

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：32503

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K11895

研究課題名（和文）音響計測・音響制御におけるロボティクス技術の利用に関する基礎的研究

研究課題名（英文）A Fundamental Study on the Use of Robotics in Acoustic Measurement and Control

研究代表者

大川 茂樹（OKAWA, Shigeki）

千葉工業大学・先進工学部・教授

研究者番号：40306395

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、音響情報処理の分野でこれまでは専ら人間の経験的な知見や技術に基づいて行われてきた音響計測や音場制御において、ロボティクス技術を利用することで自律化・効率化が行えないか検討することを目標とした。代表的な成果としては、まず、対象とする室（空間）の音響的計測を行うロボットおよび吸音材や音響反射板に代表される受動的な装置を駆動系によって制御するロボットのプロトタイプ開発を行った。次に、超指向性を持つパラメトリックスピーカにより発せられた音を室壁面に反射させることにより、仮想音源を聴者の背後や側面に生成するサラウンドシステムを開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義としては、音響情報処理における音の測定や分析、加工や制御など、これまで人手や人の知見により行われることが多かった技術に対して、ロボティクスを適用した点と、それらの実装に伴って種々の知見が得られたことが挙げられる。

社会的意義としては、一般的なロボット開発における、人間の労働力や知的生産力を置き換えたいという動機が、本研究の成果についても当てはまる点と、それらの動機を積極的に利用してロボティクスによる快適な音環境の構築・サラウンドシステムの開発が実現できた点が挙げられる。

研究成果の概要（英文）：This study aims to improve autonomy and efficiency by using robotics technology in acoustic measurement and sound field control, which have so far been based on human experiential knowledge. Representative results include, first, the development of a prototype robot that performs acoustic measurements of the target room (space) and a robot that controls passive devices such as sound absorbing materials and acoustic reflectors using a drive system. Next, we developed a surround system that generates virtual sound sources behind and to the sides of the listener by reflecting the sound emitted by superdirectional parametric speakers onto the room wall.

研究分野：音響情報処理、ロボティクス

キーワード：音響情報処理 音響計測 音響制御 ロボティクス

1. 研究開始当初の背景

音響工学は、電気音響、建築音響、音楽音響、音声、聴覚、超音波など、音を対象とするあらゆる技術を包含する学問分野である。対象とする音の種類や研究目標は様々であるものの、音の測定や分析、加工や制御、評価や診断など、基礎となる処理には共通点も多い。他の工学分野と同様、近年のコンピュータ技術の発展に伴って、音響情報処理（音メディアを対象とした情報処理）の観点からそれらの技術の自動化や高精度化も進んでおり、研究成果を応用した工業製品も多く開発・販売されている。

一方、ロボットならびに人工知能などロボット周辺の要素技術を含むロボティクス（ロボット学）は、言うまでもなく最近のトレンドであり、近未来の社会において人間の労働力や知的生産力を置き換えたいという動機による研究も多く行われている。音響工学の関連分野にも、同様の動機が適用できる部分が多く存在する。一例を挙げると、コンサートホールのような広い空間内の音響測定を人手で行うには、機器の設置等の準備、実際の測定、そしてデータの収集に至るまで、手間のかかる作業が多い。これらの手間をなくし、処理そのものの精度も高められるのであれば、ロボティクス技術の利用効果は大きいと言える。

本研究では、そのような音響工学へのロボティクスの適用のうち、特に快適さを追求する音環境へのアプローチとして、室内音響（建築音響）と電気音響が関わる部分を取り上げる。これらの分野には、次のような具体的な学術的背景がある。

(1) 室内における音環境の評価

響き自体が主たる条件となる音楽用ホールでの音響測定（インパルス応答測定）は古くから行われているが、近年では、住居や会議室、教室などのより一般的な空間を対象とし、空間の音環境が人に与える影響にも着目されるようになってきている。音の大きさだけでなく、響きに含まれる様々な要素が人に影響を与えることも分かってきているが、環境基準で言及されているのは騒音レベルのみである。音は目に見えないだけでなく、対象とする空間において何が起因して不快感に繋がるかは専門的な判断が必要である。しかし音の測定には機材が多く必要な上、人手と手間が必要となる。トラバース装置のように、家電製品や自動車を対象とした限られた範囲を計測できるシステムはあるが、空間を対象とする場合は室全体をカバーするルールが必要となることから、ロボットによる自律的な測定には大きな意味がある。

(2) 高臨場感オーディオ技術

近年では、視聴覚のどちらに対しても高い臨場感を実現するための技術が開発されている。視覚に対するVR・AR市場の拡大などが先行している一方、聴覚に対しては周囲から音が出ているように聞こえるサラウンドシステムが開発されている。しかし、従来のサラウンドシステムでは範囲が限られる上（スイートスポット）、スピーカを聴者の周囲にあらかじめ静的に配置する必要がある。特に音像位置を制御する技術であるAVS (Adjustable Virtual Surround) では、頭部位置によって効果が大きく異なる。ロボットによる能動的制御が行えれば、聴者の位置に動的に適応するような、より効果的な臨場感オーディオが期待できる。

(3) ロボティクス応用方式の未確立

音響工学とロボティクスは、本来は融合しやすい分野同士のはずであるが、そういった指向

の研究がまだ多く行われていないため、いわゆるプラットフォームと呼べるような方式が確立していない。本研究により、そのような基盤的な知見を得ることも期待できる。

2. 研究の目的

本研究の全体的な目的は、前述した通り、音響工学にロボティクスを適用することで自律化や効率化の効果を検討することである。より具体的な目的として、次の3点を設定する。

(1) 小規模空間（会議室や教室など）内の音響情報の取得や予測、それに基づく制御を行うロボットシステムを開発する。これにより、空間の形状や壁・天井の材質、空間内の状態（設置物や騒音など他の音響事象）に応じて、利用者が快適と感じる音環境を実現できる。

(2) ロボティクスを利用した電気音響装置の配置・駆動による高臨場感音響再生を試みる。利用者の位置や頭部動作に応じて自律的に移動するロボットを開発し、静的なスピーカ配置では実現困難な音環境を作り出す。

(3) 室内音響におけるロボティクス応用のスキームを確立する。ロボットの設置方法や動作精度、評価手法など、他の音響工学応用にも活かせるプラットフォームを開発する。同時に、ロボットが得た音環境の各種パラメータを可視化表示することにより、利用者に分かりやすい提示法を検討することも試みる。

3. 研究の方法

(1) ロボティクスによる快適な音環境の構築

対象とする室（空間）の音響的計測を行うロボット、および吸音材や音響反射板に代表される受動的な装置を駆動系によって制御するロボットの開発を行った。これらを用いて、人にとって快適な音環境を実現できるか具体的に検討する。どのような音環境が快適であるかはその室の用途によって異なるが、本研究では対象とする室を会議室や教室などの小規模空間に限定する。これらの空間における快適さは会話のしやすさとし、音声の明瞭度などの数値的な評価、また印象評価実験などを通じてこの問題を明らかにした。

(2) ロボティクスを用いたサラウンドシステムの構築

超指向性を持つパラメトリックスピーカにより発せられた音を室壁面に反射させることにより、仮想音源を聴者の背後や側面に生成するシステムを開発した。このシステムは、室形状を得るセンサ系およびパラメトリックスピーカを駆動するアクチュエータ系によって構成される。また、AVS (Adjustable Virtual Surround) において、受聴者の頭部をセンシングし追従するように再生信号を処理し、スピーカの姿勢と位置をリアルタイムで制御するシステムを開発した。これらの手法によって、従来のサラウンドシステムと同様に周囲から音が聞こえる環境が再現でき、これまでの制約（スピーカの配置やスイートスポット）をなくすことが可能となった。聴取実験を行い、受聴者が知覚した音像の幅や位置、方向を記述した「音像マップ」を作成した。得られた音像マップにより、周囲からの音が再現できたかを評価した。

(3) 音響工学の諸問題へのロボティクス応用に必要な要件や方法の確立・提案

(1), (2)における活動を通じ、実装したシステムがどの範囲の精度で有効か検討した。たとえば、移動ロボットについては、移動精度や駆動音が測定結果にどの程度影響するかの調査を行

った．ここで得られた知見は，様々な音響問題に対しロボティクスの知見や要素技術を応用する際の基準になると考えられる．

4．研究成果

(1) 移動ロボットを用いた3次元室内音響測定

図1と図2に外観とシステム構成を示すような，室内音響測定のためのロボット実機を製作した．本ロボットはi-Cart miniをベースとし，SLAM 用センサとしてKinect for Windows v1 を搭載している．マイクロホンの鉛直軸方向の移動にはボールねじ機構を用いた．環境地図作成および測定点の記録にはSLAM (Simultaneous Localization And Mapping)技術を用いた．SLAMにより距離センサ等の情報から環境地図の作成と自己位置推定を行う．測定結果を出力される環境地図に重ね合わせることで音場を可視化した例を図3に示す．

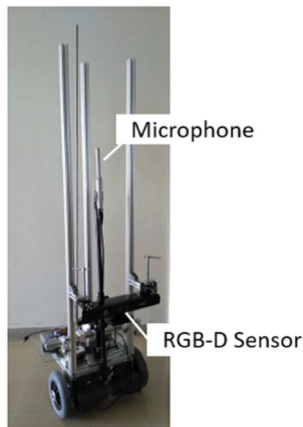


図1. 音響測定ロボット外観

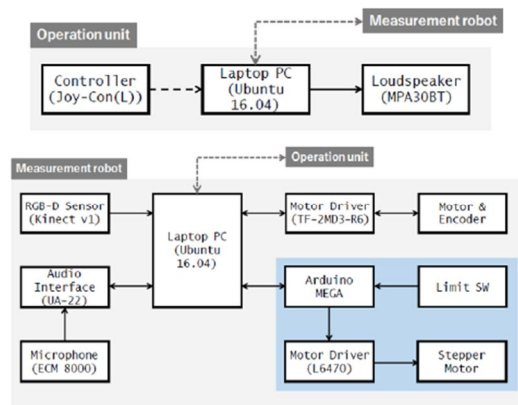


図2. 音響測定ロボットシステム構成

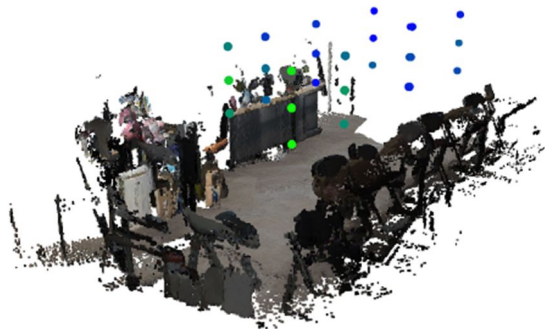


図3. 音場を可視化した例

(2) Q 学習による音響測定用自律移動ロボットの行動獲得

自律移動ロボットの行動を獲得する際に良く利用される強化学習法であるQ学習を用いて，測定点の決定と測定点までの経路の算出を行った．測定可能な範囲の全域を測定すること，測定済みの領域では測定を行わないことを条件として学習を進めた結果，これらの条件を満たすことが確認できた．音場マップを生成した結果，隣接する測定点であっても値の変化が大きい部分があることから，空間を離散化する際の解像度については検討を続ける必要がある．

(3) パラメトリックスピーカとラウドスピーカを組み合わせたサラウンドシステムの設計

パラメトリックスピーカ(PAL) による音の直進性を利用し，受聴者の後方での反射により後

方音像を構成することで、5.1ch サラウンドの後方スピーカの代用となりうるかを実験により検証した。前面2チャンネルラウドスピーカと後方反射を利用した2チャンネルPALを組み合わせた4チャンネルシステムを図4および図5に示す。反射板には、厚さ1cm、1m四方のMDFボードを2枚用いた。TSP (Time Stretched Pulse) 信号を用いたインパルス応答測定実験を行った結果、提案するシステムにおいてPALによる後方音像を用いることが可能であり、受聴者前方の音響装置のみでサラウンドシステムが実現できた。



図4. 設計したサラウンドシステムの外観

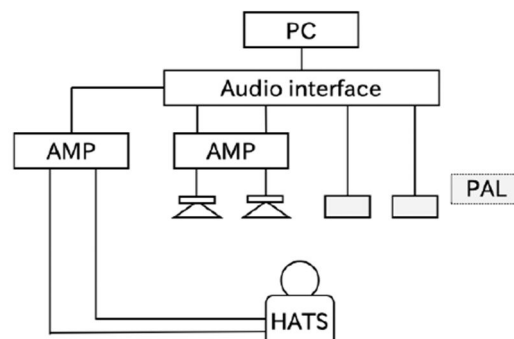


図5. サラウンドシステムの構成

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 坂本悠哉、大川茂樹
2. 発表標題 GANによる画像生成を用いたデータ拡張に基づく物体検出
3. 学会等名 情報処理学会全国大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 上原正志、大川茂樹
2. 発表標題 VRを利用した室内音響指標の3次元空間分布の可視化
3. 学会等名 日本音響学会秋季研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masashi Uehara, Shigeki Okawa
2. 発表標題 Development of Mobile Robot for Room Impulse Response Measurement and Visualization of Sound Environment
3. 学会等名 2022 International Congress on Acoustics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 加藤弘士朗、上原正志、大川茂樹、福島学、柳川博文
2. 発表標題 反射板の大きさによってパラメトリックスピーカの反射音が受ける影響の検討
3. 学会等名 日本音響学会秋季研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上原正志、加藤弘士朗、福島学、大川茂樹
2. 発表標題 リフレクションフィルターによる録音音声への影響の調査
3. 学会等名 日本音響学会秋季研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上原正志、加藤弘士朗、福島学、大川茂樹
2. 発表標題 可変機構を有するヘルムホルツ共鳴器アレイの検討
3. 学会等名 日本音響学会春季研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石川直生、上原正志、福島学、大川茂樹
2. 発表標題 室内音響測定のための自律移動ロボットの検討
3. 学会等名 日本音響学会秋季研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 上原正志、石川直生、福島学、大川茂樹
2. 発表標題 移動ロボットを用いた3次元室内音響測定
3. 学会等名 日本音響学会秋季研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 加藤弘士朗、上原正志、大川茂樹
2. 発表標題 パラメトリックスピーカとラウドスピーカによるサラウンドシステムの配置に関する検討
3. 学会等名 日本音響学会秋季研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 上原正志、石川直生、福島学、大川茂樹
2. 発表標題 移動ロボットを用いた多点室内音響測定の評価
3. 学会等名 日本音響学会春季研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石川直生、上原正志、福島学、大川茂樹
2. 発表標題 ロボットによる室内音響測定のための経路決定
3. 学会等名 日本音響学会春季研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 加藤弘士朗、上原正志、大川茂樹、福島学
2. 発表標題 パラメトリックスピーカによる反射音のサラウンド応用に関する検討
3. 学会等名 日本音響学会春季研究発表会
4. 発表年 2021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
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------