解 説

人体を内側から扱うロボットの設計

Design of a Surgical Robot for Use Inside the Human Body

光 石 衛^{*1} 杉 田 直 彦^{*1} 保 中 志 元^{*1} 橋 爪 誠^{*2}

^{*1}東京大学 ^{*2}九州大学

Mamoru Mitsuishi^{*1}, Naohiko Sugita^{*1}, Shigen Yasunaka^{*1} and Makoto Hashizume^{*2}

^{*1}The University of Tokyo ^{*2}Kyushu University

1. は じ め に

ロボティック・サージェリーは、(1) 医師が通常では見ることのできない臓器や骨格などの裏側や内部に存在する患部を見えるようにすること、(2) 通常手では困難な狭い領域や臓器の裏側の手術、微細な手術、高精度な手術を可能とすること、(3) 遠隔診断や遠隔手術を可能とすることなどの特徴があることから、将来性が期待されている。本稿では、人体を内側から扱うロボットの例として、内臓系の手術を行う低侵襲手術支援システムを取り上げ、特に実際に手術を行うスレーブ・マニピュレータの要求機能と制約条件を挙げ、筆者らが実際に設計、実装し、動物実験を行った結果について記す。

2. 従 来 の 研 究

手術ロボットに関しては、機構に特色を有するマニピュレータが開発されている。例えば、生田らは人体体内での遠隔微細手術を可能とするマイクロフィンガーに電気メスなどの機能を付加し、切開機能の追加やツール部のモジュール化を行っている[1]。橋本らは、内視鏡下手術における超音波駆動メス用に超弾性合金を用いた能動湾曲機構を提案している[2]。古荘らは、曲がり多重チューブを用いたシステムを開発している[3]。また、高山らは腹腔内で組み立てることを特徴とするハンドシステムを構築しており、大型の臓器の把持や圧排等を可能としている[4]。

環境対応型の手術ロボットも多く見られ、岸らはMRI環境に対応した小型マニピュレータ[5]を、廖らは内視鏡下胎児手術におけるマニピュレータを提案している[6]。さらに、内視鏡下手術支援ロボットを用いて日本と韓国、および、タイを結んで遠隔手術実験を行った研究がある[7]。整形外科領域では、大腿骨骨折修復支援ロボットを臨床使用

した報告[8]、人工関節置換術を支援する骨切除ロボットの研究[9]などがある。

一方で、ロボットを構築・使用する際に必要となる人体組織の機械特性についても基礎的な研究がなされており、小林らの肝臓などの臓器をモデリングする研究[10]、松宮らの集束超音波を照射した後の組織熱変性評価[11]、栗田らの眼球の剛性を測定・評価する研究などがある[12]。また、杉田らの骨切除特性を調べた研究もある[13]。さらに、手術ロボットのトレーニングも重要であり、これについての報告がある[14]。

福祉ロボットについては、食事支援ロボット、ロボット車椅子、動作支援ロボットなどが提案されている[15]。例えば、筋電信号や筋音信号を直接的、あるいは、間接的に検出し、人体装着型ロボットにより高齢者や障害者を支援する研究が進められている[16][17]。高齢者、障害者の日常生活支援のために当該分野への期待も大きい。

3. 内臓系低侵襲手術システムの設計

3.1 スレーブ・マニピュレータの要求機能と制約条件

スレーブ・マニピュレータへの要求機能と制約条件は大きくは次の通りである：(1) 患者の安全性を確保すること、(2) 手術室環境に適合可能であること、(3) 腹腔鏡下手術に必要な手技を行えること、(4) 遠隔操作が可能であること。

この中で、特に、腹腔鏡下手術を可能とするため、および、安全性を確保するため、次のことを考慮する必要がある。

① 術者、内視鏡助手に代わり、2本の術具（鉗子、電気メス等）、内視鏡を操作可能とする。

② 患者の腹部に開けた創に負荷を掛けずに腹腔内で手術を可能とするため、また、安全性を高めるため、術具と内視鏡を把持するアームの動作に不動点を設け、不動点と挿入位置とを一致させる。

③ 術中のワークスペースについて：標準的な人間のサイズから内臓系で手術が必要な範囲は、図1に示すように縦400[mm]×横300[mm]×高さ150[mm]である。ただし、上側と下側とでマニピュレータを頭寄り、あるいは、脚寄りに配置することで対処可能であるため（図2）、鉗子が届

原稿受付 2008年2月29日

キーワード：Surgical Robot, Computer-Integrated Surgical System, Minimally Invasive Surgery, Master-Slave System, Telesurgery

^{*1}〒113-8656 文京区本郷 7-3-1

^{*2}〒812-8582 福岡市東区馬出 3-1-1

^{*1}Bunkyo-ku, Tokyo

^{*2}Higashi-ku, Fukuoka-shi, Fukuoka

図1 手術に必要な作業領域

図2 手術ロボットの配置

く必要があるスペースは、縦 200 [mm] × 横 300 [mm] × 高さ 150 [mm] である。

④ 鉗子挿入点（ポート）の位置：図3に示すように、野球のダイヤモンドに例えて、患部の位置をホームベースとすると、1 塁、3 塁ベース上から術具を挿入し、2 塁ベース上から内視鏡を挿入する。このとき、ダイヤモンドの一辺は 100 [mm] である。ただし、術式や患者の体格に応じてポートの位置関係が変化することもありうる。また、美容的な観点から両脇から挿入することもある。このため、術具と内視鏡とを把持するアームには独立した自由度を持たせるほうが位置決めが容易である。

⑤ 鉗子と手術台上面との角度：30～60 度が最もよく使用される角度である。ただし、場合によってはマイナスになることもある。

図3 患部と術具、および、内視鏡挿入点配置

⑥ 後述するように本稿で実現したシステムでは、鉗子挿入点まわりの不動点を実現するために、曲率ガイドを使用するが、その内側（腹壁側）に鉗子以外の機械的要素がないようにすることが望ましい。これは、手術ロボットの側に存在する医師（助手）の視認性を確保するためと、体表面近傍に不潔物体を配置しないために必要である。

⑦ 手術台と手術ロボットとの間の距離は清潔域と不潔域とを分ける意味で離れている必要があるが、50 [mm] あればよい。

⑧ 手術台の高さ：患者腹部上面が術者の臍の高さ程度である。背の低い医師は、台に上って手術をすることもある。医師は、座ったままで行うことも可能である。

⑨ 病院でエレベータを使用して手術ロボットを移動するためには、サイズは縦 2,300 [mm] × 横 1,100 [mm] × 高さ 2,100 [mm] 以下でなければならない。一般に病院のエレベータはベッドを移動可能としているため、ある一定の大きさは確保されている。

⑩ 肝臓をハンドリングするためには、重さ 2 [kg] の物体をハンドリングできなければならない。また、直径 1 [mm] の血管をハンドリングするためには、分解能は 0.1 [mm] 以上必要である。さらに、スムーズな手術を行うためには、鉗子先端がワーキングエリア内を等方的に最高速度 100 [mm/s] で移動可能であることが必要である。

⑪ 緊急事態が発生したときに、鉗子などの術具をすみやかに撤去し、通常の手による手術が可能な状態とすることが必要である。

⑫ 清潔域、中間域、不潔域が明確に分かれて確保されていることが必要である。

3.2 スレーブ・マニピュレータの設計

スレーブ・マニピュレータの具体的な設計として、上記①の要求機能を満たすため、3 本のマニピュレータを設ける。また、セットアップ時にパッシブに動作する部分と術中にアクティブに動作する部分（術中駆動部）とを設ける。

②の要求機能を満たすための機構として、回転と平行リンク機構とを組み合わせる方法、回転と曲率ガイドとを組

図 4 内視鏡アーム配置

図 5 鉗子アーム配置

み合わせる方法、曲率ガイドを2個組み合わせる方法などがある。これらの種々の不動点を実現する機構のうち、アーム同士の干渉が比較的小さく、かつ、剛性が高く精度を出しやすい回転と曲率ガイドとを組み合わせる方法を用いる。

③、④の要求機能を満たすため、鉗子用アーム、内視鏡用アームを SCARA 型とする。ただし、鉗子用アームは、術中駆動部の姿勢を術前に決定する冗長な3自由度を設ける。内視鏡用アームは先端リンクによる内視鏡の向き（上から見た際の向き）を任意に設定可能なように冗長な1自由度を設ける（図4）。これらの冗長自由度は、いずれも、アーム相互の干渉を避けるため、および、患部へのアプローチ姿勢を適切にするために設けられたものである。また、図5に示すようにスレーブ・マニピュレータのベース部から患部までの距離が600[mm]であるとする、鉗子用アームの全長を1,000[mm]、内視鏡用アームの全長を750[mm]とすれば、必要な範囲をカバーできる（図6）。さらに、鉗子用アームと内視鏡用アームの干渉を避け可動域を広げるため、それぞれの高さを換え、内視鏡アームを上方に配置

図 6 アームの可動域（白い円の内部が必要な領域）

図 7 スレーブ・マニピュレータの概観

する。

⑤の要求を満たすため、また、鉗子を脇から挿入することを考慮して、曲率ガイド上を鉗子が動作可能な範囲を0～60度とする。

⑧に関し、医師の身長が1,600～1,800[mm]と想定すると臍の高さは940～1,060[mm]である。これから腹部の厚さ150[mm]、アームの姿勢による高さの変化を100[mm]とすると上下方向の必要可動範囲は690（＝940－150－100）～1,060[mm]となる。

3.3 スレーブ・マニピュレータの実装

製作したスレーブ・マニピュレータの概観を図7に示す。また、鉗子アーム、内視鏡アームをそれぞれ図8、図9に示す。術具、あるいは、内視鏡の挿入ポートとなる不動点の位置決めを行うパッシブ部の関節には電磁ブレーキを設けた。1本のアームの1本のアームの電磁ブレーキの解除はボタン一つにより行うことができ、操作容易性を実現した。総重量は630[kg]、高さは1,736[mm]である。アームは収納姿勢をとることができ、1,300[mm]×900[mm]×1,750[mm]のサイズに収めることが可能であり、エレベータで移動可能である。

図 8 鉗子アーム

図 9 内視鏡アーム

図 10 鉗子アームの機構学モデル

実現した鉗子アームの機構学モデルを図 10 に示す。この図中で、H1, H2, H3, P1, P2 がパッシブな自由度であり、 α , β , γ がアクティブな自由度（術中駆動部）である。筆者らの製作したシステムでは、鉗子アームの先に多自由度屈曲鉗子を装着可能としている。これは、鉗子の長軸と垂直な二つの軸周りの屈曲自由度、長軸周りの回転自由度、鉗子先端開閉自由度の合計 4 自由度を有し、術中に駆動可能である。この多自由度屈曲鉗子は、アーム部にス

図 11 動物実験時の挿入点配置

ライドイン／アウトする方式で着脱容易性を実現している。

3.4 動物を用いた実験

本稿に記したスレーブ・マニピュレータと筆者らが先に開発したマスタ・マニピュレータとを用いて、マスタ・スレーブ・システムを実現した。構築したシステムを用いて豚（メス、生後 3 ヶ月、体重 30 [kg]）を対象とした胆嚢摘出実験を行った。豚を使用する理由は、人間の内臓に似ているからである。また、実験として胆嚢摘出術を行う理由は、胆嚢摘出術は内臓系に必要な基本的手技をすべて含んでいるからである。セッティングを 3 回行った場合の平均時間は 15 分であった。2 時間程度で胆嚢摘出術を完遂した。図 11 に豚の腹部に開けた挿入点の位置関係を示す。左右の術具の挿入点間の距離は 160 [mm] であり、想定していた値と同等であるが、内視鏡と術具の挿入点間の距離は 80 [mm], 85 [mm] であり、想定していた 100 [mm] よりも小さい位置に設定された。内視鏡と術具との間の距離が 100 [mm] よりも小さいとき、術中駆動部同士の干渉のため図 10 中の α 軸の可動範囲が限られることが懸念される。しかしながら、実験では α 軸可動域が問題となることなく手術を遂行できた。

4. おわりに

本稿では、人間を内側から扱うロボットの一例として、内臓系低侵襲手術システムの要求機能と制約条件を検討した。これに基づき、設計・製作したスレーブ・マニピュレータの実例を示した。また、製作したシステムを用いた遠隔動物実験とその結果について記した。本稿に記した要求機能・制約条件は、筆者らの間の長きにわたる議論の末に抽出されたものである。本稿が内臓系手術ロボットの進展、実用化に貢献することを期す。

参考文献

- [1] 生田幸士, 高橋友也, 山内宏太, 中一俊弘, 森島昭男: “低侵襲遠隔マイクロサージャリシステムの研究, —(第 7 報) 電気メス, マイクロ

- スコープを持つマイクロフィンガーファミリーの提案，開発—，第24回ロボット学会学術講演会予稿集 CD-ROM，3J32，2006.
- [2] 橋本稔，坂東和哉，若子倫美：“超弾性合金を用いた内視鏡下手術用超音波駆動メスの能動湾曲機構”，日本ロボット学会誌，vol.24，no.7，pp.845–850，2006.
- [3] 古莊純次，鈴木俊男，葛城孝哉，菊池武士：“曲がり多重チューブシステム（CMT）を用いた制御型ピンポイント穿刺システムの研究開発”，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'06，2A1-A13，2006.
- [4] 高山俊男，小俣透，二見空，赤松秀樹，大谷俊樹，小嶋一幸，高瀬浩造，田中直文：“腹腔鏡下手術のための組立式ハンド”，日本ロボット学会誌，vol.25，no.3，pp.478–484，2007.
- [5] 岸宏亮，橋爪誠，藤江正克，佐久間一郎，土肥健純：“MRI 環境対応マスタ・スレーブ型小型手術支援マニピュレータの開発”，第24回ロボット学会学術講演会予稿集 CD-ROM，3J17，2006.
- [6] 廖洪恩，鈴木宏和，松宮潔，正宗賢，土肥健純，千葉敏雄：“内視鏡下胎児手術における柔支持マニピュレータの研究”，生体医工学：日本エム・イー学会誌，vol.44，no.4，pp.643–649，2006.
- [7] 荒田純平，高橋弘樹，Phongsarn Pitakwatchara，割澤伸一，田上和夫，小西晃造，家入里志，清水周次，中島直樹，岡村耕二，藤野雄一，上田幸宏，Pornarong Chotiwan，光石衛，橋爪誠：“日本-タイ遠隔手術実験”，第24回日本ロボット学会学術講演会予稿集 CD-ROM，3J31，2006.
- [8] 前田ゆき，菅野伸彦，齋藤正伸，割澤伸一，光石衛，佐久間一郎，中島義和，米延策雄：“大腿骨折整復ロボットの臨床使用経験”，日本コンピュータ外科学会誌，vol.8，no.3，pp.230–231，2006.
- [9] 光石衛，割澤伸一，中島義和，杉田直彦，松田長親，阿部信寛，藤原一夫，守屋秀繁，鈴木昌彦，中島義雄，藏本孝一，井上貴之，長谷井稔，谷本圭司：“最小侵襲を特徴とした人工関節置換術ロボット・サージェリ・システムの開発”，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'06，1A1-A09，2006.
- [10] 小林洋，岡本淳，藤江正克：“穿刺支援ロボットにおける臓器特性を規範とした可変インピーダンス制御”，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'06，2A1-A01，2006.
- [11] 松宮潔，正宗賢，廖洪恩，千葉敏雄，土肥健純：“集束超音波照射による軟性組織の熱変性に対する血流の冷却効果についての基礎検討”，日本コンピュータ外科学会誌，vol.8，no.3，pp.262–263，2006.
- [12] 栗田雄一，飯田義親，奥出純平，Roland Kempf，金子真，三嶋弘，塚本秀利，杉本栄一郎，方倉聖基，小林賢：“コンタクトプローブ法による眼剛性評価”，第24回ロボット学会学術講演会予稿集 CD-ROM，2J21，2006.
- [13] 杉田直彦，光石衛：“骨のエンドミル加工における切削温度と冷却効果”，精密工学会誌，vol.72，no.2，pp.117–121，2006.
- [14] 家入里志，小西晃造，掛地吉弘，田上和夫，松本耕太郎，小林毅一郎，安永武史，山口将平，吉田大輔，金城直，岡崎賢，中島秀彰，橋爪誠：“da Vinciを用いたロボット手術トレーニングの有効性の検討”，日本外科学会雑誌，vol.107，p.110，2006.
- [15] 特集「創立110周年記念：医療福祉と機械工学」，日本機械学会誌，vol.110，no.1058，2007.
- [16] 木口量夫：“筋電信号を利用した運動支援ロボット”，計測自動制御学会第7回システムインテグレーション部門講演会（SI 2006），pp.688–689，2006.
- [17] 吉久智之，島圭介，辻敏夫：“筋電信号を利用した人間支援マニピュレータの制御法”，第24回日本ロボット学会学術講演会予稿集 CD-ROM，1I15，2006.

光石 衛 (Mamoru Mitsuishi)

1979年東京大学理学部物理学科卒業。1981年同大学工学部船舶機械工学科卒業。1983年同大学大学院工学系研究科機械工学専攻修士課程修了。1986年同専攻博士課程修了。工学博士。同年東京大学工学部産業機械工学科講師。この間1987年10月より1年間、ドイツ連邦共和国フランクフルト研究所IPA（Institut fuer Produktionstechnik und Automatisierung）客員研究員。1989年東京大学工学部産業機械工学科助教授。1999年より東京大学大学院工学系研究科産業機械工学専攻教授。コンピュータ統合手術支援システム，知能化生産システム，ナノバイオ・インテグレーション，ナノ・マイクロ加工などの研究に従事。IEEE，ASPE（米国精密工学会），日本機械学会（フェロー），精密工学会，計測自動制御学会，日本ヴァーチャル・リアリティー学会，情報処理学会，日本臨床バイオメカニクス学会，日本コンピュータ外科学会などの会員。（日本ロボット学会正会員）

保中志元 (Shigen Yasunaka)

2008年東京大学大学院産業機械工学専攻修士課程修了。2006年より内臓系遠隔手術支援システムの開発に従事。

杉田直彦 (Naohiko Sugita)

1996年東京大学大学院工学系研究科産業機械工学専攻修士課程修了。同年日本電気株式会社入社。2003年東京大学大学院工学系研究科産業機械工学専攻助手，2007年同准教授。現在に至る。生産工学，医療工学の研究に従事（博士（工学））。日本機械学会，精密工学会などの会員。

橋爪 誠 (Makoto Hashizume)

1979年九州大学医学部卒業，1984年同大学大学院医学研究科修了（第一病理），1998年同大学医学部第二外科助教授などを経て，1999年より同大学大学院医学研究院先端医療医学教授。現在，九州大学病院救命救急センター長なども兼任する。専門は，消化器外科学，コンピュータ外科学，災害救急医学，門脈圧亢進症。2007年には，MR画像誘導下小型手術用ロボティクスシステムで「今年のロボット」大賞2007審査委員特別賞を受賞した。