

人間行動の認識と遂行のための実世界知能情報学

國吉 康夫

情報理工学系研究科 知能機械情報学専攻

概要

人間の振舞いを認識・理解し、それに呼応してタイミングよく適切に情報提供したり手助けする機能は、知能情報システムの一つの理想形であろう。その実現のためには、複雑・不確実な実世界中でも的確に、かつ適応的に行動の認識・遂行ができる手法の確立が必要である。そのための新たな原理と手法を求めて、本研究では、身体環境相互作用の情報構造解析、ヒューマノイド全身行動実験、身体像や行動概念の獲得、などのテーマに取り組んでいる。

1. 身体環境相互作用の情報構造解析

複雑、動的な実世界でロボストに目的を達成するためには、環境相互作用の中にある、外乱等により変動しない不変構造を捉え、それを目的に向けて「乗りこなす」タイプの新しい行動原理が必要である。このような不変構造は、身体性や個々の状況が若干異なっても安定と考えられ、異なる行為主体間でも共通に有効なはずである。従って、他者の行為を認識し、その要点を獲得し自己の作業知識とする場合や、他者の行為に介入して意味のある介助行動を行う場合にも有効と思われる。我々は、これらの不変構造について、行為制御の観点からは「コツ」、行為認識の観点からは「目の付け所」と呼んでいる。これは、複雑動的な実世界において、身体性を通して、自律行動と社会的相互作用を融合する一つの新たなアプローチを構成する。

今年度は、力学状態空間において、上記の考え方に基づく自動的な行動生成手法を構築することに取り組んだ。

1.1 力学構造に基く行動の自動生成

本研究では目標を状態空間中の局所的な領域として表し、さらに陽なモデルを持たずにメモリーベースで自身のダイナミクスを有限時間領

域到達性を鍵に構造化し運動を生成できるモデルを提案する。

1.2 ロボットの力学系

ロボットの運動方程式は多くの場合力学系としての取扱いが可能であるので、ここではロボットの運動を力学系での運動と考えることにする。多くのロボットの系はコントローラとして状態フィードバックを仮定すると次の自励系の力学系で表される。

$$\frac{dx}{dt} = f(x)$$

このとき力学系は相空間でのベクトル場としてあらわされる。

1.3 有限時間到達性

ある運動の表現方法は目標を用いて表されることが多い。本手法では目標をある程度大きさを持った領域として定義する。目標を領域として定義することによりある程度の軌道のずれがあつた場合でも目的を達成したとみなしたことにする。これを図で表すと図 1.1 のようになる。

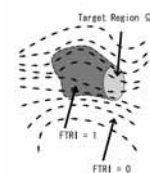


図 1.1 SFTR

有限時間到達性の計算は、力学系の微分方程式を積分することで得られるが、一般の微分方程式を積分することは難しい。そこで十分に与えられた時系列データから有限時間到達可能性を計算することを考える。これはあるコントローラのもとランダムな初期値から体を動かすことによって得られたデータを SVM により汎化させて得られる。

1.4 複数コントローラを考慮した階層型有限時間到達性

状態フィードバックコントローラを変えることにより、コントローラも含めた力学系は変化し、有限時間到達領域も変化する。したがってうまく複数のコントローラを用意し、その切替えを考えることで到達領域は非常に広くなり、ある任意の領域と別の任意の領域を遷移できる可能性がある。このような動作を実現する方法として複数コントローラを用いた階層型到達性 HFTR を定義する。これは複数のコントローラの切り替えを使った方策を発見できる。

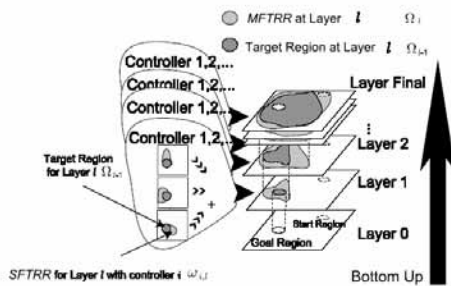


図 1.2 HFTR

1.5 実験

提案手法の有効性を確かめるために非線形性が支配的な2つのタスク、振子の振り上げと二脚歩行のタスクを行った。振子で得られた構造を図3に示すここでは2つの最大トルクを代えたコントローラを用いたがコントローラに応じた方策が自動的に獲得された

また二脚歩行に本手法を適応し、ある程度の外乱を加えても大域的なフィードバックが働くので安定して歩行を続けることを示した。

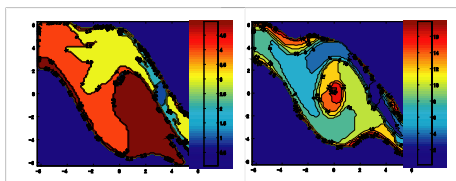


図 1.3 振子の振り上げの際の HFTR



図 1.4 二脚歩行

2. ヒューマノイド全身行動用触覚センサ

本研究では、ヒューマノイドの全身に実装可能で、特にダイナミックな全身運動時に生じる圧力分布を測定可能な触覚センサの構築を目指す。従来の触覚センサ研究は、ロボットの手のための触覚-滑り覚などの物体操作・スキルのためのモダリティを開発する目的のものが多くを占め、ヒューマノイドの全身に実装することを目指したものは限られる。

ヒューマノイドの全身に適用するための触覚センサとして、次の点を考慮に入れる必要がある。1) 全身に触点を分散して実装する。特に曲面への実装が可能でなければならない。2) 実装を容易とするために配線の取り回しの困難を解消する。3) 実装部位に応じて感度、ダイナミックレンジを変更することができる。4) 軽量・少ない消費電力。5) 実装・製作コストを最小限に抑える。6) 耐衝撃性。

しかし、従来の触覚センサは、曲面への実装が困難であったり、センサの性能が十分でなかったり、センサ数が極めて少なかったりした。すなわち、ヒューマノイドの全身に実装可能で、全身運動の制御の使用に耐える触覚センサは存在しない。本研究の目的は、上記の条件を満たす触覚センサを構築することである。

2.1 切り貼り触覚センサ

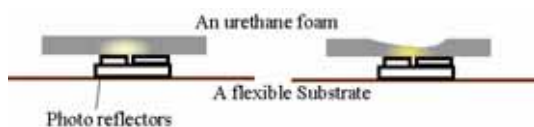
上記の条件を満たす触覚センサの構成法を以下で提案する。まず、配線のコストを減らすために、複数の触覚エレメントとシリアル通信機能をまとめてフレキシブル基板上に実現する。このようなモジュールを触覚センサシートと名づける。触覚センサシートを複数つなげネットワークを構成することで、ヒューマノイドの全身を覆い、触覚情報を取得する。フレキシブル基板を用いた触覚センサは多く存在するが、曲面に応じて異なる形状のフレキシブル基板を作成することはコストの増加をまねくし、大判の基板は曲面への実装に適さない。本研究では、このような問題点を解消する新しいフレキシブル基板の形状と、触覚センサの実装方法を提案する。提案するフレキシブル基板の形状は、帯状の基板から構成される形状である。複数の帯の一方の末端には触覚センサエレメントが実装され、もう一方の末端は別の帯状基板に接続さ

れ木構造をなす。このような形状とすることで、触覚センサエレメントが柔軟に移動することができ、フレキシブル基板を折り曲げることによって触覚センサエレメントの位置を調節することも可能となる。また、各帯を切り取っても機能が損なわれないように配線を取り回すことで、触覚センサエレメントを取り除くことも可能となる。このような「切り貼り実装」によって曲面へ柔軟に適応可能な触覚センサモジュールを構成できる。1種類の触覚センサシートを用いるだけで、広い曲面から小さな曲面にまで対応可能であり、必要に応じて触覚センサエレメントの密度を変更可能である。

2.2 触覚センサエレメント

シートの接続、帯の折り曲げ、切断を用いた「切り貼り実装」を有効に活用するためには、次の特性を持つ触覚センサエレメントが要求される。1) 小型である。2) 配線が少ない。3) 補間性を有する。

小型かつ配線の少ない触覚センサエレメントを用いることで、各帯状基板を細くすることができ、より曲面への適応性が増す。また、近接する触覚エレメント間に働く力に対しても反応し、補間により全身の触覚分布を獲得するためには、それぞれの触覚エレメントの感受する領域が十分広い必要がある。そこで、我々は、光ファイバと発泡ウレタンを用いたKinotex技術の原理を利用し、さらに実装面の改善を行った反射型フォトインタラプタと発泡ウレタンを用いた触覚センサエレメントを提案する。本センサの特徴は、1) 小型である。2) 省配線化が可能である。3) 発泡ウレタンを変更することで、感度やダイナミックレンジを変更可能である。4) 軽量である。5) 補間性を有する。6) 耐衝撃性が高い。といった非常にすぐれた性能を持つ。



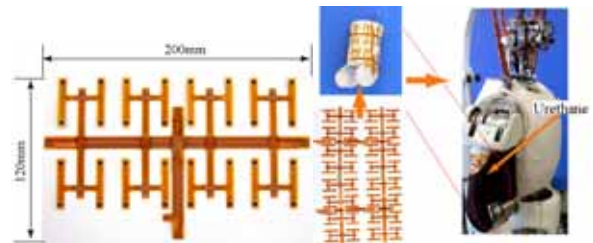
2.3 センサネットワークと触覚センサシート

複数の触覚センサエレメントとネットワーク機能をフレキシブル基板上に実現することで触覚センサシートを構成した。センサネットワークは2つの異なるネットワークを併用した。実装スペースが最小で済み、切り貼りにも向く

SMus というシリアルバスと、その上位で、体内のセンサシートを相互結合する、より高速なリング型の差動シリアルネットワーク (体内 LAN) である。単一 SMBus で扱うことのできる触覚センサエレメントの数は 1024 個で、全点のサンプリング時間は、51.2msec であり、視覚センサより少し遅い程度であり、かなり高速であることがわかる。また、最大 64 ネットワークを単一の体内 LAN で実現でき、触覚センサエレメント数は 6 万個以上となる。

2.4 結果

作成した触覚センサシートと「切り貼り実装」によってヒューマノイドの腕に適用した例を示す。また、最後に開発した触覚センサシートの仕様を示す。



サイズ	120mm×200mm
センサエレメント	32点
サンプリングレート	20000点/1sec
重量(ウレタン含まず)	1.7g(1枚)
ウレタン重量	200g/m ²
厚さ	74μm(折り曲げ部)
消費電流(定常)	10mA(3.3V)
消費電流(LED駆動)	最大200mA(3.3V)

3. 身体像と道具使用のモデル

把持した道具で対象に触れるとき、我々は道具を異物と意識せず、あたかもそれが自分の手であるかのように対象物との接触を感じ取ることができる。このような認知能力を道具身体化と呼ぶ。自動販売機の下に落ちた硬貨を道具で取り寄せるとき、見えない対象の視覚像を想像しながら実行できるのは、この能力を活用した結果であると言える。

しかし道具身体化の具体的なメカニズムは解明されていない。本研究の目的は、道具身体化メカニズムに構成論的な解を与え、道具使用における道具身体化能力の役割を明らかにすることである。

3.2 道具使用における道具身体化モデル

脳内には身体像/身体図式と呼ばれる、身体

各部の位置姿勢や占有領域の表象(身体表象)がある。身体の変化に適応し、感覚統合の場となる。異種感覚間のタイミングの同期によって身体の空間感覚が狂うという心理物理的な知見や、道具使用するサルに関する脳神経科学的な知見から、道具身体化を「異種感覚間の時間関係から環境中に身体とみなせる物体を見つけて道具とし、道具モデルを身体表象の形式に合わせ同定する機能」とモデル化した。

アーム末端のハンドに把持された稼動部のない剛体(道具)によって目標を操作する、基本的な道具使用の形態についてモデルを適用したものを以下に示す。ロボットはカメラ(視覚)、関節角センサ(体性感覚)、手に力覚センサ(触覚)を持つとする。

ロボットは視覚画像から切り出された物体を追跡し、物体の運動情報を得る。身体運動と相関が高い物体を随伴物体(道具)とし、その形状を保持する。並行して把持物体の慣性情報を身体運動と力覚から同定し、形状と合わせて身体表象に追加する(図 3.2)。

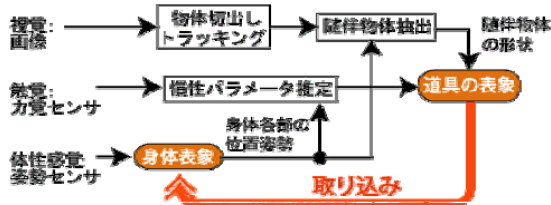


図 3.2: 道具身体化モデル

視覚が入力されない状況での手探りによる物体操作を可能にするために、触覚から視覚を推定する必要がある。目標に与えた力積(触覚)と目標の位置の変位(視覚)を連想記憶(統合器)に学習させる。また目標位置の推定と身体表象から自由空間を導くことができる。目標の位置推定と自由空間の算出により、目標を操作するような運動計画/生成が可能となる(図 3.3)。

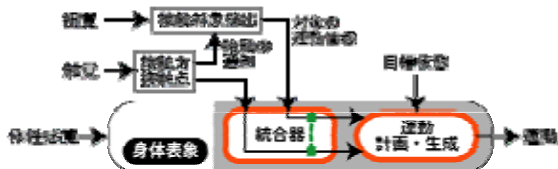


図 3.3: 視触覚統合による隠れに強い物体操作モデル

道具を含んだ身体表象は接触力/接触点の算出結果を変換する。道具の慣性情報と形状を

もとに、ハンドの触覚から道具上の接触力/接触点を算出し、出力を上書きする。これにより視触覚統合器、運動計画/生成器は変更無しに利用でき、道具による手探りも可能となる。

3.3 実験

道具を持たされたロボットは、まず素振りをして、視覚および力覚による同定を行い、次に、手探りタスクを行った。図 3.4 上が枝形道具、図 3.4 下が雲形道具を使ったときの連続写真である。灰色の長方形が遮蔽された領域を示す。どちらも道具と目標物の接触を検知し、推定した接触力/接触点を視触覚統合器に入力、目標物に可能な移動範囲を得た。目標物の推定位置に対し取り寄せ動作を行うことで、タスクが達成された。

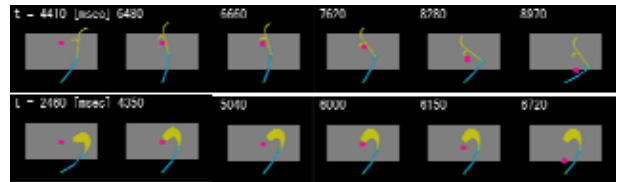


図 3.4: 遮蔽された物体を道具を使って取り寄せるロボット

3.4 結論

生理学的知見とロボティクスの成果を組み合わせ、道具身体化モデルと対応する道具使用モデルを構築した。構築したモデルによって道具使用タスクが実現できた。これは道具使用において道具身体化能力が基礎となっていることの構成論的実証である。

成果発表

- [1]Koji Terada and Yasuo Kuniyoshi, Automatic Motion Generation Exploiting the Global Structure of Non-Linear Dynamics Based on Finite Time Reachability, Robotics and Autonomous Systems, 2006 (in press).
- [2]Cota Nabeshima, Max Lungarella and Yasuo Kuniyoshi: "Timing-Based Model of Body Schema adaptation and its Role in Perception and Tool Use: A Robot Case Study", The 4th IEEE International Conference on Development and Learning (ICDL-05), pp.7-12, Osaka, Japan, 2005.
- [3] 大村吉幸、瀬田尚子、長久保晶彦、國吉康夫: 切り貼り触覚センサシステム、第 23 回日本ロボット学会学術講演会、CD-ROM、2005.

計: 査読付論文 8 件 + 掲載予定 3 件, 口頭発表 5 件, 図書 (共著) 1 件, 特許出願 1 件, 報道 1 件, 招待講演 3 件.