

身体技能に見られる階層性と「あそび」に関する考察

Synchronisation and Differentiation found in Skillful Bodily Movements

藤波 努^{*1} 山本 知幸^{*1} 阿部 真美子^{*2}
 Tsutomu Fujinami Tomoyuki Yamamoto Mamiko Abe

^{*1}北陸先端科学技術大学院大学 知識科学研究科
 School of Knowledge Science, Japan Advanced Institute of Science and Technology

^{*2}(株)東芝 研究開発センター
 Corporate Research & Development Center, Toshiba

The ability of bodily movements of human such as walking or throwing has been thought to be acquired by decreasing the degrees of freedom inherent in the structure of our body. We confirmed the theory through our experiments of skills such as kneading and shaking, where we identified synchronisations among the bodily movements, but found another phenomenon, which we call *differentiation*. The synchronised movement established is decomposed into several sections to be executed on different timings, resulting in the gain of efficiency or flexibility. In the acquisition of skills, the coordinative structure thus goes through two stages: synchronisation and differentiation. We verify in this paper our observation through our experiments and analyses.

1. はじめに

我々が「技」と呼んでいる、高度に洗練された身体動作（以下、身体技能と呼ぶ）は、通常の動作とどのように異なっているのだろうか？我々はいかにして身体技能を習得するのだろうか？また、身体技能を伝授するには、どのような要素が重要なのだろうか？本論では、これら三つの問題のうち、最初の問題、すなわち「身体技能の運動としての特性」について考察する。

身体技能の特徴を明らかにするため、我々はこれまでに「陶芸の菊練り」[Abe 03]や「シェイカーによるサンバリズムの演奏」を調べてきた。そのなかで、「技」と呼ばれるような洗練された身体動作であっても、ミクロレベルの精密な制御は不要であり、基本となる動作から階層的に部分動作が派生し、各部分動作が協調してひとつのタスクを遂行しているのではないかと考えるようになった。

以下では、まず「技」を考える上で重要な概念である「自由度の問題」[Bernstein 67]に触れつつ、身体技能に関する我々の仮説を述べる。次に、我々が行った二つの実験—菊練りとサンバ—について説明し、データに基づいて仮説を検証する。最後に身体技能について考察し、まとめとする。

2. 同期と分化

人間の身体は複雑であり、関節だけでも数百、また筋肉は数千ある。これら関節と筋肉の組み合わせ方は膨大であり、運動という観点からは大きな自由度を持つ。つまり、ひとつの動作（たとえばテーブルの上のグラスをつかむなど）を行うにも何通りもの体の動かし方が可能である。対して脳の処理能力には限界があり、すべての自由度を制御することはできない。これが「自由度の問題」[Bernstein 67]である。

人間は自由度の問題をどのように解決しているのだろうか。Bernsteinの解答は、身体各部位を協調させて、身体動作に拘束を加えることによって自由度を減少させているというものであった。たとえば手首の関節を固定してしまえば、肘から

先の運動制御は容易になる。身体各部位を連結することにより、身体に「協調構造」ができあがる。Bernsteinによれば、ある協調構造を獲得することが、特定の動作を習得することと考えられる。

「協調構造」は、具体的には運動のどのような特徴として観察されるのだろうか。我々の実験では、協調構造は身体各部位がそろって同時に動くこととして観察された。たとえば菊練りの実験では、初心者動きには秩序がなく、身体各部位がバラバラに動いていたが、もう少し上達した経験者の場合は身体各部位が連係してリズムカルに動いていることを観察した。したがって協調構造は身体各部位の「同期」運動として表れると考えられる。

では、「技」と呼ばれるような洗練された身体動作は「同期」*synchronisation* という概念でとらえられるのだろうか？我々は実験を通して、技能者の身体動作は「同期」という概念でとらえられるものではなく、さらにその先の「分化」*differentiation* という概念が必要となることに気づいた。菊練りの例にもどって説明すると、一応の基礎を身につけたと思われる経験者レベルの動作は、全身の動作がひとつのリズム（周期）で動いている。これは同期現象の表れと考えられる。一方、長年の修練を経て技能を磨き上げた熟練者の動作を解析すると、ふたつの異なったリズムが見いだされた[Abe 03]。つまり熟練者は、身体を二つのグループに分割し、それぞれのグループ内では身体各部位を同期させつつ、より高次のレベルで両グループを連携させていると考えられる。このような一段高いレベルでの協調構造を、我々は「分化」と名付けた。

「分化」という概念は、自由度を減少させるという運動制御の原理とは逆であり、自由度を増加させることを含意する。自由度という観点から、技能の習得過程を考えてみると、まず自由度を減少させて身体各部位の動作を同期させることを学ぶのが第一段階である。次に、身体を分割し、それぞれのグループ内では動作が同期しつつも、グループ間では異なったタイミングで動作させ、一段高いレベルで協調させることを学ぶのが第二段階である。身体各部位を分割することにより、自由度は増加する。またグループ間の連携は厳密に制御される必要はなく、ある程度の「遊び」を許すと考えられる。「技」の特徴は分化として観察される。以下では我々が行った実験について説

明し、仮説を検証する。

3. 実験と解析手法

3.1 ボディモデル

実験では Ascention Corp 社製の MotionStar を用いた。時間分解能は 86.1Hz であり、マーカーは 18 個用いた。各マーカーは図 1 左に示した位置に取り付けた。これらのマーカー取り付け位置に基づいて、8 つの関節と 13 の体節からなるボディモデルを構築した。(図 1 右を参照。) 図中、J で始まる記号が関節 joint を表しており、対応は次のようになっている：首 (J1), 腰 (J2), 左肘 (J3), 右肘 (J4), 左股関節 (J5), 左膝 (J6), 右股関節 (J7), 右膝 (J8)。また、e は終端 endpoint を意味し、それぞれ e1(頭), e2(左手), e3(右手) である。

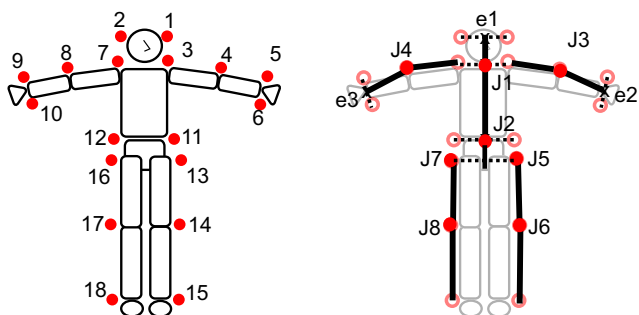


図 1: ボディモデル 左: マーカー取り付け位置 右: 部位と関節

3.2 データ解析手法

モーションキャプチャ装置を使って収集したデータは以下の手順で解析する:

1. 関節角度の計算: 18 点から得られたデータを元に各関節の角度を計算する。8 関節の時系列データが得られる。
2. 平滑化: まず、4 階の Butterworth フィルターを使って角度変化を平滑化する。カットオフ周波数は 10Hz とした。次に、一周期の動作に関連するデータだけ取れるよう、不要な低周波成分を取り除いた。
3. 位相基点の計算: 平滑化した各時系列データにヒルベルト変換 [Panter 65][Pikovsky 01] を適用する。この操作を経ることにより、異なった位相で動作する各関節の運動を比較できる。
4. 相対位相の計算: 動作が他よりも安定している関節を参照点として、その他の関節動作との相対位相を求める [Pikovsky 01]。菊練りの場合は股関節、サンバの場合は膝を参照点とした。各関節の相対位相は参照点となった部位との同期の度合いを示す。

4. 菊練りの分析

4.1 菊練りの概要

菊練りとは、ろくろで成形する前に粘土をよく練る動作であり、粘土に含まれている気泡を押しだし、均質化することを目的とする。長時間粘土に触れていると体熱で粘土が乾き、加工しにくくなるため、あまり触れないように、かつ短時間で練る必要がある。初心者は数十分かけても練ることができないが、

熟練者は数分で練ることができる。熟練には 5 年から 7 年を要するとされている。

菊練り動作は大きく二つに分解できる。一つは胴体を前後に動かす動作、もう一つは手で粘土を練る動作である。土を練る場合、普通に考えると胴体を前に出す時に手に力を入れた方が効率的のように思われるが、熟練者の動作は逆で、胴体を後ろに押し返す時に粘土を練っていることがわかった。喩えて言うなら、一応の基礎を習得した者の動作は単純な 4 つ打ちのリズム (ユーロビート) であり、熟練者の動きは裏拍を強調するスカのリズム (8 ビート) になっている。前者の場合は一つの波しか表れないが、後者の場合、押し返す時に胴体と手の動作の間に微妙なズレが生じ、そのズレが熟練者のみに見られる二つの周期を作り出していると考えられる。

4.2 菊練りに見られる協調動作

実験では一名の熟練者と三名の経験者、および一名の初心者にご協力いただいた。図 2 と図 3 に熟練者 A と経験者 B の時系列データを示す。

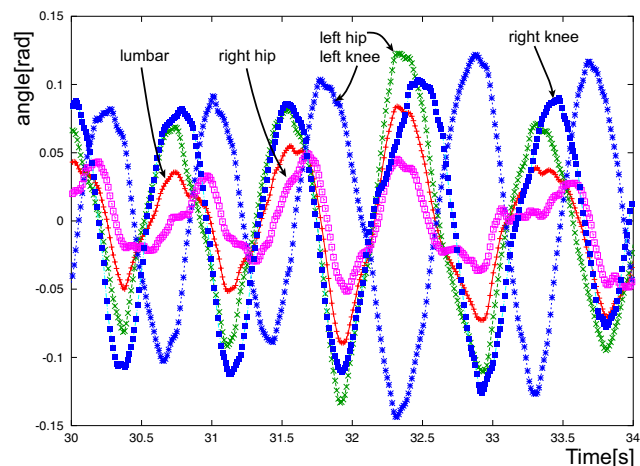


図 2: 熟練者 A の各関節角度の時系列

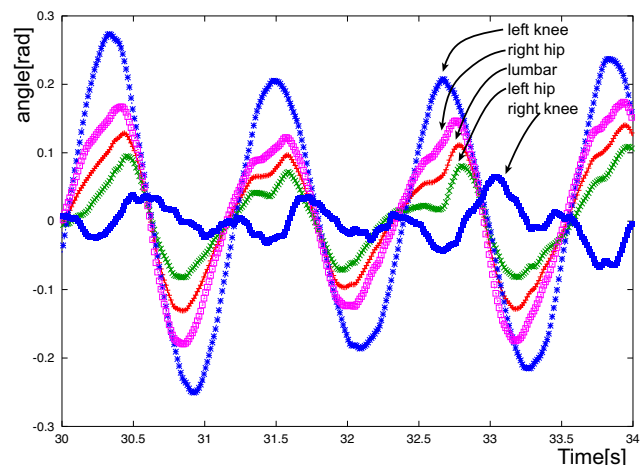


図 3: 経験者 B の各関節角度の時系列

これらの図を比較する限り、経験者 B の動作 (図 3) の方が、波形がそろっていて技能レベルが高いように思われる。フー

リエ変換すると、経験者 B の動作はすべての角度において熟練者 A よりも鋭いピークを示す（紙面の制約からグラフは省略）。したがって同期性という点では経験者 B の方が高い。しかしながら実際に練られた粘土の状態から判断すると、明らかに熟練者 A の方が技能レベルが上であった。このことは動作が同期しているということだけでは熟練度を推し量ることができないことを意味している。

4.3 菊練りに見られる分化

フーリエ変換では身体各部位間の連結の度合いを見ることはできない。身体各部位の連結の度合いを分析するため、参照点となる関節（菊練りの場合は左股関節）を選び、各部位について参照点との相対位相 (§3.2) を求め、そのヒストグラムを作成した。図 4 は熟練者 A のヒストグラム、図 5 は経験者 B のヒストグラムである。これらのヒストグラムは、左股関節の動きに対して、他の身体部位の位相がどの程度ずれているかを示している。中心（点線）に近い部分ほど、その部位の動作が左股関節と同期しており、中心から左にずれるほど左股関節よりも早めに、また右にずれるほど左股関節に遅れて動いていることを意味する。横軸は一周周期をラジアン $[-\pi, \pi]$ で表示しており、グラフの両端は基準点の動きに対して逆位相の動きに相当する。

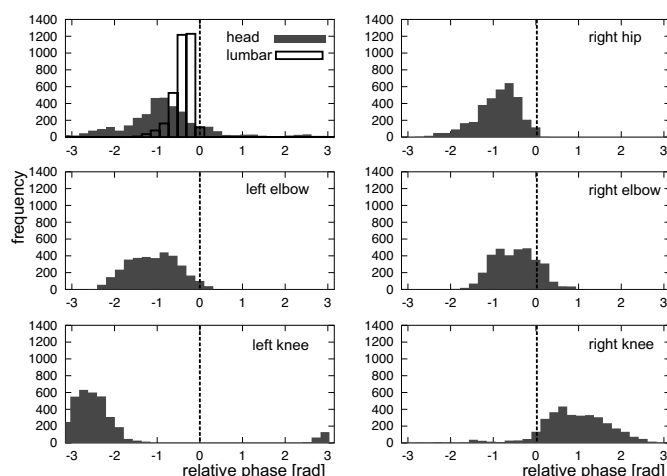


図 4: 熟練者 A の相対位相のヒストグラム

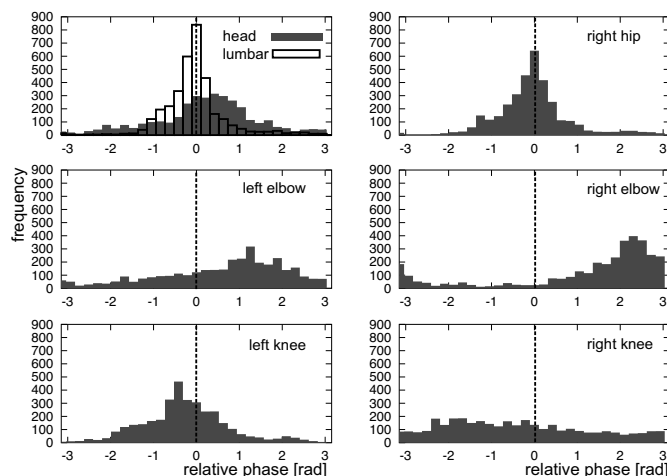


図 5: 経験者 B の相対位相のヒストグラム

各図上段左の図からは、まず、どちらの被験者も、腰の動きが基準点と強く同期していることが読みとれる（各図上段左）。次に腕の動きに着目すると（各図の中段を参照のこと）、熟練者 A の動きが基準点に対して遅れ気味（中心より左寄り）であるのに対し、経験者 B の動きは基準点に対して早め（中心より右寄り）である。経験者 B は、体幹部よりも先に腕を動かして粘土を押しているため、このような結果になると考えられる。一方、熟練者 A は押し返すときに体幹部が先に動き、それに腕がついていくような動作になっているため、このようなグラフとなると考えられる。

膝の動きはさらに興味深い。熟練者 A の場合、左膝は大きく遅れ、逆位相に近くなっている。一方、右膝は基準点よりも早めに動いている（図 4 下段参照）。これは、体幹部を前に動かす動きが右足から始まっていること、また押し戻す動きは左足から始まっていることを示している。一方、経験者 B の場合、左膝の動きのみに、基準点からやや遅れたピークが観察されるのみである（図 5 下段参照）。このような違いが見られるのは、熟練者 A は腰付近を軸とする、二重振り子のように体を動かしているためと推測される。

5. シェイカーによるサンバ演奏の分析

5.1 サンバ演奏の概要

もう一つの実験は、シェイカーを使ってサンバのリズムを演奏するタスクで行った。シェイカーは長さ 23cm、直径 6.5cm の円筒形のものを使い、両端にマーカーを設置した。被験者は四名（うち上級者二名、初心者二名）である。

シェイカーによるサンバリズムの演奏で難しい点は、シェイカーを動かす動作と打ち出すリズムのアクセントが非対称であることにある。シェイカーは腕を体幹に対して外側 (out) と内側 (in) に振ることによってノイズが発生し、強く振ったときにアクセントがつく。サンバのリズムはアクセントのついた音を H、軽く振っただけの鈍い音を L とすると、一小節の間に {H-L-L-H H-L-L-H H-L-L-H H-L-L-H} のような 16 ビートを演奏しなければならない。このとき、腕の動きは {out-in-out-in out-in-out-in out-in-out-in out-in-out-in} となるので、最初の {H-L} は {out-in} で演奏し、続く {L-H} も {out-in} で演奏するという非対称が存在する。正確にアクセントをつけるには半年程度の練習を必要とする。また長時間、リズムを一定に保つには、腕の動きだけでなく全身を使って演奏する必要がある。

5.2 サンバ演奏に見られる協調動作

初心者二名を対象に連続五日間、シェイカーによるサンバ演奏法を教授した。その際、一日目と三日目、および五日目の計三回にわたって演奏時の身体動作をキャプチャーし、動作の変遷を調べた。その結果、最初は無秩序な動きであったのが徐々に秩序が見いだされ、最終日には動作に周期が見いだされた。紙面の都合で詳細は割愛する。詳しくは別稿 [上村 04] を参照のこと。

5.3 サンバ演奏に見られる分化

図 6 に上級者 X のヒストグラムを、図 7 に上級者 Y のヒストグラムを示す。基準点は両被験者とも左膝とした。紙面の制約上、ヒストグラムは腰と右膝および股関節 (X については左股関節、Y については右股関節) に関してのみ示している。

実験では、1 セッションを 3 分間とし、異なったテンポで 6 セッション演奏してもらった。被験者 X の場合はテンポを、80, 90, 100, 110, 120(bpm) の順で、また被験者 Y には 90,

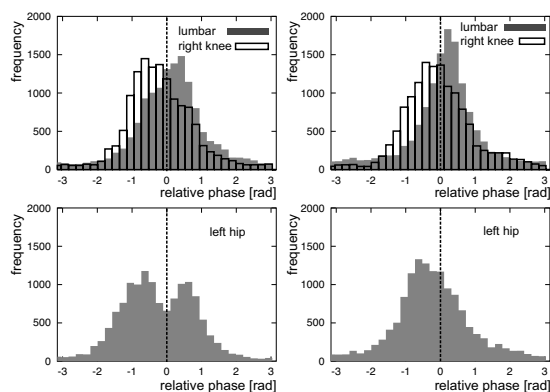


図 6: 被験者 X のヒストグラム 左: 100 bpm 右: 90 bpm.

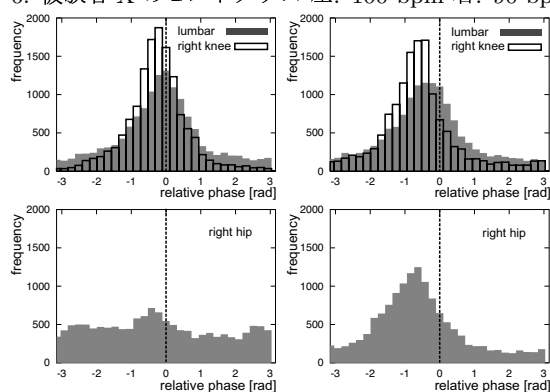


図 7: 被験者 Y のヒストグラム (100bpm) 左:1 回目 右:2 回目

100, 110, 120, 130, 100(bpm) の順で演奏してもらった。被験者にインタビューしたところ、両被験者とも 100bpm の時が最もいいノリで演奏できたとのことであった。

図 6 を見ると、被験者 X の場合、本人がうまく演奏できたと申告した 100bpm での演奏 (図 6 左) は、よりテンポの遅い 90bpm での演奏 (図 6 右) に比べて、同期の度合いが低い。左股関節の動きに至っては、二つのピークが観察されるほどである (図 6 左下)。これら二つのピークは、左股関節を中心として身体運動の分化が起きていることを示している。一方、リズムに乗りやすかった 90bpm のテンポでは、左股関節の動きは一つのピークが観察されるのみであった (図 6 右下)。より早いテンポ (110, 120bpm) でもピークは一つしか観察されなかった。

同様の現象は被験者 Y についても観察された。被験者 Y の場合も、100bpm よりも早い遅いテンポでは右股関節が基準点に同期してしまうが、100bpm では非同期であった (図 7 左下)。さらに興味深いことに最後にもう一度 100bpm で演奏するように被験者 Y に頼んだところ、今度は右股関節が同期していた (図 7 右下)。これは長時間の実験の最後だったため、疲労により身体を十分に分化できず、同期してしまったと考えられる。

6. まとめ

本論では、技と呼ばれる洗練された身体動作について、その運動特性を考察した。我々の仮説は、身体動作の協調構造は二段階で発達するというものであり、第一段階は身体各部位の「同期」として、また第二段階は身体動作の「分化」として観

察されると主張した。また菊練りとサンバの実験を通して、仮説を検証した。

結論として、通常の身体動作と技を区別するのは、身体動作が「同期」にとどまっているか、あるいは「分化」のレベルに至っているかによると考える。分化の利点は、マイクロレベルでの精密な制御が不要であること、また各部分動作間の協調に「あそび」を許すことにより、体全体で外乱を分散して吸収し、動作を安定させられる点にあると考える。

従来の身体動作に関する研究 (たとえば [Haken 85] の指振り運動) は操作対象がない単純な身体動作を対象としていたため、同期現象しか見いだせなかった。しかしながら、粘土やシェイカーなど対象を操作する身体動作は、対象との相互作用があるため、分化という現象が見られたと考えられる。Bernstein の巧みさに関する研究 [Bernstein 96] によれば、指振り運動はレベル B に相当し、空間的動作を伴う菊練りやサンバは一段レベルの高いレベル C に相当する。このことから我々の仮説は Bernstein の理論とも整合する。

本論では扱えなかった残り二つの問題、すなわち、技能修得過程と教授については別稿で考察する。前者については [上村 04] を、また後者については [恒次 04] を参照されたい。

参考文献

- [Abe 03] Abe, M., Yamamoto, T., and Fujinami, T.: A Dynamical Analysis of Kneading Using a Motion Capture Device, in *proceedings of second international workshop on Epigenetic Robotics 2003*, pp. 41–48 (2003)
- [Bernstein 67] Bernstein, N.: *The co-ordination and regulation of movements*, Pergamon (1967)
- [Bernstein 96] Bernstein, N.: *On dexterity and its development*, Lawrence Erlbaum Associates (1996), 邦訳: デクステリティ 巧みさとその発達, 金子書房 (2003)
- [Haken 85] Haken, H., Kelso, J. A. S., and Bunz, H.: A theoretical model of phase transitions in human hand movements, *J. Biological Cybernetics*, Vol. 51, pp. 347 – 356 (1985)
- [Panter 65] Panter, P.: *Modulation, Noise and Spectral Analysis*, McGraw Hill, New York (1965)
- [Pikovsky 01] Pikovsky, A., Rosenblum, M., and Kurths, J.: *Synchronization – a universal concept in nonlinear sciences*, Cambridge University Press (2001)
- [恒次 04] 恒次 創, 藤波 努, 山本 知幸: リアルタイム音声信号生成によるリズム演奏の習得支援, 第 18 回人工知能学会全国大会予稿集 (2004)
- [上村 04] 上村 章浩, 藤波 努, 山本 知幸: モーションキャプチャ装置を用いたリズム演奏修得過程の分析, 第 18 回人工知能学会全国大会予稿集 (2004)