

新環境における乳児の運動の多様性と変化可能性

東京大学大学院教育学研究科 加藤 萌
東京大学大学院教育学研究科 平島 雅也

Changeability of infant movements in a novel environment

Graduate School of Education, The University of Tokyo, KATO, Moe
Graduate School of Education, The University of Tokyo, HIRASHIMA, Masaya

要約

新環境中における乳児の運動獲得の発達過程を理解するために、90–129日齢の乳児のモバイル課題時の四肢運動特性を検討した。研究1では、運動量と運動パターンを表す2つの独立指標を導入したところ、日齢が小さい乳児においてはモバイルで遊んでいるときに運動量の増加が見られたものの運動パターンの大きな変化は見られなかったが、日齢が大きい乳児においては運動パターンの変化に引き続き運動量の増加が見られた。研究2では、運動を構成する時空間要素（シナジー）を抽出する手法である非負値行列因子分解アルゴリズムを用いた解析を実施したところ、日齢の小さい乳児においておもちゃで遊ぶ前と遊んでいる最中で運動パターンの変化はなかったが、日齢の大きい乳児においてはおもちゃの動きに直結した腕の運動が増加し、脚の運動を減少することが示された。これらの結果は、環境に応じて運動を変化させる能力の発達の変化を示唆している。

【キー・ワード】 運動発達, 自発運動, モバイル課題, 3次元動作解析, シナジー

Abstract

To investigate the developmental emergence of the ability to change their behavior depending on environmental conditions, we studied spontaneous limb movements and subsequent changes in movement patterns while playing with a mobile toy in infants 90–129 days old. In Study1, we calculated two independent indices to represent amount and pattern of movements. While younger infants only increased the amount of movement, older infants first changed their movement pattern towards the arm-dominant pattern and then increased the amount of movement. In Study 2, a decomposition algorithm based on non-negative matrix factorization was applied to discrete movement units taken from the data. The contribution ratio of each synergy was different between the spontaneous movements and the movements during the mobile task in the older infants, while there were no differences in the contribution ratios between the different movement conditions in the younger infants. These results suggest that there is a drastic transition in the changeability of

spontaneous movements towards movements suitable for the specific environmental condition.

【Key words】 motor development, spontaneous movement, mobile paradigm, 3D motion capture, synergy

目 的

乳児は、変化する環境の中で多数の新しい運動を獲得することができる。この能力の発達メカニズムを理解するためには、乳児が随意的な運動を獲得する際に、児がもともと行っている自発運動の特性をどのように利用するのか、また、環境の変化に応じて運動パターンを変化させる能力（変化可能性）がいつ出現するのかを検討することが重要である。乳児期初期の自発運動は、全身を含んだ複雑な運動パターンから構成されることが知られている（Kanemaru, Watanabe & Taga, 2012; Prechtl & Hopkins, 1986）。また、そのような自発運動の生成は神経系の自発活動を反映していると考えられており（Hadders-Algra, 1993; Kanemaru et al., 2013）、自発運動の質の評価は脳機能の発達を評価・予期するための有用な指標として用いられてきた。一方、新奇な環境下での乳児の振る舞いを検討する手法として、モビール課題が用いられてきた（Rovee & Rovee, 1969）。これは、仰臥位の乳児の頭上に吊るされたおもちゃと乳児の四肢のうち1つを紐で連結し、乳児の動きに附随しておもちゃが動くという状況を作り、おもちゃで遊ぶ前と遊んでいる最中、あるいは遊んだ後の乳児の運動を比較する実験パラダイムである。モビール課題を用いた先行研究により、四肢の動きに附随しておもちゃが動く、乳児は課題環境に応じてよりたくさん動くようになることが明らかになっている（Angulo-Kinzler & Horn, 2001; Angulo-Kinzler, Ulrich & Thelen, 2002; Chen, Fetters, Holt & Saltzman 2002; Heathcock, Bhat, Lobo & Galloway, 2004; Rovee & Rovee, 1969; Thelen, 1994; Watanabe & Taga, 2006, 2009, 2011; Watanabe, Homae & Taga, 2011）。しかし、おもちゃで遊んでいる最中の四肢協調パターンの変化の様子を詳細に焦点を当てた研究は少ない。そこで本研究では、おもちゃで遊んでいる最中の乳児の運動の変化に注目し、乳児が環境に応じてどのように運動を変化させるのかを明らかにすることを目的とした。

研究 1

目 的

環境に応じた運動の変化を検討するため、モビール課題中の乳児の運動データを解析対象とする。モビール課題は、仰臥位の乳児の頭上に吊るされたおもちゃと乳児の四肢のうち1つを紐で連結し、乳児の動きに附随しておもちゃが動くという状況を作り、おもちゃで遊ぶ前と遊んだ後の乳児の運動を比較する実験パラダイムである。本研究では、従来行われてきた時間平均による乳児の運動解析に加え、運動を構成する時空間要素を抽出する手法を乳児の運動データに応用することで、運動量の変化と運動パターンの変化を独立に捉え、乳児の多様な運動に含まれている基本的な運動パターンを抽

出する。乳児が環境に応じてどのように運動を変化させるのかを、課題前の自発運動との関係を考慮したうえで明らかにし、また、乳児がおもちゃで遊んでいるときに、その基本的な運動パターンがどのように変化するのか、また、おもちゃで遊ぶ前の自発運動のパターンがその後の運動の変化のしかたにどのように影響を与えるのかを検討する。さらに、日齢別に運動変化の様子を比較し、環境に応じた運動の変化可能性が発達に伴ってどのように変化するのかを明らかにする。

方法

1. 対象

生後 90–129 日の健康な乳児 298 名分のデータを解析対象とした。乳児を日齢により 4 群に分け (G1: 日齢 90–99, G2: 日齢 100–109, G3: 日齢 110–119, G4: 日齢 120–129), 日齢群ごとに解析を行った。

2. 手続き

モバイル課題中の乳児の四肢先端 4 点の 3 次元座標をモーションキャプチャーシステム (Motion Analysis Co., Santa Rosa, California) を用いてサンプリング周波数 60Hz で計測した。データは以下の 2 つのピリオドにおいて取得された。1) baseline (2 分) : 乳児は頭上に吊るされているおもちゃを見ることができるが、動かすことはできない (図 1 左)。2) playing (4 分) : 乳児の片腕と頭上に吊るされているおもちゃが紐で連結され、乳児が腕を動かすとおもちゃが動いて音が鳴る (図 1 右)。

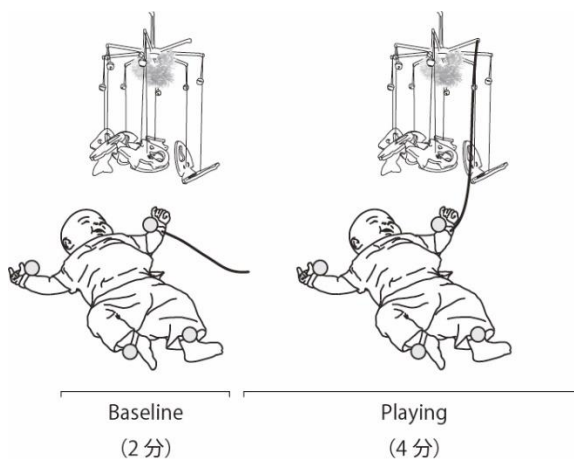


図 1 計測手続き

3. 解析方法

2 分ごと (baseline, playing 前半, playing 後半) の平均速度を解析対象とした。得られた速度情報から上肢と下肢の平均速度の値を計算し、その速度ベクトルを極座標変換して Amplitude を運動

量, Phase を運動パターンの指標として用いた (図 2)。乳児がたくさん動くと Amplitude の値は大きくなる。また Phase の値が 45 であることは, その乳児が腕と脚を同じ割合で動かしていたことを意味し, Phase の値が 45 よりも大きいことは, その乳児が脚よりも腕をより多く動かしていたことを意味する。

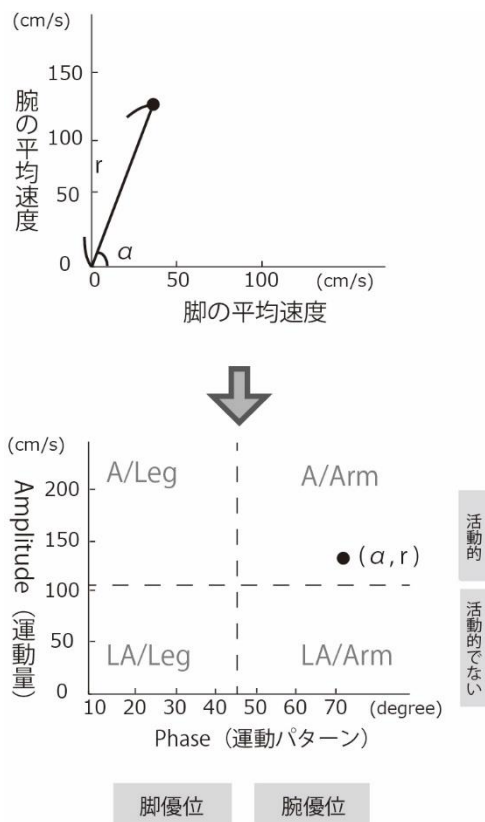


図 2 解析方法の概念図

結果と考察

四肢それぞれに関して 30 秒ごとの平均速度を算出した(図 3)。4 つの日齢群のいずれにおいても, playing の後半に四肢運動の増加が観察されたが, 若齢群 (G1, G2) に比べて, 高齢群 (G3, G4) においては, 腕と脚の運動の分離が明確であり, 脚の運動に比べて腕の運動の増加が顕著に認められた。

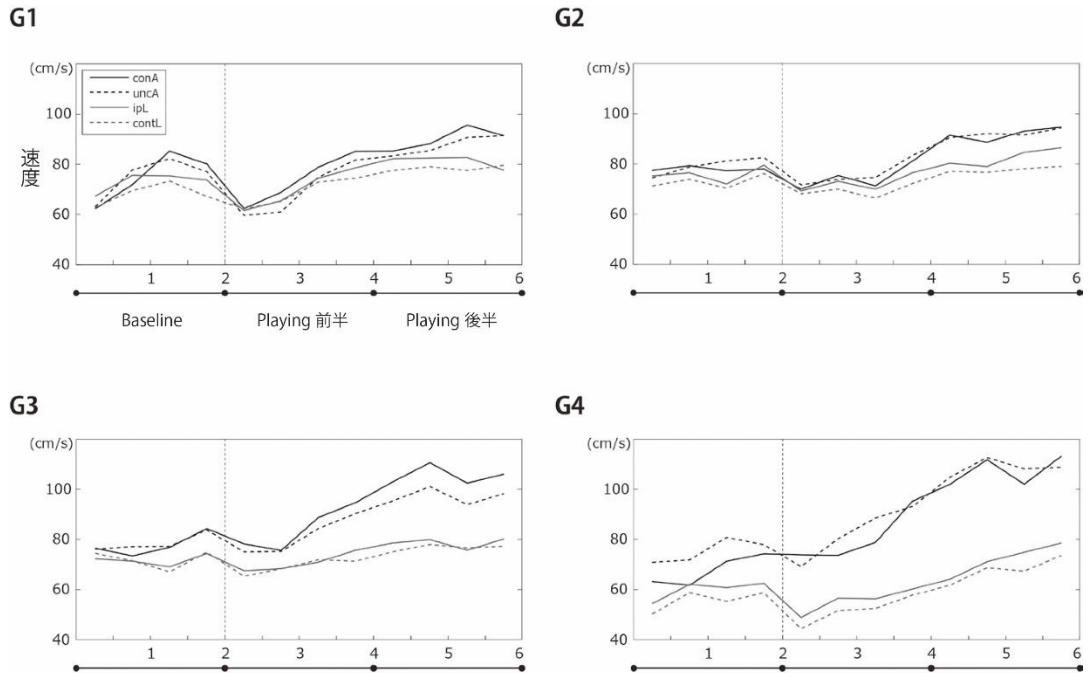


図3 グループ毎の四肢それぞれに関する平均速度

両腕および両脚をそれぞれまとめ、2分ごと平均速度を算出し、縦軸に Amplitude (運動量)、横軸に Phase (運動パターン) を示した (図4)。モバイル課題前の自発運動に関しては、日齢群間に差はなかった。課題中の運動の変化に関しては、若齢群 (G1, G2) の乳児では、おもちゃで遊んでいるときに運動量が増えるが運動パターンはあまり変化せず、一方、高齢群 (G3, G4) の乳児では、課題の前半に腕優位の運動パターンが出現し、その後運動量が増えるという特性が明らかになった。これらの結果は、運動を環境に応じて変化させる能力が、発達に伴って大きく変化すること意味している。

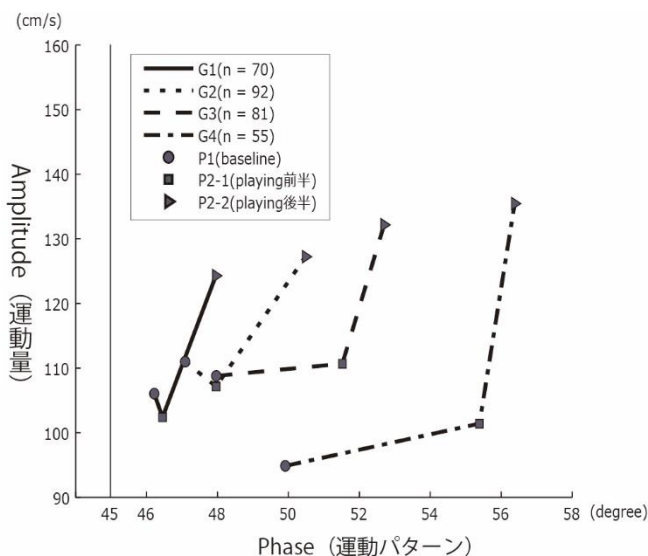


図 4 各グループにおける運動量と運動パターンの時間変化

研究 2

目的

研究 1 (Kato et al., 2013) を含む、モバイル課題を用いて乳児の運動変化を調べた先行研究 (Watanabe & Taga, 2006, 2009, 2011; Watanabe et al., 2011) では、主に運動の量的情報 (速度や頻度) を用い、それらを時間平均した値で運動の特徴が表現されてきた。研究 1 では新たに運動パターンの変化をとらえる指標を導入したが、指標計算の過程で本来 3 次元的情報を持つ速度を 1 次元に圧縮したり、2 分間のデータを時間平均したりしているため、生の計測データに含まれている豊かな時空間運動情報を生かしているとは言えない。そこで研究 2 では、運動を構成する時空間要素を抽出する手法を乳児の運動データに適用することで、乳児の運動に含まれている時空間的な特徴量を抽出することを目的とした。

近年、Motor Control の分野では、比較的少数の基本的な時空間運動パターンを組み合わせることにより、複雑で多様な運動を構成することができるという考え方に注目が集まってきている。そこで、d'Avella ら (2001, 2003) によって開発された筋シナジー抽出のアルゴリズムを乳児の運動データに適用し、自発運動を構成する様相を解明することを目指した。これにより、「複雑に見える赤ちゃんの動きは、どのような構成要素 (パターン) によって成り立っているのか」を検査することができると考えられる。この手法によって抽出されたシナジーが、日齢群間およびモバイル課題前後で変わってくるかを調べることで、運動を構成する要素自体が変化しうるのかを明らかにした。

方法

運動を構成する時空間運動パターンを抽出する手法として用いられている非負値行列因子分解アルゴリズム (図 5) を、乳児の運動データ (研究 1 と同じデータセット) に適用した。この方法は、乳児が呈する四肢運動 (例えば V_1) がいくつかの基本的な時空間運動パターン (W^1 や W^2 : 今後これらをシナジーと呼ぶ) の重み付け線形和によって表現されることを仮定しており (図 5), 観察された運動データからそれを構成する基本的要素としてのシナジーを抽出する方法である。ここでは各シナジーの時間遅れ (t_{11} や t_{12}) も許すこととした。このアルゴリズムを適用するために、四肢いずれかの速度が閾値(150 mm/s)を超えた点を運動の開始点とみなし、その点から 250ms の長さのデータを 1 つの movement unit (MU) と定義して、連続的な運動データを MU に分割した。この結果、298 名分のデータから、389,708MUs (P1: 106,583MUs, P2: 283,125MUs) が取り出された。抽出するシナジーの数は、先行研究と同様に交差検定を用いて決定した。計算コストを軽減するため、交差検定では全データセットのうち 10%にあたる 38,971MUs をランダムに選び使用した。38,971 MUs うちの 80%のデータセットからシナジーを抽出し、残りの 20%のデータセットに対する抽出されたシナジーの説明率 (R^2) を計算し、その値をもとにシナジー数を 5 個に決定した。全データセットから 5 個のシナジーを抽出する手順を 5 回繰り返し、得られた 25 個のシナジーをクラスタリングして各クラスタの平均値を代表シナジーとした。また、観測された MU の特徴を表現することを目的として、各シナジーにかかる重み付け係数をクラスタリングした。各シナジーの MU に対する寄与率を計算し、日齢群 (研究 1 と同様) ごとに、ピリオド間で各シナジーの平均寄与率を比較した。

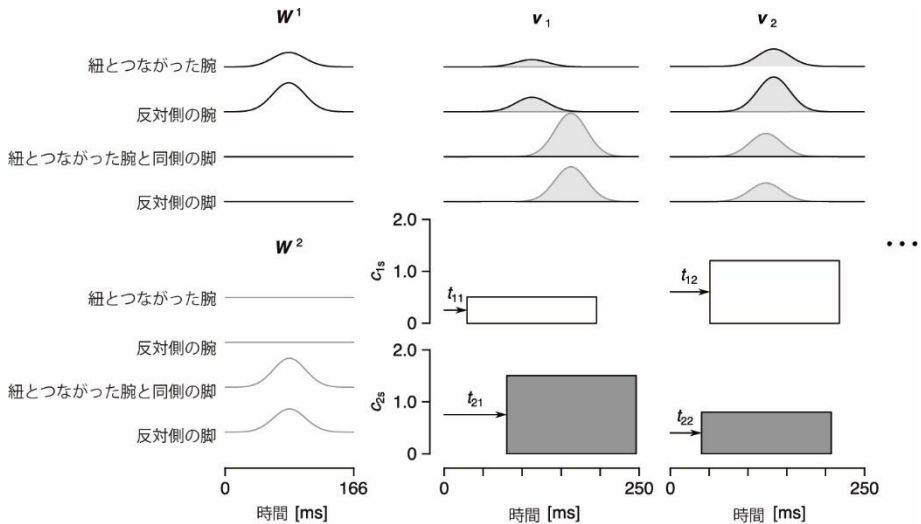


図 5 シナジーの組み合わせによる速度の時間変化の表現 (W : シナジー, V : 速度)

結果と考察

交差検定によって得られた説明率曲線の傾きがシナジー数 5 個（もしくは 6 個）を境に緩やかになることが示された（図 6）。また、シナジー数が 5 個で R^2 がおよそ 0.7 に達したため、抽出するシナジーの個数は 5 個とした。全データセットからのシナジー抽出を 5 回繰り返して、最終的に 5 個のシナジーを得た（図 7）。5 個のシナジーのうち 4 個（ W^1 , W^2 , W^3 , W^4 ）は四肢のいずれか 1 つの独立した運動を表現するもので、残りの 1 個（ W^5 ）は全四肢の同期した運動を表現するものであった。5 個のシナジーの R は 0.69 であり、乳児の運動の約 70% がこれらの 5 個のシンプルなシナジーで表現できることが示された。

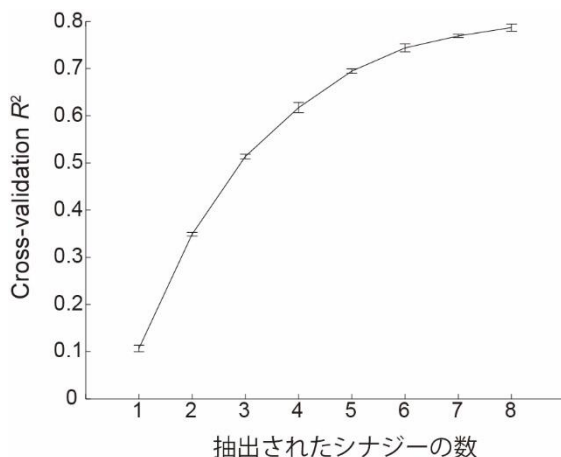


図 6 交差検定で得られた R^2

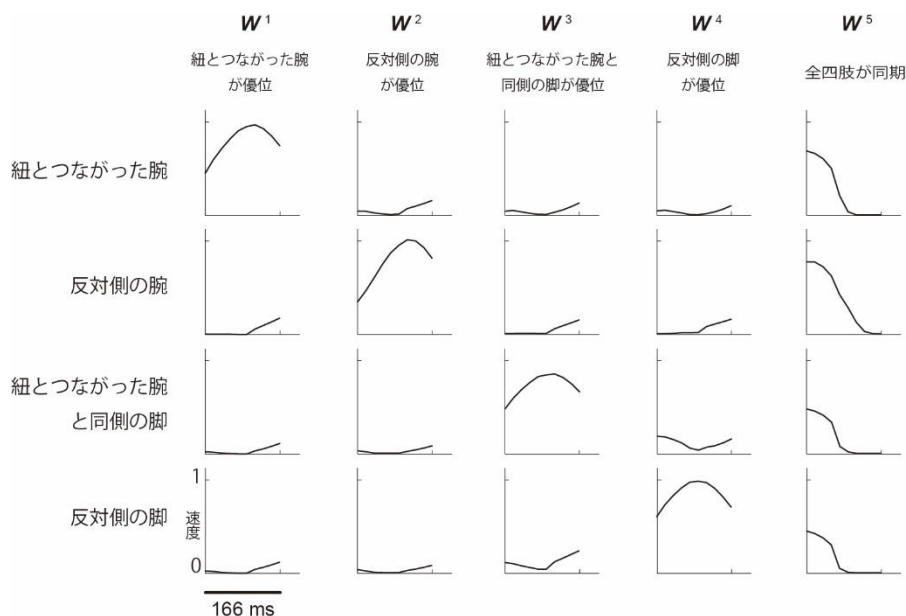


図 7 抽出された 5 つのシナジー

各シナジーの平均寄与率を比較した結果（図 8），若齢群（G1, G2）では自発運動時の各シナジーの寄与率と，モバイル課題中の各シナジーの寄与率に差がなかった。つまり，日齢の小さい乳児は，おもちゃで遊ぶ前と遊んでいる最中で運動のパターンが変化しなかった。一方，高齢群（G3, G4）では，自発運動時に比べてモバイル課題中の運動において，腕の運動を表すシナジー（W¹, W²）の寄与率が有意に高く，脚の運動を表すシナジー（W³, W⁴）の寄与率が有意に低かった。これは，日齢の大きい乳児は，課題環境に応じておもちゃの動きに直結した腕を動かす運動を増加させ，その一方で脚の運動を減少させたことを意味する。

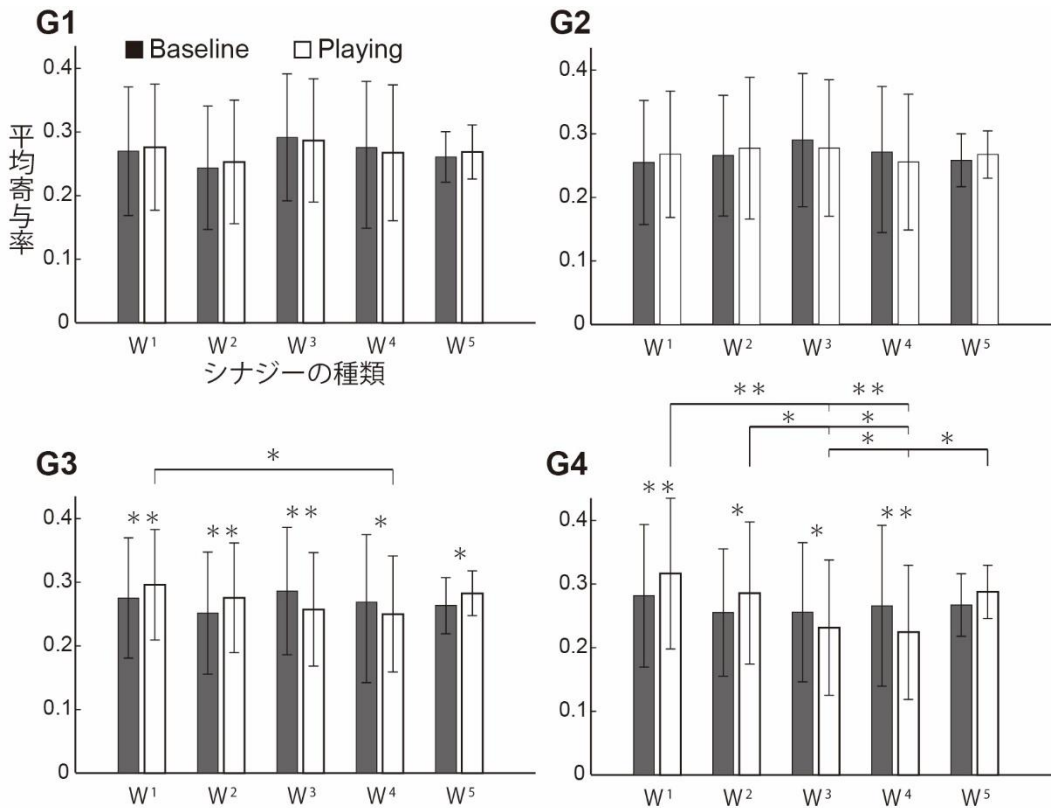


図 8 各日齢群における各シナジーの平均寄与率

これらの結果は研究 1 の結果と一致しており，シナジーの平均寄与率の変化によって運動パターンの変化が表現できることを示している。本研究では，連続的な運動が少数のシナジーの組み合わせによって表現可能であることが示され，この手法が個々の乳児の連続的な運動の特徴量を定量化するための有用な手法となり得ることが示唆された。すなわち，非負値行列因子分解アルゴリズムを用いることによって，日齢の小さい 2 つのグループ（日齢 100–109 日）の乳児では，遊ぶ前と遊んでいる

最中で 5 つのシナジーの関わり方に変化がないことが明らかになった。一方、日齢の大きい 2 つのグループ（日齢 110–129 日）の乳児では、おもちゃで遊ぶ前の運動に比べて、おもちゃで遊んでいる最中の運動において、腕の運動を表すシナジーの関わりが大きくなり、脚の運動を表すシナジーの関わりが小さくなることが示された。これは、日齢の大きい乳児が、おもちゃの動きに直結した腕の運動を増加させ、おもちゃの動きの直結しない脚の運動を減少させたことを意味している。「シナジーの寄与率」という新しい指標を用いることにより、複雑に見える連続的な運動に含まれる要素の変化を、定量的に表現することに成功した。

総合考察

本研究では、乳児期初期の児が環境の中で自身の行動を変化させていく能力の発達的变化を検討するために、生後 90–129 日の児を対象に、環境内の刺激がない状況で生じる運動（自発運動）および児の行動により環境内の玩具（モビール）がインタラクティブに変化する状況で生じる運動に関する三次元座標データを、2 つの異なる手法で解析した。

研究 1 では、運動量と運動パターンという独立した指標を考案し、日齢の小さい乳児は主に運動量の増加が生じたのに対して、日齢の大きい乳児では、はじめに運動パターンを変化させ、それに続いて運動量を増加させるという 2 段階の方略がとられていることを明らかにした。自発運動の際に観察された運動の多様性は日齢によって違いがなかったにも関わらず、玩具で遊ぶ際には日齢によって異なる行動が認められた。このことは、もともと児が持っている自発運動を基盤として環境に適した運動パターンを生成する能力は、生後 110 日の時期を境界として劇的に変化することを示唆している。

研究 2 では、複雑に見える自発運動や環境との相互作用の中で生じる随意的な運動は、比較的少数の基本的な運動パターン（シナジー）によって表現できるのではないかと考え、非負値行列因子分解アルゴリズムを適用した解析を実施した。その結果、乳児の運動の約 70% は、四肢それぞれの運動を主体とした 4 つのシナジーと全四肢の運動によって表現される 1 つのシナジーの、合計 5 つのシナジーによって表現できることを明らかにした。この方法は、一見複雑に見える乳児期独特の身体運動を、シンプルな形で表現できるものであり、それぞれのシナジーで表現された運動パターンが、時系列や環境の変化によってどのように変化していくかを定量的に検討できる点で、たいへん有用なものである。本研究においても、得られた 5 つのシナジーが、自発運動中と玩具（モビール）で遊んでいる最中でどのように変化していくかを検討したところ、日齢の小さい乳児では、各シナジーの寄与率は環境状況によって変化が見られなかったが、日齢の大きい乳児では、玩具で遊んでいる最中において、玩具をより効果的に動かせる腕の運動に関連したシナジーが増加し、一方玩具の動きに直接関係しない脚の運動に関連したシナジーは減少することが明らかになった。

このように、本研究は、複雑な乳児の運動を、異なる方法で定量化することに成功し、環境の変化や発達に伴う乳児の行動の変化を、よりシンプルな形で客観的に表現することを可能にした。今後は、これらの手法を用いて、さまざまな状況や発達段階における児の行動の特性を解明していくことが望まれる。

引用文献

- Angulo-Kinzler, R. M. & Horn, C. L. (2001). Selection and memory of a lower limb motor-perceptual task in 3-month-old infants. *Infant Behavior & Development*, 24, 239-257.
- Angulo-Kinzler, R. M., Ulrich, B., & Thelen, E. (2002). Three-month-old infants can select specific leg motor solutions. *Motor Control*, 6, 52-68.
- Chen, Y. P., Fetters, L., Holt, K. G., & Saltzman, E. (2002). Making the mobile move: Constraining task and environment. *Infant Behavior & Development*, 25, 195-220.
- d'Avella, A., Saltiel, P., & Bizzi, E. (2003). Combinations of muscle synergies in the construction of a natural motor behavior. *Nature Neuroscience*, 6, 3, 300-308.
- d'Avella, A. & Tresch, M. C. (2001). Modularity in the motor system: decomposition of muscle patterns as combinations of time-varying synergies. In *Advances in Neural Information Processing Systems 14* (eds. Dietterich, T. G., Becker, S. & Ghahramani, Z.) 141-148. (MIT Press, Massachusetts)
- Hadders-Algra, M. (1993). General movements in early infancy: What do they tell us about the nervous system? *Early Human Development*, 34, 29-37.
- Heathcock, J. C., Bhat, A. N., Lobo, M. A., & Galloway, J. (2004). The performance of infants born preterm and full-term in the mobile paradigm: learning and memory. *Physical Therapy*, 84, 9, 808-821.
- Kanemaru, N., Watanabe, H., & Taga, G. (2012). Increasing selectivity of interlimb coordination during spontaneous movements in 2- to 4-month-old infants. *Experimental Brain Research*, 218, 49-61.
- Kanemaru, N., Watanabe, H., Kihara, H., Nakano, H., Takaya, R., Nakamura, T., Nakano, J., Taga, G., & Konishi, Y. (2013). Specific characteristics of spontaneous movements in preterm infants at term age are associated with developmental delays at age 3 years. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 55, 713-721.
- Kato, M., Hirashima, M., Oohashi, H., Watanabe, H., & Taga, G. (2014) Decomposition of spontaneous movements of infants as combinations of limb synergies. *Experimental Brain Research*, 232, 2919-2930.
- Kato, M., Watanabe, H., & Taga, G. (2013) Diversity and changeability of infant movements in a novel environment. *Journal of Motor Learning and Development*, 1, 79-88.
- Precht, H. F. R. & Hopkins, B. (1986). Developmental transformations of spontaneous movements in early infancy. *Early Human Development*, 14, 253-238.
- Rovee, C. K. & Rovee, D. T. (1969). Conjugate reinforcement of infant exploratory behavior. *Journal of Experimental Child Psychology*, 8, 33-39.

- Thelen, E. (1994). Three-month-old infants can learn task-specific patterns of interlimb coordination. *Psychological Science*, 5, 5, 280-285.
- Watanabe, H. & Taga, G. (2006) General to specific development of movement patterns and memory for contingency between actions and events in young infants. *Infant Behavior & Development*, 29, 402-422.
- Watahabe, H. & Taga, G. (2009). Flexibility in infant actions during arm- and leg-based learning in a mobile paradigm. *Infant Behavior and Development*, 32, 79-90.
- Watanabe, H. & Taga, G. (2011). Initial-state dependency of learning in young infants. *Human Movement Science*, 30, 125-142.
- Watanabe, H., Homae, F., & Taga, G. (2011). Developmental emergence of self-referential and inhibition mechanisms of body movements underlying felicitous behaviors. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 37, 1157-1173.

付 記

本研究は、東京大学大学院教育学研究科の多賀巖太郎，渡辺はま，大橋浩輝との議論を通して進められた。