

## T-RHYTHM : 触覚フィードバックを用いた 音楽学習支援システム

三浦 宗介 杉本 雅則

東京大学大学院 新領域創成科学研究科 基盤情報学専攻

合奏や合唱において、複数の学習者に対し、触覚フィードバックを用いてリズムを伝えることで、他者のパートに惑わされることなく、自分のパートを正しく演奏できるよう支援するシステム T-RHYTHM を提案する。T-RHYTHM は、伴奏者の演奏からテンポを抽出し、それを元にリズムを無線通信で伝える。

## T-RHYTHM : A System for Supporting Music Learning Using Tactile Feedback

Sosuke MIURA Masanori SUGIMOTO

Department of Frontier Informatics, Graduate School of Frontier Sciences  
The University of Tokyo

A system called T-RHYTHM that supports individual learners playing or singing in an ensemble is proposed. A learner using T-RHYTHM is not confused by other learners' performances, because he/she is given his/her own rhythm through tactile feedback. A rhythm of each learner is extracted based on a performance by an accompanist and transmitted to his/her tactile device via a wireless communication.

### 1. ま え が き

「音楽は和声が調う事によって始めて完成する」[2]

グレゴリオ聖歌以降の西洋音楽において、複数の音による音の調和性が重要視されてきている。

日本の小学校の音楽の授業においても、高学年から「音の重なりや和声の響きに重点を置いた活動を通して、基礎的な表現能力を高め、音楽表現の喜びを味わう」ことに重点が置かれ、それを達成するために合奏や合唱が取り入れられ始めている[5]。

合奏や合唱では複数の旋律が並んでおり、旋律が同時に演奏されると音が調和し和音が作られるため、それらを演奏し聴くことによって、音や声の重なりによる響きを鑑賞することができる。技術的に複数の旋律を同時に演奏することが出来ない児童にとって、複数人で複数の旋律を演奏する合奏や合唱は、音の重なりや響きを楽しみ鑑賞するための良い手段となる。しかし、その合奏や合唱において、児童によってはある問題を抱えることになる。合奏や合唱ではそれぞれの旋律を複数人で演奏するため、自分のパート以外の旋律も同時に聞こえてくることになる。この合奏

や合唱における利点が、児童によっては欠点にもなってしまう。つまり、同時に聞こえてくる自分のパートとは異なる他の旋律のリズムやテンポに惑わされ、自分の旋律を正しく演奏できなくなってしまうのである[10]。

合奏や合唱において、正確な演奏を行うためには、他のパートに惑わされずリズムやテンポを正確に刻むことが重要になってくる。リズムやテンポがずれば、調和するはずの音とは別の音と和音をつくってしまい、不協和音を形成してしまう可能性が出てくるのである。リズムやテンポのズレにより不協和音を作ってしまうえば、授業における合奏や合唱の本来の目的である、音の調和性を鑑賞できなくなってしまうのである。

そこで、本研究では合唱や合奏を行う上で欠かせない音楽的な能力の一つであるリズムに注目し、この能力を身につける過程を支援することを考える。支援においては、触覚フィードバックを用いて行う。

我々が構築するシステムは、伴奏者の演奏情報から自動的にテンポを抽出し、そのテンポに合わせて各パートが演奏すべき旋律リズムを、各パートへ触覚フィードバックと

して伝える。これにより、合奏や合唱において、他のパートのリズムに惑わされることなく、自分が演奏すべきリズムを正確に刻めるようにし、最終的にシステムが無い状態でもリズムを正しく刻むことが出来るよう、支援を行う。

本論文の構成は、以下のとおりである。2. では、本研究の位置づけについて述べ、3. では、システムの詳細を示す。4. では、システムの評価実験および結果について示し、その考察については5. で述べる。そして最後に、6. で、結論と今後の課題について述べる。

## 2. 関連研究

本研究では、Tactile Feedbackを用いて音楽学習、特にリズム学習を支援することを目的とする。

音楽学習におけるコンピュータの利用では、CMI (Computer Managed Instruction)やMIE(Music in Education)のような教師をアシストするもの、そしてCAIやMLS(Music Learning Soft)のように児童をアシストするものの二つに大きく分けることができる[12]。本研究では児童をアシストすることに重点を置くが、従来のCAIやMLSのようなコンピュータが学習者に対して教授を行う形をとるのではない。コンピュータは教授を行う手段であり、コンピュータを用いて学習者が他の学習者に対して教授を行うことが出来るようにし、学習者が中心となって学習を行えるようにする[6]。学習者が技術的な制約から行うことが出来なかった分野の学習を、コンピュータを用いることで可能にする場合、CAIやMLSでは制約となる技術的な部分はコンピュータが代行してしまうため、その部分の学習は行われなまま終わってしまう。そのため、その部分は未修得のままであり、コンピュータがなければ次のステップに進めなくなってしまうのである。そこで、その制約となる技術的な部分の学習もコンピュータを用いて行いながら、かつ技術的な制約から行うことが出来なかった分野の学習も進めることができるようにすることで、最終的にコンピュータを用いなくても学習を進められるよう支援する。

Tactile Feedbackに関しては、それ自身が学習の妨げになってしまうこと、また認知的科学的に音との相乗効果があることを考慮し[4][8]、皮膚感覚に注目する。皮膚感覚には触覚や圧覚、温覚や冷覚、痛覚と言ったものがあるが、その中から特に触覚に注目し、触覚を通してリズムを伝えること

とする。触覚を通したリズムの伝達は、振動モータを用いて行う[11]。振動モータによる振動のオンオフおよび振動の強さの強弱によって様々なリズムを表現する。

## 3. システム構成

合奏や合唱において、触覚フィードバックを用いてそれぞれのパートにそれぞれの演奏すべき旋律リズムを伝える。これにより、リズムやテンポの矯正を行い、正しく演奏出来るよう補助することで、リズム感を身につける過程を支援する。そして結果的に、重奏や合奏、合唱において他のパートの旋律に惑わされることなく、自分が演奏すべき旋律を正しく演奏することが出来るようになることを狙い、それを実現するシステムを構築した。

本システムは、演奏情報を送信する電子楽器、電子楽器から情報を受け取り旋律の処理を行うコンピュータ、コンピュータから受け取った情報を各パートのデバイスに送信する無線送信機、受け取った情報を元に様々な振動によって旋律リズムを再現する振動デバイスから構成される。システムの構成を図3に示す。

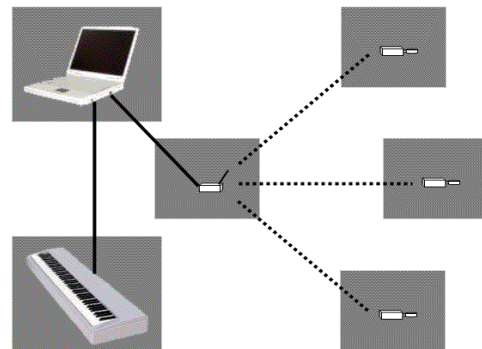


図3 システムの構成図

### 3.1 ソフトウェア

PC側のソフトウェアでは、電子楽器から送られてくる伴奏情報とあらかじめ登録されている楽譜情報を、動的計画法のアルインメントを用いて比較することにより、伴奏者がどの位置のどの音を演奏しているのかを認識し、伴奏情報から鍵となる旋律の情報だけを抜き出す[3]。電子楽器から送られてくる伴奏情報で、音を弾き忘れる(脱落)、弾き間違える(置換)、余分に弾く(挿入)、という間違いが起こった場合は、動的計画法のアルインメントを用いてデータベースとの比較を行い、間違えて演奏されている箇所を補完する。正しい旋律への補

完処理では、音の高さおよび音の並び順だけを処理し、音の長さや音の強さに関しては、演奏情報を優先させる。そして、抜き出した旋律の各音の長さを調べ、音価の基準となる長さの変化を認識することにより、現在の伴奏者の演奏テンポを決定する。その後、そのテンポに合わせて、あらかじめデータベースに登録されている各パートの旋律リズムに関する情報を、各パートの振動デバイスに対してブロードキャストする。

振動デバイス側のソフトウェアでは、受け取った情報が自分のパートの情報であるかどうかを判定する。自分のパートの情報でなければその情報は無視し、自分のパートの情報であれば、その情報から、振動のオンオフをすることにより、リズムを表現する。振動によるリズムは、振動のオンオフの長さおよび強さを変えることで、様々な表現を可能にする。また、振動の強さは、パルス幅制御を用いて電圧を制御することで調整する。

### 3.2 ハードウェア

無線送信機は、PIC16F84A, ADM232A, AMRT, 振動デバイスは、PIC16F84A, FM23Aモータ, AMHTから構成される。通信距離は約15mである。また、振動モータの圧力は最大1Gであり、これを3段階に分けて使用している。無線送信機および振動デバイスの外観を、図4および図5に示す。

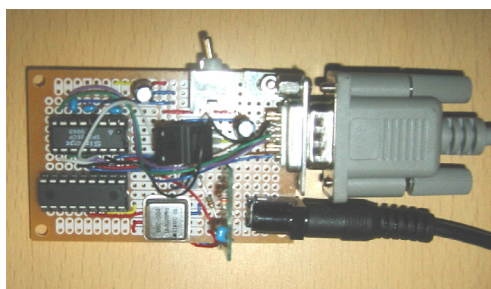


図4 無線送信機

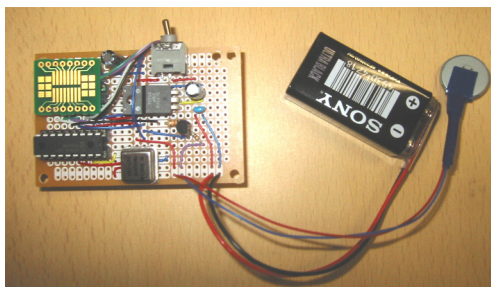


図5 振動デバイス

### 3.3 使用シナリオ

- 1, 伴奏者が電子楽器を演奏.
- 2, 電子楽器で演奏された演奏情報からテンポを抽出.
- 3, そのテンポに合わせて、あらかじめ登録しておいた、各パートの旋律リズムを、各パートの振動デバイスに送信.
- 4, 振動デバイスは信号を受信し、触覚フィードバックとしてリズムを伝達.

## 4. 評価実験

### 4.1 評価実験の目的

本システムの目的は、リズム学習を支援すること、および合奏や合唱において他のパートに惑わされることなく正しく自分のパートのリズムを刻めるよう支援すること、の二つである。この二つの支援において、システムが既存の支援方法に比べ有用であるかどうかを判断するため評価実験を行った。

本システムは、毎日のように音楽に触れ楽器に慣れ親しみ、専門的に音楽指導を受けている児童を対象にはしていない。音楽の授業で、週に一、二度散発的に、短時間しか音楽に触れない児童を対象にしている。そのため、本システムを長期的に継続して使用してもらい音楽を学習するということは想定していない。システムは、限られた回数、短い時間の中で、正しくリズムを刻めるよう支援することを目的としている。これにより、システムの評価実験においても、長期的な使用による学習効果というよりは、短期的な即効性という視点から評価を行っている。

### 4.2 実験1

一つ目の評価実験では、リズム学習の支援において、システムが有用であるかどうかを判断するため実験を行った。被験者は音楽経験のある大学生5人、および音楽経験のない大学生5人である。3つの条件の下で、曲を練習してもらい、どの条件の下で練習したときに最もリズムを正確に刻めるようになったかを比較した。3つの条件を以下に示す。

条件A: メトロノームによる拍を聴きながら練習。

条件B: 自分が演奏する旋律を聴きながら練習。

条件C: 自分が演奏する旋律リズムを触覚に感じながら練習。

これらの条件の下で、15回練習してもらい、その後、何も無い状態でさらに5回演奏してもらおう。そして、この5回の演奏の平均値をそれぞれの条件の演奏と比較することで、どの条件の下での練習が一番効果的かを見た。正確にリズムを刻

めているかどうかは、発音するタイミング、発音している長さ、およびテンポを比較することによって判断した。実験結果を以下に示す。

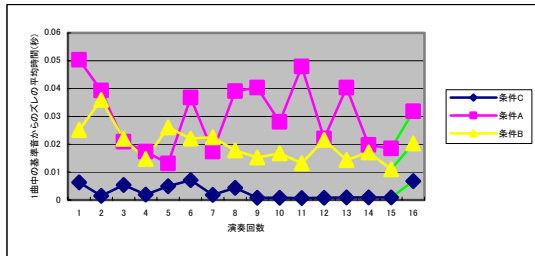


図6 未経験者の実験結果

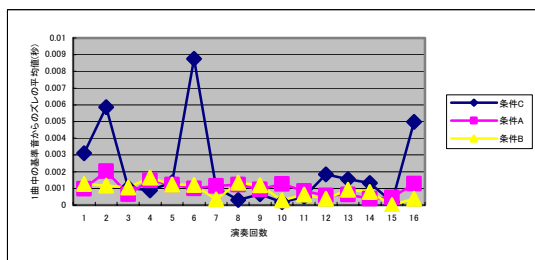


図7 経験者の実験結果

### 4.3 実験2

二つ目の評価実験では、合奏や合唱において、他のパートに惑わされず自分のパートを演奏するのに、システムの支援が有用であるかどうかを判断するため実験を行った。被験者は、音楽経験の浅い大学生12人である。パート1およびパート2を用意し、4つの条件の下で、パートナーが演奏するパート1に合わせて、パート2を被験者に演奏してもらった。どの条件の下で演奏したときが、最もパート1に惑わされず、かつパート1と同期し、正確にパート2を演奏することができたかを比較した。4つの条件を以下に示す。

条件D：お手本として、パート2の演奏も同時に聴きながら演奏。

条件E：パート2の演奏するタイミングを、メトロノームの音で教えてもらいながら演奏。

条件F：メトロノームによる拍だけを聴きながら演奏。

条件G：パート2の演奏するタイミングを、触覚フィードバックで教えてもらいながら演奏。

パート1に合わせて演奏できているか、またパート2を正確に演奏できているかどうかの判断の基準は実験1と同様とする。実験結果を以下に示す。

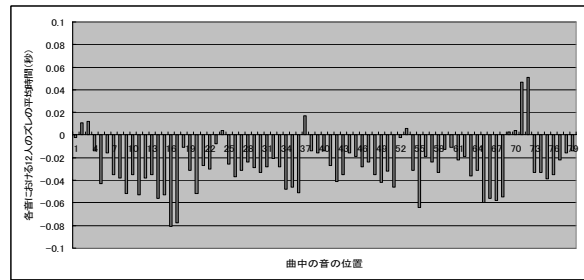


図8 条件Dでの発音タイミングのズレ

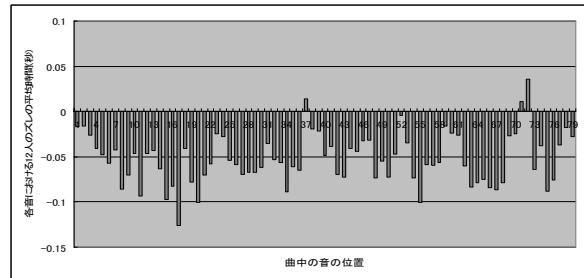


図9 条件Eでの発音タイミングのズレ

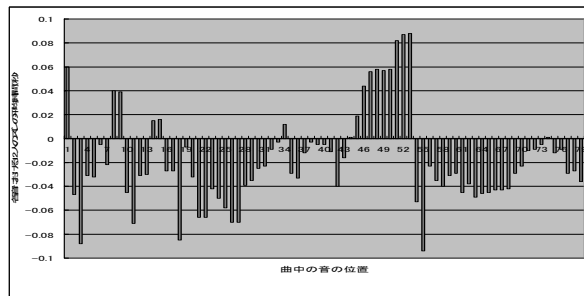


図10 条件Fでの発音タイミングのズレ

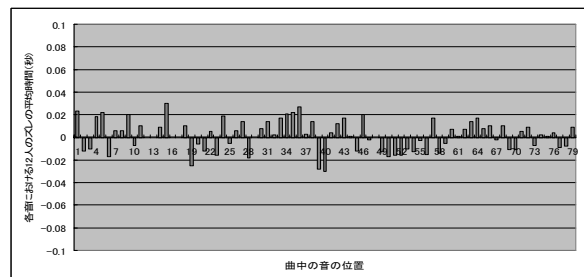


図11 条件Gでの発音タイミングのズレ

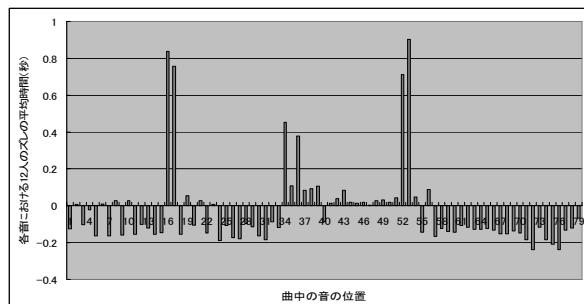


図12 条件Dでの発音の長さのズレ

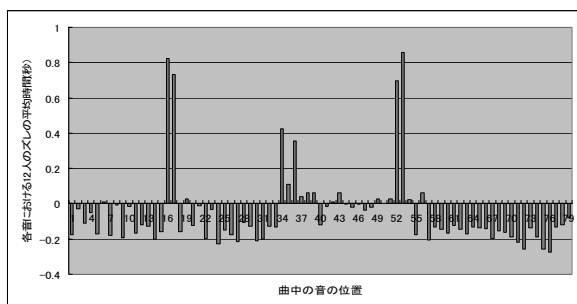


図13 条件Eでの発音の長さのズレ

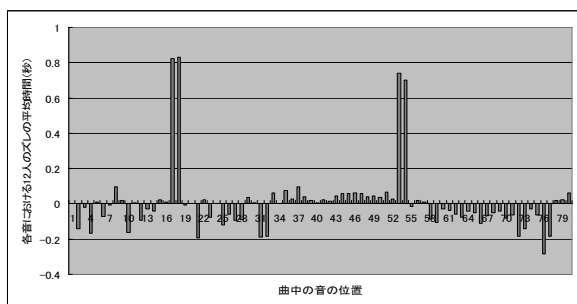


図14 条件Fでの発音の長さのズレ

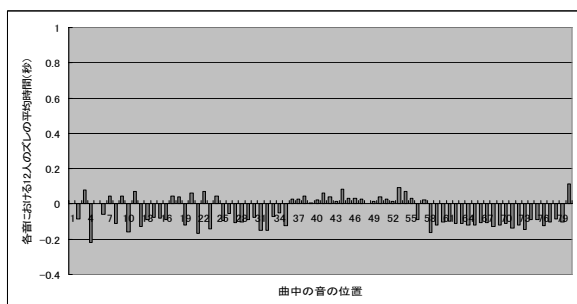


図15 条件Gでの発音の長さのズレ

## 5. 考察

### 5.1 実験1に関する考察

リズム学習において、未経験者の場合、触覚フィードバックによる支援は、他の手段を用いた支援に比べ有効であることが分かった。

触覚フィードバックによる支援を受けながら練習を行った場合は、正しい演奏と実際の演奏のズレの程度は、他の支援を受けながら練習したときに比べ小さかった。また、触覚フィードバックを用いた場合、練習を重ねるにつれ、ズレの程度は収束していたのに対し、他の支援を受けながらの練習では、練習回数を重ねてもズレの程度は収束していなかった。また、支援をはずした後の演奏でも、触覚フィードバックを用いて練習した後の演奏では、ズレの程度は支援があるとき

に比べ大きく変化しなかったのに対し、他の支援を用いて練習した後の演奏ではズレの程度は、触覚フィードバックに比べ2倍以上大きくなっていった。

逆に経験者の場合では、触覚フィードバックによる支援は、他の支援に比べ有効でないことがわかった。これは、経験者は音楽を習う初期の段階でメトロノームを使用するなど、耳からの情報ですべてを処理することに慣れており、逆に触覚から情報を得ることによって戸惑いが生じたため、触覚フィードバックを用いた支援では散発的に大きなズレが生じてしまったものと思われる。

### 5.2 実験2に関する考察

合奏や合唱において、他のパートに惑わされず、かつ他のパートと同期し自分のパートを正確に演奏するための支援においても、他の支援に比べ触覚フィードバックによる支援が最も有効であることがわかった。

発音タイミングのズレを見た場合、触覚フィードバックを用いた状況では、ズレが遅れる場合と早まる場合が交互に繰り返されている。これは、演奏が遅れてしまった場合は次は早く演奏しようとし、早く演奏してしまった場合は次は遅らせて演奏しようと言ったように、ズレを意識しそのズレを修正しようとしていることが分かる。さらに、演奏前半に比べ後半ではズレの程度が小さく収束していることから、後半は前半に比べ、より正確に演奏できるようになっていることがわかる。

また、発音の長さのズレを見た場合、休符においては明らかな差があり、触覚フィードバックを用いた状況においてだけ、休符も正確に演奏できていることがわかった。さらに、フレーズへの依存も大きく、曲中で相対的に短い音符が連続するフレーズや、休符の前のフレーズなどでは特に触覚フィードバックが有効であることがわかった。

## 6. むすび

本研究の目的は、音楽学習の中で重要な要素の一つであるリズムに着目し、触覚フィードバックを用いることで、その理解と取得の過程を支援するシステムを構築することである。振動のオン、オフによりリズムを形成し、触覚を通して、各パートにそれぞれのパートの旋律リズムを伝えることで、演奏すべきパートのテンポやリズムを正確に演奏できるよう支

援した。そして、システムの評価を行うための比較実験では、リズム学習および合奏合唱において、本システムを用いた支援が他の支援に比べ、有意に差があるという結果を得ることが出来た。

本研究の成果は、振動による触覚フィードバックを用いることで、リズムの学習過程を支援でき、また、合奏や合唱において他のパートに惑わされることなく、かつ他のパートと同期して、自分のパートを正確に演奏できるよう支援するシステムを構築したことである。

今後の課題について、一つ目は、協調学習支援についての検証である[13]。音楽の苦手な児童が器楽演奏において抱える問題の多くはリズムであるが[10]、リズム学習において評価実験から、メトロノームの拍や聴覚への旋律リズムの提示に比べ、触覚フィードバックによるリズムの提示の方が、リズムを理解するのに有効であることがわかった。従って、音楽の得意な児童の演奏を、システムを通して、触覚フィードバックとして苦手な児童に提示することで、適切な足場を作ることができ、児童が協調して学習を進めることが可能になる。よって、実際の教育現場でシステムを使用し、児童がお互いに協調して学習を進める、という過程を支援することができるかどうか検証したいと考えている。

そして二つ目の課題は、システムの学習者への適応化である。今回の実験結果から、タイミングのズレの程度やテンポのズレの程度を見ることで演奏者の上達の変化を見ることができ、また音の長さに加え音の高さに関する情報も考慮することで弾き間違いやすいフレーズや困難となるフレーズなども把握することができることがわかった。よって、各演奏者の演奏情報の履歴をとり、全体や過去の履歴と比較することで、人間に代わりコンピュータが演奏者の特徴や到達度を自動的に判断できるようにする。そして、それを元に適切な足場を作りながら、徐々に支援を減らしていき、最終的にシステムの使用なしで演奏者が正しく演奏出来るようになるよう支援する、というScaffolding[7]の考え方に基づいた、学習者に適応できるシステムに発展させていくことである。

## 参 考 文 献

[1]後閑哲也 電子制御のためのPIC応用ガイドブック 技術

評論者 2000

[2]ショーペンハウアー/西尾幹二訳 意思と表象としての世界 中央公論社 1975

[3]中川聖一 パターン情報処理 丸善 1999

[4]南博 現代心理学 白水社 1971

[5]文部科学省学習指導要領 <http://www.mext.go.jp>

[6]Chris Quintana et al. Learner-Centered Design: Reflections and New Directions. Human-Computer Interaction. pp605-626, 2001

[7]Collins, A. Design Issues for Learning Environments, in S.Vosniadou, E. DeCorte, R. Glaser, H. Mandl(Ed.) International perspectives on the psychological foundations of technology-based learning environments, Lawrence Erlbaum Assoc., 1996

[8]Eaton G. Ears to technology. Electronic Education. April 10-11. 1986

[9]Jaques-Dalcrose Emile. Rhythm Music and Education. Trans.Harold Rubenstein, RUL 1921

[10]Keith Swanwick. Music Mind and Education. Routledge. 1988

[11]Massimino M. Sheridan T. Sensory Substitution for Force Feedback in Teleoperation. Teleoperation and Virtual Environments, Presence2(4) 421-458, 1993

[12]Stevens R. S. Computer Technology and Music Teaching and Learning. Deakin University Press, 1985

[13]Timothy Koschmann. CSCL:Theory and Practice. LEA, 1996