

VR空間の単純な視覚刺激が及ぼす体感音量への影響調査

小林 永実¹ 松田 裕貴¹ 渡邊 拓貴² 安本 慶一¹

概要: 安価で高性能な VR (バーチャルリアリティ) 装置の登場に伴い, VR ゲームやメタバースなどの VR コンテンツが急速に普及しつつある. VR 空間では速度や落下といった様々な感覚・刺激を主に視覚情報・聴覚情報としてユーザに提示することができる一方で, 人間が知覚する主観的な印象 (例えば体感音量) は, ユーザを取り巻く VR 空間内の状況によって変化することから, 状況に応じた音量調整により, 情報提示のクオリティを向上させることが期待される. それに先立って本研究では, 視覚刺激が主観的な音量に与える影響を明らかにすることを目指している. 本稿では, 単純化した視覚刺激として「色」, 聴覚刺激として「テストトーン」に焦点を当て, それらを VR 空間内で提示する調査実験を行った. 結果として, 「色」の種類によって体感音量には差が生じることが示され, 特に音量が小さくなる場合において寒色系の色について暖色系よりも音量変化が大きく感じられる (音量が小さく感じられる) ことが明らかとなった.

Investigating the effects of simplified visual stimuli on the perceived sound volume in VR space

TOMA KOBAYASHI¹ YUKI MATSUDA¹ HIROKI WATANABE² KEIICHI YASUMOTO¹

1. はじめに

近年の技術発展により, 安価で高性能な VR (バーチャルリアリティ) 装置を手に入れることができるようになった. また VR の種類として, VR グラスにスマホをセットする「スマホセットタイプ」や, ケーブル接続によって高度な VR を体験できる「PC・ゲーム機連動タイプ」, 本体のみで VR として機能する「スタンドアロンタイプ」といった具合に, VR へのアプローチは多様化している. このような状況に伴い, VR ゲームやメタバースなどの VR コンテンツが今後, 一般化すると考えられる. VR 空間では速度や落下などの様々な感覚・刺激をユーザに提示することができる. そしてそのシステムの提示は, 視覚情報と聴覚情報で構成されることが多い. しかしながら, 先行研究では人間が知覚する主観的な印象は, ユーザの状況によって変化することが報告されている.

例えば, スマートグラス上に視覚刺激を提示することで主観的な時間の速さが変化するシステムの提案 [1] や, ス

マートグラス上で再生する動画の再生速度が視聴後の作業速度に与える影響が報告されている [2]. また, 新型コロナウイルス感染症といった社会情勢が, ある空間における体感混雑度に影響を与えることが報告されている [3]. 音についても, ユーザが感じる音の大きさ (体感音量) は, ユーザの状況によって異なることが先行研究から報告されている. 例えば, ユーザの主観的な音量は, 直前までに提示されていた音量によって変化すること [4] や, 同音圧の音源でも視覚効果の有無によって主観的な音量や音から受ける印象が変化することが報告されている [5].

一方で, これらの研究では視覚刺激と音とは対応するもの (例えば, 車の映像に対して車の音) を用いており, 視覚刺激と音とが対応していない場合 (例えば, 視覚刺激は公園の映像だが聴覚刺激は音声アナウンス) の影響については言及されていない. これに対して渡邊らの研究では, 雑踏のような刺激の多い映像よりも, 公園のような刺激の少ない映像の方が, 体感音量が上がる傾向にあることが確認された [6]. この研究では, 視覚刺激の多い・少ないといったことを評価する基準が曖昧であるため, より単純化・一般化した刺激を用いた評価が必要があると考えた. 視覚刺激の体感音量への影響を一般化された形で調査すること

¹ 奈良先端科学技術大学院大学
Nara Institute of Science and Technology

² 北海道大学
Hokkaido University

で、イヤホンなどのヒアブル機器において従来考慮されていた環境音に応じて情報提示の音量を変化させるだけでなく、視覚刺激にも応じて情報提示の音量を変化させることで適切な音量でのサービス提供が可能となる。

以上から本稿では、単純化した視覚刺激として「色」、聴覚刺激として「テストトーン」に焦点を当て、それらを VR 空間内で提示することにより、視覚刺激が主観的な音量に与える影響について調査する。

2. 関連研究

2.1 聴覚刺激が体感音量に与える影響

聴覚に音刺激が持続的に提示されることで、体感音量が減少するということが古くから研究されている [7], [8]. 矢高らは、騒音等の周囲の状況や会話中などの活動状況の影響に応じてイヤホンから提示する音量を動的に変更するシステムを提案した [9]. 同じく矢高らは、体感音量が直前に聴取した音量の影響を受けることを利用し、システムからの音声情報提示によりユーザの感じる音量が一定とする機構を提案した [4].

上記の研究では音の提示により体感音量が変化することに着目しており、本研究で対象とする異なる視覚刺激が音声情報提示の体感音量に与える影響の調査とは対象が異なる。

2.2 視覚刺激が体感音量に与える影響

視覚情報と聴覚情報とは相互に影響を及ぼす可能性があることが複数の先行研究から示されている。佐久間らは、視覚情報の変化によって体感音量が変化するか調査を行った [10]. Web カメラを搭載した HMD を用い、ユーザが指定した箇所に視覚効果を施すことにより、ユーザの体感音量を制御するシステムを実装した。安倍らは、視覚情報が環境音知覚に及ぼす影響について調査を行った [5]. 刺激音を提示する際に、対応する映像も同時に提示して評価実験を行なった結果、音の明るさ因子を除く各因子について、映像の付加による影響が確認されている。Tokunaga らは、自動車走行音を対象として、音のみの場合と、音と映像を与えた場合に、被験者の感じる主観的な音量が変化することを報告している [11]. 藤本らも自動車騒音を対象として、現場で実騒音を聴いた場合、実験室内で騒音だけを聴いた場合、実験室内で映像と騒音を試聴した場合において、得られる大きさ、やかましさ、妨害感の評価が異なることを示している [12]. Szychowska らは、聴覚刺激のみ、視覚刺激のみ、聴覚刺激と視覚刺激を与えた場合で、環境騒音から得られる評価が異なることを検証している [13]. Bangjun らは、騒音の音源が視覚的に確認できるかどうかで生じる影響について検討しており、同じ騒音環境であれば、騒音源が視認できる方が不快感が高まることが報告されている [14]. 宮川らは日常聞かれる 62 種類の環境音を

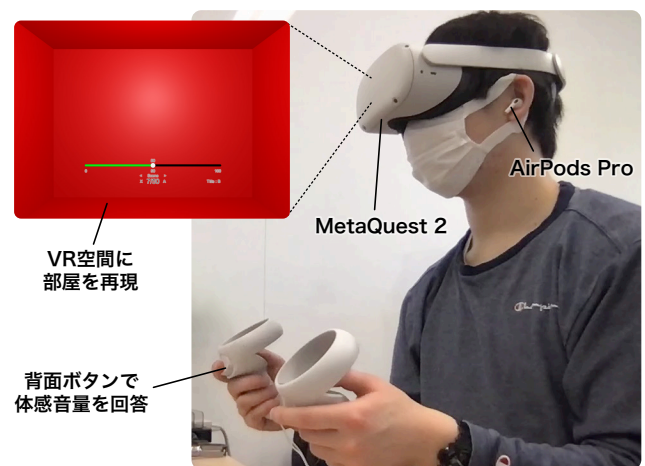


図 1: 実験の様子

対象として、音のみを提示した場合と、映像を付加して提示した場合について音の印象を調査した [15]. また、朝倉は都市環境音の主観的印象が視覚情報の有無や種類によって異なることを明らかにしている [16]. 結果として、視覚刺激のない場合に比べて滝や飛行機といった視覚刺激がある場合に体感音量が増大することが示されている。上記の研究では、視覚情報が聴覚へ与える影響を調査しており、視覚情報と聴覚情報とに関連があることが示されている。しかし、これらの研究では対応のある視覚刺激と聴覚刺激を用いており、本研究で対象とする視覚刺激と聴覚刺激が対応していない状況での影響の調査という点で異なる。これに対して著者らは先行研究として、視覚刺激の体感音量に与える影響について調査しており、雑踏のような刺激の多い映像よりも公園のような刺激の少ない映像の方が、体感音量が大きくなる傾向にあることを確認している [6]. しかしながら、視覚刺激の大小を評価する基準が曖昧であったため、より単純化・一般化した刺激を用いた評価が必要と結論づけているところである。

3. 視覚刺激が体感音量に与える影響調査

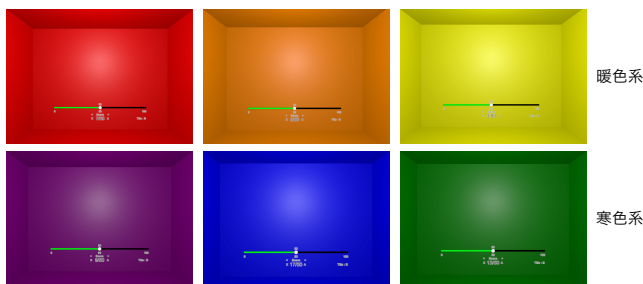
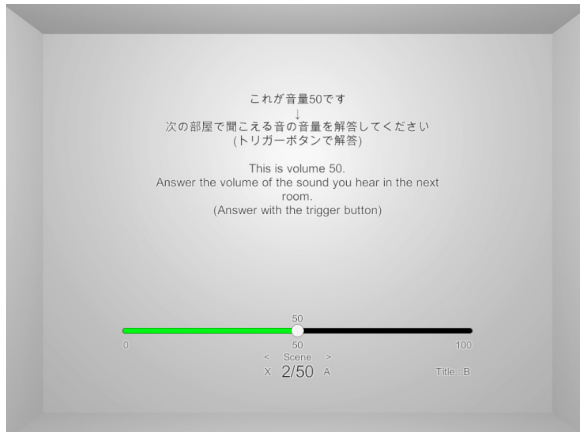
本研究では、VR 空間内における単純な視覚刺激が体感音量に与える変化を調査することを目的とする。本稿では、著者らの以前の研究 [6] での設定（視覚刺激は街・公園の映像、聴覚刺激はニュースの音声）より刺激を単純化するため、視覚刺激として「色」、聴覚刺激として「テストトーン」に焦点を当てる。以降では、VR 空間内の部屋の「色」を変化させたときの視覚刺激の差が、主観的な音量に影響を与えるかどうかについて調査する。

3.1 実験条件

実験環境を図 1 に示す。被験者は、没入型 HMD (MetaQuest 2*) を装着し視覚刺激を、耳にはイヤホン

*1 <https://www.meta.com/quest/products/quest-2/>

基準の部屋 部屋色: 白, 音量: 50 (±0dB)



対象の部屋 部屋色: 赤・橙・黄・紫・青・緑, 音量: 20~80 (最大±6dB)

図 2: VR 空間上における表示画面

(Apple AirPods Pro^{*2}) を装着し、聴覚刺激をそれぞれ受ける。視覚刺激としては、図 2 に示すような VR 空間における部屋を Unity で作成した。この部屋は縦 8m × 横 4m × 高さ 3m の空間として表示され、部屋の壁色が、白、赤、橙、黄、紫、青、緑といった異なる色に変化する。聴覚刺激には、1kHz の正弦波 (テストトーン) を基準音として定義し、音量を ±6dB の範囲で変化させることで異なる刺激を提示する。

3.2 実験手順

上記の実験環境を用いて、以下の手順でデータを収集する。本実験では、聴覚刺激について音量 50 を基準とし、0~100 の段階で相対的に表現する。

まず、視覚刺激・聴覚刺激の基準として、HMD 上に白い部屋が表示された状態で基準音 (音量 50) を提示する。次に、HMD 上に色付きの部屋 (赤、橙、黄、紫、青、緑からランダムに選択) を表示するとともに、基準音の音量を ±6dB の範囲でランダムに変化させた音 (本実験では -6dB は音量 20, +6dB は音量 80 と設定した) を提示する。最後に、被験者は基準音と比較して刺激音がどの程度と感じたか、音量 0~100 の間で回答する。例えば、基準音 (音量 50) に対して、刺激音が少し大きいと感じたら 70 などと

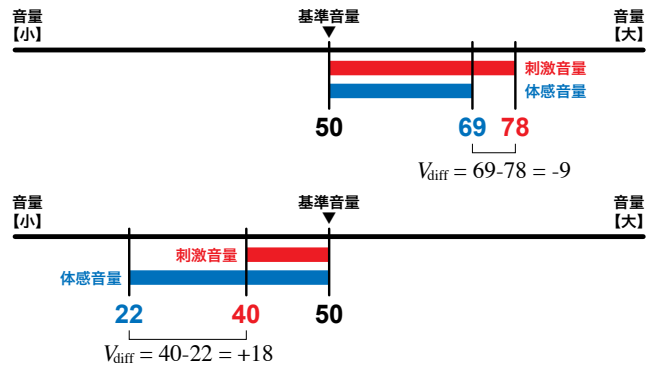


図 3: 提示音量と体感音量との差 V_{diff} の計算方法

回答するよう指示した。

この手順を 1 セットとし、1 セットが終わると再び白い部屋・基準音を提示する場面に戻り、次のセットが開始される。上記の手順を 24 回 (部屋各 6 色 × 4 回) 行う。視覚刺激と聴覚刺激の組み合わせと提示順は、被験者毎に異なるようにランダムに設定した。被験者は 20 代から 30 代の男女 20 名である。

3.3 実験結果

実験では、基準音 (=音量 50) と比較し、提示した刺激音の音量 (以降、提示音量) がどの程度大きく (あるいは、小さく) 聞こえるのかを体感音量として回答してもらっていることから、基準音を中心として算出された提示音量 (V_{true}) と体感音量 (V_{subj}) の差 (V_{diff}) を分析に用いることとする。算出方法の概要を図 3 および下記に示す。

$$V_{diff} = \begin{cases} V_{subj} - V_{true} & (V_{true} \geq 50) \\ V_{true} - V_{subj} & (V_{true} < 50) \end{cases} \quad (1)$$

■ 全データを用いた分析

まず、収集した全データについて、提示音量と体感音量の差 V_{diff} を視覚刺激 (部屋の色) 別に示したものが図 4 である。全体の傾向として狭い範囲での回答が得られているが、これは本実験では基準音以外は被験者に提示していないことに起因することに留意されたい (被験者は各自の基準によってどの程度音量が変化したかを報告している)。

このデータについて有意水準 5% の Shapiro-Wilk 検定により正規性を検定したところ、 $p = 0.010$ ($p < 0.05$) となったことから、本データセットは正規分布に従っていないといえる。そこで、視覚刺激 (部屋の色) による差が生じているのかを調べるために、有意水準 5% の Kruskal-Wallis 検定を適用した結果、 $p = 0.034$ ($p < 0.05$) を得た。このことから、視覚刺激による体感音量の影響が存在することがわかった。加えて、Bonferroni 法に基づく多重検定を行った結果は、いずれの組においても差があるとは言えないことがわかった。これについては、比較対象群が多すぎることによる検出力の低下が一因と考えられる。

*2 <https://www.apple.com/airpods-pro/>

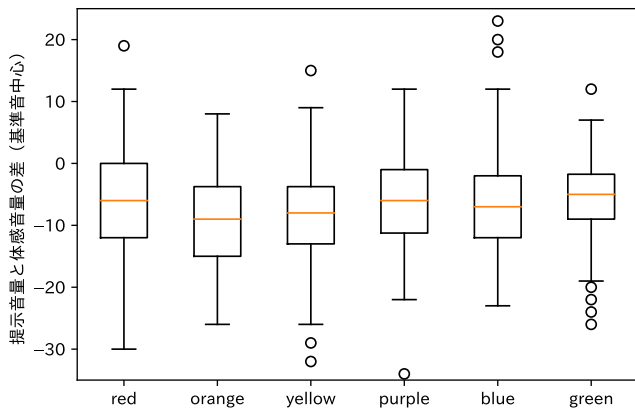


図 4: 提示音量と体感音量との差 (全データ)

■ 音量別での分析

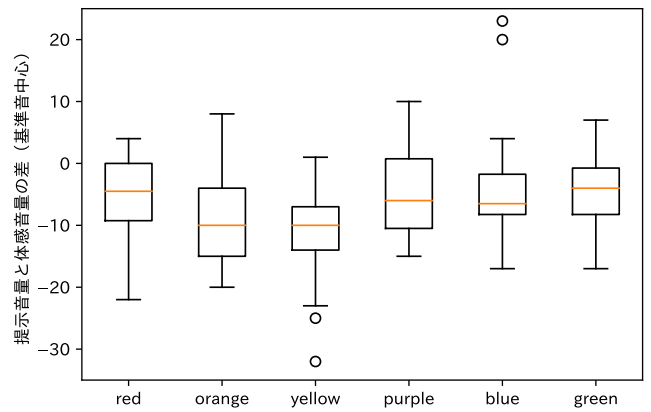
次に、著者らの以前の研究 [6] では実音量の音量によって視覚刺激の影響が異なることが示されているため、本実験のデータセットについても同様の分析を試みる。本実験では、音量 20~80 ($\pm 6\text{dB}$) の間で被験者に提示していることから、データセットを小 (音量 20~40)・中 (音量 40~60)・大 (音量 60~80) のグループに分割した。各音量グループについて提示音量と体感音量の差 V_{diff} を視覚刺激 (部屋の色) 別に示したものが図 5 (a)(b)(c) である。

このデータについて有意水準 5% の Shapiro-Wilk 検定により正規性を検定したところ、それぞれ $p < 0.05$ となった。そこで、視覚刺激 (部屋の色) による差が生じているのかを調べるために、有意水準 5% の Kruskal-Wallis 検定を適用した結果、各音量グループについて、小 ($p = 0.01, p < 0.05$)・中 ($p = 0.76, p > 0.05$)・大 ($p = 0.20, p > 0.05$) を得た。このことから、実音量が小さい場合においてのみ、視覚刺激による体感音量の影響が存在することがわかった。なお、これは以前の研究 [6] を支持する結果となっている。加えて、Bonferroni 法に基づく多重検定を行った結果は、いずれの組においても差があるとは言えないことがわかった。

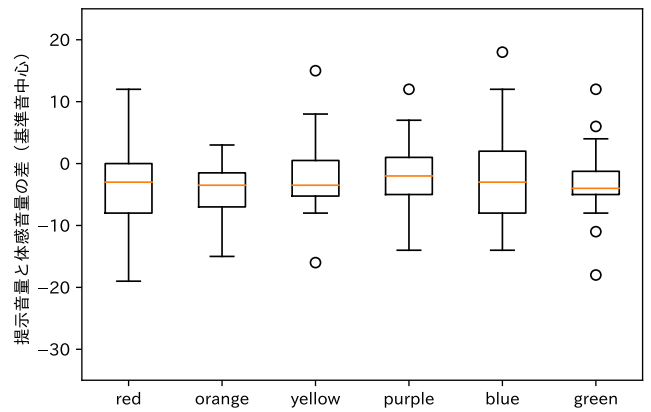
■ 音量別・色カテゴリ別での分析

最後に、視覚刺激を個別の色ではなく「色の温度」という観点から見た際に、体感音量に影響するかどうかについて分析する。本実験では、大きく分けて暖色系 (赤, 橙, 黄) と寒色系 (紫, 青, 緑) を用いていることから、それらをカテゴリ分けしたデータセットを作成した。それらについて、各音量グループの提示音量と体感音量の差 V_{diff} を示したものが図 6 (a)(b)(c) である。

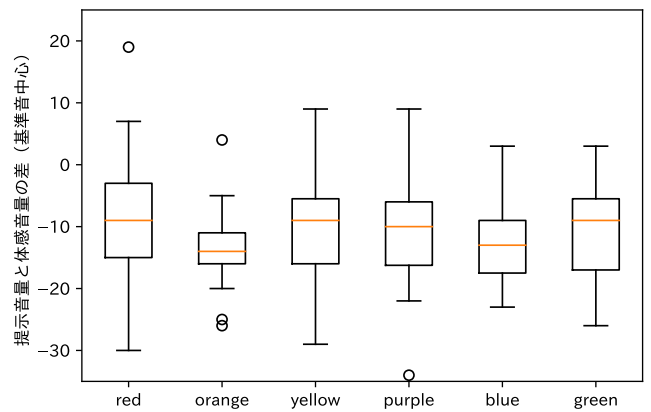
このデータについて有意水準 5% の Shapiro-Wilk 検定により正規性を検定したところ、それぞれ $p < 0.05$ となった。そこで、視覚刺激 (部屋の色) による差が生じているのかを調べるために、有意水準 5% の Mann-Whitney-U 検定を適用した結果、各音量グループについて、小 ($p = 0.01, p < 0.05$)・中 ($p = 0.50, p > 0.05$)・大 ($p = 0.81, p > 0.05$) の結果を得た。このことから、実音量が小さい場合におい



(a) 音量・小 (音量 20~40)



(b) 音量・中 (音量 40~60)



(c) 音量・大 (音量 60~80)

図 5: 提示音量と体感音量との差 (音量別)

て暖色系の方が有意に音量減少を感じづらくなる (寒色系の場合よりも相対的に音が大きく感じられる) ということを示された。寒色系よりも暖色系の色の方が視覚刺激は強いと考えられるが、この結果は以前の研究 [6] の結果 (街・公園の映像を提示したとき、より刺激が大きい「街」の方が音が小さく感じられる) とは異なっている。以前の研究では複数の要因が重なる視覚刺激となっているため、本研究の結果に加えて、今回は取り扱わなかった「視界の動きの激しさ」といった「色」とは異なる視覚刺激についても、今後調査を進める必要があると考えられる。

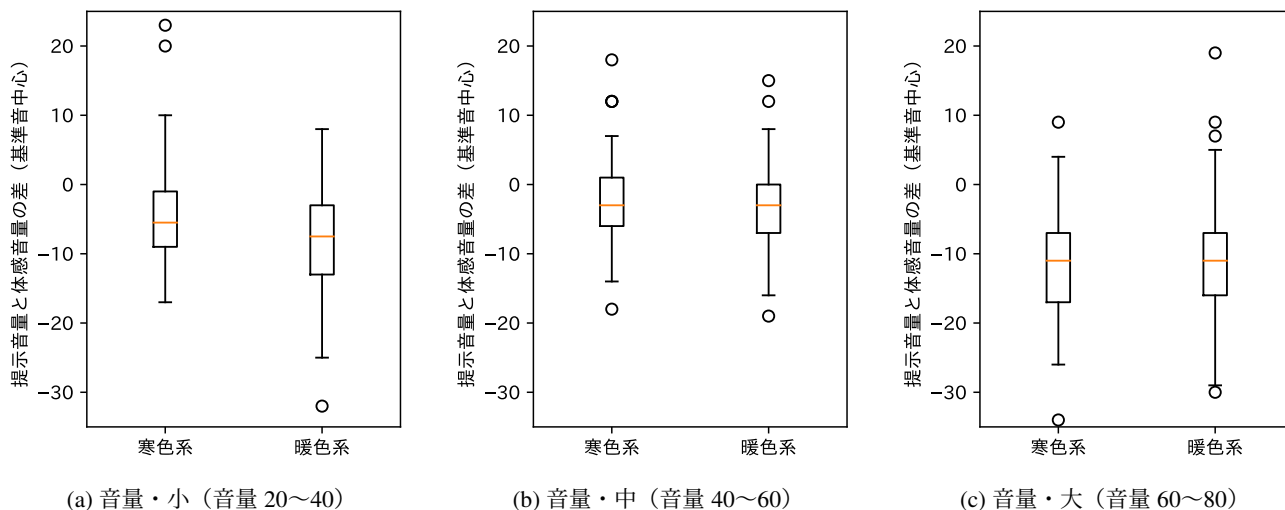


図 6: 提示音量と体感音量との差 (音量別, 暖色系・寒色系で集約)

4. まとめ

VR 空間では速度や落下といった様々な感覚・刺激を主に視覚情報・聴覚情報としてユーザに提示することができる一方で, 人間が知覚する主観的な印象 (例えば体感音量) は, ユーザを取り巻く VR 空間内の状況によって変化することから, 状況に応じた音量調整が求められる. その実現に向け, 視覚刺激が主観的な音量に与える影響を明らかにするべく, 本稿では単純化した視覚刺激として「色」, 聴覚刺激として「テストトーン」に焦点を当て, VR 空間内においてそれらを提示することによって視覚刺激の体感音量に対する影響調査実験を行った. 結果として, 「色」の種類によって体感音量には差が生じることが示され, 特に音量が小さくなる場合において寒色系の色について暖色系よりも音量変化が大きく感じられる (音量が小さく感じられる) ことが明らかとなった. 今後は, 「視界の動きの激しさ」といった異なる視覚刺激についても同様の実験を行っていくことで, 視覚刺激と体感音量の関係性を明らかにする.

参考文献

- [1] 長谷川瑛一, 磯山直也, 酒田信親, 清川清. 動画の再生速度が視聴後の作業速度に与える影響. *インタラクティブ* 2021, pp. 41–48, 2021.
- [2] Tomoyuki Shimizu, Kyosuke Futami, and etc. In-clock manipulator: information-presentation method for manipulating subjective time using wearable devices. In *Proceedings of the 16th International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia*, pp. 223–230, 2017.
- [3] Yuki Matsuda. IoPT: A Concept of Internet of Perception-aware Things. In *The 12th International Conference on the Internet of Things (IoT '22)*, pp. 201–204, 2022.
- [4] 矢高真一, 寺田努, 塚本昌彦. ウェアラブルコンピューティングのための主観的音量に基づく音声情報提示手法. *情報処理学会研究報告 (2011-UBI-29)*, pp. 1–8, 2011.
- [5] 安倍幸治, 小澤賢司, 鈴木陽一, 曾根敏夫. 視覚情報が環境音知覚に与える影響. *日本音響学会誌*, 第 56 巻, pp. 793–804, 2000.
- [6] 渡邊拓貴, 松田裕貴. 視覚情報が音声情報提示の主観的音量に与える影響の調査. *マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO 2022) シンポジウム論文集*, pp. 1318–1322, 2022.
- [7] Sylvie Charron and Marie-Claire Botte. Frequency selectivity in loudness adaptation and auditory fatigue. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 83, No. 1, pp. 178–187, 1988.
- [8] 立木孝. 聴覚の順応現象について. *耳鼻咽喉科臨床*, 第 58 巻, pp. 741–751, 1965.
- [9] 矢高真一, 田中宏平, 寺田努, 塚本昌彦, 西尾章治郎. ウェアラブルコンピューティングのための状況依存音声情報提示手法. *情報処理学会論文誌*, 第 51 巻, pp. 2384–2395, 2010.
- [10] 佐久間一平, 寺田努, 塚本昌彦. 視覚効果を用いた主観的音量の制御システム的设计と実装. *エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2015 論文集*, pp. 357–364, 2015.
- [11] Yasunobu Tokunaga, Takane Terashima, and Ayumi Ishikawa. Influence of visual information on subjective evaluation of road traffic noise. In *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, Vol. 249, pp. 3607–3611, 2014.
- [12] 藤本一寿, 坂田展甫, 谷田雅敏. 自動車騒音の不快感に関する現場実験と実験室実験の比較. *日本建築学会計画系論文報告集*, 第 364 巻, pp. 10–19, 1986.
- [13] Malina Szychowska, Honorata Hafke-Dys, Anna Preis, Jędrzej Kociński, and Paweł Kleka. The influence of audio-visual interactions on the annoyance ratings for wind turbines. *Applied Acoustics*, Vol. 129, pp. 190–203, 2018.
- [14] Zhang Bangjun, Shi Lili, and Di Guoqing. The influence of the visibility of the source on the subjective annoyance due to its noise. *Applied Acoustics*, Vol. 64, No. 12, pp. 1205–1215, 2003.
- [15] 宮川雅充, 鈴木真一, 青野正二, 高木興一. 視覚情報が種々の環境音の印象に与える影響. *日本音響学会誌*, 第 56 巻, pp. 427–436, 2000.
- [16] 朝倉巧. 聴感実験における視覚情報の影響. *日本音響学会誌*, 第 74 巻, pp. 655–662, 2018.