解　説

ロボット模倣の創発・発達的構成論にむけて

國　吉　康　夫*

要旨

ロボット模倣機能は，究極の作業教示法として，また，人間の認知の理解への構成論的アプローチとして重要性を増している．しかし，従来の構成法は，個別のタスク，状況に限定され，本当に模倣が必要となる新奇なタスクや状況に適用できない．

模倣の創発・発達的構成論に向けて，認知心理学等の知見をもとに機能構成図を提案し，その諸要素とロボット研究との対応付けを解説する．また，それらの土台をなす身体性に基づく行動創発と模倣の発生についても研究動向を紹介する．

1. はじめに

人間の作業を観察し同等の作業を行う，いわゆる模倣機能は，ロボットにおける究極の作業教示機能として早くから着目され，組立作業[1, 2]や剣玉遊び[3]などを題材に先駆的な研究がなされ，その後も様々な実現例がある．

しかしながら，これらはいずれも，特定の作業ごとに人間がモデル化を行い，観察からの情報抽出法とそれに基づく行動生成法をロボットにプログラムしたものである．想定した範囲や境界条件を超えた新奇な作業状況では破綻してしまう．

本来，模倣が有効なのは，馴れない環境・状況で未経験のタスクを身につけようとする時なのだから，従来のアプローチには根本的に問題がある．予め規定・限定されないopen-endedなタスクについて模倣できる，開放系としての能力を目指す必要がある．

人間の認知機能を理解するためにも，模倣は非常に重要な切り口である[4]．実世界中の他者の行為を知覚し，変動，外乱，不確実性の中で，相手と異なる自己の身体と状況において「同等な」行為を達成する．同等性の認識はカテゴリ化の基本であるから，模倣は実世界行為者における概念獲得の基本といえる．また，言語を介する以前に自己と他者の行為を関係付け，呼応させるので，コミュニケーションや協調の基盤ともいえる．さらに，自律行動と他者相互作用の両方が関わり，常に学習が関与することから，社会的相互作用と自律適応行動が相互に影響を与えつつ発達する過程の基本であり，人間特有の認知発達を理解する基本軸ともいえる．

本稿では，ロボット模倣の新たな構成論とそれに基づく人間の認知の理解に向けて，模倣の機能構成を分析し，ロボット機能および関連分野の研究動向と対応づけて解説する．

2．模倣の発達的構成論

ロボットを用いた構成論的方法で認知を解明するにあたり，特定の認知機能そのものをスナップショット的に切り出して再構成するのでは真の理解は得られず，発達過程とそのメカニズムをモデル化することが重要であることが提唱されている[5]．その趣旨で，模倣の発達的構成論を提唱してきた[6]．

発達過程においては，模倣の様々な機能要素の部分的統合により，異なる模倣の様相が見られるはずである．逆にいえば，そのような様相を分離，分析することにより，模倣の機能構成が明らかになるだろう．心理学や脳科学の知見の総合的分析に基づき，我々が作業仮説として定義した模倣の諸様相を，例と共に説明する．

図1は，家族が庭の掃除をしている光景である[1]．左端の女児は，母親を見つめて，その仕草と道具の動かし方を一所懸命真似している．しかし，彼女の持つ道具はモップ

2004年12月22日受付
* 東京大学大学院情報学環・情報理工学系研究科
〒113-8656 文京区本郷7-3-1　東大工学部8号館
Tel/Fax : 03-5841-6276
E-mail : kuniyosh@isi.imi.i.u-tokyo.ac.jp
キーワード：模倣，ロボット，認知発達，構成論，身体性

[1] 國吉一家の協力に感謝する．

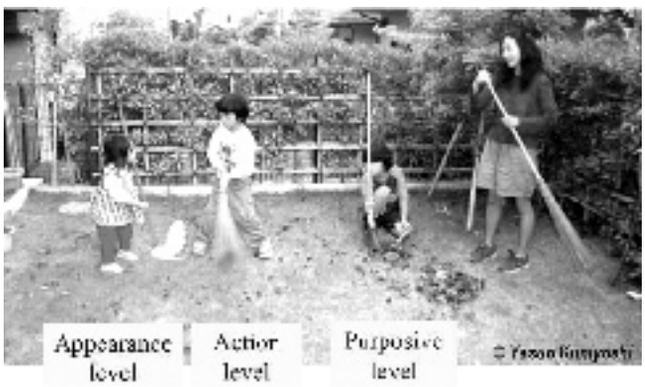


図１　模倣の諸様相

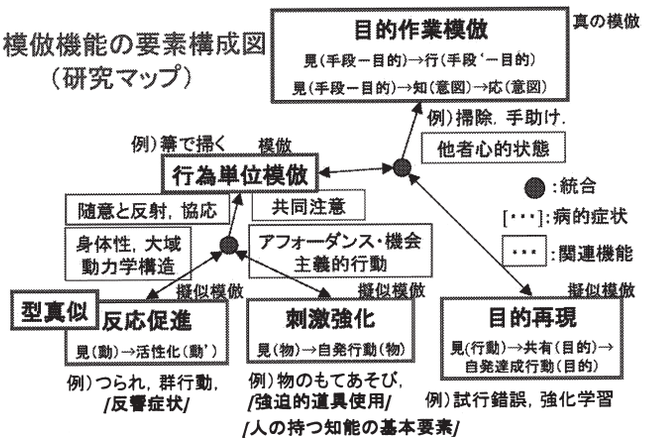


図２　模倣の機能構成

なので，落ち葉を掃くことはできない．それでも彼女は母親と同じことができたと思い満足している．中央の男児は，母親のと全く同じ竹箒を手に入れ，それを効果的に用いて実際に落ち葉を掃くことができた．ところが，彼は，落ち葉を掃く行為自体に熱中するあまり，掃除全体の目的は眼中になく，かえって落ち葉を掃き散らかしてしまった．右側の少年は，幼い者達に譲ったため，母親の同様な道具は手に入れることができなかった．しかし，土間箒と塵取りという，全く適切な別の道具を見つけて来た．これらを効果的に使用するために，彼は他の者達とも母親とも全く異なる姿勢をとり，全く異なる動作をした．それでも，彼は母親と同じ作業目的を共有し，それに寄与することができた．

上の例に登場する 3 人の子供の模倣は，模倣者が被模倣者の行為のどの範囲に着目し再現（共有）しているかの違いにより以下のように分類できる．

1. 型真似レベル：身体（およびその延長としての道具）の見かけの姿勢と運動を共有．
2. 行為単位レベル：身体の姿勢と運動およびそれが対象物体に与える効果を含む 1 個の因果関係を共有．
3. 目的作業レベル：作業全体の目標とそれに至る手段－目的関係の構造を理解している．全体目標を共有し，作業の構造は状況に応じて柔軟に適応させられる．

我々は，人間の模倣能力が厳密に上の 3 段階を通って発達することを主張するものではない．むしろ，これらは，模倣の要素機能群の異なる部分が活性化し協調して発生するモードのようなものと考えている．成人でも，時と場合により，上の 3 通りのいずれの模倣でも行うことがある．にも関わらず，レベルという呼称を用いるのは，機能を構成する観点からは，型真似よりも目的作業レベルの方がより多くの機能単位の統合を必要とすると考えられるからである．

３．模倣の機能構成

前節で提示した模倣の 3 様相の背後に，どのような機能単位があるかを考える．

模倣に関する心理学的知見と，脳科学や人工知能の知見を総合して分析する．脳の機能構成推定には，しばしば特定部位の障害事例が有力な情報を与えるが，この分析でも病的症例を有力な根拠として援用する．

図２に，模倣の機能構成を示した．

認知心理学では，模倣学習を「主体Ａが，主体Ｂの行動の形態から，自分にとって新奇な部分を学習し，かつ，Ｂが不在でもその行動を行えるようになること」[7, 8] などと定義する．このように，他者の行為の構造と意味の理解に基づく新奇行動の獲得だけを「真の模倣」(true imitation) と呼ぶ．表面的に他者と同じ行動を見せても，新奇性がない場合や，行動認識が行動生成に直接因果関係を持たない場合は「擬似模倣」(pseudo imitation) と呼んで区別する．

他者の行動を見て，その場所や対象物に注意を惹かれ，そのもとで試行錯誤学習をし，結果的に同様な行動をする場合は，「刺激強化」(stimulus enhancement) と呼ばれる．他者の行動を見て，その目的を共有し，試行錯誤学習で結果的に同じ行動をする場合は「目的再現」(goal emulation) と呼ばれる．これらは極端な場合，他者が不在でも，その食べかすを見るだけでも起動する．他者の行動に直接呼応する行動でも，それが自己の既存の行動単位を活性化し，非意図的に，新奇でない同じ行動を引き起こす場合を「反応促進」(response facilitation) という．以上が擬似模倣とされる．

刺激強化や目的再現で結果的に行動が他者と一致するのは偶然ではなく，環境の構造・状況によるので，これを「環境による行動収斂」と呼ぶことにする．また，上の「真の模倣」は，行為認知の内容を問題にしているから，「認知的模倣」と呼ぶことにする．

実世界知能の構成論の立場からは，両者の連続性や，共通の認知機能が重要である．環境要因を知能の重要な構成要素と考える環境相互作用主義からも，環境による行動収斂が認知的模倣と連続体をなすと見る方が生産的である．また，ロボット行動制御の Subsumption Architecture [9] の拠り所である進化による機能重畳の考え方からも，擬似模倣の機能が真の模倣を下部で支えているとするのが自然に思

われる．

これらを踏まえて，図２では，上述の 3 種の擬似模倣が低位の機能要素として並列に配置され，それらが統合されることで上位の模倣機能が構成されることとした．

４．ロボット模倣の機能要素

図２では，類似動作の共鳴的発生（反応促進），対象物注目による対物動作発生（刺激強化），目的の認識と自発達成行動 (目的再現)，はロボットにとって重要な行動生成過程と考え，それらの統合により対物的な行為単位模倣や，手段－目的階層構造の認識と利用に基づく目的作業模倣（真の模倣）が発生するとした．これは，真の模倣と擬似模倣を全く別物とした心理学的理論と一線を画し，構成論的に模倣の認知機能の全体像を提示するものである．

以下に，各要素の機能的意味と，関連するロボット研究を解説する．

4.1 反応促進

反応促進は，模倣の最も原初的な基盤と考えられる．この機能だけが強調されて病的に現れたものが統合失調症でときに見られる反響症状であろう．患者は，その意図に反する場合でも，相手の発話や身振りを即座に真似してしまい，自らの意思でとめることができない．このような性質はおそらく，我々皆が共通に有するが，通常は抑制されているものと思われる．相手の動作についつられて同じ動きをする，といった共鳴的動作は，親密な対話中などにしばしば見られるものである．また，社会性動物が群行動する際にも，同様のメカニズムが働いている可能性がある．

ロボットの機能としては，動きの意味までは考えない型真似 [10] が近いが，その発生原理として重要な共鳴的性質については，従来あまり考慮されなかった．模倣ではないが関連する研究として，周期的音刺激に神経振動子による引き込みで同調してドラムを叩くロボットの例 [11] がある．

より一般的な行動生成メカニズムとしては，知覚により自己の行動レパートリ群が並列にボトムアップに活性化し，何らかのきっかけで何れかが実際の行動として発現する方式を考えるべきだろう．これは，ロボットの並列行動制御方式 [9] や，発達心理学で Piaget が提案した感覚運動シェマの活性化 [12] とも密接に関連する．このような機能をニューラルネットでモデル化し，模倣メカニズムとして提示した例が最近発表された [14]．

4.2 刺激強化

刺激強化は，物体や場所への注目をきっかけとした行動発生原理といえる．この機能だけが突出した病的な事例として，強迫的道具使用がある．患者は，櫛やはさみなどを見せられ，手に持たせられると，「絶対に動かしてはいけない」と指示され，本人もそう努力しているにも関わらず，手に持った道具のステレオタイプ的な使用動作（髪を梳かす，など）を行ってしまう．このような，物を見るとその操作を発生させる機構は，我々一般が備える基本的認知機構と考えられる．物体アフォーダンスの知覚がこれに深く関わることは間違いない．実際，最近のミラーニューロンの有力な計算論的モデル [19] では，物体の形状要素（ジオン）の知覚に伴ってボトムアップに動作が提案される，いわばアフォーダンス機構が中心的な役割を果たしている．また，事前の計画に従うのでなく，その場その場の状況から行動を思いつき実行する，機会主義的行動 [13] は，このような機構に基づくより一般的な振舞いと考えられるが，それは人間の日常行動を説明する新たな考え方として追求されてきた．

計算機視覚と人工知能に基づき，物体の形状認識に基づいてその機能を理解し，操作動作を生成することは，過去にも試みられているが，明示的プログラミングによる極めて限定的なもの以外は成功例がなく，非常に困難な問題として知られている．その困難さは，自己の身体性と能動的働きかけを全く無視した枠組みに起因すると考えられる．ロボットが未知の物体に働きかけ，そのアフォーダンスを学習するロボットの研究としては，最近，一定方向に転がる物体 [15]，ネジ蓋の開け方 [16] についての成果が報告されている．また，身体像や身体スキーマ（動作との関連を含む）の形成・獲得 [17, 18] と融合したアプローチが今後重要となるだろう．

4.3 目的再現

目的再現は，今日のロボット研究からもっとも理解しやすい現象にみえる．一旦目的を与えられたら，自律的にその達成を試みることは，プランニングや強化学習によってモデル化できるだろう．この分野の発展は著しく，構成論的にも充分解決が可能である．ただし，目的の認識自体は，必ずしも自明でない．ここでの目的認識には，相手の心の中を読む必要はなく，直接的に目に見えて，しかも自分にとって価値のある状態を認識すればよい．しかし，そこには価値判断が必要であり，木の実を食べ散らかしている状態，などといった実世界中の乱雑な動的変化に対して，自律的価値判断を行うことは，構成論的には極めて困難な課題といえる．

4.4 機能統合

上述の諸機能が相互作用し統合されていくことで，より構造豊かで柔軟性に富む模倣機能が構成されていくと考えられる．例えば，反応促進と刺激強化の両方が，相互に影響を及ぼす双方向因果性を持つと，行為単位模倣が成立する．つまり，相手の動きと，その働きかける対象，それらの因果関係を把握した上で模倣することが可能となる．この過程で，反応促進で発生した運動に身体性に基づく構造化（後述）が働くことで，また，刺激強化に共同注意が働きかけることで，被模倣者との動作および対象物の共有が

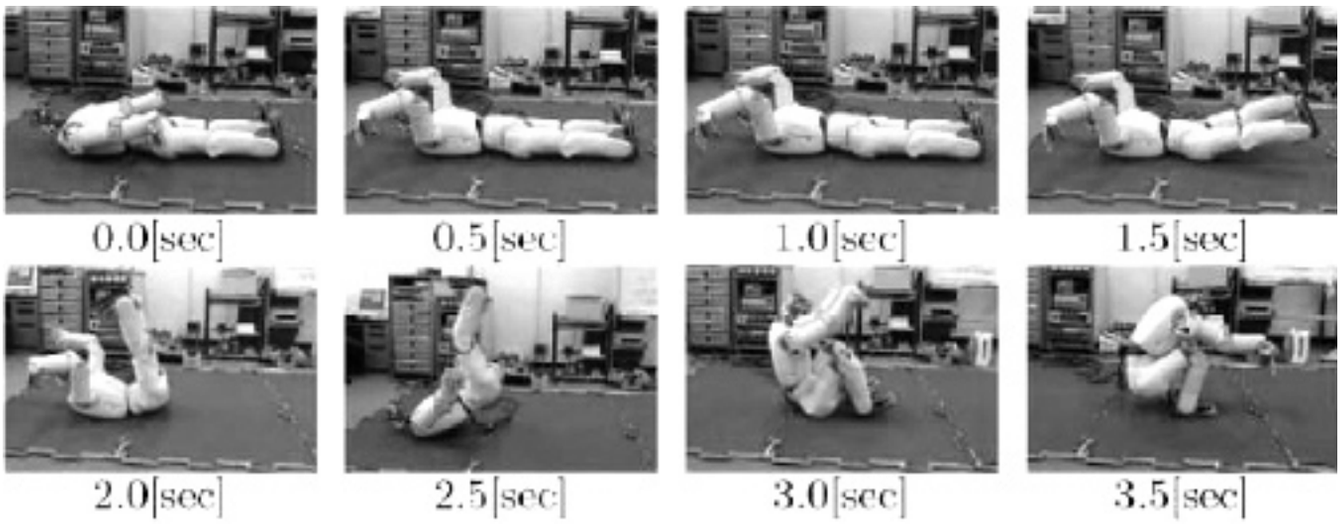


図３　ヒューマノイドの起き上がり動作

発生する．

また，個々の動作と，目的達成との間の因果性を確立することで，手段－目的関係全体の模倣[20]，すなわち，目的作業模倣（真の模倣）が可能となる．この過程で，被模倣者との価値体系の共有や情動的共鳴を基盤とした意図共有が起こることで，周囲の多数の事象の中で適切に目的を同定したり，直接観測不可能な隠れ事象を目的と認定したりすることができるようになるだろう．

５．身体性に基づく模倣の創発

上述の枠組みでは３つの擬似模倣機能は予め存在すると仮定したが，発達的構成論の立場からは，これら自体が発生する過程も検討する必要がある．

反応促進で促進される運動パタンや，刺激強化や目的再現で発生される行動はそもそもどのように獲得されたのか．これらは既に，一定のカテゴリ化がなされ，外乱等による変動のもとでも選択的，類型的反応を示す必要がある．

我々は，身体を駆動して運動を発生した時点で，既に身体と環境の性質により不変構造が発生すること，そのような構造を自律的に探索し，身体性に適合した複数の行動パタンを発生するメカニズム，そして，自己の運動指令と自己身体の視覚像の時空間パタンを学習することで反応促進を形成するメカニズムを構築した．

5.1　全身ダイナミック動作に内在する不変構造

我々は，全身ダイナミック起き上がり動作（図３）について，人間運動計測，力学解析，ヒューマノイドロボット実験等を用いて，その構造を分析した[21]．その結果，タスクの動力学構造の中に，成功軌道が収束する疎な分節点があることを明らかにした．この点は，タスクの成否を左右するが，その存在自体は変動に対して安定で，いわば「コツ」のような性質を持つ．同じタスクを人間が観察してタスクの成否を判定する実験においても，同じ点から最大の情報量を得ていることが明らかになった．この不変構造は，タスクの認識と遂行の両方に共通であり，模倣における共有情報となりうる．

このように，模倣における共有情報は，身体性に起因することが示唆される．

5.2　カオス結合系に基づく身体性適合行動探索

複数のカオス写像を平均場で結合すると，初期値鋭敏性により各要素がばらけようとする傾向と平均場による収束傾向とが競合し，それにより，多様な部分的協調パタンが発生することが知られている[22]．

ロボット身体の各自由度ごとに，センサ情報を対応するカオス写像に入力し，出力でモータを駆動するようにすると，各写像は，身体全体の動力学，つまり時間変化する非線形関数により結合される．この関数は，身体－環境相互作用の状態を時々刻々反映している．

そのもとで発生する部分的協調は，身体のいくつかの関節を協調させ，一つの身体運動を発生することが可能となる．また，この協調パタンは，身体性と環境状態に呼応して決まる．従って，身体の構造や，環境状態の変化に呼応して，身体運動は変化するはずである．実際に，筋骨格モ

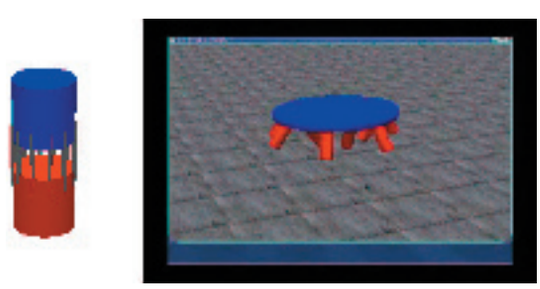


図４　筋骨格モデル（左）と多脚生物モデル（右）

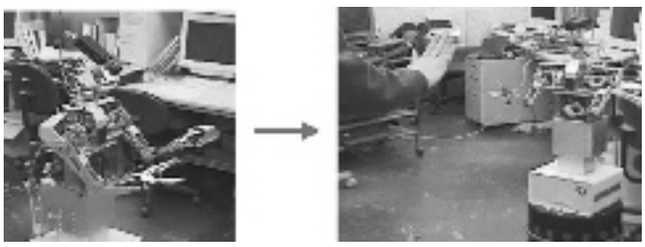


図５　自己学習による型真似の創発

デルと多脚生モデル（図４）について適用し，身体性に適合した運動パタンが即座に発生することを確認した[23]．

従来のロボットの行動創発や学習の研究とは全く異なり，組み込みプリミティブを一切用いず，評価関数も用いず，純粋に身体性に適合した運動のみを，瞬時に創発する機構であり，開放系としての模倣における運動発生機構に適した性質を有する．

5.3　新生児模倣の発生

Meltzoff らが発見した新生児模倣[24]に基づき，模倣能力の生得説が力を持った．しかし，我々は，出生以前の胎内学習を考えることで，出生直後に既に単純な模倣能力が成立していることが可能と主張した．

これを検証すべく，視覚と腕の付いたロボット（図５），脳型視覚処理による動き検出，腕運動の分散表現，非単調ニューロン[26]からなる学習システムを構築し実験した．視覚と運動の時系列パタンは，ニューラルネットの状態空間中での軌道アトラクタとして学習される．学習後に，詳細は異なるが，全体として類似の運動を見せられると，この軌道アトラクタへの引き込みが起こり，その結果，対応する運動指令が自然に出力されてしまう．結果的に，見真似をしているように見える．

これは，反応促進の基本モデルともいえる．

６．おわりに

模倣の創発・発達的構成論に向けて，認知心理学等の知見をもとに機能構成図を提案し，その諸要素とロボット研究との対応付けを解説した．また，それらの土台をなす身体性に基づく行動創発と模倣の発生についても研究動向を紹介した．

取り上げたロボット研究成果は未だ統合されるには距離があるが，既に必要な要素は概ね研究が進められているといえよう．これらが統合される時には，目指す open-ended な模倣機能の実現可能性が見えてくるであろう．

謝辞

本論文中の図１，図２と関連する分析・考察は，科学研究費学術創成研究「知能ロボットによる模倣の構成論的研究」（代表：佐藤知正）の一貫として行われた．また，本論文中の研究成果は，上記研究および科学研究費基盤研究，特定領域研究と，２１世紀型革新的先端ライフサイエンス技術開発プロジェクトの補助を受けた．

参考文献

1) Kuniyoshi, Y., Inaba, M. and Inoue, H.: Learning by watching: Extracting reusable task knowledge from visual observation of human performance, IEEE Trans. Robotics and Automation, 10(6), 799-822, (1994).
2) Ikeuchi, K. and Suehiro, T.: Toward an assembly plan from observation. I. Task recognition with polyhedral objects, IEEE Trans. Robotics and Automation, 10(3), 368-385, (1994).
3) Miyamoto, H., Schaal, S., Gandolfo, F., Gomi, H., Koike, Y., Osu, R., Nakano, E., Wada, Y. and Kawato, M.: A kendama learning robot based on bi-directional theory, Neural Networks, 9, 1281-1302, (1996).
4) 國吉康夫 : 模倣ロボットは人間的知能を獲得するか？ , 学術月報 , 53(9), 951-958, (2000).
5) 浅田稔 , 石黒浩 , 國吉康夫 : 認知ロボティクスの目指すもの , 日本ロボット学会誌 , 17(1), 2-6, (1999).
6) Kuniyoshi, Y.: The science of imitation --- towards physically and socially grounded intelligence ---, Technical Report TR-94001, RWC, (1994).
7) Galef, B.G.: Imitation in animals, In Zentall et al.(eds): Social Learning, Lawrence Erlbaum, 3-28, (1988).
8) Whiten, A. and Ham, R.: On the nature and evolution of imitation in the animal kingdom, In Slater, P.J.B. et al.(eds): Advances in the study of behavior, 239-283, Acad. Pr., (1992).
9) Brooks, R.A.: A Layered Intelligent Control System for a Mobile Robot, IEEE J. of Robotics and Automation, RA-2, (1986).
10) Cheng, G., Nagakubo, A. and Kuniyoshi, Y.: Continuous Humanoid Interaction: An Integrated Perspective - Gaining Adaptivity, Redundancy, Flexibility - In One, Robotics and Autonomous Systems, 37(2-3), 161-183, (2001).
11) 琴坂信哉 , Schaal, S.: 神経振動子を用いたロボットのリズミックな運動生成 , 日本ロボット学会誌 , 19(1), 116-123, (2001).
12) J. ピアジェ : 知能の心理学 , みすず書房 , (1952).
13) Suchman, L. A.: Plans and Situated Actions, Cambridge, (1987).
14) Tani, J., Ito, M. and Sugita, Y.: Self-Organization of Distributedly Represented Multiple Behavior Schemata in a Mirror System: Reviews of Robot Experiments Using

RNNPB, Neural Networks, 17(8-9), 1273-1289, (2004).
15) Metta, G. and Fitzpatrick, P.: Early Integration of Vision and Manipulation, Adaptive Behavior, 11(2), 109-128, (2003).
16) Fukano, R., Kuniyoshi, Y., Kobayashi, T., Otani, T. and Otsu, N.: Statistical Manipulation Learning of Unknown Objects by a Multi-Fingered Robot Hand, Proc. Int. Conf. on Humanoid Robotics, No.65, CD-ROM, (2004).
17) 鍋嶌厚太 , 國吉康夫 : 視触覚の時間的統合に基づくロボット身体像の適応的延長モデル , 第 22 回日本ロボット学会学術講演会講演予稿集 , CD-ROM, (2004).
18) Kuniyoshi, Y., Yorozu, Y., Ohmura, Y., Terada, K., Otani, T., Nagakubo, A. and Yamamoto, T.: From Humanoid Embodiment to Theory of Mind, In Iida, F., Pfeifer, R., Steels, L., and Kuniyoshi, Y. (Eds.): Embodied Artificial Intelligence, Lecture Notes in Artificial Intelligence, 3139, 202-218, Springer, (2004).
19) Oztop, E. and Arbib, M. A.: Schema design and implementation of the grasp-related mirror neuron, Biological Cybernetics, 87, 116-140, (2002).
20) Byrne R.W. and Russon, A.E: Learning by imitation: A hierarchical approach, Behavioral and Brain Sciences, 21, 667-721, (1998).
21) Kuniyoshi, Y., Ohmura, Y., Terada, K., Nagakubo, A., Eitoku, S. and Yamamoto, T.: Embodied Basis of Invariant Features in Execution and Perception of Whole Body Dynamic Actions --- Knacks and Focuses of Roll-and-Rise Motion, Robotics and Autonomous Systems, 48(4), 189-201, (2004).
22) Kaneko, K. and Tsuda, I.: Complex Systems: Chaos and Beyond, Springer, (2001).
23) Kuniyoshi, Y. and Suzuki, S.: Dynamic emergence and adaptation of behavior through embodiment as coupled chaotic field, In Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems, 2042-2049, (2004).
24) Meltzoff, A.N. and Moore, M.K.: Imitation of facial and manual gestures by human neonates, Science, 198, 75-78, (1977).
25) Kuniyoshi, Y., Yorozu, Y., Inaba, M. and Inoue, H.: From visuo-motor self learning to early imitation -- a neural architecture for humanoid learning, In Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 3132-3139, (2003).
26) Morita, M.: Memory and Learning of Sequential Patterns by Nonmonotone Neural Networks, Neural Networks, 9, 1477-1489, (1996).



國吉　康夫（くによし　やすお）
1985 年東京大学工学部物理工学科卒業，1991 年同大学院工学系研究科情報工学専攻博士課程修了，工学博士，同年通商産業省工業技術院電子技術総合研究所知能システム部研究員，1995 年同主任研究官，1996 年～ 1997 年米国マサチューセッツ工科大学人工知能研究所客員研究員，2000 年東京大学大学院工学系研究科情報工学専攻助教授（併任），2001 年同大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻助教授（専任），2004 年同大学院情報学環助教授，2005 年同教授．身体性に基づく認知の創発と発達，人間の行為の観察・理解システム，ヒューマノイドロボット，自律協調ロボットなどの研究に取り組んでいる．日本ロボット学会研究奨励賞，論文賞，佐藤記念知能ロボット研究奨励賞，IJCAI Outstanding Paper Award 等を受賞．IEEE, 日本ロボット学会，日本赤ちゃん学会各会員．