

# 身体スキル開発における経験・予測・摂動・調整 に関する一考察

松浦健二<sup>\*1</sup>, 谷岡広樹<sup>1</sup>, 後藤田中<sup>2</sup>

<sup>\*1</sup> 徳島大学, <sup>2</sup> 香川大学

## Modeling issue of experience, prediction, perturbation, and coordination in motor-skill development

Kenji Matsuura<sup>\*1</sup>, Hiroki Tanioka<sup>1</sup>, Naka Gotoda<sup>2</sup>

<sup>\*1</sup> Tokushima University, <sup>2</sup> Kagawa University

Motor-skill brings physical availability on concrete tasks which are previously set. Some sports give names for typical tasks depending on focused properties such in forms, speed, time and objects of operation. When a learner tends to shift their application from one skill for a task to another task or a trick name, s/he should know or aware the difference between them. This paper tries to offer an opportunity of discussion on how we organize the systematic approach in supporting the shift.

キーワード: 身体スキル開発, スキル学習, 学習支援

### 1. はじめに

身体運動を伴うスキル開発において、人間の技能の習熟過程と支援技術の果たす役割のバランスを考慮しながら、個々の技に焦点を当てて様々な研究が進められている<sup>(1)</sup>。スキル学習においては、古典理論・モデルに基づき、センサー技術や表現技術およびネットワーク技術の進展と共に、脳科学、スポーツ科学、学習科学、認知科学、教育工学といった学際領域において、新たな理論・モデルを生む可能性が広がっている。ここでは、従来の研究対象領域にあったものが、こうした技術、学問によって見直される契機ともなる。

スキルやその習熟課程、さらにはその支援方略の本質に迫るには抽象度を適度に上げた議論が必要である。ただし、身体スキルの学習においては、個々の具象度の高いスキルを特徴づける属性およびその特徴量を観測対象として取り出してみたら、具体的に議論する必要があり、それらを踏まえて抽象度を上げることになる。具象度を上げると、スキルの本質以上に環境条件や身体的個別性といった外部要因が運動結果に大き

く作用してしまう場合があることに注意が必要である。これはオープンスキルとクローズドスキルとして従来議論されているが、それらの観測精度技術の向上により、より精緻な熟達モデル化や支援の構成も可能となってきた。

また、表層的なスポーツを評するには、具体的な応用スポーツ技能、それを支える基礎運動技能（走る、跳ぶ、投げるなど）、基礎運動要素（柔軟性、平衡能力など）、さらにはそれらを生み出す筋骨格系などによる体格・身体機能といった階層化された構造<sup>(2)</sup>で説明される。熟達化を捉える際には、成否への影響をどの階層に主要因を置くか定め、単なるパフォーマンス観測だけでなく、想定の内モデル、意図を制御する枠組みを前提とした支援を行うことが望ましい。特に、基礎技能、運動要素までを共通的に一定水準で既習と仮定しても、初学者と上級者との間では、応用スポーツ技能で相違が生じることがある。このような場合、階層構造に応じた分析に対して、経験や予測などを含む横断的な要因の影響も考慮しなければならない。例えば、サッカーのリフティングなどは、基礎運動技能以

下に焦点を当てた指導が目的に対して直接的に行われることはあまりない。したがって、このような場合には、階層構造における下層での支援より、応用技能を含む最上位層のみに焦点をあてて、外部から観測されるパフォーマンスによって支援を行うことが多い。

本研究では、こうした議論を踏襲しつつ、表出する特定の具体的な技に対する技能を取り上げ、スキルのインスタンスから別の応用的インスタンスに昇華させる際の習熟課程を捉え、その方法論や観点の整理を試みる。本稿では縄跳びを主な例に、「技」間の差異を人間の学習を通じた変容としてどう整理できるか、そのための観測はどう行うことが可能か、検討する。

## 2. 身体スキル開発プロセス

### 2.1 技間の遷移の概念化

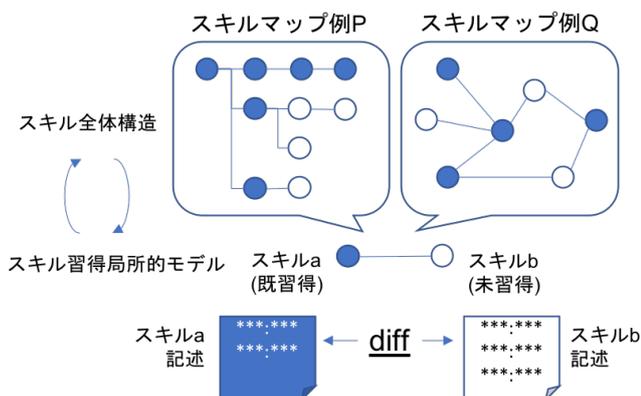


図 1 スキル遷移の差の概念化

縄跳びは、身体部位運動の組み合わせによる全身統合運動であり、一般に知られる比較的単純な技が多く、専門性の高い指導教員が個別指導にあたることは希である。すなわち、学習者個々の自己訓練によることが多く、結果としてシステム技術支援の需要は高い。

技自体をスキル実装と捉え、技をノード、その関係性（概念理解や構造上の関係定義）をエッジとしてネットワーク表現したものをスキルマップと呼ぶことにする。例えば、後藤田ら<sup>(3)</sup>の研究がある。異なる技の間の相違は、基本技習得段階で既に内部形成されたスキーマに応じて、比較的容易に習得できる技と、そうでない技との違いを生じさせる。それらをプログラム学習する際のパラメータ調整は、試行錯誤を反復訓練することで「経験」を通じて磨かれる。

文献<sup>(3)</sup>からは、明示的にスキル間の差を知識として学習者に与えない場合には、結果として獲得技のスキ

ルマップは、特定指標にしたがった規則性に必ずしも従わない様子が伺える。これは、児童が経験で得られた技から新しい名称の技には、こうした体系よりも興味に基づいて取り組むことが一因である。すなわち、観測指標により抽象化して体系を捉えることと、スキルの実装上暗黙に行われている変容が常に一致しないケースもあることが示唆される。スキルマップは、技自体の抽象化を高め、その俯瞰視は、図 1 上部のような既習・未習の別があっても、未収のものを概念としては既知として見てしまう。ところが、実際のスキル遷移では、未習のものは見えておらず、また経験もしていないことから、「予測」に基づく運動が必要になり、予測の精度を上げるためには、試行錯誤が必要になる。

例えば、縄跳びの各種の技を、抽象的なスキルの実装に名付けられた名称と捉えると、それら個々の名称により識別可能なスキル実装を支援するには、技間の特定指標による差に着目することが理解を容易にする。前述の縄跳びにおけるスキルマップでは、マップ自体に特定規則により構造化された関係（例えば木構造やネットワークポロジ）は得られていないが、局所的なノード間の関係のみに注視すれば、その遷移は抽象化して説明できる。

すなわち、ここでは識別指標が、ある目標としての未習スキルに対して、その元となる既習スキルの支配的特徴が可観測である場合には、その差分を数値または関数として得ることが可能になる。遷移の例ではないが、文献<sup>(6)</sup>ではフラフープにおける観測対象を、運動の開始時点で 2 種類、継続化の時点で 3 種類取り出して分析した結果、指標としての適性が得られたものとそうでないものに分けて論じられている。

ただし、試行錯誤の過程では、冒頭で述べたように、外因としての環境要因の変動、内因としての恣意性、目標軌道自体のゆらぎ、ホワイトノイズなどが試行毎に「摂動」として生じることになる。したがって、目標軌道が正確であれば、それに対する補正を適切に行い、試行途中または次試行での「調整」を試みることも可能になる。本節で述べてきたこれら「経験」「予測」「摂動」「調整」の過程を、システム技術によってどのように支援するかを設計していくことになる。

## 2.2 観測した軌跡からの軌道予測

前節のスキルマップであるが、観測対象の軌跡を比較的想像に易い線形回帰により近似できる場合には、このような関係性を支援手法に直接取り込むことを検討する。例えば、前一重跳びをできる学習者が、前二重跳びに取り組む時、さらに前三重跳びに取り組む時には、速度や腕回旋などはその候補になる。観測により得られた軌跡の数理モデルからの予測軌道を知識として学習者に与えた場合に、当然ながら未習の軌道であっても実際の体現はイメージしやすい。

縄の速度や回旋軌跡における径の大きさ、周期などはそのような評価指標の候補として考えられる。これらの観測対象データを特定した場合に、特定の数理モデルまたは数値計算による予測が近似的にでも可能であれば、それらを集めて体系化することができそうであるが、スキル学習の観点でこれを整理したものは著者らの知る限りあまり見当たらない。これは、個々の事例を集めていく地道な作業を経る必要があると考えられる。その際には、既に述べたように、行動変容としてのスキル開発に対して、支援システムとしての可観測性が同義ではないことに注意する必要がある。

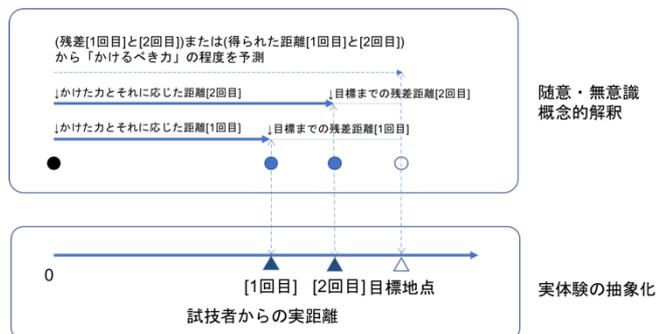


図 2 輪投げにおける線形予測の例

ここで、試行間の二つ以上の観測データから、未知の目標に対して単純に予測が成り立ちそうな例を挙げて、その習熟化の構造を帰納的に説明することを試みる。例えば、予め定められた距離の先に的がある時に、何らかの操作対象オブジェクトを的に目掛けて投げることを考える。例えば、輪投げゲームがある。この場合、二回の試技から、予測による次の試技の運動を学習者が導出する過程は、図 2 のように概念化できる。ただし、横方向のブレが無視できるほど小さいといった前提で、投げる距離だけに観測対象が絞れると前提が必要であるが、学習者への説明としてはこうした周辺条件の影響が小さければ省略した方が理解されやす

い。すなわち、概念上成立するモデルの一種ではあるが、これが実際に成立するのは、文献⑨における中・下階層のスキルが許容解の中に問題なくおさまリ、かつ外因があったとしても、摂動を生じることなく対応できるといった理想的前提が成立する場合である。

## 3. 縄跳び運動ケーススタディ

### 3.1 一重跳びから二重跳びへ

縄跳びの一重跳びから二重跳びへのスキルアップで身体部位ごとの運動を切り出したときに、跳躍に関しては跳躍周期の調整を要するが、これは比較的容易である。一方で、手の回旋については、一重と二重跳びの間で、一様に周期を 1/2 にするよう縄を回せば対応できる訳ではない。単調な周期運動と見なせる足の跳躍が線形に変化したとしても、手の回旋の方は、二種類の楕円状の軌跡による交互運動となる。

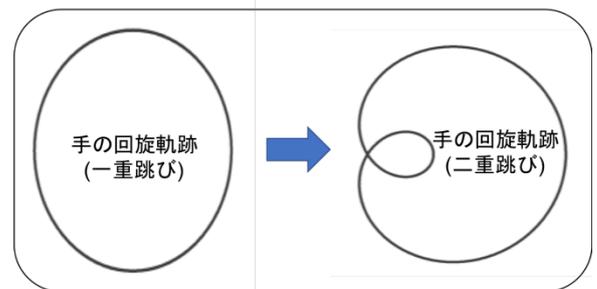


図 3 抽象化した手の回旋軌跡

実際の軌跡を分析するため、二重跳びを複数回跳躍可能な複数人の試技を左体側面からビデオ撮影して、軌跡の分析を実施した。図 3 は、実際の観測データに基づいて、一重跳びの軌跡を抽象化した楕円(左)と、二重跳びの軌跡を同様に抽象化した極座標方程式におけるリマソン形状に近似した図(右)であり、これが可観測な手の回旋軌跡の差として観測される。運動自体は一般には試行錯誤の中で経験的に開発されるが、視覚的イメージを与えることで、このような部位運動の遷移に生じる困難さを軽減することができる。一方で、このような軌跡は先の例のような線形の目標軌道変化とは見えない。非線形の数理モデルをある程度の正確性で体現するのは困難なため、差の理解促進には、軌跡に対するアフィン変換や軌跡から得られる細分化された属性などを取り出して、理解しやすい表現で理解・体現の困難さを軽減することを試みる。

### 3.2 軌跡とその詳細情報の提供

前節のように見ると、手の回旋の軌跡を学習者に伝えるには、軌跡を単純に見せることが直接的ではあるが、スキル学習における理解と体现の困難性が懸念される<sup>(4)</sup>。すなわち、うまく体现できない学習者に対しては、軌跡の全体視だけではかえって強く意識し過ぎることがあり、その場合には抽象化された情報を付加することで自己調整が機能する。したがって、学習者に適度な情報・表現を用いる必要がある。本研究では、(1)手の回旋の大きさ、(2)その速さ、(3)縄に対する手の相対的運動、(4)ワンツースリズムを要素としてとりあげる<sup>(6)</sup>。これらは、ARSA<sup>(7)</sup>による二重跳びの指南に従っており、これらは観測軌跡から定量的に取得できる。

#### 3.2.1 手の回旋の大きさ

手の回旋の大きさは、手の運動効率を示す指標となる。本研究における手の回旋の大きさを表す指標は、図3右のように現れる全ての観測点の重心を求め、それに対する個々の観測点の位置の径に対する平均値を求め、それを身長で割ったものとする。身長で割るのは、学習者間の身長差を考慮して相対値として表現するためである。

#### 3.2.2 手の回旋の速さ

データ系列を体幹の上下運動から、鉛直方向での極小点から極小点までで分節化した際に、1跳躍単位でのデータ取得ができる。手の回旋の速さは、グリップ（縄の柄）の一重跳びにおける1周期、二重跳びにおける2周期分のフレーム数をカウントして求める。

#### 3.2.3 手の回旋の縄に対する相対速度

手の回旋は、肩の関節、肘の関節、手首の関節の運動によって行われる。縄跳びの回旋運動を行う際、肩や肘の関節の運動よりも、手首の関節の使用程度によって、運動が崩れにくく、安定的なフォームに繋がる。そこで、手の甲と縄の柄の先端の運動を相対的な速度比として算出する。

#### 3.2.4 手の回旋のリズム

本項目は、二重跳びにおける手の2回旋1セットとなる運動での「ワンツー」のリズム評価である。熟練者における手の運動分析から、二重跳びの手の波形は大小2種類の合成波とみなせる。すなわち、2種類の合成波となっている場合に、「ワンツー」リズムを刻めっていると判断できる。そこで、手の波形は全観測デー

タに対するフーリエ変換によって、スペクトルを調べる。変換によって得られた極大点を閾値判定し、極大点の個数が2点現れる場合、強いスペクトルが2である運動として二重跳びが判断される。

### 3.3 熟達者の事例

複数の熟練者における運動の計測データから、技と技の間の動作における定量的な傾向を、前節に示した指標毎で算出を試みる。二重跳びを10回以上連続でできる20代の男女5人に協力依頼し、一重跳びと二重跳びをそれぞれ4試行以上実施してデータ取得した。ただし、1試行は運動の開始から終了までとし、使用するデータは十分に計測が行えたもののみとする。

一重跳びと二重跳びの差における全試行データから、前節で示した4要素のうち、2値判断となる(4)以外の指標に対する相関係数を算出すると、(1)と(3)に高い相関が見られた( $r(1)=0.931$ ,  $r(3)=0.787$ )。すなわち、手の回旋の大きさと相対的な速度に相関が伺える。回旋の速さに関しては、試技に対する運動や個人差が大きいことも影響していると考えられる。

このことから、相関の強い要素に関しては、初学者に対しても二重跳び運動に必要なパラメータを推測できる可能性が示唆される。そこで、二重跳び未習の学習者が行う一重跳びの計測データから、回帰直線を算出し、さらに標準誤差を加味することで、上限・下限を設けることを考える。この幅を個人毎の目標域として設定することにする。この目標域は、本手法での評価に際しては、手本となるモデルとし、これによって表される一重と二重跳びの差異に基づき支援する。

## 4. フィードバック設計およびシステム実装

### 4.1 フィードバック

運動学習では、始めにフォームから練習するのがよいとされる<sup>(8)</sup>。そこでは、学習者の内部にスキーマを形成する過程が含まれる。そこで本研究では、手の回旋における個々の観測指標としての要素に着目して、要素ごとに前節のように目標域を設定する。

これを踏まえた際の縄跳び運動における練習の問題点として、縄にひっかかってしまうことでの失敗があるため、特に初学者においては、連続（反復）運動としての学習に必要な成功経験を蓄積することが難しい。

本研究では、学習の第一段階として、道具を使用せず、回旋と跳躍を個々の部分運動での練習を行う<sup>9)</sup>。これにより、身体部位運動単位での二重跳びへのスキルアップが失敗を気にせず行える。

本研究では、先に定義した差分抽出からのフィードバック情報は、運動直後に非同期的に与えることにする。ここで、三輪<sup>10)</sup>の「過剰支援における学習効果減衰仮説」によれば、学習者に課題に対するフィードバックの回数や情報量を過剰に提供するよりも、回数や情報量を制御して学習者に考えさせる余地を残した方が学習の成果が記憶として定着しやすいことを示唆している。そこで、フィードバックのタイミングやその時に与える情報量は適度に低く留めることにする。具体的には、非言語情報として上述の目標域を視覚化したアニメーション映像を直感的な理解のために与え、教示する言語情報としては固定的なテキスト文字列と目標となる値を表示することにする。

## 4.2 システム実装

本システムの開発は Windows OS 上で、VC++.Net で行い、動作計測とアニメーション表示部は Intel OpenCV ライブラリを使用した。カラーマーカーを身体に装着利用して、動画画像分析により、先の指標における評価を試みる。

フィードバック実装は、システムの分析に基づき得られた数値や動画画像を応用する。すなわち、AVI 形式の動画出力と、各種取得データと目標域を可視化する。これにより、目標との差分を直感的に認識しやすくなる。また、固定テキストには「もっと早く回そう」や「もっとゆっくり回そう」などの情報量を抑制した発言を上記情報に合わせて提示する。

## 5. ケーススタディ

### 5.1 概要

ケーススタディとして、男女 14 人の成人被験者による試行を実施した。本試行の対象者は、一重跳びを十分に跳ぶことができ、かつ二重跳びを連続して 2 回以上跳べない人である。本システムを使った学習が十分行える期間を想定し、1 人あたり 2 週間程度とする。そして、1 人あたり計 4 回のシステム利用日を設け、その経過観察と、実験前後の変化を比較する。試行の

場所は、縄跳び運動に支障がなく、かつ画像分析においてはノイズが比較的少なくなる同一環境である。

予備試行を一重跳び、二重跳びそれぞれ一定回数実施し、評価に用いる観測指標に対して概ね均等と見なせるよう 2 群に分けた。実験用システムを使用する A 群と、機能制限した統制システムによる B 群である。A 群、B 群とも、試行時には、一重跳び、二重跳びそれぞれ 1 試行ずつ計測し、合計 4 回の練習とシステム利用を行った。また、試行期間の後に、事後試行として、予備試行同様に制約なく試行を行う。

## 5.2 結果

事前(予備)試行と事後試行の間のパフォーマンス値の改善が群間で個人ごとに調査した。パフォーマンス値とは、1 回あたりの全ての観測データ個数に対して、目標域に入った成功データ数の割合で定義している。3.2 節の観測指標(1)-(3)であるが、実験群を優位とする傾向が得られたのは(3)で、(2)は反対に統制群が優位であった。また、(1)はいずれでもなかった。

また、身体部位運動単位ではないが、実験を通じて跳べるようになった二重跳びの成功数の変化量を付記する。表 1 は、成功回数の増加量の比較である。すなわち、実験前後で実施した 3 試行の平均の差である。群 A の平均的な成功回数の増加が高い様子が分かる。

表 1 実験前後における連続跳躍成功数の変化

	A 群	B 群
実験前後の平均変化(SD)	2.04(3.56)	0.52(0.30)

評価指標全てに有効性が見られる訳ではなかったが、手の回旋に対する縄の柄に現れる手首の相対的な運動指標には、予測に近いパフォーマンスが現れる傾向となった。手首は、全身運動に比して複数の関節による大きな制御を要する運動とはいえないため、容易に運動を修正できる可能性が考えられる。また、局所的な運動であることから、目標を視覚的に強調することで、意識的に運動を制御できる利点もある。

一方で、手の回旋の大きさと速さといった比較的大きな軌跡による指標では、パフォーマンス値としては大きな差とまでは観察されなかった。このうち、統制群に優位との結果が出た手の回旋の速さについては、目標域が実際には  $29.827 \leq \mu \leq 39.820$  [1/60 sec] であった。およそ 0.6 秒以内で二回旋の運動が完結する

ため、一回旋の運動は平均して 0.3 秒で完結する。よって、二重跳びの手の回旋には、比較的素早い動作を必要とするバリストック運動と考えられ、運動中の修正が困難にも関わらず不応な情報を示唆していた可能性が考えられ、今後検討していく必要がある。

## 6. おわりに

本研究では、人間のスキルの実装結果として現れる運動の技と別の技の差について、その観測指標を定め、指標の差に基づいてフィードバックを行う議論を行った。実際の運動に対して分析・支援に用いる指標は、軌跡から得たものであるが、軌跡自体に加え目標指標として人間の理解を助ける可能性があると考えられる。また、それを用いて指南する際には、その指標に関する数理モデルが明らかな場合は、未習の技を適応的に予測可能であるが、そうでない場合は、近似モデルに基づいて予測を行う必要がある。実際には、目標軌道自体は数理モデルとして定義できても、それを実現する人間の各関節などの運動の複雑さや、摂動を生じさせる外因の影響が無視できないことから、調整項を要する。結果として、既習の元スキルの「経験」を観測し、そこから未習の対象を試行する際の「予測」を支援するための指標抽出とフィードバック、試行錯誤しながら経験する「摂動」に対する「調整」に対して、本研究の枠組みでは、その前半を対象に設計している。

本稿は実例として、縄跳び運動を対象とした技の広がりの中で、一重と二重跳びの遷移に着目し、身体部位運動に着目した支援システムの開発を行った。手法として、熟練者が行う運動を計測し、そのデータに基づいた技と技との間にある動作の関係性（学習項目における要素ごとの所作の差）を導入した。熟練者の間では顕著な相関が見られたものが、初学者に必ずしも適用できない指標もあり、今後の研究が必要である。

今後は、反復運動のように表層的には比較的単純に見える運動だけでなく、フィールドスポーツのような応用スキルへの展開可能性も検討を重ねたい。例えば、攻守対峙場面におけるフェイント動作は、自らの運動だけでなく、相手の運動を認知したり予測する必要があるため、その習熟のサイクルを、人間が実装可能なレベルでモデル化できるかを検討していきたい。

## 謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP18H03344, JP15K01072 の助成を受けたものです。また、初期システム開発には、吉岡真也氏、菅原宏太氏の助力を得ています。

## 参考文献

- (1) 古川康一(編):“スキルサイエンス入門”, オーム社 (2009)
- (2) Larson, L.A. and Yom, R.D.: “Measurement and Evaluation in Physical, Health, and Recreation Education,” The C.V., Moby Company, St.Louis, 206-208 (1951).
- (3) 後藤田中, 松浦健二, 鍋島豊晶, 金西計英, 矢野米雄: “SNS 上でのナワトビスキルの学習者を対象とする個別記事閲覧とその全体像俯瞰の支援”, 日本教育工学会論文誌, Vol.34, No.3, 269-277 (2010).
- (4) リチャード・A・シュミット(著), 調枝孝治(訳): “運動学習とパフォーマンス”, 大修館出版, (1994)
- (5) 松浦健二, 濱上佳祐, 山田慶太: “等位置での反復運動スキル学習支援システム—フラフープスキルを対象として”, 電子情報通信学会論文誌(D), Vol.J98-D, No.1, 61-70 (2015).
- (6) Yoshioka, S., Matsuura, K. and Gotoda, N.: “Hand-motion analysis for development of double-unders skill,” 19th International Conference in Knowledge Based and Intelligent Information and Engineering Systems - KES2015, Vol.60, 775-783 (2015).
- (7) Australian Rope Skip Association Coaching Manual Level 1, <http://www.sports-media.be/links/Coaching-Manual-Rope-Skipping.pdf>, (last visited 2018.9.27)
- (8) Johnson, H.W.: “Skill=Speed × Accuracy × Form × Adaptability,” Perceptual and Motor Skills, Vol.13, pp.163-170 (1961).
- (9) Sugawara, K., Yoshikawa, T., Matsuura, K., Karungaru, S.G. and Gotoda, N.: “A Learning Support System for Integrated Motor Skill by Organized Training Stages,” Proceedings of 25Th ICCE, 451-456 (2017).
- (10) 三輪和久, “学習の科学と工学の協同—アシスタンスジレンマから学習効果減衰を巡って—”, 人工知能学会誌, Vol.30, No.3, pp.273-276 (2015).