

コーチと学習者との情報コミュニケーションにおける 身体スキルの伝達を表現した数理モデルの構築

山田雅敏^{†,††} 里 大輔^{†††} 坂本勝信[†] 松村剛志[†] 大畑昌己^{††††} 砂子岳彦[†] 竹内勇剛^{††}

Construction of Mathematical Model Expressing the Transmission of Motor Skill in an Informatical Communication between a Coach and a Learner

Masatoshi YAMADA^{†,††}, Daisuke SATO^{†††}, Masanobu SAKAMOTO[†],
Takeshi MATSUMURA[†], Masaki OHATA^{††††}, Takehiko SUNAKO[†]
and Yugo TAKEUCHI^{††}

要 旨

あらまし スポーツにおける身体スキルの伝達とは、技の動作を繰り返し訓練する学習者と、その学習者の身体動作を観察し、言葉かけやジェスチャーなどによって指導を行うコーチとの円滑な情報コミュニケーションにより成立する。一方、両者の情報コミュニケーションを通して、身体スキルが上手く伝達できれば良いが、身体スキルの暗黙知的性質や、学習者の個人固有性などの理由により、難しい場合が多い。ここで、当該領域の視座から、現象に潜む本質部分を数理的な根拠をもって捨象し、数理モデルとして抽象化することによって、現象をより簡潔に理解することが求められよう。そこで本研究では、コーチと学習者との情報コミュニケーションにおける身体スキルの伝達に関する現象を数学的に記述し、解明する数理モデルを構築することを目的とした。その結果、数理モデル (X, Y, f) を理論的に記述できる見通しがついた。また、身体スキルの伝達が、変分原理で表現できることが新たに明らかとなった。さらに、コーチが伝達する身体スキルを、停留曲線という最小作用的に捉えることにより、停留曲線からの学習者の身体動作のズレを関数空間上の距離として表すことができた。したがって、停留曲線と学習者の身体表現との隔たりから、学習者の身体スキルの熟達度を定量的に予測できる可能性が生まれた。

キーワード：身体スキル, 伝達, 情報コミュニケーション, 数理モデル, 変分原理

Abstract

Transmission of motor skill in sports is established by smooth Informatical communication between a learner who repeatedly trains the movement of the technique and a coach who observes the body movement of a learner and conducts guidance through words and gestures. On the other hand, it is only necessary to successfully communicate motor skill through an informatical communication between them, but it is difficult in many cases due to the tacit intellectual nature of motor skill and the body uniqueness of students. Here, it is required to understand the phenomena more concisely by abstracting the essential part hiding in the phenomenon from the viewpoint of the region with mathematical grounds and abstracting it as a mathematical model. In this study, we aimed to construct a mathematical model to describe and elucidate the phenomena related to skill transmission in an informatical communication between a coach and a learner mathematically. As a result, we can predict the mathematical model (X, Y, f) theoretically. Also, it became clear that the transmission of motor skill can be represented by variational principle. Furthermore, we can express the shift of the body movement of a learner from the stopping curve as the distance on the function space by grasping the skill transmitted by a coach as the minimum action of the stopping curve. Therefore, the gap between the stopping curve and the body expression of a learner has created the possibility of quantitatively predicting the degree of mastery of a learner's skill.

Keywords : Motor Skill, Transmission, Informatical Communication, Mathematical Model, Variational Principle

[†] 常葉大学 Tokoha University

^{††} 静岡大学創造科学技術大学院 Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University

^{†††} 株式会社 SATO SPEED SATO SPEED Inc.

^{††††} 桃山学院教育大学 St. Andrew's University of Education

1. 研究の背景と目的

人間同士には、種々の関係が存在するが、どのような関係においても、その根底には情報コミュニケーションを通じた情報のやり取りがある [1]. そして、スポーツにおける身体スキルの伝達では、技の動作を繰り返し訓練する学習者と、その学習者の身体動作を観察し、言葉かけやジェスチャーなどによって指導を行うコーチとの円滑な情報コミュニケーションにより成立する. この情報は、それ自体で意味や価値を担っているのではなく、送り手と受け手との相互関係の中で生み出される [2]. スポーツ現場の場合、身体スキルに関する情報の送り手側のコーチと、受け手側の学習者との円滑なコミュニケーションによって、両者間で身体スキルに関する有益な情報を共有することが可能となる.

一方、両者の情報コミュニケーションを通して、身体スキルに関する情報が、コーチから学習者へと簡単に伝われば良いが、往々にして難しい場合が多い. なぜなら、指導者が伝えたい身体スキルとは、教科書に書かれているような形式知ではなく、言葉に表現し難い暗黙知的性質を持つ身体知 [3] だからである. 杉原 (2003) は、この暗黙知的性質について「経験的によく言われるコツというものは、うまくやったとき感じる、言葉ではうまく正確に言い表せない筋運動感覚を指していることが多い」ことを指摘している.

また、ポラニー (2003) は、情報の受け手側である学習者の役割について「受け手が、言葉として伝え得なかった内容を発見できるかどうかにかかっている」と指摘している [4] [5]. つまり、身体スキルが上手く伝達するには、指導者からの情報に対して、積極的に関わり合いながら意味を獲得していく学習者の知的協力が不可欠となる. 一方で、指導された動作を積極的に実践したとしても、感じる個々の身体感覚は学習者によって異なり、情報に対する意味、内容、重要度は、個々人それぞれ違う [1].

このように、コーチと学習者との情報コミュニケーションにおける身体スキルの伝達に関する現象は、身体スキルの暗黙知的性質や、学習者の個人固有性という理由から、未だ十分に明らかにされていない. しかし、身体スキルの伝達という共通の目標を達成するために互助する両者の情報コミュニケーションでは、秩序のある関係が構築されることが一般的であり、共通する特徴的なパターンがあると予想される.

ここで、認知科学的領域の視座から、この問題を考えると、現象に潜む本質部分を数理的な根拠をもって捨象し、数理モデルとして抽象化・簡略化することによって、問題をより簡潔に理解することが求められよう. また、身体スキルの伝達に関する数理モデルを導くことができれば、学習者の熟達度合を定量的に予測できることも期待される. そこで、本研究では、コーチと学習者との情

報コミュニケーションにおける身体スキルの伝達に関する現象を数学的に記述し、解明する数理モデルを構築することを目的とする (図1 参照).

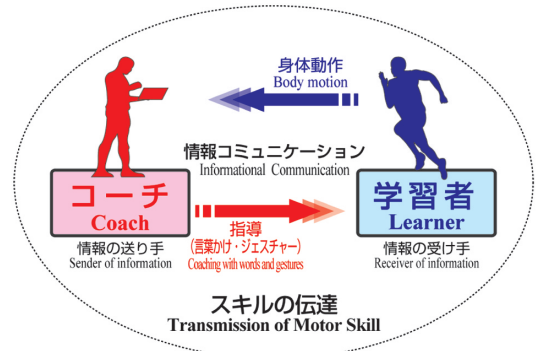


図1 コーチと学習者の情報コミュニケーションにおける身体スキルの伝達

Fig.1 The transmission of motor skill in an informational communication between a coach and a player

2. 関連研究

2.1 理論的背景

最小作用の原理 (Principle of Least Action) とは、「物事は常に最小の労力で起きる」ことを本質的に述べているものである. たとえば、光は一直線上を真っ直ぐ進むが、これは直線が二点間を結ぶ最短距離だからである. この原理の発見が、力と運動の関係を記述する方程式の定式化につながり、ポテンシャルエネルギーや、運動エネルギーといった重要な概念を生み出した [6]. 本研究では、この最小作用の原理を理論的背景とした上で、身体スキルの伝達に関する現象を数学的に記述し、数理モデルを構築することで、その現象を理解することを試みる.

2.2 先行文献と本研究の位置づけ

近年、高い精度で測定可能な機器や動作解析ソフトが開発されたことにより、身体スキルに関するバイオメカニクスの構造を探った知見が多く蓄積されている. 身体スキルを探る手法として、(1) 熟達者と初心者との身体動作を比較する方法、(2) 初心者の身体動作の変化を観察する、などが挙げられる. 一方で、先行研究では、身体スキルに関する身体動作が分析の対象となり、その身体スキルの伝達に関する現象に対して定量的アプローチは行われてこなかった.

しかし、スポーツのフィールドに照らし合わせるならば、学習者が身体スキルを学ぶ環境には、身体スキルに精通したコーチがいることが一般的である. したがって、認知科学的領域におけるスキル研究を行うにあたり、いかにコーチから学習者へと身体スキルが伝達されているかの仕組みを定量的に探る視点も重要であると考えられる.

第1筆者は、従来の研究成果として、身体スキルの伝達に注目し、数理モデルを構築することを試みてきた

[7]. 数学の持つ抽象性・普遍性を活用した数理モデルは、様々な身体スキルに対して応用可能であることから、認知科学的領域におけるスキル研究の発展に寄与するものと考えられる。

次に、身体スキルの伝達に関する定性的なモデルを報告している先行研究を概観する。たとえば、マートン(2013)は、時系列的な流れとして(1)コーチによる身体スキルの紹介→(2)コーチによる実演と説明→(3)学習者による練習→(4)コーチによる間違いの修正、の4つの段階的プロセスの定性的モデルを提示している[8]。また、暗黙知を伝達するモデルとして、知識創造SECIモデルが挙げられる。このモデルは、暗黙知と形式知の相互作用から、暗黙知を豊かにしつつ、形式知化し、次にそれらを組み合わせて実践に結び付けることで、再び新たな暗黙知を形成するというダイナミックな螺旋プロセスを表現している[9]。さらに、身体スキルの伝達に関して、段階的な学習活動(Task)と、活動を経て行き着く到達状態(Achievement)と傾向性(Disposition)の時系列的な関係を示したモデルも報告されている[4]。

これら先行研究のモデルは、身体スキルの獲得に関する定性的アプローチが取られているのに対して、本研究の新たな試みとして、定量的アプローチから、身体スキルの伝達に関する現象を理解する点にある。近年、諸現象に潜む複雑な仕組みの本質部分を数学的に見出す試みは、戦略的創造研究の領域でも注目されており[10]、認知科学的領域におけるスキル研究と合わせ、学際的研究の発展の一助となることが期待される。

3. 身体スキルの伝達

3.1 歩行の指導の例

歩行を例にとって、その身体スキルの伝達プロセスから数理モデルを模索する。たとえば、コーチから高度な歩行身体スキルを学ぼうとしている学習者がいると仮定し、コーチの指導によって、学習者が高度な歩行が実現できるように導くことを想定する(図2参照)^(注1)。



図2 高度な歩行の例
Fig. 2 Advanced walking example

はじめに、学習者は、コーチとの情報コミュニケーションを通して、段階的な歩行の獲得を目指す。まず一歩目を踏み出すことを学ぶ。仮に、コーチが「50cm 右足を出す。そして右足に体重を移す」と指導したとする。その指導に対して、学習者は、その通りにできる場合もあれば、できない場合もあろう。学習者の身体スキルの獲得状況に応じて、さらなる指導がなされていくというのが、一般的な指導的アプローチである。

この歩行の指導を例にして、数理モデルの構築を図る。まず、コーチによる指導「50cm 右足を出す」を指導 x とする。そして、指導 x に従ってそれを再現しようとした結果、右足を y cm 出したとする。

ここで、指導 x は、教育的指導を前提としている。つまり、指導 x は、それが学習者に伝わることで再現される動作の指導である一方で、コーチは、動作に伴う体感を学習者が得ることを期待している。歩行の例では、右足を 50cm 前に出して終わりではなく、その動作によって生じる体感を伝えたいということが重要である。したがって、指導 x とは、教育効果を狙った方便であると考えられる。その意味で、指導 x は、コーチと学習者との情報コミュニケーションの中で捉えられるひとつの指標となる。この指導 x は、おそらく 50cm ではなくてもよいはずで、48cm であれ、51cm であれ大きな違いはさほどない可能性が高い。しかし、50cm が学習者にとって最適な目安だったとすると、 y は極値を持つことが要請される。

$$\frac{df(y)}{dy} = 0 \quad (1)$$

上記の例の場合、指導 $x=50$ を実践した学習者の身体動作 y に対して、以下の式(2)の極値が、最適な指導通りの学習者の身体動作を与える。

$$f(y) = (y - 50)^2 \quad (2)$$

学習者の身体動作が、コーチの期待する歩行に沿わないとき、さらなる指導がなされるのが一般的なコーチングである。そこで、コーチは、学習者の身体動作を観察し、段階的に適切な指導を考案し、身体スキルの伝達を試みる。コーチの指導に対し、学習者の身体動作の極値と異なるときは、身体動作が十分でないと評価することになる。ここで、コーチの指導 x がパラメータを伴うとき(たとえば、指導が時間と関係している場合や、技

(注1): 図2は、付録に記載する歩行の熟達の調査研究で、熟達者の歩行を記録した動画を画像編集したものである。

の手本となるジェスチャーを行う場合), コーチの指導は $x(t)$ で表される. また, 学習者の身体動作 y が, 同じく時間などのパラメータによる動作を伴うとき, 学習者の身体動作は $y(t)$ で表される. コーチの指導 $x(t)$ と, 学習者の身体動作 $y(t)$ のズレが, 身体スキルの評価を決めると考えれば, 評価関数 f に対する変分問題となる.

$$\delta f = 0 \quad (3)$$

この停留曲線は, 「自然の運動は, 常にもっとも簡単で最短のルートを通る」という最小作用の原理 (図 3 参照) に従う [6].

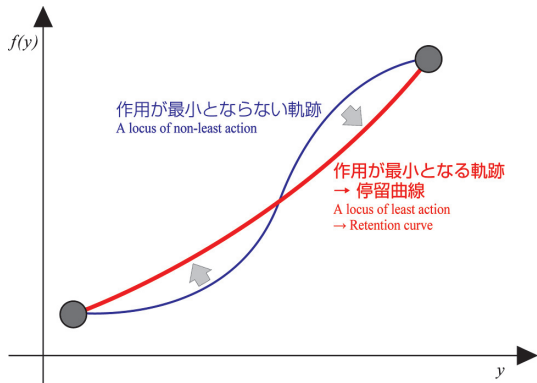


図 3 最小作用と停留曲線
Fig. 3 Least action and retention curve

3.2 コーチと学習者との情報コミュニケーション

次に, コーチと学習者との情報コミュニケーションを通して, 初歩的な歩行から, より高度な歩行の獲得を目指す様子を表現する.

はじめに, 変数空間を設定し, コーチが要請する方向性を評価関数 f で示す. また, コーチの指導を x で表し, それを実践した学習者の身体動作を y とする. 指導 x と身体動作 y は, 交互に交わされていき, 次第にコーチの期待する目標に近づいていくと予想される. 指導 x と身体動作 y は, 何回か繰り返されるので, $k = 1, 2, \dots, n$ に対して, x^k, y^k とする.

x^k は k 回目の指導である. y^k についても同様である. さらに, x^k が時系列に変化する場合, t の関数 $x^k(t)$ となる. たとえば, コーチの第 k 回目に行った「スタートからゴールまで, 同じテンポ (速度) で歩く」と指導した場合, 時間によってその動作が実現されていくので, 関数 $x^k(t)$ により表される. パラメータ t は, 時間である必要はなく, その指導に対して適切なパラメータ (たとえば, 腕や足の角度など) を選んで良いものとする.

次に, その指導に対して, 学習者がそれを実践した結

果, どのように身体動作を実現したのかを変数 $y(t)$ で表す. コーチの指導 $x^k(t)$ と学習者の身体動作 $y^k(t)$ が, どれくらい隔たりがあるのかを数値化できたとすると, それは評価関数を設定したことにはかならない. k 回目の指導 $x^k(t)$ に対する評価を関数 $f^k(y^k(t), dy^k(t)/dt)$ で表すならば, これが評価関数となる. この評価関数 $f^k(y^k(t), dy^k(t)/dt)$ に対して, 作用積分 $I^k[y^k]$ を次のように定めることができる.

$$I^k[y^k] = \int_{t_0}^{t_1} f^k(y^k(t), dy^k(t)/dt) dt \quad (4)$$

この作用積分の停留曲線は, 次のオイラー方程式,

$$\frac{df^k(y^k(t), dy^k(t)/dt)}{dt} - \frac{df^k(y^k(t), dy^k(t)/dt)}{d(dy^k(t)/dt)} = 0 \quad (5)$$

によって導かれる. ここでの停留曲線は, コーチが要請する学習者の動きである. それは, 単に指導 $x^k(t)$ を実践すればいいというわけではない. コーチの指導 $x^k(t)$ は, 学習者が理解しやすい形に表した具体的な指導 (たとえば, 「50cm 右足を出す」) であって, コーチからの指導を忠実に実践することによって, 学習者が体感を得ることが期待される. 一般的に, 学習者の気づきが不十分な場合, 学習者の身体動作 $y^k(t)$ に表われるので, 次の指導を与えることになる.

コーチの指導 x^k と学習者の身体動作 y^k の間には相関があり, この相関は個人差のあるものと予想される. また, コーチの指導 x^k のもとで, 学習者がそれを実践した身体動作 y^k に, 次のコーチの指導 x^{k+1} が与えられて, それに対する学習者の身体動作 y^{k+1} がもたらされるという, k による階層ができる. この階層は, コーチが学習者の身体動作の状況を観察して, 身体スキルが獲得されたと評価するまで続けられる.

この数理モデルは, 変数 x^k, t と変数 y^k, t , および評価関数 $f^k(y^k(t), dy^k(t)/dt)$ によるものなので, コーチと学習者との情報コミュニケーションにおける身体スキルの伝達を表現した数理モデルを (X, Y, f) と記すことにする. ただし, $X=(x^k(t)), Y=(y^k(t)), f=f^k(y^k(t), dy^k(t)/dt), k=1, 2, \dots, n$ とする (図 4 参照).

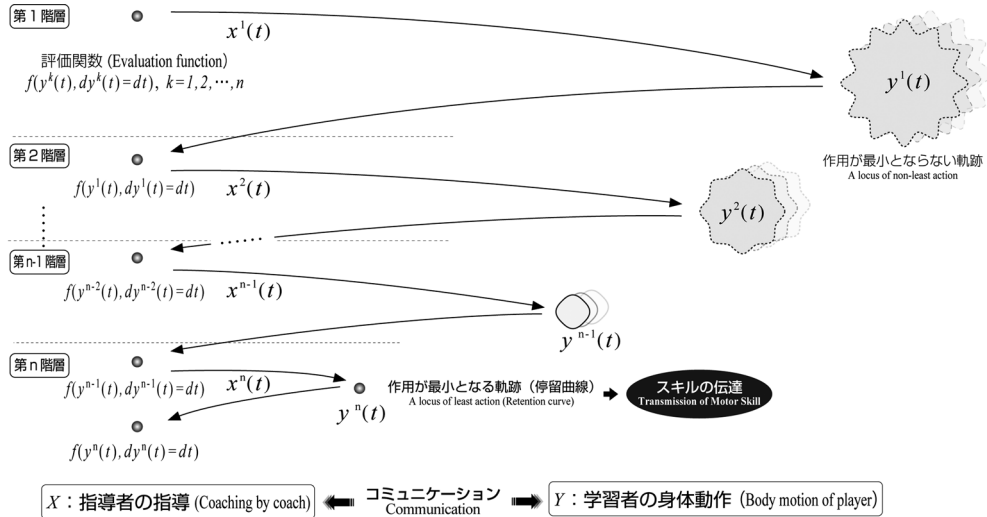


図 4 コーチと学習者との情報コミュニケーションにおける
身体スキルの伝達を表現した数理モデル (X, Y, f)

Fig. 4 Mathematical model expressing the transmission of motor skill
through informational communication between a coach and a learner (X, Y, f)

3.3 関数化の工夫

はじめに、構築した数理モデルのポイントは、評価関数にあることが分かる。評価関数を決めるということは、コーチが伝えたい身体感覚を陽に与えることを意味する。したがって、評価関数を有効に決めることが重要となる。

学習者の身体動作は連続したデータであるのに対し、コーチの指導は、その身体スキルに関するジェスチャー（連続値）を交えた言語的な指導が多く含まれることとなる。たとえば、この言語的な指導が「50cm右足を出す」などの定量的な場合は、関数化し易い。まず、 $x = 50$ とする。パラメータはとらない。これに対して学習者の身体動作 y とする。このとき、50cm 近辺で、学習者の身体動作がコーチの求めるものになれば、コーチングの目的は達せられるとする。ここで評価関数は、

$$\min f(y) = 50 \quad (6)$$

であり、（変分する必要はなく）微分によって、その極値が得られる。

一方、指導が進むにつれて、コーチの言語的な指導は感覚的な表現になると予想される。この場合は、パラメータの関数化には工夫が必要となる。そこで、感覚的な表現に対して、指導に対する解析ポイントを押さえて行う方法が考えられる。たとえば、コーチから「スタートからゴールまで、同じテンポで歩く」ことが要請されたとする。この時、コーチの評価関数は

$$f(y(t), dy(t)/dt) = \frac{1}{2} \left(\frac{dy(t)}{dt} \right)^2 \quad (7)$$

となる。この評価関数 $f(y(t), dy(t)/dt)$ に対して、作用積分 $I[y]$ を、次のように定めることができる。

$$I[y] = \int_{t_0}^{t_1} f(y(t), dy(t)/dt) dt \quad (8)$$

すると、オイラー方程式 (5) より、

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = 0 \quad (9)$$

したがって、

$$y = at + b \quad (10)$$

が導かれるので、式 (10) が、コーチから要請される学習者の身体動作の関数となる。この場合、 a が速度となり、 y が移動距離である。時間 $t=0$ の場合、移動距離はないので、 $b=0$ となる。学習者の身体動作が、コーチの理想とする動作ではない場合、関数空間上のズレから定量的に熟達度を評価できることとなる（図 5 参照）。なお付録に、自由歩行（速さを一定に保つことを教示する以外は自由に行う歩行）の実験に関する傍証データを記す。

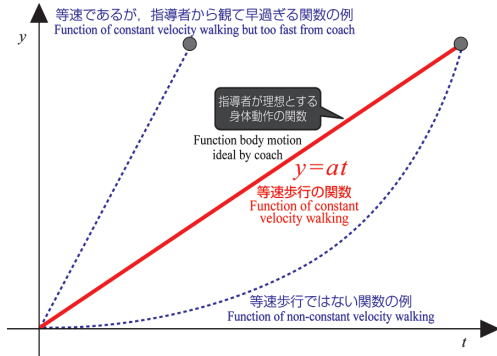


図 5 等速歩行の関数とそれ以外の関数の例
Fig. 5 Examples of function of constant velocity walking and other function

4. 考察とまとめ

本研究では、コーチと学習者との情報コミュニケーションにおける身体スキルの伝達に関する現象を数学的に記述し、解明する数理モデルを構築することを目的とした。その結果、数理モデル (X, Y, f) を理論的に記述できる見通しがつき、身体スキルの伝達が、変分原理で表現できることが新たに明らかとなった。このことにより、コーチが伝える身体スキルが、一つの停留曲線という最小作用的な捉え方ができ、さらには、その停留曲線からの学習者のズレを、関数空間上の距離として表すことができた。

今後の課題は、次の通りである。本研究から得られた新たな知見として、身体スキルの伝達を停留曲線として表現できたことにより、その曲線と学習者との隔たりから、身体スキルの熟達度を予測できる可能性が生まれた。したがって、構築した数理モデルの人工知能への応用などを視野に入れている。

謝辞 本稿に関連する実験（付録 1.）を行った際、管理栄養士・公認スポーツ栄養士の小山ゆう先生、常葉大学女子バスケットボール部の皆さまには、多大なるご協力を賜りました。ここに謝意を表します。

本研究は、JSPS 科研費 16K12986 の採択を受けたものです。

文 献

- [1] 浦昭二（監修）、神沼靖子、内木哲也：基礎 情報システム論 — 情報空間とデザイン、共立出版（2014）。
- [2] 伊藤守、西垣通、正村俊之（編）：パラダイムとしての社会情報学、早稲田大学出版部、野家啓一、第 3 章「情報内存在」としての人間、pp.69-98（2003）
- [3] 日本認知心理学会監修、三浦佳世編：知覚と感性：身体知 — 習熟と伝承 —（安藤花恵）、北大路書房、第 9 章、pp.213-236（2010）。
- [4] 生田久美子、北村勝朗：わが言語 — 感覚の共有を通しての「学び」へ；スポーツ領域における暗黙知習

得過程に対する「わが言語」の有効性（永山貴洋）、慶應義塾大学出版会株式会社、第 3 章、pp.65 -100（2014）。

- [5] Polanyi, Michael : The Tacit Dimension, University of Chicago Press（1966）
- [6] P.Parsons, M.Rees, “30 秒で学ぶ科学理論 示唆に富んだ 50 の科学理論”, STUDIO TAC CREATIVE, pp.16-17, 2013
- [7] 山田雅敏, 里大輔, 坂本勝信, 小山ゆう, 砂子岳彦, 竹内勇剛：身体知の言語化とその情報学的な段階モデルの応用 立位と歩行に注目して、日本認知科学会第 33 回大会（2016）。
- [8] レイナー・マートン, 大森俊夫, 山田茂（監訳）：スポーツ・コーチング学 指導理念からフィジカルトレーニングまで、東京出版（2013）。
- [9] 野中郁次郎, 紺野登：知識創造の方法論 ナレッジワーカーの作法、東洋経済新報社（2003）。
- [10] 文部科学省：科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業 社会における支配原理・法則が明確でない諸現象を数学的に記述・解明するモデルの構築、<http://www.mext.go.jp/>, 参照日（2018 年 5 月 1 日）

付 録

1. 傍証データ

紙幅の都合上、数理モデルに関する傍証データを付録に記載する。本研究グループでは、過去に歩行熟達に関する実験を実施した（実験期間：2015 年 11 月 6 日～12 月 5 日）。実験協力者は、大学生 5 名と歩行の熟達者 1 名の計 6 名である。大学生 5 名は、実験期間にコーチから歩行の指導を受けた。熟達者は陸上競技部の学生で、コーチから歩行の指導をすでに受け、高いレベルの歩行ができる状態であった。自由歩行の測定は、無風状態のアリーナにおいて、20m の自由歩行（速さを一定に保つことを教示する以外は自由に行う歩行）を実施した。表 1. の測定結果から、コーチからの指導前と指導後で、それぞれ大学生の自由歩行のタイムが、熟達者に近づいたことが示された。



図 A・1 歩行熟達に関する実験の計測風景
Fig. A・1 Examples of function of constant velocity walking idealized by coach and other functions

表 A・1 自由歩行のタイムの測定結果

Table A・1 Measurement result of free walking time

学習者	自由歩行のタイム		
	指導前	→	指導後
学習者 A	7"72	→	10"14
学習者 B	8"68	→	10"33
学習者 C	8"73	→	9"51
学習者 D	9"13	→	11"40
学習者 E	8"72	→	12"24
熟達者 X	-		11"96