

「先進的統合センシング技術」  
平成19年度採択研究代表者

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ーフェース
- (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。

H21 年度は、主にウェアラブル生体・環境センシングの要素技術(1-1、2-1)として、血圧、食習慣、ストレスのセンシングをめざしたセンサおよび分析技術の開発を行った。また、無線インタフェースの要素技術(1-2)として、ウェイクアップモジュールのチップ試作に着手した。マルチセンサネットワークの要素技術(1-3)として、異種のセンサ情報を高速でリアルタイムに伝送する手法の研究を行った。生体・環境情報の表現手法に関する要素技術(2-2)として、基質に基づく分類を行い、それに応じた最適な情報提示方法の提案を行った。メタデータベースの要素技術(2-3)として、デモシステムを構築し、動作検証及び性能評価を行った。さらに、サービスの実証実験(3)を想定し、医療従事者およびヘルスケアサービス事業者などへのヒアリングを基に、実施内容の検討を行った。その結果、H22 年度より、「東大病院におけるメタボ診療サービス」および「生活習慣病に関する情報共有サービス」の実証試験を実施することとした。

## § 2. 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
  - ・生体・環境情報のメタデータベース構築
  - ・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

### (3) 中村グループ

- ① 研究分担グループ長: 中村 二郎(日本電信電話株式会社、グループリーダー)
- ② 研究項目
  - ・マルチセンサネットワーク構成技術の開発
  - ・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

### § 3. 研究実施内容

(文中に番号がある場合は(4-1)に対応する)

H21年度は、H20年度に引き続き、医工連携のもとウェアラブルに基礎データを収集・分析する各要素技術の開発を行った。また、サービスとして展開することを前提にしたデータベース構築をめざした。その際、近年、医療現場での普及が進められている、遠隔医療や電子カルテなどの医療情報ネットワークとの連携を視野に入れ、病院のカルテや薬局の投薬記録なども含めた情報処理基盤の開発をめざしている。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

※ 本項目は、ハード・ソフト一体として開発を行うため、(2-1) 生体・環境情報分析技術の開発の項目とまとめて記す。

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。生体・環境情報の種類および実現容易性を考慮して、胸部貼付型、腕時計型を優先的に開発する。また、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年度までに、ウェアラブルな食習慣センサ、ウェアラブル血圧センサ、小型運動センサ、呼気ガスセンサの開発と、これらを用いた分析手法の研究を行った。H21年度は、引き続きウェアラブルセンサの開発を進めるとともに、分析技術の高精度化をめざした。

食習慣センシングについては、H20年度までに、医学的に意味のあるとされている、①咀嚼回数、②食品種類、③食事時間・回数(食事の規則性)などの食習慣のセンシングを目標に、骨伝導マイクを用いたウェアラブルな食習慣センサのプロトタイプの開発を行ってきた。H21年度は、引き続きウェアラブルなセンシングシステムの開発<sup>9)</sup>と、これによって得られた音情報の蓄積共有システムの構築をめざした。

プロトタイプの開発については、H20年度までは、フィージビリティ確認のため、実験室環境での音情報の取得に重点を置き、ICレコーダに記録した音情報をオフラインにてPCで解析する方法であった。H21年度は、実環境で使用することを想定して、マイクから携帯端末へ無線でデータ送信し、かつ携帯端末においてデータ処理・通信までを行うことを念頭にシステム開発を行っている。

また、H21年度は、H20年度の基礎実験によりデータ解析手法の有効性を確認できたことを受け、日常生活でのサンプル収集を目的としてデータ収集を実施した。音情報分析に基づく食習慣モニタリング手法の実現には、個人差のない分析アルゴリズムを見出すため、多くの被験者から収集した大量のデータを蓄積できる音情報共有データベースシステムの構築が有用と考えられる。これを利用して様々な分析アルゴリズムやモジュールの研究開発が期待でき、多くの研究者や医療関係者に貢献できる。音情報共有データベースシステムに関しては、専用端末やアプリケーションを使って、自己の情報に適宜アクセスして健康チェックができる仕組みや、

医師や栄養士が必要な情報を抽出して適切な健康指導を行える仕組みを提供することを目的として、膨大な情報を蓄積でき、必要な情報を素早く取り出せることを考えて構造設計を行った。今後は、一日の食事回数や食事にかけた時間、咀嚼回数などの分析情報も追加し、医師や歯科医師、保健師、栄養士が診断や指導にも用いることのできる有用なデータベースとしていく。

血圧センシングについては、H20 年度に開発した簡易型計測システムをベースに、日常生活中で、より長時間、より多くのサンプルを採取できるウェアラブル血圧センサを開発した。主な仕様としては、①心電、脈波、3 軸加速度の 5 チャンネルを同時計測、②各チャンネルは 1kHz サンプルングで同期計測、③2 時間以上の連続計測である。このデバイスを評価した結果、医学的要求からさらに検討を加える必要があるものの、実用レベルの精度(誤差 10mmHg 以下)で測定可能であることがわかった。高血圧の診断・治療は、診察室で測定された血圧値、あるいは家庭で一日に 1、2 回測定された血圧値に基づいてなされるが、このリアルタイムで長時間測定が可能なウェアラブル血圧センサが実用となり、既存の方法では計測し得ないような頻度で日常生活での血圧測定が可能となれば、より繊細な治療と、従来は職場や自宅では血圧が高くなっているにもかかわらず、診察室での血圧が正常であるために、従来は異常なしとして見逃されていた“仮面高血圧”などの発見につながる可能性がある。

また、血圧値の算出方法として、安静時のみならず運動時にも適応可能な測定法とするため、従来の脈波伝播速度法に血管動的变化モデルを考慮した新たな血圧算出式を導出し<sup>5)</sup>、その有効性を確認するために、医師による聴診法との比較実験を行った。その結果、運動時でも測定誤差 10mmHg 以下の連続的な血圧測定が実現できる可能性を確認した。さらに、循環器疾患患者を対象とした心臓カテーテル検査から得られる真の血圧値との比較実験を実施中であり、これによって 1 心拍毎の血圧値がどのくらいの精度で得られるかを検証中である。

ストレスセンシングについては、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、各種基礎検討を行った。H20 年度に引き続き、日常生活でのストレス負荷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、実験室環境下で、計算タスクに関連した複数(基準、緊張、単調の 3 種)のストレスを与え、被験者の主観評価と併せてウェアラブルセンサによる生体情報のモニタリングを行うことで評価した。ウェアラブルセンサからは心電、脈波、呼吸、指部皮膚温度を計測し、9 種の特徴量(生理指標)を得た。複数種のストレス推定手法を実現するにあたって、推定処理をステップ分けし、各ステップにおいて個人差が小さい複数の生理指標を用いる手法を提案し、その有効性を確認した。ステップ分けにおいては推定すべき種類に応じ 3 段階とし、ストレス推定手法の最適化を行い、実環境下でのストレス推定が可能であることを確認した。

呼気ガスセンシングについては、H20 年度に引き続き、医師による診断応用可能な呼気センサシステム開発をめざし、その基礎検討を行った。具体的には、ガスクロマトグラフィシステム(ガス分析装置)の小型化などを行った。小型化によるガス分離性能の低下を改善するために、三次元マイクロ構造を有する分離カラムを開発した<sup>2)</sup>。三次元マイクロ構造にガス分離機能をもつ固

定相を均一に成膜することが困難であったが、材料と成膜手法を変えることで、マイクロカラムの試作に成功した。実験の結果、従来構造を有するマイクロカラムよりも、本研究で開発したマイクロカラムは高い分離性能を有することがわかった。

#### (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%~50%を占めるため、センサの長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、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。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した。

H21 年度は、ウェイクアップモジュールの実用化に向け、半導体で構築するチップレイアウトの設計と、通信プロトコルの MAC 層の検証を行った。チップレイアウトは、プロセスルール 0.18 $\mu\text{m}$ 、ポリシリコン 1 層、メタル配線 5 層、電源電圧 1.8V で CMOS LSI 設計を行った。レイアウトレベルのシミュレーションにおいて bloom filter を用いる方式により回路規模を小さくできると同時に、電池のリーク電流程度の電流で動作可能であることを明らかにした。MAC 層の検証では、ヘルスマニタリングへの応用を想定し、マルチパスが頻発するような電子機器が多数存在する環境において、bloom filter を用いた場合と用いない場合の通信特性の評価を行った。その結果、bloom filter を用いた場合では、bloom filter に偽陽性が発生するという特性により、通常の論理積による ID マッチングよりも再送回数が抑えられることが明らかになった。

#### (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 年度の検討をベースに、実現するサービスの内容と、機能配置について検討を行った。H21 年度は、H20 年度に検討したマルチセンサネットワークによるサービスモデル

を想定し、複数のウェアラブルセンサノードによって構成される BAN について検討した。ウェアラブルセンサとしては身体動作を測定する加速度センサの他、血圧を脈波伝播時間から測定するため脈波センサと心電センサをターゲットとした。これらの信号をセンシングするためには以下の機能が要求される。①センサノード間の高精度な同期、②ms オーダーの高速サンプリング、③リアルタイム通信、である。①に関しては無線によるブロードキャスト同期を検討し、②に関しては無線受信割込みを禁止することにより正確なサンプリングが可能となり、③に関しては高速データ通信モジュールの利用を検討した。今回、これまでに開発した生体センサを BAN に適用するテストベッドを構築するため、上記3つの機能を実現する ZigBee による同期機能と Bluetooth による高速リアルタイムデータ通信機能を持つウェアラブルセンサノードを試作し、加速度センサを使用して身体動作のセンシングを行った。さらに、脈波センサと心電センサを使用して、0.1ms 以下の同期誤差での脈波と心電の同時センシングを実施し、ms オーダーで脈波伝播時間を測定できることを確認した。

#### (2-1) 生体・環境情報の分析技術の開発

※ 本項目は、ハード・ソフト一体として開発を行うため、(1-1) ウェアラブル生体・環境センサの開発 の項目にまとめて記した。

#### (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。

H21 年度は、生体・環境情報の表現手法の開発について、①提供情報の選択と伝達法、②三日坊主の防止、③サポート環境の3つを柱として、認知心理学的手法により人間の認知特性を調べ、情報加工・表示技術の開発に際して考慮すべき課題の検討を並列的に開始した。①については、人の気質によって望まれる情報提示方法が異なることを明らかにした。②については、健康維持行動の継続性を向上させる上で有効なギミック(ゲーム性を付加するなどの仕掛け)の性質について調べた。気質に合ったシステム構築を行い、適切なギミックを付加することにより、自己効力感の維持の支援を自動化でき、ユーザ自身によるセルフケアを可能にできると考えられる。③については、健康維持行動に人同士の社会的なインタラクションが及ぼす影響について検討し、次年度以降に精査すべき点の整理を行った。

#### (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。

H21年度は社会実装に向け、生体情報を蓄積したメタデータベースから生体データを取得してサービス構築する場合のインタフェースに関する検証を行った。具体的には、次世代電話技術の一要素であるIMS(IP Multimedia Subsystem)を基盤としたSIP(Session Initiation Protocol)とRTP(Real-time Transport Protocol)を用いたインタフェースと、ウェブサービスを簡単に構築するためのマッシュアップ技術であるRESTfulインタフェースの2つのインタフェースに関して比較検証を行った。検証システムは、被験者の生体情報を遠隔地で健康状態をモニタリングするというサービスで利用することを想定して構築した。その結果、サービスの開発コストの観点からはRESTfulインタフェースが有用であることが明らかになった。しかしながら、リアルタイムの遠隔値の生体情報をモニタリングする場合にはウェブ技術をベースとしたRESTfulインタフェースでは要求性能を満たすことができず、SIPとRTPを用いたインタフェースが必須であることが分かった。

### (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。

H21年度は、まず、いくつかのワーキンググループを設置し、実施するサービスの検討を行った。第一に、ウェアラブルセンサの開発を担当している工学チームの研究者と東大病院の医師を中心に、医工連携会議を開催した。そこでは、本プロジェクトのメンバー以外にも、メタボリック症候群と関連のある栄養士や、糖尿病専門医などの協力を得て、開発中のウェアラブルセンサの医学現場におけるニーズに関する意見交換とともに診療サービスへの応用検討を行った。その成果として、開発中のウェアラブル血圧センサを用いた「東大病院におけるメタボ診療サービス」の実証試験を提案した。H22年度においてはメタボ診療サービス実現のための第一の実証実験として本プロジェクトに加わっている内科系医師が担当する外来・入院患者を対象にウェア

ラブル血圧センサを装着しデータ取得を行ってそれを被験者および担当医師に還元するといったパイロット研究を実施する予定である。その他に、フィットネスセンター、健康保険組合、遠隔医療ネットワークなどとも協議中である。

第二に、工学メンバー主体でサービス検討チームを結成し、複数の対象におけるヘルスケアサービスを提案した。これに基づいて、H22年度に「生活習慣病に関する情報共有サービス」の実証試験を実施することとした。

一方で、新たな試みとして、国際連携への展開を検討している。開発を進めている生体環境情報処理基盤を通じて、個人が自らの健康状態を正確に知ることで、健康増進や生活習慣病予防をめざして、積極的な健康管理が促進される。そのため、個人のヘルスケア情報を共有するためのサービスとして、担当医への共有だけではなく、個人、事業者や、医学研究者の利便性確保のためには、個人と医療機関、事業者等の中でデータを容易に共有できるようにする必要がある。これを実現するには、SNS、e-Learningを実施例としているウェブベースコミュニティ技術をヘルスケアサービスに活用することが有効だと分かったので、その研究領域を推進しているフランス、ジャン・モネー大学のマレー教授と共同研究を検討している。H21年度に共同研究の可能性や仕組みについて議論を行ったのを受けて、H22年度から本格的にスタートの予定である。

## § 4. 成果発表等

### (4-1) 原著論文発表

#### ●論文詳細情報

1. 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. (doi: 10.1117/1.3094748)
2. Takashi Nakai, Sho Nishiyama, Masakai Shuzo, Jean-Jacques Delaunay, Ichiro Yamada, “Micro-Fabricated Semi-Packed Column for Gaschromatography by Using Functionalized Parylene as a Stationary Phase,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 19, no. 6, pp. 065032, 2009. (doi: 10.1088/0960-1317/19/6/065032)
3. Takashi Nakai, Jun Okawa, Shuji Takada, Masaki Shuzo, Junichiro Shiomi, Jean-Jacques Delaunay, Shigeo Maruyama, Ichiro Yamada, “Carbon Nanotube Stationary Phase in a Microfabricated Column for High-Performance Gas Chromatography,” *AIP Conference Proceedings*, vol. 1137, pp. 249-252, 2009. (doi: 10.1063/1.3156518)
4. Ippei Nagatomo, Ryohei Uchino, Masaki Shuzo, Ichiro Yamada, Jean-Jacques Delaunay, “Enhancement of Gas Response of ZnO Micro-Nano Structured Films through O2



Plasma Treatment,” 電気学会論文誌 E, vol. 129, no. 9, pp. 307-311, 2009.

(doi: 10.1541/ieejsmas.129.307)

5. Guillaume Lopez, Masaki Shuzo, Hiroyuki Ushida, Keita Hidaka, Shintaro Yanagimoto, Yasushi Imai, Akio Kosaka, Jean-Jacques Delaunay, Ichiro Yamada, “Continuous Blood Pressure Monitoring in Daily Life,” Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, vol. 4, no. 1, pp. 179-186, 2010. (doi: 10.1299/jamdsm.4.179)
6. Masaki Shuzo, Shintaro Komori, Tomoko Takashima, Guillaume Lopez, Seiji Tatsuta, Shintaro Yanagimoto, Shin'ichi Warisawa, Jean-Jacques Delaunay, Ichiro Yamada, “Wearable Eating Habit Sensing System Using Internal Body Sound,” Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, vol. 4, no. 1, pp. 158-166, 2010. (doi: 10.1299/jamdsm.4.158)