

モーショニーズの発生原理とその役割：ロボティクスから探る 発達足場づくり

○長井志江（大阪大学）

1. はじめに

乳幼児の認知発達における養育者の役割の一つに、発達足場づくり [1, 2] がある。乳幼児が一人では達成できない課題に対し、養育者が課題の難しさを調整したり、解決方法を例示することで、乳幼児の課題達成を促す援助のことである。認知発達ロボティクス [3] においても、発達するロボットの内部構造の設計と同時に、養育者を含む環境設計の重要性が指摘されており、後者の不適がロボットの発達に遅れや障害を生じることが示されている [4, 5]。しかし、これらの研究における足場づくりは設計者によって定義されたもので、養育者が乳幼児やロボットとのダイナミックな相互作用をとおして足場をどう形成していくのか、そして、発達をどう導くのかは明らかになっていない。

そこで本稿では、乳幼児の動作学習に注目し、養育者による発達足場づくりの発生原理とその役割を議論する。養育者が乳幼児に運動を呈示するときの援助として知られるモーショニーズ [6] を例にとり、ダイナミックな相互作用をとおして養育者がモーショニーズを規定する過程と、それによって促進される乳幼児やロボットの運動学習を構成的手法により検証する。第2節でモーショニーズについて詳しく説明し、著者の仮説を述べる。第3, 4節では、これらの仮説を検証する実験を紹介し、第5節で総合議論を行う。

2. モーショニーズ：乳幼児に対する運動の誇張呈示

養育者は乳幼児に対して動作を呈示する際に、動作をより単純かつ大きめに修正することが知られている [6, 7]。例えば、乳幼児の遊びとしてよく知られるカップ積み重ね課題では、個々のカップを動かす際の手先軌道はより大きな弧を描き、連続した運動は動作区分（例えば、カップを掴む、持ち上げる、下ろす）に分節化されて呈示される。このような運動の誇張はモーショニーズ [6] と呼ばれており、対乳幼児発話として知られるマザリーズ [8, 9] と共通の特徴をもつことが指摘されているが、なぜそのような誇張がモダリティを超えて現れるのか、そして乳幼児の運動学習にどのような影響を持つのかは明らかでない。

上記の問題に対して、筆者は以下の仮説を立てる。

1. 養育者のモーショニーズは呈示動作における重要な情報を強調し、乳幼児の未熟な知覚・運動を適切に誘導する（運動学習におけるモーショニーズの役割）。
2. 乳幼児の未熟な知覚・運動は養育者のモーショニーズを誘発する（モーショニーズの発生原理）。

つまり、乳幼児の機能的未熟さがモーショニーズなど



図1 養育者による発達足場作りと学習者の未熟な知覚・運動とのダイナミックな相互作用

の養育者の足場作りの発生要因となっており、ダイナミックなインタラクションをとおして双方が形作られていく（図1参照）。

3. 運動学習におけるモーショニーズの役割

モーショニーズが乳幼児の運動学習にどのような効果をもたらすか検証するため、計算論的モデルを用いて養育者の動作呈示を解析した。著者の仮説は、乳幼児の知覚・運動が未熟であっても、モーショニーズによって呈示動作の重要な特徴（例えば、動作の目的）が強調されるため、乳幼児の視線は動作を学習するのに適切な場所へと誘導されるというものである。そこで、乳幼児の視覚機能を模したモデルとして、顕著性に基づく注意モデル [10, 11] を導入し、モーショニーズによる視線誘導の効果を対成人動作と比較した。詳細は [12] を参照されたい。

3.1 乳幼児の視覚機能を模した顕著性モデル

顕著性モデル [10, 11] は、色やエッジの向き、動きなどの低次特徴量について、画像の注目領域とその周辺領域の差分を計算することで、空間的な顕著度を推定するモデルである。図2は顕著性モデルによって決定された注視点（(a)内の赤丸）と、それに対応する顕著性マップ（(b)）を示している。ここでは、色彩、明度、エッジの傾き、明度の時間差分、オブティカルフローの方向の5種類の特徴量を使用した。

人間の視覚注意は、一般的に、上述したボトムアップの顕著性と、文脈に関する知識などのトップダウンな情報を融合することによって決定していると考えられている。しかし、乳幼児は文脈に関する知識が乏しいため、ボトムアップな情報に強く依存せざるをえない [13, 14]。そこで、本節と次節で紹介する実験では、顕著性モデルのみを用いて乳幼児の視覚注意を再現することとした。



(a) 顕著性モデルにより選
択された注視点 (赤丸) (b) 顕著性マップ

図2 顕著性モデルによるモーショニーズの解析

3.2 顕著性モデルを用いたモーショニーズの解析実験

あらかじめビデオ録画した養育者の対乳幼児動作と対成人動作を、顕著性モデルを用いて解析した。図2に示したのは、対乳幼児動作画像の一例である。養育者と乳幼児／成人が机をささんで対面した状況で、乳幼児／成人の後上方にビデオカメラを設置し、養育者の動作を撮影した。

実験に参加した被験者は、8～11ヶ月 ($M = 10.56$, $SD = 0.89$) の乳児とその養育者 15 名 (父親 5 名, 母親 10 名) である。養育者はカップ積み重ね課題を、乳児 (IDA: Infant-directed Action) と配偶者 (ADA: Adult-directed Action) それぞれに向かって呈示するよう指示された。

3.3 実験結果と考察

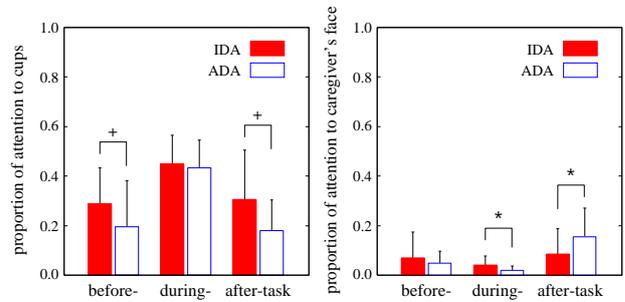
IDA 条件と ADA 条件とで、顕著性モデルが注視した画像領域を比較した。図3 (a) にカップへの注視率を、(b) に養育者の顔への注視率を示す。各グラフ中、左からタスク呈示直前 (2 秒間)、呈示中 (平均 13 秒間)、呈示直後 (2 秒間) の注視率を示している。この結果から、IDA 条件では

- タスク呈示の直前・直後においてカップへの注視率が高くなる (図3 (a) 参照)
- タスク呈示中は養育者の顔への注視率が高くなる (図3 (b) 参照)

ことが分かる。

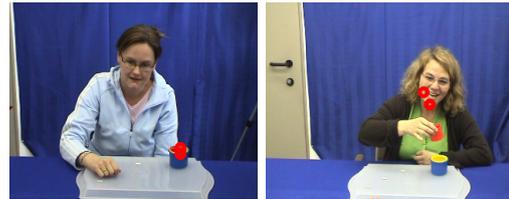
まず前者の要因について、養育者の動作を定性的に調べた結果、IDA 条件ではタスクの開始直前と終了直後に、養育者は身体運動を抑制する傾向があることが確認された。図4 (a) に示すのは、タスク呈示直後に顕著性モデルの注視点カップに移った瞬間である。身体運動の抑制は動き特徴による顕著性を低下させ、相対的に色やエッジによる顕著性を上昇させる。カップは色やエッジに関して他の物体に比べて顕著であるため、養育者の運動の抑制が、結果的にカップの初期・終了状態の強調へとつながった。また、養育者は身体運動に抑揚をつけることで、タスクがいつ始まりいつ終わるのかも同時に乳児に教えていたと考えられる。タスクの開始・終了のタイミングとそのときのカップの状態は、呈示動作の目的の理解に重要な情報であり、モーショニーズはそれらを強調する役割を果たしていたことが分かる。

次に後者については、タスク呈示中の養育者から乳児への頻繁な働きかけが、その要因であると考えられる。IDA 条件では、養育者は乳児に頻繁に話しかけた



(a) カップへの注視 (b) 養育者の顔への注視

図3 タスク呈示直前・呈示中・呈示直後の顕著性モデルの注視率 (*: $p < 0.05$, +: $p < 0.1$)



(a) タスク呈示直後のカッ
プへの注視 (b) タスク呈示中の養育者
の顔への注視

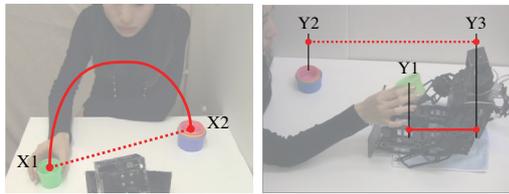
図4 モーショニーズによって強調されたカップと養育者の顔への注視

り笑顔を見せるなど、常に社会的な信号を送っていた。その一例を図4 (b) に示す。養育者が社会的信号を送るタイミングは手先の運動の一時停止と一致しており、養育者は乳児の注意の維持だけではなく、動作の分節化や目的の発見にも貢献していたと考えられる。

以上の二つの結果から、モーショニーズにはタスクの目的を強調する効果があると言える。文脈に関する知識や経験が乏しい乳幼児にとっては、タスクの目的が何であるのか、そして、それを達成する動作区分が何であるのかを認識することは難しい。ロボットの運動学習や模倣の研究においても、what to imitate 課題としてその難しさが指摘されている [15]。本節で示した実験結果は、「乳幼児やロボットの知覚・運動機能が未熟であっても、モーショニーズが呈示運動の目的に関する重要な特徴を強調しており、運動学習の促進が期待できる」という第一の仮説を支持している。

4. モーショニーズの発生原理

モーショニーズが何を引き金として発生するのか、特に、乳幼児からのどのような信号が養育者の運動の誇張を誘発するのか検証するため、ロボットを用いたインタラクション実験を行った。著者の仮説は、乳幼児の未熟な知覚・運動が養育者の動作の誇張を引き起こすというものである。そこで前節と同様に、顕著性モデルを用いて乳幼児の未熟な視覚機能を再現し、これを実装したロボットとインタラクションする養育者の呈示動作を解析することで、モーショニーズのような誇張が現れるかを検証した。詳細は [16] を参照されたい。



(a) 正面から見た手先運動 (b) 側面から見た手先運動

図5 養育者の呈示動作の解析指標

4.1 顕著性モデルを用いたインタラクション実験

小型のヒューマノイドロボットに2種類の視覚注意機能を実装し、2条件間での養育者の呈示動作を比較した。条件1では顕著性モデルを用いて、ロボットに頭部カメラ画像中の最も顕著な位置を注視させた。条件2では Wizard of Oz 法を用いて、ロボットに動作の目的を予測するような視線変化を実現した。例えば、養育者がカップを持ち上げると、ロボットを制御する実験者がその動作の目的位置を予測し、ロボットの視線を養育者の運動に先駆けて移動させるというものである。各条件について、22~30歳の大学生8名(男7名, 女1名, 2条件の合計16名)に養育者として参加してもらい、ロボットに対して自由にカップ積み重ね課題を呈示してもらった。

条件によるモーショニーズの発生の有無を調べるため、文献[7]と同様の指標を用いて養育者の呈示動作を解析した。用いた指標は以下の6つである(図5参照)。

- 手先軌道の弧の大きさ
= (X1, X2) の軌跡の長さ / (X1, X2) の直線距離
- ロボットへの近さ
= $1 - ((Y1, Y3) \text{ の距離} / (Y2, Y3) \text{ の距離})$
- 1つのカップを動かすのに要する時間 [sec]
- カップの移動速度
= (X1, X2) の軌跡の長さ / 所要時間
- 動作の一時停止の頻度
= 一時停止の数 / 移動したカップの数
- タスクの呈示回数

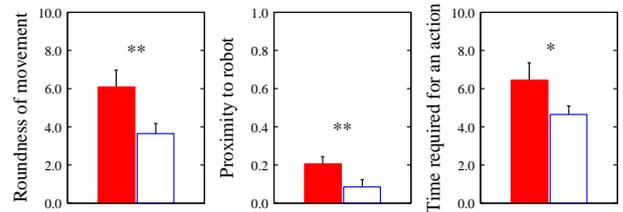
4.2 実験結果と考察

2条件間での養育者の呈示動作を比較した。図6に、前述した6つの指標のうち有意差の見られた4つの結果を、図7に手先運動の軌跡の一例を示す。この結果から、顕著性モデルを用いた条件1において、

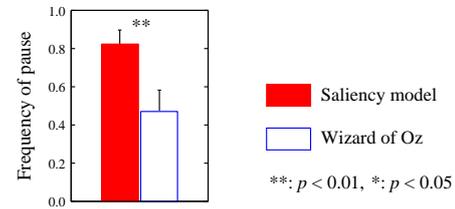
- 養育者の手先軌道はより大きな弧を描く(図6(a)および図7(a)左図参照)
- よりロボットに近づいて動作を呈示する(図6(b)および図7(a)右図参照)
- よりゆっくりと動作を呈示する(図6(c)参照)
- 動作中により頻繁に一時停止を入れる(図6(d)参照)

ことが分かる。

ロボットの視覚注意として顕著性を用いた場合、ロボットは養育者の手先運動を追従するように視線を変化させる。カップや手がつまみ色やエッジ特徴に動きが加わることで、手先の運動は周辺刺激に対してより顕

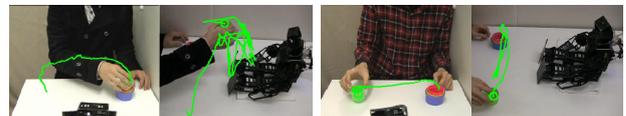


(a) 手先軌道の弧の大きさ (b) ロボットへの近さ (c) 1つのカップを動かすのに要する時間



(d) 動作の一時停止の頻度

図6 養育者の呈示動作の解析結果



(a) 条件1: 顕著性に基づく注視によって誘発された動作誇張 (b) 条件2: 予測をともなう注視によって促進されたスムーズな運動

図7 養育者の手先軌道

著な領域として検出される。養育者はロボットのこうした追従反応を常に確認するためにゆっくりと動作を呈示し、さらには、頭部の首振りという比較的小さなロボットの運動をより拡大して確認しやすくするために、自らの手先運動を拡張することでロボットの反応を引き出していたと考えられる(図7(a)左図参照)。またその一方で、注視点が散漫になりやすいというのも顕著性モデルの特徴である。低次特徴からボトムアップに計算される情報のみを用いるため、ロボットがタスクに関係のない場所に注意を向けることもたびたび起こる。このようなとき、養育者はロボットの注意を再びタスクに関連した場所(例えば、カップを把持した手先)へと誘導するために、カップの移動を一時停止して、カップをよりロボットに近づけて見せるなどしていたと考えられる(図7(a)右図参照)。

以上の結果は、「乳幼児の未熟な知覚・運動がモーショニーズを誘発する」という第二の仮説を支持している。Wizard of Oz 法での養育者の動きを予測するような視線変化に比べて、注意が散漫であったり応答的にしか視線を移動させない様子は、より低月齢の未熟な乳幼児を想像させる。実際に、養育者と乳幼児のインタラクションを解析した実験[17]からも、8~11ヶ月の乳児は顕著性モデルに類似した視線変化を示し、12~24ヶ月児になってはじめて養育者の動きを予測するようになることが指摘されている。養育者による発達の足場づくりは乳幼児の未熟な知覚・運動を誘導するだけでなく、反対にそこから誘発されるという双方向の関

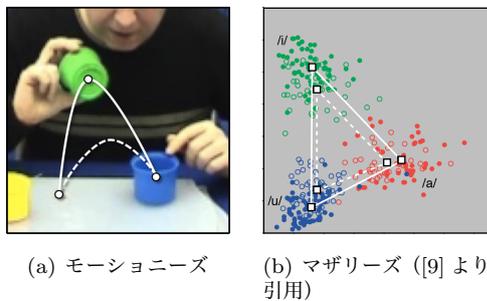


図8 モダリティを超えた刺激の誇張 (実線: 対乳幼児動作・発話, 破線: 対成人動作・発話)

係をもっている。

5. まとめと議論

本稿で紹介した二つの実験結果は、運動学習におけるモーションーズという養育者の援助が、乳幼児の未熟な知覚・運動機能によって引き出されること、そして、その乳幼児の未熟さを補うように、モーションーズが呈示運動の重要な特徴を強調していることを示した。この援助と未熟さの関係が発達の足場づくりの重要なポイントであるが、実は、マザリーズ [9, 8] にも同様の関係が見られる。

図8 (a) に本稿で紹介したモーションーズの典型的な手先運動の軌跡を、(b) に Kuhl ら [9] によって発見されたフォルマント空間でのマザリーズの母音 (ロシア語の/a/, /i/, /u/) の分布を示す。それぞれ、実線が対乳幼児運動・発話、破線が対成人運動・発話を表している。このように、空間の違いはあるものの、モーションーズとマザリーズには特徴空間を拡張することで入力信号の分節化を促すという共通の役割がある。そして、これに対する乳幼児の発話能力を見てみると、運動の認識と同様に、発達初期では母音のクラスタが未分化であることが知られている [18]。マザリーズに関しては実験的な検証はまだ行われていないが、乳幼児はこの未分化な状態をもつことで養育者の発話の誇張を誘発し、自身の母音カテゴリの学習に役立っていると推測される。

養育者による発達の足場づくりは、乳幼児の認知発達を理解する上で欠かせない要素である。今後もロボティクスの視点から仮説の生成、検証を行うことで、認知発達をよりダイナミックな過程として探求していく必要がある。

謝辞 本稿を執筆するにあたり、日頃から活発な議論をしていただいている大阪大学の浅田稔教授、中谷明子氏、ビーレフェルト大学の Katharina J. Rohlfing 氏に深い感謝の意を表す。

参考文献

[1] D. Wood, J. S. Bruner, and G. Ross, "The role of tutoring in problem solving," *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, vol. 17, no. 2, pp. 89–100, 1976.
 [2] L. E. Berk and A. Winsler, *Scaffolding Children's Learning: Vygotsky and Early Childhood Education*. Natl Assn for the Education, 1995.

[3] M. Asada, K. Hosoda, Y. Kuniyoshi, H. Ishiguro, T. Inui, Y. Yoshikawa, M. Ogino, and C. Yoshida, "Cognitive Developmental Robotics: A Survey," *IEEE Transactions on Autonomous Mental Development*, vol. 1, no. 1, pp. 12–34, 2009.
 [4] Y. Nagai, M. Asada, and K. Hosoda, "Learning for joint attention helped by functional development," *Advanced Robotics*, vol. 20, no. 10, pp. 1165–1181, 2006.
 [5] J. Triesch, C. Teuscher, G. O. Deák, and E. Carlson, "Gaze following: why (not) learn it?," *Developmental Science*, vol. 9, no. 2, pp. 125–147, 2006.
 [6] R. J. Brand, D. A. Baldwin, and L. A. Ashburn, "Evidence for motionese: modifications in mothers infant-directed action," *Developmental Science*, vol. 5, pp. 72–83, Mar. 2002.
 [7] K. J. Rohlfing, J. Fritsch, B. Wrede, and T. Jungmann, "How can multimodal cues from child-directed interaction reduce learning complexity in robots?," *Advanced Robotics*, vol. 20, no. 10, pp. 1183–1199, 2006.
 [8] A. Fernald and T. Simon, "Expanded Intonation Contours in Mothers' Speech to Newborns," *Developmental Psychology*, vol. 20, no. 1, pp. 104–113, 1984.
 [9] P. K. Kuhl, J. E. Andruski, I. A. Chistovich, L. A. Chistovich, E. V. Kozhevnikova, V. L. Ryskina, E. I. Stolyarova, U. Sundberg, and F. Lacerda, "Cross-Language Analysis of Phonetic Units in Language Addressed to Infants," *Science*, vol. 277, pp. 684–686, Aug. 1997.
 [10] L. Itti, C. Koch, and E. Niebur, "A model of saliency-based visual attention for rapid scene analysis," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 20, no. 11, pp. 1254–1259, 1998.
 [11] L. Itti, N. Dhavale, and F. Pighin, "Realistic avatar eye and head animation using a neurobiological model of visual attention," in *Proc. of the SPIE 48th Annual International Symposium on Optical Science and Technology*, vol. 5200, 2003.
 [12] Y. Nagai and K. J. Rohlfing, "Computational Analysis of Motionese Toward Scaffolding Robot Action Learning," *IEEE Transactions on Autonomous Mental Development*, vol. 1, no. 1, pp. 44–54, 2009.
 [13] M. C. Frank, E. Vul, and S. P. Johnson, "Development of infants' attention to faces during the first year," *Cognition*, vol. 110, pp. 160–170, Feb. 2009.
 [14] R. M. Golinkoff and K. Hirsh-Pasek, "BabyWord-smith: From Associationist to Social Sophisticate," *Current Directions in Psychological Science*, vol. 15, no. 1, pp. 30–33, 2006.
 [15] C. L. Nehaniv and K. Dautenhahn, eds., *Imitation and Social Learning in Robots, Humans and Animals*. Cambridge University Press, 2007.
 [16] Y. Nagai, A. Nakatani, and M. Asada, "How a robot's attention shapes the way people teach," in *Proc. of the 10th International Conference on Epigenetic Robotics*, pp. 81–88, 2010.
 [17] A.-L. Vollmer, K. Pitsch, K. S. Lohan, J. Fritsch, K. J. Rohlfing, and B. Wrede, "Developing feedback: how children of different age contribute to a tutoring interaction with adults," in *Proc. of 9th IEEE International Conference on Development and Learning*, pp. 76–81, 2010.
 [18] P. K. Kuhl and A. N. Meltzoff, "Infant vocalizations in response to speech: Vocal imitation and developmental change," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 100, pp. 2425–2438, Oct. 1996.