

ロボティクスを用いた 室内音響環境改善のためのアプローチ

山梨県若手研究者奨励事業 研究成果報告書

千葉工業大学大学院 工学研究科 工学専攻

博士後期課程 上原正志

はじめに

本研究では、人にとって快適な空間を作り上げることを目的とし、ロボティクスを利用したシステムによって室内音響における聴こえの改善をするための研究・開発をおこなっている。その中でも本報告書では移動ロボットを用いた音響測定の実効率化を通じて、対象とする室の評価、および室内における聴こえの可視化に取り組んだ内容について述べる。

1 研究背景

1.1 残響の影響と測定

古来より人は残響を利用してきた歴史がある。例えば古代ギリシャに見られる円形劇場ではステージ背後の構造物により演者の音声を反射させ、より広い空間でも声を響かせられるような設計がなされている。一方で残響理論が組み立てられるようになったのは19世紀に Sabine が大学の講堂にておこなった実験から生まれた残響式 [1]からであるとされており、紀元前から経験的に利用してきた点と比較すると時代的な隔りがある。

室空間の用途によって求められる残響は異なっている。例えば講演や授業などの音声の伝達を目的とした空間では一般的に残響が短い方が良いとされている。これは先に発した音の残響が次に発声する音と重なることで、音声の明瞭性が低下することが原因である。しかし、無響室のように残響を限りなく低減させた空間でも音声聞き取りにくくなることが知られている。残響の中でもその音が発せられてから比較的早く到来する残響音は、直接到来した音を補強する効果があるため、残響が極端に短い場合においても音声のやり取りがおこなわれる空間には不適切である。Fig. 1 では用途や室容量ごとに提案された最適な残響時間を指している。提案者による差はあれど、人の音声を主とする空間では短く、音楽では長いという傾向は共通している。このように室の用途ごとに音響的な要求は異なっており、それに合わせた設計が必要である。

室内音響の知見を駆使して設計される空間として音楽ホールがあげられる。設計段階で大規模なシミュレーションや模型実験などを通じ、精密な音響設計がおこなわれている。改良や室の評価のため施工段階や後において詳細な測定がおこなわれる。

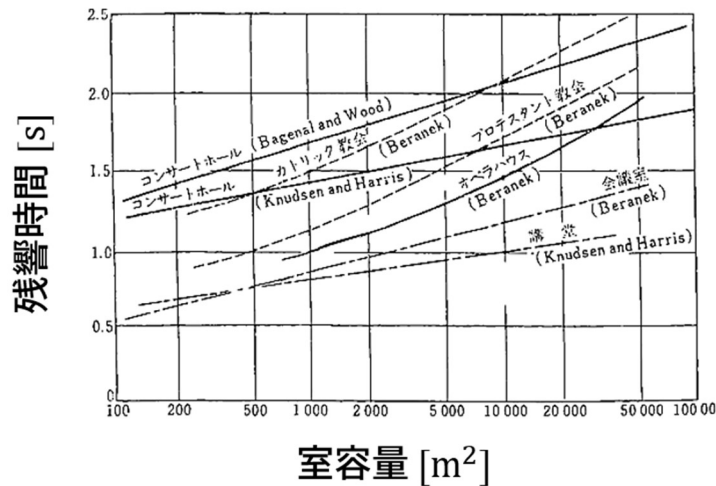


Fig. 1 用途別の最適残響時間の比較 [2]

このようなパフォーマンス空間での設計や評価がおこなわれている一方、近年では教室や会議室、または居室などといったより一般的な室を対象とした音響的な測定・評価がおこなわれている。これらの空間では詳細な音響設計がなされることはないため、望ましくない響きをもつ可能性がある。例えば佐藤らのおこなった居室における残響の会話への影響の調査 [3]では、聞き手と話者の両方立場から残響の影響を明らかにし、指標を用いた設計の目安を示している。

しかし、一般的な空間において音響測定をおこなうことは多くのコストが必要となる。音響測定の効率化という面では、受音点の移動機構を有したものが研究開発され、計測の現場で用いられている。マニピュレータや、測定室内に敷設したレール、あるいはトラバース装置 [4]という形態が用いられている。これらは比較的位置の制御がしやすいという利点がある一方で、物理的な制約を受けるため様々な空間に適応させることは困難である。

1.2 先行研究

1.2.1 人間協調型移動ロボットによるコンクリート打音検査記録システム [5]

トンネル等のインフラの非破壊検査にはインパルスハンマによって被測定対象に衝撃を与え、その際に観測される振動を観測する手法が広く用いられている。この測定手法では打撃位置を記録したり、記録されたデータと測定位置の紐づけしたりなど、作業量が多い傾向にある。トラックなどの大型車の上に打撃装置を付け、広大な範囲を測定する研究がされている一方で、大型の装置が搬入できない箇所や詳細な測定が求められる場合は人の手による作業が必須である。

先行研究では人がより効率よく非破壊検査をおこなうために打撃位置の記録と、測定データの紐づけを自動化するシステムを提案している。測定位置の導出には移動ロボットの自己位置推定の結果と画像認識による打撃位置の推定結果を足し合わせることで実現している。測定位置の記録にSLAMを用いる有効性を示している。

1.2.2 Active Acoustic Impedance Mapping using Mobile Robots [6]

特定の空間における音響伝搬のモデルを組み立てる際に、境界面における音響インピーダンスの情報が不可欠である。具体的に音響インピーダンスの分布はシミュレーション等に応用されることが期待される。先行研究ではマイクロホンを搭載したロボットを二台用い、効率的に満遍なく壁面の音響インピーダンスを測定するアルゴリズムを提案している。対象とする室内を広く測定することに関し、移動ロボットを適切に用いることで効率的な測定がおこなえることを示唆している。

2 研究目的

本研究では快適な音環境を構築するために移動ロボットを用いて測定の効率化を目的としている。より快適な室内音響環境を実現するような調整をおこなうために、まず対象とする空間内の情報を得る必要がある。室内音響測定を多点でおこなうことによって実現可能であるが、移動ロボットを用いてどれほど効率化を図れるか、あるいは測定位置の記録などの精度から有効性を議論する。

3 システム開発

3.1 システム概要

本研究で提案する測定の効率化をおこなう移動ロボットを含めたシステムの概要を Fig. 2 に示す。測定者は測定対象とする室の外側から測定用の移動ロボットを操作する。任意の位置に移動させた後にロボットを停止した状態で測定をおこなうトリガを送信する。トリガが送られると想定用音源がラウドスピーカから発せられると同時にロボットに搭載されているマイクロホンでの收音がおこなわれる。このロボットの移動と測定を測定者が十分と判断するまで繰り返すことによって多点での測定をおこなう。

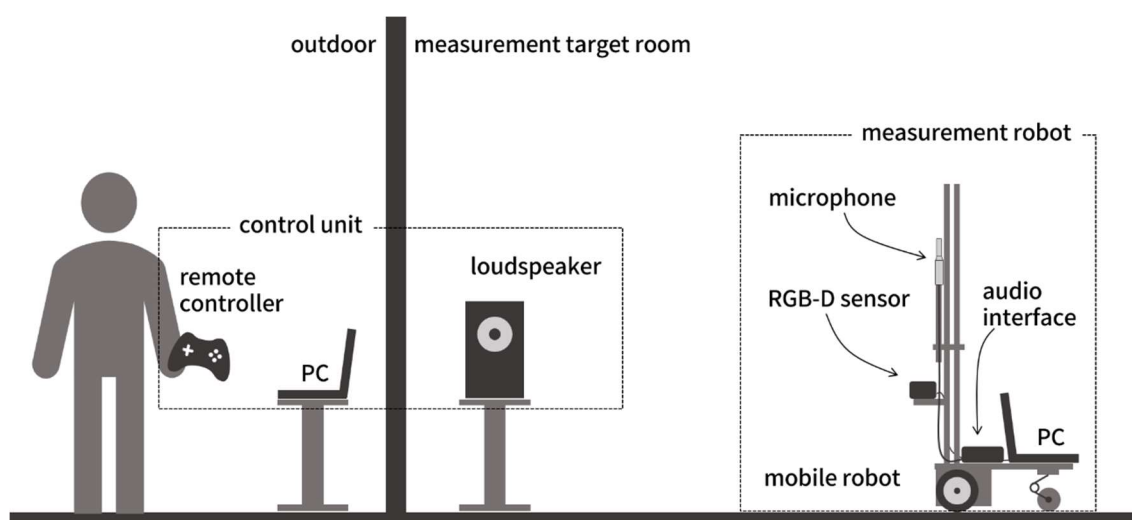


Fig. 2 提案システムの概要と使用イメージ

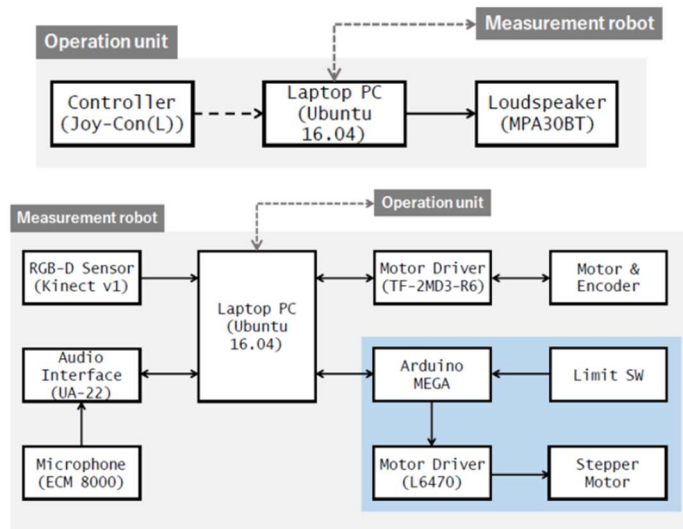


Fig. 3 提案システムのシステム図

提案する測定システムの詳細を Fig. 3 に示す. 本システムは主に operation unit (Fig. 3 上段) と measurement unit (Fig. 3 下段) の2つのユニットから構成されている. なお Fig. 3 右下の青い枠で括られた部分は三次元測定のためのマイクロホン昇降機能を担っており, 後に述べる二次元測定では実装されていない.

3.2 SLAM

ナビゲーションとは目的地まで移動するための技術であり, 近年では Lidar のような測距センサの普及や計算機の能力向上により広く活用されている. とくに自己位置推定と環境地図作成を同時におこなう SLAM(simultaneous localization and mapping)技術が自律移動などの分野で研究および利用がされている.

本研究では SLAM の応用イメージを Fig. 4 に示す. 使用した SLAM パッケージは RTAB-Map [7] である. 測定をおこなった受音点位置の記録をおこなうために, 自己位置推定結果を利用, 三次元点群データとして得られる環境地図上に室内音響指標の空間分布をプロットすることで室の音響的な評価結果を可視化した.

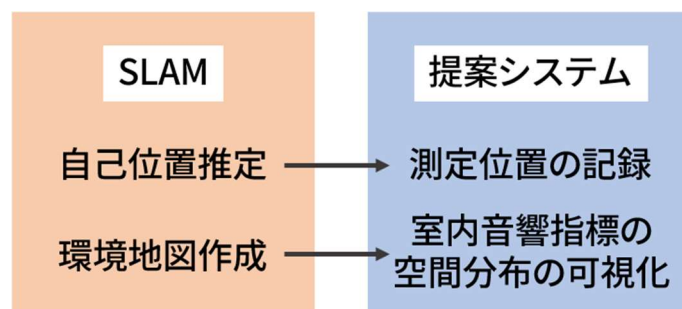


Fig. 4 提案システムにおける SLAM の利用

3.3 音響測定

室内の音響を評価するにあたり広く用いられているのが室内インパルス応答測定である。測定用の音源をラウドスピーカ等によって対象とする室内に放射し、マイクロホンを用いて收音する。得られたデータから適切な信号処理を施すことによって音源-受信点間でのインパルス応答を取得できる。このインパルス応答から明瞭度や残響感などといった印象と対応づけられている指標値を計算することが可能であり、室の音響的な評価として扱われる。

本研究ではインパルス応答測定には測定用音源に Fig. 5 に示す Log Swept-Sine(以下、LogSS と表記)信号を用いた。Swept-Sine 信号は TSP(time stretched pulse)信号とも言い、時間軸に対して周波数が掃引される信号である。Swept-Sine 信号は再生する信号のエネルギーを時間軸上に分散することでラウドスピーカそのものの出力が低い場合でも高い SN 比を確保することができる。また周波数の掃引する速さを調整することで特定の周波数をより精度よく測定することができる。測定で用いた LogSS 信号はその一種であり、低域を強調する効果がある。

測定用音源は掃引周波数 0~22050 [Hz]、サンプリング周波数 44.1 [kHz]、1 周期 2^{16} [sample](約 1.5 [s])を 5 周期連結したものをを用いた。間の 3 回を同期加算し、逆 LogSS 信号を畳み込むことでインパルス応答を算出した。

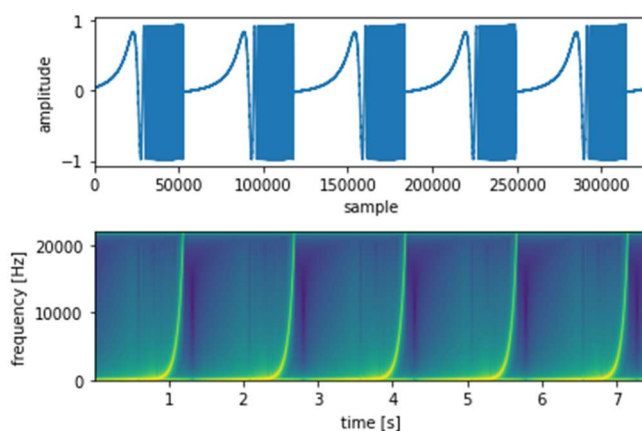


Fig. 5 用いた測定用音源
(上段: 時間波形, 下段: スペクトログラム)

3.4 室内音響指標

対象とする室の音響評価をおこなう際、人の聴こえの印象と対応づけられている室内音響指標が用いられる。室内音響指標は多く存在するが、本研究では特に音声の聴こえやすさを重視しているため、初期残響時間(以下、EDT)と C 値(early-to-late index)を用いた。

EDT は 1970 年に Jordan が提案した、人の知覚する残響感と対応があるとされている指標である。残響減衰曲線の最初の 10[dB]の減衰にかかる時間を 6 倍することによって得られる。この残響減衰曲線はインパルス応答からシュレーダー法によって求められる。

C値は ISO3382-1 にて定義がされている明瞭性を示す指標であり，以下の式で求めることができる．

$$C_{te} = 10 \log_{10} \frac{\int_0^{te} p^2(t) dt}{\int_{te}^{\infty} p^2(t) dt}$$

(C_{te} : C 値[dB], $p(t)$:インパルス応答)

上式における te は音声信号を対象にする場合は 50[ms]，音楽の場合は 80[ms]を用いる．本研究では $te = 50$ [ms]とし，中心周波数 500[Hz]と 1000[Hz]の 1 オクターブバンドで求めた C 値を相加平均して求めた．

各室内音響指標を求めるプログラムは日本建築学会の室内音響指標ベンチマーク [8]を用いて十分な精度があることを確認した．

3.5 測定用ロボット

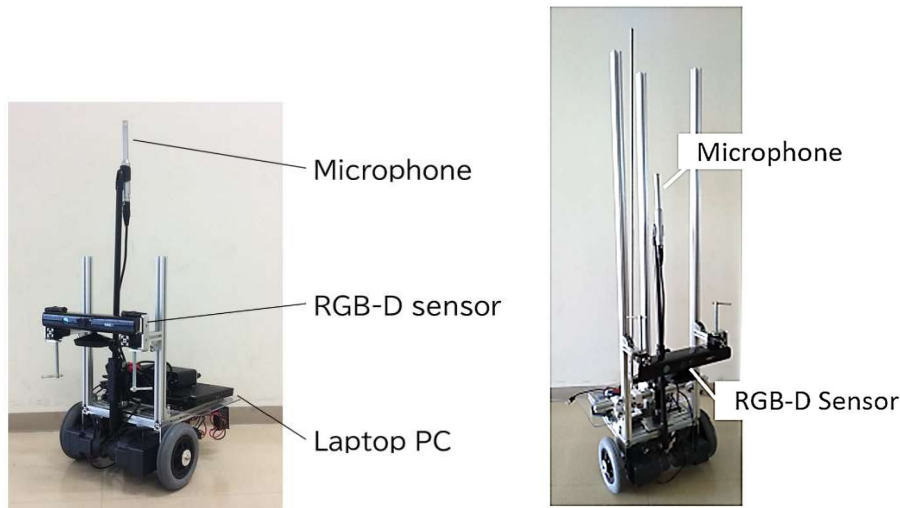


Fig. 6 測定用ロボットの外観(左：二次元平面のみ，
右：三次元測定のための機構を追加した移動ロボット)

本研究にて開発し，測定をおこなった測定用ロボットの外観を Fig. 6 に示す．車体には移動ロボットプラットフォームは i-Card mini [9]を使用した．SLAM をおこなうための RGB-D センサには Kinect for Windows v1 を用いた．後に述べる 5 章では Fig. 6 の左側，4・6 章では Fig. 6 の右側の構成で実験をおこなっている．

4 位置検出精度の評価実験

4.1 位置検出精度 評価実験概要

本研究で用いたシステムによって検出された位置がどの程度ばらつきがあるのか評価するために，現実空間における位置と検出した位置のずれを記録する実験をおこなった．実際の音響測定のように繰り返しロボットの移動と位置検出結果の記録を実行し，得られた測定位置と真値の比較をおこなう．予め床面に格子状に測定位置をマークし，ロボットをそのマ

ーク上まで操作する。その状態で測定用のトリガを送信し、位置検出結果を記録する。マークは間隔が 25 [mm] になるように格子点状に配置した（一辺につき 4 か所、合計 16 点）。16 点での測定を 1 セットとし、5 セット測定をおこなった。

4.2 位置検出精度 評価実験結果

検出した位置とその平均をエラー! 参照元が見つかりません。左に、また検出した位置の平均と正解位置の比較エラー! 参照元が見つかりません。右に示す。検出した位置のヒストグラム Fig. 8 から読み取れる通り、x 軸と y 軸でばらつき具合に差が出ている。

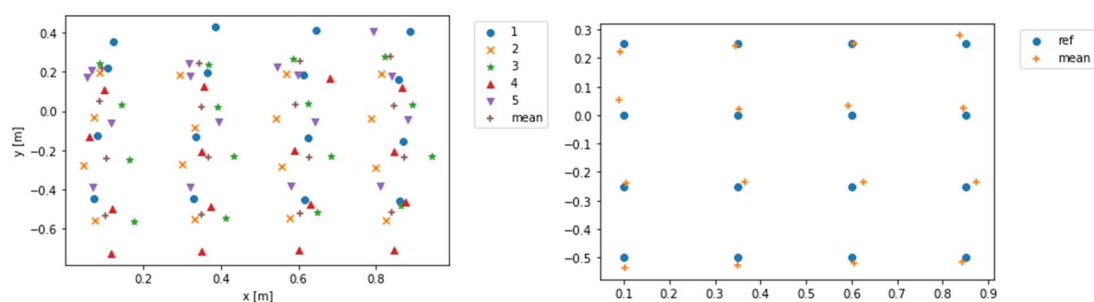


Fig. 7 位置検出結果の分布（左：検出結果と平均，右：平均と真値）

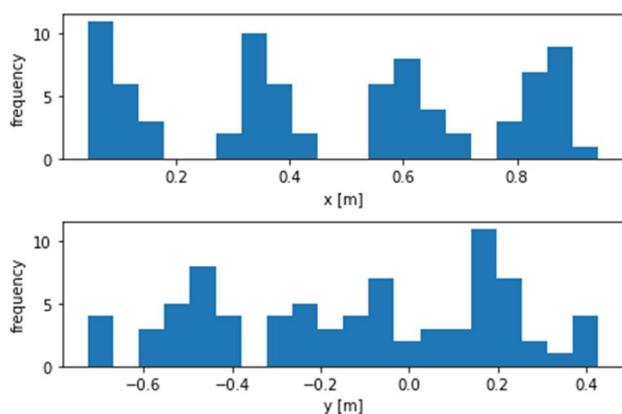


Fig. 8 位置検出結果のヒストグラム

4.3 位置検出精度 評価実験考察

測定時においてロボット自身が保有する地図を更新するかによって位置の検出におけるばらつきに相違が生じることが考えられる。実際に環境地図作成時に特定の方向にセンサが向き続ける状況などによって、方向ごとにばらつきが大きくなる傾向が見られた。

そこで環境地図作成を予め完了させた状態で一方向に一定間隔でロボットを 10 回繰り返し動かした際の検出位置を求める実験を追加でおこなった。その結果を Fig. 9 に示す。他の結果と比較するとばらつきがおさえられていることがわかる。したがって環境地図作成のタイミングやロボットの動かし方などで位置検出精度の向上が期待できると考えられる。

本評価実験を通じて、環境や開発した機体に依存している部分は存在しているが、測定に移動ロボットを用いる場合の位置検出精度の一つの目安になると考えられる。

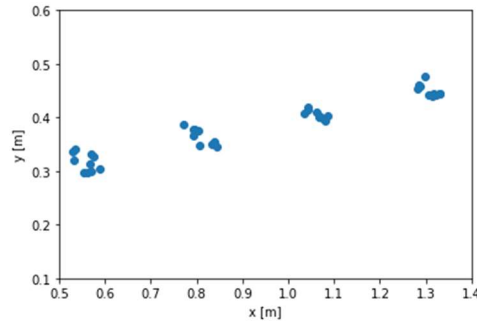


Fig. 9 環境地図の更新をしない場合の位置検出結果

5 二次元平面における測定

提案システムを用いて現実空間での測定をおこなった。対象とする室は Fig. 10 に示すような一般的な会議室であり、実際に使用する状態に近づけるため椅子や机が設置されている。測定位置は予め決めずに机の周りを 2 周しながら測定をおこなった。測定結果から得られた室内音響指標の空間分布を Fig. 11 に示す。

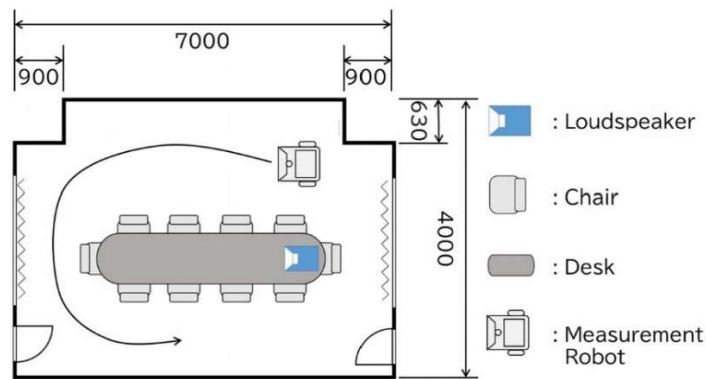


Fig. 10 二次元平面測定の対象空間の平面図

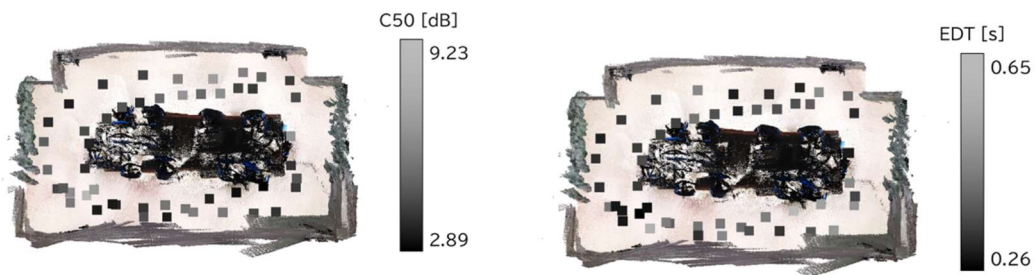


Fig. 11 測定された室内音響指標の二次元平面上の分布の可視化
(左：明瞭度 C 値, 右：EDT)

6 三次元空間における測定

5章と同様に現実空間での測定を三次元に拡張し、おこなった。測定対象となる環境を Fig.

12 に示す。8 箇所それぞれで 3 段階の高さ(床から 900, 1200, 1500[mm])で測定をおこなった。測定結果を Fig. 13 に、各値から各指標の可視化した様子を Fig. 14 に示す。

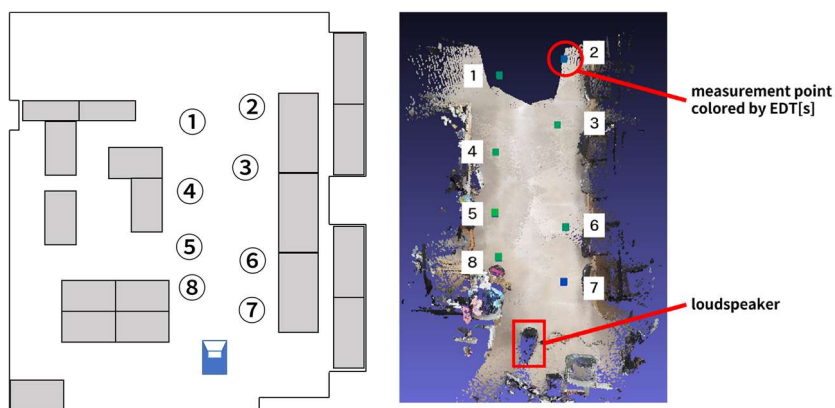


Fig. 12 三次元空間測定の対象空間と測定位置
(左：平面図，右：SLAM によって得られた環境地図)

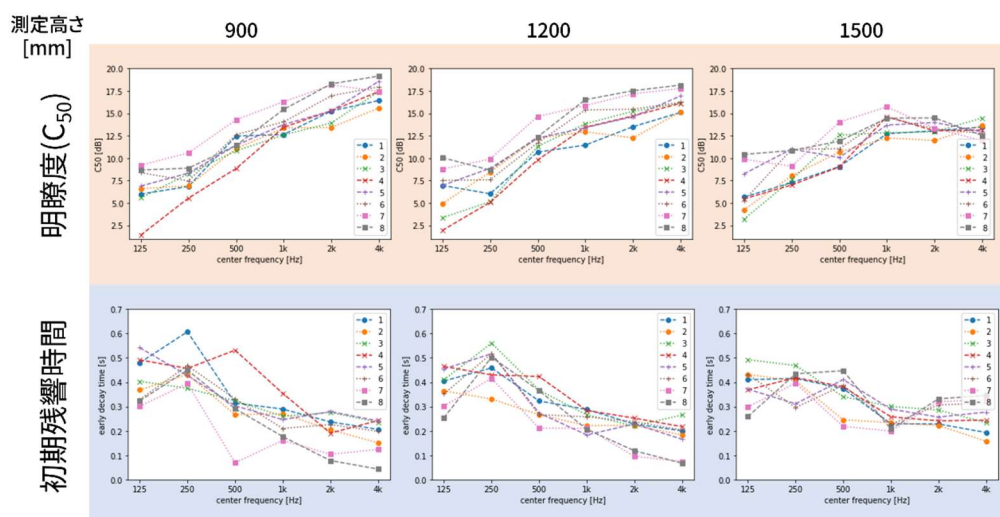


Fig. 13 三次元空間測定から得られた各室内音響指標値

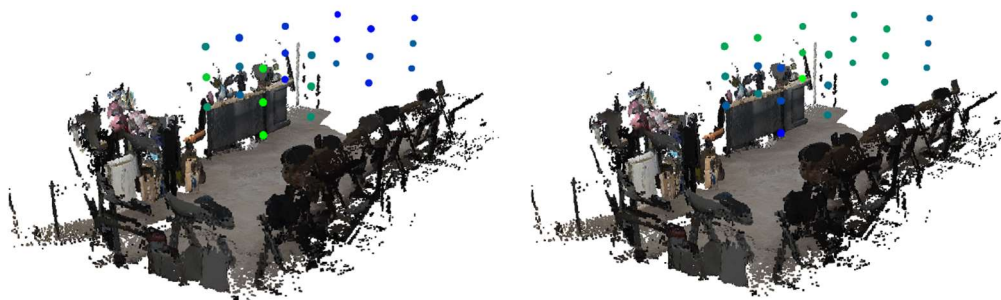


Fig. 14 三次元空間測定から得られた室内音響指標の空間分布の可視化
(左：明瞭度 C 値，右：EDT)

Fig. 14 は紙面の関係上、平面的な画像で表しているが本来は三次元の点群データであるため、専用のビューワを用いて確認した動画を YouTube にて公開しているⁱ.

7 おわりに

本研究では、快適な音環境を実現するために、対象とする空間の音響的な情報を取得することとその結果を人が理解しやすい形で提示することについてロボティクスを用いたアプローチによって取り組んだ。

今後、得られた情報を元に音環境を調整するためのフェーズが実装されることによって詳細な音響設計がされていない一般的な環境においても、その室の用途に適した音環境を作り上げることができると考えられる。

参考文献

- [1] W. Sabine, *Collected papers on acoustics*, Cambridge Harvard University Press, 1922.
- [2] B. F. Day, R. D. Ford, P. Load, *Buildinf Acoustics*, Elsevier, 1969.
- [3] 佐藤逸人, 森本政之, 小吹佳織, “住宅の居室における残響音が会話に与える影響,” *日本音響学会*, 第 卷 66, 第 11, pp. 541-551, 2010.
- [4] 日本音響エンジニアリング, “マイクロホン移動装置 特殊,” [オンライン]. Available: <https://www.noe.co.jp/business/acoustic-measurement/mpd-top/mpd/mpd-others.html>.
- [5] 渡辺 敦志, エヴァン・イアニ, モラレス・ルイス洋一, 石井 カルロス寿憲, “人間協調型移動ロボットによるコンクリート打音検査記録システム,” *日本ロボット学会誌*, 第 卷 33, 第 7, pp. 548-554, 2015.
- [6] Y. Feng, R. Khodayi-mehr, Y. Kantaros, L. Calkins, M. M. Zavlanos, “Active Acoustic Impedance Mapping using Mobile Robots,” 著: *IEEE Conference in Decision and Control*, 2018.
- [7] introlab, “RTAB-Map,” <http://introlab.github.io/rtabmap/>.
- [8] 日本建築学会, “室内音響指標ベンチマーク,” http://news-sv.aij.or.jp/kankyo/s24/benchmark/index_j.html.
- [9] T-frog project, “ロボットフレーム i-Cart mini,” https://t-frog.com/products/icart_mini/.

ⁱ https://youtube.com/playlist?list=PLLt1R5UeTsPWobg-OK1_XhEXw6TOZfwl