

児童の時間知覚の発達を支援するリズムアプリの研究開発

境澤由起江¹ 中村泰敏¹ 小杉素子¹ 西田昌史¹ 和田 真² 鈴木康之¹

概要: 本研究では、時間情報を高精度に伝えることのできる聴覚からの刺激と、予測を生起させるリズムの時間的構造に着目し、DTW (Dynamic Time Warping)で手拍子リズムの評価を行うアプリを試作した。主要ユーザーとしては小学生を想定している。ゲームは、前半が手拍子音によるガイドあり、後半はガイド無しとして、手拍子によるリズムへの同期と継続のトレーニングを促す仕様とした。短期的評価では、ガイド手拍子とのズレが小さくなり、手拍子タイミングの正確性と精度、恒常性が向上し、アプリを使うことで時間知覚が向上できる可能性が示唆された。

キーワード: 時間知覚, リズム, 聴覚, 手拍子,

Research and development of a rhythm application to support children's time perception

YUKIE SAKAIZAWA¹ YASUTOSHI NAKAMURA¹ MOTOKO KOSUGI¹
MASAFUMI NISHIDA¹ MAKOTO WADA² YASUYUKI SUZUKI¹

Abstract: In this study, we focused on auditory stimuli that can convey temporal information with high accuracy and the temporal structure of rhythms that generate predictions, and developed a prototype application that evaluates hand-clapping rhythms using DTW (Dynamic Time Warping). The main users are assumed to be elementary school students. The first half of the game is guided by the hand-clapping sound, while the second half is unguided, to encourage training of synchronization and continuation of the hand-clapping rhythm. Short-term evaluations showed that the deviation from the guided hand-clapping became smaller, and the accuracy, precision, and constancy of hand-clapping timing were improved, suggesting that the application may improve time perception.

Keywords: Time perception, Rhythm, Auditory, Hand Clapping

1. はじめに

時間知覚は出来事の流れを認識・整理し、将来の出来事を予測するための認知能力である [1]。道を横断する、友達との会話で相槌を打つ等、時間の感覚を正しく持つことは、予期せぬ事態を減らし、まわりの人とのやりとりをスムーズにする。また、時間を推定する能力は言語の発達や読解等の学習面にも影響を与えると考えられる [2] [3]。

こうした時間を処理する能力を、子供たちは成長と共に身に付け、それまでの経験から時間を推定し導きだす [2]。しかし、過去の時間の経験を活かすことが苦手な子供もいる。例えば、突然の予定変更に気持ちがついていかずに、癇癪に繋がってしまうことがあるし、「やりたい」という気持ちを抑えられないこともある。これらは子供であれば誰しも生じることであるが、自閉症や注意欠陥多動性障害 (ADHD)等の傾向を持つ児童においては、そのようなことが起こりやすい [1] [2]。今、見えたり聞こえたりする世界がどう違うのかについても、十分に理解されておらず、本人も周囲も困惑してしまうことが少なくない。

ヒトの時間処理能力について、時間感覚、時間見当識、時間管理という能力が順々に獲得されることが示されている [4]。まず、時間的な概念がない乳児期を経て、2-4歳で朝起きてご飯食べてという生活の流れが生まれる。この時、時間概念のもとになるような小さな時間の知覚を積み重ね、行動の順序が身につく。自分とは違うリズムに運動のリズムを合わせるために必要な柔軟性が発達し始めるのもこの時期である [5]。

やがて、過去・現在・未来という時間の流れの理解と共に自己認識が形成されると考えられている [6]。つまり時間知覚は、安定した生活リズムを育み、健康な体をつくり、自己形成にも影響を与えている。時間知覚は、子供たちの健やかな成長の基盤であり、その獲得のために発達の早い段階での支援が求められている。

幼児から児童にかけての時期は、心身の発育・発達が活発となり、様々な随意運動ができるようになる時期でもある [7] [8]。このような発達期にある子供の時間知覚を最も効率良く刺激するのがリズムである [9]。リズムは時間を分節し、構造化するため、成長期の子供の身体に、時間情報

¹ 国立大学法人静岡大学大学院
National University corporation Shizuoka University, Graduate School of Integrated Science and Technology

² 国立障害者リハビリテーションセンター研究所
National Rehabilitation Center for Persons with Disabilities

を最も端的に伝達できる。幼稚園や小学校では、このような時期に、周囲と関わりながら様々なリズム遊びや音楽、運動等に取り組み、新たな動作・行動を学ぶ。

発達の基盤としてリズムの重要性を説いたピアジェ [9] は、このことを同化と調整という概念を使って説明している。生得的なリズムカルな動きに、様々な経験が取り込まれることで、複雑な動作・行動ができるようになる。本研究でも手拍子という動作でリズムの時間的情報を取り込めるよう、同化と調整を促すことを目指す。また、ゲーム等のモバイルアプリを活用することで、遊びの延長で時間知覚へ働きかけることを目指す。

これまでに、音楽に主軸をおいたリズムに関するゲームは数多く、国内外で多様なゲームが流通している。「全身の動きを記録するゲーム」、「キーを指で叩いて遊ぶコンピューターやコンソールゲーム」、「歌うことができるコンソールゲーム」など、市場に流通する音楽ゲーム 27 種類について評価した先行研究では、既存の音楽ゲームではリズムを十分に鍛えられないと報告している [10]。主な課題は 3 点あり、1 点目は音楽が流れている間に視覚的な刺激に反応させているということ、2 点目は音楽のリズム特性ではなく、刺激の数を変えることで難易度を調整していること、3 点目は望ましい動き等のガイドが提供されず、暗黙的な課題の提示になっていること。自発的に運動を促すためには明示的な刺激が求められている。

そこで本研究では、児童の時間知覚の発達を支援するリズムアプリの研究開発を目的に、小学生(以下児童)を主要ユーザーとして想定し、心理学や神経科学の研究等で行われているビートへの同期を分析する手法 [1] [2] [8] [11] よりリズムアプリを構想・試作し、そのアプリが児童の時間知覚に与える影響を評価することを目標とした。

既存のリズムアプリの課題を解消し、明示的なリズムの時間的特性を活用できれば従来のリズムアプリでは十分ではなかった児童の時間知覚の発達を支援できる可能性があると考えられる。

2. 先行研究

(1) 時間知覚

私たちの身体は、概日リズムとインターバル・タイミングという複数の体内時間を使い分けている。概日リズムはホルモンや体温、睡眠などの周期を管理する生命活動の基盤である [12]。インターバル・タイミングは、数時間から数分・数秒、ミリ秒単位まで、幅広い範囲の時間情報を利用している [12]。このうち、本研究では、秒範囲の時間間隔を測る時間知覚を対象として、研究を進めた。この範囲の時間知覚は、様々な脳領域の活性化を促し、日常生活に必要な意思決定や行動など、認知的なメカニズムに関わると示唆されている [12]。その分解能は、発達と共に向上することが明らかにされている [13]。

(2) リズム同調

リズムは、再現的で周期的な事象として、予測を生じさせる特性がある [14]。同じ長さの時間の繰り返して等間隔のリズムが形成されることにより、次に生じる音の時間的位置が予測可能になるためである [15]。一定の時間構造を繰り返すリズムによって、脳は細分化された時間の流れを予測し、フィードフォワード的に運動同調を促す [16]。本アプリではこのリズムに基づく予測性を活用して時間知覚の向上を目指している。

(3) 聴覚刺激

視覚、聴覚、触覚などの感覚様相の中で、最も迅速・正確に刺激を検出できるのが聴覚である [17]。聴覚は、音を持つ振動パターンを素早く伝達するため、反応速度が速く [17]、リズム周期と運動周期の同調においても効果的に橋渡しすることが期待できる。

この時、知覚系では引き込み現象 (エントレイメント, Entrainment) が生じている [16]。引き込み現象は、あるシステムの動きや信号の周波数が、別のシステムの周波数を巻き込む物理的な現象だが、心臓の動きや歩行のリズム、ホルモンの概日変化など生物学・医学に関わることも同様の現象として捉えられている。脳卒中やパーキンソン病等のリハビリテーションでは、既にこの現象が応用されている。音楽で歩行を支援するツールを開発した MedRhythms 社では、聴覚刺激による同調が時間の予測を改善し運動サイクルを安定させることから、神経の可塑性を高め、歩行機能の改善につながる可能性があるとして報告している [18]。

3. アプリ開発

(1) 開発方針

以上のことより、新たなアプリは、聴覚経路での刺激を主とする。今回はオーディオゲームというジャンルに着目し、モニタなどの映像情報を極力使用せず、音情報でプレイ出来るアプリの試作に取り組んだ。

従来、視覚に困難のある方々を中心に親しまれてきた分野であるオーディオゲームは、現在、多様なコンテンツが開発されている [19]。2019 東京ゲームショーでは、ヘッドホンから聞こえる蚊の羽音の方向に向かって、スプレーを模したコントローラを動かすと、蚊が退治できるという独創的なゲームが出展され話題を集めた [19]。本研究では、機能が限定された試作開発となるが、視覚的な効果の強いリズムアプリが多い中、将来的には音を主体としたユニークな体験の創出が期待できるのではないかと考える。

プレイヤーの反応として、手拍子を採用した。リズムへの反応を調べる実験では、一般的にタッピングを用いることが多いが、タッピングの場合、聴覚のフィードバックがないため、同期がうまくできない [20]。対して手拍子の場合、左右両方向からリズムカルな衝撃を体にフィードバックできるだけでなく、手を打つことによる音も同時に知

覚することが可能である。これによりプレイヤーは、ガイド手拍子と自身の手拍子のズレも認識しやすくなる。また、タッピングより運動負荷も高められる。

デバイスはiPadを採用した。児童はヘッドホンでiPadから流れる音楽を聞き、手拍子を打ち、iPadのマイクでその手拍子を録音する。音楽は初級・中級・上級の難易度に分けて作成した。1ゲームの長さは約1分。前半が手拍子音によるガイドあり、後半はガイドが無くなり、手拍子によるリズムへの同期と継続のトレーニングを促す仕様とした。

子供のリズム能力の特性をとらえるためのアプローチとして運動抑制を含む運動能力に着目することの重要性が示唆されている [8]。ヒトにはパーソナルテンポと呼ばれる固有のリズムがあり、幼児から児童にかけてはパーソナルテンポより速い刺激には遅く、遅い反応には速く反応し、動作の恒常性が低いことが知られている [7]。そこで同期フェーズでは規定されたリズムでどれだけ自己のリズムを制御できるかを学習できるようにし、ガイド手拍子が無くなる継続フェーズでは学習したリズムの自発的な再現を促す。これらのタイミングを同調させるには、外的な刺激となるリズムと、自己の運動との予測的な同調が必要である。本アプリの継続フェーズでは、この予測的な動作を促す。

(2) DTW によるリズム判定

アプリ開発ではリズム評価に取り組んだ。まず、iPadに内蔵されているマイクで手拍子音を録音し、ゲームエンジンUnityで手拍子の音響信号を検出した。その手拍子がガイド手拍子とどのくらい類似しているかを動的時間伸縮法(以下DTW:Dynamic Time Warping)により定量化した。DTWは音声認識の分野で古くから活用されてきたアルゴリズムとして知られているが、音声認識で使われる「音声」を「手拍子」の検出に変えることができないかと考えた。

プレイ中は手拍子が正確に打たれるわけではない。ガイド手拍子の位置で必ずしも音が発生するとは限らず、また、

想定外のところで手拍子が多く発せられることもある。DTWは、2つの時系列の各点の最短距離から類似度を求めることができるため、手拍子のようにデータ同士の長さや周期が違ってても定量化できるのが特徴である。本アプリではガイド手拍子と児童の手拍子の信号の最短距離をDTWで求め、その結果をスコアとした。最高得点は0点である。

リズム判定のフローを図1、試作機の画面は図2に示す。表1に示す機種、OS、開発環境を用いて製作した。

4. 実証実験

(1) 対象

参加者は小学生16人(男子5人、女子11人、7歳~12歳)、著者がボランティアに取り組む児童養護施設、静岡大学工学部が主宰するものづくりダヴィンチキッズ等の協力のもと希望者を募った。比較対象として、地域の高校生15人(男子5人、女子10人、16~18歳)の協力も得た。

対象者の聴力に異常はなく手拍子を打つにあたり支障をきたす問題等がない事、及び本研究の主旨を保護者等に確認し説明した上で書面による参加の同意を得た。本研究は、静岡大学人を対象とする研究倫理委員会の審査と承認を得た。

(2) 手続き

対象者は、事前に課題に用いる音楽(課題音楽)を聞き、手拍子の練習を1~2回実施した。椅子に座位あるいは、立位の状態、児童の好きな姿勢で実施した。音量については児童が手拍子を聞き取ることができることを確認した。

(3) 課題

課題音楽は「初級」で、テンポ102、1小節に2拍の手拍子リズム、約1分の楽曲中に64回の手拍子が発生する(図3)。この約1分の音楽に合わせて手拍子を打つことを1試行とし、計3回繰り返すという短期的評価を実施した。全ての課題終了後、感想をアンケートで確認した。(図14)

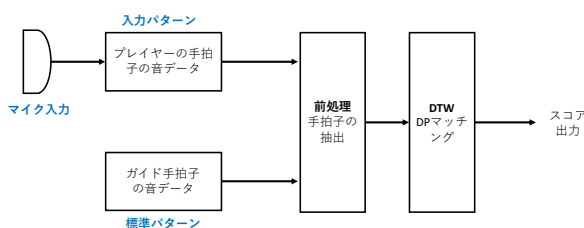


図1 手拍子リズムの判定フロー

表1 動作環境と開発ツール(8/1時点)

機種	iPad(第6世代)
OS	iPadOS15.5
開発ツール	Unity2020.3.2f1, Xcode 13.4.1, Visual Studio Code 1.68 0
ヘッドホン	Sony MDR-ZX110 B



図2 試作機の画面



図3 初級リズムパターン

(4) 評価方法

本研究ではタッピングを使った先行研究より負の非同期(Negative Asynchrony)と呼ばれる現象に着目した [21]. 反応は音が鳴ったら手を動かすため、必ず動作が遅れて発生することに対し、リズムで時間的な予測が成立していれば手拍子タイミングがやや前に発生するか、一致する(図 4). 手拍子を通して児童の予測的なタイミング制御が促進されれば、時間知覚が向上するという仮説を立てた.

実証では、リズムアプリより取得したサンプリング周波数 44100Hz の手拍子データより、100Hz でリサンプリングした手拍子の時間情報を対象とした. 評価は、正確性と精度 (DTW スコア)、位相差でみる恒常性 (同期誤差の変動係数)、周期性でみる恒常性 (手拍子の時間間隔の変動係数)、予測的手拍子の生起率 (負の非同期現象の発生率) の 4 項目で、統計手法は反復測定一元配置 ANOVA を用い、試行 1 回目から 3 回目の成績を分析した. 統計ソフトは RStudio4.1.1 を使用し有意水準は 1% または 5% に設定した.

(5) データ分析と結果

手拍子回数と発生した手拍子の時間への近さを同時に定量化できるため、正確性と精度の評価には DTW スコアを用いた. 最高得点が 0 点のため、値が小さいほどガイド手拍子への時間的な近さを表す. 結果を図 5 に示す. 各試行平均は 1 回目 6.88±5.80, 2 回目 6.75±4.74, 3 回目 4.31±4.41 であり、試行間の主効果は有意であった(p<.05). その差は下位検定では有意ではなかったが、試行を重ねるごとに徐々にスコアが減少しており、手拍子リズムの正確性と精度が向上している様子が示唆された.

恒常性は、位相差と周期性の 2 種類を分析した. 位相差は、ガイド手拍子と児童の手拍子との同期誤差 (以下 SE : Synchronization Error) を絶対値に変換し、周期性は手拍子間隔 (2 つの連続する手拍子の時間間隔, 以下 ITI : Inter Tap Onset Interval) を集計した. いずれも個人差があるため、平均値に対するばらつきを相対的に評価する変動係数

を指標とした. 値が大きいほどばらつきが大きいという判断になる. 結果, SE の変動係数 (図 6) は 0.23±0.13, 0.20±0.09, 0.19±0.08 と減少傾向を示したものの、統計的に有意な差とはならなかった. 一方, ITI の変動係数 (図 7) は 0.29±0.15, 0.30±0.15, 0.20±0.10 となり、試行間の主効果は有意であった (p<.01). 下位検定の結果, 1 回目から 3 回目, 2 回目から 3 回目において有意に減少し(p<.05), 周期性では恒常性が改善していることが明らかになった.

予測的な制御が手拍子タイミングに影響を及ぼしているという点については、ガイド手拍子と児童の手拍子の同期誤差である SE より負の非同期現象の発生率を集計した. 三宅ら [21]の同期タッピング課題では、1800msec より小さい時間間隔では、刺激に先行した予測的なタッピングが生じることが報告されている. 手拍子による閾値が不明のため、今回はこのタッピングの先行研究より、ガイド手拍子との差が 100msec 以下の手拍子を抽出し、64 回の手拍子に対しての生起率を求めた.

結果、予測的手拍子自体は 16 人中 13 人に観察でき、1 回目 20.71±37.19, 2 回目 25.68±37.87, 3 回目 21.22±37.38 と増加傾向にあったが、その差は有意ではなかった. そこでガイド手拍子のある同期相からガイド手拍子の無い継続相において、リズムが継続できているか変化の有無を同等性検定で分析した. 同等限界は 59msec とした. この値は初級テンポ 1180msec の 5% の時間であり、ヒトがリズムの変化を認識できないとされる基本間隔の 5% 以内とした [14]. 結果、同期相→継続相の平均は 1 回目 1307.33→1267.04, 2 回目 1284.85→1251.13, 3 回目 1242.37→1251.57 となり、同期相と継続相の差はどの試行も同等限界 59msec の範囲内にあることが検証された (p<.01) (図 8). よってガイド手拍子が無くなった継続相でも、同期相で学習した手拍子のリズムが保持され、次に打つ手拍子の位置を予測して手拍子を打つことが出来ていることが示された.

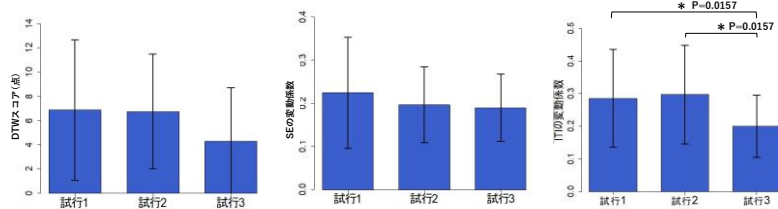
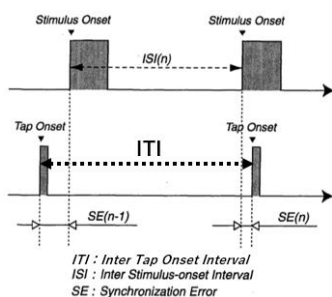


図 5 DTW スコア, 図 6 同期誤差の変動係数, 図 7 手拍子間隔の変動係数

図 4 三宅美博, 大西洋平, エルンスト・ペップル, 2002 を編集
 ITI は 2 つの連続する手拍子の時間間隔, SE はガイド手拍子と児童手拍子の同期誤差

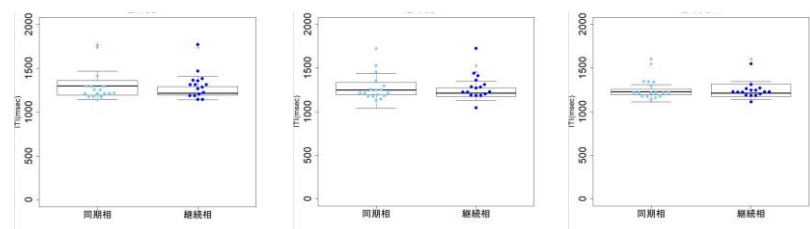


図 8 左より試行 1-3 の手拍子間隔における同期相と継続相

一方、ガイド手拍子を基準 (0msec) に児童の手拍子が発生する時間帯を集計したところ、主に基準より 100~300msec 付近の後方で分布していたことがわかった。そこで、この同期誤差が年齢差による影響かを確認するため、高校生(15人,16~18歳)にも同様の課題を実施し、全被験者のヒストグラムを分析した。

結果、小学生も高校生も、主に 200msec 付近を中央値として正規分布していたことに加え、小学生 16 人中 4 人、高校生 15 人中 2 人においては、-400msec 付近にも 2 峰性とみられるピークが観察できた (図 9,10)。この 2 峰性は、1 つの試行内で観察できる場合 (図 11) と、試行間の経過で観察できる場合 (図 12) に分かれ、前者は DTW のスコアが小学生 7-12 点、高校生 15-28 点と高く上手に手拍子が打つことが出来ていない場合に観察できることが示唆された。

(6) 考察

実証実験では、最初正確ではなかった手拍子が、試行を重ねるごとに時間情報の学習が行われ、予測の幅が小さくなっていく様子が観察できた。時間間隔の弁別においては、多観察効果(multiple-look effect)という現象によって、同じ時間間隔を繰り返し提示することで時間間隔の長短の弁別精度 (sensitivity) が向上することが報告されている [22]。本実証では、手拍子という運動要素が加わっているが、ガイド手拍子に同調している時に、この多観察効果で時間間隔の弁別精度が高まり、時間知覚の感度を高め、手拍子の同期が促進したのではないかと考える。恒常性については、位相差 (SE) ではなく、周期性 (ITI) の誤差が次第に減少し、リズム同調の基盤が周期性にあるという先行研究を裏

付ける結果となった [14][16]。リズム同期の過程では、まず周期誤差が発生し、それが一時的に位相差を拡大させ、その後数サイクルをかけて徐々に元の誤差に戻っていくことが報告されている [14][16]。つまり、リズム同調では手拍子の周期性が引き込みの基盤となっているため、周期誤差が 1~2 サイクルという短い時間で修正されるのに対し、同期誤差は時間をかけて修正される。実証データにおけるサンプルでも、その様子が確認できた (図 13)。このことからリズム評価では、個々の刺激と対になるような反応との同期誤差ではなく、周期に着目することが重要であり、主に視覚的な効果でタイミングを計るような前述のゲームアプリでは、個々の拍への同期が強調され、周期性への働きかけが限定的になると推察する。

一方、位相差のデータからは、個人の学習過程と推察される様子が観察できた。ガイド手拍子を基準 (0msec) に児童の手拍子が発生する時間帯を分析した結果からは、手拍子の同期誤差は、試行内でガイド手拍子より先行する「負の手拍子パターン」、ガイド手拍子より後方の「正の手拍子パターン」、正と負の両方が同一試行内に現れる「2 峰性のパターン」に分類できると考える。その様子は、個人差という点で、早めに手拍子を打つ傾向(負の手拍子パターン)と、後に手拍子を打つ傾向 (正の手拍子パターン)、さらにリズムが捉えられず手拍子が上手に打てない場合には 2 峰性のパターンで手拍子が出現しており、今後の研究から、個人差や発達の影響 (年齢差) を明らかにできると考えている。

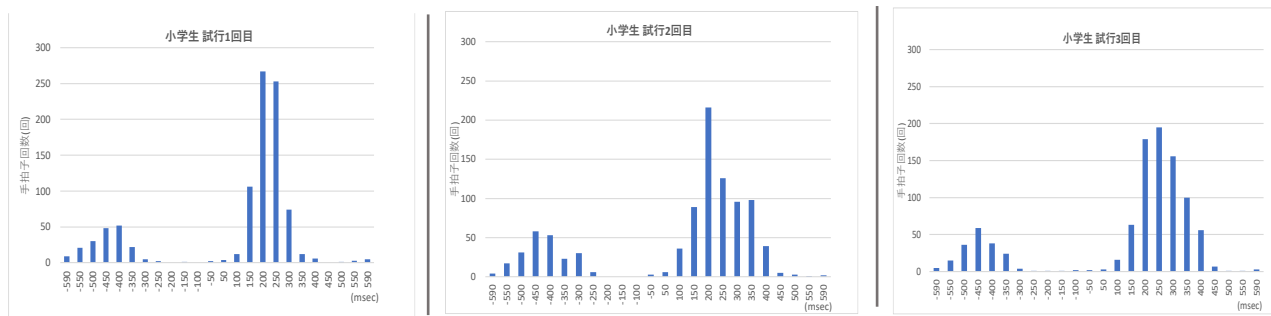


図 9 SE より集計した小学生の同期時間帯
2 峰性とみられるピークが 200msec, -400sec 付近で観察できる

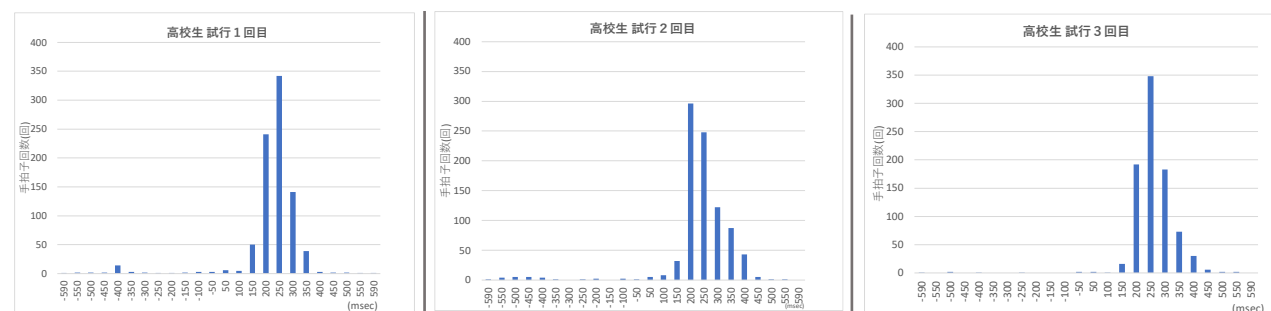


図 10 SE より集計した高校生の同期時間帯
200sec 付近に加えて-400msec 付近にもわずかに手拍子が発生

5. おわりに

今後の課題としてはリズム評価において、周期性という観点に重みづけをする他、こうした個人における学習過程を評価に反映することが考えられる。

また、実証後のアンケートでは試作機であることにもかかわらず、16人中13人が「また遊びたい」と回答した。音楽に合わせて手拍子を打つという単純なアプリではあるが、隣り合う友達と手を合わせる、体全体で動きをつけた手拍子を打つ等、ゲーム性のない試作機に自ら楽しみを見つけて遊ぶ様子も垣間見ることができた。今後の開発では、こうした子供たちがついてしまうような自然な反応を無くさないようなゲーム性と共に、音楽性の追求が課題である。音楽に合わせて動きたいという欲求は、グルーブと呼

ばれ、心地よい体験をもたらしてくれる [20]。本実証では、等時性のあるリズムだったが、変化に富んだリズムも小節単位で周期性を評価できれば、手拍子という身近な動作で音楽性のある心地よい体験を促すことができると考える。

時間知覚という点でリズム同調は、個人の身体の内にある時間を整え、時間認知を通して日常の様々な行動が上手に出来るよう働きかけてくれるものと考えられる。本研究のリズムアプリでは、そうして培った自分のリズムをもとに、やがては自分と異なる他者のリズムにも上手く同調していけるように働きかけることを目指している。また、今回は定型発達児童を対象としたが、将来的には知的・発達障害児を対象とした検証を進めて、時間知覚の発達を促すことによる支援の実現を目指している。

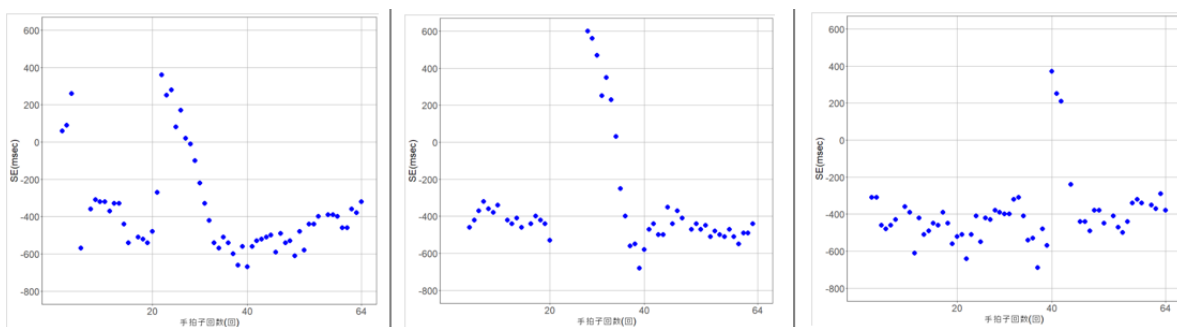


図 11 試行内での 2 峰性

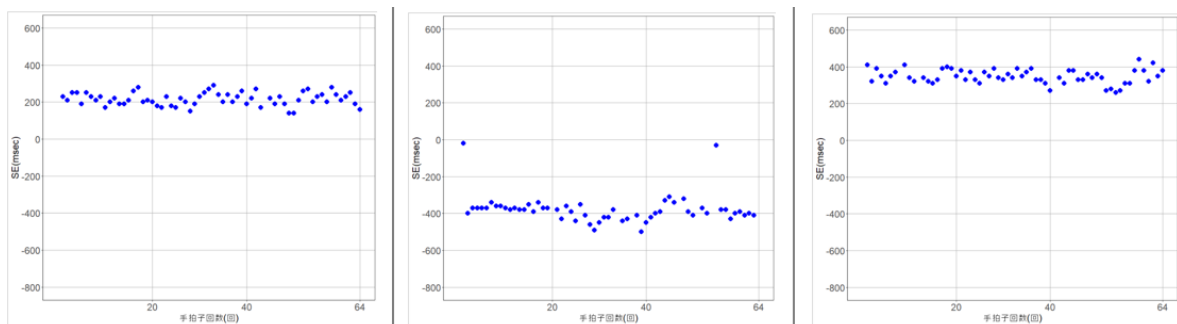


図 12 試行間での 2 峰性

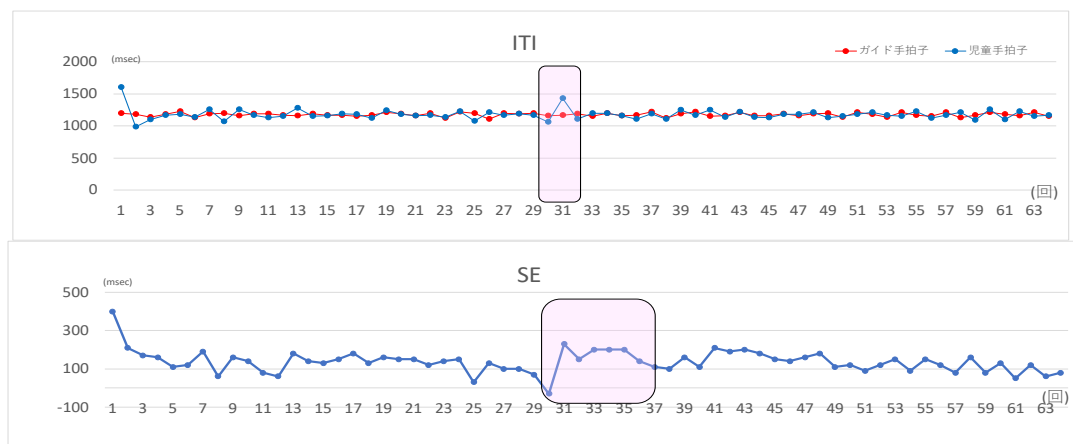


図 13 児童 n11 における ITI(上段)と SE の時系列データ



図 14 実証実験の様子

謝辞

本研究の実証にあたり、コロナ禍にもかかわらずリズムアプリの試用をご許可頂いた保護者、代諾者の方々、そして参加してくれた子どもたちに心より御礼申し上げます。

参考文献

- [1] Maggie E Toplak, Colleen Dockstader, Rosemary Tannock, “Temporal information processing in ADHD: findings to date and new methods,” *J Neurosci Methods.*, 151(1), 15-29., 2005.
- [2] Themelis Karaminis, Guido Marco Cicchini, Louise Neil, Giulia Cappagli, David Aagten-Murphy, David Burr & Elizabeth Pellicano, “Central tendency effects in time interval reproduction in autism,” *Scientific Reports*,28570., 2016.
- [3] Woodruff Carr K., White-Schwoch T., Tierney A. T., Strait D. L., Kraus N., “Beat synchronization predicts neural speech encoding and reading readiness in preschoolers,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*,111(40):14559-64, 2014.
- [4] G Janeslätt, M Granlund, I Alderman, A Kottorp, “Development of a new assessment of time processing ability in children using Rasch analysis,” *Child: Care, Health and Development*, 34,6, 2008.
- [5] Kirschner S, Tomasello M., “Joint drumming: Social context facilitates synchronization in preschool children,” *J Exp Child Psychol*,102,299–314, 2009.
- [6] 筒井健雄, “時間および時間概念の発達について,” *科学基礎論研究*,15 卷 4 号 p. 193-198, 1982.
- [7] 佐々木玲子, “子供のリズムと動きの発達,” *バイオメカニズム学会誌*,36 卷 2 号 p. 73-78, 2012.
- [8] 佐々木玲子, “子供のリズムカルな運動の調整機能の発達について,” *体育研究所紀要*,Vol.41, No.1 (2002. 1), p.1- 14, 2002.
- [9] ジャン・ピアジェ, 訳: 波多野完治, 滝沢武久, “知能の心理学,” みすず書, 新装版, 334, 1998.
- [10] Valentin Bégel, Ines Di Loreto, Antoine Seilles, Simone Dalla Bella, “Music Games: Potential Application and Considerations for Rhythmic Training,” *Front Hum Neurosci*,11:273., 2017.
- [11] Valdas Noreika, Christine M Falter, Katya Rubia, “Timing deficits in attention-deficit/hyperactivity disorder (ADHD): evidence from neurocognitive and neuroimaging studies,” *Neuropsychologia*,51(2):235-66., 2013.
- [12] Catalin V Buhusi, Warren H Meck, “What makes us tick? Functional and neural mechanisms of interval timing,” *nature reviews neuroscience*, 6(10), 755–765, 2005.
- [13] Sylvie Droit-Volet, Warren H Meck, Trevor B Penney, “Sensory modality and time perception in children and adults,” *Behavioural Processes*,Volume 74, Issue 2, 244-250, 2007.
- [14] マイケルH.タウト, 訳: 三好恒明, 頼島敬, 伊藤智, 柿崎次子, 糟谷由香, 柴田麻美, “リズム, 音楽, 脳 神経学的音楽療法の科学的根拠と臨床応用,” 協同医書出版社, 新版, 224, 2011.
- [15] 黒田剛士, 小野史典, 門田宏, “時間とリズムをつなぐ注意のダイナミクス,” *BRAIN and NERVE*, 69(11), 1195-1202, 2017.
- [16] Michael H Thaut, Gerald C McIntosh, Volker Hoemberg, “Neurobiological foundations of neurologic music therapy: rhythmic entrainment and the motor system,” *Frontiers in Psychology*, 5:1185., 2015.
- [17] Jose Shelton, Gideon Praveen Kumar, “Comparison between Auditory and Visual Simple Reaction Times,” *Neuroscience and Medicine*, Vol.1 No.1, 2010.
- [18] MedRhythms, “Our mechanism of action Auditory-Motor Entrainment,”: <https://medrhythms.com/>. [2022/9/30 時点].
- [19] オーディオゲームセンター, “AUDIO GAME CENTER,”: <https://audiogame.center/>. [2022/9/30 時点].
- [20] Tranchant P, Vuvan DT, Peretz I., “Keeping the beat: a large sample study of bouncing and clapping to music,” *PloS one*,11(7), 2016.
- [21] 三宅美博,大西洋平,エルンスト・ベッペル, “同期タッピングにおける 2 種類のタイミング予測,” *計測自動制御学会論文集*, 38 卷 12 号 p.1114-1122, 2002.
- [22] Gert Ten Hoopen, Stéphanie Van Den Berg, Jiska Memelink, Bruno Bocanegra & Roel Boon, “Multiple-look effects on temporal discrimination within sound sequences,” *Attention, Perception & Psychophysics*, volume 73, p.2249–2269, 2011.