

形式概念分析を用いた 武道における型の習熟支援手法の検討

A Support Method Mastering a Kata in Martial Arts Using Formal Concept Analysis

増田 康介	島 孔介	石樽 隼人
Kosuke Masuda	Kosuke Shima	Hayato Ishigure
武藤 敦子	森山 甲一	犬塚 信博
Atsuko Mutoh	Koichi Moriyama	Nobuhiro Inuzuka

名古屋工業大学大学院 工学研究科情報工学専攻
Dept. of Computer Science and Engineering, Graduate School of Engineering,
Nagoya Institute of Technology

1. はじめに

近年、スマートフォンやウェアラブル端末の普及により場所を選ばずに人間の動きに伴う加速度を収集して、人間の行動の分析に利用する研究が広くされている [3][4][5][6][7][8]。行動には腕を振る動作や体の上下など様々な動作が現れ、腕の振り方やその振れ幅などの個人差があり、これを分析することは、本人認証や健康状態推定など様々な応用が考えられる [4][8]。これらの研究の中に、別の人が同じ行動をした際の質の違いなどを分析をする研究 [3] があるが、行動の上手さに着目した研究は少ない。

そこで本研究では、演武競技において型の上手さに着目する。演武競技とは、武道・武術において学んだ型を披露する競技であり、熟練者の審判の目視による評価が一般的である。演武競技の型は行うべき行動があらかじめ決められており、行動が切り出しやすく、段位、級位等によって型の上手さが存在し、技術力や熟練度などの個人差が現れやすいため行動の分析に良い対象であると考えられる。また、演武者の型の習熟には師範のアドバイスが必要になるが、アドバイスが得られない状況下でも自主的に練習し、効率良く習熟していくことが望ましい。それには、段階を踏んで習熟に必要なコツを掴む練習をしていくことが大事となる。

そこで、本稿では、習熟につながるような動きの特徴を段階的に把握するために形式概念分析を用いる。形式概念分析は、束論の応用として提案されたデータ分析手法である [2]。形式概念分析では、対象と属性の対応関係を表す形式文脈から、数学的に定義された

概念である形式概念を得て、得られた形式概念を利用してデータ分析を行う。また、形式概念がなす束構造(概念束)の可視化により、データの構造の理解を助けることができ、事象の含意関係などの理解が容易になる。また、概念束は階層構造であり、隣接する概念には包含関係が存在する。したがって、概念に演武競技の習熟に関わる情報を持たせることで、習熟に必要な動きの特徴の関係が段階的に把握できる。

本稿では、動きから得た特徴を属性とした形式文脈から概念束を得て、概念間に距離を定義することで演武者の型の習熟につながる動きの特徴を段階的に提示する手法を提案する。習熟したい演武者(以降、ユーザーと呼ぶ。)は、熟練者の持つ動きの特徴を持つことができれば習熟につながると考えられることから、提案手法では、ユーザーの持つ動きの特徴により束上でのユーザー自身の位置を定め、熟練者のいる目標概念への最短経路を求めることで、熟練者の特徴を段階的に提示する。そして、ユーザーは提示された特徴を獲得できるように練習をすることで型の習熟につなげる。

実験では演武者の腰にスマートフォンを固定し、型を行う際の加速度を計測する。得られた加速度データから島らの手法 [6] を用いて個人差を表すルールを抽出する。その得られたルールを属性、加速度データのIDを対象とした形式文脈を作成し、概念束を得る。得られた概念束の各概念間に身体的特徴や経験年数などを基にした距離を定義し、熟練者のいる概念への最短経路を求める。本稿で定義した距離を用いた経路と、Blachon らによって定義された概念間の距離 [1] を用いた経路を比較し、ユーザーの型の習熟に必要な動きの特徴を段階的に提示する習熟支援手法を検討する。

本研究は、ユーザーの型の習熟に必要な動きの特徴を段階的に提示し、効率の良い演武の習熟につなげることが目的である。また、応用例の少ない形式概念分析のスポーツ科学の分野への応用の可能性を探る。

2. 形式概念分析

2.1 形式概念

形式概念分析は、形式文脈と呼ばれるデータから、形式概念と概念束を得ることでデータ分析を行う。形式文脈 $K = (G, M, I)$ は、対象の集合 G と、それが取り得る属性の集合 M の間の二項関係 $I \subseteq G \times M$ から構成される。対象 $g \in G$ 、属性 $m \in M$ に対して、 $(g, m) \in I$ であるとき対象 g は属性 m を持つと言い、 gIm と書く。また K において、 $X \subseteq G$ と $Y \subseteq M$ に対して、式 (1), (2) で写像を定義する。

$$X \mapsto X^I := \{m \in M \mid gIm \text{ for all } g \in X\} \quad (1)$$

$$Y \mapsto Y^I := \{g \in G \mid gIm \text{ for all } m \in Y\} \quad (2)$$

対象集合 $A \subseteq G$ 、属性集合 $B \subseteq M$ に対して、 $A = B^I$ かつ $B = A^I$ である組 (A, B) を K の形式概念と言う。この時、 A を外延、 B を内包と言う。

また、二つの形式概念 (A_1, B_1) 、 (A_2, B_2) に対して式 (3) のように半順序が定義される。

$$(A_1, B_1) \geq (A_2, B_2) \Leftrightarrow A_1 \supseteq A_2 \Leftrightarrow B_1 \subseteq B_2 \quad (3)$$

この順序により K の形式概念全てからなる集合は束を構成する。これを概念束と呼ぶ。

表 1 は四つの対象、三つの属性からなる形式文脈である。形式文脈中の「×」は、対象がその属性を持つことを意味する。表 1 の形式文脈からは 6 つの形式概念が得られる。図 1、2 は表 1 の形式文脈から得られる概念束を表すハッセ図である。図中のノードは形式概念、エッジは順序関係を表す。図 2 は図 1 の略記法である。略記では、概念に新たに追加される対象や属性のみを記してある。ノードの上に記されているアルファベットはその概念に新たに追加される属性、下に記されている数字は対象を表している。上位のノードは下位のノードの対象を併せ持ち、下位のノードは上位のノードの属性を併せ持つ。以下、概念束を表示する際は略記で表示する。

2.2 形式概念間の距離

Blachon らは類似した形式概念のクラスタリングを行うために、形式概念間の距離を定義した [1]。二つ

表 1: 形式文脈の例

名前	卵生 (a)	言葉 (b)	母乳 (c)
ハト (1)	×		
ヒト (2)		×	×
カモノハシ (3)	×		×
ネコ (4)			×

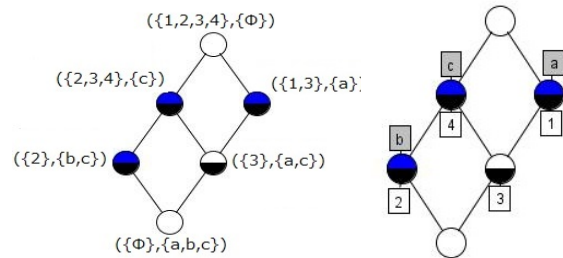


図 1: ハッセ図

図 2: 略図

の形式概念 $C_1 = (A_1, B_1)$ と $C_2 = (A_2, B_2)$ の距離 $d_1(C_1, C_2)$ は式 (4) のように定義される。

$$d_1(C_1, C_2) = \frac{1}{2} \frac{|A_1 \Delta A_2|}{|A_1 \cup A_2|} + \frac{1}{2} \frac{|B_1 \Delta B_2|}{|B_1 \cup B_2|} \quad (4)$$

ここで、 $S_1 \Delta S_2 = (S_1 \cup S_2) \setminus (S_1 \cap S_2)$ である。すなわち、形式概念間の距離は、外延間の Jaccard 距離と内包間の Jaccard 距離の平均である。この距離は、言わば外延と内包の数を用いた距離であり、概念同士の関連度を意味している。

しかし、本研究では「動きの特徴」を属性とした形式文脈を扱う。動きは、体型や熟練度に依存し、似たような体型の人同士の方が似たような動きをしやすいため Blachon らの距離を用いても習熟という意味では不十分になる。そこで、身体的特徴や経験年数、師範の評価などの外部的な情報を用いて距離を定義する。

3. 提案手法

3.1 提案手法の流れ

ユーザーは、熟練者の持つ動きの特徴を持つことができれば習熟につながると考えられることから、習熟への要素を段階的に提示する手法を提案する。この手法により、ユーザーは自分に必要な特徴を段階的に把握でき、その特徴を得られるような練習をすることで習熟につながる。

以下に、提案する習熟支援手法の流れを示す。

- ① 加速度のデータセットから動きの特徴を属性とした概念束を作成する。
- ② 概念束の各概念間に定義した距離 (3.2 で説明) を求める。
- ③ ユーザーの加速度を計測し、属性を抽出する。
- ④ ユーザーの持つ属性が一致する概念束中の概念の位置を特定。ただし、当てはまらない場合は最も多くの属性が共通する概念とする。
- ⑤ ユーザーと身体的特徴が最も似ている熟練者を目標者とし、概念束において目標者が外延に含まれる概念の内、下限の概念 (内包が目標者の属性と一致する概念) を目標概念とする
- ⑥ ユーザーの概念束の位置から目標概念への最短経路を求める。ここで、目標概念が複数ある場合、目標概念への総距離が最も短い経路を最短経路とする。
- ⑦ 最短経路の各概念の内包で表されている動きの特徴を目標概念への経路順にユーザーに提示する。

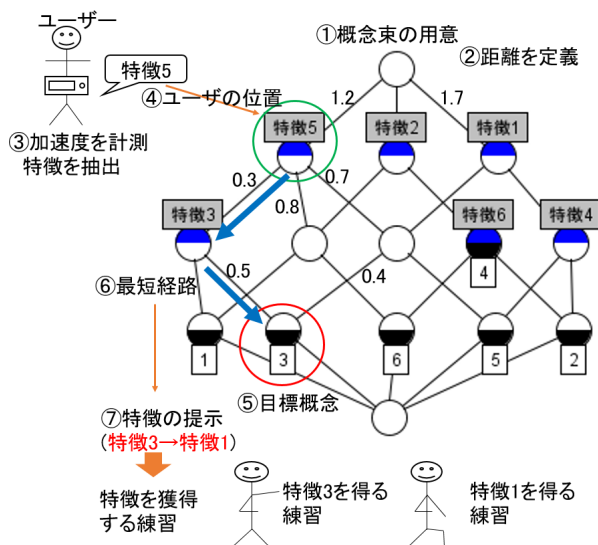


図 3: 提案手法のイメージ図

図 3 に例を用いた提案手法のイメージ図を示す。ユーザーが特徴 5 を持つとすると、緑丸の概念に位置する。ユーザーと身体的特徴の似ている ID3 (目標者) を外延に含む概念の内、下限の概念 (赤丸の概念) を目標概念とする。この場合、ユーザーは特徴 3 → 特徴 1 の順に特徴を獲得すれば ID3 の人のようにすることができる。

3.2 形式概念間の距離の定義

本稿では、熟練者のいる概念への最短経路を求めるために、身体的特徴や経験年数などを用いて概念間に距離を新たに定義する。そこには、演武者の身体的特徴や経験年数、師範の目視による評価などの形式文脈以外の情報を用いる。この情報を要素と呼ぶ。式 (5) に二つの形式概念 C_1 と C_2 の距離 $d_2(C_1, C_2)$ を定義する。ただし C_1 は上位概念、 C_2 を下位概念とする。

$$d_2(C_1, C_2) = \sqrt{\sum_{e \in E} \frac{(\text{mean}_e(C_{1,ex}) - \text{mean}_e(C_{2,ex}))^2}{V_{e,ex}}} \times \text{score} \quad (5)$$

$$(E = \{ \text{要素 1, 要素 2, } \dots, \text{要素 } m \})$$

$C_{1,ex}$ は C_1 中の外延、 $C_{2,ex}$ は C_2 中の外延を表す。 $\text{mean}_e(C_{1,ex})$ は要素 e における C_1 中の外延の平均値である。 $V_{e,ex}$ は、要素 e における全対象の分散値である。また、式 (5) 中の score は、下位概念中の外延 ($C_{2,ex}$) の師範の三段階評価に基づいて評価の高い人が多いほど値が小さくなるように重みづけをした値である式 (6)。ここで評価は A、B、C の三段階で A、B、C の順に評価が高いものとする。

$$\text{score} = \sum_{i=1}^n \begin{cases} \frac{1}{3} & (C_2 \text{ の外延で } i \text{ 番目の対象の評価} = A) \\ \frac{2}{3} & (C_2 \text{ の外延で } i \text{ 番目の対象の評価} = B) \\ 1 & (C_2 \text{ の外延で } i \text{ 番目の対象の評価} = C) \end{cases} \quad (6)$$

($n = C_2$ の外延数)

要素 1、要素 2、 \dots 、要素 n それぞれにおいて、 C_1 中の外延 ($C_{1,ex}$) の値平均と C_2 中の外延 ($C_{2,ex}$) の値の平均の差の二乗を求め、各要素ごとの全対象の分散 $V_{i,ex}$ で割って標準化する。そして、全要素分足し合わせて二乗根を取った値に score を掛けた値が $d_2(C_1, C_2)$ の定義である。

2.2 で説明した Blachon らの距離では概念の外延、内包のみで距離を定義しており、概念同士の類似度を表していたが、提案手法では概念同士の身体的近さ、熟練度などの外部的情報を考慮した近さを表している。

4. 実験

4.1 実験方法

実験で扱う演武競技はテコンドーとした。テコンドーには、段位や級が存在するため熟練度の分析において良い対象であると言える。テコンドー選手 9 名に、腰にスマートフォンを固定した状態でチョンジという型を行ってもらい、加速度を計測する。チョンジは、19 個の技から構成され、初歩に習う基本的な型であり、

個人差が大きく表れるとされる。個人差とは、技術力や熟練度からなる上手さである。計測には「一定ビットレート加速度ロガー」というアプリを用いた。同じ選手に複数回型を行ってもらったため、加速度データは合計 23 個であった。同じ選手であっても型の動きは計測の度に変化するため、本稿で扱う形式文脈の対象数は 23(=ID 数) とする。

次に、島らの手法 [6] を用いて得られた加速度から特徴を抽出する。この手法は、ラジオ体操の加速度データを対象に、以下の流れで動きの特徴を抽出する。

- 時系列の加速度データから窓を用いた平均値や分散値により文字列(動作語と呼ぶ)を生成する
- 全ての文字列中に頻出する部分文字列から特徴的な動きを求める
- その特徴的な動きの組について共起関係と排他的関係によって動きのルールを求める

図 4 は島らの手法のイメージ図である。

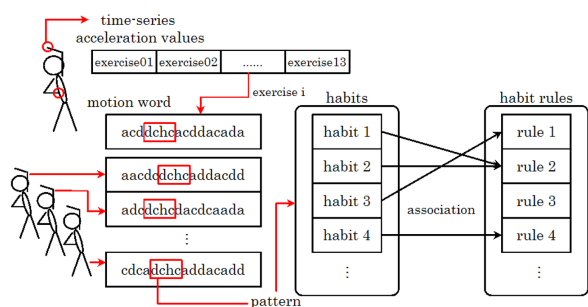


図 4: 島らの手法のイメージ図 ([5][6] 参考)

本稿では、計測した加速度データから特徴である「動きのルール」を抽出し、形式文脈の属性とする。各加速度データが「動きのルール」を持つかどうかで形式文脈(表 2)を生成する。

表 2: 実験で扱う形式文脈

	rule1	rule2	rule3	...	rule25
1			×		
2			×		×
3	×	×	×		
...					
21			×		
22					×
23					

また、選手 9 名に対して年齢、身長、体重、テコンドー歴を問うアンケートを実施し、これを要素として

各概念間に 3.2 で定義した距離を求める。そして、チョンジを行っている際には師範の目視による三段階の評価をもらう。加速度データ数 (ID 数) 23 の内、評価 A が 4 件 (加速度 ID : 5、6、11、12)、評価 B が 14 件 (加速度 ID : 3、4、7、8、9、10、13、14、15、17、20、21、22、23)、評価 C が 5 件 (加速度 ID : 1、2、16、18、19) であった。

提案手法により、ユーザーは目標者のように習熟するために必要な「動きのルール」を段階的に把握できる。

4.2 実験結果

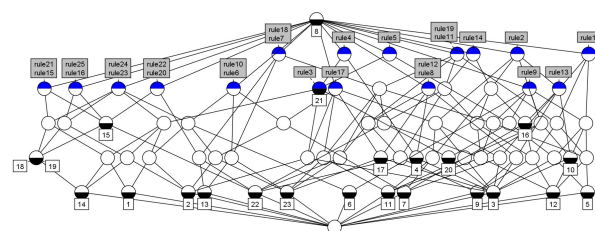


図 5: 表 2 の概念束

図 5 に実験により作成された概念束を示す。そして、図 5 の各概念間に、選手の年齢、身長、体重、テコンドー歴を要素として 3.2 で定義した距離を求め、ユーザーの位置する概念から目標概念への最短経路を求めた。ここで、属性を 1 つも持っていない ID8 をユーザーとした場合の結果を図 6 から図 9 に示す。ユーザーには目標者が複数存在したため、その目標概念への経路を全て示す。図中の青丸で囲ってある概念がユーザーの位置する概念であり、赤丸が目標概念である。また、赤線が提案手法による経路、緑線が Blachon の距離による経路である。

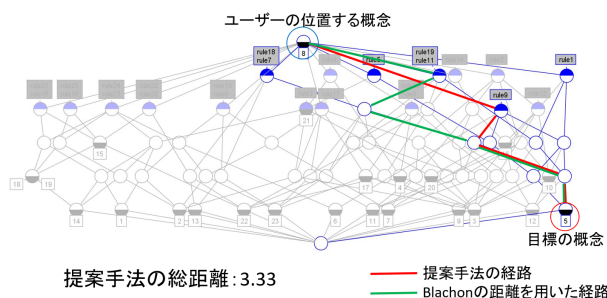


図 6: 加速度データ ID:5 を目標者

図 6 より、加速度 ID5 を目標とする場合、提案手法では rule9→rule7、11、18、19→rule1→rule5 の順に動きのルールを獲得していくことが望ましいことがわか

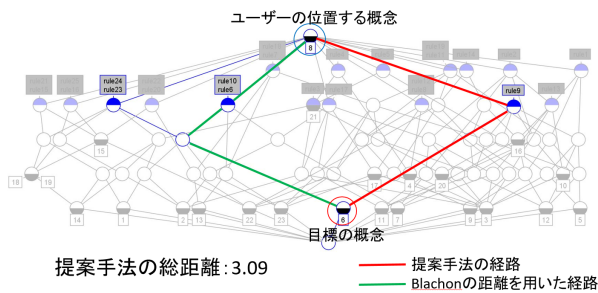


図 7: 加速度データ ID:6 を目標者

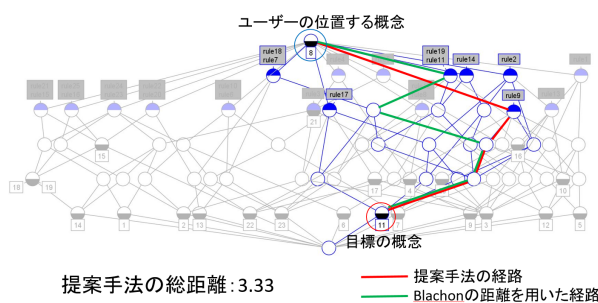


図 8: 加速度データ ID:11 を目標者

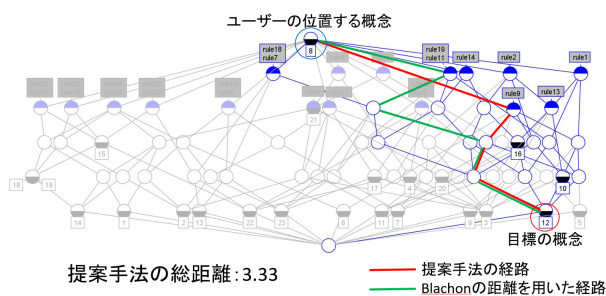


図 9: 加速度データ ID:12 を目標者

る。一方、Blachonらの距離を用いた経路では、rule11、19→rule7、18→rule9→rule1→rule5の順となった。同様に図7より、加速度ID6を目標とする場合、提案手法では、rule9→rule6、10、23、24の順で特徴の獲得が望ましく、Blachonらの距離を用いた経路では、rule6、10→rule23、24→rule9の順となった。また、図8より、加速度ID11を目標とする場合、提案手法ではrule9→rule7、11、18、19→rule2、14→rule1、13の順に対し、Blachonらの距離を用いた経路では、rule11、19→rule7、18→rule9→rule2、14→rule1、13であった。最後に図9より、加速度ID12を目標とする場合、提案手法ではrule9→rule7、11、18、19→rule2、14→rule1、13の順に対し、Blachonらの距離を用いた経路ではrule11、19→rule7、18→rule9→rule2→rule1、13であった。

また、目標概念への総距離が最も短い経路は図7であった。したがって、提案手法ではユーザーへの習熟支援として、rule9→rule6、10、23、24を順に獲得するように提示する。

4.3 考察

提案手法では、評価Aの誰を目標者としても、目標概念への最短経路を辿る際に動きの特徴rule9は最初に獲得することが望ましいという結果であった。したがって、rule9の動きはこの型を習熟するための第一歩の動きであると言える。また、多くの場合でrule1は最後の方に獲得すべき特徴ということが分かることから、rule1は熟練してこないと身に付けることのできない特徴である可能性がある。しかし、どの結果も似たような経路であった。これは目標者である評価Aの4人が同一人物であり、データ量の少なさが問題であるからと考える。

一方で、Blachonの距離を用いた経路では繋がる概念同士の距離が小さい、つまり概念同士の類似度が大きいと言えても、ユーザーが経路を辿った時、そのruleが習熟につながるとは限らない。また、身体的特徴などにより獲得できない特徴もあると考える。

したがって、身体的特徴や経験年数、評価を考慮する提案手法により、ユーザーは目標者により近づくための段階的な動きの特徴の把握ができ、より効率的な型の習熟につながると言える。しかし、動きの特徴であるruleが実際どのような動きであるかは分からないため、ruleの可視化や別の分かりやすい特徴を属性とすることが必要だと考える。

5. まとめ

本稿では、演武競技において習熟を目指す演武者は、目標とする人の動きの特徴を持つことができれば、習熟につながると考えた。そして、加速度から抽出した動きの特徴を属性とした概念束の各概念間に身体的特徴や経験年数、評価を考慮した距離を定義し、目標とする概念への最短経路を求め、段階的に動きによる特徴を示す習熟支援手法を提案した。

その結果、習熟したい演武者の目標とする選手への必要となる動きの特徴が段階的に提示できた。また、演武者が習熟するためにまず必要となる動きの特徴や、逆に熟練していかないと身に付かないであろう動きの特徴が存在することがわかった。

しかし、評価Aの人のデータが少ないため、似たような経路が出てしまうというデータ量の少なさが問題となった。今後は、A、B、Cの評価の人数が等しくなるようにデータを増やすことが課題である。また、

本稿では動きの特徴である rule の理想の獲得順は分かったが、それが具体的にどのような動きがわからなかった。したがって、rule の可視化や分かりやすい別の特徴を用いた同様な実験が必要である。また、今回 Blachon らの距離を用いた経路と比較したが、別の指標を用いた評価方法の検討が今後の課題として挙げられる。

謝辞

本研究を行うにあたり、ご協力頂いた岐阜テコンドークラブの岸師範、選手の皆さまに感謝致します。

参考文献

- [1] Blachon, S., Pensa, R. G., Besson, J., Robardet, C., Boulicaut, J. F., and Gandrillon, O.: Clustering Formal Concepts to Discover Biologically Relevant Knowledge from Gene Expression Data, In *Silico Biology*, Vol. 7, No. 4, 5, pp. 467-483 (2007)
- [2] Ganter, B. and Wille, R.: *Formal Concept Analysis: Mathematical Foundations*, Springer (1999)
- [3] 菊池直樹, 松田浩一; 腰部の加速度に着目した地域伝統舞踊の質の違いに関する分析法、人工知能学会全国大会論文集 (2017)
- [4] 今野慎介, 中村嘉隆, 白石陽, 高橋修: ウェアラブルセンサを用いた歩行動作による本人認証法の検討、情報処理学会研究報告、MBL-74 No.25(2015).
- [5] 島孔介, 犬塚信博, 山口陽平; ラジオ体操に現れる特徴的動作の発見とその関係の分析、情報処理学会研究報告、ICS-183 No.20(2016)
- [6] 島孔介, 森山甲一, 武藤敦子, 犬塚信博; ラジオ体操の区切りを利用しない加速度データの文字列表現と人の動作分析、情報処理学会研究報告、UBI-61 No.26(2019)
- [7] 樋口雄大, 山口弘純, 東野輝夫; スマートフォン内蔵センサを用いた鉄道乗車コンテキストの推定、情報処理学会研究報告モバイルコンピューティングとユビキタス通信、2015-MBL-75 No.35, pp.1-8(2015)
- [8] 細井悠貴, 松下宗一郎; 日常生活における特徴的歩行分析に関する研究、情報処理学会全国大会論文集、No.1, 297-298(2011)

パレード行進に関する基礎研究

Research of the military parade

奥川洋平¹ 久保正男¹

Yohei Okugawa¹ and Masao Kubo¹

¹防衛大学校 情報工学科

¹Dep. of Computer Science, National Defense Academy of Japan

Abstract: In the military organization, the military parade is important to show their majesty for audience, and the cadets in National Defense Academy of Japan have trainings a lot. However, there was no scientific research about the military parade, and many cadets need to participate in monotonous parade training. In order to establish the effective training for the military parade, we analyzed the military parade from multiple perspectives. In this paper, we introduce our findings of the military parade analysis: Modeling the military parade and Quantitative evaluation for the military parade.

1 緒言

軍事組織にとってパレード行進は、部隊の威容を示す大切な行事であり、防衛大学校においても行進訓練が多く実施されている。

パレード行進では、腕振りの角度や歩幅など、様々な統制事項が細かく設定されており、それらの決まりに従うとともに、行進曲のリズム、周囲のメンバーにあわせて行進を行う。

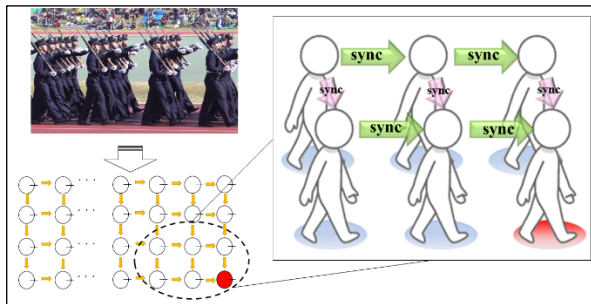


図1：パレード行進の模式図

図1左上写真のようにメンバー全員の手足が同期していると美しいパレード行進とみなされる。パレード行進の同期は簡単なように見えるが、行進全体を美しく揃えるという目標を全体で共有しながらも、図1右図のようにメンバーが相互に影響を及ぼし合っているため、行進全体のずれの修正は難しく、美しく均一に揃えるには多くの訓練が必要である。すなわちパレード行進は、統制事項通りに正しく歩行する技能の他に、周囲の人間との微妙な違いを都度調整をする技能も要求されるため、一見単純ながら複雑な身体技能であるといえる。

しかしながら、現在に至るまで行進に関する身体知の解明はされておらず、多数の参加者を要する単調な訓練を繰り返しているのが実情であり、効果的な訓練システムの開発が望まれている。

このような問題認識を背景に、我々は、効果的なパレード行進の訓練教材作成を最終的な目標に据え、複数の視点から行進の分析を行っている。集団行動の一つであるパレード行進の分析は、個人の技量に注目されがちであった身体知の解明に新しい知見をもたらす可能性があり、パレード行進以外にも有用であると言える。

本論文では、以下の2つの視点からの研究成果を紹介する。

一つ目が、行進シミュレーションモデルの作成である。行進の挙動が再現できるシミュレーションモデルができれば、ズレの状況分析や、ズレの修正プロセスの解明などが期待できる他、VR環境を利用した、個人でもパレード行進訓練可能な教材作成の一助となる。

二つ目が、パレード行進の定量的な計測方法の確立である。現状では行進に対しての定量的な計測方法が確立されておらず、採点者の主観を通じてパレード行進を評価している。効果的で定量的な計測方法が作成できれば、行進の良し悪しの判断基準の解明につながり、効果的な訓練の補助教材となる。

本論文は、我々の研究成果を紹介することを目的に、以下のように構成される。次章では行進シミュレーションモデルの作成についての研究成果を述べる。第3章では定量的な計測方法についての研究成果を、最後にまとめと今後の展望を述べる。

2 行進シミュレーションモデル

本章では、行進シミュレーションモデルの研究[2]を紹介する。

蛍の自然発光や、虫や魚の群れ行動などの自然界に見られる同期現象は数多く研究されているが、パレード行進における集団行動の同期とはメカニズムが異なる部分があり、不明な点が多い[1]。

本研究では、モデル化の第一歩として、防衛大学の学生の行進の腕振りの同期について着目し、同期の特徴をシミュレーションモデルを作成して検証した。

ここでは各学生をパラメータが異なる蔵本モデル振動子[3]としてモデル化した。行進は周りのメンバーの周期的な手足の歩行動作に自身のそれを合わせるものであり、モデル化の際には、この周期運動を位相振動子として設定した。さらに各学生が参照する学生に相当する振動子とをリンクでつなぎ、位相振動子のネットワークとして、その振る舞いを、計算機シミュレーションを使用し検証した。

提案モデルを以下に示す。

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \omega_i + \frac{K_i}{|N_i|} \sum_{j \in N_i} \sin(\theta_i - \theta_j) \quad (1)$$

ここでは行進時の学生の振舞いが周期的であることに注目し、行進時の腕の振りを、振動子の同期モデルである蔵本モデルを用いて表現した。今学生*i*の規範とする学生の集合を*N_i*とし、*K_i*は学生*i*の練度とし、実験では*K_i* = 2.0とした。

ω_i は学生*i*の腕の振りの固有振動数で、平均 2π (rad)、標準偏差 0.2π (rad)に従う乱数で定めた。

$$R = \left| \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N e^{i\theta_j} \right| \quad (2)$$

また、学生全体の同期具合 *R* を、蔵本モデルの秩序パラメータを利用して(2)の通り設定した。もしすべての学生の腕の位相が一致していれば *R* = 1 となる。

図2は計算機シミュレーション画面である。ここでは、学生の個性である固有振動数と練度とその隊形内での位置の関係及び、どのような特性をもつ学生を隊のどの位置に配置すると、全体としてどのような振る舞いになるのかという同期の特徴を調査した。もし配置によって隊全体として同期のしやすさに法則性や規則性がみられれば、これを利用して訓練の難易度を設定できる可能性がある。

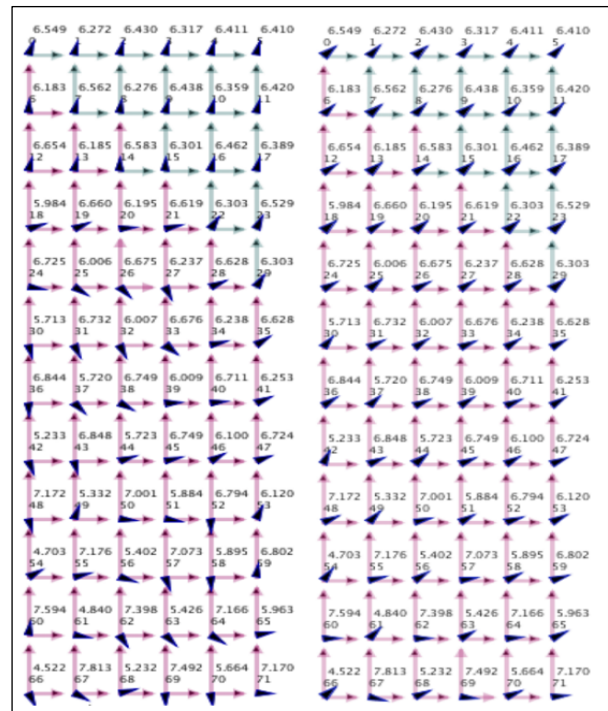


図2：左:シミュレータ (図上が進行方向) の初期状態. 矢印が規範とする学生を示す. 初期位相は乱数で毎回変更して実施した. *R*=0.261 右:同期状態.*R*=0.965

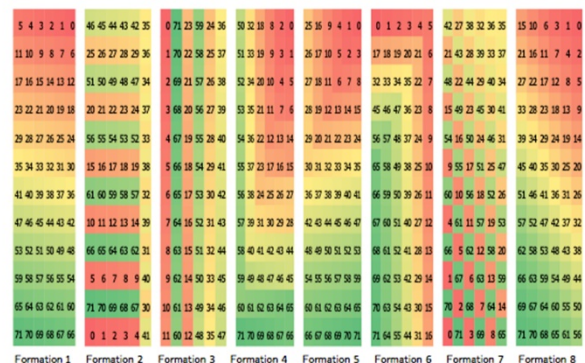


図3：学生の配置方法, 赤い色は固有振動数が低く(身長が高く), 緑色は固有振動数が高い(身長が低い)

図3の計8通りの配置を試した結果、従来の身長順に並ぶ配置 (Formation 1) は同期を得ることが難しいことがわかった, また学生の特性を考慮した配置 (Formation 7) を行えば、練度が低くても同期が得られる場合があることが予想できた。従来の身長順に並ぶ配置 (Formation 1) と学生の特性を考慮し、平均身長順に並ぶ配置 (Formation 7) の同期具合の時間経過の図4を以下に示す。

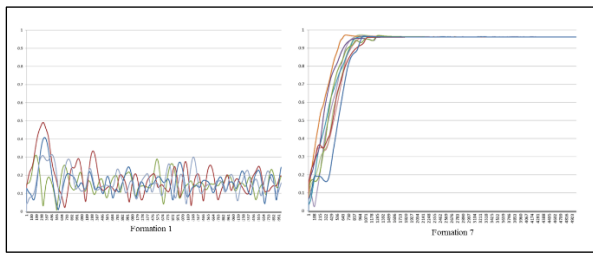


図4：Formation 1 と Formation 7 の同期度 R の時系列変化。縦軸が同期度，横軸が時間変化を表す。それぞれの図中の線の種類は試行回数。

行進シミュレーションモデルの作成の研究において、行進の腕振りを同期の観点から振動子ネットワークを用いてモデル化し、人員の配置と同期の質を調査した結果、蔵本モデルによるシミュレーションでは、従来の身長順に並ぶ配置よりも高い秩序が得られる配置方法があることがわかった。

3 行進の定量的な計測方法

防衛大学校では行進訓練の他にも、小隊(約 30 人)ごとに、行進の練度を競う競技会が実施されている。競技会の際には採点官がパレード採点基準にのっとり各小隊のパレードの評価を行うが、人数の少ない小隊の方が点数が高い傾向にあることや、参加者の出来の感覚と得点の乖離など、採点方法に疑問を呈す声もある。定量的な行進評価法が確立できれば、採点の公平性や正確性の向上に貢献することができる。本章では姿勢情報を用いた定量的計測法[4]、音情報を用いた定量的計測法[6]について紹介する。

3.1 姿勢情報を用いた定量的計測法

姿勢情報を用いた定量的計測法の研究[4]では、深層学習を用いた姿勢推定技術である OpenPose[5]を用いて腕振りに着目した行進の定量的な評価法を提案した。

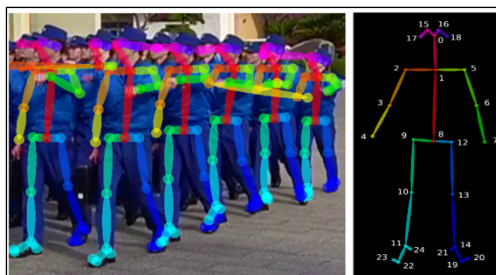


図5：左図: OpenPose の行進への適用例。右図: OpenPose によって取得できるボーン情報

図5は OpenPose によって取得されるボーン情報である。提案手法では、パレード行進において練度の違いが顕著に目立つ腕振りに着目し、行進動画の中の腕の角度をボーン情報から取得した。動画の画

角、OpenPose の認識精度によって、姿勢情報を取得できる隊員数は変化するため、取得できた人間の腕の角度のフレーム毎の標準偏差を時系列データ(図6)とし、その標準偏差の平均値をそのパレード行進の評価値として採用した。

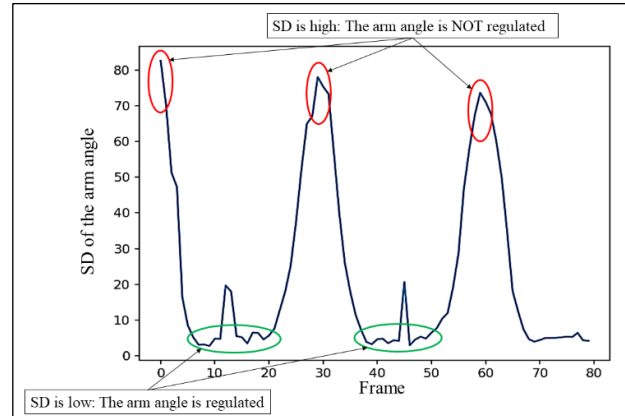


図6：パレード動画の腕角度の標準偏差の推移。

提案手法に基づき算出した評価値が、人間の評価と相関性があるか確かめるため、パレード行進の熟練者である防大生 29 人に、2つのパレードの練度比較アンケートを計5組実施した。

	Questionnaire (%)		The evaluation value (degree)	
	Platoon A	Platoon B	Platoon A	Platoon B
Set 1	3.4	96.9	35.18	27.05
Set 2	79.3	20.7	24.47	25.33
Set 3	86.2	13.8	28.25	30.43
Set 4	13.8	86.2	28.02	22.01
Set 5	93.1	6.9	22.01	24.70

図7：評価値とアンケート結果の比較

図7で示された通り、アンケート結果と提案手法による評価値とで相関がみられたことから、提案手法は2個小隊の練度比較において、有効な計測法であると確認できた。

3.2 音情報を用いた定量的計測法

姿勢情報を用いた計測法[6]において、画面に映らない人間の計測ができないという問題点を解決するため、パレード行進の音情報に着目した研究を実施した[6]。音情報は足音の他にも、敬礼などの掛け声等、パレード行進の威容に関する様々な情報を含んでいる。

本研究では、足音のばらつき具合に着目した。パレード行進中の足音をパレード行進がもつテンポと考える。足音がばらついている、同期していないパレード行進の場合は、テンポ解析した際に推定値が低く、逆に足音が一定で、テンポにゆらぎがなく齊一に同期しているパレード行進ではテンポ解析結果の推定値が高いことが予想される。

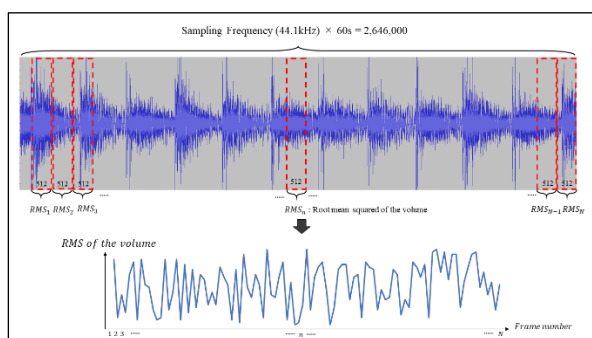


図 8 : テンポ解析の概要図

図 8 にテンポ解析の概要図を表す. 音データを適切なフレーム長に分割し, フレーム内での音量を計算する. さらにフレーム間の音量増加量を計算し, 音量増加量を周波数解析した後, ピーク周波数をその音データのテンポに変換した.

提案手法の検証を行うため実験を行った. 屋外の環境下で 4 人の被験者にテンポ 120 のメトロノームに合わせて 3 パターンの行進を実施してもらった. 一つ目はメトロノームに合わせての行進, 二つ目は 4 人中 1 人だけメトロノームから意識的にずらし, 残りの被験者はメトロノームに合わせた行進, そして三つ目は 4 人ともメトロノームとは関係ないバラバラの行進である. なお, 行進中の指標にしたメトロノーム音の影響を除くため, メトロノーム音に当たる周波数をそれぞれの音データから除いている.

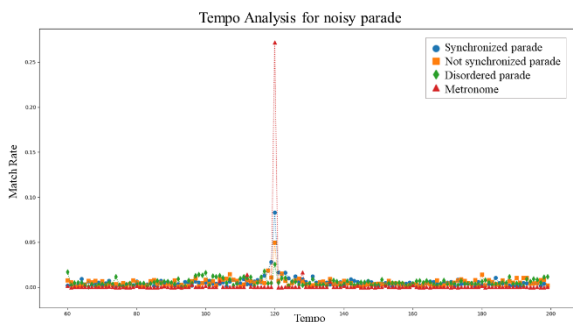


図 9 : 行進の足音のテンポ分析実験結果

図 9 に実験結果を示す. 3 パターンの行進音のテンポ分析結果のほか, メトロノーム音だけのテンポ分析結果も記載している. 図 9 より, 全体の同期度が高い行進の方がよりテンポ 120 の推定値が高いという結果になったことから, 提案手法はパレード行進の定量的な評価に有効であると示唆が得られた.

実験の被験者は 4 人であるため, 実際に行われているパレード行進とは大きくことなる. 今後は実際のパレード行進で足音の分析を実施するとともに, 姿勢情報を用いた定量的計測法の研究にて用いたようなアンケート評価を利用して, 実際のパレード行進での評価にも有効であるか検証していく.

4 結言

本論文では, 2つの視点から, パレード行進に関する研究成果を紹介した.

行進シミュレーションモデルの研究においては, 行進を同期の観点から振動子ネットワークを用いてモデル化し, 人員の配置と同期の質を調査した結果, 従来の身長順に並ぶ配置よりも高い秩序が得られる配置方法があることが示唆された.

また, 定量的な計測法の研究については, 姿勢情報を用いた行進計測法, 音情報を用いた行進計測法を提案し, その有効性を実験結果とともに提示した.

今後は複数の視点からの研究結果を踏まえ, 効果的なパレード行進の訓練教材の作成に尽力したい.

参考文献

- [1] Steven Strogatz, 蔵本 由紀, 長尾 力, SYNC なぜ自然はシンクロするのか, 早川書房, 2009.
- [2] Yohei Okugawa, Masao Kubo, Takato Shimohagi, Tenta Ishihara, and Hiroshi Sato, Analysis of a Parade with the Kuramoto Model -For Better Performance without Trainings-, Proceedings of IEEE SMC, pp, 4005 – 4010, 2018.
- [3] Kuramoto Yoshiki, H. Araki. Lecture Notes in Physics, International Symposium on Mathematical Problems in Theoretical Physics. 39. Springer-Verlag, New York. p. 420, 1975.
- [4] Yohei Okugawa, Masao Kubo, Hiroshi Sato, and Bui Duc Viet, Evaluation for the Synchronization of the Parade with OpenPose, Proceedings of ICAROB, 2019.
- [5] Z. Cao, T. Simon, S.E. Wei, and Y. Sheikh, Realtime multi-person 2d pose estimation using part affinity fields. Proceedings of the 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 7291-7299, 2017.
- [6] Yohei Okugawa, Masao Kubo, Hiroshi Sato, and Shun Sakai, Footstep Analysis for the Military Parade. proceedings of the 23rd Asia Pacific Symposium on Intelligent and Evolutionary Systems, 2019.

アンダースローの投球は打ちにくいのか

-VR を用いた実験的検討-

Is a submarine pitcher's throwing hard to hit?

-An experiment on using Virtual Reality-

櫻井豊¹ 鳥居拓馬¹ 日高昇平¹

Yutaka Sakurai¹, Takuma Torii¹, Shohei Hidaka¹

¹北陸先端科学技術大学院大学

¹Japan Advanced Institute of Science and Technology

概要: プロ野球では、高成績をあげているものの、アンダースロー投手の人数は少ない。そこで本研究では、アンダースローの新たな優位点の発見を目指し、投球法の違いが打者のスイングに及ぼす効果を、VRを用いた実験で検証する。

1. はじめに

近年プロ野球の世界では、セイバーメトリクス¹⁾という野球ゲームの統計データの分析やバイオメカニクスによる身体データの分析により、従来の経験型の野球からデータ駆動型の野球に変わってきている。これにより、対戦回数が少ない選手に対しても対策がとれるようになった。また、数値化されることで選手の特徴や得意・苦手を発見しやすくなった。このことにより、打者は慣れていない投手に対しても対応できるようになり、投手は慣れない打者であってもその打者の苦手な球種・コースに絞って投げるようになった。

その結果、オーバースローが主流になる一方で、アンダースロー投手は急激にその数を

減らしている。過去には人数は多くはなくても、数十人のアンダースロー投手が日本プロ野球界に存在していた。しかし、近年は急激に数を減らし、2019年ではプロ野球(NPB)で活躍する選手は2人のみ(MLBの1名除く)になっている。その原因としては、アンダースロー投手はほぼ全員右投げであるがゆえに、左打者の増加により、ボールが打者に対して近づいてくるため、またカーブなどの変化球が打者側に曲がるため球筋を見やすくなってしまい打たれやすくなってしまったことやセイバーメトリクスに基づき投手数が少なくても対策されるようになったこと、それに指導者不足によりそもそも教わる方法が少ないことなどが挙げられる。アンダースローに左投

げがほとんどいない理由としては、アンダースローは他の手段では活躍できなかった選手がとる最後の手段とも言われており^[2]、数が少なく貴重とされる左投げの投手は、そもそも変則投球といわれているアンダースローにわざわざ変更しないからではないかと言われている。しかし、アンダースロー投手は近年も活躍し続けている。

近年では、2001~2013年に千葉ロッテマリーンズで先発として活躍し、2009年のWBC

では世界一に貢献した渡辺俊介投手や、2011~2017年に埼玉西武ライオンズで中継ぎとして活躍した牧田和久、それに2018年~現在まで活躍し、先日のWBSCプレミア12でも世界一に貢献した高橋礼投手が存在する。表1に2019年度のアンダースロー投手と投手全体の比較^[1]を示す。この表を見ると、アンダースロー投手は投手全体より防御率と被安打は少ないが、三振率も少なく、死球率も高いといった特徴がみられる。

表1 アンダースロー投手と投手全体の比較

	防御率	被安打	三振率	四球	死球率
アンダースロー	3.77	0.226	4.6	3	0.71
投手全体	3.9	0.252	7.6	3.35	0.17

アンダースロー投手の既存の優位点としては、浮き上がるようなボールを投げられることや、投球フォームを調整しやすく、いつ球がリリースされるか分かりにくい投球ができるので、打者がタイミングを狂わせやすいこと^[2]が挙げられる。一方で、欠点としては速いボールを投げにくいことや、投球に時間がかかるので盗塁されやすいことが挙げられる。

過去の先行研究では、投球動作の分析に関する研究^[3]はされているが、ほとんどがオーバースローを前提とした内容である。また、アンダースローに関する動作分析の研究^[4]もあるが、ほとんどが障害や疲労に関する内容あり、他の投球動作と比較したときのアンダースローの優位点に関する研究は未だされていない。もし新たな優位点が見つければ、アンダースローを目指す選手が増え、その結果アンダースロー投手を増えるのではないかと考えている。そこで我々は、他の投球動作とアンダースローを比較して実験を行うことが

必要であると考えた。

アンダースローの実験を行うにあたり、一番の問題点は、アンダースロー投手の数が少なく、十分な実験データが取れないことが挙げられる。この問題点を解決するためには、ピッチングマシンを使用するという手段もあるが、ピッチングマシンだと投球時のボールの座標の把握が難しいことや、実際の投手と軌道が異なるといった問題点が挙げられる。更に、アンダースロー用の地面すれすれから投げられるピッチングマシンは存在しないので、ピッチングマシンだと実験するには不十分である。そこで、筆者らはVIVE Pro^[5]を用いたVR(仮想現実)空間でのバッティング実験を提案する。

VRを使った研究は、シミュレーションと組み合わせることで、実際の投手なしでも様々な投球パターンを試せること、軌道の忠実な再現が可能なこと、それにボールやバットの座標の把握が可能であるという利点があ

る。この利点は、投手頻度の少ないアンダースローの利点を調べるのに適している。一方で、VR 実験の課題としては、VR 空間を用いた際には装置の重量やバットの重量の現実との違いの問題で実際の打席との相違点は必ず発生してしまうことや、フレームレートが VR の場合最大でも 120fps であるので、実空間とは違った見え方になってしまうという問題点がある。しかし、最近のプロ野球でも、特に DeNA という野球チームが VR を用いた練習法を取り入れているので、実用性も十分にあると考えている。

2. 研究目的

以上のことを踏まえて、本研究では VR とシミュレーションを用いて、アンダースローの利点を探究する。本研究では、VR を用いて投球シミュレーションを行い、打者の反応の違いを調べることで、投球フォームの違いがバッター視点での投球の見え・予測可能性に与える影響を明らかにすることを目的とする。また、様々な投球の中からアンダースローに着目し、アンダースローと他の投球を比較したときのバッティング成績からアンダースローの優位性を新たに発見することを目的とする。

3. 仮説

アンダースロー投手、渡辺俊介氏はその著書^[2]でアンダースローの利点に関する仮説を述べている。渡辺氏によると、アンダースローの利点は他の投球法にはない浮き上がる球を投げられること、また、投球中に間を作ることにより打者のタイミングを外しやすいことがあると述べている。一方で、リリースポイントの低さは重要とは限らないとも述べている。

我々はこの仮説に加え、球の落差がアンダースローの優位点になるのではないかという仮説を立てた。アンダースローは下から投げることにより浮き上がるように見えるが、実際にはボールはマウンドから打席までの距離 18.44m の間に上がってから落ちている。ボールの落ちる方もうまく使い、落差の高低と配球の高低を自在に使い分けることで、打者は変化球、速度だけでなくボールの高低差も考えなくてはならなくなり、思考の要素が増え、その結果打者がボールをとらえにくくなると考えた。そこで我々は、今回は以下のような予備実験を計画した。

4. 予備実験

今回の実験の前に、図 1 のように 2D で動画をスクリーン上に映し、一球ごとに予測地点を記入してもらうといった予備実験を行った。その際に、バットとボールの接触率を求めたが、表 1 のように、まともにボールとバットが接触しないといった結果になってしまった。



図 1 2D 実験時の様子

そこで今回の予備実験では 2D よりも VR 環境の方が実際のバットを振る環境に近いかを確認することを目的とした。そのためのアプローチとしては、VR 空間内で野球場を構築し

表 1 2D 実験時の接触率

実験条件	110km/h(over)	130km/h(over)	110km/h(under)	130km/h(under)
接触率(<6.9cm)	0.06	0.06	0.06	0

球速によって接触率が変わるかを確認することに設定した。

今回の実験は、打者の視点から、被験者にHMDをかぶってもらい、オーバースローとアンダースローの二種類での球速による打ちやすさを検証した。被験者は、学内の学生6名(初心者2名、野球経験者(ブランクあり)4名)で実験を行った。被験者は、VR上に映された動画に対し、VR空間では1回1回バットを振ってもらい、実空間では、図2のように、コントローラーをバットとみなして振ってもらった。



図2 VR実験時の様子

実験条件は、ボールの初期条件は色々変えるが、空気抵抗は、unityに物理演算として実装されているDragを利用し、今回はDragの値を2に設定した。また、マウンドから打席までの距離はプロ野球仕様様の18.44mとした。具体的には、以下のような実験条件を設定した。

① 投球動作：オーバースローとアンダースローの2種類

② ストレートを投じる。球速は、オーバースロー、アンダースローのどちらも110km/hと130km/hを用いる。

③ 図3に示すように、ストライクゾーンを3×3分割し、{低め、真ん中、高め}×{内角、真ん中、外角}の9マスの他に、ストライクゾーンの外部に1マス进行け、ボール球として右打者に対しての{更に高め}×{真ん中}、{更に高め}×{更に内角}、{真ん中}×{更に内角}、{真ん中}×{内更に外角}、{更に低め}×{更に外角}、{更に低め}×{真ん中}の6マスの投球位置を用いる。

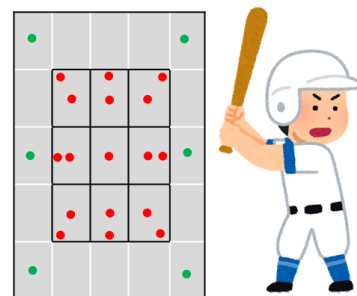


図3 バッティングゾーン^[6]

- : ストライク(真ん中は×2)
- : ボール

今回は被験者1名に対して96球(投球動作と球速の計4条件、ボール球6球含む24球ずつ)の球軌道を見せた。また、実験前に練習として12球(投球動作と球速の計4条件で3球ずつ)の球軌道を見せた。

5. 実験結果

図4にバットとボールの接触率を示す。

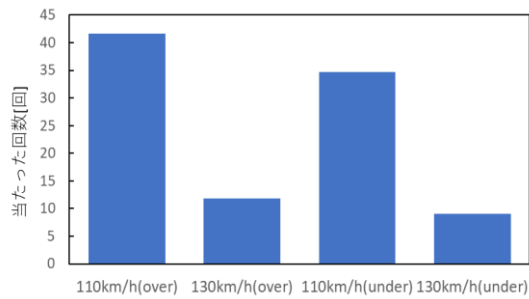


図4 各条件の接触率

図4を見ると、オーバースローとアンダースローともに110km/hの方が接触率が高かった。また、オーバースローとアンダースローは110km/hと130km/hともに有意差は見られなかった。

次に、図2のように設定したときのバットの芯からの誤差を表2、図6に示す。



表2 バットの芯からの誤差

	~3(cm)	3~23(cm)	23~43(cm)	43~63(cm)	63~(cm)
110km/h(over)(回)	23	13	19	5	0
130km/h(over)(回)	0	5	8	4	0
110km/h(under)(回)	17	20	8	4	1
130km/h(under)(回)	1	4	6	2	0

図5 バットの芯からの誤差

110km/hに関して、130km/hよりバットの内側でボールが接触していた。しかし、接触したボールのほとんどがバットの芯から外れていた。

次に、図7のようにストライクゾーンを中心の座標を(0,0)とみなす。このときのボールの位置を表3、図8に示す。

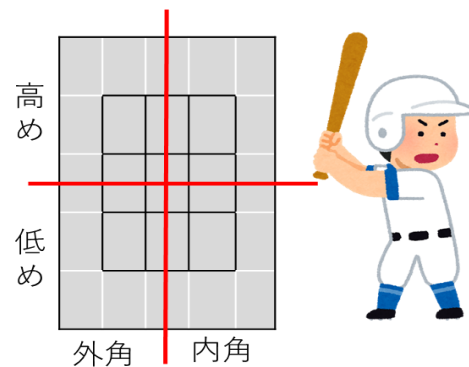


図7 ストライクゾーンの内訳⁶⁾

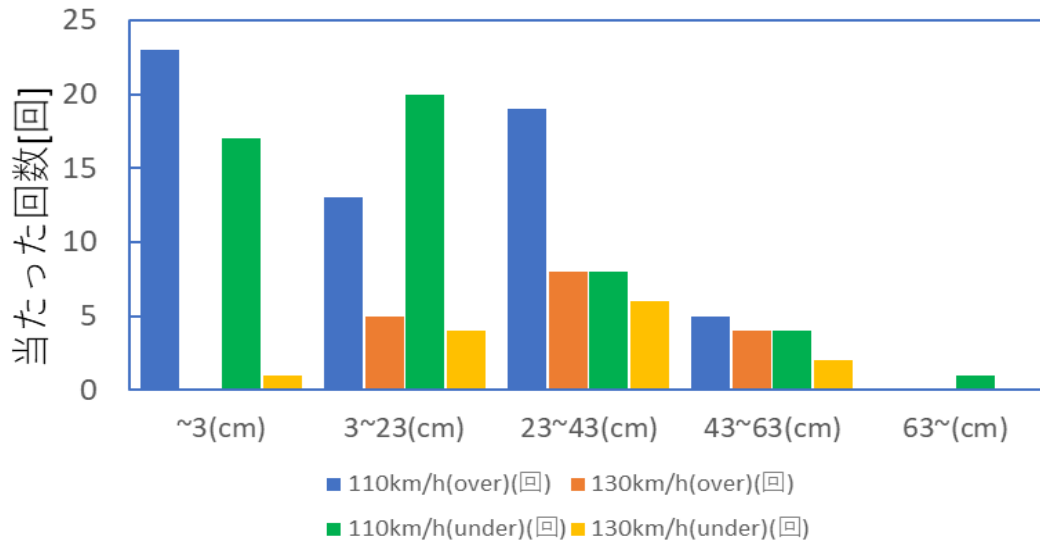


図 6 バットの芯からの誤差

表 3 接触したときのボールの位置

	110km/h(over)	130km/h(over)	110km/h(under)	130km/h(over)
内角高め(回)	6	4	6	1
外角高め(回)	19	8	16	1
内角低め(回)	13	1	7	6
外角低め(回)	22	4	21	5

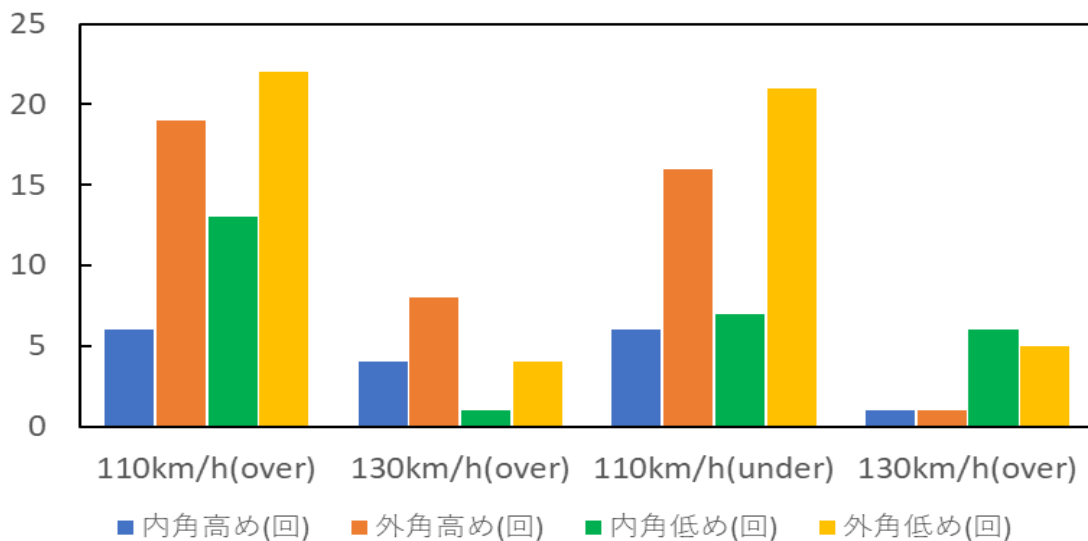


図 8 接触したときのボールの位置

6. 考察

今回の結果を通して、接触率に関しては2D

よりも VR 環境の方が実際のバットを振る環境に近いことが確認できた。しかし、図4、図

にあるように、ほとんどがバットの芯から外れているなどといった、実際にバットを振る環境とは異なった結果が得られた。これは、今回は VIVE のコントローラーをバットとみなして振ったので、実際のバットとは異なり長さや重心が分かりにくかった可能性が考えられる。以上の結果を踏まえて、次回は実際のバットに VIVE Tracker を取り付けて実際のバットを持って振ってもらう実験を行う予定である。

謝辞

本研究は科学研究費補助金 JP16H05860, JP17H06713 の助成を受けて行われた。

参考文献

[1] データで楽しむプロ野球

<http://baseballdata.jp/> (2019/11/21 参照)

[2] 渡辺俊介, “野球 アンダースロー”, 株式会社ベースボールマガジン社, 2016

[3] 宮西智久ほか, “野球の投球動作におけるボール速度に対する体幹および投球腕の貢献度に関する 3 次元的研究”, 体育学研究 41, p23-37, 1996

[4] 高崎恭輔ほか, “アンダースロー投法の動作分析-『動作中の関節運動が持つ意義』に着目して-”, 関西理学 7, p43-49, 2007

[5] <https://www.vive.com/jp/> (2019/11/21 参照)

[6] https://www.irasutoya.com/2017/04/blog-post_150.html (2019/11/21 参照)

熟練者と入門者のドローイングプロセスの違いに関する考察

A Study of the Difference in the Drawing Process of Experts and Novice Learners

永井 孝^{1*} 香山 瑞恵²
Takashi NAGAI¹ Mizue KAYAMA²

¹ ものづくり大学技能工芸学部

¹ Faculty of Technologists, Institute of Technologists

² 信州大学工学部

² Faculty of Engineering, Shinshu University

Abstract: Drawing is a foundational skill in an art education, and novices should learn first. The purpose of this research is build of a drawing learning supporting system to a art novice. In this paper studies the difference in the drawing process of experts and novices based on a time-series shift of a drawing area and pen pressure.

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 [8, 5], 入門者が最初に学ぶべき内容とされる [6]. 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スキル学習である [1, 2, 3, 7]. 個人で学習を進める場合、自分の癖や弱点に自ら気付くのは困難である。ドローイングのスキル獲得は、誤りの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。美術スクール等に通い、学習を進めることは時間と場所とに制約を受ける。これら制約を受けない形の学習方法として、通信による教育がある。しかし、通信教育の場合、描き終えたドローイングを郵送や描画写真を LMS への登録することにより指導者から評価・指導を受ける。そのため、指導者は学習者の描くプロセスを予測しながら評価・指導を行う。学習者は評価・指導を読み解くが、このとき、描画プロセスの共有がされていないため、理解することが難しい。これは美術スクールにおいても同様である。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、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。

本研究の目的は、美術入門者に対するドローイング学習支援環境を構築することである。学習支援環境を

ネットワーク環境に置くことで、学習者は場所と時間に制約を受けることなく指導者からアドバイスや評価が得られる。本稿では、熟練者と入門者のドローイングプロセスの違いについて、描画領域および筆圧の時系列変化に基づき考察する。

2 観察ドローイング

観察ドローイング (Observational Drawing) とは、目前に構成した対象物をよく観察して描くことである [4]. 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技法を身につけることができる。美術入門者がドローイングの学習を始める際、観察ドローイングから始めることが多い。構成されたモチーフを観察し、筆記具を使い用紙へ正確に対象物を描くためには、正しい描画手法を身につける必要があり、何度も描いていく過程で、模索し修正を繰り返していくことで身につけていくことが可能である。

3 描画プロセス

3.1 描画プロセスの段階

美術専門家および美術指導の専門家5名に対して、描画プロセスについてのヒアリング調査を行った。その結果から得られた描画プロセスの段階とそれらの内容を表1に示す。段階1では配置物や光の方向などが観察される。段階2では自分の目の高さ(消失点の高さ)

*連絡先: ものづくり大学 技能工芸学部総合機械学科
〒361-0038 埼玉県行田市前谷333番地
E-mail: t_nagai@iot.ac.jp

を基準に、モチーフの位置が観察される。段階3ではモチーフ全体から描画部分を決定し、構図を決める。段階4ではモチーフの細部(サイズ・設置位置・方向)および全体像を捉え、構成していく。この際、アタリ線を利用して相互の関係を画面に定着させていく。段階5では補助線を使い直方体→円柱→球という順序で配置物をとらえ輪郭を描く。段階6では光と影を利用してモチーフのトーンを描く。そして、段階7でモチーフの構造との整合性に留意しつつ質感・ディテールを描き作品としていく。

表 1: 描画プロセスの段階と内容

段階	内容
1	モチーフをよく観察する。
2	モチーフがどんな位置に置かれているかに注目する。
3	画面に対してのバランスを考えながら構図を決める。
4	ごく単純な形態の構成としてとらえアタリを描く。
5	モチーフの構造を分解的にみながら形をとらえ輪郭を描く。
6	モチーフのトーンを描く。
7	質感・ディテールを描く。

3.2 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、美術指導者と共に熟練者の描画プロセスデータ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1は、熟練者のドローイングであり、図2は、熟練者の描画プロセスの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。

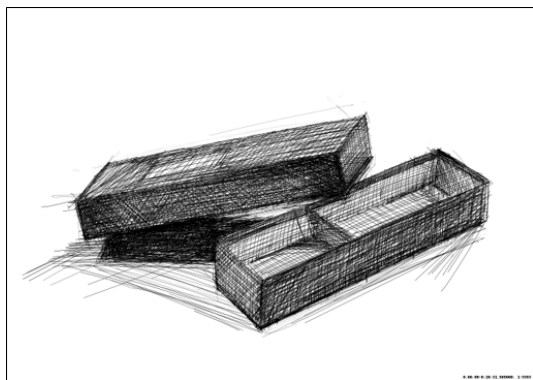


図 1: 熟練者のドローイング

描画プロセスの初期(図2左)は、構図と輪郭を決定する重要な過程である。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(図2中)は、モチーフの色の調子(トーン)や陰影を描く過程である。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。面の大きさや方向に注意をしハッチングを行う。部分部分描画するのではなく、常にモチーフ全体を意識して描く。クロスハッチングを用いて徐々にトーンの濃度を上げていく。ハッチングとは、線画による面の表現を行う際に用いる描画技法であり、一定間隔の平行線の集合である。また、クロスハッチングとは、ハッチングを描画した面に角度を変えたハッチングを重ねて描画する技法である。

描画プロセスの後期(図2右)は、仕上げの過程である。トーンを描いたモチーフに対して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。

これらの各区間における体系的な描画特徴を、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。

3.3 描画プロセスの段階と区間

表2は、描画プロセスの段階(表1)と区間(図2)を対応付けさせたものである。描画プロセスの段階と区間は、段階1から5は初期区間に対応し、段階1と段階6は中期区間に対応し、段階1と段階7は後期区間に対応する。段階1の観察行為は全ての区間に必要なものである。

表 2: 描画プロセスの段階と区間の対応

描画プロセスの段階	描画プロセスの区間
1,2,3,4,5	初期
1,6	中期
1,7	後期

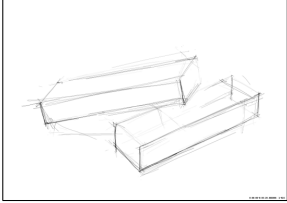
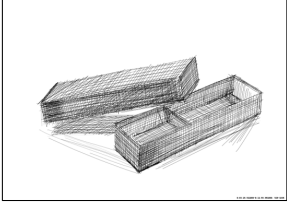
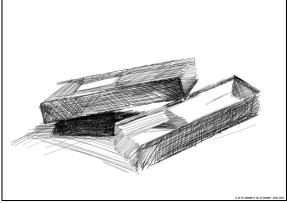
描画結果			
区間/時間	初期 / 0-4分	中期 / 4-12分	後期 / 12-20分
描画特徴	アタリ・輪郭	トーン	ディテール

図 2: 熟練者の描画プロセス

3.4 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、初期・中期・後期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、単位時間区間における幾何的特徴を見た。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、濃度を求めた。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。

熟練者 1 名による 2 つのモチーフの 20 分間ドローイング 3 描画を対象に、外包領域・新規描画・筆圧の時間変化を考察する。

3.4.1 外包領域の増加

外包領域は、描画開始からのストロークが加えられた領域を外包する領域のことである。なお、ストロークの筆圧は考慮していない。図 3 上のグラフは、外包領域の増加を示している。縦軸は用紙に対する外包領域の割合、横軸は描画開始からの経過時間である。グラフ中の数値は 3 ドローイングの平均値である。全体として、描画の経過時間が進むにつれて外包領域の割合 (外包領域ブロック数/全ブロック数) が増えていく。描画終了時点では 45% となる。

この変化を時間経過とともに考察する。まず、描画初期に相当する区間で 0% から 30% まで増加する。この変化は描画開始からの 3 分間で顕著となる (図中 a 区間)。中期に相当する区間では 30% から 38% まで増加する。その内訳は、描画開始から 4 分経過した時点から 5 分 30 秒までは 30% から増加せず (図中 b 区間)、5 分 30 秒から 6 分 30 秒の 1 分間で 5% 増加し、8 分 30 秒から 9 分 30 秒の 1 分間で 3% 増加となる (図中 c 区間)。後期に相当する区間では、38% から 45% まで増加する。この区間では 12 分から 13 分 30 秒までは変化が

なく、それ以降は増加しない区間と増加する区間が交互に出現する。

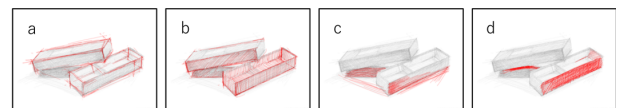
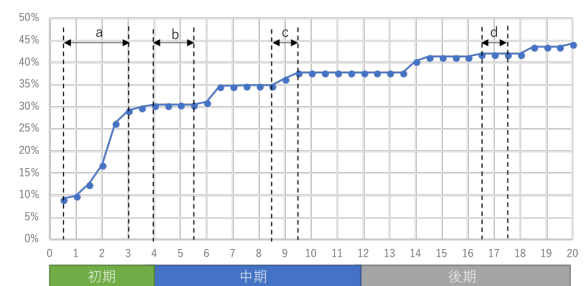


図 3: 外包領域の増加率グラフ (上) と描画結果 (下)

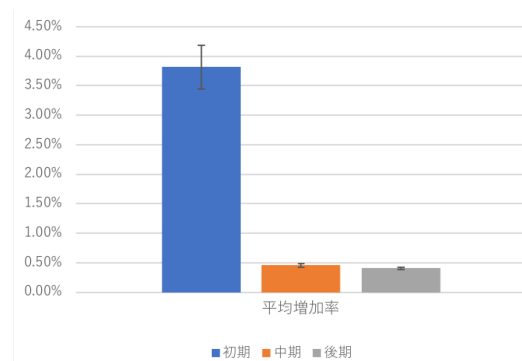


図 4: 30 秒区間の平均外包領域増加率

熟練者に対して、このグラフを示しながら、外包領域が増加している区間についてヒアリングした。その結果、以下のコメントを得た。

1. 初期において外包領域が増えるところ (区間 a) は、アタリ・輪郭を描いている。
2. 初期のアタリ・輪郭は、モチーフに対して行っている。

3. 中期で陰影を描く時(区間c)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、トーンを描きディテールを描く。
4. トーンやディテールを描く際は、輪郭から1ミリもはみ出さない気持ちで描いている。

図3グラフの区間a,b,c,dにおける描画結果を図3下部に示す。灰色の最終描画に対して、赤色部分が当該区間でのストロークである。

区間aは外包領域が顕著に増加している区間である。初期に相当するこの区間の描画は、モチーフ全体のアタリをつけ用紙への配置を決め、輪郭を描いていることが想定される。実際のストロークから、最終描画の輪郭に相当する箇所が形成されていることがわかる。上記ヒアリング結果の1.と2.に相当する行為が確認された。

一方、区間bでは外包領域は増加していない。この区間の描画結果bから、区間aで形成されたモチーフ輪郭内にトーンを描いていることがわかる。また、区間dはディテールを描いている。実際のストロークから紙箱の質感を描いていることがわかる。そして、中期において外包領域が増加する区間cでは、区間aで描き加えられた輪郭に対してトーンを描いたり陰影を描いている。特に、陰影を加えることにより、外包領域が増加したことがわかる。上記ヒアリング結果の3.と4.に相当する行為が確認された。

これらの結果に基づき、外包領域の増加率に関する描画プロセス毎の閾値を検討する。

図4のグラフは描画プロセスの初期・中期・後期における30秒区間の平均増加率を表したものである。図3のグラフにおける各データ間の増加を、描画時期ごとに平均した。

初期における平均増加率は $3.82\% \pm 0.37$ 、中期は $0.46\% \pm 0.03$ 、後期は $0.41\% \pm 0.02$ であった。

初期はほかの区間に比べて平均増加率が約10倍となる。中期と後期の平均増加率は0.5%に満たない。このことから、外包領域の増加率に関する描画プロセス毎の閾値は、初期は「高い」、中期以降は「低い」として区分することとする。ここでの高低の区別は、熟練者のコメント4.から、中期の平均増加率を基に0.5%とすることとする。

3.4.2 新規描画率

新規描画領域は、30秒間に描画した領域の内、新たにストロークが加えられた領域のことである。なお、ストロークの筆圧は考慮していない。新規描画率とは30秒間に描画した領域に対する新規領域の割合(新規描画ブロック数/描画ブロック数)である。すでにストロー

クが存在している領域へのストロークの追加では新規描画領域は生じない。

図5のグラフは平均新規描画率の推移を示している。縦軸は新規描画率、横軸は描画開始からの経過時間である。グラフ中の数値は3ドローイングの平均値である。

新規描画率は描画が進むにつれ低くなる。描画初期では100%~40%、中期では40%~0%、後期では15%~0%の変化を示した。特に、中期後半と後期前半において、約10分から13分30秒付近で0%となる。13分30秒以降は15%以下で推移している。熟練者に対し

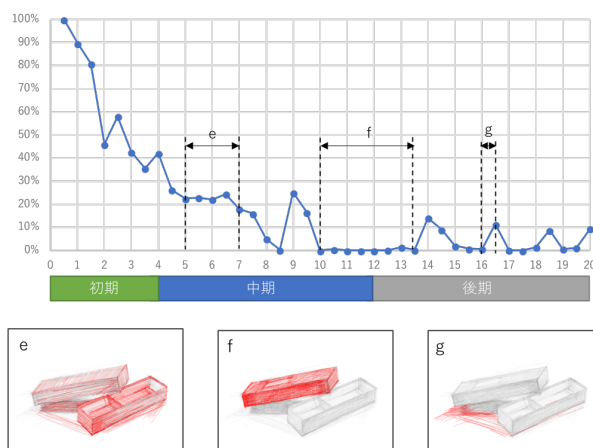


図5: 新規描画率グラフ(上)と描画結果(下)

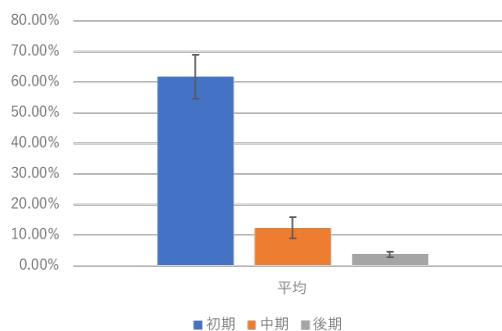


図6: 30秒区間の平均新規描画率

て、このグラフを示しながら、中期と後期の区間についてヒアリングした。その結果、以下のコメントを得た。

1. 初期で描いたモチーフの輪郭に対して、中期でトーンを描いている(区間e)。
2. トーンを描くときは、モチーフ全体を意識している為、ハッチングで全体を描いた後、クロスハッチングで濃度を上げていく。
3. 後期はディテールを描き、作品としての完成度を高めている。

4. デティールを描く箇所 (区間 f) でトーンを描いていない部分は存在しない。
5. 後期後半のグラフで増加する区間は、モチーフとモチーフが置かれたテーブルとの関係 (陰影等) を描いている (区間 g)。

図5 グラフの区間 e,f,g における描画結果を図5 下部に示す。灰色の最終描画に対して、赤色部分が当該区間でのストロークである。

区間 e は中期において新規描画率が高い区間である。この区間の描画は初期に描かれた輪郭に対しトーンを描いている。実際のストロークから、モチーフ全体に均一にトーンを描いていることがわかる。上記ヒアリング結果の 1. と 2. に相当する行為が確認された。

区間 f 後期において新規描画率が低い区間である。この区間の描画は中期で描いたトーンに対しディティールを描いている。実際のストロークから、トーンが描かれた箇所に対してディティールを描いていることがわかる。上記ヒアリング結果の 3. と 4. に相当する行為が確認された。

区間 g は後期において新規描画率が高い区間である。この区間の描画はテーブルに投影されたモチーフの影を描いている。実際のストロークから、モチーフ以外のテーブル面を描いていることがわかる。上記ヒアリング結果の 5. に相当する行為が確認された。

これらの結果に基づき、新規描画率に関する描画プロセス毎の閾値を検討する。

図6 グラフは描画プロセスの初期・中期・後期における 30 秒区間の平均新規描画率を表したものである。初期における平均新規描画率は $61.85\% \pm 7.16$ 、中期は $12.53\% \pm 3.5$ 、後期は $3.88\% \pm 0.82$ であった。新規描画率は、初期が最も高く、中期そして後期の順となる。このことから、新規描画率に関する描画プロセス毎の閾値は、初期および中期は「高い」、後期は「低い」として区分することとする。ここでの高低の区別は、熟練者のコメント 2,4. から、後期の平均新規描画率を基に 5% とすることとする。

3.4.3 筆圧

筆圧は、30 秒間に描画したストローク集合の筆圧平均のことである。筆圧相対率とは 30 秒間に描画したストローク集合の筆圧平均が最大筆圧 (ペンが出力する最大筆圧) に対する割合 (筆圧平均/最大筆圧) である。

図7 のグラフは筆圧相対率の推移を示している。縦軸は筆圧相対率、横軸は描画開始からの経過時間である。グラフ中の数値は 3 ドローイングの平均値である。

筆圧相対率は、描画初期では 2%~10%、中期では 10%~38%、後期では 20%~53% で推移している。

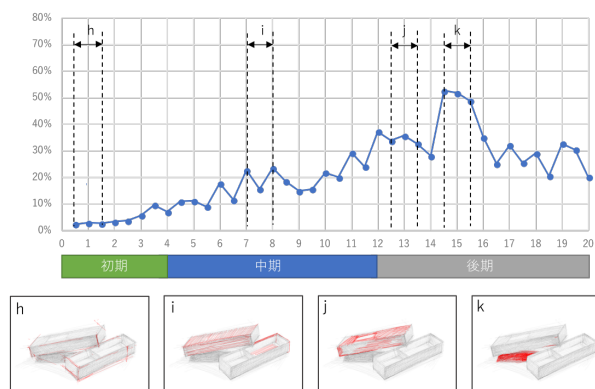


図7: 筆圧相対率グラフ (上) と描画結果 (下)

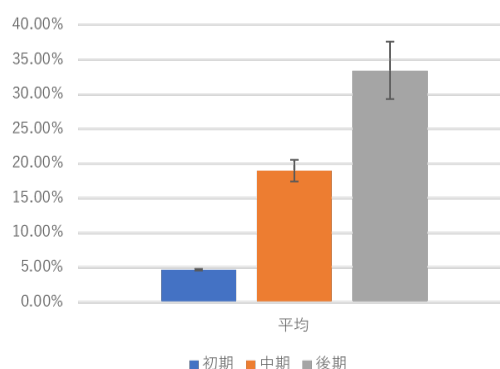


図8: 30 秒区間の平均筆圧相対率

熟練者に対して、このグラフを示しながら、初期と中期・後期の区間についてヒアリングした。その結果、以下のコメントを得た。

1. 初期はアタリ・輪郭を描くため筆圧を抑えて描いている (区間 h)。
2. 中期はハッチング、クロスハッチング技法により徐々に筆圧を上げトーンを描いている (区間 i)。
3. 後期はトーンを描いた箇所へのディティールを描いている。筆圧は高くなる (区間 j)。
4. 後期の特筆筆圧が高い箇所 (区間 k) は陰影を描いている (区間 k)。

図7中の区間 h,i,j,k における描画結果を図7 下部に示す。灰色の最終描画に対して、赤色部分が当該区間でのストロークである。区間 h は初期において筆圧相対率が低い区間である。この区間の描画はアタリを描き、輪郭を描いている。実際のストロークから、モチーフの輪郭を描いていることがわかる。上記ヒアリング結果の 1. に相当する行為が確認された。

区間 i は中期の平均的な筆圧相対率の区間である。この区間の描画は初期で描いたモチーフの輪郭内にトーン

ンを描いている。実際のストロークから、輪郭が描かれた内側に対してトーンを描いていることがわかる。上記ヒアリング結果の 2. に相当する行為が確認された。

区間 j は後期の平均的な筆圧相対率の区間である。この区間の描画はトーンを描いた箇所に対してディティールを描いている。実際のストロークから、紙箱の質感や模様といったディティールを描いていることがわかる。上記ヒアリング結果の 3. に相当する行為が確認された。

区間 k は後期において筆圧相対率が特に高い区間である。この区間の描画はテーブル面に投影されたモチーフの影を描いている。実際のストロークから、テーブルに投影された紙箱の影を描いている。上記ヒアリング結果の 4. に相当する行為が確認された。

これらの結果に基づき、筆圧相対率に関する描画プロセス毎の閾値を検討する。

図 8 のグラフは描画プロセスの初期・中期・後期における 30 秒区間の平均筆圧相対率を表したものである。

初期における平均筆圧相対率は $4.7\% \pm 0.12$ 、中期は $19.03\% \pm 1.56$ 、後期は $33.46\% \pm 4.16$ であった。筆圧相対率は、初期が最も低く、中期そして後期の順となる。

このことから、筆圧相対率に関する描画プロセス毎の閾値は、熟練者のコメント 1,2,3 から、初期を「低」、中期を「中」、後期を「高」として 3 段階で区分することとする。ここでの低と中の区別は初期の平均値を基に 5% とし、中と高の区別は中期の平均を基に 21% とすることとする。

4 描画プロセスラベル

描画プロセスラベルは、描画開始から終わりまでを単位時間 (30 秒) で分割し、その単位区間における、3 つの幾何的特徴を対応させたものである。表 3 に示す。プロセスラベル A は外包領域の増加率が高く、新規描

表 3: 描画プロセスラベルと幾何的特徴との対応

プロセスラベル	幾何的特徴		
	外包領域増加率	新規描画率	筆圧
A	高い	高い	低
F			中
B	低い	高い	高
			低
C		低い	中
			高
N	ストロークなし		

画率が高く、筆圧が低・中の時である。プロセスラベ

ル B は外包領域増加率が低く、新規描画率が高い時である。プロセスラベル C は外包領域増加率が少なく、新規描画率も低い時である。プロセスラベル N は描画がない時である。プロセスラベル F は外包領域増加率、新規描画率、筆圧がすべて高い時である。

4.1 描画区間におけるプロセスラベルの出現頻度

図 9 に描画区間における熟練者 2 名の 4 ドローイングの描画プロセスラベルの出現率を示す。初期においては、プロセスラベル A が多くを占める。中期においては、プロセスラベル B と C が同じぐらいの出現である。後期は、プロセスラベル C が多く出現する。プロセスラベル F は後期に少し出現し、プロセスラベル N は出現しない。

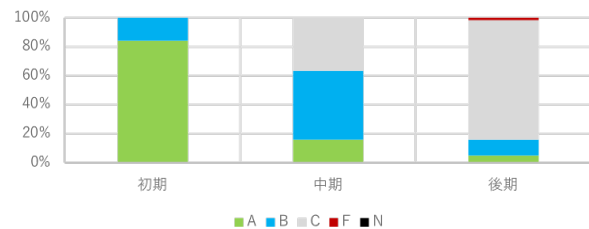


図 9: 熟練者の描画プロセスラベルの出現率

表 4: ドローイングプロセスモデル

描画区間	時間区間	プロセスラベルの出現
初期	0-4 分	A が多い
中期	4-12 分	B → C の順で同程度
後期	12-20 分	C が多い
		プロセスラベル N は出現しない
		プロセスラベル F は出現しない

5 ドローイングプロセスモデル

描画区間とその時間区間、5 つの描画プロセスラベルを対応させたものがドローイングプロセスモデルである。表 4 に示す。初期区間は、時間は描画開始から 4 分までとなり、プロセスラベルは、アタリ・輪郭を描くことから A が多く出現する。中期区間は、時間は 4 分から 12 分までとなり、プロセスラベルは、ハッチングを描きクロスハッチングを描くことから、B,C が同程度出現する。出現順序として B → C の順である。後期区間は、時間は 12 分から描画終了までとなり、プロセスラベルは、中期で描いた箇所に描くので、C が多く

出現する。描画開始から終了までの区間で、プロセスラベル N,F は出現しない。

6 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、描画開始から終了までの描画特徴を可視化したものである。図 10 にドローイングプロセスグラフを示す。描画プロセスラベルをそれぞれ、A を緑、B を青、C を灰、N を黒、F を赤色で表し、これらを描画開始から終了まで左から右に順に並べる。

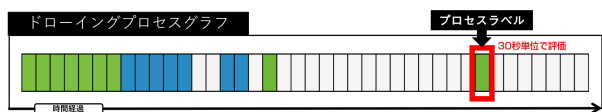


図 10: ドローイングプロセスグラフ

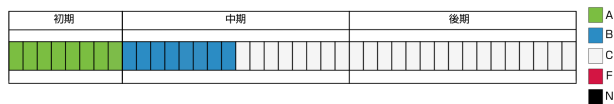


図 11: 理想的なプロセスグラフ

6.1 理想的なプロセスグラフ

ドローイングプロセスモデルを基にした理想的なプロセスグラフを図 11 に示す。初期区間は、アタリ・輪郭を描くことから、この区間におけるプロセスラベルは A(緑色) の連続となる。中期区間は、初期で描いた輪郭内へのトーンの描画である。描画対象全体に対してトーンを描いていく。トーンは徐々に濃度を上げていくように描画する。中期前半のプロセスラベルは B(青色) の連続となり、中期後半は既に描いた箇所に対して描画をしていくことから、プロセスラベルは C(灰色) の連続となる。なお、連続したプロセスラベル C は、B よりも前に出現しない。後期区間は、ディテールを描画していく。中期にトーンを描いた箇所に対し描くので、プロセスラベルは C(灰色) の連続となる。常に描画をしているので、プロセスラベル N (黒) は出現しない。また、筆圧が高い状態での外包領域を増加させるプロセスラベル F (赤) も存在しない。プロセスグラフは、プロセスラベル A(緑) の連続、B(青) の連続、C(灰色) の連続の順に出現することが理想的である。

6.2 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 12 に示す。図 12 上がプロセスグラフであり、左か

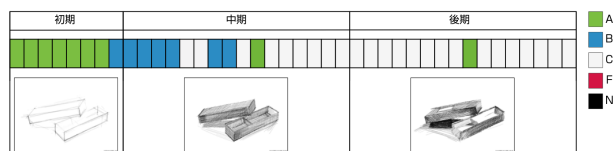


図 12: 熟練者のドローイングプロセスグラフ (上) と描画区間内の描画結果 (下)

ら右へ時間が流れている。図 12 下は、初期・中期・後期の区間内の描画結果である。

初期は、プロセスラベル A の連続ではじまり、最後にプロセスラベル B が出現する。中期は、初期の最後に出現したプロセスラベル B の連続ではじまり、C が 2 区間出現、B が 2 区間出現し、C,A と出現の後、C の連続となる。後期は、C の連続で始まり、途中 A が出現後、C の連続となる。プロセスラベル F および N は出現していない。

熟練者のプロセスグラフは理想型に近いが一致はしていない。各区間の描画結果を見ると、初期にアタリ・輪郭を描き、中期にトーンを描き、後期にディテールを描いていることが伺える。中期および後期に 1 つずつプロセスラベル A が出現しているが、描画プロセスビューワーにて確認をしたところ、テーブルに投影された影を描くための輪郭を描いていた。

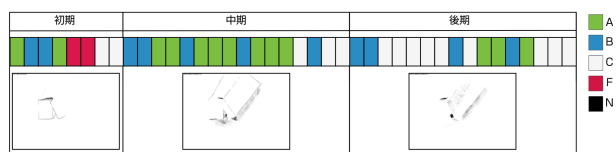


図 13: 美術入門者のドローイングプロセスグラフ (上) と描画区間内の描画結果 (下)

6.3 美術入門者のドローイングプロセスグラフ

典型的な美術入門者が紙箱を描いた際のドローイングプロセスグラフと初期・中期・後期の区間内の描画結果を図 13 に示す。図 13 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 13 下は、初期・中期・後期の区間内の描画結果である。入門者がドローイングを行うと、全体を捉えることができないため、部分的に描き進めていく。その結果、構図が悪く、モチーフの形が狂ってしまう。また、トーンによる表現ができず、輪郭線で表現してしまう。

理想的なドローイングプロセスグラフ (図 11) や熟練者のドローイングプロセスグラフ (図 12) は、描画プロセス全体を通して、連続に続くプロセスラベル A,B,C

が順に表示されているのに対して、美術入門者のドローイングプロセスグラフは、プロセスラベルがバラバラに出現している。

初期区間は、プロセスラベル A が連続にならず、B が2つ出現し、A が出現、F が2つ出現し、C が続く。描画結果をみると、モチーフの一部の輪郭を描き、影を描いている。中期区間は、プロセスラベル B と A が交互に出現し、最後に C が出現する。描画結果は、中期でモチーフの全体像が現れる。輪郭を描きつつ、影を描いている。後期区間は、プロセスラベル B が出現後、C の連続となり、B, C, A, C と出現する。描画結果は、模様と影を描いている。

6.4 プロセスグラフの変化

図 14 は、経験者(図上段)と入門者 B(図下段)の1回目から3回目までの描画結果とプロセスグラフである。経験者のプロセスグラフを見ると、初期はプロセスラベル A の連続が続き、しっかりとアタリ・輪郭を描いている。中期は、B2つとC2つがくり返し続いたのち C の連続となる。後期は、C の連続で始まり、B2つ、C2つが繰り返す。描画結果から初期がしっかりできていたので形の狂いは少ないが、中期に全体にトーンを描いていないため、トーンにばらつきがある。中期の描画プロセスの改善をする必要がある。

入門者 B は、我々の学習支援システムを用いて学習を行った。1回目のプロセスグラフを見ると、初期はプロセスラベル A,C,B と続き A ののち N が出現する。中期は B の連続のち A,B,A の連続、B の連続となる。後期は、B の連続、A,C,B の連続で終わる。描画結果を見ると、輪郭による描画であることがわかる。モチーフの形をとったのち、トーンを描画せず、紙箱の模様を描いている。

2回目のプロセスグラフを見ると、初期は、A の連続で始まり B が3つ続く。中期は、C が3つ続き、F,A,C,F,B2つとC2つとなる。後期は、B の連続で始まり、C,B の連続、C となる。初期の描画プロセスが改善されている。描画結果をみると、前回に比べトーンを描いているが、部分的にしか描いておらず、まだ柄を描く傾向にある。中期・後期の描画プロセスの改善が必要である。

3回目のプロセスグラフを見ると、初期は、A の連続で始まり、B,A の連続となる。中期は、C,A,B,A,F と出現し、B の連続、C2つ、B3つ、C となる。後期は C,B2つ、C4つ、A,B,C の連続、B となる。描画結果を見ると、トーンにより、モチーフの明暗や陰影を表現している。中期・後期の描画プロセスが改善されている。入門者 B は、ドローイングを重ねる度に、描画プロセスが改善している様子が伺える。

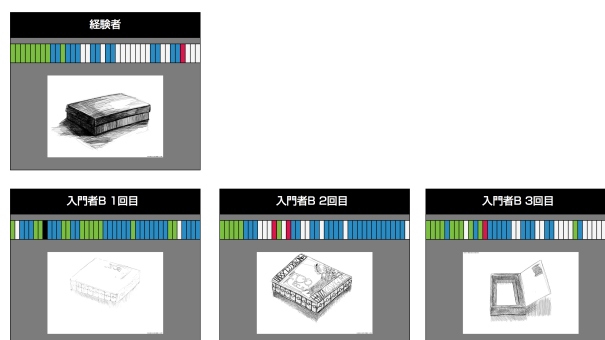


図 14: 紙箱を描いた経験者(上段)と入門者 B(下段)の1回目から3回目の描画結果とプロセスグラフ

7 おわりに

本稿ではドローイング学習環境を概観し、熟練者の描画プロセスから、描画領域および筆圧の時系列変化について述べ、美術入門者の経験を重ねることによる変化を示した。今後は、ドローイングプロセスモデルの精緻化および、自動学習支援について検討をしていく。

参考文献

- [1] N.A. Bernshtein. *The Co-ordination and Regulation of Movements*. Pergamon Press, New York, 1967.
- [2] M. L. Latash. *Progress in Motor Control: Bernstein's Traditions in Movement Studies*, Vol. 1. Human Kinetics, Urbana, IL, 1998.
- [3] M. L. Latash. *Progress in Motor Control: Structure-Function Relation in Voluntary Movement*, Vol. 2. Human Kinetics, Urbana, IL, 2002.
- [4] 越川倫明, 栗田秀法(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.
- [5] 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.
- [6] 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, Vol. 6, pp. 89-100, 1984.
- [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] 岩田弥富. 造形的修練としての素描論. 芸術選書, No. 7. 芸大出版会, 1971.