

ユビキタスコンピューティング実験住宅における無侵襲歩行モニタリングの試み

非会員 太田 裕治 非会員 元岡 展久 非会員 椎尾 一郎

非会員 塚田 浩二 非会員 神原 啓介

Non-invasive gait monitoring in a ubiquitous computing house

Yuji OHTA, Non-member, Nobuhisa MOTOOKA, Non-member, Itiro SIIO, Non-member,

Koji TSUKADA, Non-member, Keisuke KAMBARA, Non-member

Computers become smaller and cheaper from day to day, and the utilization, as daily life equipments, is now becoming ubiquitous. Therefore, it's essential to discuss the development of applications, as well as the installation of ubiquitous computing technologies into our daily living environments. Based on this idea, in order to investigate how ubiquitous computing can be used in the most efficient way, an experimental house, Ocha House, has been constructed in the campus of Ochanomizu university in 2009. In this study, we described the feature of the design of the experimental house and proposed a non-invasive gait monitoring technique as a healthcare application. Specifically, five wireless accelerometers were fixed on the floor of the house, and the floor vibration was measured when the subject walked along the accelerometers. As a result, the floor acceleration intensity was found to surge at the ground contact, and the gait cycle could be detected. By combining the simple acceleration sensors and the housing structures, human motion monitoring would become less invasive.

キーワード: ユビキタスコンピューティング, 実験住宅, ヘルスケア, 生体モニタリング, 生活支援工学

Keywords : ubiquitous computing, experimental house, healthcare, human monitoring, life support technology**1. はじめに**

コンピュータの小型低価格化により, 日用品としてのコンピュータ利用が進展しつつある. その利用場所は, 研究所や工場などを出て, オフィスや公共インフラへと広がり, いまやコンピューティング技術は生活のあらゆる場面で身近でユビキタスな存在となりつつある. 今後は家庭でのコンピュータ利用が一層進むと考えられる.

一方で, 高齢社会の進行, 健康意識の高まりから, 個人が自己管理するヘルスケアシステムが求められており, 在宅で利用可能な生体モニタ・計測機器として, 各種ウェアラブルデバイスや什器組み込み機器などの研究が進められている. そしてこの両者, すなわち, 発展著しいユビキタスコンピューティング技術と生体計測技術を融合させることにより, 在宅型ヘルスケアシステムの開発を目指した研究が, 現在, 盛んに行われている.

一例として経済産業省により実施された, 「人間行動適合同型生活環境創出システム技術(1999~2003年度)」では, 住宅内での行動を常時計測することで, 生活者の状態を住宅が見守るリアルタイム生活支援技術が研究され, その結果, 普段の生活行動からの逸脱を自動検知し緊急通報する手法や健康管理のための生活支援技術等が開発されている.

在宅ヘルスケアシステムが有効に機能するために生体計測に求められる要件を考えた場合, 以下があげられる. へ

ルスケアにおいて生体計測は日々実施され, またデータは長期間にわたり蓄積されねばならないが, そのためには, 計測自体が簡便であり, かつ侵襲性や拘束性の低いものでなければならない. さらに, 被計測者が意識することなく計測が実施されることも求められる. なぜなら, 一般に生体は周囲環境の影響を受け易く, 被計測意識は日常とは異なる計測データをもたらす可能性があるためである. 計測が意識されることなく行われれば, 普段の生活, すなわち, **Real Life** 下の生体データが収集できる. 以上の要件にたいする課題としては以下があげられる.

第一に, 住空間の設計上の問題が指摘できる. 計算機やセンサ類が露出した, いわば未来的コンピュータ住環境では, 上述の「被計測意識」が生じかねない. 加えて, コンピューティング技術は日進月歩であり, 機器の導入交換, メンテナンスが容易に行われる必要がある. これらの計算機ハードウェアに由来する要求を住宅設計面で解決する必要がある.

次に計測の問題がある. 生体計測に関しては, より低侵襲, 無拘束を志向した技術開発が主流であり, 近年では, 機器の小型化, ひいては, ウェアラブル機器開発が盛んである. 住環境内における生活者が計測対象となることを前提とするのであれば, この考え方を延長し, 何のデバイス類も身に付けることなく, たんに住空間内に留まるだけで計測が実施される環境を構築することが望ましい. これに

*お茶の水女子大学 〒112-8610 東京都文京区大塚 2-1-1
Ochanomizu University 2-1-1 Otsuka, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8610

より、初めて、無意識下での「Real Life」計測が実現する。この技術開発に関しても課題である。

以上の観点から本研究では、計算機ハードウェアと建築設計の関係、ならびに、住環境側に埋め込まれたセンサによる Real Life 計測に関し検討した。前述の「人間行動適合型生活環境創出システム技術」では、赤外線センサ、電力量モニタ、CCD カメラ、ウェアラブルデバイスなどにより生活行動がモニタされ、動線推定・行動解析が行われており、本研究でも同様の観点に立ち、歩行時の床の振動を床面に配置した加速度センサから取得し、生活者の位置情報を検出するための基礎実験を実施した。また、踵接地時の床加速度情報には身体運動情報も含まれると考え、体幹（腰部）加速度推定に関する基礎実験も行った。

2. お茶の水女子大学 Ocha House プロジェクト

住環境へのコンピューティング技術の導入、ならびに Real Life 生体計測技術の実証実験を目的に、2009年3月に大学敷地内に、「お茶の水女子大学ユビキタスコンピューティング実験住宅」（以下 Ocha House、東京都文京区大塚、延床面積 82.7 m²、1階建て）を建造した [1]。図1にその平面図等を、図2に外観写真を示す。建築構法は一般的な木造である。以下、実験住宅の設計上の特徴を列挙する。

(1) 情報設備機器が組み込まれた住環境を設計する際には、アプリケーションの利用形態のみならず、機器の実装方法や配線方法までも、あらかじめ検討しておく必要がある。Ocha House では、情報設備機器の実装とその頻繁な更新を考慮し、skeleton-infill の考え方に基づく設計がなされた。

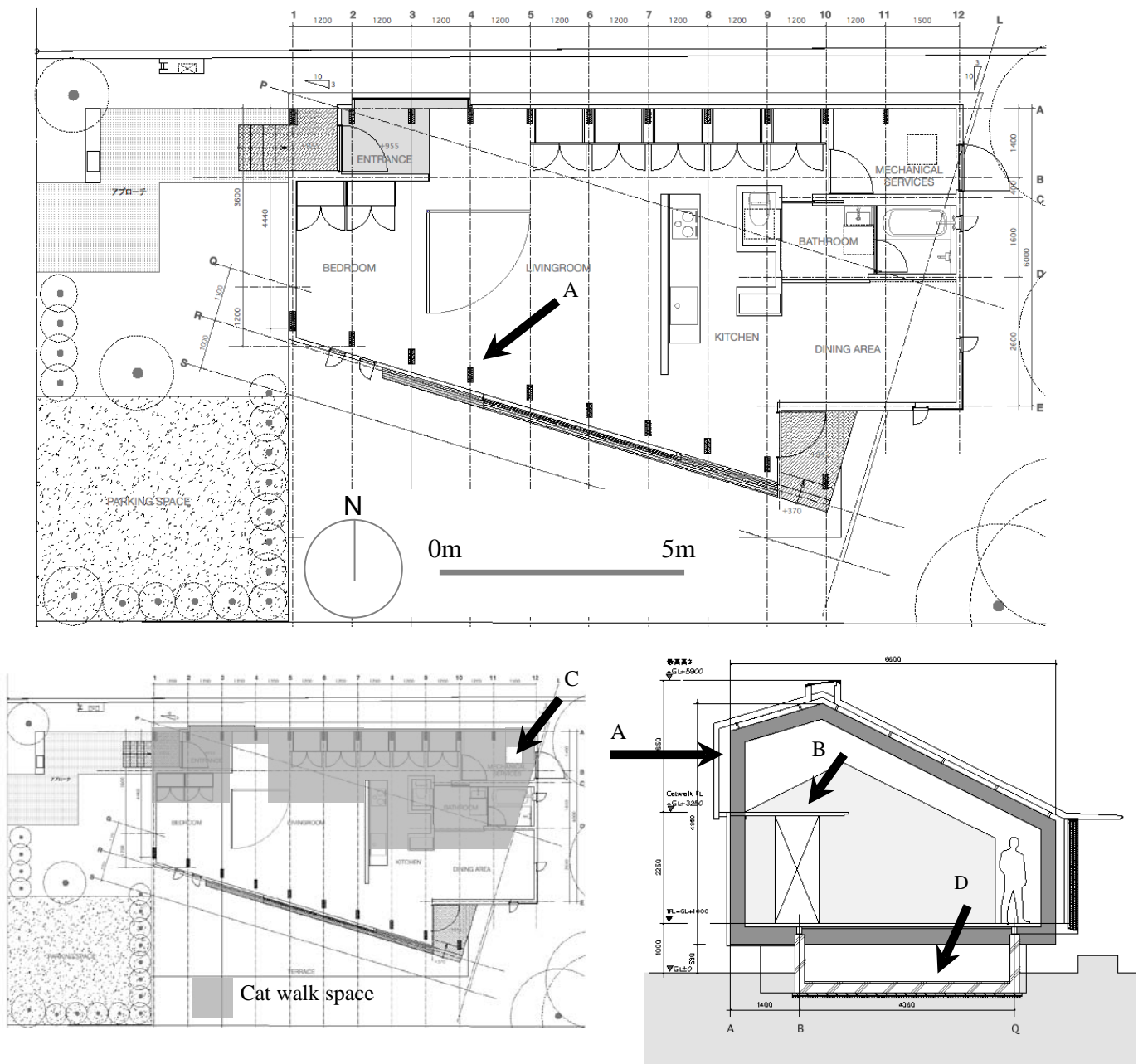


Fig. 1. Floor plan and cross section of the experimental house (Ocha House).



Fig. 2. View from street.

skeleton-infill とは、建物の skeleton (柱・梁・床等の構造躯体) と infill (間仕切りや設備機器など) を分離する設計手法を指す。具体的には図 1 右下の五角形剛性フレーム (矢印 A, 厚さ 108 mm, 1200 mm 間隔で建物東西方向に配置) を構造体とする構法を新規開発することで、構造と infill を分離した。計 11 個のフレームにより囲まれた内部空間の利用は自由であり、情報設備の配置・導入・更新、将来の間仕切り変更などに対し柔軟に対応可能である。

(2) 上記の具体例として、キャットウォークスペースをあげる。すなわち、機器の実装や配線に供するスペースとして、一般住宅の天井裏にあたる部分にキャットウォークを設けた、キャットウォークの平面レイアウトを図 1 左下灰色部分に、また、その断面 (床面) を同図右下矢印 B に示す。1 階部分のほぼ半分に相当する面積を計算機やデバイス実装のために割り当てた。このスペースへのアプローチは、住宅裏口天井に設けた開口部 (図中矢印 C) を通じてなされる。これにより、作業者は裏口から開口部を経由してキャットウォークスペースに上がるため、家人と対面することが無く、作業時の心理的負担は軽減されると考えられる。このように skeleton-infill 設計の採用により、情報設備スペースは生活空間から分離され、各種メンテナンスの際の作業性は向上した。それは同時に、計算機やデバイスが露出することのない居住空間の創成でもあり、「機器に囲まれた」生活感の低減、ひいては、「被計測意識」の低減ももたらされると考える。

(3) 情報設備への配線を考慮し、剛性フレームの厚みの中間部分に、配線溝 (幅 36 mm, 深さ 36mm) を設けた。溝はフレームの全外周に沿って設けられており、照明や各種センサなどの配線を溝内に実装可能とした。

(4) 床面高さを通常よりも高い位置に設計することで、床下にも情報設備スペースを確保した (矢印 D)。室内のどの場所からも床下空間への簡便な配線アクセスが可能である。

つぎに、本住宅を利用した歩行モニタリングの試みにつき述べる。

3. 実験方法

歩行時の床振動を加速度計により計測することで、動線推定のための基礎実験を実施した。加速度計 (小型無線ハイブリッドセンサ WAA-006, ワイヤレステクノロジー株、

外形 $39 \times 44 \times 12$ mm, 質量 20 g) をリビングルーム床面 5 カ所に図 3 に示すように 1200 mm 間隔にて直線状に配置した。センサ配置の設定に際しては、床振動と関連すると推測される住宅建築構造を考慮した。すなわち、センサ間隔を剛性フレームの配置間隔に一致させるとともに、設置位置をフレーム間の根太部材 (床板の下に渡され床板を支える横木) の直上とした。加速度のサンプリングレートは 5 msec, 2 回平均とした。また、周囲には家具等を配置しない状況で計測を行った。実験参加者は中年健常男性 1 名ならびに若年健常女性 3 名であり、以下の 2 種類の歩行計測実験を行った。実験実施に際しては、お茶の水女子大学倫理特別委員会の承認を受けた。

実験 (A) : 図 3 に示すセンサ列の左方 15cm 脇を矢印のように直線歩行した際の歩行に伴う床振動を床面の垂直方向加速度として計測した。すなわち、歩行開始点 ■ から終了点 ◆ までの約 7m 区間を被験者の快適速度で直線歩行し、その際の 5 個の加速度計の出力を計測した。Ocha House ではセンサ A の位置の左にベッドが置かれ、また、センサ E の奥にはキッチン、ダイニング、水回りスペースが配置されており、ここでは、寝室スペースから住居奥方向への移動に際しての動線検出を企図している。

実験 (B) : 被験者の腰部に加速度計をベルトにて固定し、歩行に伴う腰部上下動の鉛直方向加速度を計測した。その際、図 3 中の加速度センサ C の横に目標点をマーカで示し、歩行中にマーカ点を踏むよう指示した。踵がマーカ点を踏んだ時のステップの、腰部並びに床面のピーク加速度を計測し比較した。歩行動作として、緩速歩行、通常歩行、やや速い歩行の 3 種類を指示した。

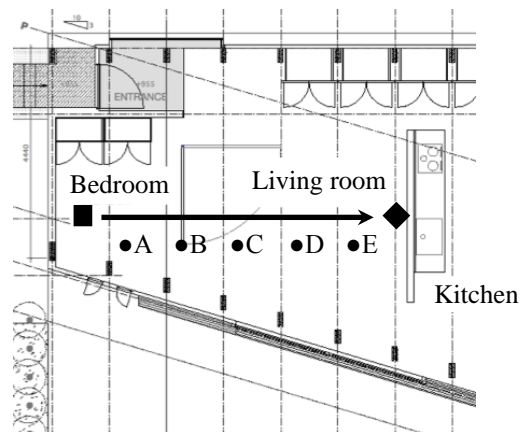


Fig. 3. Gait experiment in the house. (●: acceleration sensor, →: gait direction, ■: starting point, ◆: goal point)

4. 計測結果

実験 (A) : 7m 区間の直線歩行の際の床面加速度の計測例 (4 名分) を図 4 に示す。Subject 1 が男性被験者の結果、他は女性被験者の結果である。グラフの横軸は時間、縦軸は加速度 (絶対値) である。図に示すように、被験者の移動につれ、各地点での加速度パルス波形は順次漸増漸減し、約 10 歩で歩行終了点に向けて移動することが分かり、無拘

束計測下で歩行が検出されたことが分かる。加速度や時間スケールに多少の違いは見られるが、いずれの被験者でも同様の計測が可能であり、設定したセンサ間隔 1200 mm の条件で移動が検出可能と推測された。

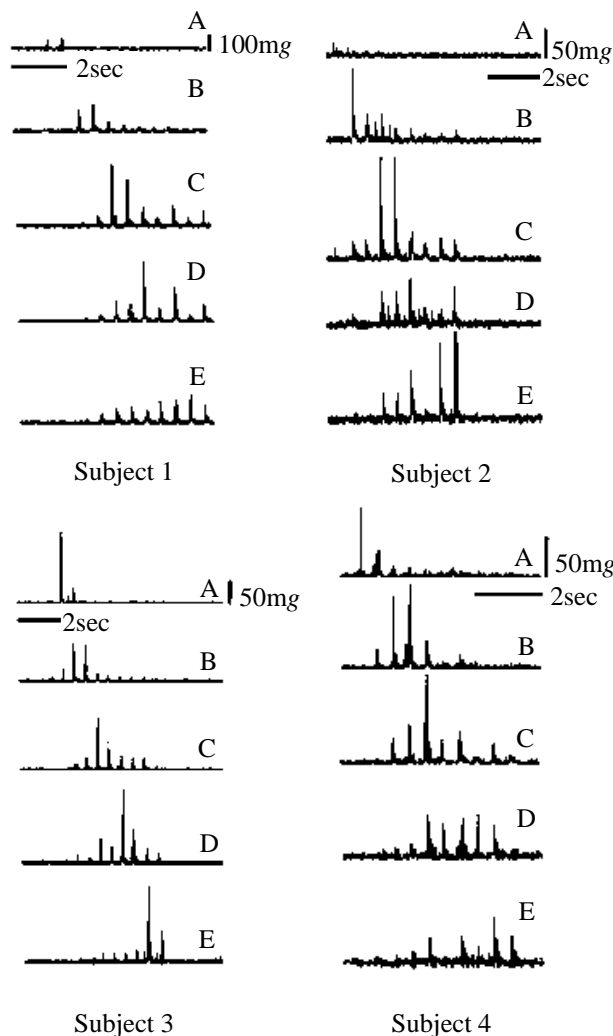


Fig. 4. Examples of floor acceleration during straight walking.

実験 (B) : 図 5 に踵接地の際の、腰部加速度ピーク値と床 C 地点における加速度ピーク値の関係を示した。グラフは 1 名 (図 4 の Subject 1) の結果である。3 種類の歩行速度実験における全ステップをまとめて示した。この結果は踵着地点のすぐ脇での床振動と腰部振動を比較したものであり、両加速度は正の相関傾向にあることが分かる。表 1 には全被験者の相関係数並びに p 値を示した。いずれの被験者についても正の相関傾向が見られたことから、腰部加速度の床面加速度からの推測可能性が示されたと考えられる。

5. 考察・まとめ

ユビキタスコンピューティングの実験住宅への導入は、すでに様々な大学や企業で実施・計画されており、先の人

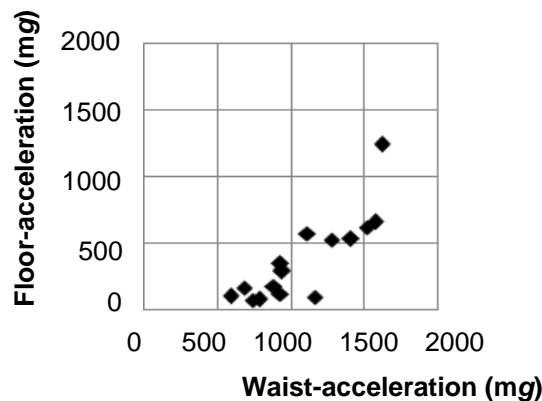


Fig. 5. Comparison between floor and waist acceleration.

Table 1 Correlation coefficient between floor and waist acceleration

Subject	Correlation coefficient	p -value
1	0.8407	0.4532×10^{-4}
2	0.7086	0.3108×10^{-2}
3	0.9188	0.4645×10^{-3}
4	0.8752	0.4140×10^{-4}

間行動適合型生活環境創出システム技術以外にも、国内では TRON 電腦住宅、ゆかりプロジェクト、JEITA ハウス、PAPI (トヨタ)、EUHouse (松下電器) など、海外では Aware Home (ジョージア工科大学)、Gator-Tech Smart House (フロリダ大学) などがある。これらの実験住宅の居住空間内には、カメラ、マイク、圧センサなどの各種センサが埋め込まれたセンサネットワークが構築されており、生活者を対象とした活動計測が行われている。また、エビデンスの明瞭な生理学諸量の定量収集に基づく健康管理システムの研究もなされている [2]。その具体的な計測方法としては、ウェアラブルデバイス [3]、もしくは什器 (浴槽・ベッド・トイレ・家具) 組み込み型のセンサ [4] として各種モニタ機器を開発し、無線ないし有線通信で情報取得する例が多い。

本研究では、在宅ヘルスケアシステムの開発を目指し、ユビキタスコンピューティング技術の導入に求められる建築上の要件を考慮した上で、実験住宅を設計・建造した。設計段階から計算機技術や生体計測技術の導入を考慮した実験住宅は従来に例がない。そして、この実験住宅を利用することで、歩行モニタリングの基礎実験を実施した。すなわち、住宅内での計測を前提としたシステムを指向するのであれば、ウェアラブル方式であっても計測を煩雑と感じるユーザも多いと考え、一層の拘束性侵襲性の低減を目指し、住宅側に設置したセンサにより計測を行うことの可能性に関し検討した。具体的には、住環境に加速度センサを埋め込むことで、無侵襲的に歩行時の床面加速度を計測した。その結果、歩行時の概略位置を推定することが可能であった。Ocha house は木造構法であり、ここで提案した計測手法は木造建築一般に適用可能と考えられる。本実験に関する考察事項を以下に列挙する。

文 献

(1) 実験Aでは、生活行動モニタリングの観点に基づき被験者の部屋内での概略位置推定を目的とした。生活者の空間内での活動様式や家具・什器のサイズなどを考えれば、検出精度は数 m 程度で十分と考えられる。建築構造を考慮しセンサ間隔を 1200 mm に設定した歩行実験を通じ、概ね、1～2センサ間隔程度の検出精度が得られており、必要な計測条件が得られたと考えている。歩行実験ではリビング床面を対象としたが、床構法は1階全面で同一であり、他の空間でも同様に計測可能と考えられる。センサの延長配置により、さらに長距離の動線が計測可能となろう。前述の人間行動適合型生活環境創出システム技術研究では、各室の特定場所に設置した赤外線センサを利用することで通過情報を得ている。それと比較すると、高い精度で動線情報が得られると考える。

(2) 実験(B)の腰部加速度計測については、文献[5]と同様の波形が得られたこと、また、踵接地の際の腰部加速度と床加速度との間に相関が見られたことから、床加速度値に基づき、体幹部の運動状態が推定可能と推測され、今後、歩容評価などへの応用が可能と思われる。いずれの被験者についても相関傾向が見られたが、表1にも示したように、両者の相関係数に関しては、被験者ごとに違いが見られた。これに関し、体重など歩行に関連するパラメータに基づいた検討を行ったが、現時点で明確な関係を見出していない。個々人の歩行特徴の影響が大きいと推察され、今後の検討事項と考えられた。したがって、腰部加速度の推定に際しては、個人差が大きいことから事前に適切な校正が必要と考えられた。

(3) このほか今後の課題として、加速度パルス波形を詳細に解析することで歩行バイオメカニクス情報の取得、歩行特徴の抽出による個人識別などが挙げられる。なお、本研究での計測対象は歩行可能者であったが、車いすにより同様の移動実験を行ったところ、センサ近傍を通過する際に加速度パルス波が生じる実験結果を得ている。根太などの構造材上を通過する際の振動と推測されるが、歩行実験同様に動線検出が可能と考えられ、本手法はさまざまな住まい方に展開が可能と思われた。

住宅内の床振動に関する研究は建築分野でも行われており、公害等による床振動の防止の観点から、建築構造体における振動伝搬性状に関する研究例がある[6]。この場合の振動源は外部である。居住者自身が生み出す振動を計測した例[7]では、居住快適性の観点から歩行時の床振動感覚を心理評価している。本研究では、居住者自身の生み出す歩行振動が住宅構造内を振動伝搬する際の特性を計測し、そのデータから活動情報を得ようとする試みであった。住環境内で正確な無拘束モニタリング技術を確立し、真に健康管理に役立てるためには、建築学と計測工学、情報工学、生体医工学などの融合が今後一層進むべきと考える。

謝辞 本研究の遂行にあたり快く協力頂いたお茶の水女子大学生活科学部四年飯田悠子さんに心より感謝します。

- 1) Ohta Y, Motooka N, Siio I, Tsukada K, Kambara K. An approach for real life monitoring in a ubiquitous computing house. *Ubiquitous healthcare 2009*, pp. 15-17 (2009)
- 2) 田村俊世: “長寿社会に向けた生体計測とセンサ”, *電学論E*, **123**, 2, pp. 37 - 42 (2003) (in Japanese)
- 3) 苗村潔, 小見正幸, 西山智宏, 保坂寛, 板生清: “ヘルスケア用ウェアラブル・多チャンネルセンシング機器の開発”, *マイクロメカトロニクス*, **45**, 3, pp.10-21 (2001) (in Japanese)
- 4) 川原田淳: “日常生活空間におけるストレスとその計測—在宅生体情報計測によるストレス評価の可能性について—”, *バイオインダストリー*, **25**, 6, pp. 35-42 (2008) (in Japanese)
- 5) M. Sekine, T. Tamura, T. Togawa, Y. Fukui: “Classification of waist-acceleration signals in a continuous walking record”, *Medical Engineering & Physics*, **22**, 4, pp. 285-291 (2000)
- 6) 佐野泰之, 伊積康彦, 横島潤紀, 富田隆太, 石橋敏久, 平松和嗣, 成瀬治興, 後藤剛史: “木造家屋床面の振動モード解析. 鉄道により高振動数が卓越する床面の解析”, *日本建築学会技術報告集*, **29**, pp.151-154 (2009) (in Japanese)
- 7) 横山 裕, 井上竜太, 池田文乃, 八木 豊: “歩行により発生する周期的および連続的な床振動の評価指標”, *日本建築学会環境系論文集*, **74**, 636, pp. 125-132 (2009) (in Japanese)

太田裕治 (非会員) 1987年東京大学大学院工学系研究科修士課程修了. 博士(工学). 東京大学工学部, 東洋大学工学部を経て, 現在, お茶の水女子大学大学院人間文化創成科学研究科准教授. 医療福祉工学分野におけるデバイス開発として, 人工臓器, コンピュータ外科, 福祉工学の研究を行っている。

元岡展久 (非会員) 1991年東京大学工学部建築学科卒業, 1996年東京大学大学院工学系研究科修了. 博士(工学), 一級建築士. 香山壽夫建築研究所, 眉山女学園大学生活科学部を経て, 現在, お茶の水女子大学大学院人間文化創成科学研究科准教授. 木質構法のデザイン設計, ならびに建築設計手法の分析, 建築意匠の研究に従事。

椎尾一郎 (非会員) 1979年名古屋大学理学部物理学科卒業, 1984年東京工業大学大学院総合理工学研究科博士課程修了. 博士(工学). 日本アイ・ビー・エム東京基礎研究所, 玉川大学工学部を経て, 現在, お茶の水女子大学理学部情報科学科教授. 実世界指向インタフェース, ユビキタスコンピューティングを中心に研究。

塚田浩二 (非会員) 2000年慶應義塾大学環境情報学部卒業, 2005年同大学大学院政策・メディア研究科博士課程修了. 博士(政策・メディア). 産業技術総合研究所を経て, 現在, お茶の水女子大学特任助教. ユビキタス・インタフェースの研究開発に従事。

神原啓介 (非会員) 2004年慶應義塾大学環境情報学部卒業, 2006年慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科修士課程修了. 株式会社はてなを経て, 現在, お茶の水女子大学特任リサーチフェロー. ヒューマンコンピュータインタラクションの研究開発に従事。