

平成 20 年度
プロジェクト研究報告書

一般化調和解析を利用した和音解析

1090321 岡崎 理奈

指導教員 福本 昌弘

2009 年 3 月 5 日

高知工科大学 情報システム工学科

要 旨

一般化調和解析を利用した和音解析

岡崎 理奈

楽譜が無い音楽の音高を知るには、ドレミ…のどの音かを聴覚で判別するしか方法がなく、誰でもできるわけではない。しかし、信号に含まれている周波数を解析することである程度の音高を知ることは可能である。周波数解析をする一般的な方法として、フーリエ変換が知られている。フーリエ変換を用いる場合も短時間フーリエ変換を用いるなどすれば、音の時間的な変化に対応することができる。しかし、フーリエ変換では短時間の場合は周波数分解能が悪くなり、さらに窓関数の影響で元の信号自体が変わるなど問題がある。

本研究ではフーリエ変換より解析精度が高いと言われる一般化調和解析を用い、和音を対象にした周波数解析を行い、フーリエ変換との比較を行う。その結果、一般化調和解析ではほとんどの場合で音高を正しく抽出することができたが、フーリエ変換では自動化する必要があることが判明した。

キーワード 一般化調和解析, フーリエ変換, 音高抽出

目次

第 1 章	序論	1
1.1	背景と目的	1
1.2	本論文の概要	2
第 2 章	周波数解析の方法	3
2.1	はじめに	3
2.2	周期関数の近似方法	4
2.3	フーリエ変換の特徴	5
2.3.1	フーリエ変換の手順	5
2.3.2	フーリエ変換を用いた和音解析	6
2.4	一般化調和解析	9
2.4.1	一般化調和解析の手順	10
2.4.2	一般化調和解析を用いた和音解析	11
第 3 章	音高抽出	13
3.1	はじめに	13
3.2	ピアノの音高抽出	13
3.3	様々な音色の音高抽出	15
3.4	スペクトル表示	15
3.4.1	ピアノ	16
3.4.2	トランペット	17
3.4.3	オカリナ	18
3.4.4	ギター	18
3.4.5	マリンバ	19

目次

3.4.6	琴	20
3.4.7	ストリングス	21
3.4.8	一般化調和解析のスペクトル表示	21
3.5	範囲を考慮した一般化調和解析の解析結果	21
3.6	50 種類の和音解析の正確率	22
3.7	まとめ	23
第 4 章	結論	24
4.1	本研究のまとめ	24
4.2	今後の課題	24
	謝辞	26
	参考文献	27

目次

2.1	周期信号 $f(t)$ のグラフ	4
2.2	三角多項式のグラフ	4
2.3	始点と終点に差がある信号	7
2.4	ブラックマン窓	8
2.5	図 2.3 の信号に窓を掛けた信号	8
2.6	フーリエ変換による和音解析	9
2.7	一般化調和解析による和音解析	12
3.1	解析する和音	14
3.2	ピアノのファ・ラ・ドの和音 (FFT)	17
3.3	トランペットのファ・ラ・ドの和音 (FFT)	17
3.4	トランペットのファ・ラ・ドの和音 2(FFT)	18
3.5	オカリナのファ・ラ・ドの和音 (FFT)	19
3.6	ギターのファ・ラ・ドの和音 (FFT)	19
3.7	マリンバのファ・ラ・ドの和音 (FFT)	20
3.8	琴のファ・ラ・ドの和音 (FFT)	20
3.9	ストリングスのファ・ラ・ドの和音 (FFT)	21
3.10	ピアノのファ・ラ・ドの和音 (GHA)	22

表目次

3.1	各音の周波数 (平均律)	14
3.2	解析結果	15
3.3	様々な音色の結果 (FFT)	16
3.4	様々な音色の結果 (GHA)	16
3.5	探索範囲を変更した結果	22
3.6	50 種類の音色で解析を行なった結果	23

第 1 章

序論

1.1 背景と目的

楽譜が無い音楽の音高を知るには、ドレミ…のどの音かを聴覚で判別するしか方法がなく、誰でもできるわけではない。そして単音であれば判別できたとしても、和音を判別するのはさらに困難である。しかし、音階にはそれぞれ音に規定の周波数があり、周波数解析によって音高を判別することがある程度可能である。

周波数解析で最もよく使用されているのはフーリエ変換 [1] である。フーリエ変換とは信号は正弦波の和で近似できることを利用し、周波数成分ごとに分解する方法である。さらに短時間フーリエ変換を用ることで、時間的な音の変化にも対応することができるようになる。だがフーリエ変換は窓関数などの影響で正確な結果が出ない場合がある。

その問題を解決できる方法として一般化調和解析 [2] がある。一般化調和解析とは信号の解析区間内から正弦波を引いて差波形が最小になるものを探し、残差波形に同様の処理を繰り返す方法である。短時間フーリエ変換では不可能であった微妙な周波数の変動にも対応可能である。

本研究では、フーリエ変換と一般化調和解析を和音解析によって、正しい周波数解析の比較を行なう。

1.2 本論文の概要

1.2 本論文の概要

本論文の概要について説明する。まず，第2章で本研究で周波数解析に用いるフーリエ変換と一般化調和解析について説明，その具体的な手順についての説明を行なう。第3章では実際に和音の周波数解析を行ない，結果について述べる。そして，最後の第4章ではまとめと今後の課題について報告を行なう。

第 2 章

周波数解析の方法

2.1 はじめに

楽音を耳で聞いてドレミ…の音名を判別するためには、一般的には「音感」というものを持っていることが条件であるとされている。音感には大きく分けて「絶対音感」と「相対音感」の 2 種類がある。絶対音感を持つ人は音を聞いてそのまま音高の音名を判別できるが、相対音感を持つ人は他の音と高さを比較することで音名を判別できる。音高を判別するにはどちらかを持っていれば可能であると言われている。絶対音感は幼少の頃から音名を判別するという経験が無ければ身に付かないとされているが、相対音感は後からトレーニングで身に付けることが可能だという。どちらにしろ、楽音を耳で聞きドレミ…のどの音なのかを判別するのは誰でも可能というわけではない。そこで、音高を自動で判別する方法を考える。

音は物理的には波形で表現され、音階の各音にはそれぞれ周波数が規定されている。例えば、オクターブ 4 のハ長調ラは平均律音階では 440Hz であると決められている。1 オクターブ上のラの周波数は 2 倍の 880Hz となり、下だと $\frac{1}{2}$ の 220Hz となる。

つまり、信号の波形に周波数解析を行い、どんな周波数成分が含まれているかを知ることができれば音名の判別は可能であるということが言える。和音の場合であっても同様である。ド・ファ・ラの和音の場合は、ド、ファ、ラのそれぞれの周波数成分を持つ波形が合成された波形になる。この波形に周波数解析を行なうと、ド、ファ、ラの周波数を確認することが可能である。

だがこれらは正弦波などの単純な波形の場合であり、実際はピアノやギターなどの楽器ではもっと複雑な波形になるため、正確な判別は行なえない場合がある。この章では周波数解

2.2 周期関数の近似方法

析の方法である，フーリエ変換と一般化調和解析の手順について述べる．

2.2 周期関数の近似方法

図 2.1 のような周期が π である周期関数の信号 $f(t)$ を例に説明する．

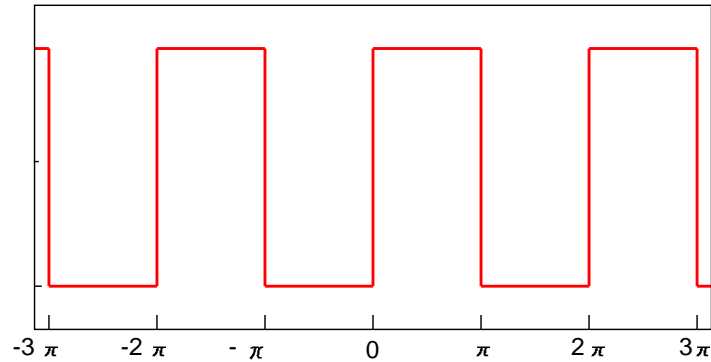


図 2.1 周期信号 $f(t)$ のグラフ

このような周期信号は三角関数の足し合わせ，即ち三角多項式で近似することが可能である．信号 $f(t)$ は三角多項式 (2.1) で近似でき，グラフは図 2.2 のようになる．

$$\sin(t) + \frac{1}{3} \sin(3t) + \frac{1}{5} \sin(5t) + \frac{1}{7} \sin(7t) + \frac{1}{9} \sin(9t) + \frac{1}{11} \sin(11t) \quad (2.1)$$

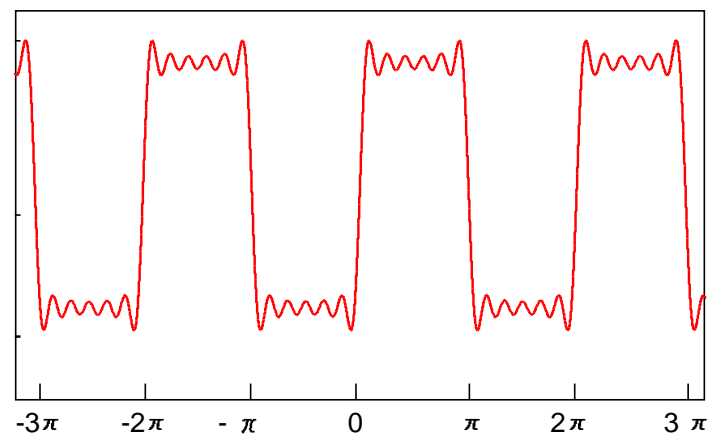


図 2.2 三角多項式のグラフ

このことを踏まえた上でフーリエ変換と一般化調和解析について説明を行なう．

2.3 フーリエ変換の特徴

まず、フーリエ変換について説明する。フーリエ変換は信号解析に一般的に用いられている方法である。フーリエ変換には、離散データを扱う離散フーリエ変換 (Discrete Fourier Transform, DFT)、離散フーリエ変換の計算処理を減らした高速フーリエ変換 (Fast Fourier Transform, FFT) や時間的な変化のある信号に対応できる短時間フーリエ変換 (short-time Fourier Transform, STFT) がある。

2.3.1 フーリエ変換の手順

フーリエ変換の計算手順について述べる。先程 2.2 で述べた通り一般の周期信号は三角多項式での近似が可能である。これを無限級数で表すと、

$$f(t) = \frac{1}{2}a_0 + a_1 \cos t + a_2 \cos 2t + \cdots + b_1 \sin t + b_2 \sin 2t + \cdots \quad (2.2)$$

のような式となる。ただし、 $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n, b_1, b_2, \dots, b_n$ は定数である。この式は次のように直すことができる。

$$f(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nt + b_n \sin nt) \quad (2.3)$$

式 (2.3) を $f(t)$ のフーリエ級数と呼ぶ。

ここで周期を考慮する。周期を T とした関数は、 $-\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2}$ の範囲の信号の周期的な繰り返しになる。このような周期を持つ関数は $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$ とおくと

$$f(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_0 t + b_n \sin n\omega_0 t) \quad (2.4)$$

と表現することができる。さらにこの式をオイラーの公式を用いて複素指数の形として直すと

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{jn\omega_0 t} \quad (2.5)$$

という式になる。ただし c_n は、

$$c_n = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) e^{-jn\omega_0 t} dt \quad (2.6)$$

2.3 フーリエ変換の特徴

となる。 c_n は正弦波及び余弦波の大きさを表す。 フーリエ変換はこれを使用したもので、信号を周波数成分ごとに分解することで周波数解析を行なう。 信号 $f(t)$ に対してフーリエ変換を行なうと、

$$F[f(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega_0 t} dt \quad (2.7)$$

のような式で表す。

2.3.2 フーリエ変換を用いた和音解析

図 2.6 に手順を示す。 まず、これまでは連続信号に対するフーリエ変換の方法について述べたが、実際に扱う信号は連続的ではない離散信号である。 そこで、離散フーリエ変換 [3] を用いる必要がある。 周期 N の離散信号 $x(t)$ という信号に対し、離散フーリエ変換を行なうとすると、

$$F[x(n)] = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\omega_0 n} \quad (2.8)$$

という式で表すことができる。

本研究では、時間短縮のため離散フーリエ変換を改良した高速フーリエ変換 [3] を用いて解析を行なう。 離散フーリエ変換では、例えば 1024 サンプルの信号について解析を行なうには、 2^{20} という計算量が必要になる。 この問題を解決するため、フーリエ変換の計算量を減らし、高速で計算できるよう改良したものが高速フーリエ変換である。

しかし、高速フーリエ変換だけでは時間的な音の変化に対応することができないため、短時間フーリエ変換 [3] を利用する。 短時間フーリエ変換とは、分析区間を切り出してフーリエ変換を行なう方法である。 分析区間を切り出すためには窓関数というものを使用する。

窓関数について説明を行なう。 まず、フーリエ変換は信号が周期関数であるという前提で解析を行っている。 しかし、始点と終点の値に大きな差が生じていると解析結果に影響を及ぼす。 なぜならば、周期関数であるということは分析区間が繰り返されている事になり、つまり始点と終点は連結されているものとして計算されるためである。 始点と終点の値に大きな差があると歪み (ノイズ) が発生してしまう。 例えば、図 2.3 の信号の AB 間に窓を掛け

2.3 フーリエ変換の特徴

て解析を行なうとする。始点 A と終点 B の値には差があり、このままフーリエ変換を行なうと影響を受けてしまう。そこで、図 2.4 のような窓関数というものを掛ける必要がある。図 2.4 はブラックマン窓という窓関数である。本研究では、この窓関数を用いてフーリエ変換を行う。ブラックマン窓の数式は次の通りである。

$$w(x) = 0.42 - 0.5 \cos 2\pi x + 0.08 \cos 4\pi x \quad (2.9)$$

窓関数を掛けると有限区間以外を 0 にすることができる。図 2.3 にブラックマン窓を掛け

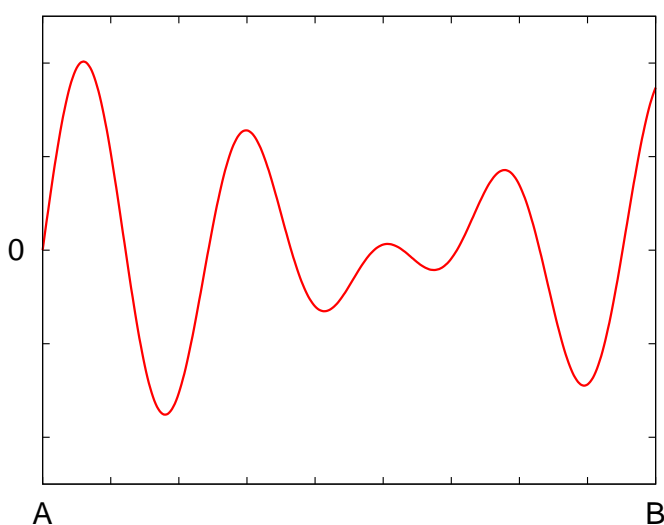


図 2.3 始点と終点に差がある信号

たものが図 2.5 である。始点と終点の値が 0 になっているのが分かる。このように、窓関数を掛けることで差を無くし、信号を分析区間を切り出すことができる。

窓関数を掛けた区間を入力信号としてフーリエ変換を行い、周波数ごとに分解したあと周波数成分の大きい順に並びかえ、決められた個数分だけ周波数を出力する。そして、得られた周波数からド・レ・ミ…の音名の判別を行なう

これまで短時間フーリエ変換について説明を行なった。しかしこの方法には、窓関数を掛けることで元の信号とは違うものになる可能性があること、短時間フーリエ変換には信号が短くなると周波数分解能が悪くなるという 2 つの欠点がある。例えば、48kHz でサンプリングした信号に対して短時間フーリエ変換を行なうとする。この信号の長さが 5ms であっ

2.3 フーリエ変換の特徴

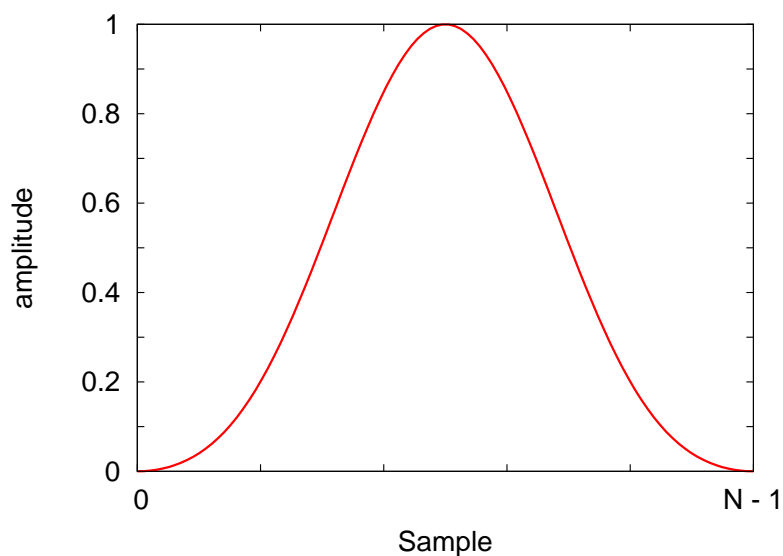


図 2.4 ブラックマン窓

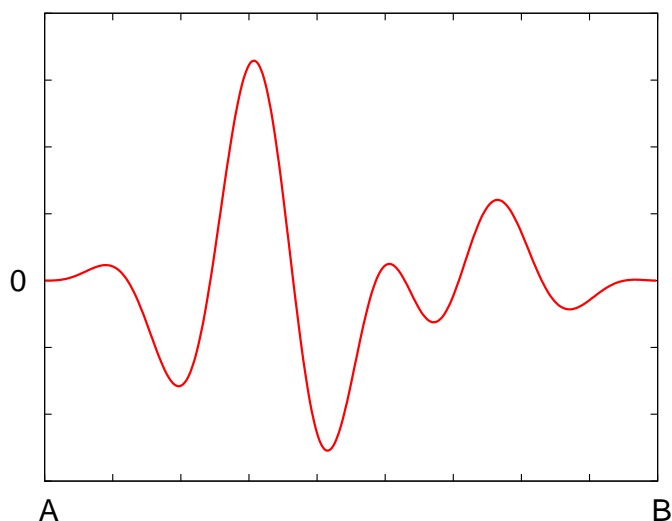


図 2.5 図 2.3 の信号に窓を掛けた信号

た場合、分析区間には 240 サンプルの信号が含まれていることになる。つまり、240 サンプルの情報で解析を行わなければならない、短ければ短いほど情報が少なくなり、精密な解析を行うのが困難になる。これを解決するためには、サンプリング周波数を大きくするという方法しかない。

このように、フーリエ変換は時間に依存しているため、高精度な解析を行なうことができ

2.4 一般化調和解析

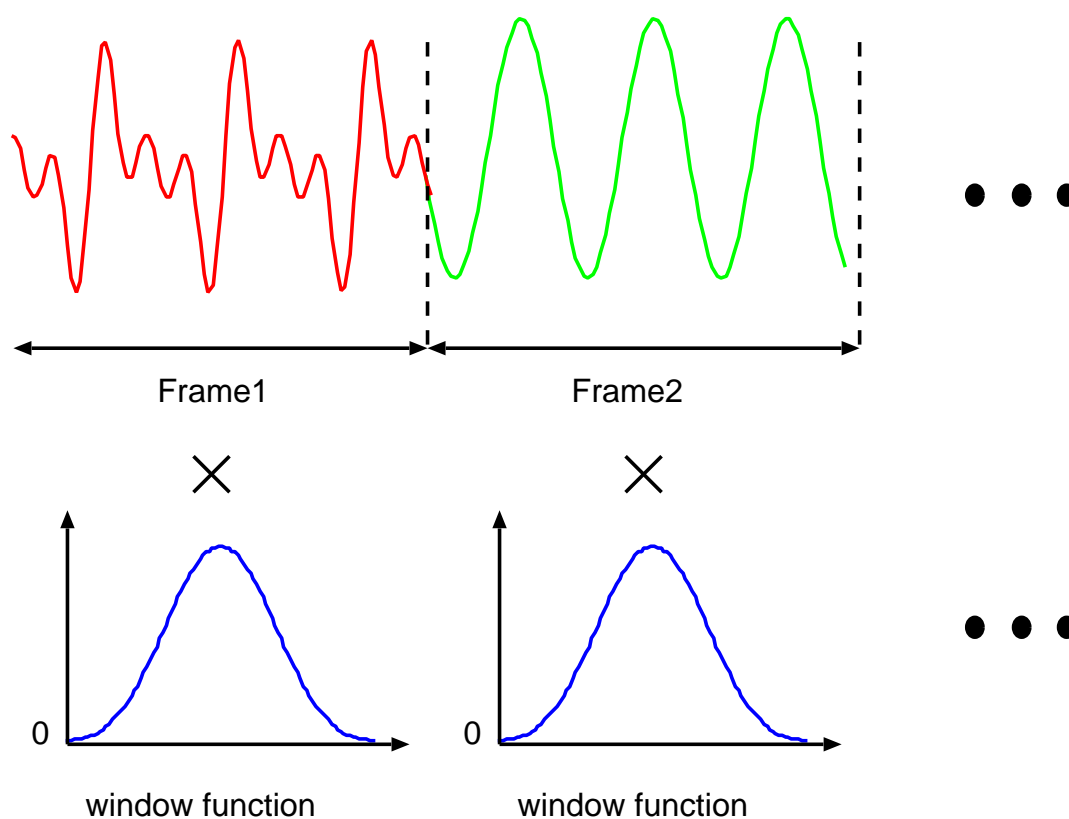


図 2.6 フーリエ変換による和音解析

ない場合がある。そこで、これらの問題を解決するために一般化調和解析を利用する。

2.4 一般化調和解析

一般化調和解析 (Generalized Harmonic analysis, GHA)[2] について説明する。一般化調和解析とは、解析対象とする信号の解析区間内から正弦波を差し引いて残差波形が最小となるものを抽出し、残差成分に同様の処理を繰り返すという単純な方法を持つ解析方法である。

2.4 一般化調和解析

2.4.1 一般化調和解析の手順

具体的な計算手順を以下に示す。まず、周期関数は定義として

$$|f(x) - \sum_{k=1}^n A_k e^{j\Lambda_k x}| \leq \varepsilon \quad (2.10)$$

を満たす $f(x)$ とする。ただし、 A_k は複素数、 Λ_k は実数であり、 $\varepsilon > 0$ である。次に、分析区間の範囲を L 、範囲内にある信号を $x_0(t)$ とし、フーリエ係数

$$S(f) = \frac{2}{nT} \int_0^{nT} x_0(t) \sin(2\pi ft) dt \quad (2.11)$$

$$C(f) = \frac{2}{nT} \int_0^{nT} x_0(t) \cos(2\pi ft) dt \quad (2.12)$$

をそれぞれ計算する。ただし、 $f[\text{Hz}]$ は任意の周波数で、周期 T は $\frac{1}{f}[\text{s}]$ であり、 n は整数である。また、 $nT \leq L$ である。そして $S(f)$ 、 $C(f)$ をもとに残差のエネルギーを求める。残差 ε は

$$\varepsilon(t, f) = x_0 - S(f) \sin(2\pi ft) - C(f) \cos(2\pi ft) \quad (2.13)$$

となり、そのエネルギーは分析区間内において

$$E(f) = \int_0^{nT} \varepsilon(t, f)^2 dt \quad (2.14)$$

である。この $E(f)$ を最小にする f_1 をもとに、 $S(f_1)$ 、 C_1 を求める。求めた周波数成分を取り除き、 $\varepsilon(t, f)$ を再び原信号とみなしてこれまでのプロセスを繰り返す。これを任意の回数繰り返して残差のパワーが必要最低限になるまで行なう。

一般化調和解析は以上の手順を繰り返すことで周波数解析を行なう。利点としては、任意の周波数分解能を設定でき、窓関数を必要としないので短時間フーリエ変換と比べ、同一のサンプル数で高い精度での周波数解析が行える。しかし計算量はフーリエ変換に対し、信号と解析条件によっては膨大な量になる。

2.4 一般化調和解析

2.4.2 一般化調和解析を用いた和音解析

一般化調和解析を用いた和音解析の方法について説明する。図 2.7 は原信号 x を n 個でフレーム分解し、 $K = 3$ で解析を行なう場合の手順である。一般化調和解析は解析対象とする信号 x を任意の解析区間長にフレームを分解し

$$x(n) = \sum_{k=1}^K A_k \sin(\omega_{kn} + \phi_k) \quad (2.15)$$

のように、各フレームを正弦波の線形和で表現するものとする。ここで、 A_k 、 ω_{kn} 、 ϕ_k はそれぞれ k 番目の正弦波の振幅、周波数、位相を表し、 K は抽出する正弦波の数を表す。一般化調和解析では被解析信号から減算を行った結果が最小となる振幅・周波数・位相を有する正弦波の探索を行い、得られた正弦波を $x(n)$ から減算し残差信号を得る。次にこの残差信号から同様に正弦波の探索を行い再度残差信号を得る。この一連の処理を K 回、もしくは残差信号が十分小さくなるまで繰り返すことにより $x(n)$ に含まれる正弦波を推定する。本研究では、 $x(n)$ に含まれる正弦波を K 個抽出した時点で終了とする。

一般化調和解析はこのような手順で高精度な周波数解析を行なうことができる。しかし、精度を上げれば上げる程莫大な計算量になってしまう。そこで、20Hz~2000Hz の範囲、1Hz 単位での探索を行なうという条件で解析を行なうことにする。

2.4 一般化調和解析

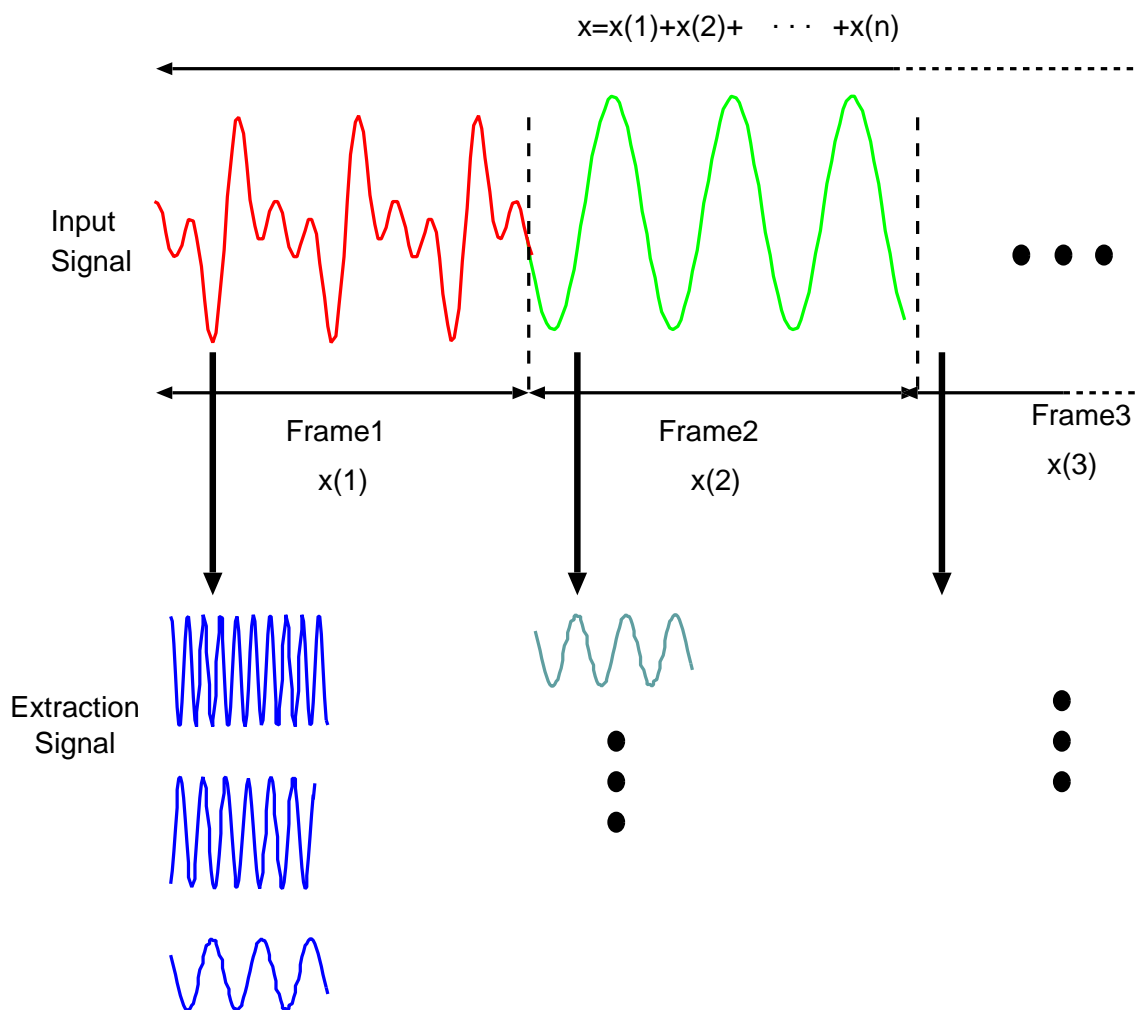


図 2.7 一般化調和解析による和音解析

第 3 章

音高抽出

3.1 はじめに

和音で構成される信号に対して、フーリエ変換と一般化調和解析を用いた周波数解析の結果を比較するため、実際の楽音に対して解析を行う。楽音はソフトウェアシンセサイザを用いて録音した wave 形式のファイルから抽出した波形データを用いる。各音の周波数は平均律を用いることにし、表 3.1 を規定とする。なお、平均律とは 1 オクターブ内にある音の高さを均等に 12 等分し、これを半音とする単純な音階のことである。抽出された周波数と規定との差が 5Hz 以内の場合は同じ値とする。

3.2 ピアノの音高抽出

図 3.1 のようなファ(4) ラ (4) ド (5), ミ (4) ソ (4) ド (5) の 2 種類の和音を順番に 25ms ずつ鳴らし、録音したものを使用する。ただし、括弧内はオクターブとする。サンプリング周波数は 48kHz, テンポは標準的な速さである BPM120 に設定し、長さはベース音によく用いられる長さである 8 分音符にし、24000 サンプルとした。フーリエ変換・一般化調和解析を行い、共に周波数成分の大きいものを上から 3 つ抽出した。

その結果を表 3.2 に示す。表 3.2 から、GHA は規定の周波数の値とほぼ同じになっていることが分かるがフーリエ変換では誤った解析結果もある。フーリエ変換でのファ・ラ・ドの解析結果では、ファの規定の周波数 (349.2Hz) に近い周波数の値が抽出されており、ミ・ソ・ドではミの規定の周波数 (329.2Hz) に近い値が抽出されている。

3.2 ピアノの音高抽出

表 3.1 各音の周波数 (平均律)

オクターブ	音名 (ハ長調)	周波数 [Hz]
4	ド	261.6
4	ド#	277.1
4	レ	293.6
4	レ#	311.1
4	ミ	329.6
4	ファ	349.2
4	ファ#	369.9
4	ソ	391.9
4	ソ#	415.3
4	ラ	440.0
4	ラ#	466.1
4	シ	493.8
5	ド	523.2

これは、ピアノの音にある倍音の影響で複雑な周波数成分になるためである。倍音とは、ある音の基音の周波数の2以上の整数倍の周波数成分を持つ音の成分のことである。自然の音は全て倍音を持っているとされる。音色によっては倍音の周波数成分が基音よりも大きくなる場合がある。



図 3.1 解析する和音

3.3 様々な音色の音高抽出

表 3.2 解析結果

	ファ(349.2Hz)	ラ(440Hz)	ド(523.2Hz)
FFT	348	352	344
GHA	349	440	523
	ミ(329.2)	ソ(391.9)	ド(523.2)
FFT	328	392	332
GHA	329	391	523

3.3 様々な音色の音高抽出

他の音色でも同様の解析を行なった。ファ・ラ・ドの和音をそれぞれの音色で 25ms 鳴らしたものを先程と同様にサンプリング周波数 48kHz で録音し、長さ 12000 サンプルとした。その結果を表 3.3 に表す。ただし、単位は Hz である

トランペットでフーリエ変換・一般化調和解析ともに解析結果が規定とは大きく違うことが分かる。これは管楽器では倍音成分の方が大きいため、高い周波数成分が結果として表れているためである。ファの値は規定のファの 2 倍音の周波数の値に近く、ドは規定のファの 3 倍音の値に近いことが分かる。また、ラの周波数は規定のドの 2 倍音に近い値になっている。

3.4 スペクトル表示

フーリエ変換は倍音成分を含んでいる音色などは結果を正しく抽出できない。そこで、抽出する周波数の個数を 1000 個に増やしてスペクトル表示を行ったところ、音色によっては、和音ファ・ラ・ドのドやラの周波数も判別することができた。

3.4 スペクトル表示

表 3.3 様々な音色の結果 (FFT)

音色	ファ(349.2Hz)	ラ (440Hz)	ド (523Hz)
正弦波	348	440	524
トランペット	692	1040	1384
オカリナ	880	1044	1048
マリンバ	348	440	352
ギター	436	440	444
琴	1396	1760	1756
ストリングス	523	440	524

表 3.4 様々な音色の結果 (GHA)

音色	ファ(349.2Hz)	ラ (440Hz)	ド (523Hz)
正弦波	349	440	523
トランペット	693	1039	1385
オカリナ	698	879	1046
マリンバ	348	439	522
ギター	349	440	523
琴	1396	1758	1761
ストリングス	1047	440	522

3.4.1 ピアノ

ピアノのスペクトル表示を図 3.2 に示す。ドの周波数 523Hz, ラの周波数 440Hz の付近にスペクトルを確認できる。なお, それぞれの図に見られる 600Hz 以降にあるスペクトルは先程述べた倍音成分によるものである。それぞれファ(349.2Hz) の 2 倍のおよそ 700Hz, ラ (440Hz) の 2 倍の 880Hz, ド (523Hz) の 2 倍のおよそ 1020Hz に相当することが分かる。

3.4 スペクトル表示

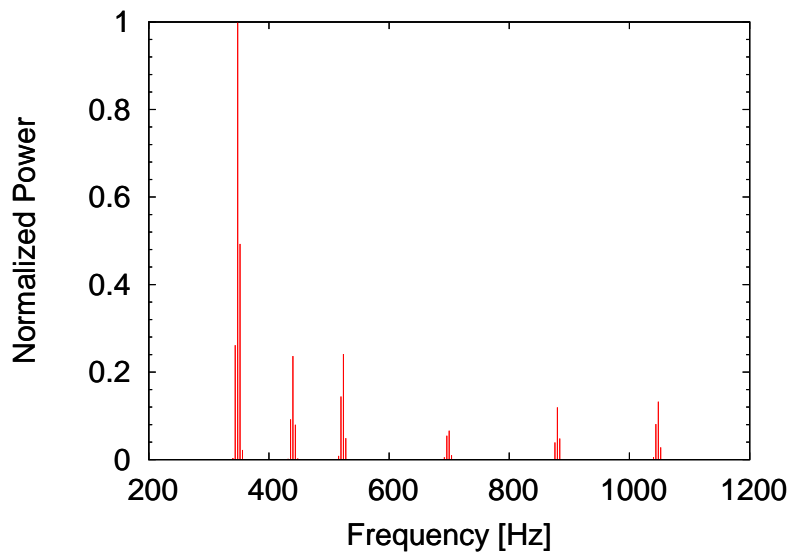


図 3.2 ピアノのファ・ラ・ドの和音 (FFT)

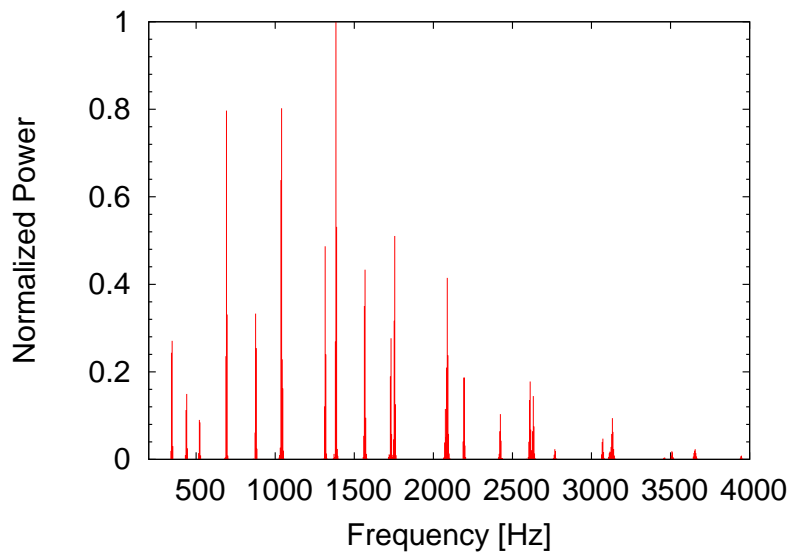


図 3.3 トランペットのファ・ラ・ドの和音 (FFT)

3.4.2 トランペット

トランペットの解析結果のスペクトル表示を図 3.3 に示す。3 つ抽出した場合、フーリエ変換、一般化調和解析ともに正しく音を判別することはできなかった。図 3.3 を見ても、スペクトルが広い範囲で分散しており、全く見当が付かない。

3.4 スペクトル表示

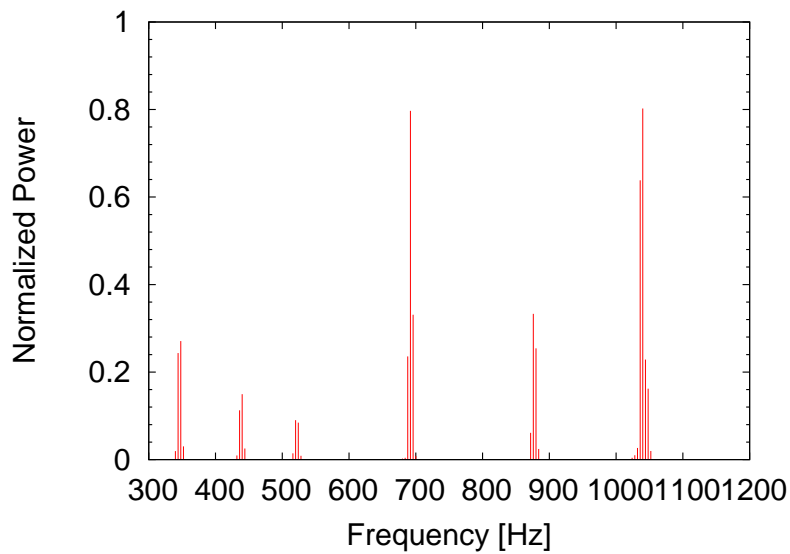


図 3.4 トランペットのファ・ラ・ドの和音 2(FFT)

そこで、表示範囲を 200Hz~1200Hz に設定したものを図 3.4 に示す。この図ではファ・ラ・ドの各周波数成分を確認することができた。

3.4.3 オカリナ

オカリナの解析結果のスペクトル表示を図 3.5 に示す。およそ 700Hz, 880Hz, 1040Hz 付近に値が集まっていることが分かる。これはオクターブ 4 のファ・ラ・ドの周波数の 2 倍の周波数、つまり倍音になっている。

3.4.4 ギター

ギターの解析結果のスペクトル表示を図 3.6 に示す。ピアノと同じようなスペクトルになっており、同様にファ・ラ・ドの周波数を判別することができた。倍音成分も確認することができる。

3.4 スペクトル表示

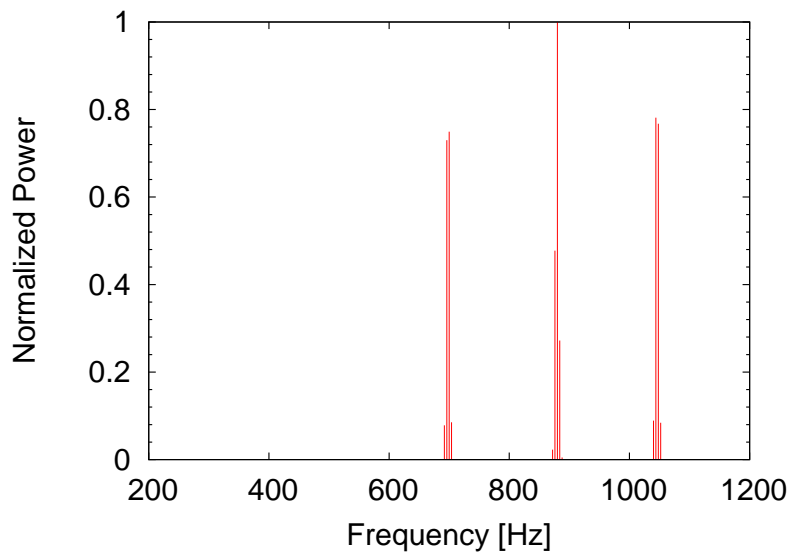


図 3.5 オカリナのア・ラ・ドの和音 (FFT)

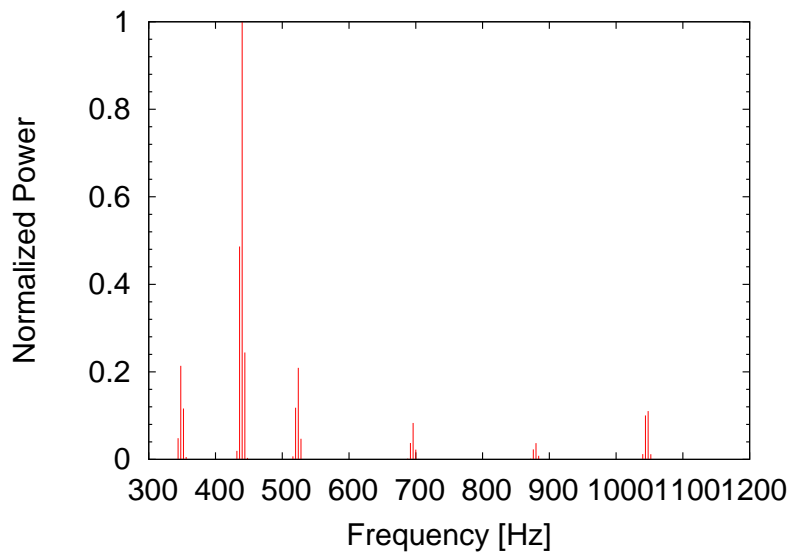


図 3.6 ギターのア・ラ・ドの和音 (FFT)

3.4.5 マリンバ

マリンバの解析結果のスペクトル表示を図 3.7 に示す。スペクトルがあまり密集しておらず、350Hz、440Hz、520Hz 付近に集まっていることが分かるので、ア・ラ・ドと判別することが可能である。

3.4 スペクトル表示

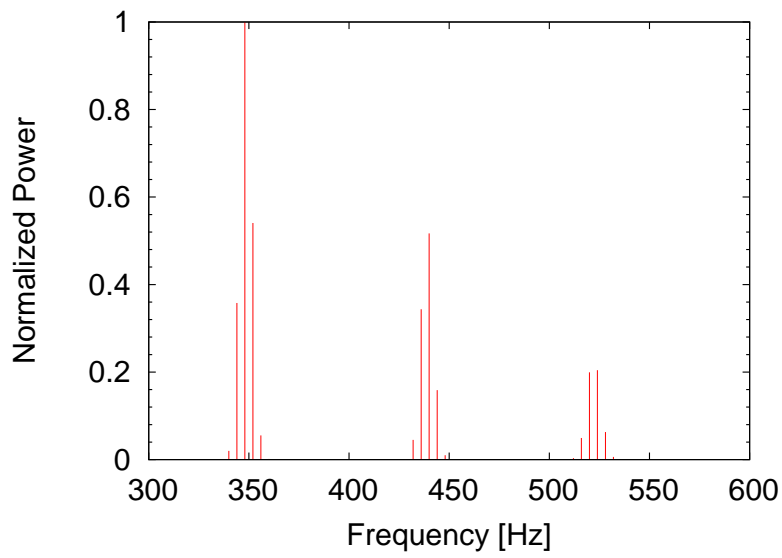


図 3.7 マリンバのファ・ラ・ドの和音 (FFT)

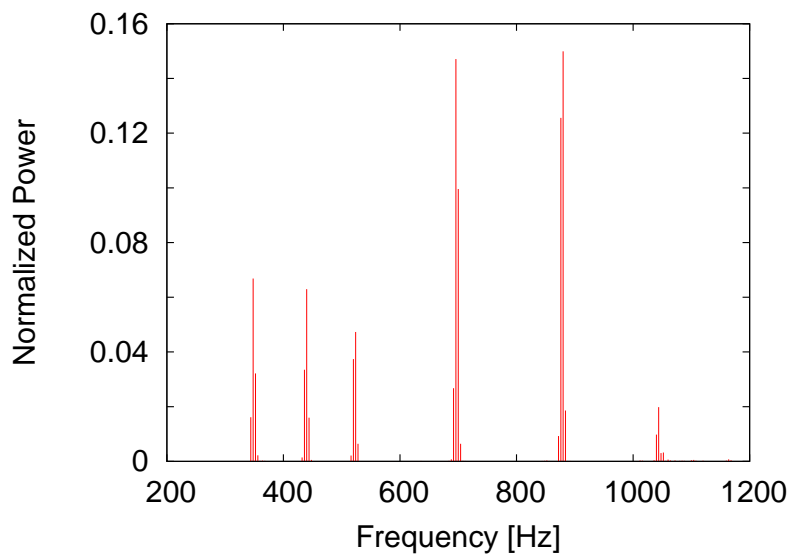


図 3.8 琴のファ・ラ・ドの和音 (FFT)

3.4.6 琴

琴の解析結果のスペクトル表示を図 3.8 に示す。この図もスペクトル表示による判別が可能であることが分かる。

3.5 範囲を考慮した一般化調和解析の解析結果

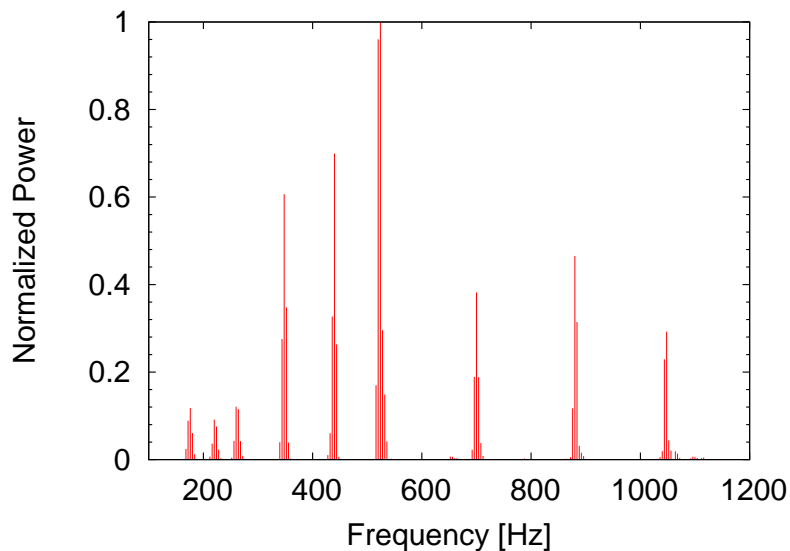


図 3.9 スtringスのファ・ラ・ドの和音 (FFT)

3.4.7 スtringス

Stringスの解析結果のスペクトル表示を図 3.9 に示す。倍音成分の他に基音の $\frac{1}{2}$ の周波数成分も表れている。この場合も判別可能である。

3.4.8 一般化調和解析のスペクトル表示

図 3.10 は GHA で和音ファ・ラ・ドを解析し、周波数を 100 個抽出してスペクトル表示を行なったものである。それぞれ規定の周波数にほぼ線スペクトルが存在していることが分かる。

3.5 範囲を考慮した一般化調和解析の解析結果

トランペットの解析では 3.3 の結果の通り、一般化調和解析では正しくは判別できなかった。トランペットは倍音成分の方が大きく、倍音の方の周波数が抽出されてしまうためである。そこで、一般化調和解析で探索する正弦波の範囲を規定の音階の周波数の範囲である 200Hz~600Hz に変更して解析を行なった。その結果、表 3.5 のようになり、ファ・ラ・ド

3.6 50 種類の和音解析の正確率

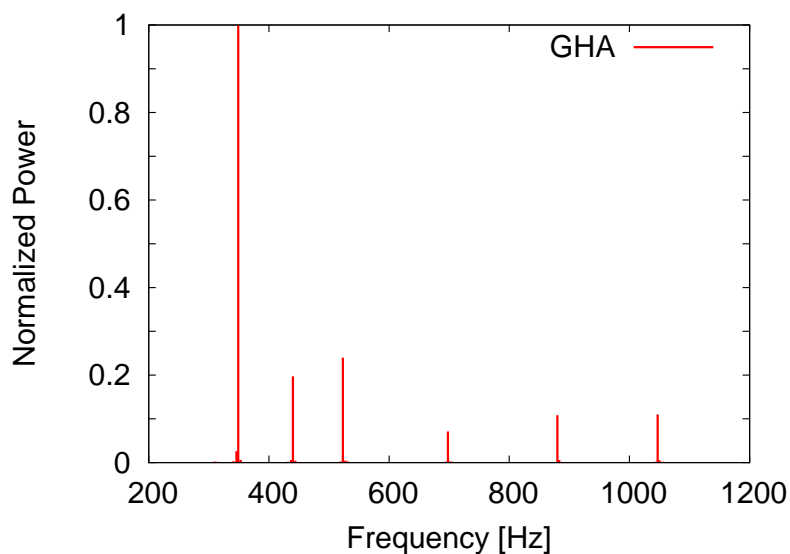


図 3.10 ピアノのファ・ラ・ドの和音 (GHA)

表 3.5 探索範囲を変更した結果

ファ(349.2Hz)	ラ (440Hz)	ド (523.2Hz)
346Hz	339Hz	522Hz

を判別することができた。しかし、この方法は和音の音の範囲を予測できる場合のみ可能である。

3.6 50 種類の和音解析の正確率

50 種類の音色をランダムに選出し、それぞれ和音を鳴らして録音したものについて解析を行ない正確率を調べた。ただし、楽器の種類(弦楽器、金管楽器、管楽器など)が偏らないように選出している。その結果、表 3.6 のようになった。一般化調和解析の方が正確率が高いことが分かる。

3.7 まとめ

表 3.6 50 種類の音色で解析を行なった結果

解析方法	正確率
フーリエ変換	9/50
一般化調和解析	23/50

3.7 まとめ

実際の楽音について和音解析についてフーリエ変換，一般化調和解析行なった．その結果，フーリエ変換では複雑でない音色については判別可能であったが，ほとんどがスペクトル表示による判別でないと不可能であった．しかし，一般化調和解析では，複雑な音色でも全てではないが判別することができた．フーリエ変換と比較すると 3.6 を参照してもその差は明確である．

第 4 章

結論

4.1 本研究のまとめ

和音を解析するにあたって、フーリエ変換と一般化調和解析の 2 種類の方法を利用した。その結果、一般化調和解析ではほとんどの音色で正しい結果を得ることができた。ピアノ、ギター、マリンバなど弦楽器の音色の結果は正しかったが、トランペットなど管楽器の音色では倍音成分が大きく影響し、そのままでは正しい結果は得られなかった。

フーリエ変換は倍音が含まれない正弦波などの単純な信号では正しく解析することができた。しかし、倍音成分が含まれている音色は全般的に正しい結果を得ることができなかった。だが、一部の音色では、スペクトルを表示することで視覚によっておおよその判別は可能だった。この動作を自動化するためには、規定の周波数の前後の周波数に注目することが必要であると考えられる。

以上、一般化調和解析は自動で判別可能であること、50 種類の音色について解析しフーリエ変換と比較した結果から、一般化調和解析では高精度な周波数解析が可能であることを確認した。

4.2 今後の課題

一般化調和解析では、管楽器のように倍音成分が大きく複雑な波形の信号の場合、倍音成分の周波数を抽出してしまうという問題がある。そこで、3.5 のように探索する正弦波の範囲をあらかじめ設定しておくというように、倍音成分にも対応できるように工夫する必要がある。

4.2 今後の課題

ある．探索する正弦波を設定することで，その膨大な計算量を減らすことに繋がる．今後はその範囲をどう設定するかどうかを見極める必要がある．

謝辞

本研究を行なうに辺り、御指導して下さった福本昌弘准教授に深く感謝致します。また、本研究で審査をして頂きました吉田真一講師にも深く感謝致します。そして、佐伯幸郎氏、福留英次氏、劉立剛氏、金井宏一郎氏に心から感謝致します。これまでずっと逃げていた私を見捨てずにご指導して頂き、言葉では言い尽くせないほど感謝の思いでいっぱいです。

福本昌弘准教授は、論文発表会の前々日は翌日の朝まで面倒を見て頂き、さらに早朝の頃にくれましたサンドイッチは、あの時はうまく言えませんでした。徹夜で疲労困憊だった時の私に安らぎを与えてくださいました。この事はこの先ずっと忘れないと思います。佐伯幸郎氏には、何もかもお世話になりっぱなしでたくさんご迷惑もお掛けしました。研究以外にも本当にいろいろとお世話になりました。思い出も作る事ができました。

また、お互い福本研究室の同じ4年生の皆様にも心から感謝致します。皆様にも私はお世話になってばかりでした。

最後になりましたが、私を支えてくださった全ての方々に心から深く感謝致します。

参考文献

- [1] H.P. スウ, 佐藤平八 訳, フーリエ解析, 森北出版, 1979.
- [2] 山崎芳男, 金田豊, “量子化雑音の一般化調和解析による分析”, 音・音場のデジタル処理, コロナ社, 2000.
- [3] 高橋進一, 池原雅章, デジタルフィルタ, 培風館, 1999.