

令和 2 年 6 月 15 日現在

機関番号： 11301
研究種目： 国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）
研究期間： 2016～2019
課題番号： 15KK0002
研究課題名（和文）人間の外界空間認識過程に基づく自己運動感応型バーチャル視聴覚空間創成技術の確立（国際共同研究強化）
研究課題名（英文）Development of three-dimensional virtual space synthesis method responsive to self-motion based on the mechanism of space perception(Fostering Joint International Research)
研究代表者
坂本 修一（Sakamoto, Shuichi）
東北大学・電気通信研究所・教授
研究者番号：60332524
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 9,900,000円
渡航期間： 6ヶ月

研究成果の概要（和文）：本研究では、人間の自己運動時の視聴覚、特に聴覚情報による外界空間認識メカニズムの解明と、視聴者の自己空間を精密に再現可能な自己運動感応型VR空間創成技術の構築を目指す。一連の研究の結果、自己運動感覚と聴覚を中心とした多感覚情報処理過程としての外界音空間知覚過程が明らかとなり、また、研究代表者がこれまで培ってきた球状マイクロホンアレイを用いた3次元音空間収録・再生技術の高度化の実現にも目処が立った。

研究成果の学術的意義や社会的意義
高臨場感技術の実現に必要な基盤技術の確立に寄与したものである。単にアミューズメントなどのエンターテインメントの分野にとどまらず、遠隔教育や遠隔協働といった、複数人で場を共有しコミュニケーションを行い、知的活動を行う場面においても活用可能な要素技術であり、よりリアルな意思疎通が実現されて生産性が上がるといったことも期待される。また、人間の知覚情報処理に関する知見は、工学分野のほか、心理学、情報学などへの波及も期待される学際的な成果である。

研究成果の概要（英文）：We investigated how people perceive and recognize environmental space. Based on the knowledge, advanced three-dimensional virtual space synthesis method was developed. When people perceive outside environment, they integrate various sensory information inputted simultaneously. We especially focused on the effect of self-motion and auditory space perception. When listener and/or sound source are moving, auditory signals inputted to listener's ears are changing according to the relative position between them. In the experiment, we measured the detection threshold of sound source motion during the listener's linearly acceleration movement. The results suggested that sensitivity of the motion detection is degraded when listener is moving. By applying the knowledge of human auditory perception, we improved the accuracy of synthesized sound space information virtually presented by our three-dimensional auditory space synthesis method.

研究分野：聴覚・多感覚情報処理工学

キーワード：バーチャルリアリティ マルチモーダルインタフェース 認知科学 情報システム 音空間創成

1. 研究開始当初の背景

よりリアルで感性高く様々な感覚情報を通信する次世代情報通信システムの実現は、近年のバーチャルリアリティ（VR）技術の急速な発展により、現実味を帯びてきている。このようなシステムの開発時には、複数の感覚に同時並列的に入力された情報を人間がどのように統合処理するかを理解することが必要不可欠である。特に、モーションシミュレータなど空間提示に関するシステム開発が進んでいる現在では、人間自身の動き（自己運動）と視聴覚を中心とした外界認識過程の関係に関する高度な理解がシステムの深化や VR 技術の更なる進展に必須である。

外界空間認識過程を明らかにしていく上では、自己運動との関連を考慮することが不可欠である。人間は自己運動中も、刻一刻と変化する外界と自己との相対的関係性を瞬時に把握し、適切な外界把握と外界に対する働きかけを行っている。したがって、自己運動時の外界空間認識メカニズムを解明することは、人間のリアルで自然な振る舞いを理解する道筋を与えるものである。もし、ユーザの動きとそれに伴う外界空間認識の変化を十分に考慮した情報提示が可能になれば、ユーザに高い臨場感や実在感など豊かな感性情報を効率的、かつ、効果的に伝えることができる VR システム実現につながると期待できる。

2. 研究の目的

本研究では、人間の自己運動時の視聴覚、特に聴覚情報による外界空間認識メカニズムの解明と、視聴者の自己空間を精密に再現可能な自己運動感応型 VR 空間創成技術の構築を目指す。これまでに、自己運動の運動様式の違いにかかわらず、知覚される聴空間が変容するという結果が得られ、この知見を生かすことで、これまで以上に外界の聴空間情報を高精度に制御し提示する技術の確立が可能となることが明らかとなった。

そこで本研究では、(1) 球状マイクロホンアレイを用いた 3 次元音空間収録・再生技術を規範とした自己運動感応型 3 次元音空間提示技術の確立、(2) 自己運動時の 3 次元聴空間知覚過程の解明、の 2 つを具体的なテーマとして、これまでの研究で開発してきた聴空間情報の収録・再生技術（図 1）を本国際共同研究を通して高度化し、それを用いて人間の外界空間認識メカニズムの聴覚情報処理の観点からの更なる精緻化を目指す。



図 1：研究代表者開発の球状マイクロホンアレイを用いた 3 次元音空間収録・再生技術

3. 研究の方法

本研究では、3 次元音空間の高精度収録・再生技術の開発において高い業績を上げている研究機関において、研究代表者が開発した聴空間情報の収録・再生技術の高度化を図り、その技術を用いて聴空間を高精度に収録・再生し、人間の外界空間認識メカニズムを聴覚情報処理の観点から精緻化させていく。その上で、構築したシステムを活用しつつ、3 次元聴空間上での自己運動知覚過程の解明を進めていく。

共同研究先は、Jade University of Applied Sciences（独）、Oldenburg University（独）、University of Sydney（豪）、Macquarie University（豪）、University College London（英）である。Jade Univ. of Applied Science、Oldenburg Univ. は研究代表者と同様に 3 次元音空間収録・再生技術を開発しており、かつ、その際のアプローチも研究代表者が開発した技術と類似しているため、両者の技術の得失を議論することで、お互いの技術の高度化を図る。Univ. of Sydney、Macquarie Univ. は球状スピーカアレイによるバーチャル音空間再現システムを有し、本研究で明らかにする聴空間の認識メカニズムに関する聴取実験を行う。UCL は脳機能計測に関する豊富な知見を有し、また、聴覚の空間的注意に関する研究も盛んに行っている。そこで、人間の外界聴空間知覚、特に聴覚の空間的注意のメカニズムを明らかにするための実験を行う。

なお、2020 年 3 月末に研究データの取りまとめを行うために Macquarie University への訪問を予定していたが、COVID-19 のために海外渡航が困難となったため、渡航を断念することとなった。

4. 研究成果

(1) 自己運動中の聴空間知覚

音源から聴取者の両耳に入力される音信号は、音源と聴取者との相対位置に応じて変化する。この変化は、音源が動く場合、聴取者が動く場合の何れにおいても生じることになる。そこで、音源と聴取者が動く場合の音空間知覚、具体的には音像移動の検知限を実験的に明らかにした。実験では、目隠しした聴取者を前進加速度運動をさせ、それと同時に、進行方向に並行に設置したスピーカアレイから、振幅パニングの技術を用いて移動音像をバーチャルに提示した。移動音像は絶対座標系で聴取者に対して接近する場合と遠離する場合の 2 種類の条件でランダムに選択され、聴取者はその移動音像が絶対座標系上で接近しているか遠離しているかを回答させた。得られた結果を図 2 に示す。図 2(a) は自己運動の有無が PSS (point of subjective stationarity: 音像が静止していると感じる点) にどのような影響を及ぼすかを示したものであり、自己運動中は値が物理的な静止点から大きく増加していることが見て取れる。この結果は、自己運動中は音像静止の判断が困難であることを意味しており、自己運動中は音像定位精度が低下することを

示唆している。一方図 2(b)は、自己運動の有無が MAMD (minimum audible moving distance : 音像が移動したことが分かるために必要な距離) に与える影響を示しており、自己運動時には音像が離れる方向に移動した際のみ移動検知限が上昇していることが見て取れる。この結果は、音像が自分自身に向かってくる場合には自己運動に関係なく音像移動検知限が一定であることを意味しており、非常に興味深い。自分自身に向かってくる音源は自己にぶつかる可能性があり、危険回避の観点から自己運動の有無に関係なく移動検知限が低くなったのではないかと推測される。この結果は、2018 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP'18)で発表され、Student Paper Award を受賞した。

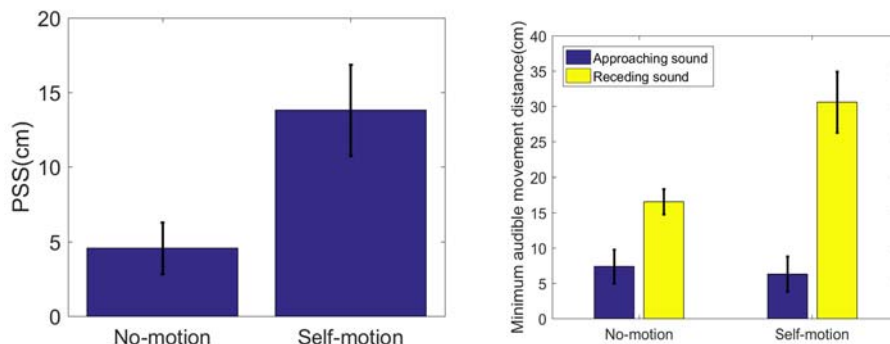


図 2：自己運動中における音像の(a)主観的静止点（左図）と、(b)音像移動の検知限（右図）

また、加速度直線運動だけでなく、頭部回転中の音空間知覚についても実験を行い、頭部回転している最中には主観的正面判断の感度が低下するという結果も得られている。これらの成果をまとめ、2018 年 9 月に行われた第 23 回日本バーチャルリアリティ学会において、招待講演を行った。

(2) 球状マイクロホンアレイを用いた 3 次元音空間收音・再生技術

3 次元音空間を高精度に收音する際に多数のマイクロホンを表面に配置した球状マイクロホンアレイは極めて重要な收音装置である。これは、音空間情報を高精度に記録するためには、全ての方向について高い空間解像度で音情報を收音する必要があるためである。さらに、球状マイクロホンアレイは形状に基づく音響特性を解析的に求めることができ、球面調和関数との親和性も高いことも利点としてあげられる。ただし、マイクロホンを稠密に配置する必要があるため、必然的に個々のマイクロホンの大きさが小さくなり、マイクロホン自体の持つ低い SN 比が合成される音空間の精度を低下させるという問題点があった。本研究では、MEMS マイクロホンの改良に取り組み、計測用マイクロホンとしても使用可能な高い SN 比を有するマイクロホンの開発に成功した。そのマイクロホンを用いて新たに球状マイクロホンアレイを構築している。さらに、球状マイクロホンアレイと頭部伝達関数 (head-related transfer function : HRTF) を連成させたバイノーラル音空間收音・再生技術の体系化を行い、マイクロホンの個数と頭部伝達関数の測定点数の両者が合成音空間の精度に及ぼす影響を定量化した。この成果は、日本音響学会 2018 年秋季研究発表会で招待講演として発表を行った。また、球状マイクロホンアレイに配置されたマイクロホンの個数が充分でなくても提示される音空間の主観的な精度を高く保つための技術の開発も行い、人間の音空間知覚メカニズム、特に、高い周波数では音の位相の知覚感度が低いことを活用した、新しいバイノーラル音空間收音・再生技術の提案も行った。

その一方で、提案したシステムを含む様々なバーチャル音空間再現システムについて、再現された音空間を客観評価するための方法についても研究を進めた。多くの場合、再現したい音空間と実際に再現された音空間を、音圧分布や周波数特性などの物理パラメータを用いて評価するのだが、物理パラメータがどれくらい近ければ主観的な評価に一致するかは明らかではないため、最終的には何らかの形で聴取者が主観評価する必要があった。しかし、主観評価の方法についても現在多くの研究がなされている段階であり、適切な主観評価法の存在が待たれる状況で

表 1：音空間印象の評価に使用する評価語群

左右方向感がある	包みこまれている	拡がり感がある	荒い	安定感がある	実在感がある	柔らかない
前後方向感がある	濃い	響きが豊かな	強い	重い	艶やかな	明瞭感がある
情景が分かる	単純な	立体感がある	繊細な	没入感がある	暗い	緊張感がある
配置感がある	つながっている	奥行きがある	迫力がある	臨場感がある	甲高い	かたい
平坦な	周りを満たす	近い	心地よい	引き締まった	澄んだ	空気感が感じられる

あった。本研究では、聴取者がバーチャル音空間の主観評価において、評価する際に重要となる印象を明らかにすべく、音空間印象評価用の評価語を検討し、選ばれた評価語を用いて、音空間印象の多次元構造を分析した。選定された評価語群を表 1 に示す。これらの評価語を用いて幾つかのバーチャル音空間再現技術で再現された音空間の主観印象を調べたところ、空間臨場性因子（拡がり感、距離感、臨場感など）、明瞭性因子（引き締まった、繊細な、明瞭感がある、澄んだなど）、質感因子（荒い、重い、暗い、強い）、安定性因子（つながっている、柔らかい、安定感のある、心地よい）といった 4 因子が抽出され、使用したバーチャル音空間再現技術の違いがこの 4 因子で表現されることが明らかとなった。これらの結果は、本研究で構築したバーチャル音空間再現技術の性能評価をする上でも有効な知見である。

(3) 聴覚の空間的注意のメカニズムの解明

外界空間を我々が認識する際には、聴きたい音に注意を向けて外界の情報を取得することになる。この注意を聴覚の空間的注意と呼ぶ。聴覚の空間的注意は、言うなればスポットライトのようなものであり、ある方向に注意を向けるとその周辺にスポットライトのように周囲が向かうことになる。これまでに角度方向についてはいろいろな研究でその特性が明らかになりつつあるが、距離方向においてどのような特性を有するのかは不明な点が多かった。

そこで、ある距離に注意を向けた状態で、その周囲の距離から提示された音の聴き取りに対する注意の影響についても検証した。ここでは、バーチャル音源を用い、聴取者から 0.13、0.25、0.5、1 m のいずれかの距離から標的音が提示された。このとき、聴取者は 0.13 m と 1 m のいずれかに注意を向け続けながら、標的音が聞こえたか否かを判断し、聞こえた際はできるだけ早く反応するように教示された。注意効果が特定の位置に向けられるならば、その位置での反応が促進されるはずである。

実験結果を図 3 に示す。図 3(a)は聴取者の左 90 度において得られた結果で、図 3(b)は聴取者正面において得られた結果である。いずれも、横軸は聴取者からの距離、縦軸は標的音が聞こえた際に反応するまでの反応時間である。何れの距離に注意を向けた時でも、その距離から提示された標的音に対して早く反応することが見て取れる。その一方で、注意を向けた距離から離れた位置から標的音が提示された際の反応時間の傾向は注意を向けた距離によって異なっている。これらの結果は、空間的注意の空間窓が、角度方向だけでなく、距離方向にも広がっていることを示唆するものである。

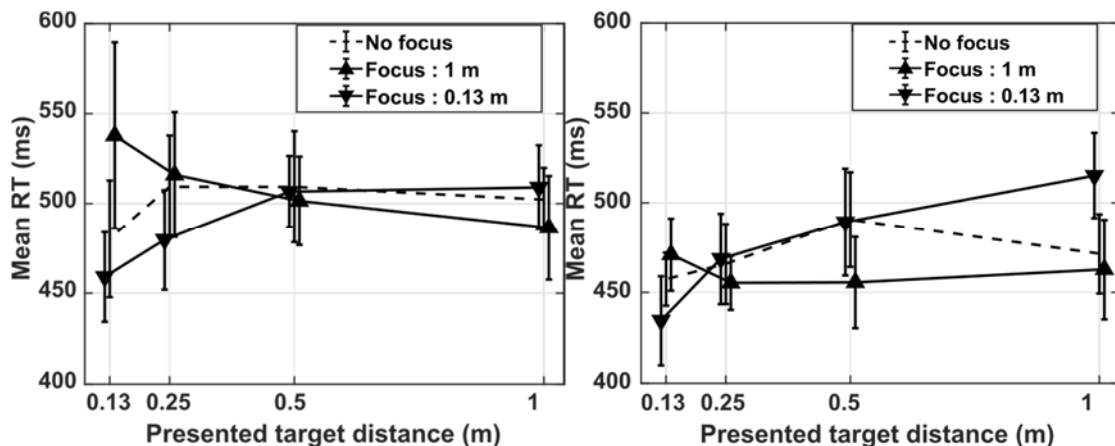


図 3：聴覚の空間的注意の距離特性 (a)左 90 度での結果 (左図) と (b)正面での結果 (右図)

以上の成果は、いずれも、海外の研究者との議論を経て行われたものであり、本研究をとおり、バーチャル空間の知覚、生成技術の高度化がなされ、さらに、多くの海外研究者とのコミュニティー形成も行えたものと考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 S. Sakamoto, F. Monasterolo, C. Salvador, Z. Cui and Y. Suzuki	4. 巻 -
2. 論文標題 Effects of target speech distance on auditory spatial attention under noisy environment	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. The 23rd International Congress on Acoustics	6. 最初と最後の頁 2177-2181
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 M. Noda, S. Sakamoto, Z. Cui, W. Teramoto, Y. Suzuki, and J. Gyoba	4. 巻 5AM1-1-5
2. 論文標題 Detection threshold of auditory apparent motion during linearly self-motion	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proc. 2018 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP'18)	6. 最初と最後の頁 17-20
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 2件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 岡部敏貴，トレビーニョ ホルヘ，山高正烈，坂本修一，鈴木陽一
2. 発表標題 音空間再生方式の差異が音空間の印象に与える影響
3. 学会等名 日本音響学会2019年秋季研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 前田啓，本多明生，坂本修一，鈴木陽一
2. 発表標題 水平方向ベクションが主観的正面の音像定位に及ぼす影響
3. 学会等名 日本音響学会2019年秋季研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 坂本修一
2. 発表標題 身体の動きと音空間知覚
3. 学会等名 日本バーチャルリアリティ学会第23回大会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 坂本修一
2. 発表標題 球状マイクロホンアレイを用いたバイノーラル音空間収音再生手法
3. 学会等名 日本音響学会2018年秋季研究発表会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 野田美春，坂本修一，崔正烈，寺本渉，鈴木陽一，行場次朗
2. 発表標題 直線加速度運動時における音像移動検知限の検討
3. 学会等名 日本音響学会2018年春季研究発表会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	William Martens (William Martens)	Macquarie University・School of Engineering・Honorary Associate Professor	

6. 研究組織(つづき)

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	Volker Hohmann (Volker Hohmann)	Oldenburg University・Department of Medical Physics and Acoustics・Professor	
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	Maria Chait (Maria Chait)	University College London・Ear Institute・Professor	
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	Craig Jin (Craig Jin)	University of Sydney・School of Electrical and Information Engineering・Associate Professor	
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	Matthias Blau (Matthias Blau)	Jade University of Applied Sciences・Institute for Hearing Technology and Audiology・Professor	