

解説



音楽情報処理

1. 計算機への音楽の入力

—「音」の分離抽出の難しさ†—

柏野邦夫 田中英彦

1. まえがき

計算機に音楽を聴かせることは難しい。われわれ人間は、音楽を聴いて主だった楽器の音色を聞き分け、メロディの流れを追ったり、また音の重なり的美しさを味わったりすることができる。音楽に合わせて歌ったり得意な楽器を演奏したりできる人もいるし、中には、耳にした音楽を楽譜に書き起こせる人もいる。ところが、一般の音楽演奏の音響信号を元に、感性情報を抽出したり、伴奏を行ったり、楽譜を生成したりといったことを人間なみに行うことのできる計算機システムは、まだ実現されていない。そのようなシステムを構築する場合にまず問題となるのは、実は一番最初の、計算機に音楽演奏を入力する部分である。

もちろん、音楽演奏の音響信号を適宜デジタル化して計算機に入力するだけであれば、特に難しいことではない。しかしここで考えている入力の実目的は、あくまで計算機上で前述のような種々の処理を行うことにある。その前処理として音響信号を記号化することが、実は大変難しいのである。そこで本稿では、この部分に具体的にどのような課題が存在するのか、またそのような課題を考えることにどのような意義があるのかを、最近の話題を概観しながら考えてみたい。

2. 音楽を入力する目的

音楽演奏の音響信号を計算機に入力する目的は、大別して次のように整理することができる。

(1) 音楽演奏の可視化

音楽演奏を、楽譜など目に見える形にして表示お

よび蓄積する^{1),2)}。自動採譜システムはその代表的な例である。音楽活動支援のほか、もともと楽譜の存在しない音楽や即興演奏を楽譜化したいというニーズが存在する。また一般に音楽には楽譜に記されない情報が豊富に存在するが、それを抽出し可視化することも重要なテーマである。

(2) 音楽演奏の分析

心理学的分析としては、たとえばタイミングや強弱のゆらぎと聴取者の心理量との関係を調べるなどの研究が考えられる。音楽学的分析としては、楽曲の音楽的構造を抽出したり³⁾音名や音長に関する統計をとることなどが考えられる。工学的手法として、音楽から感性情報を抽出する試みもある⁴⁾。

(3) 音楽演奏の生成

他者の演奏を聴き、それに呼応した音楽演奏を行う自動演奏(伴奏)システムの研究^{5),6)}が行われている。また音楽演奏の分析結果をもとに、表情豊かな自動演奏を行う試みもみられる。

音響信号を入力としてこれらの処理を行うためには、それぞれの処理に対する前処理として、音響信号から音楽を構成する基本的な要素である「ひとつひとつの音」に対応する記号表現を抽出しなければならない。

3. 自動採譜システムの研究

上にあげたそれぞれの目的に沿った研究のうち、これまで最も精力的に取り組まれてきたのは、音楽演奏の可視化、中でも自動採譜システムの研究である。そこで本章では、自動採譜システムを例にとって研究の経緯を辿り、音楽の入力において現在何が問題になっているのかを明らかにしよう。

自動採譜においては、音響信号の周波数解析、拍の抽出、時間的情報の抽出(音符や休符の種類

† Can Computers Listen to Music? —Source Separation and Symbolization of Musical Sound— by Kunio KASHINO and Hidehiko TANAKA (Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, The University of Tokyo).

† 東京大学工学部電気工学科

の同定), 調の決定, などの処理が必要であるが, 中でも周波数解析に基づく基本周波数の抽出は最も基本的な処理である. 高速フーリエ変換 (FFT) のアルゴリズムが発表されたのは 1965 年のことであるが, 1970 年代には FFT を応用した自動採譜が試みられるようになった⁷⁾. このころから 1980 年代半ばごろにかけて研究されたシステムは, 単旋律やごく簡単なポリフォニーを対象とするものであったが^{8), 9)}, それでも基本周波数やリズムのゆらぎなど, いくつかの問題があることが認識された.

1980 年代半ばを過ぎると, 採譜を行うには各種の知識が不可欠であることが指摘されるようになった. 中でも音楽に関する知識の利用が検討され, 知識処理の手法を用いた自動採譜システムの構築が試みられた. また, このころから, 多重音を対象とするシステムが本格的に研究されるようになった. 多重音では, 各音のスペクトルが重なり合うために, ある時間区間において, 含まれる音の基本周波数の抽出どころか, 含まれる音符の数の判定すら困難である. この問題に対しては, あらかじめ出現する音のスペクトルを知識としてもつことや, 各種のヒューリスティクスを適用することが行われた^{10), 11)}.

この時期を代表する自動採譜システムとしては, 片寄らによるものがあげられる^{12), 13)}. これは, 単一楽器の多重音を対象とする自動採譜システムであり, 制御モジュール, 処理モジュール, および音楽解析モジュールの三つの部分から構成されている. 制御モジュールはプロダクションシステムの形態をとっており, ルールベースの推論によって処理モジュールを起動する. 処理モジュールにおいて, 実際に基本周波数や拍の抽出などが行われる. また, 音楽解析モジュールではメロディ, リズム, コード進行, 調などの検出が行われ, その結果が一連の採譜処理に反映されるようになっている.

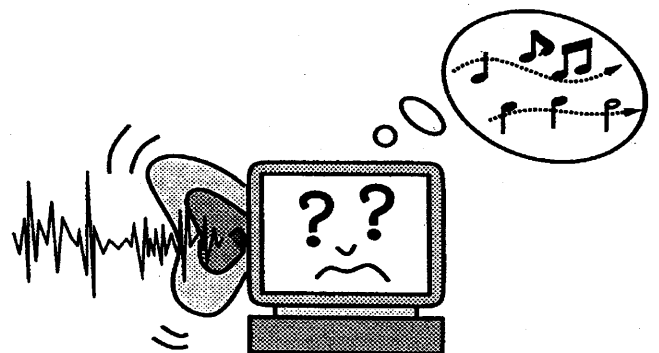
ところで, 一般にプロダクションシステムでは, しばしば知識ベースの脆弱性や知識獲得のボトルネックといった問題が生じることが指摘されている. これは, システムが, 内部にもっている知識に適合しない事態に遭遇すると有効な処理結果が得られない場合があること, また, だからと言ってあらかじめシステムに完全な知識を与えて

おくことも大変困難であることを言い表したものである. 1990 年代に入り, 複数種類の楽器の多重音を含む音楽を対象とするシステムの構築が試みられるようになると, 自動採譜システムもまた, このような問題に直面することになった. すなわち, あらかじめ登録した特定の種類の楽器演奏に対してはかなり高精度の処理ができるシステムであっても, 任意の種類の楽器演奏に対しては必ずしもうまく動作しない.

4. 問題点の分析と解決の枠組

その最も基本的な問題は, 重なり合ったスペクトルから, その中に含まれている音符を楽器の種類ごとに分けて取り出す処理であった. この処理が可能であれば, 問題は単旋律の場合に帰着する. しかし, 混合されたデータから混合する前のそれぞれのデータを求めることは, いわゆる逆問題であって解くことが難しい. 一般にこのような問題は音源分離と呼ばれており, 制約条件の与え方に関する工夫¹⁴⁾や, パターン照合に基づく方法¹⁵⁾など, 現在もさまざまなアプローチが試みられているところである (図-1).

ここでは, それらのアプローチを見通し良く行うための枠組について考えてみよう. そのためには, 「ひとつひとつの音」とは何かをあらためて考える必要がある. ここで, 音には二つの側面があることに注意を要する. 第一は物理的な側面である. 発音体の振動そのもののことを「物理的な音」と呼ぶことにする. 物理的な「ひとつの音」は, 工学的には点音源などの形でモデル化して扱うことができる. たとえば, マイクロホンアレイ



音響信号のデジタル化自体は難しいことではないが, デジタル化された音楽音響信号から, 音楽を表現する基本的な要素である「音」を抽出することは難しい.

図-1 計算機への音楽の入力における問題

などを用いて特定の位置にある音源を選択的に集音する方法があるが^{16),17)},これは物理的な音を分離する方法である。また、音源のスペクトルを既知とし、パターン照合に基づいて音源を分離する方法も、音の物理的な側面に注目した方法である。

音の第二の側面は、知覚的な側面である。知覚的な「ひとつの音」とは、「人間がひとつのものとしてとらえる音響エネルギーのまとまり」である。これを「知覚的な音」と呼ぶことにする。たとえば、モノラルのスピーカを通して音楽のアンサンブル演奏を聴く場合、物理的な音源はひとつであるが、われわれはいくつかの楽器の音を聞き分けることができる。これは、人間がひとかたまりの音響エネルギーから知覚的な音を分離抽出し、再構成する例である。

音楽の入力を考えるときには、これらの両方の側面を考え合わせることが大切である。また、これら二つの側面は相反するものでもない。人間も、知覚的な音の構成に際して音の物理的な側面を利用しているに違いないからである。実際、片耳より両耳のほうが音の聞き分けはしやすいし、音の具体的な記憶は音の聞き分けを助ける。しかし人間は、未知の音を含むモノラルの音響信号に対しても音源分離を行うことができる。これがどのような働きによるものかを調べることは、音楽の入力の研究においても有益であろう。そこで、ここでは知覚的な側面に着目してみる。

知覚的な音を考える際には、「人間がひとつのものとしてとらえる」音の場合によって異なることに注意する必要がある。つまり、音楽を聴いているとき、ピアノの単音をひとつのものとして聞くこともあれば、和音をひとつのものとして聞くこともある。しかもそれらは相互に関係をもっている。このことから、知覚的な音に対しては階層性を考える必要があることが分かる。したがって、音響信号から知覚的な音を抽出する問題は、「構造化されていない音響信号波形を元に、音響エネルギーのまとまりやそれらの関係などを抽出して、知覚的な音として構造化すること」であると言える。これが、知覚的な音の分離抽出を行う上で解決しなければならない具体的な課題ということになる。

ところで、これと類似の問題として、コンピュータビジョンの分野におけるシーン解析の問題があ

げられる。その理由は、ビジョンの分野でのシーン解析の問題は「構造化されていない画素の輝度値を元に、点、線、面などの画素のまとまりやそれらの関係などを抽出して物体として構造化し、これらの物体に関する記述を得ること」と言うことができるからである。このような類似性に基づいて、計算機への音楽の入力などの問題をシーン解析という見地からとらえる考え方が最近話題となっている。

5. 音によるシーン解析

5.1 音によるシーン解析の位置付け

計算機によって外界の状況を解析し理解することはシーン解析の問題と呼ばれ、これまでもっぱらコンピュータビジョンの分野において研究が積み重ねられてきた。しかし、シーン解析は視覚的情報のみに特有な機能ではない。あまりに日常的事務的なことなので意識することは少ないが、人間は、混ざり合った音響エネルギーを切り取り、仕分け、補って、外界の状況を理解しているのである¹⁸⁾。聴覚系のこのような働きを、心理学者 Bregman は Auditory Scene Analysis と呼んだ¹⁹⁾。本稿ではこれを「音によるシーン解析」と訳すことにする。Bregman の考え方に立てば、音楽に関連した問題である楽器音の分離やメロディの知覚などと、音声に関連した問題である「カクテルパーティの問題」²⁰⁾ や音素修復現象なども、シーン解析という見地から統一的に扱うことができる。

前章で、計算機への音楽の入力における知覚的な音の抽出の問題は、音によるシーン解析の問題とみなし得ることを述べた。では、このような考え方は、音楽の入力を考える上で果たして役に立つのだろうか。音によるシーン解析の位置付けを図に表してみると、図-2のようになる。図-2で、川の対岸にあるビジョンの分野のシーン解析では、計算機への音楽の入力の研究に比べれば、相当多くの体系的な研究の蓄積がある。また、ビジョンの分野のシーン解析では、音楽の入力という分野に比べれば、心理学的知見、生理学的知見、および計算理論に基づいた研究の方法論が比較的しっかりと確立されている。もちろん、物理的な対象の違いから、ビジョンの分野での成果をそのまま音楽の入力の問題に適用できるとは限らないが、このような考え方が、音楽の入力の研究

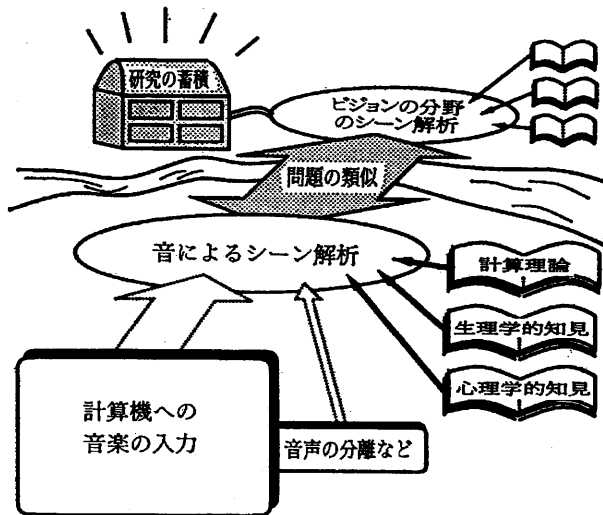


図-2 音によるシーン解析の位置付け
 計算機への音楽の入力を、音によるシーン解析の問題と考えることは有効だろうか。川の対岸にはビジョンにおけるシーン解析の問題が見えている。

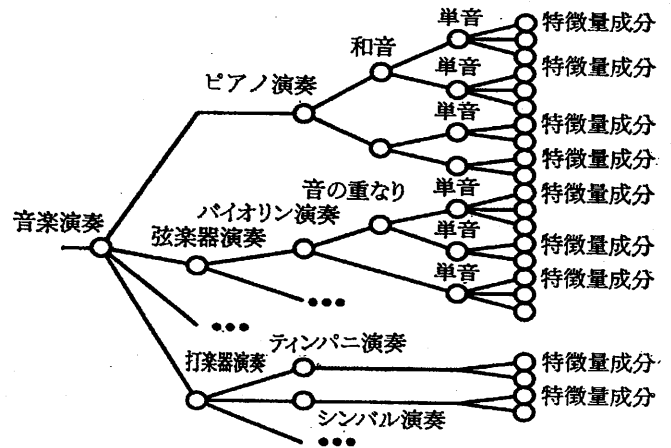
図-2 音によるシーン解析の位置付け

を見通し良く進めるための羅針盤となる可能性があるだろう。

5.2 音響エネルギーの群化と構造化

さて、音によるシーン解析において鍵となる機能は、到来した音響エネルギーを外界の事象に対応した適切なまとまり、すなわち知覚的な音に群化し、構造化することである。この群化の過程は、周波数方向の群化と時間方向の群化に大別することができる。音楽を対象とする場合について考えてみると、周波数方向の群化とは、同時に演奏されている複数の音を聞き分けたり、あるいは複数の音からなる和音の響きを聞いたりすることに対応する。また時間方向の群化とは、瞬間的な妨害音が存在する場合に前後の音のつながりから音を補完したり、あるいは時間を追って、メロディをひと続きのものとして聞き取ったりすることに対応する。

このような群化の結果として構成される知覚的な音の例を、図-3 に示す。これは、音楽演奏に対する知覚的な音の構造の一例を示したものである。人間が音楽を聴くときには、時には単音のレベル、また時には和音のレベルといったように、複数の階層にわたって、音楽を表現する基本的な要素としての音を聞き取っている。図-3 で特徴量成分とあるのは、一般に音を表現する特徴ベクトルの成分の意味であるが、ここでは音響エネルギーそのものを特徴量と考えることができる。なお図-3 では、作図の都合で時間方向の群化につい



音楽演奏における知覚的な音の階層構造の一例を示す。それぞれの○が、知覚的な音に対応している。

図-3 知覚的な音のスナップショットの例

ては描き表されていないが、実際には時間方向にも、このような階層構造がさまざまに形を変えながら連なっていると考えることができる。

では、日常瞬時にこのような問題を解決している人間は、どのような情報を手がかりにしているのだろうか。これまでの研究で、周波数方向の群化については、周波数成分の高調波関係（ある周波数成分の周波数が、基本周波数成分の周波数の整数倍になっていること）の有無、周波数成分の振幅変化の共通性やずれ（特に立ち上がりや立ち下がり時刻のずれなど）、および周波数成分の周波数変化の共通性、などの要因が関係し得ることが分かっている^{21),22)}。また時間方向の群化についても、ボトムアップ的な文脈情報や、トップダウン的なスキーマが用いられていることが、心理学的実験などによって分かっている¹⁸⁾。

5.3 音によるシーン解析の実験システム

音によるシーン解析という考え方は幅広い内容を含んでいるが、何人かの研究者がそれぞれの視点から実験システムの実装を始めているので、その具体例三つをみることにする。なお、これらのうち、たまたま音楽ではなく音声を対象とした評価実験を行っているものもあるが、音楽に対しても同様に処理が可能であるので、ここでは区別なく取り上げる。

生理学的側面に着目したアプローチの代表的なものは、Cooke と Brown の研究である^{23),24)}。彼らは、音によるシーン解析の考え方に立って、音声の雑音抑圧を行う実験システムを実装している。システムへの入力は、サイレンや電話のベル

など、さまざまな雑音が混入したモノラルの音声である。このシステムは、まず人間の聴覚的特性を模擬したモデル（蝸牛モデル）によって周波数解析に相当する処理を行う。次に、周波数成分を抽出し、それらの立ち上がり時刻のずれ、立ち下がり時刻のずれ、および高調波関係という特徴に基づいて特徴地図を作成する。この地図上で、ヒューリスティクスを用いて主要な領域をグループ化し、これを目的音声とみなして音響信号を再合成する仕組みになっている。

心理学的側面に着目したものとしては、柏野らの研究があげられる²⁵⁾。柏野らは、特徴の評価と統合を心理学的実験の結果を反映させたモデルによって行い、さらに音の記憶の利用を組み合わせて知覚的な音を抽出することを提案した。モノラルの音楽演奏を対象とする音源分離の実験システムが実装されており、処理精度に関する評価実験が行われている。

計算モデルの観点からの研究に、中谷らによる音の流れの分離 (Stream Segregation) の試みがある²⁶⁾。中谷らの実験システムは、ジェネレータ、トレーサ、およびモニタという3種類のエージェントから構成されるマルチエージェントシステムである。ジェネレータは、スペクトログラム上の周波数成分を監視しており、音の流れ (Stream) が検出されるとトレーサを生成する。トレーサは、周波数成分の高調波関係に着目して音の流れを追跡し、追跡を終了すると消滅する。またモニタは、トレーサの挙動を監視し、追跡のグローバルな制御を行う。この音の流れの分離システムは、創発的計算モデル (Emergent Computation Model) に基づくシーン解析システムの中のひとつの構成要素として位置付けられている。

以上は、音によるシーン解析のもつある側面に沿った研究の代表的な3例ではあるが、いずれもシステムの動作は初歩的なものであって、今のところ音によるシーン解析のアプローチの正当性や有効性を実証するものとはなっていない。この点は、今後の研究の進展を待たねばならない。

6. 今後の研究の展望

音によるシーン解析の考え方に影響を受けた研究や、その他の音源分離の試みも含め、計算機への音楽の入力に関する研究は、現在のところすぐ

に一般の音楽演奏の音響信号を対象とする応用に結び付けることは難しい。では、今後、どのような研究の展開が期待されるだろうか。ここでは、能動性、計算論的考察、そして音のカテゴリ化という三つのキーワードをあげる。

一つめのキーワードは、能動性である。近年、人間の聴覚系が適応性や能動性をもつことを直接的に示す実験事実が明らかになってきているが^{27), 28)}、音響信号から知覚的な音の抽出を行う工学的システムを考える上でも、パラメータ値の変更、着目する特徴の変更、動作のストラテジ自体の変更など、適応的あるいは能動的な動作が必須のものとなるだろう。

これに関する研究としては、Nawab らによる IPUS (Integrated Processing and Understanding Signals) プロジェクトがあげられる²⁹⁾。これは、音響信号理解のための、黒板モデルと種々の知識ベースに基づく情報処理方式を提案するものである。基本的には、信号処理に用いるパラメータ値をトップダウン的な知識によって文脈依存的に制御するというものである。

しかし一方で、IPUS のように一種のフィードバックによって能動性を実現するアプローチでは、どのように制御の安定性を確保するかという問題が生じる。そこで、能動性に関する定量的な検討も欠くことができないであろう。たとえば、相互情報量という概念を用い、複数の情報源から最も大きな情報量を与えるものを選択するなどの研究が注目される³⁰⁾。

二つめのキーワードは、計算論的考察である。コンピュータビジョンの分野におけるシーン解析の研究では、Marr によって提案された計算論的アプローチ³¹⁾が広く支持されている。実際、この考え方がビジョンの問題を整理し、ひいてはコンピュータビジョンシステムの構築を試みる上で、質的な進歩をもたらしたと言えるであろう。このような進歩が、類似の問題である知覚的な音の抽出の問題においても切望される場所である。これは、音の物理的側面についての考察と密接に関連している。

ビジョンの分野における計算論的アプローチは、まず解かれるべき問題は何か、何を計算すべきかをよく吟味し、それに対し現実世界に存在するどのような制約が利用できるかを検討すること

から始められた。しかし、ビジョンの方法をそのまま音の問題に対して適用することは必ずしも容易ではなく、光と音という物理的対象の違い、また視覚と聴覚というモダリティの違いを考慮する必要がある。

三つめのキーワードは、音のカテゴリ化である。本稿では「ひとつひとつの音」の抽出の問題に焦点を当てているが、2. に述べたうちのどのような処理を行うにせよ、複数種類の楽器が含まれている音楽を対象とする場合には、一般にそれぞれの音がどの楽器によるものであるかの判別も行う必要がある。このことも、実は大変難しい問題である。つまり、ある楽器に固有の音響的特徴を見出すことは一般に容易ではない。もちろん、音楽音響の分野において、種々の楽器の発音機構のモデルも研究されてきてはいるが、それは言わば典型的な例を示すものであって、カテゴリの境界を定めるものではない。この事情は、たとえば音声の分野において、各音素の音響的特徴の分析や発音機構のモデル化が行われている一方で、必ずしも各音素の認識が容易ではないということと似た面があり、一般のパターン認識に共通の難しさでもある。しかも、「ひとつひとつの音」の抽出と楽器の種類による音のカテゴリ化の処理とは、必ずしも直列的に進行するのではなく、むしろ相補的に働くべきであろう。音楽の入力の問題において、これらの点に関する本格的な検討はこれまでほとんど行われていないが、今後の重要な課題のひとつである。

7. む す び

計算機への音楽の入力に関しては、これまでに周波数解析やパターン照合の技術に立脚した研究が行われ、音楽的知識に基づく知識処理の適用も試みられてきた。そして今や、より実際的な場面で有効に機能するシステムを構築する上では、音響信号から「ひとつひとつの音」を抽出することが大きな課題となって立ちふさがっている状況である。この課題に関連する最近の話題として、音によるシーン解析という考え方がある。これは、見通し良く研究を進める上で有効な枠組になり得ると考えられるが、これまでに実装された実験システムは、いずれもまだ初歩的な段階にある。今後、能動性に関する定量的な考察や計算論的な視

点を含めた研究が進展すれば、やがては自動採譜システムや伴奏システムなど、各種の応用となって結実することも期待できるであろう。

なお本稿では、計算機への音楽の入力という問題について、音楽情報処理における特定の応用とは切り離して考えた。このため、特定の応用を期待する見地からは、応用への道筋が曖昧でつかみにくいと感じられたり、ずいぶんと遠回りであるように思われたかもしれない（実際、行くべき道のりは長そうである）。しかし一方で、本稿に述べた事項が、計算機への音楽の入力という問題のもつ奥の深さ、そして音楽という枠にとどまらないスペクトルの広さの一端を示しているとも言えるだろう。計算機への音楽の入力という問題を考えることの意義は、まさにその点にあるように思われる。

参 考 文 献

- 1) 井口征士：採譜と音楽情報処理，音楽情報科学研究会編：“コンピュータと音楽”所収，bit 別冊，pp. 30-41 共立出版（1987）。
- 2) 高澤嘉光：計算機による採譜，情報処理，Vol. 29，No. 6，pp. 593-598（1988）。
- 3) Chafe, C., Mont-Reynaud, B. and Rush, L.: Toward an Intelligent Editor of Digital Audio: Recognition of Musical Constructs, *Computer Music Journal*, 6, 1, pp. 30-40 (1982).
- 4) 片寄晴弘，今井正和，井口征士：音楽における感性情報抽出の試み，人工知能学会誌，3, 6, pp. 748-754 (1988)。
- 5) Katayose, H., Kanamori, T., Kamei, K., Nagashima, Y., Sato, K., Inokuchi, S. and Simura, S.: Virtual Performer, *Proc. of the 1993 Intl. Computer Music Conf.*, pp. 138-145 (1993).
- 6) Cook, P., Morrill, D. and Smith, J. O.: A MIDI Control and Performance System for Brass Instruments, *Proc. of Intl. Computer Music Conf.*, pp. 130-133 (1993).
- 7) Piszczalski, M. and Galler, B. A.: Automatic Music Transcription, *Computer Music Journal*, 1, 4, pp. 24-31 (1977).
- 8) 新原高水，今井正和，井口征士：歌唱の自動採譜，計測論，20, 10, pp. 940-945 (1984)。
- 9) Roads, C.: Research in Music and Artificial Intelligence, *ACM Computing Surveys*, 17, 2, pp. 163-190 (1985).
- 10) Mont-Reynaud, B.: Problem-Solving Strategies in a Music Transcription System, *Proc. of IJCAI 85*, pp. 916-918 (1985).
- 11) Chafe, C., Kashima, J., Mont-Reynaud, B. and Smith, J.: Techniques for Note Identification in Polyphonic Music, *Proc. of the 1985 Intl. Com-*

puter Music Conference, pp. 399-405 (1985).

12) 片寄晴弘, 井口征士: 多重音を対象とした知的採譜システム, 日本音響学会音楽音響研資, MA 87-18 (1988).

13) 片寄晴弘, 井口征士: 知的採譜システム, 人工知能学会誌, 5, 1, pp. 59-66 (1990).

14) 植田 護, 橋本周司: ブラインドデコンポジション問題としての音源の分離と同定, 情報処理学会研究報告 (93-MUS-3), 93, 93 (1993).

15) 長束哲郎, 才脇直樹, 井口征士: 異種楽器を対象とした採譜システム, 信学 '92 春大会, D-499 (1992).

16) Flanagan, J. L., Johnston, J. D., Zahn, R. and Elko, G. W.: Computer-Steered Microphone Arrays for Sound Transduction in Large Room, *J. Acoust. Soc. Am.*, 78, 5, pp. 1508-1516 (1985).

17) 永田 仁, 安倍正人, 城戸健一: 多数センサによる音源波形の推定, 日本音響学会誌, 47, 4, pp. 268-273 (1991).

18) 津崎 実, 河原英紀: 「切取り, 仕分け, 補う」聴覚系能力—外界を捉える手段としての聴覚系の機能を探る—, *ATR ジャーナル*, 13, pp. 24-29 (1993).

19) Bregman, A. S.: *Auditory Scene Analysis*, MIT Press (1990).

20) Cherry, C. E.: Some Experiments on the Recognition of Speech, with One and with Two Ears, *J. Acoust. Soc. Am.*, 25, 5, pp. 975-979 (1953).

21) Hartmann, W. M.: Pitch Perception and the Segregation and Integration of Auditory Entities, in Edelman, G. M. et al. (eds.): *Auditory Function, Neurobiological Bases of Hearing*, pp. 623-645, John Wiley & Sons (1988).

22) Handel, S.: *Listening*, MIT Press (1989).

23) Cooke, M.: *Modelling Auditory Processing and Organisation*, Ph. D. Thesis, University of Sheffield (1991); Published by Cambridge University Press (1993).

24) Brown, G. J.: *Computational Auditory Scene Analysis: A Representational Approach*, Ph. D. Thesis, Department of Computer Science, University of Sheffield (1992).

25) 柏野邦夫, 田中英彦: モノラル楽器音の音源分離のための知覚的手がかりの検討と処理モデルの実装, 日本音響学会聴覚研資 H-93-84 (1993).

26) 中谷智広, 川端 豪, 奥乃 博: 計算論的アプローチによる音響ストリームの分離, 日本音響学

会聴覚研資 H-93-83 (1993).

27) 平原達也: 聴覚末梢系モデルの研究動向, 信学誌, 74, 2, pp. 146-149 (1991).

28) 河原英紀: 聴覚の工学的表現, 信学誌, 76, 11, pp. 1197-1202 (1993).

29) Nawab, S. H. and Lesser, V.: Integrated Processing and Understanding Signals, in Oppenheim, A. V. and Nawab, S. H. (eds.): *Symbolic and Knowledge-Based Signal Processing*, pp. 251-285, Prentice Hall (1992).

30) Sakaguchi, Y. and Nakano, K.: Active Perception with Intentional Observation, *Proc. of the Second Intl. Symp. on Measurement and Control in Robotics*, pp. 241-248 (1992).

31) Marr, D.: *Vision*, W. H. Freeman and Company (1982); 乾 敏郎, 安藤広志訳: ビジョン—視覚の計算理論と脳内表現—, 産業図書 (1987).

(平成6年2月4日受付)



柏野 邦夫 (正会員)

1967年生. 1990年東京大学工学部電子情報工学科卒業. 1992年同大学院修士課程修了. 現在同大学院博士課程在学中. 音響的情報を対象とする信号処理および知識処理に興味をもつ. 電子情報通信学会, 人工知能学会, 日本音響学会, IEEE 各会員.



田中 英彦 (正会員)

1943年生. 1965年東京大学工学部電子情報工学科卒業. 1970年同大学院博士課程修了. 同年同大工学部講師. 1971年同助教授, 1987年同教授, 現在に至る. この間1978~1979年ニューヨーク市立大客員教授. 工学博士. 計算機アーキテクチャ, 並列推論マシン, 人工知能, オブジェクト指向計算システム, 分散処理, CAD等の研究に従事. 著書「非ノイマンコンピュータ」, 「情報通信システム」, 共著書「計算機アーキテクチャ」, 「VLSI コンピュータ I, II」, 「ソフトウェア指向アーキテクチャ」. 電子情報通信学会, 人工知能学会, 日本ソフトウェア科学会, IEEE, ACM 各会員.