

# 力センサを印刷可能な 3D プリンタのための 光ファイバーセンサ射出ノズルの開発

Development of 3D printer nozzle capable of extruding optical fiber sensor  
for 3D-printed force sensor

研究代表者 金沢大学自然科学研究科 助教 西村齊寛

This study aims to develop a 3D printer system capable of printing a force sensor. In the proposed procedure for printing the force sensor, a dual nozzle 3D printer, which possesses two extruder nozzles, and an optical-fiber-based strain gauge are used. One of the nozzles is for printing a sensor body with the thermoplastic material, same as conventional FDM-method-based 3D printer technologies. Another nozzle deposits the optical-fiber-based strain gauge on the sensor body printed by the FDM nozzle. As the first step for the final goal, the nozzle for fixing the strain gauge was developed in this project. To deposit the strain gauge on the sensor body made of the thermoplastic material, the fusing-based strategy is proposed. The strain gauge is fixed by extruding the strain gauge while partially melting the sensor body using the heated nozzle. The feasibility of the proposed depositing method is validated and the condition of the control parameters for the method is investigated experimentally. In addition, the system for fixing the strain measurement point in the optical fiber sensor to the target position is developed while considering the uncertainties due to manufacturing errors. The 1-axis force sensor is fabricated using the developed technology and evaluated.

## 要旨

本研究は力センサを印刷可能な 3D プリンタの実現を最終目標とする。デュアルノズル 3D プリンタと光ファイバ式ひずみゲージを用いた印刷手法を提案する。一方のノズルは、従来の FDM 方式造形が可能であり、熱可塑性材料によりセンサボディを 3D 造形する。そして、もう一方のノズルはセンサボディに光ファイバ式ひずみゲージを積層するためのものである。加熱したノズルをセンサボディに押し当て部分的にセンサボディを溶かしながらひずみゲージを射出することでセンサボディにひずみゲージを溶着する方法を提案する。今回は最終目標のための最初のステップとして、光ファイバ式ひずみゲージを溶着可能な射出ノズルの開発を行った。

### 1. まえがき

本研究は力センサを 3D 印刷のみで製造する技術の開発を目的としており、その特徴は以下の通りである。

- 人手による作業無しで力センサを自動製造する。
- 光ファイバ式ひずみゲージを用いることで光ファイバ 1 本で多方向の力・モーメントが測定可能である。

- 光学的測定原理を用いることで優れた耐環境性を有する。

近年、3D プリンタ技術の発展により様々なモノが 3D 印刷により実現されてきている<sup>(1)(2)</sup>。従来、部品の製造における機械加工では、母材を削って目的の形状を得る除去加工が主流である。一方で 3D プリンタは材料を必要な分だけ使用して造形する「付加製造」という新たな製造手法を確立している。材料ロスが少なく資源の効率的な利用を実現することから、製造の低コスト化だけでなく、SDGs 目標にもマッチした新たな製造方法である。そこで本研究では 3D プリンタで実現可能なモノの可能性を広げるべく、力センサを 3D プリンタのみで完全自動製造する技術の開発を目標とする。力センサはセンサボディに加わる力の大きさを測定することが可能なセンサデバイスであり、ロボティクス分野を中心に広く使われている。ハプティクス技術を取り入れ、知能化が進むロボットにとって必要不可欠な構成要素となりつつある。ただし、力センサはある程度のサイズ・形状のバリエーションが展開されているもののカスタマイズ性が乏しく、ユーザは既存の力センサをベースに周辺部品の設計を行うことが求められ、設計の自由度が制限されている。そこで設計の自由度が高い 3D プリンタを用いて力センサを製造することが

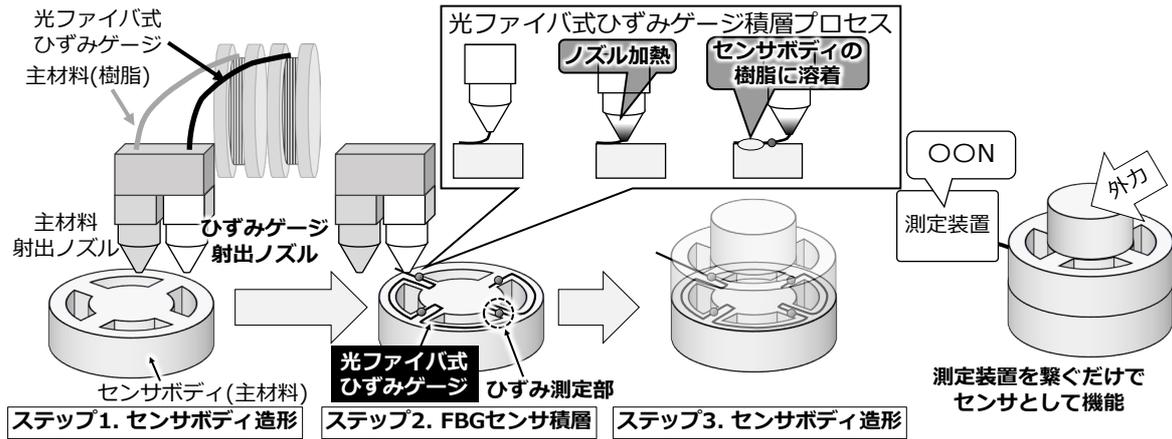


図1 提案する力センサの3D印刷プロセス

できればユーザが各自の実装先に適したサイズ・形状のものを用意することができ、力センサのさらなる応用先の拡張が可能となると期待される。

上記の理由から力センサの製造を目的とした研究は数多く存在する。3D プリントによる力・圧力・触覚・ひずみセンサにおける力測定原理として、圧電効果<sup>(3)(4)</sup>、電気抵抗変化<sup>(5)(6)</sup>、静電容量変化<sup>(7)(8)</sup>を用いたものが多い。これらは電気的特性を用いた手法であるが、1方向の力を測定するために2本以上(信号線、GND 線など)のリード線がセンサデバイスに接続される必要がある。2方向以上の力の測定を想定している研究も少ないが、測定方向を増やすにつれてリード線の数も増えていくのが電気的測定原理を用いた力センサの課題である。本研究のように光ファイバ式ひずみゲージを使用した研究も存在するが、造形中に手で光ファイバを造形物内に内包させていることから、複雑な経路でのファイバ設置が難しく、手作業による誤差も想定される。よって、本研究のように3Dプリンタのみで光学的測定原理を使った力センサを実現する技術は存在しない。

## 2. 提案印刷プロセス

本研究において実現を目指す力センサの3D印刷プロセスを図1に示す。本研究では、2種類の材料を射出可能なデュアルノズル式3Dプリンタを用いて、センサボディ・カバーの3D造形とひずみゲージの設置を3Dプリンタのみで達成する方法を提案する。ベースとなる3D印刷方式にはFDM方式を執る。本提案でカギとなるのが光ファイバ式ひずみゲージ

(FBGセンサ)<sup>(9)</sup>である。光ファイバ式ひずみゲージは光ファイバ内に設けた回折格子での光の反射を利用した光学的なひずみゲージである。図2に示すように光ファイバ内に回折格子を設けたシンプルな構造であり、外観は一般的な光ファイバと同じである。測定デバイスであるインテロゲータは発光部と受光部を備えており、光ファイバ内に近赤外光を照射する。光ファイバ内の回折格子は所定の波長 $\lambda_B$ の光を反射するように調整されており、その反射波長は回折格子のスリット間隔 $\Lambda$ により決まる。それらの関係は次の式で表される。

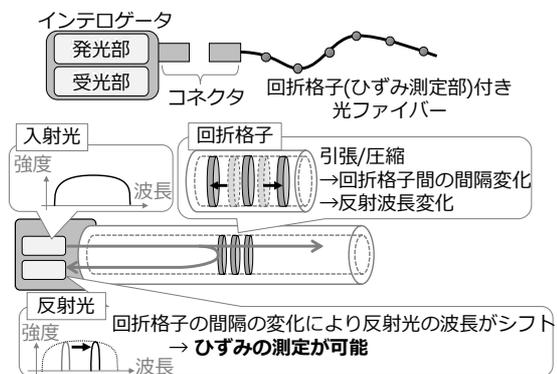
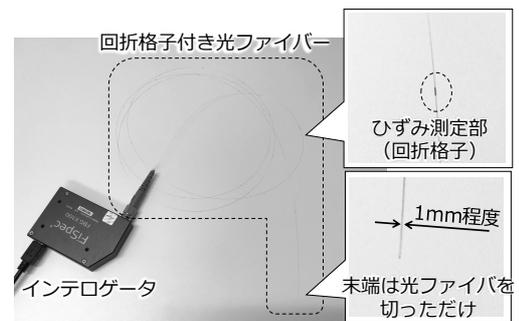


図2 光ファイバ式ひずみゲージ

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad (1)$$

ここで $n$ は光ファイバコアの屈折率である. 光ファイバに加わる軸力により $\Lambda$ が $\Delta\Lambda$ 変化したとすると, ブラッグ波長も $\Delta\lambda$ だけシフトする.

$$\Delta\lambda = 2n\Delta\Lambda \quad (2)$$

よってそのシフト量から回折格子部(ひずみ測定点)でのひずみ量を計測するのが光ファイバ式ひずみゲージの測定原理である. この光ファイバ式ひずみゲージを用いた力センサの提案 3D 印刷プロセスは以下のステップである.

1. 主材料射出ノズルから主材料(今回は樹脂)を射出・積層することでセンサボディとカバーをFDM方式により造形する. 本ステップでは起歪部まで造形する.
2. もう一方の射出ノズル(ひずみゲージ射出ノズル)から光ファイバ式ひずみゲージを射出し, センサボディ上(起歪部)に積層する. この際, 高温にした射出ノズルを主材料に押し当て, 主材料を部分的に溶かしながらひずみゲージを主材料に接着(溶着)する. 積層したひずみゲージはリード線となる長さを残して切断する.
3. 主材料射出ノズルにより, 残りのセンサボディ・カバーを造形

印刷完了後, 光ファイバの末端にインテロゲータ用コネクタを取り付け, 製造を実現する. 本稿では, ステップ2の光ファイバ式ひずみゲージの溶着に着目し, それが可能な光ファイバ式ひずみゲージ射出ノズルの開発を行った.

### 3. 光ファイバ式ひずみゲージ射出ノズル

#### 3.1 構造

図3に開発したひずみゲージ射出ノズル装置と全体システムを示す. 開発したひずみゲージ射出ノズルの特長は以下である.

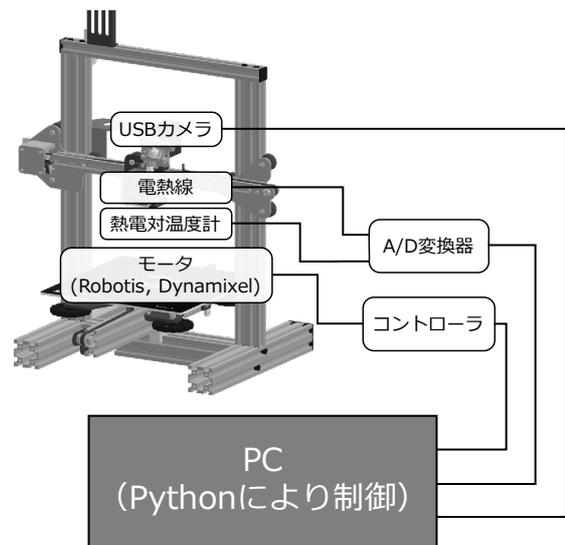
- ノズル部に電熱線による加熱装置および熱電対式温度計を搭載
- 光ファイバの送り出しは樹脂をシリコンゴムでコーティングしたローラを使用
- 引き込まれる光ファイバを撮影するカメラを搭載

電熱線と温度計によりノズル部の温度を制御するこ

とができ, センサボディを溶融するための温度を調整可能である. また, 一般的なFDM式3Dプリンタでは高硬度かつ表面に凹凸のついた金属製ローラを用いてフィラメントを送り出すが, 提案する射出ノズ



(a) ひずみゲージ射出ノズル装置



(b) 全体システム

図3 開発した光ファイバ式ひずみゲージ射出ノズル



図4 取得したカメラ画像

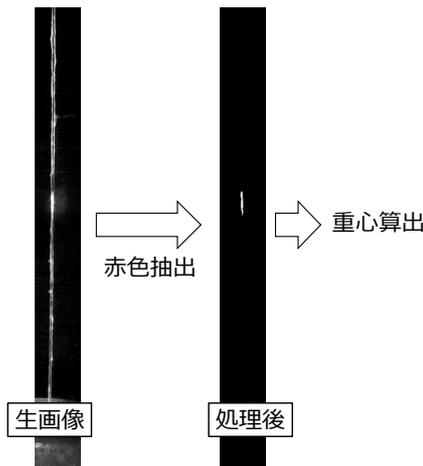


図5 画像処理：ひずみ計測点の抽出

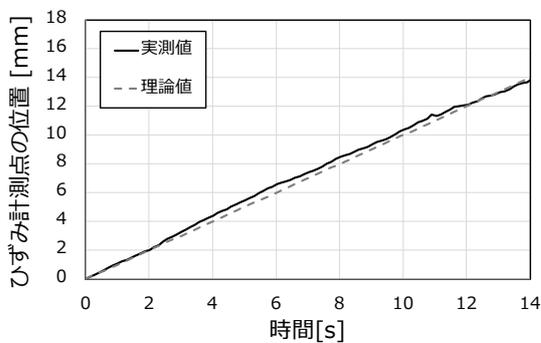


図6 ひずみ計測点の位置の推移

ルでは光ファイバを傷つけないために樹脂とシリコーンゴムを用いた柔軟なローラを実装している。射出ノズルユニットの上部に取り付けられたカメラは光ファイバ内のひずみ計測点の位置計測用である。光ファイバ内のひずみ計測点は製造誤差があり、センサボディ上の任意の位置にひずみ計測点を配置するのは、送り出されるひずみ計測点の位置計測が必要である。そこでカメラを用いてひずみ計測点の位置を計測可能なシステムを構築した。

### 3.2 ひずみ計測点位置測定システム

前述の通り、光ファイバ式ひずみゲージは近赤外光によりひずみの測定を行うが、可視光を入射すると回折格子部（ひずみ計測点）で乱反射が起き、部分的に光するという特徴を持つ。本システムではその特徴を用いて画像処理によりひずみ計測点の検出を行った。図4は赤色光を入射しながら、光ファイバを押し出したときの様子である。ひずみ計測点は赤く光ることから赤色部の抽出を行った。得られた画像は8ビットRGB画像であるため、HSV空間への変換後、以下の条件を満たすピクセルを赤色領域として抽出した。

$$Red\ area = \begin{cases} Hue > 230 \\ Saturation > 200 \\ Value > 200 \end{cases} \quad (3)$$

そして、抽出した赤色ピクセル領域の重心をひずみ計測点の位置とした。画像の撮影開始時点でのひずみ計測点の位置を初期位置とし、光ファイバを1mm/sで送り出したときのひずみ計測点の位置の推移を図6に示す。図6には理論値も示す。i番目の時間ステップにおけるひずみ計測点の実測位置と理論値をそれぞれ $x_i$ 、 $\bar{x}_i$ とすると理論値と実測値との差を表す平均二乗誤差RMSEは以下の式となる。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i (x_i - \bar{x}_i)^2} \quad (4)$$

ここでNは総時間ステップ数である。式(4)により算出したRMSEは0.28mmであった。これは力センサのスケールに対して十分に小さいと考える。

### 3.3 溶着条件の検証

本節では、開発したひずみゲージ射出ノズルを用いてひずみゲージを溶着する際の調整パラメータの調査を行う。図7に本研究で対象とする溶着用調整パラメータを示す。ノズル移動速度は溶着操作中に

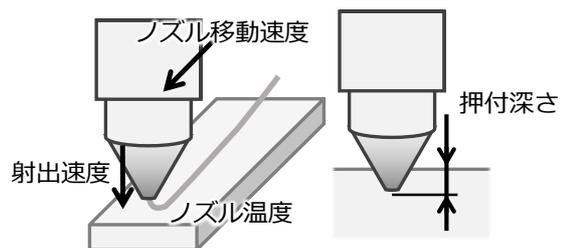


図7 調整パラメータ

表1 溶着条件調査

条件No.	溶着条件				結果
	ノズル移動速度 [mm/s]	ノズル温度 [°C]	ひずみゲージ射出速度 [mm/s]	押付深さ [mm]	
1	1	200	1	0.5	成功
2	<b>5</b>	200	5	0.5	樹脂が溶けずに失敗
3	5	<b>220</b>	5	0.5	樹脂が溶けずに失敗
4	1	200	1	<b>0.2</b>	接着強度不十分
5	1	<b>190</b>	1	0.5	成功

**下線大文字**: 各条件内で特徴的な設定値

ノズルを水平方向に移動させる際の実験速度である。ひずみゲージ射出速度は溶着操作中にひずみゲージを押し出す速度である。押付深さはノズル先端とセンサボディ上面が接触する位置をゼロ点とし、そこからノズルをセンサボディに押し付ける方向に移動させたときの距離（深さ）である。ノズルはセンサボディを溶融させるために加熱する必要があるため、PLA フィラメントの適正溶融温度である 190°C から 220°C の範囲でノズル温度を変えて検証を行った。センサボディを想定した PLA 製の板を用意し、それに対して調整パラメータを変えながら溶着を行った。本検証では光ファイバの積層経路は直線とした。なお、今回はノズルの移動速度とひずみゲージの射出速度は同じとした。パラメータを変えた際の結果を表 1 に示す。事前実験から溶着に成功した条件 1 からパラメータを変化させていった。条件 2 ではノズルの移動速度のみ条件 1 から増加させた。結果としては、ノズルの移動に対して PLA 板が十分に溶融しないことでノズルから PLA 板に水平方向の大きな負荷が加わり、PLA 板が溶着装置のベースプレートから剥離し失敗した。よって、条件 2 からノズル温度を増加させることでノズル移動速度が速い条件であっても樹脂を溶融できると推察し条件 3 を行った。しかし、結果は条件 2 と同じであり、溶着に失敗した。条件 3 におけるノズル温度は PLA フィラメント適正值内の最大値であったことからノズル移動速度の上限も 1mm/s である。続いて、条件 1 に対して押込み深さを減少させた場合についての検証を行った。これは押込み深さを浅くすることができればノズルに加わる水平方向の負荷を低減でき、故障リス

クや PLA 板（センサボディ）の剥離リスクを減らすことができると推察されるためである。よって条件 4 では押込み深さを 0.2 mm に減らし実験を行った。しかし、本条件では光ファイバの接着強度が低い結果となった。接着強度が低いことで力センサ使用中にひずみゲージがずれていく可能性が考えられることから十分な接着強度を得るにはある程度の押込み深さが必要であることがわかった。そして最後にノズル温度を PLA フィラメントの適正最下限値とした場合の実験を行った。本条件であっても PLA を十分に溶融することができ溶着に成功した。よってセンサボディを溶融するのにノズル移動速度が十分に低く設定されていれば、ノズル温度は PLA フィラメントの適正值以内であれば影響がないことがわかった。

#### 4. 1 軸力センサへの適用

本章では開発したひずみゲージ射出ノズルを用いて 1 軸方向の力を測定可能な 1 軸力センサの製作を行った。力センサのモデルは図 8 の通りである。荷重印加部を支持する起歪部は 2 本とし、そこに 1 本

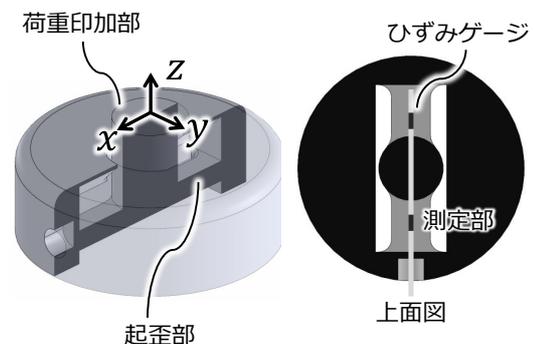


図8 1軸力センサモデル

のひずみゲージを積層させるひずみ測定部は起歪部2本上にそれぞれ1か所ずつ配置することとした。それぞれのひずみ測定部での測定歪を $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ とすると荷重印加部に加わるz方向の力の大きさ $f$ は次の式で得られる。

$$f = c_1\varepsilon_1 + c_2\varepsilon_2 + c_3 \quad (5)$$

なお、原理上、1軸方向の力を測定する場合、ひずみ測定点は1箇所あれば推定可能であるが信頼性向上のために2点でのひずみから算出するものとした。加えて、2点のひずみを測定する本構造であればy軸周りのモーメントも計測可能であるが今回は対象外とした。

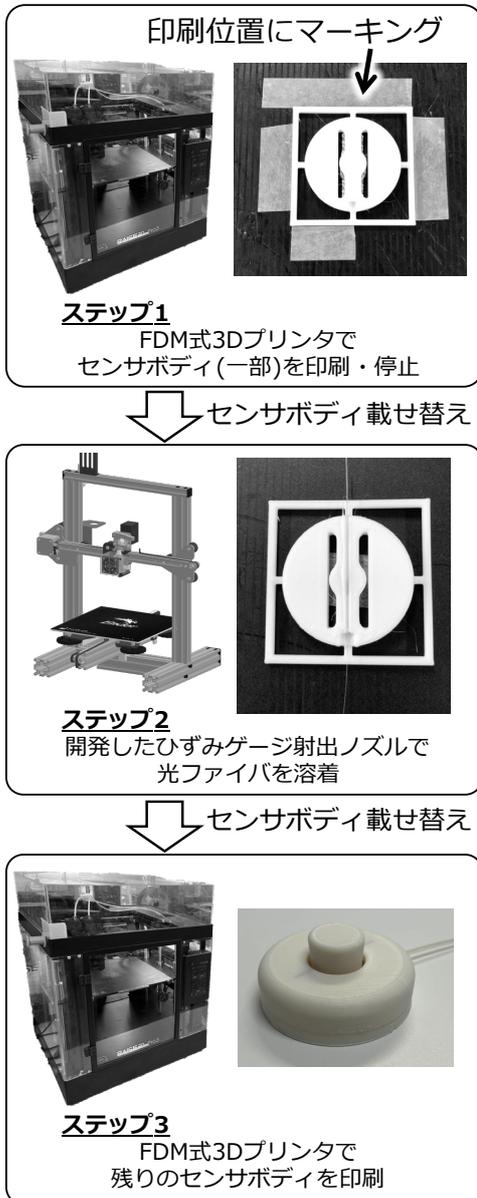


図9 1軸力センサ製作プロセス

今回開発したひずみゲージ溶着装置はセンサボディを造形する機能を備えていないことから、既存のFDM式3Dプリンタを併用して図1記載の提案プロセスに準じた1軸力センサの製作を行った。そのプロセスを図9に示す。まず既存のFDM式3Dプリンタ(Raise 3D pro3)を用いてセンサボディをひずみゲージ積層レイヤーまで印刷し、造形を一時停止する。その後、図9のように造形プレートにマーキングをする。これはステップ3においてセンサボディの印刷を再開するためである。ステップ1の後、開発したひずみゲージ射出ノズル装置にセンサボディを載せ替え、ひずみゲージの溶着を行う。このとき溶着条件は表1の条件1とした。溶着後の様子は図9の通りである。溶着完了後、センサボディをマーカーを基準にFDM式3Dプリンタに載せ替え、センサボディの印刷を再開する。今回は既存3Dプリンタを併用しているが、行った操作はセンサボディの部分印刷、ひずみゲージの積層、センサボディの印刷完了であり、図1の提案プロセスに即していることから提案手法の実現可能性の検証としては十分である。

そして、製作した1軸力センサの精度評価を行った。本検証ではフォースゲージを用いて印加荷重とひずみゲージ測定値の関係式を導出し、その関係式の近似精度から力センサの精度を評価する。精度検証のための実験セッティングを図10に示す。フォースゲージで1軸力センサの荷重印加部に加えた際のフォースゲージによる力の測定値および1軸力センサ内のひずみゲージにひずみ量を計測する。これにより印加した力とそれに対応したひずみ量のデータセット $S$ を取得する。

$$S = \{s^{(k)} = [f^{(k)}, \varepsilon_1^{(k)}, \varepsilon_2^{(k)}] \mid k \in \{1, 2, \dots, K\}\} \quad (6)$$

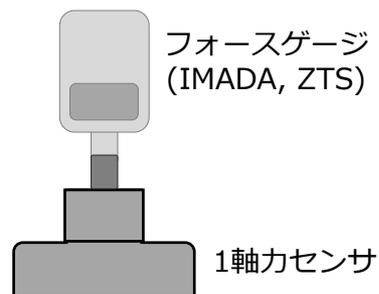


図10 1軸力センサの精度評価用実験セッティング

$k$ は $k$ 番目のデータであることを指し、 $K$ はデータ総数である。よって式(5)より

$$\begin{aligned} f^{(1)} &= c_1 \varepsilon_1^{(1)} + c_2 \varepsilon_2^{(1)} + c_3 \\ f^{(2)} &= c_1 \varepsilon_1^{(2)} + c_2 \varepsilon_2^{(2)} + c_3 \\ &\vdots \\ f^{(K)} &= c_1 \varepsilon_1^{(K)} + c_2 \varepsilon_2^{(K)} + c_3 \end{aligned} \quad (7)$$

であるため、

$$\begin{aligned} \mathbf{f} &= [f^{(1)}, f^{(2)}, \dots, f^{(K)}]^T \\ \mathbf{E} &= \begin{bmatrix} \varepsilon_1^{(1)} & \varepsilon_2^{(1)} & 1 \\ \varepsilon_1^{(2)} & \varepsilon_2^{(2)} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \varepsilon_1^{(K)} & \varepsilon_2^{(K)} & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

とすると式(7)は

$$\mathbf{f} = \mathbf{E} \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{bmatrix} \quad (9)$$

となる。式(5)からわかるように $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$ を同定できれば、ひずみ量から力の大きさを算出することが可能であり、各係数は以下の式で得られる。

$$\begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{bmatrix} = \mathbf{E}^+ \mathbf{f} \quad (10)$$

$\mathbf{E}^+$ は $\mathbf{E}$ の疑似逆行列であり、以下の式で得られる。

$$\mathbf{E}^+ = (\mathbf{E}^T \mathbf{E})^{-1} \mathbf{E}^T \quad (11)$$

実測で得られた印加荷重 $f_{ex}$ および、ひずみ量 $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ とそれらから算出された近似直線を図11に示す。近似直線の決定係数は0.988であり、高い線形性を得

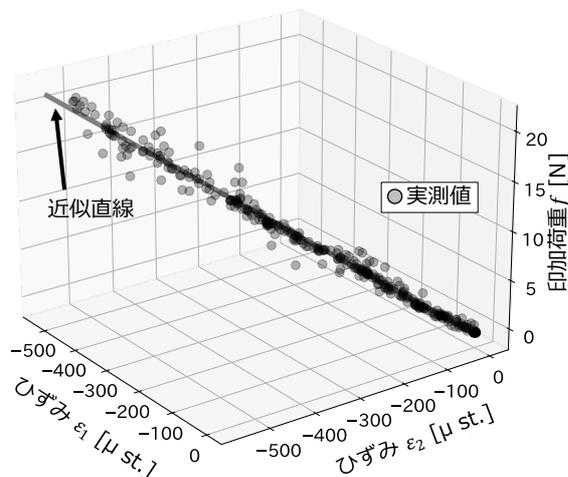


図11 1軸力センサの精度評価結果

られていることがわかった。また近似値 $f$ と実測値 $f_{ex}$ の平均二乗誤差は

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N_{ex}} \sum_i (f_i - f_{ex_i})^2} \quad (12)$$

で得られる。 $N_{ex}$ は総データ数である。今回の実験では平均二乗誤差は0.6Nであった。市販の力センサと比較すると誤差としては大きい結果となったが、本提案手法の実現可能性は十分に示すことができていると考える。なお本実験では動的にフォースゲージを力センサに押し当てる方法によりデータを取得したため、静的に荷重を印加可能な実験セッティングとすることでより精度の高い結果が得られると推察される。

## 5. まとめ

本研究では光ファイバ式ひずみゲージを用いて3Dプリンタのみで力センサを製造する技術の構築を行った。その第1ステップとして光ファイバ式ひずみゲージを射出し、センサボディ上に溶着可能な射出ノズルシステムを開発した。開発した溶着装置は光ファイバ射出システム、ひずみ測定点位置計測システム、加熱制御システムを有している。ひずみ測定点の位置計測の検証では0.28mmの精度で位置計測が可能であった。また、溶着用パラメータの調査では、ノズルの移動速度、ノズル温度などの溶着結果への寄与を調査した。そして、開発したひずみゲージ射出システムを用いて1軸力センサの3D製造を行った。提案手法により力センサを製造できる実現可能性を確認した。

## 6. 謝辞

本研究の遂行にあたり支援いただいた公益財団法人マツダ財団の関係者の皆様に深く感謝申し上げます。

## 口頭発表、受賞等

### 口頭発表

- [1] 西村斉寛, 渡辺哲陽, “力センサを「一気に」印刷する3Dプリンタの開発 第1報: 光ファイバ式ひずみゲージ内包技術の構築”, ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2023
- [2] 西村斉寛, 渡辺哲陽, “力センサを「一気に」印刷する3D

プリンタの開発 第2報：光ファイバ式ひずみゲージの複雑  
経路積層の検証”，第24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

#### 受賞

- [1] 第24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 優秀講演賞
- [2] 加えて国内表彰について1件内定済みである

#### 特許

- [1] 特願2023-097944, 3次元印刷方法、カセンサの製造方法及  
び3次元印刷装置

#### 参考文献

- (1) Paolini, A., Kollmannsberger, S. & Rank, E. Additive manufacturing in construction: A review on processes, applications, and digital planning methods. *Addit. Manuf.* **30**, 100894 (2019).
- (2) Bandyopadhyay, A. & Traxel, K. D. Invited review article: Metal-additive manufacturing-Modeling strategies for application-optimized designs. *Addit. Manuf.* **22**, 758-774 (2018).
- (3) Kim, K. *et al.* 3D printing of multiaxial force sensors using carbon nanotube (CNT)/thermoplastic polyurethane (TPU) filaments. *Sensors Actuators, A Phys.* **263**, 493-500 (2017).
- (4) WASSERFALL, F., HENDRICH, N., FIEDLER, F. & ZHANG, J. 3D-PRINTED LOW-COST MODULAR FORCE SENSORS. in *Human-Centric Robotics* 485-492 (WORLD SCIENTIFIC, 2017). doi:10.1142/9789813231047\_0059.
- (5) Xiang, D. *et al.* Synergistic effects of hybrid conductive nanofillers on the performance of 3D printed highly elastic strain sensors. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* **129**, 105730 (2020).
- (6) Yong-Lae Park, Bor-Rong Chen & Wood, R. J. Design and Fabrication of Soft Artificial Skin Using Embedded Microchannels and Liquid Conductors. *IEEE Sens. J.* **12**, 2711-2718 (2012).
- (7) Zega, V. *et al.* The First 3-D-Printed z-Axis Accelerometers With Differential Capacitive Sensing. *IEEE Sens. J.* **18**, 53-60 (2018).
- (8) Zega, V. *et al.* The First 3D-Printed and Wet-Metallized Three-Axis Accelerometer With Differential Capacitive Sensing. *IEEE Sens. J.* **19**, 9131-9138 (2019).
- (9) Campanella, C. E., Cuccovillo, A., Campanella, C., Yurt, A. & Passaro, V. M. N. Fibre Bragg Grating based strain sensors: Review of technology and applications. *Sensors (Switzerland)* **18**, (2018).