

知能の力学的情報処理の研究

中村仁彦 山根 克 大武美保子 杉原知道

情報理工学系研究科知能機械情報学専攻

概要

身体の力学系と脳神経系が多重階層的、連続的に構造化された複雑系が示す非線形力学系の挙動の中に、人の知能や心の情報処理の本質があると考えられるようになってきた。本研究では、機械知能を力学的情報処理によって実現するための、モデル仮説を構築することを目的とする。ここでいう機械知能とはシンボルの操作及びそこから発展する言語的な世界理解や自己内省、それらを用いた他者とのコミュニケーションなどの特徴をもつ認知機能を、機械が自分の体のセンサリ・モータ・マップを多重階層的に発達させることにより獲得するための基本原理である。この基本原理を構成論的に明らかにし、ヒューマノイドロボットの実験と詳細人間モデルを用いたシミュレーションによって実証することを目標とする。本研究の独創的な点は、簡略化された人間モデルと考えられるヒューマノイド規模の複雑さの機械に対して、連続的な力学現象を情報処理機構とするシステムを設計し、構成論的に知能発現のメカニズムの原理を探求することにある。本研究は情報学的に重要であるのみならず、神経科学と認知科学の間のミッシングリンクをつなぐ原理を探るものであり、学術的にも大きな意義がある。

1 脳型情報処理

1.1 シンボルの抽象化と力学的情報処理

物理情報を抽象化することによるシンボルの獲得、また抽象的なシンボルからの運動の生成を階層的な力学系を用いて行うことが考えられる。具

体的には、20自由度のヒューマノイドロボットの全身運動を扱い、学習においては、運動を扱う層でパターン時系列の分節化、各運動における関節間の相関の学習、相関によって低次元な空間に拘束された力学系の学習を行い、シンボルを扱う層で運動の遷移の系列である記号列の学習を行うことを目的としている。また、生成においては、抽象的なシンボルが獲得されたときに、シンボルを扱う層と運動を扱う層との相互作用によって多義的に生成されるシンボルと運動との対応を通して、ロボットの運動を生成することを目指している。本研究では、物理情報としてロボットの全身動作

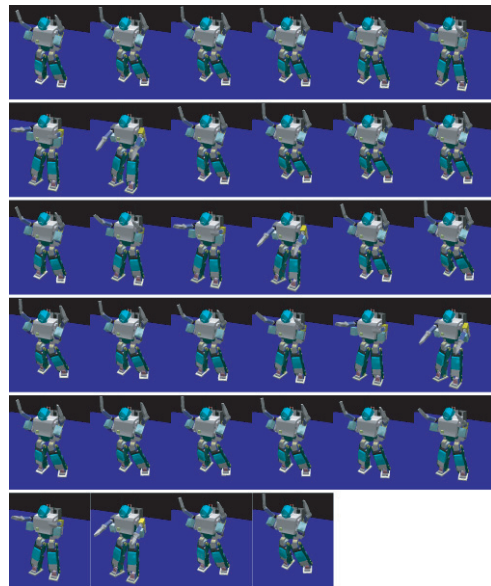


図 1: 獲得された運動

を扱い、運動を表現する層、これと直接の相互作用をせず抽象化された高次のシンボルを表現する層、この2つをつなぐ中間層の3層からなる階層

的な力学系を用いて，ロボットの運動の学習と生成を行う．学習の基本的な枠組みは，運動層での競合学習による分節化，各運動の関節間の相関を表わす低次元化行列の主成分分析による獲得，低次元空間での多項式で表現される力学系の学習と，シンボル層での記号列のエルマンネットワークによる学習である．また，抽象化され物理情報との多義的な対応をもつようなシンボルを獲得できたとしたときの状況を作成し，身体の文脈に応じてシンボルと運動の対応を生成するシミュレーションを行った．

1.2 ミメシスモデル：運動パターンの中からの特徴の抽出

認知心理学の分野において，ミメシス理論が近年注目を集めている．ミメシス理論とは，ヒトは音声，言語によるコミュニケーション以前に身振りによるコミュニケーションを行っており，他者の行動の見まねを通じた行動認識，行動生成の相互的な循環により，シンボル操作等の能力を獲得したとする理論である．

単に他者の行動を自身の座標系に変換するだけでなく，他人の行動をシンボルとして認識し，さらにシンボルから自身の行動を生成するプロセスに高度な知能の根源が存在するという考えに基づき，われわれは運動パターンの認識，生成の双方向の仕組みを，隠れマルコフモデル (HMM) を用いた確率的数理モデルを提案してきた．さらに，ある運動を抽象化した HMM のパラメータを原始シンボルと位置づけ，原始シンボル間の関係性を記述する手法として，幾何学的シンボル操作に着目した原始シンボル空間の構築を行ってきた．原始シンボル空間は，これまで 10 程度の運動パターンに各々対応した HMM を空間に配置したのみであり，原始シンボル間の関係性等の検討が不十分であった．個々の原始シンボルは全身の各関節角の時系列データを抽象化した HMM パラメータであり，各関節角を等価として扱い，身体性等は全く考慮されていなかった．すなわち，肩関節による腕の動きと肘関節による腕の動きも腕全体とし

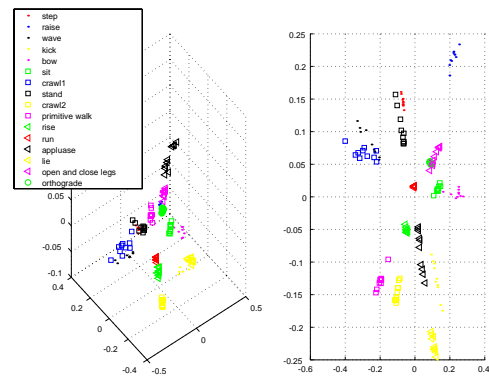


図 2: 獲得された運動

での運動パターンの非類似度は，同じものとして扱われていた．各関節角を等価として処理することは人間の感覚と合致するとは考えにくく，さらに，関節空間でなくデカルト空間に基づく運動パターンの表記形態が，より人間の行動認識，生成過程に適合すると考えられる．各運動パターンにおいて必ずしも全身の動きを観察して運動認識するわけではなく，その運動パターンの特徴を支配的に占めている身体部位があり，その部位に着目することにより運動認識を行っていると考えられる．

本研究では，身体性に基づいた多様な運動パターンに対応した原始シンボル空間を提案し，原始シンボル空間から，運動パターンを特徴づける身体部位の抽出について議論した．

2 筋肉骨格神経モデルを用いた体性感覚情報処理

スポーツの世界では，小山による初動負荷理論のような画期的な理論による大幅な記録更新がよく見られる．このような画期的な理論はスポーツの分野では勿論のこと，急激に高齢化が進みリハビリテーション医療の重要性が増す現在においては必要不可欠なものである．

スポーツ科学や医療の分野において筋骨格系のモデルを用いた運動解析が行われてきた．これらの研究における主たる目的は，筋・腱張力等の情報を運動フォームの改善やリハビリ支援に活用す

ることであり，特定の部位だけを扱った人体モデルや簡略化されたモデル等を用いている．スポーツ科学における理論の開発や高齢社会におけるリハビリテーション医療のように，全身のバランスと共に詳細な筋の伸縮も関わる場合は，従来のモデルは十分とは言えない．本研究では，スポー

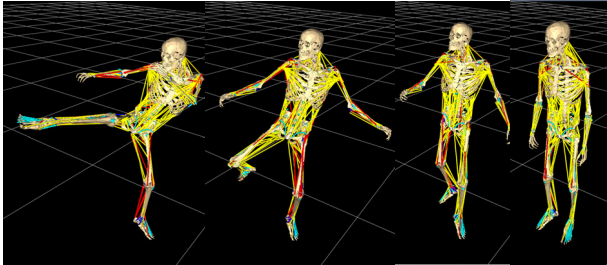


図 3: 逆運動学計算：運動から筋力を計算

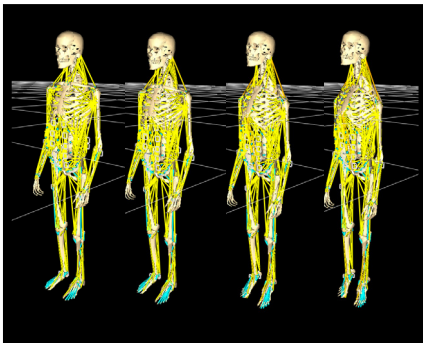


図 4: 順運動学計算：筋力から運動を計算

ツ科学やリハビリテーション医療に有用な詳細な筋力計算を可能にするために，詳細な筋骨格モデルを用いてモーションキャプチャデータから逆動力学による筋力計算を行う過程の改善について述べている．関節トルクから筋・腱・靭帯張力への変換の際の誤差について，人体の受動的な力をモデル化し，モーションキャプチャデータからそのパラメータを推定することで解消する．

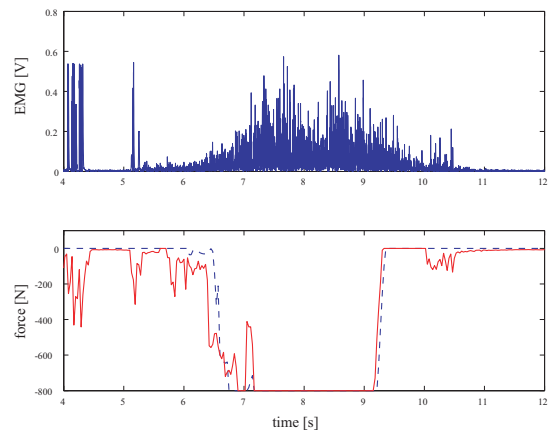


図 5: EMG を用いて拮抗筋の筋力を決定する

3 ヒューマノイドロボット

3.1 加速度補正によるヒューマノイドロボットの高精度 ZMP 操作

脚口ロボットは慣性系に直結した駆動源を持たず，環境との相互作用を通して関節力を反力に変換することで初めて運動できる．従って反力をいかに操作するかが制御の要となる．このとき，環境との接触状態に応じて課せられる力学的制約を比較的簡単に考慮するため，床面上の圧力中心である ZMP および垂直反力と鉛直軸回りモーメントの組で反力を置換することが有効である．特に ZMP は水平方向運動との関係が深く，脚口ロボットの移動制御において重視されている．

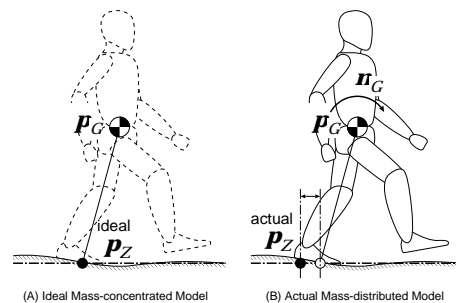


図 6: ZMP への外乱力の影響と補正制御

ZMP の操作に関してはこれまでに，足首トルクを用いる方法や体幹加速を用いる方法などが提案されているが，大自由度を有するヒューマノイド

ロボットにおいては更に、系全体の振舞いを破綻させないように、全身運動と ZMP の挙動とを見通しよく関連付けることが望ましい。ZMP を制御対象と捉える方法もあるが、本来 ZMP は力と同一の次元を有するため躍度やトルク変化率の操作を要求し、実用上困難である。

筆者らは、重心ヤコビアンを用いた全身協調 ZMP 操作法を提案している。これは質量集中モデルに基づくため、必ずしも良好な近似とはなっていない。大きな加速を伴う即応的な運動になると、ZMP に関する制約はより厳しくなり、精密な操作が求められる。本稿では、重心回りモーメントの影響をオンラインで評価し、重心加速度を補正することによって、より高い ZMP 操作精度を簡単に実現する方法を提案した。

3.2 二重球面肩・股関節を持つヒューマノイドロボット

ヒューマノイドロボットの作業・運動性能を向上させるために関節数を増やすことは 1 つの解決となるが、重量、体積の拡大につながり制御が複雑化するという問題も生じる。ヒューマノイドロボットのように小型で軽量の機構を要求されるシステムにおいて、同じ自由度の中でより有効な行動を生み出す機構の設計論を与えることは今後のロボット開発において有益である。

またロボットの駆動系に目を向けると、減速比の大きなギアと高ゲインなサーボを併用した関節制御ではバックドライバビリティが低く、この結果ロボットの身体は環境から加えられる外力を関節に働く力として感じる事が困難である。これに対し、人間は歩行やダンスといった運動において重力や環境から受ける外力を積極的に利用している。そこでは環境と身体との力学的な相互作用が強く現れ、その相互作用の結果として運動パターンが現れている。このため人間は重力に従った効率のよい運動を行ったり、環境の変化に対して鋭敏に反応することができる。

本研究では関節数を変えるのではなく、配置や構成の工夫によって運動機能を拡大する機構を用

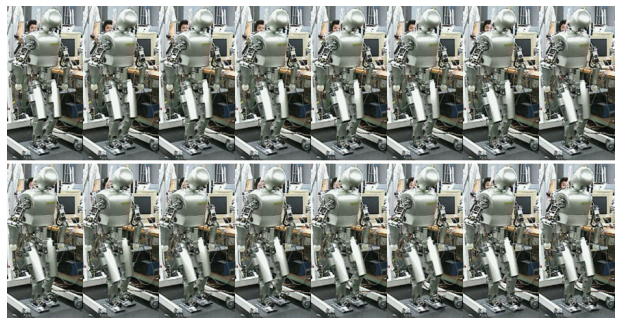


図 7: バックラッシュクラッチの切り替えによる歩行制御: UT- θ

いた全身型ヒューマノイドロボットを開発し、その機構を活かした運動制御を行うことを目的としている。開発中のヒューマノイドロボットは腰関節の機能を併せ持ち、作業領域を広げる機構として二重球面ジョイントを用いた肩関節・股関節機構を持ち、重力や環境からの力に従った効率の良い動きを実現する機構として膝関節にバックラッシュクラッチを用いた機構を有している。

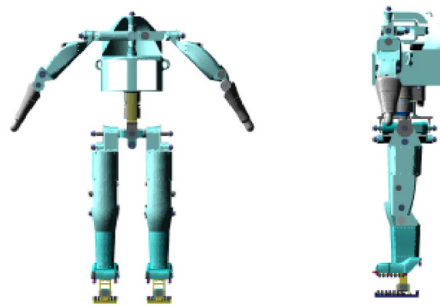


図 8: 二重球面構造を肩・股関節にもつ UT- $\theta 2$

謝辞

本報告は平成 16 年度における 科学研究費補助金 基盤研究 (S) 「知能の力学的情報処理モデルの展開」(平成 15-19 年度) の成果をまとめたものである。本研究にかかわった学生諸君、特に高野涉、門根秀樹、村井昭彦、山本裕介、岩城洋平、ならびに Fabio Zonfrilli, University of Roma, La Sapienza, と Dirl Wollherr, Technical University of Munich の諸氏に感謝する。