

# CHILDHOOD: 小児の体験を再現する 装着型身体性変換スーツ

佐藤 綱祐\*<sup>1</sup> 西田 惇\*<sup>1,3</sup> 高鳥 光\*<sup>1</sup> 鈴木 健嗣\*<sup>2</sup>

CHILDHOOD: Wearable Suit for Augmented Child Experience

Kosuke Sato\*<sup>1</sup>, Jun Nishida\*<sup>1,3</sup>, Hikaru Takatori\*<sup>1</sup> and Kenji Suzuki\*<sup>2</sup>

**Abstract** --- In this research we propose a wearable suit for embodiment transformation, which virtually realizes a child's experience while preserving the user's interactions and perceptions. The embodiment transformation suit consists of a viewpoint translator and passive hand exoskeletons. The viewpoint translator simulates a child's point of view (POV) by using a pan-tilt stereo camera attached at the waist position and a head mounted display (HMD). The pan-tilt mechanism follows the user's head behavior. The passive hand exoskeletons simulate a child's tiny grasping motion by using multiple quadric crank mechanisms and a child-size rubber hand. Virtualized child's embodiment through our own body will provide opportunities to feel and understand a child's perception and recognition, to evaluate products and spaces such as hospitals, public facilities and homes from the aspect of universal design. This paper describes the system design and implementation of the viewpoint translator and the exoskeletons, and assessment of them based on user's feedback in exhibitions.

**Keywords:** Universal Design, Embodiment Transformation, Viewpoint Translator, Passive Hand Exoskeleton

## 1 はじめに

超高齢社会をむかえた日本において、ユニバーサルデザインの重要性がより高まっている。ユニバーサルデザインは「できるだけ多くの人々が利用可能であるように製品、建築、空間をデザインすること」として R.Mace によって提唱された[1]。近年、高齢者[3]や子ども[4,5]、車いす使用者[6]、片麻痺患者[7]、義足者[8]など、様々な身体状況・認知状況にある人達の支援を円滑に行うために、作業従事者などで体験的に彼らの状況を理解しようとする取り組みが増加している。

社会における相互理解を高めるためには、他者による体験や利便性を可能な限り想定することが重要である。これを実現するために、想定が難しい他者の身体機能を疑似的に体験する試みがある。例えば「疑似体験セット まなび体 (特殊衣料社製)[2]」は、高齢者の身体の機能を学ぶための学習用教材であり、高齢者疑似体験を通じて高齢者の身体的特徴の理解だけでなく、高齢者の心情理解を促す教育効果があると報告されている[3]。また車椅子搭乗者のための研究として、車椅子で



図 1 CHILDHOOD 装着概要

Fig. 1 Overview of wearing style of CHILDHOOD

のスロープ走行時の身体的負荷を計測することで、路面の評価や車いす搭乗者が通行しやすい経路へ案内する方法などに応用できることが報告されている[6]。さらに片麻痺患者の体験を健常者に提示する研究として、彼らが歩行時に感じる運動と知覚の不整合性を体験できるシステムが挙げられる。本システムは、理学療法士や看護師など医療従事者の育成に有効であると報告されている[7]。これらの研究は共通して、体験者が自身の身体動作を通して対象者の身体を体験しているため、対象者体験の再現性が高いといえる。

一方で、子どもの身体状況を理解するためにいくつか

\*1 筑波大学グローバル教育院

\*2 筑波大学大学院システム情報系

\*3 日本学術振興会

\*1 School of Integrative and Global Majors, University of Tsukuba

\*2 Faculty of Engineering, Information and Systems, University of Tsukuba

\*3 JSPS Research Fellow

の試みがなされている。小型ビデオカメラを用いて低い視線から店舗や交通機関などの環境装置を観察する試み[4]やコンピュータグラフィックスを用いて店舗を作り出し、子ども視線での映像をシミュレーションする研究[5]が挙げられる。子どもの視点からこれら現実世界での環境装置やバーチャルな世界を見ることにより、実環境において、目の前の視界がふさがれるシチュエーションが多いなどの問題点が明らかになったことが報告されている。また、これらの子どものための研究は共通して、低い視点からの映像を観察し評価を行うことを目的としているが、観察者の身体動作を反映しておらず、また外界とのインタラクションがない。先行研究で開発されたシステムは、限られた環境下での子どもの体験を試みることは可能であるが、主体的に外界と相互作用する感覚を得ることは困難であり、大人と身体特性の異なる子どもの体験の再現が十分になされてきたとはいえない。

そこで本研究では、装着型デバイスを用いて子どもの体験を再現する”CHILDHOOD”[9]を提案する。本システムでは、子供の知覚体験のうち、世界を認知するために必要不可欠である視覚と、人やモノと相互作用するための触力覚を、装着者の身体上で再現することを目指す。

以下本論文では、2章で全体システムの概要について述べ、3章で子どもの視覚を再現する視覚変換装置を、4章で触力覚を再現する受動型手指外骨格のシステムの提案・設計・実装について述べる。5章では各システムの動作評価、6章でデモ展示を通じて得たユーザフィードバックについて議論し、7章で全体を通じた考察を行う。

## 2 コンセプトとシステム概要

一般的に人間は自らの身体を能動的に動かすことで外界との間に生じる多感覚の相互作用を通じ、自己と外界の存在を知覚認知している。子どもの体験を再現するためには、子どもの身体的特性に合わせて装着者のそれを変換する必要がある。しかし、子どもの身体は大人に比べて小さい。そこで子どもの身体的特性を再現する要素として視点と手指に着目し、装着型デバイスを用いた”CHILDHOOD”を提案する。これは、装着者の認知的特性を可能な限り保ちながら身体的特性のみを変換することで、子どもの体験を再現する試みであるといえる。

提案システムを装着した様子を図1に示す。システムは、腰部に取り付けた、頭部回転運動を再現するパンチルト機構およびステレオカメラ、ユーザの頭部動作を取得し映像を提示するヘッドマウントディスプレイ、小児の手指動作を再現するための手指外骨格機構、上腕および母指の可動域制限機構からなる。視覚変換装置により、装着者の頭部回転運動を子どもの視点回転運

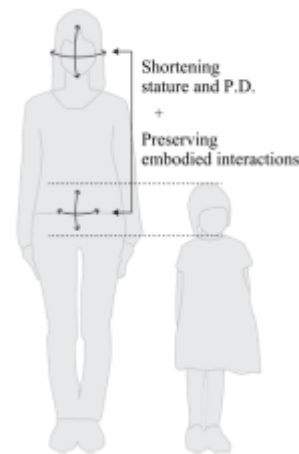


図 2 視覚変換機構のコンセプト

Fig. 2 Conceptual representation of the viewpoint translator

動として適用することで視覚の変換が可能になる。また、手指外骨格機構により、装着者の手指動作を子どもの動作に変換することが可能になる。本システムを用いることで、病院や保育園、公園、店舗といった公共空間における建築物や、おもちゃ・日用品といった製品のユーザビリティについて、専門家や大人自身が理解することを支援できると考えている。また、建築/製品設計者が本デバイスを用いて設計・製作・評価を行うことでユニバーサルデザインの推進に寄与することに留まらず、幼稚園教諭/保育士や医療従事者のための子どもに対する理解の支援にも効果があると期待される。

## 3 視覚変換装置

### 3.1 システム構成

大人の視点を子どもの視点に変換するためには、①視点位置を低くすること、②瞳孔間距離 (Pupillary Distance : P.D.) を小さくする必要がある。一方で頭部回転運動は、装着者の頭部回転運動をそのまま子どもの視点回転運動として適用することで視覚を変換する(図2)。これらの設計思想の下、視覚変換機構は次の4つの要素で構成する。小児の目の位置での見えを取得するためのステレオカメラ、ユーザの頭部回転運動をカメラに伝えるパンチルト制御機構、ユーザの頭部動作の取得と映像提示を同時に行うヘッドマウントディスプレイ、以上の処理を行うシングルボードコンピュータからなる。

#### ステレオカメラ

両眼視差をもつ映像の生成のために、ステレオカメラシステムを作成する。カメラは PlayStation Eye (Sony Interactive Entertainment LLC) を用いる。本カメラは W640×H480 画素の画像を 60fps で取得可能である。2台のカメラに対し、ヘッドマウントディスプレイ(HMD)での表示に適した広角レンズを用いる。レンズ間距離に相当する視差は、対象とする子どもの身体特性に応じて変更できるようにする。ここでは、カメラケースを物理的

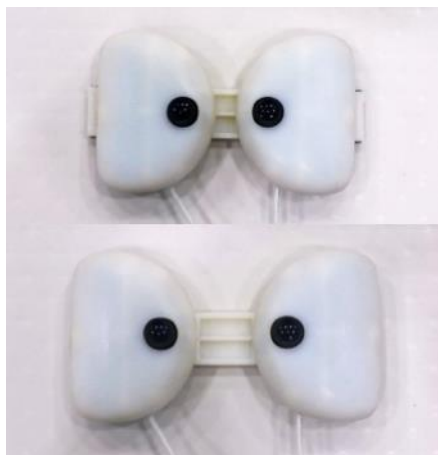


図 3 ステレオカメラのレンズ間距離変更例  
(上:45mm/下:65mm)

Fig. 3 Example of changing the distance of the lenses  
(Upper: 45mm / Lower: 65mm)

にスライドできるように調整レールを製作する。カメラをそれぞれ 90 度回転させた状態でレールに取り付け、取得した画像を横に並べることで Side-By-Side 形式の立体映像として表示する。したがって最終的な解像度は 960 × 640 画素となる。この調整レールによって、45mm から 120mm まで連続的にレンズ間距離を変更できる。レンズ間距離の変更例を図 3 に示す。また、レール裏面には、面ファスナを取り付ける。これにより、対となる面ファスナをとりつけた HMD の前面、およびパンチルト制御機構の前面にステレオカメラを装着できる。

#### パンチルト制御機構

頭部回転運動を再現する仕組みとして、腰部に装着するベルト型パンチルト制御機構を製作する。ここで、実世界での垂直上方向を軸とする回転をパン回転、首の傾き方向の回転をチルト回転とする。首部が有する自由度を完全に再現するためには、パンチルトの 2 軸に加えロール方向、すなわち首をかしげる方向の回転軸も必要となる。しかし、3 軸制御のためにモータを 3 台実装するとアーム部分の重量が増加し、腰部装着時に装置正面が下方へ向く原因となる。また大きな慣性による首振り動作時のゆれの増大要因ともなる。このため、3 軸ではなくより軽量の 2 軸での実装とする。これにより、左右方向(パン)、上下方向(チルト)の頭部回転運動を腰部で再現可能となる。本機構は小型デジタルサーボモータ 2 機(Futaba RS303MR, BigNuts BN2331M)と、マイクロコントローラ(Arduino micro)、慣性計測チップ(MPU-9150)、サーボモータ用バッテリー(ROBO パワーセル F2-850)から構成する。製作した機構を図 4 に示す。本機構の前面に上記ステレオカメラシステムを装着する。

#### ヘッドマウントディスプレイ(HMD)

頭部回転運動の計測、およびステレオカメラから取得した映像を提示するため HMD(Oculus Rift DK2)を使用

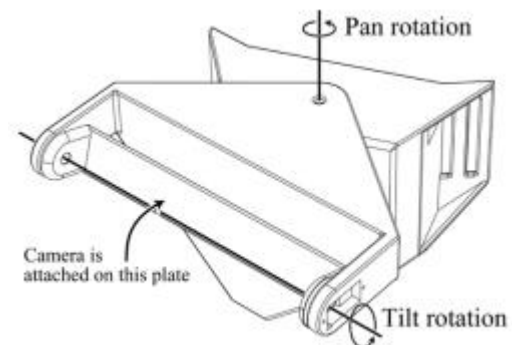


図 4 パンチルト機構概観(上)  
回転方向とカメラ装着位置(下)

Fig. 4 Overview of the pan-tilt system (Upper)  
Rotating axis, and plate for attaching camera (Lower)

する。

#### シングルボードコンピュータ(SBC)

パンチルト制御機構にはマイクロコントローラを用い、ステレオカメラの画像取得、HMD を制御するためにシングルボードコンピュータ(LIVA, Elitegroup Computer Systems)を用いる。本システムは、カメラおよび HMD のドライバが動作する環境として、OS に Windows 8 を採用する。また本 SBC は、モバイルバッテリーを用いることで、電源供給の無線化が容易である。

#### 3.2 処理の流れ

頭部回転運動計測から画像提示までの一連の処理は SBC、およびマイクロコントローラ上で行う。処理の流れを図 5 に示す。SBC では、取得したステレオ画像に基づき、HMD において Side-By-Side の立体映像として表示する処理スレッド A、さらに HMD からの頭部姿勢情報を取得しマイクロコントローラに送信するスレッド B の計 2 スレッドが動作する。マイクロコントローラにより、装着者の腰部の姿勢を随時取得するとともに HMD で得られた頭部姿勢との差を求めることで、腰部に対する頭部の回転量を算出する(図 6)。これをパンチルト制御機構におけるモータ指令値に変換し、腰部にて頭部の回転運動を再現する。1 ループの処理時間は 20ms であった。

以上の処理によって、この視覚変換機構は、装着者の頭部回転運動を保存しながら、視差と視点高さの変更を可能とする。

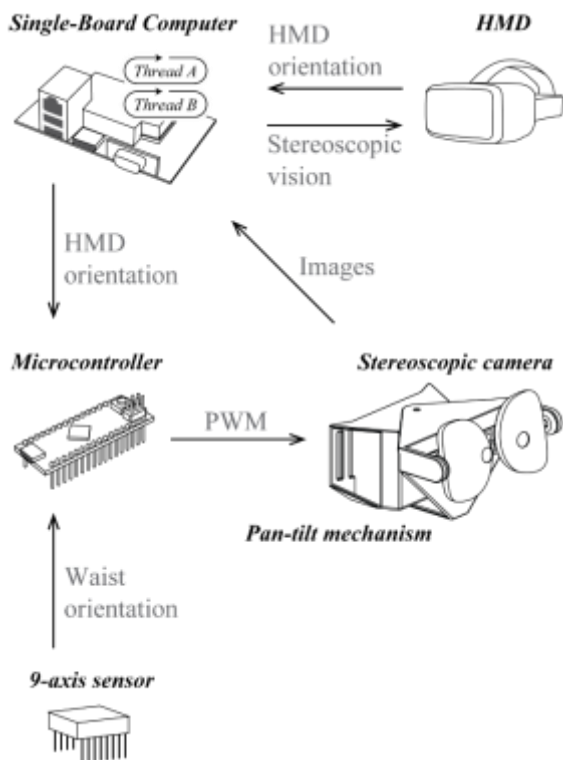


図 5 視覚変換装置における構成要素間の情報の流れ  
Fig. 5 Data flow between elements of the viewpoint translator

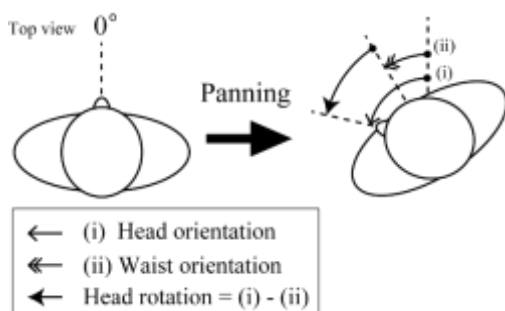


図 6 頭部回転運動の計算  
Fig. 6 Calculation of the head orientation

#### 4 受動型手指外骨格

##### 4.1 概要

ここでは、小児の上腕と手指の動作を再現するための手指外骨格について述べる。提案する外骨格は以下の機構部品で構成する(図 7)。

- 装着者の手指とリンク機構を接続するグローブ
- 大人の把持動作を縮小するリンク機構
- 5歳児の寸法で成形したラバーハンド
- 上腕と母指の可動域を制限するカラビナ付きワイヤ

提案する外骨格は電動部品を用いず、受動型リンク機構によりユーザの随意運動により駆動させる。これにより力覚帰還の生成において重要となる時間応答性を

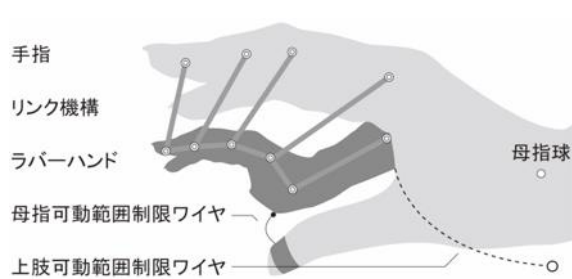


図 7 受動型手指外骨格のコンセプト  
Fig. 7 Conceptual representation of the passive hand exoskeleton

高める。リンク機構は装着者の指の把持動作により駆動し、先端に取り付けたラバーハンドに把持動作を伝達する。ラバーハンドの成形には一般社団法人人間生活工学研究センターが公開する5歳児の寸法を基に設計を行い、常温硬化型ウレタン樹脂[10]により成形する。

小児の上腕動作を擬似的に実現するために、手指外骨格と腰部のベルトループを70cmのカラビナ付きステンレス製ワイヤで接続し、可動範囲の制限を再現する。これにより普段手が届く場所に届かないといった体験を可能とする。なお母指にはリンク機構とラバーハンドを装着しない。これにより母指の皮膚感覚を保存することで触覚情報を補完する。なお親指サック付きの4cmのポリエステル製ワイヤを用いて外骨格と母指を接続することで可動範囲を制限し、小児の母指動作を擬似的に再現する。

##### 4.2 リンク機構モデル

図8に把持動作を縮小するリンク機構モデルを示す。リンク機構はT字型のリンク( $T_1, T_2, T_3$ )と、ラバーハンドに手指動作を与える3つの小型リンク( $C_1, C_2, C_3$ )、ボールジョイントに接続された3自由度を持つリンクで構成する。ここでは装着者の把持動作の自由度をできる限り保存しつつ、装着者の手指よりも小さいラバーハンドに手指動作を対応付けするリンク機構を設計する。まず、健康な20代男性1名の把持動作をモーションキャプチャシステム(V100:R2, OptiTrack Inc.)により計測し、モデルの妥当性をシミュレーションにより検証する。

T字型リンクは指の各関節間の長さに応じて造形する。1自由度のジョイントによりリンク間を接続し、装着者の把持動作を保存する。 $P_1$ を含むリンクはラバーハンドを示す。T字型リンクとラバーハンドを連結する際、このまま接着すると把持動作により発生するT字型リンク先端部の位置( $P_1, P_2, P_3$ )の移動( $traj_1, traj_2, traj_3$ )が行われないため、把持動作を行うことができない。そのため、これらの移動を吸収するスリットを持つリンク機構( $C_1, C_2, C_3$ )を設計する必要がある。T字型リンク先端部の位置( $P_1, P_2, P_3$ )は計測した手指関節角 $\theta_i$ 、関節間長 $l_i$ 、T字型リンク長 $d_i$ 、関節位置 $J_i$ を用いて次のように表す。

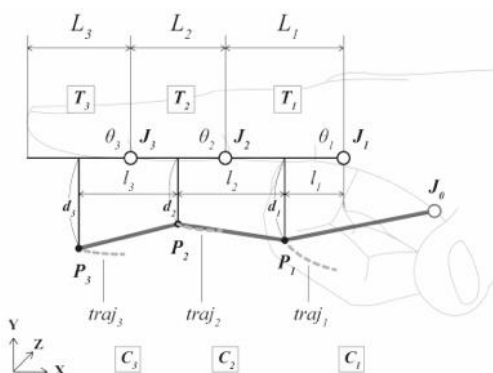


図 8 受動型手指外骨格のリンク機構モデル  
Fig. 8 Link Model of the passive hand exoskeleton

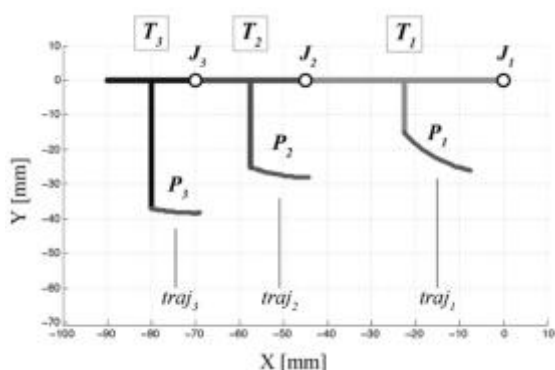


図 9 軌跡シミュレーションの結果  
Fig. 9 Result of the link simulation



図 10 手指リンク機構の概要  
Fig. 10 The drawing picture of the links



図 11 造形した手指外骨格  
Fig. 11 Overview of the developed exoskeleton

$$P_i(x, y) = \left( -\frac{1}{2}L_i \cos \theta_i + d_i \cos \left( \frac{\pi}{2} - \theta_i \right), \right. \\ \left. -\frac{1}{2}L_i \sin \theta_i + d_i \sin \left( \frac{\pi}{2} - \theta_i \right) \right) + J_i$$

人の手指動作における関節角変化を計測した結果に基づき、T字型リンク先端部の軌跡をシミュレーションした結果を図9に示す。縦軸および横軸は図8左下に示した座標系に従い、位置座標を示す。

これらの軌跡シミュレーションの結果を基に、把持動作に伴うT字型リンクの移動を実現する小型リンクを設計する(図10)。

リンク部品の寸法制限により、T<sub>1</sub>リンクのtraj<sub>1</sub>スリットは削除し、C<sub>1</sub>リンクと手指を3自由度のボールジョイントにより接続することでその機能を補完する。

## 5 システムの動作評価

視覚を変換する視覚変換装置、手指の把持動作を変換する受動型手指外骨格、それぞれのシステムにおける性能評価の方法と結果について述べる。

### 5.1 視覚変換装置

小児の視覚を再現するためには大人の頭部回転運動(首振り動作)に応じて、パンチルト制御機構が遅延なくかつ正確に追従する必要がある。そこでHMDの回転角に対する、パンチルト制御機構における2軸の回転角の追従性能を検証する。正面を向いた静止状態から、右方向に45度、上方向に40度、下方向に40度の3方向の頭部回転動作に対する腰部のパンチルト制御機構の追従性について評価実験を行う。予備実験から、各軸における可動域とオーバーシュートを考慮して、本実験の角度を設定した。

実験の流れを以下に示す。被験者に視覚変換装置を装着させ、視界を覆わないよう前額部にHMDを置く(図12)。これは、本実験の目的がパンチルト制御機構の追従性能を評価するためである。装着者に対し、正面を向いた状態から、あらかじめ目印を配置した上記3方向に向かって頭部回転運動を行うよう指示する。また首振り速度はできるだけ早く行うよう指示した。この時のHMD、パンチルト制御機構それぞれにおける回転角をモーションキャプチャシステムにより計測し、追従性能を評価した。本実験は20代の健常な男性1名を対象に実施した。

図13-15に、右方向45度、上方向40度、下方向40度それぞれの結果を示す。なお、左回転方向をパンチルト回転正方向、うなずき下方向をチルト回転正方向とする。パンチルト方向ともに、頭部回転運動に対してパンチルト制御機構が100ms程度の遅延で追従していることが見てとれる。

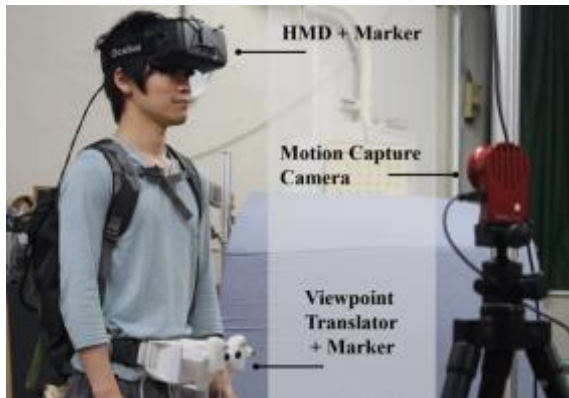


図 12 実験の様子

Fig. 12 Appearance in experiment

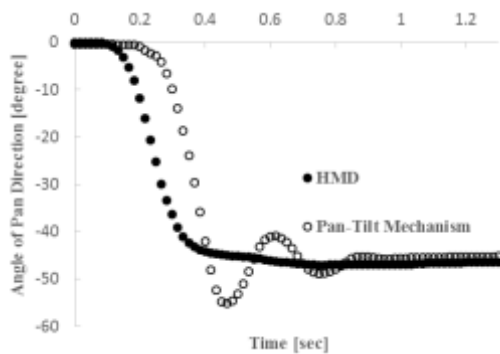


図 13 パン方向における追従性

Fig. 13 Following performance in the pan direction

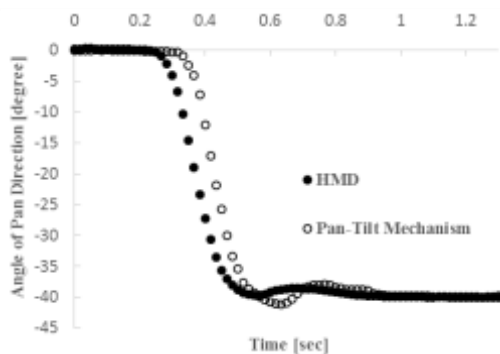


図 14 チルト(上)方向における追従性

Fig. 14 Following performance in the tilt(upward) direction

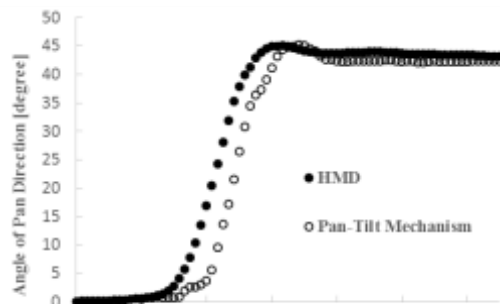


図 15 チルト(下)方向における追従性

Fig. 15 Following performance in the tilt(downward) direction

## 5.2 受動型手指外骨格

手指による把持動作の変換を評価するため、把持動作時の装着者の手指とラバーハンドの関節角変化を計測する。ここではモーションキャプチャシステムを用いて手指動作毎の関節可動域の変化について比較検討する。なお本実験では計測の簡便性を考慮し示指と母指を計測対象とする。小型マーカを示指(Index finger)と母指(Thumb finger), ラバーハンドの各関節部に貼付する。原点となるマーカは把持動作による位置変動が少ない示指と母指の線分の交点上にある母指球(Ball of the thumb)付近に設定する。20代の健常な男性1名を対象に実施した。結果を図16に示す。縦軸および横軸は図8左下に示した座標系に従い、位置座標を示す。

図16中右のBall of the thumbが母指球上に貼付したマーカ, 図16中上から装着者の示指の関節, ラバーハンドの示指の関節, 装着者の母指の関節の軌跡を示す。モーションキャプチャシステムによる観測が容易なことから装着者の示指, ラバーハンドの示指のみについて示す。結果より, 装着者の随意運動に基づいてリンク機構が駆動し, 把持動作に類似する屈伸運動が再現されていることがわかる。設計したスリット長  $traj_i$  よりも大きい関節角変化がなされたのは, ラバーハンドの伸縮によるものであると考えられる。

次に, 装着者とラバーハンドそれぞれの関節角の関連性を調べるため, 関節角の変化量を比較する。図17に示指の関節ごとの変化量の比較を示す。

結果より, まずPIP(第二)関節以外において伝達把持動作の拡大が認められた。これは構成するリンク機構がクランク機構に準ずる構成になっているため, 入力関節角が増幅され出力されていることに起因する。一方PIP(第二)関節の動作が拡大されず, MP(第三)関節の関節角変化よりも小さくなった。

## 5.3 考察

開発したパンチルト制御機構は, 頭部回転運動に対して100ms程度の遅延で追従しているが, 一般的に人が視覚の遅延を認識できるのは50msからで, 150ms程度が許容範囲といわれている[11]。しかしながら, パン方向は目標値に対するオーバーシュートが大きく, 減衰, 収束まで時間を要していることがわかる。これはパン軸における, 頭部と腰部における回転半径の差や, ステレオカメラの重量による慣性, またユーザの身体との密着度合いや衣服の動きが大きく影響していると考えられる。今後は, 機構の再設計やステレオカメラの軽量化, またデジタルサーボモータの制御方式をPWM方式からコマンド方式へと変更することで, 改善していきたい。

評価実験より, 装着者の示指とラバーハンドの示指の関節角変化の関連を明らかにした。これより装着者に必要な把持動作量が減少し, 必要な筋駆動とそれに伴う

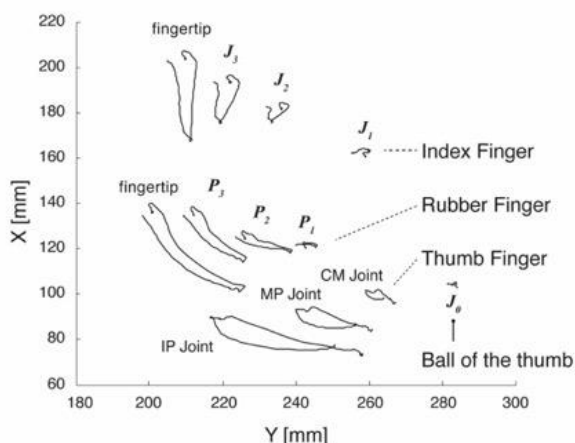


図 16 示指, ラバーハンドの示指, 母指の関節の軌跡  
 Fig. 16 The trajectories of the user's fingers and rubber hand

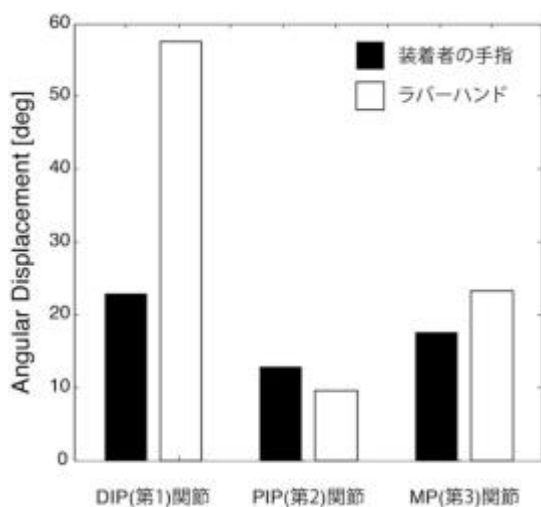


図 17 手指とラバーハンドの関節ごとの変化量の比較  
 Fig. 17 The comparison of angular displacement of each joint between the user's hand and the rubber hand

体性感覚の帰還量が縮小されているため、小児の把持動作の再現が行われていることが示唆される。一方 PIP(第二)関節の動作は拡大されず、MP(第三)関節の関節角変化よりも小さくなった。これはグローブと T 字型リンクの接着が不十分である場合、リンクの駆動によりグローブから T 字型リンクが数ミリ乖離し、モデルと異なる軌跡をとることが原因の一つとして考えられる。これについては、ゴムバンドによるリンクとグローブ、手指の密着性の向上やより弾性の低いグローブを用いることで改善すると考えられる。一方で異なる手指寸法を持つ多くの体験者に対応するためには、デバイスにある程度の弾性を持たせて物理的差異を吸収する必要がある。今後は寸法差異を吸収するための調整機構の導入などについて検討したい。加えて、ラバーハンドには本来滑り止めの役割を果たす指紋が無いため、把持物体が滑り落ちないように装着者が意図的に指先で強く掴むような



図 18 視覚変換装置体験の流れ  
 Fig. 18 Experience Flow of viewpoint translator



図 19 大人/子ども用のお碗把持  
 Fig. 19 Appearance of Grasping a bowl for adult / child

把持動作を行うことなどが認められたことから、ラバーハンドと生体の材質特性の違いが関節角の変化量に影響を与えたと考えられる。また、ラバーハンド内に骨格が存在しないことも正確な動作伝達を妨げる原因になっていると考えられる。装着者の手指の屈伸運動に応じてラバーハンドも屈伸運動を行うが、この際ラバーハンドの屈伸が一直線上にならない現象が認められる。人の手指は長い運動経験を経て関節部の皮膚表面に皮膚を折りたたむ仕組みが形成されているが、使用しているラバーハンドは掌形状が平坦なサーフェスデータを用いてウレタン樹脂で成形しており、前述のような機構がない。より再現度の高いラバーハンドを用いることで正確な手指の屈伸運動の再現が可能になると考えられる。

## 6 デモ展示によるシステム評価

### 6.1 システム評価方法

2014 年度に日本科学未来館で開催された「国際学生対抗バーチャルリアリティコンテスト (International collegiate Virtual Reality Contest: IVRC) 2014」において、「CHILDHOOD」のデモ展示を行った。

デモ展示における CHILDHOOD 体験の流れを以下に述べる。実際の体験において、視覚変換装置と受動型手指外骨格の装着は分けて行い、それぞれ順番にデバイスの効果を体験してもらった。

視覚変換装置の体験では、初めにステレオカメラ部を HMD に取り付け、カメラ間距離を装着者の瞳孔間距離と等しくすることで、通常の装着者の視点とした。まず

初めにこの状態で周りを見渡してもらうことで、カメラを通してHMDで世界を知覚することに対する違和感を取り除くようにした。その後、カメラ間距離を5歳児の瞳孔間距離の平均である5cmに近づけ[12]、ステレオカメラ部を装着者の視点からパンチルト制御機構部までゆっくりと下げた(図18)。この過程を通じて、急激な視点映像の差異が原因で生じる酔いを低減させるとともに[13]、身体が小さくなる過程を体験させた。その後は周囲の環境を回視してもらい、特に複数人の大人に囲まれる、大人と視線を合わせる、大人がしゃがんで視線を合わせる、といったインタラクションを促すようにした。

次に受動型手指外骨格の体験では片手のみ装着させ、玩具や日常生活用具を触る、握る、掴むなどの体験を通じて、物の把持感覚、特にスケールの変化を感じてもらうようにした。また体験の一部として大人用と子ども用のお椀(図19)の把持をしてもらい、その持ちやすさの比較検証を行った。

## 6.2 結果と考察

IVRC2014において500人を超える方々に対してデモ展示を行い、多くのフィードバックを得た。ここでの意見に基づき、2015年6月に東京ビッグサイトで開催された「第23回3D&バーチャルリアリティ展(IVR展)」におけるデモ展示で体験者にユーザ評価に関するアンケート調査を行った。体験者は21歳から75歳までの男女合わせて96名、各システムの平均体験時間はそれぞれ2分前後であった。体験者には表1に示す問1-6の6つの設問を5段階のリッカート尺度(1.全く同意できない, 2.同意できない, 3.どちらともいえない, 4.同意できる, 5.非常に同意できる)で回答してもらい、また自由記述も同時に回収した。

得られたアンケートから集計した、問1-6の5段階評価の結果を図20に示す。

問1では、回答数96人に対して4以上の評価を付けたのが94人(98%)であり、3が1人(1%)、2が1人(1%)の結果となった。これより、ほとんどの体験者が視覚変換装置によって自身の身長が低くなったように感じた、と報告していることが見てとれる。特に大人と視線を合わせるために首を大きく傾げる動作を必要とすることや、複数人の大人に囲まれた際、周辺の視野を覆われてしまうことが大きく影響していると考えられる。

問2の結果より、瞳孔間距離の縮小と視点の高さの変換によって空間知覚が変化する傾向が見られた。一般に、人の認知する空間の奥行き感は瞳孔間距離によって変化する。今回のユーザ評価では、結果では4以上の評価が51人(53%)に留まっていることから、瞳孔間距離のわずかな変位(20mm程度)による空間知覚の変化は大きくないといえる。一方自由記述において、「ただ単にしゃがむのとは違って、本当に子ども視線で物

表1 設問項目

Table 1 Questionnaire items

設問項目	問	内容
視覚変換装置	問1	身長が低くなったように感じた。
	問2	空間が広がったように感じた。
	問3	歩行時の体感速度が上がったように感じた。
手指外骨格	問4	手が小さくなったように感じた。
	問5	物が大きくなったように感じた。
	問6	大人用のお茶碗よりも子ども用のお茶碗の方が持ちやすかった。

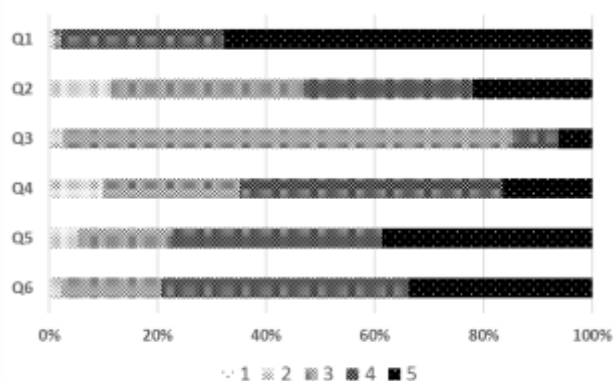


図20 アンケート主観評価の結果

Fig. 20 Results of the questionnaire survey

や人を見ているように感じられた。」といった意見もあり、瞳孔間距離を小さくすることで、視点の位置を下げるだけではない効果があることが示唆された。

問3は視点が下がることによる歩行時の体感速度の変化を検証するための設問であるが、体験者は大きな変化を体感しなかったと報告している。この結果の要因として、実際に視覚変換のみ行った状態では体感速度は変化しないか、あるいは視覚変換が不十分であったことの2点が考えられる。変換の不十分さとして、パンチルト制御機構の揺れがあげられる。体験者の歩行動作に伴いステレオカメラが揺動するために、HMDの映像酔いによる体調不良を訴える体験者もいた。また本装置の再現する視界に慣れない状態での歩行は非常に不安定であったことも起因していると考えられる。今後ハードウェア/ソフトウェア上での揺れ補正を検討する必要がある。

一方、問4,5の結果より、受動型手指外骨格による体験者の把持動作の縮小が概ね実現できているといえる。また問4と比較して問5の評価値の方が高いことから、多くの体験者は自身の手指が縮小したと感じてはおらず、むしろ疑似手指を操作して物とインタラクションを行っている、と感じていたと推測される。ラバーハンドイリュ



ージョンの実験[14]では、被験者の身体を覆い隠すことで視認させずに行っている。これに対し今回は、自身の手指が視認できることにより、擬似手指を操作していると感じたと推察される。体験者の手指やリンク機構を覆い隠し、小児の擬似手指のみ視認できる工夫を付与することで、より円滑に身体感覚を外骨格に拡張させることができると期待される。

問 6 の結果より、受動型手指外骨格により手指の把持動作が縮小したことで、大人用のお椀に対して持ちにくさを体感し、把持のしやすい(お椀のふちに指が引っかかりやすい)子ども用のお椀の方が持ちやすかったと報告していることがわかる。また大人用のお椀を把持しようとする際、お椀を落としかける体験者が多く観察された。このことから、受動型手指外骨格は子ども向け製品のユーザビリティテストに有効であることが示唆された。

デモ展示を通じて明らかとなった問題点を改良していく必要があり、特に映像揺れと音知覚の整合性の問題が対象となる。映像揺れの問題は、適切な身体性変換を阻害するだけでなく、酔いの原因にも繋がり体験の中断をも引き起こす。カメラ姿勢を安定させる構造の設計やソフトウェア上の映像補正、機構の軽量化などの改良によって改善していきたい。また視覚と聴覚の感覚の不一致の問題も、適切な身体性変換を阻害しているといえる。一般に視覚と聴覚に対する不一致情報により知覚量は変化するといわれている[15]。そこでパンチルト制御機構部にマイクを搭載し、ヘッドフォンなどを通して低い位置での音声を提示することで視覚と聴覚が一致した情報となり違和感を取り除けると考える。

また 5.3 で述べた視覚変換装置に関して、パン方向における追従性能の評価でオーバーシュートが発生していることが明らかとなった。しかしデモ展示において、体験者からの意見として映像遅延が課題となることがなかったことから、パンチルト制御機構による追従性能は十分高いといえる。

またアンケート調査の自由記述から、「自分が小さくなるという新しい感覚だった」という身体性変換に関する意見をはじめ、「子ども時代に戻った気がした」という心理的变化を示唆する意見、「大人が近くにいると圧迫感がすごい」「大人が目の前に立つだけで怖い」といった意見もあった。主観的で情動を伴う小児体験は子どもへの理解を促進するため、小児病棟の医師や看護師、保育士や教員などの子どもに対する理解やアウェアネスの支援のためのシステムとして利用できると考えられる。また「楽しかった」「おもしろかった」といった意見もあり、体験者が子どもの身体性を体験することで満足感を得たことがわかった。自身の身体性の変換により、周りの人とのインタラクション(手を振り合う、握り合うなど)が促進される様子が多く見られたことから、エンタテインメ

ントとしての活用に留まらず、社会的交流を促す機会を提供する可能性も示唆している。一方で、「聞こえてくる音も位置と合わせられるとさらにいいのでは」、「手が大きくて(外骨格を)きちんと体験できなかった」などの改良を求める意見も見受けられた。

## 7 総合考察

本研究では、子どものためのユニバーサルデザインに着目し、装着型デバイスを用いて子どもの視覚と触力覚を再現するシステム”CHILDHOOD”を提案した。システムの評価として、視覚変換装置においてはパンチルト制御機構による頭部回転運動の追従性能を、受動型手指外骨格においては把持動作のスケール縮小の有効性を実験により検証した。またデモ展示におけるユーザ評価を通して、体験者の身長が低く感じられたことや空間知覚が変化したこと、通常使用しているものが大きく感じたことなどが報告されたことから、体験者に子どもの視覚と触力覚を提示することで子ども体験の再現が実現出来たといえる。

今後の課題として、本システムによる身体性変換を定量的に評価する必要がある。CHILDHOOD 体験前後での身体図式[16]の変化を実験的に求め[17]、それが子どもの身体性を再現しているか検証する予定である。

今回開発したシステムを利用したデモ展示における評価を通じて、おもちゃや日用品といった製品のユーザビリティテスト、病院や保育園といった建築物の空間評価のための評価ツールとしての活用方法を見出すことが出来た。さらに、先述した「大人が近くにいると圧迫感がすごい」といった自由記述だけでなく、体験中には「大人の手がちょうど目の前に見え、握りたくなる」「(大人に)しゃがんでもらうと話しやすい」などといった感想もあり、子どもに対する理解の支援にも効果があることが示唆された。そのため今後は、幼稚園教諭や保育士、医療従事者、子育て世代の方などへ体験の機会を拡大させ、その有効性を検証していきたい。

## 謝辞

本研究は JSPS 特別研究員奨励費 16J03777 の助成を受けたものです。

## 参考文献

- [1] Ron Mace: Universal Design: Barrier Free Environments for Everyone, Designers West, 33(1), pp.147-152, (1985)
- [2] 疑似体験セット まなび体 (2016/10/05 Accessed) <http://www.tomoni.co.jp/product/manabitai/index.html>
- [3] 森宏樹, 郷木義子: 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, (2014)
- [4] 井田志乃, 山中敏正: 目線の違いによる環境装

置のユニバーサル性について, デザイン学研究. 研究発表大会概要集, Vol.47, pp.396-397, (2000)

[5] LOUP-ESCANDE Emilie, et al.: 3D Child Software: a decision-making help tool in innovative product design, Journal of Decision Systems, Vol.19, pp.9-31, (2010)

[6] Tsutomu Hashizume, et al.: Evaluation of Physical Load While Propelling Manual Wheelchair on Cross Slope Road and Wave Road, ASSISTIVE TECHNOLOGY RESEARCH SERIES, Vol.29, pp.796-803, (2011)

[7] Shigeru Wesugi, et al.: Design Approach on Human-diminishing Devices Considered through Development of Hemiplegic Gait Simulation Device, Proc. of International Conference on Human-Machine Systems, Cyborgs and Enhancing Devices, pp.176-177, (2012)

[8] Edward D. Lemaire, et al.: Gait Evaluation of a Transfemoral Prosthetic Simulator, Archives of Physical Medicine and Rehabilitation, Vol.81, pp.840-843, (2000)

[9] Jun Nishida, et al.: CHILDHOOD: Wearable Suit for Augmented Child Experience, Proc. of the 2015 Virtual Reality International Conference, No.22, pp.1-4, (2015)

[10] 株式会社エクシールコーポレーション 人肌ゲル <http://www.exseal.co.jp/> (2016/10/05 Accessed)

[11] Robert S. Allison, et al.: Tolerance of Temporal Delay in Virtual Environments, Proc. of IEEE Virtual Reality 2001, pp. 247-254, (2001)

[12] Colleen MacLachlan, Howard C. Howland: Normal values and standard deviations for pupil diameter and interpupillary distance in subjects aged 1 month to 19 years; OPO, Vol.22, pp.175-182, (2002)

[13] 中川千鶴, 大須賀美恵子: VE 酔い研究および関連分野における研究の現状, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.3, No.2, 31-39, (1998)

[14] Matthew Botvinick, Jonathan Cohen: Rubber hands 'feel' touch that eyes see, Nature, Vol.391, pp.756, (1998)

[15] 佐々木卓ら: 視覚情報と聴覚情報の不一致における知覚判断への相互作用(聴覚・音声及び一般), 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.SP2005-40, pp.31-36, (2005)

[16] Angelo Maravita and Atsushi Iriki: Tools for the body(schema), Trends in Cognitive Sciences, Vol.8, pp79-86, (2004)

[17] 三嶋博之: “またぎ”と“くぐり”のアフォーダンス知覚, 日本心理学会, Vol.64, No.6, pp.469-475, (2010)

## [著者紹介]

### 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.

### 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に関する研究に従事.

### 高鳥 光



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.

### 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).

(2016 年 06 月 13 日受付)