

平成22年 6月 4日現在

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2008～2009

課題番号：20760166

研究課題名（和文） 指に装着する触覚情報計測センサの開発

研究課題名（英文） Development of a Finger-Mounted Tactile Sensor

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・助教

研究者番号：90432286

研究成果の概要（和文）：自動化が進んだ産業分野においても、未だヒトの手により行われている作業現場は数多く、熟練したヒトの触覚が重要な役割を果たしている。本研究は、指装着型の触覚センサの開発を目的とする。指に装着することで、器用なヒトの手を利用し、現場に導入しやすく、直感的操作を可能とする。微小凹凸検査用センサを試作し、リアルタイムセンシングのための信号処理を実装した。実験結果は、センサが良好に微小凹凸を検出し、定性的に評価を行えることを示した。

研究成果の概要（英文）：Many tasks have still required human hand even in industry fields where automation technologies have been developed. Well-trained craftsworker's touch is indispensable. The aim of this study is the development of a finger-mounted tactile sensor. By mounting a sensor on finger, dexterous human fingers are applied to the sensing, it is easy to introduce into the task, and the intuitive sensing is given. A tactile sensor for small surface irregularity inspection was developed and real-time signal processing was introduced for detection and evaluation. Results show that the sensor can detect the surface irregularity and evaluate it relatively.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

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、ウェアラブル、リアルタイムセンシング、感度強化、

1. 研究開始当初の背景

自動化が進んだ産業分野においても、未だヒトの手により行われている作業現場は数多い。こうした現場では熟練したヒトの触覚が重要な役割を果たしている。例えば、自動車鋼板の面不良検査作業がある。表面の微小な凹凸をヒトの手（触覚）により検出する。

レーザー変位計やダイヤルゲージによる自動化も考えられるが、計測にかかる時間や安定性の面から導入は難しい。他にも、製品の手触りの評価や製品表面や金型などの微小な傷や粗さの検査、組立作業におけるコネクタの勘合の確認などは、指や手のひらを通じて得られる触覚情報が頼りである。また、こ

これらの作業はいずれも、ヒトの主観で行われているため客観評価も課題となっている。

さらに、上記のような作業は技能伝達の問題も含んでいる。触覚による作業は長年培われた匠の技により行われていることが多い。一方、流通速度が増し、グローバル化が進む現代において、労働者の回転も早く作業現場も国際的になりつつある。これにより、熟練者は減少しつつあり、以前のように長年かけて一つの技を身につけるといった状況は困難になりつつある。

以上の面から、誰でも簡単に使え、現場に導入しやすく、作業に関わる情報を客観評価でき、技能の伝達にも役立つような技術の開発が切に望まれている。

ここで、指に装着する触覚センサを考える。指に装着することで、以下の利点がある。

- ヒトの手の器用さを利用でき、現在手を使っている現場であれば、簡単に適用可能
- センシングのための駆動装置を必要とせず、現場への導入が容易
- リアルタイムで計測・提示することで、現在触っている場所の触覚情報として、使用者が直感的に認知できる。
- 現在の動作と同じ動作をセンシングに用いることで、目的とする触覚情報と深く関係する情報を検出・定量化できる可能性が高い。技能伝達の面でも有用。
- 将来的に、ロボットアームと組み合わせることで、自動化にも結びつく。

なお、これまでに力計測を目的とする指装着型センサは開発されているが、上述したような微小な凹凸等の触覚情報を計測するものは十分に開発されていない。

2. 研究の目的

以上を鑑み本研究では、ヒトの指に装着し触覚情報を計測できるセンサの開発を目的とする。計測目標とする触覚情報は、表面の微小な凹凸情報および振動情報である。ヒトの触覚は皮膚に生じた歪の時間変化に敏感である。したがって、なぞり動作などの能動触で生じた歪の変化が重要な要素として触覚に関わっており、これらの情報が作業現場で検出・定量化が必要な触覚情報に結びつくと考えられる。

3. 研究の方法

(1) 触覚センサの試作

ヒトの皮膚は数種の機械受容器が適材適所に配置されている。また、皮膚は介在物であり、これを通じて機械受容器は皮膚表面で生じた機械刺激を受感している、皮膚や機械受容器の構造には優れた触覚情報処理機構が隠されている。これらの構造から学ぶことで、特定の触覚情報に強い感度を示すセンサ

を開発できる可能性がある。そこで、信号処理や電氣的処理でなく、機械的な要素をセンサに付与することに注目する。このようなセンサは複雑なシステムを必要とせず、シンプルでロバストな検出能力を発揮できる可能性を有する。

また、センサの柔軟性も考慮する。ヒトの指は柔軟であり、これにより、様々な形状の対象面に対し皮膚を密着させ、安定してセンシングができる。センサを指に装着し自然に使用するために、ヒトの指と同程度の柔軟性を付与する。

以上の点に基づき、触覚センサの構造について検討し、センサを試作する。

(2) リアルタイムの計測システムの構築

センサ出力について、解析的・実験的に検討し、目的とする面不良を検出し、定量的に評価する信号処理を実装する。特に、リアルタイムの信号処理とすることで、直感的なセンシングを可能とする。また、開発したセンサシステムを用いて評価実験を行う。

4. 研究成果

(1) センサ形状によるセンシングの安定化

ヒトの指と接触するセンサ母材の形状に注目し、センサを指に装着して湾曲した表面をなぞる際、対象面との接触が安定するようなセンサ構造について検討した。数種の形状を有するセンサを試作し、なぞり時の接触面の動的な状態観察および表面粗さに対するセンサ出力について比較した。その結果、なぞり方向のセンサ両端部分を強く押さえられるセンサ母材形状にすると、ヒトが無意識的に対象表面からセンサが離れないようなぞり動作を行う傾向にあることがわかった。

(2) 弾性介在物による感度増強

感度向上のために、センサと対象面の間には弾性介在物を挿入することを検討した。適切な弾性介在物を挿入すると、対象面の微小凹凸などに起因する応力集中がセンサ内部に起こり、歪分布の範囲も広がる。したがって、弾性介在物を用いて、応力集中の起こる適切な位置にセンサ素子を配置することで、目的の微小凹凸に対して高感度のセンサを得ることができる。有限要素法解析および歪ゲージを用いたセンサによる実験を通じこの効果を確認した。

(3) 触覚センサの開発

検討に基づき、図1に示す指装着型触覚センサを試作した。センサは柔軟なゴム材からなっており、軍手内に埋め込まれている。対象面に対して、センサを押しつけなぞり動作を行うことで、微小凹凸の検出が行える。センサの中央部には隙間があり、センサの周辺

部分がヒト指と接触する。これにより、ヒト指の力はセンサ周辺に加わり、センシング面であるセンサ底面部分には間接的に比較的一様な荷重が加わる。さらに、センサ底面には、シリコンオイル（動粘度 $1.0 \text{ km}^2/\text{s}$ ）がテフロンシートに封入されたシリコンオイルシートが貼りつけてある。流体を介在させることで、センサ底面が対象面と隙間なく密着し、さらに指からの力を底面に均一に与える効果を持つ。なお、流体はある程度の粘性を必要とする。適度の粘性が、微小凹凸による変形をセンサ底面に伝える。

本センサはこの構造により、センサ底面と対象面との安定した接触を保持し、柔軟であることから曲面に対しても適用できる。また、センサは軍手程度の厚みとなっている。センサの厚みが大きすぎると、センサを動かす際に回転トルクが生じ、操作性を損なってしまう。

微小凹凸の検出は、センサ底面に貼り付けられた2枚の歪ゲージの差分を取ることで行う。曲率が均一な表面には反応せず、高い空間周波数を持つ湾曲した表面、すなわち微小凹凸をなぞった際には、大きな出力信号を得ることができる。なお、歪ゲージを点対象に配置したことにより、どの方向からも、微小凹凸に対しセンサが反応する。

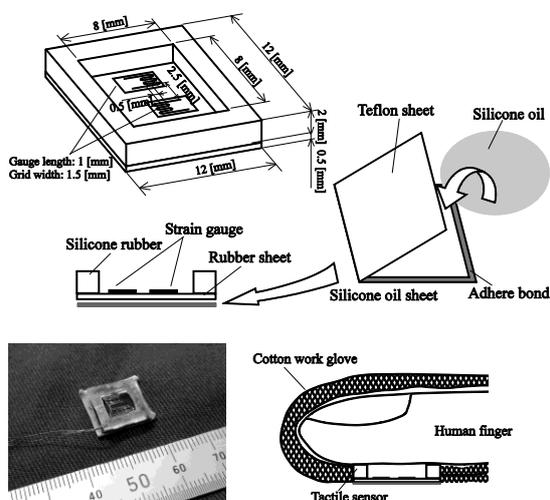


図1 開発した指装着型触覚センサ

(4) センサによる微小凹凸の定量評価に関する検討

微小凹凸に対しどのようなセンサ出力が得られるか、またそのセンサ出力特性について調べるため、図2に示すようなモデルを用いて解析を行った。図2に示すように、凸モデル上を、2枚の歪ゲージが指定した直線軌道に沿って動くことを考える。ただし、ゲージの向きが x 軸方向に固定されて動くとする。また、 y 軸とセンサ軌道のなす角度を θ 、凸の中心からの軌道の x 軸方向のずれを λ とする。

図3は、幅 $w=15 \text{ mm}$ 、高さ $h=0.02 \text{ mm}$ の凸に対するセンサの出力信号を、4種類のセンサ軌道に関して求めた解析結果である。図3より、全体として正弦波よりもやや鋭い波形を有する出力波形となることがわかる。軌道によりその形状が変化する。

センサが凸の中心を角度をつけずに通る場合 ($\theta=0, \lambda=0$) について、凸の幅 w および高さ h が変わったときに得られる出力波形の振幅値 (PP 値) を調べた。結果を図4に示す。図4(a)より、幅 w に応じて PP 値が滑らかに変化していることがわかる。特に、ある w に対して極値を持ち、 w が大きくなるにつれて PP 値は小さくなっている。極値の位置や大きさは、歪ゲージの大きさや2枚の歪ゲージの間隔により変化する。したがって、目標とする凹凸の大きさに応じて、適切にこれらを設定することにより、大きな出力信号を得ることができるといえる。また、極値周辺では、 w による出力の変化よりも h による出力の変化の方が大きく、 h の計測を行いやすいことがわかる。図4(b)からは、 h と PP 値は比例関係となっていることがわかる。

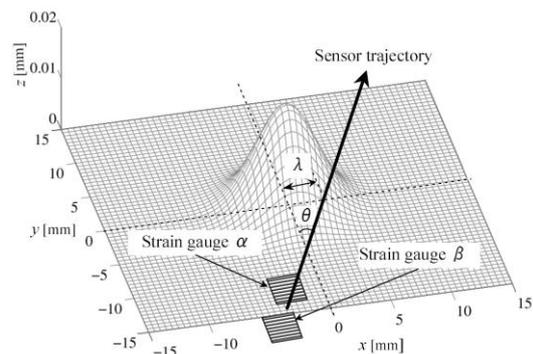


図2 解析で用いたモデル

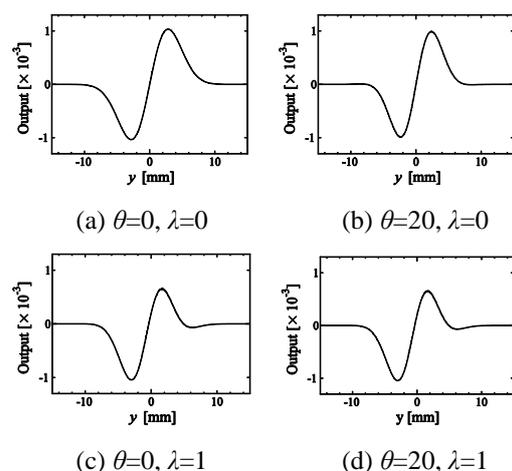
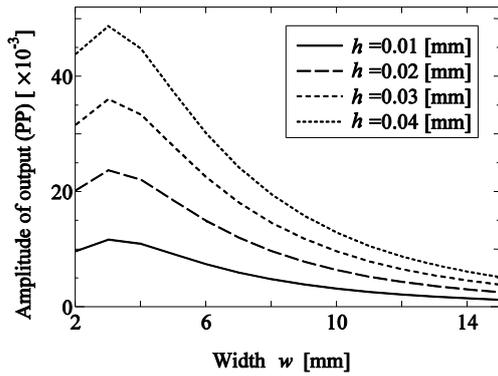
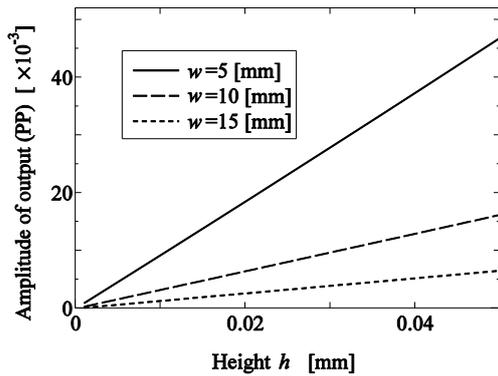


図3 センサ出力波形に関する解析結果



(a) 幅とセンサ出力の関係



(b) 高さでセンサ出力の関係

図4 微小凸の高さと幅に対するセンサ出力波形の振幅値に関する解析結果

(5) リアルタイム信号処理の構築

微小凹凸の検出・評価のための信号処理について検討した。特に、時間周波数解析の一種であるウェーブレット変換に注目した。ウェーブレット変換は、マザーウェーブレットと呼ばれる参照波形を用意し、これを時間軸に対しスケール変換およびシフトを施した波形に対し、得られた出力波形との類似の程度を測るものである。ここで、本センサでは曲率の均一な面では安定した出力信号を得ることができるが、摩擦や急激な動作の変化に由来する出力信号が少なからず生じてしまう。したがって、微小凹凸判定のためには、これらによる出力信号と分離して、微小凹凸による出力信号のみを検出する必要がある。ハイパスフィルタ処理では両者を分けることが不十分であり適さない。そこで、図3に示したような微小凹凸通過時の出力波形に似ているメキシカンハットと呼ばれるマザーウェーブレットを用いて、ウェーブレット変換を行い、得られたパワーから微小凹凸を判定し、評価を行う信号処理法を構築した。

図5および図6に開発したセンサシステム全体および信号処理の詳細を示す。図5に示すように、微小凹凸の検出は、音（ビープ音）およびPCモニター上にリアルタイムで提示される。信号処理では、始めに、ウェーブ

レット変換を行い、微小凹凸の候補となる出力波形を切り出す。さらに、切り出した波形に対し、微小凹凸の判定処理を行う。微小凹凸と判定された波形に対しローパスフィルタ処理を行い、PP値を求め、評価が行われる。これらの処理がセンサシステムにリアルタイムで実装された。

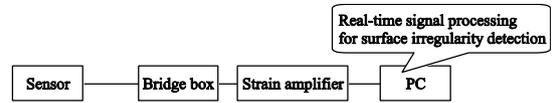


図5 センサシステム全体

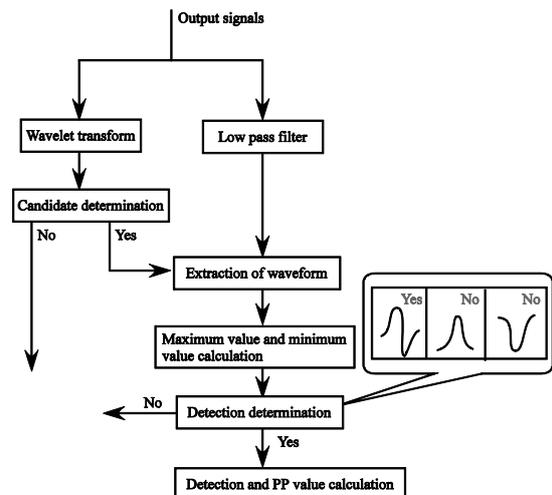


図6 リアルタイム信号処理

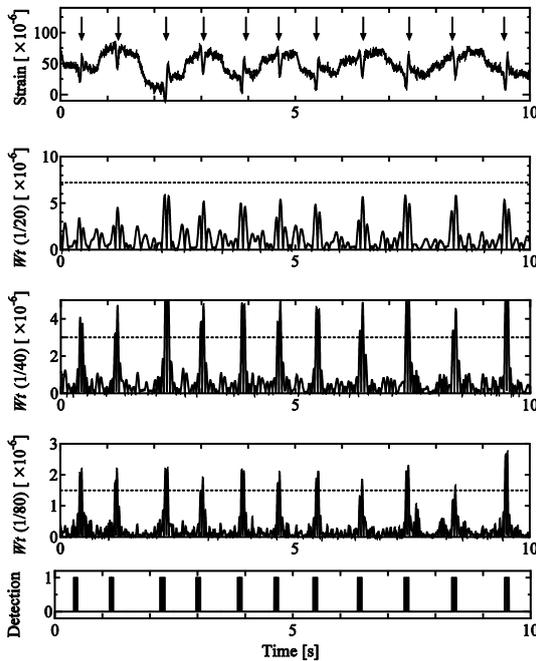
(6) 評価実験

開発したセンサシステムを用いて、複数人に対しセンサを装着し、微小凸に対するセンシングを行ってもらい、評価実験を行った。なお、実験時には、約100mm/sの速度で、微小凸上を往復運動でなぞってもらった。

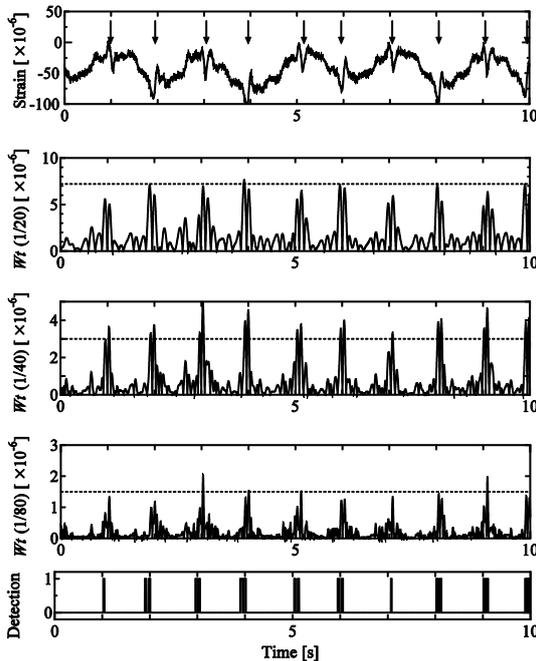
平面および曲面上に存在する微小凸（高さ約40 μ m、幅約20mm）について得られた代表的な結果を図7に示す。図7には、センサから得られた生の出力波形、リアルタイム信号処理における微小凹凸の切り出しのためのウェーブレット変換により求められた値 $Wt(a)$ 、 a はスケール変換の大きさ、および判定結果が示されている。図中の矢印は、凸通過時を示す。判定結果の1は検出した状態、0は検出していない状態を示す。図7より、平面と曲面どちらについても、良好に検出できていることがわかる。

また、2種類の微小凸（A: 高さ約30 μ m、幅約15mm、B: 高さ約20 μ m、幅約15mm）を用いて、定量評価について比較した結果を図8に示す。図8には、各微小凸に対して得られたセンサ出力の評価値（検出された出力波形の振幅値）が、各被験者（5名）につい

それぞれ示されている。図より、絶対的な大きさは異なるものの、全ての被験者が微小凸 A の方で高い出力を得ており、同一の人物であれば、大きさの評価も良好に行えることが確認された。



(a) 平面に対する実験結果



(b) 曲面 ($R=35\text{mm}$) に対する実験結果

図 7 平面および曲面上の微小凸に対するセンシング結果 (矢印は凸部を示す。点線は設定した閾値を示す。)

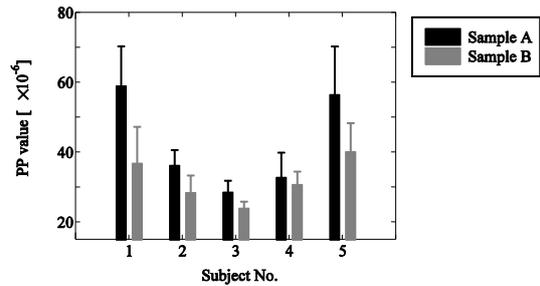


図 8 異なる大きさの微小凸に対するセンサ出力の比較実験

(7) まとめと今後の課題

機械的にセンシングを安定化し、感度を増強する構造について検討し、センサを試作した。さらに、リアルタイム信号処理を実装し、試作したセンサにより、微小凹凸を検出・評価可能なシステムを構築した。微小凸に対する評価実験により、その有効性を示した。

本センサは器用なヒトの手を利用するものであり、簡便ですぐに現場へ導入することができるだけでなく、直感的に作業者が使用できるセンサであり、ヒトへの親和性が高い。本研究では、産業分野における触覚の利用に着目しているが、ヒトの触覚が頼りの現場は医療分野でも多く存在する。本センサは、ヒトの手を利用することから応用展開が容易であり、様々な分野へ導入が期待できる。また、ヒトの触覚は未だ十分に明らかにされていない。本センサは、ヒトの特性を利用していることから、触覚研究の基盤要素としても利用が期待できる。

なお、今後の課題には、微小凹に対する評価実験およびセンサの改良、また、表面粗さ等のより小さい微小凹凸、振動のセンシングが挙げられる。センサ素子の最適化や、指紋のような凹凸をセンサ底面に付与するなどの方法が有効と考えられる。また、絶対的な評価に向けたセンサの改良や信号処理の改善も今後行っていく。

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)

- ① Yoshihiro Tanaka, Hideo Sato, and Hideo Fujimoto, Real-time inspection of surface irregularity by finger-mounted tactile sensor, Proceedings of the 18th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, 査読有, 2009, pp.442-447
- ② 田中由浩, 佐藤英雄, 藤本英雄, 指に装着する面歪検出用触覚センサの開発, 日本機械学会論文集 (C 編), 査読有, Vol.75,

2009, pp1639-1646

- ③ 田中由浩, 藤本英雄, 弾性介在物による触覚センサの感度強化と微小凹検出への応用, 第9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, 査読無, 2008, pp1003-1004
- ④ 佐藤英雄, 田中由浩, 藤本英雄, 触覚センサ形状が対象面との接触の安定性に及ぼす影響, 第9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, 査読無, 2008, pp1001-1002

[学会発表] (計5件)

- ① Yoshihiro Tanaka, Real-time inspection of surface irregularity by finger-mounted tactile sensor, The 18th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, 2009年9月29日, Toyama
- ② 田中由浩, 触覚センサの産業・医療分野への応用, 日本機械学会 No.09-54 講習会「触覚技術の基礎と応用」, 2009年7月31日, 名古屋
- ③ 田中由浩, 触覚センサの産業・医療分野への応用, 日本機械学会 No.09-53 講習会「触覚技術の基礎と応用」, 2009年7月24日, 大阪
- ④ 田中由浩, 弾性介在物による触覚センサの感度強化と微小凹検出への応用, 第9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, 2008年12月7日, 岐阜
- ⑤ 佐藤英雄, 触覚センサ形状が対象面との接触の安定性に及ぼす影響, 第9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, 2008年12月7日, 岐阜

[その他]

ホームページ等

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

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・助教

研究者番号: 90432286