



建材統合型の静電容量計測による空間内の人間の接触・近接行動計測の基礎検討

小林康平¹⁾²⁾, 新居英明²⁾, 張佳楠²⁾, 彭涵睿²⁾, 吉田貴寿²⁾, 南澤孝太²⁾

1) 武蔵野美術大学 造形構想学部映像学科 (〒 187-8505 東京都小平市小川町 1-736, ias00236kk@ct.musabi.ac.jp)

2) 慶應義塾大学 大学院メディアデザイン研究科 (〒 223-8526 横浜市港北区日吉 4-1-1, ko5884, nii, sonan13zjn, phanrui, yoshida, kouta@kmd.keio.ac.jp)

概要: 部屋スケールの人間計測において, 床や壁, 天井など, 建材に計測機能を統合する建材統合型アプローチが用いられてきた. 従来は圧力分布計測が主に用いられており, 人と物の接触を計測することができたが, 近接の計測は難しかった. そこで本研究では, 床と天井を電極とする静電容量計測により, 接触だけでなく近接計測が可能なシステムを提案する. 人間の位置や, 家具や家具上に置かれた物への近接および接触状態の計測を実現した.

キーワード: 計測・認識, 静電容量計測, 知能化空間, 建材統合型インタフェース

1. 序論

空間内の人間の行動計測は, セキュリティやヘルスケアのみならず, メディアアートや映像インスタレーションなど, 芸術・表現の領域においても活用が期待されており, これまで多くの手法が提案されている.

身体への装着を必要としない, 環境型という利点がある行動計測手法として, 圧力分布や静電容量計測を用いた研究が行われている [1, 2]. 環境型の計測装置の構成手法の一つとして, 床, 壁, 天井などの空間の構造に対して計測システムとしての拡張を施す建材統合型のアプローチが研究されている [3, 4, 5]. 建材が元来の拡張機能を維持しながらも, 計測システムとして建材を加工・拡張することで, 既存の建築や施工の手法のまま空間をつくることができ, 空間設計の汎用性, 高いデザイン性, 普遍性, 人への行動制約の軽減などに利点がある.

そこで, 本プロジェクトでは, 床, 天井建材への計測機能の付与に着眼し, 空間内の人間の接触・近接行動計測を研究を行っている. 前回の報告 [6] において, 地面圧力分布と静電容量計測を用いることで, 接触の前後の近接の状態が計測できることを確認した. 今回は, 生活空間における静電計測をモデル化し, それに基づき, 計測システムを設計した. 建材として用いられる素材を用いプロトタイプを構築し, 建材統合型電極による人間行動計測の検証を行った. 空間内の人間の床への接触計測に加え, 家具やものへの近接・接触についての計測の検証も行った.

2. 生活環境の容量的モデル化

まず, 生活環境を集中定数回路に基づいてモデル化する. 床と天井を電極とし, 間の空間を誘電体とする構造のコンデンサと見なす. ここでは人間を導体と考えその表面は等電位となる. また, 金属などの導体で出来た家具など, 金属物が存在する場合には, 人と金属物の間も容量的な結合が

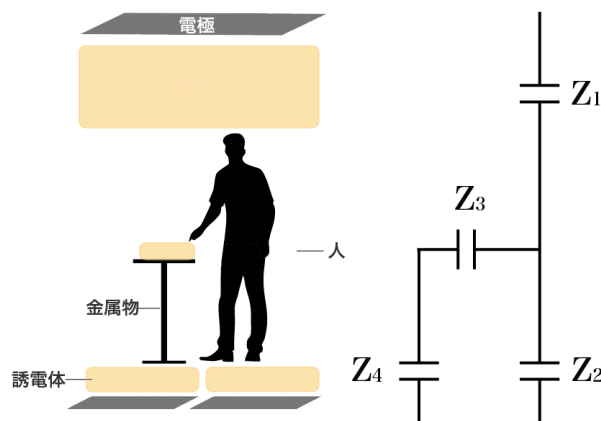


図 1: 静電容量に基づく空間内の人間計測原理

起きる. 以上の状況を電気回路として理解するために, 人と天井 (電極) までの間 (Z_1), 人と床 (電極) の間 (Z_2), 人と金属物の間 (Z_3), 金属物と床 (電極) の間 (Z_4) とした時の等価回路のモデルを図 1 に示す.

ここで, 平行板コンデンサの静電容量式を今回のモデル化において考える.

$$C = \epsilon \frac{S}{d}$$

ϵ は誘電体, S は極板面積, d は極板間距離である. 今回のような生活空間におけるモデル下においては, 主として, ϵ は素材に, S は人体の部位に, d は動作の状態によって変化するため, これらの要因が合わさることにより, 容量 C が動的に変化する.

このモデルを, 次の具体的なシチュエーションにおいて考える. 例えば, 人が立ってテーブルに手を伸ばしている状況を考えると, 前述のモデル化に従い, 各コンデンサは次のように構成され则认为る.

Z₁：天井の表面と人体と天井に最も近い箇所が電極となり、その間には空気が誘電体となるコンデンサが構成される。姿勢を上下すると、頭の位置が変わるため、極板間距離が変化し、その容量が変化する。さらに、片手を高く掲げる姿勢では、手と天井を極板とするコンデンサとの合成容量が Z_1 となる。

Z₂：靴を履いている場合や、地面にカーペットなどが敷かれている場合には、その厚みが極板間距離になり、かつその素材が誘電体になるようなコンデンサが構成される。特に、人は歩く際に接地点数が変わるため、両足ついている時に比べ、片足あげている時は、極板面積が半分になると考えられる。

Z₃：人の手のひらとテーブルの表面を極板とし、その間の空気を誘電体とするコンデンサが構成される。例えば、表面に手のひらが近づく場合には、極板間距離が小さくなり、人とテーブルは等電位となると考えられる。テーブルから手を離すに従って、極板間距離が大きくなり、その容量が大きくなる。また、接触した際には容量が無量大となり、導通しているとみなせる。

Z₄：テーブルの脚部と床の電極からコンデンサが構成される。カーペットなどの敷物や電極の上に床材がある場合には、その厚みと素材がコンデンサの容量を決定する。このように、テーブルが床に機械的に“接地”していても、電気的には“接地”していないため、容量的に結合する。

また、人の位置や、家具の接地しているそれぞれの場所で容量計測を行うため、床の電極は空間内の分解能をあげるため、複数から構成される。電極毎の大きさは、計測の目的ごとに異なり、人が乗ることの出来る大きさであれば、各電極での容量変化を通じて、空間内の人の行動が計測できる。

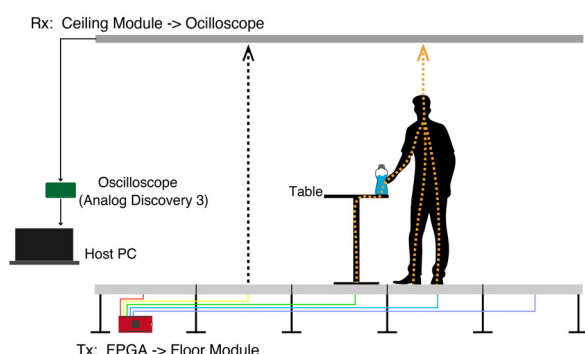


図 2: システム構成

3. 建材統合型インタフェース

3.1 デザイン指針

前述の生活環境モデルに基づいて、ある特定の建材を静電容量計測に基づいたインタフェースとして再加工・拡張することについて考える。この時、例えば、ただ適当にアルミ板を木板の表面に貼り付けただけでは、適切なデザイン

がなされたとは言い難い。なぜなら、加工前の木板が持つ意匠が損なわれたり、塗装が難しくなったり、木工機材での加工性が損なわれたりと、建材としての元来の拡張性を失うからである。そこで、建材をインタフェースにする上で、加工が行われる前と同等の機能を保つ建材統合の手法を採用する。金属などの導電性のある建材の場合は、新たに加工を施すこと無く機能を保持出来るため、インタフェースとして利用できる。また、木や石、石膏ボード、カーペット、コンポジションビニル床タイルなど絶縁体である建材においては、例えば、建材内部にシート上の金属電極を中間層として埋め込むことで、表層の機能を保持したままインタフェースとして利用できる。

3.2 システム構成

前述のデザイン指針に基づき、実際の建材に統合できる計測システムを設計する。床と天井それぞれ広い面積をもつ金属を電極として設置する。床の場所毎の静電容量計測をするため、床には一定の面積をもつ電氣的に独立したタイル状の電極を並べる。天井側には単一の端子として、床に敷かれた電極の上をある程度覆うように設置する。計測方式として、床にはそれぞれ特定の周波数の波形を送信し、天井の受信部に到達するまでのインピーダンスを各周波数毎に測定できるようにすることで、床モジュールごとに同時測定を可能とする。

また、本システムでは隣接した床に人体の一部が近づくとそちらとの静電容量変化も発生するため、人の行動に関する情報を取得できる。これは垂直方向の容量変化だけでなく、水平方向に関する容量変化も計測可能といえる。また、底面積が大きい金属製の家具を用いることで、家具や家具上に置かれた誘電性のあるものへの近接接触の計測が可能である。

4. プロトタイプ

これまでの指針設計に基づきプロトタイプを実装し、図3に示す。ハードウェアとソフトウェアに分け、各章で構成について述べる。

4.1 ハードウェア

天井電極には、パイプでできた骨組みの上に木板を置き、その上に厚さ 0.2mm 幅 400mm 長さ 1200mm のアルミ板を2枚を、床モジュールの上に均等になるように設置した。互いをワニ口クリップで接続し、端点に電線繋げ測定器のプロープに接続した。

床電極にはナカ工業社製のスチール製の OA フロアと脚材を使用し、脚部の設置面を電氣的に独立させ、縦に3つ、横に5個並べ、合計15個設置した。また、各床モジュールは他の床材と接触する箇所は電気用ビニールテープで絶縁した。各モジュールへは、発信機としては発振周波数 48MHz からの分周器として FPGA を使用した。出力する周波数は 10kHz から 400Hz おきに 20kHz 未満の周波数であり、床モジュールごとに出力した電線をワニ口クリップで接続している。また、出力周波数誤差は最大 8Hz となっている。

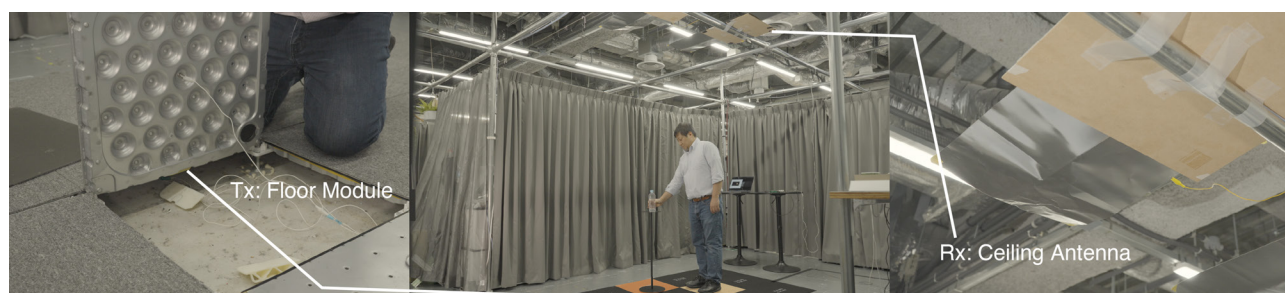


図 3: 構築した建材統合型プロトタイプおよび計測化空間

FPGA 出力には Logic IC のバッファを付加し、5Vp-p の出力を取り出し、出力した周波数における電圧値を抽出した。測定器には Digilent 社の Analog Discovery 3 を用い、PC に接続し、計測を行った。

4.2 ソフトウェア

ソフトウェア実装においては、測定器の Analog Discovery 3 で計測した電圧波形データに周波数スペクトル解析を行った。電圧波形データは WaveForms SDK の Analog In および Spectrum API を用いて処理し、高速フーリエ変換 (FFT) によって周波数スペクトルを抽出する。対象周波数範囲は 0-25 kHz、周波数分解能は 12.21 Hz である。約 14 Hz の周波数で測定をリアルタイムに行い、各モジュールへ出力した周波数の電圧値を抽出した。

可視化部では、抽出した電圧値に、直前 4 点の移動平均を算出し、その平滑化後の値をカラー強度で表現したヒートマップとして表示した。さらに、テーブル位置として登録された領域については詳細な容量性信号の時間変化を合わせて提示し、各モジュールにおいて変動を詳細に観測できるよう設計した。

5. 実験

5.1 接触・近接行動計測

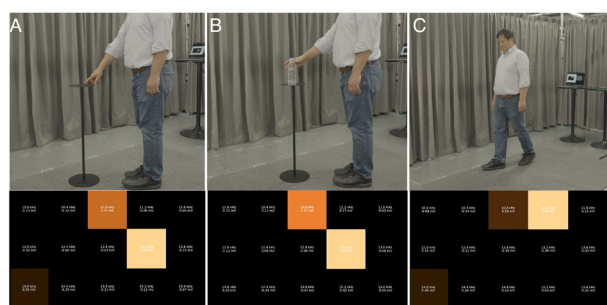


図 4: 実験の様子

図 4 に実験設定および結果を示す、上段 (A) は被験者がテーブル天板に手を近接・接触する様子、(B) はテーブル上に置いた水入りペットボトルに手を近接・把持する様子、(C) は隣接する 2 枚の床電極上を歩行する様子である。下段は各条件下で測定した静電容量変化をヒートマップとして可視化したものである。本プロトタイプを用いて A-C の

3 条件で接触・近接行動実験を実施した。A および B では、一方の床電極上にスチール製テーブルを配置し、他方の床電極上に被験者が立位をとった。A ではテーブル天板、B ではテーブル上のペットボトルに対し手を接近・接触させた。C では隣接する 2 枚の床電極上を歩行をした。いずれの条件においても、ヒートマップ上で接近から接触に伴う静電容量性の変化が確認された。

5.2 床建材の素材の比較

前述の建材統合のデザイン指針に従い、床材を 3 種類の素材を用いてモジュールを試作し実験を行った。試作したモジュールを図 5 に示す。

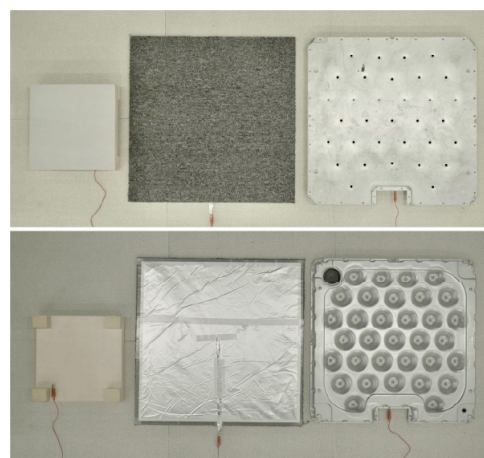


図 5: 使用した木、カーペット、金属の床建材

試作したモジュールは、アルミニウム板が挟まれた木の板の上にコンポジションビニル床タイルを貼り、木で脚部を作ったモジュールの床、裏に薄いアルミニウムのシートを貼り付けたタイルカーペット、プロトタイプで使用している金属製の OA フロア、の 3 種類である。なお、金属やタイルカーペット、コンポジションビニル床タイルは、商用施設で広く内装材に使われ、木や布は、商用施設のみならず住宅建築にも広く使われる素材である。

各モジュールに、Analog Discovery 3 を用い 10kHz、5Vp-p の正弦波を出力し、Spectrum Analyzer モードで出力した周波数の電圧値を受信した。靴下を履いた人が、上に乗っている時と乗っていない時の 2 つの条件で実験を行い、その時の値を記録した。結果を図 6 に示す。

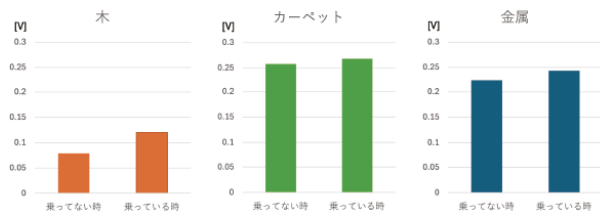


図 6: 各素材での容量性信号の変化

縦軸が容量性信号の電圧 [V] を示し、左が人が上に乗っていない時、右が乗っている時の電圧を示す。全ての試作した建材において、人の行動変化に伴う計測値の変化が確認された。

6. 議論

接触・近接行動計測において、手をテーブルやものへ近づけた時と歩行の際に、ヒートマップ上での容量変化の様子にあまり違いがなかった、第2章で定義したモデルに基づく、 Z_2 の電極に当たる足底と、 Z_3 の電極にあたる手掌は、素手であるため面積は Z_2 の方が大きい一方、靴底厚分 Z_3 の素手と距離が近いことから、容量変化には大きな違いが見られなかったと推察される。

また、床建材の素材の比較より、金属のみならず木板や布といった種類の建材においても、本提案の建材統合アプローチが有効である可能性が示された。特定の建築空間のみならず、様々な空間において、空間構造を静電容量インタフェースに拡張することが推察される。今後は、石膏ボードや石など建材においても同様の結果が見られるか検証したい。

さらに、今後の応用として、床モジュールおよび家具との静電容量変化を詳細に解析することで、垂直、水平の両方向の人間の行動が計測できることから、立位や歩行姿勢など多様な姿勢の推定が可能であると考えられる。これは非装着の屋内モーションキャプチャやメタバースや芸術、インスタレーションにおけるインタラクションに有用である。

7. 結論

以上より、様々な素材の建材において、静電容量計測インタフェースへと拡張し、空間内の人間の近接・接触行動を計測することができた。また、本提案の指針を元に拡張された建材を用いることで、多くの建築物において、既存の建築と同様のプロセスで建築構造を静電容量計測システムとして構築することが可能であり、様々な建築・空間内で、本来の空間建築設計と美観を保ったまま、空間内の人間の行動計測をすることが期待できる。

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」(JPMJMS2013), JST ACT-X(JPMJAX23KK)の支援のもと行われた。

参考文献

- [1] Yiyue Luo, Yunzhu Li, Michael Foshey, Wan Shou, Pratyusha Sharma, Tomás Palacios, Antonio Torralba, and Wojciech Matusik. Intelligent carpet: Inferring 3d human pose from tactile signals. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 11255–11265, June 2021.
- [2] Te-Yen Wu, Lu Tan, Yuji Zhang, Teddy Seyed, and Xing-Dong Yang. Capacitivo: Contact-based object recognition on interactive fabrics using capacitive sensing. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '20*, pp. 649–661, Virtual Event, USA, October 2020. ACM.
- [3] Sizhen Bian, Mengxi Liu, Bo Zhou, Paul Lukowicz, and Michele Magno. Body-area capacitive or electric field sensing for human activity recognition and human-computer interaction: A comprehensive survey. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, Vol. 8, No. 1, p. 1–49, March 2024.
- [4] Yang Zhang, Chouchang Yang, Scott E. Hudson, Chris Harrison, and Alanson P. Sample. Wall++: Room-scale interactive and context-aware sensing. In *Proceedings of the 36th Annual SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '18*, Montreal, Canada, 2018. ACM. Paper 273, 15 pages.
- [5] 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.
- [6] 新居英明, 吉田貴寿, 小林康平, 南澤孝太. 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. 第29回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, pp. 3E1–10. 日本バーチャルリアリティ学会, 9月2024.