

## [研究助成 (A)]

## 生体軟組織の2方向切断力を計測可能なスマート術具の開発

## Development of a Surgical Instrument for Measuring Biaxial Cutting Forces of Biological Soft Tissues

2181001



|       |                        |     |         |
|-------|------------------------|-----|---------|
| 研究代表者 | 芝浦工業大学<br>工学部 電気工学科    | 教授  | 安孫子 聡 子 |
| 共同研究者 | 防衛大学校<br>システム工学群 機械工学科 | 准教授 | 辻 田 哲 平 |

## [研究の目的]

本研究の目的は「生体軟組織の2方向切断力を計測可能なスマート術具の開発」である。外科手術における生体組織の切断は、術具先端の刃の適切な角度・微細な力のかけ具合で、2方向の力を人間の手の巧みさで制御する必要がある。したがって、熟練医師の技量を解析するためには、術具（メス）に加わる2軸を取得することが必要である。しかしながら、2方向の値から計測のためには、二つのロードセルの搭載が必要となり、大型化してしまい、実際の術具とは異なるサイズ・重心になってしまうため、正確な解析・評価が困難となる。また、一般に市販されているロードセルや力センサは高価である。力センサの知識が少ない素人が把持し使用することは、コスト面においても問題である。そこで、本研究では、可能な限りロードセル部を小型化した、力センサー一体型術具を開発することを目標とする。特に、術具の把持部の大きさ・形状を実術具となるべく同じとなるようにし、2方向の力を計測することを目指す。

## [研究の内容, 成果]

上記、研究目的の達成のためには、少ない計測センサで2方向の力を計測する方法の提案と

力の受感部の2方向へのひずみに関して、等方向性を有する起歪部を提案することが本研究での大きな課題である。計測方法そのものに関しては、2枚のひずみゲージを用いて、圧縮方向と曲げ方向の測定原理をもとに、計算により計測力方向を分離することを実現する。

## 【2軸力計測センサの設計要求】

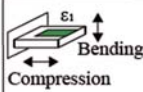
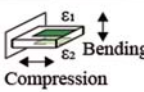
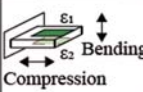
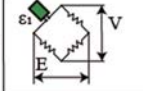
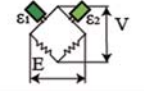
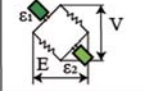
本研究で開発する2軸力計測センサは、下記の5項目の設計要求を満足することを目指す。

1. 形状が術具に近いこと
2. 術具切断方向と切断方向に垂直な2方向の力の計測が可能であること
3. 計測解像度0.1 Nを有すること
4. 最大2 Nの力を計測できること
5. 市販されている力覚センサにくらべ安価に製作可能であること

## 【測定原理と計測方法】

上記設計要求を満たす術具設計をめざし、本研究では、単一起歪部において2方向の力を計測する手法を提案した。表1にひずみ測定に用いる回路と貼付方法による特性を示す。表1に示すように、ひずみゲージによるひずみ計測を行う場合、貼付方法が同じであっても、ブリッジ回路の組み方によって計測可能なひずみが異なる。表1のB<sub>2</sub>に示す貼付方法と回路を用い

表1 ひずみゲージのブリッジ回路

|         | B <sub>1</sub>  | B <sub>2</sub>  | B <sub>3</sub>  |
|---------|---|---|---|
| Pasting |  |  |  |
| Bridge  |  |  |  |
| Output  | $V = \frac{E K_s \varepsilon_1}{4}$   | $V = \frac{E K_s (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{2}$                             | $V = \frac{E K_s (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}{2}$                             |
| Remarks | • Gain of 1   | • Gain of 2<br>• Cancel Compressive Strain  | • Gain of 2<br>• Cancel Bending Strain  |

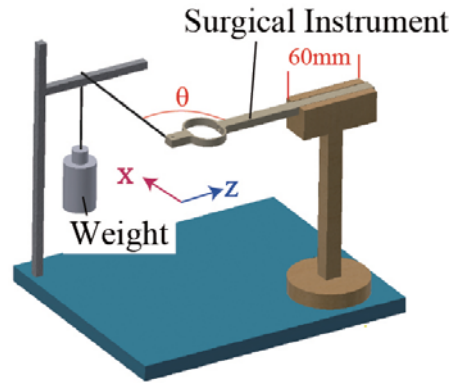


図1 検証装置の概要

れば、圧縮方向のひずみを除去し、曲げ方向のひずみのみを計測できる。一方、貼付方法はB<sub>2</sub>と同様でも、B<sub>3</sub>のようにブリッジ回路を組むと、曲げ方向のひずみを除去し、圧縮方向のひずみのみが計測可能となる。B<sub>2</sub>、B<sub>3</sub>の貼付方法およびブリッジ回路の特性を用いることで、本研究では、曲げと圧縮の2方向の力の分離および計測を行い、小型かつ自由な操作性を有する術具を実現する。ここで、上下面のひずみをε<sub>1</sub>およびε<sub>2</sub>と定義すると、理想的には曲げ力によるひずみε<sub>Fx</sub>と圧縮によるひずみε<sub>Fz</sub>は、それぞれ下記の式が成り立つと考えられる。

$$\varepsilon_{Fx} = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{2}, \quad \varepsilon_{Fz} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} \quad (1)$$

提案する2方向の力計測が可能な単一起歪部にひずみゲージを実装し、ひずみ量をもとに2方向の力計測を行う。ここでは、起歪部のひずみ量をデータロガーを用いて計測する。図1と図2に2方向の力計測に用いた実験装置の概要と外観を示す。図1において、重さ方向と術具の角度(θ)を変化させることで、曲げ方向のみ(ε<sub>Fx</sub>)、曲げ方向と圧縮方向の2軸方向、圧縮方向のみ(ε<sub>Fz</sub>)の各方向に力が加わった状態を再現する。ここでは、θ=90°が曲げ方向のみ、θ=0°が圧縮方向のみの力が加わった状態となる。また、実際の術具の把持位置を想定し、60 mmを固定部とする。術具に加わる力は重さ(wkg)と角度(θ)によって決定されるため、曲げ・圧縮方向の力は、重力加速度 gm/s<sup>2</sup>とする

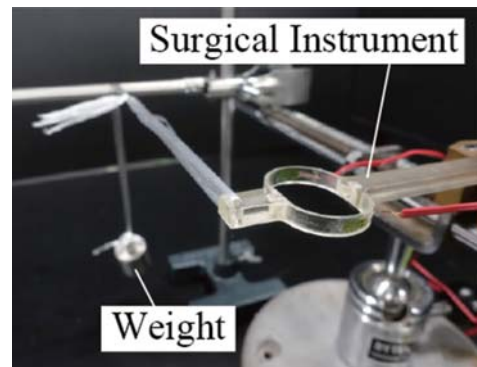


図2 検証装置の外観

と、下記のように定義される。

$$F_x = wg \cos(\theta), \quad F_z = wg \sin(\theta) \quad (2)$$

最終的に2つのひずみ量ε<sub>1</sub>およびε<sub>2</sub>から曲げひずみε<sub>Fx</sub>と圧縮ひずみ(ε<sub>Fz</sub>)が式(1)で導出される。ここでは、下記の3つの検証を行い、式(1)と式(2)の関係式を導出し、単一起歪部による2軸力センサの有用性を検証する。

1. 曲げ方向の負荷のみ(F<sub>x</sub>)、および圧縮方向の負荷のみ(F<sub>z</sub>)の1軸方向の力とひずみの関係式の同定
2. 2軸合力とひずみの関係式の検証
3. ひずみ量に基づく力の分離

## 【2方向力計測が可能な単一起歪部の設計と基礎検証】

### 2方向力計測が可能な単一起歪部の設計

2方向の力を計測するためには、2方向の感度をなるべく均一とした等方性・無指向性を有

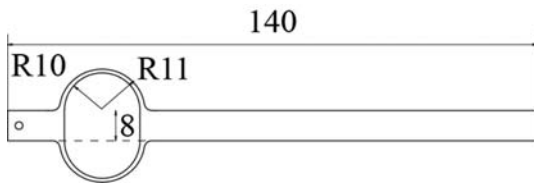


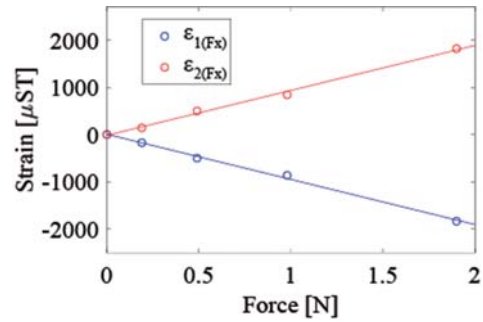
図3 起歪部一体型術具の設計

する単一起歪部構造の設計が必要である。そこで本研究では、アーチ状の起歪部を用いることで、より大きな圧縮ひずみを得ることのできる起歪部を開発した。図3に設計した術具を示す。しかし、設計した術具は、主金属材料による加工が困難である。そこで、術具製作における材料はアクリル材料を用いることとした。これはアクリル材料が、主金属材料よりも加工が容易であることに加え、剛性も主金属材料よりも低いため効率的な圧縮ひずみの取得が可能という2つの利点があるためである。一方で、アクリル材料は、力を加えた後の残留ひずみが大きくなるという欠点が考えられる。基礎検証では、残留ひずみにも着目した評価を行う。

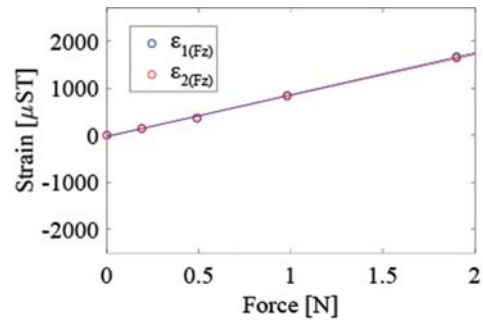
#### 単一起歪部による2方向力計測の基礎検証

##### (1) 1軸方向のみの力とひずみの関係式の同定

まず、曲げ方向の負荷のみ( $F_x$ )、および、圧縮方向の負荷のみ( $F_z$ )の力とひずみの関係式を導出する。各軸のみに0.2 kg, 0.1 kg, 0.05 kg, 0.02 kgのおもりをかけたときのひずみとの関係を図4に、その時の同定式を式(3), (4)に示す。図4(a)は曲げ方向のみの上下面のひずみ量、図4(b)は圧縮方向のみの上下面のひずみ量を表す。図より、0.2 kg 負荷時に、圧縮、曲げともに、 $1.6 \times 10^{-3}$ 以上のひずみが計測された。これは、計測アンプ等を考慮した設計要求を満たす。また、圧縮方向への負荷は上下面にて同方向へのひずみ、曲げ方向への負荷は上下面にて反対方向へのひずみが観測された。これにより、前章で示した測定原理を満たす挙動を示していることがわかる。また、圧縮ひずみ、曲げひずみともに同程度のオーダーのひずみ量が観測された。したがって、設計した単一起歪部が有効に機能していることがわかる。



(a) 曲げ方向のみ



(b) 圧縮方向のみ

図4 1軸方向の力とひずみの関係

$$\varepsilon_1(F_x) = 939.7F_x, \quad \varepsilon_2(F_x) = -950.1F_x \quad (3)$$

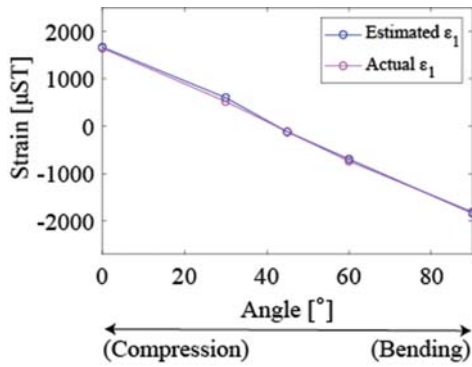
$$\varepsilon_1(F_z) = 865.5F_z, \quad \varepsilon_2(F_z) = 853.3F_z \quad (4)$$

##### (2) 2軸の合力とひずみの関係式の検証

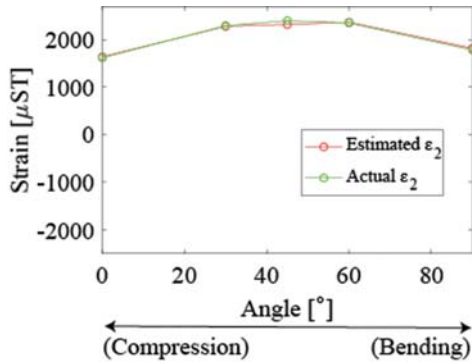
次に、2軸の合力とひずみの関係式を計測したひずみ量と式(3), (4)より導出される上下面の推定値を比較して、その妥当性を検証する。2軸合力を術具に加えるために、図1の角度 $\theta$ を $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ に変化させ、各角度ごとのひずみ量を計測する。また、重さは0.2 kgとした。横軸をおもりをかける角度、縦軸をひずみ量とした時の、実験値と推定値の比較結果を図5に示す。同図より、推定値と計測値がほぼ一致していることが確認できる。このことから、開発した術具が、他の外力の影響を受けずに、2軸の合力をひずみとして計測できていることがわかる。

##### (3) ひずみ量に基づく力の分離

最後に、ひずみの計測値から2軸の力を分離し、導出できるかを検証する。まず、(1)1軸方向のみの力とひずみの関係の実験結果をもとに、式(1)より、曲げひずみと圧縮ひずみを

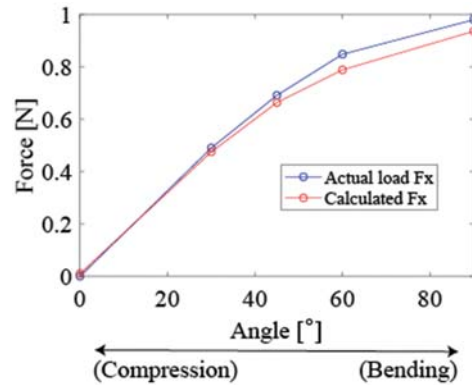


(a) 上面ひずみ

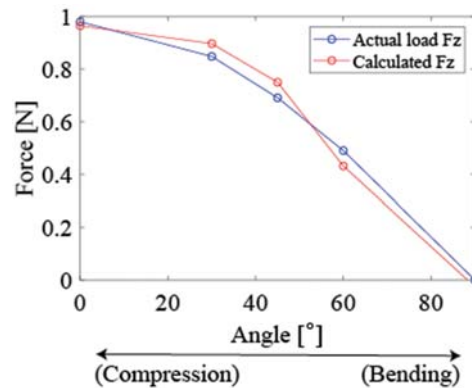


(b) 下面ひずみ

図5 2軸方向の力とひずみの関係



(a) 曲げ方向 ( $F_x$ )



(b) 圧縮方向 ( $F_z$ )

図6 ひずみ量に基づく力の分離検証

計算し、力との関係式を導出した。その結果は以下となる。

$$F_x = \frac{1}{937.0} \varepsilon_{Fx}, \quad F_z = \frac{1}{865.7} \varepsilon_{Fz} \quad (5)$$

そこで、合力とひずみ量からの力推定の実験をおもり 0.1 kg を用い実施する。式 (5) から算出する推定値と比較した結果を図 6 に示す。同図より、推定値と理論値を比較すると、曲げ方向、圧縮方向ともに最大で 0.06 N の誤差が観測された。要求分解能は、0.1 N であるため、設計要求を満たしている。以上より、本研究で設計した単一起歪部が有用であることが確認された。

#### 残留ひずみとバネ挿入による起歪部の改良

先に示したセンサでは、起歪部の材料特性のため、残留ひずみが観測された。そこで、残留ひずみ量を計算することで、それと拮抗するバネを起歪部内部に挿入する。図 7 に改良した術具の外観を示す。図 8 にバネ挿入前後の曲げ方

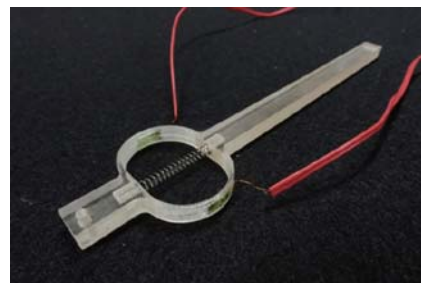
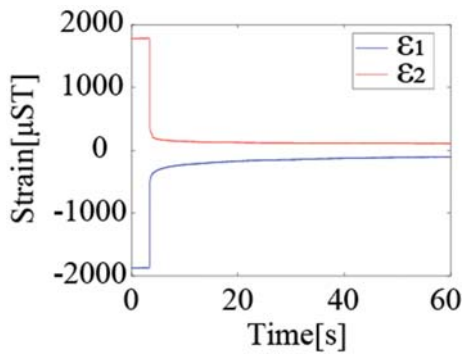


図7 センサー一体型術具の外観

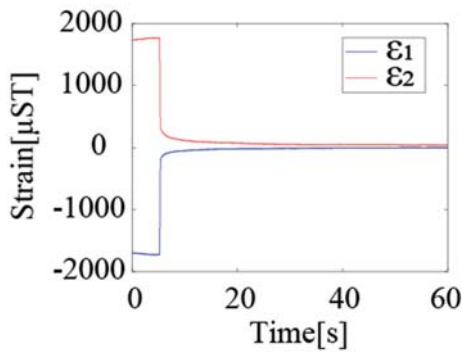
向に対する残留ひずみ量の結果を示す。改良前の残留ひずみ量が約 100  $\mu$ ST であったのに対し、バネを挿入することで、約 30  $\mu$ ST となった。これは力に換算すると約 0.03 N を示し、設計要求の計測解像度 0.1 N を満足する。

バネ挿入術具を用いて、改めて、ひずみ量に基づく力の分離検証実験を実施した。ひずみと力との関係式は改めて同定し実施した実験結果を図 9 に示す。同図より、ひずみ量からの計算値と実荷重を比較すると、曲げ方向では最大 0.06 N、圧縮方向では最大 0.05 N の誤差が観測され



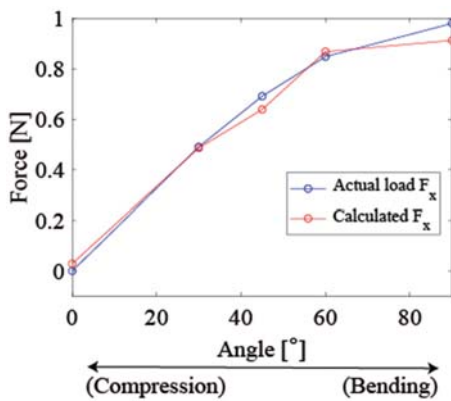


(a) バネなし

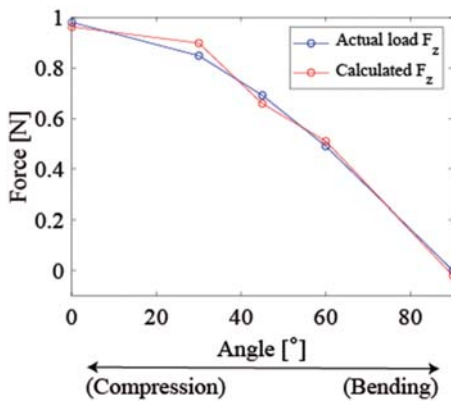


(b) バネあり

図8 曲げ方向のみの時の残留ひずみ



(a) 曲げ方向 ( $F_x$ )



(b) 圧縮方向 ( $F_z$ )

図9 ひずみ量に基づく力の分離検証 (バネあり)

た。精度として0.1 Nを設計要求としているため、検証実験においても設計要求を満たすことが示された。

【豆腐切断実験による性能評価】

上記の開発したセンサー体型術具を用いて、より現実に近い状態での性能を評価するために、図10に示すような豆腐の切断実験を実施した。木綿豆腐の硬さは脳実質の硬さに似ているとの脳外科医の知見をいただいたため、豆腐を切断対象とした。切断実験は一定速度で実施するために、産業用ロボットアーム PA10 に固定し実施した。術具先端に刃が装着されていること、それによる物質の切断は複雑であることから、このときの力とひずみの関係は上記の基礎検証の場合と異なる。そこで、まず、刃が装着されている状態での力とひずみの関係の同定を実施した。この際に、図10に示すように術具根元に市販の6軸力覚センサを搭載し、これを真値と見なし、同定することとした。同定には、最適化問題のアルゴリズムの一つである内点法を用いた。その後、再度様々な角度にて豆腐切断

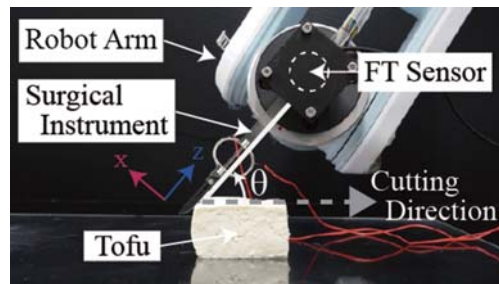


図10 豆腐の切断実験による検証

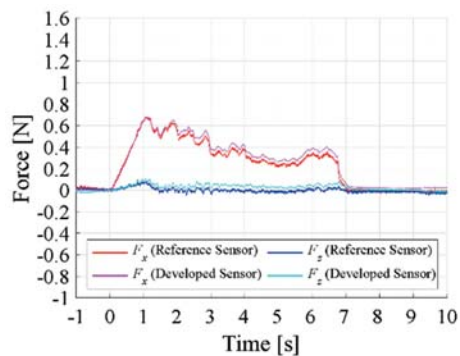


図11  $\theta=82.5^\circ$ の時の切断結果

実験を実施し、市販の力覚センサでの計測結果と開発したセンサー一体型術具で計測した結果を比較した。図 11 にその一例を示す。同図に示すように、真値と一致する結果を開発した術具でも得ることができた。

#### [今後の研究の方向, 課題]

本研究では、単一起歪部での 2 軸方向の切断力を計測できるセンサー一体型術具の開発を実施した。基礎検証の結果、開発した術具の有効性を示すことができた。一方で、現段階では、材料はアクリル材料を用いており、耐久性等に難がある。そこで、今後はこの基本コンセプトを元に、金属材料での開発を実施する。また、計測データ送受信の無線化を行うことで、より可

搬性を有するシステムとすることを旨とする。

#### [成果の発表, 論文等]

- [1] M. Suzuki, S. Abiko, T. Tsujita, and K. Abe: "Development of a Surgical Instrument with a Single Strain Area for Measuring Biaxial Cutting Forces," Proceedings of the 2020 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, July 2020. (To be appered)
- [2] 鈴木雅也, 安孫子聡子, 辻田哲平, 阿部幸勇: "単一起歪部で 2 軸の値から計測可能なセンサー一体型術具の開発", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2020 講演予稿集, 2P1-M14, 2020.
- [3] 鈴木雅也, 安孫子聡子, 辻田哲平: "圧縮ひずみ拡大機構による 2 軸力計測可能な力センサー一体型術具の開発", 第 19 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講演論文集, pp.41-45, 香川, 2019.