

## 情報と知」研究領域 領域活動 評価報告書

- 平成 15 年度終了研究課題 -

研究総括 安西 祐一郎

## 1. 研究領域の概要

情報の面から人間の知的活動をサポートする新しい情報処理システムの構築を目指し、ソフトウェアを中心とした基盤的情報科学と先端的情報技術の研究を行う。例えば、分散処理、ネットワーク、アーキテクチャ、知的情報処理、マルチメディア、ヒューマンインタフェース、脳型コンピューティング、計算モデル、アルゴリズムなどに関する基礎研究、あるいは様々な分野への応用などの研究も含む。

## 2. 研究課題 研究者名

別紙一覧表参照

## 3. 選考方針

選考の基本的な考えは下記の通り。

- 1) 選考は「情報と知」領域に設けた選考委員 7名と研究総括で行う。
- 2) 選考方法は、書類選考、面接選考および総合選考とする。
  - ・ 書類選考において、1提案につき3名の選考委員に査読評価を依頼する。
  - ・ 選考委員の所属機関と応募者の所属機関が異なるように配慮する。
  - ・ 面接選考では、可能な限り多くの研究提案を直接聴取し、質疑応答する。
- 3) 独創的な発想に恵まれ、活力に富み、自ら研究を実施する者を優先する。
- 4) 審査は、書類選考結果、面接選考結果および研究実施の条件等を加味して総合的観点から行う。

## 4. 選考の経緯

選考	書類選考	面接選考	採用者
対象者数	155 名	25 名	11 名

## 5. 研究実施期間

平成 12 年 10 月～平成 15 年 9 月

## 6. 領域の活動状況

領域会議 :11 回

研究報告会 :4 回

研究総括 (または技術参事)の研究実施場所訪問：研究開始に際し全研究者を訪問。

その後、研究者が研究実施場所を移った際の新たな研究実施場所の訪問、研究進捗の確認。

## 7. 評価の手続き

研究総括が個人研究者からの報告・自己評価を基に領域アドバイザーの協力を得て行った。また、研究終了時に科学技術振興機構が開催する一般公開である研究報告会の参加者の意見を参考とした。

### (評価の流れ)

平成 15 年 9 月	研究期間終了
平成 15 年 11 月	研究報告会を東京国際フォーラムで開催
平成 15 年 11 月	研究報告書及び自己評価提出
平成 15 年 12 月	研究総括による評価

## 8. 評価項目

- (1) 外部発表 (論文、口頭発表等)、特許、研究を通じた新しい知見の取得等の研究成果の状況
- (2) 得られた研究成果の科学技術への貢献

## 9. 研究結果

平成 12 年度に採択した研究者、第 4 期生は 11 名であったが、研究分野的には多岐にわたり、自然言語処理、画像処理、音楽情報処理に各 2 名、データマイニング、人工知能、セキュリティ、認知情報処理、バイオインフォマティクスに各 1 名など 8 分野に広がった。彼等は地道に研究を進め、3 年間の研究期間を終了し今後の土台を築き上げた。また、研究期間中、彼等は第 1 期生から第 3 期生のこれまでの「情報と知」研究者と交わり、領域会議等でのディスカッションを通してコメント、アドバイスを受け、研究者間の議論等を研究推進の糧とすることで研究者として更に成長し、それぞれが研究成果をあげたと言える。

また、平成 15 年 11 月 14 日、東京国際フォーラムで開催した第 4 回研究報告会では多くの方々に参加をいただき、忌憚のない感想・コメントの中に、今後の研究発展、実用化への期待が多く寄せられた。

研究者毎に言えば、有田正規はバクテリアの代謝とシグナル伝達のメカニズムを、グラフを用いて形式的に記述・推論ができるシステム構築を研究課題とした。時間的な制限のため、シグナル伝達のメカニズムには対応できなかったが、代謝のネットワークを正確に記述し、必要な酵素反応をユーザが自由に検索、推定できるシステムを作成し、バイオインフォマティクスという分野で非常に重要な布石としたと考える。今後代謝の研究が成熟するに従い、本研究成果によるメリットが一層顕在化するであろう。計算機による自然言語理解は情報化社会の諸問題を解決するための重要なテクノロジーの一つであるが、黒橋禎夫は大規模な電子テキストや電子化辞書をもとにした自然言語理解のための知識を自動的、且つ段階的に獲得する枠組みを考案した。特に、文章理解の基本となる格フレーム辞書について、従来の人手で構築されてきた辞書を質、量ともに上回るものを自動処理によって構築したことは大きな成果である。また、第 4 回研究報告会では、参加者から大きな関心が寄せられ、今後の研究発展に期待されている。後藤真孝は、音楽音響信号を人間のように理解できる計算機システムを工学的に実現することを研究目標とし、具体的には、CD 等に収録されている複雑な音響信号を入力としてリアルタイムに音楽理解が可能なシステ

ムを実現した。音楽の理解に対して従来なかった新しいアプローチを提案し、世界初の手法として実現したが、上記の研究報告会では、参加者からもっとも多くの関心が寄せられている。斎藤英雄は、多数のカメラで撮影された多視点画像から復元される実際のシーンの3次元構造モデルを仮想環境内で共有し、3次元通信を行うことが出来る「仮想環境共有型3次元通信システム」を構築してそれを応用した新しい通信システムを提案することを研究課題とした。多くの要素技術を確立したが、特にマルチカメラによる3次元復元システムを2セット構築して仮想空間を共有した3次元通信の有効性を示した。研究報告会では今後の発展と実用化を期待するとのコメントが多数寄せられた。諏訪正樹は、人間の感性を磨くための教育方法論の構築を目指し、多くの実験的研究を通して「感性」に認知科学的な定義を与え、科学的に感性の問題を扱うための糸口を得た。また、感性を開拓するための方法論をケーススタディとして示すなど、この分野での発展に貢献している。竹田正幸は、情報が氾濫する今日のネットワーク上で、個人や組織が必要とする情報を主体的に獲得し、迅速な意思決定を行うために必要である「大量データからの知識発見技術の開発」という重要な課題に取り組み、大量・不定形・不均質なデータから知識獲得を行うための新しい基盤技術の確立を目指し、顕著な成果をあげた。また、理論的な側面ばかりでなく、応用面においても、言語学や文学、分子生物学などの他分野の研究者と手を組み、現場の具体的な問題に対して開発手法の有効性を示した点は高く評価できる。西本一志は、初心者から熟練者までの誰でもが、思い通りに音楽演奏を楽しむことができるようにするための方法論と技術の確立を研究の目標に掲げ、その第1ステップとして、クラシック音楽に代表される「再現演奏型楽曲」の演奏を主な研究対象とし、次世代の楽器のあり方についての基本的な概念を考察し、その有効性を実証した。野田五十樹は、模倣学習が実環境で動作するロボットに行動規則を教える方法として期待されている中で、模倣学習によるマルチエージェントシステムの構成を目指し、システムの構成単位となる「意図」の扱いを汎用性の高い確率モデルで提案する成果を得た。戸次大介は、我が国では、未開拓の分野である理論言語学の研究に、人間が自然言語を用いて行う推論を処理できるシステムの構築を目指したが、研究の進展に伴って、さらに理論的な目標へとシフトした。この中で、独自の言語理論を提案し、理論言語学・自然言語処理の統合的枠組みを構築して、従来の諸理論に対する優位性を実証した。水木敬明は、高度情報化社会を安全・安心なものにするため、情報セキュリティや暗号研究の重要性がますます高まっている中、絶対に安全な暗号、即ち、情報理論的に安全な暗号について研究し、いくつかのモデルに対してそのような暗号が実現できるための条件を理論的に実証したことは基礎研究として評価できる。

## 10. 評価者

研究総括 安西 祐一郎 慶應義塾長

### 領域アドバイザー氏名 (五十音順)

久間 和生	三菱電機(株) 先端技術総合研究所 所長
後藤 滋樹	早稲田大学理工学部 教授
田中 譲	北海道大学大学院工学研究科 教授
西尾 章治郎	大阪大学大学院情報科学研究科 研究科長 教授
橋田 浩一	産業技術総合研究所サイバーアシスト研究センター 副研究センター長
松山 隆司	京都大学大学院工学研究科 教授

米澤 明憲 東京大学大学院情報理工学系研究科 教授

(参考)

(1)外部発表件数

	国内	国際	計
論文	25	22	47
口頭	107	106	213
その他	10	3	13
合計	140	131	273

平成 15 年 11 月現在

(2)特許出願件数

国内	国際	計
7	2	9

(3)受賞等

・有田正規

Int 1 Conf. on Intelli.Sys in Molecular Biology 'Best Paper Award' 2002/08

New Generation Computing 'New Generation Computing Award' 2002/05

CBI学会 ベストペーパー賞 2002/09

後藤真孝

日本音楽知覚認知学会 研究選奨 2002/11

情報処理学会 ベストペーパー賞 2003/02

諏訪正樹

日本認知学会 大会発表賞 2002/06

・星野准一

(財)船井情報科学財団 船井情報科学奨励賞 2003/03

(4)招待講演

国際 8 件

国内 18 件

## 別紙

## 情報と知」領域 研究課題名および研究者氏名

研究者氏名 (参加形態)	研究課題名 (研究実施場所)	現職* (応募時所属)	研究費 (百万円)
有田 正規 (兼任)	グラフによる細胞内メカニズムの記述と推論 (東京大学大学院新領域創成学研究科)	東京大学大学院新領域創成学研究科 助教授 (電子技術総合研究所知能情報部 研究員)	39
黒橋 禎夫 (兼任)	自然言語による知識の表現と利用 (東京大学大学院情報理工学系研究科)	東京大学大学院情報理工学系研究科 助教授 (京都大学大学院情報学研究科 講師)	36
後藤 真孝 (兼任)	リアルタイム音楽情景記述システムの構築 (産業技術総合研究所情報処理研究部門)	産業技術総合研究所情報処理研究部門 研究員 (電子技術総合研究所知能情報部 研究員)	57
斎藤 英雄 (兼任)	共有仮想空間におけるリアルタイム3次元通信 (慶應義塾大学理工学部)	慶應義塾大学理工学部 助教授 (同大学 講師)	53
諏訪 正樹 (兼任)	感性の開拓のための方法論構築 デザインのパーソナル化に向けて (中京大学情報科学部)	中京大学情報科学部 助教授 (同上)	42
竹田 正幸 (兼任)	文字列データ圧縮に基づく高速知識発見システムの構築 (九州大学大学院システム情報科学研究科)	九州大学大学院システム情報科学研究科 助教授 (同上)	41
西本 一志 (兼任)	音楽における創造活動を触発支援するシステム (北陸先端科学技術大学院大学知識科学教育研究センター)	北陸先端科学技術大学院大学知識科学教育研究センター 助教授 (同上)	45
野田 五十樹 (兼任)	模倣学習によるマルチエージェントシステムの構成 (産業技術総合研究所サイバーアシスト研究センター)	産業技術総合研究所サイバーアシスト研究センター 主任研究官 (電子技術総合研究所情報科学部 主任研究官)	37
戸次 大介 (専任)	プログラミング言語としての自然言語～推論システムと人間の思考～ (科学技術振興事業団)	科学技術振興事業団 さきがけ研究者 (東京大学大学院理学系研究科 博士課程)	26
星野 准一 (兼任)	ヴァーチャルアクターのための動画処理と動作生成 (筑波大学機能工学系)	筑波大学機能工学系 講師 (新潟大学大学院自然科学研究科 助手)	48
水木 敬明 (兼任)	情報理論的に安全な秘密鍵共有法 (東北大学情報シナジーセンター)	東北大学情報シナジーセンター 助教授 (東北大学大学院情報学研究科 助手)	14

## 研究課題別評価

1. 研究課題名 : グラフによる細胞内メカニズムの記述と推論

2. 研究者氏名 : 有田 正規

3. 研究の狙い :

バクテリアの代謝とシグナル伝達のメカニズムをグラフを用いて形式的に記述、推論できるシステムを構築する。生物実験系の研究者が行う推論をモデル化し、矛盾や曖昧性を含むデータも取り扱える、実験支援のための推論システムの作成を目標とする。

4. 研究成果 :

細胞内の代謝情報を電子化するのに必要なアルゴリズムを考案し、ARM(Atomic Reconstruction of Metabolism)と名づけたソフトウェアシステムを開発した。具体的には以下の技術を開発、実用化した。

(1)代謝物質構造のデータベース(DB)化技法 : 不斉炭素情報も含めた構造情報をグラフ表現、正規化し、構造の重複がない代謝物質DBを構築した。データは他のデータベースを参考にしておよそ2500物質を新規に入力した。

(2)代謝物質構造の自動描画 : 化学構造を平面に描画するアルゴリズムを考案、実装し、上記の技術とあわせてユーザが自在に構造を編集できるDBインターフェースを構築した。

(3)酵素反応のデータベース化技法 : 各反応における物質構造変化を自動認識、原子レベルの情報を得る技術を開発、実装した。およそ2500の酵素反応を入力し、この技術を用いてにおける物質間の原子対応情報を電子化、公開した。

(4)代謝経路の検索技法 : 原子レベルの情報に基づき、代謝経路を全て列挙するアルゴリズムを実装し、結果を視覚的に表示するインターフェースを作成した。

以上の技術を用いて、以下の事実を検証した。

(1) 代謝のネットワークはスモールワールドではない : 多くの研究論文で代謝を含む生体ネットワークがスモールワールド性という性質を持つことが報告されてきたが、原子レベルの検証によりこの性質が成り立たないことを明らかにした。

(2) 現在知られている大腸菌の代謝は不完全である : 現在一番良くわかっていると思われる大腸菌の代謝でさえ、およそ400の代謝物しか生合成経路と遺伝子との対応付けが完成していないことを明らかにした。

5. 自己評価 :

研究テーマは代謝とシグナル伝達を記述、推論できるシステムの構築であった。代謝だけで研究期間が終了してしまい、シグナル伝達に対応することができなかった点は非常に残念である。また、当初は生体ネットワークを記述する言語の設計が役立つと考えていたが、実際に役立つシステムはネットワークを視覚的に表示できるものであり、推論機能も他生物種との比較による推論

であることが後に明らかになった。そのため GUI を備えたシステムを作成したが、研究発足時の計画をそのまま実現しているとはいえない。しかし、代謝のネットワークを正確に記述し、必要な酵素反応をユーザが自由に検索、推定できるシステムを作成したことはバイオインフォマティクスという分野で非常に重要な布石となったと考えている。まず、代謝物質の構造を不斉情報まで電子化したデータベースは他に見当たらない。また、物質間の原子対応情報を算出したデータベース、正確な経路検索を実現したシステムも他に見当たらない。これらは代謝の研究をシステムティックに行なう際に不可欠な情報であるため、今後代謝の研究が成熟するに従い、本研究成果によるアドバンテージがますます顕在化すると思われる。これらの技術に基づく ARM システムは <http://www.metabolome.jp/> において公開中であり、研究の視点が複数の国際会議等で高い評価を得ていることも、本研究の重要性を示している。

#### 6. 研究総括の見解：

ウェブページの作成がそのまま研究成果とされがちなバイオインフォマティクスの世界で、情報科学的な視点に基づくデータベース作りを目指し、それを達成した点は高く評価できる。代謝のような生体ネットワーク全体を取り扱うシステム作成を個人研究レベルで行なうには相当の知識と意欲が必要だが、有田正規は積極的にこの事業に取り組み、さきがけ研究の三年間で実用システムの設計から実装にわたるまで優れた成果を挙げた。同時に、国内外から多くの招待講演の依頼を受け、成果について注目を浴びている。バイオインフォマティクス分野の研究は始まったばかりであり、今後更に大きな展開を必要とするが、有田正規がこの成果を踏まえて生体メカニズムを解析する上での革新的な技術を世の中にもたらしていくことを強く期待する。

#### 7. 主な論文等：

##### 論文

1. M. Arita "In silico Atomic Tracing by Substrate-Product Relationships in Escherichia coli Intermediary Metabolism." *Genome Research* 13(11) 2455-2466, CSHL Press, 2003.
2. Yamazaki, Y., Kitajima, M., Arita, M., Takayama, H., Sudo, H., Yamazaki, M., Aimi, N. & Saito, K. "Biosynthesis of camptothecin. In silico and in vivo tracer study from [1-<sup>13</sup>C]glucose." *Plant Physiology*, 134(1) 161-170, Am Soc Plant Biol Press, 2004.
3. M. Arita and S. Kobayashi "DNA Sequence Design using Templates." *New Generation Computing*, 20(3) 263-277, Ohm-sha:Springer-Verlag, 2002.
4. Arita, M. "Comma-free design for DNA words." *Communications of the ACM*, 47(5) 99-100, ACM Press, 2004.
5. Arita, M. "The metabolic world of Escherichia coli is not small." *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 101(6) 1543-1547, NAS, 2004.

##### 解説記事、著書

1. 有田 正規 「ARM データベース」(『メタボローム研究の最前線』富田勝編中の1章)(刊行予定)
2. 有田 正規 「代謝の電子化と高分子への応用」*炎症と免疫* 11(6) 46-51, 2003.



3. 有田 正規 「代謝の電子化プロジェクト」蛋白質核酸酵素 48(7) 823-828, 共立出版, 2003.
4. 有田 正規 「代謝は原子レベルで記述しよう - 電子化の意義と将来性 - 」, JITA ニュース March, 日本産業技術振興協会, 2003.
5. 有田 正規 「代謝の電子化と有用物質の生産」, 実験医学 9 月号 1868-1872, 羊土社, 2002.
6. 有田 正規 「代謝ネットワークの情報解析」, 日本計算工学会誌 6(1) 10-12, 2001.
7. 有田 正規 「パスウェイマップの探索」, 日本シミュレーション学会誌, vol.20(2) 16-20, 2001.

#### 受賞、特許

1. M. Arita "Atomic Reconstruction of Metabolism", Best poster award at the International Conference on Intelligent Systems in Molecular Biology, 10 Aug 2002.
2. M. Arita, S. Kobayashi "DNA Sequence Design using Templates." New Generation Computing Award, 2002.
3. 有田正規 「ARM でみる薬物代謝」, CBI 学会全国大会ベストポスター賞 20 Sep 2002.
4. 有田正規 「ミスハイブリダイゼーションを回避しうるオリゴヌクレオチド配列とその設計方法」特願 2001-331732.

#### 招待講演

1. M. Arita "Computer Applications for Metabolome Analysis", ICSB2002 Satellite Meeting "Metabolome Analysis and Systems Biology", December 16, Stockholm Sweden, 2002.
2. M. Arita "Computer Applications for Comprehensive Metabolite Analysis", Cambridge Healthtech Institute's Second Annual Metabolic Profiling: Pathways in Discovery, December 2 - 3, Research Triangle Park (North Carolina) USA, 2002.
3. M. Arita "Atomic Representation of Metabolism", Invited Lecture Courses, June26 - July 2, Department of Computer Science, University of Helsinki, Finland, 2002.
4. M. Arita "Atomic Reconstruction of Metabolism (ARM) Project", Workshop on Protein Interaction and Clinical Data Analysis, May 28 - 31, National University of Singapore, 2002.
5. 有田 正規 「代謝の電子化と機能予測」新資源生物変換研究会シンポジウム 12/5 東京 2003.
6. 有田 正規 「代謝データベースとその盲点」日本生化学会 全国大会シンポジウム (メタボローム研究の最前線) 10/15, 横浜 2003.
7. 有田 正規 「代謝の電子化プロジェクト」日本質量分析学会 質量分析総合討論会 5/14-16, つくば 2003.
8. 有田 正規 「ARM プロジェクト: 細胞内代謝の電子化技術」基礎生物学研究所研究会 生命科学における Informatics と Mathematics」3/11-12, 岡崎 2003.
9. 有田 正規 「大腸菌の代謝経路再構築」JST 異分野研究者交流フォーラム 3/1-2, 大仁 2002.

## 研究課題別評価

1. 研究課題名 :自然言語による知識の表現と利用

2. 研究者氏名 :黒橋 禎夫

3. 研究の狙い :

人間の知を理解する上で、また工学的にも、計算機に知的な振る舞いをさせることは大きな目標であり、そのためには計算機上での知識の取り扱いが重要な課題となる。人間は自然言語によって知識を操作するが、計算機にとっては自然言語は曖昧で扱いづらいものであった。そのため、計算機における知識操作には人工的な形式言語が必要であると考えられ、形式言語によって常識を人手で記述するということが試みられた。しかし、そのような方法はコストが膨大でありまた形式言語で書いた知識は保守・拡張が非常に困難であることが認識されてきた。このように、知識の取り扱いの難しさが人工知能研究の大きな障害であった。

これに対して、計算機環境の劇的な進歩と辞書、テキストなどの大規模データが利用可能となったことで、自然言語処理の研究はこの10年間で大きく進展し、テキストの形態、素構文解析、固有名詞抽出などの基本的な処理ではかなりの精度がえられるようになった。すなわち、自然言語が計算機にとって扱い可能な言語となり、自然言語によって知識を操作することが少しずつ可能となってきた。

計算機が自然言語で記述された知識、すなわち自然言語テキストを「使いこなせる」ようになれば、webをはじめとする既存の膨大な自然言語テキストを知識源とすることができ、また、人間が日常行っているテキストの更新・追加という方法で知識の保守・拡張が可能となる。そして、なによりも、人間と同じメディアを使うことで、人間と計算機のコミュニケーションが格段に容易になる。本研究では、このようなことを実現するための基礎的研究を行った。

4. 研究結果 :

自然言語テキストを計算機が知識として利用するためには、次の2つのことを行わなければならない。

1. テキストの構造化(テキスト中の様々な要素の関係付け)
2. 同義異表記の問題の解決

例えば、知識ベース中に「今大会の注目は室伏選手。昨年、世界記録を更新し…」というテキストがあり、これを用いて「ハンマー投げで世界記録を塗りかえたのは誰？」という質問に答える状況を考える。上記1は、知識ベーステキストの構文・格・省略解析などを行い、「昨年、室伏選手がハンマー投げで世界記録を更新した」という構造を理解することを意味する。上記2は、質問の「記録を塗りかえる」と知識ベースの「記録を更新する」との同義性を認識することである。この2つの問題を解決することにより、質問に対して「室伏選手」と答えることが可能となる。これは、人間との質問応答だけでなく、知識ベースの内部において推論などを行う場合にも同様である。

このような処理を実現するためには、各語の意味・使われ方に関する正確な情報が必要となり、さらに、言語が表現する世界において一般にどのようなことがおこるか、すなわち常識に関する情

報も必要となる。このようなことを人手で規則として与えることはもちろん不可能である。

そこで、本研究では、各語の基本的な意味に関して国語辞典を、語の使われ方、さらには常識に相当する知識に関して大規模コーパスを知識源とし、これらをうまく組み合わせて利用することにより、自動的に、徐々に高度な知識を獲得していくというアプローチをとった。具体的には、まず大規模コーパスから格フレームと呼ぶ知識構造を抽出し、これを用いてテキストの構造化を行い、さらに格フレームと国語辞典を用いて同義異表記を認識・言い換えるということを行った。これらの各研究項目の成果について以下で詳しく説明する。

#### 4.1. 格フレーム辞書の自動構築

格フレーム、すなわち各述語(動詞、形容詞など)がどのような項(主語、目的語など)をとるかという情報は、文・文章を構造的に解釈するための必須の情報である。格フレームは各述語に固有であり、さらに、一つの述語は複数の意味をもち、それぞれに異なる格フレームを持つ場合が多い。そのため、カバレッジの高い格フレーム辞書を人手で記述することはほとんど不可能である。

そこで、大規模コーパスの構文解析を行い、その解析結果のうち信頼性の高い述語項構造だけを抽出し、その結果を各述語の各用法ごとにクラスタリングすることによって自動的に格フレーム辞書を構築する方法を考案した。

しかし、単純にコーパスから述語項構造を収集するだけでは、二重主語構文、連体修飾の外の関係などの複雑な構文を扱うことができない。そこで、まず大規模コーパスの構文解析結果から単純な格フレームを学習し、次にこれを用いて大規模コーパスの格解析を行い、その結果を収集することによって、より頑健な格フレーム辞書を構築する方法を考案した。

たとえば、「この車はエンジンが良い」という実例について、はじめに構文解析をする段階では「車は」は解釈することができないので、「エンジンが良い」という部分だけが収集される。このようにして収集した「エンジンが良い」の格フレームを用いてもう一度この実例を解析すると、格フレームにヲ格や他の格がないことから、「車は」はガ格であり、「エンジンが良い」は二重主語構文をとることがわかる。これに対して、例えば「その問題は彼が図書館で調べている」の「問題は」は、他の実例データから収集される「図書館で調べる」のヲ格の名詞集合と近いことから2回目の格解析では単にヲ格と解析されるだけである。このような原理で、2回目の格解析の結果から二重主語構文の2つめのガ格(外のガ格)を収集することができる。

まったく同じ原理により、一度目の解析では「業務を営む免許」の「免許」は扱われないが、2回目の格解析ではこのような被連体修飾詞がガ格やヲ格であるかどうか調べられ、そうでない場合には外の関係の名詞であると判断される。外の関係の名詞には、この「免許」のように特定の用言の場合に外の関係となるものと、「可能性」、「結果」、「見通し」などのように一般的に外の関係になりやすいものがある。これらの区別も、外の関係と判断される名詞の(用言との)分布によって自動的に判断することができる。

この処理を新聞記事20年分の大規模コーパスに適用した結果、2万3千の述語について、平均14.5個の格フレームを持つ、カバレッジの広い実用的な辞書を構築することに成功した。この格フレーム辞書は、今後の自然言語処理の様々な場面で利用できる基礎的知識源となるもので、本研究においても、以下に述べる省略解析、言い換え規則の自動学習などで利用している。

#### 4.2. 関係「タグ付きコーパス」の作成

文章中に存在する種々の関係性を計算機で正確に取り扱うためには、まずその関係のバリエーションを実際のデータ調査に基づいて整理し、それらの関係をタグ付けしたコーパスを整備することが必要である(これはコーパスベースの自然言語処理の基本的な考え方である)。省略・照応を含めた述語項構造、関係名詞などの種々の名詞間関係、共参照関係について、それらの関係を整理し、タグ付けコーパスを作成した。このコーパスは一般に公開する予定である。

#### 4.3. 省略解析

日本語の文章では格要素が頻繁に省略される(ゼロ代名詞となる)。文章の照合(検索)、要約などを正確に行うためには、文章中の述語項構造の認識、すなわち省略された格要素の復元が必要となる。

一般に、ゼロ代名詞の先行詞はゼロ代名詞から距離が近いところにある傾向がある。しかし従来の研究では、先行詞から何単語離れているかというような、文の構造を考慮しない単純な距離尺度が用いられてきた。これに対して、我々は従属節、主節、埋め込み文など、構造的にゼロ代名詞と先行詞候補の関係をとらえ、その中でどの位置にあるものがどの程度先行詞となりやすいかを尺度とした。

この尺度の具体的値は、ガ格、ヲ格、ニ格それぞれのゼロ代名詞について、文章中の種々の関係を人手でタグ付けした関係コーパスを利用して計数した。すなわち、先行詞候補の位置  $L$  に対して、(先行詞が  $L$  にある回数)/( $L$  にある先行詞候補の数の和)の値を計算した。

入力文に対する省略解析を行う際には、ゼロ代名詞の格ごとに、上記の値が大きな位置にある先行詞候補から順に調べ、ある基準を満たす場合に先行詞とする。ある基準とは、自動学習した格フレームと比較して先行詞と述語の関係が妥当であるかどうか、および、種々の手がかりの機械学習結果から先行詞と判断されるかどうか(学習コーパスは先述の関係コーパス)の AND 条件とした。

関係コーパスの一部、100 記事に対して省略解析の評価実験を行ったところ、まず、格フレームと入力とのマッチングによって判断される、ゼロ代名詞があるかどうかの同定(ある述語に対して省略されている格要素があるかどうかの同定)は適合率 88.7%、再現率 74.7% であった。そして、ゼロ代名詞があると判断された場合の先行詞同定の精度は 63.0% であった。これらの掛算となる全体の適合率・再現率はそれぞれ 55.9%(503/900)、47.1%(503/1068) であった。この値は、この結果を直接利用するアプリケーションの立場からはまだ低いものであるが、省略解析についての学習・評価コーパス、基本的な扱い方、ベースラインとなる精度がえられたので、今後この評価結果を詳細に検討し、種々の言語的制約などを整備していくことで、解析精度を向上させていく予定である。

#### 4.4. 国語辞典と格フレームを用いた用言の言い換え規則の学習

同一、またはほぼ同一の意味内容に対して、多くの表現が存在するという同義異表記の問題を解決しなければ、計算機による質問応答や、計算機内での自然言語による推論を行うことはできない。この問題を解決するために、国語辞典の情報をもとに言語表現をより平易な方向に言い換え、それによって同じ意味のさまざまな表現を一つの表現に収束させることを考えた。

国語辞典に基づく言い換えの基本的なアイデアは、与えられた文中の各単語を、国語辞典から得られる上位語と置き換えるというものである。しかし、この方法で簡単な単文の用言を言い換えるだけでも、多くの問題を解決しなければならない。例えば「他社をしのぐ」を「しのぐ」の定義を用いて「他社より優れている」に言い換える場合、次のような問題がある。

1. 「しのぐ」の多義性解消、
2. 「しのぐ」と置き換えられる定義文中の部分表現の決定(たとえば「体得する」を言い換える場合、単に「つける」ではなく「身につける」としなければならない)、
3. 表層格パターンの対応付け(「しのぐ」が「より優れる」になる)。

これらの問題を、先に述べた格フレーム辞書を利用することによって解決する方法を考案した。例えば上記の例では、言い換えるべき用言(「しのぐ」)の各格フレームについて、最も類似する言い換え先用言(「耐え忍ぶ」「優れる」)の格フレームを見つけ出し、さらにその間で格要素間の対応付けを行うことにより、上記の3つの問題を一気に解決することができる。この方法は、国語辞典という人手で高度に整理された情報を、大規模コーパスを用いてさらに補足・強化したものと考えることができる。

この方法を実験文 220 文で評価したところ、77%の精度で適切な言い換え表現をえることができ、単純なベースラインの手法(辞書中の最初の語義を採用し、格助詞の言い換えなどを行わない方法)と比較して11ポイントの精度向上を得ることができた。ここで学習した言い換え規則は、今後、同義異表記の問題を扱う上での基本的なモジュールとして利用していく予定である。

#### 4.5 .迂言表現と重複表現の認識と言い換え

前節で扱ったような異なる表現ではなくある表現に余分なものが付加された、ある種の冗長性によって表現のずれが生じる場合がある。例えば、「パソコンを買う」のような「体言 + 格助詞 + 用言」という形の句を考えた場合、一般には体言と用言の意味は独立であり、その二つの意味の組合せとして句の意味が構成される。しかし、次の(1a)、(2a)の表現はこのような一般的な表現ではない。

- (1) a. 改革を断行する / b. 思い切って改革する
- (2) a. 貯金をためる / b. 貯金する / c. お金をためる

(1a)の例では、「断行」にいわゆる述語や項の意味はなく、副詞的な意味のみがある。ゆえに、これをより簡潔な副詞的表現に置き換えた(1b)の言い換えが考えられる。また、(2a)では「貯金」と「ためる」の間に意味の重複があり、この重複を取り除くと、(2b)、(2c)のより簡潔な表現が得られる。ここでは、(1a)を迂言表現、(2a)を重複表現とよぶことにする。

迂言表現と重複表現に関するずれを吸収するために、国語辞典の語の定義文を利用することにより、それらを認識し、言い換える方法を考案した。迂言表現は、付属要素の語の定義文の特徴から認識することができる。たとえば「断行」の定義文は「思いきってやること」、強制」の定義文は「むりにさせること」となっている。このように、定義文が、「副詞的表現 + 一般的な動作表現 + ヴォイスやアスペクトを表す付属語」であるものが迂言表現の付属要素と考えることができる。「一般的な動作表現」とは「物事をする」、「行う」、「やる」などで、辞書を調査したところ 20 程度の語句であることがわかった。付属要素がわかれば迂言表現の言い換えは比較的簡単で、(1a)に対する(1b)や「寄付を強制する」に対して「むりに寄付させる」を得ることができる。

一方、重複表現は、包含する方の(大きな意味の)語の定義文に、包含される方の語が含まれていることで認識できる。たとえば(2)の例であれば、「貯金」の定義文が「お金をためること」とあるので、この中に「ためる」があることで「貯金をためる」は重複表現とわかる。これが認識されれば、「ためる」を削除し、「貯金」を用言化して「貯金する」としたりさらに「貯金」の定義文を用いて「お金をためる」と言い換えることができる。

このような手法の有効性を確かめるために、例解小学国語辞典を用い、新聞記事からランダムに取り出した600表現を対象に評価実験を行った。まず、人手でこれらの600表現を調べたところ、84の迂言・重複表現があった。これに対して、システムの解析結果は適合率65%、再現率58%であった。今後、この方法によって迂言・重複表現のずれを吸収することが情報検索、対話システムなどでどの程度有効であるかを検討する予定である。

#### 5. 自己評価：

研究計画においては、1.言い換え関係の認識・生成による言語の冗長性の吸収、2.テキスト中の関連性の複合的関連付け、3.これらの機能を質問応答、対話システム等に組み込むこと、を目標とした。このうち、1.については国語辞典による用言の言い換えと、迂言、重複表現の言い換えを実現し、2.については格フレームの自動構築、省略解析システムの構築、学習用データとしての関係コーパスの構築などを実現した。また、3.についてもPC環境に関するヘルプシステムにおいて、言い換え、関係付けの成果の導入を行い、その有効性を検証した。このように、当初目標とした3項目それぞれについて、十分な成果をおさめることができた。

今後は、さきがけ研究で進めてきた方法論、すなわち、大規模コーパスと辞書を融合して利用する方法を発展させることにより、上位下位関係に代表される用語のオントロジーの自動獲得、名詞を中心とした関係性辞書の自動構築、さらに、述語項構造の連鎖関係、すなわち因果関係的な常識の自動獲得に発展させることを検討している。

また、PC環境に関するヘルプシステムはすでにwebを通して実際にサービスを行っているものであり、このシステムを自然言語理解技術のテストベッドとして、要素技術の統合、高度化を進める予定である。

#### 6. 研究総括の見解：

計算機による自然言語理解は、情報化社会の諸問題を解決するキー・テクノロジーの一つとして期待されている。本研究では、大規模な電子テキストや電子化辞書をもとにして、自然言語理解のための知識を、自動的に、段階的に獲得する枠組みを考案した。特に、文理解の基本となる格フレーム辞書について、従来の人手で構築されてきた辞書を質、量ともに上回るものを自動処理によって構築したことは大きな成果である。さらに、この辞書を利用することによって、同義異表記関係のパターンを自動学習する方法を考案しており、知識獲得のブートストラップのプロセスを具体的に示した功績も大きい。研究提案時には、言語の基本語彙の問題に取り組むという項目も挙げられていたが、この問題に十分に組み込まなかった点は残念である。今後の研究の発展に期待したい。

## 7. 主な論文等：

### 学術雑誌および国際会議

1. 鍛冶伸裕, 黒橋禎夫: 迂言表現と重複表現の認識と言い換え, 自然言語処理, Vol.11, No.1, (2004.1 採録予定)
2. 清田陽司, 黒橋禎夫, 木戸冬子: 大規模テキスト知識ベースに基づく自動質問応答 - ダイアログナビ -, 自然言語処理, Vol.10, No.4, pp.145-175(2003.7)
3. 鍛冶伸裕, 河原大輔, 黒橋禎夫, 佐藤理史: 格フレームの対応付けに基づく用言の言い換え, 自然言語処理, Vol.10, No.4, pp.67-81 (2003.7)
4. Daisuke Kawahara and Sadao Kurohashi: Fertilization of Case Frame Dictionary for Robust Japanese Case Analysis, In Proceedings of 19th COLING (COLING02), pp.425-431 (2002.8).
5. Youji Kiyota, Sadao Kurohashi, and Fuyuko Kido: Dialog Navigator" A Question Answering System based on Large Text Knowledge Base, In Proceedings of 19th COLING (COLING02), pp.460-466 (2002.8).
6. Nobuhiro Kaji, Daisuke Kawahara, Sadao Kurohashi, and Satoshi Sato: Verb Paraphrase based on Case Frame Alignment, In Proceedings of 40th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (ACL02), pp.215-222 (2002.7).
7. Daisuke Kawahara, Sadao Kurohashi, and Koichi Hasida: Construction of a Japanese Relevance-tagged Corpus, In Proceedings of The Third International Conference on Language Resources & Evaluation, pp.2008-2013 (2002.5).
8. 河原大輔, 黒橋禎夫: 用言と直前の格要素の組を単位とする格フレームの自動構築, 自然言語処理, Vol.9, No.1, pp.3-19 (2002.1).
9. Daisuke Kawahara and Sadao Kurohashi: Japanese Case Frame Construction by Coupling the Verb and its Closest Case Component, In Proceedings of First International Conference on Human Language Technology Research (HLT 2001), pp.204-210, San Diego, California, (2001.3.18-21).

### 解説記事、招待 依頼講演等

1. 黒橋禎夫: 自然言語処理の紹介, 土木学会第1回情報社会基盤小委員会 (2003.7.23).
2. 黒橋禎夫: コンピュータによる自然言語処理 :入門と応用 『質問に答えるコンピュータ』, 国際日本文化研究センターシンポジウム (2003.7.15).
3. 黒橋禎夫: 大規模テキスト知識ベースに基づく自動質問応答システム, 電子情報通信学会言語理解とコミュニケーション研究会 『質問応答 (QA) 技術最前線 - QA の現状と今後の可能性』講習会 (2003.1.27).
4. 黒橋禎夫, 清田陽司, 木戸冬子: 自動質問応答システム -ダイアログナビの現状と課題, 情報処理学会研究会 音声言語情報処理 43-4, pp.19-24 (2002.10.25).
5. 黒橋禎夫: 自然言語処理を支える文法, 月刊 『言語』, Vol.31, No.4, pp.52-57 (2002.4).
6. 黒橋禎夫: 大規模テキスト知識ベースに基づく自動質問応答, 第3回音声言語シンポジウム, pp.37-42 (2001.12.21).
7. 黒橋禎夫: 言語処理 資源に関する世界の Initiative の動向, JEITA 自然言語処理技術シン

ポジウム (2001.12.12).

8. 黒橋禎夫: 計算機による言語の理解, 第 15 回人工知能学会全国大会 AI レクチャ (2001.5.24).



## 研究課題別評価

### 1.研究課題名 :リアルタイム音楽情景記述システムの構築

### 2.研究者氏名 :後藤 真孝

### 3.研究の狙い :

本研究は、音楽音響信号を人間のように理解できる計算機システムを工学的に実現することをねらっている。人間は音楽を聞いて、メロディーを口ずさんだり、サビ(曲中で盛り上がる部分)がわかったり同じフレーズが繰り返されていることに気付いたりできる。しかし、こうした音楽理解能力を備えた計算機システムの構築は、メディア検索や音楽編集等の様々な用途で望まれているにも関わらず、困難な課題であるために従来実現されていない状況であった。本研究は、その状況を打破すべくコンパクトディスク(CD)等に収録されている実世界の複雑な音響信号を入力として、リアルタイムに音楽理解が可能なシステムを実現することを目的としている。

### 4.研究成果 :

本研究では、複数種類の楽器音や歌声を含む音楽音響信号を入力とし、それに対応した記述を理解結果として出力するリアルタイム音楽情景記述システムを構築した。音楽情景記述とは、音楽演奏中の刻一刻と変化する情景を分析・理解した結果を記述する処理過程である。ここで問題となるのは、「何ができれば音楽を理解したといえるのか」という問題設定である。本研究では、この問いに答えること自体も研究対象と考え、具体的な提案をした上で実際に実現した点が重要である。具体的には、この問いに対する現段階での答えとして、メロディー、ベース、繰り返し区間、サビ区間の4種類の音楽的要素の記述を得る音楽情景記述システムの実現に取り組んだ。これらの音楽的要素は、いずれも楽曲の情景を表す本質的な要素であるが、従来は推定が困難だと考えられていたものであり、その実現は重要な課題である。

以下では、本研究の主要な四つの成果である

1. リアルタイム音楽情景記述システムの実現
2. 応用システム「サビ出し機能付き音楽試聴機」の実現
3. RWC 研究用音楽データベースの構築
4. 音楽情景記述エディタの開発と記述のラベリングの実施

の概要を述べる。

#### 4.1.リアルタイム音楽情景記述システムの実現

メロディーとベースの推定手法 PreFEst (Predominant-F0 Estimation Method) とサビ区間と繰り返し区間の推定手法 RefraiD (Refrain Detecting Method) を提案し、それに基づいて音楽情景記述システムを構築した。本システムは、複数の楽器音が混在したモノラルの音楽音響信号に対し、4種類の音楽的要素の記述をリアルタイムに得ることができる。

メロディーとベースの推定手法 PreFEst

PreFEst は、帯域制限された混合音中で最も優勢な音高を推定する手法である。メロディーは中高域において最も優勢な高調波構造を持ち、ベースは低域において最も優勢な高調波構

造を持つことが多いため、それぞれに適した帯域に制限して適用すれば、メロディーとベースの音高を推定できる。本手法が対象とするCD等による実世界の音響信号は、事前に音源数を仮定することが不可能な混合音であり、ここでは、周波数成分が頻繁に重複する上に、基本周波数成分がないような音も存在する。しかし、従来の音高推定手法の多くは、少数の音源数を仮定し、周波数成分を局所的に追跡したり、基本周波数成分の存在に依存したりしていたために、そのような実世界の混合音には適用できなかった。それに対して本手法は、音源数を仮定せず、周波数成分の局所的な追跡もおこなわず、基本周波数成分の存在を前提としないという特長を持つ。

#### サビ区間と繰り返し区間の推定手法 RefraiD

RefraiD は、ポピュラー音楽の音響信号に対して、楽曲中に出現するすべてのサビの区間を網羅的に検出する手法である。従来、楽曲の音響信号中に何度も出現するサビのどこか一箇所を、指定した長さだけ切り出して提示する研究はあったが、サビ区間の開始点と終了点はわからず、サビの転調も扱えなかった。本手法は、音楽 CD 等による実世界の複雑な混合音に対して、各サビの区間の開始点と終了点の一覧を求めることができるだけでなく、転調を伴うサビを検出することも可能である。さらに、楽曲全体の中での様々な区間の繰り返しに基づいてサビを検出するため、その中間結果として、繰り返し区間の一覧も得ることができる。

#### 4.2. 応用システム「サビ出し機能付き音楽試聴機」の実現

サビ区間と繰り返し区間の推定手法 RefraiD を応用し、試聴に適した新たな音楽再生インターフェース SmartMusicKIOSK を実現した。CD 販売店の店頭で音楽を短時間試聴する際には、通常の音楽鑑賞における受動的な聴き方と異なり、試聴者は早送りを何度も繰り返しながらサビを探ることが多い。しかし、こうした聴き方に対する支援は従来なかった。本研究では、サビの区間や楽曲中で繰り返される区間の先頭へジャンプする機能と、それらの区間の楽曲中での配置を視覚化する機能を提供する。これにより、試聴者が手探りでサビを見つける煩わしい作業を不要にし、試聴者が能動的に聴きたい場所を探す作業を容易にする。このような、インタラクティブに楽曲中の再生位置を変更しながら所望の箇所を見つけられるインターフェースは、試聴に限らず、音楽を選んで利用する一般的な目的で有用である。従来の音楽再生インターフェースでは、楽曲単位でしか興味のない音楽を飛ばせなかったのに対し、SmartMusicKIOSK によって初めて、楽曲内部の興味のない箇所も容易に飛ばすことが可能になったといえる。

#### 4.3. RWC 研究用音楽データベースの構築

RWC (Real World Computing) 知的資源 WG (ワーキンググループ) 内に、RWC 音楽データベースサブWG という組織を主査として立ち上げ、その活動を通じて RWC 研究用音楽データベースを構築した。本データベースは、共通利用の自由、学術利用の自由が確保された世界初の楽曲 DB であり、音楽情報処理研究全般に広く貢献する成果である。音楽情報処理の研究分野全体の発展のためには、世界中の研究者が自由に利用可能な音楽データベースが必要であるが、従来、共通楽曲データベースや大規模な楽器音データベースは存在していなかった。

そこで、RWC 研究用音楽データベースとして、「ポピュラー音楽データベース」(100 曲)、著作権切れ音楽データベース」(15 曲)、クラシック音楽データベース」(60 曲)、ジャズ音楽データベース」(60 曲)、音楽ジャンルデータベース」(100 曲)、楽器音データベース」(60 楽器、29.1

Gbytes)の六つを構築した。上記の全 315 曲は、すべて新規に演奏、歌唱、録音した。この内、著作財産権の保護期間が終了した 96 曲以外の 219 曲は、新規に作曲、作詞、編曲した。さらに全 315 曲に対し、音響信号、標準 MIDI ファイル、歌詞のテキストファイルを用意した。一方、50 楽器に対しては、音域全体を半音間隔で収録した単独演奏音を用意した。これにより、研究者は、着想(問題発見)、問題解決、実装、評価、発表の各段階で、著作権等の制約を受けない楽曲を使用することが可能となった。

#### 4.4. 音楽情景記述エディタの開発と記述のラベリングの実施

楽曲の音響信号に対して音楽的要素の記述のラベリングを施すことができる音楽情景記述エディタを開発した。RWC 研究用音楽データベースを活用して音楽情景記述システムを構築したりシステムの出力を評価したりするためには、本エディタによる音楽的要素の記述のラベリングが重要となる。実際にラベリング作業も実施し、前述の RWC 研究用音楽データベースのポピュラー音楽データベース 100 曲に対し、メロディーの音高とサビ区間のラベリング作業を完了している。

#### 5. 自己評価：

さきがけ研究 21 「情報と知」領域 研究員として研究を開始したことで、予算的な裏付けを持ちながら様々な研究展開が可能となり、充実した 3 年間で多様な成果を上げられた。

- 1) 音楽的要素の記述の推定手法については、局所的な構造としてメロディーとベース、大局的な構造として繰り返し区間、サビ区間の 4 種類の推定に成功した。特に、繰り返し区間とサビ区間の推定に関しては、研究課題提案当初は階層的なビート構造を利用しながら実現する計画であったが、そうした局所的な記述を使わずにこれを実現できたこと、つまり、大局的な構造を音響信号から直接推定することが達成できたことは、自分自身にとっても大きな驚きであった。なお、以下に述べる応用システムやデータベースのような新たな研究の展開にも取り組むために、研究課題提案当初よりも音楽的要素の対象を絞ったものとなったが、最大限の研究成果を出す上で、正しい選択であったと考えている。今後は、既の実現した手法の推定精度をより向上させていくと共に、新たな音楽的要素の記述の推定にも取り組んでいきたい。
- 2) 応用システムとして実現した「サビ出し機能付き音楽試聴機」は、学会発表や各種デモンストレーション等で、すぐに実用化されそうな完成度を持ち、実際に使って便利なシステムだと高い評価を受けた。本成果は、情報処理学会シンポジウムインタラクション 2003 でベストペーパー賞を受賞し、採択率 4.64 倍の国際会議(ACM UIST2003)に採択され、日本経済新聞朝刊(2003 年 8 月 1 日発行)でも紹介された。本研究の重要性を一般に広くアピールする上で意義のある成果であった。
- 3) 本研究は、研究課題提案当初の見込みを大きく上回る RWC 研究用音楽データベースの構築という成果に結び付いた。これは、さきがけ研究 21 の採択が発端の一つとなって、RWC 音楽データベースサブ WG を発足させて主査として活動することが可能となったことによる。音楽情報処理の研究分野に広く貢献する成果として国内外から高く評価されており、今後の研究分野全体の発展のための基礎が築けた。
- 4) 音楽情景記述エディタの開発と記述のラベリングの実施は、地道な作業であり、通常は光が当たらない部分であるが、着実な研究の進展のために多くの時間を割いてきた。これらは今

後様々な研究を展開する上で土台となると考えている。

本研究の成果が、今後の音響信号を対象とした音楽理解研究の発展に大きく寄与していくことを願っている。

#### 6. 研究総括の見解：

本研究は、音楽の理解に対して、従来なかった新しく本質的なアプローチを提案しただけでなく、それを世界初の手法として実現した点が高く評価できる。また、音楽理解の応用例として、過去数十年間変化のなかった音楽再生インタフェースの新たな形態を提案し、産業界にもインパクトのある成果を上げた。さらに、研究用音楽データベースの構築といった研究分野全体としての土台作りにも貢献している。

#### 7. 主な論文等：

##### 論文誌

1. 後藤 真孝: SmartMusicKIOSK: サビ出し機能付き音楽試聴機, 情報処理学会論文誌, Vol.44, No.11, pp.2737-2747, 2003. (推薦論文)
2. Masataka Goto: A Real-time Music Scene Description System: Predominant-F0 Estimation for Detecting Melody and Bass Lines in Real-world Audio Signals, Speech Communication (ISCA Journal), 2004. (accepted)
3. 浜中 雅俊, 後藤 真孝, 麻生 英樹, 大津 展之: 発音時刻の楽譜上の位置を確率モデルにより推定するクオンタイズ手法, 情報処理学会論文誌, Vol.43, No.2, pp.234-244, 2002.
4. 北原 鉄朗, 後藤 真孝, 奥乃 博: 音高による音色変化に着目した楽器音の音源同定: F0 依存多次元正規分布に基づく識別手法, 情報処理学会論文誌, Vol.44, No.10, pp.2448-2458, 2003.

##### 査読付き会議

1. Masataka Goto: A Predominant-F0 Estimation Method for CD Recordings: MAP Estimation using EM Algorithm for Adaptive Tone Models, Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP 2001), pp.V-3365-3368, 2001.
2. Masataka Goto, A Predominant-F0 Estimation Method for Real-world Musical Audio Signals: MAP Estimation for Incorporating Prior Knowledge about F0s and Tone Models, Proceedings of CRAC-2001 (Workshop on Consistent & Reliable Acoustic Cues for Sound Analysis), 2001.
3. Masataka Goto, Music Scene Description: Toward Audio-based Real-time Music Understanding, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol.111, No.5, Pt.2, p.2349, 2002. (Invited Paper of The 143rd Meeting of the Acoustical Society of America)
4. Masataka Goto, Hiroki Hashiguchi, Takuichi Nishimura, and Ryuichi Oka: RWC Music Database: Popular, Classical, and Jazz Music Databases, Proceedings of the 3rd International Conference on Music Information Retrieval (ISMIR 2002), pp.287-288, 2002.
5. 後藤 真孝: SmartMusicKIOSK: サビ出し機能付き音楽試聴機, 情報処理学会 インタラクシヨ

ン 2003 論文集, pp.9-16, 2003.

6. Masataka Goto: A Chorus-Section Detecting Method for Musical Audio Signals, Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP 2003), pp.V-437-440, 2003.
7. Masataka Goto: A Chorus-Section Detecting Method for Musical Audio Signals, Proceedings of the 2003 IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics (WASPAA'03), 2003.
8. Masataka Goto: Music Scene Description Project: Toward Audio-based Real-time Music Understanding, Proceedings of the 4th International Conference on Music Information Retrieval (ISMIR 2003), pp.231-232, 2003.
9. Masataka Goto, Hiroki Hashiguchi, Takuichi Nishimura, and Ryuichi Oka: RWC Music Database: Music Genre Database and Musical Instrument Sound Database, Proceedings of the 4th International Conference on Music Information Retrieval (ISMIR 2003), pp.229-230, 2003.
10. Masataka Goto: SmartMusicKIOSK: Music Listening Station with Chorus-Search Function, Proceedings of the 16th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST 2003), pp.31-40, 2003.

#### 招待講演

1. Masataka Goto, Music Scene Description: Toward Audio-based Real-time Music Understanding, The 143rd Meeting of the Acoustical Society of America, 2002 年 6 月 4 日.
2. 後藤 真孝: J-POP 革命のための音楽情報処理, DBWeb2002 (データベースとWeb情報システムに関するシンポジウム), 2002 年 12 月 3 日.

#### 受賞

1. 日本音楽知覚認知学会 研究選奨 受賞, 2002 年 11 月.
2. 情報処理学会シンポジウム インタラクション 2003 ベストペーパー賞 受賞, 2003 年 2 月.

## 研究課題別評価

### 1.研究課題名 共有仮想空間におけるリアルタイム 3次元通信

### 2.研究者氏名 斎藤 英雄

### 3.研究の狙い：

本研究では、多数のカメラで撮影された多視点画像から復元される実際のシーンの3次元構造モデルを仮想環境内で共有し、3次元通信を行うことのできる「仮想環境共有型3次元通信システム」を構築し、それを応用した新しい通信システムを提案することを目的とする。このシステムは、多数カメラにより得られる画像から対象シーンの3次元復元を行い、復元された3次元モデルを元に仮想カメラを自由に動かして観察できるような仕組みを提供する手法に基づいたものである。この技術を通信に応用することにより、複数の異なる場所で多数のカメラで撮影され、そして復元された3次元モデルをコンピュータネットワークにより通信することにより、各通信者はお互いの3次元形状を仮想的に融合して共有することができ、あたかも同じ空間に存在するような仮想現実感を得ることが可能になる。

この研究では、上記の仮想環境共有型3次元通信に関連するシステムの構築を通して、これを実現するために必要な要素技術である、

画像からの幾何学形状推定とモデル化

仮想環境における情報提示・インタラクション

三次元形状・多視点画像の圧縮とモデル化

に関係した基盤技術の研究を行うことによって、研究目的である新しい通信システムの実現に寄与したいと考えている。

### 4.研究結果：

本研究では、画像からの幾何学形状推定とモデル化、仮想環境における情報提示・インタラクション、三次元形状・多視点画像の圧縮とモデル化、の3つの技術に関する成果を得た。

画像からの幾何学形状推定とモデル化

・マルチカメラシステムによる共有仮想空間通信実験

マルチカメラによる3次元復元システムを2セット構築し、仮想空間を共有した3次元通信の実験を行った。このシステムは、4台のカメラと撮影用PC及び表示用PCからなるシステムを2セット接続したものであり、毎秒数フレームの処理速度で3次元形状モデルを復元し、仮想視点画像を生成し、ネットワークを介してお互いの3次元形状モデルや仮想視点画像を通信することができる。このシステムを構築することにより、仮想空間を共有したような効果を与える通信の実験を行うことができた。このシステムにおいては、4台のカメラシステムのカメラキャリブレーションを不要にするための手法として、正射影グリッド空間(Orthographic Projective Grid Space:OPGS)を利用している。これは、2台のカメラで定義された座標系である、Projective Grid Space(PGS)において、カメラの射影歪みを避けるために、正射影とみなせる別の2台のカメラを用意し、そのカメラによってPGSを定義するものである。なお、この手法を利用した多視点カメラシステムに関する特許を出願

した。

#### 射影幾何学理論を利用した新手法の提案

上記の実験のように、多数のカメラを利用して3次元空間の幾何学的情報を得るためには、それぞれのカメラの幾何学的位置関係を実験データから推定(カメラキャリブレーション)する必要がある。この推定を簡易に行うことは、このようなシステムを実際に利用する上で重要な技術となる。そこで、この研究では、カメラキャリブレーションを簡易に行い、しかも簡易に対象の3次元形状を推定可能な手法として、射影幾何学理論を効果的に利用した新しい手法について研究を進めた。

#### その結果

- 手持ちビデオカメラの連続画像からの3次元形状復元における射影復元利用手法
- 未校正で動きが未知の画像列からの超解像画像生成・光線空間の構築
- 未校正で動きが未知の画像列への仮想物体の重ねあわせ合成
- 未校正マルチカメラ画像からの3次元ボクセルサイズに依存しない形状復元

等の新しい手法を提案し、有効性を検証することができた。

#### 仮想環境における情報提示・インタラクション

上記の に関する成果は、仮想環境共有型3次元通信システムにおける3次元環境幾何学的情報を入力する技術に関する成果である。共有仮想環境での通信では、入力された3次元環境情報を提示し、さらに人と人がインタラクションを通して情報共有することが重要なポイントになってくる。この意味において、一旦仮想環境に入力した3次元環境情報の提示技術・インタラクション技術は極めて重要である。本研究では、このような観点の元、以下に述べるような、仮想と現実の融合提示システム・インタラクションシステムを構築した。

#### デジタル文書画像の現実物体への投影提示システム

これは、デジタル画像としてアーカイブされた文書を見る時に、画面ではなく、現実の紙の上に文書が印刷されているようにユーザに提示することにより、デジタルメディアをより自然に見ることができるようにするシステムである。PCに蓄積されたデジタル文書画像を何も印刷されていない本の表面に投影する。このとき、本の形状や位置・向きが変化しても、その変化に追従するようにデジタル画像の投影をコントロールすることにより、あたかもその本にデジタル文書が印刷されているように提示するわけである。このために、投影するためのプロジェクタと本の形状・位置・姿勢をモニタするためのカメラを上空に設置しておき、このカメラに撮影した画像を利用する。投影する画像のコントロールのために、カメラ画像平面、本の表面、プロジェクタ投影平面の3者の関係を平面射影変換行列でモデル化し、これらの平面射影行列をカメラに撮影された画像から推定する手法を新たに考案し、実装している。

#### 仮想化されたサッカー映像を現実のスタジアムで観戦するシステム

多視点から撮影したサッカー映像を利用して仮想化され、任意視点映像が生成可能なサッカー映像を現実のスタジアムのグラウンド上に重畳提示し、あたかもそのスタジアムで試合が行われているような提示を行うシステムの検討を行った。このシステムでは、ヘッドマウントディスプレイ(HMD)を通して、現実には誰も居ないスタジアムのグラウンドを見ると、HMDに取り付けられて

いるカメラの画像からHMDの位置や姿勢を推定し、HMDの位置や姿勢に合う視点でのサッカー映像が重畳表示される。このようにして、現実のスタジアムで仮想化されたサッカーシーンを観戦することができる。

#### 手振り動作の実時間認識によるインタフェースシステム

ウェアラブルコンピューティングのインタフェースとしてステレオカメラを胸部前面に装着し、カメラの前面で手の位置や姿勢を変化させることによる3次元ウェアラブルインタフェースを実現した。3次元マウスを用いて3次元デスクトップを操作し、その映像が頭部に装着されたディスプレイに表示されるようになっている。手の3次元位置と3軸方向の回転を用いて、容易に3次元仮想空間における操作を実現できるインタフェースとなっている。また、近くにある壁に対する相対的な腕の回転・移動を利用したモーションセンサーにより、ユーザの体の向きにより仮想環境における姿勢も制御できる。

#### 三次元形状・多視点画像の圧縮とモデル化

共有仮想環境での通信では、上記に述べてきた入力技術、情報提示・インタラクション技術に加え、さらに効率的な情報通信技術が重要になる。本研究では、3次元モデルを獲得する際に利用した入力の多視点画像の視点間整合性に着目し、その整合性を保存するようなポリゴンの割り当て方をすることにより、データの削減を図る手法を考案した。この手法を用いると、もともとテクスチャの変化が少なく、3次元モデル形状の誤差が任意視点画像に大きく影響を与えないような部分については、例えば形状が複雑でも、少数のポリゴンしか割り当てない。一方、形状の変化が少ない部分でも、テクスチャの変化が大きい場所には多くのポリゴンを割り当てて、3次元モデル形状の誤差が任意視点画像に与える誤差を抑えることができる。

#### 5. 自己評価：

研究の目的である仮想環境共有型3次元通信を実現するために必要な要素技術である、

画像からの幾何学形状推定とモデル化

仮想環境における情報提示・インタラクション

三次元形状・多視点画像の圧縮とモデル化

それぞれについて、質・量共に充実した多くの成果が出せたと考えている。特に、最終年度に入ってから、に関連した研究成果を多く残すことができた。これは、本研究のためのサポートにより、実験に必要な設備を十分に導入できたことが大きく影響している。これは当初から、最初の年度は、に関連した研究を推進し、その成果を、に生かすという計画であったが、ほぼ当初計画通りに成果が挙げられたことになると考えている。

但し、に関連した成果については、他の2項目に比べると多くの成果を残すことが出来なかった。当初は、及びを進めていくことにより、の研究もそれに伴って進み、問題点やそのためのアプローチが明確になっていくと予想していたのだが、実際は、の研究の必要性のみがクローズアップされ、問題解決のためのアプローチを明確にし、実現することが十分できなかった。これについては、今後の研究で解決していきたい。

また、も含めた要素技術が更に発展することが、本研究成果を実用化に結びつける大きな要因であると考えられる。このことを踏まえたうえで、今後更に本研究で得た成果を発展さ



せていきたいと考えている。

#### 6.研究総括の見解：

本研究では、多数のカメラで撮影された多視点画像から復元される実際のシーンの3次元構造モデルを仮想環境内で共有し、3次元通信を行うことのできる「仮想環境共有型3次元通信システム」を構築を目指し、多くの要素技術において研究成果をあげた。特に、マルチカメラによる3次元復元システムを2セット構築し、仮想空間を共有した3次元通信の実験が実施できたこと、更に仮想環境における新しい情報提示システムを複数試作し、有効性を示していることは、大いに評価できる。しかしながら、仮想空間共有3次元通信の実験では、その画質や処理速度が実用レベルに達することができなかつたことや、3次元形状・多視点画像の圧縮とモデル化については十分な成果が得られなかつたこと等、今後ブレイクスルーすべき課題を残している。今後の発展が強く期待される。

#### 7.主な論文等：

##### 論文

1. 磯大輔, 斎藤英雄, 小沢慎治, 距離情報とカラー情報の融合によるシルエット検出に基づく任意視点画像描画システム, 画像電子学会誌、ビジュアルコンピューティング論文特集号、Vol.31, No.4, pp.525-533, Aug.2002.
2. 斎藤英雄, 木村誠, 矢口悟志, 稲本奈穂, 射影幾何を利用した多視点画像からの中間視点映像生成, 情報処理学会コンピュータビジョンとイメージメディア研究会論文誌、Vol.43, No.SIG11, pp.21-32, Dec.2002.
3. 清真一郎, 斎藤英雄, 未校正の移動カメラによる複数平面シーンの超解像度画像生成, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J86-D-II, No.5, pp.688-696, May 2003.

##### 国際会議論文

1. D. Iso, H. Saito, Modeling and rendering in 3D coordinate defined by two cameras for shared virtual space communication, MIRAGE2003, pp.28-37, Mar.2003.
2. H. Todoroki, H. Saito, Light field rendering with omni-direction camera, Visual Communications and Image Processing (VCIP2003), Proceedings of SPIE, Vol.5150, 124, Jul.2003.
3. H. Saito, S. Kamijima, Factorization Method Using Interpolated Feature Tracking via Projective Geometry, Proc. 14th British Machine Vision Conference, Vol. II, pp.449-458, Sept. 2003.
4. Shinichiro Hirooka, Hideo Saito, Displaying Digital Documents on Real Paper Surface with Arbitrary Shape, The Second International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR03), Oct.2003.
5. Naho Inamoto, Hideo Saito, Immersive Observation of Virtualized Soccer Match at Real Stadium Model, The Second International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR03), pp.188-197, Oct.2003.

#### 口頭発表

1. 中村 芳浩, 斎藤 英雄, “Visual Hull を利用した多視点画像からの仮想視点画像生成”, 情報処理学会 CVIM 研究会, 133-15, May 2002
2. 保利栄作, 斎藤英雄, “視差画像を用いたウェアラブルな3次元デスクトップ環境の構築”, 第8回画像センシングシンポジウム講演論文集, pp.499-504, July 2002.
3. 辻大輔, 斎藤英雄, “物体表面のテクスチャを考慮した細分割曲面フィッティングによる3Dメッシュデータの圧縮”, 電子情報通信学会技術報告, PRMU2003, Jan. 2003.
4. 江森基倫, 斎藤英雄, “任意テクスチャの現実物体への重畳表示による拡張現実感システムの構築”, 電子情報通信学会 2003総合大会, D-12-121, Mar. 2003
5. 山口義隆, 斎藤英雄, “未校正多視点画像からの多面体表面モデルの直接復元法”, 情報処理学会 CVIM 研究会, 138-6, May 2003
6. 等々力寛, 斎藤英雄, “全方位カメラ画像からの光線空間構築による任意視点画像生成”, 情報処理学会 CVIM 研究会, 138-7, May 2003
7. 広岡慎一郎, 斎藤英雄, “任意形状表面への自己補正投影システム”, 情報処理学会 CVIM 研究会, 138-8, May 2003

#### 解説 招待発表

1. 斎藤英雄, “多視点画像からの自由視点映像生成技術の動向”, 電気学会論文誌 C, 特集解説, Vol.121-C, No.10, pp.1493-1499, Oct. 2001.
2. 斎藤英雄, “自由視点映像生成”, エンタテインメントコンピューティング2003, 招待セミナー「エンタテインメント仮想環境」, 2003年1月14日

#### 特許

1. 特願 2003-036577 自由視点動画画像データ生成方法およびその処理をコンピュータに実行させるためのプログラム

## 研究課題別評価

1. 研究課題名 感性の開拓のための方法論構築 ? デザインのパーソナル化に向けて?

2. 研究者氏名 諏訪正樹

3. 研究の狙い:

感性」の存在は誰も疑わない。誰もが感性を磨いて創造的な自己を実現したいと考える。しかし、科学的な既往研究は皆無に等しく、どのように教育すれば感性が磨かれるのかは全く未知である。本研究では、感性に認知科学的な定義を与え、一般人が自己の感性を開拓し磨くための教育的方法論を構築することを目的とする。

上記目的を達成するためには以下のアプローチが必要である。一般に感性が豊かであるとされるデザイナーと、そういう活動に携わっていない一般人を認知的な尺度から比較することを通じて、感性の本質を探究するというアプローチである。比較するための認知課題として何を選定するかもキーポイントになる。

4. 研究結果:

まず、感性に認知科学的な定義を与えた。感性は、人間が外界世界との関わり方を規定する基本的認知能力であると考え。我々人間は、外界から何かを知覚し、それにより何かを感じ、その結果として経験することにより、外界世界と関わる。そこで本研究では、感性を、外的表象の中に新しい視覚的空間的発見を行う知覚行為と、新しい解釈や意味付けを想起する概念行為の両者をコーディネートして働かせる認知能力であると定義した。この認知能力を構成的知覚 (constructive perception) と命名した。

次に、構成的知覚能力の指標となる認知的課題として、曖昧図形の多様解釈という課題を見出したことが本研究の第二の成果である。図形の全体もしくは部分を何かに見立てて、限られた時間内にできるだけ多くの異なる解釈を与えるという課題である。一般に、解釈の生成率は少し時間が経つと急激に低下する。それは、既に与えた自分の解釈に縛られて異なる視点から図を見られなくなるという一般的認知傾向 (fixation 現象) があるからである。生成率の急激な減衰を避けて解釈を与え続けるには、図の中に新たな視覚的空間的特徴を知覚し、概念的連想により新しい意味付けを行わなければならない。曖昧図形の多様解釈課題は、まさに構成的知覚能力を必要とする。筆者の過去の研究によれば、図を構成する諸要素の組み合わせの仕方を意識的に組み換えるという知覚的戦略が、生成率の大幅な向上に繋がることが判明している。つまり、自分の知覚に対するメタ認知がこの課題の遂行に有効である。知覚的な発見と概念的意味付けをコーディネートするためには、自分の知覚行為や概念行為をメタ認知することが必要とされる。構成的知覚能力は一種のメタ認知能力である。

本研究期間の3年間に約120名の被験者が曖昧図形実験に参加した。被験者は、4種類のグループに分かれる。プロのデザイナー (インダストリアルデザイン、建築、グラフィック)、デザインを学習している学生、デザインと無関係の仕事をしている一般社会人、デザイン以外の分野の学習をしている学生である。実験データに不備を生じた被験者を除き、合計107名の被験者に関して分析を行った。プロのデザイナー23名、デザイン学生27名、一般社会人20名、一般学生37名

である。プロのデザイナーはデザイン学生よりも解釈生成数が多く、またデザイン学生は一般学生よりも解釈生成数が多いことが判明した(統計的有意差あり)。また一般社会人の平均値は、デザイン学生と一般学生の間であったが、どちらとも有意差はなかった。デザイン課題ではない単純な認知課題においてプロのデザイナーが傑出していることに注目すべきである。この結果は、構成的知覚能力は、少なくともデザインにおける感性に深く関わっていることを示唆している。この種の統合的メタ認知能力を異なる職業の被験者で測定する研究は、過去に例をみない。

本研究の最大の成果は、感性を開拓するための教育方法論を構築したことにある。中京大学諏訪研究室のゼミ活動の一環として、以下の実験的教育プログラムを取り入れた。上記の研究成果に基づき、知覚的発見と概念的意味付け連想の両要素を含むような実践的な活動課題をデザインし、学生に行わせた。例えば、絵画に含まれる様々な中空の空間(何も描かれていない空間)の意味を考えると課題や、実世界にある建築空間の特徴(視角的特徴や空間的位置関係)が持つ意味を解釈するという課題である。ここで重要なのは、本来、意味付けや解釈に正しい答えはないという認識を学生に持たせ、自由に解釈をさせることである。どんな特徴を知覚し、それにどのような解釈を与えるかは、一人一人の感性に依存する。客観的な良し悪しを論じられる類いのことではない。上記の課題は、自分が何を知覚しどのような解釈を与えているかをメタに認知することを求めている点で、まさに構成的知覚能力の育成に適している。

約9か月に渡る活動の前後に曖昧図形課題を遂行させることにより、構成的知覚能力が向上したかどうかを評価した。また、統制グループとして、上記の実験的育成活動を行わない被験者にも、一定期間を置いて曖昧図形課題のパフォーマンスを2回測定した。被験者は、プロのデザイナー12名、一般社会人6名、デザイン学生7名の合計25名である。教育を受けた学生の解釈生成増加率(教育活動後の生成数を教育活動前の生成数で割ったもの)の平均値は1.65であった。明らかな増加がみられる。それに対して、統制グループの解釈増加率の平均値は1.08であった。両グループの増加率には統計的有意差が認められた( $F(1,37)=11.29, p<0.01$ )。この結果は、構成的知覚育成プログラムの教育効果を明示している。教育を受けた学生の教育後の解釈生成数の平均値は42.4個である。これは、先に述べた4被験者グループの比較実験におけるデザイン学生の平均値水準に匹敵する。その実験で一般学生37名の平均値は27.2個であり、この学生らの教育活動前のデータも含んだ数字である。明らかに、彼らは教育活動により構成的知覚能力という観点から別人になったと結論付けられる。

## 5. 自己評価

感性と構成的知覚能力の関連性を示せたことが、本研究において最重要であったと感ずる。曖昧図形課題が構成的知覚能力の指標になり得るという発見は、デザイナーの認知プロセスを分析する実験を行っている際に、曖昧図形課題の本質に関連するようなプロセスを見出したことから生まれた。この発見が感性を磨くための教育活動をデザインするための知見を与えた。一般に、研究はプロポーザルを提出し認可されることにより始まるが、プロポーザルに書いたことだけに固執しては良い成果は生まれない。如何に研究期間中に研究的アンテナを張り巡らすことができるか、如何に敏感に新しい発見を行えるかが、研究成果の善し悪しを決定する。上記の研究的発見は、この点において大成功であったと評価できる。また、教育プログラムにおいて、ケーススタディ的な研究成果ではあるが、感性の開拓の実践的な実証が行えたことは評価に値すると自負

している。

## 6. 研究総括の見解：

人間の感性を磨くための教育方法は確立されていない。感性に関する研究がいまだに未熟だからである。諏訪正樹は多くの認知的実験的研究を通して、個々人が独自に持つ感性を磨くための教育方法論の構築を目指した。研究の成果として、これまで科学的探求の的にならなかった「感性」に、構成的知覚能力という認知科学的な定義を与え、これにより科学的に感性の問題を扱うための糸口を得たことは評価に値する。第二の成果は、構成的知覚という知見に基づき、感性を開拓するための方法論をケーススタディとして示したことにある。教育プログラムを受けた学生が、教育プログラムを受けないグループに比べ、1年弱の期間において構成的知覚能力が大きく向上したことを実証したことは高く評価できる。この成果が、小学校、中学校などの低年齢層への教育に適用できる日を強く期待する。

## 7. 主な論文等

### 論文

1. 諏訪正樹、(2001). 外的表象を上手にみるための知覚的スキル-創造への源泉-、日本認知科学会 18回全国大会、函館 2001 年 6 月, pp.266-267.
2. Suwa, M., Tversky, B., Gero, J. and Purcell, T. (2001). Regrouping parts of an external representation as a source of insight, Proc. of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Cognitive Science, pp. 692-696, Press of USTC, Beijing, China, Aug. 2001.
3. Suwa, M. and Tversky, B. (2001). Constructive perception in design, in J. S. Gero and M. L. Maher (eds), Computational and Cognitive Models of Creative Design V, Key Centre of Design Computing and Cognition, University of Sydney, Sydney, Australia, pp.227-239, 2001.
4. Suwa, M. and Tversky, B. (2002). External representations contribute to the dynamic construction of ideas, Proc. of the Second International Conference on Diagrammatic Representation and Inference: Diagrams 2002, Callaway Gardens, GA, Springer-Verlag, pp.341-343.
5. Suwa, M. and Tversky, B. (2002). Constructive Perception: An Expertise to Use Diagrams for Dynamic Interactivity, Proc. of 24<sup>th</sup> Annual Conference of the Cognitive Science Society, Virginia, USA, August 2002, p.55 (publication-based talk).
6. Suwa, M. (2003). Constructive perception: Coordinating perception and conception toward acts of problem-finding in a creative experience. Japanese Psychological Research, Vol.45, No.4, 221-234.
7. 諏訪正樹、(2003). 構成的知覚 ? 知覚と概念をコーディネートする認知能力?、日本認知科学会第 20 回大会、電気通信大学、2003 年 6 月, pp.30-31.
8. Suwa, M. and Tversky, B. (2003). Constructive perception: A meta-cognitive skill for coordinating perception and conception, to appear in Proc. of 25<sup>th</sup> Annual Conference of the Cognitive Science Society, Boston, USA.
9. Suwa, M. and Tversky, B. (2003). Constructive perception: a meta-cognitive skill for driving divergent processes in creation, to appear in Proc. of ICCS/ASCS-2003, Joint International

Conference on Cognitive Science, Sydney, Australia, pp.658-659.

#### 受賞

1. 認知科学会第18回大会、大会発表賞、2002年6月受賞

#### 招待講演、招待講義

1. 諏訪正樹. デザインプロセスの認知分析と創造性教育、東京工業大学大学院建築学科特別講義、2002年3月
2. Suwa, M. Protocol Analysis of Design Processes, Invited Intensive Lecture at MS and PhD Programs, Graduate Institute of Architecture, National Chiao Tung University, Hsinchu, Taiwan, Oct., 2002.
3. Suwa, M. Spatial Cognition for Creative Processes, Invited Lecture at Stanford University CSLI e-Zuka Seminar "Spatial Cognition and Design"; Kyushu Institute of Technology, Dec., 2002.

## 研究課題別評価

1. 研究課題名 : 文字列データ圧縮に基づく高速知識発見システムの構築

2. 研究者氏名 : 竹田 正幸

3. 研究の狙い :

大量のデータから、そこに内在する規則や傾向などを、計算機によって半自動的に発見する機械発見技術の確立が強く望まれている。本研究では、データ圧縮という古典的研究分野に「機械発見処理の高速化」という新しい価値基準を導入し、この視点から、データ圧縮で用いられる各要素技術の再評価を行い、機械発見システム構築のための基礎技術を確立することを目的とする。

本研究では、対象を、陽には構造をもたない文字列データに絞り、文字列データを対象とした機械発見の問題を扱う。データ圧縮と機械発見を統一的に扱うために、文字列記述の形式的体系を導入し、このもとで、機械発見に必要な文字列処理問題の計算量を解析してその階層を究明する。また、実用的に有用なクラスに関して、文字列照合や文字列データ圧縮の技術を駆使した高速なアルゴリズムを開発することを目指す。

4. 研究結果 :

文字列データからの知識発見のための要素技術の確立を目指して、理論と実用の両面から研究に取り組んできた。その成果の概要は以下の通りである。

### 【理論的側面】

[1] 本研究の第 1 の特色は、データ圧縮を処理速度向上の手段として用いるという一見常識に反する手法を提案し、高速化に成功した点である。圧縮による高速化の研究は、フランスのマルネラ・ラ・バレー大学の M. クロシュモア教授、イスラエルの G. ランダウ教授、米国のブランディス大学 J. ストラー教授など、当該分野第一線の研究者から高く評価され、このアイデアに追随した研究も多く見受けられるようになった。圧縮による高速化に関して、以下の成果を得た。

1. 複数パターン照合の高速化。
2. 近似文字列照合の高速化。

[2] 本研究の第 2 の特色として、従来ディスク容量の節約やデータ転送量の低減のみを目的としていたデータ圧縮を、機械発見の観点から捉え直した点が挙げられる。ここでは、「パターンによる圧縮」という概念を導入することによって、「パターン発見」と「テキスト圧縮」という一見まったく別の問題が、実は密接に関連していることを顕在化させた。具体的には、以下の成果が得られた。

1. 部分文字列パターン、部分列パターン、VLDC パターン、Angluin パターン、断片パターンなど、様々な形式のパターンのクラスに対し、
  - (a) パターン照合問題、
  - (b) 最適弁別パターン発見問題、

- (c) 最適パターン発見問題、
  - (d) 類似度計算問題
- の各々についての計算量階層の究明。
2. 1 で多項式時間計算可能と判明したパターンクラスについての高速度アルゴリズムの開発。
  3. 1 で計算困難性が示されたものについて、実用時間内に動作させるための有効な枝刈り方式等の開発。

[3] 以下で述べる「実用的研究」の[1]、[2]で得た知見を生かし、ウィンドウ幅の制限や近似的照合を加味したパターン照合を盛り込んだ、より表現力の豊かなパターンを対象に、高速パターン発見処理を理論的に追求した。具体的には、以下の2つについて研究を進め、効率的手法の開発に成功した。

1. 表現力のアップしたパターンのクラスについての計算量階層究明。
2. 有効な枝刈り手法の開発。
3. さらなる高速化のための、高速パターン照合技術の開発。

#### 【実用的側面】

[1] 知識発見システムにおいては、システムは、あらかじめ設定した仮説空間の中から最もスコアの高い仮説を選び出し出力する。だが、この「仮説」がそのまま有益な発見につながるわけではない。専門家による仮説の評価・意味づけ作業を通して、初めて有益な知見が得られる。この評価は、必ずしも体系的なものではなく、自然科学分野においてすら、学問的「勘」や長年の経験に基づく「コツ」と無縁ではない。したがって、成功のカギは、このような専門家の「主観的判断」をどれだけうまくシステムに取り込み得るかにかかっている。

そこで、研究の第1段階においては、上述の理論的研究の傍ら、最も主観的判断を伴う学問領域のひとつとして文学を選び、文学研究者の協力を得て「古典和歌からの知識発見」という研究テーマに挑んだ。その結果、国文学上の研究成果として学会発表され、学術雑誌論文にもまとめられるほどの、レベルの高い発見がなされ、3度にわたって新聞報道されるなど、社会的にも大きなインパクトを与えた。

[2] この経験を通して、専門家の主観的知見をも取り込むためのノウハウを蓄積することができた。すなわち、専門家の問題意識や対象領域の性質をできる限り反映した、柔軟でより表現力のある仮説空間を設定することの重要性が判明した。一方、計算量の観点からは、できるだけ単純な仮説空間を設定しておかなければ、実用的時間内に計算を終了させることが困難である。そこで、研究の第2段階においては、より豊かな仮説空間に対する知識発見の問題を可能な限り高速に処理するための研究に、真正面から取り組んだ。かなり難易度の高い課題であった、膨大な探索空間に対する有効な枝刈り方式と、複雑なパターンに対する高速照合技術の開発に成功した。

また、いわゆるデータ発掘の出力は、そのままでも有用であることはなく、人間による評価・解釈作業が重要となるが、この作業を支援する方策として、パターンのコンパクトな表現法に基づく可視化の研究も併せて行い、ソフトウェアを作成し実用に供した。



## 5. 自己評価 :

本研究では、テキストデータからの知識発見の核となる要素技術の開発を目指した。その最大の目的は、知識発見処理の高速化にあった。だが、誰も使わないような処理を高速化しても無意味である。このような研究を有意義なものとするためには、現実社会に存する問題をうまく定式化することにより、真に意味のある知識発見問題について高速化を目指すべきである。そこで、単にアルゴリズムを開発して処理技術の高速化を図るだけでなく、一方で現実の問題へ適用し、本研究で開発した知識発見処理の有効性を検証し続ける必要がある。すなわち、理論と応用の両面から、知識発見の問題へ取り組む必要がある。

本研究では、このような観点から、3年間知識発見の研究に取り組み、満足のいく成果をあげることができた。ここで扱っているテキストデータとは、文字の連鎖であればよく、内容は問わない。したがって、本研究で得られた要素技術は、Web ページなどの自然言語文はもとより、遺伝子情報、音楽情報などにも適用できるなど、応用範囲はきわめて広い。

最適弁別パターン発見問題に関しては、本研究で開発した技術を使って、DNA の塩基配列やアミノ酸配列を対象とした実験を、分子生物学者の協力を得ながら引き続き行っている。仮説空間を変更した後の分子生物学者側の反応は、これまでと明らかに違っており、生物学上の有益な発見が得られるものと期待できる。

また、類似度計算問題に関しては、音楽情報の他、医薬品取り換え防止の観点から、薬名間類似性指標の設計を目指し、薬学分野の研究者との共同研究を遂行中である。

さらに、本研究の成果として得られた技術は、時系列データ解析にも有効と思われる。現在、いくつかの具体的な問題に本手法を適用し、その解決に取り組んでいる。

## 6. 研究総括の見解 :

急速に情報社会化が進みネットワーク上に情報が氾濫する中で、個人や組織が必要な情報を主体的に獲得し、迅速な意思決定を行うために不可欠である「大量データからの知識発見技術の開発」という緊急の課題に取り組む、大量・不定形・不均質なデータから知識獲得を行うための新しい基盤技術の確立を目指し、顕著な成果をあげた。具体的には、特徴パターン発見、最適弁別パターン発見、類似文字列発見という3つの問題のそれぞれに対し、多様な仮説空間に対する高速な発見アルゴリズムを開発・実装し、発見支援システムに結実させた。また、理論と実装にとどまらず、応用面においても、言語学や文学、分子生物学といった他分野の研究者と手を組み、現場の具体的な問題に対して開発手法の有効性を示した点は、高く評価できる。今後の研究発展が強く期待される。

## 7. 主な論文等

論文 (査読付き論文のみ)

1. M. Takeda, S. Inenaga, H. Bannai, A. Shinohara and S. Arikawa: Discovering Most Classificatory Patterns for Very Expressive Pattern Classes. Ⅱ Proc. 6th International Symposium on Discovery Science (DS2003), 486-493, Springer-Verlag, October 2003.
2. S. Inenaga, T. Funamoto, M. Takeda and A. Shinohara: Linear-Time Off-Line Text

- Compression by Longest-First Substitution. In Proc. 10th International Symposium on String Processing and Information Retrieval (SPIRE2003), 137-152, Springer-Verlag, October 2003.
3. K. Baba, S. Tsuruta, A. Shinohara, and M. Takeda: On the Length of the Minimum Solution of Word Equations in One Variable. In Proc. 28th International Symposium on Mathematical Foundations of Computer Science (MFCS2003), 189--197, Springer-Verlag, August 2003.
  4. K. Baba, A. Shinohara, M. Takeda, S. Inenaga, and S. Arikawa: A Note on Randomized Algorithm for String Matching with Mismatches. *Nordic Journal of Computing* 10:2-10 (2003).
  5. H. Bannai, S. Inenaga, A. Shinohara, and M. Takeda: Inferring Strings from Graphs and Arrays. In Proc. 28th International Symposium on Mathematical Foundations of Computer Science (MFCS2003), 208-217, Springer-Verlag, August 2003.
  6. T. Kida, T. Matsumoto, Y. Shibata, M. Takeda, A. Shinohara, and S. Arikawa: Collage system: A unifying framework for compressed pattern matching. *Theoretical Computer Science* 298(1):253-272 (2003).
  7. S. Miyamoto, S. Inenaga, M. Takeda, and A. Shinohara: Ternary Directed Acyclic Word Graphs. In Proc. Eighth International Conference on Implementation and Application of Automata (CIAA2003), Springer-Verlag, July 2003.
  8. M. Hirao, H. Hoshino, A. Shinohara, M. Takeda, and S. Arikawa: A practical algorithm to find the best subsequences patterns. *Theoretical Computer Science* 292(2):465-479 (January 2003).
  9. M. Takeda, T. Fukuda, I. Nanri, M. Yamasaki, and K. Tamari: Discovering instances of poetic allusion from anthologies of classical Japanese poems. *Theoretical Computer Science* 292(2):497-524 (January 2003).
  10. M. Takeda, T. Matsumoto, T. Fukuda, and I. Nanri: Discovering characteristic expressions in literary works. *Theoretical Computer Science* 292(2):525-546 (January 2003).
  11. H. Bannai, S. Inenaga, A. Shinohara, M. Takeda, and S. Miyano: A String Pattern Regression Algorithm and Its Application to Pattern Discovery in Long Introns. In *Genome Informatics 13*, (GIW2002), pp. 3-11, Universal Academy Press, Inc., December 2002.
  12. M. Takeda, T. Fukuda, and I. Nanri: Mining from Literary Texts: Pattern Discovery and Similarity Computation. In *Progress in Discovery Science (Final Report of the Japanese Discovery Science)*, Lecture Notes in Artificial Intelligence (LNAI2281), Springer-Verlag, 2002.
  13. A. Shinohara, M. Takeda, S. Arikawa, M. Hirao, H. Hoshino, and S. Inenaga: Finding Best Patterns Practically. In *Progress in Discovery Science (Final Report of the Japanese Discovery Science)*, Lecture Notes in Artificial Intelligence (LNAI2281), 307-317, Springer-Verlag, 2002.
  14. S. Inenaga, H. Bannai, A. Shinohara, M. Takeda, and S. Arikawa: Discovering Best Variable-Length-Don't-Care Patterns. In Proc. 5th International Conference on Discovery Science (DS2002), Lecture Notes in Artificial Intelligence (LNAI), Springer-Verlag, November

- 2002.
15. M. Takeda, S. Miyamoto, T. Kida, A. Shinohara, S. Fukamachi, T. Shinohara, and S. Arikawa: Processing text files as is: Pattern Matching over compressed texts, multi-byte character texts, and semi-structured texts. In Proc. 9th International Symposium on String Processing and Information Retrieval (SPIRE2002), 170--186, Springer-Verlag, September 2002.
  16. S. Inenaga, A. Shinohara, M. Takeda, and S. Arikawa: Compact Directed Acyclic Word Graphs for a Sliding Window. In Proc. 9th International Symposium on String Processing and Information Retrieval (SPIRE2002), 310--324, Springer-Verlag, September 2002.
  17. S. Inenaga, A. Shinohara, M. Takeda, H. Bannai, and S. Arikawa: Space-Economical Construction of Index Structures for All Suffixes of a String. In Proc. 27th Inter. Symp. on Mathematical Foundation of Computer Science (MFCS2002), 341--352, Springer-Verlag, August 2002.
  18. S. Inenaga, M. Takeda, A. Shinohara, H. Hoshino, and S. Arikawa: The Minimum DAWG for All Suffixes of a String and Its Applications. In Proc. 13th Annual Symposium on Combinatorial Pattern Matching (CPM'02), 153--167, Springer-Verlag, July 2002.
  19. H. Bannai, K. Iida, A. Shinohara, M. Takeda, and S. Miyano: More speed and more pattern variations for knowledge discovery system BONSAI. In Genome Informatics 12 (GIW2001), 454--455, Universal Academy Press, Inc., December 2001.
  20. H. Hori, S. Shimozone, M. Takeda, and A. Shinohara: Fragmentary pattern matching: Complexity, algorithms and applications for analyzing classic literary works. In Proc. 12th Annual International Symposium on Algorithms and Computation (ISAAC'01), 719--730, Springer-Verlag, December 2001.
  21. M. Hirao, S. Inenaga, A. Shinohara, M. Takeda, and S. Arikawa: A practical algorithm to find the best episode patterns. In Proc. 4th International Conference on Discovery Science (DS 2001), 432--437, Springer-Verlag, November 2001.
  22. K. Yamamoto, M. Takeda, A. Shinohara, T. Fukuda, and I. Nanri: Discovering repetitive expressions and affinities from anthologies of classical Japanese poems. In Proc. 4th International Conference on Discovery Science (DS 2001), 413--425, Springer-Verlag, November 2001.
  23. T. Kadota, M. Hirao, A. Ishino, M. Takeda, A. Shinohara, and F. Matsuo: Musical sequence comparison for melodic and rhythmic similarities. In Proc. 8th International Symposium on String Processing and Information Retrieval (SPIRE 2001), 111--122, IEEE Computer Society, November 2001.
  24. S. Inenaga, H. Hoshino, A. Shinohara, M. Takeda, and S. Arikawa: On-line construction of symmetric compact directed acyclic word graphs. In Proc. 8th International Symposium on String Processing and Information Retrieval (SPIRE 2001), IEEE Computer Society, 96--110, November 2001.
  25. S. Inenaga, H. Hoshino, A. Shinohara, M. Takeda, and S. Arikawa: Construction of the CDAWG for a trie. In Proc. Prague Stringology Club Workshop (PSC2001), 37--48, Prague, Czech

Republic, September 2001.

26. T. Kida, T. Matsumoto, M. Takeda, A. Shinohara, and S. Arikawa: Multiple pattern matching algorithms on collage system. In Proc. 12th Annual Symposium on Combinatorial Pattern Matching (CPM'01), 193--206, Springer-Verlag, July 2001.
27. M. Takeda: String resemblance system - A unifying framework for string similarity with applications to literature and music. In Proc. 12th Annual Symposium on Combinatorial Pattern Matching (CPM'01), 147--151, Springer-Verlag, July 2001.
28. S. Inenaga, M. Hoshino, A. Shinohara, M. Takeda, S. Arikawa, G. Mauri, and G. Pavesi: On-line construction of compact directed acyclic word graphs. In Proc. 12th Annual Symposium on Combinatorial Pattern Matching (CPM'01), 169--180, Springer-Verlag, July 2001.
29. M. Takeda, Y. Shibata, T. Matsumoto, T. Kida, A. Shinohara, S. Fukamachi, T. Shinohara, and S. Arikawa: Speeding up string pattern matching by text compression: The dawn of a new era. 情報処理学会論文誌 42(3): 370--384 (March 2001).
30. G. Navarro, T. Kida, M. Takeda, A. Shinohara, and S. Arikawa: Faster approximate string matching over compressed text. In Proc. Data Compression Conference (DCC 2001), 459-468, IEEE Computer Society, March 2001.
31. S. Mitarai, M. Hirao, T. Matsumoto, A. Shinohara, M. Takeda, and S. Arikawa: Compressed pattern matching for SEQUITUR. In Proc. Data Compression Conference (DCC 2001), 469-478, IEEE Computer Society, March 2001.
32. 竹田正幸, 福田智子, 南里一郎, 山崎真由美, 玉利公一 和歌データからの類似歌発見. 統計数理 48(2): 289--310 (December 2000).

#### 解説記事 (学術雑誌)

1. 竹田正幸: コンピュータは文学研究を変えるか? 人工知能学会誌 17(3):326-330, 2002.
2. 竹田正幸, 篠原歩: 圧縮されたテキスト上のパターン照合 - データ圧縮とパターン照合の新展開 - , 情報処理学会誌 43(7):763-769, 2002.
3. 竹田正幸, 福田智子: 古典和歌からの知識発見 - モビルスーツを着た国文学者 - , 情報処理学会誌 43(9):941-949, 2002.

#### 解説記事 (一般誌)

1. 竹田正幸, 福田智子: 類似歌を探せ: デジタル国文学の新展開, 日経サイエンス 2002年5月号, 2002.
2. 竹田正幸: コンピュータで和歌を読み解く, 九大広報 27号, 2003.

#### 新聞報道

1. 紫式部と清少納言の意外な因縁をコンピューターが発見, 2001年5月26日朝日新聞夕刊一面トップ.
2. デジタル国文学, 2001年9月8日 日本経済新聞朝刊文化面(裏一面).
3. 計算機にヒラメキを, 2002年4月7日 日本経済新聞朝刊科学面.

4. 発見支援プログラム ,2003 年 11 月 12 日 朝日新聞朝刊 Labo ラボ探偵団.

招待 依頼講演

1. 竹田正幸：文学作品からのテキストマイニング - 文学における発見を支援する - ,電子情報通信学会チュートリアル企画 発見科学とデータマイニングの最前線 金融 ,経済 ,ゲノムからウェブまで」,2001 (依頼講演) .
2. Masayuki Takeda: Text Mining in Literary Works, PNC Annual Conference and Joint Meetings 2002. (依頼講演) .
3. 竹田正幸: 文学作品におけるデータマイニング ,2002 年度統計関連学会連合大会 (招待講演) .
4. 竹田正幸: 系列データからの知識発見 ~ 文学・音楽 分子生物学への応用をめぐる ~ ,情報処理学会九州支部 「火の国シンポジウム」,2003. (招待講演) .

## 研究課題別評価

### 1. 研究課題名 :音楽における創造活動を触発支援するシステム

### 2. 研究者名 :西本 一志

### 3. 研究の狙い :

本研究の最終的な目標は、アマチュアからプロフェッショナルまで、幅広い層の人々がより自分の思い通りに音楽を演奏して楽しむことができるようにするための方法論と技術を確立することにある。この目標に向けて、さきがけ研究の3年間では、特にクラシック音楽に代表される「再現演奏型楽曲」の演奏を主な研究対象とし、まずはその演奏表現構築過程の分析を行い、そこで得られた知見に基づき、誰もがより自在に独自の演奏表現を実現できる楽器のあり方を考案した。さらに、構築したプロトタイプシステムを用いた被験者実験を実施し、考案したアイデアの有効性を評価した。加えて、合奏のインタラクションの面白さに着目した、音楽を媒介とするコミュニティウェアとしても機能する装着型楽器の研究開発も行った。

音楽という芸術への取り組み方には、作曲・演奏・鑑賞の3つの方法がある。このうちもっとも広く普及している方法は「鑑賞」である。しかしながら、多くの人々は音楽鑑賞という受動的な音楽との関係に飽き足らず、もっと能動的に音楽と接することを欲していると思われる。とりわけ、自ら音楽を演奏して楽しむことへの欲求は強い。ところが現状において、自分の思うように音楽を演奏することは、一般に容易ではない。ほとんどの場合、楽譜どおりの音をはずさずに演奏したり歌ったりすることができるようになるという最初の段階でつまづいてしまう。また、努力してこの最初の段階を乗り越えたとしても、次には自分が創り出した演奏の質をいかにして向上させるかという難問が控えているし、そもそも「演奏の質の向上」ということに目を向けようとしないで、ただ闇雲に楽譜どおりに弾けた」だけで満足してしまう場合も往々にして見受けられる。これは、音楽の精神的側面を考慮しない単なる機械的作業への習熟であり、音楽とは言いがたいものである。

では、音楽演奏をもっと一般に広く楽しむことができるようにするには、どうすればいいのだろうか。演奏者は、何を考え、何をなすべきなのか。そして、演奏者の何を支援すべきで、何を支援すべきでないのか。本研究の狙いは、このような問題意識のもとに、演奏構築過程の分析を行うことによって豊かな演奏表現を実現するために考慮すべき要素を明らかにするとともに、より自在に独自の演奏表現を実現できるような、いわば「新しい楽器」を実現することにある。

### 4. 研究結果 :

#### (1) ピアノ・レッスンのケース・スタディに基づく演奏表現構築過程の分析 ~何が難しいのか~

演奏表現の構築過程においてどのような部分が問題となるのかを明らかにするために、ピアノ・レッスンのケース・スタディを実施し、その分析を行った。一般に演奏表現を構築する際に考慮する必要がある要素には、音高、音量、音長等があり、これらの要素を有機的・統合的に組み合わせることによって、演奏者は独自の演奏表現を構築する。しかし、これらすべての要素に気を配ることは難しく、ほとんどの場合はごく一部の要素にのみ着目し、他の要素に対する配慮が疎かになる。この結果、演奏表現が全体としてバランスを欠いたものとなってしまふ。そこで5回のピアノ・レッスンを2ケース行い、先生と生徒の演奏データを比較して、生徒の演奏における個々の「管

楽表情に関する要素」の変化を分析し、ピアノ演奏学習者がどのような点を見落としがちであるのか、あるいはどのような点に困難を感じるのかを洗い出すことを試みた。

この結果、音の強弱の推移については、レッスンが進むにつれて両生徒とも先生の演奏との演奏差が減少していくのに対し、鍵盤から指を離す速さ(離鍵速度)については演奏差がほとんど減少しないことがわかった。また離鍵速度の推移については、一方の生徒は練習を重ねるにつれてメリハリができていったのに対し、もう一方の生徒は回を追うにつれ単調で一樣な、メリハリのないものとなった。離鍵動作はアーティキュレーションやフレージングと密接に関連する重要な演奏要素であるが、楽譜上に明示的に指示されていない上に直接聞き取ることが難しい要素であるため、ピアノ演奏学習者があまり注目しない可能性があることが示された。また、今回の実験の2名の被験者のうち、一方の被験者は技術的な面でもう一方の被験者より劣る部分があり、その分音の強弱の推移の演奏差の減少がやや遅い傾向が見られた。しかし、この被験者の方が離鍵速度に対して配慮しており、必ずしももう一方の被験者より「音楽的に」劣っているとは言えず、むしろが優れている可能性もある。つまり、技術的な問題さえ乗り越えられれば、この被験者は非常に優れた演奏を実現できる可能性があることが示唆された。

#### ②) 離鍵動作に関する基礎的分析 ~ ピアノ演奏の独自性の現われどころはどこか ~

ピアノ演奏の際、ピアニストが手で制御できる要素は、(1)打鍵時刻、(2)打鍵強度、(3)離鍵時刻、(4)離鍵速度、の4つあるが、従来(4)の離鍵速度については非常に軽視されている。しかし、すぐれたピアニストが演奏する姿を見ていると、鍵盤を叩く時以上に鍵盤から指を離す動作に特徴を見出すことができる。そこで、本研究では離鍵動作に関する基礎的な分析を実施し、離鍵動作が「フレージング」と密接に関連があり、その結果として演奏者それぞれの演奏表現の「独自性」に関係があることを見出した。

まず、離鍵速度の変化によって音がどう変わるのかを調査した。離鍵速度以外はすべて同一の内容のMIDIデータを作成し、これをヤマハサイレントアンサンブルピアノC5プロフェッショナルモデルを使用して、電子音源ではなく実際にハンマーで打弦して音を発生させ、これをマイクで記録した音響データからスペクトログラムを求めた。この結果、離鍵速度の差によって周波数成分のパワーの減衰に差が生じ、音の消滅の時間の他に音色の差も現れることがわかった。次に、ピアニストが離鍵動作をどのように制御しているかを調べるために、4名の熟練者の演奏データを収集し、その演奏データを分析した。この結果、一人の演奏者について見ると、十分に練習して演奏表現を確立した状態であれば、打鍵速度と離鍵速度のいずれについても推移の再現性が高く、何度演奏してもほぼ同じ演奏になることがわかった。一方、4名の演奏者の演奏をそれぞれ比較すると、打鍵速度の推移は4名の間であまり大きな差が無いのに対し、離鍵速度の推移は4名の間で大きく異なることがわかった。各演奏者の離鍵速度の推移を楽曲の構造に照らして分析したところ、いずれの演奏者も離鍵速度の推移(特に、非常に遅い離鍵速度を使用する箇所)が、楽曲構造となんらかの一貫性ある対応をもつことがわかった。つまり離鍵速度の制御は、演奏に楽曲構造を反映させるために非常に重要であることがわかった。

#### ③) 理想の楽器を目指して ~ 再現演奏」のための楽器を例題として ~

私の考えでは以下の条件を満たす楽器が理想の楽器である a) 低い初期障壁: 初心者が楽器に触れてすぐにそこそこの演奏ができて楽しめること、b) 上達の余地: 練習を積むことによって実感できる速度で上達できること、c) 極限における品質の高さ: 最終的に到達可能な演奏表現のレベルは、既存の伝統的な楽器と比べて勝るとも劣らないものであること。ほとんどの伝統楽器は

初期障壁が非常に高い。これは、既存の楽器が非常に高い自由度を持つことに起因すると考えられる。しかしながら、伝統楽器が持つ自由度のすべてを必要とする場面は、実際にはほとんどない。つまり、状況に応じて不必要な自由度を削減もしくは削除して必要な自由度のみを残すようにすれば、余分な負荷が軽減されて初期障壁が低減されると同時に、より本質的な作業に演奏者は直接取り組みやすくなり、上達速度が増すとともに演奏の質も向上すると思われる。

そこで再現演奏と呼ばれるタイプの演奏を例題として、理想的な楽器のあり方を検討した。このタイプの演奏においては、どのような旋律を演奏するかについての自由度は演奏者には一切与えられていない。したがって、演奏者が独自性を発揮できる部分は、旋律に対する「表情付け」となる。そこで試作した楽器は、演奏すべき楽曲の音高列データをあらかじめ楽曲データベースに登録しておき、演奏者が演奏インタフェース上のどの操作子进行操作しても、音高列データの音高列を順に出力・再生するという構成とした。ただし、打鍵/離鍵時刻ならびに打鍵/離鍵速度についてはシステムは一切手を加えず、演奏者が操作したとおりに出力・再生する。したがってこの楽器では、音高の選択に関する自由度は削減されているが、表情付けのための自由度は一切削減されていない。このプロトタイプを使用して、音楽演奏経験がほとんど無い被験者から、18年のピアノ演奏経験を持ち大学でピアノ演奏を専攻している学生まで、幅広いレベルの被験者による演奏実験を行った。この結果本システムによって、初心者から熟練者までどのようなユーザでも満足できる演奏を容易に短時間で実現可能であることがわかった。特に注目すべきことは、従来このような「支援機能付き楽器」は、熟練者にとっては無用なものであると見なされていたが、実際には熟練者にとっても有用性があることを示した点である。

#### (4) 協調的な音楽演奏活動の拡張と支援 ～音楽コミュニティウェアの提案～

「いつでも、どこでも、誰とでも」気軽に合奏を楽しむことができるような、ウェアラブルでモバイルな楽器「CosTune」（衣装を意味するCostumeと、楽曲を意味するTuneから作った造語）を構築し、あわせて「行きずりセッションプロトコル」を考案・実装した。

現在のプロトタイプでは、ジャケットやパンツの上に貼付されたタッチセンサを叩くと、どのセンサが叩かれたかに関するデータがPCに入力される。入力されたデータは、個々のタッチセンサに対して予め割り当てられている音のデータに変換され、実際の音としてヘッドフォンから出力される。一方、音のデータは、ASP (Ad-hoc Session Protocol 行きずりセッションプロトコル) 処理モジュールによってパケット化され、ワイヤレスネットワークから近傍に存在する別のCosTuneユーザに対してブロードキャストされる。受信されたパケットは、元の音データに還元され、ヘッドフォンから実際の音として再生される。このようにして、CosTuneユーザは自分と、自分の近傍の別のCosTuneユーザの演奏を同時に聞くことができる。「行きずりセッションプロトコル」は、同じ場所に同時に複数のセッションの存在を可能とし、ユーザは任意のセッションに対し自由に聴取・参加・離脱することができる。このようなメカニズムによって、街角などで複数のCosTuneユーザが偶然出会ったとき、そこで即座に「行きずりセッション」を楽しむことができる。この結果、見知らぬ者同士が音楽を媒介として出会い、新たなコミュニティを形成することが可能となる。偶発的な出会いの場を即座に協調的な音楽演奏の場とするCosTuneは、単なる新奇な楽器にとどまらず、新たな音楽文化をもたらすシステムとして機能するであろう。

#### 5. 自己評価：

当初計画では、演奏のみならず作曲をも支援の対象とすることを目指していたが、やはりわず



か3年の期間でこの両方を扱うことには無理があり、作曲についての支援は全く未着手となってしまった。この点は当初計画立案の際の甘さとして反省すべきであると考えている。しかしながら演奏の支援については、初心者から熟練者まであらゆるレベルの演奏者に対して有効な支援のための基本概念を確立することができた。また、この概念に基づくプロトタイプシステムによって、実際に初心者にも熟練者にもこの考え方に基づくシステムが有効に作用することを証明した。これらの成果は、近い将来楽器のあり方に革新をもたらし、より多くの人々が自分なりの音楽を楽しむことができるようになるとともに、プロの演奏家もより多くの能力を演奏における本質的な行為に注ぐことができるようになる結果、より質の高い演奏を実現できるようになることが期待される。また、ピアノ演奏の学習者が陥りやすい問題はどこにあるかを明らかにしたこと、ならびに従来から熟練者が経験的に感じていた「離鍵速度」の制御の重要性と意味を具体的に示したことは、ピアノ演奏の学習や音楽教育上非常に意義深いものであると考える。さらに装着型ネットワーク楽器 CosTune によって、まったく新しい音楽文化を実現する可能性を示すことができた。このように、本研究では音楽文化そのものを変革させる可能性がある重要な成果が得られたと考えている。

#### 6. 研究総括の見解：

本研究は、音楽における創造性の支援という非常に困難な問題に真正面から取り組み、初心者から熟練者まで幅広い演奏者を対象として地道な分析を行い、その結果に基づき次世代の楽器のあり方についての基本的概念を考案し、その有効性を実証した。この成果は、今後の音楽文化や音楽教育のあり方に有益な影響をもたらすものであり、この点では十分な成果をあげたと評価する。ただ、当初の研究計画に含まれていた「作曲」の支援がまったく実施されていないことは残念であり、計画の立案と推進に多少問題があったものと思われる。この点を反省しつつ、今後さきがけ研究の成果を基礎として、作曲を含めたさらに幅広い「音楽における創造性」の支援技術の確立を目指して精進されることを期待する。

#### 7. 主な論文等：

##### 学術論文等

1. 前川督雄, 西本一志, 多田幸生, 間瀬健二, 中津良平 : ネットワーク型ウェアラブル音楽創奏システムによる日常生活空間演出構想の提案, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.6, No. 2, pp. 69-78, 2001.
2. Chika Oshima, Yohei Miyagawa, Kazushi Nishimoto and Takashi Shiroaki: Two- step Input Method for Supporting Composition of MIDI Sequence Data, Entertainment Computing-- Technologies and Applications, pp. 257-264, Kluwer Academic Publishers, 2003.
3. 大島千佳, 西本一志, 宮川洋平, 白崎隆史 : 音楽表情を担う要素と音高の分割入力による容易な MIDI シーケンスデータ作成システム, 情報処理学会論文誌, Vol. 44, No. 7, pp. 1778-1790, 2003.

##### 国際会議

1. Yukio Tada, Kazushi Nishimoto, Tadao Maekawa, Romain Rouve, Kenji Mase and Ryohei Nakatsu: Toward Forming Communities with Wearable Musical Instruments, Proc. the 21st IEEE International Conference on Distributed Computing Systems Workshops Mesa (ICDCS

- Workshops 2001), pp. 260-265, 2001.
2. Chika Ooshima, Kazushi Nishimoto and Akihiko Konagaya: Toward Computer Supported Piano Lesson to Opportunely Advance to the Creative Stage, Proc. Artificial Intelligence and Soft Computing (ASC2001), pp. 85-92, 2001.
  3. Kazushi Nishimoto and Chika Ooshima: Computer Facilitated Creation in Musical Performance, Proc. Scuola Superiore G. Reiss Tomoli (SSGRR-2001: CD-ROM proceedings), L'Aquila, Italy, Aug. 6-12, 2001.
  4. Kazushi Nishimoto, Tadao Maekawa, Yukio Tada, Kenji Mase and Ryohei Nakatsu: Networked Wearable Musical Instruments Will Bring A New Musical Culture, Proc. The 5th International Symposium on Wearable Computers (ISWC2001), pp. 55-62, 2001.
  5. Kazushi Nishimoto, Chika Oshima, Yohei Miyagawa and Takashi Shirosaki: A Musical Instrument for Facilitating Musical Expressions, CHI2002 Extended Abstracts, pp. 722-723, 2002.
  6. Chika Oshima, Yohei Miyagawa, Kazushi Nishimoto and Takashi Shirosaki: Two- step Input Method for Supporting Composition of MIDI Sequence Data, Proc. First International Workshop on Entertainment Computing (IWEC2002), pp. 253-260, 2002.
  7. Chika Oshima, Kazushi Nishimoto, Yohei Miyagawa, and Takashi Shirosaki: Coloring-in Piano: Indiscrete Musical Elements are Essential for Performers, Proc. ICAD 2002 Rencon Workshop - Performance Rendering Systems: Today and Tomorrow -, pp. 21-23, 2002.
  8. Chika Oshima, Yohei Miyagawa and Kazushi Nishimoto: Coloring-in Piano: A Piano That Allows A Performer to Concentrate on Musical Expression, In C. Stevens, D. Burnham, G. McPherson, E. Schubert, and J. Renwick (Eds. ), Proc. the 7th International Conference on Music Perception and Cognition (CD-ROM Proc. ), Adelaide: Causal Publications, Paper No. 707, 2002.
  9. Chika Oshima, Kazushi Nishimoto, Yohei Miyagawa, and Takashi Shirosaki: A Concept to Facilitate Musical Expression, Proc. Creativity & Cognition 2002, ACM Press, pp. 111-117, 2002.
  10. Tadao Maekawa, Kazushi Nishimoto, Kenji Mase, and Makoto Tadenuma: A Wireless-networked Wearable Musical Instrument with Which We Can Go to Town, Proc. 12th International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT2002), pp. 170-173, 2002.
  11. Tadao Maekawa, Kazushi Nishimoto, Kenji Mase, and Makoto Tadenuma: A Wireless, Networked Musical Environment Consisting of Wearable MIDI Instruments, Conference Proceedings of 10th International Conference on Telecommunications (ICT'2003), Vol. II, pp. 1731-1734, 2003.
  12. Kazushi Nishimoto, Chika Oshima and Yohei Miyagawa: Why Always Versatile?: Dynamically Customizable Musical Instruments Facilitate Expressive Performances, Proc. of the 3rd International Conference on New Instruments for Musical Expression (NIME03), pp. 164-169, 2003.
  13. Kazushi Nishimoto and Chika Oshima: Basic Analyses on Effects of Key-release Velocity in

- a Piano Performance, Proc. of the IJCAI-03 workshop on methods for automatic music performance and their applications in a public rendering contest, pp. 46-53, 2003.
14. Chika Oshima and Kazushi Nishimoto: An Attempt of Performance Rendering Based on Correlation Between Duration of Notes and Key-release-velocity, Proc. of the IJCAI-03 workshop on methods for automatic music performance and their applications in a public rendering contest, pp. 76-77, 2003.

#### 解説記事 チュートリアル

1. 西本一志 :音楽における創造的表現の支援, 電子情報通信学会 2003 年総合大会講演論文集 (CD-ROM), 2003.
2. 西本 一志 :心を表現するインタフェース, システム制御情報学会誌 システム/制御/情報, Vol. 47, No. 4, pp. 173-178, 2003.
3. 西本一志 :音楽における創造的表現の支援, 特集「エンタテインメントコンピューティングの事例」, 情報処理, Vol. 44, No. 8, pp. 819-822, 2003.

## 研究課題別評価

### 1.研究課題名 模倣学習によるマルチエージェントシステムの構成

### 2.研究者氏名 野田 五十樹

### 3.研究の狙い：

人間の学習において模倣は重要な役割を占めている。例えば団体スポーツなどのチームプレーの練習の際、各プレイヤーの動きを言葉で説明するよりも、コーチが自ら動きを示す事が多いが、これも学習者がコーチの動きを模倣できるからこそ可能な教示方法である。スポーツに限らず、人間のさまざまな社会活動において、実演やビデオ教材など人間の模倣能力を前提とした指導や学習が行われている。模倣学習は、この模倣という現象を計算機上で実現することを目指しており、以下のような性質を持つ学習方法として注目されてきている。

- 未知の環境への素早い適応性
- マルチエージェント間における有用なコミュニケーションの手段
- 他の学習手法との併用が容易
- 学習結果の共有が容易

これらの性質から、模倣学習は実環境で動作するロボットに行動規則を教える方法として期待されている。一方、従来の模倣学習の研究では問題を簡潔にするため、学習者は単一であり学習タスクも単一であることが多かった。よって、複数の仲間や人間と協調して行う作業などへの適用は限られており、複雑なタスクへの拡張は容易でなかった。

本テーマでは、この複数による協調作業(チームプレー)の模倣学習を可能とするために、模倣を行うためのモデルを階層的に構築していく枠組みとその上での学習方法を開発し、模倣によって複雑なスキルを獲得する手法を提案する。

### 4.研究結果：

本研究では協調作業の模倣を実現するのに必要なプロセスとして、

- エージェントの動作の観察からの意図の認識と内部表現の獲得
- 協調作業における各エージェントの意図の変化のタイミングの獲得

に注目し、これらを統一的に表現し、かつ、認識と再現の両方に適用できる枠組みとして、隠れマルコフモデル(Hidden Markov Model, HMM)を階層的に適用したモデル化を行った。

#### 意図の内部表現の獲得

エージェントの意図を動作の観察から認識する場合、環境の変化とエージェントの動作をどのような内部モデルで表すかが問題となる。特に環境の変化をどのような精度で表現するか、つまり環境をどのレベルで分節するかは認識の制度を決める重要な要因となる。本研究ではこの内部表現の獲得の問題をHMMによる学習によって解決した。

提案したモデルの最大の特徴は、環境の変化をモデルへの入力ではなく出力として扱っているところである。エージェントの行動をHMMで表現する手法はすでいくつかの研究が行われているが、これらの方法では環境の変化はHMMへの入力として扱っているため、環境がHMMの中で陽

に扱われず、環境の分節を扱うことができない。環境変化を出力とすることで HMM は環境をモデルの中に陽に含むようになり、環境の分節も確率的関係として導き出すことができる。

環境変化を HMM の出力として扱うもうひとつのメリットは、環境の認識が不完全であっても HMM をロバストに動作させられる点にある。たとえば環境のある属性が観測できない場合、提案モデルでは HMM の出力としてその属性値を推定することが可能であり、そのままモデルの動作を続けることができる。実世界を対象とするエージェントやロボットの場合、環境認識の完全性を仮定できないため、このメリットは重要である。

#### 意図の変化のタイミングの獲得

マルチエージェントシステムにおける協調動作を扱う場合、複雑に絡み合った依存関係をどのように整理してモデル化するかが問題となる。本研究では「意図」をその整理の単位と考え、複数エージェントによる協調動作は各エージェントの意図が相互に同期して変化することで達成されるものであると考えた。そして相互に同期して変化していく意図の流れを表すために、1つの意図を達成するための動作モデルに1つの HMM を割り当て、それらの HMM をより上位の遷移の単位として扱う階層的な HMM を提案した。

提案モデルの最大の特徴は、意図の流れをあらわしている上位の HMM の遷移条件として他のエージェントの意図だけを扱っている点にある。つまり、あるエージェントが特定の意図をもっているということは、そのエージェントの周囲の環境が特定の条件を満たしているという考えに基づき、エージェント同士の協調作業を相互の意図の依存関係として記述する。これにより自分および他のエージェントの意図により環境の細かい変化が抽象化され、協調動作に関係する広範囲の条件を少ないパラメータで表現することが可能となる。パラメータが少数であることにより機械学習における汎化能力が高くなり、模倣学習のような小数の成功例のみ与えられる課題に対しても適用可能なモデルとなっている。

また、意図レベルと動作レベルをともに HMM で表し、計算量を抑えつつ確率的関係を用いて階層化している点も提案モデルの特徴となっている。これにより一般的な HMM の手法を適用することができ、HMM の特徴である認識と生成の双方向の適用可能性が保たれている。この双方向性を利用することで、学習におけるエージェントの意図の認識と動作生成における意図決定の両方に提案モデルを用いることができるようになっている。

複数エージェントの協調作業ではコミュニケーションも重要な要素となる。本研究ではコミュニケーションについては扱うことができなかったが、考察により、提案したモデルの中で扱っている意図の尤度を用いることでエージェントがコミュニケーションを必要とするタイミングを発見できる可能性が示されている。また、HMM の階層化を拡張することで、戦略など高度な意図を表現やグループ全体の意図などを扱う枠組みを構成できると考えられる。

#### 5. 自己評価 :

本テーマでは、複雑で微妙な制御を必要とするマルチエージェントシステムを効率よく構築するために、人間のチームあるいは他のマルチエージェントシステムが行った協調動作の模範行動をもとに各エージェントの行動規則を獲得する統一的方法を探究してきた。3年間の研究の結果、各エージェントの私的な意図が協調動作のビルディングブロックになりえること、そしてその意図を階

層化した隠れマルコフモデルで適切に扱うことができることを示せたことが本テーマでの最大の成果といえる。マルチエージェントシステムではエージェントの数が増えるに従い状況の多様性が指数的に増えていき、通常のルールベースシステムや学習手法では手におえなくなるのは目に見えているが、個々のエージェントの意図による環境の抽象化は多様性の爆発を回避する有効な手段となっている。同時に、意図はマルチエージェントシステムを設計する人間にとっても扱いやすい概念・単位であり、ルールベースシステムなどによる既知行動ルールなどとの親和性も高いといえる。実際、例題で用いたサッカーエージェントでは既存のルールベースの行動規則中に提案手法の意図の遷移モデルを自然な形で埋め込むことができている。

また、意図を扱う際に生じるあいまいさを確率あるいは尤度であらわすことにより、汎用性の高い隠れマルコフモデルで扱える形にモデル化できたことは、応用を広げる意味で大きな意義があったと考えられる。特にマルコフモデルの学習により環境の内部表現を獲得する能力があることを示せたことは、内部表現が機械学習の能力を規定してしまう点から重要な成果といえる。ただし、提案した手法では学習の収束性や完全性は保証されておらず、コンピュータの計算能力に頼った解決方法をとっている。今後はこの部分の改善が必要であろう。

一方、テーマの当初の目的であったマルチエージェントシステムの構築に関しては、最初の例題であるサッカーエージェントの比較的簡単な例題を実現したところで時間切れになってしまったことは残念であった。時間がかかってしまった原因としては、隠れマルコフモデルの採用までの試行錯誤と、他人の意図を環境の抽象化に利用できるという考え方に到達するのにことに気づくのにかかったことがあげられる。また、すべてを学習的手法で構成することにこだわりすぎたことも研究がなかなか進捗しなかった原因となってしまった。より多くのシステム、複雑な課題への応用や具体的な構築手順の確立に関しては今後の課題としていきたい。

また、階層的な意図の導入や意図の尤度の変化を明示的なコミュニケーションのきっかけとする考えなど、多くの魅力的な課題が本テーマには残っている。これらについても今後取り組んでいきたい。

## 6. 研究総括の見解：

模倣による協調動作の学習は、人間と共存するロボットの行動設計や社会における人間行動のモデル化などの重要な基盤技術となるものであり、それに率先して取り組み、システムの構成単位となる「意図」の扱いを汎用性の高い確率モデルで整理し一定の成果をあげたことは評価できる。ただし、マルチエージェントシステムの構築に関しては、積み残しており、またその他にも課題は多数あるなど今後の研究推進が大いに重要であり、発展を期待したい。

## 7. 主な論文等：

1. 野田五十樹: 模倣に基づくエージェント動作系列の学習, 人工知能学会全国大会(第 15 回)論文集, 2C1-06, 2001/5.
2. NODA, Itsuki et. al.: Language Design for Rescue Agents. Proc. of RoboCup 2001 Symposium, p.17, 2001/Aug.
3. NODA, Itsuki et. al.: Language Design for Rescue Agent, The Second Kyoto Meeting on Digital Cities, 2001/Oct.
4. 野田五十樹: HMM の学習による環境の分節, 人工知能学会全国大会予稿集, 2B3-082002/5.

5. NODA, Itsuki: Segmentation of Environments using Hidden Markov Modeling of Other Agents. Proc. of AAMAS-2002, pp.1395--1396,2002/Jul.
6. NODA, Itsuki: Hidden Markov Modeling of Multi-Agent Systems and its Learning Method 第15回 SIG Challenge 研究会, pp.13--20,2002/3.
7. NODA, Itsuki: Hidden Markov Modeling for Multi-Agent Systems, Proc. of The Seventh Pacific Rim International Conference on Artificial Intelligence, pp.128--137,2002/Aug.
8. NODA, Itsuki: Hidden Markov Modeling of Multi-Agent Systems and its Learning Method. Proc. of RoboCup 2002 International Symposium, 2002/Jun.
9. Itsuki Noda et. al: Language Design for Rescue Agents, Robot Soccer World Cup V, pp.164--172,2002
10. Itsuki Noda, Peter Stone: The RoboCup Soccer Server and CMUnited Clients: Implemented Infrastructure for MAS Research, Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, Vol.7, No.1-2,pp.101-120,2003/Jul.
11. NODA, Itsuki: Hidden Markov Modeling of Team-play, Proc. of IJCAI-2003, pp.1470--1472,2003/Aug.
12. 野田五十樹:お気軽サッカーを目指して,情報処理, Vol 44, No.9, pp.927--930,2003/9.
13. 野田五十樹:HMM による協調動作の模倣学習,2003年度 人工知能学会全国大会(第17回) 論文集, No. 3D4042003/6.
14. NODA, Itsuki: Hidden Markov Modeling of Team-play Synchronization, Proc. of RoboCup 2003,2003/Jul.
15. NODA, Itsuki: Hierarchical Hidden Markov Modeling for Team-play in Multiple Agents, IEEE Conference on System, Man, and Cybernetics,2003/Oct.
16. 野田五十樹:ロボットにおける機械学習の課題と動向,情報処理, Vol.44, No.11, 2003/11.

## 研究課題別評価

1. 研究課題名 :プログラミング言語としての自然言語～推論システムと人間の思考～

2. 研究者氏名 :戸次大介

3. 研究の狙い :

研究の目的として「我々自身の意識や思考の構造を知る」ということに興味を持っています。ただ、それらを直接観測することは難しいため、科学として取り組むには観測可能な「傍証」を対象とせざるを得ません。脳神経科学、心理学、認知科学、分析哲学、理論言語学等、多くの分野が異なる経路から同じ山に登っていると言えるかもしれません。

その中で、「言語」と対象とするアプローチは、以下の三つの点で有望であると考えています。

1. 思考のうち、言語化できる(文で表せる)範囲は大きい。もちろん非言語的思考も存在し重要であるが、たとえば故人の思考について我々が著作を通して知ることのできる情報量を鑑みれば、研究対象として十分である。
2. 新聞記事コーパス等、大規模なテキストデータが利用できるようになった。またここ数年のインターネットの発達により、膨大なテキストデータが WWW 上に蓄えられつつある。それらによって現在の言語学は、十年前には存在しなかった「客観的なデータ」を電子的に利用可能となっている。
3. 副作用として、自然言語処理技術(機械翻訳、自動要約、情報検索、自然言語インターフェース等)の基盤技術や新たな応用分野を提供できる。たとえば、チョムスキー階層がプログラミング言語理論に与えた影響等。

このような興味から、私は「言語」を対象としたアプローチすなわち理論言語学によって、意識や思考といった捉えがたい概念を捉えたいと考えています。ただし、私の考える理論言語学とは、必ずしも現在の理論言語学(生成文法、形式意味論)そのものではありません。それは、以下のような問題意識に依るものです。

元々「言語化された思考を通して思考を分析する」というアプローチは分析哲学のものです。分析哲学(およびそこから派生した形式意味論)そのものは、科学として捉えようとする反証可能性をもたないと考えています。すなわち、分析哲学では言語化された思考を論理式におきかえて分析しますが、言語化された思考についての我々の直観は、文に対する直観(文と文の間の演繹関係についての直観)であって論理式に対する直観ではありません。にも関わらず、文と論理式の間の変換規則が与えられていないならば、論理式上の議論は厳密には検証できないわけです。

一方、チョムスキーの生成文法では、理論は文と統語構造の可能なペアを計算し、(strong generative capacity を論じるときには)その両方が検証の対象となります。統語構造から論理式への変換については、生成文法の中では扱いません。ところが、我々は与えられた文の受容性についての直観はあっても、与えられた統語構造(理論の用語で記述されたもの)について、正しいかどうかの直観をもてないのではないかと私は考えています。したがって、ペアのうち文の受容性だ



けを検証する weak generative capacity についてはともかく strong generative capacity については理論を検証することができません。

しかしながら、分析哲学と生成文法を組み合わせることで、最低限の楽観的な仮定のもとで、直観による検証が可能な言語理論を構成することができます。すなわち、文と(統語構造よりも)一步踏み込んで)論理式の間の変換規則を生成文法や形式文法理論によって与え、論理式の間の変換規則を数学的に与えることで、二つの文の間の変換関係を計算する理論を構成できます。我々は二つの文の間の変換関係に対する直観を持っていると仮定できれば、この理論は直観により検証でき、なおかつその過程で統語構造について間接的に論じることもできるわけです。このように検証可能なデザインを取ると、理論が厳しく制約されるため、現在の生成文法が陥っているある現象に対する理論を、どうしても書ける」状態から脱却することができます。

これが私の考える理論言語学のデザインであり、現在これに共通する理論構成を取っている研究としては、範疇文法(Categorial Grammar)や、形式意味論の一部の研究がありますが、この立場はまだ理論言語学の主流をなすに至っておりません。

生成文法の研究対象は思考ではなく言語機能にあるのですが、私は生成文法およびそこから派生した HPSG、LFG、CG 等の形式文法理論は、分析哲学およびそこから派生した形式意味論と(組み合わせるのではなく)一体化することで、はじめて言語に対する科学的なアプローチを完成できると考えています。

#### 4. 研究結果：

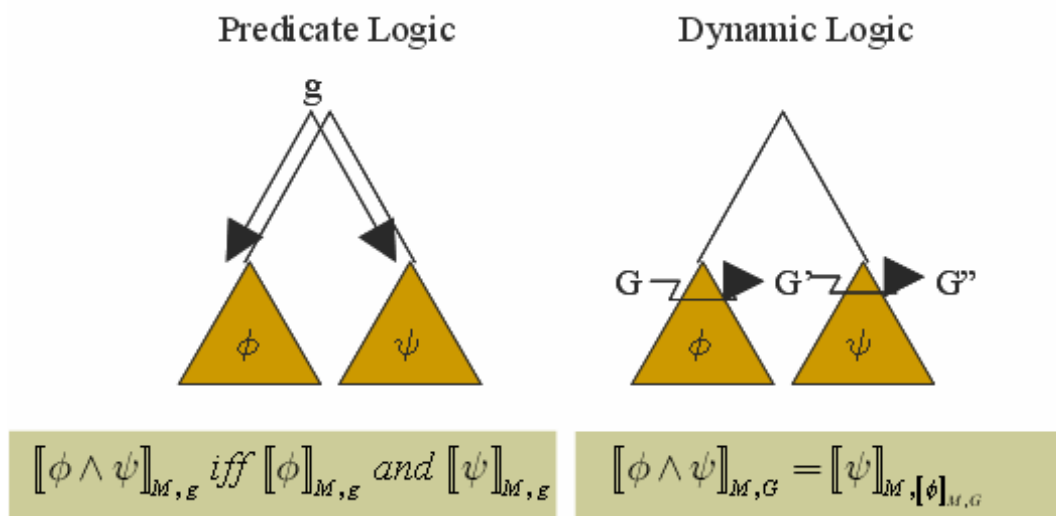
自然言語の意味のモデリングは、フレーゲ(Frege)以来の哲学的問題を数多く抱えており、実用化はおろか理論化すら見通しの立ちにくい領域です。意味解析の理論にとって特に問題となるのは、一階論理では記述できない次のような現象とされています。これらの現象は一般のテキストで頻出する現象であり、決して例外的現象ではないにも関わらず、自然言語処理では多くの場合処理を避けてきた現象です。

1. 量化の問題 Barwise and Cooper (1981)
2. 照応の問題 Heim (1982), Kamp (1984), Kamp and Reyle (1993)
3. 複数形の問題 Scha (1981), Link (1983)

これに対して、私はさきがけ研究において、「型付き動的論理」(Typed Dynamic Logic (TDL): Bekki (2000a)(2000b)他)という言語理論を独自に提案し、統語・意味理論を含む理論言語学・自然言語処理の統合的枠組みの構築を目指しました(TDL プロジェクト)。TDL は先行する理論言語学の諸理論(生成文法や HPSG 等)に対し、説明的妥当性において優位であることを、これまでの研究で示しています。特に、前述 1~3 の問題を統一的に、しかも統語理論と一体化した形で解決しています。

TDL は Groenendijk and Stokhof (1991)による動的意味論(Dynamic Semantics)と共通点を持ち、命題を、真偽値を表すものとしてではなく、文脈から文脈への関数(Information flow)として捉える点に特徴があります。

Figure 1: Typed Dynamic Logic (アイデア)



その他、TDL の特徴としては、以下が挙げられます。

- 型付き 計算に基づく三階論理である。
- 組合せ範疇文法(Combinatory Categorical Grammar)を統語理論として持ち、英語・日本語文法の差を最小限のパラメータで説明できる。
- TDL 表現間の証明論は、 計算の定理として健全性が証明される。

Figure 2: Typed Dynamic Logic (TDL)の定義

<i>atomic predicate</i> :	$r_{TIE \times \dots \times E}(x_1, \dots, z_1)$	$\equiv \lambda G_{T(EIII)} \lambda g_{EII}. Gg \ \& \ r \langle gx, \dots, gz \rangle$
<i>conjunction</i> :	$\phi_{Prop} \wedge \dots \wedge \varphi_{Prop}$	$\equiv \lambda G_{T(EIII)} (\varphi \dots (\phi G))$
<i>disjunction</i> :	$\phi_{Prop} \vee \dots \vee \varphi_{Prop}$	$\equiv \lambda G_{T(EIII)} \lambda g_{EII}. (\phi G) g \mid \dots \mid (\varphi G) g$
<i>negation</i> :	$\neg \phi_{Prop}$	$\equiv \lambda G_{T(EIII)} \lambda g_{EII}. Gg \ \& \ \sim \exists h_{EII}. \phi Gh$
<i>distribution</i> :	$\Delta x_i [\phi_{Prop}]$	$\equiv \lambda G_{T(EIII)} \lambda g_{EII}. \exists d_e. \phi (\lambda h_{EII}. Gh \ \& \ hx=d) g$
<i>unary quantification</i> :	$uq(N_{TIN}, x_i)$	$\equiv \lambda G_{T(EIII)} \lambda g_{EII}. Gg \ \& \ N[G/x]$
<i>binary quantification</i> :	$bq(Q_{T(RTIE)(TIE)}, x_i, y_j)$	$\equiv \lambda G_{T(EIII)} \lambda g_{EII}. Gg \ \& \ Q \langle G/x, G/y \rangle$
<i>copy</i> :	$x_i \triangleright y_j$	$\equiv \lambda G_{T(EIII)} \lambda g_{EII}. Gg \ \& \ \exists h_{EII}. Gh \ \& \ gy=hx$
<i>anaphora</i> :	$\phi_{Prop} \Vdash \varphi_{Prop}$	$\equiv \lambda G_{T(EIII)} \left[ \begin{array}{l} \text{if } G/x = \phi G/x, \text{ then } \varphi G \\ \text{else if } G/x = (\lambda g_{EII}. true)/x, \text{ then } (\phi \wedge \varphi) G \\ \text{otherwise undefined} \end{array} \right]$

where  $G_{T(EIII)}/x_i \equiv \lambda d_e. \exists g_{EII}. Gg \ \& \ gx=d$

Figure 3: Example of Syntactic Derivation

<p>“東京に”</p> <p><math>V_{FORM} / V_{FORM}</math></p> <p><math>\lambda v. \lambda e. \lambda c. \lambda s. Tokyo(\zeta, \varsigma) \Vdash ve \left[ \begin{array}{l} \lambda e'. \lambda s'. \left[ \begin{array}{l} to(e', \zeta) \\ ce's' \end{array} \right] \right] s</math></p>	<p>“行く”</p> <p><math>V_{\text{終止連体}}</math></p> <p><math>\lambda e. \lambda c. \lambda s. \left[ \begin{array}{l} going(e, s) \\ pres(e, s) \\ ces \end{array} \right]</math></p>
<p><math>V_{\text{終止連体}}</math></p> <p><math>\lambda e. \lambda c. \lambda s. Tokyo(\zeta, \varsigma) \Vdash \left[ \begin{array}{l} going(e, s) \\ pres(e, s) \\ to(e, \zeta) \\ ces \end{array} \right]</math></p>	

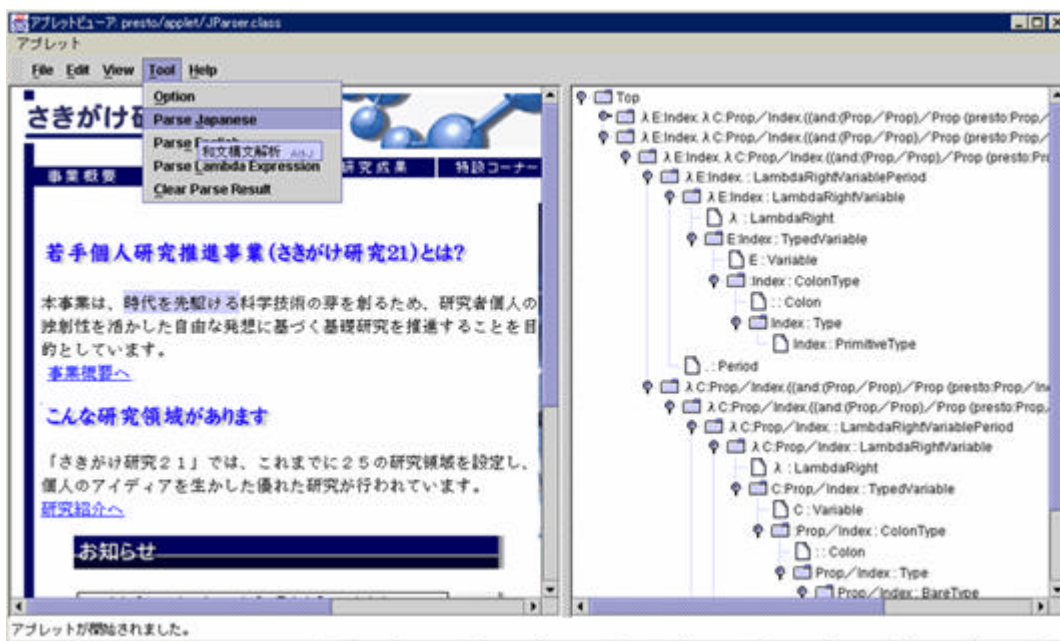
また、TDL は他の動的意味論に対して、複数形の扱い等様々な点で優位性を持っています (Bekki (2000))。また、TDL は型付き 計算 (Church (1951)) に基づいているため、独自の意味論を持つ動的意味論よりも計算機との相性がよいという性質もあります。

TDL プロジェクトではこの TDL の特長を生かし、自然言語処理のための推論システムをデザインしています。具体的には、

1. TDL による構文解析用の日本語・英語文法を完成し、実装する。
2. TDL の意味表現における、証明論 (= 推論システムの基礎) を完成させる。

の二つの副課題に取り組んできました。その結果として、研究開始時には予定になかった談話構造 (前提条件、フォーカス、照応の到達性など) についても、TDL による分析に利点があることが分かってきており、現在理論化を進めています。また、プロトタイプ実装としてはFigure 4の TDL-Parser があります。

Figure 4: TDL-Parser (JAVA 版)



TDL-Parser は、自然言語を入力として、文と文の間の演繹関係を計算できるシステムのプロトタイプです。これが完成すれば、情報検索でもより高度なクエリー、たとえば否定を含むもの(「ウディ・アレンの映画で、ウディ・アレンが出演していない作品」さらには「映画監督本人が出演していない作品」)などを用いることができます

## 5. 自己評価

研究の評価というもの是一般に研究目標に対する達成度ではかられる。工学的研究の場合は、社会的インパクトを持つ研究目標を掲げ、それを達成するための研究課題に細分化し、研究計画とする。

しかし自然科学の場合、「真理の探究、すなわち対象を理解すること」及び「我々が対象を理解する仕組みを理解すること」という二つ拮抗する活動自体を目標としており、これを工学的研究の評価スキームにあてはめようとすると、問題が生じる。

その問題とは、研究目標というのはその時点での対象の理解に基づいて設定されるものであるが、自然科学の研究の場合はその理解そのものが進展していくのであり、従って研究の進展につれて当初の目標そのものが概念的に成り立たなくなる場合があることである。

例えば、多くの理論では言語に句構造があることを仮定しているが、その句構造を検証していきたいという目標設定をしたとする。ところが、本研究のように、句構造そのものは経験的な検証

の対象に成り得ず、真理条件の計算のための媒介的な理論概念にすぎないということが分かってくると、当初の「句構造を検証する」という問題設定そのものが成り立たないのである。しかしながら、「では句構造の検証はあきらめて、文の真理条件の関係を調べましょう、そのための構造的な理論を構築しましょう」と問題を再設定したときには、当初の目標が形を変えて包摂されているのである。

同様に、今回のプロジェクトの目標として、自然言語間の推論システムを構築するというのがあったわけだが、その目標は現在では形を変えつつあるため、目標に対する達成度という基準では評価できない。その目標設定の時点では、文から論理形式への変換というのは比較的自明なものであって単純な二項関係で表せるという仮定があったのであるが、研究を進めるにつれて、照応の参照先決定やフォーカスの構造、前提条件の解消といった問題が、文と論理形式の間において、言語機能にとっての「もう一つ」の推論レイヤーを要求していることが分かってきた。「もう一つ」というのは、単語から文を組み上げる派生そのものが人間にとっては無意識だが言語機能にとっては推論であり、また論理形式同士のいわゆる人間が能動的に行う推論が知られているが、その間にも同様な推論が必要なのだ、ということである。

こうなると我々が意識的に「これが推論である」という我々が命題の間で意識的に行うことと、単語から文を構成するといった無意識で行う推論といったもののどちらをもって推論システムと呼ぶのかを明らかにしない限り、当初の推論システムの構築という命題そのものが成り立たないといった意味で、当初の研究計画は文字通りには成り立たないのであるが、現在は当初の問題の理解よりも一段深いところで考察を続けているのである。

しかし、ここで述べたいのは、研究は大いに進展して多くの知見が得られたということである。研究目標の達成という意味では当初掲げた推論システムの構築ということには未だ至らなかったが、先に述べたような事情でその問題は再設定されているのである。また当初の目標には入っていなかった、様々な量化の現象や前提条件やフォーカスといった現象にまつわる伝統的な問題が、TDLのメカニズム及び文法によって大部分消滅するのだということを見出し、また示してきた。そういった意味でこの研究はまだまだ途上ではあるものの、大いに研究を進展させることができたと考えている。

## 6. 研究総括の見解

理論言語学の分野は、自然科学の中にあってもまだ未開の領域であり、特にわが国においては研究の土壌が不十分である。その中で戸次大介は、人間が、自然言語を用いて行う推論を処理できるシステムの構築を目指した。研究推進と共に、その目標はさらに理論的な研究へと形をシフトしたが、これは十分理解し得ることである。この中で、「型付き動的論理」(Typed Dynamic Logic(TDL))という言語理論を独自に提案し、統合・意味論を含む理論言語学・自然言語処理の統合的枠組みの構築を行い、従来の理論言語学の諸理論に対して、説明的妥当性において優位であることを実証した。同時にこれまでの既存の理論の中で伝統的な問題とされてきた事象をTDLのメカニズムおよび文法によって多くの部分が消滅できることを示した成果は評価できる。今後、「型付き動的論理」が言語現象全体の統一理論になりうるかどうかはまだ分からないが、更なる研究推進を推し進め、当研究分野発展への貢献を期待する。

## 7. 主な論文等

1. Bekki, Daisuke (2000b) "Typed Dynamic Logic for E-type link", In Proceedings of Third International Conference on Discourse Anaphora and Anaphor Resolution (DAARC2000), pp.39-48, Lancaster University, U.K.
2. Bekki, Daisuke (2000c) "Delayed Quantification for Cumulative Readings", A talk presented at SINN UND BEDEUTUNG V, The University of Amsterdam, Netherlands.
3. 戸次大介 (2002) 型付き動的論理(TDL)による日本語の量化・照応の分析, 情報処理学会研究報告 2002-NL-150, pp.69-76, 東北大学.
4. 戸次大介 (2003a) 型付き動的論理(TDL)によるイベント量化の分析, 情報処理学会研究報告 2003-NL-154, pp.23-30, 徳島大学.
5. 戸次大介 (2003b) 型付き動的論理(TDL)による前提条件と照応の統一的分析, 第 37 回言語・音声理解と対話処理研究会資料 SIG-SLUD-A203, pp.7-13, 立教大学.

## 研究課題別評価

### 1. 研究課題名 :ヴァーチャルアクターのための動画像処理と動作生成

### 2. 研究者氏名 :星野准一

### 3. 研究の狙い :

近年のエンターテインメントや教育などの分野では、CGによる人物アニメーションが含まれるコンテンツが増加している。コンテンツの制作には複雑な技術や専門知識に加え、膨大な制作時間が必要になるなど、個人、とりわけ初心者が制作するには未だに敷居が高いのが現状である。例えば、CGにおける仮想人物の動作を制作する場合には、キーフレーム補間法が一般的に使用されているが、自然な動作を生成するためには、多数のキーフレームを設定することが必要となり、熟練も必要になる。更に、対話型映画のようにインタラクティブにストーリーを体験できるコンテンツの普及に伴い、仮想俳優がストーリーに沿った行動と即興的な行動の両方を行うなど、複雑な行動制御を行うことも重要となる。このような背景から、本研究では、対話型映画のようなインタラクティブなアニメーションコンテンツのための人物動作生成法の基礎を確立することを目的とする。

### 4. 研究結果 :

本研究では、対話型映画のための人物動作生成法について取り組み、1)事例に基づく人物アニメーションの生成、2)階層的動作生成の2つの基本機能を実現した。

#### 1)事例に基づく人物アニメーションの生成

ビデオ映像からの俳優の動作事例を収集するとともに、概略的な図表現によるストーリー記述から人物アニメーションを自動生成する機能を実現した。

##### a) 動力学モデルに基づくビデオモーションキャプチャ

仮想俳優の動作を生成するためには、まず素材となる動作セグメントを蓄積しておくことが必要となる。人物動作を計測する方法としては、一般的に磁気センサや光学式センサによるモーションキャプチャが用いられている。ところが、これらのシステムは一般的にスタジオなどの広い作業空間が必要となる。また、動作を高精度に計測するためには、高価なセンサが必要となる。手軽に入る機材で利用できるものとしては、ビデオ映像から3次元的人物動作を計測することが考えられる。従来法ではビデオ映像からの輝度値を主な情報源としているため、人物の身体部分が他の身体部分によって隠されて輝度値を取得できないとき、動作推定の結果は不安定になる。そこで、輝度値に加えて関節駆動力を最小化することで部分的なオクルージョンに強い人物動作の推定を行う。この手法では、部分的に輝度情報が得られていない場合でも、関節駆動力を最小化する軌道を求めることができるため、より安定で正確な推定を行うことができる。

##### b)概略記述からの連続動作の生成

ストーリーボードから動作アニメーションを生成する際の問題は、代表的な姿勢のみを記述するた

めに、キーフレームとして使用するには間隔が広すぎることである。そのため記述された姿勢をそのままキーフレームとして使用して仮想人物の動作を生成することは困難である。本手法ではストーリーボードに描かれた概略的なキャラクタ動作の記述に、動作データベースに蓄積された動作セグメントを当てはめて再構成することでアニメーションを生成する。

## 2 対話型映画のための階層的動作生成

対話型映画のようにインタラクティブにストーリーを体験できるシステムの普及に伴い、仮想俳優がストーリーに沿った行動と即興的な行動の両方を行うなど、複雑な行動制御を行うことが重要となる。本研究では、ストーリーと連動して、会話動作、注意動作、呼吸動作、歩行動作などの動作成分を生成するモジュールを適切なタイミングで連動制御することによって人物動作を生成する機能を実現した。

また、キーイベントによって仮想俳優の概略的な行動を指定するとともに、行動ネットワークによってキーイベント間の行動を自動的に生成する手法を提案した。キーイベントとは、ストーリー中で確実に起こって欲しい出来事を記述したもので、仮想俳優の動作、時間、場所を指定する。行動ネットワークは仮想俳優の動作を生成する動作モジュールを有効グラフによって連結することで構成する。キーイベントによって仮想俳優の動作を指定すると、時間制約を満たすように行動ネットワークの探索を行って適切な行動系列を生成する。

## 5. 自己評価：

本研究では没入環境の中でストーリー性のある出来事を体験できる対話型3D映画システムを実現するという新しいテーマに取り組み、実働するプロトタイプシステムを構築するとともに、新しい動作生成法を提案することができた。申請時に研究計画に書いた各研究項目についても達成されている。研究期間の後半に取り組んだ部分については、論文投稿などの成果展開はこれからであるが、本研究は企業から大学に移った直後に新規に立ち上げたものであり、自己評価としては将来の基礎となる成果が得られたと考えている。

今後の課題としては、より人間らしいと感ずることができるバーチャルヒューマンを生成するためには、高精細な人物モデルによる微妙な動きの表現に加えて、会話の内容なども含めた統合的な取り組みを行う必要がある。また、本研究では様々な動作モジュールの連動によって表現力の高い動作を生成する手法を提案したが、様々な状況において複雑でダイナミックな機能の連携を行うためのメカニズムについては今後も検討の余地がある。本研究期間で構築したバーチャルヒューマン基盤システム上に様々な動作生成アルゴリズムを実装して評価を行うことで研究を深めたい。

## 6. 研究総括の見解：

CGによる人物アニメーションを含むコンテンツは、近年エンターテインメントや教育の分野で多く利用されつつある。星野准一は、没環境の中で、ストーリー性のある出来事を体験できる対話型3D映画システムの実現を目指し、実働するプロトタイプを構築しまた新しい動作生成法を提案したことは評価できる。この中で、特に高精細なバーチャルヒューマンは体験型教育やエンターテインメントなど様々な応用が可能な基盤技術であり、今後の発展と実用化に期待が持てる。



## 7. 主な論文等：

### 書籍

1. Ryohei Nakatsu、Junichi Hoshino(ed.): "Entertainment Computing: Technologies and Applications"、Kluwer Publisher、2003

### 論文誌

2. 中野敦、星野准一：'動力学モデルに基づくビデオモーションキャプチャ'、日本バーチャルリアリティ学会論文誌 Vol.7、No.4、pp.471-480、2002
3. 山本正信、八木下勝利、古山隆志、大久保直人、星昌人、星野准一、中山一：'映画からの俳優の演技の測定とアニメーションでの再利用'、日本バーチャルリアリティ学会論文誌 Vol.7、No.4、pp.503-512、2002
4. 星野准一：'人物動作からの個性の推定と再構成'、画像電子学会論文誌、Vol.30、No.15、pp.631-640、2001
5. 星野准一、斉藤啓史：'ビデオ映像とCGの合成によるヴァーチャルファッションの実現'、情報処理学会論文誌、Vol.42、No.5、pp.1182-1193、2001
6. Jun'ichi Hoshino、Hirofumi Saito、Masanobu Yamamoto: "A Match Moving Technique for Merging CG Cloth and Human Video"、Journal of Visualization and Computer Animation、Vol.12 No.1、pp.23-29、2001

### 国際会議

7. Junichi Hoshino: "Building Virtual Human Body from Video"、IEEE Virtual Reality 2002、pp.265-266、2002
8. Junichi Hoshino: "Extraction and Reconstruction of Personal Characters from Human Movement"、Third Int. Workshop on Intelligent Virtual Agent、IVA 2001、pp. 237-238、2001
9. Junichi Hoshino、Yumi Hoshino: "Intelligent Storyboard for Prototyping Animation"、IEEE Int. Conf. on Multimedia and Expo、ICME2001、Conference CD-ROM FAI.03、2001
10. Junichi Hoshino : Model-Based Synthesis of Human Body Images、SIGGRAPH Sketch and Applications、p.228、2001
11. Junichi Hoshino: "Interactive Virtual Fashion Simulator"、INTERACT2001、pp.785-786、2001
12. Junichi Hoshino: 'Extracting Personal Characteristics from Human Movement'、Int. Conf. on Acaustics and Signal Processing、ICASSP2001、Conference Proceedings CD-ROM、IMDSP-P6.1、2001
13. Junichi Hoshino、Hirofumi Saito: "A Match Moving Technique for Human Body Sequences"、Int. Conf. on Acaustics and Signal Processing、ICASSP2001、Conference Proceedings CD-ROM、IMDSP-P3.1、2001
14. Junichi Hoshino: 'Merging Virtual Object with Human Video Sequences'、2nd International Symposium on Mixed Reality、ISMR2001、pp.157-158、2001

15. Junichi Hoshino: "See-Through Representation of Video", 2nd International Symposium on Mixed Reality, ISMR2001, pp.155-156, 2001

#### 受賞等

1. 船井情報科学奨励賞 「ビデオ映像からのデジタルヒューマンの自動生成と対話型仮想シアターへの応用」, 2003
2. Marquis Who 's Who in the World, 2004

## 研究課題別評価

### 1. 研究課題名 情報理論的に安全な秘密鍵共有法

### 2. 研究者氏名 水木 敬明

### 3. 研究の狙い：

秘密鍵を共有したい  $k$  人のプレーヤーがいるとし、プレーヤー間の通信は無制限の計算能力をもつ盗聴者によって盗聴されているとする。このような  $k$  人のプレーヤーが絶対に安全な共通の秘密鍵を共有するには、どのような条件が必要かについて解明することが、本研究の大きな目的である。例えば、あらかじめプレーヤーにカードをランダムに配布し、そのカードを使って秘密鍵を共有できることが知られている。カードのランダム配布は、プレーヤーにあらかじめ与える入力としての一例であり、極めて単純なモデルのひとつである。カードのランダム配布を用いて秘密鍵を共有するためのプロトコルがいくつか開発されているが、秘密共有に必要な最小なカード配布枚数は見付かっておらず、そのような枚数を見付けることは長年の未解決問題である。本研究では、既存のプロトコルを改良し、より少ない枚数で秘密鍵を共有できるプロトコルを与え、未解決問題のギャップを縮める。また、プレーヤーへの入力として、部分秘密鍵共有グラフというものを定義し、その下でのプロトコルを開発する。さらに、得られた手法を別の問題に応用する。

### 4. 研究結果：

#### (1) カードのランダム配布による秘密鍵共有

カードのランダム配布を利用した秘密鍵共有プロトコルとして、変換プロトコルと呼ばれるものが知られている。この変換プロトコルは、カードの配布が入力されると、分割と結合を繰り返すことにより、1 ビットの秘密鍵を複数生成し、秘密鍵共有を実現するものである。変換プロトコルが成功するためのカードの配布枚数に関する十分条件は知られていたが、必要十分条件については知られておらず、未解決問題であった。本研究では、まず、変換プロトコルの改良を行った。改良点は、無駄な分割を無くすことと、鍵集合プロトコルと呼ばれるプロトコルの手法を応用し、特殊な配布枚数の場合にはその手法により分割を行うこと、および結合のときにダミーカードを追加することにより、使用されず無駄になっていたカードを活用したことである。これらの改良により、より少ない枚数でのプロトコルの実行が可能となった。また、この改良変換プロトコルが成功するための必要十分条件を発見した。この結果、長年の未解決問題が解決し、変換プロトコルの潜在的な能力がわかった。

また、階層構造を有するプレーヤーに適した秘密鍵共有を行うプロトコルが成功するための必要十分条件を与えた。階層構造を有する2個のグループがあり、各プレーヤーそれぞれが1つのグループに属しているとする。Igarashi らは、2000年に、このような階層構造に適した秘密鍵共有グラフとして、2レベル木というものを定義し、そのようなグラフを構成するためのプロトコルを与えた。また、そのプロトコルが成功するための必要なカードの枚数に関する十分条件を見付けている。しかし、必要十分条件については知られていなかった。本研究では、この未解決問題に取り組み、必要十分条件を求めることに成功した。

さらに、量子暗号を応用することによってカードの配布を行う手法を提案した。

## (2) 部分秘密鍵共有グラフからの秘密鍵共有

プレーヤーを点とし、秘密鍵を共有しているプレーヤーの対を辺として得られるグラフを秘密鍵共有グラフと呼ぶ。グラフの辺に対応する秘密鍵のうち、いくつかは盗聴者に知られているとする。このようなグラフを部分秘密鍵共有グラフと呼ぶことにする。部分秘密鍵共有グラフを入力として、プレーヤーで安全に秘密鍵を共有する問題を扱い、そのような秘密鍵共有を実現するプロトコルを与えた。

この問題は、次のような問題のモデル化になっている。プレーヤー対が秘密鍵を共有するとき、それぞれのプレーヤー対で暗号アルゴリズムや物理的状況、あるいは時間的状況が異なるため、盗聴者が全てのプレーヤー対の秘密鍵を知っていると仮定することは非現実的である。例えば、あるプレーヤー対が共有した秘密鍵は、暗号アルゴリズムが弱かったため解読されるかもしれないが、別のプレーヤー対の秘密鍵は、強力な暗号アルゴリズムにより作られたため解読できないかもしれない。したがって、秘密鍵共有グラフの中で、全ての辺に対応する秘密鍵が盗聴者によって知られているとは仮定せず、一部の秘密鍵だけが知られていると仮定することは妥当である。

盗聴者がどのように秘密鍵を知っているかについて、「それぞれの秘密鍵はある確率分布に従い盗聴者に知られている」と「任意のたかだか  $t$  個の秘密鍵が盗聴者に知られている」の2つの場合を考え、それぞれのモデルに対してプロトコルを設計し、理論的限界を求めることに成功した。

## (3) 電子透かしの安全性指標

上記の秘密鍵共有の研究で得られた手法を応用し、電子透かしの安全性評価に関する研究に取り組んだ。電子透かしは、配布したい電子ファイルに電子透かし情報を埋め込むことにより不正コピーを防ぐために利用される。個々の電子ファイルにそれぞれ異なった電子透かし情報を埋め込む場合を扱い、本研究では、電子透かしとして埋め込むコードについて、どのようなものが適切なかを評価する指標を与えた。不正コピーが発見されたとき、そのコピーに埋め込まれた電子透かし情報から犯人が特定できることが望ましいが、一般に、確実に犯人を特定することは不可能であることが示されている。そのため、本研究では、まず、 $q$  人中、少なくとも  $p$  人は犯人であることが言えるとき、そのコードは  $(p/q)$ -安全であると定義した。次に、そのようなコードを構築するとともに、コードの長さに関する下界の証明を行い、その理論的限界を示した。

## 5. 自己評価：

本研究では、情報理論的に安全な暗号の実現の条件に関する基礎的な研究を行った。ひとつのモデルとして、カードのランダム配布による秘密鍵共有問題を扱い、そのような秘密鍵共有を実現できる効率的なプロトコルを開発し、また、必要な配布枚数の下界を理論的に示すことにより秘密鍵を共有することのできる配布枚数と、できない配布枚数の完全な特徴付けを目指したが、未だ完全な特徴付けには至っていない。今後の展開としては、そのような完全な特徴付けを与えることが挙げられる。それにより、カードのランダム配布が潜在的に持つパワーの完全な解明を目指す。

また、本研究では、部分秘密鍵共有グラフからの秘密鍵共有という問題を扱い、いくつかのモデルを与え、安全な秘密鍵を共有するためのプロトコルを提案した。たかだか  $t$  個の秘密鍵が盗聴者に知られているというモデルにおいては、未解決問題が残されており、今後の課題である。

本研究では、盗聴者に知られている秘密鍵を、確率分布としきい値でモデル化したが、より現実に即したモデルを考案することも、今後の課題である。

今後の展開として、より一般に、個々のプレイヤーへの入力がどのような分布であれば秘密が共有できるのか、あるいは、与えられた入力では共有できないことを示す統一的手法の確立が挙げられる。

#### 6. 研究総括の見解：

コンピュータネットワークがすでに社会基盤となっている現在、この高度情報化社会を安全・安心なものにするために、情報セキュリティや暗号の研究の重要性は益々高まっている。現在使われている暗号方式のほとんどは計算量的に安全なものであり、盗聴者の計算能力によっては、解読されてしまう。それに対し、水木敬明は、情報理論的に安全な暗号について研究し、いくつかのモデルに対してそのような暗号が実現できるための条件を理論的に与えていることは基礎研究として評価できる。ただし、実用化に向けては、少なからず距離があるため、今後はより実社会に適用可能な技術の研究・開発が望まれる。また、当該分野には未解決問題も多く、さらなる研究発展を期待する。

#### 7. 主な論文等：

1. Takaaki Mizuki and Takao Nishizeki, Necessary and Sufficient Numbers of Cards for Sharing Secret Keys on Hierarchical Groups, IEICE Trans. Inf. & Syst., Vol.E85-D, No.2, pp.333-345, 2002.
2. 小泉康一, 水木敬明, 西関隆夫, 量子カード配布, 電子情報通信学会論文誌 A, Vol.J86-A, No.4, pp.465-473, 2003.
3. Shingo Orihara, Takaaki Mizuki, and Takao Nishizeki, New Security Index for Digital Fingerprinting and its Bounds, IEICE Trans. Fundamentals, Vol.E86-A, No.5, pp.1156-1163, 2003.
4. Takaaki Mizuki and Takao Nishizeki, Necessary and Sufficient Numbers of Cards for Sharing Secret Keys on Hierarchical Groups, Proc. ISAAC 2001, Lecture Notes in Computer Science, Springer-Verlag, Vol.2223, pp.196-207, 2001.
5. Koichi Koizumi, Takaaki Mizuki, and Takao Nishizeki, Necessary and Sufficient Numbers of Cards for the Transformation Protocol, 2003 Japan-Korea Joint Workshop on Algorithms and Computation, pp.124-137, 2003.