

時間分解能と周波数分解能を両立させる超高精度の次世代型聴覚指標の検討

広 林 茂 樹

富山大学大学院理工学研究部(工学)教授

1 はじめに

音楽信号の解析は、これまでに多くの研究成果があり、現在も様々研究が続けられている。音楽信号は基本的にいくつかの周波数成分を含み、かつ時間に応じて微細に周波数が変化している信号であることが多い。この音楽信号を解析し、周波数の時間的変動の様子を可視化する手段として、短時間窓によるフーリエ変換を用いたスペクトログラムがよく用いられる。しかしながら、短時間窓フーリエ変換はその性質上、周波数分解能が低下し、周波数の特定が難しくなる。また、窓長を長くとった場合には窓内の信号が平均化されて解析されてしまうため、窓内で周波数変化を伴う信号についての解析精度が低下してしまう。このように、フーリエ変換によるスペクトログラムでは、周波数分解能と時間分解能の両立が難しい。特に、楽器演奏および歌唱における技法の一つである、ビブラートのような微細な周波数変動をともなう音楽信号について、実際にどのくらいの周波数変動があるのかを正確に読み取ることは非常に難しい。また、周波数変動の幅、割合などといった、ビブラートのパラメータは個人個人のさじ加減であり、定量的な評価がなく、試行錯誤を重ね、主観的な評価によってのみ最良なパラメータを得ている。ビブラートに限らず、音楽表現技法の詳細なパラメータを精度良く解析し、可視化することが出来れば、定量的な評価をすることができ、技法習得の補助、音声合成の表現力の向上、コンピュータによる演奏の再現、あるいは人工的に楽器を作り出すことなどができる可能性がある。

一方で、上記のフーリエ変換の欠点を補う手法として、窓関数、ゼロ付けなどがある。窓関数は、ハミング窓、ハンニング窓などを短時間窓にかけ合わせ、周波数域におけるサイドローブを抑圧する。ゼロ付けは短時間窓に切り取った後、0を付加することによってデータ点数を増加させ、見かけ上の周波数分解能向上を図るものである。しかしながら、いずれの手法も見かけ上の周波数分解能向上を図るものであり、劇的な結果改善を得ることはできない。また、瞬時周波数解析(Instantaneous Frequency)という手法は、位相情報の微分値を利用してスペクトルの周波数、時間のそれぞれを補正するものであるが、振幅の補正はされず、時間-周波数平面上のスペクトルを再配置するのみである[1]-[5]。別の解析手法としてはMUSIC法(Multiple Signal Classification)がある。これは信号ベクトルについての固有値を利用して周波数スペクトルを推定するものである。周波数特定精度は非常に高いが、振幅の特定については難点があり、オーダ数が適切に選択されていない場合についても、精度が低下するといった問題がある[6]-[11]。さらに別の手法として一般調和解析(Generalized Harmonic Analysis)がある[12]-[16]。これは複数の異なる窓長の解析窓をもちいて選択的に周波数を特定する手法であり、精度は向上しているが、窓長が解析対象信号の周期の整数倍になっていない場合には、確実に誤差が発生してしまう。前述のとおり、さまざまな手法が提案されているが、そのどれもが一長一短であり、周波数、位相、振幅のすべてを精度よく解析できる手法ではなかった。

最近、著者らが研究を行っている高い周波数分解能をもつ周波数解析手法、Non-Harmonic Analysis(NHA)では、解析窓の影響を受けにくくしたことにより、微細な周波数変化を可視化することが明らかになっている[17, 18]。そこで、NHAの周波数分解能の良さを利用し、時間分解能の定評的な実験を行い、時間分解能と周波数分解能を両立させる解析への応用を試みた。

2 NHAについて

一般に、時間的に周波数が変動している信号の解析短時間窓で信号を分割し、フーリエ変換を応用して、時間的な周波数変動をみることが出来る(Short Time Fourier Transform)。ただし、時間分解能を高めるため時間窓を短くすると周波数分解能が向上しない。例えば、次式のような周波数の変動がない単純な減衰振動モデルでも、包絡線と周波数を独立に抽出することは難しい。

$$y(t) = a^t \sin(2\pi ft + \phi) \quad (1)$$

この周波数特性はよく知られていつように図1 に示される周波数特性になる。また、STFTで時間周波数特性を求めても分析窓の影響を受け、図2 のような包絡線情報と周波数情報が分離されず、図3 を鈍化させる。

著者は最近、この問題を解決するためにNHAを開発した。NHAは、非線形方程式を解くことでフーリエ係数を推定しているため、分析窓長による影響が小さく、正確に周波数とそのパラメータを推定できる。[19, 20] 式(5) はその基本となる最小二乗法を用いた式で、この式を用いて対象信号と正弦波モデルの信号の差の二乗和が最小値になるように周波数 と振幅 と初期位相 を求めている。

$$F(\hat{A}, \hat{f}, \hat{\phi}) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \{x(n) - \hat{A} \cos(2\pi \frac{\hat{f}}{f_s} n + \hat{\phi})\}^2 \quad (2)$$

この方法を使えば、分析窓の影響を軽減させることができるため、短い窓長でも周波数分解能を低下させることなく、時間分解能と周波数分解能を両立させる可能性がある。これらを両立させれば、時間的な細かい周波数変化を正確にとらえることができ、厳密で正確な音質評価を行うこと可能になる。

一般に、GHAはDFTの発展型の中でも精度が最も良いものと言われている[15, 16]。これらの解析では、周波数分解能が分析窓長に依存している。これは、1つの分析窓長に見かけ上、複数の窓長を持たせているからである。しかし、いずれの場合にもその分解周波数は有限長であり、それ以外の周波数が目的信号となった場合には、解析することが出来ない。図4は、各分析窓長におけるDFT, GHAの分析可能周波数の数である。ここでの分析可能周波数とは、目的信号のスペクトルの数と分析後のスペクトルが一致する場合のみを考えている。すなわち、DFTでは窓長が 個の場合、 $0, f_s/N, 2f_s/N, \dots, N$ [Hz]の 個の分解周波数を有する。これによりDFTは、データ長の約半分に対し、GHAは1桁以上向上している。しかし、解析対象の信号が正しく解析できる周波数と異なった場合、最も近い分解周波数とその周辺にあらわれる小さなスペクトルの周波数のように複数の周波数が出現する。

そこで、NHAの周波数分解能を検証するため、DFTとGHAとの比較実験を図5で行なった。実験では、分析窓長1秒(512 samples)とし単一正弦波を解析し、それぞれの手法によって正弦波を1本抽出し元の信号との二乗誤差を調べた。

DFTでは基本周波数の整数倍以外の周波数で分析精度が悪くなっている。GHAで1Hz以上では2~5桁向上している。これに対し、NHAではDFTに比べ1Hz以上で10桁以上向上していることがわかる。また、1Hz以下では、DFTとGHAの精度は同じであるが、NHAでは分析窓長の影響を受けず、正しく周波数等のパラメータを推定できていることがわかる。このように、DFTの発展型であるGHAに比べても高い精度で分析できることがわかる。

3 人工音による精度検証

コンピュータ上で周波数ゆらぎを持つ音楽信号を仮定して、信号を人工的に作成し、解析を行うことで、実際のパラメータをどこまで正確に抽出できているかを検証する。

解析対象の信号は以下の式により生成した。

$$x(t) = \cos\left\{2\pi \frac{f_t}{f_s} t - \frac{v_f}{f_f} \cos\left(2\pi \frac{f_f}{f_s} t\right)\right\} \quad (3)$$

これは、サンプリング周波数 f_s において、周波数 f_t (Hz)を中心として振幅 v_f (Hz)の正弦波のような周波数変動を、一秒間に f_f 回のゆらぎを伴う信号である。今回の実験では $f_s = 44100$, $f_t = 2400$, $v_f = 50$, $f_f = 90$ とした。縦軸を周波数、横軸を時間として、図6 のような特性を持つ。従来法として、広く利用されておりMATLAB にも関数として用意されているFFT とMUSIC 法を比較対象とし、FFT, MUSIC法, NHA のそれぞれの手法で解析を行ったものを以下に示す。

FFT による解析では、0 付けを行わず、窓長1024 点で解析した場合、周波数分解能が約43.07Hz となるが、比較的大きな解析窓長であるにもかかわらず周波数分解能が不足しているため、図7 のように、真値である紫色の破線に対して周波数分解能ごとにブロック状でしか表示することができない。そこで今回の実験においては、それぞれの解析窓長に切り出し、ハニング窓を適用したのち、データ点数が44100 点になるまで解析窓終端に0 を付加してFFT を行い、周波数分解能を補正している。MUSIC 法による解析ではMATLAB の関数

として用意されているPseudo MUSIC 法 (pmusic) を用いて、擬似スペクトル数を44100本とし、オーダを1として解析を行った。NHAによる解析では切り出した解析窓長のデータのみで解析を行い、スペクトル抽出数を1とした。解析窓のシフト長はいずれの手法も1点である。

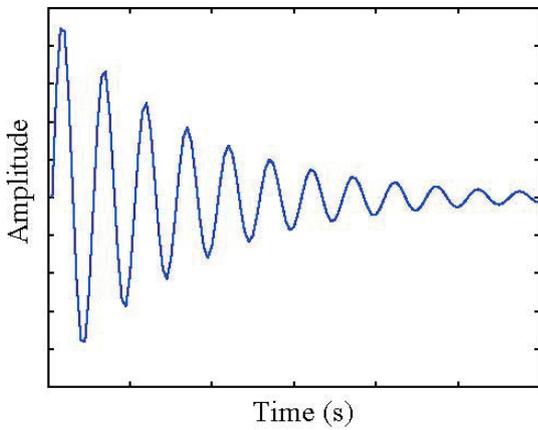


図1：減衰信号の時間特性

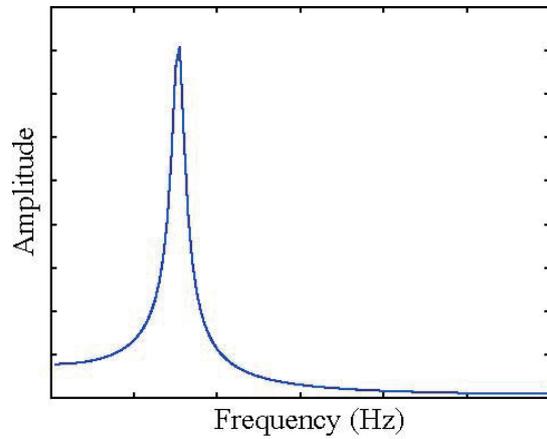


図2：減衰信号の周波数特性

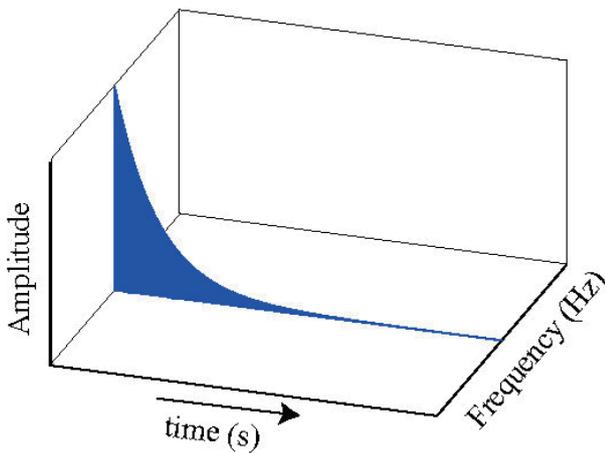


図3：減衰信号の理想的な周波数一周波数特性

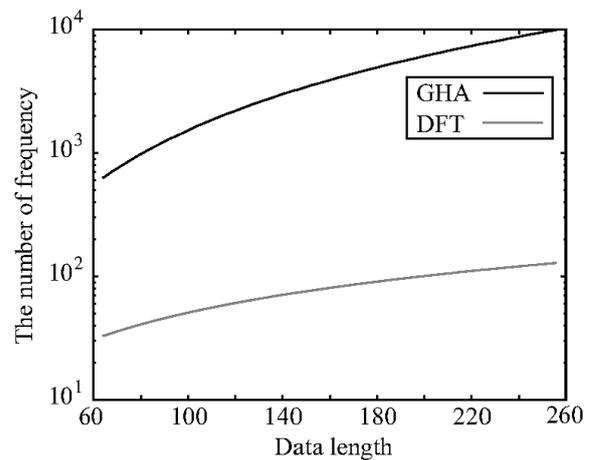


図4：DFT, GHAの周波数分解能

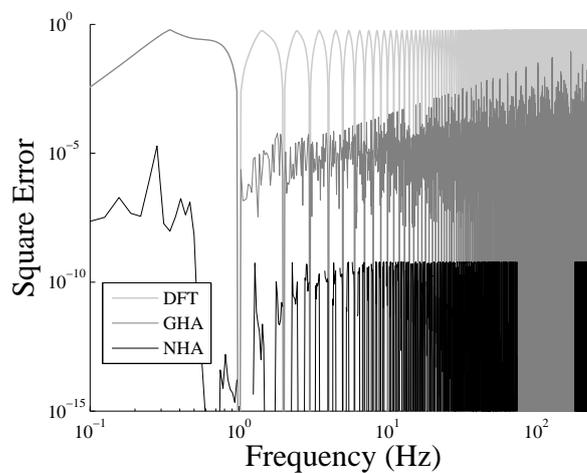


図5：二乗誤差 (フレーム長512)

図8 は解析窓長が128 点の場合において、(a)FFT, (b)MUSIC 法, (c)NHA のそれぞれの解析手法によるスペクトログラムを示している。縦軸は振幅、右の横軸が時間、左の横軸が周波数となっている。この図では表示している周波数帯域が比較的広いので、どの解析手法もスペクトルが1 列に並んでいるような状態になっている。表示する周波数帯域をしぼり、縦軸を周波数、横軸を時間として表示したものを図9 に示す。高い値から低い値になるにつれて、黒色から白色に変化するようなグレイスケールで振幅を表現している。また、真値を紫色の破線で示す。図9(a) のFFT による解析結果について見てみると、変動していることはかろうじて読み取ることができる。しかし、全体的に非常にぼやけてしまい、どの程度の幅で周波数が変動しているのか、変動の詳細な情報を正確に読み取ることはできない。図9(b) のMUSIC 法による解析結果では、FFT と比較すると周波数変動の様子が非常にはっきりわかるが、周波数が急激に変化している部分(カーブ部)で若干の誤差が見られる。これは解析窓内の信号が平滑化されたためと考えられる。これらに対して図9(c) のNHA による解析結果では、スペクトルを線として抽出することができるため、周波数変動がさらに精細な像で示されていることがわかる。こちらもMUSIC 法と同様に周波数のカーブ部に若干の誤差が見られるが、誤差量はMUSIC 法よりも小さく、真値に非常に近い結果が得られている。誤差の原因はMUSIC 法と同様、解析窓内の信号が平滑化されたものと考えられる。図8 に対し、振幅を含めた3 次元の図で表現したものが図10 である。縦軸が振幅、左の横軸が周波数、右の横軸が時間をそれぞれ表している。本来の振幅は式3 からわかるように最大振幅が1 であり0 dB である。図10(a) のFFT による解析結果を見てみると、図8(a) の山の頂上付近を拡大している状態だが、起伏の表現が乏しくなってしまう。また、0 付けの影響により、パワーが分散してしまい、本来の振幅よりも非常に小さな値となっており、ほぼ一定の値を維持できているものの、正確な振幅推定が出来ていないことがわかる。図10(b) のMUSIC 法では擬似スペクトルという形ではあるものの、振幅が非常に不安定な表現になっており、ここから信号を再現する場合にはこのままでは難しい状態である。一方、図10(c) のNHA による解析では、ほぼ真値どおりの0dB であることが正確に表現されている。次に、解析窓長が64点の場合のそれぞれの解析手法による結果を図11 に示す。図11(a) のFFT による結果をみると、窓長が128 点の場合と比較して、スペクトルの太さがわずかに時間方向に対して小さくなっている。これは、解析窓による平滑化の影響が小さくなり、時間分解能が向上したためである。しかし、周波数方向についての広がり依然として広く、ぼやけた像となっている。このように、FFT による解析においては、0 付けや窓がけなどの手法を用いたとしても、時間分解能と周波数分解能のトレードオフの問題は解消されない。図11(b) のMUSIC 法による結果を見ると、窓長が128 点の場合に見られた誤差が改善され、ほぼ真値と一致している。解析窓内の平滑化の影響が小さくなり、時間分解能が向上したためであると考えられる。図11(c) のNHA による結果を見ると、MUSIC 法と同様にほぼ真値と一致するような結果が得られた。図10 と同様に振幅の様子を図12 に示す。解析窓長が64 点、128 点のMUSIC 法の振幅が非常に不安定であることがわかる。

以上のことから、MUSIC 法は周波数変動を細かく見ることができ一方で、同時に振幅を正確に取ることができないという一面も併せ持っている。それに対して、NHA による解析では周波数変動と振幅を、どちらも正確に特定することができていることがわかった。

さらに非常に微細な周波数変動をもった信号を解析した結果を図13 に示す。(a)はFFT, (b)はMUSIC 法, (c)はNHA による解析結果をそれぞれ示している。ここでの解析対象信号は、式3 において $f_s = 44100$, $f_i = 2000$, $v_f = 1$, $f_f = 100$ とした。また、すべての解析手法において解析窓長は64 点、シフト長は1 点とし、FFT については解析窓長に切り出した後、ハニング窓を掛け合わせる。0 付けを解析データ長が441,000 点になるまで行った上で解析した。MUSIC 法については擬似スペクトル本数を441,000 本として解析を行った。実験結果中の紫色の破線は真値を示している。結果をみると、図13(a) のFFT では膨大な量の0 付けを行っているにもかかわらず、周波数が変動していることすら判断できない状態になっている。0 付けがあくまで見かけ上の周波数分解能の向上をはかる手法であり、1 本のスペクトルが引き伸ばされて見えていることを示している。図13(b) のMUSIC 法、図12(c) のNHA では、紫色の破線で示された真値とほぼ一致しており、非常に高い精度で解析できていることがわかる。振幅の様子を見るため、斜めから結果を見たものを図14 に示す。図10, 12 と同様に、MUSIC 法による解析結果では振幅が非常に不安定であり、真値である0 dB からかけ離れた値となっている。一方、NHAによる解析結果は0 dB であることがはっきりと示されており、正確にパラメータを抽出できていることがわかる。

以上のように、MUSIC 法はごくわずかな周波数の変動も見ることができ、振幅の推定は難しい。一方、NHA はMUSIC 法と同程度かそれ以上の周波数推定精度を持ちながら、振幅も正確に推定できていることがわかる。

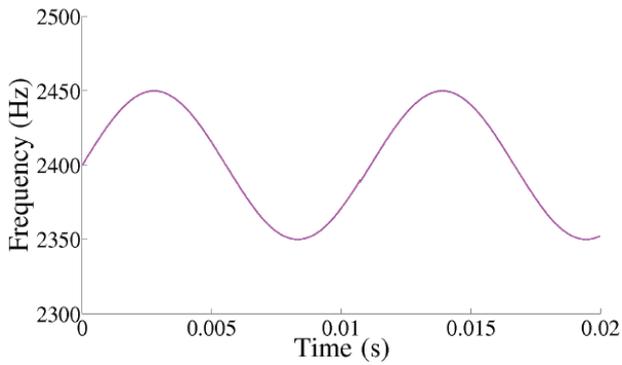


図6: 設計した音源の時間周波数特性 (理想特性)

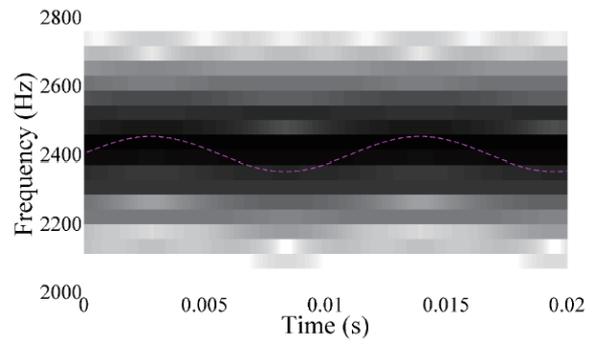
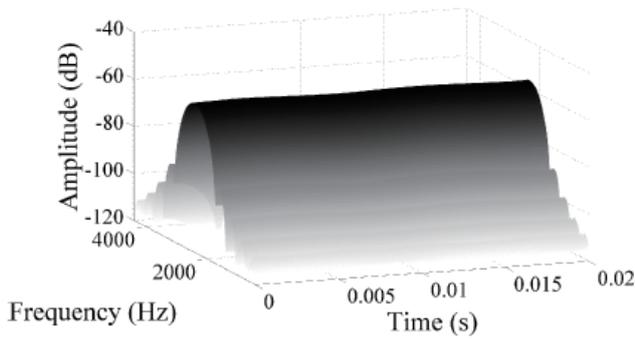
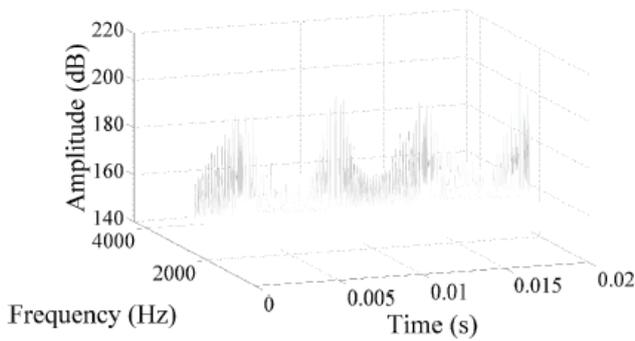


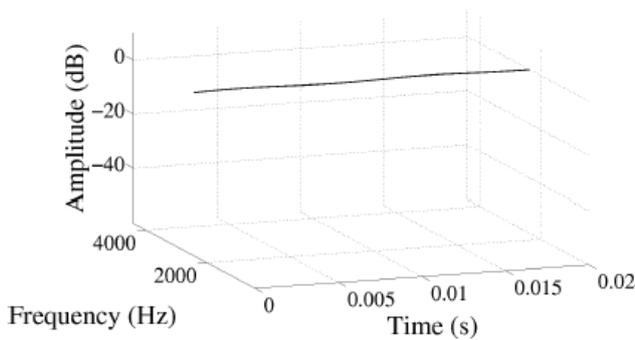
図7: Analysis by FFT without zero-padding (frame length:1024, shift length:1)



(a)

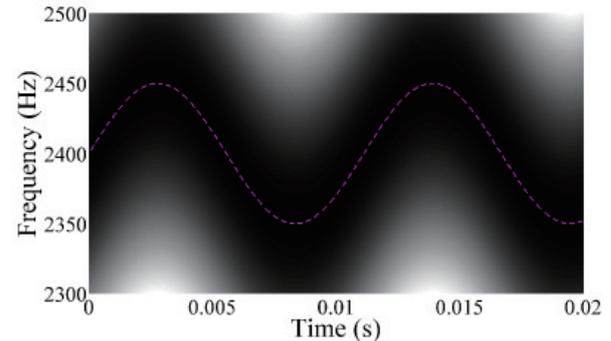


(b)

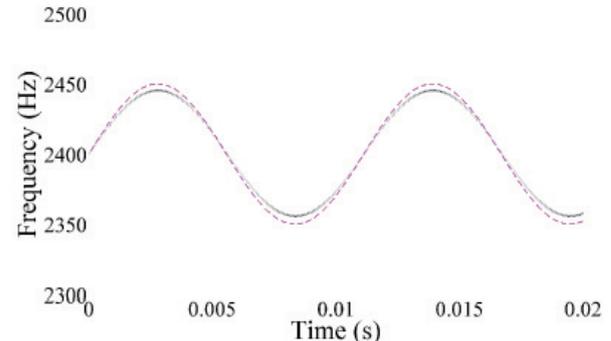


(c)

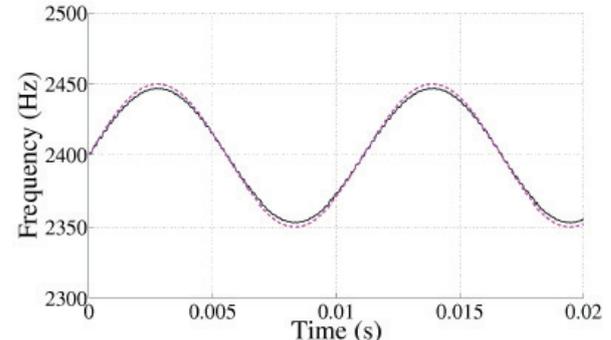
図8: Analysis of 128 point window in wide frequency range (a) FFT with zero-padding and hanning window (b) pseudo MUSIC(number of order:1) (c) NHA



(a)

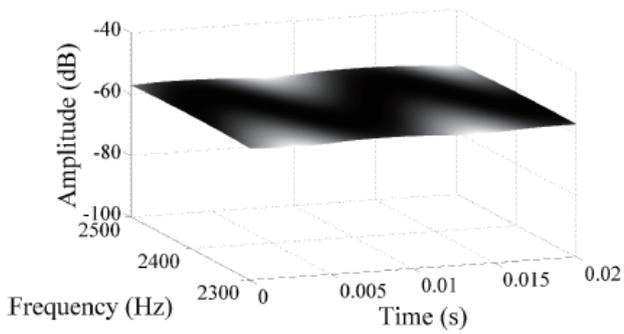


(b)

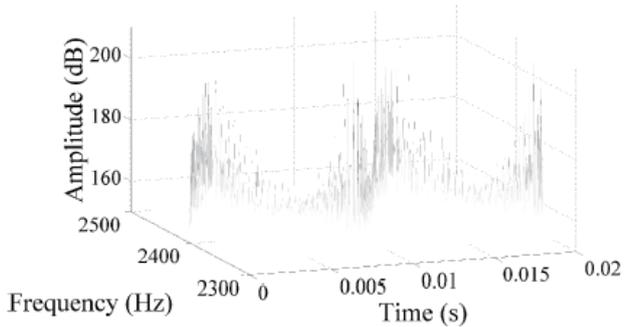


(c)

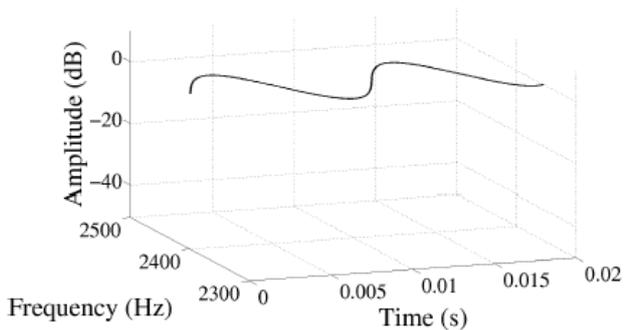
図9: Analysis of 128 point window (a) FFT with zero-padding and hanning window (b) pseudo MUSIC(number of order:1) (c) NHA



(a)

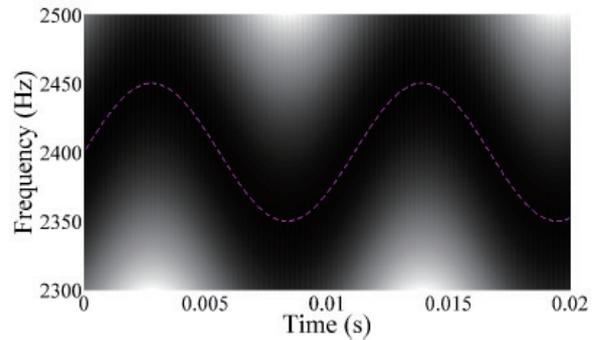


(b)

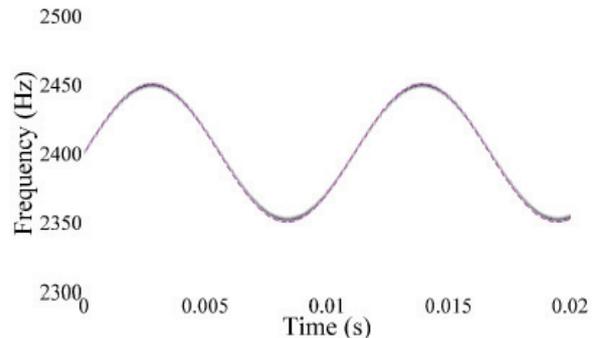


(c)

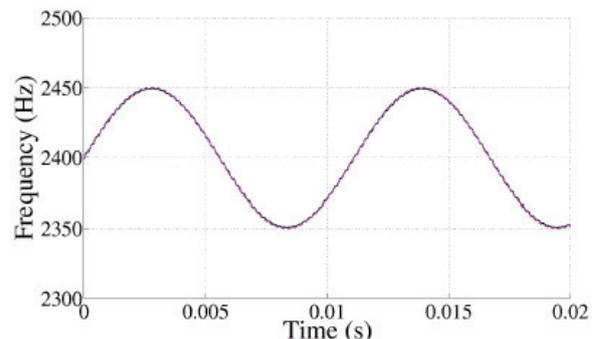
図10: Amplitude of Analysis of 128 point window
 (a) FFT with zero-padding and hanning window
 (b) pseudo MUSIC(number of order:1) (c) NHA



(a)



(b)



(c)

図11: Analysis of 64 point window (a) FFT with zero-padding and hanning window (b) pseudo MUSIC(number of order:1) (c) NHA

4 音楽信号についての解析結果

実際の音楽信号を用いて、それぞれの解析手法によって周波数変動をどの程度可視化することができるのかを検証する。解析に用いた信号はホールで収録された演奏が収められたCD からトランペットソロで、同じ音を連続で演奏している部分0.3 秒分を抜き出したものである。図15(a) に時間領域における実際の信号、(b) に0 付けを行わないFFT によるスペクトログラムの縦軸を周波数、横軸を時間として示す。この演奏は0.1 秒付近で同じ音を吹きなおしているため、音量が大きくなり、見られる倍音数が増加している。このスペクトログラムより、倍音数は多いところで17 番目まで見ることができる。解析はシフト長1点とし、FFT についてはハミング窓を使用し、解析窓にデータ長が44100 点になるように0 を付加した後に解析する。MUSIC 法についてはオーダー数を17 とし、それぞれの解析窓において44100 本の擬似スペクトルを抽出した。

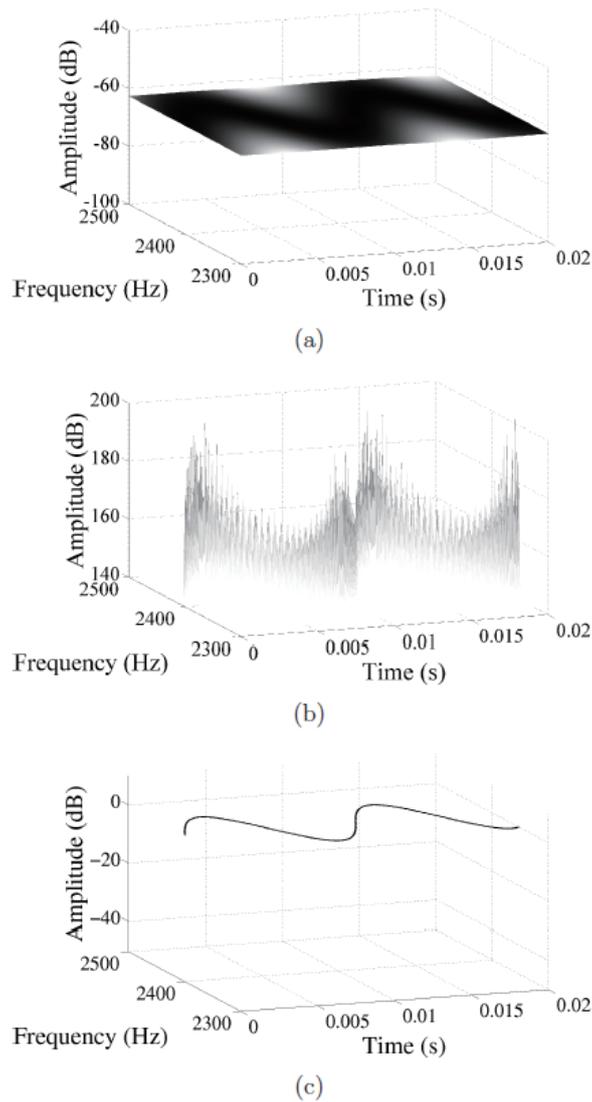
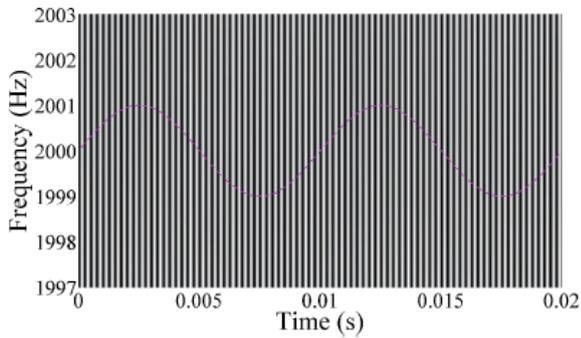


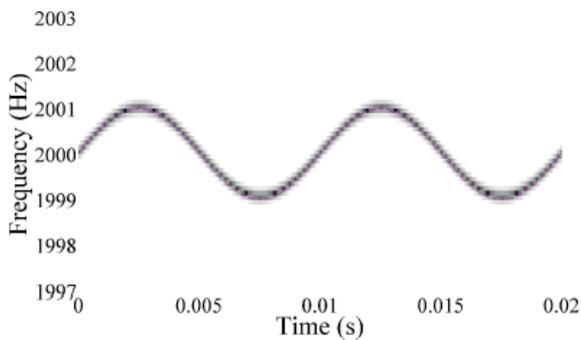
図12: Amplitude of Analysis of 64 point window (a) FFT with zero-padding and hanning window (b) pseudo MUSIC(number of order:1) (c) NHA

図15(b) のスペクトログラムから、一見すると周波数変動が見られない、直線のように見える倍音のうち、比較的高い周波数になっている3倍音目についての解析結果を図16に示す。振幅を高い値から低い値にかけて黒から白になるようなグラデーションで表現し、カラーバーの単位はデシベル(dB)である。それぞれ(a)がFFT、(b)がMUSIC法、(c)がNHAによる解析結果である。FFTによる解析結果を見てみると、周波数推定スペクトルが広い範囲に拡散してしまっているため、周波数や振幅の変動を読み取ることは非常に難しい。MUSIC法による解析結果ではFFTによる結果と比べると、明瞭なスペクトルを確認できるが、0~0.1秒部分と0.25~0.3秒部分でスペクトルが大きく広がってしまっている部分がある。これは、倍音数が17である部分が0.1~0.25秒の部分であり、それ以外の部分では指定のオーダー数と倍音数が一致しないため、誤差が大きくなったと考えられる。このように、実際の音楽信号では必要なオーダー数は時間経過とともに変動するため、MUSIC法による解析では常に高い精度の解析結果が得られるとは限らない。一方、NHAによる解析結果を見てみると、雑音のようなスペクトルが点在しているものの、スペクトルの形状をしっかりと読み取ることができる。続いて、振幅の様子を見るため、スペクトログラムを斜めから見たものを、図17に示す。それぞれ縦軸が振幅、左の横軸が周波数、右の横軸が時間を示している。図16(b)のMUSIC法による解析結果を見ると、本来振幅が高いはずの0.1秒付近の吹きなおし部分が低い振幅となっており、明らかに実際とは異

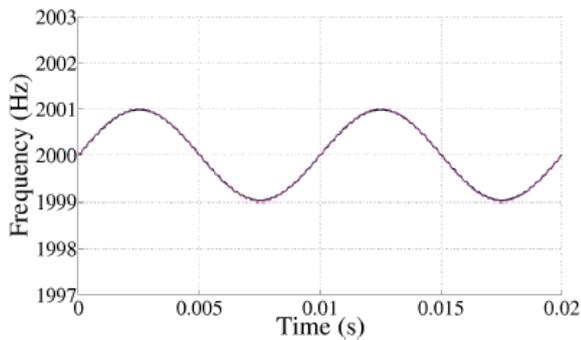
なった振幅が示されていることがわかる。図17(a) のFFT の結果では、山の頂点部分を結ぶことで振幅の変化を読み取ることができるが、図17(c) のNHA の結果ではスペクトルそのものが線として抽出できているため、振幅の変化をよりはっきりと読み取ることができる。



(a)



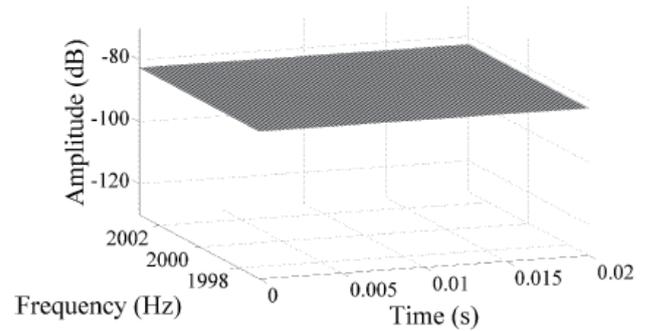
(b)



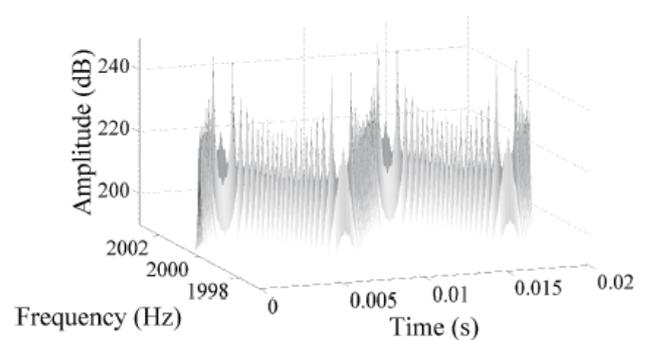
(c)

図13: Analysis of 64 point window in hard environment (a) FFT with zero-padding and hanning window (b) pseudo MUSIC(number of order:1) (c) NHA

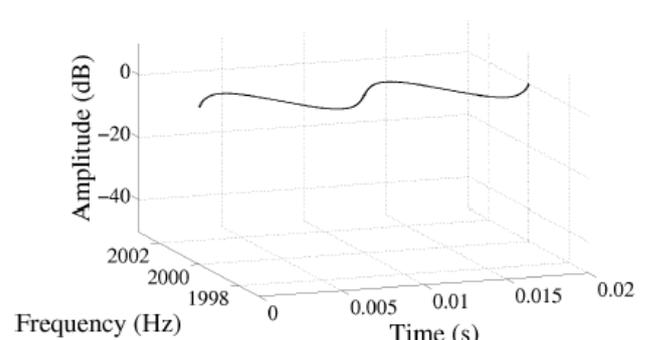
MUSIC 法でこれらをも特定する場合には、オーダ数を厳密に指定しなければ正確に特定することができず、刻々と変化していく音楽信号を解析する場合において、実用性に乏しい。それに対し、NHAによる解析では、ある程度のスペクトル抽出数を確保すれば、倍音数にとらわれることなく精細な解析結果を得ることが可能であり、これまで見ることができなかった情報、あるいは見落としていた情報を読み取ることができる可能性がある。



(a)



(b)



(c)

図14: Amplitude of analysis of 64 point window in hard environment (a) FFT with zero-padding and hanning window (b) pseudo MUSIC(number of order:1) (c) NHA

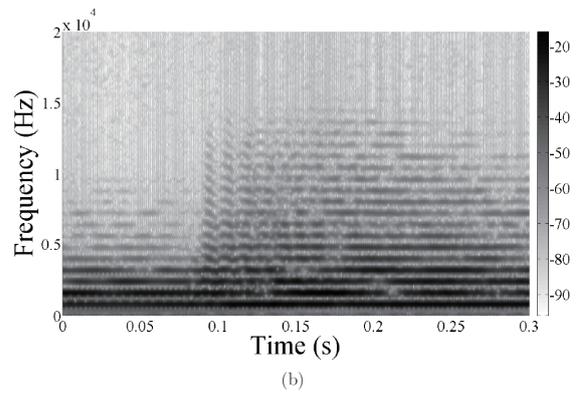
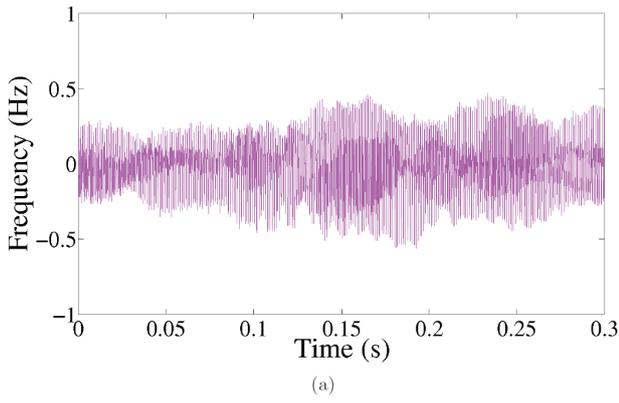


Figure 15: Trumpet tone in (a) time domain and (b) frequency domain.

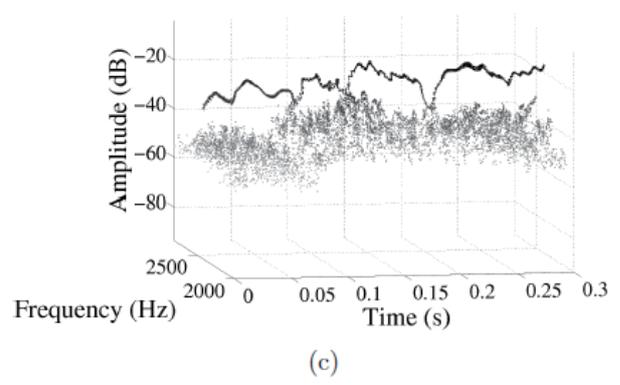
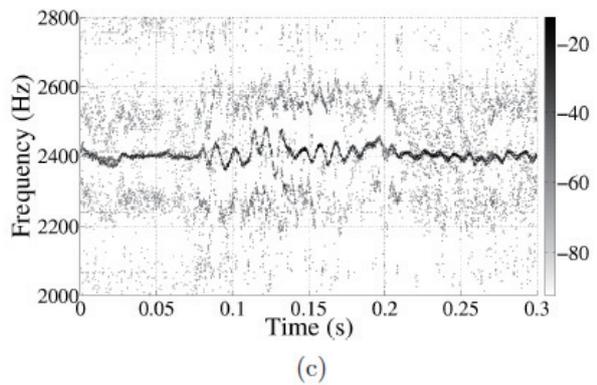
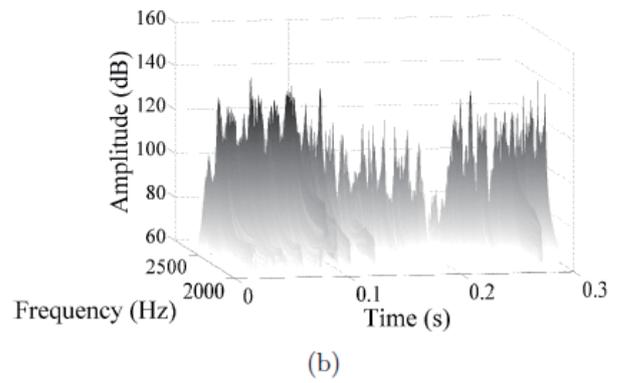
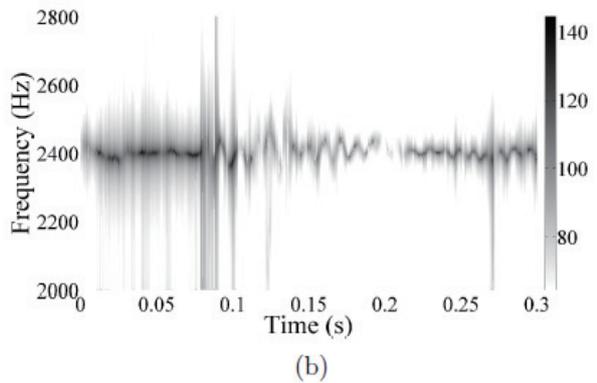
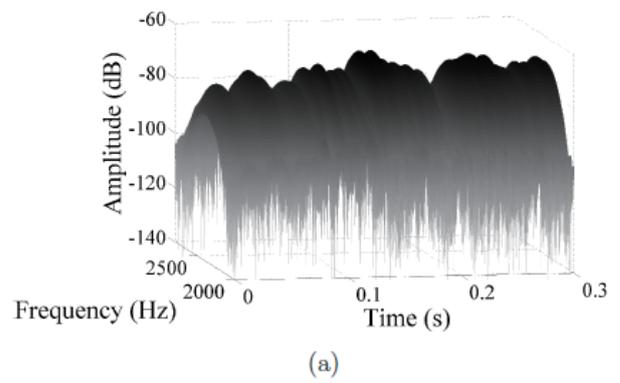
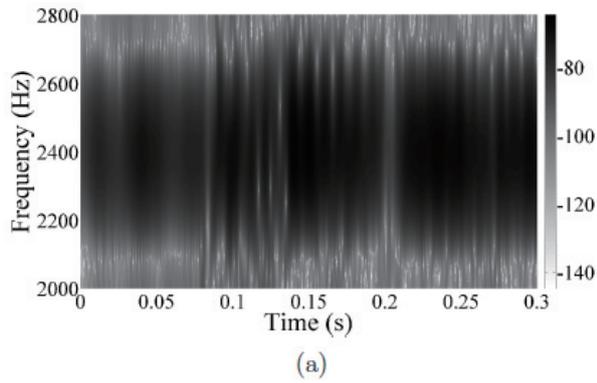


Figure 16: Analysis of 3rd harmonic of trumpet tone by 256 point window (a) FFT with zero-padding and hamming window (b) pseudo MUSIC (number of order:17) (c) NHA (number of spectrum:20)

Figure 17: Amplitude of 3rd harmonic of trumpet tone by 256 point window (a) FFT with zero-padding and hamming window (b) pseudo MUSIC (number of order:17) (c) NHA (number of spectrum:20)

5 まとめ

音楽信号の解析は、通常、短時間窓による周波数解析法が使われる。これまでに多くの研究成果があるが、そのどれもが一長一短であり、周波数、位相、振幅のすべてを精度よく解析できる手法はなかった。そこで、高い周波数分解能をもつ周波数解析手法NHAを短時間窓解析に応用し、広く利用されてるFFTとMUSIC法との精度検証を行った。その結果、人工的な微細な周波数変動を持った信号を解析した場合、MUSIC法とNHAによる解析の精度が非常に高かった。しかしながら、MUSIC法は振幅を正確に特定することができず、周波数、振幅の両方を精度よく解析できたものはNHAのみであった。実際のトランペットの収録音を解析した結果においても、MUSIC法、NHAともに高い周波数特定精度であるといえるが、MUSIC法では振幅を正確に特定することはできていなかった。また、実際の音楽信号は刻々と倍音数が増えるため、オーダ数の指定が非常に重要なパラメータとなるMUSIC法では、常に高い精度の解析結果が得られるわけではない。しかしながら、NHAによる解析では、これまでの手法による解析では見落としとしていた情報を読み取ることができる可能性があり、音楽信号における非常に繊細な周波数の変動を可視化することができることがわかった。

【参考文献】

- [1] K. Kodera, C. de Villedary, and R. Gendrin, "A new method for the numerical analysis of non-stationary signals," *Phys. Earth Planet. Inter.* 12, 142-150, 1976.
- [2] D. J. Nelson, "Cross-spectral methods for processing speech," *J. Acoust. Soc. Am.* 110, 2575-2593, 2001.
- [3] F. Auger and P. Flandrin, "Improving the readability of time-frequency and time-scale representations by reassignment method," *IEEE Trans. Signal Process.* 43, 1068-1089, 1995.
- [4] P. Flandrin, F. Auger, and E. Chassande-Mottin, "Time-frequency reassignment: From principles to algorithms," in *Applications in Time Frequency Signal Processing*, edited by A. Papandreou-Suppappola (CRC Press, Boca Raton, FL, 2003), pp. 179-203
- [5] K. Kodera, R. Gendrin, and C. de Villedary, "Analysis of time-varying signals with small BT values," *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Process. ASSP-* 26, 64-76, 1978.
- [6] M. G. Christensen, A. Jakobsson, and S. H. Jensen, "Joint high-resolution fundamental frequency and order estimation," *IEEE Trans. Audio, Speech, and Language Process.*, 15(5):1635-1644, 2007.
- [7] R. Schmidt, "Multiple emitter location and signal parameter estimation," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 34(3):276-280, Mar. 1986.
- [8] G. Bienvenu, "Influence of the spatial coherence of the background noise on high resolution passive methods," In *Proc. IEEE Int. Conf. Acoust., Speech, Signal Processing*, Vol. 4, pp. 306-309, Apr. 1979.
- [9] A. Barabell, "Improving the resolution performance of eigenstructure-based direction-finding algorithms," In *Proc. IEEE int. Conf. Acoust., Speech, Signal Processing*, Vol. 8, pp. 336-339, Apr. 1983.
- [10] B. D. Rao and K. V. S. Hari, "Performance analysis of root-MUSIC," *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Process.*, 37(12):1939-1949, Dec. 1989.
- [11] P. Stoica and A. Nehorai, "MUSIC, maximum likelihood, and Cramer-Rao bound," *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Process.*, 37(5):720-741, May 1989.
- [12] T. Terada, H. Nakajima, M. Tohyama, and Y. Hirata, "Non-stationary waveform analysis and synthesis using generalized harmonic analysis," *IEEE-SP International Symposium on Time-Frequency and Time-Scale Analysis*, pp. 429-432, 1994.
- [13] N. Wiener, "The Fourier integral and certain of its applications," Cambridge University Press, London, pp. 150-199, 1993.

- [14] Y. Hirata, "Non-harmonic Fourier analysis available for detecting very lowfrequency components," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 287, pp. 611-613, 2005.
- [15] 牛山聡, 東山三樹夫, 飯塚昌弘, 平田能睦, ``一般調和解析による波形分析,’’ 信学技報, EA 93-103, 1994.
- [16] 中沢誠, 服部永雄, 大内康裕, 山崎芳男, ``信号の特徴を利用した一般調和解析,’’ 日本音響学会誌, 61 卷 4 号, pp. 192-196, 2005.
- [17] S. Hirobayashi, F. Ito, T. Yoshizawa, T. Yamabuchi "Estimation of the frequency of non-stationary signals by the steepest descent method", *Proceedings of the Fourth Asia-Pacific Conference on Industrial Engineering and Management Systems*, pp. 788-791, 2002
- [18] 広林茂樹, 柴野洋平, 山淵龍夫"高分解能の周波数解析法を用いたスペクトルサブトラクションの改善", 電気学会論文誌 C, Vol. 125, pp. 147-148, 2005.
- [19] 片桐広伸, 胡敬焮, 平澤宏太郎, 村田純一, ``ノード数可変型 Genetic Network Programming,’’ 電学論 C, 123 卷 1 号, pp. 57-66, 2003.
- [20] 江口徹, 胡敬焮, 平澤宏太郎, 村田純一, ``Genetic Network Programming を用いた共生学習進化型マルチエージェントシステム,’’ 電学論 C, 123 卷 3 号, pp. 517-526, 2003.

〈 発 表 資 料 〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Noise reduction for periodic signals using high-resolution frequency analysis	EURASIP Journal on Audio, Speech, and Music Processing, 2011:5	2011 年 9 月