

山田 一郎

東京大学大学院工学系研究科・教授

生体・環境情報処理基盤の開発とメタボリック症候群対策への応用

1. 研究実施の概要

本研究課題では、日常生活における生体・環境情報を長期間に渡って常時モニタリングでき、個人が自らの生活習慣を振り返ることができる生体・環境情報処理基盤(人間の日常生活を科学するプラットフォーム)を開発することを目標とする。プラットフォームを開発するためには、日常生活をモニタリングするセンシングシステムの開発とセンサ情報を加工・処理する基盤ソフトウェアの開発が必要である。センシングシステムに対しては、ウェアラブル環境下での多様なセンサ情報を低消費電力かつロバストに取得・流通するソフト・ハード両面からの基盤技術の開発が必要である。また、基盤ソフトウェアに対しては、多量のデータから埋もれがちな有意な変化の検出、量的だけでなく質的な診断の支援、注目する情報や対象に合わせた表現手法、医学的に有効なデータへの昇華などが求められる。

これらの要求を満たす要素技術として、

- (1-1) ウェアラブル生体・環境センサ
- (1-2) ゼロ待機電力ウェイクアップ無線インタフェース
- (1-3) マルチセンサネットワーク構成技術
- (2-1) 質的診断を可能にする生体・環境情報の分析技術
- (2-2) 様々な粒度で変化をとらえる生体・環境情報の表現手法
- (2-3) 生体・環境情報のメタデータベース構築

の研究開発を進める。これらの要素技術を統合して、生体・環境情報処理基盤(プラットフォーム)を構築し、アプリケーションプログラムを開発して、

- (3) メタボリック症候群の予防・治療に資するヘルスケアサービスの実証実験を行い、プラットフォームの有効性を検証する。

2. 研究実施内容(文中にある参照番号は 4.(1)に対応する)

H20 年度は、生体・環境情報を「取る」「見る」「貯める」システムの早期構築をめざし、昨年度に引き続き、ハード・ソフトの要素技術の研究開発を医工連携のもと進めた。本報

告では、工学分野の独善的な研究開発ではなく、医学・保健指導の現場の声を十分に取り入れることに留意した。以下、要素技術ごとに報告する。

(1-1) ウェアラブル生体・環境センサの開発

ウェアラブル生体・環境センサの開発に当たっては、市販のウェアラブルセンサや既開発のセンサノードを利用することによって、効率的な開発を行う。

H19 年度は、市販のウェアラブルセンサや据置き型の医療計測機器を利用して、種々の日常生活行動に関する基本的なデータ（教師データ）を収集した。また、医学・健康保健の観点からすると、メタボリック症候群対策として、食習慣（食事時間、咀嚼回数など）やストレスの分析が重要といわれており、H20 年度は、ウェアラブルな食習慣センサ、ストレスセンサの開発を中心に進めた。

食習慣については、H19 年度の生活音や環境音に着目した行動・状態推定に関する予備実験から、咀嚼・発話のセンシングがマイクを用いて可能であることが明らかになった。H20 年度は、医学的に意味のある食習慣を洗い出すとともに、利用者に負担をかけない食習慣の分析方法として、マイクを利用したウェアラブルな食習慣センサの開発を目標とした。専門家（栄養士や歯科医など）へのヒアリングなどを通して医学的に意味のある食習慣を洗い出したところ、①食事時の咀嚼回数、②食品の種類、③食事時間・回数（間食の有無など）などが挙げられ、これらのセンシング手法について研究した。予備実験によりセンシング手法の有効性を確認できたため、日常生活でのサンプル収集、およびサンプル数の拡大を目的として、長時間モニタリングが可能なウェアラブル食習慣センサの実験機を開発した。医学的な評価としては、「現在の食事療法は、自己申告や観察によるものがほとんどであるが、加速度センサなどとあわせて、食後の運動などを検知することで食事療法との整合性がでてくる。理想的には食事内容（カロリー、成分など）を把握できるとより有用なツールとなる。」とのコメントを受けており、次年度以降の課題とする。

ストレスの有力な分析手法に、血圧変動を用いる分析方法がある。しかしながら、従来の血圧計の欠点として、カフを用いる加圧式によるものは拘束感が強く常時測定できないことや、体動による誤差を含むことがあげられる。よって H20 年度は、日常生活の中で、拘束感が少なく、常時計測できる ウェアラブル血圧センサの開発を目標とした。被験者に対して、日常生活下での自由行動を極力制限しない 常時モニタリング型ウェアラブル血圧計測手法の確立に向け、従来の脈波伝播速度法のセンサ構成要素を改良した。①心電図（第 2 誘導）、②耳朶部での脈波（透過型赤外線センサによる耳朶部末梢ヘモグロビンの流量的変化計測）、③胸部に装着された 3 軸加速度センサによる被験者の姿勢・運動の変化を計測し、心電図の R 波と耳朶部における脈波ピーク間の脈波伝播時間を一拍毎に計測する方式を採用した。被験者の運動状態を 3 軸加速度センサによりモニタリングしながら、脈波伝播時間を計測する簡易型システムの開発を行った。医学的な評価としては、①日常生活者（自覚症状のない一般健康者に対する生活習慣病・メタボリック症候群に関連する脳血管障害・循環器系の疾病の早期発見（発症リスクの適切な評価）と、②すでにメタボリック症候群あるいはそれに類する疾病にかかっている患者

の臨床指標を経過モニタリングすることに大きな意義がある。また、③既存の方法では計測し得ないような頻度・時間で日常生活下の血圧を測定し続けることで従来知られていなかった血圧に関連した新たな知見が得られる可能性がある（新たな診断指標、リスク評価指標の発見）。つまり、検診や外来受診時の単回血圧測定では観察し得ないような血圧の変動、仮面高血圧と呼ばれる血圧異常の検出にも有用である簡便な持続血圧測定方法の確立は医療現場においても有用な成果となることが期待されている。

また、医学的知見に基づいた、腕の動きからもストレスを分析する新しい試みも開始しており、従来の加速度情報に加えて、角速度や筋電位の情報を併用することで、詳細なストレス分析が可能になると予想される。H20 年度は、3 軸加速度センサに異種センサを統合した小型センサの開発を目標とした。角速度や筋電位のセンサ情報の有効性を検証しつつ、Bluetooth による無線計測が可能な腕装着型の小型 6 軸（加速度、角速度）センサを開発した。従来の 3 軸加速度センサと比較して、どのような動きに有意な特徴が現れるかを検証中である。

(1-2) ゼロ待機電力無線インタフェースの開発

無線通信は、センサノード全体の電力消費の 30%から 50%を占めるため、センサの高寿命化には無線通信プロトコルの良し悪しが大きな影響を与える。待受け電力を必要とせずにデバイスをウェイクアップさせる機構を開発する。

H19 年度までに、ゼロ受信待機電力無線システムについて、ウェイクアップモジュールとデータ通信モジュールの 2 つの無線モジュールを組み合わせた無線インタフェースを検討し、方式と回路構成についてシミュレーションによる基本的な設計を行った。その結果、BAN における想定距離である約 1m 離れた距離においてウェイクアップさせることができる見通しを得た。

H20 年度は、H19 年度の結果に基づき、ディスクリートのパーツを組合せ、ウェイクアップ無線インタフェースの性能を示すことを目標とした。しかしながら、ウェイクアップ無線による電力削減効果を十分に示さない状況で、チップ化を意識した具体的な回路設計を行うことは非常にリスクが高い。そこで、システムレベルでの開発を進めた方が有利であるとの判断から、H20 年度はシステムレベルの設計・評価を先行して行うこととした。これまでのところ、消費電力の少ない市販の無線モジュールをベースにウェイクアップインタフェースを設計するとともに、ウェイクアップ機能のアプリケーションにおいて重要となる省電力 ID マッチング機構を bloom filter を用いることで実現し、その効果をシミュレーションで確認中である。

(1-3) マルチセンサネットワーク構成技術の開発

ネットワークで取り扱う情報が、短パケット・超多量トランザクション処理であることに着目し、信号処理系の機能を BAN、集約装置、ネットワークサーバ間でどのように分担すべきか検討を行う。系全体としてコストベネフィットのトレードオフ関係を明らかにし、最適な機能配置を決定する。

H20 年度は、H19 年度検討をベースに、実現するサービスの内容と、機能配置のそれ

それぞれについて以下の検討を行った。第一に、H19 年度想定したサービスをベースに、センシング情報を有効に活用する新たなサービスモデルを 2 つ考案した。①センシング情報を用いてユーザの状況を監視し、異常時に人が対応するストリーム処理型のサービスであり、ユーザとボランティアを含むサービス提供者間のリソースをネットワークがマッチングすることで、サービスの追加や負荷の分散を容易とするもの（医療サービス提供者仲介サービス）。②センシング情報等を蓄積して解析するタイプのサービスであり、複数のそれら蓄積解析型サービスをネットワークが結びつけ、情報を多角的に解析することで単独のサービスでは得られない高度な相関分析や環境汚染発生時のトレースなどの機能を提供するもの（環境みまもりサービス）。第二に、H19 年度想定した構成要素を前提に、前記サービスを実現するために必要な機能の配置案を作成した。

(2-1) 生体・環境情報の分析技術の開発

ウェアラブル生体・環境センサによって計測された信号から、特徴の抽出や動特性の解析を行うための相関分析、多変量解析に代表される統計解析、スペクトル推定を核とする周波数解析を行うことで、人間の高次情報を抽出し、量的ではなく質的な診断を可能とするソフトウェアモジュールを開発する。

H20 年度は、体や心の状態の分析技術に加えて、環境インパクト（環境変化が生体情報に及ぼす影響）に関する研究を行った。

体の状態の分析技術については、H19 年度は、医学的に意味のある日常生活行動（睡眠、運動、食事など）をピックアップするとともに、市販のウェアラブルセンサや据置き型の医療計測機器によって基本データ（教師データ）を収集し、行動分類する技術の研究を開始した。これを受けて、H20 年度は、連続した生体・環境データから、行動の「切り出し」と「ダグ付け」を行うことを目標とし、高次情報を抽出するために、食習慣、ストレス、睡眠（いびき、歯軋り、呼気）などの分析技術の研究を進めた。

食習慣分析については、耳に装着する骨振動マイクから体内音をサンプリングして、①食事時の咀嚼回数、②食品の種類、③食事のタイミングの解析が可能となった。具体的に、①食事時の咀嚼回数については、咀嚼時にサンプリングした体内音から抽出される特徴的な咀嚼周期に基づいた LPF による前処理後にピーク検出を行うことによって、咀嚼スピードによらず安定して咀嚼回数がカウント可能となった。②食品の種類については、咀嚼時にサンプリングした体内音を周波数毎に複数のチャンネルにわけ、各チャンネルでのパワーの分布から、咀嚼している食品の硬さに関係すると思われるパラメータが抽出可能となった。硬い食品が咀嚼によって軟らかくなり、最終的に飲み込まれるまでの遷移状態が解析でき、食事時の咀嚼状態の理解につながる可能性があることから、現在研究を継続中である。③食事のタイミングについては、周波数解析することによって、「食べる」、「飲む」、「話す」、「その他」の各状態を 80%以上の成功率（自己 DB による認識）で認識可能となった。医学的な評価としては、音情報をセンシングしているので、咀嚼・嚥下などの食習慣の分析のみならず、言語的活動分析への展開可能性が指摘された。言語活動は知的活動の一つのバロメータとなり、例えばうつ病の検出や認知症の早期発見につながる可能性がある。これらは、次年度以降の検討課題とする。

呼気分析については、疾病のマーカー分子を明らかにするため、加熱脱着装置とガスクロマトグラフィ質量分析装置を用いた呼気分析システムのセットアップに着手した。また、医師による診断応用可能な呼気センサシステム開発を目指し、その基礎検討を行った。具体的には、酸化物半導体型ガスセンサの高感度化¹⁾、プラズモン現象を用いたセンサデバイスの開発²⁾、ガスクロマトグラフィシステムの小型化などを行った。

環境インパクトについては、環境変化がメタボリック症候群などの疾患に与える影響（特にストレスに与える要因）と、それらを改善すべき環境因子について科学することを目的として、各種基礎検討を開始した。まず、日常生活で起こりうる環境変化と生体情報の関連について基礎的データを取得した。具体的には、環境制御ルームの中で、温度、照度や騒音などを変化させ、被験者に一定のタスクを与えたときの心理状態を、従来手法の主観評価にあわせ生体情報の分析によって評価した。

(2-2) 生体・環境情報の表現手法の開発

注目する生体・環境情報およびその分析結果を効果的に表現するために、認知心理学に基づく情報加工・表示技術を開発する。

H20年度は、生体や環境から得られる多種多様な情報を表現するのに、適切な表現手法の開発に着手し、表現手法を認知心理学的に評価する項目の整理を行い、次年度以降の研究課題を明確にした。具体的には、多次元で定義される複雑な視覚情報を、いかに効果的に利用者に提示するかを検討するために、どのような視覚情報弁別能力を人間が有するかという点から基礎的な実験を行った。大きさや形状などを組み合わせた多次元定義図形の弁別実験を行い、弁別定義特徴の複雑さや、課題とは無関係な妨害特徴の付加による影響を明らかにした。すなわち、視覚次元という観点から、利用者にはできるだけ整理された情報提供が望まれることが確認された。

(2-3) 生体・環境情報のメタデータベース構築

ウェアラブル生体・環境センサから得られる大容量・多項目のデータを用いて解析を行う場合、全体データから解析対象データを迅速かつ容易に検索することが必要となる。本研究では、生体・環境情報を統一した形式で表現し、それらに対するスケーラブルなアノテーション手法と、付加されたメタ情報に基づく検索を可能とするメタデータベース機構の検討を行う。加えて、蓄積したデータを様々なアプリケーションで相互に利用するための流通基盤についても検討する。

H19年度は、メタデータベース機構に対する要求条件を整理するとともに、それらを満たすデータベースの選定と初期実装を行った。これを受け、H20年度は生体情報の利用シーンを詳細に検討し、メタデータベースの拡張と、生体センサ情報をデータベースに統合するためのデータ構造の設計を行った。具体的には、波形レベルや診断結果レベルなどの多様な興味に対応して、患者、家族、医療機関等にイベント通知が可能なデータベースシステムをXDMS（XML Document Management Server）をベースに構築した。このとき、標準のXDMSはXML文書の作成、読出し、更新等の基本的な機能しか備えないため、XQueryによる多様な検索（例えば、心電図データにおける異常の検索）と通

知機能を実現できるように拡張し、その実装を行った。また、生体センサ情報を医療情報に統合化し、XDMS で取り扱えるよう、医療情報の標準的フォーマットである HL7 のデータなどを参考にしつつ、スキーマレスにデータを格納できるようなデータ構造を設計した。

(3) メタボリック症候群の予防・治療に資するヘルスケアサービスの実証実験

社会的背景として、H20 年 4 月からは、メタボリック症候群対策として、特定健診・保健指導が開始された。このような世の中の動きと連動して、メタボリック症候群の指標化など、利用者のニーズにあったサービス開発を進める。

ウェアラブル生体・環境センサや生体環境情報の分析技術などの要素技術について、プラットフォーム構築後の本格的なサービス実証実験に先立って、開発できたものから早期に実証実験に投入することを予定している。H20 年度は、特定保健指導の現状の調査、遠隔医療・情報化施策の調査を開始し、フィールドにおける要求条件などを明らかにしている。具体的な実証実験のフィールドとしては、東大病院、フィットネスセンター(フィールファイン株式会社など)、自治体(小諸市、佐久市、長野市など)などを取り上げ、これらに対してヒアリングを進めている。その結果、センサの機能を追い求めるだけでなく、被験者や保健師・栄養士にとって継続性を持たせる工夫が重要であることが確認された。また、従来は、運動のデータを見て「動け」や「歩け」程度しか提示できなかったが、健康運動指導師の協力も必要であり、被験者に運動履歴を褒めることも求められている。これらは、(2-2) 生体・環境情報の表現手法の開発の項目と密接に関わり、次年度以降の課題とする。

今後は、実証実験の初期段階として、食習慣(食事時間、咀嚼回数など)分析やストレス分析を想定しており、アプリケーションソフトを開発して、日常生活中における健康管理や保健指導に関するサービス実証実験を行う予定である。

3. 研究実施体制

(1) 山田グループ

① 研究分担グループ長: 山田 一郎(東京大学大学院 教授)

② 研究項目

- ・ウェアラブル生体・環境センサの開発
- ・マルチセンサネットワーク構成技術の開発
- ・生体・環境情報の分析技術
- ・生体・環境情報の表現手法
- ・メタボリック症候群の予防・治療に資するヘルスケアサービスの実証実験

(2) 森川グループ

① 研究分担グループ長: 森川 博之(東京大学 教授)

② 研究項目

- ・ゼロ待機電力無線インタフェースの開発

4. 研究成果の発表等

(1) 論文発表（原著論文）

1. Jean-Jacques Delaunay, Ippei Nagatomo, Ryohei Uchino, Y. B. Li, Masaki Shuzo, Ichiro Yamada, “Enhancement of gas response of ZnO micro-nano structured layers through plasma treatment”, Advanced Materials Research, vol. 47-50, pp. 634-637, 2008.
2. Ryosuke Tsuji, Koichi Endo, Masaki Shuzo, Ichiro Yamada, Jean-Jacques Delaunay, “Hydrogen detection with subwavelength palladium hole arrays,” Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS, vol. 8, no. 2, pp. 021140, 2009 (in press).

(2) 特許出願

平成 20 年度 国内特許出願件数：0 件（CREST 研究期間累積件数：0 件）