

## ヒューマンインフォマティクスの研究

國吉康夫 中村仁彦 大津展之 土肥健純 Rolf Pfeifer 波多伸彦 山根克

大武美穂子 杉原知道 深野亮

情報理工学系研究科知能機械情報学専攻

### 1 はじめに

実世界情報システムの中心課題である、人間との知的インタラクションを実現するためには、人間自身の知的インタラクションの能力を解明しモデル化し、これに基づき新たな情報処理手法を構築することが必要である。ヒューマンインフォマティクス研究グループでは、人間の知覚・行動・認知機能の計測・解析に基づくモデル化、実世界情報処理の数理的基礎、それらに基づく新たな認識・行動、コミュニケーション、協調・介助機能の基本手法の構築を目的として研究を展開している。今年度は、人間行動計測に基づく体性感覚推定のための筋骨格系力学計算、ヒューマノイドロボットの全身行動制御法、全身行動認識の人間の着目点の解明、人間行動認識のための、連続運動データからの行動シンボル獲得手法、人間の振る舞い認識のための数理的基盤、ロボットの身体像獲得モデル、胎児のイメージング、などの研究成果を報告する。これらにより、実世界情報システムにおけるヒューマンインフォマティクス要素技術・要素環境が整った。また、国際研究協力の成果についても報告する。

### 2 人間行動計測に基づく内部状態推定

#### 2.1 運動計測に基づく筋力計算の詳細化

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。

しかし、本研究が目指す、任意の全身行動中の人体内部状態推定のためには、全身のバランスと共に詳細な筋の伸縮も関わるため、従来のモデルは十分とは言えない。

本研究ではまず、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力学による筋力計算

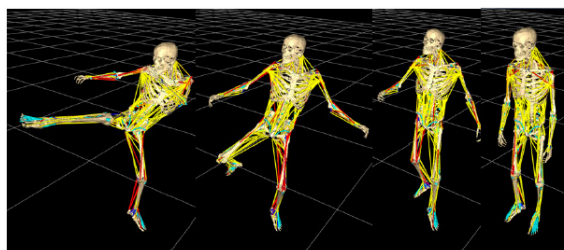


図 1. 逆運動学計算：運動から筋力を計算

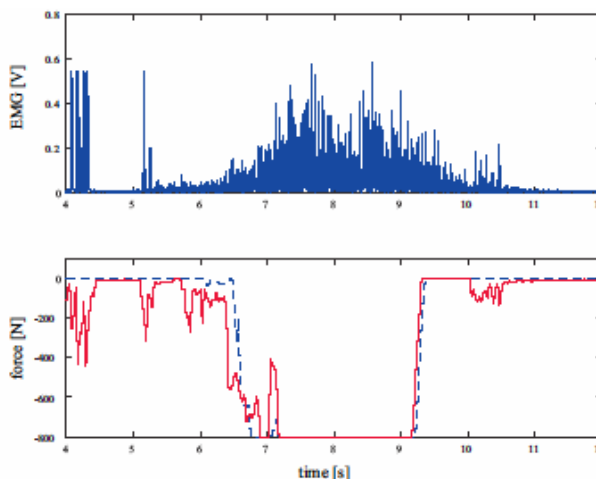


図 2. EMG を用いて拮抗筋の筋力を決定

を行う過程を改善した。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し解消する。

#### 2.2 運動計測に基づく神経情報推定

運動計測に基づく神経系シミュレーション技術は、実世界情報システムが人の振る舞いやしぐさを観察し、人がどう感じ何をしようとしているかを推定して、それに合った応答をするための基盤となりうる。

本年度は、人の内部状態、特に体性感覚を推定するために、神経系モデルを構築し、運動計測に基づいて神経系シミュレーションを実施するという新しい研究の方法を発見し、(1) 運動情報の神経情報への写像手法、(2) 神経情報の

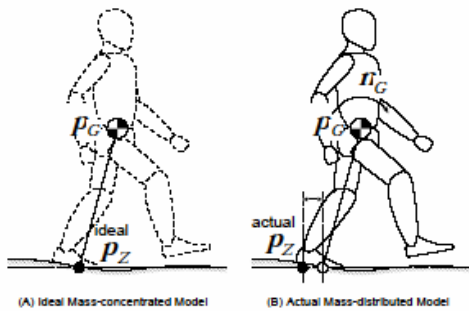


図3. ZMP への外乱力の影響と補正制御

解析に基づく運動学習支援手法, (3) 脊髄神経系シミュレーション手法, を開発した.

#### 運動情報の神経情報への写像手法

身体運動が神経系からどのように観測されるかを知るため, 感覚と運動をつなぐ脊髄に注目し, 解剖学的知見に基づいて幾何学的構造をモデル化した. このモデルを用い, 運動時に脊髄を流れる神経情報を, 脊髄を輪切りにした画像へ, あるいは時空間パターンへと写像する手法を提案した.

#### 神経情報解析に基づく運動学習支援

実世界情報システムが人を見守り, 人に働きかける具体的なアプリケーションとして運動学習支援システムを提案し, その基盤技術を開発した. 人間の神経系の構造を利用し, 全身運動を表現する大局的情報と局所的情報の階層処理を構成した. 具体的には神経活動パタンの時空間相関による運動位相差の検出, 脊髄情報レベルでの協調動作パターン検出, 神経ごとの時間的ピークの検出などである. これらにより, 人間の運動を神経情報の観点から評価する手法を提案した. これは運動学習支援に不可欠な機能である.

#### 全身動作への応用

袈裟斬りや中段蹴り動作に対して以上の解析を行い, 繰り返し学習の過程において, 神経毎に類似のパターンが試行により異なるタイミングで発生することや, 全身運動時の神経情報は脊髄毎に極めて縮約しており, 協調の度合いが大きく, 同期していることを明らかにした.

### 3 ヒューマノイド全身行動制御と認識

ヒューマノイドロボットの全身行動は, 地面に固定されない多自由度の身体をダイナミックに動かす点で, 従来のロボット制御技術では, 実世界中で真に有用な行動を実現することが困難である. 新たな原理や手法が必要とされる.

#### 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, 脚ロボットの移動制御において重視されている.

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かった. 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. 今年度は, 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 ダイナミック起き上がり行動

複雑, 動的な実世界でロボストに目的を達成す

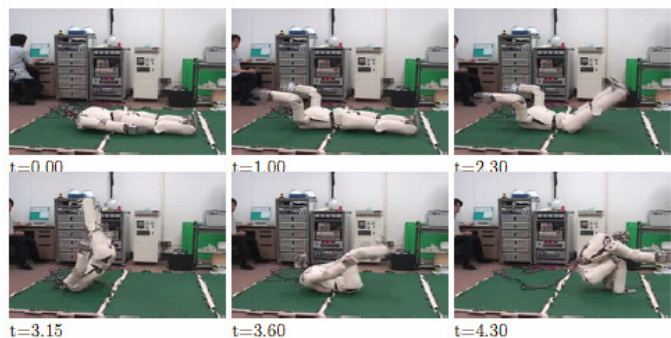


図4. ダイナミック起き上がり動作実験

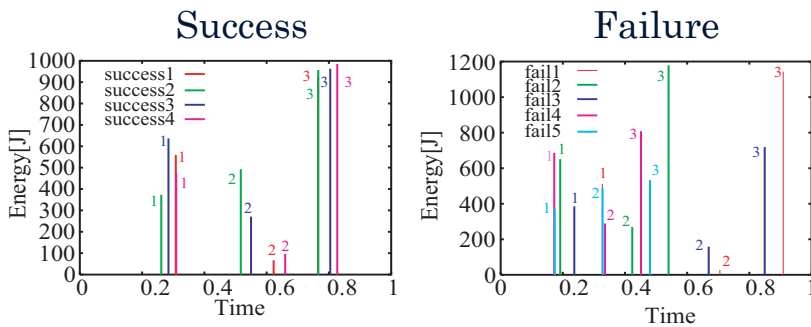


図 5. エネルギー投入タイミングがタスクの成否を分ける

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。これらの研究のため、既に、前年度までに、全身ダイナミック動作が可能な等身大ヒューマノイドロボット・システムを構築し、世界で初めてダイナミック起き上がり行動実験に成功した(図4)。

この動作は、慣性など強い動力学効果と環境(床)との接触運動など強い相互作用を含み、従来のロボットでは困難なタスクであった。人間のモーションキャプチャを解析すると、一様でなく疎らに精密な制御を行い、それ以外は変動を許容していることが分かった。力学モデルの解析を行うと、最も成功条件の厳しいポイントが、人間の制御ポイントと一致することが分かった。これらに基づき実機の動作実験に成功した。

多数回の実機試行の成功例と失敗例について、これらを明確に弁別する指標を探したところ、全関節角軌道の総誤差や全エネルギー量などの時間非依存の指標では弁別されず、全関節の投入エネルギーの時間的重心、という指標、すなわち、エネルギー投入タイミングが、明確に成功・失敗を弁別することが分かった(図5)。このことは、「コツ」に相当する時点でタイミングよく瞬発力を出すことがタスク成功の決め手であることを示す。

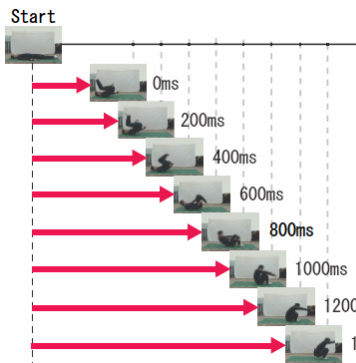


図 6. 人間の起き上がり動作の時間限定提示

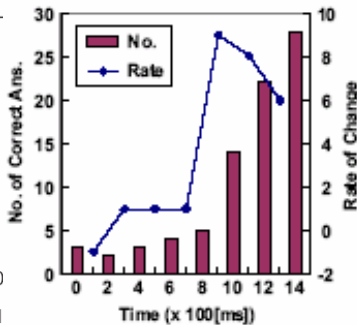


図 7. 動作判定正答率(棒グラフ)とその変化率(折線)

さらに、人間の被験者が人間による実演を観察する際に、どのポイントから多くの情報抽出を行っているかを実験した。実演動画を様々な時間範囲に限定して被験者に見せ(図6),そのトライアルが成功したか失敗したかを問う(動画は途中で終了してしまうので推量させる)実験で、被験者は、力学的解析が示す成功条件の厳しいポイントと同じ時点付近で、多くの情報を得ていることが明らかになった(図7)。

#### 4. 人間行動認識手法

行動知覚の情報は時空間的に分布するパターン情報であり、曖昧さや不確かさ、また時間的な動きや変容を特徴とする。これらをロバストに識別し、あるいは意味を抽出するために、統計的枠組みと、力学的情報処理の枠組みからアプローチしている。

##### 4.1 統計的認識手法の展開

静止画像認識のための汎用的な特徴抽出法として開発した高次局所自己相関(HLAC)を、時間を扱えるように拡張(立体HLAC)し、実世界情報、特に動画像の効率の良い認識が可能となる知見を得た。

具体的には、5人の4行動(左右方向の歩く・走る)に対し非常に高い認識率(99.8%)で個人の同定(gait)と行動の同定が得られた。さらに国際コンテストの標準データ(71名のgait認識)に対して適用し、トップの認識率を達成した。

また、2D画像のHLAC特徴抽出を動画像に適用すると特徴の時系列データが得られるが、それらを自己回帰分析と組み合わせることで、より複雑なジェスチャなど、人間の動作の認識が可能となる。具体的には、HMM識別を用いて、48名の17種のジェスチャデータに対して高い認識率(95.7%)が得られている。

##### 異常行動検出への応用

監視カメラなどビデオサーベイランスのニーズが高いが、そこで省力化のキーとなる異常行動の検出機能に対して、立体HLAC特徴の加法性と部分空間法をうまく組み合わせた効率の良い方法を開発した。カメラを通して豊富に得られる通常動作の固有空間を教師無しで統計的に学習し(PCA)、そこからの逸脱(通常動作の部

分空間への距離)として異常(通常ではない)動作が容易に検出できることを示した。

#### 移動体追跡への応用

カラー画像に対して拡張した HLAC 特徴と k-NN 識別を用いて、認識ベースの追跡手法を開発した。従来の画像ベースの照合(相関)に比べて、移動体の交差や隠蔽に対して頑健な手法となっていることを確認した。

#### 顔認識への応用

表情など、場所によって重要度が異なる認識課題に対応するため、HLAC特徴を場所に応じて重み付けし、それらの重みを学習適応的に求める方式を開発した。数理的には、これは従来の Eigen-Face や Fisher-Face 手法を特別の場合として一般化した手法となっていて、より認識率が向上することを確認した[4]。

#### 不変特徴抽出理論の応用

パターン認識における特徴抽出の幾何学的な側面として、対象の受ける平行移動や拡大縮小などの見かけ上の変換に寄らない不変量として形の特徴を求める理論を既に構築しているが、これを実応用の課題に適用した。

#### 移動体の検出と認識

車などの移動体の運動は 2D 画像へ射影され幾何学的な変換を受けるが、それらに対する不変特徴を求め、認識実験で有用性を確認した。逆にカメラが運動する場合にも同様な理論が使えて、一様なカメラの運動による画像の変換とは独立な運動として移動物体を検出できる。

#### 照明変化に頑健な物体認識

照明の物理(光学)的な拘束条件から物体画像の受ける変換を求め、不変特徴について考察した。特に位置不変な HLAC 特徴空間では、照明の変化は部分空間内の多様体を成すことを示し、部分空間法によって照明に不変な(頑健な)認識が可能となることを実験により確認した。

## 4.2 力学的情報処理による行動シンボル獲得

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。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。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。

本研究では、物理情報としてロボットの全身動作を扱い、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。

## 5. 胎児診断画像撮像法の研究

胎児外科の代表的対象疾患である、水頭症、先天性横隔膜ヘルニア、仙尾部奇形腫、脊髄髄膜瘤を正確に診断し、内視鏡手術で治療するための、高度胎児診断画像と手術ロボットの開発を研究のメインテーマとした。具体的には、高度胎児診断の開発については胎児 MRI 流れイメージングによる血流イメージングと脳内髄液(CSF)フローイメージングの実現を目指し、非心電同期方式と、心電同期方式による MRI 流れイメージングの撮像法の開発を行った。心電同期方式においては、MRI 内で使用可能な胎児心電モニタリング装置の開発を行った。

胎児の画像計測は、学習発達モデルの研究にも重要な情報を提供する可能性がある。



## 6. 国際共同研究

先端研究成果の教育への還流，対外発信，国際貢献と国際交流育成は，当 COE の重要なミッションの一部である．実世界情報システムプロジェクトでは，実世界知能の新たな構成原理である身体性認知科学の研究・教育のために，同テーマにおける世界的権威である，チューリッヒ大学教授 Rolf Pfeifer 氏を COE 研究員として 4 ヶ月間招聘し，これらの活動を推進した．

Pfeifer 教授は，昨年度，COE 特任教授として国際多点遠隔講義などの国際発信活動に尽力い

構築を進めた．これにより，実世界情報システムにおけるヒューマンインフォマティクス要素技術・要素環境が整備された．また，昨年度まで展開した国際研究協力をさらに推進した．

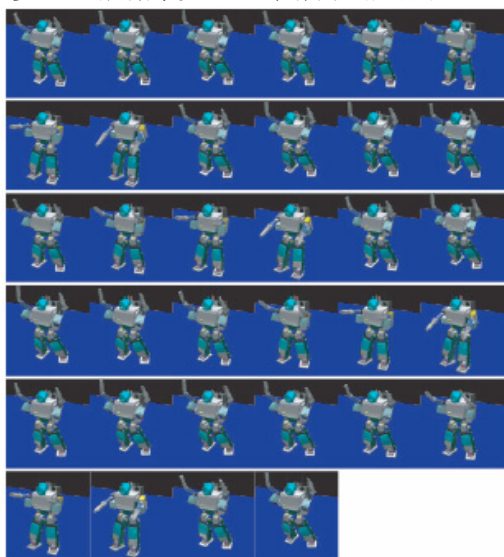


図 8. 獲得された行動

ただいた．今年度は，純粹に共同研究に焦点を絞った活動をお願いした．

滞在期間中に，身体性認知科学の新たな理論基盤について当グループと共同で検討を深めた．その結果，身体動力学のアトラクタ構造と認知の関連性，身体性認知科学を発達論に展開するための原理のリストアップ，能動的知覚行為を情報理論的に評価する手法，身体動力学構造を探索・獲得するためのニューラルネット機構の基本構想，などの成果を挙げた．これら成果は，滞在中に開催した研究セミナーで講演いただくとともに，滞在中に執筆を進めた身体性認知科学に関する著書（MIT Press より刊行予定）の一部としても採用された．

## 7. おわりに

人間と真に親和性のあるインタラクティブシステム技術を目指して，人間の解明とモデル化，実世界情報の数理，ロボット実験やインタフェース