

## Changing coordinative structures in complex skill acquisition

Human Movement Science, Vol. 16, No. 6, pp. 823-844, 1997

Vereijken, B., Van Emmerik, R.E.A., Bongaardt, R., Beek, W.J., & Newell, K.M.

### Abstract

- 複雑なスキル獲得過程における（運動の）協応構造の変化を検証
- 練習早期で安定性が獲得され、終盤に掛けてもう 1 段階変化が観察

### 1. Introduction

- 運動科学…運動において「何」が影響を受けるか
  - 運動パターンに関する生物力学的特徴
    - ◇ 制御された運動，運動制御に関する 'outside' な側面
  - 課題達成をもたらす制御変数の特定
    - ◇ 神経系による制御そのものに焦点，運動制御に関する 'inside' な側面
- 本研究…身体全体によるスキル獲得に関心
  - スキーのスラローム課題
  - 目標：課題達成に向け，（初学者が）何を行っているのか（制御するのか）を示す
- 協応：運動の自由度における統合プロセス (Bernstein, 1967a, b)
  - 明確に示された運動構造（以下，協応構造）
    - ◇ e.g., Kugler et al., 1980; Turvey, 1977; Turvey et al., 1978
- スキル獲得過程における協応構造の獲得はほとんど検証されていない
  - 協応構造の変化をみる
  - 先行研究のデータを使用 (Vereijken et al., 1992a)

### 2. Method

#### 2.1. Subjects

- 男性 5 人（スキー経験なし）
  - 平均 24 歳，平均身長 1.76m，平均体重 67.4kg

#### 2.2. Apparatus

- Skier's Edge (Fig.1)
  - 水平方向にスキーで要求される動きを行う

- 力の加減で様々な横揺れが可能

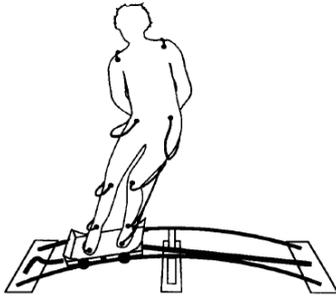


Fig. 1. The ski apparatus.



<画像 URL> Teleton Gravity Research:

<http://www.tetongravity.com/forums/showthread.php/266595-Buying-a-new-or-used-ski-ers-edge>

- 11 か所（踏み台、左右の肩、尻、膝、足首）に LED を装着
  - 2 台のカメラ（サンプリング周波数 50Hz）で撮影
  - 光工学装置で 3 次元の位置座標を記録

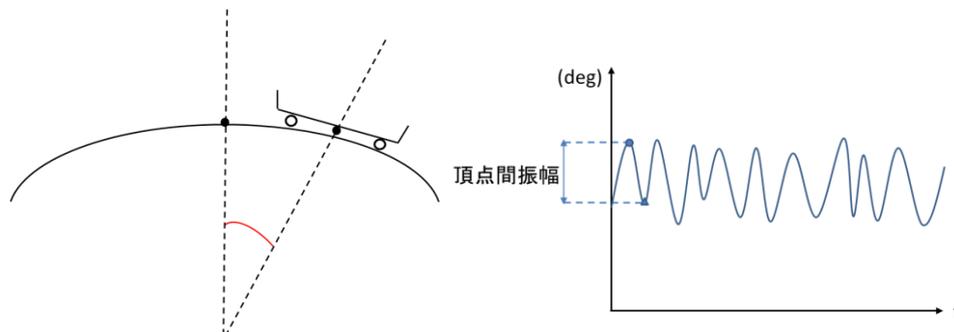
### 2.3. Procedure

- 大きく素早く横揺れするように教示
  - 手は背中にまわす
  - 課題達成の方法やパフォーマンスに関するフィードバックはなし
- 連続 7 日間実施
  - 1 日で、1 試行（1 分間）× 20 = 20 試行、試行毎に 1 分間の休憩
- 1 日目の 1 試行（Pretest）と各日の 20 試行目の最初の 30 秒間を対象に運動計測

### 2.4. Dependent measures

- 踏み台のダイナミクス
  - 踏み台の角度振幅と変動（度）<補足 1>
    - ◇ 角度振幅：試行内における平均頂点間振幅
      - ✓ 時系列に沿った角度の変化（sin カーブ）における山と谷の差分
    - ◇ 肩も同様（ただし、左右肩の中心点を対象）

<補足 1>



● 胴体の動き

- 重心（身体に付けた 10 点の LED の位置から特定）の高さ (cm) と変動，高さの振幅
  - ◇ 高さ：踏み台との距離 (Fig.2 の  $h$ )
  - ◇ 振幅：試行内における平均頂点間振幅
  - ◇ 変動：変動係数 (%)
    - ✓ 変動係数 = 標準偏差 / 平均値
    - ✓ 平均値が大きく異なるデータ群間の“ばらつき” 具合を比較
    - ✓ 例：幼稚園児 50 人における身長 of “ばらつき” と，高校生 50 人における身長 of “ばらつき” を比較
- 回転角度の振幅と変動 (Fig.2 の  $\phi$ )
  - ◇ 角度振幅：試行内における平均頂点間振幅

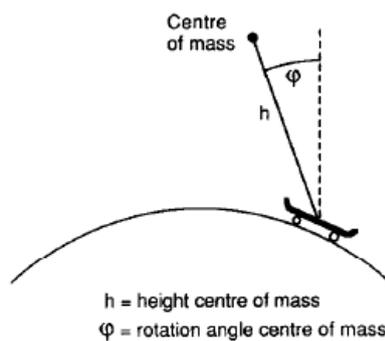


Fig. 2. Derivation of the angular position of centre of mass in the frontal plane (rotation angle) and its height above the platform.

● 踏み台と被験者とのインタラクション

- 踏み台と重心による位相差 (度) と変動
  - ◇ 位相差…初期状態による影響を除くため，最後の 20 秒間を分析対象

### 3. Results

#### 3.1. Changes in the platform movements

- 練習より，踏み台の角度振幅はより大きく，周期性が増す (Fig.3, 上, P. 9)
- 角度振幅の変動も減少 (Fig.4, 上, P. 10)
  - ただし，S1 は，Pretest 後に変動が増加
    - ◇ 練習効果は確認されなかった ( $F(7,28) = 5.214, p = 0.053$ )
    - ◇ Day 3 では周期的ではなく，より小さい動きを行う方略
    - ◇ Day 4~Day 5 で運動のバランスを消失

#### 3.2. Changes in the subject-apparatus interaction

- 練習より，位相差は小さく，周期性が増す (Fig.3, 中)
- Pretest における位相差は，被験者間で様々 (Fig.5)
  - Pretest 後は，全ての参加者で約 10 度まで減少
  - 練習効果を確認 ( $F(7,28) = 11.92, p < 0.05$ )
    - ◇ Pretest > Day1~7 ( $p < 0.05$ , in all cases)

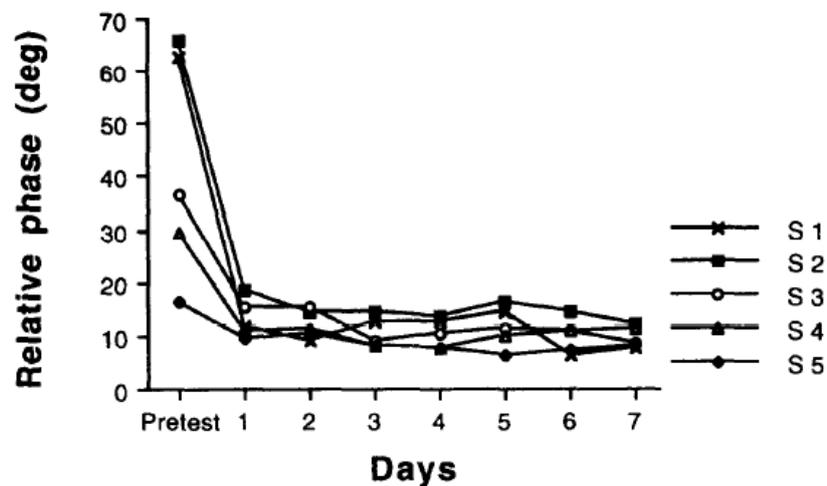


Fig. 5. Relative phase between platform and centre of mass over practice for all subjects.

- 位相差の変動も，Pretest 後に大きく減少 (Fig.4, 中)
  - ただし，S1 は，Day3~5 で変動が増加
  - 練習効果を確認 ( $F(7,28) = 12.17, p < 0.05$ )
    - ◇ Pretest > Day1~7 ( $p < 0.05$ , in all cases)

### 3.3. Changes in the subject I: Global body configuration

- Pretest では身体全体の動きが小さい (Fig.6, 左)
  - 直立状態
- 終盤では、下半身(太ももや下腿)の動きが大きい一方で、胴体の動きが小さい (Fig.6, 右)

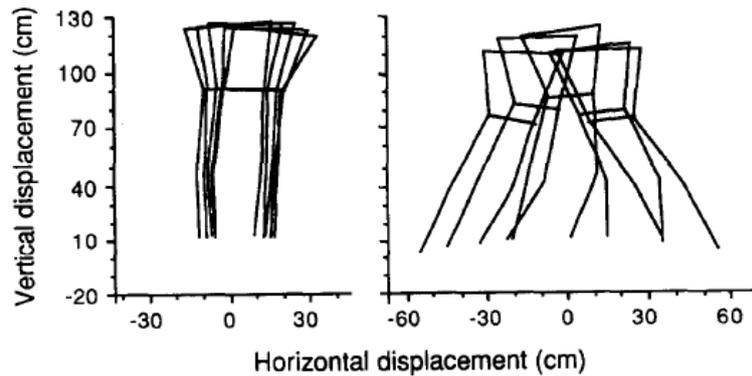


Fig. 6. Stick figure diagrams in the frontal plane for a novice (left panel) and an expert (right panel).

- 最終的に、踏み台の角度振幅は、Pretest から大幅に増加する一方で、肩は微増 (Fig.7)
  - 日にち要因とセグメント要因の主効果を確認
    - ◇ 日にち…  $F(7,28) = 45.79, p < 0.0001$
    - ◇ セグメント…  $F(1,4) = 331.33, p < 0.0001$
  - 交互作用も確認 ( $F(7,28) = 34.69, p < 0.0001$ )
    - ◇ 踏み台 > 肩 ( $p < 0.05$ ) (Pretest を除く)
    - ◇ 踏み台… Pretest < Day1~7 ; Day1, 2 < Day3~Day7 ; Day3 < Day6, 7 ( $p < 0.05$  in all cases)
    - ◇ 肩は、練習効果なし

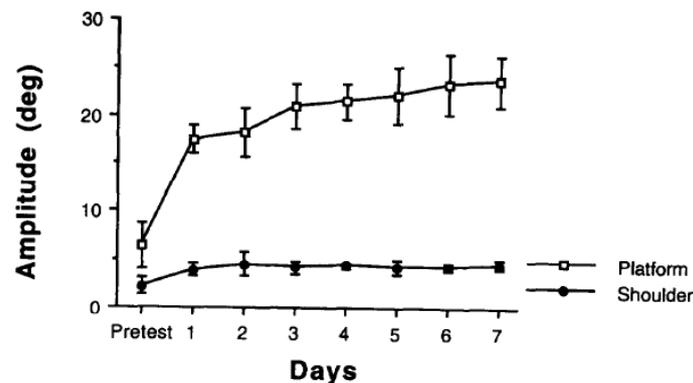


Fig. 7. Mean peak-to-peak movement amplitude of platform and shoulder mid-point over practice. The error bars indicate the SDs across subjects.

### 3.4. Changes in the subject II: Rotation angle of the centre of mass

- 重心の回転角度の振幅は、Pretest で比較的小さく、不規則 (Fig.3, 下左)
  - 練習後は大きくなり、周期的 (Fig.3, 下右)
- 全被験者、練習を通して回転角度の振幅を増加 (Fig.8)
  - 練習効果を確認 ( $F(7,28) = 26.5, p < 0.0001$ )
    - ◇ Pretest < Day1~7; Day1 < Day3~7; Day2 < Day4~7 ( $p < 0.05$  in all cases)

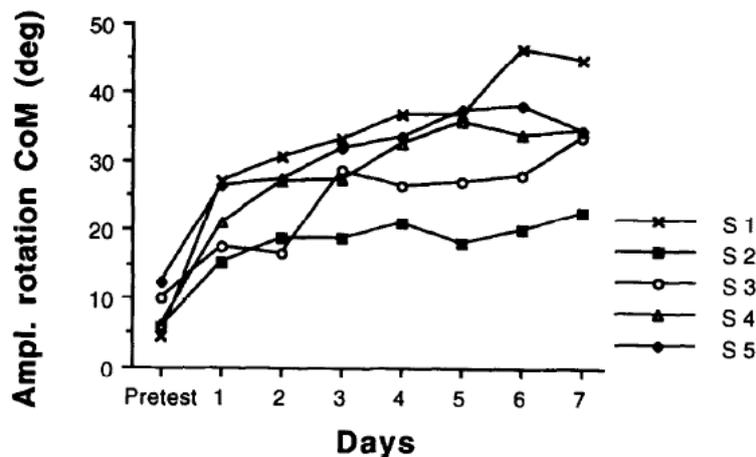


Fig. 8. Mean peak-to-peak movement amplitude of the rotation angle of centre of mass over practice for all subjects.

- 振幅の変動も、Pretest 後に減少し、それを維持 (Fig.4, 下)
  - ただし、S1 は Day3~Day5 で運動のバランスを消失
  - 練習効果を確認 ( $F(7,28) = 9.56, p < 0.05$ )
    - ◇ Pretest > Day1~7 ( $p < 0.05$  in all cases)

### 3.5. Changes in the subject III. Height of the centre of mass

- 練習より、重心の高さが減少 (Fig.9, 上)
  - 練習効果を確認 ( $F(7,28) = 3.47, p < 0.05$ )
    - ◇ Pretest > Day6~Day7 ( $p < 0.05$  in all cases)
- 練習より、全ての参加者において高さの振幅は増加 (Fig.9, 中)
  - 関節 (下半身) の柔軟性が増加することを示唆
    - ◇ 柔軟性がない場合…高さは変わらずに振幅のみが増加
  - 練習効果を確認 ( $F(7,28) = 7.40, p < 0.005$ )
    - ◇ Pretest < Day1~Day7 ( $p < 0.05$  in all cases)

- 練習より，全体的に高さの変動も減少し，規則性が増加 (Fig.9, 下，縦軸は%)
  - 練習効果を確認 ( $F(7,28) = 12.25, p < 0.001$ )
  - ◇ Pretest > Day1~Day7 ( $p < 0.05$ )
  - ◇ Day2~Day4 に掛けて有意な増加 ( $p < 0.05$ )

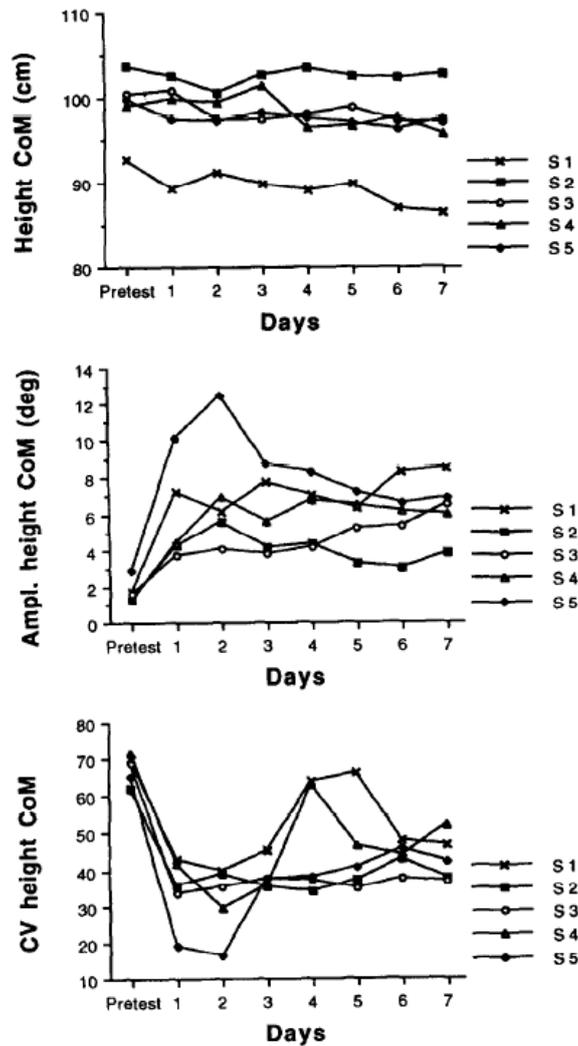


Fig. 9. Mean within-trial height of the centre of mass (CoM, top panel), mean peak-to-peak movement amplitude of height (middle panel), and within-trial coefficient of variation (CV) of height (bottom panel) over practice for the subjects.

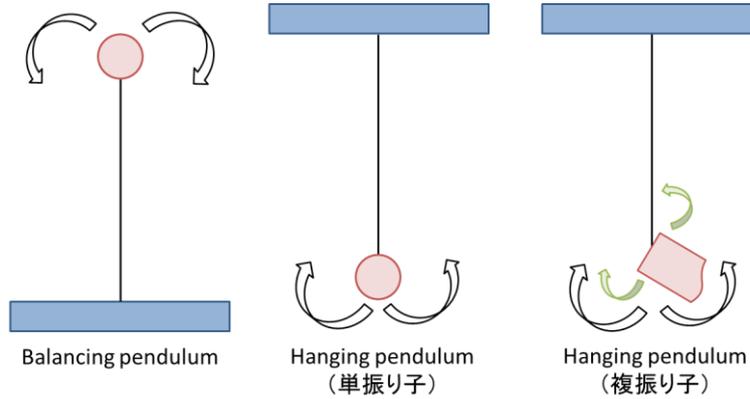
※Fig.9 中の縦軸の単位は (cm)

#### 4. Discussion

- Bernstein (1967a)
  - (身体全体の) 協応と局在間の相互関係，パフォーマンスと制御変数を関連付けることは早期の試み
  - 本研究の試み

- 多くの変数で練習効果を確認
  - 学習曲線の傾向，タイムスケールは異なる
    - ◇ Pretest から Day1 で変化が観察
      - ✓ 重心の高さの振幅，胴体の動き，踏み台と重心による位相差，運動の変動に関する全ての指標
    - ◇ 練習終盤で変化が観察，変化の持続が観察
      - ✓ 重心の高さ，踏み台の角度振幅，重心の回転角度の振幅
  
- 安定性は早期に獲得，後に遂行中の調整が獲得
  - 調整はパフォーマンスのさらなる向上をもたらす
  - Dual control problem (Newell & McDonald, 1994)
  
- 今回の結果から，以下の振り子モデルを提案
  - リズミカルな現象で起こる「協応」を振り子で例える
    - ◇ e.g., Alexander (1977a, b, 1980); Cavagna et al. (1977); Holt et al.(1990); Kugler, & Turvey (1987); Townsend (1981); Wagenaar, & Van Emmerik (1994)
  
- 練習初期…Balancing pendulum <補足 2>
  - 不安定な状態…重心の位置が比較的高く，踏み台と肩の角度振幅が同程度，運動の変動が大きい
  
- 練習早期…Hanging pendulum <補足 2>
  - 安定した状態…可動域が大きくなり，重心の位置が比較的安定
    - ◇ 単振り子 <補足 2>
  
- 練習終盤…Hanging pendulum
  - 重心の位置の変動が増加するが，練習初期のようなランダムな変動ではない（安定性は保持）
    - ◇ 自由度の固定からの解放 (Vereijken et al., 1992a).
    - ◇ 複振り子<補足 2>…単振り子と異なり，重心以外の箇所でおもりが固定された振り子で，剛体が振動する（緑の矢印）
  
- 歩行においても同様のモデルが提案 (Alexander, 1976)

<補足 2>



- 今回、身体全体による運動の複雑性を分解して説明
  - 制御モデルの発展に寄与

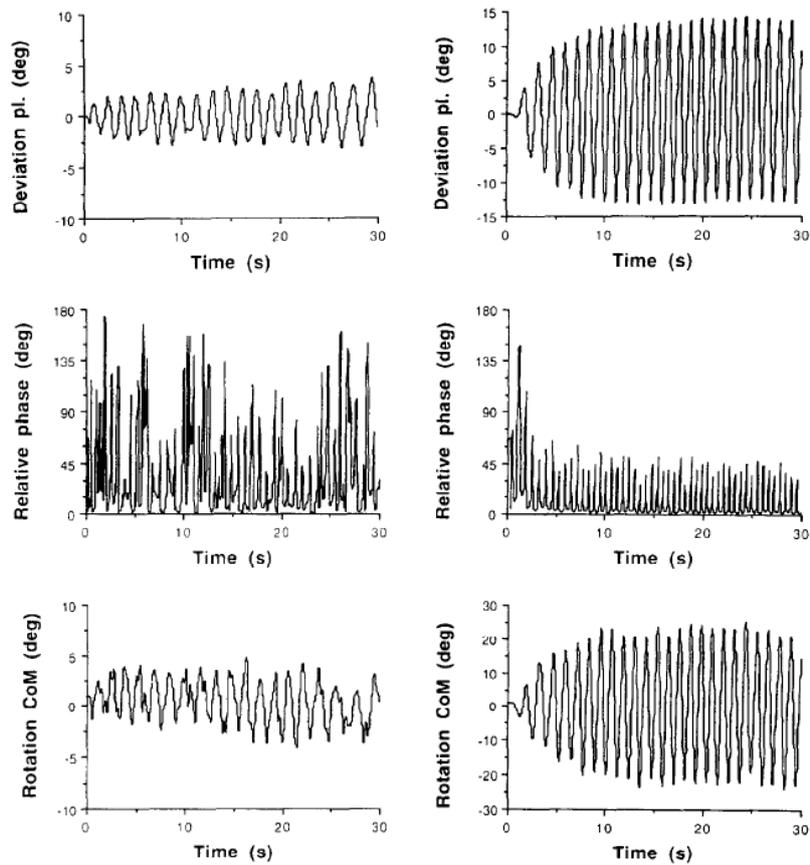


Fig. 3. Exemplar time series of the deviation angle of the platform (top panels), relative phase between centre of mass and platform (middle panels), and rotation angle of centre of mass (bottom panels) for a novice (left panels) and an expert (right panels).

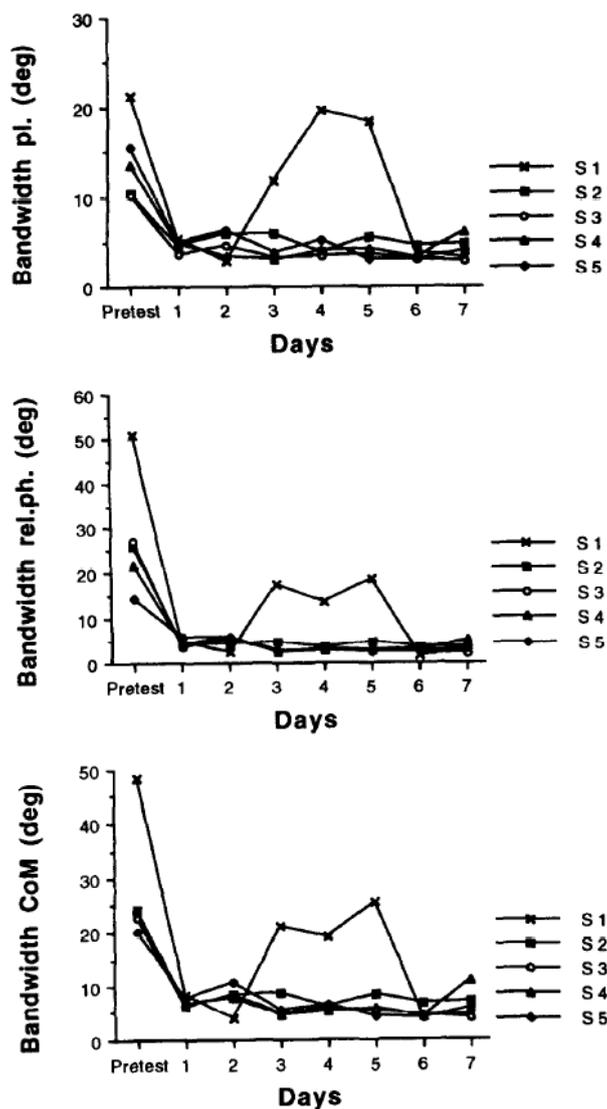


Fig. 4. Mean bandwidth across cycles of platform phase angles (top panel), relative phase angles (middle panel), and centre of mass phase angles (bottom panel) over practice for the five subjects.