

日本バーチャルリアリティ学会研究報告

The 6th Workshop on Telexistence

第 6 回テレイグジスタンス研究会

2015年6月5日

日本バーチャルリアリティ学会

日本バーチャルリアリティ学会研究報告目次

CONTENTS

第6回テレグジスタンス研究会／The 6th Workshop on Telexistence

[主催：テレグジスタンス研究委員会]
[Organized by Special Interest Group on Telexistence]

2015年6月5日（金）14:00－17:00（大阪大学）

TX01-1	時を超える情景の作り方 大倉史生(大阪大学).....	1
TX01-2	風の適切な提示を目指した頭部風向知覚特性の測定 中野拓哉(名城大学).....	5
TX01-3	視触覚間相互作用を用いた形状知覚操作 伴 祐樹(東京大学).....	9
TX01-4	言語音弁別能力の向上のための意識下でのニューロ フィードバック手法 常 明(大阪大学).....	13
TX01-5	Mutual Body Communication in Telexistence using Virtual Embodiment MHD Yamen Saraiji (慶應義塾大学).....	17

時を超える情景の作り方

Making Virtual Time Machines Real

大倉史生¹⁾

Fumio OKURA

1) 大阪大学 産業科学研究所

(〒567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘 8-1, okura@am.sanken.osaka-u.ac.jp)

Abstract : This paper introduces two approaches to actualize *virtual time machines* with photo-realistic real-world textures: 1) photorealistic virtual object superimposition onto virtualized real environment using image-based rendering, 2) season transfer using unified color and texture transfer. The first approach, which input omnidirectional images captured from an unmanned airship, enables us to explore ancient ruins by superimposing virtual buildings. The second approach selectively modifies the color and texture in a still image by analyzing training images to present the appearance change between seasons (e.g. leaves).

Key Words: *Mixed reality, Texture synthesis, Color transfer*

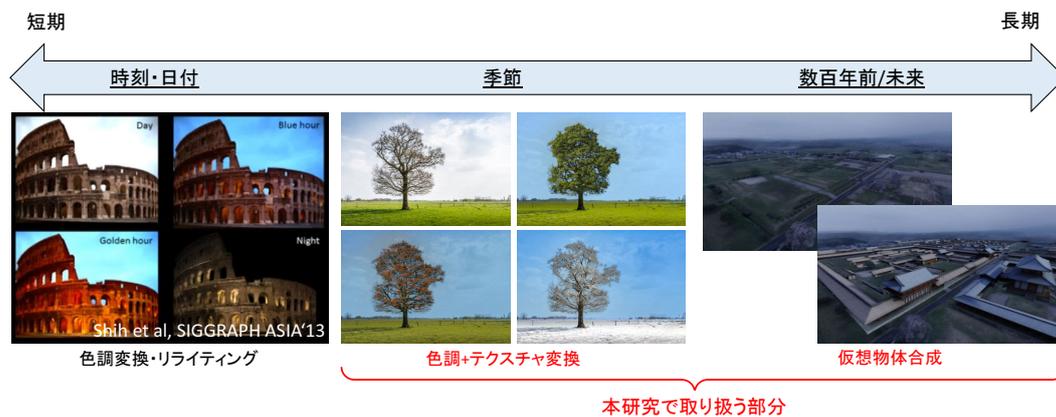


図 1: 時間変化の表現方法。従来、時刻や天気の変更のための色調変換手法や、太古や未来の情景を表現する仮想物体合成の手法が提案されてきた。本研究は、1) 軽量な画像ベースの手法による、仮想化実空間への仮想物体合成の写実性向上、2) 色調・テクスチャ変換の併用による、写真中のテクスチャ変化の伴う季節変化の表現を取り扱う。

1. はじめに

人類は、時空（時間と空間）を超越することを夢みている。空間を瞬時に転移するワープ航法やどこでもドア、そして時間を超越するタイムマシン等の空想上の技術は多くのフィクションに描かれ、人々の知的好奇心を惹きつけてやまない。近年のコンピュータグラフィックス（CG）・バーチャルリアリティ（VR）技術の進歩は、人工現実空間における時空の超越体験を可能にした。ユーザがあたかも遠隔地に存在するかのような感覚を提示するテレプレゼンスやテレイグジスタンス技術は、まさに空間の超越を実現する「バーチャルどこでもドア」である。

一方で、実画像群に基づいて構築された仮想空間内における時間変化をユーザに体験させる「バーチャルタイムマシン」は、表現する変化が生じる長さにより、異なる技術を用いて実現される。図 1 に示すように、従来、写真や、写真群を入力として復元された三次元空間内の時刻や天気

変化を表現するために、色調変換（color transfer）やライティング技術が用いられてきた。また、現存しない太古の建造物等を含む情景の生成のため、仮想物体の合成が行われてきた。

本論文ではまず、空撮全方位画像群を用いた三次元復元に基づき仮想化された実空間への仮想物体合成の写実性向上のための手法 [1] について述べる。次に、静止画像を対象とした季節変更についての研究 [2] について概説する。それぞれの詳細については、[1] および [2] を参照されたい。

2. 写実的な仮想物体合成による過去の遺構の復元 [1]

近年、Google Earth 等の地図アプリケーションを代表例として、事前撮影された画像群を用いた多視点ステレオ等による三次元復元を用いて実世界を仮想化し、効率的に広範囲の情景を提示する仮想化実空間の閲覧アプリケーションが広く普及している。仮想化実空間内に仮想物体を合成し、

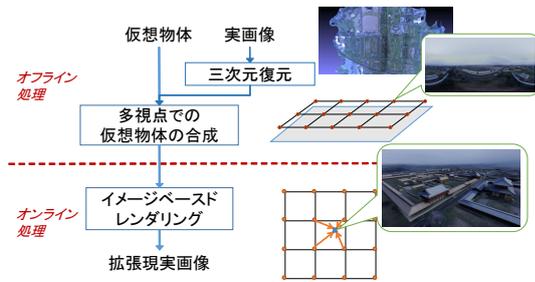


図 2: 仮想化実空間への仮想物体合成の流れ

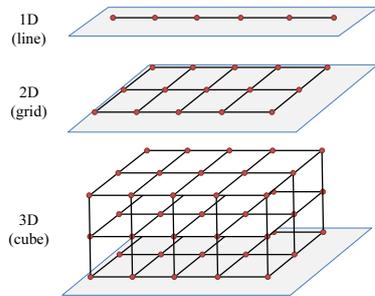


図 3: オフライン処理で事前生成される視点位置の例

自由な視点から観察する SketchUp のようなアプリケーションでは、仮想物体の描画品質と計算量のトレードオフが存在し、オフラインで時間をかけて合成した「映画のような」品質の合成は未だ実現されていない。

本研究は、オフラインの仮想物体合成によって得られる高い品質を保ったまま実時間の画像生成を実現することを目標とする。オフラインで時間をかけてレンダリングされた画像群を用いてイメージベースドレンダリング (IBR) を行い、仮想物体が合成された仮想化実空間内の自由な視点からの映像 (自由視点映像) を提示する。

提案フレームワークは、図 2 に示すようにオフライン処理とオンライン処理に分割される。オフライン処理では、多視点で時間をかけて高品質に仮想物体を実画像群に合成する。オンライン処理では、高速化された自由視点画像生成により、多視点でレンダリングされた合成画像群の見えを変形し提示する。

2.1 オフライン処理

まず、Structure-from-Motion (SfM) により撮影時のカメラ位置・姿勢を推定し、多視点ステレオ (MVS) 法で実環境の密な三次元形状を推定する。次に、密な視点群に仮想視点を生成し、IBR を用いて各視点からの実環境の見えを生成する。視点群は、環境とアプリケーションに合わせ、図 3 のように直線上、平面上、三次元空間上に構造的に設定される。本研究では、復元された実空間の三次元モデルに仮想視点位置に応じて適切なテクスチャを投影する IBR 技法である視点依存テクスチャマッピング (VDTM) [3] を用いた。生成された各格子視点上の実画像に、欠損のない環境マップを光源として、グローバルイルミネーションレンダリングにより写實的に仮想物体を合成する。本研究で構築したアプリケーションにおいては、かつて存在した建造物を模した三次元モデルを遺跡上空で撮影された画像群

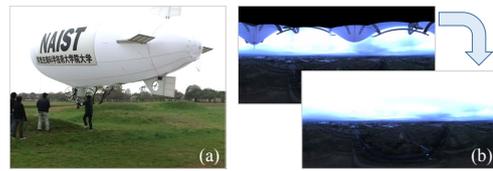


図 4: (a) 屋外無人飛行船撮影された全方位画像。(b) 飛行船の映り込みによる欠損領域を補完した全方位画像例。



図 5: 上: 自由視点画像、下: 仮想物体が合成された自由視点画像

から生成された格子視点画像に合成した。本処理はオフラインで行われるため、光源やレンダリング結果等に対する調整が可能で、言い換えれば、時間と手間をかければ「映画の品質」で仮想物体の合成を行うことができる。

2.2 オンライン処理

オンライン処理では、仮想物体が合成された格子視点画像群および、実空間と仮想物体の三次元モデルを用いて、計算量が削減された VDTM により提示画像を生成する。本処理では、仮想視点の近傍に存在する事前生成視点のテクスチャのみを三次元モデルに投影・混合することでテクスチャ選択のための計算量を削減する。実・仮想物体の三次元モデルはオンライン処理の入力とするために統合され、さらに数% のポリゴン数に削減される。これにより三次元モデルに形状誤差が発生するが、VDTM による自由視点画像生成は通常の三次元モデルのレンダリングと比較して、モデル形状の誤差の見えへの影響を抑制する [3]。

2.3 空撮全方位画像群を用いた実験

提案手法の有効性を実証するため、奈良平城宮跡で空撮を行い、過去の建造物の CG を合成する実験を行った。174 地点で空撮された全方位画像群を用いて三次元復元を行い、3,290,880 ポリゴンからなる実環境の三次元モデルを得た。さらに、仮想物体の合成時に実環境の光源を用いるためには図 4 上部に見られるような光源環境の欠損が問題となるため、空の照度を統計的にモデル化した天空光モデルを用いて光源環境の欠損部分を補完した。これらを用い、400m × 400m の平面内に 20m 間隔の格子点を設定して格子視点画像群を生成し仮想物体を合成した。オンライン処理で生成された画像を図 5 に示す。オンライン処理は NVIDIA GeForce 690 (テクスチャメモリ 2GB) を搭載したデスクトップ PC 実装され 1000 fps 程度で動作し、タブレット PC (Surface Pro 3, Core i5) 上で 300 fps 以上で動作した。提案手法により、軽量かつ写實的な仮想物体合成を実現できた。

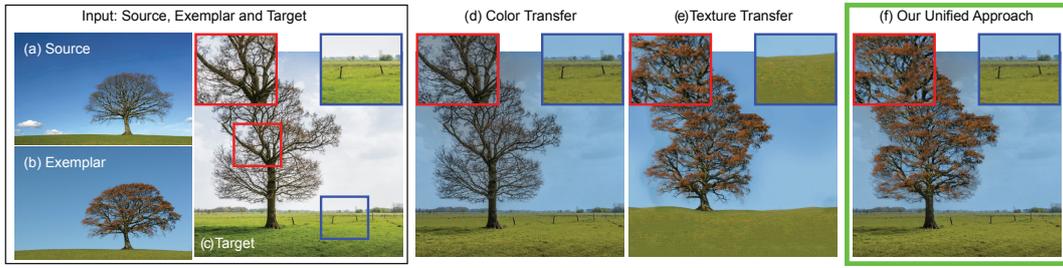


図 6: 色調変換 [4] はテクスチャ変化を表現できない (d)。一方で、テクスチャ変換 [5] は Target 画像内のシーン構造を変更してしまう (e)。提案手法は、色調変換により十分に変化が表現できない部分にのみテクスチャ変換を施すことにより、Target 画像のシーン構造を保ちながら季節変化を表現する (f)。

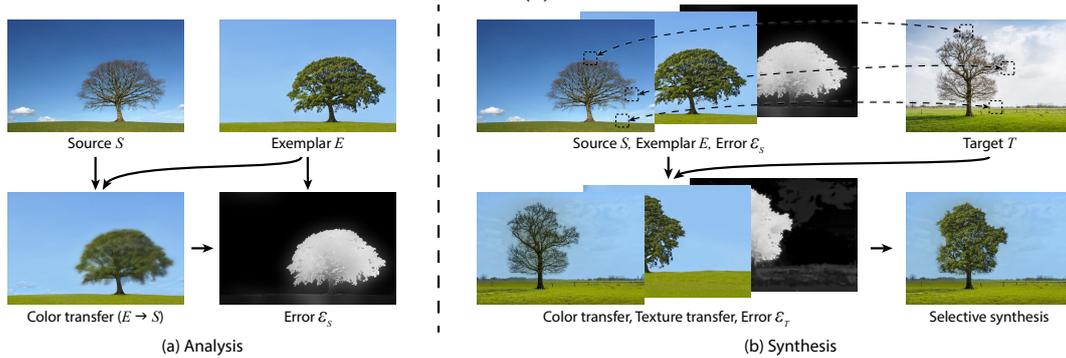


図 7: 提案手法は (a) 予測処理および (b) 変換処理に大別される。予測処理では、Source/Exemplar 間で色調変換を行い、十分に変化を表現できない部分を相違度として検出する。計算された相違度を、変換処理において Target 画像上に合成し、色調およびテクスチャ変換結果の混合に用いる。

3. 色調・テクスチャ変換の併用による季節変化表現 [2]

色調変換 (color transfer) およびテクスチャ変換法 (texture transfer) は、画像に顕著な変化を与える CG 分野の手法として知られている。これらの手法は事前に位置合わせされた Source および Exemplar 画像 (図 6(a,b)) に含まれる変化を検出し、同様の変化を Target 画像 (図 6(c)) に付与する。色調変換は、画像の「雰囲気」を変化することに適しており、時刻や天候の変化を表現するために用いられる [4] が、テクスチャ変化を表現できない (図 6(d) 参照)。一方でテクスチャ変換 [5] には、Exemplar 画像に含まれる小領域 (パッチ) を Source/Target 画像の対応に基づき Target 画像上にコピーすることで、テクスチャの変化を表現する。しかし、Target 画像の画素を全て置き換えることになるため、多くの場合 Target 画像のシーン構造を破壊する (図 6(e) 参照)。

本研究は、色調およびテクスチャ変換を併用し、図 6 に示すように、Target 画像のシーン構造を保持したままテクスチャ変化を伴う季節変化を表現する手法を提案する。提案手法は、色調変換が Exemplar 画像の局所領域を十分に表現しているかどうかを評価し、そうでない部分にのみテクスチャ変換を施す。提案手法を用いて、季節変化や洪水など、テクスチャ変化を含む写真の情景変化を表現可能になる (図 6(e) 参照)。

3.1 提案手法の流れ

提案手法は、Source S , Exemplar E , Target T 画像を入力とする。Source/Exemplar 画像は、同じシーンを異なる

時刻や季節に撮影した写真であり、事前に位置合わせがなされているものとする。Target 画像は、Source 画像との密な対応付け [6] で良好な結果が得られる程度に、似た内容のシーンを選択する必要がある。出力画像 O として、Target 画像と同じシーンで、Exemplar と同様の見えを持つ画像が生成される。

Source/Exemplar 間に含まれる情景の変化を、色の変化 (青空と曇り空、緑の草原と枯れた草原など) と視覚的に新たな物体 (テクスチャ) を生成する必要がある変化 (枯れ木と夏の木など) に分離することが、提案手法の根幹となるアイデアである。そのために、提案手法は Source/Exemplar 画像ペアを学習セットとして、テクスチャ変換が必要な領域を予測する。

予測処理 (図 7(a) 参照) では、色調変換によって Source 画像 S を Exemplar 画像 E に近づくように色調変換し、変換結果の画像 S_c と E の相違度 ε_s を評価する。ここで、相違度 ε_s が高い領域は、色調変換により十分に E の見えが表現されておらず、テクスチャ変換が必要な領域であるといえる。変換処理 (図 7(b) 参照) では、Source 画像 S , Target 画像 T 間の密な対応付けに基づき Target 画像上での相違度を計算し、相違度が低い領域に色調変換を施し、相違度が高い領域に Exemplar 画像のパッチをコピーするテクスチャ変換を施す。

3.2 実験結果

図 8 上部に、提案手法により全自動で生成された結果を示す。また、より複雑なシーンを対象として、半自動で



図 8: 上: 全自動で生成された結果。下: 半自動で指定された領域分割結果 (図 9) を入力とした結果。提案手法は、草原や建造物などの変更の必要がないテクスチャを保持したまま、テクスチャ変換が必要な領域のみに樹木の葉や積雪を生成した。

Source/Target 画像それぞれの領域分割および領域間の対応関係を指定し、密な対応付け時の制約として用いた結果を図 8 下部に示す。提案手法は色調・テクスチャ変換それぞれのみを用いた結果と比較して、より自然に冬から夏への季節変化や積雪などによる劇的な見えの変化を表現可能であることを確認した。

4. まとめ

本論文は、「バーチャルタイムマシン」を実現するための 2 つの手法を紹介した: 1) オフラインレンダリングの品質を生かす軽量 IBR を用いた、仮想化実空間への仮想物体合成 [1]、2) 色調・テクスチャ変換の選択的適用による、テクスチャ変化を伴う季節変化の表現 [2]。いずれの手法も VR や CG における画期的なアイデアに基づき、これまで誰も見たことのないような情景を作り出す手法である。しかし、仮想化された実空間内で自由な時間・空間移動を実現するには至っていない。著者らは今後、現時点で 1 枚の写真をターゲットとする色調・テクスチャ変換による季節変化表現を、多視点画像に基づく仮想化実空間に拡張することで、真の「バーチャルタイムマシン」実現に寄与しようと考えている。

謝辞 本研究は、文部科学省特別経費「アンビエント環境知能研究創出事業」、日本学術振興会科学研究費補助金 基盤研究 (A) No.23240024、および特別研究員奨励費 No.25-7448、頭脳循環を加速する若手研究者戦略的海外派遣プログラム (G2503) による。



図 9: 図 8 下の結果を出力するための入力とした、半自動で指定された領域分割結果

参考文献

- [1] F. Okura, M. Kanbara and N. Yokoya: “Mixed-reality world exploration using image-based rendering”, ACM JOCCH, **8**, 2, p. 9 (2015).
- [2] F. Okura, K. Vanhoey, A. Bousseau, A. Efros and G. Dretakis: “Unifying color and texture transfer for predictive appearance manipulation”, Computer Graphics Forum (Proc. EGSR) (2015).
- [3] P. Debevec, C. Taylor and J. Malik: “Modeling and rendering architecture from photographs: A hybrid geometry- and image-based approach”, Proc. ACM SIGGRAPH’96, pp. 11–20 (1996).
- [4] Y. Shih, S. Paris, F. Durand and W. Freeman: “Data-driven hallucination of different times of day from a single outdoor photo”, TOG, **32**, 6, p. 200 (2013).
- [5] A. Hertzmann, C. Jacobs, N. Oliver, B. Curless and D. Salesin: “Image analogies”, Proc. SIGGRAPH’01, pp. 327–340 (2001).
- [6] C. Barnes, E. Shechtman, A. Finkelstein and D. Goldman: “Patchmatch: a randomized correspondence algorithm for structural image editing”, TOG, **28**, 3, p. 24 (2009).

風の適切な提示を目指した頭部風向知覚特性の測定

Measurement of Property of Wind Direction Perception for presenting wind in accurate way

中野拓哉¹⁾, 柳田康幸²⁾

Takuya NAKANO and Yasuyuki YANAGIDA

1) 名城大学大学院 理工学研究科

(〒468-8502 愛知県名古屋市天白区塩釜口 1-501, 133441503@ccalumni.meijo-u.ac.jp)

2) 名城大学 理工学部

(〒468-8502 愛知県名古屋市天白区塩釜口 1-501, yanagida@ccalumni.meijo-u.ac.jp)

Abstract: Recently, several VR systems that use wind to enhance users' sensation of presence have been built. In typical systems, simple fans are often used as wind sources and those wind sources are arranged rather sparsely. However, it is not known whether the wind direction is presented precisely enough with such a configuration. In order to find a guideline for optimal arrangement of wind sources, we examined the properties of wind direction perception at the head. We measured the just-noticeable difference (JND) on the perceived wind direction at the face using a method of constant stimuli.

Key Words: Wind direction perception, JND, wind display.

1. はじめに

バーチャルリアリティにおいて、いわゆる「臨場感」を高めるための手法はいくつか存在する。有名な Sensorama[1]では、風や臭いなどを映像と同時に提示することで、臨場感を高めている。臨場感は、視覚のみでなく、触覚や嗅覚といった感覚器官で感知される外界の物理情報に基づいている[2]。よって、映像のみを提示するよりも、五感を活用した方がより臨場感は高まる。

なかでも触覚提示技術の発展は著しく、物体との相互作用により、あたかも本物に触れているかのように感じさせることができる。近年では風を用いて非接触に触覚を提示する研究も盛んになってきている。小木らは風が当たった時の感覚を「風覚」と定義しており[3]、風覚を利用した研究が数多く存在している。

しかしそのような研究では多くの場合、風源を等間隔に疎に配置している。このような疎な配置で正確に風向を提示できているのか疑問が生じる。従来、風覚提示における空間性に着目した研究は少なく、風向に関して系統的かつ詳細な調査が十分に行われているとは言いがたい。正確に風向を表現できていなければ、システム設計者の想定した風向と実際に感じた風向との差にユーザは違和感を覚えると考えられる。逆に風源を密に配置し過ぎると、ユーザは隣接するファンを区別できなくなると考えられるため、オーバースペックとなる。人間の風向識別能力に合わせた風源の配置を行えば、無駄な風源を使用せず、自然に吹く風を再現できるようになると期待される。また、より現実

に近い風を提示することで音や映像との相乗効果も更に高まると考えられる。

そこで、我々は正確に風向を表現することを目標とし、人の風向知覚特性を測定した。

2. 関連研究

風覚を用いて環境を再現する研究はいくつか行われている。一例として、古くは Heilig による Sensorama[1]が挙げられる。Sensorama はマルチモーダル映画であり、視覚や聴覚だけでなく、触覚や嗅覚にも刺激を与える。その中に、前方から風を感じることができると風覚も含まれ、街中をオートバイで疾走するコンテンツが存在した。

Moon らは、人を覆うフレームにファンを設置した風覚ディスプレイ Wind Cube の設計と評価を行った[4]。フレームに3つのレベル(45度間隔)にファンを設置している。上端からの風は、判別がつきにくいので、4つ(90度間隔)とし、残りの2つのレベルには8つ(45度間隔)と、計20個のファンを用いている。また、上端と下端のファンは体の上部に風が当たるように傾けられている。Moon らは、被験者をこの装置の中に入れ、スクリーンに表示された吹雪の映像を見せ、ファンを動作させた場合と、させない場合で被験者が感じる現実感に違いがあるかを実験している。実験の結果、風を発生させた方が、現実感のはるかに高まるといった結果になった。

Cardin らの Head Mounted Wind[5]では、フライトシミュレータの現実感を向上させるために風を用いている。HMD

の周囲に8つのファン取り付けすることで、実際のフライトのように風提示を行っている。

これらの研究では、風による現実感の向上をそれぞれ達成しているが、風向知覚特性は解明されていないため、最適な風源の配置であるとは言えない。このような疎な配置で正確な風提示が可能なのかどうかという疑問が生じる。

風覚提示を行う際、考慮すべき要素はいくつか存在する。例えば、風速が変化すれば、風圧や風量も変化するため、ユーザが感じる印象も変わる。風速の知覚下限はおよそ0.2 m/s であるが、風温や風速の変動率によっても変化する[6]。風温が高い、風速の乱れが大きいほど風を感じやすくなる。また、顔の中でも口や鼻などで風の知覚しやすさが違う[7]ので、用いる風の風速分布を把握しておく必要がある。このように、人の風覚に関する特性を調査した研究はいくつか行われている。

小坂らの研究では、ドーム状の骨組みに45度間隔に配置した25個のプロアファン(耳の高さ、仰角45度、仰角-45度にそれぞれ8個ずつと頭頂部の1個)のうち、どこから風が出力されているかを問う正答率と、風が来たことを知覚する反応時間について、3種の風速を用いて計測している。その結果、左右に比べて前後の正答率が低く、仰角が45度以上のところでは反応時間が遅いなど、空間方位的に不均一な風覚認知が行われていることが明らかにされた[8]。しかし、ファンの配置間隔が大きいため、分解能は測定されていない。

小島らの研究では、頭部へ局所的な風を提示し、風が知覚されやすい部位の検証を行っている。その結果、耳周辺が風を敏感に感じるということが明らかにされた[7]。

また、橋本らの研究では、風覚における指先の絶対閾を極限法で、弁別閾を恒常法で測定している。さらに、指先の方向弁別閾の測定も行っている[9]。

また、小木らの研究では、手における風向の知覚実験を行っている[1]。

これらの研究では、人間の顔における風向知覚特性が測定されていない。風向知覚特性を明確にすることにより、風を提示する際、最適な風源配置が可能になる。

3. 実験概要

3.1 内容

風向知覚特性の調査は、被験者の顔に向けて風を提示することによって行う。心理物理学的測定法の一つである恒常法を用いて丁度可知差異(JND)を測定する。標準となる風(標準刺激)を設定し、それに対して比較すべき風(比較刺激)を与える。比較刺激が標準刺激よりも右から感じたか、左から感じたかを被験者に答えさせ、JNDを算出する。関連研究より、耳が最も風を感じやすい[7]ことが示されており、刺激部位によって、風向の判断のしやすさが変わる可能性があるため、顔正面と顔背面と2箇所で行う。

3.2 装置

風源には、SilverStone社の120mm PCファン「SST-AP121」を用いる。最大1.0 m³/minの風量を出力でき、騒音値は22.4 dBAである。このファンは一般的なファンと比べ高い指向性・直進性を持っている。直進性が高いと、狙った場所に風を送ることができる。図1に一般的な(指向性・直進性が考慮されていない)ファンとの風の流れの違いを示す。比較に用いたファンは山洋電気社の120mmファン「109R1212H102」である。



図1 風の流れ(左:通常のファン, 右: SST-AP121)

既存の風覚ディスプレイの多くは、風源として単発の小型ファンを用いており、顔や頭部の一部に風が当たる、局所的な風が提示されている可能性がある。しかし、自然界の風はそれほど局所的でなく、頭部全体にわたってほぼ均一な風にさらされる場合が多いと考えられる。顔や頭部の一部にしか風が当たらない場合、人間は顔や頭部のどこに風が当たるかを風向判別の手がかりとして利用するのに対し、頭部全体に均一な風が当たる場合はこの手がかりを利用できないため、局所的な風と均一な風では人の風向知覚の精度が異なる可能性がある。そこで、本研究ではファン単発による局所的な風と顔全体を包み込む均一な風を提示し、結果を比較する。均一な風は図2のようにファンをアレイ状に組み合わせることで実現した。



図2 風源ユニット

複数の位置からファンによる風を被験者に提示するが、ファンの個体差による影響を防ぐため、風源は図2の3×3のユニット一つだけを用いる。被験者の頭部中心を中心とした円弧180度のレールに移動部を取付け、風源ユニットをその上に乗せ、風源を物理的に移動させる。風源と被験者との距離は80 cmであり、1.3 m/sになるように風速を調整する。

実験中に頭部位置がずれることを防ぐため、顎台を用いる。また、モーター音で方向を特定できないように、イヤ

ホンからホワイトノイズを流した。また、ファンの移動先を視覚的に判断できないようにする必要があるが、目隠しなどは風を受ける面積が減ってしまうため、使用しない。被験者には実験中ずっと目を閉じているよう指示した

実際の実験装置の配置は図3のようになる。顎台を装置台に固定すると、モーターの振動が伝わってしまうため、顎台を固定する台と装置台は離している。



図3 実験装置の全体図

3.3 方法

JNDの測定は恒常法によって行う。顔正面の測定は被験者の正面0度を標準刺激とし、-15度から+15度まで5度間隔の7つの位置からの風を比較刺激とする。被験者は風源の正面に座り、顎台に顔を乗せ、目を閉じた状態で実験を開始する。顔背面の測定は背面を0度とする(図4)。

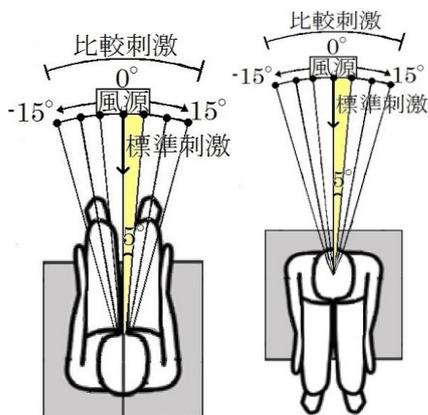


図4 装置構成図(左:正面, 右:背面)

初めに標準刺激を提示する。次に風源が-15度から+15度のいずれかの位置に移動し、比較刺激を提示する。被験者は比較刺激が標準刺激と比べて右から来たか、左から来たかを答える。次に風源が最初の位置(0度)に戻り、標準刺激を提示する。次に、また風源が-15度から+15度のいずれかの位置に移動し、比較刺激を提示する。これを7つの位置でそれぞれ10回ずつ比較刺激を提示するまで繰り返す。つまり、標準刺激と合わせて計140回の刺激が与えられる。

実験を始める前に、モーター音などで方向を判断できないように、実際に被験者に目を閉じさせてモーターを動か

し、確認する。もし、音が聞こえるようなら、聞こえなくなるまでホワイトノイズの音量を大きくする。

20代男性10名に対して、局所的な風と均一な風の2種類の風を用いて、顔正面と背面の2か所で実験を行った。ただし、正面と背面では異なる被験者を用いた。

3.4 結果

被験者が右と答えた確率と実際の提示角度とのグラフを図に示す。正規分布の累積分布関数をフィッティングさせJNDを算出した。例として、図5に正面での単発の1名分の結果を示す。また、単発での10名の算出したJNDと風源ユニットでのJNDを表1,2に示す。

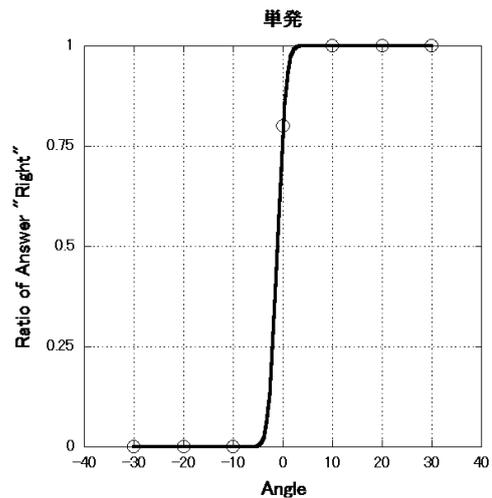


図5 ある被験者が右と答えた確率(正面・単発)

表1: 単発での被験者毎のJND(度)

被験者	正面	背面
1	2.12	3.44
2	0.50	4.65
3	1.59	7.00
4	3.11	1.85
5	0.50	0.49
6	1.85	23.2
7	3.70	10.8
8	3.72	7.14
9	2.74	10.7
10	2.62	3.16

表2: 3×3での被験者毎のJND(度)

被験者	正面	背面
1	7.12	3.90
2	5.44	6.47
3	5.08	3.06
4	5.56	4.47
5	3.29	3.53
6	6.57	5.74
7	3.13	10.4
8	5.53	16.8
9	6.93	52.8
10	3.05	0.80

10名のJNDを平均すると正面でのJNDは単発で2.24度、3×3で5.17度であり、背面では単発で7.24度、3×3で10.8度となる。どちらもJNDが増加している。しかし、背面における単発での被験者6や3×3での被験者9など、大きく値が外れている被験者も存在したため、検定を用いて、外れ値かどうか確認した。結果、背面における単発での被験者6、3×3における被験者8,9は外れ値であることがわかったため、除外してJNDを平均したところ単発で5.47度、3×3では4.80度となった。

正面でのJNDと背面でのJNDの値に有意差があるか確認するために検定を行う。正面と背面では被験者が異なるため、対応のないt検定を用いて検定を行ったところ、単発の場合、 $P(T \leq t)$ の値は両側で0.033となり、5%水準で有意差があるという結果になり、風源ユニットでは、 $P(T \leq t)$ の値は両側で0.743となり、5%水準で有意差がないという結果になった。よって、単発では顔正面よりも背面の方が風向を知覚しにくく、均一な風では差はないという結果になった。

3.5 考察

顔に均一な風を提示した場合、局所的な風を提示するよりも風向判断がしにくくなることが示された。これは、局所的な風の場合、顔のどの点に最初に風が当たったか(強く当たるか)で方向を判断できるが、均一な風の場合、顔全体に風が当たるため最初に風が当たった部位がわかりにくくなったためだと考えられる。そのため、風がどちらに流れていくかなど、方向判断の仕方を変える被験者も存在した。単発の場合、全ての被験者が風の当たった場所で左右を判断していたが、風源ユニットでは風がどちらに流れるかで判断していた被験者が存在した。また、風の当たる範囲が単発より広いので、首や腕にまで風を感じ、方向判断の参考にしたと答える被験者も存在した。このように風が均一になると、個人差が生じやすくなると考えられる。

また、局所的な風の場合、正面よりも背面の方が風向を判断しにくいことが示された。単発の場合、正面では鼻を基準としてどちらの頬や耳などに風が当たったかで風向を判断していたが、背面の場合、頭髮があるため、風の高さである後頭部中心に風を感じた被験者は10名中1名のみであった。多くの被験者は首や頭髮の揺れで判断をしていた。最も風が強い後頭部中心で風を感じることができず、首では鼻のような基準となるものもないため、正面よりもJNDが増加したと考えられる。

均一な風の場合、顔全体に風が提示されているので、首にも強い風が当たっており、正面と差が出なかった。

4. まとめ

本研究では、風提示ディスプレイでしばしば利用されて

きた単発のファンによる局所的な風と、自然な風により近い均一な風に対する風向知覚のJNDを測定した。その結果、均一な風の方が局所的な風よりもJNDが大きくなり、風向を判断しにくいことが示された。

また、顔正面と背面に対して風向知覚実験を行った。結果として、ファン単発による局所的な風を提示する場合、正面よりも背面の方が風向を知覚しにくいことが分かった。また、ファンを3×3に組み合わせた風源ユニットによる顔全体を包み込むような均一な風では正面と背面で差はないということが分かった。

風向の知覚には、風速、風温、性、年齢など多くの要素が影響していると考えられるため、得られたJNDの値をそのまま風源配置に利用するのは早計である。また、本研究の実験で被験者は風向判断のみに集中しているが、実際の風提示ディスプレイでは映像や音声などが存在しており、風への注意度が下がるため、本研究の結果よりも風源間隔を大きくすることが許容される可能性が考えられる。そのため今後は、老若男女問わず利用可能な風提示ディスプレイにおいて正確に風向を再現するためにはどこまで知覚特性を考慮すべきか検討し、それぞれの要素を確認する実験を行い、視覚や聴覚など他の感覚との統合効果を検証していく。

参考文献

- [1] M. L. Heilig : Sensorama Simulator, US Patent 3,050,870, 1962.
- [2] 日本バーチャルリアリティ学会(編) : バーチャルリアリティ学, コロナ社, 東京, 2011.
- [3] 小木, 廣瀬: 科学技術データ提示における多感覚の統合効果, 日本機械学会論文集, C編, Vol. 61, No. 584, pp. 322-328, 1995.
- [4] T. Moon and G. J. Kim: Design and Evaluation of a Wind Display for Virtual Reality; Proc. the ACM symposium on Virtual reality software and technology, pp.122-128, 2004.
- [5] S. Cardin, F. Vexo and D. Thalmann: Head Mounted Wind, Proc. the 20th annual conference on Computer Animation and Social Agents, pp.101-108, 2007.
- [6] 窪田: 室内気流と体感, 空気調和・衛生工学, Vol. 58, No. 3, pp. 243-248, 1984.
- [7] 小島, 橋本, 梶本: 皮膚を局所的に刺激するウェアラブル風覚提示デバイスの基礎的検討, 日本バーチャルリアリティ学会第13回大会論文集, pp. 465-468, 2008.
- [8] 小坂, 宮下, 服部: 没入型三次元風覚ディスプレイの開発と評価, インタラクシオン2007論文集, pp. 105-112, 2007.
- [9] 橋本, 今枝: 人間の指先における微風の知覚特性に関する研究, 信学技報, Vol. 106, No. 91, pp. 35-40, 2006.

視触覚間相互作用を用いた形状知覚操作

Modifying Shape Perception Using Visio-Haptic Interaction

伴 祐樹¹⁾

Yuki BAN

1) 東京大学 大学院情報理工学系研究科

(〒113 東京都文京区本郷 7-3-1, ban@cyber.t.u-tokyo.ac.jp)

Abstract : In our research, we aim to construct a visuo-haptic system that can provide users with the sensation of touching virtual objects of varying shapes, using visuo-haptic interaction. We compose a video see-through system through which we can change the shapes of objects the user is visually touching, and displace the visual representation of the user's hand and modify its posture as if s/he were touching the visual shape although in actuality s/he is touching another shape. Using this system, we perform experiments to investigate the effects of visuo-haptic interaction for altering the perception of curvature, angle and size of shape. These results prove the possibility for constructing a novel visuo-haptic shape display system.

Key Words: Shape Display, Visuo-Haptics, Virtual Reality

1. はじめに

これまで主にバーチャルリアリティの分野において、様々な触力覚提示デバイスが開発されてきた。しかし、その多くは提示する力を物理的に再現するというコンセプトに基づいているため、表現可能な触力覚の精度・分解能を向上させるためには、リンク系やワイヤなどによって構成される機構が複雑になるといったトレードオフがあった。一方、感覚情報提示の新たな方法論として、近年感覚間相互作用に注目が集まっている。触覚に関する感覚間相互作用についても様々な研究がなされており、特に視覚-触覚間には強く効果の発生する錯覚融合現象が観察されることが知られている。例えば、身体動作とそれを反映した視覚刺激の間に齟齬が生じた場合、擬似的な触力覚が生起される Pseudo-Haptics という現象が有名である [1]。

多くの先行研究では、空間、時間的に変換された視覚刺激を作りやすいことから、操作対象としてマウスカーソルのような自己の運動を投影したものが利用されてきた。また、Lecuyer は、Pseudo-Haptics を生起させる身体運動と、その投影部との物理的距離が遠いほど、Pseudo-Haptics の影響力は強まるとしている。しかし、バーチャルリアリティにおいて触力覚を提示する際には、そうしたポインタを介さず、実際に手で直接触れているような体験を生成できることが望ましい場合がある。Pusch らは、手等の身体自体を直接的に操作対象としても Pseudo-Haptics が生じることが確かめており [3]、直接手を用いる触力覚インタラクションにも視触覚間相互作用の効果が表れると考えられる。

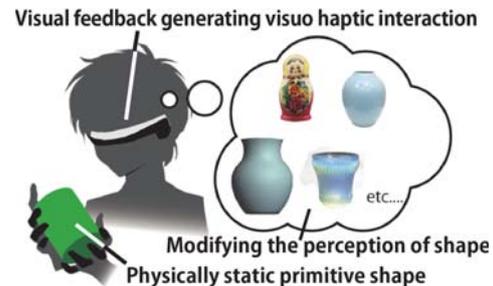


図 1: 視触覚間相互作用を利用した形状提示システム

物理的な触覚刺激に基づいて知覚される形状を、視覚刺激の影響によって様々なに変化される研究も行われている。Rock らはキューブの大きさを人間が判断する時の触覚に対する視覚の影響を調査し、同サイズのキューブを触っている状況下でレンズによってキューブの大きさを変化させながら観察を行うと、その変化に伴ってキューブに触れた時に感じる大きさが変化することを示した [4]。物体の形状や幅、角の角度等についても同様に視覚によって触覚が影響を受けることが確認されている [5, 6]。

筆者らはこのような視触覚間相互作用を利用することで、簡易な触力覚提示デバイスから、多様な形状のバーチャル物体を指でなぞる感覚を提示可能な視触覚システムの構築を目指している。具体的には、物理的触力覚提示部に触れているユーザの手の動きや姿勢を映像として取得し、それを空間的・時間的に変換して視覚提示することで、視触覚間相互作用の効果を生起させ多様な形状の物体表面をなぞ

る感覚が提示可能な視触覚システムの構築を目指している(図1)。そのような複雑な機構を持たず、かつ表現力の高い視触覚システムが構築できれば、機構が単純なためにメンテナンス性が高く、公共の場などでの長期的な運用も可能になると考えられる。

本研究の目指すシステムの構築に当たっては、静的単純形状物体からの多様な形状提示と、バーチャル物体に対する様々な触り方への対応を実現する必要がある。本稿では、これらの2つのアプローチに対する筆者らの取り組みについて述べる。

2. 多様な形状を提示する為の基本触覚要素に対する知覚操作

まず、視触覚間相互作用を用いて多様な形状を提示する為に必要な触覚要素の検討を行うため、実際に触っている形状と見ている形状が異なる実験装置を構築した(図2)。この実験システムを用い、ユーザに形状変形しない物体を指一本で触らせつつ、モニタに映す物体形状や手の動きを変化させることで視触覚間相互作用の効果を生起させ、様々な形状の物体をなぞる体験が可能か検討を行った(図4)。

複雑な形状を含んだ様々な形状に対する触覚体験は、凹凸局面、角面といった形状提示のための基本触覚要素を組み合わせることで実現可能になると考えられる。そのために必要な基本触覚要素は、指で触れている部分が凹凸曲面なのか角なのか、といった局所的な形状に対する知覚と、それらの基本形状が物体上にどのように配置されているかといった形状の位置や角度に対する知覚に分類される(図3)。

2.1 局所的提示に対する知覚操作

触っている部分における局所的な形状提示に関しては、ユーザに変形しない円筒形を触らせつつ、モニタに映す物体形状や手の動きを変化させることで視触覚間相互作用の効果を生起させ、様々な形状の曲面をなぞる体験が可能か検討をおこなった。その結果、視覚提示する形状により差は見られるものの、7~8割の確率で視覚提示した形状を触っているとの回答が得られた(表1、表内における $S_{physical}$ は物理的に提示した形状、 S_{visual} は視覚的に提示した形状を表しており、数値は視触覚間相互作用の効果が生起され被験者が S_{visual} を触っていると知覚した割合を示す)。また、表1上段は手映像を重畳した結果、下段はバーチャル物体だけを提示した結果を示しており、このことから、本システムによる形状知覚操作の効果は動きを変調した手映像を重畳してこそのものであり、手映像を提示せず、バーチャル物体だけを提示した場合は同等の効果が得られないことも明らかになった。

2.2 空間的提示に対する知覚操作

基本形状の物体上での配置位置、角度に対する知覚操作については、図5のような板の上に複数の角形状が平行、等間隔に配置された物体を物理的刺激として用意し、視覚刺激として物体上の角形状の位置や角度を様々な変化させた映像を提示する実験を行った。その際、実際に触っている物

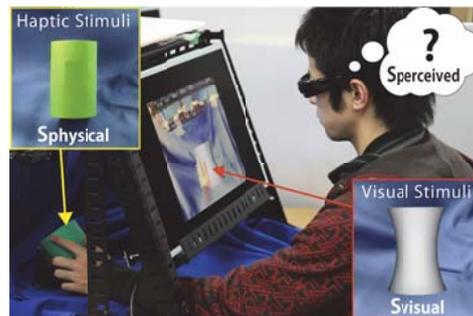


図2: ビデオシスルー実験装置

体と提示映像内の物体で、指が角形状を通過するタイミングを揃えることで視触覚間相互作用の効果を生起し、様々な形状に触っている感覚を提示可能か検証した。つまり図5の場合、実際は被験者が角面に指をそわせ真横に手を動かしていたとしても、モニタ上の手の動きはバーチャルな角面に合わせて斜めに動くことになる。

被験者が知覚した形状を得る方法に関しては、角形状の配置位置や角度が自由に操作可能な回答用のデバイスを用意し、モニタ裏にある物体とこのデバイスとを触り比べ、被験者が触っていると感じた形状をデバイスによって再現させることで、物理的等価点を得る手法を採用した。その結果、位置に関しては実際に触ってる角間距離と映像内の角間距離の比が0.7~1.3、角度に関しては実際に触っている角と映像内の角の角度差が±30に収まっている場合、視覚提示した形状を強く知覚することが示された(図6)。図fig:result11は、被験者に対して水平に配置(0度)された角面を触った際の視覚提示角度と、それらの組み合わせにより被験者が知覚した角面の配置角度を示している。以上の実験より、指一本で物体をなぞる場合に関して、本手法を用いることで、視触覚間相互作用の効果が上手く作用し、形状提示に有用であることが示された。

2.3 局所的/空間的提示手法を統合した多様な形状提示

上記の二つの手法を統合することで、簡易な機構のデバイスのみで、より多様な形状を提示できるか検証した。

その際、形状を構成する面の組み合わせ数を変化させるために、ユーザが実際に触る物体上に微小な角面を提示できる機構を付与した(図7)。この微小角面の提示/非提示を切り替えることで、提示するバーチャル物体の構成面数を変化させ、また、バーチャル物体表面形状における連続

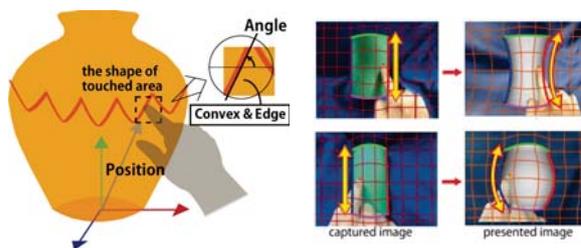


図3: 形状提示要素

図4: 手映像動作の変調

面の曲率, 非連続面形状 (角面) の配置位置/角度の組み合わせを様々に変化させて, それに応じて視覚提示する手の動きを空間変調させることで, 単純な機構の形状要素提示デバイスから多様な形状を提示できるようになると考えた。

形状知覚を操作するための視覚フィードバックアルゴリズムは, 前2節のものを応用し, ユーザがモニターを通して見る物体の形状を変化させると同時に, あたかもその物体を触っているかのように物体変形にあわせて手の動きを操作した映像を提示した。その際, デバイス上の角面とバーチャル物体上の角面を指が通過するタイミングを同期させることで, 適切な視触覚効果が得られるようにした。

製作した可変形状提示デバイスと上記の視覚フィードバック生成アルゴリズムの組み合わせにより, 側面が連続面/不連続面であるバーチャル物体を提示できるか検証したところ, 表9左のような結果が得られた。数値は知覚された形状と視覚提示形状が類似した割合, つまり形状知覚が操作され, 実際とは異なる複雑形状を触っていると被験者が知覚した割合を示している。また, 角面/曲面等複数の形状特徴を含むような複雑多様な形状を提示できるか, 被験者に知覚した形状の絵を描かせ, 視覚提示形状との類似度評価を行ったところ表9右のような結果が得られた。以上により, 物理的形状提示デバイス表面の微小角面の提示/非提示を切り替えることで構成面数の異なるバーチャル物体を触っている感覚を提示できること, また, 形状を構成する各々の面や不連続面の曲率・角度等の基本形状要素が今まで個々に確かめた形状知覚操作可能範囲内に収まっていれば, 不連続面を含む多様な形状を触っている感覚を物理デバイスの微小な形状変形のみで提示できることを確かめた。

3. 多様な触り方に対応する手法の検討

前章の実験から, 指一本で物体の表面や側面をなぞる接触方法については視触覚間相互作用の効果が十分に表れ, 形状提示に応用できることが明らかになった。しかし, 汎用的な触力覚提示システムを実現するにあたっては, 多指での握り動作や掌を使ったつかみ動作といった物体への様々な接触方法に対応する必要がある。

本研究では, その第一歩として母指と示指で物体をつかむ事による形状知覚に着目し, Image Deformation アルゴリズムである RigidMLS[8] を応用して手形状を変形することで, 取得した手の動きの空間変調だけでなくその姿勢をも自然な形で変調し, 接触点が多数ある場合も空間的整合

表 1: 視覚提示形状と知覚形状が一致した割合 (%)

visual \ physical	1	2	3	4	5
1	95.0	75.0	80.0	90.0	60.0
2	85.0	15.0	5.0	20.0	0.0

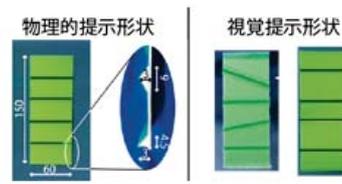


図 5: 角面の配置位置角度に対する知覚操作

性のとれた視覚フィードバックを合成可能なリアルタイム映像処理手法を構築した。

本研究ではまず, 提案手法により多指で挟んでいる物体の大きさに対する知覚を操作可能か検証を行い, 変形許容量を明らかにした。図8のように画像変形アルゴリズムを利用して取得した手の領域を変形し, 変形後の物体を握っているかのような画像を生成する。実験の結果, 実物体の大きさ (直径: $D_{physical}$) に対しその差が40%~35%に収まる範囲であればつかんでいる物体の大きさに対する知覚を操作出来ることが明らかになった (図9)。

しかし, この検証では実際の指間距離が変化しない状況では提示する手映像の指間距離も変化しない。バーチャル物体の表面を複数指で自由になぞることが出来るようにするためには, 実際の指間距離が変化しない状況においても提示する手映像の指間距離がバーチャル物体の形状に合わせて動的に変化する必要がある。そのため, 多指で物体を挟んでなぞる状況における三次元曲面形状の知覚操作についても検証を行った。

前章の実験と同様, 視覚刺激 ($S_{physical}$) として円筒形, 触覚刺激 (S_{visual}) として凹凸曲面, 円錐台を用意し, 表示する手の動きの空間変調のみを行い指一本で物体に触らせる条件と, 手の姿勢をバーチャル物体に合わせて操作し複数指で物体をつかませる条件とで, 形状知覚操作の効果がどのように異なるか検討した。被験者に課した7段階評価の結果, $S_{physical}$ と S_{visual} との形状差から生じる違和感が, 凹凸曲面を $S_{physical}$ とした場合二本指で触る条件のほうが強いという傾向が得られたものの, それ以外の要素 (図10左: 触っている物体形状が変化した感覚があったか, 図10中央: 視覚提示された形状を触ったと知覚したか) については後者の条件においても前者と同様の効果が得られること

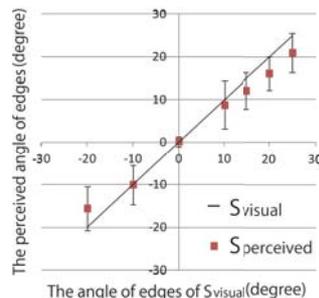


図 6: 視覚提示角度と知覚された角度

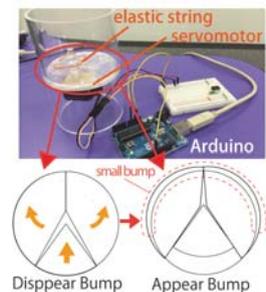


図 7: 形状要素提示デバイス

表 2: 視覚提示形状と知覚形状が一致した割合 (%)

visual	B1	C1	visual	B2	B3	B4	B5
physical			physical				
A1	88.9	0.0	A1	76.7	76.7	70.0	66.7
A2	16.7	94.4	A2	0.0	0.0	0.0	0.0

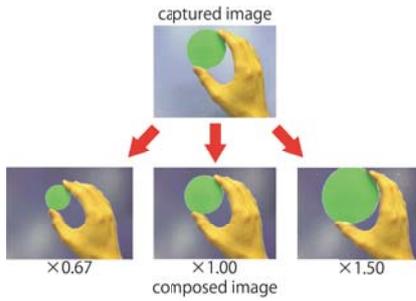


図 8: 手形状変調視覚フィードバック

が示された。以上より、手形状変形フィードバックが、手の動きの空間変調同様、視触覚間相互作用を生起させ形状知覚を操作するのに有用であることが示唆された。

4. 結論と今後の展望

本稿では、筆者らの、視覚触覚間相互作用を利用して簡易な機構で多様な形状提示を可能にするシステムに関する研究について述べた。ユーザの物体を触る手の動きや姿勢を空間変調することで、実際には単一の静的な物体を触っているにも関わらず、あたかも多様な形状を触っているかのような感覚を生起させる手法を構築し、その効果を検証してきた。筆者らは近年、本手法を応用することで、本稿で述べた静的な形状に対する知覚だけでなく、多指で押し込んだり、引っ張ったりした際の物体の硬さといった動的要素についても知覚操作可能なことを明らかにしており [9]、今後はこれらの手法を組み合わせることで、より多様な形状の物体を触っている感覚を提示できるようになると考えられる。

また、本稿で述べたシステムは全て図 2 のような据置型で、ユーザは固定の視点からしか物体を触ることができなかった。しかし、筆者らは手映像の視点方向からの変調量をリアルタイムに算出することで、自由な視点から多様なバーチャル物体を触ることができる手法の構築も進めており [10]、触り方についても、より自由度の高い触体験を可能にするシステムの構築を目指す。

謝辞 本研究は平成 26 年総務省 SCOPE(課題番号 132103004)の支援を受け実施されたものである。

参考文献

[1] A. Lécuyer, "Simulating haptic feedback using vision: A survey of research and applications of pseudo-

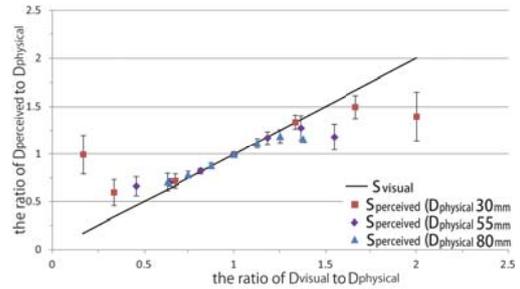


図 9: 把持物体の直径に対する知覚操作の割合

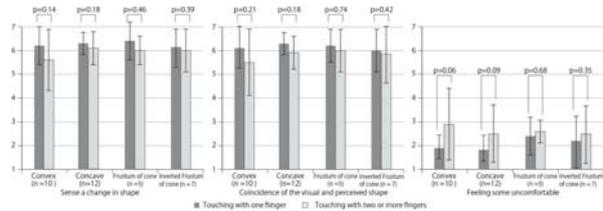


図 10: 一指と多指で触り比べた際の、視覚フィードバックによる形状知覚操作効果の違い

haptic feedback," Presence: Teleoperators and Virtual Environments, vol.18, no.1, pp.39-53, 2009.

[2] F.Argelaguet et al. "A novel approach for pseudo-haptic textures based on curvature information." Haptics: Perception, Devices, Mobility, and Communication. Springer Berlin Heidelberg, pp.1-12, 2012.

[3] A. Pusch et al. "HEMP-hand-displacement-based pseudo-haptics:A study of a force field application and a behavioural analysis," International Journal of Human-Computer Studies, 67(3), pp.256-268, 2009.

[4] I. Rock and J. Victor, "Vision and touch: An experimentally created conflict between the two senses," Science, vol.143, pp.594-596, 1964.

[5] L. Kohli, "Exploiting Perceptual Illusions to Enhance Passive Haptics," Proc. of IEEE VR Workshop on PIVE, pp.22-24, 2009.

[6] E. Abravanel, "The synthesis of length within and between perceptual systems," 1971.

[7] 飯田亮介ら, "線分提示角度差異の視触覚融合に与える効果", 日本 VR 学会論文誌, 3(3), pp.107-110, 1998

[8] Schaefer, S. et. Al.: Image deformation using moving least squares. ACM Transactions on Graphics 25(3), pp.533-540, 2006.

[9] 伴祐樹ら, "手形状変形フィードバックを利用した把持動作における硬さ知覚操作", 日本 VR 学会論文誌, 19(4), pp. 523-532, 2014

[10] Yuki Ban et al., "MagicPot360: Free Viewpoint shape Display Modifying the Perception of shape", IEEE Virtual Reality, 2015

言語音弁別能力の向上のための意識下での ニューロフィードバック手法

Unconscious Learning of Speech Sounds using Mismatch Negativity Neurofeedback

常明¹⁾, 飯塚博幸²⁾, 成瀬康³⁾, 古川正紘^{1,3)}, 安藤英由樹^{1,3)}, 前田太郎^{1,3)}

Chang Ming, Hiroyuki Iizuka, Yasushi Naruse, Masahiro Furukawa, Hideyuki Ando and Taro Maeda

1) 大阪大学 情報科学研究科

(〒567-0871 大阪府吹田市山田丘1-4, chang.ming@ist.osaka-u.ac.jp,

m.furukawa@ist.osaka-u.ac.jp, hide@ist.osaka-u.ac.jp, t.maeda@ist.osaka-u.ac.jp)

2) 北海道大学 情報科学研究科

(〒060-0814 札幌市北区北14条西9丁目, iizuka@complex.ist.hokudai.ac.jp)

3) 独立行政法人情報通信研究機構 脳情報通信融合研究センター

(〒651-2492 兵庫県神戸市西区岩岡町岩岡588-2, y_naruse@nict.go.jp)

Abstract: Learning the speech sounds of a foreign language is difficult for adults, and often requires significant training and attention. For example, native Japanese speakers are usually unable to differentiate between the “l” and “r” sounds in English; thus, words like “light” and “right” are hardly discriminated. We previously showed that the discrimination ability for similar pure tones can be improved unconsciously using neurofeedback (NF) training with mismatch negativity (MMN), but it is not clear whether it can improve discrimination of the speech sounds of words. We examined whether MMN Neurofeedback is effective in helping native Japanese speakers discriminate ‘light’ and ‘right’ in English. Participants seemed to unconsciously improve significantly in speech sound discrimination through NF training without attention to the auditory stimuli or awareness of what was to be learnt. Individual word sound recognition also improved significantly. Furthermore, our results indicate a lasting effect of NF training.

Key Words: Unconscious learning, Language learning, Neurofeedback, Interface

1. はじめに

外国語の習得において、言語の発音や理解ができる前に、言語音の音韻を聞き取ることが必要である。音韻知覚がうまくいかないことによって、コミュニケーションに支障をきたす。しかし、母語に含まれる言語音と含まれない言語音に対する反応が生後6カ月の子供において、既に異なることが報告されており[1]、年齢に従って外国語の母音への感受性は徐々に消失する事が示されている。これらの先行研究から、大人にとって、母語に含まれない言語音を聞き取ることやその学習は困難である事が知られている。例えば、多くの日本人にとってはrとlの音を聞き取ることが難しいとされている[2,3]。また、英語会話者にとっては、中国語の四声(第1音, 第2音, 第3音, 第4音)を弁別するのは非常に難しい[4]。加えて、単語や文法は正解が自明で自習が可能であるが、音韻の聞き取りは間違いに学習者自ら気付くことができず、指導者も間違いを指摘しようにも、具体的にどう直せば正解を促せるかという指導が難しいため、試行錯誤しながら学習を進める必要があり、結果的に莫大な時間や労力を必要とする。

学習という観点で言えば、近年 fMRI (functional magnetic resonance imaging) を利用して、脳の一次及び二次視覚野の活動をフィードバックによるトレーニングすることで視覚識別能力が向上するという Decoded Neurofeedback (DecNef) 技術が実現されている[5]。しかし、この技術は脳活動パターンと活動部位の関係が明らかにするため、学習ターゲットを先に知覚する必要がある。外国語学習時の音韻知覚のような元々知覚できないものに対してはこの方法は適用できない。

単一の音刺激を聞き取るための処理を直接行っている脳活動を同定することは困難である一方で、意識下においてその違いに対応して活動する事象関連電位の一つである潜時100~250msのミスマッチ陰性電位(MMN)が知られている。MMNは、聴覚刺激における変化によって引き起こされ、刺激の変化量によって振幅が増減することが知られている[6]。また、MMNは音刺激に注意を向けなくても観察される[7]。多くの先行研究で意識上の聴覚弁別トレーニングを通して、MMN脳波が増強されることが示されている[6,8]。また、我々の先行研究では、弁別能力の指標とし

て、ピッチの異なる純音に対応して活動している MMN 脳波の振幅を計測し、その情報を視覚刺激の形で学習者にフィードバックし、その情報を手がかりとして、MMN 脳波の振幅が増強するようにトレーニングさせることで、純音の弁別能力が有意に向上することが示唆されている [9].

我々は外国語の音の聞き取り学習に対してこの手法を利用する事を考えている。しかしながら、この手法は言語音に応用が可能かどうか不明である。さらに、外国語習得の際には、音の弁別だけではなく、母語に含まれない単一の言語音を正確に聞き取れる(認知できる)ようにしなければならない。

そこで、本稿では、MMN を利用するニューロフィードバック学習法で言語音の弁別と認知能力を向上できるかを検証する。また、外国語習得における学習持続効果を検証する。

2. 提案方法

本稿では、学習者の意識下において聴覚刺激の違いに対応して活動している MMN 脳波の振幅を抽出し、その情報を視覚刺激の形で意識できるように提示し、その情報を手がかりとすることで自己学習する Neurofeedback 学習(NF 学習)手法を提案する [9]. MMN は音刺激に注意なくとも誘発されるため、学習者は視覚刺激に集中するだけで音韻の弁別学習が意識下で行われると考えられる。

3. 実験

3.1 被験者と聴覚刺激

被験者は 6 名とした。また、全員とも日本語が母語であり、実験で与えられる指示を完全に理解できる事ができた。また、実験協力者は留学の経験がなく、学校の授業以外は英会話などの学習経験がないこと確認した。被験者はランダムに NF 学習グループとコントロールグループにランダムに分けられた。

聴覚刺激では、情報通信研究機構 (National Institute of Information and Communications Technology (NICT)) が作成した合成音 (女性の声) を音刺激として用いた。この合成音の持続時間は 460ms であった。

3.2 主観聴覚能力テスト

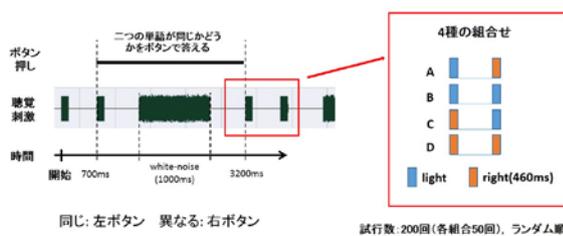


図 1 単語 “right” と “light” の弁別テスト

主観聴覚能力テストは、弁別テストと認知テストで構成され、トレーニング前(pre)と後(post)、またトレーニング

が終わってから 1 週間後(one week later)に行われた。弁別テストとは、主観的に弁別できるかどうかを検証するテストである。“light” と “right” の 2 つの単語の組み合わせである 4 条件を設定し、ボタン押しによって呈示された単語が同じかどうかを二肢強制選択法で被験者に回答させた。認知テストでは、1 つの単語が聞かせる際に、この単語を認知できるかどうかを検証するテストである。テスト方法としては二肢強制選択法によって被験者から回答を得た。

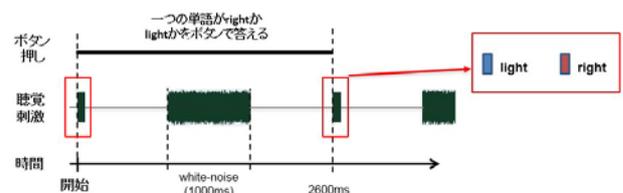


図 2 単語 “right” と “light” の認知テスト

3.3 トレーニング実験

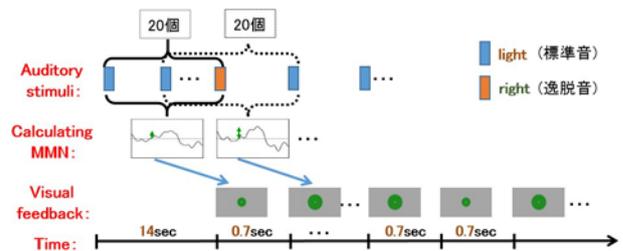


図 3 ニューロフィードバックトレーニング

学習開始前に、被験者に椅子に座るよう指示し、手前のモニタに灰色の背景で緑色の円 (0.4deg) を提示した。被験者に「後で音を流しますが、音を無視して、何を考えてもいいので、緑の円を大きくするようにしてください」という指示を与えた。標準音 “light” と逸脱音 “right” は 4 : 1 の比率でランダムに一定の間隔 (0.7sec) でイヤホンを用いて被験者に呈示された。最初の 20 個の音の呈示中に引き起こされる MMN の振幅を用いて、最初の円の大きさが決められた。そして、1 個目の標準音に対応する脳波データを 21 個目の音に対応する脳波データに入れ替えて、もう一度 MMN 脳波の振幅を算出した。これらの計算結果を利用して視覚刺激の円の大きさを変化させた。図 3 に示すように、この算出結果に基づき 0.7 秒ごとにデータを更新し、同時に視覚刺激の円の大きさを更新した。また、緑色の円の大きさは 0.4~5.0deg の範囲で変化するように設定した。コントロール実験においては、視覚刺激の円はコントロールグループの被験者の MMN 振幅に対応させるのではなく、NF グループの被験者のデータを用いて円の大きさを変化させている。一つのセッションは 300 個の音刺激を含む。各学習日には 12 セッションが行われる。各被験者は合計 5 日の学習を行った (学習日は連続する必要はないが、最長

でも10日以内で完了するように日程を調整した)。

4. 結果

4.1 意識上における聴覚能力の向上

まず, pre, post と one-week follow-up test で行われた主観聴覚能力テストの結果から聴覚能力の変化を確認する。“light” と “right” の違いが弁別できるかを検証するための弁別テストの結果は図 4. a に示す通りである。ANOVA によって, グループ要因による主効果に有意差が認められた ($F(1, 12) = 24.83, P < 0.01$)。NF 学習グループとコントロールグループの間でトレーニング前の弁別テストである pre-test では正答率に有意差は認められなかったが ($F(1, 12) = 0.45, n.s$), トレーニング後の弁別テストである post-test では有意差が認められた ($F(1, 12) = 22.17, P < 0.01$)。また, 学習前後の要因による主効果に有意差が認められた ($F(2, 12) = 6.91, P < 0.05$)。コントロールグループが学習により正答率における有意な向上見られなかったが ($F(2, 12) = 0.36, n.s$), NF 学習グループは, 学習前後の弁別正答率の間に有意差が認められた ($F(2, 12) = 16.00, P < 0.01$)。さらに, グループ要因と test 要因の間に交互作用に有意差が認められた ($F(2, 12) = 9.45, P < 0.01$)。NF 学習グループにおいて, 各 test の間に有意差が認められたため, LSD 法により, 多重比較を行なった結果, pre-test よりも one-week follow-up test のほうは正答率が有意に高かった ($MSe = 82.9515, p < 0.05$)。post-test と one-week follow-up test の間に有意差が認められなかった。

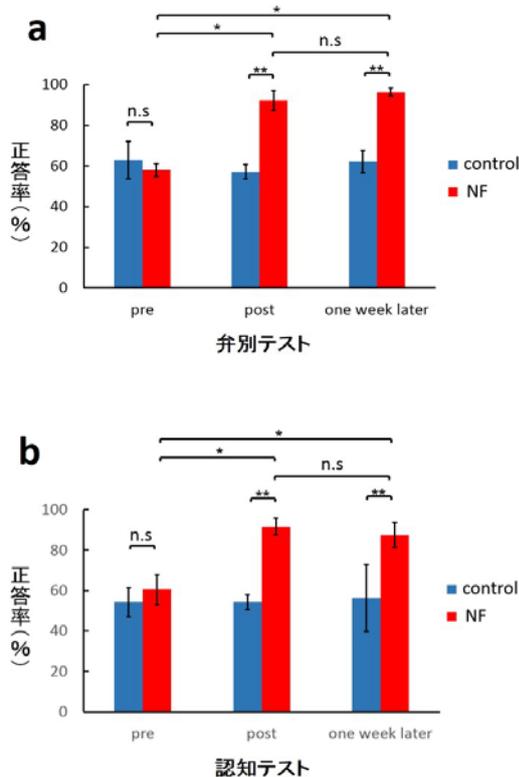


図 4 主観聴覚能力テスト結果

そして, “light” と “right” の中でどちらの 1 つの単語を聞かせて, その単語を認知できるかを検証するための認知テストの結果を図 4. b に示す。ANOVA によって, グループ要因による主効果に有意差が認められた ($F(1, 12) = 24.92, P < 0.01$)。NF 学習グループとコントロールグループの間でトレーニング前の弁別テストである pre-test では正答率に有意差は認められなかったが ($F(1, 12) = 0.52, n.s$), トレーニング後の弁別テストである post-test では有意差が認められた ($F(1, 12) = 18.69, P < 0.01$)。また, 学習前後の要因による主効果に有意差が認められた ($F(2, 12) = 4.06, P < 0.05$)。コントロールグループが学習により正答率における有意な向上見られなかったが ($F(2, 12) = 0.04, n.s$), NF 学習グループは, 各 test 条件の弁別正答率の間に有意差が認められた ($F(2, 12) = 7.65, P < 0.01$)。さらに, グループ要因と test 要因の間に交互作用に有意傾向が認められた ($F(2, 12) = 3.63, P < 0.10$)。NF 学習グループにおいて, pre-test よりも one-week follow-up test のほうは正答率が有意に高かった ($MSe = 112.8472, p < 0.05$)。pre-test と one-week follow-up test の間に有意差が認められなかった。

4.2 MMN の変化

pre, post, one week later test で行われた主観聴覚能力テストの後で無視条件下のオドボール課題で脳波 (EEG) は計測された。記録した EEG データを正規化して, MMN を算出した。トレーニングを経た各グループの MMN 振幅差とトレーニング及びまた 1 週間を経た各グループの MMN 振幅差を図 5 に示す。

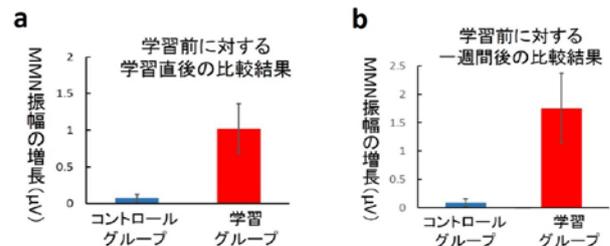


図 5 MMN 振幅の向上

post-test での MMN 振幅から pre-test の MMN 振幅を引くことにより実験後の MMN 振幅差を図 5. a に示す。one week later test での MMN 振幅から pre-test の MMN 振幅を引くことにより実験時と 1 週間後の MMN 振幅差を図 5. b で示す。これらの結果について, NF 学習グループとコントロールグループの差に有意傾向が認められた ($t(2) = 3.01, P < 0.1$; $t(2) = 2.86, P = 0.1$)。

5. 考察

外国語習得での /l/ と /r/ の弁別トレーニング課題について, /l/ と /r/ に対する弁別正答率がトレーニングにより上昇する事が先行研究で示されている [10]。この研究では

実験協力者がモニタの前に座り画面には左右で/l/と/r/を含むペアの単語（例えば red と led）が表示される。そして、その2つの単語の1つの音が聞かせ、実験協力者が“1” または “2” のボタンで/l/または/r/を判断する。その判断結果の正誤によって異なる音でフィードバックするというトレーニングを行っており、3~4週間のトレーニングを通して平均正答率が16ポイント上がったものの、これはネイティブ英語話者と比べれば大きな差がある。別の先行研究[11]においてもほぼ同様の結果が得られているが、これらの学習法は実験協力者が聴覚刺激に対して識別結果を返答し、その結果により Yes/No のフィードバックが与えられるという通常のトレーニング手法である。しかしながら、意識下と意識上で同じ反応が出るとは限らないため、意識上の識別結果が間違えたとしても、意識下での脳反応が正しい可能性がある。これは通常のトレーニング手法が難航する原因であると考えられる。これに対して、本論文で提案した手法では、5日間のトレーニングによって“light”と“right”の弁別正答率は35ポイント上昇し、認知正答率は34ポイント上昇したことから、意識下の脳反応を手がかりにして、学習者に意識下でのフィードバックを与えることで、より有効なトレーニングが実現出来たと言える。

6. おわりに

本論文では、MMN ニューロフィードバック手法が言語学習課題に適用可能であるかどうかを検証するために、元々/l/と/r/の聞き分けができない日本人実験協力者に対して、“right”と“light”の単語弁別トレーニングを行った。学習の前後での比較で、ニューロフィードバック学習グループの“right”と“light”に対する弁別正答率と認知正答率は有意に上昇した。そして、少なくとも1週間の持続学習効果があることが分かった。このことから、本手法を利用した言語の音を聞き分けるといったトレーニングを行うことで、意識を向けなくても(意識の下で)学習ができるような装置の開発につながると考えられる。今後の課題としては、rとlを付いている非ターゲット単語に対する学習効果を検証する(例：“led” and “red”)。そして、学習に従って、MMN以外のERP成分の変化を検証する。

謝辞

本研究は総務省戦略的情報通信研究開発推進制度 (SCOPE) により行われた。

参考文献

- [1]Cheour, M., Ceponiene, R., Lehtokoski, A., Luuk, A., Allik, J., Alho, K., & Näätänen, R. Development of

language-specific phoneme representations in the infant brain. *Nature Neuroscience*, Vol. 1, No.5, pp. 351-353, 1998.

- [2]Kuhl, P. K. Learning and representation in speech and language. *Current Opinion in Neurobiology*, Vol. 4, No.6, pp. 812-822, 1994.
- [3]Lively, S. E., Pisoni, D. B., Yamada, R. A., Tohkura, Y. I., & Yamada, T. Training Japanese listeners to identify English/r/and/l/. III. Long - term retention of new phonetic categories. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 94, No. 6, pp. 2076-2087, 1994.
- [4]Wang, Y., Spence, M. M., Jongman, A., & Sereno, J. A. Training American listeners to perceive Mandarin tones. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol.106, No. 6, pp. 3649-3658, 1999.
- [5]Shibata, K., Watanabe, T., Sasaki, Y., & Kawato, M. Perceptual learning incepted by decoded fMRI neurofeedback without stimulus presentation. *Science*, Vol.334, No. 6061, pp. 1413-1415, 2011.
- [6]Tiitinen, H., May, P., Reinikainen, K., & Näätänen, R. Attentive novelty detection in humans is governed by pre-attentive sensory memory. *Nature*, Vol.327, pp. 90-92, 1992.
- [7]Alho, K., Woods, D. L., & Algazi, A. Processing of auditory stimuli during auditory and visual attention as revealed by event - related potentials. *Psychophysiology*, Vol.31, No.5, pp. 469-479, 1994.
- [8]Tremblay, K., Kraus, N., & McGee, T. The time course of auditory perceptual learning: neurophysiological changes during speech - sound training. *Neuroreport*, Vol.9, No.18, pp. 3557-3560, 1998.
- [9]Chang, M., Iizuka, H., Naruse, Y., Ando, H., & Maeda, T. Unconscious learning of auditory discrimination using mismatch negativity (MMN) neurofeedback. *Scientific Reports*, Vol.4, 2014.
- [10]Bradlow, A. R., Pisoni, D. B., Akahane-Yamada, R., & Tohkura, Y. I. Training Japanese listeners to identify English/r/and/l: IV. Some effects of perceptual learning on speech production. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol.101, No.4, pp. 2299-2310, 1997.
- [11]Strange, W., & Dittmann, S. Effects of discrimination training on the perception of/r/and/l/by Japanese adults learning English. *Perception & Psychophysics*, Vol.36, No.2, pp. 131-145, 1984.

Mutual Body Communication in Telexistence using Virtual Embodiment

サライジ ムハマドヤメン¹⁾, フェルナンド チャリス¹⁾, 南澤 孝太¹⁾, 舘 暲²⁾
MHD Yamen Saraiji¹⁾, Charith Lasantha Fernando¹⁾, Kouta Minamizawa¹⁾ and Susumu Tachi²⁾

¹⁾ 慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科

²⁾ 東京大学 高齢社会総合研究機構 (IOG)

¹⁾{yamen,charith,kouta}@kmd.keio.ac.jp, ²⁾tachi@tachilab.org

Abstract: In this paper, we addressed the lack of physical representation of human's avatar robot arms and hands in Telexistence systems by substituting them with virtual representation. We propose using user's hands captured images from his first point of view (FPV) and superimposing them locally in user's view as well as projecting them remotely in robot's location. Using this method, it is possible to provide mutual awareness of user's intended body actions for remote participants, as well as increase the level of presence for the user in remote place. This paper discuss the proposed system, and evaluation of the proposed method.

Key Words: *Mutual Body Representation, Augmented Reality, Communication, Telexistence.*

1. Introduction

Telepresence systems have evolved in social activities and day-to-day communications. However, not all the telepresence robots provide a sense of presence to the user who is controlling. Furthermore, these type of robots provides minimum representation of the operator's body and state in the remote place and usually provide limited representation using a front display showing user's head only. Though for social oriented applications, our bodies are considered as an effective communication tool that embodies internal mental states to the others [1]. Previous works addressed the physical body representation for telepresence and telexistence [2][3]. However, these approaches are not portable, too pricey and not efficient for mobile social contexts. Image based embodiment for collaborative screens has been proposed previously [4][5], however they do not apply for mobile telexistence applications.

A previously proposed mobile telexistence system [6] provides operators own hands visuals by segmenting them from the background and superimposing them on to the remote environment from the FPV. It was found out that providing the virtual hands improved the sense of body presence in the remote place, however it lacked the mutual hands representation in to the remote place. As a result, the remote participants were not aware of user's hands and actions with respect to his avatar body. Therefore, sometimes the remote participants get confused due to lack of visual clues of the

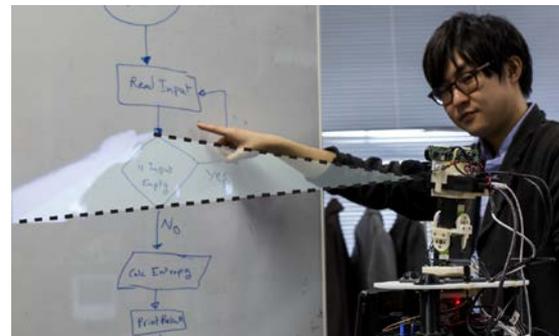


Figure 1. Remote participant interacting with user's actions operator interactions.

To address these limitations, we propose a mutual virtual embodiment method for lightweight telexistence robots that lacks physical arms. This method uses virtual hands that are captured from user's side, and present those hands in user's view as superimposed pictures on the remote images. Also, the hands are projected remotely using a small projector mounted on the robot head and aligned with head movement. The virtual hands can be projected onto a physical table, remote user, or to any remote surfaces in order to provide the clue of user's hands interaction and intended actions. These virtual hands also provides the awareness for the user about his body, which are necessary for the sense of body presence. Figure 1 shows an example of the proposed method where the user interacting with remote participant.

The proposed method can be used in many applications to enhance the arms and hands representation of the operator at a remote place. With the proposed method, the remote participants can understand the intended interactions clearly although the operator does not have physical representation of his arms and hands

2. System Implementation

2.1 System overview

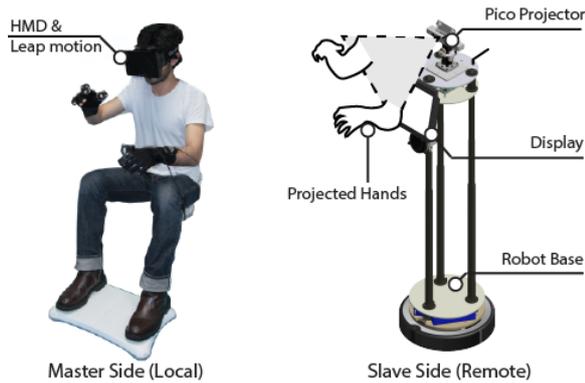


Figure 2. System overview

The developed system is divided into a typical Master-Slave Telexistence systems as described in Figure 2. The master side is the operating side where the user is located, and it contains a set of tracking tools that are used to capture user's head movement (Oculus DK2) as well as hand movement and visuals (Leapmotion). Robot movement is controlled using user's body movement with no physical joystick been used.

In the robot side (slave), a 3 Degrees of Freedom (DOF) head is used to physically map user's head rotational motion at the remote place. FullHD stereo cameras and binaural microphones are used to enable bidirectional visual and auditory communication to the user from robot side. The robot provides to the remote participants user's video and voice in the remote place via a LCD display and a speaker mounted on the front side of the robot. The robot designed with fully wireless and mobile platform that allows free motion in remote places.

The captured Hands movement and visuals are used to provide visual feedback to user's side, as well as to be projected in the robot's side. The user observe his own hands motion over robot's vision. To present user's hands in the remote place, the captured images using the mounted camera on the HMD are first segmented to isolate the hands from the background. Then those segmented hands are superimposed on the visual stream from the robot side, so the user can have awareness of his hands presence. The position and size of the captured hands are preserved in the FPV with his hands, so the pointing remains natural. Those hands are sent to the robot side and projected

using a pico projector (Model: Lumex Beampod) that is mounted on the head module.

2.2 Hands Capturing and Segmentation

In the user side, the hands are captured using an IR camera mounted on the front of the HMD. The camera provides 110° field of view which covers HMD FoV, and thus it is possible to capture user hands with no cropped areas. Though the resolution of the cameras are relatively low (640x240), up sampling step is necessary to smooth out the edges.

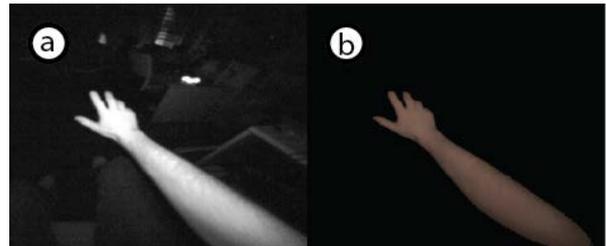


Figure 3. Hands IR images before and after segmentation from the background.

The advantages of using IR camera compared with RGB camera is the possibility to capture objects close to the camera using the returned intensity, in our case we capture hand visuals effectively. However there is a resulting noise from the background. We apply a nonlinear filtering function on the captured images, this function removes the pixels which color intensity are below a certain threshold. The results of applying the filter can be seen in Figure 3.

2.3 Hands Presentation

2.3.1 Presenting to User

The processed hands are used locally in the user side by superimposing them over the remote visuals of the robot side. By doing this, the user stays aware of his body though there is no physical representation in the remote side. Also, since the hands are image-based captured from his FPV, the user knows that the presented hands are his own. Figure 4 shows what the user sees when he uses his hands.

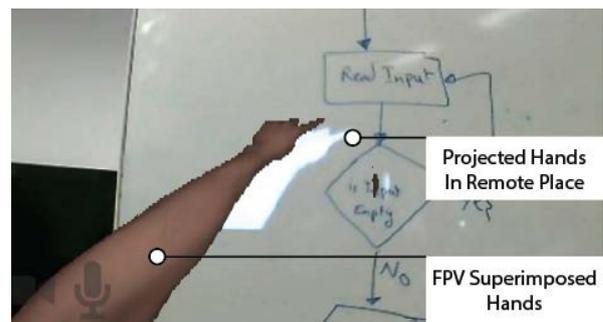


Figure 4. User's hands being super imposed locally

2.3.2 Presenting to remote participants

User hand images are streamed remotely to robot side, and are projected from robot's point of view using a pico projector mounted on its head. Due to the displacement between the projector and the eyes, a calibration step is required for the projector/camera, more details will follow.

Those hands are aligned with user hands position and motion, and allows the remote participants to see the gesture of his hands. Figure 5 shows the hands being projected on a trivial surface, where user hand gesture can be seen remotely



Figure 5. User hands being projected on remote objects

2.4 Projector Calibration

Due to the displacement between the projector position and the camera position in the robot side, and the difference between both fields of view, the projection of the hands directly will result mismatch scale and position when observed by the operator from the FPV. Thus it is necessary to measure this displacement and scale by calibrating the projector with respect to one of the cameras.

The goal of the calibration process is to determine the amount of displacement (dx, dy) between the projected image and camera's captured region. Also to extract the relative scale between the projected image and the field of view of the camera (Rw, Rh). This process is done at a projection distance (D).

Figure 6 shows an illustration of the top and side views of calibration setup. The parameters (Wp, Hp), (Wc, Hc) represents the size of projection and capture for the projector and the camera respectively. An automated process is done to extract those parameters by projecting a chessboard image into a specific distance (D) which is set to 100 cm as representation of hands reach. The relative scale of the projected images (Rw, Rh) is calculated as the ratio between (Wp, Hp) and (Wc, Hc). This ratio is used as a cropping factor for the projected hands, and the displacement (dx, dy) is used to shift the cropping region of hands images.

This calibration gives matching results for images projected at the calibrated distance (D). However it is affected when the images are projected at different plane, resulting mismatching size and shift of hands position. To improve the results, a depth sensor is necessary to be used to calibrate the projected images. For our application, with projections within the range $D \pm 50cm$, no significance distortion and misalignment of the projected hands was observed.

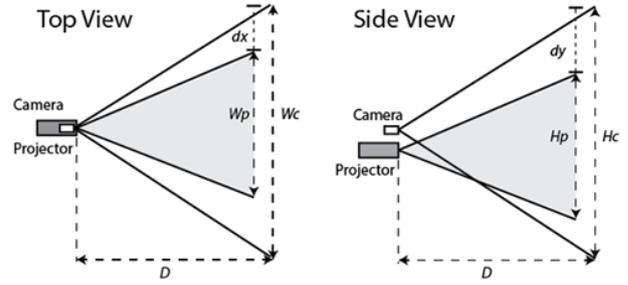


Figure 6. Top/Side views of camera/projector FoV and projection size

3. User Study

3.1 Experiment setup:

To evaluate the effectiveness of using virtual embodiment method, we conducted a study using the proposed system. Our hypothesis for this study was:

H₀: The addition of the virtual hands will increase the sense of presence the user in the remote place, and makes the experience more engaging.

The experiment was conducted in living room like, which the room contained several colorful objects and set of chairs and tables. This setup reflects the intended application of the system, which is adapting telepresence systems into our daily life. The user sits in a separate room that is isolated from the one that the robot moves in. In operator's room, a camera is installed to capture their behavior during the experiment, and the videos are used later for analyze purpose only.

3.2 Experiment Procedure:

Basic data are acquired from each participant about their physical and psychological state before starting the experiment. After that, each participant is asked to operate the system for five minutes in order to get used to operating the motion of the robot in the remote place. The participant experiences the mobility and head motion of the system during this step.

The experiment has two conditions to evaluate the system:

Condition 1: No hands are being displayed to the user.

Condition 2: Hands are provided to the user.

After each condition, set of questions were asked based on a previous study about measuring the presence in virtual environment [7]. The questions are summarized in Table 1.

The experiment is conducted for 20 minutes per participant, including the five minutes training. Each participant was instructed briefly how to operate the system. And asked during each condition to try to grasp objects in remote place, as an indirect instruction to use their hands.

To avoid any bias in the evaluation, the users were randomly divided into two groups: GroupA and GroupB, and the order of the conditions was different for each group.

Table 1. Set of questions after each condition

Questions
How natural the interaction was?
Level of presence for your body?
Level of involvement?
How much disturbed or confused did you feel?

3.3 Results:

Ten first time users participated (8 Males, 2 Females) in this experiment with age ranged between 22 and 32 years (Mean: 26 – SD: 3.6). 3 out of the 10 participants reported before the experiment that they have stereo sickness in general (unable to see 3D digital contents).

Result data from both groups is summarized in Figure 7. It can be seen that adding the hands has decreased the level of confusion for the participants, and increased the sense of being bodily present in the remote place.

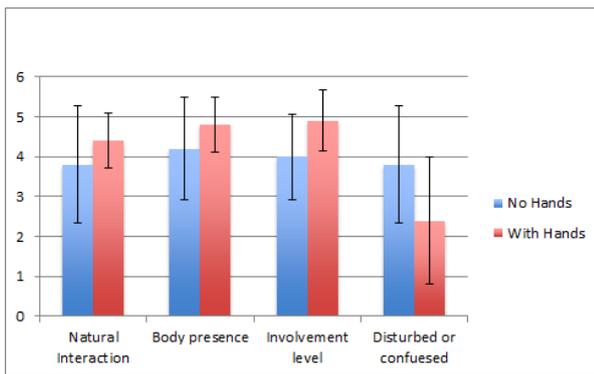


Figure 7. Results of the evaluation

3.4 Discussion:

On one hand, participants of GroupA showed higher level toward the natural interaction and body presence compared with GroupB. GroupA was mainly affected by phase 3 (with hands) after experiencing phase 2 (no hands) which explains the higher results in the answers. On the other hand, GroupB participants showed less involvement and higher level of confusion and disturbance compared with GroupA because the hands were removed. Some participants of GroupB expressed that they “felt as a part of their body is being missing”.

4. Conclusion

In this paper, an image-based approach was used to provide mutual visual information of operator hands in Telexistence robots. The hands are captured from the user side using an IR

camera mounted on his HMD, and then superimposed on the remote images inside user’s FPV. Those hands are also streamed to the robot side and projected using a pico projector mounted on the head of the robot. The experiment was evaluated via a user study, and it showed an increment in the sense of presence for the participants when they can see their own body remotely. Using this method, it is possible for the participants to understand where the user is pointing at or what the user is intended to do with his hands in the remote environment.

Acknowledgement

This work was supported by JSPS KAKENHI Grant #26240030

References

- [1] Jonathan Benthall, and Ted Polhemus. “The body as a medium of expression”. 1976.
- [2] Daniel Leithinger, Sean Follmer, Alex Olwal, and Hiroshi Ishii. "Physical telepresence: shape capture and display for embodied, computer-mediated remote collaboration." In Proceedings of the 27th annual ACM symposium on User interface software and technology, pp. 461-470. ACM, 2014.
- [3] Charith Lasantha Fernando, Masahiro Furukawa, Tadatoshi Kurogi, Sho Kamuro, Katsunari Sato, Kouta Minamizawa, and Susumu Tachi. "Design of TELESAR V for transferring bodily consciousness in telexistence." In Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012 IEEE/RSJ International Conference on, pp. 5112-5118. IEEE, 2012.
- [4] Hiroshi Ishii, and Minoru Kobayashi. "Clearboard: A seamless medium for shared drawing and conversation with eye contact." In Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems, pp. 525-532. ACM, 1992.
- [5] Andreas Kunz, Thomas Nescher, and Martin Kuchler. "Collaboard: a novel interactive electronic whiteboard for remote collaboration with people on content." Cyberworlds (CW), 2010 International Conference on. IEEE, 2010.
- [6] Mhd Yamen Saraiji, Charith Lasantha Fernando, Yusuke Mizushima, Youichi Kamiyama, Kouta Minamizawa, and Susumu Tachi. "Enforced telexistence: teleoperating using photorealistic virtual body and haptic feedback." In SIGGRAPH Asia 2014 Emerging Technologies, p. 7. ACM, 2014.
- [7] Bob G. Witmer, and Michael J. Singer. "Measuring presence in virtual environments: A presence questionnaire." Presence: Teleoperators and virtual environments 7, no. 3 pp. 225-240, 1998.

日本バーチャルリアリティ学会研究報告

VR 学研報 Vol.20, No. TX01

第 6 回テレイグジスタンス研究会

©2015 by the Virtual Reality Society of Japan (VRSJ)

発行者 日本バーチャルリアリティ学会
〒113-0033 東京都文京区本郷 2-28-3 山越ビル 301
TEL 03-5840-8777 / FAX 03-5840-8766
e-mail office@vrsj.org

The Virtual Reality Society of Japan
Yamakoshi Bld. #301, 2-28-3 Hongo, Bunkyo-ku,
Tokyo, 113-0033 Japan

禁無断転写・転載