

超高感度静電誘導電流検出法を用いた非接触・無装着人体動作検出技術

栗田 耕一^{*1}

Non-contact and Non-attached Motion Detection Technique using an Ultrahigh Sensitive Detection Method of Electrostatic Induction Current

Koichi Kurita^{*1}

Abstract - Recently, researchers investigating human machine interfaces (HMI) have been trying to create easier to use interfaces by taking advantage of the communication and manipulation skills natural to human beings. HMIs with a direct sensing feature can be developed for a wide range of applications. However, because of the inherent limitation posed by input devices such as the mouse, keyboard and touch-sensitive panels, it is not possible to utilize the abundant forms of natural human expressions. In this paper, an effective non-contact technique for the measurement of the human hand and foot motions with application to HMI has been reported. We propose a method for detecting the motion of a subject's hand with respect to a given measurement electrode by measuring the current generated due to the change in the capacitance between a subject's hand and the measurement electrode. This method effectively describes the behavior of the waveform of the induced current.

Keywords: human motion, electrostatic induction, hand motion and walking motion

1. はじめに

人体動作を何らかの手法で検出し、この信号をヒューマンマシンインターフェイスに応用するため、多くの研究がなされている。例えば、筋電信号を利用したヒューマンマシン制御系への適用に関する研究などが活発になされている。この技術は、筋電信号検出装置の改良や低コスト化と共に、様々な用途への適用が期待されている。しかし、筋電信号検出のためには、オペレータの皮膚に対して電極を複数装着する必要がある^[1]。

一方、パッシブな方法として、オペレータの動きのカメラ画像を画像処理することによる方法も提案されている。この方法は、近年のコンピュータの処理速度向上に伴い、リアルタイムで画像処理を行い、処理結果を出力することも可能な優れた方法である。しかし、カメラを用いる方法は、オペレータの動きを的確に検出するために、オペレータの衣服の色と背景色とのコンビネーションや照明等の制約条件が生じる場合がある。また、カメラの死角を解消するためにカメラの数を増やすと処理が煩雑になるという欠点がある。

筆者らは、オペレータに対して一切の機器を装着することなく、完全非接触で人体の動きを検出する方法の開発を試みた。これを実現するため、筆者らは、オペレータの近傍に設置した電極とオペレータとの間で形成される静電容量が、オペレータの動きに伴い変化する現象に着目した。そしてこの現象により、電極に pA 程度の微

弱な静電誘導電流が流れることを理論的に予測し、これを実験で確認した。本稿では、この検出技術の原理を述べたあと、オペレータの手の動きや足の動きを非接触検出することにより得られた結果を基に、本手法の有効性を明らかにする。

2. 検出原理

2.1 手の動きの検出

人体は、歩行や足踏み運動等の動作を行うことにより、帯電することが分かっている。図 1 に示すように、被験者が床の上に直立している場合を想定する。ここで、人体とアース間には、靴底と床表面層の 2 つの高抵抗層が形成されている。そこで、地面と足の間の静電容量 C_{sf} は、足の靴底の静電容量 C_s と床表面層の静電容量 C_f との直列結合と見なす。さらに、人体と人体の周辺にある近接物体との間の静電容量を C_o とする。すると、床に直立している人体の電位 U_B は以下の式で与えられる^[2]。

$$U_B = Q_B / \left(\frac{C_s C_f}{C_s + C_f} + C_o \right) \quad (1)$$

ここで、 Q_B は人体に帯電する電荷である。従って、図 1 に示すように被験者の手から距離 d だけ離れた位置に電極を設置した場合に、被験者と電極の間の静電容量を C とすると、電極に誘起される電荷 Q は以下の式で与えられる。

$$Q = C(U_B - V) \quad (2)$$

ここで、 V は電極の電位である。最初に被験者の手があ

^{*1}: 近畿大学工学部 電子情報工学科

^{*1}: Faculty of Engineering, Kinki University

位置に電極が設置されている。この状態で、被験者の手を速度 v で原点から距離 x まで移動させた場合を想定する。そのときの人体と電極との間の静電容量 C は以下の式で与えられる。

$$C \propto \frac{\epsilon_a S(x)}{(d-x)} \quad (3)$$

ここで、 S は被験者の手の電極に対する有効面積である。また、 ϵ_a は空気の誘電率である。この式を用いて被験者が手を動かした際に生じる誘導電流 I を以下のように求めることができる^[3]。

$$I = \frac{dQ}{dt} = U_B \frac{dC}{dt} \propto U_B \frac{\epsilon_a S}{(d-x)^2} v \quad (4)$$

従って、この静電誘導電流を検出することにより、非接触で人体の動きを検出することが可能となる。また、式(4)から、流れる電流は電極に対する被験者の手の速度に比例していることが分かる。このことから、この方法を用いることにより手の動きの有無だけでなく、手の動きの速度も推定可能であることが分かる。

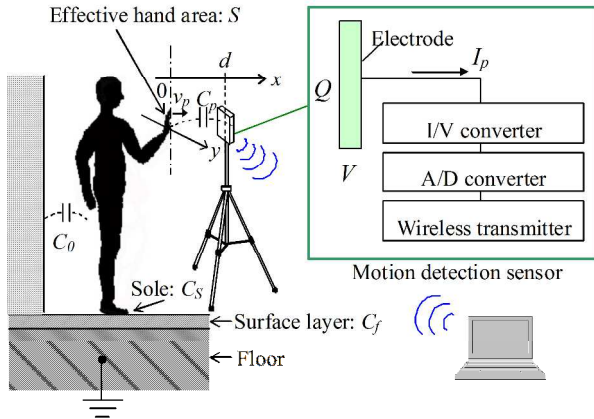


図1 被験者と静電誘導センサとの配置

Fig.1 Schematic representation of the interaction between the human body and the motion detection sensor.

2.2 足の動きの検出

図2に示すように、高抵抗の床材の上で靴を履いた被験者が歩行運動している場合を考える。被験者の靴底は高抵抗層を形成している。そこでまず、歩行運動による人体電位変動を考える前に、靴を履いた足がアースとの間で形成する静電容量について考えてみる。ここで、アースから足の間の静電容量 C_{sf} は、アースから床材表面までの静電容量 C_f と、靴の靴底部分で形成される床表面から足までの静電容量 C_s による直列結合で表すことができる。ここでは、人体を導体として取り扱っている。

$$\frac{1}{C_{sf}} = \frac{1}{C_s} + \frac{1}{C_f} \quad (5)$$

ここで、人が足踏みや歩行運動をしている場合には、歩行に伴い足が床から離れるため、床表面と靴底との間で形成する静電容量 C_x は以下の式で表すことができる。

$$C_x = \frac{\epsilon_a S_{nc}}{(x-x_0)} + \frac{\epsilon_f S_c}{x_0} = \frac{\epsilon_a S_{nc} x_0 + \epsilon_f S_c (x-x_0)}{(x-x_0)x_0} \quad (6)$$

ここで、 S_c は足裏と床表面との接触面積、 S_{nc} は足裏と床表面との剥離面積、 x はアース接地部から足裏までの距離、 x_0 はアース接地部から床表面までの距離、 ϵ_a は空気の誘電率、 ϵ_f は床表面からアースまで材質の平均誘電率である。式(6)の右辺第1項は足裏の床に対する剥離部分で形成される静電容量である。分母が $x-x_0$ は床表面から足までの距離を表している。 x がアースから足までの距離であり、 x_0 がアースから床表面までの距離だからである。一方、式(6)の右辺第2項は足裏が床に接触した部分で形成される静電容量である。この第2項はアースと床表面までの距離 x_0 を用いて表すことができる。また、式(6)の S_c は S_{nc} を含まず、両者の和が足裏面積となる。歩行運動中の人体の静電容量は、歩行運動により歩行者の足が床から離れることにより生じる付加的な静電容量 C_x と、先に求めた直立静止した静電容量 C_{sf} とが直列結合しているとみなすことができる。従って、歩行運動中の人体の全体の静電容量 C_B は以下の式で表すことができる。アースと足との静電容量変化は、人体を導体と見なしているため、式(7)のように人体とアースとの間の静電容量となる。

$$\frac{1}{C_B} = \frac{1}{C_{sf}} + \frac{1}{C_x} \quad (7)$$

そこで、歩行運動（靴の足裏と床との間の摩擦帯電）により、導体とみなしている人体に蓄積する電荷を Q_B とすると、人体電位 U_B とは以下の式で与えられる。

$$U_B = \frac{Q_B}{C_B} = \frac{Q_B}{C_{sf}} + Q_B \frac{(x-x_0)x_0}{\epsilon_a S_{nc} x_0 + \epsilon_f S_c (x-x_0)} \quad (8)$$

このような状況下で、被験者の近傍に設置した電極と人体との間で形成される静電容量を C とする。電極の電位を V とすると、歩行運動による人体電位の変動に伴い静電誘導現象により電極に誘起される電荷 Q は以下の式で表すことができる。

$$Q = C(V - U_B) \quad (9)$$

従って、人体近傍に設置した電極に流れる静電誘導電流 I は電極に誘起される電荷 Q の時間微分として以下の式で与えられる。

$$I = \frac{dQ}{dt} = \frac{d}{dt} (CV - CU_B) = \frac{dC}{dt} V + C \frac{dV}{dt} - \left(\frac{dC}{dt} U_B + C \frac{dU_B}{dt} \right)$$

$$= -CQ_B \frac{d}{dt} \left[\frac{(x-x_0)}{\epsilon_a S_{nc} x_0 + \epsilon_f S_c (x-x_0)} \right] + \frac{dC}{dt} V + C \frac{dV}{dt} - \frac{dC}{dt} U \quad (10)$$

この式の右辺の微分を実行すると、以下の式を得る。

$$I \propto \frac{Q_B}{\{\epsilon_a S_{nc} x_0 + \epsilon_f S_c (x-x_0)\}^2} \cdot \left[-x_0^2 \epsilon_a S_{nc} \frac{dx}{dt} + (x-x_0) x_0^2 \epsilon_a \frac{dS_{nc}}{dt} + (x-x_0)^2 x_0 \epsilon_f \frac{dS_c}{dt} \right] + \frac{dC}{dt} (V-U_B) + C \frac{dV}{dt} \quad (11)$$

式(11)の右辺の第1項は足が離地した後の足の動きに起因して生じる静電誘導電流であり、 x 方向への足の速度に比例している。第2項は足裏と床表面との剥離面積 S_{nc} の時間微分に比例した項である。さらに、第3項は足裏と床表面との接触面積の時間微分に比例した項である。ここで、床表面からアースまでの材質の平均誘電率 ϵ_f は空気の誘電率 ϵ_a に比べて数倍程度大きいので、式(11)の右辺第3項は第1項及び第2項に比べ静電誘導電流に強く寄与することが分かる。即ち、式(11)は人体の歩行運動に伴い誘起される静電誘導電流には足の接地・離地に伴い生じる足裏接地面積の時間微分に比例した信号が強く反映されることを示している。また、式(11)の右辺第3項は被験者と電極間で形成される静電容量 C に比例している。このため、例えば歩行運動により静電容量 C が減少した場合には、静電誘導電流 I も減少することとなる。

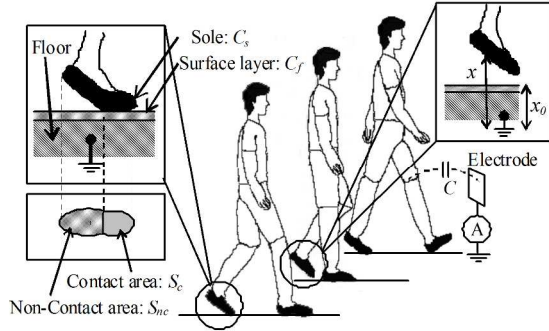


図2 歩行動作中の被験者と周辺で形成される静電容量
Fig.2 Scheme of interaction between human body and surface layer of floor in walking motion.

3. 実験方法

3.1 装置構成

床に直立した被験者の右手の手のひらから 30cm 離れた位置に電極を配置する。被験者の手の動きに伴い電極に誘起される電流を、I-V 変換器で電圧に変換する。この電流は pA 程度の微弱な電流であるため、商用電力によるノイズの影響を受ける。そこで、商用電力によるノイズを除去するため、カットオフ周波数 20Hz のローパスフィルタを経て A/D コンバートによりデータを収集した。静電誘導電流を誘起する電極のサイズは 2cm 角である。

また、A/D 変換のサンプリング周波数は 100Hz である。このセンサにより検出した静電誘導電流信号は、マイコン制御による XBee を用いて短距離無通信により PC にデータ転送した。

本研究では、まず、試作したワイヤレスセンサに対して、電極に近づく動作や電極から離れる動作をおこなった。さらに、図3に示す配置で、2台のワイヤレスセンサを 30cm 離して水平に配置し、センサ面から垂直に方向に 30cm 離れた位置にある手を電極に対して平行移動させた場合の信号を検出した。この際には、手の甲に加速度計を装着し、手の加速度を同時に計測した。計測した加速度データを積分することにより、手の速度を算出した。

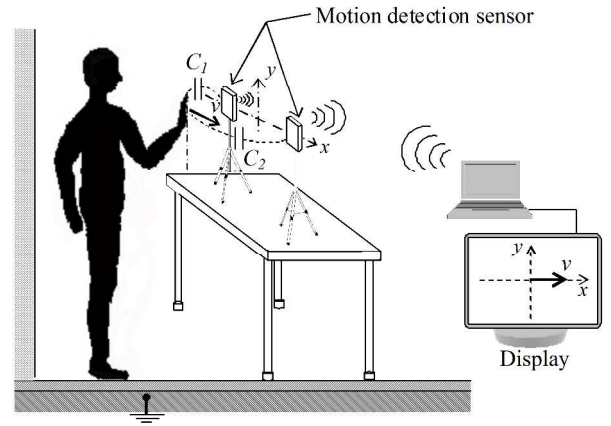


図3 2台のセンサを用いた手の動き検出配置図
Fig.3 Schematic representation of the interaction between the human body and the two wireless portable motion detection sensors.

3.2 検出回路

図4に本研究で用いた I-V 変換回路を示す。微弱な電流を電圧に変換するため、I-V 変換には入力オフセット電圧 $40\mu\text{V}$ 、入力オフセット電流 1pA の低ノイズのオペアンプを使用した。

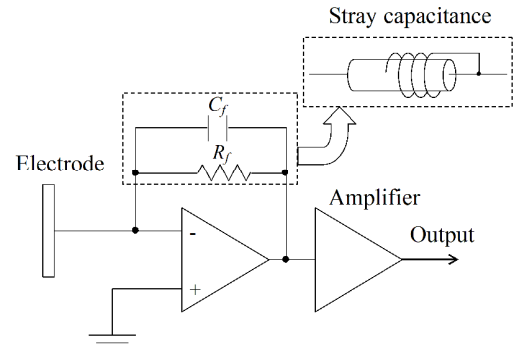


図4 I-V 変換回路

Fig.4 Schematic circuit diagram of the I-V converter.

帰還抵抗 R_f は $3\text{T}\Omega$ とし、 C_f を 1pF 程度とするために、

R_f にオペアンプの出力側から直径0.6 mmのスズメッキ銅線を巻きつけたストレを構成し、これを静電容量として利用した。 C_f は抵抗に巻きつける位置をオペアンプの入力側に移動すると増加し、オペアンプの出力側に移動すると減少する。さらに、このような微弱な電流を検出するため、オペアンプの入力で漏れ電流を低減するガード構造を採用した。I-V変換の変換比率は約3V/pAである。

4. 結果と考察

4.1 手の動き

図5で得られた結果は、図1に示した配置で得られた手の動きにより誘起された静電誘導電流波形である。センサから30cmの位置で、手のひらをセンサに近づけた場合と遠ざけた場合の一連の動作で得られた波形である。式(4)の予測どおり、静電誘導電流が検出されることが確認できた。

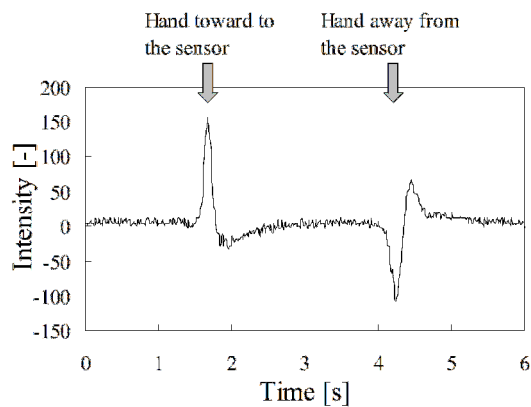


図5 手の動きによる静電誘導電流波形(センサ1台)

Fig.5 Waveforms of the electrostatic-induction currents generated due to hand movement with respect to one sensor.

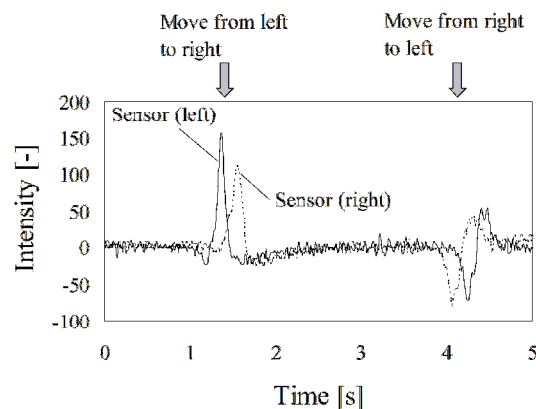


図6 手の動きによる静電誘導電流波形(センサ2台)

Fig.6 Waveforms of the electrostatic-induction currents generated due to hand movement with respect to two sensors.

図6は被験者の左手を水平に左から右に移動させ、引き続き右から左移動させた際に検出された典型的な静電誘導電流波形である。左から右に移動する際には、

Sensor(left)に先にピークが検出され、その後、Sensor(right)にピークが検出されている。このピークの時間差から手の動きの方向と速度を検出することが可能となる。一方、手を右から左に動かす動作では Sensor(right)で先にピークが検出され、遅れて Sensor(left)でピークが検出されており、手の動きの方向を反映した結果が得られており、式(4)を基に2枚の電極に拡張した予測結果と一致していることが明らかとなった。

4.2 足の動き

足の接地や離地の際に検出された静電誘導電流波形を図7に示す。この結果は、センサから1mの位置で被験者が直立し、右足のみを足踏みした際に検出された結果である。被験者には運動靴を履き、PVC製の床の上で右足のみ足踏み回数を1回、2回、3回と続けて行ってもらった。式(11)で予測されたように、足の接地や離地に伴いピークが検出されていることが分かる。

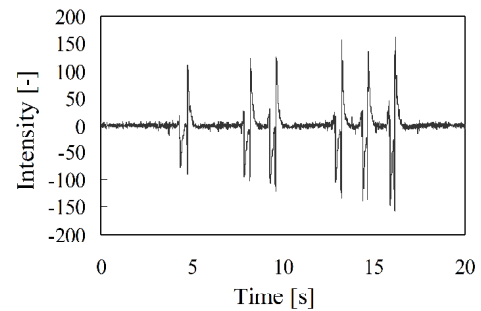


図7 足踏み運動により誘起された静電誘導電流波形

Fig.7 Typical waveform of current generated by human stepping motion.

5. まとめ

被験者に対して一切の機器を装着することなく、完全非接触で人体の動きを検出する方法の開発を試みた。これを実現するため、被験者の近傍に設置した電極と被験者との間に形成される静電容量が、被験者の動きに伴い変化する現象に着目した。この現象を利用することにより、被験者の手の動きの方向や速度を推定できる可能性があることを明らかにした。

参考文献

- [1] Rosenberg, R.: EMG Control of a Two Dimensional Pointer; Proceedings of the 2nd International Symposium on Wearable Computers, pp.162-163 (1998).
- [2] Ficker, T.: Electrification of Human Body by Walking; Journal of Electrostatics, Vol. 64, pp.10-16 (2006).
- [3] Kurita, K., Nishikubo, K.: Development of a Human Motion Measurement System for Application to the Human Machine Interface; ICROS-SICE International Joint Conference 2009, pp.5485-5488 (2009).