

平成 22 年 5 月 13 日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2007 年度 ～ 2009 年度

課題番号：19360190

研究課題名（和文）：多指ハプティックインターフェイスによる手技伝達に関する研究

研究課題名（英文）：Research on hand skill transfer using a multi-fingered haptic interface robot

研究代表者：川崎 晴久（KAWASAKI HARUHISA）

岐阜大学・工学部・教授

研究者番号：40224761

研究成果の概要（和文）：

医療における触診や鉗・メスなどの道具を操作する手技は、熟練を要する。手技の学習では、見様見真似が伝統的手法であるが、訓練者には難しい。この問題の解決に向けて、バーチャルリアリティ環境に生体モデルを構築した手技の学習システムの研究があるが、これまで5本の指を対象とした研究は皆無である。こうした背景をもとに、多指ハプティックインターフェイスによる手技伝達に関する基礎的な研究を行ない、人間の指先での3次元的な力の知覚能力を明らかにし、人間とインターフェイスのダイナミクスを考慮した制御法、手技の伝達に効果的な手法、道具デバイスの可操作性を最適とする装着法、摩擦を考慮した触覚レンダリング法等を研究開発した。

研究成果の概要（英文）：

Considerable hand skill is required to palpate a human body during a medical examination or to manipulate tools such as scissors and surgical knives during surgery. The hand skill transfer approach based on observation and imitation is a traditional approach, but it is very difficult for trainers because they are not given quantitative and evincive information. To solve this issue, methods for learning human hand skills in a virtual reality (VR) environment have been researched. To date, most of the research has not involved multi-fingered hand skills. We have researched hand skill transfer using a multi-fingered haptic interface robot. As the research results, we have presented the perceptive faculty of three dimensional forces at human fingertip, a force control method that combines the dynamics of human fingers and a haptic interface, a hand skill transfer method and so on.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|------------|-----------|------------|
| 平成19年度 | 5,300,000 | 1,590,000 | 6,890,000 |
| 平成20年度 | 4,400,000 | 1,320,000 | 5,720,000 |
| 平成21年度 | 4,400,000 | 1,320,000 | 5,720,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 14,100,000 | 4,230,000 | 18,330,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：ハプティックインターフェイス，力覚，手技伝達，VR訓練システム

1. 研究開始当初の背景

医療における触診や鉗・メスなどの道具を操作する手技は、熟練した先輩から長期にわたりその技術のトレーニングや指導を受けて学んできている。また、実施訓練においては、ボランティアの協力のもと触診等の手技を訓練し、時には患者を対象に半ば訓練を兼ねた治療が行われる。医学知識を伝える学習では、知識が文字や言語などを通じて直接伝達されるため、長期にわたるトレーニングは一般に必要としない。しかし、手技を伝える学習では、手の動き、指先での力の使い方、手の感触を伝えなければならないが、このための直接的手段がない。医学における手技訓練では、先輩医師（以後熟練者と呼ぶ）は医学生（以後訓練者と呼ぶ）に手の動きとその感触を伝え、訓練者が実行する様子を熟練者が観測して、操作の仕方、力のかけ方の間違いを見出し、これを訓練者にフィードバックする。訓練者は、熟練者の操作を見様見真似で手の動きを学ぶ。一方、こうした手技の学習での伝統的な手法の一つとして書道教室などにみられる、熟練者が訓練者の手をとって操作する方法がある。これは、熟練者が力のかけ方、手の動きを熟練者の手を介して訓練者に伝える。これらの従来からある手技の伝達法には、手技情報の精度に問題があり、訓練者による習得を難しくしている。また、触診等の実施訓練では、ボランティアが様々な病状を示せるものではないので、リアルな患者状態が提示できず、学べる触感も限られる。

こうした問題の解決に向けて、バーチャルリアリティ環境に生体モデルを構築した手技の学習システムの研究が近年開始されている。バーチャルリアリティを用いた手技伝達システムの特徴は、

- 1) 熟練者がその場になくても教示を受けられ、また、同時に複数の訓練者が教示を受けることもできる。
- 2) 記録した熟練者の手の動き、力の操作を記録でき、画面とハプティクスにより記録データを訓練者に提示できるので、正確な情報伝達ができる。
- 3) 訓練者の技能レベルに応じた訓練メニューが可能で、学習の効果も提示できるなどがある。しかし、従来のバーチャルリアリティを用いた手技伝達システムでは、5本の指先に力伝達する研究が皆無であった。

2. 研究の目的

触診や手術の手技は多くの場合5本の指を用いて行われる。そこで、本研究では、熟練者の手技を訓練者に効果的に伝達するため、人間の指先で力の知覚能力の解明を基礎に、5本の指先に力覚を提示できる多指ハプティックインターフェイスを用いた手技伝達法を研究すること目的としている。

3. 研究の方法

報告者の研究グループは、図1に示す人間の5本の指先に力感覚を提示するハプティックインターフェイスロボット HIRO を研究開発してきた。HIRO は人間の手に対抗して設置され、指ホルダーを介して人間の指と連結される。HIRO の各指は3自由度あり、腕は6自由度ある。指ホルダーに付いている鉄球は永久磁石で吸引され受動球関節を構成する。これにより、広い作業空間で人間の5本指に力感覚を提示でき、装着時の圧迫感が殆ど無く、異常動作時には手を引き抜くことでインターフェイスから安全に離れられる。このような対向型の多指ハプティックインターフェイスは世界に例がなく、国際会議 IEEE Haptic Symposium 2006 の Proceedings の裏表紙を飾り注目を受けている。



図1 多指ハプティックインターフェイスロボット HIRO

この多指ハプティックインターフェイスを用いて、医療における乳癌触診の訓練を目的とした乳癌触診訓練システムを研究開発している。乳癌検査ではマンモグラフィによる精密検査が今後主流になるが、触診による検査も継続的に必要とされている。しかし、ボランティアによる訓練は年々厳しくなっている。そこで、乳房の生体モデルを構築し、開発した HIRO による訓練システムの

研究開発を試みた。訓練システムの試作にあたり、学習用シリコン乳房モデルからの乳房のモデル化、乳房の押し付け力と変形量に関する非線形特性を近似計算する有限要素法に基づく実時間計算アルゴリズムを開発し、乳癌触診の模擬システムを試作した。しかしながら、熟練の医者による手技をどのように訓練者に提示するかが大きな課題である。熟練者の5本の指先の空間軌道と力の大きさと方向を映像ディスプレイに表示を試みたが、熟練者の5本の指先の位置情報と力情報を同時に見て、訓練者が自分の指先の位置と力を修正することは極めて困難であることが判明した。そこで、人間の指先での3次元の力の知覚能力を解明し、熟練者の力を離散的に HIRO を用いて提示することで訓練者が熟練の手技を学ぶ方法を基本に、手技伝達法を開発する。

4. 研究成果

多指ハプティックインターフェイスによる手技伝達に関する次の研究により、次の成果を得た。

(1)人間の力覚の空間的認知能力の評価

手技の伝達では、人間の空間的な力に対する方向と大きさの感度などの認知能力を評価する必要がある。そこで、人間の力覚の空間認知能力を実験評価し、指の前面方向は高い精度で力の大きさを認識するが側面方向では減少することを明らかにした。図2は、知覚特性の一例として示指の側面内での力の知覚特性を示したもので、力の方向による上限と下限の弁別域の差が大きいことを示す。

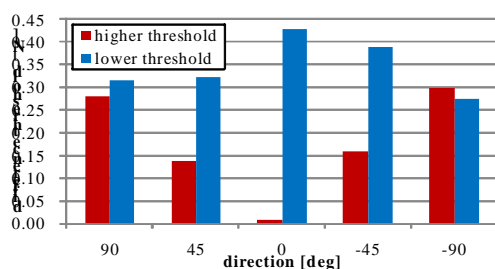


図2 力の知覚特性の例

(2)力覚提示法と5本指による評価実験

熟練者と訓練者の5本指の位置と指先力を画像で表示すると、訓練者にとって注視する箇所が多くなり、力覚の学習が難しい。そこで、操作者に熟練者の力を短い時間提示し、残りの時間は訓練者の操作力を提示する方法の有効性の検証に向けて、熟練者の力を提示する時間、提示の周期、誤差に応じた提示方法等を5本指で詳細に基礎実験を行った。その結果、連続的な力と断続的な力に対する

知覚能力に大差がないことが明らかになり、提案手法が効果的であることを示した。しかし、力を提示する目標値が大きく変化するとき、多指ハプティックインターフェイス HIRO が振動的になる。この振動の低減方法として図3に示すように目標変化量を制限する方法を提案し、実験によりその有効性を確認した。また、手技の伝達では熟練者の指先の空間的な位置と力を同時に提示するが、情報量が多くなると操作者は混乱し、同時に5本指でなく適当に選んだ少ない指での手業伝達が有効であることを実験的に検証した。

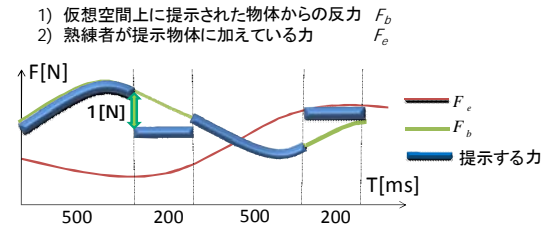


図3 熟練者の力の提示方法

(3)遠隔での手技伝達におけるシステム構成

バーチャルリアリティ環境での触診訓練システムでは、訓練者の手の位置に仮想物体を提示できることが望ましい。そこで、図4に示すように、操作者の手先に仮想物体が投影される大型の没入型立体画像ディスプレイを試作した。また、遠隔にいる操作者を対象とした手技伝達では、通信遅れを考慮する必要がある。そこで、従来はVRシミュレーションをサーバのみで行っていたが、サーバのみならず各クライアントでも行うシステムを提案し、実験により通信遅れによる不安定化を減少させることを検証した。

(4)柔軟物体の摩擦を考慮した有限要素法による触覚レンダリング

有限要素法による触覚レンダリングは、静的な力学関係をもとに変位と力を計算するが、摩擦が考慮されていない。このため、よりリアルな触感の提示に向けて、摩擦を考慮した触覚レンダリングのアルゴリズムを開発し、肝臓モデルでの実装によりその有効性を検証した。

(5)人間とインターフェイスのダイナミック



図4 VR触診訓練システム

スを考慮した力覚提示制御

手技の伝達において(2)項で示した手法を実現するには、高い力応答特性が求められるが、系の動特性は人間の指とインターフェイスのダイナミックスの影響を受ける。インターフェイスのダイナミックスを補償する動的制御法を提案し、その有効性を実験的に検証した。また、人間の指先の動特性を図5に示すインピーダンスモデルで同定し、その結果に基づいて動的補償を施す人間の指先のダイナミックスを考慮した力覚提示制御法を提案し、実験的に良好な結果を得た。

(6)VR 触診訓練システムの高度化の研究触診

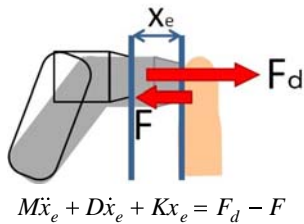


図5 人間の指のダイナミックス

等では指先のみならず指腹部も力覚の提示が求められる。そこで、小型デバイスを試作し、図3に示すように指腹部の9箇所にも力覚を提示できるようにした。物体操作の評価実験では、指先のみと比較して装着が煩わしくなるが、物体操作における臨場感が向上した。

(7)複数の道具デバイスを扱えるVR医療訓練

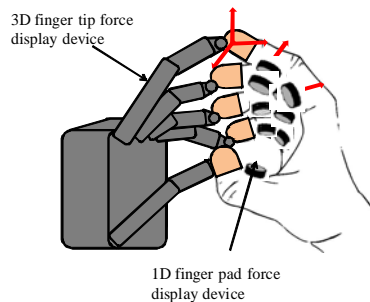


図3 指腹部への力提示デバイスのコンセプト

練システムの高度化

鉗、メス、注射器などの複数の道具を扱えるVR医療訓練システムを構築するにあたり、道具が扱い易いことが望まれる。そこで、道具の可操作性を最大とする配置法を提案し、実験によりその有効性を検証した。ユー

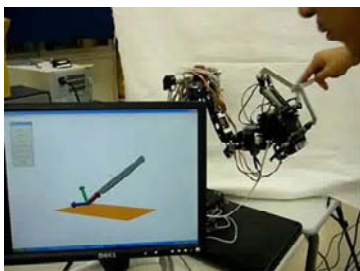


図4 鉗デバイスを装着したHIRO

ザ評価でも、操作性が改善されたことを示した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計5件)

- 1) T. Endo, T. Kanno, M. Kobayashi, and H. Kawasaki, Human Perception Test of Discontinuous Force and a Trial of Skill Transfer Using a Five-Fingered Haptic Interface, Journal of Robotics, 2010 (in Press).
- 2) 横山哲也, 山田俊郎, 棚橋英樹, 川崎晴久, 力覚提示における有限要素法を用いた柔軟物体の把持操作, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.14, No.4, pp.501-510, 2009
- 3) Haruhisa Kawasaki, Multi-Fingered Haptic Interface Robot and Its Application Systems, Solid State Phenomena Vol. 144, pp 1-8, online at <http://www.scientific.net>© (2009) Trans Tech Publications, Switzerland, 2009
- 4) Haruhisa Kawasaki and Tetsuya Mouri, Control of Multi-Fingered Haptic Interface Robot for Reducing Feelings of Insecurity in Operator, Mechatronics and robotics (M&R 2007), 2-5. 10. 2007
- 5) Haruhisa Kawasaki and Tetsuya Mouri, Design and Control of Five-Fingered haptic Interface Opposite to Human Hand, IEEE Transaction On Robotics, Vol. 23, No.5, October, pp. 909-918, 2007

[学会発表](計26件)

- 1) Takahiro Endo, Takashi Yoshikawa and Haruhisa Kawasaki, Collision Avoidance Control for a Multi-Fingered Bimanual Haptic Interface, Proc. of EuroHaptics 2010, Amsterdam, 2010.7.8 (accepted).
- 2) Haruhisa Kawasaki, Yasuhiko Doi, Shinya Koide, Takahiro Endo, Tetsuya Mouri, Hand Haptic Interface Consisting of 1D Finger Pad Force Display and 3D Fingertip Force Display, Proc. of IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2010), Bari, 2010.7.4 (to be appeared)
- 3) Takahiro Endo, Haruhisa Kawasaki, Tetsuya Mouri, Yasutoshi Doi, Tetsunori Yoshida, Yasuhiko Ishigure, Hisayuki Shimomura, Masato Matsumura, and Kazumi Koketsu, Five-Fingered Haptic Interface Robot: HIRO III, Proc. of World Haptics 2009
- 4) 吉川貴支, 遠藤孝浩, 川崎晴久, 両腕HIROシステムの研究, 日本機械学会東海支部第58期総会講演会講演論文集, No. 093-1, pp.139-140, 2009.12.24

- 5) 木村友紀, 川崎晴久, 遠藤孝治, ダイナミクスを考慮したハプティックインターフェイス制御, 日本機械学会東海支部第58期総会講演会講演論文集, No. 093-1, pp.137-138, 2009.12.24
- 6) 小林 真奈, 遠藤 孝浩, 川崎 晴久, 多指力覚提示装置による力の大きさと方向を考慮した力覚情報の伝達, 第10回計測自動制御学会S I部門講演会 CD-ROM 予稿集, pp.1029-1032, 2009.12.24
- 7) 7) 木村 友紀, 遠藤 孝浩, 川崎 晴久, 動的補償を考慮した多指ハプティックインターフェイスの高精度制御, 第10回計測自動制御学会S I部門講演会CD-ROM予稿集, pp.1149-1150, 2009.12.24
- 8) 8) 山川 智久, 毛利 哲也, 川崎 晴久, 遠藤 孝浩, 通信遅延を考慮した仮想空間における遠隔共同作業, 第10回計測自動制御学会S I部門講演会CD-ROM予稿集, pp.1671-1672, 2009.12.24
- 9) 吉川 貴支, 遠藤 孝浩, 川崎 晴久, 人間の両手指に3軸方向の力を提示可能な両腕多指ハプティックインターフェイス, 第27回日本ロボット学会学術講演会予稿集, RSJ2009AC3C1-05, 2009.9.15
- 10) 遠藤 孝浩, 川崎 晴久, 毛利 哲也, 石樽康彦, 松村 雅人, 瀧 和 美, 下村 尚之, 多指ハプティックインターフェイスロボットHIROIIIと省配線制御システム, 第27回日本ロボット学会学術講演会予稿集, RSJ2009AC3C2-03, 2009.9.15
- 11) 小出 真也, 川崎 晴久, 毛利 哲也, 摩擦モーメント提示デバイスを用いたVR環境での物体操作, 第27回日本ロボット学会学術講演会予稿集, RSJ2009AC3C2-04, 2009.9.15
- 12) Takashi Yoshikawa, Takahiro Endo, Tatsunari Maeno and Haruhisa Kawasaki, Multi-Fingered Bimanual Haptic Interface with Three-Dimensional Force Presentation, Preprints of the 9th International, September 9-12, 2009
- 13) Mai Mishima, Haruhisa Kawasaki, Tetsuya Mouri, Takahiro Endo, Haptic Teleoperation of Humanoid Robot Hand Using Three-Dimensional Force Feedback, Preprints of the 9th International Symposium on Robot Control (SYROCO' '09), September 9-12, pp. 565-570, 2009.9.9
- 14) Haruhisa Kawasaki, Yoshio Ohtuka, and Tetsuya Mouri, Development of Haptic Device to Display Frictional Moment Proc. of Distributed Human-Machine Systems (DHM 2008), 2008
- 15) 吉田哲基, 毛利 哲也, 川崎 晴久, 遠藤 孝浩, 多指触覚インターフェイスを用いた仮想空間における遠隔共同作業, 第9回システムインテグレーション部門講演会 (SI2008) 2008年12月5日~7日・岐阜), pp. 989-990, 2008
- 16) 三嶋 麻衣, 川崎 晴久, 毛利 哲也, 遠藤 孝浩, 多指ハプティックインターフェイスによる人間型ロボットハンドの遠隔制御, 第9回システムインテグレーション部門講演会 (SI2008) (2008年12月5日~7日・岐阜) PP.1039-1040, 2008
- 17) 前野達成, 遠藤孝浩, 川崎晴久, 対向型多指ハプティックインターフェイスとハサミデバイスによる柔軟物体の切断, 日本バーチャルリアリティ学会第13回大会論文集, pp.397-400, 2008.9.24-26, 奈良
- 18) Takahiro Endo, Yuki Kawachi, Haruhisa Kawasaki, and Tetsuya Mouri, FPGA-Based Control for the Wire-Saving of five-Fingered Haptic Interface, Proc. Of Euro Haptics 2008, pp. 536-542, 2008.6.11-13
- 19) 土肥 康俊, 川崎 晴久, 遠藤 孝浩, 河地 勇毅, 毛利 哲也, 小型省配線化と低摩擦化を目指したハプティックハンド, ROBOMECH 2008 予稿集, 1P1-H16(1)-(2), 2008.6.5-7, 名古屋
- 20) 横山 哲也, 棚橋 英樹, 川崎 晴久, 有限要素法を用いた柔軟物体の把持操作における重心位置および姿勢算出方法の検討, ROBOMECH 2008 予稿集1P1-I20(1)-(2), 2008.6.5-7, 名古屋
- 21) 古川 知洋, 川崎 晴久, 毛利 哲也, 複雑タスクを対象とした動作意図解析によるVR 教示の研究, ROBOMECH 2007, 2A2-B11, 2007
- 22) 河地 勇毅, 遠藤 孝浩, 川崎 晴久, 毛利 哲也, ロボットハンド用FPGA 制御システムの研究開発, 第25回日本ロボット学会学術講演会, 1H13, 2007
- 23) 菅野智大, 遠藤孝浩, 川崎晴久, VR 空間上における提示力の方向に対する知覚能力の計測, 第28回バイオメカニズム学術講演会 SOBIM 2007予稿集, 1C12, pp263-264, 岐阜、11月11日、2007
- 24) Takahiro Endo, Haruhisa Kawasaki, Tomohiro Kanno and Tetsuya Mouri, Perception of the Force Direction and Skill Transfer by using Five-Fingered Haptic Interface, Proceedings of the 13th International conference on Virtual Systems and Multimedia(VSMM' 07), Brisbane, Australia from 23-26 September.
- 25) Haruhisa Kawasaki, Tetsuya Mouri, Sho Ikenohata, Multi-Fingered Haptic Interface Robot Handling Plural Tool Devices, Proc. of World Haptics 2007, Tukuba, pp397-402, 2007.3.22
- 26) Takahiro Endo, Haruhisa Kawasaki,

Kazushige Kigaku, Tetsuya Mouri, Transfer method for force Information using Five-Fingered Haptic Interface, Proc. of World Haptics 2007, Tukuba, pp.599-600, 2007.3.22

〔図書〕(計3件)

- 1) ロボットハンドマニピュレーション, 川崎晴久, 共立出版(2009).Solid State
- 2) Sensors, Focus on tactile, Force and Stress Sensors, Edited by Jose Gerardo Rocha and Senentxu Lanceros-Mendes, Published by In-Teh, Vienna, Austria, Publication date: December 2008, "High-precision Three-Axis Force Sensor for Five-Fingered Haptic Interface," Takahiro Endo, Haruhisa Kawasaki, Kazumi Kouketsu and Tetsuya Mouri, pp.87-102
- 3) Solid State Phenomena Vol. 144, Mechatronic Systems and Materials II, ISBN 3-908451-60-4, Edited by Inga Skiedraite and Jolanta Baskutiene, Trans Tech Publications LTD, Selected paper from MSM2007, Haruhisa Kawasaki, MuJti-Fingered Haptic Interface Robot and its Application Systems, pp.1-8, 2009 (<http://www.scientific.net>)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

○取得状況(計1件)

- 1)名称: 触覚インターフェイス及びその制御方法
発明者: 川崎晴久, 毛利哲也, 伊藤聡
権利者: 岐阜大学学長
種類: 特許
番号: 特許第 3843319 号
出願年月日: 2003年2月6日
登録日: 平成18年8月25日
国内外の別: 国内

〔その他〕

- (1) 国際会議招待講演(計2件)
 - 1) H.Kawasaki, 平成19年12月5日 国際会議 ICMIT2007 にて招待 Plenary 講演、"Multi-Fingered Haptic Interface Robot."
 - 2) H. Kawasaki, 平成19年9月27日 国際会議 MSM2007 にて keynote 講演、"Multi-Fingered Haptic Interface Robot and Its Application Systems."
- (2) 学術雑誌解説論文(計2件)
 - 1) 川崎晴久, 仮想空間での物体操作, トライボロジスト, Vol.54, No.5, トライボミュージアム, 2009
 - 2) 川崎晴久, ヒトの触覚とバーチャルリアリティ空間での摩擦シミュレーション, トライボロジスト, Vol.54, No.5, pp. 331-336,

2009

(3) 表彰(計3件)

- 1) 川崎晴久, 石樽康彦, 松村雅人, 第9回産官学連携功労者表彰総務大臣表彰, ネットワーク触覚インターフェイスの研究開発, 2010年6月5日
- 2) 川崎晴久, 毛利哲也, 遠藤孝浩, 原美オサマ, ダヌラティス ビタウタス, 2008年度日本機械学会船井賞, 対向型多指ハウティックインターフェイス HIRO の研究開発, 2009年3月24日
- 3) 川崎晴久, 毛利哲也, 遠藤孝浩, 石樽康彦, 下村尚之, 2008年度日本機械学会東海支部プロジェクト賞, ハプティックインターフェイスロボット HIRO III の研究開発, 2009年3月17日

(4) 報道関連情報

新聞12件, TV1件, WEB ニュース8件, 雑誌9件, 展示7件主な新聞記事:

- 1) 2008年11月27日、朝日新聞、「次世代技あり」
- 2) 2008年7月2日、日刊工業新聞、「触覚伝達ロボ開発、岐阜大・丸富精工など」

(5) ホームページ

<http://robo.mech.gifu-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川崎晴久(KAWASAKI HARUHISA)
岐阜大学・工学部・教授
研究者番号: 40224761

(2) 研究分担者

遠藤 孝浩(ENDO TAKAHIRO)
岐阜大学・工学部・助教
研究者番号: 70432185

(3) 連携研究者

西本 裕(NISHIMOTO YUTAKA)
岐阜大学・医学部・教授
研究者番号: 20208234

川口順敬(KAWAGUCHI YOSHIHIRO)
岐阜大学・医学部・教授
研究者番号: 50252135

上木 諭(UEKI SATOSHI)
岐阜大学・VSL・研究員
研究者番号: 50467213

(4) 研究協力者

ビータス デニウライ(Vytautas Daniulaitis)
カウナス工科大学・情報学部・講師