

2-3 ヒューマノイドロボットを使ったヒトコミュニケーションの研究

2-3 Using Humanoid Robots to Study Human Communication

Christopher G. Atkeson (株式会社 国際電気通信基礎技術研究所)

要旨

ATR ISD(先端情報科学研究部)のサイバーヒューマン・プロジェクトでは、人の行動やコミュニケーションをヒューマノイドロボットを使って研究している。現在テーマとしているのは「見真似による学習」である。これは、ある人が他者又は機械にスキルを示すことによってスキルを伝達する、というものである。「見真似による学習」を研究する際には、機械が人の動きを知覚する過程、動作や目標を翻訳する過程そして練習によって学習する過程が重要になる。

The ATR ISD CyberHuman Project uses humanoid robots to study human behavior and communication. A current focus is learning from demonstration, where a person communicates a skill by showing it to another person or machine. Machine perception of human movement, translating actions and goals, and learning from practice are important ingredients in our approach to learning from demonstration.

[キーワード]

ヒューマノイドロボット, 見真似による学習, 練習による学習, 機械視覚
Humanoid Robots, Learning from Demonstration, Learning from Practice, Machine Vision.

ATR ISDにおいて展開されるサイバーヒューマン・プロジェクトの目的は、人の行動に関する計算モデルを作成し、人と人、又は人と機械のコミュニケーションをもっと効果的にサポートすることである。本稿では、人の動きの知覚及び生成に関する我々の研究の一端を紹介する。理論及び行動アルゴリズムを検証するに当たり、我々はヒューマノイドロボットを使用している。ヒューマノイドロボットを研究ツールとするには、複雑な物理装置や複雑なタスクを扱わねばならない。こうした研究は人々の関心を喚起するものであるが、観察者は人の姿をした機械に対して人と同じレベルの能力を期待するため、我々は高い基準をクリアする必要がある。ヒューマノイドロボットは、人に直接奉仕するばかりでなく、人向けに作られた空間で動作すると

いう意味で、社会において多大な可能性を秘めている。将来的には、人がロボットとコミュニケーションすることで、遠隔作業や危険作業が実施できると考えられる。そのとき、ロボットが人の形をしているほうが、コミュニケーションや制御が行いやすい。今回、人間が行動をプログラムする方法をもとに、ヒューマノイドロボットの行動をこれまでより簡単にプログラムする方法を幾つか開発した。これはおそらく他の機械やコンピュータシステムにも適用できるはずである。

本稿では、現在のヒューマノイドロボットDB (www.erato.atr.co.jp/DB/)を用いた研究について紹介する。これは手足、関節つきの胴、そして頭を備えた人型の油圧ロボットである(図1)。このロボットをテストベッドとして使用するプロ

ジェクトには、例えば科学技術振興事業団が運営する創造科学技術推進事業 (ERATO) の一つ、「川人学習動態脳プロジェクト」がある。このロボットは、人の姿をしている点及びその機械的性能において世界でも類を見ない。多くの国際的研究者がATRを訪れて、このロボットを使った研究を行っている。

我々は既に幾つかの単純な行動についてデモを実施した。ボールをラケットの上でぼんぼんと弾ませる、人が踊るのを見て踊りを学ぶ[4]、聞いた音に同期してドラムをたたく(カラオケ・ドラミング)[5]、3個のボールをお手玉のように操る、人と一緒に太極拳を舞う[2]、様々な眼球運動を行う[6]などである。研究の対象はもっぱら学習(とくに見真似による学習)である。

我々が関心を持っているのは、人や機械が知覚及び運動スキルを得るために感覚情報からどのように学習するかという点である。そのため、ニューラルネットワーク、統計的学習、機械学習といったアルゴリズムを調査している。調査中の学習トピックは幾つかの分野に分類されるが、例えば見真似による学習や強化学習などもその一つである。

1 見真似による学習

ヒューマノイドロボットを使った研究の主要テーマは「見真似による学習」である。人型ロボットに対してある作業をプログラムするには、概して多大な時間がかかる。複雑なシステムに対するコミュニケーションや制御のコストを削減するにはどうすればよいのか。作業のやり方を友だちに教える場合、一つの方法は相手にやり方を示してみせることである。そうした複雑

な感覚入力在学习に役立つのは驚きである。学習者はデモにおいて何が重要で何が重要でないかをどのようにして知るのだろうか。そして実演者のやろうとしていることを、どのようにして推論するのだろうか。また、様々な状況をどのようにして法則化するのだろうか。ヒューマノイドロボットが人と同じように見真似から学習できるとすれば、複雑なシステムのプログラミングコストが大幅に削減できる。また、人の動作を見真似によって教えることができれば、人間が行う作業をヒューマノイドロボットにやってもらうことも期待できる。

見真似による学習を研究することは、脳内で起きている感覚運動制御や学習の情報処理を理解する重要な足がかりにもなると考えられる。人や多くの動物は、単に試行錯誤によってゼロから作業のやり方を学習するわけではない。他者が同様の作業を行っているのを見、それを自身の知識と組み合わせることによって、問題への取り組み方に関する知識を見いだすのである。計算論的神経科学の観点からすれば、見真似から学習するという行為は、外部座標系(ワールド座標系)で与えられる知覚した動作をそれとはまったく異なる内部基準系へとマッピングし、運動性ニューロンひいては筋肉の活性化を必要とする、極めて複雑な過程である。行動神経科学における近年の研究では、霊長類の前頭皮質にある特殊なニューロン(「ミラーニューロン」)が、知覚した運動と生成する運動とを媒介するらしいことが分かっている。すなわち、このニューロンは、霊長類にある特定の運動を見せたときばかりでなく、その動物自身がその運動を行ったときにも極めて選択的に興奮する。人に対する脳画像の研究もこの結果と矛盾しない。

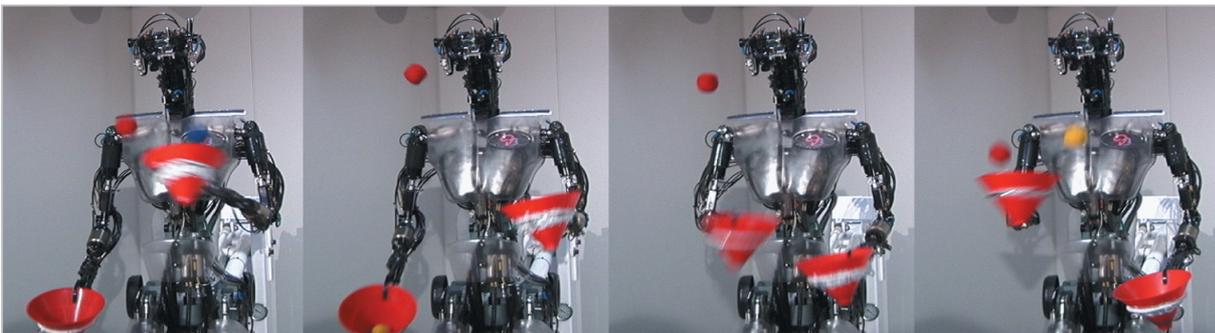


図1 じょうごを使って3個のボールをお手玉のように操るヒューマノイドロボット

「見真似による学習」の研究は、将来の自律ロボット及び医療研究に対して多大な可能性をもたらす。人が機械に教示することで機械とコミュニケーションできるようなれば、機械とのインタラクションはもっと自然なものになる。機械が人の動きを理解できれば、リハビリに個人トレーナーとして使用し、患者をみることに加え、運動スキルを高める特定の新しい運動を提供することも可能になる。最終的に、「見真似による学習」で得た生物学的運動制御に関する知見は、人工器官の性能を学習によって向上させられるように適応させた人工補装具の構築にも役立つ。

ここに有用な仮説が一つある。知覚した運動は、知覚した動作をしようとする競合的な有限個の基本動作へとマッピングされる、というものである。こうした過程は、競合学習の枠組みにおいて定式化することができる。それぞれの基本動作は知覚した運動の結果を予測し、勝者が決定されるまで、更に良い予測が得られるようパラメータを調整しようとする。人型ロボットを使った事前調査では、このアプローチが有効であることが示された。しかし多くの問題が将来の研究課題として残ったままである。小脳が学習基本動作にどのように関与しているかについて、我々は理論を構築しようと努力しているところである。

こうした問題を調査するため、踊りや各種のお手玉動作など幾つかの動作について見真似からの学習を実施した。その際、幾つかの課題を挙げた。第1の課題は、実演中に何が起きているかを知覚・理解できるということである。第2の課題は、ロボットが行動を実行できる何らかの形に翻訳する適切な方法を見つけることである。我々のロボットは人間の姿をしているヒューマノイドだが人間ではない。関節の動きには制限がある上、脆弱で、しかもその最高速度は人より遅い。関節の数が少ない部分が多く、動きに制限がある。第3の課題は、見真似では知覚することが難しい又は不可能なことが多々あるという点である。例えば筋肉の活性化や、デモでは発生しない失敗に対する反応などである。ロボットは「練習による学習」をとおして不足情報を補う必要がある。こうした課題は、実演者が

やろうとしている内容をロボットに知覚させることで大いに解決しやすくなる。

2 人の動きを知覚する

ロボットがある動作についてのデモンストレーションを理解するには、その時点で何が起きているかを知らなければならない。そこで我々は、人の動きを知覚することに焦点を当てた。その際、人が知覚アルゴリズムに情報を与える際にどのように動きを生成するかという知識を利用することにする。例えば人の動きに関する一つの理論は、筋力の変化速度が最小となるように動くというものである[3]。動きの発生に関するこの理論を用いれば、あいまいな感覚入力に対して最もふさわしい解釈を選ぶことができる[7]。

我々が最初に考えたことは、動きの取り込み技術を映画やビデオゲーム業界から借用することであった。しかし、絵を描くのではなく、ヒューマノイドロボットのような物理装置を実際に制御するには、そうした取り込み技術を大幅に改変することが必要であった。実験に使用したのは、デモの模範者が測定装置に取り付けて使用する、マーカーを追跡する光学システムと、特別なマーカーを用いない視覚ベースのシステムである。

知覚アルゴリズムにおける体系化原理は、測定された画像が復元情報をもとに再生又は予測できるということである。また、いわゆる「正規化」項を最小となるように付加することにより、動きの復元に対する信頼度が高まる。正規化項は、センサデータにおけるあいまいさの解決に役立つ。例えば正規化項を一つ入れると、推定される筋力の変化速度はあまり大きくならない。入力処理はある一回で採取した画像や測定値について行うのではなく、長時間にわたる入力を同時に処理する。そのため正規化演算子をずっと作用させることができ、オクルージョンやノイズが容易に処理できる。このように、知覚は測定されるデータを予測し、人の動きに関する我々の知見から外れた潜在的な動き(すなわち「運動プログラム」)を見つけようとする最適化過程となる。

人体やヒューマノイドロボットのように複雑なシステムを扱うには、適応的解像度を持つ表現を使用する必要があった。そこでBスプラインウェーブレットを使用した。ウェーブレットは係数が小さければ除去され、大きな予測誤差があるときに付加される。このほか観測データによく見られるまばらな表現を扱うために、大規模な最適化方法を開発した。この最適化方法では、高い信頼性を実現するために信頼領域を用いた二次最適化を使用する。また高いロバスト性を達成するために頑健な(ロバスト性の高い)統計の考え方を取り入れ、知覚した動作の解釈に影響を及ぼしてはならない背景情報やノイズを無視し、必要なデータのみを勘案する。高速ビデオカメラのフレームにこの知覚アルゴリズムを適用した例を図2に示す。

3 動きの翻訳とゴールの推論

「見真似による学習」のテストケースとして、「かちャーレー」という沖縄の踊りを使用した[4]。熟練した踊り手の動きを取り込んだ。上述の知覚方法を使用したところ、踊り手の関節の動きはロボットの能力を超えていることが分かった。そのため「踊り」を保存しながらロボットが見真似できるよう、見真似する内容を修正することが必要となった。我々は幾つかの案について検討した。

① 関節の軌跡を拡大縮小ないし並進させ、

ロボットの関節限界内に収める。四肢のデカルト位置は無視する。

② ロボットが認識しようとする視覚的特徴を、すべてが到達範囲内となるように調節する。これは、画像又は3次元座標での位置を並進ないし拡大縮小することによって行える。ただし、これを原則どおりに行う方策は定かでない上、関節運動に与える影響は考慮されない。

③ 関節の限界を特別な知覚アルゴリズムに組み込み、ロボットがデモを解釈・推論する際に可能な姿勢しか「見え」ないようにする。ただし、そのままでは関節空間での誤差やデカルト空間上での誤差が混入する。

④ パフォーマンスを何らかの方法でパラメータ表示し(例えばスプラインに対するノット点の位置)、関節限界を超えないようパラメータを調節する。オリジナルの動きの「スタイル」や「エッセンス」をいかによくとらえているか、人間が観察者として採点し、最適なパラメータセットを選択する。ただし、動きの採点に対する自動誤差関数が用意できないと、これは極めて時間のかかる作業となる。

我々は一つめの案を実施した。当然ながら代替的なアプローチも検討する必要がある。我々がこの作業で学んだことは、見真似による学習によって正しい認識を得るには何が重要で何が重要でないかを特定するアルゴリズムが必要だ



図2 人の動きを知覚する様子

上段は人の歩行を示し、下段は人間の知覚システムがどれだけその動きを捕らえているかを示す。知覚システムによって人体部分の存在が認識された部分にグラフィックモデルを重ねた

ということである。例えば我々は、見真似による学習によってボールをキャッチするという過程に取り組んでいる(図3)。この場合、学習した動きを例えばボールの軌跡といった新しい条件に適合させねばならない[4]。ボールのキャッチにおいて重要なことは、空間における適切な場所と時刻において手がボールを受け取ることであり、関節角度の軌跡は二次的なことである。

現在はデモンストレーションを見せることによって三つのボールをお手玉のように操る方法をヒューマノイドロボットに学習させるということを行っている。このケースでは、アクチュエータの力学と制限が非常に重要な役割を果たす。油圧アクチュエータによって関節速度は人の運搬動作より小さい値に制限されるため、ロボットがボールをうまく運ぶには観察した動きを大幅に修正する必要がある。我々は、幾つかの可能なお手玉パターンを手動で実装した。図1に示したのはそのうちの一つである。見真似による学習においては、運動軌跡よりも抽象的なものを伝達しなければならない。必要な抽象化を行うには、実演者がやろうとしていることを知覚できねばならない。我々は現在、それを行う代替的な方法を模索している。

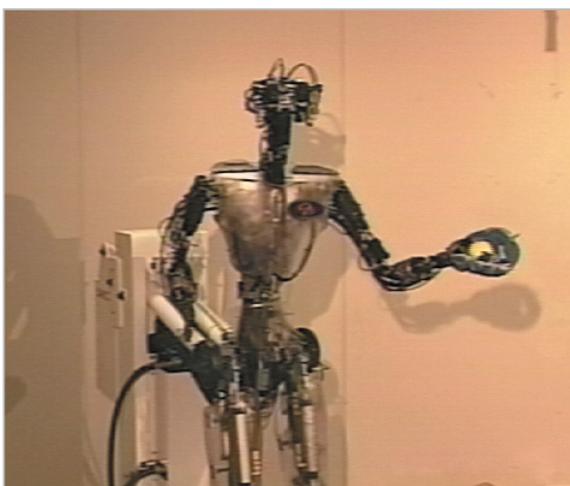


図3 ボールキャッチ・シーケンスの終了を示す動きのひとコマ

4 練習による学習

ロボットに模範デモを見せたら、次にその動作を練習させねばならない。その目的は、パフ

ォーマンスを向上させることと、デモでは見ることが難しい「量」を推定させることである。見真似から学ぶ我々のアプローチでは、ロボットは模範デモを見て報酬関数を学習し、その後は模範デモを見ることなく練習によって学習する[1]。学習した報酬関数は、観察したデモによく似たロボット動作を与える。これは極めて単純な報酬関数であり、動作の真のゴールをとらえることはできないが、それでも多くの動作について十分に機能する。ロボットはまた、デモ及び動作を行おうとする反復的な試行によって動作のモデルを学習する。報酬関数や動作モデルの知識により、ロボットは適切な制御メカニズムを計算する。

練習による学習を実施することで、次のことが判明した。

- ① 模範デモで見た動作を単に真似るだけでは不十分であることが多い。
- ② デモ模範者と学習ロボットの違い及びデモを見せる回数が少ないことから、模範者の方針(起こり得るあらゆる状況において模範者が行うこと)を学習できないことも多い。
- ③ しかし、学習したモデルと報酬関数を使ってタスクプランナが適切な方針を計算することは可能である。
- ④ モデルをベースとするこのプランニング過程は、高速学習を可能にする。
- ⑤ パラメトリックモデルも非パラメトリックモデルも共に学習及び使用できる。
- ⑥ モデルを用いたプランニングに加えて、非モデルベースであるタスクレベルの直接学習要素を組み入れることは、構造的なモデリング誤差や速度の遅いモデル学習を補う上で役に立つ。

5 将来の目標

サイバーヒューマン・プロジェクトが掲げる将来的な目標は、コミュニケーションのスタイル、より完全に近い行動、そして持続的に存在するシステムとのインタラクションである。例えばビデオゲームで遊ぶ者の多くは、その性格を含めて人のように振る舞うキャラクターを作り出したいと考える。我々が現在コミュニケー

トできるのは、ばらばらのスキルだけである。 ケートできることを我々は望んでいる。
しかしもっと完全に近い行動モデルがコミュニ

参考文献

- 1 C.G.Atkeson and S.Schaal, "How can a robot learn from watching a human?", In Proceedings of the Fourteenth International Conference on Machine Learning (ICML '97), pp.12-20, Morgan Kaufmann, San Francisco, CA, 1997.
- 2 J.G.Hale and F.E.Pollick, "Sticky hands' interation with an anthropomorphic robot", In 2000 Workshop on Interactive Robotics and Entertainment (WIRE-2000) , 2000.
- 3 M.Kawato, "Internal models for motor control and trajectory planning", Current Opinion in Neurobiology, 9: 718-727, 1999.
- 4 M.Riley, A.Ude, and C.G.Atkeson, "Methods for motion generation and interaction with a humanoid robot: Case studies of dancing and catching", In 2000 Workshop on Interactive Robotics and Entertainment (WIRE-2000), 2000.
- 5 S.Schaal, S.Kotosaka, and D.Sternad, "Nonlinear dynamical systems as movement primitives", In IEEE International Conference on Computational Intelligence in Robotics and Automation (CIRA '99), 1999.
- 6 T.Shibata and S.Schaal, "Fast learning of biomimetic oculomotor control with nonparametric regression networks", In IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA '00), 2000.
- 7 A.Ude, C.G.Atkeson, and M.Riley, "Planning of joint trajectories for humanoid robots using B-spline wavelets", In IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA '00), 2000.

Christopher G.Atkeson, Ph.D.
株式会社国際電気通信基礎技術研究所(ATR)
先端情報科学研究部 サイバーヒュー
マンプロジェクト 客員研究員
機械学習