

# 平成 27 年度 未来研究ラボシステム 研究成果報告書

研究種目：個人研究

研究期間：平成 27 年 4 月～平成 27 年 10 月

研究課題名：電気インピーダンストモグラフィに基づく応力時空間分布計測とその応用  
ラボ長

所属：基礎工学研究科機能創成専攻生体工学領域

氏名：吉元俊輔

研究成果（当初の研究目的と得られた結果を記載してください。図表を含め 3 ページ程度）：

本研究では、任意形状の物体と身体の接触問題における力学的相互作用を電氣的に計測し、運動を制約することなく応力の時空間分布を取得可能な技術の開発を目的としている。提案する計測手法では、二つの対象物に電圧を印加し、接触時に生じる電位分布から物体間の接触に伴う圧力と接触位置の推定を行う。推定には導電体の電位分布モデルを利用し、計測された複数の部位の電位から逆問題を解くことで、力学的相互作用と関係のある電氣的な境界条件を得る。当該年度は（1）応力分布再構成アルゴリズムの改良、（2）計測システムの性能評価に取り組んだ。

（1）応力分布再構成アルゴリズムの改良

計測された電位から接触圧と部位を推定するために、導電体の電位分布モデルを利用し、二乗誤差で定義される目的関数の最小化問題を解くことで物体間の境界の位置と電位を推定する。境界部位の電位は接触抵抗に依存しており、接触圧を反映した情報であるため、計測された電位から接触圧を求めることができる。これまでの取り組みでは、最小化問題の解法として全探索を行っていたのに対し、本実施期間ではその改良として、進化的アルゴリズムの一つである差分進化を利用した最小化を実装した。また、目的関数と接触圧を求める関数を改良し、空間分解能と力の計測感度を向上させた。具体的な計算アルゴリズムを以下に示す。

i ラプラス方程式により導電体の電位分布をモデル化、電位の計算に利用する。

$$-\nabla \cdot (\sigma \nabla u) = 0 \quad (\sigma \text{ は導電率, } u \text{ は電位である。})$$

ii 計測された電位とモデルの電位の二乗誤差を目的関数として定義する。

$$E(\phi(\mathbf{x})) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^N (\tilde{\phi}_j^i(\phi(\mathbf{x})) - \phi_j^i)^2$$

( $\phi(\mathbf{x})$  は  $\mathbf{x}$  における電位境界条件,  $\tilde{\phi}_j^i(\cdot)$  は  $i$  番目の電極を設置した条件での  $j$  番目の電極の電位,  $\phi_j^i$  は計測された電位である。ただし,  $\phi$  はモデル・計測毎に最小値  $\tilde{u}_{\min} \cdot u_{\min}$ , 最大値  $\tilde{u}_{\max} \cdot u_{\max}$  を利用して正規化した値である。)

iii 目的関数を最小化する電位境界条件を求める。

$$\mathbf{x}_f = \arg \min_{\mathbf{x}} E(\phi(\mathbf{x})), \quad V(\mathbf{x}_f) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{u_{\max}^i - u_{\min}^i}{\tilde{u}_{\max}^i - \tilde{u}_{\min}^i} \tilde{u}_{cc}^i$$

( $\mathbf{x}_f$  は接触位置,  $V(\mathbf{x}_f)$  は接触位置での電圧値であり, 接触圧に依存した量である。)

電位分布の計算においては、対象物の形状データをメッシュ表現しておき、有限要素法を利用する。また、高速な計算を実現するため、全てのノードに対して電位境界条件を与えた際の電位分布を予め計算してデータ化おき、最小化問題の計算に利用する。

## (2) 計測システムの性能評価

計測装置では、対象物への電圧の印加と、各電極における電圧の取得を行う。さらに、逆問題を解くために複数の電圧印加状態の電位を取得する。本実験では、図 1(a)に示すように、対象物に接続する電極、印加状態を切り替えるためのマルチプレクサ、電源、AD/DA 変換器 (USB-6216, National Instrument 社製) を利用した。一方の対象物に接続する計測電極の数は 16 点であり、もう一方の対象物に電源の 9 V 端子を一つ接続した。計測電極はマルチプレクサに接続されており、接地される電極を時分割で切り替えることにより、16 種類の電圧印加状態を再現した。その切り替えの周波数は 1 kHz とし、計測のサンプリング数周波数は 10kHz とした。モデル化においては、対象物を要素数 4800、節点数 1722 の四面体メッシュに分割し、有限要素法による導電解析を行った際の各電極位置の電圧を取得した。計測において取得した電位の時間変化、計測およびモデルにおける電位の分布を図 1(b)に示す。モデルにおいて境界条件が適切に設定されれば (下段中央)、計測における電位分布と類似した分布が得られることが結果から確認できる。

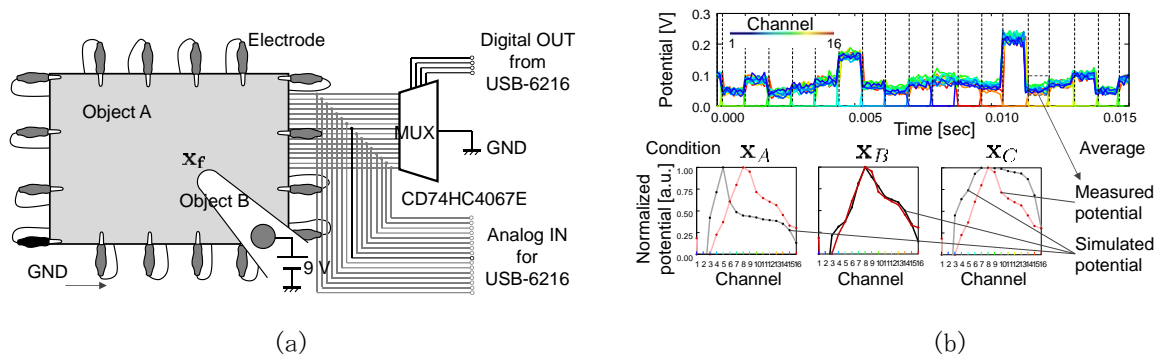


図 1: (a) 計測装置の構成, (b) 各電極の出力電圧 (上) と計測・モデルの電位比較 (下)。

縦 230 mm, 横 330 mm, 厚さ 2 mm の導電性シートと金属片の接触を例に、提案システムの性能評価を行った。具体的には、接触位置の推定 (A) と接触力の推定 (B) について評価を行った。実験装置の様子を図 2(a)に、いくつかの接触条件に対する電位の推定結果を図 2(b)に示す。金属片には力覚センサ (Tec Gihan Co., Ltd., USL06-H5-50N) が取り付けられており、接触力の真値の取得に利用した。また、推定された接触位置での電位分布の計算結果から、電圧が最も高い位置は二つの物体が接触した位置の付近であることが確認でき、位置の推定が正しく行えていることがわかる。

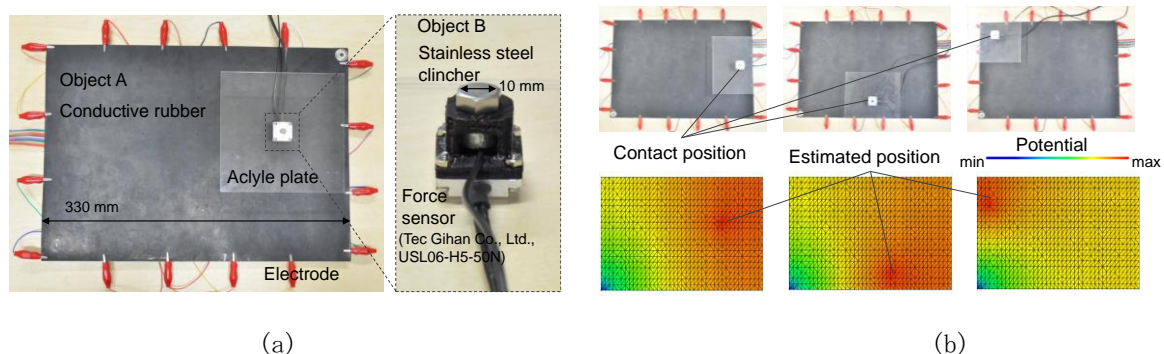


図 2: (a) 実験装置, (b) 計測の様子 (上) と電位分布の計算結果 (下) の一例。

## A. 接触位置の推定

接触位置の推定性能を評価するために、いくつかの接触位置に対する推定位置を取得し、誤差を算出した。対象物の表面、縦横  $4 \times 9$  か所（縦 40 mm，横 30 mm 間隔）に 12 N の接触力で金属片を配置した際の推定位置，二次元誤差ベクトルを図 3(a) に示す。結果より，物体の中央のほうが電極近傍よりも推定精度が良いことがわかる。また，誤差ベクトルが渦状に分布していることから，計測とモデルで電極の位置に差異があり，誤差が生じた可能性が示唆される。全体として，平均誤差を算出したところ，位置の推定精度は本実験における環境では 30 mm であることが明らかとなった。人体への適用を考えると現状の推定精度では不十分であるが，対象物のメッシュ分割数の増加とモデルにおける電極位置の適切な設定によって，精度の向上が期待される。

## B. 力の推定

力の推定性能を評価するために，力覚センサで得た接触力と推定電位との相関を調べた。実験では，対象物の中央に力覚センサを取り付けた金属片を配置し，0 N から 30 N の範囲で接触力を 5 回増減させた際の推定電位と力覚センサの値を記録した。計測結果を図 3(b) に示す。結果より，力の増加に伴って推定電位が増加し，高い相関を示すことがわかる。また，力の増加と低下によりその傾きが異なり，ヒステリシス特性を示すことがわかる。力の増加におけるデータに対し線形回帰を行ったところ，0.04 V/N の感度で力を推定可能であることが明らかとなった。

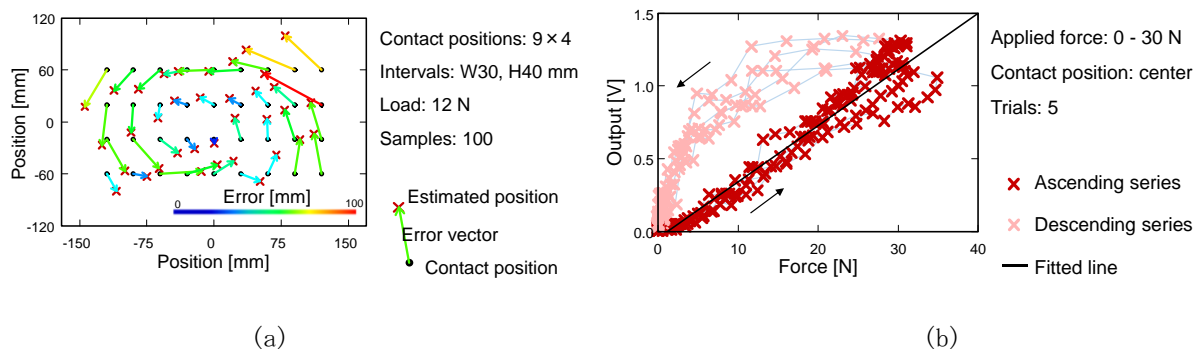


図 3 : (a)接触位置の推定結果，(b)接触力と推定電位の関係。

電位の計測にかかる時間は 16 ms であるのに対し，取得した電位から接触部位と力を推定するのに要する計算時間は  $7 \mu s$  未満であった。したがって，電極の切り替えに利用した周波数により時間分解能が決定される。この結果は電極の数やモデルの分割数によって変化するため，要求される時空間分解能に応じて決定するのが良いと考えられる。人の日常的な動作は 10 Hz 程度であることが知られているため，時間分解能に関しては現状の構成においても良好な結果が得られると考えられる。一方，接触条件として 1 点を想定した実験のみ行っており，多点での接触における性能を評価する必要がある。原理的には 1 点のみの電位の計算結果の重ね合わせで多点の場合についても取り扱うことが可能であり，本実施期間において実装したアルゴリズム・最適化手法の効果が期待できる。

本実施期間では身体動作への適応を計画していたが，計測原理の構築に当初の計画より時間がかかり，課題を残すこととなった。基本システムの構築とその評価を達成できたため，未来ラボ研究システムの支援下での実施は終了したものの，今後も継続的に研究を進める予定である。

キーワード：触覚センサ，応力計測，電気インピーダンストモグラフィ，接触解析

#### 研究経費（H27年度）の内訳

備品費	消耗品費	旅費	謝金	その他	合計
0円	112,143円	0円	0円	3,857円	116,000円

#### 共同研究者等

(1)共同研究者（氏名・所属）

該当なし

(2)研究協力者（氏名・所属・学年（学生の場合））

該当なし

#### 発表論文等（平成28年3月31日現在）

[雑誌論文] 該当なし（IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems への投稿準備中）

[著書] 該当なし

[学会発表]

S. Yoshimoto, M. Imura, and O. Oshiro:

Unobtrusive Tactile Sensing based on Electromechanical Boundary Estimation.

In Proceedings of 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, pp.4375-4378, Milan, August 2015.

[その他] 該当なし

外部資金獲得状況・申請状況（本研究課題に関連して、科研費、JST等の競争的資金、受託研究、奨学寄付金等を受給された場合、また、申請された場合はその状況を記入ください）

該当なし

#### 参考となるHP等

<http://oshiro.bpe.es.osaka-u.ac.jp/people/staff/yoshimoto/>