

単旋律のパート分配による アンサンブルのための自動編曲手法

酒 向 慎 司^{†1} 水 野 理 央^{†1} 北 村 正^{†1}

本報告では、管楽器アンサンブル奏者が自分たちの好みと希望に合わせた編曲楽譜を自動生成・支援するシステムを目的として、メロディ構造や各楽器の演奏難易度に基づいて入力メロディのパートを分配する問題を経路探索問題として定めた。伴奏・副旋律を生成する手法と組み合わせた編曲システムを実装し、得られた楽譜を用いて、アンサンブル演奏者による主観評価を実施した。評価結果を元に今後の課題と展望について考察する。

An Automatic Music Arrangement Technique for Ensemble Based on Melody Partition

SHINJI SAKO,^{†1} RIO MIZUNO^{†1} and TADASHI KITAMURA^{†1}

In this paper, we describes a technique to generate the arrangement score automatically that is matched to the wind instrument ensemble performer's desire. In our approach, general arrangement process is divided into some parts in order to apply route search problem. When the user inputs the melody and the composition of an instrument to this system, the part assignment, the accompaniment, and the sub-melody generation of the melody are done based on the performance difficulty of musical instruments and the melody structure. We show the result of subjective evaluation of musical performance, and discuss the future works.

1. はじめに

アンサンブルの特徴として、数名から十数名程度で楽譜に従い個々の楽器が様々な形で他

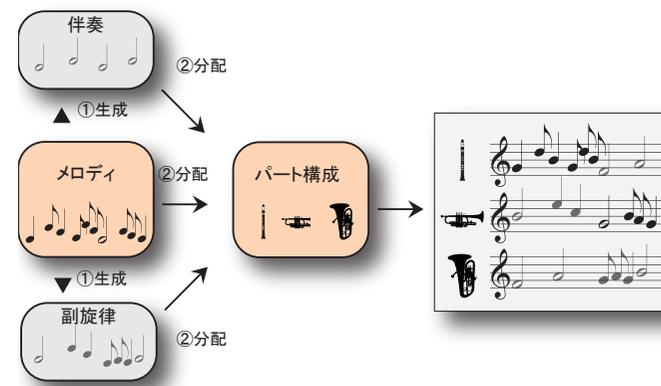


図1 伴奏・副旋律生成とパート分配による編曲手法
Fig. 1 A block diagram of proposal method

と協調する音楽といえる。演奏者は、あるフレーズでは主旋律で主導し、別のフレーズでは、和音の一部やリズムを担い、他の楽器との掛け合いなどを織り交ぜて音楽を構成する。また、その楽器構成の自由度の高さも魅力であり、このような演奏行為がアンサンブルの醍醐味の一つであるが、既存の楽譜では限られた楽器構成のものしか存在せず、自分たちで自由に編曲出来る仕組みが求められている。本提案は、演奏者が望んだメロディを希望のパート編成で演奏するための編曲支援に寄与するシステムの実現を指向した、アンサンブルの自動編曲を目的としている。

2. 編曲の近似とパート分配の最適化

本研究での主要な課題は、メロディを希望のパート編成で演奏できるように他旋律の生成と各楽器への割当てを行いパート構成に適したアンサンブル譜面をすることにある。そのために、一般的な編曲手法を分析し、その概要を図1に示す。続いて、一般的な編曲手法とその近似・分解による提案手法について説明する。

2.1 一般的な編曲手法

まず、本研究のアプローチの基となった一般的な編曲手法について述べる。存在する楽譜（例えばピアノ楽譜）を様々な楽器編成のアンサンブル楽譜を作成することをオーケストレーションと呼ぶが、これは、単にその編成で演奏可能にするという安易なものではなく、

^{†1} 名古屋工業大学大学院
Graduate School of Engineering Nagoya Institute of Technology

音楽的な美しさが損なわれず、かつ各楽器で演奏可能なものであり、また作曲家や演奏者の意図が十分かつ効果的に伝えられることが必要である。そのためには、個々の楽器の性能や特性の十分な理解と音楽基礎技法、和声学等の音楽知識が必要であるとされ、言うまでもなく高度な芸術的行為である。文献¹⁾によると、オーケストレーションは以下のような点に留意して行われ、それぞれは段階を追って行われるものではなく、編曲者の意識下において、同時並行的に解決されるべきものである。

- 旋律を各楽器が演奏したとして心で聴いてみる。
- 次にオクターブ移高して検討する。
- ユニゾン、オクターブ重複について検討する。
- 楽器の組み合わせの変化による音色や旋律進行について検討する。
- 旋律の進行に従い順次楽器の組み合わせを検討する。
- 旋律が不自然無く接続するべきである。

2.2 編曲手法の近似・分解

あるメロディが与えられたとき、指定のパート構成で演奏出来るようにするためには、指定されたパート分の旋律が必要となる。今回は、既存研究を参考に副旋律や伴奏を生成する。これにより、前述の一般的な編曲手法におけるピアノ楽譜が用意できている場合を考える。

生成されたピアノ楽譜を指定されたパート構成で演奏するためには、どのパートがどのタイミングでどのフレーズ（メロディや伴奏）を演奏するかを定める必要がある。メロディには、その作曲過程において、フレーズ感やどのように演奏されるかという作曲者の考えが反映されたものであると考えられる。これを次に説明するコスト関数として数量化し、パート分配をある種の経路探索問題として定式化する。

本来、伴奏・副旋律の生成や演奏楽器の決定は段階的になされるような独立した問題ではないが、今回は編曲におけるオーケストレーションに重点を置き、このような簡略化を考える。また、各旋律のパート分配においても同時に最適化されるべき問題であるが、今回は基本のメロディから順次分配をしていくこととする。

3. 経路探索問題によるメロディ分配

メロディや伴奏・副旋律の、どの箇所をどのパートが演奏するかは、アンサンブルにおける重要な問題である。

与えられた音符列を各パートに割り当てる行為は、音符列におけるどの部分をどのパートが演奏するかを決定することである。2.1 節に述べた通り、演奏楽器の決定にはオクターブ

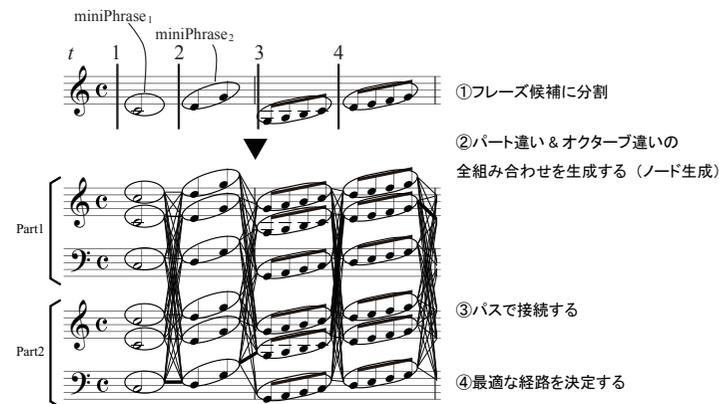


図 2 メロディのパート分配における経路探索問題
Fig. 2 Part arrangement for each instrument using route search

移高を考慮し、その音符列のある部分を各パートが演奏したとして、それが音楽的に見て相応しいかを評価する必要がある。また、同時に音符列のどこまでを同一楽器が演奏する一つのフレーズとするかも決定する必要がある。これは、図 2 に示すように、時間方向に分割し、音符列の楽器違いおよびオクターブ違いを考慮することで得られる多数の候補から、音楽的に最適なものを選択していく経路探索問題として捉えることができる。具体的な下記のような手順で問題を考える。

ステップ 1

まず、対象の音符列を一定の単位で分割しフレーズ候補 *miniPhrase* を定める。一般的に、楽器の役割の変更は小節の先頭で行われる事が多いが、小節途中で行われる場合も考えられるため、小節よりも短い拍単位で分割する。この一定の単位で分割時刻を $t = 1, 2, 3, \dots$ とする。対象の音符列が、4/4 拍子で 12 小節あり、2 拍単位で分割したとすれば、 $t = 1, 2, \dots, 24$ となる。また、分割された音符列を $miniPhrase_t$ と表記することにする。この分割されたフレーズ候補が各楽器に分配されることになる。この時、連続してフレーズ候補が同一楽器に分配されたものが、フレーズとなり対象の音符列の担当楽器とフレーズ長が同時に決定される。

ステップ 2

次に、生成したフレーズ候補のパート違いおよびオクターブ違いによる経路探索上のノー

ドを生成する．このノードは，時刻 t ，フレーズ候補 $miniPhrase_t$ ，オクターブ $octave$ ，パートの種類 $part$ の 4 つの変数により式 1 のように定める．例えば図 2 の左上のノードを表現するとすれば， $t = 1$ で，オクターブ $octave$ が元のメロディを 1 オクターブ移高したものであるので $octave = +1$ ，パートは Part 1 なので，そのノードは式 2 のように表現できる．

また，各 t における候補ノードの集合を P_t と示すこととする． P_t 内部の候補ノード数は，パート数と考慮するオクターブ範囲により決定される．例えば図 2 のようにパート数が 2，オクターブ範囲が -1 から $+1$ までの 3 オクターブだとすれば， $count(P_t) = 2 \times 3$ で 6 となる．

$$node_{(t, miniPhrase_t, part, octave)} \quad (1)$$

$$node_{(1, miniPhrase_1, Part1, +1)} \quad (2)$$

ステップ 3

作成されたノードを時間軸方向にパスで接続する．これにより生成される経路 $route$ の総数 $count(route)$ は，各 t でのノード数と時間軸方向の分割数によって定まる．今回の例では，各 P_t 内部のノード数は $count(P_t) = 6$ ，分割数 $max(t) = 24$ であるため， $count(route) = count(P_t)^{max(t)} = 6^{24} \approx 4.7 \times 10^{18}$ となる．

ステップ 4

以上のステップ 1~3 により，入力されたメロディが一定の制限において何らかのパートに分配される可能性の全てを列挙したことになる．この探索空間の中から最適な経路を選択する．作成したノードとパスを音楽上・編曲上の見知に基づいた適切なコスト関数で重み付けをすることにより，最適な経路を定めることが出来る．

このようにして，探索空間をコスト関数によって重み付けし，経路探索によって得られた最適経路は，その音価列をどのパートに割り当てるかを表すことになる．ここで用いられるコスト関数は，2.1 節で述べた編曲上・音楽上の一般的な見知から設計することができる．今回は，以下の点に着眼しコスト関数を設計し，次節で述べる．

- 音楽的な自然さ
- 楽器の特性
- 旋律の特徴
- 一般的なフレーズ長

3.1 音楽的な自然さ

演奏者やその演奏を聴く人間にとって，音楽が自然なものでなければ，それは演奏や聴くに堪えないものとなるであろう．この音楽的な自然さは非常に曖昧なものではあるが，不自然だと考えられる音符の進行は，ある程度想定でき，以下が一般的に認識されていると思わ

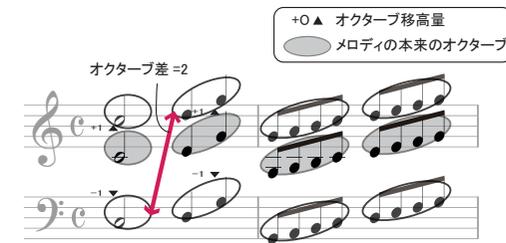


図 3 2 つのノードのオクターブ差の計算
Fig. 3 How to calculate the distance between each node

れる．

- 音高の突然の跳躍
メロディがそのような進行による楽曲であることも考えられるが，一般的には大きな跳躍を含むことは少なく，音楽的な不自然さに影響すると考えられる．
- 音色の異なる楽器の突然な出現

他の楽器と旋律を受け渡す場合を想定している．音色の変更に伴う不自然さは，その旋律のフレーズ感と相互に影響し合う問題だと考えられる．また，音色に対する人間の認識は様々であり，これだけで十分な研究対象となるべき問題である．

今回は，小規模なアンサンブル演奏を想定しており，音色がある程度異なる楽器が集合すると考えられる．そのため，楽器の音色に関しては考慮せず「音高の突然の跳躍」にのみ着眼し，コスト関数を設計した．音高の突然の跳躍は，与えられた音符列を基準にするべきである．それは，音符列のみの進行を見ても，その跳躍が検討中のオクターブ移高によるものなのか，そもそも音符列の跳躍によるものなのかは判断がつかないからである．そのため，二つのノードのオクターブの差をとることが望ましい．例えば，図 3 のような $node_{(t-1, part, -1)}$ ， $node_{(t, part, +1)}$ の二つのノードについては，オクターブ差は $absolute((+1) - (-1)) = 2$ である．

このようなオクターブ差から $octaveCost$ を作成し，音楽的自然さを調整するパラメータとして経路のコスト計算に用いることが可能だと考えられる．

3.2 楽器の特性

先に説明したように，管楽器はその構造や演奏方法により，演奏可能な音域が決まっていることから，これらの制約を利用する．また，その構造や演奏方法によって，演奏可能な音域内においても，得意な音高や苦手な音高が存在する．一般的には，音域内において，その低域側もしくは高域側の音高は演奏しにくく，中間域の音高は演奏しやすいとされる．その

ほか、その楽器の特徴により、低音楽器は低域側に、高音楽器のフルートなどは高域側に演奏しやすさが偏っていると考えられる。

このような、各楽器について各音高の難易度を示すようなコスト関数 *instrumentCost* を定めることで、演奏上の難易度を示すパラメータとして経路のコスト計算が可能となる。

3.3 旋律の特徴

メロディは、音符が階層的に接続されている列として考えることができる。しかしその音符列の接続は、すべて同一の強度で接続されているわけではない。例えば楽器奏者は、与えられたメロディのフレーズ感を意識して演奏をしたり、音楽を聴く側もフレーズ感を意識的、あるいは無意識的に感じていると予想できる。例えば、クラシックやポップスなどで呼称は異なるものの、A メロ・B メロなどの表現により、一連のメロディを分割して解釈していることが多く見られる。

アンサンブルにおいても、この旋律の切れ目は非常に重要であり、この切れ目で音楽上の役割が変わることが多く、またそれが自然である。アンサンブル演奏におけるこれらのフレーズの境界の特徴として、長いフレーズの終了後に音楽上の役割を変えるのではなく、より短い区間で役割を切り替える必要があることが多い。これは、アンサンブルが、他の楽器と強調し音楽上の役割を引き継いでいくことに重きを置くべき演奏形態だからである。

このため、一般的な 8 小節や 16 小節といったフレーズ調ではなく、より細かい切れ目（切り替わりの位置）を見いださなければならない。また、その境界は音楽的な自然性も同時に満たされなくてはならない。そのため、メロディの自然な切れ目を探す必要があり、メロディはその情報を含有していると考えられる。具体的には、メロディの休符の情報であったり、 $2n$ 小節などの短いフレーズ感、スラーなどの楽譜上の情報が有用である。このような情報を元にメロディの接続境界の深さを *connectionStrength* として定め、その情報とノード間の情報を考慮することで *phraseBorderCost* が設計出来ると考えられる。

3.4 一般的なフレーズ調

3.3 節で説明したように、人間は音楽を聴くとき、そして作るときにフレーズ感を意識している。現在、聴き・作られる音楽は旧来の西洋音楽の影響により 4 小節や 8 小節といった $4n$ 小節ごとのに区切られた構成で作られていることが一般的である。

また、アンサンブルにおいて、いかに楽器の役割の変更が重要な要素であるとはいえ、2 拍ずつメロディを演奏する楽器が変更されてしまえば、音楽としての不自然だけでなく、楽器演奏者にとっても演奏が困難になることは自明である。前述の 3 つの音楽的特徴は、これを制御することができない。なぜなら、メロディの進行や楽器の特徴によっては 2 拍ずつ

で役割を変更する可能性が十分にあり、当該のメロディにおいて、音楽上の役割がどの程度続くべきかということが考慮されていないからである。

このような観点から、音楽上の役割が一般的にどの程度連続するかということ制御するため、フレーズ長についてのコスト関数を *phraseLengthCost* とする。

4. システムの実装

前節で述べた手法に基づいたパート分配の経路最適化問題を実装し、以下に示す伴奏・副旋律生成を組み合わせることで、単一メロディと楽器構成からアンサンブル譜面を生成するシステムを実装した²⁾³⁾。

各種のコスト関数は、音楽上の知見および奏者に対する聞き取り調査により値を決定した。探索空間における先頭から終端までのある経路の経路コストは、そのノードコスト（楽器コストとフレーズ長コスト）、パスコスト（オクターブコストとフレーズ境界コスト）の重み付き和として、コスト最小の経路を最適なパート分配とする。

4.1 伴奏生成

アンサンブルの演奏しやすさは、伴奏が大きく影響する。ここでは、入力されたメロディを一定のセグメント（ここでは 2 拍ずつ）に区切り、各セグメントにおける先頭の音高を疑似根音として、2 部音符による伴奏を生成する手法を採用した。いくつかのリズムパターンを用意し、そのパターンに従った根音による伴奏を生成する。

4.2 副旋律生成

アンサンブルの大きな特徴として、他の演奏形態に比べ他パートとの協調した演奏が重要視される。この他との協調は、時によってメロディと同じ動き方をしたり異なる動き方をする副旋律が大きく影響する。副旋律の生成手法については、これまでに様々な研究がなされている。本提案では、文献⁴⁾の手法を参考にして、簡易的な副旋律を生成する。入力されたメロディのリズムパターンに対し事前に用意したリズムパターンの中から最適なものを決定し、和声ルールに従って音高を割り当てた。

4.3 生成結果

本システムから生成されたアンサンブル譜面を図 4 に示す。楽器構成としてクラリネット、アルトサクソ、トランペットの 3 パートとして、図中のグレーで覆われた部分のメロディが入力された際のものであり、フレーズの切れやすい箇所各楽器に分配されていることが確認できる。なお、本システムの一部の機能は、Web サイト上のアプリケーションとして実装したものを試験的に公開している⁵⁾。

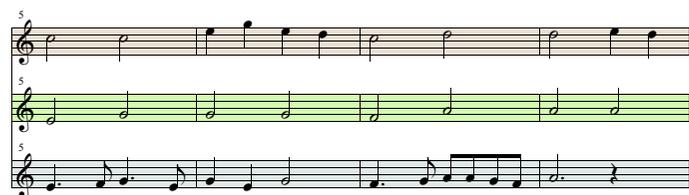
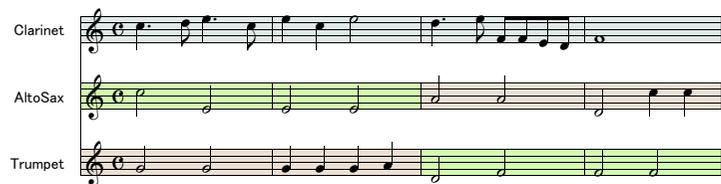


図4 システムの生成例 (Clarinet, AltoSax, Trumpet)
 Fig.4 An example of generated score (Clarinet, AltoSax, Trumpet)

表1 評価実験における演奏者の公募条件
 Table 1 Detail of invite applications for performer

対象人数	4人
対象楽器(管調)	Flute(C), AltoSaxophone(Es), Trumpet(B), Trombone(C)
楽器経験	2年以上, アンサンブル演奏の経験を有すること

5. アンサンブル奏者による主観評価

実装により生成された楽譜をアマチュアアンサンブル奏者に提示し、練習と合奏を踏まえ、音楽上・演奏上の不自然な箇所を評価させた。

5.1 実験条件

実験では、4人のアマチュア管楽器奏者を公募し、主観評価実験を行った。公募対象の楽器やその他の詳細は表1の通りである。本実験での楽器構成の組み合わせは、4種の楽器から3種類を選ぶため、 ${}_4C_3 = 4$ 通りとなる。表2に、楽器構成の種類とその表記を示す。実験で用いた対象メロディは、表3の通りである。なお、被験者には、対象曲の曲名は提示せず、こちらで任意につけた記号と前述した楽器構成を示す記号の組み合わせを曲名として提示した。よって、被験者に対して提示される楽曲は8曲であり、1人あたり6曲につ

表2 楽器の組み合わせ

Table 2 Detail of instruments used in evaluation

記号	構成楽器		
FlSxTp	Flute	Alto Saxophone	Trumpet
FSxTb	Flute	Alto Saxophone	Trombone
FlTpTb	Flute	Trumpet	Trombone
SxTpTb	Alto Saxophone	Trumpet	Trombone

表3 評価実験で用いたメロディ

Table 3 Detail of music used in evaluation

記号	曲名	作曲家	小節数
m1	情景 白鳥の湖から	チャイコフスキー	28
m2	交響曲「新世界」第4楽章	ドヴォルザーク	36

いて評価を行うことになる。評価内容は主に下記の二つを実施した。

- 評価項目 A: あらかじめ音楽的に不自然な箇所と見なされる可能性のある場所を調査し、被験者にその箇所を提示する。その箇所が音楽的に不自然であるかについて5段階で評価
- 評価項目 B: 上記の対象箇所であるかに関わらず、楽譜を演奏した上で音楽的もしくは楽器演奏上不自然な箇所印とその理由を記述させる

5.2 評価項目 A に関する考察-音高の悪化要因の分析

共通質問の集計結果を、表4に示す。なお、Aが最も良い結果であり、Eが項目に反した最も悪い結果である。DおよびEの評価が付けられた5箇所について、その内容を図5に示す。ここから、楽譜への直接記述でも指摘のあった音高の大きな跳躍が、自然さに大きく影響していると言える。ただし、良い判定の箇所とを比べると、メロディの進行方向に大きく影響していると考えられる。例えば、メロディが上昇の途中で下降するようなオクターブ移高を持つノードが選ばれてしまった場合に、自然さに大きく影響している。これは逆に言えば、上昇中に上方向へのオクターブ移高を含んだとしても、それが演奏可能であれば、あまり自然さに対して影響を与えない可能性があると考えられる。これに関しては、楽器およびその演奏者が演奏する旋律をどう解釈しているかにも依存すると考えられるが、本提案における問題としては、メロディの進行をパート分配の中で考慮する必要性を示唆している。

5.3 評価項目 B に関する考察

得られた演奏上の指摘を分類してまとめると、表5のようになる。この結果から、音楽

表 4 共通質問の集計結果
Table 4 A summary of evaluation test A

	A(良い)	B	C	D	E(悪い)
m1	6	13	3	2	0
m2	2	12	1	8	1

m1-FISxTp Trumpet
m1-FITpTb Trumpet
m1-FITpTb Trombone
m2-FISxTp Trumpet
m2-FISxTb Trombone

図 5 音高遷移に関して悪い評価が下った箇所
Fig. 5 Examples of negative comment on pitch transition

上・演奏上不自然に感じる点として特に重要点としては、「a. 楽器の特徴による演奏難易度」、
「c. 音高の跳躍」、「f. 伴奏関係」、「g. 伴奏とメロディの遷移」の4点であることが分かる。

6. むすび

本報告では、任意の単一メロディと楽器構成から、アンサンブル譜面を生成するための手法として、パート分配を経路探索問題として考えた。楽器の特徴や音楽上の知見に基づき、候補を局所的に用いるようにオクターブ・楽器・フレーズ境界・フレーズ長にコスト関数を設計し、与えられた入力から考えられる様々な分配候補から、効率的に最適解を求めた。さらに既存の伴奏・副旋律生成を組み合わせることで、アンサンブル譜面の自動生成システムを実装し、その主観評価を実施した。4名の演奏者による楽譜への直接記述と5段階評価により、各コスト関数の有効性が示された。

しかし、現状のコスト関数では、場合によっては演奏者にとって最適解(アンサンブル

表 5 評価において指摘された内容のまとめ
Table 5 A summary of evaluation test B

記号	分類項目	指摘数
a	楽器の特徴による演奏難易度	28
b	音高の跳躍	25
c	全体について	4
d	楽譜の表記	1
e	伴奏関係	29
f	伴奏とメロディの遷移	23
g	運指	1
合計		111

譜面)が求められていないことも明らかになった。現状のコスト関数では、一般的に考えられるような楽器の特性や常識的な知見しか考慮されておらず、また隣接するノード間のみという局所的なコスト計算を行っていることや、パート構成による相互的な関係を考慮することが欠如している。一つの対策としては、このような知見から詳細な音楽知識や編曲技巧をコスト関数に反映させることも考えられる。一方で、これらのコスト関数を既存楽譜から統計モデルとして学習するアプローチも有望である。

その他にも、編曲支援システムとしての側面では、ユーザの意図を探索コストに容易に反映させることや、より一般的な編曲システムを指向した課題では、複数メロディの入力、弦楽器・打楽器の対応などが考えられる。

謝辞 本研究の一部は(財)堀情報科学技術振興財団の研究助成によって行われた。同財団に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) Walter Piston, 戸田邦雄: 管弦楽法, 音楽之友(2005)
- 2) 水野 理央, 酒向 慎司, 北村 正, “単旋律のパート分配と伴奏・副旋律生成によるアンサンブルのための自動編曲システム”, インタラクシオン 2010, インタラクティブセッション, SB25, (2010)
- 3) 水野 理央, 酒向 慎司, 北村 正, “単旋律のパート分配と伴奏・副旋律生成によるアンサンブルのための自動編曲手法”, 情報処理学会第72回全国大会, 1T-4, (2010)
- 4) 中瀬 昌平, 西本 卓也, 嵯峨山 茂樹, “動的計画法と音列出現確率を用いた対位法の対旋律の自動生成”, 情報処理学会研究報告, 2004-MUS-56, pp.65-70, (2004)
- 5) 自動編曲システム MusicPipe, <http://www.musicpipe.net/>