

伴奏システムのテンポ制御モデルの検討

堀内靖雄^{†1} 足立亜里紗^{†1} 黒岩眞吾^{†1}

概要: 伴奏システムとは人間の伴奏者が行う伴奏のように独奏者に協調した演奏を計算機で実現するシステムである。合奏では事前に何回かリハーサルを行った後に合奏するケースだけでなく、初見で合奏するケースもある。初見時はリアルタイムで相手の演奏に反射的に反応する演奏テンポ制御が必要となる。本研究ではこのような人間の反射的な演奏制御を明らかにするために人間同士の演奏を分析する。先行研究では「独奏者と伴奏者の演奏タイミングのずれ」と「伴奏者の過去数拍分の平均テンポ」という2つの演奏情報から未来の演奏を予測する線形回帰モデルを提案したが、テンポ変動が比較的少ない楽曲を想定していたため、突然の大きなテンポ変化への対応はまだ検討されていない。そこで本研究ではテンポが大きく変化する場面にも適用可能な伴奏制御モデルを構築することを目標とし、合奏の分析を行った。分析の結果、人間同士の合奏ではお互いの演奏タイミングのずれが±約30ミリ秒以内の場合には互いに自分自身のテンポで自律的な演奏を行い、それ以上のずれが生じた場合はずれを減らすように自身のテンポを調整するという制御が示唆された。また、テンポ変化時に約100ミリ秒のずれが生じた場合には一部の音の時間長を極端に変化することにより、ずれを解消して相手との同期を維持する制御が示された。

キーワード: 伴奏システム, テンポ制御, 相互作用

1. はじめに

伴奏システムとは独奏パートと伴奏パートの楽譜情報が事前に計算機に与えられている状態で、人間の独奏者の演奏に協調した伴奏を人間ではなく計算機で行うシステムである[1-7]。これは、演奏会等で独奏であるフルートやヴァイオリンの伴奏を行うピアニストの役割を計算機が担うことを想定している。伴奏システムは教育現場や個人で行う合奏の練習などに応用されることから実用的あるいはエンターテインメント的な側面を持ち合わせている。実際に市販の伴奏システムも存在し[16]、プロの演奏家と合奏した事例も存在する[6]。人間同士が合奏を行う場合、何回かのリハーサルを重ねて理想の演奏を作り上げていくことが多い。すなわち本番の前にテンポや演奏タイミングなどの傾向のある程度リハーサルによって決定している。しかし、それによって全ての演奏が事前に決定されるわけではなく、本番で独奏者が多少演奏を変化させても、伴奏者はきちんと追従することができる。また、難しい楽曲でなければリハーサルを行わなくても合奏を成立させることができる。それは、人間の演奏者が合奏において相手の演奏に対して、反射的に瞬時に演奏制御を行っているからであると考えられる。したがって、人間の合奏制御は

- ・リハーサルで獲得した事前情報による制御
 - ・リアルタイムでの相手の演奏に対する反射的な制御
- という2つの制御メカニズムに従っていると考えられる。

伴奏システム研究において、リハーサルは古くから着目されており[8]、様々な統計データの学習を行うために活用されている。リハーサルを数回重ねることで予測性能が改善することが確認されている[9]。しかし、まだ伴奏システムには出力される伴奏の演奏が人間にとって不自然に感じられるといった問題点がある。これは伴奏システムが人間の合奏を十分に模倣していないことに起因すると考えられ

る。人間の演奏者が未来の演奏タイミングをどのように決定しているのか、すなわち人間の伴奏制御モデルはまだ十分に解明されていない。リハーサルを導入するか否かに関わらず行われる「リアルタイムでの演奏に対応する反射的な演奏制御」を解明する必要がある。反射的な演奏制御に関しては同期タッピングの分野でも研究されており、テンポ変化をするメトロノームに対する人間の挙動の分析が行われている[10]。伴奏制御も同様に知覚、認知、運動の複雑な協調を必要とし、制御の分析にあたり人間同士の演奏の分析が重要である。

人間の独奏者は伴奏者との合奏を行う際、自分勝手に演奏することはできず、少なからず伴奏の演奏に影響を受けてしまう。この相互作用については古くから指摘されており[11]、人間同士の演奏は相互作用が含まれるため分析が難しい。そこで、相互作用が含まれない計算機による独奏と人間の伴奏者の合奏の分析からテンポ変化部と安定部の分析を行った[12][13]。その後、相互作用を含んだ演奏の分析も行った結果、テンポの逸脱を取り除いたテンポ安定部に対して有効なモデルを提案した[7]がテンポ変化部への対応はまだ検討されていない。

そこで、本研究ではテンポ変化および相互作用を含んだ人間同士の演奏を分析し、テンポ変化時の独奏者と伴奏者の反射的な演奏制御を分析することを目的とする。

2. 分析データ

2.1 演奏曲目

分析には先行研究[14]で収録されたデータを用いる。分析対象曲はHanon作曲「ピアノの名手になる60練習曲」第5番を修正したものである。この曲はもともとピアノ独奏曲であるが本実験では左手パートを独奏パート、右手パートを伴奏パートとし、独奏・伴奏とも右手で演奏するこ

^{†1} 千葉大学



図 1 収録対象曲の 1 部

ととした．この曲は最後の音以外はすべて同じ音価の音から構成されているため，音楽的な要素が少なく，また，独奏と伴奏の演奏が記譜上はまったく同じリズムとなるため，分析が容易であるという利点がある．この曲は本来，全曲を通じて右手パートと左手パートがオクターブで並行移動するが，お互いの音を聴こえやすくするため，左手パートを 3 度上げ，6 度の並行移動とした．収録に用いた楽譜を図 1 に示す．

2.2 演奏者

演奏者は幼少期からピアノ演奏経験がある音楽大学ピアノ専攻卒の 4 名である．その内の 2 人を独奏者，残りの 2 人を伴奏者とした．独奏者にはできるだけ指示されたテンポを守るように，伴奏者にはできるだけ相手に合わせて演奏するようにと教示した．

2.3 収録環境

演奏は独奏者と伴奏者がそれぞれ別々の防音室内で行った．各演奏者は 88 鍵の MIDI ピアノで演奏を行い，各演奏者の演奏した MIDI 情報（打鍵時刻，音程，強さ，打鍵時間）を計算機で記録すると同時に，外部の MIDI 音源で音を再生し，各演奏者のヘッドフォンへと伝えた．すなわち，各演奏者は自分の演奏と相手の演奏をヘッドフォンの左右の耳から聞くことができる．その際，演奏された音ごとに打鍵強度が異なると相手の音の強さによって演奏が変化してしまう可能性があるため，打鍵強度にかかわらず一定の音量でヘッドフォンに出力するように音源を設定した．

2.4 テンポ変化の指示

独奏者が演奏する楽曲では突然のテンポ変化が 2 回指定された．テンポ変化のパターンは以下の 2 通りで，それぞれ 2 回ずつ収録した．テンポの単位は[beat/minute]である．

- ・パターン I 116→132→116
- ・パターン II 132→116→132

テンポ変化は小節の冒頭になるようにランダムに配置した．独奏者は各テンポを収録前の練習で確認した．伴奏者には曲中にテンポ変化があることは収録前に伝えたが，どの箇所に変化するかは伝えなかった．

2.5 分析データ

本研究では独奏者と伴奏者の組み合わせ 4 パターンに対して，テンポ変化 2 パターン×2 回の 16 回のデータを分析対象とする．

3. データの分析

以下の分析はテンポ安定部，加速のテンポ変化部，減速のテンポ変化部で個別に分析した．テンポ変化部はテンポ変化が指定された小節の 1 小節前から 3 小節間とし，テンポ安定部はそれ以外の全ての領域とする．

3.1 分析に使用するパラメータ

3.1.1 独奏者と伴奏者の演奏タイミングのずれ

独奏者と伴奏者の演奏タイミングのずれを以下のように定義する．

$$d_n = T_n - t_n \quad (1)$$

式(1)中の T_n , t_n はそれぞれ独奏，伴奏の n 番目の音における演奏時刻を表す．これは伴奏者からみた独奏者との演奏時刻のずれを表しており， d_n が正の場合は伴奏者が独奏者よりも早く演奏したことを意味し， d_n が負の場合は伴奏者が独奏者よりも遅く演奏したことを意味する．

3.1.2 平均時間長（テンポの逆数）との差

先行研究[7]では伴奏者は自身のテンポを一定に保とうと演奏しているという仮説に基づいている．テンポを一定に保つということは人間の脳内で一定周期の拍を刻んでおり，その拍時刻に合わせようと調整しているのではないかと考えられる．しかしながら，人間が脳内で感じている拍を計測することは困難である．そこで先行研究では脳内で感じている一定の拍時間長を伴奏者の平均時間長 l_{ave} であるとみなした．ここで平均時間長は伴奏者の直前 8 拍の平均時間長と定義し，また，直前の時間長と平均時間長との差 $l_{n-1} - l_{ave_{n-1}}$ を平均時間長変化 v_{n-1} と定義する．このように先行研究では平均時間長を過去 8 拍の平均としていたが，本研究ではテンポ変動時の局所的な平均時間長を分析したいため，移動平均により以下のように定義する．

$$v_{n-1} = l_{n-1} - l_{ave_{n-1}} \quad (2)$$

$$l_{ave_n} = 0.7 \cdot l_{ave_{n-1}} + 0.3 \cdot l_n \quad (3)$$

ここで l_n は伴奏の $n-1$ 番目の音から n 番目の音までの演奏時間間隔（Inter onset interval, 以下 IOI）であり，これは一般的に用いられるテンポの単位 bpm (beat per minute) の逆数となる時間長である（単位は秒またはミリ秒）． l_n は伴奏の n 番目の音の演奏時刻 t_n と $n-1$ 番目の音の演奏時刻 t_{n-1} の差として次式で定義される．

$$l_n = t_n - t_{n-1} \quad (4)$$

3.1.3 時間長変化

時間長変化とは伴奏者の IOI の変化を表し，以下の式で定義する．

$$c_n = l_n - l_{n-1} \quad (5)$$

時間長変化は演奏時刻 t_n の 2 階差分であり，直前の時間長に対して次の時間長をどの程度変化させているかを表しており， c_n が正の場合は直前の音よりも IOI を長く演奏したことを意味し， c_n が負の場合は直前の音よりも IOI を短く演奏したことを意味する．

3.1.1 節と 3.1.2 節で述べた独奏者と伴奏者の過去の演奏時刻の情報をもとに未来の伴奏演奏時刻を推定するのが伴奏制御モデルである。テンポ計算には独奏と伴奏の演奏位置がそれぞれの音に到達したときの時刻（演奏時刻）から計算されるパラメータが使用される。先行研究で使用されたパラメータは独奏者と伴奏者のずれ d_n と伴奏の平均テンポからのずれ v_n の 2 種類であり、直前の独奏と伴奏の演奏時刻が揃った時点で予測する伴奏の時間長変化 c_n を次式で計算する。

$$c_n = \alpha d_{n-1} + \beta v_{n-1} \quad (6)$$

式(6)における係数 α, β の値は人間同士の合奏データに対して重回帰分析を適用し、結果として求められる偏重回帰係数を用いている。すなわち、独奏と伴奏のずれと伴奏の平均テンポのずれの履歴から次の伴奏のテンポ変化量を決めるモデルである。

本研究では独奏者のふるまいも分析するため、独奏者の平均時間長からのずれ、独奏者の時間長、独奏者の時間長変化をそれぞれ伴奏者と同様に定義する。

$$V_{n-1} = L_{n-1} - L_{ave_{n-1}} \quad (7)$$

$$L_n = T_n - T_{n-1} \quad (8)$$

$$C_n = L_n - L_{n-1} \quad (9)$$

3.2 テンポ安定部

先行研究の分析結果が本研究の分析データに対しても同様に観測されるかを検証する。図 2 にテンポ安定部における直前のずれと次の時間長変化の関係、図 3 に直前の平均時間長との差と次の時間長変化の関係を示す。以降、 r は相関係数を表す。

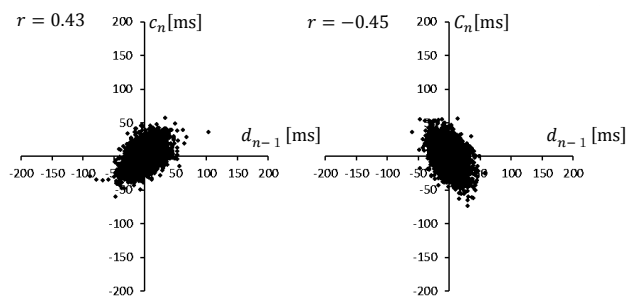


図 2 直前の演奏タイミングのずれ（横軸）と次の時間長変化（縦軸）の関係。左が伴奏者、右が独奏者。

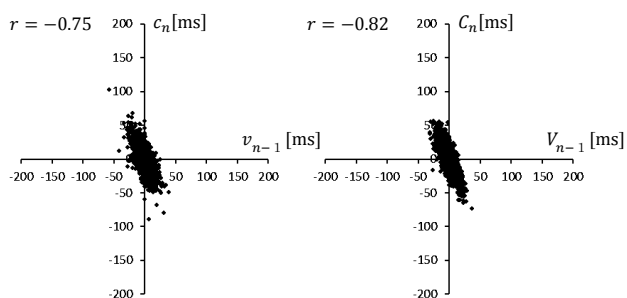


図 3 直前の平均時間長との差（横軸）と次の時間長変化（縦軸）の関係。左が伴奏者、右が独奏者。

表 1 テンポ安定部のずれの統計量（単位はミリ秒）

	平均値	標準偏差
演奏タイミングのずれ d_n	0.12	13.35
伴奏の平均時間長との差 v_n	-0.22	7.41
独奏の平均時間長との差 V_n	-0.25	8.26

図 2, 3 は伴奏に関しては先行研究[7]と同様の傾向を示しており、2 つのパラメータ d_{n-1}, v_{n-1} が伴奏の時間長変化 c_n の予測に有効であることが分かる。また、独奏者についても伴奏者と同様の傾向が見られた。

先行研究で提案したように、これらの変数との相関が高いことを利用して伴奏システムの制御を行うことは有効であると考えられる。この分析結果は人間の演奏者があたかも時間的なずれやテンポのずれに応じて伴奏制御を行っていることを示唆しているように推測される。しかしながら、この推測は人間の聴覚特性を考えるといささか奇妙な現象である。なぜなら、人間の聴覚における先行研究[15]では、±約 30 ミリ秒以内の 2 音の立ち上がりについて、人間はずれを知覚することができないことが示されている。すなわち、図 2 における負の相関は±約 30 ミリ秒以内のずれについてはずれを知覚したことに起因する現象ではないと考えることが妥当である。

そこで本研究では相手とのずれが知覚できない（±約 30 ミリ秒以内）場合は自分自身のテンポが一定になるように（平均時間長を一定に保つように）演奏し、相手とのずれが知覚できた（±約 30 ミリ秒以上）場合は相手とのずれを減らすように自身のテンポを変化させるモデルを仮定する。テンポを一定に演奏する場合であっても人間は機械のように正確に演奏することはできないと考えられるため、テンポ安定部の人間の演奏の時間長と平均時間長との差の分布を調べたところ、ガウス分布の傾向を示した（平均と標準偏差を表 1 に示す）。このことから、テンポ安定部で互いのずれが知覚できない場合はそれぞれが相手の演奏を考慮せずに独立に演奏を行っているとして解釈することも可能である。図 6 は時系列データの一例で、独奏者と伴奏者の平均テンポはおおよそ一致しており、互いの時間長は逆位相と同位相の両方の関係が存在していることから、それぞれが独立に平均テンポで演奏しようとしている可能性を示唆している。そこで本研究では二人の演奏者が±30 ミリ秒以内のずれの場合には自分自身の平均テンポからガウス分布に従う変動で演奏を行い、ずれが±30 ミリ秒を超えたときにはずれを減らすように平均テンポをわずかに変化させるモデルでシミュレーション実験を行ったところ図 4,5 の結果が得られ、図 2,3 と同様の結果を観測することができた。この結果から先行研究で示された図 2,3 に見られる相関のうち、±30 ミリ秒以内の現象はほぼ同じテンポで二人が独立して演奏をしているときに観測される見かけ上の相関で

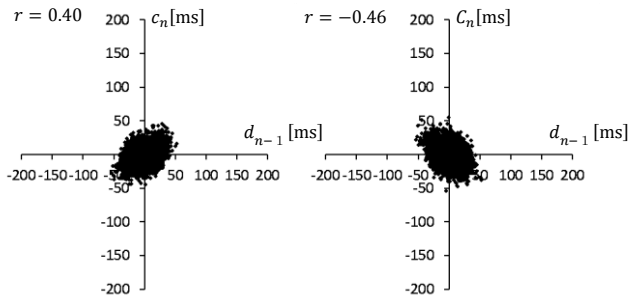


図4 直前の演奏タイミングのずれ(横軸)と次の時間長変化(縦軸)の関係のシミュレーション結果. 左が伴奏者, 右が独奏者.

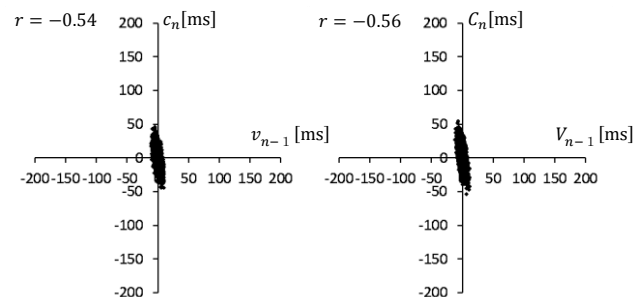


図5 直前の平均時間長との差(横軸)と次の時間長変化(縦軸)の関係のシミュレーション結果. 左が伴奏者, 右が独奏者.

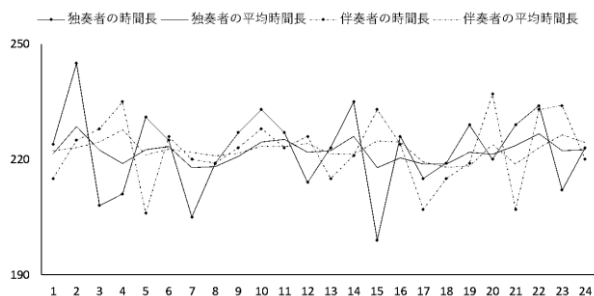


図6 独奏者と伴奏者の時間長と平均時間長の時系列. 横軸は楽譜上の位置, 縦軸は各音の時間長と平均時間長.

あと解釈することが妥当であると考えられる.

これらのことから, テンポ安定部での独奏者と伴奏者は自分自身の平均テンポを保つように演奏しようとした結果, 平均テンポ周辺で確率的な変動を行いながら, 相手とのずれを検出した際には平均テンポを調整することにより同期のとれた演奏を実現していると考えられる.

3.3 加速のテンポ変化部

テンポ加速部におけるずれの統計量を表2に示す. 表2においてずれの平均は負に偏っていることから, 伴奏者よりも早いタイミングで演奏することによりテンポを加速している現象が見受けられる. また, 標準偏差が比較的小さいことから演奏タイミングのずれはそれほど大きく増大していないことが推測できる. ここで平均時間長との差の変化量を以下のように定義する.

$$v'_n = v_n - v_{n-1} \quad (10)$$

$$V'_n = V_n - V_{n-1} \quad (10)$$

図7で伴奏者と独奏者のずれに対する挙動を観察すると, 伴奏者は-30ミリ秒以上の大きな演奏タイミングのずれが発生したときに平均テンポを負の方向, つまり加速方向に変化させ, 独奏者が加速して生じたずれを瞬時に減らそうとしていることが観察される. 一方, 独奏者のずれと平均テンポの変化は無相関である. これは独奏者がリーダーシップをとって加速を行っている状況であることから, 伴奏者の演奏の影響を受けずに加速を行っていると考えられる. また, 独奏者の平均テンポの変化量は±約10ミリ秒の範囲に分布しており, 極端に大きなテンポ変化はしていないと解釈できる. なお, 独奏者には急激なテンポ変化を行うように教示しているが, 収録データからは人間の独奏者は徐々に加速し, それに反応して伴奏者が加速している現象が観察された.

図8は加速の時系列データの一例である. 独奏者は平均時間長を徐々に減らしているため, 平均時間長よりも下向きの値が多くみられる. 独奏者は, 10音目~16音目に平均テンポを加速させている. このとき演奏タイミングのずれは30ミリ秒を越えており, 伴奏者は演奏タイミングのずれに応じて平均テンポを加速方向に変化させているのではないかと考えられる.

これらのことから, 加速のテンポ変化では独奏者は平均テンポを徐々に変化させ, 加速を実現し, 伴奏者は知覚できるずれが生じたら平均テンポを変化させることで, 独奏者に追従している様子が観測された. また, 独奏者, 伴奏者ともに平均テンポを中心に上下にテンポの変動が生じていることから, テンポ安定部と同様に意図した平均テンポから確率的に変動している現象が見受けられる.

表2 加速のテンポ変化部のずれに関する統計量

	平均値	標準偏差
演奏タイミングのずれ d_n	-9.23	17.3
伴奏の平均時間長との差 v_n	-3.07	8.59
独奏の平均時間長との差 V_n	-3.06	8.75

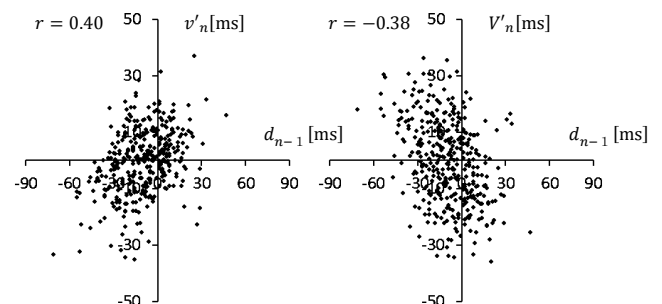


図7 演奏タイミングのずれ(横軸)と平均テンポの変化(縦軸)の関係. 左が伴奏者, 右が独奏者.

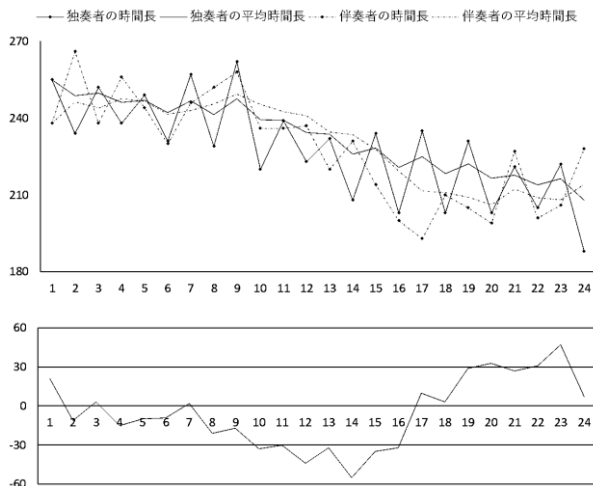


図8 独奏者と伴奏者の時間長と平均テンポの時系列 (上). 演奏タイミングのずれ (下). 横軸は楽譜上の位置

3.4 減速のテンポ変化部

テンポ減速部におけるずれの統計量を表3に示す. 表2と表3から, 減速部では加速部と大きく異なる現象が生じていると考えられる. 平均値の差はそれほど大きくはないが, 演奏タイミングのずれと伴奏の平均テンポとの差の標準偏差が約2倍の値になっている. 一方, 独奏者の平均テンポとの差は伴奏ほど変化していない. このことから減速時には演奏タイミングのずれと伴奏の平均テンポの差に因果関係があると予想し, ずれが何故加速時より増大したのかを考察する.

図9に演奏タイミングのずれとその後の平均時間長の変化量との関係を示す. 図9より演奏タイミングのずれは50ミリ秒~150ミリ秒でも多く分布しており, 加速が約50ミリ秒以内のずれで収まっているのに対して大きく異なる結果が観測された. 伴奏者のふるまいを観察すると, ずれが0付近ではテンポ安定時と同様の傾向が見られるが, ずれが大きい領域(約30ミリ秒以上)では大きく減速しているデータも観察されるが, わずかな減速しかしていないデータも見られる. そこでテンポ減速部の時系列データの分析を行った.

分析の結果, 独奏者はテンポ変化の瞬間から急激にテンポ変化を行い, 直前とは異なる平均テンポでそれ以降の演奏を行っている現象が見られた. これは突然テンポを遅くするという教示に従った制御をしていると考えられる. 一方, 伴奏者は独奏者のテンポ変化後, ずれが約30ミリ秒を超えると徐々に平均テンポを減速する現象が観察された. しかしながら, 独奏者が急激にテンポ変化を行ったのに対し, 伴奏者が徐々に減速を行う場合, ずれの大きさが徐々に拡大してしまい, 結果として非常に大きなずれとなってしまうことがある. 図10に示す例では8音目で独奏者が急激なテンポ変化を行い, その後はほぼ一定のテンポ

表3 減速のテンポ変化部のずれに関する統計量

	平均値	標準偏差
演奏タイミングのずれ d_n	12.09	33.74
伴奏の平均時間長との差 v_n	3.52	16.93
独奏の平均時間長との差 V_n	2.43	11.26

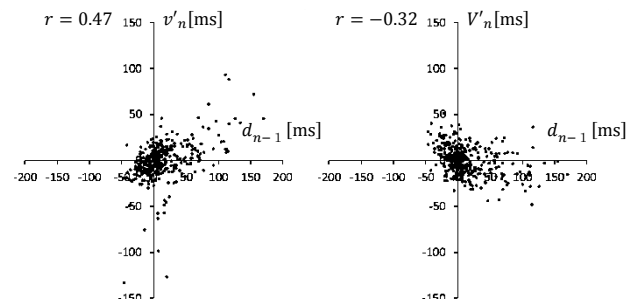


図9 演奏タイミングのずれ (横軸) と平均時間長の変化 (縦軸) の関係. 左が伴奏者, 右が独奏者.

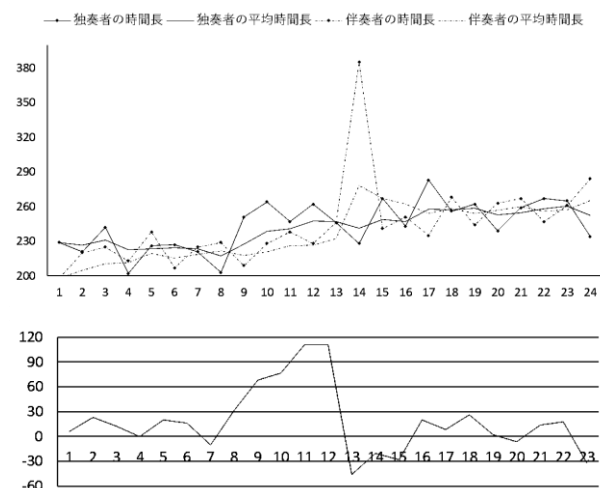


図10 独奏者と伴奏者の時間長と平均時間長の時系列 (上). 演奏タイミングのずれ (下). 横軸は楽譜上の位置

で演奏をしている様子が見られる. 一方, 伴奏者はずれが30ミリ秒を超えた9音目から徐々に減速を開始しているが, 両者のテンポに開きがあるため, ずれは減少せず, 逆に増加している. その後, 12音目で独奏者と伴奏者のテンポはかなり近づいているが, ずれは100ミリ秒を超えてしまっており, その直後の13音目で伴奏者は1音だけ急激に遅く演奏し, その後は安定した平均テンポで演奏を行っている. この急激に遅くした1音により, ずれは解消され, 独奏者と伴奏者の同期が回復したと解釈できる. 他の事例も同様に分析したところ, 同様の現象は数多く見られたが, 伴奏者の急激な減速が1音だけでなく, 連続する2音を急激に減速し, その後, テンポを戻した事例も観察された. これらの事例において, 伴奏者の急激な減速が見られる音符の直前のずれの大きさについて分析したが, 70ミリ秒か

ら 150 ミリ秒程度の範囲で発生しており、共通する閾値は見出せなかった。他に観測された事例として、独奏者のテンポ減速量が少ない場合や時間をかけて徐々に独奏者が減速した場合には伴奏者は約 30 ミリ秒以上のずれに反応して減速し、そのまま減速後のテンポで安定した合奏になる事例が見られた。

3.5 考察

これまでテンポ安定部、テンポ加速部、テンポ減速部の合奏を分析してきた結果、合奏における人間の独奏者と伴奏者のふるまいに対して、共通の現象が見出された。まず、合奏においては相手とのずれが認識できない状況（±約 30 ミリ秒以内）では自分自身のテンポに従って演奏を行うがその際、平均テンポに対して確率的に発生するわずかなテンポ変動を伴って演奏されていることが示された。また、テンポ安定時、テンポ変化時ともに相手とのずれが±約 30 ミリ秒を超えると平均テンポを変化させてずれを解消しようとする現象が観測された。ただし、独奏者の意図的なテンポ変化時には独奏者はずれをあえて無視してテンポ変化を達成していた。また、ずれが極端に大きくなった場合（約 100 ミリ秒以上のずれ）には伴奏者は 1 音あるいは 2 音だけ急激に減速することにより、ずれの解消を行い、それ以後はテンポ一定の制御に戻る現象が見られた。このような現象は音楽的にはアゴーギグ的なふるまいとして、それほど不自然な演奏にはならないと考えられる。

独奏者のふるまいとしては意図的に減速する際には急激なテンポ変化が実現されているが、加速する際には急激なテンポ変化は見られず、徐々に加速する現象が見られた。急激なテンポ変化という指示があるのにも関わらず独奏者が徐々にしかテンポを加速させていないのは、人間の演奏者にとって急激な加速は不自然であるか、あるいは伴奏者が追従できるように緩やかに変化させている等の可能性が考えられるが今回のデータだけではその原因はわからないため、今後さまざまなテンポや楽曲での実験を行い、検証したいと考えている。

4. まとめと今後の課題

本研究では初見合奏を想定し、合奏におけるテンポ安定部とテンポ変化部における演奏者のふるまいを分析した。その結果、人間の演奏者は相手とのずれが認識できない状況（±約 30 ミリ秒以内）では自分自身のテンポに従って演奏を行い、相手とのずれが±約 30 ミリ秒を超えると平均テンポを変化させてずれを解消している様子が示唆された。また、相手との遅延が極端に大きくなった場合（約 100 ミリ秒以上のずれ）には 1 音あるいは 2 音だけ急激に減速することにより、相手との同期を維持している様子が示された。

今後の課題としては分析用の収録データを増やすこと

が挙げられる。具体的には様々なテンポでの合奏に加え、独奏者が徐々に加速や減速を行うケースやもっと遅いテンポで突然の加速を行うケース等を含む合奏の収録を行った。また、今回の分析によって得られた知見をモデル化し、伴奏システムへ実装したいと考えている。

謝辞

本研究は科研費 17H00749 の補助を受けています。

参考文献

- [1] Dannenberg, R.: An On-Line Algorithm for Real-Time Accompaniment, *Proc. of ICMC*, pp. 193-198 (1984).
- [2] Vercoe, B.: The Synthetic Performer in the Context of Live Performance, *Proc. of ICMC*, pp. 199-200 (1984).
- [3] 中村栄太, 武田晴登, 山本龍一, 齋藤康之, 酒向慎司, 嵯峨山茂樹: 任意箇所への弾き直し・弾き飛ばしを含む演奏に追従可能な楽譜追跡と自動伴奏, *情報学論*, Vol. 54, No. 4, pp. 1338-1349 (2013).
- [4] Raphael, C.: Music Plus One and Machine Learning, *Proc. of ICML*, pp. 21-28 (2010).
- [5] Cont, A.: ANTESCOFO: Anticipatory Synchronization and Control of Interactive Parameters in Computer Music, *Proc. of ICMC* (2008).
- [6] 前澤陽: 自動合奏のためのタイミング結合モデル, *情報処理学会音楽情報科学研究会*, 2016-MUS-112, pp. 1-8 (2016).
- [7] 和田静花, 堀内靖雄, 黒岩真吾: 伴奏システムのための演奏時刻予測モデル, *情報処理学会研究報告[音楽情報科学]*, 2015-MUS-106(9), pp. 1-6 (2015).
- [8] Vercoe, B.: Synthetic Rehearsal: Training the Synthetic Performer, *Proc. of ICMC*, pp. 275-278 (1985).
- [9] Xia, G., Wang, Y., Dannenberg, R., Gordon, G.: Spectral Learning for Expressive Interactive Ensemble Music Performance, *Proc. of ISMIR*, pp. 816-822 (2015).
- [10] Schulze, H., Cordes, A., Vorberg, D.: Keeping Synchrony While Tempo Changes: Accelerando and Ritardando, *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*, Vol. 22 No. 3, pp. 461-477 (2005).
- [11] 澤田秀之, 磯貝昌幸, 橋本周司, 大照完: 音楽演奏における人間と機械の協調動作について, *全国大会講演論文集第 44 回(応用)*, pp. 389-390 (1992).
- [12] 堀内靖雄, 財津茜, 市川薫: 人間の演奏制御モデルの推定 (1), *情報処理学会音楽情報科学研究会*, 99-MUS-30-13, pp.59-64 (1999).
- [13] 堀内靖雄: 人間の演奏制御モデルの推定 (2), *情報処理学会音楽情報科学研究会*, 99-MUS-3-13, pp. 73-78 (1999).
- [14] 堀内靖雄, 坂本圭司, 市川薫: 合奏時の人間の演奏制御の分析・推定, *情報処理学会論文誌*, Vol. 45 No.3, pp. 690-697 (2004).
- [15] Rasch, A.: The Perception of Simultaneous Notes such as in Polyphonic Music, *Acustica*, 40, 21-33 (1978).
- [16] SmartMusic® <http://www.smartmusic.com/default.aspx>