

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月29日現在

機関番号：13903

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2010～2012

課題番号：22686026

研究課題名（和文）自己言及性と双方向性を考慮した新しい触覚センシング技術の構築

研究課題名（英文）Development of a Novel Tactile Sensing Utilizing Self-Reference and Bidirectionality

研究代表者

田中 由浩（TANAKA YOSHIHIRO）

名古屋工業大学・工学研究科・助教

研究者番号：90432286

研究成果の概要（和文）：本研究では、ヒト自身の指をセンサ素子として利用し、対象に触れた際に対象と自身の皮膚との力学的相互作用で生じた自身の皮膚振動を計測する指装着型センサを開発した。使用者は触覚を感じながら触動作を生成でき（双方向性）、ヒト自身の優れた触知覚特性を損なわずに、ヒトが受容する触覚情報を取得できる（自己言及性）。皮膚の振動伝搬特性や触動作と触覚受容の関係に関する基礎的実験から、ヒトの触知覚特性についても考察した。開発したセンサを用いた粗さ計測の実験結果は、本センシング技術の可能性と検査技能等への有用性を示した。

研究成果の概要（英文）：A finger-mounted sensor for measurement of the skin vibration generated by the mechanical interaction between the finger and the object was developed. The sensor employs a user's finger as a sensing element. Users can apply the sensor while retaining their normal haptic perception (bidirectionality) and simultaneously obtaining the skin vibration from which perception is derived (self-reference). Human haptic perception was investigated through the fundamental experiments on the skin-transmitted vibration characteristic and relation between the perception and the exploratory movement. The experimental results on roughness evaluations with the developed sensor showed a potential and availability of the proposed sensing for the inspection in the manufacturing and other applications.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	6,500,000	1,950,000	8,450,000
2011年度	7,800,000	2,340,000	10,140,000
2012年度	5,300,000	1,590,000	6,890,000
総計	19,600,000	5,880,000	25,480,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：触覚センサ、アクティブタッチ、皮膚振動、ウェアラブル、主観、粗さ

1. 研究開始当初の背景

ものづくりの分野では、未だ多くの作業でヒトの触覚が重要な役割を果たしている。例えば、製品表面や金型の微小な傷や粗さの検査、材質の評価などがある。いずれも熟練の技が必要であり、主観的評価であるため、客

観的評価技術の開発が望まれ、技の伝承も課題となっている。

これに対し、様々な触覚センサの研究開発が行われている。高分解能、高速応答、大面積化などがしばしば問題に取り上げられ、MEMS技術の進歩による小型化、ヒトの皮膚構

造に基づくセンサなど、高性能なセンサが様々提案されつつある。しかしながら、未だヒトと同様もしくはヒトを超えるセンサの開発には至っていないように見える。ここで、ヒトの触覚について立ち返ると、これまでの触覚センサの研究開発に欠けていた要素が見えてきた。センサ自身の性能が十分であったとしても、以下のようなヒトの触知覚特性を十分に反映できていないことである。

- ・自己言及性：我々は対象に触れたときの感覚を対象の情報として認知するが、その情報の根源は、対象と自身の皮膚との力学的相互作用により生じた、自身の皮膚変形である。

- ・双方向性：触覚の本質は能動触である。すなわち、触るという動作と触覚受容が不可分の関係にあり、双方向となっている。

自己言及性については、皮膚や爪などの指先特性には個人差があり、対象が同じでも各人が得ている情報は元々異なっており、対象の物理情報だけでは、触覚情報を真に共有化ができないことを示唆している。双方向性については、これまでも触覚センサをロボットあるいはヒトが動かしアクティブセンシングを行うものがあつた。しかしながら、これらは双方向ではなく単方向である。すなわち、センサにより得られる情報は評価されるのみであり、動作自体は（ヒトに近い動作を実装したものはあるが）予め決められていた。ヒトは触覚受容とともに触動作を変化させることができ、目的に応じて最適なセンシングを行っている。これは特に、対象の形状や構造が複雑な場合のセンシングの安定性や柔軟性、微細な評価の際に役立つ。ものづくり分野の検査技能ではこれが大いに活用されていると考えられる。

2. 研究の目的

本研究は、触覚の自己言及性と双方向性を考慮した新しい触覚センシング技術の構築を目的とする。ヒト自身の指をセンサ素子として利用し、対象に触れた際に対象と自身の皮膚との力学的相互作用で生じた自身の皮膚振動を取得・評価する指装着型センサを開発する。使用者は触覚を感じながら触動作を生成することができ（双方向性）、ヒト自身の優れた触知覚特性を損なわずに、ヒトが受容する触覚情報を取得できる（自己言及性）。センサの試作とともに、ヒトの触覚受容と触動作の関係およびセンサ出力と感覚値との関係などについて検討し、センサによる触覚情報の客観評価システムを構築、本センシング技術の可能性と検査技能等への具体的有用性を示す。

3. 研究の方法

(1) 指装着型センサの開発

マイクロフォンや加速度センサを用いて、

指先に装着して使用可能な、皮膚振動計測用センサを開発する。特に、触覚受容および触動作の妨げにならないよう、リング型のセンサを設計・試作する。なお、音を取得する場合は外部環境音への対応を、加速度センサを用いる場合は、指全体の振動への対応を検討する必要がある。さらに、複数のマイクロフォン等を用いて、指先で生じた振動源の位置を特定する技術について検討する。

(2) ヒトの触知覚特性に関する検討

本研究で開発するセンサでは、使用者自身の指の特性および動作の影響が出力信号に含まれる。そこで、触動作（指の動きや押付け力）の条件に対するセンサ出力の変化について検討を行う。また、皮膚に入力された振動刺激は皮膚上を伝搬する（開発するセンサで取得している情報は、この伝搬した振動に相当する）。この伝搬特性について調べ、触動作や感覚値との関係についても検討する。さらに、ヒトの触覚の双方向性に関する基礎的検討として、対象や目的に応じた触動作の変化について検討する。

(3) 定量評価とその活用に関する検討

得られた知見をもとに、触覚情報の客観評価システムを開発する。特に、センサの具体的応用として、ものづくりの現場における製品表面の粗さや摩擦感の検査作業の客観評価を試みる。センシングに適した信号処理や客観評価のためのセンシング方法について検討する。また、技能訓練や触覚情報の共有の可能性について検討する。

4. 研究成果

(1) マイクロフォンを用いたセンサの開発
マイクロフォンを複数用いて、外部環境音をキャンセル可能なセンサと皮膚振動源の重心位置の計測が可能なセンサを開発した。

① ノイズキャンセル機能付き皮膚振動センサ

図1に開発したセンサを示す。指輪からマイクロフォン（スター精密、MAA-03A-L30）が先端についたアームが飛び出しており、指先側面に接触するようになっている。センサは皮膚と対象との直接の接触に干渉せず、皮膚で生じた振動に基づく情報を取得できる。マイクロフォンは、指およびその反対側向きに背面を合わせた状態で2つ設置されている。

計測では、この両者のマイクロフォンから得られる情報の差分を取ることで、外乱となる環境音を取り除き、指と対象との間で生じた振動に基づく情報を捕えることができる。システムとしては、マイクロフォンから取得した出力信号をリアルタイムで取得・差分処理し、特徴量抽出のための信号処理を行う。

サンプリング周波数は40[kHz]とした。なお、バネによりセンサを指に密着させ、DIP 関節部でセンサをはめることで、指先を動かしても指先に対するマイクロフォンの位置が変化しない。センサは十分に軽く小型であり、センサ装着による違和感は小さい。

本センサにより得られた出力信号から5.125[ms]ごとにFFTを用いて、パワースペクトル密度(PSD)を求め、特徴量として、20-5000HzのPSDの総和を求めた。図2に、センサ出力波形の例として、粗さ試料片をなぞった際の各周波数のPSDおよびPSDの総和を示す。

触動作とセンサ出力の関係を明らかにするため、7名の被験者に対し、複数の粗さの異なる試料片を用いて、いくつかの押付け力およびなぞり速度の条件について、実験を行った。得られた結果を図3に示す。図3に示すように、試料が滑らかになるに従い、センサ出力が小さくなっていることが確認できるが、押付け力や速度に応じてセンサ出力が変化していることが分かる。特に、押付け力については、増加とともにセンサ出力も大きくなる傾向が得られた。なぞり速度については、被験者に応じて傾向が異なり、個人差が大きいことがわかった。

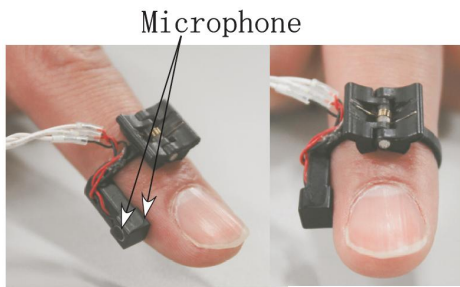


図1 マイクロフォンを用いた皮膚振動センサ(ノイズキャンセル機能付き)

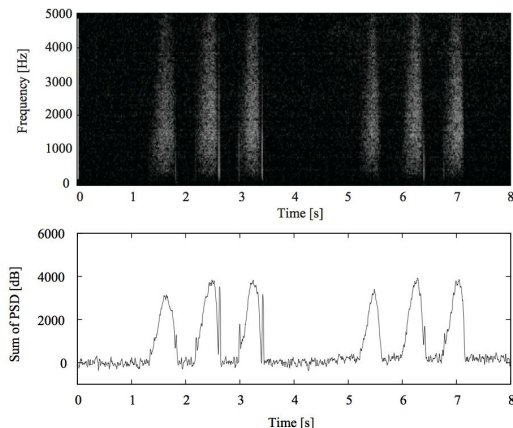
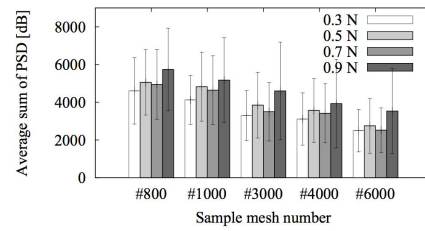
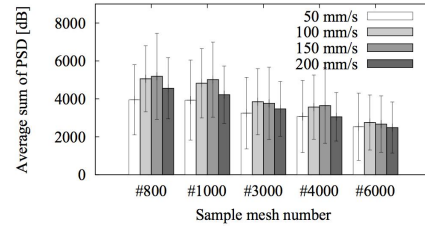


図2 センサ出力例(センサを装着した指で粗さ試料片上を6回なぞった結果)



(a) Normal contact force



(b) Scanning velocity

図3 触動作によるセンサ出力の変化

②振動源重心計測機能付き皮膚振動センサ

図4に開発したセンサを示す。2つのマイクロフォンを指腹部側面の両側に対向して取り付けた。本センサにおいては、2つのマイクロフォンから得られた出力信号それぞれに対してPSDを求め、2000-20000[Hz]のPSDの総和を用いて、センサ出力の重心位置を求めた。

表面に4×2で凸が並んでいる試料の右側面、中央、左側面をなぞった際に得られた重心を図5に示す。図より、良好なセンサ出力が得られており、本センサによる指に入力された振動の位置計測の可能性が示された。

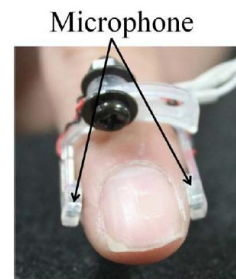


図4 マイクロフォンを用いた皮膚振動センサ(振動源重心計測機能付き)

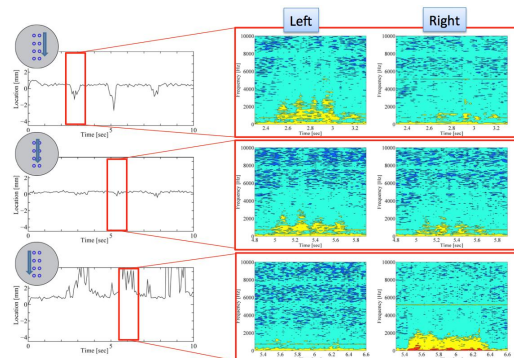


図5 皮膚振動源の重心位置の計測

(2) 加速度センサを用いたセンサの開発

皮膚に生じた振動を正確に捉えるために、図 1, 4 で示したセンサに加えて、加速度センサを 2 つ用いた指装着型センサを開発した。図 6 に外観を示す。開発したセンサは、指先の指腹部側面に貼り付けられた加速度センサ (昭和測器, 2302B, 質量 1.3[g]), およびリングに取り付けられた同じ型の加速度センサからなる。皮膚には両面テープを使用し加速度センサを貼り付ける。リングは、厚さ 2[mm]のアルミと内側に厚さ 1[mm]のシリコンゴムからなる。これは、皮膚の振動をリングの加速度センサに伝搬させないためである。アルミを用いた剛体部分と振動を吸収するシリコンゴムを用いた弾性部分を適切に構成することで皮膚振動によるリングの振動を抑えることができる。

リング部の加速度センサは、指の振動を計測する。皮膚に貼付けられた加速度センサは、皮膚表面の振動と指の振動を計測する。2 つのセンサは、皮膚断面に対し左右対称につけられており、2 つのセンサから得られた情報を差分することで、皮膚表面の振動計測が可能となる。

指腹部に振動を入力し、リング部の加速度センサに皮膚振動が伝搬しないことを確認し、また、空中で指を動かした際には、皮膚部とリング部のセンサ出力の差分がほぼゼロ (皮膚振動がゼロ) となることを確認した。本センサを用いて、複数の粗さの異なる試料片について一定の押付け力および速度で実験を行った結果、図 7 に示すように、粗さに応じて、センサ出力が小さくなり、良好な相関関係を得ることができた。

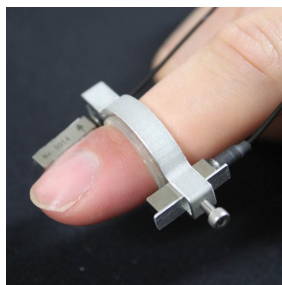


図 6 加速度センサを用いた指装着型皮膚振動センサ

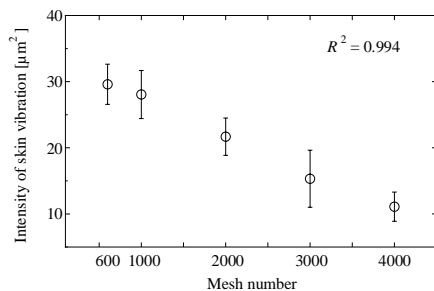


図 7 粗さとセンサ出力の関係 (被験者 5 名,

押付け力 0.5[N], なぞり速度 100[mm/s])

(3) ヒトの粗さ知覚における押付け力となぞり速度

ヒトの触知覚における双方向性を検討するため、粗さの心理物理実験を行い、同時にヒトの触動作を計測し、粗さの程度や評価方法 (絶対評価, 相対評価) によって、触動作がどのように変化するかを調べた。具体的には、押付け力となぞり速度について、弁別と識別による違い、粗さの大きさによる違いを検討した。滑らかな表面を持つ 5 種類の試料と粗い表面を持つ 5 種類の試料を準備し、各グループについて、弁別実験と識別実験を行った。11 名の被験者に対して実験を行い、押付け力や速度について平均値や標準偏差を求めた。その結果、図 8 に示すように、粗さの程度によって、使用する押しつけ力の大きさの変化幅を変えること、評価方法によって、なぞり速度を変えることが明らかになった。

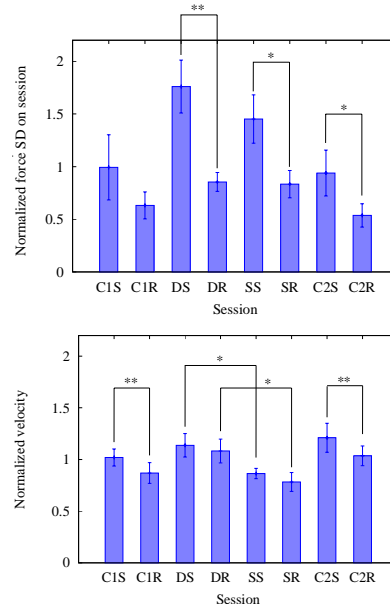


図 8 各セッション中の押付け力の標準偏差と速度の平均値. C1, D, S, C2 は、実験開始時のコントロールタスク (粗さ評価の指示なし)、弁別実験、識別実験、実験終了時のコントロールタスクを示し、R と S は粗いグループと滑らかなグループを指す。

(4) 皮膚振動伝搬の特性と皮膚振動伝搬の直接操作による振動感覚変化

図 6 で示した加速度センサを用いて、皮膚に伝搬する振動の特性を素早く計測可能なシステムを構築した。指先に振動刺激を圧電アクチュエータにより入力し、皮膚に伝搬する振動を計測する。これを用いてヒトの指先の皮膚振動伝搬特性を計測した結果、図 9 に示すように、200~250[Hz]周辺にピークがあり、先行研究で報告されている皮膚の振動特性と同様の傾向を得た。

さらに、皮膚振動と粗さ感覚に関する検討

として、指先にテープ等を装着し、積極的に皮膚に伝搬する振動を増幅/減少させ、振動の感覚が変化するかを心理物理学実験により調べた。その結果、入力刺激は同一でも、伝搬する皮膚振動の変化に応じて、振動の知覚強度が変化することが示された。

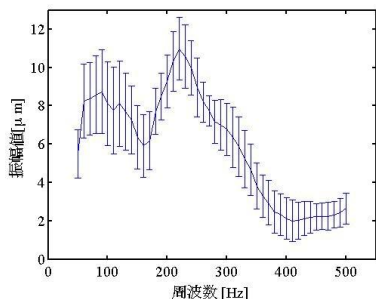


図9 皮膚振動伝搬特性 (被験者7名, 刺激子(円柱)直径10[mm], 押付け力1[N])

(5) 平面と曲面における粗さの評価

これまでの知見を基に、図1で示したセンサを用いた物体表面の粗さ計測について検討を行った。特に、曲面における粗さの計測は一般的に難しいとされている。そこで、図10に示すように、平面と曲面を持つ、粗さの異なる試料を複数用いて実験を行った。

実験では、被験者に一定の触動作(押付け力と速度)を用いるように指示した。特に、対象試料を触る前に、平面の参照試料をなぞってもらい、押付け力や速度の大きさを確認・記憶し、同様の動作で、対象試料をなぞってもらった。得られた結果を図11に示す。図に示すように、平面および曲面のどちらにおいても、センサ出力と粗さとの間に良好な相関関係が得られ、同一の粗さであれば、平面や曲面といった形状に関係なく似たセンサ出力が得られる傾向が示された。この結果を基に、センサ出力には個人差があるが、平面の粗さ試料片を参照試料として準備し、これに対するセンサ出力を基に正規化することで、粗さの絶対評価が行える可能性が示唆された。

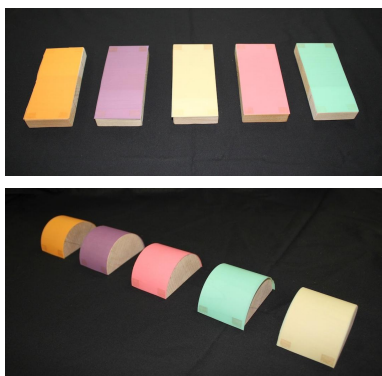


図10 平面および曲面形状を有する粗さの異なる試料片 (同じ色は同一の粗さ)

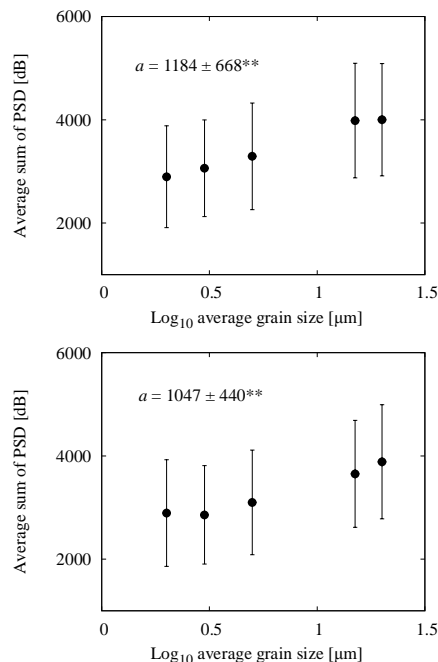


図11 平面(上図)および曲面(下図)に対するセンサ出力(被験者8名, 押付け力0.5[N], なぞり速度100[mm/s])

(6) センシング技術の波及効果

これまでの知見を基に、本研究で提案しているセンシング技術の波及効果について考察した。

本研究で開発したセンサは、ヒトが取得している情報を知ることができるため、触覚メカニズムの解明や触覚ディスプレイにおける提示情報への応用に寄与する。双方向性や自己言及性の観点を加えることで、技能者が注目する触覚の特徴量(匠の技の解明)や個体間による知覚の違いなど、さらに有益な知見を与える可能性がある。

また、他者の皮膚の変形状態の記録や参照ができ、技能伝承や訓練、ある種の触覚の共有の一役となるかもしれない。現在は言葉で触覚を共有しているが、曖昧で捉え方も様々である。また、数値化にはさらに多くの触覚メカニズムの解明が必要であろう。例えば、図12に示すように、同じ触動作条件においても、使用者が異なるとセンサ出力が異なる。センサ出力を基に、自身のセンサ出力が他の人と同じになるよう触動作を変えることで、皮膚への機械刺激を同じくし、体感としての共有を与える可能性がある。

また、センサの開発を通じて触覚における双方向性が明らかになれば、ロボットでの同様のセンシングも可能であろう。さらに、人が使用することで、新たな技能を生む可能性がある。本研究で提案しているセンシング技術は、ヒトをシステムに含んでいることで、匠の技を残し、かつ技を発展させる伸び代を

与えることができる。

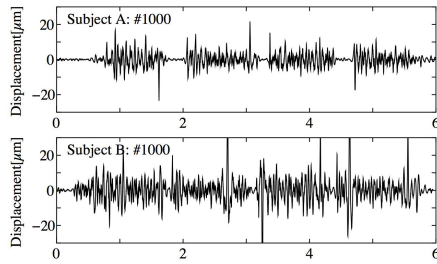


図 12 一定の触動作（押付け力 0.5[N], なぞり速度 100[mm/s]）で同じ粗さ試料片をなぞった際のセンサ出力の一例（図 6 のセンサを使用, 2 名の被験者のセンサ出力波形）

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 Yoshihiro Tanaka, Takanori Nagai, Masamichi Sakaguchi, Michitaka Fujiwara and Akihiro Sano: Tactile sensing system including bidirectionality and enhancement of haptic perception by tactile feedback to distant part, Proceedings of the Fifth joint EuroHaptics conference and IEEE Haptics Symposium (IEEE World Haptics Conference 2013), 査読有, 2013, pp. 145-150
- ② Yoshihiro Tanaka, Wouter M. Bergmann Tiest, Astrid M. L. Kappers and Akihiro Sano: Contact force during active roughness perception, Lecture Notes in Computer Science, vol. 7283, Haptics: Perception, Devices, Mobility, and Communication, 査読有, 2012, pp. 163-168
- ③ Yoshihiro Tanaka, Yoshihiro Horita and Akihiro Sano: Finger-mounted skin vibration sensor for active touch, Lecture Notes in Computer Science, vol. 7283, Haptics: Perception, Devices, Mobility, and Communication, 査読有, 2012, pp. 169-174
- ④ 田中由浩, 佐野明人: 自己言及性と双方向性の組み込み, 日本ロボット学会誌, 査読有, vol. 30, 2012, pp. 472-474
- ⑤ Yoshihiro Tanaka, Yoshihiro Horita, Akihiro Sano, and Hideo Fujimoto: Tactile sensing utilizing human tactile perception, Proceedings of the Fourth Joint Eurohaptics Conference and IEEE Haptic Symposium (World Haptics 2011), 査読有, 2011, pp. 621-626

〔学会発表〕（計 17 件）

- ① 田中由浩: 触覚技術の探り方・使い方, ひろしま医工連携・先進医療イノベーション拠点 拠点設備・機器の有効活用に向けたセミナー, 2012 年 12 月 13 日, 広島, [招待講演]
- ② 田中由浩: 触覚技術の研究動向と医療応用の可能性, 分野横断型医工学研究プラットフォーム講演会, 2012 年 9 月 12 日, 仙台, [招待講演]
- ③ 田中由浩: 自己言及性と双方向性から考える触覚技術, システム制御情報学会サステイナブル・フレキシブル・オートメーション研究分科会第 9 回研究例会, 2012 年 8 月 28 日, 大阪, [招待講演]
- ④ 田中由浩: 指装着型皮膚振動センサ(第二報)-圧力および面積の影響-, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012, 2012 年 5 月 27-29 日, 浜松
- ⑤ Yoshihiro Tanaka, Wouter M. Bergmann Tiest, Astrid M. L. Kappers, and Akihiro Sano: Psychophysical experiment on roughness perception considering bidirectionality in active touch, 第 12 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, 2011 年 12 月 23-25 日, 京都
- ⑥ 田中由浩: 自己言及性と双方向性を考慮した触覚センシング, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2010, 2010 年 6 月 13-16 日, 旭川

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

- 出願状況（計 0 件）
- 取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ

<http://drei.mech.nitech.ac.jp/~sano/>

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

ワークショップ

Workshop: Quantification of Tactile Feelings: How can We Analyze, Measure, and Design Diverse Textures in Touch?, IEEE World Haptics Conference 2013, 2013 年 5 月 14 日, Deajeon, Korea

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 由浩 (TANAKA YOSHIHIRO)

名古屋工業大学・工学研究科・助教

研究者番号: 90432286