

基礎論文

身体性変換スーツによる小児体験における知覚・運動特性の評価

西田 惇^{*1*2}高鳥 光^{*1}松田 壮一郎^{*3}佐藤 綱祐^{*1}大木 美加^{*3}鈴木 健嗣^{*3}

Perceptual and Kinetic Characteristics by Egocentric Child Experience

Jun Nishida^{*1*2} Soichiro Matsuda^{*3*2} Mika Oki^{*3} Hikaru Takatori^{*1} Kosuke Sato^{*1} and Kenji Suzuki^{*3}

Abstract – We have been developing a set of wearable devices for providing an egocentric child experience to the wearer, named CHILDHOOD. The system is composed of two wearable devices: 1) a visual translator for mapping the wearer's eyesight level onto his/her waist position by using a head-mounted display and a wearable camera module, and 2) a pair of passive hand exoskeletons for miniaturizing hand gestures by using motion conversion mechanisms. In this paper, we revised the configuration of the visual translator to improve the usability, and implemented a new passive mechanism of the hand exoskeleton for achieving natural grabbing motion. We conducted a field study at a nursing school for evaluating how the visual system modulates the perception of interpersonal distance, and also performed a lab study to observe the changes in a user's hand function while using the exoskeleton with a peg test environment.

Keywords : Body Representation; Wearable Device; Personal Space; Hand Function

1 はじめに

本研究では、ウェアラブルデバイスを用いて自己主体的な小児インタラクションを再現する身体性変換スーツ(図1(a))と、これを用いた時の知覚・運動特性の評価(図1(b, c))について報告する。小児向けの製品や空間環境を設計するデザイナーがそのユーザビリティやアクセシビリティについて主観的に評価したり、小児と関わることの多い保育士や医療従事者が普段の教室や病室を子供目線で探索することで小児に対する捉え方を考え直すことは、他者の身体特性に対する理解を増進し、より円滑な意思疎通を行う上で重要となる。こうした Empathic Design[1] に基づく考えから、高齢者[2, 3]やパーキンソン病患者[4]といった他者の身体的・生理学的特性の再現に基づく様々な教育・製品評価支援ツールが提案されてきた。小児体験を再現する手法として、カートに設置したビデオカメラ[5]やCG/VR空間で低い視点を提示[6, 7]するなどして小児の視点を再現する手法が提案されている。これまでに我々は、装着者の視点の位置と手指把持スケールを変容するウェアラブルデバイスのプロトタイプを開発し、小児体験を実空間でかつ身体上で再現する手法を提案してきた[8, 9, 10]。

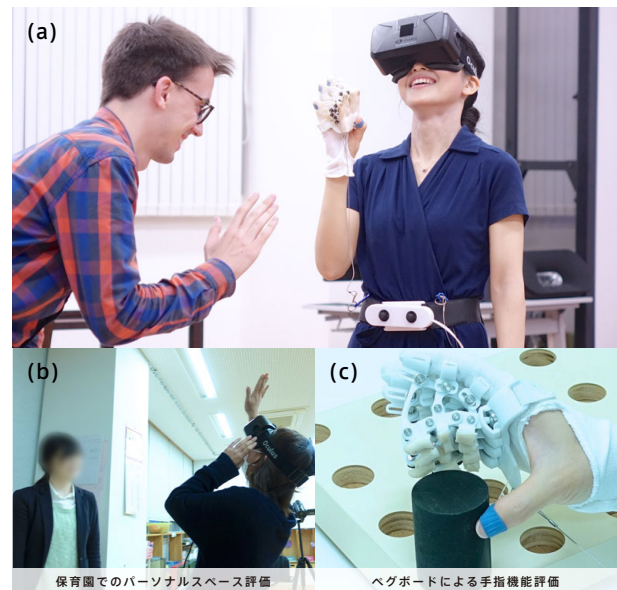


図1 開発した身体性変換デバイスと実験の様子

Fig. 1 Overview of the proposed interaction

これは装着者の視点位置の移動と手指の把持スケールの縮小により、自身の身体上で本質的に小児の特性を再現することで、実空間において自己主体的な小児体験に基づき人や実環境とのインタラクションを行うものである(図2)。これを実現するため、ヘッドマウントディスプレイ(HMD)とステレオカメラモジュール等で構成する視点変換デバイスと、受動型リンク機構で構成する把持動作縮小外骨格を開発した(図3)。

*1筑波大学 グローバル教育院

*2日本学術振興会

*3筑波大学 システム情報系

*1Empowerment Informatics Program, Univ. of Tsukuba

*2The Japan Society for the Promotion of Science

*3Faculty of Eng., Information and Syst., Univ. of Tsukuba

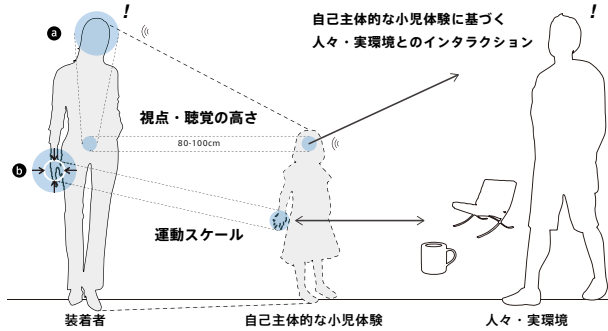


図2 小児体験のインタラクションモデル
Fig. 2 Model of the proposed interaction

これにより、例えば教室内や小児病棟内のこういった構造物が圧迫感を与えるかといった空間の印象評価や、最適な対人距離感の学習、掲示物の視認性の確認、さらに小児の上腕長で届く位置に物が配置されているか、小児の手指長で把持することができるかといったアクセシビリティの評価をより主体的・身体的に行うことが可能となる。本研究では、保育園や小児病棟といった生活年齢・発達年齢が共に低い小児が居る実環境で、小児と接する大人を対象としており、この文脈において主体的な探索行動と、他者との社会的相互作用が可能な小人機能を提供する本システムを使用する時、そのインタラクションを小児体験と定義する。

本論文では、視点位置変換デバイスの構成の変更による空間的整合性とユーザビリティの改善、受動型手指外骨格のリンク機構の変更による把持機能の改善を実施し、それらの性能評価実験を行なった。加えて、保育士を対象として視点変換デバイス使用時のパーソナルスペースを計測することでその変化について検討したほか、開発した外骨格使用時の手指機能の変化について物理的・認知的側面から観察し、教育・空間設計支援ツールとしての有用性について検討する。

2 関連研究

これまでに実空間やCG/VR空間で錯覚現象などを用いて人の身体知覚を変容させ、物体や距離の知覚を変える試みがなされてきた。例えば、モーションキャプチャシステムとHMD環境を用いて、VR空間における小児身体アバターに身体所有感を持たせ、距離や大きさの知覚を変更する手法が提案されている[7, 11]。これらの研究から、人は自身の身体を基準として物体の大きさを判断する傾向があることが示唆されている。こうしたVR空間内での身体知覚の変容が、物や距離の知覚のみならず自己意識[12]や対人距離[13]にも影響するという報告もなされている。CG/VR空間での身体知覚の変容に加えて、実空間において身体に対する視覚刺激と触覚刺激を用いて他者の身体感覚を再



図3 提案デバイス概要
Fig. 3 Overview of the developed device

現する試みがなされてきた。PhilippeらはウェアラブルカメラとHMDを用いて参加者2名の視覚を交換した後、実験実施者が手指に対してタイミングの同期した触覚刺激を与えたり、同じ上腕動作を参加者に行わせることで両者の身体感覚が互いに交換されたような感覚を生み出すインスタレーションを提案している[14]。また、座った状態で自身の身体を背後から撮影した様子をHMDに提示した環境で自身の身体と観察視点の腹部に棒でつつく刺激を与えると、自分の身体が実体の身体から離れて存在する感覚が生起することが報告されている[15]。

これらに加えて、小児サイズの人形に身体所有感を転写させることで実験参加者の空間知覚を変える試みがなされている[16]。実験参加者と人形が同じ姿勢で横たわり、実験参加者は人形の下肢が映った人形視点の映像をHMDを通して観察する。実験参加者と人形の下肢に対して同期した触覚刺激を与えた後に物体の大きさについて実験参加者に質問したところ、本来よりも大きく知覚したと報告している。

このように、実空間において身体知覚を変容させるためには着座、あるいは横たわった状態になるなどして他者との主体的なインタラクションが難しい状況にあったが、本研究ではデバイス装着者の身体的動作を可能な限り保存しつつ感覚器官や運動器官を変容させる手法を提案しており、装着者の自己主体的な行動を最大限に活用した身体知覚の変容の可能性について検討する。特に、シナリオとして想定している保育園や医療機関での教育支援ツールとしての利用を念頭に、開発した視点変換デバイスが実空間で他者との対人距離の知覚にどう影響するか、そして環境や物体との能動的なインタラクションを通して小児の触力覚的視点を提供するにあたって、外骨格使用により装着者の認知負荷を増加させずに運動機能に介入できるかに着目し、実験を構成する。

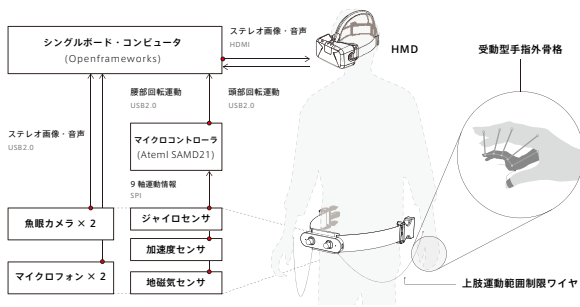


図4 提案デバイスの概要

Fig. 4 Overview of the developed device

3 提案手法

本論文において開発した身体性変換スーツのシステム概要を図4に示す。概要と改良点について次に示す。

3.1 視点変換デバイス

視点変換デバイスはHMD、ステレオ魚眼カメラモジュール、センサベルト、シングルボードコンピュータ、画像処理ソフトウェア及びモバイルバッテリーで構成する(図4)。新たに開発したステレオ魚眼カメラモジュール及びセンサベルトの概要を図5に示す。ステレオ魚眼カメラモジュールは2つの魚眼カメラモジュール(ELP-USBFHD01M-L180, Ailipu Technology 社製)とUSBマイクロフォン(OC-987, SIENOC 社製)を有する。使用したカメラは視野角 180° のレンズにより 1280×720 画素の魚眼画像を60 frame per second (fps)にて出力できる。USBマイクロフォンはステレオ魚眼カメラモジュール周辺の音声をUSBケーブルを介して取得可能で、ノイズキャンセリング機能を有するヘッドホンに腰部の音声情報を提示することができる。ステレオ魚眼カメラモジュールの寸法は $148\text{mm} \times 44\text{mm} \times 18\text{mm}$ (高さ)で、重量は 107g であった。

従来の視点変換デバイス[9, 10]では頭部回転運動に合わせてサーボモータで構成するパンチルト機構を駆動させていたが、デバイスの容積が大きいためカメラが腰部から 15cm 程度離れてしまい、人の目の位置との水平軸上の空間的整合性が低下してしまう問題があった。また重量も約 600g と大きく、装着に他者の支援が必要であったり、長期間使用するとサーボモータの交換が必要になるといったユーザビリティ上の課題もあった。本論文では魚眼カメラを用いて同様の機能を実装し小型化・軽量化することで、カメラと腰部の距離を 1cm に縮め、 107g と軽量に構成することで使用者自身で装着できるようになるなど前述の問題を解決した。センサベルトは9軸運動センサ(MPU-9250, Invensense 社製)とマイクロコントローラ(SAMD21, Atmel 社製)を備え、装着者の腰部のロール・ピッチ・

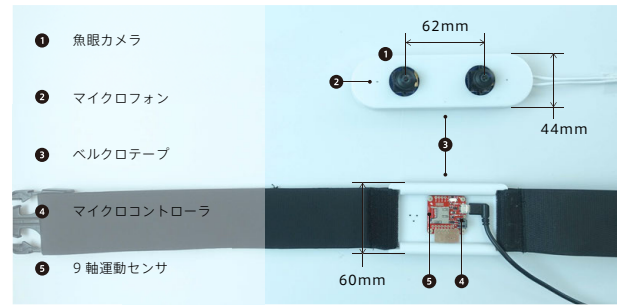


図5 視点変換デバイスの概要

Fig. 5 Overview of the visual translator

ヨー角を計測する。寸法は $97\text{mm} \times 66\text{mm} \times 12\text{mm}$ (高さ)で、重量は 146g であった。HMDには視野角 100° 、片目あたり 960×1080 画素のディスプレイを有するRift (Development Kit 2, Oculus 社製)を用いた。HMDに提示する画像はC++言語を用いた開発環境であるOpenframeworksで記述した画像処理ソフトウェアにより生成する。本ソフトウェアでは半球状のオブジェクトに取得した魚眼画像をテクスチャとして貼り付け、範囲指定して2次元平面に投影することで平面画像を取得する。

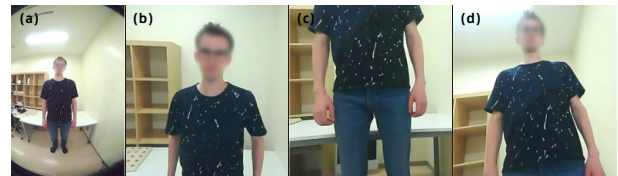
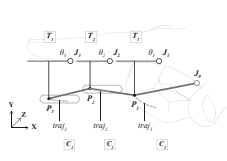


図6 取得した魚眼画像と平面展開画像

Fig. 6 A captured image and perspectives

従来の視点変換デバイス[9, 10]と同様に、頭部姿勢と腰部姿勢の差分を視線方向とすることで、体を1回転させたとしても提示する画像が変化しないようにする。これに加えて新たに開発したシステムではハイパスフィルタにより姿勢センサ値のドリフトを除去したり、腰部回転運動の角速度に対してローパスフィルタを適用することで歩行などによる腰部の振動を抑制し、頭部回転運動に伴う上体の低速な姿勢変化のみを視線方向計算に含めるなどして、提示画像の安定性を高めた。平面画像を歪みなく提示できる範囲を計測した結果、垂直方向で $\pm 80^\circ$ 、水平方向で $\pm 40^\circ$ であった。本研究で想定するシナリオでは、装着者は主に上下に頭部を動かす傾向が多いため、HD比率で出力するカメラモジュールを 90° 回転して設置することで垂直方向に大きく頭部運動できるようにしている。図6中(a)に取得した魚眼画像、(b)頭部にカメラを装着した時の平面展開画像、(c)腰部にカメラを装着した時の平面展開画像、(d)見上げた時の画像を示す。

(a) 従来のリンクモデル



(b) 新しいリンクモデル

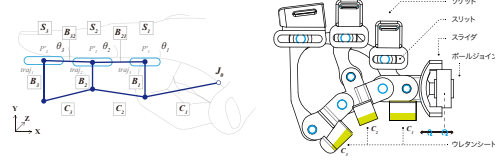


図 7 受動型手指外骨格のモデル

Fig. 7 The model of the developed exoskeleton

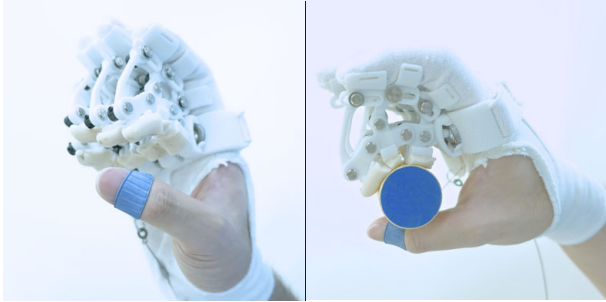


図 8 受動型手指外骨格の概要

Fig. 8 Overview of the hand exoskeleton

3.2 受動型手指外骨格

受動型手指外骨格は、装着者の手指動作をリンク機構を用いて小児の手指に見立てたラバーハンドに伝達することで、実空間において手指動作のスケールを変更するものである。手指動作を伝達するリンク機構、機構を取り付けたグローブ、手指の肌に類似した力覚フィードバックを生成するウレタン樹脂、親指の可動域を制限し小児の手指長を再現するワイヤ (4cm) 付き指サック、及び上肢の可動範囲を制限し小児の上肢長を再現するカラビナ付きワイヤ (70cm) で構成する。従来のリンク機構 [9, 10] では、図 7(a) に示す T 字型ソケットを用いて、手指動作をラバーハンドを接着したリンク $C_{1,2,3}$ に伝達していた。T 字型ソケットの形状の特性から、その先端部 $P_{1,2,3}$ が把持動作に応じて移動できるようスリット $traj_{1,2,3}$ を要した。しかし製造誤差によるリンク間のガタや摩擦などが原因で先端部 P がスリット内を円滑に移動しないことがあり、これによる x 軸方向の反力によって把持動作時にグローブとリンク $T_{1,2,3}$ の接着が剥がれたり、グローブが変形するなどして手指リンク $C_{1,2,3}$ が意図した動作をしないことがあった。

そこで本論文では新たに、図 7(b) に示す B_{12} および B_{23} リンクを追加し四節リンク機構が常に構成されるようにした。このリンク $B_{12,23}$ の追加に伴い、これまでソケットとリンク機能を兼ねていた従来リンクモデルにおける T 字型リンク $T_{1,2,3}$ はそれぞれスリットを持つソケット $S_{1,2,3}$ とリンク $B_{1,2,3}$ に分割した。こ

れによって、対象物体を把持した時の点 $P'_{1,2,3}$ における x 軸方向のモーメントはリンク B_{12} および B_{23} が受け、ソケット $S_{1,2,3}$ は y 軸方向のみの反力を手指に伝えるため、把持動作時にグローブから剥離することがなくなった。またスリット $traj_{1,2,3}$ の位置を手指関節の回転中心に近い位置に設置したことで必要となるスリット長が短くなったことから、把持動作を行うことができる関節角範囲が拡大した。加えて、従来の手指外骨格では 5 歳児の寸法に基づきウレタン樹脂を用いて一体成形したラバーハンドを手指リンク C に接着していたが、ラバーハンド自体に皮膚のしわが形成されていないことや、指骨がないことから十分に把持動作を行えないといった課題があった。そこで本論文では、関節ごとに切り分けた手指皮膚シートを同様にウレタン樹脂で成形し、これをそれぞれの手指リンク C に接着することで、より小さい握力で把持できるようにした (図 8)。

4 性能評価実験

4.1 描画遅延時間

開発した視点変換デバイスのカメラ撮像から HMD 上のディスプレイ描画までの時間を評価する。視点変換デバイスのカメラモジュールの前方にフラッシュライトを設置し、その様子を撮像する。使用している HMD のレンズ部分を取り外した状態で、960fps のハイスピードカメラ (RX10, SONY Inc.) を用いてフラッシュライトの点灯と、その様子を描画している HMD のディスプレイ部分を同時に撮影し、得られた時間差を時間遅れと定義する。本システムでは Openframeworks を用いて制作したソフトウェアにより 1 フレームの間に、魚眼画像取得、9 軸運動センサからの回転角情報取得 (シリアルポート通信)、HMD からの頭部回転角情報取得、取得した回転データの平滑化、OpenGL による平面画像展開、および HMD 上のディスプレイへの描画を行う。計 10 回計測を行なった。描画のリフレッシュレートは 120fps であった。計測の結果、描画遅延時間は平均 108.1ms, 標準偏差 13.6ms であった。

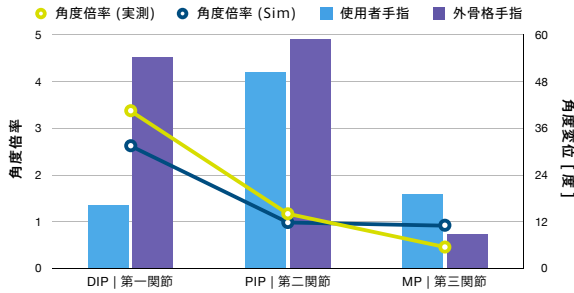


図9 受動型手指外骨格リンク機構評価
Fig.9 Link Performance Evaluation

4.2 外骨格リンク機構評価

新たに開発した受動型手指外骨格が手指動作をウレタン手指に伝達できているか観察するため、実装したリンク機構の動作評価を行なった。ここでは装着者の手指と外骨格のウレタン手指の関節角変化を計測し、人の手指から外骨格の手指への伝達倍率を求め、3DCAD シミュレーション上で得られた関節角倍率と比較することで実装機構の再現性を確認する。成形した人工皮膚シートは指紋を持っていないことから、人の手指と同様の動作をした場合であっても物体をうまく把持できないことがあったため、つまみやすいように第一関節の関節角倍率が大きくなるよう設計する(2.6倍)。実験参加者および外骨格の手指 C_i の各関節に直径 1mm の黒色のマーカーを取り付け、手首を固定した状態で手指を伸展した状態と屈曲した状態の様子を真上から写真撮影し、マーカー座標から手指と外骨格手指の関節角を求める。健常な 20 代男性 1 名が 1 施行実施した。結果を図 9 に示す。棒グラフは把持動作による使用者の手指と外骨格手指の関節角度変位を示す。使用者の手指の関節角度変位に対する外骨格の関節角度変位の割合を角度倍率と定義し、折れ線グラフに示す。第一関節および第二関節において、手指の関節角変位よりも大きく外骨格の手指が駆動し、第三関節においては計測された手指の動作よりも小さい範囲で運動の伝達がなされていることがわかった。

5 ユーザスタディ

5.1 パーソナルスペース評価

本実験では開発した視点変換デバイスを用いた時、頭部運動を保存した状態での視点移動がパーソナルスペースの知覚にどう影響するのか観察した。パーソナルスペースとは対人距離の分類の一つであり、他者からの接近に対して不快に感じたり、恐怖を感じたりする身体を取り巻く空間を指すもので、およそ 45cm から 120cm の範囲とされている [17]。これまでに実験参加者が横たわった状態で小児サイズの人形に身体所有感を転写させた時に知覚が変容するといった報告や



図10 パーソナルスペース: 実験概要
Fig.10 Personal Space: Setup

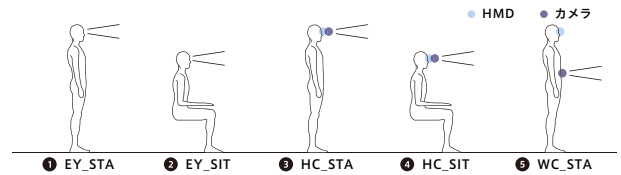


図11 パーソナルスペース: 実験条件
Fig.11 Personal Space: Conditions

[16], CG 空間内でのアバターに対するパーソナルスペースを計測する研究などが行われてきた [13]。本実験では、主体的な身体動作を保存しつつ視点位置を変換することができる開発デバイスを実環境で使用した時に、使用者の距離や物体の大きさの知覚にどう影響を及ぼすのか観察する。特に、保育士や教師が小児の対人距離感を学習するのに有効か考察するため、実空間におけるパーソナルスペースの変化を計測する。

5.1.1 実験手順

パーソナルスペースの計測は Stop-distance 法を用いる。本手法はパーソナルスペースの計測に広く用いられているものであり [18]、これまでに年齢や性別の違い [19]、疾患の有無といった様々な条件下で用いられている。本実験では、実験実施者が実験参加者に徐々に接近し (図 10(a))、実験参加者が不快と感じた時点で「ストップ」と宣言する (図 10(b))。この時点での両者のつま先の距離を床面に設置した目盛りを用いて計測し、パーソナルスペース距離とする。次の 5 つの実験条件を設定する (図 11)。(1) EY_STA: HMD を装着せず裸眼で直立、(2) EY_SIT: HMD を装着せず裸眼で着座、(3) HC_STA: HMD を装着し、頭部にカメラモジュールを設置して See-through 状態で直立、(4) HC_SIT: 前項同様に See-through 状態で着座、(5) WC_STA: 腰部にカメラを装着し、HMD を頭部に装着した状態で直立。実施者と参加者の性別は一致させ、条件は無作為に提示する。実験開始前に約 5 分間、デバイスを試用してもらい機器の使用に慣れる時間とする。WC_STA 及び HC_SIT 条件のカメラ位置は、いずれかの状態を側面より撮影し、それを参考に目視により高さが同一となるよう調整した。

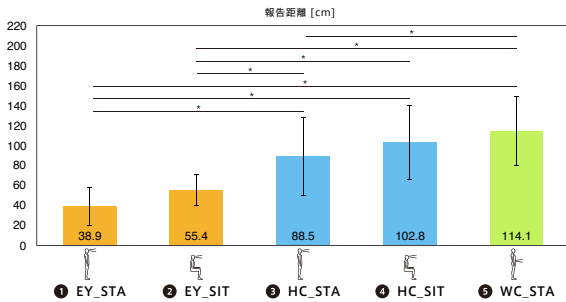


図 12 パーソナルスペース: 計測結果
Fig. 12 Personal Space: Results

5.1.2 実験参加者

9 名 (男性 1 名, 女性 8 名) の健常な保育士から同意を得て, 計 216 回計測を行なった (1 名につき (5)WC_STA 条件と (3)HC_STA 条件を 6 試行, その他の条件は 4 試行). 参加者は HMD を使用した経験はない. 1 名に対して約 20 分要した. 平均身長は 160.5cm, 標準偏差 7.7cm であった.

5.1.3 結果

図 12 に各条件におけるパーソナルスペース距離の結果を示す. また Friedman 検定により条件間に有意性があることを確認した後 ($\chi^2 = 23.4, p < 0.001$), Wilcoxon の符号付順位検定により多重検定を行なった. なお p 値調整については Benjamini-Hochberg 法を用いて, False Discovery Rate (FDR) の基準値を 0.10 とし調整を行なった.

(5)WC_STA と (4)HC_SIT 条件 ($p = 0.123$), ならびに (4)HC_SIT と (3)HC_STA 条件 ($p = 0.093$), (2)EYE_SIT と (1)EYE_STA 条件 ($p = 0.05$) において有意差は認められなかった. 一方で, (5)WC_STA 条件と比較した時, (3)HC_STA 条件 ($p = 0.025$), (2)EYE_SIT 条件 ($p = 0.017$), (1)EYE_STA 条件 ($p = 0.012$) との間に有意差が認められた.

(5)WC_STA と (4)HC_SIT: 腰部にカメラを装着し, 直立した状態で実験実施者を観察する (5)WC_STA 条件において最も大きいパーソナルスペースが観察された (平均 114.1cm, 標準偏差 34.9cm). 頭部にカメラを装着し着座した条件 (4)HC_SIT でのカメラの高さは, (5)WC_STA 条件と同じであった. 両条件間に有意差は認められなかったが, (5)WC_STA 条件下において実験実施者の身体がより大きく感じられたと報告した例があった.

直立条件 STA と着座条件 SIT: 裸眼の 2 条件間 ((1)EY_STA と (2)EYE_SIT) と, HMD を頭部に装着した 2 条件間 ((3)HC_STA と (4)HC_SIT) を比較した時, 直立した条件よりも着座した条件でより大きいパーソナルスペースが観測された.

体験に対する主観評価: 実験後に (5)WC_STA 条件

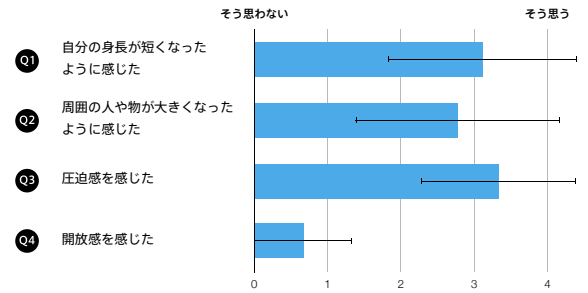


図 13 主観評価結果
Fig. 13 Likert Questionnaire and Results

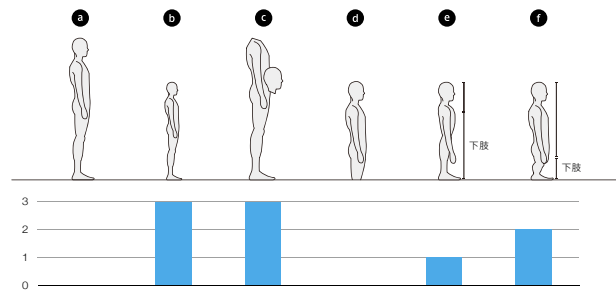


図 14 身体知覚アンケート結果
Fig. 14 Body Representation Questionnaire

による小児体験に対する主観評価を実施した. 図 13 に質問項目と 5 段階のリッカート尺度による回答 (0=そう思わない, 4=そう思う) を示す. 自分の身長が短くなったように感じた (Q_1) に対して平均 3.33 (標準偏差 1.05), 周囲の人やものが大きくなったように感じたか (Q_2) に対して平均 2.77 (標準偏差 1.39) と回答があった. また Q_3 及び Q_4 から, 開放感 (平均 0.67, 標準偏差 0.67) よりも圧迫感 (平均 3.33, 標準偏差 1.95) を感じたとする傾向が認められた.

身体知覚に対するアンケート: 実験後に (5)WC_STA 条件による小児体験時の実験参加者の身体知覚についてアンケート調査を行なった (図 14). 本アンケートでは回答紙面上に異なる 6 種類の身体図形が予め図示されており, 実験参加者は最も近いと感じた身体図形を選択する. 6 種類の身体図形以外の状態について回答する場合は「その他」の空欄に描き込むことができるが, 今回の実験では全ての実験参加者が予め図示された図形から選択した. 図示した 6 種類の身体図形は次の通りである. (a) 変化がなかった (b) 身体全体が小さくなったように感じた (c) 頭部のみが腰部へ移動したように感じた (d) 下肢が地面に埋まっているように感じた (e) 上半身が縮んだように感じた (f) 下半身が縮んだように感じた.

実験参加者のうち 6 名が身体全身のスケールに変化があったと感じたと報告し, 3 名が頭部位置のみに変化があったと感じたと報告した.

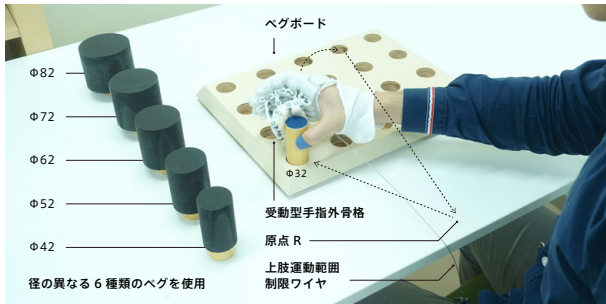


図 15 ペグテスト実験: 概要
Fig. 15 Peg Test Experiment: Setup

5.2 手指把持機能評価

次に、開発した受動型手指外骨格使用時の手指把持機能について評価を行う。人の手指機能は手指や筋といった物理的特性に基づく運動機能と、リーチング計画や把持方法といった運動計画機能の影響を受ける。運動機能は生活年齢（実年齢）に、運動計画機能は発達年齢に対応する。本論文では開発した外骨格装着時の使用者の手指運動に関わる物理的・認知的機能の両方を観察し、使用者に対する認知的負荷が増加せずに運動機能のみを変容できているかを評価することで、エンドユーザが使用するツールとして適しているか検討する。ペグボードを用いた手指機能評価は主にリハビリテーションの分野において様々に行われており、小児によるペグ移動時間と生活年齢の関係や [20]、把持力とペグ移動時間の関係について報告した例などがある。本実験では同様の環境を利用して、ペグの移動ルートを固定した状態で外骨格・手指使用時のペグの移動時間を計測、比較検討することで把持機能の評価する。外骨格使用時にペグ径の増大に伴いペグ移動時間が増加する時、把持機能の低下が示唆される。

5.2.1 実験手順

図 15 に実験構成を示す。20 個のペグ穴を有するペグボード（SOT2101, 酒井医療社製）を用いる。ペグ寸法は直径 32mm×高さ 20mm で、ペグボードの寸法は横 380mm×高さ 305mm である。ペグ径を変更するため、既存のペグ径を大きくするアダプタを 5 種類造形し計 6 種類のペグを用意した（ $\phi 32, 42, 52, 62, 72, 82\text{mm}$ ）。実験参加者は始め外骨格を装着した手指を原点 R におき、ペグを P_0 から P_1 へ移動させ設置した後、再び手指を原点 R に戻す。復路も同じ経路で行う（図 16(a)）。外骨格装着時、上肢運動範囲制限のためカラビナ付きワイヤを実験参加者のベルトループに取り付け、リーチング動作において上腕運動だけでなく上体姿勢の変更を必要とするインタラクションを再現する。実験参加者が原点 R からペグを移動した後、再び原点 R に手指を戻すまでの時間をストップウォッチにより計測し、ペグ移動時間と定義する。

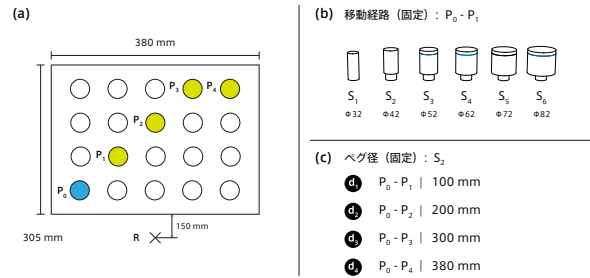


図 16 ペグテスト実験: ペグ径・経路条件
Fig. 16 Peg Test Experiment: Conditions

5.2.2 実験参加者

健常な 6 名の実験参加者（男性 5 名、女性 1 名）が参加し、計 360 回試行した（外骨格を装着した状態としない状態で 6 種類のペグに対して 5 試行実施）。平均年齢は 24.3 歳、標準偏差は 1.89 歳であった。参加者は利き手を使用することとし、開始前に 2 分間外骨格を試用し、最も径の小さいペグ S_1 を支障なく把持・移動できることを確認した。参加者は開発した外骨格を使用した経験はない。1 名につき約 20 分要した。

5.2.3 結果

ペグ径と手指・外骨格使用時における平均移動時間の関係を図 17 に示す。1 名の参加者については外骨格使用時にペグ S_6 を把持することができなかったため計測値から除外した。ペグ S_5 と S_6 を移動中に落とした参加者 1 名については計測値に含めた。参加者が外骨格を使用せずに自身の手指を用いてペグを移動する時、ペグ径の種類に関わらず移動時間は一定であった。一方、参加者が外骨格を使用して手指運動のスケールを縮小した時、ペグ径が大きくなるほど平均移動時間が増加する傾向が認められた。図 17 中の折れ線は外骨格使用時と手指使用時の移動時間差を示す。

5.3 手指運動計画機能評価

次に、ペグ径を固定した状態で、移動経路を変更した時のペグ平均移動時間を観察することで外骨格使用による実験参加者の運動計画に対する影響を観察する。外骨格使用時にルート長の増大に伴いペグ移動時間が増加する時、運動計画機能の低下が示唆される。

5.3.1 実験手順

前実験と同様のペグボード環境を用いる。また外骨格と実験参加者のベルトループをワイヤで接続する。本実験ではペグ S_2 ($\phi 42\text{mm}$) のみを用い、 (d_1) $P_0 - P_1$ 間、 (d_2) $P_0 - P_2$ 間、 (d_3) $P_0 - P_3$ 間、 (d_4) $P_0 - P_4$ 間を経路としてペグを移動する（図 16(c)）。

5.3.2 実験参加者

前実験と同様に健常な 6 名の実験参加者（男性 5 名、女性 1 名）が参加し、計 240 回試行した（外骨格を装着した状態としない状態で 4 種類の経路に対して 5 試行

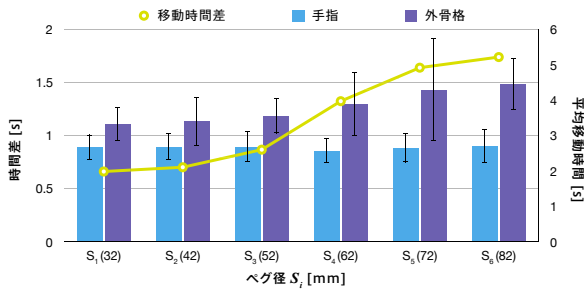


図 17 ペグテスト実験: ペグ径と平均移動時間
Fig. 17 Peg Size and Movement Time

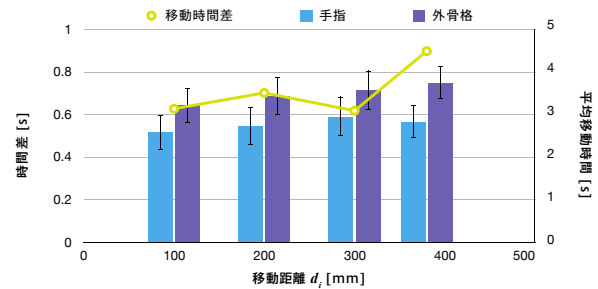


図 18 ペグテスト実験: ペグ経路と平均移動時間
Fig. 18 Peg Route and Movement Time

実施)。実験参加者は本実験実施前に外骨格を約 20 分程度使用している。1 名につきおよそ 20 分を要した。

5.3.3 結果

ペグ移動経路と手指・外骨格使用時における平均移動時間の関係を図 18 に示す。全ての実験参加者において外骨格使用時の平均移動時間が手指を用いた時よりも長くなったが、単調増加の傾向は認められなかった。経路 d_4 において外骨格使用時の移動時間に増加が認められた。この経路条件においては、上肢可動範囲制限のワイヤーによりペグへの到達が困難であり、姿勢を変更する必要があるといった様子が確認された。

6 考察

6.1 視点変換デバイス性能評価

これまでに VR 空間において自身の身体動作を反映したアバターに対する運動主体感と自己保持感は描画遅延時間が 125ms を超えたとき低下し始め、300ms を超えたとき悪化するとして報告がなされている [21]。本システムにおける画像取得から HMD 提示までの時間は平均して 108.1ms であることから、装着者の自身の身体動作に対する違和感は小さいことが示唆された。

6.2 受動型外骨格性能評価

結果より、実装した機構は想定した角度倍率と概ね同じ値で動作し、外骨格を通して物体をつまみ上げられることが明らかとなった。外骨格の第一関節及び第二関節について、シミュレーションとほぼ同じ傾向で使用者の手指動作がより大きくするよう手指リンク C が駆動していることがわかった。第一関節における角度倍率の実測値がシミュレーション値よりも大きいのは、第一関節に貼付した柔軟な皮膚シートが第二関節の皮膚シートと干渉した際に変形するなどして、本来よりも少し広い範囲まで手指リンク C が駆動したためであると考えられる。第三関節について実測値がシミュレーション値よりも下回ったのは、手指リンク C_1 とスライダの摩擦によるものであると考えられる。スライダは y 軸方向にスリットの入った部品で、手指リンク C_1 とボールジョイントを接続するリンクを通す。

人の手指は手のひらの中心に向かって屈曲するため、それぞれの手指の方向に合わせてスライダを x 軸方向に回転することで、手指リンク C の屈曲方向と合致させることができる。このスライダの回転角と手指の屈曲方向が完全に一致しない場合、手指リンク C_1 とボールジョイントを接続するリンクとスライダとの間に摩擦が発生する。今後はそれぞれの手指の屈曲方向をモーションキャプチャシステムなどを用いてより正確に計測し、摩擦を小さくすることで改善したい。

6.3 パーソナルスペース評価

(5)WC_STA 条件: 実験参加者が直立した状態で腰部から実験実施者を観察した時、最も大きなパーソナルスペースが計測された ((5)WC_STA)。同様に直立した状態で頭部にカメラを装着した条件 ((3)HC_STA) と比べてとき、有意にパーソナルスペースが大きくなったことから、実空間における視点位置の変更が対人距離感を変容させたことが示唆される。裸眼条件 EYE と HMD 条件 HC において着座した条件 SIT と直立した条件 STA の間に有意差は見られなかった。これは視覚情報と姿勢の間に空間的・感覚的整合性が保たれていることから、自身の身体知覚に対して違和感や変容を感じなかったことが要因と考えられる。一方で (5)WC_STA 条件では低い視点からの視覚情報と直立姿勢の間に空間的・感覚的整合性が保たれていない。このことから、視覚情報と体性感覚情報の不整合が自身の身長知覚に影響し、パーソナルスペースの増大を誘発した可能性が考えられる。実験前に (5)WC_STA 条件で視点変換システムを試用中に、” (他者の存在が) 怖い”, あるいは” (視点がこれ以上高くならないことが) もどかしい” と報告した実験参加者が複数名いたことから、直立状態による下肢の体性感覚が、” 提示されている低い視点が最高点である” という感覚を増強させ、より圧迫感が強まった可能性が考えられる。これまでに、風景を反転しても距離の知覚は変化しないが、股のぞきをして姿勢と観察する風景の両方を反転させた時にのみその知覚が変容することが報告されており [22], 今後こうした姿勢の体性感覚情報が

視覚による人や環境の認知にどう影響するのか、詳しく調べてゆきたい。

直立条件 **STA** と着座条件 **SIT**: 有意差は認められなかったが、着座条件において実験実施者がより大きく見えたとする報告があった。これは視点の位置が直立時よりも低く、見上げる必要があることから圧迫感を感じやすい環境にあったことに加え、着座と直立条件では他者の接近に対し自身が応答するための運動のし易さが異なることが影響したと考えられる。

アンケート・行動観察結果: ユーザスタディの前後に、デバイスを試用し教室内を歩き回ってもらった。その際に、「壁に飾ってある園児が書いた絵が少し高い位置にあるから下からだと見辛い」といった指摘や、実験実施者の顔が高い位置にあることを見て驚く様子、「走って近づかれると怖そう」といった発言、他の保育士に大きな声で見下ろして掛け声をされたときに装着者が強い恐怖感を指摘する場面など、装着した人と周囲の人々の行動や態度に変化が見られ、小児体験の顕在化とその理解を示唆する行動やコメントが認められた。また身体図式の報告と設問に対する回答結果より、自身の身長が縮小したと感じたり、それに伴い周囲の環境の知覚に変化が生じることで、人や物に対して普段持つことがなかった感覚が生じたことが示唆されることから、小児視点による保育空間の印象評価や小児の知覚様式の学習を主体的・身体的に行うことが可能であることが示唆された。

6.4 手指機能評価

外骨格使用時の手指機能の計測によりペグ径の増大に合わせて把持機能が低下したことが認められた。これはリンク機構による手指寸法の縮小や、母指の可動範囲制限により把持できる物体の大きさに制限が生じたものであると考えられる。一方、ペグ移動経路を変えて実施した実験より、装着者の運動計画は保存されていることが示唆された。開発した外骨格はリンク機構を用いているため手指による入力と外骨格の出力の対応関係が明瞭である上、手指動作伝達の時間遅れが小さいことや、力覚帰還の時間的・感覚的整合性が高いことから、使用者は外骨格の動作モデルについて推定する必要なく使用することができたと考えられる。実験後に実験参加者に「外骨格を動かすことと、ペグを掴むことどちらに集中したか」を聞いたところ、全員がペグを掴むことに集中したと回答したことから、実験参加者は実験中外骨格の制御に対して大きな認知の負荷を感じることはなかったことが期待される。

7 まとめと今後の展望

本研究では自己主体的な小児体験を提供する身体性変換スーツの視点変換システムおよび受動型手指外骨

格の構成の変更を行い、これらの性能評価実験とフィールドスタディ、およびユーザスタディを行なった。新たな視点変換システムでは従来使用していたパンチルト機構の代わりに魚眼カメラモジュールを用いることで本体容積を削減し、腰部とカメラモジュールの距離を小さくすることで空間的整合性を向上させた。保育園でのパーソナルスペース計測実験によって、提案する身体変換によって小人感が増強されていることが明らかになった。新たな受動型手指外骨格では四節リンクの状態を把持動作の影響を受けずに維持できるようにリンクを追加・変更することで、従来と比べ物体を把持しやすくなった。ペグボードを用いた手指機能評価によって外骨格使用時に装着者の把持機能が減少した一方、運動計画に関する機能は保存されていることが明らかになった。これによって、使用者の認知負荷の増加なしに人々が小児の運動機能をもって人や空間環境とインタラクションできる可能性が示唆された。

今後は複数のカメラを用いて頭部の回転中心を一致させる手法 [23] を導入することなどを検討したい。

参考文献

- [1] Uday Dandavate, Elizabeth B N Sanders, and Susan Stuart. 2016. Emotions Matter: User Empathy in the Product Development Process. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 40, 7: 415-418.
- [2] 森 宏樹, 郷木 義子. 2014. 高齢者疑似体験による教育学部学生の高齢者に対する意識の変化, 就実論叢, Vol.43, pp.263-272
- [3] Joseph F. Coughlin, "Development of an Older Adult Empathy System to Assess Transit and Livability", 2013
- [4] Jun Nishida and Kenji Suzuki. 2017. bioSync: A Paired Wearable Device for Blending Kinesthetic Experience. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '17)*. ACM, New York, NY, USA, 3316-3327.
- [5] 井田 志乃, 山中 敏正, 2000. 目線の違いによる環境装置のユニバーサル性について, 日本デザイン学会研究発表大会概要集
- [6] Emilie Loup-Escande, Jean-Marie Burkhardt, Herve Christofol, Simon Richir. 2010. A Decision-making Help Tool in Innovative Product Design. *Journal of Decision Systems*. 19(1), pp.9-31.
- [7] Kim, Jangyoon and Interrante, Victoria. 2017. Dwarf or Giant: The Influence of Interpupillary Distance and Eye Height on Size Perception in Virtual Environments. *International Conference on Artificial Reality and Telexistence and Eurographics Symposium on Virtual Environments*.
- [8] Jun Nishida, Hikaru Takatori, Kosuke Sato, and Kenji Suzuki. 2015. CHILDHOOD: wearable suit for augmented child experience. In *ACM SIGGRAPH 2015 Emerging Technologies (SIGGRAPH '15)*. Article 7
- [9] Jun Nishida, Hikaru Takatori, Kosuke Sato, and Kenji Suzuki. 2015. CHILDHOOD: Wearable Suit for Augmented Child Experience. In *Proceedings*

of the 2015 Virtual Reality International Conference (VRIC '15). Article 22, 4 pages.

- [10] 佐藤 綱祐, 西田 惇, 高島 光, 鈴木 健嗣. 2017. CHILD-HOOD: 小児の体験を再現する装着型身体性変換スーツ, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌
- [11] Domna Banakou, Raphaella Groten, and Mel Slater. 2013. Illusory ownership of a virtual child body causes overestimation of object sizes and implicit attitude changes. PNAS 2013 110 (31). 12846-1285.
- [12] Ana Tajadura-Jimenez, Domna Banakou, Nadia Bianchi-Berthouze, and Mel Slater. 2017. Embodiment in a Child-Like Talking Virtual Body Influences Object Size Perception, Self-Identification, and Subsequent Real Speaking. Nature Publishing Group 7, 1: 9637.
- [13] Iachini T, Coello Y, Frassinetti F, Ruggiero G. 2014. Body Space in Social Interactions: A Comparison of Reaching and Comfort Distance in Immersive Virtual Reality. PLOS ONE 9(11): e111511.
- [14] Bertrand Philippe, Daniel Gonzalez-Franco, Arthur Pointeau, and Christian Chereche. 2014. The Machine to be Another - Embodied Telepresence using human performers. Prix Ars Electronica (2014).
- [15] Ehrsson, H. Henrik. 2007. The Experimental Induction of Out-of-Body Experiences. Science. Vol.317. No.5841. 1048-1048.
- [16] van der Hoort B, Guterstam A, Ehrsson HH. 2011. Being Barbie: The Size of One's Own Body Determines the Perceived Size of the World. PLoS ONE 6(5): e20195.
- [17] Hall, Edward T. 1969. The hidden dimension. Garden City, N.Y.: Anchor Books.
- [18] Dorsey, M., Meisels, M. 1969. Personal space and self-protection. Journal of Personality and Social Psychology. 11, 93-97.
- [19] Tannis, G., and Dabbs, J. 1975. Sex, Setting and Personal Space: First Grade Through College. Sociometry, 38(3), 385-394.
- [20] Gloria R. Gogola, Paul F. Velleman, Shuai Xu, Adrienne M. Morse, Barbara Lacy, Dorit Aaron. 2013. Hand Dexterity in Children: Administration and Normative Values of the Functional Dexterity Test. The Journal of Hand Surgery, Volume 38, Issue 12, 2426-243.
- [21] Thomas Waltemate, Irene Senna, Felix Hulsman, Marieke Rohde, Stefan Kopp, Marc Ernst, and Mario Botsch. 2016. The impact of latency on perceptual judgments and motor performance in closed-loop interaction in virtual reality. In Proceedings of the 22nd ACM Conference on Virtual Reality Software and Technology (VRST '16). ACM, New York, NY, USA, 27-35.
- [22] Atsuki Higashiyama, Kohei Adachi. 2006. Perceived size and perceived distance of targets viewed from between the legs: Evidence for proprioceptive theory, Vision Research, Volume 46, Issue 23, 3961-3976
- [23] S. Tachi, K. Watanabe, K. Takeshita, K. Minamizawa, T. Yoshida and K. Sato. 2011. Mutual telexistence surrogate system: TELESAR4 - telexistence in real environments using autostereoscopic immersive display -. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, San Francisco, CA, 2011, pp. 157-162.

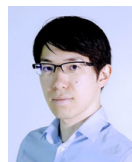
謝辞

本研究は日本学術振興会特別研究員奨励費（課題番号 16J03777）の助成を受けた。本実験の一部は社会福祉法人悠和会ゆめの森保育園の協力を得て実施した。

(2018 年 3 月 12 日受付)

[著者紹介]

西田 惇 (学生会員)



2014 年筑波大学理工学群工学システム学類卒業。現在同大学院グローバル教育院一貫制博士課程在学中。2016 年より日本学術振興会特別研究員 (DC1)。ヒューマンインタフェースとインタラクションの医用・教育応用に関する研究に従事。

松田 壮一郎



2010 年慶應義塾大学文学部心理学専攻卒業。日本学術振興会特別研究員 DC1, PD を経て、筑波大学システム情報系研究員、現在に至る。応用行動分析、アイトラッキング、感情認知の研究に従事。博士 (心理学)。

大木 美加



1999 年早稲田大学理工学部環境資源工学科卒業。産業技術総合研究所、筑波大学リサーチ・アドミニストレータ業務を経て、2018 年より筑波大学システム情報系研究員。ソーシャル・イメージングに関する研究に従事。修士 (工学)。

高島 光 (学生会員)



2014 年筑波大学理工学群工学システム学類卒業。現在同大学院グローバル教育院一貫制博士課程在学中。没入ディスプレイに関する研究に従事。

佐藤 綱祐 (学生会員)



2014 年筑波大学理工学群工学システム学類卒業。現在同大学院グローバル教育院一貫制博士課程在学中。スポーツ工学に関する研究に従事。

鈴木 健嗣 (正会員)



1997 年早稲田大学理工学部物理学科卒業。早稲田大学助手、筑波大学講師、准教授を経て、2016 年筑波大学システム情報系教授、現在に至る。人工知能、人工支援ロボティクス、および人工現実感に関する研究に従事。博士 (工学)。