

Title	統計的室内インパルス応答モデルとそのパラメータ推定法の検討
Author(s)	石川, 大介
Citation	
Issue Date	2017-09
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/14801
Rights	
Description	Supervisor: 鶴木 祐史, 情報科学研究科, 修士

修士論文

統計的室内インパルス応答モデルと
そのパラメータ推定法の検討

北陸先端科学技術大学院大学
情報科学研究科情報科学専攻

石川 大介

2017年9月

修士論文

統計的室内インパルス応答モデルと
そのパラメータ推定法の検討

指導教官 鵜木祐史 教授

審査委員主査 鵜木祐史 教授
審査委員 赤木正人 教授
審査委員 党建武 教授

北陸先端科学技術大学院大学
情報科学研究科情報科学専攻

1510004 石川 大介

提出年月: 2017年8月

概要

室はその用途に応じて設計をされ、建築されている。その室が設計通りの音響特性を持つことを明らかにするために、室内音響指標が使われる。この室内音響指標は室内インパルス応答（RIR: Room Impulse Response）を測定し、算出される。室内インパルス応答は測定される際、非常に大きい音圧レベルを持った信号か、長時間の観測信号が必要である。このため、駅やショッピングセンターなどの公共環境においては、その場の人に対して聴力を保護するような機器を着用させなければ、RIR の測定が事実上不可能である。このような環境において室内音響指標を得るためには、測定の代替として RIR を推定し、室内音響指標を推定する必要がある。このため、室内音響指標のブラインド推定法が必要である。

現在までに様々な室内音響指標のブラインド推定法が提案されてきた。この推定法にはパワーエンベロープ逆フィルタ法を用いた推定法や、変調スペクトル特性を用いた推定法がある。しかし、これらの推定法においてはいずれも、その推定過程において RIR モデルのパラメータ推定法が用いられており、この推定の精度に問題があった。これは、推定に用いる統計的な RIR モデルの近似精度が低いため、推定精度に問題があることや、変調度に依った制約があり、実環境において推定が行えないという点に原因がある。これらの問題を解決するために、本研究では、従来の統計的 RIR モデルにおける近似精度を改善したモデルを提案することや、変調度に依らない制約条件を提案することで解決を試みる。

今までの統計的 RIR モデルとしては Schroeder の RIR モデルや一般化 RIR モデルが提案されてきた。これらの RIR モデルには実測された RIR の過渡部を表現できない問題や、残響特性を精度良く表現することが困難な問題があった。これらの問題を解決するために、本提案法では過渡部と減衰部を独立して表現できる、拡張型 RIR モデルを提案する。このモデルが有効であるか評価するため、実測された RIR に対して、これらのモデルを適用し、近似した。この結果、拡張型 RIR モデルは時間領域において実測 RIR を精度良く表現することが可能であり、変調周波数領域においても従来の RIR モデル群と同等程度の近似が可能であることが示された。また、これら近似結果から室内音響指標を推定した結果、拡張型 RIR モデルの時間領域における D_{50} の推定精度が特に良く、その他の指標も同程度に正確な推定が行えた。

また、変調度によらないパラメータ推定法を提案するために、残響が付加されていない周期的な信号のパワー包絡線の形状に着目した。この信号に対して、最大値と最小値を取得し、それに対して回帰直線を引くと傾きが 0 になる。一方で、残響が付加された周期信号のパワー包絡線から得られた最大値と最小値に対して回帰直線を引くと、傾きが 0 にならない。この回帰直線を引く処理は上側包絡線と下側包絡線を得る処理と同義である。この特徴を用いた制約条件をパラメータ推定法に適用した結果、シミュレーションや実環境を想定した信号においてパラメータ推定が行えることが明らかになった。

目次

第1章	序論	1
1.1	はじめに	1
1.2	室の音響特性の算出	1
1.3	関連研究	2
1.4	問題点	3
1.5	研究の目的	4
1.6	本研究の構成	5
第2章	室内インパルス応答と室内音響指標	6
2.1	室内インパルス応答	6
2.2	室内音響指標の算出方法	6
2.2.1	残響時間	6
2.2.2	ドイトリッヒカイト	7
2.2.3	変調伝達関数	10
2.2.4	音声伝送指標	11
2.3	室内音響指標の測定上の問題点	11
第3章	統計的室内インパルス応答モデルの提案	13
3.1	従来の統計的室内インパルス応答モデル	13
3.1.1	Schroeder の室内インパルス応答モデル	13
3.1.2	一般化室内インパルス応答モデル	14
3.2	問題点	16
3.3	拡張型室内インパルス応答モデル	17
3.4	拡張型室内インパルス応答モデルの変調伝達関数	19
3.5	モデル評価	20
3.6	最適化されたパラメータ	29
3.7	まとめ	29
第4章	提案モデルのパラメータ推定法	31
4.1	拡張型室内インパルス応答モデルのパラメータ推定	31
4.2	推定方法の前提条件	33
4.3	パラメータ推定法	34

4.4	評価	37
4.4.1	評価方法	38
4.4.2	残響とパワーエンベロープ逆フィルタ法に Schroeder の統計的室内 インパルス応答モデルを用いた場合	39
4.4.3	残響とパワーエンベロープ逆フィルタ法に一般化室内インパルス応 答モデルを用いた場合	40
4.4.4	残響とパワーエンベロープ逆フィルタ法に拡張型室内インパルス応 答モデルを用いた場合	41
4.4.5	残響を実測された RIR, パワーエンベロープ逆フィルタ法に拡張型 RIR モデルを用いた場合	42
4.5	まとめ	43
第 5 章	結論	45
5.1	本研究で明らかになったこと	45
5.2	残された課題	45

目次

1.1	従来法の処理フロー	3
2.1	インパルス応答	7
2.2	インパルス応答のパワー包絡線と残響時間の関係	8
2.3	インパルス応答のパワー包絡線とドイトリッヒカイトの関係	9
2.4	変調伝達関数の概念	11
3.1	残響環境における MTF の特性	14
3.2	実際の RIR と Schroeder, 一般化 RIR モデルの比較 (パワー包絡線)	15
3.3	Schroeder の RIR モデルの MTF と一般化 RIR モデルの MTF との比較	16
3.4	b を変化させた場合の一般化 RIR モデルの動き	17
3.5	実際の RIR と従来の RIR モデル, 拡張型 RIR モデルの比較	18
3.6	拡張型 RIR モデルの MTF	20
3.7	近似結果の一例 (時間領域)	23
3.8	近似結果の全 RMS (時間領域)	23
3.9	近似結果の一例 (変調周波数領域)	24
3.10	近似結果の全 RMS (変調周波数領域)	24
3.11	近似結果から算出された T_{60} (時間領域)	26
3.12	近似結果から算出された T_{60} (変調周波数領域)	26
3.13	近似結果から算出された D_{50} (時間領域)	27
3.14	近似結果から算出された D_{50} (変調周波数領域)	27
3.15	近似結果から算出された STI (時間領域)	28
3.16	近似結果から算出された STI (変調周波数領域)	28
4.1	パワーエンベロープ逆フィルタ法の概要図	32
4.2	無残響の sin 波パワー包絡線の上側包絡線と下側包絡線	34
4.3	残響が付加された sin 波パワー包絡線の上側包絡線と下側包絡線	35
4.4	拡張型 RIR モデルの性質	36

4.5	拡張型 RIR を用いたパワーエンベロープ逆フィルタ法の原理. (a) 原信号, (b) $T_h = T_t = 1.0$ の残響が付加された信号, (c)・(e)・(g) $T_t = 1.0$ と固定 し, T_h をそれぞれ過少, 適切, 過大な値にした場合の回復信号, (d)・(f)・ (h), $T_h = 1.0$ と固定し, T_t をそれぞれ過少, 適切, 過大な値にした場合 の回復信号	37
4.6	試験信号のパワー包絡線 ($e_x^2(t)$): 変調周波数 5, 10 Hz	39
4.7	評価項目 1-1 の推定結果	40
4.8	評価項目 1-2 の推定結果	41
4.9	評価項目 1-3 の推定結果	42
4.10	評価項目 2 の推定結果	43

表 目 次

2.1 室の音声伝送品質と STI の関係	11
3.1 SMILE2004 データベースにおける各実測 RIR の条件	22
3.2 近似した際の各 RIR モデルのパラメータ	29

第1章 序論

1.1 はじめに

様々な室はその用途に応じた設計をされて建築されている。例えば、コンサートホールであれば、音の響きが良くなるように設計される。また、会議室であれば、音声コミュニケーションが円滑に進められるよう設計される。室の設計が適切であることを示すためには、その室が適切な音響特性を持つことを明らかにすることが重要である。室の音響特性は、その設計過程においてコンピュータを用いたシミュレーションや縮小された模型を用いて模擬的に測定される。最終的に、室はその室に合致した調整が施され、完成を迎える。もし、これら室の音響特性を測定する段階において、なんらかの理由によりこの特性が得られない場合、室は完成を迎えることができない。このため、測定をする以外の方法で室の音響特性を得る方法が必要である。

1.2 室の音響特性の算出

室の音響特性を物理指標として表した室内音響指標 [1] においては、残響時間 (T_{60}) [2, 3] やドイトリッピカイト (D_{50} : Deutlichkeit) [4], 音声伝送指標 (STI: Speech Transmission Index) [5] などの指標が存在する。これら室内音響指標を算出するためには、室内インパルス応答 (RIR: Room Impulse Response) を測定する必要がある。この RIR は、インパルスや定常雑音、正弦波信号を発する方法を用いて測定される。RIR を測定するこれらの方法において共通していることは、室の応答が取れるような大きな音圧レベルを持つ信号が必要とされることである。この音圧レベルは室の大きさや周囲の雑音の大きさによって変動し、いずれにおいても人の聴力に悪影響を与えるほど、大きな音圧レベルを持つ信号が必要である。このために、どの方法においても、室に人が居ない状態にすることや聴力を保護するような機器を着用した上で、RIR を測定することが必要である。室の設計時や調整段階であれば人を排除して RIR を測定することが可能であるものの、室が本来の機能を果たしている状態、つまり、人が居る状態においては聴力保護の観点から RIR を測定することが困難である。同様に、室内音響指標を算出することも困難である。

この状況を解決し、室に人が居る状況においても室内音響指標を算出するためには、RIR を測定することなしに室内音響指標を推定できる方法が必要である。従来においても同様の試みは存在し、特に事前情報が何もない推定法はブラインド推定法と呼ばれている。このブラインド推定法には、人工ニューラルネットワーク (ANN: Artificial Neural Network)

を用いた推定法 [6, 7] や、変調伝達関数 (MTF: Modulation Transfer Function) [8, 9] の概念を用いた推定法 [10, 11, 12, 13, 14, 15] が存在する。ANN を用いた推定法では、残響音声とこの音声に付加されているインパルス応答から算出された STI を学習データとすることで、STI を算出した結果に匹敵するほどの推定精度を持つことが示された。しかし、この推定法は膨大な事前学習が必要であることに加えて、推定場所に対する最適化のために、その場所の学習データが必要であるため、本当の意味で事前情報がないとは言いがたい。一方で、MTF の概念に基づいた推定法では、室の音から直接に室内音響指標の推定が可能であり、事前学習など必要がないことから、本当の意味でブラインドな推定が可能であると言えることができる。しかし、MTF の概念に基づいた、現在までのブラインド推定法には推定を行える状況に制約があり、室内音響指標の算出を代替することは難しい。このため、従来の推定法における制約を少しでも取り払えるような技術を提案して、実環境に対して適応させる試みは必要不可欠である。

1.3 関連研究

MTF の概念を使った室内音響指標のブラインド推定法においては、RIR モデルから導出される無限インパルス応答 (IIR) フィルタを用いた推定法 [10, 11, 12] や RIR モデルから導出される MTF を用いた推定法 [13, 14, 15] が存在する。

前者は広林らが提案したパワーエンベロープ逆フィルタ法 [16] を改善し、室内音響指標の 1 つである残響時間 (T_{60}) の推定を行っていた。この推定法のフロー図を図 1.1 (a) に示す。 T_{60} は室の音が 60 dB 減衰するのに要する時間を示しており、この減衰の特性を模擬したモデルが Schroeder の RIR モデルである。また、この RIR モデルのパワー包絡線に関する IIR フィルタとその逆フィルタを導出することで、パワーエンベロープ逆フィルタ法を用いることが可能になる。この IIR フィルタの T_{60} に関するパラメータを変化させ逆特性を得ることで、パラメータを決定する方法がパワーエンベロープ逆フィルタ法である。Unoki et al. はこの推定法を残響波形や残響音声のパワー包絡線回復に用いており、この過程で、信号の変調度が 1 以下かつ 0 以上という仮定をし、 T_{60} に関係したパラメータを推定していた [10, 11]。また、この点を解決するために、Hiramatsu & Unoki は信号の変調スペクトルから得られる特徴を用いた推定法を提案した [12]。この推定法も推定に用いる信号に対して変調度 1 以下 0 以上という仮定をしていた。この推定法によるパラメータ推定の結果、 T_{60} に関するパラメータ推定の精度が良くなることが明らかになった。

後者は各 RIR モデルから導出された MTF の T_{60} に関するパラメータと変調スペクトルとの関係に着目し、 T_{60} や D_{50} , STI の推定を行う方法である。この推定法のフロー図を図 1.1 (b) に示す。この推定法では前者において必要であった IIR フィルタとパワー包絡線間の処理を MTF と変調スペクトル間の乗算に置き換えた。Sasaki & Unoki は残響の MTF に着目し、残響環境の推定法を提案した [14]。また、Sasaki & Unoki は Lu & Unoki が提案した従来の RIR のモデルよりも実測の RIR を近似できるモデル [17] を推定法に用いた。Miyazaki et al. は雑音の MTF にも着目し、雑音残響環境でのパラメータ推定法を

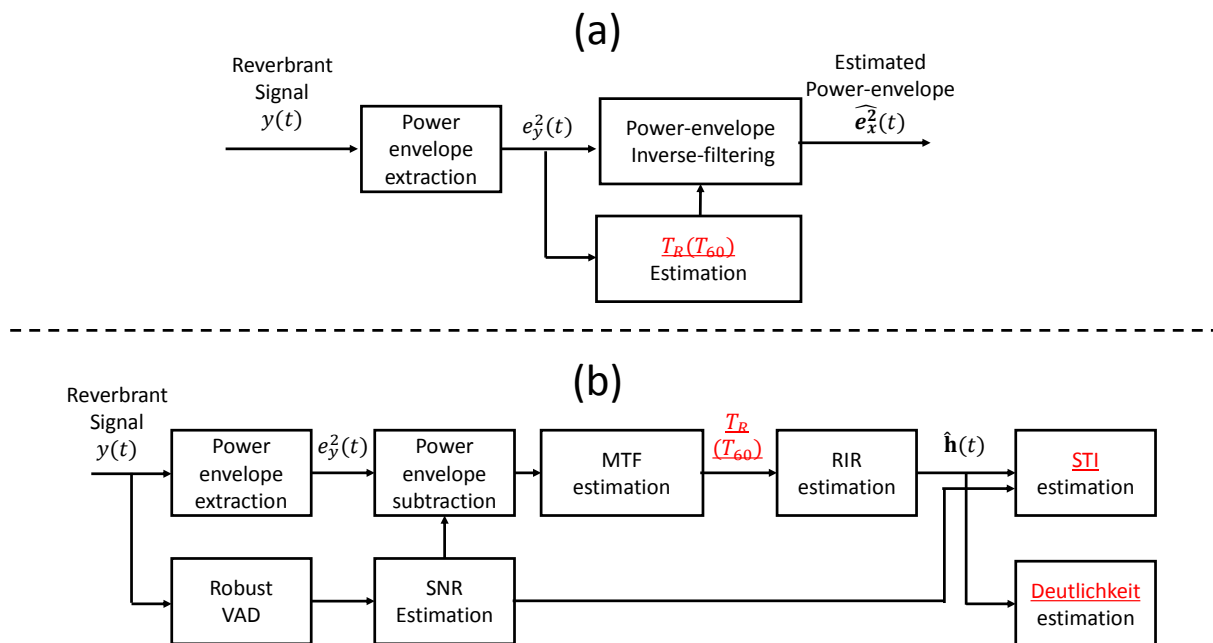


図 1.1: 従来法の処理フロー

提案した [15]. これらは MTF の T_{60} に関するパラメータを変化させることにより，信号の変調スペクトルの変調度を 1 に戻すような逆特性を算出することで，各パラメータの推定を行っていた．また，これらの推定法においても Unoki et al. や Hiramatsu & Unoki の推定法と同様に信号の変調度を 1 以下かつ 0 以上であると仮定する必要があった．

1.4 問題点

Unoki et al. の報告においては推定の対象となった信号の T_{60} が大きい値を取るほどに適切な推定を行うことが難しいということが明らかになった．これは IIR フィルタが持つ T_{60} のパラメータが大きい値を取ると，逆フィルタを掛けた際に復元された信号の高域の周波数成分が強調されるため発生していると考えられた．また，Hiramatsu & Unoki の推定法でも T_{60} が大きい値を取るほどに適切な推定を行うことが難しいということが明らかになった．この結果から，Hiramatsu & Unoki は実環境に適応する際に Schroeder の RIR モデルが簡素であるため，実環境を正確に模擬できないという問題を示した．この問題を解決するため，Sasaki & Unoki や Miyazaki et al. は一般化 RIR モデルという Schroeder の RIR モデルを一般化したモデルを提案し解決を試みた．この推定法の推定結果においては STI は正しく推定されたが， T_{60} や D_{50} は推定の精度に問題があることが示された．この問題は，STI は変調周波数領域で定義される指標であることに対して， T_{60} や D_{50} は時間領域で定義される指標であり，時間領域における波形の特徴が重要であることに起因していた．このため，変調スペクトル特徴のみで室内音響指標を正確に推定することが困

難であるという問題が明らかになった。また, Unoki et al., Hiramatsu & Unoki, Sasaki & Unoki, Miyazaki et al. の研究においては推定に用いる信号の変調度が1以下0以上であることが推定を行える条件であった。よって, 推定を出来る条件が限定的であるという問題も明らかになった。

これらの問題を解決するためには一般化 RIR モデルの IIR フィルタとその IIR フィルタに適合した頑健なパラメータ推定法が必要である。従来ではこの RIR モデルの IIR フィルタが導出できなかったことからパワーエンベロープ逆フィルタ法を用いることができず, パラメータ推定を行うことができなかった。しかし, Kashihara & Unoki がこの IIR フィルタの導出に成功したため, この推定法を用いることが可能になった [18]。このため, この IIR フィルタを用いたパワーエンベロープ逆フィルタ法の構築を行った。まず, 従来のパワーエンベロープ逆フィルタ法へこの IIR フィルタを適用し, パラメータの推定を行った。この結果, 一般化 RIR モデルにおける IIR フィルタの次数を担うパラメータの取りうる値が非常に限定的であり, 正確な推定が行えないことが明らかになった [19]。次に, 実測された RIR に対してこの RIR モデルを近似した結果, 実測された RIR を精度良く近似できる条件が, 従来の RIR と同様少ないという結果が明らかになった。これは一般化 RIR モデルがパラメータとして持つ次数の影響によって, その減衰特性が実測された RIR に適合しなくなるためである [20]。よって, これらの結果より, 実測された RIR を正確に近似できる RIR モデルが必要である。最後に, この推定法は実環境での使用を想定しているが, 推定に用いる信号に対して変調度に関する制約を置いていた。このため, 様々な環境へ頑健に適応できないことが問題である。以上より, これらの研究においては以下のような問題がある。

1. 一般化 RIR モデルは次数を担うパラメータが限定的であることに加えて, 実測された RIR を精度良く近似できる条件が少ないこと。
2. 推定に用いる信号に対して変調度に関する制約が必要であること。

1.5 研究の目的

本研究では従来までの問題を解決するために, 1. に対しては正確さを持った RIR モデルの提案とそのモデルへの頑健なパラメータ推定法を提案する。一般化 RIR モデルとは異なる, パラメータ間で相互に影響を及ぼさないような, RIR の立上り (以下, 過渡部) と立下り (以下, 減衰部) を独立に決定できる正確な RIR モデルを提案する。その後, RIR モデルを IIR フィルタ化し, 従来のパワーエンベロープ逆フィルタ法へ適用し推定可能か検討する。この検討の後, 2. を解決するために, 実環境への適応を考慮し, 変調度に依らない RIR モデルのパラメータ推定法の検討を行う。

1.6 本研究の構成

本論文は5章で構成される

第1章 本研究の背景と従来の研究における問題点を明らかにし，本研究の目的を述べる

第2章 過渡部，減衰部が独立したRIRモデルに関する提案と各RIRモデルとの比較を行う

第3章 従来のパラメータ推定法への拡張型RIRモデルの適用と変調度にとらわれない頑健なパラメータ推定法の原理を述べる

第4章 RIRモデルの頑健なパラメータ推定法の評価を行う

第5章 本研究で明らかになったことと残された課題について述べる

第2章 室内インパルス応答と室内音響指標

2.1 室内インパルス応答

室の伝達特性を明らかにするためには、振幅無限大、時間無限小である信号、インパルスや長時間の観測信号を用いて測定する必要がある。室に音源を置き、十分離れた場所に受音点を設ける。そして、音源から測定用の信号を発生させ受音点において観測する。このとき、観測された信号には測定用の信号である直接音のみならず、様々な経路を通った音である反射音も含まれている。このように、インパルスにその室の特性が反映された信号を室内インパルス応答と呼び、室の伝達特性を評価するときに用いられることが知られている。また、この RIR から算出される物理指標のことを室内音響指標という。図 2.1 には実測されたインパルス応答を示す。

2.2 室内音響指標の算出方法

本章においては本研究で用いる室内音響指標である残響時間やドイトリッヒカイト、MTF/STI について説明を行う

2.2.1 残響時間

残響時間 (T_{60}) は室における残響音の減衰度合いを表す室内音響指標であり、Sabine[21]によって示された。Sabine らは残響時間を RIR が 60 dB 減衰に係る時間であると定義した。この指標を ISO3382[2] では T_{60} と示した。ISO3382 では 60 dB 減衰が室の状況によって取得できない場合に 30 dB や 20 dB にかかる減衰時間から T_{60} を算出する方法を定義した。このとき、30 dB 減衰から T_{60} を求める方法を T_{30} 、20 dB 減衰から T_{60} を求める方法を T_{20} と定義した。 T_{60} 、 T_{30} 、 T_{20} の関係を図 2.2 に示す。

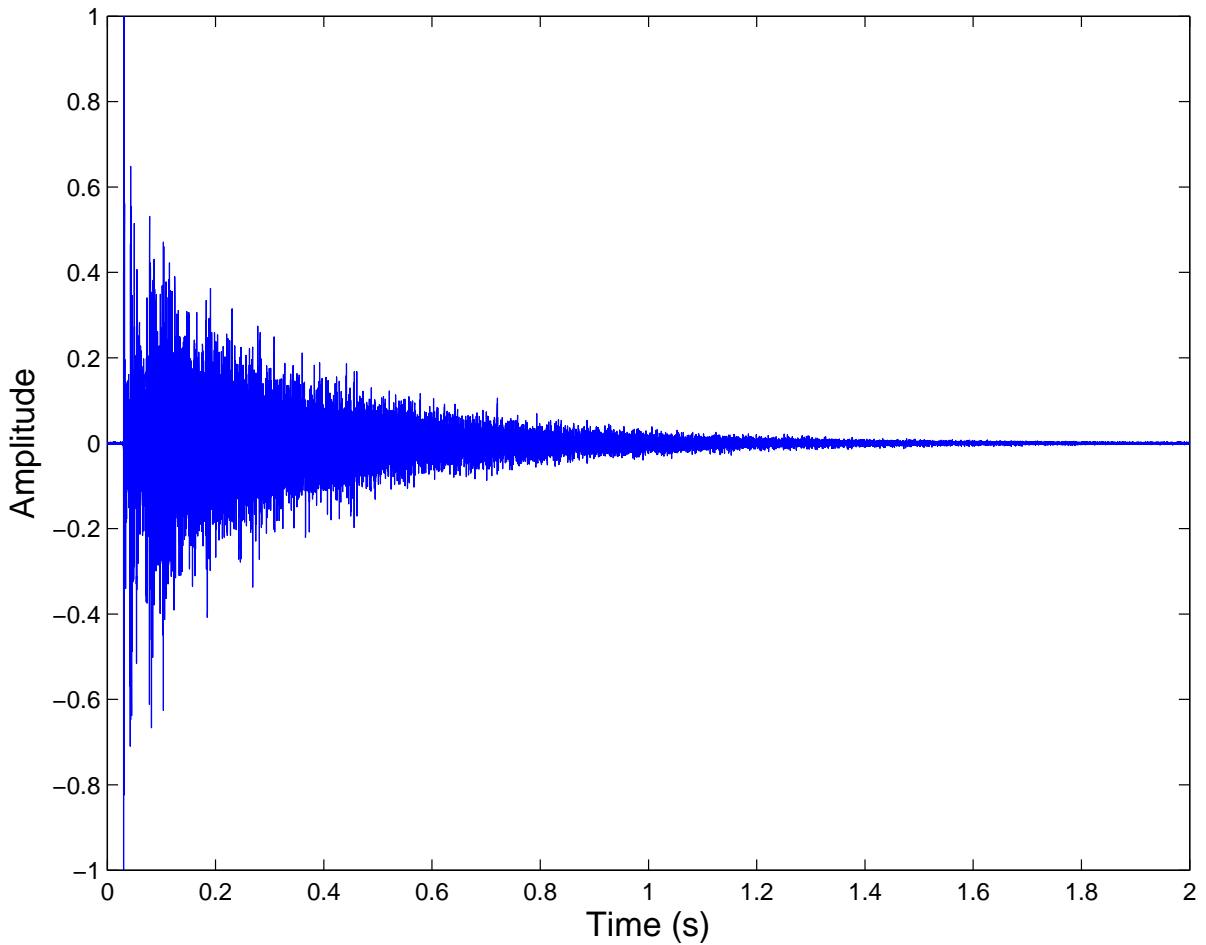


図 2.1: インパルス応答

2.2.2 ドイトリッヒカイト

ドイトリッヒカイト (D_{50}) は Thiele[4] によって定義される言葉の明瞭性に関する室内音響指標である。 D_{50} は RIR における直接音到来時 50 msec までのパワーと RIR 全体のパワーの比を用いて定義されており、次式のように表される。

$$D_{50} = \frac{\int_0^{\tau} h(t)^2 dt}{\int_0^{\infty} h(t)^2 dt}, \tau : 50 \text{ msec} \quad (2.1)$$

このとき $h(t)$ は RIR である。 D_{50} は 1 に近づけば近づくほど言葉の明瞭性が高く、0 に近づけば近づくほど言葉の明瞭度が低いことが示される。これは、RIR の直接音から 50 msec までの初期反射音に音を明瞭に聞こえさせる特徴があることに起因する。インパルス応答のパワー包絡線とドイトリッヒカイトの関係を図 2.3 に示す。

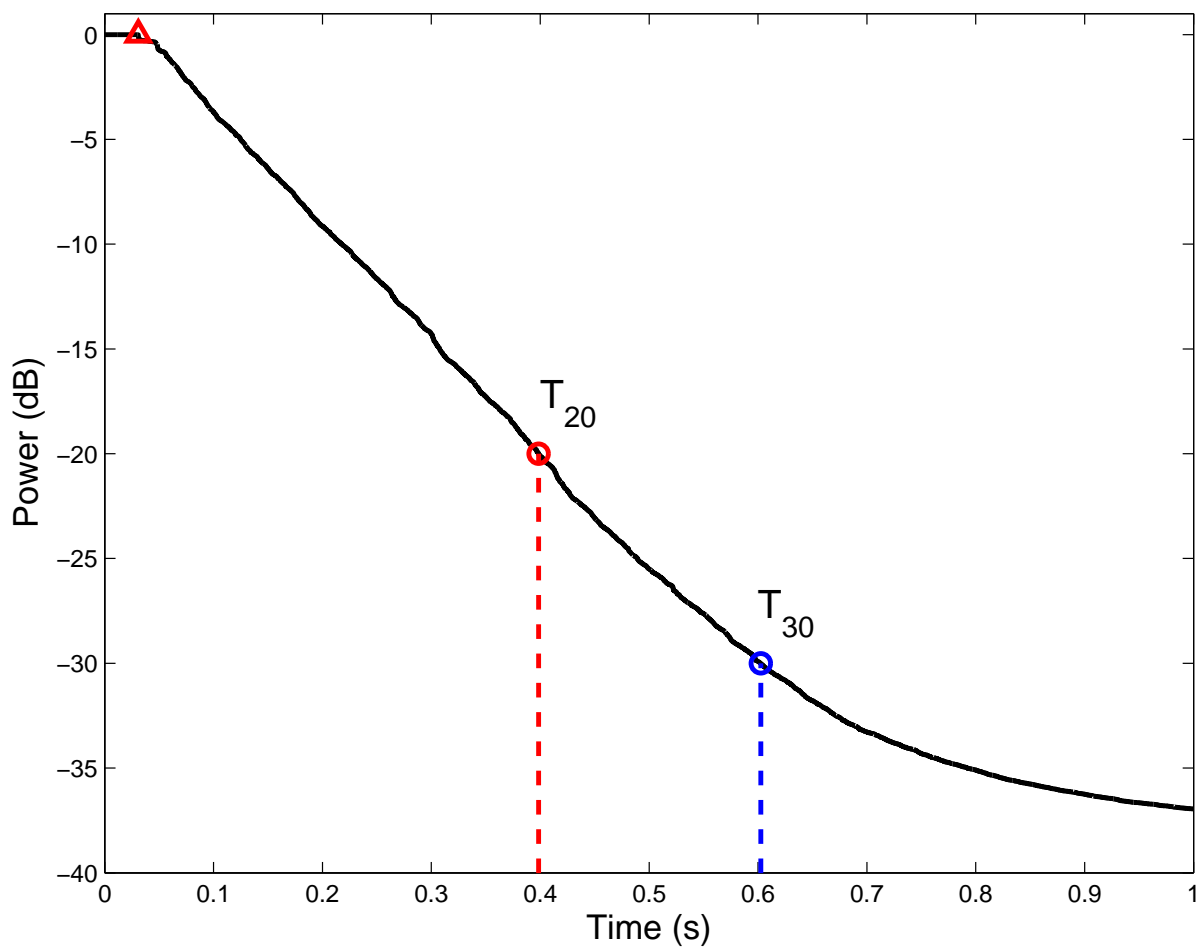


図 2.2: インパルス応答のパワー包絡線と残響時間の関係

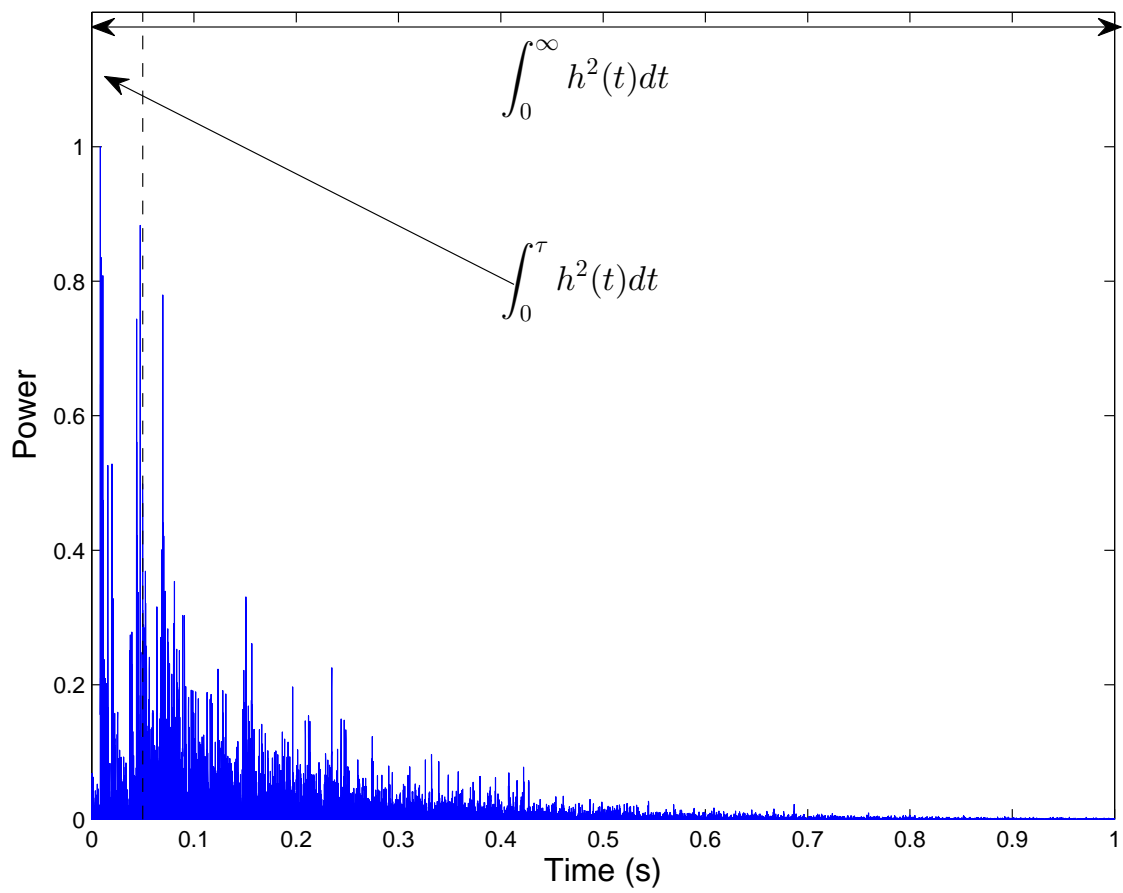


図 2.3: インパルス応答のパワー包絡線とドイトリッヒカイトの関係

2.2.3 変調伝達関数

本節においては変調伝達関数 (MTF) の概念について説明する. MTF の概念は Houtgast & Steeneken によって提案された [8, 9]. この概念は室を拡散音場と仮定し, その室の伝達特性を入力と出力の時間領域における包絡線の関係を用いて説明するものである. また, MTF の概念においては室から与えられる影響は雑音 (加法性) と残響 (重畳性) に分類され, これらは MTF の変調度に影響があるとされる. 入出力信号の関係は以下のように定義される. この概念に関する図を図 2.4 に示す.

$$\text{Input} : \bar{I}_i^2 \{1 + \cos(2\pi f_m t)\} \quad (2.2)$$

$$\text{Output} : \bar{I}_o^2 \{1 + m(f_m) \cos(2\pi f_m t - \tau)\} \quad (2.3)$$

このとき \bar{I}_i^2 は室に対する入力信号のパワー包絡線, \bar{I}_o^2 は室に対する出力信号のパワー包絡線, f_m は変調周波数, $m(f_m)$ は MTF である. ここで $m(f_m)$ は以下のように示される.

$$m(f_m) = \frac{\int_0^\infty \mathbf{h}(t)^2 \exp(-j2\pi f_m t) dt}{\int_0^\infty \mathbf{h}(t)^2 dt} \quad (2.4)$$

またここで, $\mathbf{h}(t)$ と MTF に基づいた残響信号のモデル化を以下に示す.

$$\mathbf{h}(t) = e_h(t) \mathbf{c}_h(t) \quad (2.5)$$

$$\mathbf{x}(t) = e_x(t) \mathbf{c}_x(t) \quad (2.6)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{x}(t) * \mathbf{h}(t) = e_y(t) \mathbf{c}_y(t) \quad (2.7)$$

ここで, $e_x(t)$, $e_h(t)$, $e_y(t)$ は $\mathbf{x}(t)$, $\mathbf{h}(t)$, $\mathbf{y}(t)$ の振幅包絡線であり, 入力信号, 出力信号, 室内インパルス応答 (RIR) を示す. また, $\mathbf{c}_x(t)$, $\mathbf{c}_h(t)$, $\mathbf{c}_y(t)$ はガウス性白色雑音キャリアである. 以上から室における振幅包絡線の関係は以下のように示される.

$$e_y(t) = e_x(t) * e_h(t) \quad (2.8)$$

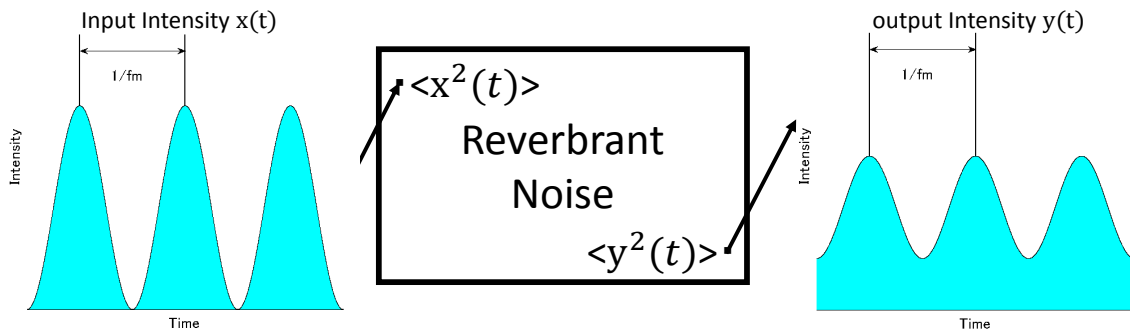


図 2.4: 変調伝達関数の概念

2.2.4 音声伝送指標

音声伝送指標 (STI) は Houtgast & Steeneken [8, 9, 29] によって提案され, IEC60286-16[5] によって標準化された, 室における音声伝送品質と対応している室内音響指標である [3]. STI は単語理解度 [22, 23] や聴き取りにくさ [24] など, 室における音の伝達特性を主観評価するとき用いられる尺度と相関を有していることが知られている. 本来, 室の伝達特性を主観評価するためには, 人的, 時間的に多大な労力を要する. よって, 客観評価尺度である STI から主観評価を予測することが注目されている.

STI は MTF の概念に基づき算出される. この概念では, ある信号が残響などの室の伝達特性による影響を受けた場合, その信号の MTF が減衰するという特性を利用している. RIR を 7 オクターブに帯域分割し, 帯域ごとに MTF を算出する. そして, 各 MTF に対して予め決められた荷重をかけ, 総和をとることによって STI が算出される. 算出された STI は 0 から 1 で表現され, 表 2.1 のように 5 段階 (Bad, Poor, Fair, Good, Excellent) に分けられる.

表 2.1: 室の音声伝送品質と STI の関係

Quality	Bad	Poor	Fair	Good	Excellent
STI	0~0.3	0.3~0.45	0.45~0.6	0.6~0.74	0.75 ~ 1.0

2.3 室内音響指標の測定上の問題点

室内音響指標を測定するためには, RIR を実測することが重要であることは述べた通りである. この RIR を実測するためには, インパルス性の信号や白色雑音, 正弦波信号などが必要である. これら信号を発生させる際には, 室の雑音などに留意すべきである. この理由は, 室に雑音がある場合, その雑音は測定に対して影響を及ぼし, 誤差を生じさせる恐れがあるためである. この誤差を低減させるためには, 測定に用いる信号の音圧レ

ベルを大きくし、SN 比を改善する必要がある [27]. このとき、信号の音圧レベルは雑音以外にも、その室の大きさなどを考慮しなければならない. この結果、RIR を実測するときの音圧レベルは非常に大きな値となることが多い. このような音圧レベルは人に対して悪影響を及ぼすため、人が居る環境下で RIR を測定することは困難である. すなわち、室内音響指標を公共環境下において測定することも困難である. しかし、室内音響指標は災害時の避難誘導や駅などにおいてその室の状況を正しく取得し、放送などの音量などをコントロールすることに用いられることが考えられている. また、近年では音声認識や残響除去に用いられることも考えられている [28]. よって、インパルス応答を測定しない室内音響指標の推定法、ブラインド推定法が求められている.

第3章 統計的室内インパルス応答モデルの提案

本章では従来用いられてきた RIR モデルの説明を行った後，提案法である拡張型統計的 RIR モデルの利点と欠点を説明する．そして，従来のモデル群とこのモデルを実測された RIR の近似に適用することや，その近似結果から算出された室内音響指標を比較することで，どのモデルが正確な RIR モデルであるか議論する．

3.1 従来の統計的室内インパルス応答モデル

3.1.1 Schroeder の室内インパルス応答モデル

Schroeder の RIR モデル [29] は室内インパルス応答の統計的性質を模擬したモデルであり，無雑音，拡散音場を仮定し，振幅包絡線 $e_h(t)$ とガウス性白色雑音キャリア $\mathbf{c}_h(t)$ の積で表される確率変数で定義される．

$$\mathbf{h}(t) = a \exp\left(\frac{-6.9t}{T_R}\right) \mathbf{c}(t) \quad (3.1)$$

ここで， a は振幅項， T_R は残響時間を示すパラメータである．式 (3.1) を式 (2.4) に代入することで，Schroeder の RIR モデルにおける MTF が以下のように得られる．また，この MTF を図 3.1 に示す

$$m_R(f_m, T_R) = \left[1 + \left(2\pi f_m \frac{T_R}{13.8} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (3.2)$$

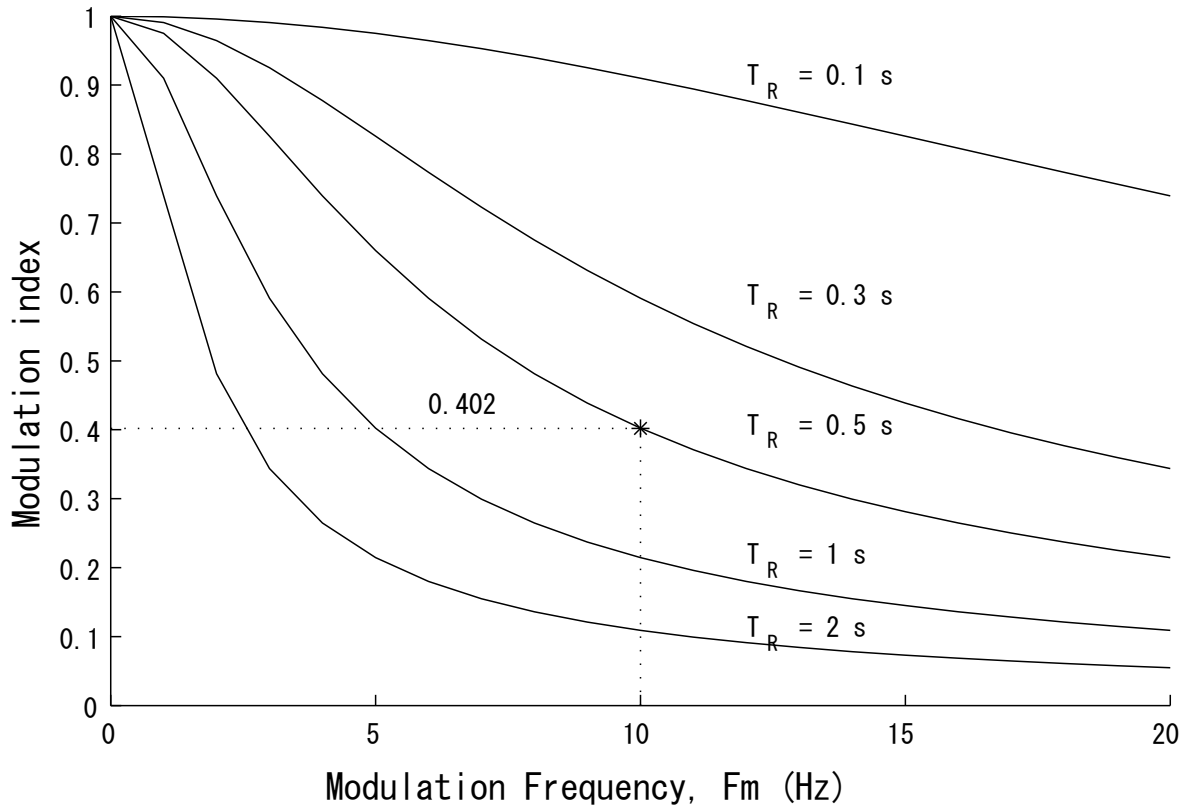


図 3.1: 残響環境における MTF の特性

3.1.2 一般化室内インパルス応答モデル

一般化 RIR モデルは Schroeder の RIR モデルと同様、無雑音、拡散音場を仮定し、振幅包絡線 $e_h(t)$ とガウス性白色雑音キャリア $c_h(t)$ の積で表される確率変数で定義される。

$$\mathbf{h}(t) = at^{b-1} \exp\left(\frac{-6.9t}{T_R}\right) \mathbf{c}(t) \quad (3.3)$$

ここで b は 1 以上の次数、 T_R は残響時間を表すパラメータ、 t は時間を示すパラメータである。 b が 1 のとき、一般化 RIR モデルと Schroeder の RIR モデルは同一の式となる。 よって、一般化 RIR モデルは Schroeder の RIR モデルよりも自由度が高い。 そして、これまで表現できていなかった実測された RIR の過渡部を表現することが可能である。 実測された RIR と Schroeder の RIR モデル、一般化 RIR モデルの比較を図 3.2 に示す。 次に、式 (2.4) に式 (3.3) を代入することで、一般化 RIR モデルの MTF が以下のように得られる。

$$m_R(f_m, b, T_R) = \left[1 + \left(2\pi f_m \frac{T_R}{13.8} \right)^2 \right]^{-\frac{(2b+1)}{2}} \quad (3.4)$$

一般化 RIR モデルと Schroeder の RIR モデルの違いは指数部 $(2b + 1)$ にある。 Schroeder の RIR の MTF と一般化 RIR の MTF の比較を図 3.3 に示す。 図の点線は Schroeder の RIR

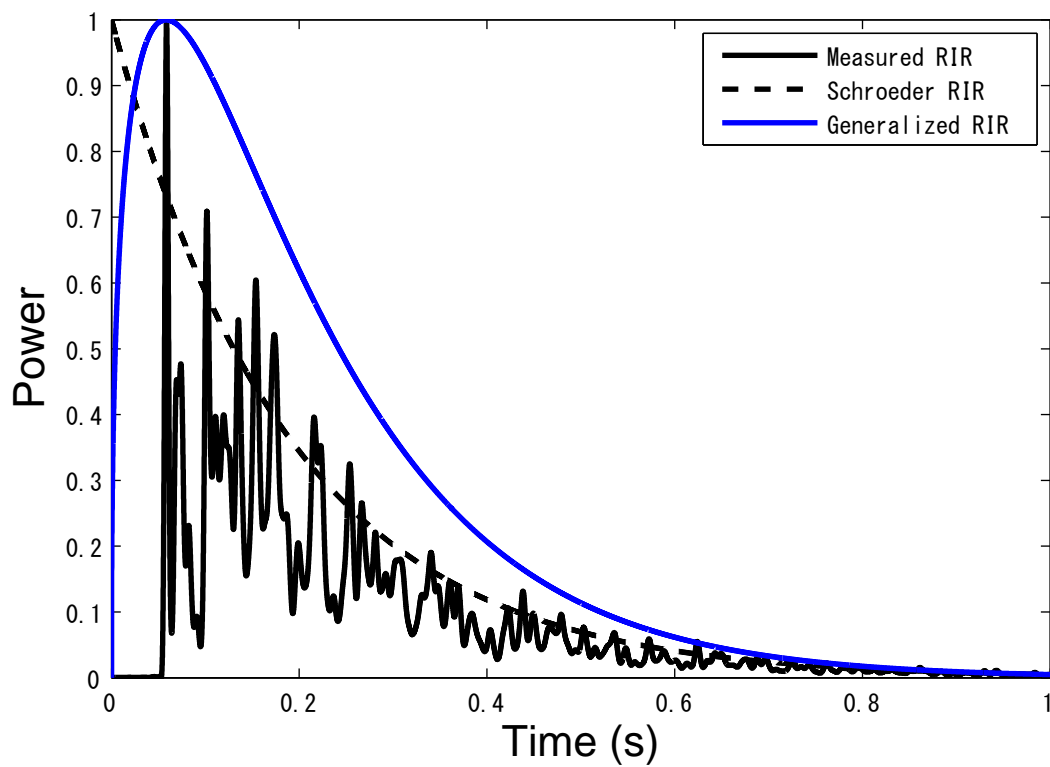


図 3.2: 実際の RIR と Schroeder, 一般化 RIR モデルの比較 (パワー包絡線)

モデルの MTF を表し, 図の実線は一般化 RIR モデルの MTF を表す. この図から MTF はどちらのモデルにおいても低域通過特性を持つことが示されている.

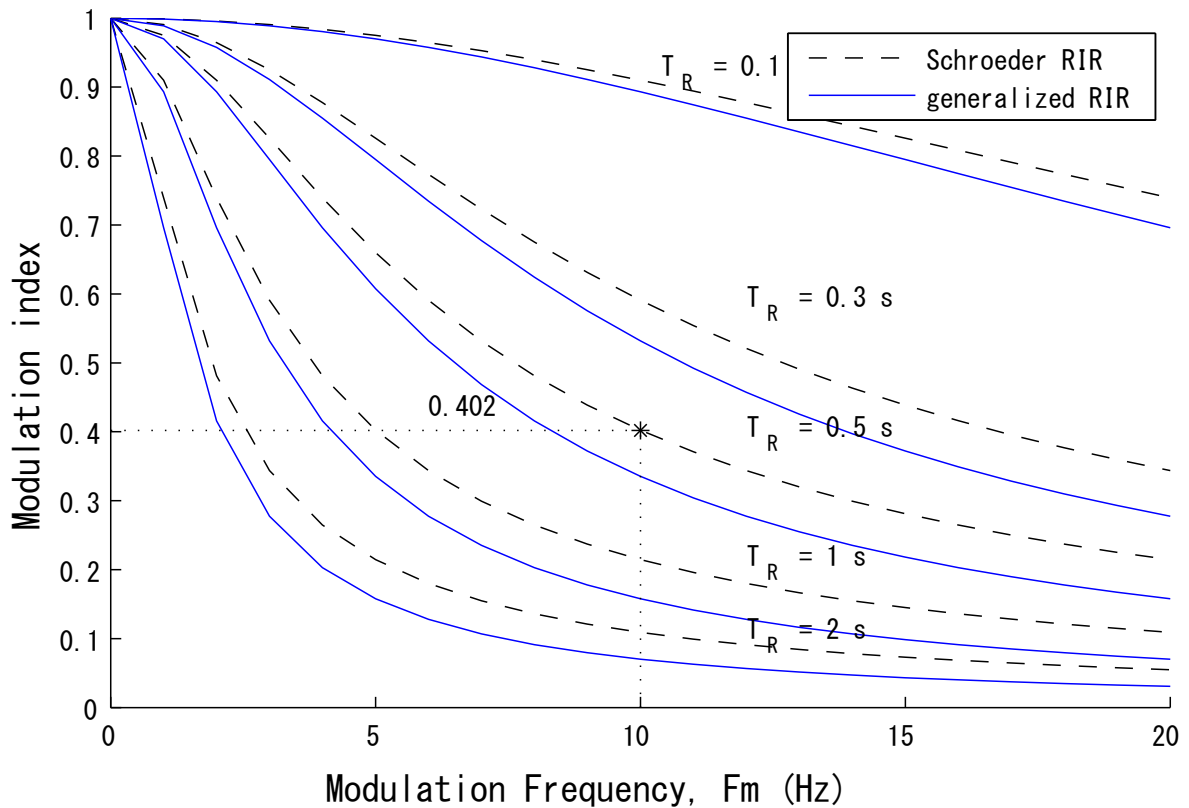


図 3.3: Schroeder の RIR モデルの MTF と一般化 RIR モデルの MTF との比較

3.2 問題点

図 3.2 に示される通り，Schroeder の RIR モデルは実測された RIR の減衰特性のみを表現出来るモデルであることが分かる．また，一般化 RIR モデルは Schroeder の RIR モデルに加えて，実測された RIR の過渡部が表現できる．このため，一般化 RIR モデルは Schroeder の RIR のモデルに比べて，表現力が高いということが出来る．また，一般化 RIR モデルは 2 変数で表現されるため，簡素に実測された RIR を表現することが可能である．その反面，一般化 RIR モデルの過渡部と減衰部の傾きは b と T_R という 2 変数が相互に影響することで形作られている．変調周波数領域において，この点に関しては問題は無い．しかし，時間領域においては b の値が増加するにつれて，残響の減衰が指数減衰するという定義から外れる問題がある．図 3.4 には $T_R = 0.5$ としたときに b を変動させた一般化 RIR モデルを示している． $b = 1$ のときには Schroeder の RIR と同一であり，残響の減衰が指数減衰するという定義からは外れない．しかし， b が大きくなるにつれて，その概形が変わることから，定義から外れてしまう．このため，一般化 RIR モデルでは正確に実測された RIR を表現できないことが問題である．

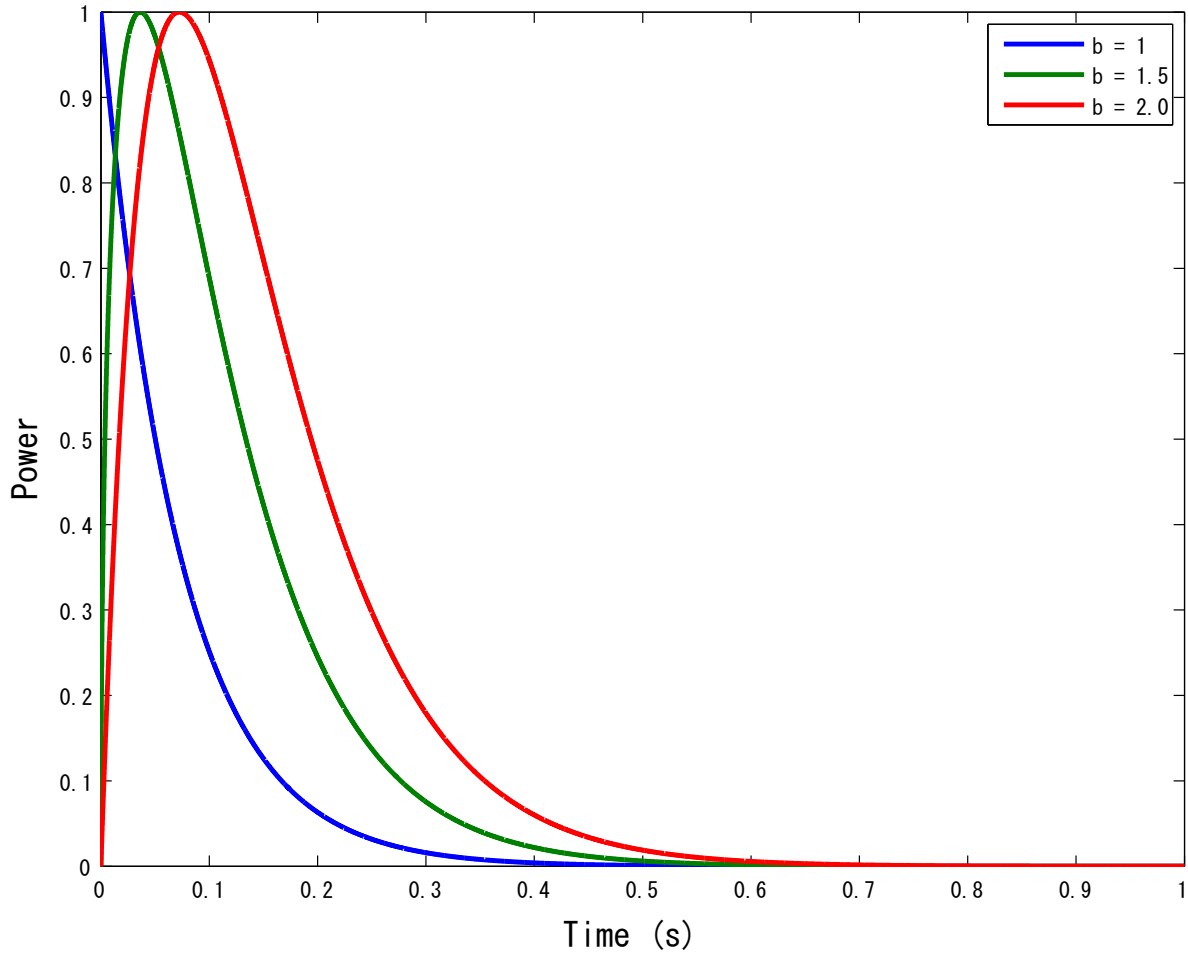


図 3.4: b を変化させた場合の一般化 RIR モデルの動き

3.3 拡張型室内インパルス応答モデル

拡張型 RIR モデルは一般化 RIR モデルのパラメータが独立では無いという問題点を改善するために提案されたモデルである。拡張型 RIR モデルは以下のように定義される。

$$\mathbf{h}_0(t) = \begin{cases} \exp\left(\frac{6.9t}{T_h}\right) \mathbf{c}(t), & t < 0 \\ \exp\left(\frac{-6.9t}{T_t}\right) \mathbf{c}(t), & t \geq 0 \end{cases} \quad (3.5)$$

$$\mathbf{h}(t) = \mathbf{h}_0(t - t_0), t_0 \geq 0 \quad (3.6)$$

ただし、 T_h は過渡部に関するパラメータ、 T_t は減衰部に関するパラメータ、 t_0 はピーク位置に対応する時刻のパラメータ、 $\mathbf{c}(t)$ は白色雑音キャリアである。また、 T_h が 0 のとき式 (3.5) は (3.1) と同一の式である。式 (3.5) は非因果性フィルタであるため、因果性フィルタとして表現する必要がある。式 (3.5) を因果性フィルタに変換したものが式 (3.6) である。拡張型 RIR モデルは一般化 RIR モデルとは異なり、2 つの式を持つ。この 2 つ

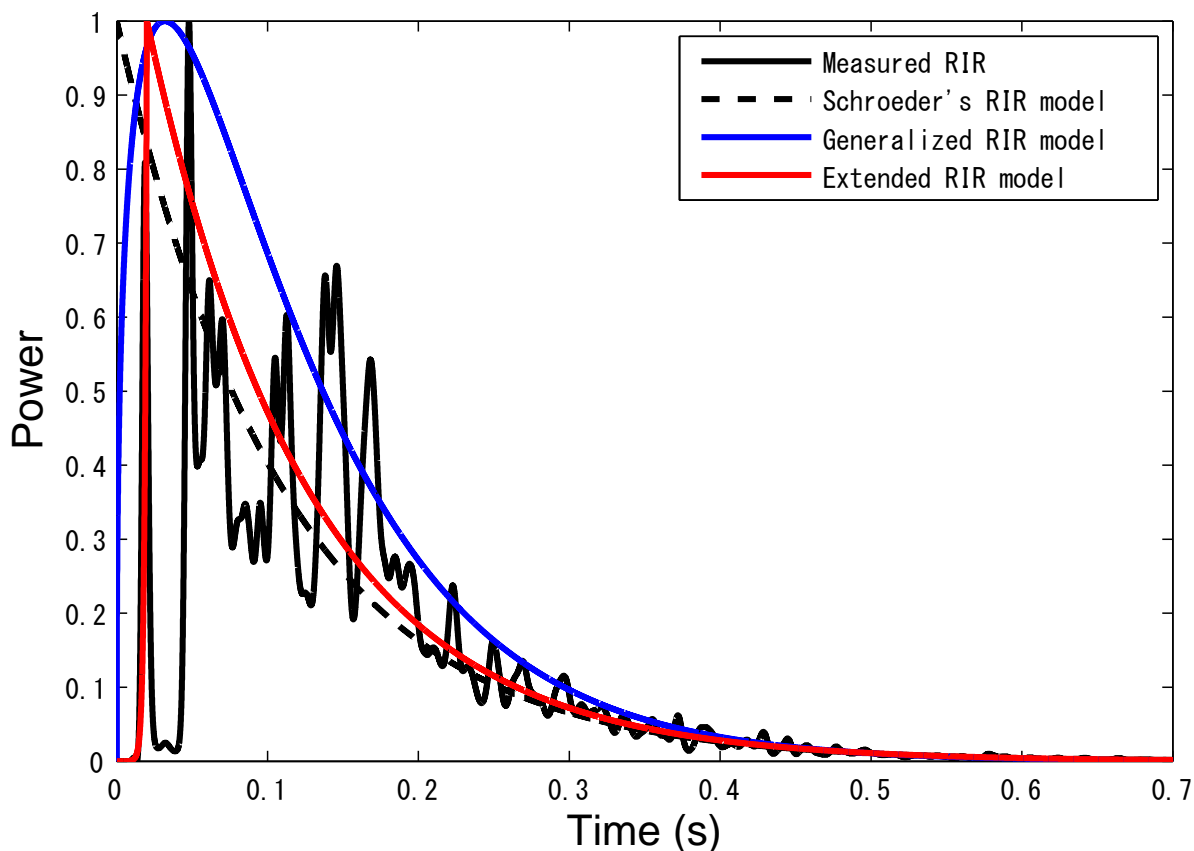


図 3.5: 実際の RIR と従来の RIR モデル, 拡張型 RIR モデルの比較

の式は t_0 を式の境界とし, 過渡部と減衰部を独立に表現することができる. よって, 一般化 RIR モデルにおける問題を解消し, 実測された RIR を詳細に近似することが可能になった. 加えて, 減衰部を示す式が Schroeder の RIR モデルと同一の式となったため, パラメータ T_t がそのまま T_{60} と一致するようになった. その一方で, 一般化 RIR モデルに比べて複雑化したため, 単純なモデルであるとは言い難い. また, t_0 において 2 つの式を利用して作成した 1 つの式が不連続となることから, 従来のモデル群と同様に MTF を導出することができるか確かめる必要がある. この拡張型 RIR モデルと実測された RIR や従来の RIR モデルを時間領域においてパワー包絡線を用いて比較した図を図 3.5 に示す. 時間領域で比較した結果, 過渡部, 立ち下がり共に一般化 RIR 以上に実測された RIR を近似できていることが分かる.

3.4 拡張型室内インパルス応答モデルの変調伝達関数

拡張型 RIR モデルは従来のモデル群とは異なり、不連続点を持つモデルである。このため、従来のモデル群と同等な MTF の導出が行えるか確かめる。式 (2.4) に拡張型 RIR モデルを代入した結果、以下のような式が導出された。

$$m(f_m, T_h, T_t) = \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \left(2\pi f_m \frac{T_h}{13.8}\right)^2\right) \left(1 + \left(2\pi f_m \frac{T_t}{13.8}\right)^2\right)}} \quad (3.7)$$

拡張型 RIR モデルの MTF においてはピーク位置 t_0 が式より消えたため、これには関係がないことが分かる。これは、MTF が変調周波数領域で表され、時間領域における情報がなくなるためである。また、不連続点があることが MTF の導出に影響がないことも明らかになった。

拡張型 RIR モデルの MTF の形状を図 3.6 に示す。図の青の実線は $T_h = 0.1$ であり、図の赤の実線は $T_h = 0.0001$ である。拡張型 RIR モデルの MTF も従来の RIR モデルの MTF と同様に低域通過特性を持つことが示されている。また、一般化 RIR モデルと同様に MTF 上においても自由度の高いモデルであることが分かる。

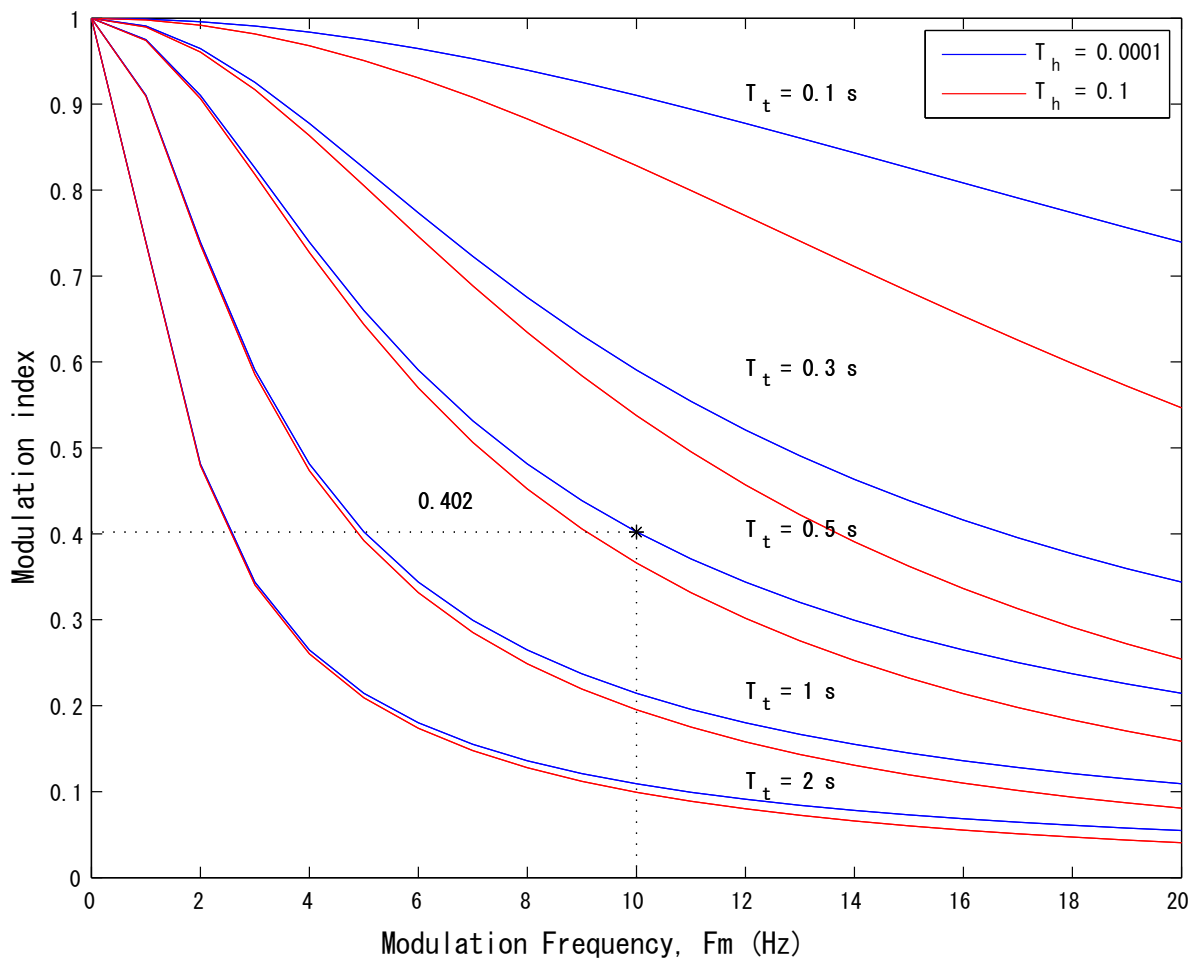


図 3.6: 拡張型 RIR モデルの MTF

3.5 モデル評価

本節は拡張型 RIR モデルと従来の RIR モデル群との比較を行う。比較は、時間領域において実測された RIR を各 RIR モデルで近似することにより行われる。実測された RIR は SMILE2004 データベース [30] の 43 件の RIR (以下、実測 RIR と呼ぶ) を用いる。この実測 RIR はサンプリング周波数 44100 Hz である。実測 RIR の収録環境などを表 3.1 に示す。実測 RIR と各モデル間の近似は二乗平均平方根 (RMS: Root Mean Square) を用いて行われる。この RMS を最小にするような解をそのモデルにおける近似した結果とする。RMS は以下の計算式から計算される。

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [20 \log_{10} e_h^2(n) - 20 \log_{10} \hat{e}_h^2(n)]^2} \quad (3.8)$$

ここで $e_h^2(t)$ は実測 RIR のパワー包絡線であり、 $\hat{e}_h^2(t)$ は各 RIR モデルを実測 RIR に近似したパワー包絡線、 n は離散時間領域における時間、 N は $e_h^2(n)$ の長さを示す。また、実測 RIR に合わせて、各 RIR モデルのサンプリング周波数は 44100 Hz としている。この結果の一例を図 3.7 に示す。図 3.7 上段は時間領域で近似した結果を示し、下段はその近似結果から算出された各 RIR モデルの MTF と実測 RIR モデルの変調スペクトルを変調周波数領域で比較している。また、各 RIR モデルと全ての近似結果についてまとめた図を図 3.8 に示す。この図は横軸が実測 RIR の RIR 番号を示し、縦軸が近似結果の RMS を示す。43 件全ての近似結果で RMS が拡張型、一般化、Schroeder という順番に小さいので、拡張型 RIR モデルは従来の RIR モデル群よりも正確に実測 RIR への近似を実現していることがわかる。

また、変調周波数領域においても同様に近似することができるかを検討した。このとき、変調周波数 1 – 20 Hz において近似を行うため、1 秒以下の実測 RIR の後部をゼロ埋めし、変調スペクトルを算出した。この近似に用いた式を以下に示す。

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{20} \sum_{f_{ml}=1}^{20} [20 \log_{10} E_y(f_{ml}) - 20 \log_{10} m(f_{ml})]^2} \quad (3.9)$$

ここで、 $E_y(f_{ml})$ は実測 RIR の変調スペクトル、 $m(f_{ml})$ は各 RIR モデルの MTF、 f_{ml} は変調周波数 (1–20 Hz) である。この結果の一例を図 3.9 に示す。図 3.9 上段は変調周波数領域上で実測 RIR に対して各 RIR モデルを近似した結果を示し、下段はその近似結果から算出された各 RIR モデルと実測 RIR を時間領域で比較している。この変調周波数領域での近似では拡張型 RIR モデルのピーク位置を決定することが困難であるため、ピーク位置を予め決めて近似した結果 (Lim) とピーク位置を決めずに近似した結果 (Ind) という 2 つの結果が存在することに注意されたい。また、各 RIR モデルと全近似結果についてまとめた図を図 3.10 に示す。この結果から、RMS は一般化と拡張型 (Ind) が同程度であり、拡張型 (Lim)、Schroeder の順に低いという傾向があることが分かる。拡張型 (Lim) が拡張型 (Ind) や一般化 RIR モデルと比較して高い RMS を持っていた理由としては、 t_0 を固定したために、正確な近似を行うことができなかったことに由来する。全体を通して、拡張型 RIR モデルは拡張型 (Ind) のように時間領域における近似の精度を考えなければ、一般化 RIR モデルと同程度の近似が行え、正確なモデルであることが示された。

時間、変調周波数両領域の近似結果においては、拡張型 RIR モデルの RMS が従来の RIR モデルと比較して同程度かそれ以上に低い値を示した。このため、拡張型 RIR モデルは従来の RIR モデル群よりも実測 RIR を精度良く表現することが可能である。

表 3.1: SMILE2004 データベースにおける各実測 RIR の条件

No.	RIR No.	室の名称・条件	$T_{60}(s)$
1	301	MultiPurpose Hall 1 (with Reflector)	1.09
2	302	MultiPurpose Hall 1 (without Reflector)	0.80
3	303	MultiPurpose Hall 2 (with Reflector)	1.44
4	304	MultiPurpose Hall 2 (without Reflector)	1.04
5	305	MultiPurpose Hall 3 (with Reflector)	1.93
6	306	MultiPurpose Hall 3 (without Reflector)	1.35
7	307	MultiPurpose Hall 4 (with Reflector)	1.42
8	308	MultiPurpose Hall 4 (without Reflector)	1.54
9	319	MultiPurpose Hall 5 (14,000 m ³)	1.47
10	320	MultiPurpose Hall 6 (19,000 m ³)	2.16
11	309	Classical Concert Hall 1 (5,600 m ³)	2.35
12	310	Classical Concert Hall 1 ($d = 6$ m)	2.34
13	311	Classical Concert Hall 1 ($d = 11$ m)	2.35
14	312	Classical Concert Hall 1 ($d = 15$ m)	2.39
15	313	Classical Concert Hall 1 ($d = 19$ m)	2.38
16	314	Classical Concert Hall 2 (6,100 m ³)	1.14
17	315	Classical Concert Hall 3 (20,000 m ³)	1.96
18	316	Classical Concert Hall 4 (with Acoustic curtain)	1.92
19	317	Classical Concert Hall 4 (with Acoustic curtain)	2.55
20	323	Classical Concert Hall 5 (17, 000 m ³)	2.32
21	324	Classical Concert Hall 6 (1F front)	1.77
22	325	Classical Concert Hall 6 (2F side)	1.74
23	326	Classical Concert Hall 6 (3F)	1.69
24	201	Lecture room	1.36
25	318	Theater hall (3, 900 m ³)	0.85
26	401	Meeting room (130 m ³)	0.62
27	402	Lecture room (400 m ³)	1.12
28	403	Lecture room (2,400 m ³)	1.09
29	404	Lecture and Speech Hall (11,000 m ³)	1.54
30	405	Church 1 (1,200 m ³)	0.71
31	406	Church 2 (3,200 m ³)	1.30
32	407	Event hall 1 (28,000 m ³)	3.03
33	408	Event hall 2 (41,000 m ³)	3.62
34	409	Gym 1 (12,000 m ³)	2.82
35	410	Gym 2 (29,000 m ³)	1.70
36	411	Living room (110 m ³)	0.36
37	412	Movie theater (560 m ³)	0.38
38	413	Atrium (4,000 m ³)	1.57
39	414	Tunnel (5,900 m ³)	2.72
40	415	Concourse in train station	1.95
41	416	Lecture and Speech Hall 2 (1F front)	1.53
42	417	Lecture and Speech Hall 2 (1F center)	1.49
43	418	Lecture and Speech Hall 2 (1F balcony)	1.40

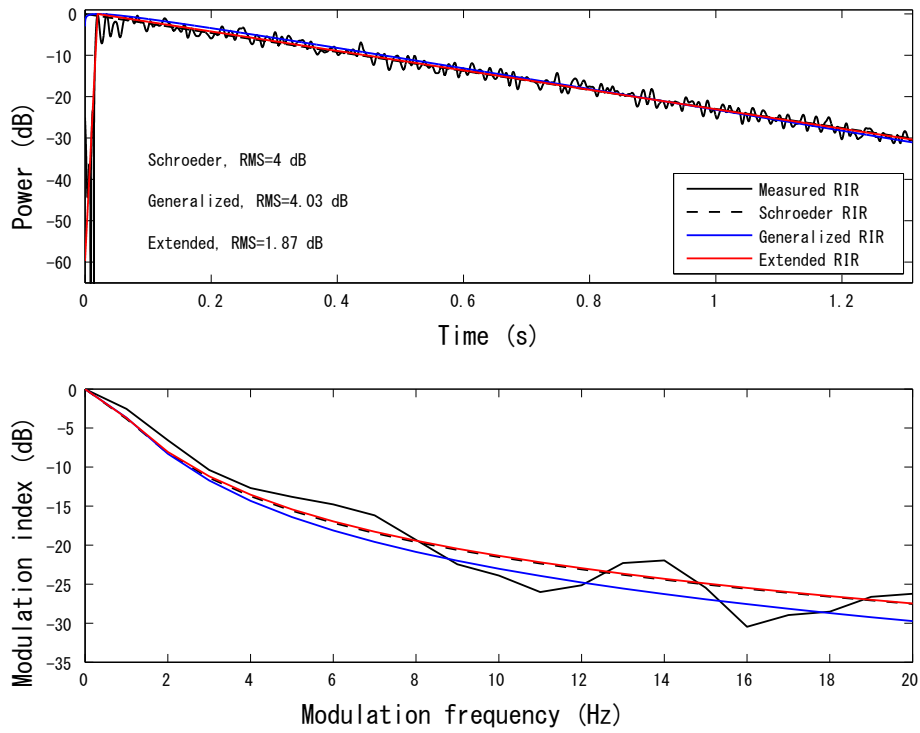


図 3.7: 近似結果の一例 (時間領域)

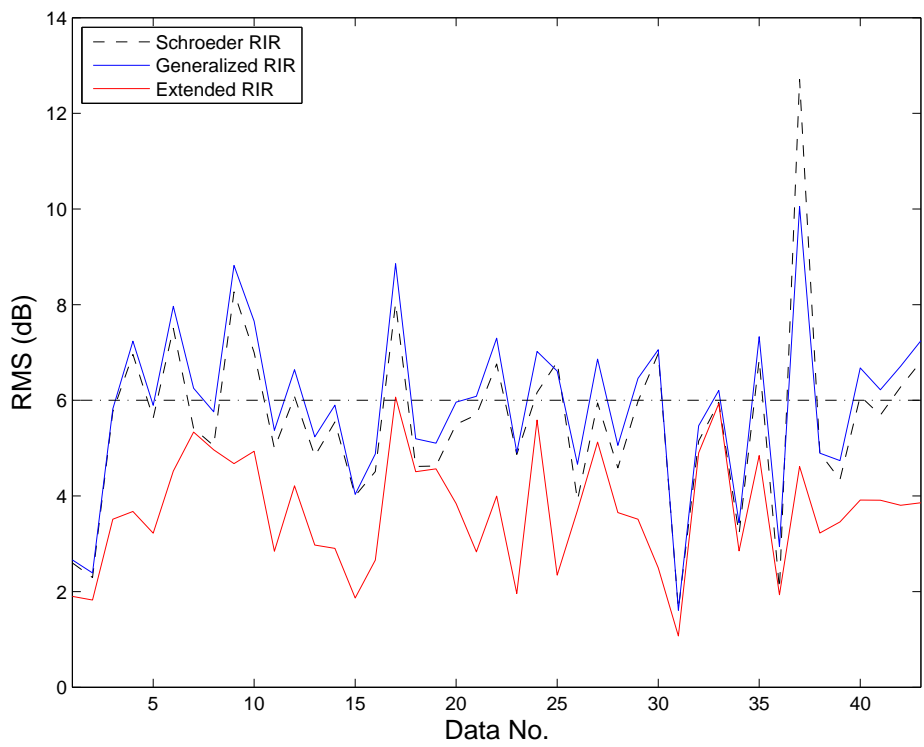


図 3.8: 近似結果の全 RMS (時間領域)

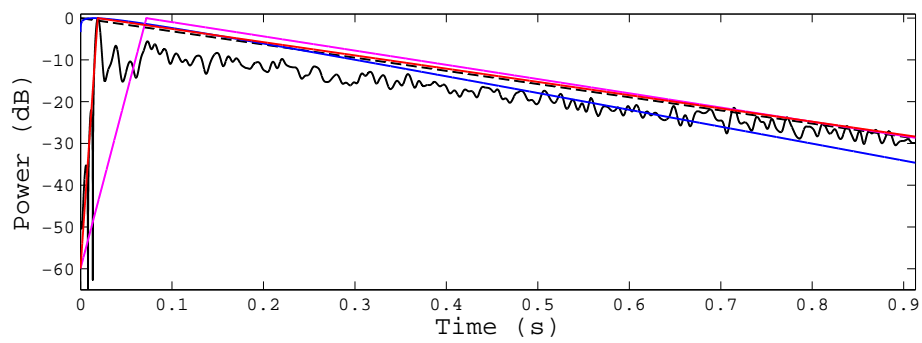
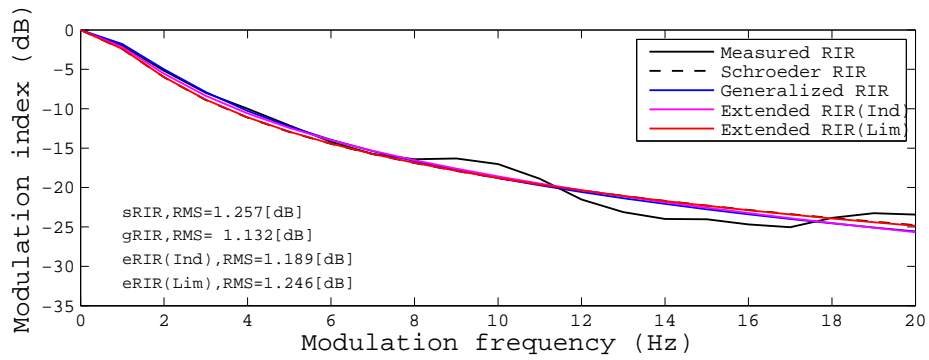


図 3.9: 近似結果の一例 (変調周波数領域)

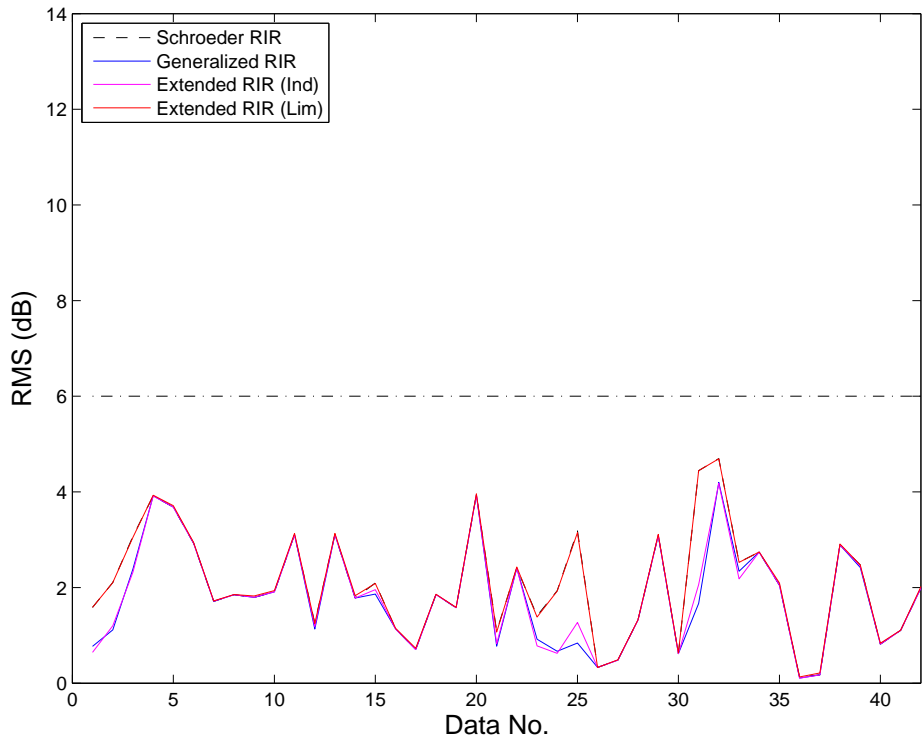


図 3.10: 近似結果の全 RMS (変調周波数領域)

実測 RIR への近似に対しては拡張型 RIR モデルが有効であることが明らかになったが、室内音響指標を正しく算出することが可能であるか明らかにされていない。よって、各モデルの近似結果から室内音響指標の算出を行い、どのモデルが正確に室内音響指標を算出することが可能であることを明らかにする。この結果を図 3.11 から図 3.16 にかけて示す。図では縦軸が各モデルからの算出結果、横軸が実測 RIR から算出された室内音響指標（真値）を表す。また、図中には各 RIR モデルの真値に対する相関係数（ R ）とモデル毎の回帰直線の勾配（Gradient）も同時に記載している。相関係数、勾配は両者とも 1 に近づけば近づくほど良い結果を示している。

時間領域における室内音響指標の推定結果（図 3.11, 図 3.13, 図 3.15）においては、すべての推定結果において強い相関（ $R = 0.7$ 以上）があることが明らかになった。また、勾配は T_{60} の推定においては各 RIR モデル間で同程度の傾きを持ち、 D_{50} や STI の推定においては拡張型 RIR モデルが従来の RIR モデル群に比べて、1 に近いということも明らかになった。特に D_{50} の推定結果においては、相関と勾配が従来の RIR モデル群よりも良い結果を示している。以上から、拡張型 RIR モデルは時間領域において、従来の RIR モデルと同程度かそれ以上に室内音響指標を算出できると示された。

変調周波数領域における室内音響指標の推定結果（図 3.12, 図 3.14, 図 3.16）においては、全 RIR モデルに対して D_{50} や STI に強い相関があることが明らかになった。一方で T_{60} の推定結果には強い相関がないことがわかった。これより、変調周波数領域においては時間領域の指標である、 T_{60} を検討することが困難であるということが改めて示された。一方で、 D_{50} は変調周波数領域においても非常に良い推定結果が示された。その結果において、拡張型（Ind）は正しく算出することが出来なかった。これは t_0 決めることができないため、RIR のパワー包絡線の形状が、過渡部が非常に長く減衰部が非常に短いような、実環境では起こり得ないような特性を表していた。このため、唯一低い相関係数を示している。この推定において、拡張型（Lim）の推定結果が非常に良い理由は、事前に t_0 を決定した結果、時間領域における形状を考慮することが可能であったため、非常に良い推定結果となっている。また、STI は変調周波数領域ではどの RIR モデルにおいても非常に良い相関を持つことが明らかになった。勾配は T_{60} の推定結果においては、ほぼ同程度に低いということが示された。また、 D_{50} や STI の推定結果においては 1 に近いということが示された。しかし、変調周波数領域における推定結果を俯瞰的にみると、相関や勾配が良くても時間領域に比べて、 D_{50} は過大に推定され、 T_{60} は過少に推定される傾向がある。その一方で STI は時間領域に比べてどのモデルであっても非常に良く推定されている。このため、STI は変調周波数領域で推定されるべきということが出来る。

時間、変調周波数両領域を総括すると、 T_{60} や D_{50} は時間領域で推定されるべきであり、STI は変調周波数領域で推定されるべきであるということが明らかになった。また、時間領域における D_{50} 推定の結果は拡張型 RIR モデルがよいということが明らかになった。また、同時に他の推定においても同程度によいと言うことが明らかになった。よって、拡張型 RIR モデルは時間、変調周波数両領域において同程度かそれ以上に室内音響指標の推定精度が高いということが言える。

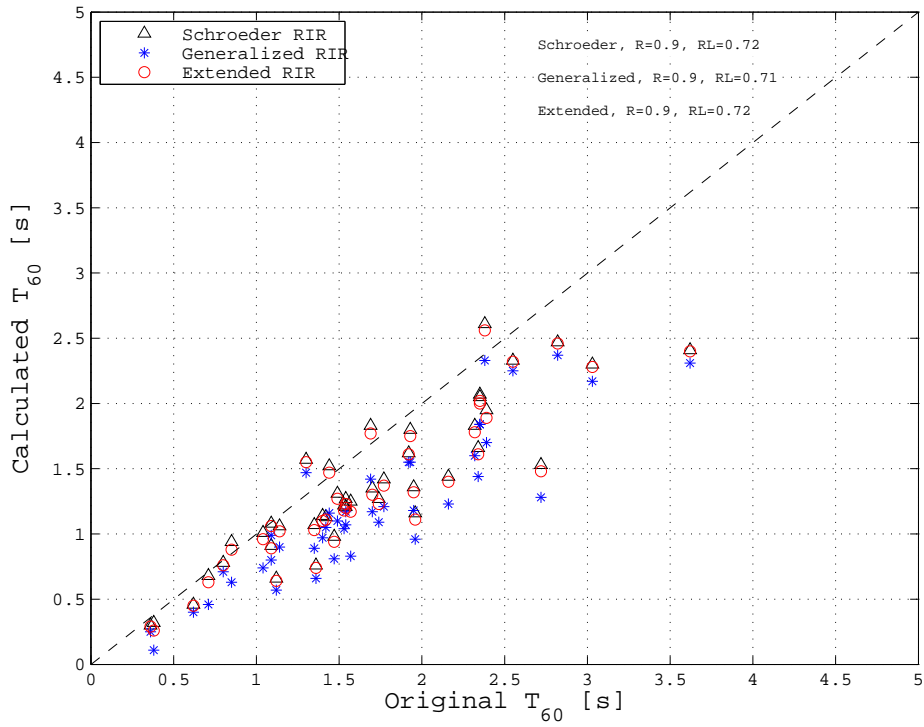


図 3.11: 近似結果から算出された T_{60} (時間領域)

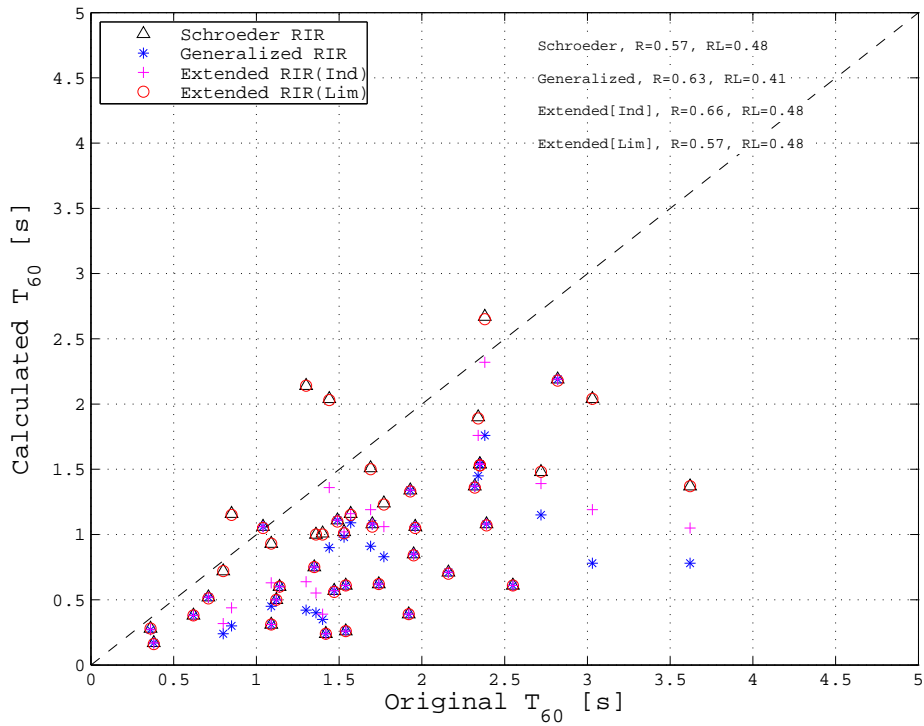


図 3.12: 近似結果から算出された T_{60} (変調周波数領域)

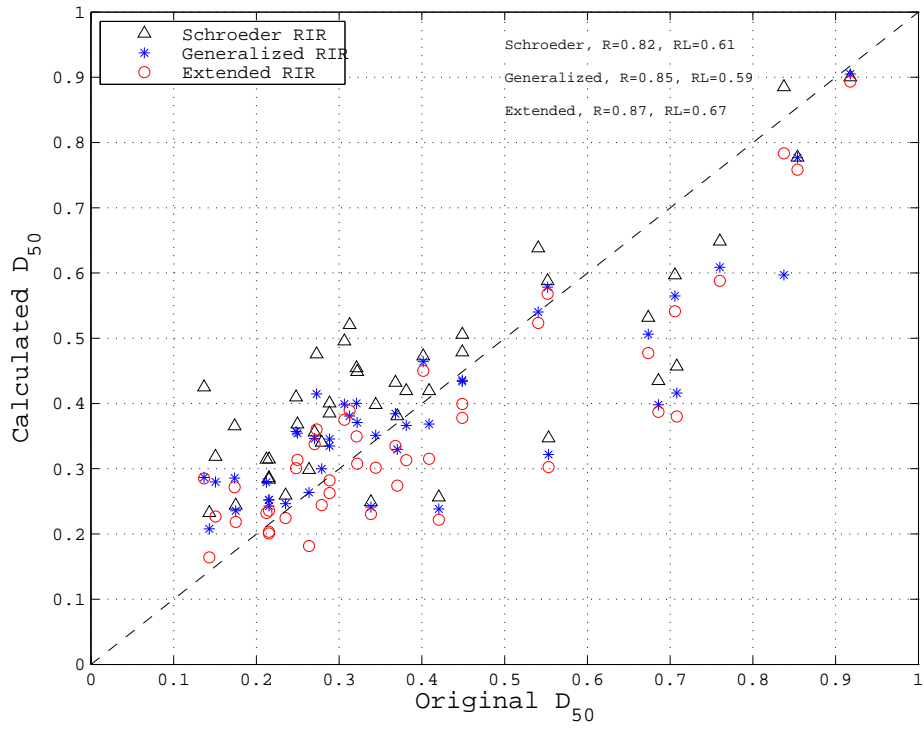


図 3.13: 近似結果から算出された D_{50} (時間領域)

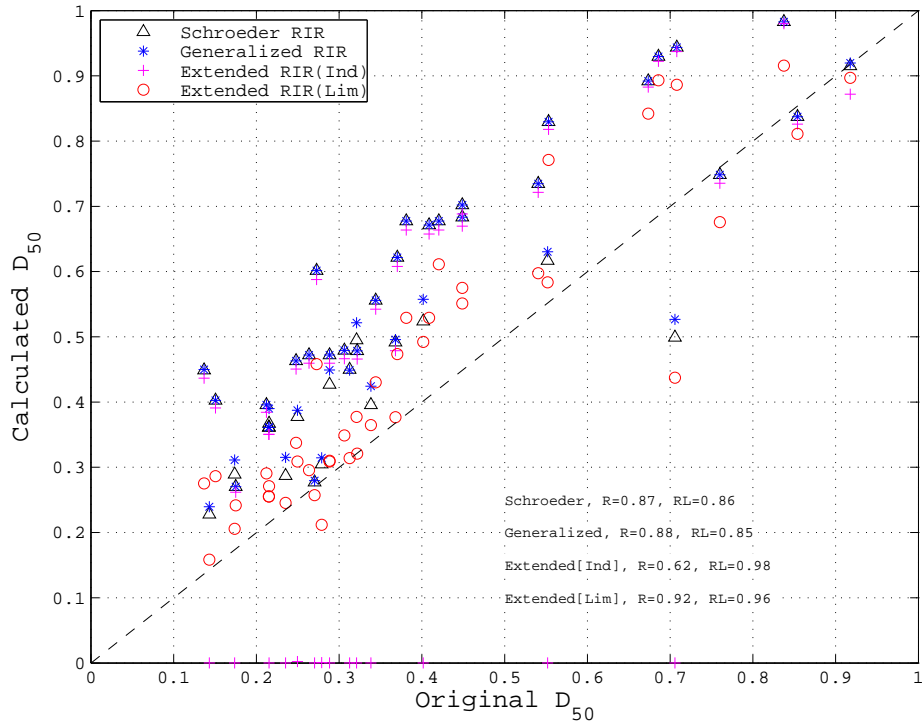


図 3.14: 近似結果から算出された D_{50} (変調周波数領域)

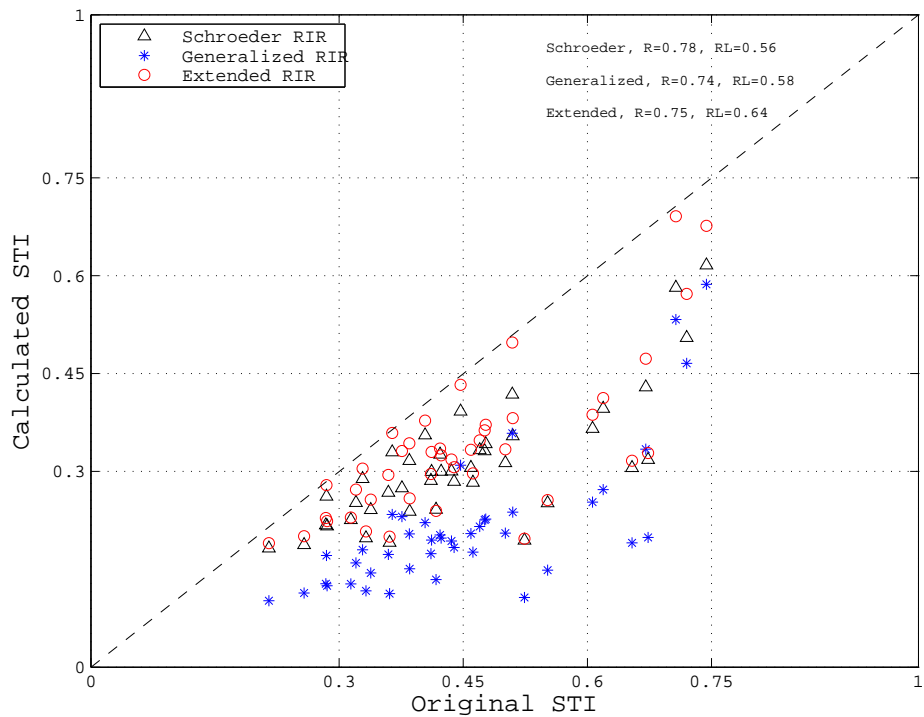


図 3.15: 近似結果から算出された STI (時間領域)

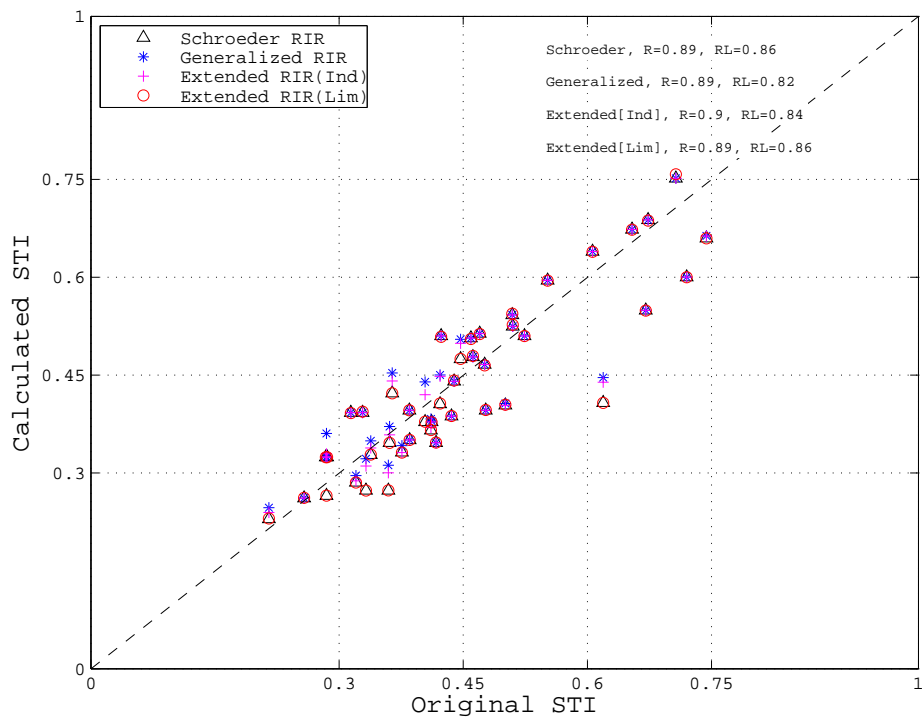


図 3.16: 近似結果から算出された STI (変調周波数領域)

表 3.2: 近似した際の各 RIR モデルのパラメータ

No.	Ext.		Gen.		Sch.	No.	Ext.		Gen.		Sch.
	T_h	T_t	b	T_R	T_R		T_h	T_t	b	T_R	T_R
1	0.008	1.06	1.04	0.99	1.08	2	0.012	0.76	1.05	0.71	0.78
3	0.020	1.47	1.19	1.16	1.52	4	0.020	0.96	1.25	0.74	1.01
5	0.020	1.75	1.09	1.55	1.80	6	0.018	1.03	1.14	0.89	1.07
7	0.022	1.11	1.07	1.05	1.13	8	0.014	1.20	1.05	1.17	1.21
9	0.016	0.94	1.16	0.81	0.98	10	0.018	1.40	1.11	1.23	1.44
11	0.020	2.02	1.07	1.84	2.07	12	0.020	1.61	1.09	1.44	1.66
13	0.022	2.00	1.07	1.84	2.05	14	0.028	1.89	1.08	1.70	1.95
15	0.020	2.56	1.06	2.33	2.61	16	0.020	1.02	1.11	0.90	1.06
17	0.024	1.11	1.16	0.96	1.16	18	0.014	1.61	1.04	1.55	1.62
19	0.014	2.32	1.03	2.25	2.33	20	0.020	1.78	1.08	1.60	1.83
21	0.018	1.37	1.11	1.21	1.42	22	0.016	1.23	1.11	1.09	1.27
23	0.018	1.77	1.17	1.42	1.83	24	0.012	0.74	1.10	0.66	0.76
25	0.022	0.88	1.37	0.63	0.94	26	0.010	0.45	1.08	0.40	0.46
27	0.014	0.64	1.12	0.57	0.66	28	0.014	0.89	1.08	0.80	0.91
29	0.020	1.23	1.12	1.07	1.27	30	0.020	0.63	1.35	0.46	0.68
31	0.010	1.55	1.03	1.47	1.57	32	0.014	2.28	1.03	2.17	2.30
33	0.012	2.40	1.02	2.31	2.41	34	0.010	2.46	1.02	2.37	2.47
35	0.026	1.30	1.11	1.17	1.35	36	0.018	0.29	1.12	0.25	0.30
37	0.024	0.26	3.50	0.11	0.32	38	0.048	1.17	1.35	0.83	1.25
39	0.022	1.48	1.07	1.28	1.53	40	0.018	1.32	1.10	1.18	1.36
41	0.020	1.18	1.11	1.04	1.22	42	0.020	1.27	1.12	1.10	1.31
43	0.016	1.10	1.12	0.97	1.14						

3.6 最適化されたパラメータ

前節では実測 RIR へ各 RIR モデルの近似を行った。4.4 章において、拡張型 RIR モデルを実測 RIR へ近似した結果を用いて評価を行うため、本節でまとめる。同時に Schroeder の RIR モデルと一般化 RIR モデルの近似結果についてもまとめる。各 RIR モデルを近似した際に最適であったパラメータを表 3.6 に示す。表の最上部のヘッダーには RIR モデルの名前が記載されている。Ext. は拡張型、Gen. は一般化、Sch は Schroeder の RIR モデルを示す。No. は実測 RIR と対応しており、表 3.5 の No. と対応している。また、 T_h , T_t , b , T_R は最適な近似が行われた際のパラメータを示す。

3.7 まとめ

本章では従来の RIR モデル群の問題をまとめ、その欠点を克服することが出来る拡張型 RIR モデルを提案した。このモデルが従来の RIR モデル群に対して正確であるか議論を行うために、実測 RIR への近似を行い、その近似した結果について議論した。この結

果，拡張型 RIR モデルは実測 RIR に対して従来のモデル群と同等以上の近似が行えることが明らかになった．その後，近似した結果を用いて，拡張型 RIR モデルが従来のモデル群と比較して正確に室内音響指標を算出できるか検討を行った．この結果，室内音響指標の算出においても，拡張型 RIR モデルは従来の RIR モデル群以上に実測 RIR の算出結果に近い値が算出されるという結果が示された．以上より，拡張型 RIR モデルは従来のモデル群よりも正確なモデルであるということが示された．

第4章 提案モデルのパラメータ推定法

前章においては、従来のモデル群が実測 RIR を正確に表現できないという問題を解決するために、拡張型 RIR モデルを提案し、その正確さについて議論を行った。この結果から、拡張型 RIR モデルは従来のモデル群に比べて正確なモデルであるということが明らかになった。この結果を踏まえて、本章では従来の時間領域におけるパラメータ推定法に関して説明する。その後、そのパラメータ推定法における問題とその解決法や拡張型 RIR モデルへの適用に対して議論を行い、パラメータの推定の可否や推定の精度に関して議論を行う。

4.1 拡張型室内インパルス応答モデルのパラメータ推定

Unoki et al. は、時間領域における RIR モデルのパラメータ推定法には MTF の概念を用いたパワーエンベロープ逆フィルタ法を用いた [10]。この方法は残響パワー包絡線 ($e_y^2(t)$) に付加されている残響を回復できるような逆特性を畳み込むことで実現される [16]。またこの関係は、式 (2.8) を z 領域で示した場合、以下のように表すことができる。

$$E_x(x) = \frac{E_y(z)}{E_h(z)} \quad (4.1)$$

この逆特性はフィルタ処理を行うことで実現される。Unoki et al. が提案した方法 [10] では回復に用いたフィルタとして、Schroeder の RIR モデルの IIR 逆フィルタを用いていた。まず、このフィルタの順フィルタを次式に表す。

$$E_h(z) = \frac{a^2}{1 - \exp\left(\frac{-13.8f_s}{T_R}\right) z^{-1}} \quad (4.2)$$

ここで、 a は振幅項、 f_s はサンプリング周波数である。 a は次式のように表される。

$$a = \sqrt{1 / \int_0^T \exp\left(\frac{-13.8t}{T_R}\right) dt} \quad (4.3)$$

このフィルタは最小位相特性をもつため、分子と分母を入れ替えることによって、逆フィルタを構成することが可能である。逆フィルタを次式に表す。

$$E_h^{-1}(z) = \frac{1 - \exp\left(\frac{-13.8f_s}{T_R}\right) z^{-1}}{a^2} \quad (4.4)$$

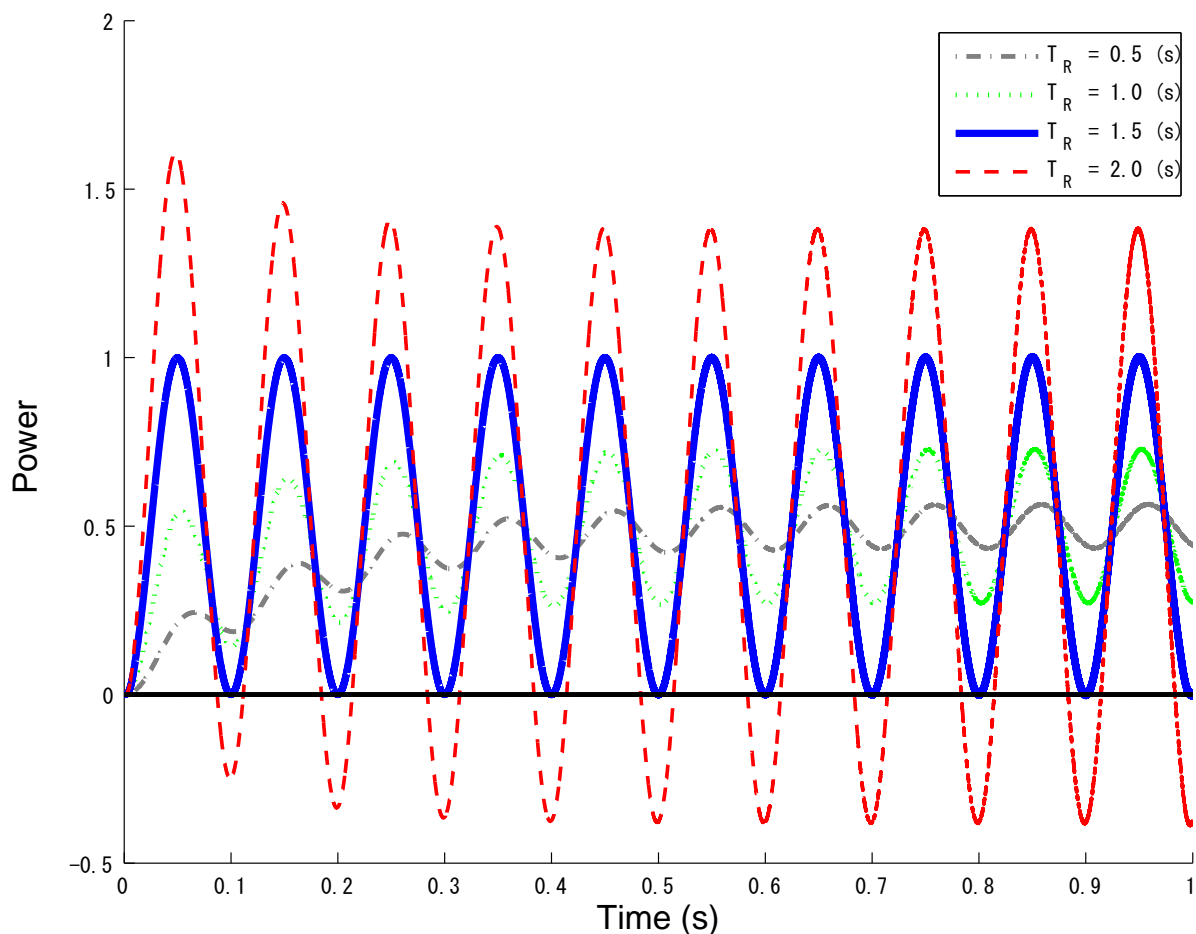


図 4.1: パワーエンベロープ逆フィルタ法の概要図

この逆フィルタのパラメータ T_R を徐々に変化させていくことで、適切な逆特性を求める。逆特性を決定する際には、パワー包絡線は負値を取らないという点に着目し、次式のような制約条件を提案した。

$$\{\hat{T}_R\} = \arg \min_{0 \leq T_R \leq 4.0s} \left\{ \int_0^T \min(\hat{e}_{x,T_R}^2(t), 0) dt \right\} \quad (4.5)$$

ここで、 \hat{T}_R は推定されたパラメータ T_R であり、 $\hat{e}_{x,T_R}^2(t)$ は回復パワー包絡線である。また、 T_R は本制約条件においては 0–4 s であるとする。この制約条件は T_R を変化させて行く過程で、 $\hat{e}_{x,T_R}^2(t)$ が負値を取ったその直前の \hat{T}_R を推定結果とする。この制約条件を用いた \hat{T}_R の推定過程を図 4.1 に示す。図 4.1 は $T_R = 1.5$ s の残響が付与されている。また、凡例には残響回復に用いた T_R の値が示されている。残響に用いられたパラメータよりも残響回復に用いられたパラメータが過小である場合、 $\hat{e}_{x,T_R}^2(t)$ の変調度は 1 よりも小さいことが分かる（灰色の一点鎖線、緑の点線）。逆に、残響に用いられたパラメータよりも残響回復に用いられたパラメータが過大である場合、 $\hat{e}_{x,T_R}^2(t)$ の変調度は 1 よりも大きいこ

とが分かる（赤の点線）．残響と残響回復に用いられたパラメータが同じである場合，変調度が1になり， $\hat{e}_{x,T_R}^2(t)$ から負値が算出されていないことが分かる（青の実線）．このとき，推定処理が終了する．そしてこのとき算出されたパラメータから室内音響指標 T_{60} が推定される．

この方法では Schroeder の RIR モデルを用いて推定が行われていた．Schroeder の RIR モデルの変数は1つ (T_R) である．よって，パワーエンベロープ逆フィルタ法は1変数の推定のみに対応している．また，信号の変調度が1以下かつ0以上である必要がある．拡張型 RIR モデルは3変数 (T_h, T_t, t_0) を持つため，パワーエンベロープ逆フィルタ法を適用することはできない．また，変調度に仮定があるため，実環境に存在する，変調度が1ではない信号に対して適応することが困難である．この問題を解決するために，一般化 RIR モデルを用いたパワーエンベロープ逆フィルタ法を実現した際 [19] と同様に，制約条件を提案することで3変数を同時，かつ，変調度に依らないパラメータ推定法を提案する．

4.2 推定方法の前提条件

変調度に着目せず，複数パラメータを同時に推定可能なパラメータ推定法のためには，信号の振幅特性に着目しない制約条件が必要である．この制約条件を提案するために，残響がない周期的な信号の形状に着目した．図 4.2 には残響がない sin 波のパワー包絡線と本提案法において着目する特性について示す．また，図 4.3 に残響が付加された sin 波パワー包絡線とその特徴について示す．残響がない sin 波のパワー包絡線（図 4.2 黒の実線）は周期信号であるため，0 から 1 の間において値の増減を繰り返している．この信号から最大値（赤い丸）と最小値（青い丸）を抜き出すと，周期的な信号であるが故，全く同値の最大値や最小値を複数点得ることができる．この最大値群や最小値群に対して各々回帰直線（最大値群：赤い実線，最小値群：青い実線）を引くと，傾き 0 の直線が得られることがわかる．この直線を得る処理は信号の上側包絡線と下側包絡線を得ることと同義である．ここで，sin 波に残響が付加された信号（図 4.3 黒の破線）に対して上側包絡線と下側包絡線を取得すると傾きが 0 になっていないことがわかる．以上から，周期的な信号の上側包絡線と下側包絡線を取得し，この傾きが 0 になった場合，残響が付加されていない信号であるということがわかる．これらの傾きは変調度に関する制約を受けることはないため，従来法とは異なり変調度には一切依存していない．また，適切な逆特性を持たなければ上側包絡線の傾きと下側包絡線の傾きが同時に 0，もしくは，同時に限りなく 0 へ近づくことはないと考えられるため，複数パラメータを同時に推定することが可能であると考えられる．よって，従来法が問題としていた部分を解決することが可能である．これらを踏まえた制約条件を以下に示す．

$$\{\hat{T}_h, \hat{T}_t\} = \arg \min \left\{ \left| \frac{d\hat{e}_{y,\text{upr}}^2(t)}{dt} \right| + \left| \frac{d\hat{e}_{y,\text{btm}}^2(t)}{dt} \right| \right\} \quad (4.6)$$

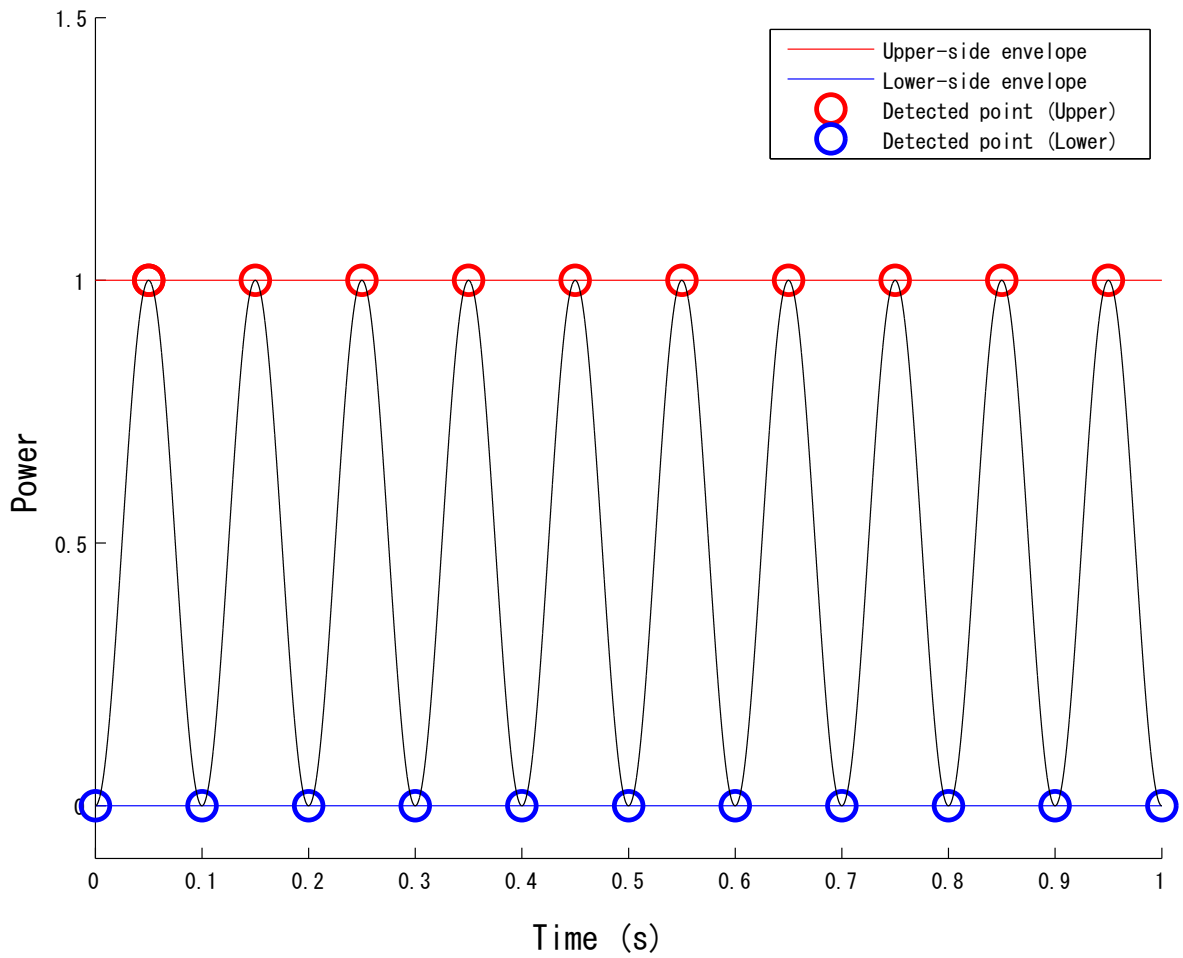


図 4.2: 無残響の sin 波パワー包絡線の上側包絡線と下側包絡線

$\frac{d\hat{e}_{y,\text{upr}}^2(t)}{dt}$ は上側包絡線の傾きを示し, $\frac{d\hat{e}_{y,\text{btm}}^2(t)}{dt}$ は下側包絡線の傾きを示す. これら傾きの合計が 0 になる. もしくは, 0 に限りなく近づいた際の \hat{T}_h , \hat{T}_t の組が解となる.

4.3 パラメータ推定法

前章で説明した制約条件を用いたパワーエンベロープ逆フィルタ法に関して, その原理を例を交えて説明する. パワーエンベロープ逆フィルタ法で用いる拡張型 RIR モデルの IIR フィルタは以下のように導出される.

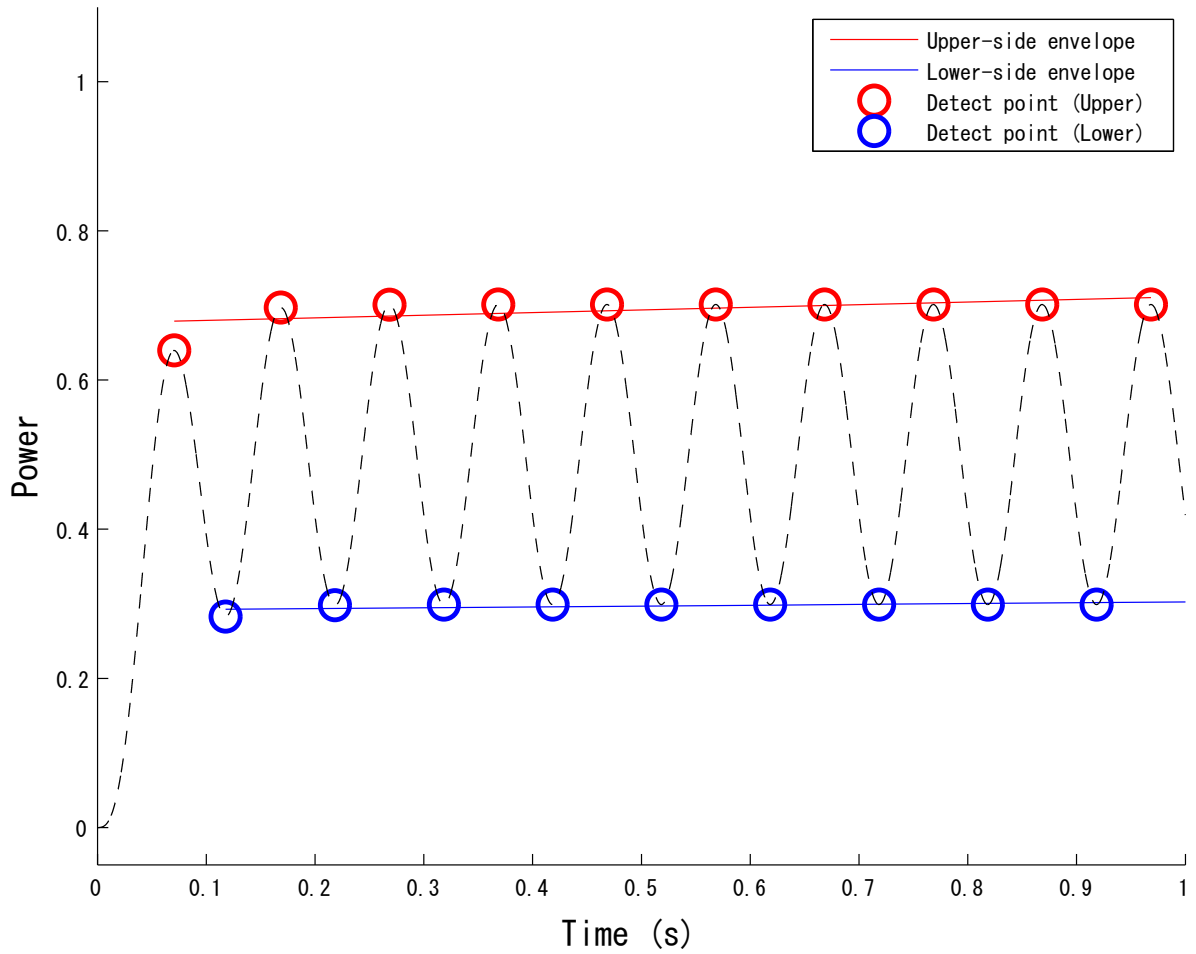


図 4.3: 残響が付加された sin 波パワー包絡線の上側包絡線と下側包絡線

$$\alpha = \exp\left(\frac{-13.8}{T_t f_s}\right) \quad (4.7)$$

$$\beta = \exp\left(\frac{13.8}{T_h f_s}\right) \quad (4.8)$$

$$E_h(z) = \frac{(\alpha - \beta)z^{-(n_0+1)}}{(1 - \alpha z^{-1})(1 - \beta z^{-1})} \quad (4.9)$$

$$E_h^{-1}(z) = \frac{(1 - \alpha z^{-1})(1 - \beta z^{-1})}{(\alpha - \beta)z^{-(n_0+1)}} \quad (4.10)$$

$$n_0 = t_0/f_s \quad (4.11)$$

ここで、 n_0 は離散時間上における時間シフト (t_0) を示すパラメータである。

まず、拡張型 RIR モデルの性質について検討を行う。拡張型 RIR モデルは図 4.4 に示されるように t_0 分だけ時間シフトされている。これは、過渡部を示す部分である T_h を全て

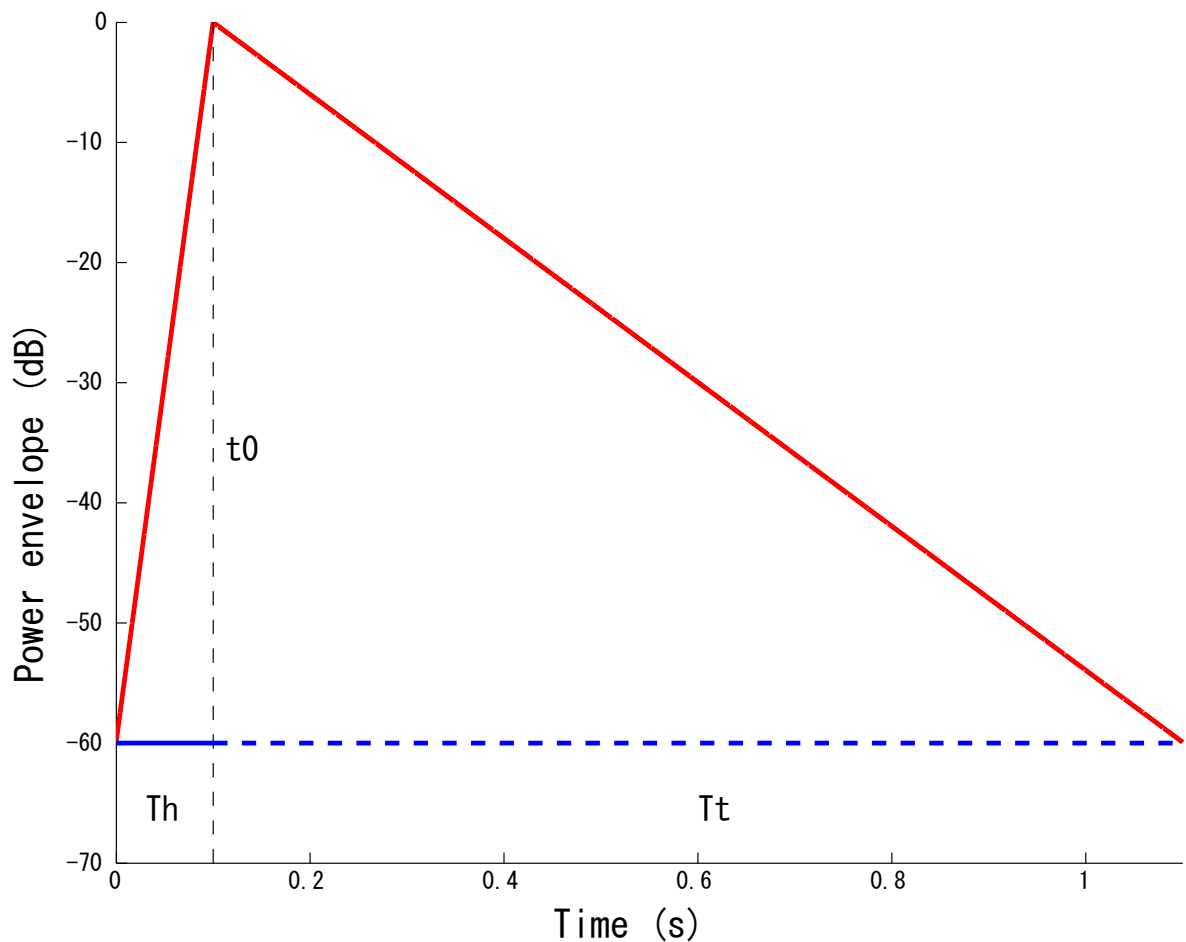


図 4.4: 拡張型 RIR モデルの性質

シフトすることに他ならない．よって， $T_h = t_0$ であると仮定することが可能である．この仮定から T_h と T_t という 2 つのパラメータ推定とすることが可能である．

次に，拡張型 RIR モデルを用いた際のパワーエンベロープ逆フィルタ法の原理を説明する．まず，図 4.5(a) に変調周波数 $f_m = 10$ Hz である原信号のパワー包絡線 $e_x^2(t) = \sin(2\pi f_m t)$ を示す．図 4.5(b) では式 (2.8) に基づき， $e_x^2(t)$ に $T_h = 1.0$ ， $T_t = 1.0$ の残響インパルス応答のパワー包絡線 $e_h^2(t)$ を畳み込み，出力信号のパワー包絡線 $e_y^2(t)$ が示されている．このとき，原信号のパワー包絡線に比べて変調度が減少していることが分かる．図 4.5(c)，(e)，(g) では，それぞれ， $T_h = 0.1$ ， $T_t = 1.0$ ， $T_h = 1.0$ ， $T_t = 1.0$ ， $T_h = 1.7$ ， $T_t = 1.0$ の回復パワー包絡線 $\hat{e}_x^2(t)$ を示している．この図から， T_h 変化させることによってパワー包絡線の時間 2 秒方向の傾きに影響があることが分かる．また，4.5(d)，(f)，(h) では，それぞれ， $T_h = 1.0$ ， $T_t = 0.1$ ， $T_h = 1.0$ ， $T_t = 1.0$ ， $T_h = 1.0$ ， $T_t = 1.7$ の回復パワー包絡線 $\hat{e}_x^2(t)$ を示している．この図から， T_t 変化させることによってパワー包絡線の時間 0 秒方向の傾きに影響があることが分かる．このとき，残響付加に用いたパラメータ

の値と残響回復に用いたパラメータが同値となった場合，図 4.5(e)，(f) から傾きが 0 である。

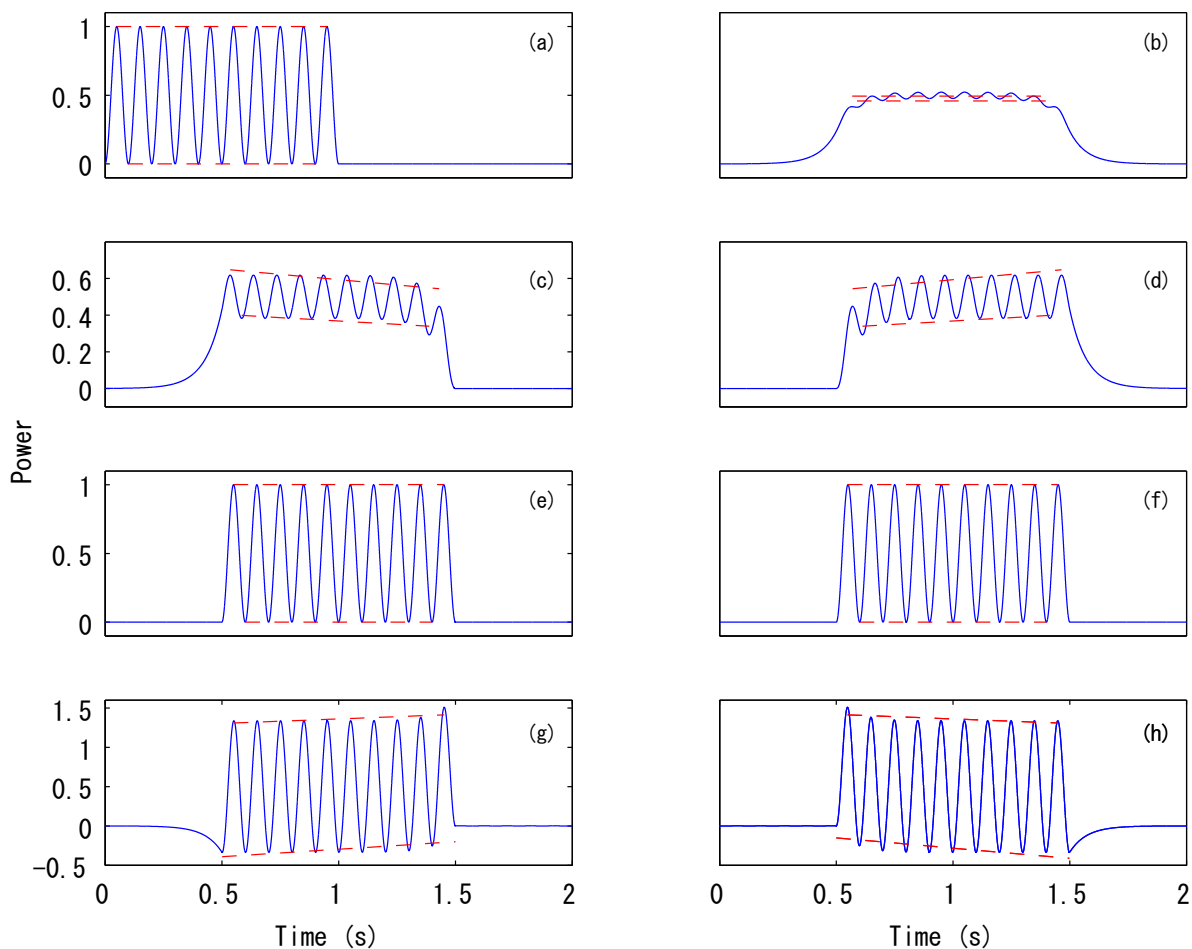


図 4.5: 拡張型 RIR を用いたパワーエンベロープ逆フィルタ法の原理. (a) 原信号, (b) $T_h = T_t = 1.0$ の残響が付加された信号, (c) · (e) · (g) $T_t = 1.0$ と固定し, T_h をそれぞれ過少, 適切, 過大な値にした場合の回復信号, (d) · (f) · (h) , $T_h = 1.0$ と固定し, T_t をそれぞれ過少, 適切, 過大な値にした場合の回復信号

4.4 評価

前節で提案した原理に基づき，上側包絡線と下側包絡線を用いた制約条件を適用したパラメータ推定法の評価を行う．評価を行うにあたって，提案した制約条件を各 RIR モデルのパラメータ推定法に用いて，パラメータ推定が行えるか評価する．その後，実測 RIR に対して拡張型 RIR モデルを用いたパワーエンベロープ逆フィルタ法を適用し，パラメータ推定が正確に行えるか評価する．

4.4.1 評価方法

評価に用いる信号は AM 信号のパワー包絡線を想定するため $e_x^2(t) = \sin(2\pi f_m t)$ を用いる。このときの変調周波数 (f_m) は 5, 10 Hz である。試験信号を図 4.6 に示す。また、評価は 2 ステップに分けて行う。評価を分けて行う理由は、シミュレーション上と実環境、両方の議論を行うためである。評価の内容としては 2 つあり、

- 変調度によらない制約条件を用いてどの RIR モデルに対してもシミュレーション上でパラメータ推定が可能であるか
- 実環境におけるパラメータ推定において、拡張型 RIR モデルに対してこの制約条件を適用できるか

である。この前者を評価項目 1、後者を評価項目 2 として推定を行う。評価項目 1 では試験信号に対して各 RIR モデルを畳み込んだ後、そのモデルを用いたパワーエンベロップ逆フィルタ法を行い、残響付加したパラメータと推定したパラメータが一致するか確認する。以下に評価項目 1 における評価の内容を示す。

1. 残響とパワーエンベロップ逆フィルタ法に Schroeder の RIR モデルを用いた場合
2. 残響とパワーエンベロップ逆フィルタ法に一般化 RIR モデルを用いた場合
3. 残響とパワーエンベロップ逆フィルタ法に拡張型 RIR モデルを用いた場合

評価項目 2 においては実測 RIR を残響としたとき、拡張型 RIR モデルのパワーエンベロップ逆フィルタ法を用いて適切なパラメータ推定が行えるか評価する。ここで、拡張型 RIR モデルのパワーエンベロップ逆フィルタ法のみを取り扱う理由は 3 章で示されたように、実測 RIR を正確に表現できるモデルであるため、従来法と比較して精度良く推定できると考えられるためである。以下に評価項目 2 における評価の内容を示す。

- 残響を実測 RIR、パワーエンベロップ逆フィルタ法に拡張型 RIR モデルを用いた場合

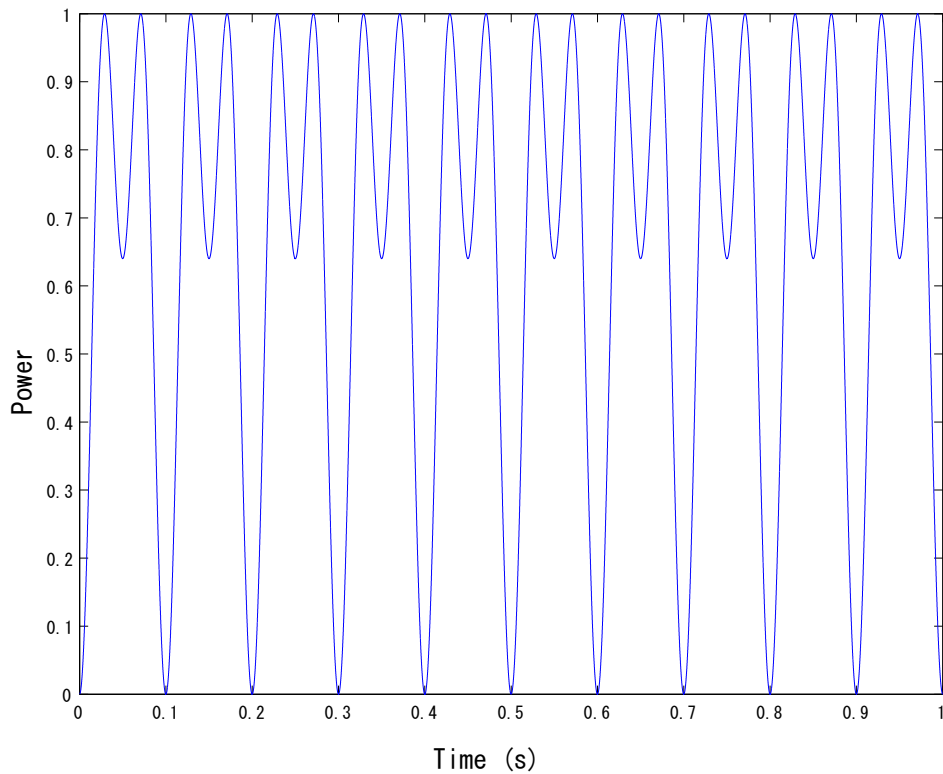


図 4.6: 試験信号のパワー包絡線 ($e_x^2(t)$) : 変調周波数 5, 10 Hz

4.4.2 残響とパワーエンベロープ逆フィルタ法に Schroeder の統計的室内インパルス応答モデルを用いた場合

この評価における残響とパワエンベロープ逆フィルタ法においては Schroeder の RIR モデルを用いる。また、このときのパラメータは $T_R = \{0.1, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0\}$ である。逆特性を推定する際には $\hat{T}_R = \{0.05 - 2.5\}$ という範囲を用いて 0.05 刻みで変化させた。よって、合計 5 件の評価を行った。推定の結果を図 4.7 に示す。縦軸は推定された T_R を示し、横軸は残響に使われた T_R を示す。傾き 1 の破線（基準線）は真値と推定値が一致する値を示している。この結果、全ての条件において正確にパラメータを推定できることが明らかになった。このため、新しく提案した変調度に依らない制約条件を用いて原理的に正しく推定できることが示された。

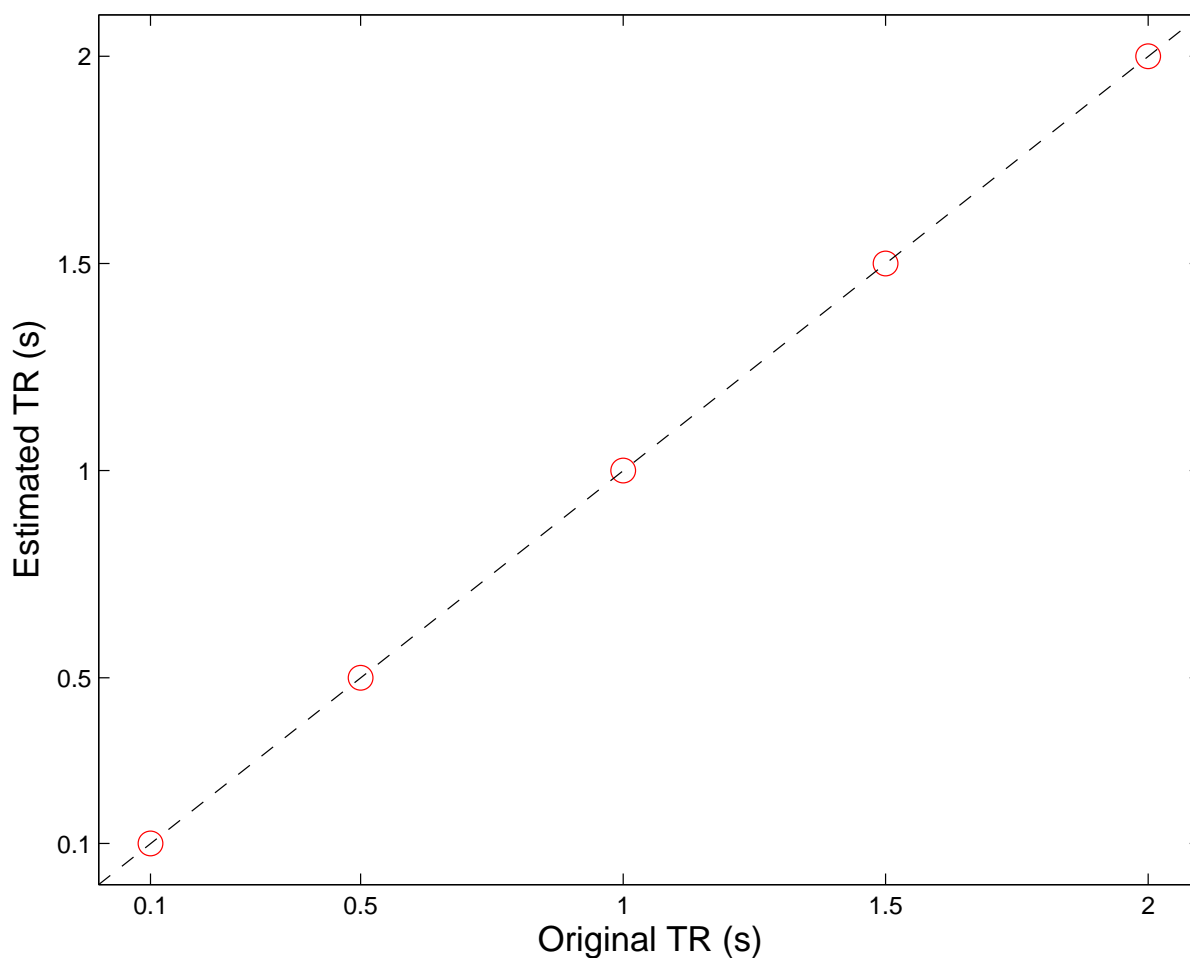


図 4.7: 評価項目 1-1 の推定結果

4.4.3 残響とパワーエンベロープ逆フィルタ法に一般化室内インパルス応答モデルを用いた場合

この評価における残響とパワーエンベロープ逆フィルタ法においては一般化 RIR モデルを用いる。また、このときのパラメータは $T_R = \{0.1, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0\}$ である。また、 $b = \{1, 1.5\}$ である。逆特性を推定する際には $\hat{T}_R = \{0.05 - 2.5\}$ という範囲を用いて 0.05 刻みで変化させた。また、 $\hat{b} = \{1, 1.5\}$ の 2 通り用いた。よって、合計 10 件の評価を行った。 b が 2 条件のみで評価を行った理由は、一般化 RIR モデルの IIR をフィルタが取りうる b の値が 0.5 刻みであることに起因する。推定の結果を図 4.8 に示す。図の見方は前節と同様である。この結果、全ての条件において正確にパラメータを推定できることが明らかになった。このため、新しく提案した変調度に依らない制約条件を用いて原理的に正しく推定できることが示された。

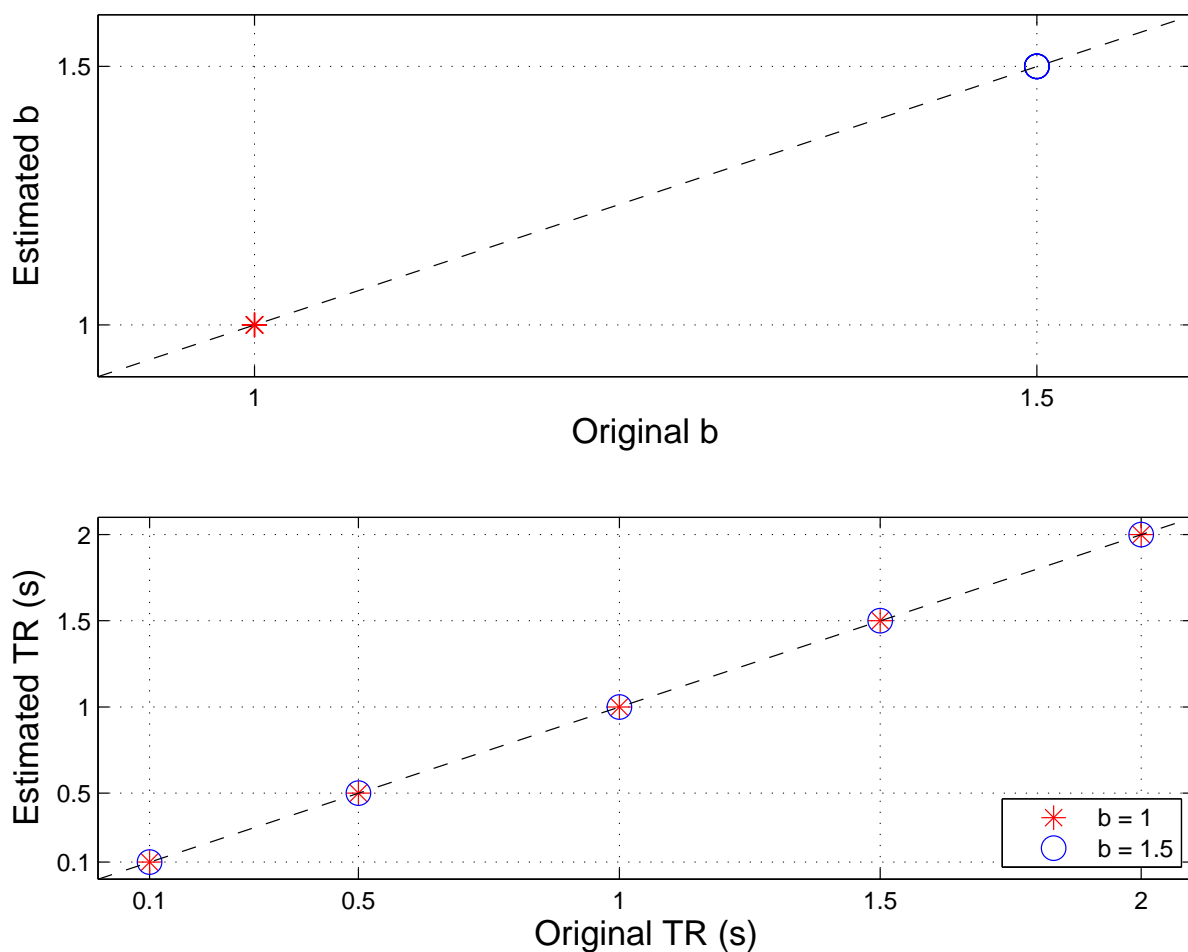


図 4.8: 評価項目 1-2 の推定結果

4.4.4 残響とパワーエンベロープ逆フィルタ法に拡張型室内インパルス応答モデルを用いた場合

この評価における残響とパワーエンベロープ逆フィルタ法においては拡張型 RIR モデルを用いる。また、このとき、パラメータは $T_h = \{0.002, 0.004, 0.007, 0.02, 0.04, 0.07\}$, $T_h = \{0.1, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0\}$ であり、合計 30 条件である。逆特性を推定する際には $T_h = \{0.001 - 0.1\}$ という範囲を用いて 0.001 刻み, $T_t = 0.05 - 2.5$ という範囲を用いて 0.05 刻みで変化させた。推定の結果を図 4.9 に示す。図の見方は前節と同様である。この結果、全ての条件において正確にパラメータを推定できることが明らかになった。このため、新しく提案した変調度に依らない制約条件を用いて原理的に正しく推定できることが示された。

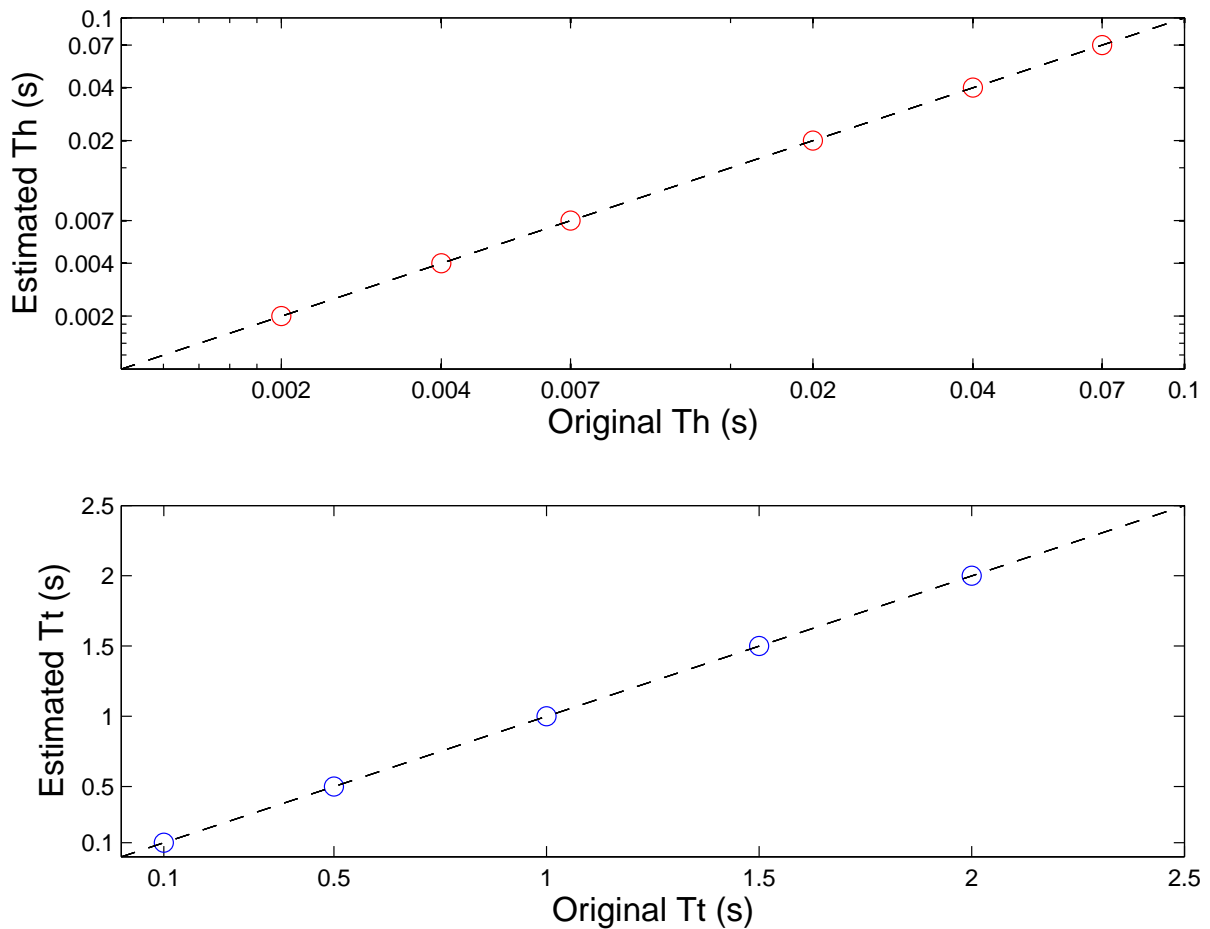


図 4.9: 評価項目 1-3 の推定結果

4.4.5 残響を実測された RIR, パワーエンベロープ逆フィルタ法に拡張型 RIR モデルを用いた場合

この評価における残響には SMILE2004 データベースの実測された 43 件の RIR[30] を用いる。また、パワーエンベロープ逆フィルタ法には拡張型 RIR モデルを用いる。このデータベースに関する情報は表 3.5 に示している。逆特性を推定する際には $T_h = \{0.001 - 0.1\}$ という範囲を用いて 0.001 刻み、 $T_t = \{0.05 - 2.5\}$ という範囲を用いて 0.05 刻みで変化させた。この推定における真値 (Original T_h , Original T_t) は 3.6 章の表 3.6 の T_h , T_t を用いた。推定の結果を図 4.10 に示す。図の見方は前節と同様である。この推定結果を図 4.10 に示す。図は上部を T_h の推定結果, 下部を T_t の推定結果としている。縦軸, 横軸に関しては前節と同様である。

これらの結果から, T_t に関しては基準線付近に分布が集中しているため, 推定が可能であることが示されている。しかし, T_h は基準線に集まらなかった。また, 各点の分散に傾向も存在しなかった。このため, 推定結果には誤差が多く含まれるという結果が示さ

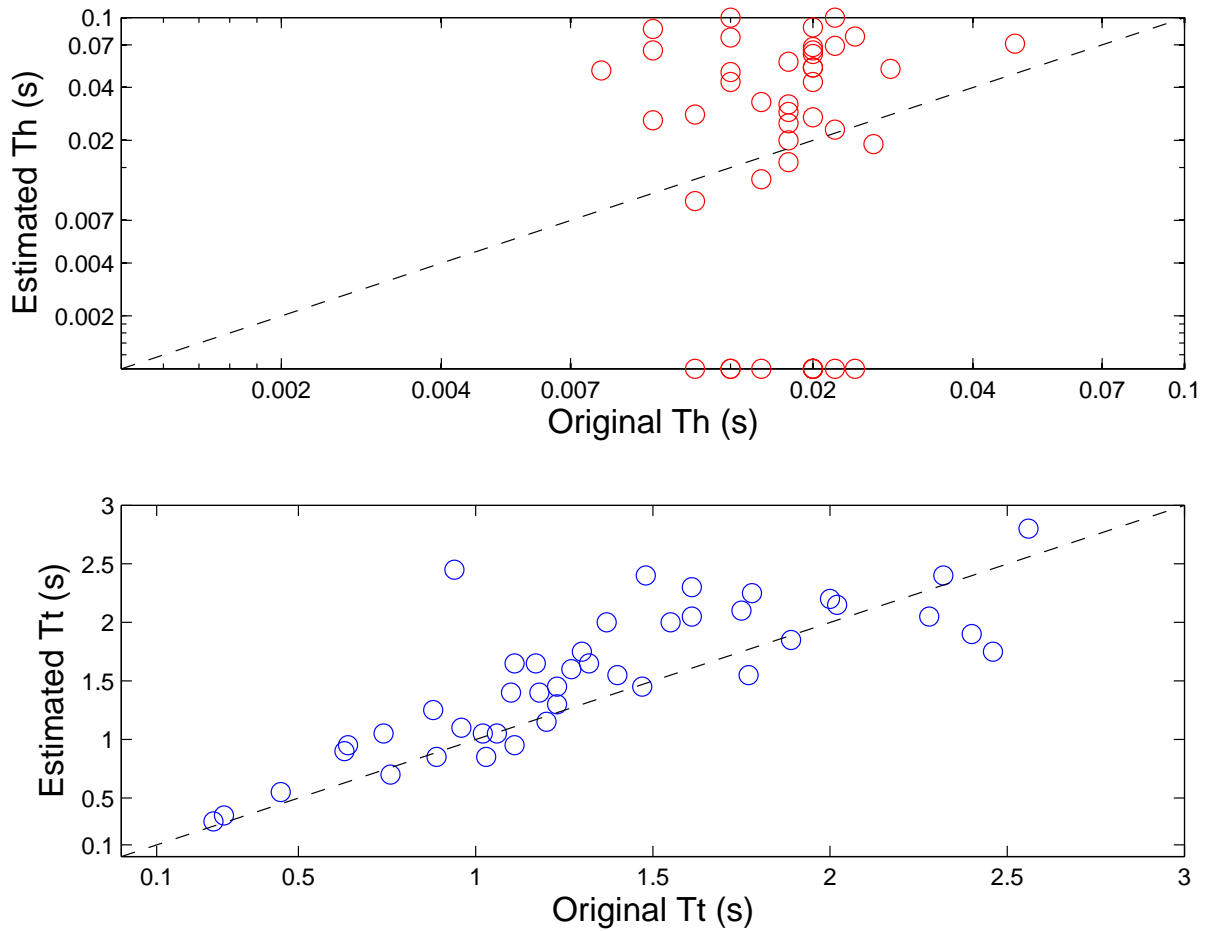


図 4.10: 評価項目 2 の推定結果

れた。

4.5 まとめ

評価項目 1 に関しては全ての評価において正しいパラメータを推定することができた。よって、提案した制約条件をパワーエンベロップ逆フィルタ法に用いることで原理的に正しく推定が行えることが示された。このため、上側包絡線と下側包絡線を用いた変調度に依らないパラメータ推定法の提案を行うことができた。

評価項目 2 に関しては T_t は適切に推定することができた。一方で T_h の推定に関しては課題があることが明らかになった。 T_h が正しく求まらなかった理由としては T_t に対して次数が低すぎることが挙げられる。本研究では、 T_h を決めるにあたっては SMILE2004 データベースの RIR が過渡部に係る時間の範囲を調べて決定した。また、拡張型 RIR モデルは D_{50} の算出精度が高いため 50 ms 未満を評価できたほうが良いと考えたため、このような値の決定を行った。しかし、 T_t に比べて 1/100 倍程度の精度を持つため、残響付

加や回復を行った場合の T_h に関する変化が非常に低い。よって、 T_t と比較して傾きの変化が小さい。このため、 T_h の変動幅が適切であるか議論が必要である。

第5章 結論

5.1 本研究で明らかになったこと

本研究では従来法で解決できなかった、

1. 一般化 RIR モデルは次数を担うパラメータが限定的であることに加えて、実測された RIR を精度良く近似できる条件が少ないこと。
2. 推定に用いる信号に対して変調度に関する制約が必要であること。

という2つの問題に対して、改善の方法を提案した。

1. においては一般化 RIR モデルの過渡部と減衰部が相互に影響し合うことで減衰特性が変化するという問題を解決するために、過渡部と減衰部に関して独立に決定することが可能なモデルである拡張型 RIR モデルを提案した。このモデルは実測 RIR を時間領域において正確に表現でき、変調周波数領域において同程度に表現できることが明らかになった。特に、拡張型 RIR モデルは実測 RIR に対して近似した結果、時間領域において有効であるということが明らかになった。また、室内音響指標を従来の RIR モデルと同程度かそれ以上に正確に算出できるモデルであることを明らかにした。特に、拡張型 RIR モデルは時間領域における D_{50} の推定に対して有効であることが示された。

2. においては従来法においてはパラメータ推定をする際に、信号の変調度が1であるという仮定が必要である、という問題を解決するために、sin 波パワー包絡線の上側包絡線と下側包絡線の傾きに着目した。この結果、残響がない場合に、各包絡線の傾きが0となるという点に着目することで、どの RIR モデルにおいても変調度に依らないパラメータ推定が行えることを示した。また、実測 RIR を残響とした AM 信号のパワー包絡線からパラメータの推定を行った。この結果、拡張型 RIR モデルの T_{60} に関連したパラメータである T_t を正確に推定が行えることを示した。

5.2 残された課題

残された課題としては三つの課題が挙げられる。

一つ目は拡張型 RIR モデルの T_h を実測された RIR を用いて推定する場合、その RIR モデルのパラメータを変動幅に関する議論を行う必要があるということである。今回用いたパラメータの変動幅は D_{50} を正確に評価することを考えて設定していた。しかし、 T_t

と T_h のパラメータにおける変動幅の精度が 1/100 程度異なるため、 T_h が上手く推定できなかったかどうか、という点に対して疑問が残っている。関連して、これらパラメータを正確に推定した暁には室内音響指標のブラインド推定を行う必要がある。

二つ目は実環境の音を用いて推定を行っていないという課題がある。今回用いた試験用の信号は全て、パワー包絡線であることを前提に行っていた。しかし、実際の信号からパワー包絡線をそのまま得ることはできない。よって、実環境の信号をからパワー包絡線を検出し、上側包絡線と下側包絡線を使った変調度に依らない推定が可能であるか議論する必要がある。関連して、現状では AM 信号のパワー包絡線である sin 波のパワー包絡線のみを推定の対象としている。しかし、AM 信号以外の音声や音楽、環境音などから室内音響指標で推定を行えるようにする必要がある。

参考文献

- [1] 羽入敏樹, “室内音響指標値,” 日本音響学会誌 60(2), 72–77, 2004.
- [2] ISO 3382, *Acoustics Measurement of the Reverberation Time of Rooms with Reference to Other Acoustical Parameters*, 2nd ed. Geneve, 1997.
- [3] Kuttruff, H., *room Acoustics, 3rd ed.* (Elsevier Science Publishers Ltd., Lindin). 1991.
- [4] Thiele, R., “Richtungsverteilung und Zeitfolge der Schallruckwürfe in Raumen,” *Acustica*, vol. 3, pp. 291–302, 1973.
- [5] IEC 60268–16:2003. *Sound system equipment – Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index.*
- [6] Li, F. F. and Cox, T. J., “Speech transmission index from running speech: A neural network approach,” *J. Acoust. Soc. Am.* vol. 113, pp. 1999–2008, 2003.
- [7] Li, F. F. and Cox, T. J., “A neural network model for speech intelligibility quantification” *Applied Soft Computing*, vol.7, issue 1, pp. 145–155, 2007.
- [8] Houtgast, T. and Steeneken, H. J. M., “The Modulation Transfer Function in Room Acoustics as a Predictor of Speech Intelligibility,” *Acustica*, vol. 28, pp. 66–73, 1973.
- [9] Houtgast, T., Steeneken, H. J. M., and Plomp, R., “Predicting speech intelligibility in rooms from the Modulation Transfer Function. I. General Room Acoustics,” *Acustica*, vol. 46, pp. 60–72, 1980.
- [10] Unoki, M., Furukawa, M., Sakata, K., and Akagi, M., “An improvement method based on the MTF concept for restoring the power envelope from a reverberant signal,” *Acoust. Sci. & Tech.*, vol. 25, No. 4, pp. 232–242, 2004.
- [11] Unoki, M., Sakata, K., Furukawa, M. and Akagi, M., “A speech dereverberation method based on the MTF concept in power envelope restoration,” *Acoust. Sci. & Tech.*, vol. 25, No. 4, pp. 243–254, 2004.

- [12] Hiramatsu, S. and Unoki, M., “A study on the blind estimation of reverberation time in room acoustics,” *J. Signal Processing*, vol. 12 No. 4, pp. 323–326, July 2008.
- [13] Ikeda, I., Unoki, M., and Akagi, M., “Study on blind estimation of Speech Transmission Index in room acoustic,” 2011 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits and Signal Processing, 2011.
- [14] Sasaki, K., Unoki, M., “Study on Estimation Method of MTF/STI Using Generalized Model of Room Impulse Response,” 2013 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits and Signal Processing, 2013.
- [15] Miyazaki, A., Shota, M., and Unoki, M., “Study on Blind Method of Estimating Speech Transmission Index from Noisy Reverberant Amplitude-Modulated-Signals,” *Journal of Signal Processing*, vol. 18, No. 4, pp. 201–204, 2014.
- [16] 広林茂樹, 野村博昭, 小池恒彦, 東山三樹夫 “パワーエンベロープ伝達関数の逆フィルタ処理による残響音声の回復,” *電子情報通信学会論文誌, A*, Vol. J81-A, No. 10, pp. 1323–1330, 1998.
- [17] X. Lu and M. Unoki, “A study on temporal envelope restoration methods for reverberant signals based on the modulation transfer function concept,” JCA2007,CDROM, 2007.
- [18] Y. Kashihara and M. Unoki, “Study on IIR Implementation for Modulation Transfer Function of Room Impulse Response,” *Journal of Signal Processing*, vol. 20, No. 4, pp. 201–204, 2016.
- [19] 石川大介, 鷗木祐史 “室内インパルス応答のパラメータ逆推定の検討,” 平成 28 年度電気関係学会北陸支部連合大会, G-2, 2016.
- [20] 鷗木祐史, 石川大介, 柏原佑太, 小林まおり, 赤木正人, “室内インパルス応答のモデル化とその室内音響特性の検討” *信学技法*, vol. 116 no.32, EA2016–61, PP.79–84, 2016 年 11 月.
- [21] Sabine, W.C., *Collected Papers on Acoustics. Cambridge: Harvard University Press.* 1922.
- [22] 戸井田 義徳, “空間内における音声情報伝達,” (小特集 – 音声の明瞭度と認識率 –) *日本音響学会誌*, vol. 51, No. 4, pp. 312–316, 1995.
- [23] 小椋靖夫, 三浦種敏, “MTFと日本語の音節明瞭度,” *音響学会建築音響研資 AA84–19*, 1984.

- [24] Sato, H., Morimoto, M., and Sato, H., “Evaluation of speech transmission performance using listening difficulty ratings,” *J. Acoust. Soc. Jpn.*, vol. 63, No. 5, pp. 275–280, 2007.
- [25] 小口恵司, “MTF-STI と明瞭度の関係,” 音響学会建築音響研資 AA87-27, 1987.
- [26] 中島立視, “音声の明瞭度指標 (STI) の測定,” *日本音響学会誌* 49(2), 103–110, 1993.
- [27] 金田豊, “インパルス応答測定の際の留意点” *日本音響学会誌*, vol.55, No.5, pp. 364–369, 1999.
- [28] J. Eaton, N. D. Gaubitch, A. H. Moore, P. A. Naylor, “Estimation of room acoustic parameters: The ACE Challenge,” in *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, vol. 24, No. 10, pp. 1681 – 1693, 2016.
- [29] Schroeder, M. R., “Modulation transfer functions: definition and measurement,” *Acustica*, vol. 49, pp. 179–182, 1981.
- [30] 日本建築学会 (編), 建築と環境のサウンドライブラリ SMILE2004 , 技報堂出版, 2004.

研究業績リスト

本研究に関連する研究業績

1. 石川大介, 鷗木祐史 “室内インパルス応答のパラメータ逆推定の検討,” 平成 28 年度電気関係学会北陸支部連合大会, G-2, 2016.
2. Unoki, M., Ishikawa, D., Kashihara, Y., Kobayashi, M., and Akagi, M., “Study on Modeling of Room Impulse Response and its Room Acoustic Characteristics,” IEICE Technical Report, EA 2016-67, pp.79-84, 2016.
3. Ishikawa, D., and Unoki, M., “Study on method for blindly estimating parameters of the extended stochastic model of room impulse response,” 2017 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP’17), Guam, Mar. 2017.
4. 石川大介, 小林まおり, 赤木正人, 鷗木祐史, “室内インパルス応答のモデル化とその室内音響特性,” 音講論 (春), 1-P-19, 2017.
5. 石川大介, 鷗木祐史, “室内インパルス応答モデルのパラメータ推定の検討,” 音講論 (春), 1-P-20, 2017.

その他の研究業績

口頭発表

1. Toya, T., Ishikawa, D., Miyauchi, R., Nishimoto, K., and Unoki, M., “Study on Effects of Speech Production during Delayed Auditory Feedback for Air-conducted and Bone-Conducted Speech,” 2016 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP’16), Honolulu, Mar. 2016.

ポスター発表

1. 石川大介, 鳥谷輝樹, 鷗木祐史, “Puredata を用いた遅延聴覚フィードバックシステムの構築,” 第 7 回北陸合同音響ビギナー成果発表会, 石川, 2015 年 12 月.