

爪の歪み情報を用いた指先接触力推定

Estimation of Fingertip Contact Force Using Strain of a Fingernail

白井 雅憲 (中大) 多田 充徳 (産総研) 高野 太刀雄 (産総研) 梅田 和昇 (中大)

Masakazu Shirai¹ Mitsunori Tada^{2,3} Tachio Takano^{2,3} Kazunori Umeda¹

¹ Faculty of Science and Engineering, Chuo University

² Digital Human Research Center, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

³ CREST, Japan Science and Technology Agency

Tactile sensors that can estimate contact force of a fingertip in direct contact with target object are required in analysis of human grasping. This paper presents an estimation system of fingertip contact force: its design, algorithm and performance. It employs five strain gauges glued on a fingernail, and linear regression model to convert the obtained strain data to the fingertip contact force. The root mean square error of the estimations are about 1 to 4 N for normal, and 0.5 to 1 N for tangential force.

Key Words : Fingertip contact force, Fingernail, Strain gauge, Linear regression model

1 はじめに

人の把握運動の解析や、VR 空間への情報入力を目的とした様々な計測デバイスが開発されている。しかし、これらの多くは把握対象物に力センサを埋め込んだ装置や、手に装着するグローブ型接触センサである¹⁾。このため、前者では計測可能な対象物が限定されるという問題が、後者では指と対象物が直接触れないという問題が発生する。

このような問題に対処するために、爪に生じる物理現象から指先接触力を推定する研究が行われている。Mascaroらは、接触に伴う爪の色変化から指先接触力を推定するセンサを考案した²⁾。しかし、原理上指先の接触角度が推定精度に与える影響が大きいと考えられる(この点に関する具体的な検証は論文中で行われていない。)

一方、前野らは爪の歪み情報を用いた接触センサを提案した³⁾。しかし接触に伴う歪みパターンの変化を検証しただけで、指先接触力の推定を行うには至っていない。

本研究では、爪の歪み情報に対し線形モデルを適用することで、指先接触力の推定を試みる。本稿では、構築した爪歪み計測システムの構成と推定アルゴリズムについて述べる。また、指先接触力の推定精度を検証し、その誤差要因を考察する。

2 推定システム

Fig. 1 に指先接触力推定システムを示す。本システムは、歪みゲージ (KFG-02-120-C1 : 共和電業)、ブリッジボックス、歪みアンプ (HSC-10BS : 共和電業) から成る。爪表面には計 5 枚の歪みゲージ (x 軸方向に 3 枚, y 軸方向に 2 枚) を接着する。歪みアンプは最大 8 チャンネルの歪み増幅が可能であるが、今回は 5 チャンネルだけを使用する。

指先が対象物に接触すると、爪表面の歪みが変化する。これが歪みゲージの電気抵抗値の変化となり、ブリッジ回路を介して、歪みアンプで増幅される。歪みアンプの出力を AD 変換ボード (AD12-16U(PCI)EH : Contec) を用いて PC に入力し、データファイルとして保存する。

本システムのブリッジボックスは極めて小型 (90(W) × 20(H) × 60(D) mm/8ch) であり、Fig. 1 に示すように手首に装着することが出来る。ブリッジ回路と歪みゲージとの距離が最小となり、温度変化やケーブルの動揺に伴うノイズの発生を最小限に抑えることができる。

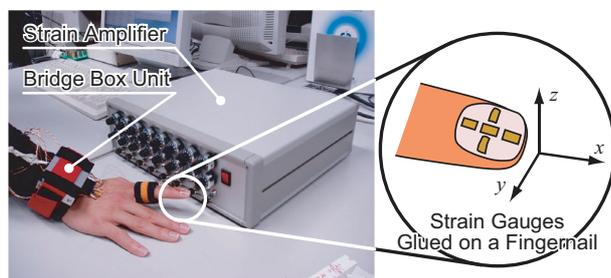


Fig. 1: Estimation system of fingertip contact force

3 推定アルゴリズム

指先接触力と爪の歪みを同時に計測する。時刻 t に計測された指先接触力を $f_{i(t)}$ (ただし, $i = x, y, z$), 爪の歪みを $\varepsilon_{j(t)}$ (ただし, $j = 1 \dots 5$) とする。ここで、全指先接触力情報の行列表記を、

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} f_x(0) & f_x(1) & \dots & f_x(T) \\ f_y(0) & f_y(1) & \dots & f_y(T) \\ f_z(0) & f_z(1) & \dots & f_z(T) \end{bmatrix} \quad (1)$$

全歪み情報の行列表記を、

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{1(0)} & \varepsilon_{1(2)} & \dots & \varepsilon_{1(T)} \\ \varepsilon_{2(0)} & \varepsilon_{2(2)} & \dots & \varepsilon_{2(T)} \\ \varepsilon_{3(0)} & \varepsilon_{3(2)} & \dots & \varepsilon_{3(T)} \\ \varepsilon_{4(0)} & \varepsilon_{4(2)} & \dots & \varepsilon_{4(T)} \\ \varepsilon_{5(0)} & \varepsilon_{5(2)} & \dots & \varepsilon_{5(T)} \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

とおく。これらの間に線形性を仮定すると、 \mathbf{F} と \mathbf{E} は 3×6 の校正行列 \mathbf{C} で関係付けられる。即ち、

$$\mathbf{F} = \mathbf{CE} \quad (3)$$

が成り立つ。校正行列 \mathbf{C} は、計測した \mathbf{F} と \mathbf{E} より、

$$\mathbf{C} = \mathbf{FE}^T (\mathbf{EF}^T)^{-1} \quad (4)$$

と求めることができる。指先接触力の推定値 \mathbf{F}' は計算した \mathbf{C} を用いて、 $\mathbf{F}' = \mathbf{CE}$ と求まる。

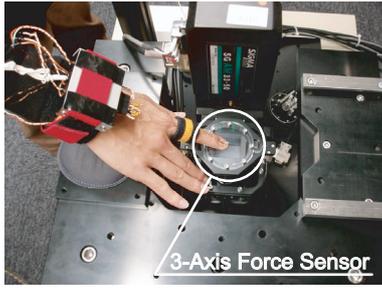


Fig. 2: Validation of the developed system

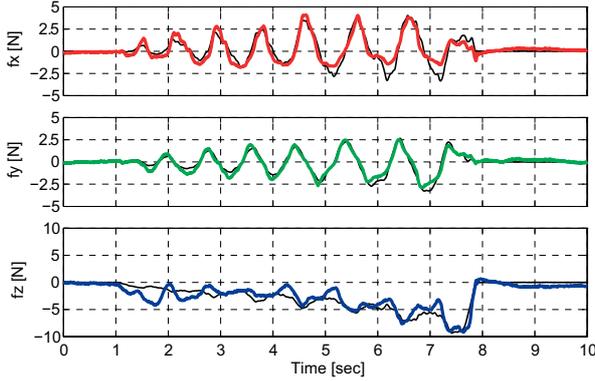


Fig. 3: Measured forces and estimated forces (training)

4 推定精度の検証

4.1 検証方法 はじめに指先接触角度 θ が 20 deg の時に指先接触力と爪の歪みを計測する (Training Trial) . これらを用いて校正行列 C_{20} を計算する . 次に , 指先接触角度 θ を 10 deg と 30 deg に設定し , 指先接触力と爪の歪みを計測する (Validation Trial) . そして校正行列 C_{20} と計測した爪の歪みを用いて指先接触力を推定し , その精度を検証する .

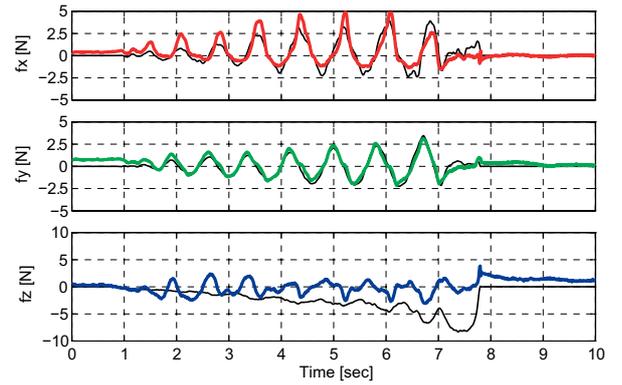
指先接触力の計測には 3 軸力センサを使用する . Fig. 2 に検証実験の様子を示す . 指先を力センサに接触させ , それらの間に相対的な滑りが発生しないように接線方向 (x, y 軸方向) の力を加える . ただしこの力は , $x-y$ 平面内で円を描き , かつ絶対値が徐々に大きくなる力である .

4.2 検証結果 Training Trial における指先接触力の実測値と推定値を Fig. 3 に , Validation Trial における指先接触力の実測値と推定値を Fig. 4 に示す . ただし全てのグラフにおいて細黒線が実測値を , 色付き太線が推定値を表す . また , 全試行における各軸方向力の 2 乗平均平方根誤差を Fig. 5 に示す .

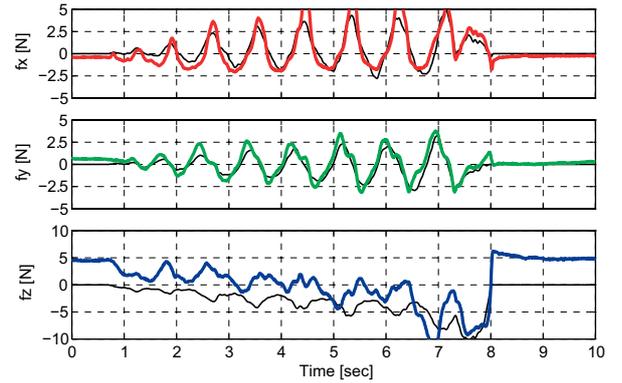
Training Trial では , 接線方向力の推定誤差は 0.3 から 0.6 N , 法線方向力の推定誤差は 1 N 程度となる . つまり , 接線方向力に対する法線方向力の推定誤差は約 2 倍となる .

また , Validation Trial では , Training Trial で計算した校正行列を用いた推定であるものの , 接線方向力の推定誤差は 0.4 から 0.9 N と Training Trial の 2 倍程度でしかない . 一方 , 法線方向力の推定誤差は 3 から 4 倍となる .

4.3 考察 爪歪みの計測データから , 法線方向力に伴う歪みの感度は約 $10 \mu\text{strain}/\text{N}$, 接線方向力に伴う歪みの感度は約 $50 \mu\text{strain}/\text{N}$ となることが分かった . つまり , 接線方向力に比べ , 法線方向力に伴う歪みの感度が 5 倍程度低いことになる . これが法線方向力の推定精度が , 接線方向力と比べて低い要因になると考えられる .

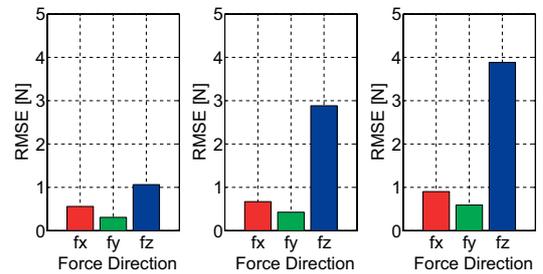


(a) $\theta = 10 \text{ deg}$



(b) $\theta = 30 \text{ deg}$

Fig. 4: Measured forces and estimated forces (validation)



(a) $\theta = 20 \text{ deg}$ (b) $\theta = 10 \text{ deg}$ (c) $\theta = 30 \text{ deg}$

Fig. 5: Root mean squared error of force estimation

5 結論

爪の歪みから指先接触力を推定するセンサシステムを開発した . 検証実験を行った結果 , 接線方向力の推定誤差は 1 N 以内となるが , 法線方向力の推定誤差は接線方向力に比べて数倍となることが分かった . これは , 法線方向力に伴う歪みの感度が低いことに起因すると考えられる . 今後は , 法線方向力の推定精度向上を実現させ , 人の把握運動計測へと応用する .

参考文献

- 1) 関喜一, 下条誠, 佐藤滋, 高橋昭彦, “高柔軟性をもつ把持圧分布センサの開発”, 計測自動制御学会誌, vol. 31, no. 9, pp.1528–1530, 1995.
- 2) S. Mascaro and H. Asada, “Measurement of Finger Posture and Three-Axis Fingertip Touch Force Using Fingernail Sensors”, IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 20, no. 1, pp.26–35, 2004.
- 3) 前野隆司, 佐藤武彦, “爪のひずみを利用した触覚センサ”, ロボティクス・メカトロニクス講演会'00 講演論文集, 1A1-69-097, 2000.