

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 Rolf Pfeifer 土肥健純 岡田昌史 波多伸彦 岩原誠
大武美穂子 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法と全身ダイナミック行動制御法、人間行動認識のための数理的手法、身体性に基づく認知原理、力学的情報処理モジュールの階層化、人間への新たな情報提示のためのめがねなし3Dディスプレイ、などの研究成果を報告する。また、国際貢献と対外情報発信の効果をもつ教育活動として行った国際多点遠隔講義についても報告する。

2 動作計測に基づく体性感覚推定法

人間は他者の動作を観察し、その内部の神経や筋肉等の活動状態などを連想して、相手の心や体の状態の理解に役立てていると考えられている。外部からの観測により、人間内部の状態が計算できれば、人間の感覚を左右する情報を読むヒューマンインタフェイスをもつ機械が実現できるであろう。本年度は、人間を外から観測してその内部状態、特に体性感覚を推定するための基礎研究を進めた。

2.1 運動と筋・神経活動の同時計測

人間の行動を経時的かつマルチモーダルに計測することを目的として、これまでに、モーションキャプチャシステム、床反力測定用フォースプレート、視線方向検出用アイマークレコーダを導入してきた。本年度は、より人間の内部の情報を得るために、高精度の筋電位計を導入し、センサ

の種類によらない汎用アナログ入力サーバを実装した。これにより、運動と筋肉および神経活動の同時計測を実現した。

2.2 詳細人体筋骨格モデルと計測による深部体性感覚の計算

詳細人体筋骨格モデルは適当な細かさでグループ分けされた骨と、骨間に張られた筋・腱・靭帯のネットワークから成り、366の筋、91の腱、34の靭帯、56の軟骨、53の骨群から構成される。このモデルと、運動と筋・神経活動の計測結果を用い、深部体性感覚を計算することができる。

モーションキャプチャシステムから得られるのは、全身に貼り付けた光学式マーカの三次元位置軌道である。逆運動学計算によりマーカの軌道を実現する人体モデルの関節角・筋長の時系列データを求め、逆動力学計算によりその運動を実現する関節トルクを求める。この関節トルクを実現する筋・腱・靭帯張力は、筋の冗長性から一意に決めることができないという問題がある。これまでは、全身で発生する筋力が最小になるように最適化計算で発生張力を求めてきた。筋電位計により筋活動度が分かるようになったので、生理学の実験データに基づく数学モデル(Stroeveのモデル)を用い、より確からしい張力を推定できるようになった。

2.3 軟組織の変形計算

体性感覚を計算するためには、深部感覚だけでなく皮膚感覚をシミュレーションする必要がある。そこで、皮膚などの軟組織の変形計算を目的として、薄膜構造の柔軟物体をバネで結合された剛体リンク系として表現し、高速に計算する手法を提案した。柔軟物体を膜厚方向に沿って仮想的に分割することでリンク集合体とし、リンク間をバネと球面関節の両方で結合する。バネ長さの関節値に対するヤコビアンを求め、ヤコビアンを用いてバネ張力を関節トルクに変換した上で、剛体リンク系の動力学計算を行う。

2.4 今後の課題

今年度は、1)全身運動と筋肉・神経活動の同時計測・計算システムを構築し、運動学習・獲得の過程を定量的に観察する基盤を作った；2)軟組織の変形計算法を提案した。全身の体性感覚情報を統合する数理モデルを構築することがこれからの課題である。

3 人間型身体性の情報構造解明と全身ダイナミック動作への応用

人間は身体や操作物体のダイナミクスを活用した行動スキルを有しており、不安定な領域も積極的に利用しつつ、高速な運動や、大きな力を要するタスクをこなすことができる。

身体や操作対象物のダイナミクスを利用するという事は、それを認識・同定し、それに合わせた適切な制御則を適用することを意味する。実世界中のタスクは複雑で、身体や物体の状態は刻々と変化し、それらのダイナミクスも変化する。従って、ダイナミクスの切り替わり、すなわち境界とその次に存在するダイナミクスの同定が必要となる。また、系の状態は不確定性を有するので、適切な制御則とは、従来型のように系の状態軌道を完全に規定するのではなく、系本来のダイナミクスを破壊せずその安定性や発散的方向性を利用するため、必要以外の時には系に介入しないことを意味する。

このような制御戦略は大域的には安定であり、多少の身体・環境状態の変動に対してロバストな、記号的性質を有すると考えられる。これはいわば、「コツ」に相当する概念であり、個体を超えて伝達可能な意味的情報といえる。従って、これはコミュニケーションや協調・介助において、行為概念記号や他者行動への介入点という、要になる情報構造を規定すると考えられる。

これらの内容を具体的に明らかにすることが本研究の目的である。

3.1 全身行動実験用ヒューマノイドロボット

この目的のために、任意姿勢全身ダイナミック運動可能な等身大人間型ロボット（名称：R. Daneel Study 1、右図）を完成した。身長 150cm、体重 70kg、46 自由度。人間に非常に近い関節可動



範囲と、瞬発力と素早さを重視し、滑らかな外形を持つ。このため、任意姿勢でダイナミックに自重を操る能力を有し、従来の二足歩行ロボットとは一線を画す。このような全身での任意ダイナミック動作が可能な等身大ヒューマノイドは世界でも他に例がない。

3.2 ダイナミック起き上がり行動

人間型身体の特性を活用した行動の例として、ダイナミックな起き上がり行動を取り上げ、人間の行動戦略の分析と上記ロボットでの行動実験を行った。

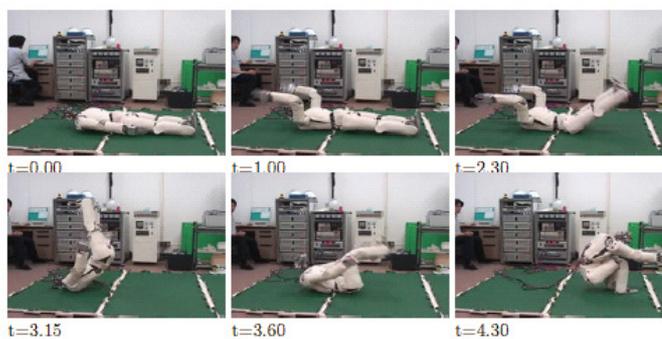
これは、床に仰向けに寝ている状態から、両脚を振り上げて、その反動を使って一気に立ち上がる行動である。

この運動を人間が行った様子をモーションキャプチャ装置で計測し、力学的解析を併用して分析すると、次のことが明らかになった。

この起き上がり動作の位相空間中には、ごく疎らに、非常に条件の厳しい状態があり、そこをきちんと通過しないと動作全体が成功しないが、それ以外の部分では、状況に応じて変化させて構わない、すなわち、状態軌道はばらけてよい、ということが分かった。

3.3 実機ヒューマノイドによるダイナミック起き上がり実験

以上の原理を適用して、実機ヒューマノイドでの起き上がり実験に成功した。身長 150cm、体重 70kg という、小柄で小太りな体格のマシンであるが、身体各部に大きな瞬発力を有し、脚の振り上げ開始からわずか 2 秒という素早い起き上がり動作が世界で始めて実現された（写真）。この成果は、国内外のメディア（NHK、民放各社、新聞各紙、CNN、BBC 等）で広く報道されると共に、権威ある国際会議での発表 3 件並びに国内学会発表 2 件により学術的に高く評価された。この実験結果とシステム性能、および国内外の反響は、当初想定した範囲を超えた。



4. 人間行動認識のための数的手法

実世界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。従ってこれらを取り扱う上で、パターン認識と学習、特に時間を含む多変量解析の手法や、確率統計の手法（ベイズ推定、ベイジアンネット）といった情報数的手法がキーとなる。これら理論的基礎の上に、認識、理解、推論、学習機能の研究を進めている。

4.1 汎用的特徴抽出手法としての高次局所自己相関（HLAC）法の数理的な拡張と整備

静止画像（2D空間）認識のための特徴抽出法としてこれまで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整備した。これによって、時系列（1D時間）の場合に自己回帰モデルとの整合性が良くダイナミックスの同定が可能となること、また立体 HLAC（2D空間+1D時間）により動画像の効率の良い認識が可能となる知見が得られた。一般に立体 HLAC は、3次元の形で得られる任意のデータ（3-way data）からの汎用的な特徴抽出手法となるものであり、実世界情報を扱う強力な数的手法が得られたことになる。

4.2 動画像認識への応用

動画像は2D（空間）+1D（時間）の立体（3-way）データと考えられる。これに立体 HLAC を適用することにより、その位置不変性と対象加法性を生かし、動物体の位置に依らない（分節を要しない）認識、また複数動物体の同時認識が可能となることを実データにおいて示し、動画像認識手法としての有効性を示した。具体的には、5人の4行動（左右方向の歩く・走る）に対して99.8%の認識率で個人の同定と行動(gait)の同定が得られている。

また、空間2D（画像）の HLAC 特徴抽出を動画像に適用すると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95.7%の高い認識率が得られている。

さらに、移動物体の追跡や異常行動の検出について、新しい有効な手法を開発した。

4.3 顔認識への応用

社会生活において顔は重要な役割を占めている。顔を見ることで、個人、性別、年齢、表情な

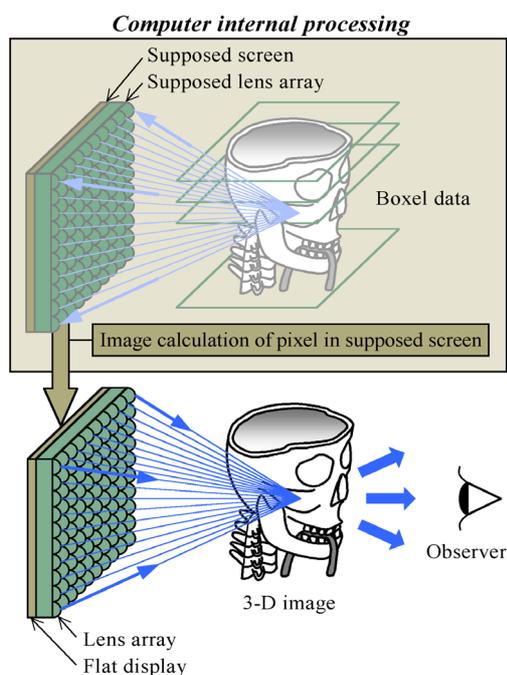
どを知ることができる。こうした顔情報を認識する機能をコンピュータに持たせれば、人と情報システム（ロボットを含む）とのより円滑で親しい対話が可能となる。

既に筆者らは HLAC 特徴抽出を顔認識（個人の同定）に応用し高い認識率を得ているが、さらに表情認識へ応用を拡大した。まず、因子分析と合わせることで、位置あわせと顔の切り出しを要しない高速な個人と表情の同時認識が可能となることを確認した。具体的には、9人、7種の表情の認識率は、各々、98%、80.8%、同時79.7%であった。表情認識は人間にとっても微妙であるので、これらは高い認識率と言える。

さらに、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、認識率が向上することを確認した。

5. めがねなし 3D ディスプレイの開発

特殊な眼鏡を掛けることなく、多人数の観察者に対し、三次元画像を正確に表示できる Integral Photography の原理に基づき、それを発展させ、リアルタイム性を持たせることによりコンピュータとの相性を改善した Integral Videography (IV)三次元画像表示技術の確立を目指す。



Integral Videography の原理

5.1 試作 IV ディスプレイ

画素密度 204dpi、画素数 3280×2400 pixel の超高解像度・超多画素ディスプレイ (IBM 9503-DG0) に対応したマイクロ凸レンズ二次元アレイを新たに開発し、簡便にして高画質なフルカラー三次元動画像ディスプレイを実現した。

5.2 IV 三次元動画表示

IV 画像生成の新アルゴリズム開発により、従来不可能だった VRML で記述されたヒューマノイドのオブジェクトデータから IV 三次元動画像を再生することができた。

今後は、研究の目的である実世界三次元構造の把握と、その認識結果を人間に分かり易く表示するヒューマンインターフェースとしての三次元画像表示技術の確立を目指す。

6. 国際多点双方向遠隔講義の実施

先端研究成果の教育への還元、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 特任教授として 6 ヶ月間招聘し、これらの活動を推進した。

その中で特筆すべき試みとして、身体性認知科学に関する国際多点双方向遠隔講義を実施した。

6.1 国際協力体制

この試みは、本学とスイス・チューリッヒ大学の連携・先導のもとに、ドイツ・ミュンヘン大学、ポーランド・ワルシャワ (Polish-Japanese Institute)、ポーランド・ロジュ(Lodz)、中国・北京大学、サウジアラビア・ジダ(Jiddah)の参加・協力を得て実現した。また、米国・マサチューセッツ工科大学からも遠隔招待講演の形で参加・協力を受けた。

6.2 リアルタイム双方向接続

インターネット経由で、H.323 (TV 会議) プロトコルでの映像・音声接続と、アプリケーション共有によるパワーポイント多地点提示を併用して各地の講堂をリアルタイムで双方向に結ぶと共に、ライブストリーミング配信により参加サイト以外の登録聴講者にも提供を行った。

このような国際多点双方向遠隔講義の試みは、世界的にも他に例を見ない。

6.3 講義の概要

“AI Lectures From Tokyo”というタイトルで、身体性認知科学の基礎から最新の研究動向までをテーマとし、全 10 回各 2 時間の講義を実施した。期間は 2003 年 11 月 4 日より 2004 年 1 月 27 日まで。うち、8 回は Pfeifer 教授による講義に加え、後半 20 分は毎回新しい招待講師による最新の研究動向紹介を行った。最後の 2 回分は、Future Trends と題して、参加各国の第一人者による先端研究紹介で構成した。当実世界プロジェクトからも、第 1 回目でのプロジェクト統括の挨拶を皮切りに、6 名の教官が講義を行い、最新の研究動向を紹介した。他に、国内では東京工業大 (広瀬教授、村田助教授)、大阪大 (浅田教授)、北海道大 (横井助教授)、から、また、国外ではミュンヘン工科大 (F. Pfeiffer 教授)、マサチューセッツ工科大 (Brooks 教授) などの世界の第一人者による講義、そして飛び入りゲストとして、ベルギー自由大(Steels 教授)、サンタフェ研(Langton 教授)らによる討論参加を受けた。本学を含め各サイトにおいて、単位取得科目として実施すると同時に、公式ウェブサイト(<http://tokyolectures.org/>)で聴講登録を受け付けた。登録者は全世界で総計 900 名に達した。

6.4 成果

上記のような試みは世界的にも他に例がなく、参加した学生からは、「遠く離れた国の学生と同じ教室にいるようで新奇な体験であった」等の感想が寄せられ、早くも次回の開講予定の問い合わせが数多く寄せられている。また、招待講師陣からも、「非常に面白い試みで、自分の所でも行ってみたい」との声が寄せられている。もちろん、講義や招待講演の内容も非常に高い評価を受けた。

今回の試みを通して、本格的な国際多点遠隔講義の実現技術と多くのノウハウを蓄積することができた。また、講義の記録はすべてデジタルムービーコンテンツとして整備されており、将来にわたって活用可能な貴重な資産を構築することができた。

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構築を進めた。成果発信と教育還元のため、国際多点遠隔講義という世界初の試みを行い、成功した。