

# 生活空間における人位置検出用静電容量型床センサシステム

福井類 (東京大学) 森武俊 (東京大学) 佐藤知正 (東京大学)

## A Capacitive Floor Sensor System for Human Position Detection in Living Space

\*Rui FUKUI, Taketoshi MORI, Tomomasa SATO (The Univ. of Tokyo)

**Abstract**— This paper presents a prototype of capacitive floor sensor system with low-cost/easy-installation/maintenance-free advantages for detecting human position in a living space. Features of the sensor system is simplicity that the system is made of very simple parts hence inexpensive, and modularity which enables easy expansion of the sense area. Experiments confirmed the sensor characteristics for human detection and showed the feasibility of accurate sensing with only simple recognition and filtering processes.

**Key Words:** Capacitive Sensor, Human Position Detection, Intelligent Environment, Sensor Network

### 1. 緒論

近年、安心・安全のために人を見守るセンサへの関心が高まっている。福祉介護用途では老人の在室、外出、さらには徘徊などを観察するツールとしてのセンサシステムが数多く商品化されており [1, 2]、現場における人出不足を解消する手段として利用が始まっている。人の動きを観察するために、人にデバイスを携行してもらうことを想定したシステムも多いが、本研究では非拘束性を重要視するため、この方式を採らない。

現在商品化されているみまもりシステムでは赤外センサ、焦電センサ、スイッチなどが一般的である。これらは特定のスポットにおいて堅牢に人の動きを観察するのに便利であり、何よりセンサの価格が安価であることが魅力的である。しかし赤外センサや焦電センサは、状態の変化を検知するものであり、静的な人の在室を検知するには適していない。また光学の原理を利用したものは、設置位置によっては家具などが検知の障害(オクルージョン)になることもしばしばである。

一方で、床に敷き詰めるタイプのセンサはこの問題を回避可能であるため、我々はこれまで床圧力センサやスイッチのセンサシステムを提案してきた [3, 4]。このように圧力の変化によって、人の位置を検出してサービスを提供する試みは数多く行われており、Rangarajanらは Modularity を重視したシステムを提案している [5]。しかし、圧力を検知するセンサ・スイッチは複雑な床構造を有する必要があるため、製作・設置コストが大きく、気軽に導入出来ない。さらにはその検知原理から変形部を有することが多く、保守のためのコストも軽視出来なかった。

そこで本研究では製作・設置・整備のコストを大幅に低減し、直接的に人の位置を計測することが可能となる床センサシステムを開発することを目的とする。

### 2. 人位置検出用床センサシステム

#### 2-1 関連研究の整理と本研究の方針

人位置検出用床センサシステムには多くの関連研究がある。しかし概ね人間の自重による床反力の変化をロードセル、FSR、導電性ゴムなどを用いて電気信号に変換し、検出している。最近ではセンサの廉価化、大

型化を可能とするために電磁誘導方式を用いたセンサシステムも提案されている [6]。

しかし、これらの床反力検出方式では変形部が必要となるため、我々の研究では静電容量検出方式を採用することとした。昨今インタフェースとして静電容量式タッチパネルの利用が盛んであるが、検知部に静電容量変化をもたらす人間の接触を直接的に計測することが出来るこの方式は変形部が不要であり、センサ構造の抜本的な簡素化が可能となる。

#### 2-2 要求仕様の整理

本研究では生活環境中での見守り、具体的には高齢者の移動、卒倒そして幼児の安全な移動<sup>1</sup>を検出することをターゲットとして仕様を以下のように設定した。  
[センサ敷設方式] 本研究では複数のセンサをマトリクス状に敷き詰めて、各センサが検出結果を(重心換算などせず)独立で出力する方式とする。

[センサ出力] 人の位置を知るために最低限必要な、人の接触・非接触を示すバイナリ出力とする。

[空間解像度とモジュール化] 人の位置を知るための解像度は、足のサイズが 15~30 [cm] であることを考えると、足跡の形状を認識するような場合を除いて、それ以下の細かい解像度は不要である。また、生活空間全域を網羅するためセンサをモジュール化し、連結することで広い計測領域も実現出来るようにする。

以上を踏まえて1モジュールを 300 [mm] × 300 [mm] とし、それをそのまま空間解像度とする。この大きさは日本の建築で一般的に用いられている尺モジュールに適合可能となるという利便性もある。

[センサ厚み] 既存の設備を可能な限り生かしたまま、センサシステムを導入出来ることが好ましい。そこで、木製のフローリング (12 [mm] と 15 [mm] が一般的) と同等の厚さとすることで、リフォーム等の際に床部以外の補修工事をせずに設置が可能となる。ここでは厚さ 12 [mm] をターゲットとする。

[施工性(モジュール連結性)] モジュール間の連結性が施工性に繋がる。複雑な連結作業なしに敷き詰められる構造であることが望まれる一方で、連結性を向上さ

<sup>1</sup>家具等へのよじ登りや保護者が目を話している隙に外に出てしまうといったことを防止することを狙っている。

せるために特殊な構造的・電気的コネクタを用いてしまうと製造コストが増大してしまう。

### 2.3 設計検討事項の整理

前節の要求仕様に基づき、次章の設計・試作において検討項目となる事項をここで整理しておく。

静電容量検出方式: 静電容量の値を正確に計測することが目的ではない、可能な限り簡素な電子・電気部品で構成される検出方式であることが望まれる。

電力供給・データ通信方式: センサをモジュール化することによって、モジュール間の電力及びデータを如何に上手く接続するかが課題となる。

敷設方式: 厚さ 12 [mm] という限られた容積の中で、高いモジュール連結性を有する敷設方式を実現しなければならない。特に電力・データ信号ケーブルも含めた薄型化が必須である。

## 3. センサシステムの設計と試作

本章では前章で整理した検討項目に沿って、設計・試作したセンサシステムについて述べる。

### 3.1 静電容量計測方法の検討

本センサシステムでは、各モジュールにおいて簡便な方法で人の接触による静電容量変化を検出することが求められる。最近では静電容量の変化(人の接触の有無)を検出可能なマイコン(ルネサス製 R8C/33T など)も商用化されており、最終製品ではこのような部品を活用することも考えられる。

しかし今回静電容量を検出するプローブの大きさが、これらの市販マイコンが想定している電極よりも非常に大きいため、そのままでは空間のノイズによる変化を人の接触と判断してしまう可能性が大きい。そこで本研究では静電容量読み取り部を自作し、取得されるデータのフィルタリングにも取り組む。

Fig. 1 に上記要件を満たす計測方法を示す [7]。

- ヒステリシス発振方式: Fig. 1(A) に示すようにインバータ IC を用いて CR 共振を発生させ、その周波数を計測する方法。非常に簡便な方法であるが、静電容量変化が小さい場合、ノイズによる影響を受けやすい。
- 弛張発振方式: Fig. 1(B) に示すようにスイッチングによりキャパシタの充放電を行う回路により、静電容量に応じたパルスを出力し、その幅を計測する方法。但しヒステリシス発振方式同様ノイズに弱い。
- 分圧計測方式: Fig. 1(C) のような回路を形成し SW がオン、オフのときの電圧から連立方程式を解くことにより静電容量を求める方法。

本研究では部品が安価で実装が容易であることから弛張発振方式 (B) を採用した。

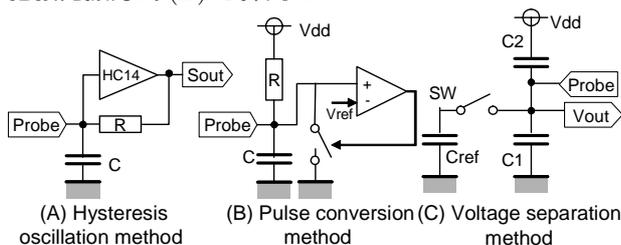


Fig.1 Capacitance measuring methods

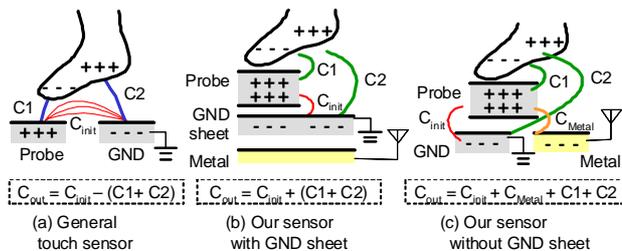


Fig.2 Basis of capacitive variation

### 3.2 静電容量計測用の GND 設置方法の検討

Fig. 2(a) に一般のタッチセンサーにおける静電容量変化の原理を示す。ここでは人は交流場における GND の役割を果たしており、人の接近によってプローブ・GND 間の静電容量が減少することによって人の接触を検知している。しかしこの場合、2つの電極を横に並べて設置するため電極形状が複雑になりがちである。一方で我々は Fig. 2(b) に示すような電極配置を採用した。この場合、人が接近することによって静電容量は増大することになる。GND シートは人と直接接触するものではないので、単なる金属の薄膜でよく製造も施工も容易である。このように GND シートを底面に設置した場合には、下部の金属と人の間には静電容量変化はない。一方で Fig. 2(c) のように、GND シートを省面積化した場合でもプローブと金属が十分離れている場合には Fig. 2(b) とほぼ同様な状態になることが期待され、この場合 GND シートの施工すらも省略出来る可能性がある。本研究では、実験によって GND シートの有無による差異を確認することとした。

### 3.3 電力供給・データ通信の設計検討

電源供給及びデータ通信両方において有線・無線の選択肢が考えられる。しかし従来研究の実験において [8]、静電容量計測部の消費電力が約 30 [mW] と大きく、バッテリーの交換を行わずに数年の計測を行うのは困難であることが判明した。よってセンサコントローラへの電力供給は有線方式とした。一方データ通信は小電力の無線機が手頃な価格で入手出来るため、モジュール連結性の弊害となるケーブルを削減するために ZigBee(2.4 [GHz]) の無線通信とした。

### 3.4 敷設方式の設計検討と試作品のまとめ

Fig.3 にセンサシステムの構成を示す。まず、各モジュールは静電容量の変化を検出する金属プレート(センサプローブ)とそれを支持し、隣り合うモジュールとの連結性を実現するための筐体構成部、さらに GND シートの 3つにより構成される。また 9つのモジュールを 1コンポーネントとしてまとめ、その中心に回路

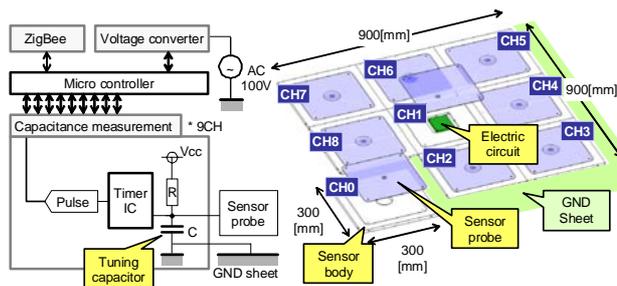


Fig.3 Framework of floor sensor system



Fig.4 Snapshot of floor sensor system

を配置し各モジュールをチャンネルとして取り扱う構成とし、回路数の増大を防いだ。筐体構成部には Fig. 4(右) に示すような溝を角部に用意しておき、金属コネクタで隣接するプレートと接続する方式とした。Fig. 4(左) に試作した床センサシステムの外観を示す。

#### 4. 実験

本節では試作した床センサシステムの基本的な性能を把握する実験と簡単なデータ処理について述べる。

##### 4.1 実験の設定

本実験の設定は次の通りである。

- 被験者: 3 名 ⇒ 被験者 A: 20 代男性, 身長 173 [cm], 足のサイズ 27.5 [cm]. 被験者 B: 20 代女性, 身長 158 [cm], 足のサイズ 24.5 [cm]. 被験者 C: 20 代男性, 身長 188 [cm], 足のサイズ 27.5 [cm]  
体格の差異による影響調査を狙った。
- センサシステムの設置場所: 2 箇所  
⇒ アルミ製床上と木製床上
- 接触位置 (CH): 4 種 ⇒ GND シートあり: 2 種 (0CH, 8CH), GND シートなし: 2 種 (3CH, 4CH)
- 接触状態: 2 通り ⇒ 両足全面, 片足全面  
靴下を装着, 複数 CH には跨らない
- データ数: 各試行 100 サンプル @ 6 [Hz]
- 繰り返し数: 3 (接触なしは 9)

以上の設定により 162 種類のデータを取得したが、以降では調査項目に適切なデータを抜粋して掲載する。

##### 4.2 人の接触・非接触による静電容量変化の全体傾向

まず Fig. 5(a) に人が接触していない状態での、

Fig. 5(b) に被験者 A が接触した状態でのセンサ出力をヒストグラム化したものを示す。さらに Fig. 5(c) に人が接触していない状態のセンサ出力の標準偏差を示す。

アルミ製の床上に設置された場合でも GND シートがある場合には正規分布に近い分布を示している一方で、GND シートがない場合には複雑な分布を示し、かつ大きな標準偏差を示しているため、接触と非接触を分析することが困難なことが分かる。

よって以降では (a)GND シートありでアルミ製床上に設置した場合と (b)GND シートなしで木製床上に設置した場合の 2 つに絞って議論を進める。

#### 4.3 被験者の体格差によるセンサ出力への影響

Fig. 6 に GND シートありでアルミ製床上に設置した場合の各被験者のセンサ出力ヒストグラムを示す。ヒストグラムをみると被験者 3 人のプロファイル (身長, 足のサイズ) に成人としては大きな差異があるにも関わらず、ヒストグラムのピーク位置及びその値には大きな差異はない。これは GND シートなしで木製床上に設置した場合でも同様であった。

この結果より、体格差によらず成人女性・男性であれば同様に計測出来ることが示された一方で、静電容量変化より個人を特定することが困難であることが確認された。これは荷重 (圧力) 計測タイプのセンサと比較すると不利な点であると言える。

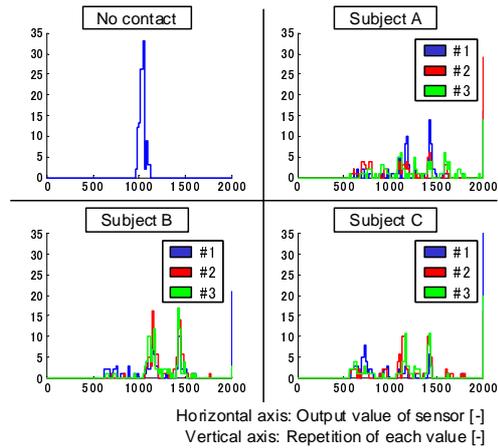


Fig.6 Histogram of sensor output for 3 different subjects (Aluminum floor with the ground sheet)

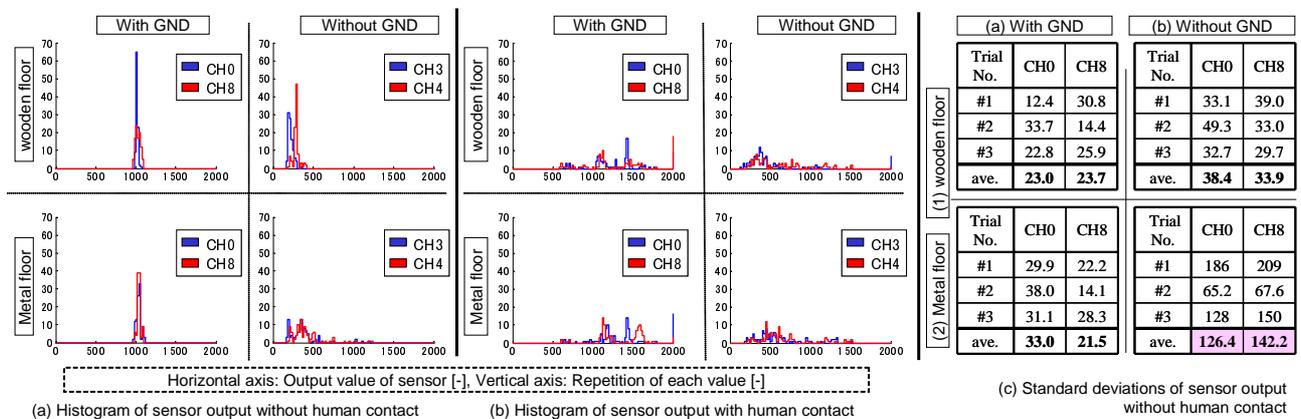


Fig.5 Attribution of the sensor output without/with human contact

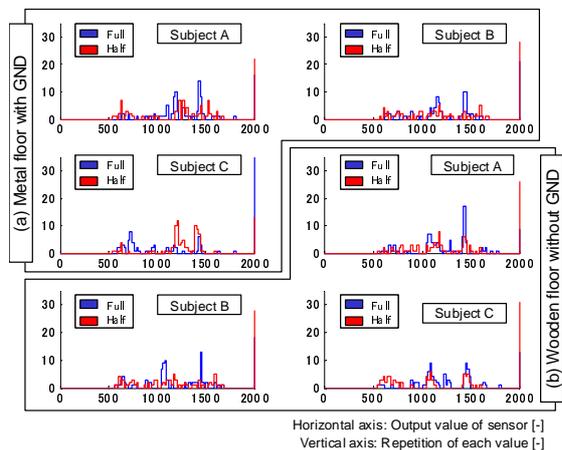


Fig.7 Histogram of sensor output for 3 different subjects in different contact conditions

#### 4.4 接触状態によるセンサ出力への影響

Fig. 7 にプローブとの接触を両足・片足(他方の足はセンサ横の踏み台に置いた状態)と変化させた場合のセンサ出力の様子を示す。結果として両足・片足の接触状態によらず同様に静電容量の増変化が確認された。これにより歩行時等で片足のみ接触している場合でも検知可能であることが分かった。

#### 4.5 簡易認識結果

これまでセンサ出力の基礎的な傾向を把握してきたが、非接触状態のセンサ出力分布が正規分布に近いことを利用して簡単な認識処理を実装した。認識処理は今後マイコン側に実装することを考えると、可能な限り簡素な実装で実現されるものが好ましい。

具体的に本研究では非接触状態の平均・標準偏差をもとに非接触状態をモデル化し、平均より(係数×標準偏差)離れた場合を接触状態と認識するアルゴリズムとして、この係数を走査することによって人の接触認識性能がどのように変化するかを確認した。

実験結果を Fig. 8 の ROC 曲線で示す。横軸は FPF で人が接触していないのに接触していると誤って認識した確率を示し、縦軸は TPF で人が接触した状態を正しく接触と認識した確率を示している。よって、グラフが左上に寄るほど良い認識結果であることを示している。なおこの結果は (a)GND シートありでアルミ製床上に設置した場合と (b)GND シートなしで木製床上に設置した場合両者において、接触時は 36 データ、非接触時は 8 データの平均をプロットしている。非接触時は全部で 9 データを取得したが、そのうち 1 つを学習データ、残りをテストデータとして用いた。結果より、GND シートありでアルミ製床上に設置した場合が良い認識結果を示している一方、GND なしでは単純な識別方法では TPF と FPF がトレードオフとなっていることが分かる。

#### 4.6 時系列フィルタリング(移動平均)の導入

前節で GND シートがない場合が芳しくない結果であったが、識別結果を見ると瞬発的に現れるノイズを誤認識していることが多いことが分かった。そこで移動平均フィルタを導入することによって、このような単発のノイズを除去することを試みた。Fig. 9 に結果例を示す。横軸は 6 [Hz] で取得したデータのインデッ

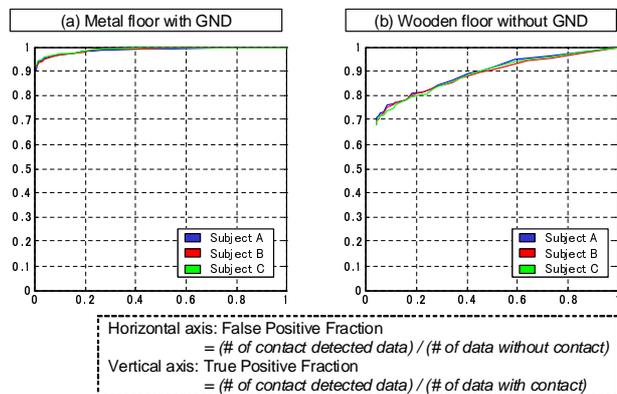


Fig.8 Result of human contact recognition test

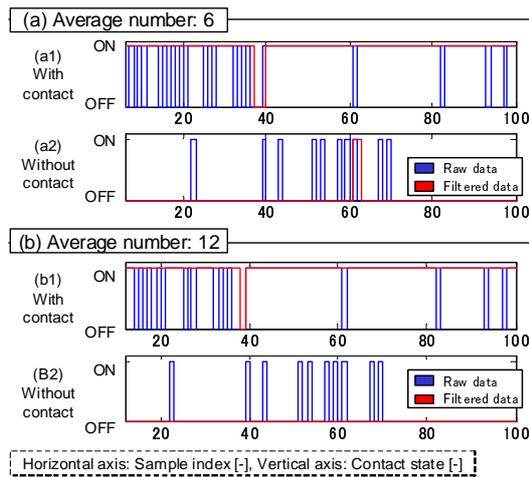


Fig.9 Result sample of moving average filter

クスで、縦軸は接触有無の認識結果を示している。移動平均フィルタという非常に簡単なフィルタを施すだけでも、GND シートが無い状態の認識結果を向上させることが可能であることが分かった。

## 5. 結論

本研究では製作・設置・整備のコストを大幅に低減し、直接的に人の接触位置を計測することが可能となる床センサシステムの実現を目指し、試作品の製作及び基本性能の把握を行った。今後の課題として認識・フィルタ処理のマイコンへの組み込みと、複数コンポーネントを導入したときのデータ連動が挙げられる。

- [1] 竹中エンジニアリング株式会社. 徘徊お知らせ機器. <http://www.takex-eng.co.jp/>.
- [2] ナカヨ電子サービス株式会社. mircon: みまもりシステム. <http://www.nakayo.co.jp/>.
- [3] Taketoshi Mori et al. One-room-type sensing system for recognition and accumulation of human behavior. In *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 1, pp. 344–350, 2000.
- [4] Hiroshi MORISHITA et al. High resolution pressure sensor distributed floor for future human-robot symbiosis environments. In *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1246–1251, 2002.
- [5] Sankar Rangarajan et al. The design of a pressure sensing floor for movement-based human computer interaction. *LNCS*, Vol. 4793, pp. 46–61, 2007.
- [6] 株式会社シロク. LL SENSOR. <http://www.llsensor.com/>.
- [7] 桑野雅彦. タッチ・パネル&タッチ・センサの実際. *トランジスタ技術*, pp. 163–172, February 2008.
- [8] 福井類ら. ZigBee センサネットワークを利用した家庭用電源管理知能化空間の構築. 第 9 回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会, pp. 547–548, 2008.