

Learning the Cascade Juggle: A Dynamical Systems Analysis

Beek, P. J. & Santvoord, A. A. M.

Journal of Motor Behavior, 24, 85-94. (1992)

Abstract

- エキスパートのジャグラーにおける過去の理論や実験から客観的評価に基づく学習プロセスの 3 段階モデルを提案する。
- 新たな運動スキルの学習は、知覚運動を行う空間で(運動の)不変性, 固定ポイントの発見があり, そこから発展して逸脱が起こる特性を持つ。

Introduction

- 新たな動作に対して、どのようにうまく協調させ、制御するのかを解明することは、運動科学において最も挑戦的な問題の 1 つであった。
- 動作の協調性や道具による動作制御、(運動の)非線形的ダイナミクス(原動力)の概念における発達原理の研究から 10 年後、運動スキルの獲得に関するダイナミクス理論が実践的になっている (Beek, 1989a, 1989b; Fowler & Turvey, 1978; Haken, Kelso, & Bunz, 1985; Kelso, 1984; Kugler, Kelso, & Turvey, 1982; Saltzman & Kelso, 1987)。
- 新たな運動スキルの学習は、ある特定のダイナミクスな状況から別の状況へ遷移することであると一般的に考えられている。
 - ここで、研究者は 3 つの問題に直面する。
 - ◇ (a) 最初の運動パターンにおけるダイナミクスに関する問題
 - ◇ (b) 運動システムを進化させる要因に関する問題
 - ◇ (c) 遷移をもたらすダイナミクスの原則に関する問題
 - これらの問題を解決には主に 2 つのアプローチがある。
 - ◇ the synergetic approach (Schoner, 1990; Schoner & Kelso, 1988a, 1988b; Zanone & Kelso, in press)
 - ◇ the natural-physical approach (Newell, Kugler, van Emmerik, & McDonald, 1989)
- the synergetic approach
 - 課題実行における固有のダイナミクスを特定する。
 - ◇ そのダイナミクスには安定フェーズと遷移フェーズがある。
 - ✓ 指と手の協調に関する実験 (cf. Haken et al., 1985; Kelso, 1984)
 - ダイナミクスを伴う学習された運動パターンを決める行動情報を与える。
 - ◇ 外部から取り入れられるダイナミクスそのものや、初期状態から学習された運動パターンへの遷移をモデル化する。
 - ◇ 時間を構造化させる環境(例:メトロノーム)が、運動パターンへの遷移においてどのように影響を与えるのかを示した (Schoner & Kelso, 1998a, 1988b; Schoner, 1990)。

- 最近では, (運動の)協調に基づくダイナミクスの質的变化が実験的に立証された (Zanone & Kelso (in press)).
- このアプローチは学習段階が制限される時に用いられる.
 - ✧ 初期状態が明確である.
 - ✧ 初期状態と遷移状態が徹底的に研究される.
- the natural-physical approach
 - 特定の知覚運動の空間探索において学習者がどのように方略を発見するのかについて優先的に考えられる.
 - 方略が推測(どのような考えをしたのか)に基づく主張したいのだが, 方略自体は練習に伴って発達することが特に難しい問題である.
 - そこで, 課題の運動パターンを対外的に定義する形で基準を設けた (cf. Nell et al., 1989; Fowler & Turvey, 1978).
 - ✧ 対外的に定義されたそのダイナミクスにより, 制約は方略で大きく決定することになる.
 - ✓ 理想的な運動パターンを定義し, そこに辿り着くまでの方略プロセスを見る.
 - 複雑な運動行為に関連する空間の方略は, 身体の制約, 環境, 課題の制約間での相互作用から成り立つ (Newell, 1986).
- the synergetic approach も the synergetic approach どちらも, 初期状態や遷移状態, あるいは外的なダイナミクスのどちらかが定義される必要がある.
 - しかし, 新たな運動スキルを学習する上で, 初期状態はスキルが実行されない限り, 明確にすることが難しい.
 - 対外的に定義されたダイナミクスは通常, 曖昧になりがちである.
- 現状では, the synergetic approach は初期状態と遷移状態が明確な運動に限定され, 一方で the synergetic approach も, 人と環境の相互作用に関して詳しく言及できていない.
- 本研究では運動学習における上記の問題を解決するために, 第3のアプローチを考えた.
 - 学習が進んだ最終状態を特定することである.
 - ✧ 過去の広範囲に渡るエキスパート研究を参考にする.
- 特に時間的, 空間的制約の観点からエキスパート研究では明らかにされていなかった部分を明らかにする.
 - ジャグリングのカスケードにおける知覚運動の空間を分析対象とした (Figure.1).
- カスケードのようなスキルに求められる知覚運動の空間に関する研究のメリットは, 正確な時間的, 空間的制約がありながらも, 達成される課題解決が少ないことである.
 - 今回は, カスケードにおける時間的制約に焦点を当て, 制約を調整する学習の観点からカスケードの学習プロセスを検証する.
- カスケードはリズムカルな性質を持つ, 複雑な周期的な行為である.
 - 他のリズムカルな行為と比べて正確にリズムとは何であるのかを定義しやすい.
 - 時間的制約は, 課題の実行において肉眼でわかるレベルで固定が生じることを意味する.

- 以下の時間に関する関係式が成立する (Beek, 1989a, 1989b).
 - ◇ the average frequency (of the hand): $2\pi/t_h \equiv 2\pi/(t_l + t_u)$
 - ✓ t_l はボールを手に乗せている時間, t_u はボールを手に乗せていない時間
 - ◇ the average frequency (of the balls): $2\pi/t_b \equiv 2\pi/(t_l + t_f)$
 - ✓ t_f はボールの滞空時間
 - ◇ $t_b/t_h = N/H$
 - ✓ N はボール数, H は手の数
- 基本的なカスケードの時間的制約は, 行為を持続する上で満たされなければならない.
 - より詳細な固定の原則に基づく式がある.
 - ◇ $W(t_l - t_u) = (t_l + t_u)$
 - ✓ W は手の回転数である.
 - ◇ W が整数値ならば, 動作が固定されていることを意味する.
 - k を使用することで, 確認できる.
 - ◇ $k \equiv t_l/(t_l + t_u)$
 - ◇ $W(t_l - t_u) = (t_l + t_u)$ into $W\{k \cdot (1 - k)\} = 1$ あるいは $k = .5(1 + W^{-1})$
 - ◇ 最も動作が固定されている時の W の最小値は $W = 2$ である ($k = .75$).
 - ✓ $W = 1$ は, 全ての手が常時ボールを持っている状態を意味するので現実的にはあり得ない.
- 上記はエキスパートのジャグラーによって実験的に立証された (Beek, 1989a, 1989b, in press).
 - ボール数に関係なく, 常に hand cycle time に基づく k は平均的に .75 に近づく.
- 3 ボールカスケードの場合, .75 より小さくなる傾向がある.
 - カスケードのダイナミクスな空間において .75 は, より好まれる値であるが必須ではない.
- カスケードに関する疑問として, 適切なタイミングにまつわる問題がある.
 - カスケードには以下の学習プロセス(仮説)がある.
 - ◇ (a) ボールと手による, 動作が固定されるまでの調整段階
 - ◇ (b) 手の動きが ($W = 2, k = .75$) を満たす段階
 - ◇ (c) 柔軟性を備えた段階
 - ✓ $k = .75$ が一過性となり, 変動が起こる.
- 今回の研究では, カスケードの学習プロセスにおける上記の仮説を確かめる.
 - 特に, 動作の固定 ($k = .75$) が未経験者のノービス 20 人でも反映されるのかを調査する.
 - 学習段階を客観的な根拠に基づいて明らかにする.
- ノービスは, プロから投げ方を教わった.
 - ノービス 10 人は聴覚的な学習(メロノームの使用)が認められた.
 - ◇ 手の動きをビーブ音と同調させることができる.
 - メロノームが動作の固定 ($k = .75$) に役立つことを期待する.

Method

Subjects

- 男性 13 人と女性 7 人が実験に参加した(全員, カスケード未経験者).
 - 平均年齢は, 21.1 歳で標準偏差は 3.3
- 参加者は 3 ボールカスケードを学習することだけ伝えられていた.

Procedures

- 2 週間掛けて, 30 分の練習セッションに 10 回参加した.
 - それ以外での練習は認められなかった.
- 参加者は指導経験があるプロから投げ方を教わった.
- セッション 1 の始めにノービスは, 以下の指示に従って段階的にカスケードを教わった.
 - (1) 1 つボールを持ち, それをもう一方の手に投げる. 胸ぐらいから頭の上ぐらいの高さに向けて投げる.
 - (2) 右手でボールを 1 つ掴み, 左手に向けてボールを投げる. そのボールが頂点に達した時に左手にあるもう 1 つのボールを右手に向けて投げる.
 - ◇ 1 つ目のボールは左手に, 2 つ目のボールは右手に持っている状態である.
 - (3) 右手に 2 つボールを持ち, 左手に 1 つボールを持つ. 右手にあるボールの 1 つを左手に投げる. そのボールが頂点に達した時に左手のボールを右手に投げる. 2 つ目のボールが頂点に達した時に最後 3 つ目のボールを左手に投げる.
 - (4) 直前に投げたボールが頂点に達した時にボールのキャッチ, あるいはトスをする.
 - (1) ~ (4) を繰り返すとカスケードになる.
- (1)~(4) を教わった後, 参加者はでカスケードを練習し, プロから個別指導を受けた.
- 10 セッションの間, 参加者は **juggling cycle** (one complete cycle: 6 連続トスとキャッチ) の記録が更新される度に実験者に報告した.
 - 6 cycles まで行った(これが分析対象となる).
- その後, カメラの前で one complete cycle 分, カスケードを行った.
- セッション 3 後, 参加者は進捗を基に同じスキルレベルになるように 2 つのグループに分けられた.
 - セッション 7 以降, あるグループはメロノームがある状況で練習し, もう一方のグループはなしで練習した.
 - ◇ 最初は 1.66Hz でセットされ, ボールが(腰の位置から)1m 投げられた時の $k = .75$ に一致し, インターバルは両手におけるトス・トス(キャッチ・キャッチ)間であった.
 - ◇ セッションの間に参加者は, 望ましい値に自由に変更するように指示された.
 - ◇ 参加者はビーブ音でトスもしくはキャッチの一方を同調させるように言われた.
- 全ての参加者は, セッション 4 (pretest)の始めとセッション 7 (midtest) の途中, セッション 10 の終わり (posttest) に 2 complete cycles 分をメロノームなしで行った.

Data Acquisition

- ハイスピードカメラが, 参加者から 6m 離れた正面(参加者とボール全て映る所)に設置された.

Data Reduction

- 今回, 設置した時間変数は以下である.
 - Time flight t_{fi} : 同じボールにおけるトスからキャッチまでの時間
 - Time loaded t_{li} : 同じボールにおけるキャッチから次のトスまでの時間 (ボールを手に乗せている時間)
 - Time unloaded t_{ui} : 同じ手におけるトスからキャッチまでの時間 (ボールを手に乗せていない時間)
 - Hand cycle time $t_h = t_{li} + t_{ui}$

Results and Discussion

Cycle Trials

- セッション 4 の時点で全ての参加者は少なくとも one complete cycle (6 連続トスとキャッチ) はできるようになった.
 - 参加者によって進捗状況に大きな差があった (Figure.2A).
- 平均の学習率はほぼ直線になった (Figure.2B).
 - pretest 後 (90 分後), 参加者は平均 3.4 complete cycles できるようになった.
 - 各参加者の hand/ball cycle (それぞれ, t_{li}/t_{ui} , t_{fi}) から, 偏差 (z_i) を計算した.
 - ◇ $z_i = \{[(N/H) - 1](t_{li}/t_{fi})\} + (Nt_u/Ht_{fi}) - 1$
 - 6 complete cycles 分の平均偏差 $|z|$ が記録された.
 - ◇ $|z| = |\sum_i^n \frac{z_i}{n}|$
- 分散分析より, $|z|$ において cycle trial 数の主効果が確認された, $F(5,95) = 5.89, p < .0001$.
 - パフォーマンスが増加するにつれて, 有意に減少した (Table1).
- Table1 より, first cycle で得られた k は少し (.75 より) 高いが .75 に近づく.
 - しかし, 分散分析では cycle trial 数の主効果はなかった, $F(5,95) = 1.33, p > .10$.
 - 6 cycle trials の平均は .75 より有意に高かった, $t(199) = 3.16, p < .005$ (両側検定).
 - t_h は cycle trial 数が進むにつれて有意に減少し, 1s に近づいた, $F(5,95) = 3.98, p < .005$.

Test Trials

- pretest において k のグループ平均は, .75 周辺になり, 一方で post test において t_h のグループ平均は 1s に近づいた.
 - 練習要因 (IM (Instructor-Plus-Metronome) と IO (Instructor Only)) とテスト要因 (pre-test, midtest, posttest) で分散分析すると, メトロノームは k と t_h に有意に影響を与えないことが示唆された, $F(1,18) = 0.00$ for the k , $F(2,36) = 1.24, p > .10$ for the t_h .
 - テストの主効果が k と t_h 共に確認された, $F(2,36) = 4.73, p < .02$ for the k , $F(2,36) = 14.84, p < .0001$ for the t_h .
 - ◇ 実験を通して k と t_h 共に有意に減少した.

- さらに、深い考察をするために参加者を FL (faster learners) と SL (slower learners) のグループに分けて k と t_h を観察した。
 - 6 complete cycle できた順にグループ分けした.
 - 各グループとも IM と IO の人数はそれぞれ 5 人であった.
- Table3 より, k と t_h は両グループとも実験を通して減少した。
 - SL における k と t_h のテスト毎の平均は, FL よりも高かった.
- グループ要因とテスト要因の分散分析では, テスト要因の主効果が明らかになった: test, $F(2,36) = 4.54, p < .02$, for the k ; $F(2,36) = 11.60, p < .0001$, for the t_h ; group, $F(1,18) = 4.76, p < .05$ for the k ; $F(1,18) = 6.22, 2p < .05$ for the t_h . 相互作用はなかった.
- SL における k は, .75 よりも大きく, 徐々に減少し.75 に近づいた。
 - 一方で, FL における k は pretest で既に.75 で徐々に.75 よりも小さくなった.
 - SL におけるテスト要因をまとめた k は, .75 よりも有意に高かった, $t(29) = 3.19, p < .005$ (両側検定); k の平均 = .77.
 - ◇ 一方で, FL におけるテスト要因をまとめた k は, .75 と有意差はなかった, $t(29) = -1.44, p > .10$ (両側検定); k の平均 = .74.
- 重要なことに pretest における SL の k は.75 よりも有意に高い, $t(9) = 2.72, p < .02$ (片側検定), 一方で FL では確認されなかった。
 - 反対に posttest では, FL の k は.75 よりも有意に低かったが, $t(9) = -1.81, p < .05$ (片側検定), 一方で SL では確認されなかった.
- FL が pretest で $k = .75$ であったが, それは主要なモードロックを得ていることを示しており, pretest 前に記録された cycle trials における(例: 5 complete cycles までしかできない時も記録される) k は.75 よりも有意に高かった, $t(49) = 1.82, p < .05$ (片側検定); k の平均 = .76.

General Discussion

- 先行研究では, ジャグリングスキルは以下のプロセスとして説明される。
 - (a) “debugging” (Minsky & Papert, 1972)
 - (b) 運動プログラムを “intellectually” に構築する (Austin, 1976)
 - (c) 特定の “grammatical” な規則を発見する (Norman, 1976; Steiner, 1988)
 - 共通することは, 概略的な制御構造といった学習プロセスが認知的な表れの構造として考えられている.
- 今回の研究は, ダイナミカルシステムからジャグリングの学習を全く異なる構図で捉えた。
 - 3 ボールカスケードのパターンにおける 3 段階学習を量的に, 理論的に基づいて調査した.
 - 全般的に, ノービスから得られた結果は, エキスパートのパフォーマンスに関する洞察に基づき証明した 3 段階学習仮説と一致した (Figure.3).
- 学習の Stage 1 では, ノービスはカスケードで実際に要求されることを活発的に探索することに忙しい.

- ボールと手が同じ時間フレームで動こうとする。
 - ◇ 一度達成され、初めの **juggling cycle** が行われると、今度は安定したパフォーマンスを目指し、**hand cycle** がどのようなタイミングで行われるべきかを探索する (Stage 2).
- Stage 2 では、主要な固定ポイント $k = .75$ が定着するようになる。
 - 始めの数 **juggling cycle** のうちは、.75 より高い値になるが、近づくようになる。
 - SL は k が .75 少しではあるが有意に高かった。
 - FL は **test trials** に入る前は有意に k が .75 よりも高かったが、最後の 7 セッション間で **frequency modulation** (周波数変調) を発見したため、 k が .75 より有意に低くなったことが特徴付けられる。
 - ◇ k が低くなったにも関わらず、パフォーマンスが崩されなかったことを示す。
 - ✓ FL は Stage 3 にすぐに入った。
- Stage 3 は、 $k = .75$ のモードロックから **frequency modulation** になることが特徴付けられる。
- 今回の実験で FL が達成した程度は、**frequency** が 1Hz よりも高く(約 2.5Hz) で(1 秒間に 2.5 回連続キャッチを行う)、 k は .75 よりも低かった。
 - エキスパートは、(.75) 以外の固定ポイントを持っており、 $k = .67$ ($W = 3$), $k = .63$ ($W = 4$) であった。
 - しかし、重要なことはノービスが $k = .75$ を発見し、 $k = .75$ のモードロックから安定性を失うことなしにさらなる探索・調整することである。
- Beek (1989b) はモードロックに定着することなくその形態に近い動きをするようになる、熟達した生態システムの特性を以下の 2 つの世界があると述べた。
 - 安定性と信頼性(モードロック)
 - 順応性と柔軟性
 - 近年、この考えはさらなる実験的・理論的検討が行われている (DeGuzman & Kelso, 1991; Kelso, DeGuzman, & Holroyd, 1991).
- 今回の研究の疑問として、なぜメトロノームの存在がカスケードの助けにならなかったのかである。
 - 1 つ目の説は、信号が ($k = .75$ に結びつく) 特定の時間構造を与えないという考えである。
 - 2 つ目の説は、カスケードの学習は閉じられたプロセスであるという考えである。
 - ◇ 空間(操作)の性質で、スペースを操作するような外的フィードバックの発見が難しい。
- 動作の協調に対するダイナミカルシステムアプローチのキーは、知覚運動課題が ($k = .75$) の固定ポイントの存在である。
- 今回の研究では、固定ポイントが参加者で同じでエキスパートと異なることは、学習の段階プロセスを提供した。
 - 初期状態を知るきっかけとなる。
 - 今後、Stage 3 を検証するための長期的実験が必要である。

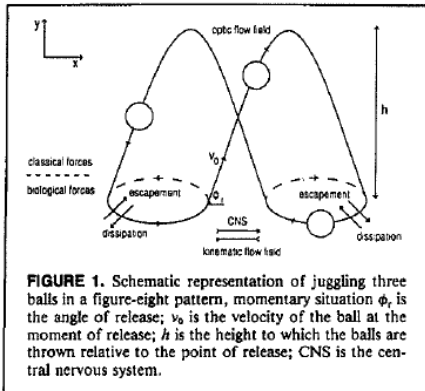


TABLE 1
Means (and Between-Subject Standard Deviations) of $|z|$ (-), k (-), and t_h (s) on the Cycle Trials

	Cycle number					
	1	2	3	4	5	6
$ z $.05 (.04)	.03 (.03)	.02 (.01)	.01 (.01)	.02 (.01)	.01 (.01)
k	.76 (.05)	.76 (.03)	.77 (.03)	.76 (.04)	.76 (.05)	.75 (.05)
t_h	1.08 (.11)	1.05 (.09)	1.03 (.09)	.98 (.11)	1.01 (.14)	.99 (.12)

Note. $N = 20$ subjects.

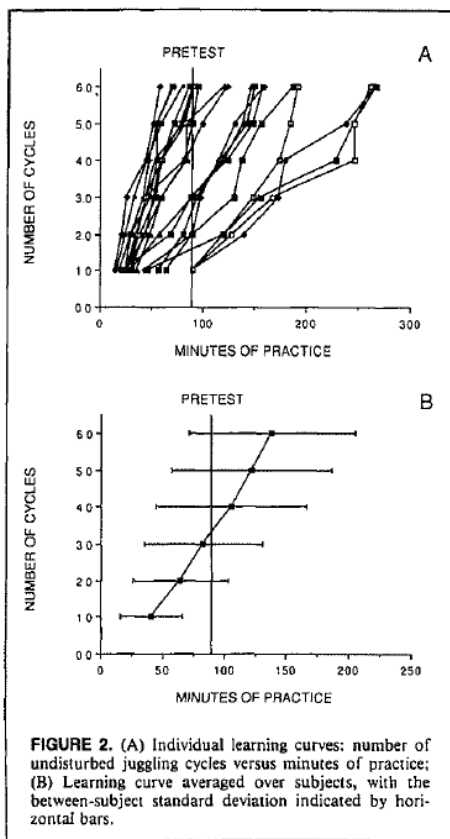


TABLE 2
Means (and Between-Subject Standard Deviations) of k and the Absolute Value of t_h (in s) on the Test Trials for the Instructor-Plus-Metronome Group (IM) and the Instructor-Only Group (IO)

Group	Pretest		Midtest		Posttest	
	k	t_h	k	t_h	k	t_h
IM	.78* (.04)	.93 (.13)	.75 (.06)	.90 (.15)	.75 (.04)	.88 (.14)
IO	.77 (.06)	1.08 (.20)	.76 (.04)	.94 (.16)	.74 (.04)	.90 (.16)
M	.77 (.05)	1.00 (.19)	.76 (.05)	.92 (.15)	.74 (.04)	.89 (.15)

Note. Both groups were comprised of 10 subjects.
* = significantly different from .75 at the .05 level on a one-tailed t test.

TABLE 3
Means (and Between-Subject Standard Deviations) of k and the Absolute Value of t_h (in s) on the Test Trials for the Faster Learning Group (FL) and the Slower Learning Group (SL)

Group	Pretest		Midtest		Posttest	
	k	t_h	k	t_h	k	t_h
SL	.79* (.04)	1.06 (.18)	.78 (.05)	.98 (.12)	.76 (.03)	.93 (.13)
FL	.75 (.05)	.94 (.18)	.74 (.05)	.85 (.16)	.73* (.04)	.84 (.16)
M	.77 (.05)	1.00 (.19)	.76 (.05)	.92 (.15)	.74 (.04)	.89 (.15)

Note. Both groups were comprised of 10 subjects.
* = significantly different from .75 at the .05 level on a one-tailed t test.

