

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 2 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25282156

研究課題名(和文) 人側/装置側の両者の力触覚機能向上による新しい医用力覚呈示システム

研究課題名(英文) Haptic display system for a medical simulator that enhances human's and equipment's performances

研究代表者

栗田 雄一 (Kurita, Yuichi)

広島大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：80403591

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,100,000円

研究成果の概要(和文)：3Dプリント等により生成した3次元モックアップ臓器を利用して、画像ならびに力覚の両者をプロジェクションするシステムを構築した。力覚提示装置と力センサを利用して、鉗子先端が臓器に接触したことを感知すると、その位置に応じて力覚提示デバイスから反力が生成される。これをドライボックス型トレーニングシミュレータと統合することで、トレーニングシステム型プロトタイプを製作した。また外科用把持鉗子の把持部に微小振動を付与することで術者の触覚知覚感度を向上させられることを実験により確認した。また受容器発火ネットワークモデルを用いて、人に与えるべき理想的なノイズ強度について考察した。

研究成果の概要(英文)：We proposed the concept of surgical grasping forceps with enhanced sensorimotor capability based on attaching a vibrator to the forceps' grip by evoking a stochastic resonance (SR) effect. The experiments conducted with the proposed forceps showed that maintaining the noise intensity within the optimal range could improve tactile sensitivity, and confirmed the usefulness of the SR application for medical devices. We also developed a haptic display system to render the force response of a viscoelastic object that considers the applications to a laparoscopic surgery training with the HER method was developed. The results of evaluation experiments showed that the displayed force by the proposed HER method can provide closer haptic feeling to the target object than that generated by the mass-spring model.

研究分野：人間拡張学，ヒューマンインタフェース，運動アシスト

キーワード：コンピュータ外科 触覚 力覚提示 確率共鳴

1. 研究開始当初の背景

腹腔鏡下手術とは、開腹せずに腹腔鏡で腹腔内の様子をモニタに映しだし、特殊な器具を使って手術を行う手法である。傷が小さいため術後の痛みが少なく入院期間が短く済み、傷もほとんど見えなくなるので、患者さんへのメリットが大きく、日本全国で1年間に10万例を超える手術(日本内視鏡外科学会集計)が行われている。しかし腹腔鏡下手術はモニタ越しでの手術になるため、3次元の奥行き情報を得ることが難しい。したがって視覚情報を補助できる触力覚情報の重要性は高いが、腹腔鏡下手術では鉗子等の医療器具を介してしか臓器等に触れられないため、鉗子を介して環境を知覚する、特殊かつ熟練した技術が必要とされている。腹腔鏡下手術を安全に実施するには、このような技能を習得するためのトレーニングが必須であり、その需要にあわせて多様なシミュレータが開発されている。しかし多くのトレーニングシミュレータは、モニタ越しでの鉗子操作に対応したハンドアイコーディネーションの習熟、または学生・研修医向けの手術手順の学習に重点を置いており、視覚的には質の高いシステムが販売されている一方で、触力覚呈示については、そもそも機能を有していないか、または機能はあっても質が低い上に価格がきわめて高いという問題があった。触力覚情報の特殊性は、近年普及が急速に進んでいるロボット支援手術においてより顕著である。内視鏡手術支援ロボット da Vinci (Intuitive Surgical Inc.) では、その優れた操作性に対して、力覚情報のフィードバックが一切なく、手術者は状況を視覚情報から判断するしかない。しかし本来、対象と接触したか否か、どれくらいの力で接触しているのかは、安全な手術をする上で非常に重要な情報である。特にロボット手術では、スレーブ側で対象に過剰な力を加えていることを見落としした場合、臓器等に深刻なダメージを与えてしまう危険性がある。

2. 研究の目的

これらの背景から示されるように、術中の触力感情報を、コストを抑えながら、リアリティ高くユーザに提供する手法が求められている。本研究では、この問題を解決するためのアプローチとして、(1)既存のトレーニング機器または手術支援ロボット側のインタフェースに力覚提示機能を付与する、(2)確率共鳴現象を利用することで人側の触覚知覚機能を向上させる、という2つの独創的なアプローチをとる。さらに、(3)どんな手術スキルにどれくらいの向上が見られるのかを定量評価できるシステムを開発する。

(1)力覚提示 においては、シミュレーション精度やデバイス性能のみに頼るのではなく、補助として配置した物体の反力を利用しながら、大まかな差分だけを力覚デバ

イから重畳する手法(力覚重畳技術)を応用する。これにより(I)廉価な力覚デバイスと安価な試料から製作した模擬臓器(補助物体)の組み合わせにより、目標反力応答を低コストかつ高いリアリティで呈示する、(II)駆動可能な補助物体を設置することにより、既存器械側の改造はほぼなしで力覚呈示機能を付与することが可能になる。(2)知覚向上 においては、知覚できないぎりぎりの大きさの振動刺激を与えることで人の知覚感度が向上する現象(確率共鳴現象)を利用する。申請者らの過去の研究より、知覚感度の向上が運動機能も向上させる可能性が示されており、さらに予備実験から、デバイス越しやグローブ越しなどの知覚感度が鈍る条件ほど知覚感度向上効果が高いことが示唆されている。基本的に振動発生デバイスを装着するだけで利用可能なため、既存鉗子やグローブ等への付加が容易である。(3)性能評価 では、開発した触力覚呈示手法の有効性を検証するため、研究分担者が開発した内視鏡手術技術評価装置 Hiroshima University Endoscopic Surgical Assessment Device (HUESAD) を利用する。これにより、どのような状況で、どのような手術スキルがどれくらい向上するのかを客観的に評価できる。得られた知見は開発者に積極的にフィードバックして、必要となる機能の再検討、性能向上に努める。

3. 研究の方法

ロボット側への力覚呈示機能付加手法として、シミュレーション能力やデバイス性能に100%頼るのではなく、補助物体の反力を利用しながら大まかな力の変化・修正だけを力覚デバイスが重畳する、という独創的な手法を用いる。補助物体はシリコンなど安価で使い捨て可能な材料を主に利用することで、切断・縫合といったコンピュータシミュレーションによる力覚計算が難しいケースにも対応可能である。さらに、補助物体自体にも駆動機能を持たせることで、必ずしも力覚デバイスを利用しなくても仮想的な力覚変化が実現できる。これによって、構造や安全性などの問題から既存デバイスの改造が好ましくない状況でも、補助物体を設置するだけで力覚呈示機能を付与できる点も本手法の特徴である。

また確率共鳴現象を利用した人側の知覚向上手法は、もともと人が有している触覚能力を向上させるアプローチであり、医用機器をインテリジェント化して新しい情報を提供しようとする一般的な手法とは一線を画している。提案デバイスは医師が使いこなすためのトレーニングがほぼ必要ない上に、医師側への装着であり、付加機器を患者さんの体腔内に差し入れる必要もないため、患者さんへの危険性や負担がほとんどないことも大きな利点である。

4. 研究成果

4.1 力覚重畳提示技術を用いた腹腔鏡手術用トレーニングシミュレータ

力覚提示システムとして、力覚重畳提示技術を用いた腹腔鏡下手術用トレーニングシステムを開発した。力覚重畳提示手の特徴を図1に示す。図2は、補助物体としてゴムシートを利用し、そのゴムシートに鉗子先端を押し当てた状態で表面をなぞる動作を行ったときの反力を計測した結果である。(a)はゴムシートには何の処理もしていないときの結果であり、(b)はゴムシートにジェル状の液体を塗ったときの結果を示す。元のゴムシートは摩擦が強いため、なぞり動作を行うとスティックスリップ現象が発生し、反力に振動が観察される。一方、ゴムシートにジェルを塗ると、表面特性が変化してスティックスリップが起こりづらくなる。両者ともゴムシートを利用しているため弾性は実現できているが、(b)の方が臓器表面をなぞったときのような、なめらかでかつ粘着感のある感触を表現できる。臓器をなぞったときに感じるなめらかさや粘着感のような微妙な感触をコンピュータで仮想的に作り出すことはきわめて難しいが、実際に補助物体を液体で濡らしてしまえばその実現は容易である。さらに力覚デバイスで基本となる弾性感・硬さ感のみを変更することで、補助物体の一部に仮想的な硬さの違いを作り出すことも可能である。このように、適切な補助物体を用意してその特性をうまく利用しつつ、さらに力覚デバイスによって仮想的な力覚呈示を行うことが、力覚重畳呈示技術の基本である。

用意した模擬臓器に対して、力覚デバイスによる反力の重畳と、プロジェクタによる視覚の重畳とを同時に行う。ユーザは、実際の手術と同様にモニタを介して鉗子の動きを見ることにより、腹腔鏡下手術の特殊な環境における手技のトレーニングを行うことができる。図3は、補助物体としてゴムシートを使ってトレーニングシミュレータを構築した例であり、市販の腹腔鏡下手術用トレーニングボックス（京都科学：エンドワークプロ）をベースに、力覚呈示部ならびに視覚呈示部を付加した構成となっている。力覚デバイスは、Geomagic Touch（3D Systems, Inc.）を使用し、またあらかじめ用意した臓器の映像をプロジェクタによりゴムシート面に投影した。そのワークスペースはカメラで撮影されており、リアルタイムに正面モニタに出力される。ゴムシートをリニアスライダ等を使って水平方向に牽引することで、目標とする臓器の力覚特性に応じて補助物体の基本的な弾性特性を修正することも可能であり、それによって穿刺時の反力を呈示することもできる。

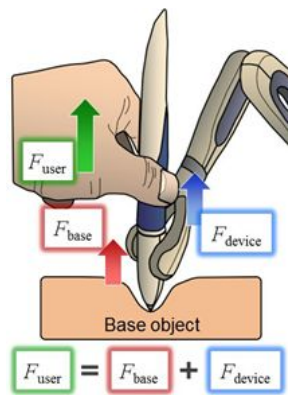
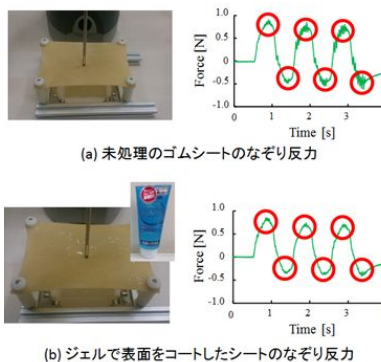


図1 力覚重畳手法



(a) 未処理のゴムシートのなぞり反力

(b) ジェルで表面をコートしたシートのなぞり反力

図2 ゴムシートのなぞり反力の修正

また図4は、補助物体として立体形状を模した模擬臓器を使用した例である。実際の心臓 CT スキャンデータに基づき、やわらかい樹脂で内側まで再現された心臓レプリカ（crossMedical, Inc. : Cardio Model E.V.）に対して、力覚と視覚の重畳を行うことが可能である。個人ごとの臓器レプリカを3Dプリンタ技術等で製作することにより、術前のリハールシステムとしての応用も期待できる。



図3 開発したトレーニングシミュレータ（ゴムシートタイプ）

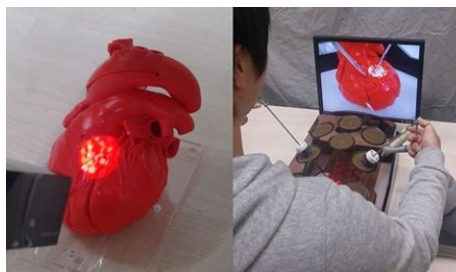


図4 開発したトレーニングシミュレータ（模擬臓器タイプ）

4.2 確率共鳴を利用して触覚知覚感を向上させる外科用把持鉗子の開発

確率共鳴(Stochastic resonance)現象とは、非線形システムにおいてノイズにより微弱な信号の検知能力が向上する現象である。本研究では、振動デバイスを付加することで触覚知覚感を向上させる効果を持たせた低侵襲手術用把持鉗子の開発を目的とする。開発した低侵襲手術用把持鉗子型の触覚向上デバイスを図5に示す。開発したデバイスは把持鉗子を介して手に微弱な振動を与えることで確率共鳴を生起させることを目的として製作されており、低侵襲手術用把持鉗子(KARL STORZ 社製)のグリップ部裏側に、振動子である piezo-actuator (CEDRAT TECHNOLOGIES 製:APA35XS) を装着して、主に拇指球を垂直方向に振動させるような構成となっている。確率共鳴による感度向上について、振動強度による知覚向上効果への影響を調べるため、図6に示す興奮性ニューロンの加算ネットワークモデルを構築し、入力信号とシステム出力の相関係数を算出することにより刺激知覚感を評価した。結果の例を図7に示す。ここからは、知覚向上効果の高いノイズ強度が存在することが示唆される。

この結果を考慮に入れてノイズ強度を設計し、把持鉗子デバイスに実装して、触覚知覚感度の向上効果を評価した。振動子から与える振動強度を様々に変化させたときに、外部刺激に対する受動的知覚感度(刺激閾値)がどう変化するかを調べるタッチテスト(図8)を行った結果の例を図9に示す。横軸は振動子が与えた振動強度であり、1.0T が振動閾値を示している。縦軸は被験者ごとの刺激閾値の平均であり、値が小さいほど小さい外部刺激でも知覚できたことを示している。無振動条件を対照群として Steel 法による多重検定を実施した結果、振動閾値の 0.75 倍、1.0 倍(0.75T, 1.0T) の振動強度を鉗子を介して皮膚に与えたとき、統計的に有意な知覚感度向上を実現できることを確認した。また粗さ判別テスト、異物知覚テストも別途行い、それぞれの実験において提案デバイスにより知覚感度を向上させられることを確認した。

本研究により、知覚機能向上効果が得られる振動強度にはある程度の幅が存在することが示唆された。このことは、振動子が与えるべき振動強度は、理想的な振動閾値を厳密に調整しなくても良いことを意味しており、医療応用を含む実用面からも喜ばしい結果であるといえる。



図5 開発した把持鉗子の外観

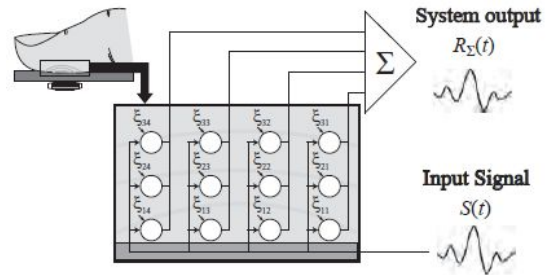


図6 触神経ネットワークモデル

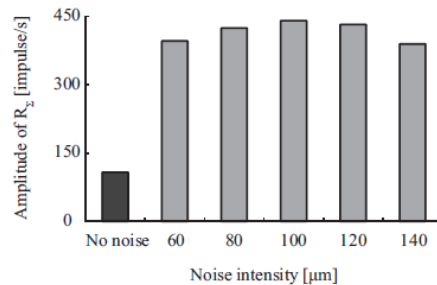


図7 シミュレーションによる知覚向上効果

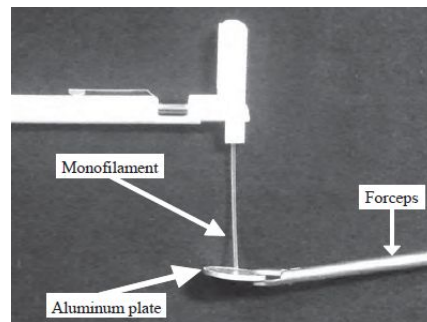


図8 タッチテストの例

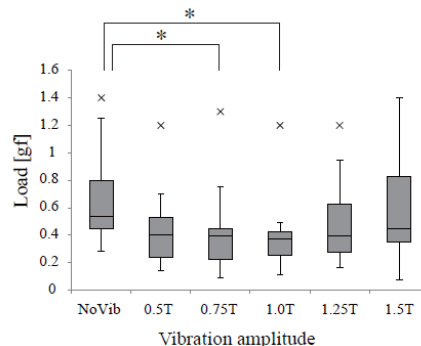


図9 タッチテストの結果

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 4 件)

Yuichi Kurita, Jumpei Sato, Takayuki Tanaka, Minoru Shinohara, and Toshio Tsuji, Unpowered sensorimotor-enhancing suit reduces muscle activation and improves force perception, IEEE Transactions on Human-Machine Systems, 査読あり(採録)

Yuichi Kurita, Yamato Sueda, Takaaki Ishikawa, Minoru Hattori, Hiroyuki Sawada, Hiroyuki Egi, Hideki Ohdan, Jun Ueda, and Toshio Tsuji, Surgical Grasping Forceps with Enhanced Sensorimotor Capability via the Stochastic Resonance Effect, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol.21, Issue 6, pp.2624-2634, 2016, DOI:10.1109/TMECH.2016.2591591, 査読あり

末田大和, 服部稔, 澤田紘幸, 恵木浩之, 大段秀樹, 上田淳, 辻敏夫, 栗田雄一, 確率共鳴を利用した触知覚感度向上効果を有する低侵襲手術用把持鉗子, 日本ロボット学会誌, Vol.32, No.6, pp.76-83, 2014, 査読あり

Yuichi Kurita, Minoru Shinohara, and Jun Ueda, Wearable Sensorimotor Enhancer for Fingertip using Stochastic Resonance Effect, IEEE Transactions on Human-Machine Systems, Vol. 43, Issue 3, pp. 333-337, 2013, DOI:10.1109/TSMC.2013.2242886, 査読あり

〔学会発表〕(計 19 件)

笠原拓也, 服部稔, 恵木浩之, 大段秀樹, 辻敏夫, 栗田雄一, HMD へのリアルタイム全天球画像提示による腹腔鏡手術支援システム, 第 25 回計測自動制御学会中国支部学術講演会, 1D-3 pp.48-49, 広島, 2016.11.26

栗田雄一, 小池祐輝, 田中孝之, 辻敏夫, 感覚運動機能を向上させるウェアラブルスーツ:SEnS - 第五報:腹腔鏡外科手術を支援するスーツの評価 -, 第 34 回日本ロボット学会学術講演会, RSJ2016AC1A3-03, 山形, 2016.9.7

栗田雄一, 小池祐輝, 田中孝之, 辻敏夫, 感覚運動機能を向上させるアシストスーツ:SEnS - 第四報:腹腔鏡外科医師向けスーツの試作 -, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016 講演論文集, 1P1-02b4(1)-(2), 横浜, 2016.6.8-11

笠原拓也, 辻敏夫, 栗田雄一, 全天球カメラを利用した腹腔鏡下手術支援システム, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016 講演論文集,

1A1-02a5(1)-(3), 横浜, 2016.6.8-11
Yoshihide Otsuru, Yuichi Kurita, Koji Kawaguchi, Minoru Hattori, Hiroyuki Egi, Hideki Ohdan, Kazuyuki Nagata and Toshio Tsuji, Palpation force display by enhancing the force response of a surgical training phantom, International Conference on Advanced Mechatronics, pp.191-192, Waseda, Tokyo, 5-8 December, 2015

栗田雄一, 小池祐輝, 田中孝之, 辻敏夫, 感覚運動機能を向上させるウェアラブルスーツ:SEnS - 第二報:両腕の補助が可能なスーツの開発 -, 第 33 回日本ロボット学会学術講演会, RSJ2015AC2A2-04, 東京, 2015.9.4

大鶴佳秀, 川口孝二, 服部稔, 恵木浩之, 大段秀樹, 永田和之, 辻敏夫, 栗田雄一, 力覚重畳呈示技術を用いた腹腔鏡手術用トレーニングシステム - 心拍の再現 -, 情報処理学会研究報告グラフィクスと CAD (CG), 2015-CG-159(2), 1-3 (2015-06-23), 2188-8949, 東広島, 2015.6.30

Yuichi Kurita, Yoshihide Otsuru, Masahiro Kiyooka, Toshio Tsuji, Kazuyuki Nagata, Koji Kawaguchi, Minoru Hattori, Hiroyuki Egi, Hideki Ohdan, Haptic force augmentation on a 3D printed surgical training phantom, 50th Golden Anniversary Congress of the European Society for Surgical Research, OP-167, Liverpool, England, 10-13 June 2015

大鶴佳秀, 辻敏夫, 栗田雄一, 力覚重畳呈示技術を用いた腹腔鏡手術用トレーニングシステム - 三次元補助物体への力覚重畳 -, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015 講演論文集, 1A1-D02(1)-(2), 京都, 2015.5.17-19
大鶴佳秀, 辻敏夫, 栗田雄一, 力覚重畳呈示を用いた腹腔鏡下手術用トレーニングシステム - モックアップ臓器の利用 -, 第 19 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, pp.513-514, 名古屋, 2014.9.19

佐藤純平, 田中孝之, 篠原稔, 辻敏夫, 栗田雄一, 感覚運動機能を向上させるウェアラブルスーツ SEnS の評価, 第 19 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, pp.130-131, 名古屋, 2014.9.17

栗田雄一, 佐藤純平, 田中孝之, 篠原稔, 辻敏夫, 感覚運動機能を向上させるウェアラブルスーツ:SEnS, 第 32 回日本ロボット学会学術講演会, RSJ2014AC2Q2-04, 福岡, 2014.9.5

Yoshihide Otsuru, Toshio Tsuji and Yuichi Kurita, Haptic rendering of tissue stiffness by the haptic enhanced reality method, In Proc. of Haptics: Neuroscience, Devices, Modeling, and Applications: 9th International Conference EuroHaptics 2014,

Springer, Versailles, France, June 24-26, 2014, M. Auvray and C. Duriez (Eds.): EuroHaptics 2014, Part II, LNCS 8619, pp. 320-325, 2014

大鶴佳秀, 辻敏夫, 栗田雄一, 力覚重畳呈示技術を用いた腹腔鏡手術用トレーニングシステム, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014 講演論文集, 3P2-B07(1)-(2), 富山, 2014.5.28
Yuichi Kurita, Jumpei Sato, Takayuki Tanaka, Minoru Shinohara, and Toshio Tsuji, Unloading muscle activation enhances force perception, Augmented Human 2014, Kobe, Japan, March 7-9, 2014

清岡雅弘, 辻敏夫, 栗田雄一, 力覚拡張呈示を用いたなぞり感呈示, 第 14 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集, pp.684-685, 神戸, 2013.12.18-20

栗田雄一, 末田大和, 上田淳, 辻敏夫, 確率共鳴現象を利用した触覚知覚感度の向上効果に関する考察, 電子情報通信学会技術報告, Vol.113, No.272, WIT2013-45, pp.13-16, 霧島, 2013.10.26-27

栗田雄一, 末田大和, 辻敏夫, 服部稔, 澤田紘幸, 恵木浩之, 大段秀樹, 竹村裕, 上田淳, 確率共鳴現象を利用した触覚知覚感度向上に関する研究 - 加算ネットワークモデルに基づく知覚向上効果の考察 - 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013 講演論文集, 2A1-A14(1)-(4), つくば, 2013.5.23-25

清岡雅弘, 永田和之, 辻敏夫, 栗田雄一, 補助物体の反力に力覚デバイスの仮想力を重畳する力覚拡張呈示に関する研究, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013 講演論文集, 1A1-E02(1)-(2), つくば, 2013.5.23-25

〔図書〕(計 1 件)

Jun Ueda and Yuichi Kurita, Human Modeling for Bio-Inspired Robotics, ISBN:9780128031377, Academic Press, Elsevier, September 2016 (編著, 総 358 ページ)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 1 件)

名称: 補助スーツ

発明者: 田中孝之, 栗田雄一

権利者: 北海道大学, 広島大学

種類: 特許

番号: 特願 2015-218662

出願年月日: 2015 年 11 月 6 日

国内外の別: 国内

○取得状況(計 0 件)

6. 研究組織

(1)研究代表者

栗田 雄一 (KURITA, Yuichi)

広島大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号: 80403591

(2)研究分担者

辻 敏夫 (TSUJI, Toshio)

広島大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号: 90179995

恵木 浩之 (EGI, Hiroyuki)

広島大学・病院(医)・助教

研究者番号: 20403537

永田 和之 (NAGATA, Kazuyuki)

産業技術総合研究所・知能システム研究部

門・主任研究員

研究者番号: 10357634