

共創インタフェースとアンサンブル

山本知仁, 小林洋平, 三宅美博

東京工業大学 総合理工学研究科 知能システム科学専攻

本研究では、音楽の共同演奏時における、音楽的な協調と心理的な協調の関係について解析した。結果として、演奏の同期度と楽譜の音符のばらつき度との間に正の相関関係があることが示唆され、演奏者の小節周期が一人での演奏時から共同演奏時に変化し、両演奏者間の変動パターンが近くなることが示された。また、小節周期と呼吸周期の差が時間変動し、両時間変動が音符のばらつき度合いと負の相関関係があることが示された。これらの結果から、演奏のリズムと呼吸のリズムが結合系にあり、演奏者の演奏に対する注意の量が結合強度を変える要因になっているという仮説を導いた。

また、解析結果から演奏者間の相互作用を位相振動子を用いて構築し、その評価を行った。結果として、機械が一方向的に音楽を演奏するよりも、演奏のずれ、演奏の揺らぎを押さえられることが示唆された。

Co-creative interface and ensemble

Tomohito Yamamoto Youhei Kobayashi Yoshihiro Miyake

Dept. of Computational Intelligence and Systems Science,
Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering,
Tokyo Institute of Technology

In this research, we analyzed the relation between the players in a musical cooperative live performance from the musical point and the psychological point of view. The results were that (a) there was a positive correlation between musical synchronization and scatter of notes of music score, (b) there was a negative correlation between respiratory synchronization and scatter of notes, (c) the difference between 1-bar period and respiration period temporally changed.

From results of analysis, we modeled the relation between humans in a cooperative performance with the phase oscillator, and we developed the ensemble system. Experiment results of developed model were superior to these of the former constraint entrainment model.

1. はじめに

オーケストラの演奏やジャズセッションなどの音楽の共同演奏において、演奏者間には円滑な協調関係が実現されている。このような協調関係は演奏者間の相互作用を通して構築されているといえる。われわれの研究グループは、このような人間間における相互作用を通して新たな協調関係が生まれてくるような現象を共創と呼び、これまで研究を行ってきた¹²⁾。本研究においては、音楽の共同演奏を共創的な現象として捉え注目する。

音楽の共同演奏における協調を考えると、それには2つの側面があると考えられる。ひとつは、音楽的な協調である。これはいかに演奏者間の演奏がそろっているかということであるが、このことを解析した先行研究としてR.A.Raschによるもの¹⁾が挙げられる。この研究では、違うパートの演奏者が同時に発音するとき、演奏者間には必ずある程度の非同期があることが示された。

もうひとつは、心理的な協調である。これは、演奏者の主観的な“合っている”という感覚であるが、このことを解析した先行研究として古浦によるもの⁴⁾が挙げられる。この研究では、“いきがあう”という視点から、ギター共同演奏時における演奏者の呼吸を計測し、むしろ初心者同士、あるいは困難な曲を用いたときのほうが、呼吸が一致することが示唆された。

われわれは、これら2つの協調がどのようなメカニズムで成り立っているかを調べるために、音楽の共同演奏時における2つの協調を同時に調べた。2節にお

いてその方法、3節において結果と考察について述べる。また、4節において、解析結果をもとに、人間-機械間で共同演奏を実現するシステムの構築を試みる。

2. 実験手法

2.1 実験手順

共同演奏の実験は電子ピアノを用いて行った。演奏者にはピアノの演奏経験が15年以上の20代男子学生3人が参加し、演奏曲はベートーベンのソナタ(Op.49, No.2, 122小節)で、実験は以下の手順で行った。

1. 一人で5回演奏曲を弾く
2. 共同演奏で5回演奏曲を弾く

この実験では、先行研究⁷⁾と同様に演奏者の呼吸周期と小節周期を計測した。今回の計測では、呼吸周期は呼吸の吸気のピーク時間を計測データの最大値より検出し、その間隔より算出した。小節周期は、録音

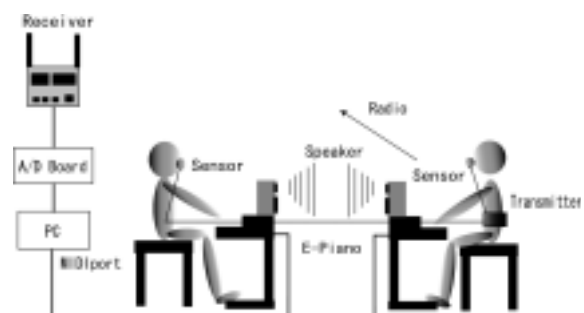


Fig.1 Measuring system of a live performance

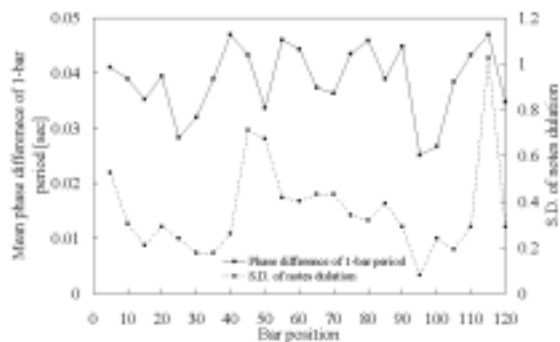
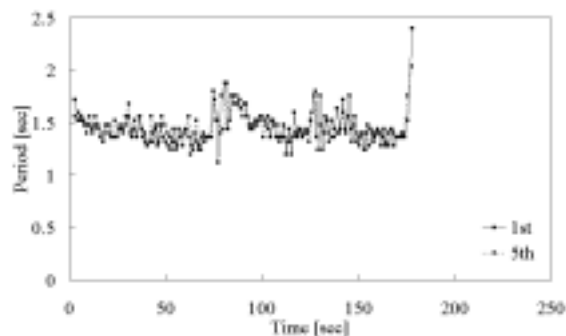


Fig.2 Time course of mean phase difference of 1-bar period and S.D. of notes duration

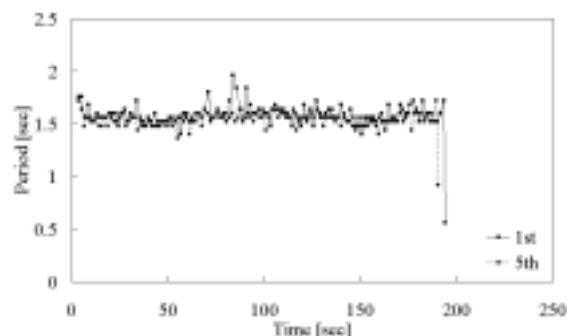
された演奏のある小節の最初の音と次の小節の最初の音との間隔より算出した。

2.2 実験システム

計測は Fig.1に示すシステムを用いて行った。演奏は電子ピアノ (Roland: RD-600) を用いて行い、音はスピーカー (ONKYO:GX-R3) を通じて提示した。演奏中演奏者は2.7m 離れて対面になる。ピアノの演奏はMIDI 信号としてMIDI シーケンサー (emagic: Logic Audio platinum Ver 3.5) に記録し、聴取者の呼吸との時間関係を分析できるようにした。呼吸はサーミスターセンサー (日本光電: TR - 511G) を用いて計測し、計測データは送信機 (同社: XB - 581Z) より、受信機 (同社: Multi Telemeter System WEB - 5000) に送られ、そのアナログデータはA/D ボード (ADTEK: AXP-



(a) Player_1



(b) Player_2

Fig.3 Time course of 1-bar period in a alone performance

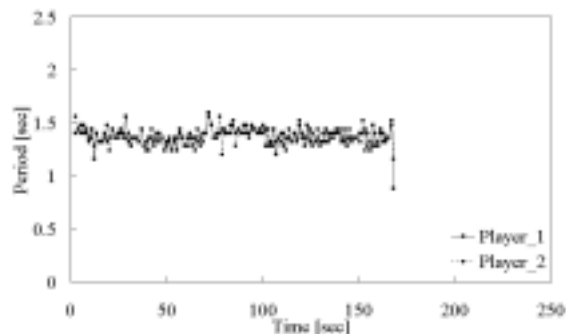


Fig.4 Time course of 1-bar period in a cooperative performance of Player_1 and Player_2

AD02) により 256Hz のサンプリング周期, 12bit の解像度でデジタル化され PC (Intel PentiumIII 1GHz) に最終的に格納した。

3. 実験結果

共同演奏の実験結果として, 3.1 節において, まず音楽の協調に関する結果を述べる。次に 3.2 節において, 呼吸の協調についての結果を述べ, 3.3 節で音楽と呼吸の関係について述べる。最後の 3.4 節において, 結果について考察する。

3.1 演奏者間の演奏の一致度と小節周期の変化

Fig.5の実線は共同演奏時における2人の演奏者間における演奏の一致度を示している。この図では, 値が大きいほど演奏のずれが大きいことを示している。値は, まず両演奏者の各小節の最初の音の時間差を算出し, その値を5小節ごとに平均化して, その後全演奏 (15例) について平均値を算出して求めた。図より演奏が相対的に合っているところと合っていないところがあるのがわかる。

ここで, 演奏に用いた楽譜情報について解析する。Fig.5の破線は演奏に用いた楽譜の右手パートにおける音符のばらつきの時間変動 (120小節) を示したものである。値は楽譜の4分音符を1, 8分音符を0.5, 全音符を4と換算して, 5小節ごとの標準偏差より算出した。この音符のばらつきの時間変動と, 演奏の一致度の時間変動との相関係数を調べるとその値は0.427である。この結果は音符がばらついているほど, 演奏が合わなくなることを示唆しているが, その理由

Table.1 Correlation coefficient of 1-bar period

	Player_1- Player_2	Player_1- Player_1	Player_2- Player_2
Alone	0.345	0.571	0.711
1st	0.430	0.405	0.542
2nd	0.421	0.330	0.533
3rd	0.346	0.422	0.399
4th	0.433	0.431	0.441
5th	0.392	0.417	0.429

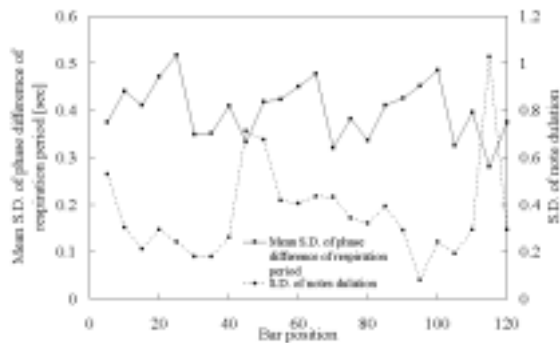


Fig.5 Time course of mean phase difference of respiration period and S.D. of notes duration

は、音符のばらつきが大きいと演奏者は相手との演奏のタイミングが合いにくくなるためだと考えられる。

次に、小節周期の時間発展が一人での演奏時と共同演奏時の間で、どのように変化するかについて調べる。Fig.3(a),(b)にPlayer_1,2が一人で演奏したときの1回目と5回目の小節周期の変動を示す。また、Fig.4にPlayer_1とPlayer_2の共同演奏時における5回目の小節周期変動を示す。ここで、これらの変動パターン間の条件間の変化を定量的に比較するため、それらの相関係数を調べる。

Table 1はPlayer_1とPlayer_2間の結果を示している。すべての相関係数は、122小節中から最後の2小節を除いた120小節より算出した。Table1の左から2番目の列におけるaloneの行は、一人での演奏時(5回目)の間の相関係数を示し、1,2,3,4,5の行は共同演奏時の1~5回目の相関係数を示している。左から3番目の列、左から4番目の列のaloneの行は一人での演奏時の1回目と5回目の演奏の相関係数を示す。また、1,2,3,4,5の行は一人での演奏時(5回目)の演奏と共同演奏時の自分の演奏との相関係数を示している。

Table1の左から2番目の列において、Aloneの行の値と1,2,3,4,5の行の値をそれぞれ比較すると、すべてのTableにおいてAloneの値のほうが小さいのがわかる。また、左から3番目の列、および左から4番目の列におけるAloneの行の値と1,2,3,4,5の行の値を比較すると、すべての例でAloneの値の方が大きいのがわかる。つまり共同演奏時において、2人の演奏者は音を介して相互作用し、一人で演奏時から小節周期の変動パターンが変化して、両者の変動パターンが近くなったことを示している。

3.2 演奏者の呼吸周期の一致度

Fig.8の実線は共同演奏時における、2人の演奏者における呼吸の一致度を示している。この図では、値が大きいほど両者の呼吸がずれていることを示している。値はまず各演奏における2人の演奏者の呼吸波形のピーク時間の差を算出し、その時間変動の5小節ごとの標準偏差を求め、その後、全演奏(15例)について標準偏差の平均値を算出し求めた。図より演奏が相対的に合っているところと合っていないところがあるのがわかる。

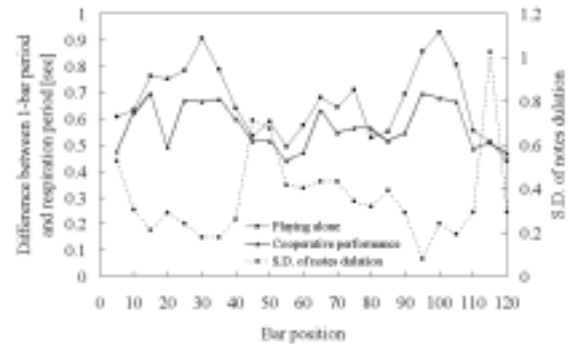


Fig.6 Mean difference between time course of 1-bar period and respiration period and S.D. of notes duration

この呼吸の一致度の時間変動と音符のばらつき度合いの時間変動との相関係数を調べるとその値は-0.400であった。この結果は、前節の演奏の位相差の結果とは逆に音符がばらついているほど呼吸は合っていることを示唆している。

3.3 小節周期と呼吸周期の差の関係

この節では、音楽的な協調と心理的な協調の関係について解析するために、各演奏者の一人での演奏時と共同演奏時における小節周期と呼吸周期の差について調べる。

Fig.10の細い実線は一人での演奏時における、各演奏者の小節周期と呼吸周期の差の平均値を示し、太い実線は共同演奏時における小節周期と呼吸周期の差の平均値を示している。値は各演奏において、小節周期の5小節の平均値とそれに対応する呼吸周期の平均値の差(呼吸周期 - 小節周期)を算出し、すべての一人での演奏(15例)、すべての共同演奏(30例)についての平均より求めた。図より、両周期の差が大きいところと小さいところがあり、また2つの変動パターンが似ていることがわかる。この2つの変動パターンの相関係数は0.818であった。また、一人での演奏時の時間変動の平均値は0.665であるのに対し、共同演奏時は0.569であった($p < 0.001$ で有意差あり)。

ここで、一人での演奏時の時間変動と音符のばらつきの時間変動との相関係数を調べると、その値は-0.596、共同演奏時の時間変動との相関係数は-0.554であり、2つとも負の相関係数がある。この結果は、音符のばらつきが多いところで、小節周期と呼吸周期の差が小さくなる傾向があり、音符のばらつきが小さいところで小節周期と呼吸周期の差が大きくなる傾向があることを示している。

3.4 考察

3.3節において、小節周期と呼吸周期との差が時間的な変動をすることがわかった。この理由として次のようなことが考えられる。演奏リズムと呼吸リズムは結合系として成り立っている。これは、体の動きと呼吸の間に相関があること(10)、また呼吸リズムと音楽の間に相関があること(7)9)から推測されるが、このとき、系の結合強度が時間的に変化する。結合強度が強くなれば呼吸周期と小節周期はコヒーレントな関係に

なるが、弱くなるとその関係が崩れる。ここで3.3節における、音符がばらついているほど、小節周期と呼吸周期の差とが小さくなるという結果より、次のような仮説が立てられる。音符のばらつきが大きいほど、演奏者はより演奏に対して注意を払うようになるが、この演奏者の注意を払う度合いが、系の結合強度を変える要因になっている。

この仮説より、3.1節、3.2節の結果は次のように説明できる。共同演奏中、音符のばらつきが大きいところでは、演奏者は相手とのタイミングを合わせづらく演奏は合あわない。よって相関係数は正になる。しかし、演奏が合っているときよりも、合っていないときのほうが演奏に対して注意は払われる。そうすると演奏リズムと呼吸リズムの結合が強くなり、演奏リズムと呼吸リズムの関係が一定になって、同じ曲を演奏している2人の演奏者の呼吸が結果的に合う傾向になる。よって相関係数は負になる。また3.3節の結果である、共同演奏時のほうが小節周期と呼吸周期の差の平均値が小さくなることについては、共同演奏時では相手の演奏に合わせるというタスクが増えるため、演奏に対して注意を払うことが多くなるためであると考えられる。

音楽の共同演奏において相手の演奏に合わせるためには、演奏者は相手の演奏を予測する必要がある、この予測性は共創的な現象に不可欠な要素であると考えられる。本研究で得られた仮説が妥当ならば、今後、呼吸を通して共創的な現象における予測性について解析を行える可能性があると考えられる。

4. アンサンブルシステムの開発

前節までの解析結果より、共同演奏時に演奏者間で

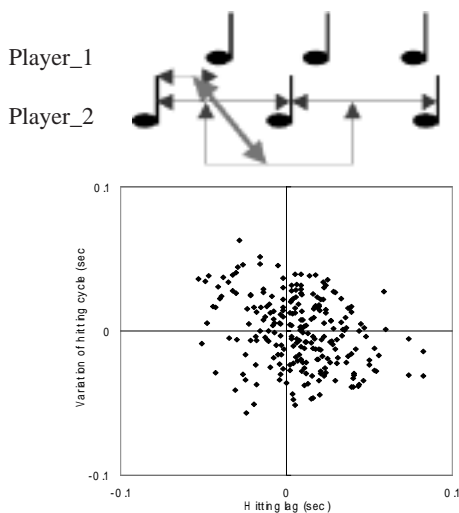


Fig.8 Relation between the hitting lag and the variation of the hitting cycle

Table.2 Correlation coefficient between the hitting lag and the variation of the hitting cycle

	1	2	3	4	5	All
High	-0.29	-0.29	0.30	-0.29	-0.34	-0.30
Low	-0.42	-0.38	-0.33	-0.38	-0.39	-0.38

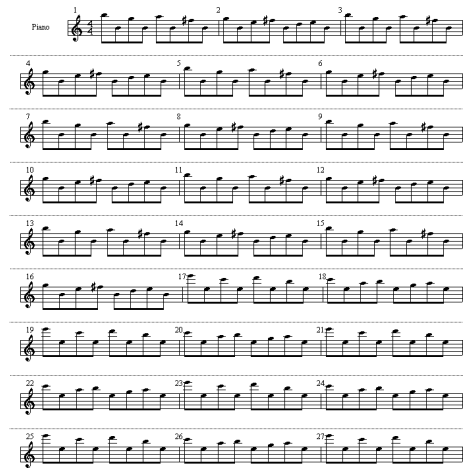


Fig.7 Music score composed by only 1/8 note

音を介する相互作用があり、お互いの小節周期の変動パターンが似てくること、また演奏リズムと呼吸リズムの間に結合系が成り立っているという仮説を得た。本節では、これらの結果のうち、前者の音楽レベルでの相互作用についてのモデル化を行い、それを実現するシステムの構築を行う。

4.1 演奏者間の相互作用のモデル化とシステムの開発

演奏者間のモデル化を行うためには、比較的時間スケールの大きい小節周期の変化だけでなく、時間スケールの小さい音符単位の変化を調べる必要がある。そのため次のような実験を行った。Fig.7に示す8分音符だけで構成された音楽を、同じ鍵盤の高いパートと低いパートで同時に2人で弾いてもらい、そのとき

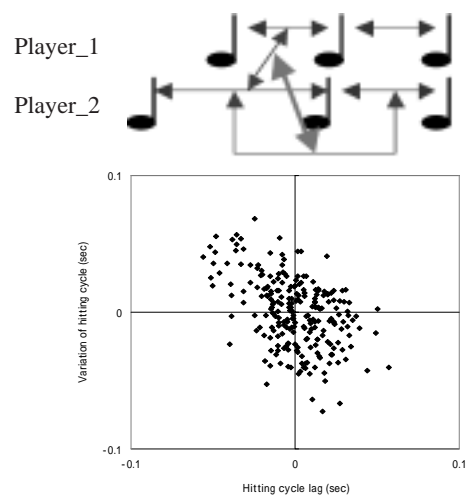


Fig.9 Relation between the hitting cycle lag and the variation of the hitting cycle

Table.3 Correlation coefficient between the hitting cycle lag and the variation of the hitting cycle

	1	2	3	4	5	All
High	-0.40	-0.48	-0.60	-0.48	-0.50	-0.49
Low	-0.32	-0.45	-0.50	-0.45	-0.42	-0.43

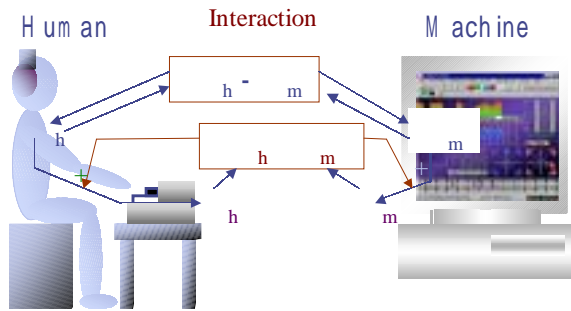


Fig.10 Measuring system of a live performance

の演奏者間の各音符のずれ(演奏者間の演奏のずれ)と打鍵周期の差(演奏者間における音符間隔の差),および各演奏者における打鍵周期の変化(各演奏者における音符間隔の時間変化)について調べた.実験は基本的な音楽の教育を受けた5人の20代の学生によって行われ,各ペアで演奏曲を5回演奏してもらった.

Fig.8は演奏者間の音符のずれと各演奏者における打鍵周期の変化の関係(太矢印の関係)を示した1例であり, Fig.9が演奏者間の打鍵周期の差と各演奏者における打鍵周期の変化の関係(太矢印の関係)を示した1例である. Table.2はFig.8に対応する相関係数であり,計5回の演奏の結果を示している. Table.3はFig.9に対応する相関係数であり,計5回の演奏の

Table.4 Parameters of experiment

	Music A	Music B	Music C
Tempo (BPM)	100	108	147
Meter (beat)	4/4	3/4	4/4
Music length (sec)	103	150	181

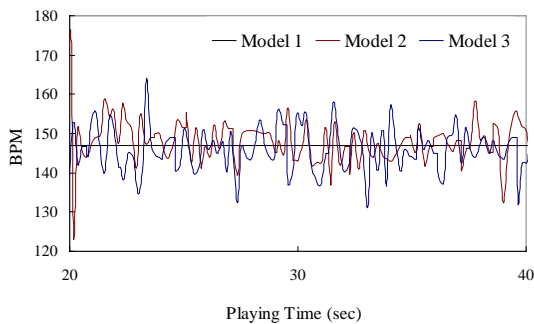


Fig.9 Time course of music tempo

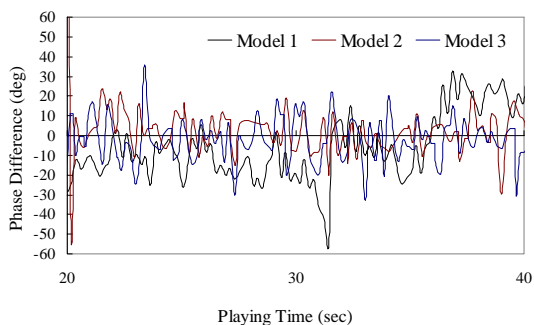


Fig.11 Time course of phase difference

結果を示している.両方の表において,値はすべて負である.2つの表において,Highは高いパートの演奏者,Lowは低いパートの演奏者を意味する.これらの傾向はすべてのペアについてみられた3).この結果は,演奏者間の関係がフィードバック系で構成されていることを示唆する.本研究では,この関係を以下に示す位相振動子系を用いてモデル化した.

$$\begin{aligned} \dot{\phi}_m &= \omega_m + K \cdot \sin(\theta_h - \theta_m) \\ \dot{\theta}_m &= A(\phi_h - \omega_m) \end{aligned}$$

ここで, ϕ_m は機械側の演奏の位相(演奏されている場所)を示す. ω_m は機械側の固有振動数を示し,実際には演奏される音楽のテンポを意味する.上式の相互作用項は人間との演奏の位相差についてのものであり(Fig.8の関係を実現する),下式の相互作用項は人間との演奏の固有振動数の差についてのものである.また, A, K は結合係数である.

Fig.10は構築した人間-機械系の模式図である.人間の演奏者と機械の演奏者が同時に演奏を行い,人間は位相差および,打鍵周期差を音の差として聞く.機械側はMIDIキーボードより入力された信号より,位相差および周期差を計算し,上記の式より演奏テンポを決め演奏を行う.

4.2 アンサンブルシステムの実験と結果

本節では前節で構成されたシステムの実験を行う. Table.4は実験に使用した曲のパラメタである.また実験には,前節で示したモデルの結合係数を変えた3種類のモデルを使用した.ひとつは $K=0, A=0$ である,モデル1.これは機械側がまったく変化しないモデルである.つぎに $K>0, A=0$ である,モデル2.これは,

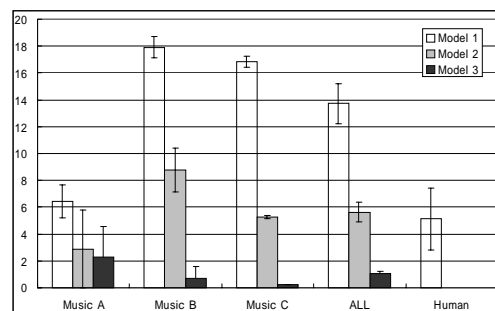


Fig.12 Mean of phase difference

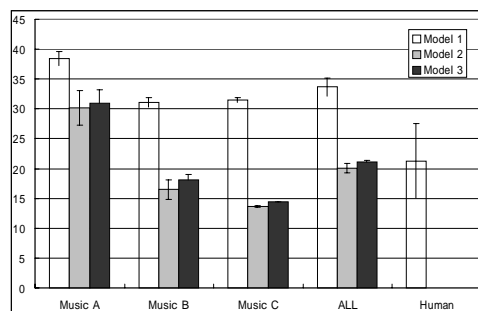


Fig.13 S.D. of phase difference

人間との位相差だけを考慮したモデルである。最後は、 $K>0$ 、 $A>0$ であるモデル3で、これは位相差、打鍵周期差両方を考慮したモデルである。またすべてのモデルにおいて、機械側の目標は人間との位相差が0になるように設定されている。

Fig. 10は共同演奏時の機械側の演奏テンポの時間発展を示し、Fig. 11は共同演奏時の人間と機械の演奏の位相差の時間発展を示している。またFig. 12はFig. 11に示した位相差の平均値を示し、Fig. 13は位相差の時間変動の標準偏差を示している。Fig. 12, 13における“Human”の値は人間同士が共同演奏を行った時の値である。Fig. 12よりすべての曲において、モデル1, 2, 3の順に値が小さくなっているのがわかる。またFig. 13より、標準偏差がモデル1に比べ、モデル2, 3のほうが小さいのがわかる。

モデル1に比べて、モデル2、モデル3と位相差の平均値が小さくなっていることから、システムの目標である人間との位相差を0にすることが実現されているといえる。しかし、モデル3ではその値は人間同士の値よりも小さくなっていることがわかった。これは、人間同士の演奏においてはある程度の位相差がいつも含まれていることを示唆している。また、標準偏差については、モデル2, 3の値が人間の演奏と同じであることがわかる。これは演奏の揺らぎについては、人間の演奏と同じ程度に押さえられていることを示唆している。

5. 結論

本論文では、音楽の共同演奏時における、音楽的な協調と生理的な指標を用いて解析される心理的な協調の間の関係について解析した。結果として第一に、演奏の一致度が楽譜の音符のばらつき度合いと正の相関関係があることが示唆された。また演奏者の小節周期が一人での演奏時から共同演奏時に変化し、変動パターンが近くなることが示された。第二に、位相差の解析より、呼吸の一致度が楽譜の音符のばらつき度合いと負の相関関係があることが示唆された。第三に、小節周期と呼吸周期の差が時間変動し、音符のばらつき度合いと負の相関関係があることが示された。これらの結果から、演奏のリズムと呼吸のリズムが結合系にあり、演奏者の演奏に対する注意の量が結合強度を変える要因になっているという仮説を導いた。

また、解析結果から演奏者間の相互作用を位相振動子を用いて構築し、その評価を行った。結果として、機械が一方向的に音楽を演奏するよりも、演奏のずれ、演奏の揺らぎを押さえられることが示唆された。今後はより人間に近いシステムを構築する上で、人間の演奏者の呼吸等を計測して、システムに演奏者の心理状態を認識させるシステムの構築などを考えている。

参考文献

- 1) R.A.Rasch : Synchronization in Performed Ensemble Music, *ACUSTICA*, **Vol.43**, 121/131 (1979)
- 2) 堀内, 坂本, 市川 : 合奏における人間の発音時刻制御モデルの推定, *情報処理学会誌*, Vol. 43, No.2, 260/267 (2002)
- 3) 小林, 三宅 : 相互引き込みモデルを用いたアンサンブルシステムの開発, 第40回計測自動制御学会学術講演会予稿集, 111C-4 (2001)
- 4) 古浦, 心理学的考察「いきが合う」, 北大路書房 (1990)
- 5) 中村: 「間」における演奏者と伴奏者の呼吸の同期, 日本心理学会第59回大会発表論文集, 631 (1995)
- 6) 長岡, 中村: 練習が演奏者間の呼吸の一致に及ぼす効果, 日本心理学会第64回大会発表論文集, 603 (2000)
- 7) 山本, 三宅 : 生演奏時における演奏者と聴取者の相互作用の解析, 計測自動制御学会論文集, Vol.38, No.9, 800/805 (2002)
- 8) T. Yamamoto, and Y.Miyake : Analysis of Interaction in Musical Communication and Its Modeling, Proc. of IEEE Int. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics, U.S.A., 763/768 (2000)
- 9) F.Haas, S.Distenfeld and K.Axen : Effects of perceived musical rhythm on respiratory pattern, *J. APPL. PHYSIOL.*, **Vol.61**, NO.3, 1185/1191 (1986)
- 10) R.R.BECHBACHE and J.DUFFIN : THE ENTRAINMENT OF BREATHING FREQUENCY BY EXERCISE RHYTHM, *J.Physiol.*, **Vol.272**, 553/561, 1977.
- 11) 三宅, 宮川, 田村: 共創出コミュニケーションとしての人間-機械系, 計測自動制御学会論文集, **Vol.37**, No.11, 1087/1096 (2001)
- 12) 大串: 音楽演奏とコミュニケーション, *日本音響学会誌*, **Vol.52**, No7, 558/562 (1996)
- 13) Y. Kuramoto, K. Kawasaki, M. Yamada, S. Kai, M.Sasamoto, "Pattern Formation," Asakura Shobo Co., 1991.
- 14) Y. Ohkura, "An elementary knowledge of Sound and Music," Kokushokankokai, 1999.
- 15) Y. Nagashima, S. Hahimoto, Y. Hiraga, K. Handa, "The Computer and Music," Kyoritsu Shuppan Co., 1998.
- 16) R.B.Dannenberg, "An On-Line Algorithm for Real-Time Accompaniment," Proc. of ICMC, pp.275-283, 1984.
- 17) J.J.Bloch and R.B.Dannenberg, "Real-Time Computer Accompaniment of Keyboard Performances," Proc. of ICMC, pp.279-289, 1985.
- 18) B. Veroco, "The synthetic performer in the context of live performance," Proc. of ICMC, pp.199-200, 1984.
- 19) R. Rowe, "Interactive Music Systems Machine Listening and Composing," The MIT Press, 1993.
- 20) S. Waki, H. Kato, N. Saiwaki, S. Iguchi, "-JASPER-" Proc. of IEICE, Vol.35, No.7, pp.106-107, 1995.
- 21) M. Nishijima and K. Watanabe, "Interactive music composer based on neural networks," Proc. of ICMC, pp.53-56, 1992.