

# 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

○学 中嶋 峻大, 正 河村 晃宏, 正 倉爪 亮 (九州大学)

## Calibration Method of a Bolt Type Force Sensor using Particle Filter

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

Abstract : This paper proposes a calibration method of a bolt type force sensor using particle filter to select suitable data for calibration automatically. This sensor consists of a general metal bolt and four strain gauges. Due to the feature of the sensor, it can measure the force applied to the object bolted by it. In this report, a calibration method of the sensor using particle filter is proposed. The performance of the sensor using the proposed method is evaluated by a comparison with an exhaustive search method.

### 1. 緒言

スポーツクライミングとは、壁にとりつけられたホールドと呼ばれる突起物をつかんで、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力の計測を行う。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するという問題があり、登攀者の重心位置や姿勢に影響を与えてしまう。そこで、ホールドを壁面に取り付ける際に使用するボルトを力覚センサ化することでこの問題を解決する。先行研究により、複数の歪みゲージを搭載したボルトを6軸力覚センサでキャリブレーションし、3軸の力を推定する手法が提案されている [3]。

本研究では、ボルト型力覚センサ [3] の新たなキャリブレーション手法を提案する。これまでキャリブレーション時に利用するデータセットを手動で選択していたが、パーティクルフィルタによって自動選択し、センサの高精度化およびキャリブレーションの時間短縮を行う。

### 2. ボルト型力覚センサ

ボルト型力覚センサ [3] 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。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にのみ、6軸力覚センサを併せて用いる。



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

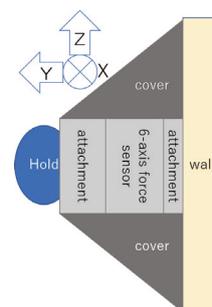


Fig. 2: Structure of hold force measurement system[2]

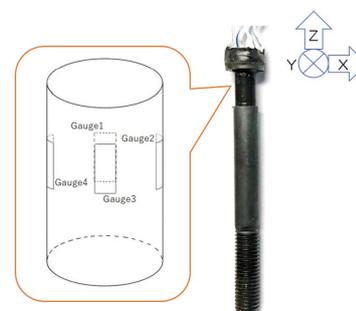


Fig. 3: Bolt type force sensor

#### 2.1 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競技で実際に使われているものとする。

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、 $E_{13} = (e_1 - e_3)/2$ ,  $E_{24} = (e_2 -$

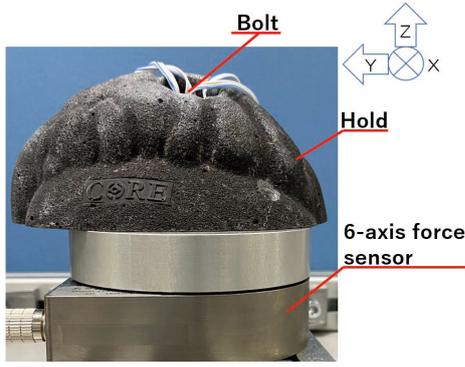


Fig. 4: Calibration setup

$e_4)/2, S = (e_1 + e_2 + e_3 + e_4)/4$  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 組用いることで決定する.

## 2.2 パーティクルフィルタによるデータ選択

パーティクルフィルタを用いてキャリブレーションに必要な 3 つのデータを自動選択する手法を以下に示す. また, データ間隔を  $t_i$  とする.

(1) ある時刻  $t_1$  までを初期状態とし, 時刻  $t_1$  までの全てのデータから, 3 つのデータの組み合わせ (パーティクル) を全パターン求め (Fig.5), それぞれの尤度を計算する.

(2) それぞれの尤度によって重みづけを行い, リサンプリングを行う (Fig.6).

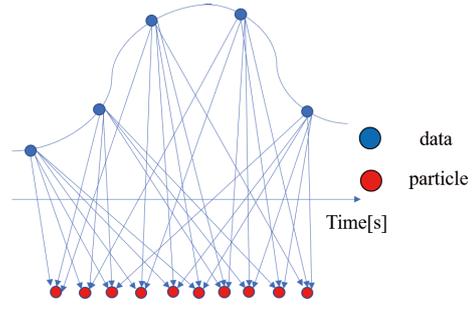


Fig. 5: Data combination

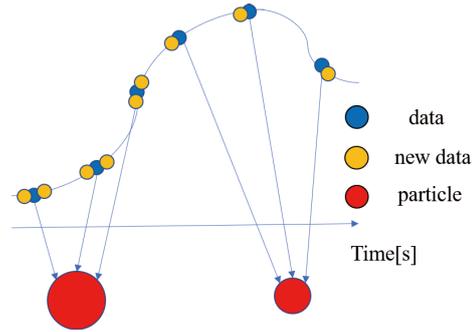


Fig. 6: Resampling

(3)  $t_i$  秒後に取得した新たなデータをリサンプリング後のデータに追加し, 3 つのデータの組み合わせ (パーティクル) を全パターン求め, それぞれの尤度を計算する.

(4) (2),(3) を繰り返す.

(2) のリサンプリングでは, 各パーティクルに紐づいたデータについてリサンプリングを行う. 最終的に尤度が最も高いパーティクルに紐づいた 3 つのデータを用いてキャリブレーションを行う.

尤度は以下の式で求める. 時刻  $t$  までの 6 軸力覚センサの出力を

$$f = [f_1, f_2, f_3, \dots, f_t] \quad (5)$$

時刻  $t$  までにボルト型力覚センサの各パーティクル  $p$  で推定した力を

$$f^p = [f_1^p, f_2^p, f_3^p, \dots, f_t^p] \quad (6)$$

とする. 次に, すべての時刻での  $f$  と  $f^p$  の誤差の最大値を各パーティクルで求める.

$$e_{max}^p = \max_t (|f - f^p|) \quad (7)$$

$$= \max_t [|f_1 - f_1^p|, |f_2 - f_2^p|, \dots, |f_t - f_t^p|] \quad (8)$$

各時刻  $t$  における各パーティクル  $p$  の尤度  $L^p$  を求める.

$$L^p = [L_1^p, L_2^p, L_3^p, \dots, L_t^p] \quad (9)$$

$$= \left[ 1 - \frac{|f_1 - f_1^p|}{e_{max}^p}, \dots, 1 - \frac{|f_t - f_t^p|}{e_{max}^p} \right] \quad (10)$$

各パーティクルごとに時刻  $t$  までの平均尤度  $L_{ave}^p$  を求める。

$$L_{ave}^p = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^t L_i^p \quad (11)$$

これによって求めた  $L_{ave}^p$  を各パーティクルの尤度とする。

### 3. 計測実験

パーティクルフィルタの有効性を確認するために、虱潰しにキャリブレーションデータを探索した場合との比較を行った。2手法でのキャリブレーションの結果を Fig.7 に示す。緑縦線は虱潰し、青縦線はパーティクルフィルタでキャリブレーションに使用したデータフレームを表す。虱潰しのキャリブレーションデータと近いデータフレームが選択されていることがわかる。また、計算時間に関しては、虱潰しによるキャリブレーションが 37 時間、パーティクルフィルタによるキャリブレーションが 6 分 21 秒となり、パーティクルフィルタによって短時間でのキャリブレーションが実現できている。

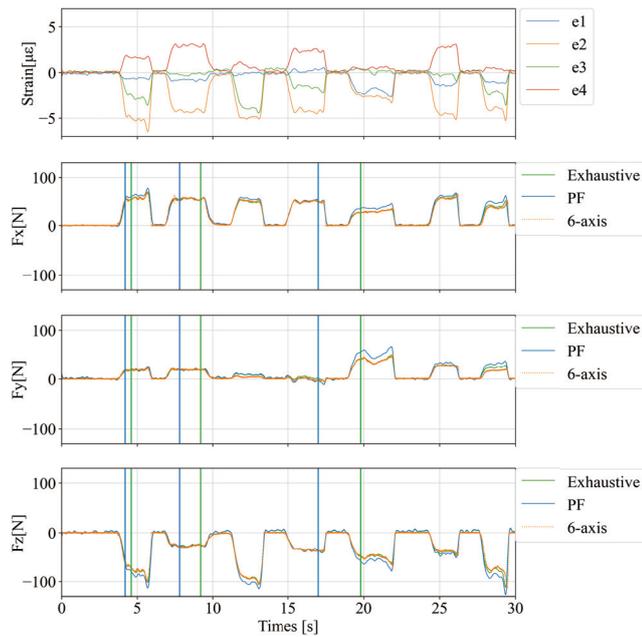


Fig. 7: Calibration

次に、キャリブレーションデータから得られた係数を使用して力推定を行ったときの結果を Fig.8 に示す。また、2つの手法による力推定の平均誤差について Table 1 に示す。これらの結果から、パーティクルフィルタによって虱潰しでの精度を担保した力推定を実現できていることがわかる。

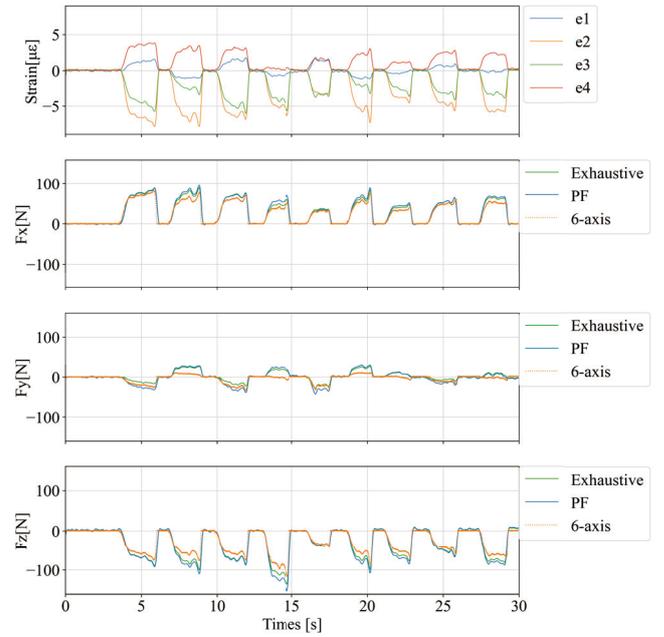


Fig. 8: Force estimation

Table 1: Comparison of the error between the two methods

	Exhaustive	Particle
Mean error rate Fx	6.3 %	7.8 %
Mean error rate Fy	22.1 %	24.8 %
Mean error rate Fz	6.6 %	11.7 %

### 4. 結言

本研究では、ボルト型力覚センサのキャリブレーションにパーティクルフィルタを用いた手法を提案した。本手法では、キャリブレーションに適したデータを迅速に自動選択し、虱潰し手法に近い精度を実現した。しかし、虱潰し手法についても目標とする推定精度に到達していないため、歪み-力変換式を改良し、さらなる高精度化を目指す。

### 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.
- [3] Danjo Masakado, Ryo Kurazumei, Akihiro Kawamura, "Development of Bolt Type Force Sensor using Strain Gauges"