

指先装着型 6 軸力センサの研究

Study of fingertip-mounted type 6-axis force sensor

精密工学専攻 22 号 古賀裕也
Yuya Koga

1. 研究の背景と目的

現在、製造現場では作業者の手を使った様々な精密作業が行われている。このような製造現場では、手わざの技能は熟練者の動きを観察することで経験による違いを推定し、継承されている⁽¹⁾。しかし、このような方法だけでは手わざの技能の継承には不十分であり、作業の際に加わる力を計測し、定量化することが求められている。

筋腱の張力変化から指先力を推定するセンサの開発が行われた⁽²⁾。しかし、このセンサでは垂直方向の力の計測しか行われていない。ピンセットで物体の把持を行う場合、ピンセットや把持物体に加わる重力を支える力がせん断力として加わる。また、ピンセットが回転しないように支え、ピンセットの姿勢を変化させるとき、指先にはトルクが加わる。そのため、指先に生じる 6 軸方向の力とトルクを計測できるセンサが必要となる。

そこで、本研究では指先に装着可能な 6 軸力センサデバイスを試作する。試作したデバイスを装着してピンセットによる精密部品の組み立て作業を行う。そして指先に生じる 6 軸力を計測することで、作業者がピンセットをどのように使っているかを定量的に示すことを目的とする。

2. 計測原理と試作

2.1 ピンセットでの作業時に加わる 6 軸力

本研究ではピンセットによる精密部品の組み立て作業を計測対象とする。

ピンセットでの作業時に加わる力/トルクのモデルを Fig. 1 に示す。ピンセットを用いる際、部品を把持するために指先には Z 軸方向の力が生じる。また、ピンセットや部品には重力が加わっており、それらを落とさないように支えるために指先には X 軸、Y 軸方向のせん断力が生じる。また、部品に生じた重力によってピンセットが回転しないように支えるための Z 軸周りのトルクが指先に発生する。ピンセットの姿勢を変化させた場合、X 軸、Y 軸周りのトルクが発生する。以上のことから、ピンセットによる精密部品の組み立て作業を定量化するには指先に生じる 6 軸力を計測することが求められる。

2.2 試作する 6 軸力センサと計測原理

本研究で試作する 6 軸力センサの概略図を Fig. 2 に示す。6 軸力センサは 2 つの垂直力ひずみゲージと 2 つのせん断力ひずみゲージによって構成される。それぞれのひずみゲージは 3D プリンタで作成した治具に貼り付けられ、PDMS (シリコーンゴム) で治具の表面を覆っている。また、垂直力ひずみゲージには 2 つの垂直力センサ素子、せん断力ひずみゲージには 2 つのせん断力センサ素子が付けられている。せん断力ひずみゲージはセンサ素子の部分で折り上げ、直立させている。

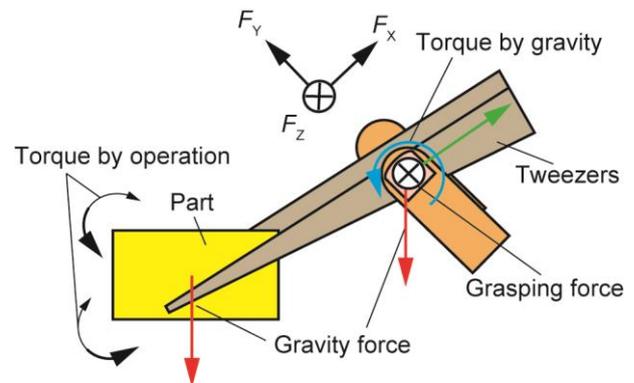


Fig. 1 Force and torque during grasping tweezers.

まず、 F_x 、 F_y 、 T_z の計測原理を Fig. 3 に示す。X 軸方向の力 F_x 、Y 軸方向の力 F_y 、Z 軸まわりのトルク T_z を同時に加えたとき、せん断力ひずみゲージの 4 つのセンサ素子には Fig. 3 に示すような方向に力が加わる。この時 Fig. 3 の(a)のセンサ素子では F_x の方向と T_z により加わる力の方向が同じ向きであり、(b)のセンサ素子では F_x の方向と T_z により加わる力の方向は反対である。したがって、(a)と(b)のセンサ素子から得られる出力から F_x と T_z を判別することが可能である。同様に(c)と(d)のセンサ素子の出力から F_y と T_z の判別が可能である。

次に、 F_z 、 T_x 、 T_y の計測原理を Fig. 4 に示す。Z 軸方向の力 F_z 、X 軸まわりのトルク T_x 、Y 軸まわりのトルク T_y を同時に加えたとき、垂直力ひずみゲージの 4 つのセンサ素子には Fig. 4 のような力が生じる。この時(e)のセンサ素子では F_z の方向と T_x により加わる力の方向が反対の向きであり、(f)のセンサ素子では F_z の方向が T_x により生じる力の方向が同じ方向であるため、 F_z と T_x の判別が可能である。同様に、(g)と(h)のセンサ素子の出力から F_z と T_y の判別が可能である。

以上によって、それぞれのセンサ素子の電圧変化から 6 軸力の判別が可能となる。

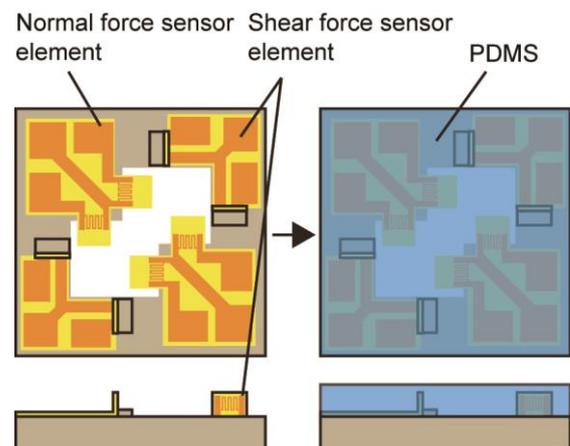


Fig. 2 Schematic view 6-axis force sensor.

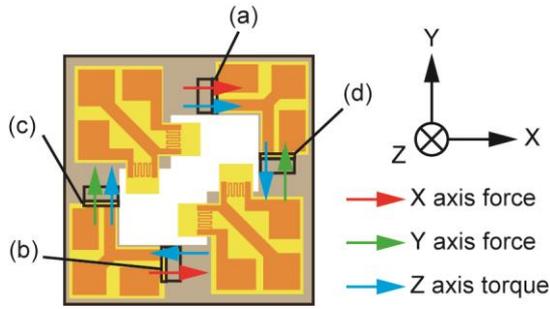


Fig. 3 Measurement principle of F_x and F_y , T_z .

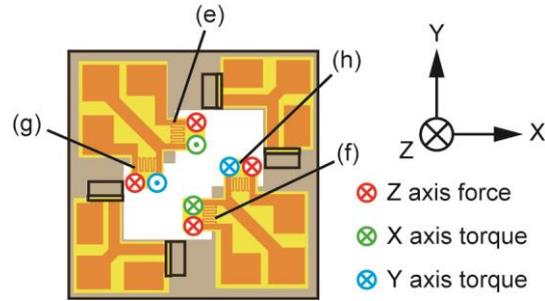


Fig. 4 Measurement principle of T_x and T_y , F_z .

2.3 ひずみゲージの試作

本研究では、銅層とポリイミド層の2層で構成されるフレキシブル基板を使用して、ひずみゲージを試作した。試作工程を Fig. 5 に示す。まず、2層フレキシブル基板に露光、現像、エッチングを行うことで、ポリイミド上に銅の配線を形成した。そこに薄い銅を蒸着し、再び露光、現像、エッチングを行い金属抵抗体をポリイミド上に形成することで、力センサ素子を試作した。また、ひずみゲージは1つの電圧入力部から、2つのセンサ素子に電圧が流れ、2つの電圧出力部から電圧変化を得るような設計とした。

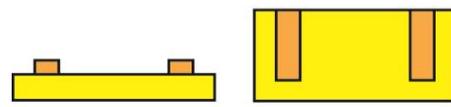
2.4 指先装着型6軸力センサデバイスの試作

6軸力センサの試作プロセスを Fig. 6 に示す。まず、3Dプリンタを用いて、6軸力センサの土台となる治具を作成した。次に、フレキシブルプリント基板をエッチングして銅の配線を作成し、接着剤を用いて治具に貼り付けた。次に、試作した垂直力ひずみゲージ、せん断力ひずみゲージをフレキシブルプリント基板上に接着剤で貼り付けた。この際、垂直力センサ素子は治具に設けた穴の縁部分に乗るように配置し、せん断力センサ素子は突起に沿わせて折り上げた。次にフレキシブルプリント基板の銅の配線とひずみゲージを導電性ペーストで通電させた。その後、治具表面をPDMSで覆い、はんだを用いてフレキシブルプリント基板に導線を接続した。

試作した6軸力センサを3Dプリンタで製作した指先装着型デバイスと組み合わせて、指先装着型6軸力センサとした。指先装着型6軸力センサデバイスの概略図と、実際に試作したデバイスの写真を Fig. 7 に示す。指先装着型デバイスはセンサと、部品A、B、Cで構成される。まずセンサ側面に設けた突起にAとBの部品をはめ合わせる。次にAとBが取り付けられた6軸力センサを、Cの部品とねじを用いて組み立てることで指先に装着できるような構造とした。

ひずみゲージから得られる電圧変化は、ホイートストンブリッジ回路と差動増幅回路を組み合わせて出力を増幅し、ローパスフィルタによってノイズを除去して計測された。

1. Use Flexible substrate (Cu/Polyimide)
Side View



3. Make strain gage by deposition

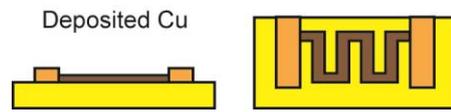


Fig. 5 Fabrication process of the force sensor element.

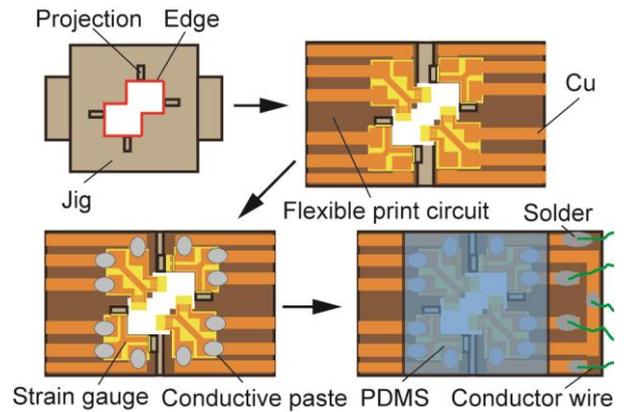


Fig. 6 Fabrication process of 6-axis force sensor.

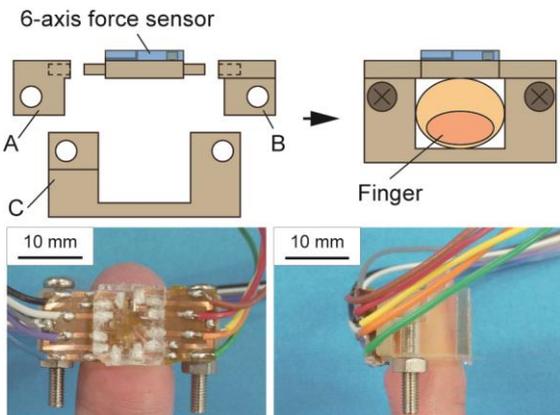


Fig. 7 Schematic view and picture of fingertip-mounted type 6-axis force sensor device.

3. 実験

3.1 基礎特性計測実験

試作した6軸力センサの基礎特性計測実験を行った。基礎特性計測実験のセットアップを Fig. 8 に示す。また使用する基礎特性計測実験装置の概略図を Fig. 9 に示す。Fig. 9 に示すように、試作した6軸力センサを市販の6軸力センサの上部に取り付け、市販の6軸力センサを5軸駆動装置の上部に取り付けた。そして、5軸駆動装置を用いて試作した試作した6軸力センサを天板に押し付けることで、Y軸方向を除いた5軸方向の力を加えた。その後、 θ 軸調節ステージによって試作した6軸力センサの向きを 90° 回転させ、再びX軸調節ステージを用いてY軸方向の力を加えた。X軸調節ステ

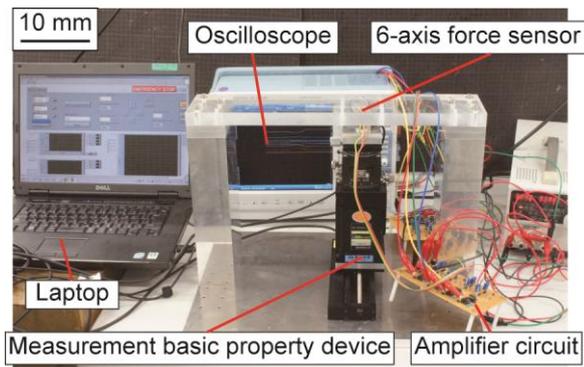


Fig. 8 Setup for measurement of basic property.

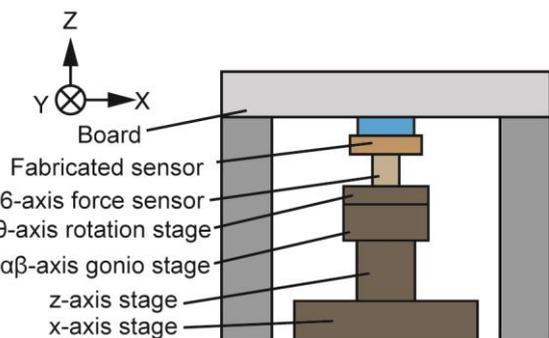


Fig. 9 Schematic view of measurement basic property device.

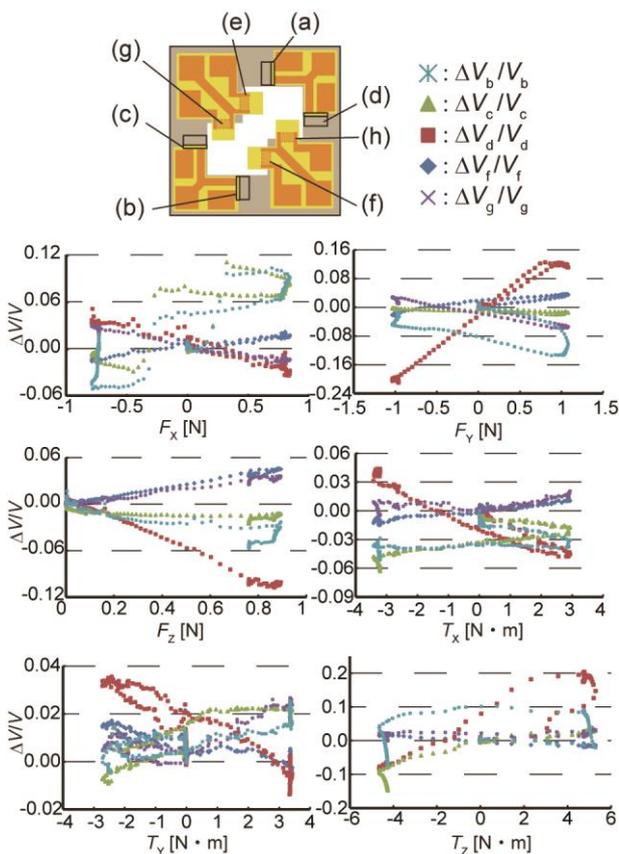


Fig. 10 Basic property of the 6-axis force sensor.

ージと Z 軸調節ステージは PC を通して操作を行った。

また、市販の 6 軸力センサによって計測された力とトルクの値は PC で取り込んだ。力センサ素子の抵抗変化から生じる電圧変化は増幅回路を通してオシロスコープで計測した。市販の 6 軸力センサで計測された力/トルクと、オシロスコープで計測された電圧変化を用いて基礎特性計測実験を行った

実験結果を Fig. 10 に示す。(a), (e), (h)のセンサ素子は断線してしまい、電圧が計測できなかったため、(b), (c), (d), (f), (g)のデータを示す。また、(b), (c), (d), (f), (g)のセンサ素子から生じた電圧変化をそれぞれ $\Delta V_b/V_b \sim \Delta V_g/V_g$ とおいた。Fig. 10 より、各 6 軸力において反応を示すよう設計したひずみゲージが、概ね線形の値を示した。しかし、設計していないひずみゲージに反応が生じてしまったものもあった。また、(d)のひずみゲージは、 F_y, T_z において $\Delta V/V$ の変化量が 0.21, 0.20 となり、設計通り他軸方向の力/トルクと比較して大きな反応を示した。このことから、(d)のひずみゲージを用いる F_y, T_z は比較的正確な値を計測可能であると考察した。また、センサ素子から得られた電圧変化は力やトルクに対してほぼ線形関係となったため、最小二乗法を用いて電圧の変化からセンサに加わった 6 軸力を求める較正行列を求めたところ、較正行列は式(1)のようになった。

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5.12 & -3.25 & -10.5 & 2.13 & -6.34 \\ -36.8 & 25.4 & -7.75 & -26.6 & -36.9 \\ 8.75 & -9.63 & -0.25 & 17.6 & 20.8 \\ -93 & 114 & 48 & 0 & -69.9 \\ -428 & 308 & -180 & -509 & -398 \\ 130 & -71.0 & 47.5 & 134 & 181 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_b/V_b \\ \Delta V_c/V_c \\ \Delta V_d/V_d \\ \Delta V_f/V_f \\ \Delta V_g/V_g \end{bmatrix} \quad \dots(1)$$

3.2 ピンセットを用いた精密部品の組み立て実験

試作した指先装着型 6 軸力センサデバイスを用いてピンセットを把持し、精密部品の組み立て作業を行う。実験のセットアップを Fig. 11 に示す。精密部品には 3D プリンタで作成した部品を用いる。作業内容はピンセットを用いて棒のついた部品 A を把持し、穴の付いた部品 B を挿しこむものとした。

本研究では、ピンセットを掴む位置を先端から 3 cm, 6 cm, 9 cm の 3 カ所を変えて計測した。また、計測は部品 A を把持する直前から開始するものとし、計測開始時の部品 A の向きはピンセットに平行な状態で掴むものとした。

計測した F_y, F_z, T_z の結果を Fig. 12 に示す。また、 F_y の 6 mm の波形を抽出したものを Fig. 13 に示す。

F_x, F_y の合成力は重力を支える力であり、把持位置によらず F_x, F_y の合成した力は重力と同じ値であると予想される。またピンセットの持ち方も 3 つの把持位置でほぼ同じであるため、 F_y は 3 つの把持位置でほぼ一定の値を示すと予想できる。しかし、Fig. 12 より 9 mm の時のみ他の把持位置と比べて値が大きく異なった。また、ピンセットと部品の重さから計算した重力の値と大きく異なっていた。 F_z に関しては、3 mm の時はピンセットを変形させやすいため、把持に必要な F_z が小さくなると予想できるが、計測した結果においても 3 mm は 6 mm より小さくなっている。しかし、9 mm においては小さい値となってしまい、また、負の方向に大きく値が出てしまっており、上手く計測できていなかった。

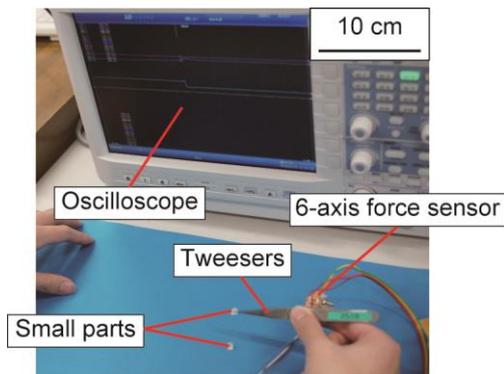


Fig. 11 Setup for assembling small parts using tweezers.

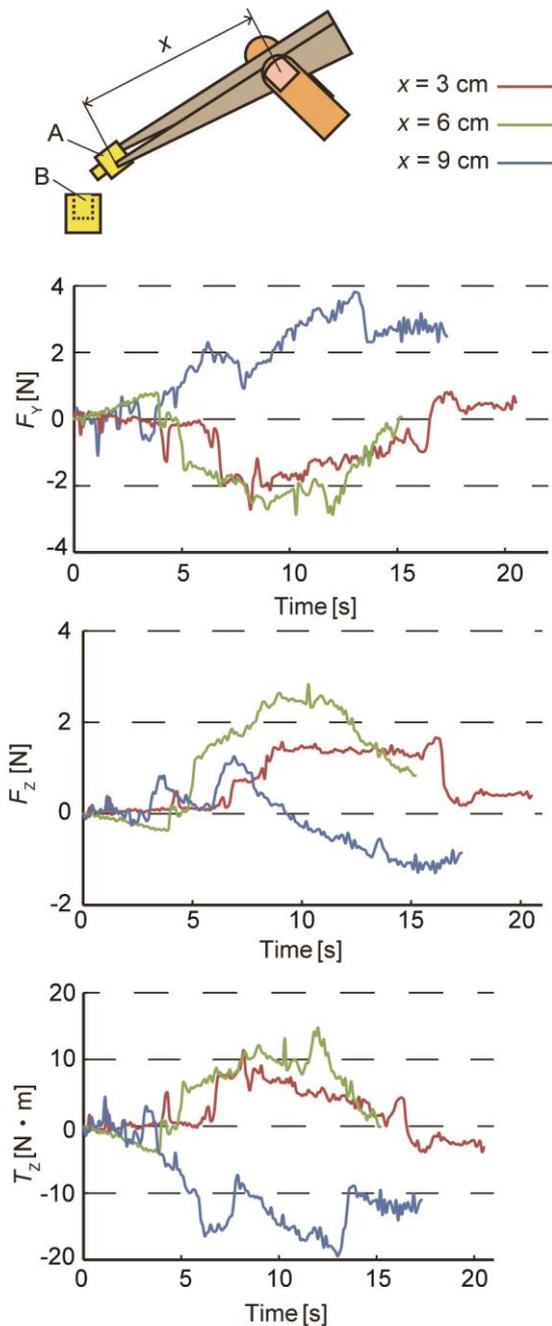


Fig. 12 F_x , F_y , T_z during assembling small parts using tweezers.

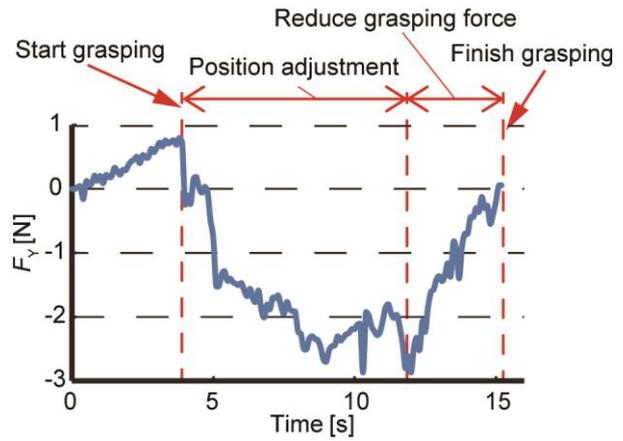


Fig. 13 F_y (6 mm) during assembling small parts using tweezers.

また、ピンセットの重心は先端から約 6.4 mm の位置にあったため、 T_z は重心に近い 6 mm において最もトルクが小さく、3 mm と 9 mm においては反対方向のトルクが発生すると予想できる。結果は、3 mm と 9 mm において反対方向のトルクを計測できたが、6 mm の時に最も大きいトルクが発生した。また計算した理論値と大きく異なった。これらの上手く行っていない部分は、センサが 3 つ断線してしまったことや、設計したとおりにセンサに力が加わらなかったため基礎特性計測実験が上手くいかず、較正行列が正確でないことが原因であると思われる。今後は、よりセンサが断線しにくい構造とすることや、正確な配置が可能な構造にすることで、指先に生じる 6 軸力をさらに正確に計測することが可能になると思われる。

また、Fig. 13 に示す通り、把持を始めた瞬間、部品 A の棒を部品 B の穴と位置を合わせる時間、位置合わせが完了し徐々に把持力を弱める時間、把持終了の瞬間の作業における 4 つのプロセスの様子を計測できていることが確認できる。また、これは F_y だけでなく、他の力やトルクにも同様の波形が概ね確認できる。以上より、試作した 6 軸力センサを用いることで作業の様子を計測することには成功したといえる。

4. 結論

本研究では指先装着型の 6 軸力計測デバイスを試作した。試作した 6 軸力センサの基礎特性実験を行った。 F_y, T_z において(d)のひずみゲージの $\Delta V/V$ の変化量が 0.21, 0.20 となり、他軸方向の力/トルクと比較して設計通りに大きな反応を示した。よって、 F_y, T_z は他軸と比べて正確な値を計測可能であると考察した。また基礎特性計測実験の結果から較正行列を作成した。デバイスを装着し、ピンセットを掴む位置を 3 か所を変えて部品の組み立て作業を行った。結果、組み立て作業時の各プロセス時に指先に加わる力やトルクを定量的に示すことに成功した。以上より、ピンセットを指先でどのように使っているかを定量的に計測することができた。

参考文献

- (1) 遠藤博史, 石川純, 梅村浩之, ピンセットを用いた微小部品の組み立て作業における把持力の解析, 日本人間工学第 52 回大会講演集 (2011) pp. 116-117.
- (2) 小林晃平, 奥山武志, 田中真美, 指先力計測用ウェアラブルセンサの開発に関する研究, 2015 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 (2015) pp. 931-932.