

## パフォーマンスと生理指標を用いた技能タスクの習熟段階推定

Proficiency Stage Estimation of Skilled Task  
by Using Performance and Physiological Indices松田 貴大 西田 豊明 大本 義正  
Takahiro Matsuda Toyoaki Nishida Yoshimasa Ohmoto

京都大学大学院情報学研究科

The School of Information and Mathematical Science, Faculty of Engineering, Kyoto University

There are many "skilled tasks", which require people a lot of time to acquire skills. In these tasks, it is important and difficult that instructors properly understand the proficiency stage of the learner. This study aims to develop a method to estimate the proficiency stage by combining the performance with the task difficulty consciousness. We proposes a proficiency stage model which has two axes of learning outcomes and difficulty consciousness. In order to estimate the two values, we utilize the learner's performance and physiological indices. We created a shooting game task and experimented to consider the utility of this model. As a result, LF/HF tended to react if the learner was considering a new method for solving the task, and SCR tended to react if the learner was establishing it. This result suggests the utility of physiological indices to estimate the detailed changes of difficulty consciousness.

## 1. はじめに

楽器演奏やプレゼンテーションなど、特有の知識(宣言的知識)と「身体で覚える」技術(手続き的知識)が要求され、完全な習得に長い年月が必要である「技能タスク」は数多く存在する。仕事や趣味において技能タスクの習熟を目指す人は多いが、独学では知識・技術の習得に限界があり、自分がどの程度習熟しているのかを客観的に判断することが難しい。そのため、より高いレベルを目指す学習者には習熟レベルを適切に評価できる熟達者による指導が必要となり、これが指導者・学習者の大きな負担となる。この問題を解決するために、繰り返し練習の中で得られた学習者のパフォーマンスから習熟レベルを推定し、適当と思われるアドバイスを行う学習支援システムが提案されている[森田 08][曾我 08]。しかし、習熟を適切に評価するには学習者のタスクに対する意識の変化を無視することができず、人間による指導では無意識的にそれらが考慮されていると考えられる。

本研究では、技能タスクを繰り返し練習している学習者の学習成果と難点意識を組み合わせ、設定された習熟段階のどこに位置するかを推定する手法の開発を最終目標とする。

## 2. 関連研究

技能タスクの習熟過程及び評価に関する先行研究を紹介する。技能習熟における学習成果の変化に関して、習熟曲線と呼ばれるものがしばしば議論になり、好調と不調を繰り返しつつ段階的に習熟していくケースが見られる[Konrad 98][Ritter 01][Grantcharov 09]。一般的にもスランプという言葉で知られる不調にどのような意味があるのか考察する必要があるだろう。

Kraigerらは、それまでの学習に関する研究結果をまとめ上げ、学習成果は知識・技術・感情に反映されるというモデルを提唱した[Kraiger 93]。このモデルから、習熟推定には感情など学習者の内部状態を推定することが重要であるといえる。

Langan-Foxらは、技能習得過程における内部状態変化についてこれまでの研究成果をまとめ、技能習得過程は3段階に分

けることができると主張している[Langan-Fox 02]。Langan-Foxらのまとめた技能習得過程を表1に示す。この3段階モデルは第2段階が曖昧に定義されている。実際の技能習得過程において学習者はほとんど第2段階にあると考えられ、この段階を詳細に定義する必要があるといえる。

表 1: 技能習得過程 (Langan-Fox, 2002)

第1段階	行動に認知と思考が必要 タスクが学習者にとって目新しい
第2段階	行動に認知と思考を要しない部分がある 部分的に行動が自動化されている
第3段階	行動に認知と思考が不要 完全に行動が自動化

習熟過程・評価に関する以上の先行研究より浮かび上がった疑問点は、以下の通りである。

- 習熟曲線に見られる不調にどのような意味があるのか
- 技能習熟時に見られる知識・技術・感情の変化を説明するモデル
- Langan-Foxらの主張する技能習得第2段階の詳細な定義

これらを統合的に説明するモデルは存在していない。そこで本研究では、学習成果(習熟曲線)と学習者のタスク難点意識(感情)の推定を組み合わせた習熟段階推定手法の開発を目標とする。

## 3. 習熟段階モデル

まず、学習成果と難点意識の2軸を持った習熟段階モデルを提案する(図1)。

難点意識はタスクに対する苦手意識の有無である。学習者の初期状態は左上の「学習成果:無, 難点意識:有」であり、成果が合格ラインに達していない状態に当たる。習熟にしたがって技術が成熟してくると成果が合格ラインに達し、右上の「学習

連絡先: 松田 貴大, 京都大学大学院情報学研究科,  
matsuda@ii.ist.i.kyoto-u.ac.jp

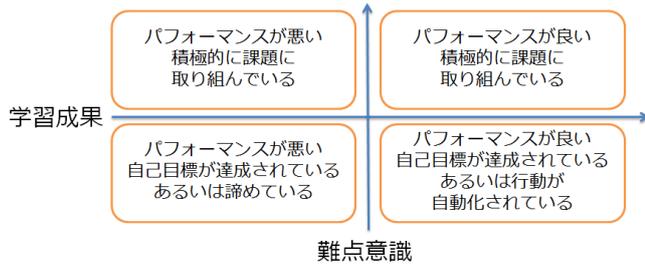


図 1: 習熟段階モデル

成果:有, 難点意識:有」に遷移する。この状態で何度も練習を繰り返すうちにその部分を難点と感じなくなり, 右下の「学習成果:有, 難点意識:無」に遷移する。コツが上手く掴めなかった場合は, 初期状態から動かないか完全に諦めてしまい, 左下の「学習成果:無, 難点意識:無」に遷移する。

### 3.1 生理指標による難点意識推定

学習成果をパフォーマンスから評価できることは先行研究でも示されており [森田 08][首我 08], 難点意識の推定手法が重要となる。学習者がタスクに難しさを感じている時, ストレスが高まり, 思考を働かせて緊張・興奮状態にあると考えられる。よって, ストレス指標に用いられる生理指標の一種, LF/HF および SCR が有効であると考えた。LF/HF および SCR は, 交感神経系が優位に働いている場合高数値を示すとされている [藤澤 98]。また, LF/HF は 3DTV 視聴時の感情状態推定に関する研究において緊張・興奮の有効な指標として結論付けられている [阪本 12]。

### 3.2 技能タスクとしてのシューティングゲーム

実験タスクとして, 技能タスクであり, なるべく短時間での習熟が期待できるタスクが必要である。そこで本研究ではシューティングゲームを採用した。シューティングゲームは習熟過程における知識構造変化のモデル化を試みた先行研究においてもタスクとして採用されている [Day 01]。

シューティングゲームは技能タスクである。知識として「操作方法・クリア条件・スコア獲得条件・各ゲーム場面の特徴」、技術として「全体を通して利用できるコツ・各ゲーム場面に限定的に利用できるコツ (パターン)」等が挙げられ, 後者の方が膨大である。また, 習熟には各ゲーム場面に対応したパターンの構築が不可避であり, それには学習者自身による長期間の繰り返し練習が必須となる。シューティングゲームはゲーム場面によってある程度分割でき, プレイヤーはそれぞれに対して異なる難点意識を持ち, それが生理指標反応に反映されると考えられる。

## 4. 評価実験

### 4.1 概要

難点意識の推定に対してどのように生理指標を用いれば良いかを検討・評価するため, シューティングゲーム (図 2) を制作し, 実験を行った。

タスク所要時間は 1 回あたり約 2 分 30 秒であり, プレイヤーはジョイスティックとボタン 2 つを用いる。このタスクにおいて, プレイヤーの達成目標は「ゲーム全体を通して高いスコアを獲得すること」で固定化される。スコアは各ゲーム終了時にプレイヤーにフィードバックされるが, ゲーム中に確認することは出来ない。プレイヤーはスコアを獲得するための行動

を把握しており, スコア獲得時のエフェクトの派手さによっておおよその獲得スコアを知る。具体的な数値としてスコアが表示されるのは, ゲーム終了時のみである。高いスコアを獲得するためには, 敵の動きを見極め, それに合わせて安全な動き方を考え, 積極的に敵に近づく必要がある。また, 時系列でイベントが設定されており, 各イベントは前のイベントの影響をほとんど受けない。実験環境の概略図を図 3 に示す。



図 2: シューティングゲームタスク

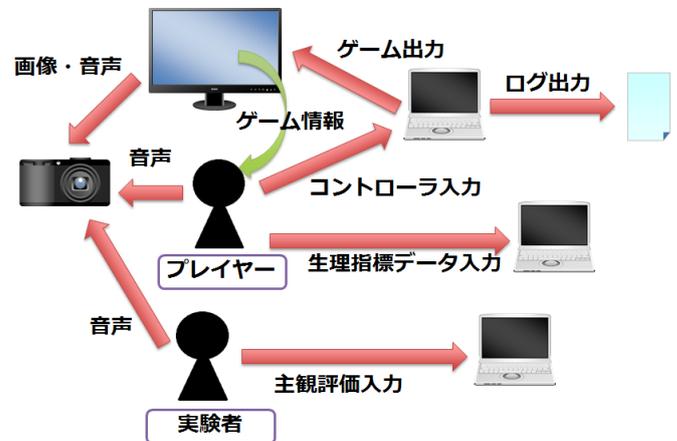


図 3: 実験環境の概略図

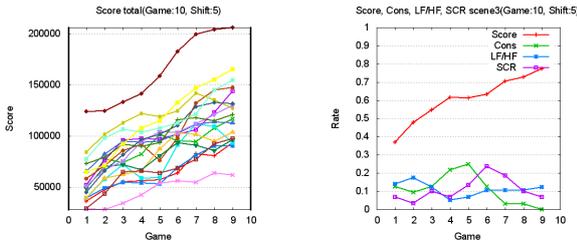
実験参加者は京都大学の学生 21 名 (全員男性) であり, 平均年齢は 21.7 歳 (標準偏差 1.75, 最大年齢 25 歳, 最小年齢 18 歳) である。実験参加者は, 前述のタスクを 50 回繰り返し行う。実験の所要時間は約 240 分であり, タスク自体の所要時間は約 100 分である。実験は同一日で 15 分間の休憩を挟んで 120 分ずつ行うか, 連続する 2 日間で 120 分ずつ行うかの 2 択で実行した。

ゲーム中, 予め決められたタスク部分区間終了時に, ゲーム画面とプレイヤーの様子を見ながらプレイヤーがその区間に対して難点意識を持ってプレイしていたかを, 実験者が主観で 2 値評価する。この評価に関してプレイヤーにフィードバックは行わず, 評価の存在も教示しなかった。

### 4.2 データ分析

データは 21 名分取得したが, 故意にミスをするなど真剣に取り組んでいなかった 2 名と, SCR の反応がほとんど見られなかった 2 名を分析対象から除外し, 17 名分のデータを分析した。長期的な習熟を見るため全てのデータに関して 10 ゲーム移動平均 (5 ゲームずつシフト) で考察を行った。図 4 に, 全プレイヤーの最終的なスコアの遷移と, ゲーム部分区間ごとのスコア (Score)・実験者主観評価による難点意識の有無 (Cons)・LF/HF の反応率 (LF/HF)・SCR の反応率 (SCR) の遷移の一例を示す。スコアに関しては, 実際の取得点数を, 最大限習熟

した場合その区間で取得すべき点数で割ったもの（ただし 1.0 を超える場合は 1.0）で表している。難点意識の有無に関しては、難点意識があるように見えた場合 1 を、ないように見えた場合 0 としている。部分区間ごとの生理指標の反応率は、指標が反応閾値（LF/HF:3.0, SCR:15.5）以上だった秒数をプレイ秒数で割ったものである。なお、LF/HF の反応率・SCR の反応率・難点意識の有無はプレイヤーの意識を表す指標と考えられるため、個人差を無くす目的で「各 10 ゲーム移動平均値の合計」で「各 10 ゲーム移動平均値」を除算し、正規化を行った。



最終スコア（全プレイヤー） 分析結果の例（1 プレイヤー）

図 4: 10 ゲーム移動平均の分析グラフ

## 5. 考察

スコア・難点意識を従属変数、LF/HF 反応率と SCR 反応率を説明変数として考察を行う。

### 5.1 難点意識と SCR

各ゲーム部分区間についてスコア・難点意識と生理指標反応率の相関係数を見ると、スコアと SCR について 7 区間中 1 区間で弱い正の相関があり、難点意識と SCR について 7 区間中 2 区間で中程度の正の相関が、5 区間で弱い正の相関があった（表 2）。よって、難点意識がある場合、SCR が反応しやすいと考えられる。

表 2: スコア・難点意識と生理指標反応率の相関係数

区間	スコアと LF/HF	スコアと SCR	難点意識と LF/HF	難点意識と SCR
1	0.008	-0.143	-0.067	0.326
2	-0.110	-0.066	0.021	0.219
3	-0.152	-0.043	0.055	0.294
4	0.038	-0.134	-0.162	0.341
5	-0.018	0.255	-0.096	0.380
6	0.081	-0.000	-0.034	0.518
7	-0.079	-0.067	0.092	0.440

### 5.2 スコア急上昇と LF/HF・SCR バランス

スコアの急上昇と共に SCR の強い反応が多く見られる区間があり、急成長時には SCR が反応しやすいのではないかと考えた。急成長時とは、5 ゲーム（横軸 1 点遷移）後にスコアが 0.1 以上上昇し、かつ、上昇後のスコアが 0.4 以上である区間（始点と終点を含む）とする。ただし、急成長区間あるいは非急成長区間のどちらかが見られなかったプレイヤーのデータは利用しない。ウィルコクソンの符号順位検定（両側検定）を行い、区間 5 と区間 7 において、プレイヤーごとの急成長区間と非急成長区間の SCR 反応率と LF/HF 反応率の差（ $SCR - LF/HF$ ）の平均に有意差が見られた（表 3）。

表 3: SCR-LF/HF プレイヤー平均の変化 (\*\*:  $p < 0.01$ )

区間	データ数	非急成長区間中央値	急成長区間中央値	p 値
1	12	-0.0155	0.0375	0.2036
2	10	-0.0030	0.0078	0.8457
3	7	0.0094	-0.0187	0.9375
4	5	0.0066	-0.0233	0.1250
5	11	-0.0135	0.0291	0.0098**
6	8	-0.0038	0.0141	0.3125
7	12	-0.0160	0.0511	0.0024**

急成長時、プレイヤーは新しい動き方の定着を試みておりタスクが再び目新しいものとなって様々な思考を働かせ、それが SCR と LF/HF のバランスに反映されていると考えられる。

### 5.3 スコア不調と LF/HF・SCR バランス

スコアの不調と共に LF/HF の強い反応が多く見られる区間があり、不調時には LF/HF が反応しやすいのではないかと考えた。不調時とは、5 ゲーム（横軸 1 点遷移）後のスコア変化が 0 以下である区間（始点と終点を含む）とする。ただし、不調時あるいは非不調時のどちらかが見られなかったプレイヤーのデータは利用しない。ウィルコクソンの符号順位検定（両側検定）を行い、区間 1 と区間 5 と区間 7 において、プレイヤーごとの不調時と非不調時の LF/HF 反応率と SCR 反応率の差（ $LF/HF - SCR$ ）の平均に有意差が見られた（表 4）。

表 4: LF/HF-SCR プレイヤー平均の変化 (\*\*:  $p < 0.01$ , \*:  $0.01 < p < 0.05$ )

区間	データ数	非不調区間中央値	不調区間中央値	p 値
1	16	-0.0356	0.0227	0.0110*
2	12	0.0070	0.0045	0.6221
3	16	-0.0004	0.0081	0.3225
4	17	-0.0031	0.0102	0.3225
5	17	-0.0209	0.0129	0.0032**
6	17	-0.0030	0.0266	0.3060
7	16	-0.0376	0.0385	0.0182*

不調時、プレイヤーは新しい動き方を試行錯誤しており、この思案が LF/HF と SCR のバランスに反映されていると考えられる。スコアの落ち込みは習熟曲線上では不調として考えられるが、プレイヤーの思考を考慮すると成長段階と捉えられる。この結果は、従来のパフォーマンス評価では捉えられなかった思考上の習熟レベル変化を推定できる可能性を示唆しており、習熟曲線に見られる不調の意味を説明する手がかりの一つではないかと考えられる。

#### 5.3.1 習熟段階モデルの再検討

考察をまとめて、習熟段階モデル（図 1）の再検討を行い「難点意識:有」に関して細分化した習熟段階モデルを提案する（図 5）。

学習者は初め左上の「学習成果:無、難点意識:有、 $LF/HF > SCR$ 」の状態にあり、タスクの性質を捉えながら方策を考案している。これは宣言的知識の習得段階といえ、表 1 で示した Langan-Fox らの技能習得過程モデルの第 1 段階に当たる。良い方策が見つかった場合、右の「 $LF/HF < SCR$ 」の状態に遷移してその方策を定着させようとする。これは宣言的知識の手続き化段階といえ、Langan-Fox らの技能習得過程モデルの第 2 段階に当たり、学習成果は良い状態に移行する。方策が定着する（手続き化が完了する）と学習者は再び

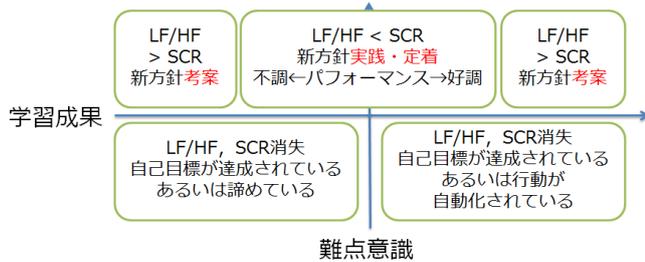


図 5: 難点意識:有 を細分化した習熟段階モデル

新しい方策を考え始め、右の「LF/HF>SCR」の状態に移行する。この状態は意識の面で左上の「LF/HF>SCR」と同じ状態であるが、学習成果は良い状態である。このとき一時的に学習成果が低下すると予想されるが、新たに考えた方策がより良いものならば最終的な学習成果はさらに良いものとなる。これが習熟曲線における好調・不調の波の正体なのではないかと考えられる。方策が完全に定着して新たな方策も浮かばなくなると、もはや思考を必要とせずタスクは無意識に遂行することができる。これが右下の「学習成果:有、難点意識:無」状態であり、Langan-Fox らの技能習得過程モデルの第 3 段階に当たる。

## 6. まとめ

本研究では「身体で覚える」技術が重要となる「技能タスク」における学習者の習熟を適切に評価するための習熟段階推定手法の開発を最終目標とした。習熟の適切な評価には学習者のタスク難点意識の変化も重要であると考えて習熟段階モデルを提案し、難点意識の推定に対してどのように生理指標を用いれば良いかを検討・評価するためシューティングゲームを制作し、評価実験を行った。評価実験の結果、LF/HF と SCR を用いて難点意識を細分化できる可能性を見出し、改善された習熟段階推定モデルを提案した。

評価実験の結果から、先行研究調査で見えてきたいくつかの疑問点に対する答えが見つかった。習熟曲線に見られる不調時に学習者は新しい方策を考案しており、意識面での成長段階にあると考えられる。技能習熟時に見られる感情変化は、図 5 で示す改善された習熟段階推定モデルで説明でき、これは表 1 で示した Langan-Fox らの技能習得過程モデルの第 2 段階の詳細な定義にもなっている。

実際にこのモデルが適当であるかを検証するためには学習成果と学習者の難点意識の真値が必要となるが、これらの真値設定は難しい問題であり今後の課題としたい。

## 7. 謝辞

本研究は、新学術領域研究 (KAKENHI No.26118002) の助成を受けています。

## 参考文献

[Day 01] Day, E. A., Jr., W. A., and Gettman, D.: Knowledge Structures and the Acquisition of a Complex Skill, *Journal of Applied Psychology*, Vol. 86(5), pp. 1022–1033 (2001)

[藤澤 98] 藤澤 清, 柿木 昇治, 山崎 勝男: 新 生理心理学 生理心理学の基礎, 北大路書房 (1998)

[Grantcharov 09] Grantcharov, P. T., Funch-Jensen, P., and Peter, P.: Can everyone achieve proficiency with the laparoscopic technique? Learning curve patterns in technical skills acquisition, *The American Journal of Surgery*, Vol. 197, No. 4, pp. 447–449 (2009)

[Konrad 98] Konrad, C., Schupfer, G., Wietlisbach, M., and Helmut, G.: Learning manual skills in anesthesiology: is there a recommended number of cases for anesthetic procedures?, *Anesthesia and Analgesia*, Vol. 86, No. 3, pp. 635–639 (1998)

[Kraiger 93] Kraiger, K., Ford, J. K., and Salas, E.: Application of cognitive, skill-based, and affective theories of learning outcomes to new methods of training evaluation, *Journal of applied psychology*, Vol. 78(2), pp. 311–328 (1993)

[Langan-Fox 02] Langan-Fox, J., Armstrong, K., Balvin, N., and Anglim, J.: Process in skill acquisition: motivation, interruptions, memory, affective states, and metacognition, *Australian Psychologist*, Vol. 37(2), pp. 104–117 (2002)

[森田 08] 森田 慎也, 江村 伯夫, 三浦 雅展, 秋永 晴子, 柳田 益造: 演奏特徴の強調およびアドバイス文呈示によるピアノ基礎演奏の独習支援, 日本音響学会平成 20 年度秋季研究発表会, pp. 933–934 (2008)

[Ritter 01] Ritter, E. F., Schooler, J. L.: The learning curve, *International encyclopedia of the social and behavioral sciences*, Vol. 13, pp. 8602–8605 (2001)

[阪本 12] 阪本 清美, 浅原 重夫, 坂下 誠司, 山下 久仁子, 岡田 明: 生理心理計測による 3DTV 視聴時の感情状態推定の試み, 電子情報通信学会技術研究報告. HCS, ヒューマンコミュニケーション基礎, Vol. 112(45), pp. 121–126 (2012)

[曾我 08] 曾我 真人, 松田 憲幸, 瀧 寛和: デッサン描画中に描画領域に依存したアドバイスを提示するデッサン学習支援環境, 人工知能学会論文誌, Vol. 23(3), pp. 96–104 (2008)