



床天井間の静電容量計測による 部屋スケール人体姿勢検出の基礎検証

新居 英明¹⁾, 吉田 貴寿¹⁾, 小林 康平¹²⁾, 南澤 孝太¹⁾

1) 慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科, nii, yoshida, ko5884, kouta@kmd.keio.ac.jp

2) 武蔵野美術大学造形構想学部映像学科, ias22036kk@ct.musabi.ac.jp

概要: 部屋スケールでの人体姿勢の研究において, 既にモジュール床による足裏の重心計測などを用いた姿勢検出がおこなわれてきている. しかし荷重のない状態や足裏が触っている状態などの検出は難しかった. 今回, モジュール床と天井の間にアクティブな容量変化を計測することで, モジュール単位での位置計測や, 足裏がモジュール床に接触する前の状態を計測できることがわかった. この件に関する基礎的な検証をおこなったので報告する.

キーワード: 静電容量計測, 姿勢計測, 屋内位置計測

1. はじめに

生活空間における人間の行動計測は, セキュリティやヘルスケアの文脈から非常に期待される技術領域であり, 多くの手法が提案されている. 特に, 現在普及するカメラ画像による計測のように, 認識性能が高いがプライバシー侵襲性の高い画像を取得する手法以外の代替手法の研究開発が盛んである. 例えば筋力発揮などの画像からは直接計測が難しいパラメータの取得や, 人間の安全と尊厳という, 計測性能とプライバシー保護のトレードオフに別解をもたらす手法の提案が待たれている.

この実現に向けて, 建材統合型のアプローチが検討されている. 建材統合方では, 床, 壁, 天井といった建材に対して計測システムとしての拡張を施すことで, 人間計測・空間理解の機会としてもちいるアプローチである. 建材統合という環境型のアプローチは, 装着型のように人間に追加の装着の手間を必要としないために利用時の負担が少ない. 特に, 床建材統合型のアプローチにおいては, 圧力分布計測が用いられる. これは人間の体重の情報に加えて, 歩行時の荷重左右差などより高次の身体情報の取得が期待される. さらに近年では, 人や家具との接触情報が家具を通じて床に伝搬したものを計測することで, 空間におけるより詳細な身体の使い方を計測することができる. このような床建材統合された計測システムについては, 建材と直接的・間接的に接触する身体の計測がメインとなっており, 非接触状態の身体の状態についての理解が薄かった.

そこで本提案では, 床建材と天井建材を電極として拡張することによる, 建材統合型アクティブ相互容量方式を提案する. これによって部屋スケールにおいて, 人間は上下の電極の間にはさまれる誘電体としてみなすことができ, そ

の行動を電氣的に計測することができる. さらに本方式では, 電極間における誘電体の有無を計測原理としているため, 床に着地する直前の足など, 建材と非接触状態である身体の情報も計測できると期待される. 本研究では, 天井 1 電極床 2 電極からなるプロトタイプを構築し, 建材統合型電極による人間計測の概念実証を行う.

2. 関連研究

本研究は, 建材統合型計測システムによる部屋スケールでの人々の行動計測に関するものである. 部屋スケールにおける人間の行動計測の全体像については, Teixeira らのサーベイ [1] が詳しい. 人の検出を存在, 計数, 位置, 追跡, 同定という 5 段階に分けて, 人間計測の手法を類別している. 検出の目標を定めることで, 用いることが可能な検出手法やその限界が明らかになる. 今回の手法では, 一般の公共空間や日常生活における行動計測を志向し, 利用時の手間を要する装着方式ではなく, 利用者に特段の事前要件を設けない環境型のシステムによる人間計測を検討する.

つぎに, 建材の種類 (たとえば, 床, 壁, 天井など) と検出原理 (たとえば圧力, 画像, 音響など) の組み合わせによる長短について見る. たとえば, 床建材を例にとると, 圧力 [2, 3], 画像 [4, 5], 振動 [6, 7] などが検討されている. 床建材は重力と拮抗する方向にその表面の法線をもつため, 接触を中心とした計測技術が提案されてきている. また壁面建材では, WiFi [8, 9] や容量式 [10] を用いた手法が検討されている. このように接触式に加えて, 電磁波を用いた非接触の検知も多い. これは壁面は人間が明示的に接触する機会が少ないことを反映していると考えられる. 最後に天井では, LED [11] や PIR [12] などを中心に, 光学式の手法が多い. これは人間の生活が部屋の底面に貯まることで上方のクリアランスが確保されるため, 一望できるというメリットがある.

Hideaki Nii, Takatoshi Yoshida, Kohei Kobayashi,
Kouta Minamizawa

本研究では、人間の接触状態を検出する床建材の活用をベースとして部屋スケールの人体姿勢検出を目指すものであり、特に、人間と建材表面の接触状態によらない計測手法の開発を目指す。このため、容量式による手法開発を検討する。さらに、電極による相互容量方式を拡張し、床材と天井建材による相互容量検出によって、空間分解能の大きな部屋スケールの検出を目指す。

但し、部屋スケールにおける容量計測をおこなう研究は既におこなわれている [13]。この中では床をモジュールで分割しそれぞれを電極とし、もう一方を机や壁などをとする容量計測をおこない、位置推定をおこなっている。本研究では位置推定に加え、姿勢推定のために利用可能な信号を取得することを目的とする。

3. 静電容量に関する基礎的計測

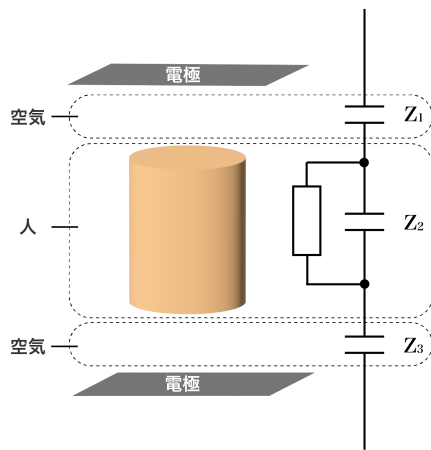


図 1: 床材から天井までの静電容量のモデルについて

今回の環境をモデル化すると、床材は正方形タイルであり、その表面に一定の大きさを持つ正方形の平面電極を用意し、天井をもう一方の電極と考える。この床材と天井の建材を電極とする構造のコンデンサと見なし、それぞれの床材と天井の間の静電容量を測定する手法を検討した。この電極の間を人が歩くと、非常に大きな誘電率をもつ生体組織により静電容量が大きく変わることが予想される。

この変化を計測することにより人の右足、左足がどのモジュール上にあるか、足と床とが非接触の状態であっても床との大まかな距離も計測できるか検討した。

この環境の床材と天井は一般的な平行平面電極としてモデル化でき、電極の間にひとがいる状態を考えると、図 1 で示す 3 つのコンデンサを直列につないだモデルとなる。 Z_1 は頭上の電極との間であるが、こちらは距離が数十センチから 1m を超える程度の値となるが、頭の位置はあまり変わらないことから容量変化はあまりないと仮定している。次に Z_2 に関しては生体組織の誘電率が影響する。[14] に示されている例としては 10kHz 程度の比誘電率で 10^4 のオーダー

となるため、コンデンサを直列につないだ場合には生体組織側の容量変化はあまり影響を与えることは無いと考えられる。また、人体表面は抵抗値も小さいため、影響はより小さくなる。最後に Z_3 であるが、こちらは接触する状態まで近づく近接範囲では、大きな容量変化となる。以上のことから、静電容量変化を用いて足と床材までの大まかな距離を測定することが可能と考えた。

次にどの床材モジュールの上に足が乗っているか推定する必要がある。いろいろな手法が考えられるが、今回は複数の床材との静電容量を同時に測定する方法として、床材側をモジュール毎に異なる周波数の正弦波で駆動し、天井側の電極を受信側に接続し、それぞれの周波数成分毎の信号電圧を計測し、それぞれの床材との静電容量に応じた電圧を取得できるようにした。

以上の方法を用いて、それぞれの床材モジュールから天井までの静電容量を求め、最終的にはそれぞれの床モジュール毎の容量性信号強度を計測することとした。このシステムでは、足が床に近づくと該当する周波数の容量性信号強度が大きくなり、足が床から離れると容量性信号強度が下がることになる。

4. 実験

上記の手法を用いて、床材モジュール 2 枚のどちらの上にも足があるか、また足が床に重量を掛けるまえに検出できるか実験をおこなった。使用機材は 50cm 角の重量センサ内蔵床モジュールで、実物を図 2 に示す。外観を一番奥に示し、その右側に示す床はカーペットを剥がした状態でアルミ泊が貼り付けてあり、さらにその下部には重量センサを取り付けた構造になっている。

また容量計測のために、発振器とオシロ機能を同時に利用可能な Analog Discovery3 [15] を用いて、10kHz と 20kHz の 5V の正弦波を出力し、スペクトラムアナライザモードで信号を受信し、0-50kHz まで記録した。このようにして準備した実験環境は図 3 に示す。

実験手順としては、以下の動作をおこない、モジュール毎の体重データと容量性信号を同時に記録した。

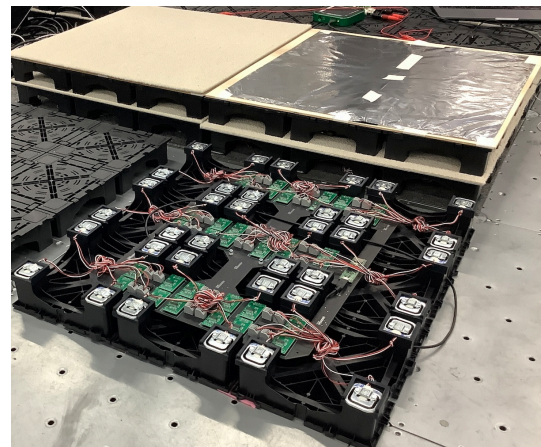


図 2: 床モジュールの外観と内側

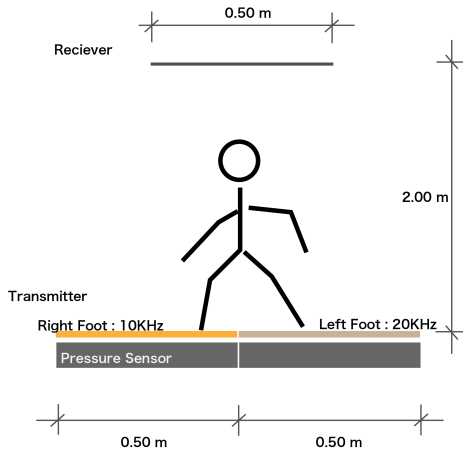


図 3: 実験環境セットアップ

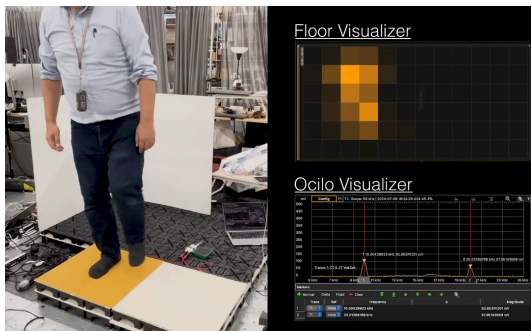


図 4: 実験のようす

- 右足を右の床モジュールに乗せる
- 左足を左の床モジュールに載せ替え、右足を浮かせる
- 左足を残し、右足を右の床モジュールに乗せ、重心だけを左右に振る
- 左足を浮かせる
- 左足を付けて、右足を浮かせる

実験の様子を図 4 に示す。また、実験結果を図 5 に示す。X 軸は開始からの秒数、縦軸は「床右足」、「床左足」については体重 [kg] であり、「容量右足」、「容量左足」は容量性信号の電圧 [V] を示す。このグラフより、足を踏み換えることにより、体重計測値と同様に容量性信号も綺麗に変化していることがわかる。容量性信号からも大まかな足の位置が計測できていることは明白である。その中でも、図中の中央部分においては容量性信号の変化は少ないのに対して、床センサの値は明確に変化していることから、足をつけたまま重心移動していることが推察できる。また、図 7 は図 5 の最初の部分の拡大図である。こちらの図を見ると、重量センサが反応する前に容量性信号は明らかに強度が上昇している。その結果から以下の 2 点が判明した。

- 両足を付けた状態では重心が変わっても容量性信号強度はあまりかわらない

- 最初の重量センサの値が 0 から大きくなる手前から容量性信号強度は強くなっている

しかしながら、この実験では重量信号よりやや早くから容量性信号強度が変化していることは読み取れたが、信号強度から足と床の距離を測定することはできなかった。その理由としては、床についている足の数が 1 本、2 本などの異なる場合には異なるモデルが必要なためだと考えられる。

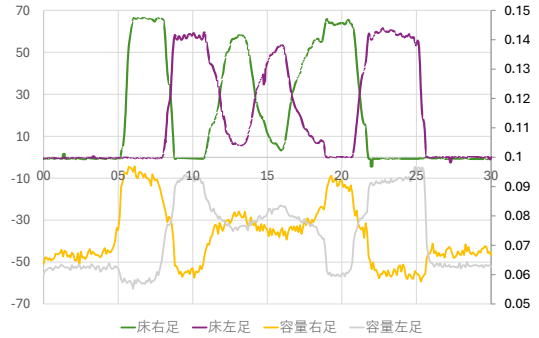


図 5: 床にかかる重量と容量性信号強度の関係

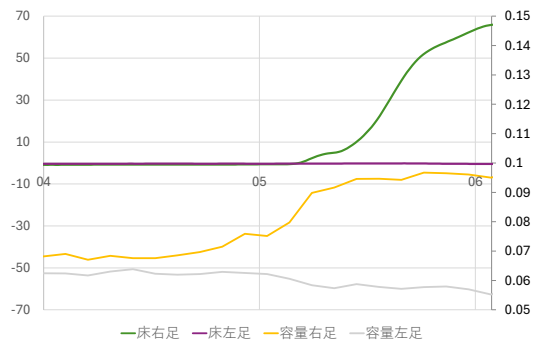


図 6: 容量性信号強度の立ち上がり

5. まとめ

以上の結果より、容量信号計測をおこなうことで、足が床に着く前に信号を検出することができた。この現象を利用して、床モジュールを用いた部屋スケールの人体姿勢検出に関する補佐信号としての利用が示唆される。しかしながら、この信号から直接距離情報を計測することはできなかった。その理由としては足の着き方により異なるモデルが必要だからであると考えられる。

6. 発展的問題

ところで、今回の静電容量計測では距離に比例した値を取得することはできなかった。しかしながら、別の興味深い現象を取得することができた。その結果を図 7 に示す。この「2乗加算のルート」とグラフに書かれている値は $V = \sqrt{V_{10kHz}^2 + V_{20kHz}^2}$ を意味するが、この値は人が乗っている間ずっと一定値を示していた。最初と最後に値が小さいのは床モジュール外に人がいる時を示している。これは何を示すのだろうか？足を上げたり下げたり足を動かしても

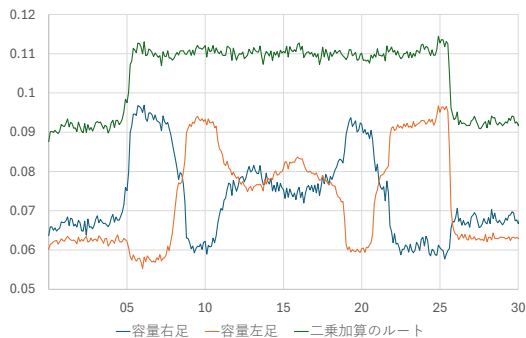


図 7: 左右の容量性信号と演算処理後の容量性信号

値が変わらないことから、まったく別のパラメータを示しているに違いないが、時間が足りないため、結果を出すことができなかった。

謝辞 本研究は、JST ムーンショット型研究開発事業「身体的共創を生み出すサイバネティック・アバター技術と社会基盤の開発」(Grant number JPMJMS2013) の支援のもと行われた。

参考文献

- [1] Thiago Teixeira, Gershon Dublon, and Andreas Savvides. A survey of human-sensing: Methods for detecting presence, count, location, track, and identity. *ACM Computing Surveys*, Vol. 5, No. 1, pp. 59–69, 2010.
- [2] Takatoshi Yoshida, Narin Okazaki, Ken Takaki, Masaharu Hirose, Shingo Kitagawa, and Masahiko Inami. Flexel: A modular floor interface for room-scale tactile sensing. In *Proceedings of the 35th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 1–12, 2022.
- [3] Takuya Murakita, Tetsushi Ikeda, and Hiroshi Ishiguro. Human tracking using floor sensors based on the markov chain monte carlo method. In *Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition, 2004. ICPR 2004.*, Vol. 4, pp. 917–920. IEEE, 2004.
- [4] Alan Bränzel, Christian Holz, Daniel Hoffmann, Dominik Schmidt, Marius Knaust, Patrick Lühne, René Meusel, Stephan Richter, and Patrick Baudisch. Gravityspace: tracking users and their poses in a smart room using a pressure-sensing floor. In *Proceedings of the SIGCHI conference on human factors in computing systems*, pp. 725–734, 2013.
- [5] Thomas Augsten, Konstantin Kaefer, René Meusel, Caroline Fetzer, Dorian Kanitz, Thomas Stoff, Torsten Becker, Christian Holz, and Patrick Baudisch. Multitoe: high-precision interaction with back-projected floors based on high-resolution multi-touch input. In *Proceedings of the 23rd annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 209–218, 2010.
- [6] Shijia Pan, Amelie Bonde, Jie Jing, Lin Zhang, Pei Zhang, and Hae Young Noh. Boes: building occupancy estimation system using sparse ambient vibration monitoring. In *Sensors and smart structures technologies for civil, mechanical, and aerospace systems 2014*, Vol. 9061, pp. 406–421. SPIE, 2014.
- [7] Shijia Pan, Mostafa Mirshekari, Jonathon Fagert, Carlos Ruiz, Hae Young Noh, and Pei Zhang. Area occupancy counting through sparse structural vibration sensing. *IEEE Pervasive Computing*, Vol. 18, No. 1, pp. 28–37, 2019.
- [8] Jiaqi Geng, Dong Huang, and Fernando De la Torre. Densepose from wifi. *arXiv preprint arXiv:2301.00250*, 2022.
- [9] Fadel Adib and Dina Katabi. See through walls with wifi! In *Proceedings of the ACM SIGCOMM 2013 conference on SIGCOMM*, pp. 75–86, 2013.
- [10] Miika Valtonen, Jaakko Maentausta, and Jukka Vanhala. Tiletrack: Capacitive human tracking using floor tiles. In *2009 IEEE international conference on pervasive computing and communications*, pp. 1–10. IEEE, 2009.
- [11] Tianxing Li, Qiang Liu, and Xia Zhou. Practical human sensing in the light. In *Proceedings of the 14th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*, pp. 71–84, 2016.
- [12] Xiaomu Luo, Tong Liu, Baihua Shen, Liwen Gao, Xiaoyan Luo, et al. Human indoor localization based on ceiling mounted pir sensor nodes. In *2016 13th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*, pp. 868–874. IEEE, 2016.
- [13] Tobias Grosse-Puppenthal, Christian Holz, Gabe Cohn, Raphael Wimmer, Oskar Bechtold, Steve Hodges, Matthew S. Reynolds, and Joshua R. Smith. Finding common ground: A survey of capacitive sensing in human-computer interaction. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, p. 3293–3315, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.
- [14] 金井寛, 中山淑. 生体の電気特性. 医用電子と生体工学, Vol. 24, No. 4, pp. 220–225, 1986.
- [15] DIGILENT PULLMAN. Analog discovery 3. <https://digilent.com/shop/analog-discovery-3/>.