

指関節の動作計測のための切り紙構造を利用したマイクロひずみセンサ

Micro strain sensor using a kirigami structure for measuring the motion of finger

精密工学専攻 29号 知念 尚人
Naoto Chinen

1. 研究の背景と目的

現在、日本には高度熟練技能者による伝統産業が存在する。このような熟練技能の伝承は見て覚える方法に依存しており、伝承方法として不十分である。そのため、熟練の手技の伝承を目的とした、モーションキャプチャ技術による動作計測が行われている⁽¹⁾。

人の動作を計測するモーションキャプチャ技術に光学式センサを用いた手法と機械式センサを用いた手法がある。光学式センサを用いた手法では、カメラとマーカを用いて人の動きを計測する。この手法では人の動きを阻害せずに、自然な動きを計測することができる。しかし、指先の動作のような重なりによってカメラとマーカの間を遮蔽してしまう動作の計測が困難という課題がある⁽²⁾。機械式センサを用いた手法では関節にひずみセンサやポテンショメータなどを配置して人の動作を直接計測する。この手法は光学式では計測が困難な遮蔽がある動作を計測できるが、機械式センサが人の動作を阻害してしまう課題がある。

そこで本研究では切り紙構造と呼ばれる高い伸縮性を持った構造に注目し、光学式及び機械式の両方の利点を持ったセンサを提案する。切り紙構造とは、紙に切れ込みの入った構造で、小さい力で大きく伸縮することが知られている。このことから、生体の動作を阻害せずに動きに追従できる生体デバイスとして応用する研究が行われている⁽³⁾。しかしこの研究では切り紙構造を電気素子を配置するための基板として使用しており、切り紙構造をセンサとして用いてひずみを計測することは行われていない。

本研究では切り紙構造を利用したひずみセンサを指の関節上に配置し、関節の角度の変化を計測する方法を提案する。切り紙構造の高い伸縮性から指先の動作を阻害せずに、指の曲げ角度を計測することができる。そして、実際に指先を使用する動作として、つかみ動作とつまみ動作の計測を行う。

2. 切り紙ひずみセンサの原理と概要

2.1 切り紙ひずみセンサの原理

Fig. 1 に切り紙構造を利用したひずみセンサの計測原理を示す。切り紙構造は初期状態は二次元的な構造だが、引張が加わった際、切れ込みを入れた部分が両持ち梁のように三次元的な構造に変形し、構造全体が伸張する。この両持ち梁の部分に金属抵抗体を配置することで変形時のひずみが金属抵抗体にも加わり、ピエゾ抵抗効果によって抵抗値が変化する。計測回路を用いて抵抗値の変化による出力電圧の変化からひずみを計測する。

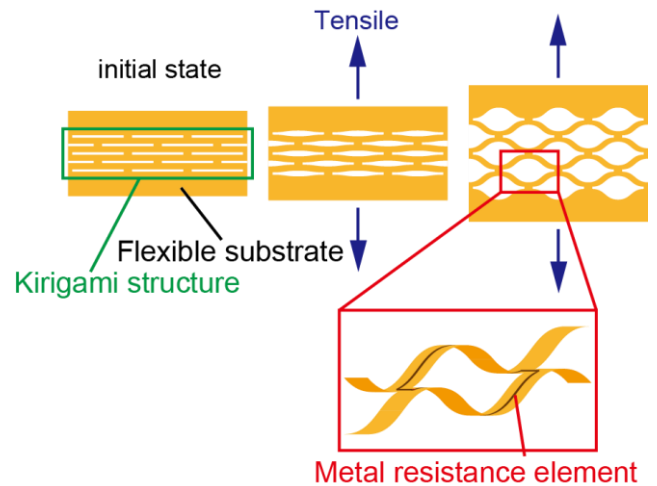


Fig. 1 Principle of strain measurement. By using kirigami structure, strain can be detected as a resistance change due to the deformation of the metal resistance element.

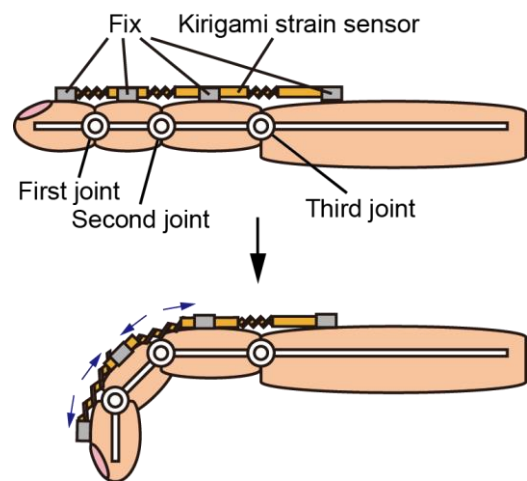


Fig. 2 Schematic view of the kirigami strain sensor.

2.2 切り紙ひずみセンサの概要

Fig. 2 に切り紙構造を利用したひずみセンサの概要を示す。人差し指における第一、第二、第三の部分に切り紙構造を配置する。指を曲げた際に切り紙構造にひずみが発生し、その際のセンサの出力から指の曲げ角度を計測する。ひずみセンサは指の関節と関節の間の部分で固定され、関節の動きを阻害する要素は切り紙構造のみとなる。切り紙構造には高い伸縮性があるため、関節の動きは阻害せずに曲げ角度を計測することができる。

3. 切り紙ひずみセンサの設計と試作

3.1 切り紙ひずみセンサの設計

切り紙センサの設計値を Fig. 3 に示す。提案するセンサは、Cu/ポリイミド/Cuの3層構造のフレキシブル基板にエッチングを用いて切り紙構造の切れ込みと、銅配線パターンを入れることで試作する。銅配線パターンはひずみを計測するための金属抵抗体となるゲージ部と、配線部から構成される。センサの各寸法は自分の人差し指に合わせ設計した。切り紙構造は各関節上に配置し、切れ込み間隔 d は後述の実験から $500 \mu\text{m}$ とした。ゲージ部の抵抗値は一般的なひずみゲージと同じ 120Ω 以上を目標に設計し、配線幅 b は後述の実験から $100 \mu\text{m}$ とした。配線部はゲージ部と比べ2桁以上小さい抵抗値を目標に設計した。これにより配線部が変形してもゲージ部の出力に干渉しないと考えた。

3.2 切り紙ひずみセンサの試作プロセス

切り紙ひずみセンサの試作プロセスを Fig. 4 に示す。本研究では Cu 層の厚さ $4 \mu\text{m}$ 、ポリイミド層の厚さ $25 \mu\text{m}$ の三層構造のフレキシブル基板を用いて切り紙ひずみセンサを試作した。まず A-A 断面の配線部の試作プロセスについて説明する。ポリイミド層をエッチングすることにより切り紙構造の切れ込みを形成した。そして Cu 層をエッチングすることにより配線部を形成した。なお、切れ込みを入れた面のフォトレジストの塗布が困難であったため、本研究では配線部及びゲージ部は切れ込みを入れない裏面に形成した。次に B-B 断面のゲージ部の試作プロセスについて説明する。まず、配線部と同様にポリイミド層をエッチングすることにより切れ込みを形成した。次に、配線部以外の銅をエッチングで除去し、真空蒸着装置を用いてポリイミド層に銅の薄膜を形成した。銅の薄膜の厚さは 100 nm とした。最後に蒸着した銅薄膜をエッチングすることによりゲージ部を試作した。

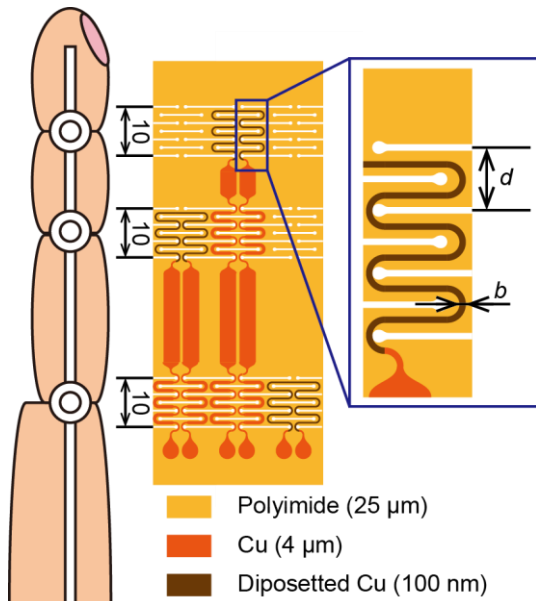


Fig. 3 Design of kirigami strain sensor.

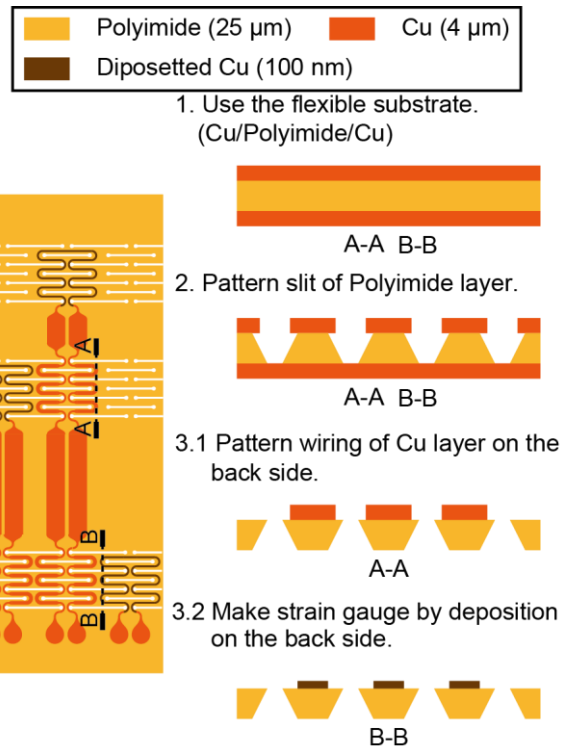


Fig. 4 The fabrication process of kirigami strain sensor.

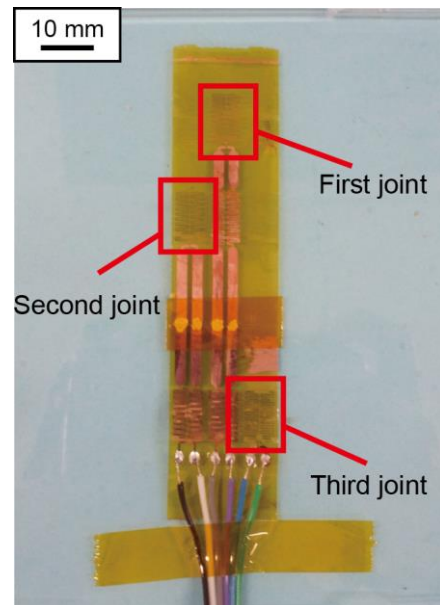


Fig. 5 Photographs of fabricated kirigami strain sensor.

なお、真空蒸着の銅薄膜が均一に形成できないことや、切れ込みによってフォトレジストを均一に塗布できないことから、1枚のフレキシブル基板で3つのゲージ部を同時にエッチングで形成することは困難であった。そこで本研究では第一関節、第二関節用の部分と、第三関節用の部分を分割して試作し、導電性ペーストを用いて電氣的に接続することでセンサを試作した。

実際に試作した切り紙ひずみセンサを Fig. 5 に示す。第一、第二、第三関節のゲージ部の抵抗値はそれぞれ 155.3Ω 、 147.4Ω 、 97.5Ω となった。

4. 実験

4.1 節および 4.2 節においては切り紙構造の設計値を確認するための実験について述べる。そして、4.3 節および 4.4 節において実際にセンサを使って指の曲げ角度を計測する実験について述べる。

4.1 切り紙構造の切れ込み間隔を変化させたときの有効弾性率計測実験

試作した切り紙センサが指先の動作を妨げないことを確認するため、また、最適な切り紙構造の切れ込み間隔を確認するために切り紙構造の弾性率を計測する実験を行った。

Fig. 6 に実験のセットアップを示す。実験装置は可動ステージと 6 軸力センサ、および赤外線レーザーによって構成される。可動ステージを動かしたときの 6 軸力センサのせん断力の出力とレーザーの出力を計測することで切り紙構造にかかる応力とひずみを計測した。Fig. 3 に示す切れ込み間隔 d をそれぞれ $750\ \mu\text{m}$, $500\ \mu\text{m}$, $250\ \mu\text{m}$ の 3 種類用意し計測を行った。引張量は指の関節で最も可動域の大きい第二関節が最大まで曲げた時に発生する伸びとして $15.4\ \text{mm}$ とした。

なお、一般的な弾性材料では材料そのものが伸縮するのに対し、切り紙構造は両持ち梁の変形による疑似的な伸縮である。そのため、一般的な弾性率を当てはめることはできない。そのため、本研究では切り紙構造の初期状態の断面積が一定であるとみなして応力 σ [MPa] を導出し、それをひずみ ε で除したものを有効弾性率 E と定義し、評価を行った。実験の結果を Fig. 7 に示す。横軸がひずみ、縦軸が応力である。ひずみと応力の関係を最小二乗法により導出した。本研究ではこの関係式の傾きを有効弾性率とした。

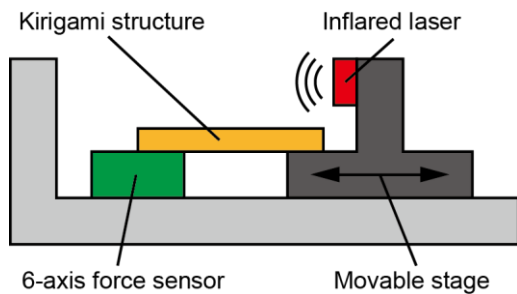


Fig. 6 Experimental setup to measure the Young's modulus with fabricated kirigami structure.

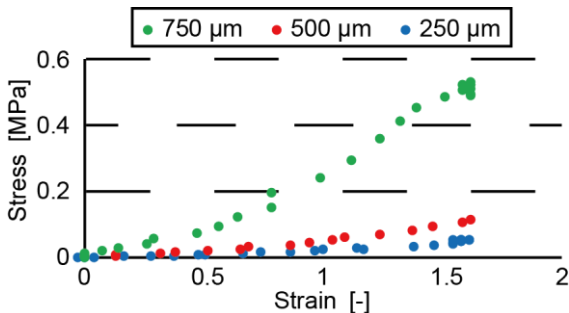


Fig. 7 Relationship between applied strain and stress of fabricated kirigami structures.

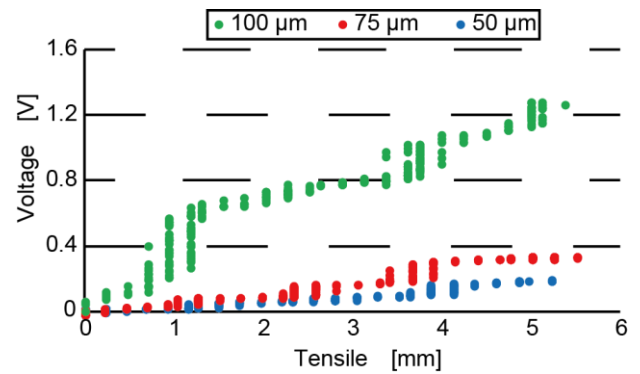


Fig. 8 Relationship between applied strain and voltage change of each fabricated strain gauge of strain sensor.

実験の結果から切れ込み間隔が $750\ \mu\text{m}$, $500\ \mu\text{m}$, $250\ \mu\text{m}$ におけるそれぞれの有効弾性率は $304\ \text{kPa}$, $59.5\ \text{kPa}$, $29.6\ \text{kPa}$ となった。皮膚の大部分を構成する真皮の弾性率は数 $10\ \text{kPa}$ である⁴⁾。このことから、切れ込み間隔が $500\ \mu\text{m}$ 以下の構造は皮膚と同程度の弾性率であることを確認した。よって、本センサの切り紙構造は指先の動きを阻害せずに指の曲げ角度を計測可能であると考えた。また、切れ込み間隔が小さくなるにつれて、三次元的な変形が小さくなることを確認した。金属抵抗体は切り紙構造の変形によるひずみから抵抗値が変化するため、三次元的な変形が大きいほど感度が向上すると考えられる。このことから本研究では $500\ \mu\text{m}$ が指の動作を阻害せずに計測でき、かつ感度が向上する最も適切な設計値と考えた。

4.2 配線幅を変化させた時のゲージ部の出力計測実験

最適なセンサの設計値を調べるため、切り紙構造のゲージ部における配線幅を変化させ、センサの出力の変化を計測する実験を行った。実験のセットアップは Fig. 6 と同様である。引張を加えた時のゲージ部の出力と赤外線レーザーの出力をオシロスコープで同期させながら計測した。Fig. 3 に示すゲージ部の銅配線の線幅 b をそれぞれ $50\ \mu\text{m}$, $75\ \mu\text{m}$, $100\ \mu\text{m}$ の 3 種類用意し、計測を行った。引張量は $5\ \text{mm}$ とした。

実験結果を Fig. 8 に示す。横軸が引張量、縦軸が電圧変化である。引張量と電圧変化の関係を最小二乗法により導出した。本研究ではこの関係式の傾きを感度とした。ゲージ部の感度は配線幅が大きくなるほど向上し、 $100\ \mu\text{m}$ のときに最大で $0.259\ \text{V/mm}$ となった。よって本研究では配線幅 $100\ \mu\text{m}$ がゲージ部の最適な設計値と考えた。

4.3 指関節の角度計測実験

試作したセンサを指に装着し、指を曲げた時の関節角度とセンサの出力電圧の関係式を導出するための実験を行った。動画解析ソフトを用いて関節の角度を計測しながら出力電圧の変化を計測した。動画解析ソフトには kinovea を使用した。実験の結果を Fig. 9 に示す。横軸が各関節の角度変化、縦軸が出力電圧変化である。最小二乗法を用いて角度変化と出力電圧変化の関係式を導出し、相関係数を算出した。第一、第二関節は相関係数がそれぞれ 0.958 , 0.842 となり線形に変化した。しかし、第三関節は相関係数が 0.44 となり線形に変

化しなかった。これは、切り紙構造の変形時に配線にひびなどが入り、抵抗値が大きく変化してしまったことが原因と考えられる。また、第一関節と第二関節の計測範囲内で発生する最大の力を計算した結果 5.27 mN, 4.02 mN となった。微小な力であることから指の動作を阻害せずに、曲げ角度計測できることを確認した。

4.4 つかみ動作とつまみ動作の計測実験

試作したセンサを用いて、具体的な指を使った動作としてつかみ動作とつまみ動作を計測した。計測対象には手になじみやすい円筒形の物体として直径 60 mm のボトルを使用した。計測対象にそれぞれの動作を行い、10 mm 程度持ち上げた。つかみ動作の実験結果を Fig. 10 に、つまみ動作の実験結果を Fig. 11 に示す。緑の枠で囲った領域がそれぞれの動作を行っている区間である。第三関節の波形はほとんど変化がなかったため、省略する。

つかみ動作において第一、第二関節ともに動作開始時から指の曲げが発生しているのに対し、つまみ動作では第二関節の曲げが、第一関節よりも 1 秒ほど遅れて発生することを確認した。これはつまみ動作において指先が物体に接触するときは第二関節をあまり使わずに、計測対象を持ち上げる際に第二関節を使用して持ち上げたためと考えられる。以上より、試作したセンサを用いてつかみ動作とつまみ動作の違いを確認した。このことから、本センサが指の曲げに追従して曲げ角度計測が可能であることを示した。

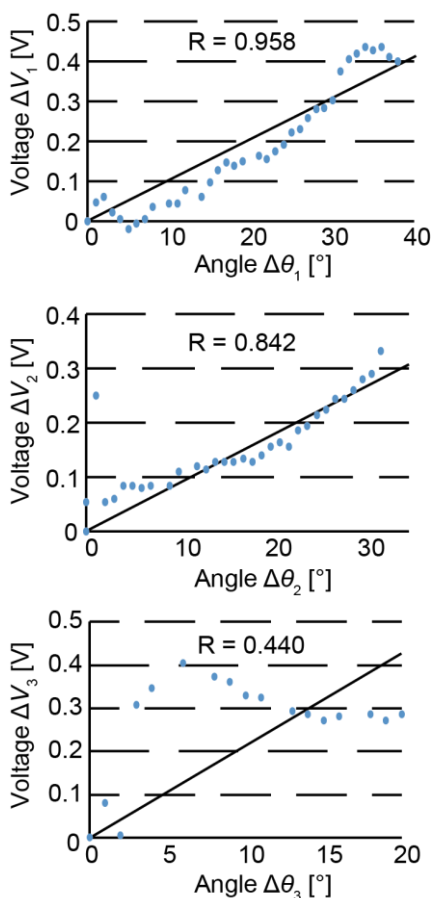


Fig. 9 Relationship between angle change and voltage change each fabricated strain gauge part of strain sensor.

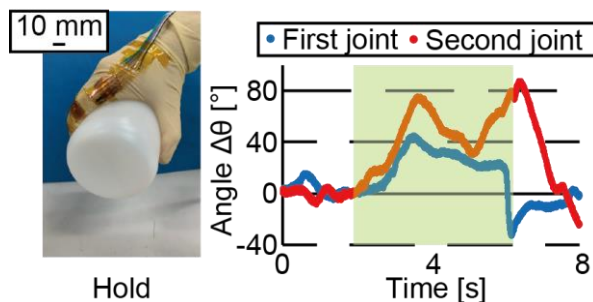


Fig. 10 Experimental result of the angle measurement in hold manipulation.

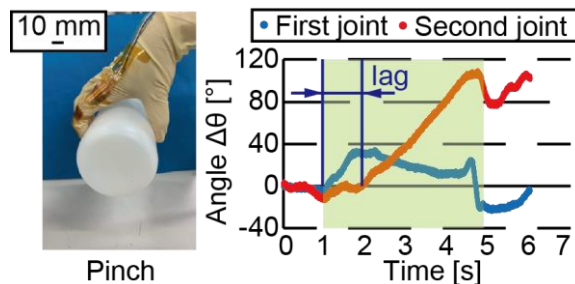


Fig. 11 Experimental result of the angle measurement in pinch manipulation.

5. 結論

本研究では、切り紙構造を利用した指先の動作を阻害しないひずみセンサを提案した。フレキシブル基板で作成した切り紙構造上に金属抵抗体を試作し、切り紙構造の変形による抵抗値の変化から、ひずみを計測した。試作したセンサの切り紙構造の有効弾性率は皮膚の弾性率と同程度の 59.5 kPa となった。試作したセンサを用いて、指の曲げ角度を計測した結果、第一、第二関節において角度と出力の相関係数が 0.958, 0.842 となった。また、計測区間で発生する最大の力はそれぞれ 5.27 mN, 4.02 mN となった。このことから、指の動作を阻害せずに、指の変形に追従して曲げ角度計測が可能であることを確認した。つまみ動作とつかみ動作の計測を行った結果、つまみ動作において、第一関節と第二関節の立ち上がりには 1 秒程度の遅れが発生することを確認した。以上より、試作したセンサが指の各関節の動作を阻害せずに関節の曲げ角度を計測できる可能性を示した。

参考文献

- (1) 芳田哲也, 日本の伝統技能を保存・継承するための「匠の技」の解析, 繊維機械学会誌, **60-6** (2007) pp. 321-326.
- (2) 尾形邦裕, 人体の動作計測技術における基礎的原理から最新動向まで, システム制御情報学会誌, **63-8** (2019) pp. 341-345.
- (3) Morikawa, Y., Ayub, S., Oliver, P., Kawano, T. and Patrick, R., Highly stretchable kirigami structure with integrated LED chips and electrodes for optogenetic experiments on perfused hearts, *Transducers* (2019) pp.2484-2487.
- (4) 鈴木辰憲, 長山和亮, 松本健郎, 三角孔の押し付けによるヒト皮膚表皮・真皮の力学特性の推定, 第 25 回バイオエンジニアリング後援会論文集, (2013) 1E17.