

携帯電話を用いたモバイル生体センサデータ解析プラットフォームの構築

幸島 明男^{†1,†2} 車谷 浩一^{†1,†2}

本論文では、ユーザの健康管理などを目的として、ユーザが装着したワイヤレス生体センサから得られる生体センシングデータのリアルタイム解析サービスを行うモバイル生体センサデータ解析プラットフォーム: CONSORTS-S について述べる。携帯電話を用いた生体センシングデータ解析サービスを構築しようとした場合、計算資源や通信帯域の限られた携帯電話を用いて、いかにして生体センサから継続的に送信されるデータストリームを遅滞なく解析し、迅速にサービス提供を行うかという問題の解決が重要な課題となる。一方で、複数のユーザへのサービスを実現するには、解析サーバへのデータの集中による負荷の軽減を目的とした、携帯電話からの通信量の削減も重要な技術課題となる。CONSORTS-S では、モバイルセンササーバと呼ぶ通信モジュールおよびインターネット上のデータ解析サーバを協調的に動作させることで、既存の携帯電話を用いて迅速なサービス提供を実現した。具体的には、センサ通信の各段階においてデータの縮約処理を行うことで全体としてセンサデータ解析の高速化を実現するとともに、変異の検知に基づくイベント駆動の通信を行うことで、通信量の削減を可能にした。CONSORTS-S を用いて、心電位データと3軸加速センサデータをリアルタイムで解析し、心拍数、姿勢および歩行速度を常時モニタリングする遠隔生体見守りサービスを構築し、処理時間、通信量の評価を行った。センサデータ解析に要する応答処理時間は1.5秒程度で済むこと、また非同期通信を行った場合、常時送信する場合に比べて、通信量は半分以下に削減されることを確認した。

Development of Physiological Sensor Data Analysis Platform on Cellular Phone

AKIO SASHIMA^{†1,†2} and KOICHI KURUMATANI^{†1,†2}

CONSORTS-S is a mobile physiological sensor data analysis platform on cellular phone. The platform consists of a mobile phone, a wireless physiological sensor, a mobile sensor router, and sensor analysis middleware on the Internet. It provides following facilities: 1) communicating with a wireless sensor unit via user's cell phone to collect his/her physiological data, 2) asynchronously sending

the sensor data to the sensor middleware when variations of the data is dynamically changed, 3) analyzing the data by sensor middleware, called SENSOR, on a remote server to capture one's status, and 4) immediately providing the status, such as posture and heart-rates, using display of the cell phone. In this paper, we describe the concept and architecture of CONSORTS-S, and show a health-care service on CONSORTS-S. The service maintains and improves user's condition by monitoring one's physiological information, such as heart-rates, posture and locomotion. The service is implemented with popular 3G phones and a wearable wireless sensor unit, which includes electrocardiograph, thermometer, and 3-axis accelerometer. We confirm that the response time of the service is less than 1.5 seconds and the amount of the communicate data can be decreased by the asynchronous communication mechanism.

1. はじめに

近年、携帯電話による情報通信インフラの普及と、高齢化社会の進展にともなう医療費の増大を背景として、医療・健康管理のための携帯電話を用いた情報通信サービスへの関心が高まっている。誰もが常時携帯し、いつでもどこでも利用することのできる携帯電話を用いて、ユーザの生体情報を常時センシングすることができれば、さまざまな新しい生体センシング応用サービスが可能になると考えられる。そこで、我々は、現在、ユーザの健康管理などを目的として、携帯電話と装着型生体センサを用いた、新しい生体センシングサービスの実現を目指した研究を進めている。具体的には、以下のようなサービスを想定して研究・開発を進めている。

高齢者のための遠隔生体見守りサービス 高齢者や被介護者の方などが、生体センサを装着し、携帯電話を用いて、そのセンシング情報を常時インターネット上のセンサデータ解析サーバに送信することで、遠隔地の家族や介護者が自らの携帯電話で、健康状態や身体状況（心拍や姿勢など）を見守ることを可能にするサービス。

トレーニング時の運動強度のフィードバックサービス ランニングなどの有酸素運動を行うユーザが、生体センサを装着し、携帯電話を用いて、そのセンシング情報を常時インターネット上のセンサデータ解析サーバに送信し、その解析結果（走る速度や心拍、姿

†1 独立行政法人産業技術総合研究所

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

†2 独立行政法人科学技術振興機構 CREST

CREST, Japan Science and Technology Agency

勢など)をユーザ自身や遠隔地のトレーナが確認することで、効果的なトレーニングを実現するサービス。

これらのサービスでは、計算資源や通信帯域の限られた携帯電話で高度な解析サービスを提供するために、インターネット上の解析サーバを利用する。今後、携帯電話上のサービスの高度化にともない、このようなアプローチへの需要は高まると予想され、データ解析サーバとの協調による解析処理技術の研究は重要と考え、研究を進めている。

しかしながら、上記のような生体センシングサービスを実現するには、いくつかの解決すべき問題がある。具体的には以下のような要件を満たすシステムを開発する必要がある。応答時間の短縮 リアルタイムでユーザの生体情報をモニタリングするには、センサデータをセンサデータ解析サーバに送信するとともに、その解析結果を受信し、ただちにユーザに提示するといった処理を高速かつ継続的に行う必要がある。しかも、こうした処理を、計算資源や通信帯域の限られた携帯電話とその公衆回線網を利用して実現しなければならない。

サーバの負荷低減 個々のユーザがセンシングしたデータは、生体データ解析サーバに送信され、そこでセンサデータ解析を行い、その結果を携帯電話に送信することで、高度なデータ解析サービスを提供する。したがって、複数のユーザが同時に大量のセンシングデータを送信した場合には、解析サービスの提供が困難になる。1人のユーザのサーバに対する負荷を低減させると同時に、ユーザ数の増加に対して、スケーラブルな設計を行う必要がある。

これまででも、遠隔医療の研究において、計測したデータを遠隔地のサーバに効率的に送信するための圧縮手法の研究は行われてきた¹⁾。しかしながら、本研究で目的としているような、携帯電話とインターネット上のセンサデータ解析サーバが連動して解析処理を行い、つねにユーザが解析結果を利用するための研究は少なかった。

本論文では、以上のような観点から、携帯電話とセンサデータ解析サーバとの協調による生体センシングデータ解析サービスのための生体センサデータ解析プラットフォーム: CONSORTS-S を提案する。CONSORTS-S は、モバイルユーザが装着した生体センサからのセンシングデータを、携帯電話で受信して、インターネット上のセンサデータ解析サーバに送信することで、センサデータの解析を行う機能を提供する。そして、その解析結果に基づいたさまざまな生体情報サービスを、携帯電話をユーザインタフェースとしてただちに提供できる。

CONSORTS-S では、生体センサデータ解析プラットフォームに求められる、「応答時間

の短縮」と「サーバの負荷低減」という2つの要件を達成するための手法として、

- 応答時間の短縮を目的とした分散センサデータ解析アーキテクチャ
- サーバの負荷低減を目的とした変異検知による通信量削減手法

という2つの手法を提案する。これらの手法については、心拍数、姿勢、歩行のようなユーザの身体状況を遠隔地からモニタリングする生体情報サービスを、CONSORTS-S 上の具体的なサービスとして実現し、評価を行う。

まず、2章では、本研究の関連研究に関して述べる。続いて、3章では、CONSORTS-S の分散解析処理の概要について述べる。CONSORTS-S では、モバイルセンサルータと呼ぶ通信モジュール、携帯電話、そしてインターネット上のデータ解析サーバのそれぞれが、センサデータの転送の過程で、必要とされる解析処理を分散して行うことで、迅速なサービス提供を実現する。4章では、CONSORTS-S 上の具体的なサービスとして構築した、高齢者のための遠隔地からの生体見守りサービスについて述べる。本サービスは、高齢者などの被介護者の生体情報をワイヤレス心電センサと3軸加速度センサを用いてセンシングし、そのデータから推定したユーザの身体状況を遠隔地のユーザの携帯電話に提示する機能を提供するものである。最後に、本サービスを題材として行った、通信量、処理応答時間などの評価について述べる。

2. 関連研究

医療の分野では、遠隔地から携帯電話や通常の電話回線などを用いて、在宅患者の生体情報をモニタリングする技術の研究は、これまで数多くなされてきた^{2),3)}。そこでは、携帯型の心電計を装着し、そのデータを適宜、遠隔地の医師などへ携帯電話の通信回線を用いて送信するというような特定の疾病の管理(たとえば不整脈の検知など)を行う遠隔医療サービスの提案は多い⁴⁾⁻⁶⁾。そのため、個人の状況認識の併用など、装着型生体センサを用いたより汎用的なサービスへの展開を模索する研究は、現状では、十分になされているとはいえない。本研究では、さまざまな生体センサを用いてユーザの活動や身体状況、健康状態を認識するための一般的なサービス基盤としてのセンサデータ解析プラットフォームを構築し、その上で健康管理などのサービスの提供することで、さまざまなサービスへの展開を目指して開発を進めている。

携帯電話に装着されたセンサを用いて、ユーザの活動や身体状況を推定する手法として、倉沢ら⁷⁾は、携帯電話への組み込みを前提として、3軸加速度センサを用いた姿勢推定手法を提案している。また、Choudhuryら⁸⁾は、複数のセンサを搭載した携帯型センサボード

を用いて、ユーザの行動を推定する手法を提案している。CenceMe⁹⁾は、携帯電話に内蔵されたマイクロフォンなどのセンサを利用して、ユーザの社会的状況を推定し、ソーシャルネットワークサービスと連携させる手法を提案している。より強く健康管理に着目した研究として、大内ら¹⁰⁾は腕時計型生体センサと携帯電話を用いて、生活習慣管理や睡眠状態のチェックなどを行うシステムを提案している。また、複数の生体センサを用いた行動認識を併用しながら、高齢者のケアや健康管理サービス¹¹⁾⁻¹³⁾を行う研究も提案されはじめている。

しかしながら、これらの研究は、ユーザの状態の推定手法に焦点をあてたものが多く、携帯端末の通信機能の利用やサーバとの連携によるデータ解析処理プラットフォームという観点については、十分な検討がなされているとはいえない。携帯電話をキーデバイスとして、生体センサ、組み込みシステム、インターネット上のサーバという、異なる計算資源を持つ情報処理システムがそれぞれ連携しながら迅速に解析処理を行うためのアーキテクチャおよびそのための計算手法の確立が、本研究の狙いである。

遠隔医療情報処理のためのセンサデータ処理ミドルウェアという観点からは、生体センサデータの情報を携帯電話を用いて遠隔地に送信するためのミドルウェア：HARMONI¹⁴⁾が提案されている。HARMONIは、携帯電話上でセンサデータの簡単な状況認識処理を行い、状況に応じて送信データの縮約処理を行う機能を持つ。また、より一般的なセンサデータの送信という観点から、Trossenら¹⁵⁾は、NORS^{*1}と呼ぶ携帯電話を用いたリモートセンシングのプラットフォームを提案している。これらのシステムの目的は、データの円滑な送信処理にあり、送信したデータをどう処理し、どうサービスを提供するかという点は考慮していない。また、センサデータのストリームデータ解析という観点からは、STREAM¹⁶⁾、Aurora¹⁷⁾、XStream¹⁸⁾などが各種のセンサデータストリームミドルウェアが提案されている。従来の研究の多くが、十分な計算資源を前提としているのに対して、本研究では、いかにして通信帯域と計算資源の制約された携帯電話を用いて、ストリームデータを処理することに注目して、全体の設計を行っている。

3. 生体センサデータ解析プラットフォーム：CONSORTS-S

本章では、生体センサデータ解析プラットフォーム CONSORTS-S の概要について述べる。CONSORTS-Sは、モバイルユーザへのサービスを目的として、ユーザの装着した生

体センサ情報の収集、管理、解析、サービスを行う。具体的には、以下の機能の実現を目指した。

センサデータ収集機能 ユーザの携帯電話は装着型生体センサとワイヤレスで通信し、センサ情報を収集する。携帯端末の処理機能および通信機能には限界があるため、提供するサービスに応じて、センサデバイスから取得するデータの削減や、携帯電話側で重要と思われるセンサデータ（時系列のトレンドの変化点付近のデータ）だけを送信することで、サーバへ送信するセンサデータの削減処理を行う。

センサデータ解析機能 ユーザの携帯端末は、周囲のセンサ群から取得したセンサデータを、センサ情報管理サーバへ送信し、センサデータの解析はサーバ上で行う。多くの携帯端末への対応を想定して、携帯端末とサーバとの間の通信プロトコルは抽象化された共通プロトコルとする。

センサデータ管理機能 センサ情報管理サーバは、受信したセンサデータを蓄積し、遠隔地からのアクセスに対して、情報を提供する。サーバ上でのセンサデータの処理を原則とするが、送信休止時や圏外時のデータの保存のための、携帯端末内のストレージにセンサデータのログを蓄積する機能を持つ。

遠隔サービス提示機能 ユーザの携帯端末は、サーバ上でセンサデータの解析結果に基づいたサービスを提供する。本研究では、生体センサを用いた遠隔見守りサービスを想定して、開発を進めている。

上記のような機能を提供するためのプラットフォームを目指して開発した CONSORTS-S の概要を、図1に示す。CONSORTS-Sは、生体センサ、モバイルセンササーバ、携帯電話、センサ解析サーバ (SENSORD¹⁹⁾) の4つの要素から構成される。以下では、各モジュールの概要と役割について述べる。

3.1 生体センサ

CONSORTS-Sで利用する生体センサは、Bluetooth^{*2}、もしくは2.4GHz ISMバンドを用いてデータを継続的に送信する、ストリーム送信型のセンサデバイスを想定して開発を進めている。現状では、2.4GHz帯高度化小電力データ通信システム上の独自通信プロトコルによる通信が実現されている。

具体的には、温度センサ、3軸加速度センサ、心電位センサを1つのケースで一体化した

*1 <http://opensource.nokia.com/projects/nors/index.html>

*2 <http://www.bluetooth.com/bluetooth/>

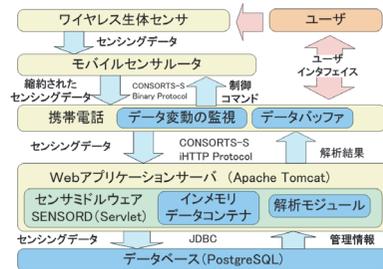


図 1 CONSORTS-S プラットフォームの概要
Fig. 1 Architecture of CONSORTS-S platform.



図 2 ワイヤレス生体センサの装着例

Fig. 2 Wireless physiological sensor attached to user's body.



図 3 モバイルセンサルータ

Fig. 3 Mobile sensor router.

ウェアラブルなワイヤレス生体センサユニット^{*1}を用いている。本センサは、各センサの値を同時に 204 Hz でセンシングし、ワイヤレスで送信する。送信速度は 1 Mbbs, 送信距離は約 15 m である。本センサの装着は、心電位を計測するために、シール型の電極を用いて、直接、胸部に貼付する必要がある(図 2 参照)。胸部に直接貼付されるため、加速度センサを用いて重力方向を検知することで、身体の軸の傾きを容易にセンシングすることができる。

3.2 モバイルセンサルータ

携帯電話は、一般に、無線機器と通信する機能を持たない(もしくはユーザのプログラムから利用しにくい)ため、ソフトウェアだけで、ワイヤレスセンサと通信する機能を実現することは困難である。CONSORTS-S では、携帯電話とのシリアルポート(UART)に接続するワイヤレス通信ボードとして“モバイルセンサルータ”を開発し、このボードを中継器として利用することで、前節で述べたワイヤレス生体センサユニットとの通信を実現した。モバイルセンサルータの主な仕様は、サイズ: 100 × 60 × 20 (mm), 重さ: 91 g (ケース・乾電池含む)、電源: 3 ボルト(アルカリ電池単 4 × 2 本)となっている。

このボードを携帯電話のシリアルポートに有線で接続し、携帯電話から制御することで、周囲のワイヤレスセンサと通信を行う。図 3 に、モバイルセンサルータの外観を示す。

3.2.1 特徴量の計算による縮約処理

現状の携帯電話の処理能力では、CONSORTS-S で想定するようなストリーム送信型のセンサデバイスから送信される大量のセンシングデータを、すべて処理し、即座にサーバに

転送することは困難である。何らかのフィルタリング処理を行い、データ量の縮約を行わない場合、データの欠落もしくは処理の遅延が避けられない。そこで、モバイルセンサルータは、受信したデータをそのまま携帯電話に送るのではなく、一定の長さの時系列データを単一の特徴量に縮約することによって、データ量を削減してから送信する。この時系列データの長さの特徴量の種類、中継するセンサの種類を、ユーザが指定することで、アプリケーションサービスが必要とする精度・種類のセンサデータだけを携帯電話へと中継する。

特徴量を計算するために、ルータは次のプロセスを繰り返す。

- (1) データバッファのクリア。
- (2) 受信したデータをデータバッファに蓄積する。
- (3) 一定の量(N 個)だけサンプルが蓄積したら、データバッファ内のデータの特徴量(たとえば平均値)を計算する。
- (4) 携帯電話にはデータそのものではなく計算した特徴量を送信する。
- (5) 最初に戻る。

モバイルセンサルータは、204 Hz でセンシングされた 3 種類のセンシングデータを受信して、即座に特徴量の抽出処理を行う必要がある。現状では、ルータに搭載された安価な MPU でも高速に処理が可能かつ、特定のアプリケーションに依存しない特徴量として、以下の 4 つの特徴量の計算ルーチンが実装されている。

- 最新値: データバッファに最後に追加されたデータ値
- 平均値: バッファ内の全データ値の算術平均
- 最大値: バッファ内の全データ値の最大値

*1 RF-ECG http://www.mmdevice.co.jp/product_all.html

- 最小値：バッファ内の全データ値の最小値
したがって、データバッファのサイズを N とすると、データ量は $\frac{1}{N}$ に削減できる。

3.3 携帯電話

CONSORTS-S において、中心となる携帯端末は、PDA やスマートフォンの携帯電話ではなく、一般的な携帯電話^{*1}を用いて開発を行った。CONSORTS-S の携帯電話上のプログラムは、携帯電話内蔵のプログラム実行環境で動作し、センサデータの収集とサーバへの送信、受信したコンテンツの表示などを自動的かつ並列して行い、アプリケーションのダウンロード時と認証時以外は、サーバの存在を利用者が意識しなくても済むように設計されている。

3.3.1 携帯電話上の情報処理の概要

携帯電話上の処理は、複数のスレッド処理によって構築されており、取得したセンサデータを共有メモリ上に保持することで、以下のような処理を並列的に行う。

モバイルセンサルータとの通信 ワイヤレス通信ボードを経由して、センサと通信を行い、センサデータを取得する。

センサデータ管理と変異検知 取得したセンサデータを保持するとともに、取得したセンサデータの変異を監視して通信を制御する機能

解析サーバとの通信 取得したセンサデータを一定間隔で Web サーバに送信する。

ユーザインタフェース センサデータの解析結果やユーザへの指示などを表示する。

上記のうち、ユーザインタフェースはアプリケーションに強く依存するため、4 章で、実際の例に即して述べる。

3.3.2 携帯電話とモバイルセンサルータの通信

携帯電話は、シリアルポート (UART) にケーブルで接続された、モバイルセンサルータの制御を行い、センサデータを取得する。具体的には、携帯電話側から制御用コマンドを送信することで、以下のような制御を行う。

- センサデバイスの指定：ルータが通信するセンサデバイスを指定する。
- センシングの設定：各センサのセンシングに関する設定 (センシングレートや通信レートなど) の設定を行う。
- モバイルセンサルータの設定：モバイルセンサルータの設定 (データバッファのサイズ

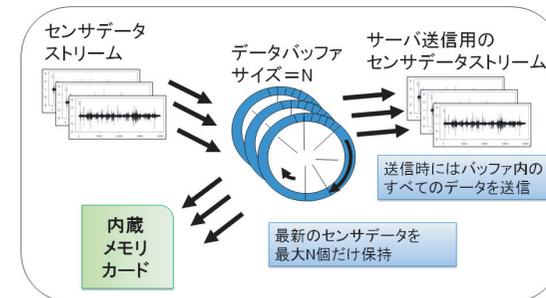


図 4 CONSORTS-S の携帯電話におけるセンサデータの管理
Fig. 4 Sensor data management architecture of mobile phone.

や特徴量の種類、中継するセンサの種類などの設定) を行う

- ストリーム制御：センサデータストリームの中継開始・停止の制御を行う

3.3.3 センサデータ管理と変異検知

携帯電話内のクライアントソフトウェアのデータ記憶領域は、突発的なセンサデータの異常検知などの解析処理のためのデータを保持するデータバッファと、より長期的なデータ保存用の内蔵メモリカードから構成される。

データ解析用のデータバッファは、メモリ上に保持されるリング構造の配列として実装されており、最新の N 個のデータだけが保持されるしくみになっている (図 4 参照)。モバイルセンサルータから受信したデータは、内部のメモリバッファに蓄積され、一定間隔でバッファ内の最新データについて時系列解析処理を行い、時系列データの変異を検知する。データバッファ内の古いデータは、最新のデータで上書きされる前に、まとめて長期的な解析用にメモリカードに保存する。

センサデータの変異の検知 (Change Point Detection) は、センシングするデータのモダリティに依存しない方法として、時系列データの分散の検定 (F 検定) を行うことで実現した。データのモダリティに依存しない変異の検知の手法に関しては、これまでも提案がなされている^{20),21)}。しかしながら、これらの手法は、十分な計算資源の利用を前提とした手法であり、限られた計算資源しか利用できない携帯電話を用いたリアルタイムの変異検知に適用することは困難である。そこで、軽量かつ高速処理が可能、かつアドホックではない変異検知アルゴリズムとして、本研究では、F 検定を用いることとした。

F 検定によるセンサデータの変異の検知では、まず一定期間 $2n$ にわたる最新時系列

*1 NTT ドコモ社 (<http://www.nttdocomo.co.jp/>) の携帯電話と i アプリ (<http://www.nttdocomo.co.jp/service/imode/content/iappli/index.html>) を用いた。

データ $t_k \{k = 1, 2, \dots, 2n - 1, 2n\}$ を中点 n で 2 つの時系列 $t_1 = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$, $t_2 = \{t_{n+1}, t_{n+2}, \dots, t_{2n}\}$ に分割する．そして, 2 つの時系列に関して等分散性の検定 (F 検定) を行う．F 検定は, 自由度が $n - 1, m - 1$ の 2 つの群 X, Y が正規分布の場合, 両群の分散 $V(X), V(Y)$ の比 F が自由度 $n - 1, m - 1$ に依存する F 分布に従うことを利用して, 等分散性の検定を行う統計的手法である． F は次式により計算する．

$$F = \begin{cases} \frac{V(X)}{V(Y)} & V(X) > V(Y) \\ \frac{V(Y)}{V(X)} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

F の値が F 分布の棄却域 (危険率 5%) に入っていた場合, 2 つの分散が一致しているという仮説が棄却され, 時系列 t_1 と t_2 の間に何らかの変異があったものと見なす．変異を検知した場合は, 即座に, 一時保持用のメモリバッファ内のデータをすべて解析サーバへと送信するイベント駆動の通信を実現している．検知後は, 一定期間 (5 秒程度) にわたってデータを送信し続ける．まったく変異が検知されない場合でも, あらかじめ定められた時間が経過した場合は, データを送信する．この送信間隔に関しては, 次項で述べる．

3.3.4 携帯電話と解析サーバの通信

携帯電話内のクライアントプログラムとインターネット上のサーバシステムとの通信は, 携帯電話回線網を経由した HTTP プロトコルを用いて通信を行う．そこで, 解析サーバは, 携帯電話との通信仕様にあわせてアプリケーションサーバ*1を立ち上げ, このアプリケーションサーバ内で動作する Servlet から, センサミドルウェア (SENSORD) の API を呼び出すことで実現した．この Servlet と携帯電話内のクライアントプログラムが HTTP プロトコルを用いて通信することで, センサデータの解析処理を行う．サーバ内の Servlet から呼び出されるセンサミドルウェアは, 受け取ったセンサデータの解析処理を行い, HTTP Post へのレスポンスとして, クライアントプログラムへ解析結果を返す．本通信におけるデータの形式は, 属性・値ペアリストの形式で表現されているため, 高速なパージングが可能である．なお, 本通信処理は, HTTP プロトコル上に実装されているため, セキュリティを重視する場合は, SSL を用いた通信の暗号化も可能である．

携帯電話から解析サーバへのセンサデータの送信は, 通信量の削減を意図して, ユーザの指定する一定の間隔 (たとえば 1 秒間隔, 5 秒間隔, 5 分間隔など) で, データバッファ

内に保存された最大 N 個のセンサデータをまとめて送信する．デフォルトでは, 1 秒間隔 (最小値) で送信する設定になっている．したがって, 前項で述べた変異検知による通信タイミングの設定を含めて,

- 変異検知あり・なし
- 送信間隔 (たとえば 1 秒間隔, 5 秒間隔, 5 分間隔など)

が設定できる．

3.4 センサデータ解析サーバ

携帯電話から送信されたセンサデータはアプリケーションサーバに組み込まれて動作するセンサミドルウェア SENSORD に送信され, 解析が行われる．SENSORD (Sensor-Event-Driven Service Coordination Middleware) は, 我々が開発中のセンサデータ管理・解析・サービス統合ミドルウェアであり, さまざまなセンサデバイスからのセンサデータを時空間的に管理し, ユーザ向けのサービスへと結びつける機能を持つ．

SENSORD のデータ記憶領域は, 実時間データ解析用のインメモリデータバッファと, より長期的なデータ解析用のリレーショナルデータベース管理システム*2を併用するアーキテクチャとなっている (図 5 参照)．データ解析用のデータバッファは, 携帯電話内のデータバッファと同様にメモリ上に保持されるリング構造の配列として実装されており, 最新の N 個のデータだけが保持されるしくみになっている．携帯電話から送信されたデータは, 内部

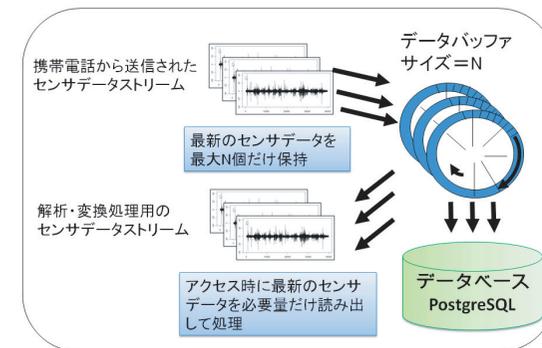


図 5 SENSORD におけるセンサデータの管理
Fig. 5 Sensor data management architecture of SENSORD.

*1 Tomcat 5.5 (<http://tomcat.apache.org/>) を用いた．

*2 PostgreSQL <http://www.postgresql.org/>

のデータバッファに蓄積し、解析要求をクライアント（携帯電話）から受信した際には、そのコンテナ内の最新データについて、時系列解析処理を行い、その結果をクライアントに返す。データコンテナ内の古いデータは、最新のデータで上書きされる前に、まとめて長期的な解析用にリレーショナルデータベースに保存される。

携帯電話からアクセスがあった際に、SENSORD は、データバッファ内の最新のデータを取り出して、高速フーリエ変換による主要な周波数成分の検出など、特定のサービスに依存した解析処理を行い、解析結果を携帯電話に応答する。具体的には、携帯電話側のクライアントからの、センサデータの HTTP Post 要求に対する、応答として解析結果を応答する。

4. CONSORTS-S による生体見守りサービスの構築

本研究では、CONSORTS-S 上のサービスとして、生体センサと携帯電話を用いて、高齢者の方などの身体状況・健康状態や日常時の生活状態を、遠隔地の家族がいつでもどこからでも見守ることを可能にする生体見守りサービスを実現した²²⁾。

図 6 に、構築した生体見守りサービスの概要を示す。まず、高齢者の方など（見守られるユーザ）の身体にワイヤレス生体センサを装着し、CONSORT-S を用いて管理する。遠隔地の家族の方など（見守るユーザ）は、自分の携帯電話から、解析サーバにアクセスすることで、高齢者の方の身体状態を、いつでもどこからでも確認できる。具体的には、体温、心拍間隔、心拍数、歩行速度、姿勢などを、携帯電話を用いて確認できる。

本サービスでは、携帯電話を通じて遠隔地のユーザに対して、センサ装着者の身体状況を

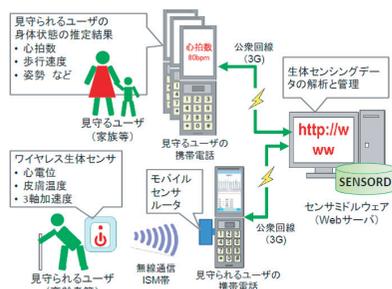


図 6 CONSORTS-S を用いた遠隔生体見守りサービス

Fig.6 Remote healthcare services on CONSORTS-S platform.

提示する。ここでは、以下に述べる携帯電話上の 3 つの画面モードに沿って、その概要について述べる。

設定モード モバイルセンサルータと通信するセンサの ID の設定や各センサデータの送信レートの制御を行う。本サービスにおけるモバイルセンサルータの設定を、表 1 に示す。これ以上のセンシングレートでセンシングした場合、シリアル通信処理に遅れが生じ、取得したセンサデータのリアルタイム状況推定を行うことはできなかった。

グラフモード センサから取得された心電位、3 軸加速度、温度などを折れ線グラフで表示する（図 7 左参照）。このモードは、ユーザに対して、自らの身体状況を視覚的にフィードバックするためのものである。

モニタモード サーバ上に送信されたセンサデータを SENSORD を用いて解析した結果を表示する（図 7 右参照）。センサユニットの ID を指定することで、遠隔地のユーザも、このモードの表示をリアルタイムで確認することができる。具体的には、ユーザの身体状況を次にあげるような、複数の定性的状態に識別して表示する。

表 1 モバイルセンサルータのセンシングに関する設定

Table 1 Configuration of sensor and router.

センサデバイス	センサのサンプリングレート	ルータの転送レート	利用した特徴量
温度センサ	204 Hz	2 Hz	最新値
心電位センサ	204 Hz	8 Hz	平均値
3 軸加速度センサ	204 Hz	8 Hz	平均値

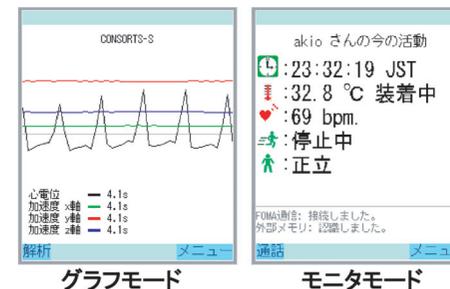


図 7 見守りサービスのユーザインタフェース：グラフモード（図左）とモニタモード（図右）

Fig.7 User interface of the healthcare service: graph mode (left side) and monitor mode (right side).

姿勢 生体センサが胸部に装着されていることを前提に、3軸加速度センサの値から重力方向を検出することにより、身体の軸の傾きを計算し、角度に応じて、「仰向け、うつぶせ、正立」を識別する。

歩行 3軸加速度のスカラ値 $(ax^2 + ay^2 + az^2)^{\frac{1}{2}}$ の分散が、ある閾値より大きい場合は「移動中」と判定する。移動中の場合は、Y軸加速度の時系列データに関するパワースペクトルを高速フーリエ変換 (FFT) により算出し、パワーの最も大きい周波数から歩行速度 (歩数/分) を計算して表示する。FFT は、最新の 64 サンプル (8 秒分) に対して計算する。その速度に応じて、「歩行中」もしくは「走行中」と判定する。

心拍 心電位の時系列データのパワースペクトルを高速フーリエ変換により算出し、パワーの最も大きい周波数から心拍数 (拍数/分) を計算する。FFT は、最新の 128 サンプル (16 秒分) に対して計算する。

体温 胸部の皮膚温度を計測し、温度がある閾値 (30 度) 以下の場合「非装着」、そうでない場合は「装着中」と判定する。

5. 評価

5.1 応答時間

見守られるユーザの生体センシングを行ってから、上記の解析処理を行い、見守るユーザの携帯電話の画面に推定結果が表示されるまでは、ほとんど時間遅れなく、ユーザの身体状況を見守ることができる。実際に、携帯電話間がデータを解析サーバに送信してから、解析結果を受信するまでの平均時間を図 8 に示す。

図 8 は、実際の携帯電話を用いて公衆回線網経由でサーバにアクセスし、解析した場合と計算機上の携帯電話エミュレータから同一計算機内のサーバにアクセスした場合の応答時間の平均 (棒グラフ)、および 1 回あたりの送信パケットサイズの平均値 (折れ線グラフ) を示したものである。携帯電話で処理するセンサデータの転送レート (20 Hz と 8 Hz) による違いも同時に示した。この実験では、変異検知アルゴリズムは動作させずに、一定間隔 (1 秒程度) で常時、センサデータを送信した。携帯電話内のデータバッファのサイズ N は 128 に設定してある。図 8 より、公衆回線網を用いた場合でも、1.5 秒程度で応答していることが分かる。また、20 Hz 程度に処理データを増やしても、応答時間は変わらないことが分かる。

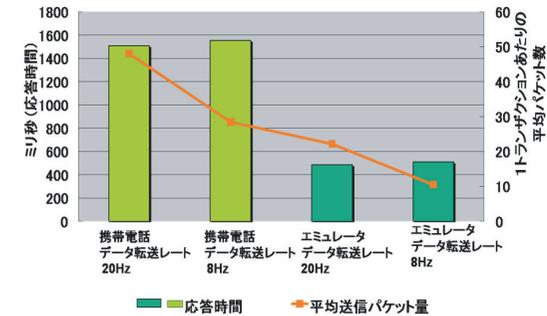


図 8 解析の応答時間 (解析サーバ・携帯電話間)

Fig. 8 Response time of sensor data analysis.

5.2 スケーラビリティ

解析サーバで解析処理を行う場合、利用者が増加した際のスケーラビリティが問題になる。計算機上で携帯電話の送信をモデル化したデータ送信クライアントを作成し、そのクライアント数を増やした際のサーバ^{*1}の平均応答時間の変化をシミュレーション実験によって計測した。

応答処理に関する実験結果を図 9 に示す。クライアントは、サーバと同一の LAN 内の計算機で実行し、2 種類のモデル: a) 変異検知なしの携帯電話のクライアントをモデル化し、携帯電話と同様の送信間隔 (約 1.5 秒) で連続して 25 個のパケットを送信しつづけるもの、b) 変異検知ありの携帯電話のクライアントをモデル化し、10 秒休止後に 5 秒間連続 (約 1.5 秒間隔) で 25 個のパケットを送信するもので比較を行ったものである。本クライアントは、サーバと同一の LAN 内であるため、ネットワーク上の遅延時間はほとんどないと考えてよい。図 9 を見ると、変異検知ありの場合の方が短い応答時間で処理を終えていることが分かる。通信量の削減によって、クライアントがサーバ側で実行中の解析処理が終わるのを待つことがないため、短時間で応答できると考えられる。

図 10 は、サーバに対する全リクエストのうち、接続や HTTP レスポンスのタイムアウトなどにより、正しい解析結果が得られなかった割合を示したものである。変異検知があるなしにかかわらず、400 クライアント程度までは問題なく処理できるが、500 クライアントあたりからは、タイムアウトなどによる通信処理の失敗が頻発しており、安定した応答処理

*1 OS: CentOS 5.3, CPU: Core2Duo E6700 2.66 GHz, Memory: 3 G Byte

1200 携帯電話を用いたモバイル生体センサデータ解析プラットフォームの構築

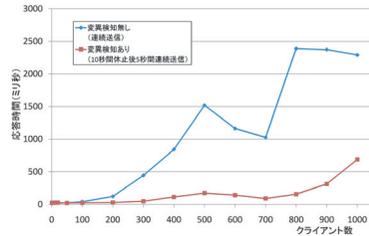


図 9 クライアント数の増加とサーバの解析応答時間 (変異の検知ありなしの比較)

Fig. 9 Response times when many clients are connected.

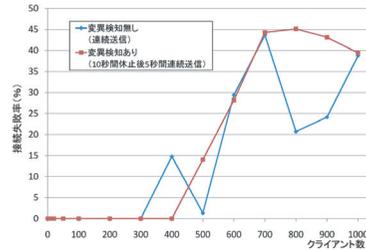


図 10 クライアント数の増加とサーバ応答の失敗率 (変異の検知ありなしの比較)

Fig. 10 Percentages of failed transactions.

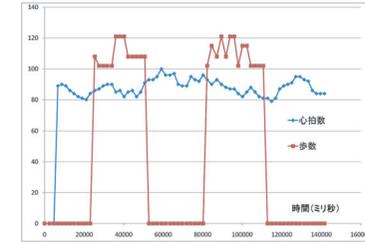


図 11 歩行数・心拍数計測

Fig. 11 An analytic result of heart-rate and step speed.

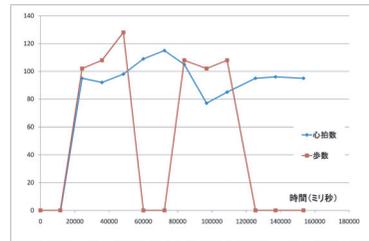


図 12 10 秒間休止を併用した歩行数・心拍数計測

Fig. 12 An analytic result of heart-rate and step speed (sleep time: 10 seconds).

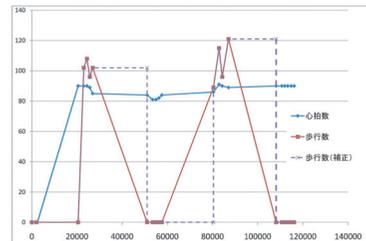


図 13 変異検知を導入した歩行数・心拍数計測

Fig. 13 An analytic result of heart-rate and step speed (change detection, sleep time: 30 seconds).

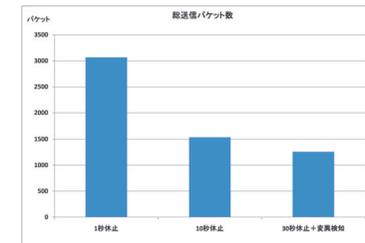


図 14 各方式による総通信量の比較

Fig. 14 Comparison of total packet size.

が困難となること分かる。したがって、400 クライアント以上への対応が必要な場合は、サーバのクラスタ化など、異なるアプローチによる解決が必要と思われる。本解析サーバは Web 用のアプリケーションサーバ上に実装されているため、既存の Web サーバのクラスタ化手法を用いることで、クライアント数の増加にも比較的容易に対応可能であると考えている。

5.3 変異の検知と通信量の削減

図 11 に歩行速度に応じた心拍数の変動の解析結果の例を示す。約 30 秒静止後、30 秒歩行を 2 回連続して繰り返し、最後に 30 秒静止する動作を行った。図 11 のデータは、休止時間はほとんどなく (1 秒休止)、センサデータを、常時連続して解析サーバに送信して解

析している。そのため、時間精度良く、歩行数と心拍数が計算できている。

同様の動作を、携帯電話内のプログラムの送信を 10 秒間休止した後に、その時点でデータバッファに蓄積された最新のデータを送信するプロセスを繰り返した場合の、解析結果を図 12 に示す。この例では、10 秒間隔が開いてしまうため、時間精度は悪くなる。

最後に、携帯電話内のプログラムの送信を 30 秒間休止した後に最新のデータを送信する処理を繰り返す通信とセンサデータの変異検知処理によるイベント駆動の通信を同時に行った場合の結果を図 13 に示す。歩行数に関しては、変化がない場合は、最新の歩行数計測結果と同じ歩行数を維持していたと仮定できるので、この仮定に基づいて補正した波線も示した。グラフより、動作の変化 (静止 歩行と歩行 静止) の時点を正確に検知して、送信処

理を行っていることが分かる。

以上の3種類のセンサデータ送信処理に関して、前期の動作の期間(150秒)に、送信した総パケット数を比較したグラフが図14である。結果的に、変異検知を行う方法は、常時送信する場合の半分以下の送信量で済みであり、10秒ごとに送信するものよりも少ないことが分かる。

以上の実験結果は、あらゆる動作パターンにおいて通信量の削減ができることを保証するものではない。しかしながら、行動の変化の少ないユーザでは、通信量の削減が期待できる。

6. 今後の課題

本研究の通信プロトコルは、現状では、2.4GHz帯高度化小電力データ通信システム上の独自通信プロトコルを採用している。そのため、通信可能なセンサは、3.1節で述べた、ワイヤレス生体センサユニットに限られている。今後は、BluetoothやANT^{*1}、ZigBee^{*2}のような標準的な通信方式による実装を検討することで、より多様なワイヤレスセンサデバイスへの対応を可能にしたい。

医療・健康機器と携帯電話の通信方式に関しては、近年、標準化を進める動きが高まっている。たとえば、Continua アライアンス^{23),24)}は、IEEE11073²⁵⁾を基にして、体重計などの健康機器の計測データを、携帯電話やパーソナルコンピュータに送信するための標準通信プロトコルを提案している。本研究は、システムの全体アーキテクチャに関するものであり、Continuaのような標準化と競合するものではない。むしろ、より多くの健康機器と通信できるように、将来的に、CONSORTS-SをContinuaのような標準規格に対応させることは不可欠と思われる。しかしながら、現時点では、本研究で想定したストリーム送信型のセンサデバイスのように、依然として標準化に向けた検討が十分になされていないセンサデバイスも数多く存在する。標準規格への対応を進める場合、そうした規格化されていないデバイスをどのように取り扱うべきかという点は、今後の検討課題である。

近年、People-centric sensing^{26),27)}と呼ばれるユーザ指向のセンシングパラダイムが提案されている。People-centric sensingは、誰もが自由に利用可能なオープンな大規模センサネットワークを目指した研究を進めている。これらのユーザ指向アプローチは、携帯電話をキーデバイスとして、さまざまなセンサ情報を集約し、新しいセンシングサービスの構築

を提案している。本研究では、心電位、3軸加速度、温度と3種類の生体センサデータだけを解析の対象とした。今後は、生体センサにこだわらず、より多様なセンサ、たとえば、温度、湿度、地磁気、気圧、さらには環境中に設置されたビジョンセンサなどとの連携を想定した開発を進めていきたいと考えている。携帯電話を用いた生体センシングデータ解析サービスという具体的なサービスを想定しながら、複数のセンサデータストリームの実時間統合解析など、より高度なデータ解析機能の実現を目指したい。

7. おわりに

本論文では、ユーザの健康管理などを目的として、ユーザが装着したワイヤレス生体センサから得られるセンシングデータをリアルタイムで解析し、生体情報のモニタリングを可能にするモバイルセンサデータ解析プラットフォーム：CONSORTS-Sについて述べた。携帯電話を用いた生体センシングデータ解析サービスを構築しようとした場合、計算資源や通信帯域の限られた携帯電話を用いて、いかにして生体センサから継続的に送信されるデータストリームを遅滞なく解析し、迅速にサービス提供を行うかという問題の解決が重要な課題となる。CONSORTS-Sでは、モバイルセンサルータと呼ぶ通信モジュールおよびインターネット上のデータ解析サーバを協調的に動作させることで、既存の携帯電話を用いて迅速なサービス提供を行う。また、センサデータの変異の検知に基づくイベント駆動の通信を行うことで、携帯電話からの通信量の削減が可能である。CONSORTS-Sのアプリケーションとして、携帯電話を用いた遠隔生体見守りサービスを構築し、応答処理速度と通信量の削減の評価を行った。CONSORTS-Sを用いることにより、本サービスのセンサデータ解析に要する応答処理時間は1.5秒程度で済み、その通信量も常時送信する場合にくらべて、半分以下に削減できることが確認された。

CONSORTS-Sによる生体センシングサービスに関しては、さまざまな応用を模索中である。提供するサービスの高度化にとともに、より複雑なセンサデータ解析処理への必要性は高まると予想される。いつでもどこでも利用できるという携帯電話の特性を活かしつつ、携帯電話だけでは実現が困難な、高度な生体センシングサービスを実現し、その実用性について検証していきたい。

参考文献

- 1) 中静 真, 菊池久和, 申 宰浩, 牧野秀夫, 石井郁夫: 多重解像度ピーク解析による ECG データ圧縮, 電子情報通信学会論文誌 D-II, 情報・システム, II-情報処理, Vol.79,

*1 <http://www.thisisant.com/>

*2 <http://www.zigbee.org/>

- No.8, pp.1412–1421 (1996).
- 2) Jurik, A.D. and Weaver, A.C.: Remote Medical Monitoring, *Computer*, Vol.41, No.4, pp.96–99 (2008).
 - 3) 岩野賢二, 宮崎仁誠: 情報通信技術を活用した在宅医療分野での取組み, *電子情報通信学会誌*, Vol.90, No.8, pp.622–627 (2007).
 - 4) Leijdekkers, P. and Gay, V.: Personal Heart Monitoring and Rehabilitation System using Smart Phones, *ICMB '06: Proc. International Conference on Mobile Business*, Washington, DC, USA, IEEE Computer Society, p.29 (2006).
 - 5) Oliver, N. and Flores-Mangas, F.: HealthGear: A Real-time Wearable System for Monitoring and Analyzing Physiological Signals, *Proc. International Workshop on Wearable and Implantable Body Sensor Networks (BSN'06)*, Washington, DC, USA, IEEE Computer Society, pp.61–64 (2006).
 - 6) Lin, Y.-H., Jan, I.-C., Ko, P.C.-I., Chen, Y.-Y., Wong, J.-M. and Jan, G.-J.: A wireless PDA-based physiological monitoring system for patient transport, *IEEE Trans. Information Technology in Biomedicine*, Vol.8, No.4, pp.439–447 (2004).
 - 7) 倉沢 央, 川原圭博, 森川博之, 青山友紀: センサ装着場所を考慮した3軸加速度センサを用いた姿勢推定手法, *情報処理学会研究報告, ユビキタスコンピューティングシステム研究会*, Vol.2006, No.54, pp.15–22 (2006).
 - 8) Choudhury, T., Borriello, G., Consolvo, S., Haehnel, D., Harrison, B., Hemingway, B., Hightower, J., Klasnja, P., Koscher, K., LaMarca, A., Landay, J.A., LeGrand, L., Lester, J., Rahimi, A., Rea, A. and Wyatt, D.: The Mobile Sensing Platform: An Embedded System for Activity Recognition, *Appears in IEEE Pervasive Magazine – Special Issue on Activity-Based Computing*, Vol.7, No.2, pp.32–41 (2008).
 - 9) Miluzzo, E., Lane, N.D., Fodor, K., Peterson, R., Lu, H., Musolesi, M., Eisenman, S.B., Zheng, X. and Campbell, A.T.: Sensing meets mobile social networks: the design, implementation and evaluation of the CenceMe application, *SenSys '08: Proc. 6th ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems*, New York, NY, USA, ACM, pp.337–350 (2008).
 - 10) 大内一成, 鈴木琢治, 森屋彰久, 亀山研一: ウェアラブル機器を用いたヘルスケアサービス, *情報処理学会研究報告, ユビキタスコンピューティングシステム研究会*, Vol.2007, No.14, pp.29–36 (2007).
 - 11) Drugge, M., Hallberg, J., Parnes, P. and Synnes, K.: Wearable Systems in Nursing Home Care: Prototyping Experience, *IEEE Pervasive Computing*, Vol.5, No.1, pp.86–91 (2006).
 - 12) Anliker, U., Ward, J.A., Lukowicz, P., Tröster, G., Dolveck, F., Baer, M., Keita, F., Schenker, E.B., Catarsi, F., Coluccini, L., Belardinelli, A., Shklarski, D., Alon, M., Hirt, E., Schmid, R. and Vuskovic, M.: AMON: A wearable multiparameter medical monitoring and alert system, *IEEE Trans. Information Technology in Biomedicine*, Vol.8, No.4, pp.415–427 (2004).
 - 13) Tentori, M. and Favela, J.: Activity-Aware Computing for Healthcare, *IEEE Pervasive Computing*, Vol.7, No.2, pp.51–57 (2008).
 - 14) Mohamed, I., Misra, A., Ebling, M. and Jerome, W.F.: HARMONI: Context-aware Filtering of Sensor Data for Continuous Remote Health Monitoring, *PerCom*, pp.248–251 (2008).
 - 15) Trossen, D. and Pavel, D.: Building a Ubiquitous Platform for Remote Sensing Using Smartphones, *MOBIQUITOUS '05: Proc. 2nd Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services*, Washington, DC, USA, IEEE Computer Society, pp.485–489 (2005).
 - 16) Arvind, D.P., Arasu, A., Babcock, B., Babu, S., Datar, M., Ito, K., Nishizawa, I., Rosenstein, J. and Widom, J.: STREAM: The Stanford Stream Data Manager, *IEEE Data Engineering Bulletin*, Vol.26, pp.19–26 (2003).
 - 17) Abadi, D.J., Carney, D., Cherniack, M., Convey, C., Lee, S., Stonebraker, M., Tatbul, N. and Zdonik, S.: Aurora: A new model and architecture for data stream management, *VLDB Journal*, Vol.12, pp.120–139 (2003).
 - 18) Girod, L., Mei, Y., Newton, R., Rost, S., Thiagarajan, A., Balakrishnan, H. and Madden, S.: XStream: A Signal-Oriented Data Stream Management System, *ICDE*, pp.1180–1189 (2008).
 - 19) Sashima, A., Inoue, Y. and Kurumatani, K.: Spatio-temporal sensor data management for context-aware services: designing sensor-event driven service coordination middleware, *ADPUC '06: Proc. 1st International Workshop on Advanced Data Processing in Ubiquitous Computing (ADPUC 2006)*, New York, NY, USA, p.4, ACM Press (2006).
 - 20) 河原吉伸, 矢入健久, 町田和雄: 部分空間法に基づく変化点検知アルゴリズム, *人工知能学会論文誌*, Vol.23, No.2, pp.76–85 (2008).
 - 21) 井手 剛, 井上恵介: 非線形変換を利用した時系列データからの知識発見, No.29, pp.1–8 (2004).
 - 22) Sashima, A., Inoue, Y., Ikeda, T., Yamashita, T., Ohta, M. and Kurumatani, K.: Toward Mobile Healthcare Services by Using Everyday Mobile Phones, *HEALTH-INF (1)*, pp.242–245 (2008).
 - 23) Carroll, R., Cnossen, R., Schnell, M. and Simons, D.: Continua: An Interoperable Personal Healthcare Ecosystem, *IEEE Pervasive Computing*, Vol.6, No.4, pp.90–94 (2007).
 - 24) Wartena, F., Muskens, J. and Schmitt, L.: Continua: The Impact of a Personal Telehealth Ecosystem, *International Conference on eHealth, Telemedicine, and Social Medicine (eTELEMED)*, IEEE Computer Society (2009).
 - 25) Schmitt, L., Falck, T., Wartena, F. and Simons, D.: Novel ISO/IEEE 11073 Stan-

dards for Personal Telehealth Systems Interoperability, *Joint Workshop on High Confidence Medical Devices, Software, and Systems and Medical Device Plug-and-Play Interoperability*, pp.146–148 (2007).

- 26) Campbell, A.T., Eisenman, S.B., Lane, N.D., Miluzzo, E. and Peterson, R.A.: People-centric urban sensing, *WICON '06: Proc. 2nd Annual International Workshop on Wireless Internet*, New York, NY, USA, ACM, p.18 (2006).
- 27) Campbell, A.T., Eisenman, S.B., Lane, N.D., Miluzzo, E., Peterson, R.A., Lu, H., Zheng, X., Musolesi, M., Fodor, K. and Ahn, G.-S.: The Rise of People-Centric Sensing, *IEEE Internet Computing*, Vol.12, No.4, pp.12–21 (2008).

(平成 21 年 7 月 8 日受付)

(平成 21 年 12 月 17 日採録)



幸島 明男 (正会員)

1992 年東京農工大学大学院工学研究科電子情報工学専攻博士前期課程修了。同年通商産業省工業技術院電子技術総合研究所(現・独立行政法人産業技術総合研究所)入所。2007 年東京農工大学大学院工学府電子情報工学専攻博士後期課程修了。博士(工学)。センサネットワーク, マルチエージェントシステム, 空間認知等の研究に興味を持つ。人工知能学会, 認知科学会, Cognitive Science Society 各会員。



車谷 浩一 (正会員)

1989 年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。工学博士。同年電子技術総合研究所入所。1996～1997 年スイス工科大学ローザンヌ校(EPFL)人工知能研究所(LIA)客員研究員。2001 年産業技術総合研究所サイバーアシスト研究センターマルチエージェントチーム長。2004 年産業技術総合研究所情報技術研究部門マルチエージェントグループ長。ユビキタスコンピューティング, 社会シミュレーション, マルチエージェント等に興味を持つ。人工知能学会, AAAI 各会員。