

機関番号：13701

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009 ～ 2010

課題番号：21700190

研究課題名（和文） ヒトの触覚の触感覚認識機構を模倣した高機能・高感度ハイブリッド触覚センサの開発

研究課題名（英文） Development of Multi-functions-and-high-sensitivity Hybrid Tactile Sensor Mimicking Human Tactile Recognition Mechanism

研究代表者

川村 拓也 (KAWAMURA TAKUYA)

岐阜大学・工学部・助教

研究者番号：50313911

研究成果の概要（和文）：本研究では、CMC 触覚センサと力覚センサから構成されるハイブリッド触覚センサが開発された。このセンサシステムはセンサ素子の圧縮力と変形量を測定できる。実験では、1 から 9 μm の微小変形に対するセンサの応答特性が評価された。さらに CMC 触覚センサの近接覚特性も測定された。またヒトが指先で 10 μm 程度の微小段差を認識するときの触覚の方向性が調査された。心理物理実験で被験者は、0, 90 度の呈示角度をもつ微小段差対を指先の先端部と指腹部で弁別した。実験から弁別閾と主観的等価値が測定された。

研究成果の概要（英文）：In this study, a hybrid tactile sensor system consisting of a Carbon Micro Coil (CMC) touch sensor and a force sensor was developed. The sensor system has the capability to measure compression force of the sensor element as well as its deformation. In experiments, the response characteristics of the sensor system to fine deformations of 1 to 9 μm were evaluated. In addition, the proximity characteristics of the CMC touch sensor were measured. Also, the directionality of the human tactile sensation capability of human fingertip was investigated in recognizing fine step-heights of about 10 μm . In psychophysical tests, human subjects distinguished the pairs of the step-heights with the presentation angles of 0 and 90 degrees using the top and center of their fingertips. And the difference thresholds and subjective equalities were determined.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,900,000	870,000	3,770,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：センサ工学

科研費の分科・細目：情報学・知能情報学

キーワード：センシングデバイス・システム, 先端機能デバイス, 実験系心理学, 触覚センサ, 触覚, 感覚情報処理, カーボンマイクロコイル

1. 研究開始当初の背景

(1)ヒトの触覚が得意とする「つるつる・ざらざら」といった数 μm の微小な凹凸のセンシングや、物体把持のときに重要と考えられる

微小な初期滑りのセンシングなど、ヒトの触覚の高機能・高感度な触感覚認識機構を解明し、その認識機構の仕組みをカーボンマイクロコイル(CMC)をセンサ素子として用いた触覚センサの設計・開発に役立て、ヒトの触覚

認識機構を模倣した高機能・高感度な触覚センサを開発することを本研究の目的とする。

(2)CMC は、ミクロンオーダーのらせん構造をもつ炭素素材である。これまで、このミクロンのコイル状の素材を弾力性シリコン樹脂に添加した CMC センサ素子が考案され、数 μm の微小な刺激を検出できる高感度なセンサ (CMC 触覚センサ) の開発が進められてきた。またヒトの触覚では、数 μm の微小な刺激の感応に重要な役割を果たすマイクロナードと呼ばれる皮膚感覚器が、カーボンマイクロコイルと同じようなミクロンオーダーのらせん構造をもっている。このように、CMC の構造とヒトの触覚の皮膚感覚器の構造が類似しているため、微小な凹凸や物体把持のときの初期滑りなどのセンシングに適した構造をもつ CMC センサ素子を開発できれば、ヒトの触覚と同じような高機能・高感度な触覚センサを実現できると期待される。

(3)そこで本研究の目的の一つとして、数 μm から数十 μm の微小な変形を検出可能な CMC センサ素子を用いた触覚センサを設計・開発して、そのセンサの圧覚・滑り覚特性を評価する。本研究では、歪ゲージを用いた既存の力覚センサと CMC センサ素子を組み合わせたハイブリッド触覚センサの開発を目指す。ロボットハンドに搭載される触覚センサは、物体を把持するときの微小な初期滑りと把持力を同時に検出することが求められる。本研究で開発する触覚センサでは、物体を安定把持するための力を力覚センサで検出し、それと同時に、CMC センサ素子でその把持状態の微小な変化を高感度に検出する。

(4)一方、「つるつる・ざらざら」といった質感を感知するヒトの触覚の触覚認識機構については、不明な点が多い。数 μm の微小な刺激を知覚する場合、刺激に触れている指を動かす触運動に伴う指先の変形と皮膚内部の感覚器の位置との関係により触覚の認識能力を高めている可能性が指摘されている。そこで本研究のもう一つの目的として、触運動の方向により指先の変形の仕方が異なる点に着目して、「人は触運動の方向を選択して触覚認識能力を高めている」とする仮説を立て、触運動の方向依存性や速度効果などについて定量的に測定することにより、本仮説を検証する。

2. 研究の目的

(1)CMC 触覚センサは、マイクロメートルオーダーサイズのコイル状の炭素繊維であるカーボンマイクロコイル (CMC) をシリコンゴムの中に分散させたセンサ素子をもつ。

CMC 触覚センサは数ミクロンの外部刺激の変化を検出可能であり、この触覚センサを利用すれば、ロボットにヒトと同じように物体を安定把握させることが可能になると期待される。そこで本研究では、CMC 触覚センサと既存の力覚センサを組み合わせた二段構造のハイブリッド触覚センサシステムを提案する。このハイブリッド触覚センサシステムを用いて、把持力と把持物体のずれによる微小変形量をそれぞれ検出する技術を開発することを目指す。

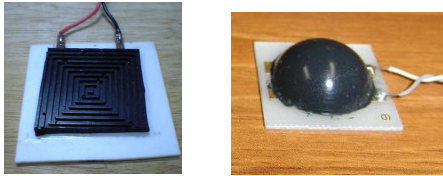
(2)ロボットハンドで物体を把持するとき、ロボットハンドが物体に近づく。このとき、指先と物体との距離が分かれば物体の安定把持に寄与すると考えられる。CMC 触覚センサは単一で接触センサと近接センサとして利用できる可能性がある。本研究では、本センサを搭載したロボットハンドによる把持動作における探索・接近過程を想定して、センサ素子が物体に接触するまでの近接感に着目し、CMC 触覚センサの出力と物体との距離の関係を明らかにする。

(3)ヒトは指先で対象物の表面を触って動かす (触運動) ことにより、ツルツルやザラザラといった表面の滑らかさを認識することができる。これまでに、このような触覚認識の認識においては、触運動の方向が触覚認識に影響を与えていることがわかってきた。さらにヒトの指先の指紋に着目し、指紋の縞模様が段差弁別に影響を及ぼすことがわかってきた。そこで本研究では、ヒト指先の指紋の縞模様の方向が指の長手方向と垂直であることに着目して、「ヒトの指の指紋の模様が段差弁別に影響を与える」という仮説を立て、心理物理実験を用いて仮説の妥当性を検討する。実験では、示指の先端部および末節掌側中心部 (指腹部) それぞれに、 $10\mu\text{m}$ 程度の微小な段差を呈示して、このときの弁別閾と主観的等価値を求める。これにより、微小段差刺激を呈示したとき、指紋の模様が触覚認識にどのように影響するのかについて検討する。

3. 研究の方法

(1)本研究では、図 1(a)と(b)に示すような平面型 CMC センサ素子 (縦 30mm ×横 30mm ×厚さ 3mm) とドーム型 CMC センサ素子 (底面の円の直径 16mm ×高さ 4mm) を作製した。シリコンゴムを母材とし、その中に 10% (重量比) の CMC を均一に分散させてある。ここで、CMC は導電性を持ち、コイル状の形をしていること、母材であるシリコンゴムは誘電体であることから、CMC センサ素子は LCR 共振回路を形成すると考えられる。このため、

外部刺激によりセンサ素子に変形すると、その電気的な共振特性が変化する。本研究では、センサ信号処理装置（シーエムシー技術開発（株））を用いて、センサ素子に高周波の交流信号を印加して、外部刺激が与えられたときの共振特性の変化を計測する。この装置は、印加した信号の振幅変調（R成分）と位相変調（LC成分）をそれぞれ電圧信号の変化として出力できるようになっている。また本研究では、図2に示すようなCMCセンサ素子と力覚センサ（(株) テック技販）を組み合わせたハイブリッド触覚センサを開発した。



(a) Plate type (b) Dome type
Fig. 1 CMC sensor elements



Fig. 2 Hybrid tactile sensor system

(2)本研究では、CMCセンサ素子を数 μm から数百 μm まで圧縮変形させたときの力とセンサ出力を計測するため、図3に示すようなセンサ評価システムを用いた。本システムは、XYステージ（神津精機（株））、楔形Zステージ（神津精機（株））、6軸力覚センサ（ビー・エル・オートテック（株））、レーザ測定器（(株) キーエンス）、センサ信号処理装置（シーエムシー技術開発（株））などから構成される。CMCセンサ素子は力覚センサの上に置かれる。実験では、楔形Zステージにより、CMCセンサ素子を固定されたアクリル板に垂直方向に押しつけて圧縮変形し、そのときのCMC触覚センサの出力と力覚センサの出力を計測する。

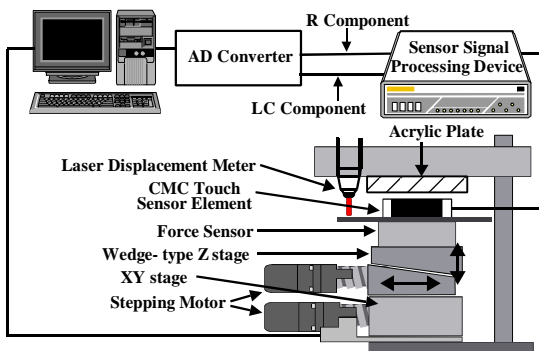


Fig. 3 Experiment system

(3)本研究では、CMC触覚センサの近接覚特性を計測するため、図4に示すようなセンサ評価システムを開発した。本システムは、Xステージ（神津精機（株））、6軸力覚センサ（ビー・エル・オートテック（株））、センサ信号処理装置（シーエムシー技術開発（株））などから構成される。実験では、Xステージにより、アクリル板をセンサ面に対し垂直方向に移動させ、そのときのCMC触覚センサの出力を取得する。またセンサ素子の下には力覚センサが設けられており、センサ素子に掛かる力を計測して、物体との接触を判断する。

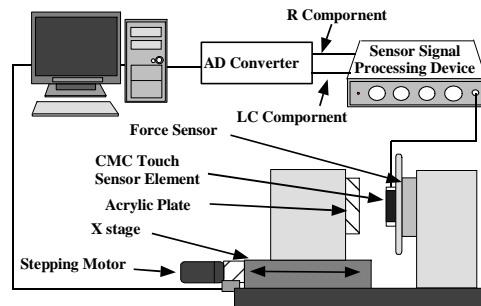


Fig. 4 Experiment system

(4)本研究では、図5に示すように、ステンレス鋼板を突き合わせた数 μm のステップ状の微小段差を被験者に呈示することができる微小段差呈示装置を用いた。本装置では、微小段差の刺激強度、呈示速度、呈示方向、呈示温度の四つのパラメータを定量的に制御可能である。段差量は、ステッピングモータ駆動の楔形Zステージによりステンレス鋼板を上下させて制御される。呈示速度は、ACサーボモータ駆動のXテーブルにより段差を水平に移動させて制御される。また呈示方向は、回転テーブルにより制御される。さらに呈示温度は、ステンレス鋼板の下のペルチエ素子により制御され、これにより指の感度低下を防ぐようになっている。本実験装置の仕様としては、呈示可能な段差量は0～1000 μm 、呈示速度は0～60mm/s、呈示可能な方向は0～180°である。

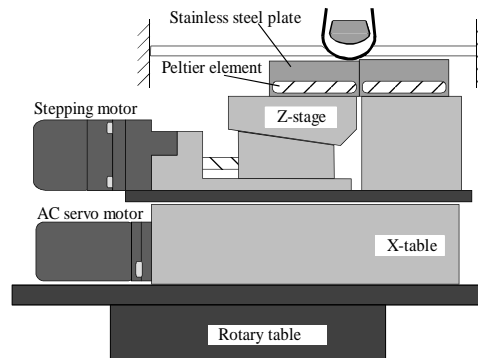


Fig. 5 Step-height presentation system

(5)本研究では、微小段差刺激とそれに触ったときに生じた感覚の大きさとの関係を調べる。実験では、二つの段差刺激を被験者に呈示し、どちらが大きいかを判断させる。この一連の呈示実験から弁別閾と主観的等価値を求める。実験では、図6に示すように、示指の先端部と指腹部に刺激を呈示する。段差の呈示方法は、指を固定して段差を移動させる受動的触知覚とする。また、呈示方向は、図7に示すように、指の長手方向に対して段差を垂直に移動させる場合（呈示方向：0°）、平行に移動させる場合（呈示方向：90°）の二通りとする。これは、先端部分では指紋の縞模様の方向が指の長手方向と垂直であることに着目したからである。これらの条件のもとで、10 μm 程度の微小な段差を呈示した場合の弁別閾と主観的等価値を求める。

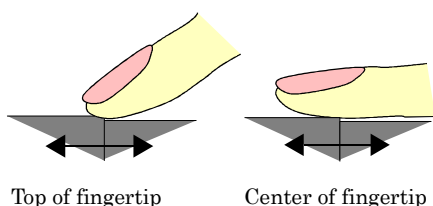


Fig. 6 Fingertip regions for presenting a step

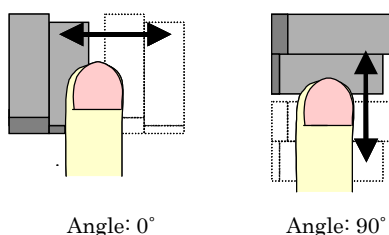


Fig. 7 Presentation angles of a step

4. 研究成果

(1)本研究では、ヒトの触覚の触覚認識機構を模倣した高機能・高感度な触覚センサを開発することを目的として、心理物理実験法によるヒトの触覚の触覚認識機構の解明、力覚センサと CMC センサ素子を組み合わせたハイブリッド触覚センサシステムの開発、CMC センサ素子における 10 μm 以下の微小な機械的変形に対する応答特性、およびセンサ素子に物体を近づけたときの CMC 触覚センサの近接覚特性の評価などを行った。

(2)CMC センサ素子における微小な機械的変形に対する応答特性の評価を行った。センサ素子を 0 ~ 125 μm 圧縮変形し、その過程で 1 ~ 9 μm の微小変形を与えたときの CMC 触覚センサと力覚センサの出力を測定した。CMC 触覚センサ出力を図8に示す。数 μm の微小変形に対するセンサの出力変化が圧縮量に依存し、その変化幅は圧縮量が大きくなるに

つれて大きくなることがわかった。さらにこの特性はセンサ素子にかかる力と相関があることも示唆された。

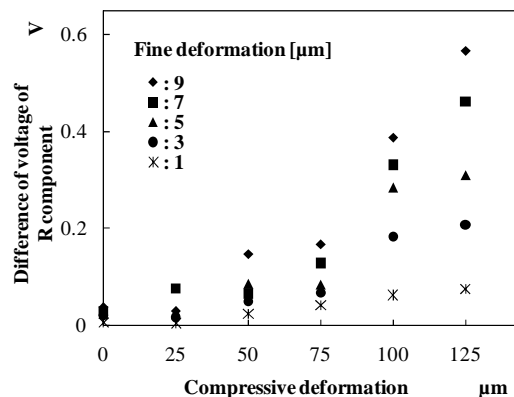


Fig. 8 Relationship among the CMC sensor's output differences of R component for the fine deformations of 1 to 9 μm and the compressive deformations of 0 to 125 μm

(3)CMC センサ素子の応答特性に基づいて、センサ素子に生じた微小変形量を推定する技術を開発した。図1(a)と(b)に示した平面型 CMC センサ素子とドーム型 CMC センサ素子を用いたハイブリッド触覚センサシステムを用いて、微小変形量推定実験を行った。平面型センサでは、センサ素子を 50 ~ 125 μm 圧縮量した場合、その圧縮量を 5 ~ 10 μm 程度の誤差で、またそのとき同時に生じた 1 ~ 9 μm の微小変形量を 2 μm 程度の誤差で推定できた。他方、ドーム型センサでは、500 ~ 900 μm 圧縮量した場合、その圧縮量を 10 μm 以下の誤差で、1 ~ 9 μm の微小変形量を 1 μm 以下の誤差で推定できた。

(4)CMC 触覚センサの近接覚特性を測定した。アクリル板を CMC センサ素子から 20mm 離れた所から近づけたときのセンサ出力を測定した。それを図9に示す。アクリル板が近づくと R 成分が大きくなることがわかった。一方、LC 成分はほとんど変化しないことがわかった。

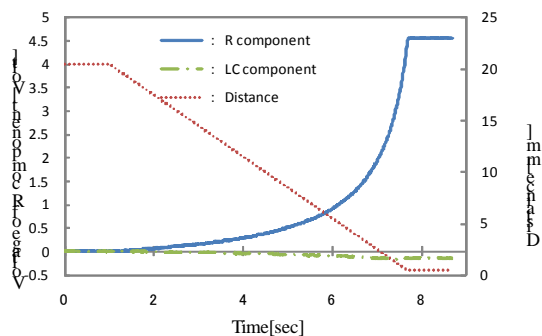


Fig. 9 Relationship among the CMC sensor's outputs for the distance between the sensor element and the object

(5)CMC 触覚センサの応答特性に基づいて、近づいてくる物体との距離を推定する技術を開発した。図 1(a)に示した平面型 CMC センサ素子を用いて、距離推定実験を行った。その結果、物体とセンサ素子の距離が 10mm 以下の場合、その距離を 1mm 以内の誤差で推定できることがわかった。

(6)微小段差刺激対の呈示方向が 0° vs. 0° あるいは 90° vs. 90° で、これらの刺激対を指の先端部あるいは指腹部に呈示したときの弁別閾と主観的等価値を表 1 に示す。弁別閾については、 $10\ \mu\text{m}$ の段差を指の先端部に 0° で呈示したとき $2.6\ \mu\text{m}$ 、指腹部に 0° 、 90° で呈示したときそれぞれ $2.6\ \mu\text{m}$ 、 $2.5\ \mu\text{m}$ となり、これらの呈示条件では、弁別閾はほぼ同じ値となった。これに対して、指の先端部に 90° で呈示したとき弁別閾は $2.0\ \mu\text{m}$ となり、ほかの値と比べて小さくなった。これらの結果から、指の先端部では、呈示方向が 0° の場合は $10.0\ \mu\text{m}$ と $12.6\ \mu\text{m}$ の段差のどちらが大きいかを 75% の確率で弁別できることがわかり、呈示方向が 90° の場合は $10.0\ \mu\text{m}$ と $12.0\ \mu\text{m}$ を 75% の確率で弁別できることがわかる。これは、指の先端部の段差弁別の分解能が、刺激の呈示方向が 0° のときよりも 90° のときのほうが高いことを示している。この要因としては、呈示方向が 90° の場合、段差が指紋の縞模様引っかかるように呈示され、触覚受容器への刺激が大きくなるためと考えられる。一方、指の指腹部では、刺激対の呈示方向が 0° 、 90° の場合、段差弁別の分解能が変わらないことを示している。なお主観的等価値については、いずれの呈示条件においてもほぼ $10.0\ \mu\text{m}$ となり、差は見られなかった。

Table 1 Difference thresholds and subjective equalities for a step-height of $10\ \mu\text{m}$

	Presentation angle [deg]	Difference threshold [μm]	Subjective equality [μm]
Top of fingertip	0 vs. 0	2.6	10.0
	90 vs. 90	2.0	10.1
Center of fingertip	0 vs. 0	2.6	9.9
	90 vs. 90	2.5	10.1

(7)微小段差刺激対の呈示方向が 0° vs. 0° あるいは 0° vs. 90° で、これらの刺激対を指の先端部あるいは指腹部に呈示したときの弁別閾と主観的等価値を求めた。主観的等価値を図 10 に示す。まず弁別閾について、微小段差刺激対の呈示方向が 0° vs. 0° のとき、指先端部では平均値が $1.9\ \mu\text{m}$ 、指腹部では $2.4\ \mu\text{m}$ となった。一方、呈示方向が 0° vs. 90° のとき、

指先端部では $2.3\ \mu\text{m}$ 、指腹部では $2.4\ \mu\text{m}$ となった。これより、呈示方向が同じ刺激対の場合、指先端部の弁別閾が指腹部より小さくなり、呈示方向が異なる刺激対の場合、指先端部と指腹部の弁別閾はほぼ同じ値となった。また、指先端部では、刺激対を同じ方向で呈示したときより、異なる方向で呈示したときのほうが弁別閾が大きくなることがわかる。つぎに主観的等価値については、刺激対の呈示方向が 0° vs. 0° と同じとき、指先端部と指腹部において、呈示された段差の値（標準刺激の値）とほぼ等しくなった。その一方、呈示方向が 0° vs. 90° と異なるとき、指先端部と指腹部において、呈示された段差の値より小さくなることがわかる。さらに、標準刺激の値と主観的等価値の差は、段差の値が大きくなるにつれて大きくなっていくことがわかる。これらの結果は、指先の触覚の弁別能力には方向性があることを示している。また、ヒトが指先で微小な刺激を知覚する場合、指を横に動かすよりも縦に動かすほうが刺激を大きく感じることを示唆している。

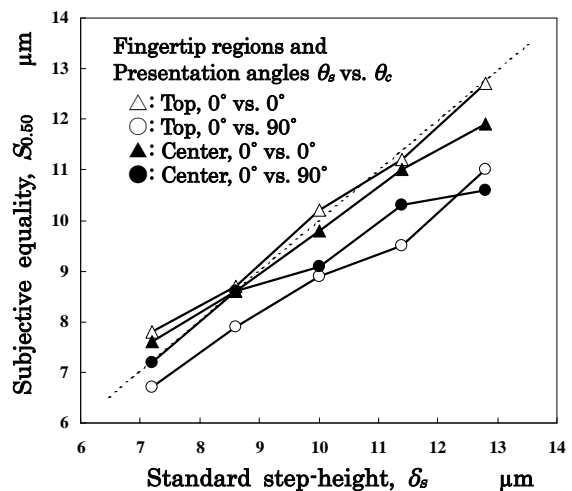


Fig. 10 Subjective equalities for a step-height with a fingertip region and presentation angle as parameter

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 10 件)

① 稲熊直人, 柘次金孝, 川村拓也, 谷和男, 山田宏尚, ロボットハンドのための CMC 触覚センサにおける近接覚特性の測定, 日本機械学会東海支部 第 60 期総会講演会講演論文集, p. 261, 2011, 査読無。

② 柘次金孝, 川村拓也, 谷和男, 山田宏尚, ロボット用指先型ハイブリッド触覚センサによる微小変形量の推定, 日本機械学会東海支部 第 60 期総会講演会講演論文集, p. 260, 2011, 査読無。

③Takuya Kawamura, Ko Nejigane, Kazuo Tani, Force Response Characteristics for Fine Deformation of CMC Touch Sensor in a Hybrid Tactile Sensor System, Proceedings of the 5th International Conference on Advanced Mechatronics (ICAM2010), pp. 345-350, 2010, 査読有.

④柁次金孝, 川村拓也, 山田宏尚, 谷和男, 微小変形時における CMC 触覚センサの力覚応答特性, 日本ロボット学会 第 28 回学術講演会 (RSJ2010) 予稿集, p. RSJ2010AC201-2, 2010, 査読無.

⑤Takuya Kawamura, Ko Nejigane, Kazuo Tani, Proposal of a Hybrid Tactile Sensor System and its Evaluation Method for Fine Deformation, Proceedings of the 1st International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors (IRIS2010), pp. 157- 162, 2010, 査読有.

⑥Takuya Kawamura, Naoki Tanaka, Kazuo Tani, Directionality of Tactile Sense of Human Finger on Fine Step-height Recognition, Proceedings of the 1st International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors (IRIS2010), pp. 151- 156, 2010, 査読有.

⑦Naoki Tanaka, Takuya Kawamura, Kazuo Tani, Directionality of Human Tactile Sensation Capability in Discriminating Fine Step-heights, Proceedings of the 18th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN 2009), pp. 1010-1015, 2009, 査読有.

⑧Takuya Kawamura, Yuki Otake, Kazuo Tani, Effect of Touching Manner and Motion Direction of Human Finger on Human Tactile Recognition, Proceedings of the 18th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN2009), pp. 998-1003, 2009, 査読有.

⑨柁次金孝, 川村拓也, 谷和男, ハイブリッド触覚センサシステムとその微小変形量の推定方法の提案, 日本ロボット学会 第 27 回学術講演会 (RSJ2009) 予稿集, p. RSJ2009AC3I2-01, 2009, 査読無.

⑩柁次金孝, 川村拓也, 谷和男, ハイブリッド触覚センサシステムとその微小変形量の推定方法の提案, 日本ロボット学会 第 27 回学術講演会 (RSJ2009) 予稿集, p. RSJ2009AC3I2-01, 2009, 査読無.

[学会発表] (計 10 件)

①稲熊直人, ロボットハンドのための CMC 触覚センサにおける近接覚特性の測定, 日本機械学会東海支部 第 60 期総会講演会, 2011.3.14-15, 豊橋, 愛知.

②柁次金孝, ロボット用指先型ハイブリッド触覚センサによる微小変形量の推定, 日本機械学会東海支部 第 60 期総会講演会,

2011.3.14-15, 豊橋, 愛知.

③Takuya Kawamura, Force Response Characteristics for Fine Deformation of CMC Touch Sensor in a Hybrid Tactile Sensor System, The 5th International Conference on Advanced Mechatronics (ICAM2010), October 4-6, 2010, Suita, Osaka.

④柁次金孝, 微小変形時における CMC 触覚センサの力覚応答特性, 日本ロボット学会 第 28 回学術講演会 (RSJ2010), 2010.9.22-24, 名古屋, 愛知.

⑤Takuya Kawamura, Proposal of a Hybrid Tactile Sensor System and its Evaluation Method for Fine Deformation, The 1st International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors (IRIS2010), March 8-11, 2010, Nagoya, Aichi.

⑥Takuya Kawamura, Directionality of Tactile Sense of Human Finger on Fine Step-height Recognition, The 1st International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors (IRIS2010), March 8-11, 2010, Nagoya, Aichi.

⑦Naoki Tanaka, Directionality of Human Tactile Sensation Capability in Discriminating Fine Step-heights, 18th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN2009), September 27-October 2, 2009, Toyama, Toyama.

⑧Takuya Kawamura, Effect of Touching Manner and Motion Direction of Human Finger on Human Tactile Recognition, 18th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN2009), September 27-October 2, 2009, Toyama, Toyama.

⑨柁次金孝, ハイブリッド触覚センサシステムとその微小変形量の推定方法の提案, 日本ロボット学会 第 27 回学術講演会 (RSJ2009), 2009.9.15-17, 横浜, 神奈川.

⑩柁次金孝, ハイブリッド触覚センサシステムとその微小変形量の推定方法の提案, 日本ロボット学会 第 27 回学術講演会 (RSJ2009), 2009.9.15-17, 横浜, 神奈川.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川村 拓也 (KAWAMURA TAKUYA)

岐阜大学・工学部・助教

研究者番号 : 50313911