。

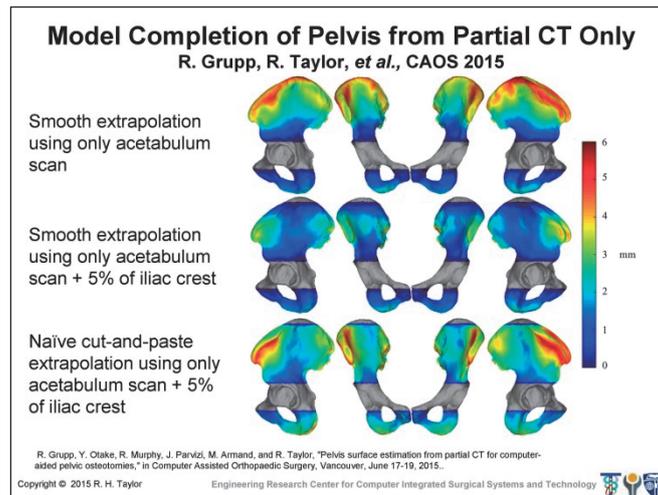


図-19

〈図-19〉 より最近の事例では、私の指導研究生である Robert Grupp 氏が従来の方法と同等の成果を実現するために、いくつかの追加撮影ですむ股臼の CT スキャンを用いる手法を開発しました。これにより、手術前のワークフローを大幅に簡略化することが可能になります。

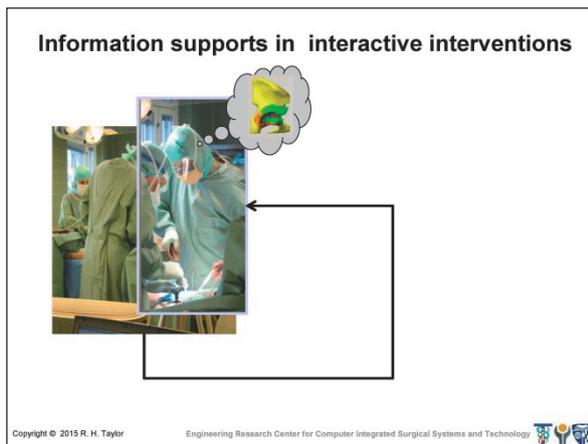


図-20

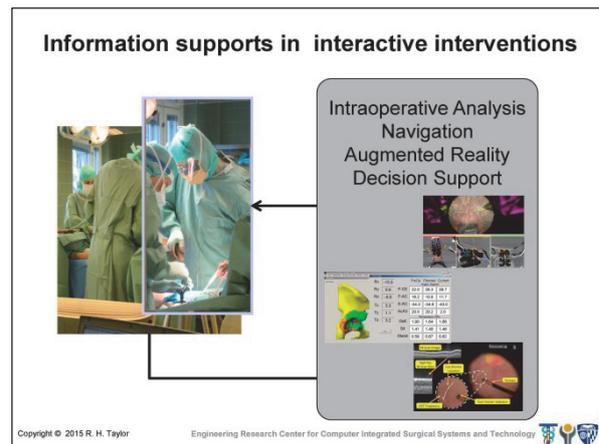


図-21

〈図-20、21〉 多くの場合、外科医の支援に能動的なロボットは必要としません。昔から手術は外科医の目と手の連携、外科医の頭の中で描く手術計画のイメージおよび、手術の進行状況に依存してきました。

しかしながら、コンピュータは手術を進めるうえで極めて有用な追加情報を外科医へ提供することができます。私は当初からこのアイデアに興味を抱き、それ以来私の研究においてずっと繰り返されるテーマでした。

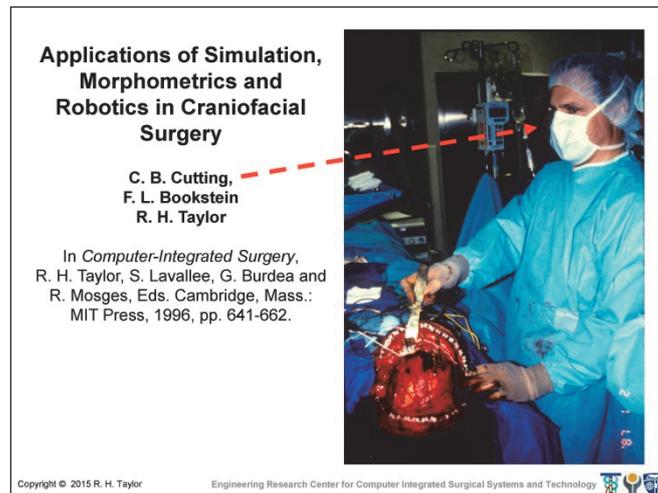


図-22

〈図-22〉 私は Robodoc の研究を進める一方、頭蓋骨顔面切骨術用のコンピュータ統合システムを開発するために、ニューヨーク大学医療センターの整形外科医である Court Cutting 博士との共同研究も始めました。この手術において、外科医は患者の容貌を改善し、また咀嚼のような機能を助けるために患者の顔の骨を切り離し、骨片を再接合します。このケースにおける我々の主たる目標は、外科医が骨の断片を互いの位置関係を考慮して配列する支援を行うことでした。

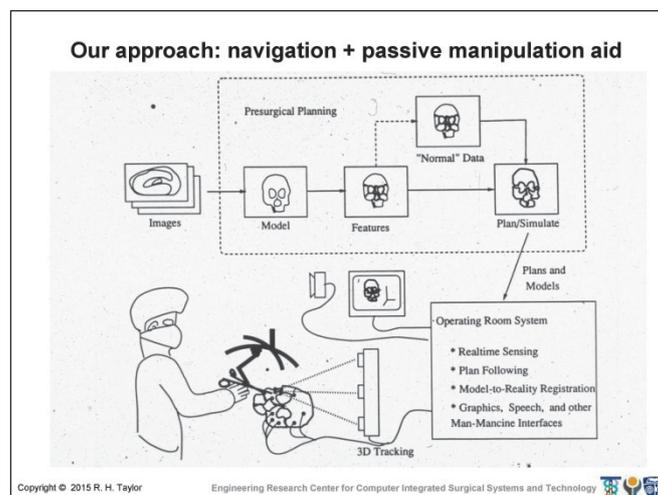


図-23

〈図-23〉 これは我々が開発したシステムを要約したスケッチです。このシステムは私および Fred Bookstein 氏のアイデアとともに、Cutting 博士のアイデアを大いに利用しています。患者の頭蓋骨モデルを作るために患者の CT スキャンが利用されました。これは様々な患者の CT スキャンから作られた統計的モデルと対比され、どの位置で骨が切断されるべきか、また、どのように配列し直されるべきかを決定するのに利用されました。手術室で対象の患者にモデルと計画が登録され、CG ディスプレイおよび他のヒューマンマシンインターフェースが外科医の手術計画の実行を支援するために利用されることがあります。

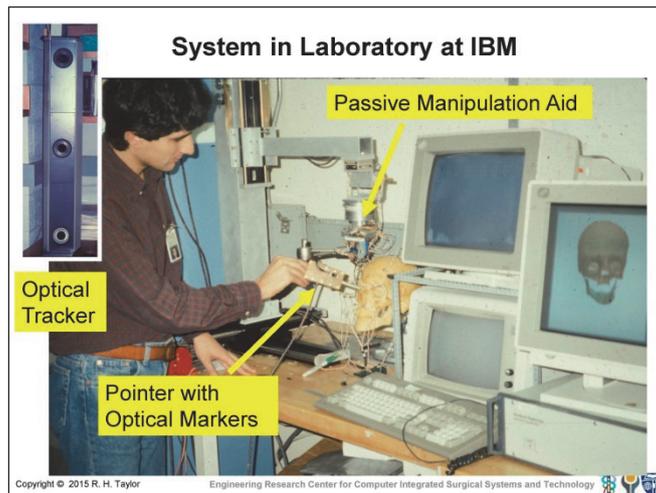


図-24

〈図-24〉 これは IBM の研究室でのシステムの様子です。外科医が骨片を互いに接続する間、骨片を配列し、固定するのを助ける受動的操作支援とともに、手術器具と患者の体の一部を追跡する光学追跡システムが使用されていることにご注目ください。

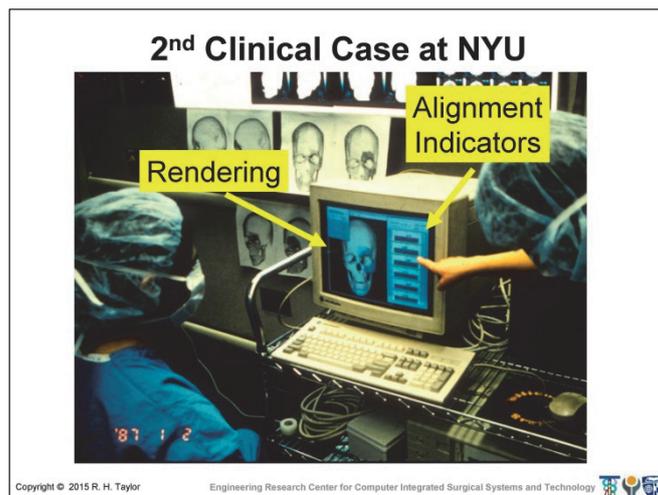


図-25

〈図-25〉 これはニューヨーク大学病院の手術室の写真です。生々しい手術中の患者の頭蓋骨写真は省きました。

ただし、この実施例は手術中に情報支援を行ういわゆる「手術ナビゲーション」の脳神経外科以外での最初の適用例であることにご留意下さい。

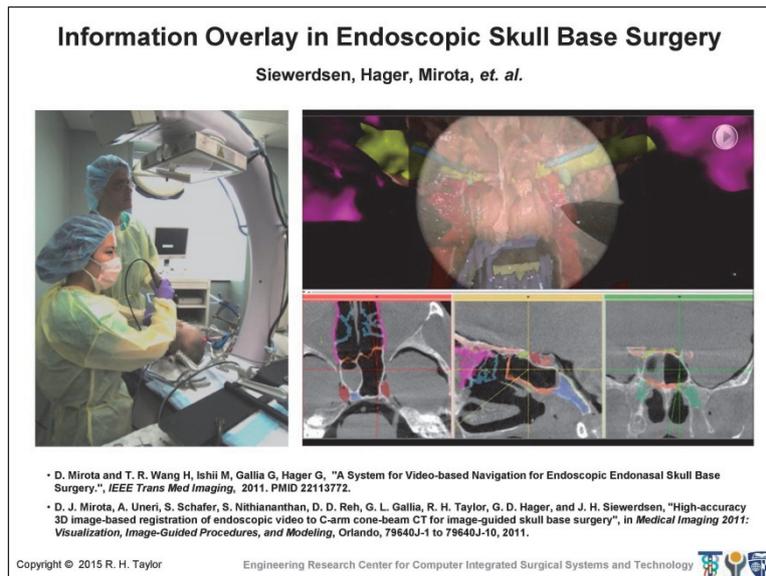


図-26

〈図-26〉 ごく最近では、研究者は手術用ビデオおよび他の画像診断法を手術支援システムに組み入れ始めました。このシステムは、内視鏡ビデオとコーン・ビーム CT 撮影法を用いる頭蓋底手術のために開発されました。私もこの開発に参加しましたが、私の同僚の Jeff Siewerdsen 氏と Greg Hager 氏が中心となり開発が進められました。

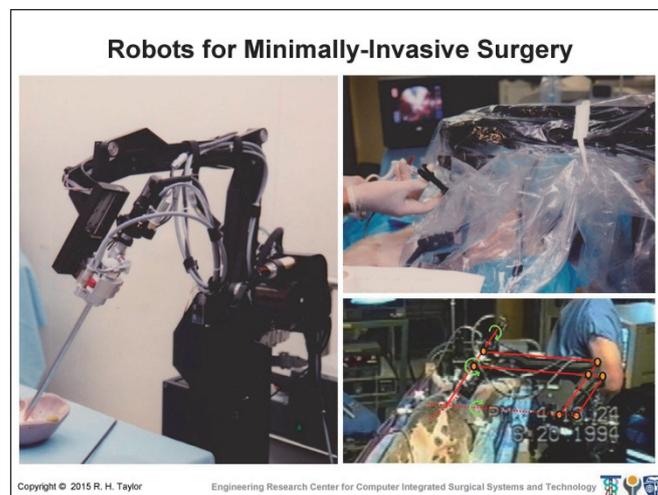


図-27

〈図-27〉 1991 年ごろ、私は内視鏡手術に関する会議で講演しました。この時、私は内視鏡手術のためのロボット支援開発の可能性に興味を持ちました。この興味は最終的に、低侵襲手術において内視鏡と手術器具の精密操作を行うためのシステム開発を目的とした、IBM とジョンズ・ホプキンス大学との共同研究に結びつきました。

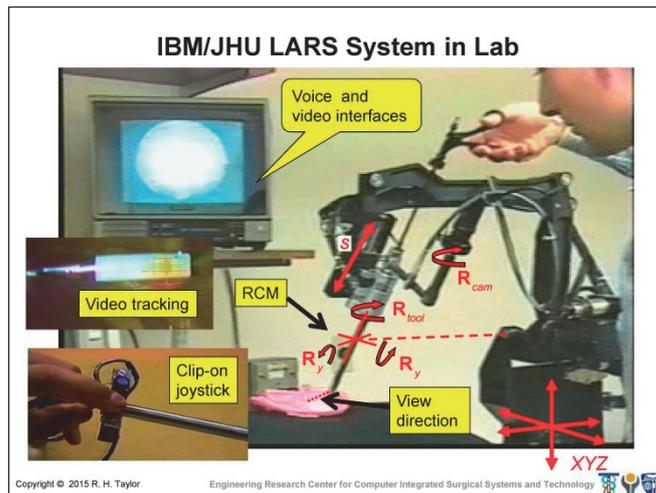


図-28

〈図-28〉 そのシステムは、当時は新しかった多くの機能を有していました。

例えば、我々は IBM のノートパソコンからトラック・ポイントのしくみを借用し、外科医の器具に取り付けられ、ロボットの動きの制御や画像オーバーレイを使ったビデオディスプレイを通じて、システム制御装置と連携する簡単なマウス/ジョイ・スティックを考案しました。また、ビデオ画像をロボット動作制御に利用し外科医を支援する、いわゆる「仮想装置」を開発しました。

そのシステムは、簡単な音声コマンドによるインターフェースも備えていました。音声合成装置に、わずかにスカンジナビアなまりがあったので、「LARS」と呼んでいました。

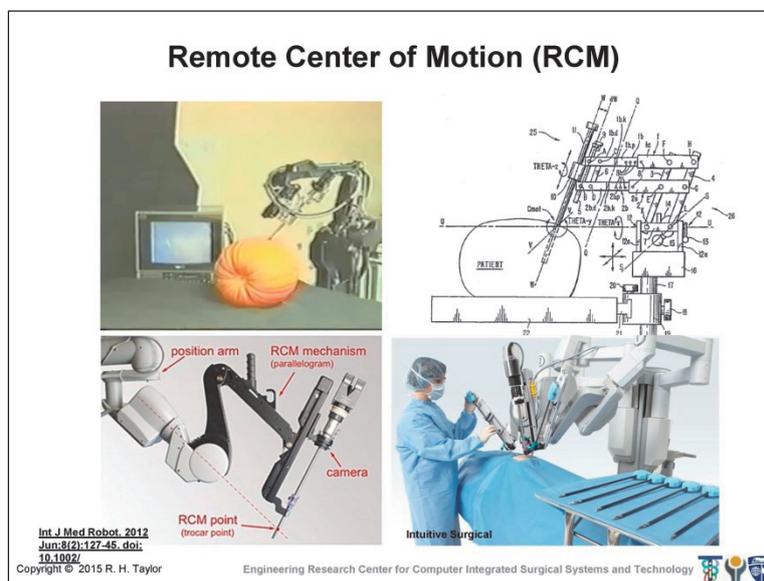


図-29

〈図-29〉 後にいたる所で見かけるようになった運動学的設計上の特色は、私が「仮想孔中心機構」あるいは「RCM」と呼んだものでした。

低侵襲手術において、RCMは手術器具が患者の体に入っていく箇所回回転軸をもうけます。

手術ロボットの分野でこの特徴が最もよく知られている例は、恐らく Intuitive Surgical 社の daVinci 手術システムにおける使用例です。

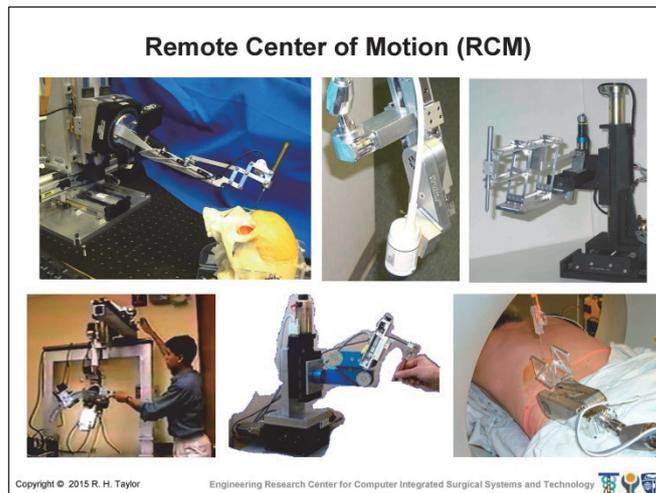


図-30

〈図-30〉 RCM の使い道はもちろん多く存在します。ここに挙げているものは、我々が長年にわたり RCM を利用してきた例の一部です。

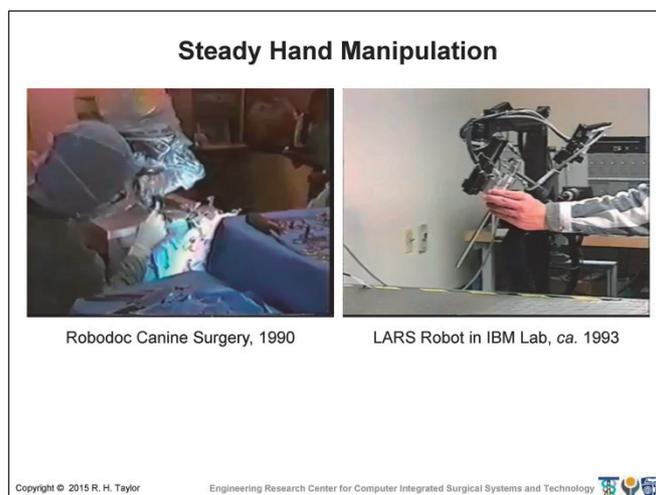


図-31

〈図-31〉 初期の IBM の研究から生まれたもう一つのアイデアは、我々が「手振れ防止」と呼ぶ連携制御です。これは自動車のパワーステアリングのように動きます。外科医とロボットの双方が手術器具を持ちます。ロボットは外科医が加えた力を感知してそれに応じて動きます。実際にはロボットが操作を行うので手の震えは伝わりません。

同様に、ロボットは外科医を様々な方法で助けます。安全バリアを設けたり、解剖対象となる組織に手術器具の照準を定めるのを助けたり、あるいは他のセンサーへの反応を補助したりといったものです。我々はこれらの能力を「仮想装置」と呼びます。

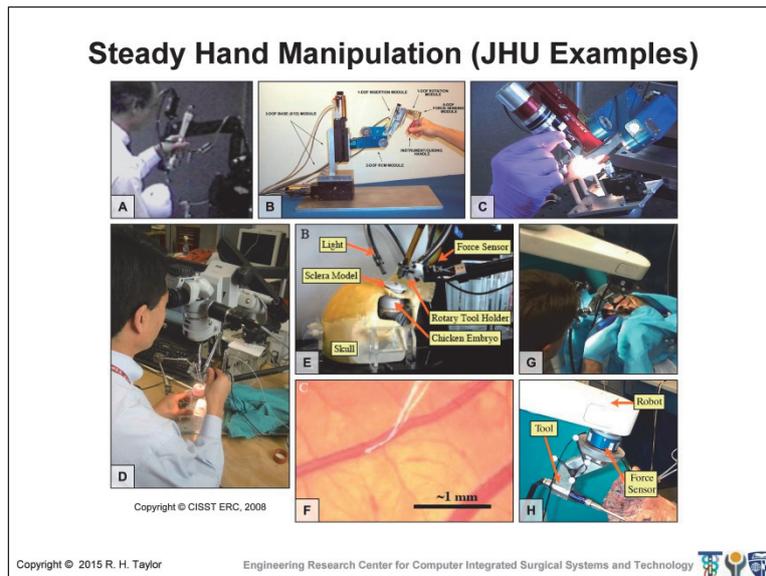


図-32

〈図-32〉 これらのアイデアは、ジョンズ・ホプキンス大学およびその他研究機関の双方で、多くの研究活動の焦点になってきました。これらは長年にわたって我々が開発してきたシステムのいくつかです。

その内のいくつかについてもう少し詳しく取り上げて、手振れ防止ロボットがいかにコンピュータ統合外科手術システムに適しているかご紹介しましょう。

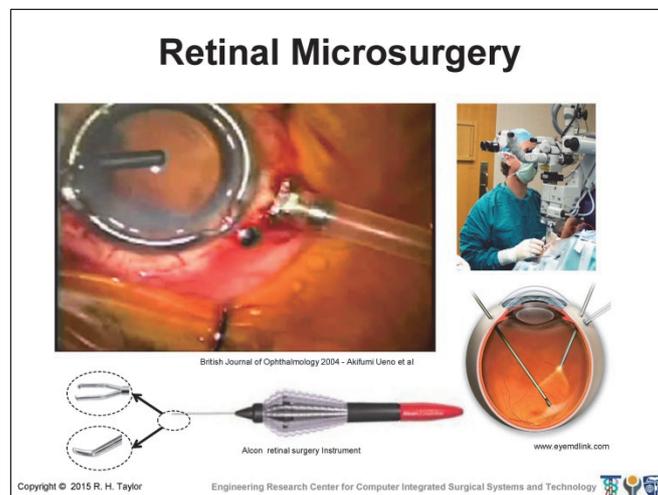


図-33

〈図-33〉 網膜疾患は失明の代表的な原因です。多くの場合、外科支援治療は視力回復あるいは視力維持に最大の希望をもたらします。しかしながら、網膜手術は難易度が高く、外科医は手術にあたって、感覚・運動能力の極限レベルにおける施術が求められます。典型的な手術では、強膜（白目の部分）に挿入された小さなトロッカー（套管針）を通して直径がミリメートル以下の器具を挿入し、傷ついた組織を網膜を傷つけずに剥がさなければなりません。これは、ティッシュペーパーから、粘着テープをティッシュペーパーを破らずに剥がすようなものだといわれています。

外科医の手の震えは、施術している解剖学的構造と同じくらい、あるいはそれより大きく、一方で、器具と網膜との間にはたらく力は、人間が感知できるより桁違いに小さく、また、器具とトロッカーとの間の力よりも桁違いに小さいのです。

外科医は外科用顕微鏡で処置の様子をとらえ、見ているものと患者に関する手術前の情報を関係づけるために、記憶を頼りにします。外科医の姿勢は不動で、首や背中への痛みは職業病となっています。

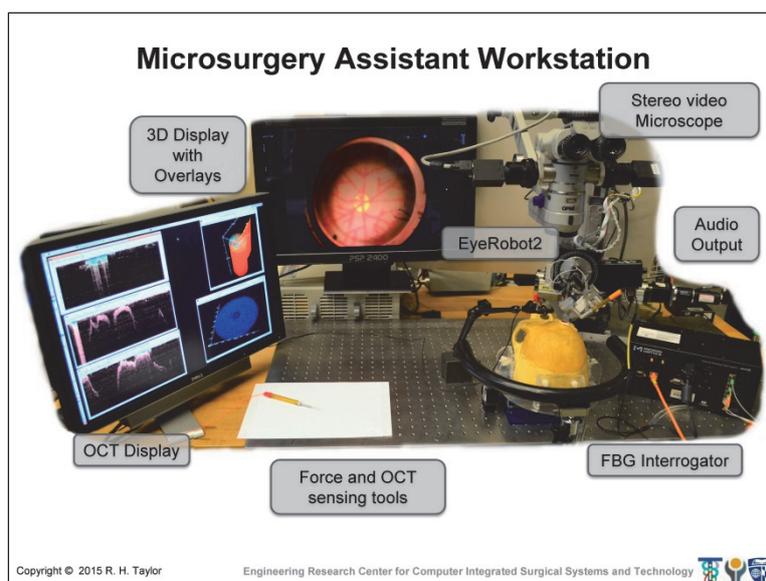
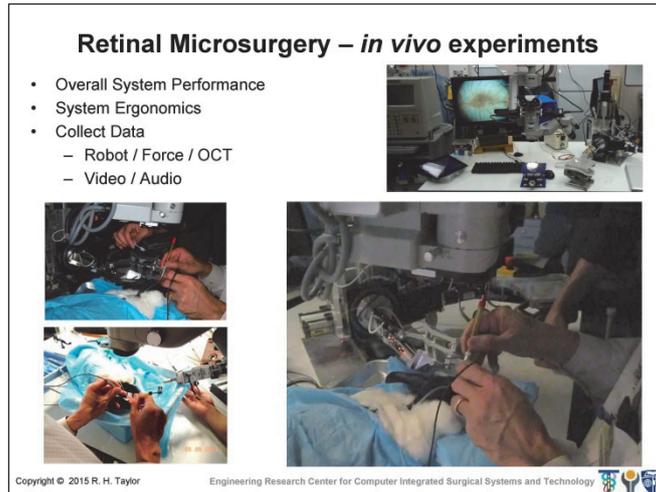


図-34

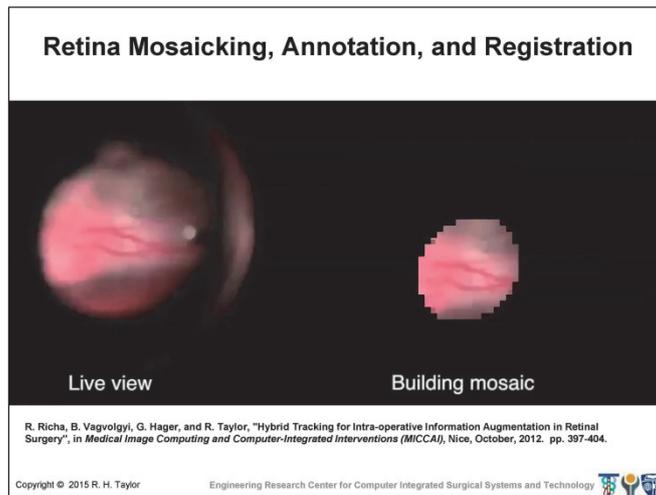
〈図-34〉 我々はこれらの限界に対処するために、個別の技術的な構成要素を様々な方法で組み合わせるといふシステムアプローチの手法をとってきました。たくさんの方々がこの研究に貢献していますが、全体として、このシステムは私の指導研究生である Marcin Balicki 氏の博士論文のテーマが基礎になっています。これは我々の技術研究室におけるシステムの概要です。



図－35

〈図－35〉 そして、これが当病院の顕微鏡下手術研究室の様子です。ここではウサギを対象にシステムの性能をテストしています。

RCM の一つである「アイ・ロボット」と共に手振れ防止ガイド装置が使われていることにご注目ください。



図－36

〈図－36〉 我々は外科医の直接の視野を、顕微鏡から得た立体映像を記録することによって拡張しました。これは立体映像モニターに表示することができます。

我々は映像を網膜のモザイク地図作成のために加工することができ、そしてこの地図を手術前の画像から得た、あるいは手術中に様々なソースから得た情報と融合させることができます。この情報は外科医が手術中に見ている顕微鏡の画像に重ねることができます。

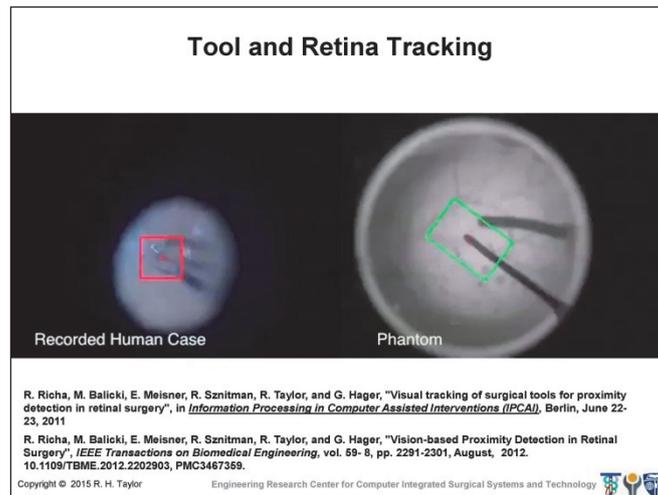


図-37

〈図-37〉 我々はまた手術器具の軌道を追跡することができ、その結果を注視の表示や、器具が網膜に近づいているときに外科医に警告するために利用できます。

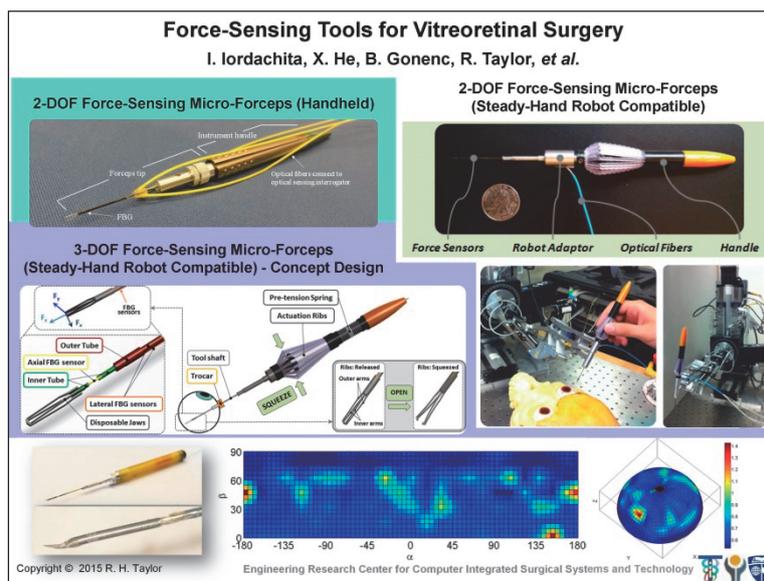


図-38

〈図-38〉 私の同僚である Iulian Iordachita 氏が中心となった研究では、ミリニュートン感度の力センサーをミリメートル以下の手術器具のシャフトに組込むために光ファイバーを使用してきました。また、この成果を手術ロボットの制御および他のヒューマン・インターフェースに組み入れてきました。

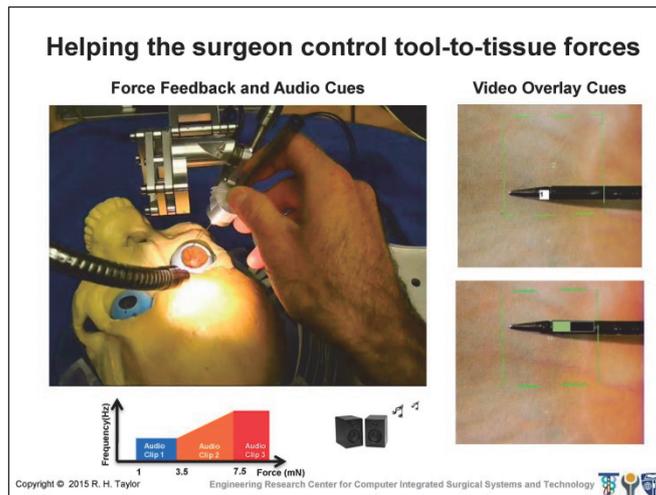


図-39

〈図-39〉 ロボット制御への力のフィードバックに加え、他にも外科医に手術器具と人体組織との相互作用を伝える様々な方法があり、それらはフリーハンド器具に対しても利用できます。最も効果的なものの一つは聴覚によるものであることが判明しました。コンピュータはどれくらいの力が人体組織に加わっているかを音で伝えます。



図-40

〈図-40〉 手術器具と強膜との間の力を感知できることも重要です。2つの手振れ防止ロボットを使うこのケースを考えてみましょう。外科医は顕微鏡下で眼を回転させるために、同時に両方の器具を使います。もし動作が協調していないと、眼球が引っ張られることがあります。

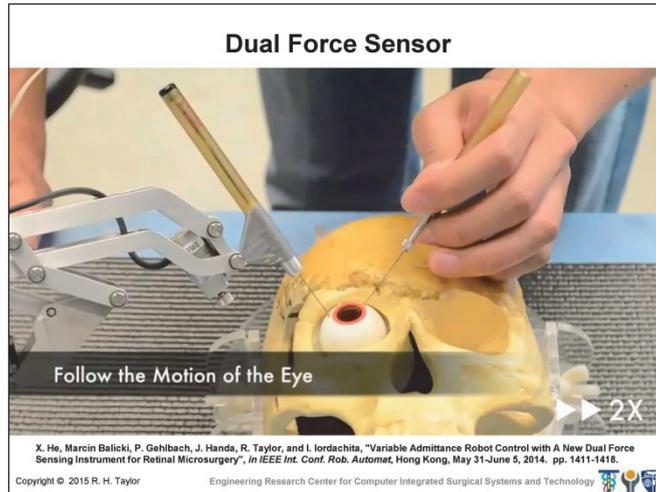


図-41

〈図-41〉 器具の軸に更なる力センサーを追加することによって、Iordachita 博士の指導研究生である Xingchi He 氏は器具によって強膜に加えられる横力を感知すること、軸上の器具が強膜に挿入されたポイントを算定することができ、網膜に加わる力を感知することもできます。彼はこの情報をロボットの制御に組み込むこともできます。

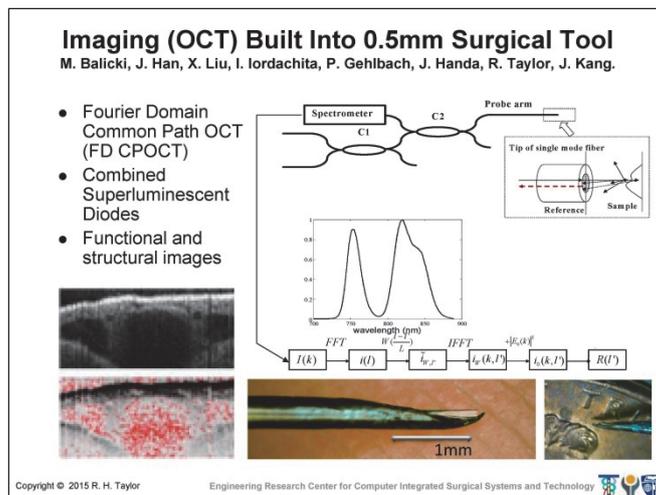


図-42

〈図-42〉 我々は他の形式の感知装置を手術器具に組み込むことができます。ここでは私の同僚の Iulian Iordachita 氏と Jin Kang 氏が、ミリメートル以下の手術器具に光干渉断層撮影 (OCT) センサーを組み込みました。これらの器具によって網膜の構造を感知し、酸素化レベルのような組織性状を測定するとともに、器具の網膜までの距離を決定することができます。

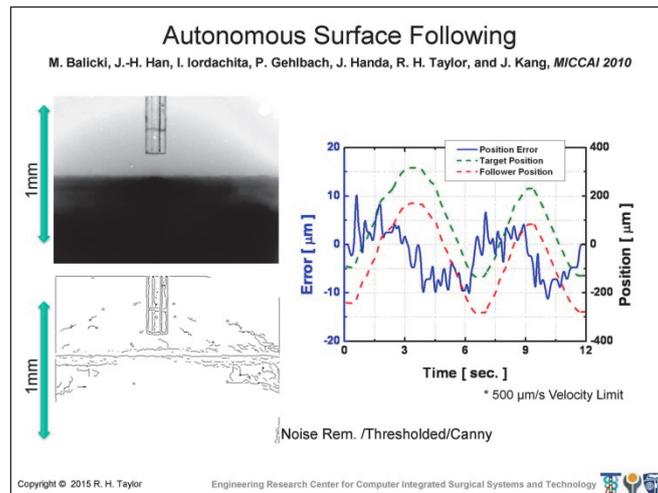


図-43

〈図-43〉 この初期の実証において、私の指導研究生である Marcin Balicki 氏はプローブが 10 ミクロンの誤差で、動いている表面から 150 ミクロンの距離を常に保つように、OCT センサーをロボットへのフィードバックの手段として利用しました。この機能は OCT スキャンやレーザー切除のようなアプリケーションにおいて有用です。

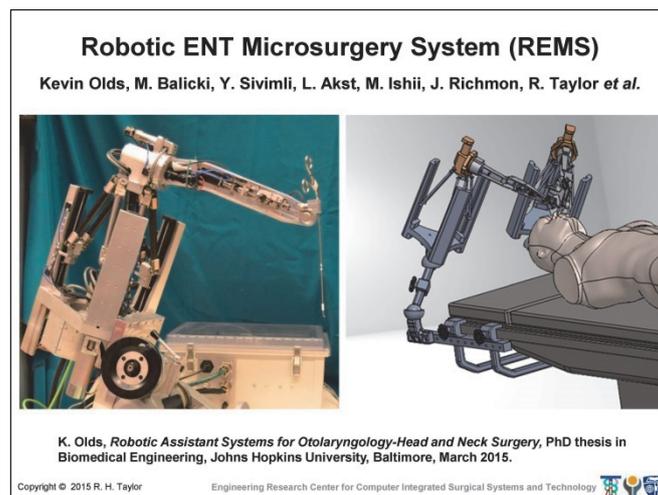


図-44

〈図-44〉 もう一つの例として、現在頭頸部外科手術用の手振れ防止ロボットの開発を進めている研究についてご紹介します。

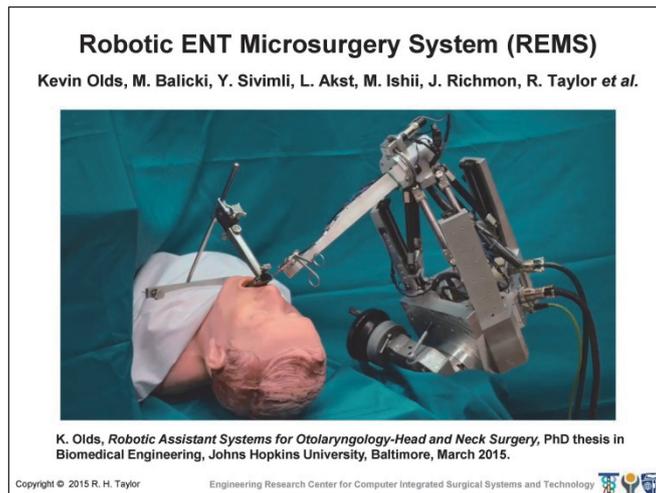


図-45

〈図-45〉 このロボットは、機械装置ができるだけ外科医の視線を妨げないようにして、穴の中に達する長い器具を手振れせずに操作する目的で特別に設計されました。

この写真は、喉頭または声帯手術の代表的なセットアップです。平行構造が移動質量を減少させ、ロボットの反応をより速くします。

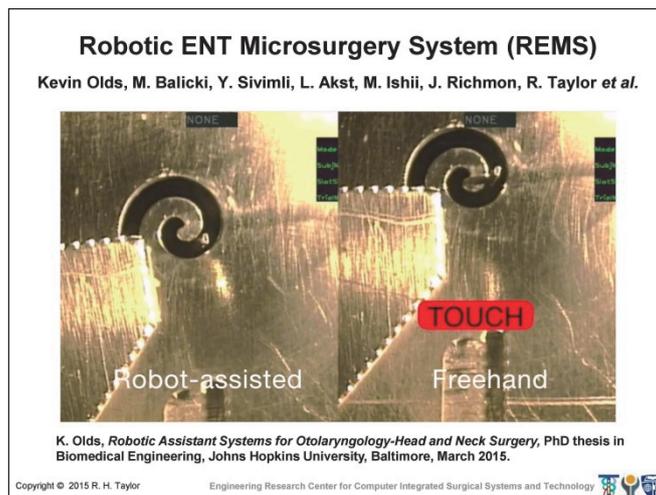


図-46

〈図-46〉 この精密な実験において、外科医は迷路の壁に触れずに器具を操らなくてはなりません。

これは、アシストがなければ実質的に不可能なタスクを全うしようとする外科医のパフォーマンスを比較対照したものです。

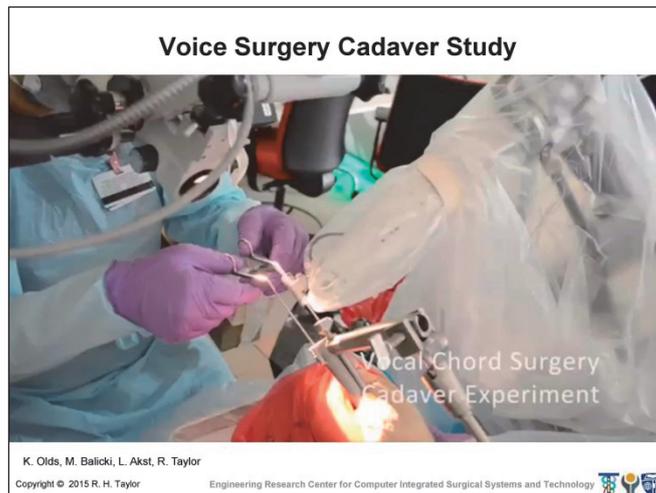


図-47

〈図-47〉 このビデオは、協力外科医である Lee Akst 博士によって我々の研究室で行われた実験で、死体検体に一般的な声帯手術を行っています。

Akst 博士が好むもう一つの機能は、器具の位置決めをした後に、再び彼が動かすまでロボットが器具の位置を安定させることができる機能です。

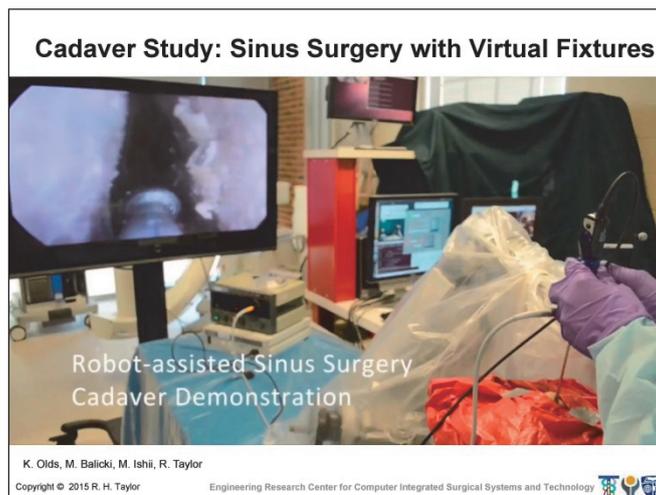


図-48

〈図-48〉 このいささか長い実験は、ロボットが仮想装置を提供できる能力とともに、手術ナビゲーション・システムに統合される能力を示しています。

このケースでは、先程と同様死体検体を使用しており、それを CT スキャンにかけます。CT スキャンの画像結果がロボットに登録された後、ナビゲート表示が CT 画像に対応する器具の位置を示します。

洞手術では、手術器具を複雑な経路に通し、何回も鼻に挿入しなければなりません。器具が人体組織に触れば出血の恐れがあります。そこで我々は外科医が器具を経路に沿って進める間も器具を正しい経路内に保つために、仮想装置を実装しました。

この仮想装置は、「固い（ハード）」状態と「柔らかい（ソフト）」状態になることができ、固い状態では器具は経路から決してそれる事はなく、柔らかい状態では、外科医は経路を逸らすことはできますが、器具を経路に戻そうとする力が働くのを感じます。

我々の協力外科医である Masaru Ishii 博士は、この機能は特に外科研修医の訓練に有益であると考えています。

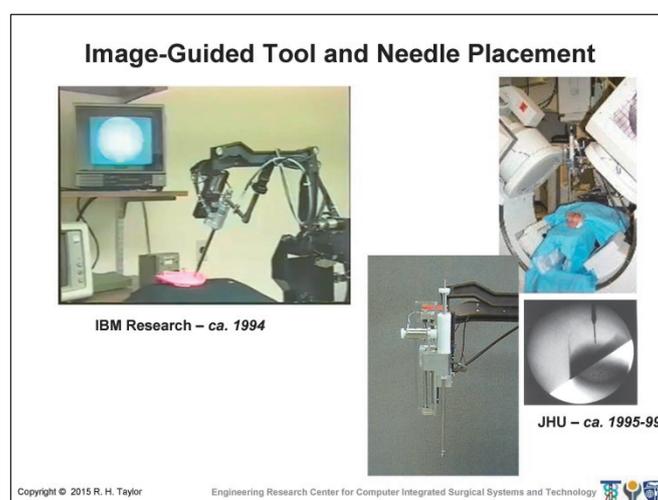


図-49

〈図-49〉 別の初期のロボットの利用は、画像で特定されたターゲットに、針や他の手術器具を正確に配置することでした。スライドの左側では、内視鏡ビデオで特定されたターゲットに手術用把持具の配置支援をするため、LARS ロボットが内視鏡の作業チャンネルの位置決めをしているのが見えます。右はバイプレーンの X 線ガイドのもとで肝臓に放射線シードを埋め込むのにロボットを使用する、初期の実験的システムを説明する画像です。

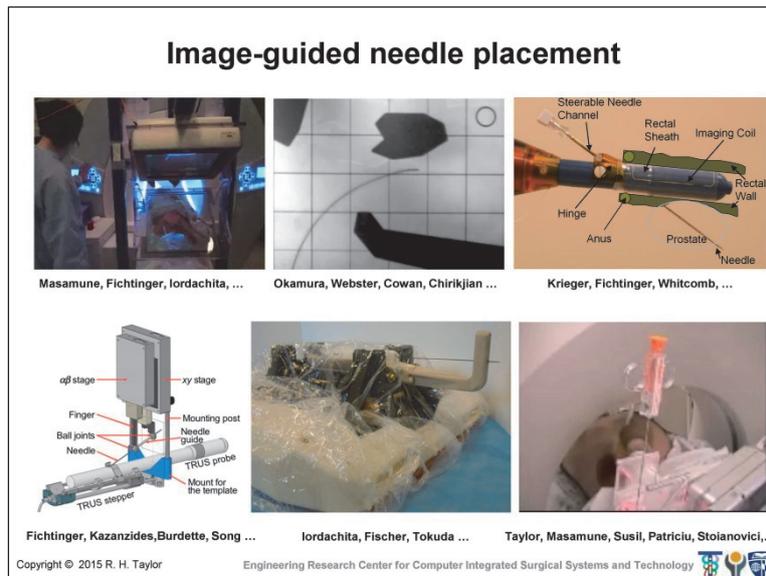


図-50

〈図-50〉 それから何年もの間、画像ガイドによる針配置の多くの実例が当センターで開発されてきました。私はそれらの研究のいくつかに積極的に関わり、それ以外の研究に関しても関心を抱き見守ってきました。

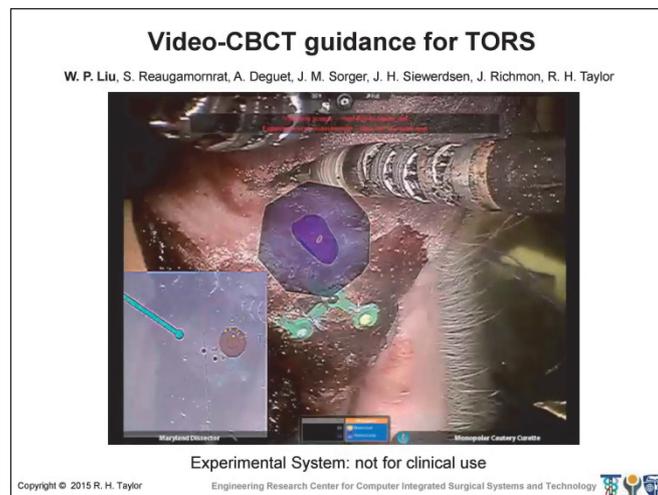


図-51

〈図-51〉 このスライドは、Intuitive Surgical 社およびジョンズ・ホプキンス大学との共同で行われた、私の指導研究生である Wen Liu 氏の博士論文に関する研究です。Intuitive Surgical 社で行われたこの動物実験で、我々は外科医によるダヴィンチ・ロボットを使った舌根腫瘍切除手術を支援するために、術中 X 線照射、コーン・ビーム CT およびビデオグラフィックオーバーレイを使っています。

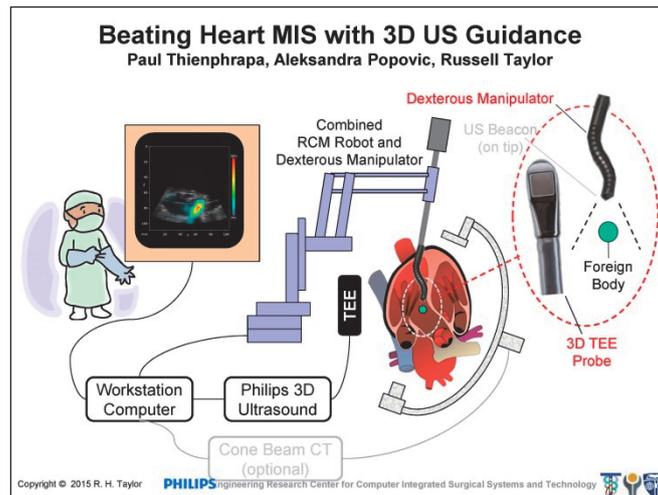


図-52

〈図-52〉 これは別の例で、私の指導研究生である Paul Thienphrapa 氏が Philips Research と共同で行った研究の一部です。課題は拍動する心臓の内部から異物を取り除くというものです。これは通常心臓切開手術を必要とします。その代わりに我々は、リアルタイムの 3D 超音波を使用して手術をモニターしながら、拍動する心臓にヘビ型ロボットを小さな穴に通して挿入したいのです。

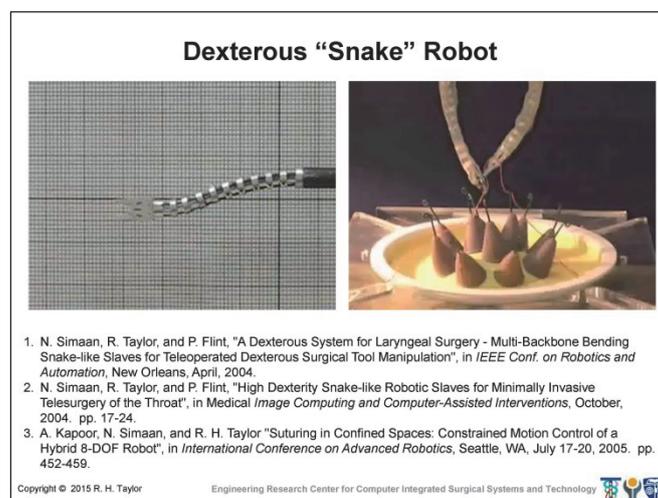


図-53

〈図-53〉 このケースでは、ポスドク研究者である Nabil Simaan 氏と私が低侵襲的手術用に開発した直径、4ミリのヘビ型のフレキシブルマニピュレーターを使用しました。

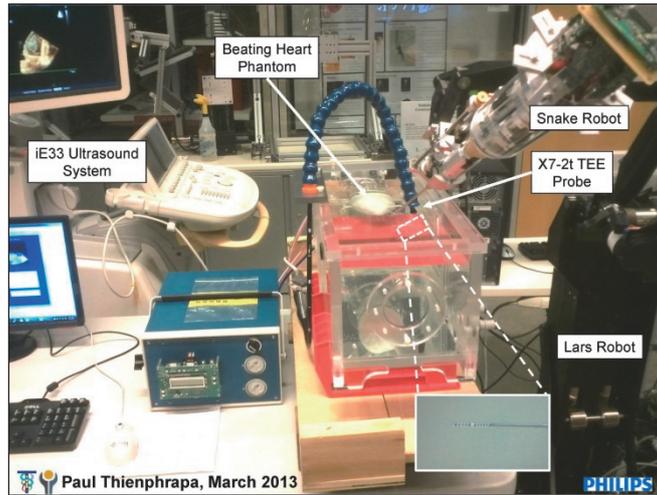


図-54

〈図-54〉 これは我々の研究室において、リアルな心臓の模型、Philips の 3D 超音波システムや LARS ロボットに搭載したへび型末端効果器を使用する実験装置です。

1 つの課題はロボットの動作が非常に遅く、心臓内の小片の動きは多くの場合、とても速かったことです。

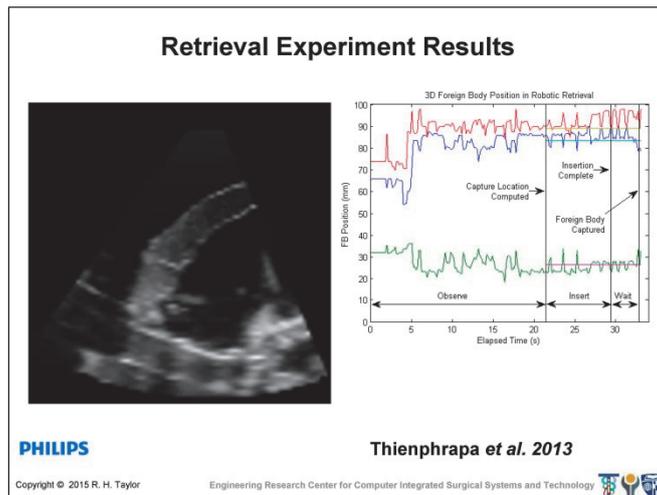


図-55

〈図-55〉 しかしながら、我々は小片が数秒間巻き込まれる渦が心臓の中にも気づきました。そのため、小片をしばらく観察していれば、すぐにまた現れる場所を予想できるので待っていれば良いのです。ちょうど小魚が近づいてくるのをバスが待つように。

そこで、確率地図が作れます（右図）。断片を待ち受ける場所をコンピュータが決定します。ロボットがそこに行き、小片を回収します。

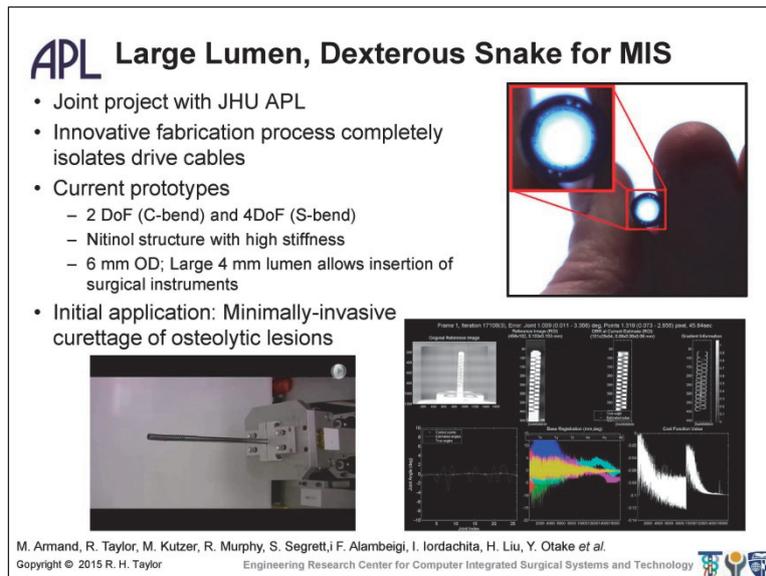


図-56

〈図-56〉 この数年、私は同僚の Mehran Armand 氏たちと共同で、他の種類のヘビ型ロボット末端効果器の開発をしてきました。このケースでは、ヘビ型ロボットは基本的に折り曲げ可能な金属のチューブで、外径は 6 ミリ、手術器具を通す内径は 4 ミリです。

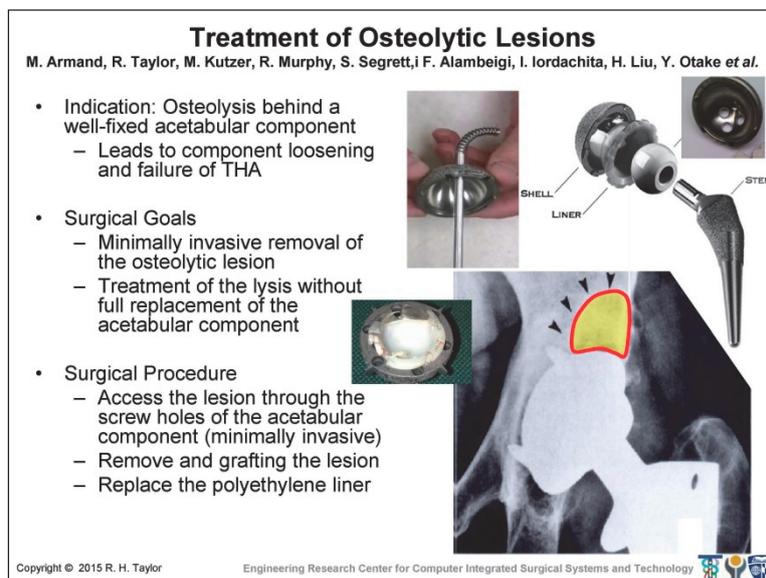


図-57

〈図-57〉 最初の実施例は人工関節手術における溶骨性病変の治療です。人工関節には、一般的に腰部に固定されたカップ状の部品と大腿骨に固定されたステムのボールとの間に、ポリエスチル製のライナーがあります。摩耗したライナーのかげらは、カップの裏に徐々に進み、骨盤の骨をぼろぼろにしてしまうことがあります。放置すると、これによって骨折したり、人工関節がグラツいたりすることがあります。ライナーを取り換える手術をするのが一般的ですが、溶骨性病変の病巣をきれいに取り去り、エポキシセメントまたは何らかの骨補填材で代替しなければな

りません。具合の悪いことに、カップはカップの表面にできた内殖骨によって骨盤にしっかり固定されています。それを取り除いて病巣に達する手法は、骨折を引き起こす懸念があります。

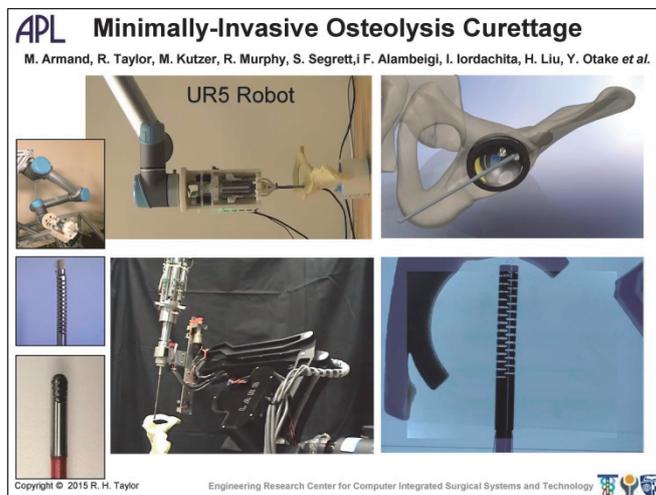


図-58

〈図-58〉 我々の方法は、カップの穴か、カップの後ろの骨にあけた小さな穴にへび型装置を挿入し、内側から空隙を清掃するためにへび型装置の中を通して器具を入れるというものです。

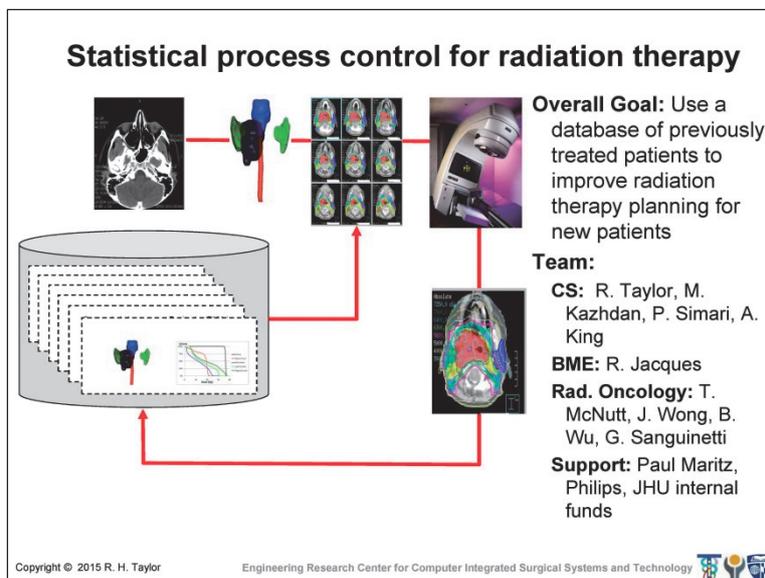


図-59

〈図-59〉 ほかにもたくさんの例がありますが、ここでコンピュータ統合支援治療の統計的工程管理について触れたいと思います。

我々は治療プロセスの質を向上させるために、統計的手法とデータベースを利用し始めています。このケースでは頭頸部癌の放射線治療です。ジョンズ・ホプキンス大学癌研究学部は、臨床ケアおよび研究に役立てるために患者のデータベースを構築してきました。学部長の Ted DeWeese 氏が語るところによれば、彼が患者を診察する際、データベースに登録されているどの

患者がこの患者に最も似ているか、あるいは、このような患者はどの合併症によりかかりやすいか（確率順に並べて）、またこのような患者にはどの治療方法が最も有効であったか等のことを、いずれは知ることができるようにしたいと思っているとのことです。

これは Todd McNutt 氏との共同研究の一例で、治療計画向上のためにこのデータベースを利用するものです。

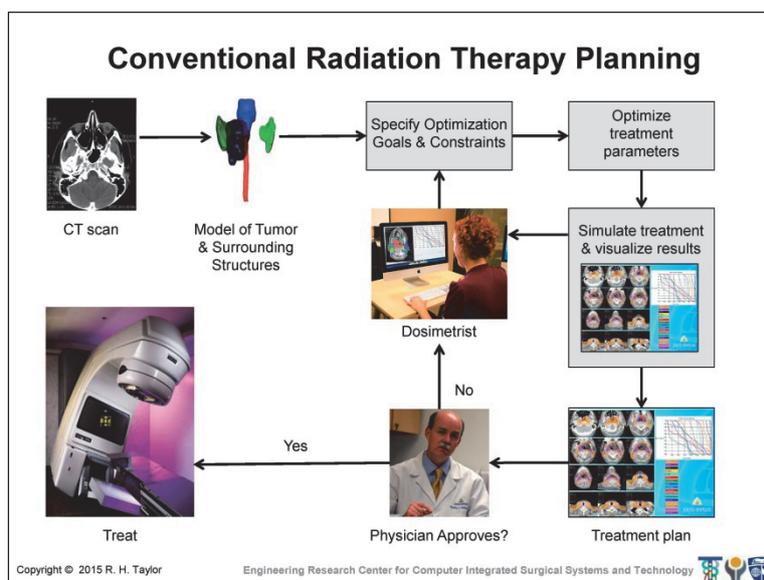


図-60

〈図-60〉 目的は、脊髄、眼および唾液腺のような、腫瘍の周りの重要な組織への放射線量を最小限度に抑えながら所定の放射線量を腫瘍に照射する、放射線ビームのパターンを作成することです。

これはコンピュータにとっては困難な課題です。そのため、従来の計画策定においてはコンピュータが近似的な答えを得るために解く単純な最適化問題を線量測定士が作ります。コンピュータは患者の CT 画像を使って、この計画の非常に精密なシミュレーションを作成し、その結果を表示します。それから線量測定士は最適化基準を修正し、線量測定士と内科医の双方が受け容れられる計画ができるまで、このプロセスが続きます。これは何度も繰り返されることがあり、治療計画の質はそのプロセスをいつ止めるかという人間の判断で決まります。この決定は、その患者に治療計画がどのくらい効果があるかを予測できる経験に基づいて下されます。

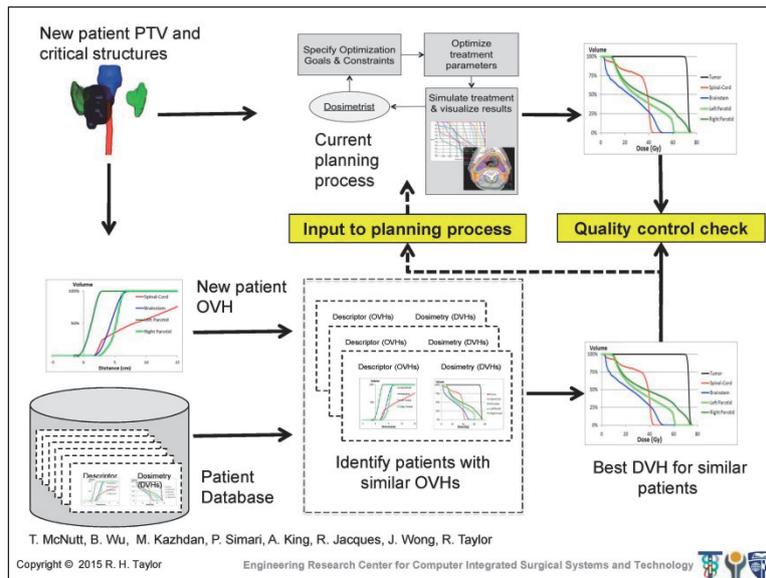


図-61

〈図-61〉 計画策定のプロセスを向上するため、我々は腫瘍とその周りの組織との間の幾何学的関係の特性を記述し、この記述子を使って過去に治療した患者のデータベースを検索する有効な方法を開発しました。

治療計画が提案されたら、品質管理チェックとして、腫瘍の治療中に周りの組織に害をより与えない好ましい治療計画の対象となった同様の患者を、データベースから探すことができます。データベースの患者の最適化基準を、該当患者に当てはめると、多くの場合、策定された計画はより良いものとなります。

同様に、計画策定のスタートポイントとして、過去に治療を受けた同様の患者に対して行われた最良の計画を探すためにデータベースを使えば、従来方式で作成された計画と同様、あるいはそれよりも優れた計画を、線量測定士と内科医のインタラクティブなプロセスにおいて非常に少ないやりとりで作成することができます。

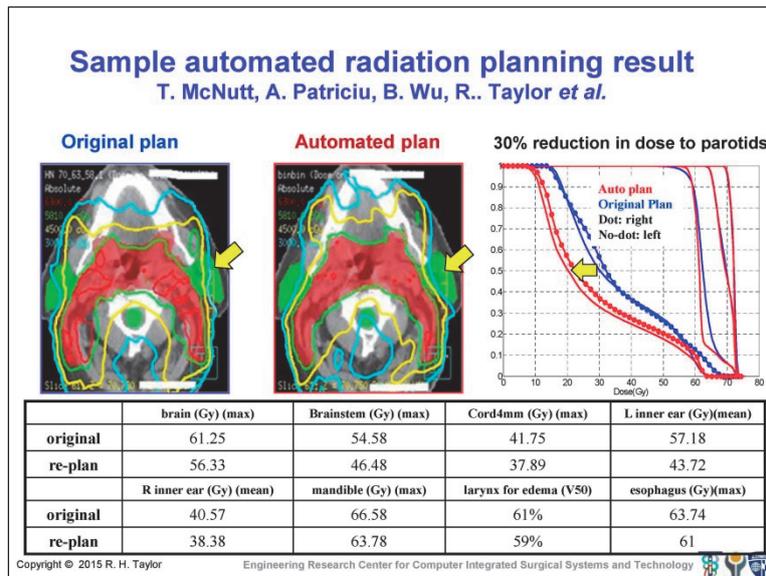


図-62

〈図-62〉 これは、唾液腺への放射線量が大幅に減った1つの例です。
 現在この計画策定法は、ジョンズ・ホプキンス大学の臨床ワークフローに組み込まれています。

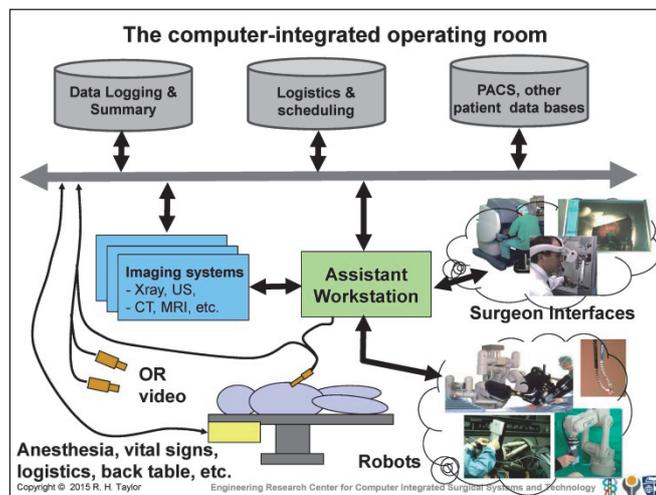


図-63

〈図-63〉 締めくくりとして、25年あまりの私の研究のより大きなテーマについて再び触れたいと思います。コンピュータ統合支援治療とは、特定のロボット、画像装置や、単なる一つのテクノロジーだけで説明できるものではありません。

私は将来の手術室は高度にモジュール化された、情報がふんだんにある環境であると考えます。そこでは、さまざまな装置やサブシステムが外科医と協働して動き、病院のより大きな情報インフラに完全に統合されるでしょう。

色々な側面で、コンピュータ統合医療供給体制は、精密性、質、そして継続的なプロセス改善に力点を置くという意味で、コンピュータ統合製造に似てくるでしょう。

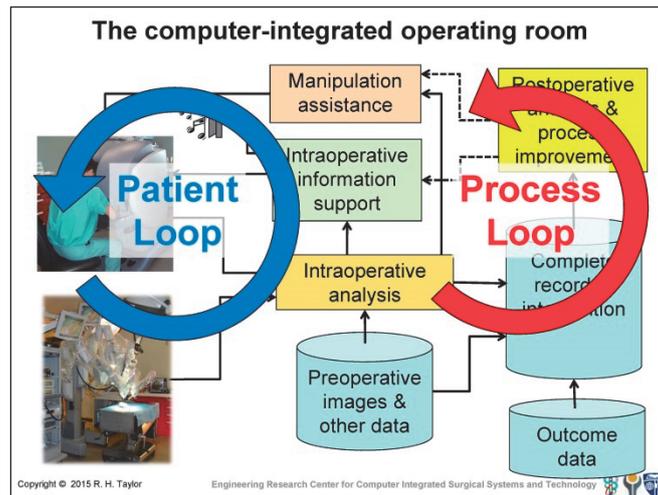


図-64

〈図-64〉 これは、この環境での情報フローがどうなるかについてのブロック図です。

左は個々の患者の治療プロセスを表す、少し前にお見せした図の「青いループ」です。そして右は、将来の患者の治療改善のための情報使用を示す「赤いループ」です。

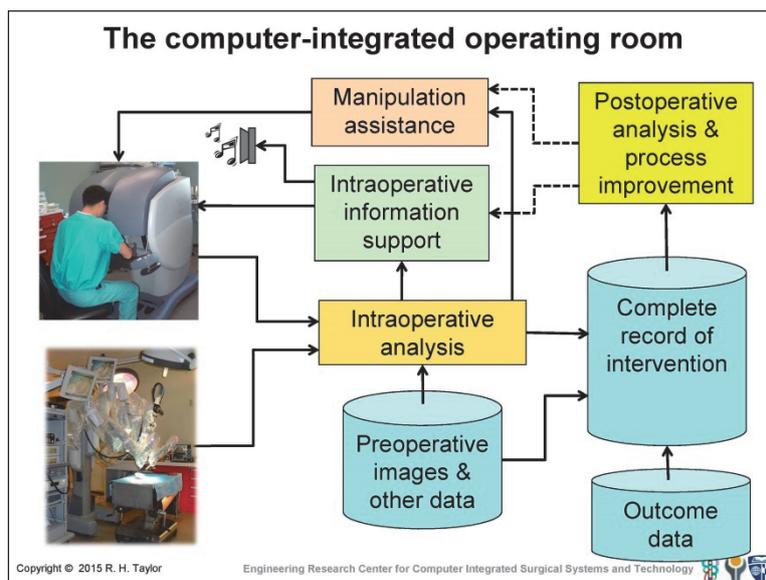


図-65

〈図-65〉 図はほとんど同じだということにご注目ください。低侵襲的ロボット手術の場合でも...

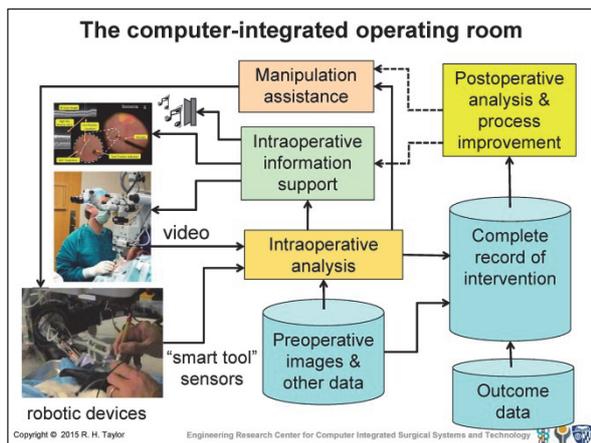


図-66

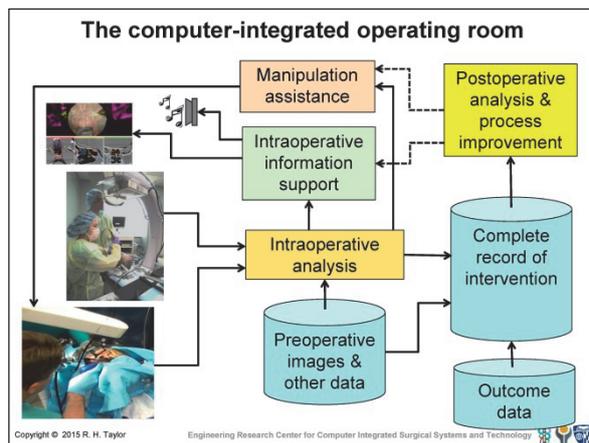


図-67

〈図-66、67〉 あるいは顕微鏡手術でも、あるいは、もちろん他の形式の治療にも当てはまります。

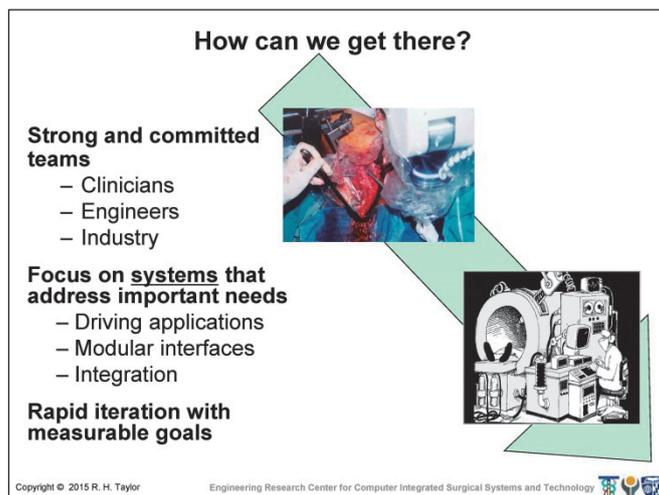


図-68

〈図-68〉 このような分野で働くことはとてもやりがいのあることでした。そして、旅はまだ始まったばかりです。

私を得た大きな教訓の1つは、チームで働くことの重要性です。そのチームのメンバーは、ニーズと問題を理解している臨床医、様々な異なった分野の技術者、そして独自のノウハウを持ち、研究成果を公共の用に供することのできる産業界のパートナーです。

また、チーム全体でフィードバックと交流を絶やさぬことはもちろん、実際の応用に基づいてシステム手法を用いることが、たいていの場合に成功への鍵となることを知りました。チームでの共同は、この分野での研究をとて楽しいものにしてくれました。



図-69

〈図-69〉 面白く、技術的に興味深いことに加えて、この分野で働くことは間違いなく他の面でもやりがいがあります。コンピュータ統合支援治療の最終的な「エンドユーザー」は患者さんです。そして我々のテクノロジーが救うことができた患者さんに出会えたのは、私にとって最も幸せなことでした。徐々に形になりつつある医師、テクノロジーおよび情報の 3 者によるパートナーシップは、それなくしては不可能であった新しい治療法の開発を可能にする一方、同時に安全性と治療の質を高め、患者の死亡率を低下させています。さらに、より良い結果と費用効率に優れた治療プロセスを推進することによって、社会が抱える深刻かつ増えつつあるニーズに対応することができます。



図-70

〈図-70〉 最後に、また最も大事なことです、妻の Beverley Pederson、そして息子の Sam Taylor に感謝したいと思います。二人の存在は私の人生を有意義なものにしてくれました。

- このレポートは本田財団のホームページに掲載されております。
講演録を私的以外に使用される場合は、事前に当財団の許可を得て下さい。



公益財団法人 本田財団
HONDA FOUNDATION

発行責任者 山本雅貴
Editor in chief Masataka Yamamoto

104-0028 東京都中央区八重洲 2-6-20 ホンダ八重洲ビル

Tel. 03-3274-5125 Fax. 03-3274-5103

6-20, Yaesu 2-chome, Chuo-ku, Tokyo 104-0028 Japan

Tel. +81 3 3274-5125 Fax. +81 3 3274-5103

<http://www.hondafoundation.jp>