

視聴覚複合現実空間における ガリバー・ドップラー現象に関する考察

村井 嘉彦^{*1*2}, 木村 朝子^{*1}, 柴田 史久^{*1}, 田村 秀行^{*1}

Considerations on “Gulliver-Doppler Phenomenon” in Audio-Visual Mixed Reality Space

Yoshihiko Murai^{*1*2}, Asako Kimura^{*1}, Fumihisa Shibata^{*1}, and Hideyuki Tamura^{*1}

Abstract – In the real world, the Doppler effects are caused by moving object like emergency vehicle. We introduce the way to reproduce the Doppler effects caused by moving sound source into the existing audio-visual mixed reality space system. We find the Doppler effects which caused by artificial sound made by full - sized virtual object and thus the results make us satisfaction. Additionally, we tried to reproduce the Doppler effects on virtual object of miniature, some subjects felt unnatural by the condition, however we noticed they feel natural in virtual reality space removed real background. We defined this phenomenon effect on perception of Doppler effects as “Gulliver-Doppler Phenomenon”. This paper presents the results of the experimentation, “Gulliver-Doppler Phenomenon”.

Keywords: Mixed Reality, Audio - Visual MR, The Doppler Effect

1. はじめに

現実世界と仮想世界を実時間で融合する複合現実感 (Mixed Reality; MR) は人工現実感 (Virtual Reality; VR) の限界を克服する技術として、VR 研究の中でも急速な発展を遂げている分野である。空間全体が人工的な電子情報だけで構成される従来の VR に対して、電子データと現実世界の情報を混在できる MR では表現力が増し、新しい情報提示技術として期待されている。

こうした状況下で、我々は視覚的 MR と聴覚的 MR を同時に体験できる視聴覚併用 MR システムの研究開発を推進してきた[1]。まず、基本的枠組を実装した後、実音・人工音のそれぞれが、仮想物・実物に反射し、遮断される現象も表現できるよう機能を拡張した[2]。そして、更なる視聴覚 MR 空間の表現力向上策として、移動物体が発する音に関する「ドップラー効果」の導入を図った。

実時間処理でドップラー効果を電子的に再現する研究として、Smith ら[3]は遅延線を用いた手法を、Iwaya ら[4]は位置情報のみを用いた手法を提案している。本研究では Iwaya らの手法を採用し、仮想移動物体が体験者に接近し、遠ざかる場合のドップ

ラー効果を実現した。現実世界を背景に、実寸大の仮想物体 (救急車) が発する人工音 (サイレン音) に対してその効果を確認したところ、被験者の全員から「電子的にドップラー効果を付加してある場合の方が、視聴覚 MR 空間をより自然に感じる」との回答が得られた。

このように、実寸大の視聴覚 MR 空間では満足できる表現力を達成したが、現実世界中にミニチュアサイズの仮想世界を MR 合成し、体験した場合には、ドップラー効果を現実世界における知覚体験と同じように感じるのか、もしくは不自然に感じるのかという疑問が生じてくる。即ち、「ガリバー旅行記」のガリバーが訪れた「小人の国」では、ガリバーはミニチュア救急車の発するサイレン音のドップラー効果を不自然に感じるのかという疑問である。

現実空間に実寸大と異なるスケールの MR 空間を合成し、体験することは MR において一般的な手法であり、特に実寸大よりもかなり縮小したミニチュア MR 空間を構成し、体験することは少なくない。ここで、ミニチュア MR 空間には、現実空間の光景に縮小仮想物体のみを重畳表示する場合と、実在する縮小模型に縮小率が同じ仮想物体を合成する場合が考えられる。いずれも俯瞰的視点で対象世界を観察したい場合に利用度が高い用途であり、通常サイズの観測者 (体験者) を「ガリバー」になぞらえることも、よくある一般的な事項である。

*1 立命館大学大学院理工学研究科

*1 Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University

*2 現在、パナソニック株式会社

*2 Panasonic Co., Ltd.

後述するように、少し考えれば、小説で記されたような「小人の国」の物理的特性は矛盾だらけで、移動物体と空気の相対速度は非常に小さく、現実世界と同様のドップラー効果を知覚できない。そのため、ドップラー効果を知覚させるには、条件を変えた「ガリバー・ドップラー世界 (GDW)」を定義することで理論的には解決できるはずであったが、ミニチュア MR 空間で試したところ、条件によっては、ドップラー効果の存在が不自然に感じられる現象が生じた。また、その原因究明の過程で暗室のように周囲の事物を視認できない（視覚の手がかりを得られない）ミニチュア VR 空間で試したところ、仮説の通り、その不自然さが全く生じない（即ち、ドップラー効果を自然に感じる）現象も観察された。我々は、ミニチュア VR/MR 空間でのドップラー効果の知覚に影響を及ぼすこの一連の現象を「ガリバー・ドップラー現象」と呼ぶことにし、この現象を引き起こす要因が、実験環境中に存在する様々な事物の影響であるという予想の下、系統的な実験を行って、要因の分析・検討をすることにした。以下、本論文では、この実験結果と考察に関して報告する。

2. 関連研究

両眼立体視における歪み現象である「箱庭効果」や「書き割り効果」[5]、ベクシオンや映像酔い[6]など、仮想空間における視知覚の影響を考察した研究の歴史は古く、多くの知見が明らかにされているが、本研究は視覚的 MR と聴覚的 MR を同時に達成可能なシステムを用いて、MR 空間における視聴覚同時提示の影響を検討するものである。

VR 空間における視聴覚を併用した研究は多く、小曳ら[7]は、視聴覚の同時提示における音光速度の補正には両眼視差と運動視差が必要なことを、Hasegawa ら[8]は、広視野スクリーンに提示した CG のパトカーと移動式のスピーカを用い、仮想物体と音源位置の関係を報告している。しかし、これら VR 空間における視聴覚併用の研究は、暗室や完全没入型の環境といった実験室的な空間における事例が大半を占める。一方、MR 空間では仮想物体のみならず、現実世界の事物が多数存在する環境であるが、それら現実・仮想世界の事物が視聴覚の知覚に及ぼす影響は未だ明らかにされていない。

MR 空間における視聴覚の関係を考察した事例もあり、Zhou ら[9]は、視聴覚のスケールを意図的に変更した実験を行い、近距離においては奥行きや方向を知覚しやすいことを示している。また我々もこれまでに、MR 空間において遠距離で同時発生する視聴覚刺激（花火など）をミニチュアスケールに縮

小して体験する際には、音の遅延時間は理論値よりも短い方が好まれることを確認している[10]。本研究では、現実世界に生じる聴覚的な物理現象であるドップラー効果を MR 空間で再現し、ミニチュア MR 体験した場合を対象としている。

3. ミニチュア世界とドップラー効果の印象変化

3.1 メンタルモデルとドップラー効果

人間は視認対象が現実存在し得る物体のミニチュアであると認識すると、縮尺に関らず、実寸大の事物を見ているかのようなメンタルモデルを構築するとされている。この場合、視覚的な刺激に対する議論が中心であり、聴覚刺激に関する議論はほとんどなされていない。

一方、ドップラー効果は、音源や光源の接近に伴う周波数変化という物理的な現象である。ところが、音を発しながら高速移動する実寸大の仮想物体に対しても、ドップラー効果の導入が好ましいという実験結果を得たが、音のドップラー効果に慣れた人間には既に、「高速で移動する発音体はドップラー効果が生じる」というメンタルモデルが形成されていると考えられる。

では、VR 空間や MR 空間において、実寸大ではなくミニチュアサイズの仮想物体に対してドップラー効果を再現し、体験者に提示した場合はどのような問題が生じるのか。低速度で移動するミニチュアサイズの発音体に対してドップラー効果を知覚できるようにすべきなのか。高層ビルなどの高所から、眼下を走行している救急車を観察しているように感じるのか。ミニチュア仮想物体の視覚刺激の影響が強く、ドップラー効果の聴覚刺激は考慮する必要がないのか、興味深い問題が生じてくる。

3.2 小人の国でのドップラー効果

我々人間がミニチュア世界を体験する場合、しばしば J・スウィフト作の風刺小説「ガリバー旅行記」の小人の国になぞらえて語ることがある。「ガリバー旅行記」では、主人公ガリバーは小人の国の他に巨人の国等も訪れており、その記述は以下のようになっている。

【ガリバー旅行記における小人や巨人の国の記述】

- ・ 両国は地球上に存在している。
- ・ 住人や事物の大きさはガリバーに対して、小人の国では 1/12 倍、巨人の国では 10 倍とされている。
- ・ 住人はガリバーと会話をできる聴覚器官をもっている。

ここで、小人や巨人は、生理的にガリバーのような

人間の単純な縮小・拡大とは考え難い。なぜなら人間とは異なる鼓膜や声帯をもっていない限り、ガリバーとの会話が成立しないはずであるが、小説であり、その点の詳しい記述はない。

では、小人や巨人の国々において、住人の大きさに適した救急車が存在した場合、ガリバーやその国の住人は救急車のサイレン音のドップラー効果を知覚できるのだろうか。我々人間社会での救急車の速度が 50km/h、常温での音速を約 340m/s である場合、小人の国、巨人の国では以下ようになる。

【小人・巨人の国での音速と救急車】

- ・ 両国は地球上に存在する以上、両国でも音速は常温で約 340m/s
 - ・ 小人の国における救急車の速度：4.16km/h
 - ・ 巨人の国における救急車の速度：500km/h
- よって、小人の国、巨人の国のいずれの場合も人間社会における救急車の速度に比べ低速、もしくは高速であるが、音速は人間社会と同じく 340m/s であるため、ドップラー効果は生じるが、現実世界で生じる範囲の周波数変化ではないため、それを通常の現象として知覚できるかどうかは疑問である。

しかしながら、ドップラー効果は音源の移動速度と音速との関係で決まるので、縮小・拡大世界において現実世界と同様のドップラー効果を知覚させるには、両国が地球上に存在するという前提を捨て、物理的特性が地球とは異なる異星上に小人や巨人の国が存在すると考えるのが自然である。よって、以下の要件を満たすことにより、ドップラー効果を知覚できる世界を「ガリバー・ドップラー世界 (Gulliver Doppler World; GDW)」と呼ぶ事にする。

【GDW の前提】

- ・ 音速・音圧も含め、あらゆる物理特性が地球上の n 倍
- ・ GDW の住人がもつ視聴覚器官は GDW の環境に適合したものであり、地球人が地球環境で感じるのと同じ知覚体験をする。
- ・ (ガリバーを含む) 地球人が GDW に赴いた場合、視覚的には単なる縮小・拡大世界を体験する (図 1)。



図 1 GDW のイメージ図
Fig. 1 Imaginary picture of GDW



図 2 実験環境
Fig. 2 Experimental environment



図 3 VR 空間での体験者視点の映像
Fig. 3 User's view of VR space

- ・ 聴覚的には、GDW の音圧・音速に適した聴覚器官を有していないので、GDW の住人が聴く音を地球人が受聴することは困難である。そのため、GDW 内でマイクロホンを通じて収集した音をヘッドホン等で提示することにより、GDW の住人も地球人 (ガリバー) もドップラー効果を同時に知覚できるようになる。

3.3 VR/MR 空間における GDW の適用試行実験

VR 空間は全てが電子情報で構成された仮想世界であり、これを GDW とした場合も、全くその縮尺に関する手がかりがないと、実寸大と変わらない体験になってしまう。MR 空間に GDW を配した場合 (大抵は $n < 1$)、体験者は自分の手足が見えるので、GDW を訪れたガリバーと同じ知覚体験ができると言える。

この前提の下に、視聴覚 MR 空間でのミニチュア GDW のドップラー効果の実験を行った。

【MR 空間に埋め込んだ GDW】実寸大の様々な事物が存在する室内で (図 2)、 n の値を様々に変化させて、床面に GDW 内を速度 $r = 50\text{km/h}$ で走行するミニチュア救急車から発生するサイレン音をヘッドホンで受聴させた。

【結果】GDW の倍率が $n = 1/10$ や $n = 1/20$ の場合は、ミニチュアの救急車が発するドップラー効果に対して違和感を覚えなかったが、 $n = 1/30$ の場合「救急車の動きが遅いのに、ドップラー効果を聞かせるのは不自然」との意見が多く出た。その n の値に個人差はあるが、GDW 内での救急車の相対移動速度は同じであるのに、ある一定倍率から遅く感じてしまう。その原因として、実験環境中に存在する現実世界の事物 (スケール手がかり) が影響を及ぼし、体験者が GDW に没入できないためと考えられる。

【VR 空間での GDW】スケール手がかりの影響を確認すべく、ビデオシースルー方式での視覚提示で、現実世界の映像信号を除去した VR 表示とした。即ち、視覚的手がかりを得られない真っ暗な闇の中を救急車が走行しているように見える (図 3)。 n の値によって、当然、救急車の画面内の大きさは異なる。

【結果】暗闇での走行という条件を除き、その他の条件はMR空間におけるGDWと全く同じであっても、ドップラー効果を不自然に感じる現象は消滅した。さらに、MR空間に比べて救急車の速度 r がかなり速く感じられるとの感想が多く聞こえた。

【考察】周囲の事物の影響でミニチュアをミニチュアと感じてしまうことから、移動速度を遅く感じてしまうのだと考えられる。その影響を断ち切れば、心理的移動速度が変化し、ドップラー効果への違和感もなくなるという仮説を立てたが、それが証明されたと言える。心理的移動速度とドップラー効果を自然に感じるかどうかの関係や条件には興味深いものがあるので、違和感の発生と解消も含めて、これを「ガリバー・ドップラー現象」と名付け、MR空間中に存在するスケール手がかりの影響に関する系統的な実験を行い、この現象の振る舞いを観察することにした。

4. 視聴覚MRシステムでのドップラー効果の実現

4.1 ドップラー効果の実装

視聴覚MRシステム基幹部は文献[1]の2x2方式を踏襲し、文献[4]を参考にドップラー効果を実装した。ドップラー効果の電子的実現では、音データよりも周波数を低くする（低音にする）場合は音のバッファの読み込みポイントを後ろにし、反対に音データよりも周波数を高くする（高音にする）場合は音のバッファの読み込みポイントを先にする。相対速度は、フレーム間の経過時間、仮想音源の3次元座標、体験者の頭部位置姿勢を毎フレーム取得し算出する。

また、音データの操作によって補間処理を必要とする部分が生じる。先行研究では線形補間、3次のラグランジュ補間を用いており、本システムにおいてもこの2つの補間処理を実装したところ、入力音（波形の形状）によっては、どちらの補間処理を用いても生成音に多くのノイズが含まれた。ラグランジュ補間は補間の点数が増加すると、関数が振動し精度が悪化することが知られており、それが原因で生成音にノイズが多く含まれてしまったと考えられる。また、この問題を避けるための補間処理として、多項式で近似するスプライン補間が有効であると言われている。そのため、本研究では線形補間、3次のラグランジュ補間に加えて3次のスプライン補間を実装した。

また、幾つかの入力音を用いて生成音を確認したところ、入力音によって最適な補間処理が異なることが判明した。そのため、ドップラー効果を再現したい入力音に対して、事前に各補間処理を施した音を生成し、生成音のノイズ量を確認した後、最もノ

イズが少なくなる補間処理を適用させた。

4.2 ミニチュア仮想物体の視聴覚MR実験環境

日常生活においても、緊急自動車の電子サイレンによるドップラー効果を耳にする機会は多いので、引き続き提示する仮想物体は救急車を、人工音はサイレン音を用いた。

【被験者】正常な聴力を持つ22~24歳の男女10名
【音響処理】サンプリング周波数：16kHz、処理フレーム長：128ms、実験環境の暗騒音レベル：A特性の音圧レベル50dB程度、補間処理：線形補間

【視聴環境】システム構成は文献[10]の構成を踏襲し、被験者はビデオシースルーHMDと開放型ヘッドホンを装着しMR体験を行う。実験は3.3節と同様の室内（図2）で行い、周囲には様々な事物が存在する。被験者には、直立した状態で床面に重畳描画された、等速度で左右に往復している仮想物体の救急車を注視するよう教示した。救急車の移動範囲及び被験者との位置関係を図4に示す。また人工音は3.3節で述べたようにGDWの住人が聴取している音を計算機上で生成し、ヘッドホンから提示する。

【提示する仮想物体と人工音】救急車は総務省消防庁認定の高規格救急車の1種である「日産パラメディック」の寸法を参考にモデル化した（図5）。また、サイレン音は消防防第337号通知に記載されている「救急自動車に備える電子サイレンの概要」に準拠し、現実世界の救急車から発せられるサイレン音に等しい周波数の音を提示する。

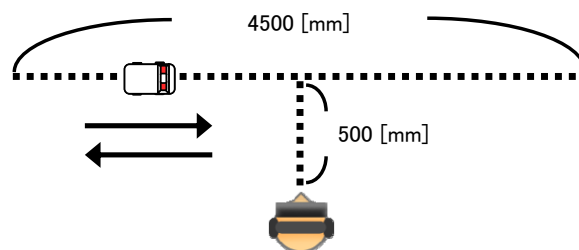


図4 救急車の移動範囲

Fig. 4 Movement range of CG ambulance

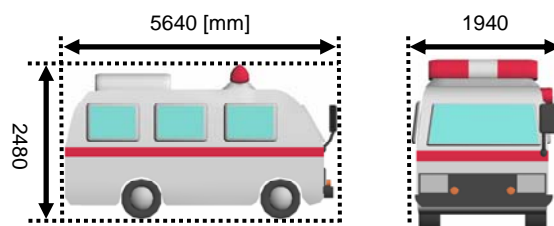


図5 仮想物体の救急車の寸法

Fig. 5 Size of CG ambulance

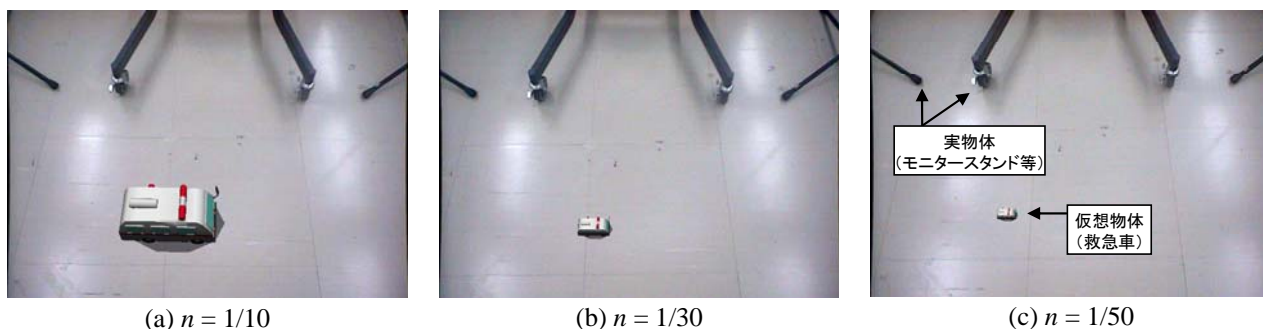


図6 体験者視点の映像
Fig. 6 User's view

5. ガリバー・ドップラー現象の系統的实验

5.1 实验1: GDW 内の速度と GDW の倍率の関係

【目的】3.3 節の試行实验では、GDW の倍率 n の値が一定値以下になるとドップラー効果を不自然に感じた体験者が多かった。これは体験者が MR 空間内の他の物体に影響され、救急車を低速度に感じたためと考えられる。どの縮尺や速度から周囲に存在する実寸大の事物に影響されるのかを調べるため、GDW 内の走行速度 r と GDW の倍率 n においてドップラー効果を不自然に感じるのか、 r と n を様々な値に変えて調べる。

【GDW 内の走行速度】 $r = 25, 50, 75, 100$ (km/h) の4種類を試す。この速度は GDW 内の救急車の相対移動速度であり、MR 空間内の座標系での救急車の走行速度とは異なる。GDW 内の音速も倍率 n に比例して変化するので、GDW 内の速度が一定ならば、倍率によらず被験者に提示するドップラー効果(周波数の変化量)は同じである。

【GDW の倍率】 $n = 1/10, 1/20, 1/30, 1/40, 1/50$ の5種類の GDW を試す。倍率が下がるとそれに比例して、救急車の MR 空間内での速度やサイズも小さくなる(図6)。GDW 内の走行速度 r 、倍率 n と救急車の見かけの速度の関係を表1に示す。

【提示順序】始めに学習作業として各被験者には、提示する速度と倍率は告知せずに全20種類を低速・低倍率の組合せから昇順に提示した。その後、ランダムに全ての組合せを提示し、提示毎に印象を回答させた。回答は「特に問題はない」「どちらか答えられない」「何か不自然に感じる」の3通りとした。

【実験前の予想】多くの人は「ドップラー効果は高速移動する発音体に生じる現象」というメンタルモデルを有していると考えられる。そのため、提示する救急車の GDW 内の速度 r が高速であれば、倍率 n を小さくしても、救急車の見かけの速度は遅くなり過ぎないため、実験環境中に存在する現実世界の事物の影響を受けず、ドップラー効果に違和感を覚えなないと予想した。

表1 救急車の見かけの速度

Table. 1 Appearance speed of CG ambulance

GDW 内の速度 [km/h]	GDW の倍率				
	1/10	1/20	1/30	1/40	1/50
25	2.5	1.25	0.83	0.625	0.5
50	5	2.5	1.67	1.25	1
75	7.5	3.75	2.5	1.875	1.5
100	10	5	3.33	2.5	2

単位: km/h

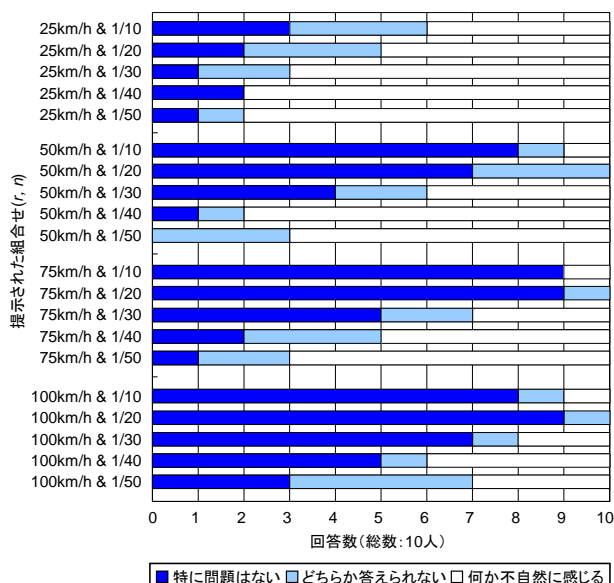


図7 实验1の結果

Fig. 7 Result of experiment 1

【結果と考察】結果を図7に示す。横軸は各回答に対する人数、縦軸は提示された r と n の組合せを示す。予想通り、個人差はあるが GDW 内の速度 r (救急車の見かけの速度) が高速であるほど、大きく倍率 n を下げてもドップラー効果を不自然に感じにくいという結果を得た。一方、100km/h のサイレン音は、音の高低が変わり過ぎるため、少し不自然に感じるという意見もあった。これは現実には100km/h で走行するという救急車の音を耳にした経験が少ないことが原因と考えられる。

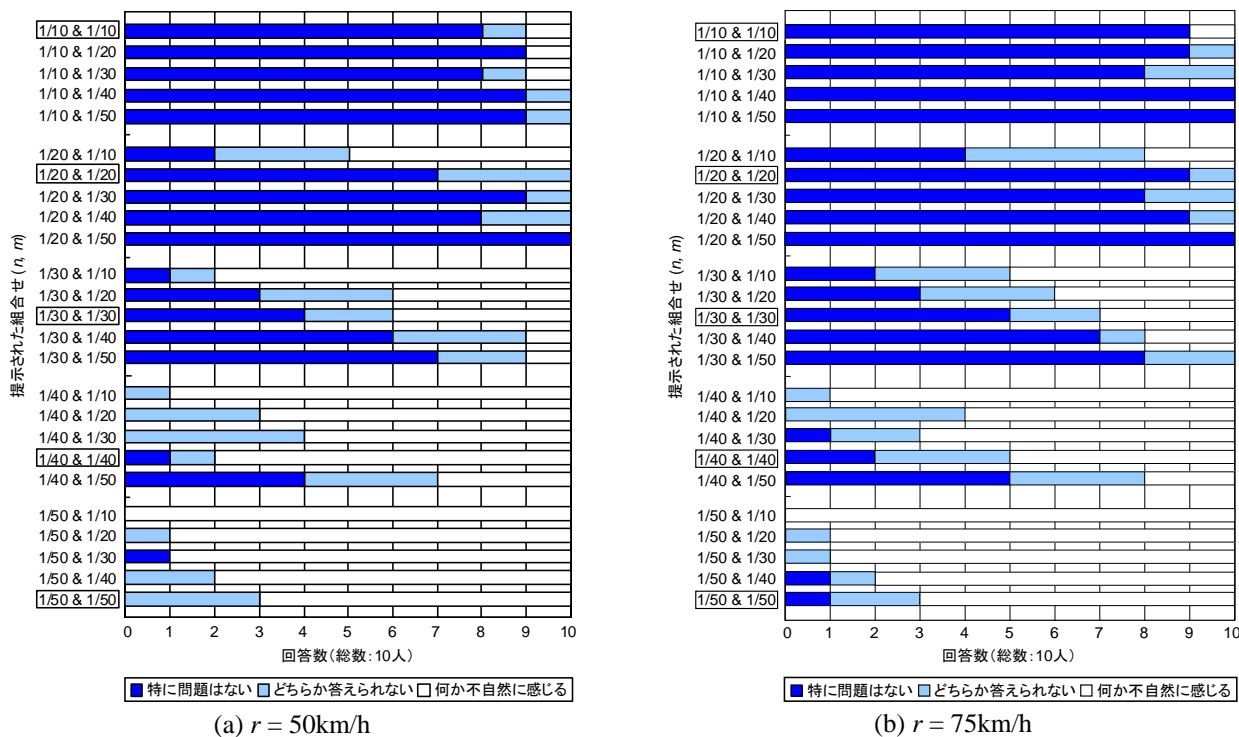


図8 実験2の結果
Fig. 8 Result of experiment 2

5.2 実験2：救急車の見かけの大きさによる影響

【目的】実験1ではGDWの倍率 n が下がると、救急車の見かけの速度のみならず、大きさも同じ倍率で変化させた。GDWと救急車の縮小率が違うと何が起こるのか、という興味から、別々の倍率を用いた（即ち、異なったサイズの救急車を走らせる）実験を行う。

【実験内容】GDWの倍率 n と救急車の見かけの倍率 m を異なる状態で提示する。即ち、 $n > m$ の場合は、同じ速度で走る小型救急車を、 $n < m$ の場合は、大型救急車の走行を眺めている状態である。例えば $n = 1/30$ で、 $m = 1/10$ ならば図6(a)、 $m = 1/50$ ならば図6(c)の大きさの救急車を眺めている状態である。実験済みであるので $n = m$ の場合は提示しない。被験者は実験1と同様の被験者である。

- GDW内の走行速度： $r = 50, 75$ (km/h)
- GDWの倍率： $n = 1/10, 1/20, 1/30, 1/40, 1/50$
- 救急車の見かけの倍率： $m = 1/10, 1/20, 1/30, 1/40, 1/50$
- 提示手順： r は変更せずに、 n と m の組合せ全20種類をランダムに提示する。 $r = 50\text{km/h}$ の実験を行った後に、目を空けて $r = 75\text{km/h}$ の実験を50kmと同様の手順で行った。回答は実験1と同様3通りとした。また事前学習は行わない。

【実験前の予想】異なる大きさの物体が等速度で移動する場合、小さい物体の方がより速く動いていると感じるため、 $n > m$ の場合は実験1で行った r と

n の組み合わせに比べて、ドップラー効果を不自然に感じ難くなり、逆に $n < m$ の場合は実験1に比べて不自然さを感じやすくなる予想した。

【結果と考察】結果を図8に示す。横軸は各回答に対する人数、縦軸は提示された n と m の組合せを示す。矩形で囲まれた組合せは実験1の結果である。予想通り $r = 50, 75\text{km/h}$ ともに $n > m$ の場合は、実験1でドップラー効果に違和感を覚えた (r, n) の組み合わせであっても、違和感が軽減された。逆に、実験1で不自然に感じない n であっても、 $n < m$ の場合には正常でないと感じる比率が増えた。これは、速度 r が同じであっても、 m の変化によって被験者の心理的移動速度が変化し、ドップラー効果の知覚に影響を及ぼしたと考えられる。

6. GDWへの没入感に関する系統的実験

6.1 没入感に関する考察

人間は複数の感覚から外的環境の情報を得ており、特に観察対象までの距離（奥行き）や速度を知覚する際には、運動視差や輻輳、事物の重なりや陰影などの視覚情報が強力に作用する。しかし、暗室などの状況下においては、3次元物体のみを提示した際に、運動視差による奥行き知覚の精度は著しく低下することが報告されており[11]、また事物の重なりや陰影などの情報も得られないため、観察対象の知覚に影響を及ぼす。

そのような認識のもと、3.3 節の背景情報を全て除去した VR 空間において被験者は、視覚の手がかりを得られず、MR 空間ではドップラー効果の存在に違和感を覚えた条件であっても、サイレン音のドップラー効果を聴取することで、“高層ビルなどの高所から、サイレン音を発しながら眼下を走行する救急車を観察している状態”というメンタルモデルが形成され、不自然さを感じなかったと言える。また、暗室でなくとも、ミニチュア救急車の縮尺に適した仮想物体で構成された完全没入型の VR 空間においては、同様のメンタルモデルが形成されると容易に想像できる。

一方、MR 空間は VR 空間と異なり現実世界と仮想世界の事物が混在しているため、現実世界に存在する実寸大の事物が知覚に作用するが、MR 空間内に GDW に没入させるためのミニチュアサイズのスケール手がかりが存在さえすれば、暗室や没入型の環境と同様、ドップラー効果の存在に不自然さを感じないと予想できる。

また、体験する MR 空間内において、どれほど現実世界と仮想世界のスケール手がかりを有しているのか、それらが視野内を占める割合や GDW に没入させるスケール手がかりの完成度、注意を向ける体験者の意識等といった様々な要因が複雑に関係していると考えられるため、それらの影響を観察すべく実験を行った。

6.2 実験 3：僅かなスケール手がかりによる影響

【目的】3.3 節では、周囲の事物を全て除去した VR 空間で実験を行ったが、MR 空間において GDW に没入させるためのスケール手がかりが存在する際の影響を調べる。

【実験内容】被験者の意識を GDW に没入させるため実験室の一部に、ミニチュアのビル (CG でなく、実体模型 (図 9(a))) を 4 つ床面に設置し、走行する救急車の背景に見えるようにする (図 10)。提示する GDW 内の速度 r と倍率 n は、3.3 節の実験で多くの被験者がドップラー効果を不自然に感じた $n = m = 1/30$ とし、速度 $r = 25, 50, 75, 100$ (km/h) の 4 種類をランダムに提示し、これまでの実験と同じく 3 通りで回答させた。また、実験は実験 1、実験 2 と同様の室内 (図 2) で行った。

【実験前の予想】スケール手がかりの量は多くないが、救急車のサイズに則したミニチュアサイズのビルが存在することで被験者の意識が GDW に没入し、ドップラー効果を不自然に感じる被験者の割合が実験 1 に比べてある程度は減少すると予想した。

【結果と考察】結果を図 11 に示す。短形で囲まれた組合せは実験 1 の結果である。予想に反してミニチ

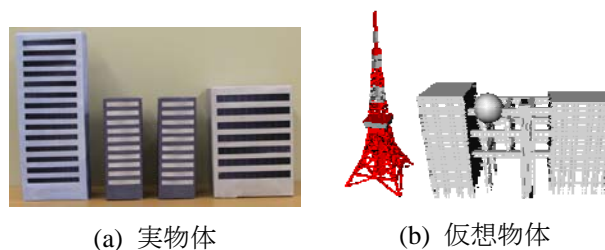


図 9 ミニチュア模型
Fig. 9 Miniature models

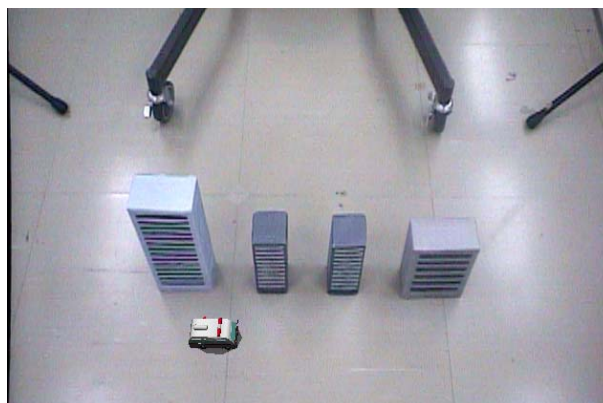


図 10 実験 3 における体験者視点の映像
Fig. 10 User's view of experiment 3

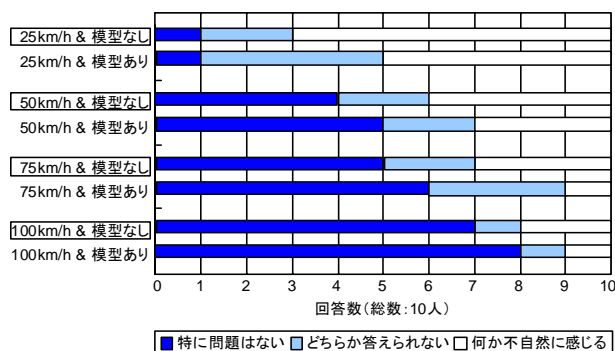


図 11 実験 3 の結果
Fig. 11 Result of experiment 3

ュアサイズの模型が存在しても、実験 1 の結果と大きく変わらなかった。これは、GDW に没入させるために用いた実体模型が室内の一部にしか存在せず、模型の完成度も低いいため、被験者の意識を GDW に没入させることができず、ミニチュアのスケール手がかりではなく、周囲に存在する現実世界の事物の影響を受けてしまったためだと考えられる。

6.3 実験 4：複数のスケール手がかりによる影響

【目的】実験 3 では GDW に没入させるスケール手がかりの割合が少なく、被験者の意識を没入させることが出来なため、ドップラー効果に対する印象の改善が見られなかった。そこでスケール手がかり

を追加し、被験者の意識を GDW に没入させた際の影響を調べる。

【実験内容】スケール手がかりの増加を目的に、実験 3 で用いた実体模型の他に、仮想物体のミニチュア模型 (図 9(b))、道路を模したテクスチャを用いる。被験者の視点からは、ミニチュア救急車が床面に重畳描画された道路の上を走行しているように見えるため、被験者は高所から眼下を走行する救急車を眺めているような状況といえる (図 12)。提示する GDW の倍率 n 、救急車の GDW 内の速度 r 、提示順序、回答は実験 3 と同様、 $n = m = 1/30$ 、 $r = 25$ 、50、75、100 (km/h) とし、ランダムに全 4 種類を提示した。回答はこれまでの実験と同様の 3 通りである。また、各被験者への提示順序は実験 3 と異なる。

【実験前の予想】実験 3 に比べてスケール手がかりの量が増加しているため、完全没入型の空間と同じ様に被験者の意識が GDW に没入し、ドップラー効果を不自然に感じる被験者の割合が減少すると予想した。

【結果と考察】結果を図 13 に示す。予想通り、GDW に関するスケール手がかりの割合を増加させたことで、ドップラー効果を不自然に感じる被験者の数が減少した。また、多くの被験者から「道路があると印象が変わる」という意見が挙がった。そのため、仮想物体の模型 (図 9(b)) は用いずに、実体模型 (図 9(a)) と道路を用いた状態 (即ち、実験 3 に道路を追加した状態) での実験を試みたところ、スケール手がかりの量が減少したにも関わらず、図 13 とほぼ同様の結果が得られた。スケール手がかりの割合も GDW に没入させるための重要な要素であるが、現実世界における体験と酷似した状況を再現可能な事物を用いることで、没入感に対して強力に作用すると考えられる。

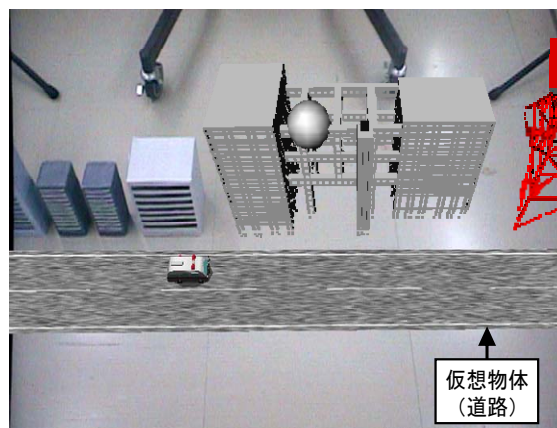


図 12 実験 4 における体験者視点の映像

Fig. 12 User's view of experiment 4

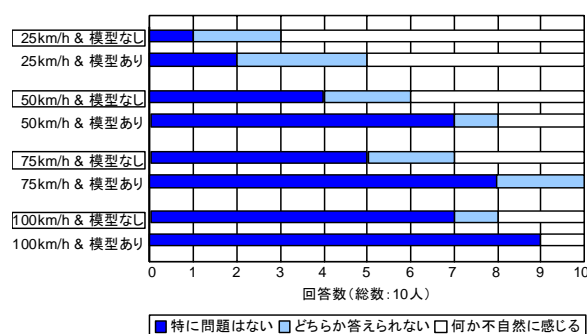


図 13 実験 4 の結果

Fig. 13 Result of experiment 4



図 14 仮想物体の車

Fig. 14 CG objects of car

6.4 実験 5：救急車以外の車を提示した際の影響

【目的】これまでの実験では、GDW に没入させるためにミニチュアのビルをスケール手がかりとして用いていた。しかし、現実世界において救急車を観察すると多くの場合は一般車両も目にするため、それらを提示した際の影響を調べる。

【実験内容】実体・仮想模型 (図 9) は用いず、床面に重畳描画した道路上に仮想物体の車 (図 14) を配置し、被験者に提示する (図 15)。一般車両は緊急車両の進行を妨げないことが義務付けられているため、移動せず静止した状態で提示し、救急車と同じサイズに縮小させる。提示する救急車の GDW 内の速度 r 、GDW の倍率 n 、提示順序、回答はスケール手がかりを用いたこれまでの実験と同様、 $r = 25$ 、50、75、100 (km/h)、 $n = m = 1/30$ とし、ランダム

に全 4 種類を提示し、3 通りで回答させた。

【実験前の予想】実験 4 と比較して、GDW に没入させるスケール手がかりの量は多くないが、道路や救急車以外の車を GDW のスケール手がかりとして用いているため、現実世界において高所から救急車を観察しているようなメンタルモデルが形成されると考えられる。そのため、被験者は現実世界の事物の影響を受けず、ドップラー効果を不自然に感じる被験者の割合が減少すると予想した。

【結果と考察】結果を図 16 に示す。実験 4 と同様、ドップラー効果を不自然に感じる人数が実験 1 に比べて減少した。また、実験 4 に比べて GDW に没入させるためのスケール手がかりの割合が少ないにも関わらず、50~100km/h では 1 人を除き 9 人の被験者は不自然さを感じなかった。一方で、25km/h は

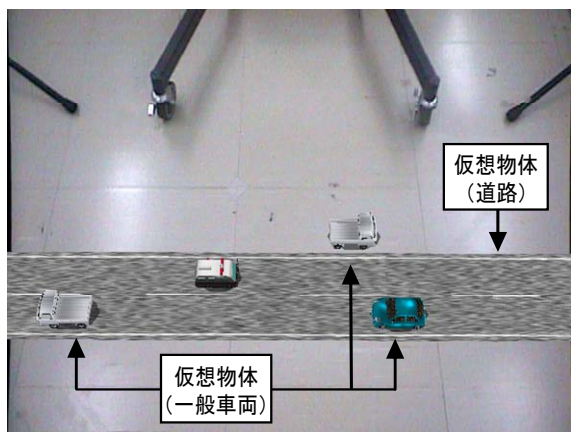


図 15 実験 5 における体験者視点の映像

Fig. 15 User's view of experiment 5

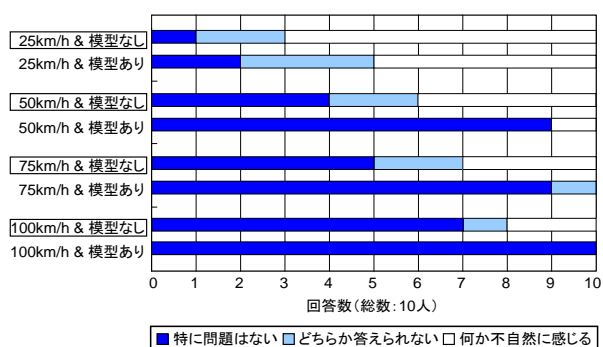


図 16 実験 5 の結果

Fig. 16 Result of experiment 5

スケール手がかりを用いた一連の実験において、一度も大きな改善は見られなかった。そのため、スケール手がかりが存在しても、救急車の見かけの速度が一定以下ならばドップラー効果を不自然に感じてしまうと考えられる。

7. むすび

視聴覚併用複合現実空間の表現力向上を図り、実時間でのドップラー効果の実装まで行ったところ、ミニチュア MR 空間でドップラー効果を正しく感じられるかという問題に遭遇した。即ち、平均的身長の体験者がミニチュア世界を俯瞰的に観察する場合、体験者を小人の国に訪れたガリバーに見立てることがよくあるが、そのガリバーにとってドップラー効果が自然かどうかの問題である。

実際に、仮想のミニチュア世界を MR 空間に重畳したところ、移動音源のドップラー効果を不自然に感じたり、解消したりする現象が生じたので、これを「ガリバー・ドップラー現象」と称した。そして予め立てた、MR 空間に存在する現実物体・仮想物体のスケール手がかりがこの現象を生じる最たる要

因であるという仮説の下、系統的实验を行って、この現象を分析・検討した。

VR 空間や MR 空間における視聴覚の影響に関しては、様々な現象が生じることが知られているが、本研究で対象にしたような、現実物体と仮想物体が混在し、かつミニチュア世界が部分的である場合には、問題が単純ではない。縮小していない物体や人物が現実世界に存在して視野に入って来る場合にその影響を受けたり、縮小模型の完成度が低いゆえに、ミニチュアをミニチュアと感じてしまう場合が多々あるからである。ミニチュア世界を本物と感じるには没入感への集中力と想像力が必要であり、その能力には個人差が大きい上に慣れの影響も大きい。

以上のような実験条件の困難さを伴っての研究実験であったが、まず、どの程度の速度から周囲の事物の影響を受けるのか、救急車の見かけの大きさによって印象の変化が生じるのかを観察すべく、救急車の移動速度や倍率を変更した実験を行った。その結果、高速であれば不自然に感じ難く、同一の速度であっても、救急車の見かけの大きさが小さければ不自然に感じ難く、大きければ不自然に感じやすいことが明らかとなった。また、暗室や完全没入空間でなくとも、ミニチュア世界のスケール手がかりを用いて体験者の意識を GDW に没入させることで印象が変化すると考え、系統的实验を行った。実験の結果、予想通り、ミニチュア世界のスケール手がかりが少なければ改善が見られず、多い場合や没入感に強く作用すれば、ドップラー効果を不自然に感じ難いという結果を得た。一方で、速度が遅すぎる場合には、ミニチュア世界のスケール手がかりが存在してもドップラー効果を不自然に感じ、印象の改善は見られなかった。

本研究は、視聴覚併用 MR システム実現の発展形として行ったものである。ガリバー・ドップラー現象はミニチュア MR 空間や巨大 MR 空間に対してのみ考慮すべき事象であるが、前者の利用度の高さを考えると、本研究の結果は、このような現象が生じることを想定していなかった読者に有益な知見を与えるものであると考えられる。

謝辞

本研究におけるドップラー効果の実装には、研究室の学部生（現在、富士通エフ・アイ・ピー（株））塚本拓郎君の協力を得た。また、本実験の音響学的な観点からの検討は、本学西浦敬信准教授、森勢将雅助教の助言を得た。本研究の一部は、科研費・基盤研究 A「視聴覚併用複合現実空間の表現力向上に関する研究」による。

参考文献

[著者紹介]

- [1] 比嘉恭太, 西浦敬信, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行: “視覚・聴覚の現実と仮想を融合する 2×2 方式複合現実感システムの実現”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 13, No. 2, pp. 227 - 237, 2008.
- [2] 吉野将治, 西浦敬信, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行: “視覚・聴覚を併用した複合現実感システムの開発 (4) - 複合現実空間での音の反射・遮断の実現 -”, 同学会第 13 回大会論文集, pp. 556 - 559, 2008.
- [3] J. Smith, S. Serafin, J. Abel, D. Berners: “Doppler simulation and the leslie,” Proc. 5th Int. Conf. on Digital Audio Effects DAFx - 02, pp. 13 - 20, 2002.
- [4] Y. Iwaya and Y. Suzuki: “Rendering moving sound with the doppler effect in sound space,” *Applied Acoustics*, Vol. 68, pp. 916 - 922, 2007.
- [5] 山之上祐一, 奥井誠人, 岡野文男, 湯山一郎: “2 眼立体画像における箱庭・書き割り効果の幾何学的考察”, 映像情報メディア学会誌, Vol. 56, No. 4, pp. 575 - 582, 2002.
- [6] 中川千鶴, 大須賀美恵子, 竹田仰: “映像と動きに誘発された「酔い」における生理反応の基礎的検討: 大型 4 面立体映像提示装置と 6 軸モーションを用いて”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 6, No. 1, pp. 27 - 36, 2001.
- [7] 小曳尚, 繁樹博昭, 北崎充晃: “バーチャルリアリティ空間における視聴覚の同時知覚 - 両眼視差と運動視差の効果 -”, 電子情報通信学会研究報告, Vol. 106, No. 234, MVE43 - 62, pp. 73 - 77, 2006.
- [8] H. Hasegawa, M. Ayama, S. Matsumoto, A. Koike, K. Takagi and M. Kasuga: “Evaluation of the Corresponding Degree between a Visual Image and Its Associated Sound under Dynamic Condition on a Wide Screen,” *IEICE Trans. on Fundamentals of Electronics*, Vol. E87-A, No. 6, 2004.
- [9] Z. Zhou, A. D. Cheok, Y. Qiu, and X. Yang: “The role of 3-D sound in human reaction and performance in augmented reality environments,” *IEEE Trans. on Syst., Man & Cybern., Part A*, Vol. 37, No. 2, pp. 262 - 272, 2007.
- [10] 石黒祥生, 比嘉恭太, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行: “視聴覚併用複合現実空間のスケール感に関する考察”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 13, No. 2, pp. 125 - 128, 2008.
- [11] F. H. Durgin, D. R. Proffitt, T. J. Olson and K. S. Reinke: “Comparing depth from motion with depth from binocular disparity,” *J. Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, Vol. 21, No. 3, pp. 679 - 699, 1995.

(2010 年 12 月 8 日受付)

村井 嘉彦 (正会員)



2009 年立命館大学情報理工学部情報コミュニケーション学科卒。2011 年同 大学院理工学研究科博士前期課程修了。同年 4 月, パナソニック (株) 入社。2009 年より 2011 年まで視聴覚併用複合現実感に関する研究に従事。2009 年本学会学術奨励賞受賞。

木村 朝子 (正会員)



1996 年大阪大学基礎工学部卒。1998 年同 大学院基礎工学研究科博士前期課程修了。同大学助手, 立命館大学理工学部助教授, 科学技術振興機構さきがけ研究員等を経て, 2009 年 4 月より立命館大学情報理工学部メディア情報学科准教授。博士 (工学)。実世界指向インタフェース, 複合現実感, ハプテックインタフェースの研究に従事。電子情報通信学会, 情報処理学会, ヒューマンインタフェース学会, ACM, IEEE 各会員。本学会学術奨励賞・論文賞, 情報処理学会山下記念研究賞等受賞。

柴田 史久 (正会員)



1996 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士前期課程修了。1999 年同 研究科博士後期課程修了。大阪大学産業科学研究所助手を経て, 2003 年 4 月より立命館大学理工学部助教授。現在, 同 情報理工学部情報コミュニケーション学科准教授。博士 (工学)。モバイルコンピューティング, 複合現実感等の研究に従事。本学会複合現実感研究委員会委員。IEEE, 電子情報通信学会, 日本ロボット学会, 情報処理学会等の会員。本学会学術奨励賞・論文賞を受賞。

田村 秀行 (正会員)



1970 年京都大学工学部電気工学科卒。工業技術院電子技術総合研究所, キヤノン (株) 等を経て, 2003 年 4 月より立命館大学理工学部教授。現在, 同 情報理工学部メディア情報学科教授。工学博士。1997 年より 2001 年まで, MR システム研究所にて「複合現実感研究プロジェクト」を率いた。本学会元理事, 現在, 評議員, 複合現実感研究委員会顧問。編著書「Mixed Reality」(Ohmsha & Springer)「コンピュータ画像処理」(オーム社)など。電子情報通信学会フェロー, IEEE, ACM, 情報処理学会, 人工知能学会, 映像情報メディア学会等の会員。本学会及び情報処理学会論文賞, 人工知能学会功労賞等を受賞。