



指先の皮膚変形と姿勢の計測による接触力推定の検討

齋藤彩音¹⁾, 久能若葉¹⁾, 杉浦裕太¹⁾²⁾

1) 慶應義塾大学 理工学部 情報工学科 (〒223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1)

2) 科学技術振興機構 さきがけ (〒332-0012 埼玉県川口市本町 4-1-8)

概要: 複数の光センサを用いて指先の側面の皮膚変形を計測することにより, 指先が物体に接触したときの接触力を推定できる. 本稿では, 指が物体に接触したときの接触面との距離を光センサで計測し, 距離から指の姿勢情報を測定することにより, 先行研究で開発された装置の接触力の推定精度を向上させる. この装置は, 指先と物体の間の接地面にセンサを置かず力に力を感じさせることなく接触力を推定することができる.

キーワード: ウェアラブルデバイス, 力触覚, 反射型光センサ

1. 序論

指先の接触力を計測することは, 指先の動作の定量的な評価に用いることができる. 例えば, 製品に触れたときの圧力の変化の様子からユーザビリティ評価に使用することができる. 指先の接触力を計測する方法として2つの方法がある. 1つ目は対象物に対してセンサを装着する方法である. この方法では人間の指に対してセンサを装着する必要がないことから, 指の動作には影響がない. 一方で, 個々の対象物にセンサを装着する手間が存在する. 2つ目の方法は人間の指に対してセンサを装着する方法である. この方法では個々の対象物にセンサを装着する手間がない. 一方で, 指の腹に対しセンサを装着した場合, 対象物と指の間にセンサが存在することから触覚が変化してしまう. そこで, 先行研究[1]において指先の接触力を推定する付爪型デバイスを開発した. このデバイスでは, 複数の光センサを用いて指腹側面の皮膚変形を計測することにより, 指先が物体に接触したときの3次元接触力を推定できる. 一方で, 人間の指は接触面に対する角度や姿勢を変化させることで, 接触面に触れる指腹の接触面積や接触位置を変化させることができる. そのため, 指腹側面の皮膚変形には指の姿勢が影響を与える可能性がある. そこで本研究では, 指が物体に接触した時の接触面との距離を光センサで計測し, 距離から指の姿勢情報を測定することにより, 先行研究で開発されたデバイスの接触力の推定精度を向上させることを目的とする.

2. 関連研究

2.1 指先装着センサ

指腹部と対象物の間にセンサを取り付けずに力の計測

Ayane SAITO, Wakaba KUNO, and Yuta SUGIURA

を行った研究が存在する. Mascaro らは, 発光ダイオードとフォトダイオードをつけたデバイスを爪に付け, 指先の血液量の変化を計測することで指腹にかかる圧力を推定している[4]. Grieve らはカメラにより爪の色の変化を計測することで圧力を推定する方法を提案している[5]. 指の指腹の変形を歪ゲージで計測して接触力を推定した研究としてHapLogが存在する[6]. 本研究は指腹の変形を計測しているという点では HapLog に類似しているが, HapLog では水平方向の指腹の変形を計測することで垂直方向にかけられた力を推定している一方で, 本研究では3次元接触力を推定できる. また, 本研究では爪にデバイスを貼り付けるため, 指の側面を覆う形のHapLogよりは指のサイズの変化に対しても許容範囲が広がっている.

2.2 指先の姿勢と接触力計測

本研究は, 接触面との距離から指先の姿勢を測定することで, 接触力の推定精度の向上を目指している. Han らは, 指先の接触力や接触面積, 指の姿勢によって指先の摩擦係数が変化することを指摘している[2]. Nishimura らは指の接触面に対する接触角度が大きいときよりも小さいときの方が, 接触力の増減に伴った接触面積の変化が大きいことを示している[3]. Mascaro らは圧力推定のために作成した指先の血液量の変化を計測するデバイスを使って, 指先の姿勢角度の推定の実験を行っている[4]. このように指先の姿勢と接触力には関連性があることが示されていることから, 本研究では, 接触力の推定精度向上のために指先の姿勢計測を実現する.

3. 提案手法

3.1 ハードウェア構成

本研究では指が物体と接触したときに生じる皮膚変形を反射型光センサで取得することで接触力を計測する. 反

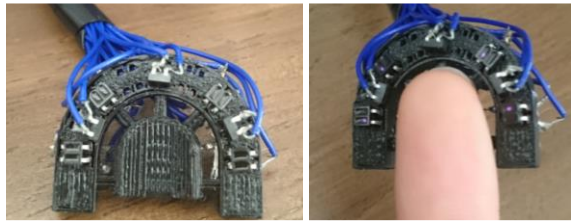


図1 指先装着型デバイスの外観

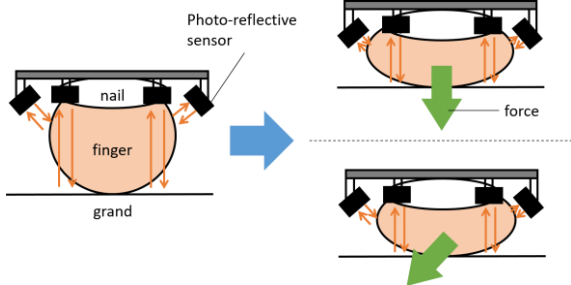


図2 反射型光センサによる指姿勢と圧力計測原理

射型光センサは赤外光 LED とフォトトランジスタが一体になったものであり、対象物までの距離計測や色認識などに利用される。反射型光センサによって指の側面までの距離を測ることで、指腹側面の皮膚が圧力によって変形する様子を捉えることができる。また、接触面を向く方向に反射型光センサをつけることで、接触面との距離を計測する。距離を測ることで、指の接地面に対する姿勢情報を測定できる(図1)。

本研究では反射型光センサを7個使用しており、接触面との距離を測るものが4個、指腹側面の皮膚変形を測るものが3個となっている(図2)。これらは交互になるように配置した。センサは3.3V 駆動の Arduino Pro Mini マイクロコントローラに接続される。センサ部には爪形状におおよそ沿うように湾曲したパーツを3Dプリンタで作成した。パーツと指は付け爪用の両面シールを用いて貼り付けることができる。

3.2 3次元接触力の推定

デバイスを装着した指に加わる3次元接触力の推定を行う。人ごとに指のサイズや形は異なるため、個人ごとに回帰モデルを生成し推定する。回帰分析は、ある2つの連続変数間の相関関係を表す関係式を推定する統計学的手法の1つであり、その関係式を回帰モデルと呼ぶ。推定した回帰モデルを用いることで、一方の変数の値から他方の変数の値を推定できる。本研究では、この回帰モデルを利用して指の皮膚変形、接触面との距離と圧力の関係を得ることで指の皮膚変形と接触面との距離から3次元接触力を推定する。

本手法は学習段階と推定段階に分かれている。学習段階では、装着型デバイスと力センサを用いてユーザの指の皮膚変形、接触面との距離とそのときの3次元接触力を同時に計測する。計測した指の変形データ、距離データと圧力データで回帰モデルを学習させることで指の皮膚変形、接触面との距離と3次元接触力の関係を取得する。推定段階においては、装着型デバイスから指の皮膚

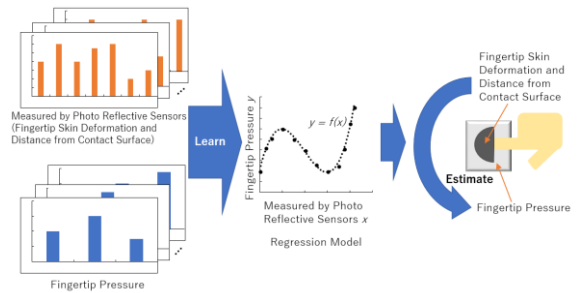


図3 3次元接触力推定のフロー

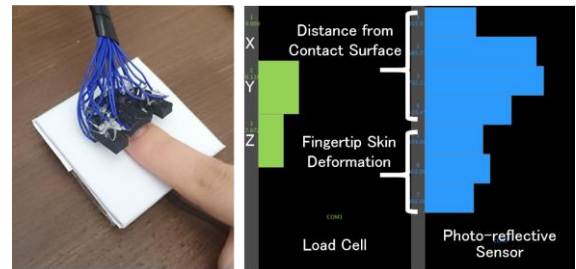


図4 ロードセルを用いて真値の取得と同時にデバイスでのデータを取得している様子

変形および接触面との距離を計測し、計測したセンサ値と回帰モデルから3次元の接触力情報を取得する(図3)。

3.3 指先の皮膚変形と接触力の計測

本研究では、ロードセルを力センサとして利用し、接触力を計測することで3次元の力情報を取得できる。また、開発した装着型デバイスを用いて皮膚変形および接触面との距離を計測することで7次元のデータを取得する。反射型光センサやロードセルなどの計測機器は計測したセンサ値にノイズが乗る。そのため本研究では5回計測した平均値をセンサ値として計測する。また、ロードセルでの圧力測定において指と接触面との距離を正確に測るため、ロードセル上に5cm×5cmの薄い平面の板を置いた(図4)。

3.4 システムの実装

本システムは Processing で構成したソフトウェアと Python で構成したソフトウェアに分かれている。指の皮膚変形と接触面との距離と圧力の計測およびセンサ値の可視化は Processing で行い、回帰モデルの学習および回帰モデルによる指先の圧力推定は Python で行う。

Processing から Python へ指の皮膚変形データ、接触面との距離データ、圧力データが送られると Python 上でセンサ値と回帰モデルから指先の圧力を推定する。本システムはフレームレート 60fps で動作する。また、回帰モデルの学習に用いた RFR は scikit-learn ライブラリに実装されているものを使用する。

3.5 提案手法の推定精度評価

提案手法による圧力推定精度を評価するためユーザ実験を行った。被験者として20代の女性3名が参加した。実験中被験者は人差し指にデバイスを装着してロードセルの上に置き、図5のような4方向にロードセル上で力を加えた。ロードセルへ力を加えている際の被験者の人差し指の皮膚変形と接触面との距離を装着型デバイスで計測

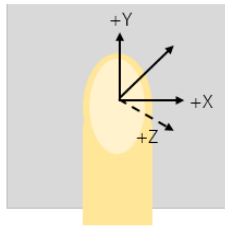


図5 力を加える4方向

し、同時に指先の圧力をロードセルで計測した。実験を行う前に被験者は操作の練習を行った。被験者は図5の各方向へ2回ずつ力を加えるように練習した。デバイス装着の際には被験者の利き手の人差し指に実験者が装着した。操作の練習を終えた後に実験を行い、被験者1人につき各方向10セットを計測して約12000フレーム(=60fps×約20秒×10セット)のデータを取得した。被験者はそれぞれの方向ごとに約5秒間力を加えた。予備実験で10N以上の力を指先に加えると皮膚の変形が起こらないために10N以上の力を推定できないことがわかった。そのため0-10Nのデータを使用して実験を行うこととした。被験者がz軸の方向に10N以上の力を加えた場合、ロードセルのセンサ値を10Nとして測定した。

接触力推定精度の評価として10分割交差検証を行い、ロードセルの圧力データと推定した指先の圧力の差の絶対値を求めることで推定誤差を計算した。計測したデータセットをランダムに分割して10個のサブセットを作成した。9個のサブセットを訓練データとして学習を行い、残りの1つのサブセットをテストデータとして圧力の推定誤差を計算した。10個のサブセットそれぞれが一度ずつテストデータとなるまでこれを繰り返した。学習は被験者ごとのデータセットを用いて行った。これはユーザーごとに皮膚形状が異なるためセンサの値が異なるからである。また、計測したデータセットのうち接触面との距離の情報を除いた状態でも10分割交差検証による学習と推定を行い、指先の姿勢情報を含めた場合と含めない場合の推定誤差を比較した。

接触力推定精度評価実験結果を図6に示す。図6は全被験者での平均接触力推定誤差を算出した結果であり、指先の姿勢情報を含めた場合はx軸方向に0.925N(標準偏差0.186N)、y軸方向に1.293N(標準偏差0.165N)、z軸方向に1.606N(標準偏差0.685N)となった。また、指先の姿勢情報を含めなかった場合はx軸方向に1.484N(標準偏差0.325N)、y軸方向に1.581N(標準偏差0.260N)、z軸方向に1.962N(標準偏差0.739N)となった。また、各軸ごとに姿勢情報を含めた場合の誤差と姿勢情報を含めなかった場合の誤差でt検定を行った結果、x軸では有意差が見られたが、y軸とz軸では有意差が見られなかった($p < 0.05$)。

図7はある被験者における3次元接触力推定結果の時間推移の一例である。図7では特にx軸で姿勢情報を含めた推定値が指腹変形のみでの推定値よりも真値に近い値となった。これは、右方向に指を傾けてx軸方向の入力を

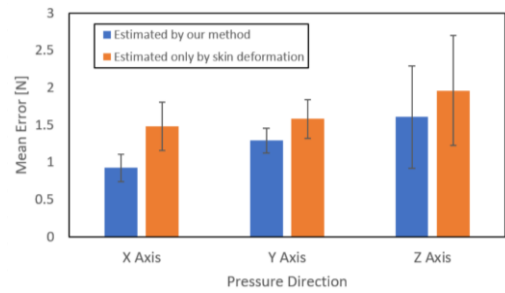


図6 接触力推定の平均誤差

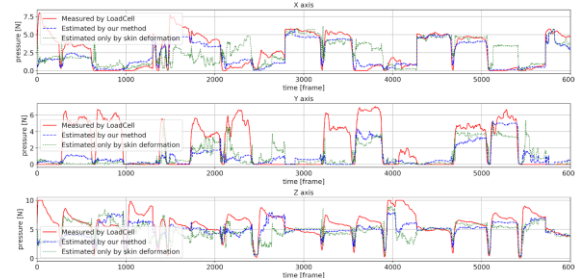


図7 ある被験者における3次元接触力推定結果

行うことが多かったことが影響していると考えられる。一方でy軸方向に入力を行う際はx軸に比べて前方向に力を加える際に指を傾ける角度が小さかったため、x軸ほど2種類の推定値に差が出なかったと考えられる。z軸の場合は被験者がx軸方向やy軸方向に力を加えているときにも垂直方向に力が加えられた。そのため、指の姿勢情報を含めた推定値と指腹変形のみでの推定値においてあまり差がでなかったと考えられる。また、ロードセルの上に薄い板を置いて計測を行ったため、被験者がロードセルにうまく力を伝えられなかった可能性も考えられる。

3.6 ランダムに動かしたときの推定精度

ユーザ実験としてもう一種類の実験を行った。被験者は1つ目の実験と同じ20代の女性3名が参加した。実験中被験者は人差し指にデバイスを装着してロードセルの上に置き、自由な方向に力を加えた。ただし、ロードセルの値をとることができる範囲が図5の各軸の+方向のみであるため、その範囲で動かすように伝えた。ロードセルへ力を加えている際の被験者の人差し指の皮膚変形と接触面との距離を装着型デバイスで計測し、同時に指先の圧力をロードセルで計測した。この実験は1つ目の実験が終わった後、指を少し休めてから行った。デバイス装着の際には被験者の利き手の人差し指に実験者が装着した。被験者1人につき10セットを計測して約12000フレーム(=60fps×約20秒×10セット)のデータを取得した。1つ目の実験と同様に被験者がz軸の方向に10N以上の力を加えた場合、ロードセルのセンサ値を10Nとして測定した。

接触力推定精度の評価として10分割交差検証を行い、ロードセルの圧力データと推定した指先の圧力の差の絶対値を求めることで推定誤差を計算した。計測したデータセットをランダムに分割して10個のサブセットを作成した。9個のサブセットを訓練データとして学習を行い、残りの1つのサブセットをテストデータとして圧力の推定

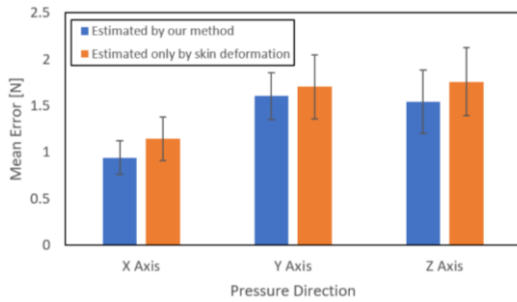


図8 接触力推定の平均誤差

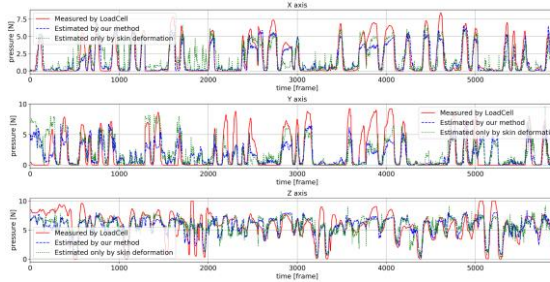


図9 ある被験者における3次元接触力推定結果

誤差を計算した。10個のサブセットそれぞれが一度ずつテストデータとなるまでこれを繰り返した。学習は被験者ごとのデータセットを用いて行った。また、計測したデータセットのうち接触面との距離の情報を除いた状態でも10分割交差検証による学習と推定を行い、指先の姿勢情報を含めた場合と含めない場合の推定誤差を比較した。

接触力推定精度評価実験結果を図8に示す。図8は全被験者での平均接触力推定誤差を算出した結果であり、指先の姿勢情報を含めた場合はx軸方向に0.943N(標準偏差0.178N)、y軸方向に1.605N(標準偏差0.255N)、z軸方向に1.545N(標準偏差0.343N)となった。また、指先の姿勢情報を含めなかった場合はx軸方向に1.144N(標準偏差0.234N)、y軸方向に1.705N(標準偏差0.345N)、z軸方向に1.760N(標準偏差0.364N)となった。また、各軸ごとに姿勢情報を含めた場合の誤差と姿勢情報を含めなかった場合の誤差でt検定を行った結果、z軸では有意差が見られたが、x軸とy軸では有意差が見られなかった($p < 0.05$)。

図8はある被験者における3次元接触力推定結果の時間推移の一例である。図9を見ると、x軸ではロードセルの値が0Nのときの推定値が指腹変形のみの場合には1~3Nの値を示すことが多かった一方で姿勢情報を含めた推定値ではほぼ0Nとなった。指腹変形のみでの推定値で値が出た部分はy軸またはz軸で力を加えているときであったため、指腹変形のみではどの方向に力を加えているのかわかりづらかった部分の姿勢情報を含めることで力の方向を推定しやすくなったと考えられる。

4. 結論

本研究では、指と物体との接触面にセンサを配置せずに接触力を測定するウェアラブルデバイスを提案した。反射型光センサを用いて指の側面の皮膚変形を計測することにより指にかかる接触力を推定した。また、反射型光セン

サを用いて接触面との距離を計測することにより、指の姿勢情報を得ることで推定精度の向上を目指した。

回帰モデルを用いて指先の皮膚変形、接触面との距離と3次元接触力の関係を得ることでデバイスのセンサ値から3次元接触力を推定する。推定精度を評価するため4方向に力を加えるユーザ実験を行い、平均推定誤差は姿勢情報を含めた場合x軸方向に0.925N、y軸方向に1.293N、z軸方向に1.606Nであった。また、ランダムな方向に力を加えたときのユーザ実験もを行い、平均推定誤差は姿勢情報を含めた場合x軸方向に0.943N、y軸方向に1.605N、z軸方向に1.545Nであった。力の入力方向を指定したときは、姿勢情報を含めて接触力を推定することで姿勢情報を含めないときと比較してx軸方向の場合に精度が向上した。被験者に自由に力の入力を行ってもらったときは、姿勢情報を含めて接触力を推定することで姿勢情報を含めないときと比較してz軸方向の場合に精度が向上した。

本研究のデバイスは指のサイズや形によってはうまく貼り付けられない場合がある。これは3Dプリンタでいくつかのサイズバリエーションや、指に合わせて湾曲させている部分の形を何種類か設けることで解決できると考える。また、今回のデバイスの場合、接触対象が平面上の場合にはうまく接触面との距離を測ることができるが、球体のものに触った場合は距離の測定が難しくなる。これは加速度センサなどを用いて指の角度情報を組み合わせることによって解決できると考える。

謝辞 本研究は、JST AIP-PRISM JPMJCR18Y2 および JST さきがけ JPMJPR17J4 の支援を受けた。

参考文献

- [1] 久能若葉, 河合航, 杉本麻樹, 杉浦裕太. 反射型光センサを用いた指腹の変形計測による接触力の推定. 電子情報通信学会技術研究報告, pp. 63-68, 2017.
- [2] Han, H., Shimada, A., Kawamura, S.: Analysis of Friction on Human Fingers and Design of Artificial Fingers; IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1996.
- [3] Nishimura, T., Doi, K., and Fujimoto, H.: Evaluation of Touch-Sensitive Screen Tablet Terminal Button Size and Spacing Accounting for Effect of Fingertip Contact Angle; IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 2015.
- [4] Mascaro, S. and Asada, H.: Measurement of Finger Posture and Three-Axis Fingertip Touch Force Using Fingernail Sensors; IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 20, No. 1, 26-35, 2004.
- [5] Grieve, R. T., Hollerbach, M. J., and Mascaro, A. S.: Fingernail image registration using Active Appearance Models; Robotics and Automation(ICRA 2013), IEEE.
- [6] 中谷正史, 川副智行. 触感の感性評価ツール: ウェアラブル触動作センサ HapLog. 日本ロボット学会誌, Vol.30, No. 5, pp. 499-501, 2012.