

ヒトが面歪を感知する能動触メカニズムを  
規範とした触覚センシングに関する研究

2020年 9月

安藤 潤人

ヒトが面歪を感知する能動触メカニズムを  
規範とした触覚センシングに関する研究

安藤 潤人

システム情報工学研究科  
筑波大学

2020年 9月

## 概要

ヒトは皮膚の柔軟さを利用して、環境との接触が生じた際に皮膚が変形し、機械的受容器を反応させ触覚情報として物体の認識などを行う。さらにヒトは経験的に機械受容器が良く反応させるために手や腕等の動作を上手く調節し、触覚情報を受容し易いように動作を生成していると考えられている。この経験的に獲得してきたヒトの能動触メカニズムを規範とした触覚センシングについて述べる。この触覚センシングを生産現場で行われている面歪検査に適用する。面歪検査は未だに自動化が行われずに作業者が表面を走査して、触覚を頼りに不要な面歪を検知している。面歪検査ではコストや検査時間などの問題から機械や専用装置の導入が困難とされている。この問題に挑むため、微小面歪を検知する新たな触覚センシングを提案する。本論文で述べる触覚センシングでは触動作はヒトに委ね、簡易構造の柔軟触覚センサを用いる。ヒトが走査することで、ヒトが経験的に備え持つ触動作を規範とすることができる。まず初めに走査型触覚センシングの最小構成としてウェアラブル走査型触覚センサについて述べる。このセンサは指の周りにゴム層を成形し、その層の間にひずみゲージを埋め込んだセンサであり、ゴム製人工皮膚層と呼んでいる。このセンサを装着し、表面を走査することで、表面形状に従って指が変形し、その変形に伴ってゴム層が変形しひずみゲージが反応する。本論文では表面形状の曲率に応じて信号が出力し、出力信号から表面の曲率変化を推定可能であることを示している。しかしながら、曲率が小さくなるほどセンシングがし難くなるという問題が存在する。そこで、柔軟構造体を利用し、センサ出力の増幅効果を使った、微小ひずみ検出を行った。その増幅効果はセンサ信号のSN比の向上に寄与し、結果的にセンサ感度向上を達成することができた。本研究では、それぞれの走査型触覚センサに対して、正弦波面を持った触覚サンプルを使用し、評価を行った。最後に、走査型触覚センシングを面状に拡張した、面状走査型触覚センサについて述べている。面状にすることで、広い面をセンシングするのに役立つ。実用的には広い面を検査しなければならないことが想定され、広い面を効率的に検査するには、一度の走査による検査範囲が広くなければならない。したがって、面状に拡張できれば、その検査範囲が広がる。走査型触覚センシングによって、接触だけでなく、走査という作業の拡張によって触覚センシングが拡張される。面状走査型触覚センサによって高さが数十  $\mu\text{m}$  で幅が数 mm の検知が困難な面歪を検知できることを示した。

# 目次

概要	i
<b>第1章 序論</b>	<b>1</b>
1.1 研究背景	1
1.2 面歪検査の課題	2
1.3 研究目的	3
1.4 関連研究	4
1.5 研究内容	6
1.6 本論文の構成	8
<b>第2章 ウェアラブル走査型触覚センサ</b>	<b>9</b>
2.1 ひずみゲージ埋め込みゴム製人工皮膚層	9
2.1.1 製作方法	10
2.1.2 曲率検出能力	11
2.1.3 応答性	12
2.2 面歪形状の曲率推定	14
2.2.1 曲率推定の過程	16
2.2.2 実験方法	17
2.2.3 触覚サンプル	17
2.2.4 信号処理	19
2.2.5 実験結果	20
2.2.6 検出能力評価	21
2.3 考察	25
2.3.1 センシングの優位性と使用制限	25
2.3.2 推定誤差	26
2.3.3 面ひずみ検出の実用的問題	27

2.3.4	応用性 . . . . .	29
2.4	まとめ . . . . .	29
<b>第3章</b>	<b>触覚コンタクトレンズを利用した感度向上</b>	<b>30</b>
3.1	触覚コンタクトレンズ . . . . .	30
3.2	触覚コンタクトレンズによる信号増幅 . . . . .	31
3.3	微小うねり検出 . . . . .	33
3.3.1	触覚サンプル . . . . .	33
3.3.2	実験方法 . . . . .	34
3.3.3	実験結果 . . . . .	34
3.3.4	押しつけ力と走査速度 . . . . .	38
3.4	考察 . . . . .	40
3.4.1	センシングの優位性と使用制限 . . . . .	40
3.4.2	センシングの実用的な問題 . . . . .	42
3.5	触覚コンタクトレンズの機能 . . . . .	42
3.6	まとめ . . . . .	43
<b>第4章</b>	<b>面状走査型触覚センサ</b>	<b>47</b>
4.1	面状走査型触覚センサ . . . . .	47
4.2	検出幅の検討 . . . . .	47
4.3	検出の問題 . . . . .	49
4.4	微小凸検出 . . . . .	49
4.4.1	実験方法 . . . . .	50
4.4.2	曲率検出 . . . . .	51
4.5	反応箇所の判別 . . . . .	55
4.6	面上の異常位置推定 . . . . .	57
4.6.1	実験結果 . . . . .	57
4.7	考察 . . . . .	59
4.7.1	使用上の制限 . . . . .	59
4.8	まとめ . . . . .	60

第 5 章 結論	61
5.1 全体のまとめ	61
5.2 今後の展望	63

## 表 目 次

2.1	Results of curvature amplitude $\tilde{A}$ and spatial period $\tilde{T}$ estimated by the haptic sensor when only the curvature amplitude is changed, and the respective error rates. . . .	23
3.1	Results of curvature amplitude $\tilde{A}$ and spatial period $\tilde{T}$ estimated by the haptic sensor when only the curvature amplitude is changed, and the respective error rates. . . .	38
3.2	Results of curvature amplitude $\tilde{A}$ and spatial period $\tilde{T}$ estimated using the haptic sensor when only the spatial period is changed, and the respective error rates. . . .	40

## 目 次

1.1	Inspection method for detecting surface undulation . . . . .	2
1.2	Gaussian shape . . . . .	7
1.3	Gaussian shape curvature . . . . .	7
2.1	Schematic diagram and photo of rubber artificial skin layer with embedded a strain gauge . . . . .	10
2.2	Structure of rubber artificial skin layer with embedded a strain gauge . . . . .	10
2.3	Direct dipping process . . . . .	11
2.4	Tactile sample with constant curvature . . . . .	12
2.5	Relationship between output signal value and curvature . . . . .	13
2.6	Sensing system for confirming responsiveness . . . . .	14
2.7	Time series data of force at tapping . . . . .	15
2.8	Time series data of strain at tapping . . . . .	15
2.9	Zoomed time graphs of tapping force and micro-strain of proposed sensor. The latter graph is inverted, and each graph is normalized for each peak value for better comparison. . . . .	16
2.10	Curvature estimation process . . . . .	17
2.11	Touch sample with sinusoidal wavy surface . . . . .	18
2.12	Photograph of a finger wearing our proposed sensor during tracing. The marker attached to the tactile sensor is used for camera position measurements . . . . .	19
2.13	Undulation surface coordinates. The flat surface and the undulation peak are at the same level . . . . .	20
2.14	Sensor system. The sensor signal is uploaded into a personal computer (PC) via a strain gauge amplifier and an analog/digital (AD) converter . . . . .	20
2.15	Sensor signal before signal processing . . . . .	21



2.16	The estimated curvature reconstructed from the proposed sensor (the solid curve) in comparison with the real curvature (the dashed curve) when a sine surface with an amplitude of 40 $\mu$ m was traced. . . . .	22
2.17	The estimated curvature reconstructed from the proposed sensor (the solid curve) in comparison with the real curvature (the dashed curve) when a sine surface with an amplitude of 20 $\mu$ m was traced. . . . .	23
2.18	The estimated curvature reconstructed from the proposed sensor (the solid curve) in comparison with the real curvature (the dashed curve) when a sine surface with an amplitude of 10 $\mu$ m was traced. . . . .	24
2.19	Results of Fourier analysis when tracing a sinusoidal wave surface with an amplitude of 40 $\mu$ m. . . . .	25
2.20	SN ratio for each amplitude . . . . .	26
2.21	Normalized mean squared error(NMSE) for each amplitude . . . . .	27
2.22	The estimated curvature reconstructed from the proposed sensor (the solid curve) when a flat surface was traced. . . . .	28
3.1	Schematic diagram showing a the structure and b a photo of the proposed sensor. Deformation due to an undulation on the object's surface is amplified by the pins of the flexible structure, after which information of the object ' s surface is transmitted through the flexible structure to the sensor element. . . . .	30
3.2	Schematic diagram of Touche Lens and its usage example . . . . .	31
3.3	Average of peaks when tracing sinusoidal curved surfaces with different amplitudes: the black circles show when tracing with Touchlens and the white circles show when Touch Lens does without. . . . .	32
3.4	Sensor system. The sensor signal is uploaded into a personal computer (PC) via a strain gauge amplifier and an analog/digital (AD) converter . . . . .	34
3.5	Comparison between actual and estimated curvature. Each graph shows the output signal of (a) a conventional sensor (without a Touch Lens) and b our proposed sensor (with a Touch Lens) . . . . .	35

3.6	Fourier analysis result of sensor signal. Each graph shows the result of a conventional sensor, and b our proposed sensor. The dotted line represents the curvature amplitude of the traced surface . . . . .	37
3.7	Graph showing the relationship between the curvature amplitude $\tilde{A}$ and the NMSE	39
3.8	Graph showing relationship between the curvature amplitude $\tilde{A}$ and the SNR . . .	39
3.9	Graph showing the relationship between spatial period $\tilde{T}$ and the NMSE . . . . .	41
3.10	Graph showing relationship between the period $\tilde{T}$ and the SNR . . . . .	41
3.11	In the experiments conducted using our proposed sensor, the graphs show (a) the position and (b) pressing force for each time. . . . .	44
3.12	In the experiment involving the conventional sensor, the graphs show (a) the position and (b) pressing force for each time. . . . .	45
3.13	This graph shows the output signal when a sinusoidal surface with an amplitude of $40 \mu\text{m}$ and a spatial period of $10 \text{ mm}$ is traced by the proposed sensor. . . . .	46
4.1	Components of surface scanning tactile sensor . . . . .	48
4.2	Scanning direction and detection width . . . . .	48
4.3	Comparison of sensitivity of strain gauges with different detection widths . . . . .	49
4.4	Experiment of micro convex detection . . . . .	50
4.5	Output signal of each . . . . .	51
4.6	Superposition of output signals . . . . .	52
4.7	Constant curvature model . . . . .	53
4.8	Calibration method . . . . .	53
4.9	Results of calibration: Relationship between curvature and output signal . . . . .	53
4.10	Signal after signal processing . . . . .	54
4.11	Zoom around detection signal . . . . .	54
4.12	Result of curvature estimation . . . . .	55
4.13	Detection of reaction points . . . . .	56
4.14	Sensor layout for detecting reaction points in the sensor . . . . .	56
4.15	Output signal . . . . .	57
4.16	Experimental system . . . . .	58
4.17	Estimated position . . . . .	58

4.18 Signal on the flat . . . . . 59

# 第 1 章 序論

## 1.1 研究背景

製造業において、製品を品質高く、効率的に生産する技術が求められる。さらに、品質にばらつきがあってはならず、ある一定の水準に品質を保つ生産が求められる。品質を保つためには製品検査が必要不可欠である。そのような製品検査の中で、ヒトの触覚を頼りに行われる検査がある。その例として、自動車などの生産ラインで行われている面歪検査が挙げられる。この検査では製造工程で生じた表面の面歪を検知する検査である。表面の面歪とは成形不良で生じる表面のうねりやプレス加工時に埃などの介在によって生じる凸等である。自動車の場合、このような面歪が生じると見栄えが悪化し、製品の品質が落ちることにつながる。面歪のうねりは高低差が数十  $\mu\text{m}$  とほぼ平坦であり、凸の幅は数  $\text{mm}$  程度で小さい。現状ではこのような面歪を検査者が手で触れて、触覚を頼りに検査を行なっている。十分に訓練された職人でなければ、表面から検出するのは困難である。最終検査では、塗装された車のボディに光を当て、光の歪みを見ることで判別が簡易になるが、光による検査は生産ラインの下流である塗装後に行わなければならない、無駄が生じる。生産ラインの上流で面歪を発見し、排除または修正工程に移すことが理想的である。しかしながら、生産ラインの上流で面歪を発見するのに困難であり、その要因として面歪の小ささに加えて、以下のようなことが挙げられる。

- 加工された部品が次々と流れてくる中で素早く検査を行わなければならない。
- 検査範囲は数百  $\text{mm}^2$  の広範囲である。
- 表面の汚れや金属光沢によって表面形状が視覚的には分かり難い。

これらの要求については [1, 2, 3] にて、作業者のインタビューによって明らかにされている。要求される環境下で微小な面歪を感知するには 10 年程度の訓練が必要であるとされている。数十  $\mu\text{m}$  の大きさの面歪を検知する検査手法として、マイクロメータが挙げられるが、狭い範囲を精密に検査するには向いているが、広範囲に検査するには不向きである。さらにレー

ザセンサや画像処理による手法が考えられるが，表面の汚れや金属光沢によって誤検知が生じ，信頼性が低い．さらに，プレス加工で製造される製品には形状が複雑のため，適用が困難である．また，専用装置の導入にはコストがかかり導入の敷居が高い．このような理由から，生産ラインには表面検査専用の機械の設置が行われず，ヒトの触覚を頼りに面歪検査が行われている．

検査工程での最重要事項は面歪の検出である．検査者は検査精度を落とさず，維持することが求められる．しかしながら，実際には熟練度や作業の負担やその日の体調によって検査精度にばらつきが生じてしまう．このような検査精度の変動が触覚検査の課題の一つである．検査精度に影響する要因の検討や触覚刺激を増強させるデバイスの開発に関する研究が行われている [4, 5]．

## 1.2 面歪検査の課題

面歪検査は未だに自動化が行われておらず，その自動化が期待されている．面歪検査以外の溶接や塗装などのような生産ライン上で行われる作業の多くは自動化されてきた．溶接や塗装などの作業は大型の専用装置に置き換わるのではなく，産業ロボットがヒトの役割を担い，自動化が行われている．面歪検査でも塗装後であればマイクロエプシロン社製の reflectCONTROL PSS 8005.D system という面歪を自動検知するシステムがある [6]．塗装後は表面が綺麗にされており，光の反射などを利用した光学センシングが容易になる．塗装作業時にゴミの付着や塗装のムラによって面歪が発生するが，生産ラインの上流にあるプレス加工の過程で発生する面歪も存在する．プレス加工ではゴミの侵入によって生じる凸状の面歪，成形不良によって表面にうねりが発生する面歪がある．このような面歪はプレス加工後に発見されるのが望

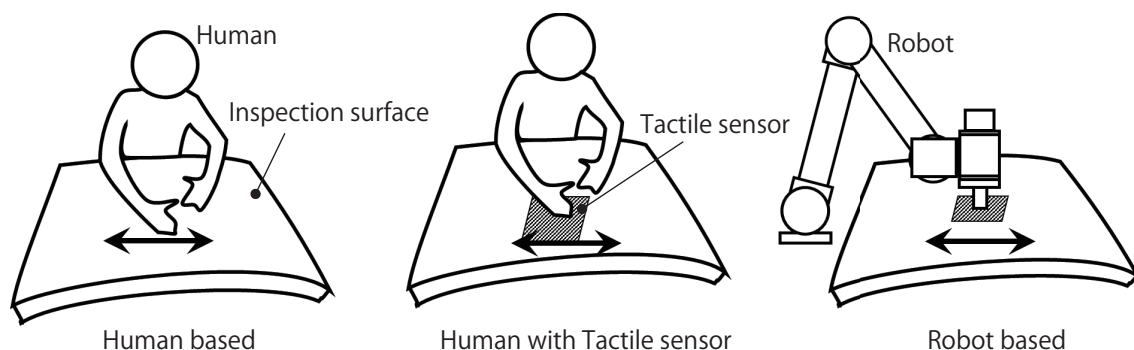


Fig. 1.1: Inspection method for detecting surface undulation

ましいが、検知が困難であり、自動化ができていない部分である。

図 1.1 は面歪検査方法のイメージ図を示す。現在はヒトが手で触って、触覚を頼りに面歪検査が行われている (Human based) が、自動化を考える場合、溶接や塗装などの自動化と同様にヒトがロボットに置き換わるのが良い。ロボットによる検査の自動化では接触するかどうか重要な問題となる。非接触の場合、製品に損傷を与えるリスクがほとんどなく作業が行える。しかしながら、上記で述べた理由から光学的アプローチの導入が困難であるため、非接触で精度良く検査することが困難である。したがって、現在ヒトが行っている作業と同様に接触して検査を行なう方法が考えられる。ロボットを使って自動化を考える場合、検出技術だけでなく、製品に大きな損傷を負わせないために、形状に合わせて適切に力やスピードを制御することが重要である。このようなロボットによる自動検査 (robot based) と現状のヒトによる検査 (Human based) には技術的に大きなギャップが存在する。面歪検査の本質は表面に存在する微小な面歪の検出である。最終的にはロボットを使った自動化 (Robot based) が望まれるが、本稿では探索する部分の制御はヒトに委ね、センシングだけに着目する。具体的にはヒトがセンサを動かし、そのセンサで面歪を検知する (Human with Tactile sensor)。

ヒトは腕や指、手のひらを巧みに動かし、様々な形状の表面に柔軟に押し当て、能動触を行っている。能動触では皮膚からの触覚情報だけでなく筋肉や関節などからの触覚情報も得ており、それらの情報を統合処理している [7]。触る動作 (触動作) と触覚情報の受容 (触受容) は表裏一体となっており切り離すことが困難であるとされている [8]。関連文献では表面の形状によって押しつけ力が変化したり、粗さによって速度を変化させたり、繰り返しの動作によって粗さの識別率が向上することが実験的に示されている [9, 10, 11]。ヒトは触覚から得られる情報を使って運動を生成し、どんな表面でも巧みになぞり、表面からの微妙な触覚情報を受容していると考えられる。そこでヒトが面歪を感知する能動触メカニズムを規範とした触覚センシングによって表面の微妙な変化を検知できるのではないかと考えた。

### 1.3 研究目的

面歪検査は未だに自動化や機械の導入が行われておらず、ヒトが手で触って微小面歪を感知している。つまり、現状の面歪検査ではヒトが触って主観評価で微小面歪の有無を検査している。熟練工が作業を行っているが、ヒトが行っているためその日の体調や作業環境の変化によって検査にばらつきが生じる。さらに、主観評価で行っているため、検出されるべき面歪がどんな大きさなのか定められていない。したがって、定常的に微小面歪を検知し、そ

の面歪を何らかの数値によって定量評価することが求められる。本研究の目的は微小面歪を検知し、定量評価することである。

## 1.4 関連研究

面歪を感知し易くするために、佐野らは表面の微妙な凹凸を知覚し易くする触覚デバイス「触覚コンタクトレンズ」を開発した [1, 5, 12]。触覚コンタクトレンズはレバーメカニズムを用いて面歪の知覚を増幅させる触覚デバイスである。この触覚デバイスを用いれば、誰でも容易に微小な凹凸を発見することができるが、主観評価であり表面の定量的な評価ができない。

センシングという観点に注目すると、菊植らによりハンドベル型の片持ち梁式触覚センサが開発されている [13]。作業者が手に持って表面をなぞって計測するため、即座に凹凸の場所が直感的に分かる。しかしながら、サイズが大きいため大きく湾曲した表面や幅が狭い表面には使用が困難であるという問題がある。

ヒトは指や手のひらを器用に動かし、様々な形状の表面に柔軟に押し当てることができ、その表面に沿って容易に探索することができる。そこで、ヒトの巧みさを利用して、探索作業をヒトに委ねて触覚センサで面歪を捉える研究がある。田中らは指に装着する面歪用触覚センサが開発された [2]。アクティブタッチによって検査し、ウェーブレット変換を用いたりリアルタイム計測を実現した。しかしながら、凹凸の大きさ判別等の定量的評価が詳しく行われていない。高精度に凹凸検出を行う計測装置として GelSight がある [14, 15]。Gelsight は柔軟素材を利用して、押し付けた表面の凹凸を画像処理によってデジタル上に形状を再構築することができる。しかしながら、全ての計測範囲を押し付けなければならないため、このデバイスも広範囲に探索するには不向きであると言える。

一方で、広範囲を計測するには、菊植ら [13] や田中ら [2] のように表面をなぞることで計測を行う手法が適している。竹囲らは指のまわりに薄いゴム層を成形し、その層の間にひずみゲージを埋め込んだ、ウェアラブル走査型触覚センサを開発した [3]。この触覚センサは表面をなぞったときに、表面の形状に沿って変形し、それに応じた信号が出力される。その出力信号からなぞった表面の曲率情報を再構築できる。しかし、我々が目的とする、10 マイクロレベルのうねりは再構築し難いという問題点がある。

竹囲らが開発したような柔軟物にセンサを埋め込んだ研究は以前から行われている。山田らは隆起部がある分布型触覚センサを開発した [16]。これを使って、触覚センシングによる把持力制御を実現した。細田らは柔軟物に PVDF フィルムをランダムに埋め込んだロボット指

を開発した [17]. このロボット指によりロボットマニピュレーションの能力を向上させた. このようにロボットマニピュレーションでは器用なロボットのための触覚センサが開発されてきた [18, 19]. 古くは 1971 年にオンオフスイッチという単純な触覚センサをロボットハンドに分布させ物体認識を行っている [20]. しかし, 分布型触覚センサはセンサ素子の数が多く, 複雑な配線が問題である. それを解決したのが, 下条, 石川らが開発した CoP(Center of Pressure) センサである. Cop センサは劇的に配線の数を減らした [21, 22].

柔軟物を利用すると接触した物体の形状に応じて柔軟物に変形するので, その変形から触覚情報を抜き出すことができる. 柔軟物の変形を計測するために Vision-based の単純な構成で, 安価なセンサが開発されている. 永田らは柔軟物に整列させたピンの変位をカメラでとらえることで, 押し当てられた物体の形状を検出可能な触覚センサを開発した [23]. 神山らは柔軟物表面にマーカを付与し, そのマーカの変形をカメラでとらえ, 力の大きさと方向を計測可能な触覚センサ (GelForce) を開発した [24]. 同様な手法で, Corolay と Leppora らはより高精度な触覚センサ (TacTip) を開発している [25]. さらに, 山口らはロボットマニピュレーションのために小型で安価な触覚センサ, FingerVision を開発した [26]. 前述した GelShight も Vision-Based Tactile Sensor の 1 つである [14, 15]. 単純な構成で高精度な触覚センサを実現できるが, センサ素子を柔軟物に埋め込んだ触覚センサと比べて大型になってしまう問題がある.

近年では, 半導体技術やファブリケーション技術の発展にともない, 人の皮膚のような薄い触覚センサとしての人工皮膚が開発されている. エレクトロニクス分野では, 非常に軽く, 薄く, 伸縮可能な回路やタトゥーのように皮膚に付加可能な電子回路が開発され, それを利用した触覚センサとしての人工皮膚が開発されている [27, 28, 29]. しかしながら, エレクトロニクス分野で開発されている人工皮膚の作製には高度な技術が必要である. そこで, ラピッドプロトタイピング可能な人工皮膚が開発されている. Tenzer らはラピッドタイピングし易い, MEMS を埋め込んだ触覚センサを開発し, 人工皮膚に応用できることを示した [30, 31]. Charalambides と Bergbreiter はシンプルな製造法によって柔軟物に電子回路を埋め込む方法を提案し, 滑りを検出可能な人工皮膚を開発した [32].

ロボットの皮膚として人工皮膚が開発されることが多いが, ヒトの手の動きや触覚情報を抜き出すためのウェアラブルなセンサも多く開発されている [33]. Park と Hammond らは液体金属を利用した人工皮膚を開発し, 手の動きと圧力分布の計測を実現した [34, 35]. Li らはジェスチャー認識のための人工皮膚を開発した [36].

これまで述べてきた触覚センサや人工皮膚の多くは力センシングを目的としており, 面歪



検査のように面上の微小ひずみの検出を目的とした研究は少ない。さらに広範囲を検査する走査型触覚センシングについて議論されていない。

以上の関連研究についてまとめると、いままでの触覚センシングでは、力覚や触覚による物体認識については様々な角度から広く検討されているが、物体の表面を走査して表面情報を抽出することについての議論に乏しい。ヒトは物体をなぞって表面の形状を知覚できる。さらに広範囲の面でも、様々な形状に対しても適応可能である。触覚センシングでは走査することが本質であると捉える。対象となる表面に押し当て、走査してセンシングする手法を走査型触覚センシングと呼ぶことにする。広範囲の面を素早く検査する面ひずみ検査を事例として取り上げ、微小面歪の検知を行う走査型触覚センシングについて研究を行う。

## 1.5 研究内容

本研究の目的は滑らかな面に存在する微小形状の曲率検出を目的である。本論文では、今までの触覚センシングで多く行われている力のセンシングに着目するのではなく、形状変化に伴うひずみセンシングに着目し、走査型触覚センシングについて研究を行う。さらに、ヒトの経験的に獲得してきた能動触メカニズムを規範とした触覚センシングによって面歪検査の問題に挑む。本研究の内容を以下にまとめる。

- 柔軟な触覚センサを用いたヒトの能動触メカニズムの観察
- ウェアラブル走査型触覚センサを用いた微小ひずみ検出
- 広範囲の検査に適した走査型触覚センサの開発

面歪検査を研究対象とするが、現場ではヒトが触って主観評価が行われているため、どのような形状でどのくらいの大きさの面歪が検知されなければならないのか定量的に定められていない。そこで本研究では検出する形状を定め、パラメータを変更してセンシングによってどの程度の形状が計測可能なのか評価を行う。形状の評価として曲率を使用する。面歪検査では製品の曲面に存在する微小なうねり凸等を検出する必要がある。製品の曲面の曲率は検出物のと比べて非常に小さく0に近い。それに比べて検出されるべき微小な凸形状の曲率は大きくなる。例えば、高さ  $50\ \mu\text{m}$  のガウシアン形状を幅を  $20\sim 4\ \text{mm}$  に変化させたときの曲率を考える。図 1.2 はガウシアン形状の凸を表す。図 1.3 はその凸形状の曲率を表す。凸形状で曲率が正になるように示している。幅を小さくするほど、曲率が大きくなり、評価指標として妥当だと考える。走査型触覚センシングによって微小な形状の曲率推定を行い、その検出能力の評価を行った。

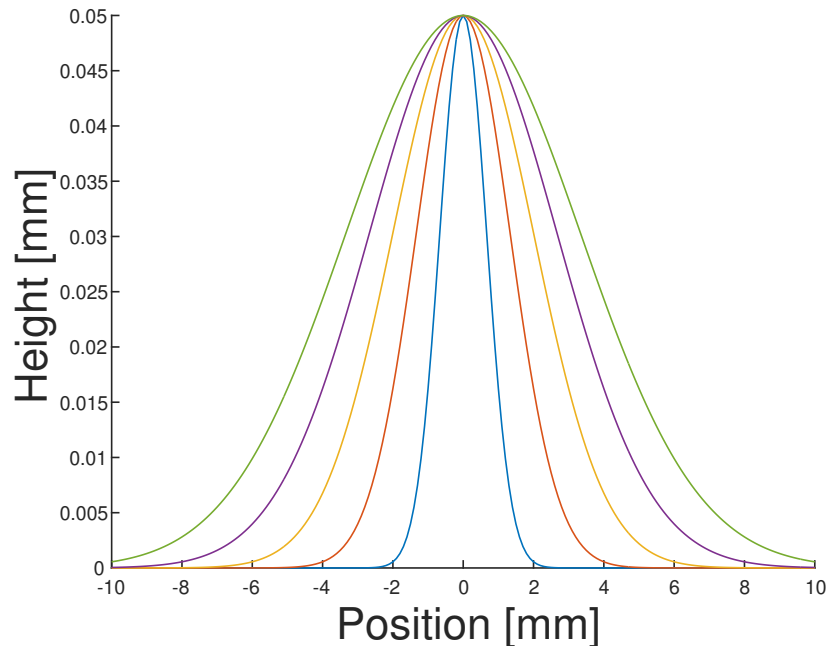


Fig. 1.2: Gaussian shape

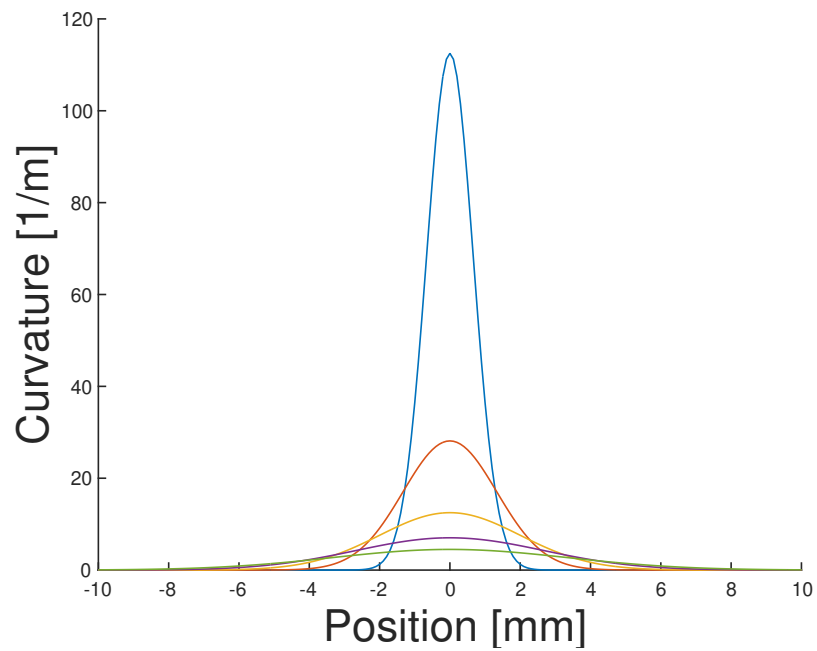


Fig. 1.3: Gaussian shape curvature

## 1.6 本論文の構成

本論文の構成については以下の通りである。

第2章では、本研究で取り扱う基本的なセンシング原理を最小限要素で示した、ウェアラブル走査型触覚センサについて説明する。ウェアラブル走査型触覚センサの入力を曲率したときの出力信号について調べた。曲率と出力信号の関係を使って、ウェアラブル走査型触覚センサを正弦波曲面を走査して、その面の曲率の推定を行った。得られた曲率推定の結果から、走査した面の曲率と比較し、検出能力の定量評価を行った。走査対象の正弦波曲面は数十  $\mu\text{m}$  の振幅を持つ微小なうねりを使用する。

第3章では、微小面歪を検出するために触覚コンタクトレンズを利用した増幅効果について説明する。触覚コンタクトレンズとは、指と走査面の間に介在させて走査すると、表面の微小な凹凸の知覚を感じ易くするデバイスであり、単純な構造体である。触覚コンタクトレンズは本来、ヒトの触知覚を増強するデバイスであるが、走査型触覚センサと併用利用することで、センサ信号が増幅させる効果がある。この増幅効果を利用して、微小うねりの曲率推定を行った。増幅効果によって検出能力がどの程度向上させることができるのか評価を行った。

第4章では、走査型触覚センシングを面状に広げ、広範囲検査に適した面状走査型触覚センサについて説明する。一度の走査で検出できる範囲を広くするため、検出幅を広げた走査型触覚センサを提案する。2, 3章より実際の面歪検査に近い状況で検出を行える。この面状走査型触覚センサを使って、2, 3章と同様な曲率推定を行った。また、微小ひずみの位置検出を行った。

最後に第5章では、結論としてまとめと今後の展望について述べる。

## 第2章 ウェアラブル走査型触覚センサ

この章ではウェアラブル走査型触覚センサを使った面歪の曲率推定について述べる。ここで述べるウェアラブル走査型触覚センサとは使用者の指に装着し、対象とする表面を走査してセンシングを行うセンサである。この触覚センサにはひずみゲージ埋め込みゴム製人工皮膚層を使用する。ひずみゲージ埋め込みゴム製人工皮膚層とは構造が単純で、非常に薄いセンサである。それによって、皮膚と対象となる表面の間に最小限に介入することができ、ヒトの触動作の妨げにならない。この単純な構造のセンサを使って走査型触覚センシングを利用して表面に存在する微小な面歪検出の実証実験を行った。この章では面歪の形状を正弦波形状とし、振幅や空間周期を変更したときの面歪検出について調査した。

### 2.1 ひずみゲージ埋め込みゴム製人工皮膚層

ゴム製人工皮膚層とは指に薄いゴム層を形成し、そのゴム層にひずみゲージが埋め込まれたウェアラブル走査型触覚センサである。図 2.1 は装着時のゴム製人工皮膚層の写真と模式図である。指に装着し、面を走査してセンシングを行う。ひずみゲージがゴム層の中に埋め込まれており、ゴム層の変形に伴い電気信号が出力される。表面を走査したときに、ひずみゲージが指と走査する表面の間になるように配置されている。

ゴム層は使用者の指にフィットさせることで、皮膚変形によってゴムが変形し、そのゴム層の中のひずみゲージが反応する。したがって、このセンサを指に装着して表面を走査すると、走査表面の形状変化に応じてセンサ信号が出力される。指の柔らかさとゴムの伸縮性によって面の形状に沿い、それに従って信号が生じる。図 2.2 はセンサ構造を示す。

ヒトの指は様々な面の形状に沿って変形し、皮膚に埋め込まれた触覚受容器が反応させる。このヒトの触覚センシングの原理と同様に、指が面の形状に沿って変形することで、その周りのゴム層が変形し、その変形をひずみゲージが電気信号へと変換する。この原理に従った最も単純なセンサがひずみゲージ埋め込みゴム製人工皮膚層である。

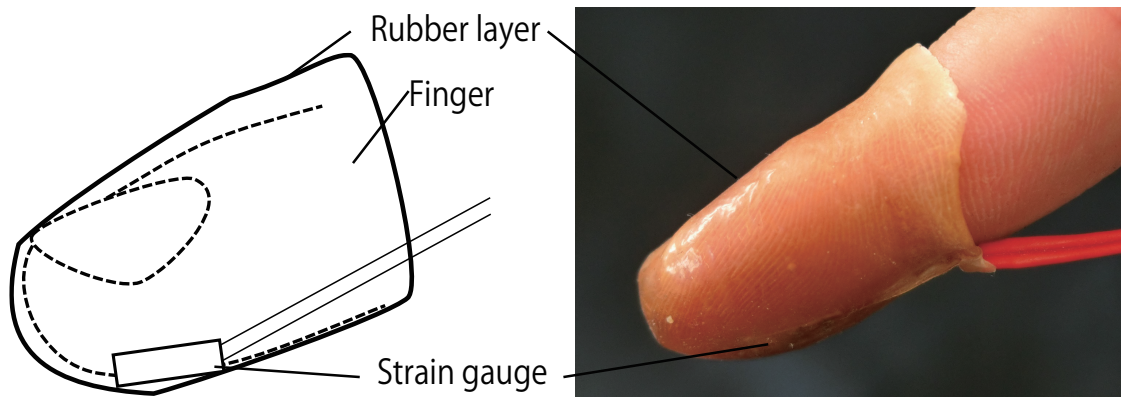


Fig. 2.1: Schematic diagram and photo of rubber artificial skin layer with embedded a strain gauge

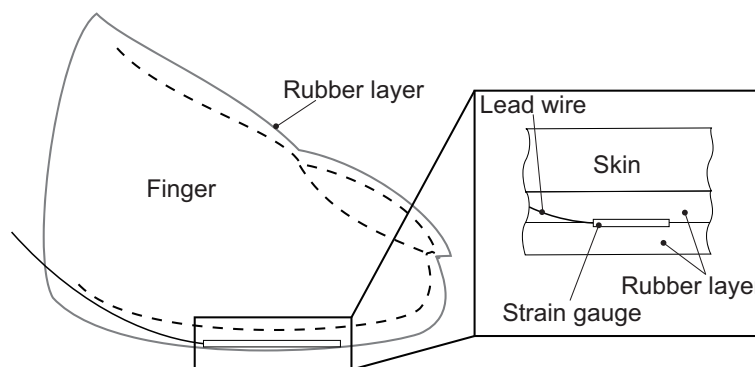


Fig. 2.2: Structure of rubber artificial skin layer with embedded a strain gauge

### 2.1.1 製作方法

ひずみゲージ埋め込みゴム製人工皮膚層はダイレクトディッピング法と呼ばれる手法により成形される。ダイレクトディッピング法とは、装着する指を直接、液体ゴムに浸し、乾燥させることで指の周りにゴム層を成型する方法である。この成形方法によって皮膚とひずみゲージ埋め込みゴム製人工皮膚層の間の隙間を無くすることができる。ダイレクトディッピング法の基本的な作業は以下の通りである。

- I. 指を液体ゴムへ浸す。
- II. 余分な液体ゴムを除去し、乾かす。
- III. ひずみゲージをゴム層に張り付ける
- IV. 再び液体ゴムへ浸す。

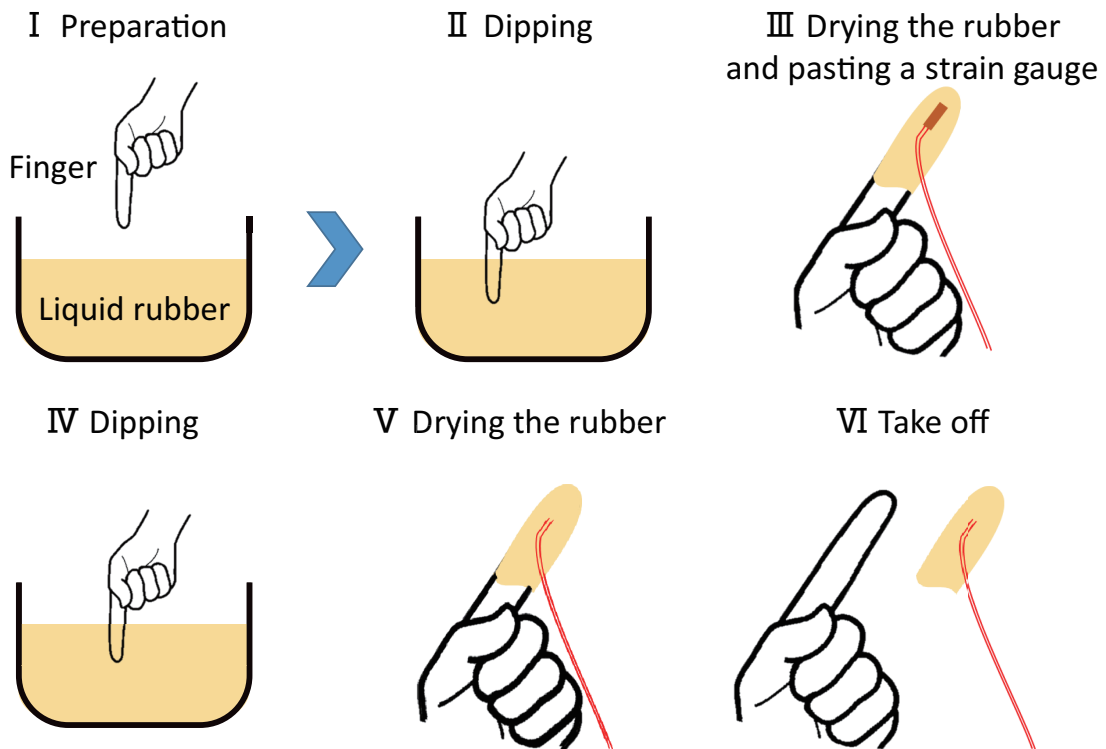


Fig. 2.3: Direct dipping process

V. (II) を行い、指からゴム層を着脱する。

以上の手順に従って、ダイレクトディッピング法の手順を説明する。まず、指を直接、液体ゴムに浸す。次に指の周りに付いた余分な液体ゴムを除去し、ヒータまたはドライヤ等で乾かす。余分な液体ゴムを除去することで薄いゴム層を成形することができる。十分に乾かし、凝固したら、ひずみゲージを張り付ける。ひずみゲージは指腹の中央部に張り付ける。そして、再び液体ゴムに浸し、乾かして凝固させる。この指の周りに成形されたゴム層をひずみゲージ埋め込みゴム製人工皮膚層である。これをタルクと呼ばれる粉末を塗布しながら、指から着脱する。タルクを塗布することでゴム同士の接着を防ぐ。液体ゴムに「浸す」・「乾かす」作業を繰り返すことで、ひずみゲージ埋め込みゴム製人工皮膚層の厚みを調整することができる。

### 2.1.2 曲率検出能力

ひずみゲージ埋め込みゴム製人工皮膚層を装着して走査した表面上の面歪を曲率として定量評価をするため、センサの出力信号と曲率の関係性を調べる。ひずみゲージ埋め込みゴム



**Fig. 2.4:** Tactile sample with constant curvature

製人工皮膚層は表面の曲がり具合、つまり曲率に応じて、信号が出力する。出力信号と曲率の関係性を調べるため、図 2.4 に示すような曲率一定の表面にセンサを押し当てる実験を行った。押し当てた曲率は  $-100 \sim 100$   $1/m$  である。0  $1/m$  は平面である。この実験結果から図 2.5 に示すような関係が得られた。この結果は凸形状ではひずみと曲率の関係は比例関係であることを示している。しかし、凹型形状では  $-50$   $1/m$  付近まで線形である。これは表面の形状に沿えなくなったためだと考えられる。したがって、表面の形状に沿うことができれば、その形状に従って比例的に出力信号が得られる。この関係性を使って、出力信号から走査した表面状に存在する面歪の曲率推定が可能となる。

### 2.1.3 応答性

センサの動的な応答を調査するため、ひずみゲージ埋め込みゴム製人工皮膚層を装着した指で、平らな面を叩く実験を行った。実験は片持ち梁の先端をタップし、梁の根本に配置し

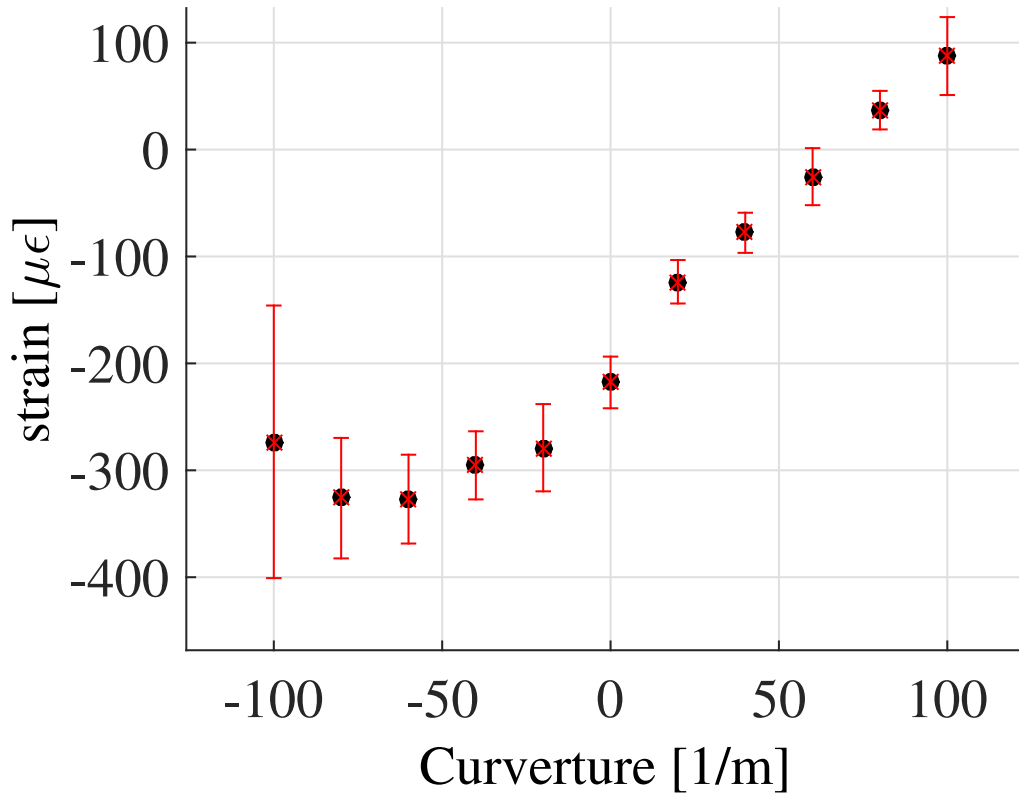


Fig. 2.5: Relationship between output signal value and curvature

たひずみゲージの信号とゴム製人工皮膚層のセンサ信号から応答時間を計測する。図 2.6 は計測システムの概略図である。

反応時間として、初期時間から、センサに埋め込まれたたひずみゲージからの信号の各スパイクのピークの 50% に到達するまでの時間を測定した。10 回のタップを行い、測定した反応時間の平均と標準偏差を算出した。

図 2.7 と図 2.8 はタップした際に同時計測した押しつけ力とゴム製人工皮膚層に埋め込まれたたひずみゲージの信号である。0.5 N 未満の軽いタップでも提案されたセンサによって検出された。

図 2.10 は図 2.7 と反転させた図 2.8 の 1 つずつのピークに対して正規化し、重ね合わせたグラフである。実線はゴム製人工皮膚層の信号、破線はタップ力を示す。この図から 2 つのピーク時の時間差が 50 ms より小さいことがわかる。具体的に、10 回のタップの結果を平均すると 22.2 ms であった。標準偏差は 1.1 ms であった。

この図から、2 つのピーク時間の時間差が 50 ms よりはるかに小さいことがわかる。より具



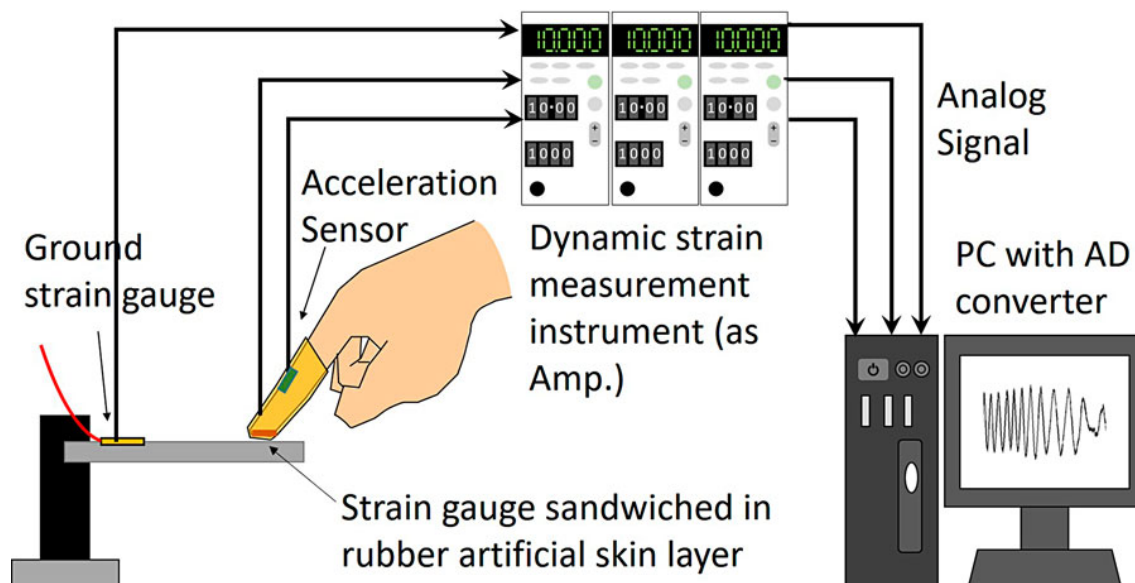


Fig. 2.6: Sensing system for confirming responsiveness

体的には、10回の測定における反応時間の平均と標準偏差は、それぞれ22.2 msと1.1 msである。この反応時間は、ビジョンベースの触覚センサーよりも短く、単一のデータセットをサンプリングする場合でも、通常100 msかかる [14, 15]。以下のように、センシングシステム全体の動的応答をより正確に理解できる。提案されたセンサーが、入力としての垂直変位から出力としてのセンサーひずみへの2次システムであると仮定した場合、振動せずに進むため、実線の曲線は臨界減衰のインパルス応答に近似できる。この場合、固有振動数  $f_n$  は  $f_n = 1 / (2\pi t_p)$  で計算できる。ここで、 $t_p$  は図 2.10 の約 0.07 のピーク時間を示す。空間周波数が  $F$  1/m の正弦波状の表面を速度  $v$  m/s で走査する場合、センサー信号の時間周波数  $f$  は  $f = vF$  Hz になる。したがって、 $v$  は  $vF$  がこの場合約 2.3 Hz である固有周波数  $f_n$  よりも大きくならないように選択する必要がある。

## 2.2 面歪形状の曲率推定

前節ではひずみゲージ埋め込みゴム製人工皮膚層がロバストな曲率検出可能であることを示した。この節では、このロバスト性を活かし、センサを装着してなぞった面の形状を曲率として再構築する実験を行った。再構築する面は正弦波とし、信号からなぞり面の曲率を推定した。

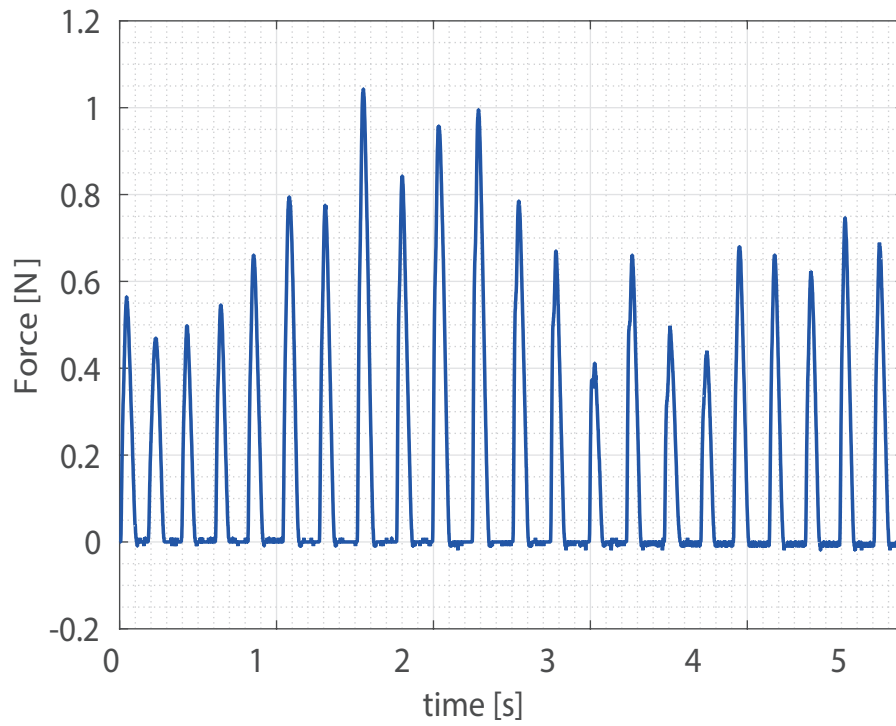


Fig. 2.7: Time series data of force at tapping

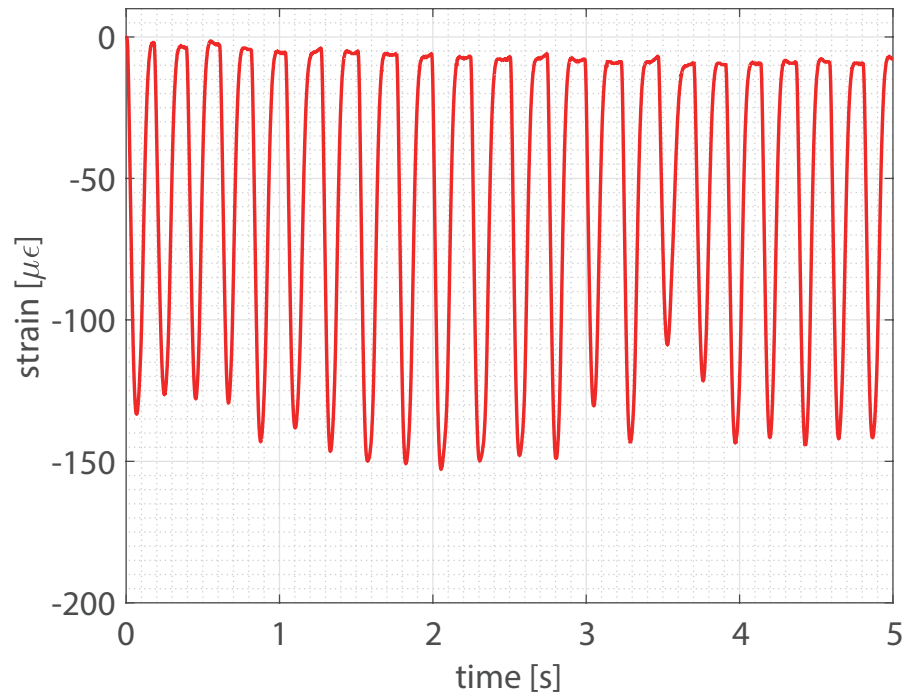
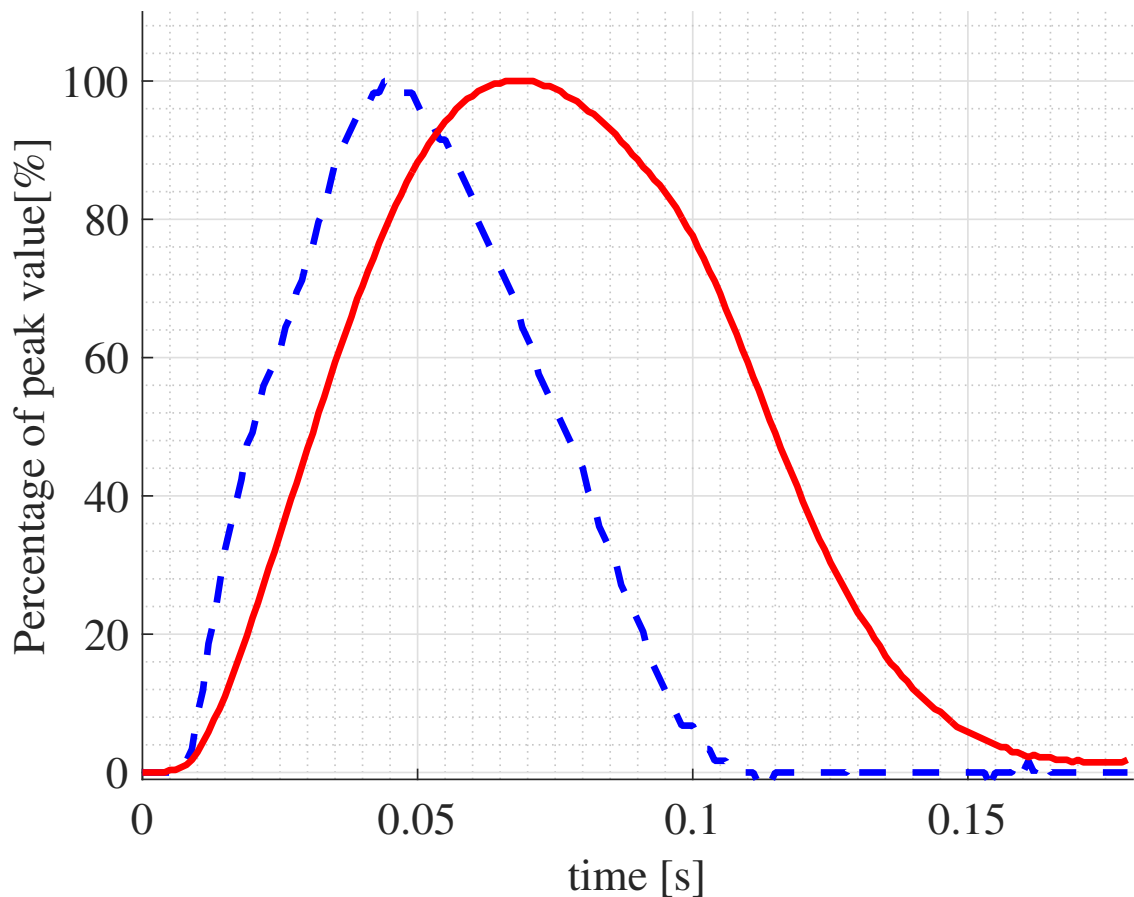


Fig. 2.8: Time series data of strain at tapping



**Fig. 2.9:** Zoomed time graphs of tapping force and micro-strain of proposed sensor. The latter graph is inverted, and each graph is normalized for each peak value for better comparison.

### 2.2.1 曲率推定の過程

ひずみゲージ埋め込みゴム製人工皮膚層を使用した面歪の曲率推定を行う過程について述べる。使用者は指にひずみゲージ埋め込みゴム製人工皮膚層を装着し、正弦波形状の面歪が存在する面を走査する。走査時のセンサ信号はひずみゲージ用のアンプを使って増幅される。そのアンプであらかじめ定められたひずみ量に対する電圧値の関係から、定数  $k_s$  が決まっているので、これに乗じて電圧値をひずみ量に変換する。次に前節で調べた、曲率とひずみ量の比例関係から比例定数  $k_c$  を乗じて曲率に変換する。ここまでで、走査時の時間に対するセンサ信号から得られた曲率推定値のデータが得られる。走査時にはカメラで動画を撮影する。センサにはマーカが設置されており、そのマーカを動画像処理によって走査時の時間に対する走査位置を計測する。これらの計測結果を使って、走査位置に対する曲率の推定値が得られる。また、走査位置から実際の曲率を計算し、曲率の推定値と比較する。

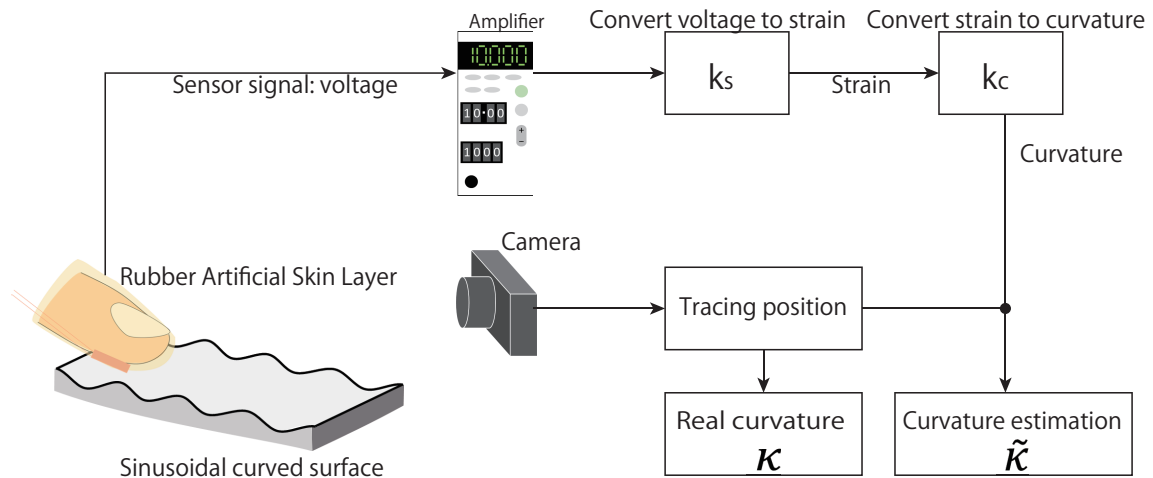


Fig. 2.10: Curvature estimation process

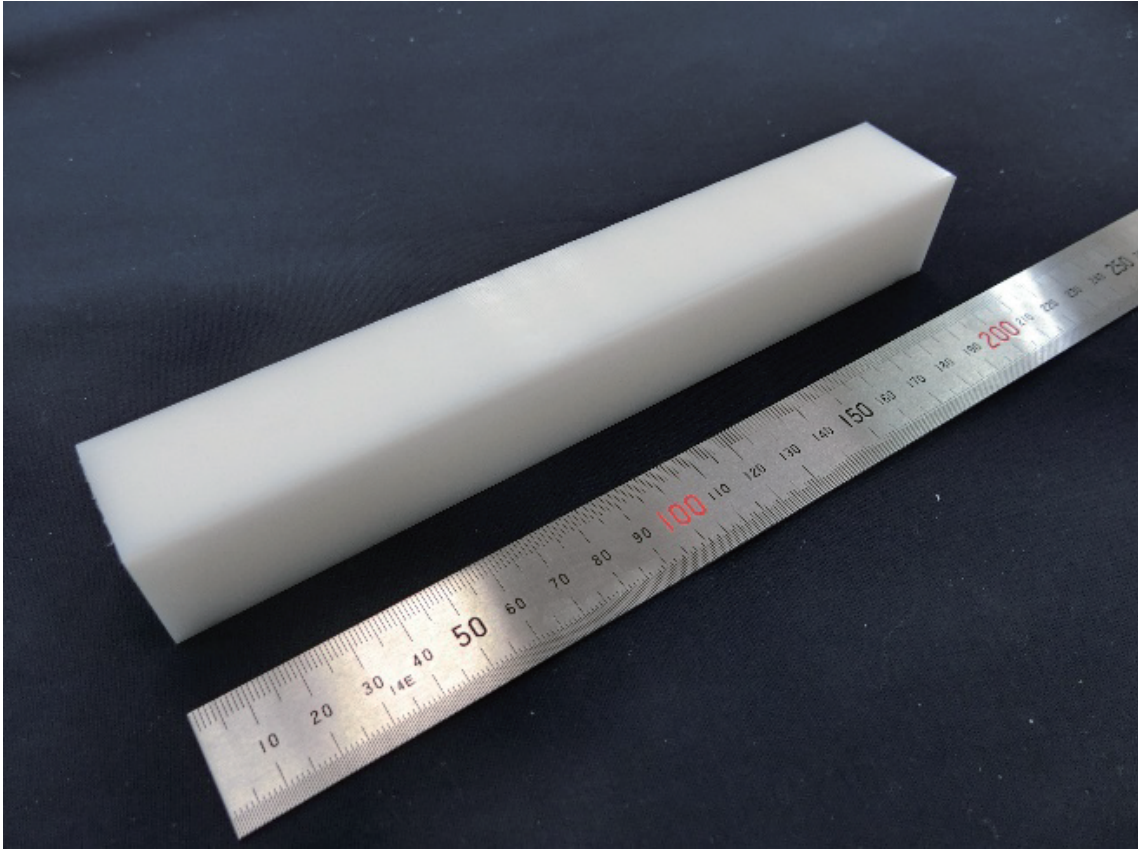
### 2.2.2 実験方法

実験では正弦波を表面に持つポリアセタール製のブロックを用意した。そのブロックを複数用意し、それぞれ振幅が異なっている。図 2.11 は触覚サンプルの写真を示す。振幅は数十  $\mu\text{m}$  であり平坦に近い面歪である。このブロックを触覚サンプルとし、正弦波形状の表面をゴム製人工皮膚層を装着した指で走査を行う。走査時の出力信号を計測する。また、走査時にはカメラで動画を撮影し、計測後に動画像解析により指に取り付けたマーカの位置を計測する。図 2.12 は走査時の様子を表す写真である。センサ出力から走査面の曲率を推定し、動画像解析から得られた走査位置から、走査位置に対する曲率推定のデータを作成する。この曲率推定のデータを使って走査面の曲率と比較を行う。

### 2.2.3 触覚サンプル

触覚サンプルは長手方向に基準面からの深さが正弦波状に変化するサンプルである。触覚サンプルは  $30\text{ mm} \times 30\text{ mm} \times 200\text{ mm}$  のポリアセタール樹脂の四角柱から機械加工によって製作された。うねり面の両端には基準位置の平面 (区間  $20\text{ mm}$ ) がある。したがって、うねり面の長さは  $160\text{ mm}$  である。図 2.13 のように座標系を設置し、触覚サンプルのうねり面形状を表す曲線を以下の式で表すことができる。

$$z(x) = A \cos\left(\frac{2\pi}{T}x\right) \quad (2.1)$$



**Fig. 2.11:** Touch sample with sinusoidal wavy surface

ここで、 $T$  は空間周期、 $A$  は振幅を表す。この正弦波面の  $x$  方向の曲率  $\kappa(x)$  は次のように表される。

$$\kappa(x) = \frac{-A\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cos\left(\frac{2\pi}{T}x\right)}{\left\{1 + A^2\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \sin^2\left(\frac{2\pi}{T}x\right)\right\}^{\frac{3}{2}}} \quad (2.2)$$

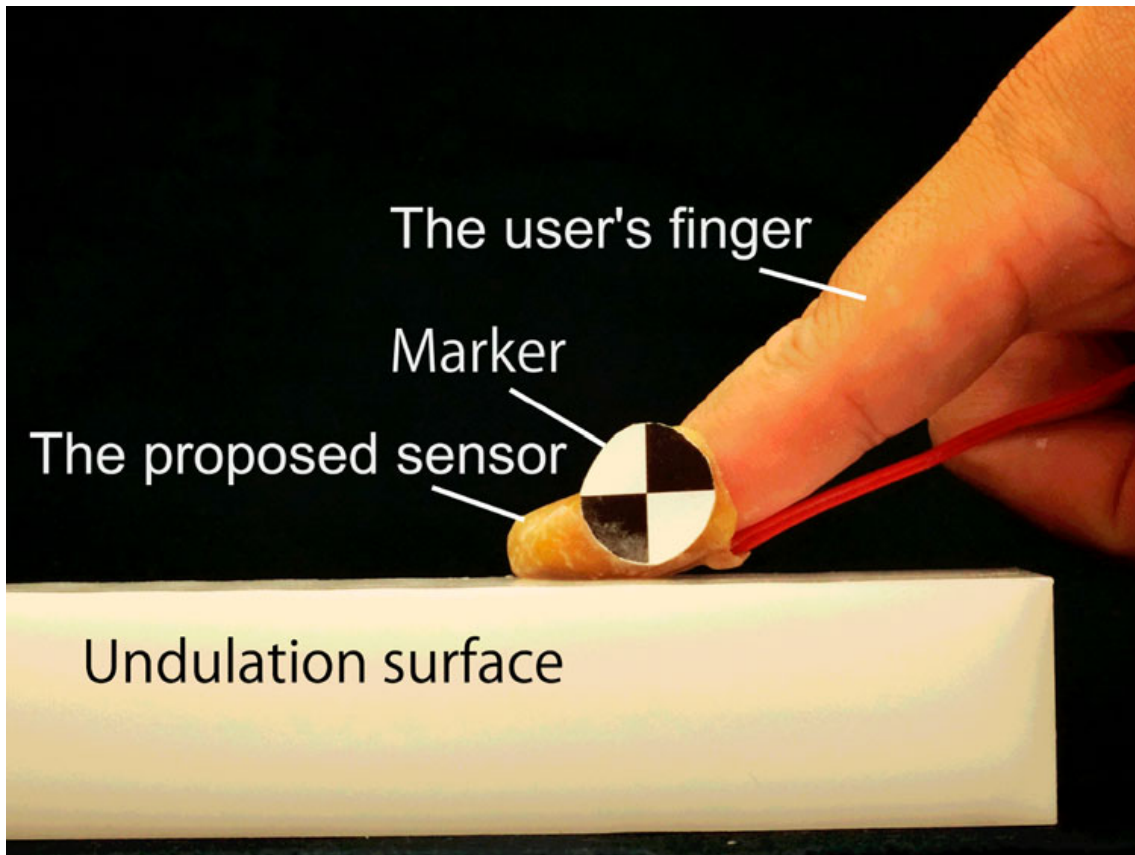
凸型を正、凹型を負とするため数学的表記の曲率とは正負を逆にとる。本研究のケースでは  $A/T \ll 1$  であるので、以下のように  $\kappa(x)$  を近似できる。

$$\kappa(x) \approx \tilde{A} \cos\left(\frac{2\pi}{\tilde{T}}x\right) \quad (2.3)$$

ここで  $\tilde{A}$  と  $\tilde{T}$  は以下のように定義する。

$$\begin{aligned} \tilde{A} &:= A\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \\ \tilde{T} &:= T. \end{aligned} \quad (2.4)$$

本稿では  $\tilde{A}$  を曲率におけるの振幅として扱う。この曲率におけるの振幅  $\tilde{A}$  と空間周期  $\tilde{T}$  の推定を行う。



**Fig. 2.12:** Photograph of a finger wearing our proposed sensor during tracing. The marker attached to the tactile sensor is used for camera position measurements

#### 2.2.4 信号処理

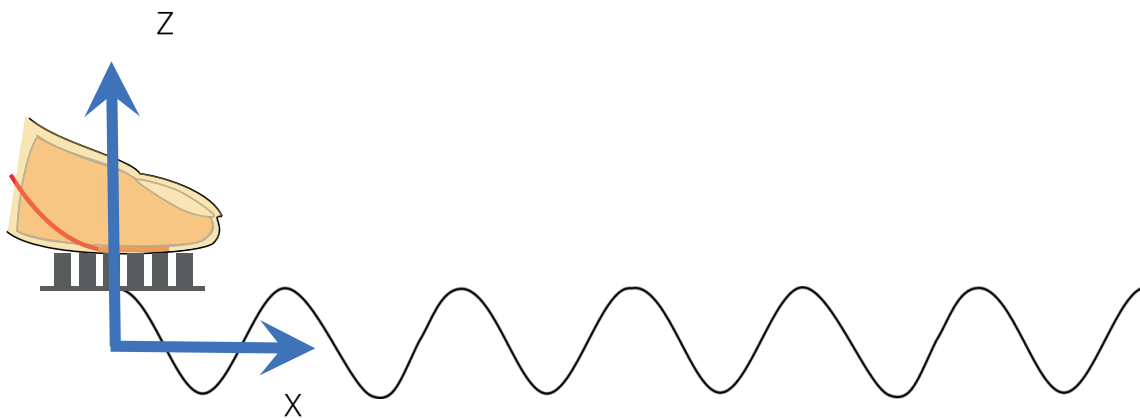
図 2.14 はセンサ信号計測のシステム図を示す。センサ信号はひずみゲージアンプを使って増幅され、AD コンバーターを通し PC に記録する。なぞり位置はセンサにマーカを取り付け、カメラを使って位置を計測される。フレーム数は 120 fps とした。触覚サンプルをなぞっている間を動画撮影し、後で動画画像解析ソフトによってマーカを追跡し、走査位置を計測する。センサ信号ロガー開始と画像解析による位置計測開始時間 ( $t=0$  sec) を合わせるために LED の光をセンサ信号の記録開始時に発光させ、それを位置計測開始の合図とした。

図 2.15 は信号処理前のセンサ信号を表す。一定時間の間、うねり面がある表面を往復で走査する。このデータから同じ走査方向の信号をそれぞれ 1 つずつ抜き出す。カメラで計測される走査位置情報からうねりが存在する部分を切り出す。この信号にはバイアスやトレンドが乗っているため、それらを除く。事前に行っていた、信号値を曲率に変換するためのキャリブレーションの結果を使って、信号値を曲率に変換する。信号のサンプリング時間

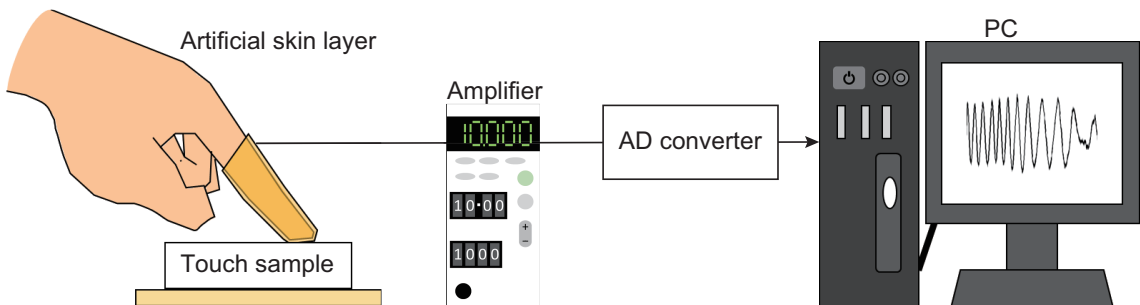
は 1 msec であるのに対し，位置計測は 1/120 sec であるので位置計測の測定点は信号の測定点と比べて少ない．位置計測のサンプル時間は信号のサンプル時間より長いので，位置計測の計測点数は信号の計測点数より少ない．したがって，不足している点は直線近似より算出し信号の測定点と位置の測定点の数を同じにしている．

### 2.2.5 実験結果

図 2.16 は振幅が  $40 \mu\text{m}$  の正弦波面を持つ触覚サンプルをなぞった時の結果の一例を示す．横軸は x 方向の位置，縦軸は曲率を表す．点線は走した面の曲率，実線はセンサ信号によって推定された曲率を表す．この図から 2 つの曲線の形状はよく似ていることがわかる．同様に図 2.17 と図 2.18 はそれぞれ振幅が 20,  $10 \mu\text{m}$  の正弦波面を持つ触覚サンプルをなぞった時の結果の一例を示す．同様に走査面の曲率(点線)と推定曲率(実線)はよく一致しているよ



**Fig. 2.13:** Undulation surface coordinates. The flat surface and the undulation peak are at the same level



**Fig. 2.14:** Sensor system. The sensor signal is uploaded into a personal computer (PC) via a strain gauge amplifier and an analog/digital (AD) converter

うに見える。この結果を使ってセンサの検出能力の評価を行う。

### 2.2.6 検出能力評価

以下の3つの観点から評価を行う。

- 周波数解析
- ノイズの影響
- 走査面の曲率と推定曲率の類似度

周波数解析では信号のフーリエ解析を行う。解析結果から信号の振幅と空間周期を推定する。図2.19は振幅 $40\ \mu\text{m}$ の正弦波面を走査したときの信号から得られた周波数解析の結果を示す。横軸は空間周波数，縦軸は曲率推定から得られた信号の振幅を表す。点線は実際の走査面の曲率変化における振幅を示す。この結果のピーク値より，曲率推定から得られた信号の振幅

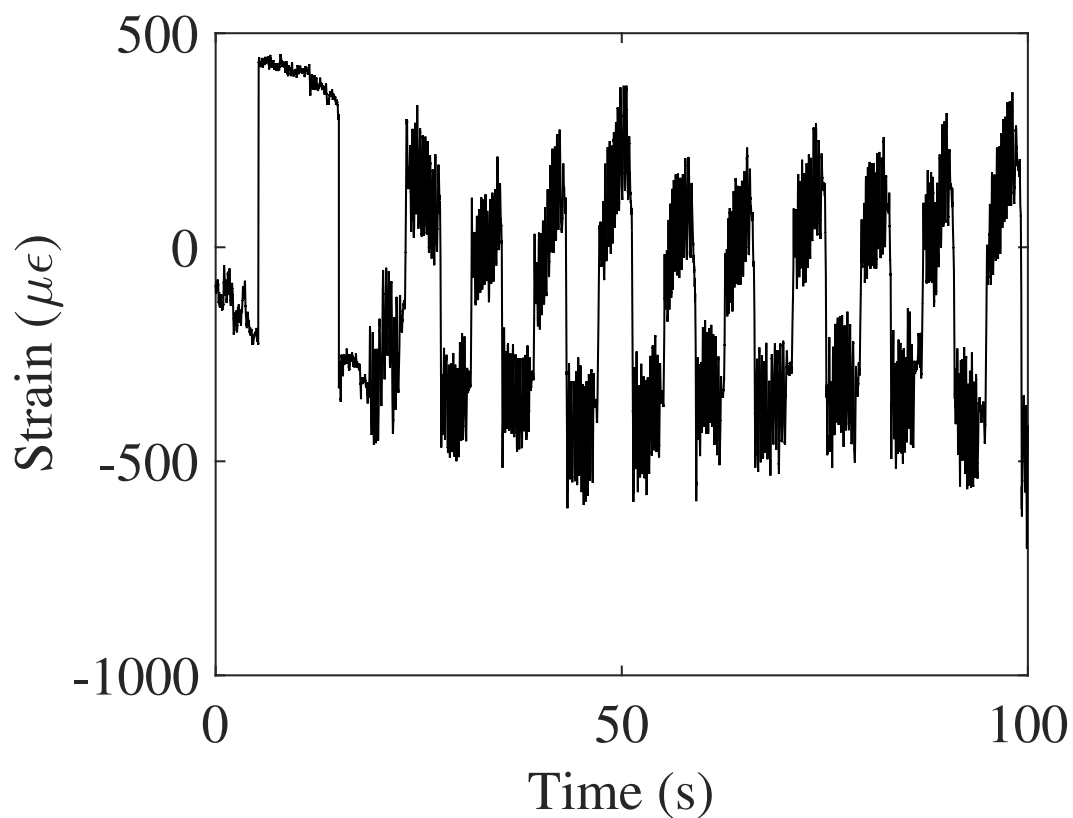


Fig. 2.15: Sensor signal before signal processing

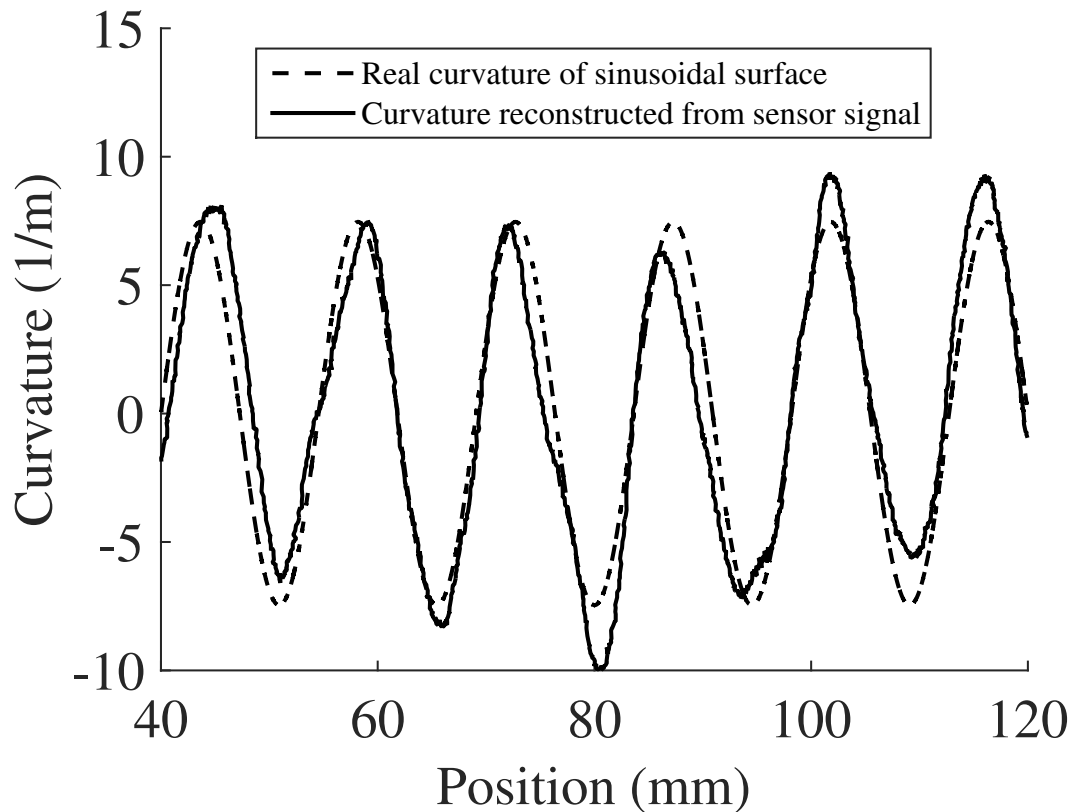


を得る。そのピーク位置での空間周波数の逆数を取って、空間周期の推定を行う。表 2.1 は周波数解析から得られた曲率変化における振幅及び空間周期の推定結果を示す。この結果からどの計測結果でもばらつきが小さく推定されていることがわかる。また、空間周期の推定に関してはどの結果も誤差率が数%でありよく推定することができている。しかしながら、振幅に関して推定結果に違いがある。形状の振幅が  $10 \mu\text{m}$  の推定結果は約 6%ほどであり、比較的よく推定することができている。一方、ほかの 2 つの結果では誤差率が大きくでている。

次にノイズの影響に関して評価を行う。ここでは信号に対するノイズの比である SN 比を計算する。SN 比 (SNR: Signal-Noise Ratio) を以下のように定義する。

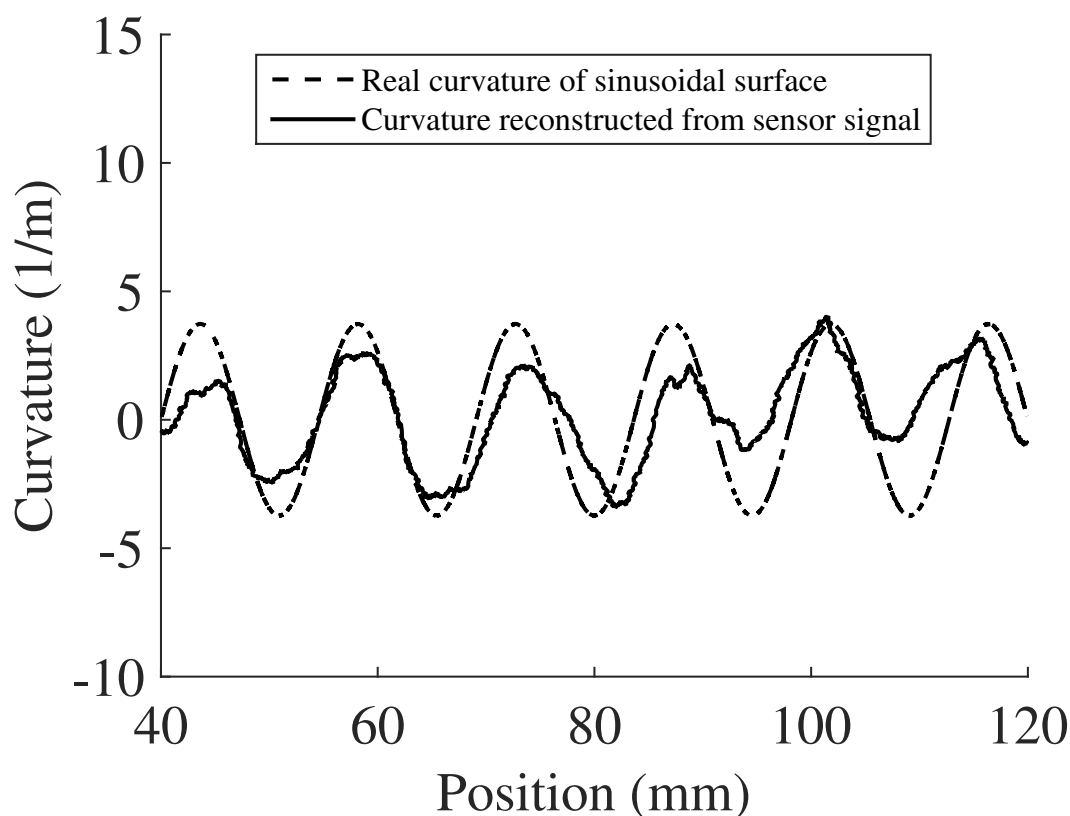
$$SNR := 10 \log_{10} \frac{\sum_i (\hat{\kappa}_i)^2}{\sum_i (\kappa_i - \hat{\kappa}_i)^2} \quad (2.5)$$

ここでは、ノイズとしてある走査位置で示される推定曲率とその点での実際の曲率との誤差と定義する。図 2.20 は各振幅での推定結果の SN 比の算出結果を示す。横軸は曲率変化にお



**Fig. 2.16:** The estimated curvature reconstructed from the proposed sensor (the solid curve) in comparison with the real curvature (the dashed curve) when a sine surface with an amplitude of  $40 \mu\text{m}$  was traced.

ける振幅, 縦軸はSN比を示す. 点は10サンプルの平均値, エラーバーはその分散値を表す. SN比は数値が大きいほどノイズの影響が小さいことを表す. ばらつきは大きい, おおよそ



**Fig. 2.17:** The estimated curvature reconstructed from the proposed sensor (the solid curve) in comparison with the real curvature (the dashed curve) when a sine surface with an amplitude of  $20 \mu\text{m}$  was traced.

**Table 2.1:** Results of curvature amplitude  $\tilde{A}$  and spatial period  $\tilde{T}$  estimated by the haptic sensor when only the curvature amplitude is changed, and the respective error rates.

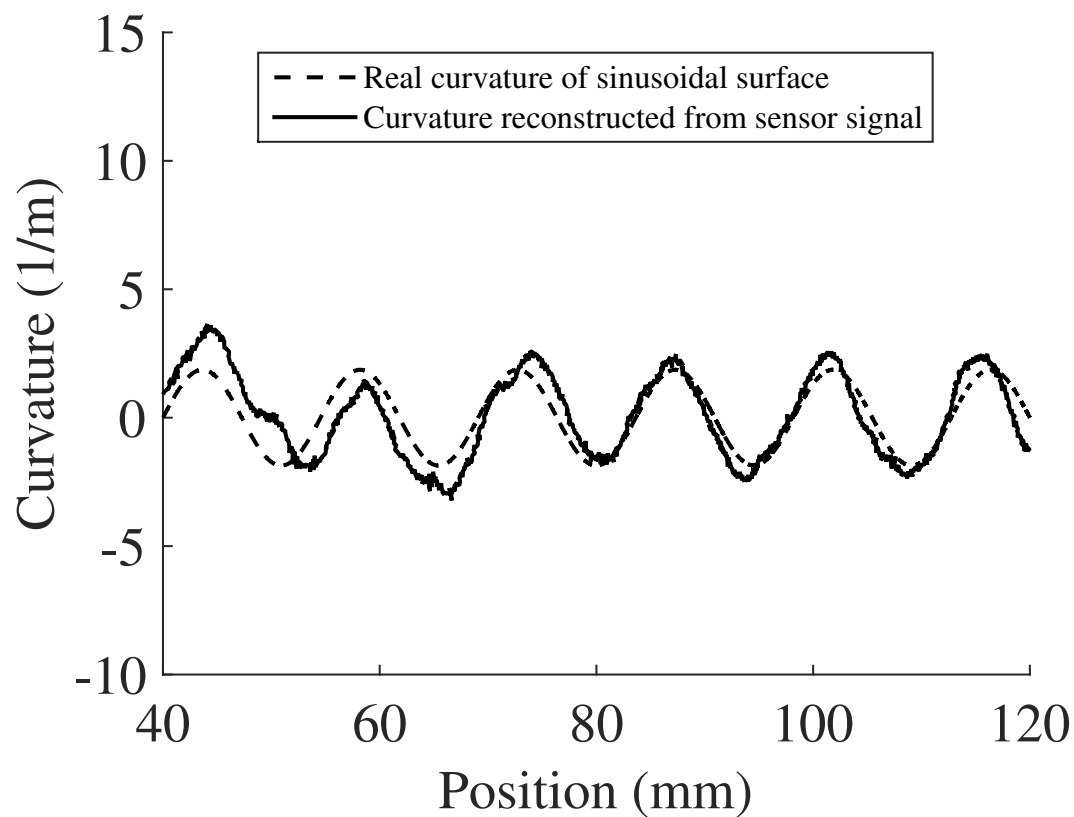
A ( $\mu\text{m}$ )	$\tilde{A}$ (1/m)	$\tilde{T}$ (mm)	Estimated $\tilde{A}$	Error (%)	Standard deviation	Estimated $\tilde{T}$	Error (%)	Standard deviation
40	7.46	14.6	6.39	14.4	0.7	14.0	3.7	0.2
20	3.73	14.6	2.27	39.1	0.2	14.4	3.0	0.5
10	1.87	14.6	1.98	5.9	0.2	13.26	1.61	0.5

5~2であり、ノイズに影響され難いことがわかる。

次に走査面の曲率と推定曲率がどの程度一致しているのか類似度を計算した。類似度として正規化平均二乗誤差を計算する。測定する曲面の曲率を  $\kappa$  とし、センサ信号から推定した曲率を  $\hat{\kappa}$  としたとき正規化平均二乗誤差 (NMSE: Normalized Mean Square Error) は以下のようになる。

$$NMSE = \frac{\sum_i (\kappa_i - \hat{\kappa}_i)^2}{\sum_i (\kappa_i)^2}. \quad (2.6)$$

図 2.21 は各振幅での推定結果の NMSE の算出結果を示す。横軸は曲率変化における振幅、縦軸は NMSE を示す。点は 10 サンプルの平均値、エラーバーはその分散値を表す。NMSE は 0 に近いほどよく一致していることを表す。この結果から振幅が大きいほど、走査面の形状とよく一致した信号が出力されていることがわかる。



**Fig. 2.18:** The estimated curvature reconstructed from the proposed sensor (the solid curve) in comparison with the real curvature (the dashed curve) when a sine surface with an amplitude of  $10 \mu\text{m}$  was traced.

## 2.3 考察

### 2.3.1 センシングの優位性と使用制限

ここで示したひずみゲージ埋め込みゴム製人工皮膚層の主な利点の1つは、超軽量であり、ユーザーの指の周りに1 mm未満の厚さで形成されるため、占有するスペースが非常に少ない。これらの特性は、ウェアラブルセンサーとして適している。また、センサーは伸縮性があり静止時の圧力がほとんどかからないので自由度が高く、天然ゴムでできており、使用者の体型に合わせてゴムディップで形成されているため、ウェアラブルセンサーとしても好ましい。

もちろん、提案されたセンサーにはいくつかの制限がある。このセンサーは細かいテクスチャ情報を排除するため、このような情報も検出する必要がある場合は、皮膚の振動を検出するいくつかの手段をこのセンサーと一緒に使用する必要がある。細かいテクスチャ情報を検出するための優れた手法の1つは、PVDFフィルムを使用することである [37]。

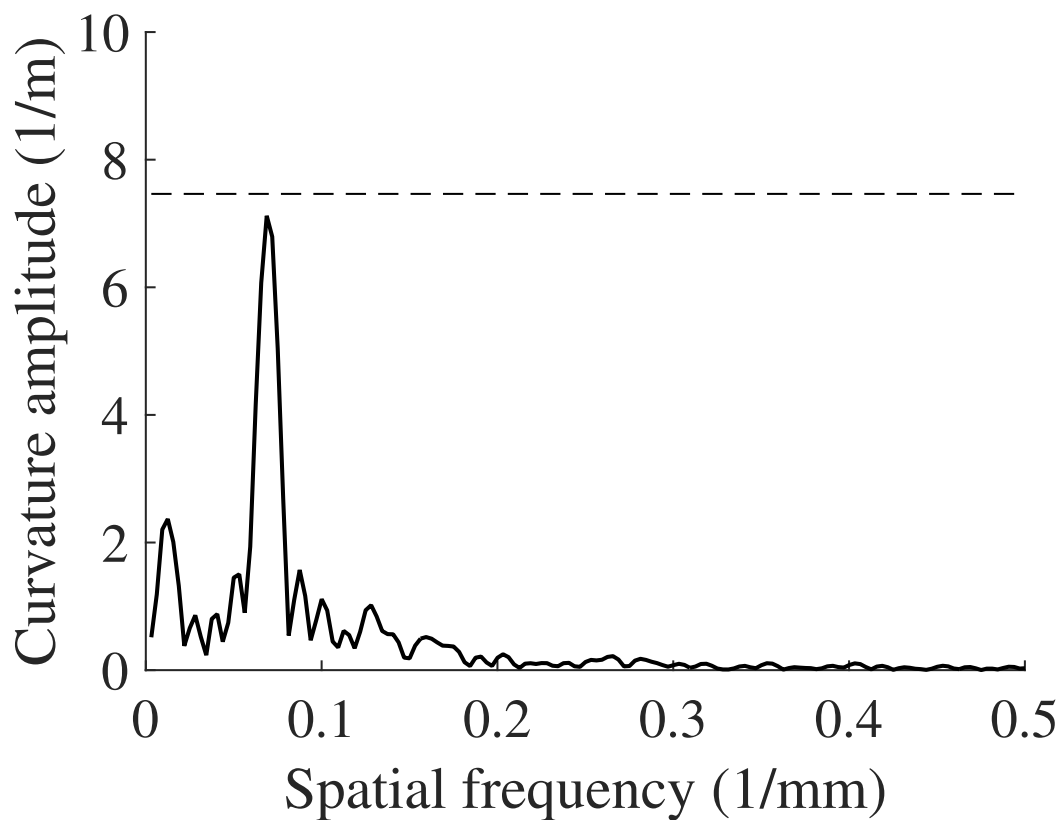


Fig. 2.19: Results of Fourier analysis when tracing a sinusoidal wave surface with an amplitude of 40  $\mu\text{m}$ .

### 2.3.2 推定誤差

提案されたセンサーによる表面形状の曲率推定は完全ではない。図 2.22 は、使用者が平面、つまり曲率 0 の表面をトレースしたときの曲率推定の結果を示している。この図から、推定曲率値が 0 になるはずの曲率の大きさが、 $2 \text{ 1/m}$  までのエラーを確認できる。考えられる誤差の原因には、センサーとサンプルの表面間の摩擦であると考えられる。摩擦をできるだけ低くしようとしたが、完全にゼロにすることはできなかった。したがって、接線力がセンサーに適用され、センサー層に埋め込まれたひずみゲージの出力に影響を与える可能性がある。

提案されたセンサーはカスタムメイドであるため、各センサーは各ユーザーに合わせて調整する必要がある。ただし、セクション 2.2.1 で説明したダイレクトディッピングを使用すると、センサーの製造はそれほど難しくない。この校正手順には時間がかかり、センサーの精度に影響を与える可能性がある。これに加えて、ユーザーが自分の指からセンサーを取り外し、再度指に装着すると、これらの定数がわずかに変化する可能性がある。

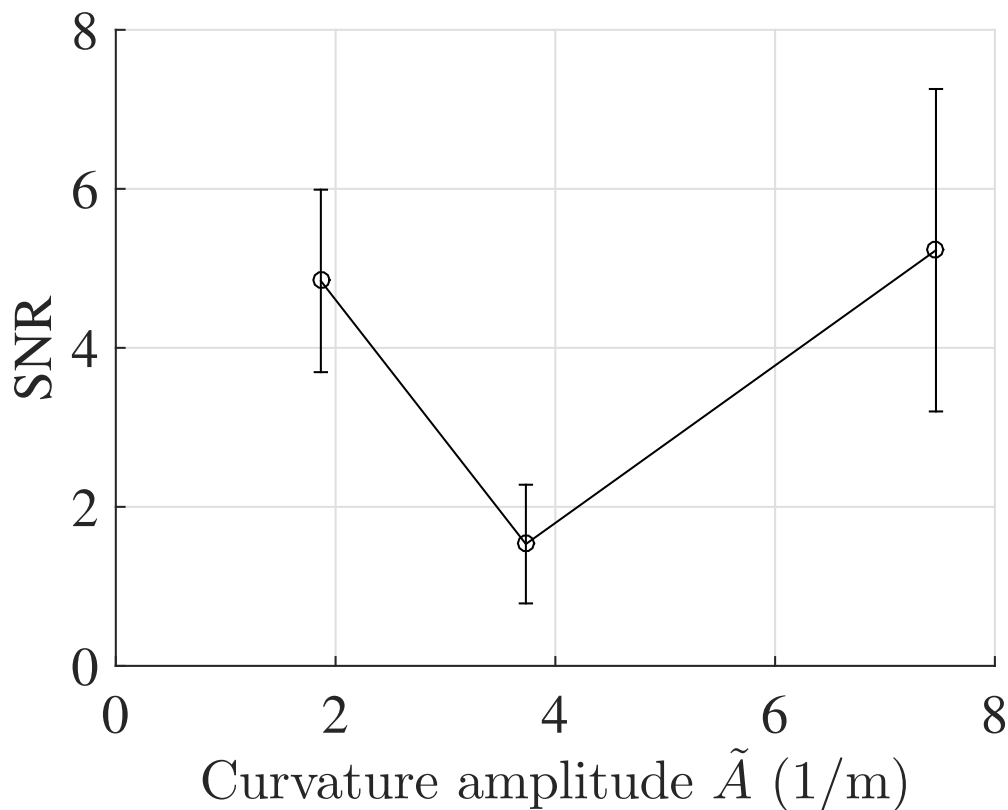


Fig. 2.20: SN ratio for each amplitude

図 2.16 から、実際の曲率に対する推定曲率の位相のずれを観察できる。この現象は、提案されたセンサーが、走査された曲率の導関数を検出するための動的特性を持つ可能性を示す。このセンサーの理論モデルは、最適なセンサーを設計する観点から、およびそれらのエラーの原因を考慮するためにも重要である。弾性理論に基づく [1] と同様の理論的分析は、この現象を明確に理解するのに役立つ可能性がある。これは今後の展望で重要なトピックの 1 つである。

### 2.3.3 面ひずみ検出の実用的問題

この研究では、提案されたセンシングシステムが精度に関して実現可能であることを発見された。しかしながら、表面起伏検出のために提案されたセンサーの実用的な問題がある。広範囲の面を効率良く走査するには、指から手に拡張する必要がある。1 度の走査で検出する幅を広くするのは、実用上の大きな問題である。さらに、提案された検知システムはより速

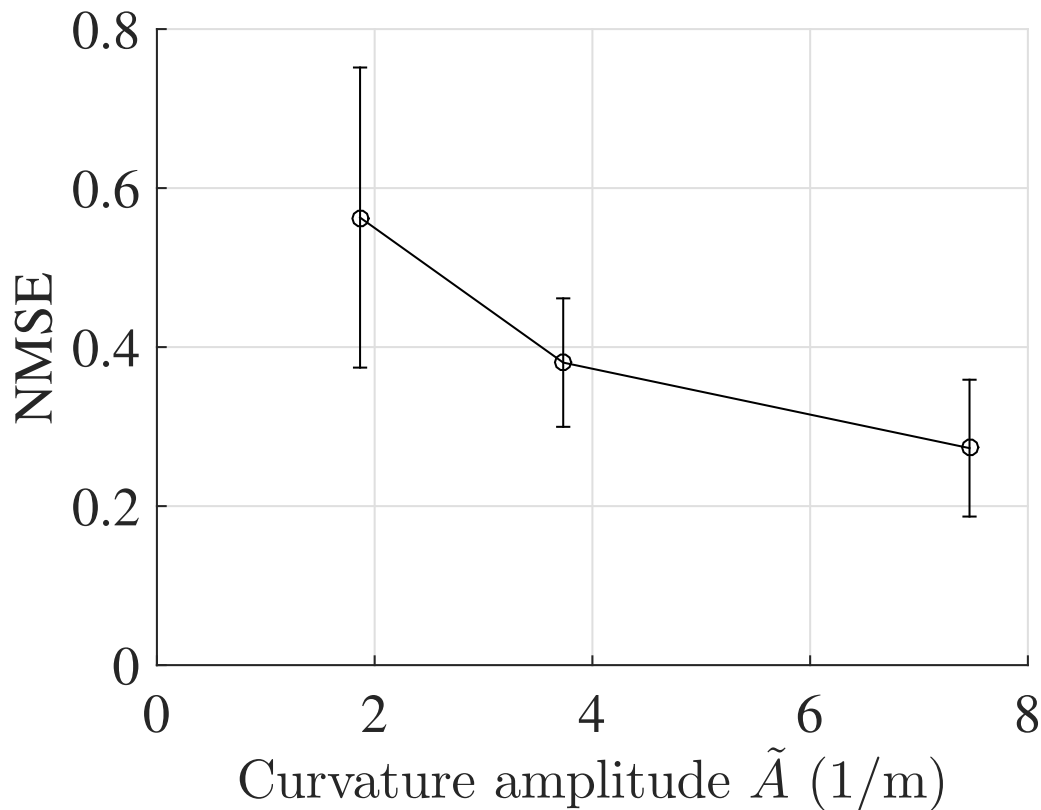
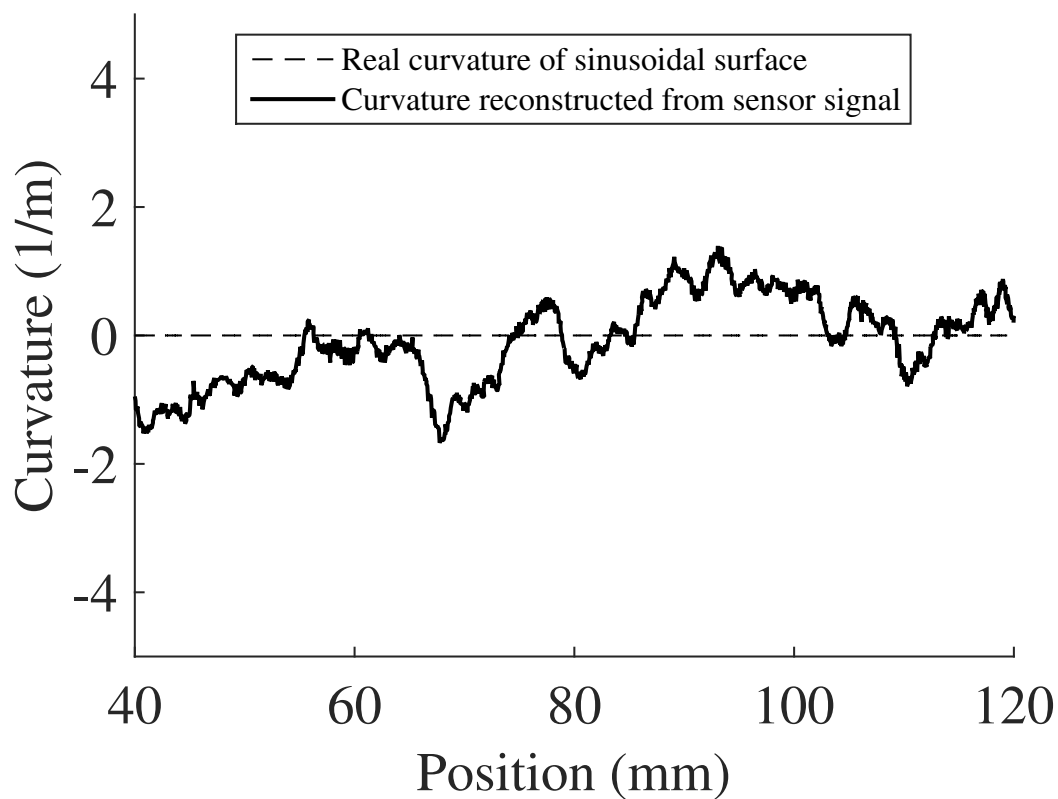


Fig. 2.21: Normalized mean squared error(NMSE) for each amplitude

い速度でターゲット表面をトレースするためにより速い動的応答を持たなければならない問題がある。人間の触覚センシングシステムがさまざまな周波数応答のさまざまな種類の機械受容器を利用しているため [38], 別のセンシング要素をゴム製人工皮膚層とひずみゲージに埋め込む必要がある場合がある。ゴム層は非常に薄いため、埋め込まれた検知素子が大きく曲がることを妨げない場合があることに注意しなければならない。したがって、薄いゴム層に新たに埋め込まれたセンサー素子には、曲げに対する高い感度が要求される。一方、ゴムはローパスフィルターのよう機能し高周波の高速曲げ動作をセンサ素子に伝えない。ゴム層がセンサー出力に及ぼす影響は、今後の作業では無視できるかどうかを判断するには定量的な議論が必要となる。



**Fig. 2.22:** The estimated curvature reconstructed from the proposed sensor (the solid curve) when a flat surface was traced.

### 2.3.4 応用性

ひずみゲージ埋め込みゴム製人工皮膚層は小さな表面のうねりの検出の問題を解決するために発明されたが、これは、このセンサが表面を走査することで、非常に正確な形状を再構築できる特徴がある。このようなアプリケーションの例には豊富な触覚情報を使用した器用な遠隔操作や触覚情報のリモート送信が含まれる。どちらの場合も本研究のセンシングテクノロジーとウェアラブル触覚ディスプレイ [39] を組み合わせて使用することが不可欠であり、有望である。高さが数百  $\mu$ 、幅が数百 mm の広くて小さい表面のうねりを設計する場合うねりの形状が通常の曲線であると仮定すると [40]、表面の目標曲率は 2.5 1/m 未満である。このアプリケーションでは、センサーの精度を向上させる必要がある。提案されたセンサーはロボットの指に適度な柔らかさを実現できれば、ロボットの指に触覚機能を付加するために利用できる。さらにヒトの触動作と触受容の関係を崩さずにロボットシステムに適用できれば、自動面歪検出システムを実現できる可能性がある。面歪検査だけでなく、ヒトのように触覚を上手く利用したロボットシステムが切り開かれる。

## 2.4 まとめ

この章では、接触している小さな面歪の形状を再構築するためのウェアラブル走査型触覚センサについて説明した。このセンサーは指などのユーザーの身体の周りに薄く形成されたゴム製の人工皮膚層であり、小さなひずみゲージが埋め込まれている。提案されたセンサの最も顕著な特徴は、人間の皮膚の柔らかさの利用である。実験結果は、提案された触覚センサによりほぼ平坦に近い、正弦波形状（曲率振幅は約 8 1/m）を検知可能であることを示した。これらの実験結果はセンサ信号から面歪の定量評価が可能であることを示唆している。

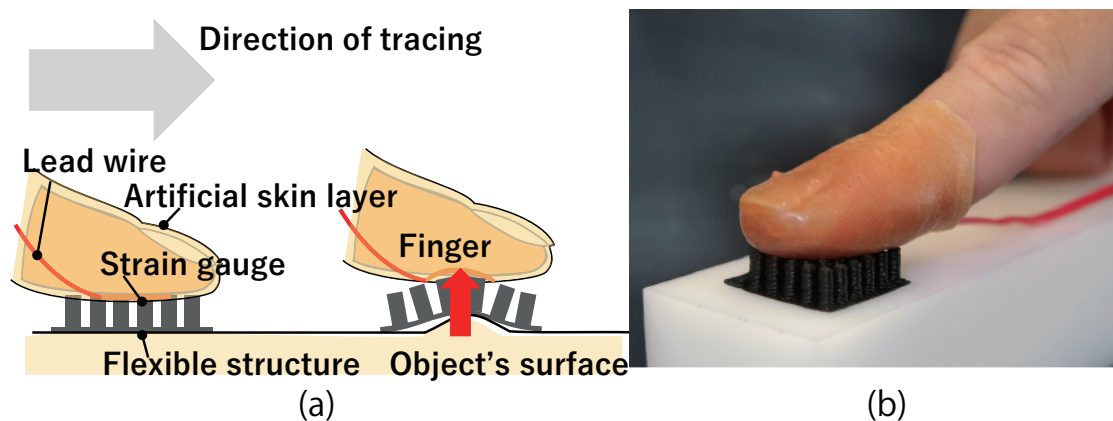


## 第3章 触覚コンタクトレンズを利用した感度向上

ひずみゲージ埋め込みゴム製人工皮膚層は触覚コンタクトレンズという柔軟構造体と併用利用することで信号を増幅させることができる。そこで、この柔軟構造体を利用して感度向上を図り、微小な面歪の検出に挑む。図 3.1 は触覚コンタクトレンズと併用利用の方法を示す。柔軟構造体を使用するして信号増幅を行った場合と使用しない場合での曲率推定の違いを評価した。

### 3.1 触覚コンタクトレンズ

触覚コンタクトレンズ (Touch Lens) は、微小な凹凸の知覚を増強させるデバイスである [1, 5, 12]。図 3.2 は触覚コンタクトレンズの模式図を示す。触覚コンタクトレンズを触る対象の表面と指の間に介在させ、なぞることで表面の微小な凹凸を知覚しやすくなる。このデバイ



**Fig. 3.1:** Schematic diagram showing a the structure and b a photo of the proposed sensor. Deformation due to an undulation on the object's surface is amplified by the pins of the flexible structure, after which information of the object's surface is transmitted through the flexible structure to the sensor element.

スは可撓性を有する底板とその上面に形成される硬い複数のピンから成る極めて単純な柔軟構造体である。触る対象の表面と接する薄い底板が表面形状に伴って変形し、上のピンが左右に動き皮膚を引っ張る。[41]ではひずみゲージ埋め込みゴム製人工皮膚層に対して、なぞり面の形状に対する微小変形を拡大する構造を付加させることで、出力信号を拡大する現象を示した。この現象を利用し、微小面歪の曲率推定を行う。

### 3.2 触覚コンタクトレンズによる信号増幅

触覚コンタクトレンズと一体となったひずみゲージ埋め込みゴム製人工皮膚層を触対象表面の形状を測定する新たなウェアラブル走査型触覚センサとして提案する。ゴム層はダイレクトディッピングによって指のまわりに成形された。ダイレクトディッピングでは型を使わずに指を直接、液体ゴムに浸す。この手法によってユーザの指に一致したずれのないゴム製人工皮膚層を作製することができる。指は3回ディッピングされ、そのうちの間でひずみゲージを配置された。試作品の表皮層を作るのに使用された液体ゴムは、硫黄を含有する汎用天然ゴムラテックスである。薄いゴム層に埋め込まれたセンサ素子は大きな変形のためのひずみゲージ (KFEM-2-120-C1L1M2R, 協和電子機器株式会社) である。ひずみゲージは指の長手方向に配置されている。ゴム層の厚さは約 0.3 mm である。柔軟構造体の底板の寸法は 20 mm × 20 mm, 厚さは 0.2 mm である。その底板に整列しているピンは直径 2mm の円筒形状で底板からの長さは 4 mm である。また、ピン間距離は 3 mm であり、底板の上にピンが 36 本整列している。

上記で示したサイズの触覚コンタクトレンズについて、増幅率を調べた。空間周期が同じ

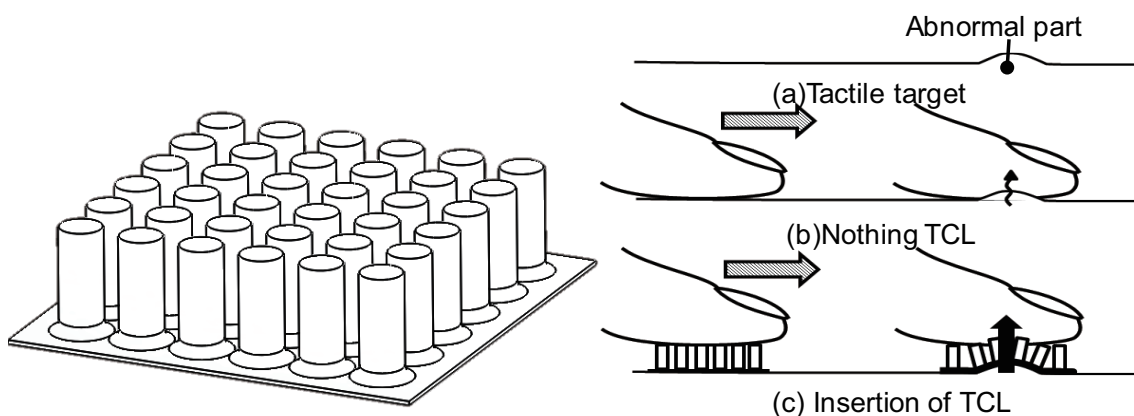
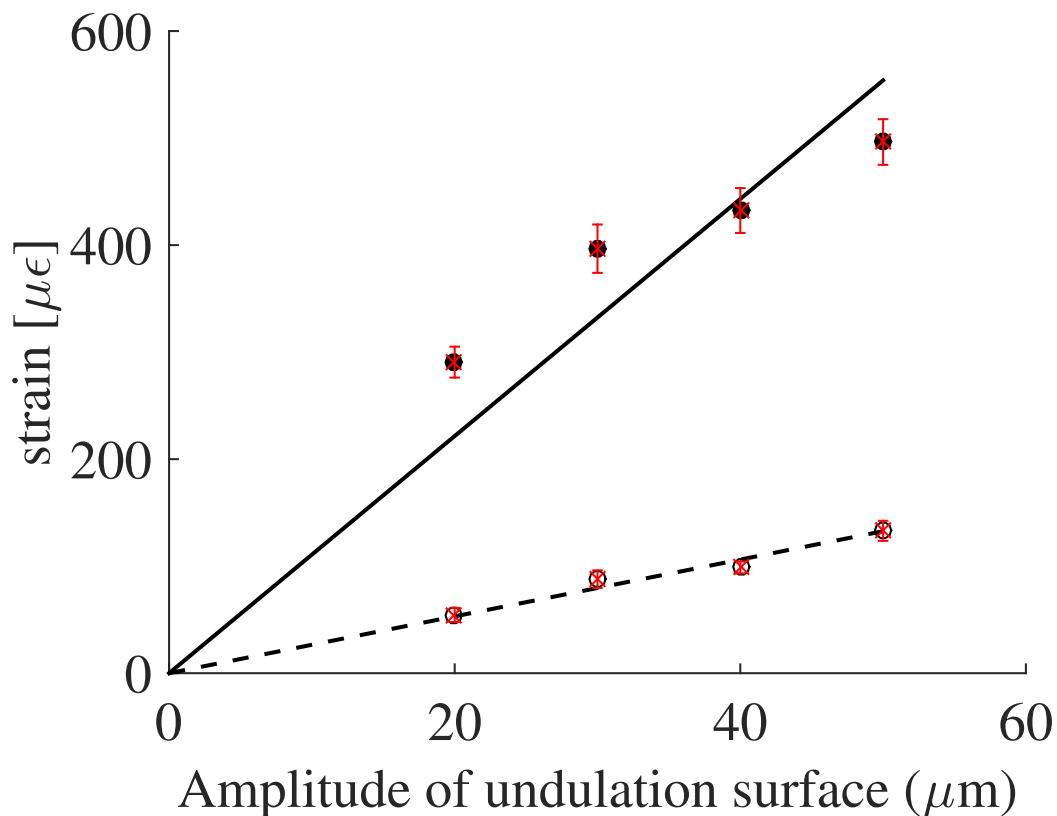


Fig. 3.2: Schematic diagram of Touche Lens and its usage example

で、振幅が異なる正弦波状の面を持つサンプルを用意した。振幅は 20, 30, 40, 60  $\mu\text{m}$  の 4 種類である。それぞれのサンプル表面をゴム製人工皮膚層だけで走査した場合と表面とゴム製人工皮膚層の間に触覚コンタクトレンズを介在させて走査した場合の 2 つのパターンでセンサ信号を計測した。それぞれの信号の振幅値を取り出し、その平均を求めた。その結果を図 3.3 に示す。図 3.3 の横軸は走査したサンプル表面の振幅、縦軸はセンサ信号から得られたひずみ量を示す。点の値は 50 サンプルの平均、エラーバーはその分散を示す。得られた結果から最小二乗法により直線に近似しその傾きを調べた。触覚コンタクトレンズを介在しないで走査した場合での直線の傾きは約 2.7、介在させた走査した場合の直線の傾きは約 11.1 であることがわかった。触覚コンタクトレンズを介在させるだけで、傾きが約 4 倍になることがわかる。したがって、触覚コンタクトレンズを介在させて表面を走査すると信号は約 4 倍増幅される。正弦波の振幅を小さくすると、その面をなぞった時の信号も小さくなることが予測されるが、小さくなるとノイズで埋もれてしまい、計測が困難になってしまう。しかし、



**Fig. 3.3:** Average of peaks when tracing sinusoidal curved surfaces with different amplitudes: the black circles show when tracing with Touchlens and the white circles show when Touch Lens does without.

触覚コンタクトレンズを使用することで、信号が増幅されノイズに埋もれ難くなり計測がし易くなると考えられる。この触覚コンタクトレンズの増幅効果を使用して微小うねりの検出を試みる。

### 3.3 微小うねり検出

前述したセンシング原理を利用して、面を走査して面の状態を測定する。この実験では触覚サンプルとして正弦波状の面をなぞり、静的応答性で得られた曲率とセンサ信号の関係を使って、なぞった面の曲率を測定する。

#### 3.3.1 触覚サンプル

2章と同様に正弦波曲面を持つ触覚サンプルを用意した。同様にして曲面形状と曲率を以下のように定義する。

$$z(x) = A \cos\left(\frac{2\pi}{T}x\right) \quad (3.1)$$

$$\kappa(x) = \frac{-A\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cos\left(\frac{2\pi}{T}x\right)}{\left\{1 + A^2\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \sin^2\left(\frac{2\pi}{T}x\right)\right\}^{\frac{3}{2}}} \quad (3.2)$$

凸型を正、凹型を負とするため数学的表記の曲率とは正負を逆にとる。本研究のケースでは  $A/T \ll 1$  であるので、以下のように  $\kappa(x)$  を近似する。

$$\kappa(x) \approx \tilde{A} \cos\left(\frac{2\pi}{\tilde{T}}x\right) \quad (3.3)$$

ここで  $\tilde{A}$  と  $\tilde{T}$  は以下のように定義する。

$$\begin{aligned} \tilde{A} &:= A\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \\ \tilde{T} &:= T. \end{aligned} \quad (3.4)$$

本稿では  $\tilde{A}$  を曲率の振幅として扱う。本研究では振幅  $10 \mu\text{m}$ 、空間周期  $10 \text{mm}$  を基準にし、 $\tilde{A}$  を 2 倍、4 倍にしたサンプルと  $\tilde{T}$  を 2 倍、4 倍にしたサンプルを用意した。 $\tilde{T}$  を固定し、 $\tilde{A}$  変化させるには振幅を変えるだけでよいが、 $\tilde{A}$  を固定し、 $\tilde{T}$  を変化させるには空間周期だけではなく振幅も変えなければならない。したがって、式 (1) より  $\tilde{T}$  だけを 2 倍または 4 倍する場合は空間周期を 2 倍または 4 倍するだけでなく振幅を 4 倍または 16 倍することになる。用意した触覚サンプルについてまとめると、振幅  $10 \mu\text{m}$ 、空間周期  $10 \text{mm}$  を基準にし、 $\tilde{A}$  を 2 倍、4 倍にしたサンプルと  $\tilde{T}$  を 2 倍、4 倍にしたサンプルの計 5 種類を用意した。

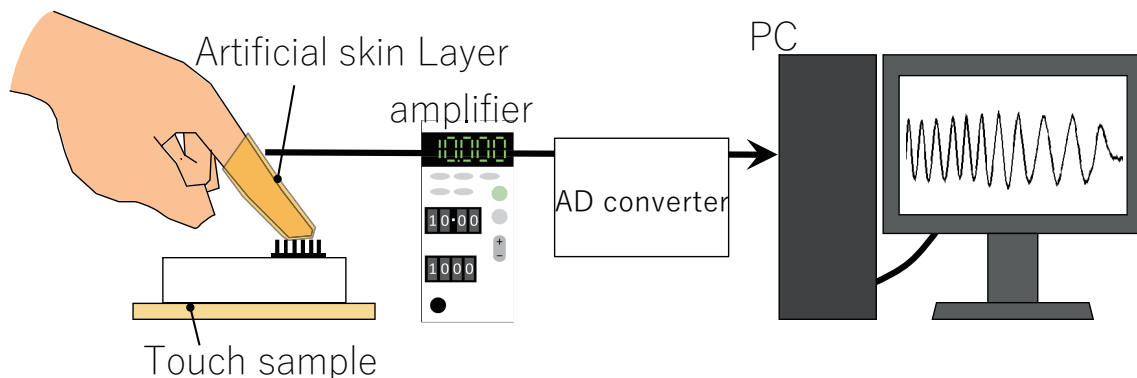
### 3.3.2 実験方法

前述の面歪検出と同様に実験を行った。これらの触覚サンプル表面上をセンサを装着した指で走査し、そのセンサの信号から表面の曲率を推定する。図 3.4 はセンサ信号計測のシステム図を示す。センサ信号はひずみゲージアンプを使って増幅され、AD コンバーターを通し PC で記録する。走査位置はセンサにマーカを取り付け、カメラを使って位置を計測される。フレーム数は 120 fps とする。触覚サンプルを走査している間を動画撮影し、後で動画画像解析ソフトによってマーカを追跡し、走査位置を計測する。

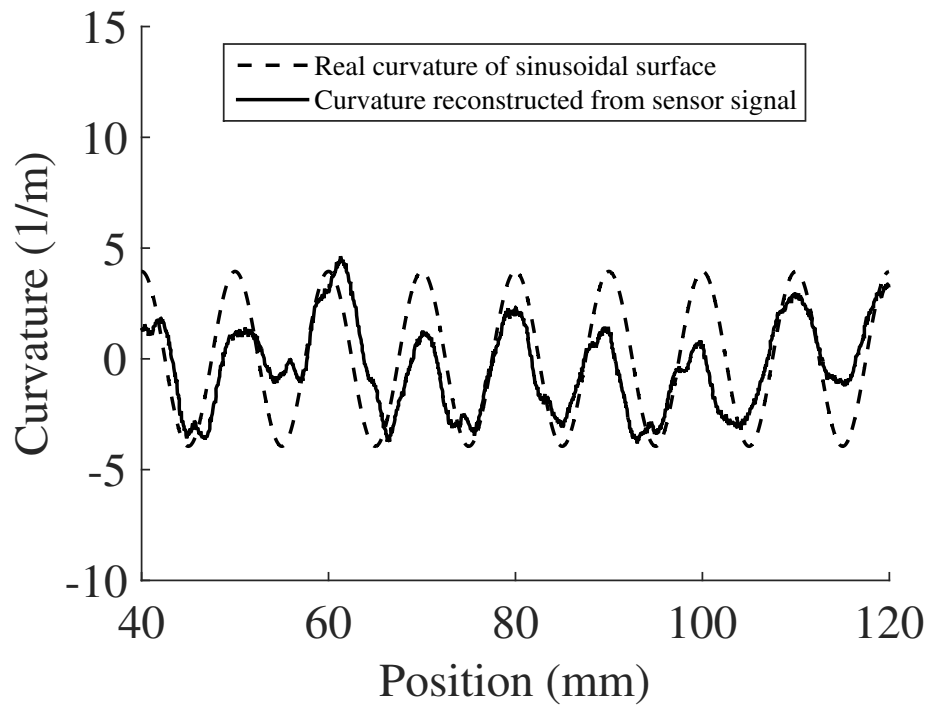
位置情報をもとにセンサ信号から得られる曲率情報と実際の曲率を比較した。評価も 2 章と同様に 3 つの観点から行った。評価はフーリエ解析から走査面の空間周期と振幅を推定し、その推定値と実際の値との誤差を見る。走査面の面歪を入力信号と捉え、入力信号と出力信号から SN 比を算出し、ノイズの影響を評価した。また、同様に入力信号と出力信号から正規化平均 2 乗誤差を算出し、推定された曲率変化が実際の曲率変化とどの程度類似しているのかの評価を行った。

### 3.3.3 実験結果

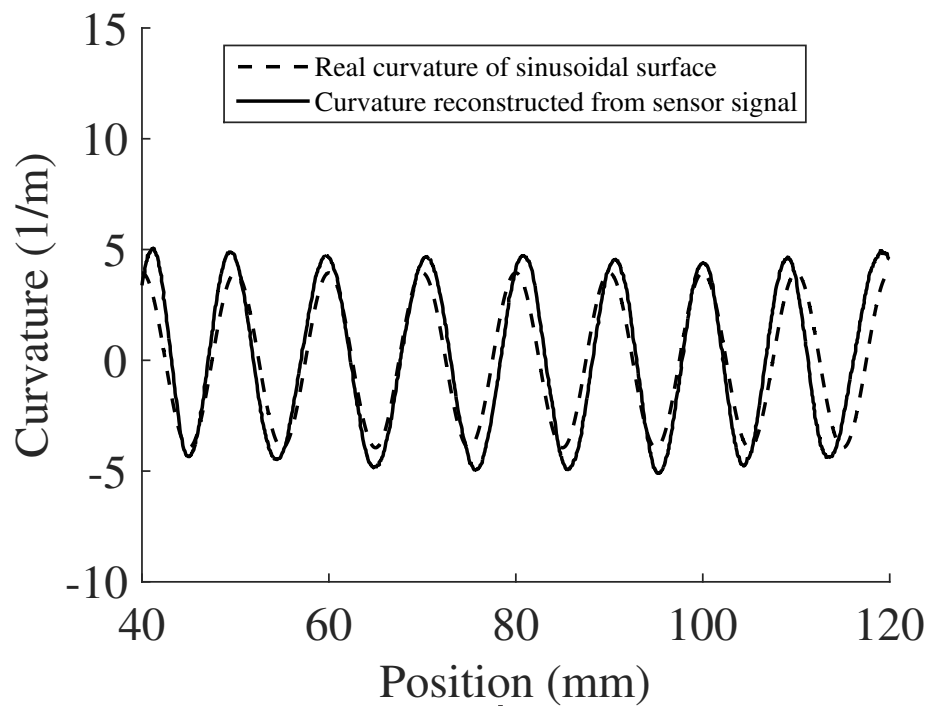
図 3.5 で示すグラフは振幅  $10\ \mu\text{m}$  と周期  $10\ \text{mm}$  の正弦波曲面の実際の曲率(点線で示す)とセンサ信号から推定した曲率(実線で示す)を示している。縦軸は x 方向のなぞり位置、横軸は曲率を示している。この図では相互相関が最大になるように推定した曲率を実際の曲率に一致させている。(a) は柔軟構造体を介在させずに推定を行った結果、(b) は介在させて推定を



**Fig. 3.4:** Sensor system. The sensor signal is uploaded into a personal computer (PC) via a strain gauge amplifier and an analog/digital (AD) converter



(a)



(b)

**Fig. 3.5:** Comparison between actual and estimated curvature. Each graph shows the output signal of (a) a conventional sensor (without a Touch Lens) and b our proposed sensor (with a Touch Lens)

行った結果である。(a)では周期的な信号は見られるが、波が乱れてしまっていることが分かる。一方で提案型の結果である(b)では実際の曲率と良く似た推定曲率を示している。図3.6はセンサ信号からの曲率推定をフーリエ解析した結果を示す。図3.6(a)は柔軟構造体を使用せずに推定した曲率のフーリエ解析の結果、図3.6(b)は柔軟構造体を使用し、センサで推定した曲率のフーリエ解析の結果である。グラフの縦軸は信号の曲率、横軸は空間周波数を表す。点線は実際の空間周波数(0.1 1/mm)を示す。どちらの結果も実際の空間周波数付近でピークを示しているが、柔軟構造体を介在させた場合の振幅の推定曲率は介在させない場合と比べて、より実際の値に近い数値を示している。柔軟構造体を使用しない場合の信号には真値より低い周期の波が加わり、波が乱されていることがわかる。

次にSN比によるノイズ評価を行う。SN比(SNR: Signal-Noise Ratio)を2章と同様に以下のように定義する。

$$SNR := 10 \log_{10} \frac{\sum_i (\hat{\kappa}_i)^2}{\sum_i (\kappa_i - \hat{\kappa}_i)^2} \quad (3.5)$$

柔軟構造体を使用しない場合では、SNRは-0.43、使用する場合は7.22であった。したがって、提案型センサ利用するとノイズの影響を軽減することができる。

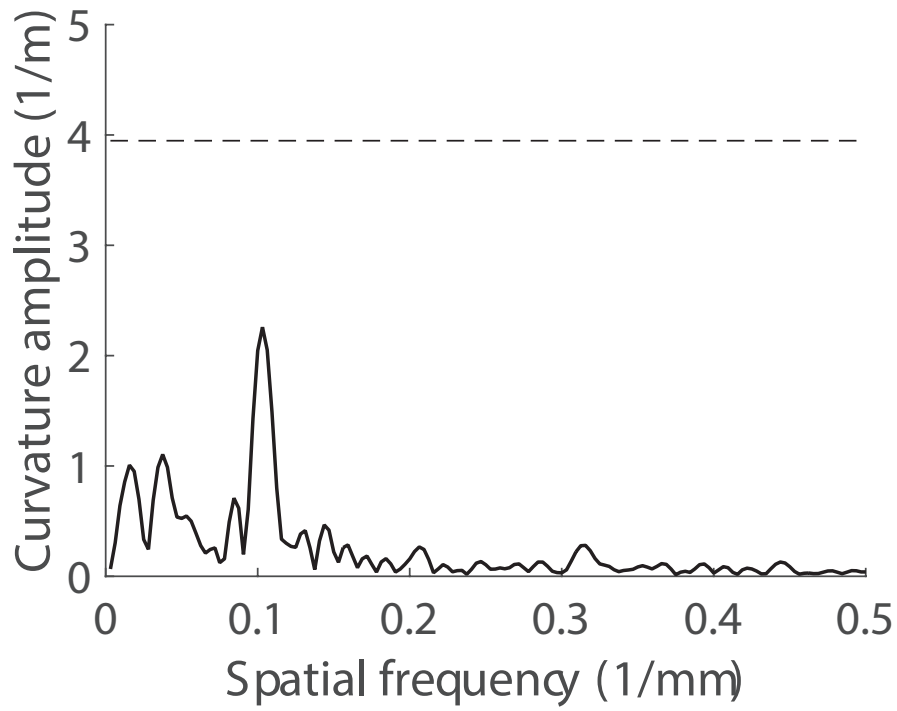
次に正規化平均二乗誤差による評価を行う。正規化平均二乗誤差(NMSE: Normalized Mean Square Error)は2章と同様に以下のように定義する。

$$NMSE = \frac{\sum_i (\kappa_i - \hat{\kappa}_i)^2}{\sum_i (\kappa_i)^2}. \quad (3.6)$$

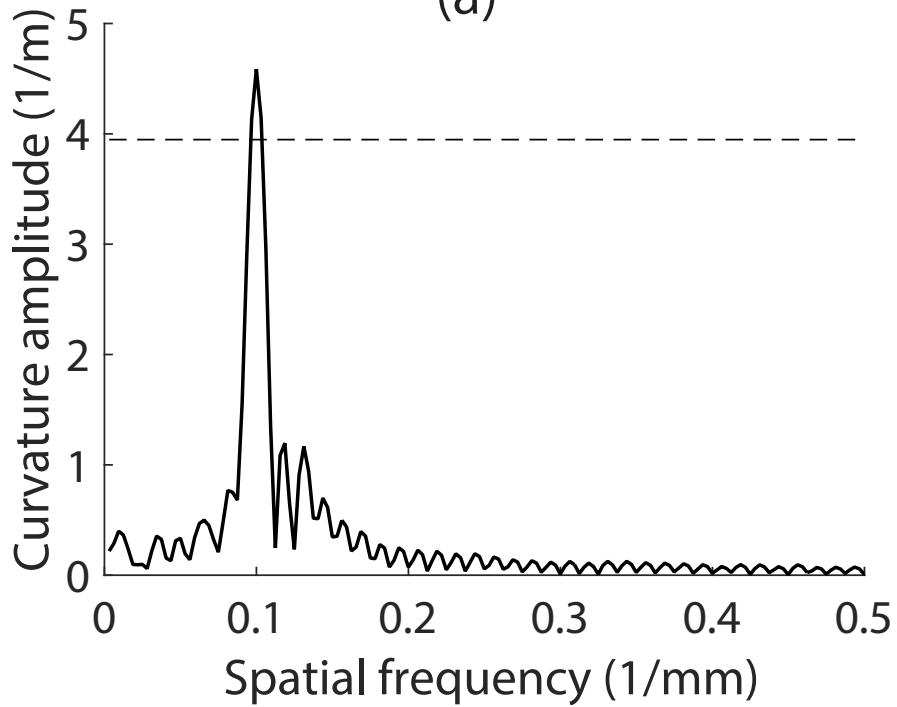
それぞれのセンサによる10回の測定結果の平均したNMSEを算出した。柔軟構造体を使用しない場合では、NMSEは0.61、使用する場合は0.29であった。したがって、提案型センサから推定値の方が実際の曲率に近い推定値を示した。

測定対象の曲面の周期 $\tilde{T}$ を固定し、曲率振幅 $\tilde{A}$ を変化させ測定したときの結果を示す。表3.1はフーリエ解析から得られた推定結果とその誤差率を示している。我々は $\tilde{T}$ の推定能力には変化が見られないが、 $\tilde{A}$ の推定能力は提案センサの方が向上していることが分かる。しかし、 $\tilde{A}$ が大きくなるにつれて、誤差が大きくなっていることが分かる。図3.7はそれぞれの曲率振幅 $\tilde{A}$ に対して算出したNMSEに関するグラフである。横軸は曲率振幅 $\tilde{A}$ 、縦軸はNMSEを表す。エラーバーは10サンプルに対する標準偏差を示す。図3.7において、曲率振幅が大きくなっても提案センサを用いた推定値の方が精度が良くなっていることがわかる。さらに、曲率振幅が大きくなるに連れて、NMSEが減少していることが示されている。

図3.8はそれぞれの曲率振幅 $\tilde{A}$ に対して算出したSN比に関するグラフである。横軸は曲率振幅 $\tilde{A}$ 、縦軸はSN比を表す。同様にエラーバーは10サンプルに対する標準偏差を示す。



(a)



(b)

**Fig. 3.6:** Fourier analysis result of sensor signal. Each graph shows the result of a conventional sensor, and b our proposed sensor. The dotted line represents the curvature amplitude of the traced surface



図 3.8 において、曲率振幅が大きくなっても提案センサを用いた推定値の方がノイズの影響が減少していることがわかる。曲率振幅が変わってもノイズの影響は変化しない。

表 3.2 は  $\tilde{A}$  を固定し、 $\tilde{T}$  だけを変化させて測定を行ったときの推定結果と誤差率を示す。この結果でも  $\tilde{T}$  の推定能力には変化が見られないが、 $\tilde{A}$  の推定能力は提案センサの方が向上していることが分かる。小さな曲率変化でも誤差が小さく測定できていることがわかる。

図 4.16 はそれぞれの空間周期  $\tilde{T}$  に対して算出した NMSE に関するグラフである。横軸は空間周期  $\tilde{T}$ 、縦軸は NMSE を表す。エラーバーは 10 サンプルに対する標準偏差を示す。図 4.16 において、空間周期が変わっても提案センサの方が良い推定値が得られている。しかし、この結果では空間周期が 20 mm において一時的に精度が悪くなっていることがわかる。この結果から空間周期 10 mm から 40 mm の間で NMSE がピークになる空間周期が存在していることを示唆している。図 3.10 はそれぞれの空間周期  $\tilde{T}$  に対して算出した SN 比に関するグラフである。横軸は空間周期  $\tilde{T}$ 、縦軸は SN 比を表す。同様にエラーバーは 10 サンプルに対する標準偏差を示す。図 3.10 において、どの空間周期でも柔軟構造体を介在させたセンサを用いた推定結果の方がノイズの影響が小さいことがわかる。さらに、この結果から柔軟構造体を介在させないセンサでは空間周期が長くなってもノイズの影響は変化しないが、介在させたセンサでは空間周期が長くなるとノイズの影響がさらに減少することが示唆している。

### 3.3.4 押しつけ力と走査速度

実験では触覚サンプル下に設置した力センサから押しつけ力を計測している。図 3.11 と図 3.12 はそれぞれ柔軟構造体を介在させずに走査した時、介在させずに走査した時の走査位置

**Table 3.1:** Results of curvature amplitude  $\tilde{A}$  and spatial period  $\tilde{T}$  estimated by the haptic sensor when only the curvature amplitude is changed, and the respective error rates.

$\tilde{A}$ (1/m)	$\tilde{T}$ (mm)	Conventional sensor				Proposed sensor			
		Estimated $\tilde{A}$	Error (%)	Estimated $\tilde{T}$	Error (%)	Estimated $\tilde{A}$	Error (%)	Estimated $\tilde{T}$	Error (%)
3.95	10	1.85	53.2	9.84	1.7	4.26	8.02	9.26	1.8
7.90	10	3.84	51.3	9.78	2.3	8.34	5.69	9.78	2.2
15.8	10	7.01	55.6	9.62	3.9	11.7	26.0	9.64	3.7

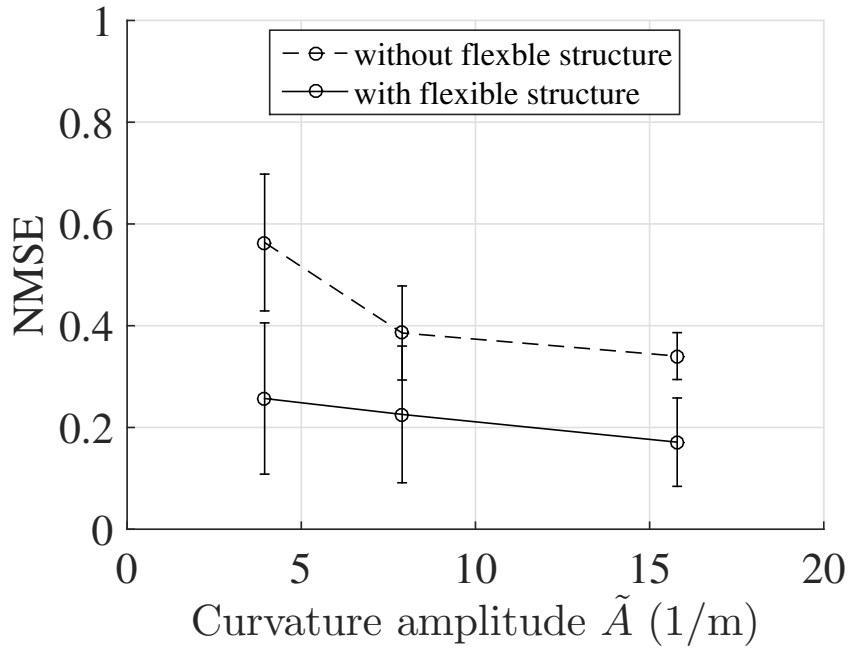


Fig. 3.7: Graph showing the relationship between the curvature amplitude  $\tilde{A}$  and the NMSE

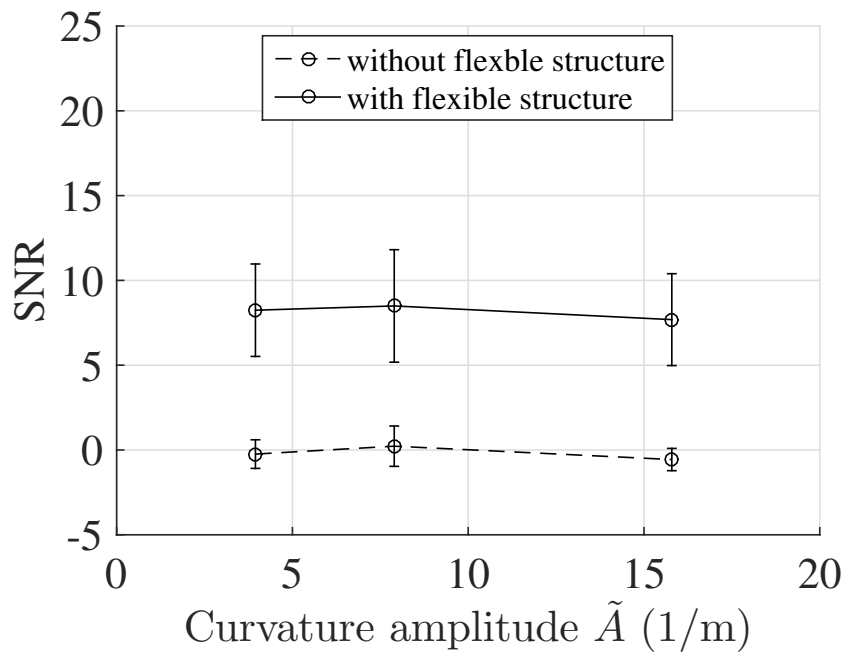


Fig. 3.8: Graph showing relationship between the curvature amplitude  $\tilde{A}$  and the SNR

(a) と押しつけ力 (b) の時系列データである。押しつけ力が 10~15 N の範囲に入るデータを使って上記の曲率推定の評価を行っている。これを見ると走査速度や押しつけ力に大きな差はない。したがって、押しつけ力の違いによって信号の増幅が生じているわけではないことがわかる。触覚コンタクトレンズを介在させても触動作の変動することはなく、柔軟構造によって信号の増幅が生じている。

### 3.4 考察

#### 3.4.1 センシングの優位性と使用制限

柔軟構造体である触覚コンタクトレンズの主な効果の 1 つはノイズの影響を小さくし、触覚コンタクトレンズを介在させない場合より精度良くなぞった表面の形状を推定することができることである。単純な柔軟構造とひずみゲージ 1 枚という単純な構成による触覚センサによって実現することができたのは大きな貢献である。もちろん、いくつかの制限が存在する。表 3.1 から、基準とするうねり面の曲率振幅  $\tilde{A}$  を 4 倍にしたときの推定した曲率振幅  $\tilde{A}$  の誤差率が他と比べて非常に大きくなっているが、NMSE で評価すると他の結果と比べてなぞり面の形状をよく推定していることを示している。図 3.13 は基準とするうねり面の曲率振幅  $\tilde{A}$  を 4 倍にしたときの提案センサ信号からの推定値となぞり面の曲率を示している。図 3.13 において、うねり面の谷間の形状が欠落していることがわかる。この欠落が推定値の誤差の原因である。提案センサの構造が形状に沿っていないことがわかる。したがって、空間周期が短いうねり面は推定することができない。しかしながら、我々が想定している面歪検

**Table 3.2:** Results of curvature amplitude  $\tilde{A}$  and spatial period  $\tilde{T}$  estimated using the haptic sensor when only the spatial period is changed, and the respective error rates.

		Conventional sensor				Proposed sensor			
$\tilde{A}$	$\tilde{T}$	Estimated $\tilde{A}$	Error	Estimated $\tilde{T}$	Error	Estimated $\tilde{A}$	Error	Estimated $\tilde{T}$	Error
(1/m)	(mm)	(%)		(%)		(%)		(%)	
3.95	10	1.85	53.2	9.84	1.7	4.26	8.02	9.26	1.8
3.95	20	1.70	57.0	18.2	9.7	4.57	15.8	18.2	9.7
3.95	40	1.45	63.3	37.6	6.5	3.80	3.67	37.6	6.5

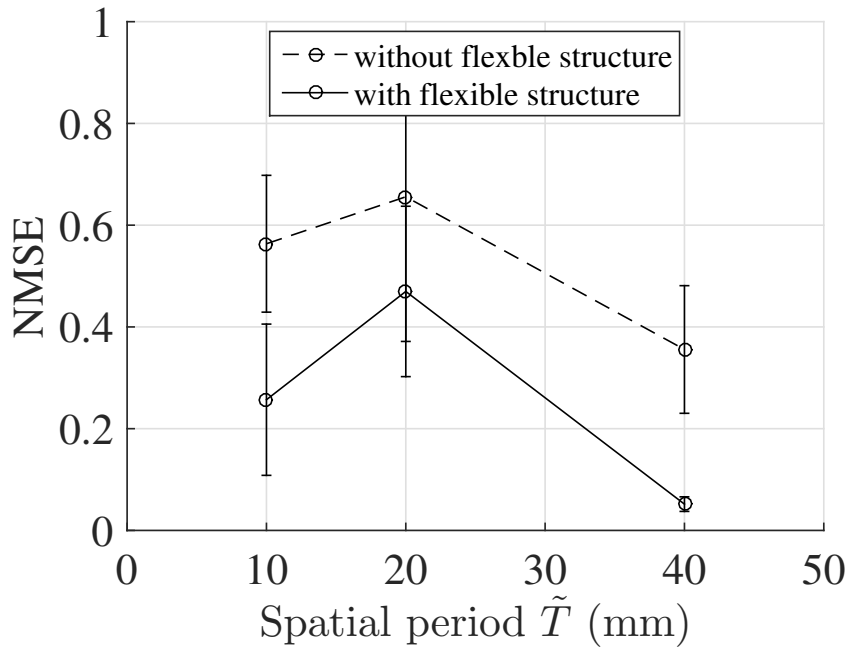


Fig. 3.9: Graph showing the relationship between spatial period  $\tilde{T}$  and the NMSE

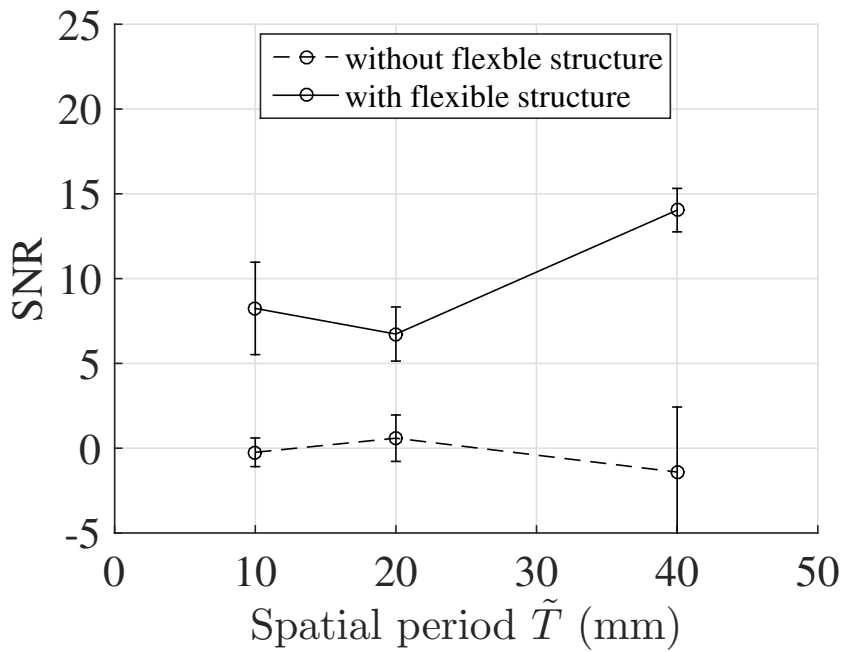


Fig. 3.10: Graph showing relationship between the period  $\tilde{T}$  and the SNR

査では数 10～数 100mm レベルの空間周期を持つうねりの検出を想定しているため、この制限は問題ない。

### 3.4.2 センシングの実用的な問題

本研究では十分精度よくうねり面の形状を推定できることを見出した。しかし、実際の面歪検査において実用上の問題がいくつかある。面歪検査における実用上の問題の 1 つは広範囲に検査しなければならないことである。本研究で提案したセンサは指先に装着可能なセンサであるが、広い測定範囲の中でいくつものうねりを探すには現状よりも時間がかかってしまい不向きである。実際の面歪検査では手のひらを利用して検査を行っている。手の平を使うことで 1 回のなぞりで広範囲に検査することができ、広い測定範囲でも素早く検査することができる。したがって、手の平にセンサを拡張すれば、広範囲の測定範囲にも適用可能なセンサとなると確信している。面歪検査は生産ライン上で行われるため、即座な判断が必要となる。実用を考えれば、曲面形状推定のリアルタイム化が必要不可欠である。Masaki らはニューラルネットワークによる機械学習を取り入れ、ひずみゲージ埋め込みゴム製人工皮膚層を使って、リアルタイムでうねりを見つけるシステムを開発した [42]。機械学習を取り入れるのはリアルタイム化に向けて 1 つの手法と成り得ると考えている。

また、使用の制限も存在する。本稿では検出物の対象を正弦波形状のような滑らかなにつながった曲面と仮定している。段差や尖った形状は仮定していない。そのような形状がある表面を走査した場合、引っかけがあり上手く測定できないと考えられる。段差や尖った形状は滑らかな面と比べて視覚的にも触覚的にも非常に検知し易い。また、プレス加工での成形不良では起き難い形状でもある。

面歪検査では微小なひずみがどこにあるかが重要になる。しかし、本稿で示した触覚センサだけでは位置を計測することができない。したがって、位置に関してはカメラなどの別のセンシングが必要となってくる。

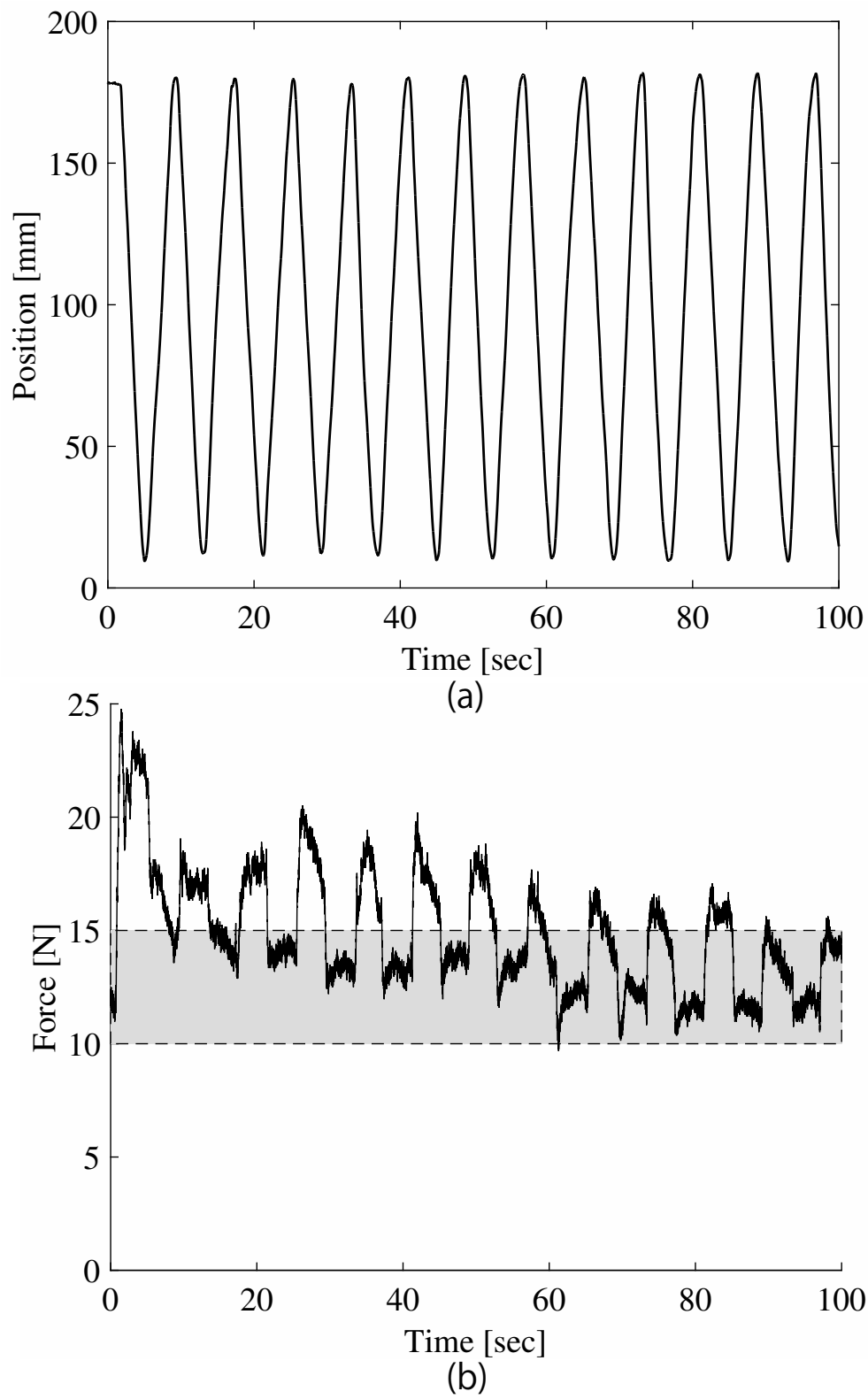
## 3.5 触覚コンタクトレンズの機能

触覚コンタクトレンズはヒトの触覚による凹凸の知覚を増強するデバイスである。その増強のメカニズムの一つとして、触覚コンタクトレンズを使うことで皮膚の内部ひずみが増幅していることが弾性論の知見から理論的に示されている [1]。本研究では、触覚センサと触覚コンタクトレンズを併用利用することで、信号の増幅される現象を発見した。この現象は [1]

で理論的に示されている皮膚の内部ひずみの増幅を実験的に裏付けていると言える。さらに、本研究の結果では触覚コンタクトレンズを使うことで、SN比を向上させ、微小面歪による信号の明瞭化を示した。これはヒトの知覚にも言えることであり、触覚コンタクトレンズは面歪以外の触覚情報つまりノイズの影響を小さくし、面歪の触覚情報を明瞭化することで知覚の増強を行っていると考えられる。この知見は触覚コンタクトレンズのような介在させる構造を変化させることで、欲しい触覚情報を選択できる可能性を示唆している。

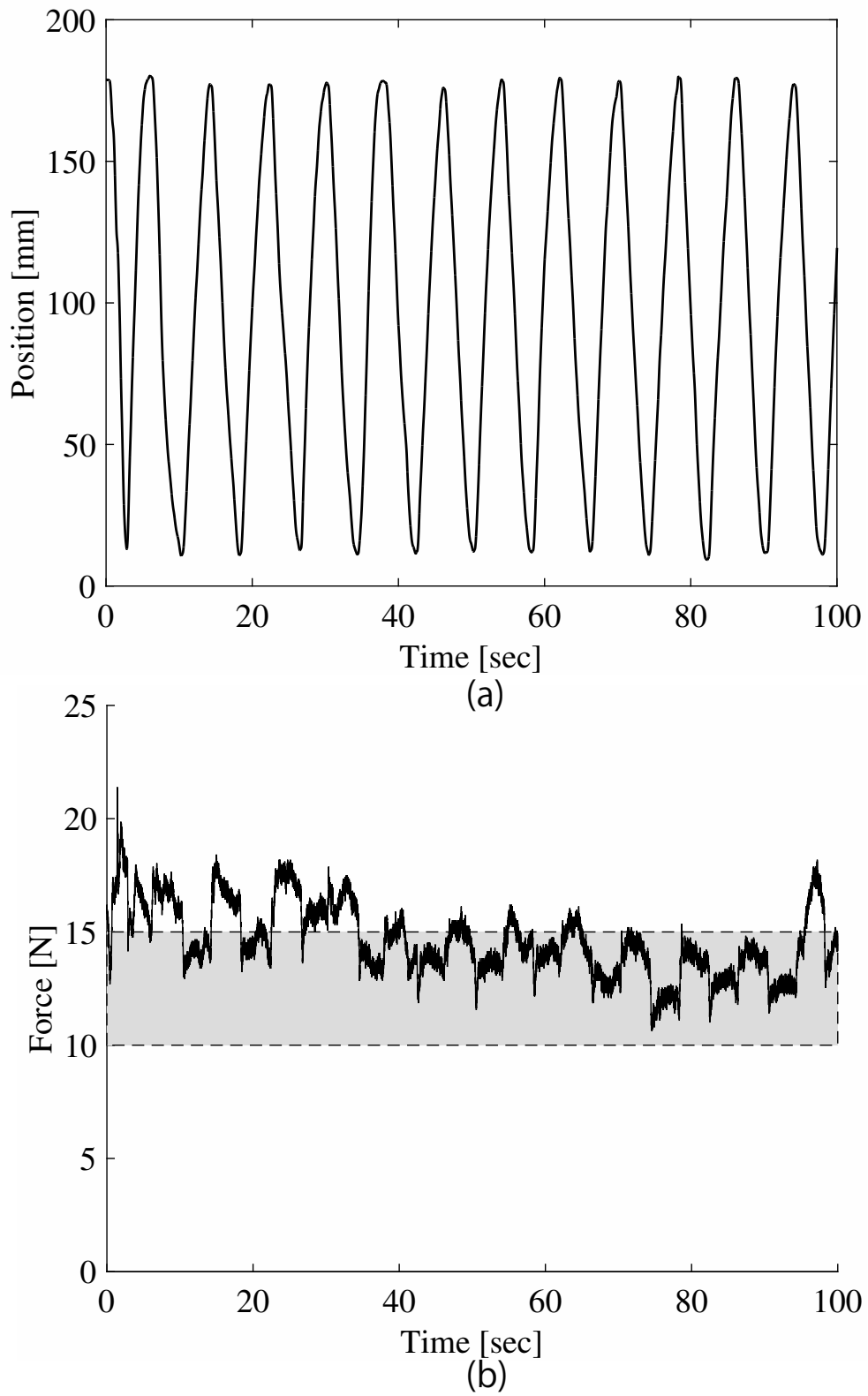
## 3.6 まとめ

この章では、振幅  $10\ \mu\text{m}$  という微小うねり検出のために柔軟構造体を利用した走査型触覚センサの信号増幅を説明した。この指装着型センサーを装着したユーザーは、検査対象物の表面を指でなぞるだけで表面形状を測定できる。センサーは埋め込まれたひずみゲージを備えたユーザーの指の周りに成形されたゴム層とひずみゲージと検査対象の表面の間に挿入された柔軟な構造で構成されている。提案されたセンサーをユーザーの指に取り付け、測定対象の表面に押し付けると、センサー信号からトレースされた表面の曲率変化を推定できる。このとき押圧力の影響を排除するためにユーザーは飽和レベルに達するまで押し続ける必要がある。他の人もこの方法で測定できる可能性が高いと考えられるが、今後の研究の一環として実験が必要かどうかを判断する必要がある。表面の曲率に関しては、振幅や空間周期を変えても、精度 0.5 以下で NMSE を推定できることを示した。さらに、SNR は 5 以上であり、ノイズの影響を受け難くノイズに対して堅牢であることを示している。



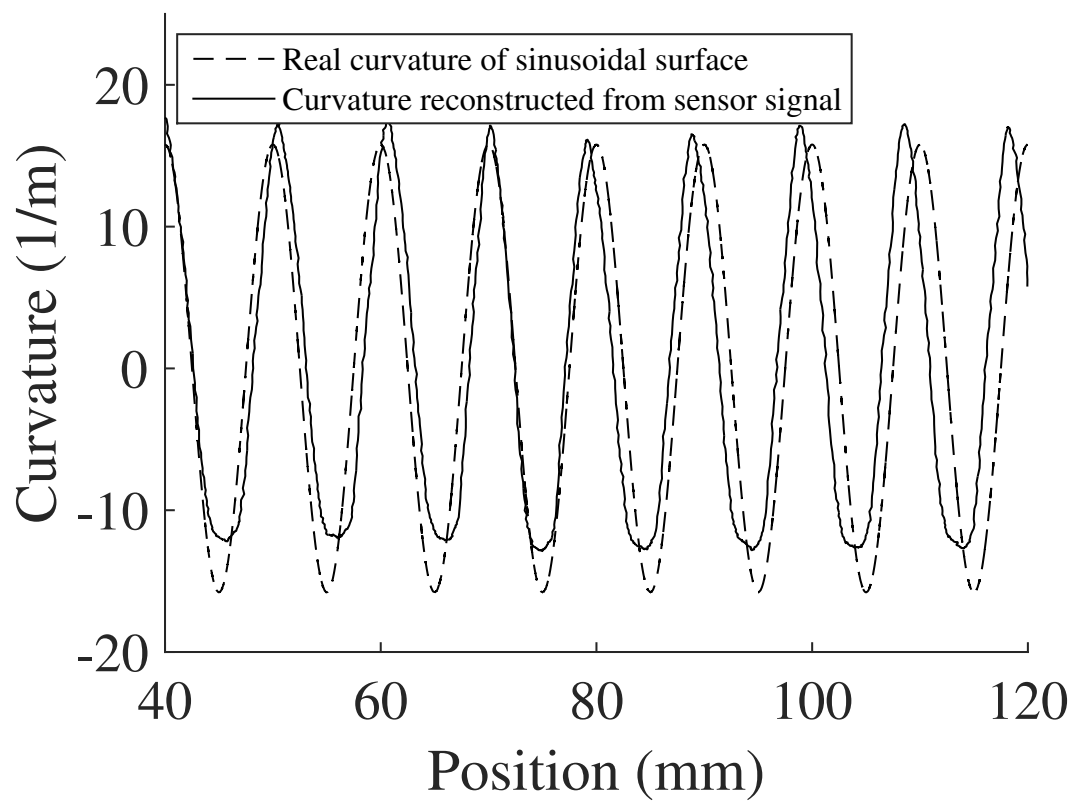
**Fig. 3.11:** In the experiments conducted using our proposed sensor, the graphs show (a) the position and (b) pressing force for each time.

第3. 触覚コンタクトレンズを利用した感度向上



**Fig. 3.12:** In the experiment involving the conventional sensor, the graphs show (a) the position and (b) pressing force for each time.





**Fig. 3.13:** This graph shows the output signal when a sinusoidal surface with an amplitude of  $40 \mu\text{m}$  and a spatial period of 10 mm is traced by the proposed sensor.

## 第 4 章 面状走査型触覚センサ

これまで指に装着可能なウェアラブル走査型触覚センサについて述べてきた。このセンサの欠点は一度の走査で計測される幅が小さく、広範囲の検査面には不向きである。そこで、同様なセンシング原理で、1度のなぞりの検出幅を広げる試みとして面状走査型触覚センサについて述べる。さらに今まで扱ってきた検出対象である触覚サンプルの表面形状はひずみゲージのサイズに対して幅が十分に大きいうねり形状を扱ってきた。この場合、表面に押し当てることで、ひずみゲージ全体が変形する。しかしながら、現実的には幅が数 mm 程度の小さなサイズである。ここでは、検出対象とする形状はひずみゲージの検出幅に対して小さな幅の形状を取り扱う。

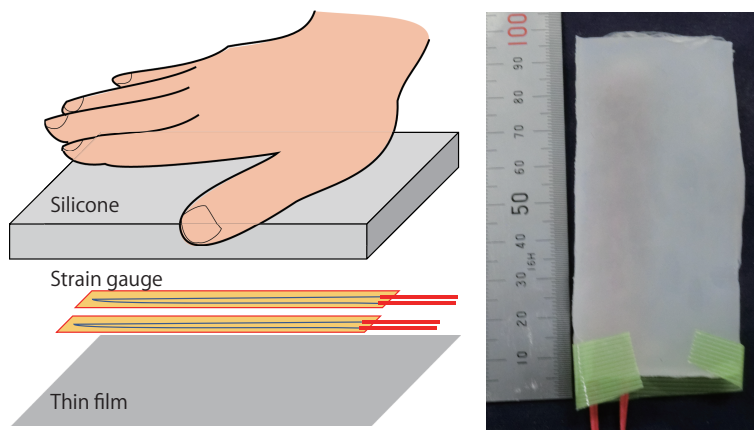
### 4.1 面状走査型触覚センサ

面状走査型触覚センサは雑巾のように表面を走査することが可能な形状に作製した。大きさは 100 mm × 50 mm の厚さ 3 mm のシリコンに長尺ひずみゲージを張り付ける。ひずみゲージは走査方向に対して直交するように張り付ける。表面との接触面には摩擦を低減するため、厚さ 7  $\mu\text{m}$  の薄いフィルムで覆う。これを手と走査する表面の間に介在させて表面を走査して計測を行う。

### 4.2 検出幅の検討

1度の走査での検査幅を広くするため、長尺のひずみゲージを使用する。今まで述べてきたウェアラブル走査型触覚センサでは指サイズのひずみゲージを使用していたが、実用を考えると手の平サイズに拡張する必要がある。図 4.2(a) は指サイズのひずみゲージの各部分の寸法と走査方向の検出幅を示す。ウェアラブル走査型触覚センサでの検出幅は約 1.5 mm である。走査方向と直交するように配置しても検出幅が 2 mm であり大幅に広くすることができない。そこで、長尺である線ひずみゲージの利用を検討した。線ひずみゲージを走査方向と

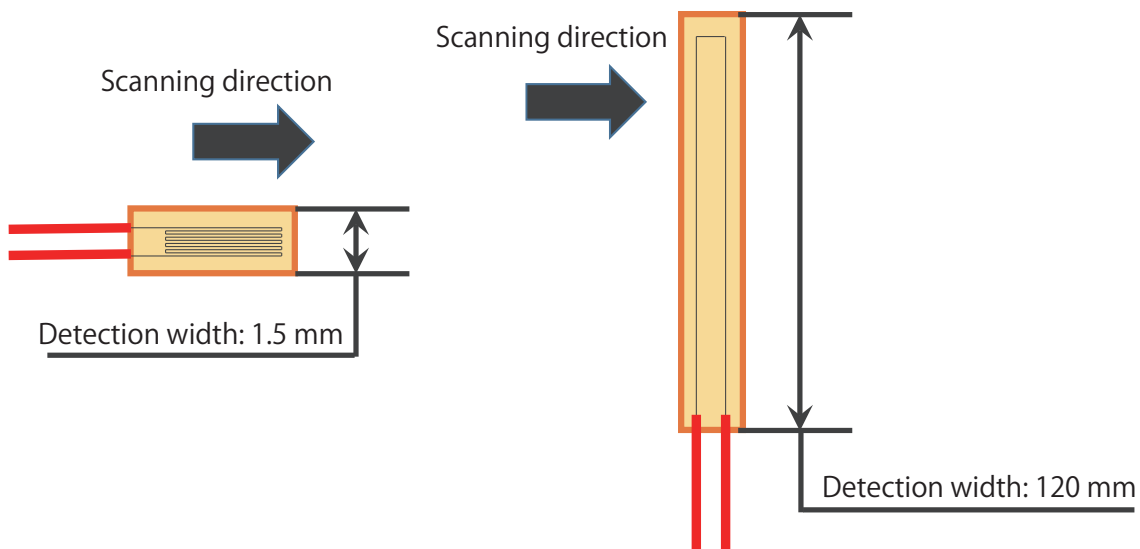
直交するように配置することで検出幅を 120 mm に広げられる。少ないセンサ素子で手の平サイズに広げられるので、線ひずみゲージの利用を検討する。



**Fig. 4.1:** Components of surface scanning tactile sensor

Gauge width: 1.5 mm  
 Gauge length: 2 mm  
 Gauge rate:  $2.07 \pm 1.0\%$   
 Number of turns: 5 times

Gauge width: 1 mm  
 Gauge length: 120 mm, 60 mm  
 Gauge rate:  $2.02 \pm 1.0\%$   
 Number of turns: once



(a) Strain gauge for large deformation

(a) Wire strain gauge

**Fig. 4.2:** Scanning direction and detection width

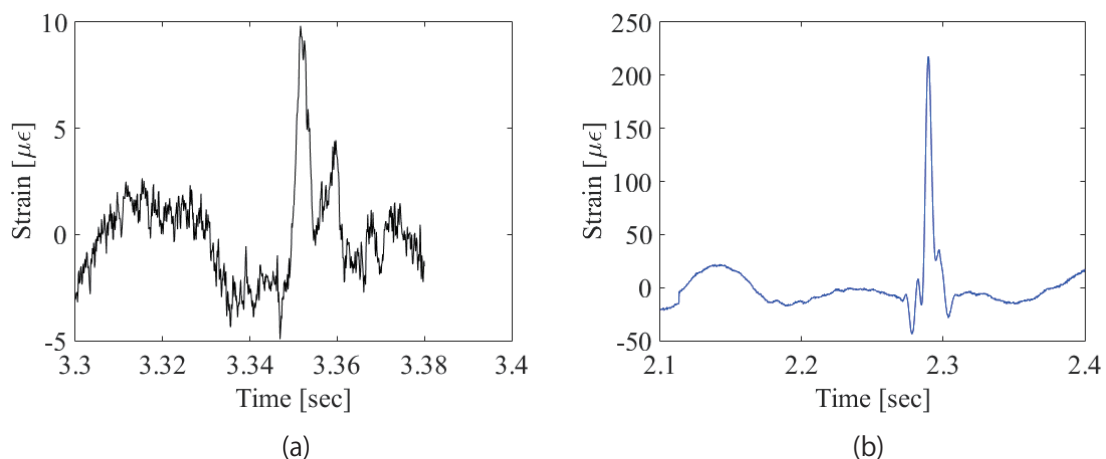
### 4.3 検出の問題

検出幅を広げることで、大きく 2 つの問題が生じる。その 1 つは感度の問題である。図 4.3 は同じ凸を走査したときの出力信号である。図 4.3(a) は長尺ひずみゲージ、図 4.3(b) はウェアラブル走査型触覚センサで使用しているひずみゲージの出力信号のグラフである。横軸は時間、縦軸はひずみ量を表す。これを比べると直尺ひずみゲージはもう一方のひずみゲージと比べて感度が 1/20 倍と感度が落ちている。微小ひずみを検出するには感度向上の向上について検討する必要がある。もう一方は反応箇所の判別である。1 枚の長尺ひずみゲージでは、検出物が走査方向と直交する方向でどこを通過しても、同じ出力信号である。したがって、ひずみゲージ内のどこで反応しているか特定できないという問題がある。

### 4.4 微小凸検出

ここで取り扱う面状の微小ひずみの形状はガウシアン形状の凸を扱う。2 章、3 章で扱ってきた形状はひずみゲージの検出幅に対して十分大きな幅のうねりを対象として扱ってきた。しかし、現実問題としては幅が数 mm 程度の小さな形状を検出しなければならない。したがって、ここではひずみゲージの検出幅に対して幅が非常に小さなガウシアン形状の凸を取り扱う。凸形状は以下のような式で表される。走査方向を  $x$  とし、その鉛直方向を  $z$  とする。

$$z(x) = a \exp\left(-\frac{x^2}{2b^2}\right) \quad (4.1)$$



**Fig. 4.3:** Comparison of sensitivity of strain gauges with different detection widths

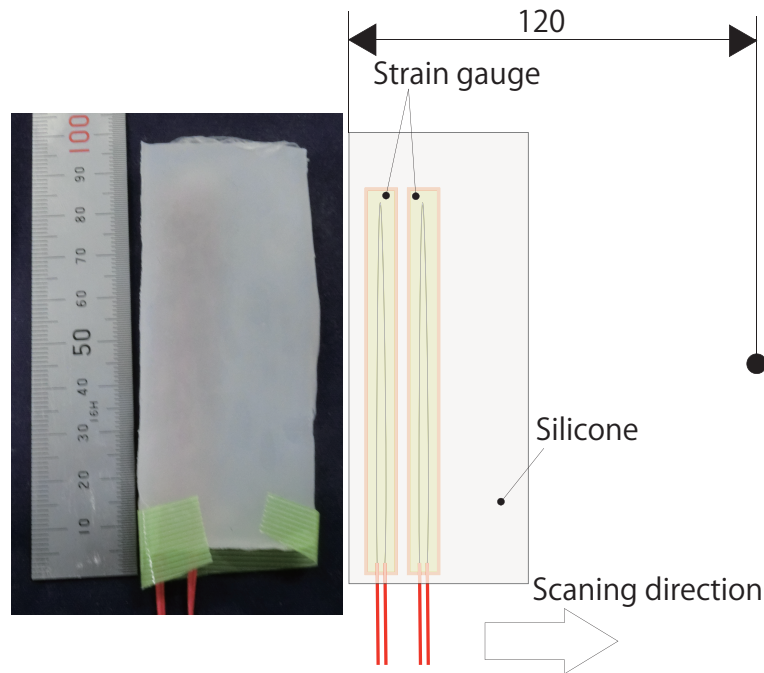
ここで、 $a$  は形状の高さ、 $b$  は形状の幅に関する定数である。この曲線の回転させた形状を触覚サンプルとする。この形状の曲率を以下のように定義する。

$$\kappa(x) = -\frac{z'(x)}{(1+z''(x))^3/2} \quad (4.2)$$

曲率の符号は凸形状で正となるように定めた。形状の大きさが高さ  $50 \mu\text{m}$ 、幅が約  $4 \text{ mm}$  となるように式 (4.1) の  $a$  と  $b$  を定めた。このような形状の場合、指型の走査型触覚センサでは探すのに時間がかかってしまうので、一度の広い幅を検査することができる面状の走査型触覚センサが適している。

#### 4.4.1 実験方法

ウェアラブル走査型触覚センサと同様に触覚コンタクトレンズを使用して、感度向上を図ったところ、同様な効果は観測されなかった。この原因は同様に薄いゴム層の成形が困難であり、厚さ  $3 \text{ mm}$  ので試したところ増幅効果が見られなかった。さらに面状に一律な圧力がかけられなかったことが原因と考えられる。そこで、ここでも2つの長尺ひずみゲージを使って感度向上を試みた。センサの感度向上のため柔軟なシリコンゴムに長さ  $60 \text{ mm}$  の長尺ひずみゲージを2枚並べて貼り付ける。しかしながら、微小凸形状のような幅が小さい形状は



**Fig. 4.4:** Experiment of micro convex detection

ひずみゲージの一部分しか変形が起こらないので、感度が落ちてしまいノイズに埋もれてしまう可能性がある。そこでセンサを複数使用し、それぞれの信号を重ね合わせることで、ランダムノイズを除去し検出されるべき信号を特出させる。さらに均一に押し付けられようにシリコンゴムと手の平の間にアクリル板を挟む。そのアクリル板にマーカを取り付け、動画処理によって位置情報を計測する。検出されるべき幅が小さな微小凸はなぞり面端から 120 mm の位置に配置した。

図 4.5 はそれぞれのひずみゲージから出力された信号である。一方の信号は走査位置情報から 2 つのひずみゲージの間隔の距離分シフトしている。図 4.6 は二つのひずみゲージの信号を重ね合わせた結果である。120 mm の位置にピークが見られる。微小凸によるひずみ量は約  $20 \mu\epsilon$  と小さい値であるが、ノイズに埋もれずはっきりとピークがわかる。

#### 4.4.2 曲率検出

2章で行ったセンサ信号と曲率の関係性を調べるため、同様に一定曲率にセンサを押し当てそのときのセンサ信号を計測した。押し当てた一定曲率は 10, 20, 40 1/m の 3 種類である。

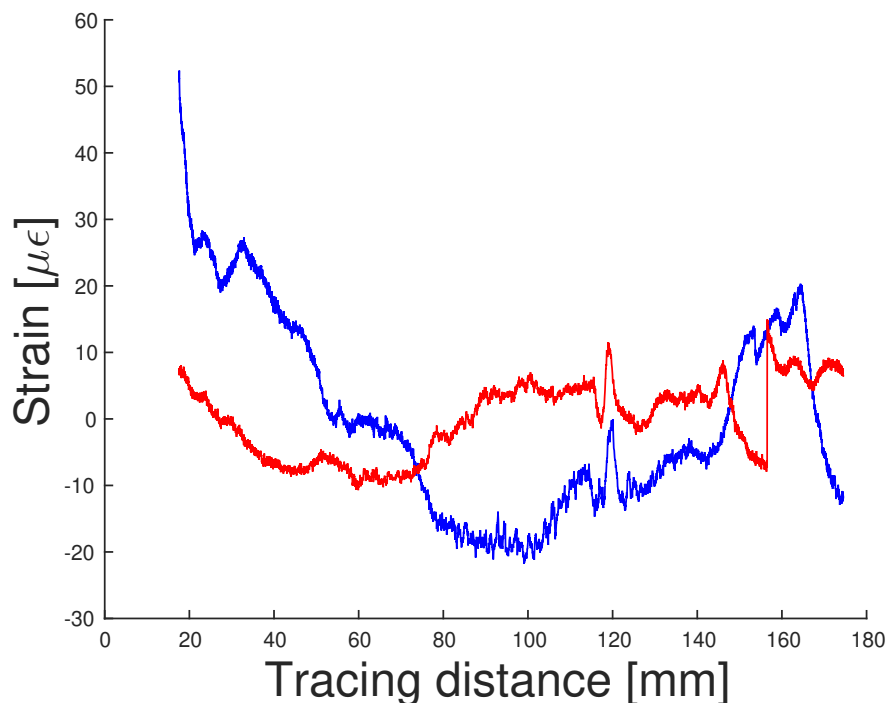


Fig. 4.5: Output signal of each

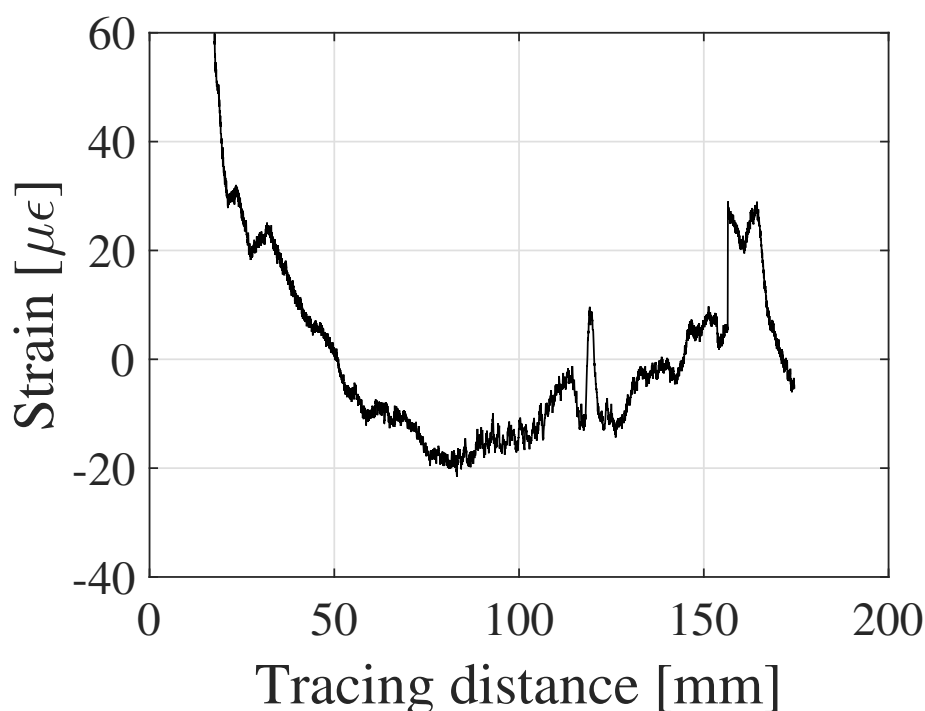


Fig. 4.6: Superposition of output signals

対象とする検出物の大きさはひずみゲージの長さより小さく、ひずみゲージの一部しか変形しないほどである。これを考慮するため、出力信号の平均値をひずみゲージの長さで割った値を算出し、単位長さ当たりのひずみ量に換算した。得られた結果を図 4.9 に示す。図 4.9 は横軸は曲率 [1/m]、縦軸は単位長さ当たりのひずみ量 [ $\mu\epsilon/\text{mm}$ ] を表す。曲率 0 でセンサ信号は 0 とするように計測を行った。

センサ信号と曲率の関係を比例関係として扱い、図 4.6 示した結果を使って曲率に変換する。図 4.10 は曲率に変換した結果を示す。また、図 4.11 は凸を検出したと考えられるなぞり位置が 120mm の付近を拡大したグラフである。このグラフから立ち上がりがなぞり位置 118mm 付近、立ち下りが 122mm 付近であることがおよそその値で読み取れる。このことから検出物の幅は約 4mm であることが信号から得られる。ここで示した曲率は単位長さ当たりのひずみ量から算出した値である。したがって、曲率が最大の付近では検出物の幅分だけセンサが変形していると考ええる。単純に図 4.11 の示す値に検出物の幅を掛け合わせてみる。図 4.12 は信号から得られた曲率と検出されるべき凸の曲率を示している。



Fig. 4.7: Constant curvature model

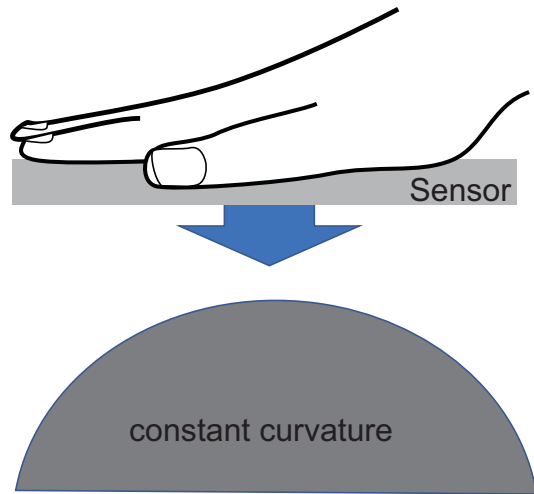


Fig. 4.8: Calibration method

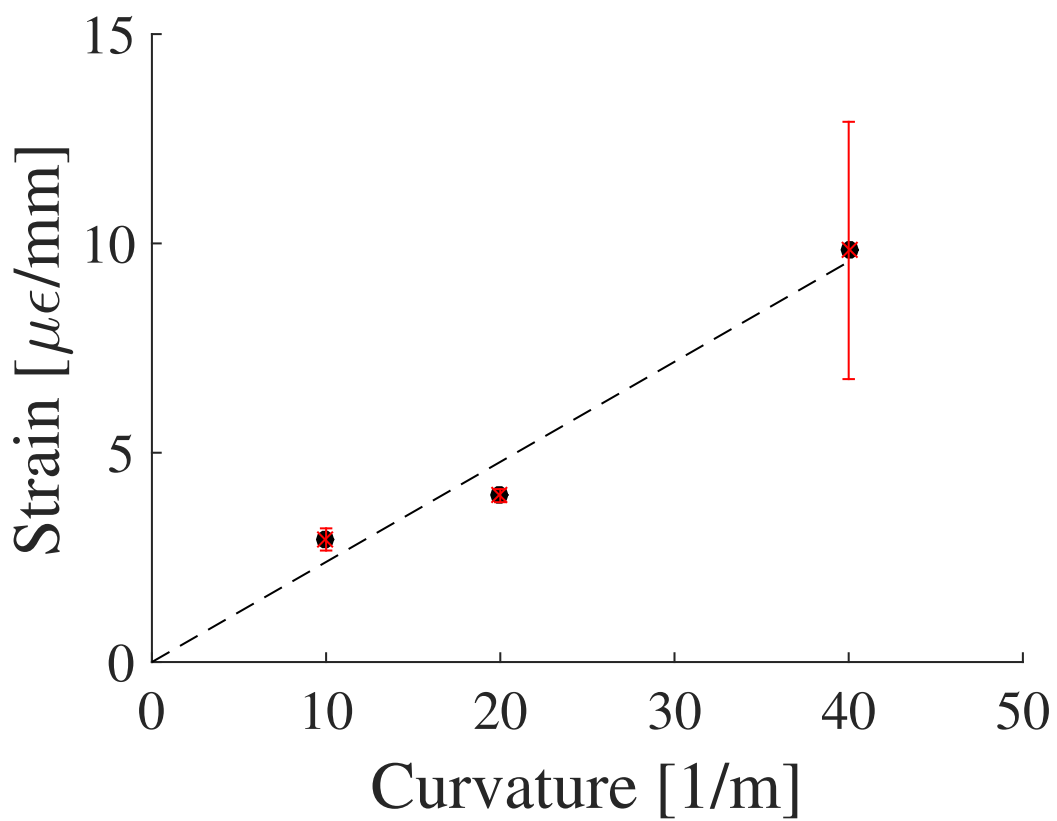
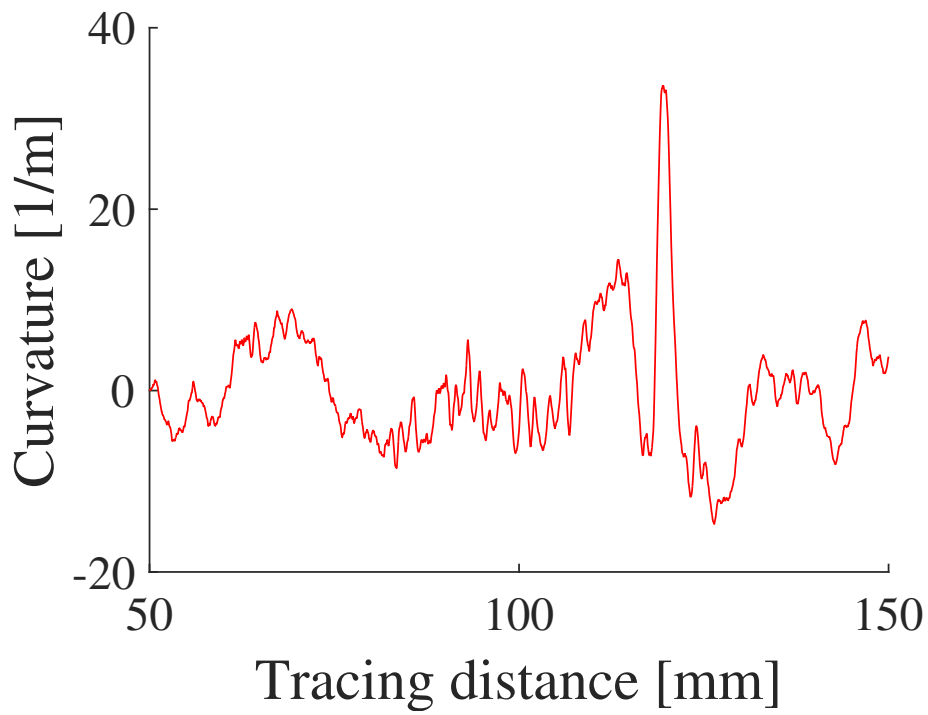
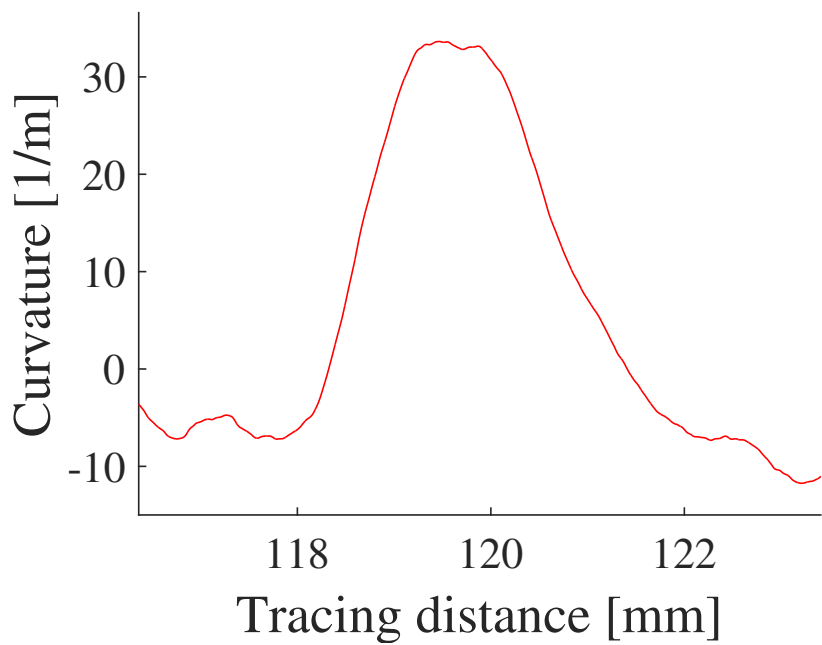


Fig. 4.9: Results of calibration: Relationship between curvature and output signal





**Fig. 4.10:** Signal after signal processing



**Fig. 4.11:** Zoom around detection signal

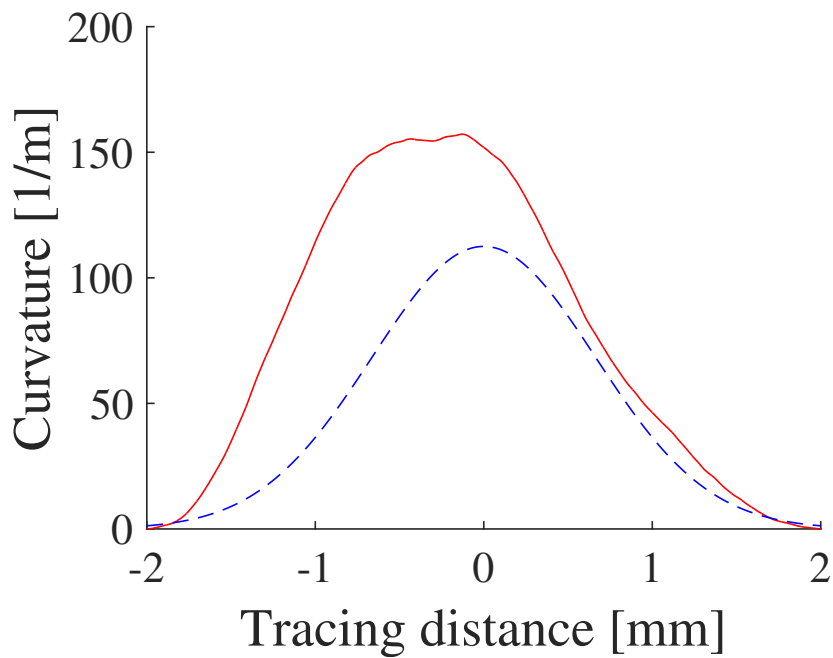


Fig. 4.12: Result of curvature estimation

#### 4.5 反応箇所の判別

ひずみゲージ内の反応箇所を判別するため、2つひずみゲージを使った方法について述べる。図 4.13 に示すように走査方向と直交して配置された長尺ひずみゲージとそこから傾けてもう一方を配置する。こうすることで、通過位置でそれぞれの反応信号に時間差が生じる。例えば、図 4.17 で通過位置 A, B, C について考える。走査方向は図の右方向とする。最初のひずみゲージが反応する時刻を  $t_1$  とし、それぞれの通過位置で次にひずみゲージが反応する時刻を  $t_A, t_B, t_C$  とする。この時刻を使って、走査位置  $x$  の時系列データから時刻  $t_1$  との差  $\Delta$  抽出する。この  $\Delta$  から検出箇所  $y$  は以下のように算出される。

$$y = a\Delta + b \quad (4.3)$$

ここで、 $a$  と  $b$  は 2 つのひずみゲージの幾何情報から定まる定数である。2 つのひずみゲージの反応時間差と走査距離の情報と 2 つのセンサの幾何情報から反応位置を判別することが可能である。検査面上の位置を検出するため、加速度センサを搭載し、面上の異常箇所の位置を推定する。

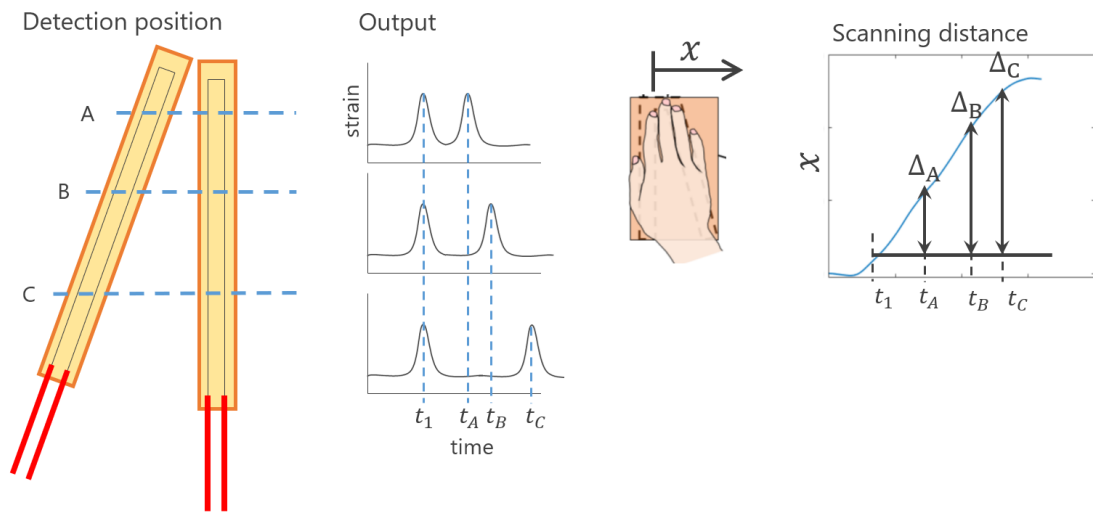


Fig. 4.13: Detection of reaction points

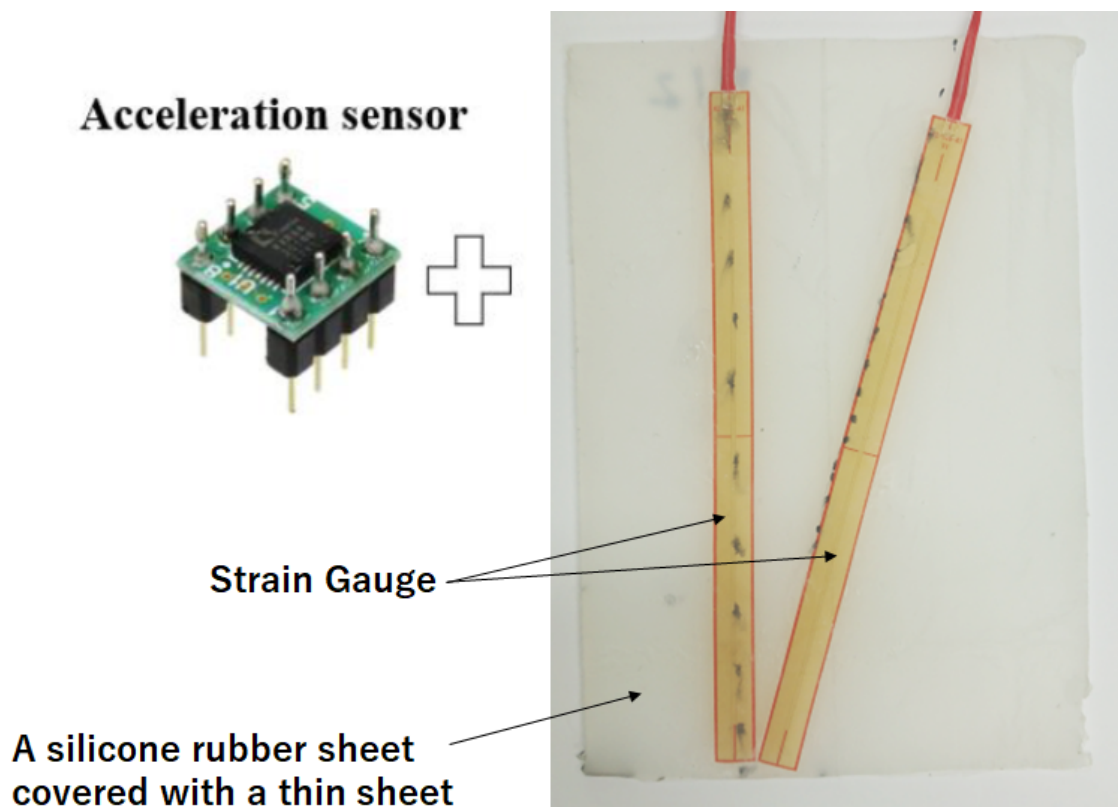


Fig. 4.14: Sensor layout for detecting reaction points in the sensor

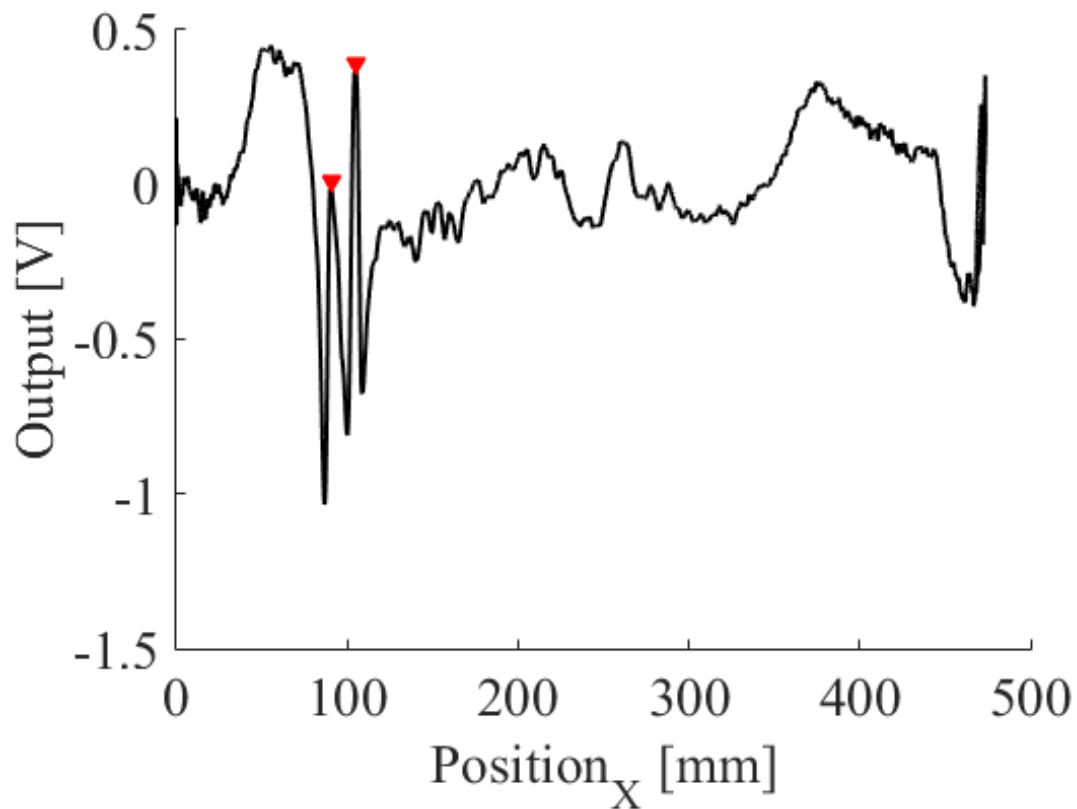


Fig. 4.15: Output signal

#### 4.6 面上の異常位置推定

面状走査型触覚センサの面上での異常検出能力を調べる実験を行った。広い面上に凸を1つ配置し、その凸が面上のどの位置にあるのかセンサを利用して推定を行った。凸を移動させ、様々な位置でも推定可能かどうかを調べた。

##### 4.6.1 実験結果

4.17は推定した凸の結果を示す。×印は凸がある正確な位置である。点は5回なぞった推定値の平均値を示す。その周りの楕円形状はX方向、y方向の標準偏差で描いた形状である。この結果よりy方向の推定にばらつきが大きいことがわかる。

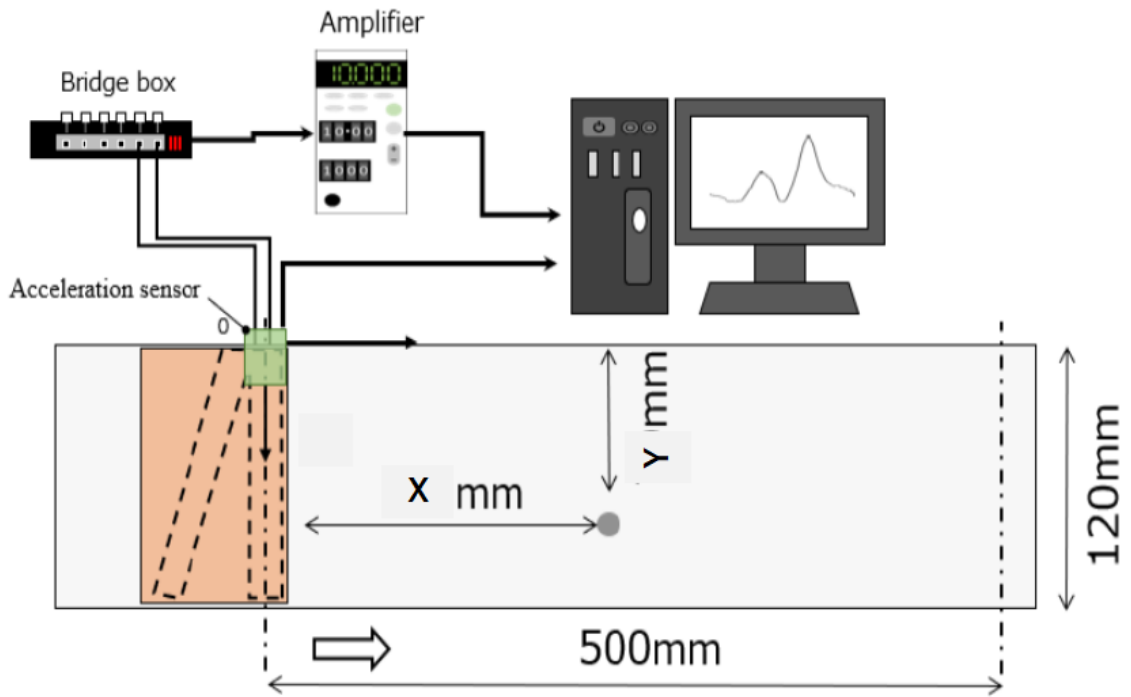


Fig. 4.16: Experimental system

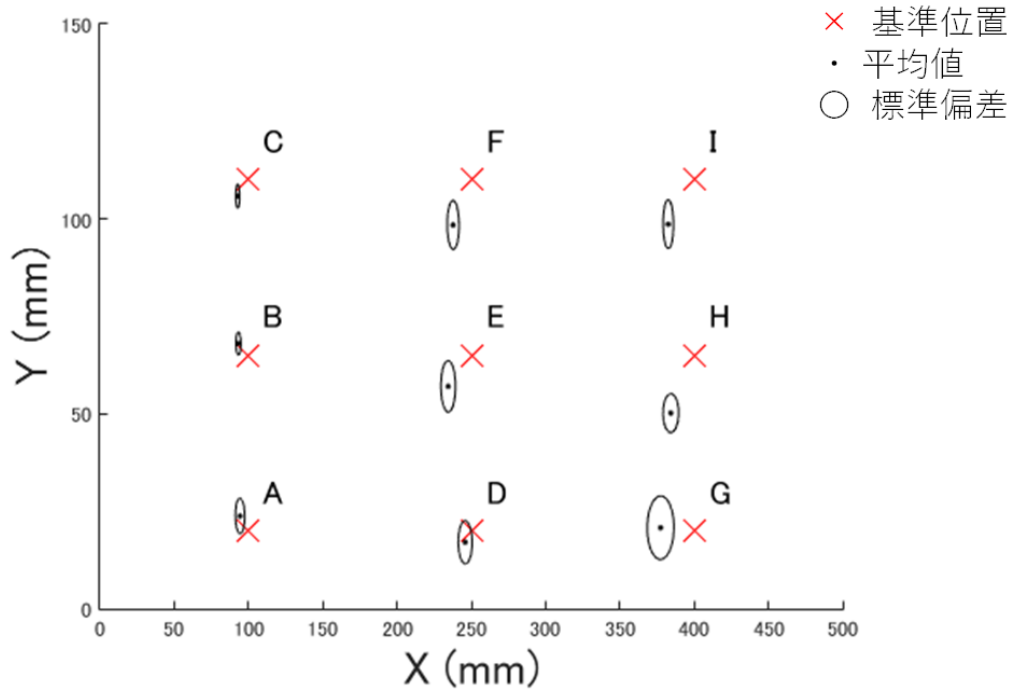


Fig. 4.17: Estimated position

## 4.7 考察

### 4.7.1 使用上の制限

ここでは広い表面上に存在する幅が小さなガウシアン形状の凸の検出について述べてきた。微小ひずみを検知することができれば，面状走査型触覚センサ内のどこで検出されるかがわかる。しかしながら，どんな形状でも検出できるわけではなく制限がある。2，3章で述べた指に装着型のウェアラブル走査型触覚センサでも同様なことが言えるが，溝が深い凹形状は計測が困難である。ここまで述べてきた触覚センシングの原理は柔軟物が走査面の形状に沿って変形し，ひずみゲージで検知する原理である。そのため，深い溝の凹形状は柔軟物が形状にすることができず，検知することができない。幅がセンサより大きければ形状に沿って変形するため計測できるが，想定される検出物の幅は数 mm 程度であり，凹形状には適用が困難である。しかしながら，プレス加工で生じる成形不良は多くの場合，ごみが入り込んだことが原因で生じる凸やうねりである。

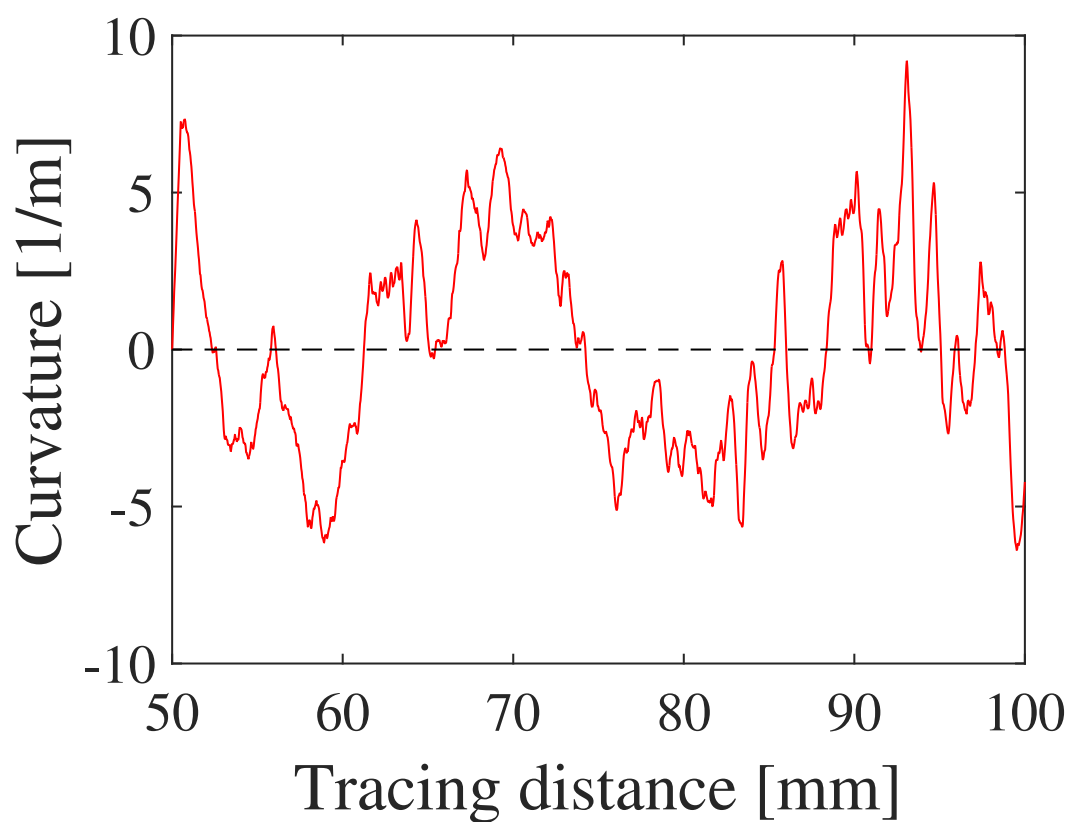


Fig. 4.18: Signal on the flat

図 4.18 は平面部分を走査した際のセンサ信号である。平面を走査しているのに、0 と出力されるべきであるが、おおよそ  $\pm 5 \text{ 1/m}$  の信号値が出力されている。これをノイズとしてとらえると、これより小さな曲率をもつ形状は検出が困難であることを示す。3 章で示したように形状情報に対する信号を増幅することでより小さな曲率を持つ形状も検出可能になるのではないかと考える。

## 4.8 まとめ

この章では、広範囲の検査面を効率良く検査するために、一度の走査の検査幅を広げた面状走査型触覚センサについて説明した。長尺ひずみゲージを利用することにより実現し、2 枚利用することで、センサの反応位置を推定することができる。また、さらに加速度センサと併用利用することで、面上の位置を推定し、異常箇所を特定することができる。センサの幅を広げたことにより感度が低下してしまうという問題があるが、信号の重ね合わせにより、感度を補う方法について説明した。正確な位置を検出するにはさらなる感度向上など必要ではあるが、広範囲面上での異常箇所の範囲を範囲を狭め、面ひずみ検査として役立つことが示された。

## 第5章 結論

### 5.1 全体のまとめ

本論文では、走査型触覚センシングについて、面歪検査の事例を挙げ、走査型触覚センシング、利用方法、感度向上、面状走査型触覚センサの開発について述べてきた。指や柔軟物の伸縮性に着目し、検査する表面に押し当てて走査したときの変形をひずみ量として捉え、微小面歪を検知した。さらに、センサ信号から面歪の曲率を推定し、定量的な評価を行った。

2章では柔軟構造を持ったウェアラブル走査型触覚センサを使って、表面にセンサを押し当て、面歪を検知できることを示した。また、センサ信号から面歪の曲率を推定し、定量評価を行った。面歪の定量評価には大きな価値がある。現状の面歪検査ではヒトが触覚による感覚でしか判断されていない。したがって、面歪の形状や大きさなどは定められておらず、熟練者の感覚に委ねられているのが現状である。微小面歪の形状や大きさを計測できる装置や技術は存在するが、コストや時間が多くかかるので行われていない。本研究で示した、触覚センサによる面歪検査では微小面歪の検知と同時に得られるセンサ信号から面歪の形状や大きさを評価できる。過大なコストをかけずに面歪の検知と評価を可能にする。面歪の定量評価によって、どんな面歪が除去されるべきか定量的に判断され、より効率的な生産が可能になる。また、定量評価によってヒトの感覚による曖昧さが無くなり、検知のばらつきが小さくなる。センサを使うことによって電氣的なノイズによる誤差やばらつきに注意しなければならないが、熟練度や体調などの個人差によるばらつきよりは小さくできる。

3章では2章で取り扱った面歪よりさらに微小な面歪に対して、触覚増強として研究された知見を触覚センサの信号増幅に活用し、微小面歪の検知と定量評価を行った。触覚増強デバイスとして開発された触覚コンタクトレンズをセンサと検査を行う表面の界面に介在させることで、センサの感度を上げることに成功した。さらに触覚コンタクトレンズという柔軟構造体を使うことでSN比の向上し、微小面歪の検知をし易くすることが示された。ヒトは優れたセンシング受容器だけによって上手く触覚センシングを行っているのではなく、皮膚の構造も密接に関係し合って触覚情報を得ている。触覚センサの感度を向上させる取り組み



として、人間の皮膚構造を模倣した接触面を持つ触覚センサーに関する研究が行われている [43, 44, 45]. ヒトは指先の指紋や手の皺などの構造がある種のフィルタの役割を担い、触覚情報を巧みに選択している [46]. 触覚コンタクトレンズの構造も同様に考えられ、センサ素子と接触表面の間の構造によって取り出したい触覚情報を選択できることを示唆している. この構造をある触覚情報に対して自由に設計することができれば、ヒトと同様な巧みな触覚センシングは困難であっても、ある目的に特化した触覚センシングが可能になる. 本稿で例に挙げた、面歪検査では微小面歪を検知が目的であるので、他の触覚情報は除外し、表面形状の情報を抜き出すことができている.

2章, 3章ではヒトの能動触の現象をセンサ信号として観測している. 能動触では皮膚からの触覚情報だけでなく筋肉や関節などからの触覚情報も得ており、それらの情報を統合処理している. そのような触覚情報をフィードバックしながら触動作を調整し、知覚し易いような触動作を獲得している. 実際に、ウェアラブル走査型触覚センサを使って、表面を走査し、その界面の変形をセンサ信号を観測することで面歪を検知することができることを示した. これはヒトが今までの経験から表面を知覚し易いように指、腕を上手く動かしているからだと考えられる.

4章では2章, 3章で示した柔軟物の変形に着目した走査型触覚センシング原理を使って、広範囲の面ひずみ検査に適した、触覚センサの提案を行った. 指から手のひらへと拡張し、面歪検査に近い状態で触覚センサを走査できるようにした. 2章, 3章で理解されたヒトの能動触メカニズムを規範として、触覚センサを能動的に走査し微小面歪の検知を行った. 結果として高さ数十  $\mu\text{m}$ , 幅数  $\text{mm}$  の面歪を検知できることを示した. センサ感度など問題点はあるが、単純な構造の触覚センサとヒトの能動触によって微小面歪を検知し、定量評価が行えることを示した.

本研究では触動作と触受容が相互に関係し合っただけでなく触覚センシングを行っているヒトの能動触メカニズムに着目した. 本研究ではセンシングに着目し、動作はヒトに委ね、ヒトが触覚センサを走査して検査し微小面歪の検知を行った. その結果から微小面歪を検知することが可能で、得られたセンサ信号から定量的に評価可能であること示した. 長い期間、訓練された熟練者が微小な面歪を正確に検知できるという事実から、知覚し易いように触動作を適切に調整して、微小面歪の検知に適した動作を獲得していることが言える. しかしながら、訓練を行ってなくても日常的に触るという経験からある程度は表面の凹凸を知覚し易い動作を無意識に生成している可能性がある. 表面を上手く走査し、微小面歪を知覚することができるヒトの能動触メカニズムを大きく崩すことなく、触覚センシングに挑んだ. その結果、熟

練者でなくても微小面歪を検知することができ、曲率として評価できることを示した。ヒトが備え持つ皮膚の柔らかさ、触覚受容器だけでなく、経験的に得る触受容し易い触動作の生成という能動触メカニズムはヒトならではのメカニズムである。

本論文で示した、走査型触覚センシングの研究の主な貢献は以下の通りである。

- 面歪の定量評価：

走査面の曲率変化をひずみ量として捉え、そのひずみ量から曲率変化を再構築し、定量評価が可能である。触覚センサを走査することで、微小面歪の検知と同時に得られるセンサ信号から面歪の形状や大きさを評価できる。これによって、検知されるべき面歪が定量的に判断され、より効率的な生産が可能になる。

- 柔軟構造体を利用した微小面歪の検出：

ゴムや薄板構造のような柔軟物、柔軟構造によって、表面に沿うことで表面形状の情報をセンサ信号として捉えられることを示した。これは柔軟さによって使用するヒトと環境に上手くなじむことで得られた結果である。さらに、より微小なうねりに対して、触覚コンタクトレンズのような柔軟構造体を利用して信号を増幅し、微小面歪を検知可能である。これは触覚センサと接触表面の界面の構造によって欲しい触覚情報を明瞭化できることが示唆された。複雑な信号処理を行わずに柔軟物と柔軟構造によって達成された成果であり、柔軟さを積極的に利用するソフトロボティクスへの貢献になる。

- ヒトの能動触メカニズムを規範とした触覚センシング：

ヒトが経験的に獲得してきた能動触メカニズムを規範として触覚センサを走査して微小面歪をセンサ信号として捉えた。ヒトは触覚情報を検知し易いように動作を上手く調整している可能が示唆された。研究では一部ではあるが、皮膚と接触表面の界面にセンサを介入させることで、ヒトの能動触をセンサ信号として捉えることができている。これに加えてヒトの動作計測をすることでヒトの能動触メカニズムの理解を深めることが可能である。

## 5.2 今後の展望

指型のウェアラブル走査型触覚センシングでは触覚コンタクトズのような柔軟構造体によって感度向上を行い、微小面歪の検知を可能にさせた。しかし、検出幅が狭いという問題があ

る。一方、面状走査型触覚センシングでは検出幅が広いが、感度が小さいという問題がある。本研究ではひずみゲージの縦列化によって検出信号の明瞭化を図ったが、より感度を向上させる必要がある。本研究の結果で柔軟構造体や信号処理の組合せによって感度向上が可能であることを示唆している。

本論文の題目には「ヒト」という生物学で用いられる術語を用いているが、本研究では生物学的観点から特徴的であるヒトの面歪を上手く感知できる能動触メカニズムを意識している。ヒト以外の動物でも能動触は観察されるが、ヒトのように器用に触動作を生成し、表面の面歪を感知できるのか疑問が残る。感知し易いように器用に手を動かすことは、ヒトが持つ能動触の特徴の一つだと考えられる。また、ヒトと似ているサルも手を器用に動かして能動触を行うことができると考えられるが、学習という側面で違いがあると考えられる。長期の訓練で表面の面歪を感知する能力を大幅に向上させた熟練者がいるように、ヒトは訓練による学習によって能力を大きく向上させることができる。熟練者は学習によって面歪の感知能力を洗練させ、素人には感知が困難な微小な面歪であっても瞬時に感知できるようにしていると言える。この能動触メカニズムの学習的側面の研究は今後の展望である。

他の今後の展望として、広い検出幅と高い感度の両立した面状走査型触覚センシングを目指すと共に以下のような展望が望める。

- 触覚情報に基づいた面歪のマッピング:

触覚センシングによって得られた情報を基に、走査面のどの位置にどんな面歪が存在するかをマッピングすることによってより実用的な面歪検査が可能となる。

- 微小ひずみによる信号の自動検出:

現在はセンシングしたデータを後処理によって信号を切り出して評価を行っているが、将来的には検出されるべき面歪なのかどうか自動判別することが望ましい。今回、検出物のモデルとして正弦波曲面やガウシアン形状を使用したのが、これらを学習データセットに用いて機械学習によって信号の検出できる可能性がある。

- 面ひずみ検査の自動化:

最終的には面歪検査の動作についても考え、触動作、これまで述べてきた触受容を一体となったロボットシステムを実現し面歪検査の自動化が望まれる。

## 参考文献

- [1] R. Kikuuwe, A. Sano, H. Mochiyama, N. Takesue, and H. Fujimoto, “Enhancing haptic detection of surface undulation,” *ACM Tran. Applied Perception*, vol. 2, no. 1, pp. 46–67, 2005.
- [2] Y. Tanaka, H. Sato, and H. Fujimoto, “Development of a finger-mounted tactile sensor for surface irregularity detection,” in *Proc. 2007 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robot. Syst. (IROS 2007)*, San Diego, CA, USA, Oct. 2007, pp. 690–696.
- [3] T. Takei, M. Ando, and H. Mochiyama, “Wearable artificial skin layer for the reconstruction of touched geometry by morphological computation,” *Advanced Robotics*, vol. 32, no. 21, pp. 1122–1134, Nov. 2018.
- [4] 行縄 拓海, 肥田 拓哉, 瀬尾 明彦, “触覚検査作業における検査対象面の角度と検査経路が上肢負担に与える影響”, 日本経営工学会論文誌, vol. 64, no. 2, pp. 138–144, 2013.
- [5] A. Sano, H. Mochiyama, N. Takesue, R. Kikuuwe, and H. Fujimoto, “Device and method for sensing and displaying convexo concave,” Japanese Patent WO/2005/064 299, Dec. 27, 2004.
- [6] “reflectcontrol pss 8005.d system,” June 2020, [Online]. Available from:<https://www.micro-epsilon.jp/measurement-systems/Paint-Inspection/karosserie/>.
- [7] 岩村 吉晃, “能動的触知覚（アクティヴタッチ）の生理学”, バイオメカニズム学会誌, vol. 31, no. 4, pp. 171–177, 2007.
- [8] 田中 由浩, “触覚の主観性と身体性, その活用”, システム／制御／情報, vol. 63, no. 4, pp. 151–155, 2019.
- [9] H. B. Smith Allan M., Gosselin Geneviève, “Deployment of fingertip forces in tactile exploration,” *Experimental Brain Research*, vol. 147, pp. 209–218, 2002.
- [10] E. A. Gamzu E, “Importance of temporal cues for tactile spatial-frequency discrimination.” *The Journal of neuroscience*, vol. 21, no. 18, pp. 7416–7427, 2001.

- [11] K. Drewing, A. Lezkan, and S. Ludwig, "Texture discrimination in active touch: Effects of the extension of the exploration and their exploitation," in *2011 IEEE World Haptics Conference*, 2011, pp. 215–220.
- [12] A. Sano, H. Mochiyama, N. Takesue, R. Kikuuwe, and H. Fujimoto, "TouchLens: touch enhancing tool," in *Proc. IEEE Conf. Robot. Autom. (TEXCRA 2004)*, 2004, pp. 71–72.
- [13] R. Kikuuwe, A. Sano, H. Mochiyama, N. Takesue, and H. Fujimoto, "A tactile sensor capable of mechanical adaptation and its use as a surface deflection detector," in *Proc. IEEE Sensors*, 2004, pp. 256–259.
- [14] "Gelsight," Apr. 2019, [Online]. Available from: <http://www.gelsight.com/>.
- [15] M. Johnson, and E. Adelson, "Retrographic sensing for the measurement of surface texture and shape," in *Proc. 2009 IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2009)*, June 2009, pp. 1070–1077.
- [16] D. Yamada, T. Maeno, and Y. Yamada, "Artificial finger skin having ridges and distributed tactile sensors used for grasp force control," in *Proc. 2001 IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst. (IROS 2001)*, vol. 2, no. 2, 2001, pp. 686–691.
- [17] K. Hosoda, Y. Tada, and M. Asada, "Anthropomorphic robotic soft fingertip with randomly distributed receptors," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 54, no. 2, pp. 104–109, Feb. 2006.
- [18] 木下 源一郎, "触覚センサの開発現状", *日本ロボット学会誌*, vol. 2, no. 5, pp. 430–437, 1984.
- [19] Z. Kappassov, J. A. Corrales, and V. Perdereau, "Tactile sensing in dexterous robot hands - Review," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 74, pp. 195–220, 2015.
- [20] 木下 源一郎, 高瀬 国克, 森 政弘, "人工触覚によるパターン認識", *計測自動制御学会論文集*, vol. 7, no. 1, pp. 25–30, 1971.
- [21] M. Shimojo, T. Araki, Aigou Ming, and M. Ishikawa, "A ZMP sensor for a biped robot," in *Proc. 2006 IEEE Int. Conf. Robot. Autom. (ICRA 2006)*, Orlando, Florida, May 2006, pp. 1200–1205.

- [22] M. ISHIKAWA, and M. SHIMOJO, “A Method for Measuring the Center Position of a Two Dimensional Distributed Load Using Pressure-Conductive Rubber,” *Tran. of the Soc. of Instrument and Control Engineers*, vol. 18, no. 7, pp. 730–735, 2014, (in Japanese).
- [23] K. Nagata, M. Ooki, and M. Kakikur, “Feature detection with an image based compliant tactile sensor,” in *Proc. 1999 IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst. (IROS 1999)*, vol. 2, Kyongju, South Korea, South Korea, 1999, pp. 838–843.
- [24] K. Kamiyama, K. Vlack, T. Mizota, H. Kajimoto, N. Kawakami, and S. Tachi, “Vision-based sensor for real-time measuring of surface traction fields,” *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 25, no. 1, pp. 68–75, 2005.
- [25] C. Chorley, C. Melhuish, T. Pipe, and J. Rossiter, “Development of a tactile sensor based on biologically inspired edge encoding,” in *Proc. 2009 Int. Conf. Advanced Robotics (ICAR 2009)*, Munich, Germany, June 2009, pp. 1–6.
- [26] A. Yamaguchi, and C. G. Atkeson, “Combining finger vision and optical tactile sensing: Reducing and handling errors while cutting vegetables,” in *Proc. 2016 IEEE-RAS 16th Int. Conf. Humanoid Robots (Humanoids 2016)*, Cancun, Mexico, Nov. 2016, pp. 1045–1051.
- [27] D.-H. Kim, N. Lu, R. Ma, Y.-S. Kim, R.-H. Kim, S. Wang, J. Wu, S. M. Won, H. Tao, A. Islam, K. J. Yu, T.-I. Kim, R. Chowdhury, M. Ying, L. Xu, M. Li, H.-J. Chung, H. Keum, M. McCormick, P. Liu, Y.-W. Zhang, F. G. Omenetto, Y. Huang, T. Coleman, and J. A. Rogers, “Epidermal Electronics,” *Science*, vol. 333, no. 6044, pp. 838–843, Aug. 2011.
- [28] M. Kaltenbrunner, T. Sekitani, J. Reeder, T. Yokota, K. Kuribara, T. Tokuhara, M. Drack, R. Schwödauer, I. Graz, S. Bauer-Gogonea, S. Bauer, and T. Someya, “An ultra-lightweight design for imperceptible plastic electronics,” *Nature*, vol. 499, pp. 458–463, 2013.
- [29] S. Wang, J. Xu, W. Wang, G.-J. N. Wang, R. Rastak, F. Molina-Lopez, J. W. Chung, S. Niu, V. R. Feig, J. Lopez, T. Lei, S.-K. Kwon, Y. Kim, A. M. Foudeh, A. Ehrlich, A. Gasperini, Y. Yun, B. Murmann, J. B. Tok, and Z. Bao, “Skin electronics from scalable fabrication of an intrinsically stretchable transistor array,” *Nature*, vol. 555, no. 7694, pp. 83–88, Mar. 2018.
- [30] “Takktiler sensors,” Apr. 2019, [Online]. Available from: <https://softroboticstoolkit.com/book/takktiler-sensors>.

- [31] L. P. Jentoft, Y. Tenzer, D. Vogt, Jia Liu, R. J. Wood, and R. D. Howe, “Flexible, stretchable tactile arrays from MEMS barometers,” in *Proc. 2013 16th Int. Conf. Advanced Robotics (ICAR 2013)*, Nov. 2013, pp. 1–6.
- [32] A. Charalambides, and S. Bergbreiter, “Rapid Manufacturing of Mechanoreceptive Skins for Slip Detection in Robotic Grasping,” *Advanced Materials Technologies*, vol. 2, no. 1, p. 1600188, Jan. 2017.
- [33] M. Amjadi, K. U. Kyung, I. Park, and M. Sitti, “Stretchable, Skin-Mountable, and Wearable Strain Sensors and Their Potential Applications: A Review,” *Advanced Functional Materials*, vol. 26, no. 11, pp. 1678–1698, 2016.
- [34] Yong-Lae Park, Bor-Rong Chen, and R. J. Wood, “Design and Fabrication of Soft Artificial Skin Using Embedded Microchannels and Liquid Conductors,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 12, no. 8, pp. 2711–2718, Aug. 2012.
- [35] F. L. Hammond, Y. Menguc, and R. J. Wood, “Toward a modular soft sensor-embedded glove for human hand motion and tactile pressure measurement,” in *Proc. 2014 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intell. Robot. Syst. (IROS 2014)*, Chicago, IL, USA, Sep. 2014, pp. 4000–4007.
- [36] L. Li, S. Jiang, P. B. Shull, and G. Gu, “SkinGest: artificial skin for gesture recognition via filmy stretchable strain sensors,” *Advanced Robotics*, vol. 32, no. 21, pp. 1112–1121, Nov. 2018.
- [37] Y. Tanaka, D. P. Nguyen, T. Fukuda, and A. Sano, “Wearable skin vibration sensor using a pvdf film,” *2015 IEEE World Haptics Conference (WHC)*, pp. 146–151, 2015.
- [38] S. Mack, E. Kandel, T. Jessell, J. Schwartz, S. Siegelbaum, and A. Hudspeth, *Principles of Neural Science, 4th Edition*, ser. Principles of Neural Science. McGraw-Hill Education, 2000.
- [39] C. Pacchierotti, S. Sinclair, M. Solazzi, A. Frisoli, V. Hayward, and D. Prattichizzo, “Wearable haptic systems for the fingertip and the hand: Taxonomy, review, and perspectives,” *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 10, no. 4, pp. 580–600, 2017.
- [40] Y. Tanaka, Y. Goto, and A. Sano, “Haptic display of micro surface undulation based on discrete mechanical stimuli to whole fingers,” *Advanced Robotics*, vol. 31, no. 4, pp. 155–167, 2017.

- [41] M. Ando, H. Mochiyama, T. Takei, and H. Fujimoto, “Effect of tactile contact lens on rubber artificial skin layer with a strain gauge,” in *Proc. 2016 IEEE/SICE Int. Symp. Syst. Integr. (SII2016)*, Dec. 2016, pp. 397–402.
- [42] T. Masaki, M. Ando, T. Takei, H. Fujimoto, and H. Mochiyama, “Surface Undulation Detection System Using Wearable Artificial Skin Layer with Strain Gauge ,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Soft Robotics (RoboSoft 2019)*, Apr. 2019.
- [43] V. A. Ho, H. Yamashita, Z. Wang, S. Hirai, and K. Shibuya, “Wrin’Tac: Tactile Sensing System With Wrinkle’s Morphological Change,” *IEEE Tran. Industrial Informatics*, vol. 13, no. 5, pp. 2496–2506, Oct. 2017.
- [44] H. X. Trinh, V. A. Ho, and K. Shibuya, “Computational model for tactile sensing system with wrinkle’s morphological change,” *Advanced Robotics*, vol. 32, no. 21, pp. 1135–1150, Nov. 2018.
- [45] C. M. Boutry, M. Negre, M. Jorda, O. Vardoulis, A. Chortos, O. Khatib, and Z. Bao, “A hierarchically patterned, bioinspired e-skin able to detect the direction of applied pressure for robotics,” *Science Robotics*, vol. 3, no. 24, p. eaau6914, Nov. 2018.
- [46] M. Shimojo, “Mechanical filtering effect of elastic cover for tactile sensor,” *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 13, no. 1, pp. 128–132, 1997.



## 謝辞

望山洋教授にはこの5年半大変お世話になりました。大学院から入学してきた私を快く迎えていただき感謝しております。お忙しい中、研究に関するきめ細やかなご指摘や論文、発表資料などに関しての確認していただきありがとうございます。望山先生には研究内容だけでなく研究者としての心構え、考え方など様々なことを教わりました。ときには厳しく、ときには親身に研究等の相談に乗っていただきありがとうございます。また、本研究を進める上で貴重な助言を頂きました。相山康道教授、鈴木健嗣教授、黒田嘉宏教授、名古屋工業大学の佐野明人教授に感謝いたします。世界的に社会が混乱の状態です。日常とは異なる忙しさの中、学位審査を引き受けてくださり、ありがとうございます。共同研究者である、名古屋工業大学の藤本英雄教授、弘前大学の竹田年延助教には貴重なご意見を頂き深く感謝いたします。天然ゴムを提供して下さったハナキゴム株式会社の方々に感謝いたします。そして、柔軟ロボット学研究室の先輩方、後輩方、同期には日々議論し合ったり、助言を貰ったりとお世話になりました。研究室は異なるが、同期の伊藤孝浩君には相談に乗ってもらったり、励まし合ったり、遊びに行ったりなど日々の生活でお世話になりました。ありがとう。

高等専門学校入学時から大学、大学院を見据えて勉強や研究活動を進めてきました。工学的な基礎知識を教えてくださいました。都立産業技術高等専門学校の先生方に感謝いたします。高専で身に付けた技術や基礎知識は研究を進める上で役立っております。最初の卒業研究を指導していただきました堀滋樹准教授、授業外で数学の基礎知識を教えてくださいました齋藤純一准教授、課外活動でもものづくりの楽しさを教えてくださいました吉田喜一教授、深谷直樹准教授には特にお世話になりました。吉田教授には研究生になる前から研究に加えていただいたりと、研究の基盤を教えてくださいました。ありがとうございます。

東京農工大学の中本圭一准教授には大学の卒業研究でお世話になりました。ここで得た工作機械の知識や研究活動の基礎は研究を進める上で役立たせることができました。暖かく受け入れ、指導していただきありがとうございます。大学での同期、先輩方にも感謝いたします。

最後に、どんなときでも暖かく見守ってくれる家族、親戚に感謝します。将来を自由に選択してもらい、高専、大学、大学院と通わせてもらった両親に感謝します。ありがとう。

## 関連論文リスト

## [査読付き雑誌論文]

- Mutsuhito Ando, Toshinobu Takei, Hiromi Mochiyama, “ Rubber Artificial Skin Layer with Flexible Structure for Shape Estimation of Micro-undulation Surfaces ”, ROBOMECH Journal ,vol. 7, No. 11, 2020
- Toshinobu Takei, Mutsuhito Ando, Hiromi Mochiyama, “ Wearable artificial skin layer for the reconstruction of touched geometry by morphological computation ”, Adv Robot, Vol. 32, issue 21, 2018, pp.1122–1134

## [査読付き国際会議論文]

- Mutsuhito Ando, Hiromi Mochiyama, Toshinobu Takei and Hideo Fujimoto, ”Effect of tactile contact lens on rubber artificial skin layer with a strain gauge,” 2016 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), Sapporo, Dec. 2016, pp. 397-402.
- M. Ando, H. Mochiyama, T. Takei, H. Fujimoto, “ On a Haptic Phenomenon by Combined Use of t he Rubber Artificial Skin Layer with a Strain Gauge and the Tactile Contact Lens ”, AsiaHaptics2016, Kushwaha, Nov. 2016, pp 309-313

## [査読付き国内会議論文]

- 安藤潤人, 竹囲年延, 望山洋 「TouchLens Amplifies the Strain inside a Rubber Artificial Skin Layer」, 第 23 回ロボティクスシンポジア, 秋津, 3 月 2017, pp.296-297

## [査読無し国内会議論文]

- 安藤潤人, 徳嶺隆介, 竹囲年延, 望山洋, 「長尺ひずみゲージを用いた面状走査型触覚センサの提案」, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 5 月 2020
- 安藤潤人, 正木俊明, 徳嶺隆介, 竹囲年延, 望山洋, 「面状走査型柔軟触覚センサを用いた面歪検出システムの提案」, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 広島, 6 月 2019, pp. 1P2-F05
- 安藤潤人, 望山洋, 「Robo-Dip: ロボット化ゴムディッピングによる薄型柔軟構造体の作製法」, 第 35 回日本ロボット学会学術講演会 (RSJ2017) . 川越, 9 月 2017 , pp.2676-2677

- 安藤潤人, 福田航平, 望山洋, 竹岡年延, 藤本英雄, 「触覚コンタクトレンズの増幅効果を利用したゴム製人工皮膚層」, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 横浜, 6月2016, pp.1A2-19b3
- 安藤潤人, 望山洋, 「触覚コンタクトレンズの Rapid Prototyping による触知覚現象の探索」, 第16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, 名古屋, 12月2015, pp.2676-2677