

平成21年 5月 1日現在

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2006～2008

課題番号：18760302

研究課題名(和文)：多自由度分布型触覚センサの研究

研究課題名(英文)：Research on Multi DOF Distributed Tactile Sensor

研究代表者

梶本 裕之 (Hiroyuki Kajimoto)

電気通信大学・電気通信学部・准教授

研究者番号：80361541

研究成果の概要：

多自由度分布型触覚センサとは、表面に加わる力の分布を、方向も含めて計測できるセンサであり、従来の分布型触覚センサに比べてより多くの作業に必要な情報を所得できる。本研究ではこの型のセンサを設計するに当たって未だ提案されていなかった最適化規範を提案、実証すると共に、代表的な他自由度分布型触覚センサである人間の皮膚への効率的な触覚提示という応用を行った。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,100,000	0	1,100,000
2007年度	1,000,000	0	1,000,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	300,000	3,400,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：触覚センサ、触覚ディスプレイ、最適化問題、ヒューマンインタフェース、バーチャルリアリティ

1. 研究開始当初の背景

本研究は本研究計画代表者を含めたチームが提案、実装した光学式触覚センサを背景とする。

提案した触覚センサは透明弾性体、弾性体中に敷設されたマーカー、及び撮像系から構成される(図 1)。申請者らはマーカーの移動から表面に加わる力分布を方向も含めて逆算可能であることを示し、ロボットハンドの指先、および半球状ユーザインタフェースへの実装も行った。

本センサは柔軟性を持ち、任意形状に適用可能な分布型触覚センサとしては初めて力の

方向も含めて計測できるものであったが、マーカーの移動計測に通常の撮像系を用いるため、撮像系と弾性体表面間に必要な距離が問題となった。この問題点は他の機器への組み込みを困難にし、用途を大幅に限定することとなった。

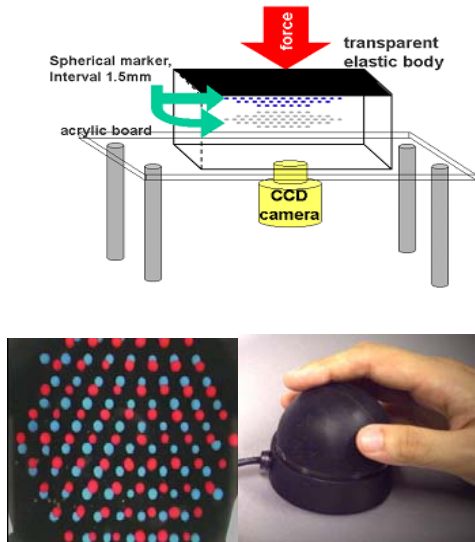


図 1 提案した触覚センサ. 構成, CCD 画像, ユーザインタフェースへの応用

2. 研究の目的

以上のような触覚センサ開発の現状から, 本研究は主に二つの目標を立てた.

(1) 第一に, 多自由度分布型触覚センサを設計するに当たって従うべき規範を確立することである. これは設計したセンサの「良さ」を, 実測のみによってではなく原理的に検証できる枠組みを与えるという意味を持つ.

(2) 第二に, 多自由度分布型触覚センサの代表的な例である人間の皮膚に対して同様の考察を適用することで, 効率よく触覚を提示できる触覚ディスプレイを提案することである.

3. 研究の方法

上記の主要な二つの目標に対し, 次のような方法で研究を行った.

(1) 多自由度分布型触覚センサの性質を, 表面力ベクトル分布から出力分布への写像行列によって表し, センサの「良さ」を写像行列の持つ特異値によって明確に定義した. 定義されたセンサの「良さ」が合理的であることを示すために, 最も代表的な多自由度分布型触覚センサの例である光学式触覚センサの例に適用し, 最適化した.

(2) またあらたに非常に感度の高い触覚センサを光でこの原理を用いて設計, 実証した.

(3) 人間の皮膚への効率的な触覚提示に関しては, 皮膚下の受容器深さに効率よくひずみエネルギーを生じさせる手法として, 皮膚表面に水平方向に変異を与える手法, および最適な間隔で垂直方向に多数の変位を与える手法をシミュレーションと心理物理実験によって検証した.

4. 研究成果

(1) 多自由度分布型触覚センサの「良さ」の定義

一般に力の方向も計測する力分布センサは次のことを行う.

まず力ベクトル分布が入力される. 計測点が N 個の場合, 力の成分が 3 要素であれば

$\mathbf{F} = [F_{x1} \ F_{y1} \ F_{z1} \ F_{x2} \ F_{y2} \ F_{z2} \ \dots \ F_{xN} \ F_{yN} \ F_{zN}]$ なる $3N$ 個の要素からなるベクトルが入力となる.

次に各センシングエレメントからの出力が観測される. 例えば各計測点が 4 つのセンサエレメントで構成される場合,

$\mathbf{O} = [O_{A1} \ O_{B1} \ O_{C1} \ O_{D1} \ O_{A2} \ \dots \ O_{AN} \ O_{BN} \ O_{CN} \ O_{DN}]$ なる $4N$ 個の要素からなるベクトルが出力となる.

弾性体とセンサ出力の線形性が仮定できれば, 力 \mathbf{F} と出力 \mathbf{O} の関係はある行列 \mathbf{H} によって $\mathbf{O} = \mathbf{H}\mathbf{F}$ と記述される.

結局, $\mathbf{F} = \mathbf{H}^{-1}\mathbf{O}$ という逆問題を解くことによって, 表面に加わる力は方向も含めて計測される. \mathbf{H}^{-1} は一般には擬似逆行列となる.

センサの性能は行列 \mathbf{H} によって決定される. よってセンサの設計とは, 行列 \mathbf{H} の設計に他ならない.

行列 \mathbf{H} の良さを次の 2 点から定義する. 第一に観測される出力ベクトル \mathbf{O} に含まれる, 測定したい力ベクトル \mathbf{F} の各成分の独立性である. 独立性が高いほど入出力間のクロストークが小さくなる. クロストークは逆行列 \mathbf{H}^{-1} によって解消されるものであるが, センサの S/N 比の悪化につながる. これに関しては行列 \mathbf{H} の特異値の最大値と最小値の比が 1 に近いほど独立性が保証されることが知られている.

第二にセンサそのものの敏感さ, すなわちゲインである. これには特異値の平均値を宛てる事が出来る.

結局, 独立性とゲインを共に考慮した行列の良さの指標として次の評価基準を選ぶ.

$$score = \frac{\min(\sigma_i)}{\max(\sigma_i)} \cdot mean(\sigma_i)$$

σ は行列 \mathbf{H} の特異値の集合を表す. \min , \max , $mean$ はそれぞれ最小, 最大, 平均を表す. 式から明らかなように, 第一項で独立性を, 第二項でゲインを評価している. 本稿では最も単純に二つの項を掛けたものを用いるが, 独立性とゲインのうちどちらを重視するかによって各項を適当に階乗することも考えられる.

(2) 定義した他自由度分布型触覚センサの設計規範の実証

検証においては図 2 に示すような光学式の触覚センサを考えた. 複数の発光素子 (LED) と受光素子 (PD) の配列上に透明弾性体層を乗せ, さらに弾性体カバーを被せる. 弾

性体カバー底面には凹凸がつけられ、力の作用点を限定する役割を果たす。力の向きによって反射板の変位、傾きが変わるため、隣り合った LED からの反射光の和と差をとることにより法線、接線方向の力を独立に計測出来る。

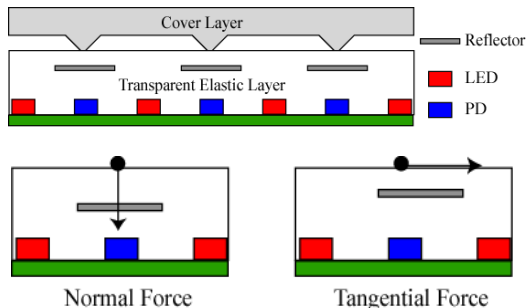


図 2 ケーススタディ用光学式触覚センサ

この結果、従来ヒューリスティックに求められていたセンサ形状と類似する結果が得られた(図 3)。

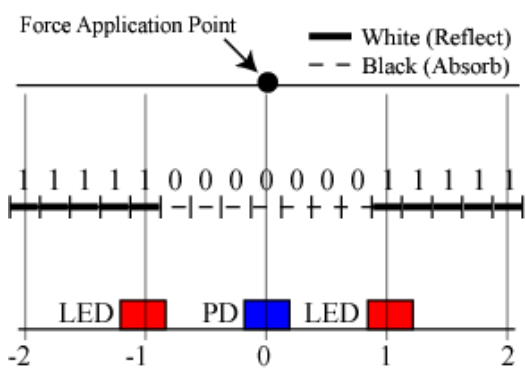


図 3 最適化された反射板配置

さらにこの LED-PD 対を無数に繰返し並べた場合の最適化も実現し、透明弾性体中に配置する反射板の最適形状を求めた。こちらの結果も従来手法で考えられていたものと酷似した最適化結果が得られた(図 4)。

以上の結果により従来の設計の妥当性が初めて数学的に保障された最適化の枠組みで検証された。

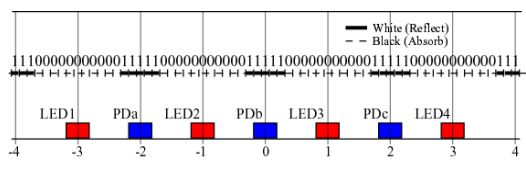


図 4 最適化された反射板配置 (多点の場合)

(3)あらたな分布型触覚センサの提案

またあらたな分布型触覚センサの提案、試作も行った。従来の光学式触覚センサが敷設されたマーカーの移動や傾きをカメラで計測するものであったのに対し、界面の全反射を用いる。画像パターンを界面に反射させ、このパターンの変形を見ることにより表面変位を逆算できることを示した。本手法は画像パターンを動的に変更することによって任意の解像度の触覚センシングが可能となるはじめてのシステムであると同時に、光テコの原理を用いているために極めて微弱な変位を検出できるという特徴を持つ。提案したセンサの評価を行い、実際に表面変位を再構成できることを示した。

(4)人間の皮膚の最適刺激手法の提案

現在、視聴覚に代わるポータブルデバイスの新たなインターフェースやアプリケーションとして、触覚の利用が注目されている。しかしポータブルデバイスのように地面に固定されていないものでは、力覚を提示することが困難である。

その一方、我々の力知覚は皮膚感覚のみによっても生じることがわかっている。

我々のこれまでの研究は多自由度触覚センサの最適なセンサ構成に関する議論に終始していたが、人間の皮膚が代表的な他自由度分布型触覚センサであることに着目し、接触形状が異なれば、同じ押し込み量でも知覚されやすさに違いが生じることに着目し、最も効率的に人間の皮膚を刺激し、以て擬似的な力覚を提示することを試みた。

本研究では、細い円柱が剣山のように密集した面を指先に提示することを考えた。剣山状の面では平面よりもエッジ部分が多いため、皮膚の変形によるひずみエネルギーを増加させることができる。例えば(図 5)のように穴のあいた板に指を触れていて、穴から剣山が生えてくれば、動的にひずみエネルギーを変化させることができる。このとき指の押し付け力が変化していないにも関わらず、力が強くなったと錯覚されるならば、システム全体として力の総和を変えずに擬似的な力を提示できることになる。

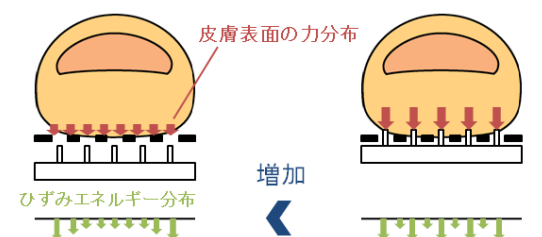


図 5 提案手法

(4)人間の皮膚の最適刺激手法の実証

剣山のトゲの間隔は、小さすぎれば皮膚の厚みによって凹凸がキャンセルされてしまうし、大きすぎればトゲのテクスチャ感が強くなりすぎる。

そこで、剣山状の接触面によって人間の指先の力弁別能力がどの程度変化するかを調べる実験を行った。実験では、人間の指先の二点弁別閾が約 2.0mm、表皮の厚みが約 0.7mmであることを考慮し、直径 0.7mm のトゲを 1.0mm, 1.5mm, 2.0mm 間隔に最密充填構造で配置した三種類の剣山を用意した。

実験装置を図 6 に示す。三種類の剣山状の面を比較刺激とし、比較刺激と同じ外形をした平らな面を標準刺激とした。

標準刺激の押し込み力 130gw に対し、比較刺激は 50gw から 200gw の間で 10gw ずつ変化させた。被験者に重いと感じたほうを左右どちらかで回答させ、極限法により主観的等価点を求めた。その結果、最も効率的に皮膚に擬似的な力感覚を生じるピン間隔は 1.5mm であり、その場合に約 10%の力の増加を知覚できることがわかった。

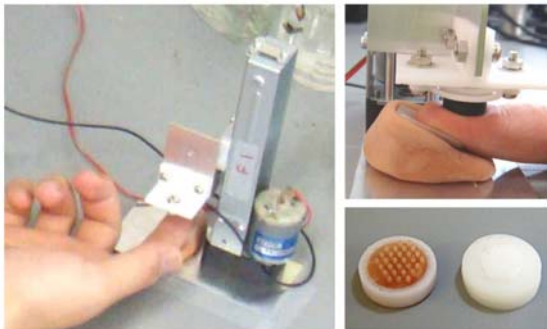


図 6 実験装置と実験に使用した比較刺激と標準刺激

(5)あらたな錯覚現象の発見

さらに実験の過程で、触覚でよく知られた錯覚現象である仮現運動とファントムセンセーションにおける新たな知見を得た。仮現運動は従来、2点を続けて刺激した場合に連続した運動となるという現象としてのみ理解されてきたが、同時に運動の「太さ」が刺激周波数によって変化することが見いだされた。一方、ファントムセンセーションは従来、2点を同時に刺激した場合に中間の点に触覚を生じる現象としてのみ理解されてきたが、同時に錯覚像の大きさ等の性質が刺激時間によって変化することが見いだされた。以上の知見は人間の触覚知覚に関する高次情報処理モデルの再考を促すものでと考えられる。

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 2 件)

- ① 梶本裕之: 力ベクトル分布センサの最適設計, 日本ロボット学会誌, vol. 26, pp. 68-73, 2007.
- ② Satoshi Saga, Hiroyuki Kajimoto, Susumu Tachi: High-resolution tactile sensor using the deformation of a reflection image, Sensor Review, Vol. 27, pp. 35-42, 2007.

[学会発表] (計 10 件)

- ① 加藤寛士, 橋本悠希, 梶本裕之: I ファントムセンセーション現象と刺激像の質的变化, 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
- ② 佐藤淑美, 橋本悠希, 梶本裕之: ポータブルデバイスのための擬似的な力覚の提示手法, 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
- ③ 中田五月, 橋本悠希, 梶本裕之: 足底皮膚刺激を用いたぐらつき感提示, 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
- ④ 加藤寛士, 橋本悠希, 梶本裕之: ファントムセンセーションの拡張に関する研究 (第 1 報): ファントムセンセーションに対する刺激特性の付加, 日本バーチャルリアリティ学会, 2008 年 9 月 24 日
- ⑤ 佐藤淑美, 橋本悠希, 梶本裕之: 皮膚接触面の形状変化による擬似的な力覚提示手法: 日本バーチャルリアリティ学会, 2008 年 9 月 24 日
- ⑥ Yuichiro Kojima, Yuki Hashimoto, Hiroyuki Kajimoto: A Handle Interface to Present Pressure Sensation by Using Locally Cancelled Strains, SICE Annual Conference, 2008/8/20
- ⑦ 梶本裕之: 光学式触覚センサの最適設計-最適化規範の提案と反射板形状設計への適用-, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2007 年 5 月 10 日
- ⑧ 嵯峨智, 梶本裕之, 館璋: 反射像の移動を用いる高解像度触覚センサーアクティブパターンの検討-日本バーチャルリアリティ学会, 2006 年 9 月 7 日
- ⑨ Satoshi Saga, Takeshi Morooka, Hiroyuki Kajimoto, Susumu Tachi: High-Resolution Tactile Sensor Using the Movement of a Reflected Image, Proceedings of EuroHaptics, pp. 81-86, 2006/7/3

- ⑩ 嵯峨智, 諸岡孟, 梶本裕之, 舘暲: 反射像の移動を用いる高解像度触覚センサ: Proceedings of the 2006 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, Waseda, 2P2-B06, 2006.5.26

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称: 反射像を用いた触覚センサ

発明者: 嵯峨智, 梶本裕之, 舘暲

権利者: 嵯峨智, 梶本裕之, 舘暲

種類: 特許出願

番号: 2006-179351

出願年月日: 2006年6月29日

国内外の別:

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ

<http://kaji-lab.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

梶本裕之 (KAJIMOTO HIROYUKI)

電気通信大学・電気通信学部・准教授

研究者番号: 80361541

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし