

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：33803

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26560298

研究課題名（和文）小児リハビリ支援のためのウェアラブル行動・嚔下解析システムの開発とその医学的評価

研究課題名（英文）Development of a wearable activities and aspiration monitoring system for supporting rehabilitation in children and its medical evaluation

研究代表者

本井 幸介（Motoi, Kosuke）

静岡理科大学・理工学部・講師

研究者番号：80422640

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、脳性麻痺や発達障害等を持つ子供のリハビリテーションの支援のため、活動状態や健康状態の定量評価を実現すべく、小児の動作・行動の特徴とリハ効果、また嚔下障害や痰詰まり等による呼吸障害発生の危険度を、簡便に解析可能なシステムの開発を行った。具体的には、姿勢変化や歩行速度、さらには動作の再現性を評価可能なウェアラブルシステムと、睡眠状態や呼吸障害による不安定性を解析可能なベッド内蔵型システムが開発され、良好な計測性能が確認された。また実際の小児や脊髄損傷患者における計測結果より、本システムは装具の効果等を含む療法効果や、健康状態の解析に非常に有用であることが確認された。

研究成果の概要（英文）：In the field of rehabilitation for disabled children with brain paralysis or developmental disorder, therapists need a new network system capable of obtaining activities and health status of children quantitatively and continuously. Therefore, we have developed a wearable system for monitoring activities and a non-conscious monitoring system for respiration and body motion during sleeping installed at bed. In this study, the present system can successfully detect the motion characteristics of the children with and without a brace during rehabilitation program and the breathing disorder by the aspiration during sleeping. From the results, it is demonstrated that the systems can be useful means for evaluating the effectiveness of the rehabilitation and the health condition in the disabled children.

研究分野：生体情報計測・ネットワークシステム

キーワード：小児リハビリテーション 無拘束・無意識計測システム 姿勢 活動 歩行速度 呼吸障害 誤嚔

1. 研究開始当初の背景

脳性麻痺や発達障害を持つ子供のリハビリテーション(以下、リハ)を実施する際には、子供の動作・行動の特徴や健康状態を的確に把握し、その情報を基にリハプログラム設定やその評価を行う必要がある。しかし、現在これら情報については問診や観察に頼るしかなく、問題点を発見できないこともあり、簡便で定量的かつ継続的な生体計測・評価手法の確立が望まれている。一方、無拘束(いつでもどこでも)[1~4]及び無意識(センサ装着や機器操作が一切必要ない)的な活動・健康情報に関する生体計測技術の研究について、国内外にて実施されてきた[5~11]。しかし、これらは高齢者の健康支援、循環器系疾患や脳血管障害患者の治療・リハ支援等への発展は成されてきたが、小児の行動や健康評価への検討は少ない。一方、申請者らは慣性センサを用いた小児の歩行動作解析や、トイレ・ベッド内蔵センサによる健康評価法に関する基礎的検討を行ってきた[12]。

2. 研究の目的

上記基礎的検討を進展させ、本研究では、「小児リハ室にて療法中に、簡便に行動の特徴を捉え、療法・装具効果を定量的に把握したい」、「レントゲンによる嚙下造影検査は、脳に障害のある小児への適応は困難であり、嚙下障害の予兆を早期発見できる新しい手法を実現したい」という課題に着目し、ウェアラブル活動・嚙下障害解析システムを実現することを目的とする。本研究では具体的に、(1)小型慣性センサを用いた小児リハ室における動作問題点・装具効果抽出法の確立、(2)日常生活中における誤嚥や嚙下障害の兆候を検出可能な超小型のセンサモジュール(加速度センサ、薄型圧力センサなど)及びその危険度解析の実現、(3)試作システムによるフィールド試験と医学的有効性の基礎実証を行った。

3. 研究の方法

(1) 小児の動作解析システムの開発については、まず加速度・ジャイロセンサなどを内蔵したセンサユニットと、小児にも簡便に装着可能なセンサホルダーを併せて開発し、試作計測システムを構築した。また本システムを用いて、発達障害を持つ小児を対象として、小児リハ室における療法中の行動計測を行い、データ集積と動作の問題点やリハ効果の解析手法の検討を行った。

(2) 嚙下障害の兆候検出システムについては、現場のリハスタッフを対象とした予備調査の結果、日中についてはスタッフの管理下にあるため、むしろ夜間における誤嚥等による影響を解析できることが有効であるとの知見を得た。そこで、当初マイクによる日中の嚙下音の解析を主に検討予定であったが、さらにこれを発展させ、自宅のベッドに内蔵可能な呼吸解析システムの開発と、実際に呼吸障害

を抱える患者を対象とした計測・評価を先導的に実施した。

(3) 試作システムによるフィールド試験と医学的有効性評価については、ウェアラブル動作計測システムと、ベッド内蔵型呼吸障害解析システムをネットワーク化した、プロトタイプ活動・誤嚥モニタリングシステムを開発し、リハ室や日常生活下における計測・評価を通して、その有効性評価を行った。

なお計測の際には、ヘルシンキ宣言に基づき、倫理委員会の承認並びに対象者とその家族への説明と同意を得た後に実施した。

4. 研究成果

(1) 図1は小児におけるウェアラブル動作・活動計測システムの概要である。本システムは、体幹・大腿・下腿それぞれに、3軸加速度・ジャイロセンサ、Bluetooth、メモリ、バッテリー等が内蔵された小型センサユニットを装着する。今回図中上段に示すように、より簡便に小児の身体にセンサユニットを装着し、かつ違和感を与えないセンサホルダーを開発した。また、小児がリハ室において療法、あるいは遊んでいても、計測中に装着位置がずれないように工夫を行った。これにより、より安定して連続的に姿勢状態を計測可能とした。

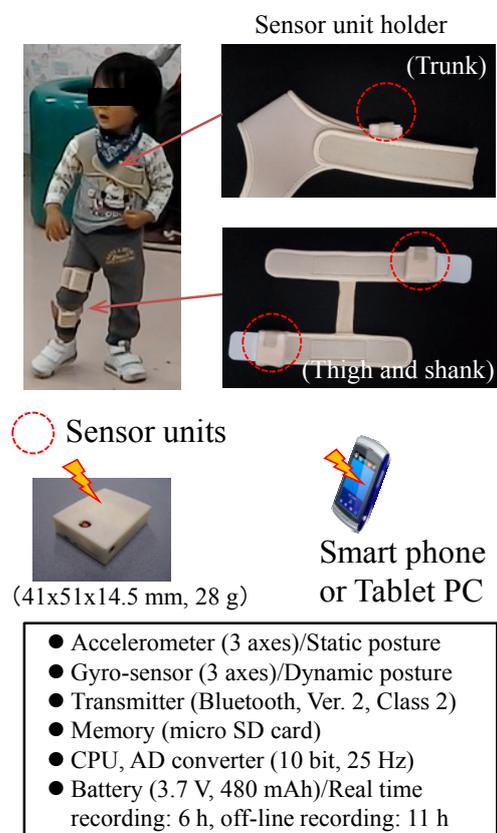


図1 ウェアラブル姿勢・活動計測システムの概要。小児に最適化された専用ホルダーにより、簡便かつ密着したセンサ装着が可能。

なお、計測されたデータについては、スマートフォン等情報端末により収集し、その後解析 PC にて姿勢状態の解析が行われる。各センサ信号を用いて、小児の運動に適した角度変化抽出フィルタ及び初期角度リセットプログラムを用いて、各部の角度変化が算出される。また、角度の条件分けにより歩行、起立・着座、休息座位（体幹後傾）、活動座位（体幹前傾）、臥位、立位に判別すると共に、歩行中においては詳細な各部の関節角度変化や 1 歩行周期毎の歩行速度等を算出可能とした。

図 2 は 3 歳男児（ダウン症候群）を対象とした小児リハ室における動作計測結果例である。図中(a)は姿勢変化の履歴を、また同図中(b)には、①インソール（足底板）処方後と、②裸足における、大腿・下腿角度（踏み出し方向を正）及び 1 歩行周期毎の速度を示している。また同図中(c)は、歩行中における大腿・下腿部における角度変化の正及び負のピーク値と標準偏差について、インソールの有無における差を解析したものである。なお本計測は、より自然な、日常での歩行や装具の効果の評価とすべく、子供がボール遊びを行っている間に計測を行ったものである。

結果(a)より、本システムは小児リハ室において子供が遊んでいる際に、連続的に行動履歴を追跡可能であることが確認された。

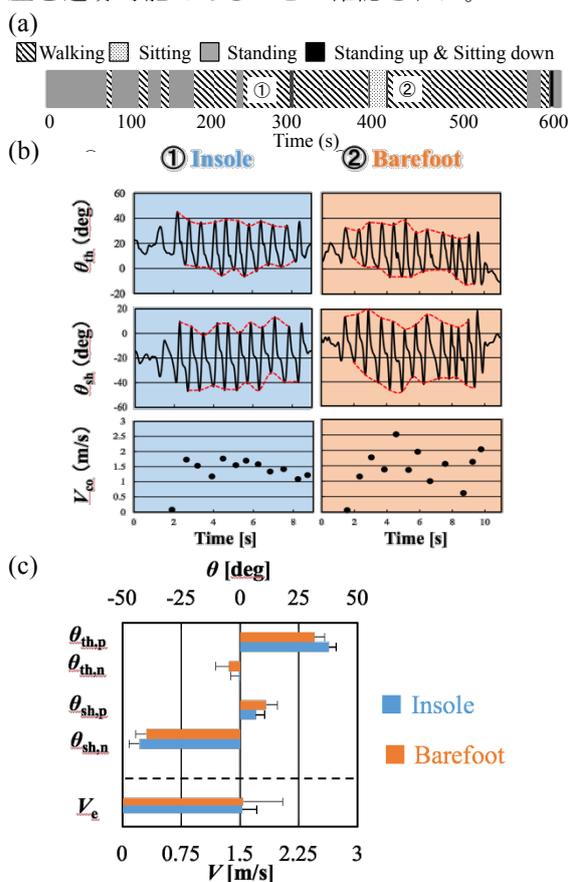


図 2 小児における活動解析例。(a)姿勢変化履歴、(b)インソールの有無における大腿角度 θ_{th} 、下腿角度 θ_{sh} 、歩行速度 V_{co} 、(c)大腿・下腿角度のピーク値 (p:正、n:負) 及び歩行速度 V_e の平均値と標準偏差。

また結果(b)及び(c)から、動作の特徴も併せて解析可能であることが確認された。具体的には、足底板を装着しない際には、1 周期毎に歩行速度が変化し、動作の安定性が低く、標準偏差も大きくなっている。一方、足底板装着時には、歩行速度における安定性が向上しており、大腿部の前方への振り出しが増加していることも確認された。しかしながら、角度変化自体の安定性に大きな変化はなく、さらなる療法の必要性を確認することができた。

(2) 図 3 は無意識（ベッド内蔵）型睡眠・呼吸障害解析システムの概要である。本システムは、被験者の枕～胸郭下の薄型圧力センサ部と、AD 変換器、Bluetooth（あるいは、Wi-Fi も可能）、メモリ、CPU 等を内蔵したコントロールユニット部から構成されている。

まずセンサ出力の DC 成分より、小児が枕付近にいるか否かを、また AC 成分から呼吸を検出する。また、AC 成分における大きな信号変動により体動を検出し、1 分毎の回数（閾値を超えた回数）もカウントする。一方、本研究では夜間の誤嚥等による呼吸状態の変化を検出すべく、呼吸信号の周波数分布から呼吸の不安定性を検知するプログラムを開発し、これにより呼吸障害の危険性を把握できるシステムを実現した。

一方、センサ部の検出面積を大きくし、ベッド・布団全体における検出を行うことも考えられるが、発達障害等を持つ小児の評価においては、同じ位置で寝られているか否かも有効な指標と想定され、今回は上記のようなセンサ面積とした。

Flat type pressure sensor (150x600x10 mm)



Control unit (90x190x40 mm)



Smart phone or Tablet PC

- Transmitter (Bluetooth, Ver. 2, Class 2)
- Memory (micro SD card)
- CPU, AD converter (10 bit, 50 Hz)
- On pillow or out of pillow: DC signal

図 3 無意識（ベッド内蔵）型睡眠・呼吸障害解析システム概要。

図4は3歳男児（自閉症）を対象とした自宅における睡眠計測結果であり、1分毎の呼吸数及び体動数を示した。また、センサのDC信号より判定した小児が枕の上にいる時間帯を灰色で示した。

これら結果より、まず計測開始から240分までにおいて、呼吸数は60分程度のサイクルで変化していることが判る。また体動数については、240分までは上昇、その後下降、再び上昇というサイクルが見られており、上昇時の体動数は1分間あたり6回以上となっており、頻繁に動いていることが判る。次に240分以降においては、最初は呼吸数が大きく変動しており浅い眠りであることが示唆されるものの、その後は60分程度安定している。また360分以降についても同じ傾向が見られる。一方、体動数については0~2回程度となっているが、3回枕上から離れていること、また前述のように同時間帯において体動数は少ないものの、呼吸数には大きな変動が見られることが確認された。

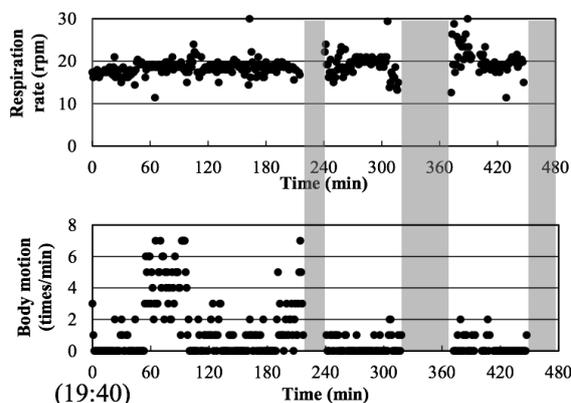


図4 3歳男児（自閉症）を対象とした自宅における睡眠計測結果例。図中上部は呼吸数、下部は体動数。

次により重度な呼吸障害を検知可能であるか検証すべく、脊髄損傷患者を対象として呼吸状態の計測を行った。図5は55歳男性を対象とした24時間の呼吸不安定性を追跡した結果である。なお、図中矢印は排痰ケアを行った時間を示している。

本結果より、患者の呼吸の不安定が徐々に増加していき、12時間後に排痰ケアを行った際に数値が低下していることが判る。しかしながら、その後すぐに上昇し、再度ケアを行っている。またその後も再び呼吸状態は悪化傾向にあることが確認された。

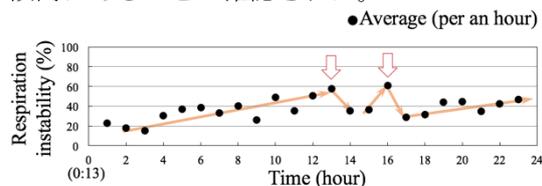


図5 脊髄損傷患者（55歳男性）における呼吸不安定性の追跡結果例。矢印は排痰ケア実施。

(3) 次に、図6に示すように、ウェアラブル活動計測システム、ベッド内蔵型睡眠・呼吸障害システムを融合したプロトタイプ活動・誤嚥モニタリングシステムを開発した。この際、前述の2つのシステムに加え、今後入浴時における負荷心電図から子供の疲労や循環器系疾患の併発を早期に検知可能とすべく、浴槽内における全自動心電図・呼吸計測システムについても、先行的に融合した。

今回これらシステムについてフィールド試験を行い、その有効性評価を行った。特に発達障害を持った小児を対象とした計測結果の有効性については、図2や図4、図5に示したが、さらに以下には脊髄損傷を負ったケースにおける活動解析や、入浴時の疲労・ストレス解析結果について示す。

図7は29歳男性脊髄損傷患者を対象とした病棟内移動中の活動解析結果例であり、図中(a)は活動履歴（立位：灰、座位：水、車椅子走行：橙、キャスター上げ：赤、回旋：薄橙、側方移乗：黄、前方移乗：薄黄）の一部、また(b)は体幹の重力方向に対する角度変動量（後傾：+）を追跡した結果である。まず、活動履歴の結果より、頻回に姿勢変化を行うことができており、特に移乗（前方、側方含む）を11回、キャスター上げ18回、立位は5回など、病棟における活動が詳細に確認可能であった。一方体幹の動きについては、キャスター上げでは26.3~41.2 deg、側方移乗では-17.9~17.1 deg の変化幅が確認され、姿勢変化の特徴を捉えることができた。

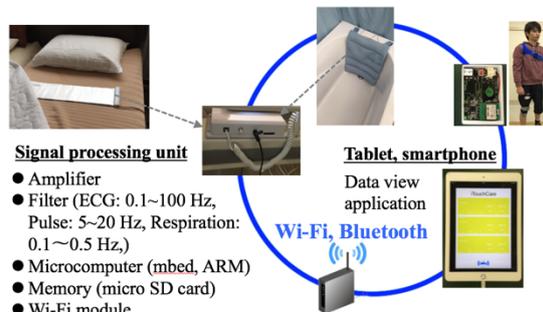


図6 プロトタイプ活動・誤嚥モニタリングシステム概要

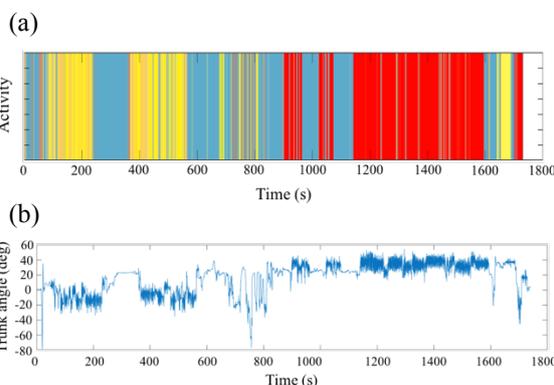


図7 29歳男性脊髄損傷患者における病棟内の活動解析結果例

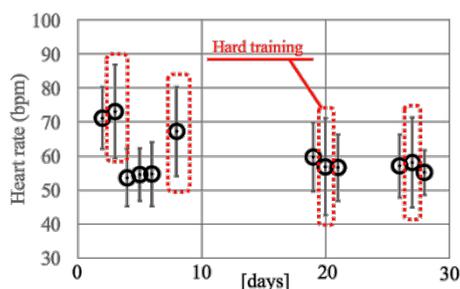


図8 脊髄損傷者（24歳男性）における入浴中の心拍数解析結果例

図8は、24歳男性車椅子陸上選手（交通事故により脊髄損傷）を対象とした、浴槽内蔵システムによる入浴中の心拍数の平均値及び標準偏差の解析結果である。これら結果より、大きな負荷を伴うトレーニング時には、心拍数の標準偏差が大きくなり、体調の変化を捉えることができた。

以上より、本システムはリハにおける療法効果の評価や、睡眠及び呼吸状態の変化を検出する上で有効であることが確認された。

小児を対象とした活動計測では、特別な検査環境で行うことは難しいが、本システムを用いることにより、いつでもどこでも、かつ遊んでいる時間などの自然な活動における有効な情報を抽出・解析することができ、療法効果の評価に非常に有用であると考えられる。またインソール型装具の装着・未装着による姿勢変化の特徴変化も解析可能であり、目視では難しい評価も数値的に可能となった。また、今回先行的に脊髄損傷を伴う患者における解析も実現しており、今後はパラリンピックを目指す障害者スポーツ選手へのサポートへの応用など、さらなるシステムの改良・評価を進めていく予定である。

一方、ベッドにおける睡眠・呼吸障害計測システムにおいては、小児の睡眠状況はもちろんのこと、さらには夜間の誤嚥による呼吸の不安定性や、それに対するケアの効果を追跡可能であった。このような症状は、医療施設等における検査を通して発見することができなかったため、いつの間にか重篤化しているケースが非常に多かった。しかし、本システムを用いれば、日常生活下においてその予兆を捉えることができ、早期にケアを行う上で非常に有効と考えられる。さらには図8にあるように、浴槽における計測システムとの融合も進め、さらには有効な体調管理指標の構築を進めていく予定である。

以上、本研究においては、発達障害や脊髄損傷に伴う小児や成人において、簡便に活動・呼吸障害や誤嚥をモニタリング可能なシステムを開発し、その有効性を実証した。今後はより多くの症例におけるデータを長期的に集積していき、さらなる有効性評価に繋げていくとともに、スポーツ支援への応用など、さらなる発展研究を推進していく。

<引用文献>

1. Miyazaki S. Long-term unrestrained measurement of stride length and walking velocity utilizing a piezoelectric gyroscope. *IEEE Trans Biomed Eng* 1997;44(8):753-759.
2. Williamson R, Andrews BJ. Detecting absolute human knee angle and angular velocity using accelerometers and rate gyroscopes. *Med Biol Eng Comput* 2001;39(3):294-302.
3. Najafi B, Aminian K, Paraschiv IA, Loew F, Bula CJ, Robert P. Ambulatory system for human motion analysis using a kinematic sensor: Monitoring of daily physical activity in the elderly. *IEEE Trans Biomed Eng* 2003;50(6):711-723.
4. Matoi K, Taniguchi S, Baek M, Wakugawa M, Sonoda T, Yuji T, Higashi Y, Fujimoto T, Ogawa M, Tanaka S, and Yamakoshi K. Development of a wearable gait monitoring system for evaluating efficacy of walking training in rehabilitation. *Sensors and Materials*. 2012;24(6):359-373.
5. Togawa T, Mizukami H, Tamura T. Physiological monitoring techniques for home health care. *Biomed Sci Instrum*. 1992;28:105-110.
6. Ishijima M, Togawa T. Observation of electrocardiograms through tap water. *Clin Phys Physiol Meas*. 1989;10(2):171-175.
7. Chow P, Nagendra G, Abisheganaden J, Wang YT. Respiratory monitoring using an air-mattress system. *Physiol Meas* 2000;21:345-354. Chee Y, Han J, Youn J, K. Park. Air mattress sensor system with balancing tube for unconstrained measurement of respiration and heart beat movements. *Physiol Meas*. 2005;26(4):413-422. doi: 10.1088/0967-3334/26/4/007.
8. Watanabe K, Watanabe T, Watanabe H, Ando H, Ishikawa T, Kobayashi K. Noninvasive measurement of heartbeat, respiration, snoring and body movements of a subject in bed via a pneumatic method. *IEEE Trans Biomed Eng* 2006;52(12):2100-2107. doi: 10.1109/TBME.2005.857637.
9. Mack DC, Patrie JT, Suratt PM, Felder RA, Alwan MA. Development and preliminary validation of heart rate and breathing rate detection using a passive, ballistocardiography-based sleep monitoring system. *IEEE Trans Inf Technol Biomed* 2009;13(1):111-120. doi: 10.1109/TITB.2008.2007194.
10. Yamakoshi K. Current status of non-invasive bioinstrumentation for healthcare. *Sens Mater*. 2011;23(1):1-20.
11. Matoi K, Kubota S, Ikarashi A, Nogawa M, Tanaka S, Nemoto T, Yamakoshi K. Development of a fully automated network system for long-term health-care monitoring at home. *Proc 29th Annu Conf IEEE Eng Med*

- Biol, Lyon, Aug. 2007. p. 1826-1829. doi: 10.1109/IEMBS.2007.4352669.
12. Motoi K, Oyama T, Tanaka N, Yuji T, Higashi Y, Sagawa K, Fujimoto T, Yamakoshi K. Development of a network system combined with ambulatory and non-conscious physiological measurements for supporting challenged kids -A new proposal of a gait monitoring system for use in rehabilitation-. Proc 35th Annu Conf IEEE Eng Med Biol, Osaka, July 2013. P. 6393-6396. doi: 10.1109/EMBC.2013.6611017.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① Motoi K, Yamakoshi Y, Yamakoshi T, Sakai H, Tanaka N, and Yamakoshi K. Measurement of electrocardiograms in a bath through tap water utilizing capacitive coupling electrodes placed outside the bathtub wall. Biomedical Engineering Online 2017;16(12):1-13.
- ② Motoi K, Takatsuka Y, Sakai H, Ehara Y, Matsumoto M, Yamakoshi Y, Yamakoshi T, Tanaka N, Shiba K, and Yamakoshi K. Respiratory condition analysis in patient with spinal cord injury using a bed-installed healthcare monitoring system. Proc 38th Annu Conf IEEE Eng Med Biol, Orlando, Aug. 2016. paper ID: FrCT18.3.
- ③ Motoi K, Yamakoshi Y, Yamakoshi T, Tanaka N, Yamakoshi K. Development of a fully non-conscious cardiopulmonary monitoring system using capacitive coupling electrodes placed outside the bathtub wall. Proc 37th Annu Conf IEEE Eng Med Biol, Milan, Aug. 2015. paper ID: 21263335.
- ④ 佐川貢一, 福川亮, 本井幸介, 木立り子. 二重課題歩行特性と副次課題成績を組み入れたワーキングメモリモデルによる健康高齢者の転倒経験の識別. 人間工学, 第 50 巻, 第 6 号, 2014 年, 342-349 頁.
- ⑤ 谷口早弥香, 本井幸介, 東祐二, 藤元登四郎, 山越憲一. ウェアラブル姿勢変化・歩行解析システムによる在宅移行期の脳血管障害者の定量的身体活動評価—Life-SpaceAssessment による活動範囲評価との同時比較検討. 保健医療学雑誌, 第 5 巻, 第 1 号, 2014 年, 1-14 頁.
- ⑥ 小山崇宣, 本井幸介, 西山和宏, 田中あすか, 湯地忠彦, 東祐二, 佐川貢一, 藤元登四郎, 山越憲一. チャレンジド・キッズにおけるリハビリ支援のための無拘束・無意識生体計測融合型ネットワークシステムの開発—小児における活動・健康情報モニタシステムの提案—. 電子情報通信学会技術研究報告, 第 113 巻, 第 409 号, 2014 年, 31-34 頁.

[学会発表] (計 6 件)

- ① 本井幸介, 坂井宏旭, 江原喜人, 松本正幸,

角南慶佑, 山越康弘, 松村健太, 芝 啓一郎, 田中直登, 山越憲一. 無意識型ヘルスケアモニターシステムを用いた脊髄損傷患者体調管理法の基礎的検討. 第 55 回日本生体医工学会大会, 富山, 2016 年 4 月, ID: 1T7-4-5.

- ② 本井幸介, 山越康弘, 田中直登, 山越憲一. 容量結合による見えない電極を用いた完全無意識型浴槽心電図・呼吸計測システムの開発. 第 54 回日本生体医工学会大会, 名古屋, 2015 年 5 月, ID: P1-4-7-F.
- ③ 佐藤駿祐, 本井幸介, 木立り子, 佐川貢一. 二重課題の難易度と体幹の動作および歩行パラメータとの関係について. 第 54 回日本生体医工学会大会, 名古屋, 2015 年 5 月, ID: P2-6-12-G.
- ④ 佐川貢一, 坂上滉哉, 佐藤駿祐, 本井幸介, 高橋一平, 澤田かほり, 中路重之. 慣性センサによる 10m 最大速度歩行時間の推定. 日本機械学会 2015 年度年次大会, 札幌, 2015 年 9 月, ID: J1630202.
- ⑤ 本井幸介, 西山和宏, 杉原遥, 湯地忠彦, 東祐二, 佐川貢一, 藤元登四郎, 山越憲一. 小児リハビリテーションにおけるウェアラブル姿勢・活動計測システムを用いた自由歩行評価の有効性検討. 第 53 回日本生体医工学会大会, 仙台, 2014 年 6 月, O3-15-4.
- ⑥ 本井幸介, 田中あすか, 田中麻祐美, 津曲優子, 湯地忠彦, 東祐二, 佐川貢一, 藤元登四郎, 山越憲一. チャレンジドキッズにおける健康・生活支援のための無意識型ヘルスケアモニタシステムの開発. 第 53 回日本生体医工学会大会, 仙台, 2014 年 6 月, O3-23-6.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

本井 幸介 (MOTOI, Kosuke)
静岡理工科大学・理工学部・講師
研究者番号: 80422640

(2) 研究分担者

佐川 貢一 (SAGAWA, Koichi)
弘前大学大学院・理工学研究科・教授
研究者番号: 30272016

(3) 研究協力者

東 祐二 (HIGASHI, Yuji)
湯地 忠彦 (YUJI, Tadahiko)
西山 和弘 (NISHIYAMA, Kazuhiko)
岩村 秀世 (IWAMURA, Hideyo)