

## 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 24 年 3 月 31 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2011

課題番号：22760177

研究課題名（和文）人間の触覚感度特性を実現する触覚センサの研究

研究課題名（英文）A Research on Tactile Sensor Whose Sensitivity is Similar to Human

研究代表者

嵯峨 智 (SAGA SATOSHI)

(東北大学・大学院情報科学研究科・助教)

研究者番号：10451535

研究成果の概要（和文）：

本研究では、我々が提案する反射型触覚センサにおいて、人間類似の触覚感度特性を実現する触覚センサを目指し、以下の検討を実施した。まず、透明弾性体の構成を検討し、ヒト類似のデザインが有効なことを示した。また、変形に伴う幾何光学的解析をシミュレーションおよび実機により実施し、全体最適化により正確な復元を実現した。さらに、本センサの応用装置として、センサの高速化や、アクティブセンシングによる高精度化を実現した。

研究成果の概要（英文）：

In this research, with our proposed reflection-based tactile sensor, we aim at realizing a sensitivity which is similar to human. First, we considered the construction of transparent rubber and found design of our sensor is suitable for human-like tactile sensor. Second, we considered and verified the geometrical optics under the deformation in simulation and implemented sensor. Furthermore, several applications such as fast sensing and active sensing were also considered.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成 22 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
平成 23 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

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：人間機械システム

## 1. 研究開始当初の背景

近年、ロボット技術の普及に伴い、多くのロボット様の機械が人間と身近な環境で動作することが求められるようになり、安全性の確保のため、さまざまなセンサが用いられてきている。中でも柔軟性、頑健性と精細な測定性能を合わせ持つ人間の触覚のようなセンサの登場が望まれている。また、近年失われつつある技能、伝統芸能を記録するシス

テムもいくつか開発されているが、こういったシステムでも、高度な技能を要求するものほど、精細な力情報を分布的な広がりをもって記録する必要がある。しかし、これら精細な力の分布を記録するための最適な触覚センサは現在までのところ開発されていない。加えて、iPhone などの例にみられるように、情報入出力機器におけるキーボードやマウス以外の直感的インタフェースへの希求も

強まっている。このような背景のもと、申請者は人間の触覚の物理的特性に類似したシリコンゴムを用いた構成により柔軟性と頑健性を保持しながらも、人間の触覚解像度程度に精細な変位情報を、分布的な広がりをもって測定可能なセンサを開発することを目的とする。具体的には、透明な弾性体を用い、空気との境界における反射特性を利用し、光てこにより変位が増幅された反射像を光学的に観察することで接触の状態を測定するセンサの開発および定量的評価を目指す。

## 2. 研究の目的

本研究では申請者発案の反射型触覚センサを用い、本センサの理論的解析、および実応用を目標とした研究を計画する。申請者は、反射型触覚センサの原理を用い、人間の触覚の物理的特性に類似した材料で、人間の触覚と同等の計測性能を持つ触覚センサの開発を行うことを目指す。

本センサは柔軟な反射膜と、光てこの原理を利用することにより、精細かつ分布的に接触と変形を計測するところに独創的新規性がある。本センサの光てこの情報拡大により、人間の触覚解像度である 0.1 mm 程度の高さ変位、200 Hz の振動変化を定量化する詳細な触覚情報を取得可能なセンサとして、人の感覚をもつロボットハンドや、直感的インタフェース機器が実現する。

## 3. 研究の方法

### (1) 透明弾性体の構成および形状の検討

透明弾性体として用いることのできる透明シリコンゴムの硬さ変化、ゴムの多層化による特性変化の効果を検証する。ゴムの硬さ変化のみにより、センサの測定レンジを操作できる本センサの特徴を定量的に検証することで本センサの計測レンジを特定する。これらの特性はシミュレーションや実装を通して調査する。また、シリコンゴムの形状についても自由度がある。測定面が平面であるプリズム状の形状の他に、測定面が曲率をもつ構成や、センサの厚みを変化させるための構成などの自由度(図2)がある。これらの特性も合わせて調査し、センシング対象に適切な構成を検討する。

### (2) 変形に伴う反射特性の幾何光学的解析

本センサは反射像の変形に基づきセンサ面の変形を再構成する。そのため、反射像の変形からセンサ面の変形を再構成するための逆問題を解く必要がある。本課題が本研究の核であり、最も困難なところとなる。これを幾何光学的手法により解析する。本解析については、前述の測定面に曲率があるセンサなどについても同様に実施する。また、シミュレーションにより光学的

変形画像を作成し、幾何光学の解析結果を適用することでセンサ面での変形を再構成する。再構成された変形とシミュレーションに与えた変形を比較することで解析の妥当性を検証する。

### (3) センサ試作および検証

幾何光学的に得られた解析結果に基づき、光学的な変形をカメラにより取得し、計算機を用いて変形を自動的に再構成するための枠組みを構築する。また、得られた再構成の結果と、実際の変形を比較することで実装されたセンサの性能を定量的に検証する。

### (4) 本センサの応用装置の検討、実装

本センサは構成要素が単純なため、さまざまなデバイスとの組み合わせによる機能付加が考えられる。接触面の状態と接触力など複数の情報の同時取得や、センサの高速化、視覚ディスプレイとの組み合わせによるインタラクティブデバイスなど、本センサの原理を用いたいくつかの応用装置について検討し、実際に実装を通して性能を検証する。以下にその一例を挙げる。

#### ● センサの高速化

前述のセンサ構造の検討とあわせ、センシング素子にカメラではなく、PD (photodetector) のような高速応答が可能な光学素子を用いることでセンシングの更新レートを向上させることができる(図3)。本高速化の素子配置や、測定精度などについて理論的解析と実装を通して検証する。

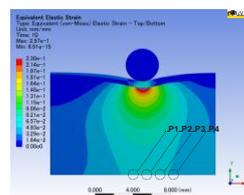
#### ● アクティブセンシング

本センサは静的な画像パターンへの反射像の変形を取得することでセンサ面の変形をとらえるが、画像パターンがシリコンゴムの外部にあるので、画像パターンをアクティブに変化させることができる。画像パターンのために液晶を用い、変形にあわせた画像変化によりセンサ感度を局所的に変化させることができ、天秤ばかりのような零位法を実現できる。このような能動計測手法について検討する。

## 4. 研究成果

### (1) 透明弾性体の構成および形状の検討

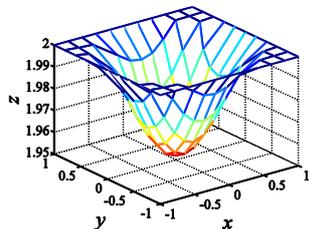
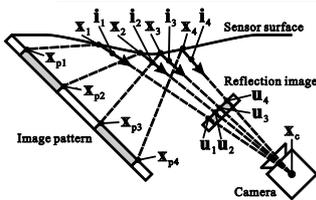
シリコンゴムの多層化に関しては、左図に示すような、有限要素法を用いたシミュレーションを通じた検証により次のことが明らかになった。



ヒトの皮膚構造を模した、比較的硬い表皮と比較的柔らかい真皮のような2層構造の場合、表皮部分が薄

いほど変形が局所化し、局所的に大きな画像変化が得られる。これはカメラによる空間的な高精細処理に適した変化であるといえる。一方、表皮部分を厚くするほど全体にひろがる変化を確認できる。こちらはLEDなど単純な光学素子による時間的な解像度を向上可能な変化であるといえる。このことはヒトの触覚における特性とも通じることがわかり、物理的にも機能的にもヒトに類似したセンサ設計が可能であることがわかった。

### (2) 変形に伴う反射特性の幾何光学的解析



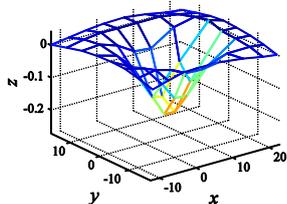
変形による光路変化を画像から取得することで形状を復元するためには、光路を適切に定式化し、画像から得られる情報に基づき復元を行う必要がある。左図のような光路の検討から、隣接点間の拘束式を定式化した。定式化だけでは

自由度が多いため、変形形状の2次元で近似することにより自由度を減らし、さらに全光線群の全体最適化を行うことにより、最適な形状復元手法を提案し、シミュレーションから復元手法が精度よく復元を実現することがわかった。

### (3) センサ試作および検証



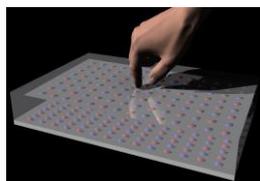
左図のようなセンサ実機を試作し、これに提案手法を実装した。本センサに対し、変位を加えたときの変化を用いて形状復元をした結果が左図である。これらの実験から、本装置が変位を定量的に計測できるセンサであることが明らかになった。



### (4) 本センサの応用装置の検討、実装

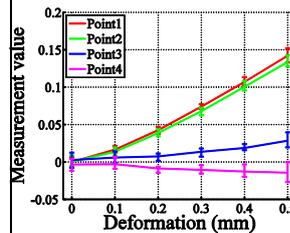
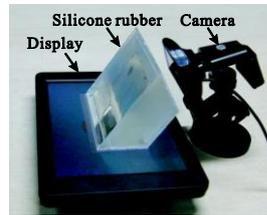
#### ● センサの高速化

前述のセンサ構造の検討とあわせ、センシング素子としてPDのような高速応答が可能な光学素子を用いた装置についての検討も行った。図のようなタッチパネル型の触覚センサにおい



て、素子配置や、測定精度などについてシミュレーションを通じた検証を行った。シミュレーションの結果から、素子配置と計測精度の関係を明らかにし、高速センサにおける設計指針を示した。

#### ● アクティブセンシング



提案するセンサにおいて、動的なパターンを利用した復元手法についても検討した。1フレーム前の復元情報を利用することで、現在提示すべき最適なパターンを生成し、これにより復元を行った。シミュレーションと実機(上図)による検証から、提案するアクティブセンシングが、静的なパターンによる復元より10倍程度の精度向上と、大変形に対するロバスト性の向上、測定における線形性(左図)を実現可能なことを示した。

### 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1件)

1. 嵯峨 智. 光学式触覚センサ -ヒトの触覚特性との対応-. 光アライアンス, Vol. 12, pp. 6-10, 2010. (査読無し)

[学会発表] (計23件)

1. Satoshi Saga and Koichiro Deguchi. Lateral-force-based 2.5-dimensional tactile display for touch screen. In Proceedings of Haptics Symposium 2012, 2012.(2012年3月4日, Vancouver, Canada)
2. 小見 耕太郎, 嵯峨 智, 岡谷 貴之, 出口 光一郎. 反射型触覚センサにおけるフォトディテクタ配置の設計と実装. In 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. (2011年12月23日, 京都)
3. 嵯峨 智, 出口 光一郎. 剪断力を用いた2.5次元触覚ディスプレイによる凹凸感提示手法の評価. In 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. (2011年12月23日, 京都)
4. 平良 亮祐, 嵯峨 智, 岡谷 貴之, 出口 光一郎. 反射型触覚センサにおける擬似的な零位法を用いたアクティブパター

- ンの実装. In 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.(2011 年 12 月 23 日, 京都)
5. 嵯峨 智, 出口 光一郎. 剪断力を用いた 2.5 次元触覚ディスプレイにおける定量的凹凸感提示. In 第 7 回力触覚の提示と計算研究会, 2011.(2011 年 11 月 25 日, 名古屋)
  6. 嵯峨 智, 出口 光一郎. 剪断力を用いた 2.5 次元触覚ディスプレイにおける実環境提示. In エンタテインメントコンピューティング 2011 予稿集, 2011.(2011 年 10 月 7 日, 東京)
  7. 平良 亮祐, 嵯峨 智, 岡谷 貴之, 出口 光一郎. 反射型触覚センサにおける最適なイメージパターンの検討. In 日本バーチャルリアリティ学会第 16 回大会論文集, 2011.(2011 年 9 月 22 日, 函館)
  8. 嵯峨 智, 出口 光一郎. 剪断力を用いた 2.5 次元触覚ディスプレイにおける定量的凹凸感提示手法. In 日本バーチャルリアリティ学会第 16 回大会論文集, 2011.(2011 年 9 月 22 日, 函館)
  9. 小見 耕太郎, 嵯峨 智, 岡谷 貴之, 出口 光一郎. 光学式触覚/近接覚センサにおける全反射方式と拡散反射方式の比較. In 日本バーチャルリアリティ学会第 16 回大会論文集, 2011. (2011 年 9 月 22 日, 函館)
  10. 嵯峨 智, 出口 光一郎. 剪断力を用いた 2.5 次元触覚ディスプレイにおける空間凹凸知覚. In ヒューマンインタフェースシンポジウム 2011 予稿集, 2011.(2011 年 9 月 13 日, 仙台)
  11. 嵯峨 智, 出口 光一郎. 剪断力を用いた 2.5 次元触覚ディスプレイによる凹凸感提示手法の検討. In 日本機械学会年次大会講演論文集, 2011.(2011 年 9 月 11 日, 東京)
  12. Ryosuke Taira, Satoshi Saga, Takayuki Okatani and Koichiro Deguchi. Optimum method for real-time reconstruction of sensor surface in total-internal-reflection based tactile sensor. In Proceedings of IEEE World Haptics 2011, 2011. (2011 年 6 月 21 日, Istanbul, Turkey)
  13. Momotaro Koike, Satoshi Saga, Takayuki Okatani and Koichiro Deguchi. Sensing method of total-internal-reflection-based tactile sensor. In Proceedings of IEEE World Haptics 2011, 2011. (2011 年 6 月 21 日, Istanbul, Turkey)
  14. 平良 亮祐, 嵯峨 智, 岡谷 貴之, 出口 光一郎. 反射型触覚センサにおける全体最適化を用いたセンサ面形状復元手法の実装. In Proceedings of the 2011 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, Okayama, Japan, 2011.(2011 年 5 月 26 日, 岡山)
  15. 小池 桃太郎, 嵯峨 智, 岡谷 貴之, 出口 光一郎. 拡散光を利用したタッチパネル型反射型触覚センサの設計と実装. In Proceedings of the 2011 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, Okayama, Japan, 2011.(2011 年 5 月 26 日, 岡山)
  16. 平良 亮祐, 嵯峨 智, 岡谷 貴之, 出口 光一郎. 反射型触覚センサにおける最適化を用いた実時間形状復元手法の改善. In 第 11 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, 2010. (2010 年 12 月 23 日, 仙台)
  17. 小池 桃太郎, 嵯峨 智, 岡谷 貴之, 出口 光一郎. 拡散光を利用したタッチパネル型反射型触覚センサの設計と評価. In 第 11 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, 2010. (2010 年 12 月 23 日, 仙台)
  18. 嵯峨 智, 出口 光一郎. タッチパネルインタフェースにおける剪断力による 2.5 次元触覚提示についての検討. In 第 5 回力触覚の提示と計算研究会, 2010. (2010 年 11 月 2 日, 仙台)
  19. 平良 亮祐, 嵯峨 智, 岡谷 貴之 & 出口 光一郎. 反射型触覚センサにおける最適化を用いた実時間形状復元手法. In 日本バーチャルリアリティ学会第 15 回大会論文集, 2010. (2010 年 9 月 15 日, 金沢)
  20. 小池 桃太郎, 嵯峨 智, 岡谷 貴之, 出口 光一郎. 拡散光を利用したタッチパネル型反射型触覚センサの設計. In 日本バーチャルリアリティ学会第 15 回大会論文集, 2010.(2010 年 9 月 15 日, 金沢)
  21. Ryosuke Taira, Satoshi Saga, Takayuki Okatani and Koichiro Deguchi. 3D reconstruction of reflective surface on reflection type tactile sensor using constraints of geometrical optics. In Proceedings of SICE Annual Conference 2010 in Taiwan, 2010. (2010 年 8 月 17 日, Taipei, Taiwan)
  22. 嵯峨 智. 触覚からひらく人工現実と形の世界. In 第 69 回 形の科学会シンポジウム予稿集, 2010. (2010 年 6 月 25 日, 東京)
  23. 平良 亮祐, 嵯峨 智, 岡谷 貴之, 出口 光一郎. 反射型触覚センサにおける汎用性の高い形状復元手法の提案. In Proceedings of the 2010 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, 2010. (2010 年 6 月 14 日, 旭川)

[その他]  
ホームページ等

[http://www.fractal.is.tohoku.ac.jp/2008/04/01\\_173147.html](http://www.fractal.is.tohoku.ac.jp/2008/04/01_173147.html)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

嗟峨 智 (SAGA SATOSHI)

東北大学・大学院情報科学研究科・助教

研究者番号：10451535

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：