

三次元構造触覚センシングに関する研究

篠田 裕之

三次元構造触覚センシングに関する研究

1.1 研究の背景	1
1.2 研究の目的	2
1.3 研究の意義	3
1.4 研究の範囲	4
2. 関連技術の調査	10
2.1 触覚センシング技術	10
2.2 三次元構造触覚センシング技術	15
2.3 触覚センシング技術の応用	20
2.4 触覚センシング技術の課題	25
2.5 触覚センシング技術の将来	30
2.6 触覚センシング技術のまとめ	35
3. 本研究の概要	40
3.1 研究の目的	40
3.2 研究の意義	41
3.3 研究の範囲	42
3.4 研究の手法	43
3.5 研究の結果	44
3.6 研究のまとめ	45
4. 結論	50
4.1 研究の成果	50
4.2 研究の課題	51
4.3 研究の将来	52
4.4 研究のまとめ	53

篠田裕之

もくじ

1 序論	2
1.1 触覚センサへの期待	2
1.2 触覚センサ開発の現状	4
1.3 触覚センサへの課題	11
1.4 本論文のアプローチ - 皮膚の構造がもつ知能 -	12
2 触覚センシングの物理	18
2.1 内部状態の表示	18
2.2 微小歪みの仮定と半無限弾性体近似	21
2.3 弾性体内部状態と表面状態	21
2.3.1 デルタ関数	22
2.3.2 正弦関数	24
2.3.3 ウェーブレット基底関数	26
2.4 動的な場合	29
3 三次元構造触覚センサ ~ 垂直サンプリング法とそれに基づく指先型センサ ~	31
3.1 表面ダイバージェンスの弾性体内伝達特性	32
3.2 表面変形スペクトル情報の抽出	33
3.2.1 主要スペクトルの知覚	33
3.2.2 運動を用いた全スペクトルの知覚	33
3.3 垂直サンプリング法に基づく指先型センサ	35
3.3.1 センサの構造	35
3.3.2 滑り運動およびテクスチャの知覚	37
3.3.3 接触面積のセンシング	38
3.3.4 実験結果	40
3.4 本章のまとめ	45

4	三次元構造を利用したヒルベルト変換対の知覚	46
4.1	原理	46
4.2	実験的検証のためのセンサ	47
4.3	実験	48
4.3.1	実験結果	48
4.4	ヒルベルト変換センシングの応用	50
4.4.1	狭帯域信号に対する完全情報の取得	50
4.4.2	広範囲の信号特徴を得るための手がかり情報	51
4.5	本章のまとめ	53
5	微分検出素子によるフィルタバンク構築	55
5.1	弾性体の周波数展開機構	55
5.2	フィルタの特性	56
5.3	本章のまとめ	58
6	ダイバージェンスプローブ、シアプローブによる滑べりと摩擦係数の同時知覚	59
6.1	基本原理	59
6.1.1	ダイバージェンスプローブとシアプローブ	60
6.1.2	具体的なアルゴリズム	60
6.2	プローブの構造	61
6.3	実験的検証	62
6.4	本章のまとめ	65
7	テンソルセルによる高度触覚センシング	66
7.1	テンソルセル触覚センサの概要	66
7.2	センサ内部応力テンソルの固有構造と表面応力分布の関係	68
7.2.1	一点接触による応力テンソル	68
7.2.2	一般の場合	69
7.2.3	テンソル行列のランクによる接触形態分類	69
7.2.4	接触広がりパラメータの直接的な検出	70
7.3	テンソルセルの試作と実験結果	72
7.4	本章のまとめ	79

8	超音波エミッション触覚センサ	80
8.1	基本原理と明らかにすべき問題	82
8.2	接触による超音波放射：理論的解析	84
8.3	センサの試作と実験	86
8.3.1	超音波の検出	86
8.3.2	接触点の定位能力	86
8.3.3	複合波形の分解	91
8.3.4	滑りによる超音波放射	94
8.3.5	シリコンゴムによるセンサの試作と実験結果	97
8.4	本章のまとめ	99
9	非接触触覚センサ	100
9.1	硬さの指標	101
9.2	Z_0 の非接触測定	102
9.3	測定の基本原理	102
9.3.1	表面の駆動	102
9.3.2	振動測定	104
9.4	実験的検証	106
9.4.1	ジェット生成	106
9.4.2	ジェットによって対象表面に与えられる圧力分布	108
9.4.3	振動計測	115
9.5	硬さ計測の実際	115
9.6	本章のまとめ	121
10	結論	123

記号

変位ベクトル	$\mathbf{u}, (u_x, u_y, u_z), (u_r, u_\theta, u_\psi)$
変位のダイバージェンス	u
歪みテンソル	u_{ij}
応力テンソル	σ_{ij}
表面応力ベクトル	$\mathbf{s}, (s_x, s_y, s_z)$
物質密度	ρ
ヤング率	E
ポアソン比	σ

第 1 章

序論

本論文は新しい触覚センシングの構造について論じたものである。本章ではまず工学的な触覚センサが応用的見地からどのような期待を受け、そのためにどのようなセンサの開発が試みられてきたかをサーベイし、現状技術が抱えている問題点を整理する。次に従来の触覚センサにおいて見落とされていた着眼点が三次元構造の利用にあることを指摘する。

1.1 触覚センサへの期待

機械的接触に起因する現象を捉えるセンサを最も広義の触覚センサとすれば我々はごく基本的なツールとして多岐にわたる触覚センサを様々な場面で利用していることになる [30]。例えば日常生活で使用する各種の秤は、秤表面と接触対象との間の応力を検出する一種の触覚センサと見れるし、打楽器や弦楽器も機械的接触を検出して音に変換するという意味では触覚センサの働きをしている。また対象の温度を計ろうとして温度計を物体に接触させれば温度計は温度を代行する触覚センサとなっている。また我々を取り囲む種々の機械とそれを操作する人間とのインタフェイスの部分には、最も原始的なものとしてはスイッチ、さらにはキーボード、タッチパネル、マウスといった広い意味での触覚センサがふんだんに使われている。

ここで再び触覚センサという言葉のそもその由来である人間の触覚をながめてみると、ここには非常に多様な情報を取得する優秀な触覚センサの存在証明をみることができる。例えば我々は対象の接触やその強さおよび方向、表面温度や熱伝導度等を知覚するのみならず表面を軽くボンボンと触れたりさすったりすることによって表面性状や硬さあるいは粘度等の微妙な違いをいとも簡単に見分けるし、対象を把持する際にはその滑りや転がりの知覚あるいはその予知を行いながら常に最適な把持力で対象をつかむことができる。そしてこれらの知覚は振動やセンサ自身の変形

といった悪条件の中で遂行され、しかもそれらは全て同一の皮膚表面で行われる。

このような触覚を人工物として実現することへの要求はすでに多くの側面から生じており、これまでも様々な試みがなされてきている。

まず最初の強い要求は、人間がタスクを遂行する手順を手本に種々の作業の自動化を試みるロボット技術から生じた。そして人間が当たり前に行っている対象物の適切な把持や対象の知覚識別等のタスクを実現するための触覚センサの開発が主に1980年代以降積極的に進められてきている [56]。また最近注目を集める遠隔作業ロボットや Virtual Reality といった技術 [94] は、必ずしも自律的作業を目指すものではないが触覚とそのフィードバック [7] が重要である点は同じである [99]。

次に作業するロボットに必要な情報を与えるということと並んで重要な第二の要求は、対象の性質を探ることを第一目的としたセンサとしての役割である。我々は対象に実際に指を触れてみることによって視覚等では得られない様々な情報を取得する。すなわち微妙な触感の違いから果物の鮮度を判断したり医師の触診が癌などの重要な病気を発見する [60]。ここで我々の指先はしばしば少数のパラメータでは記述が困難な内部構造や粘弾性的性質に関する情報を取得し、それらと果物のおいしさや患者の病気との対応関係について多くの経験から得られた知識をもとに判断をおこなっている。そしてその判断はしばしば非常に的確である。このように我々自身によってその有効性をすでに実感している知覚手法を人工的に実現できないか、という考えから触覚センサが求められることになる。

さらに第三の要求は、実際に人間が触れた時どのような感じがするか、という感性情報を定量化する目的 [97] から生じるものである。製造技術の進歩によって製品の形状や質感等の設計の自由度が大きくなってきた分、それが人間にどのような印象を与えるか、ということが製品のよしあしを大きく左右する要因となってきている。人間の肌が触れることを前提にしたあらゆる製品についてはその触り心地の定量化が大きな課題となりつつある。このような要求は工業製品の評価に限らず種々の分野から生じているが [27]、こういった目的のためには特に人間と同じ知覚特性をもつ触覚センサが求められることになる。なお同様な触覚センサを必要とする応用目的として、触覚情報の提示技術をもう一つの課題とした触感の記録、伝送の試み [28] が最近興味を集めつつある。

そして最後に挙げるのが人間と機械のインタフェースとしての役割である。作業用ロボットの操縦や CAD システムにおいて現実のあるいは仮想的な 3 次元物体を操作する状況を考えると、このように自由度の大きい情報をどのように機械の側に伝えるか、ということが問題になってくる [95]。すでに馴染みの深いインタフェースであるスイッチやキーボードなどを単に組み合わせるだけでは使用者側の負担が非常に大

大きく、それがシステム全体の有用性を大きく低下させてしまう。またこれまでの計算機が一部の技術者やマニアからそれ以外の一般のユーザへ普及していった際には、キーボードに加えマウスが登場したことが重要な役割を果たしたと考えられるが、今後日常生活により高度な情報機器が入り込み、それらが積極的に使いこなされるようになるためには、特別の訓練なしに機械側と人間がコミュニケーションできることが必須の条件となる。このような背景からより洗練されたインタフェースが求められることになるが、このとき人間の触覚の知覚の多様性は注目に値する。すなわち計算機の入力側にも人間のそれと類似した特性をもちながら多様な知覚特性を有するセンサを考えることにより、多様な情報をしかも特殊な訓練なしに伝達可能となるようなインタフェースが実現できないか、という考えが生じてくることになる。

このように人間の触覚を手本とした触覚センサに対する各分野からの要求と期待は非常に大きく、これらの要請に答えられるセンサをどれだけ実現していけるかは次世代技術の全体像をも左右する重大なキーとなる。

そして最後に、触覚が人間あるいは生物全体がもつ巧妙な知覚あるいは情報処理手法を採求する上で都合な題材と考えられることを付記しておきたい。触覚は他の特化した器官と異なり、原始的な生物から高等生物に至るまで共通して存在し、その生存を支える上で最も基本的な働きをしている。にもかかわらず研究の蓄積は比較的浅く、他の分野の研究では見落とされがちで重大な知見がより容易に得られる可能性は高いと想像される。

以下ではこれらの期待を受けて、現在までのところどのような触覚センサが開発されてきたかを簡単にまとめ、問題点を整理する。

1.2 触覚センサ開発の現状

これまでのところ触覚センサに関する研究の大部分はロボットに必要な情報を与えることを第一目的としたものである。そこで本節ではそれらの研究を中心にその現状を概観していくことにする。

従来の一般的な認識において、触覚センサといえば、接触の有無、あるいは接触圧のセンサを指すものと定義されるか、あるいはこれらと同列に滑べり覚センサを加えたものがしばしばその定義とされている [38]。その際、触覚センサを用いる目的は (1) 接触の有無、(2) 垂直応力、トルク、シア等の接触力、(3) 滑べり、(4) 対象の位置、(5) 対象の形状、(6) 対象の材質、硬さ、表面状態、などの知覚情報を得るためであり、多くの触覚センサは、これらのうちの一つあるいは幾つかをセンスするものとして位置付けられている。

触覚センサの開発は単純な一点での接触の有無や応力を検出するセンサからはじまり、やがて人間の優れた触覚能力はその表面応力を2次元的な分布として獲得することによってはじめてもたらされるという認識から Harmon のアンケート結果 [21] を主な開発指針として 1980 年代以降、精力的に 2 次元分布応力検出型センサの開発が行なわれてきた。Fig. 1.1 に示すのは、Nicholls らのサーベイ [56] 等に従い、触覚センサの開発現況を、特に触覚情報の物理的な検出機構という観点からまとめたものである。

接触圧から電気信号への変換手法に関しては、(1) 抵抗変化型 (2) 容量変化型 (3) ピエゾ型 (4) 磁気型 (5) 光学型 (6) 機械的スイッチ、接点型 (7) その他、のように大別され、その出力には、オンオフの2値のものとアナログ出力のもの2種類がある。

以下では歴史的な経緯も踏まえながらこれまで提案されてきた代表的なセンサを分布型センサを中心に個別にとりあげていく。

[1] 木下、森のアレイセンサ (1972)

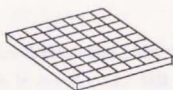
人工触覚を目指した先駆的な研究として 井上ら [29]、あるいは木下ら [36] の 2 次元アレイセンサの試みが挙げられる。木下らは素子直径 3mm のオンオフ型の接触センサを 4mm 間隔に 400 個 5 本指ハンドの指表面に配置し、これによって対象物の形状識別等の実験をおこなっている。検出原理は炭素を含ませたスポンジの上下を電極ではさみ上下電極間の距離変動による抵抗変化を検出し、ある閾値によって2値化するというものであった。ただしロボットハンドに実装した際にはスポンジは単にクッションとして用いられ、上下電極間の接触によるオンオフを検出原理としている。これらのセンサはパターン情報として触覚情報を得ようとした先駆的研究としての価値は非常に大きい。

[2] W. D. Hills の高分解能センサ (1982)

接触応力パターンを得る触覚センサとして 商業的なセンサにまで発展した最初の本格的なアレイセンサは Purbrick らの研究 [63] の流れを受け継ぎながら Hills によって一応の完成をみた 導電ゴム型の触覚センサである。Hills のセンサは「行」の電極をもつ基板と「列」の電極をもつ基板を背中合わせにしその周囲を ACS と呼ばれる異方性導電ゴムのシートでセパレータを介して覆った構造をしており、圧力によって電極と導電ゴムの接触面積が変化することによる抵抗変化を、電極の行と列を逐次指定しながら読んでいくことによって、2次元的な圧力分布を得るというもので

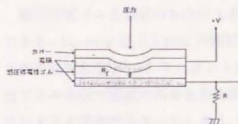


0次元



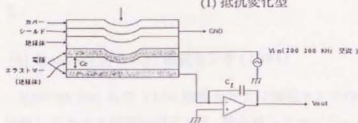
2次元

(a) センサ要素の配列次元



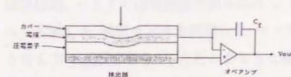
(1) 抵抗変化型

木下, 森 1972 導電ゴム, 形状識別
 Hills, 1982 接触抵抗, 異方性ゴム
 Raibert, 1984 導電ゴム, VLSI 触覚センサ
 石川, 下条 1988 導電ゴム, ピアオ出力
 Kowalski 1984 半導体圧力センサ



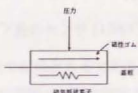
(2) 容量型

Siegel et al. 1987



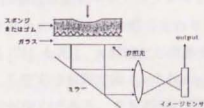
(3) ピエゾ型

Dario et al. 1987 2層構造
 De Rossi et al. 1987 6成分センサ



(4) 磁気型

木下ほか 1983 ホールIC
 Vranish 1986 磁気抵抗
 Hackwood et al. 1983 磁気抵抗, トルク検出



(5) 光学型

谷江ほか 1984 フォトトランジスタ
 Mott et al. 1984 CCD
 前川ほか 1991 PSD, 指先型
 Rebmán and Morris 1983 光遮断検出

Fig. 1.1 これまで提案されている触覚情報の検出手法. 図は文献 [30] より転載.

あった。このような構成をとることによって、簡単な構造と製法で精細な2次元アレイが実現され(1cm × 1cm 内に 16 × 16 エlement)、以後これと類似の構造の触覚センサが数多く開発された。

[3] Speeter の曲面センサ (1988)

感圧導電ゴムと類似のものでしばしば使われるのがFSRと呼ばれる感圧フィルムである。Speeterは0.5mm間隔程度のストライプ電極とFSRを実装したフィルムを指先曲面に巻きつけモーメント検出等の実験を行なっている[92, 93]。このセンサはフィルム状で柔軟であるため曲面に実装できるという特長があるが、実装後のセンサはすでに柔軟性を失ってしまう。同様なフィルム型センサは国内でも市販されている。

[4] Raibert の VLSI 触覚センサ (1984)

Raibert [64] らの VLSI 触覚センサは触覚センサのインテリジェント化を最初に具体化したものと位置付けられる。彼らはシリコンウェハ上に AD 変換器アレイ、並列演算回路、シリアル通信機能を組み込みシリコンウェハ上の露出した電極上に導電ゴムを配置した触覚センサを提案した。センサの末端で特徴抽出演算まで行なおうという考え方は重要であるが、ただこのような構成では演算部をいかに充実させてもその真価を発揮できるだけの入力信号が得るのは難しかったのではないかと予想される。

[5] 石川、下条のセンサ (1988)

日本国内で商用化にまで発展したセンサは石川、下条によるものが代表的である[32]。彼らは導電ゴム型の触覚センサの走査データをビデオ信号出力するセンサを開発し、画像処理装置やディスプレイを視覚センサと共用できることを強調した。このセンサはその後走査の際のまわりこみ信号を回避する回路上の改良等が行なわれている[71]。ただし大面積化が容易であるという特長を生かし、触覚センサというよりむしろ圧力分布測定器(pedobarograph)として、人間工学、あるいは動物行動学への応用が中心である。また石川は同時期に局所パターン処理用LSIを組み込んだセンサも開発しており[31]、触覚センサの知能化、アクティブセンシング、センサフェュージョンといった新しい視点を広く定着させた。

[6] Wolfenbuttel の容量型センサ (1993)

容量変化を利用したセンサアレイとしては Boie[3] に始まり Siegel[89], Fearing[14], Wolfenbuttel らのセンサが著名である。Wolfenbuttel らは ポリシリコン膜を用いるモノリシックな容量型圧力センサアレイを近年完成させている [106]。これは 2 次元圧力センサアレイとしてはマイクロマシニング技術を駆使した最も完成度の高いものの一つと言えるであろうが、センサに柔軟性を付与できないことが触覚センサとしてのネックとなろう。

[7] Fearing の研究

一方 Fearing の研究は 検出手法 (容量型) という側面よりもむしろ表面のカバーをセンサシステムの一部と認識し、アレイセンサの出力と表面応力の関係をきちんと議論している点が特色である。彼はこのセンサを用いて、接触点のより正確な定位や対象表面の曲率の推定 [15] など興味深い研究を行なっている。

[8] Dario の 2 層型圧電センサ (1987)

次に非常にユニークな構造をもつセンサが、圧電ポリマーを用いた Dario[9] らの指先型センサである。彼らは指の表面近く (エピダーマルセンサ) と深部 (ダーマルセンサ) の 2 層に圧電ポリマーを配し表面テクスチャ、形状、硬さ、熱伝導度 などの多様な情報を抽出している。このセンサは表層部と深部のセンサで知覚情報を分担している点でセンサの構造自体に一種のインテリジェンスが付与されているといえ、人間の触覚の構造との類似という観点からも大変興味深いセンサと言えよう。

[9] De Rossi の 6 成分センサ (1987)

同じく圧電ポリマーを用いたセンサに D. De Rossi[10] らの研究がある。彼らは人間の触覚についての生理学的な知識をもとに弾性体内部で 6 個の応力成分の全てを分離して知覚するセンサ提唱し、このセンサによって表面のより精細な応力分布を不良設定問題の正則化解法によって得ることを試みている。[11] 弾性体内部に 6 成分冗長に存在する応力テンソルから表面の情報をより多く取り出そうという着眼は、大変高く評価できるが、この逆問題解法の限界を指摘する報告もあり [13]、また 6 成分センサの実験的な試作検証は行われていない。

[10] 磁気を利用した Hackwood のセンサ (1983)

圧力の検出に 磁気を利用したセンサとしては コイルを利用した佐藤らの研究 [69], ホール素子を用いた木下の研究 [37] 磁気抵抗素子を用いた Vranish[103] あるいは Hackwood[18] らの研究が挙げられる。とくに Hackwood らは他の多くのセンサと異なり シア成分検出の重要性を強調し、彼らのセンサが表面応力3成分全てを検出することを指向している点は注目に値する。ただしこれを発展させた研究は現在までのところ見当たらない。

[11] 谷江らの光学型センサ

光を使った触覚センサは大別して二通りの方法が提案されている。一つはすでに足裏の圧力分布や歩行中の重心位置等を検出するために用いられていた pedobarograph[6] と呼ばれる手法を触覚センサに応用したもので、表面を覆うゴムシートが透明板表面に押しつけられたときの表面反射率変化を利用して圧力分布を光学的な像に変換し、それを撮像素子で検出するというものである。光検出素子としてフォトトランジスタアレイを用いた 谷江らの研究 [98], CCD を用いた Mott[54] らの研究さらにこれを球面状にし、検出素子に PSD を用いて専ら像の重心位置を検出する 前川らの研究 [48] 等が代表的である。これらはできあいの光検出素子を用いて精細な圧力分布が得られる点で好まれている方法でありこれらを実装したロボットの研究例は比較的多い [39]。

もう一つの手法は光遮断方式と呼ばれるもので、発光素子、受光素子とその間に配置された遮光物からなるセンシングサイトをアレイ状に並べたものである。圧力による遮光物の変位を受光強度の変化として検出する。これは 1 サイトあたり $2\text{mm} \times 2\text{mm}$ のものがすでに市販されている。[65]

[12] 超音波を利用した Grahn のセンサ (1986)

超音波パルスを利用したアレイ型センサが Grahn らによって提案されている。[17, 26] これは柔軟体背面の基板から発信されたパルスが表面で反射され帰ってくるまでの時間を計測して表面の垂直変位を計測するするもので、 1.6mm 間隔 16×16 のアレイで変位計測精度 $10\ \mu\text{m}$ 程度のものが現在報告されている。このセンサは直接計測される物理量が表面の垂直変位であることが特色である。

[13] AE を利用した Dornfeld のセンサ (1987)

また検出媒体として超音波を利用したものとして D. Dornfeld らは滑べりの際に発生する アコースティックエミッションを検出することによって滑べりを検出するセンサを提案している [12]。しかし彼らのセンサにおいては、せっかく短波長の弾性波を計測しているにもかかわらず、一般の AE 計測で中心的役割を果たす位相情報の利用が全くなされていないのが残念である。

[14] その他のセンサ

これまで述べてきたセンサ以外にも興味を引くものとして、CT の原理を応用した川嶋らの光学式イメージャ [35]、あるいは3次元的な柔らかさを強調した Russell らのセンサ等がある。川嶋らの研究はアプローチとしては大変面白いが、得られる結果が単なる接触像である限り、わざわざ CT の手法を用いるメリットは見出しにくいであろう。また Russell らのセンサは、フィルム状センサ等の柔軟性とは異なり、対象のくいを許容する3次元的な柔らかさを有している点が特長であるが、検出原理が単に導電ゴム型センサの導電ゴムを厚くしたものと殆んど変わらないのが残念である。

またねこヒゲセンサあるいは触角センサ [34] といったアプローチも興味深い。人間の触知覚においても体毛は重要な役割を果たしており [70]、その意味での今後の発展も大いにあり得よう。

またアレイセンサにおける応力の検出手法として忘れてはならないのが半導体抵抗のピエゾ性を利用したもの [43] である。マイクロマシニング技術を利用したアレイセンサにおいては今後中心的な役割を果たしていく可能性がある [106]。

[15] 最近の動向

垂直応力分布を計測する2次元アレイセンサの開発が最も盛んであった1980年代においてはアレイの精細化、面積化、ゴムのヒステリシス克服等を含む高精度化等が研究の mainstream であった。この背景にはその延長線上に標準的触覚デバイスと呼びうる一種万能のセンサが実現可能であろうという期待感があったように感じられる。しかし現実には平面的な対象を押し当てたときの輪郭やエッジを検出する以外、他の多くの役に立つ触覚情報を検出するセンサを実現することはできなかった。この事情の詳細は次節に譲るが、この反省からか、ここ数年は触覚センサへの取り組み方に変化が生じてきているように思われる。それは触覚情報の本質を問わずにセンサの構造自体から改めて検討していこうとする動きである。

まず Howe らは動的な接触情報を検出することが触覚において特に重要であると
して、これをはじめから主眼におき、それに合わせてその構造から検討し直したセン
サを提案した [23]。また Tremblay ら [101]、あるいは山田ら [107] のセンサも簡単な
構造でありながら、時間応答特性が高く [105]、滑べりや滑べりの中で検出される表面
凹凸情報、あるいは滑べりの予知情報を検出するものである。

以上簡単にこれまでの開発現状を概観してきたが、その期待の大きさに反し、満足
のゆくセンサが現状で得られているとは言いがたい [66]。

以下ではその問題点を、特に標準的触覚センサ、あるいは万能触覚センサとしての
発展を期待された 2 次元アレイセンサを念頭においてまとめてみる。

1.3 触覚センサへの課題

今後触覚センサが本格的な応用を得ていくためには以下の点が解決される必要が
ある。

[1] センサのやわらかさ

センサ自体の柔らかさの重要性についてはすでに多くの指摘がある [30]。例えば人
間の指先が剛体であれば器用な作業ができなくなることは容易に想像されよう。柔ら
かさは対象の把持をより容易にし、また対象との密な接触によってより多くの触覚情
報を取得することを可能にする。また特に人間と同じような知覚特性を必要とする応
用目的に対しては、センサ自体が人間の皮膚と同様な粘弾性的性質をもつことが、必
須要件になるとも考えられる。

これまで開発されてきた分布型のセンサの多くにおいては、硬い基板やフィルム上
に応力検出機構が集中し、柔らかさは専らその表面にかぶせられた柔軟体カバーからも
たらされる構造、あるいはこれに類する構造を有している [66]。このとき柔らかさを
得るために柔軟体の厚みを厚くするとその厚みに比例して細かいパターンに対する
感度が失われ、薄くすればその分柔らかさが失われるという一種のジレンマが生じ
ている [30]。

[2] 得られる情報の多様性と完結性

例えば滑べりを検出するセンサと垂直応力を知覚するセンサが空間的に離れた位
置に設置されたハンドは物体を正しく把持することが大変困難であろう。触覚センサ
が役にたつセンサとして利用されるためには、把持等において必要となる多様な触覚

情報が、すべて同一の接触面内において完結して得られることが必須要件となる。

このためには 単一皮膚内で、応力各成分、変位、温度など多自由度の物理パラメータが知覚されることがまず必要となる。次に バターン処理的な観点からすれば、空間的にも時間的にも非常に細かい特徴と、大局的な特徴の双方を捉えなければならない。

しかしこれを均質な 2 次元アレイセンサで実現しようとすれば、これらは非常に厳しい要求であると言わざるを得ない。まず多自由度の物理パラメータを、密にそして大量に、しかも均一な感度で取得しなければならない。そして重要な触覚情報の多くが動きの中で生じるものであることから、それらが高速で動作し [4, 105], なおかつ必要とする触覚情報がそこから高速に抽出されなければならない。

1.4 本論文のアプローチ - 皮膚の構造がもつ知能 -

センサ表面に与えられる外界からの物理的作用、すなわち応力や変形の時空間分布から必要な情報を抽出するインタフェースを触覚センサと位置付けるとすれば、2 次元アレイセンサは「表面での接触状態を完全検出するデバイス」と「そこから特徴を抽出するソフトの部分」という二極分化したシステムによってこれを実現しようとするものである。この取り組みにおいては、常に大量のデータを正確にデバイス部で検出し、処理部でごく一部の有用な情報のみ抽出するという遠回りな手順を強いられることになり、その過大なコスト、あるいは完全性に対する過大な要求が前述のような問題点を引き起こしていた。

本論文では触覚センサを構成する柔軟体の三次元的な広がりを物理的実体として明確に認識する。そして触覚センサの設計を三次元的な弾性体の場の中で触覚情報を抽出する構造を探索する問題として捉え直す。

このような問題設定によって我々は

1. 弾性体表面状態が深さ方向へ伝達していく物理的特性の利用,
2. 三次元的な広がりの中での新しい検出物理量と検出構造の導入,
3. 深さ方向への非均質な検出子の配置,

という新たな設計の自由度を取得したことになる。

ここから先に進むためには第一の鍵として、弾性体の物理的な振舞いが明確にされなければならない。第 2 章においてはセンシングへの積極的利用という視点からそれが整理し直される。その結果、均質等方な弾性体ですら実は情報処理場と呼ぶにふさわしい多様かつ巧妙な特性を有していること、そしてそれが触覚情報を抽出するための処理媒体としての役目を担い得ることが示唆される。

次にこの特性を積極的に利用する3次元センシング構造を考えることによって、局在した疎らな配置の検出子から有用な触覚情報が直接的に得られるようになること、その結果、センサの作製技術と信号処理双方の負担が軽減され、同時にセンサ自体の柔らかさも得られることを、具体的に3章以下で示していく。本論文で示す個々のアルゴリズムとその実現法は、互いに融合可能され、その結果多様な触覚情報を得るセンサが容易に実現されるものと期待される。

なお解剖学的な研究結果をみると[70, 5], このような3次元構造は人間の触覚においてはすでに実現されていることがわかる。皮膚の受容器の中で数10m/sの速いパルスの伝達速度有するII群求心性神経繊維に支配される受容器が機械的受容器とよばれ、これらが皮膚感覚のうち、組織を損傷しない程度の皮膚表面の小さな変形によって生じる感覚を司っていると考えられているが、それらが皮膚内部にどのように組み込まれているかを示したのがFig.1.2および1.3である。各受容器はユニット化され、比較的疎らにそして3次的に配置されている。

本論文の3章以下の構成をFig.1.4に示す。3章以下では論文タイトルにそのまま対応する大別して2つのアプローチ、

1. 情報処理媒体としての弾性体の準静的伝達特性の定式化とセンサへの積極的利用
2. センサ内部を伝搬する超音波の利用

に基づくセンサの具体的実現が示され、最後に触覚センサの新しい応用分野を開拓することを目的とした

3. 非接触触覚センサ

の試みが論じられる。

[1] 3次元構造触覚センサ

センサを構成する弾性体の3次的な状態は6つの応力成分(3軸方向の垂直応力およびせん断応力)の場として記述されるが、それはベクトルの分布(表面変位あるいは表面応力)として2次元表面に与えられるパターンに対しその観測可能な成分の数と弾性体の深さ方向の広がりという2つの意味で冗長な場を形成している。そして、そのような場を適切な視点からながめることによって、表面での重要な特徴が、物理的に観測容易な形でそこにあらわれてきていることが見い出されてくる。ここでは特に表面状態が内部へ伝達していく準静的特性に着目したセンサを提案していく。

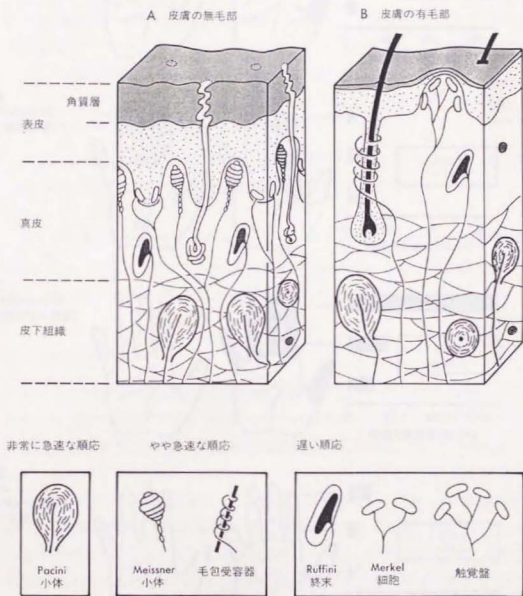


Fig. 1.2 人間の触覚の構造. 文献 [70] より転載.

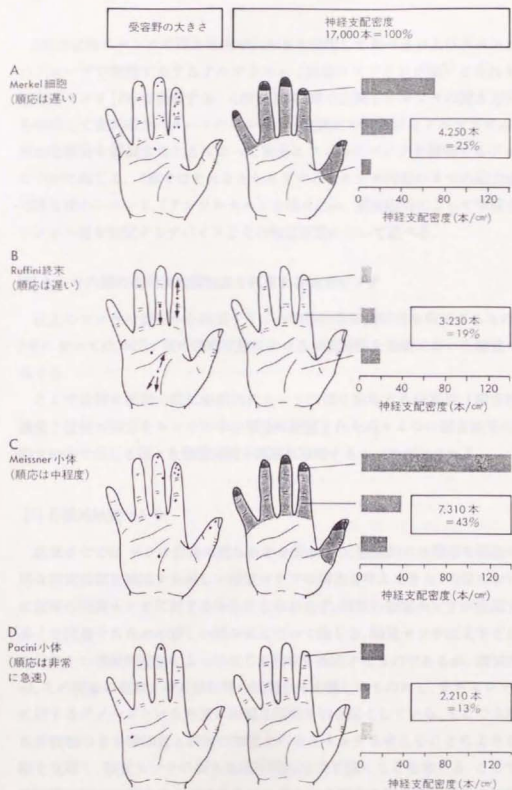


Fig. 1.3 人間の触覚における機械的受容器の分布. 文献 [70] より転載.

3章では特にセンサの深さ方向の広がりを利用して滑りおよびテクスチャを少数のプロープで知覚するアルゴリズム（垂直サンプリング法）とそれを利用した指先型センサ [79] を提案する。4章および5章では同じくセンサの深さ方向の広がりを利用して表面応力パターンのヒルベルト変換対を知覚するアルゴリズム並びに局所的な微分を観測することによって容易にフィルタバンクを構築するアルゴリズムについて論じる。7章ではそれをさらにすすめてセンサ内部の6つの応力成分を検出可能な微小ユニット（テンソルセル）を埋め込み、表面応力によって形成される応力テンソル場を知覚するデバイスとその触覚原理について述べる。

[2] センサ内部の高周波数弾性波を利用する触覚センサ

以上のセンサは表面から検出子までの準静的な伝達特性を利用するものであるが、8章においては MHz 域の高周波数における伝達特性を基礎においた触覚センサを提案する。

ここでは特に接触の際に必然的にセンサ内部に発生する超音波（超音波放射）の強度と位相の両方をセンサの中心部分に配置された高々4つの超音波受信子で捉え、動きの中で生じる様々な触覚情報を高速に取得するセンサが示される。

[3] 非接触触覚センサ

前章までではセンサ自身の柔らかさを保ちつつ、物理的には簡単な構造によって有用な触覚情報を抽出する新しい触覚センサの構造を考えてきた。9章においてはさらに従来の触覚センサに対する枠組にとらわれず、現状の触覚センサが直面する問題の多くを回避するための新しい試みについて論じる。触覚センサは文字どおりセンサと対象との機械的接触によって生じる情報を抽出するものであるが、機械的接触こそが、その現象の複雑さゆえ触覚の問題全体を難しいものにし、またセンサ、対象双方に対するダメージという非常に困難な問題を引き起こしている。そこで本章では対象に非接触のまま触覚と同等の知覚を行なうセンサを考えることによりこれらの困難を克服し、触覚センサの新たな応用範囲を切り開くことを考える。ここでは特に通常触覚以外では得ることができないと考えらる硬さの知覚を非接触で行なうセンサを考える。

1. 情報処理媒体としての皮膚（弾性体）の準静的伝達特性定式化とセンサへの積極的利用

1 自由度

- 垂直サンプリング法による滑りと表面粗さの検出
- ヘルベルト変換対の知覚
- 微分検出によるフィルタバンク構築

2 自由度

- Divergence および Shear プローブによる摩擦係数、空間周波数の同時検出

6 自由度

- テンソルセル触覚センサ

- 局在した検出子のまばらな配置
- 柔らかさ

2. 新しい検出物理量の導入

----- 超音波輻射触覚センサ

3. 新しい応用分野の開拓

----- 非接触触覚センサ

Fig. 1.4 本論文の構成.

第 2 章

触覚センシングの物理

本章では触覚センシングを考える上で、不可欠と考えられる最も基本的な物理的事項を整理する。本章は任意の触覚センサにおいて、そのセンサ出力がどのような触覚情報を反映するものであるかを考察し、設計の指針を得るための基礎を与えることを第一目的とする。

ただしここでは機械量から電気信号への変換手法等については論じない。あくまで目標は触覚センサ表面に与えられる任意の境界条件と、その下に埋め込まれた何等かの機械量トランスデューサの出力とを結び付ける中間部分の物理を明らかにすることである。

これまでの触覚センサにおいてはまずトランスデューサの部分設計し、表面の柔軟体カバーは、単に副次的なもの、さらにはセンサの性能を劣化させる要因、として捉えられることがしばしばであった [66]。この中間部分をセンシング機構の一部と見做してその影響を真面目に論じている研究は数少ない [9, 10, 14, 72]

しかし三次元構造触覚センサの設計においては、本章での議論は第一の鍵であり、以降で具体的に提案されるすべてのセンサの基礎となる。

2.1 内部状態の表示

まずこれからの議論の前提ともなるべく以下の事項について確認しておく。センサが対象と機械的に接触することによってセンサに生じる状態の変化を記述する手段として以下の3通りが考えられる。

1. 長さ次元の記述 — 柔軟体内部点の変位
2. 歪み次元（無次元）の記述 — 歪みテンソル、その他の変位微分量
3. 圧力次元の記述 — 応力テンソル

数学的にみればこれらはどの一つをとっても内部の状態を完全に記述可能であるが、センサの構造や対象との接触条件によって内部状態を決定するための境界条件が応力で与えられる場合と、変位で与えられる場合の両方があること、また検出子がどの物理量を検出するかによってセンサとしての特質も大きく左右されてくることから、これらの記述法の特徴と相互の関係を明確にしておく必要がある。

[1] 変位と歪み

歪みとは弾性エネルギーの変化を伴う材質の変位の仕方の特徴付ける量であり、歪みテンソルによって局所的な歪みは必要十分に記述される。数学的な手続きとしては変位 (u_x, u_y, u_z) のあらゆる方向についての空間一次微分から回転の成分を除いた対称行列として以下のように与えられる。

$$\begin{pmatrix} u_{xx} & u_{xy} & u_{xz} \\ & u_{yy} & u_{yz} \\ * & & u_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} u_x & \frac{\partial}{2\partial y} u_x + \frac{\partial}{2\partial x} u_y & \frac{\partial}{2\partial z} u_x + \frac{\partial}{2\partial x} u_z \\ & \frac{\partial}{\partial y} u_y & \frac{\partial}{2\partial z} u_y + \frac{\partial}{2\partial y} u_z \\ * & & \frac{\partial}{\partial z} u_z \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

これがテンソル量となる（座標変換に対しテンソル変換する）ことは、 u_{ij} が、長さ dl の任意の微小線素 (dl_x, dl_y, dl_z) の変形による長さ変化を

$$dl'^2 - dl^2 = \sum_{i,j=x,y,z} 2u_{ij} dl_i dl_j$$

のように与える係数であることから明らかである。テンソル行列の対角成分は x, y, z 軸に沿っての伸び率を表し、非対角成分、例えば u_{xy} は x 軸および y 軸に垂直な仮想微小平面の y および x 方向への横ずれ率から回転成分を除いたものである。一点での歪みテンソルはすでに変位自体の情報は失っているが、その近傍での 3 次元的な変形を完全に記述し、また次に述べるように応力と直接に関係付けられる。そして後で述べていくように弾性体内部のたかだか一点での歪みテンソルでさえ、すでに表面応力の大局的な分布特徴を捉える能力を有していることに注意する必要がある。

現実の触覚センシングにおける両者の役割をみてみると変位と歪みはいずれも不可欠な知覚量となっていると予想されるが、センシング対象としての両者の違いはセンサの設計段階から明確に意識されている必要があろう。例えば本来変位を知りたいのに歪みセンサを配置したセンサを設計しても、そこから例えば単純な積分演算等によって変位を求めるためには、センサの密な配置と各素子に対する非常に厳しい感度の均一性、およびオフセット、ドリフト特性等が要求されることに注意する必要がある。

[2] 応力と歪み

応力とは仮想的な微小平面を設定したとき、面の一方の側の媒体が面を介して他方の媒体に与えている力（を面積で割ったもの）である。媒体内に任意の面を設定したときの応力ベクトル s は応力テンソル σ_{ij} を用いて

$$\begin{pmatrix} s_x \\ s_y \\ s_z \end{pmatrix} = n_x \begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{xz} \end{pmatrix} + n_y \begin{pmatrix} \sigma_{xy} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{yz} \end{pmatrix} + n_z \begin{pmatrix} \sigma_{xz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zz} \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

のように与えられ、応力の状態は応力テンソルを用いて完全に記述される。ただし p は観測者側が、仮想面に対し、面の法線ベクトル (n_x, n_y, n_z) と同じ側にいるときに、面の観測者側の媒体が反対側の媒体に面を介して働きかける力（を面積で割ったもの）と定義している。

完全弾性体においては応力テンソルと歪みテンソルは以下のようなフック則によって局所的に相互変換される。

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ * & & \sigma_{zz} \end{pmatrix} = \frac{E}{1+\sigma} \left[\begin{pmatrix} u_{xx} & u_{xy} & u_{xz} \\ & u_{yy} & u_{yz} \\ * & & u_{zz} \end{pmatrix} + \frac{\sigma}{1-2\sigma} \operatorname{div} u \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ & 1 & 0 \\ * & & 1 \end{pmatrix} \right] \quad (2.3)$$

ただし $\operatorname{div} u = u_{xx} + u_{yy} + u_{zz}$ である。またこの逆形式は

$$\begin{pmatrix} u_{xx} & u_{xy} & u_{xz} \\ & u_{yy} & u_{yz} \\ * & & u_{zz} \end{pmatrix} = \frac{1+\sigma}{E} \left[\begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ * & & \sigma_{zz} \end{pmatrix} - \frac{\sigma(\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz})}{1+\sigma} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ & 1 & 0 \\ * & & 1 \end{pmatrix} \right] \quad (2.4)$$

で与えられる。ただし E は材質のヤング率、 σ はポアソン比である。この式からは、これら2種類の物理量は殆んど等価なものに感じられるが以下の条件

1. 材質のポアソン比 σ が 0.5 に近い場合。
2. 材質の粘弾性的性質が無視できない場合。

のいずれかが満たされるときは注意が必要である。なおこの二つの条件は触覚センサの材質として通常使用される密で柔らかいゴム状の材料においてはいずれもよくあてはまる条件である。

まずポアソン比が 0.5 に近い場合、弾性体の変形は等積変形のみが許されることになり、これは応力の対角成分がすべて等しいとき（等方圧縮）に限り歪みは殆んどおこらないことを意味する。さらに言い替えれば歪みテンソルの自由度は実質的には

$u_{xx} + u_{yy} + u_{zz} = 0$ なる拘束条件のもとで5自由度となる。このとき上述の変換式から明らかのように応力から歪みは安定に求まるが逆変換は不安定となり、状態の記述法としては応力がより完全なものとなる。もちろんこのことはセンシング対象としての優劣を意味するものではなくどちらがより有利な知覚量となるかはセンシング全体の目的と具体的な検出手法の問題を合わせて検討する必要があることを確認しておく。

次に材質の粘弾性的性質が無視できない場合を考える。この場合応力テンソルから歪みテンソルへの変換の係数 E および σ は時間周波数 ω の複素関数となり、現実には歪みの応力に対する時間おくれ、ヒステリシス、クリープといった現象となつてあらわれてくる。したがって例えば表面に与えられた力の情報を内部の応力検出素子で検出する場合は特に影響は生じないが、本質的には歪みや変位を検出する構成（例えば感圧導電ゴム型センサ [22]）で間接的に応力を検出しようとする場合等は注意が必要である。

2.2 微小歪みの仮定と半無限弾性体近似

次章からは半無限弾性体表面に応力あるいは変位境界条件を与えたときの弾性体内部の応力あるいは変位分布を計算していく。微小歪みと半無限を仮定することによって任意境界条件に対する応答を求めるための核関数が解析的に求まるがこの結果は任意のセンサあるいは検出子の出力と表面状態の関係を考察するための最も基本的なツールとなる。例えばセンサ表面が曲面である場合でも局所的な特徴を論じる多くの場合にはこの結果がそのまま使えるし、弾性体の厚みが薄い場合にも表面の細かい特徴は内部で素早く減衰していくため、その成分に関しては半無限の仮定は不自然な仮定とはならない。また例えば薄い柔軟カバーで覆われた検出子群の出力を求めたい場合にも、ここで得られた解の簡単な組み合わせで検出子表面での境界条件と矛盾しない解を得ることができよう。例えば文献 [14]。

2.3 弾性体内部状態と表面状態

以下では $z < 0$ の半無限空間を満たす弾性体の表面に働く力の分布を \mathbf{f} に対する入力とし、そのときの内部の変位あるいは応力を与える式を導いていくが、まず議論の初めに用語と表記を再確認しておく。「応力」はこれまで媒体の内部状態を表す物理量として専ら用いられてきたが、表面に与えられる入力としての力の分布を表すのにも「表面応力」のように特に区別しないで同じ言葉を用いることとする。ここでい

ら表面応力 $s(x, y)$ とは表面上の点 (x, y) に働く単位面積あたりの力ベクトルの分布であり、その直下の応力テンソルとは

$$s \equiv (s_x, s_y, s_z) = (\sigma_{xz}, \sigma_{yz}, \sigma_{zz})$$

のように結ばれる。

さて、これより表面応力分布を構成する基底関数として

1. デルタ関数
2. 正弦関数
3. ウェーブレット基底関数

の3通りについて内部の応力、変位を計算していく。なおここで弾性体は等方的、変位は微小であるとし、媒体の質量は考えない準静的な解を与える。動的な場合の解析結果は次章で述べる。不均質、非等方性媒体については、非常に興味深いものここでは論じない。

なお以下の解についての導出は省略するが、変位 u が基礎方程式

$$\frac{2\rho(1+\sigma)}{E} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \Delta u + \frac{1}{1-2\sigma} \text{grad div } u \quad (2.5)$$

において左辺を0とおいた式を満たし、かつ前の章で述べた応力-変位関係式に従っていること、さらに σ_{xz} , σ_{yz} , σ_{zz} に課せられる応力境界条件を満たすことは、容易に確かめられる。なお ρ は媒質の密度であり、 σ , E は粘弾性体の場合 時間周波数 ω の複素関数となる。

2.3.1 デルタ関数

表面上の一点 $x = y = z = 0$ に集中力が与えられたときその作用点を原点にとった極座標で表示した応力テンソル $T(r, \theta, \psi)$ は以下のように与えられる。

$$T(r, \theta, \psi) = \frac{3}{2\pi r^2} \left[\begin{pmatrix} -F_r & 0 & 0 \\ & 0 & 0 \\ * & & 0 \end{pmatrix} + \frac{1-2\sigma}{3} (A_1 F_r + A_2 F_\theta + A_3 F_\psi) \right] \quad (2.6)$$

$$A_1 = \frac{1}{1 + \cos \theta} \begin{pmatrix} \sin^2 \theta & \sin \theta \cos \theta & 0 \\ & \cos^2 \theta & 0 \\ * & & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

$$A_2 = \frac{-\sin \theta}{(1 + \cos \theta)^2} \begin{pmatrix} \sin^2 \theta & \sin \theta \cos \theta & 0 \\ & \cos^2 \theta & 0 \\ * & & -1 \end{pmatrix} \quad (2.8)$$

$$A_3 = \frac{-\sin \theta}{(1 + \cos \theta)^2} \begin{pmatrix} 0 & 0 & \sin \theta \\ & 0 & \cos \theta \\ * & & 0 \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

ただし極座標は

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r \sin \theta \cos \psi \\ -r \sin \theta \sin \psi \\ -r \cos \theta \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

となるように設定されており、 (F_r, F_θ, F_ψ) は表面に与えられる力ベクトルの極座標系における表示である。例えばデカルト座標系における表示が $\mathbf{F} = (F_x, 0, F_z)$ のとき

$$\begin{pmatrix} F_r \\ F_\theta \\ F_\psi \end{pmatrix} = F_x \begin{pmatrix} -\cos \theta \\ \sin \theta \\ 0 \end{pmatrix} + F_z \begin{pmatrix} \sin \theta \cos \psi \\ \cos \theta \cos \psi \\ -\sin \psi \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

である。またこのときの弾性体内部の変位ベクトルは同様の極座標を用いて

$$\frac{E}{1 + \sigma} \begin{pmatrix} u_r \\ u_\theta \\ u_\psi \end{pmatrix} = \frac{1}{2\pi r} \left[\begin{pmatrix} 2F_r \\ F_\theta \\ F_\psi \end{pmatrix} + \frac{1 - 2\sigma}{1 + \cos \theta} \begin{pmatrix} F_r \cos \theta (1 + \cos \theta) + F_\theta \sin \theta (1 - \cos \theta) \\ -F_r \sin \theta (1 + \cos \theta) + F_\theta (\sin^2 \theta + \cos \theta) \\ F_\psi \end{pmatrix} \right] \quad (2.12)$$

で与えられる。

ここで(2.6)式における $(1 - 2\sigma)(A_1 F_r + A_2 F_\theta + A_3 F_\psi)/3$ の項の全体に対する寄与をみてみると、 $(1 - 2\sigma)/3$ は多くのゴム状弾性体において 1% 程度であり、また A_1, A_2, A_3 の各成分は $\theta < \pi/2$ において 1 以下であることからこれらの項はほとんど無視できる大きさであることがわかる。したがって単一の集中力下での応力テンソルは、力の向きによらず加圧点と観測点を結ぶ方向の垂直応力のみが有意の値を持ち、その大きさは集中力ベクトルの観測点方向に対する射影成分で決定されるといってよい。

なお 2 次元問題における同様な問題の解は

$$\begin{pmatrix} \sigma_{rr} & \sigma_{r\theta} \\ * & \sigma_{\theta\theta} \end{pmatrix} = \frac{2}{\pi r} \begin{pmatrix} -F_r & 0 \\ * & 0 \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

で与えられ、(2.6)式における主要項に相当する部分のみが厳密解となることは興味深い。

次に(2.6)式の主要項を x - y - z デカルト座標で表示する。ここではより一般的に表面応力分布 $s(x, y)$ に対する内部応力テンソルを書くと

$$w(x, y, z) \equiv \frac{3}{2\pi(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (2.14)$$

$$T(x, y, z) \equiv \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ * & & \sigma_{zz} \end{pmatrix}_{(x, y, z)} = \int w(\alpha, \beta, z) \cdot s(x - \alpha, y - \beta) \begin{pmatrix} \alpha^2 & \alpha\beta & z\alpha \\ & \beta^2 & z\beta \\ * & & z^2 \end{pmatrix} d\alpha d\beta \quad (2.15)$$

となる。ただし $s(x, y) = (s_x(x, y), s_y(x, y), s_z(x, y))$ は弾性体の表面に対し、 x, y および z 方向に働く応力を表すベクトルである。

2.3.2 正弦関数

いま表面応力分布を

$$\begin{pmatrix} S_x(k_x, k_y) \\ S_y(k_x, k_y) \\ S_z(k_x, k_y) \end{pmatrix} = \int \begin{pmatrix} s_x(x, y) \\ s_y(x, y) \\ s_z(x, y) \end{pmatrix} e^{-ik_x x - ik_y y} dx dy \quad (2.16)$$

のようにフーリエ成分で表示することを考えると任意の深さ z における弾性体内部応力分布の x, y 方向に対するフーリエ変換表示は以下のように書かれる。

$$\begin{pmatrix} \Sigma_{xx} & \Sigma_{xy} & \Sigma_{xz} \\ & \Sigma_{yy} & \Sigma_{yz} \\ * & & \Sigma_{zz} \end{pmatrix}_{(k_x, k_y, z)} \equiv \int \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ * & & \sigma_{zz} \end{pmatrix} e^{-ik_x x - ik_y y} dx dy \\ = H_x S_x + H_y S_y + H_z S_z \quad (2.17)$$

ここで H_x, H_y, H_z は

$$\begin{pmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} ik_x/k & -(2-2\sigma)ik_x/k & ik_y/k \\ ik_y/k & -(2-2\sigma)ik_y/k & -ik_x/k \\ 1 & -(1-2\sigma) & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Phi_a \\ \Phi_b \\ \Phi_c \end{pmatrix} \quad (2.18)$$

$$\Phi_a = \begin{pmatrix} k_x^2 z/k + 1 & k_x k_y z/k & -i k_x z \\ & k_y^2 z/k + 1 & -i k_y z \\ * & & 1 - k z z \end{pmatrix} e^{kz} \\ + (1 - 2\sigma) \begin{pmatrix} -1 & 0 & i k_x/k \\ & -1 & i k_y/k \\ * & & 1 \end{pmatrix} e^{kz} \quad (2.19)$$

$$\Phi_b = \begin{pmatrix} -k_x^2/k^2 & -k_x k_y/k^2 & i k_x/k \\ & -k_y^2/k^2 & i k_y/k \\ * & & 1 \end{pmatrix} e^{kz} \quad (2.20)$$

$$\Phi_c = \begin{pmatrix} 2k_x k_y/k^2 & (k_y^2 - k_x^2)/k^2 & -i k_x/k \\ & -2k_x k_y/k^2 & i k_x/k \\ * & & 0 \end{pmatrix} e^{kz} \quad (2.21)$$

ただし $k \equiv \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$ である。なお Φ_a, Φ_b, Φ_c は弾性体内部に生じる3種類の変位場

$$\begin{pmatrix} U_x \\ U_y \\ U_z \end{pmatrix}_{(k_x, k_y, z)} = \frac{1 + \sigma}{E} \cdot \frac{1}{k} \left[\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 3 - 4\sigma \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} i k_x \\ i k_y \\ k \end{pmatrix} z \right] e^{kz} \quad (2.22)$$

$$\begin{pmatrix} U_x \\ U_y \\ U_z \end{pmatrix}_{(k_x, k_y, z)} = \frac{1 + \sigma}{E} \cdot \frac{1}{k^2} \begin{pmatrix} i k_x \\ i k_y \\ 1 \end{pmatrix} e^{kz} \quad (2.23)$$

$$\begin{pmatrix} U_x \\ U_y \\ U_z \end{pmatrix}_{(k_x, k_y, z)} = \frac{1 + \sigma}{E} \cdot \frac{1}{k^2} \begin{pmatrix} -2i k_y \\ 2i k_x \\ 0 \end{pmatrix} e^{kz} \quad (2.24)$$

にそれぞれ対応する応力場である。これより表面応力と内部および表面変位の関係のフーリエ変換表示も求められた。さて上記の表式のままでは大変見難いので特に (k_x, k_y) ベクトルに平行な座標軸をとった場合すなわち $(k_x, k_y) = (k_x, 0)$ の場合についての計算結果を与えておく。この場合には

$$H_x = \begin{pmatrix} i k_x z + 2i \operatorname{sgn}(k_x) & 0 & |k_x|z + 1 \\ & 2\sigma i \operatorname{sgn}(k_x) & 0 \\ * & & -i k_x z \end{pmatrix} e^{|k_x|z} \quad (2.25)$$

$$H_y = \begin{pmatrix} 0 & i \operatorname{sgn}(k_x) & 0 \\ & 0 & 1 \\ * & & 0 \end{pmatrix} e^{|k_x|z} \quad (2.26)$$

$$H_z = \begin{pmatrix} |k_x|z + 1 & 0 & -ik_x z \\ & 2\sigma & 0 \\ * & & 1 - |k_x|z \end{pmatrix} e^{|k_x|z} \quad (2.27)$$

となる。ただし $\operatorname{sgn}(k_x)$ は k_x の正負に対しそれぞれ 1 および -1 なる値をとる関数である。

2.3.3 ウェーブレット基底関数

(2.15) 式でみたように 弾性体内部の深さ z における仮想的な平面上での応力分布は

$$\sigma_{ij} = \sum_{k=x,y,z} A_{ij}^k \frac{1}{z^2} f_{ij}^k \left(\frac{x}{z}, \frac{y}{z} \right) * s_k(x, y) \quad (2.28)$$

のように 表面応力分布とスケール関数 f/z^2 とのコンボリューション積で与えられる。いまこの分け方の構造をさらに明確にするために 以下のような応力分布特徴量とウェーブレット関数 [47] を導入し 再度定式化をおこなう。

★ 表面応力分布特徴量

1. $s_x(x, y), s_y(x, y), s_z(x, y) \dots$ 表面応力分布
2. $s_d(x, y) = D_x s_x(x, y) + D_y s_y(x, y) + s_z(x, y) \dots$ 表面ダイバージェンス
- 3.

$$\begin{pmatrix} s_{xx}(x, y) & s_{xy}(x, y) \\ * & s_{yy}(x, y) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2D_x s_x & D_y s_x + D_x s_y \\ * & 2D_y s_y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} D_x^2 & D_{xy} \\ * & D_y^2 \end{pmatrix} (D_x s_x + D_y s_y)$$

ここで D_x 等は 以下のように定義される線形疑似微分演算子である。

[定義]

$$D_x^m D_y^n f(x, y) \equiv \mathcal{F}^{-1} \left[\frac{(ik_x)^m (ik_y)^n}{k^{m+n}} \mathcal{F}[f] \right] \quad (2.29)$$

ただし $k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$ であり, \mathcal{F} , \mathcal{F}^{-1} はそれぞれ 2 次元フーリエ変換および逆変換を表す. なお 任意の D 演算子同士は互いに交換可能であり

$$D_x^m y^n D_x^p y^q = D_x^{m+p} y^{n+q}$$

が成り立つこと, また

$$D_x^2 + D_y^2 = -1$$

であることに注意. これより例えば

$$s_{xx} + s_{yy} = D_x s_x + D_y s_y$$

となる.

項目 2 に書かれる s_d は弾性体表面直下での応力テンソル対角成分和を $2 + 2\sigma$ で割った値 $(\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}) / (2 + 2\sigma)$ に等しい. また項目 3 の s_{xx} , s_{yy} , s_{xy} は s_x , s_y のみに依存し, ポアソン比が 0.5 に近いとき表面直下での歪みテンソル成分 u_{xx} , u_{yy} , u_{xy} にそれぞれ比例するとみてよい.

★ 平滑化関数

$$\phi_z(x, y) \equiv \frac{1}{2\pi z^2 \sqrt{1 + (x^2 + y^2)/z^2}} = \mathcal{F}^{-1}[e^{kz}] \quad (\text{ただし } z < 0) \quad (2.30)$$

★ ウェーブレット関数

$$\psi_x^x(x, y) \equiv -z \frac{\partial \phi_z}{\partial x} \quad (2.31)$$

$$\psi_x^y(x, y) \equiv -z \frac{\partial \phi_z}{\partial y} \quad (2.32)$$

$$\psi_x^z(x, y) \equiv -z \frac{\partial \phi_z}{\partial z} \quad (2.33)$$

$$\psi_x^{xx}(x, y) \equiv -z \int_{-\infty}^z \frac{\partial^2 \phi_z}{\partial x^2} dz = \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(\frac{z}{2\pi \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \right) \quad (2.34)$$

$$\psi_x^{yy}(x, y) \equiv -z \int_{-\infty}^z \frac{\partial^2 \phi_z}{\partial y^2} dz = \frac{\partial^2}{\partial y^2} \left(\frac{z}{2\pi \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \right) \quad (2.35)$$

$$\psi_x^{xy}(x, y) \equiv -z \int_{-\infty}^z \frac{\partial^2 \phi_z}{\partial x \partial y} dz = \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \left(\frac{z}{2\pi \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \right) \quad (2.36)$$

ここで示した ψ_z^i はすべて直流成分をもたず、また $z = -1$ における ψ_z^i を ψ_0^i とすると任意の z における ψ_z^i は ψ_0^i のダイレイション

$$\psi_z^i(x, y) = \frac{1}{z^2} \psi_0^i\left(\frac{x}{|z|}, \frac{y}{|z|}\right)$$

で与えられる。これら3つずつ2組のウェーブレットのセットはどちらの組をとっても任意の関数を展開可能な完全基底をなしている。なお

$$\psi_z^{xx} + \psi_z^{yy} = -\psi_z^z$$

である。

さてこれらを使うと弾性体内部深さ z での応力テンソルは各表面応力特微量が ϕ_z によって平滑化された項 $s_i * \phi_z$ と、ウェーブレット基底 ψ_z^i によって s_d を展開したときの展開係数 $W_z^i s_d \equiv s_d * \psi_z^i$ との和として以下のように与えられることがわかる。

$$\sigma_{xx} = s_x * \phi_z + W_z^x s_d \quad (2.37)$$

$$\sigma_{yy} = s_y * \phi_z + W_z^y s_d \quad (2.38)$$

$$\sigma_{zz} = s_z * \phi_z + W_z^z s_d \quad (2.39)$$

$$\sigma_{xx} = (s_{xx} + s_d) * \phi_z + W_z^{xx} s_d - (1 - 2\sigma)(s_d + D_{xz} s_d) * \phi_z \quad (2.40)$$

$$\sigma_{yy} = (s_{yy} + s_d) * \phi_z + W_z^{yy} s_d - (1 - 2\sigma)(s_d + D_{yz} s_d) * \phi_z \quad (2.41)$$

$$\sigma_{xy} = s_{xy} * \phi_z + W_z^{xy} s_d - (1 - 2\sigma)(D_{xy} s_d) * \phi_z \quad (2.42)$$

ただし

$$W_z^x f = f * \psi_z^x, \quad W_z^y f = f * \psi_z^y, \quad W_z^z f = f * \psi_z^z,$$

$$W_z^{xx} f = f * \psi_z^{xx}, \quad W_z^{yy} f = f * \psi_z^{yy}, \quad W_z^{xy} f = f * \psi_z^{xy}$$

である。(1 - 2σ) のかかる項を無視して整理すると

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ * & & \sigma_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_{xx} + s_d & s_{xy} & s_x \\ & s_{yy} + s_d & s_y \\ * & & s_z \end{pmatrix} * \phi_z + \begin{pmatrix} W_z^{xx} & W_z^{xy} & W_z^x \\ & W_z^{yy} & W_z^y \\ * & & W_z^z \end{pmatrix} s_d \quad (2.43)$$

となる。このように弾性体内部で s_d に関するウェーブレット展開がなされていることは大変興味深い。

2.4 動的な場合

本節においては(2.5)式の左辺をも考慮に入れた解析結果を述べる。ただしここでは弾性体は全空間を満たしているとした場合の近似解について、基底関数をデルタ関数とした場合を示すにとどめる。

まず(2.5)式は時間に関するフーリエ変換により、

$$-\frac{2\rho(1+\sigma)}{E}\omega^2\mathbf{u} = \Delta\mathbf{u} + \frac{1}{1-2\sigma}\text{grad div}\mathbf{u} \quad (2.44)$$

と書きなおされる。ここで横波波数 $k_t = \omega/c_t$, および縦波波数 $k_l = \omega/c_l$ を定義し、さらに $k_0 = \sqrt{k_t^2 - k_l^2}$ と書くことにすると原点での集聚力 \mathbf{F} による弾性体内部変位は

$$\mathbf{u} = f(r)\mathbf{F} + g(r)(\mathbf{F} \cdot \mathbf{r})\mathbf{r} \quad (2.45)$$

で与えられる。ただし \mathbf{r} は原点から観測点へ至るベクトル, r はその距離であり、

$$f(r) = \frac{1+\sigma}{4\pi E(1-\sigma)} \left[2(1-\sigma) \frac{e^{ik_l r}}{r} - \frac{1}{k_0^2 r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{e^{ik_l r} - e^{ik_t r}}{r} \right) \right] \quad (2.46)$$

$$g(r) = -\frac{1+\sigma}{4\pi E(1-\sigma)} \frac{1}{k_0^2 r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{e^{ik_l r} - e^{ik_t r}}{r} \right) \right] \quad (2.47)$$

である。また k_t, k_l は E および σ を用いて

$$k_t = \omega \sqrt{\frac{2\rho(1+\sigma)}{E}} \quad (2.48)$$

$$k_l = \omega \sqrt{\frac{\rho(1+\sigma)(1-2\sigma)}{E(1-\sigma)}} \quad (2.49)$$

で表される。さてこのとき極座標表示での歪みテンソルは

$$\begin{pmatrix} u_{rr} & u_{r\theta} & u_{r\psi} \\ & u_{\theta\theta} & u_{\theta\psi} \\ * & & u_{\psi\psi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (f'(r) + 2rg(r) + r^2g'(r))F_r & (f'(r) + rg(r))F_\theta/2 & (f'(r) + rg(r))F_\psi/2 \\ & rg(r)F_r & 0 \\ * & & rg(r)F_r \end{pmatrix} \quad (2.50)$$

で与えられる。ただし $f'(r), g'(r)$ はそれぞれ $\frac{df(r)}{dr}, \frac{dg(r)}{dr}$ である。

さてこのままでは大変複雑であるが特に以下の条件下での結果はシンプルである。

[1] $k_l r \gg 1 \gg k_{lr}$ のとき

これは観測点までの距離が縦波の波長よりは十分小さいが横波の波長よりは十分大きい場合で、ポアソン比が 1/2 に近い材質においては縦波と横波の速度が大きく離れているためしばしば起こりうる仮定である。

この場合には

$$\begin{pmatrix} u_{rr} & u_{r\theta} & u_{r\psi} \\ & u_{\theta\theta} & u_{\theta\psi} \\ * & & u_{\psi\psi} \end{pmatrix} = \frac{1 + \sigma}{4\pi E} \frac{ik_l e^{ik_l r}}{r} \begin{pmatrix} 0 & F_\theta & F_\psi \\ & 0 & 0 \\ * & & 0 \end{pmatrix} \quad (2.51)$$

となる。

[2] $k_{lr} \gg 1$ のとき

これは観測点までの距離に対し縦波の波長さえも十分小さくなる場合で、8章で論じるセンサが観測するような非常に高い周波数の成分に対して成り立つものである。

この場合には

$$\begin{pmatrix} u_{rr} & u_{r\theta} & u_{r\psi} \\ & u_{\theta\theta} & u_{\theta\psi} \\ * & & u_{\psi\psi} \end{pmatrix} = \frac{(1 + \sigma)(1 - 2\sigma)}{4\pi E(1 - \sigma)} \frac{ik_{lr} e^{ik_{lr}}}{r} \begin{pmatrix} F_r & 0 & 0 \\ & 0 & 0 \\ * & & 0 \end{pmatrix} \quad (2.52)$$

となる。

このように注目する周波数帯域によって伝達特性に特徴的な変化が見られることは興味深い。

第 3 章

三次元構造触覚センサ ～ 垂直サンプリング法と それに基づく指先型センサ ～

人間の触覚の重要な働きの一つに対象を軽くさすってみることによって得られる“触わり心地”あるいはテクスチャの知覚がある。人間が非常に細かい表面特徴の違いを識別する能力を有することは、日常生活においてもしばしば体験していることであるが、心理物理的な実験においても 1mm 以下のテクスチャのピッチが数%変化すると、被検者が指を動かす能動の場合と対象が動く受動の場合を問わず、その違いを識別可能であるとの報告がある [53, 45]。そして単にテクスチャを識別するだけでなく、その動きから滑り運動情報も抽出し、重要な触覚情報の一つとなっている。

このような知覚においては、対象表面との接触によって生じた皮膚表面の細かい応力あるいは変形分布の特徴を、対象ごとに見分けなければならない。これを例えば 2 次元のアレイセンサで行なうことを考えると、センサを密に並べ、さらにその後複雑な信号処理が必要となるであろう。しかし人間の触覚をみると、既に指摘したように、その受容器は最も密な指先ですら 1 mm 間隔程度 [5]、他の部分はさらに粗く配置されているに過ぎない。

本章では三次元構造を利用することによって、少数のプローブから、センサ自体の柔らかさを保ちつつこれらの情報を抽出するセンサを提案する。

まず最初に 3.1 節において、弾性体表面に与えられた変形あるいは応力の分布が弾性体内部にどのよう伝達されていくかを記述した 2 章の議論にもう一度立ち返り、これを数理的、多次元信号理論的にながめ直す。そしてこの特性を積極的に利用すると、異なる深さの 2 点に埋め込まれたプローブの出力から表面を滑る対象のテクスチャと滑り速度を容易に検出可能であることを示す(垂直サンプリング法)。

つぎに 3.3 節以降でこれを指先型のセンサとして実現することを考える。

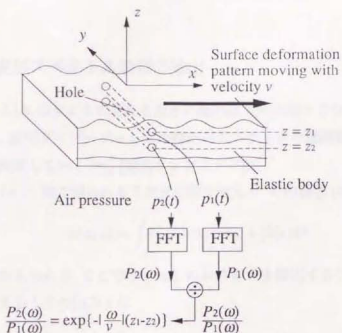


Fig. 3.1 垂直サンプリング法.

3.1 表面ダイバージェンスの弾性体内伝達特性

本節では弾性体表面に変形を与えたときの、弾性体内部での振舞いについて2章に立ち返って検討する。

まず Fig.3.1のように $z < 0$ を半無限弾性体で満たされた (x, y, z) 空間において、特に弾性体内部での変位のダイバージェンス (等方圧縮成分: 応力テンソル対角和に等価) に注目する。これは後述するようなプローブにより容易に測定できる量である (3.3節参照)。

さて2章での議論から $u(\mathbf{r}, z) \equiv \text{divu}(\mathbf{r}, z) = (1 - 2\sigma)(\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz})/E$ は

$$u(\mathbf{r}, z) = \int U_0(\mathbf{k}) \exp(|\mathbf{k}|z) \exp(i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) d\mathbf{k} \quad (3.1)$$

(Divergence Transfer Function)

のように書かれる。ただし $\mathbf{r} \equiv (x, y)$, $\mathbf{k} \equiv (k_x, k_y)$ である。ここで $U_0(\mathbf{k})$ は表面直下での $u \equiv \text{divu}$ のフーリエ変換であり2.3.3節で定義した表面特徴量 s_d のフーリエ変換 S_d を使うと $U_0 = (1 - 2\sigma)(2 + 2\sigma)S_d/E$ である。

上式は、波数 \mathbf{k} をもつ u の周波数成分は弾性体の奥深くにいくにつれ $\exp(|\mathbf{k}|z)$ のように減衰していくことを示している。すなわち空間周波数が高くなるにつれ、その成分は内部においてよりはやく減衰することになる。

3.2 表面変形スペクトル情報の抽出

ここで Fig.3.1 に示すように異なる深さに埋め込まれた高さ 2 つのプロープを考え、その出力から、表面ダイバージェンスの細かいスペクトルや運動情報を得る 2 つのアルゴリズムを提案していく [81] (垂直サンプリング法)。

簡単のため (x, z) 軸で張られる 2 次元空間を考える。この場合 (3.1) 式は

$$u(x, z) = \int U_0(k) \exp(ikx + |k|z) dk \quad (3.2)$$

のように書きかえられる。ここで (x_0, z_0) における u を検出するプロープの径が十分小さいと仮定するとその出力 p は

$$p = \int U_0(k) \exp(ikx_0 + |k|z_0) dk \quad (3.3)$$

のように書かれる。

3.2.1 主要スペクトルの知覚

まず対象形状が周期的であり、センサ表面変形が単一の未知周波数 k_0 をもつ場合を仮定してみる。そのとき上下に 2 つ埋め込んだプロープの位置を (x_0, z_0) および $(x_0, z_0 - \epsilon)$ とすると (3.3) 式から上下プロープの出力 p, p' はそれぞれ

$$p = \int U_0 \delta(k - k_0) \exp(ikx_0 + |k|z_0) dk \\ = U_0 \exp(ik_0 x_0) \exp(|k_0|z_0) \quad (3.4)$$

$$p' = U_0 \exp(ik_0 x_0) \exp\{|k_0|(z_0 - \epsilon)\} \quad (3.5)$$

で与えられる。上式から上下プロープの比 $r = p'/p$ は

$$r = p'/p = \exp(-|k_0|\epsilon). \quad (3.6)$$

従って、プロープの上下比をとることによって

$$|k_0| = -\frac{\log r}{\epsilon} = -\frac{\log(p'/p)}{\epsilon} \quad (3.7)$$

のように k_0 を決定することができる。

3.2.2 運動を用いた全スペクトルの知覚

次に対象表面テクスチャは任意であるが、それが任意の速度でセンサ表面を滑べる場合を考える。

運動速度を v とすると $U_0(k, t)$ は $U_0(k) = U_0(k, 0)$ を用いて

$$U_0(k, t) = \int u_0(x - vt) \exp(-ikx) dx = U_0(k) \exp(-ivkt) \quad (3.8)$$

のように書かれるため (x_0, z_0) におけるプローブの出力は

$$p(t) = \int U_0(k) \exp(-ivkt) \exp(ikx_0 + |k|z_0) dk \quad (3.9)$$

で与えられ、その時間的なスペクトルは

$$\begin{aligned} P(\omega) &= \iint U_0(k) \exp(-ivkt) \\ &\quad \exp(ikx_0 + |k|z_0) \exp(-i\omega t) dk dt \\ &= \int U_0(k) \exp(ikx_0 + |k|z_0) \delta(-vk - \omega) dk \\ &= U_0(-\omega/v) \exp\{i(-\omega/v)x_0 + |\omega/v|z_0\} \end{aligned} \quad (3.10)$$

と書かれる。

すなわち出力の時間的なスペクトル $P(\omega)$ は空間的なスペクトル $U_0(-\omega/v)$ に $\exp\{i(-\omega/v)x_0 + |\omega/v|z_0\}$ を乗じたものに等しい。

ここまでのところでは速度 v が不明であるため $P(\omega)$ がどの空間周波数に対応するか決定することはできないが、ここで再び異なる深さに埋め込まれた二つのプローブを考える。そのとき出力の時間的なスペクトル $P(\omega)$ および $P'(\omega)$ はそれぞれ

$$P(\omega) = U_0(-\omega/v) \exp\{i(-\omega/v)x_0 + |\omega/v|z_0\} \quad (3.11)$$

$$P'(\omega) = U_0(-\omega/v) \exp\{i(-\omega/v)x_0 + |\omega/v|z_0\} \exp\{-|\omega/v|\epsilon\} \quad (3.12)$$

のように書かれ、特に各周波数ごとのスペクトルの比に注目すると

$$P'(\omega)/P(\omega) = \exp(-|\omega/v|\epsilon) \quad (3.13)$$

となる。これは $P'(\omega)/P(\omega)$ が空間周波数の一価関数であり、ここから空間周波数 ω/v が v を知ることなしに決定されることを意味する。具体的には任意の周波数 ω に対する以下の式

$$|v| = -\frac{|\omega|\epsilon}{\log\{P'(\omega)/P(\omega)\}} \quad (3.14)$$

より ν が決定され、さらに時間的な周波数スペクトルの周波数軸を速度 ν でスケールリングすることにより空間的なスペクトル $U_0(k)$ を構成することができる。

説明が前後するが Fig.3.5 はここで述べたことの実験的検証結果である。(b)に示す周波数ごとの上下比の値が、対応する空間周波数を表し、またプロット全体の傾きが滑べり速度を与える。

なおここで基礎においているローパス演算は弾性体の物理的特性が必然的に与えるもので、その動作は最も安定で信頼性があること、またサンプリングを介さない理想的な連続演算であり、エリアシング等とも無縁であることを強調しておきたい。

3.3 垂直サンプリング法に基づく指先型センサ

これまで述べてきた垂直サンプリング法の長所を生かした指先型のセンサを以下に具体化していく [80]。本センサは

1. 柔らかい構造の球状センサ表面と
2. 表面近くに十字状に配置された垂直サンプリングプローブ

をもち

1. センサ表面を滑べる対象のテクスチャと
2. その滑べり速度、さらに
3. 対象とセンサ間の接触の深さ

を対象との滑べり運動の中で検出する。

3.3.1 センサの構造

本センサの構造、および写真を Fig.3.2, Fig.3.3に示す。プローブはシリコーンゴム内部の直径 0.1mm の円柱状の空洞を圧力センサ（マイクロフォン）に導くことによって実現される。圧力センサの出力は空気の波長がプローブのスケールより十分小さい低周波数域においては空洞の体積変化に比例し、これはプローブ部分のダイバージェンスの積分に比例するとみなせる。なお本プローブの構成においては粘性の影響もほとんど無視できる。このプローブが表面近くの 2 種類の深さに十字状に配置されている。

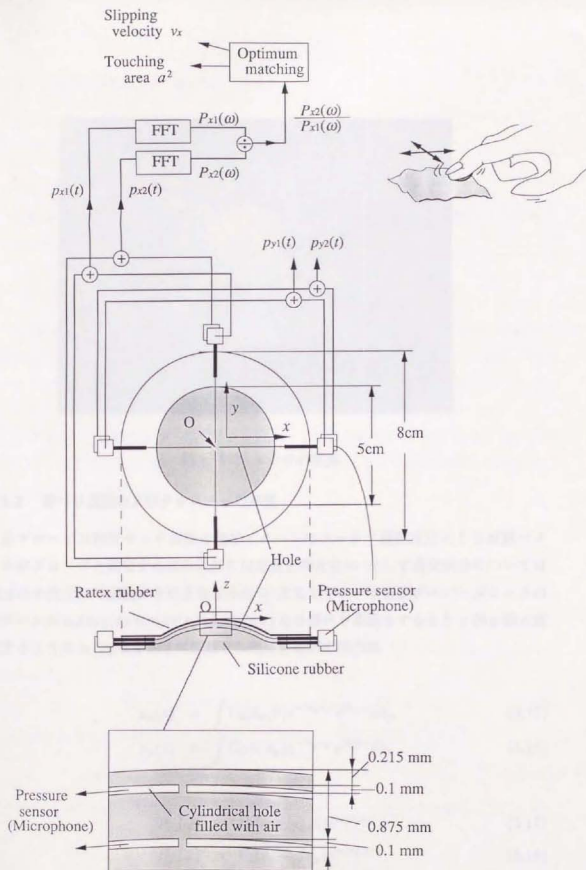


Fig. 3.2 指先型センサの構造.

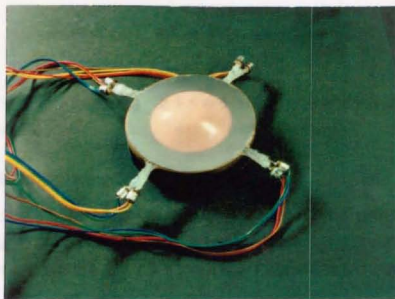


Fig. 3.3 センサの写真.

3.3.2 滑べり運動およびテクスチャの知覚

各プローブは触覚センサ表面の変形パターンのフーリエ展開成分のうち波数ベクトルがプローブと直交する成分以外には感度を持たない。そして直交成分については前述の2次元での議論がそのままなりたつ。すなわちセンサ表面ダイバージェンスのパターンが $u_0(x, y, t) = u_0(x - v_x t, y - v_y t)$ なる滑べり運動をするとき x 軸 y 軸と直交するように z_1, z_2 なる深さに配置されたプローブの出力は

$$p_{xi}(t) = \int U_0(k_x, 0) e^{-ik_x v_x t} e^{|k_x| z_i} dk_x \quad (3.15)$$

$$p_{yi}(t) = \int U_0(0, k_y) e^{-ik_y v_y t} e^{|k_y| z_i} dk_y \quad (3.16)$$

$$P_{xi}(\omega) = U_0(-\omega/v_x, 0) e^{|\omega/v_x| z_i} \quad (3.17)$$

$$P_{yi}(\omega) = U_0(0, -\omega/v_y) e^{|\omega/v_y| z_i} \quad (3.18)$$

のように書かれ

$$|v_x| = -\frac{|\omega|(z_1 - z_2)}{\log(P_{x2}(\omega)/P_{x1}(\omega))} \quad (3.19)$$

$$|v_y| = -\frac{|\omega|(z_1 - z_2)}{\log(P_{y2}(\omega)/P_{y1}(\omega))} \quad (3.20)$$

によって2次元な滑べり速度が、また

$$U_0(k_x, 0) = P_{x1}(-k_x v_x) e^{-|k_x|z_1} \quad (3.21)$$

$$U_0(0, k_y) = P_{y1}(-k_y v_y) e^{-|k_y|z_1} \quad (3.22)$$

によって $u_0(x, y)$ の空間スペクトルのうちプローブと直交する波数ベクトルをもつ成分が求まる。

3.3.3 接触面積のセンシング

以上は対象とセンサの接触面積が十分大きい(本センサの場合半径 3mm 程度以上)場合の議論であったが、本センサは、接触面積が非常に小さくかつ滑べり速度が既知のとき、その接触面積を上下プローブのスペクトル比から知ることができることを以下に示す。

まず対象が x 軸にそって既知速度 v_x で滑べる場合を考える。球面状センサが大局的には平面である対象表面に狭い面積で接するとき、センサ表面の大局的な垂直応力分布 s_n は a を接触半径として、

$$s_n(x, y) = \begin{cases} s_{n0} \sqrt{1 - \frac{x^2 + y^2}{a^2}} & (x^2 + y^2 \leq a^2) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (3.23)$$

のように書かれるが [100], いまこの接触によって生じる、より詳細な表面応力分布 \hat{u}_0 (より厳密には表面ダイバージェンス) が、ここで示した大局的応力分布と類似の $w(x, y) \simeq s_n(x, y)$ なるウィンドウ関数と真の並進運動パターン $u_0(x - v_x t, y)$ の積として

$$\hat{u}_0(x, y) = w(x, y, a) u_0(x - v_x t, y) \quad (3.24)$$

で近似されるものと仮定する。このとき上下プローブの出力は

$$P_{xi}(\omega) = \iint W(k_x + \frac{\omega}{v_x}, -\beta, a) U_0(-\frac{\omega}{v_x}, \beta) e^{|k_x|z_1} d\beta dk_x \quad (3.25)$$

のような W を用いた畳み込み演算で表現される。ここで次なる仮定として $w(x, y)$ が

$$W(k_x, k_y, a) = W_x(k_x, a) W_y(k_y, a), \quad (3.26)$$

のように分解可能であると考えても差し支えないものとする、 P_{xi} は

$$P_{xi}(\omega) = \int U_0(-\frac{\omega}{v_x}, \beta) W_y(-\beta, a) d\beta \int W_x(k_x + \frac{\omega}{v_x}, a) e^{|k_x|z_1} dk_x, \quad (3.27)$$

のように簡単化され、上下プローブの比は

$$\begin{aligned} \frac{P_{x2}(\omega)}{P_{x1}(\omega)} &= \frac{\int W_x(k_x + \frac{\omega}{v_x}, a) e^{i k_x |z_2|} dk_x}{\int W_x(k_x + \frac{\omega}{v_x}, a) e^{i k_x |z_1|} dk_x} \\ &\equiv R\left(\frac{\omega}{v_x}, z_1, z_2, a\right). \end{aligned} \quad (3.28)$$

のように表現されることになる。ここで R は a が小さいとき a に強く依存する関数となるため v_x が既知であれば、このスペクトル比が上式でもっともよく表される最適な a を選ぶことによって接触半径 a が決定される。

なお実際に a を求める際に必要となる R の a に対する具体的な関数形は

$$\begin{aligned} w(x, y, a) &= w_0 \exp\left\{-\frac{3}{2a^2}(x^2 + y^2)\right\} \\ &\left(W_x(k_x, a) = W_0 \exp\left(-\frac{a^2 k_x^2}{6}\right)\right) \end{aligned} \quad (3.29)$$

を仮定して決定した。

以上数々の仮定および近似の妥当性は実験で確かめられる。

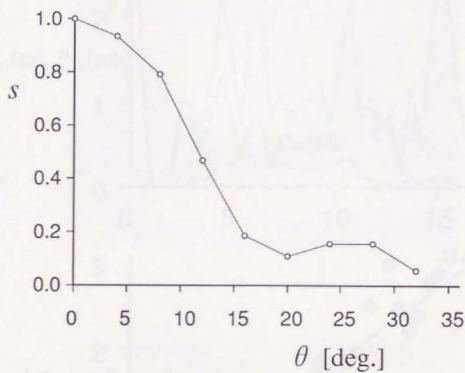


Fig. 3.4 プローブの方向選択性.

3.3.4 実験結果

Fig.3.4に示すのは各プローブの空間周波数選択性を検証するための実験結果である。センサとの接触半径3 mmのもとで1.5mmのピッチをもった洗濯板状の対象をプローブに対し角度 θ だけ傾け直交方向に滑べらせたときの出力強度を $\theta = 0$ を1に規格化して表示した。20度以上傾けると出力は10%程度になり、プローブと直行する波数成分以外の応力スペクトルに対する各プローブの感度は非常に小さくなっていることがわかる。

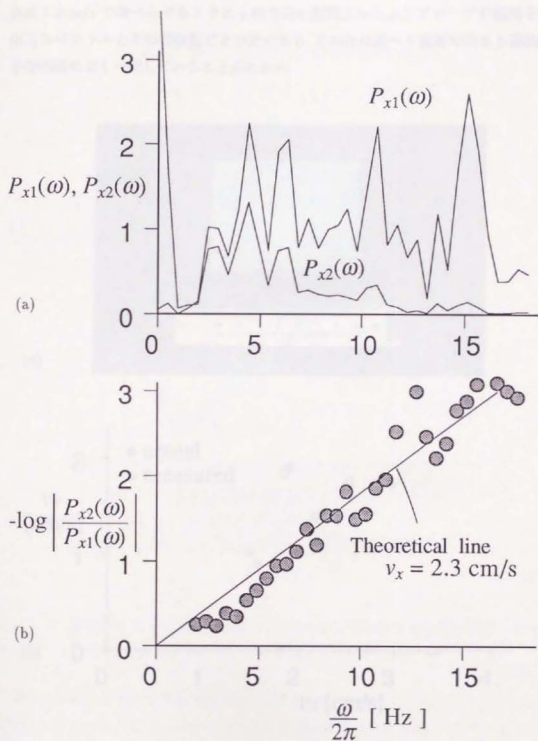


Fig. 3.5 ランダムな表面テクスチャをもつ発泡スチロール表面を滑べらせたときの上下プローブ出力のスペクトル (a) とその周波数ごとの比 (b).

次に Fig.3.5に示すのはランダムなテクスチャをもつ発泡スチロール表面をx軸方向に2.3cm/sで滑べらせたときにy軸方向に配置された上下プローブで観測された出力スペクトルとその周波数ごとの比である。その比は滑べり速度で決まる理論的な予想曲線によく一致していることがわかる。

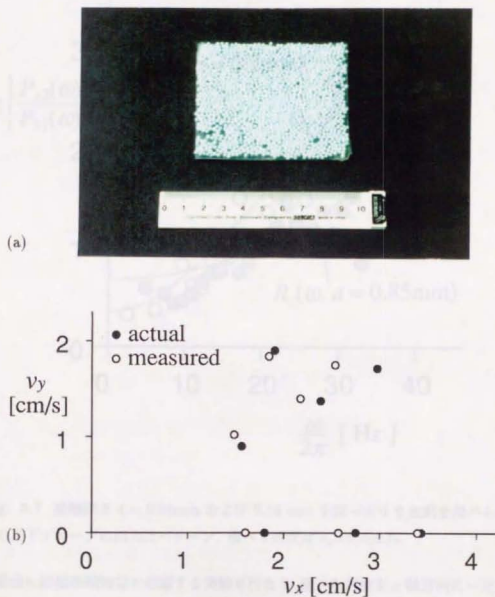


Fig. 3.6 (a): 実験で用いた対象物と (b): 2次元滑べり速度の測定結果。

センサに2次元的に様々な滑べり速度を与え、そのときの上下スペクトル比のプロットに最もよくフィットする傾きを最小自乗法により求めることにより滑べり速度を決定した結果を Fig.3.6に示す。実際の滑べり速度とセンサ出力の間によい一致がみられる。

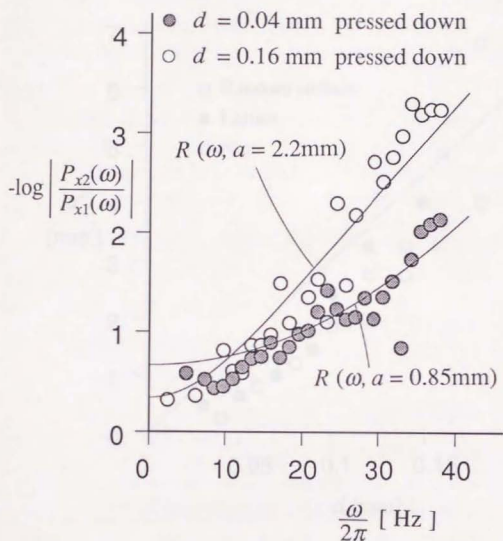
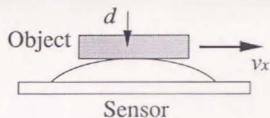


Fig. 3.7 接触深さ $d = 0.04\text{mm}$ および 0.16mm を保ったまま金網を滑べらせたときの上下プローブの出力比パターン。滑べり速度は $v_x = 4.7\text{cm/s}$ 。

最後に接触面積知覚を確認する実験を行なう。様々な対象を x 軸方向に一定の速度 4.7cm/s で滑べらせる。Fig.3.7 に示すのは接触深さ d を 0.04mm および 0.16mm に保ったまま金網を滑べらせたときの上下プローブ出力のスペクトル比をプロットしたものである。接触深さによってプロットパターンに変化が見られる。各プロットについて (3.28) 式における R が最もよくフィットするような a を選び、そのときの R を重ねて表示してある。

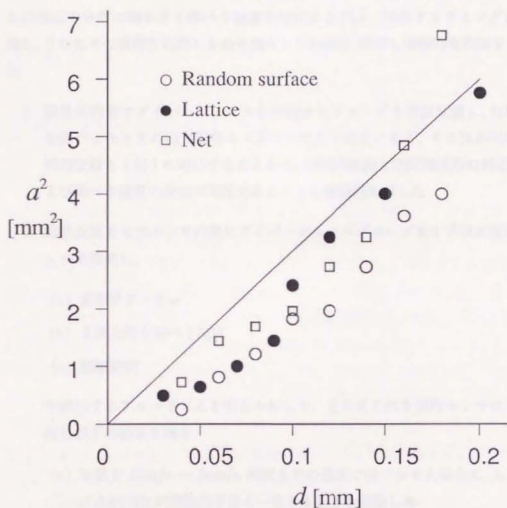


Fig. 3.8 接触面積センシング結果.

次に様々な対象を様々な深さ d で接触させ、スペクトル比のパターンに最もよくマッチする R を与える a をもって接触面積を決定した結果を Fig.3.8に示す。実線で示すのはセンサの曲率半径で決まる d と a^2 の間の関係の理論値である。なおここで用いた対象物は Fig.3.6 の写真に示されるランダム表面、Fig.3.4 の実験で用いられた一次元格子、および間隔 1mm の金属ネットであった。

3.4 本章のまとめ

本章では表面応力の深き方向への伝達特性を利用して垂直配置されたプローブから表面応力分布の細かさや滑り速度を知覚する手法（垂直サンプリング法）を提案し、さらにその原理を応用した指先型センサを提案、試作し実験的な検証をおこなった。

1. 弾性体内部でダイバージェンスを検出するプローブを垂直配置し、対象が表面を滑べったときの出力信号スペクトルの上下比をとると、その比が対応する空間周波数と1対1に対応することから、時間周波数と空間周波数の対応付け、および滑り速度の決定が可能であることを理論的に示した。
2. 球状表面をもつセンサ内部にダイバージェンスプローブを十字状に配置したセンサを提案し、

- (a) 表面テクスチャ
- (b) 2次元的な滑り速度
- (c) 接触面積

を検出するアルゴリズムを明らかにした。さらにこれを試作センサにおいて検証し以下の結果を得た。

- (a) 対象を1cm/s～5cm/s程度までの速度で滑べらせた場合に上下プローブの出力比が理論的予想と一致することを確認した。
- (b) その場合にランダム表面の2次元的な滑り速度が10%以内の精度で検出可能であることを確認した。
- (c) 滑り速度が既知の場合には、接触面積が5mm²以下のときその接触面積の大小の傾向が判別可能であることを3種類の対象について確かめた。

第 4 章

三次元構造を利用したヒルベルト変換対の知覚

ヒルベルト変換とは、本来複素量で表されるような時間空間的パターンの実部と虚部の一方から他方を再現する変換のことであり、測定可能な実数データから位相を含む複素情報を復元する変換として知られている。この変換は、すでに計測分野、特に光学計測や音響計測において広い応用を有しているが、純粋に信号処理的な方法でヒルベルト変換対を得ようとする、一方のパターンの空間全体の情報が必要となるため、局所的な観測では正しい変換の実現は不可能である。これに対して本章では、弾性体内部においては局所的な観測によってヒルベルト変換対を同時に知覚可能な機構が既に存在していることを明らかにする。具体的には表面境界条件によって決定される弾性体内変形分布の、表面方向および深さ方向の微分場を一定深さ面上の関数とみたとき、それらは互いにヒルベルト変換対をなしていることが示され、その結果、局所的な観測のみから表面方向パターンの複素観測値が得られることが明らかになる。本章では、最初に基本原理とそれを確認する基礎実験を行なった後、このヒルベルト変換対の計測によって具体的にどのような知覚情報が新たに得られるかについて検討し、実験によってこれを確かめる。

4.1 原理

ここでも 3 章同様、ダイバージェンス検出素子を前提とし、ダイバージェンスの伝達特性

$$u(\mathbf{r}, z) = \int U_0(\mathbf{k}) \exp(|\mathbf{k}|z) \exp(i\mathbf{k} \cdot \mathbf{x}) d\mathbf{k} \quad (4.1)$$

を基礎におく。ただし u は変位 \mathbf{u} のダイバージェンス、 U_0 は表面直下の u のフーリエ変換 $= (1 - 2\sigma)(2 + 2\sigma)S_d/E$ であった。

さて $f(x)$ のヒルベルト変換 $f^*(x)$ とは $f(x)$ の各周波数成分の位相を一律に 90° ずらして得られるものである。具体的には

$$f(x) = \int F(k) \exp(ikx) dk \quad (4.2)$$

と表現したとき

$$f^*(x) = \int -i \operatorname{sgn}(k) F(k) \exp(ikx) dk \quad (4.3)$$

で与えられる。弾性体内部においては f と f^* の組は実はあらゆるところに現れているが(2章参照)，ここでは特に u の空間的な微分量に注目してみる。

いま検出子として、3章でのセンサ同様 y 軸に平行な一次元プローブを用いることを前提とし、 x, z の2次元空間における u の x および z 微分を考えると、それらは(4.1)式よりそれぞれ

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x} &= \int ik U_0 \exp(ikx) \exp(|k|z) dk & (4.4) \\ \frac{\partial u}{\partial z} &= \int |k| U_0 \exp(ikx) \exp(|k|z) dk \\ &= \alpha \int -i \operatorname{sgn}(k) ik^2 \exp(ikx) \exp(|k|z) dk \\ &= \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^* & (4.5) \end{aligned}$$

で与えられる。これは x の関数 $\partial u / \partial x(x)$ と $\partial u / \partial z(x)$ が実は互いのヒルベルト変換そのものであることを意味している。この結果、局所的な観測のみからパターン
のヒルベルト変換(の一点観測値)が検出できることが明らかになった。

4.2 実験的検証のためのセンサ

Fig.4.1 に試作したセンサの構造を示す。4本の隣接したプローブをシリコンゴム内部に埋め込む。各プローブの構造はFig.4.1(b)に示される。シリコンゴム内部に直径0.3mmの円筒状の空洞を設け、ステンレスパイプでマイクロフォンに導いた。空気の音波長がプローブのスケールより十分大きくなる低周波数域ではマイクの出力は空洞部分の体積変化に比例し、粘性の影響は無視できる程度である。また対象表面凹凸の代表的な空間波長より空洞の長さ w が十分長いとき、前節における2次元な扱いがそのまま適用される。なおFig.4.1におけるマイク1,2,3,4の出力をそれぞれ p_1, p_2, p_3, p_4 とし、

$$\begin{aligned} p_x &= \frac{1}{4h} (p_1 + p_3 - p_2 - p_4) \\ p_z &= \frac{1}{4h} (p_1 + p_2 - p_3 - p_4) \end{aligned}$$

によりFig.4.1(a)におけるA点での u_x, u_z の差分近似を得ることとする。

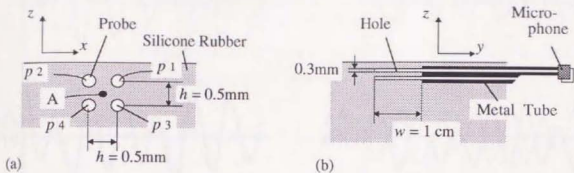


Fig. 4.1 実験的センサの構造.

4.3 実験

本節ではヒルベルト変換の知覚を実験的に確認するための手続きを述べた後, その実験結果を示す. いま表面の変形パターンが x 軸方向に速度 v で運動するとすれば弾性体内部の点 (x_0, z_0) における u の x 微分の時間的な観測値 $p_x(t)$ は

$$p_x(t) = f(x_0 - vt) \quad (4.6)$$

なる形で書かれ, u の z 微分の時間的な観測値 $p_z(t)$ は f を用いて

$$p_z(t) = f^*(x_0 - vt) \quad (4.7)$$

と書かれる. ただし $f^*(x)$ は $f(x)$ のヒルベルト変換である. いま $p_x(t)$ の時間に関するヒルベルト変換を $p_x^*(t)$ と書くと p_x, p_z が (4.6), (4.7) 式のように表されるとき

$$v > 0 \rightarrow p_z = -p_x^* \quad (4.8)$$

$$v < 0 \rightarrow p_z = p_x^* \quad (4.9)$$

となる. 実験においてこの関係を確認する.

4.3.1 実験結果

センサ表面上に間隔 $d=2.6\text{mm}$ のピン列を $+x$ 方向, および $-x$ 方向に一定速度で滑べらせたときの p_x, p_z の出力結果を Fig.4.2(a) および (b) に示す. 図中太線で示されるのが p_x, p_z の出力結果であり, 細い線で示されるのが $p_x(t)$ の時間的なヒルベルト

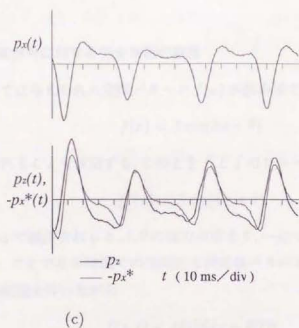
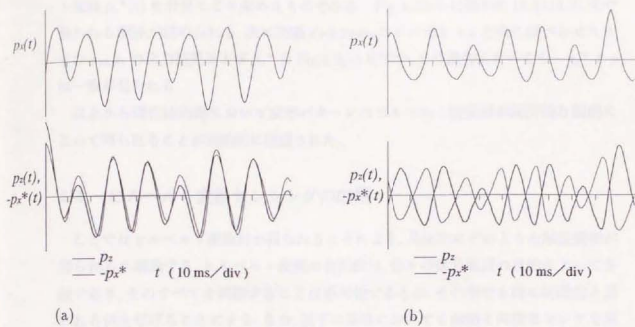


Fig. 4.2 ヒルベルト変換対検出の実験的検証結果.

ト変換 $p_x^*(t)$ を計算により求めたものである。Fig.4.2からは確かに(4.8),(4.9)式で書かれる関係が認められる。次に間隔 $d=5.2\text{mm}$ のピン列を $+x$ 方向に滑べらせたときの p_x, p_z の出力結果および p_x^* を Fig.4.2(c) に示す。この場合においても $-p_x^*$ と p_z の一致が見られる。

以上から弾性体内部において変形パターンのヒルベルト変換対が局所的な観測によって得られることが実験的に確認された。

4.4 ヒルベルト変換センシングの応用

ここではヒルベルト変換対が得られることにより、具体的にどのような触覚情報が得られるか議論する。ヒルベルト変換の有用性は、個々の信号処理の目的によって多様であり、そのすべてを網羅することは不可能であるが、その中でも特に特徴的と思われる例を挙げることにする。なお、以下の議論においても前節と同様なセンサを前提とする。

4.4.1 狭帯域信号に対する完全情報の取得

本節においては与えられた空間パターン $f(x)$ が狭帯域であり、近似的に

$$f(x) = A \cos(kx + \theta) \quad (4.10)$$

のように書かれることを仮定する。このとき f と f のヒルベルト変換

$$f^*(x) = A \sin(kx + \theta) \quad (4.11)$$

が一点 $x = x_0$ で観測されると、 A, θ の両方が求まり、一点での観測から信号全体の情報が得られる。ここである時刻での空間的な狭帯域パターン $f_0(x)$ が x 軸に沿って緩やかな強度の変動を伴いながら

$$f(x, t) = A(t)f_0(x - \theta(t)) \quad (4.12)$$

のように運動するならば、一点 $x = x_0$ におけるヒルベルト変換対の時間的な観測値からパターンの表面方向の移動や振幅の変動を安定に知覚することができる。

Fig.4.3に示すのは、周期的なパターンをもつ対象がセンサ表面上を滑るとき、その位相の動きを検出した実験結果である。パターンの周波数が明らかな場合、これはそのまま表面方向の変位を表すことになる。対象としては前節で用いた間隔 $d = 2.6\text{mm}$ のピン列を用い、一定速度で $+x$ 方向および $-x$ 方向に滑べらせた。図中点線で示すのは時刻 $t = 0$ を起点として移動速度から理論的に予想される値である。図に見られるように 0.4mm 程度の誤差内で表面方向絶対変位が検出されていることがわかる。

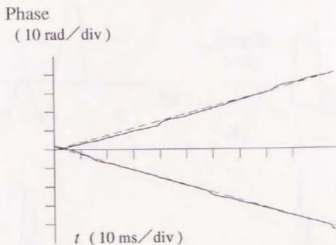


Fig. 4.3 実験結果. 表面方向絶対変位の検出.

4.4.2 広範囲の信号特徴を得るための手がかり情報

滑べり運動による一種の走査によって空間情報を得る営みは人間の触覚においても不可欠な知覚手法となっていると考えられ、また触覚センサにおいてもこれによって素子間隔を広げることが可能となると予想される。しかし触覚においては長時間パターンが変化しないまま移動する状況はむしろ特殊であることと、離れた素子の感度を均一に保つのが難しいと考えられることから、各素子ごとが、短い区間の観測信号からより広い範囲の信号特徴を獲得する機構、あるいは他の素子との連携をとるための手がかり情報を有していることが望まれる。

ここでヒルベルト変換対が観測信号として得られている意味を考え直す。ヒルベルト変換信号は元信号の大局的な特徴をも反映するものであるから、それが対になって観測された場合、短い観測区間の信号にも、広範囲の信号特徴が反映されているはずである。実は有限区間での解析信号がノイズなしに得られた場合の数学的な議論においては、そのフーリエ変換が周波数空間の正領域に局在するという凸条件によって全区間の信号が再生されることが証明されている [58]。

以下ではその利用についての具体的なアルゴリズムを考える前段階の議論として、ヒルベルト変換対の取得によってより広範囲の情報が実際にはどれだけ得られることになるのかを定量的に吟味してみる。

このような評価を具体的にこなすために、しばしば光学計測分野で超解像に用いられる POCS 法を適用する [90]。

これは以下のような反復アルゴリズムである。まず観測区間内において $g_0(x) = f(x) + if^*(x)$ 、区間外において $g_0(x) = 0$ とおいた複素初期関数 $g_0(x)$ を用意しループに入

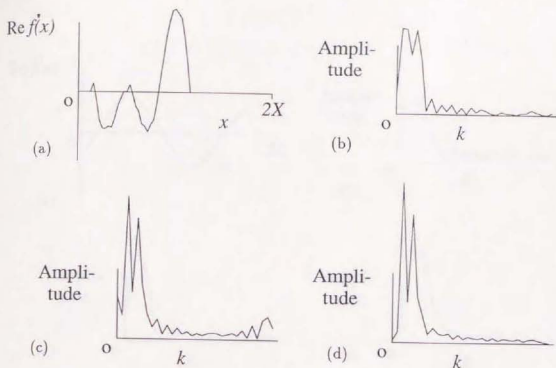


Fig. 4.4 シミュレーション結果。(a) ノイズを含む信号 $f'(x)$ 。(b) $f'(x)$ のフーリエ変換。(c) POCS 法を適用した結果。(d) ノイズなしの信号に POCS 法を適用した結果。

る。ループ内ではまず $g_i(x)$ のフーリエ変換 $G(k)$ を求め、次に $k < 0$ において $G(k) = 0$ なる知識を用いて $G(k) = 0 (k < 0)$ とおいたのち、逆フーリエ変換して $g(x)$ を求める。次に観測区間内における g に対し $g(x) = f(x) + if^*(x)$ とおき直し、この $g(x)$ を g_{i+1} とする。以下この要領で順次 g_n を求めていく。

このアルゴリズムを適用したシミュレーション結果を Fig.4.4 に示す。Fig.4.4(a) に示す波形 $f'(x)$ は $f(x) = \exp(2\pi i x/X) + \exp(4\pi i x/X)$ に振幅 0.2 のノイズを加えたものを区間 $[0, X]$ だけ切り出し他の区間においては $f'(x) = 0$ とおいたものである。Fig.4.4(b) は $f'(x)$ のフーリエ変換の絶対値を示す。一方 Fig.4.4(c) は周期 $2X$ の周期性を仮定し、前述の POCS 法を用いてスペクトル推定を行なった結果である。ヘルベルト変換の存在により同じ観測区間のデータから、より分解能の高いスペクトル推定が可能であることが、このシミュレーション結果から分かる。なお Fig.5(d) はノイズ含まない信号に対し POCS 法を適用した結果である。

次にこれを実際の観測データに適用した例を Fig.4.5 に示す。Fig.4.5(a) に示すのが間隔 $d = 2.6\text{mm}$ のビン列を一定速度で滑べらせたときに観測された p_x の出力信号である。得られた信号は時間信号であるが前の議論と統一をはかるため座標軸は X を用いる。いま Fig.4.5(a) に表示される区間の半分にあたる $[0, X]$ でのデータを用い

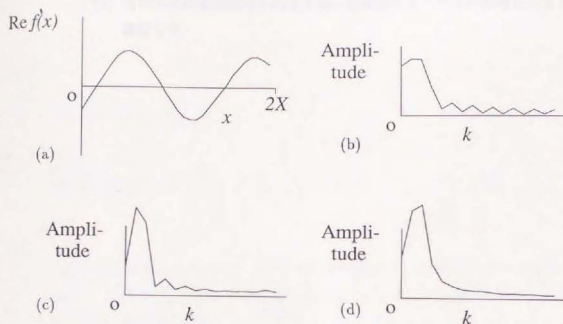


Fig. 4.5 実験結果. (a) 観測信号 $f(x)$. (b) $f(x)$ の部分信号 $f'(x)$ のフーリエ変換. (c) POCS 法を適用した結果. (d) $f(x)$ のフーリエ変換.

てスペクトル推定を行なう。Fig.4.5(b) に示すのは、 $[X, 2X]$ における出力を 0 とおき区間 $[0, 2X]$ に対してフーリエ変換を行なったものである。Fig.4.5 (c) に示すのは p_z の出力を用いて POCS 法によってスペクトル推定を行なったもので、 $[0, 2X]$ の区間の信号全体を用いてフーリエ変換を行なった Fig.4.5(d) の結果に、より近いものが得られている。

4.5 本章のまとめ

1. 弾性体内部でダイバージェンスの横方向および深さ方向微分場が互いにヒルベルト変換対をなすことを示した。
2. 横方向および深さ方向微分検出プローブを試作し、解析信号が得られることを実験的に確認した。
3. 試作したセンサによって
 - (a) 周期的形状 (ピッチ 2.6 mm) を有する対象が表面に沿って移動したときの絶対変位を 0.4 mm 以内の精度で検出した。

- (b) 有限区間の観測信号からより高い分解能のスペクトルが得られることを確認した。

第5章

短時間フーリエ変換によるフィルタバンク構築

本章では、短時間フーリエ変換を用いて、観測信号のスペクトルを短時間フーリエ変換により抽出し、その抽出されたスペクトルをフィルタバンクとして抽出する。短時間フーリエ変換を用いて抽出されたスペクトルをフィルタバンクとして抽出する。短時間フーリエ変換を用いて抽出されたスペクトルをフィルタバンクとして抽出する。

短時間フーリエ変換を用いて抽出されたスペクトルをフィルタバンクとして抽出する。短時間フーリエ変換を用いて抽出されたスペクトルをフィルタバンクとして抽出する。短時間フーリエ変換を用いて抽出されたスペクトルをフィルタバンクとして抽出する。

短時間フーリエ変換を用いて抽出されたスペクトルをフィルタバンクとして抽出する。短時間フーリエ変換を用いて抽出されたスペクトルをフィルタバンクとして抽出する。短時間フーリエ変換を用いて抽出されたスペクトルをフィルタバンクとして抽出する。

短時間フーリエ変換を用いて抽出されたスペクトルをフィルタバンクとして抽出する。短時間フーリエ変換を用いて抽出されたスペクトルをフィルタバンクとして抽出する。短時間フーリエ変換を用いて抽出されたスペクトルをフィルタバンクとして抽出する。

短時間フーリエ変換によるフィルタバンク構築

短時間フーリエ変換を用いて抽出されたスペクトルをフィルタバンクとして抽出する。短時間フーリエ変換を用いて抽出されたスペクトルをフィルタバンクとして抽出する。短時間フーリエ変換を用いて抽出されたスペクトルをフィルタバンクとして抽出する。

短時間フーリエ変換を用いて抽出されたスペクトルをフィルタバンクとして抽出する。短時間フーリエ変換を用いて抽出されたスペクトルをフィルタバンクとして抽出する。短時間フーリエ変換を用いて抽出されたスペクトルをフィルタバンクとして抽出する。

短時間フーリエ変換を用いて抽出されたスペクトルをフィルタバンクとして抽出する。短時間フーリエ変換を用いて抽出されたスペクトルをフィルタバンクとして抽出する。短時間フーリエ変換を用いて抽出されたスペクトルをフィルタバンクとして抽出する。

第 5 章

微分検出素子によるフィルタバンク構築

人間の聴覚末梢系においては一次元の音圧時間信号を基底膜上で時間周波数空間に展開し、音声特徴の抽出等をより有利に実現しているとの仮説がある。この処理系の存在は多くの生理学的あるいは解剖学的な知見によっても支持され [2]、すでに音声特徴の工学的な識別、あるいは音声認識システム等の入力段においては、類似の時間周波数展開が不可欠な前処理ともなっている [104]。

一方視覚情報処理においても、画像を周波数軸で展開してその特徴を捉えることの有効性、あるいは人間の処理機構との類似性がすでに古くから指摘されており現在もその研究が盛んである [46, 47]。

ここで発生的にみてこれら特化した器官のそもそもの由来でもある触覚について考え直してみる。触覚においても、その知覚特性を考えると、対象のテクスチャを認識したりする際に、表面の圧力分布ないしは凹凸を空間周波数軸に展開し、その特徴を捉えている可能性は十分であると予想される。

本章では弾性体中で微分を検出する素子を仮定すると、表面凹凸分布の周波数展開、(特にウェーブレット展開) が極めて容易に実現できることを示していく。

5.1 弾性体の周波数展開機構

本章においても $x-z$ 2次元ダイバージェンス伝達特性

$$u(x, z) = \int U_0(k) \exp(ikx) \exp(|k|z) dk \quad (5.1)$$

を基礎におく。

さてここで u の表面方向および深さ方向の微分を考えると

$$\left[\frac{\partial^{m+n}}{\partial x^m \partial z^n} u(x, z) \right] = \int U_0(k) (ik)^m |k|^n \exp(|k|z) \exp(ikx) dk \quad (5.2)$$

であり、ある深さ z での u は表面でのダイバージェンス $U_0(k)$ に

$$H_z(k) = (ik)^m |k|^n \exp(|k|z)$$

で表されるフィルタリングを施したものと等価である。

ここで

$$\psi_z^{m,n}(x) = \mathcal{F}^{-1}[|z|^{m+n} H_z] \quad (5.3)$$

とすると、 $\psi_z^{m,n}(x)$ は $\psi_{|z|=1}^{m,n}(x)$ を用いて以下のようなダイレーション

$$\psi_z^{m,n}(x) = \frac{1}{|z|} \psi_{|z|=1}^{m,n}(x/|z|) \quad (5.4)$$

で与えられ、ウェーブレット基底をなしている [47]。

すなわち弾性体内部の $u(x, z)$ の (m, n) 階微分場を考え、深さ方向 (z 方向) を周波数軸とみなせば、それはそのまま $u_0(x)$ の $\psi_z^{m,n}$ を基底関数としたウェーブレット変換になっている。

以上から物理的機構としては u の微分に感度を有する検出子を深さ z を変えながら複数配置することによって、表面での $u (= u_0)$ のウェーブレット変換が直接得られることが明らかになった。

5.2 フィルタの特性

次にここで論じられたフィルタの特性について明らかにする。(5.2) 式の絶対値のピークを与える k を中心周波数と呼ぶことにすると、中心周波数 k_0 は

$$k_0 = (m+n)/|z| \quad (5.5)$$

であり Q 値は

$$Q \equiv \frac{\text{(中心周波数)}}{\text{(半値幅)}} \approx \sqrt{\frac{m+n}{8 \log 2}} \quad (5.6)$$

である。

Fig.5.1, 5.2 に $(m, n)=(1, 0)$ および $(m, n)=(1, 1)$ の場合についての $H_z^{m,n}(k)$, および対応するウェーブレット関数 $\psi_z^{m,n}$ を示す。ただし

$$\psi_z^{1,0} = -z \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{-z}{\pi(x^2 + z^2)} \right] \quad (5.7)$$

$$\psi_z^{1,1} = z^2 \frac{\partial^2}{\partial x \partial z} \left[\frac{-z}{\pi(x^2 + z^2)} \right] \quad (5.8)$$

であり、図中の $\psi_0^{m,n}$ は $z = -1$ における $\psi_z^{m,n}$ である。

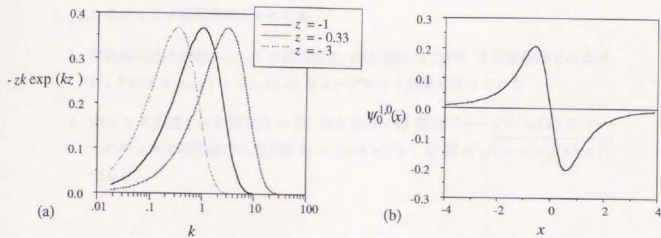


Fig. 5.1 微分場のフィルタ特性. (a): $|zH_z^{1,0}|$ のプロットと (b): 対応するウェーブレット波束.

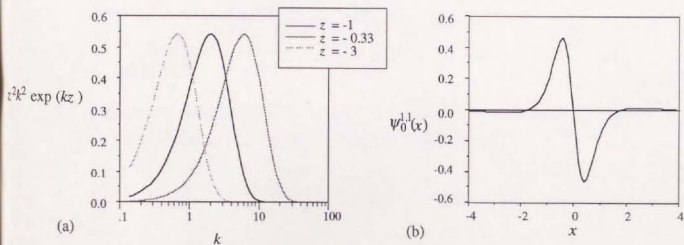


Fig. 5.2 微分場のフィルタ特性. (a): $|z^2 H_z^{1,1}|$ のプロットと (b): 対応するウェーブレット波束.

5.3 本章のまとめ

本章においては弾性体内部において発散の微分を検出するブローブを異なる深さに複数配置することによって容易にフィルタバンクが形成可能なことを理論的に示し、また各フィルタ特性を明らかにした。

1. 弾性体内部の発散 $u(x, z)$ の微分場は、深さ方向 (z 方向) を周波数軸とみなせば、そのまま $u_0(x) \equiv u(x, 0)$ のウェーブレット変換になっている。
2. 深さ z に配置された横方向 m 階、深さ方向 n 階 微分ブローブの $u_0(x)$ についてのフィルタ特性は中心周波数 $k_0 = (m+n)/|z|$ 、 Q 値 $\approx \sqrt{(m+n)/(8 \log 2)}$ である。

第 6 章

ダイバージェンスプローブ、シアプローブによる 滑べりと摩擦係数の同時知覚

これまでダイバージェンス検出プローブによる触覚アルゴリズムとその応用について論じてきたが、弾性体内部の状態が 6 成分の応力テンソルで記述されることを念頭におきつつ多自由度の応力成分を観測可能なエレメントを前提に考察を進めてみると、そこに新たな知覚機構の可能性が見い出されてくる。

本章ではまずダイバージェンスプローブ、シアプローブという容易に実現可能な 2 種のプローブを弾性体内部に近接配置することを考え、それによって表面テクスチャやその滑べりとセンサ対象間の摩擦係数を同時知覚するアルゴリズムおよびその基礎実験結果を示す [40]。なお次章においては応力テンソルの 6 成分を検出可能な素子 (テンソルセル) に基づく触覚センサについて論じる。

6.1 基本原理

本節においても前節までと同様、 y 軸に平行な 1 次元プローブを前提とし、2 次元 $x-z$ 空間で議論する。(2.25) 式等より 表面応力 s の伝達特性は

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xx}(x, z) & \sigma_{xz}(x, z) \\ * & \sigma_{zz}(x, z) \end{pmatrix} = \int (H_x S_x + H_z S_z) e^{ikx} dk \quad (6.1)$$

[Stress Transfer Function]

$$H_x = \begin{pmatrix} ikz + 2i\text{sgn}(k) & |k|z + 1 \\ * & -ikz \end{pmatrix} e^{|k|z} \quad (6.2)$$

$$H_z = \begin{pmatrix} |k|z + 1 & -ikz \\ * & 1 - |k|z \end{pmatrix} e^{k|z} \quad (6.3)$$

であった。

次に対象がセンサ表面を滑っている状況を仮定し、表面での垂直応力とシアが摩擦係数 γ を用いて

$$s_x(x) = \gamma s_z(x) \quad (6.4)$$

の関係を満たすと仮定する。

以下では上で述べた伝達特性に基づいて γ や滑り速度を検出するアルゴリズムを論じる。

6.1.1 ダイバージェンスプローブとシアプローブ

本センサでは PVDF 圧電フィルムによって得られる 2 種類の特性のプローブを前提としている。PVDF フィルムやその他の圧電体は一般に応力に対する感度がその応力成分ごとに異なっており、この性質を用いて応力成分選択性をもつ受容素子を設計することができる [10]。またフィルム自体は柔軟な高分子フィルムであるから加工が容易でかつ柔らかい触覚センサによくなじむ材質である。ダイバージェンスプローブ、シアプローブは PVDF フィルムを用いて容易に得られるものであるがその実現法の詳細は後に譲りここではその定義のみを述べる。まずダイバージェンスプローブは前章までのプローブと同様弾性体内部において等方的な応力成分 $\sigma_{xx} + \sigma_{zz}$ を出力するプローブであり、一方シアプローブは反対称成分 $\sigma_{xx} - \sigma_{zz}$ を出力するものと定義する。

6.1.2 具体的なアルゴリズム

対象がセンサ面上を滑ることを前提として、近接配置されたダイバージェンス、シアプローブの出力から滑り速度と接触面での摩擦係数を同時推定するアルゴリズムを述べる。

対象がセンサ上を速度 v で滑るとき $(x, z) = (0, z_d)$ に配置されたダイバージェンスプローブの出力信号 $p_d(t)$ のスペクトル $P_d(\omega)$ は

$$\begin{aligned} P_d(\omega) &= \left[2i \operatorname{sgn}\left(-\frac{\omega}{v}\right) S_x + 2S_z \right] \exp\left(i - \frac{\omega}{v} z_d\right) \\ &= 2 \left[i \operatorname{sgn}\left(-\frac{\omega}{v}\right) \gamma + 1 \right] S_z \exp\left(i - \frac{\omega}{v} z_d\right) \end{aligned} \quad (6.5)$$

のように書かれる。同様に $(x, z) = (0, z_s)$ に配置されたシアプローブの出力スペクトル $P_s(\omega)$ は

$$\begin{aligned} P_s(\omega) &= \left[\left\{ 2i \operatorname{sgn} \left(-\frac{\omega}{v} \right) + 2i \left(-\frac{\omega}{v} \right) z_s \right\} S_x + 2 \left| -\frac{\omega}{v} \right| z_s S_z \right] \exp \left(\left| -\frac{\omega}{v} \right| z_s \right) \\ &= 2 \left[\left\{ i \operatorname{sgn} \left(-\frac{\omega}{v} \right) + i \left(-\frac{\omega}{v} \right) z_s \right\} \gamma + \left| -\frac{\omega}{v} \right| z_s \right] S_z \exp \left(\left| -\frac{\omega}{v} \right| z_s \right) \quad (6.6) \end{aligned}$$

で与えられる。ここで2種のプローブが十分に近接配置され、 $z_d = z_s = z_0$ とみなせると仮定すると、 $P_s(\omega)$ と $P_d(\omega)$ の周波数ごとの比は

$$R(\omega) \equiv \frac{P_s(\omega)}{P_d(\omega)} = \left| -\frac{\omega}{v} \right| z_0 + \frac{i \operatorname{sgn}(-\omega/v) \gamma}{1 + i \operatorname{sgn}(-\omega/v) \gamma} \quad (6.7)$$

となり、この比 $R(\omega)$ は対象のプロファイルによらず速度と摩擦係数のみに依存することがわかる。特に $\gamma \ll 1$ とみなせる場合には上式は

$$R(\omega) \simeq \left| -\frac{\omega}{v} \right| z_0 + i \operatorname{sgn} \left(-\frac{\omega}{v} \right) \gamma \quad (6.8)$$

と書き直され、移動速度 v は比 $R(\omega)$ の実部から、摩擦係数 γ は虚部から

$$|v| = \frac{|\omega| z_0}{\operatorname{Re}[R(\omega)]} \quad (6.9)$$

$$\gamma = \operatorname{Im}[R(\omega)] \operatorname{sgn} \left(-\frac{\omega}{v} \right) \quad (6.10)$$

のように決定される。

6.2 プローブの構造

[1] ダイバージェンスプローブ

ダイバージェンスプローブの構造を Fig.6.1に示す。ダイバージェンスプローブはPVDFフィルムをセンサ内部の空洞に挿入しシリコンオイルを満たしたものである。この構造のプローブは幾何的な対称性からその出力は $\sigma_{xx} + \sigma_{zz}$ に比例する。なお使用するPVDFフィルムの圧電定数は $g_{31} = \partial V_{\text{electrode}} / \partial \sigma_{xx} / d$, $g_{32} = \partial V_{\text{electrode}} / \partial \sigma_{yy} / d$, $g_{33} = \partial V_{\text{electrode}} / \partial \sigma_{zz} / d$ として (d : フィルムの厚み) $g_{31} = 0.216$, $g_{32} = 0.019$, $g_{33} = -0.339$ [(V/m)/(N/m²)] であり、シアに対しては感度をもたない。

[2] シアプローブ

シアプローブはPVDFフィルムを弾性体内部に直接埋め込むことによって得られる。もし弾性体がポアソン比が0.5に近い柔らかい材質であれば変形に際してその

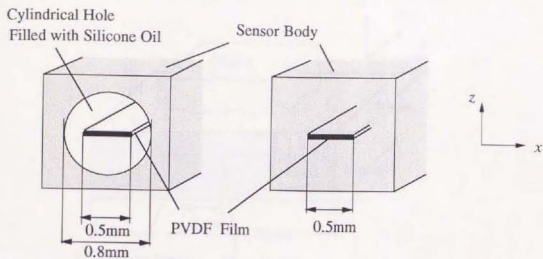


Fig. 6.1 ダイバージェンスプローブ (左) およびシアプローブ (右) の構造.

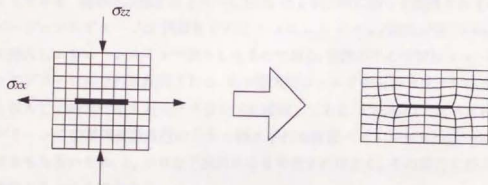


Fig. 6.2 応力集中.

体積はほとんど変わらないため $\sigma_{xx} = \sigma_{zz}$ なる等方応力に対しては歪みはほとんど生じない。しかし $\sigma_{xx} \neq \sigma_{zz}$ なる場合には $\sigma_{xx} - \sigma_{zz}$ に比例した変形が生じフィルムのエッジに応力集中が生じ非常に大きな出力が発生する。この効果に加え、使用するフィルム自体の $g_{31} + g_{33}$ と $g_{31} - g_{33}$ との比はすでに 1:4.5 であり、反対称成分に対する感度が高くなっているため本プローブの出力は反対称成分 $\sigma_{xx} - \sigma_{zz}$ に比例するとみなしてよい。

6.3 実験的検証

検証実験のための触覚センサを Fig.6.3に示す。センサ本体はシリコンゴムを成形したものでその表面近くに2種類のプローブが配置されている。シアプローブは幅 0.5mm 長さ 40 mm の長方形で引っ張りに対する感度の最も悪い配向軸を長手方向

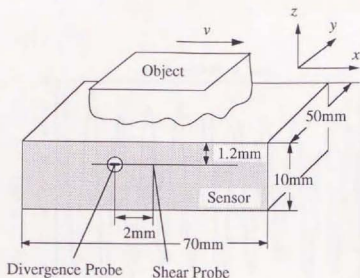


Fig. 6.3 実験的センサの構造.

にとつてある。埋め込み深さは $z = -1.2\text{mm}$ で y 軸方向に沿って配置されている。ダイバージェンスプローブは同様な PVDF フィルムをセンサ内部の内径 0.8mm の空洞に挿入しシリコンオイルで満たしたものである。空洞の中心位置は $z = -1.2\text{mm}$ でシアプローブに平行に配置される。なお電気的シールドのためセンサ本体はカーボンを混入して導電性をもたせグラウンドに接続してある。これらのプローブは表面応力パターンの空間周波数成分のうち x 軸に平行な波数ベクトルをもつ成分以外には感度をもたないため、 $k_y = 0$ なる成分のみを考慮すればよく、その場合には 2 次元の議論がそのまま成立する。

Fig.6.3 に示すように 様々なピッチ d の周期的パターンをもつ対象 (ボルトの周囲に一定間隔で針金を巻き付けたもの) をセンサ面上で x 軸方向に滑べらせる。各々の対象についての出力信号のうち最も大きな周波数成分について上下プローブ比 $R(\omega_0)$ をとり Fig.6.5 にプロットした。ただしプロットに際しては 2 種類のプローブの x 軸に沿った位置のずれの効果はすでに補償してある。より詳細な定量的検証が今後さらに必要であるが、実験結果は理論的予想と同じ傾向を示している。すなわち $\text{Re}[R(\omega_0)]$ は対応する空間周波数 $k_0 = \omega_0/v = 2\pi/d$ の増加に伴って増加し $\text{Im}[R(\omega_0)]$ の符号は理論的予想と一致している。

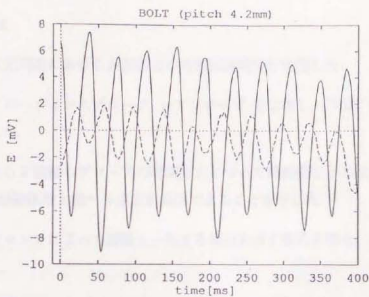


Fig. 6.4 ピッチ $d = 4.2\text{mm}$ の対象を滑べらせたときの2種類のプローブの時間的出力。

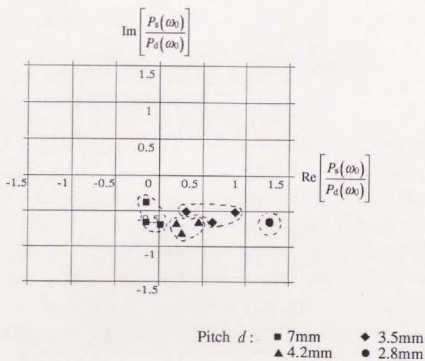


Fig. 6.5 様々な対象についての $R(\omega_0)$ のプロット。

第7章

テンソルセルによる高度触覚センシング

弾性体内部においては表面変形を反映する物理量として6つの応力成分（3軸方向の垂直応力およびせん断応力）が観測可能な量として存在するが、それはベクトルの分布（表面変位あるいは表面応力）として2次元表面に与えられるパターンに対しその観測可能な成分の数と弾性体の深さ方向の広がりという2つの意味で冗長な場を形成している。これまでは特にセンサの深さ方向の広がりを利用した触覚センシングについて論じてきた。本章ではそれをさらにすすめてセンサ内部の6つの応力成分を検出可能な微小ユニット（テンソルセル）を埋め込み、表面応力によって形成される内部の応力テンソル場を知覚する新しい触覚センサのアーキテクチャについて論じる。

7.1 テンソルセル触覚センサの概要

本章で考える触覚センサの基本的なアーキテクチャは、弾性体の内部に、その周囲での6つの自由度の応力テンソル（3軸方向の垂直応力 σ_{ii} とせん断応力 σ_{ij} ）を観測する微小ユニットを、まばらに、しかしさまざまな深さに配置したものである（Fig.7.1）。人間の触覚は例えばボンボンとランダムに表面に触れたり軽くさすったりして表面の形状や構造の柔らかさあるいは粘着性などを知覚同定するし、把持対象の滑べりの予見、あるいは転がりと滑べりの識別などの知覚を、センサや対象の振動といった悪条件の中でおこなえながらタスクを遂行していく。本章の触覚センサはこのような多様でかつ優れた触覚を、情報処理媒体としての応力テンソル場の助けを借りて実現していこうとするものである。

まず本アーキテクチャによって得られるメリットをまとめてみる。ここで列挙される事項の大半はこれまで論じてきた三次元構造触覚センサのコンセプトそのものであるが、敢えて重複を恐れず書くと

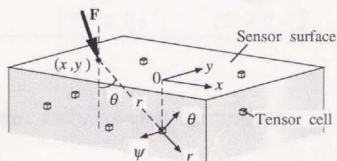
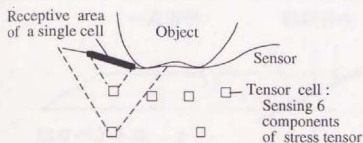


Fig. 7.1 テンソルセル触覚センサの概要.

1. 各テンソルセルは単に表面での応力3成分を検出するだけでなく、感受面内における接触広がりや位置を直接的に検出する能力を有していること。弾性体内部での応力テンソルの固有構造と表面での接触形態は明瞭な関係で結ばれており、この物理的特性（理想的な連続演算）を利用して、多量で密なサンプリングを介さずに、特徴抽出の初期段階を経た出力が直接得られること。
2. その結果、検出子の配置はまばらでよく、また検出ユニット間での感度均一性への要求は緩和されること。さらにその後の信号処理は大幅に軽減されること。
3. まばらなエレメント配置によってセンサのやわらかさがえられ、
4. 3次元的なエレメントの配置によってマルチスケールでの知覚が容易に行なえること。

以下では本アーキテクチャにおいて最も基本となるべく個々のセルの特徴抽出能力を理論的に論じ、基礎実験結果を示す。

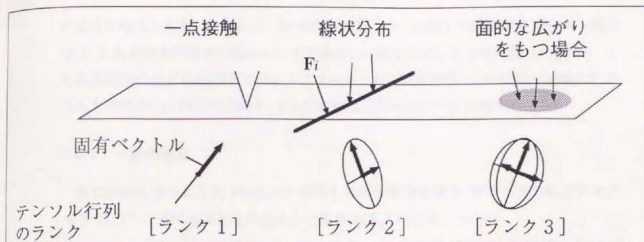


Fig. 7.2 テンソルの固有構造と表面応力分布の関係. 図は応力楕円表示.

7.2 センサ内部応力テンソルの固有構造と表面応力分布の関係

本節では準静的な議論がそのままではまる比較的ゆっくりとした動きに話を限定し、テンソル6成分と深さ方向の冗長性の中に表面パターンの特徴がどのように蓄積あるいは分離されているかを2章の議論に基づいて示していく。まずあらゆる議論の前提として以下の事項を再確認しておく。

1. 応力テンソルは文字通りテンソル変換に従うテンソル量であるから、3つの固有ベクトルと、対応する固有値によって、座標系を特定することなく、完全に記述される。従って以下の記述においては、対応する固有値で重みづけした3つの固有ベクトルによって応力テンソルを図示する。(応力楕円表示)
2. 零固有値に対応する固有ベクトルで張られる空間を、そのテンソルのカーネルと呼ぶ。

7.2.1 一点接触による応力テンソル

まず対象表面の点 (x, y) に点接触による集中力 \vec{F} が働いている場合を考えると、そのとき弾性体内部に生じる応力テンソルは、2章において

$$\begin{pmatrix} \sigma_{rr} & \sigma_{r\theta} & \sigma_{r\phi} \\ & \sigma_{\theta\theta} & \sigma_{\theta\phi} \\ * & & \sigma_{\phi\phi} \end{pmatrix} = \frac{-3|\mathbf{F}|\cos\alpha}{2\pi r^2} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ & 0 & 0 \\ * & & 0 \end{pmatrix} \quad (7.1)$$

のように与えられた。ただし $1-2\sigma$ の項は無視した。上式は対象表面の力点から観測点 P をながめた方向を r 軸にとった座標系での表示であることに注意 (Fig.7.1)。すなわち任意の点 P の応力テンソル t はランク 1 の行列を形成し、その第一主軸は P からみた力点 (x, y) の方向を向く。また固有値は $|F| \cos \alpha / r^2$ に比例する。

7.2.2 一般の場合

次に表面に分布した力 $F_i(x_i, y_i)$ が与えられた場合を考える。そのときの応力テンソル T は、(7.1) 式で示される各点からの寄与 $t_i(F_i)$ の和として

$$T = \sum_i t_i \quad (7.2)$$

で与えられる。

7.2.3 テンソル行列のランクによる接触形態分類

以上の性質によってテンソル行列の固有構造と表面での接触形態が以下のように対応することがわかる。

- もし接触が一点であれば、任意の点で観測される応力テンソル T は零でない固有値を一つだけ有し、それに対応する固有ベクトルは接触点の方向を向く。
- もし接触がある直線上（一次元）に局在していれば、その直線と観測点を含む平面の法線ベクトルは、各点からの寄与 t_i のカーネルの全てに共通して含まれる。従って T のランクは 2 を越えることがなく、さらに言えば、ごく特殊な場合を除いてそのランクは 2 に等しいと言える。このとき零でない 2 つの固有値に対応する固有ベクトルは観測点と直線を含む平面を張り、直線の位置はそこから決定される。
- 接触が 2 次元的に広がっている場合には 3 軸すべての固有値が応力の向きを反映しつつ有限の値を有する。（テンソル行列のランクは 3。）

このように応力テンソルの固有構造は表面分布の広がりに応じてリッチになっていき、分布広がりが小さい場合にはその主軸方向がその集中分布の位置情報を有する。(Fig.7.2参照)

また表面に近い点の応力テンソルほど観測点真上付近の分布特徴を強く反映し、深い点ほどその深さに比例して広い範囲の分布の影響がそこにたし込まれる。すなわち弾性体内部のテンソル場を表面に平行な平面で切断して得られるパターンの集合を考えると、そこには深さ方向に比例したスケールスペースが形成されている。

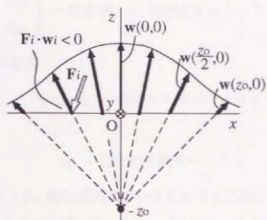


Fig. 7.3 関数 $w(x, y)$ の図解.

7.2.4 接触広がりパラメータの直接的な検出

本節では表面応力分布とテンソルセル出力との関係についても一つ別の見方を与える。2章でも論じたように表面力分布 F_i に対する弾性体内部の点 $(0, 0, -z_0)$ における応力テンソルを記述した(7.2)式および(7.1)式は x - y - z デカルト座標を用いて以下のように書き直される。

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ * & \sigma_{zz} \end{pmatrix} = \sum_i F_i \cdot w(x_i, y_i) \begin{pmatrix} x_i^2 & x_i y_i & x_i z_0 \\ y_i^2 & y_i z_0 \\ * & z_0^2 \end{pmatrix} \quad (7.3)$$

ただし

$$w(x, y) \equiv \frac{3}{2\pi(x^2 + y^2 + z_0^2)^{\frac{3}{2}}} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z_0 \end{pmatrix}$$

であった。

ここで、 $F_i \cdot w_i$ ($w_i \equiv w(x_i, y_i)$) が全ての i について一定符号のみを持つ場合を仮定すると(これが通常の接触状況において成り立つことは Fig.7.3より明らか) 応力テンソルの各成分は分布 $F_i \cdot w_i$ のモーメントをそのまま表していることがわかる。すなわち

1) 左上隅 2×2 成分

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} \end{pmatrix} \rightarrow \text{分布 } F_i \cdot w_i \text{ の原点まわりの 2 次モーメント}$$

2) 最右列の上から 2 成分

$$(\sigma_{xz}, \sigma_{yz}) \rightarrow \text{分布の 1 次モーメント}$$

3) 右下隅成分

$$\sigma_{zz} \rightarrow \text{分布の 0 次モーメント}$$

これらのモーメントが、弾性体内部の一点における応力テンソルを観測することとて、直接得られることに注意。例えばエッジや尖端の存在による集中応力分布が感受領域内（ウインドウ関数 $w(x, y)$ が有意な値をもつ領域 $x^2 + y^2 < z_0^2$ を感受領域と呼ぶことにする。）に与えられたときにはそれがエッジあるいは尖端であることの同定とその位置の決定が可能となり、また広がりのある分布の場合にはその広がり具合を定量的に評価することができると期待される。

最後に応力テンソルから、表面での応力の総和 F 、分布中心 (x_G, y_G) および分布中心まわりの広がりを表す分散行列 M への逆変換を具体的に書くと、

$$\begin{aligned} F &= z_0^2 \sigma_{zz}, \\ (x_G, y_G) &= \frac{z_0}{\sigma_{zz}} (\sigma_{xz}, \sigma_{yz}), \\ M &= \frac{z_0^2}{\sigma_{zz}} \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} x_G^2 & x_G y_G \\ x_G y_G & y_G^2 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (7.4)$$

である。

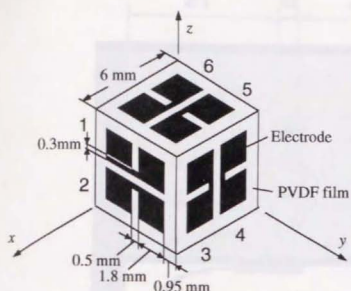


Fig. 7.4 試作したテンソルセルの構造(左)と写真(右)。

7.3 テンソルセルの試作と実験結果

本節以下では本触覚原理が具体的にセンサとして応用可能なものであるかを吟味するためにおこなったテンソルセルの試作および実験結果を示す。

ここで示すテンソルセルはなるべく小さな広がりて最大の感受面積を獲得し、またその対象性から各応力テンソルに対し均等な感度を有する構成となっている。

[1] テンソルセルの構造と動作原理

Fig.7.4のように6mm角の剛体キューブ表面上に電極パターンをエッチングしたPVDFフィルムが貼られている。PVDFフィルムの各サイトの出力は、そこに働く垂直応力の面積分に比例する。キューブの辺を r とするとキューブが存在することによる弾性場の乱れはほぼ $1/r^3$ に比例して減少するため r の数倍程度以上の深さにセルを埋め込む場合、センサ表面上の弾性的性質はセルを埋め込むことによってはほとんど影響を受けない。いまセル自体の大きさより大きなスケールで一様とみなせる応力場 $\sigma_{ij}(i, j = x, y)$ が生じている中に、テンソルセルを埋めた時のような出力が得られるか考える。いま図中1から6で示されるユニットの出力を $o_i(i = 1, \dots, 6)$ とし、各面ごとの和信号

$$p_x = o_1 + o_2, \quad p_y = o_3 + o_4, \quad p_z = o_5 + o_6$$

および差信号

$$q_{xy} = o_3 - o_4, \quad q_{yz} = o_5 - o_6, \quad q_{zx} = o_1 - o_2$$

に注目すると、対称性に関する考察から p_i, q_{jk} と σ_{lm} は

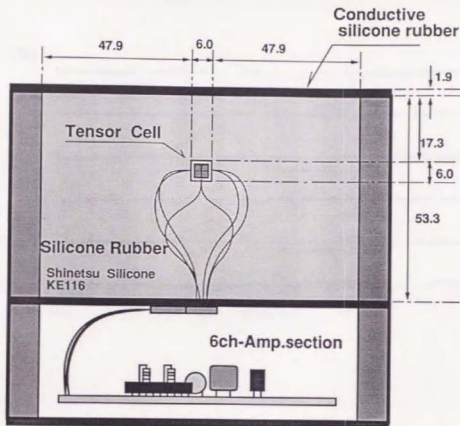


Fig. 7.5 実験条件.

$$\begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} 1 & -\alpha & -\alpha \\ -\alpha & 1 & -\alpha \\ -\alpha & -\alpha & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \end{pmatrix}$$

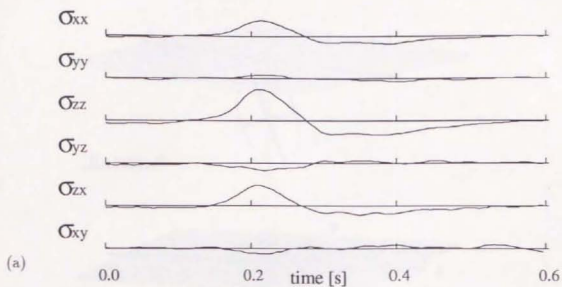
$$\begin{pmatrix} q_{xy} \\ q_{yz} \\ q_{zx} \end{pmatrix} = A\beta \begin{pmatrix} \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \end{pmatrix} \quad (7.5)$$

のように結ばれる。

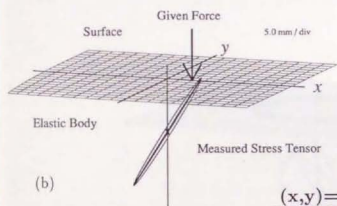
上式中の α, β, A は弾性体のポアソン比とパターンの形状のみによって決まり、ポアソン比 0.45 の場合 $\alpha = 0.24, \beta = 0.36$ であることが数値計算によって得られている。このとき p_x, p_y, p_z の変換式においてマトリックスの固有値はすべて等しく 0.93 であり、このことは本セルの出力から応力テンソルへの安定な逆変換が可能であることを意味する。

[2] 基礎実験結果

テンソルセルをセルの上面がセンサ表面から 17 mm の深さになるように埋め込み応力テンソルを観測する (Fig.7.5) .



$(x,y)=(1.0,0.0)$



$(x,y)=(0.0,-1.0)$

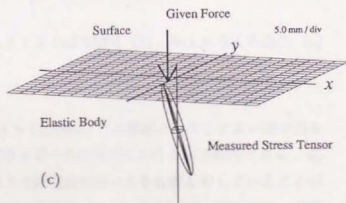


Fig. 7.6 (a): $(x,y) = (1,0)$ [cm] に点接触を与えたときのテンソルセルの出力波形.
 (b): ピーク ($t = 0.21$ s) における応力楕円. (c): $(x,y) = (0,-1)$ [cm] に点接触したときの応力楕円.

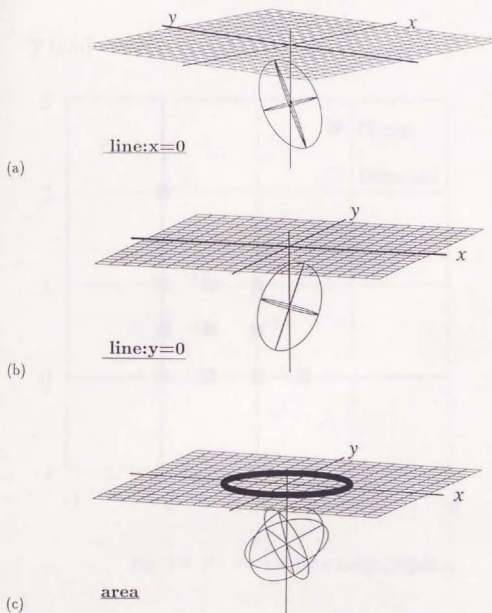


Fig. 7.7 (a) y 軸上に線接触を与えたときの応力楕円. (b) x 軸上を与えた場合. (c) 広がりをもつ対象の場合.

Fig.7.6に示すのは、センサ表面 $(x, y) = (1, 0)[\text{cm}]$ に点接触とみなしてよい集中心力を与えたときのテンソルセルの出力波形とピークの時刻における応力楕円である。応力楕円をみると第1固有値のみが残りの固有値に比べ大きな値を有していることがわかる。なおセル表面の各ユニット出力から応力テンソルを算出する際の前述の変換係数は $\alpha = 0.237, \beta = 0.355, A = 1.90$ とした。

Fig.7.7は表面に線状あるいは面状接触を与えたときの応力楕円表示である。線接触の場合には第2固有値までが有意な値をもち面接触の場合には第3固有値までが有意な値をもっている様子がわかる。

y [cm]

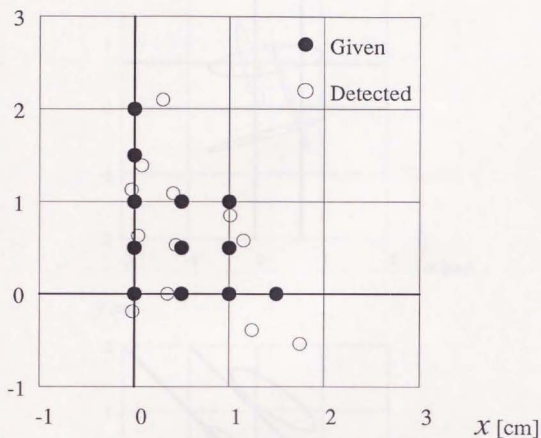


Fig. 7.8 テンソルセル出力から決定した接触点.

Fig.7.8に示すのは表面に点接触(直径10mmの球の接触)を与えた際の接触点をテンソルセルの出力から前述のアルゴリズムに基づいて推定したものである。推定に際しては出力波形におけるピーク付近の一時刻のみの出力値を用いている。なお表示されている全データについて、得られたテンソルの第2固有値は第1固有値の20%以下であった。

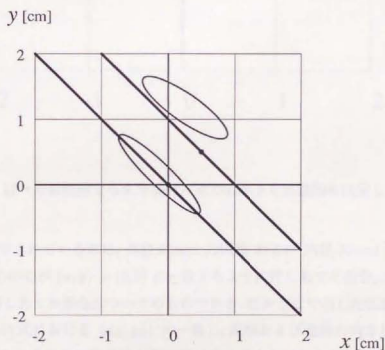
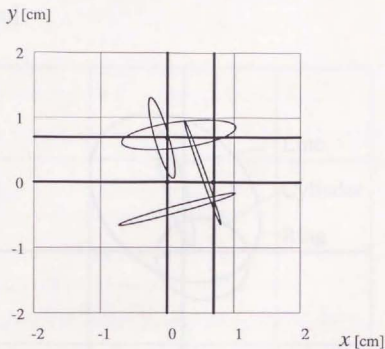


Fig. 7.9 様々な線接触を与えた場合にその広がりを定量的に決定した結果.

また Fig.7.9,7.10に示すのは表面に様々な広がりをもつ対象を押しあてたときの広がり の推定結果である. まず Fig.7.9 に示すのは, 様々な線接触を与えた場合にその広 がりを表す楕円表示である.

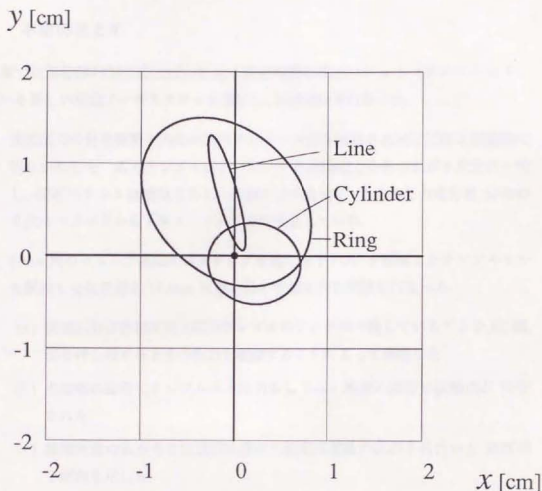


Fig. 7.10 様々な線接触を与えた場合にその広がりを実量的に決定した結果.

Fig.7.10に表示されているのは、外径35mmの円柱および内径35mm外径50mmのリングをその中心が $(x, y) = (0, 0)$ に一致するように押しあてた場合、および y 軸に沿って線を押しかけた場合についてのものである。なおここで示した広がり楕円は、楕円中心が(7.4)式における (x_G, y_G) に一致し、長軸および短軸の向きは M の主軸方向で、かつその長さが各固有値の平方根になるように描かれている。図からこのセンサが3種類の対象の広がりの違いを捉えていることがわかる。 (x_G, y_G) が必ずしも原点と一致していないのは接触面内における圧力分布の偏りを反映しているものと考えられる。

7.4 本章のまとめ

本章では弾性体内部の応力成分を全て検出可能な微小ユニット（テンソルセル）を用いる新しい触覚アーキテクチャを提案し、基礎実験を行なった。

1. 表面応力の分布特徴と内部の応力テンソルの固有構造との対応関係を理論的に明らかにした。応力テンソル行列のランクと表面応力分布の広がり次元は一致し、固有ベクトルは接触点あるいは線の方角を向く。また各応力成分は分布の0次モーメントから2次モーメントまでを表している。
2. 6mm 角のキューブ表面にエッチングを施した PVDF を配置したテンソルセルを試作しそれを深さ 17 mm に埋め込んで基本的な実験を行なった。
 - (a) 表面応力の分布次元と応力テンソルのランクが一致していることを点、線、面を押し当てたときの出力を観測することによって確認した。
 - (b) 点接触の場合にテンソルセル出力から 1mm 程度の精度で接触点が決定された。
 - (c) 接触対象の広がりを定量的に求めた結果は対象の広がり具合とほぼ同じ傾向を示した。

第 8 章

超音波エミッション触覚センサ

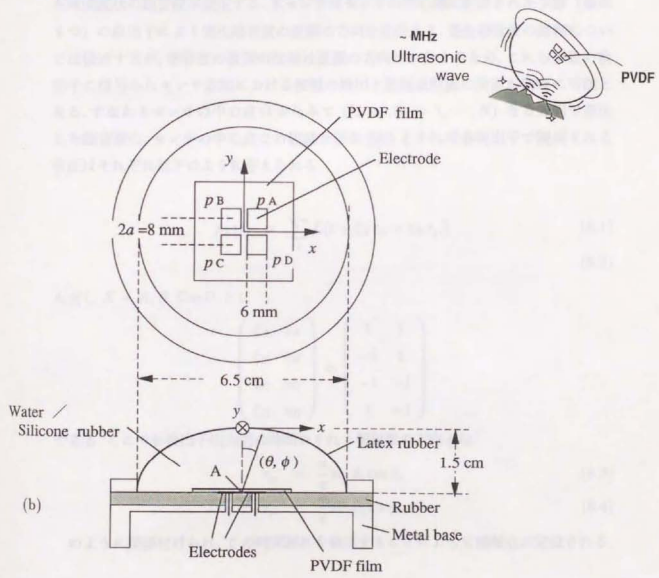
前章まででは表面から検出子までの準静的な伝達特性に基づくセンサを考えてきたが、本章においては MHz 域の高周波数における伝達特性を基礎においたセンサについて論じる。

接触の際には必然的にセンサ内部に弾性波が発生するが、その中にはセンサ径に比べて小さな波長をもつ高周波数成分も含まれる [12, 19]。これらの成分は、その波面の中に波動発生源の方角に関する情報を有しており、センサの中心部分に配置された小数の超音波受信子のみから、動きの中で生じる豊富な触覚情報を高速に取得することが可能になると考えられる。また検出子がセンサの最も奥深くに配置されているためダメージに対し有利な構造になっている。これからの述べるセンサは空中の音源定位センサとしてすでにその能力が確認されているシステム [1] を基礎にしている。そのシステムは 4 つのマイク捉えられた音波束の短時間波形特徴のみからそれが単一音源からのものであるかを瞬時瞬時判断しつつ有意な波形が到来した瞬間ごとにその音源定位の結果を出力、蓄積していくもので、非常に高速な応答を有すると同時に処理アルゴリズムが簡単に回路的実現も容易な構成となっている。また高速定位とその蓄積という考え方によって空間的に分布した複数の音源を時間軸上で分離同定し、未知の複数音源環境を柔軟に捉えることができる。

すでに可聴音波に対する処理回路の実現とシステム全体のリアルタイムでの動作確認は済んでおり、回路自体の超音波領域までの高速化にも本質的な困難は予想されないことから、これをそのまま触覚センサの奥深くに埋め込まれた 4 つの超音波検出子に適用すればリアルタイムに表面からの輻射源を捉えて定位する触覚センサが実現するはずである。以下ではここで述べたセンサを実現するために、最初に明らかにすべき基礎的問題について検討していく。



(a)



(b)

Fig. 8.1 (a) 試作モデルの写真と (b) その構造.

8.1 基本原理と明らかにすべき問題

本章で提案するセンサの基本的な構造は Fig.8.1 に示される。4つのブロックからなる PVDF フィルムが球状のセンサの中心部に配置され、対象との接触の際にセンサ内部に発生する超音波を捉える。以下に基本的なセンシングの原理を述べ、その実現のために明らかにすべき問題点を示す。

[1] 輻射源の定位

物体がセンサ表面に接触した際には物体とセンサとの最初の接触点を輻射源とした球面波状の超音波が発生する。本センサはセンサの中心部に配置された少数（最低4つ）の検出子により発生超音波の波面の方向を定位する。発生超音波の詳細については後述するが、超音波の波面の法線は波源の方向に一致するため、これら少数の検出子の信号からセンサ表面における接触の検出と接触点位置の決定が同時に可能となる。すなわちセンサの中心点 O からみて (θ_i, ϕ_i) , $(i = 1, \dots, N)$ なる方向で発生した超音波の、センサの中心点での観測音圧を $f_i(t)$ とすれば各検出子で観測される音圧はそれぞれ以下のように与えられる。

$$p_X(t) = \sum_i f_i(t + \xi_X \tau_{xi} + \eta_X \tau_{yi}) \quad (8.1)$$

$$(8.2)$$

ただし $X = A, B, C, D$ とし

$$\begin{pmatrix} \xi_A & \eta_A \\ \xi_B & \eta_B \\ \xi_C & \eta_C \\ \xi_D & \eta_D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \\ -1 & -1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$$

である。ここで各検出子出力間の時間おくれと輻射源の方向とは

$$\tau_{xi} = \frac{a}{c} \sin \theta_i \cos \phi_i \quad (8.3)$$

$$\tau_{yi} = \frac{a}{c} \sin \theta_i \sin \phi_i \quad (8.4)$$

のように関係付けられ、この時間遅れを検出することによって接触点が定位される。

[2] 高速定位と定位結果の蓄積

次に重要な本センサの考え方は各接触点の高速定位とその結果の蓄積である [1]。この考え方によって単に接触情報を高速に与えるという側面だけでなく空間的に分

布した複数の輻射源を時間軸上で分離同定し、未知の複数輻射源環境を柔軟に捉えることができる。実際の処理アルゴリズムについてはアーキテクチャを Fig.8.2 に示すにとどめ、その詳細はここでは省略するがこのような高速推定と複数輻射源同定を可能にするためには接触による超音波輻射が時間的に局在していることが必須要件となる。

以上で提案されたセンサを実現するために最初に明らかにすべき点は次のようにまとめられる。

★接触によってどのような性質の超音波が輻射され、また観測されるか。

1. 現実的に検出可能な強度を有しているか
2. 輻射の時間的局在性
3. 接触面形状と輻射の関係

以下ではこれらの問題を理論的および実験的に検討していく。

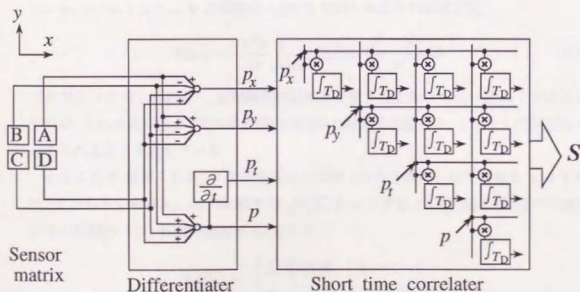


Fig. 8.2 信号処理のアーキテクチャ。

8.2 接触による超音波放射：理論的解析

[1] 超音波の発生

本節では対象とセンサの機械的接触によってどのような超音波がセンサ内部に発生するかを理論的に解析する。ここでは特に対象がセンサ表面に対し垂直に衝突する場合について以下の仮定のもとで発生超音波を解析する。

1. 対象面内の凸部とセンサが接触する場合において、最初の接触点付近で対象表面は連続で、さらに有限の曲率を有する。
2. 対象は理想的な剛体であるとする。
3. 対象の速度は衝突時刻付近で連続である。(ただしこれらの仮定のもとで解析した結果によれば、対象、センサ間に無限大の力は発生しないため実はこの仮定は不用である。)
4. せん断率は体積弾性率に比べ十分小さいものとしてこれを無視する。これはポアソン比が $1/2$ に近い柔軟体を考えるとき妥当な仮定である。

ここからの解析は 2.4 節での議論に従って与えられる。接触点真下での観測音圧 p ($\approx \sigma_{rr} \approx \sigma_{\theta\theta}$) $\approx \sigma_{\phi\phi}$ を表面変位 $u_r(r, t)$ で表した以下の表式 [50]

$$P(\omega) = -\frac{\omega^2 \rho}{2\pi} \int_{\text{surface}} U_r(r, \omega) \frac{e^{(-i\omega r/c)}}{r} dS \quad (8.5)$$

(ただし $c \equiv c_l$) において、接触瞬間付近のみを扱うことから r は一定 $= l$ であるとすれば、これは観測圧が、表面垂直変位面積分の時間 2 次微分と、 l/c なる時間遅れで与えられることを表している。

いまここで 仮定 1 に従い、対象表面の全曲率 (ガウス曲率) の平方根を a とすれば (すなわち主曲率 a_1, a_2 の相乗平均 $\sqrt{a_1 a_2}$ を a とすると) 衝突瞬間付近での表面変位の面積分 $V(t)$ は衝突速度を v_0 として

$$V(t) = \begin{cases} \int_0^t \frac{2\pi}{a} v_0^2 t dt & (\text{for } t > 0) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (8.6)$$

で与えられる。ただし衝突の最初の瞬間を $t = 0$ とした。この 2 次微分と (8.5) 式より、

$$p(t) = \begin{cases} \frac{\rho v_0^2}{al} & (\text{for } t > l/c) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (8.7)$$

が得られる。またこのときのスペクトルは

$$P(\omega) = \frac{\rho v_0^2 \exp(i\omega l/c)}{al} \frac{1}{i\omega} \quad (8.8)$$

である。

このように対象との接触によって圧力の不連続点が生じ、ここに高周波数成分が集中することがわかる。またここで観測される高周波数成分はすべて衝突の最初の一点付近のみから発生していることに注意。

ここで一例として $v_0 = 30$ [cm/s], $\rho = 10^3$ [kg/m³], $l = 10$ [mm], $a = 1$ [1/mm] の場合を計算してみると音圧のギャップは

$$\dot{p}\left(\frac{l}{c}+\right) = \frac{\rho v_0^2}{al} = 9 \quad [\text{Pa}] \quad (8.9)$$

で与えられる。

[2] 超音波エミッションの持続時間

つぎに一回の衝突によって輻射される超音波の持続時間について検討する。前述の解析によって得られた不連続信号をハイパスフィルタを通して観測することを考えるとフィルタ通過後の波形の持続時間は専らフィルタのカットオフ周波数 ω_0 によって決まることがわかる。一例としてカットオフ周波数 $\omega/2\pi = 100$ kHz のフィルタを考えれば持続時間は $T \simeq 1/\omega_0 = 10 \mu\text{s}$ の程度である。

8.3 センサの試作と実験

試作したセンサの構造を Fig.8.1に示す。PVDF のマトリクスはフィルム表面に蒸着された金属薄膜に対してケミカルエッチングを施すことによって形成されている。またセンサ本体としては柔らかくかつ超音波の透過特性のよい材料を選ぶ必要があるが、ここでは最もその特性がよい材質として水を選んだ。なお不純物を含まないシリコーンゴムは超音波の透過特性が非常によく、これを用いた試作結果については後述する。

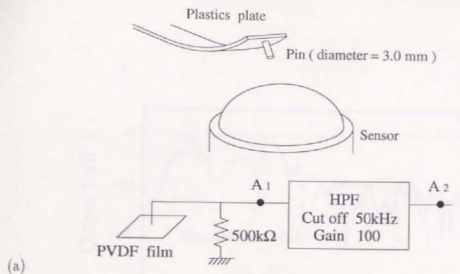
8.3.1 超音波の検出

本節では接触によって生じる超音波が実際に検出可能であることを確かめる。実験状況は Fig.8.3(a) に示される。先端が直径 3 mm の球状をしたピンでセンサ表面を軽くたたいたときの検出子の出力を Fig.8.3(b),(c) に示す。接触直前のピンの速度は 60 cm/s であった。なお Fig.8.3(b) はハイパスフィルタ通過前の波形、Fig.8.3(c) は通過後のものである。観測された振動的な波形は 前述の解析とは若干食い違うものであるがはっきりとした出力波形が 50 μ s 程度の短時間に観測されている。

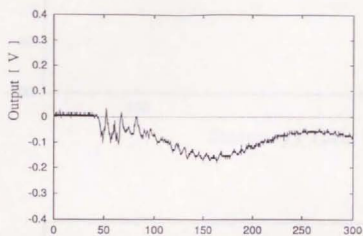
Fig.8.4 は得られたセンサ出力の時間的なスペクトラムである。(a) に示されるように 周波数に反比例して振幅が小さくなってゆくパターンが最も頻繁に観測された。これは理論的予想と一致する傾向である。一方 (b) に示すようにより強い高周波数成分を含む波形がランダムな表面をもつ対象が接触した場合にまれに観測されることがあった。これは対象の有限領域が、まさに一瞬とみなせる短時間内に (この場合 1 μ s 程度以内) にセンサ表面に接触した場合と考えられる。

8.3.2 接触点の定位能力

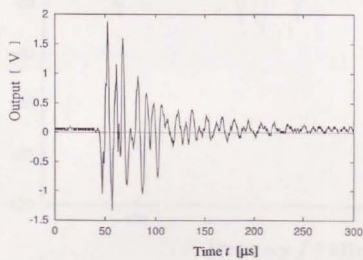
次に観測される超音波放射が、理論的に予想される通りに放射源の方向を正しく反映するものとなっているかを検討する。Fig.8.5 (a),(b) に示すのはセンサの真上 (x, y) = (0, 0) [mm] および点 (2.5, 0) [mm] をたたいたときの各エレメントの出力波形である。ただし $x - y$ 座標はセンサ表面に Fig.8.1 に示すようにに設定されたものである。Fig.8.5 (a) においては出力 $p_A + p_D$ および $p_B + p_C$ は至るところで一致している。一方、Fig.8.5 (b) においては $p_A + p_D$ と $p_B + p_C$ の間には明確な時間差が見てとれる。なお図中点線で示す時刻より後の時刻においては各出力間の関係は無秩序である。これはセンサ反射を繰り返して到着した超音波が重なっているためと考えられる。ただし文献 [1] の信号処理を前提とした場合無秩序な区間のデータは自律的に排除されるためこれは悪影響を及ぼさない。



(a)



(b)



(c)

Fig. 8.3 接触時に観測された超音波輻射. (a) 実験状況. (b) ハイパスフィルタリング前の波形. (c) 後の波形

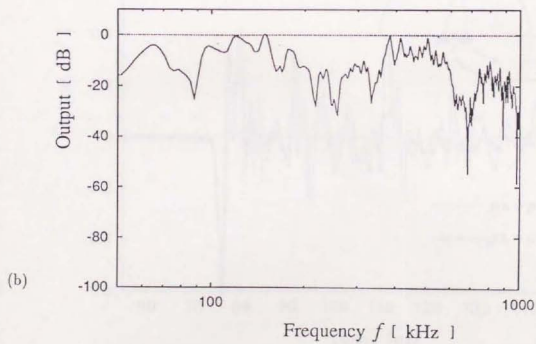
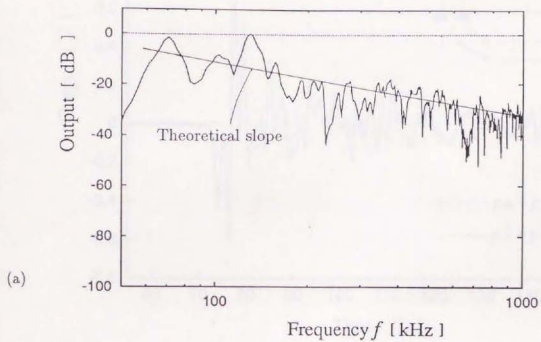


Fig. 8.4 観測された超音波放射のスペクトラム.

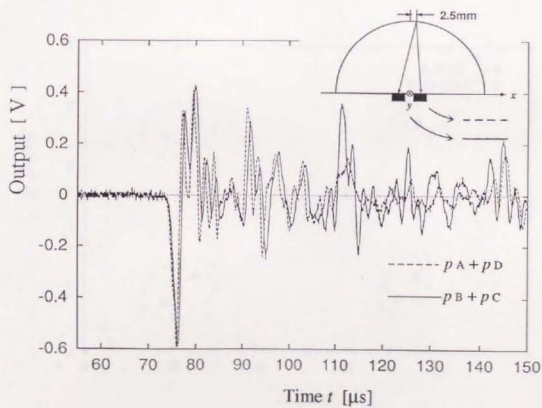
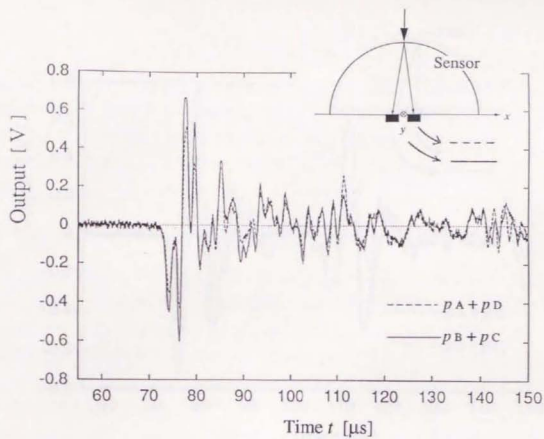


Fig. 8.5 (a) : $(x, y) = (0, 0)$ [mm] に接触した場合の出力波形, (b) : $(2.5, 0)$ [mm] の場合.

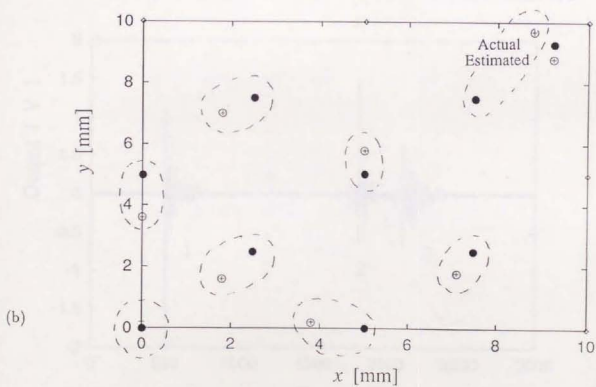
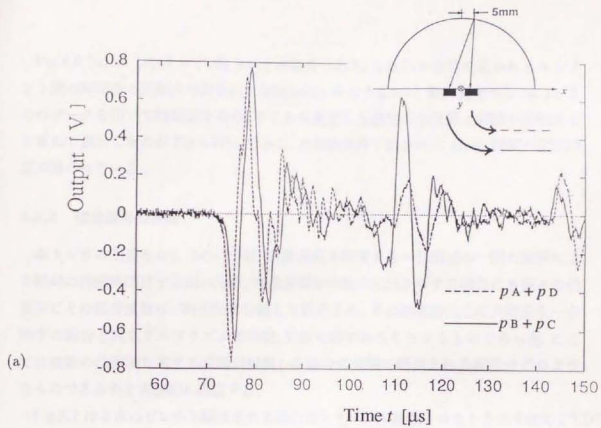


Fig. 8.6 (a) $(x, y) = (5, 0)$ [mm] に接触したときの出力波形. (b): センサ出力から決定された接触点.

Fig.8.6 (a) は $(x, y) = (5, 0)$ [mm] の場合である。これらの信号に見られるエレメント間の時間差と接触点の定量的な関係を明らかにするため 衝突直後から $30 \mu\text{s}$ までのデータを用いて時間差を求め、そこから決定した接触点の位置と実際の接触点とを重ねて表示したのが Fig.8.6(b) である。本実験条件下において 1mm 程度の定位精度が得られている。

8.3.3 複合波形の分解

本センサの主要な考え方の一つは、対象表面を構成する一凸領域の一回の衝突による輻射の持続時間は十分短いため、対象表面が多数の凹凸を有する場合にも個々の凸領域ごとの超音波複写が時間的に分離して観測され、その結果衝突点の大部分を一点衝突の場合と同じアルゴリズムで同定、定位可能であろうとするものであった。ここでは複数の凸領域を有する表面が接触した場合に実際に観測される波形がどのようなものであるかを実験的に確認する。

Fig.8.7 は 3本のピンから構成される凹凸面をセンサに接触させたときの4枚のPVDFフィルムの和信号を示している。データ中に3つのインパルス状の波束が確認される。

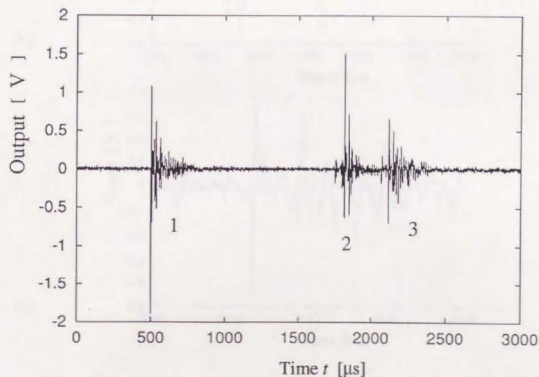


Fig. 8.7 3つの凸領域が接触したときのセンサの出力波形。

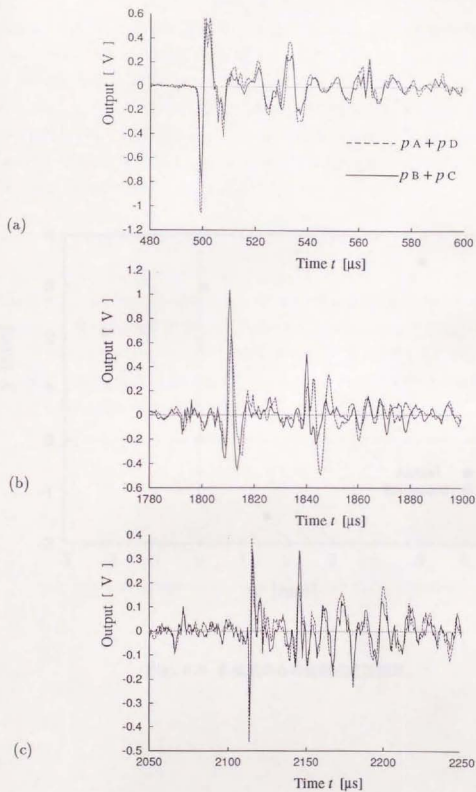


Fig. 8.8 前図の時間軸を拡大表示した図. (a): 第1波束の詳細図. (b): 第2波束の詳細図. (c): 第3波束の詳細図.

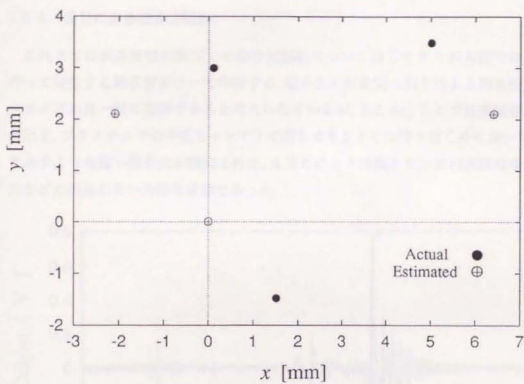


Fig. 8.9 各波束からの接触点定位結果.

ここでは表示の都合から 高々 2ms の間に 3つのパルスがおさまっているデータを示しているが、多くの場合波束の間隔はこれよりはるかに長く、これはむしろまれな例であったことを付記しておく。

Fig.8.8 (a),(b) および (c) は各波束を時間軸を拡大して表示したものである。この場合においても前節同様 各エレメントからの信号はそれぞれ互いの時間差信号となっていることがわかる。Fig.8.9 はこれら3つの波束について前節と同じアルゴリズムでそれぞれの輻射源を定位した結果である。

8.3.4 滑りによる超音波輻射

これまでは垂直接触の瞬間での超音波輻射について論じてきたが本節では滑りに伴って発生する超音波について吟味する。柔らかい対象間の滑りによる超音波発生のメカニズムは一般に複雑であると考えられているが、[12, 91] ここでは実験結果のみを示す。プラスチックの平板をセンサ上で滑らせたときその滑りはじめにおいて Fig.8.10 に示すような強い超音波が観測された。なおこのとき対象とセンサの表面はほこりや油などの汚れがない清浄な状態であった。

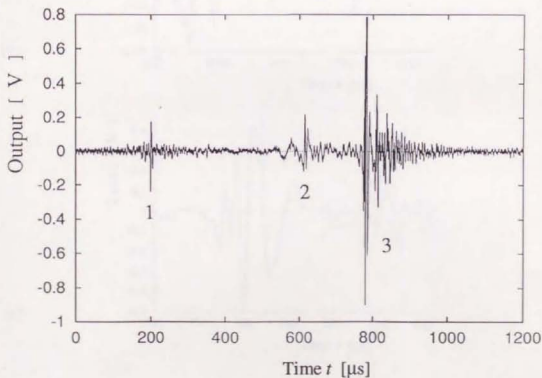


Fig. 8.10 滑りの際に観測されたセンサ出力波形。

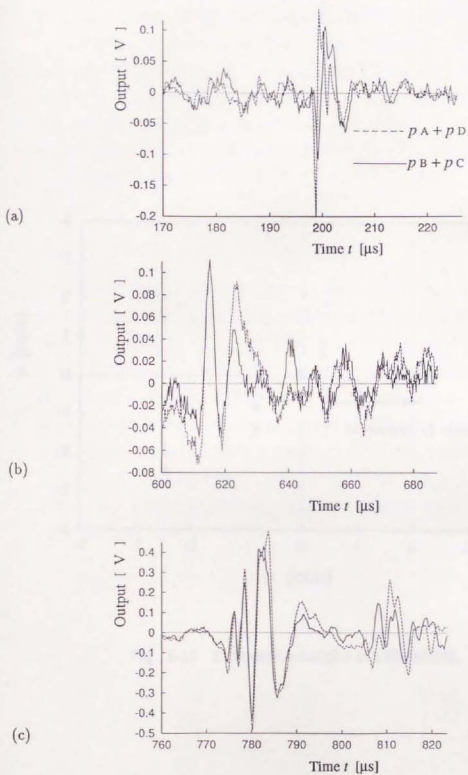


Fig. 8.11 前図の時間軸を拡大表示した図。(a): 第1波束。(b): 第2波束。(c): 第3波束。

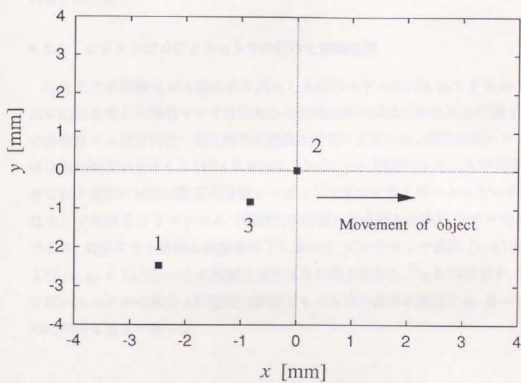


Fig. 8.12 3つの波束から計算された輻射源位置.

Fig.8.10においては3つのパルス状の波束が認められる。ただしプラスチック平板はセンサの頂上付近を $+x$ 方向に滑った。Fig.8.11 (a), (b) および (c) は3つの波束について時間軸を拡大して表示したものであるが、この場合においても各エレメントの出力波形は互いの時間差信号として観測されている。このことは 各波束の放射源がセンサ表面の小領域に局在していたことを示唆している。Fig.8.12 は各波束から計算された放射源位置である。本実験結果は本センサがマクロな滑りを検出するだけでなく、接触面内の部分的な滑りをも検出するセンサとして発展する可能性を示唆しているといえよう。

8.3.5 シリコンゴムによるセンサの試作と実験結果

これまでの実験はゴム膜に水を満たした試作モデルで行われてきたがセンサの幅広い応用を考えた場合センサは何らかの固体材料で構成されることが望ましい。多くの柔軟なゴム状材料は一般に超音波減衰が非常に大きい。純度の高いシリコンゴムは比較的減衰が小さく1 MHz において0.2 dB/mm 程度のものが入手可能である。なおこれと類似の材料は医用超音波レンズとしてすでに広く用いられている。Fig.8.13 はセンサ本体をシリコンゴム（信越化学社製）で成形した試作モデルでの実験結果である。前節までと同様な実験条件下において ピンをセンサ表面 $(x, y) = (0, 0)$ および $(x, y) = (5, 0)$ [mm] に接触させたときの出力波形を Fig.8.13 に示す。ゴム膜と水を用いたモデルの場合と同程度の強度をもった出力波形が観測され、各エレメント間の時間差も適正であった。

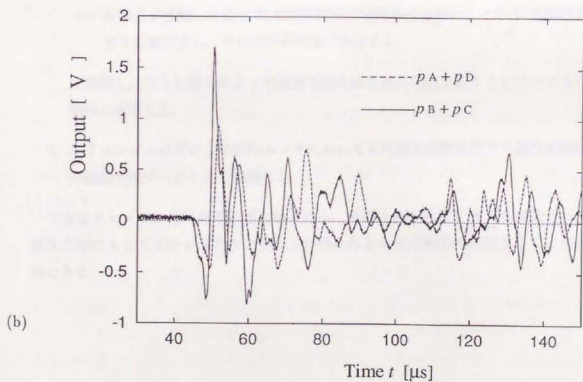
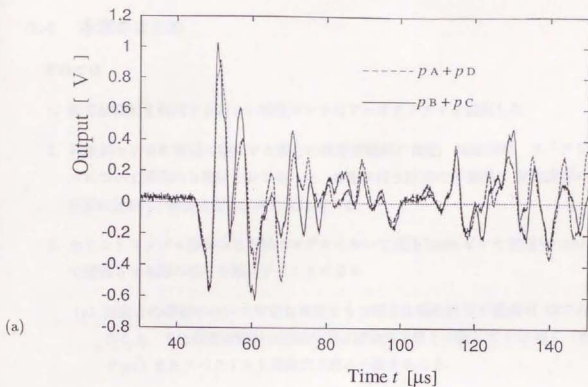


Fig. 8.13 シリコンゴムモデルでの実験結果. (a): $(x, y) = (0, 0)$ [mm] にピンを接触させたときの出力波形. (b): $(5, 0)$ [mm] の場合.

8.4 本章のまとめ

本章では

1. 超音波放射を利用する新しい触覚センサのアーキテクチャを提案した。
2. 対象がセンサに垂直に衝突する場合の超音波放射の強度、持続時間、スペクトルについて理論的な解析をおこなった。接触に伴う圧力の不連続は衝突速度の自乗に比例し、衝突表面の曲率に反比例する。
3. 水とシリコンゴム膜からなる試作モデルにおいて直径3mmピンを初速60 cm/sで接触させた際の信号を観測することにより
 - (a) 対象との接触において有意な強度をもつ超音波放射信号が観測可能であること。また超音波放射の持続時間は理論的予想と一致して十分短く(数十 μ s)またスペクトルも理論的予想と一致すること。
 - (b) それらの信号から1mm以内の精度で接触点を定位可能であること。
 - (c) 複数点が接触した場合超音波放射持続時間が十分短いことから各放射波束を分離同定し、その定位が可能であること。

を確認し、さらに滑りによって観測可能な超音波が発生することについても実験的に吟味した。

4. シリコンゴム成形による試作センサにおいても同様な実験条件下で超音波放射が観測可能であることを確認した。

今後は本センサに信号処理回路を組み込み、多様な表面性状を有する対象との多様な接触のもとでどのようなセンサ出力が得られるかを実験的に確認することが急務である。

第9章

非接触触覚センサ

前章までではセンサ自身の柔らかさを保ちつつ、物理的には簡単な構造によって有用な触覚情報を抽出する新しい触覚センサの構造を考えてきた。本章においてはさらに従来の触覚センサに対する枠組にとらわれず、現状の触覚センサが直面する問題の多くを回避するための新しい試みについて論じる。触覚センサは文字どおりセンサと対象との機械的接触によって生じる情報を抽出するものであるが、機械的接触こそが、その現象の複雑さゆえ触覚知覚の問題全体を難しいものにし、またセンサ、対象双方に対するダメージという非常に困難な問題を引き起こしている。そこで本章では対象に非接触のまま触覚知覚と同等の知覚を行なうセンサを考えることによりこれらの困難を克服し、触覚センサの新たな応用範囲を切り開くことを考える。ここでは特に通常触覚以外では得ることができないと考えらる硬さの知覚を非接触で行なうセンサを考える。

硬さは対象の性質を知るうえで非常に有効な知覚情報の一つであり、これを知覚する触覚センサへの期待は大きい。硬さの知覚を工学的に実現することを目指したセンサの研究は数多いが [61, 62, 41, 102, 96, 55] いずれもセンサ、対象双方が機械的接触によって受けるダメージは不可避である。本章では硬さの知覚を非接触でおこなうセンサシステムを提案する。本システムによってセンサ自身の損傷がなく常に安定した知覚が可能となり、容易に傷つく可能性のある対象についても表面状態を変化させることなく硬さの評価を行なうことができる。たとえば塗装表面の乾き具合なども表面の硬さから判断することができるようになり、そのほか傷つきやすい果物の鮮度の判別などにも応用可能と考えられる。またロボットの触覚センサとして応用すれば、把持動作に入る前にあらかじめ硬さ情報が得られることになり、これは未知物体を安全に操作するための非常に有効な知覚情報となるであろう。

9.1 硬さの指標

以下では硬さの指標として対象表面の有限領域 S 内に圧力 $P = P_0 \exp(i\omega t)$ を与えたときの表面の微小振動変位を R として

$$Z_s(\omega) = \frac{P}{i\omega R} \quad (9.1)$$

で与えられる表面インピーダンス Z_s をとり、以下この Z_s を非接触で測定するセンサシステムを考えていくこととする。ただし振動変位としては対象を押す方向を正にとる。従来の硬さ指標としては金属の塑性変形硬さを評価するロックウェル試験やショア試験などがまず思い浮かぶが、より柔らかい対象の硬さの評価方法として剛球を押し込んだときの変位と圧力の関係から生体組織の硬さを評価する手法 [96] や、人間が硬さを判断するプロセスを模倣し、より人間の感覚に近い硬さ識別を行なおうとする試み [55] がなされてきている。 Z_s は微小変形時の応力をダイナミックに測定するものであり、金属のように硬いものから、人体のような柔らかい対象に至るまで、その硬さを非破壊でリアルタイムに評価する指標として古くから検討がなされており、その計測法も数多く提案されている [61, 62, 41, 102]。本研究の目的は非破壊性をさらに完全なものにするため、これを非接触で測定する手法を提案することである。 Z_s は表面の応答特性を表すものであり、対象の粘性など静的な測定では得られない情報を含むものである反面、対象がマクロな構造をもつ一般的な対象に適用した場合、その構造が（特に共振をおこすときなど）硬さの判断を大きく狂わせてしまう可能性がある。しかし限定された対象に適用する場合には、このことによって逆に対象の構造を推定することも可能であり、本研究で提案するセンサは“硬さ”という言葉に特にとらわれることなく、このような目的にも応用しうるものと考えている。ここで特別な場合として対象を均質かつ等方な半無限粘弾性体と仮定し、そのとき Z_s に反映される対象の物理的性質について考えてみる。いま S の径が対象の音波長と同程度になる高周波数域においては Z_s には対象の音響的性質が反映されることになるが、 S を半径 a の円とし、 c_t を対象内での横波速度として、

$$a\omega \ll c_t \quad (9.2)$$

なる条件下では質量の効果が無視され

$$Z_s(\omega) = \frac{G(\omega)}{i\omega(1-\sigma(\omega))a} \quad (9.3)$$

と書かれる [57]。ただし (3) 式の導出においては S 内において一様な圧力を仮定し、 R としては S の中心での値をとるものとする。 $G(\omega), \sigma(\omega)$ は、周波数依存のせん断

定数、およびポアソン比であり、多くの粘弾性体について、その微小変形時の挙動は一組のパラメータ G および σ のみによってよく記述される [44]。ここで σ は多くの粘弾性体においてほぼ $1/2$ とみてよく、粘弾性的挙動の対象ごとの違いはおもに $G(\omega)$ の違いに依存することから、均質、等方な半無限粘弾性体においては、微小変形時の硬さに関する主要な情報は $Z_s(\omega)$ に集約されることがわかる。以下では特に (9.2) 式で表される条件をみえず測定手法を考えていくことにする。

9.2 Z_s の非接触測定

9.1節 (9.2) 式の条件を満たす圧力分布を対象表面に非接触のまま実現する現実的な方法として

- 1) 空気の音圧
- 2) 音波の放射圧
- 3) 空気の流れの動圧

等を利用することが考えられる。1) に基づくセンサはすでに提案されており [86]、空気の音響効果を利用することにより非常にシンプルな構造のセンサを実現することが可能である。しかし 9.1節で述べたような音波長に比較して高い空間周波数をもつ圧力分布を表面に与えるためにはセンサを対象に十分近づけなければならず、このことは応用上大きな制約となる。そこで 2) にみるように超音波の放射圧を用いれば低周波数の圧力を狭い範囲に遠隔地から集中することができる。しかしこのとき Z_s を求めるためには圧力に対する表面変位を独立な手段で測定する必要があり、その際有意な変位計測がおこなえるだけの高い圧力を実現するのは容易ではない。本研究においては安定で簡便な音響素子を用いてジェットを生成しその動圧で対象表面に圧力を加えることを試みる。本方式によれば音響素子以外の機械的可動部は一切不要でありながら小さなエネルギーで十分高い圧力を十分小さな領域に集中することが可能であり、また周波数も適切に設定することができる。これによって誘起された表面振動をレーザ光の干渉を用いて測定し、ここから Z_s を求める。

9.3 測定の基本原理

9.3.1に示す手法で対象表面に圧力を加え、そのときの表面の振動を 9.3.2に示す方法で測定し、(9.1)式より Z_s を求める。

9.3.1 表面の駆動

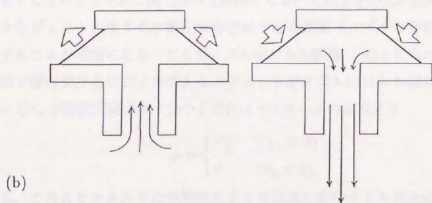
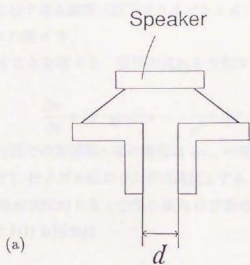


Fig. 9.1 脈動噴流による表面の非接触励振.

Fig.9.1(a) に示す様な装置 (以下ドライバとよぶ) においてスピーカを角周波数 ω で駆動しノズルの径 d を

小さくしていくことを考える。空気の流れを支配するナビエーストークスの方程式

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \text{grad}) \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \text{grad} P + \frac{\mu}{\rho} \Delta \mathbf{v} \quad (9.4)$$

におけるノズル付近での左辺第一項の寄与は ωv_n の程度、第二項の寄与は v_n^2/d の程度である。ただしはノズル出口での平均流速とする。 d が大きいかあるいは v_n が小さいとき第一項が支配的となり空気の流れは音響的な振舞いをする。そのときのノズル出口周辺における圧力は

$$p = i\alpha\omega\rho d^2 \cdot v_n \quad (9.5)$$

で与えられる [42]。ただし α はドライバおよび対象、あるいは周囲の物体の幾何的形狀や配置によって決まる数であり、ノズルが十分長く、周囲に物体の存在しない場合には、ノズルからの距離 l において $\alpha = 1/(16l)$ となる。(ただし $c/\omega \gg l \gg d$, c : 空気中の音速) ここでスピーカ・コーンの振幅を一定に保ったまま d を小さくしていくとやがて第二項が支配的となる。そのとき空気の流れは Fig.9.1(b) のようなジェットになりその動圧で非常に小さな領域 (ノズルの径程度) に圧力を集中することが可能になる。ここでノズル出口から距離 l のところに壁を置きノズル正面で壁の受ける圧力 p を考えるとジェットがノズル出口から壁に至るまでの時間 $t = l/v_n$ が振動周期より十分小さければベルヌーイの定理より

$$p = \begin{cases} \frac{\rho v_n^2}{2} & (v_n > 0) \\ 0 & (v_n < 0) \end{cases} \quad (9.6)$$

となる。このときエネルギーは空間的に小さな領域に集中するため比較的容易に高い圧力を得ることができる。ここで 9.2 節 2) で挙げた超音波の放射圧とジェットをエネルギーの面で比較してみる。いま空気の粘性やジェット生成までの変換効率等を考えなければ、ノズル面から外部に放出される単位面積、単位時間あたりの運動エネルギーは ρv_n^3 で与えられ、超音波で同じ圧力を生じさせるためのエネルギー pc (c は空気中の音速) と比べると、10 Pa 程度以下の圧力を得るためには ジェットの速度が音速よりはるかに小さい分、消費エネルギーは小さくて済む。

9.3.2 振動測定

振動の測定法としてはジェットによる空気の乱れに左右されず微小な振動を検出できることが要求される。本実験においてはレーザを用いた Fig.9.2 のようなマイ

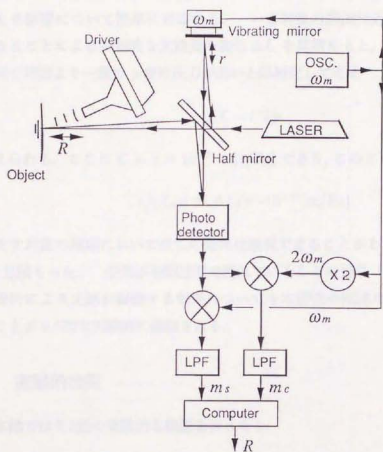


Fig. 9.2 振動ミラーを用いたレーザー振動測定システム.

ケルソン型の光学系により、振動による光路長の変化をヘテロダイン的手法で観測する。本手法あるいはこれに類する手法は対象表面の変位に比例した出力が、広いレンジで、かつ高精度に得られるため、幅広い応用を得ている手法である。特に変位に比例した出力が得られることから検波によって外乱の中でも微小な振動を測定することができ、このことは本センサの応用を考える上で非常に重要である。本実験で用いた測定原理の詳細は Appendix にゆずり、ここでは空気の乱れが振動測定に与える影響について簡単に考察する。いま対象の表面付近の空気の圧力が周囲と異なることによる実効的な光路長の変化 ΔL を見積ると、光路に沿った長さ L の区間で周囲より一様に p だけ圧力が高いと単純化して考え

$$\Delta L = CLp$$

で与えられる。ここに $C = 3 \times 10^{-9}$ [1/Pa] であり、このことから

$$1/|Z_a \omega| \gg \Delta L/p \sim 10^{-11} [\text{m/Pa}]$$

を満たす対象の測定においてはこの効果は無視できることがわかる。ただし $L \sim 1$ cm と見積もった。空気が有限速度で流れていることの効果（これは非常に小さい）や、屈折により光路が移動する効果についても本研究の範囲においては問題とならないことが 9.5 節で実験的に確認される。

9.4 実験的検証

本節では 9.3 節の実験的な検証をおこなう。

9.4.1 ジェットの生成

Fig.9.3 のような装置を考える。空間 A は密閉されており、またスピーカコーンの裏面は空間 A 内の空気を駆動する。内径 d のノズルに対し垂直に壁が設置され、直径 $w = 0.5 \text{ mm}$ の穴を通してマイク 2 により壁に加わる圧力を測定する。 w は壁の受ける圧力分布のスケールに対し十分小さく、穴の存在による測定の誤差は小さいとみてよい。マイク 1-3 は松下通信工業製の小型マイク WM-063Y を使用し、標準マイクにより較正済みである。音波長が空間 A、B のスケールより十分大きくなる低周波において B の容積の増分 δV とマイク 1 で観測される音圧 P_A の間には

$$P_A = \rho c^2 \frac{\delta V}{V_A} \quad (9.7)$$

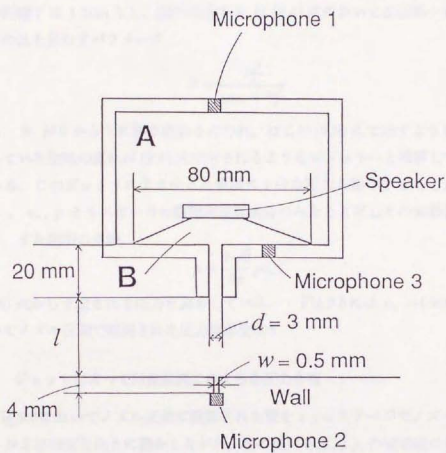


Fig. 9.3 基礎的データ取得のためのドライバ装置.

なる関係があり、これから空間Bの容積の変動分が知れる。ただし c は空気中の音速、 V_A は空間Aの体積を表す。空間Bとノズル出口により構成されるホルムヘルツ共鳴器の共鳴周波数より十分小さい周波数でスピーカを駆動し、かつ振幅を非圧縮性を仮定できる範囲におさえればマイク1の出力からノズルより流出する空気の流れを知ることができる。この装置によりノズル出口での平均流速 v_n とノズル正面でのマイク2の出力との関係を調べる。測定結果をFig.9.4に示す。ただしノズルと壁との距離 l は1.5cmとし、図中に示す Ψ は(9.4)式において左辺第一項と第二項の寄与の比を表わすパラメータ

$$\Psi = \frac{\frac{v_n^2}{d}}{\omega v_n + \frac{v_n^2}{d}} \quad (9.8)$$

である。 Ψ が0から1に移り変わるにつれ、はじめ(9.5)式で示すように音響的に振舞っていた空気の流れが(9.6)式で示されるようなジェットへと推移していくことがわかる。このジェットにより小さな領域に十分な圧力を集中することができる。ただし、 v_n 、 p ともスピーカの駆動周波数成分のみをとりだしその実効値を表示している。また図中の点線

$$p = \frac{2\sqrt{2}}{3\pi} \rho v_n^2$$

は(9.6)式から予想される圧力を表わしている。Fig.9.5には $v_n = 4.9\text{m/s}$ 、70Hzにおいてノズル正面で観測された圧力波形を示す。

9.4.2 ジェットによって対象表面に与えられる圧力分布

Fig.9.3においてノズル正面に設置された壁を x - y - z ステージでノズルに平行な向き、および垂直な向きに動かしながら、壁の受ける圧力 p の実効値の分布をマイク2によって測定する。測定結果をFig.9.6-9.9に示す。Fig.9.6に示すのはスピーカを20Hzで駆動し、ノズル流速の20Hz成分の実効値が3.8m/sのときに、ノズルから壁までの距離 l を変えながら、ノズル中心軸から x の距離での圧力の20Hz成分を測定したものである。Fig.9.7は、ノズル出口の流速の実効値が1.3m/s、スピーカの駆動周波が20Hzのときに同様な測定を行なったもの、Fig.9.8はノズル出口流速7m/s、70Hzのときのものである。またFig.9.9はこれらを立体的に表示し直したものである。ただしノズル正面 $l = 2.5\text{mm}$ での圧力を1として規格化して表示している。本手法によって生成されるジェットが非常に指向性のよいことがわかる。また $v_n = 1.3\text{m/s}$ および $v_n = 3.8\text{m/s}$ では圧力に10倍程度の開きがあるがジェットによる圧力分布の特性はあまり変化せず、また周波数による影響も小さい。このことは本方式によって広いレンジで容易に Z_0 の測定がおこなえることを意

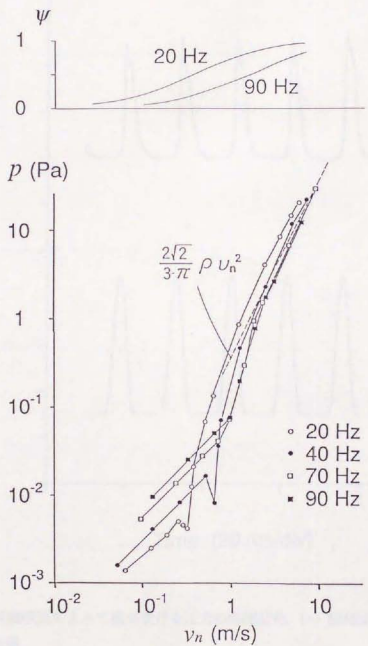


Fig. 9.4 ノズル出口での空気流速とノズル正面の壁が受ける圧力の関係。

p (10 Pa/div)

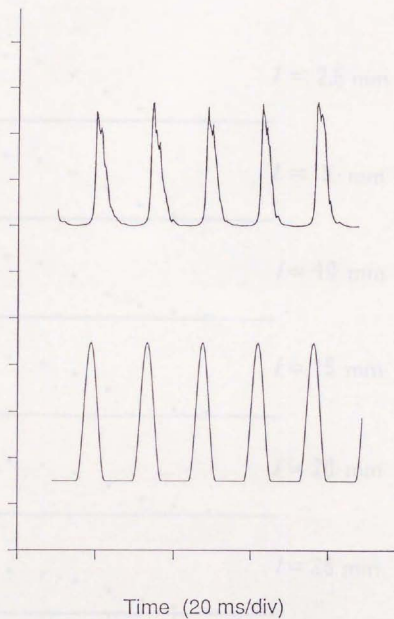


Fig. 9.5 脈動噴流によって壁が受ける圧力の時間変化. (a) 観測波形 (b) 理論的に予想される波形

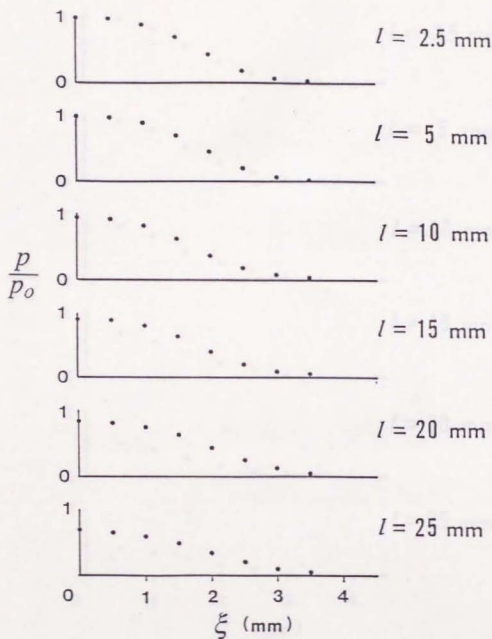


Fig. 9.6 ノズルと壁との距離, 空気流速 v_n , 駆動周波数 f を変化させながらノズル正面に設置された壁上の圧力分布を測定した結果. 図は 20 Hz $v_n = 3.8$ m/s の場合. ただし正規化圧 p_0 は ノズル-壁間の距離 $l = 2.5$ mm においてノズルの真正面で観測された圧力.

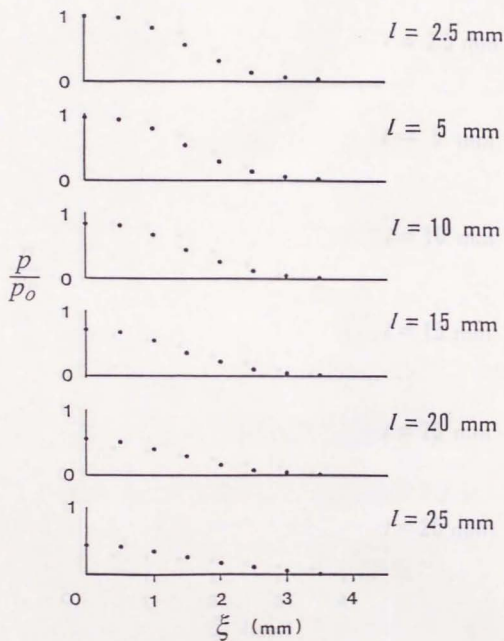


Fig. 9.7 ノズルと壁との距離, 空気流速 v_n , 駆動周波数 f を変化させながらノズル正面に設置された壁上の圧力分布を測定した結果. 図は 20 Hz $v_n = 1.3$ m/s の場合. ただし正規化圧 p_0 は ノズル-壁間の距離 $l = 2.5$ mm においてノズルの真正面で観測された圧力.

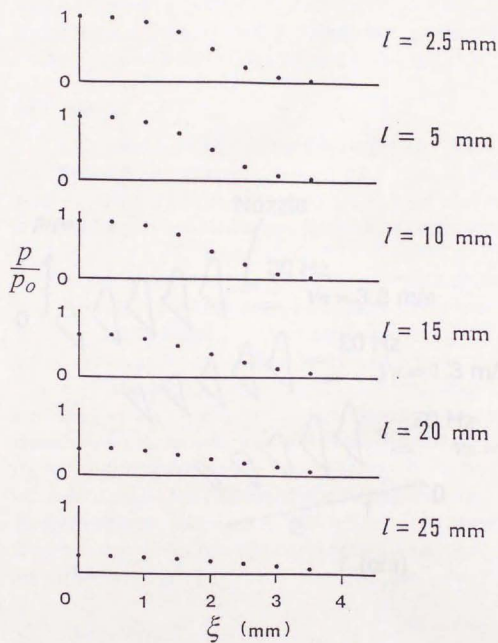


Fig. 9.8 ノズルと壁との距離, 空気流速 v_n , 駆動周波数 f を変化させながらノズル正面に設置された壁上の圧力分布を測定した結果. 図は 70 Hz $v_n = 7$ m/s の場合. ただし正規化圧 p_0 はノズル-壁間の距離 $l = 2.5$ mm においてノズルの真正面で観測された圧力.

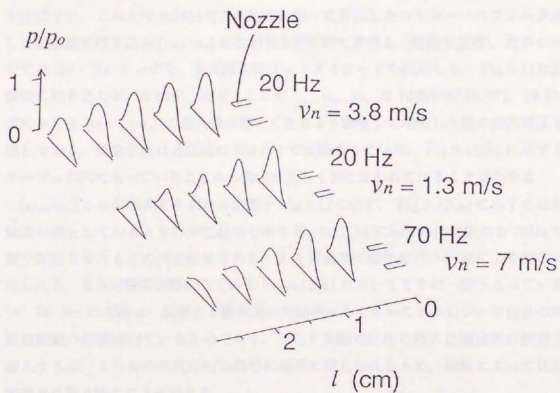


Fig. 9.9 前図までの結果を3次元プロットした図.

味する。次にノズルの中心軸上において l, v_n , 周波数を変化させて壁の受ける圧力を測定した結果を Fig.9.10 に示す。ただし $l=2.5\text{mm}$ での圧力を 1 としてその相対値で表わすものとする。本測定の範囲においてはジェットの変衰のようすが大きく変化することはない。ここで仮に $l=1\text{cm}$ 程度で対象をドライブすることを考えると、対象表面に一定の圧力を与えるために l の制御に課せられる精度の要求は、すでに提案されているセンサにくらべ、はるかに緩いことがわかる。

9.4.3 振動計測

Fig.9.2 の装置においてミラーを角周波数 $\omega_m = 2\pi \text{ kHz}$ で振動させ、振動ミラーの駆動電圧からアナログ回路で $\cos(2\omega_m t)$ および $\sin(\omega_m t)$ に比例した信号を生成する。これを受光器出力とそれぞれ別々に乗算したのちローパスフィルタ通して計算機に取り込み (m_c, m_s) の位相角を解析的に求める (付録を参照)。なおレーザには He-Ne レーザを、受光器にはフォトダイオードを使用した。Fig.9.11 に計算機に取り込んだ、を示す。ただしここで、 m_c, m_s は付録中の (9.12), (9.13) 式における $|m_c|, |m_s|$ の最大値が等しくなるよう調整して増幅した後の出力電圧を表しており、対象表面は意図的に 100 Hz で振動させている。Fig.9.11(b) に示すリサーチが円になっていることから測定が正しくおこなわれていることがわかる。

(m_c, m_s) から位相角 θ を求めた結果を Fig.9.12 に示す。Fig.9.12(a) に示すのは対象面が静止しているときの測定結果であり Fig.9.12(b) に示すのは対象面を 70 Hz で微小振動させたときの測定結果である。 θ と対象面の変位は (9.14) 式により関係づけられる。なお対象面が静止している Fig.9.12(a) においても θ は一定となっていない。50 Hz の変動は、反射光と参照光の光路差が 0 でないことからレーザ自身の周波数変動の影響が出ているためであり、さらに実際の応用の際には測定系の振動が混入するが、これらの外乱は出力信号に線形に加えられるため、検波によって比較的容易に取り除くことができる。

9.5 硬さ計測の実際

本システムにより硬さ計測を行った結果を Fig.9.13 に示す。対象としてリンゴ、トマト、こんにゃくを選びその Z_s を測定した。ジェットのノズル径は 3mm とし、対象から 1.5cm 離れたところに設置する。このときレーザビームを対象表面に対し垂直に入射させるためジェットは対象表面の垂線に対し 30° 傾け、圧力 P としてはその状態における表面上の圧力分布の最大値をとるものとする (Fig.9.13(a))。ジェットによる圧力 P の時間変化は正弦的でないため、圧力、振動変位ともにスピー

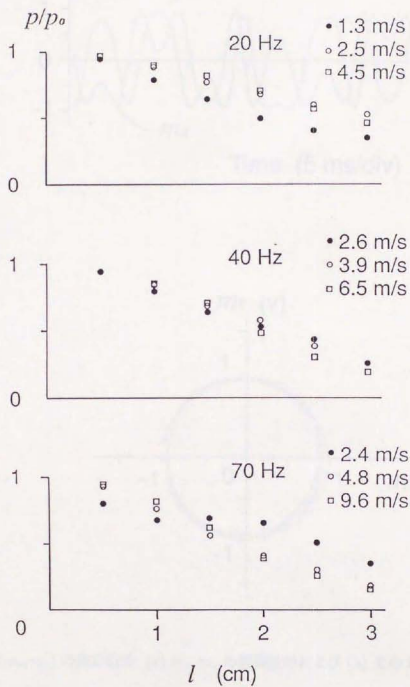


Fig. 9.10 ノズル中心軸上において l, v_n , 周波数を変化させて壁の受ける圧力を測定した結果.

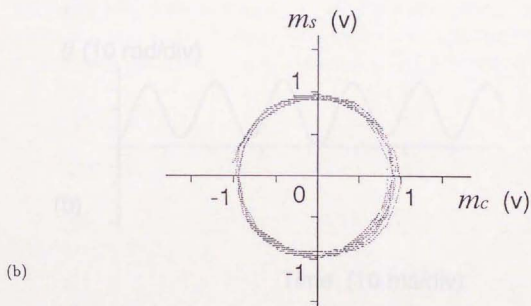
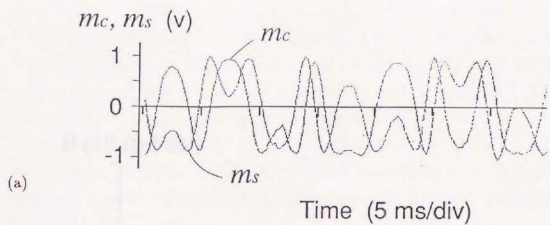


Fig. 9.11 (m_c, m_s) の測定結果. (a) m_c, m_s の観測波形および (b) そのトラジェクトリ.

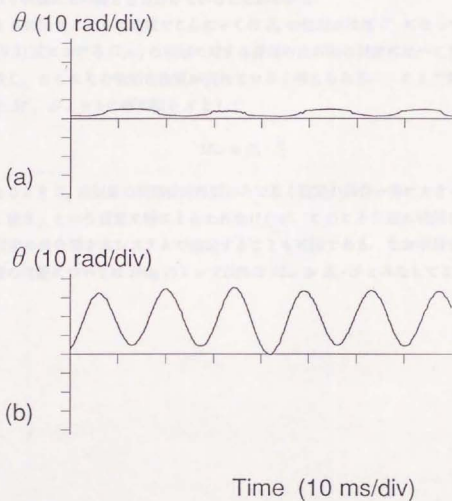


Fig. 9.12 (m_e, m_s) の位相角の観測結果. (a) 表面静止. (b) 70Hz で振動.

カの駆動周波数成分のみとりだして Z_0 を求めている。また 9.3.2 節で指摘した空気の乱れの問題は、各対象についての振幅の測定値が、対象として剛体壁を用いたときの表面振幅の測定値より十分大きい（ただしリングについては 5 倍程度）ことから本実験の範囲においては問題とならない。なお、測定は概ね 10 Pa 程度の圧力で行った。Fig.9.13(b) にみるように 3 つの対象について各々 10 倍程度 $|Z_0|$ にひらきがあり明確にその硬さを見分けていることがわかる。

また 100Hz をこえる周波数でこんやくの Z_0 の位相がほぼ 0° になっている。これは (9.3) 式における $G(\omega)$ の実部に対する虚部の比が他の対象に比べて大きいことを意味し、ここにその軟粘性性質が表れていると考えられる。ここで対象物体の質量を M 、ジェットの断面積を S として

$$M\omega \approx Z_0 \cdot S \quad (9.9)$$

となるとき Z_0 は対象の粘弾性的性質のみでなく固定の具合等に大きく左右される。「硬さ」という言葉に特にとらわれなければ、このことを逆に利用して電子部品の固定の具合等を本システムで推定することも可能である。なお本測定に使用した 3 種の対象については 280g のリング以外は $M\omega \gg Z_0 \cdot S$ とみなしてよい。

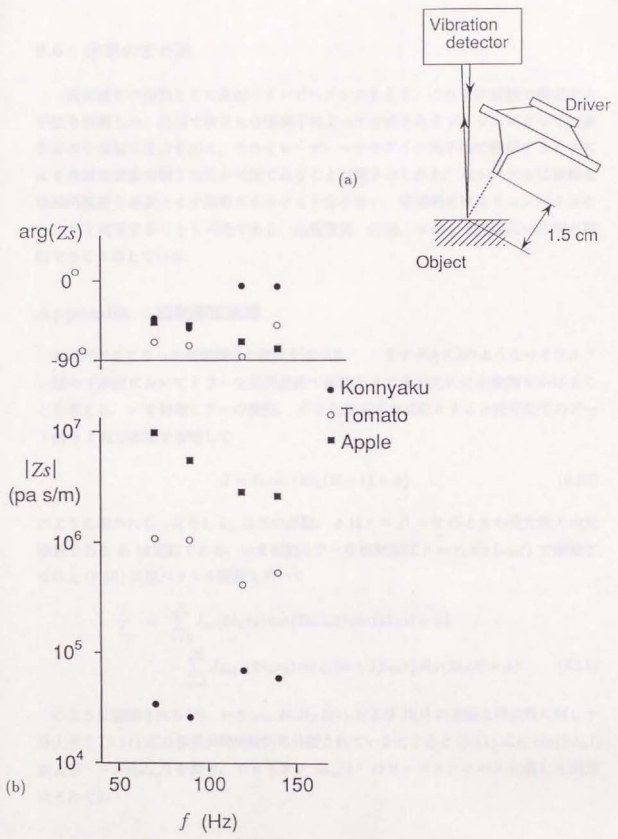


Fig. 9.13 様々な対象表面の Z_s 測定結果.

9.6 本章のまとめ

表面硬さの指標として表面のインピーダンスをとり、これを非接触で測定する手法を提案した。汎用で安定な音響素子によって生成されるジェットによって対象表面の小領域に圧力を加え、それをレーザーヘテロダインの手法で観測することにより多様な対象の硬さ知覚が可能であることが確かめられた。本システムは複雑な機械的構造を必要とせず消費エネルギーも十分小さい。原理的にはよりコンパクトなセンサを実現することも可能である。品質管理、医療、ロボット等幅広い応用が期待できると考えている。

Appendix : 振動測定原理

本研究でおこなった振動測定の原理を述べる。まず Fig.9.2のようなマイケルソン型の干渉計においてミラーを高周波数で振動させて参照光に位相変調をかけることを考える。 r を振動ミラーの変位、 R を対象表面の変位とすると受光面でのビート信号 I は定数項を省略して

$$I = I_0 \cos \{2k_L(R+r) + \phi\} \quad (9.10)$$

のように書かれる。ただし k_L は光の波数、 ϕ は $r = R = 0$ のときの受光面での光路差であり I_0 は定数である。いま振動ミラーを振動変位 $r = r_0 \sin(\omega_m t)$ で振動させると (9.10) 式はベッセル関数を用いて

$$\begin{aligned} \frac{I}{I_0} &= \sum_{n=0}^{\infty} J_{2n}(2k_L r_0) \cos(2n\omega_m t) \cos(2k_L R + \phi) \\ &\quad - \sum_{n=0}^{\infty} J_{2n+1}(2k_L r_0) \sin\{(2n+1)\omega_m t\} \sin(2k_L R + \phi) \end{aligned} \quad (9.11)$$

のように展開される [8]。いま ω_m が $2k_L \dot{R}(t)$ および $R(t)$ の主要な周波数に対し十分大きく (9.11) 式の各項が周波数的に分離されているとすると (9.11) 式に $\cos(2\omega_m t)$ および $-\sin(\omega_m t)$ を掛け、カットオフ $\omega_m/2$ のローパスフィルタを通した出力はそれぞれ

$$m_c = \frac{1}{2} J_2(2k_L r_0) \cos(2k_L R + \phi) \quad (9.12)$$

$$m_s = \frac{1}{2} J_1(2k_L r_0) \sin(2k_L R + \phi) \quad (9.13)$$

となる。 $J_2(2k_L r_0)$, $J_1(2k_L r_0)$ はミラーの振幅 r_0 で決まる定数であり、
 $\max(|m_c|) = \max(|m_s|)$ となるよう出力を調整すれば (m_c, m_s) の位相角とし
 て

$$\theta = 2k_L R + \phi \quad (9.14)$$

が求まり、ここから表面変位 R が知れる。

第 10 章

結論

本論文では触覚センシングの構造について、これまでにない新しい視点を与え、今後の触覚センサを考える上で一つの具体的な方向性を示すことができたと考えている。

まず第 1 章では触覚センサを研究することの意義と工学的な位置づけについて整理し、これまで開発されてきたセンサとその構造についてサーベイをおこなった。そしてそれらを基に問題点を整理し、三次元構造触覚センシングの概念とその重要性、および研究全体の方向性を示した。

次に第 2 章ではセンサ表面に与えられる境界条件とその内部に配置された機械量トランスデューサを結びつける柔軟体の物理を整理した。ここで述べられた物理現象自体はすでに古典といわれる弾性論から導かれたものであるが、その記述は弾性体を触覚情報を抽出するための媒体とみなす新しい視点からのものである。

第 3 章以降では前章までの議論を基礎においた新しい触覚センサの考え方と具体的なセンサの実現について論じた。従来物理的なトランスデューサとその後の情報抽出過程はしばしば独立に論じられていたが、センサを構成する弾性体が情報処理場と呼ぶにふさわしい多様な特性を有していることを指摘し、これをセンサとして積極的に利用するための定式化を行なった。そしてこの物理的特性に信号処理を分担させる三次元センシング構造によって、センサの作製と信号処理双方の負担が軽減され、同時にセンサの柔らかさが得られることを強調し、それを実証した。具体的には第 3 章において弾性体の表面近くに垂直配置されたプローブが、表面を滑る対象の凹凸の細かさや滑り速度を検出するアルゴリズムを提案し、これらのプローブを十字状に配置した指先型センサの試作および実験的検証をおこなった。次に第 4 章において弾性体内発散の表面方向微分および深さ方向微分が互いにヒルベルト変換対をなすことを示し、実験的検証とともに応用例を示した。第 5 章においては弾性体内部の微分量を検出するプローブが、表面応力分布の空間周波数についてバンドパス特性を有し、

それを異なる深さに複数配置することによって定 Q フィルタバンクが容易に得られることを示した。第 6 章ではダイバージェンスプローブ、シアプローブという 2 つの異なる応力自由度に対し選択的感度を有するプローブによって表面を滑る対象との摩擦係数と滑り速度を検出するアルゴリズムを論じ、さらに第 7 章において弾性体内部に 6 自由度の冗長性をもって観測される応力テンソル全成分を検出する微小ユニット、'テンソルセル'とこれに基づくセンサのアーキテクチャを提案し、テンソルセルの試作、検証実験をおこなった。これらのセンサはセンサ自身の柔らかさを損なうことなく、物理的に簡単な構造のセンサと簡単な信号処理により有用な触覚情報を抽出可能な構成となっている。

以上のセンサは表面から検出子までの準静的な伝達特性に基づくセンサであったが 8 章においては MHz 域の高周波数における伝達特性を基礎においた触覚センシング手法を提案し、その有用性を示した。接触の際には必然的にセンサ内部に弾性波が発生するが、その中にはセンサ径に比べて小さな波長をもつ高周波数成分も含まれる。これらの成分は、その位相情報の中に波動発生源についての空間情報を有しており、センサの中心部分に配置された小数の超音波受信子のみから、動きの中で生じる豊富な触覚情報を高速に取得することが可能になることを理論および基礎実験によって示した。

9 章においてはさらに従来の触覚センサに対する枠組にとらわれず、現状の触覚センサが直面する問題の多くを回避するための新しい試みについて論じた。触覚センサは文字どおりセンサと対象との機械的接触によって生じる情報を抽出するものであるが、機械的接触こそが、その現象の複雑さゆえ触覚知覚の問題全体を難しいものにし、またセンサ、対象双方に対するダメージという非常に困難な問題を引き起こしていた。ここでは対象に非接触のまま触覚知覚と同等の知覚を行なうセンサを考えることによりこれらの困難を克服し、触覚センサの新たな応用範囲を切り開くことを目指し、特に硬さの知覚を非接触で行なうセンサの提案と実験的検証を行った。

謝辞

本論文は東京大学工学部総合試験所安藤研究室における4年間および同大学大学院計数工学専攻修士課程山崎研究室における2年間の研究をまとめたものである。三次元構造触覚センサは現在安藤助教授が提唱されている「センシングにおける構造の探求」における具体的な一つの方向性を示すものであり、超音波エミッション触覚センサはその中でも特に同助教授が従来より切り開いてこられた微分計測の考え方を触覚センサに応用したものである。また非接触硬さセンサは山崎教授（現横河電機）が従来から進めてこられた非接触触覚センサの一部として硬さの非接触知覚を具体化したものである。恩師である安藤助教授、山崎教授から授かった研究のつくり方、進め方や数々の技術を今後少しでも世の中に対する成果へと結び付けていきたいと考えております。

なお本研究は当時研究室の学生であった先田力哉氏（現神戸製鋼）、上原雅弘氏（現東レ）、岡田美和氏（現住友電工）、木下 毅氏（現三菱重工）、小松原道高氏（現三菱商事）、安井三明氏（現東京銀行）、森本直樹氏（現SONY）との共同研究であります。彼らとともに大変楽しく研究を進めることができ、また非常に多くのことを学びました。どうもありがとうございました。

総合試験所の高橋ツタ技官には機械工作や諸々の作製技術についての相談に乗って頂いたばかりか、研究室の運営や生活面においても数々の便宜をはかって頂きました。電気通信大学の西一樹助手、また 彭 辰氏（現IBM）、安部素嗣氏（現博士課程）をはじめとする当時安藤研究室の学生だった皆さんとは、研究に関して非常に有益な議論を交わすことができただけでなく、私生活でも数々のよい思い出をつくることができました。

最後になりますが、山崎研究室の諸先輩の方々、総合試験所での各方面研究室の皆さん、物理工学科、計数工学科の先生方、そして信越化学をはじめとして色々とご協力頂いた企業の方々、また学会で知り合い議論、励ましを頂いた先生方には大変お世話になりました。どうもありがとうございました。簡単ですいません。今後ともよろしくお願い致します。

参考文献

- [1] 安藤, 篠田, 小川, 光山, “時空間勾配法に基づく3次元音源定位センサシステム,” 計測自動制御学会論文集, Vol. 29, No. 5, pp.520-528, 1993.
- [2] G. Bekesy, “Experiments in Hearing,” McGraw Hill, 1960.
- [3] R. A. Boie, “Capacitive Impedance Readout Tactile Image Sensor,” Proc. 1984 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.370-378, 1984.
- [4] S. J. Bolanowski, G. A. Gescheider, R. T. Verrillo and C. M. Checkosky, “Four Channels Mediate the Mechanical Aspects of Touch,” J. Acoustical Society of America, Vol. 84, No. 5, pp.1680-1694, 1988.
- [5] J. M. Brookhart and V. B. Mountcastle ed., “Handbook of Physiology - Section 1: The Nervous System III -,” Chap. 17, American Physiological Society, 1984.
- [6] J. D. Chodera and M. Lord, “Retraining of Standing Balance Using a Pedobarograph,” Proc. 6th Int. Symp. on External Control of Human Extremities, pp.333-341, 1978.
- [7] M.B.Cohn, M.Lam and R. S. Fearing, “Tactile Feedback for Teleoperation,” Proc. SPIE, Boston, Nov. 15-16, 1992.
- [8] J. Cole et al., “Synthetic-Heterodyne Interferometric Demodulation,” IEEE Trans. Vol.MTT.30, No.4 April, pp.540-543, 1982.
- [9] P. Dario and G. Buttazzo, “An Anthropomorphic Robot Finger for Investigating Artificial Tactile Perception,” Int. J. Robotics Res., Vol.6, No.3, pp.25-48, 1987.
- [10] D. De Rossi, et al., “Biomimetic Tactile Sensor with Stress-Component Discrimination Capability,” J. Molecular Electronics, Vol.3, pp.173-181, 1987.

- [11] D. De Rossi, A. Caiti, R. Bianchi, G. Canepa, "Fine-Form Tactile Discrimination through Inversion of Data from a Skin-Like Sensor," Proc. 1991 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.398-403, 1991.
- [12] D. Dornfeld and C. Handy, "Slip Detection Using Acoustic Emission Signal Analysis," Proc. 1987 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 1868-1875, 1987.
- [13] R. E. Ellis and M. Qin, "Singular-Value and Finite-Element Analysis of Tactile Shape Recognition," Proc. 1994 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol.3, pp.2529-2535, 1994.
- [14] R. S. Fearing, "Tactile Sensing Mechanisms," Int. J. Robotics Res., Vol. 9, No.3, pp. 3-23, 1990.
- [15] R. S. Fearing, "Using a Cylindrical Tactile Sensor for Determining Curvature," IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 7, No.6, pp. 806-817, 1991.
- [16] J.D.Ferry, "Viscoelastic Properties of Polymers," Wiley, 1980.
- [17] A. R. Grahn and L. Astle, "Robotic Ultrasonic Force Sensor Arrays," Robot Sensors Vol.2: Tactile and Non-Vision, ed. A. Pugh, Springer-Verlag, pp.297-315, 1986.
- [18] S. Hackwood, G. Beni, L. A. Hornak, R. Wolfe and T.J. Nelson, "A Torque-Sensitive Tactile Array for Robotics," Int. J. Robotics Res., Vol.2, No.2, pp.46-61, 1983.
- [19] H. R. Hardy and F. W. Leighton ed., "Acoustic Emission/ Microseismic Activity in Geologic Structures and Materials," Trans Tech Publications, 1984.
- [20] L. D. Harmon, "Tactile Sensing for Robot, Recent Advances in Robotics," G.Beni and S. Hackwood eds., John Wiley & Sons, pp. 389-424.
- [21] L. D. Harmon, "Automated Tactile Sensing," Int. J. Robotics Res., Vol 1, No.2, pp.3-32, 1982.
- [22] W. D. Hills, "A High Resolution Imaging Touch Sensor," Int. J. Robotics Res., Vol.1, No.2, pp.33-44, 1982.

- [23] R. D. Howe and M. R. Cutkosky, "Dynamic Tactile Sensing: Perception of Fine Surface Features with Stress Rate Sensing," IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 9, No. 2, pp.140-151, 1993.
- [24] R. D. Howe, "A Tactile Stress Rate Sensor for Perception of Fine Surface Features," Proc. TRANSDUCERS '91, pp. 864-867, 1991.
- [25] R. D. Howe, "A Force-Reflecting Teleoperated Hand System for the Study of Tactile Sensing in Precision Manipulation," Proc. 1992 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 1321-1326, 1992.
- [26] B. L. Hutchings, A. R. Grahn and R. J. Petersen, "Multiple-Layer Cross-Field Ultrasonic Tactile Sensor," Proc. 1994 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, Vol.3, pp.2522-2528, 1994.
- [27] 飯田, 井垣, 桑村, 野呂, "肌状態検出における触覚," 第4回ロボットセンサシンポジウム講演論文集, pp.201-206, 1994.
- [28] 井野, 和田, 伊福部, "皮膚表面の温度変化パターンと材質認識," 第4回ロボットセンサシンポジウム講演論文集, pp.195-200, 1994.
- [29] 井上, 田中, "高密度に配置されたロボットの触覚," 第14回自動制御連合講演会講演論文集, pp.301-302, 1971.
- [30] 石川正俊, "触覚情報の処理に関する基礎的研究," 東京大学工学部博士論文, 1987.
- [31] 石川正俊, "並列処理を用いた局所パターン処理用LSIとその触覚センサへの応用," 計測自動制御学会論文集, Vol. 24, No. 3, pp.16-23, 1988.
- [32] 石川, 下条, "ビデオ信号出力をもつ圧力分布センサと触覚パターン処理," 計測自動制御学会論文集, Vol. 24, No. 7, pp.662-669, 1988.
- [33] 石川正俊, "センサフュージョンシステム - 感覚情報の統合メカニズム -, 日本ロボット学会誌, Vol.6, No. 3, pp.79-83, 1988.
- [34] M. Kaneko, "Active Antenna," Proc. 1994 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation," pp. 2665-2671, 1994.

- [35] 川嶋, 青木, “CTの原理を応用した光学式二次元分布圧力センサ,” 電子通信学会論文誌, Vol. J69-C No.12, pp.1536-1543, 1986.
- [36] 木下, 森, “学習機能をもった多素子人工触覚による対象物の形状識別,” バイオメカニズム 2, pp.243-249, 1972.
- [37] 木下 源一郎, “ホール素子を用いた圧覚センサ,” 計測自動制御学会論文集, Vol. 20, No.2, pp. 89-91, 1983.
- [38] 木下 源一郎, “触覚センサの開発現状,” 日本ロボット学会誌, Vol. 2, No. 5, pp.46-53, 1984.
- [39] 木下, 竹家, 武藤, 谷江, “3-D 物体形状の触覚像取得 - 触覚アスペクト法 -, ” 第30回計測自動制御学会学術講演会予稿集, pp.547-548, 1991.
- [40] 木下, 篠田, 安藤, “強誘電ポリマーを用いる3次元構造触覚センサ,” 第31回計測自動制御学会学術講演会予稿集, pp.675-676, 1992.
- [41] C. Kleesattel, “Compliance of Mechanical Contacts and Its Significance for Ultrasonic Hardness Testing and for Vibration Amplitude Measurements,” J. Acoust. Soc. Am., Vol.39, No.2, pp.404-405, 1966.
- [42] 小橋 豊, “音と音波,” 裳華房, 1969.
- [43] C. Kowalski, “Silicon Sensors for Tactile Arrays and Distributed Touch Sensing,” SME Technical Papers, MS84-1040, 1984.
- [44] 国尾 武, “固体力学の基礎,” 培風館, 1977.
- [45] G. D. Lamb, “Tactile Discrimination of Textured Surfaces : Psychophysical Performance Measurements in Humans,” J. Physiol. Vol. 338, pp.551-565, 1983.
- [46] S. G. Mallat, “A Theory for Multiresolution Signal Decomposition : The Wavelet Representation,” IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 11, No. 7. pp.674-693, 1989.
- [47] S. G. Mallat, “Characterization of Signals from Multiscale Edges,” IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 14, No.7, pp.710-732, 1992.

- [48] H. Maekawa, K. Tanie, K. Komoriya, M. Kaneko, C. Horiguchi and T. Sugawara, "Development of a Finger-Shaped Tactile Sensor and its Evaluation by Active Touch," Proc. 1992 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1327-1334, 1992.
- [49] 前川, 谷江, 金子, 鈴木, 堀口, 菅原, "光導波形指先触覚センサに関する研究," 第30回計測自動制御学会学術講演会予稿集, pp. 375-376, 1991.
- [50] 実吉, 菊池, 能本 監修, "超音波技術便覧," 日刊工業新聞社, pp.23-23, 1971.
- [51] N.Morimoto, H.Shinoda and S.Ando, "Tensor Cell: A Complete Stress Sensing Element for Tactile Sensor," Proc. IEEJ 12th Sensor Symposium, pp.179-182, Osaka, 1994.
- [52] 森本, 篠田, 安藤, "局所応力テンソル検出に基づく触知覚アルゴリズム - 基礎的解析および接触状態分類への適用 -, "第32回SICE学術講演会予稿集, pp.127-128, 1993.
- [53] J. W. Morley, A. W. Goodwin and I. Darian-Smith, "Tactile Discrimination of Gratings," Experimental Brain Research, Vol. 49, pp.291-299, 1983.
- [54] D. H. Mott, M. H. Lee and H. R. Nicholls, "An Experimental Very High Resolution Tactile Sensor Array," Proc. 4th Int. Conf. on Robot Vision and Sensory Controls, pp.241-250, 1984.
- [55] 永沼 肇, "機械による硬さ認識," 計測と制御, Vol.14, No.3, pp.263-267, 1975.
- [56] H.R.Nicholls and M. H. Lee, "A Survey of Robot Tactile Sensing Technology," Int. J. Robotics Res., Vol 8, No.3, pp.3-30, 1989.
- [57] 二井義則, "地表面上に設置した物体の垂直方向振動性状," 日本音響学会誌, Vol. 30, No.12, pp.653-661, 1974.
- [58] 西, 安藤, "超解像にみる多次元信号処理と逆問題," 計測と制御, Vol. 31, No. 9, pp. 962-967, 1992.
- [59] S. Omata, S. Yoshida, C. E. Constantinou K. Kayata, O. Yamaguchi, and Y. Shiraiwa, "New Medical Sensor for Detecting Compliance of Living Tissue and Its Applications," Proc.12th Sensor Symposium, pp.245-248, 1994.

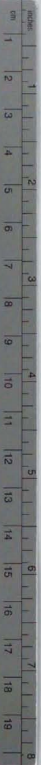
- [60] S. Omata, Y. Terunuma and Y. Horiuchi, "Development of New Tactile Sensor for Detecting Hardness of Living Tissue and Its Applications for Biomedical Engineering," Proc. 11th Sensor Symposium, pp. 205-208, 1992.
- [61] S. Omata, "Development of a New Type Tactile Sensor for Detecting Hardness," Proc. 8th Sensor Symposium IEEJ, pp.267-270, 1989.
- [62] S. Omata, "New Type Transducer for Measuring Contact Compliance of a Soft Body," J. Acoust. Soc. Am., Vol.78, No.1, pp. 1-5, 1985.
- [63] J. A. Purbrick, "A Force Transducer Employing Conductive Silicone Rubber," Proc. 1st Int. Conf. Robot Vision and Sensory Controls, pp. 73-80, 1981.
- [64] M. H. Raibert, "An All Digital VLSI Tactile Array Sensor," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics, pp. 314-319, 1984.
- [65] J. Rebman and K. A. Morris, "A Tactile Sensor with Electrooptical Transduction," Proc. 3rd Int. Conf. on Robot Vision and Sensory Controls, pp. 341-347, 1983.
- [66] P.P.L.Regtien, "Tactile Imaging," Sensors and Actuators A, Vol.31, pp83-89, 1992.
- [67] R. A. Russell and Simon Parkinson, "Sensing Surface Shape by Touch," Proc. 1993 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol.1, pp.423-428, 1993.
- [68] 先田, 篠田, 安藤, "3次元構造を有する触覚センサ(II) - 弾性体内部における変位の微分知覚 -, "第34回自動制御連合講演会予稿集, pp.529-530, 1991.
- [69] N. Sato, H. Heginbotham and A. Pugh, "A Method for Three-Dimensional Part Identification by Tactile Transducer," Robot Sensors Vol.2: Tactile and Non-Vision, ed. A. Pugh, Springer-Verlag, pp.133-143, 1986.
- [70] R.F.Schmidt ed., "Fundamentals of Sensory Physiology," Chap.2, Springer-Verlag, 1986.
- [71] M. Shimojo, M. Ishikawa and K. Kanaya, "A Flexible High Resolution Tactile Imager with Video Signal Output," Proc 1991 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.384-391, 1991.

- [72] M. Shimojo, "Spatial Filtering Characteristic of Elastic Cover for Tactile Sensor," Proc. 1994 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol.1, pp.287-292, 1994.
- [73] H. Shinoda and S. Ando, "On Intelligent Architecture for Tactile Sensor," Sensors and Materials, to be published in 1995.
- [74] H. Shinoda and S. Ando, "Ultrasonic Emission Tactile Sensor," Proc. IEEJ 12th Sensor Symposium, pp.87-90, Osaka, 1994.
- [75] 篠田, 森本, 安藤, "三次元型触覚センサ - 触覚におけるスマートストラクチャ -, 第4回ロボットセンサシンポジウム講演論文集," pp.183-188, 1994.
- [76] 篠田, 森本, 安藤, "触覚とスマートストラクチャ - 弾性テンソル場を利用する高度触覚情報抽出 -, 平成6年電気学会全国大会講演論文集, Vol. 13, S.17-25-28, 1994.
- [77] H. Shinoda and S. Ando, "Ultrasonic Emission Tactile Sensor for Contact Localization and Characterization," Proc. 1994 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, Vol.3, pp.2536-2543, San Diego, 1994.
- [78] H. Shinoda, M. Uehara, M. Okada and S. Ando, "A Fingertip Tactile Sensor with Three Dimensional Structure," Proc. Transducers'93, pp.614-617, Yokohama, 1993.
- [79] H. Shinoda, M. Uehara and S. Ando, "A Tactile Sensor Using Three-Dimensional Structure," Proc. 1993 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.435-441, Atlanta, 1993.
- [80] H. Shinoda, M. Uehara, M. Okada and S. Ando, "A Tactile Sensor with Three-Dimensional Structure - Sensation of 2-D Motion, Spectra and Deepness of Contact -, Proc. 11th Sensor Symposium, Tokyo, pp.217-220, 1992.
- [81] H. Shinoda and S. Ando, "A Tactile Sensing Algorithm based on Elastic Transfer Function of Surface Deformation," Proc. IEEE ICASSP'92, Vol.3, pp.589-592, San Francisco, 1992.
- [82] 篠田, 安藤, "3次元構造を利用する触覚センサ - 皮膚に隠れている知能 -, 平成4年度 AVIRG-SMC サマーセミナー「五感を探る」講演予稿集, pp.46-54, 1992.

- [83] 篠田, 安藤, “三次元構造を利用する触覚センサ - その構造とアルゴリズム -,” 第3回ロボットセンサシンポジウム講演論文集, pp.13-18, 1992.
- [84] 篠田, 安藤, “3次元構造をもつ触覚センサ - 変形パターンのヒルベルト変換の知覚とその利用 -,” 電気学会センサ技術研究会資料, ST-91-19, pp.69-78, 1991.
- [85] 篠田, 山崎, “脈動噴流を用いた表面硬さの非接触センシング,” 計測自動制御学会論文集, Vol. 28, No. 10, pp.1152-1159, 1992.
- [86] 篠田, 山崎, “表面硬さの非接触センシング,” 計測自動制御学会論文集, Vol. 27, No. 7, pp.749-754, 1991.
- [87] M.Shitara, H.Shinoda and S.Ando, “A Vertical Sampling Image Motion Sensor,” Proc. Transducers'93, pp.1062-1065, Yokohama, 1993.
- [88] M. Shitara, H. Shinoda and S. Ando, “A Vertical Sampling Method for Image Motion Measurement,” Proc. 11th Sensor Symposium, Tokyo, pp.63-66, 1992.
- [89] D. M. Siegel, S. M. Drucker and I. Garabieta, “Performance Analysis of a Tactile Sensor,” Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.1493-1499, 1987.
- [90] H. Stark ed., “Image Recovery ~ Theory and Application ~,” Academic Press, 1987.
- [91] N. P. Suh and H. C. Sin, “The Genesis of Friction,” Wear, Vol.69, pp. 91-114, 1981.
- [92] T. H. Speeter, “Flexible, Piezoresistive Tactile Sensor,” Proc. SPIE Optics, Illumination, and Image Sensing for Machine Vision III, pp. 31-43.
- [93] T. H. Speeter, “A Tactile Sensing System for Robotic Manipulation,” Int. J. Robotics Res, Vol.9, No.6, pp.25-36, 1990.
- [94] 館, “人工現実感,” 日刊工業新聞社, 1992.
- [95] 高橋, 金丸, “触覚による3次元操作インタフェース,” 第4回ロボットセンサシンポジウム講演論文集, pp.87-90, 1994.
- [96] 高谷, 赤塚, “生体硬さの臨床的測定法,” 計測と制御, Vol.14, No.3, pp.281-292, 1975.

- [97] 田村 博, “こころと感性のエンジニアリング,” 計測と制御, Vol.33, No.3, pp.183-185, 1994.
- [98] K. Tanie, K.Komoriya, M.Kaneko, S. Tachi and A.Fujikawa, “A High Resolution Tactile Sensor,” Proc. 4th Int. Conf. on Robot Vision and Sensory Controls, pp.251-260, 1984.
- [99] 谷江 和雄, “人工現実感とロボティクス : 計測技術へのインパクト,” 計測と制御, Vol. 31, No. 9, pp. 955-961, 1992.
- [100] S. P. Timoshenko and J. N. Goodier, “Theory of Elasticity,” McGraw-Hill, 1970.
- [101] M. R. Tremblay and M. R. Cutkosky, “Estimating Friction Using Incipient Slip Sensing During a Manipulation Task,” Proc. 1993 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 429-434, 1993.
- [102] 塚原 進, “筋コンプライアンス計,” 医用電子と生体工学, Vol.1, pp.57-59, 1963.
- [103] J. M. Vranish, “Magnetoresistive Skin for Robots,” Robot Sensors Vol. 2 : Tactile and Non-Vision, ed. A.Pugh, Springer-Verlag, pp. 99-111, 1986.
- [104] 渡辺隆夫, “音声認識におけるインテリジェンス,” 電気学会センサ技術研究会資料, ST-94-10, pp.9-13, 1994.
- [105] G. Westling and R. S. Johansson, “Responses in Glabrous Skin Mechanoreceptors during Precision Grip in Humans,” Exp. Brain Res., 66, pp.128-140, 1987.
- [106] M. R. Wolfenbuttel, “Surface Micromachined Capacitive Tactile Image Sensor,” Delft University Press, 1994.
- [107] 山田, 三田, 土田, 今井, “力覚と振動覚の統合による静摩擦係数の検出と把握力制御への応用,” 第4回ロボットセンサシンポジウム講演論文集, pp.189-194, 1994.





Kodak Color Control Patches

© Kodak, 2007 TM Kodak

- Blue
- Cyan
- Green
- Yellow
- Red
- Magenta
- White
- 3/Color
- Black



Kodak Gray Scale



© Kodak, 2007 TM Kodak

- A 1 2 3 4 5 6 M 8 9 10 11 12 13 14 15 B 17 18 19

