

# 慣性計測装置における 3 次元加速度センサを用いた 歩容評価指標の妥当性に関する研究

A Study on the Validity of Gait evaluation using 3-axis accelerometer at an IMU

小島 匡顕<sup>1</sup> 三宅 礼華<sup>2</sup> 香山 瑞恵<sup>2</sup> 橋本 昌巳<sup>2</sup> 二上 貴夫<sup>3</sup>

Masaaki Kojima<sup>1</sup>, Ayaka Miyake<sup>2</sup>, Mizue Kayama<sup>2</sup>, Masami Hashimoto<sup>2</sup>, Takao Futagami<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 信州大学大学院総合理工学研究科

<sup>1</sup> Graduate School of Science & Technology, Shinshu University

<sup>2</sup> 信州大学工学部

<sup>2</sup> Faculty of Engineering, Shinshu University

<sup>3</sup> 東陽テクニカ

<sup>3</sup> TOYO Corporation

**Abstract:** 本研究では、小型の慣性計測装置における 3 次元加速度データに基づく歩容評価指標の妥当性を検討する。通常歩行とは異なる 10 種類の歩行方法を実施し、安定性と効率性を算出した。その結果、歩行の特徴が評価値に反映され、妥当性があることが示唆された。

## 1 はじめに

近年、スポーツの成績向上や日常生活支援を目的とした動作解析が行われている。人や物の動きを数値化し、分析や解析を行うことで、動作の特徴などを読み取ることができる。これらの試みでは、ビデオカメラや各種センサが用いられていることが多い。競技者の位置座標が大きく変化しない競技であれば、ビデオカメラを用いた動作解析が有効であろう[1]。しかし、移動系の競技でビデオカメラを用いるためには、広範囲を高解像度で撮影する必要がある。この事例として、トレッドミルや回流水槽などの設備を用いた動作解析[2]が挙げられる。一方、ビデオカメラでの撮影が困難な場合、身体に装着可能な小型センサによる動作解析が有効であろう。動作解析に用いるセンサとしては、加速度センサ、ジャイロセンサ、圧力センサ、GPS センサなどがある。このような小型センサを用いた動作解析の事例として、歩行経路推定や平泳ぎ下肢動作、各種スポーツでの移動パターンの分析[3,4]などが行われている。

本研究では、小型慣性計測装置を用いた歩行動作

解析を対象に、これまでに解析環境構築[5,6]および歩容評価指標の開発[7,8]を行ってきた。これらの研究成果に基づき、本稿では、歩容評価指標の妥当性検証に関して述べる。

## 2 歩行動作計測に関する先行研究

歩行に関する動作解析の研究は、これまでに多数報告されてきている。本研究に関連する事例としては、フットセンサと 3 次元加速度センサを組み合わせさせて変位を算出し、腰軌道解析による片麻痺患者の歩行障害の特徴を評価する研究[9]や、床反力計と三次元動作解析装置（赤外線カメラ 14 台）を使用し、片麻痺患者の歩行を動的安定性と効率性の視点から分析する研究[10]などがある。特に近年は、計測場所に拘束されない小型加速度センサを用いた動作解析の報告が増加している。しかし、加速度だけでなく、速度、位置座標の変化に着目し、より汎用な評価および解析方法を提案している研究は少ない。

本研究では、これまでにスピードスケート競技を対象とした動作解析、およびそれを発展させた歩行動作解析が研究されてきた。前者においては、慣性計測装置（以下、IMU とする）を用いて滑走動作を計測し、スケートリンクなどの滑走環境データと統合することで、滑走特徴量を可視化し、競技者の内

\*連絡先: 信州大学大学院総合理工学研究科

〒380-8553 長野県長野市若里 4-17-1

E-mail: 16w2026e@shinshu-u.ac.jp

省を支援するシステムが開発された[5,6]. 後者では、スピードスケート競技よりも動作制限が少ない環境下における通常歩行動作を対象にした安定性（対称性、再現性、動揺性、円滑性の4つの指標[11]）と効率性を評価する指標（歩容評価指標）が提案された[7,8]. しかし、これらの先行研究の方法には以下の問題点がある。

- I. 解析対象が通常歩行に限定されていた
- II. 歩行の安定性指標の解析能力に関する検討がなされていない

### 3 歩容評価指標

本章では、先行研究で提案された歩容評価指標に関して概観する。まず、歩行動作における解析単位としての1歩行周期、1歩、パーセント歩行周期の定義を示す。その上で、これらの解析単位を利用した歩行の安定性指標としての対称性、再現性、動揺性、円滑性、加えて効率性の定義と計算方法を示す。

#### 3.1 歩行動作における解析単位の定義

ここでは、片足の踵接地(Heel Contact:以下, HC)から同足の次 HC までを1歩行周期とする。その上で、1歩行周期における左足歩と右足歩の違いを考慮するために左右の各1歩を解析単位として考える。

また、被験者によって1歩にかかる時間が異なるため、1歩の時間区間をパーセント歩行周期[12]の考えに基づき整理する。パーセント歩行周期の考えを適用し、1歩の開始を0%、終了を100%として正規化する。

#### 3.2 対称性の評価

歩容評価における対称性とは、歩行時の左右差についての評価である。歩行周期における最初の1歩の加速度変化は、それに続くもう一方の足での1歩の加速度変化に対して、左右方向では時間軸対称、前後方向および上下方向では同一であるという仮説を設ける。対称性を評価する際は、パーセント歩行周期の考え方をを用いて、3軸方向全ての評価値を算出する。解析対象区間内のn歩を発生順に $s_1, s_2, \dots, s_n$ とした場合、 $s_1$ と $s_2$ 、 $s_2$ と $s_3$ というように連続する2歩を対象として相互相関を求めることとする。相互相関とは、相関を求めたい2つの波形がそれぞれn点でサンプリングされたものとする。これらを波形 $1w_a = \{w_{a1}, w_{a2}, w_{a3}, \dots, w_{an}\}$ 、波形 $2w_b = \{w_{b1}, w_{b2}, w_{b3}, \dots, w_{bn}\}$ としたとき、相互相関は(1)式で表される。

$$\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_{ai} \times w_{bi}}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_{ai}^2} \times \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_{bi}^2}} \quad (1)$$

#### 3.3 再現性の評価

歩容評価における再現性とは、歩行時の周期性についての評価である。解析対象区間における同一足による1歩においては、同一の加速度変化を示すものと仮定する。3.2節に示したn歩に対して、奇数番目の1歩と偶数番目の1歩の集合に分けて解析する。各集合における加速度変化の平均波形を求め、集合の各要素との相互相関を求めることとする。再現性の評価の際、対称性と同様にパーセント歩行周期の考え方をを用い、3軸全ての方向での評価値を算出する。

#### 3.4 動揺性の評価

歩容評価における動揺性とは、歩行時の体の揺れについての評価である。本指標では、変位波形の平均値が低いほど体の揺れの少ない歩行、すなわち、動揺性の低い歩行であるとする。パーセント歩行周期の考え方に基づいた1歩区間の変位波形に対して、その区間の平均値との差分の和を動揺性の値とする。1歩区間として評価を行うのは、左右それぞれの差や左右の違いを検討するためである。評価値計算のためにまず、変位の最大値を用いて正規化を行う。次に解析対象区間内での平均値を求め、変位波形との差分を求める。差分値は絶対値で評価することとする。最後に、1歩区間における差分値の総和を求め、これを動揺性の評価値とする。動揺性は3軸方向全て算出し評価する。解析対象区間内における動揺性の値の低い歩行が安定した歩行となる。

#### 3.5 円滑性の評価

歩容評価における円滑性とは、歩行の滑らかさを評価する指標である。歩行の1歩に要する時間(データ数)に着目した。1歩に要する時間が均等であれば、なめらかな歩行であると考えられる。歩行の円滑性を評価する際、1歩の時間に着目するため、ここでは、パーセント歩行周期の考え方は利用せず、計測データを用いて評価値を求める。解析対象区間内の1歩におけるデータ数の変動係数を円滑性の評価値とする。変動係数の値が小さいほど円滑性が高くなる。

#### 3.6 効率性の評価

歩行動作における効率性とは、いかに力を発揮せ

表 1: 歩行カテゴリ(○: 差有/×: 差無)

| カテゴリー | 略称        | 周期性の有無 |        |        |        |        | 差の有無 |    | 種類数 |
|-------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|------|----|-----|
|       |           | 1歩毎    | 奇/偶数歩毎 | 1歩行周期毎 | 2歩行周期毎 | 3歩行周期毎 | 1歩時間 | 歩幅 |     |
| a     | 通常        | ○      | ○      | ○      | ○      | ○      | ○    | ○  | 7   |
| b     | 上体反らし     | ○      | ○      | ○      | ○      | ○      | ○    | ○  | 2   |
| c     | 線上        | ○      | ○      | ○      | ○      | ○      | ○    | ○  | 2   |
| d     | 踏み違い      | ○      | ○      | ○      | ○      | ○      | ○    | ○  | 2   |
| e     | 速度変化      | ×      | ×      | ×      | ×      | ×      | ×    | ○  | 2   |
| f     | 片足歩幅変化    | ×      | ×      | ×      | ×      | ×      | ○    | ×  | 2   |
| g     | 左/右 上体揺らし | ×      | ○      | ○      | ○      | ○      | ○    | ○  | 2   |
| h     | 片足引きずり    | ×      | ○      | ○      | ○      | ○      | ×    | ×  | 12  |
| i     | 片足振り子     | ×      | ×      | ×      | ○      | ○      | ○    | ○  | 6   |
| j     | 通常+ひねり    | ×      | ×      | ×      | ○      | ○      | ○    | ○  | 3   |
| k     | 通常+膝曲げ    | 1周期    | ×      | ×      | ×      | ○      | ○    | ○  | 2   |
|       |           | 2周期    | ×      | ×      | ×      | ×      | ○    | ○  | 2   |
|       |           | 3周期    | ×      | ×      | ×      | ×      | ×    | ○  | ○   |

ずに移動できるかを示す指標であると考え。本指標では、解析対象区間における仕事率を歩行の効率性とする。動作の効率性という観点では、ランニング動作におけるランニングエコノミー (Running Economy, 走の経済性) [13]という指標が存在する。ランニングエコノミーは、ある走速度での酸素摂取量によって定義される。酸素摂取量が高ければ、より多くのエネルギーを要することを意味し、ランニングエコノミーが低いと評価される。ランニングエコノミーはランニングのパフォーマンスを評価するうえで非常に有用であると評価されてきた[14]。しかし、酸素摂取量を測定して得られる指標のため、一般人にとっては身近ではない。

本研究における歩行動作の効率性では、IMU から得られるセンサデータから速度を算出し、体重あたりの仕事率を求める。仕事率が 0 に近い歩行が効率のよい歩行であると仮定し評価を行う。

ある足の HC 時での速度を  $v_i$ 、それに続く一方の足の HC 時の速度を  $v_{i+1}$ 、その間の時間を  $t$  とした時、仕事率は(2)式で表せる。

$$\text{効率性}[W/kg] = \frac{1}{2t}(v_{i+1}^2 - v_i^2) \quad (2)$$

## 4 研究目的

本研究では、2章に示す問題点の解決を目指し、以下を検証することを目的とする。

I.解析対象が通常歩行に限定されていたこと、II.

歩行の安定性指標の解析能力に関する検討がなされていないことを解決するため、通常歩行に加え、歩行動作の周期性と、歩行時間、歩幅が異なる複数種類の歩行動作を計測し、3章に示した歩容評価指標を算出し、その結果を考察することで指標の妥当性を検証する。

## 5 歩容評価指標の妥当性

本章では、先行研究で提案された歩容評価指標の妥当性検証の方法と結果を示し、考察する。

### 5.1 実験方法

通常歩行とは異なる歩行を IMU で計測し、その計測データの歩容評価指標を算出する。ここでの通常歩行と異なる歩行とは、歩行動作の周期性の有無、および歩行動作における各 1 歩の歩行時間あるいは歩幅の差の有無に着目をして整理した。具体的には、周期性の有無とは、1歩毎、奇数(または偶数)歩毎、1歩行周期毎、2歩行周期毎、3歩行周期毎にまとめた。これらの観点に基づいた計 11 カテゴリーの歩行動作を表 1 に示す。各カテゴリーの歩行方法は以下の通りである。

- a.: 通常歩行
- b.: 上体を反らし、大きく腕を振りながら歩行
- c.: 狭い直線の上をゆっくりと歩行
- d.: 千鳥足のように右足と左足を踏み違う歩行
- e.: 速度を上昇させ続ける歩行や、急加速・急減速を交えた歩行



図 1: 歩行計測の様子

- f.: 片足の歩幅を変化させる歩行
- g.: 上体を左（または右）に揺らしながら歩行
- h.: 片足を引きずる歩行
- i.: 片足を曲げて出す, 伸ばして出すを 1 歩毎に繰り返す歩行
- j.: 通常歩行 1 歩行周期, 腰をひねって歩行 1 歩行周期を繰り返す
- k.: 通常歩行を 1 歩行周期, 大きく膝を曲げて足を前に出す歩行を 1 歩行周期繰り返す

歩行の周期性を 1~3 周期と分けたのは, 歩行の周期性と歩容評価指標との関係を確認するためである。また, 個人差や試行差を考慮し, 各カテゴリにおける歩行種類数は全て 2 以上とした。これらのデータは, 20 代健常者 3 名を被験者として計測された。ただし, 被験者全員が全カテゴリの歩行を行ったわけではない。

計測範囲は 15 m×0.45 m の矩形領域（ただし, カテゴリ c. 除く）とし, 被験者に計測装置を着用させ, 長手方向に歩行させた。計測実験中の様子はビデオカメラにより背後から撮影した（図 1）。

計測データを 3 章に示した安定性指標で解析する。左右方向が X 軸, 前後方向が Y 軸, 上下方向が Z 軸である。特に効率性に関しては, 解析能力を向上させる検証として, 各歩の効率性の平均値を算出した指標（以下,  $\pm$  と称す）と各歩の効率性の絶対値の平均値を算出した指標（以下,  $||$  と称す）の 2 種を検討する。解析対象区間は歩行時の速度が安定する区間として, 計測開始後の 5 歩目から連続する 5 歩を採用した。

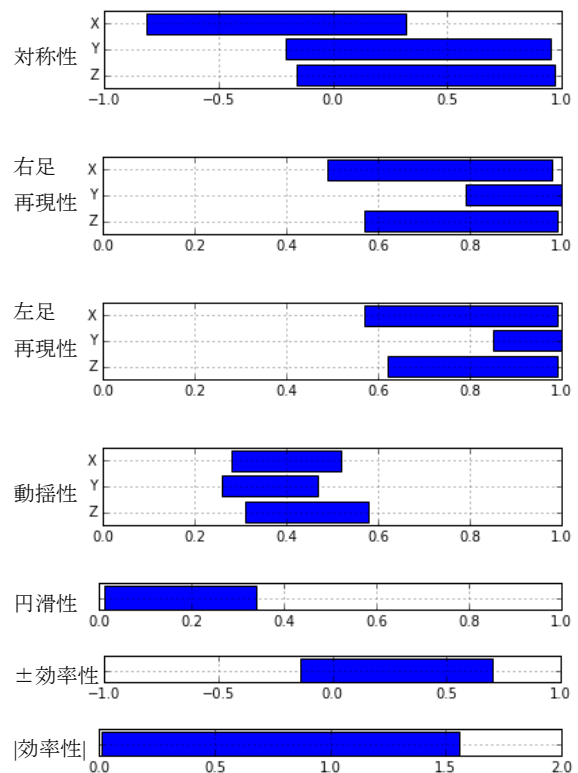


図 2: 値域

## 5.2 実験結果

今回の計測データにおける各歩容評価指標の値域を図 2 に示す。横軸は評価値の最大と最小を示し, 色付きバーで各指標の値域を示した。

歩行データの解析結果を表 2 に示す。歩行カテゴリ毎に歩容評価指標の評価値の大きさで, 3 段階（大・中・小）で分類した。各段階の閾値は各指標において今回の計測データの値域を 3 分割する点とした。濃灰項目は, カテゴリに含まれる全歩行の結果がある段階に集中したことを示す。全体の 61% がこの分類となった。薄灰項目は, カテゴリに含まれる全歩行の結果が 2 段階に集中したことを示す。全体の 32% がこの分類となった。白色項目は, カテゴリに含まれる全歩行の結果が 3 段階または, 大と小の 2 段階にばらついたことを示す。全体の 7% がこの分類となった。

### 5.2.1 対称性

対称性の値域は X 軸[-0.82, 0.32], Y 軸[-0.21, 0.95], Z 軸[-0.16, 0.97]であった。X 軸は-1 に近いほど, 連続する 2 歩の加速度波形が時間軸対称であるとされる。Y, Z 軸は+1 に近いほど, 連続する 2 歩の加速度波形が同一であるとされる。通常歩行では X 軸で



表 3: 各歩行カテゴリの歩容評価指標結果 (■分布集中/■分布やや集中/□分布分散)

| カテゴリ | 略称       | 対称性 |   |   | 右足再現性 |   |   | 左足再現性 |   |   | 動揺性 |   |   | 円滑性 | 効率性 |   |
|------|----------|-----|---|---|-------|---|---|-------|---|---|-----|---|---|-----|-----|---|
|      |          | X   | Y | Z | X     | Y | Z | X     | Y | Z | X   | Y | Z |     | ±   |   |
| a    | 通常       | 大   | 大 | 大 | 大     | 大 | 大 | 大     | 大 | 大 | 中   | 大 | 大 | 小   | 小   | 小 |
| b    | 上体反らし    | 大   | 大 | 大 | 大     | 大 | 大 | 大     | 大 | 大 | 中   | 大 | 中 | 小   | 小   | 小 |
| c    | 線上       | 小   | 大 | 中 | 中     | 大 | 小 | 中     | 中 | 中 | 小   | 大 | 小 | 小   | 小   | 小 |
| d    | 踏み違い     | 大   | 大 | 小 | 中     | 中 | 中 | 大     | 中 |   | 中   | 大 | 大 | 小   | 中   | 小 |
| e    | 速度変化     | 中   | 大 | 中 | 中     | 大 |   | 中     | 中 | 中 | 中   | 大 | 中 | 小   | 小   | 小 |
| f    | 片足歩幅変化   | 中   | 中 | 中 | 中     | 中 | 中 | 中     | 中 | 中 | 中   | 大 | 中 | 小   | 小   | 小 |
| g    | 左/右上体揺らし | 中   | 大 | 中 | 大     | 大 | 大 | 大     | 大 | 大 | 中   | 大 | 大 | 小   | 小   | 小 |
| h    | 片足引きずり   | 小   | 小 | 小 |       | 大 |   | 大     | 大 | 大 |     | 小 | 小 |     |     |   |
| i    | 片足振り子    | 小   | 大 | 小 |       | 大 |   | 中     | 中 | 大 | 中   |   | 中 | 大   | 小   | 小 |
| j    | 通常+ひねり   | 小   | 大 | 中 | 中     | 中 | 中 | 中     | 中 |   | 中   | 大 | 中 | 中   | 小   | 小 |
| k    | 通常+膝曲げ   | 大   | 大 | 大 | 大     | 大 | 大 | 大     | 大 | 大 | 小   | 大 | 中 | 小   | 小   | 小 |

負値, Y 軸と Z 軸で正值であった. それに対して, X 軸で正值であったのは c., h., i. に含まれる歩行であり, Y 軸と Z 軸で負値であったのは h. に含まれる歩行のみであった. これらは, 対称性が低いことが示唆された.

対称性に関しては, 歩行カテゴリの違いによる顕著な差が確認された. a., b., k. は同様に評価値が大きい結果となった. 表 2 より, a. と b. は同傾向を示すことは予想される. しかし, k. は a. や b. とは異なる周期性を有する歩行である. 今回の分析対象区間には, k. における通常歩行が含まれていたためこのような結果となったと考えられる. また, 評価値が小さい範囲に偏ったのは, c. の X 軸, h. の 3 軸, i. の X 軸と Z 軸であった. これは, 左右の足の出し方の違いが影響していると考えられる.

## 5.2.2 再現性

再現性の値域は右足で X 軸[0.49, 0.98], Y 軸[0.79, 1.0], Z 軸[0.57, 0.99]であった. 左足では X 軸[0.57, 0.99], Y 軸[0.85, 1.0], Z 軸[0.62, 0.99]であった. 両足とも Y 軸の値域は約 0.8 以上と大きい値が得られた. いずれの軸も 1 に近いほど再現性が高い歩行となる. 今回の実験対象歩行は, c. を除き, すべて左右で再現性が低いものであったことが考えられる.

歩行カテゴリによる顕著な差が確認された. 通常歩行においては, X 軸は 0.86 以上, Y 軸と Z 軸では 0.97 以上の値であった. 同様に, 3 軸で大きな値が得られたのは, b., g., k. である. b., g. は同足の歩行方法が同じであるため, 妥当であると考えられる. 一方,

k. に関しては, 対称性と同様に, 解析対象区間に通常歩行が含まれていたため, このような結果となったと考えられる. 評価値が小さい範囲に偏ったのは c. の右足再現性 Z 軸のみであった. c. は他の歩行カテゴリに比べ, 腰の位置変化が少なく, 微小な動きの変動が影響したのかもしれない. 再現性の結果で 3 段階にばらついたのは, 右足再現性で e. の Z 軸, h. の X 軸と Z 軸, i. の X 軸と Z 軸であった. 左足再現性では, d. の Z 軸, j. の Z 軸であった. このうち, 大と小の 2 段階にばらついたのは, e. の Z 軸, d. の Z 軸, j. の Z 軸であった. 試行差の影響が出やすい指標であることが考えられる.

## 5.2.3 動揺性

動揺性の値域は X 軸[0.28, 0.52], Y 軸[0.26, 0.47], Z 軸[0.31, 0.58]であった. 3 軸とも 0.4 付近を中心に  $\pm 0.2$  の範囲に集中した. 各軸とも 0 に近いほど, 動揺性が低く安定した歩行とされる.

歩行カテゴリによる顕著な差が確認された. 通常歩行は, X 軸で小と中の 2 段階に集中した. Y 軸と Z 軸は大きい結果だった. 左右方向より, 前後方向, 上下方向のふらつきが大きかったことになる. 一方, X 軸が大きい範囲に偏ったカテゴリはなかった. これらには 15 m  $\times$  0.45 m の計測範囲が要因の一つであると考えられる. X 軸 (左右方向) の幅は 0.45 m に対し, Y 軸 (前後方向) は 15 m, Z 軸 (上下方向) は自由であるからだ. また, Y 軸, Z 軸が小さい範囲に偏ったのは, h. だった. h. は引きずった足をもう片足にそろえるため, 変位が通常歩行よりも小さい.

それに伴い、動揺性の値が低下、ふらつきの少ない歩行であったと考えられる。3段階にばらついたのは、h.のX軸、i.のY軸であった。h.は踏み出す位置が変化することのばらつき、i.は、片足を通常通り前に出すのに対し、もう片足を曲げて前に出す、伸ばして前に出すを繰り返す歩行である。その前後の繰り返し動作が、試行によってふらつきを招いたと考えられる。

#### 5.2.4 円滑性

円滑性の値域は、[0.01, 0.34]であった。円滑性は、連続する2歩のデータ数の変動係数が小さければ評価値も小さくなり、円滑性が高いことになる。

歩行カテゴリによる顕著な差が確認された。通常歩行においては小さい結果が得られた。また、10カテゴリ中7カテゴリで通常歩行と同様に値が小さかった。一方、評価値が大きかったのはi.であった。片足が通常歩行と同様に対し、もう片足は異なる。そのため、1歩の時間間隔が異なっていたことが原因として考えられる。また、3段階にばらついたのはh.で、被験者個人毎の差が影響したと考えられる。

#### 5.2.5 効率性

効率性の値域は、±では[-0.14, 0.70]、||では、[0.01, 1.56]であった。前者では、正值に偏る傾向がみられた。後者では、絶対値とすることで前者に比べて約3倍の値域幅となった。効率性に最大値はなく、0に近いほど効率的な歩行である。

歩行カテゴリによる顕著な差が確認された。通常歩行は、±と||ともに小さい結果が得られた。±では、c., f., g., i., j., k.で小さい結果、b.とd.とe.で中と小の2段階に分布していた。||では、h.を除く9カテゴリで小さい結果だった。h.の結果においては3段階にばらついた。この理由は動作の特徴というよりは、被験者個人毎の差が影響したと考えられる。

### 5.3 考察

本節では、5.2節に示した結果をふまえ、歩容評価指標の妥当性について考察する。

#### 5.3.1 評価指標総体としての歩行判別力

歩行カテゴリ毎に歩容評価指標の値に偏りが確認された。具体的にはa., b., c., f., g., k.である。同時に、同一カテゴリ内に含まれる歩行で試行差がある歩行カテゴリも確認された。具体的にはd., e., h., i., j.である。具体的には、d.では左足再現性Z軸、e.では右足再現性Z軸、h.では右足再現性X軸とZ軸、動揺性のX軸、円滑性、効率性の5項目、i.では右

足再現性X軸とZ軸、動揺性Y軸の3項目、j.では左足再現性Z軸で3段階に分散していた。一方でこれらのカテゴリには、他の歩容評価指標において他カテゴリとは異なる分布を示す結果が確認されている。すなわち、今回の検証の結果、本歩容評価指標を用いることで歩行方法が評価値に反映され、動作を判別できる可能性が示唆されたと考えられる。特に、a.通常、b.上体反らし、k.通常+膝曲げは全体的に安定性が高かった。

#### 5.3.2 各評価指標の歩行判別力

対称性においては、左右の足の出し方の違いが指標値に反映されることが確認できた。この評価値が小さい場合は、h.片足引きずりといった、左右差のある歩行が想定される。

再現性においては、例えばc.線上のように、低速で横幅が制限された範囲での歩行において評価値が小さくなる傾向が確認された。しかし、今回実施した歩行カテゴリの多くで再現性の評価値が比較的大きくなる結果となった。再現性の評価値が小さくなるような歩行方法を再検討し、実験を行うことが必要となる。

動揺性においては、変位の小さい歩行カテゴリほど評価値が小さくなる傾向が示唆された。ただ、値域幅が狭いので、カテゴリ間の差をより明示化するために、評価値を2倍にするなど、評価値算出方法の再検討が必要であると考えられる。

円滑性においては、a.通常歩行が最小値を示した(図3)。通常歩行は他のカテゴリと比較して、より一定の速度で歩行したことがうかがえる。他カテゴリ、特にi.片足振り子歩行では評価値が高い範囲に集中した。これは歩行動作の特徴と合わせて歩行スピードの安定性が関連していると考えられる。すなわち、1歩毎の速度を安定的に一定に保つことが困難である歩行は評価値が高くなることが予想される。この問題の解決には、例えば、歩行リズムを外部から指定した歩行実験が考えられる。

効率性においては、妥当性の有無の判断が難しい。通常歩行が最も効率的であるとした場合に、今回の評価値の結果からはh.を除くカテゴリで効率的であるという判断になってしまう。また、c.線上歩行が通常歩行よりも小さい評価値を示していた(図4、図5)。この理由としては、最高到達速度と速度分散が共に小さいことが考えられる。図6にa.通常歩行とc.線上歩行における進行方向速度比較を示す。c.の歩行速度はa.の約5分の1程度である。このことから、a.を遅い速度で行った場合に、絶対値効率性がより小さくなることが予想される。

本指標における効率性は、運動エネルギーに着目

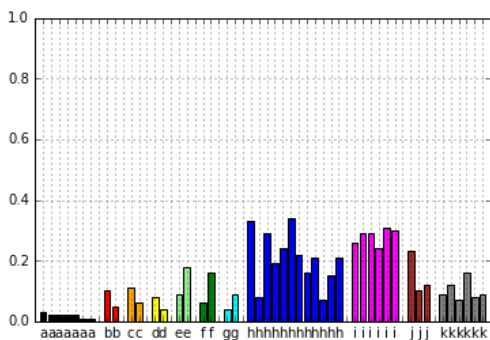


図 3: 円滑性の結果

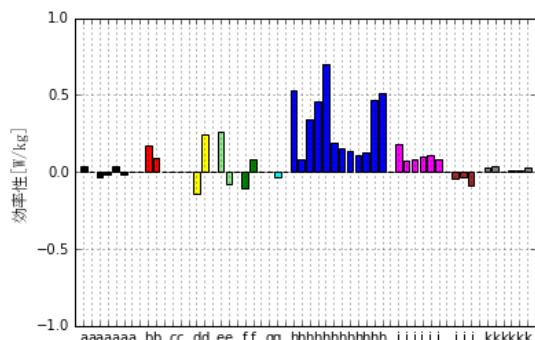


図 4: 効率性の結果

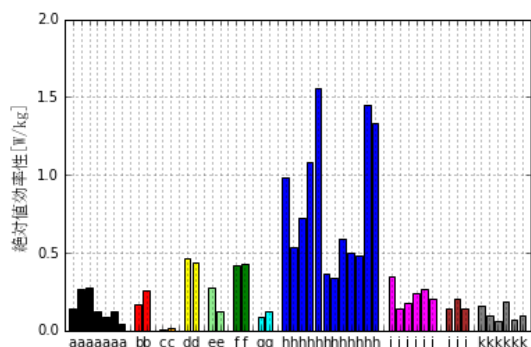


図 5: |効率性| の結果

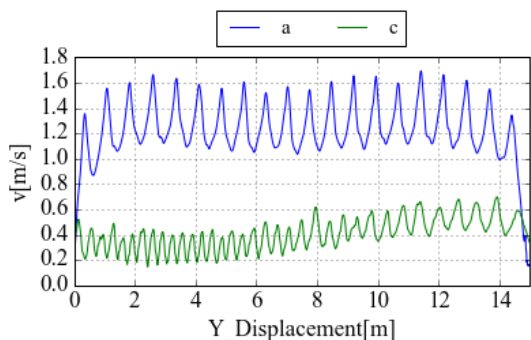


図 6: カテゴリ a と c の速度比較

して算出している。エネルギー消費の視点から歩行動作を評価する研究[15]においては、重力環境下では歩行中の重心運動を力学的エネルギーで捉え、位置エネルギーと運動エネルギーの交換率として重力の利用率を評価することができ、重力を利用するほどエネルギー消費が少ない効率性の良い歩行と考えられている。本指標においても、運動エネルギーだけでなく、位置エネルギーについても着目すれば、また異なる評価が行えるかもしれない。

いずれの歩容評価指標においても、評価値が大きい場合に安定性が高いというわけではない。例えば、対称性と再現性は絶対値が大きいほど安定性が高くなる。一方、動揺性、円滑性、効率性は値が小さいほど安定性が高くなる（動揺性ではよりふらつきが少なく、円滑性ではよりなめらかとなる。効率性では値が 0 に近いほど効率的である）。また、効率性に関しては上限が存在しない。評価結果の読み取り容易性を考慮すると、評価値の解釈を統一することが有効ではないかと考える。

### 5.3.3 通常歩行における試行差

通常歩行については、本評価指標を定義した先行研究においても評価がなされている。ここでは、それらと今回の実験で得られたデータを合わせて、通常歩行動作における考察を試みる。

同一歩行における試行差を調べるために、本実験で得られた通常歩行の計測データと、本実験とは異なる日時に行った成人男性 14 名の通常歩行の計測データを合わせた計 16 名 25 データを対象とした箱ひげ図を図 7 に示す。全体的に各指標 X 軸の箱の大きさが大きい、または外れ値が目立つ。対称性、再現性それぞれの X 軸の結果はばらついていて、動作との関連はみえなかった。そのため試行差が影響する指標であることが示唆された。

一方、Y、Z 軸は分布が集中している。通常歩行においては、評価値が図 7 に示す値域におさまることが示唆されたといえる。ここでの地域と図 2 の値域を比較すると、通常歩行とは異なる歩行方法を行ったことで、各評価指標の取り得る値域幅が大きくなったことが確認できた。対称性においては、X 軸で正の値をとる場合があること、Y、Z 軸では負の値をとる場合があることがわかった。再現性においては、Y、Z 軸では 0.8 以下の値を取り得ることがわかった。円滑性においては、0.1 以上の値、±効率性では 0.2 以上の値をそれぞれ取り得ることがわかった。また、動揺性 Y、Z 軸においては、通常歩行結果の最大値が大きい。通常歩行が動揺性の低い動作ではないことが示唆された。

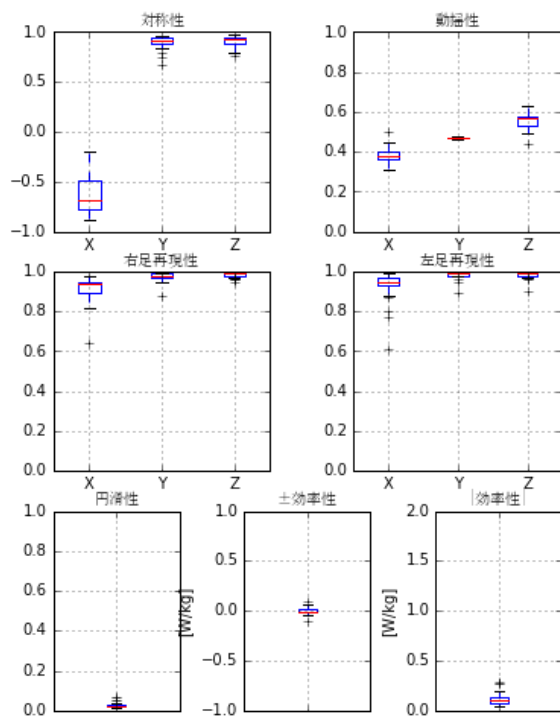


図 7: 通常歩行の箱ひげ図

## 6 まとめ

本研究の目的は以下に示す 2 つの課題を解決するための歩容評価指標の妥当性を検証することである。

- I. 解析対象が通常歩行に限定されていたこと
- II. 歩容評価指標の解析能力に関する検討がなされていないこと

その結果、歩行動作の歩容評価指標を算出することで、歩行方法が評価値に反映され、動作を判別できる可能性が示唆された。ただし、効率性においては評価が難しいといえる。

今後は、再現性の低い歩行動作計測、動揺性指標の再検討、外部要因による速度を指定した歩行動作計測、効率性評価指標の再検討を進めていく。また、歩行動作を定量的に評価できるという点において本指標は可能性を秘めているといえる。最終的には、一般人の生活に身近な計測システムを視野に入れ、本指標の汎用性を高めていきたい。

## 参考文献

- [1] 田房友典, 横田臣博, 石川聖二: 多視点カメラを用いたチームスポーツの三次元解析法, バイオメディカ・ファジィ・システム学会誌, vol. 10, No. 1, pp. 65-72, (2002)
- [2] 三輪飛寛, 市川浩, 松内一雄, 榎原潤, 高木英樹: 水

泳スカーリング動作時の泳者手部周りの流れ場の可視化 (FD 水泳), ジョイント・シンポジウム講演論文集 2009, pp. 208-213, (2009)

- [3] 佐川貢一, 小岩研, 煤孫光俊, 猪岡光: 加速度積分による屋内での 3 次元歩行経路の推定, 医療情報学, No. 22, pp. 65-72, (2002)
- [4] 角川隆明, 武田剛, 椿本昇三: 足部の圧力分布測定による平泳ぎ下肢動作の考察, 水泳水中運動科学, vol. 13, No. 1, pp. 22-28, (2010)
- [5] 高橋佑, 香山瑞恵, 橋本昌巳, 大谷真, 河合季信, 二上貴夫: スピードスケート滑走における滑走速度の特徴に関する考察, 人工知能学会 SIG-KST-2014-01-03, pp. 1-6, (2014)
- [6] 高橋佑: スピードスケートにおける動作解析と滑走速度に基づく特徴量を用いた内省支援のための環境構築に関する研究, 信州大学大学院理工学系研究科平成 26 年度修士学位論文, (2015)
- [7] 松澤拓也, 香山瑞恵, 橋本昌巳, 二上貴夫: 3 次元加速度センサの計測結果に基づく歩行特徴に関する基礎的検討, 信学技報, ET2015-66, pp. 41-46, (2015)
- [8] 松澤拓也: 3 次元加速度からみる腰部変化に基づく歩行特徴量と簡易可視化ツールの提案, 信州大学大学院理工学系研究科平成 28 年度修士学位論文, (2017)
- [9] 西辰徳, 松村さつき, 和田義明, 三宅美博: 腰軌道解析による片麻痺歩行の定量化とパターン分類の試み, ヒューマンインタフェースシンポジウム 2009, pp. 647-652, (2009)
- [10] 長田悠路, 瀧雅子: 片麻痺患者が非麻痺側から歩き始めた場合と麻痺側から歩き始めた場合の動的バランスの違い, 理学療法科学, vol. 30, No. 1, pp. 41-45, (2015)
- [11] 小田典雄, 千野直一, 山崎信寿: マイコンを応用した簡易歩行分析, 総合リハ, 10(2), pp. 245-249, (1998)
- [12] 小椋一也, 大瀧修一, 小島基永, 古名丈人, 潮見泰藏: 通常歩行時の骨盤加速度に注目した歩行分析, 理学療法科学, vol. 20, No. 2, pp. 171-177, (2005)
- [13] Saunders PU, Pyne DB, Telford RD, Hawley JA: Factors affecting running economy in trained distance runners., Sports Med., 34(7), 465-85, (2004)
- [14] 榎本靖士: 長距離選手のランニングエコノミーに影響を及ぼす体力および技術的要因の検討, 筑波大学体育学紀要, 36, pp. 137-140, (2013)
- [15] 大田瑞穂, 長田悠路, 田邊紗織, 瀧雅子: 脳損傷後片麻痺歩行における歩行周期別力学的エネルギー変換率と運動機能との関連性, 第 49 回日本理学療法学会大会, Vol. 41, No. 2, (2014)

# ドローイングプロセスグラフを用いた美術入門者に対する ドローイング学習支援の可能性

## A Basic Study of the Drawing Learning Support for the Art Beginner Using the Drawing Process Graph

永井孝<sup>1\*</sup> 香山瑞恵<sup>2</sup>

Takashi NAGAI<sup>1</sup> Mizue KAYAMA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 信州大学大学院総合工学系研究科

<sup>1</sup> Interdisciplinary Graduate School of Science and Technology, Shinshu University

<sup>2</sup> 信州大学工学部

<sup>2</sup> Faculty of Engineering, Shinshu University

**Abstract:** Drawing is one of the basic skills in learning art, it is a necessary skill for beginners to master. The acquisition of skills by individuals is difficult and is acquired by correct repetition. The purpose of this study is to build a drawing learning support system for beginners in a network environment. The student can obtain evaluation and advice from the tutor without being restricted by time and place. In this paper considers the possibility to drawing study support based on the drawing process data of the students in 2013 to 2016 about the drawing process graph designed from experts' drawing process.

## 1 はじめに

ドローイングは、美術教育における基本的な技法と位置づけられ [1]、入門者が最初に学ぶべき内容とされる [2]。入門者が学ぶときは、観察ドローイング (Observational Drawing) が取り入れられることが多い。観察ドローイングとは、目前に構成した対象物を観察して描くことである [3]。構図やパース、モチーフの形態やトーンおよび質感を正確に描画するスキルを身につけることができる。ドローイングの学習は、描いては誤りを修正し、再び描くことを何度も繰り返しながら正しい手法を身につけていく [4, 5, 6]。このような学習はスキル学習である [7]。個人でこの学習を行う場合、自分の癖や弱点に自ら気付くのは困難であり、誤りを生じた時点での指導に効果がある。そのため、美術スクールや専門学校等に通い、指導者から直接指導を受ける形態で学習が進められることが多い。しかし、美術スクールにおいても、一人の指導者に対して複数の学習者が指導を受けることが多く、一人の指導者が個々の学習者のドローイングに対してすべてを把握し指導することは困難である。

本研究におけるドローイング学習支援環境は、筆記

具としてデジタルペン [8] を、プラットフォームとして LMS (Learning Management System) を利用する [9]。デジタルペンは、記録した描画プロセスデータを LMS に蓄積し、学習者および指導者らがドローイングプロセスを閲覧できるようにする。これにより、オンラインでもオフラインの学習に近い体験が得られ、描画プロセスを時間と場所とに制約を受けず再生が可能となる。オフラインクラスでは難しかった、指導者が全ての学習者のドローイング指導が可能となり、学習者のドローイングの習得度合いをより細かく把握することができる。学習者は、他学習者のドローイングプロセスを再生が可能となり、気になる学習者のプロセスが閲覧できる。A 専門学校において 2013 年から「デジタルドローイング」授業として運用を開始した。

本稿では、熟練者の描画プロセスにより設計したドローイングプロセスグラフについて、2013 年から 2016 年度の学生の描画プロセスデータを基にドローイング学習支援への可能性について考察する。

## 2 ドローイングとストローク数

ドローイングはストロークの集合からなる。このストロークとは、用紙に対し筆記具で描く 1 本の連続した線のことを指す。本研究ではデジタルペンのペン先が

\*連絡先：信州大学大学院総合工学系研究科  
長野県長野市若里 4-17-1  
E-mail: ngi644@gmail.com



紙面に接する時間間隔内でのペンの移動を1ストロークと考えることとした。ペンによるドローイングでは描き込むことでトーンや質感を表現する。本学習支援環境では、描き込み量をデジタルペンのストローク数として量的にとらえる。

学習者が取り組むドローイング課題は、指定したモチーフを机の上に構成し、A3サイズ用の紙に20分間でドローイングをするというものである。モチーフには、紙箱と紙袋を選択した。選択理由は、ドローイング学習に適した基礎的な形状をしており、初心者にとって描きやすいこと、入手しやすいからである。用紙サイズは、直線やカーブを描く際、腕や肩を使って描くことが必要なサイズとしてA3を選択した。時間制限は、時間内に描ききることの意識づけ、自己や他者の描画プロセスを比較しやすくするために設けた。なお、20分の描画時間は、初心者にあまり負担をかけず、ある程度のボリューム感のある絵を描くことのできる時間である。モチーフの描画順序として、より紙箱の方が単純な形態をしていることから、まず紙箱を描き、次に紙袋を描く。

2013年からA専門学校でのドローイングの授業における正規の学習活動としてドローイング学習支援環境を用いた運用を開始し、学習者に対してストローク数を意識させる指導をしている。その際、入門者に対しては、段階的に2,000~3,000本を目指すように指導をしている。ストローク数を意識させることにより、入門者の一定のスキル向上は図れた[11]。図1に3名の学習者のドローイングとストローク数を示す。これらドローイングは、2,000本以上のストローク数を描いているが、モチーフの形やパースが狂っているもの(図1-学習者A)、濃淡の表現ができていないもの(図1-学習者B)である。

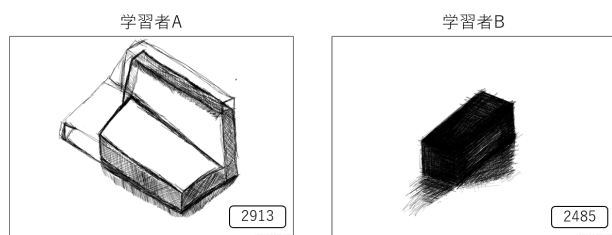


図1: 入門者のドローイング

図1のドローイングは、描画プロセスを改善することで修正が可能となる。我々は、描画プロセスを提示することで、学習者は自ら描画プロセスの違いに気づきやすくなる。また、指導者は優先して指導すべき学習者の発見や、よりの確かなドローイング指導が行えるようになると思う。

### 3 熟練者の描画プロセスの特徴

#### 3.1 描画プロセスの時間変化

描画プロセスの時間変化について、指導者と共に熟練者の描画プロセスを再生しながら検討したところ、初期・中期・後期の3区間に分割することを見いだした。図2は、熟練者のドローイングであり、図3は、熟練者の描画プロセスを各区間における描画結果と時間区間および描画特徴である。

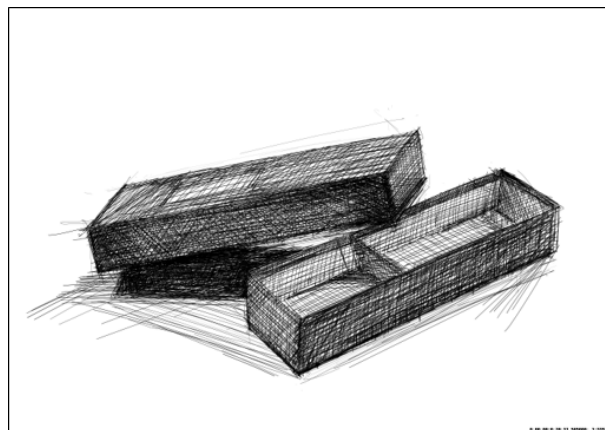


図2: 熟練者のドローイング

| 描画結果 | 初期 / 0-4分 | 中期 / 4-12分 | 後期 / 12-20分 |
|------|-----------|------------|-------------|
| 描画特徴 | アタリ・輪郭    | トーン        | ディテール       |

図3: 熟練者の描画プロセス

描画プロセスの初期は、構図と輪郭を決定する過程である。描画対象を用紙に対してどのように配置をするか、全体を外包するアタリを用紙につける、モチーフの構造を分解的にみながら輪郭を描画する。この過程では、構図やパース、形の狂いに対して修正ができるように、かつ、描画結果に影響しないように、筆圧を極力抑えた線で何度も描き、最適な輪郭線を描いていく。

描画プロセスの中期は、モチーフの色や形、陰影をトーンにより描く過程である。初期で描画した輪郭をもとに、面を意識しながらトーンを描画する。トーンを描く際、輪郭内をハッチングを用いて描画していく。ハッチングは、面の大きさ方向に注意をし、一面づつ描画するのではなく、常に全体を意識して描き、徐々にトーンの濃度を上げていく。



描画プロセスの後期は、仕上げの過程である。モチーフの質感や模様等の詳細を描画する。全体を意識して描き、時間まで作品として高めていく。

我々は、各区間における、体表的な描画特徴を、初期はアタリと輪郭、中期はトーン、後期はディテールとした。

各区間にかかる理想的な時間を検討した。4名の熟練者による描画プロセスデータを、上記に示した特徴に基づき3区間に分割し、各区間にかかる時間の平均を求めた。その結果、初期が描画開始から4分、中期が4分から12分、後期が12分から20分（描画終了）までであった。

### 3.2 描画プロセスの幾何的特徴

時間区間における描画特徴を熟練者2名による5描画プロセスデータを用いて、3つの描画特徴、アタリ・輪郭、トーン、ディテールの幾何的特徴について検討をした。

描画プロセスを単位時間（30秒）で分割し、単位時間区間にける、幾何的特徴を見る。描画用紙（A3サイズ）を3mm角（140×99ブロック）に分割を行い、各ブロックへの描画の有無、描画濃度を求めた。ブロックサイズを3mm角としたのは、本学習支援システムによる線種分類において3mm未満の線長が「点」として判定するからである。3つの描画特徴を、3つの幾何的特徴、外包領域の増加、新規描画率、筆圧の組み合わせで対応付けることが可能ではないかと考えた。

#### 3.2.1 外包領域の増加

外包領域は、描画開始からの描画ブロックを外包する領域である。図4上は、時間経過における熟練者の外包領域を示したグラフである。初期において外包領域が大幅に増加している。中期・後期にも少しながら増加している。図4下は、グラフ内のa,b区間に対応した描画結果である。赤色のストロークが当該区間の描画結果である。a,b区間ともに外包領域が多く区間である。a区間は、アタリをつけ輪郭を描いている様子が見える。b区間では、モチーフへのトーンと、モチーフが置かれているテーブルに対して陰影を描いている。

熟練者に領域が直前の単位時間に比べ増加をしている箇所について、描画結果を示しながらヒアリングしたところ「領域が増えるところは、アタリ・輪郭を描いている。初期のアタリ・輪郭は、モチーフに対して行っている。途中のテーブル部分のトーンを描くときも、まずは、アタリをつけ、最初ほど厳密ではないが輪郭を描いた後、トーンを描く。トーンやディテール

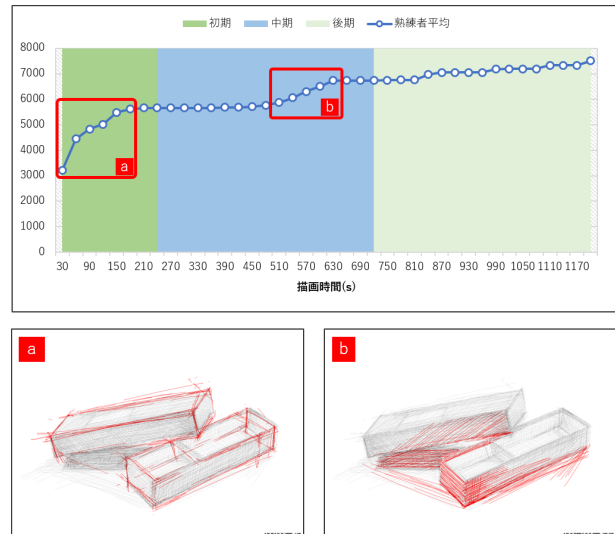


図4: 熟練者の外包領域の増加グラフ（上）と描画結果（下）

を描く際は、輪郭から1ミリもはみ出さない気持ちで描いている」とコメントを得た。

熟練者は、外包領域が増加する区間では、アタリ・輪郭を、増加がない区間では、トーンおよびディテールを描いていると考えられる。領域増加について「多い」「少ない」と分類し、閾値を36ブロックとした。

#### 3.2.2 新規描画率

新規描画領域は、単位時間内に描画した領域の内、描画開始から初めて描画した領域のことであり、新規描画率は、描画領域に対する新規描画領域の割合である。図5上は、単位時間における熟練者の描画領域と新規描画領域および新規描画率を示したグラフである。初期は、描画領域は少ないものの、新規描画率は高い。中期では、描画領域も多く、新規描画率も高い。後期では、中期と同じ程度の描画領域だが、新規描画率は低い。図5下は、グラフ内のc,d区間に対応した描画結果である。赤色のストロークが区間の描画結果である。c区間は、新規描画率が高めの部分である。描画結果として、モチーフ全体を面の方向に沿ってトーンを描いている。d区間は、新規描画率が低い部分である。既に描かれた領域に対し、モチーフの質感や陰影といったディテールを描いている。熟練者へのトーンとディテールの関係について、ヒアリングによると「まず、モチーフのトーンを整え、必要であれば、ディテールを描いてく。ディテールを描く個所で、トーンを描いていない部分は存在しない。」とコメントを得た。

熟練者がディテールを描く際、すでに描画済みの領域に対して行う。新規描画率が高い部分は、トーンを

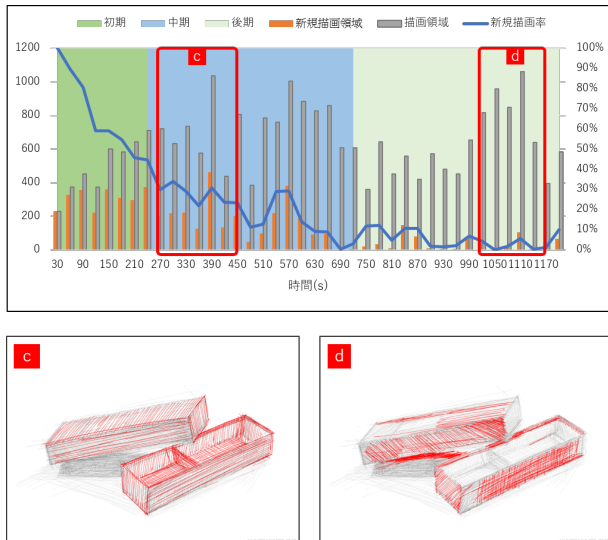


図 5: 熟練者の描画領域と新規描画率グラフ (上) と描画結果 (下)

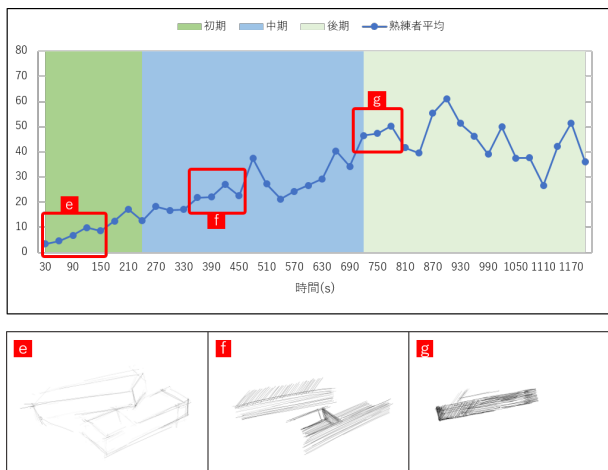


図 6: 熟練者の筆圧グラフ (上) と描画結果 (下)

描いており、低い部分は、トーンもしくは、ディテールを描いていると考えられる。新規描画率について「高い」「低い」と分類し、閾値を7.5%とした。

### 3.2.3 筆圧

筆圧は、単位時間に描画したストロークの筆圧平均である。図6上は、単位時間における熟練者の筆圧を示したグラフである。初期、中期、後期と筆圧が上がっていく。グラフのe,f,gは、eがアタリ・輪郭、fがトーン、gがディテールを描いている区間である。

図6下は、グラフ内のe,f,g区間に対応した描画結果である。e区間は、ドローイング結果(図2)に影響しない筆圧で描いている。f区間は、中程度の筆圧で描い

ている。g区間は、トーンが描かれた部分への描画のため、筆圧を高く描いている。筆圧について、「低」「中」「高」に分類し、閾値を  $低 \leq 15.57 < 中 \leq 39.78 < 高$  とした。

### 3.3 描画特徴と幾何的特徴の対応

描画特徴と幾何的特徴の対応を表1に示す。アタリ・輪郭の幾何的特徴は、外包領域の増加が多く、新規描画率が高く、筆圧は低・中である。トーンの幾何的特徴は、外包領域の増加は少ない。新規描画率が高く、筆圧は低・中の時及び、新規描画率が低く、筆圧が低の時である。ディテールの幾何的特徴は、外包領域の増加はすくない。新規描画率が高く、筆圧が高の時、及び、新規描画率が低く、筆圧が中・高である。

表 1: 各区間の描画特徴と幾何的特徴の対応

| 幾何的特徴  |       | 描画特徴 |        |     |       |
|--------|-------|------|--------|-----|-------|
| 外包領域増加 | 新規描画率 | 筆圧   | アタリ・輪郭 | トーン | ディテール |
| 多い     | 高い    | 低    | ○      |     |       |
|        |       | 中    | ○      |     |       |
|        |       | 高    |        |     |       |
| 少ない    | 高い    | 低    |        | ○   |       |
|        |       | 中    |        | ○   |       |
|        |       | 高    |        |     | ○     |
|        | 低い    | 低    |        | ○   |       |
|        |       | 中    |        |     | ○     |
|        |       | 高    |        |     | ○     |

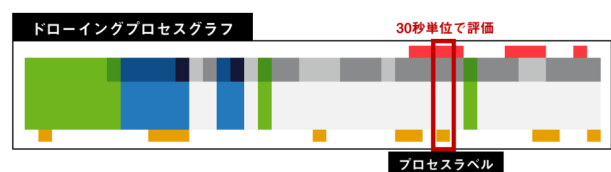


図 7: ドローイングプロセスグラフ

## 4 ドローイングプロセスグラフ

ドローイングプロセスグラフは、描画開始から終わりまでを単位時間で分割し、その単位区間における幾何的特徴、線種、線長を評価したものである。図7にドローイングプロセスグラフを示す。赤枠で囲んだ領域が単位区間の情報を可視化したもので、プロセスレベルと呼ぶ。これらを描画開始から終了まで順に並べて表現する。

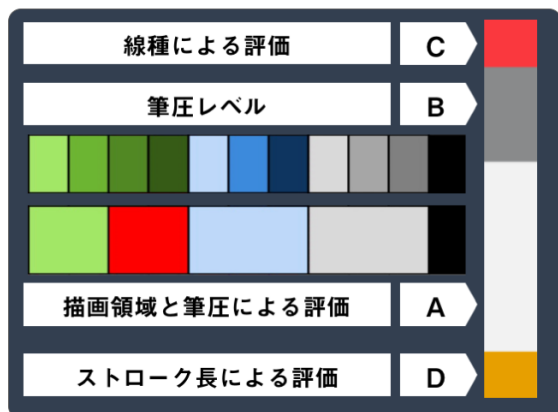


図 8: プロセスラベル

#### 4.1 プロセスラベルによる単位区間情報表示

プロセスラベルは、4 指標 A, B, C, D を縦に並べカラーバーで表す。A および B は、描画領域と筆圧による評価を、C は線種による評価を、D はストロークの長さによる評価を表したものである。図 8 にプロセスラベルを示す。

- 描画領域と筆圧による評価を緑、青、灰、黒、赤の 4 色で表示する。緑は外包領域が多く、新規描画率が高い時である。青は緑は外包領域が少なく、新規描画率が高い時である。灰は外包領域が少なく、新規描画率が低い時である。黒は描画がない時である。赤は外包領域の増加が多く、規描画率が高く、筆圧が高い時である。
- 筆圧を表し、3 段階の濃度で表示する。
- 線種のうち複雑線が 5 本以上出現するときにマゼンタで表示する。
- 最大ストロークの長さが 50mm 以下の時、黄色で表示する。

#### 4.2 熟練者のドローイングプロセスグラフ

熟練者のドローイングプロセスグラフと描画結果を図 9 に示す。図 9 上がプロセスグラフであり、左から右へ時間が流れている。図 9 下は、5 分、10 分、15 分の描画途中と最終結果を表示している。熟練者の描画プロセスは、アウトラインをとりながら、全体のトーンを描いて、ディテールを描いている。プロセスグラフは、緑から青、グレーと遷移する。線種は後半のディテールを詰めるときに複雑線が現れるのみである。ストローク長は短い区間も少ない。図 10 に描画プロセス区間における熟練者の描画プロセスの描画特徴の分

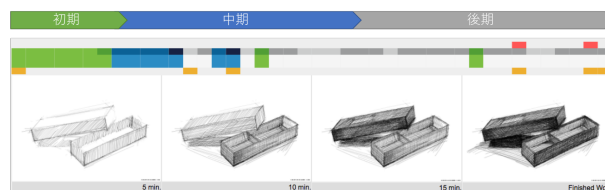


図 9: 熟練者のドローイングプロセスグラフ (上) と描画結果 (下)

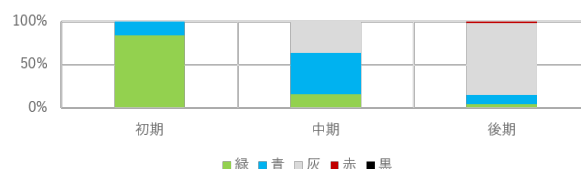


図 10: 熟練者の描画特徴の分布

布を示す。初期においては、緑が多くを占める。中期においては、青と灰色が同じぐらいの出現である。後期は、灰色が多く出現する。

#### 4.3 学習者のドローイングプロセスグラフ

図 1 の学習者のドローイングプロセスグラフと描画結果を図 11 示す。学習者 A のプロセスグラフは、全体を通して筆圧が高いことがわかる。特に初期から中期にかけて高い。初期では赤色が大半を占めている (図 11a)。描画結果と対応すると、間違った輪郭線が最後まで描画結果として残ってしまっている。新規描画率が高く、筆圧が高いラベルが多くみられる (図 11b)。描画結果を見ると、全体のトーンを描こうとせず、部分的に描いていっている。プロセス全体を通して線長が短い (図 11c) ため、モチーフの形状が歪んでしまっている。学習者 B のプロセスグラフは、初期において、

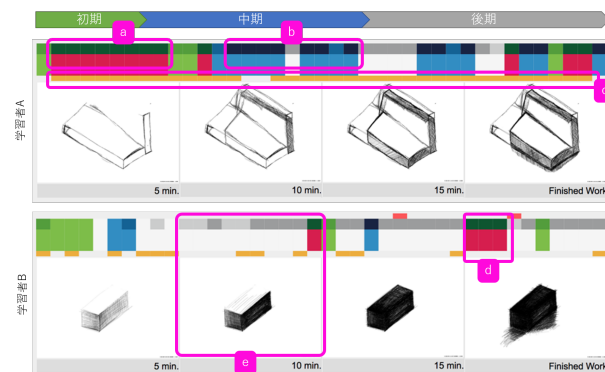


図 11: 学習者のドローイングプロセスグラフと描画結果

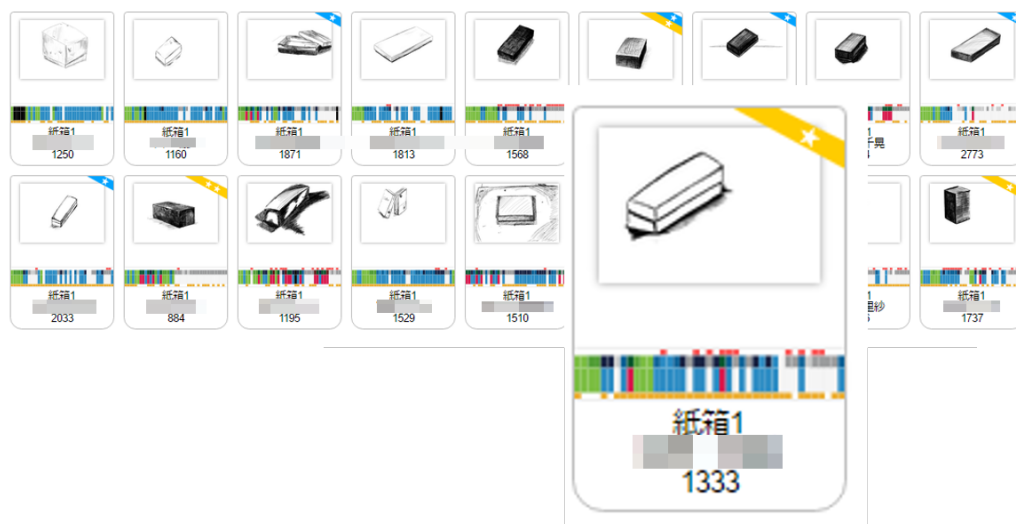


図 12: レッスンビュー

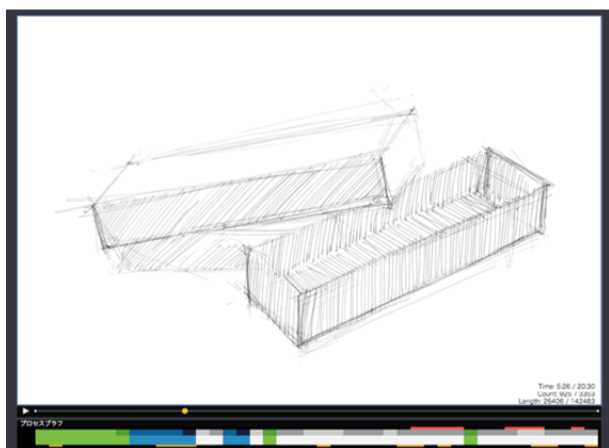


図 13: ドローイングプロセスビュー

緑，灰，青の順番で出現している。筆圧は低く抑え描画している。中期・後期ともに青色は出現せず，灰色が多い。後期に赤が出現している(図 11d)。描画結果において，中期を見ると，全体を描かずに，手前の2面に集中して描いている(図 11e)。このように部分的に描いてしまうと，正確なトーンの実現ができなくなり，この学習者のような描画結果になってしまう。プロセスグラフからは，この描画プロセスを見分けることができない。

## 5 学習支援環境への適用

ドローイングプロセスグラフを学習支援環境への適用を検討した。描画プロセスの状況を確認できることから，レッスン毎に指導者及び学習者が最初に見ることとなる「レッスンビュー」と，描画プロセスの再生

時，描画プロセスを閲覧する機能「ドローイングプロセスビュー」へ適用する。

図 12 は，レッスンビューへドローイングプロセスグラフを適用したものである。本学習支援環境では，レッスン毎に参加学習者のドローイング一覧をサムネイル形式で表示している。新たに，ドローイングプロセスグラフをドローイングの下に表示するようにした。

図 13 は，ドローイングプロセスビューへドローイングプロセスグラフを適用したものである。ドローイングプロセスビューは，描画プロセスの再生をすることができる。新たに，描画プロセス再生エリアの下に，ドローイングプロセスグラフを表示するようにした。

指導者へヒアリングをしたところ「描きははじめの誤りについて指摘することができる」「描画プロセスを比較するとき参考になる。」とのコメントを得た。

ドローイングプロセスグラフの学習支援環境への適用は，指導者が学生の学習状況を把握するのに役立つ。レッスンビューに表示することで，指導対象者を早期に発見可能となり，ドローイングプロセスビューで表示することで，指導必要箇所の発見がしやすくなった。

## 6 おわりに

本稿では，熟練者の描画プロセスから描画特徴と幾何的特徴の対応付けを行った。ドローイングプロセスグラフを設計し，学習者の描画プロセスデータを用いて学習支援ツールへ適用の可能性を検討した。アタリ・輪郭の描画誤りの可視化はできるものの，トーンの描き方に誤りの可視化には難しいことがわかった。学習支援ツールへの適用においては，今後は，プロセスグラフの見直しと精緻化を行い，学習支援ツールとして

の利用方法について検討をしていく。

## 参考文献

- [1] 佐藤聖徳: 美術・デザイン系大学におけるデザイン指導の発展的試み, 静岡文化芸術大学研究紀要, Vol. 4, pp. 153–162 (2004)
- [2] 関根英二: 美術体系の試み, 美術教育学会大学美術教科教育研究会報告, No. 6, pp. 89–100 (1984)
- [3] 越川倫明他 (編): 大英博物館所蔵イタリア素描展: ルネサンスからバロックへ, 東京新聞 (1996)
- [4] N.A. Bernshtein: The Co-ordination and Regulation of Movements, *Pergamon Press*, New York (1967)
- [5] M. L. Latash: Progress in Motor Control, Vol. 1, *Bernstein's Traditions in Movement Studies, Human Kinetics*, Urbana, IL (1998)
- [6] M. L. Latash: Progress in Motor Control, Vol. 2, *Structure-Function Relation in Voluntary Movement, Human Kinetics*, Urbana, IL (2002)
- [7] 古川康一: スキルサイエンス, 人工知能学会誌, Vol. 19, No. 3, pp. 355–364 (2004)
- [8] Anoto Group AB: Digital Writing Solutions, <http://www.anoto.com/archive/products/how-it-works> (2018/2/23 アクセス)
- [9] 永井孝, 香山瑞恵: ドローイングプロセスビューワを用いた美術入門者に対するドローイング学習支援方法の基礎的検討, 教育システム情報学会研究報告, Vol. 28, No. 4, pp. 21–26 (2013)
- [10] Takashi Nagai, Mizue Kayama, Kazunori Itoh: A drawing learning support system based on the drawing process model, *Interactive Technology and Smart Education*, Vol. 11 Issue: 2, pp. 146–164 (2014)
- [11] Nagai T, Sakimoto T, Kayama M : DEGITal Drawing: An innovative challenge for drawing skill development in art education, *e-Learning Excellence Awards, An anthology of case histories 2016*, pp. 133–154 (2016)



# Kinect を用いたスラックラインの熟達方法の検討

## A Study of the skillful method of Slackline using Kinect

大海 悠太<sup>1\*</sup> 児玉 謙太郎<sup>2</sup> 坂野 安希<sup>1</sup> 山本 正彦<sup>1</sup>  
Yuta Ogai<sup>1</sup> Kentaro Kodama<sup>2</sup> Yasuki Sakano<sup>1</sup> Masahiko Yamamoto<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京工芸大学 <sup>2</sup> 神奈川大学  
<sup>1</sup> Tokyo Polytechnic University <sup>2</sup> Kanagawa University

**Abstract:** As a result of the experiment, behaviors of some collaborators who reported that the experiment was difficult did not fluctuate too much. On the other hand, some collaborators who did not report that it was difficult showed wobbling behaviors. We think that the dynamical skill responded to such an unstable situation is the key to mastery.

### 1 はじめに

スラックラインとは、ベルト状のラインの上でバランスをとるスポーツ競技の一種である。大会やイベントが盛んに行われており、飛んだり跳ねたりする様々な技能を競いあっている。高齢者などのリハビリテーション目的にも利用されており、バランス能力向上に効果があると考えられている。しかし、初心者ではまず立つことにも苦勞するので、効率の良い指導方法の確立が求められている。

Anlauffらは深度センサである Kinect を用いて、スラックライン上の実験協力者の骨格情報(スケルトン)を取得し、そこから求めた関節角度を音でフィードバックするシステムを開発したと報告している[1]。しかし、現状の報告では、どのような動きがよいかまでは定性的な観点からしか求められていない。

児玉らはモーションキャプチャシステムを用いて、実験協力者にスラックライン上で片脚立ちを行ってもらい、そのデータを解析している[2]。しかし、この研究の場合ではまだ全身の動作解析はまだ行われていない。また、モーションキャプチャシステムでは可搬性がなく、リハビリ現場への持ち込みが困難である。

本研究では、定量的なデータを元にした指導方法の確立と、可搬性のあるシステムのために、Kinect を用いてスラックライン時の動作を関節角度などから解析をするシステムの開発を行う。

### 2 提案方法

スケルトン情報の測定のために Kinect v1 を用いる。Kinect v1 は 2010 年に発売されたセンサデバイスであり、RGB カメラ、深度センサが搭載されている。一つのスケルトンにつき 20 点の部分(頭、腕、足など)を取得可能である。プログラムは Processing 上で開発した(図 1)。本実験のシステムでは、各点の XYZ 情報を約 20msec 毎で取得することができた。

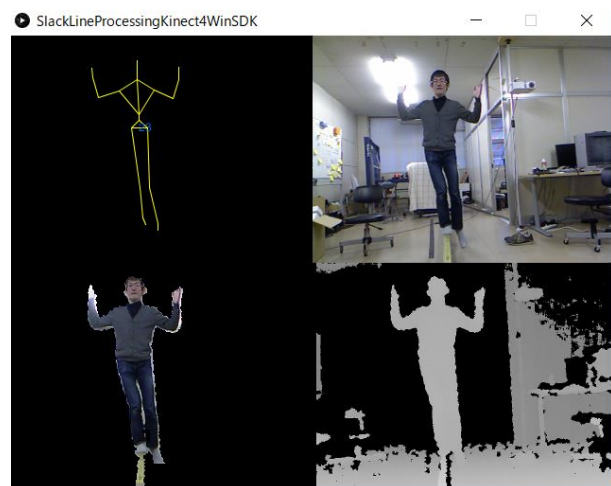


図 1: 開発したプログラムの画面。右上の画像が RGB 画像、右下が深度画像、左下が人間だけを切り出した画像、左上が認識したスケルトンの画像となっている。

XY 値は座標、Z 値は Kinect との距離 (mm) で取得され、XY は式 (1) で距離 (mm) に変換することができる。

$$(2X - 1)Z \tan(28.5^\circ) \quad (1)$$

\*連絡先: 東京工芸大学工学部電子機械学科  
〒 243-0297 神奈川県厚木市飯山 1583  
E-mail: ogai@em.t-kougei.ac.jp



また、スケルトン上の3点をP1、P2、P3とすると、P2での角度は以下の式(2)で求められる。また、単位ベクトルを用いることで、前屈など任意の軸との角度も求められる。

$$\theta = \arccos \left( \frac{\overrightarrow{P_2P_1} \cdot \overrightarrow{P_2P_3}}{|\overrightarrow{P_2P_1}| |\overrightarrow{P_2P_3}|} \right) \quad (2)$$

屋内用スラックライン SLACKRACK300 (GIBBON SLACKLINES, 長さ 3m, 高さ 30 cm) の前に Kinect v1 を置き、実験協力者のスケルトン情報を取得、CSV ファイルに書き込む(図2)。その CSV ファイルの解析を行う。実験協力者は 20 台~50 台の男性 11 名である。スラックラックの中心で片脚立ち(支持脚は左右どちらでも可)で 20 秒以上立ってもらい測定をした。またその後、5 段階リッカート尺度で以下のアンケートに答えてもらった。

20 秒間以上スラックラインの上で立つことについて、どのように感じましたか。

- 1 とても難しかった
- 2 難しかった
- 3 どちらでもない
- 4 簡単だった
- 5 とても簡単だった

### 3 実験結果

実験協力者には 20 秒間以上スラックラインに立つように依頼をしたが、1 名だけはどうしても 10 秒間程度しか立てなかった。他 10 名は 20 秒間以上立つことができた。実験協力者 11 名のアンケート結果を図3に示す。今回の実験協力者にはスラックライン初心者が多く、難しいと報告した者が多かった。

また、実験協力者のスケルトン情報から、左右の肘、左右の膝、前屈の角度を求めた。以下のグラフは縦軸は角度、横軸は時間で 20 秒間のデータとなっている。

結果として、例えば実験協力者 B はアンケートでは「3. どちらでもない」と、他の実験協力者よりは自信のある回答をしていた。しかし、左膝(支持脚)(図6)はあまり動いていなかったが、両肘(図4,5)、右膝(図7)、前屈(図8)はよく動いていた。

それに対し、実験協力者 C は「5. とても難しかった」と答えていたが、両肘(図9,10)、両膝(図11,12)、前屈(13)の関節角度はそれほど変化していなかった。



図 2: 実験の様子

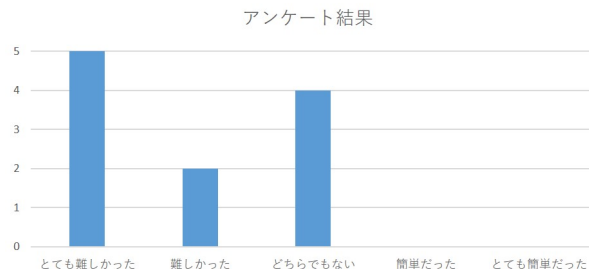


図 3: アンケート結果

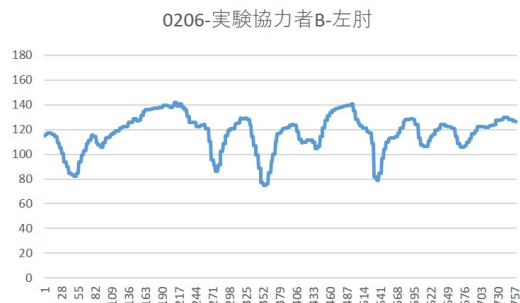


図 4: 実験協力者 B の 20 秒間の左肘角度変化。以下のグラフは縦軸は角度、横軸は時間で 20 秒間のデータとなっている。

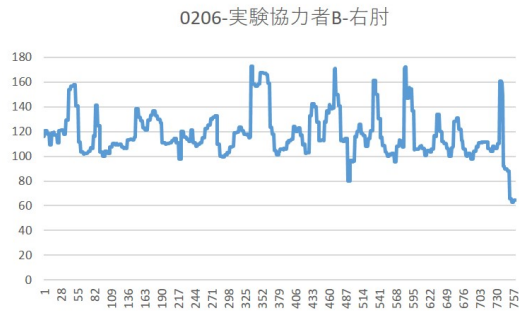


図 5: 実験協力者 B の 20 秒間の右肘角度変化

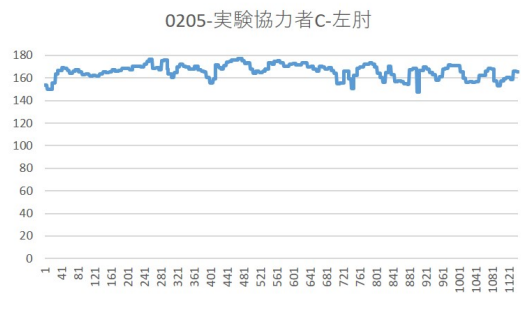


図 9: 実験協力者 C の 20 秒間の左肘角度変化。

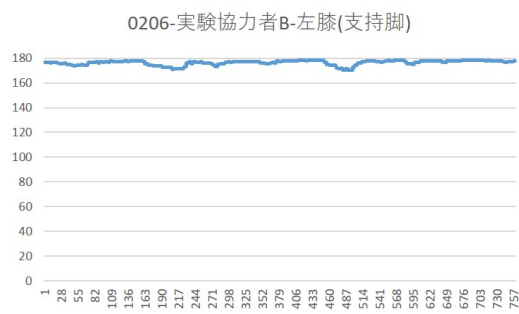


図 6: 実験協力者 B の 20 秒間の左膝 (支持脚) 角度変化

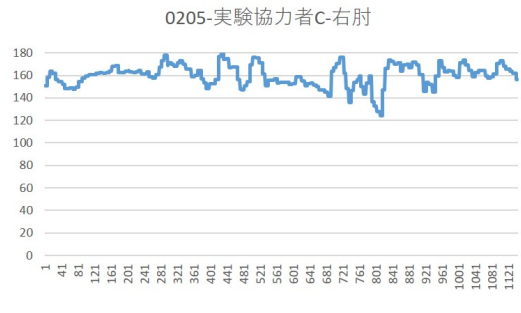


図 10: 実験協力者 C の 20 秒間の右肘角度変化。

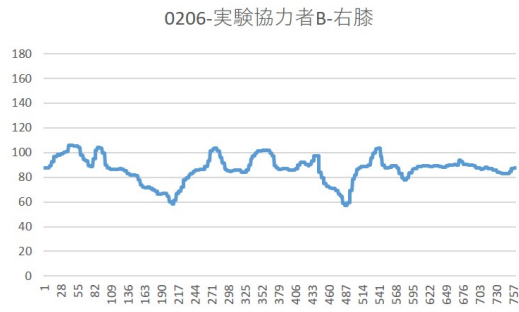


図 7: 実験協力者 B の 20 秒間の右膝角度変化

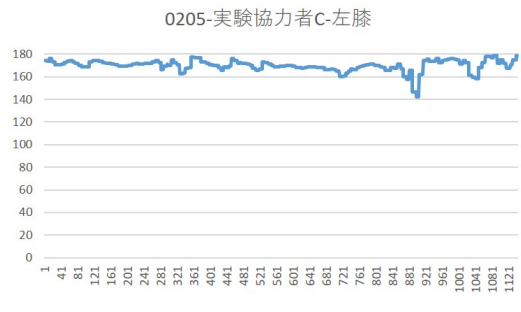


図 11: 実験協力者 C の 20 秒間の左膝角度変化。

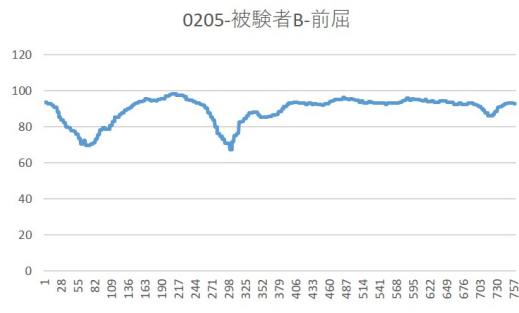


図 8: 実験協力者 B の 20 秒間の前屈角度変化

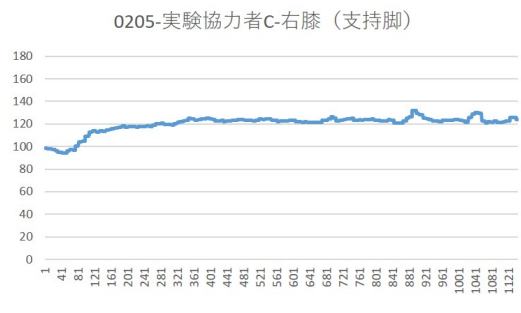


図 12: 実験協力者 C の 20 秒間の右膝 (支持脚) 角度変化。

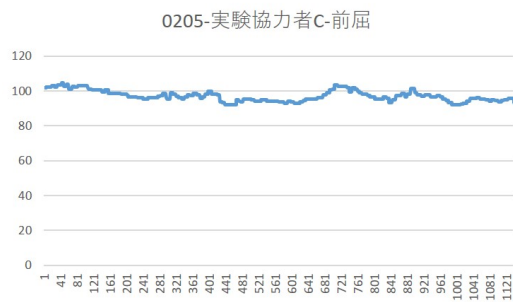


図 13: 実験協力者 C の 20 秒間の前屈角度変化。

## 4 考察、まとめ

スラックライン時の関節角度を計測できるシステムを Kinect を用いて構築することができた。

アンケートで「5. とても難しかった」と答えた人でも、データを見るとあまりふらついていない場合もあった。それに対して、「3. どちらでもない」と答えた人でも、振動している振る舞いを見せていることもあった。状況に応じてバランスをとるような動的安定性を実現していて、これを調べることで上達方法について理解できる可能性がある。また、技能レベルや、各関節角度同士の相関を求めることで、熟達の鍵を見付けていけると考えている。

## 謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP17K13125 の助成を受けており、またユニバーサル未来社会推進協議会の「教育・コミュニケーションロボットの研究開発」のテーマとしても実施している。

## 参考文献

- [1] Jan Anlauff, Jeremy R. Cooperstock, 'Augmented Feedback for Learning Single-Legged Stance on a Slackline', International Conference on Virtual Rehabilitation(ICVR), pp.162-163
- [2] 児玉 謙太郎, 山際 英男, 「全身強調バランス・トレーニング “スラックライン” がバランス能力に及ぼす影響」, 第 31 回人工知能学会全国大会, 2017

# 環境心理調査手法の応用した感性要求特定方法の提案

## ー建築デザインにおけるインテリアデザインの事例ー

### Proposal of Specifying Kansei Requirements with the Application of Environmental Psychology Research Methods

#### - Interior Design Cases in Architectural Design -

由田 徹<sup>1</sup> 前川 正実<sup>1</sup> 土田 義郎<sup>2</sup> 永井 由佳里<sup>1</sup>  
Toru Yoshida<sup>1</sup>, Masami Maekaw<sup>1</sup>, Yoshio Tsuchiyda<sup>1</sup>, Yukari Nagai<sup>1</sup>

<sup>1</sup>北陸先端科学技術大学 知識科学研究科

<sup>1</sup>Japan Advanced Institute of Science and Technology, School of Knowledge Science

<sup>2</sup>金沢工業大学 建築学科

<sup>2</sup>Kanazawa Institute of Technology, Department of Architecture

Abstract: To design and create the architecture that useful for society, identifying the requirements in the architecture and identifying the requirements is a basis to design creation of architecture. We built a model of how to identify the kansei requirements that can be utilized at the process of design creation in architecture. Considering previous studies on existing environmental psychology survey methods, we proposed a new method combinatorically developed taking into consideration the features and problems of each method. Focusing on the latency of the kansei requirements, it was required to clarify the kansei requirements in detail according to the actual situation, and examined the subjective thinking method to encourage the utterance by subjecting it subjectively. We proposed an observation model for the kansei requirements and examined the method.

## 1. 研究の背景

社会に役立つ建築をデザインするためには、その建築における要求を特定し、その要求を満たすことは、建築のみならず、人工物のデザインの基盤であり、デザインにおいて要求の特定は、人工物の価値を創造するためのひとつの起点である[1]。建築のデザインにおいて、人間に認知される空間や環境をデザインの対象としている[2]。また、人間はデザインされた人工物を、心を通して認知しており、この心を通じたデザインのあり方が議論されている[3]。人間の感性を通して未来に意味のあるデザインを行うために、何がデザインし創造されたかではなく、何をデザインし創造していくのかという問題を把握することに着目している[4]。

人間一人ひとりがどのような感性で空間や環境を捉えているのかを観察し、デザインプロセスに

取り込んでいくために人間の感性要求を特定することは大変重要である[5]。

人間の認知構造を体系的に捉える方法として環境心理調査手法が用いられている[6]。デザインのメタレベルでの定義に従えば、その本質においては理論的な問題解決作業であることが指摘[7]されており、環境心理学調査手法を応用の可能性が存在する。

## 2. 研究の目的と方法

本研究の目的は、建築デザインの感性要求をデザインの初期段階で特定する方法を示すための考察を行い観察モデルの提案をすることにある。感性要求を特定する方法が示されることで、建築デザインのデザインプロセスを科学的な問題解決作業とすることが可能となり、デザインプロセスを効率化することが可能となる。

### 3. 既存の環境心理調査手法等の検討

#### 3.1. 環境心理学調査手法の概要

(1) 評価グリッド法は、個人の認知構造を探る方法として知られている。讃井純一郎らが「レパートリーグリッド方の発展手法」として開発した手法(1986)で、後に「評価グリッド法」と改称された[8]。

(2) P A C分析は、個人の認知構造を探る方法として知られている「P A C分析」は、内藤哲雄が開発した手法(1988)である。

(3) 写真投影法は、画像イメージという視覚データを介して、人間の内省を観察する方法として、写真投影法が知られている。「写真投影法」は野田正彰が開発した手法(1999)である[10]。

(4) キャプション評価法は、「写真投影法」を応用し、「評価グリッド法」を組み合わせた「キャプション評価法」は、古賀誉章、他が開発した手法(1999)である[11]。

#### 3.2. 検討の要件による検討

既存の環境心理学調査研究手法等の比較研究[10]や先行研究[11][12][13]を参考に以下のように検討した。

「評価グリッド法」で用いられるラダーリングの操作は、評価項目の下位評価項目で機能を導出できる可能性がある。

「評価グリッド法」のクラスター分析で示されるネットワーク図は、個別の認知構造を統計的に扱うことできる。また、P A C分析で示されるデンドログラムは、クラスターとして理解が可能で、科学的に扱うことができる。

被験者の潜在化しやすい感性要求を特定することを目的として、写真印象法を参考とし自由意思で画像イメージを選択し発話の刺激となる可能性がある。また、評価項目の抽出では自由連想とし、「P A C分析」の非構造化面接法を参照し、非侵襲に人間の主観を抽出することが可能になり、実情に即した形で詳細に明らかにできる可能性を含んでいる。

#### 4. 感性要求特定方法の提案

環境心理学調査手法を応用し、以下の様に感性要求の特定方法の提案する。

(1) 被験者の内省観察を促すため、自由選択による画像イメージの選定を行う。写真投影法を参

考にし、建築デザインの専門家によって用意された画像イメージの中から、好みの画像イメージを直感に基づく自由選択で好きなだけ枚選り出す。

(2) 自由連想語(文)の抽出

テーマ(連想刺激文)と合わせ選択した画像イメージを見ながら「P A C分析」の手順に従って非構造化インタビューにより自由連想により自由連想語(文)を抽出する。

評価語を複数紙媒体で教示し、さらに深掘りして、自由連想語(文)の抽出を行う。

被験者が新しい自由連想語(文)を容易に見いだせなくなった時点で終了する。

(3) 自由連想語(文)全項目の対比較をランダムに行い類似度比較を被験者に行ってもらい。被験者の直感により判断していく。

(4) ラダーリングを、(2)で抽出された自由連想語(文)に対し、評価グリッド法の手順で実施する。

#### 4.2. 分析と理解

(2)で得られるデータにより、クラスター分析を行いデンドログラムに表し認知構造を示し、感性要求をクラスターとして理解する。

(3)で得られるデータによりネットワーク図に表し認知構造を示し、自由連想により取り出された自由連想語(文)に結びついている下位の自由連想語(文)と上位の自由連想語(文)の全体を理解する。

デンドログラムで理解出来る自由連想語(文)のクラスデンドターとして分析した上で、ラダーリングによって示されるネットワーク図を組合せ、自由連想語(文)から、被験者の感性要求を科学的に理解し特定する。

#### 5. まとめ

環境心理調査手法の応用による感性要求の特定として、既存の環境心理学調査手法を応用して、新たに観察モデルの提案を行った。

本研究では、観察モデルの提案に留まっているが、今後試行し感性要求が特定可能なことを確認する必要がある。また試行を踏まえ十分に研究を深めることが課題と言える。

デザイン学において、人間の知覚に着目した研究は、未来のデザイン創造において、さまざまな視点で問われるものであり本研究は一つの可能性を示していると言える。

## 参考文献

- [1] 山岡俊樹：ヒューマンデザインテクノロジー入門  
森北出版, 6-8, 2003
- [2] 日本建築学会編(乾正雄他共著)：人間環境学, 朝倉書店, 1998
- [3] ドナルド A. ノーマン(岡本明, 安村道晃, 伊賀聡一郎、  
上野晶子)：エモーショナル・デザイン：, 新曜社, 2004
- [4] 永井由佳里：デザイン思考とデザイン, 日本デザイン  
学会, 78-81, 2012
- [5] 前川正実：ユーザエクスペリエンスデザインにおけ  
る感性要求の取得に関する一考察-利用状況アイデ  
アの創出と編集段階での要件記述について-, 第14  
回日本 感性工学会大会講演集, 2012
- [6] 日本建築学会編(讃井純一郎他共著)：より良い環境  
創造のための環境心理調査手法入門, 技法堂出  
版, 60, 2000
- [7] 永井由佳里, 田浦俊春：デザインの創造性と既成概  
念, Cognitive Studies, 17(1), 66-82, 2010
- [8] 讃井純一郎, 乾正雄：レパトリー・グリッド発展手  
法による環境評価構造の抽出, 日本建築学会系論文  
報告集, 15-21, 1986
- [9] 内藤哲雄：PAC 分析実施法入門, ナカニシヤ出版, 1997
- [10] 土田義郎：認知構造の分析法の比較-評価グリッド  
法と PAC 分析-, 日本建築学会 2002 年度大会 学術講  
演梗概集 計画系, 2002(D-1), 845-846, 2002
- [11] 野田正彰：漂白される子供たち, 情報センター出版  
局, 198-200, 1988
- [12] 林幸史, 他：写真投影法による場所への愛着測定,  
関西学院大学 社会学部紀要 第 106 号, 15-16, 2008
- [13] 古賀誉章, 他：キャプション評価法による市民参加型  
景観調査, 日本建築学会計画系論文集 第 517 号,  
79-84, 1999



# 角速度を用いた和太鼓における タメ動作の表出に関する一検討

## A Study on Expression of TAME Action in Taiko using Angular Velocity

高橋 唯<sup>\*1</sup>

松田浩一<sup>\*1</sup>

Yui Takahashi,

Koichi Matsuda

<sup>\*1</sup> 岩手県立大学ソフトウェア情報学研究科

Graduate School of Software and Information Science, Iwate Prefectural University

### 1. はじめに

現在、日本では様々な和太鼓団体が学校での講演や式典などのオープニングセレモニーで演奏を行っている[1]。また、指導者育成、太鼓祭りの開催、ワークショップの開催といった和太鼓の振興も行われている[2]。

しかし、和太鼓指導者の減少によって直接指導の機会が減り、将来的に和太鼓の技能継承が困難になることが危惧されている。筆者らと共同研究を行ってきている岩手県洋野町の「種市海鳴太鼓保存会」もかつて存続の危機があり、現在の会長が建て直して人数も増やしてきた。しかし、人数もピークを過ぎ、若手の指導者候補たちが地域を出ていくケースが増え、会長の高齢化とともに過去を繰り返すことを危惧している。これは近隣の和太鼓団体でも同じように後継者不足による悩みを抱えているという。

一般に郷土芸能には正解がなく、指導者たちがそれぞれ良いと思うことを体得させることが多い。そのため、アドバイスが指導者により異なることもあり、学習側が混乱することもある。また、指導者が伝えたいことを学習者が理解できない原因の一つに、学習者が自身の状態を把握することが難しいということが挙げられる。そのため、指導者から見ればこうすべき、という考えがあっても、指導のための情報が学習者と共有できていないことがある。これは、和太鼓の技能の中には、抽象的で伝えにくいもの、動きが速すぎて説明できていないもの、習得が難しいものがある。これらのことから、和太鼓の技能の効果的な学習支援が求められている。

筆者らは、熟練者の動きの保存やコツの可視化などを試みてきた。中里らは、高速撮影カメラと加速度センサを用いて動作の保存、分析を試みた[3-4]。工藤らは、テンポからのズレの量をリアルタイムに視覚的に提示することで、学習者にその傾向を認識させ、さらに、その場で修正が可能なことを示した[5-8]。これらの過程において、指導者ごとに考えや、工夫している点についての共有がなされていないことがあり、分析結果の説明により、指導者および学習者にとって、指導内容についての理解を促進する

効果があることが分かってきた。

そこで、特に説明が感覚的となりやすい和太鼓の技能の一つである「脱力」について、筋電位センサを用いて力の出し入れの計測と提示を試みた[9]。指導者たちへの映像と数値による情報提供を行ったところ、同じ情報を見ることで、指導者間の議論と理解を促進することができた。

これまでの共同研究の過程で、理解が進んだ要素がある一方で、下記のような課題がある。

- 「良い」かどうかを比較することが困難なケース
  - 「良い」の程度が主観的で差が分かりにくい、または比較しにくい
  - 比較をする箇所（時間的、位置的、量）が明確でない
- 指導内容にあるが評価項目に無い要素がある
  - 映像やコマ送りでは分かりにくい項目
  - 普段目視で確認できる箇所に評価が集中
- 複数の人を比較するのに手間がかかりすぎる
  - 高速撮影カメラによりコマ単位で比較が可能となるが、比較位置をコマ単位で探さなければならない
  - 全て手で探すのは現実的ではない

以上を踏まえて、本研究では、中塚らの分析において特定できなかった情報の補完、また、指導にあるが、評価に現れにくい要素の発見を目的とする。

### 2. 和太鼓の技能

#### 2.1. パチさばきの動作要素

図1に共同研究先である岩手県洋野町の「種市海鳴太鼓保存会」における指導における動作要素を示す（以降、種市海鳴太鼓保存会固有の指導法、考え方が多く含まれている）。

- (1) 振り下ろし：力を抜いた状態で腕を下ろす。
- (2) 肘の開き：腕を開き始める
- (3) 手首の返し：手首を返しつつバチを

強く握る  
(4) インパクト：面に当たる直前で（力を抜き）叩く

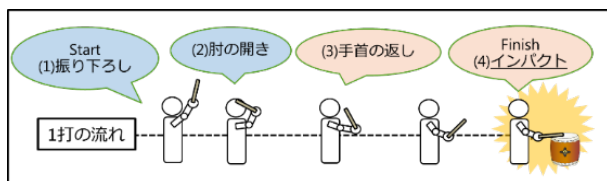


図 1 バチさばきの動作要素

また、評価においてよく使われた用語と概念を以下に挙げる。

- 「可動域」
  - (3) 手首の返しから (4) インパクトの間のバチの角度の変量を可動域とよぶ。可動域が大きいことでインパクト時の音の大きさを生み出す。
- 「スナップ」
  - (3) 手首の返しから (4) インパクトの間の手首の動きのこと。指導者が最も気にしている要素。速くなることで、大きな音を出し、かつインパクトの時間を短くできる。
- 「インパクトの時間」
  - バチが太鼓の面に触れている時間のこと。スナップの速さによりこの時間を減らし、太鼓の面振動を阻害しないことで響きの良い音を出すこと可能となる。

## 2.2. バチさばきの指導内容

初心者に対しては、まず「強く叩く」ことを指導する。大きな音が出せるようになってきた段階で、力の使い方やフォームという観点についての指導が行われる。

- 力の入れ・抜きの観点（脱力）
  - 【スナップ】強く握るのは「(3) 手首の返し」からであること。最初からバチを強く握ったままだと、スナップも遅くなる。
  - 【インパクトの時間】「(4) インパクト」直前で力を抜く。自然なバチの跳ね返りとなる（自然かどうかは視覚的・経験的に判断）。
- フォームの観点（コツ）
  - 【可動域】頭の横のあたりでバチが水平に近いこと。これにより可動域を広くする工夫。脱力せずにバチを握ったままだと水平にならない。無理やりバチを水平に倒すと肘が出てコンパクトに振れなくなる。
  - 【スナップ】「(3) 手首の返し」を行う位置を太鼓の面にできるだけ近くで、ということ意識させている。力を入れる時間を縮めて瞬発力を出し、スナップを速くするための工夫。
  - 【スナップ】上腕、前腕、手の甲、と3段階で順に部位を動かす。「(2) 肘の開き」、「(3)

手首の返し」、「(4) インパクト」の過程において鞭のように腕がしなるように打つことでスナップの速度を上げることができる。腕全体に力が入っているとできない（「しなり」とも表現している）。

## 2.3. 本研究で取り組む課題

2.2 節の指導内容について、「脱力」部分に関しては、中塚ら[3]が分析方法を提案している。筋電位センサと角速度センサを用いて、「(2) 肘の開き」「(4) インパクト」の位置を特定し、「(4) インパクト」前後の力の量を計測し、脱力の評価を試みた。しかし、「(3) 手首の返し」の位置特定に関して取り組めていない。「(3) 手首の返し」は「コツ」にも含まれる要素でもあり、本研究では、以下の「コツ」に関する内容について分析を検討する。

- 可動域に関わること
  - 頭の横のあたりでバチが水平に近い、では基準が曖昧である。可動域の角度の初期状態は「(2) 肘の開き」の段階で決まる。そこで、角速度データを用いて「(2) 肘の開き」の位置を特定することで、評価位置を一意に決めることを狙う。
- スナップに関わること
  - 「(3) 手首の返し」を行う位置を太鼓の面にできるだけ近く、は、指導者らの静止画のコマ送りによる脱力評価においても現れなかった指導内容である。脱力ができていると判断はできても、この指導内容だけはバチの角度や握りによって判断できないため指標が無い。
  - 上腕、前腕、手の甲、と3段階で順に部位を動かしているかの評価はしておらず、また、スナップに効果があるのかどうかは経験的に基づいた考えである。

以上に関して、角速度および映像データを詳細に見ることで、その指標づくりを試みる。

## 3. 実験

### 3.1. 実験環境

実験には、図2のような小型9軸ワイヤレスモーションセンサ（スポーツセンシング社製）を用いた。モーションセンサは利き手の手の甲に設置した。

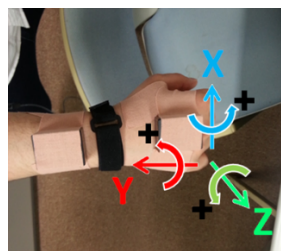
また、演奏者の利き手側に180fpsのカメラを設置し、演奏の映像を撮影した（図2）。データの取得は、筆者らが開発した、映像とデータを同期して記録再生できるシステムを用いて行った。

### 3.2. 実験内容

(ア) 被験者（レベル；和太鼓経験年数）：

- 脱力ができている
  - 被験者A（上級者；会長）1名
  - 被験者B（中級者；1.5年）1名

- 脱力が不足している
    - 被験者 C (上級者 1 名 ; 19 年)
  - 脱力ができていない
    - 被験者 D (初心者 1 名 ; 1.5 年)
- (イ) 打ち方 : 「基本打ち」を左右 8 打ずつ交互に打つ
- 「基本打ち」は初心者がまず学習する打ち方であり, 演奏の基本となる



センサ設置位置



データ取得の様子

図 2 実験環境

### 3.3. 検証結果

(ア) 「(3)手首の返し」の位置の特定

脱力ができている被験者 A, B について, 角速度の特徴的な位置と映像における状態の関係を確認した. 図 3 に被験者 A の角速度の推移を示す. 図 3 における角速度の y 軸は, 振り下ろし方向への動きが負の値を示す.

「(2)肘の開き」「(4)インパクト」は, 角速度 0 の位置としたとき, その間に, 極大値, 極小値, 最小値が存在している. 被験者 B も特徴は同様であった. 映像で確認したところ, 「(3)手首の返し」は, 最小値の前の極大値が対応していた.

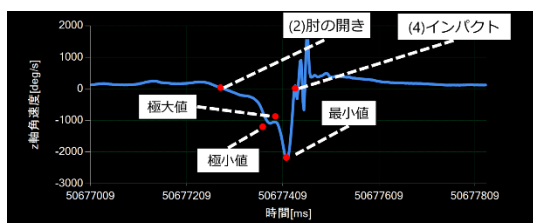


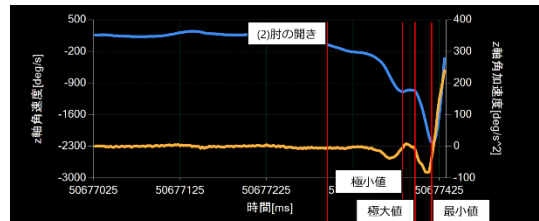
図 3 被験者 A の角速度における特徴

(イ) 脱力レベルごとの角速度の特徴点の検証

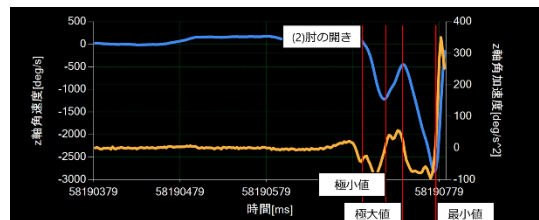
「(2)肘の開き」「(4)インパクト」に分析対象区間

を絞り, 4 名の被験者で同様に処理を行った (図 4). グラフには, 特徴が分かりやすくなるよう, 角速度に加えて, 角速度を微分した各加速度も記載した.

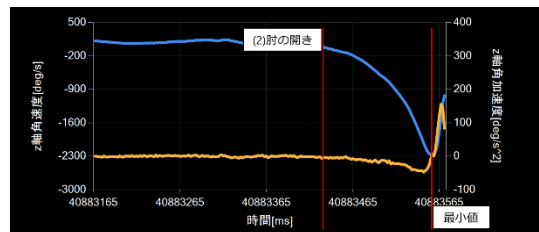
検証の結果, 脱力ができているとされるグループと不十分・できていないグループに角速度の違いに差が現れることが分かった.



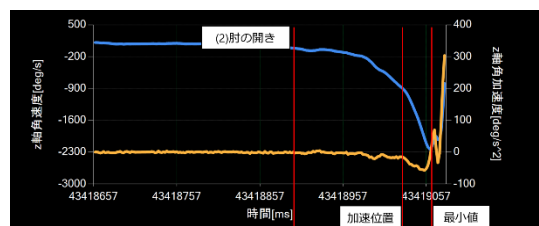
被験者 A (脱力ができている上級者)



被験者 B (脱力ができている中級者)



被験者 C (脱力が不十分な上級者)



被験者 D (脱力ができていない初心者)

図 4 被験者 A~D の角速度における特徴

脱力ができているグループは, 最小値の前に, 極大値, 極小値が存在している. 極大値の存在は, 振り抜く方向と逆の方向への動きを意味しており, スナップの前に一瞬わずかにバチを引く動作をしていることを示している. また, 被験者 A はスナップにより, 角加速度値が極小値より前よりも増大しており, 上腕, 前腕, 手の甲の 3 段階動作によってスナップの速度を大きく増大していることが数値的に示された. これが「しなり」による効果であると考えら

れる。一方で、被験者Bは、動きとしては被験者Aと同じ極大値後の値の増加が見られず、「しなり」によるスナップ速度の増加までには至っていないことが示された。

脱力が不十分なグループは、最小値の前に極大値・極小値が存在しておらず、角加速度の数値を見ても、上腕、前腕、手の甲の3段階動作による加速も少ない。比較のため、極大値の代わりに、角加速度の変化量が大きくなる位置にマークを入れている。

#### (ウ) 静止画による検証

角速度の特徴として見えた時刻の静止画により比較を行う。

##### ・ 「(2)肘の開き」検出について

角速度値が0の時刻でとらえた結果を図5に示す。図5全ての被験者において、手首がほぼ顔の横に位置している。主観評価において、被験者A、Bはバチが倒れているという評価、被験者C、Dは倒れ方が不十分であるという評価であり、推定時刻におけるバチの傾きは、主観評価による良さとも一致している。

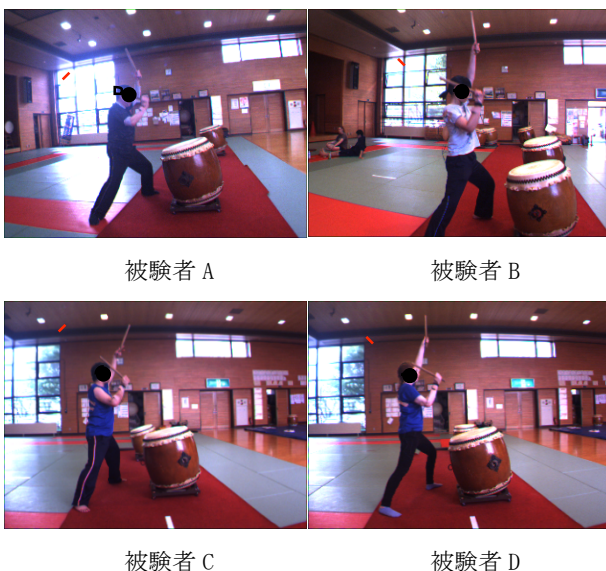


図5 被験者A～Dの肘の開き位置推定結果

##### ・ 「(3)手首返し」検出について

被験者A、Bにおける極小値、被験者C、Dにおける加速位置の時刻でとらえた結果を図6に示す。当該時刻の周辺で手首やバチの動き・画像のブレが確認でき、「(3)手首の返し」による加速が行われていることが確認できた。

##### ・ 脱力評価が高い被験者の特徴について

被験者A、Bにおいては、極大値、極小値が存在している。これらの時刻間での差異を確認した結果を図7に示す。両名とも、手首の位置が若干下に落ちているにも関わらず、バチの角度が大きく変化していないことが分かった。そこ

で、前腕の角度が合うように画像を回転させて合わせたところ、被験者A、Bともに、バチを手前に引いた（バチの振りと逆方向）状態になっていることが確認された（図8）。図8は、図7の極小値、極大値の画像について、極大値側の人物を抜き出し、前腕の角度が一致するように回転させて右側に重ねて作成した。この動きによって、極大値・極小値が生まれており、上級者はその前後で角加速度が向上していることから、その後の加速に寄与していることが示唆された。

本実験により明らかになった、極大値、極小値の存在は、指導において直接的に評価されている項目ではない。舞踏などで、動く方向に対して逆方向に動いてから動作をすることがよく行われている。和太鼓のバチさばきにおいても同様な技能が使われていることと考え、極小値から極大値の間に起きている振りと逆方向の動きを「タメ」と呼ぶこととし、この「タメ」があることが「スナップ」の良さにつながっていると考えられる。



図6 被験者A～Dの手首の返し位置推定結果

#### 3.4. 追実験

間を空けてデータを取得した被験者E(中級者, 2014年, 2015年), F(上級者; 2016年, 2018年)の2名の比較を行った。



主観評価において、被験者 E は、手首が柔らかくなったことで動きの幅が広がった、肘から手首にかけてのしなりが良くなった、との評価を受けた。被験者 F は、打ち方が団体のものでなく、太鼓の講習会で習った、バチを倒さずまっすぐ打ち下ろす打ち方になっており、曲線的な打法をよしとしてきた団体独特の打ち方より講習会寄りである、との評価を受けた。

図 10 に、被験者 E, F の経年による角速度の変化を示す。被験者 E は、2014 年には角速度が単調減少していたが、2015 年の角速度に極大値、極小値が現れるようになり、

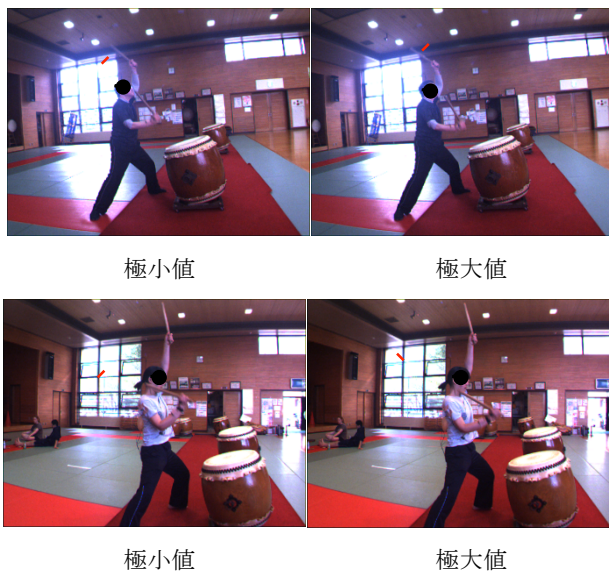


図 7 被験者 A, B の極小値、極大値時刻のバチの状態



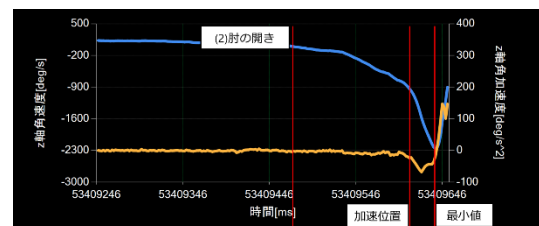
図 8 前腕の角度を合わせたときのバチ角度の比較

メができるようになっていることが分かる。主観評価において、手首や肘の動きのしなやかさへの言及があったことから、タメができていることがしなやかさへ寄与していると考えられる。

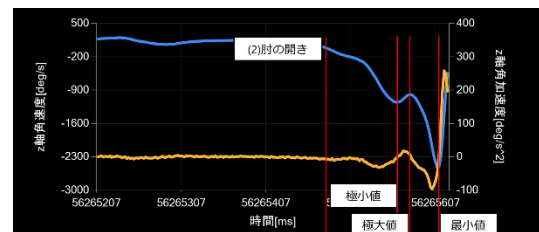
被験者 F は、2016 年は手首の返しから若干スナップによる加速が見えるが、角速度は単調減少している。2018 年になると、極大値・極小値が現れている。これにより、タメができるようになり、極大値後の角加速度が非常に大きくなり、スナップにより大きく加速していることが分かる。

図 11 に、被験者 E, F の「(2)手首の返し」のタイミングの静止面を示す。被験者 E は、2014 年に比べて 2015 年は、バチの角度が体寄りにあり、インパクトまでの可動域が大きく確保されたことが分かる。これは、主観評価と一致する。

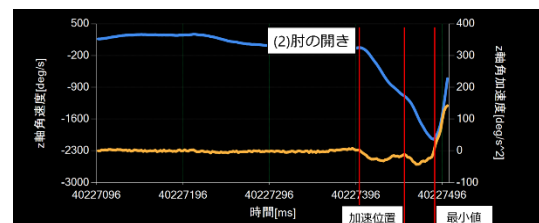
被験者 F は、2016 年に比べて、2018 年の方がバチの角度が太鼓寄りにあり、種市海鳴太鼓の理想から離れていることが分かる。これは主観評価において、バチを倒さずに打ちにいつているという主観評価と関係があると考えた。図 11 に、被験者 F の「(2)肘の開き」の静止面を示す。このタイミングにおいて、すでに 2018 年の方が、バチがやや立った状態であり、フォームが変わっていることが分かる。一方で、手首の返しは、タメがあるという状態であり、映像だけ、角速度だけでは分からない情報が、合わせてみていくことで新たな発見ができる可能性が示唆された。



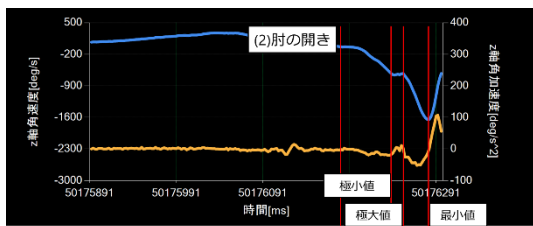
被験者 E (中級者) 2014 年



被験者 E (中級者; しなやかさが出た) 2015 年



被験者 F (上級者) 2015 年



被験者 F (上級者；まっすぐ打ち下ろす) 2015 年  
図 10 被験者 E, F の経年による変化 (角速度)

#### 4. おわりに

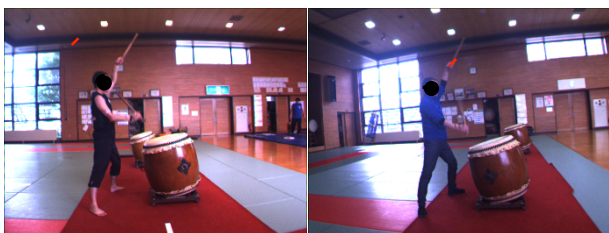
本研究では、和太鼓の技能伝承における指導者と学習者の情報共有を目指し、指導には使われているが、評価しにくい概念の計測・表出に取り組んだ。提案手法では、角速度センサを用いて「(3)手首の返し」のタイミングを特定し、また、角速度の変化から、しなりを生み出す「タメ」動作がバチさばきの過程にあることが分かった。

今後の課題としては、現状では、角速度と映像を目視で比較しながら検討する必要があることから、一打ごとの作業が必要となる。全ての打数について個別の作業をしているのは現実的ではないため、その自動化を検討し、大量のデータを俯瞰的に見ることを可能にしたい。また、本稿で



被験者 E (2014)

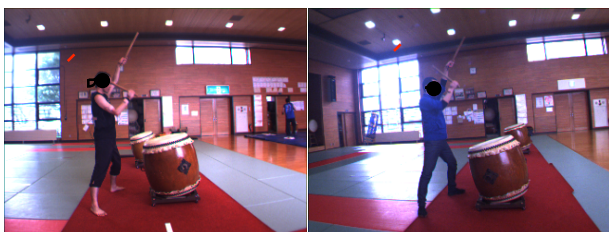
被験者 E (2018)



被験者 F (2016)

被験者 F (2018)

図 10 手首の返し始めの経年による変化 (画像)



被験者 F (2016)

被験者 F (2018)

図 11 肘の開きの経年による変化 (画像)

は、手首や肘の回転面を単純化してとらえ z 軸角速度に絞り分析していた。しかし、バチを振る過程において握り込む際には x 軸, y 軸周りにも回転しているなど、複雑な動きをしていることが分かっている。そのため、その他の軸に焦点を当てた検討により、また新たな知見が表出できる可能性がある。

#### 参考文献

- [1] 和太鼓グループ 彩 -sai-, <http://wadaiko-sai.com/>, (2018/3/2 参照)
- [2] 財団法人日本太鼓協会, <http://www.taikojapan.com/>, (2018/3/2 参照)
- [3] 中里直樹, 松田浩一, 中里利則, "和太鼓の手首の動きと音の良さの関係についての基礎的検討", 情報処理学会第 71 回全国大会, 4ZC-5, 2009.
- [4] 中里直樹, 松田浩一, 中里利則, "和太鼓のバチさばきにおける「勢い」と「脱力」の抽出と分類の一検討", 情報処理学会, 第 138 回グラフィクスと CAD 研究会, Vol.2010-CG-138, No. 8, 2010.
- [5] 工藤喬也, 松田浩一, 中里利則, "ズレの可視化による和太鼓基本リズムの習得支援システム", 情報処理学会第 75 回全国大会, 6ZF-3, 2013.
- [6] 工藤喬也, 松田浩一, 中里利則, "和太鼓リズムのズレ修正のためのリアルタイム提示による一考察", 電子情報通信学会, HCG シンポジウム 2013, I-2-11, 2013.
- [7] 工藤喬也, 松田浩一, 中里利則, "和太鼓リズムにおけるズレ提示システムの有効性の検証", 日本教育工学会, 第 30 回全国大会, 2a-023-06, 2014.
- [8] 工藤喬也, 松田浩一, "和太鼓におけるリズムのズレ提示法による学習効果の違い", 人工知能学会, 身体知研究会, 第 21 回研究会, SKL-21-04, pp. 16-23, 2015.
- [9] 中塚智哉, 松田浩一, "和太鼓のインパクト時の「脱力」技能の定量化", 人工知能学会, 身体知研究会第 23 回研究会, SKL-23-02, pp. 7-12, 2017.



# ヒストグラムを用いた盛岡さんさ踊りにおける質の違いの分析法の提案

## A Proposal of Analysis Method of Difference in Quality in Morioka Sansa Odori Using Histogram

菊地 直樹<sup>\*1</sup>  
Naoki Kikuchi

松田 浩一<sup>\*2</sup>  
Koichi Matsuda

<sup>\*1</sup> 岩手県立大学大学院ソフトウェア情報学研究科

Graduate School of Software and Information Science, Iwate Prefectural University

<sup>\*2</sup> 岩手県立大学ソフトウェア情報学部  
Software and Information Science, Iwate Prefectural University

In this research, we propose a method to find 「Morioka Sansa Odori」 and which movement causes quality difference. In the proposed method, we tried to narrow down the features from the histogram using the waist acceleration data. As a result, we were able to estimate the difference in the quality of the dancer, which was not known only by the time series waveform of the waist, and narrowing down the focus points and the motion by intersecting the histogram.

### 1. はじめに

一般に舞踊において、動きの要は腰部にあると言われており、腰部の動きが出来ることで、手足による表現が活きてくるとされている。舞踊における学習者の評価は、指導者の経験によって主観的に行われる。その際、指導者は、学習者を見て何が不足しているのかを経験的に判断し、感覚的に捉えた情報を言葉やジェスチャーに変換する。この変換結果は抽象的な内容も多く、指導側が持つ知識・経験が下地になっているため、指導側と学習側で内容が共有できず、学習者に意図が伝わりにくいこともある。

本研究で対象としている地域伝統舞踊においては、動きの固有の要素に、地域独特の動き方や農作業の動きなどが取り入れられていることも多い。そのような動きを学習者が体験したことのない場合もあり、その場合には、とりわけ伝達と理解が難しくがちである。

このような地域伝統舞踊の特徴から、指導側と学習側で情報の共有が行えるよう、客観的に印象・特徴を把握できることが求められている。そのため、筆者らは、地域舞踊における印象・特徴を客観的に示すことを目指し、印象・特徴と動作の関係についての分析方法を模索してきた。

筆者らは、腰部の加速度に着目し、その加速度の時系列波形を用いて同世代の熟練者同士の比較を行った[1]。その結果、熟練者同士だと性別や身長に差があり、同じ音楽を流しながら個別にデータ取得を行ったにも関わらず、腰部の加速度は、ほぼ同じ波形として表れ、高い相関が得られていることが分かった。その同世代のメンバーで踊るときは、全体として一体感があり、違う世代の人が混ざると合にくい、との意見があった。しかし、映像において全体として見たときに一体感はあるものの、個々を詳細に比較したとき、踊るタイミングは似ているが、踊りから受ける印象は若干異なって見えることが分かってきた。

そこで筆者らは、加速度の時系列波形を詳細に見ることで、印象に関わりのある動作の特定を行った[2]。印象の違いの要因の一つが動作間の繋がり部分にあることが分かり、腰部の加速度の振る舞いを詳細に見ることで、印象の

違いを説明できる可能性が示唆された。その一方で、映像と合わせて加速度波形を詳細に見ることができないと、被験者間の特徴に気づきにくいとされた。

そこで本研究では、加速度の時系列波形の特徴部の絞り込みを行うことを目的とし、絞り込みによる舞踊の印象の違いの分析方法を提案する。提案手法では、学習者間の違いの着目点の絞り込みが行えるため、違いに影響を与える動作を提示することを可能とする。これにより、指導側と学習側で情報を共有することが可能となり、意思疎通を促進できることが期待できる。

本研究では、岩手県の地域伝統舞踊である「盛岡さんさ踊り」を対象動作とし分析を行った。

### 2. 指導の要素と加速度の関係

#### 2.1. 指導において重要視される要素

地域伝統舞踊を専門とする秋田県の劇団わらび座において講師（指導歴 22 年）に上手い動作や印象に関わる動作の要素についてヒアリングを行った。

##### (1) 動作の印象に大きな影響を与える要素

地域伝統舞踊では、一般の舞踊と同様、腰の動きが重要であることがわかった。上半身と下半身は体幹を通して繋がっており、腰を軸として踊ることで全体的に繋がりがあがる動作となり、より良い印象を与えるとのことだった。また、腰部移動の緩急も重要であり、上手い踊り手は動作間において、腰の動きに緩急をつけることによって、踊りにメリハリを出すことがわかった。

##### (2) 「質」と「技能」

指導レベルごとの学習内容を表 1 に示す。初級者は動きの基礎を習得している段階であり、形の指導と呼んでいる。中級者・上級者になると技能や質を求められる型の指導に入る。型は、印象に影響を与える部分とされている。型において、技能は指導者が具体的な言葉を持って指導を行えることが多い。対して、質は学習者の特徴や独自の工夫など踊りの見せ方や表現に関する部分であり、指導の際に抽象的な表現が用いられる場合が多く、また指導者によって

異なる評価を受ける学習者も存在する。そのため、本研究では学習者の質の違いに着目する。

表 1 指導レベルごとの学習内容

| 指導レベル | 学習内容 |                                       | スキルレベル |
|-------|------|---------------------------------------|--------|
| 型の指導  | 印象   | 質 (表現)<br>・踊り手の個性<br>・独自の工夫<br>・理想の表現 | 上級者    |
|       |      | 技能 (動作の繋がり)<br>・体の動かし方<br>・動作の繋げ方     | 中級者    |
| 形の指導  | 基礎要素 |                                       | 初級者    |

### 2.2. 腰部の加速度と舞踊動作の関係

3 軸加速度センサでは、動的加速度、静的加速度を同時に取得し、その合算値がデータとして得られる。本研究では、3 軸加速度の合成値を求めて分析に用いる。合成加速度にして用いる方法には、以下のような特徴がある。

- ・ 重力方向に対する挙動が分かりやすく得られる
  - 特に舞踊においては、体重移動の緩急が重要であり、重力方向に対する指導が多い
- ・ センサの設置方向に制約が無い
  - その代わり方向成分は失われる

合成加速度における 0G と 1G は動作において特別な意味を持つ。0G は足が地面から離れている状態、1G は、静止状態 (に近い)。1G から 0G に向かう方向は、体重の支えの減少を示し、1G 以上は、勢いや方向転換を示している。舞踊の指導においては「腰部のゆるみ」という表現が用いられており、力を抜くことで次の動作へとスムーズに動くことを可能にする。これは 1G より下の値として表れる。

図 1 に、直立状態からの屈伸動作の加速度の推移を示す。腰が落ち始めてから膝によるブレーキがかかるまで、膝が伸び始めて直立状態に戻る前の二か所で 1G を下回っている。これが腰の緩みである。このとき、股関節や膝に不要な力が入っているとスムーズな動き (加速度波形が滑らかに変化) ができない。もし、緩みの箇所で、完全に力を抜いてしまうと、腰部は落下の状態となるため、加速度は 0G を示すことになる。なお、二つの緩みの値の大小は、落下、上昇の強さの程度の差を表す。図 1 では腰を下ろす方が挙げるよりも強く動いていたことを示している。

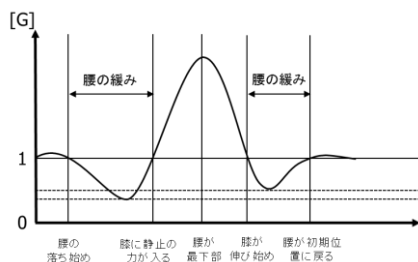


図 1 屈伸動作における合成加速度の変化

次に、加速度ヒストグラムと動きの関係を図 2 に示す。腰部に加速度センサを付けてデータを取得したときの数値には、以下のような動きと意味が対応する。

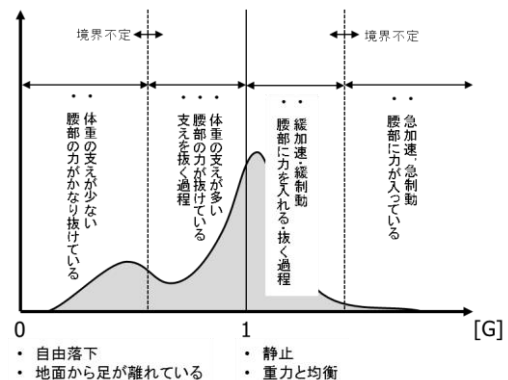


図 2 加速度ヒストグラムと動きの関係

### 2.3. 予備実験

先行研究[2]のように、加速度の時系列波形から直接違いを見つけるとするとき、動作が複雑になるほど、また、被験者が増えるほど作業コストが高くなるため、一般ユーザの利用を前提とすると現実的ではない。そのため、時系列波形と映像を直接見て理解する以外の方法で違いを見つける方法が必要である。本研究では、全体を俯瞰することができるヒストグラムに着目した。本節では、ヒストグラムの有用性を検証するために予備実験を行った。

予備実験には、わらび座で行われている地域伝統舞踊の基礎動作「保ち」を用いて行った。保ちとは軽く膝を曲げた後に片方の足を軸足とし腰を上げ、上げた腰を軸足で支えて保ったまま腰を落とすというシンプルな動作である (図 3)。保ちにおいて重要なのは、自由落下しないように軸足で腰を支えながらスムーズに着地することである。重力による落下を制御しつつ着地できることは、表現したい動き (イメージした量) を体重移動によって実現するために必要な技能の一つである。

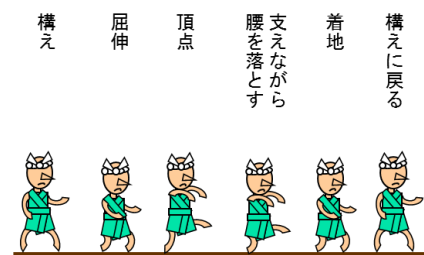


図 3 保ちの動きのイメージ

指導者から見て、体重移動が制御できて腰を落とせると見える場合には「保てている」、そうでない場合には「保てていない」と評価をする。技能の一つには、関節の使い方があり、足首、膝といった関節が柔らかく使えることで、動作の流れが滑らかに繋がる (体重移動の軌跡が曲線的、と表現) が、そうでない場合には流れが途切れる

(体重移動の軌跡が直線的，途切れる，と表現) という評価を受ける。

以下に予備実験の詳細を示す。

A) 実験環境

実験にはワイヤレス 3 軸加速度センサ (Wireless Technologies, Inc. Model WAA-010, 200Hz にて使用) を用いる。図 4 のように被験者の腰部に加速度センサを取り付け，腰部の 3 軸加速度を取得する。また，同時にセンサ同期カメラ (100fps) を用いて被験者を正面から撮影し，動作の一部始終を映像として記録する。



図 4 センサ取り付け位置

B) 実験内容

- 対象動作
  - 基本動作「保ち」
- 被験者
  - わらび座研究生 3 名 (被験者 A~C)
  - 被験者 A が最も「保ち」ができています
- データ取得方法
  - 保ち 8 回を 1 セットとし，被験者ごとに 1 セットずつ。
  - テンポは，普段練習で使用している指導員の手拍子
- 実験内容
  - 取得した 3 軸加速度より合成加速度を求める
  - 求めた合成加速度よりヒストグラムを作成し，比較対象を重ねて表示

C) 結果

指導者より動作が良いと評価を受けている被験者 A の 5 回目のヒストグラムを基準とし，他 2 名の 8 回分のヒストグラムと重ねて比較を行った (図 5, 6)。

まず，被験者 A のヒストグラムの特徴について述べる (図 7)。図 7 においてヒストグラムの概形を見ると，二つの極大値が見える。1G より若干下の極大値は，腰部の緩みを表している。映像と比較しながら確認したところ，支えながら腰を落とす際，着地から直立に戻る際の弱い緩みが時間的に長く同じような量で行っていることが分かった。

被験者 B は被験者 A と比べると階級値の取りうる範囲が広い (図 8)。最小値，最大値が異なることは，動作の強に違いがあることを表している。最小値，最大値付近の値が出ている部分について映像で確認したところ，被験者 B

は被験者 A よりも屈伸動作が大きいことが分かった。動きの大きさは，そのあとの動きにも影響を与えており，安定的な保ちを難しくする場合がある。

被験者 C は被験者 A と傾向が似ているものの，緩みとなる箇所の頻度が若干低い (図 9)。映像と加速度波形の対応の確認を行ったところ，屈伸の際の力について，被験者 A より若干大きく短い時間で力の出し入れを行っている。そのため，片足で頂点に到達するまでの間，被験者 A よりも緩みが大きくなっていることが分かった。

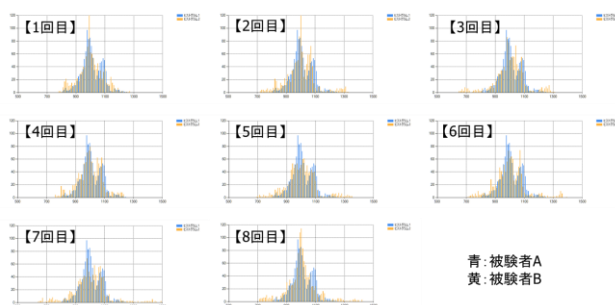


図 5 被験者 A, B のヒストグラム比較

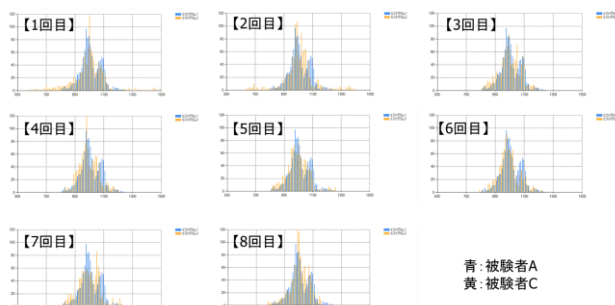


図 6 被験者 A, C のヒストグラム比較

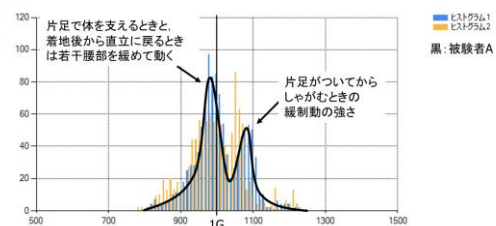


図 7 被験者 A の特徴と動作の対応

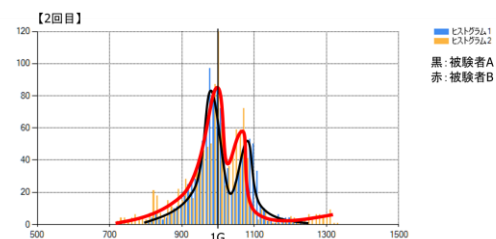


図 8 被験者 A, B の傾向の違い

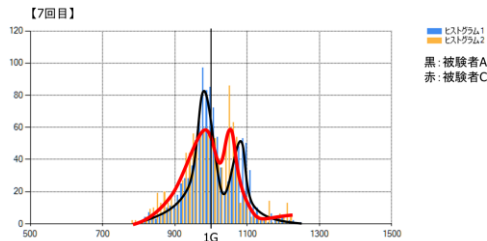


図9 被験者 A, C の傾向の違い

D) 考察

予備実験より、腰部の合成加速度より作成したヒストグラムには被験者の動作の特徴が表れる可能性が示された。違いの発見手順は以下の通り。

- (1) 比較対象とするヒストグラムを重ねる
- (2) 概形で形をとらえて差の大きい階級値を見つける
- (3) 階級値から図 2 により動作の意味を考えて、加速度波形のどの部分の変化を指しているか、を見つける
- (4) 映像との対応から動きを確認する

これらについて、一つ一つのデータに対して手作業で行うには、加速度波形に関する知識と、該当箇所を絞り込む膨大な時間が必要である。本研究では、上記の(1)～(3)のステップについてアルゴリズムを検討し、効率的に分析を行うことを目指す。

3. 提案手法

提案手法では、一連の動作の中から動作の質の違いに寄与する動きの箇所の選定を行うことができる。

手順を以下に示す。

1. 比較する被験者の腰部の合成加速度からヒストグラムを作成
2. 求めたヒストグラムに平滑化を行うため、ガウシアンフィルタをかける (図 10)
3. 二つのヒストグラムに対して階級値ごとに度数の差分を求める (図 11)
4. 極値のうち最大値・最小値の周辺を被験者の特徴のある値群と捉え、指定した範囲の値を持つ時系列波形にマーキング (図 12)

以上の手順で、該当箇所を絞り込むヒントとなるマーキングマップが得られるので、マーキングの密度の高い部分の映像を詳細に見て違いを考察する。

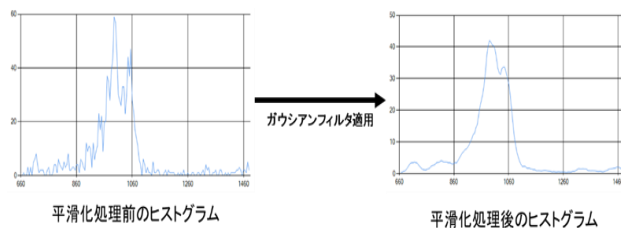


図 10 差分データ作成手順

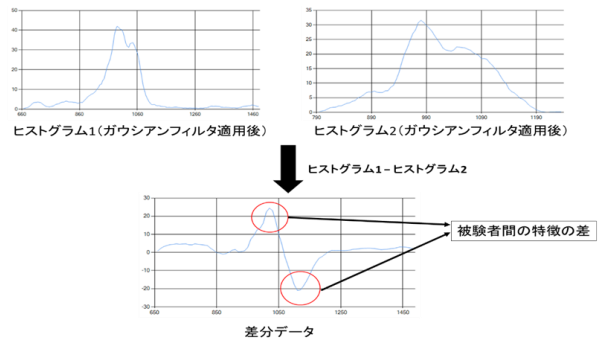


図 11 差分データ作成手順

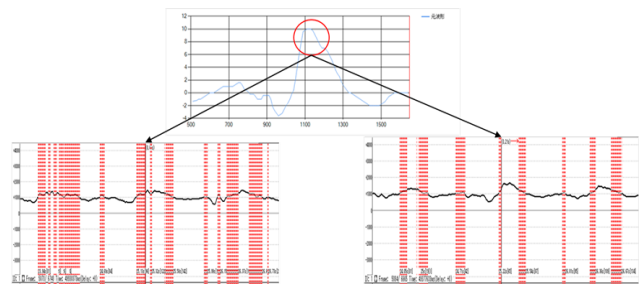


図 12 時系列波形にマーキングを施した例

4. 実験

4.1. 概要

岩手県盛岡市の伝統舞踊である「盛岡さんさ踊り」に着目し、実験を行った。実験内容を以下に示す。

- 実験環境
  - 2.3 A) 実験環境と同様
- 対象動作
  - 盛岡さんさ踊りの一連の動作
- 被験者
  - 岩手県立大学さんさ踊り実行委員会所属の 4 名 (全員がメンバーから上手いと思われる)
  - 被験者 M: 4 年生踊りパートリーダー
  - 被験者 K: 実行委員会代表
  - 被験者 O: 3 年生踊りパートリーダー
  - 被験者 N: 2 年生踊りパートリーダー
- 実験方法
  - 一連の動作を指導の単位を参考に 7 つの区間に分割し、区間ごとに提案手法を適用し、被験者同士の比較を行う。なお、本実験では、踊りパートのリーダーである被験者 M を基準として比較を行う。なお、ヒストグラムの階級幅は 10 に設定した。

4.2. 結果

被験者 K, 被験者 O, 被験者 N の区間ごとのヒストグラムからそれぞれ被験者 M の区間ごとのヒストグラムを引いて作成した差分データを図 13～15 に示す。



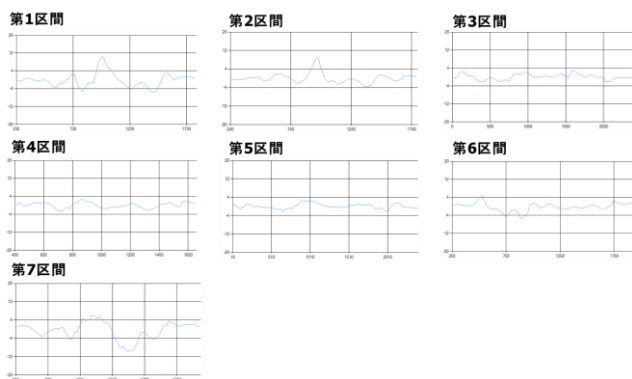


図13 被験者Kと被験者Mの差分(K-M)

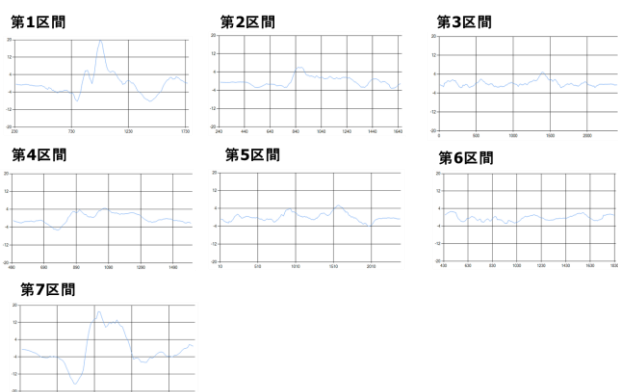


図14 被験者Oと被験者Mの差分(O-M)

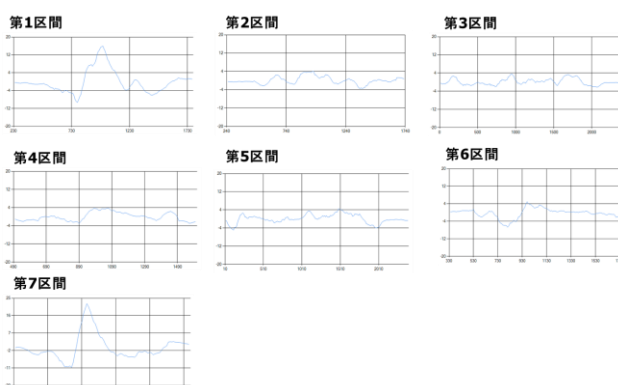


図15 被験者Nと被験者Mの差分(N-M)

7つの区間の中で、第2区間と第4区間、第3区間と第5区間はそれぞれ左右反転させた動作である。この4つの区間においては腰部の動きが少なく、個人の特徴が出づらいついと言われている。図13～15を見ても第2～5区間における極値の値は小さい。以下では、差が見えた第1, 6, 7区間に着目する。

- 第1区間

第1区間における適用結果を図16に示す。第1区間において1G付近で被験者K, M, Nの加速度の出現傾向が多いことがわかった(それぞれのヒストグラムから被験者Mのヒストグラムを引いているので極大値として表れる)。第1区間は腕を振りながらその場で足踏みをした後左右へ移動するといった動作である。1G付近の加速度にマーキ

ング処理を施し、該当部の波形と映像を合わせて観察したところ、被験者Mは他の被験者よりも腰を大きく使って左右へ移動していることが確認できた。いずれの差分データにおいても極大値の前後に極小値(被験者Mの方が頻出)が見られることから、被験者K, O, Nは腰をあまり使わずに移動するため1G付近に偏りが見られ、対して被験者Mは腰を大きく使って移動するために力の入りや緩みの時間が多くなりこのような結果になったと推測できる。被験者K, Mの第1区間における腰の動かし方のイメージを図17に示す。

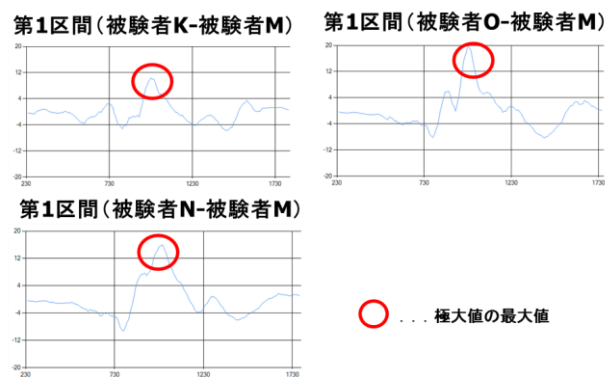


図16 第1区間適用結果



図17 第1区間の腰の動かし方のイメージ

- 第6区間

第6区間では、被験者K, Nに1G手前の部分に加速度が大きく表れていることがわかった(図18)。第6区間は前に踏み込みながら腰を落とし後、定位置に戻り腕を振り上げる動作である。該当部にマーキング処理を施し映像と確認すると、被験者K, Nは被験者M, Oと比べると踏み込みが深いことがわかった。被験者K, Nは踏み込みが深いため、定位置に戻るまでの腰を浮かせる(力が緩む)時間が長く、それがヒストグラムに影響していると推測した。被験者K, Mの踏み込みの違いを図19に示す。

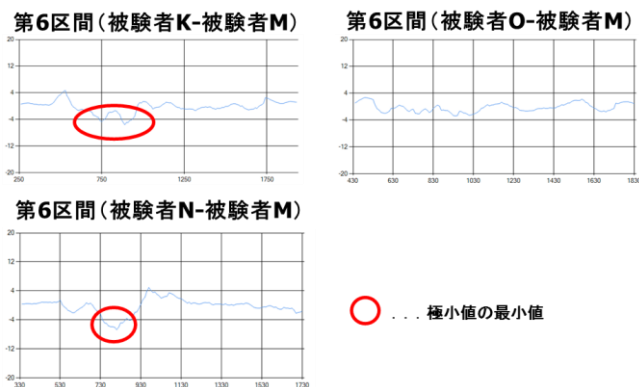


図 18 第 6 区間適用結果

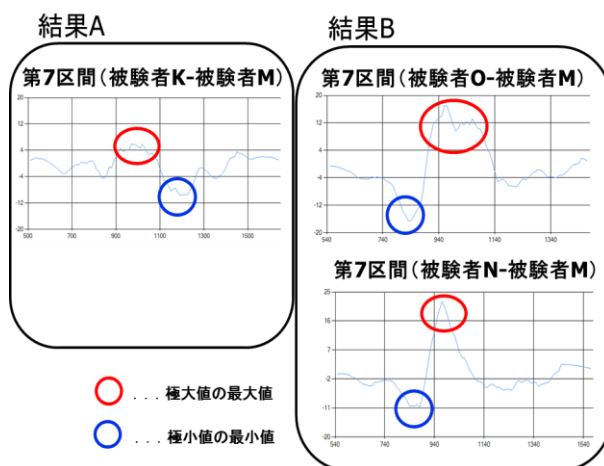


図 20 第 7 区間適用結果

被験者M

被験者K



踏み込みが浅い



踏み込みが深い

図 19 被験者 K, M の踏み込みの違い

• 第 7 区間

第 7 区間は腕を振り、腰を落としながら左右へ移動する動作である。この区間では結果 A と結果 B で極値の最大・最小値が異なる (図 20)。

結果 A, B 共に極大値の最大値は 1G 付近に表れている。しかし、極小値の最小値が結果 A では 1G の右側に表れているのに対し、結果 B では左側に表れている。結果 A, B に共通している 1G 付近の極大値の最大値であるが、結果 A と結果 B とでその大きさも異なっている。

結果 A の該当部にマーキング処理を施し、映像と確認したところ、被験者 M は腰を捻りながら落として移動しているのに対し、被験者 K は腰を勢いづけて落として移動していることが確認できた (図 21)。極小値の最小値の表れる場所とその後の加速度の大きな値にも極大値が見られることから、被験者 K は動きの緩急が強いということが推測できる。

また、結果 B においては第 1 区間と同様に被験者 M と比較して被験者 O, N があまり腰を動かさずに移動しているためこのような結果になったと推測した。

被験者M

被験者K



上げた腰を捻りながら落としている



上げた腰を勢いよく落としている

図 21 第 7 区間の腰部の落とし方の違い

4.3.考察

盛岡さんさ踊りを対象とした本実験においては、特に左右へ移動 (重心移動) する際の腰部の振る舞いの違いについて、ヒストグラムの差分によって具体的な違いが明らかになった。

本実験で明らかになった動作の違いは踊りの上手さではなく印象に関わる部分であり、踊り手の個性が反映されたものと考えられるため、本手法により踊りの質に関わる特徴抽出が行える可能性が示された。

5. おわりに

本稿では、踊り方の印象の違いの分析方法を提案した。印象に関わる動作の中でも被験者の特徴により評価が左右される踊りの質に着目し、腰部の合成加速度のヒストグラムを用いてその着目点の絞り込みを行うためのアルゴリズムを提案し、踊り手の特徴抽出を行った。提案手法では、加速度波形を見ただけではわからなかった踊り手の違いがヒストグラムに表れ、また、ヒストグラムの中から着目点を絞り込むことにより、違いに関わる動作の抽出とその要因の推定ができた。提案手法により、具体的な違いを見つけ出し、提示することが可能となることで、指導者の主観だけで教えるのではなく、指導者と学習者が情報を共有しながら学習できる可能性が示唆された。

今後の課題は、どのレベルまで提案手法が適用できるのかを検証することである。本稿では、鎌田ら [3] が用いたデータ群の一部を利用しており、各学年で最も上手いとき

れているメンバーのデータを集めており、動きも似ており、数値的にもある程度のデータの類似度は保証されている。数値的に違う被験者は、動き方が違うことも分かっており、今後、さまざまなレベルの被験者に適用し、提案手法の有効性を検証する必要がある。

## 謝辞

本研究を行うにあたり、データ取得・意見交換を行わせて頂いた岩手県立大学さんさ踊り実行委員会の皆様に感謝致します。また、舞踊の知識や指導者としての評価方法についての情報を提供して頂いた劇団わらび座講師清家久美子氏に深く感謝致します。なお、本研究の一部は、JSPS 科研費 17K01087 の助成による。

## 参考文献

- [1] 小井田康明, “地域伝統舞踊における上手い印象を与える動作要素の分析に関する研究”, 岩手県立大学ソフトウェア情報学部卒業論文, 2015.
- [2] 菊地直樹, 松田浩一, 小井田康明, “腰部の加速度を用いた地域伝統舞踊の動作分析に関する一検討”, 情報処理学会第 78 回全国大会, 4ZB-3, 2016.
- [3] 鎌田裕嗣, 松田浩一, 菊地直樹, “腰部の加速度情報を用いたさんさ踊りの「上手さ」の比較・評価に関する一検討”, 情報処理学会第 79 回全国大会, 1ZF-09, 2017.



# 技能構造化手法による新たな技能学習法の提案と学習効果

## Proposal of new skill learning method by the structured method for skill information and its learning effect

松浦 慶総<sup>1</sup> 高田 一<sup>1</sup>

Yoshifusa Matsuura<sup>1</sup>, Hajime Takada<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 横浜国立大学

<sup>1</sup> Yokohama National University

### 1. はじめに

最近、日本を代表するものづくり企業による不祥事が相次いで表面化している。特にこれまで確立してきた「メイドインジャパン」ブランドの根幹である、高品質性、高信頼性に関わる不正が長期にわたって行われていた事実が明らかになった。部材メーカーの事例では、契約時の基準に満たないが品質的に問題のないということで顧客の了承を得て納品するトクサイ（特別採用）という商慣習を該当契約以外で勝手に運用し、JIS規格の認証取り消しという事態が起きた。また、自動車メーカーでは国から移管されている完成車の最終検査業務において、無資格者に検査を行わせ、検査終了時の確認書類に有資格者の印鑑を押印させていた。これらの不正の多くは納期厳守や生産効率向上の圧力の下で、人員削減と業務増加が同時に行われたことが原因と言われている。また、経営陣の謝罪会見において「品質には問題ない」というコメントがあったが、品質に対する過剰な自信からコンプライアンスの欠如が生じたと考えられる。

これらの原因の根底にはものづくりに対する意識の低下があると推測する。現在の子ども達を取り巻く環境はものづくりの機会が大きく減少し、大学の工学系学科の学生でもプライベートで工具を用いた製作の経験は、殆どない状況である。したがって、学校の技術科教育を始め、ものづくりの導入教育が極めて重要であると考えられる。しかし、現在のものづくり技能に関する情報や研究は、多くが熟達者の技能を対象としたものであり、その身体性に関する情報は定性的、抽象的であるために、特に初級者にとっては理解が難しい。したがって、時間に制限がある学校での技術科教育では、ほとんどの生徒が上達する経験をする事が出来ない。その結果、ものづ

くり技能への理解を深めることが出来ないと考える。そこで本研究では、学習初期段階で初級者が理解できる情報を与える手法として、技能情報構造化手法（Structured Method for Skill Information）を提案し、一定程度の技能を効果的に習得できる新たな学習法の提示を行い、実技によりその学習効果の検証を行った。

### 2. 溶接技能の身体情報の現状

本研究対象である被覆アーク溶接は、基本的な手溶接の一種である。したがって、適切な溶接品質を確保するためには溶接技能の習得が必要となる。習得のための技能情報については、文献調査から約8割が溶接棒の角度、運棒動作、アーク長、アークの状態、溶融池の状態といった加工時の工具や母材の状況に関する情報で、残り2割が溶接ホルダの持ち方や上腕から上半身の姿勢に関する情報である。情報がこのように偏っている原因の一つとして、強力なアーク光が発生している特殊な環境であるため、作業中に作業姿勢等を直接視認することが困難であることが考えられる。もう一つは、ものづくりの目的が設計通りの加工を精度良く行うことであるので、品質に直接影響を及ぼす工具・母材に関する情報が主になっていると考えられる。

身体に関する溶接技能の情報については、例えばホルダを保持する手に関しては「溶接棒を溶接棒ホルダに平行、手首と直線になるように保持する」文献[1]より引用)、「親指と人差指の付け根をハンドルの上部に向け、レバーは親指の横にして、ホルダと手首と腕がほぼ直線になるように持つ。」(文献[2]より引用)、上腕および上半身に関しては、「両肩を溶接線に平行にし、やや前かがみになる。ホルダをもった腕は、約90°に曲げ、ホルダと手首と腕の線を平行にして、ひじを軽く引っ張るようにする。溶接

開始点に対して右側（溶接の進んでいく側）に位置し、上半身を左寄りにして両肩を溶接線に並行となる基本姿勢をとる。」（文献[2]より引用）、「腕の肘を体から離してゆったりかまえる。肘が脇腹にさわらない程度に下げ、自由に運動できるようにすることが大切である。」（文献[1]より引用）など姿勢に関する記述がほとんどである。なお、一部で「溶接棒の消耗速度に合わせてホルダの持つ手の位置を下げ」（文献[1]より引用）、「棒を右へ進める動作は腕だけで進めるのではなく、左寄りに構えた上半身も右へ平行移動し、上半身等での両方で進める必要がある。よく、ビードが後半で右手前に曲がることがあるが、これは上半身の右への移動を忘れたのが原因であることが多い。アーク長を一定に保つため棒の消耗に併せてホルダを下げる動作は、腕を傾けて下げるのではなく、ホルダと腕の線を母材面と平行に保ったまま腕全体を下げるようにすると良い。」（文献[2]より引用）というアークの安定性に対する溶接棒のコントロールと身体動作に関する情報が記載されている。前者の姿勢情報はどのように溶接棒をコントロールすればよいか初級者に理解できず、実際にはOJTや初級者自身が試行錯誤する必要がある。後者の身体動作に関しては、溶接棒のコントロールに有用であるが、他の情報と並列に記載されているため、初級者には習熟過程と情報との関係性が分からない。したがって、やはり試行錯誤して情報の重要性を理解しなければならないため、習得に時間がかかり、初級者のモチベーション維持が難しい。

### 3. 技能情報構造化手法によるアーク溶接技能情報

これまで著者らが提案した技能情報構造化手法は、品質工学手法の一つである特性要因図を応用して技能情報の各要因の関係を視覚化している。特性を技能品質とし、品質に影響を与える項目を主要因として明示する。ここで、技能品質へ影響を及ぼす直接要因から関係性から間接要因、身体要因の順で記載する。また、道具を制御するために身体をどのようにコントロールすればよいかという意識として、重心や力覚、視線といった体性感覚要因については直接要因に直接影響するため極めて重要である。しかし、体性感覚情報は実施者の主観的、定性的な表現であることがほとんどであるため、従来の技能研究では取り扱われないことが多かった。本研究では、体性感覚情報が初級者に対して技能動作のイメージを想起する重要な情報と位置づけ、他の要因との関係性を視覚化している（図1）。また、この視覚によって、熟達者や教授者の気付きを創出し、新たな学

習情報の提供が可能となると考える。

今回の被覆アーク溶接においては、特性を溶接技能品質とし、溶接品質に直接影響を及ぼす直接要因をビードとする。ビードの幅、余盛と言われるビードの高さ、ビード形状、ビードと母材の境界状況が外的評価項目として溶接品質を決定している。そのビード形成に影響を及ぼす間接要因を溶融池、アーク、溶接棒とする。間接要因のうち溶融池はその状況がビードを決定するために第一要因とし、アークを第二要因、溶接棒を第三要因とする。ここで、溶融池とアークに関しては直接計測することが出来ないため、文献調査や熟達者のインタビューにおいても評価が定性的表現のみである。溶接棒に関しては、母材との位置関係より定量表現で行われている。本研究の構造化手法により各要因の関係性が明確になり、溶接棒の位置を溶融池、アークを適正な状態にあるように制御することが重要であることがわかる。

次に溶接棒を適切に制御するための要因として、身体に関する要因を考慮する必要がある。しかし、身体各部の情報は文献、インタビューともに非常に少なく、さらに身体部位同士の関係性や体性感覚の身体動作を習得する上で重要な情報はほとんどない。そこで、初期構造としてホルダ保持手から体幹一頭部一足部までで構造化した図をもとに、インタビューおよび動作解析を行い、初級者が効果的に習得可能な新たな学習法の提案を行う。

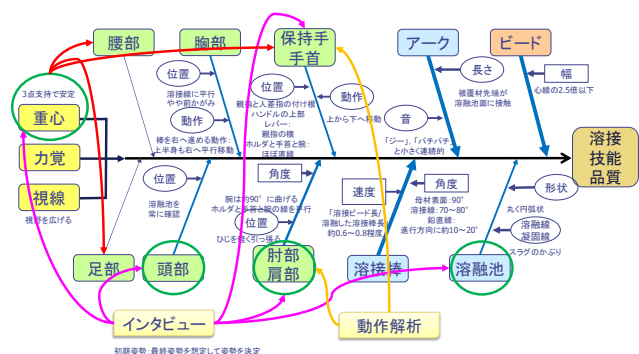


図1 アーク溶接技能特性要因図

### 4. 初級者に対応する学習法の提案

3章の技能情報構造化手法によるアーク溶接技能の構造化により、アークの安定性向上にはホルダ保持手の制御が極めて重要であることがわかった。著者の既往研究で熟達者のホルダ動作を解析した結果から、「ホルダ保持手を下向き方向に動か」し、その動作をさらに安定するために、上腕、肩を「ホルダを保持するように支えるように力かける」、アーク、溶融池状態を常時楽人するために頭部は「常に溶融

池が確認できる位置」に制御するという、新たな初心者用学習法を作成した。

具体的には、今回の実験で対象としたストリング運棒法において、溶接棒と溶接面の角度を安定させて、かつ直線的に移動させるには、保持手を進行方向には動かさず、ほぼ「鉛直下向き」に移動させる必要がある。その動作を実現するには、ホルダと溶接棒の荷重を利用し、保持手はホルダを保持することに注意し、鉛直方向に移動させることが重要である。これは、従来の指導方法には無い情報である。この保持手の運動を溶接棒が短くなるまでスムーズに行うために、次の学習情報をまず初めに提示する。

- ① ストリング運棒法では、溶接棒を進行方向に 10～20 度傾けながら溶融して短くなることで、進行方向に溶接できる。したがって、ホルダを支持している手には、ホルダを支える意識で力を入れ、重力方向に一定速度で下げる。
- ② 決して、進行方向にホルダを移動しようと意識しない。
- ③ 溶接棒と溶接線、ホルダの進行方向で構成される三角形が相似形で小さくなるイメージを持つ(図 2)。
- ④ 予め溶接棒長さ最短時の位置で余計な力がかからない姿勢になるように、肘・肩部の位置と角度を調節する。
- ⑤ 頭部は保持手、肘・肩部の動きを障害せず、さらに溶融池が常に視認できる位置にする。



図 2 初級者指導内容  
(ホルダの操作と操作イメージ)

## 5. 学習法による比較実験

### 5. 1 実験概要

4 章で作成した新たな初級者学習法の有効性を調べるため、従来指導法との比較実験を実施した。また、習熟効果の影響を考慮するために、従来指導をせずに新指導法から導入して実験を行った。新指導

法では学習結果からの気づきがあれば次の試行の情報として学習者に与え、学習効果の有無を検証した。

まず溶接棒の角度や運棒法を中心とした従来指導法で 5 回実習した後、作成した新指導法により実習をして溶接ビード結果を比較検討した。被験者は、大学 2 年次に工場実習で 3 時間溶接実習を経験した 4 名の大学院生とし、2 名(被験者 A, B)は従来指導法を 5 試行、新指導法を 5 試行、情報フィードバックによる指導を 5 試行、2 名(被験者 C, D)は新指導法を 5 試行、情報フィードバックによる指導を 5 試行×2 日間をそれぞれ 3 日間、合計 15 試行を行った。運棒法は下向きストリング運棒法とし、母材を 6mm 厚の SS400、軟鋼用溶接棒(棒径 3.2mm、棒長 350mm)を用いた。溶接線は、長さ 110mm、幅 15mm の長方形を母材に記し、溶接するように指示した。

### 5. 2 実験結果

#### 5. 2. 1 従来指導法

従来指導法のビード形状を以下に示す。被験者 A, B の 1 試行目と 5 試行目を見てみると、A では溶接開始付近のビード形状は多少揃っているが、後半以降は幅、高さともに不揃いで、スパッタも多数生じ、溶け込みが不十分である(図 3, 4)。B に関しては、1 試行目では溶接開始付近から大きく湾曲し、幅が不均一である。5 試行目では幅は揃ってきているが、高さのばらつきが目立ち、また余盛が不十分であるため、十分母材が溶融していない(図 5, 6)。

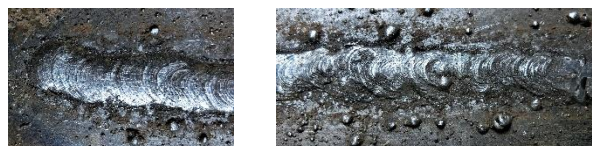


図 3 従来指導法(被験者 A: 1 試行目)



図 4 従来指導法(被験者 A: 5 試行目)



図 5 従来指導法(被験者 B: 1 試行目)



図 6 従来指導法(被験者 B: 5 試行目)



### 5. 2. 2 新指導法 (1回目)

被験者 A, B は従来指導法 5 試行の後, 新指導法による試行を行った。特に被験者 A は新指導法を行った直後で, ビードの幅, 直線性, 余盛の安定性が大幅に向上した (図 7)。被験者 C, D はこの試行が初めてである。被験者 C については, 前半部分で大きく乱れているが, タッピング (アーク発生) 時が慣れていないために, 運棒が不安定になったと思われる (図 9)。2 試行目ではビード状態が大幅に向上している (図 10)。被験者 D の 1 試行目では, ビードが波打つような形状になっている。これは母材と溶接棒先端の距離が一定していないことが原因であり, 溶接棒の消耗に対するホルダを下げる動作が上手く連動していない (図 11)。3 試行目では既に改善が見られる (図 12)。



図 7 新指導法 1 回目 (被験者 A : 1 試行目)



図 8 新指導法 1 回目 (被験者 B : 1 試行目)



図 9 新指導法 1 回目 (被験者 C : 1 試行目)



図 10 新指導法 1 回目 (被験者 C : 2 試行目)

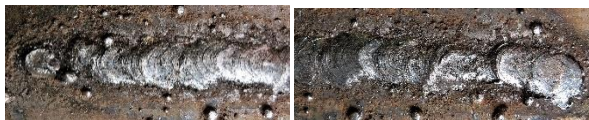


図 11 新指導法 1 回目 (被験者 D : 1 試行目)



図 12 新指導法 1 回目 (被験者 D : 3 試行目)

### 5. 2. 3 新指導法 (2回目)

新指導法による 2 回目の実験では, 1 回目の実験結果から, 十分な溶け込みを実現するためと, 余盛の安定性を向上するためにアーク長を短くするよう

に溶接棒をコントロールすることを意識するように情報を付与した。具体的には, 「母材に溶接棒先端が接触する程度までに溶接棒を降ろしていく」という指示を行った (図 13~16)。

被験者 D をも除いて, ビード形状の向上が見られた。被験者 D は 1 回目実験から 6 日経過していたため, 1 試行目はアーク長に対する溶接棒のコントロールが上手く行かなかったが, 2 試行目以降は安定したビードを作ることが出来た。

このことから, ビードの安定性と溶接棒のコントロール, 身体部位の意識の仕方の関係性を明確に説明し, 絞り込んだ情報を提示することが初級者の学習支援に重要であることがわかった。



図 13 新指導法 2 回目 (被験者 A : 1 試行目)

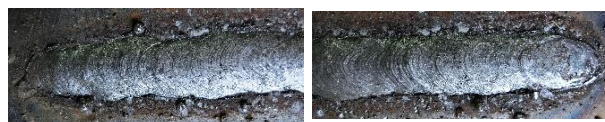


図 14 新指導法 2 回目 (被験者 B : 1 試行目)



図 15 新指導法 2 回目 (被験者 C : 1 試行目)



図 16 新指導法 2 回目 (被験者 D : 1 試行目)

### 5. 3 突合せ溶接実験

これまでは, 大学での実習で主に使われている平板を用いたストリング運棒による溶接を実施していた。しかし, 溶接資格や現場で行われる溶接では, 平板を用いることはなく, 2 枚の母材を平面につなぎ合わせる溶接である「突き合わせ溶接」や, 直角に溶接する「すみ肉溶接」の技能が必要とされる。そこで, 平板での溶接学習である程度の技能を習得した状態で突合せ溶接を実施し, 学習効果を確認する。

今回は被験者 C を除く 3 名で 3 試行ずつ行った。突合せ溶接に用いた板は 6mm 厚の開先加工 (60° 切削) した SS400 で, 3mm の間隔をあけて裏板を当て仮留めした試験板である。溶接はストリング運棒による 1 パス加工を指示した。

3 試行目の溶接結果を以下に掲載した (図 17~

19). 開始直後(図中○)は比較的正常なビードを得られたが、その後は一方の板の開先面にビードが形成されてしまった。これは全ての被験者、全ての試行で見られ、平板での技能以外の新たな情報が必要であると推測された。

一方の板の開先面にビードが形成されていることから、溶接線に対して溶接棒は平行になっているが、母材面に対しては垂直になっていないことが考えられた。これまではホルダを鉛直下向き方向に動かすよう意識させていたが、それだけだと肘や肩を中心に弧の動きになってしまう。結果として、溶接棒が母材面に対して傾くため、開先部分に正常なビードを形成できないと考えられる。同様の事象はすみ肉溶接でも起こると予想される。この対策として、上腕を下げるると同時に手首を返して母材面との垂直を保持する動作をする、肩から肘を前方に押し出す等の方法が考えられる。

以上のことから、一般に大学等での平板による溶接実習で得られる技能情報は限定的であり、平板での練習で習得した技能では、実際の溶接現場では対応が難しい。従来の指導法では、これを段階的に習得するとして対応するが、溶接技能の教育目的の観点からは、突合せ・すみ肉溶接の習得が目的であるので、当初よりこちらの技能を習得できる学習法を提案する必要がある。



図 17 突合せ溶接(被験者 A:3 試行目)



図 18 突合せ溶接(被験者 B:3 試行目)



図 19 突合せ溶接(被験者 D:3 試行目)

## 5. 4 インタビューによる技能情報の理解と気づき

それぞれの実験終了後にインタビューを行った。従来指導法による試行後では、溶接棒を一定速度で送る、母材と溶接棒との距離を一定にすることを意識している。また、被験者 A は母材と溶接棒との距離が短くなる時に上半身を動かすことで対応しようとした。また、溶接時に上腕の疲労が生じるので、実験後半では脇を締めるように意識をしたという、身体的意識を持っていた。

新指導法による試行後では、ホルダを鉛直下向き方向に移動するとの指導に対して、熔融速さの理解が、従来指導法では理解できなかったのが理解しやすくなり、溶接棒が溶け込む感覚を掴むことが出来たと複数の被験者からコメントされた。また、ホルダ操作が従来は溶接線方向に移動する意識があったため、上腕と肩に疲労が出やすかったのが、動作がスムーズになり楽になったとある。

アーク長の指示を与えた 2 回目の実験後には、ビードの状況に注意を向け、溶け込み状態やビード幅、余盛に注意を向けている。さらに、ビード品質を向上するために、自らアーク長や溶接棒の移動速度を変更したり、上腕や脇部の状態をモニタリングしてスムーズなホルダ操作を行えるように工夫したりする等、インタビューで得られる情報量も多くなった。今後はインタビューで得られた情報と身体動作、筋活動、ビード品質の各結果との関係性を解析し、新たな技能情報の抽出を行う予定である。

## 5. まとめ

本研究では、学習初期段階で初級者が理解できる情報を与える手法として、技能情報構造化手法を提案し、新たな学習法の学習効果の検証を行った。実験の結果、初級者が溶接技能を理解しやすくなり、学習効果も向上することが可能となった。

今回得られた突合せ溶接の技能情報を用い、学習効果向上にどの程度寄与するかを検証し、初級者が効果的に実用性のある技能を習得できる学習支援システムの構築を目指す。

## 謝辞

本研究は JSPS 科研費 15K01019 の助成を受けたものである。

## 参考文献

- [1] 小林 一清: 機械工学入門シリーズ溶接技術入門 (第 2 版), 理工学社, (1999).
- [2] 日本溶接協会: 溶接実務入門 ー手溶接からロボットまでー, 産報出版, (2008).



# 陸上競技におけるスキル学習の仮説生成型研究

## －身体・生活意識・ツールが共創する「野生の実践」－

Hypothesis-Generative Research in Skill Learning in Track and Field  
-“Savage Practice” as Co-creation of Body Movements, Questioning in Life, and  
Computational Tools-

堀内隆仁<sup>1</sup> 諏訪正樹<sup>2</sup>

Takahito Horiuchi<sup>1</sup>, Masaki Suwa<sup>2</sup>

<sup>1</sup>慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科

<sup>1</sup>Graduate School of Media and Governance, Keio University

<sup>2</sup>慶應義塾大学環境情報学部

<sup>2</sup> Faculty of Environment and Information Studies, Keio University

**Abstract:** Generally, skill learning is a design, as devising courses of action aimed at changing existing situation into preferred ones. In this paper, we will raise a hypothesis “Athletes should do Savage practice.”, from first author’s learning practice in track and field. Savage practice means that an athlete do Bricolage in one’s body movements and the physical environment in his or her real life situations. This research is a Hypothesis-Generative Research which is a suitable methodology for Clinical Knowledge.

## 1. はじめに

昨シーズン、ついに「10秒の壁」が破られた。男子100mにおいて、桐生祥秀選手（東洋大）が日本人史上初の9秒台、9.98(+1.8)をマークした。日本短距離界は、10.00(+0.2)の山縣亮太選手（SEIKO）や、若干18歳で世界選手権200m入賞を果たしたサニーブ라운・A. ハキーム選手など、ランキング6位までが10.10を切る<sup>1</sup>群雄割拠の時代である。他にも、男子円盤投においては、その「最古の日本記録」を、堤雄司選手（群馬総合ガード）が2度に渡り更新した。

2020年東京オリンピックを控え、陸上競技は間違いなく過去最高のピークへと向かっている。本研究では、こうした陸上競技の激動期において、「学び」という側面から、陸上競技研究の在り方を問い直す。

### 1.1. 陸上競技とその研究

陸上競技は、狩猟生活にルーツを持つ。ゆえに走・跳・投の基本的運動を競う。次第に栽培・飼育という新しい労働様式が生まれると同時に、これらの基

本的運動は「労働」から「スポーツ」という新たな地位を獲得した[1]。時が流れ、近代陸上競技では、個人スポーツとしてのフォーマットが高度に整理されている。抽象空間を模した陸上競技場における、客観的な「公認記録[2]」を評価する。

陸上競技研究の目的は、選手のパフォーマンスアップに貢献することである[3]。陸上競技研究領域は、スポーツバイオメカニクス・スポーツ工学を中心とし、その他運動生理学・スポーツ心理学・記録のデータサイエンス等によって構成される。それぞれについて詳細に述べないが、強調すべきは、「近代科学」の潮流にある事実である。すなわち、解剖学的身体・動作・心理的側面についての「普遍的な知見」を記述する。前段落で述べた、陸上競技の洗練された競技性との相性が良いからかもしれない。

### 1.2. 現場におけるスキルの学びは、デザイン行為

しかし、現場でスキルを学ぶアスリート(または指導者)にとって、上記の知見を有効活用するのは容易ではない。それぞれの固有な身体と平均化された知

<sup>1</sup> 陸上競技マガジン記録部 HP (<https://rikumaga.com/top>) から、各種目ランキングが閲覧可能（会員登録必須）。



見がマッチしなかったり、示された変数がアスリート本人にとって重要と思えるか等によってである。少なくとも、前節のような「情報」(研究の知見)を、自分自身にとっての「意味」へと昇華するプロセスが必要だ。学びは、「正しい情報をインプットして、実行すればよい」という単線的モデルでは語り得ない。実世界では複雑な身体-環境インタラクションが必然的に生起するため、モノゴトは想定どおりに運ばないのだ。そう考えれば、現場と研究に断絶が存在するのは明らかである。筑波大学陸上競技研究室教授であり、同大学陸上競技部コーチも兼ねる大山は、現場と研究の乖離を憂いている[4]。

自らの身体感覚や思考と対話しながら試行錯誤するスキルの学びは、デザイン行為である。1978年にノーベル経済学賞を受賞したハーバート・A.サイモンは、デザイン行為を以下のように定義する。

“Everyone designs who devises courses of action aimed at changing existing situation into preferred ones.” [5]

また、中島・藤井・諏訪は、デザイン行為の一般形として「問い・表す」構成的サイクルで表現した「FNS ダイアグラム[6]」を提唱する (Figure 1)。

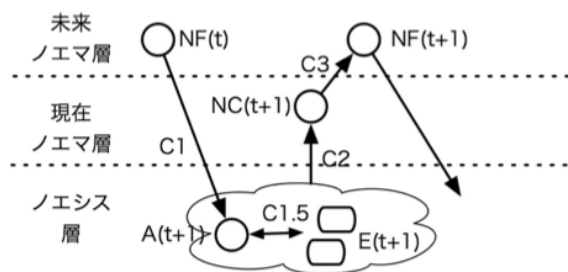


Figure 1 : FNS ダイアグラム[6]

図式を説明する。ノエマ・ノエシスとは、現象学における意識と現実世界である。目的 (NF(t)) に基づき、実際にやってみて (C1)、現実世界で身体-環境のインタラクションが起こる (C1.5)。ここから現状を認識し (C2)、新たな目的 (NF(t+1)) を発想し、また実際にやってみて・・・を繰り返す。C1.5のインタラクションでは、予期せぬことが起こり、結果としてNF(t)とNF(t+1)は異なる。

以上のように、実践者にとって「より好ましい」状況を目指して、当座の目的を更新しながらアクシ

ョンし続けるプロセスは、近代科学では捕捉不可能である。陸上競技研究は、「トップダウンな方法論ありきの知」ではなく、現場での学びにより接近した「新たな知」を示すべきだと言えよう。

## 2. 臨床の知としての仮説生成型研究

### 2.1. 「臨床の知」vs「科学の知」

では、デザイン行為としての学びは、いかに知として記述すべきか。哲学者・中村雄二郎は、我々人間の現実・現場で起こっているものごとを捉え・記述するために、「科学の知」とは異なる「臨床の知」を提唱する[7]。[7]によれば、科学<sup>2</sup>の知が普遍性・客観性・論理性を三大原理とするが、臨床の知ではそのそれぞれに対して、コスモロジー (固有世界)・シンボリズム (事物の多様性)・パフォーマンス (身体性をそなえた行為)の三つが要請される。これらは、近代科学の方法論では漏らしている。現場においては、臨床の知が近代科学の知を包含する。

### 2.2. 仮説検証型研究と仮説生成型研究

研究方法論は、知としての原理に基づくものでなければならない。すなわち、臨床の知としての方法論は、近代科学のそれと異なる。臨床の知がとるべき方法論について、[8]でなされる議論は、有効である。[8]では、個別具体的な体験をする「フィールド」と普遍的な言明である「コンセプト」の中間領域としての「ラボラトリー」の設計が、2種類に整理される。仮説検証型と、視点呈示型である。前者はモデリングによるシミュレーションによって、現実に対する適合度から現実を理解する。後者は、プロトタイプによるジェネレーションによって、現実に先行して、「もっともらしい可能性の範囲」を生成する環境として設計される。前者は、近代科学がとる方法論である。後者の視点呈示型ラボラトリーは、臨床の知にふさわしい方法論だと考えられる。

よって、本研究では後者の方法論を採用する。従来の仮説検証型研究では所与 (研究の始点)であった仮説が、研究の目的となる。これを、仮説生成型研究と呼ぶ。以下に仮説生成型研究の概要を図示した (Figure 2)。

<sup>2</sup> ここでいう科学とは、Scienceであり、近代科学のことである。

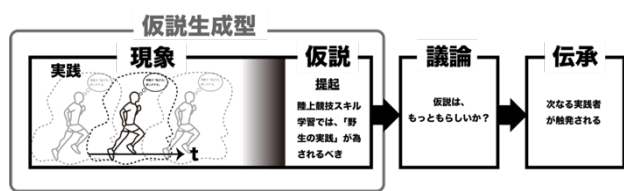


Figure 2 : 仮説生成型研究の流れ

図中のグラデーションは、現象-仮説間のシームレスな関係を意図している。現象・仮説を生成し、アウトプット（論文・作品等）することで仮説を提起する局面までが研究となる。

生成・提起した仮説は検証すべき/検証可能なのか？一般に、デザイン行為は検証不可能である。だからこそ、仮説生成型研究で得られた仮説は、議論された上で次なる実践者へと伝承されるシナリオが重要であると著者らは考えている。仮説のもっともらしさという指標は、そのために存在する。

### 2.3. 野生とは何か～本研究の目的～

本研究の目的は、「陸上競技のスキルの学びが、『野生』であるべき」という仮説を生成・提起することである。

「野生」とは、文化人類学者レヴィ=ストロースが提唱した「野生の思考」[9]に由来する。本文の骨子をごく簡潔に述べる。近代化が進む中、世界の「未開民族」は、文明に取り残された野蛮な存在とされてきた。しかし彼らの文化は、象徴欲・知識欲に溢れ、多様な自然現象（人間を含む生物自然種など）や社会文化（食物禁忌や婚姻規制などに関連する社会集団）を互いに鏡として「隠喩的に」映し合うことでつくられた、合理的なものであった。レヴィ=ストロースはこの思考様式を、近代科学の「栽培的思考」と対置して「野生の思考」と呼ぶ。隠喩的とは、全体から部分へと置換する換喩的（近代科学は、結果を原因に置換する）とは真逆の、部分を寄せ集めて全体をつくり出す方向性である。

本文では、現代の我々にも残される野生の思考として、「ブリコラージュ (Bricolage)」という概念を挙げている。ブリコラージュは、ありあわせの道具・材料から、自分の手でものをつくることである。その資材集合は、雑多でまとまりがなく、たまたま保存されていたものから成る。目下の目的に即して、それらに新たに意味づけしながら、ものをつくる。

## 3. 物語としての研究報告

### 3.1. 現象-仮説の糊部分としての物語

0 で述べた仮説の生成・提起という目的のために、研究報告が成すべき形態を考える。現象生成の部分は、「物語」として報告すべきだと、著者らは考えている。統計的真理による説得（検証）は不可能である。だからこそ、臨床の知としての記述を満たした物語によって、提起する仮説に説得力を与える。いわば、現象-仮説間を接続する「糊部分」が、物語だ。

第一著者・堀内は、陸上十種競技の現役選手である。十種競技とは、2 日間に渡って走・跳・投の計十種目の総合力を競う種目である。本研究では、堀内自らが実践者として、現象・仮説生成に試みた。3.2～3.4 にて物語を紹介し、4 章にて仮説を提起する。

### 3.2. 第一著者の物語の概観

本稿は、第一著者の修士論文[10]の短縮版である。修士論文は全 102 ページ (A4, 10.5pt) あり、うち 70 ページは現象生成が物語られる。紙面制約上、本稿で全てを掲載するのは到底不可能であるが、なるべく質を失わないように、短縮して物語ってみたい。

まず、物語の概観を以下に示す (Figure 3)。

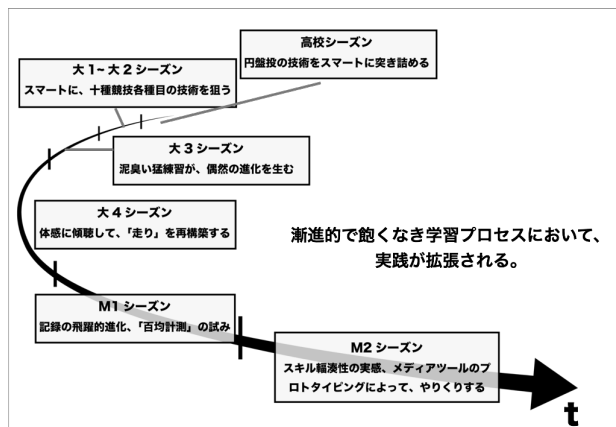


Figure 3 : 第一著者の物語概観

Figure 3 では、堀内がスキルを学ぶのに、一つ一つの細かい試行錯誤のみならず、年スケールでは取り組みの姿勢が変化していることを表現した。

大4シーズンより、堀内は「からだメタ認知[11]」を練習日誌的に駆使し、学びの過程を記述した。からだメタ認知とは、自らの曖昧な体感や思考と、それらの生起に係る/それらから想起されるモノゴトを積極的に言語表象（記述）することである。知覚・思考・行為のカップリングで成立する人間の

認知は、言語化によって変容する。すなわち、メタ認知によって認知そのものを変化させ、自らの「学び」を促すことを第一義とする<sup>3</sup>認知行為である。からだメタ認知は、過程を言語記述として残しながら、同時に自らを進化させる努力ともなるという、両義性がある。物語の元となった、堀内のからだメタ認知記述の規模を以下に示す。

- 期間：2015/4~2017/11（大4～M2）
- 総文字数：405,682
- 記述日数：411

以下に、堀内のからだメタ認知記述の例を掲載する。

インプットは「腰が後ろから押されている」ではまだまだ甘い。これではきょうの最初のような腰の上下位置が低い走りになり、脚が流れる走りを生み出す可能性がある。「ケツが下後ろから押し上げられている（ただし『押し』が8割で『上げ』は2割くらいか）」みたいな体感だったか。腰でもなくケツだ。もっと大げさに重心を前に出して、前捌きを実現することにより、重心の位置も高く保って走るにはこれがいい。（2015年9月2日の記述より抜粋）

以上のように、ある種マニアックな、「自分のため」の記述を続けた。大4シーズンであれば、不得意であった「走り」を根本から改良することに1シーズンを費やした。自らの身体感覚に傾聴しながら、漸進的なプロセスを辿った。

3.3・3.4では、物語のうち、仮説提起に直結する顕著な部分をピックアップする。

### 3.3. 身体スキル輻湊性の実感～「立つ、歩く」を究める～

M1シーズン終了直後の2016年11月、堀内はシーズンを通してごまかし続けた「右膝の怪我<sup>4</sup>」と向き合った。トレーナーにも相談をしながら、なぜずっと治らないのかを考えた。多様なリハビリをする中で、怪我の原因を実感して突き止めた。「立った状態から、大股で一歩前に踏み込む」というリハビリメニューにおいて、左脚と比較して右脚の踏み込みが不自然なことに気づく。接地を怖がるような反射

的な動作が出てしまっていたのだ。それに対するトレーナーのアドバイスもあり、大きな気づきを得た。以下に該当する記述を掲載する。

左は接地と同時に乗り込みが完了しているのに右はできない。これは、膝が出ることを怖がってこうなっているというのはわかってはいたが、それに対する対処として、「下腿が前傾している状態をつくってから離地するというのが重要ということがわかった。これはすなわち、「トープアップ」なのである！これができていると、自然に乗り込める。

（2016年11月12日の記述より抜粋）

そもそも右膝の怪我を長引かせた原因は、「前接地<sup>5</sup>」してしまう動作にあった。過剰な前接地は、進行方向に対して「ブレーキ」する成分を生み出すのは、力学的に明らかである。加えて、こうした非効率な動作は、解剖学的身体にも悪影響を与える。前接地すると、接地中に重心が接地位置を追い越す局面において、膝関節が大きく屈伸運動する。これが、膝関節の屈伸を制御する筋群（主に大腿四頭筋<sup>6</sup>）に過剰な負担を与え、積み重なると、膝蓋骨（膝頭）と脛骨（すね）の間に位置する膝蓋靭帯の損傷をも招く。

以上を前提に、記述下線部で言及している内容を解説する。言及しているリハビリメニューにおいても、前接地により、痛みを伴う「前腿優位」な動作をする癖が出ていた。しかし、立った状態から右足が地面から離地する局面において、下腿前傾状態になっていれば、空中でもつま先が上がって膝下が振り出された状態にならず、結果的により重心真下に近い位置で接地できることに気づいたのだ。

これを皮切りに、立つ・歩くという何気ない日常生活においても、「動作のクオリティ」が存在することを強く意識するようになる。しかも、それらが十種競技の競技スキルに少なからず影響を与えていることに実感せざるを得なかったのだ。堀内は、これを身体スキル輻湊性と命名した。次ページ Figure 4 がそれを象徴する図である。

<sup>3</sup>自らの「思考のみ」を「モニタリング」することが目的の、従来心理学におけるメタ認知とは異なることに注意されたい。

<sup>4</sup> 膝蓋靭帯炎である。

<sup>5</sup> 前接地とは、走りをはじめとする様々な運動において、身体重心よりも前方で接地することを指す

<sup>6</sup> 前腿の筋肉。

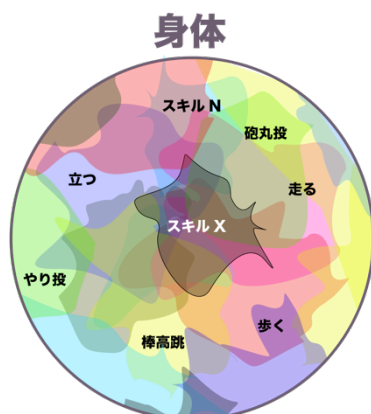


Figure 4 : 身体スキル輻湊性

あらゆるスキルは、生活の動作をも含めて、実践者の身体に未分化状態で輻湊する。図中のスキル X とは、輻湊しているがゆえに、オリジナルな分節化によって、新たなスキルを命名することも可能であることを示す。こうして堀内は、スキル輻湊性を前提に、「立つ・歩く」を身体スキルとして捉え直し、様々な着眼点を見出してきた<sup>7</sup>。実際に競技の動作・感覚にも変化を与えた。スキルの転移 (transfer) [12] は、これと関係が深いと考えられる。転移可能性を最大限に認め、有効活用していると言えよう。[13]では、具体的な着眼点と、競技に表れた変化について詳細に述べている。たとえば「歩き」であれば、「正しく立った状態から、踵で踏むことによる前回転のモーメントで、軽く倒れこむ」や「足裏が地面から剥がれる感覚」等である。

M2 シーズンに入る直前、右足舟状骨の疲労骨折を負い、そこからは試合に激しい練習をすることが不可能であったが、すでに「立つ、歩く」が練習の一部となっていたのだ。

### 3.4. メディアツールのプロトタイプング

Figure 1 の説明において、学びにおける実世界は身体-環境のインタラクションであると述べた。大4シーズンでは「身体」のみに対して直接はたらきかけていたが、M1・M2シーズンでは、「環境」にまで拡がった。つまり、進化につながる環境設計として「ツール」を自らつくる実践を行った。以下に、その例を箇条書きで掲載する。

- M1 シーズン
  - ・ 身体部位からみた映像

<sup>7</sup> すなわち、「立つ、歩く」が十種競技の練習になるということである。

- M2 シーズン
  - ・ 加速度可聴化ベルト
  - ・ 鏡型メディアツール “Fusion Mirror”
  - ・ DIY モーションキャプチャ

近年、デザイン・ものづくりの現場では、DIY (Do It Yourself) の文化的土壌が出来つつある。メディアツールである Fusion Mirror と DIY モーションキャプチャは、ともに Processing<sup>8</sup>で記述したが、Processing もその土壌で生まれた。本節では、DIY モーションキャプチャについて述べる。

上記のようなメディアツールの可能性をダンス創作において実践的に追究した RAM プロジェクト [14] にインスパイアされ。通常ハイコストなモーションキャプチャシステムを、自ら製作することはできないだろうか？ということから始まった。色差分の動体検知アルゴリズムによりマーカを認識させ、それを元に画像処理エフェクトを加える。Fusion Mirror が web カメラから入力で、モニタにリアルタイム出力するのに対し、本ツールでは、それ以前に撮影した動画を読み込み、出力する。

ソフト面のみではなく、ハード (物理環境) 面も含めてツールである。発泡スチロール球 (φ3cm) を非透明性マジックで塗ることでマーカとし、黒い布 (300cm\*110cm) をバックスクリーンとして用意した。正しくマーカが検知されるための工夫である。

Figure 5 のようにセッティングし、「歩き」を撮影した。被験者は堀内と、被験者 A (野球歴 14 年) である。撮影した映像を Figure 6 に示した。これに画像処理を加えることで得られた映像例が Figure 7・Figure 8 である。

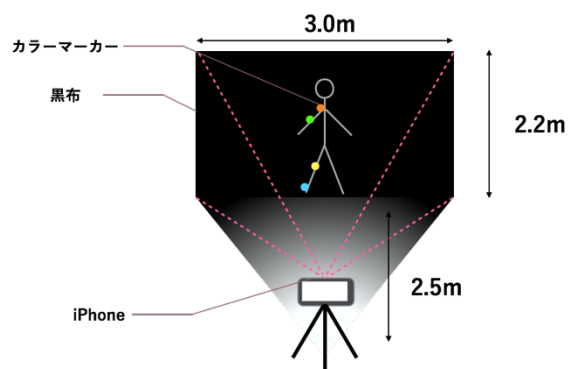


Figure 5 : 物理環境設定  
(マーカ位置は、右肩・右肘・右膝・右外踝)

<sup>8</sup> ビジュアルプログラミングのフリーソフト。URL : <https://processing.org/>



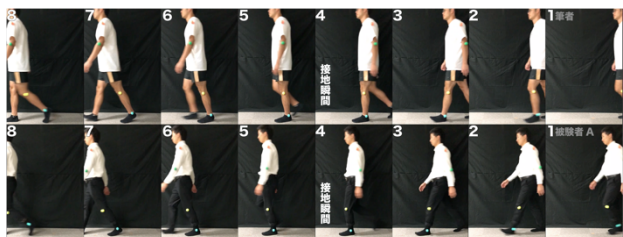


Figure 6 : 撮影した「歩き」(上段 : 堀内、下段 : 被験者 A。30fps 連続写真を 4f ずつ掲載)

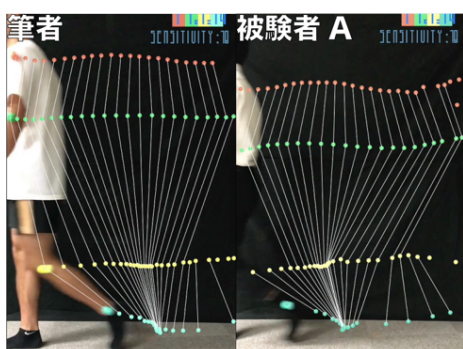


Figure 7 : 位置プロット

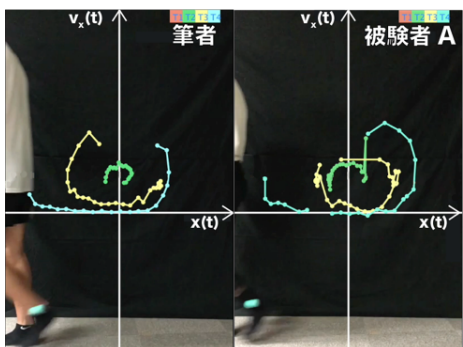


Figure 8 : 相空間プロット (横軸 : 「肩中心座標系」における水平位置、縦軸 : 絶対的な水平速度)

例えば、マーカ位置をプロットした Figure 7 では、堀内の軌跡はほぼ平行移動なのに対し、被験者 A の軌跡は波打っている。Figure 8 では、相空間にプロットした。黄色のグラフ (膝) において横軸値  $x(t)$  が負の値をとると、堀内では縦軸値  $v_x(t)$  がしばらく 0 付近を推移するのにに対し、被験者 A ではすぐに  $v_x(t)$  は増加する。これは、接地中に肩が接地位置を追い越してから、離地するまでの時間の相違を表す。堀内にとっては、これが 3.3 で挙げた「足裏が剥がれる」という感覚表現とリンクした。このように、Figure 8

は、グローバル座標系とローカル座標系が混在する奇妙なグラフだが、実践者である堀内自身が何かに気づく (= 変数発見) ことが肝要なのだ。ソフト面・ハード面共に、無機質な状態から、競技者である自分にとっての意味づけをしながら、ツールとして仕立てた。「つくりながらつかう」その過程で、多くの変数に気づくことができたのだ。

#### 4. 「野生の実践」仮説の提起

堀内の実践は、さらに意味不明な部分へと至った。以下にその例を列挙する。

- 石花<sup>9</sup>の実践
- 雨の日にリュックを「腹負う」
- 「コンディショニングスポット」としての温泉
- 川に向かって石を軽く放ると、着水位置よりも下流でスプラッシュする
- コーヒーを一服しながら、街ゆく人々の歩き方を眺める
- 引っ越し作業で、洗濯機を一人で運搬する

上記は、3.3、3.4 で解説したような実践を続けるうちに、日常生活において、自らが「意味がある」と思い実践したことである。たとえば「石花」であれば、以下の写真を収めている (Figure 9)。図中に付記したように、石をひとつずつ下から順に積み上げるのでは絶対に実現しない構造である。古典力学的に言えば、「BCD を同時に重ねてはじめて、全ての石における合力・力のモーメントの総和がともに 0 となる位置関係」である。身体のバランス感覚を石に転写するような感覚で、試行錯誤しながら作り上げた行為は、「学び」の一部となった。



Figure 9 : 堀内の石花作品

<sup>9</sup> 一般的にはロックバランシングと呼ばれる。横浜石花会 HP : <http://www.ishihana-kaneki.com/blank-2> 参照。

以上のようにして堀内は、日常生活の多様な文脈において、スキルの学びとしての実践を行えるようになった。ひとつひとつの実践が、競技の急激な進化を即座にもたらす訳ではない。しかし、それまで競技に無関係だった生活のモノゴトに対して、何らかの意味を見出し・手を加えることは、長期にわたる漸進的な学びにおいては、一定以上の価値があるのではないか。これこそが、本研究で提起する「野生」の鍵となる。以下、「野生の実践」仮説を論じ、本稿を締める。

3.3 と 3.4 では、堀内の拡張的实践を示した。3.3 では、身体-環境インタラクションのうちの身体、3.4 では環境に対して直接的に働きかけたことになる。以下に、野生の実践を図示した (Figure 10)。

実践が身体-環境インタラクションであることを、両者の掛け算 (×) とし、両者においてデザイン可能な領域とデザイン行為の種類を表現した図である。図中の身体・環境それぞれにおいて、該当箇所にふさわしい要素を布置した。右側に色の凡例を示した。

初期状態においては、デザイン可能な領域は限定的であり、実践は、陸上競技場に閉じ、身体・環境ともに所与意味的なデザイン行為にとどまる。

野生状態においては、デザイン可能な領域が、生活へと拡張され、デザイン行為は、意味の「付与」「転換」が可能となる。

よりプリコラージュ的 (0 参照) になるのだ。本節冒頭で紹介した例は、Figure 10 では、野生状態ではじめて色が塗られる部分に相当する。「(アスリート) + (メイカー)」以上の全体経験が、堀内の身体に蓄積する。究極的には、生活そのものが競技場であり、生活環境がツールともなる。初期状態とは異なる環世界 (Umwelt) [15] が形成されているとも言えよう。

特に環境の方において、デザイン行為「転換(青)」が可能となったのは、3.4 で述べたツールプロトタイプ経験が関係するかもしれない。すなわち、意味がフラットな素材 (ビジュアルプログラミング言語 Processing や、発泡スチロール球など) に対して、自分なりに意味づけして仕立てた経験が、ある種の「意味づけトレーニング」となったということだ。3.4 で触れたように、DIY という文化的土壌があったことが、堀内に対してそのトレーニングを行う広い間口となったと考えられる。

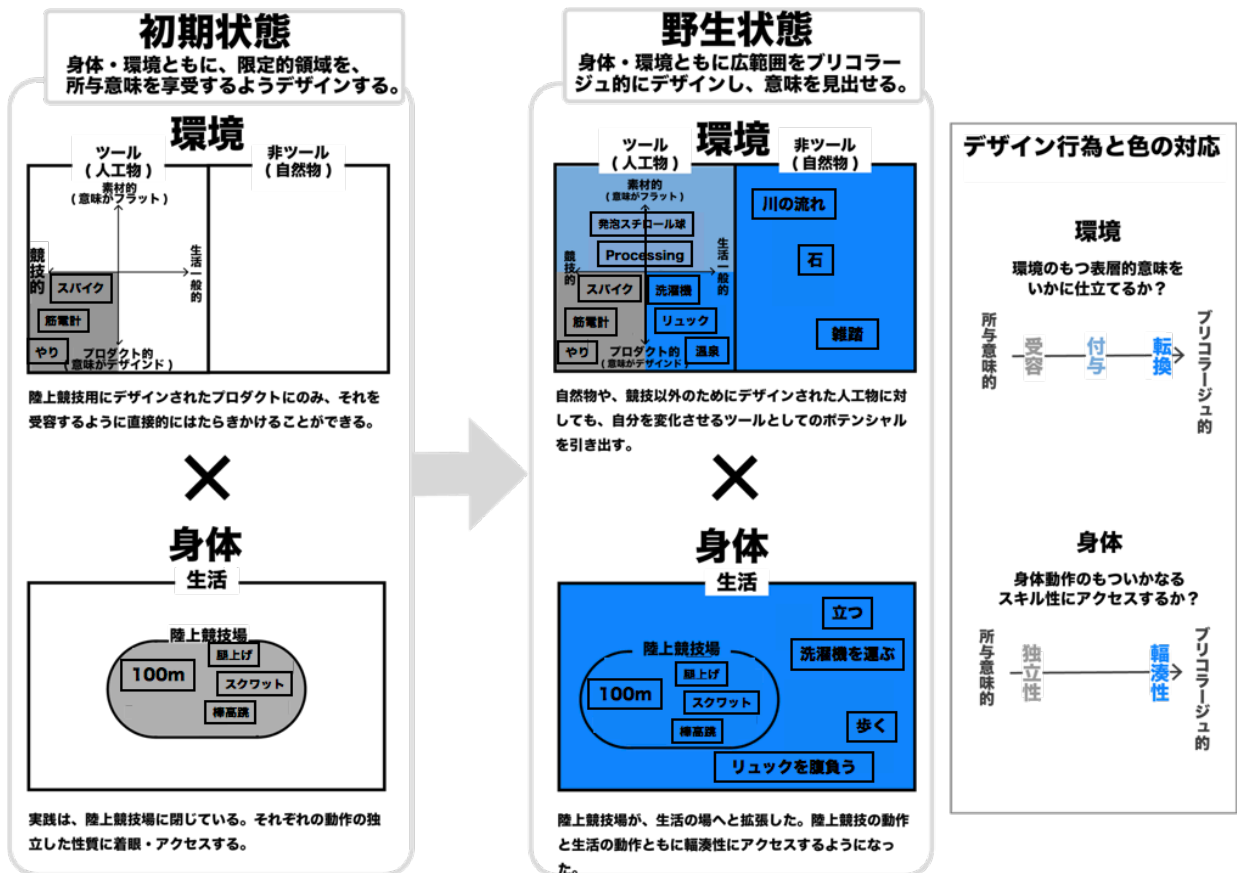


Figure 10 : 野生の実践



堀内は、初期状態から、長らくの実践者としての探究とそれに伴う飽くなき探究心があってこそ、野生状態へと遷移した。競技者として、野生の実践に一定の価値を認めるようになった。野生を実感するのは、簡単ではないのかもしれない。

本章冒頭で示した例は、単なる「遊戯」に過ぎないだろうか？我々はそうは考えない。学びはいつしか、単線的・因果律思考のみでは立ち行かなくなる。ビニールハウスに守られながら育ててもらうのは限界がある。栄養とも毒ともわからぬ偶然性をも、自ら摂取しにゆく野生的な存在として取り組まねばならない。あるいは、「野生種と栽培種の交配種」として、である。

## 5. おわりに

陸上競技は、狩猟生活にルーツがありながらも競技性を追究した結果、洗練されたフォーマットになった。一方で、陸上競技スキルの「学び」になると、フォーマットに全く収まりきらないプロセスがある。パフォーマンスアップに貢献するための陸上競技研究は、それを議論の俎上に載せなければならない。本研究では、第一著者自らが、そこに「野生」仮説を生成・提起した。

陸上競技のルーツである狩猟生活は、切迫していた生そのものであった。生き延びるため、自らの身体と広大な自然環境から、資源をフル活用していたはずだ。現代の我々は、単一目的に依らない、生活という野に曝されることには変わりはない。陸上競技を学ぶアスリートにおいても、一身体を具える限り例外はない。多様なテクノロジーが溢れる環境になった現代であっても、領域限定的な栽培的思考のみならず、野生的に学べるといのが、競技者にあるべき姿ではなからうか。

## 謝辞

本稿は、第一著者の修士論文[10]の短縮版である。副査を快く引き受け、多くの斬新なアドバイスをくださった慶應義塾大学環境情報学部の笈康明先生・石川初先生に深く感謝いたします。

## 参考文献

- [1] 岡尾恵一：陸上競技のルーツをさぐる、文理閣、(1996)
- [2] 公益財団法人日本陸上競技連盟：陸上競技ルールブック 2012年度版、ベースボールマガジン社、(2012)
- [3] 日本陸上競技学会：日本陸上競技学会 HP, [http://jsa-web.com/tournament/16th\\_photoreport/](http://jsa-web.com/tournament/16th_photoreport/), 2018年2月閲覧。
- [4] 大山卞圭吾：筑波大学陸上競技研究室コラム Rikupedia: 研究者と指導者のあいだ, <http://rikujo.taiiku.tsukuba.ac.jp/column/2014/33.html>, (2017年12月閲覧)
- [5] Herbert. A. Simon: The Science of the Artificial. Third Edition, The MIT Press, (2001)
- [6] 中島秀之、諏訪正樹、藤井晴行：構成的情報学の方法論からみたイノベーション、情報処理学会論文誌 Vol.49, No.4, pp1508-1514, (2008)
- [7] 中村雄二郎：臨床の知とは何か、岩波文庫、(1997)
- [8] 加藤文俊：「ラボラトリー」とデザイン-問題解決から仮説生成へ-, KEIO SFC JOURNAL Vol.17, No.1, pp.122-142, (2017)
- [9] クロード・レヴィ=ストロース、野生の思考、みすず書房、(1976)
- [10] 堀内隆仁：陸上競技におけるスキル学習の仮説生成型研究-身体・生活意識・ツールが共創する「野生の実践」-, 慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科 2017年度修士論文、(2018)
- [11] 諏訪正樹：「こつ」と「スランプ」の研究-身体知の認知科学-, 講談社メチエ、(2016)
- [12] ニコライ. A. ベルンシュタイン (工藤和俊訳、佐々木正人監訳)：デクステリティー巧さとその発達、金子書房、(2003)
- [13] 堀内隆仁、諏訪正樹：「立つ、歩く」という身体スキルを考える、第31回人工知能学会全国大会論文集、103-Os-30c-5, (2017)
- [14] Keima Konno, Akiko Takeshita, Satoru Higa, Kazuhiro Jo, Richi Owaki, Tsubasa Nishi, Motoi Shimizu, Yoko Ando, Yoshito Onishi, Naoko Shiomi, Yosuke Sakai, Kazunao Abe, Ryo Kanda, Yasuaki Kakehi, Takayuki Ito, Sheep, Kyle Mcdonald: Divisual Plays Experimental Lab -An installation derived from Divisual Plays, TEI 2016- Proceedings of the 10th Anniversary Conference on Tangible Embedded and Embodied Interaction, (2016)
- [15] ヤーコブ・フォン・ユクスキュル、ゲオルク・クリサート(日高敏隆・野田保之訳)：生物から見た世界、思索社、(1973)

# ペアダンス動作の相互作用

## —競技社交ダンス世界チャンピオンを例に—

Movement interaction between dancers :  
A case in the world competitive ballroom dance champion couple

吉田 康行<sup>1</sup> Arunas Bizokas<sup>2</sup> Katusha Demidova<sup>2</sup>

中井 信一<sup>3</sup> 中井 理恵<sup>3</sup> 西村 拓一<sup>1</sup>

Yasuyuki Yoshida<sup>1</sup>, Arunas Bizokas<sup>2</sup>, Katusha Demidova<sup>2</sup>,

Shinichi Nakai<sup>3</sup>, Rie Nakai<sup>3</sup>, and Takuichi Nishimura<sup>1</sup>

<sup>1</sup>産業技術総合研究所 人工知能研究センター

<sup>1</sup>Artificial Intelligence Research Center,

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

<sup>2</sup>Non-affiliated

<sup>3</sup>ダンス ジャルダン

<sup>3</sup>Dance Jordin

**Abstract:** In ballroom dance leader (male) dances with partner (female). The skills for pair dancing has not been investigated. The purpose of this study is to investigate movement interaction between the leader and the partner during ballroom dancing. The world competitive ballroom dance champion couple participated in the study. The Xsens system consisting of inertial measurement units was used to measure body positions at 240 Hz. The participants danced waltz under three conditions. The leader danced by himself. The partner danced by herself. The leader and the partner danced together. In particular, the movement interaction was found in kinetic energy.

## 緒言

社交ダンスは男性のリーダーと女性のパートナーがペアになり音楽に合わせて踊る協調運動である。これまでバイオメカニクスの先行研究においては個人内の投球時のセグメント間の相互作用 [1] や歩行時の胸椎、腰椎と骨盤の相互作用 [2] を対象にした研究などがある。しかし、個人間の相互作用を対象にしたバイオメカニクス研究は殆ど見当たらない。

個人間の協調動作には対戦形式と協調形式の動作に分けられると考えられる。そして協調形式の中も接触型と非接触型に分類できる。非接触型の例としてはシンクロナイズドスイミングなどがあげられる。また、接触型の中も用具を介したタンデム自転車や直接的に接触するアイスダンスや社交ダンスに細分

化可能と考えられる。

これまで社交ダンスは教本 [3] により技術が体系化されてきている。しかし、リーダーとパートナーの動作が個別に記述されているにとどまり、男女がペアで踊るために必要な知見はあまり記されていない。

そこで本研究の目的は、リーダーとパートナーがペアで踊った場合と単独で踊った場合を比較することにより、ペアダンス動作の相互作用を明らかにすることである。

## 方法

### 参加者

競技社交ダンス世界チャンピオン1組(男性1名,

女性 1 名) が実験に参加した。

## 実験機材

身体の位置座標を計測するために 17 個の慣性センサで構成されたモーションキャプチャシステム [4] (MVN Link, Xsens Technologies, Netherlands) を制御及び解析用ソフトウェア (MVN Studio BIOMECH 2018) により 240 Hz で使用した。参加者 2 名の同時計測を行うために 2 名分の慣性センサシステムを使用した。

## 実験設定

実践環境下での計測を行うために社交ダンス教室のフロアで実験を行なった。用いた音楽はアルバム Ballroom Symphony (Casa Musica) からワルツ Without You (29BPM) を選曲した。

モーションキャプチャシステムの中で 23 セグメントの剛体リンクモデルを構築するために身体計測を行った。次に、参加者は慣性センサシステムが装着された専用スーツを着用した。その後、キャリブレーションを行った。

試技としてワルツの基本的な以下の連続する動作を採用した。

ナチュラルスピントーン (1 2 3 1 2 3)  
 コンティニューアスピン (1 & 2 3)  
 ターニングロックトゥライト (1 & 2 3)

試技の順番は最初にリーダーのみで踊り、次にパートナーのみで踊り、最後にリーダーとパートナーがペアで踊った。また、試技は各 1 回ずつ行った。

## 解析方法

解析はナチュラルスピントーンの前半部分とそれ以降に分けて行った。解析用ソフトウェアにより全身体質量中心を算出した。そこから運動エネルギーと位置エネルギーを算出した。着床時刻は足とつま先のセグメントの質量中心から算出した。

## 結果と考察

図 1 にはリーダーとパートナーがペアで踊った際の全身体質量中心の鉛直方向における高さの時系列変化を示した。時間は、リーダーが予備歩となる左脚の足部が接地した時刻からナチュラルスピントーン前半の中で両つま先が揃い全身体質量中心の高さが最大になるまでの時刻である。予備歩から 1 歩目は 0.75 s, 1 歩目から 2 歩目は 0.62 s, 2 歩目か

ら 3 歩目は 0.65 s の時間を要した。

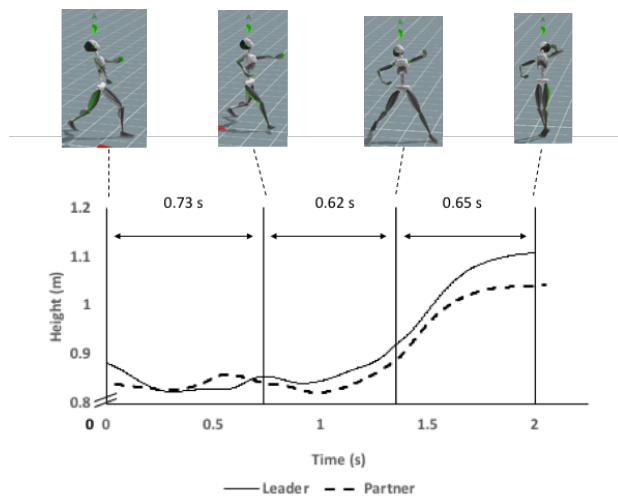


Figure 1 The height of whole body center of mass from preparation step to the highest of the whole body center of mass in 1st half of natural spin turn. The leader danced with the partner.

図 2 にはリーダーとパートナーがペアで踊った際における全身体質量中心の運動エネルギーの時系列変化を示した。解析区間の後半であり、開始は図 1 の続きとなる全身体質量中心の最高点からである。そして、ナチュラルスピントーン後半からコンティニューアスピン、最後にターニングロックトゥライトに続いている。リーダーとパートナーは各々特徴的な 4 つのピークを持っていた。そして、それらのピークは交互に出現していた。

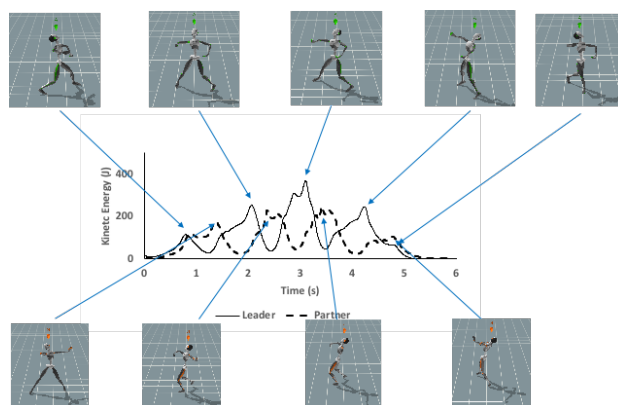


Figure 2 The kinetic energy from the end of Figure 1, 2nd half of natural spin turn, continuous spin, to turning rock to right. The leader danced with the partner.

図3の上にはリーダーがパートナーとペアで踊った場合と単独で踊った場合の運動エネルギーの変化を示した。図3の下にはパートナーがリーダーとペアで踊った場合と単独で踊った場合の変化を示した。解析区間は図2と同様である。リーダーとパートナー共に個人内で差異がみられた。リーダーの運動エネルギーの最大値はパートナーとペアで踊った時に1.29倍となった。また、パートナーの運動エネルギーの最大値はリーダーとペアで踊った時に1.79倍となった。

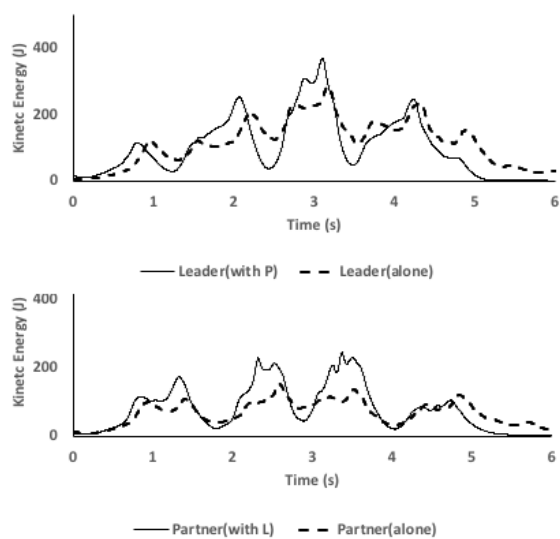


Figure 3 The kinetic energy from the end of Figure 1, 2nd half of natural spin turn, continuous spin, to turning rock to right. The graph in above shows the leader danced with and without the partner. The graph in below shows the partner danced with and without the leader.

## 謝辞

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務の結果得られたものです。

## 参考文献

- [ 1 ] Naito K, Takagi T, Kubota H, Maruyama T. : Multi-body dynamic coupling mechanism for generating throwing arm velocity during baseball pitching, *Hum Mov Sci.*, 54:363-376. (2017)
- [ 2 ] Yang YT, Yoshida Y, Hortobágyi T, Suzuki S. : Interaction between thorax, lumbar, and pelvis movements in the transverse plane during gait at three

velocities, *J Appl Biomech.* 29(3):261-269. (2013)

[ 3 ] Alex Moore: *Ballroom Dancing*, Routledge. (2002)

[ 4 ] Robert-Lachaine X, Mecheri H, Larue C, Plamondon A: Accuracy and repeatability of single-pose calibration of inertial measurement units for whole-body motion analysis, *Gait Posture*, 54:80-86. (2017)

# 上演芸術における新奇な身体表現の創作過程： 内的制約の変更に着目した検討

The Creation Process of the Novel Expressions of the Expert Performers

清水 大地<sup>1</sup> 平島 雅也<sup>2</sup> 岡田 猛<sup>1</sup>

Daichi Shimizu<sup>1</sup>, Masaya Hirashima<sup>2</sup>, and Takeshi Okada<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院 教育学研究科

<sup>1</sup> Graduate School of Education, The University of Tokyo

<sup>2</sup> 情報通信研究機構 脳情報通信融合研究センター

<sup>2</sup> Center for Information and Neural Networks, National Institute of Information and Communications Technology

**Abstract:** In the domains of performing arts, such as dance and theater, how do people generate their novel works? This study conducted a case study over several days to capture the creative processes of expert breakdancers to investigate the long-term creative process in performing arts domains. We analyzed these processes using a visualization method of the body parts on which the dancer focused and the movement data measured using a motion capture system. The results suggest that the body parts under focus and the dancers' ideas changed drastically during the creation process. The understandings and interpretations of some specific domain knowledge and skills that also changed during the processes served as the internal constraints on the dancers' generation of novel ideas. In addition, the embodiment of the ideas (externalizing the ideas as movements) facilitated changes to the dancers' understandings and interpretations.

## 1. Introduction

人はどのように新奇なアイデアや表現を生み出していくのであろうか。この問いについては、古来より検討が行われ、例えば「空からアイデアの種が突然舞い降りてきた」といった活動者の主観的な体験に基づいた、神話的な観点からの説明が数多くなされてきた。一方で、近現代の心理学や認知科学においては、上記の神話性は強く否定されている[1]。新奇なアイデア・表現の生成過程は、心的操作や概念の結合、analogy等を伴った創造的な問題解決過程として捉えられており、芸術表現や科学的発見を対象とした様々な実証的検討が行われつつある[2][3]。

本研究では、実際に長期に渡る創造活動過程が全体としてどのように営まれて新奇なアイデアや表現が生成されていくのか、特に『内的な制約の変更』と『アイデアの具現化とその知覚・省察』という2点に着目した検討を行った。その際、具体的な上演芸術領域（ブレイクダンス）の熟達者によって実際に営まれた創作過程を対象とすることで、その過程を実証的に検討することを目指した。

### 1.1. 内的な制約の変更

創造活動過程を説明した理論からは、その過程において創作者の有する認知的な枠組みである制約に変更が生じる重要性が示唆されている[4]。例として、創造活動を実験的な枠組みから扱おうとした洞察問題課題に関する研究が挙げられるだろう[5][6]。ここでは、活動者が各自の有する認知的な枠組みを用いてより解決に至りやすいと考えられる問題空間をあらかじめ設定すること、特に初期はその空間内に限定して解決方略を探索する傾向があること、そして失敗を繰り返す中でその制約が緩和して異なった問題空間の探索が営まれることで解決策が発見されていくこと、が示唆されてきた。

同様に、モネやマチス、ドビュッシーといった画家や音楽家による現実の創作を逸話的に検討したStokesのpaired constraintsの理論においても、『内的な制約』を変更する重要性が示唆されている[7][8]。ここでは、例えば領域に集積された知識・技術やそれらの理解・解釈、他領域の知識・技術などが創作時の前提となる制約として機能しうること、そしてそれらの制約の値を変更・統合し、新しいgoalを生



成することで創造活動が促進されることが示された。例えばマチスであれば、色の使い方に関して色を強調した表現から色をブロックごとに使い分ける表現へと移行し、最後に色を除外する表現に至った過程が見られており、その過程について色の表現方法に関する制約の値を変更するというメカニズムによって説明可能であることが主張されている。

以上のように、『内的な制約とその変更』が、創造活動に対して制限・促進といった強い影響を与えると考えられる一方で、その値の変更と再設定が何をきっかけとして生じ、具体的にどのように営まれていくのか、それらの過程については十分な説明がなされていないのが現状である。本研究では、以上の『内的な制約の変更』が生じるきっかけとして、『アイデアの具現化とその知覚・省察』を取り上げた。

## 1.2. アイデアの具現化とその知覚・省察

ここで取り上げたアイデアの具現化とは、生成したアイデアを実際に知覚可能な形で行為や痕跡として外に表出することを示しており、その表したものを多様なモダリティを通して知覚し、深く省察することが『内的な制約』の焦点化・変更を促し、創造的な発見に大きく寄与することを本研究では仮定した。実際にイメージやアイデアを形にして表出することが、生成するアイデアの内容等に大きな影響を及ぼすことは、これまで芸術創作などの研究において主張されてきた。

例えば、デザイナーの作品創作過程を問題解決の観点から詳細に検討した Goldschmidt (1991) と Goldschmidt (1994) では、**study sketch** というメディアの存在を取り上げ、視覚的な対象としてアイデアを具現化することがアイデア生成・探索を促進することを主張した。そこでは、アイデアを視覚的な対象として表すことで、アイデア生成段階で抱いていた明示情報(例えば描く対象やその形など)に加え、イメージの中では顕在化しきれなかった多様な情報(例えばもの同士の配置や関係性、余白など)にアクセスすることが可能となること、そして結果として、アイデアや関連する知識についてより多様な観点から活発に探索することが可能となることが示されている。実際、Wittgenstein (1953) は、単なる **seeing** と **imagining** との差異を指摘し、デザイナーがスケッチを見る際に生じていることが **imagining** であり、単なる視覚情報の知覚 (**seeing**) と異なった、抱いているイメージを多様な観点から拡張・精緻化させる過程であることを主張した(図1)。そして、Goldschmidt (1991) や Goldschmidt (1994) では、この主張を踏まえ、スケッチというアイデアの具現化行為を **Interactive imagery** と表現し、アイデア生



図1. 具現化によるイメージの拡張の例。Wertheimer (1959), Goldschmidt (1991) を参考に作成。補助線を引き、その全体像を知覚・省察することで分けられた三角形を他の部位に当てはめ、全体を長方形として捉え直すことが可能であることが想像される。

成への強い影響を主張して実証的な検討を行っている。このように、アイデアの具現化によって、アイデアやそこに含まれる知識・技術等について、既に有する観点とは異なった点から捉え、拡張・再解釈することが可能となると想定される。ここで結果として生じている現象は、上記した『内的な制約の変更』と非常に近いものだと考えられるだろう。実際に、アイデアの具現化によって予想外の発見が生じ、アイデア生成が促進されるという主張は、他にも建築家を対象にした Suwa & Tversky (1997) や多数の美術学生を対象にした Getzels & Csikszentmihalyi (1976) においても確認されており、信頼性の高い現象であると考えられる。

## 1.3. 目的

以上の議論を踏まえ、本研究では創造活動がどのように営まれていくのか、その過程に関して、その全体像に加え、『内的な制約の変更』と『アイデアの具現化とその知覚・省察』という2点に着目した検討を行うことを目的とした。また、実際に営まれた創作活動を対象としたケーススタディを行うことで、創造活動過程の実証的な検討を行うことを目指した。

## 2. ケーススタディ

### 2.1. 協力者

ブレイクダンスの熟達者1名(男性、26歳、経験年数10年)が参加した。この1名は日本国内で開催された大会で準優勝等の成績を収めており、本研究の対象として適切であると考えられる。

### 2.2. 手続き

上記のダンサーが7日間のケーススタディに参加した。ケーススタディでは、ダンサーは領域に既に存在する「エルボーエアートラックス(図2)」という技術を発展させ、領域に存在しない新奇な技術を創造する活動に取り組んだ。そして、アイデアの言語報告や身体運動データなどを用いて詳細に検討することで、創造的な発見に至る過程を客観的に解明することを目指した。

ケーススタディの手続きを図3に示す。特にダンサーは、2日目から6日目における取り組み(1日20 trialの計100 trial)を通して新奇な技術を創造し



図2. エルボーエアートラックスを実施した様子。⑭の後は、⑦の動きに戻り再度回転する動きを行っていく。

た。また、**trial** ごとに、1) 実施するアイデアの考案とその内容の口頭報告、2) アイデアの新奇性の報告（0-100のVASによる報告）、3) 実際の運動としてのアイデアの実施・具現化、4) アイデアの達成程度の報告（0-100のVASによる報告）、5) 実施・具現化時に生じた気づきの報告（気づきの程度を0-100のVASによる報告、気づきの具体的な内容を口頭による報告）を行っている。分析では、上記5つの活動で得られたデータを利用することで、創作過程に関する検討を行った。

なお、上記の手続きは全てモーションキャプチャー用のスーツとマーカーを装着した状態で東京大学教育学部の身体運動実験室にて行われた。またこのケーススタディは、本学の倫理審査委員会の許可、被験者による同意を得た上で行われた

### 2.3. 機器

OQUS300（赤外線式モーションキャプチャーシステム、QUALISYS社）を利用し、ダンサーの運動データを取得した。実験室に7台のカメラを設置し、測定頻度は200 Hzとしてデータを取得した（図4）。マーカーについては、事前に行ったパイロットスタディの結果を考慮し、技術に関する運動情報を捉える上で重要であり、かつ技術を行う際に妨げにならないと考えられた14点に装着した（図5）。

### 2.4. 分析

本研究では、以下6つのデータを利用して創造活動過程に関する検討を行った。

#### 1) アイデアに関する本人の新奇性評価

1つ目として、生成されたアイデアに対する本人の新奇性評価が挙げられる。評価値の時系列変化の検討により、創造活動の全体としての進展の様子や、創造的なアイデアが生成されると本人が感じたタイミングについて、同定することが可能である。

#### 2) アイデアの内容に関する発話データ

2つ目として、生成されたアイデアの内容が挙げられる。ダンサーのアイデアに関する発話データ（1**trial**ごと）を利用し、以下3つの観点に関して言及した頻度を日ごとに算出した。1) 身体の各部位（頭

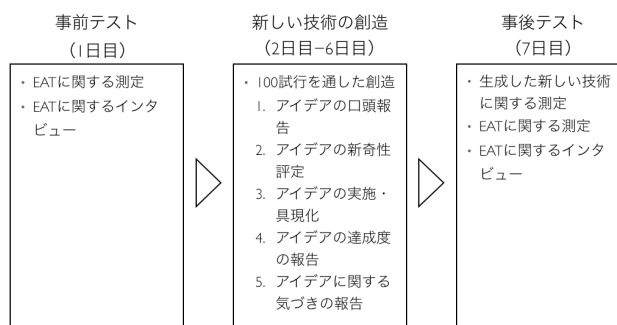


図3. ケーススタディの手続き

部、右腕、左腕、右脚、左脚など）。2) 元の技術に関する抽象的・高次的な概念（回転の方向、回転の速度など）。3) 領域における他の技術の名称（ベビーウインドミル、ナインティなど）<sup>1</sup>。この分析により各日でどういったアイデアを中心的に検討していたのか、その変遷を検討することが可能となる。

#### 3) 具現化されたアイデアに関する運動データ①（映像）

3つ目として、実際に実施されたアイデアの内容を検討した。ダンサーは、1, 2の測定後にアイデアを身体運動として実際に行っており、その運動について記録映像に基づいた検討を行った。映像について、ブレイクダンスに10年以上に渡って携わっている第一著者と他の熟達者（経験年数12年、国内大会での優勝・入賞経験有り）が別々に確認した。そして行われた技術について、A：回転を行う前の動き、B：回転中の動き、C：回転後の動き、という3つの部分に分解し、各部分でどういった運動を行っているのか、ブレイクダンス領域の用語を用いて同定した。そして同定された内容について、全**trial**の内容を確認した上でボトムアップにカテゴリーを生成し、その時系列における変化を検討した。

#### 4) 具現化されたアイデアに関する運動データ②（motion capture データ）

4つ目として、具現化されたアイデアの内容についてモーションキャプチャーのデータによる検討を行った。まず、マーカーを付与した全14箇所の位置データを利用して身体各部位の関節角度や角速度を算出した。そして以上のデータについて主成分分析を行い、運動に関する説明率の高い二次元（PC1, PC2）を算出した。PC1とPC2のデータは、実施された運動の特徴について縮約した次元を用いて説

<sup>1</sup> 以上3つの観点は、発話データの中で数多く見られており、新奇な技術に関するアイデアを生成する上で重要だったと考えられたため、分析の指針として使用した。

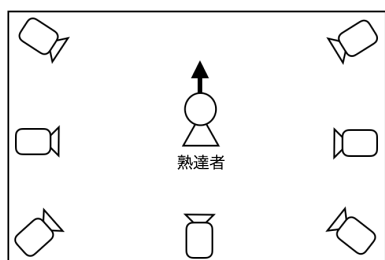


図4. ケーススタディの実施図

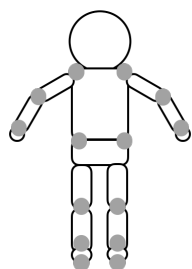


図5. マーカーの接着位置

明したものであり、その数値を利用して各 trial、各日の運動の特徴とその変遷を検討した。

#### 5) アイデア具現化後の気づきに関する発話データ

5 つ目として、アイデアを実施した結果として生じた気づきの内容について、発話データを利用した検討を行った。ここでは、気づきに関する発話データについて、2の分析と同様の3観点(1:身体各部位, 2:元の技術に関する抽象的・高次的な概念, 3:他の技術の名称)に関する発話頻度を集計することで各 trial、各日で主にどのような側面に新しい気づきが生じていたのかを同定した。

#### 6) 本人の新奇性評定と運動データ①との対応

6 つ目として、アイデアに対する本人の新奇性評定の得点と具現化されたアイデアの運動データ①とを trial ごとに対応させ、その関連性を検討した。ここでは、各運動とそれに対するダンサー本人の新奇性評定との対応を確認しており、各運動カテゴリーに対する評定が創造活動を繰り返す中で変化したのか検討を行った。これはダンサーの有する制約の変化を確認するために行った分析である。

## 3. 結果と考察

### 3.1. 生成された技術の概要

実際にダンサーによって生成された技術を図6に示す。この技術は元の技術について、その重要要素である回転するという動きを右足の着地によって中絶し、その勢いを逆側の回転として利用していく、という発想に基づいて生み出されたものである。インタビューにおいてダンサー自身も、回転という元の技術の根幹部分を敢えて途中で止めて反対方向に回転の流れを変化・利用していく点、元の技術を行う際の身体の使い方や、回転運動を繰り返し行うという元の技術の重要な特徴を高度に利用しつつ、それと異なる動きに見える点がこの技術の魅力的な点だと主張していた。

### 3.2. 創造が営まれた過程

#### 3.2.1. 全体の概要

上記した新しい技術の生成過程について、データ



図6. 生成された技術を実施した様子。②の後は、⑦の動きに戻り再度回転する動きを行っていく。

1-5の結果を参照しながらその概要を検討した。まず、データ1(本人による新奇性評定)の結果を図7に示す。図より、創作の前半(trial 1-50)では、新奇性に関して多様な値を示す場合が多く、様々な内容のアイデアを活発に探索していたことが推測される。一方で後半(trial 51-100)では、ほぼ全ての場合において新奇性が一貫して高い値を示していた。以上から、50 trial 前後で有望なアイデアが発見され、その後そのアイデアに集中した取り組みが営まれたことが推測される。実際、最終日のインタビューにおいても、50 trial 前後で有望なアイデアが突然生成され、以降はそのアイデアの洗練に注力した、という回答をダンサーは行っていた。

次に、データ2(アイデアの内容)の結果を図8に示す。図から4日目(41-60 trial)以降において、例えば右足や右腕、左足といった一定の身体部位が頻繁に言及されるようになったこと、右足と右腕・右足と左足といった特定の身体部位の組み合わせが頻繁に言及されるようになったことが窺われた。これは、データ1と同様に、50 trial 前後で有望なアイデアの発見が生じたことを示す結果だと考えられる。また、実際に生成された技術の重要な特徴として、元の技術の回転を右足によって止める、という点が指摘されていたこととも合致する結果だと言えよう。

また前半に着目すると、2日目では様々な身体部位(右手、左手、左腕、右足、左足、頭)に着目していた一方で、3日目では各身体部位へ着目することがほとんど無くなり、元の技術の抽象的・高次的な内容に着目するようになったことが窺われた。これは、50 trial 前後までは多様な観点から活発にアイデアの生成を行っていたこと、また身体各部位に関する試行錯誤を繰り返す中で元の技術の抽象的・高次的であり本質的な要素(回転の速度や回転の方向、回転の軸)に気づき、その要素を強く考慮するよう



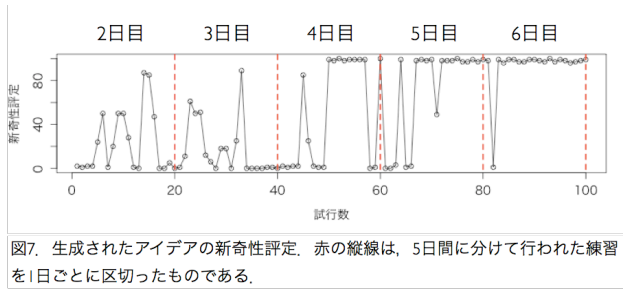


図7. 生成されたアイデアの新奇性評定. 赤の縦線は、5日間に分けて行われた練習を1日ごとに区切ったものである。

になったことを示す結果だと推測される。実際に生成された技術も、元の技術の回転という要素に着目したものであった。3日目に生じた元の技術の抽象的・高次的な内容に焦点を当て、それを大きく変化させることで新しい技術を生じたと推測される。

次に、データ 4 (具現化されたアイデアに関する運動データ②) について motion capture system によって測定した結果を図 9 に示す<sup>2</sup>。図から PC 1, PC 2 共に trial を繰り返す内に徐々にその得点が一定の値に収束しており、特に 4 日目以降は身体運動に関する探索の範囲を狭めていったことが推測される。これはデータ 1, 2 で示した、50 trial 前後で有望なアイデアが発見され、以降探索されるアイデアの内容が焦点化されたとする結果とも整合する。

さらに、データ 5 (アイデア具現化後の気づきに関する発話データ) の結果を図 10 に示す。図から 4 日目以降に右足に関する気づきが徐々に増加していったことが分かる。これはデータ 1-4 の結果と同様に、元の技術の回転を右足で止め逆方向の回転に利用していく、という創造的なアイデアが 50 trial 前後で発見され、以降はそこに着目した探索と気づきが生じていたことを支持する結果だと考えられる。また、3 日目以降に元の技術の抽象的・高次的な内容に関する気づきが多く生じてきており、このことも 3 日目に元の技術の抽象的・高次的な内容に着目するようになっていったこと、そしてその内容を利用して創造的なアイデアが発見されていったことを示唆する結果だと考えられる。

### 3. 2. 2. 内的な制約の変更

上記の結果から、ダンサーの元の技術やアイデアに対する捉え方が 50 trial 以前の試行錯誤を経て変化したこと、その変化した捉え方を高度に利用する形で新しい技術のアイデアが生成されたこと、そして 50 trial 以降はそのアイデアに焦点を当てた探索が営まれたことが推測された。ここではデータ 6 (本

<sup>2</sup> 紙面の都合上省略したが、データ 3 (具現化されたアイデアに関する運動データ①: 映像データ) の結果からも、ダンサーが実際に生成された技術の特徴を含む運動(右足を着いて元の技術の回転を途中で止める)について、50 trial 目以降に集中して取り組んでいる様子が見られた。

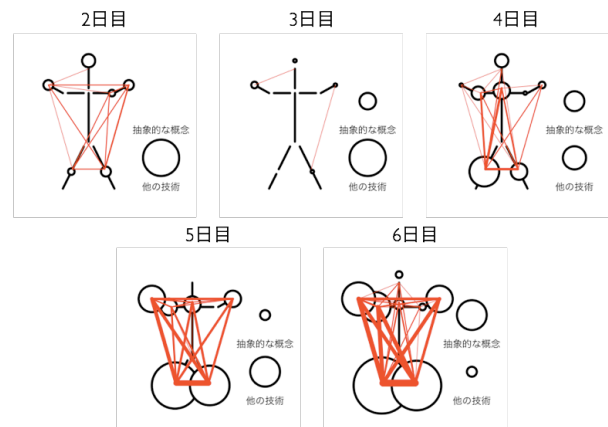


図8. 生成されたアイデアの内容. 円のサイズは各観点に言及した頻度を、円間の線分の太さは共起の頻度(同一試行内で両観点に言及した頻度)を示す。

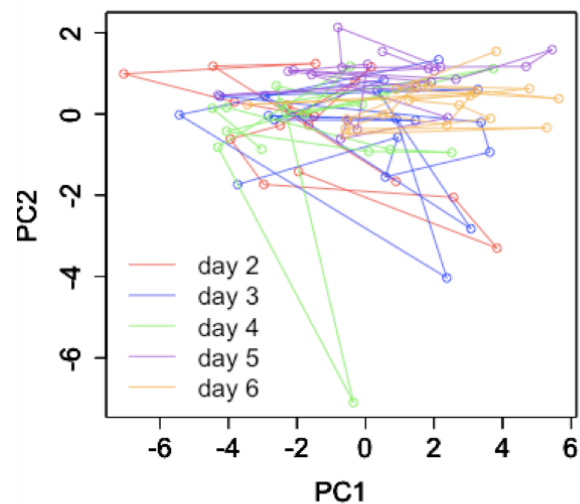


図9. PC 1とPC 2の2次元プロット

人の新奇性評定と運動データ①との対応) を利用し、実際にダンサーのアイデアに対する捉え方が、実際に創造活動を営む中で変化したかを検討した。結果を図 11, 12 に示す。図 11 では、各運動カテゴリーに対する本人の新奇性評定の平均と SD を提示している。図から最終的に生成された技術の重要な要素を含んだカテゴリー (16-19) では、新奇性評定にバラつきが見られないこと、一方でそれ以前のカテゴリーでは、実施する trial ごとに新奇性評定の値が大きくバラついていたことが分かる。各カテゴリーの新奇性評定の詳細を示したものが図 12 であるが、ここからも、初期に生成されたカテゴリー (1, 5, 9) は 50 trial 前後までの探索を経て新奇性評価が著しく変化したこと、一方、後半で生成されたカテゴリー (19) はほとんど新奇性評価が変化していないことが分かる。以上の結果は、特に創造的な発見が

生じる 50 trial までの様々な探索を通じて、生成した  
2日目 3日目 4日目

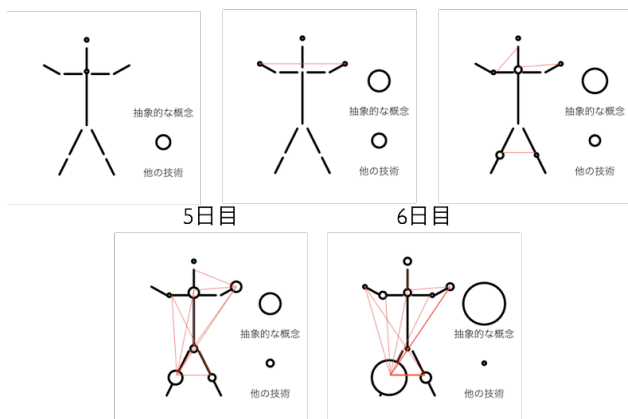


図10. 生じた気づきの内容. 円のサイズは各観点に言及した頻度を, 円間の線分の太さは共起の頻度 (同一試行内で両観点に言及した頻度) を示す.

アイデアに対するダンサー自身の捉え方や評価の仕方が大きく変化したことを示している. データ 2, 5の結果も併せて考えると, アイデアや元の技術について, 身体各部位の動かし方といった部分的に捉えようとする観点から, 次第に, 全身を使った回転の方向や速度に着目して捉えようとする, より抽象的・高次的な観点に, その理解・解釈が変遷していったと推測される.

#### 4. 総合考察

本研究では, 人が新しいアイデアや表現を生み出していく創造活動過程に関する探索的な検討を試みた. その際, 活動過程の概要に加えて『内的な制約の変更』といった点に着目した検討を行った. 実際に営まれたブレイクダンスの創作過程を対象とし, 検討を行った結果として下記の3点が示されている.

- ① ダンサーは, 50 trial 前後まで多様なアイデアを活発に探索していた. 例えば2日目(1-20 trial目)では, 身体の各部位に着目したアイデアを, 3日目(21-40 trial目)では, 元の技術の抽象的・高次的な内容に着目したアイデアを探索していた.
- ② ダンサーは, 50 trial 前後で創造的なアイデアを生成し, その後はそのアイデアに焦点を当てて洗練させる活動に移行した. そのアイデアは元の技術の抽象的・高次的な内容を利用・変化させるものであった.
- ③ ダンサーの『内的な制約』として機能していた, アイデアや元の技術に対する捉え方が, 50 trial以前の試行錯誤を経て変化したこと, その変化を利用して創造的な発見が達成されたことが推測された.
- ④ ダンサーは, 生成したアイデアを実際に具現化

し, それを知覚・省察することを通して, 内的

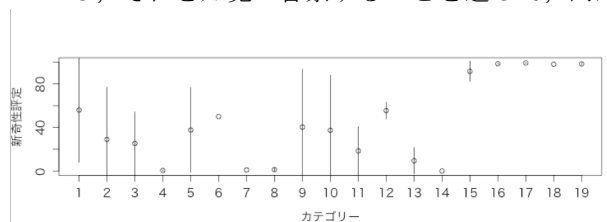


図11. 各運動カテゴリーの新奇性評価

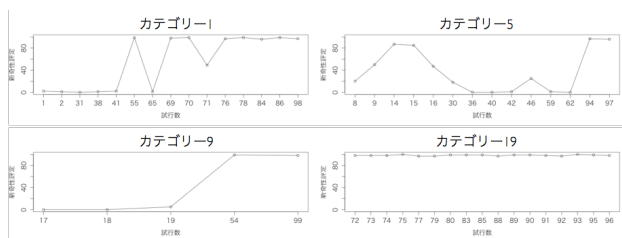


図12. 特定の運動カテゴリーにおける新奇性評価

な制約 (アイデアや元の技術に対する捉え方) を徐々に変更していった (データ 2, 5 を利用した検証の結果として示唆. 紙面の制限上, 本研究では記述を省略している).

これらは, 先行研究で逸話的に示唆された『内的制約の変更』と『アイデアの具現化とのその知覚・省察』が, 実際に創造活動過程で有効に機能することを確認した知見である. また, 異なった捉え方への着目を促すという形で, 『アイデアの具現化とその知覚・省察』が『内的制約の変更』を促進する, という両過程の関係性についても新しく言及した知見であるとも考えられる. 今後は上記の両過程やその関係性に変更を加えることで創造活動がどのように促進・制限されるのか, 更なる検討を行っていく予定である. また, 対象とする人数や領域, 協力者の属性を増やし, 実際に営まれる多様な創造活動を同様の現象によって説明可能であるか, 十分な検討を行うことも必要とされるだろう. さらに, 共に活動を行う他者[14]や周囲の環境が創造活動に大きな影響をもたらすことも示唆されており, それらの影響について加味した検討を行うことも必要と考えている.

#### 謝辞

本研究の一部は, 科学研究費補助金基盤研究 A (課題番号: 24243062, 代表: 岡田猛), 科学研究費補助金若手研究 B (課題番号: 16K17306, 代表: 清水大地) の助成を受けて行われた.

#### 参考文献

[1] Weisberg, R. W. Creativity: Understanding Innovation in Problem Solving, Science, Invention, and the Arts,



Hoboken, NJ: Wiley, (2006)

- [ 2 ] Dunbar, K. Concept discovery in a scientific domain. *Cognitive Science*, 17, 397-434, (1993)
- [ 3 ] Okada, T., Yokochi, S., Ishibashi, K., & Ueda, K. Analogical modification in the creation of contemporary art. *Cognitive Systems Research*, 10, 189-203, (2009)
- [ 4 ] Guilford, J. P. Creativity. *American Psychologist*, 5, 444-454, (1950)
- [ 5 ] Knoblich, G., Ohlsson, S., Haider, H., & Rhenius, D. Constraint relaxation and chunk decomposition in insight problem solving. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, & Cognition*, 25, 1534-1556, (1999)
- [ 6 ] Ohlsson, S. Information-processing explanations of insight and related phenomena. In K. J. Gilhooley (Ed.), *Advances in the psychology of thinking* (pp. 1-44). London: Harvester-Wheatsheaf, (1992)
- [ 7 ] Stokes, P. D. Variability, constraints, and creativity: Shedding light on Claude Monet. *American Psychologist*, 56, 355-359, (2001)
- [ 8 ] Stokes, P. D. *Creativity from constraints: The psychology of breakthrough*, New York: Springer, (2005)
- [ 9 ] Goldschmidt, G. The dialectics of sketching. *Creativity Research Journal*, 4 (2), 123-143, (1991)
- [ 1 0 ] Goldschmidt, G. On visual design thinking: the cis kids of architecture. *Design Studies*, 15 (2), 158-174, (1994)
- [ 1 1 ] Wittgenstein, L. *Philosophical investigations*. New York: Macmillan. (1953)
- [ 1 2 ] Suwa, M. & Tversky, B. What do architects and students perceive in their design sketches?: a protocol analysis. *Design Studies*, 18 (4), 385-403, (1997)
- [ 1 3 ] Getzels, J. W., & Csikszentmihalyi, M. *The creative vision: A longitudinal study of problem finding in art*. New York, NY: Wiley, (1976)
- [ 1 4 ] Okada, T., & Ishibashi, K. (2016). Imitation, Inspiration, and Creation: Cognitive Process of Creative Drawing by Copying Others' Artworks. *Cognitive Science*, 41 (8), 1-34, (2016)

# 筋駆動人体モデルを用いた動作プランニング

## A planning system for multi-joint muscle driven motions

今井 涼太<sup>1\*</sup> 原口 誠<sup>1</sup>  
 Ryota Imai<sup>1</sup> Makoto Haraguchi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 北海道大学大学院情報科学研究科情報理工学専攻

<sup>1</sup> Computer Science Graduate school of Information Science and Technology  
 Hokkaido University

**Abstract:** 近年様々な手法で人間の動作アニメーションの生成が行われるようになった。その目的としては映画やゲームなどのキャラクターのリアルな動きの生成、スポーツ動作についてユーザにとって最適な動作を生成し動作上達のサポートをするシステムの開発など様々である。本研究では最終目標としてユーザにとって最適かつ上級者の模倣を行った動作の生成を目指す。個々の動作主体は筋骨格構造が全くの同一であるとは言えず、上級者の動作を外見的に真似ることが困難な場合も多い。本研究ではこうした事情を勘案し、個々の筋骨格パラメータを持つ二関節筋駆動モデルで、(1) その人が実行可能である、かつ (2) 上級者の動作と外形的に近い運動を生成できる筋レベルでのプランニングシステムを目指している。生成手法として、動作データ（重心位置、関節角度）のフレーム間を補間するように動作生成をおこなう。このとき、フレーム間を補間する状態の選択を行う際には、A\*探索手法と同様に遷移コスト、見積もりコストを用いた探索を行う。コストには身体の各部分、体節、関節、筋肉に作用する力学的な負荷を考慮したものを採用した。また今回は筋駆動での生成を行い、実際に動作する際の筋肉の使い方を動作の見た目とともに推定した。本研究では2次元での動作を実験として生成した。

## 1 はじめに

人間が何らかの動作についてその習得を目指す時、だれしものが最初、上手な人の模倣をしようとするところから始まる。これは日常の動作からスポーツ動作まで様々な動作について行われている。スポーツ動作については、その動作の熟練者の動きをよく観察し、自分の体でもその動作を再現しようと試行錯誤を繰り返すことで上達を図る。

また近年では、スポーツ動作の上達のため動作解析や最適化シミュレーションから最適動作の生成を行う研究が数多くある。生成された動作と実際のユーザの動作を比較することで上達のためのコーチングを行っている。最適な動作を生成し、ユーザに見せることでの指導は有効であることは間違いないが、先ほど述べたようにスポーツ動作においては熟練者の動きを観察し、真似をすることの方が一般的である。ではその熟練者の動きをまったく同じように再現した動作を生成して比較すればよいのかといえどもまだ十分とは言えない。そもそも熟練者と動作上達を目指すユー

ザの間には、身体的特徴「寸法・重さ・筋肉量」が異なるということがあり、完全な再現は不可能であると考えられるからである。仮にそうした特徴が全く同じであったとしても、筋肉収縮のタイミングや力の加減など、筋肉の使いかたは訓練と試行錯誤が必要であり、その点において熟練者と初心者では全く異なる。

そこで本研究では最終的な目標とし、熟練者の動作に似ている、かつユーザの筋骨格構造に適した動作の生成を目指す。今回はそのために必要な動作のプランニングを多関節筋駆動で行うシステムを構築した。具体的には、動作の外形から取得した関節角データの一部（実験では初期、最終、および中間状態の関節角）をお手本動作とし、それをプランナーが仮定する筋力や骨格に関する物理パラメータに基づいた筋肉レベルでの動作で、お手本動作と外形的に類似したものを生成することが目標である。ここで、多関節筋駆動モデルを用いる理由は、運動とは複数の筋肉の協調制御の結果であり、無駄のないスムーズな動作はその帰結であるとの研究 [10] に依っている。

動作生成を行うにあたり、筋骨格に適しているか否かをコスト関数を用いて判定した。コスト関数として体節、関節、筋肉といった人間の筋骨格に作用する力学的なエネルギー変化を用い、これができるだけコス

\*連絡先：〒060-0814 札幌市北区北14西9 北海道大学情報科学研究科

今井涼太・原口誠

トが小さくなる動作を生成した。

## 2 関連研究

### 2.1 同化動作生成手法

先行研究が提案した同化動作生成手法 [1] では、与えられた動作データから別の動作、または別のキャラクターがしたその動作を自動で生成する手法であった。この手法での動作生成方法の流れは、与えられている動作の特徴状態列（動作データ）から再利用可能な状態を見つけ（同定処理）、その状態間を補完する処理を行い（補足処理）、その再利用した状態を含めて生成された動作状態列の関節角度をモデルが再現可能な角度に適用する処理を行い（適用処理）、動作生成を完了としていた。

動作を生成するために必要とされるトルク・力ができるだけ最小となるようにして生成される動作をスムーズな動作（目標動作）であると定義している。探索の入力として、ある時刻でのキャラクターの状態についてを与えている。キャラクターの状態として、

- (1) 位置：キャラクターが空間内でどこにいるのか
  - (2) 姿勢：キャラクターがどんな姿勢にあるのか
  - (3) 接触：キャラクターはどの物体に接触しているのか
  - (4) 力とトルク：キャラクターの筋肉、体節にどれくらいのトルクと力が作用しているのか
- を含んでいる。

#### 1. 同定処理

規範となるお手本動作から再利用できる部分を求める。与えられている動作  $M_s = (S_1, \dots, S_f)$  から再利用可能な部分  $M_R$  を同定する。そのために、 $M_R$  の始まりの状態を  $S^*$ 、終わりの状態を  $S^{**}$  とした時、コスト  $h(S_i, S^*)$ 、 $h(S_j, S_g)$  が最小となる動作状態を求める。これにより求めた状態を再利用可能な動作部分の先頭状態とする。

#### 2. 補足処理

同定処理から求めた再利用できるフレームのその間を補間していく。補間の際に A\*探索アルゴリズムを用いており、その見積もりコスト関数として重力、慣性力を考慮したコストを使用していた。また実コスト関数としては先の見積もりコスト関数に、隣接する体節から伝播する力を考慮していた。関節の番号を  $j(1 \leq j \leq J)$ 、体節の番号を  $b(1 \leq b \leq B)$ 、関節に作用するトルクを  $T$ 、力を  $N$ 、関節角度を  $\theta$ 、体節の重心位置を  $p$  として

見積もりコスト関数

$$h(S, S') = \sum_{j=1}^J h_T(S, S') + \sum_{b=1}^B h_N(S, S'),$$

$$h_T(S, S') = \left| \vec{T}_j(S, S') \cdot \frac{\vec{\theta}_j(S') - \vec{\theta}_j(S)}{dt} \right|,$$

$$h_N(S, S') = \left| \vec{N}_b(S, S') \cdot \frac{\vec{p}_b(S') - \vec{p}_b(S)}{dt} \right|,$$

実コスト関数

$$g(S, S') = \sum_{j=1}^J g_T(S, S') + \sum_{b=1}^B g_N(S, S'),$$

$$g_T(S, S') = \left| \vec{T}_j(S, S') \cdot \frac{\vec{\theta}_j(S') - \vec{\theta}_j(S)}{dt} \right|,$$

$$g_N(S, S') = \left| \vec{N}_b(S, S') \cdot \frac{\vec{p}_b(S') - \vec{p}_b(S)}{dt} \right|,$$

### 3. 適用処理

ここまでで作成した動作について、各関節の角度を目標キャラクターでも再現できるものに変換する。そのままでは同じ動作が行えない場合のために、目標キャラクターの動作と、生成した動作の元データのキャラクターの動作について、エネルギー変化量が同程度の割合になるように修正をする。

## 2.2 筋肉の数理学モデル

筋肉の筋張力を推定するために筋肉の数理学モデル Hill-Stroeve モデル [12] がある。この数理学モデルでは筋肉の活性度、伸縮速度、筋肉長から筋張力を推定することができる。筋肉の活性度とは、筋肉の運動単位での活性割合を表す。これは 0 から 1 までの値をとる。筋肉がどれだけ働いているのかの指標として本研究では考える。

このモデルによって筋肉の性質である

- 筋長-筋張力の関係  
筋肉は自然長のとき最大張力を発揮し、一定を超えると随意と無関係に受動的な静止張力が生じる
- 速度-筋張力の関係  
筋の伸縮速度と張力の間には関係がある

$$f_i(a_i, l_i, i_i) = a_i \cdot F_{l_{ce_i}}(l_{ce_i}) \cdot F_{v_{ce_i}}(i_{ce_i}) \cdot F_{max_i}$$

ただし、

$$F_{l_{ce}}(l_{ce}) = \exp \left[ - \left( \frac{l_{ce} - l_{ce0}}{l_{cesh}} \right)^2 \right]$$

$$F_{vce}(i_{ce}) = \begin{cases} 0 & (i_{ce} \leq -v_{max}(a, l_{ce})) \\ \frac{V_{sh}V_{shl}v_{max}(a, l_{ce}) + V_{ml}i_{ce}}{V_{sh}V_{shl}v_{max}(a, l_{ce}) + i_{ce}} & (0 < i_{ce}) \\ \frac{V_{sh}(v_{max}(a, l_{ce}) + i_{ce})}{V_{sh}(v_{max}(a, l_{ce})) - i_{ce}} & (otherwise) \end{cases}$$

$$v_{max}(a, l_{ce}) = V_{vm}(1 - V_{er}(1 - aF_{lce}))$$

$i$  は筋の番号 ( $i = 1, \dots, n$ ) であり、 $l$  は筋長、 $i$  は筋伸縮速度、 $F_{lce_i}$  は「筋長-張力の関係」、 $F_{vce_i}$  は「速度-張力の関係」をそれぞれ表す関数である。また、 $a$  は筋活性度 ( $0 \leq a_i \leq 1$ )、 $l_i$  は筋長、 $l_{ce_i}$  は収縮要素の長さ、 $l_{ce}$  は（腱の長さを差し引いた）筋の収縮要素の長さ、 $l_{ce0}$  は特に筋の自然長、 $l_{cesh}$  は筋長の可変範囲から決まるパラメータである。 $V_{sh}$ 、 $V_{shl}$ 、 $V_{ml}$  は伸縮時と伸長時のパラメータであり、 $V_{vm}$  は、等張性収縮時の最大速度、 $V_{er}$  筋活動状態の最大速度とする。この筋長と収縮速度は以下の式を用いて決める。

$$l_i = l_{ri} - r_{i1}(\theta_1 - \theta_{r1}) - r_{i2}(\theta_2 - \theta_{r2}) - r_{i3}(\theta_3 - \theta_{r3})$$

$$i_i = -r_{i1}\dot{\theta}_1 - r_{i2}\dot{\theta}_2 - r_{i3}\dot{\theta}_3$$

$l_{ri}$  は筋の自然長、 $r_{ij}$  はモーメントアーム（力の作用するラインから回転軸までの距離）、 $\theta_{rj}$  は筋自然長時の関節角度とする。なお間接トルク  $\tau_j$  は、

$$\tau_j = \sum r_{ij} f_i(a_i, l_i, i_i)$$

と表される。

本来筋肉の長さや伸縮速度は本来の筋肉の構造上複雑に変化するわけであるが、今回は関節を滑車として仮定して求めた。

### 3 提案手法

動作生成をするために、本研究では計算機上に人型のモデルを設計し、物理エンジン (ODE: Open Dynamics Engine) を用いた動力学計算を行い動きをシミュレーションした。今回目指す模倣動作は関節の角度、そして重心位置が類似しているものを模倣動作と定義した。本研究で人体の動作を生成するとき、人体の筋肉の使い方をプランニングする手法を用いる。初期状態の人体モデルが、入力された動作データのフレームに近づくようにその中間にあたる動作フレームを生成し、目標状態までのプランニングを行う。モデルの動作を決めるために、先で述べた筋肉の数理モデルを用いてトルクを計算している。このトルクは筋肉の活性度から

求めることができるため、本研究では動作を行ううえでの筋肉の活性度をフレームごとにごとに探索することとなる。活性度から得られたトルクから動力学計算を行い、モデルがもつ加速度、速度、変位を求める。今回は活性度の変化を-0.02、0、+0.02の3パターンに制限して前回の状態での最適とされた筋肉の活性度から変化させて探索を行った。

本研究では先に述べている先行研究と同様に、状態遷移にかかるコストを動力学の観点から見たトルクと力より算出されるエネルギーコストが小さいものを自然な動作とし、さらに筋駆動によって動作生成を行うことから、その筋肉が必要としたエネルギーコストを考慮している。このコストが小さいものを本研究では「自然な動作」「筋骨格に適した動作」として定義している。なお、シミュレーションの単位時間は0.001[s]に設定した。

また本研究での状態は

- (1) 筋肉の活性度ベクトル
  - (2) 各体節の位置・姿勢
  - (3) 各体節の速度・角速度
- である。

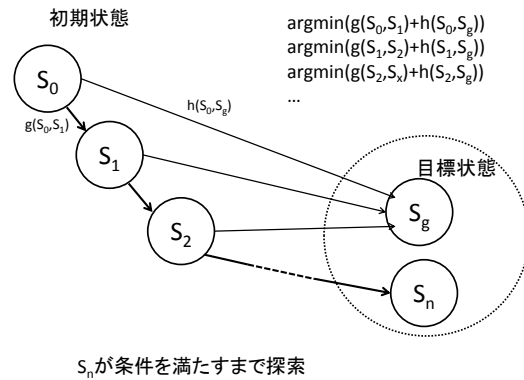


図 1: 補間動作（新しい状態の挿入）

#### 3.1 入力データ

本研究で用いるデータについて、入力として与えるのは各体節の重心位置座標と各関節の角度である。これは計算機上のモデルと入力データの主体との間にある寸法の違いから重心位置の違いを考慮するためである。

今回は2次元での動作を考えた。各体節の体の前後・上下への動きを考えて生成した。

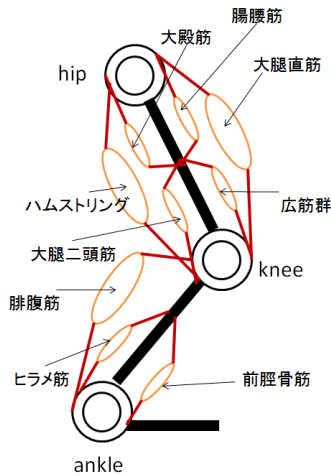


図 2: 実装した足の筋構造

### 3.2 筋駆動での生成

本研究では、物理エンジンをもちいて動力学計算をする。筋駆動での動作を生成するために、筋肉の数理モデルから筋張力を計算し、その筋張力から推定される関節トルクによりモデルの動きを生み出す。数理モデルから筋張力を求めるために必要な筋肉の活性度を変化させることで関節トルクを制御し、筋駆動での生成を行う。

本研究では多関節筋骨格運動を対象としている。人間のボディを計算機上に設計するに当たり、体を頭、胸元、腰回り、大腿部、下腿部、足に分けて考えた。各体節の形状は円柱 (Cylinder) で表現することとした。

実装した筋肉は、人間の動作に大きな影響を与える主たる筋肉である。いくつもの筋肉が密集している個所は、「筋群」として1つにまとめることとした。まず股関節から膝関節までの間に、単関節筋として腸腰筋、広筋群、大腿二頭筋、二関節筋として大腿直筋、ハムストリング。膝関節から足首関節までに、前脛骨筋、ヒラメ筋、二関節筋として腓腹筋、腹筋と背筋を実装した。

### 3.3 コスト関数

コスト関数として、本研究では動作の結果体節にかかる力、動作を行うのに必要なトルク、筋肉の筋張力を考慮したものを用いた。体節にかかる力、必要トルクについてのコストは先行研究 [1] と同様であるが、筋肉のコストについては筋肉の番号を  $m(1 \leq m \leq M)$ 、筋張力を  $F$ 、筋長を  $l$  として、

$$g_M(S, S') = \left| F_b(S, S') \cdot \frac{l_m(S') - l_m(S)}{dt} \right|$$

として、先行研究の実コストにこれを加えた。

$$g(S, S') = \sum_{j=1}^J g_T(S, S') + \sum_{b=1}^B g_N(S, S') + \sum_{m=1}^M g_m(S, S')$$

見積もりコストは先行研究と同様である。

## 4 動作生成実験

動作生成として、「しゃがみ込む」「立ち上がる」という動作を生成した。関節角度の変化、体節重心位置の変化が重要であろうと考えられる動作として選択した。入力として、「しゃがみ込んだ状態での各関節角度、各体節重心位置」「立ち姿の関節角度、重心位置」の2つのフレームを入力として与え、その間のフレームを補間した。なお本研究では下半身の筋肉にのみ着目したため、腕について省略したモデルを用いた。今回の実験で用いたモデルの各体節の寸法、重さについては以下のように設定した。

| 体節    | 長さ      | 質量   |
|-------|---------|------|
| 頭     | 半径 10cm | 3kg  |
| ボディ   | 85cm    | 35kg |
| 太もも   | 40cm    | 13kg |
| ふくらはぎ | 40cm    | 10kg |
| 足     | 27cm    | 5kg  |

### 4.1 生成結果

生成結果として、見た目は図3図4のようになった。またこのときの筋活性度の結果は図5のようになった。

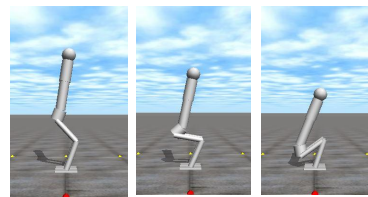


図 3: しゃがみ込み動作



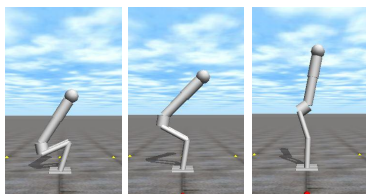


図 4: 立ち上がる動作

## 4.2 考察

実験により生成された動作の見た目(図3図4)からしゃがみこむときの上体を前に倒す、立ち上がる時の上体をさらに前に倒して重心を前にすることで体が前に倒れこまないようにする動作が生成することができた。

また図5からわかるように一関節筋、二関節筋が動作をするときにどのように働いているのか、それぞれの筋肉の活性度で示すことができた。動作を起こすための姿勢、角速度制御を一関節筋と二関節筋が互いに協調しながら行っていることが見て取れる。一関節筋だけで動作を生成するよりも二関節筋も活性させて動作を行った方が結果的にコストが小さく済むことが同様に確認できた。

しかしながら今回の実験では入力として与えた中間状態(しゃがんでいるときの状態)での膝の角度より明らかに沈み込んでの動作が生成された。図5では入力データの膝の角度に到達した時間には膝を伸ばすための筋肉が活性し始めていることが分かるため、筋肉の筋張力による膝を伸ばすための関節トルクよりもその姿勢に至ったときの慣性力が大きかったと考えられる。

## 5 まとめと今後の課題

今回の生成手法により、動作の生成を多関節筋駆動で行うことができ、動作の見た目とその際の筋肉の活性度を推定することができた。

しかしながら今回の研究では、全身の筋肉については下半身の筋肉のみを考慮した動作生成であったために、腕の動きなど本来自然な動作を生成するために予備運動として動く体節部分の動きを生成することがなかった。計算時間の関係から省略したが、全身の筋肉を実装し全身動作の生成が求められる。

また筋肉の活性度について、その変化を $-0.02, 0, +0.02$ の3パターンに限定したために、じっくりとした力の掛け方での動作生成しかできておらず、筋肉の瞬発的な力の発揮を表現することができなかった。最終目的としてスポーツの模倣動作を生成するためには、瞬発的な筋肉の使い方が必須であるため、筋肉の活性度の変化量について考慮する必要がある。

また先の考察で述べたように、慣性力により動作が入力として与えた動作データのフレームをオーバーランしてしまったことから、入力として与えられた中間動作までの補間を動作の姿勢レベルのみで考えるのではなく、各体節の加速度・角加速度を考慮しなければならないと考えられる。

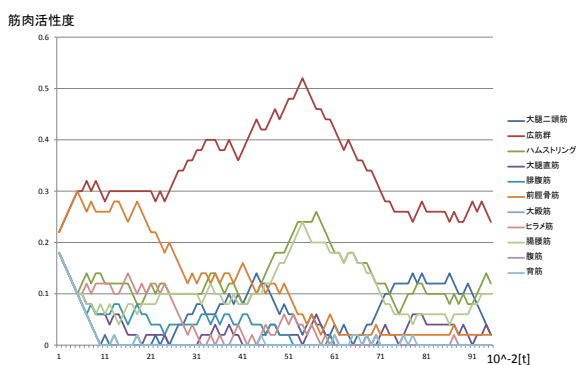


図 5: しゃがんでから立ち上がる動作の各筋肉活性度

## 参考文献

- [1] 本林正裕, 原口誠. 様々な特徴のキャラクタに対する同化動作生成手法. 電子情報通信学会論文誌. Vol.J87-D-II No.7. pp.1473-1486. 2004
- [2] 秋葉隆次. 二関節筋の機能を考慮した人体モデルにおける動作生成の研究. 北海道大学大学院情報科学研究科コンピュータサイエンス専攻修士論文. 2008
- [3] 辻敏夫, 池本貴志, 伊藤宏司, 長町三生. 冗長性を有する上肢多自由度運動におけるインピーダンス変換法. 電気学会論文誌. C-108. pp.471-477. 1988
- [4] 黒崎浩介, 村井昭彦, 中村仁彦. 人間の全身インピーダンスのモデリング. 第26回日本ロボット学会学術講演会. ROMBUNNO.1I3-03. 2008
- [5] 鈴木一郎, 山根克, 多屋浩嗣, 栗原一貴, 中村仁彦. 高速動力学計算法を用いた詳細人体モデルに基づく人間の力学計算. 日本ロボット学会創立20周年記念学術講演会. 3C14. 2002
- [6] 伊藤宏司. 身体知システム論 ヒューマンロボティクスによる運動の学習と制御. 共立出版. 2005
- [7] 出村公成. 簡単! 実践! ロボットシュミレーション Open Dynamics Engine によるロボットプログラミング. 森北出版株式会社. 2009
- [8] 阿部龍蔵 (著), 長岡洋介, 原康夫 (編). 岩波基礎物理シリーズ 力学・解析力学. 岩波書店. 2001
- [9] Vladimir M.Zatsiorsky (著), 鳥居俊 (監訳). Kinematics of Human Motion (身体動作の運動学), 有限会社ナツプ. 2003
- [10] 熊本水頼. ヒューマノイド工学: 生物進化から学ぶ2関節筋ロボット機構. 東京電機大学出版局, 229ページ (2006).
- [11] Scott L. Delp, J. Peter Loan, Melissa G. Hoy, Felix E. Zajac, member, IEEE, Eric L. Topp, and Joseph M. Rosen. An Interactive Graphics-Based Model of the Lower Extremity to study Orthopaedic Surgical Procedures. IEEE TRANSACTIONS ON BIOMEDICAL ENGINEERING. Vol.37. No.8. pp.757-767.AUGUST 1990
- [12] Stroeve, S., Impedance characteristics of a neuro musculoskeletal model of the human arm I. Posture control, Journal of Biological Cybernetics. Vol.81. No.81. pp.475-494. 1999