

導電性繊維を用いた体圧・接近センサによる
車椅子への移乗時における体圧応答の評価

正員 黒崎 紘史^{*,**a)} 非会員 白畑 紘夢^{*} 正員 川原 潤也^{**}
非会員 近藤 健^{***} 非会員 李 範爽^{****} 正員 小田垣雅人^{*5}

Evaluation of Seating Position During Wheelchair Transfer using Body-pressure and Proximity Sensors with Conductive Texture

Hirofumi Kurosaki^{*,**a)}, Member, Hiromu Shirahata^{*}, Non-member, Junya Kawahara^{**}, Member,
Ken Kondo^{***}, Non-member, Bumsuk Lee^{****}, Non-member, Masato Odagaki^{*5}, Member

(2021年8月18日受付, 2022年1月4日再受付)

Patient transfer during nursing care imposes a heavy burden on long-term caregivers, frequently causing back pain. It is therefore necessary to improve nursing skills in order to reduce the burden on caregivers so as to prevent accidents. In this study, we fabricated capacitive body-pressure and proximity sensors that use conductive texture for detection, in order to evaluate nursing care movements. To investigate the response of the sensor, an experiment was conducted in which a stainless block was brought close to and then placed in contact with a simulated living body. The results show that the sensor can detect the distance to a living body, in addition to the applied pressure. Based on these response characteristics, a sitting experiment was conducted in which 10-channel body-pressure and proximity sensors were installed. The results indicated that the proposed sensor can be used to analyze the seating position of patients in a wheelchair based on the pressure on the seat surface.

キーワード: 導電性繊維, 移乗介助, 体圧・接近センサ

Keywords: conductive texture, patient transfer, body-pressure and proximity sensors

1. はじめに

介護現場において、介護者が被介護者を車椅子やベッドに移乗させる動作（介護移乗動作）は頻繁におこなわれている。介護移乗動作は、介護者の身体に大きな負担を与えるため、腰痛などを引き起こす原因になっている。また、介護者の技能が未熟な場合は、被介護者の転落などの事故を生じる可能性がある。このため、介護者の負担軽減や事

故防止の観点から、介護者の介護技能を客観的に評価し、その結果に基づいて適切な指導をおこなうことで、介護技能の向上を図る必要がある^{(1)~(5)}。

これに対して、介護技能の評価に関する先行研究の多くは、第三者の観察など主観的な手法に基づいておこなわれているのが現状である⁽⁶⁾⁽⁷⁾。近年では、三次元動作解析装置を

a) Correspondence to: Hirofumi Kurosaki. E-mail: hirofumi.kurosaki@gmail.com

* 公立大学法人前橋工科大学大学院
〒371-0816 群馬県前橋市上佐鳥町 460-1
Graduate School of Maebashi Institute of Technology
460-1, Kamisadori, Maebashi, Gunma 371-0816, Japan

** 群馬県立群馬産業技術センター
〒379-2147 群馬県前橋市亀里町 884-1
Gunma Industrial Technology Center
884-1, Kamesato, Maebashi, Gunma 379-2147, Japan

*** 学校法人群馬パース大学
〒370-0006 群馬県高崎市間屋町 1-7-1

Gunma Paz University
1-7-1, Tonyamachi, Takasaki, Gunma 370-0006, Japan

**** 国立大学法人群馬大学
〒371-8511 群馬県前橋市昭和町 3-39-22
Gunma University

*5 公立大学法人前橋工科大学
〒371-0816 群馬県前橋市上佐鳥町 460-1
Maebashi Institute of Technology
460-1, Kamisadori, Maebashi, Gunma, JAPAN

用いた介護技能の定量的な評価方法が提案されている^{(8)~(11)}が、計測機器が高価であることからほとんど普及していない。また、計測系が大規模になることから、一般住宅には設置することも困難である。

そこで、我々は、介護技能の評価を安価かつ簡易的に実現することを目的として、導電性繊維を用いた静電容量方式のセンサを使用した体圧の評価方法を提案した⁽¹²⁾。本センサは、導電性の銀不織布で絶縁体の布を挟み込んだ構造をしており、銀不織布間で生じる静電容量の変化から体圧の変化を検出できる。しかし、本センサの原理上、接触しない限り生体の状態を検出できないため、車椅子の移乗動作など動きをともなう解析には十分な性能を発揮できなかった。

本研究では、体圧のみならず、センサと生体の間の距離の変化を検出可能な体圧・接近センサを製作する。本稿では、まず、体圧・接近センサに生体を模した導体を接近、接触させる実験を行うことで、本センサの応答特性を調べる。つぎに、体圧・接近センサを設置した車椅子への着座実験を行うことで、着座や立ち上がりを含む起居動作の解析や着座位置の検出における本センサの有用性について検証する。

2. 体圧・接近センサの原理

本研究で製作した体圧・接近センサおよび測定システムを Fig. 1 に示す。センサの検出部は、絶縁体の布の上に 40 mm 四方の導電性縫い糸 ((株) フジックス, Smart-X) の刺繍が施された構造となっており、ウォッシュャブルで柔軟性を備えていることが特徴である。センサは、スイッチトキャパシタフィルタ (SCF) を内蔵した静電容量評価ボード (ルネサスエレクトロニクス (株), RX130) に接続されており、評価ボードを通じて検出部の静電容量の変化を計測する。

センサに生体が接近、接触すると、導電性を持つ刺繍部と生体の間に静電容量が発生する。このとき生じた静電容量の変化は、SCF により電流量の変化に変換され、電流量に応じて発振周波数が変化する回路から出力されるパルス数をカウントすることで評価される⁽¹³⁾。ここで、発振波形において 100 ms 毎に含まれるパルス数のことをカウント値とよび、このカウント値で生体の接近、接触にともなう静電容量の変化を評価する。これらの計測原理から、本研究で製作した体圧・接近センサは、静電容量方式に分類される。

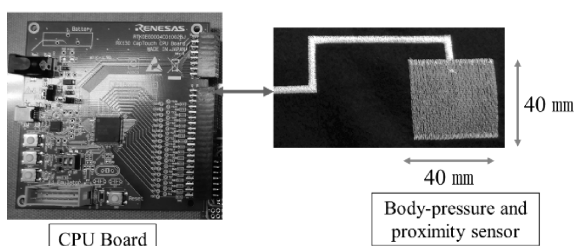


Fig. 1. Body-pressure and proximity measurement system.

3. 体圧・接近センサの応答特性の評価実験

〈3・1〉 応答特性の評価実験 製作した体圧・接近センサの応答特性を調べるため、クロスヘッドの変位や速度、対象物に加える荷重を機械的に制御可能な一軸圧縮試験機 ((株) エー・アンド・ディ, MCT-2150) のクロスヘッドにステンレスブロック (40×40×20 mm) を取り付け、センサの上に車椅子のクッション材と同じ絶縁物 (40×40×15 mm) を置き、ステンレスブロックを接近、接触させる実験を実施した (Fig. 2)。ここで、ステンレスブロックを生体として模擬するため、ステンレスブロックと生体表面を等電位にした。本実験では、ステンレスブロックと絶縁物の間の距離 D を変化させたときに生じるカウント値の変化を調べた。

ステンレスブロックを $D = 10.0$ mm の位置から絶縁物に接近させる方向に所定の距離間隔で移動させた。ステンレスブロックを移動させた後は、その位置での静止状態を少なくとも 5 s 以上保ち、その間に計測されるカウント値から 5 点を無作為に抽出し、その平均値と標準偏差をプロットした。ここで、ステンレスブロックが絶縁物の上面に接触し、一軸圧縮試験機が荷重 0.0 N の状態を、 $D = 0.0$ mm かつ圧力 0.0 Pa の状態とした。ステンレスブロックと絶縁物が接触した後は、一軸圧縮試験機が示す荷重が所定の間隔になるようにステンレスブロックを移動させ、それぞれの位置でのカウント値の平均値と標準偏差を接触前と同様に計測した。荷重が 130.0 N に達した後は、センサのヒステリシス特性を調べることを目的として、加圧時と同じ荷重間隔で減圧しながら同様の計測をおこなった。実験は計 3 回おこない、それぞれの結果を 1st, 2nd, 3rd の表記でプロットした。

〈3・2〉 応答特性の計測結果 まず、ステンレスブロックと絶縁物が接触する前の距離 D とカウント値の関係を Fig. 3 に示す。横軸は距離 D 、縦軸はカウント値の平均値を示す。 $D = 10.0$ mm から $D = 1.0$ mm までは 1.0 mm 毎、 $D = 1.0$ mm から $D = 0.0$ mm までは 0.2 mm 毎にカウント値を計測した。計測の結果、体圧・接近センサにステンレスブロックを接近させるほど、カウント値が上昇することが明らか

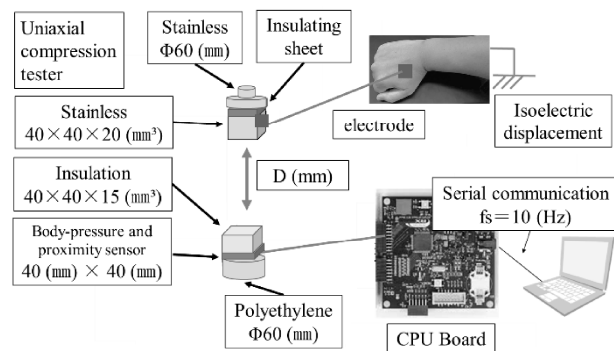


Fig. 2. Uniaxial compression test of body-pressure and proximity sensor.

かとなった。このことから、体圧・接近センサを使用することで、センサと生体の間の距離の変化を検出できることがわかった。

つぎに、ステンレスブロックと絶縁物が接触した後の荷重とカウント値の関係を Fig. 4 に示す。横軸は一軸圧縮試験機で与えた荷重を接触面積で除することで得られる圧力、縦軸はカウント値の平均値を示す。荷重は、20.0 N に達するまでは 2.5 N 毎、20.0 N 以降は 120.0 N に達するまで 20.0 N 毎、その後 130.0 N になるまで加えた。荷重が 130.0 N に達した後は、加圧時と同じ荷重間隔で 0.0 N まで減圧した。加圧時の結果を 1st, 2nd, 3rd の表記でプロットし、減圧時を 1st:re, 2nd:re, 3rd:re とした。計測の結果、加える圧力が 60.0 kPa を超えるまでは圧力に応じてカウント値が上昇するが、その後は飽和する様子が観察された。このことから、少なくとも 60.0 kPa までの圧力下においては体圧・接近センサを使用できることがわかった。また、10.0 kPa までは少なくとも 1.6 kPa 以上の分解能で圧力の変化を検出できることがわかった。また、Fig. 4 よりヒステリシス差を調べたところ、最大で 0.3% であることがわかった。ここで、計測値のばらつきを調べると、最大で 1.2% となっていることから、ヒステリシスの影響は計測値のばらつきよりも小さいといえる。

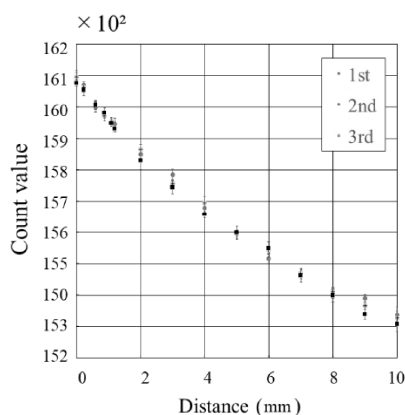


Fig. 3. Distance characteristics of body-pressure and proximity sensor.

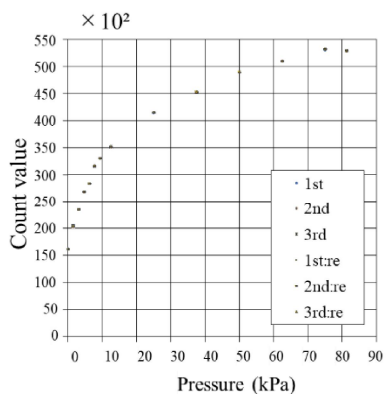


Fig. 4. Pressure characteristics of body-pressure and proximity sensor.

4. 車椅子着座時のセンサ出力評価実験

4.1 実験方法 つぎに、3章で応答特性を調べた体圧・接近センサを使用することで車椅子の起居動作の解析や着座位置の検出が可能が明らかにするため、本センサを設置した車椅子への着座実験を実施した。実験の被験者は、車椅子を利用したことがない 20 代から 40 代の男女 10 名とした。被験者の最大体重は 76 kg、最小体重は 44 kg であり、平均体重は 59 kg となった。実験は、前橋工科大学人間機能実験倫理審査委員会の承認を得て実施した (人 21 - 0004)。

Fig. 5 に被験者の着座位置を定めるために車椅子の座面上に設置した治具を示す。車椅子の座面が 450 mm に対し、幅 60 mm の治具を 2 個用いて着座位置を Left, Center, Right の 3 種類定め、着座可能な幅を 330 mm とした。Fig. 6 に車椅子着座時の実験系を示す。車椅子の座面には、導電性縫い糸で刺繍された体圧・接近センサを取り付けた。センサの詳細を Fig. 7 に示す。センサの検出部は、320 × 280 mm の絶縁体の布の上に 40 mm 四方の導電性縫い糸の刺繍が 10 チャンネル分施された構造となっている。センサの中心を原点とする座面座標 (Fig. 7) を設定すると、刺繍部は座面座標上で左右対称となっている。センサは、車椅子の背もたれに絶縁布が接するように配置されている。ここで、被験者の体重がセンサ全面に均一にかかると仮定すると、センサにかかる体圧は 4.8 kPa から 8.3 kPa 程度と見積もることが

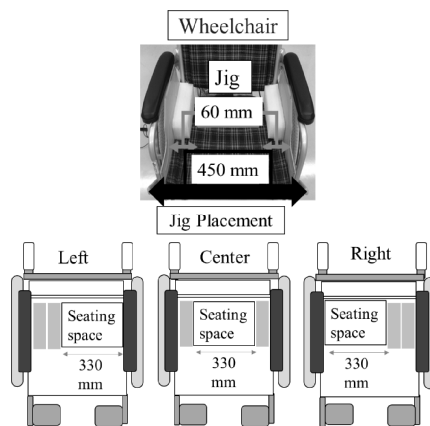


Fig. 5. Seating position on a wheelchair.

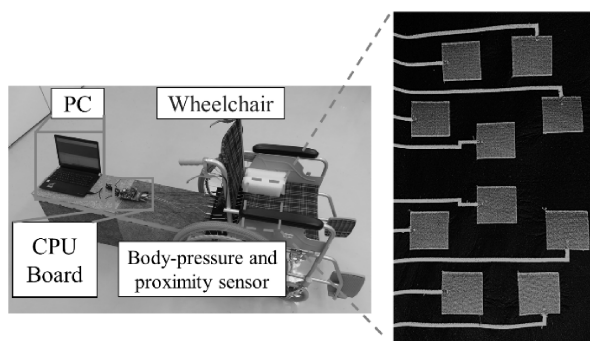


Fig. 6. Evaluation system of seating position during wheelchair transfer.

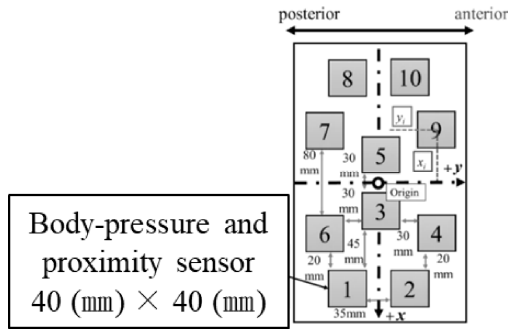


Fig. 7. Sensor position.



Fig. 8. Experimental procedure.

できる。これは、3章で示した体圧・接近センサを使用可能な圧力条件を満たしている。したがって、Fig. 6で示した実験系を使用することで、車椅子の座面上における被験者の体圧の変化を解析できるといえる。

実験手順を Fig. 8 に示す。実験の1試行を 20 s とし、実験開始から 5 s 後に鳴らすベルで着座を開始、15 s 後のベルで立ち上がりを開始、20 s 後のベルで実験終了とした。実験は 3 回繰り返す、各チャンネルのセンサ応答を調べた。センサ応答は、時間 t におけるチャンネル i のカウント値を $C_i(t)$ としたとき、時間 0 s におけるカウント値との差分値 $\Delta_i(t) = C_i(t) - C_i(0)$ により評価した。ここで、下添え字 i はセンサのチャンネル番号 ($i = 1, 2, \dots, 10$) とする。

〈4・2〉 実験結果および考察 Fig. 9 に着座位置が Right の条件での被験者 1 名の着座時の応答データを示す。横軸は測定時間 (s)、縦軸は $\Delta_i(t)$ を示す。各センサ応答の時系列を見ると、着座開始のベルが鳴った直後の 6 s 付近で着座動作がおこなわれ、その後 8 s から 15 s 付近までは安定した着座状態が継続し、立ち上がり開始のベルが鳴った直後の 16 s 付近で立ち上がり動作がおこなわれたことが読み取れる。このことから、本研究で製作した体圧・接近センサは、車椅子の起居動作の解析に有用であるといえる。

さらに、本研究では、10チャンネルのセンサ全体の応答を総合的に評価する指標として、センサ応答評価値 G_x, G_y を以下の式で定義する。

$$G_x(t) = \sum_{i=1}^{10} \Delta_i(t) x_i \dots\dots\dots (1)$$

$$G_y(t) = \sum_{i=1}^{10} \Delta_i(t) y_i \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 x_i, y_i は Fig. 7 の座面座標上におけるチャンネル i の中心の位置座標とする。(1), (2)式は、座面座標上の原点から各チャンネルの中心までの符号付きの x 距離または y 距離によって重み付けをしたセンサ応答の総和を表している。本研究では、(1), (2)式で算出された評価値の符号が、臀部の中心が位置する座面座標の象限を表すものとして定義し

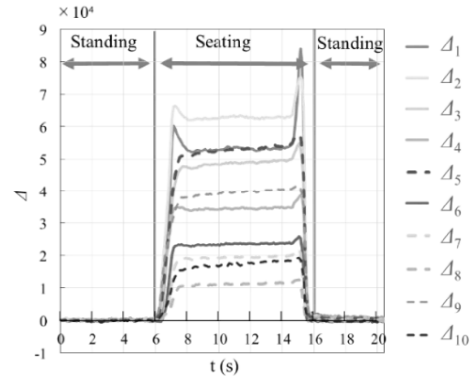


Fig. 9. Sensor response in seating motion.

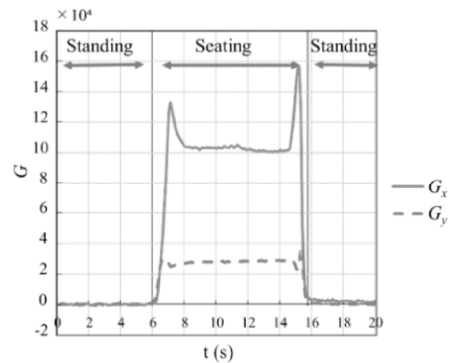


Fig. 10. Scatter plots of G_x and G_y in Left-Right discrimination test.

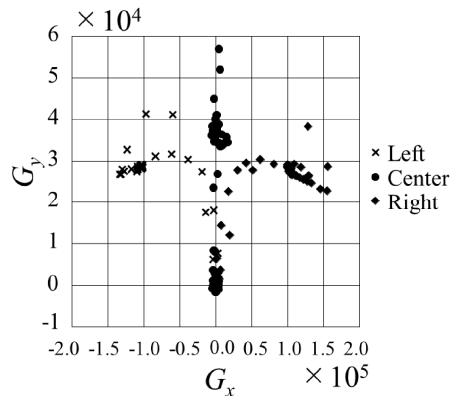


Fig. 11. Scatter plots of seating motion data in Left-Right discrimination experiment of seating motion.

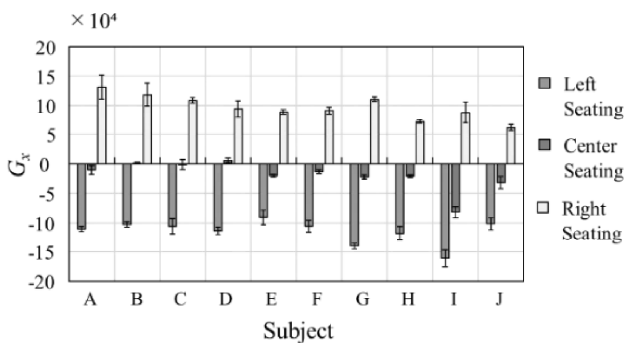
ている。

Fig. 9 で示したセンサ応答から、センサ応答評価値 G_x, G_y を算出した結果を Fig. 10 に示す。Fig. 10 の横軸は時間 (s)、縦軸はセンサ応答評価値を示す。着座位置が Right の場合、被験者の臀部の中心は座面座標上の $+x$ 側に位置することになる。これに対して、Fig. 10 において、 G_x は正の値を示しており、臀部の中心が $+x$ 側にあることを表現できていることがわかる。

Fig. 11 に着座位置が異なる場合の G_x, G_y の変化を示す。横軸は G_x 、縦軸は G_y を示す。×のプロットは着座目標が

Table 1. G_x of Left-Right discrimination test of all subjects.

Subject	Seating (t = 10)			Standing (t = 20)		
	Left	Center	Right	Left	Center	Right
A	-110523±4701	-10193±7495	131698±20505	-1169±796	2060±1483	1438±2069
B	-102685±4588	1355±1845	118785±19208	-3889±2239	-1404±1425	4953±1980
C	-105875±12957	-1608±8663	108882±4801	-1953±3163	954±3379	1128±1944
D	-113700±6704	5962±3721	94417±13813	-964±4186	-871±625	3114±2406
E	-90884±12481	-20199±2054	89045±3782	1774±5077	-737±2207	2854±589
F	-105804±10431	-13300±3574	91531±5718	-2126±601	-1708±226	1389±565
G	-140570±4888	-22345±3833	110591±4060	-3600±673	-3204±1109	149±3755
H	-118138±11628	-21060±2604	72110±3455	-2276±1470	235±2679	1719±884
I	-161589±14163	-81821±9151	87908±18315	-600±1008	-1227±1097	-651±2281
J	-101610±9851	-31960±10508	61059±5170	7300±1201	-73±1407	-7025±7456

Fig. 12. Sensor response evaluation value G_x by subject.

Left, ●のプロットは Center, ◆のプロットは Right のときの結果をそれぞれ示す。プロットしたデータは、被験者 1 名の着座から立ち上がりまでの全ての計測データを使用して算出した値である。Fig. 11 より、臀部の中心位置に対応したセンサ応答評価値の変化が確認できた。Table 1 および Fig. 12 に 10 名の着座実験の結果から得られた G_x を示す。Table 1 は被験者毎の計測データをまとめた表である。Left, Center, Right のそれぞれの条件下において、着座状態におけるセンサ応答として $A_t(10)$ および実験終了時におけるセンサ応答として $A_t(20)$ を各 3 回計測したデータから G_x を算出し、その平均値および標準偏差を計算した。Fig. 12 の横軸は被験者、縦軸は G_x を示す。Fig. 12 を見ると、Left の条件下では G_x は負の値、Right の条件下では正の値となっており、臀部の中心位置を弁別できていることがわかる。また、Center の条件下では、Left, Right に比べ G_x の絶対値が小さく、臀部の中心が座面座標の原点近傍に位置していることがわかる。

これらの結果から、本研究によって製作した体圧・接近センサは、車椅子の起居動作の解析や被験者の着座位置の違いの検出に使用できる性能を有しているといえる。

5. まとめ

本研究では、介護動作の評価に使用することを目的として、導電性縫い糸による刺繍を検出部とする静電容量方式の体圧・接近センサを製作した。製作したセンサの応答特性を調べるため、生体を模擬したステンレスブロックを接

近、接触させる実験をおこなった。実験の結果、本センサを使用することで、センサと生体の間の距離の変化やセンサにかかる圧力の変化を検出できることが明らかとなった。これらの応答特性を踏まえ、10 チャンネル分の検出部を持つ体圧・接近センサを設置した車椅子における着座実験を実施した。実験の結果、本センサによって、車椅子への着座や立ち上がりを含む車椅子の起居動作を解析できることが明らかとなった。また、車椅子の座面上における体圧の変化を検出することで、着座位置の違いが検出可能であることがわかった。

本稿では、被介護者一人による起居動作について、被験者 10 名を対象とした実験を行い、体圧・接近センサの有用性について検証した。今後は、介護者と被介護者の二人による車椅子の介護移乗動作の実験を行うことで、介護者の技能評価に本センサが有用であるか検証を進めていくことを展望としている。

謝辞

センサ製作に協力頂いた(有)川島エンブ(群馬県みどり市)に感謝する。

文献

- (1) B. Willy and C. M. Osterberg : "Strategies for Reducing Falls in Long-Term Care", *Annals of Long-Term Care*® (2014)
- (2) C. Lin, T. Ogata, Z. Zhong, M. Kanai-Pak, J. Maeda, Y. Kitajima, M. Nakamura, N. Kuwahara, and J. Ota : "Development and Validation of Robot Patient Equipped with an Inertial Measurement Unit and Angular Position Sensors to Evaluate Transfer Skills of Nurses", *International Journal of Social Robotics* (2020)
- (3) 鈴木みずえ・内藤智義・澤木圭介・金森雅夫 : 「高齢者施設入所の高齢者に対する転倒予防介入とケアスタッフ・組織への教育介入のエビデンス ～システムティック・レビューに基づく課題抽出～」, *日本転倒予防学会誌*, Vol.7, No.1, pp.33-41 (2020)
- (4) W. Li, L. Xiong, Y. Pu, Y. Quan, and S. Li : "High-Performance Paper-Based Capacitive Flexible Pressure Sensor and Its Application in Human-Related Measurement Lateral", *Nanoscale Research Letters* (2019)
- (5) N. Polhan, T. Charatrungron, W. Dacharux, J. Siriwatson, and G. Guerra : "Provisional Outcomes of Affordable Custom Wheelchair Seating for an Individual with Cerebral Palsy: Case Report", *CMU J. Nat. Sci.*, Vol.18, No.3 (2019)
- (6) P. Voyer, R. Verreault, G. M. Azizah, J. Desrosiers, N. Champoux, and A. Bédard : "Relevance of physical and verbal aggressive behaviours and associated factors among older adults in long-term care facilities", *BMC Geriatrics*, Vol.5, No.13 (2005)

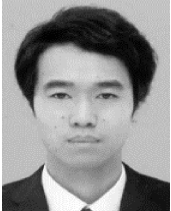
- (7) 森 和夫:「熟練技の特性と次世代への継承, 育成における課題」, 日本労働研究雑誌, 特集 スキルの継承・伝承 (2020)
- (8) S. Ohashi, A. Shiogo, K. Kaito, and A. Shionoya: "Measurement of Sitting Pressure Distribution with Gradient Changes for Wheelchair", Users Information Engineering Express International Institute of Applied Informatics, Vol.3, No.2, pp.69-77 (2017)
- (9) 春名弘一・昆 恵介・稲垣 潤・佐藤洋一朗:「マーカースモーションキャプチャによる三次元動作解析の応用例」, 日本義肢装具学会誌, Vol.35, No.1, pp.17-23 (2019)
- (10) 島上祐樹・堀場隆広・田中利幸・宮本晃吉・榎堀 優・間瀬健二・川部 勤・清水卓也・柳澤理子・水野寛隆・鈴木陽久:「圧縮または伸縮を検知できる布製のセンサを用いた生体計測システムの開発」, あいち産業科学技術総合センター研究報告 (2016)
- (11) Y. Enokibori, A. Suzuki, H. Mizuno, Y. Shimakami, and K. Mase: "E-textile pressure sensor based on conductive fiber and its structure", In Proceedings of the 2013 ACM conference on Pervasive and ubiquitous computing adjunct publication, pp.207-210, ACM (2013)
- (12) Y. Tsuda, M. Odagaki, and Y. Kondo: "Development of a Sensor with a Conductive Textile for Detecting Decubitus Ulcers", IEEE Trans. on EEE, Vol.15, No.7, pp.1065-1069 (2020)
- (13) RENESAS Electronics: RX113 Group CTSU 静電容量タッチ検出の基礎 (2014)

黒崎 紘史



(正員) 2004年3月新潟大学機能材料工学科卒業。2006年3月同大学大学院自然科学研究科材料生産システム専攻博士前期課程修了。修士(工学)。2018年4月群馬県立群馬産業技術センター入庁。2021年4月前橋工科大学大学院工学研究科博士後期環境・生命専攻入学。現在、介護教育システムの研究に従事。

白畑 紘夢



(非会員) 2021年3月前橋工科大学卒業。現在同大学大学院システム生体工学専攻博士前期課程在学中。現在、介護教育システムの研究に従事。

川原 潤也



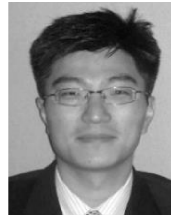
(正員) 2011年北海道大学工学部機械知能工学科卒業, 2013年同大学大学院工学院機械宇宙工学専攻修士課程修了, 2016年同大学大学院工学院機械宇宙工学専攻博士課程修了。2014年日本学術振興会特別研究員(DC2)。2016年群馬県立産業技術センター。博士(工学)。主として, 流体工学・計測工学に関する研究, 日本機械学会等の会員。

近藤 健



(非会員) 2018年群馬大学大学院保健学研究科博士前期課程修了, 2021年同後期課程修了。2020年群馬大学大学院保健学研究科リハビリテーション学講座助教, 2021年群馬パース大学リハビリテーション学部作業療法学科助教。博士(保健学)。主として, 医療機関における看護師と療法士間の連携に関する研究に従事。

李 範 爽



(非会員) 2005年群馬大学大学院医学系研究科保健学専攻博士前期課程修了, 2009年同後期課程修了。2007年群馬大学大学院保健学研究科リハビリテーション学講座助教, 2012年同講座講師, 2015年同講座准教授, 2017年同講座教授。博士(保健学)。主として, 上肢運動機能に関する研究に従事。

小田垣 雅人



(正員) 2004年東京電機大学大学院修士課程理工学研究科生命工学専攻修了, 2007年同大学大学院博士課程先端科学技術研究科先端技術創成専攻修了。科創造科学専攻助教。2009年広島市立大学大学院情報科学研究科創造科学専攻講師。2014年前橋工科大学講師。2015年前橋工科大学准教授。博士(工学)。主として, 生体磁気に関する研究, IEEE EMBS, 日本生体磁気学会, 日本応用磁気学会等の会員。