

平成 21 年 5 月 20 日現在

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19700161
 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
 触覚センサの開発
 研究課題名（英文） Development of High Function and High Sensitivity Type 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：本研究では、カーボンマイクロコイル(CMC)を用いた触覚センサの応答特性を評価する装置を開発して、CMC センサ素子を数 μm から数十 μm 微小に圧縮変形したときの力と出力信号の関係を明らかにした。またヒトの触感覚認識機構については、指先の指紋の縞模様に着目し、ステップ状の数 μm の微小な段差を指先に呈示し弁別する心理物理実験を行って、指紋の縞模様が触感覚認識機構に及ぼす影響を定量的に明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	2,700,000	0	2,700,000
2008 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	180,000	3,480,000

研究分野：センサ工学

科研費の分科・細目：情報学，知覚情報処理・知能ロボティクス

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)を用いた触覚センサのセンサ素子の設計・開発に役立て、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スナー小体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 センサ素子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感度・高機能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 の微小な凹凸や物体把持のときの初期滑りなどの検出に適した CMC センサ素子の形状や構造を探るために、平面形状や指先のような半円形状などの様々な CMC センサ素子を作成し、数 μm から数十 μm の微小な変形や滑りに対する CMC センサ素子の触覚・圧覚特性を評価して、CMC センサ素子の設計・開発指針を得る。

(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)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) を用いた CMC 触覚センサが注目されている。本研究では、この触覚センサを搭載したロボットハンドで物体を把持させることを想定して、CMC 触覚センサを微小に圧縮変形させたときのセンサの出力とセンサ素子にかかる力を測定し、センサ出力と力の関係を明らかにする。

(2)ヒトは手で対象物の表面を触ることで、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。この機能は、皮膚表面の刺激を触覚受容器が受け取り、この反応が脳に伝わることにより実現されている。ヒトの指は、表皮、皮下組織、触覚受容器といった皮膚構造をしており、触覚受容器の感度向上には、指紋が重要な役割を担っていることがわかってきた。また、ヒトが表面の粗さなどの刺激を認識するときの指の相対的な動きは触運動と呼ばれ、触覚認識においては、この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。そこで本研究では、指の先端における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、「ヒトの指の指紋の縞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検討する。実験では、指の長手方向に対して垂直方向および平行方向に、10 μm 程度の微小な段差を動かして呈示した場合の弁別閾を求める。これにより、微小刺激を指先に呈示した場合、その方向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 に示すような CMC 触覚センサ素子 (縦 30 mm, 横 30 mm, 厚さ 3 mm) 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 触覚センサ素子は 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の変形すると、その電気的な共振特性が変化する。そこで本研究では、センサ信号処理装置 (シーエムシー技術開発 (株) 製 SA-1) 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、センサ素子の LC 成分と R 成分の変化を分けて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。

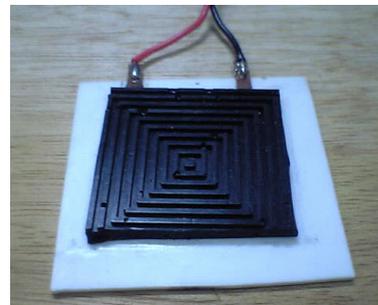


Fig. 1 Element of CMC touch sensor

(2)本研究では、CMC 触覚センサを数 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 2 に示すような CMC 触覚センサ評価システムを開発した。本システムは、XY ステージ、楔形 Z ステージ、6 軸力覚センサ (ビー・エル・オートテック (株) 製 MINI2/10)、レーザ測定器 (キーエンス社製 LT-9010M)、センサ信号処理装置などから構成される。CMC 触覚センサ素子は力覚センサの上に置かれ、楔形 Z ステージにより、固定されたアクリル板に垂直に押しつけて圧縮される。また XY ステージにより、同時に水平方向に変形させることも可能である。さらに、レーザ測定器によりセンサ

素子の圧縮量を同時に測定可能となっている。本実験では、楔形 Z ステージにより CMC 触覚センサ素子を垂直方向に圧縮変形し、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。

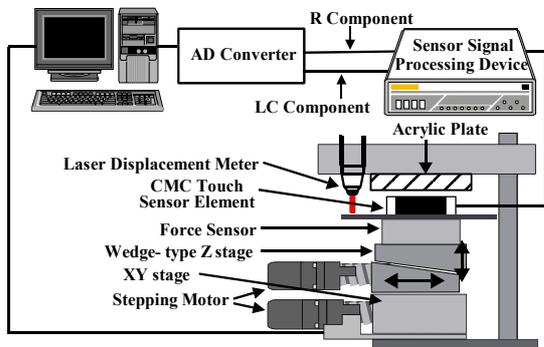


Fig. 2 Experiment system

(3)本研究では、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。これを図 3 に示す。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 $0 \sim 1000 \mu\text{m}$ 、呈示速度は $0 \sim 60 \text{ mm/s}$ 、呈示可能な方向は $0 \sim 180^\circ$ である。

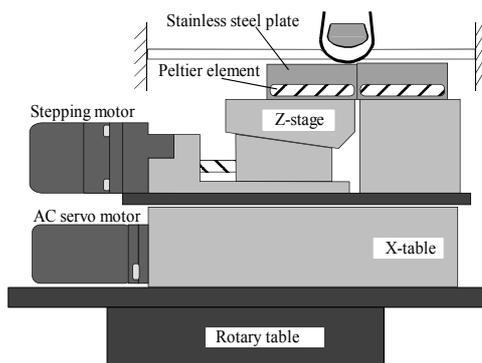


Fig. 3 Step-height presentation device

(4)心理物理実験とは、与えられた刺激強度とそれによって生じた感覚の大きさとの関係を調べる実験である。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を求める。弁別閾はヒトの触覚認識機構を解明するための有用なデータとなる。今回の実験では、弁別閾を求める手法として、PEST 法 (Parameter Estimation by Sequential Testing) を採用した。この方法は、コンピューターを用いた測定方法で、弁別閾を簡便に求めることができる。

(5)本研究では示指の腹ではなく、示指の先端に刺激を呈示する。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。この部分に $10 \mu\text{m}$ 程度の微小な段差を呈示した場合の弁別閾を求める。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覚知とする。また、呈示方向は、図 4 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°) の二通りとした。実験では、呈示方向が 0° の二つの段差を被験者に呈示しその大きさを弁別させる場合 (実験 1) と、呈示方向が 90° の場合 (実験 2) の二通りを行った。本実験では、段差量が $10.0 \mu\text{m}$ における上弁別閾を PEST 法に基づいて求めた。段差は被験者の右手示指に呈示し、このとき、段差を繰り返し動かす平均移動速度は 30 mm/s とした。なお、段差刺激に触れる時間は被験者の自由に任せた。また、段差の温度は $36 \sim 37^\circ\text{C}$ 、室温は $25 \sim 27^\circ\text{C}$ とした。被験者は二十代の男性 2 人で、各被験者が実験 1 と実験 2 をそれぞれ 4 回行った。

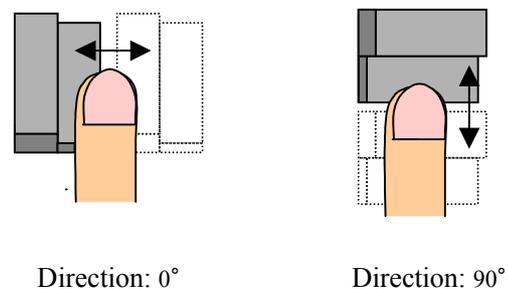


Fig. 4 Directions of the stimulus presentation

4. 研究成果

(1)ロボットハンドで物体を把持するとき、その把持力を触覚センサで計測することが重要である。そこで、CMC 触覚センサ素子を圧縮・開放変形したときの触覚センサの出力と、そのときセンサ素子にかかる力との関係を明らかにした。実験では、触覚センサ素子を $0 \sim 500 \mu\text{m}$ まで圧縮した。1 段階の Z ステージの移動量を $50 \mu\text{m}$ とし、それぞれの圧縮時における CMC 触覚センサの出力値、

力覚センサの出力値、レーザ測定器の計測値を取得した。500 μm 圧縮後、圧縮を開始した位置まで開放し、この過程でも同様にデータを取得した。500 μm 圧縮・開放したときの LC 成分の電圧変化を図 5 に示す。圧縮量が増加するにつれて電圧変化が大きくなっていくことがわかる。一方、圧縮の開始位置まで開放した場合、圧縮開始時と開放終了時の電圧値に差があり、ヒステリシスがあることがわかる。このため、CMC 触覚センサは力覚センサとして利用しにくいと考えられる。

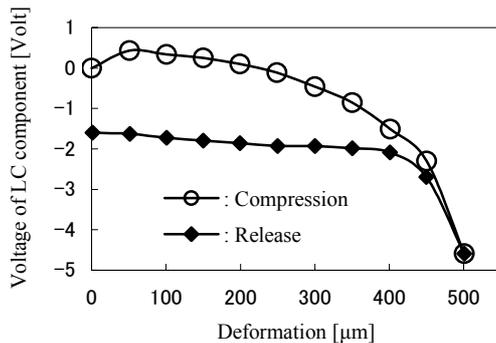


Fig. 5 Voltage of LC component for compression and release deformation of 0 to 500 μm

(2) ロボットハンドで物体を安定して把持するためには、物体の滑りを触覚センサで計測できることが重要である。把持物体が滑り出すときには、触覚センサに数 μm の微小な振動が起こると考えられる。そこで、CMC 触覚センサ素子を微小変形したときの触覚センサの出力と、そのときセンサ素子にかかる力との関係を明らかにした。実験では、触覚センサ素子の圧縮量を 0 ~ 500 μm まで、50 μm ずつ増やした。このときそれぞれの圧縮状態において、5 μm あるいは 10 μm の微小な圧縮・開放変形を繰り返し与えた。そのときの CMC 触覚センサの出力値、力覚センサの出力値、レーザ測定器の計測値を取得した。開放過程においても同様にデータを取得した。まず図 6 に、センサ素子を 250 μm 圧縮した状態で、10 μm の微小な圧縮・開放変形を繰り返し与えたときの LC 成分の電圧変化を示す。10 μm の微小な繰り返し変形に対して、電圧変化幅がほぼ一定であることがわかる。そこで、0 ~ 500 μm の圧縮・開放過程において、10 μm の圧縮・開放によって生じた変化量の平均値を図 7 に示す。本実験では、Z ステージを 10 μm 上下に 5 往復させたときの平均値を求めた。その結果、圧縮量の増減に伴って電圧変化幅も増減するという傾向が見られる。つぎに、微小な変形量と電圧変化幅との関係を調べるため、微小変形量を 5 μm としたときの平均値を求めた。図 8 に、微小変形量が 5 μm と 10 μm の場合の電圧変

化幅を示す。この図は、CMC 触覚センサを 500 μm 圧縮し 10 μm の微小変形を与えたときの電圧変化幅 0.377[V]、およびこのときの力覚センサの力の変化幅 262.4[gf] で正規化したものである。その結果、CMC 触覚センサと力覚センサは繰り返し微小変形に対してほとんど同様の応答を示している。また、微小変形に対する電圧変化幅は圧縮量に依存するということがわかり、5 μm から 10 μm に変形量を増加させると電圧変化幅の増幅度も増すという結果が得られた。

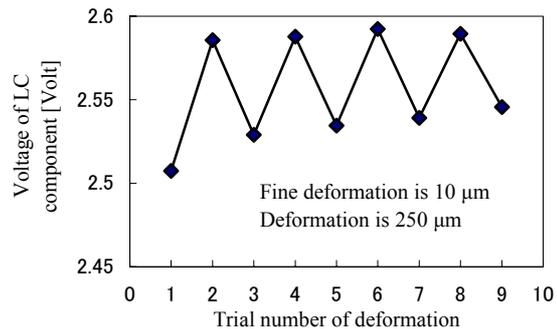


Fig. 6 Voltage of LC component for fine deformation of 10 μm

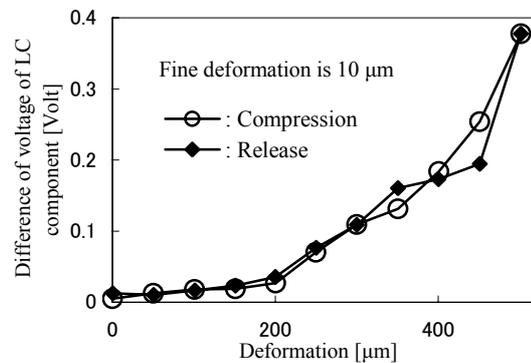


Fig. 7 Difference of voltage of LC component in fine compression and release deformation of 10 μm

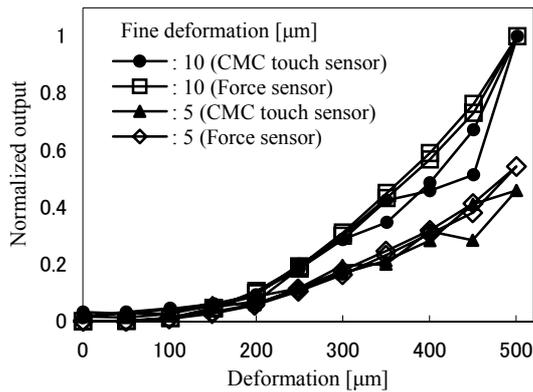


Fig. 8 Relationship between outputs of CMC touch sensor and force sensor

(3) 呈示方向が 0° の場合と 90° の場合の上弁別閾を表 1 に示す。表中の上弁別閾は実験から求められた 8 個の上弁別閾の平均値である。また下段に標準偏差を示す。上弁別閾の値から、呈示方向が 0° の場合は $10.0\mu\text{m}$ と $12.2\mu\text{m}$ 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 $11.3\mu\text{m}$ を 75% の確率で弁別できることがわかる。これは、ヒトの指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につかかると呈示され、触覚受容器への刺激が大きくなるためと考えられる。

Table 1 Upper threshold and standard deviation

	0° vs 0° (Exp. 1)	90° vs 90° (Exp. 2)
Upper threshold (μm)	2.2	1.3
Standard deviation (μm)	0.72	0.65

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 3 件)

- ① 柘次金孝, 川村拓也, 谷和男, CMC 触覚センサの微小圧縮変形時における力と出力信号の関係, 日本機械学会東海支部第 58 期総会講演会講演論文集, pp. 219-220, 2009, 査読無.
- ② 田中直樹, 川村拓也, 谷和男, ヒトの微小段差弁別における呈示方向の効果, ならびに指紋の影響についての考察, 第 29

回バイオメカニズム学術講演会予稿集, pp. 263-264, 2008, 査読無.

- ③ 中西雅人, 川村拓也, 谷和男, CMC 触覚センサの圧縮変形時の出力信号の解析, 第 28 回バイオメカニズム学術講演会予稿集, pp. 189-190, 2007, 査読無.

[学会発表] (計 3 件)

- ① 柘次金孝, CMC 触覚センサの微小圧縮変形時における力と出力信号の関係, 日本機械学会東海支部, 2009.3.18, 岐阜大学.
- ② 田中直樹, ヒトの微小段差弁別における呈示方向の効果, ならびに指紋の影響についての考察, バイオメカニズム学会, 2008.10.26, 広島大学.
- ③ 中西雅人, CMC 触覚センサの圧縮変形時の出力信号の解析, バイオメカニズム学会, 2007.11.11, 岐阜大学.

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