

# 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

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

村井嘉彦, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行

Yoshihiko Murai, Asako Kimura, Fumihisa Shibata, and Hideyuki Tamura

立命館大学大学院 理工学研究科

(〒525-8577 滋賀県草津市野路 1-1-1)

**Abstract:** In the real world, the Doppler effects on the listener is caused by the such as the siren on a rapidly passing emergency vehicle. There are many cases the virtual object is expressed in a smaller size, in the Mixed Reality (MR). In such case, the speed of CGI movement is proportional to the scale of it, the Doppler effects shift on the listener will be less effect. However, when we are the resident in the world where all the size of object, the speed of sound and everything are smaller than the real world, in other words dwarf, and hear the movement sounds of miniature object, we perceive the Doppler effects like real world. Therefore, we assume subjects see the miniature object from the sight of Gulliver, also they hear the sounds dwarf hear. Then they can perceive the Doppler effects for the miniature object that the speed is slow. This paper presents the result of experiments in which those MR Doppler effects is described as “Gulliver-Doppler Phenomenon”.

**Key Words:** Mixed Reality, Audio-Visual MR, The Doppler Effect.

### 1. はじめに

我々はこれまでに、視覚的 MR と聴覚的 MR を同時に体験できる視聴覚併用 MR システムを研究開発している[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拡張を行ってきた[2]. さらなる視聴覚 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、豊田ら[4]は位置情報のみを用いた手法を提案している. 本研究では豊田らの手法を採用し、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、より自然に感じる」との回答が得られている.

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合成し体験した場合には、正常にドップラー効果を感じられ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、ガリバーにはミニチュア救急車の音でドップラー効果を感じるのかという疑問である. これは、後述する条件を課した「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. その原因究明の過程で、実世界の背景を除去したミニチュア VR 世界を試したところ、仮説の通り、その不自然さが全く生じない(即ち、ドップラー効果が自然に感じる)現象も観察された.

本研究では、ミニチュア VR/MR 世界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、系統的な実験を行って、この現象を引き起こす要因の分析・検討を行った. 以下、本稿では、この実験結果と考察に関して述べる.

### 2. ミニチュア世界とドップラー効果の知覚

#### 2.1 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中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、支配的なのは視覚的な刺激に対してであり、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、仮想物体の高速移動に対してもドップラー効果の導入が好ましいと感じるように、音のドップラー効果に慣れた人間には既にその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 空間でミニチュアサイズの視聴覚刺激を与えた場合はどうなるのか? 視覚と聴覚を切り離して考えるべきか、興味深い問題が生じてくる.

#### 2.2 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・拡大ではあり得ない。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である場合、小人の国、巨人の国では以下のようになる。

【小人・巨人の国での音速と救急車】

- ・ 地球上である以上、両国でも音速は常温で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、いずれの場合も救急車の速度が音速とかけ離れているため、我々が通常感じるようなドップラー効果（周波数の変化）は生じず、ガリバーはもちろん、小人や巨人も音のドップラー効果を知覚できない。

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・拡大世界でドップラー効果を実現したければ、音速を変えればよい。即ち、地球上であ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れば済むことである。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）」と呼ぶことにする。

【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



図1 GDWに赴いた体験者（イメージ図）

覚的には単なる縮小・拡大世界を体験する（空気圧が異なるので、網膜保護のため防護メガネは必要かも（図1））。  
・ 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。GDW内でマイクロホンを紹介し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。

### 2.3 MR空間におけるGDWの適用と諸問題

VR空間は全くの仮想世界であり、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を訪れたガリバー感覚の体験ができることになる。

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】様々な事物が存在する室内で、 $n$ の値を様々に変化させて、床面にGDW内を速度 $v = 50\text{km/h}$ 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（図2）。

【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に対してドップラー効果を提示できたが、 $n = 1/30$ の場合「救急車の動きが遅いの、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。その原因としては、実験環境中にある現実世界の事物が影響を及ぼし、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、背景の映像



図2 実験環境

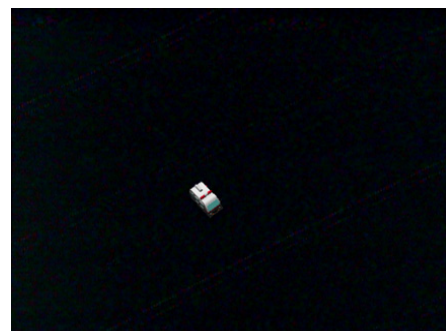


図3 VR空間における体験者の光景

信号を除去した VR 表示とした。即ち、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】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かった。

【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れば、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、それは見事に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、違和感の発生も解消も含めて、これを「ガリバー・ドップラー現象」と名付け、さらに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。

### 3. 視聴覚 MR システムでのドップラー効果の実現

系統的実験を行う実験環境に関して、その概要を記す。

#### 3.1 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) 場合は音データが格納されている配列の要素数を増加させ、反対に音データよりも周波数を高く (高音にする) 場合は配列の要素数を減少させる。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、体験者の頭部の 3 次元座標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配列中に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いたが、本研究ではそれらに加えて 3 次スプライン補間を用いた。実装した結果、入力音 (波形の形状) によって最適な補間処理が異なることが判明したので、入力音に対して事前検討を行い、ノイズが最も少ない補間処理を採用している。

#### 3.2 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: 50dBA 程度, 補間処理: 線形補間

【視聴環境】システム構成は文献[6]を踏襲し、被験者はビデオスルー HMD と開放型ヘッドホンを装着し MR 体験を行う。実験は 2.3 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眺める。また人工音は 2.2 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 4)。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用いる。

## 4. ガリバー・ドップラー現象の系統的実験

### 4.1 実験 1: GDW 内の速度と GDW の倍率の関係

【目的】2.3 節の試行実験では、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。どのレベルから他の物体に幻惑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。 $r, n$  と救急車の見かけの速度の関係を表 1 に示す。

【実験前の予想】GDW 内の速度が高速であるほど、倍率  $n$  を小さくしても見かけの速度は遅くならないため、ドップラー効果の存在に違和感を覚えないと予想した。

【結果と考察】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 100km/h で走行するという救急車の音を耳にした経験がないことが原因と考えられる。

### 4.2 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。

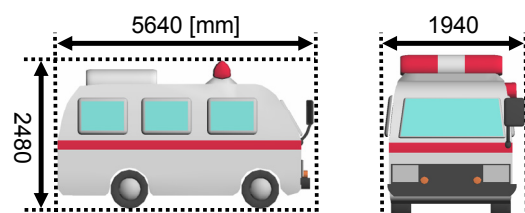


図 4 救急車の CG オブジェクトの寸法

表 1 GDW 内の速度・倍率における  
救急車の見かけの速度

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

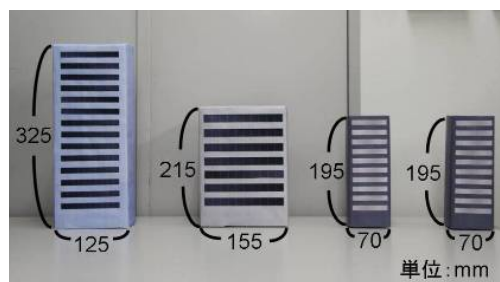


図 5 実験 3 で用いた実体模型

【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。実験済みであるので、 $n = m$  の場合は提示しない。

- ・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： $m = 1/10, 1/20, 1/30, 1/40, 1/50$

【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、 $m < n$  の場合、ドップラー効果を不自然に感じない。

【結果と考察】予想通り、 $m < n$  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、違和感が大幅に軽減された。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。即ち、救急車の大きさを見慣れていることも影響している。

#### 4.3 実験 3：GDW に没入させるスケール手がかりの影響

【目的】2.3 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】ミニチュアのビル (CG でなく、実体模型) を床面に設置し (図 5)、走行する救急車の背景に見えるようにする。提示する GDW 内の速度と倍率  $n$  は、2.3 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、速度  $r = 50$ km,  $n = m = 1/30$  とする。

【実験前の予想】ミニチュアのビルが GDW に対するスケール感の手がかりとなるため、ドップラー効果を自然に感じる被験者の割合が 2.3 節の実験に比べて増える。

【結果と考察】これは予想に反して、ミニチュアサイズの模型が存在しても、2.3 節と変わりなく、被験者の大半がドップラー効果を不自然に感じた。これは、実態模型の室内の一部にしか存在せず、GDW に没入させるほどの影響を与えるに至らなかったためだと考えられる。

## 5. むすび

仮想のミニチュア世界を複合現実空間に重畳した場合、移動音源のドップラー効果を不自然に感じたり、解消したりする錯覚を「ガリバー・ドップラー現象」を呼び、その

原因を分析・検討した。

本研究の前提として、視覚的 MR と聴覚的 MR を同時に達成できるシステムに電子音のドップラー効果を実装し、これが実寸大の CG 救急車の移動では有効に知覚されること確認した上で、新たな知見を得ようとしている。小説「ガリバー旅行記」のガリバーが訪れる地球上の「小人の国」では、ガリバーはドップラー効果を知覚できないことを明確化した上で、知覚可能な「ガリバー・ドップラー世界 (GDW)」を定義し、MR 空間において GDW の適用を試みた。その結果は、本報告で記したように、思わぬ現象に遭遇し、その原因解明と系統的な実験による分析・検討を行って興味深い知見を得た。

まだまだ未知の魅力を備えた研究テーマであるので、今後は、現実世界と仮想世界のスケール手がかりを様々な割合に変更させ実験等を行い、本研究を発展させて行く。

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)) 塚本拓郎君の協力による。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

- [1] 比嘉, 西浦, 木村, 柴田, 田村: “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 VR 学会論文誌, Vol. 13, No. 2, pp. 227 - 237, 2008.
- [2] 吉野, 西浦, 木村, 柴田, 田村: “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. of the 5<sup>th</sup> Int. Conference on DAFx - 02*, pp. 13 - 20, 2002.
- [4] 豊田, 岩谷, 鈴木: “3 次元空間内におけるドップラー効果のリアルタイムレンダリングに関する考察”, 日本 VR 学会第 9 回大会論文集, pp. 457 - 460, 2004.
- [5] W. Fujisaki, S. Shimojo, M. Kashino, and S. Nishida: “Recalibration of audiovisual simultaneity,” *Nature Neuroscience*, Vol. 7, No. 7, pp. 773 - 778, 2004.
- [6] 石黒, 比嘉, 木村, 柴田, 田村: “視聴覚複合現実空間のスケール感に関する考察”, 日本 VR 学会論文誌, Vol. 13, No. 2, pp. 125 - 128, 2008.