

[研究助成 (A)]

脳活動の試行差と個人差に対応した手術支援ロボットの最適化設計

Optimization of surgical robot applying trial and individual difference in Brain activity

2181028



研究代表者

早稲田大学
創造理工学部 総合機械工学科

助教 三浦 智

[研究の目的]

マスタ・スレーブ型手術支援ロボットは、低侵襲性に優れ患者の早期回復が可能であるため、国内外で 300 万件以上の症例に用いられている。ロボット手術は、患者体内に挿入したロボット（スレーブ）を医師が内視鏡の映像を見ながら手元のコントローラ（マスタ）で操作して手術するマスタ・スレーブ方式で主に行われる。医師は手の体性感覚によるマスタの動きと視覚で確認したスレーブの動きを整合させて直感的に操作する必要がある。この視覚と体性感覚の整合性は hand-eye coordination と呼ばれ、眼と手の代わりである内視鏡と鉗子の位置決定や構造設計などに重要視される。狭小な術空間で人間の身体とは異なる構造のロボットを直感的に操作するには、医師の知覚する hand-eye coordination を客観的・定量的に評価した設計手法が必要である。

これまで申請者は、手術支援ロボット操作者の脳活動を計測し、医師の知覚する hand-eye coordination を評価してきた。これまでの研究成果から、ロボットが直感的に操作可能であるほど特定の脳活動が強く活性化することがわかった。よって、脳活動が最も活性化するロボットの構造の導出が望ましいが、脳活動に限らず、人間の生体情報には試行毎・人毎に応じてバラツキが生じるため、ロボットの設計案

（最適解）が定まりにくい。

従来研究でも医師のモーションや視線などを計測しモデル化されているが (Guang-Zhong Yang, 2012), 人間のバラツキに対応した実用的なロボットを必ずしも開発できていない。人間の生体情報における試行毎・人毎のバラツキに応じた設計手法が必要であるという核心的な問題がある。

脳活動における人の試行毎・人毎のバラツキは、hand-eye coordination の認識の違いによって生じると考えられる。そこで、マスタ側、スレーブ側、ヒト側の目と手の相互的な位置関係を変化させたときの、脳活動の変化を光トポグラフィで計測し、その傾向を明らかにする。実験では、モニタとマスタの位置をそれぞれ変化させ、画面内のスレーブ側の内視鏡とマニピュレータの位置関係は固定した。

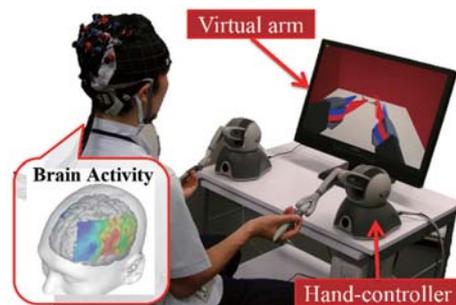


図1 VR ロボット手術時の脳活動計測

[研究の内容, 成果]

実験では、仮想環境（VR）内で手術支援ロボットを模したマニピュレータを、磁気式位置計測装置を用いて、被験者は操作した。磁気式位置計測装置のコイルは被験者の指先に取り付けられ、被験者は指先を動かすことで、VR内のマニピュレータを操作することができる。磁気式位置計測装置を用いた理由は、特定のコンソールの構造に依らないで、コンソールやモニタの配置を導出できるためである。

操作時における被験者の脳活動を、光トポグラフィを用いて計測した。光トポグラフィはfMRIのような磁場を必要とせず、EEGのような体表の電位に影響されないために選択した。

計測部位は hand-eye coordination に関係のある部位とされる頭頂間溝である。頭頂間溝は視覚野と体性感覚野の間に位置し、視覚と体性感覚の整合性を司る。光トポグラフィの分解能を考慮し、頭頂間溝周辺部位の反応を測定した。実験条件は、コンソールの配置を5条件、モニタの配置を3×3の9条件で実施した。コンソールの配置は、指先にコイルがついているため、磁気式位置計測装置のジェネレータの位置を変更した。また、モニタの配置は、被験者の目の位置に対して、高さや奥行きを変更した。

実験の結果、モニタとコンソールの配置は、ある特定の位置で有意に頭頂間溝の活動量が賦活した。その特定の位置には二つの傾向があった。一つは、被験者の手の延長線上にあたかも

仮想空間内のマニピュレータが見える場合である。これを「身体の延長化」という。一方、もう一つは、被験者の手が仮想空間内のマニピュレータを重ねて見える場合である。これを「乗り移り」という。コンソールとモニタの配置は、「身体の延長化」もしくは「乗り移り」を想起させるような場合に直感的になりやすいということがわかった。

[今後の研究の方向, 課題]

当研究成果は、手術支援ロボットのみに限らず、遠隔で操作する多様なロボットに適用可能である。また、当研究で提案した脳活動を用いた評価手法は、移動支援機器の設計開発などにも応用可能であることを、実験から確認した。今後、他の設計因子に対しても、最適化手法を交えて決定する予定である。

また、今後の研究の方向性として、脳活動だけでなく作業成績との両立を検討したうえでの設計を試みる。脳活動だけでは抽象的なモデルベースとなるが、作業成績によるAI化だけだとデータベースすぎるといふ双方の弱点を補うためである。特に、人間の作業成績および脳活動については、バラツキが生じるために、信頼性設計理論と呼ばれる統計的な最適化手法を用いる。

なお、最適化においては、構造設計だけでなく制御手法の最適化を実施する。マニピュレータの各関節の剛性・粘性を変化させることで、個人にとって動かしやすいマニピュレータの軌道を実現する。

さらに、当手法を用いて、独自にインタフェースを開発中である。このインタフェースは多様なロコモーションロボットを操作可能な仕様になっており、力覚フィードバックなどの開発を進めている。



図2 実験の様子

[成果の発表, 論文等]

- [1] Satoshi Miura, Yuki Yokoo, Yasutaka Nakashima, Yoshikazu Ogaya, Misato Nihei, Takeshi Ando, Yo Kobayashi, Masakatsu G. Fujie, "Determination of the Gain for a Walking Speed Amplifying Belt Using Brain Activity", IEEE Transactions on Human-Machine Systems, Vol. 50, No. 2, pp. 154-164, 2020 (Impact Factor 3.332)
- [2] Ayako Torisaka, Shoichi Hasegawa, Satoshi Miura, Victor Parque, Tomoyuki Miyashita, Hiroshi Yamakawa, M. C. Natori, "Optimization and demonstration of 3D self-assembly system of hierarchical modular space structure using electromagnet", Proceedings of The American Institute of Aeronautics and Astronautics Science and Technology Forum and Exposition (AIAA SciTech Forum), Orlando, Florida, Jan. 6-10, 2020
- [3] Satoshi Miura, Kazuya Kawamura, Yo Kobayashi, Masakatsu G. Fujie, "Using Brain Activation to Evaluate Arrangements Aiding Hand-Eye Coordination in Surgical Robot Systems", IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol. 66, No. 8, pp. 2352-2361, 2019 (Impact Factor 4.288)
- [4] Satoshi Miura, Rikako Saito, Victor, Parque, Tomoyuki Miyashita, "Design factors for determining the radula shape of Euhadra Peliomphala", Scientific Reports, Vol. 9, No. 749, 2019 (Impact Factor 4.122)
- [5] Satoshi Miura, Hidekazu Ishiuchi, Yuta Shintaku, Victor Parque, Ayako Torisaka, Tomoyuki Miyashita, "Enhanced frequency analysis on a vibrated tumor with a compression cylinder", ROBOMECH Journal, Vol. 6, No. 10, 2019
- [6] Satoshi Miura, Ryota Fukumoto, Yo Kobayashi, Masakatsu G. Fujie, "Modeling optimizes the effect of the vertical stripe illusion for foot clearance on upstairs", Journal of Biomechanical Science and Engineering (JBSE), Vol. 14, No. 1, 2019
- [7] Sojuro Nakano, Satoshi Miura, Victor Parque, Ayako Torisaka, Tomoyuki Miyashita, "Data Assimilation Using the Particle Filter for Online Identification of Organ Properties", IET The Journal of Engineering (JOE), Vol. 2019, No. 14, pp. 517-521, 2019
- [8] Ayako Torisaka, Yuta Shintaku, Satoshi Miura, Victor Parque, Tomoyuki Miyashita, "Study on detection of material difference deeply buried in a soft tissue using impact oscillation under forced displacement", 8th International Conference on Mechanics of Biomaterials and Tissues (ICMOBT), Waikoloa Beach, Hawaii, USA, 15-19, Dec. 2019
- [9] Ayako Torisaka, Kohei Eguchi, Satoshi Miura, Victor Parque, Tomoyuki Miyashita, "Runnability Improvement of the moon rover with leg-circle transformable wheel", 30th International Conference on Adaptive Structures and Technologies (ICAST), Montreal, Canada, 7-11, Oct. 2019
- [10] Satoshi Miura, Kazuya Kawamura, Masakatsu Fujie, Shigeki Sugano, Tomoyuki Miyashita, "Development of Virtual Pipe Simulation System for Inspection Robot Design", Proceedings of the International Conference on Engineering Design (ICED), Delft, The Netherland, 5-8, Aug. 2019 (Top 10% Accepted Papers Award)
- [11] Victor Parque, Kazuhiro Honobe, Satoshi Miura, Tomoyuki Miyashita, "On Vehicle Evaluation and Design using Data Envelopment Analysis with Hierarchical Concepts", Proceedings of the International Conference on Engineering Design (ICED), Delft, The Netherland, 5-8, Aug. 2019 (Top 10% Accepted Papers Award)
- [12] Kazuki Saito, Ayako Torisaka, Victor Parque, Satoshi Miura, Tomoyuki Miyashita, "A Study of Angular Momentum Unloading Strategy of Reaction Wheel by Solar Radiation Pressure Using Membrane Structure", Proceedings of the 5th International Symposium on Solar Sailing, Aachen (ISSS), Germany, 30 July-2 August, 2019
- [13] Tsuyoshi Sakuma, Satoshi Miura, Tomoyuki Miyashita, Masakatsu G. Fujie, Shigeki Sugano, "Development of Human-Like Driving Decision Making Model based on Human Brain Mechanism", Proceedings IEEE/SICE International Symposium on System Integrations (SII), Jan. 14-16, 2019
- [14] Ayako Torisaka, Kohei Ogawa, Satoshi Miura, Victor Parque, Tomoyuki Miyashita, Hiroshi Yamakawa, "Study on in-plane and out-of-plane deformation considering elastic plasticity of membrane", Proceedings of The American Institute of Aeronautics and Astronautics Science and Technology Forum and Exposition (AIAA SciTech Forum), San Diego, California, Jan. 7-11, 2019
- [15] Victor Parque, Kohei Ogawa, Satoshi Miura, Tomoyuki Miyashita, "Spiral Folding of Thin Films with Curved Surface", Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), Seagaia Convention Center, Miyazaki, Oct. 7-10, 2018
- [16] Tsuyoshi Sakuma, Satoshi Miura, Tomoyuki Miyashita, Masakatsu G. Fujie, Shigeki Sugano, "Development of Driving Intention Prediction System

- Based on Human Cognitive Mechanism”, Proceedings of IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR' 18), Kandima, Maldives, Aug. 1-5, 2018
- [17] Satoshi Miura, Yuta Shintaku, Hidekazu Ishiuchi, Victor Parque, Tomoyuki Miyashita, “Enhanced Frequency Difference of Tumor inside Vibrated Tissue by a Compression Cylinder”, Proceedings of the 40th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC' 18), Honolulu, Hawaii, July 17-21, 2018
- [18] Satoshi Miura, Naoya Tsuda, Victor Parque, Tomoyuki Miyashita, “Spiral Folded Adhesive Plaster Optimization for Laparoscopic Surgery”, Proceedings of the 40th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC' 18), Honolulu, Hawaii, July 17-21, 2018
- [19] Victor Parque, Masato Kumai, Satoshi Miura, Tomoyuki Miyashita, “On Parametric Excitation for Exploration of Lava Tubes and Caves”, Proceedings of the International Conference on Computational Science (ICCS), Jun. 11-13, 2018 (Acceptance rate 28%)