

バランスゲームによる運動協調能力学習について

○Differences of Motion Coordination Ability in the Balance Game

瀬田 稀介[†], 大本 義正[†]
Maresuke Seta, Yoshimasa Ohmoto

[†] 静岡大学

Shizuoka University

seta.maresuke.19@shizuoka.ac.jp

Ohmoto-y@inf.shizuoka.ac.jp

・概要

自閉スペクトラム症スクリーニングの診断補助を図るべく、機械による協調運動能力の分析を実現するため、判断基準の客観化・定量化を目指した実験を行った。方法として実験参加者にバランスゲームを行ってもらい、スコアと協調運動の因果性パターンを分析した。結果として、高スコアと低スコアの運動協調パターンに大きな差が見られ、自閉スペクトラム症スクリーニングを行う際、今回の手法を利用した新たな評価枠組みを構築できる可能性が確認された。

キーワード：運動，バランス

1.はじめに

2013年のアメリカ精神医学会(APA)の発表によって、発達障害児の診断基準が変更された。この変更の重要な点は、従来の自閉症診断は自閉症かどうかの線引きであった事に対して、スペクトラムという連続値で自閉症を捉えるようになった点である。近年は世界的に発達障害児に対する関心が高まってきており、刺激の感じ方の特徴や運動のぎこちなさなど、日常生活の中での刺激に関する研究が進んできている。実社会では世界各地で診断や相談に訪れるケースが増加し、我が子を診断したいと考える親は増えてきている。しかし、被診断者を発達障害と診断できる医師や医療機関は限られている。そのため、診断の予約が取り辛い場合や、診断待ちが発生しているなど、実際に診断を受けるに至るまで多くの時間がかかってしまう現状がある。これは診断の基準が定量的でなく定性的であり、診断が確定するまで何度も診察しなければいけない事などが原因と考えられる。こういった現状から、被診断者が不自由なく診断してもらうためには、医療現場としての仕組み改善は必須であり、我々は機械による診断補助を目指して、検討を行った。

実際に世界各地では、診断希望者の全員が医師の診断を受けるのではなく、診断に至る前に発達障害児の

疑いの有無を判断(以下、スクリーニングと呼ぶ)する仕組みを利用している。この仕組みによって、疑いがある子を優先的に診断する事ができ、また疑いのない子は診断待ちから除外する事ができ、医療現場・家庭共に負担が軽減できると考えられている。しかし、スクリーニングに関しても問題は存在している。実際に、数多くのスクリーニング項目の感度や精度などの先行研究は挙げられているものの、スクリーニング診断を人手で行っている以上、慎重性を満たすために診断の回転数は落ち、医療現場・家庭共に負担がかかってしまう。また、人員が必要になるため、自閉スペクトラム症診断だけではなく、スクリーニングに関しても効率化を目指すべきである。そこで本研究では、スクリーニングにおいて機械による診断補助を目指すべく、機械が自動的にスクリーニング項目の評価を行うため、判断基準の定量化を目指した実験を行った。

2.関連研究

2.1 効果的なスクリーニング項目

これまでの先行研究から、自閉スペクトラム症スクリーニングについて、有効なスクリーニング項目は多く判明している。Oner らによる先行研究[1]では、共同注意やアイコンタクトが有効な項目であると挙げられている。また、柴崎らの先行研究[2]によると、5歳児健康診断においては、自分の左右が分からない事や数や文字の学習が苦手である等の項目が挙げられている。しかし、García-Primo らの先行研究 [3]によると、様々なスクリーニング手段は、異なる環境において特定の要因によって異なるパフォーマンスを示す可能性があるため、スクリーニング方法の妥当性についての総合的な理解は内的妥当性のレベルだけでは不十分であると述べている。つまり、地域や年齢など様々な要因が絡み合っているため、新しくスクリーニング項目を採用する際は、

十分な妥当性や慎重な議論が必要である。こういった状況の中、Geschwindらによって自閉スペクトラム症者の約9割以上が感覚処理障害をもつと報告されている[4]。また別の要素として、発達性協調運動障害は、自閉スペクトラム症者の約8割で現れる報告もあり[5]、これらの項目に着目したスクリーニングは、効果的である可能性が非常に高い。

2.2 今研究の立ち位置

上述した関連研究のように、現在の医療現場ではスクリーニングに関して診断基準や採点方法が一様に定まっておらず、診断者個人の技能によるところが大きい。今回の研究は共同研究プロジェクトの一環として、長崎県佐々町の5歳児健診版のスクリーニング項目を参照した。以下に、参照したスクリーニング項目を示す。

【表1】長崎県佐々町のスクリーニング項目

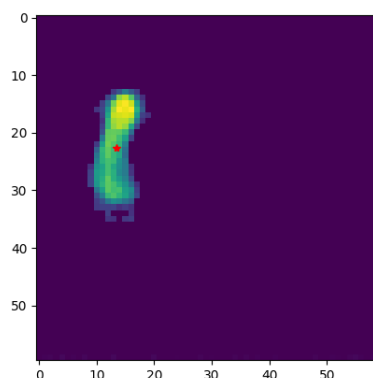
検査項目	目的
1.積み木構成	機能理解
2.人物画描画	周知的興味
3.三角形描画	手指の協調運動能力
4.片足立ち	全身の協調運動能力
5.構音反復	言語理解
6.指示の理解	働きかけの反応

上の表で挙げられているように、スクリーニング項目の中には、積み木構成や三角形描画などが存在し、我々はその中でも片足立ちに挙げられる全身の協調運動能力の診断に着目した。協調運動能力とは、一つの動作に対して必要な体の部位や筋肉を協調して動かす能力であり、体のバランスや姿勢を保つ事に必要な能力である。前セクションでは、発達性協調運動障害と自閉スペクトラム症の関係について述べており、スクリーニング項目として協調運動能力に着目する妥当性は確かである。また、前セクションで述べたように、我々は機械による医療現場の診断補助を目指しているため、機械がどのようにして協調運動能力を把握するのかを検討する必要がある。今論文のような、機械による医療現場への介入に関した先行研究は多く報告されている。例えばRajによる先行研究[6]では、機械学習による分類問題として自閉スペクトラム症の分類を行い、その精度を発表している。しかし、この研究はアンケートの回答に基づく観察項目による分類であり、

協調運動能力を始めとする能力を直接的に観察したデータに基づくものではない。そのため、我々が想定している機械による診断補助を行うためには、直接的に取得したデータに基づく客観的・定量的な判断基準が必要である。そこで今研究では、協調運動能力診断の補助を効果的に行うため、協調運動能力における優劣の客観的・定量的な判断基準の構築を目指した実験を行った。

3.方法

私達は生活している中で、バランス能力という言葉をよく耳にする。バランス能力とは、静止姿勢または動的動作中の姿勢を任意の状態に保つ、また不安定な姿勢からの回復や特定姿勢へ移行する能力を意味する。すなわちバランスとは、協調運動による結果やその能力を示していると考えられる事ができる。そこで我々は、全身の協調運動能力を診断する際、バランスに注目する事にした。バランスという観点として、実際のスクリーニング項目である片足立ちでは、以下のような圧力データが得られている。



【図1】片足立ちの圧力図

図1をみて分かるように、足の形は縦長の楕円形に近似でき、縦と横のバランスの協調を比較した際、横のバランス協調の方が全体のバランスに影響を与える可能性が高いと我々は考えた。そこでバランスの評価を行う際、横方向のバランスに焦点を当てた。そして以下の2点に注意して、実験を行った。

1 つ目は、特定の能力を評価する際の比較対象である。実験としてバランス能力に長けている人とそうでない人を比較し、その差異を見る必要がある。しかし、上記で述べたバランスという定義では、測定方法や判断基準の違いで評価が変化してしまう可能性がある。Audiffrenの先行研究[7]では、実験参加者の重心座標の移動から、バランスの評価を行っている。しかし、一般的にバランスを機械が評価する尺度は多様であるが、

その妥当性を満たす事は難しいと述べている。そのため我々は機械側、人間側共に直観的に把握しやすい尺度を検討した。そこで今回の論文では、バランスを全身の協調運動によって起きた身体の動きの結果であると捉え直し、身体の動きの因果性に基づいて評価を行う事にした。因果性とは、事象間における原因と結果の結びつきを示し、身体運動の因果性は身体の連動性に結び付くと考えることができる。ここで言う連動性とは、特定部位の運動の影響によって、別の部位が動いたと捉える事を意味する。その事から協調運動を行っている際、バランスに長けている人とそうでない人の間には、連動性による差が発生していると仮定した。そうして発生した差を動きの因果性による差として捉え、因果性を満たす動作の出現パターンがバランス能力の優劣を分離する指標になり得るのではないかと考えた。因果性の具体的な把握手法として、バランス評価診断を行っている際、特定身体部位の角度変化に着目し、統計的・数学的な手法をもって特定の角度変化が別の角度変化に対して因果性を持っているか算出する方法を行った。こうして得た因果性に基づく動作のパターン群が、バランス能力の優劣を分離する客観的・定量的な評価基準になりえるのではないかと考えた。

2つ目の問題点は、実験で行うバランス評価の題材である。今回の実験は目的上、自閉スペクトラム症の方々の実験参加者になってもらうのが理想である。しかし、実際に多くの自閉スペクトラム症の方々を集めるのは現実的ではないため、健常者の方々を実験の対象となる。しかし、我々は学校の体育など生活している中でバランス能力はみんな均等でないことは、実感済みである。この事から、健常者の方々を実験対象としてバランス評価を行っても、バランス能力の優劣の原因となる要素を把握することができ、それを自閉スペクトラム症スクリーニングに適応できると考えた。しかし、実際のスクリーニング項目である片足立ち、走るや跳ぶなどの動作より比較的シンプルである。そのため、若年層でもバランス能力の優劣が明示的に把握でき、かつ片足立ちのように移動せずにその場で留まる条件で評価できる題材を検討した。そこで今回は、横方向のバランスを重要な要因とするバランスゲームを実験参加者に行わせた。一般的に、バランスゲームの試行者は、ゲームの試行回数が増えるに従って、協調運動能力を習熟していく。そのため、協調運動能力の習熟による影響で運動の協調方法に変化が生じ、ス

コアやプレイ時間を基準として協調運動の優劣を試行毎にグループ分けすることができる。そして、その両グループ間に現れる差となる要因を分析する事で、客観的・定量的な判断基準に成り得る要素を抽出する事ができるのではないかと考えた。

以上の理由により、今回の論文ではバランスゲームによる実験を行い、因果性に基づく身体の連動性を追う事が、協調運動を評価するための客観的・定量的な評価基準になりえるかを検証した。

4.実験

4.1 実験概要

前セクションで述べたように、今実験の目標は協調運動能力診断の補助を効果的に行うため、バランス能力の優劣から現れる差の要因を抽出することである。そのために今回は実験参加者にバランスゲームを行わせ、バランスゲームで優秀な結果を残したグループと、そうでないグループを試行単位で分類した。分けた両グループにおいて、バランスゲーム試行中に撮影していた動画から、各関節点の座標データを入手し、特定の身体部位から角度を算出した。そして算出した角度の時系列変化の因果性が有意となるパターンに対して分析を行った。分析した観点として、シーケンスの長さ・支持度・発生倍率の3点が挙げられ、それぞれの観点からバランスゲームにおける協調運動能力の優劣で現れる状態の傾向や、差の要因を抽出した。

4.2 実験内容

今論文の実験では、14人の実験参加者(男性12名、女性2名、年齢:M=20.85、SD=0.64)に、任天堂株式会社が2013年に発売したWiiFitUに含まれているバランススキーと呼ばれるバランスゲームを15回プレイしてもらい、その様子を動画で撮影した。以下にバランススキーのゲーム画面を示す。



【図2】 バランススキー中の画面

図2の右上の四角形と丸はWiiボード上で計測さ

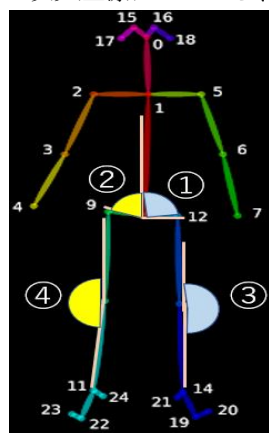
れている重心とその場所を表している。このように、バランススキーは上下方向に重心を移動する事でスコアの高得点を目指すゲームである。スコアはゴールに辿り着くまでの時間で決まるが、その道中にあるフラッグ間を通過しなければ多くのペナルティが課せられる。そのため、特に横方向の重心移動が高スコアを取る上で重要な要因となっている。

分析の比較対象として、今回はバランスゲーム1回毎のプレイ時間で、以下の2つのグループに分類した。

①プレイ時間が短いHigh。但し、Highグループの方が協調運動性に優れているとする。

②プレイ時間が長いLow。

プレイデータは14×15で210データ取得したため、HighとLowそれぞれに72データ(約三等分した際の上と下)ずつ振り分けた。そして撮影した動画を、Openposeと呼ばれる深層学習を活用した姿勢推定ツールに解析させた。姿勢推定ツールとは、静止画から人間の関節点を学習し、システム内に知識として蓄積する事で、動画などからリアルタイムに関節点を結んだ人間の姿勢として検出する事ができるシステムである。今回利用したOpenposeは、鼻や腰、左右の足首などを代表とする計24か所の関節点を検出してくれるモデルとなっており、我々は24か所の中から任意の3点を選び、角度を算出する事ができる。今回のバランススキーは、あくまで片足立ちの動作モデルとして扱っている。片足立ちは、全身のバランスが崩れようとする際、上半身をひねる動作を行う事が多く、またそれに連動して下半身も動く事が多いと我々は考えた。こういった考察の元、動画内での各実験参加者の各関節の2次元座標データから、以下4つの角度を計算した。



①首・腰・左尻からできる角度

②首・腰・右尻からできる角度

③左尻・左膝・左足首からできる角度

④右尻・右膝・右足首からできる角度

【図3】 Openposeによる座標と角度

そして各角度データ群を時系列データとして捉え(実験環境上1秒=約33フレーム)、全体の時間窓を2秒、ずらす時間窓を1秒とし、各角度変化のグレンジ

ャー因果性を計算した。グレンジャー因果性とは、時間に応じて変化するAの値を予測する際に、Aの過去の値だけでなく、Bの過去の値も利用した方が良い予測ができる指標である。因果性の方向性は、上記で挙げられた4つの角度に対して2変数だけに着目し、その総パターンで全ての方向を網羅した。例えば、角度1→角度2という因果性と、角度2→角度1を別々として捉え、全12パターンの方向性を分析対象とした。そして今実験では、因果性が有意($p < 0.05$)となる発生パターンを抽出する事で、協調運動を行う際の身体の各部位における連動性を追い、協調運動の順序や方向性を把握した。こうして得たパターン群が、今実験の目的であるバランスの習熟度の違いから現れる差の要因であると考えられるため、シーケンシャルパターンマイニングを利用する事で、パターンの組み合わせに対して細かい分析を行った。

以上の手順を行う事により、協調運動能力を学習する過程の分析を行った。

4.3 分析

前セクションで述べたように、グレンジャー因果性が有意となるパターンに、バランスゲームを通じて習熟した協調運動能力の差異が現れているはずである。そこで今分析では、シーケンシャルパターンマイニングを利用して、因果性が有意なパターン群に対して以下の3つの観点で分析した。

①シーケンスの長さ

この分析項目は、着目する時間窓の長さを表す。この値が大きくなるにつれて一度に見る分析範囲が多くなることを表し、発生するパターンの組み合わせは指数関数的に多くなる事を意味する。

②パターンの支持度

この分析項目は、全体における特定の組み合わせの出現率を表す。この値が大きくなるほど注目しているパターンが頻繁に発生している事を意味する。

③パターンの発生倍率

この分析項目は、ある条件下で特定のパターンが発生する倍率を表す。この項目は、値が大きくなるほどパターン同士の同時発生率が大きい事を意味する。今回は、発生倍率が1より大きいパターンが全体でどれくらい占めているのかの割合を算出した。1より大きいという事は、例えばA→Bというパターンにおいて、パターンAが単体で発生するより、パターンAとパターンBが同時に発生する確率が高い事を意味する。

上記の方向性を基に、以下に分析結果を示す。

【表2】 High グループのパターン数(個)

High	3	4	5	6
0.25	361	2080	7074	15492
0.3	142	633	1819	3317
0.45	20	46	84	93
0.6	4	5	6	6

【表3】 Low グループのパターン数(個)

Low	3	4	5	6
0.25	728	10303	72761	298856
0.3	383	3690	19873	66099
0.45	91	333	872	1773
0.6	39	54	96	149

【表4】 High グループのリフト数(%)

High	3	4	5	6
0.25	87	88	89	89
0.3	94	91	93	92
0.45	85	91	90	87
0.6	100	100	100	100

【表5】 Low グループのリフト数(%)

Low	3	4	5	6
0.25	47	36	31	28
0.3	41	32	28	25
0.45	29	24	26	29
0.6	10	11	27	30

表1~表4の見方を説明する。1行目の1列目は、表自体が High グループと Low グループのどちらのデータなのかを示している。次にグループ名を除く1行目の数字は、シーケンスの長さを表す。シーケンスの長さが3であった場合、着目するシーケンス

(時間窓)の長さが1~3の場合のパターン数を表している。最後にグループ名を除く、1列目の数字は支持度を表している。支持度が0.25であった場合、全体における25%以上の割合で出現するパターン数を表している。このことから、表1の2行目2列目である361という数字は、シーケンスの長さが1~3に限定した時の全体に対して25%以上の発生率を示すパターン数を表している。これを踏まえて、分析結果を次のセクションで細かく見て行く。

4.4 シーケンスの長さ

このセクションでは、表1と表2を参照する。初めにシーケンスに着目すると、High グループと Low グループ共にシーケンスの長さが大きくなるにつれて、パターン数も大きくなった。特に、両グループの2行目4列目と5列目に挙げられるように、High グループと比べ、Low グループは著しくパターン数が大きくなる事が確認できた。また、支持度が大きくなるに従って、シーケンスの長さに伴うパターン数の増加の影響が鈍化していく事も確認できた。この影響は High グループの高支持度で顕著にみられ、表1の5行目に関してはパターン数が横ばいする結果も見られた。このことからバランスゲームに長けている人は、そうではない人に比べて動きのパターン数が少なく、ゲーム中の動きが特定のパターンで構成されていることが確認できた。

4.5 パターンの支持度

このセクションでも、表1と表2を参照する。次にパターンの支持度に着目すると、両グループの2行目2列目と3行目2列目に挙げられるように、約半分減少している。同様に、両グループの支持度による変化を比較しても両グループ共に支持度の値が大きくなるにつれて、同程度パターン数が減少した。このことから、バランスゲームに長けている人とそうでない人との間に、頻出パターンの分布における差はないことが確認された。

4.6 パターンの発生倍率

このセクションでは、表3と表4を参照する。最後にパターンの発生倍率に着目すると、High グループの全ての結果において85%のパターンが1より大きい値を取ったのに対し、Low グループでは多くても40%程度という結果を得た。このことから、バランスゲームに長けている人は各部位の運動性に富んでおり、特定の部位が動けば運動して別の部位が動くように、体全体が協調的に動いていることが分かる。それに対しバランスゲームに長けていない人は、各部位の運動性に乏

しく、体全体の協調ではなく各部位が独立した運動を行っていることが確認できた。また、High グループの高支持度においては、全てのパターンの発生倍率が1より大きくなっていった。この事から特に頻繁に発生するパターンは、連動性に富んでいる動きである事が分かり、バランスゲームに長けている人は特定の動きを軸として、バランスゲームを行っていた事が確認できた。

5. 考察

上記の分析結果をまとめると、High グループはLow グループに比べ、因果性に富む動きのパターンが少ないが、抽出されたパターンの多くが発生倍率で高い数値を出していた。一方でLow グループは、因果性に富む動きのパターン数は多いが、抽出されたパターンの多くが発生倍率で低い数値を出していた。上記のまとめを受け考察すると、バランスゲームに長けている人は、因果性に基づく動きのパターンが少なく、またそれらが非常に連動性に富んでいる。この事から、バランスゲーム試行中は、無駄な動きが少なく軸となる特定の動作を基に、必要に応じてスムーズな重心移動を行っていた事が示唆された。対してバランスゲームに長けていない人は、因果性に基づく動きのパターンが多く、またそれらが連動性に富んでいない。この事から、バランスゲーム試行中は、軸となる特定の動作がないため、動作が不規則で全体的に落ち着きが無い状態であったという事が示唆された。上記の考察をまとめると、バランスゲームに長けている人とそうでない人を比較した際に、因果性に基づくパターンから見た協調運動方法に明らかな差が確認できた。この事から、因果性を満たす動作の出現パターンで協調運動能力の優劣を見出す事が成功できたと言え、前セクションで立てた仮説の検証は立証されたと考える。また、今回の実験はバランスゲームにおける協調パターンでの優劣の分離を行ったが、この手法が自閉スペクトラム症スクリーニングに適応できる可能性も示唆された。High グループから確認できるように、協調運動が習熟してしまうと協調パターンの硬直が起こる。一方で、協調運動が習熟していない場合、試行錯誤で運動を協調するため自然的にパターン数は多くなる。自閉スペクトラム症は、この協調パターンが少ないという報告があり、これは今実験のHigh グループと対応付ける事ができる。このバランスゲームによる実験では、High グループに属するデータ群は、度重なる試行の末の結

果であり、習熟度が高い事を意味する。一方で片足立ちスクリーニングにおいては、習熟度が高い方が珍しく、健常者はLow グループのように試行錯誤の末、協調パターンが多くなる可能性がある。この着目点から、今実験手法が、自閉スペクトラム症スクリーニングに適応できるのではないかと考えた。

6. 結論

今論文の実験によって、スクリーニングとして片足立ちで協調運動能力を評価する際、グレンジャー因果が有意なパターンの種類や数の大小に着目するという、新たな評価枠組みを構築できる可能性が確認された。しかし今回の実験の場合、Wii ボード上での環境という事もあり、両足が地面についている状態での分析であった。前セクションで参照した、長崎県版スクリーニング項目は片足立ちであるため、今論文で得た知見が、そのまま適応できるかは懐疑的である。そのため今後は片足立ちの状態でのデータを収集し、分析する事が必須となってくると考えている。

・参考文献

- [1] Oner, P., Oner, O., & Munir, K. (2014). Three-item Direct Observation Screen (TIDOS) for autism spectrum disorder. *Autism*, 18(6), 733-742.
- [2] 柴崎三郎, & 松原奎一. (2009). 5 歳児健康診査での軽度発達障害に関する問診項目の判別分析的検討. *小児保健研究*, 68(1), 19-27.
- [3] García-Primo, P., Hellendoorn, A., Charman, T., Roeyers, H., Dereu, M., Roge, B., ... & Canal-Bedia, R. (2014). Screening for autism spectrum disorders: state of the art in Europe. *European child & adolescent psychiatry*, 23(11), 1005-1021.
- [4] Geschwind, D. H. (2009). Advances in autism. *Annual review of medicine*, 60, 367.
- [5] Umehara, Y., Matsushima, K., Atsumi, T., Kato, T., Fukatsu, R., Wada, M., & Ide, M. (2020). Altered GABA concentration in brain motor area is associated with the severity of motor disabilities in individuals with autism spectrum disorder. *Journal of autism and*

developmental disorders, 50(8), 2710-2722.

[6] Raj, S., & Masood, S. (2020). Analysis and detection of autism spectrum disorder using machine learning techniques. *Procedia Computer Science*, 167, 994-1004.

[7] Audiffren, J., Bargiotas, I., Vayatis, N., Vidal, P. P., & Ricard, D. (2016). A non linear scoring approach for evaluating balance: classification of elderly as fallers and non-fallers. *PLoS one*, 11(12), e0167456.