

博士学位論文

圧電ポリマーを用いた
触覚センサの開発

九州工業大学 大学院生命体工学研究科

竹中 慎

目次

| | | |
|---------|---------------------------|----|
| 第 1 章 | 緒言 | 1 |
| 1.1 | 研究の背景 | 2 |
| 1.1.1 | 触覚 | 2 |
| 1.1.2 | 触覚センサのニーズ | 4 |
| 1.2 | 触覚センサ | 6 |
| 1.2.1 | 種々の触覚センサ | 6 |
| 1.2.2 | ウィスカ型触覚センサ | 8 |
| 1.2.3 | センサ素子としての圧電材料 | 10 |
| 1.2.3.1 | 圧電材料の歴史 | 10 |
| 1.2.3.2 | 圧電材料の基本式 | 11 |
| 1.2.3.3 | 圧電ポリマーの利点 | 15 |
| 1.3 | 本研究の目的 | 16 |
| 1.4 | 本論文の構成 | 17 |
| 第 2 章 | 薄板型触覚センサを用いた凹凸面評価に関する基礎検討 | 19 |
| 2.1 | はじめに | 20 |
| 2.2 | 薄板型触覚センサ | 21 |
| 2.2.1 | 試作センサおよび計測系 | 21 |
| 2.2.2 | 微小段差の計測実験 | 22 |
| 2.2.3 | 表面粗さの計測実験 | 23 |
| 2.3 | 検出原理 | 24 |
| 2.3.1 | 薄板はりのたわみにより生じる電氣的出力値 | 24 |
| 2.3.2 | 一般的な凹凸面上を走査する際の出力関係 | 25 |

| | | |
|---------|-------------------------------------|----|
| 2.3.3 | 段差エッジを登る際の実出力値 | 28 |
| 2.3.4 | 段差エッジを下る際の実出力値 | 30 |
| 2.4 | 結果 | 31 |
| 2.4.1 | 微小段差の計測 | 31 |
| 2.4.2 | 表面粗さの計測 | 39 |
| 2.5 | 考察 | 42 |
| 2.5.1 | 箔ひずみゲージによる測定との比較 | 42 |
| 2.5.2 | 圧電ポリマーを用いた薄板型触覚センサの特性について | 44 |
| 2.5.3 | センサの改良検討 | 45 |
| 2.6 | まとめ | 48 |
| 第3章 | 携帯式触覚センサシステムの開発 | 49 |
| 3.1 | はじめに | 50 |
| 3.2 | 携帯式触覚センサシステム | 52 |
| 3.2.1 | 試作センサシステム | 52 |
| 3.2.2 | 検出原理 | 56 |
| 3.2.2.1 | 薄板型はりのたわみによる形状高さの算出方法 | 56 |
| 3.2.2.2 | ケーシングの底面位置の変動による誤差影響 | 57 |
| 3.2.2.3 | 走査速度の算出方法 | 60 |
| 3.3 | 実験方法 | 65 |
| 3.3.1 | 走査速度の計測実験 | 65 |
| 3.3.2 | 微小段差の計測実験 | 68 |
| 3.3.3 | 表面粗さの計測実験 | 69 |
| 3.4 | 結果および考察 | 70 |
| 3.4.1 | 走査速度の測定 | 70 |
| 3.4.2 | 微小段差の測定 | 74 |
| 3.4.3 | 表面粗さの測定 | 78 |
| 3.5 | まとめ | 80 |

| | | |
|-------|------------------------------|-----|
| 第 4 章 | 薄板型触覚センサを用いた弾性体の剛性評価に関する基礎検討 | 82 |
| 4.1 | はじめに | 83 |
| 4.2 | 実験 | 83 |
| 4.2.1 | 検出原理 | 83 |
| 4.2.2 | 実験方法 | 88 |
| 4.3 | 結果 | 90 |
| 4.4 | 考察 | 91 |
| 4.5 | まとめ | 93 |
| 第 5 章 | 結言 | 95 |
| 5.1 | はじめに | 96 |
| 5.2 | 第 2 章のまとめ | 96 |
| 5.3 | 第 3 章のまとめ | 97 |
| 5.4 | 第 4 章のまとめ | 98 |
| 5.5 | 今後の課題と展望 | 99 |
| 5.6 | 最後に | 102 |
| 参考文献 | | 103 |
| 研究業績 | | 110 |
| 付録 A | | 114 |
| 付録 B | | 117 |
| 付録 C | | 119 |

第 1 章

緒言

1.1 研究の背景

1.1.1 触覚^[1,2]

我々人間は、五感から得られる情報をもとに、外界環境に適応した行動をとっている。中でも、視覚や聴覚から得られる情報量は極めて多いことが知られており、一般に人間が外界から得る情報の8割程度は視覚によるもの、1割程度が聴覚によるものと言われている^[3]。日常生活を行ううえで、触覚の果たしている役割も非常に大きい。視覚は目、聴覚は耳と、それぞれ局所的な器官が感覚を受容する一方、触覚を担う皮膚は全身に分布していることに特徴があり、最大の臓器とも言われている（成人では約1.6 [m²]の面積を有し、皮下組織を除き平均3 [kg] 弱の重量がある）。

全身を覆う皮膚の触感覚により、人間は、日常的にさらされている力学的な負荷を受動的に感じとっている。一方、例えば手指を動かして物体に触れることにより、対象の情報を能動的に得ていることは、他の感覚にはない特徴の一つである。例えば、テーブル上に1枚のコピー用紙を置き、指先をエッジ部に押し当てた場合、指をおいた瞬間にはエッジに触れたことが分かるが、その感覚はすぐ消え去ってしまう。これに対し、指先をエッジに垂直な方向に動かすと、エッジの段差がたとえ数 μm であったとしても、エッジに触っていることをクリアに認識し続けることができる^[4]。

人は何らかの外界の対象に触れた際に生じる皮膚変形の結果、対象物体の硬さ・質感・摩擦など、様々な情報を瞬時に読み取っている。それらの情報は皮膚の内部にある各種の触覚受容器によってもたらされている。**Fig.1.1**に示すように、皮膚は、外側から内側に向かって、表皮 (Epidermis)、真皮 (Dermis)、皮下組織 (Subcutaneous fat tissue) の3層に分けられる。通常の触感覚に関与する受容器は、表皮と真皮の境から皮下組織にかけて分布しており、主にマイスナー小体 (Meissner corpuscle)、パチニ小体 (Pacinian corpuscle)、メルケル触盤 (Merkel's disk)、ルフィニ終末 (Ruffini ending) の4種類がある。

これらの触覚受容器は、皮膚の変形刺激に対する、神経発射特性（応答

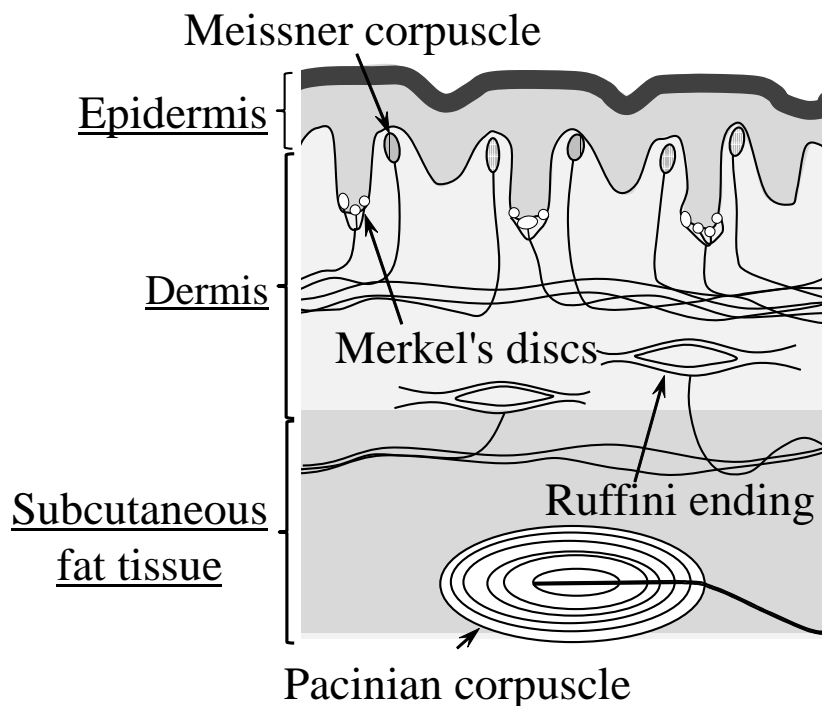


Fig.1.1 Touch receptors incorporated in skin

Table 1.1 Characteristics of tactile receptors at glabrous tissues^[5]

| Name of receptors | Type | Receptive field | Adaptation |
|--------------------|-------|-----------------|------------|
| Meissner corpuscle | FA I | small | fast |
| Merkel's disc | SA I | small | slow |
| Pacinian corpuscle | FA II | large | very fast |
| Ruffini ending | SA II | large | slow |

時間変化の違い) と、受容野の広さに関する特徴が異なる。皮膚を押し込むと受容器は刺激に応じて発火しパルスを出力する。このとき、刺激の強度に応じて発火する遅順応型 (Slowly Adapting: SA) と、刺激の時間変化に応じて発火する速順応型 (Fast Adapting: FA) とがある。また受容器の特徴からは I 型 (受容野が狭く境界が明瞭である) と II 型 (受容野が広く境界が不明瞭) に分けられる。Table 1.1 に、各受容器の特徴を示す。

例えば、対象物体の弾力性は、面の法線方向へ指を押し込んだ際に生じる圧感覚により検出している。これには表皮と真皮の境目あたりに位置するメルケル触盤が関与しており、複数のメルケル触盤からの信号を加算

した結果によって物体の硬さを検出している可能性が示唆されている^[6]。一方、指を接線方向に滑らせることにより物体表面の粗さ等の質感を検出することができる。これには、指表面の最も近くに分布し、変位速度に比例した応答を示す、マイスナー小体の関与が示唆されている^[7]。

なお、広義の触覚には、環境の温度を感じ取る温覚、冷覚や、化学的な作用を検出する感覚も含まれ^[8]、それらに対応する受容器も存在するが、本研究では、機械的な変形に伴う触覚を対象とする。

1.1.2 触覚センサのニーズ

日常生活の中だけでなく、産業や医療の分野においても、人間の触覚は大きな役割を担っている。ものづくりの現場における製品の品質検査工程では、目視による検査や視覚センサを使った自動検査手法が行われている。しかし、これらの手法は、検査対象面の光沢やほこり等の付着物の影響、照明等の測定環境の影響を受けやすいため、評価が困難な場合が数多くある。また、透明な物体や管内など障害物により遮蔽された空間内の物体などを、視覚や画像で認識することは難しい。

この場合に、作業員である人間の触覚を巧みに利用した検査が行われている^[9-11]。例えば、自動車鋼板の面不良、鋳物や切削面の表面粗さの検査工程においては、熟練工が指でなぞることにより、不良品のチェックを行っている (**Fig.1.2**)。ヒトの触覚は、3 [μm] 程度の表面凹凸まで弁別することができる^[12]、熟練した作業員であれば、生産ラインにおいて数十 μm レベルの凹凸の検出を行っている^[9]。また、ヒトが切削面等の表面粗さを評価する際、粗さ標準片を触ったときの感覚と比較することで評価を行うことがある。このとき、対象面を指の腹で触るよりも、爪の先でこするほうが感度が良いという意見もある^[13]。

このように、産業界では各種計測機器を用いず人間の指先の感覚を頼りに、高度なものづくりを支えている。しかし、上記のような技能を習得するためには多大な時間と経験を要するため、熟練度が作業員によって異なることや、技能伝承が難しいことが問題となる。また、人間の触感に頼った検査では、主観的な評価となってしまうため、定量的なデータとして他者に伝達すること、あるいは後の改善へつなげる情報としての保存ができ

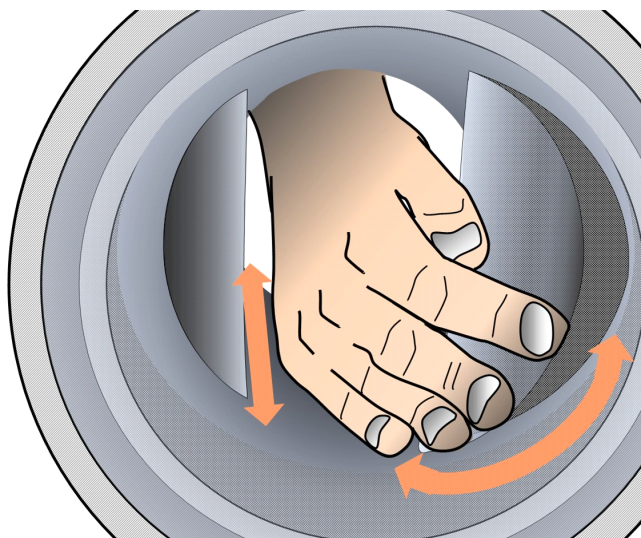


Fig.1.2 Tactile inspection of an abnormal burr of the casting

ないことに問題がある。このため、このような勘や経験などの不確定な要素に頼らず定量的なデータを取得でき、なおかつ、従来の測定機器よりも簡便に表面状態の計測を行える手法の開発が望まれる [4,11,14-18]。

一般的に、ワークの表面の形状や粗さを評価する際には、三次元計測器や表面粗さ計が用いられる。しかしこの場合、評価対象のワークを計測器のテーブル内に設置する必要があるため、大型なワークの側面や底面の計測に適用することは難しい。可搬型の表面粗さ計も一般的に使用されているが、限られた測定器サイズの中で、プローブを走査するためのアクチュエータを使用しているため、長尺物を一度にスクリーニングすることはできない。また、一般的にその走査速度は、1 [mm/s] 程度の評価であり、迅速な計測作業が実現できない。すなわち、これらの従来機器は、精度が必要とされるワークの特定部分について、その形状を精密に計測するためには適した装置であるが、大きなワークの全体について、その異常の有無を、必要に応じて迅速に測定する場合には適用することが難しい。このことが、現実の測定現場において今でもなお、人の触覚に頼った検査が行われている理由と考えられる。

また、産業の分野だけでなく、医療の現場においても触覚を用いた評価は、「触診」として広く行われている。触診とは、「手を用いて、身体の臓器、塊、浸潤を触知することや、心拍動、脈拍、胸部の振動などを調べること」 [19] である。臨床の現場では、診断のために医師が患者を直接触診

することは非常に有用な方法であり、様々な部位の診断において人間の触覚が利用されている。例えば、乳がんはその病変部分が硬くなる特徴を利用して触診が行われている。また、肝臓移植などの外科手術の場面では、肝臓の硬さや大きさを触診によつて的確に判断することは極めて重要な手段である [20]。

しかし、前述の工場における検査で挙げた例と同様に、触診による評価は、主観的である問題がある。さらに、近年の医療現場においては、術中、術後の患者の負担を低減するため、切開を最小限とし、内視鏡やカテーテルを用いた「低侵襲医療」が広く普及している。この場合、術者は触覚情報が制限され、患部を直接触れられない状況におかれる。このような場合にも、触覚情報を術者に提供できるデバイスがあれば、安全性・操作性の向上が見込まれ、また、病変部性状の検出が可能となる。

1.2 触覚センサ

1.2.1 種々の触覚センサ

1.1 に示した触覚の機能を工学的に実現するため、様々な触覚センサが提案されている。触覚センサとは、対象面に接触させることにより状態を把握する形式のセンサの総称である。触覚センサは、その用途や用いられる材料によつて多種多様な方式が提案されている [1]。

この触覚センサの定義を広く捉えば、対象物との接触状態を“ON-OFF”の2値で検知するセンサも触覚センサの一つと言える。例えば極端には、各種装置の電源や動作を切り替えたり、機械装置同士の相対的な位置を検出する、単一の接点部品もこの中に含まれる。

一方、カーナビゲーション装置や工作機械の操作パネルなど、タッチパネル方式のインターフェースも面状にスイッチが分布した触覚センサの一つの形態といえる。このタッチパネルデバイスは、近年、スマートフォンに代表されるように商業的に広く普及しており、コスト面も含めて利用しやすい環境が整いつつある。このように、“ON-OFF”の1 [bit] 情報を面状に分布させることだけでも、有用なアプリケーションが構築可能である。しかし、例えば、ロボットの指に触覚機能を持たせ、高度なハンドリ

ングを行わせたり、対象物との相対運動をさせることで、材質や質感の評価を行わせようとした場合、2値の情報だけでは実現が困難であり、接触状態をアナログ量として計測することが必要になってくる。

石川および下条らは、感圧導電性ゴムを用いた触覚センサを提案している^[21]。感圧導電性ゴムとは、従来絶縁体とされているゴム材料に導電材料を混ぜることで、導電性を持たせたもので、ゴム材の変形により電気抵抗値が変化することを利用したセンサである。下条らは、この方式の触覚センサを利用し、滑りを検出し把持力を制御可能なロボット用の指を試作した^[22]。ただし、構造としてゴム材を用いるため、荷重の履歴が影響するヒステリシスが問題となることがある^[23]。また、感圧導電性ゴムは、主に表面に垂直な方向の圧力分布を検出するために用いられる。

圧力分布を検出するセンサ方式としては、この他、静電容量の変化を利用したものがある^[24-28]。この構造は、弾性のある誘電体を2枚の電極で挟むことでコンデンサを形成している。圧力によって誘電体の厚みが変わり、これに伴って静電容量が変化することを利用した検出方式である。弾性体を替えることによって感度の調節が可能である。しかし、空間分解能を高めるためには、検出エレメントの面積を小さくすることが必要となり、センサ配線の浮遊容量、外部導体との浮遊容量による誤差が問題となることがある^[2]。

また、ひずみゲージに代表されるように、ひずみが生じることによる抵抗の変化（ピエゾ抵抗効果）を利用した触覚センサも広く研究されている一つの方式である。例えば、前野らは、シリコンゴムで作製した曲面を持つ指の内部に、ひずみゲージを並べた触覚センサを提案し、把持力の制御を行った^[29]。また、田中らは、シリコンオイルシートにひずみゲージを貼り付け、指に装着する面ひずみ検出用触覚センサを開発した^[11]。

さらに近年では、マイクロマシニング技術が発展し、MEMSセンサの開発が盛んになっている。これにより、起歪部となるピエゾ抵抗素子を有するはりを、弾性体内に埋め込んだ小型なデバイスが作製可能となり、2[mm]角程度の大きさのセンサ素子でも、表面に垂直な方向の力と、それに直交する2方向のせん断力を測定可能な触覚センサが開発されている^[30,31]。

この他、触覚センサを実現する測定原理は多く提案されている。電極と

導電層フィルムの中空構造からなり、接触抵抗が圧力によって変化することを利用する方式^[32]、柔軟体で空気室を作製し、加圧時に室内体積が減少することで、上昇する内圧を圧力センサにより計測する方式^[33]や、空気室内に音響的共鳴を発生させ、室内体積の変化に伴う共鳴周波数の変化を検出する方式^[34]、光学的なセンサを用いて、弾性体の変形に伴う画像の変化を用いて計測する方式^[35]、弾性体内に組み込んだ永久磁石の移動を磁気センサで検出する方式^[36]、電磁誘導を利用した方式^[37]などがある。

上述のように、様々な方式の触覚センサが提案されているが、一つの方式が他の方式を淘汰するということではなく、各方式には一長一短がある。触覚センサの測定の対象、目的、コストに応じて選択する必要があり、場合によってはいくつかの方式を組み合わせることも有用な解決方法となることもある^[38]。

1.2.2 ウィスカ型触覚センサ

触覚センサの中でも、簡便な手法で対象面をトレーシングし、表面性状の評価を実現するセンシング方法としては、ウィスカ（ひげ）型触覚センサが挙げられる^[4,16,18,39-46]。このセンサは、動物のひげや昆虫の触角を模したような構成となっており、例えばピアノ線のような柔軟な弾性ワイヤを用いて、環境との接触状態を検出する。昆虫は、触角を巧みに動かすことにより、特に近くにある対象物を的確に検出し、それをうまく避けながら移動している。このウィスカセンサの大きな特長は、その“柔らかさ”と“能動動作”にある。柔らかさは、対象物にぶつかった際に生じる衝撃を緩和する効果があり、能動動作はセンシング領域を拡大する効果がある。

このようなウィスカ型のセンサは、これまでも多く提案されており、初期には、Wang and Will^[39]や Russell^[40]らが、弾性ワイヤの変形を、根元部の“ON-OFF”接触スイッチで検出するシンプルな機能の触覚センサを提案している。その後、広瀬らは、形状記憶合金からなるワイヤを使用し、ウィスカセンサを歩行ロボットの足回りに取り付け、障害物や路面の近接覚センサとして利用している^[42]。しかし、これらの研究で用いら

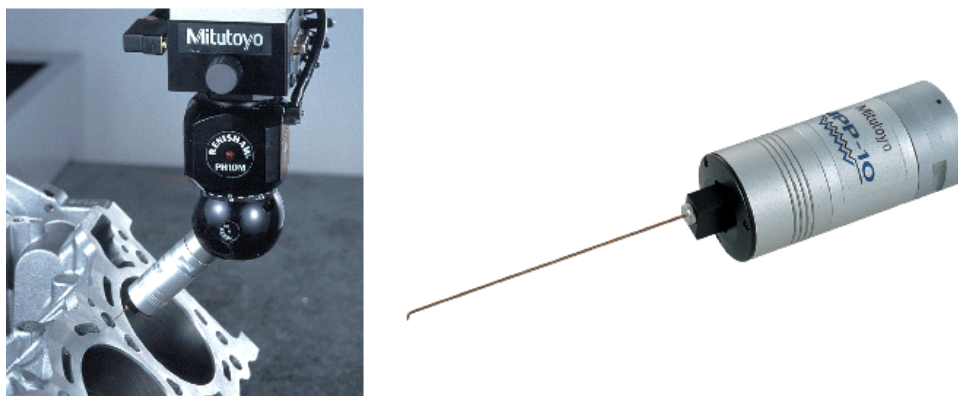


Fig.1.3 Measurement of screw effective diameter by whisker sensor (Photograph courtesy of Mitutoyo Corporation)^[47]

れているウイスカ型センサは、いずれもセンサと環境との接触の有無を“ON-OFF”で検知しているものである。

立矢らは、平面基板の法線方向に弾性棒を取り付け、その先端に作用する力で平板に生じる変形をひずみゲージにより計測し、接触面形状を測定する触覚センサを提案している^[43]。その後、接触面に作用する摩擦力および鉛直荷重を同時に測定する方法を考案した^[44]。またさらに、それらと同一の基本構造を有する触覚センサを用い、織物を対象として動摩擦係数とその変動を測定し、織物の表面特性の評価を行えることを示した^[45]。

金子らは、人工能動触角を提案し、ウイスカの根元で計測される触角の回転コンプライアンスが接触点までの距離に比例することを用いて、接触位置のセンシングを行った^[46]。また、金子らはこの研究を発展させ、“Tracing型人工能動触角”を提案した^[4]。この構成は、ステンレス製弾性棒のウイスカ、このウイスカを固定するひずみゲージ付アダプタ、ウイスカ固定部を動かすためのアクチュエータからなり、対象表面をなぞる際に生じるウイスカ根元のトルクをひずみ値として検出している。この原理を応用したウイスカ型の触覚センサは、ねじの有効長を計測するシステムとして商品化されている (Fig.1.3)。

しかし、上記に挙げた研究では、ひずみゲージを基本とした計測を行っており、そのひずみ限界から、陽に柔軟性を活かした検出方法とはなっていない。

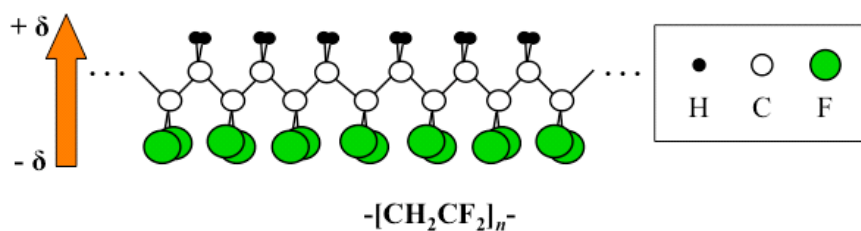


Fig.1.4 Structure of PVDF

1.2.3 センサ素子としての圧電材料

1.2.3.1 圧電材料の歴史

圧電特性とは、力やひずみを加えたときに、材料内部の電気分極が変化することで電圧や電荷が発生し、また、逆に電圧を加えることにより力やひずみが得られる性質をいう^[48,49]。圧電特性は、1880年に **Piere & Jacques Curie** によって水晶において発見された。その後、超音波ソナーを実現するための素子として実用的な研究開発が進められ、チタン酸バリウム (BaTiO_3) やチタン酸ジルコン酸鉛 ($\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$; PZT) に代表されるセラミックス系の圧電材料が開発されてきた。これらの圧電材料は現在、各種トランスデューサ、アクチュエータ、表面波デバイス、周波数制御など様々なデバイスに広範囲に利用されている^[49]。

一方、工業的に生産できる高分子材料の中にも圧電特性を有するものがあり、その代表格がポリフッ化ビニリデン (Polyvinylidene fluoride; PVDF^[48-53]) である。PVDF は、 $-(\text{CH}_2\text{CF}_2)-$ をモノマー単位とする高分子材料であり (**Fig.1.4**)、1944年にデュポン社によって初めて合成された。PVDF は、テフロン系材料としての優れた耐熱性や機械的強度、耐久性に優れていることから、他の多くの高分子材料と同様、当初よりコーティング材や被覆材料として使用されてきたが、1969年に **Kawai** により、PVDF を一軸延伸後に分極処理を行うことで、圧電性が顕著に現れることが報告された^[50]。その後間もなく、PVDF を用いた圧電スピーカやヘッドフォンなどが商品化され、また超音波素子としても有用であることも示された^[48]。PVDF は、**Fig.1.5** に示すように、厚さ数 μm 程度以上の均質なフィルムとして安定的に生産ができ、市販化もされている^[51,52]。

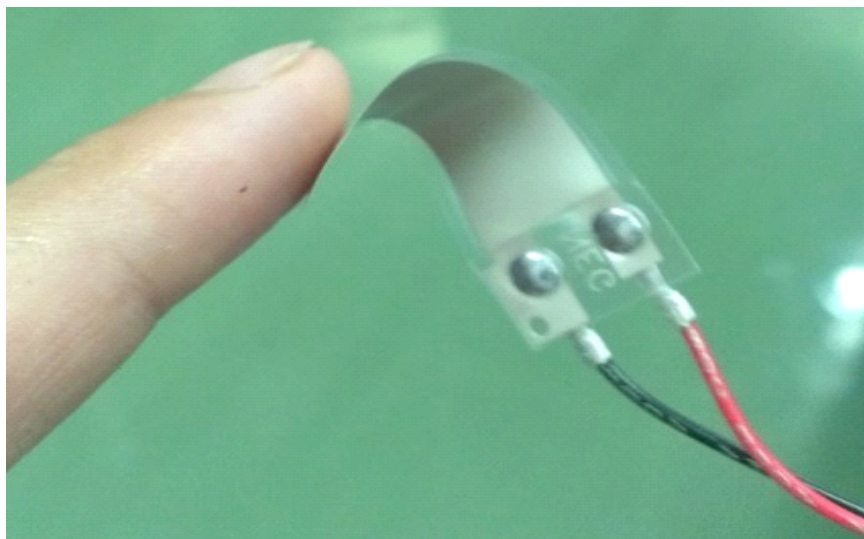


Fig.1.5 Appearance of PVDF film

Table 1.2 Relationship between tensor and matrix notation

| | | | | | | |
|-----------------|----|----|----|--------|--------|--------|
| Tensor notation | 11 | 22 | 33 | 23, 32 | 31, 13 | 12, 21 |
| Matrix notation | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |

1.2.3.2 圧電材料の基本式 [48, 49, 54]

圧電体では、応力 σ 、ひずみ ξ 、電界 E 、電束密度 D が圧電効果を介して互いに結び合っている。電界 E 、電束密度 D はベクトル量であるから三つの成分を持ち、応力 σ 、ひずみ ξ は対称テンソル量であるから六つの成分を持つ。

圧電体に適当な座標軸をあてはめ、その x , y , z 方向の電界の成分を E_1 , E_2 , E_3 、電束密度の成分を D_1 , D_2 , D_3 とする。また、応力テンソルの各成分の記号について、**Table 1.2** および **Fig.1.6** に示すように簡略化して表現し、 x , y , z 方向の垂直応力の成分を σ_1 , σ_2 , σ_3 、せん断応力を σ_4 , σ_5 , σ_6 とする。同様に、ひずみ成分のうち垂直成分を ξ_1 , ξ_2 , ξ_3 、せん断ひずみを ξ_4 , ξ_5 , ξ_6 とする。

圧電体に応力 σ が加わると、弾性コンプライアンス s^E を介して、 $\xi = s^E \sigma$ のひずみを発生するが、それと同時に圧電正効果によって応力に比例した電束密度 $D = d\sigma$ を生じる。ここで、 d は圧電ひずみ定数である。逆に電圧 E を加えると、誘電率 ϵ を介して、 $D = \epsilon E$ の電束密度を生じる

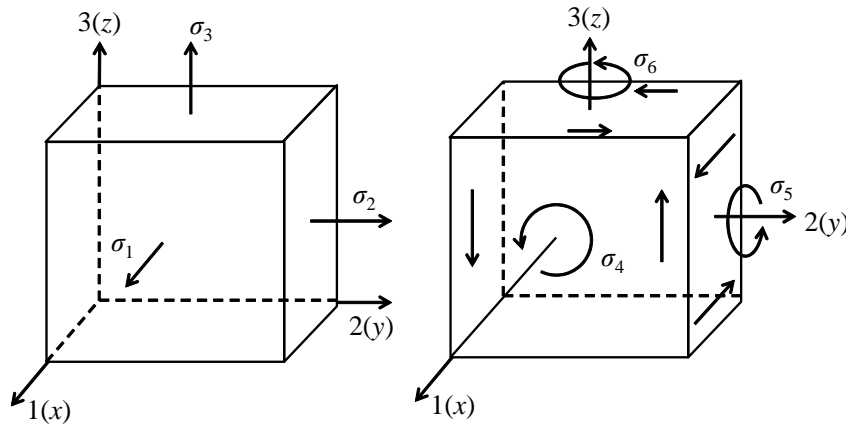


Fig.1.6 Components of stress

が、それと同時に圧電逆効果によって電界に比例したひずみ $\xi = d^T E$ を発生する (T は転置記号)。したがって、圧電体に応力と電界が加わった場合に発生するひずみと電束密度は、式 (1.1), (1.2) で表される。

$$\xi = s^E \sigma + d^T E \quad (1.1)$$

$$D = d\sigma + \epsilon E \quad (1.2)$$

また、式 (1.1), (1.2) を成分ごとに書き出すと、式 (1.3), (1.4) のように書き直せる。

$$\begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \xi_3 \\ \xi_4 \\ \xi_5 \\ \xi_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & s_{14} & s_{15} & s_{16} \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} & s_{24} & s_{25} & s_{26} \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} & s_{34} & s_{35} & s_{36} \\ s_{41} & s_{42} & s_{43} & s_{44} & s_{45} & s_{46} \\ s_{51} & s_{52} & s_{53} & s_{54} & s_{55} & s_{56} \\ s_{61} & s_{62} & s_{63} & s_{64} & s_{65} & s_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_{11} & d_{21} & d_{31} \\ d_{12} & d_{22} & d_{32} \\ d_{13} & d_{23} & d_{33} \\ d_{14} & d_{24} & d_{34} \\ d_{15} & d_{25} & d_{35} \\ d_{16} & d_{26} & d_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{21} & \epsilon_{31} \\ \epsilon_{12} & \epsilon_{22} & \epsilon_{32} \\ \epsilon_{13} & \epsilon_{23} & \epsilon_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

ただし、本研究で用いる PVDF フィルムを考えた場合には、その構造の対称性などから独立成分を減らすことができ、式 (1.3), (1.4) は、式

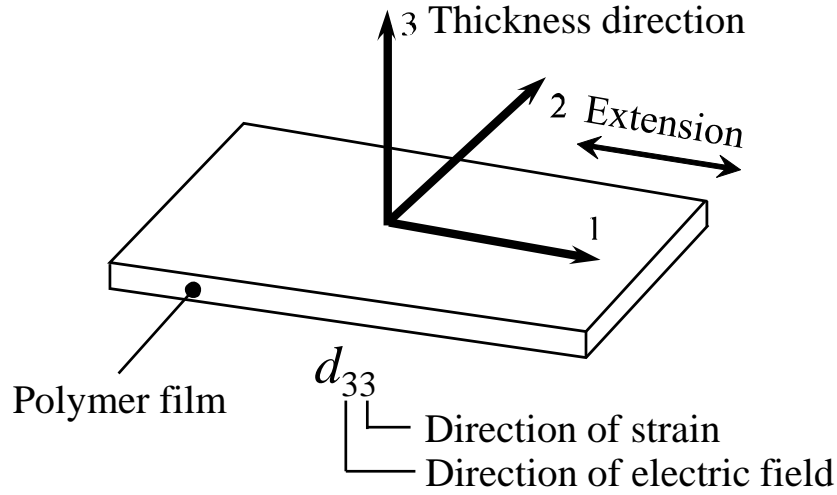


Fig.1.7 Piezofilm orientation and sensitivity

(1.5), (1.6) ように書き直すことができる [48,54].

$$\begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \xi_3 \\ \xi_4 \\ \xi_5 \\ \xi_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{22} & s_{23} & 0 & 0 & 0 \\ s_{13} & s_{23} & s_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{32} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{24} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

ここで、**Fig.1.7** に示すように、PVDF フィルムの分極方向を 3 方向，延伸方向を 1 方向，それらに直交する方向を 2 方向とすることが一般的であるため，本研究でもこの表記に従っている。

次に，PVDF フィルムをセンサ素子として利用することを想定し，分極方向 (**Fig.1.7** の 3 方向) の一対の面に電極をとりつけたうえで閉回路を構成し，応力 σ が印加されることによって計測できる電流値 I を導出する。このとき，圧電材料内の電場は 0 と見なすことができ，次式が成り立つ。

$$E_1 = E_2 = E_3 = 0 \quad (1.7)$$

また、分極方向にとりつけた電極の面積を A とすると、印加された応力によって出力される電荷 Q は、

$$Q = D_3 A \quad (1.8)$$

と表せる。 $I = \frac{dQ}{dt}$ であることから、最終的に式 (1.6) ~ (1.8) を用いて、式 (1.9) で表される関係式が導かれる。この式から、印加された応力の1階時間微分値に比例した値が、電流値として計測できることが分かる。また、圧電ひずみ定数は、センサとしての感度係数に対応することが分かる。

$$I = A \left(d_{31} \frac{d\sigma_1}{dt} + d_{32} \frac{d\sigma_2}{dt} + d_{33} \frac{d\sigma_3}{dt} \right) \quad (1.9)$$

ここで、PVDF フィルムの各方向に同じ大きさの力が働くことを考えた場合のフィルムの応力は、断面積が A である σ_3 に比べて、断面積の小さい σ_1 や σ_2 のほうが大きくなる。一方、PVDF の d_{31} と d_{33} の大きさは近いので、式 (1.9) より、各方向に同じ大きさの力が働いた場合、 σ_3 に比べて σ_1 によって生じる電流値のほうが大きくなる^[55]。すなわち、 σ_3 より σ_1 が大きくなるフィルムの伸張を利用するセンサの構造によって、出力を大きくできることが分かる。

一方、PVDF フィルムはその薄さや柔軟性ゆえに、フィルム単独としては構造物として成り立ちにくく、基板上に貼り付ける形で用いられることが多い。このとき、 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ のそれぞれの寄与による出力を独立して得ることは難しく、注意が必要である。例えば、基板の剛性が高い場合、PVDF フィルムを厚み方向に加圧 (σ_3) した際に、フィルムがポアソン効果によって面内に広がろうとするひずみは拘束され、面内方向にも応力 (σ_1, σ_2) が生じる。この結果、電氣的出力には、 $d_{33}\sigma_3$ と、これに対して異符号の値を持つ $d_{31}\sigma_1$ や $d_{32}\sigma_2$ による出力が加わることになり、電氣的な出力を弱める可能性がある^[56]。

また圧電材料の中には、圧電効果以外に、温度変化に応じて電氣的な出力をする、焦電効果と呼ばれる特性を有するものがある^[48,49,57]。この焦電効果は、人体検出用赤外線センサなどにも応用されており、PVDF フィルムもその特性を有する材料の一つである。PVDF フィルムをひずみを検出する素子として使用する場合には、焦電効果による出力もノイズとして

加わることがあるが、本研究のように、温度変化がない、もしくは非常に緩やかな場合は、この影響は無視することができる。

1.2.3.3 圧電ポリマーの利点

PVDF は、高分子材料ならではの特性として、以下に示すような様々な利点がある [49,58]。

- 圧電定数が大きく、センサとして用いた際の電氣的出力が大きい。
- センサの出力は応力の絶対値でなく、時間微分値を出力する。
- 軽量・柔軟である。
- 加工性が良いため様々な形状、大きさのセンサを作製することができる。
- 広範囲の周波数に応答し、共振が鋭くないため扱いが容易である。
- 化学的な耐食性があるため、様々な環境においての利用ができる。
- PZT のように、鉛を含有しておらず、生体への負荷が少ない。

また、Vinogradov らは、PVDF フィルムに 1 方向の繰り返し荷重（ひずみ：降伏ひずみの 20 %，ひずみ振幅：0.07 %，周波数：30 [Hz]，48 時間）を加えたときの電気特性を調べ、経時的に圧電特性が変化しないことを確認した [59]。

PVDF の弾性率は、PZT の弾性率の 0.03 倍程度であり [48]，ひずみ限界も PVDF のほうが 40 倍程度大きい [60,61]。このことから、PVDF をセンサ素子に用いた場合には、その柔軟性を活かしたセンサ構成ができる利点がある。

式 (1.9) のように、PVDF は、1.1.1 で述べたヒトの速順応型の触覚受容器の特性と同じく、機械的変形の変化率に応じた出力をする [17]。このため、PVDF フィルムを用いて様々な触覚センサシステムの検討が行われている。田中らは、柔軟なゴム材等に受感材としての PVDF フィルムを取り付けた構造からなる触覚センサを製作し、能動的な動作と組み合わせることで、前立腺触診用センサシステム [62] や皮膚性状計測用センサ [63]，毛髪触感測定システム [64]，お皿の洗い上がり感の計測システム [65] など、人の触覚を代替するための様々な触覚センサを提案している。

また、ひずみの時間変化率に敏感である利点を活かして、PVDF フィル

ムをゴム材等に埋め込んだロボットハンドを作製し、把持物体と滑りが発生したときの振動を検出する滑りセンサとしての応用^[66]や、PVDF フィルムの薄さを利用して、衝突する2つの接触対象物の界面に実装して衝撃力を計測できる薄型センサへの応用が検討されている^[67,68]。

一方、ひずみを検出するための素子として広く用いられているものには、1.2.2のウスカ型センサでも用いていたひずみゲージがある。ひずみゲージはひずみ量に比例した出力をするため、表面を低速な動作でなぞり、対象表面形状を検出する用途には適すると考えられる。しかし、動的に素早く対象面をなぞり、凹凸やエッジ等の急激な“変化”に着目したい場合や、異常部位の有無をスクリーニングすることを想定した場合には、式(1.9)に示したように応力やひずみの時間微分値に敏感な圧電材料を用いるほうが有利であると考えられる。

1.3 本研究の目的

本論文の目的は、従来、人が触覚に頼って行っている評価手法を代替できる、新たな触覚センシング手法を提案することである。1.1.2で述べたように、勘や経験などの不確定な要素に頼らず定量的なデータを取得でき、なおかつ、従来の測定機器よりも簡便に表面状態の計測を行える手法の開発が望まれているものの、これを実現できる触覚センシングデバイスは確立されていない。

1.2.2で述べたように、ウスカ型の触覚センサを用いれば、簡便な計測システムにより表面プロファイルの計測を行える可能性がある。また、圧電ポリマーには1.2.3.3で挙げた様々な利点から、触覚センサを実現するための素子として優位な点がある。しかし、それらを組み合わせた研究事例はない。そこで、本論文では、圧電ポリマーをひずみ検出素子とする薄板型の触覚センサを用いて、迅速かつ簡便に対象表面の評価を行う手法を提案する。

1.4 本論文の構成

はじめに、第2章では、新たな触覚センシング手法を構築するための準備として、薄板型の触覚センサの特性について基礎的な検討を行った。ここで、測定対象として例えば、金型のバリや接合部、鋳物の巣などの微小段差、あるいは、金属加工面の仕上げ状態に代表される表面粗さの異常状態を想定している。これらに対応する単純化した凹凸形状の微小段差および表面粗さを、自動ステージにより、試作した触覚センサを走査させ測定した。触覚センサから得られる電気的出力の定式化を行い、実験結果と対比させることで、試作した触覚センサの特徴を調べた。

第3章では、第2章で得られた知見のもと、携帯式の触覚センシングシステムを試作開発した内容について述べる。現実のものづくりの現場において、特に大型な測定対象物の側面や底面などを測定する場合には、自動ステージのようなアクチュエータを設置することは困難であり、また、治具の設置等の煩わしい設定は極力避けることが望まれる。そこで、手動で走査できる携帯式の触覚センサシステムについて試作検討を行った。試作した携帯式センサを用いて、微小段差や表面の粗さ計測実験を行い、薄板型の触覚センサを自動ステージで固定した条件と同様に対象表面の評価が可能であるかの検証を行った。また、人がセンサを定められた速度に保って手動で走査させることは困難であるが、形状プロファイルを評価するためには、センサが走査した各時刻での移動量を把握することが必要となる。このため、携帯式の触覚センサシステムを2枚の薄板型触覚センサで構成し、相関法を用いることにより走査速度の評価を行う手法を検討し、算出される走査速度をもとに時間で積算することにより、最終的にセンサの走査量を推定することができることを示した。

第4章では、薄板型触覚センサを用いた別の視点として、柔軟な物体の剛性評価に関する検討を行った。第2,3章においては、対象とする物体の剛性が高い場合について調べた。しかし、生体のような柔軟な物体を走査した場合には表面粗さのみならず、対象物の剛性を評価することが有用な情報となる。第3章においては、センサの走査速度を求めるために、2枚の薄板型触覚センサを用いたが、本章では、剛性の異なる2種類の薄板型

触覚センサを用いることで，弾性体の剛性を測定する手法を検討した．

第 5 章では，本論文で取り上げた一連の研究についての総括を行う．

第2章

薄板型触覚センサを用いた凹 凸面評価に関する基礎検討

2.1 はじめに

第1章で述べたように、ものづくりの現場における製品の品質検査工程では、目視や画像の検査だけでは判別が困難なケースが数多くあり、この場合には、作業員である人間の触覚を巧みに利用した検査が行われている。例えば、自動車鋼板の面ひずみの検査や鋳物や切削面の表面粗さの触手検査などが挙げられる^[9-11]。しかし、このような技能を習得するためには多大な時間と経験を要するため、熟練度が作業員によって異なることや、技能伝承が難しいことが問題となる。また、人間の触感に頼った検査では、主観的な評価となってしまいうため、定量的なデータとして他者に伝達すること、あるいは後の改善へつなげる情報としての保存ができない。このため、このような勘や経験などの不確定な要素に頼らず定量的なデータを取得でき、なおかつ、従来の測定機器よりも簡便に表面状態の計測を行える手法の開発が望まれる^[4,11,14-18]。

簡便な手法で対象面をトレーシングし、表面性状の評価を実現するセンシング方法としては、弾性棒等のはり形状により対象表面をなぞるウイスカ（ひげ）型触覚センサがある^[4,16,18,39-46]。金子らは“Tracing 型人工能動触角”を提案し、ねじの有効長計測システムを開発した^[4,47]。この構成は、ステンレス製弾性棒のウイスカ、このウイスカを固定するひずみゲージ付アダプタ、ウイスカ固定部を動かすためのアクチュエータからなり、対象表面をなぞる際に生じるウイスカ根元のトルクをひずみ値として検出している。

一般的にひずみを計測するためには、ひずみゲージが用いられる。ひずみゲージはひずみ量に比例した出力が得られるため、表面を比較的低速な動作でなぞり、対象表面形状を検出する用途には適すると考えられる。しかし、動的に素早く対象面をなぞり、凹凸やエッジ等の急激な“変化”に着目したい場合や、異常部位の有無をスクリーニングすることを考えた場合には、ひずみの時間微分値に敏感な圧電センサ素子を用いるほうが有利であると考えられる。圧電センサ素子から得られる電氣的出力を電流として増幅測定する場合には、電流-電圧アンプを使用するが、このとき、対象面をなぞる速度を上げることで、すばやく測定ができると同

時に，S/N 比を上げられることに利点がある．特に圧電センサ素子の中でも，PVDF^[48-53] に代表される圧電ポリマー材料は，第 1 章で挙げた多くの利点から，様々な触覚センサを実現するための検出素子として利用が検討されている [14, 15, 17, 55, 58, 62-68]．

そこで本章では，新たな触覚センシング手法を構築するため，圧電ポリマーをひずみ検出素子とした薄板型の触覚センサを試作し，このセンシング手法の特性について基礎的な検討を行った．ここで測定対象は，センサの剛性に対して剛体と見なせる面形状とし，例えば，金型のバリや接合部，鋳物の巣などの微小段差，あるいは，金属加工面の仕上げ状態に代表される表面粗さの異常状態などを想定した．

本章の実験では，これらに対応する単純化した凹凸形状の微小段差および表面粗さを対象として，試作した触覚センサを自動ステージを用いて走査させ，表面形状に対応した評価測定が行えるかを検証した．同時に，触覚センサから得られる電気的出力について理論的に定式化を行い，実験結果と対比させることで，試作した触覚センサの特徴を調べ，改善点を抽出した．最終的には，ものづくりの現場への適用を目指し，自動ステージを用いない簡便なセンシング手法を検討するが，自動ステージに固定して任意の走査速度で測定実験が行える利点から，走査時の速度やはりの固定角度が測定に与える影響について調べた．さらに従来，ひずみの検出素子として広く用いられる箔ひずみゲージとの対比実験も行った．

2.2 薄板型触覚センサ

2.2.1 試作センサおよび計測系

試作した形状を **Fig.2.1** に示す．検出素子となる圧電体には PVDF フィルム（東京センサ製，SDT1-028K）を用いた．この PVDF フィルムは，20 [mm] × 150 [mm] の 0.5 [mm] 厚ステンレス金属板に両面テープを用いて貼り付け，薄板型触覚センサの受感部とした．ただし，用いた PVDF フィルムは，電極部ケーシングがフィルム面に対してオフセットした形状となっているため，このオフセット厚み分をビニルテープにより積層し接着した．このフィルムは，28 [μm] の PVDF が薄い電極で挟まれており，ま

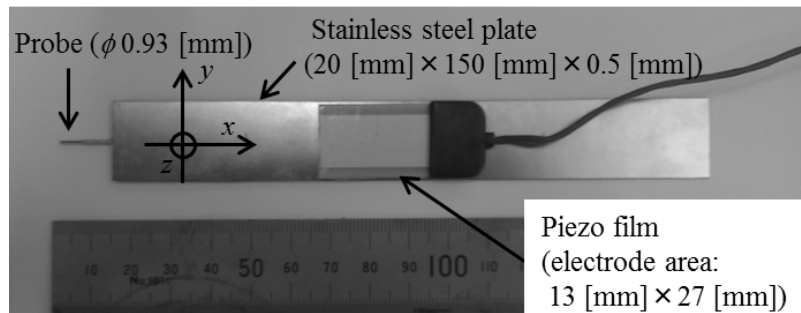


Fig.2.1 Prototype tactile sensor

た，ラミネート加工により保護されている．金属板の先端には，直径 0.93 [mm] の半球面プローブ（ミスミ製，NP-120N）を熱硬化性エポキシ樹脂（3M 製，EW-2020）によって取り付け，トレーシング動作をする際の接触点とした．また，プローブの先端は，過度の摩擦状態を防ぐため，フッ素樹脂系潤滑剤（ファインケミカルジャパン製，FC-250）を塗布し，コーティングを行った．プローブの突き出し量は 13 [mm] とした．

薄板はりのたわみによって得る PVDF フィルムからの出力は，電流プリアンプ（NF 回路ブロック製，LI-76）により電流-電圧変換を行い，A/D 変換器（National Instruments 製，USB-9234）を介して PC に取り込んだ．なお，アンプの利得は 10^6 [V/A] と設定した．また，PVDF フィルムを貼り付けた裏面には，比較実験として箔ひずみゲージ（共和電業製，KFG-5-120）を貼り付け，ひずみデータロガー（共和電業製，EDS-400A）を用いて計測を行った．

センサプローブは，**Fig.2.2** に示すように手動マイクロステージ上の治具に片持ちはりの状態として固定し，角度と高さを調整できるようにした．さらに，自動ステージ（シグマ光機製，SGSP20-85）を用いて，プローブが対象表面上を任意の速度で走査できるようにした．移動距離および速度の制御はステージコントローラ（シグマ光機製，Mark-102）によって行った．

2.2.2 微小段差の計測実験

微小段差として，走査上の基準面となるステンレスプレート上に SK 焼入鋼フィラーゲージ（Monotaro 製，幅 12.7 [mm]）を貼り付けたサンプル

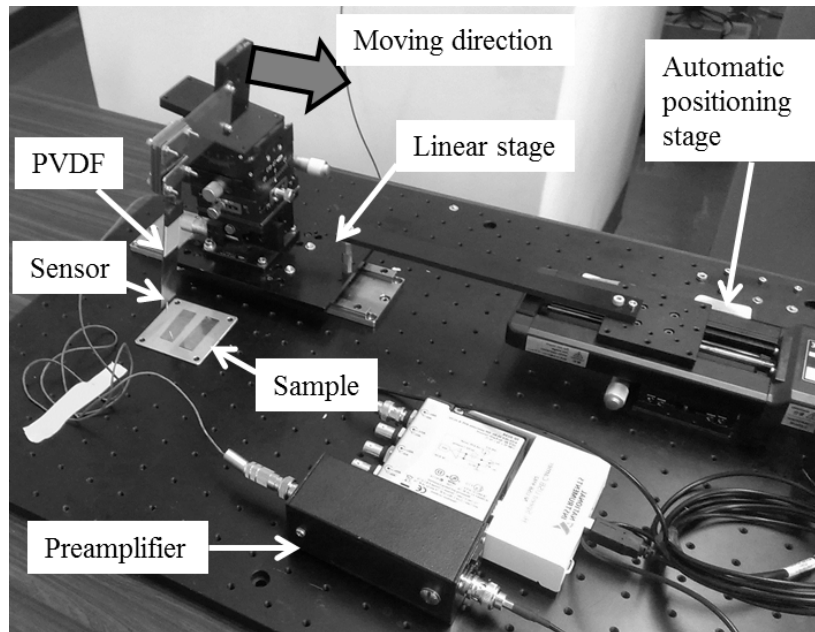
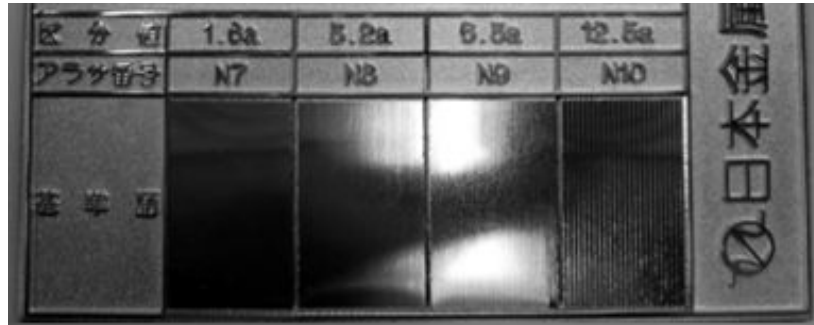


Fig.2.2 Experimental setup

を作製した。この段差高さには、10, 20, 40, 80 [μm] を用い、走査前に目視で薄板はりがたわむことなく基準面に接している状態から、それぞれのサンプルを5回ずつ計測した。センサの走査速度の影響を検討するため、ステージの移動速度 v を、1, 5, 10, 20 [mm/s] に設定した。また、薄板はりの固定角度 α を鉛直方向に対して、5, 10 [deg] と設定した。

2.2.3 表面粗さの計測実験

Fig.2.3 (a) に示す、粗さ標準片（日本金属電鍍製）を対象面とし、算術平均粗さ Ra が、1.6, 3.2, 6.3 [μm] の区間を測定した。この凹凸面は、表面粗さ計（東京精密製、590A-3D-12、スタイラスの先端径：4 [μm]、テーパ角度：60 [deg]) により表面形状を測定したところ（走査速度：0.5 [mm/s]）、**Fig.2.3 (b)** に示すような三角波形状の凹凸形状であった。 Ra 値が大きくなるに従って、対象面の波の振幅は線形的に大きくなる一方、波数は減少していた。各粗さの波数は、およそ 14, 8, 4 [mm^{-1}] であった。計測時のステージの移動速度 v は、1, 5, 10, 20 [mm/s] と設定し、走査前に目視で薄板はりがたわむことなく三角波形状の底に接している状態から、それぞれの凹凸面を5回ずつ計測した。はりの固定角度 α は 5 [deg] とした。



(a) Appearance of test sample

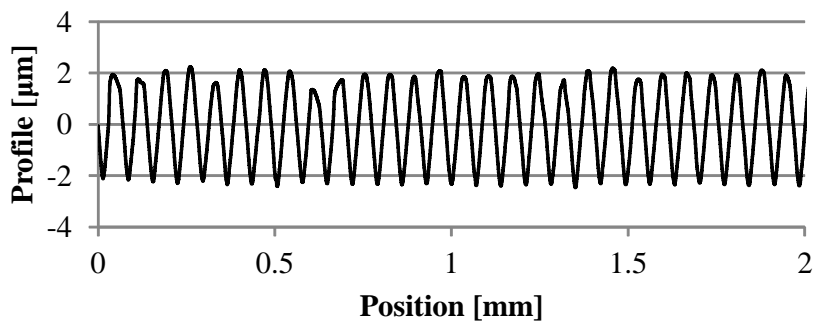
(b) Surface profile of Ra 1.6 [μm]

Fig.2.3 Standard sample of surface roughness

2.3 検出原理

2.3.1 薄板はりのたわみにより生じる電気的出力値

圧電体のセンサとしての電気的な出力値は、第1章で示したように式(1.9)で表される。本章において、**Fig.1.7**で示した1, 2, 3の方向は、それぞれ**Fig.2.1**における x, y, z に対応し、応力の1階時間微分値に比例した電流 I を発生する。ここで、薄板はりの幅方向(y 方向)と面に垂直な方向(z 方向)の応力は、境界条件から0であるため、はりの伸縮方向(x 方向)の応力のみを用いて、次式のように書き直せる。この導出の詳細に

Table 2.1 Characteristics of PVDF film

| | |
|------------------------|------------------------|
| d_{31} [pC/N] | 23 |
| E_f [GPa] | 2 |
| A [mm ²] | 351(Measurement value) |

ついては、付録 A に示す。

$$I = Ad_{31} \frac{d\sigma_1}{dt} \quad (2.1)$$

次にはりの先端が、面に垂直方向 (z 方向) に δ だけたわんだ状態を考える。このとき、はりの長手方向の力は無視し、はりの曲げひずみにより PVDF フィルムに応力が印加されるとすると、はり先端より x_s の位置にある PVDF フィルムの応力は、次式で表される。

$$\sigma_1 = E_f \frac{3h_s}{2l^3} x_s \delta \quad (2.2)$$

ここで、 E_f : PVDF フィルムのヤング率、 l : 薄板はりの全長、 h_s : 薄板はりのセンサ部厚みを示す。したがって、式 (2.1) と (2.2) より、薄板はりが $d\delta/dt$ の速さでたわんだときに得られる出力電圧 V は、プリアンプの利得値 R_V と掛け合わせて式 (2.3) になる。

$$V = \frac{3Ad_{31}E_f h_s x_s}{2l^3} \frac{d\delta}{dt} \times R_V \quad (2.3)$$

今回用いた PVDF フィルムの物性値を **Table 2.1** に示す^[53]。また、本実験では、プローブを含めた先端からの長さとして、 $l = 120$ [mm]、 $x_s = 80$ [mm]、接着弾性層 (厚さ 2.1 [mm]) を含めたセンサ部厚み $h_s = 2.6$ [mm] とした。

以降、まず一般的な面上を走査するときのセンサ出力について定式化を行い、その後に異常面として特に、段差エッジの登り降り時に着目した定式化を行う。

2.3.2 一般的な凹凸面上を走査する際の実出力関係

Fig.2.4 に、薄板型触覚センサが微小段差上を走査する際の模式図を示

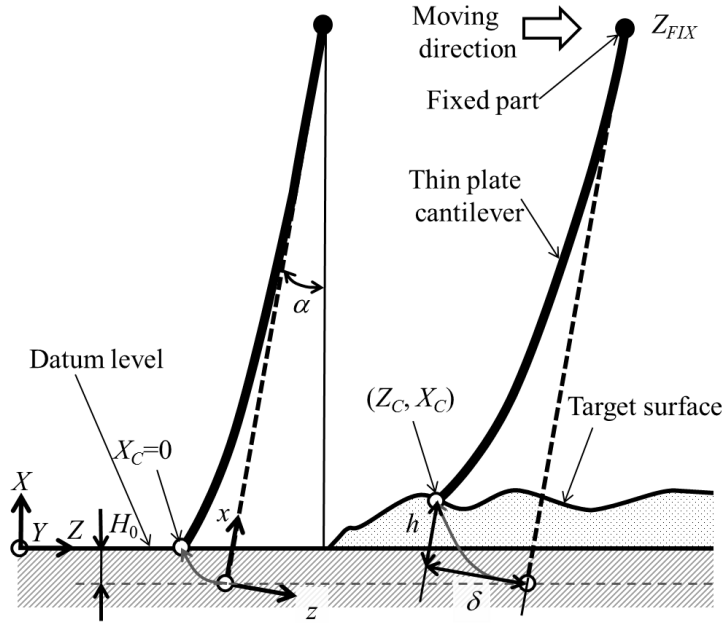


Fig.2.4 Model of thin plate cantilever deformation

す。薄板はりは、測定面の鉛直方向に対して角度 α 傾斜させた状態で対象表面をなぞることとする。本章の微小段差の計測実験では、はりがたわむことなく基準面に接している状態としたが、ここでは一般的な場合を考え、はりがたわんでいない状態では、はり先端が鉛直方向に H_0 だけ下にある状態を考える。

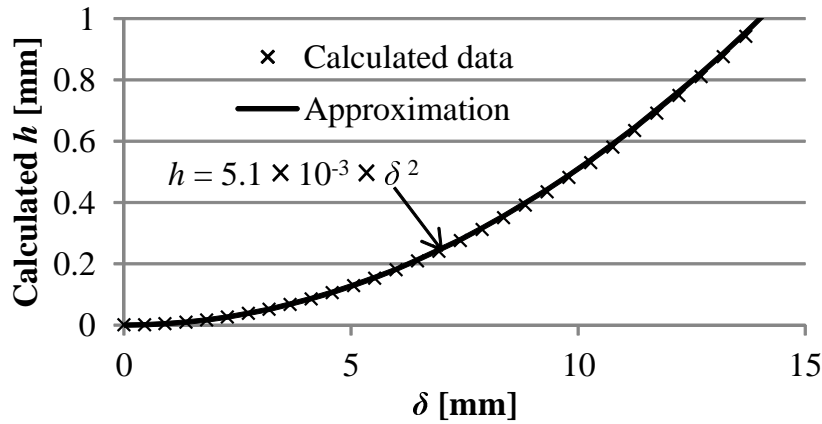
まず、はり設置姿勢での z - x 座標系について考え、薄板はりの先端たわみ δ により伴い生じる、はり長手方向 (x 方向) の変位 h の関係を求める。この関係は、はりの大変形理論^[69]を用いて算出できる。このとき、 δ および h は、数値パラメータ u を介して式 (2.4)、(2.5) の関係がある。

$$\frac{\delta}{l} = 1 - 2 \frac{E_E(u) - E_E(u, \phi)}{F_E(u) - F_E(u, \phi)} \quad (2.4)$$

$$\frac{h}{l} = 1 - \sqrt{2} \frac{\sqrt{2u^2 - 1}}{F_E(u) - F_E(u, \phi)} \quad (2.5)$$

ここで、 $F_E(u)$: 第1種完全楕円積分, $F_E(u, \phi)$: 第1種楕円積分, $E_E(u)$: 第2種完全楕円積分, $E_E(u, \phi)$: 第2種楕円積分である。また、 ϕ は式 (2.6) を満たす値である。

$$\phi = \arcsin\left(\frac{\sqrt{2}}{2u}\right) \quad (2.6)$$

Fig.2.5 Relationship between δ and h

すなわち、今回使用した薄板はりの突出し長さ l を用いて、式 (2.4) ~ (2.6) にパラメータ u の値を逐次入力していくことで、数値解析的に z と h の関係を求められ、その結果を **Fig.2.5** に示す。これらの関係は、図中の近似曲線で示すように、2次曲線状の関係であり、係数 a を用いて次式で近似して表すことが可能である。

$$h = a\delta^2 \quad (2.7)$$

次に、測定面に平行な方向を Z 方向、それに直交する方向を X 方向とし、 Z - X 座標上ではりの走査状態を考える。薄板型触覚センサの固定部の初期位置を $Z = 0$ とする。走査中に触覚センサの固定部の位置 Z_{FIX} は、測定面に平行な Z 方向へ速さ v で移動する場合、次式のように表せる。

$$Z_{\text{FIX}} = vt \quad (2.8)$$

走査前に、たわんでいないはりの先端の鉛直方向高さは、基準面より H_0 だけ下の位置にある状態を考える。はりの先端プローブは、球面となっており、その球の中心が移動する軌跡 (Z_C, X_C) とする。このとき、プローブが基準面に接している状態を $X_C = 0$ とすると、幾何学的な関係から、はりは次の2式を満たしながら変形挙動を示すこととなる。

$$Z_C = Z_{\text{FIX}} - l \sin \alpha - \delta \cos \alpha + h \sin \alpha \quad (2.9)$$

$$X_C + H_0 = \delta \sin \alpha + h \cos \alpha \quad (2.10)$$

薄板はりの長さ l に比べて先端たわみ δ が小さい場合は、**Fig.2.5** の関係から分かるように、長手方向の変位 h は、 δ と比べて非常に小さな値をと

る。しかし、式 (2.10) より、はりの固定角度 α が 0 [deg] に近い小さな角度であれば、相対的に式 (2.10) 右辺の第 2 項の占める割合が大きくなることが分かる。最終的に、式 (2.3), (2.7) ~ (2.10) を用いることで、段差形状と圧電出力値が関係づけられる。まず、式 (2.7), (2.10) より、式 (2.11) のように、 δ は X_C を変数とした値として解くことができる。

$$\delta = \frac{-\sin \alpha + \sqrt{\sin^2 \alpha + 4a \cos \alpha (X_C + H_0)}}{2a \cos \alpha} \quad (2.11)$$

また、式 (2.7) ~ (2.9) と式 (2.11) により、時間 t は、式 (2.12) のように、 X_C および Z_C を変数とした値として解くことができる。

$$t = \frac{1}{v} \left(Z_C + l \sin \alpha - \frac{\tan \alpha}{2a \cos \alpha} - (X_C + H_0) \tan \alpha + \frac{\sqrt{\sin^2 \alpha + 4a \cos \alpha (X_C + H_0)}}{2a \cos^2 \alpha} \right) \quad (2.12)$$

したがって、式 (2.11), (2.12) をそれぞれ X_C で微分し、前式を後式で割ることにより、薄板はりのたわみの時間微分値は、次式のようにプローブ先端が乗り越える段差軌跡の勾配 dX_C/dZ_C とそのときの高さ X_C を用いて関係づけられる。

$$\begin{aligned} \frac{d\delta}{dt} &= \frac{d\delta}{dX_C} \frac{dX_C}{dt} \\ &= v \frac{\cos \alpha \frac{dX_C}{dZ_C}}{\sqrt{\sin^2 \alpha + 4a \cos \alpha (X_C + H_0)} \left(\cos \alpha - \sin \alpha \frac{dX_C}{dZ_C} \right) + \frac{dX_C}{dZ_C}} \end{aligned} \quad (2.13)$$

さらに、この式 (2.13) を式 (2.3) に代入することにより、センサの圧電出力値が得られる。したがって、センサの出力値は走査速度と比例関係にあることが分かる。すなわち、対象面をすばやく走査し、凹凸面の評価をしようとすることを想定した場合には、この速度依存性は、感度の面から有利な点と考えられる。

2.3.3 段差エッジを登る際の出力値

次に、はり先端が段差エッジを乗り越える際の、最大出力値およびその持続時間について検討するため、**Fig.2.6** の模式図に示すように、先端半径

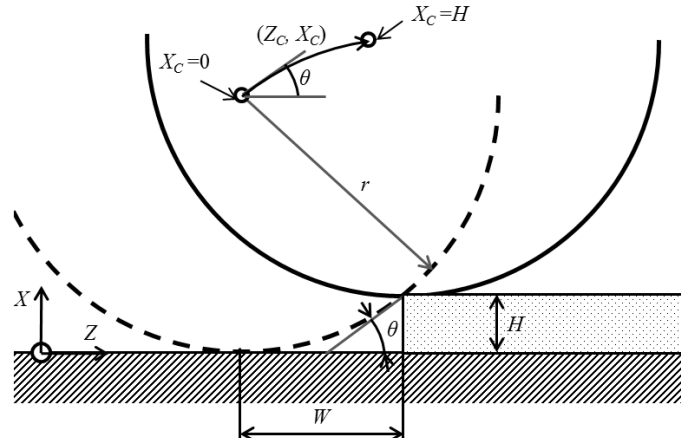


Fig.2.6 Locus of probe tip

が r のプローブ先端が高さ H の段差に接触した状態（破線）から、完全に乗り上げた状態（実線）に至る過程を考える．2.3.2 で設定したように、走査面に対して鉛直上方 r の位置にある、先端球中心の X 座標を $X_C = 0$ としている．プローブ先端は、段差に接触し始めてから（このとき $Z_C = Z_1$ とする）、図中の $\tan \theta$ の勾配で登り始め、段差を乗り越えるにつれてこの勾配は 0 に近づく．段差乗り越え初期の勾配は次式で得られる．

$$\frac{dX_C}{dZ_C} = \tan \theta = \frac{\sqrt{2rH - H^2}}{r - H} \quad (2.14)$$

この勾配値と $X_C = 0$ を式 (2.13) と (2.3) に代入することで、段差を乗り越え始めるときのセンサ出力値が求められ、この値が乗り越え時のピーク値となる．また、接触の開始点から完全に乗り越えるまでの時間長さ Δt は、式 (2.12) において、 (Z_C, X_C) が $(Z_1, 0)$ から $(Z_1 + W_d, H)$ に至るまでの時間差を求めればよく、

$$\Delta t = \frac{1}{v} \left(W_d - H \tan \alpha + \frac{1}{2a \cos^2 \alpha} \left(\sqrt{\sin^2 \alpha + 4a \cos \alpha (H + H_0)} - \sqrt{\sin^2 \alpha + 4a \cos \alpha H_0} \right) \right) \quad (2.15)$$

と求められる．ここで、 W_d は、

$$W_d = \sqrt{2rH - H^2} \quad (2.16)$$

である．ここで例えば、本研究で測定対象とした $H = 40$ [μm] のとき、 $\theta = 23.9$ [deg]、 $W_d = 189$ [μm] となる．段差エッジが台形形状である場合

を考えると、23.9 [deg] 以上の急な段差についてはすべて同じセンサ出力となる。

段差エッジの傾斜も含めたプロファイルをより詳細に評価するためには、プローブ先端の半径 r を小さくする必要がある。しかし同時に、高速で走査をする場合には、プローブ先端の強度、耐久性や引っ掛かりによる破損などが懸念されるため、従来一般的な表面粗さ計と同等の低速な走査速度の領域に留めなければならないと考える。一方、本研究は簡便に測定できる計測システムを目指しており、この場合の測定ニーズとして第一に、異常部位をスクリーニング検知し、その段差の大きさや大まかなプロファイルを測定することが挙げられる。そこで本論文では、単純化した計測条件として、矩形形状の段差を評価対象とした。

2.3.4 段差エッジを下る際の出力値

前節とは逆に、薄板型触覚センサが段差エッジから下る際の出力値について考える。はりはたわみながら高さ H の段差を登った状態の後に、はりの固定角 α より急な傾斜の段差に差し掛かった場合、プローブ先端は段差形状から解放され、はりのバネ復元力により自由振動状態となる。その後、走査上の基準面に衝突する。はりの固有振動数 f_n は、はり全体の質量 m_b を用いて、

$$f_n = \frac{\lambda_n^2}{2\pi} \sqrt{\frac{E_b I_b}{m_b l^3}} \quad (2.17)$$

と表される^[70]。 E_b : 薄板はりのヤング率, I_b : 薄板はりの y 軸まわりの断面 2 次モーメントである。 λ_n は、はりの固定条件およびモードの次数により異なる値をとる。段差の拘束から解放され、はり先端が振り出される状態は、「一端固定-他端自由」条件の 1 次モードとして考えることができるため $\lambda_1 = 1.875$ であり、突出し長さ l と一般的なステンレス材の物性値を式 (2.17) に代入すると、28.7 [Hz] を得る。実際の試作したセンサについて、はり先端が接触していない状態で固有振動数の計測を行うと、32.5 [Hz] であった。高さ H の段差を登ったときに生じるはりたわみ δ_{\max} とこの固有振動数 f_1 を用いて、次式の振動状態となる。

$$\delta = \delta_{\max} \cos(2\pi f_1 (t - t_1)) \quad (2.18)$$

ただし，プローブ先端が段差から解放される時刻を t_1 とした．はりが基準面に衝突するまでの間は，式 (2.18) を式 (2.3) に代入した出力が得られることになる．また，その波形の持続時間は， $H_0 = 0$ の場合，振動の $1/4$ 周期の $1/4f_1$ となる．

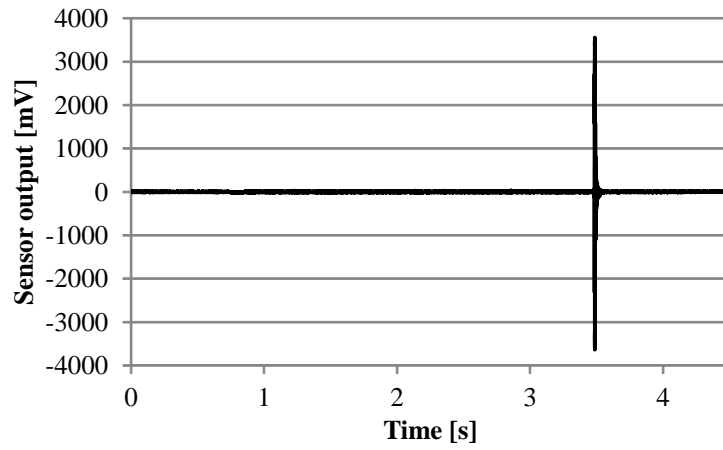
はりが再び測定面に衝突する際の挙動は，はり先端と対象面の硬さやそれらの接触状態が関係する複雑な現象となるため，衝突後の信号値の大きさを解析的に求めることは困難であるが，バネに蓄積されるエネルギーは段差高さによることから，段差高さの大きさに応じた出力が得られることが予想される．また，衝突後の過渡的な状態として，振動状態をとることになるが，「一端固定-他端単純支持」の状態に近いと考えられ，1次モードの固有振動数は，式 (2.17) に $\lambda_1 = 3.927$ を代入して 126 [Hz] を得る．実際，試作したセンサについて，段差衝突時に現れる波形を周波数解析すると， 135 [Hz] であり，この固定条件にて表される振動状態であることが推察された．

2.4 結果

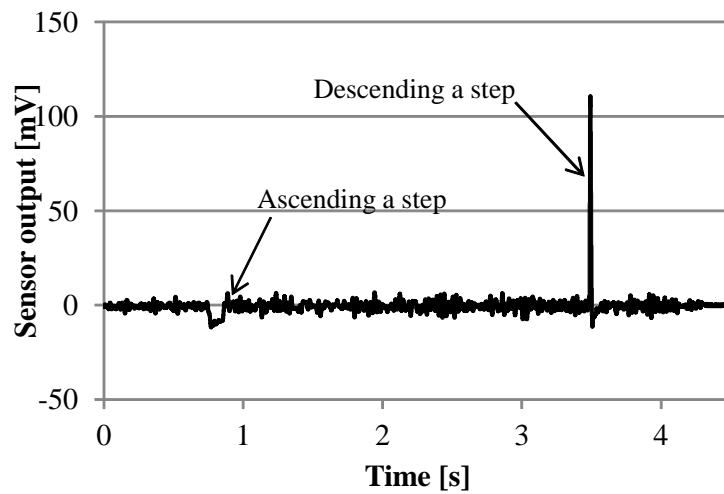
2.4.1 微小段差の計測

Fig.2.7 (a) に，微小段差上を走査したときに薄板型触覚センサより得られる信号データの例を示す ($H = 40$ [μm], $v = 5$ [mm/s], $\alpha = 5$ [deg]). はり先端が段差を下りた際の基準面間の衝突に起因する信号のみが顕著に大きく現れた．そこで，「固定-自由」の固有振動数と「固定-単純支持」の固有振動数の中間である， 50 [Hz] のローパスフィルタを処理することで，衝突等の周波数帯域の高い信号値を除去した (**Fig.2.7 (b)**) ．これにより，段差の登りエッジ部および下りエッジ部に特徴的な波形を抽出することができる．本節では以降，ローパスフィルタ処理した波形を用いた．

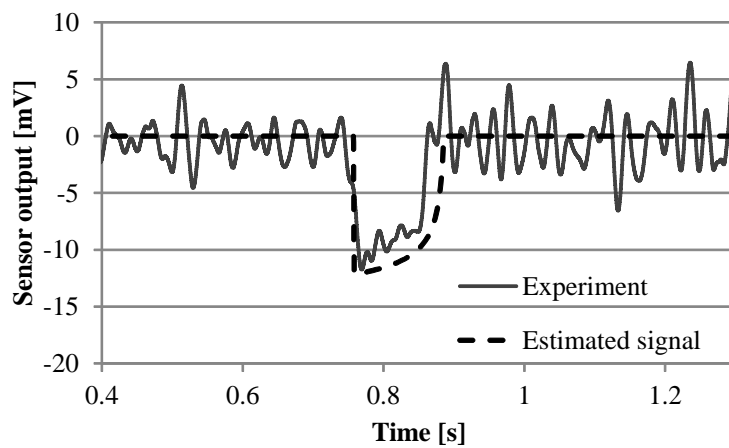
Fig.2.7 (c) に，微小段差のエッジを登るときのセンサ出力波形について **Fig.2.7 (b)** を拡大し示す．ここで，同条件で予測されるセンサ出力値について，式 (2.13) および (2.3) を用いて，プローブ先端形状を考慮して求めた結果を破線で併せて示す．実験値は細かな振動成分が重畳しているものの，予測値と同等レベルの信号が発生していることが分かる．



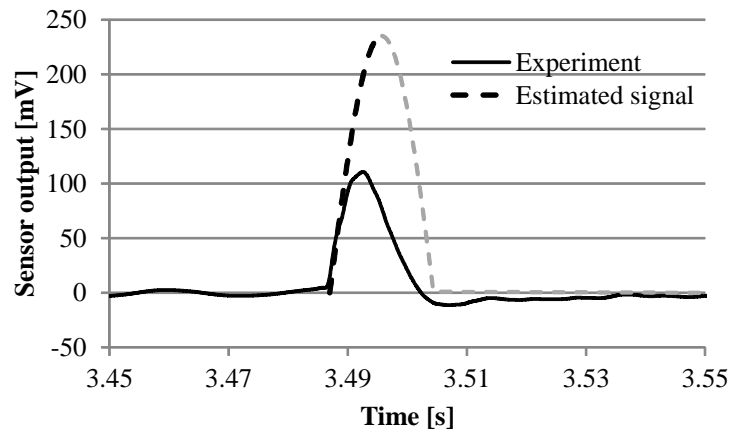
(a) Sensor output signal



(b) Filtered signal



(c) Ascending part



(d) Descending part

Fig.2.7 Experimental result of sensor output signal

Fig.2.7 (d) に、微小段差のエッジを下るときのセンサ出力波形について **Fig.2.7 (b)** を拡大し示す。式 (2.11) より、 $40 [\mu\text{m}]$ の段差を登りきった状態においては、薄板はりには先端たわみ δ_{max} が $448 [\mu\text{m}]$ 生じていることになる。これを、式 (2.18) および (2.3) に代入して予測した出力値を併せて示す。予測値は、衝突までの区間 ($\delta = 0$ となるまで) を太線で描いている。段差登り時と比較して、短時間に変化する挙動を示していることが、出力値の大きさの要因になっている。

Fig.2.7 (c) との対比として、走査速度のみ $v = 20 [\text{mm/s}]$ と変更したときに、段差エッジを登る際に得られるセンサ出力を **Fig.2.8** に示す。結果、走査速度が大きくなることにより、ノイズレベルと比較して大きなピーク波形が得られた。また、この段差を登る動作は速やかに行われるため、出力波形の持続時間は減少した。

Fig.2.9 に、段差高さ $H = 40 [\mu\text{m}]$ 、はりの角度 $\alpha = 5 [\text{deg}]$ の条件について、走査速度がセンサ出力のピーク値に及ぼす影響を示す。さらに、同条件について、式 (2.3), (2.13), (2.14) により各走査速度に対して予測した出力ピーク値も併せて示す。これらの式関係で得られたとおり、走査速度に応じて出力値の絶対値が大きくなる傾向が得られている。一方、波形の持続時間を **Fig.2.10** に示す。ただし波形は、**Fig.2.7 (c)** のように、ノイズを含んでいるため、波形の持続時間を定義することは難しい。このた

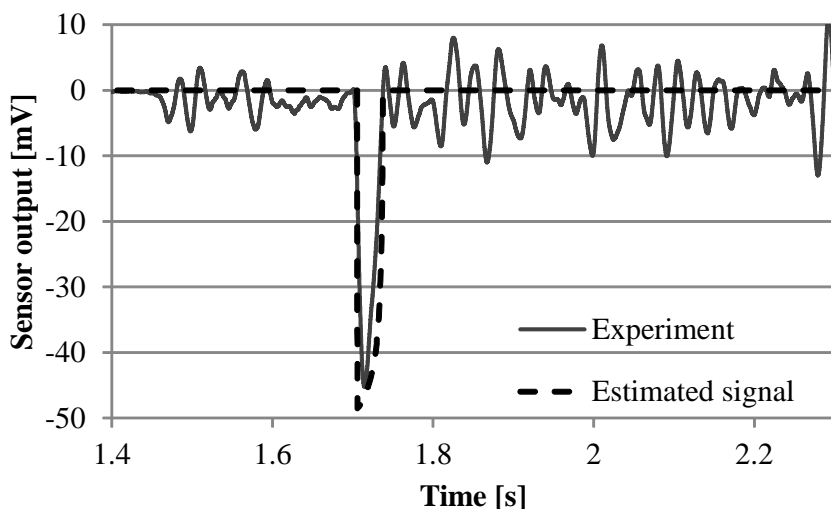


Fig.2.8 Ascending sensor output ($H = 40$ [μm], $\alpha = 5$ [deg], $v = 20$ [mm/s])

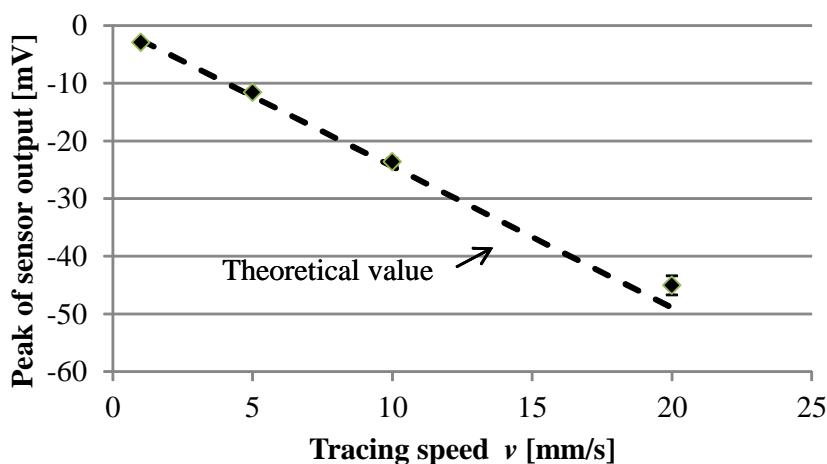


Fig.2.9 Relationship between tracing speed and peak value of ascending sensor output ($H = 40$ [μm], $\alpha = 5$ [deg]). Average value with error bar (standard deviation ($n = 5$))

め、出力がピークをとる時刻までの波形の積分値を、出力ピーク値で除した値を持続時間に対応させた。波形の持続時間は、式 (2.15), (2.16) より、走査速度と反比例の関係があり、実験により得られた波形持続時間も同じ傾向があった。ただし、実験で得られた持続時間は理論値より短かった。

Fig.2.11 に、段差エッジを下る挙動において、段差高さがセンサ出力のピーク値に及ぼす影響を示す。走査速度 $v = 5$ [mm/s], はりの角度 $\alpha = 5$ [deg] の条件について示している。また、同条件について、各段差高さに対する δ_{\max} を式 (2.11) により求め、式 (2.18) および (2.3) に代入して

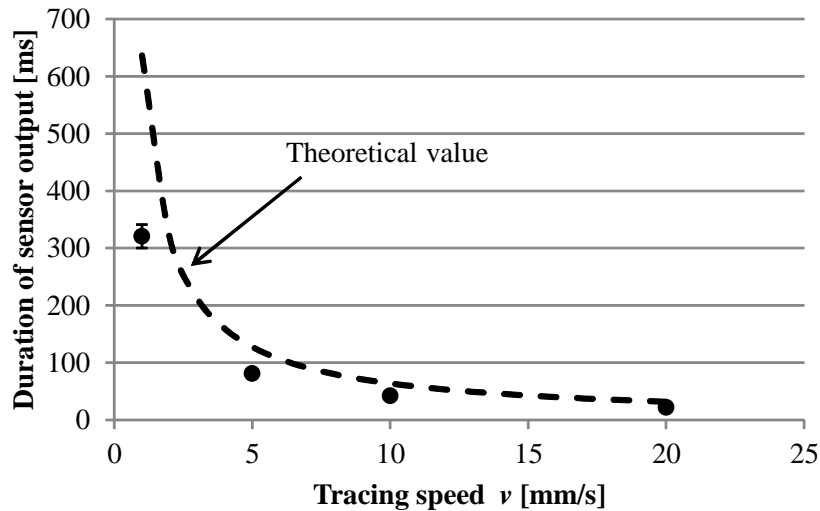


Fig.2.10 Relationship between tracing speed and duration of ascending sensor output ($H = 40$ [μm], $\alpha = 5$ [deg]). Average value with error bar (standard deviation ($n = 5$))

予測した出力ピーク値を併せて示す。結果，段差高さにほぼ比例した出力が得られることがわかった。一方，**Fig.2.12** に，走査速度とセンサ出力のピーク値との関係を示す。出力値の走査速度依存はみられなかったことから，この挙動は式 (2.18) で表されるように，段差により蓄えられたたわみ δ_{max} が復元するまでの挙動の 1/4 周期分の出力値が得られていると考えられる。ここで，段差を下るとき出力ピーク値は，理論値と比べて小さな値をとったが，**Fig.2.7 (a)** と **(d)** の比較から分かるとおり，絶対値が非常に大きく，周波数帯域の高い振動成分をフィルタ処理により除去を行っているため，誤差が生じやすくなっている。

式 (2.3) より，得られた信号値について時間積分処理を行えば，薄板はりのたわみ値に換算できる。さらに，式 (2.7)，(2.9)，(2.10) の関係を用いれば，センサが通過した対象面の高さに換算することができる。**Fig.2.13** に **Fig.2.7** の時刻歴波形を段差高さに換算した波形を示す。積分処理により DC 成分のドリフトが生じることになるが，走査の前後の傾きをもとに，直線的にドリフト成分を除去する処理を行っている。元のセンサ出力の時刻歴波形は，細かな振動を含むデータであったが，積分処理の平滑化の効果により，測定対象のフィラゲージの矩形形状を捉えられていることが分かる。しかし，算出した段差高さは，実際の高さと比べて低く見積もられていた。この要因として，算出に用いた突出し長さ l は簡易

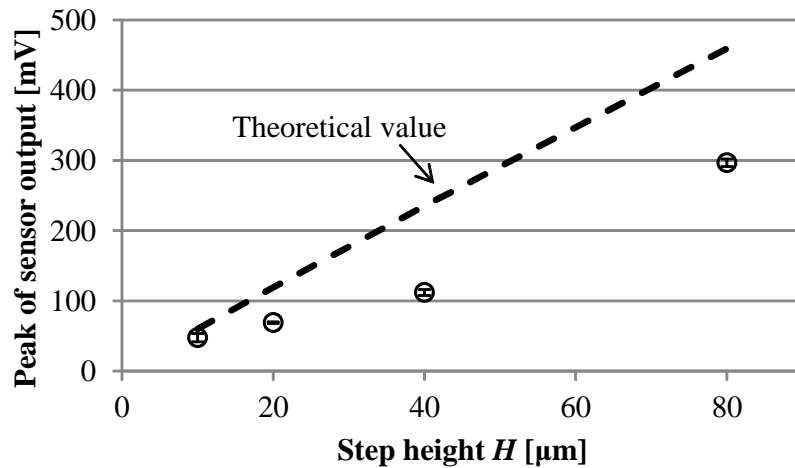


Fig.2.11 Relationship between step height and peak value of descending sensor output ($v = 5$ [mm/s], $\alpha = 5$ [deg]). Average value with error bar (standard deviation ($n = 5$))

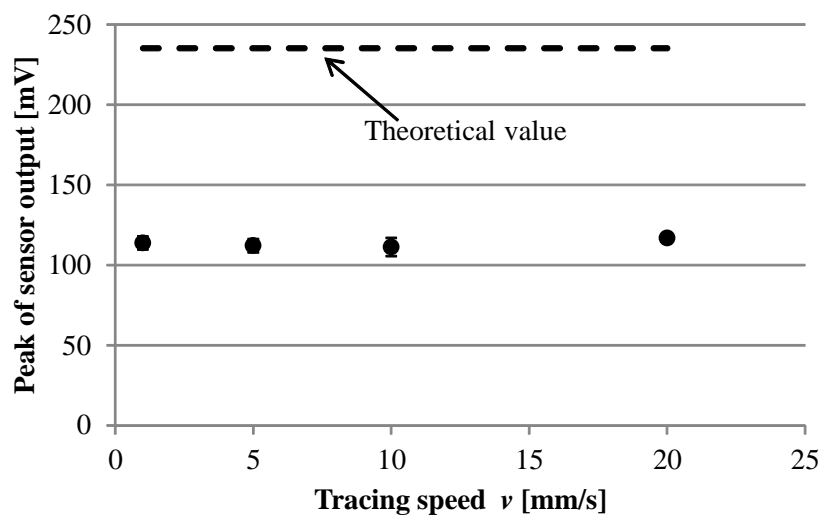


Fig.2.12 Relationship between velocity and peak value of descending sensor output ($H = 40$ [μm], $\alpha = 5$ [deg]). Average value with error bar (standard deviation ($n = 5$))

的に先端プローブを含めたものとしていること、先端プローブは薄板はりの片面に中立軸からオフセットした形で固定されていること、PVDFフィルムと薄板はり間を接着した弾性層にひずみのロスが生じていることなどが考えられる。

換算処理により計算される段差高さを **Fig.2.14** に示す。図には示していないが、標準偏差値 ($n=5$) は大きい条件でも 6% 程度と小さい。この結果、実際の段差高さ値との開きはあるものの、段差高さに比例した値を

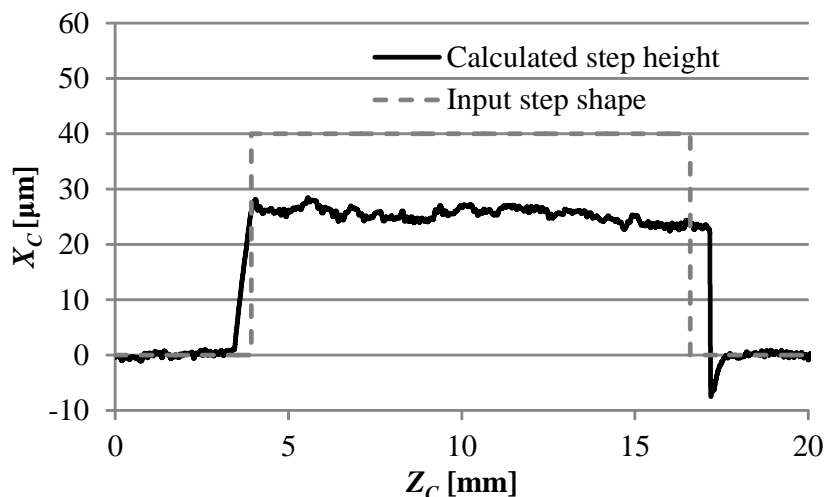
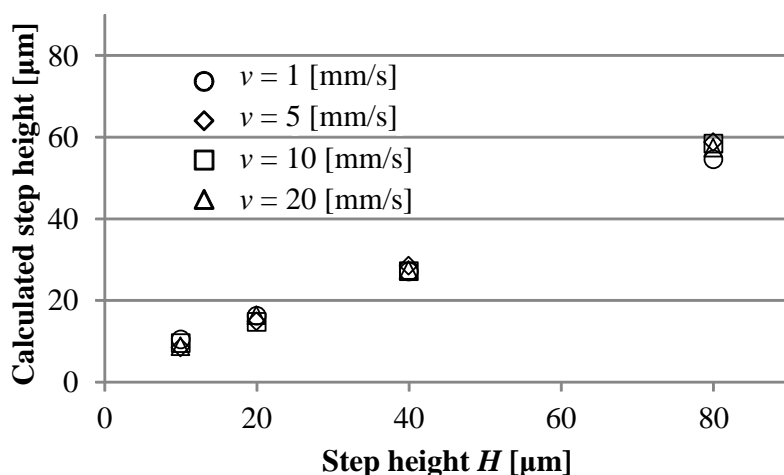


Fig.2.13 Calculated step height

Fig.2.14 Relationship between calculated output and height ($\alpha = 5$ [deg])

取得できることがわかった。また、走査速度に対する依存はなかった。一般的な表面粗さ計の走査速度は、1 [mm/s] 程度であることから、段差高さの計測を考えるうえでは、走査速度を大きく設定可能であることが期待できる。

次に、はりの固定角度が、センサ出力の積分値に及ぼす影響を **Fig.2.15** に示す。 $v = 5$ [mm/s] の条件において、センサが段差を登るときの積分値を示している。この積分値が大きいほど、段差の大きさを求める際には S/N 比を大きくとることができ、センサとして有利になる。結果、10 [deg] の条件の出力積分値は、5 [deg] のときと比べて、およそ半分となっている。

ここで、 $H = 40$ [μm], $v = 5$ [mm/s] の条件において、式 (2.3), (2.13),

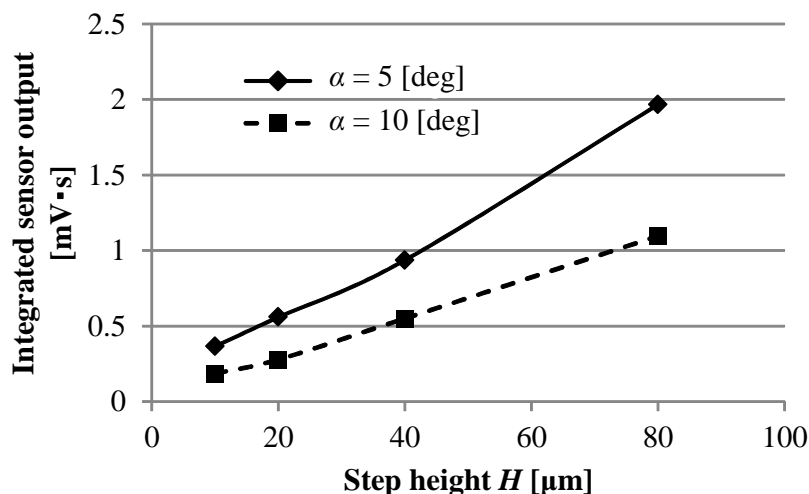


Fig.2.15 Integrated sensor output of different fixing angles ($v = 5$ [mm/s])

(2.14) により求められる段差を登る際のセンサ出力のピーク値と，式 (2.15)，(2.16) より求められる出力の持続時間について算出したものを **Fig.2.16** に示す．段差を登る際には，ほぼ矩形状の出力電圧波形となるため，単純にはこれらの値を掛け合わせた値が，出力積分値に近い値となる．この図より，センサの出力最大値とその持続時間は，固定角度の増大によって減少しており，特に，持続時間は 10 [deg] 付近までに急峻に減少していることが分かる．また H_0 を，用いた段差高さと同じ ($= 40$ [μm]) にした場合に予測される出力結果も図中に併せて示した．固定角度が 5 [deg] 以下の領域においては， H_0 によって，波形の持続時間が顕著に短くなることが分かる．今回の実験では，はり先端プローブが基準平面に接する状態を，マイクロステージの操作により再現し実験を行ったが，この高さ方向については，数 μm オーダでのコントロールは行っていなかった．しかし，はりの固定角度をつけることが， H_0 のばらつきを緩和することに効果があったと考えられる．

上記のことから，センサ感度を向上させるためには，固定角度を 0 [deg] に近づけたほうがよいことになる．ただし，固定角度が 0 [deg] に近づくにつれ，**Fig.2.16** より，固定角度 α や H_0 のわずかな違いが出力値に大きく影響する．このため，走査中の基準面に対する走査方向の平行度の変化や，固定部に回転を伴う変形が生じないように注意する必要がある．また，固定角度が走査面に対して鉛直に極めて近い場合，測定面に押し当てられていないので，摩擦力によって容易に移動方向への変形が生じる．そ

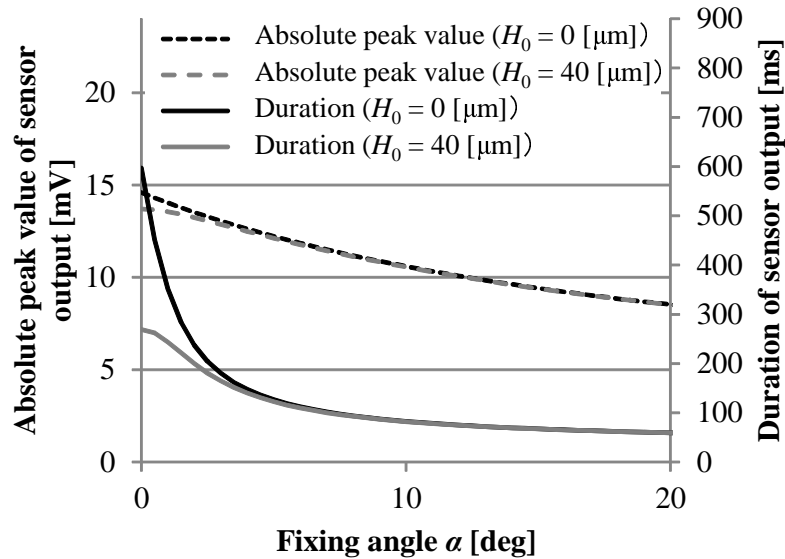


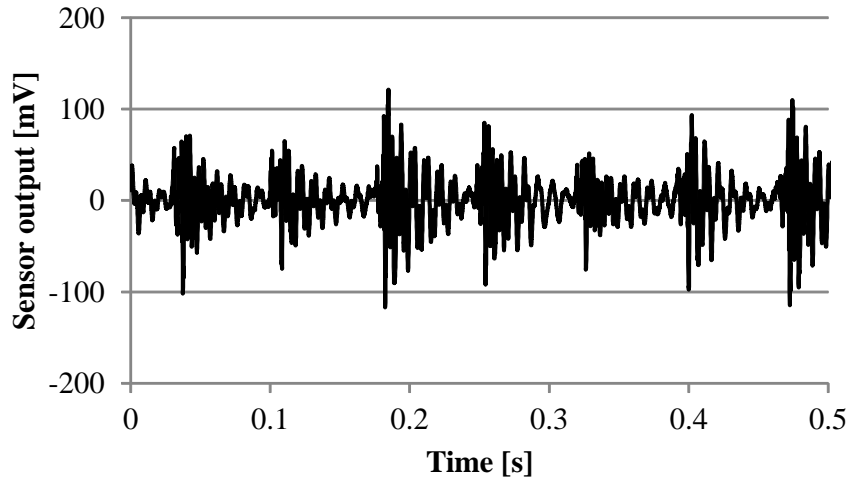
Fig.2.16 Relationship between fixing angle and ascending sensor output ($H = 40$ [μm], $v = 5$ [mm/s])

の結果，スティックスリップ状態が生じやすくなり，走査時に自励的な振動を引き起こす可能性があるため，はりの挙動を踏まえながら設定する必要がある。

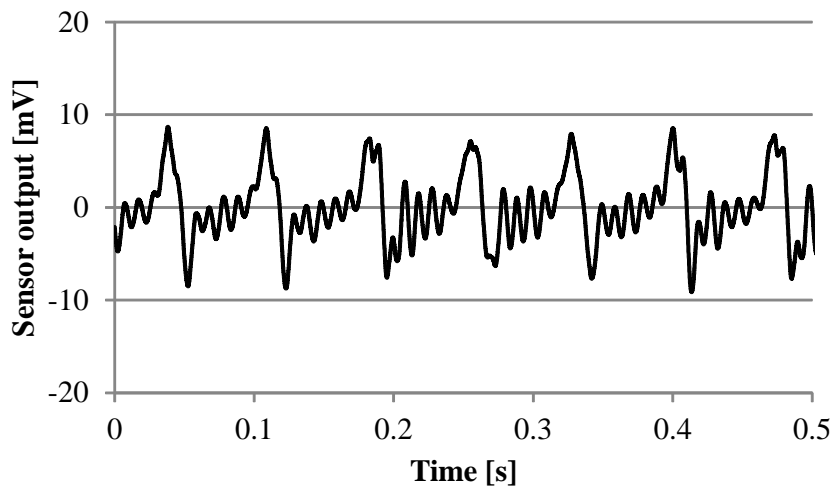
2.4.2 表面粗さの計測

表面粗さ Ra : 1.6 [μm] の面上を走査したとき ($v = 1$ [mm/s], $\alpha = 5$ [deg]) に得られる出力波形を **Fig.2.17 (a)** に示す。前節と同様に， 50 [Hz] のローパスフィルタを処理することで，衝突等の周波数帯域の高い信号値を除去したものを **Fig.2.17 (b)** に示す。結果，対象表面の微細な凹凸をはり先端が登り下りしている挙動の信号が捉えられていることが分かる。

しかし，走査速度が大きい場合には，波形にローパスフィルタを処理することは適当ではなくなってくる。例えば，今回用いたサンプルの Ra : 1.6 [μm] の表面には，**Fig.2.3 (b)** に示すような 1 [mm] 長あたり約 14 個の山形状がある。走査速度 $v = 5$ [mm/s] で走査することを考えると，センサ出力としては，約 70 [Hz] の繰り返しの波形が得られることになるが，低次のローパスフィルタを処理すると，山形状の繰り返しに起因する信号までも除去してしまうためである。したがって，用いるはりの固有振動数はなるべく高く設定しておくことが，速い走査での信号検出のために必要



(a) Sensor output signal



(b) Filtered signal

Fig.2.17 Sensor output tracing Ra 1.6 [μm] surface

となる。

次に、**Fig.2.17 (a)** で得られた時刻歴波形を信号走査方向および高さ方向の変位に換算した結果を **Fig.2.18** に示す。これは、前節同様、波形に対して時間積分処理および出力値から変位への換算を行い、その後、波長 20 [μm] 以下の信号はフィルタにより除去したものである。このフィルタ処理は、走査速度 $v = 1$ [mm/s] の条件下では、50 [Hz] のローパスフィルタ処理に相当する。この波長を大きくすれば、衝撃的な波形を軽減し滑ら

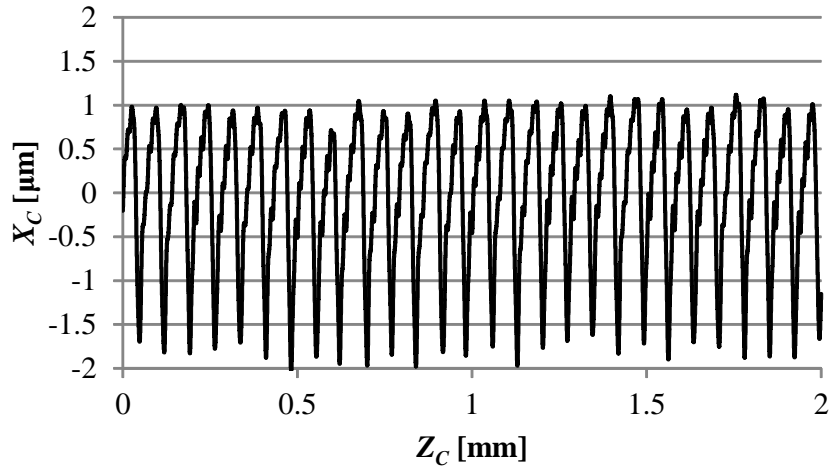


Fig.2.18 Calculated surface profile

かな波形が得られることにはなるが、山形状を平均化することになってしまうため、すべての走査速度の条件において、カットオフ波長を $20 [\mu\text{m}]$ とした。

この凹凸の山を登る挙動においては、はり先端が対象形状に沿いながらたわむ際、**Fig.2.17 (b)** に示すように $60 [\text{ms}]$ 程度要しているのに対して、下りる挙動では、 $1/4f_1 = 9 [\text{ms}]$ 程度と短い。**Fig.2.18** においては、走査方向の位置 Z_C を、式 (2.9) により代表させており、上述のように凹凸の山を下りる挙動は、山を登る挙動と比べて時間スケールが短いため、実際の三角波形状のようにはならず、のこぎり波状に近い形として検出された。

同様の処理を、異なる表面粗さ、および各走査速度条件での測定データについて行い、測定長 $7 [\text{mm}]$ の区間について、算術平均粗さの算出を行った。結果を **Fig.2.19** に示す。走査速度が、 1 および $5 [\text{mm/s}]$ の条件においては、実際の表面粗さよりも絶対値としては小さいものの、表面粗さの大きさに応じ線形に大きくなる傾向が得られた。特に、走査速度 $1 [\text{mm/s}]$ の場合は、ばらつきが小さく実際の表面粗さと良好な対応関係であった。一方、走査速度が $10, 20 [\text{mm/s}]$ と高速になると、ばらつきは非常に大きく、実際の粗度への対応が悪い。本結果では、カットオフ波長を $20 [\mu\text{m}]$ ととっているため、走査速度が $10, 20 [\text{mm/s}]$ のときのフィルタ処理は、時刻歴波形においてそれぞれ $500, 1,000 [\text{Hz}]$ のローパスフィルタ処理を行っていることに相当する。このため前節で示したように、段差を下りる際の衝突現象によって生じる振動成分が相対的に大きくなり、表

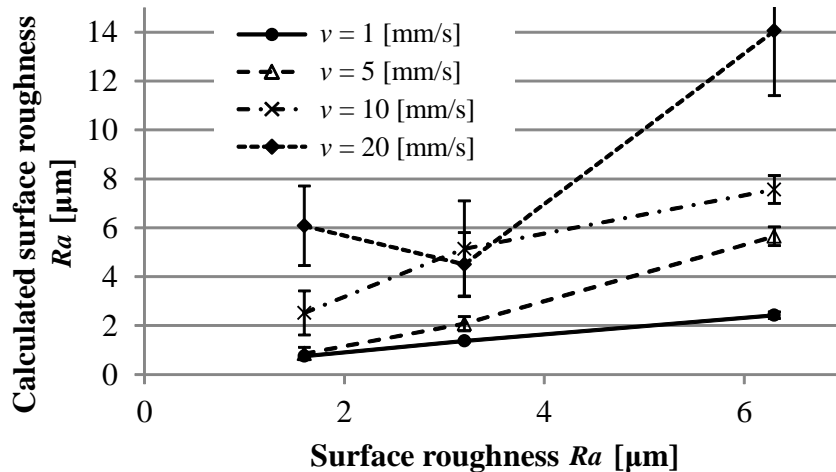


Fig.2.19 Relationship between sample and calculated roughness. Average value with error bar (standard deviation ($n = 5$))

面の凹凸を形状として認識するのが困難になってしまっている。

2.5 考察

2.5.1 箔ひずみゲージによる測定との比較

本節では、検出素子として箔ひずみゲージを用いた場合と比較する。**Fig.2.20** に、 $H = 40$ [μm] の微小段差上を走査したときに得られるひずみ値をもとに段差高さを計測した結果を示す ($v = 5$ [mm/s], $\alpha = 5$ [deg]). PVDF フィルムを用いたときの結果と同様、50 [Hz] のローパスフィルタを処理した。箔ひずみゲージを用いた測定においても、段差形状は有効に捉えられている。しかし、ノイズ成分は、PVDF フィルムを用いたときと比べると大きいことが分かる。また、 $R_a: 1.6$ [μm] の面上を走査したとき ($v = 1$ [mm/s], $\alpha = 5$ [deg]) にひずみ値をもとに形状を算出した結果を**Fig.2.21** に示す。PVDF フィルムを用いたときの結果**Fig.2.18** と比べて、微細な凹凸形状が捉えられていないことが分かる。この表面粗さを走査するとき得られるひずみ値は、式(2.2)により算出すると、高々 1 [$\mu\epsilon$] であることが予想され、一般的な箔ひずみゲージではノイズと区別して信号を抽出することが難しい。

凹凸の検出感度を向上させるためには、感度を示すゲージ率が、一般用

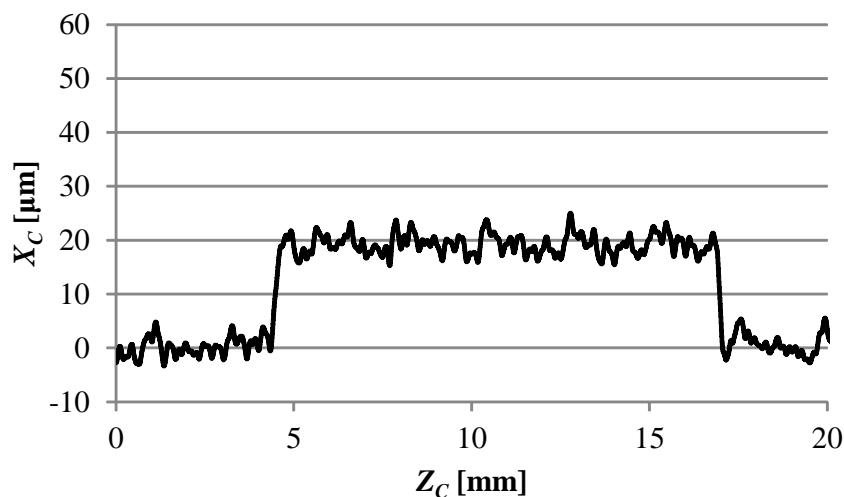
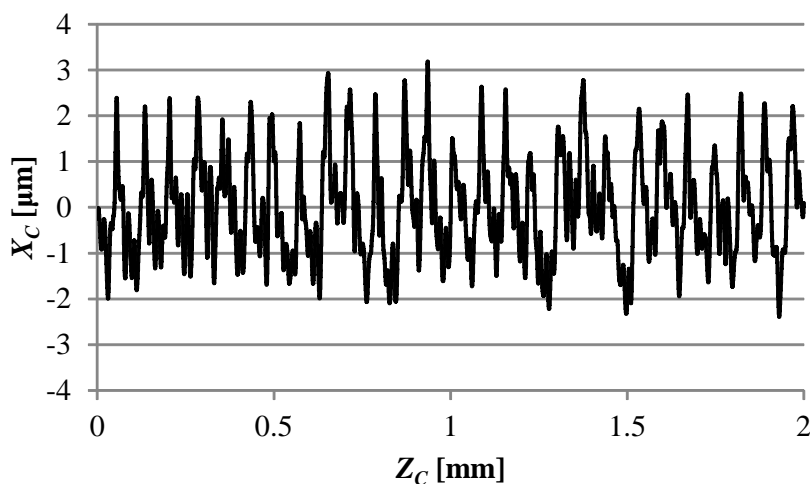


Fig.2.20 Calculated step height by strain gauge

Fig.2.21 Strain gauge output tracing *Ra* 1.6 surface

箔ゲージよりも 30~100 倍程度大きい半導体ひずみゲージ^[71]を用いる方法も考えられる。平滑平面内での微小な凹凸面のみを測定対象とするのであれば、半導体ゲージの適用は有効である。一方で、大きなうねりや段差のある形状の中に含まれる微小凹凸を評価することを想定した場合には、センサ構成として大変形に追従する柔軟性と堅牢性を兼ね備えることが不可欠となる。素子のひずみ限界として、PVDF：約 20%^[61]，一般用箔ゲージ：約 5% であるのに対し，半導体ひずみゲージは最大約 0.3% と許容できるひずみが小さく（カタログ値），センサの設計条件に大きな制約をもたらす。

2.5.2 圧電ポリマーを用いた薄板型触覚センサの特性について

圧電材料を受感部として用いる利点は、第一に形状変化に非常に敏感であることである。2.4.1の中で、**Fig.2.7 (c)**と**Fig.2.8**の結果を比較したとおり、走査速度を大きくして段差を検出した場合（すなわち形状の時間変化を積極的に大きくした場合）、式(2.13)に示したように走査速度に比例して検出信号が大きくなった。このときの信号の大きさとノイズレベルを比較することで、走査速度が大きいときにS/N比を高くとれることが分かる。このように、ひずみゲージに代表される変位応答型センサとは異なり、圧電素子の出力は速度依存性を有することから、素早く異常面の有無をスクリーニングするには有利な特性であると言える。また、感度が良いことから、2.4.2の中で示したように、微細な形状検出が非常に簡便なセンサ構造により行えた。さらに、実際の形状への換算時には、時間積分の処理を行っているが、加算累積するうちにノイズ成分は平均化され、見かけ上ノイズを除去する効果が生じた。

特に今回試作した触覚センサは、圧電ポリマーを用いているため、その柔軟性を活かした構造とすることが可能である。今回試作の触覚センサの状態では、反力は大きく測定対象面を傷つけてしまうこともあったため、現状では十分に柔軟な構成を実現できているとはいえない。はりが δ だけたわんだときに生じる z 方向の力 W は、次式で与えられる。

$$W = \frac{3E_b I_b}{l^3} \delta \quad (2.19)$$

ここで、 E_b は、はりのヤング率、 I_b は、はりの断面2次モーメントである。さらに、測定面へ負荷される鉛直方向の力 N を、次式で仮定する。

$$N = \frac{W}{\sin \alpha} \quad (2.20)$$

本章で試作したセンサについて、固定角度 $\alpha=5$ [deg]の条件において、基準面からの高さ40 [μm]を乗り越える際に生じるたわみ量 δ は式(2.11)で求めることができ、これを式(2.19)、(2.20)へ代入することにより、 $N=371$ [mN]を得る。同条件において、鉛直方向の荷重を実測すると、

$N=219$ [mN] であった。一般的な表面粗さ計の測定力は、 $0.75\sim 4$ [mN] 程度である^[72] ことから考えると、試作センサでは、測定する際に対象表面へ加える力が大きい可能性がある。

しかし一方で、同一形状で剛性を低くするだけでは、薄板はりの固有振動数の低下を招くため、ある程度の走査速度を有した測定ができなくなる。今後、測定可能な周波数帯域は確保しつつ、より柔軟性を持たせられるよう、これらを両立した構造検討をしていく必要がある。

本研究では、三角波形状の粗さ面を対象として測定を行った。用いた触覚センサの挙動としては、凹凸の登り時と下り時の時間スケールが異なってくるため、ノコギリ波形状に近い形状として認識されることとなった。この点に対して、得られる信号値の処理方法について検討する必要もある。また、実際に想定される凹凸形状は三角波形状に限らないため、種々のパターンの粗さ面に対して検討を行う必要がある。段差から下りるときのはりの挙動は、対象表面を叩くような状態である。このときに得られるセンサ出力値は、材質に依存することも考えられる。逆に、表面硬さの情報を含んだ信号として、活用できる可能性もある。

2.5.3 センサの改良検討

Fig.2.19 で示したように、走査速度が大きくなるに従って、算出された表面粗さ値が大きくなる傾向にあった。この原因として、速度が大きい領域においては、はりの衝突時に発生する過渡的な減衰波形の周波数が、表面凹凸によるはり先端の強制的な加振周波数よりも低く、設定したローパスフィルタでは除去できないことにあった。この問題への対策方針として、衝突により発生するはりの固有振動数をより高く設定すること、また、はりの減衰を増大させ速やかに過渡的な波形が収まるようにすることの2点が挙げられる。

このうち減衰値の増大については、センサのはり構造を、積層鋼板に代表されるような拘束型制振構造^[73] とすることが有効と考えられる。拘束型制振材は、**Fig.2.22** に示すように、粘弾性層の両側を基材で接着積層した構造であり、粘弾性層がせん断変形することにより振動エネルギーを消費し、振動を短時間で収束させることができる。この方法では、粘弾性物

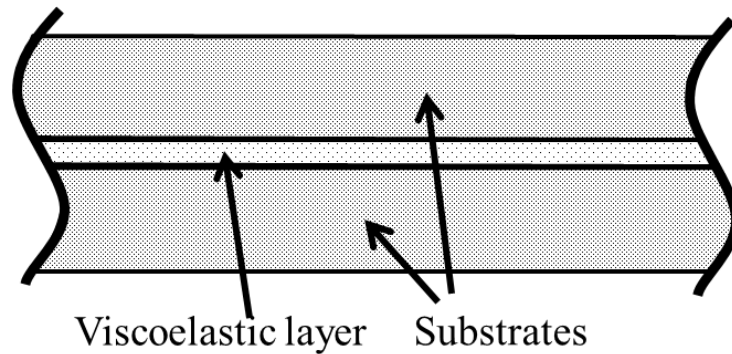


Fig.2.22 Restrained type vibration control structure

質の厚さが薄くなるほどせん断変形が大きくなり、制振効果が大きくなる
ことが期待できることから、薄板はりからなるセンサ構造を大型化するこ
となく、かつ特別な機構を付与せずとも減衰を大きくすることができる。

ここで改良方法の考察実験として、センサはり構造を、幅 12.7 [mm]、厚
み 0.15 [mm] のフィラーゲージを 2 枚、両面テープにより接着した構造
に変更し、突出し長さ l を 33 [mm] とした場合の結果を以下に示す。こ
のとき、はりが衝突する際に発生する過渡的な衝撃振動の周波数をおよそ
1,000 [Hz] となるよう設定している。また、実測した減衰波形より、減衰
比 ζ は 8.2 % であった。減衰を考慮した固有振動数は、不減衰固有振動数
に対して $\sqrt{1-\zeta^2}$ を乗じたものであり^[70]、減衰比 ζ が数 % オーダの値
の範囲では両者に大きな差はない。なお、用いた PVDF フィルムはこれ
までの実験と同一であり、このはり全体をほぼ覆うように接着している。
このセンサを用いて、走査速度を 20 [mm/s] とし、表面粗さ Ra : 1.6 [μm]
の面上を走査したとき ($\alpha = 5$ [deg]) に得られる出力波形を **Fig.2.23** に、
この波形について前節同様 20 [μm] のローパスフィルタを施し、変位プロ
ファイルに換算した結果を **Fig.2.24** に示す。また、各粗さサンプルを測定
した際に算出される粗さを **Fig.2.25** に示す。2.4.2 に示した結果では、は
りの衝突時に発生する過渡的な応答を除去できず、走査速度に依存しばら
つきの大きい結果であった。しかし上記の実験では、固有振動数を高く設
定し、また、減衰を付与した効果により、信号波形から形状に起因しない
信号を除去でき、良好な評価結果を示した。

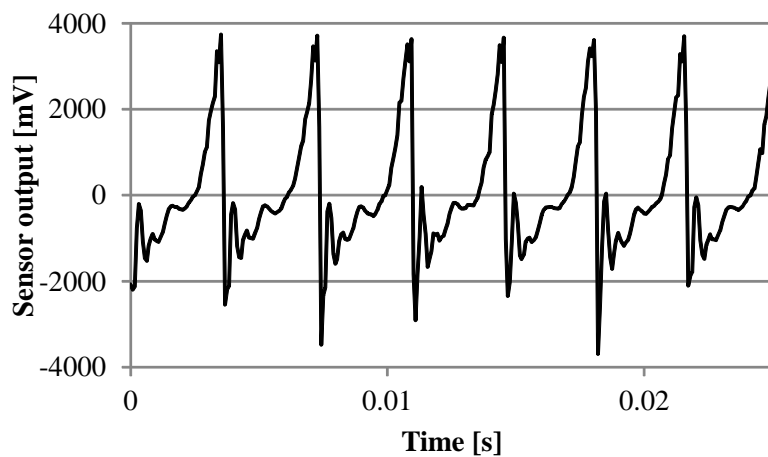


Fig.2.23 Improved sensor output tracing Ra 1.6 [μm] surface

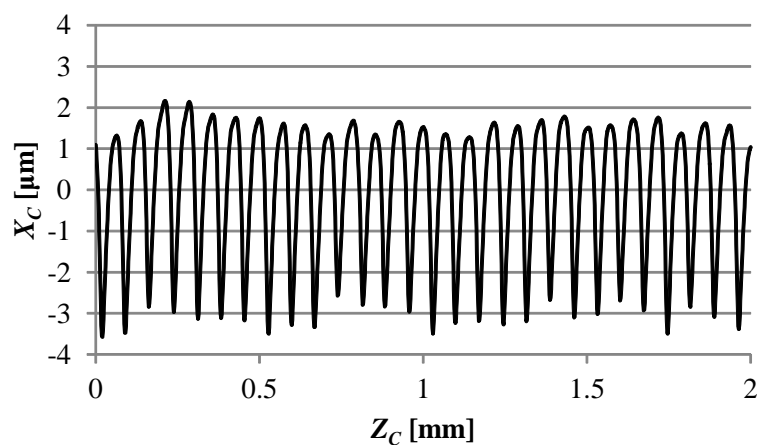


Fig.2.24 Calculated surface profile using improved sensor

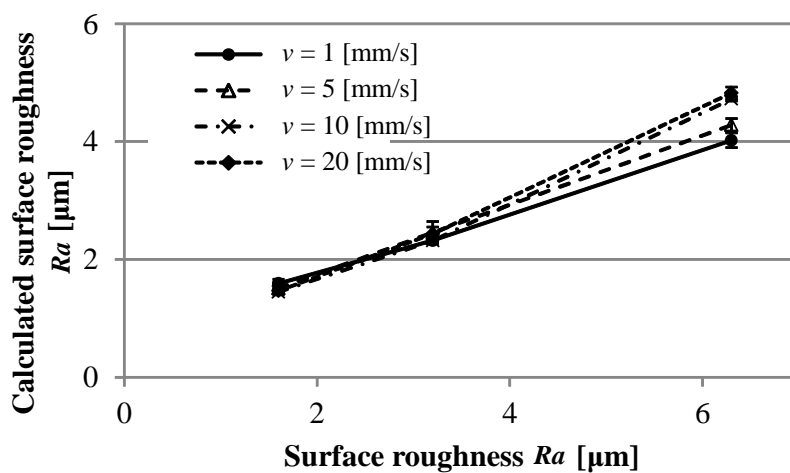


Fig.2.25 Relationship between sample and calculated roughness. Average value with error bar (standard deviation ($n = 5$))

2.6 まとめ

本章では、圧電ポリマーを受感部として用いた薄板型の触覚センサによって、表面凹凸の計測を行うセンシング手法について、理論的、実験的に基礎検討を行った。試作したはりを矩形状および三角波状の凹凸面上で走査させ、得られるセンサ出力を実験により確認した。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 凹凸面上を薄板型触覚センサで走査するとき得られる圧電出力値について、一般面上の場合と、想定した表面性状の異常部位として段差エッジを登る場合、下る場合に分けて定式化した。
- (2) 段差エッジの登り時には、走査速度に線形に依存する大きさのセンサ出力値が得られており、その出力波形は予測した傾向となった。
- (3) 段差エッジの下り時には、下る段差の高さに線形に依存する大きさのセンサ出力値が、はりの自由振動状態により得られており、その傾向は予測値と一致した。この波形は短い時間間隔で生じており、このことが段差を登る際と比べて大きな出力が生じる要因となっている。
- (4) 本提案手法では、段差高さのプロファイル評価を、一般的な表面粗さ計の走査速度（1 [mm/s] 程度）に比べて大きな走査速度の領域（20 [mm/s]）で行えることを示した。
- (5) 凹凸面上を走査時に得られる圧電出力値について、はりの振動状態を考慮した適正な周波数フィルタおよび時間積分処理を施すことにより、ノイズ成分が小さく抑えられた状態で、対象形状の認識が可能であった。
- (6) 本研究では、三角波形状の粗さ面を対象としたが、算術平均粗さ Ra : 1.6~6.3 [μm] に線形に対応したセンサ出力を得ることができた。
- (7) 微小な粗さ面を素早く測定する場合、はりが下る際の衝突現象が形状評価に悪影響を及ぼすため、柔軟性への配慮をしつつ、はりの固有振動数を大きく設定することと、減衰値を大きくすることの重要性を示した。

第3章

携帯式触覚センサシステムの 開発

3.1 はじめに

第2章では、簡便に表面の評価を行えるウィスカ型触覚センサ [4, 16, 18, 39–46] の一形態として、薄板はり構造に、ひずみ検出素子として圧電ポリマーを用いた触覚センサを試作し、その特性について基礎検討を行った。第2章の結果より、薄板型触覚センサを自動ステージ上に固定し対象面上を走査させることで、10 [μm] オーダの段差検出や算術平均粗さ Ra : 1.6 [μm] 程度の微小な表面粗さを評価でき、また、対象物のプロファイル評価を一般的な表面粗さ計の走査速度 (1 [mm/s] 程度) に比べて大きな走査速度の領域 (20 [mm/s]) で行えることを示した。さらに、一般的にひずみの検出素子として用いられている、ひずみゲージと比較して、良好な測定結果が得られることを示した。これは、検出素子として用いた圧電ポリマーは、変位の時間微分に比例した電氣的な出力をすることに起因している。この圧電ポリマーの特性は、動的に対象面をなぞることで凹凸やエッジ等の急激な変化を検出するうえで有利な特長となっている。

一方、現実のものづくりの工程においては、測定の容易さや迅速性、測定方法の柔軟性が求められる。特に、大型製品や建築構造物などを測定しようとするときには、表面粗さ計や三次元計測器等の精密機器を用いて部分的な面性状の評価をする場合は別として、簡易に携帯でき、狭小部や側面、天井面など測定姿勢によらない評価が必要となる場面がある。第2章で用いた試作センサは、シンプルな構成で実現できるものであり、かつ、薄板はりの復元力で対象表面を押圧しながら走査することもできるため、様々な姿勢での測定に応用できる可能性がある。しかし、第2章で用いた自動ステージのようなアクチュエータを設置することは困難であり、治具の設置等の煩わしい設定は極力避けることが望まれる。

本研究の最終的な狙いとしては、平滑な面上での利用を前提とするが、**Fig.3.1** のイメージに示すような携帯式の簡便なセンサシステムを構築することで、測定現場のニーズにあった測定機器が提案できると考えられる。第2章では、薄板型触覚センサを用いて表面性状を評価する手法についての基礎実験を行ったが、このセンサ出力値の定式化には、基準面に対する初期のより先端の位置や、走査速度、走査角度をそれぞれ一定とする

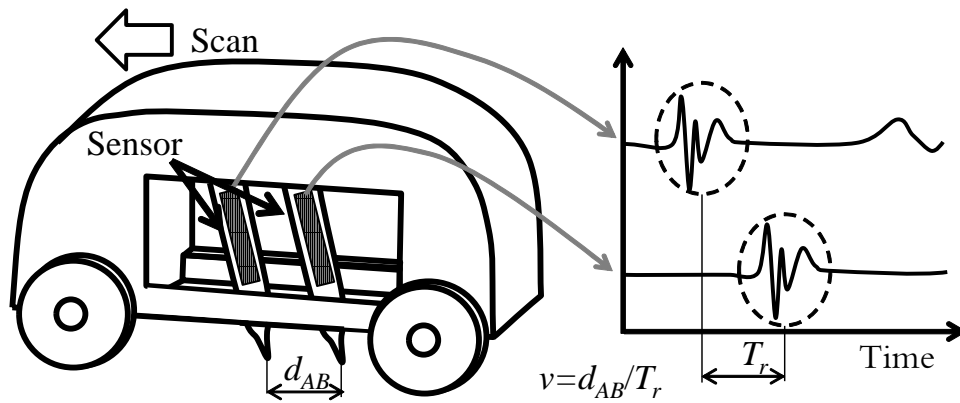


Fig.3.1 Image of hand-held type tactile sensor

などの条件を用いた。例えば，ライン上を流れてくる対象物を測定する場合や，ロボット等の自動装置によるならい動作が行える場合であれば^[4]，上記計測条件を一定に保つことは可能であろう。しかし，携帯式のセンサシステムを人が走査する状況を想定した場合，これらの条件を理想状態に近づけるため，計測状況に応じたシステム構成の工夫やセンサの補償方法への配慮が必要となる。この問題に対応するため，**Fig.3.1**に示したように，測定の基準面を携帯式のセンサシステムの底面とし，底面から突き出した薄板はりを走査前にたわませた状態から計測作業を行うことを考える。この機構により，走査面が平面と見なせる領域上を走査する場合には，固定角度と基準面を一定に保つことができ，基準面に対する凹凸の高さに応じたはりのたわみをセンサにより計測ができる。

一方，走査速度のパラメータは，2.4.1に示したように単一の段差高さを評価する際には影響はないが，表面粗さを評価する際にはその評価の原理上不可欠な情報となる。これを実現する手法として，光学式マウスに代表されるように，イメージセンサを用いて，移動中の床面の画像情報の変化を相関法により計測する手法があるが^[74]，対象面の光沢等の状況によっては光学式センサを用いることが適さない場合もある。これに対して，**Fig.3.1**に示したように走査方向に配置した複数の薄板型触覚センサを用いれば，走査面の光学的な条件には依らず，対象形状に起因する各センサ間の相関値を用いることで走査速度への換算も可能となる。

そこで本章では，表面状態の検査を簡便なシステムで実現することを目指し，手動で走査できる携帯式の触覚センサシステムについて試作検討を

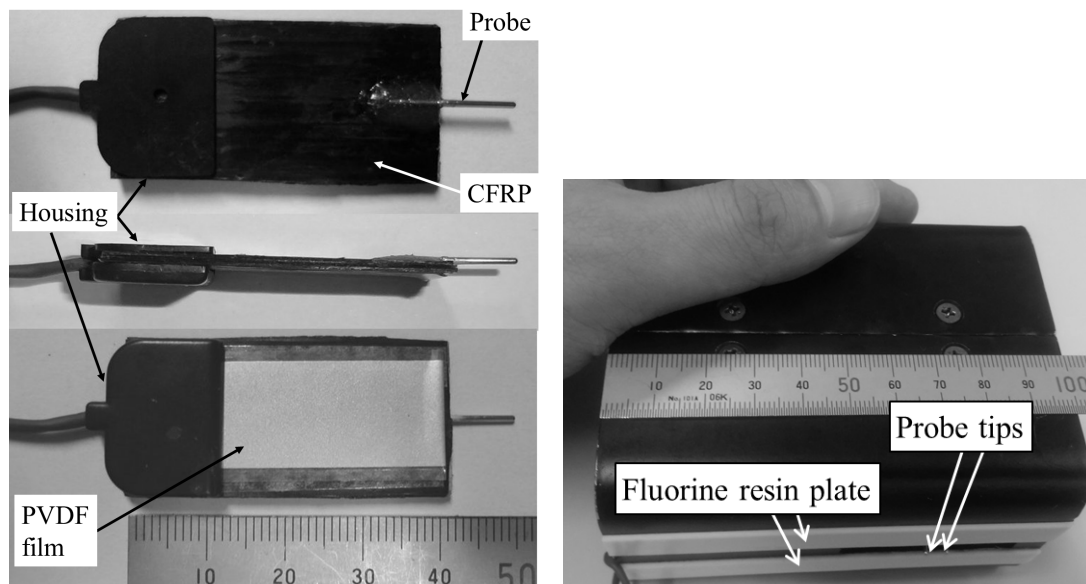
行った。試作した携帯式センサを用いて、微小段差や表面の粗さ計測実験を行い、薄板型の触覚センサを自動ステージで固定した条件と同様に対象表面の評価が可能であるかの検証を行った。このとき、第2章で述べた柔軟性と固有振動数の両立に関する課題へ対応するため、炭素繊維複合材料をはりの基材として用いた。また、携帯式の触覚センサシステムを2枚の薄板型触覚センサで構成し、相関法による走査速度の評価方法を検討した。算出される走査速度をもとに時間で積算することにより、最終的にセンサの走査量を推定することができ、別途センサ走査量を検出するためセンサを用いずともシンプルな構成により測定作業が行えることを示す。

3.2 携帯式触覚センサシステム

3.2.1 試作センサシステム

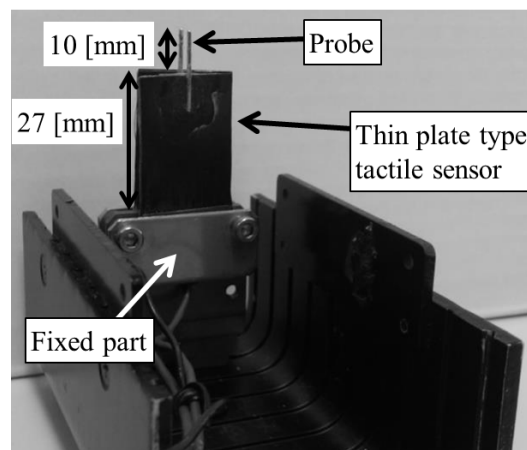
試作した携帯式触覚センサの形状を **Fig.3.2** に示す。第2章の計測システムにおいては、計測手法および精度等の基礎的な項目の評価検討を目的としていたため、センサとなる薄板はりを、自動リニアステージ上に固定し水平移動させ、はり先端で測定対象表面上をなぞらせる手法をとった。一方、本章の計測システムでは、人がセンサ自体を把持して測定対象表面上をなぞらせることを可能とするため、把持するアルミ製ケーシング（外形寸法：100 × 50 × 60 [mm]，重量：304 [g]）の内部に薄板はりを固定し、このはり先端のみをケーシングから露出させる構成とした。

センサ部は、厚さ (h_s) 1 [mm] の薄板はり（炭素繊維強化プラスチック (CFRP) 製 PAN 系，マトリクス：熱可塑性樹脂，幅：20 [mm]）からなり、ひずみの検出素子として PVDF フィルムセンサ（東京センサ製，SDT1-028K，サイズ 41 × 16 [mm]）を貼り付けた。第2章においては、使用した PVDF フィルムセンサの電極ケーシング厚さ分を埋めるため、約 2.1 [mm] 厚さの接着弾性層を用いて埋めていた。しかし、この接着弾性層によって、PVDF フィルムへ伝達されるひずみが小さくなることも懸念されるため、本章においては、この電極ケーシング部分を一度分解して、PVDF フィルムを CFRP はりへ直接接着し、再度、CFRP はりを挟み込むように電極ケーシングを組み立てた。センサ部は、対象面の凹凸高さ



(a) Thin plate tactile sensor

(b) External appearance of tactile sensor system



(c) Internal components of tactile sensor system

Fig.3.2 Prototype tactile sensor system

によって、はり形状がたわみ、結果として PVDF の伸縮変形による出力電荷が生じる。この PVDF フィルムからの出力は、外部の電流プリアンプ (NF 回路ブロック製, LI-76) により電流-電圧変換を行い、A/D 変換器 (National Instruments 製, USB-9234) を介して PC に取り込んだ。なお、アンプの利得 R_V は 10^6 [V/A] と設定した。

薄板はり型の触覚センサで測定対象面上をなぞるとき、はりが段差を降

りる際には、対象面との衝突に伴い、過渡的な振動が生じる。この過渡的な振動によって生じる信号は、評価しようとする形状プロファイルとは無関係であるため、信号にローパスフィルタを処理し、除去することが必要である。しかし、このフィルタの設定周波数が低すぎると、形状に起因する信号までも除去してしまうことになる。このため、はりの固有振動数は柔軟性を損なわない程度に十分高める必要がある。この固有振動数 f_n は、式 (2.17) で示したように、矩形断面の一樣なはりと仮定すると以下の式のように表される^[70]。

$$f_n = \frac{\lambda_n^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{E_b}{12\rho_b}} \quad (3.1)$$

ここで、 l : はりの長さ、 E_b : はりのヤング率、 ρ_b : はり材の密度である。また λ_n は、固定条件、次数によって決定される定数である。第2章においては、基材となる薄板はりの材料には、鋼材を用いてきた。一方で、式 (3.1) より、はりの固有振動数を上げるうえでは、はり材の密度に対するヤング率（比剛性、 E_b/ρ_b ）を高めることが有利である。この比剛性の値は、鋼の場合では、 2.7×10^6 [m] であるのに対し、一方向材の CFRP では 8.1×10^6 [m] 以上である。このため、本章においては、はり材料を CFRP 材に変更した。また、固有振動数は、はり長さ l の 2 乗に反比例することから、CFRP 製薄板はりの長さは、PVDF フィルムの電極部と同じ長さ (27 [mm]) とし、極力短くした。加えて、衝突に伴う過渡的な振動が生じた際には、速やかに減衰させることが重要である。このため、はりを拘束型制振構造にすることで減衰を高めることを考え^[73]、CFRP 材 (0.5 [mm]) 2 枚を両面テープにより貼り合わせる構造とした。ここで、各 CFRP 材の構成は、1 層 0.1 [mm] のシート材を、繊維方向がはりの伸縮方向を向くように 4 層積層し、中立軸側にはりの幅方向をむく 1 層を加えた計 5 層の構成とした。固有振動数を実測すると、一端固定-他端単純支持の条件において約 650 [Hz] であり、減衰比 ζ は、9.2 % であった。

薄板はりの先端には、第2章と同様に直径 0.93 [mm] の半球面プローブ（ミスミ製、NP-120N）を熱硬化性エポキシ樹脂によって取り付け、トレーシング動作をする際の接触点とした。プローブの先端は、過度の摩擦状態を防ぐため、フッ素樹脂系潤滑剤（ファインケミカルジャパン製、FC-250）を塗布し、コーティングを行った。

3.2.2.3 で後述する，相関法を用いたセンサシステムの走査速度推定を実現するため，同一構造の薄板はり型のセンサを 2 枚作製し，人の手で把持可能なケーシングの内部に片持ちはりの状態で固定した．2 枚のセンサの間隔は，離れ過ぎると，各センサが同一位置を通過する際の走査速度が変化してしまうことも予想され，センサ間距離は極力短くするほうが望ましい．本章においては，2 枚のセンサがたわんだ際に接触しない程度に距離を短くし，固定用 L 型ブラケットを介して d_{AB} ($=5.3$ [mm]) 離して固定した．また，固定部からプローブ先端までの長さを l ($=37$ [mm]) とし，プローブ先端は，ケーシング底面のスリット (42×8 [mm]) から h_0 ($=1.2$ [mm]) 露出させた (**Fig.3.3**)．

試作したセンサシステムは，全体的には比較的平坦な面の中に局所的に存在する段差や粗さを測定対象物とすることを想定している．そのため，プローブを対象面に押し当て，ケーシングの底面を対象面に設置させることで，これを測定の際の基準面とした．鉛直下向きに固定した薄板はりをたわませた状態を初期状態とし，その後，対象表面上を走査させる．本章で測定対象とした形状では，走査中に基準面が段差を乗り越える挙動もとるため，この基準面の変動を許容するよう，プローブの露出量 h_0 を設定した．

このように試作のセンサシステムでは，ケーシング底面が測定対象に接しながら計測を行うため，対象表面全体がうねっているなど曲面形状である場合には，曲面への追従性はケーシングの長手方向寸法に依存する．ケーシング底面を小さくすれば，より曲面に追従しやすくなる一方，走査させるときの安定性が悪くなることも考えられるため，計測の目的に応じて計測システムの大きさを検討する必要がある．

なお，試作したセンサについて，初期状態における押し付け荷重を計測したところ，はり 1 本あたりに $1,290$ [mN] の荷重が加わっていた．また，ケーシングの底面は計測の際の滑りやすさを向上させるため，フッ素加工プレート（ミスミ製，PTFE-200-20）を貼り付けた．センサシステムの摩擦低減効果について，検討した内容を付録 B に記載する．

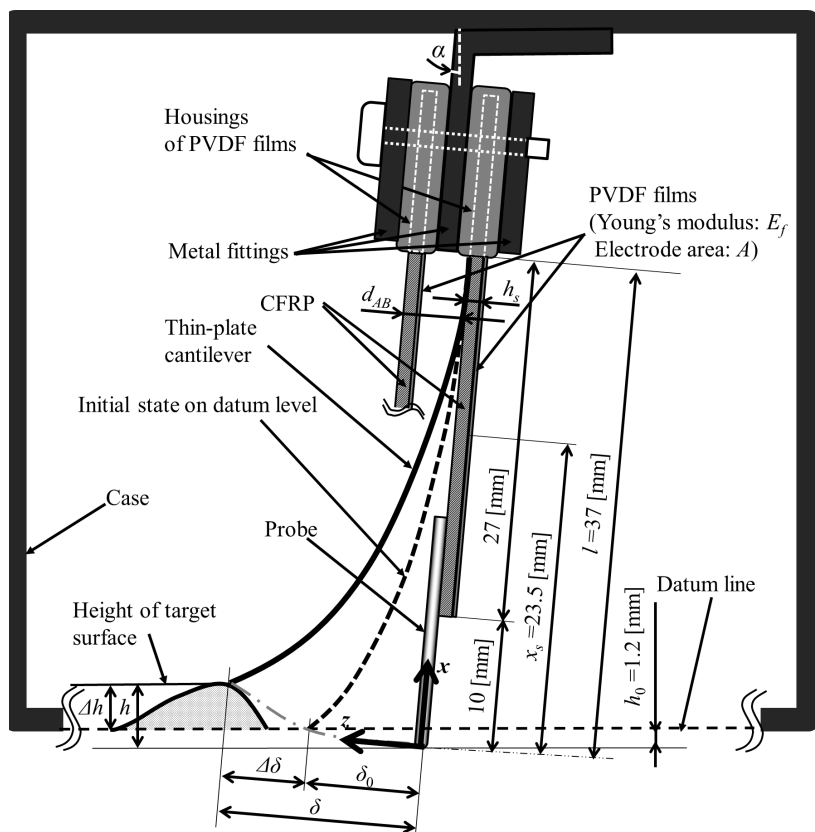


Fig.3.3 Schematic illustration of thin plate cantilever deformation

3.2.2 検出原理

3.2.2.1 薄板型はりのたわみによる形状高さの算出方法

試作したセンサによる、対象物表面の高さ方向の変位検出方法の説明を **Fig.3.3** に示す. 第2章と同様, 薄板はりをケーシング底面の法線方向に対して角度 α だけ傾斜させて固定した状態を考える. 表面形状によりプローブ先端へ与えられる, はりの面に垂直な方向 (z 方向) の変位 δ は, はりのたわみにより生じる PVDF フィルムの伸縮により検出する. このとき, PVDF フィルムから計測できる電圧 V は, 第2章で示したように, 式 (2.3) で与えられ, 印加されたはり先端の変位 δ の1階時間微分に比例する. ここで, はり先端から PVDF フィルム中央部までの距離 x_s は, 第2章の値とは異なり, 23.5 [mm] である.

はりの軸方向 (x 方向) の変位 h と, センサにより測定できる δ の関係は, 第2章で示したように, 定数 a を用いて, 2次式の関係で近似ができる (式 (2.7)). すなわち, はりの長さ l を 37 [mm] としたとき, はりは面

内方向の伸縮がないとしたはりの大変形理論^[69]を用いて数値解析的に算出した h と δ の関係から, a は $0.0173 [\text{mm}^{-1}]$ と近似できる. この近似式の妥当性について検証した結果を付録 C に示す. 走査開始前の初期状態においては, スリットから $h_0 (= 1.2 [\text{mm}])$ 突き出しているはりを基準面に押し付け, はりを δ_0 たわませていることから, 式 (3.2) が成り立つ.

$$h_0 = \delta_0 \sin \alpha + a\delta_0^2 \cos \alpha \quad (3.2)$$

したがって, δ_0 は式 (3.3) で求められる.

$$\delta_0 = \frac{-\sin \alpha + \sqrt{\sin^2 \alpha + 4a \cos \alpha h_0}}{2a \cos \alpha} \quad (3.3)$$

また, 基準面に対する対象面の高さ Δh と, 走査時にセンサより検出できるたわみ量 $\Delta \delta$ の関係は式 (3.4) として表せる.

$$h_0 + \Delta h = (\delta_0 + \Delta \delta) \sin \alpha + a(\delta_0 + \Delta \delta)^2 \quad (3.4)$$

式 (2.3) より得られる電圧出力値を時間積分することにより, 走査時に時々刻々変化する $\Delta \delta$ を求められる. 最終的に, 求められた $\Delta \delta$ から, 式 (3.2) ~ (3.4) の関係を用いることにより, 式 (3.5) で測定対象部の高さ Δh を算出できる.

$$\Delta h = \sqrt{\sin^2 \alpha + 4a \cos \alpha h_0 \Delta \delta + a\Delta \delta^2 \cos \alpha} \quad (3.5)$$

3.2.2.2 ケーシングの底面位置の変動による誤差影響

3.2.2.1 では, ケーシングの底面が基準面と常に一致した状態で計測することを仮定し, センサ出力 $\Delta \delta$ を用いて形状高さ Δh を求める方法を述べた. しかし, 実際の計測中には, 計測面の凹凸やうねりなどの影響により, ケーシングの底面の位置が基準面からずれることも考えられるため, 以下では, ずれが生じた場合の計測誤差を検討する. 本節では, ケーシング底面が, 基準位置から h_e だけずれることが出力に与える影響を考える (底面が上側にずれたときを正值とする).

まず, 2.4.1 における考察と同様に, 微小段差を登る際の出力値に, センサの固定角 α や基準面位置の変動が与える影響を検討する. 2.4.1 と同様

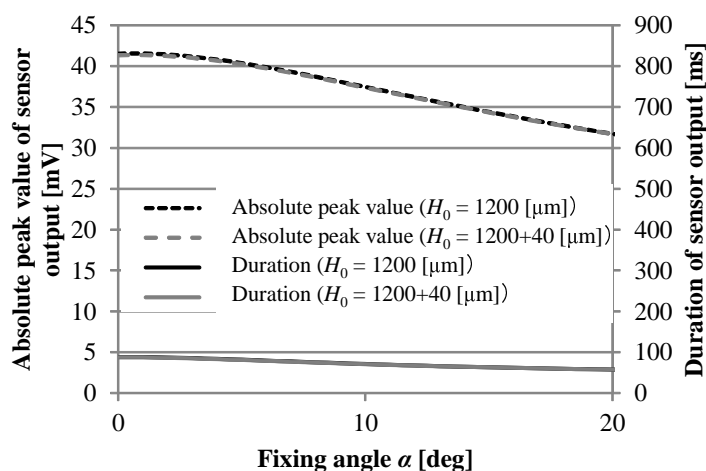


Fig.3.4 Relationship between fixing angle and ascending sensor output ($H = 40$ [um], $v = 5$ [mm/s])

に、測定対象の段差高さ $H = 40$ [um], 走査速度 $v = 5$ [mm/s] の条件を考える. 式 (2.3), (2.13), (2.14) により求められる段差を登る際のセンサ出力のピーク値と, 式 (2.15), (2.16) により求められる出力の持続時間について, 式中の H_0 へ, スリットからプローブの突き出し量である 1200 [um] を代入した結果を **Fig.3.4** に示す. また, ケーシング底面が基準位置から $h_e = 40$ [um] だけずれた状態を想定し, H_0 へ $1200+40$ [um] を代入した結果を併せて示した.

結果, 設定するセンサの固定角度により値は変わるものの, ケーシング底面のずれ h_e がピーク出力値および出力の持続時間へ与える影響が小さいことが分かる. 段差を登る際には, ほぼ矩形状の出力電圧波形となるため, ピーク出力値と持続時間を掛け合わせた値が, 出力積分値に近い値となり, 出力積分値をもとに形状プロファイルを算出する際の形状の高さに変換できる.

次に, センサの固定角 α や基準面位置 h_e の変動が, センサより出力される形状高さへ与える影響を, センサの出力積分値と比例関係にあるセンサのたわみ量を求めることにより検討する. まず, はり初期たわみ量 δ_{0e} は, 式 (3.2) と同様に, 次式の関係がある.

$$h_0 - h_e = \delta_{0e} \sin \alpha + a\delta_{0e}^2 \cos \alpha \quad (3.6)$$

計測時に, はり先端が実際の基準面から Δh の高さであり, 初期状態からさらに $\Delta\delta_e$ だけたわむとすると, $\Delta\delta_e$ には, 式 (3.4) と同様に, 次式の

関係がある。

$$h_0 - h_e + \Delta h = (\delta_{0e} + \Delta\delta_e) \sin \alpha + a(\delta_{0e} + \Delta\delta_e)^2 \cos \alpha \quad (3.7)$$

したがって、式 (3.6), (3.7) より、実際に測定したい形状高さ Δh と、基準面のずれの影響を受けたはりのたわみ量 $\Delta\delta_e$ には、式 (3.5) と同様に、次式の関係がある。

$$\Delta h = \sqrt{\sin^2 \alpha + 4a \cos \alpha (h_0 - h_e) \Delta\delta_e + a \Delta\delta_e^2 \cos \alpha} \quad (3.8)$$

式 (3.8) を解くことにより、計測中にセンサ出力から得られる $\Delta\delta_e$ は、式 (3.9) で表すことができる。

$$\Delta\delta_e = \frac{-\sqrt{\sin^2 \alpha + 4a \cos \alpha (h_0 - h_e)} + \sqrt{\sin^2 \alpha + 4a \cos \alpha (h_0 - h_e + \Delta h)}}{2a \cos \alpha} \quad (3.9)$$

しかし実際の計測時には、 Δh と h_e は不明な値であるため、式 (3.9) の $\Delta\delta_e$ を、式 (3.5) 右式の $\Delta\delta$ へ代入した値 Δh_e として、形状高さを算出することになる。ここで、はりの固定角 α を 0, 5, 10 [deg]、測定対象の高さ Δh を 40 [μm] とし、 h_e が -100~100 [μm] の範囲でずれたときの計測誤差率 $(\Delta h_e - \Delta h)/\Delta h$ を **Fig.3.5** に示す。ここで示した h_e の範囲では、いずれの固定角度でも誤差率は $\pm 5\%$ 以内であった。また、はりの固定角 α を大きくしたほうが誤差率を小さくできる傾向はあるが、最大 1% 程度改善するのみである。第 2 章では、はりを鉛直方向から傾けて固定することにより、基準面位置の誤差影響を軽減できることを示した。一方、本章では、ケーシング底面から下側の形状にもプローブが追従するように、ケーシングからの突き出し量を設けている。このとき、初期状態においてはりはたわんでおり、見かけ上、はりに傾きがついた状態となっているため、第 2 章のように傾きを設けたときと同様に、基準面の変化による誤差を軽減する効果があると考えられる。そこで本章では、製作上の扱いやすさから固定角度 α を 0 [deg] とした。

はりの固定角 α を 0 [deg] とし、測定対象の高さ Δh が最大 100 [μm] の範囲において、 h_e が -100~100 [μm] の範囲でずれたときに生じる計測誤差 $\Delta h_e - \Delta h$ を **Fig.3.6** に示す。ここに示した範囲においては、最大生じる誤差は ± 5 [μm] 以内に収まっていることが分かる。

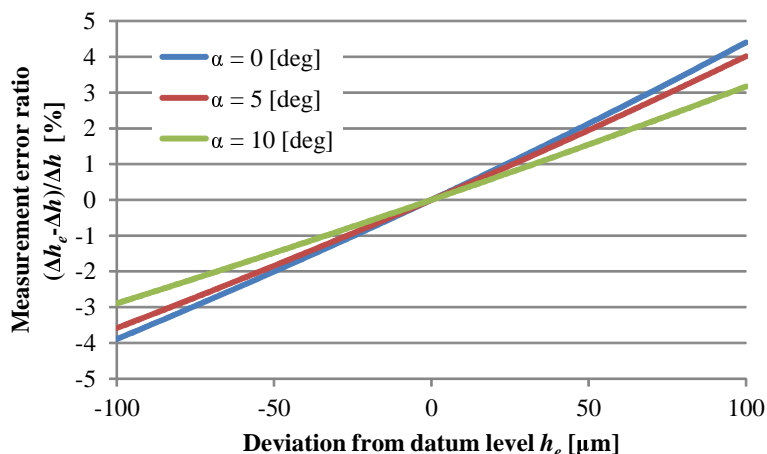


Fig.3.5 Measurement error ratio ($= (\Delta h_e - \Delta h)/\Delta h$) due to deviation from datum level h_e

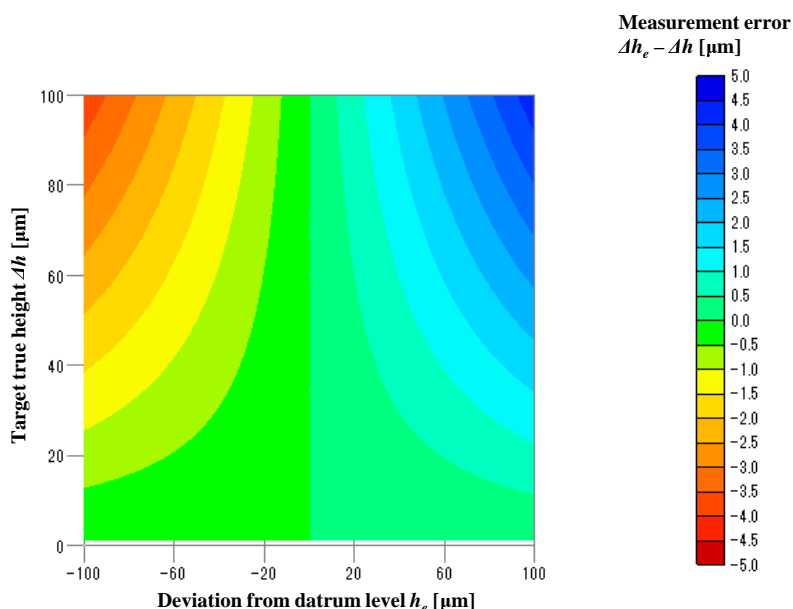


Fig.3.6 Measurement error ($= \Delta h_e - \Delta h$) due to deviation from datum level h_e

3.2.2.3 走査速度の算出方法

① 相関法による走査速度推定

本章では、走査方向に配置した二つの薄板型触覚センサの信号出力をもとに、対象形状に起因する各センサ間の相関関数を用いることで走査速度へ換算することを検討した。また、3.2.2.1で求められる測定プロファイルの高さについても、二つのセンサの出力値を平均化して算出するほうが、信頼性が高くなると考えられる。

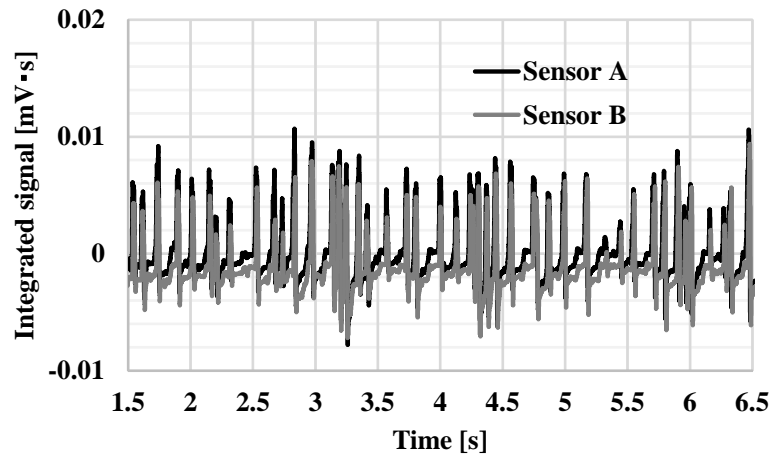


Fig.3.7 Integrated outputs of sensors A and B (B: time shifted) obtained when the sensor system was operated on the acrylic plate with grooves using the automatic linear stage ($v=10$ [mm/s])

ここで本章では、走査方向に対して前方にあるセンサを「センサ A」、後方にあるセンサを「センサ B」とする。各信号の時刻歴波形は A/D 変換器により、設定したサンプリング周期ごとのデータとして取得され、時刻 t_k における時間積分値の波形を、それぞれ $S_A(t_k)$, $S_B(t_k)$ とする (k は指標)。

信号波形の出力例を **Fig.3.7** に示す。これは、詳細は 3.3.1 で後述する不等間隔な傷を作製したアクリルプレートを対象面として、センサを自動リニアステージにより一定速度 (10 [mm/s]) でなぞらせたときの各センサの信号である。信号値については時間積分処理を行い、5~100 [Hz] のバンドパスフィルタ処理を行っている。3.2.1 で述べたように、薄板型センサの固有振動数は約 650 [Hz] であり、過渡的な振動に伴う信号を除去するため、周波数の上限を 100 [Hz] に設定した。また、時間積分によるセンサ出力のドリフトを除去するため、周波数の下限を 5 [Hz] に設定した。センサ B の信号波形 S_B は、時間軸前方向に (5.3 [mm]/10 [mm/s] = 0.53 [s]) だけずらして表示しており、二つのセンサが同一部位を通過する場合、 $S_A(t_k)$ と同様の波形は、図のように時間ずれ量 T_r をもって $S_B(t_k + T_r)$ として現れることが期待できる。なお、ここで設定したバンドパスフィルタの周波数範囲は、走査速度を算出するうえで設定した値であり、時間-対象面高さの関係を、求めた速度によって位置-対象面高さの関係に置き換えた際に、改めて測定したい波長に応じて設定しなおすこととする。

以下に、この T_r 値の検出方法を示す。 $S_A(t_k)$ について、走査速度を求

めたい時刻 t_s を基準とし、 t_s を中心として前後の時間区間 $\Delta\tau$ (この区間の時間指標を $k = s - p \sim s + p$ とする) を切り出す (この波形の例では、5 秒間の時間区間を切り出した)。この区間の波形に類似する $S_B(t_k)$ の波形は、 t_s 以降の時間領域に生じることから、 $S_B(t_k)$ について、ある時間ずれ量 t_r を仮定し、時刻 $t_s + t_r$ 後の同一時間長さの区間の波形を切り出す。この処理で得られた二つの信号 S_A, S_B の類似度は、式 (3.10) に示す相関関数 $R_{AB}(t_s, t_r)$ によって調べることができる。

$$R_{AB}(t_s, t_r) = \frac{\sum_{k=s-p}^{s+p} (S_A(t_k) \cdot S_B(t_k + t_r))}{\sqrt{\sum_{k=s-p}^{s+p} (S_A(t_k))^2} \cdot \sqrt{\sum_{k=s-p}^{s+p} (S_B(t_k + t_r))^2}} \quad (3.10)$$

この関数は、 $-1 \sim 1$ の間の値をとり、1 に近づくほど二つの波形が類似していることを示す。時刻 t_s を固定し、仮定した t_r の値を変化させながら $R_{AB}(t_s, t_r)$ を算出したうえで、最も高い相関関数をとる t_r を、二つの信号波形の時間のずれ量 T_r として推定できる (式 (3.11))。

$$T_r(t_s) = \arg \max_{t_r} R_{AB}(t_s, t_r) \quad (3.11)$$

ここで、 $\arg \max_x f(x)$ は、関数 $f(x)$ が最大値をとる x の値を表す。Fig.3.7 のセンサの信号について式 (3.10) を用いて計算することによって得られる $R_{AB}(t_s, t_r)$ のグラフを Fig.3.8 に示す ($t_s=4$ [s])。相関関数の値は T_r と示した点で最大値となっており、この T_r が、各センサが同一部位を通過する際の時間間隔であると推定できる。上記の処理を、基準とする時刻 t_s の値を少しずつずらしながら計算していくことにより、任意の走査時刻における $T_r(t_s)$ を求めることができ、走査速度の推定値 $v_e(t_s)$ は、センサ A, B 間の距離 d_{AB} (5.3 [mm]) を用いて、次式で求められる。

$$v_e(t_s) = d_{AB}/T_r(t_s) \quad (3.12)$$

上記の処理により求められた時刻 t_k における速度 $v_e(t_k)$ を用いて、最終的に、次式のように t_s 以前の時刻から積算していくことにより、 t_s 時点で

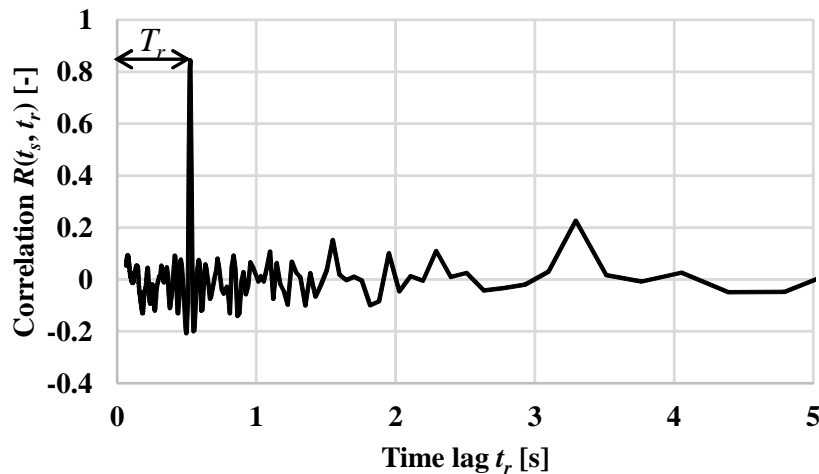


Fig.3.8 Cross correlation function between sensors A and B obtained when the sensor system was operated on the acrylic plate with grooves using the automatic linear stage ($v=10$ [mm/s])

の走査量の推定値 $Z_e(t_s)$ を算出することができる。

$$Z_e(t_s) = \sum_{k=1}^{s-1} (v_e(t_{k+1}) + v_e(t_k)) \cdot (t_{k+1} - t_k) / 2 \quad (3.13)$$

以下に、式 (3.10) で設定する t_r の設定方法について述べる。仮定する t_r は、極端にはサンプリング時間ごとにずらしてもよいが、演算処理上の負荷が大きい。また、最終的に対象面のプロファイルを得るには、走査速度に走査時間を掛け合わせて距離へ置き換えることになる。このとき、距離の分解能に影響するのは走査速度の分解能であり、式 (3.12) のとおり、 T_r の分解能に反比例の関係がある。すなわち、 T_r が大きいとき（走査速度が遅いとき）は、 t_r の分解能は走査距離に影響しにくい一方、 T_r が小さいとき（走査速度が速いとき）は、 t_r の分解能が大きく影響するため、小さなピッチで t_r を変化させながら波形の類似性を調べる必要がある。ここで、走査で想定する速度の範囲を下限： v_{min} 、上限： v_{max} として定め、 Δv の精度で速度を把握することを考える。すると、評価しうる走査速度 v_i は、次の式の範囲で離散的に表される (i は指標)。

$$v_{min} \leq v_i = v_{min} + \Delta v \times i \leq v_{max} \quad (3.14)$$

したがって、 t_r は、次式の離散的な値をとる。

$$t_{ri} = d_{AB} / v_i \quad (3.15)$$

② 相関法による走査速度の計測手法の改良

センサを手動で走査させる場合、自動ステージのように走査速度を一定に保つことができない。このため①の手法のみでは、速度変化に追従することが困難であり、相関関数が低く算出され、推定した速度の信頼性が低くなる時間領域が存在することが予想される。このため、走査速度の推定方法について以下のように変更した手法も検討した。センサ間の時間差を求めたい各時刻 t_s について、次の二つのパラメータを一定刻みで変化させながら繰り返し相関計算を行い、繰り返しの中で最も相関関数の高い t_r を採用する。

(1) センサ A の信号から切り出す評価時間 $\Delta\tau$ を可変とする。

評価対象とする面のプロファイルは不等間隔に凹凸形状が存在するため、切り取ったセンサ A の信号の中に、相関をとるうえで有効な波形が含まれているかどうかは未知である。この $\Delta\tau$ を長くするほど、波形がより多く含まれるが、その後に後方のセンサ B が検知する時刻において速度が変動していれば、一つ一つの波形の間隔がずれ、相関関数を正しく計算できない。一方で、 $\Delta\tau$ を短くすれば速度の変動にも追従しやすくなると考えられるが、センサ A の信号と類似する波形が確率的に多く存在しやすくなるため、相関関数が複数のピークを生じる。このため、ここでは $1 [\mu\text{m}]$ 以上の高さのピーク値（波形の傾きの符号が反転する値とした）を五つ以上含むことを相関計算をするための必要条件とし、 $\Delta\tau$ を 0.3 から 1.0 [s] の範囲で 0.1 [s] ごとに段階的に変化させる。

(2) センサ B の信号の時間縮尺を可変とする。

センサ A で計測された信号が現れた後に、走査速度が変化した場合、センサ B において検知する波形は、同一の高さを有する波形であっても時間軸が伸縮するような波形へ変化してしまう。このため、センサ B から切り出した波形について時間スケールを伸縮させる操作をし、センサ A で切り出した信号長 $\Delta\tau$ と同じ長さになるようリサンプリングを行ったうえで、相関計算を行った。ここでは、 $\pm 20\%$ の範囲で 4% ごとに変化させながら相関計算を行う。

しかし、不等間隔な波形を測定対象としているため、様々な t_r で相関関

数がピークをとりうる。このため、大域的な速度変化から外れて推定される値が、存在する可能性がある。そこで、以下の条件の下で走査速度推定値を補正した手法も検討した。

(i) 加速度の絶対値は設定する上限値を超えない。

極力一定速度での走査を前提としているため、瞬間的に大きな速度変化は現実的にとれず、加速度もある一定内に収まることが期待される。時刻 t_s において算出された速度は、 $d_{AB}/T_r(t_s)$ と表せることから、加速度の絶対値の上限を a_{max} としたとき、隣接する時刻 t_s と t_{s+1} の速度は以下の条件を満たす必要がある。

$$\left| \frac{d_{AB}/T_r(t_{s+1}) - d_{AB}/T_r(t_s)}{t_{s+1} - t_s} \right| \leq a_{max} \quad (3.16)$$

(ii) センサ A の波形と相関があると見なされたセンサ B の波形が存在する時刻は単調増加する。

相関計算により、時刻 t_s においてセンサ A の波形と類似するセンサ B の波形は、 $T_r(t_s)$ 後の $t_s + T_r(t_s)$ にあるとみなしている。これよりも後の時刻 t_{s+1} において、センサ A の波形と類似するセンサ B の波形は、 $t_s + T_r(t_s)$ よりも後に現れる必要があり、この関係は次式で表される。

$$t_{s+1} + T_r(t_{s+1}) > t_s + T_r(t_s) \quad (3.17)$$

速度を推定したすべての t_s と t_{s+1} の組において、上記の二つの条件を満たさない場合には、 t_s と t_{s+1} において算出した相関関数を比較し、相関関数が小さい方の速度の推定値を除外する。この操作をすべての t_s と t_{s+1} の組が上記 (i), (ii) の条件を満たすように繰り返し行う。

3.3 実験方法

3.3.1 走査速度の計測実験

走査方向に対して不等間隔な凹凸をカッターナイフで作製したアクリルプレート (**Fig.3.9**) 上を走査させ、相関法による走査速度の評価実験を行った。このアクリルプレートについて、表面粗さ計 (東京精密製、

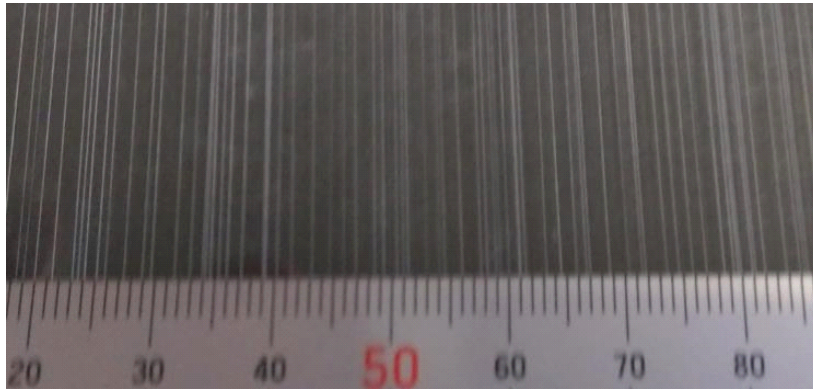
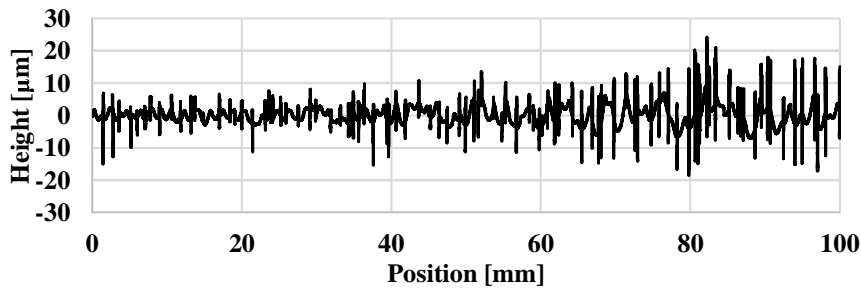


Fig.3.9 Target sample (acrylic plate with grooves)

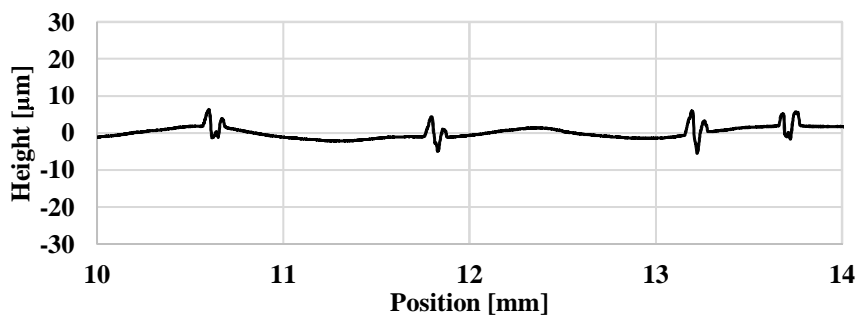
590A-3D-12) を用いて計測した表面プロファイルを **Fig.3.10** に示す。全長 100 [mm] の区間に、100 個の傷を無作為に作製しており、10 [μm] 程度の高さの凹凸形状が形成されている。また、微視的には、作製した傷の谷の両側が基準面に対して盛り上がる形状をとっている。今回触覚センサに使用するプローブの先端形状は直径 0.93 [mm] であることから、傷の内部にまでプローブが入り込むことはないが、凹凸の山部分を包絡するようになぞることになる。

まず、自動リニアステージ（シグマ光機製，SGSP20-85）を用いて携帯式触覚センサを一定速度（ $v = 1, 5, 10, 20$ [mm/s]）にて走査を行わせた。このとき、**Fig.3.11** に示すように、携帯式触覚センサを対象表面上に設置し、ケーシング上面には手で抑え込むことを想定したおもり（740 [g]）を搭載した。3.2.1 で述べたようにケーシング底面を基準面に設置させるためには、263 [gf]（ $1,290 \times 2$ [mN]）の力で押さえ込む必要があり、それ以上の荷重が加わった場合には、その力はケーシング底面で分担される。ケーシングおよび薄板型センサの固定具は金属製であり、剛性が十分高く変形しない。付録 B に示したように、センサシステムの摩擦係数は小さいため、計測中にケーシングの底面が滑らかに動く限りは、この荷重がセンサ出力に与える影響は少ないと考えられる。おもりを搭載したうえで、ケーシング後面を自動ステージ上に固定したプレートで押し出し、対象表面上を滑らせた。

また、手動によるセンサ走査時にも対応可能であるかを検証するため、上記と同じアクリルプレートを対象表面とし、手動走査による計測を行った。このとき、走査するセンサが直線的に動くように、ケーシングの側面



(a) Overall view



(b) Enlarged view

Fig.3.10 Profile of acrylic plate sample with grooves

を平坦で滑らかなブロックに沿わせながら走査した。推定した走査速度が妥当かどうか，以下の2種類の方法で評価した。

まず，表面粗さ計で測定した対象表面の傷の間隔を基準に，各速度で触覚センサを用いて測定した傷の間隔の関係を求め比較した。ここで，基準となる傷の間隔は，**Fig.3.10 (b)**に示したプロファイルの谷底の間隔とした。一方触覚センサによる出力については，**Fig.3.7**に示したような時間積分波形について，式(3.13)を用いて時間軸を走査量に置き換え，そのうえで正のピークをとる位置の間隔とした。

さらに，最も妥当な結果が得られた手法については，レーザ変位計（キーエンス製，LK-G5000V, LK-H150）で計測したセンサ走査速度との比較を行った。レーザ変位計は走査方向の後部に設置し，センサ走査時のケーシング後面の移動変位を測定した。変位は1,000 [Hz]のサンプリング周波数で計測を行い，20 [Hz]のローパスフィルタを処理したのち，時間微

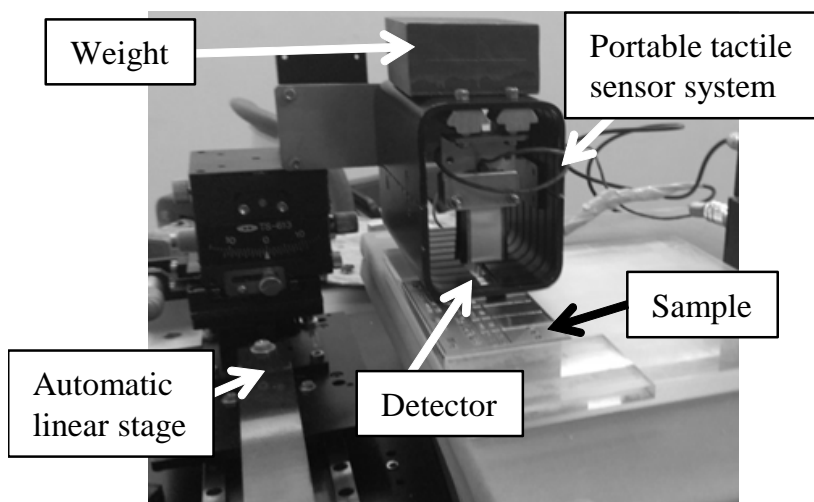


Fig.3.11 Experiment using automatic linear stage

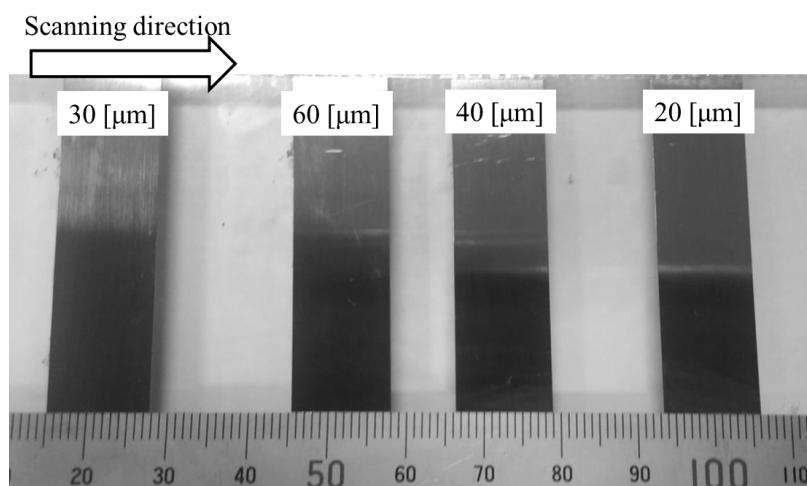


Fig.3.12 Target sample (acrylic plate with 4 microsteps)

分処理を行うことで、触覚センサを用いて計測した走査速度との比較を行った。

3.3.2 微小段差の計測実験

走査対象のサンプルとして、平滑なアクリルプレート上に不等間隔に貼り付けた厚さ 20, 30, 40, 60 $[\mu\text{m}]$ の SK 焼入鋼フィラーゲージ (Monotaro 製, 各幅: 12.7 $[\text{mm}]$) を用いた (Fig.3.12)。試作した携帯式触覚センサを用いて、手動操作により、この対象サンプル上を走査した。実験は 5 回繰り返した。

まず、計測の結果得られた、センサ A および B の二つのセンサ出力

値を用いて、走査速度の推定を行った。走査速度の推定には、3.3.1で示した手法と同様に、各センサ出力値について時間積分処理を行った後、5~100 [Hz] のバンドパスフィルタを施したものをを用いた。ここで、 $v_{min} = 5, v_{max} = 80, \Delta v = 0.1$ [mm/s], $\Delta \tau$ を 0.3 から 0.5 [s] の範囲で 0.1 [s] 刻み、 $a_{max} = 200$ [mm/s²] と設定した。また、最初の段差 (30 [μ m]) を通過する時刻を 0 [s] とした。

次に、得られた走査速度の結果をもとに、対象の段差形状の高さおよび位置を推定した。信号には、各センサ出力値について時間積分を行った後、衝突に伴う過渡的な信号を除去するため、100 [Hz] のローパスフィルタを処理したものをを用いた。この信号の時間-出力値の関係を、式 (3.13) の関係を用いて、走査位置-出力値の関係に直した。本研究で提案の計測系は、はりのたわみの時間微分を検出するという原理上、時間積分値にはドリフトが伴うため、この出力値から段差の高さ情報を取得するために、移動平均 (2 [mm] 幅) をとったものを出力値から差し引くことにより、段差の上り、下りについてエッジを抽出した。最終的に、式 (2.3) および (3.5) を用いて対象形状の高さを求めた。

3.3.3 表面粗さの計測実験

第2章でも使用した粗さ標準片 (日本金属電鍍製, **Fig.2.3**) を対象面とし、 Ra が、1.6, 3.2, 6.3 [μ m] の表面を繰り返し5回測定し、それぞれ7 [mm] の区間について粗さを評価した。表面粗さ計を用いて、この粗さ標準片を測定したところ、三角波状の凹凸形状であった。 Ra 値が大きくなるに従って、対象面の波の振幅は線形的に大きくなる一方、波数は減少しており、各粗さの波数は、およそ 14, 8, 4 [mm^{-1}] であった。この対象面を測定した場合、各センサから得られる出力は、同一の波形が一定周期で繰り返されるのみであり、原理上、相関を用いた手法では走査量の推定が困難である。このため、ここでは **Fig.3.11** に示したように自動ステージを用いて走査を行った。移動速度 v は、1, 5, 10, 20 [mm/s] と設定し、この設定値よりセンサの移動量を求めた。

センサ出力により計算された表面プロファイル波形は、バンドパスフィルタを波長: 0.02~1 [mm] で処理を行い、衝突時の過渡的な信号および出

力のドリフト値を除去した。このフィルタ処理した波形をもとに、 Ra 値を求めた。

3.4 結果および考察

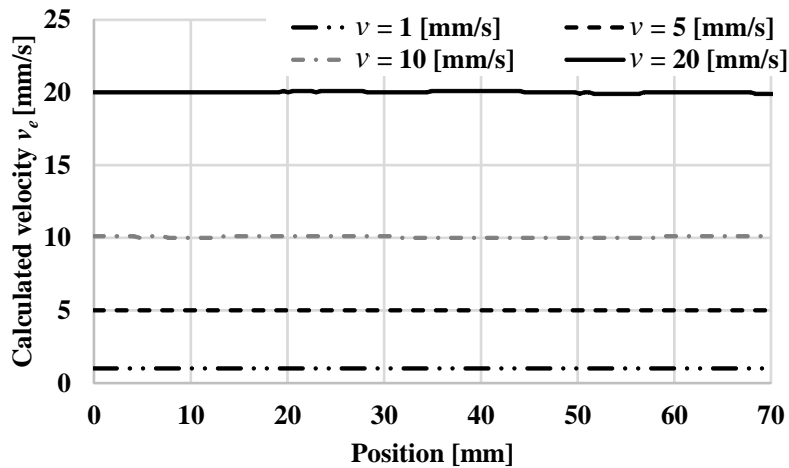
3.4.1 走査速度の測定

自動ステージによりセンサシステムを一定速度で走査させた場合について、3.2.2.3の①に示した手法により、走査速度を推定した結果を **Fig.3.13 (a)** に示し、これに対応する相関関数 R_{AB} を **Fig.3.13 (b)** に示す。図の横軸は、自動ステージで設定した速度から計算したセンサの移動量である。センサ A の波形から切り出す時間区間 $\Delta\tau$ については、**Fig.3.10** に示した凹凸の周期が 5 回程度含まれるよう、 $v = 1, 5, 10, 20$ [mm/s] に対して、それぞれ 5, 1, 0.5, 0.25 [s] と設定した。波形の相関を用いた手法により、一定速度であれば走査速度を精度よく認識できることが分かる。

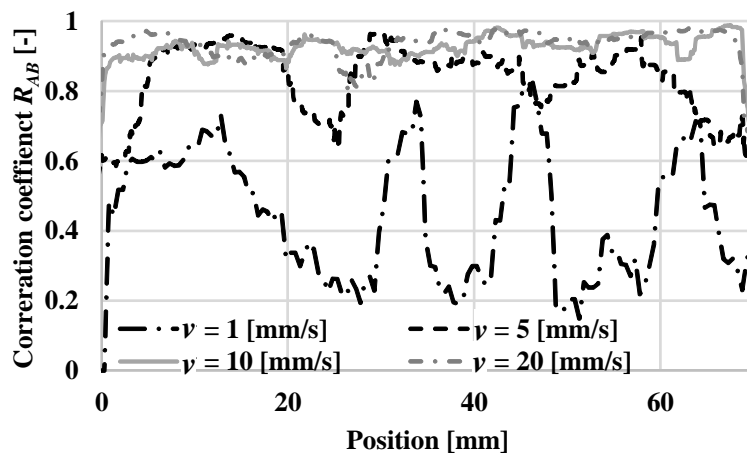
また、適切に走査速度が推定できているかを検証するため、実際の傷の間隔と触覚センサにより推定した傷の間隔の関係を **Fig.3.14** に示す。各計測において傷の間隔はほぼ一致して計測できており、走査速度が正しく測定できていた。

しかし、 $\Delta\tau$ を各速度条件で設定した値よりも短くした場合、走査速度の推定値が局所的に大きくずれる時間領域が生じていた。この例として、**Fig.3.15** に、 $v = 5$ [mm/s] の場合について、 $\Delta\tau$ を 0.5 [s] の条件のもとで計算したときの、速度推定値 v_e とこれに対応する相関関数 R_{AB} を示す。

次に、手動でセンサを走査する実験を行った際に推定される速度 v_e とこれに対応する相関関数 R_{AB} を **Fig.3.16** に示す。ここで、実際に走査した全体の距離と時間の関係から、走査速度が 10 [mm/s] 程度であることが推察されたため、 $v_{min} = 5, v_{max} = 20, \Delta v = 0.1$ [mm/s], $\Delta\tau = 0.5$ [s] と設定し、相関計算を行った。手動でセンサを走査した際には、自動ステージのように走査速度を一定に保つことができないため、3.2.2.3の①に示した手法のみでは速度変化に追従できず、相関関数が低く算出される領域が混在していた。そこで、3.2.2.3の②の(1)および(2)に示した手法により、算出した走査速度と相関関数を **Fig.3.17** 中にそれぞれ v'_e および R'_{AB} とし



(a) Sensor velocity



(b) Correlation coefficient

Fig.3.13 Calculated sensor velocity and correlation coefficient using the outputs from sensors A and B when the sensor system was operated on the acrylic plate with grooves using the automatic linear stage

て示す。Fig.3.16において相関関数の高かった領域で推定された速度が滑らかに接続されている様子が分かる。ただし、確率的に様々な t_r で相関関数がピークをとりうるため、大域的な速度変化から外れる値が、特に相関関数が相対的に低い部分に存在していた。

さらに、3.2.2.3の②の(i)および(ii)に示した手法により、補正処理を行った。ここでは、 $a_{max} = 20$ [mm/s²]と設定し、算出した走査速度と相関

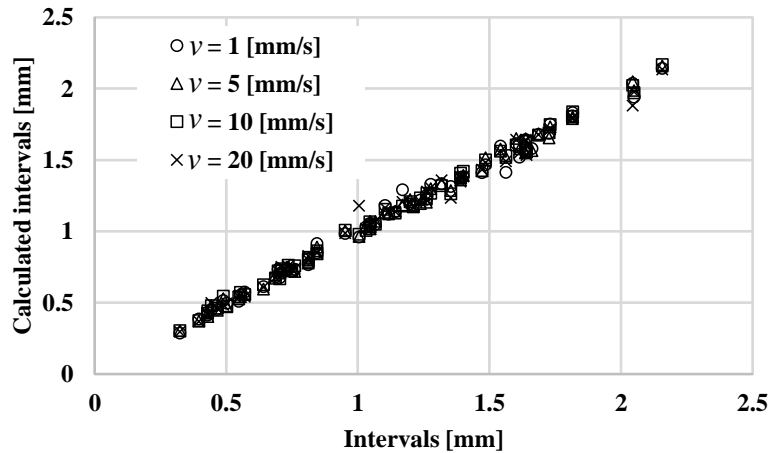


Fig.3.14 Relationship between calculated and actual intervals of grooves when the sensor system was operated on the acrylic plate using the automatic linear stage

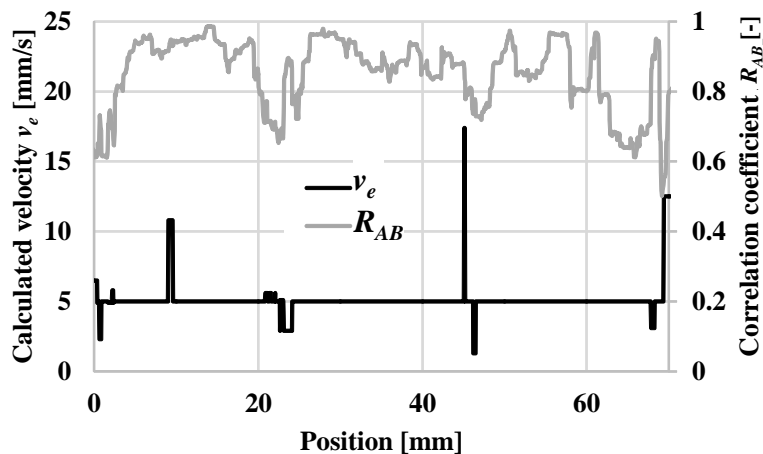


Fig.3.15 Calculated sensor velocity and correlation coefficient using the outputs from sensors A and B when the sensor system was operated on the acrylic plate with grooves using the automatic linear stage ($v = 5$ [mm/s], $\Delta\tau = 0.5$ [s])

関数を **Fig.3.17** 中にそれぞれ v_e'' および R_{AB}'' として示す。また、**Fig.3.14** と同様に、実際の傷間隔と触覚センサにより計測した傷間隔との関係を **Fig.3.18** に示す。走査速度が変動する中で推定を行っているため、ばらつきを含むものの、3.2.2.3の②の処理を施すことによって、走査速度の推定精度が向上した。このため、これ以降の実験結果では、最も妥当な結果が得られた3.2.2.3の改良手法を用いた結果のみを示す。

レーザ変位計により計測した走査速度と、触覚センサにより推定した

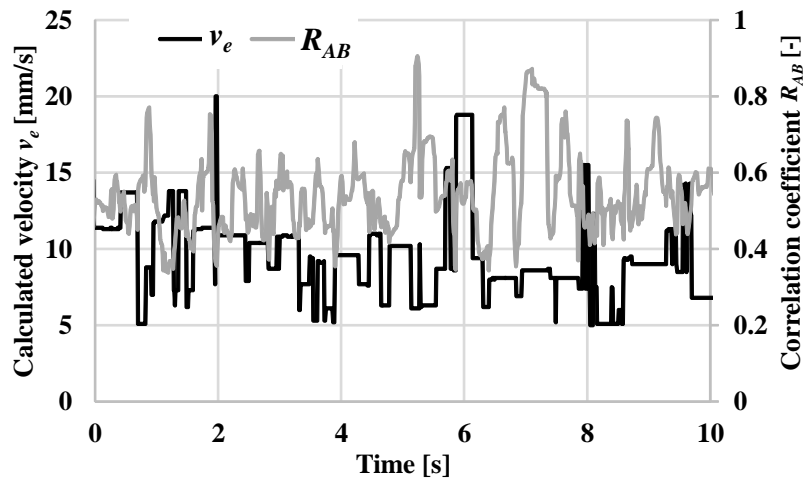


Fig.3.16 Calculated velocity and correlation coefficient when the sensor system was manually operated on the acrylic plate with grooves

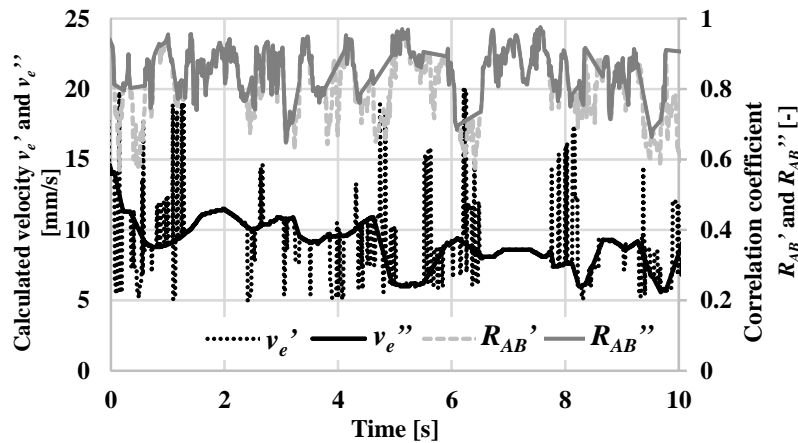


Fig.3.17 Calculated velocity and correlation coefficient using improved calculation method when the sensor system was manually operated on the acrylic plate with grooves

走査速度の比較結果を、**Fig.3.19** に示す。ここで、速度推定の上限である v_{max} を 80 [mm/s] として設定し直した。走査の始動時においては、加速度が大きく、かつ、相関関数を計算するために十分な波形が得られないため、走査速度の推定精度が悪い。しかし、走査速度が安定すれば、本章で提案した手法を用いて、センサ走査時の速度変化の推移をおおむねとらえられることが分かる。

ただし、本実験では、一つの対象面に対してある範囲内での走査速度で測定実験を行ったが、対象面の凹凸のレベルや間隔によっては、対応する理想的な走査速度領域が存在すると考えられる。このため、走査後のある

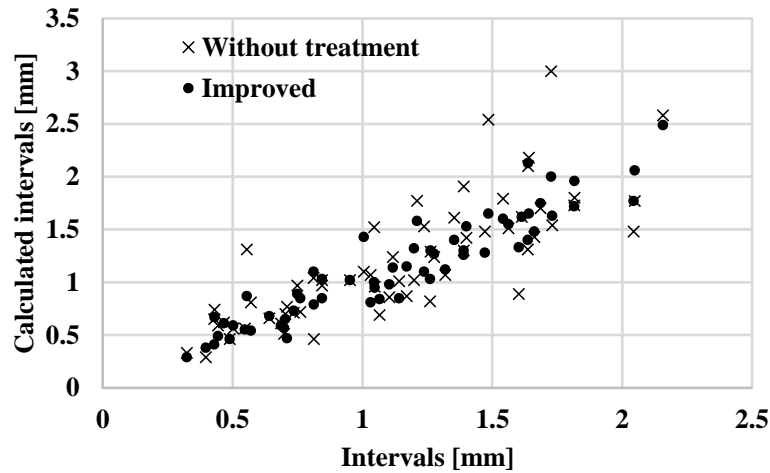


Fig.3.18 Relationship between calculated and actual intervals of grooves when the sensor system was manually operated on the acrylic plate with grooves

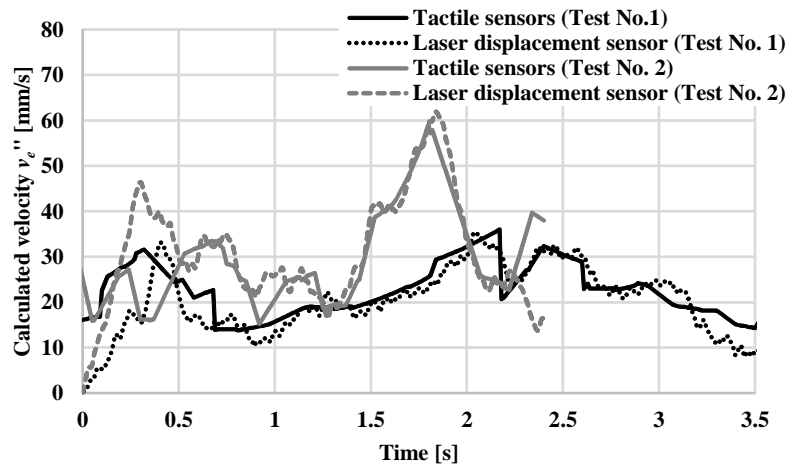


Fig.3.19 Calculated sensor velocity when the sensor system was manually operated on the acrylic plate with grooves

範囲内の速度条件を満たす信号のみ採用する手法^[14]も考えられる。

3.4.2 微小段差の測定

Fig.3.20 に、段差上を走査した際の各センサから得られる出力波形を示す。第2章に示したように、段差の上り下りに対応した波形が現れている。しかし、センサBの段差を下りる各時刻においては、センサA側には段差が存在しないものの、出力が生じてた。また、図中では線が重なっているが、センサBの出力についても同様である。これは、段差の下り時に

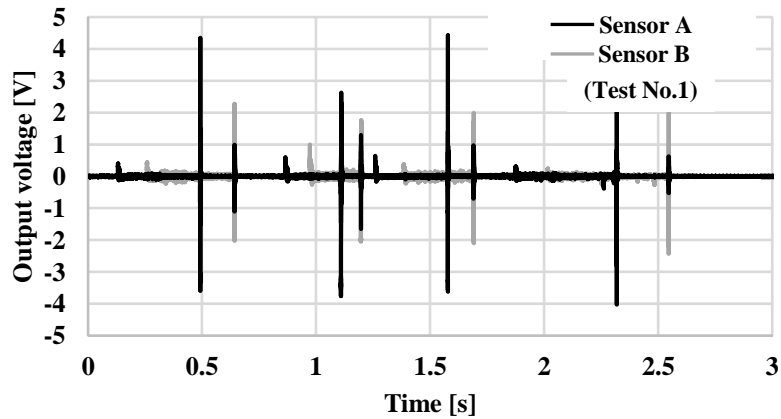


Fig.3.20 Raw output signals when the sensor system was manually operated on the acrylic plate with 4 microsteps (Test No. 1)

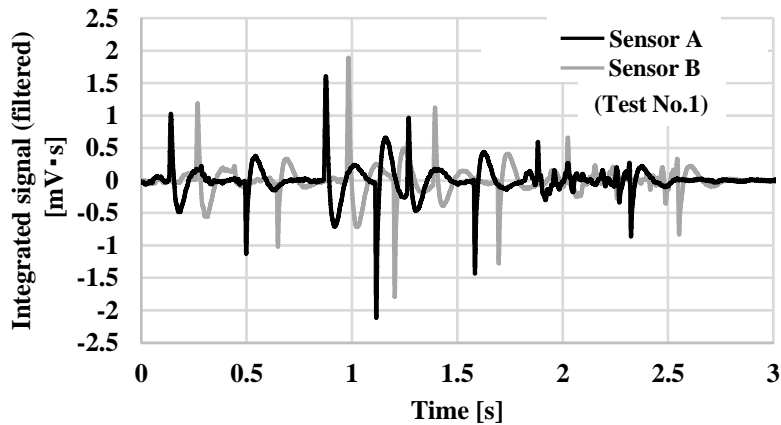


Fig.3.21 Band-pass filtered signals when the sensor system was manually operated on the acrylic plate with 4 microsteps (Test No. 1)

対象面との衝突により過渡的に大きな振動が生じるため、この振動がお互いのセンサへ伝達されたと考えられる。Fig.3.20の波形について、時間積分を行った後、5~100 [Hz] のバンドパスフィルタを施した波形を Fig.3.21に示す。センサの固有振動数は、3.2.1に示したように約 650 [Hz] であったため、周波数フィルタ処理により、過渡的な衝突波形の信号が取り除けた。

バンドパスフィルタを処理した波形を用いて、走査速度を推定した結果を Fig.3.22に示す。走査時、極力一定速度で走査させるようにしたが、始動・停止や摩擦力の変動などの影響を受けて、走査速度が一定となっていないことが分かる。

得られた走査速度を用いて、波形を走査位置と出力の関係に直したものを

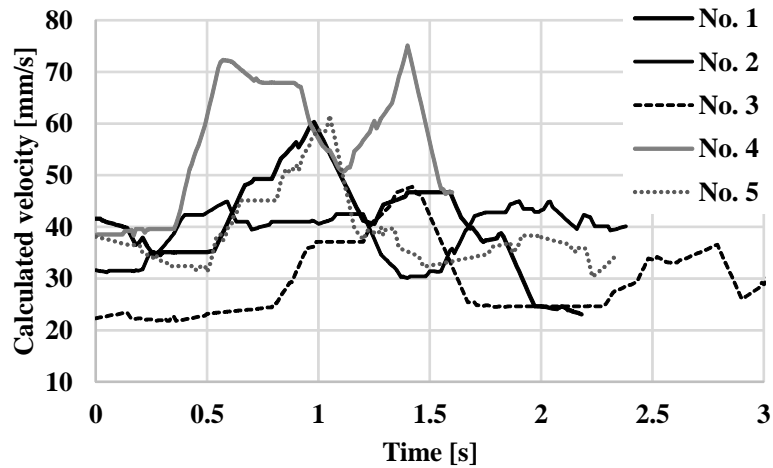


Fig.3.22 Calculated sensor velocity when the sensor system was manually operated on the acrylic plate with microsteps

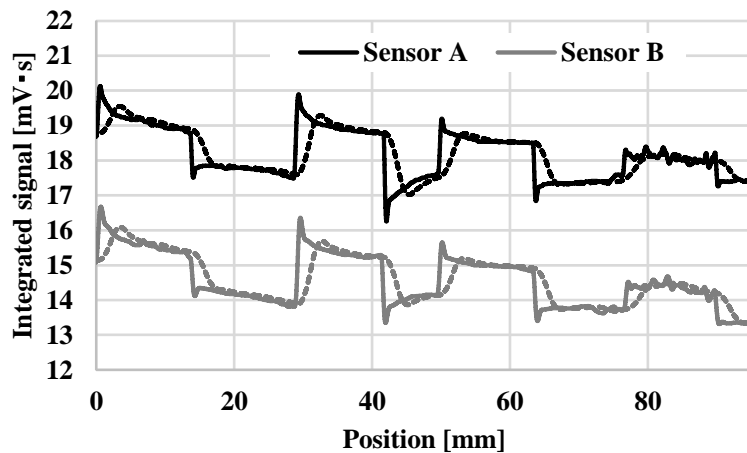


Fig.3.23 Relationships between position and integrated signal when the sensor system was manually operated on the acrylic plate with microsteps

Fig.3.23 (実線) に示す。ここで、センサ B については、前方に 5.3 [mm] 移動させて表示した。走査速度の推定により、段差の存在する位置が各センサで一致して検出できた。この出力関係について、移動平均 (2 [mm] 幅) をとったもの (**Fig.3.23** の破線) を差し引くことにより、段差高さを求めたものを **Fig.3.24** に示す。

センサ出力値を用いて、対象形状のプロファイルを算出した結果を **Fig.3.25** に示す。図は、設定した段差プロファイルを線で示し、**Fig.3.24** のピークとして検出された段差の上りおよび下りの位置と高さの平均値をポイントで示している。また、図中のバーは標準偏差である。結果、**Fig.3.22** のとおり、各計測において走査速度の変動が大きいにもかかわらず

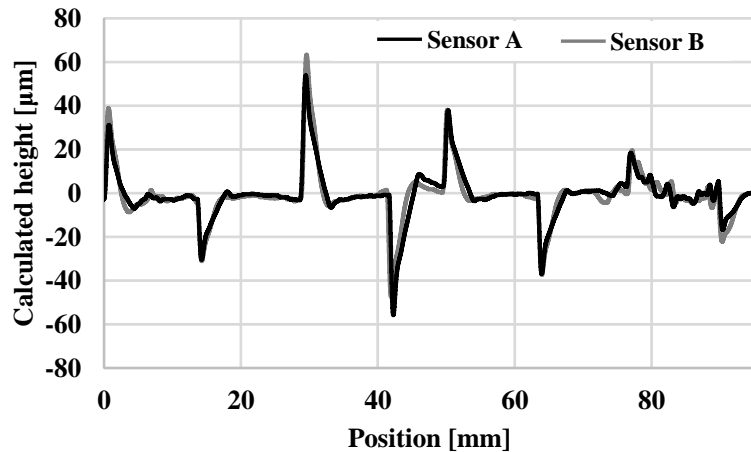


Fig.3.24 Calculated height of microsteps when the sensor system was manually operated on the acrylic plate with microsteps

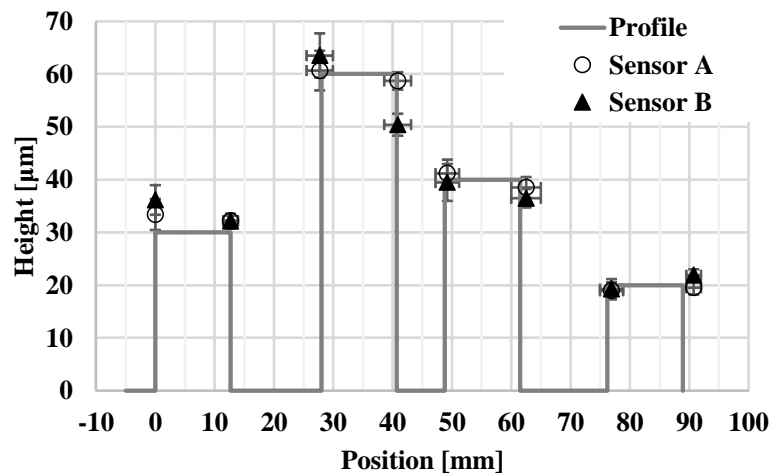


Fig.3.25 Calculated surface profile of microsteps when the sensor system was manually operated. Average value with error bar (standard deviation ($n = 5$))

ず、段差の位置やそれらの間隔が検出できた。対象の段差高さについても、実際の高さに比例して形状が認識できているものの、60 μm の段差下り部分において誤差が大きく生じていた。この段差は、走査した中で一番高さの高い領域となるため、走査の基準面としているケーシングが傾きやすく、これによってセンサ出力が変化している可能性が考えられる。また、**Fig.3.25** は個々の段差高さを独立に評価したものであり、走査領域全体のプロファイルを評価する際には、誤差が蓄積されることに注意する必要がある。

今回測定した際の速度領域は、約 20 $[\text{mm/s}]$ 以上と、従来の表面粗さ計

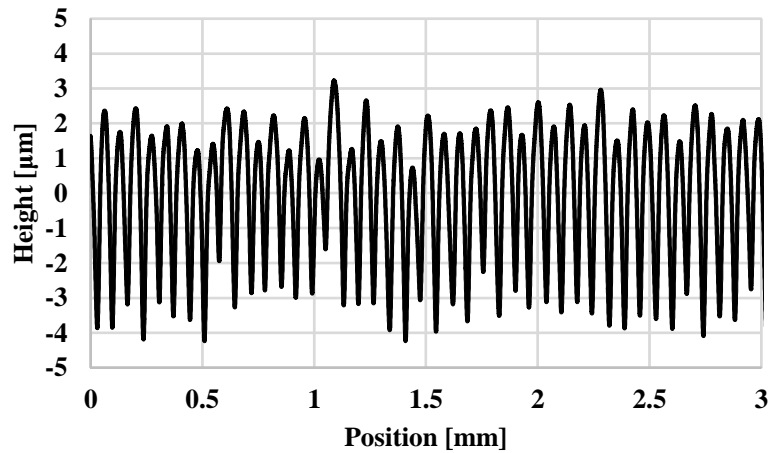


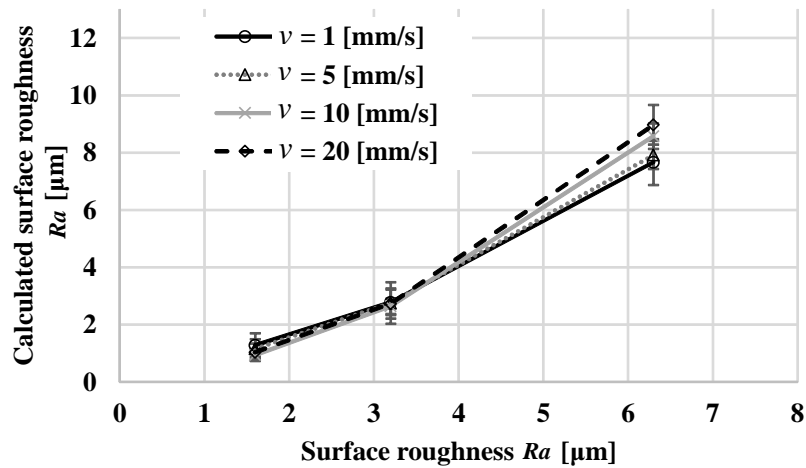
Fig.3.26 Calculated surface profile of roughness standard piece (Ra : 1.6 [μm]) using signal from sensor A. The sensor system was operated using automatic linear stage ($v=5$ [mm/s])

の走査速度 (1 [mm/s] 程度) に比べて非常に大きい。このことより、本計測システムにより、簡便かつ迅速な段差計測が可能となることが示唆される。

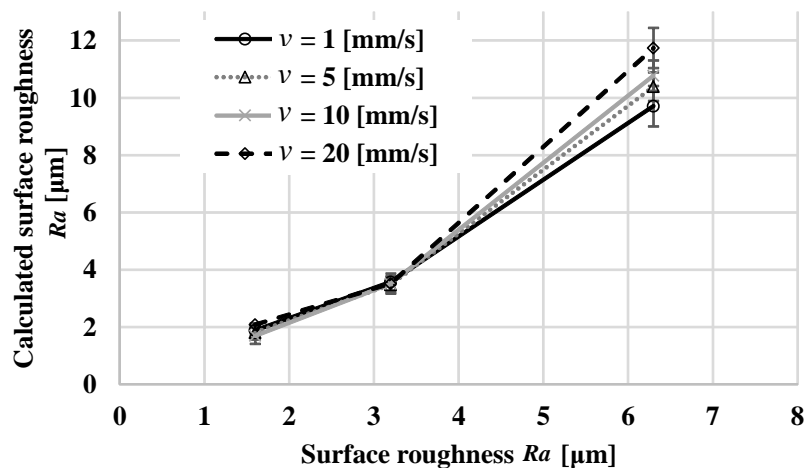
3.4.3 表面粗さの測定

粗さ面のプロファイル測定の例として、走査速度 v が 5 [mm/s] のとき、 Ra : 1.6 [μm] の面を測定した際に得られるセンサ A の信号より、形状プロファイルに換算したものを **Fig.3.26** に示す。第 2 章の薄板型触覚センサを自動ステージに固定した条件での計測手法と同様に、携帯式触覚センサを用いて粗さプロファイルが測定できた。また、センサ出力から表面粗さ Ra を算出したものと、実際の粗さとの関係を **Fig.3.27** に示す。

結果、実際の Ra 値に応じて相関関係が得られていた。しかし、両センサともに Ra : 6.3 [μm] の面において、実際の Ra 値よりも大きくなっており、走査速度が大きいほどこの傾向が顕著であった。これは、凹凸の高さが高くなれば、測定対象面との衝突に伴う過渡的な振動も相対的に大きくなり、設定したローパスフィルタでは、信号から十分に除去できていない可能性がある。本章では、はりの固有振動数を上げるため、CFRP 材料を用いたが、形状については第 2 章同様、矩形形状のはりに別部品としてプローブを取り付ける構造としていた。必要サイズ以上のプローブを取り



(a) Sensor A



(b) Sensor B

Fig.3.27 Calculated surface roughness of standard piece when the sensor system was operated using automatic linear stage. Average value with error bar (standard deviation ($n = 5$))

付ることは、はりの先端におもりを取り付けることに相当し、また、はりとの接着にも重量の増加が伴うため、はりの固有振動数の低下を招く。今後、先端側の断面を細くするテーパ形状にすることや、はりとプローブを一体構造で成形するなど、柔軟性を維持しつつ固有振動数をより高める構造へ改善する必要がある。また、センサ B で推定された表面粗さの値がセンサ A の出力と比較して平均的に 1.3 倍程度大きい結果となっていた。

これは、各センサの取り付け精度に起因するはり先端の突き出し量 h_0 や CFRP 材質のばらつきの影響などが考えられる。この点についても、よりばらつきのないはり材の作製や治具を用いた固定方法について検討する必要がある。

しかし、走査速度の違いによる測定値のばらつきを含むものの、今回測定した速度範囲においては、センサ出力を用いて、一般的な機械加工で標準数列として用いられる Ra の違いを判別可能であった。また、 $Ra : 1.6 \sim 3.2 [\mu\text{m}]$ の範囲での測定においては、繰り返しや走査速度の違いによるばらつきは小さく、表面粗さを良好に推定できていた。微小段差の計測と同様、一般的な表面粗さ計の走査速度よりも大きな速度領域でも計測が行えていることから、表面状態を大まかにすばやく評価したい場合などに、本提案手法が有効であることが示唆される。

本論文では、試作したセンサの特性を評価するため、粗さ標準片を対象として表面粗さの計測を行った。しかし、実際の測定対象面が、粗さ標準片のように周期的な凹凸が繰り返される形状であれば、相関法を用いるという原理上、提案した手法により走査速度を推定することができない。この場合の対策として、例えば測定対象区間の始点と終点に薄い粘着テープを貼りつけ、この粘着テープの段差を含めた計測作業を行うことにより、測定対象区間内の平均的な走査速度の推定が可能になると考えられる。

3.5 まとめ

本章では、簡便かつ迅速に形状プロファイルを計測する手法を提案するため、携帯式センサシステムを構築し、微小段差および表面粗さの計測実験を行った。また、携帯式のセンサシステムを構築するうえで課題となる走査量の評価方法について検討を行った。本章の結果を以下にまとめる。

- (1) 第2章で示した薄板型触覚センサをステージへ固定した計測手法と同様に、携帯式センサを用いて $20 [\mu\text{m}]$ 程度の微小な段差や、 $Ra : 1.6 [\mu\text{m}]$ 程度以上の表面粗さの評価が可能であった。
- (2) 二つの薄板型触覚センサの出力の相関を用いることにより、ほぼ一定の速度条件であれば、センサの走査速度の評価が可能であっ

た。また、制約条件は必要となるものの、相関の計算手法を改善することで、変動のある走査速度に対しても追従して推定が可能であった。

- (3) 段差の計測に関しては、従来の表面粗さ計と比較して大きな速度で対象面上の走査を行っても、段差幅や間隔の評価が可能であった。

第4章

薄板型触覚センサを用いた弾性体の剛性評価に関する基礎検討

4.1 はじめに

前章までは、剛体と見なせる対象面上について、薄板型の触覚センサを用いてなぞることにより、表面の段差や粗さ等の計測を行えることを示した。また、手動走査をした場合の走査量を評価するために、2枚の薄板はりを用いて出力値間の相関関数を求めた。これらは、対象とする物体の剛性が、センサの剛性に比べて非常に高い場合について調べたものであるが、一方、生体組織等のように柔軟な物体上を触覚センサで走査することを考えた場合には、対象の弾性変形に伴い、走査時に薄板はりを対象物に押し込む形になるため、得られるセンサ出力の特徴は第2,3章で述べたものと異なってくる。

Sedaghati ら^[76]は、剛性の異なる二つの圧子（柔軟なゴム材料の円筒形状と剛性の高いフェノール樹脂の円柱からなる）を弾性体に押し付け、PVDF フィルムによりその荷重を検出することで、対象弾性体の剛性を測定した。これは、対象の剛性により二つのセンサ素子の受け持つ荷重分担が変化することを利用したものである。このように剛性が異なる複数のセンサ素子を押し当てることで、対象物体の剛性情報を得ることが可能と考えられ、この考え方は前章まで検討した薄板型触覚センサのセンシング手法によっても実現可能と考えられる。

そこで、本章では、剛性の異なる2種類の薄板型触覚センサを用いて弾性体表面上を走査させることで、弾性体の剛性を測定することを検討した。

4.2 実験

4.2.1 検出原理

触覚センサには、第2章にて用いた薄板型触覚センサを用いた(**Fig.2.1**)。ただし、4.2.2で後述するように厚さのみが異なるはりを用いた。この薄板型触覚センサを自動ステージへ片持ちはり状に固定し、プローブ先端に与えられる**Fig.2.1**の z 方向変位によるはりたわみをPVDFフィルムの伸

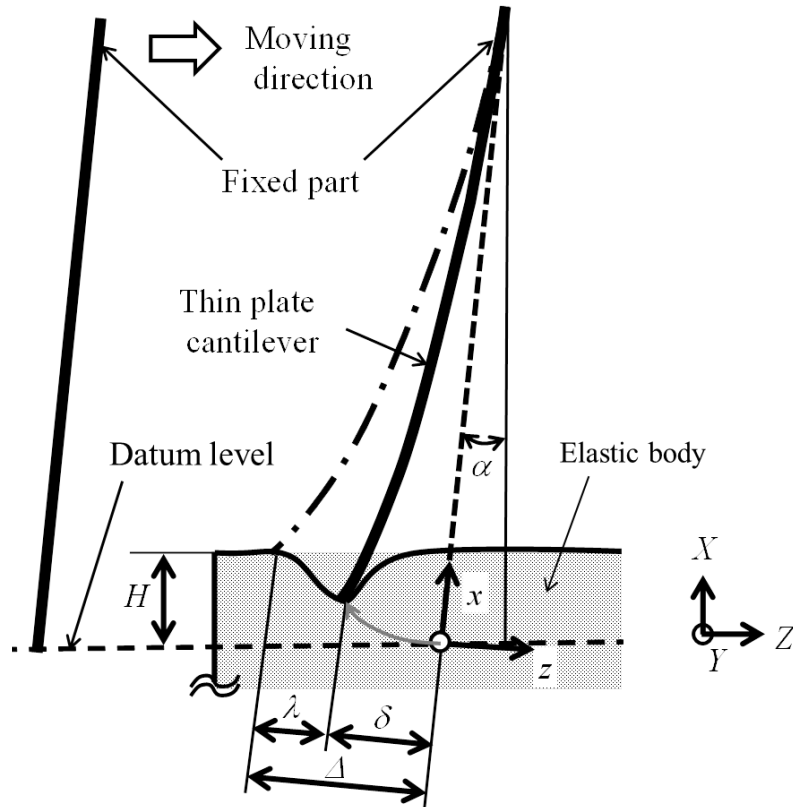


Fig.4.1 Model of thin plate cantilever deformation

縮により検出する。このとき，PVDF フィルムから計測できる電圧 V は，第2章で示したように式 (2.3) で与えられ，印加されたはり先端の変位 δ の1階時間微分に比例する。

この薄板はりを用いて **Fig.4.1** のように，一端を治具で固定し（鉛直方向 X からの角度を α とする），片持ちはりの状態で固定部を水平方向に移動させることで弾性体表面をなぞる動作を考える。走査前に，はりは弾性体のある領域からは離れており，たわんでいないはりの先端の鉛直方向高さは，弾性体表面より H だけ下の位置にとった。走査前にはり先端がある高さの面を，走査の基準面とする。対象物体の剛性が，はりの剛性と比べて十分大きい場合には， H に対応したはり先端のたわみ Δ が生じることとなる。しかし，対象物体が柔軟な弾性体の場合には，先端ははりの弾性により対象物体に押し込まれる。**Fig.4.1** では，プローブのある断面内での模式図を示したが，実際にはプローブ先端で弾性体を押し込むため，弾性体は紙面に垂直な方向にも変形が生じている。弾性体への z 方向の押し込み量を λ ，薄板はり先端に加わる z 方向の荷重を W とすると，次式が成り立つ。

$$\delta = \Delta - \lambda = \frac{Wl^3}{3E_b I_b} \quad (4.1)$$

ここで E_b , I_b はそれぞれ、はりのヤング率および断面 2 次モーメントである。

本研究では、対象に平行な方向の力を無視し、対象面に垂直な方向の負荷荷重 ($P_w = W \sin \alpha$) と押し込み方向深さ ($d_w = \lambda \sin \alpha$) の関係から対象の剛性を推定する。ところで、有限の厚みを持つ弾性体のヤング率は、その厚さや押し込み深さ、押し込む圧子の形状などが影響する。Waters は、様々な厚さのゴムシートに硬い球状圧子を押し込む実験を行い、ヤング率 E_w を次式で表せることを示した [77]。

$$E_w = \frac{9P_w}{16\sqrt{r_w}} \left(\frac{1 - e^{-0.42h_w/b_w}}{d_w} \right)^{3/2} \quad (4.2)$$

ここで、 r_w は圧子の半径、 h_w は変形前の弾性体の厚さ、 b_w は圧子と弾性体の接触面積の半径 ($= \sqrt{2r_w d_w - d_w^2}$) である。式中の $(1 - e^{-0.42h_w/b_w})$ は、ヘルツの弾性接触理論から導かれた式に、有限な弾性体の厚みを考慮するために加えられた無次元の補正因子である。なお、Waters の実験では、シートの厚みの約 10 % 以内の押し込み深さで式 (4.2) の関係を求めた。このように、 P_w と d_w の関係は、実際には複雑な関係を有するが、本内容では単純化して、定数 K_e を介して次式の線形の関係があると仮定する。

$$K_e \lambda \sin \alpha = W \sin \alpha \quad (4.3)$$

式 (4.2) との比較により、 K_e は対象物のヤング率以外に圧子半径にも影響を受けることが分かるが、本研究ではプローブ先端径は同一のため、この K_e を用いて対象物の剛性を推定する。式 (4.1), (4.3) の関係より、次式を得る。

$$\delta = \frac{K_e l^3}{3E_b I_b + K_e l^3} \Delta \quad (4.4)$$

次に、PVDF フィルムより得られる電圧信号の時間積分値を Φ とすると、式 (2.3) と式 (4.4) を用いることで、次式を得る。

$$\Phi = \frac{3Ad_{31}E_f h_s x_s R_V}{2l^3} \frac{K_e l^3}{3E_b I_b + K_e l^3} \Delta \quad (4.5)$$

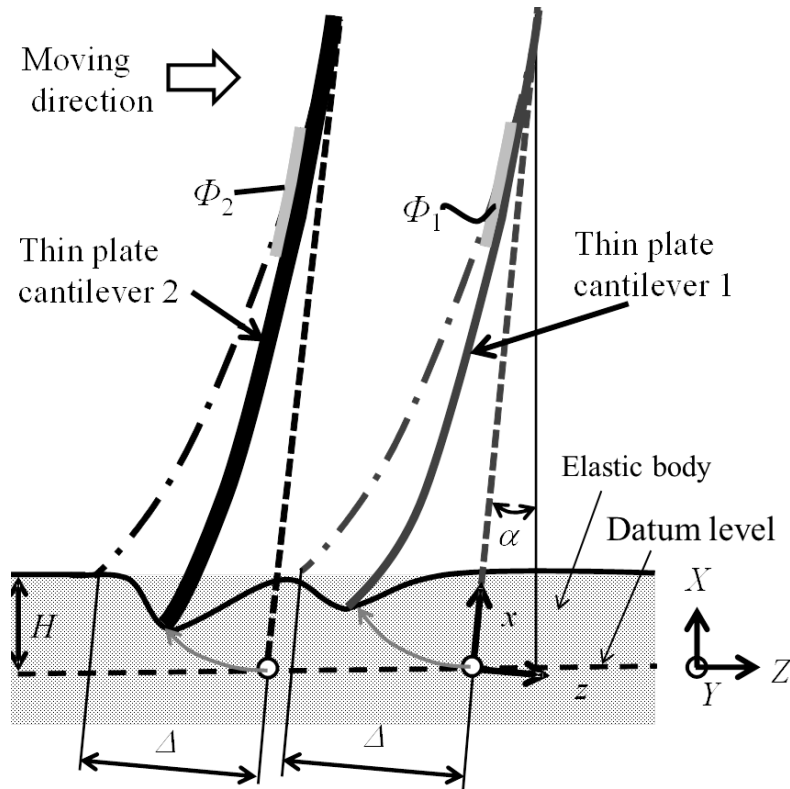


Fig.4.2 Principle of stiffness estimation

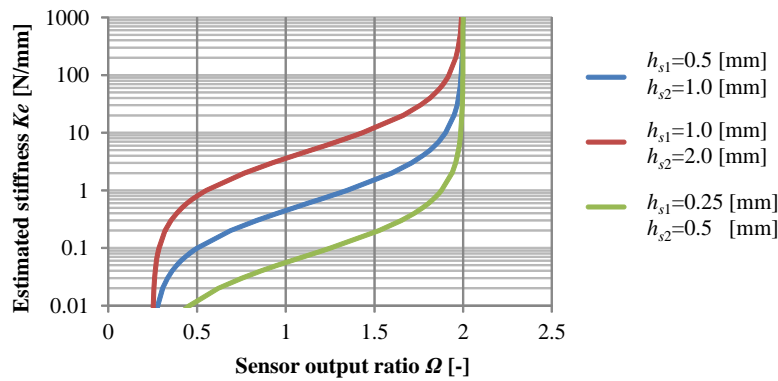
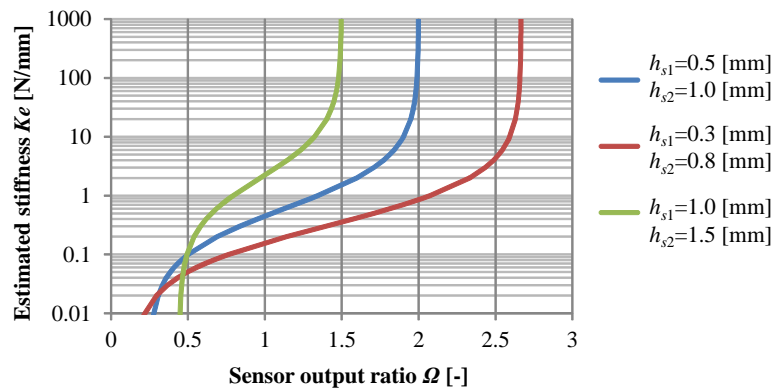
式 (4.5) を整理して K_e を求めると,

$$K_e = \frac{6E_b I_b \Phi}{3h_s x_s A d_{31} E_f R_V \Delta - 2l^3 \Phi} \quad (4.6)$$

を得て、対象物の剛性 K_e を Φ により計測できることが分かる。

しかし、実際に柔軟な物体上を走査する際には、 Δ を精密に位置決めすることは困難であるうえに、 Δ は対象弾性体表面のうねりによっても変化してしまう。そこで、本章では、はりの厚みのみを変え、剛性の異なる2種類の薄板はりで同一部位を走査させた (Fig.4.2)。このとき、2種類のはりが同一部位を通過するときの Δ は同一値をとることを利用し、はりの剛性が異なっても、対応する剛性 K_e が同一であることを仮定すれば、 Δ を消去できる。2種類のはり「1」, 「2」の h_s , I_b , Φ について各はりの番号で添え字を追加して表すこととし、式 (4.5) を書き直すと次式が得られる。

$$\Phi_i = \frac{3A d_{31} E_f h_{s_i} x_s R_V}{2l^3} \frac{K_e l^3}{3E_b I_{b_i} + K_e l^3} \Delta \quad (4.7)$$

(a) $h_{s2}/h_{s1} = 2 [-]$ (b) $h_{s2} - h_{s1} = 0.5 [\text{mm}]$ Fig.4.3 Relationship between sensor output ratio Ω and estimated stiffness K_e

ここで、 $i=1, 2$ である。 $i=1, 2$ に対応する式(4.7)の両辺をそれぞれで割り、整理することにより、式(4.8)を得る。

$$K_e = \frac{3E_b}{l^3} \frac{I_{b2}\Phi_2/\Phi_1 - I_{b1}h_{s2}/h_{s1}}{h_{s2}/h_{s1} - \Phi_2/\Phi_1} \quad (4.8)$$

すなわち、 l の値によらず、2種類のセンサ出力値の比 $\Omega = \Phi_2/\Phi_1$ を用いることで、対象弾性体の剛性 K_e が推定できる。

Fig.4.3 に、センサ出力比 Ω と、式(4.8)を用いて推定される弾性体の剛性 K_e との関係を示す。**Fig.4.3 (a), (b)** のいずれとも、 $h_{s1}=0.5 [\text{mm}]$, $h_{s2}=1.0 [\text{mm}]$, $l=120 [\text{mm}]$, $E_b=206 [\text{GPa}]$, はりの幅: $20 [\text{mm}]$ を基準として、**(a)**: 板厚比 ($h_{s2}/h_{s1}=2$) を一定のまま、各板厚を薄くまたは厚

くした場合，(b)：板厚の差 ($h_{s2} - h_{s1} = 0.5$ [mm]) を一定のまま，各板厚を薄くまたは厚くした場合について示す．センサ出力比 Ω が大きい場合は，各はりが同じたわみ量 δ となることを表し，このとき，弾性体の剛性は高いと推定できる．逆に，センサ出力比 Ω が小さい場合は，剛性の低い方のはり「1」のほうが相対的に大きくたわんでいることを示し，対象弾性体の剛性は低いと推定できる．また，弾性体の剛性を推定するうえでは，**Fig.4.3** に示した曲線において，その傾きが小さい領域で利用することが感度として好ましい．**Fig.4.3 (a)** より，はりの厚さの比が一定であれば，各はりの厚みを変えることで，剛性を評価することに適したレンジを上下に変化できることが分かる．また，**Fig.4.3 (b)** より，はりの厚さの比を変えることで，剛性を評価することに適したレンジの傾きを変えられることが分かる．

4.2.2 実験方法

実験装置を **Fig.4.4** に示す．試作した2種類の薄板型触覚センサの基材には，0.5, 1.0 [mm] のステンレスプレートを用いた．ただしそれぞれの基材には，第2章の実験と同様に，接着弾性層（厚さ 2.1 [mm]）を介して PVDF フィルムを貼り付けており， h_{s1} , h_{s2} はそれぞれ，2.6, 3.1 [mm] とした．一方，はり全体の剛性に接着弾性層が与える影響は小さいため，はりの断面2次モーメント I_{b1}, I_{b2} は，それぞれ，0.5, 1.0 [mm] をもとに計算した．この2枚の触覚センサを，手動マイクロステージ上の治具に片持ちはりの状態で固定し ($\alpha = 5$ [deg])，自動ステージ（シグマ光機製，SGSP20-85）を用いて走査させた．移動距離および速度の制御はステージコントローラによって行った．薄板型触覚センサを走査する際に得られる出力は電流プリアンプ（NF回路ブロック製，LI-76， $R_V = 10^6$ [V/A]）により電流-電圧変換を行い，A/D変換器（National Instruments製，USB-9234）を介してPCに取り込んだ．

剛性の異なる4種類の弾性体（5 [mm] 厚）について実験を行った．用いた材料は，剛体に近い物体としてアクリルプレートを用い，その他ニトリルゴム，ポリウレタンスポンジ，不織布を用いた．各弾性体は著しく摩擦抵抗値などが異なるため，表面はテフロンテープ（中興化成工業製，

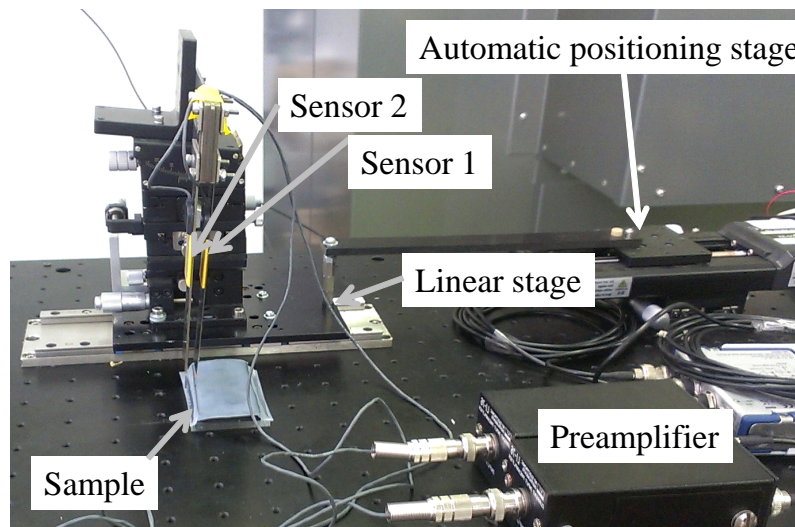


Fig.4.4 Experimental setup

ASF-110 FR, 0.08 [mm] 厚) を貼り付けて覆った。

各弾性体について円柱状圧子を用いた押し込み試験を行い、触覚センサにより推定する剛性と対比させるための圧縮剛性を求めた。本章では式(4.9)の関係を、圧縮剛性 E_c と定義した。

$$E_c = \frac{P_c/A_c}{d_c/h_c} \quad (4.9)$$

ここで、 P_c は負荷荷重、 A_c は円柱の断面積、 h_c は変形前の弾性体の厚さ、 d_c は押し込み深さである。ロードセルに直径 2 [mm] の円柱状圧子を取りつけ、各弾性体を 0.1 [mm/s] の速度で押し込むことで、負荷荷重と変位を計測した。ここで、負荷荷重 P_c が 10 [mN] となることを接触開始点とし、 d_c/h_c が 10 % 以下の領域について、 P_c/A_c と d_c/h_c の関係をプロットし、線形フィットしたときの傾きにより E_c を求めた。結果、ニトリルゴム、ポリウレタンスポンジ、不織布の圧縮剛性は、それぞれ、4.4, 0.51, 0.063 [MPa] であった。アクリルプレートについては、 d_c/h_c を 10 % まで押し込むことができなかつたため、カタログ値のヤング率である 3200 [MPa]^[78] とした。

走査動作は、触覚センサが対象弾性体から外れた位置から走査を開始し、対象弾性体を乗り上げる動作とした。このとき、弾性体表面と基準面との鉛直方向距離 H は、0.1, 0.2, 0.4, 0.6 [mm] に設定した。また、走査速度は 10 [mm/s] とした。各計測については、5 回繰り返し測定を行った。

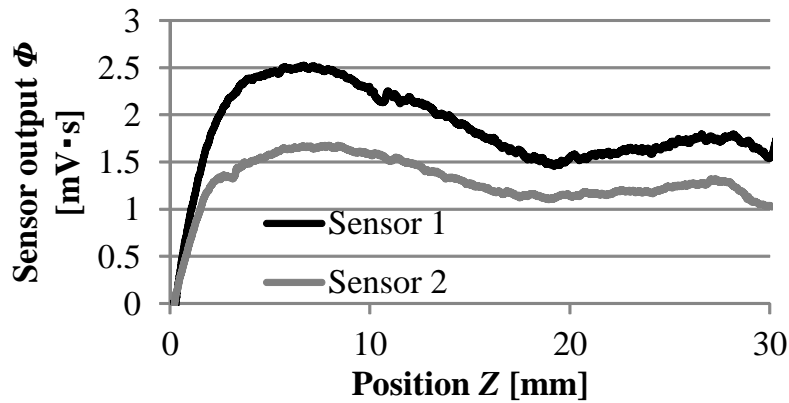


Fig.4.5 Integrated sensor output

4.3 結果

弾性体上を走査する際に計測されるセンサ電圧信号の時間積分値 Φ の例として、弾性体にポリウレタンを用い、表面と基準面との距離 $H=0.4$ [mm] とした結果を **Fig.4.5** に示す。ここで、各センサが弾性体に接触する位置を $Z=0$ とした。弾性体に乗上げる際に、出力信号は増大し、その後、各センサの出力値はほぼ同等の比率で推移している。

Fig.4.6 に、 H の違いによるセンサ信号の出力比 Ω への影響を示す。以降出力比 Ω は、弾性体の表面上を走査した際の、 $Z = 10 \sim 30$ [mm] の間の平均値とした。各弾性体について、 H が大きくなるほど、触覚センサの出力比 Ω が大きくなる傾向にあった。しかし、異なる H の条件の中でも、触覚センサの出力比を用いて、各弾性体の違いを区別することが可能であった。

Fig.4.7 に、式 (4.8) より得られる Ω と対象弾性体の剛性 K_e の推定値との関係を示し、異なる H の4条件において繰り返し5回測定したときの Ω の領域（範囲は標準偏差， $n = 20$ ）を示す。結果、対象物体の剛性の大小に応じたセンサ出力が得られていることが分かる。しかし、剛性の変化（対数スケール）に対し、 Ω （線形スケール）のばらつきは存在することから、同じオーダの剛性を有する弾性体について比較測定することは難しい。

Fig.4.8 に、各弾性体に対して、異なる H の4条件において繰り返し5回測定したときの Ω より推定した K_e と実測した圧縮剛性 E_c との関係を示す。

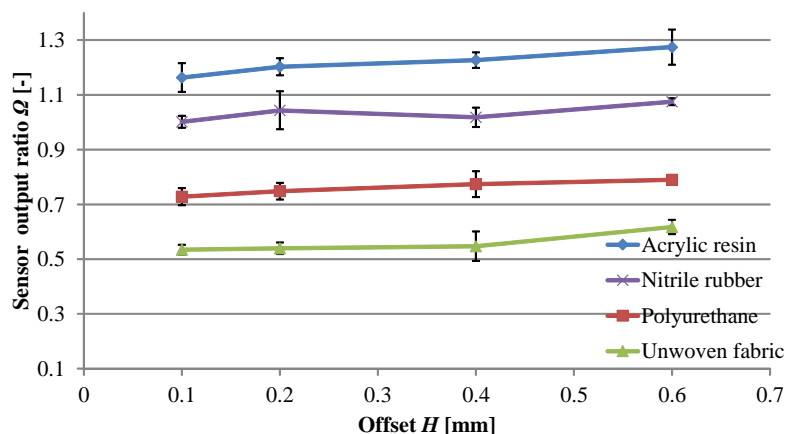


Fig.4.6 Relationship between H and sensor output ratio Φ . Average value with error bar (standard deviation ($n = 5$))

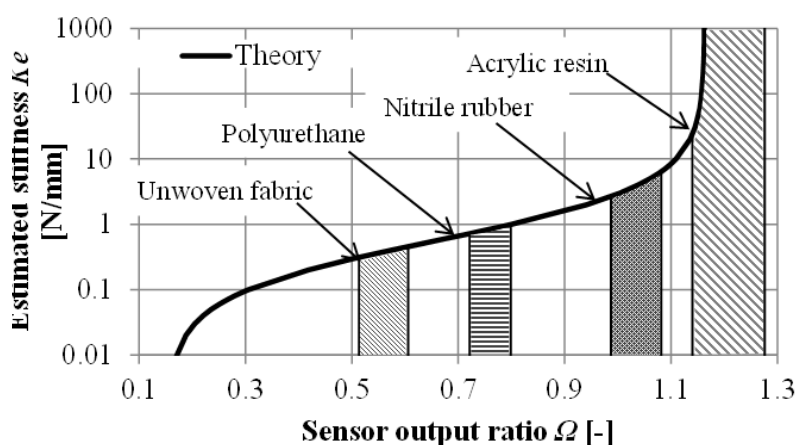


Fig.4.7 Estimation of stiffness

示す ($n = 20$)。前述のように精密な剛性測定は難しいが、広いレンジで対象物体の剛性を捉えることができた。

4.4 考察

Fig.4.6 に示したように、 H が大きくなるほど、センサの出力比 Ω が大きくなる傾向にあった。出力比 Ω が大きくなることは、対象の剛性が大きくなることに対応する。本章では、押し込み量と反発力の関係は、式 (4.3) のように線形の関係と仮定していた。しかし、実際は式 (4.2) のように、弾性体の厚さや押し込み深さの影響がある。押し込み量が大きくなると、プローブと弾性体との接触面積が増えることにより、反発力が大き

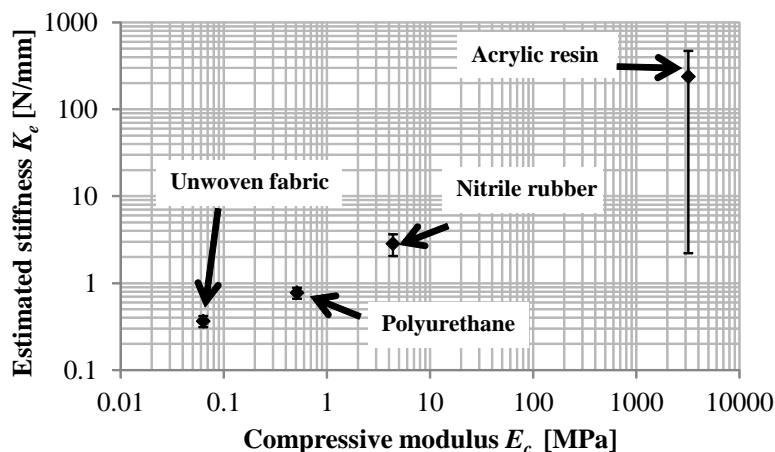


Fig.4.8 Relationship between compressive modulus E_c and estimated stiffness K_e . Average value with error bar (standard deviation ($n = 20$))

くなる。また、有限の厚みを持つ弾性体の多くは、押し込まれるにつれて厚みが小さくなり、その密度が大きくなることで、反発力が大きくなる。 H と出力比 Ω の関係は、これらの影響を受けている可能性がある。さらに本章では、粘性については考慮しなかったが、剛性はその材質によって粘性の影響を受け、負荷荷重の速度によって変化する。このため、触覚センサの走査速度が剛性計測に与える影響についても今後検討を行う必要がある。

また、剛性計測には、負荷する荷重領域が影響することも考えられる。例えば、測定対象がアクリルプレートのように対象弾性体の剛性が十分高く、押し込み量 λ を無視した場合に、式(2.20)を用いて、対象弾性体へ負荷される鉛直方向の力 N を見積もる。結果、 $H = 0.6$ [mm]の条件で、厚さが0.5および1.0 [mm]のはりについて、それぞれ、 $N = 4.4, 35$ [N]であった。本章では、各はりで対応する K_e が同じであるという仮定をしたが、実際には、負荷する荷重の領域によって対応する弾性率が異なることも考えられるため、この影響についても検討を行う必要がある。

Table 4.1に、各種の生体組織について、病変による剛性変化の例を示す。これらの値は測定方法は様々であるが、相対比較として、病変により剛性のオーダーが変化していることが分かる。本提案手法は、広範囲のレンジの剛性予測が可能であり、また、圧電ポリマーを用いていることから、正常組織と病変組織の境界に敏感な特性を有すると考えられ、生体組織の

Table 4.1 Stiffness change of living tissue due to lesion

| Tissue | Normal tissue [MPa] | Lesion tissue [MPa] |
|-------------------------------------|---------------------|--------------------------------------|
| Blood vessel ^[79] | 0.041± 0.0105 | 0.0817±0.0332 (Fibrous) |
| | | 0.346± 0.255 (Calcified) |
| Breast ^[80] | 0.020 | 0.232 (Fibrous) |
| | | 0.490 (Invasive ductal carcinoma) |
| Articular cartilage ^[81] | 0.44 | 0.03 |

病変検出に有効であることが示唆される。

アクリルプレートの場合，センサ間の出力の差がほとんどないことから，剛性の予測値は大きくばらついていて，感度は，測定したい物体の剛性の領域を，**Fig.4.3** および **Fig.4.7** に示した曲線においてその傾きが小さい領域とすることが最も良い。すなわち，測定のターゲットとする物体に応じて，はりの剛性は最適に調整する必要があり，より柔軟な物体であればはりの剛性は低く設定する必要がある。生体のように柔軟な物体について測定することを想定した場合には，PVDF フィルムの柔軟性を活かした構造とできる可能性も考えられる。

4.5 まとめ

本章では，剛性の異なる 2 種類の薄板型の触覚センサを用いて，弾性体表面をなぞる際の出力特性について検討した。本章の結果を以下にまとめる。

- (1) 弾性体上を走査させた際に得られるセンサ出力値と対象弾性体の剛性との関係を定式化した。このとき，二つの触覚センサの出力を比として扱うことにより，表面のうねりの影響を除去した形式で，対

象弾性体の剛性を表せることを示した。

- (2) 剛性のオーダーが異なる弾性体サンプルを対象に計測を行い，各サンプルの剛性が予測できることを実験的に示した。
- (3) 繰り返しの計測時に剛性推定値のばらつきは大きいですが，剛性のオーダーが異なるサンプルは有意に区別できた。本提案手法では，一つのセンサシステムで広いレンジでの剛性予測が可能であることに特長があり，病変等に起因して剛性のオーダーが変化する生体組織の評価に適用できる可能性がある。

第 5 章

結言

5.1 はじめに

本研究では、従来、人が触覚に頼って行っている評価を、定量的かつ簡便な測定手法へ代替することを目的として、新たな触覚センサの開発に取り組んだ。具体的には、基材としての薄板はりと、ひずみを検出する圧電ポリマーから構成されるウイスカ型触覚センサを試作し、金属の表面など剛性が十分高い物体を対象とした場合の表面の段差や粗さの計測について、また、柔軟な物体を対象とした場合の剛性の計測について検討した。本研究の取り組みから得られた結果を以下にまとめる。

5.2 第2章 -薄板型触覚センサを用いた凹凸面評価に関する基礎検討-

第2章では、新たな触覚センシング手法を構築するための準備として、薄板型の触覚センサの特性について基礎的な検討を行った。このとき、測定対象としては、金型のバリや接合部、鋳物の巣などの微小段差、あるいは、金属加工面の仕上げ状態に代表される表面粗さの異常状態を想定した。これらに対応する単純化した凹凸形状の微小段差および表面粗さを、自動ステージにより触覚センサを走査させ測定した。また、凹凸面上を薄板型触覚センサで走査するとき、触覚センサから得られる圧電出力値について、一般面上の場合と、想定した表面性状の異常部位として段差エッジを登る場合、下る場合に分けて定式化し、実験結果との比較を行った。

結果、段差エッジの登り時には、走査速度に線形に依存する大きさのセンサ出力値が得られており、その出力波形は定式化により予測したものと同一傾向であった。また、段差エッジの下り時には、下る段差の高さに線形に依存する大きさのセンサ出力値が、はりの自由振動により得られており、その傾向は予測値と一致した。この下り時の波形は短い時間間隔で生じており、このことが段差を登る際と比べて大きな出力が生じる要因となっていた。これらのことより、試作した薄板型触覚センサの出力を定式化した挙動により表せると考えられ、また、はりの固定角度が出力に与える影響についても議論した。

ただし、下り時には測定面との衝突により過渡的な振動が生じるため、このときの出力波形は、ノイズとして形状評価に悪影響を及ぼすことがわかった。このため、用いる薄板はりについては、柔軟性への配慮をしつつ、はりの固有振動数を大きく設定したうえで、減衰を大きくすることが重要であり、それと同時に、出力値に対しては、はりの固有振動数を考慮した適正な周波数フィルタ処理を施す必要があることを示した。このとき、薄板はりに減衰を付与するためには、拘束制振構造とすることが有効であることを実験的に示した。

上記の対策の結果、提案手法により、10 [μm] 以上の段差高さのプロファイル評価を、一般的な表面粗さ計の走査速度（1 [mm/s] 程度）に比べて大きな走査速度の領域（20 [mm/s])で行えることを示し、さらに、三角波形状の粗さ面を対象とし、算術平均粗さ Ra : 1.6~6.3 [μm] に線形に対応したセンサ出力を得られることを示した。これらのことより、提案した薄板型の触覚センサを用いて、微小な表面プロファイルを迅速に計測できる可能性が示唆された。

5.3 第3章 -携帯式触覚センサシステムの開発-

第3章では、第2章で得られた知見のもと、携帯式の触覚センシングシステムを試作し、評価実験を行った。現実のものづくりの現場において、特に大型な測定対象物の側面や底面などを測定する場合には、第2章の実験で用いたように自動ステージなどのアクチュエータを設置することは困難であり、また、治具の設置等の煩わしい設定は極力避けることが望まれる。そこで、手動で走査できる携帯式の触覚センサシステムについて試作検討を行った。

第3章において試作した触覚センサの薄板はりは、第2章で得られた知見のもと、柔軟性を維持しつつ固有振動数を上げることと、また、減衰を大きくすることを目的に、CFRP材からなる拘束型の積層はりを用いた。この薄板はりを、人が把持して走査可能なケース内に搭載し、携帯式のセンサシステムを試作した。試作した携帯式触覚センサシステムを用いて、微小段差や表面の粗さ計測実験を行った結果、第2章で示した薄板型触覚センサをステージへ固定した計測手法と同様に、20 [μm] 程度の微小な段

差や, $Ra: 1.6 [\mu\text{m}]$ 程度以上の表面粗さの評価が可能であることを示した.

また, 人がセンサを定められた速度に保って手動で走査させることは困難であるが, 形状プロファイルを評価するためには, センサが走査した各時刻での移動量を把握することが必要となる. そこで, 二つの薄板はりの出力について, 相関法を用いることにより走査時の速度を推定する手法を考案し, ほぼ一定の速度条件であれば, センサの走査速度の評価が可能であることを示した. また, 一定の制約条件は必要となるものの, 相関関数の計算手法を改善することで, 変動のある走査速度に対しても追従して推定が可能であることを示した. 特に, 段差の計測に関しては, 従来の表面粗さ計と比較して大きな速度 ($20 [\text{mm/s}]$ 以上) で対象面上の走査を行っても, 段差幅や間隔の評価が可能であることを示した.

ここで提案しているウィスカ型の触覚センサによる計測手法は, 圧電ポリマーを用いているため, ひずみゲージに代表される変位応答型センサとは異なり, 出力は速度依存性を有する. このため, 走査速度に比例して大きな出力値を得ることができ, 結果として S/N 比を高くとれることに特長がある. この結果, ひずみゲージと比較して, 明瞭に凹凸形状を捉えられることを第2章にも示している. また, 大きなうねりや段差のある形状の中に含まれる微小凹凸を評価することを想定した場合に大変形に追従する柔軟性と堅牢性を兼ね備える必要があるが, これに対しても, 圧電ポリマーの有する特長を活かした構成となっている.

以上第2章および3章において, 提案の触覚センサシステムは, 手動の走査により, 迅速, 簡便, 定量的に金属材料等の微小段差や表面粗さの異常状態をスクリーニングするための評価手段として有望であることを示した.

5.4 第4章 -薄板型触覚センサを用いた弾性体の剛性評価に関する基礎検討-

第4章では, 薄板型触覚センサを用いた別の視点として, 柔軟な物体の剛性評価に関する検討を行った. 第2,3章においては, 対象とする物体の剛性が高い場合について調べたが, 生体のような柔軟な弾性体上を走査し

た場合には表面粗さのみならず，対象物の剛性を評価することが有用な情報となる．第3章においては，センサの走査速度を求めるために，2枚の薄板型触覚センサを用いたが，第4章では，剛性の異なる2種類の薄板型触覚センサを用いることで，弾性体の剛性を測定する手法を検討した．

まず，剛性評価のための測定原理について定式化を行った．各はりがたわむことによるセンサの出力値は，はりの弾性変形による押し込み力と弾性体からの反発力とのつり合いから求められる．ここで，センサから得られる出力値は，初期押し込み量に依存した値をとることになるが，二つの薄板型触覚センサから得られる値を比として扱い，同一部位を各はりが通過することを利用することで，初期押し込み量を式から除去ができることを示した．結果として，対象面にうねりの影響を除去した形で，剛性を評価できることを定式化した．

また，圧縮剛性のオーダーが異なる弾性体サンプル ($10^{-2} \sim 10^3$ [MPa]) を用いて，検証実験を行い，対象弾性体の剛性に応じたセンサ出力値の比が得られることを実験的に示した．本提案手法では，一つのセンサシステムで広いレンジでの剛性予測が可能であることに特長があり，病変等に起因して剛性のオーダーが変化する生体組織の評価に適用できる可能性がある．また，圧電ポリマーを用いていることから，正常組織と病変組織の境界に敏感な特性を有すると考えられる．

5.5 今後の課題と展望

本研究においては，圧電ポリマーを用いた新たな触覚センサの開発に取り組んだ．このうち，第2,3章に示した取り組みについては，金属等の硬い表面を対象に，その表面の段差や粗さを迅速に評価できる手法であることを示した．ただし，本研究の一連の実験は，実験室内での限られた条件下で，単純化した形状を評価したものである．このため，本提案手法を，現実の作業現場などに適用させるためには様々解決すべき項目があり，今後，以下に示す項目について，より検討を進める必要があると考えられる．

- ロバスト性およびユーザビリティの向上

本研究の一連の実験では、矩形状の微小段差や三角波形状の表面粗さについて、その形状プロファイルの計測が可能であることを示した。しかし、現実問題として対象となる異常面の形状は多種多様であり、それらに対応した評価が行えるかは、実際の対象を用いて検証実験を行い、知見を積み重ねていく必要があると考えられる。場合によっては、対象に特化したセンサ構造を再構成する必要も考えられる。また、本研究においては、点接触かつ潤滑剤を塗布したプローブを用いていたため、摩擦の影響は無視したが、現実の材料としては、摩擦の影響が無視できない状況もありうる。また本研究では、簡便な計測を目指すため手動走査を想定した計測システムを構築したが、一連の実験はすべて一人の測定者による実験であった。測定者によってもセンサの基準面への押し付け力など計測の状態が異なることで、測定精度に影響してくる可能性もある。これら、様々な状況に対応できるロバスト性を備えたセンサシステムへ改善していく必要がある。

また、手動走査を想定した計測システムについて、第3章に述べたように、ある程度の速度変化にも追従するように計測処理方法を検討した。しかし、測定精度を確保するためには、想定内の測定条件で作業が行われるよう工夫する必要がある。例えば、本提案手法では、二つの触覚センサの出力について相関関数を用いて走査速度の推定を行っているため、センサのプローブが同一部位を走査するように直進させる工夫が必要となる。また、極端な速度変化は、走査量の誤認識を伴い測定精度の低下を招いてしまうため、評価区間から除外するなどの対策が必要となることが考えられる。このため、適正な範囲で計測作業が行われるよう、ハードウェアとして、直進性を担保するような機構や、例えば薄いテープを評価区間の始点と終点に設置することで評価区間を明確にする方法、また、ソフトウェア側で、極端な走査速度変化を検知し、評価から除外するとともに、適正な走査をユーザ側へ呈示するなどの対策も必要になる。

- 小型化等のデバイスの改善

本研究では、電流プリアンプおよび A/D 変換器は、別途、触覚セ

ンサを構成するケースの外部に設置して実験を行っていた。このため、例えば測定現場を移動する際などには、信号線のつなぎ替えなどの作業が必要となってしまう。しかし、本研究で用いたアンプおよび A/D 変換器のスペックであれば、実験で用いている触覚センサのケーシング内に収まる程度のサイズで製作が可能であり、実際に、我々は試作機の作製を進めている。この試作機では、増幅された信号の出力が可能であり、PC との接続を行うのみで、簡単に計測準備、操作が可能となると考えられる。また、センサ素子とプリアンプの電線長を短くすることで、ノイズ対策にも効果がある。

また、第 3 章では、測定面との衝突に起因するノイズを除去をしやすくするため、はりの固有振動数を上げられるよう、薄板はりの材質に CFRP を用いた。しかし、薄板はりの形状は、単純な矩形形状であり、また、別部品としてプローブを取り付ける構造としていた。今後、先端側の断面を細くするテーパ形状にすることや、はりとプローブを一体構造で成形するなど、さらに柔軟性を維持しつつ固有振動数をより高める構造へ最適化する必要がある。加えて、薄板はりの固有振動数を向上させるためには、はりの長さを短くすることが必要となる。この場合、ひずみを検出する圧電ポリマーの電極面積を小さくすることが余儀なくされるため、センサとして得られる圧電出力も小さくなり、S/N 比が悪化することが懸念される。本研究の一連の実験では、圧電ポリマー材として一般に市販されている PVDF を用いたが、より高感度な圧電ポリマーを用いることにより、サイズダウンを図りながらも、感度を保つことが可能になる。例えば、VDF オリゴマー^[56,82] は、PVDF の低分子量体であり、PVDF より高い残留分極量を有することから、センサの感度係数を表す圧電定数が大きいことが期待されている。このように、触覚センサに用いる材質、センサ素子についてさらなる改善を検討する必要がある。

また、第 4 章で示したように、病変などによって剛性が変化する生体組織について、その剛性評価に薄板型触覚センサが応用できることを、その

原理の基礎検討として示した。近年では，第1章で述べたように，術中，術後の患者の負担を低減するため，切開を最小限とし，内視鏡やカテーテルを用いた低侵襲医療が用いられることが多い。この場合，術者の触覚情報は制限され，患部を直接触れられない状況におかれるため，触覚情報を術者に提供できるデバイスや，病変部性状の検出が可能なデバイスへのニーズが高まっている。PVDF フィルムや VDF オリゴマーフィルムを用いた柔軟なカテーテル型の触覚センサデバイスについても検討を進めており^[83]，生体内の触診デバイスへ応用することも期待できる。

5.6 最後に

以上，圧電ポリマーを用いたウイスカ型の触覚センサを開発し，その応用を目指した検討を行った。得られた知見を基に，今後，発展的に開発を進めることで，人が触覚に頼って行っている評価を定量的かつ簡便な手法へ代替できる，新たな計測デバイスを構築するための一助となると考えられる。最終的に，医療分野での触診デバイスとして，また，様々な製品検査工程における評価デバイスとして活用されることを期待する。

参考文献

- [1] 下条誠, 前野隆司, 篠田裕之, 佐野明人編: “触覚認識メカニズムと応用技術-触覚センサ・触覚ディスプレイ-【増補版】”, S&T 出版, 2014.
- [2] 下条誠: “触覚センシング”, <http://www.rm.mce.uec.ac.jp/lecture/mech/H19PDF/TactileSensing.pdf>
- [3] 向井利春, 羅志偉, 加藤陽, 中島弘道: “第 1 編 超五感センサの実現に向けて”, 超五感センサの開発最前線, (株) エヌ・ティー・エス 出版, pp.3-10, 2005.
- [4] 金子真, 別所良治, 辻敏夫: “Tracing 型人工能動触角”, 日本ロボット学会誌, vol.18, no.8, pp.1173-1179, 2000.
- [5] 前野隆司: “ヒト指腹部と触覚受容器の構造と機能”, 日本ロボット学会誌, vol.18, no.6, pp.772-775, 2000.
- [6] 鄭森介, 前野隆司: “ヒト指腹部における軟らかさ分布検出特性に及ぼす触覚呈示法の影響”, 日本機械学会論文集 C 編, vol.67, no.658, pp.1926-1933, 2001.
- [7] 小林一三, 前野隆司: “ヒト指腹部構造と触覚受容器位置の力学的関係(第 3 報, 凹凸を有する面と指の接触解析結果)”, 日本機械学会論文集 C 編, vol.65, no.636, pp.3321-3327, 1999.
- [8] 篠田裕之: “器用な手の皮膚と触覚”, 日本ロボット学会誌, vol.18, no.6, pp.767-771, 2000.
- [9] 佐野明人, 菊植亮, 望山洋, 武居直行, 藤本英雄: “触の技と数理”, 日本ロボット学会誌, vol.23, no.7, pp.805-810, 2005.
- [10] 神代和欣: “熟練技能の構造と産業空洞化問題”, 日本労働研究雑誌, vol.41, no.7, pp.11-21, 1999.
- [11] 田中由浩, 佐藤英雄, 藤本英雄: “指に装着する面歪検出用触覚センサの開発”, 日本機械学会論文集 C 編, vol.75, no.754, pp.1639-1646, 2009.
- [12] 大岡昌博, 宮岡徹, 川村拓也, 三矢保永: “可変段差呈示装置によるヒトの表面粗さ弁別能力試験”, 日本機械学会論文集 C 編, vol.64, no.625, pp.3534-3540, 1998.

- [13] 日本金属電鍍株式会社: アラサ標準片カタログ.
- [14] 橋口大輝, 菊植亮, 山本元司: “金属表面の検査のための触覚センサシステムの開発”, 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会講演論文集, pp.295-298, 2012.
- [15] 菊植亮, 中村健太, 山本元司: “表面評価のための指先装着型触覚センサ”, 日本機械学会論文集 C 編, vol.77, no.784, pp.4567-4580, 2011.
- [16] T. N. Clements and C. D. Rahn: “Three-Dimensional Contact Imaging with an Actuated Whisker,” IEEE Transactions on Robotics, vol.22, no.4, pp.844-848, 2006.
- [17] 田中真美: “ヒトから学ぶ触覚感性計測用センサシステムの開発”, 日本ロボット学会誌, vol.26, no.3, pp.230-233, 2003.
- [18] 山下順広, 立矢宏, 塚本卓: “ウィスカ型触覚センサを用いたなぞり動作による接触面形状の呈示”, 日本機械学会論文集 C 編, vol.73, no.730, pp.1786-1793, 2007.
- [19] ステッドマン医学大辞典. メジカルビュー社, 1997.
- [20] 尾股定夫: “超音波による haptic (触覚に係わる) 技術の開発と次世代医療機器への応用: 我が国の医療機器産業創出を目指して”, 日本音響学会誌, vol.66, no.2, pp.84-90, 2010.
- [21] 石川正俊, 下条誠: “感圧導電性ゴムを用いた 2 次元分布荷重の中心の位置の測定方法”, 計測自動制御学会論文集, vol.18, no.7, pp.730-735, 1982.
- [22] 郡司大輔, 荒木拓真, 並木明夫, 明愛国, 下条誠: “触覚センサによる滑り検出に基づく多指ハンドの把持力制御”, 日本ロボット学会誌, vol.25, no.6, pp.970-978, 2007.
- [23] 下条誠: “感圧導電性ゴムの履歴特性”, 日本機械学会論文集 C 編, vol.59, no.564, pp.2464-2468, 1993.
- [24] H. R. Nicholls and M. H. Lee: “A Survey of Robot Tactile Sensing Technology,” The International Journal of Robotics Research, vol.8, no.3, pp.3-30, 1989.
- [25] 菅原淳: “器用な作業を実現するための触覚センサ技術”, 東芝レビュー, vol.64, no.1, pp.24-27, 2009.
- [26] 星貴之, 篠田裕之: “接触力と接触面積を計測する非線形触覚素子”, 計

- 測自動制御学会論文集, vol.42, no.7, pp.727-735, 2006.
- [27] 白岡貴久, 郭士傑, 橋本和信, 向井利春: “ポリマー材料を用いた静電容量型面状センサの開発 (測定精度と空間分解能両立構造の提案)”, 日本機械学会論文集 C 編, vol.79, no.798, pp.304-313, 2013.
- [28] Pressure Profile Systems web site. <http://www.pressureprofile.com/>
- [29] 木村竜司, 内山孝憲, 前野隆司: “把持力制御のための曲面状ひずみ分布センサの開発 (十字状ひずみゲージ配列を有する球面状センサによる任意方向把持力制御)”, 日本機械学会誌論文集 C 編, vol.70, no.689, pp.8388, 2004.
- [30] T. V. Nguyen, B. K. Nguyen, H. Takahashi, K. Matsumoto and I. Shimoyama: “High-Sensitivity Triaxial Tactile Sensor with Elastic Microstructures Pressing on Piezoresistive Cantilevers,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol.215, pp.167-175, 2014.
- [31] H. Takahashi, A. Nakai, T. V. Nguyen, K. Matsumoto and I. Shimoyama: “A Triaxial Tactile Sensor without Crosstalk using Pairs of Piezoresistive Beams with Sidewall Doping,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol.199, pp.43-48, 2013.
- [32] 鷺坂隆志, 大村吉幸, 長久保晶彦, 國吉康夫, 尾崎和行: “皮膚の変形に追従する高密度触覚センサグローブ”, 日本ロボット学会誌, vol.30, no.7, pp.711-717, 2012.
- [33] 佐々木大輔, 則次俊郎, 高岩昌弘: “生活支援ロボットのための圧力検出型ソフト触覚センサの開発”, 日本機械学会論文集 C 編, vol.70, no.689, pp.77-82, 2004.
- [34] 吉海智晃, 但馬竜介, 加賀美聡, 篠田裕之, 稲葉雅幸, 井上博允: “音響共鳴型テンソルセル触覚センサによる滑り予知と把持動作への応用”, 日本ロボット学会誌, vol.20, no.8, pp.868-875, 2002.
- [35] 金子真, 瀧下直樹, 辻敏夫, 前川仁, 谷江和雄: “PSD を用いた指先触覚センサの多点接触位置推定に関する研究”, 日本ロボット学会誌, vol.13, no.2, pp.270-276, 1995.
- [36] 中本裕之, 伍賀正典, 武縄悟, 貴田恭旭: “磁気抵抗素子とインダクタを用いた磁気式触覚センサ”, 日本機械学会論文集 C 編, vol.76, no.766, pp.1476-1482, 2010.

- [37] 友國伸保, 藤堂勇雄, 藪田哲郎: “電磁誘導に基づく三軸触覚センサとその特性 (ロボット指のための小型触覚センサの開発)”, 日本機械学会論文集 C 編, vol.71, no.703, pp.920-927, 2005.
- [38] 多田泰徳, 細田耕, 浅田稔: “内部に触覚受容器を持つ人間型柔軟指”, 日本ロボット学会誌, vol.23, no.4, pp.482-487, 2005.
- [39] S. S. M. Wang and P. M. Will: “Sensors for Computer Controlled Mechanical Assembly,” *Industrial Robot: An International Journal*, vol.5, no.1, pp.9-18, 1978.
- [40] R. A. Russell: “Closing the Sensor-Computer-Robot Control Loop,” *Robotics Age*, vol.6, no.4, pp.15-20, 1984.
- [41] M. J. Pearson, A. G. Pipe, C. Melhuish, B. Mitchinson and T. J. Prescott: “Whiskerbot: a Robotic Active Touch System Modeled on the Rat Whisker Sensory System,” *Adaptive Behavior*, vol.15, no.3, pp.223-240, 2007.
- [42] 広瀬茂男, 井上壯一, 米田完: “ウィスカセンサとその複数信号の伝達”, 日本ロボット学会誌, vol.6, no.2, pp.101-108, 1988.
- [43] 立矢宏, 金野誠司: “複数のウィスカを有する触覚センサの基礎的研究 (接触物の種類, 位置, 姿勢の認識)”, 日本機械学会論文集 C 編, vol.66, no.650, pp.3336-3343, 2000.
- [44] 立矢宏, 杉浦祐希, 伊勢大成: “タイヤ接地路面の摩擦係数測定用触覚センサの基礎研究”, 日本機械学会論文集 C 編, vol.78, no.787, pp.852-862, 2007.
- [45] 吉村史也, 喜成年泰, 立矢宏, 高桑匡平: “触覚センサを用いた織物表面特性の評価”, 日本機械学会論文集 C 編, vol.79, no.802, pp.2116-2126, 2013.
- [46] 金子真, 上野直広: “能動触角 (Active Antenna) に関する基礎的研究”, 日本ロボット学会誌, vol.13, no.1, pp.149-156, 1995.
- [47] 株式会社ミットヨホームページ資料: http://www.mitutoyo.co.jp/new/news/2001/01_12.html
- [48] 宮田清蔵, 古川猛夫: 強誘電ポリマー. 共立出版, 1988.
- [49] 内野研二, 石井孝明: 強誘電体デバイス. 森北出版, 2005.
- [50] H. Kawai: “The Piezoelectricity of Poly (Vinylidene Fluoride),” *Japan*

- Journal of Applied Physics, vol.8, pp.975-976, 1969.
- [51] 株式会社クレハホームページ資料: <http://www.kureha.co.jp/business/material/kfpiezo.html>
- [52] 株式会社東京センサホームページ資料: http://www.t-sensor.co.jp/piezo_film/
- [53] J. Fraden: Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications. p.74, Springer, 2003.
- [54] J. Sirohi and I. Chopra: “Fundamental Understanding of Piezoelectric Strain Sensors,” Journal of Intelligent Material Systems and Structures, vol.11, pp.246-257, 2000.
- [55] J. Dargahi: “A Piezoelectric Tactile Sensor with Three Sensing Elements for Robotic, Endoscopic and Prosthetic Applications,” Sensors and Actuators A: Physical, vol.80, no.1, pp.23-30, 2000.
- [56] K. Takashima, S. Horie, M. Takenaka, T. Mukai, K. Ishida and Y. Ueda: “Measurement of the Piezoelectric Properties of Vinylidene Fluoride Oligomer Using Pneumatic Pressure for Tactile Sensors,” Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, vol.6, no.10, pp.975-988, 2012.
- [57] K. Noda, K. Ishida, T. Horiuchi, H. Yamada and K. Matsushige: “Pyroelectricity of Ferroelectric Vinylidene Fluoride-Oligomer-Evaporated Thin Films,” Japanese Journal of Applied Physics, vol.42, no.11A, pp.L1334-L1336, 2003.
- [58] P. Dario, C. Domenici, R. Bardeli, D. De Rossi and P. C. Pinotti: “Piezoelectric Polymers: New Sensor Materials for Robotic Applications,” 13th International Symposium on Industrial Robotics 7, vol.2, pp.14-49, 1983.
- [59] A. Vinogradov and F. Holloway: “Electro-Mechanical Properties of the Piezoelectric Polymer PVDF,” Ferroelectrics, vol.226, pp.169-181, 1999.
- [60] S. Yagnamurthy, I. Chasiotis, J. Lambros, R. Polcawich, J. Pulskamp and M. Dubey: “Mechanical Properties of PZT Films and their Composites for RF-MEMS,” 2008 Proceedings of the Society for Experimental

- Mechanics, Orland, FL, 2008.
- [61] 中嶋宇史, 古川猛夫, 岡村総一郎: “発電システム及び圧電ポリマー素子”, 特開 2012-023345.
- [62] 田中真美, 古林満之, 棚橋善克, 長南征二: “前立腺癌および肥大症判別用駆動センサの開発”, 日本機械学会論文集 C 編, vol.67, no.656, pp.1032-1037, 2001.
- [63] 田中真美, 林寛貴, J. L. Leveque, 田上八朗, 菊地克子, 長南征二: “皮膚性状計測用センサの開発研究”, 日本機械学会論文集 C 編, vol.69, no.685, pp.2381-2388, 2003.
- [64] 奥山武志, 針生誠, 近雄介, 川副智行, 柿澤みのり, 清水秀樹, 田中真美: “毛髪手触り感計測用センサの開発に関する研究”, 日本機械学会論文集 C 編, vol.76, no.763, pp.595-602, 2010.
- [65] 土見大介, 田中真美: “触覚センサを用いた洗い上がり感の評価に関する研究”, 日本 AEM 学会誌, vol.16, no.3, pp.178-183, 2008.
- [66] 藤本勲, 山田陽滋, 前野隆司, 森園哲也, 梅谷陽二: “PVDF フィルムを用いたヒトの指に学ぶ静摩擦覚を有するフィンガスキンの開発”, 日本ロボット学会誌, vol.22, no.6, pp.806-814, 2004.
- [67] 藤本由紀夫, 新宅英司, 田中義和, 藤吉潤: “圧電フィルムを用いたシート型剪断力センサ”, 日本機械学会論文集 C 編, vol.78, no.789, pp.1863-1871, 2012.
- [68] 藤本由紀夫, 新宅英司, 田中義和, 藤吉潤: “高速衝撃力の測定に好適なパッド型圧縮力センサ”, 日本機械学会論文集 C 編, vol.78, no.791, pp.2438-2449, 2012.
- [69] K. E. Bisshopp and D. C. Drucker: “Large Deflection of Cantilever Beams,” Quarterly of Applied Mathematics, vol.3, no.3, pp.272-275, 1945.
- [70] 佐藤秀紀, 岩田佳雄, 岡部佐規一: 機械振動学. p.170, 工業調査会, 1993.
- [71] 高橋賞, 河井正安: ひずみゲージによるひずみ測定入門. p.72, 大成社, 1997.
- [72] JIS B0651: 製品の幾何特性仕様 (GPS)-表面性状: 輪郭曲線方式-触針式表面粗さ測定機の特長, 日本工業標準調査会, 2001.

- [73] 田中良平 編: 制振材料-その機能を応用. p.65, 日本規格協会, 1992.
- [74] 関森大介, 宮崎文夫: “複数の光学マウスセンサを用いた移動ロボットのデッドレコニング”, 計測自動制御学会論文集, vol.41, no.10, pp.775-782, 2005.
- [75] R. D. Howe and M. R. Cutkosky: “Dynamic Tactile Sensing: Perception of Fine Surface Features with Stress Rate Sensing,” IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol.9, no.2, pp.140-151, 1993.
- [76] R. Sedaghati, J. Dargahi and H. Singh: “Design and Modeling of an Endoscopic Piezoelectric Tactile Sensor,” International Journal of Solids and Structures, vol.42, pp.5872-5886, 2004.
- [77] N. E. Waters: “The Indentation of Thin Rubber Sheets by Spherical Indentors,” British Journal of Applied Physics, vol.16, pp.557-563, 1965.
- [78] ミスミ, 工業用素材選定サイト: https://fawos.misumi.jp/fas/rp/data/view_property.php?page=tab2_cate2_all
- [79] R. T. Lee, G. Richardson, H. M. Loree, A. J. Grodzinsky, S. A. Gharib, F. J. Schoen and N. Padian: “Prediction of Mechanical Properties of Human Atherosclerotic Tissue by High-Frequency Intravascular Ultrasound Imaging: An in Vitro Study,” Arteriosclerosis, Thrombosis, and Vascular Biology, vol.42, pp.1-5, 1992.
- [80] T. A. Krouskop, T. M. Wheeler, F. Kallel, B. S. Garra and T. Hall: “Elastic Moduli of Breast and Prostate Tissues under Compression,” Ultrasound Imaging, vol.20, pp.260-274, 1998.
- [81] M. J. Nissi, J. Töyräs, M. S. Laasanen, J. Rieppo, S. Saarakkala, R. Lappalainen, J. S. Jurvelin and M. T. Nieminen: “Proteoglycan and Collagen Sensitive MRI Evaluation of Normal and Degenerated Articular Cartilage,” Journal of Orthopaedic Research, vol.22, pp.557-564, 2004.
- [82] 高嶋一登, 堀江聡, 向井利春, 石田謙司, 松重和美: “触覚センサのための VDF オリゴマーの圧電特性”, 日本ロボット学会誌, vol.26, no.6, pp.711-717, 2008.
- [83] 高嶋一登, 竹中慎, 向井利春: “有機強誘電体触覚センサを用いた生体内触診の数値解析-血管の特性のセンサ出力への影響-”, 日本ロボット学会誌, vol.30, no.2, pp.195-204, 2012.

研究業績

本研究に関する研究業績

【第2章】

- (1) 竹中慎, 平見健一, 高嶋一登: “圧電ポリマーを用いた薄板型触覚センサの検討-凹凸面評価に関する基礎検討-”, 日本ロボット学会誌, vol.32, no.10, pp.903-913, 2014.
(日本ロボット学会から転載許諾済み. 上記論文における Fig.1~Fig.23 を, それぞれ, 本論文中の, Fig.2.1~Fig.2.9, Fig.2.11, Fig.2.13~Fig.2.21, Fig.2.23~Fig.2.25, Fig.3.1 に用いた.)
- (2) 竹中慎, 高嶋一登: “PVDF を用いた薄板型触覚センサに関する基礎検討”, 日本機械学会 九州支部 第 67 期総会・講演会, 2 pages (324), 2014.
- (3) Makoto Takenaka, Kazuto Takashima: “Thin Plate Type Tactile Sensor Using PVDF for Evaluating Uneven Surfaces,” International Symposium on Applied Engineering & Sciences (SAES2014), 2014.

【第3章】

- (1) 竹中慎, 高嶋一登: “圧電ポリマーを用いた薄板型触覚センサの検討-携帯型触覚センサシステムの開発-”, 日本ロボット学会誌, 日本ロボット学会誌, vol.34, no.9, pp.640-651, 2016.
(日本ロボット学会から転載許諾済み. 上記論文における Fig.1, Fig.3~Fig.24 を, それぞれ, 本論文中の, Fig.3.2, Fig.3.7~Fig.3.12, Fig.3.13 (a), Fig.3.14, Fig.3.16~Fig.3.27, 付録 B の Fig.B.1, 付録 C の Fig.C.1 に用いた.)
- (2) 竹中慎, 高嶋一登: “圧電ポリマーを用いた薄板型触覚センサの検討-携帯型センサの走査量評価-”, 第 15 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2014), 3 pages (1I3-3), 2014.

- (3) 竹中慎, 高嶋一登: “圧電ポリマーを用いた表面形状評価用触覚センサの開発”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015 (ROBOMECH2015), pp.2A1-C03(1)-2A1-C03(4), 2015.
- (4) Makoto Takenaka, Kazuto Takashima: “Portable tactile sensor system for evaluating uneven surfaces,” The 8th Asian-Pacific Conference on Biomechanics (AP Biomech 2015), p.352, 2015

【第4章】

- (1) 竹中慎, 高嶋一登: “PVDFを用いた薄板型触覚センサによる表面性状の評価”, 第26回バイオエンジニアリング講演会, pp.57-58, 2014.

【受賞歴】

- (1) 第15回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2014) 優秀講演賞, 竹中慎, 高嶋一登: “圧電ポリマーを用いた薄板型触覚センサの検討-携帯型センサの走査量評価-”.

その他の研究業績

【総説・解説】

- (1) 高嶋一登, 堀江聡, 石田謙司, 竹中慎, 向井利春: 「第3章 ヘルスケア用センサの高感度化と計測技術 第24節 低侵襲手術用触覚センサの開発と応用技術」, 【次世代】ヘルスケア機器の新製品開発. pp.215-220, 2014.
- (2) Kazuto Takashima, Satoshi Horie, Kenji Ishida, Makoto Takenaka, Toshiharu Mukai: Development of Tactile Sensor Composed of Organic Ferroelectrics. Japan-the Netherlands Symposium on Soft-Tribology, pp.3-6, 2015.

【学会発表】

- (1) 黒田大介, 高嶋一登, 竹中慎, 向井利春, 堀江聡, 石田謙司, 上田裕清: “有機強誘電体を用いたカテーテル型触覚センサに関する研究”, 第 26 回バイオエンジニアリング講演会, pp.55-56, 2014.
- (2) 黒田大介, 高嶋一登, 竹中慎, 向井利春, 堀江聡, 石田謙司: “有機強誘電体を用いたカテーテル型触覚センサの改良”, 日本機械学会第 25 回バイオフィロントニア講演会, no.14-51, pp.83-84, 2014.
- (3) 神園大樹, 高嶋一登, 竹中慎, 向井利春: “電熱線埋め込み型形状記憶ポリマーシートを用いた力覚センサに関する研究”, 日本機械学会第 25 回バイオフィロントニア講演会, no.14-51, pp.81-82, 2014.
- (4) 神園大樹, 高嶋一登, 竹中慎, 向井利春: “電熱線埋め込み型形状記憶ポリマーシートを用いた力覚センサの改良”, 第 15 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2014), 3 pages (1I3-4), 2014.
- (5) 森本尚祐, 高嶋一登, 竹中慎, 則次俊郎, 向井利春: “形状記憶ポリマーを用いたウェアラブル姿勢維持機構の開発”, 第 15 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2014), 4 pages (1I2-4), 2014.
- (6) 黒田大介, 高嶋一登, 池野慎也, 竹中慎, 向井利春, 堀江聡, 石田謙司: “有機強誘電体を用いたカテーテル型触覚センサの表面改質”, 第 27 回バイオエンジニアリング講演会, pp.95-96, 2015.

付録 A

はり基板について、PVDF フィルムを貼り付けた位置における、はり表面の軸方向の応力を σ_1^b とする。境界条件により、はり基板の幅方向の応力 σ_2^b および板厚方向の σ_3^b は 0 である。これらより、はり基板の軸方向のひずみ ξ_1^b および幅方向のひずみ ξ_2^b は、次式で表せる。

$$\xi_1^b = \frac{\sigma_1}{E_b} \quad (\text{A.1})$$

$$\xi_2^b = -\nu_b \frac{\sigma_1}{E_b} \quad (\text{A.2})$$

ここで、 ν_b は、はり基板のポアソン比、 E_b は、はりのヤング率である。

式 (1.5), (1.6) より、PVDF フィルムに関して、フィルム内の電場 E_3 を 0 としたときの圧電基本式は以下のように表せる。

$$\xi_1 = \frac{\sigma_1}{E_f} - \nu_f \frac{\sigma_2}{E_f} \quad (\text{A.3})$$

$$\xi_2 = -\nu_f \frac{\sigma_1}{E_f} + \frac{\sigma_2}{E_f} \quad (\text{A.4})$$

$$D_3 = d_{31}\sigma_1 + d_{32}\sigma_2 \quad (\text{A.5})$$

ここで、PVDF フィルムは等方弾性体と近似しており、 ν_f は、PVDF のポアソン比、 E_f は、PVDF のヤング率である。PVDF フィルムに対して、はり基板のステンレス材は十分に剛性が高い。したがって、はり基板の表面のひずみが、PVDF フィルムのひずみをもたらすと考えた場合、次式の関係がある。

$$\xi_1^b = \xi_1 \quad (\text{A.6})$$

$$\xi_2^b = \xi_2 \quad (\text{A.7})$$

式 (A.1) ~ (A.4), (A.6), (A.7) を解くことにより、次の 2 式が得られる。

$$\sigma_1 = \frac{1 - \nu_f \nu_b}{1 - \nu_f^2} E_f \xi_1^b \quad (\text{A.8})$$

$$\sigma_2 = \frac{\nu_f - \nu_b}{1 - \nu_f^2} E_f \xi_1^b \quad (\text{A.9})$$

この σ_1 および σ_2 を式 (A.5) へ代入することにより, PVDF フィルムの電气的出力を求めることができる. しかし, ν_b と ν_f はそれぞれ約 0.3 の同程度の値を持ち, かつ, d_{32} が d_{31} と比較して小さいことから,

$$D_3 \approx d_{31}\sigma_1 \approx d_{31}E_f\xi_1^b \quad (\text{A.10})$$

と見なすことができる.

付録 B

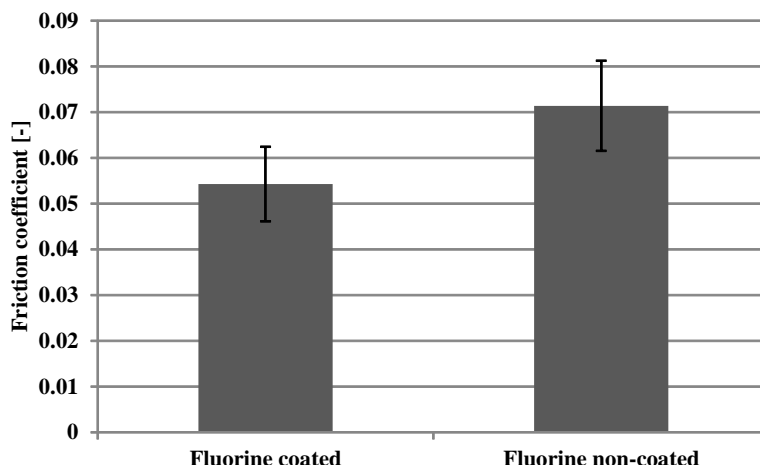


Fig.B.1 Friction coefficients of prototype tactile sensor system

本研究において、プローブの先端には、過度の摩擦状態を防ぐため、フッ素樹脂系潤滑剤を塗布した。提案した触覚センサは、対象面と接触させて計測することが前提であるため、摩擦の状態を評価することが重要である。そこで、プローブにフッ素樹脂系潤滑剤を塗布した場合と、塗布しない場合について、提案のセンサシステム全体の摩擦係数を評価した。

第3章で試作した携帯式センサシステムのケーシング上面におもりを搭載した状態で、ケーシング後面を自動ステージで押し出し、センサシステムを平滑なステンレスプレート上を走査速度 20 [mm/s] で滑らせた。このとき、後面を押し出す自動ステージ上にはロードセル (A&D 製, LCB03) を固定しており、走査中の 3 秒間の摩擦力の平均値を計測した。この摩擦力を、おもりの重量とセンサシステムの自重をあわせた鉛直方向の荷重 (10.2 [N]) で除し、摩擦係数を求めた。計測を繰り返し 5 回行った結果を **Fig.B.1** に示す。ここで、バーは標準偏差である。

結果、プローブ先端にフッ素樹脂系潤滑剤を塗布することにより、センサシステムの摩擦係数が低減できた。また、いずれの場合においても、摩擦係数は 0.1 以下であった。鉛直方向の荷重は、ケーシング底面とプローブの両方に分布することになるが、ケーシング底面にフッ素加工プレートを取り付けたことにより、低摩擦状態となり、計測作業に与える影響が小さいことを確認した。

付録 C

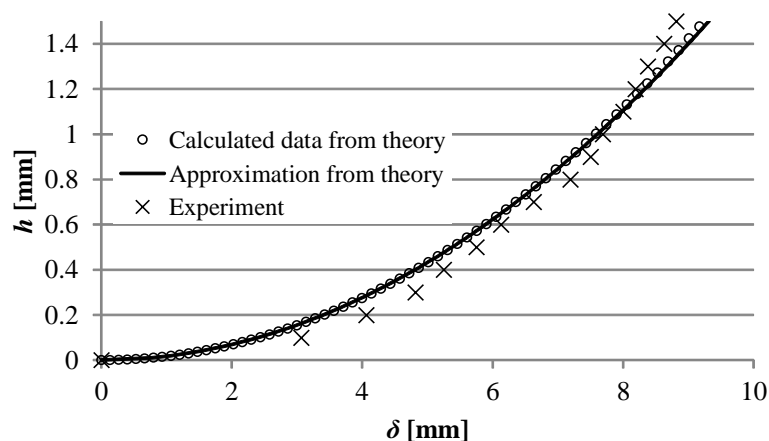


Fig.C.1 Relationship between h and δ

本研究の第2章(2.3.2)および第3章(3.2.2)において、測定対象の形状高さ h を検出するため、はりのたわみ δ から、式(2.7)を用いて h を推定する手法を提案した。これは、 h と δ の関係を、はりの大変形理論^[69]を用いて数値解析的に計算し、この関係を2次式で近似したものである。ここでは、この近似手法について実験的に検証した。

第3章で試作したCFRP製の薄板型はりに対して、手動ステージに固定した平滑な金属プレートを垂直に設置し、プローブ先端から h を模した距離分だけオフセットした状態で押し当てた。 h を0.1~1.5 [mm]の範囲で変化させ、はりのたわんだ状態をデジタルカメラで撮影し、たわみ量 δ を求めた。Fig.C.1に実験結果と、はりの大たわみ理論を用いて計算したプロット、およびこのプロットを近似し式(2.7)の a を0.0173 [mm⁻¹]とした結果を示す。実験値について、式(2.7)を用いて最小2乗法により a を求めたところ0.0174 [mm⁻¹]であり、誤差が含まれるものの、本文中において用いた近似式が成立することを確認した。

謝辭

本研究を遂行ならびに本論文の作成にあたり，九州工業大学 大学院生命体工学研究科 生体機能応用工学専攻 高嶋一登 准教授には，終始，懇切丁寧なご指導とご鞭撻を賜りました．高嶋准教授におかれましては，入学前の長くから，研究のご相談に快くのっていただき，また，入学後も膨大な時間を割いていただいた中で貴重なご意見，ご指導を賜りました．論文の完成は，ひとえに先生のご指導のおかげであり，心よりお礼を申し上げます．

本論文をご審査いただきました，九州工業大学 大学院生命体工学研究科 山田宏 教授，安田隆 教授，工学研究院機械知能工学研究系 松田健次 教授におかれましては，有意義なご助言とご討論をいただきました．謹んで謝意を申し上げます．

また本研究に関して，一緒に取組みをさせていただきました，平見健一様，黒田大介様をはじめとし，高嶋研究室の皆様方には，多くのご支援をいただきました．厚く御礼申し上げます．

本研究の遂行にあたり，ご協力，ご配慮をいただきました香川県産業技術センター 濱中忠勝 所長をはじめとする上司，同僚の方々，また社会人博士課程への就学をご支援いただきました佃昭 前所長に感謝の意を表します．

最後に，本研究への取組みにあたり，終始暖かく見守ってくれました妻 竹中佳織，長男 竹中律稀への感謝の意を付記し，謝辞とさせていただきます．