

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 31 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289060

研究課題名(和文) 双方向性の組み込みにより術者の感覚を最大限活用した腹腔鏡下手術用触覚センシング

研究課題名(英文) Tactile Sensing for Laparoscopic Surgery Utilizing Surgeon's Tactile Sense by Including the Haptic Bidirectionality

研究代表者

田中 由浩 (Tanaka, Yoshihiro)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：90432286

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,300,000円

研究成果の概要(和文)：腹腔鏡下手術では、術者の手(触覚)を直接術野に使用できない制約がある。本研究では、触覚センサと触覚ディスプレイを統合したシステムを構築し、術者の触覚における触覚受容と運動の双方向性を活用することで、腹腔鏡下手術での胃壁内側に生じた早期癌の検出(胃壁外側からの触診によるしこり検出)が可能な触診システムの開発を目的とした。研究の結果、反射音を用いた、シンプルかつ電気的安全性に優れ、滅菌や使い捨て可能な鉗子型触覚センサを開発し、触覚ディスプレイには、滅菌を必要としない足の甲にセンサ情報を触覚提示するデバイスを開発した。胃癌のファントムを用いた実験の結果、開発したシステムの有効性が確認された。

研究成果の概要(英文)：Laparoscopic surgery limits a surgeon's tactile sense. This study was aimed at developing a palpation system for detecting an early stage tumor on the internal wall of the stomach (detecting a lump from the outside wall) in laparoscopic surgery. Tactile sensor and tactile display integrated system was assembled for utilizing operator's haptic bidirectionality between tactile sensation and exploratory movement. We developed a forceps-type tactile sensor using acoustic reflection. The sensor is very simple, has electrical safety, and can be sterilized and disposable. Then, we developed a tactile display that presents normal force to instep, where is in the unclean area of surgeons. Experiments using a phantom of the stomach with an early stage tumor showed availability of the developed palpation system.

研究分野：触覚，ロボティクス，メカトロニクス

キーワード：手術支援機器 腹腔鏡下手術 触診 触覚センサ 触覚ディスプレイ 双方向性 音響 腫瘍

### 1. 研究開始当初の背景

術後の早期社会復帰が可能な低侵襲、拡大視効果による精緻な手技の観点から内視鏡手術が増加しているが、術者の手（触覚）を直接術野に使用できない大きな制約がある。開腹手術において術者の手には、解剖構造の把握、病変情報、血管等を検知するセンサの役割がある。内視鏡手術へ触覚が導入できれば、胃壁内側に生じた早期癌など外側から見えない病変の位置同定が可能になり、的確な切除マージンが得られることから、根治性と過剰な切除を行わない低侵襲性が一層向上する。こうした触覚支援のニーズから、技術的に優れた内視鏡手術用触覚センサが様々提案されているが、実際の術野環境は複雑で、臨床応用には多くが至っていない。

### 2. 研究の目的

ここで人の触知覚を考える。触知覚では、運動と受容が双方向の関係にある。人は運動を通じて触覚を得るが、触覚に応じて運動を変えることができる。この双方向性によって、対象や目的に応じて適切な運動を行うことで、人は自身の皮膚に内蔵された触覚センサである機械受容器の性能を引き出すことができる。このような人の触知覚特性の観点から、術者の持つ双方向性を触覚センサに組み込めば、外科医の修練や経験から得られた“臨床的な感覚”を最大限活用でき、同時に触覚センサの性能を対象や環境に適応しながら最大限引き出せると考えた。

そこで本研究では、腹腔鏡下手術（消化器外科）での胃壁内側に生じた早期癌の検出（胃壁外側からの触診によるしこり検出）を対象とし、双方向性を含んだ触覚センシング機能付き鉗子による触診システムを開発することを目的とした。システムは、図1に示すように、触覚センサとその情報を操作者に提示する触覚ディスプレイから構成され、術者の触覚能力を活用する。術者がセンサ情報を体感でき、環境や目標に応じセンサが適切に操作され、結果としてセンサ情報も最適化されることが期待できる。

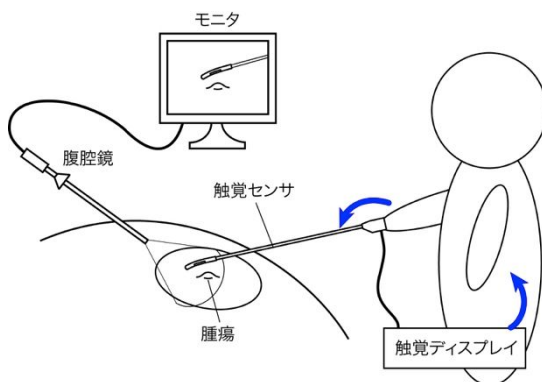


図1 触診システムの概要

### 3. 研究の方法

#### (1) 腹腔鏡下手術に適した触覚センサの開発

鉗子は触覚センサ専用に設計するが、実際の腹腔鏡下手術における使用に適した構造やセンシング原理を開発初期から考慮し試作を行った。具体的には、鉗子の形状（長さ40 cm、直径5 mm程度）や、体内に挿入して使用することから、電気的安全性に優れ、滅菌や使い捨てを考慮した設計とした。このような条件を満たす可能性のあるセンシング方法として、音響を用いることを検討し、さらにどのような種類の触覚情報を検出すべきか、人の触知覚を考慮し、触覚センサを開発した。

#### (2) 術者へセンサ情報をフィードバックするための触覚提示手法および触覚提示装置の開発

これまでの研究で、必ずしも術者が鉗子を持つ手にセンサ情報を触覚フィードバックしなくとも、双方向の効果を生むことが分かっていた。また、適切な刺激で感覚増強を生じることが分かっていた。触覚ディスプレイ開発に際し、検討すべきハード面での課題は、装置のサイズ、刺激の種類や場所である。手術環境はスペースが限られており、また、滅菌についても考慮する必要がある。そこで、術者に装着可能な小型の触覚ディスプレイや滅菌を必要としない不潔領域である下半身に触覚を提示する装置について検討し、試作を行った。刺激の種類についても、皮膚に対し剪断や法線方向の力、あるいは振動について検討を行った。

#### (3) 触知覚の双方向性に関する解析

人の触知覚における双方向性の特性について、対象物の触刺激の程度や課題の違いによる触動作の違いを見ることで、検討を行った。また、(1)、(2)で試作したデバイスも適宜使用して、しこり検出に有効な触覚情報や、開発する触診システムにおいて触知覚の双方向性を成立させるために、有効な触覚提示、触覚フィードバックによる心理物理学的效果について、実験的解析を行った。得られた知見は(1)、(2)にフィードバックして、触覚センサや触覚ディスプレイの改良を行った。

#### (4) 触覚センサと触覚ディスプレイの統合

(1)、(2)で試作されたデバイスを統合し、提案する触診システムのプロトタイプを開発した。触覚提示に加え、センサ情報の視覚的提示についても、しこり検出に有効な信号処理などを検討した。

#### (5) 非臨床レベルでの有効性の実証

(4)のプロトタイプおよび、実際の腹腔鏡下手術を模擬した環境下での早期胃癌ファントムを用いて、開発した触診システムの

有効性について評価を行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) 反射音を用いたシンプルかつ安全性に優れた鉗子型触覚センサの開発

サイズおよび電気的安全性を考慮し、反射音を用いたセンシング原理を考案し、これに基づく鉗子型触覚センサを開発した。図2に開発したセンサおよび図3にセンシング原理を示す。構造は非常に単純であり、鉗子根元にマイクロフォンとスピーカーを有し、アルミパイプと側面が弾性変形する空洞を持つ先端チップからなる。根元のスピーカーから単一周波数の音を入力すると、パイプ内の音は、入力音、先端で反射した音、鉗子が対象と接触したことにより空洞内にくぼみが生じここで反射した音、の重なりにより変化する。これをマイクロフォンで取得する。取得された音の大きさは、くぼみの大きさに応じて変化するため、接触力を計測することができる。形状や寸法は、実際の鉗子と類似している。また、体内に挿入される部分は電気的要素がなく、かつ滅菌が可能である。図4に接触力に対するセンサ出力特性を示す。なお、本センサは変位ベースのセンサであり、接触部のゴム膜の硬さを変えることで、接触力に対するセンサ出力特性を変えることができる。

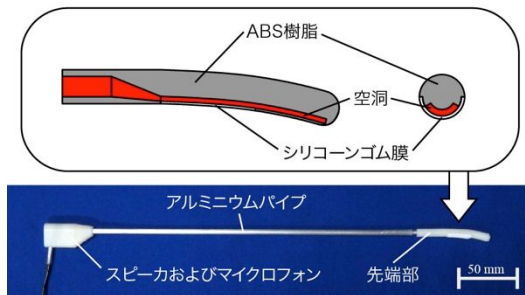


図2 反射音を用いた鉗子型触覚センサ1

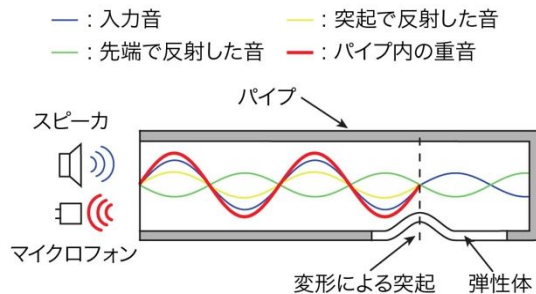


図3 反射音を用いた触覚センシング原理

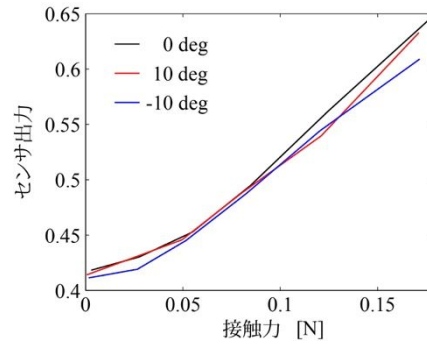


図4 センサ1の出力特性

##### (2) 鉗子型触覚センサの改良

人のしこり検出のための触覚メカニズムに関する考察から、接触力に加え、鉗子断面の円弧方向の接触位置も検出可能なセンサに改良を行った。接触力のみの場合、しこりを鉗子側面でなぞった際の接触力の時間変化がしこり検出の手がかりとなるが、接触位置も検出できれば、しこり部分を鉗子が通過した際に、しこりが他の部位と比べて硬いため、接触位置も変化する。これはゆっくりとしたセンシング動作にも対応しやすく、より高感度なしこり検出が期待できる。図3に示したセンシング原理では、鉗子内で生じた音から、入力音との位相差を見ることで、接触位置に関する情報取得も可能である。さらに、音は空洞に沿って進むことから、鉗子内部の音の経路を変化させることで、円弧方向の接触位置を検出することができる。具体的には図5に示すような、音の経路を変更したセンサを開発した。基礎実験の結果、図6に示すように、本センサは、内部で発生した音の振幅と位相差を見ることで、接触力と円弧方向の接触位置に関する情報を検出可能であることが示された。このように外形や構成要素は変えることなく、内部の反射音の経路を変え、振幅と位相を取得することで、接触力と接触位置の同時検出の可能性を見出した。

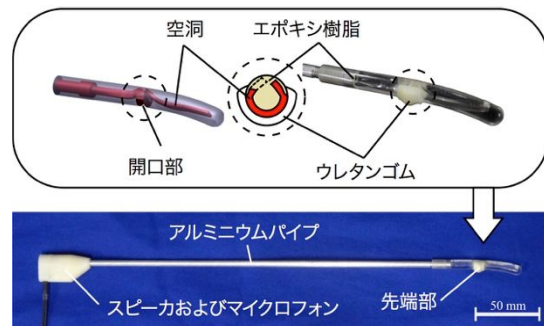


図5 反射音を用いた鉗子型触覚センサ2



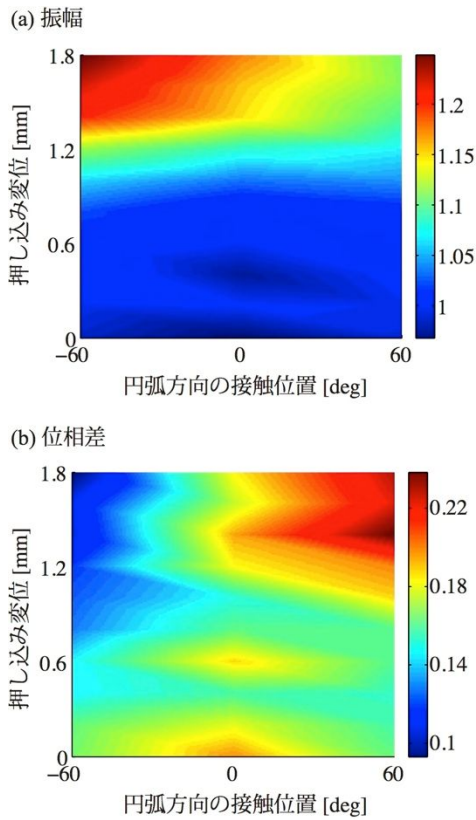


図6 センサ2の出力特性

(3) 鉗子型触覚センサによる硬さ計測

胃癌は正常組織と比べると硬くなっており、しこり検出において硬さは、重要な一つの指標となり得る。ここで、(2)より、接触力に加え、鉗子断面の円弧方向の接触位置の検出が可能となっており、センサが左右対称に対象に接触するという条件をつければ、接触面積に相当する情報を取得可能となったといえる。ここで、人は対象に対する指の押し込み動作において、接触力と接触面積から硬さの知覚が可能であり、開発したセンサはこの人の硬さ知覚原理を採用することができると考えた。そこで(2)で開発したセンサを用いて取得した接触力と接触面積から対象の硬さの計測を試みた。図7に本センサでの硬さ計測原理を示す。硬さ評価には、接触力と接触面積に相当するセンサ出力の変化率を指標とした。実験結果を図8に示す。正常の胃壁から早期癌に近い硬さを有する複数のサンプルに対する実験の結果、本手法が硬さ計測に有効であることが示された。本手法は、これまでのシステムと構成を変えずに硬さ計測を行える利点がある。

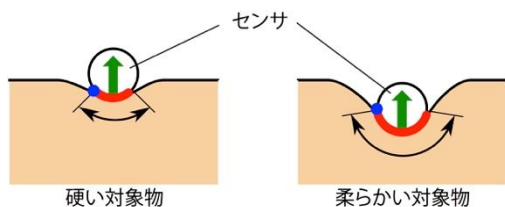


図7 硬さ計測原理

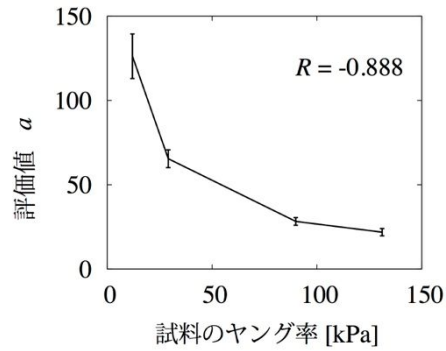


図8 硬さ計測結果

(4) 臨床応用を考慮した触覚ディスプレイの開発

図9に本研究において開発した代表的な触覚ディスプレイを示す。

まず、双方向性が適切に成立し、開発した触覚センサが有効に使用できるか検証するために、鉗子操作と逆の手に、簡単な触覚フィードバックを行う触覚ディスプレイを試作した。特に、リアリティーは不要と考え、ボイスコイルモータを用いたシンプルな構造の1軸の直動アクチュエータを製作した。しこりを検出しやすい触覚フィードバック方法について、触覚提示に使用するセンサ信号の時間的情報変換を検討した結果、センサ出力(接触力)に対しローパスフィルタ処理を行い適切なゲインを与えリアに駆動した触覚提示により、しこり検出が直感的に行えることが確認された。

続いて、臨床応用を考慮し、装着型の触覚ディスプレイを開発した。これにより術者は逆の手を他の鉗子の操作等に使用することができる。具体的には、モータを活用した腕装着型のシンプルなデバイスをいくつか開発した。刺激には、皮膚を押込むタイプとつねるタイプを開発した。実験の結果、押込むタイプが検出に違和感なく有効であったが、腕は清潔領域であるため、デバイスと術者が直接触れないように、ドレープを使用する等の対策が必要であり、デバイスの装着や扱いが容易ではない。

そこで最終的には清潔領域も考慮し、不潔領域に触覚提示することを考え、足の甲に触覚センサの情報をフィードバックするデバイスを開発した。これまでの知見を踏まえ、ボイスコイルモータにより皮膚を押込む刺激となるように構成し、設置型とすることで、術者が足を置くだけで簡単にセットアップができるようにした。

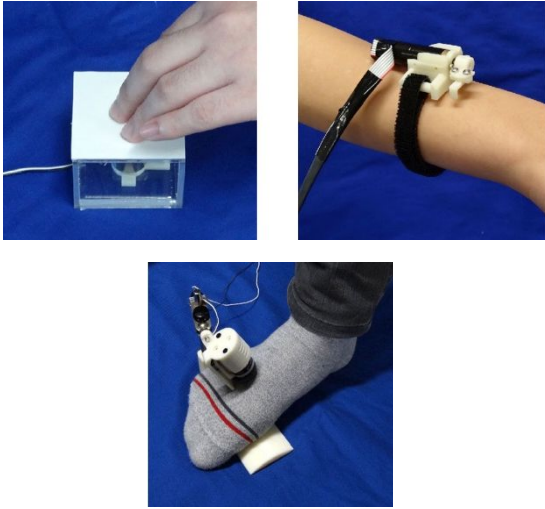


図9 触覚ディスプレイ

(5) センサ情報と触動作の類似性を考慮した信号処理

本システムでは、術者が触覚ディスプレイによりセンサ情報を体感できることで、自身の触覚により、しこりを検知できるが、センサ情報に対しても信号処理を行うことで、しこり検出に役立つ情報が得られないか検討を行った。しこり探索中の運動を計測し、位置情報とセンサ出力を重ね合わせると、しこりにより特徴的なセンサ出力が得られる場合、比較的類似したセンサ出力が各位置に対して得られた。そこで、各位置で得られたセンサ出力の平均と分散を求め、類似度をセンサ出力に反映し、しこりによるセンサ出力波形の表示を行うことを試みた。その結果、図10に示すように、しこりの有無による差異が良好になる可能性が示唆された。

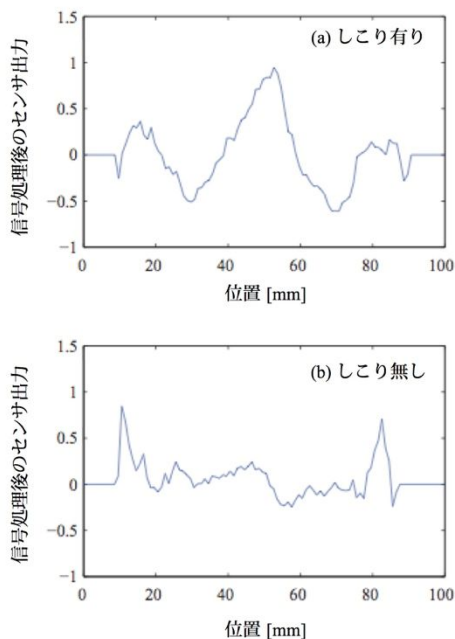


図10 センサ出力の類似性によるしこり強調処理

(6) 鉗子型触覚センサと足型触覚ディスプレイの統合による触診システムの評価

触覚センサと触覚ディスプレイを統合したシステムとして、(1)で示した鉗子型触覚センサと(3)で示した足型触覚提示装置を統合した触診システムを構築し、腹腔鏡下手術のトレーニングで良く使用されるトレーニングボックスを用いて、早期胃癌を模したファントムに対するしこり検出実験を行った。条件は、触覚ディスプレイの使用の有無で、被験者を条件に応じて二つのグループに分けた。鉗子型触覚センサは実際の腹腔鏡下手術で使用されるトロッカーに挿入され、被験者は、術野およびセンサ出力波形を映したモニターを見ながら対象部位に鉗子を当てた。

実験の結果得られた検出率を図11に示す。図11に示すように、触覚ディスプレイを使用し、センサ情報をフィードバックした条件がフィードバックなしの条件に比べて、高い検出率を示した。なお、誤検出も触覚ディスプレイの有無で変わらなかった。このように開発した触診システムがしこり検出に有効であることが示された。さらに、しこりを検出するまでに要する時間の短縮や確信度の向上についても効果が示唆された。

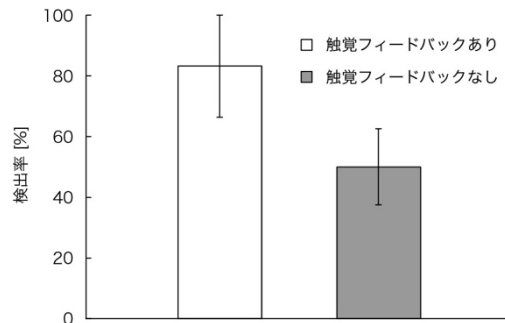


図11 触診システムの評価実験結果

(7) 今後の課題と展望

今後は、摘出臓器に対する in-vitro 実験やより実際に近い拘束条件下でのしこり検出実験を重ね、システムの有効性を検証し、臨床試験に繋げたい。また、デバイスについての改良も必要である。(2)で示した接触位置も計測可能なセンサの活用や、それに伴った触覚ディスプレイの開発、また、センサ情報の触覚フィードバックのゲイン調整法の検討等により、さらに術者に調和した触覚センサや触覚ディスプレイの構成を目指したい。また、本システムは、術者の能力が組み込まれており、センサ情報には術者のスキルが反映されている。鉗子操作に熟練した術者のスキルの抽出やそのトレーニングにも得られたデータを活用したい。

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 8 件)

T. Fukuda, Y. Tanaka, M. Fujiwara, and A. Sano, Softness measurement by forceps-type tactile sensor using acoustic reflection, Proceedings of the 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 査読有, 2015, pp. 3791-3796 DOI: 10.1109/IRROS.2015.7353909

田中由浩, 藤原道隆, 佐野明人, 術者の触知覚スキルを活用する腹腔鏡下手術用触診システム, 映像インダストリアル, 査読無, 2015, vol. 5, pp. 66-70 (解説記事)

Y. Tanaka, T. Fukuda, M. Fujiwara, and A. Sano, Tactile sensor using acoustic reflection for lump detection in laparoscopic surgery, International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, 査読有, vol. 10, no. 2, 2015, pp. 183-193 DOI: 10.1007/s11548-014-1067-z

Y. Tanaka, T. Fukuda, M. Fujiwara, and A. Sano, Lump detection with tactile sensing system including haptic bidirectionality, Proceedings of 14th International Symposium on Robotics and Applications, 査読有, 2014, pp. 77-82 DOI: 10.1109/WAC.2014.6935674

Y. Tanaka, W. M. Bergmann Tiest, A. M. L. Kappers, and A. Sano, Contact force and scanning velocity during active roughness perception, PLOS ONE, 査読有, vol. 9, no. 3, 2014, e93363 DOI: 10.1371/journal.pone.0093363

[学会発表](計 18 件)

T. Fukuda, Y. Tanaka, M. Fujiwara, A. Sano, Study on a tactile sensor that detects both of contact position and force using acoustic reflection, 2015 ASME-ISPS /JSME-IIP Joint International Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment, 2015年6月, Kobe, Japan

新垣修治, 福田智弘, 田中由浩, 藤原道隆, 佐野明人, 触覚の双方向性を活用した腹腔鏡下触診システムのための足背部呈示型触覚ディスプレイ, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015, 2015年05月, 京都

Y. Tanaka, S. Aragaki, T. Fukuda, M. Fujiwara, A. Sano, A Study on Tactile Display for Haptic Sensing System with Sensory Feedback for Laparoscopic

Surgery, 25th 2014 IEEE International Symposium on Micro-Nano Mechatronics and Human Science, 2014年11月, Nagoya, Japan

福田智弘, 田中由浩, 藤原道隆, 佐野明人, 反射音を用いた鉗子型触覚センサの検討, 第31回日本ロボット学会学術講演会, 2013年09月, 八王子

[図書](計 1 件)

田中由浩, 触覚センサの産業・医療への応用, 下條誠, 前野隆司, 篠田裕之, 佐野明人編, サイエンス&テクノロジー, 触覚認識メカニズムと応用技術 触覚センサ・触覚ディスプレイ (増補版), 2015, 328-347

[産業財産権]

出願状況(計 1 件)

名称: 接触検出器具

発明者: 田中由浩, 藤原道隆, 佐野明人

権利者: 名古屋工業大学, 名古屋大学

種類: 特許

番号: 特願 2014-171878

出願年月日: 2014年8月26日

国内外の別: 国内

取得状況(計 0 件)

[その他]

ホームページ

<http://yoshihiro.web.nitech.ac.jp>

[http://www.ceatec.com/2014/ja/award/award01\\_02\\_05.html](http://www.ceatec.com/2014/ja/award/award01_02_05.html)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 由浩 (TANAKA, Yoshihiro)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 90432286

(2) 研究分担者

藤原 道隆 (FUJIWARA, Michitaka)

名古屋大学・医学部附属病院・准教授

研究者番号: 70378222

坂口 正道 (SAKAGUCHI, Masamichi)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 60283727

佐野 明人 (SANO, Akihito)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 80196295