

歪みゲージを用いたボルト型力覚センサの開発 -クライミング動作計測による実験的検証-

○中嶋 峻大, 河村 晃宏, 倉爪 亮 (九州大学)

Bolt Type Force Sensor using Strain Gauges for Sport Climbing -Verification by Measurement of Climbing Movement-

○Takato NAKASHIMA, Akihiro KAWAMURA, and Ryo KURAZUME
(Kyushu University)

Abstract : We have developed a bolt type force sensor that measures forces applied to an object fixed by the sensor for motion analysis in sport climbing. In this paper, force estimation experiments on an actual climbing wall are conducted to verify the practical usefulness of the proposed sensor. Then, it is confirmed that this sensor achieves highly accurate force estimation for sport climbing.

1. 緒言

スポーツクライミングとは、壁に取り付けられたホールドと呼ばれる突起物を掴んで、人工的に作られた壁を登る競技である。スポーツクライミングの動作計測においては、ホールドにかかる力の情報が重要であり、これまでにホールドにかかる力の計測、解析に関する研究がいくつか行われている [1]-[3]。これらの研究では、力覚センサを内蔵した専用のホールドを使用する、もしくはホールドと壁の間に力覚センサを挿入することで力を計測している。しかし、前者ではホールドのバリエーションに制約が生まれ、また後者では、力覚センサの厚みによってホールドと壁との距離が変化するため、クライミング課題の難易度が変化するという問題がある。

そこで我々はこれまでに、ホールドを固定するボルトを力覚センサ化した、3軸のボルト型力覚センサを提案している [4]-[5]。これにより、前述の問題点を解決することができる。このセンサは、Fig.1, Fig.2 のように設置し、内蔵した4つの歪みゲージによって力を推定する。

本稿では、このボルト型力覚センサを用いて、スポーツクライミング時にホールドにかかる負荷を計測し、市販の6軸の力覚センサの値と比較することで、実践的な力推定における精度検証を行う。

2. ボルト型力覚センサ

ボルト型力覚センサは、Fig.3 のように金属製のボルトと4枚の歪みゲージで構成されている。ボルトの軸を1.8[mm] 切削した上に歪みゲージを貼り付け、酸化被膜によって保護している。4枚の歪みゲージは軸の周りに均等に配置されている。ボルト型力覚センサで固定された

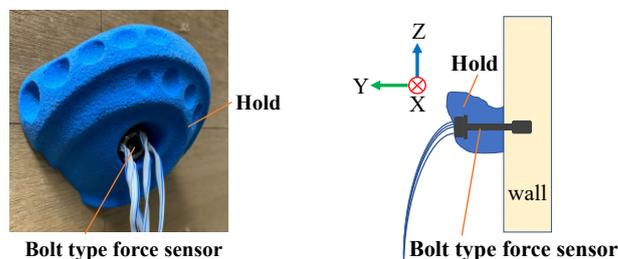


図 1: Bolt type force sensor mounted on the wall

図 2: Cross-sectional view of the installation of a hold using the bolt type force sensor



図 3: Bolt type force sensor

ホールドに力が加わると、ボルトが変形し、歪みゲージによって力が推定できる。本センサのサンプリング周波数は1000[Hz]である。また、センサ取り付けの際には、トルクレンチを用いて一定のトルクで締め付ける。

次に、ボルト型力覚センサのキャリブレーション方法について述べる。キャリブレーションには、6軸力覚センサ

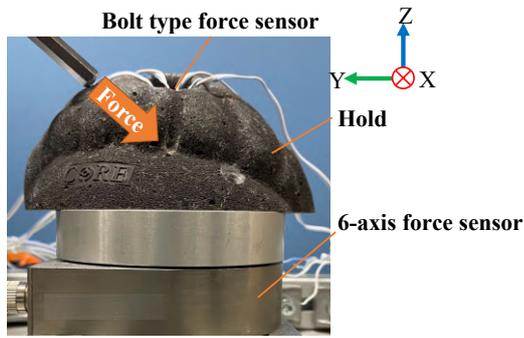


図 4: Configuration of the device during calibration

(株式会社レプトリノ社製)で測定した力を真値として利用する. ボルト型力覚センサと 6 軸力覚センサから構成されるキャリブレーション装置を Fig.4 に示す. ボルトの中心に作用する力 f_x, f_y, f_z は, 係数 $C_{xx}, C_{xy}, C_{xz}, C_{yx}, C_{yy}, C_{yz}, C_{zx}, C_{zy}, C_{zz}$ と 4 つの歪みゲージの出力 e_1, e_2, e_3, e_4 を用いて表される. 歪みゲージの出力から 3 軸の力を推定するための式を以下に示す.

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

とすると, 歪みゲージの出力から 3 軸の力を推定するための式は以下の式で表される.

$$f_x = \frac{1}{|\mathbf{B}|} \begin{vmatrix} \frac{e_2 - e_4}{2} & \frac{e_1 - e_3}{2} & \frac{e_1 + e_2 + e_3 + e_4}{4} \\ C_{yx} & C_{yy} & C_{yz} \\ C_{zx} & C_{zy} & C_{zz} \end{vmatrix} \quad (2)$$

$$f_y = \frac{1}{|\mathbf{B}|} \begin{vmatrix} C_{xx} & C_{xy} & C_{xz} \\ \frac{e_2 - e_4}{2} & \frac{e_1 - e_3}{2} & \frac{e_1 + e_2 + e_3 + e_4}{4} \\ C_{zx} & C_{zy} & C_{zz} \end{vmatrix} \quad (3)$$

$$f_z = \frac{1}{|\mathbf{B}|} \begin{vmatrix} C_{xx} & C_{xy} & C_{xz} \\ C_{yx} & C_{yy} & C_{yz} \\ \frac{e_2 - e_4}{2} & \frac{e_1 - e_3}{2} & \frac{e_1 + e_2 + e_3 + e_4}{4} \end{vmatrix} \quad (4)$$

係数 $C_{xx} \sim C_{zz}$ は, 同時刻の歪みデータと力データのペアを 3 組以上用いることで導出する.

3. 実験

本稿では, ボルト型力覚センサを用いて 2 つの実験を行う. 1 つ目の実験では, ホールドに対して, 金属棒を用いて点接触で力を加える場合の力の推定を行う. 2 つ目の実験では, 実際のスポーツライミングの環境を想定し, 競技者がホールドに力を加える際の力の推定を行う.

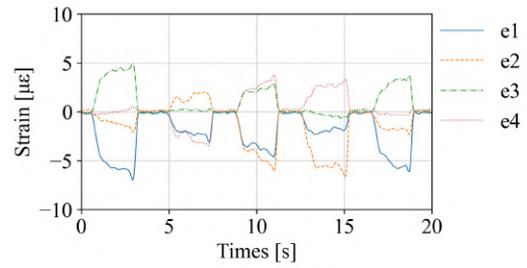


図 5: Strain data

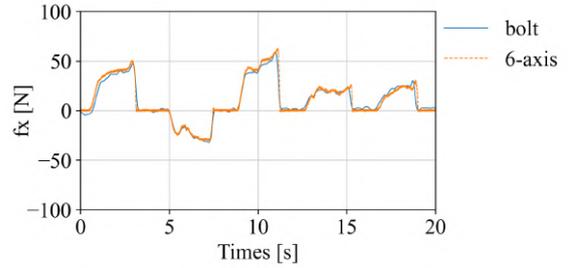


図 6: Transient responses of f_x

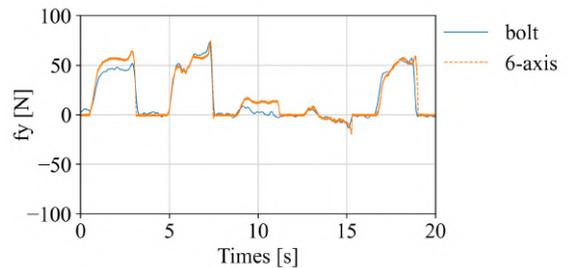


図 7: Transient responses of f_y

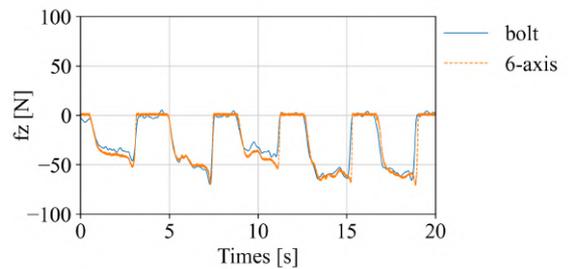


図 8: Transient responses of f_z

3.1 点接触における力推定

Fig.4 の実験装置を使用して, 点接触における力推定実験を行う. 力は金属棒を用いて点接触で与える. ボルト型力覚センサで力推定を行うにはキャリブレーション時のみ 6 軸力覚センサを使用するが, 本実験では推定値の評価を行う必要があるため推定時にも 6 軸力覚センサを利用する.

Fig.5 は歪みゲージの出力である. また, Fig.6-8 は 6 軸力覚センサの出力とボルト型力覚センサの推定値を比較した結果である. これらの結果から, ホールドに対して点接触によって力を加えた場合, 高精度な力推定を実現できていることが確認できる.

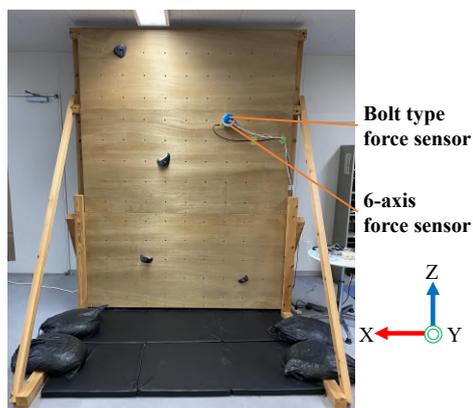


図 9: Climbing wall



図 10: Experimental setup on the wall

3.2 スポーツクライミングにおける力推定

スポーツクライミングにおける力推定実験では、研究室に設置した Fig.9 に示すクライミングウォールを用いる。前述した実験と同様に Fig.10 のようにボルト型力覚センサと壁の間に 6 軸力センサを設置している。計測したクライミングの動作を Fig.11 に示す。

クライミング動作中の歪みゲージの出力を Fig.12 に示す。また、6 軸力覚センサの出力とボルト型力覚センサの推定値を比較した結果を Fig.13-15 に示す。この実験では、ホールドを手全体で把持するため、多点接触となり、3 軸の力だけでなく、モーメントが発生する。それに関わらず、点接触と同等の高い精度で力の推定ができていくことがわかる。

4. 結言

我々はこれまでに、スポーツクライミングの動作計測において、ホールドにかかる力を計測するボルト型力覚センサを開発している。本稿では、センサの実践的な使用を想定したクライミングの動作計測実験を行い、高精度な力推定を実現した。

今後は、複数のボルト型力覚センサを用いてスポーツクライミングの動作を計測し、様々な環境における動作解析を目指す。

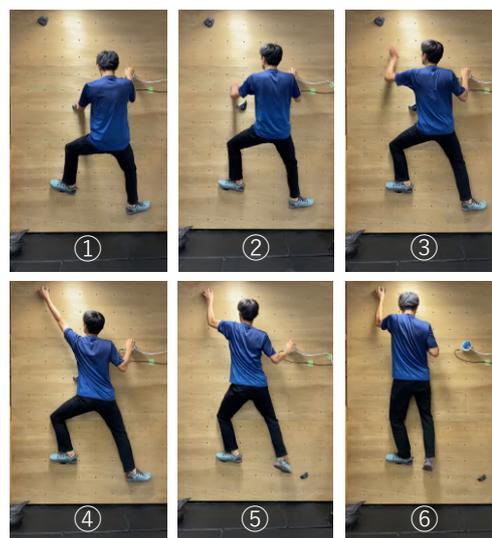


図 11: Sport climbing movement performed in the experiment

5. 謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 JP21K11468 の助成を受けたものである。

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 Kurazume, Akihiro Kawamura, "A new 3d motion and force measurement system for sport climbing in 2020 IEEE", IEEE, pp.1002-1007, 2020.
- [3] D.Pandurevic, A.Sutor, K.Hochradel, "Methods for quantitative evaluation of force and technique in competitive sport climbing", Journal of Physics Conference Series, 2019
- [4] 段上 将門, 河村 晃宏, 倉爪 亮, "歪みゲージを用いたボルト型力覚センサの開発", 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会 2021, pp.1P1-M11, 2021.6.6-8
- [5] 中嶋 峻大, 河村 晃宏, 倉爪 亮, "パーティクルフィルタを用いたボルト型力覚センサの高精度化", 第 22 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, 1F3-06, 2021.12.15-17

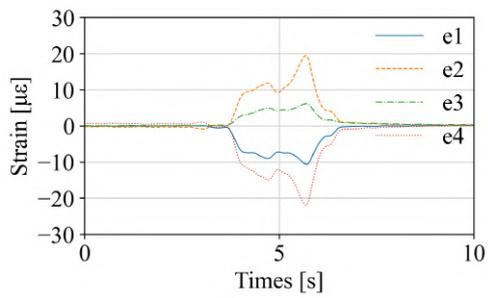


Figure 12: Strain data for sport climbing movement

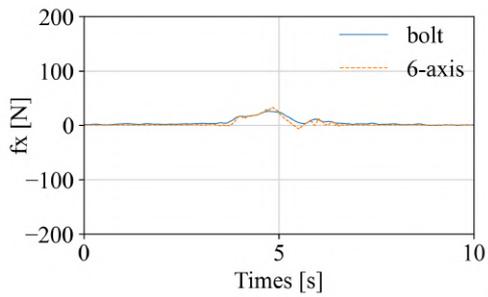


Figure 13: Transient responses of f_x for sport climbing movement

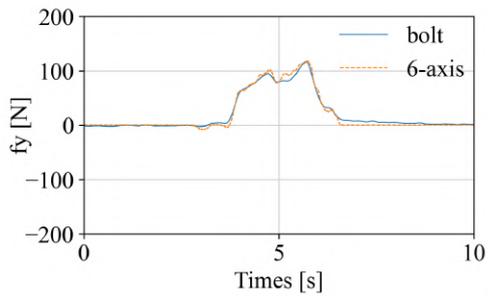


Figure 14: Transient responses of f_y for sport climbing movement

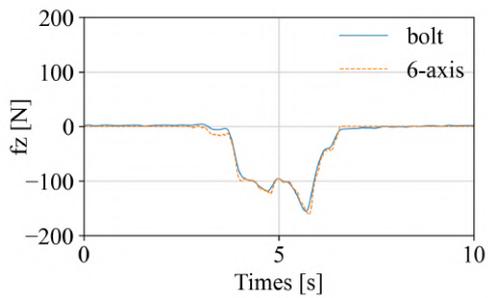


Figure 15: Transient responses of f_z for sport climbing movement