

# 拡張身体投影システムを搭載したスマート車椅子

浅井 唯貴<sup>1,a)</sup> 上田 雄太<sup>1,b)</sup> 岩井 大輔<sup>1,c)</sup> 佐藤 宏介<sup>1,d)</sup>

**概要:** ノンバーバルコミュニケーションにおいて手は重要な存在である。例えば“指差し”は、意図や目的対象を相手に伝える最もシンプルかつ強力な手段である。一方で、対象が手の届かない位置にあると伝達される内容が曖昧になるという欠点がある。この点において、車椅子ユーザのように、柔軟な移動が困難であり手の届く範囲が狭い場合、コミュニケーションに手を活かすことは難しい。遠隔の対象を正確に指し示す場合には、通常レーザーポインタが使用されるが、それでは手の持つ表現力をコミュニケーションに活かすことはできない。そこで本稿では、手が届かない対象に対して、ユーザの身体を部分的に拡張させたバーチャルハンドをプロジェクタによって投影し、自身の手の代替とすることで遠くの対象物にも直接手で指し示せるシステムを車椅子に搭載することを提案する。さらにそのシステムを使うにあたり、対象物との距離と投影されたバーチャルハンドの大きさ及び角度に関して、ユーザがどのような設定を好む傾向があるか調査を行った。

**キーワード:** スマート車椅子, プロジェクションマッピング, 拡張現実感, 身体拡張

## Projection-Based Body Augmentation System on Smart Wheelchair

ASAI YUKI<sup>1,a)</sup> UEDA YUTA<sup>1,b)</sup> IWAI DAISUKE<sup>1,c)</sup> SATO KOSUKE<sup>1,d)</sup>

**Abstract:** The hand plays an important role in the non-verbal human-human communication. For example, “pointing” is the simplest and the strongest means to convey an intention or a target to a colocated partner. On the other hand, “pointing” has a disadvantage that the target becomes ambiguous if it is at a distance. In the case of wheelchair users, because they have a narrow hand reach and are difficult to move freely, they always face difficulties in their communications. Therefore we propose a smart wheelchair system on which a battery-powered mobile projector is mounted. The projector superimposes a virtual hand image extended from the actual hand, and a user manipulates it as an extension of the real hand in order to interact with distant targets. In addition, we investigate the desirable settings with regard to the scale and orientation of the projected virtual hand.

**Keywords:** Smart wheelchair, projection mapping, augmented reality, body extension

### 1. はじめに

人間の手は表現力に富んでおり、コミュニケーションにおいてその表現力は自身の意図や目的を相手に正しく伝えるほか、相手に理解を促す補助としての役割を担っている。例えば“指差し”は、シンプルだが非常に強力な伝達手段

の一つである。一方で“指差し”には、指示する対象が遠くに位置するほど、その伝達される内容が曖昧になり正確性に欠くという欠点がある。この点において、車椅子ユーザのように、可動性に制限があり、手の届く範囲も狭い場合には、手を十分に活かしたコミュニケーションを取ることは難しい。そこで我々は、車椅子にプロジェクタを搭載し、手の代替となるバーチャルハンド (Virtual Hand:VH) を目的対象へ投影し、ユーザがVHを操作することによって、遠隔対象に対しても手を使用したコミュニケーションを可能とするシステムを提案する (図 1)。

<sup>1</sup> 大阪大学 大学院基礎工学研究科 佐藤研究室

a) asai@sens.sys.es.osaka-u.ac.jp

b) ueda@sens.sys.es.osaka-u.ac.jp

c) daisuke.iwai@sys.es.osaka-u.ac.jp

d) sato@sys.es.osaka-u.ac.jp

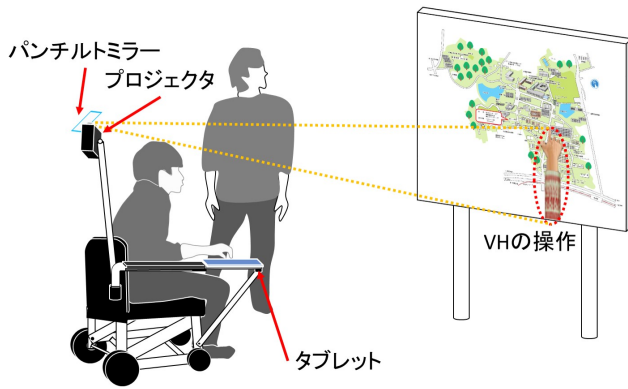


図 1 システムのイメージ図

VH を操作する代表的な手法として、サイバークロブ<sup>\*1</sup> や LeapMotion<sup>\*2</sup> がある。しかしそれらは、専用の装着物が必要であり、操作時に手を宙に浮かべる必要がある。一方提案システムでは、装着物が不要であり、アームレストに腕を置いたりリラックスした状態で操作が可能となるように、アームレストの延長上にタブレット端末を設置し、そのタッチパネルを使用して VH を操作する。VH の操作にはラバーハンド錯覚の知見 [1] を利用しており、VH により自身の身体を拡張し、広範囲におけるコミュニケーションの実現を目指している。

VH 投影用のプロジェクタを車椅子に搭載するにあたり、投影領域が特定方向に固定されるのは望ましくない。なぜなら、車椅子を回転させ目的対象に正対する必要があるが煩わしい、または十分な空間的余裕が無く回転できない、といったことが起こりうるからである。そこで、プロジェクタにパンチルトミラーを搭載することで投影方向を操作可能とする。これにより、車椅子ユーザは車椅子を移動させることなく、より広範囲で VH によるコミュニケーションを行うことが可能となる。

ミラーを使用した投影では、ユーザと VH の位置関係が大きく変化する。プロジェクタからの投影距離が大きくなるため、非常に大きな VH が投影されることになる。ゆえに、ミラーを使用して投影を行う場合には、投影する VH の大きさを調整する必要がある。また、ユーザから離れた位置に投影を行うため、VH を伸長させる向きも変える必要がある。VH を伸長させる向きは、ユーザが感じる身体拡張感に影響を与えると予想される。そのため、どのような向きで VH を伸長させるかを調べる必要がある。また、ミラーの使用に関わらず、VH の大きさや向きをどう設定すべきかに関しては、これまで十分な議論がなされていない。そこで我々は、VH の投影される位置によって VH の大きさや向きをどのように設定すべきか、実験による調査を行った。本稿ではその結果について報告する。

<sup>\*1</sup> CyberGlove Systems LLC, 入手先 (<http://www.cyberglovesystems.com/>) (参照 2017-01-26)

<sup>\*2</sup> LeapMotion - Official Site, 入手先 (<https://www.leapmotion.com/>) (参照 2017-01-26)

## 2. 身体拡張に関する先行研究

身体固有受容感覚の転移、いわゆるラバーハンド錯覚 [1] の発見がきっかけとなり、人工的な手のモデルへ身体感覚を生起させる研究が数多く行われた。ラバーハンドの形状や向きによっては身体感覚が生起しないことや、ラバーハンド錯覚の効果がゴムの手のモデルだけでなく VR 空間においてバーチャルな手のモデルに対しても表れること、そして使用するモデルの見た目が人間の手に近いことが身体拡張に重要であることが判明している [2][3][4]。他にも被験者の手の動作とモデルの動作が遅延なく同期していることがラバーハンド錯覚の効果を高める要因となっていることや、被験者の腕の 4 倍以上長い腕のモデルに対しては身体拡張感が減少することが確認されている [5][6]。さらに、VR 空間に限らず、プロジェクタによって投影された手のモデルに対しても身体感覚が拡張することが確認されている [7][8][9]。

Poupyrev らは、3D バーチャル空間において手を用いたインタフェースの操作性を向上させる研究を行い、バーチャルな腕を伸縮させることにより遠くの対象に対しても近くの対象と同等の操作感を得ることに成功した [10]。またバーチャルな腕を伸ばす際、手首から先だけでなく腕自体もあつた方が身体感覚が強くなることを確認されている [11]。小川らは、バーチャルな手と腕をユーザの手から実空間に伸長するプロジェクタ投影型インタフェースを提案し、実験により身体感覚の拡張を確認した [9][12]。彼らはユーザの手の認識にカメラを使用した。上田らはカメラのように環境に依存することなく手の認識を可能とするため、スマートフォンのタッチパネルの利用を提案した [13]。また、ユーザの手の認識とバーチャルな手と腕の描画をタブレット端末一台で完結させたタブレットベースのスタンドアロン型も提案している [14]。さらに、IoT(Internet of things) との連携例を示し、実空間に投影されたバーチャルな手によるインタラクションの可能性を示している [15]。

腕を伸長させる手法として、バーチャルな手以外にも影を利用した手法がある。Shoemaker らは、光源を設置してそれによってできる影を用いたインタラクションを提案している [16]。このシステムでは、設置した光源によってできる影を利用するため、生成される影の大きさはユーザと光源の距離に依存する。そのため目的対象とのインタラクションの際には、ユーザは光源から距離を取り、目的対象にある程度接近しなければ適切な大きさの影は生成されない。一方 Shingu らは、ディスプレイにデプスセンサを取り付け、ディスプレイとの距離に応じた大きさの影をディスプレイ上に重畳投影するシステムを提案している [17]。しかしこのシステムではディスプレイ側にセンサを取り付ける必要があるため、システムを使用できる環境や範囲が制限されるという欠点がある。



図 2 拡張した腕を投影して案内図を指し示す様子 (出典 [19])

浅井らは、先述のタブレットベースのスタンドアローン型身体拡張システム [14] を電動車椅子に搭載すると同時に、車椅子の操作部を改造し、車椅子と VH の両方をタブレットを使用して操作できるシステムを新しく開発している [18]。車椅子そのものにシステムを搭載することによって、環境を問わずユーザの身体を拡張させることに成功した。また、プロジェクタの投影口にパンチルトミラーを設置することで VH を投影できる範囲を拡張し、それを利用した地面への VH 投影による車椅子の進路表示を行った [19]。図 2 に拡張した腕を投影し使用している様子を示す。本稿はこれらに続く研究報告である。なお本稿において VH と表記する場合、手だけでなく腕も含めた表現として使用するものとする。

### 3. 拡張身体投影システムを搭載したスマート車椅子

#### 3.1 システム構成

拡張身体投影システムとして、VH 投影用のプロジェクタ (ASUS, P3B) と VH 操作用のタブレット端末 (Microsoft, Surface Pro 3) を市販の電動車椅子 (Wheelchair88 社製, PW-999UL) に搭載した。さらに、サーボモータ 2 個とミラー 1 枚を用いて構築したパンチルトミラーをプロジェクタの投影口に設置し、タブレット端末に接続した Arduino を通じて操作できるようにした。図 3 に実装したシステムを示す。

#### 3.2 バーチャルハンドの操作方法と非操作時の挙動

図 4 に VH の操作の種類を示す。VH の操作は、タッチパネルに指をタッチさせた状態で実行したい VH の動作を行うことで実現される。タッチ操作に使用する指の本数が 1 本の時は指示動作 (図 4 右下) になり、並進移動および伸長の操作が可能となる。タッチする指の本数が 2 本以上

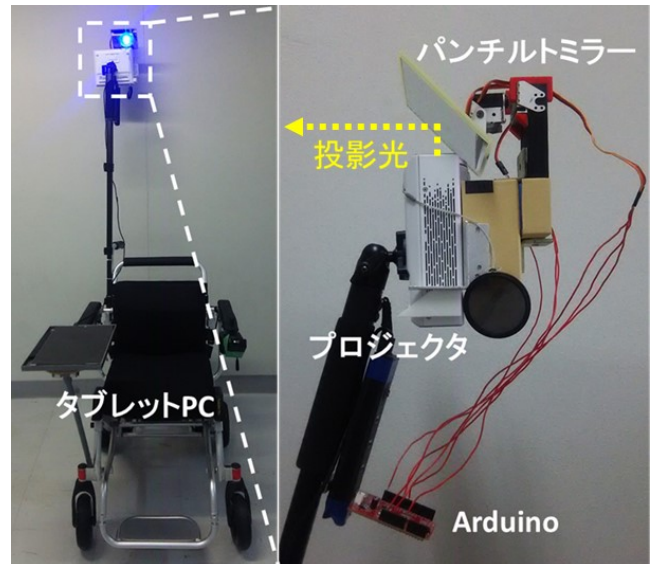


図 3 実装システム

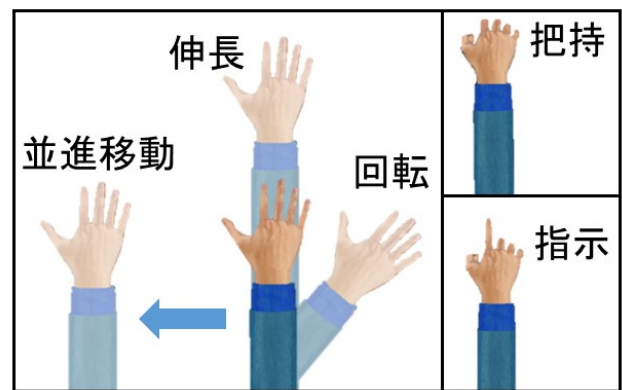


図 4 VH の操作の種類

の場合はそれに加え、VH の回転や特定の指の屈曲および把持表現 (図 4 右上) が可能となる。

VH の非制御時には、生物的印象を与えるために生体的ゆらぎを加えた。このゆらぎには、以下に示す間欠性カオスのアルゴリズムを使用している。  $X(t), Y(t) (0 < X(t), Y(t) < 1)$  はそれぞれ VH が x 軸方向および y 軸方向にゆらぐ、つまり移動する量を表している。VH をごくわずかに移動させて描画することを繰り返すことによって生体的ゆらぎを表現した。なお、以下のアルゴリズムでは  $X(t), Y(t)$  が 0 もしくは 1 に収束することがあるので、  $X(t), Y(t) < 0.05$  もしくは  $0.95 < X(t), Y(t)$  の場合には、区間  $(0, 1)$  のランダムな数値を新しく与えるようにしている。

$$X(t+1) = \begin{cases} X(t) + 2 \cdot (X(t))^2 & (X(t) < 0.5) \\ X(t) - 2 \cdot (1 - X(t))^2 & (0.5 \leq X(t)) \end{cases}$$

$$Y(t+1) = \begin{cases} Y(t) + 2 \cdot (Y(t))^2 & (Y(t) < 0.5) \\ Y(t) - 2 \cdot (1 - Y(t))^2 & (0.5 \leq Y(t)) \end{cases}$$



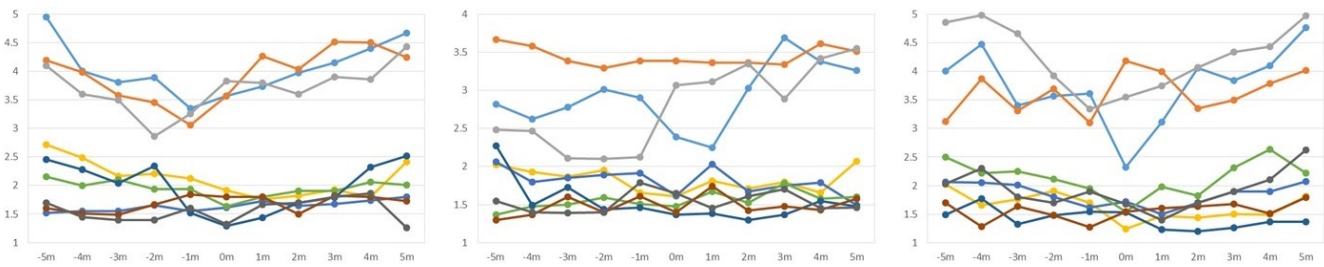


図 6 VH のスケールの設定結果 (左から車椅子ユーザ, 立ち見第三者 A, 立ち見第三者 B):  
 各グラフの折れ線グラフ一つ一つが被験者の結果を表す

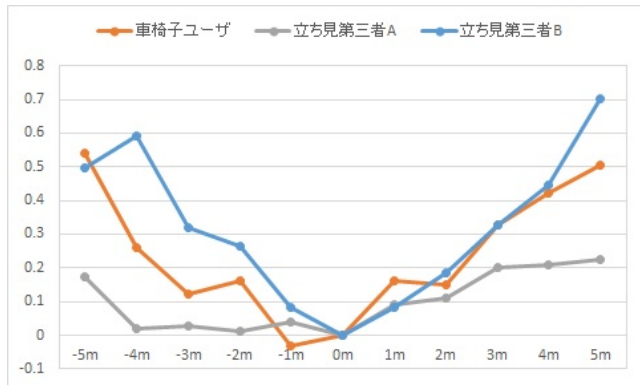


図 7 スケール変化の平均値 (0m での値との差分値)

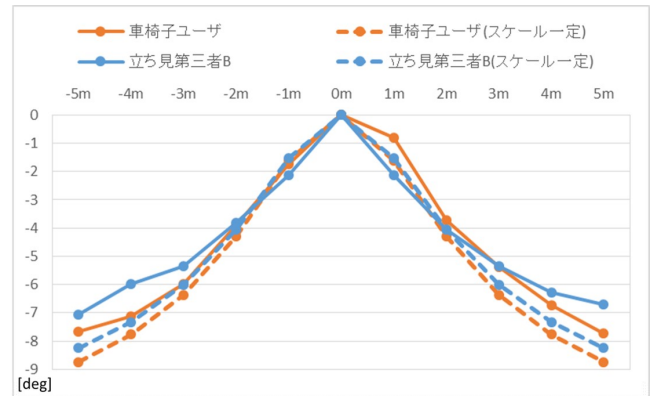


図 9 スケールを変化させない場合との視野角の比較

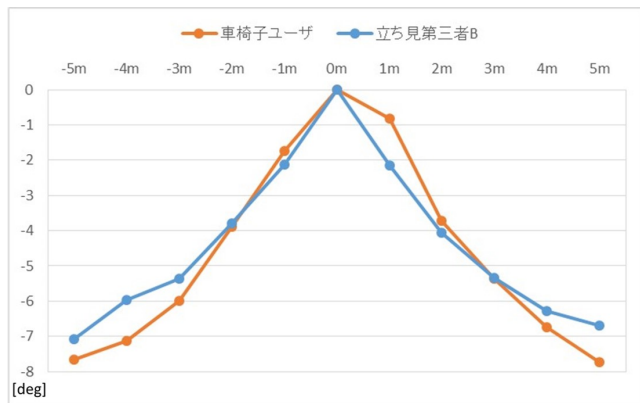


図 8 視野角の変化の平均値 (0m での値との差分値)

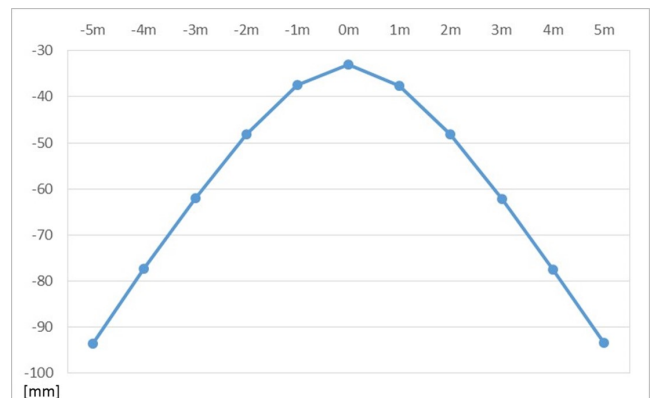


図 10 視野角が 1deg 減少した時の VH 手部の物理サイズの変化

常に一定に保つためであるという仮説が考えられる。  
 この仮説を検証するために、スケール調整後の投影された VH の手長 (図 5 右上参照) に対する、被験者の視野角について考察する。もしこの仮説が成り立つならば、投影された VH の手長に対する被験者の視野角は、VH が投影される位置に関係なく一定の値を取る。各位置で投影された VH の手長に対する車椅子ユーザおよび立ち見第三者 B の視野角を図 8 に示す。図の凸型のグラフから、投影された VH の手長に対する視野角は距離とともに減少していることが確認できる。したがって、VH の投影される位置が遠くなるにつれて VH のスケールは大きく設定されるが、その変化は VH の見た目の大きさを一定に保つものではないということである。逆に言えば、VH の見た目の大きさが距離とは無関係に一定となるような設定は好まれないと

言える。図 9 にスケールを変化させなかった場合における投影 VH に対する視野角とスケールを変化させた場合における投影 VH の手長に対する視野角 (図 8) の比較を示す。図を見ると、距離 1m での値を除くと -2m~2m の範囲ではスケールを変化させた場合と変化させない場合では値にほとんど差はなく、距離 5m においても 1, 2deg の差しかない。1m の距離では差が大きく 1deg の差が見られる。これら視野角の差でどれだけ VH の大きさが変化するのが、各投影位置において視野角が 1deg 減少した際に、投影されている VH の物理サイズがどのように変化するかを表したグラフを図 10 に示す。図から -2~2m の範囲では VH の大きさの変化は 50mm 以下と小さいことがわかる。しかし距離が増すにつれ変化の度合いが大きくなり、5m の距離でおよそ 95mm も大きさが変化することがわかる。この変化

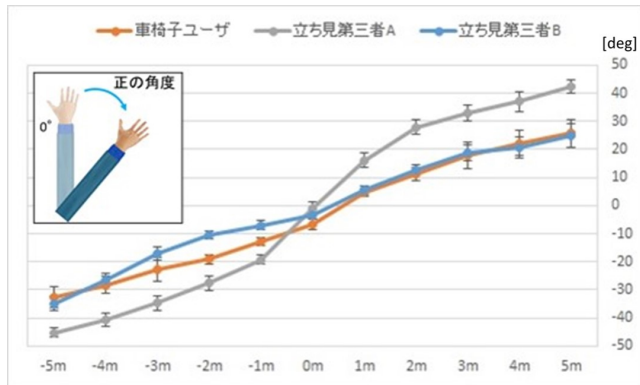


図 11 VH の角度の設定結果 (平均 ± 標準誤差)

は VH から離れた車椅子ユーザや立ち見第三者 B には認識しづらいかもかもしれないが、VH の近傍に位置する立ち見第三者 A には容易にわかる大きな変化であると予想される。

図 7 のように、VH が投影される位置に応じて VH の大きさを大きくするのが好まれるが、本実験における -2m ~ 2m の範囲 (ユーザとの距離がおよそ 3m 以内) では VH を一定の大きさにしても影響はほぼなく、それ以上に離れた位置に VH を投影する際には、投影する VH を大きくすることが良いと考えられる。

#### 4.2.2 VH の角度設定に関する結果と考察

VH の角度設定の結果では、被験者全員に同一の傾向が見られた。被験者の設定した角度の平均値と標準誤差を図 11 に示す。縦軸が角度 (deg)、横軸が VH の投影位置である。図 11 を見ると、いずれの立場においても、車椅子ユーザと VH との距離が増すにつれて角度が増加する傾向が見て取れる。また、車椅子正面 (投影位置 0m) において負の角度が設定されていることが確認できる。これらの結果から、VH ユーザであるかどうかに関わらず、VH ユーザの右手から伸長しているかのように見える向きで VH が投影されることが望ましいと推測できる。

車椅子ユーザおよび立ち見第三者 B は、いずれの距離においてもほぼ同一の角度、もしくは似たような角度が設定されており、距離が大きくなるにつれて角度が増している。設定された角度が近い値を取っているのは、両者と VH の距離および位置関係がほぼ同一であるためだと考えられる。結果がほぼ同一であることから、両者の差異である“VH の操作者であるか否か”は、VH の角度に影響を与えないと考えられる。次に立ち見第三者 A に着目すると、他の二者と比較して大きめに角度が設定されていることがわかる。これは、VH を使用する側と投影された VH を通して車椅子ユーザとコミュニケーションを行う側で好ましい VH の向きが異なることを意味している。

この VH の角度設定に関する結果から、図 4 にある並進移動のような、地面に対して垂直に伸長した状態で VH が移動するような移動表現は好ましくないと判断できる。つまり、離れた位置にある指示対象に対して VH を投影し、

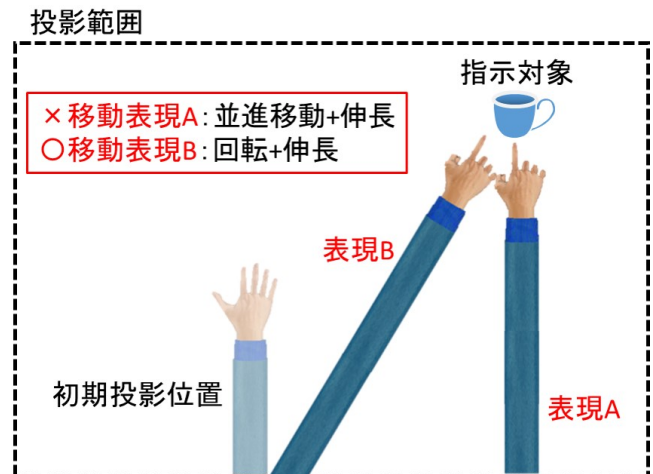


図 12 ポインティングの操作方法

“指差し”を行う場合には、図 12 に示すように、指示対象までの VH の移動表現は、並進移動と伸長 (移動表現 A) によってではなく、回転と伸長 (移動表現 B) によって行われることが望ましいと考えられる。そのため、現状の VH の並進移動に対しては、その並進移動量に応じて VH を回転させる表現を加えた方が好まれると予想される。この場合、VH の回転は並進移動に応じて行われるため、VH の回転操作には別の動作、例えば手首の回転などを割り当てることが可能である。実際にどのような操作を割り当てるかは、操作体験を交えて検討する必要がある。

## 5. おわりに

車椅子ユーザの手を使用したコミュニケーションの範囲を拡張するために、ユーザの身体を部分的に拡張して投影する、すなわちユーザの腕を仮想的に伸張させることによりユーザの手の代替とするシステムを車椅子に搭載した。加えて、パンチルトミラーの搭載により、仮想的に伸張させた腕 (Virtual Hand: VH) を投影できる領域を大きく拡張できる実装をした。本稿ではこの投影領域の拡張に当たり、投影する VH の大きさや向きを投影先の位置を変えて計測し、ユーザが好む傾向について考察を行った。

実験結果によると、VH を投影する位置がユーザから離れるにつれて VH の大きさはより大きめに設定される傾向が見られたが、ユーザとの距離がおよそ 3m 以内においてはその差は非常に小さいため、VH の大きさを一定に設定したとしても問題はないと予想される。VH の向き、つまりどの程度の角度傾けるかに関しては、こちらもユーザとの距離が離れるにつれて VH の設定角度が大きくなる傾向が確認された。これは、ユーザがいる側から伸長するような向きで VH が投影されることが望ましいのだと予想される。ほかに、ユーザおよびユーザ近傍に位置する第三者と、VH 近傍に位置する第三者との間では、両者が好む角度に差があることが確認された。

参考文献

- [1] Botvinick, M., and Cohen, J., Rubber hands 'feel' touch that eyes see, *Nature*, Vol.391, No.6669, p.756, 1998.
- [2] Tsakiris, M., and Haggard, P. The rubber hand illusion revisited: Visuotactile integration and self-attribution, *J. of Exper. Psych.* Vol.31, No.1, pp.80-91, 2005.
- [3] Slater, M., Prez Marcos, D., Ehrsson, H., and Sanchez-Vives, M. V. (2009). Inducing illusory ownership of a virtual body. *Frontiers in neuroscience*, 3, 29.
- [4] Yuan, Y., and Steed, A. (2010, March). Is the rubber hand illusion induced by immersive virtual reality?. In *2010 IEEE Virtual Reality Conference (VR)* (pp. 95-102). IEEE.
- [5] Kilteni, K., Normand, J. M., Sanchez-Vives, M. V., and Slater, M. (2012). Extending body space in immersive virtual reality: a very long arm illusion. *PloS one*, 7(7), e40867.
- [6] Sanchez-Vives, M. V., Spanlang, B., Frisoli, A., Bergamasco, M., and Slater, M. Virtual hand illusion induced by visuomotor correlations, *PloS one*, Vol.5, No.4, e10381, 2010.
- [7] Graham, K. T., Martin-Iverson, M. T., Holmes, N. P., and Waters, F. A. (2015). The projected hand illusion: component structure in a community sample and association with demographics, cognition, and psychotic-like experiences. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 77(1), 207-219.
- [8] Zhang, J., and Hommel, B. (2015). Body ownership and response to threat. *Psychological research*, 1-10.
- [9] 岡原浩平, 小川修平, 新明拓也, 岩井大輔, 佐藤宏介, 身体拡張型インタフェースのための前腕の投影表現に関する基礎検討, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 19, No. 3, pp. 349-355, 2014年09月, 学術論文
- [10] Poupyrev, I., Billinghurst, M., Weghost, S., and Ichikawa, T. The go-go interaction technique: nonlinear mapping for direct manipulation in VR, In *Proc. of the 9th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp.79-80, 1996.
- [11] G tieri, E tidoni, EF Pavone, and Salvatore Maria Aglioti. Mere observation of body discontinuity affects perceived ownership and vicarious agency over a virtual hand. *Experimental brain research*, Vol. 233, No. 4, pp. 1247-1259, 2015.
- [12] Ogawa, S., Okahara, K., Iwai, D., and Sato, K., A reachable user interface by the graphically Extended Hand, In *The 1st IEEE Global Conference on Consumer Electronics 2012, IEEE(2012)*, 210-211.
- [13] Ueda, Y., Iwai, D., and Sato, K., InstantReach: Virtual Hand Interaction using Smartphone, In *USB Proceedings of IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR), S&T Demos 14*, 2015.
- [14] 上田雄太, 浅井唯貴, 榎本龍一, 新明拓也, 武村紀子, 岩井大輔, 佐藤宏介, タブレット駆動型身体拡張インタフェース スタンドアローン型 ExtendedHand, *情報処理学会インタラクション 2016 論文集*, pp. 1004-1009, 2016年03月, 会議報告/口頭発表.
- [15] Yuta Ueda, Yuki Asai, Ryuichi Enomoto, Kai Wang, Daisuke Iwai and Kosuke Sato, "Body Cyberization by Spatial Augmented Reality for Reaching Unreachable World", *Augmented Human 2017* (3月発表予定).
- [16] Shoemaker Garth, Anthony Tang, and Kellogg S. Booth. "Shadow reaching: a new perspective on interaction for large displays." *Proceedings of the 20th annual ACM symposium on User interface software and technology*. ACM, 2007.
- [17] Shingu, J., Chiu, P., Kratz, S., Vaughan, J., and Kimber, D. (2016, October). Depth Based Shadow Pointing Interface for Public Displays. In *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology* (pp. 79-80). ACM.
- [18] 浅井唯貴, 上田雄太, 岩井大輔, 佐藤宏介, "投影バーチャルハンドを有するスマート車椅子", 第60回システム制御情報学会研究講演発表会論文集 (SCT'16), 325-1(6 pages), 2016.
- [19] Yuki Asai, Yuta Ueda, Ryuichi Enomoto, Daisuke Iwai and Kosuke Sato, "ExtendedHand on Wheelchair", In *Adjunct Proceedings of the 29th ACM User Interface Software and Technology Symposium*, pp147-148, 2016.
- [20] AIST 人体寸法データベース 1991-92 (オンライン), 入手先 (<https://www.dh.aist.go.jp/database/91-92/data/list.html>) (参照 2017-01-16)