

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 7 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2011～2015

課題番号：23226006

研究課題名(和文)超微細手術のための汎用プラットフォーム開発とそれを支える超精密テクノロジーの追求

研究課題名(英文) Super-microsurgical robotic platforms and their super-precise robotic technologies

研究代表者

光石 衛 (Mitsuishi, Mamoru)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授

研究者番号：90183110

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 168,640,000円

研究成果の概要(和文)：従来の手術では達成できない高度治療を実現するため、超低侵襲・超微細・超精密手術を可能にするスーパー・マイクロ・サージェリ支援技術に関する研究を行った。具体的には、(1)軟組織対応手術ロボットとスーパー・マイクロ技術の確立、(2)硬組織対応手術ロボットとスーパー・マイクロ技術の確立、(3)血管内治療用マイクロロボットについて研究を行った。複数の手術分野に共通な汎用的な要素技術の開発を行い、実際のロボットに実装して評価した。

研究成果の概要(英文)：Super-microsurgical robotic technologies were studied to realize highly advanced operation that cannot be performed with current technologies. Specifically, the followings were studied; (1) surgical robotic platform for soft tissues and its super-microsurgical technologies, (2) surgical robotic platform for hard tissues and its super-microsurgical technologies, and (3) intravascular surgical robotic system. Versatile technologies that can be used in several applications were developed, implemented to actual robotic systems, and evaluated.

研究分野：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

キーワード：知能機械 手術ロボット 精密加工 マイクロロボット 超精密手術

### 1. 研究開始当初の背景

本研究は、従来の手術では達成できない高度治療を社会に普及させることを目指す。医師の手の動作では実現不可能な超低侵襲・超微細・超精密手術を行うスーパー・マイクロ・サージェリを実現するロボット技術についての研究を行う。

#### (1) スーパー・マイクロ・サージェリによる高度治療と術後回復の早期化

従来の手術ロボットは医師にとって困難な作業を容易にする目的で開発されてきた。しかしながら、手術の結果が患者にとって同等であれば、患者にとっての手術ロボット適用のメリットはない。治療効果への貢献のためには医師の手の動作では実現不可能なスーパー・マイクロ・サージェリ、すなわち、超低侵襲・超微細・超精密手術を行うことにより、術後の機能回復を高めることが望まれている。

#### (2) 我が国が得意とするスーパー・マイクロ・サージェリを支える技術の確立

スーパー・マイクロ手術を行うためには、超精密部品の加工や、ロボットのインテリジェンスを活用したナビゲーション・自動制御が必要となる。我が国が得意とする超精密ロボティク技術・加工技術を生かしたデバイスの開発がこの分野での国際競争力を高めると期待される。

#### (3) 手術ロボット汎用化によるコストの低減

従来の手術ロボット研究は、対応部位・疾患別に研究が行われており、開発されるロボット数は増える一方である。このような状況は要素技術開発の遅れと手術ロボットのコスト上昇の原因となっており、早急に解決しなければならない。複数の部位・疾患に適用可能な汎用手術ロボットの開発が急務である。

### 2. 研究の目的

上記のような背景を踏まえ、本研究ではスーパー・マイクロ・サージェリ技術の確立、および、それを基礎としたプラットフォームの開発を行う。脳外科、眼科、小児外科、整形外科、血管内手術の各手術領域を対象としたスーパー・マイクロ・サージェリ技術を開発し、それらに必要な要素技術として超精密ロボティク技術・超精密加工技術を確立する。これらの成果をもとに軟組織対応手術ロボット、硬組織対応手術ロボット、血管内治療用マイクロロボットの3つを中心として複数の分野で使用可能な技術の研究する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 軟組織対応手術ロボットとスーパー・マイクロ技術の確立

脳外科、眼科、小児外科を主な対象領域と

し、軟組織手術に対応可能なように、自由度の増加、操作性の向上、モーションスケール(手の動きを縮小してロボットに伝達)による振戦(手振れ)の除去を特徴とするシステムを開発した。特に、極細径の多自由度鉗子マニピュレータを開発し、軟組織の剥離や縫合、1mm以下の血管吻合を可能とする技術を研究した。また、将来的な手術ロボットの知能化を見据えて、手術タスクの一部自動化を目的とした研究を行った。

#### (2) 硬組織対応手術ロボットとスーパー・マイクロ技術の確立

整形外科領域における骨切りを主な対象とした半自動型ロボットを開発し、術前画像を用いたプランニングと精密なレジストレーション、低侵襲を実現する工具軌道の自動生成、切削パラメータの最適設定、ロボットの超精密位置決めと切削力を考慮した制御、生体組織適合型切削を開発した。骨の微視的な構造を考慮しつつ、温度を上昇することなく、かつ、骨へのダメージを可能な限り低減する加工方法を研究した。

#### (3) 血管内治療用マイクロロボット

治療用デバイスの研究開発は、さらなる低侵襲化と細部・深部へのアプローチの方向に進みつつあり、その究極は、血管内を自由に泳動可能なマイクロロボットである。本研究では外部磁場を用いて血管内で数ミリのサイズのロボットを任意の方向へ移動させる技術を研究した。

### 4. 研究成果

#### (1) 軟組織対応手術ロボットとスーパー・マイクロ技術の確立

軟組織対応手術ロボット用のツールとして、軸径3.5mm、屈曲・屈曲先回転・把持の3自由度を有する多自由度ロボット鉗子を開発した(図1)。この機構は狭小空間において針の刺入を容易に行うことができる機構であり、手持ち型としてもロボットに搭載しても使用できるようにすることで汎用性を高めた。脳神経外科、小児外科を対象として刺入実験により操作性を確認した。例えば、脳深部を想定した狭小の作業空間内において周囲との衝突を避けながら0.3mmの人工血管へ針を刺入することに成功した。

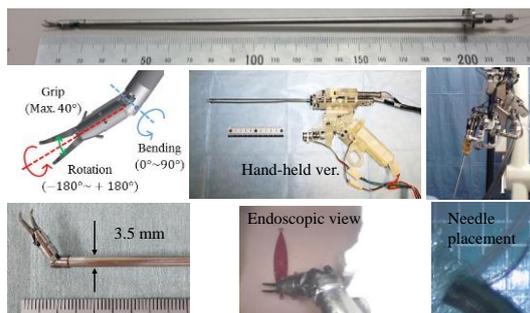


図1 多自由度ロボット鉗子

また、軟組織の操作に共通する要素技術として、画像処理によるロボット術具や針の自動認識技術及びトラッキングの技術(図2)、また、その結果を用いたロボット術具の自動誘導技術を開発した。これを微細血管などの対象物への自動位置決め技術として応用し、その性能を評価した。

ロボット術具トラッキングの例では、術具の姿勢ごとに術具の形状を平面に投影した輪郭の形状をデータベースとして事前に登録しておき、そのデータベースとリアルタイムの顕微鏡画像から抽出した術具輪郭との一致度を計算することにより、リアルタイムでの術具の位置と姿勢を検出する方法を開発した。この手法は適用する術式を選ばず、かつ、様々な術具形状にも適用可能であり、針など術具以外の検出にも適用可能な極めて汎用的な手法である。また、術具同士が重なって輪郭が正確に抽出できない場合(オクルージョン)に対してロバストな手法とするため、提案する画像処理による術具先端位置検出の結果とロボットに搭載したエンコーダの情報から計算した術具先端位置の情報を統合して正確に術具を検出する方法を開発した。画像処理のみを用いた場合の術具先端位置の検出誤差は 21.02 pixel, ロボットに搭載したエンコーダから算出した位置情報を用いた場合の先端位置の検出誤差は 17.91 pixel であるが、提案手法では誤差は 13.5 pixel となり、高い精度での検出を可能にした。

提案した手法は特に、脳神経外科、眼科、小児外科などの術野や作業空間、視野が狭小であり、術具が視野外に頻繁に移動するような場合や高い位置決め精度が求められるがロボットのたわみや組み立て誤差の影響で機構学のみでは位置を正確に検出できない場合に極めて有効な手法であり、汎用的な手法である。この手法の開発により、従来のマスタ・スレーブ型手術ロボットのように医師の動作を縮小して再現するだけでなく、手術の状況を自動で認識し、認識結果に基づいた自動かつ知的な手術支援へ発展できる見通しを得ることができた。

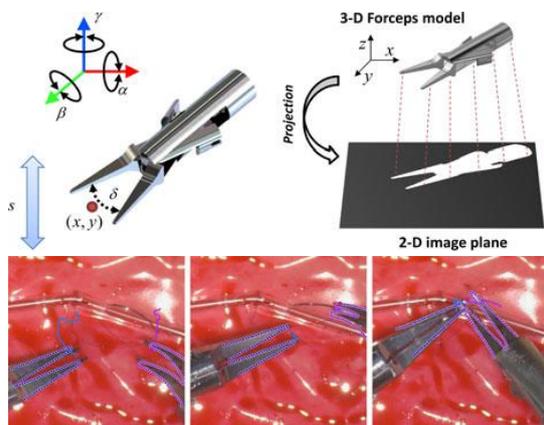


図2 ロボット術具の自動トラッキング

## (2) 硬組織対応手術ロボットとスーパー・マイクロ技術の確立

骨切除ロボットを用いた人工膝関節置換術支援システムにおいて、ロボットの自重によるたわみを補正する方法を提案し、ロボット工具先端動作の並進誤差を 1mm, 角度誤差を 1 度以内に抑制するアルゴリズムを開発した。開発したアルゴリズムはデザインの異なるプラットフォームにも適用可能な汎用的な手法である。

並行して骨加工現象をシミュレーションおよび実験により解析する研究を行った(図3)。骨加工現象の解析結果に基づき、骨切削加工時の熱の発生を抑えつつ高精度で骨を加工することを目的として、工具の振動を効果的に用いる骨切除加工の技術を開発した。骨の繊維状の構造を考慮した切削や亀裂進展の現象を解析したうえでの開発を行っており、膝の骨以外にも広く応用可能な手法である。

また、骨切除ロボット操作性を向上するための研究を行い、ロボットの半自動制御を実現するプラットフォームの開発を行った(図4)。開発した試作品について、整形外科医による操作性の評価を行った。

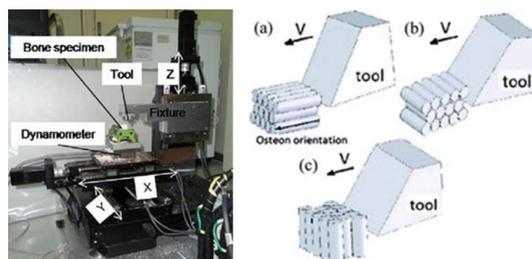


図3 骨加工現象の解析

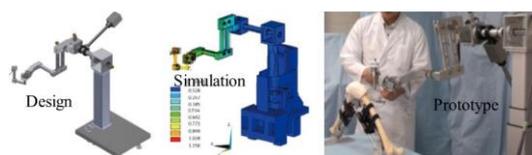


図4 操作性を考慮したプラットフォーム

## (3) 血管内治療用マイクロロボット

脳動脈瘤に対するカテーテル手術を対象として研究を行った。血管中のカテーテルの先端に磁性体で構成されるマイクロロボットをとりつけ、そのマイクロロボットを体外から外部磁場により誘導する手法を提案した。従来のカテーテル手術では血管の分岐を選択しながらカテーテル先端を押し進めることが困難であるが、対外からカテーテル先端位置を誘導できれば、従来の手法ではたどり着けなかった脳深部の動脈瘤までカテーテルを誘導することができる。まずは外部磁場による駆動に必要な制御を開発するため、小型の外部磁場発生システムを開発した(図5)。開発したシステムは、2軸の外部磁場発生コイル、模擬血管、模擬血管内の流量を制御するポンプ、模擬血管内のマイクロロボットの

動作を自動で解析する画像処理システムなどから構成される。

直径 3 mm の非対称な分岐流路における正確な分岐制御を目的とした実験を行い (図 6), 0.3 m/s の非定常流中において直径 1 mm の磁性体の位置を制御した。分岐角度が 30 度の場合は 90% の成功率であったが, 分岐角度が 45 度の場合は成功率が 50% であった。今後は, より大型のコイルを用いた更に正確な位置決め制御が必要である。



図 5 実験セットアップ

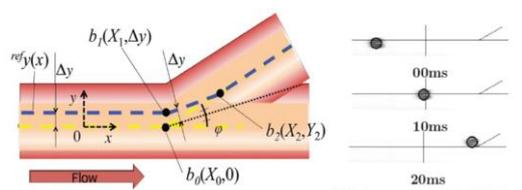


図 6 分岐方向の制御の実験

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 13 件)

- ① Osa Takayuki, Naohiko Sugita, Mamoru Mitsuishi, Online Trajectory Planning and Force Control for Automation of Surgical Tasks, IEEE Transactions on Automation Science and Engineering (採択) 査読有.  
DOI:10.1109/TASE.2017.2676018
- ② Takayuki Osa, Naohiko Sugita, Mamoru Mitsuishi, Hybrid Rate-Admittance Control with Force Resection for Safe Tele-operated Surgery, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics (採択) 査読有.
- ③ Osa Takayuki, Christian Farid Abawi, Naohiko Sugita, Hiroataka Chikuda, Shurei Sugita, Takeyuki Tanaka, Hirofumi Oshima, Toru Moro, Sakae Tanaka, and Mamoru Mitsuishi, Hand-held bone cutting tool with autonomous penetration detection for spinal surgery, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics:20 (6):3018-3027, 2015. 査読有.  
DOI: 10.1109/TMECH.2015.2410287
- ④ Shinichi Tanaka, Kanako Harada, Yoshiki Ida, Kyohei Tomita, Ippei Kato, Fumihito Arai, Takashi Ueta, Yasuo Noda, Naohiko Sugita, Mamoru Mitsuishi, Quantitative assessment of manual and robotic microcannulation for eye surgery using new eye model,

The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery, 11(2):210-217, 2015. 査読有.  
DOI: 10.1002/rcs.1586

- ⑤ Young Min Baek, Shinichi Tanaka, Kanako Harada, Naohiko Sugita, Akio Morita, Shigeo Sora, and Mamoru Mitsuishi, Robust visual tracking of robotic forceps under a microscope using kinematic data fusion, IEEE/ASME Transaction of Mechatronics, 19(1), 278 - 288, 2014. 査読有.  
DOI:10.1109/TMECH.2012.2230402
- ⑥ Mamoru Mitsuishi, Akio Morita, Naohiko Sugita, Shigeo Sora, Ryo Mochizuki, Keiji Tanimoto, Young Min Baek, Hiroki Takahashi, and Kanako Harada, Master-slave robotic platform and its feasibility study for microneurosurgery, The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery, 9(2):180-189, 2013. 査読有.  
DOI: 10.1002/rcs.1434  
DOI:10.1080/10910344.2013.837355

[学会発表] (計 34 件)

- ① Shinichi Tanaka, Young Min Baek, Kanako Harada, Naohiko Sugita, Akio Morita, Shigeo Sora, Hirofumi Nakatomi, Nobuhito Saito, Mamoru Mitsuishi, “Robust Forceps Tracking using Online Calibration of Hand-Eye Coordination for Microsurgical Robotic System”, 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2014), pp. 3529-3535, Chicago, IL, USA, September 14-18, 2014.
- ② Takuro Okubo, Kanako Harada, Masahiro Fujii, Shinichi Tanaka, Tetsuya Ishimaru, Hirofumi Nakatomi, Shigeo Sora, Akio Morita, Naohiko Sugita, Mamoru Mitsuishi, “Hand-held Multi-DOF Robotic Forceps for Neurosurgery Designed for Dexterous Manipulation in Deep and Narrow Space”, 36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC2014), pp. 6868-6871, Chicago, IL, USA, August 27-31, 2014.
- ③ Takayuki Osa, Kanako Harada, Naohiko Sugita, Mitsuishi, Mamoru, “Trajectory Planning under Different Initial Conditions for Surgical Task Automation by Learning from Demonstration ” 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2014), pp.

6507-6513, Hong Kong, China, May 31 - June 7, 2014.

- ④ 柳澤 晶, 原田 香奈子, 杉田 直彦, 光石 衛, “脳動脈瘤治療を目的とした血管内医用マイクロロボットの外部磁場制御に関する研究”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014, 富山市総合体育館, 富山, 2014 年 5 月 25-29 日
- ⑤ 柳澤 晶, 原田 香奈子, 杉田 直彦, 光石 衛, “血管内医用マイクロロボットの分岐制御に関する研究”, 第 5 回マイクロ・ナノ工学シンポジウム, 6AM2-D-7, 仙台国際センター, 仙台, 2013 年 11 月 5-7 日
- ⑥ Takayuki Osa, Takuto Haniu, Kanako Harada, Naohiko Sugita and Mamoru Mitsuishi, “Perforation Risk Detector Using Demonstration-based Learning for Teleoperated Robotic Surgery”, 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2013), pp. 2572 - 2577, Tokyo Big Sight, Tokyo, Japan, 3-7 November, 2013.
- ⑦ Yusuke Kurose, Young Min Baek, Yuya Kamei, Shinichi Tanaka, Kanako Harada, Shigeo Sora, Akio Morita, Naohiko Sugita, Mamoru Mitsuishi, “Preliminary Study of Needle Tracking in a Microsurgical Robotic System for Automated Operations”, Proceedings of 2013 13th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2013), pp. 627 - 630, Gwangju, Korea, 20-23 October, 2013.

[産業財産権]

○出願状況 (計 2 件)

名称: 内境界膜剥離モデル

発明者: 新井史人, 加藤一平, 光石衛, 杉田直彦, 原田香奈子, 田中真一, 野田康雄, 上田高志

権利者: 名古屋大学, 東京大学

種類: 特許

番号: PCT/J P 2 0 1 5 / 0 5 8 9 5 9

出願年月日: 2 0 1 5 年 3 月 2 4 日

国内外の別: 国外

名称: 内境界膜剥離モデル

発明者: 新井史人, 加藤一平, 光石衛, 杉田直彦, 原田香奈子, 田中真一, 野田康雄, 上田高志

権利者: 名古屋大学, 東京大学

種類: 特許

番号: 特願 2 0 1 4 - 7 4 6 9 4

出願年月日: 2 0 1 4 年 3 月 3 1 日

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ

<http://www.nml.t.u-tokyo.ac.jp/research.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

光石 衛 (MITSUISHI, Mamoru)  
東京大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 90183110

(2) 研究分担者

杉田 直彦 (SUGITA, Naohiko)  
東京大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 70372406

森田 明夫 (MORITA, Akio)  
日本医科大学・医学研究科・教授  
研究者番号: 60302725

阿部 信寛 (ABE, Nobuhiro)  
川崎医科大学・医学部・教授  
研究者番号: 60302725

岩中 督 (IWANAKA, Tadashi)  
東京大学・医学部附属病院・名誉教授  
研究者番号: 90193755

尾崎 敏文 (OZAKI, Toshifumi)  
岡山大学・医歯(薬)学総合研究科・教授  
研究者番号: 40294459

藤原 一夫 (FUJIWARA, Kazuo)  
岡山大学・医歯薬学総合研究科・准教授  
研究者番号: 00346438

鈴木 昌彦 (SUZUKI, Masahiko)  
千葉大学・フロンティア医工学センター・教授  
研究者番号: 10312951

中島 義和 (NAKAJIMA, Yoshikazu)  
東京大学・工学系研究科・准教授  
研究者番号: 40343256

原田 香奈子 (HARADA, Kanako)  
東京大学・工学系研究科・准教授  
研究者番号: 90193755

上田 高志 (UEDA, Takashi)  
東京大学・医学部附属病院・登録研究員  
研究者番号: 90631573