

歪みゲージを用いたボルト型力覚センサの開発 ～第1報 キャリブレーションに関する基礎理論の構築～

○学 段上 将門, 正 河村 晃宏, 正 倉爪 亮 (九州大学)

Development of Bolt Type Force Sensor using Strain Gauges - 1st Report : Study of Calibration Method -

○ Masakado DANJO, Akihiro KAWAMURA, and Ryo KURAZUME (Kyushu Univ.)

This paper proposes a new bolt type force sensor that measures forces applied to an object fixed by the sensor. This sensor consists of a general metal bolt and four strain gauges. Due to the feature of the bolt type sensor, it can measure the force applied to the object without extra jigs and gaps. In this report, the structure of the sensor is introduced and its calibration strategy is discussed. Finally, a force measurement experiment is conducted.

1. 緒言

スポーツクライミングとは、ホールドと呼ばれる壁に取り付けられた突起物をつかんで、人工的に作られた壁を登る競技である。クライミングの動作計測のため、ホールドにかかる力を計測する研究がいくつかある [1][2]。それらの研究では、Fig.1 のようにホールドと壁の間に力覚センサを挟み込むことによって計測を行う。しかし、この計測方法では、Fig.2 のように力覚センサの厚みによってホールドと壁の距離が変化してしまうという問題があり、登攀者の重心位置や姿勢に影響を与えてしまう。

そこで本研究では、ボルト型力覚センサの開発を行う。センサ化したボルトを用いてホールドを固定することで、ホールドと壁の距離に変化を与えず、ホールドにかかる力を計測する。このセンサは、ボルトの軸部に複数の歪みゲージを搭載している。ボルトで締め付けたホールドに力が加わると、ボルトの軸部が変形し、この変形を歪みとして検出することで力を算出する。また、歪みと力の関係式を求める際には、6軸力覚センサを用いたキャリブレーションを行う。最後に、実機を用いた力の計測実験を行う。

2. ボルト型3軸力覚センサ

ボルト型力覚センサは、金属製のボルトと4つの歪みゲージから構成される。ボルトで固定した物体に力が加わったときのボルトの変形を歪みゲージによって検出し、力を算出する。歪みを力に変換するためには、事前にキャリブレーションを行う必要があり、これには歪みと力のデータを必要とする。そのため、キャリブレーション時のみ、6軸力覚センサを併せて用いる。



Fig. 1: Appearance of hold force measurement system[2]

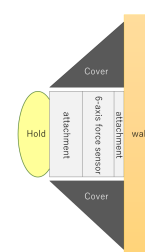


Fig. 2: Structure of hold force measurement system[2]

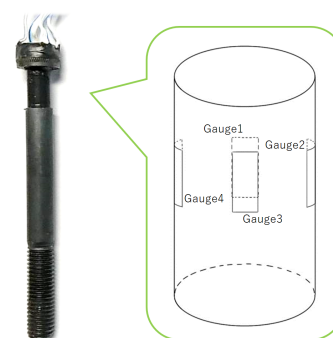


Fig. 3: Bolt type force sensor

2.1 構造

ボルト型力覚センサとその構造を Fig.3 に、示す。ボルトの頭部直下の軸部を削り、生成された溝に歪みゲージを4つ搭載している。

2.2 キャリブレーション

キャリブレーション時の装置の構成を Fig.4 に示す。歪みと力の変換式を求める際に必要な力の真値を測定するため、6軸力覚センサを利用する。また、対象となるホールドは3Dプリンタで作成した。

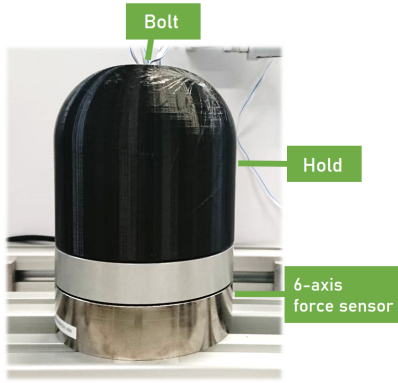


Fig. 4: Experimental setup

次に、キャリブレーション手法について述べる．ボルトに搭載された $y+$, $x+$, $y-$, $x-$ 側の歪みゲージの出力をそれぞれ e_1, e_2, e_3, e_4 とし, $E_{13} = (e_1 - e_3)/2$, $E_{24} = (e_2 - e_4)/2$, $S = (e_1 + e_2 + e_3 + e_4)/4$ とする．力 f_x, f_y, f_z が各歪みゲージの出力に与える影響を係数 $C_{xx}, C_{xy}, C_{xz}, C_{yx}, C_{yy}, C_{yz}, C_{zx}, C_{zy}, C_{zz}$ で定義し,

$$B = \begin{bmatrix} C_{xx} & C_{xy} & C_{xz} \\ C_{yx} & C_{yy} & C_{yz} \\ C_{zx} & C_{zy} & C_{zz} \end{bmatrix} \quad (1)$$

とすると、変換式は以下の式で表される．

$$f_x = \frac{1}{|B|} \begin{vmatrix} E_{24} & E_{13} & S \\ C_{yx} & C_{yy} & C_{yz} \\ C_{zx} & C_{zy} & C_{zz} \end{vmatrix} \quad (2)$$

$$f_y = \frac{1}{|B|} \begin{vmatrix} C_{xx} & C_{xy} & C_{xz} \\ E_{24} & E_{13} & S \\ C_{zx} & C_{zy} & C_{zz} \end{vmatrix} \quad (3)$$

$$f_z = \frac{1}{|B|} \begin{vmatrix} C_{xx} & C_{xy} & C_{xz} \\ C_{yx} & C_{yy} & C_{yz} \\ E_{24} & E_{13} & S \end{vmatrix} \quad (4)$$

係数 $C_{xx} \sim C_{zz}$ は、同時刻の歪みデータと力のデータのペアを3通り用いて求める．

3. 実験

ボルト型力覚センサの有効性を確認する実験を行った．まず、シミュレーションを用いて、変換式による力の推定精度の確認実験を行った．次に、構築した実験装置を用いて、実機における力の推定実験を行った．

Table 1: Applied forces and estimated forces

	f_x	f_y	f_z	f_x^S	f_y^S	f_z^S
1	248.9	99.7	102.2	248.5	99.4	102.1
2	99.7	248.9	102.1	100.0	249.4	102.5
3	99.9	99.9	237.1	100.1	100.4	237.6
4	249.1	249.1	245.2	249.4	249.6	245.5
5	497.5	99.5	16.3	496.9	101.5	17.2
6	-497.6	-0.2	-106.3	-497.5	0.2	-108.3
7	99.5	497.5	16.1	101.3	498.8	15.8
8	-0.2	-497.6	-106.1	-1.1	-498.5	-106.9
9	98.7	-0.8	-460.6	98.6	-0.9	-459.3
10	248.1	98.9	-361.1	248.7	99.1	-361.4

3.1 CAD を用いた変換式の評価実験

キャリブレーションによって求めた変換式を用いて、歪みから力を推定する精度の確認実験を行った．実機を用いた際のノイズを避けるため、3DCAD の Fusion360 を用いて、シミュレーション上で実験を行った．Fig.4 の実験装置を 3D モデルにしたものを用意し、ホールド面上に力を加える．このときの歪みデータと力データを用いてキャリブレーションを行い、係数を求める．得られた係数を代入した変換式を用い、歪みから力を推定し、加えた力 (f_x, f_y, f_z) と推定結果の力 (f_x^S, f_y^S, f_z^S) の比較を行った．結果を表 1 に示す．

実験の結果、加えた力と推定結果の力の誤差は、1 % 程度となった．この結果から、シミュレーション上では、キャリブレーションにより高精度な力の推定が可能であることが確認できた．ただし本実験では、力点をホールド表面上の一点に固定して計測を行っている．

3.2 実機を用いた力の推定実験

次に、実機を用いてホールドにかかる力の推定実験を行った．Fig.4 のホールドに力を加え、歪みと力のデータを取得する．得られたデータから3フレームを選択し、キャリブレーションを行った後、歪みから力を推定する．その結果を Fig.5 に示す．上から、歪みゲージの出力、6 軸力覚センサの出力、歪みから推定した力のグラフである．これらの結果より、定性的ではあるが、おおよその力が推定できていることが分かる．しかし、センサノイズ等の影響によって計測精度の低下がみられる．また、計測時間を長くした場合には、ゼロ点移動も観測されている．

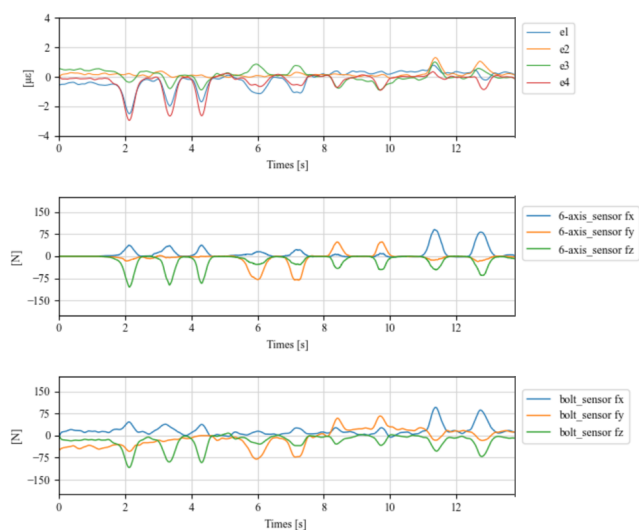


Fig. 5: Measured values from strain gauges and 6-axis force sensor, and estimated forces

4. 結言

本研究では、歪みゲージを用いたボルト型力覚センサの開発を行った。まず、センサ構造について示し、キャリブレーション手法について紹介した。次に3DCADを用いたシミュレーション実験において、高精度な力の推定ができることを確認した。最後に実機実験による力計測を行い、提案手法の有効性を定性的に確認したが、ノイズやゼロ点移動などによる計測精度の低下が見られた。今後は、これらの問題の原因究明及びその対策を行う。また、力点の変化について頑健な手法の開発を行う。

参考文献

- [1] F.K. Fuss, and G. Niegl, "Instrumented Climbing Holds and Performance Analysis in Sport Climbing", Sports Technology, No.6, pp.301-313, 2008
- [2] Iguma Hitomi, Ryo Kurazumei, Akihiro Kawamura, "A new 3d motion and force measurement system for sport climbing in 2020 IEEE", IEEE, pp. 1002-1007, 2020.