

## 教育講演

## 非侵襲生体情報センシング技術の新展開\*

## —理学療法への応用に向けて—

山越 憲一<sup>1)</sup> 本井 幸介<sup>1)</sup>

## はじめに

健康で自立した生活を送ることは万人に共通した願いである。しかし、ヒトの生涯において、健康（疾病、心の充足を含む）はしばしば損なわれ（未病）、また大きく悪化（顕在的不健康）する場合があります。医療・看護・介護による様々な介入が行われている。そのなかで特に、理学療法（physiotherapy, physical therapy）は、疾病や障害などにより運動機能が低下したヒトに対し、その機能改善・回復を目的に運動療法や温熱・電気・光線などを利用した物理療法を行い、最終的には日常生活活動（ADL：activities of daily living）を改善し、生活の質（QOL：quality of life）の向上を図ることをめざしている。さらに最近では、生活環境支援（至適福祉用具の選定などを含む）はもとより、加齢に伴う運動機能の低下予防、生活習慣病の予防、健康管理、在宅ケアなど、幅広い生活支援分野を包括している。すなわち、理学療法はユニバーサル・セラピーといっても過言でないほど、その役割は多種多様となっている。したがって、超高齢社会が加速度的に進んでいる我が国において、理学療法はますます重要な学際的役割を担っている。

一方、より高品質で高信頼の安心・健康生活支援の推進のためには、工学技術の積極的導入が強く望まれる。これまでも、運動機器・器具や物理刺激による療法支援技術、義肢・装具や車いすといった自立・ADL支援技術、家庭・社会生活支援や見守りといった生活環境・介護支援技術、さらにはコミュニケーション支援技術の開発などに工学技術が利用されてきた。また、これらほとんどの支援技術には計測・評価技術が必須であるが、まだまだその導入は不十分な状況であり、現場に適合でき簡便な生体計測技術導入の推進が必要であると考えられる。

これまで筆者らは、おもに医療分野への応用をめざし、身体を傷つけずに生体情報を測る技術、いわゆる非侵襲生体計測技術の研究開発を行ってきた<sup>1)2)</sup>が、最近これらの新技術を理学療法・福祉分野にも応用すべく、自由行動下でいつでもどこ

でも計測を行う無拘束計測技術<sup>2-7)</sup>、さらにはセンサの身体装着や機器操作をいっさい必要としない無意識生体計測技術等の研究開発<sup>1)8)9)</sup>を展開してきた。そこで本稿では、上記の理学療法分野のニーズを視野に入れて、これまで研究開発してきた非侵襲生体計測技術のいくつかを概述し、併せて理学療法や医療支援への応用実施事例について報告する。

## 非侵襲生体計測技術の概要と応用事例

## 1. 無拘束（ウェアラブル）モニタリング

ビデオ撮影等によらない身体各部の動作や日常活動を簡便に計測できるシステムは医学領域、特にリハビリテーション（以下、リハビリ）分野でも確立されていない。そこで著者らは体幹・大腿・下腿各部の重力方向に対する角度を計測することにより、日常生活におけるほとんどの行動状態を判別することが可能なシステム開発を進めてきた<sup>4-6)</sup>。

図1はウェアラブル身体活動モニタリングシステムの概要であり、本システムは各部に小型の半導体角度（3軸加速度・ジャイロ）センサを装着することにより、日常の行動シナリオや詳細な姿勢変化を捉えることができる。また、下肢の角度変化情報をを用いて1歩行周期毎の歩行速度も検出でき<sup>4)6)</sup>、さらに3次元的な詳細な動作解析を行うこともできる。得られた計測結果については、リハビリ効果の評価の際に、定量的な判断材料となるよう、活動カルテという形でまとめられ、一目で患者の動作の特徴や療法経過を追跡できるようになっている。

上記システムを用い、現在、八日会藤元早鈴病院において、脳卒中患者（片麻痺者）の歩行時の身体各部角度変化（体幹、大腿、下腿、旋回運動など）や歩行速度の計測等を実施している。図2は計測風景および患者の院内日常生活における活動計測結果例であり、実際の計測については、ヘルシンキ宣言に基づき、当院倫理委員会の承認並びに対象者自身からのインフォームドコンセントを得た後に実施した（以下の試験研究についても同様に配慮）。

これらの結果より、本システムは患者の行動シナリオや姿勢変化の特徴、歩行速度の1周期毎の変動等、さらにはセラピストの観察では判断が困難な動作の再現性などの詳細な特徴を捉えることができ、リハビリ効果の判定や療法プログラム立案等における定量的判断材料のひとつとして、有効に供されている<sup>4)</sup>。また、退院後の患者宅における日常生活行動計測も行った。

\* Non-invasive Biomedical Measurement Techniques: Towards New Developments in Physical Therapy

1) 金沢大学理工研究域

(〒920-1192 石川県金沢市角間町)

Ken-ichi Yamakoshi, Professor, Kosuke Motoi, Postdoctoral fellow: College of Science and Engineering, Kanazawa University

キーワード：非侵襲生体計測、無拘束計測、無意識計測

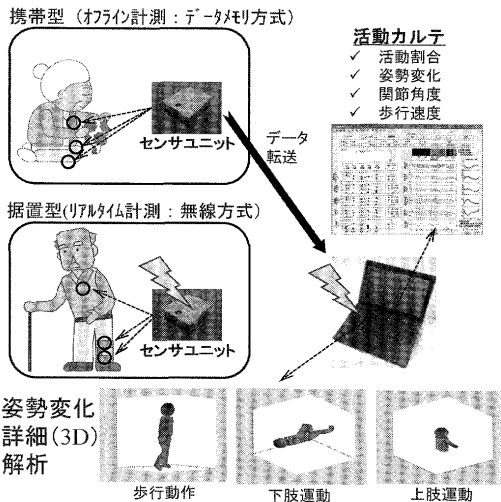
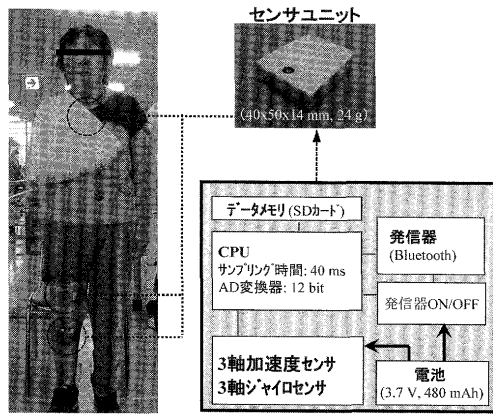


図1 ウェアラブル身体活動モニタリングシステム概要  
センサユニットについては、体幹には肩サポータ型ホルダ、下肢には膝サポータ型ホルダを用いて、対象者の体格に合わせて調整し、簡便に装着可能。使用方法としては、日常生活下等における内蔵メモリを用いたオフライン計測、リハビリ室における無線システムを用いたリアルタイム計測が可能。

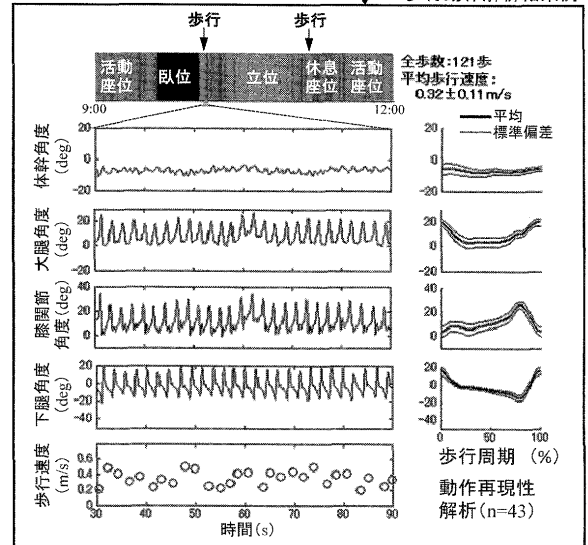
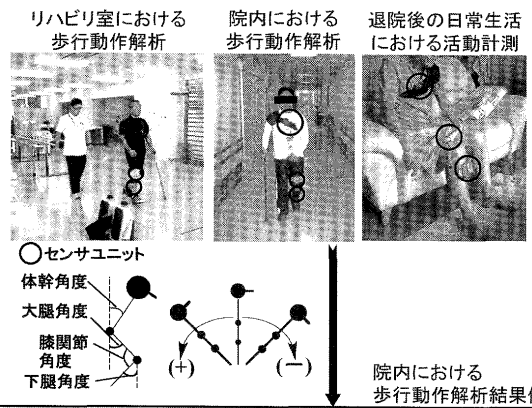


図2 ウェアラブル身体活動モニターによる片麻痺者の活動計測

図中上部はリハビリ室、院内、日常生活下における計測風景、図中下部は院内における行動シナリオ・歩行動作解析結果例（40歳男性脳卒中患者、左片麻痺、リハビリ開始15週目）を示す。動作再現性解析については、1歩行周期（踵接地→踵接地）毎に角度波形を切出して集計し、平均値および標準偏差を求めることにより評価可能である。

ており、通所・訪問リハビリの効果判定や、入院中の療育成果が維持されているかを追跡可能であることも実証されている<sup>4)</sup>。さらに、3次元的な動作解析も進めており、歩行動作等のさらなる詳細解析はもちろんのこと、今後様々な療育支援、新たな理学療法への応用展開が期待されている。

一方、図3は循環動態機能を1心拍毎に連続計測可能なウェアラブルシステムの概要と計測結果例である<sup>2)3)7)</sup>。本システムは胸部電気的アドミタンス検出<sup>7)</sup>による1心拍毎の心拍量計測と、容積振動法・補償法の原理<sup>1-3)</sup>に基づく連続血圧計測技術を用いている。また、これら情報から末梢循環抵抗等の情報を基にし、多様な循環動態指標の解析や、日常生活におけるストレス評価等への応用が進められている<sup>10)</sup>。

上記の非侵襲的な連続循環動態計測技術については、脳卒中患者の早期離床支援システムとしての応用も進めている。急性期の脳卒中患者における早期離床を目的とした座位確保においては、患者の体調を的確に把握する必要がある。しかしながら、現状の間欠的な血圧計だけでは、刻々と変化する患者の循環動態を的確に知ることができない。したがって、1心拍毎の血圧や心拍量の変動をモニタリングすることができれば、循環動

態を詳細に把握でき、安心して理学療法を行うことができるため、本循環動態モニタリングは非常に有効と考えられる。現在、患者を対象とした計測を行っており、体位変換時の循環動態・調節機序の解析と、体性感覚刺激療法の可能性、また上記データに基づく早期離床（早期リハビリ移行）支援システムの構築を進めているところである。

また、本計測技術と物理療法とが直接関係する研究開発も進めている。特に、血圧は高値であれば生活習慣病のリスクとなり、低値であれば起立性低血圧が問題となるなど、血圧値を適正にコントロールすることは重要である。我々は、上記の循環動態モニターにより、日常生活中に血圧を含む循環情報を連続モニタリングし、血圧高値を検出した場合に被験者に呼吸調節を促すシステムを開発した<sup>11)</sup>。さらに、交通事故等により中枢側で脊髄損傷を受けた場合、圧受容体反射を介した血圧調節系が遮断され、受傷患者の多くは起立性低血圧に悩み、仰臥位を余儀なくされて著しくQOLが低下する。これを改善するため、前述の容積補償法を足背動脈に適用して非侵襲的に血圧

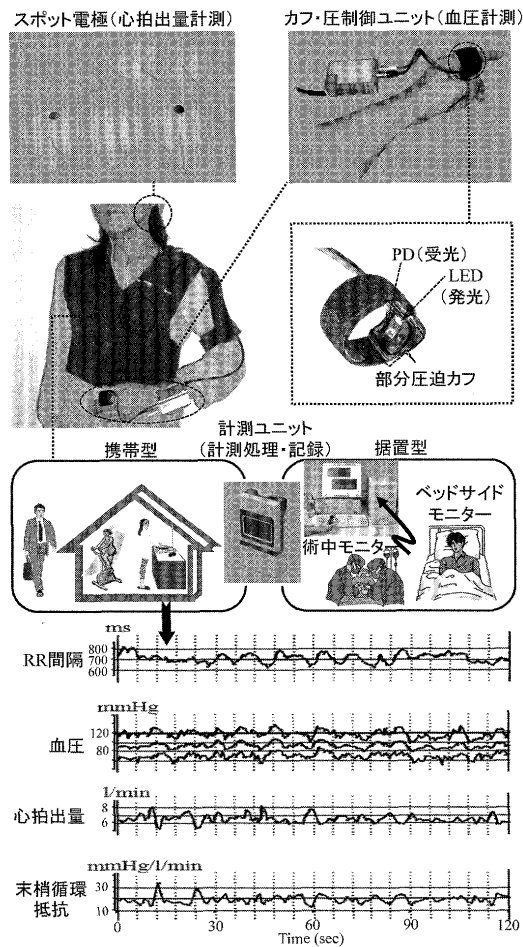


図3 ウェアラブル連続循環動態モニタリングシステム概要

容積振動法による連続血圧計測と、電気的アドミタンス法による心拍量計測を組み合わせ、末梢循環抵抗をはじめ、多量の循環動態情報を得ることができる。

を連続モニターし、血圧低値を検出した場合に自動的に昇圧刺激<sup>12)</sup>を与えて適切な血圧値を保つシステムを現在開発している<sup>13)</sup>。本システムは、受傷患者が食事や作業のために上体を起こすことを可能とし、そのQOLを飛躍的に高めるものと期待されている。

2. 無意識(全自動)モニタリング

現在市販されている健康機器は、センサの身体装着や機器操作を必要とするため、毎日の健康チェックが長続きしないことが大きな問題となっている。そこで著者らは、トイレ、バス、ベッド等の日常生活で必ず使用する場所に着目し、それらにセンサを内蔵することにより、身体にセンサ等を装着せず、知らず知らずのうちに様々な生体情報を取得可能な無意識生体計測技術を考案し<sup>1)</sup>、各要素技術の確立とそれらの統合システムの開発を行っている<sup>1)3)8)9)</sup>。

図4は当研究室モデルルームに設置したシステムの概要である。トイレでは高感度体重計により体重、排泄量、排尿速度(尿流率)、心弾動図(心拍動に伴う微小体重変化)、また便座から大腿部貫通動脈血圧(容積振動法の適用)、さらに光学的手法を利用した尿成分の計測も可能である。また、バスタブに内

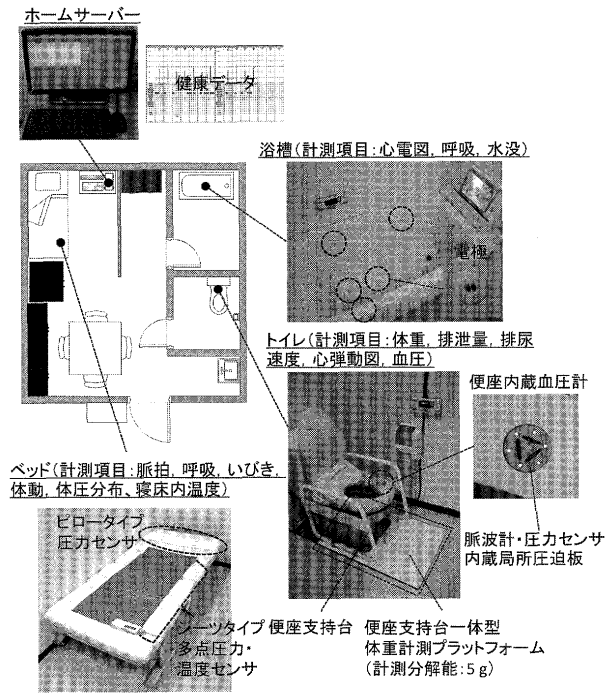


図4 無意識生体計測システム概要

本システムは日常生活で必ず利用する浴槽、トイレ、ベッドにセンサを内蔵し、センサの身体装着や機器操作をいっさい必要とせず、全自動で各種生体情報を得ることができる。

蔵した小型電極を用いて心電図や呼吸情報を検出し、水没予防等にも供されている。一方、ベッドでは、枕の下に設置したフラット型液体封入圧センサやシーツ型多点圧力・温度センサにより、脈拍・呼吸・体動・いびき、体圧分布および寝床内温度(発熱検知)などを計測可能なシステムの開発も進めている。

上記家庭調度内蔵型の無意識生体計測モニタリングシステムについては、現在医療施設(射水市民病院、八日会藤元早鈴病院)内の病室に設置し、おもに循環器系疾患患者等を対象とした計測を行っている<sup>14)15)</sup>。本システムのように、センサ等を装着する必要がなく、自動的に各種バイタルサインをモニタリングできることは、なによりも患者に負担がまったくないという点で優れている。

図5は病院内に導入したシステム(射水市民病院および藤元早鈴病院に同様のシステムを導入)の概要であり、病院個室内のトイレ、浴槽、ベッドに内蔵したセンサにより体調変化を計測し、データを継続的に収集することができる。また、図中下部は入浴中およびトイレ時における計測結果例である。これら結果より、入浴中における心機能評価や不整脈感知等の体調チェックに有効であり、またトイレでは、毎日の患者の詳細な体重変化や回復に伴う増加、さらに夜間トイレに行っても排泄不能の場合(排泄量ゼロ)があることも検知可能である。一方、ベッドにおけるモニターでは、睡眠時無呼吸症候群の簡易検査支援、睡眠様態(不眠や快適睡眠)の評価、褥瘡の危険性予知などに適用できることが実証されている。

以上のように、本システムは入院患者の術後や院内加療中のトイレ・ベッド・風呂の使用状況と生体情報から体調管理を行うとともに、退院時期(疾患によってはリハビリ移行期)の客

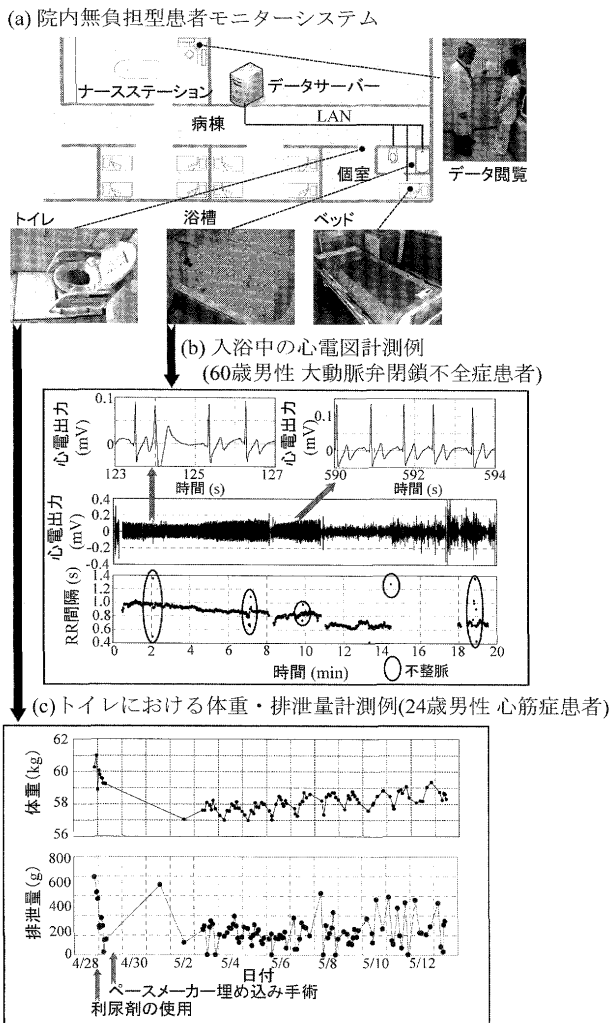


図5 病院における無負担患者モニタリング例 (a) システム概要, (b) (c) 浴槽・トイレにおける患者モニタリング例.

観的判断資料となり、また長期計測という点から、従来の臨床検査では得られない病態生理学的臨床研究も期待されている。

3. ユビキタス・ヘルスケア・モニタリング

上記のセンシング技術と、最近のICT (information and communication technology) 技術 (LAN: local area network やBAN: body area network など) を融合した新たなヘルスケアモニタリング技術の開発も行っている。すなわち、いつでもどこでも計測できる技術と、いつでもどこでもデータを閲覧可能な技術を融合したユビキタス・ヘルスケア・ネットワークシステムを実現するものである。

図6はユビキタス・ヘルスケア・モニタリングシステムの概要である。図中のように自由行動下における(屋内・外出含む)ウェアラブル身体活動モニターより得られたデータ、並びに医療関連施設あるいは自宅における家庭調度内蔵の無意識ヘルスケアモニターのデータが、ネットワークによりリアルタイムで各種データサーバに随時集積され、パーソナルコンピュータ、あるいは近年普及が進んでいる携帯型情報端末機器により、データを簡便に閲覧することができる。

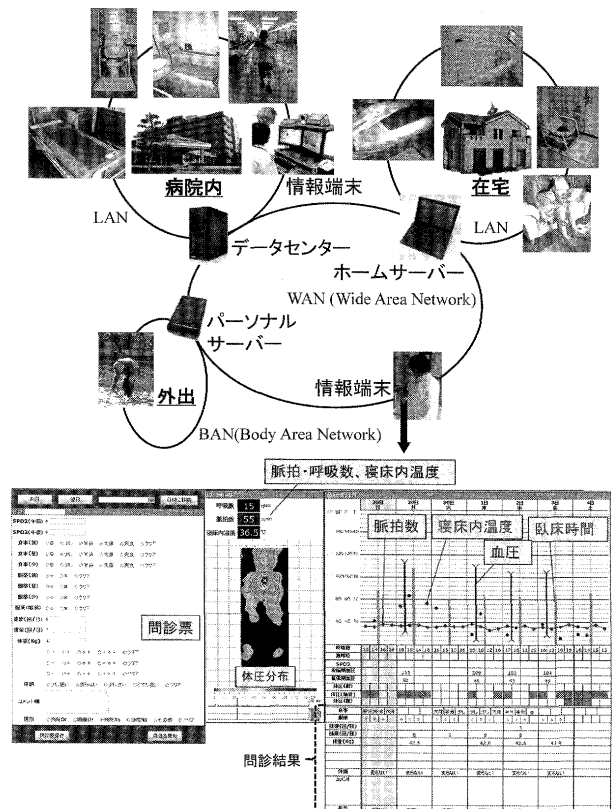


図6 ユビキタス・ヘルスケア・モニタリングシステムの概要、および計測・記録例  
ウェアラブル・無意識モニタリングとネットワーク技術を融合することにより、いつでもどこでも計測し、いつでもどこでもデータ閲覧可能なシステムとした。

これらシステムについては、実際に医療・ケア現場における運用を行っている。その一例として、現在射水市をモデル地域とし、街全体を病院化しようという「ICTユビキタス・ホスピタルタウン射水プロジェクト」において、在宅療養中の慢性心疾患の患者の体調モニタリングとして活用されている。また得られたデータについて、特にベッドにおけるデータについては、現状の脈拍数や呼吸数、体圧分布がリアルタイムで確認できるとともに、看護師が普段から記録している患者の体調チェック表、すなわち三測表(温度表)を模擬した形ですべて自動で生成されるようになっている(図6参照)。

通常、在宅ケアは患者の体調が大きく悪化してから対応する、従来の往診型医療に頼らざるを得なかった。また、ネットワーク機能をもった健康管理機器を活用する方法は数多く提案されているが、センシング技術については従来法を用いており、計測が長続きせず、結局体調変化を得ることができないことが多い。しかし、本システムによれば、毎日の健康状態をまったく負担なく計測し、時間と距離の壁を超え、簡便にデータ集積・閲覧できることになり、患者自身はもちろんのこと、医療スタッフにとっても大きな負担軽減が期待され、まったく新しい医療形態が構築できると考えられる。一方、八日会藤元早鈴病院においても、リハビリ患者の身体活動評価や体調チェック支援システムとしての応用が展開されており、今後の新たな療法の実現に向けた検討を行っている。

## おわりに

ここでは、これまで著者らが研究開発を行ってきた（いる）非侵襲・無拘束・無意識の生体情報センシング技術の概要と理学療法への応用事例について報告した。これらの開発技術の基本コンセプトは、「患者に負担をかけない計測技術」という大きな特徴をもっており、さらに「医療従事者にとっても新たな負担を与えない」ことを意図して開発を進めている。高品質で高信頼の安心・健康生活支援をめざし、そしてこの分野で国際的リーダーシップを発揮するよう、これらの技術が様々な役割を担っている次世代の理学療法への応用の一助となれば望外の喜びである。

謝辞：本研究を行うにあたり、日ごろからご協力いただいている金沢大学理工研究域・小川充洋博士研究員、山越健弘准教授、野川雅道助教、田中直登技術補佐員、九州大学医学部・砂川賢二教授、同・安藤真一教授、八日会藤元早鈴病院・藤元登四郎理事長、同リハビリ室・東 祐二室長、同・湯地忠彦主任、同・福永誠司主任、同・谷口早弥香作業療法士、同・湧川盛邦理学療法士、同・園田拓史理学療法士、射水市民病院・麻野井英次院長、同・上野博志副部長、同・水戸伊希子看護師、済生会二日市病院・吉田昌義医師、および関係各位にここに記して深謝する。

なお、本研究の一部は文部科学省知的クラスター創成事業（平成 17～21 年度）、厚生労働省科学研究費補助金事業（スーパー特区事業：平成 21～23 年度）、総務省地域情報通信技術利活用推進事業（運用中：平成 21～26 年度）、同戦略的情報通信研究開発推進制度 SCOPE（102305004、平成 22～23 年度）により行われた。ここに感謝の意を表す。

## 文 献

- 1) Yamakoshi K: Unconstrained physiological monitoring in daily living for health care. *Frontiers Med Biol Eng*. 2000; 10 (3): 139-159.
- 2) Yamakoshi K: Non-invasive cardiovascular hemodynamic measurements. In: Oberg PA, Togawa T, *et al.* (eds): *Sensors in Medicine and Health Care*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2004, pp107-160.
- 3) Yamakoshi K: Current status of non-invasive bioinstrumentation for healthcare. *Sensors and Materials*. 2010; 20: 1-20.
- 4) Motoi K, Tanaka S, *et al.*: Evaluation of a wearable sensor system monitoring posture changes and activities for use in rehabilitation. *J Robotics and Mechatronics*. 2007; 19 (6): 656-666.
- 5) 本井幸介, 田中志信, 他: 要介護認定支援のための立ち上がり・起き上がりにおける補助有無判別システムの基礎的検討. *生体医工学*. 2004; 42 (4): 241-251.
- 6) 本井幸介, 田中志信, 他: 姿勢・歩行速度の無拘束同時計測法に関する基礎的検討. *生体医工学*. 2003; 41 (4): 35-41.
- 7) 五十嵐朗, 野川雅道, 他: 心臓血液駆出に伴う胸部インピーダンス変化検出による電氣的インピーダンス心拍出量計測用至適スポット電極配置. *生体医工学*. 2008; 46 (6): 587-594.
- 8) Motoi K, Kubota S, *et al.*: Development of a fully automated network system for long-term health-care monitoring at home. *Proc 29th Annu Conf IEEE Eng Med Biol*. 2007; 1826-1829.
- 9) 田中志信, 本井幸介, 他: ホームヘルスケアのための便座内蔵型血圧計測システムの試作. *生体医工学*. 2006; 44 (3): 467-474.
- 10) Ogawa M, Nogawa M, *et al.*: Evaluation of cardiovascular stress reaction using HPCD method on a beat-by-beat Basis. *Advances in Natural Science*. 2010; 3 (2): 128-132.
- 11) Nogawa M, Yamakoshi T, *et al.*: Assessment of slow-breathing relaxation technique in acute stressful tasks using a multipurpose non-invasive beat-by-beat cardiovascular monitoring system. *Proc 29th Ann Conf IEEE Eng Med Biol*. 2007; 5323-5325.
- 12) Yoshida M, Murayama Y, *et al.*: Noninvasive transcutaneous bionic baroreflex system prevents severe orthostatic hypotension in patients with spinal cord injury. *Proc 30th Ann Conf IEEE Eng Med Biol*. 2008; 1985-1987.
- 13) Nogawa M, Ogawa M, *et al.*: Development of non-invasive instantaneous arterial pressure measurement and its control system for spinal injury patients. *Proc 6th Int Symp precision Eng Meas Inst*. 2010; 42-43.
- 14) Motoi K, Ogawa M, *et al.*: A fully automated health-care monitoring at home without attachment of any biological sensors and its clinical evaluation. *Proc 31th Ann Conf IEEE Eng Med Biol*. 2009; 4323-4326.
- 15) Motoi K, Ogawa M, *et al.*: Development and clinical evaluation of a home healthcare system measuring in toilet, bathtub and bed without attachment of any biological sensors. *Proc 10th Int Conf Info Tech App Biomed*. 2010; paper ID: 168.