

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. 研究実施体制

(1) 山田グループ

- ① 研究代表者: 山田 一郎 (東京大学大学院工学系研究科、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
 - ・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 主たる共同研究者: 森川 博之 (東京大学先端科学技術研究センター、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

§2. 研究実施内容

(文中に番号がある場合は(3-1)に対応する)

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のできる生体・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。

H23年度は、医工連携のもとH22年度に開始した東大病院におけるヘルスケアサービス(生活習慣病診療サービス)の実証実験に集中し、ウェアラブル血圧センサを中心に、医学・健康に応用できるような道筋を立て、ヘルスケアサービスとして確実な成果を出すことに注力した。具体的には、ウェアラブルセンシング・分析技術の性能向上とともに、サービスとして展開することを前提にしたヘルスケア情報共有システム(データベース)を構築し、ウェアラブルセンシング・分析技術と統合した形でヘルスケアサービスの実証実験を実施した。

(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。また、ウェアラブル生体・環境センサによって計測された一次情報から、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。

H22年度までに、ウェアラブルな血圧センサ、食習慣センサ、ストレスセンサ、小型運動センサ、呼気ガスセンサと、これらを用いた分析手法の研究を行った。H23年度は、ウェアラブル血圧センサを中心に、日常生活および病院診療において利用できる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。また、ヘルスケアサービスの実証実験と連動して、ユーザである医師や患者の要求に合うように、操作性、装着性などをハードとソフトの両面で改良した。

血圧センシングについては、H22年度までに、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、脈波伝播速度法に基づき、血管の非線形弾性特性を考慮した新たな血圧算出式を導出した。本手法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

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。そこで、日常生活において使用可能なウェアラブル血圧センサの試作機(3台)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チャンネル同時計測、②1kHz サンプリングによる高速同期計測、③2時間以上の長時間連続計測である。また、携帯端末で、リアルタイムに心電や脈波などの生波形を確認でき、自動的に血圧算出結果を表示できるソフトウェアも開発した。このウェアラブル血圧センサを用いて医療現場での血圧測定実験を繰り返し行い、総症例数は200を超えている。

H23年度は、ユーザビリティ調査において煩雑とされた心電、脈波の計測箇所から携帯端末までのケーブルを無線化した。連続ヘルスケアデータを取り扱うことを考慮し、独自の超低消費電力無線を用い、小型二次電池で3時間の連続計測を実現した。この無線型ウェアラブル血圧センサを製作し、基本機能の確認を終了したので、今後臨床現場に投入を進めていく予定である。また、医療機器メーカーと共同してウェアラブル血圧センサの実用化に向けた検討を進めている。

一方で、無線通信プロトコルについては、独自の超低消費電力無線を用いたが、並行して、医療・健康分野で用いられている無線通信プロトコルの導入を検討した。具体的には、家庭用医療機器、フィットネス&スポーツおよびヘルスケア・アプリケーション向けの低消費電力 RF センサネットワーク・ソリューションである ANTリンクの採用を決定し、無線型ウェアラブル血圧センサへの適用検証、設計を行った。

本手法の有効性について、これまで聴診法によるカフ血圧との比較による精度検証を行っていたが、東大病院におけるカテーテル検査から得られる血圧値との比較実験を開始した。これによって、1心拍毎の血圧値をどのくらいの精度で測定できるかを確認するねらいがある。現在までに入院患者10数名からデータを取得したところで、計測環境がようやく整ってきたところである。症例数を増やすと共に、血圧値と脈波伝播時間との相関解析を開始し、その初期結果をまとめた論文を投稿した。

ストレスセンシングについては、H22年度までに、日常生活で起こりうる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、複数種のストレス(基準ストレス、単調ストレスおよび緊張ストレス)を与え、被験者の主観評価と併せて、ウェアラブルセンサを用いた生体情報モニタリングによる客観評価を検討した。ウェアラブルセンサにより、心電、脈波、呼吸、指部皮膚温度を計測し、9種類の特徴量(生理指標)を得た。個人差の少ないストレス推定手法として、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。H23年度は、これまでの研究成果の取りまとめとともに、ストレスセンシングに有用とされる呼吸センサに関しては、ウェアラブルデバイスが存在しないので、新たなセンサの開発検討を行った。具体的には市販の圧電薄膜を体表面に貼り付けることにより、呼吸音モニタリングのフィジビリティスタディを行った。取付け位置として耳道、顎、喉、頬骨などを検討し、S/N が小さいもののフィルタ処理により呼気、吸気のタイミングを検出することができる可能性を明らかにした。今後は圧電薄膜を用いる呼吸センサの構造設計な

どを行い、新たなウェアラブルデバイスの開発を進める予定である。

一方、食習慣センシングについては、H22 年度までに、①咀嚼回数、②食品の種類(テクスチャー)、③食事のタイミング(規則性)といった食習慣を検出することをめざして、骨振動マイクを用いたウェアラブル食習慣センサと分析手法の開発を行った。H23 年度は、これまでの研究成果の取りまとめ^{1),8)} とともに、耳道から取得される呼吸音、脈音などの生体情報の抽出を行い、上述のストレスセンシングへの統合を行った。

(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、無線通信プロトコルの良し悪しがセンサ寿命に大きな影響を与える。本研究課題では、近距離無線(PAN)を構成する特有のトラフィックパターンの偏りをうまく利用した省電力化技術の開発をめざす。具体的には、PAN ではセンサとリーダ(センサノード)が 1~2m という極めて近い距離に位置することに着目し、受信電磁波エネルギーでマイクロコントローラを駆動してデバイス発見を行う手法を中心に、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総合的に検討する。

H22 年度までに、ウェイクアップ無線インタフェースの ID マッチング回路技術を確立し、シミュレーション評価を行った。また、実機レベルでの実装を進め、東京大学 VDEC を利用してブルームフィルタを用いた ID マッチング回路の LSI 実装を行った。H23 年度は、東大病院におけるヘルスケアサービスの実証実験に注力するため、ゼロ待機電力無線インタフェースの評価のみを実施することとし、本研究開発項目の収束を図った。具体的には、ID マッチングにブルームフィルタを用いる本手法では、ヘルスケアサービスで想定される ID 数において、従来の方式に比べて低消費電力かつ小規模な回路構成でウェイクアップモジュールを構築できることを示した⁴⁾。

(1-3) マルチセンサネットワーク構成技術の開発

※ H23 年度は、東大病院におけるヘルスケアサービスの実証実験にリソースを集中するために、この要素技術の開発は継続せず、これまでの研究内容の取りまとめ²⁾ を行った。

(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

※ H23 年度は、東大病院におけるヘルスケアサービスの実証実験にリソースを集中するために、この要素技術は単独項目として継続せず。

(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・環境情報のアノテーション情報を統合的に蓄積するメタデータベースを構築し、増加するデータに対してスケーラブルにアノテーションを行うための手法を提案する。具体的には、データベースに蓄積された生体・環境情報を REST アーキテクチャスタイルに基づいて操作可能なリソース定義方式を設計し、本方式を BAN から得たセンサ情報のアーカイブとして利用する。また、実証実験を通じて本方式の評価を行う。

H22 年度までに、メタデータベースのプロトタイプを試作し、ウェアラブル生体・環境センサとの接続実験を行った。また、データベースの高速な問い合わせ処理とデータサイズの削減を実現した。H23 年度は、メタデータベースを構成する要素のデータベースマネージャを問合せの高速性とデータサイズの削減の観点から評価し、さらに RESTful インタフェース技術を利用したヘルスケア情報共有のための生体データベースとユーザインタフェースを含めたシステムの構築することで、ヘルスケアサービスの実証実験を行った。

データベースマネージャの評価では、事前問合せ方式を基礎としデータ圧縮を行う提案方式について、問合せ数を変化させたときの問合せ処理時間やデータベースの全体サイズについて検討を行った。その結果、提案手法が問合せ処理の高速化とデータ削減を同時に最適化するという結論を得た⁶⁾。一方、ヘルスケアサービスの実証実験では、ウェアラブル生体・環境センサを RESTful のインタフェースを備えたメタデータベースに接続し、センサから測定データのデータ転送およびブラウザでの測定結果表示を行った。このブラウザでのヘルスケアサービスを医療従事者に使用してもらい、ユーザビリティや使用感を調査した。その結果、波形の拡大や縮小、操作レスポンスについておおむね良い評価を得られた。また、これにより連続的な血圧の測定と表示が可能になり、臨床や臨床研究での応用が可能になるとのコメントが得られた。一方で、臨床では、最大値、最小値、平均値などの統計量の表示、臨床研究では、症例などの検索機能が必要とされることが分かった。

最終年度に向けて実証実験の規模を拡大するにあたり、他サービスとの連携を踏まえた認証機能の拡充や、患者と医師などのユーザごとの要求にあわせて生体情報を扱う粒度を変更するといったメタデータベースの機能拡張が必要なことも明らかとなった。

(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、高まる医療費を抑えるため、健康管理・予防医療に対する本格的な取り組みが始まろうとしている。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。生活習慣病の中でも、高血圧は特に日本人の有病者が多く、脳・心血管病の最大の危険因子である。特に高齢者においては動脈壁硬化の進んだ症例も多く、血圧の短期変動(日内変動)のみならず、急激な血圧上昇・低下による相対的臓器虚血も誘発されやすい。このような社会のニーズと連動して、我々はこれまで、カフを必要とせずに連続的に血圧をモニタリングできるウェアラブル血圧センサを開発し、臨床への応用を進めている。また、医療現場

での普及が進められている医療情報ネットワークとの連携を視野に入れ、情報処理基盤の開発を平行して実施し、この実証実験データを医療従事者・患者・研究者などにフィードバックするシステムを構築している。

「東大病院における生活習慣病診療サービス」においては、ウェアラブル血圧センシングデバイスの臨床応用の可能性を探るべく、老年病科の入院患者と、循環器内科の心臓リハビリテーション通院患者の二つの医療現場における血圧測定実験を繰り返してきた。H23年度は、医工連携のもとに開発したウェアラブル血圧センサを活用して、東大病院における実証実験を外来・入院患者における、連続血圧モニタリング技術に集中し、臨床応用を次の三つの観点から検討した。

- ① 観血的動脈圧測定値と脈波伝播速度法で得られる推定値との対比(精度評価)。
- ② 高齢者において『超』短時間に起こりうるストレス反応性昇圧や短時間での血圧低下(起立後、食後、排尿後、など)をいかに非侵襲的手法で確認できるかの検証。
- ③ 高齢者診療への応用を目指した、自由行動下ウェアラブル血圧センサにおける超短期血圧変動の可視化。

①について、ウェアラブル血圧センサなどを医療・健康器具として実用に供するため、我々の開発したデバイスを医療機器メーカーと共同して実用化していく予定であり、東大病院におけるヘルスケアサービスの実証実験においても、観血的血圧測定との対比による精度評価を、医療機器メーカーと協力して開始した(1-1を参照)。

②について、開発中のウェアラブル血圧センサを血管壁硬化の進んでいる高齢者において臨床診療での実証実験を行ったところ、非侵襲的に鋭敏な『超』短期変動を捉えることができた。今回の対象症例は平均年齢 80 歳の高齢者だからこそ、様々な認知機能や下肢筋力のレベルを中心とした個人差が非常に大きく存在する中、メンタル負荷やフィジカル負荷などストレス反応性の昇圧に対しても、そして起立性血圧低下に対する病態においても、カフ血圧値と比較して安定した収縮期血圧の推移を算出することができた⁵⁾。

③について、高齢者では平地歩行や階段昇降レベルの低負荷の動作においても著明に血圧上昇していることが確認出来た。また、このウェアラブル血圧センサのもう一つの利点として、収縮期血圧と心拍数の値を乗ずることにより算出される「Double Product」(心負荷レベルを反映する指標)をリアルタイムに把握できる点である。階段昇降運動において、血圧も上昇しているが、同時に心拍数も著明に上昇しており、結果的に Double Product はかなり大きく上昇していることを複数の症例で感知することができた。このような超短期時間内における血圧、心拍数、そして Double Product の急峻な上昇は、まず高齢者の歩行リハビリテーションなどを遂行するにあたり、過度な心負荷を避ける目的としても良い目安として期待できる。

今後、このウェアラブル血圧センサを臨床の場で活用することにより、従来のカフ圧迫による頻回な苦痛を与えることなく、様々な環境変化やストレス下における高齢者の血圧の『超』短期

変動を捉えることができると考えられる。高齢者において、脳心血管系疾患の発症予防にも「厳格な血圧変動管理」という視点での有用であるだけでなく、転倒既往や転倒リスクを持ち合わせている高齢者に対しても「過度な血圧変動や過降圧による相対的脳虚血の可能性をチェック」する視点においても非常に有用である。このウェアラブル血圧センサから得られる情報を臨床診療に活用することにより、最終的には高齢者の日常生活活動度を維持させることにつながる事が期待される。

なお、臨床の場での十分な活用までにはいくつかの問題を含んでいる。まず1つ目には、この血圧センサを用いる収縮期血圧値の決定にはこれまでの **calibration** 手法ではまだ不完全な部分が残されていることである。今後、同一症例における再現性や **baPWV** (四肢(両上腕、両足首)に巻いた血圧測定カフの容積脈波から測定した脈波伝播速度:動脈硬化の指標)を代表とする動脈壁硬化度とウェアラブル血圧センサによるデータとの相関などの基礎的検討を加える予定である。また、幅広い臨床病態への応用として、認知機能レベルによるストレス昇圧の反応性の差異、易転倒性の症例における血圧低下の関与のレベル、さらには高齢者の様々なリハビリテーション時における血圧モニタリングに対するウェアラブル血圧センサの有用性を検討していく予定である。

2つ目には、算出した血圧値をいかに見やすい形として表示するかも大きな課題である。ここでは、医療関係者だけでなく、患者側へのデータのフィードバックにも配慮を必要とする。過度な『超』短期変動を捉えた時に、その血圧変化の異常をより迅速に診療内容に応用でき、そして患者側にも分かりやすい形でデータ共有できるかをさらに検討する必要がある。

3つ目には、装着した高齢者に聞き取りを行うと、基本的には耳たぶへのセンサの装着感には大きな問題を訴えてはいないが、歩行障害や手指の動作に支障をきたしている高齢者において、いかに身軽な装着として感じる事ができ、そして体動の影響をいかに少なくできるかも引き続き課題である。

一方、実証実験に用いるヘルスケア情報共有システムについては、**H22** 年度は、データセット共有の仕組みの開発を、①データセット生成パスの構築、②公開用フォーマット検討(ヒアリング調査)、③データ収集計画立案、④公開用データ収集、⑤公開用サイト構築の手順で行った。**H23** 年度は、ウェアラブル血圧センサを中心とするウェアラブルセンシング技術と統合し、「東大病院における生活習慣病診療サービス」の実証実験において評価、改良を進めた。ヘルスケア情報共有システムを医療従事者のユーザビリティの観点から評価を行い、使用感などの実用化に向けた課題の抽出を行った。その結果をヘルスケアデータベースの再構成に反映し、医療従事者を対象としたユーザインタフェースの改良を開始した。具体的には、重要項目と指摘された波形の閲覧性の向上、最大、最小、平均、分散、異常値などの特徴量の同時表示と、行動履歴とのリンクが簡易でスムーズにできるように実装を進めた。

また H22 年度は、ブログや SNS (Social Network Service) などの個人がインターネット上でデータを管理し、共有するためのサービスが爆発的に広まりつつあり、健康推進への活用が期待されているため (日本版 PHR を活用した新たな健康サービス研究会報告書、2008/03)、ウェブコミュニティにおけるヘルスケアデータの共有仕組みに関する国際共同研究を開始した。具体的には、個人情報を保護して安全を保証しつつ、関係するコミュニティ (担当医師、家族や親戚、友達など) においてヘルスケアデータを自動的に共有する情報共有フレームワークを提案し、試作を開始した。H23 年度は Web を介したコミュニケーショングループ (SNS など) の形成・運用に関するデザインルールを作成し、情報共有 “Policy Engine” の実装により、どんな条件で、どんな粒度の情報にアクセスできるかを制御でき、共有している生体情報の適切な粒度の自動分析・表示ができる PC 用と携帯端末用のアプリケーションを試作した。

今後は、その成果を反映することで、医療従事者だけではなく、患者やその家族へのフィードバックが可能なヘルスケア情報共有システムをめざして、東大病院における生活習慣病診療サービスの実証実験にて評価したいと考えている。患者の健康情報に関するセキュリティに確実に対応する必要があるため、引き続き、医師、医療情報関係者との議論を密に続けていく予定である。

§3. 成果発表等

(3-1) 原著論文発表

- 論文詳細情報

1. H. Zhang, G. Lopez, M. Shuzo, J.J. Delaunay, I. Yamada, “Analysis of Eating Habits Using Sound Information from a Bone-Conduction Sensor,” Proceedings of e-Health 2011, pp. 18-27, Rome, Italy, July 20-22 2011. (DOIなし)
2. M. Nakamura, J. Nakamura, G. Lopez, M. Shuzo, I. Yamada, “Collaborative Processing of Wearable and Ambient Sensor System for Blood Pressure Monitoring,” Sensors, vol. 11, no. 7, pp. 6760-6770, 2011. (DOI:10.3390/s110706760)
3. G. Lopez, M. Shuzo, I. Yamada, “New Healthcare Society Supported by Wearable Sensors and Information Mapping Based Services,” International Journal of Networking Virtual Organizations, vol. 9, no. 3, pp. 233-247, 2011. (DOI: 10.1504/IJNVO.2011.042481)
4. 石田 繁巳, 瀧口 貴啓, 猿渡 俊介, 南 正輝, 森川 博之, “ブルームフィルタを用いたウェアイクアップ型通信システム,” 電子情報通信学会論文誌, vol. J94-B, no. 10, pp. 1397-1407, October 2011. (DOIなし)
5. 飯島 勝矢, 亀山 祐美, 秋下 雅弘, 大内 尉義, 柳元 伸太郎, 今井 靖, 矢作 直樹, ロペズ ギョーム, 酒造 正樹, 山田 一郎, “高齢者におけるウェアラブル血圧センサーの臨床応用:～認知機能およびストレス感受性からみた血圧短期変動評価への有用性の検討～,” 人工知能学会論文誌, vol. 27, no. 2, pp. 40-45, 2012. (DOIなし)
アピールポイント:ウェアラブル血圧モニタリングデバイスを用いた実証実験の成果に関する論文。東大病院において行った実証実験をまとめ、開発した技術が切り開く新しい血圧治療の可能性を報告した。
6. 猿渡 俊介, 高木 潤一郎, 川島 英之, 倉田 成人, 森川 博之, “センサデータベースマネージャにおける問合せ処理とデータ圧縮の同時最適化,” 情報処理学会論文誌, vol. 53, no. 1, pp. 320-335, January 2012. (DOIなし)
7. H. Ide, G. Lopez, M. Shuzo, S. Mitsuyoshi, J.-J. Delaunay, I. Yamada, “Workplace Stress Estimation Method Based on Multivariate Analysis of Physiological Indices,” Proceedings of The International Conference on Health Informatics (HEALTHINF 2012), pp. 53-60, Algarve, Portugal, February 1-4 2012. (DOIなし)
8. H. Zhang, G. Lopez, R. Tao, M. Shuzo, J.-J. Delaunay, I. Yamada, “Food Texture Estimation from Chewing Sound Analysis,” Proceedings of The International Conference on Health Informatics (HEALTHINF 2012), pp. 213-218, Algarve, Portugal, February 1-4 2012. (DOIなし)