

「情報基盤と利用環境」研究領域 領域活動・評価報告書

－平成 18 年度終了研究課題－

研究総括 富田 眞治

1. 研究領域の概要

この研究領域は、10 億個のトランジスタがチップ上に集積できる時代およびインターネットでコンピュータ利用環境が激変する時代における、新しいコンピュータシステムの基盤技術と利用技術に関連した研究を対象とするものである。

具体的には、超高機能化、超高性能化、超省電力化、モバイル化、情報家電化などを視野に入れたコンピュータシステム（アーキテクチャ、ネットワーキング、言語・コンパイラ、OS）、超大規模集積システム設計技術（デザインオートメーション/CAD）、およびインターネット・マルチメディアを中心とした新しい利用に関する基礎研究が含まれる。また、ハードウェアシステムとの関連性を保ちながら行う研究に加えて、全く新しい原理に基づいたコンピュータや新しい知的なコンピュータ応用研究等が含まれる。

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「情報基盤と利用環境」領域に設けた選考委員 9 名と研究総括で行う。
- 2) 選考方法は、書類選考、面接選考及び総合選考とする。
 - ・ 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) 選考に当たっては目先にとらわれない、先見性・独創性のある研究提案を重視する。
また、活力に富み、自ら研究を実施する意欲の高い者を優先する。

4. 選考の経緯

一応募課題につき領域アドバイザー 9 名が書類審査し、書類選考会議において面接選考の対象者を選考した。続いて、面接選考および総合選考により、採用候補者を選定した。

選 考	書類選考	面接選考	採用者
対象者数	84 名	14 名	4 名

5. 研究実施期間

平成 15 年 10 月～平成 19 年 3 月

6. 領域の活動状況

領域会議:6 回

研究報告会:1 回

研究総括(または技術参事)の研究実施場所訪問:研究総括が研究開始後、全研究者を訪問し研究環境等の確認。そのほか研究実施場所の移動時あるいは適宜に研究者を訪問

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 19 年 3 月 研究期間終了

平成 18 年 12 月 研究報告会開催

平成 19 年 2 月 研究課題別評価提出及び研究総括による評価

平成 19 年 3 月 研究報告書提出

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 15 年度の 84 件の研究提案の中から採択した研究者(3 期生)は 4 名であったが、以下に述べるように、多様な分野の創造性豊かな研究が含まれている。

3 年間の研究期間を終了し、4 名の研究者が当初の期待以上の研究成果を挙げ、わが国の科学技術の発展に大きな貢献ができたものとする。平成 18 年 12 月 22 日には、3 年間の研究成果をまとめた研究報告会を東京ガーデンパレスにて開催した。この報告会は広く一般を対象としたもので、分かり易い報告に努めるとともに、ポスターセッション・デモを充実し参加者とのコミュニケーションの機会を増やしたため、多くの好意的な感想を頂くことができた。

研究者ごとに言えば、

稲見研究者はディスプレイを様々な装置に情報を提示するためのシステム「Display-based Computing」と捉え、プロジェクタや液晶など画像提示装置を映像提示だけでなく、計測・制御・通信等に用いることを提案した。画像提示装置を用い時空間変調可能な指標画像を表示することでカメラに代わり複数の受光素子のみで高速に位置計測を行う事が可能となる。画像提示装置を用い複数台の小型移動ロボットを同時に計測・制御することを可能とするシステムの試験的実装を行った。

井上研究者は、安定した高度情報化社会を実現するためには、コンピュータ・システムの安全性向上が必要不可欠であるとし、外部からの攻撃を動的に検知し、安全なコンピューティングを実現するセキュア・プロセッサを提案した。このプロセッサはハードウェア・レベルでの攻撃検知により高い安全性を実現することを目指している。

加賀美研究者は、千個程度配置した音素子の位相を制御し、複数の場所に焦点を合わせて音を取得したり、複数の焦点に音を発生させたりする多焦点形成の手法について研究した。百個単位の音素子を制御するノードを複数個接続して千個単位の実時間システムを構成し、複数の音焦点を実現した。本システムにより、特定の人にだけ音情報を提供する、また特定の話者の音声のみを記録する、などが可能になる。音の多焦点形成のための種々の技術を提案し実環境で実証した。

宮崎研究者は、最近の小型計算機は大容量のメモリを搭載することが可能となり、大きなデータベースをメモリ上に格納できるようになったが、プロセッサとメモリ間の大きな動作速度差を埋めるためのキャッシュは、大量のデータを扱うデータベース処理に対しては有効に働かない場合が多いことに注目し、データベース処理を効率よく行うためのメモリからのデータ読み出し方法と、そのデータベース演算への適用について研究した。

10. 評価者

研究総括 富田 眞治 京都大学大学院 情報学研究科長 教授

領域アドバイザー氏名(五十音順)

今井 良彦 *2	松下電器産業(株) システムエンジニアリングセンター 所長
笠原 博徳	早稲田大学 理工学術院 教授
河田 亨 *3	シャープ株式会社 フェロー 河田研究所 所長
木戸出 正継	奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 教授
櫛木 好明 *1	パナソニック モバイル コミュニケーションズ(株) 代表取締役社長

坂井 修一	東京大学大学院 情報理工学系研究科 教授
中島 浩	京都大学 学術情報メディアセンター 教授
中田 登志之	日本電気株式会社 中央研究所 主席技術主幹
林 弘	(株)富士通研究所 常務取締役
安浦 寛人	九州大学大学院 システム情報科学研究院 教授

* 1:平成 13 年 8 月～平成 16 年 7 月まで参画

* 2:平成 16 年 7 月から参画

* 3:平成 13 年 8 月～平成 17 年 6 月まで参画

(参考)

(1)外部発表件数 (学術論文件数および査読付き口頭発表の件数)

	国 内	国 際	計
論 文	4	2	6
口 頭	12	36	48
その他	2	0	2
合 計	18	38	56

その他は「著作物」

※平成 18 年 12 月 1 日現在

(2)特許出願件数

国 内	国 際	計
10	1	11

※平成 18 年 12 月 1 日現在

(3)受賞等

・稲見 昌彦

- ・ 計測自動制御学会 論文賞(平成 18 年 10 月)
- ・ 日本バーチャルリアリティ学会 論文賞(平成 18 年 9 月)
- ・ ACM ACE2006 Excellent Paper Award(平成 18 年 6 月)
- ・ ACM ACE2006 Outstanding Paper Award(平成 18 年 6 月)
- ・ 日本バーチャルリアリティ学会 功労賞(平成 18 年 3 月)
- ・ 文化庁 メディア芸術祭 奨励賞(平成 18 年 2 月)
- ・ ACM ACE2005 Excellent Paper Award(平成 17 年 6 月)
- ・ 情報処理学会インタラクシオン 2005 ベストインタラクティブ発表賞(平成 17 年 2 月)
- ・ ICAT 2004 Best Paper Award(平成 16 年 12 月)
- ・ 日本バーチャルリアリティ学会 論文賞(平成 16 年 9 月)
- ・ Laval Virtual 2004 Technopole Mayenne Trophée(平成 16 年 5 月)
- ・ 日本バーチャルリアリティ学会 学術奨励賞(平成 16 年 4 月)
- ・ IEEE Virtual Reality 2004 Best Paper Award(平成 16 年 3 月)
- ・ 米国情報誌「TIME」"Coolest Inventions 2003"(平成 15 年 11 月)

・加賀美 聡

- ・ 平成 18 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰 若手科学者賞 受賞、「ロボット分野におけるヒューマノイドの知的行動の研究」

(4)招待講演

国際 2件

国内 2件

別紙

「情報基盤と利用環境」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)
稲見 昌彦 (兼任)	再帰性光通信技術を用いたユビキタスな情報空間の創生 (電気通信大学 電気通信学部)	電気通信大学 電気通信学部 教授 (同 講師)	52
井上 弘士 (兼任)	安全で低消費エネルギーなプロセッサに関する研究 (九州大学 大学院システム情報科学研究院)	九州大学 大学院システム情報科学研究院 助教授 (福岡大学 工学部 助手)	28
加賀美 聡 (兼任)	超分散マイク・スピーカーによる複数の音焦点形成 (産業技術総合研究所 デジタルヒューマン研究センター)	産業技術総合研究所 デジタルヒューマン研究センター チーム長 (同上)	45
宮崎 純 (兼任)	主記憶上のデータの高速かつ高信頼な処理の実現 (奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科)	奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 助教授 (同上)	34

研究課題別評価

1. 研究課題名： 再帰性光通信技術を用いたユビキタスな情報空間の創生

2. 研究者氏名： 稲見 昌彦

3. 研究の狙い

研究者らはさきがけ研究での研究課題「再帰性光通信技術を用いたユビキタスな情報空間の創生」の一環として、ディスプレイを利用することによって通信や計測・制御を実現するため情報システムである Display-Based Computing(DBC)を提案している。

ディスプレイは「人」に視覚的情報を提示するための装置として主に利用されていた。それに対し DBC はディスプレイを用い人だけでなく「人工物」に対し情報を提示することで実世界指向の新たな情報システムを構築することを目的としている。

研究者らは DBC に関する一連の研究により小型ロボットの位置・角度の計測手法、複合現実感と小型ロボットを用いたゲーム環境などを開発してきた。本報告ではプロジェクタにより投影された指標画像を受光センサユニットにて計測することでセンサユニットの位置・角度を検出可能なシステム及び PC の画面上で指標画像を動かすだけで、複数台のロボットの位置・姿勢を簡便に制御することを可能とする手法を提案する。

ディスプレイを用いた位置計測

ディスプレイとはその名の通り時・空間で光を変調することにより人に対し画像情報を提示するための装置である。あるいは VR の観点では情報世界と実世界とをつなぐ窓ととらえることができる。我々はこのディスプレイという窓を通して情報世界を覗くことができる。

テレビや携帯、PDA、ノートパソコン等我々は日々ディスプレイに囲まれディスプレイを持ち歩きながら生活している。すでに生活空間にはユビキタスにディスプレイが存在しておりわれわれの日常生活においてもディスプレイは無くてはならないものとなっている。

このようなディスプレイの普及を背景に研究者らはDBCという概念を提案している。これは画像提示装置を用いることにより、実世界への影響を与えながら対象との通信、計測、制御また適切な視覚情報の提示を実現する概念である。このDBCの概念はComputer Vision(CV)とは以下のような双対性を持っている。CVでは入力装置のカメラを用いて画像情報をコンピュータの中に取り込む事によって計測等の目的を達成する。一方DBCでは出力装置である画像提示装置を用い、画像情報を現実世界に配置している機器に重畳して提示することにより目的を達成する。(図 1)

本研究は DBC の一環として、画像提示装置によるロボットの制御を試みるものである。本手法はディスプレイを空間光変調素子ととらえた光通信システムと換言することも可能である。

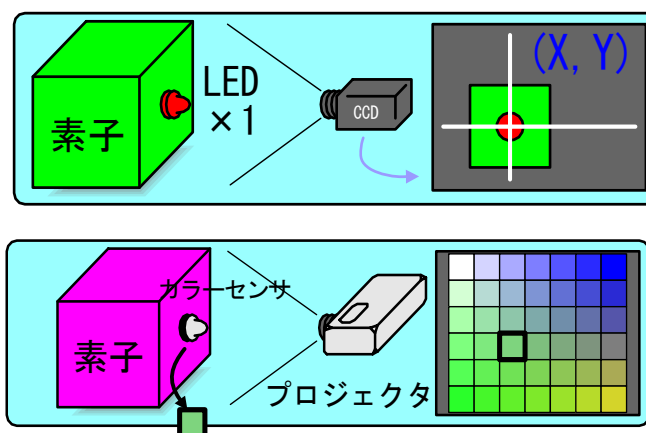


図 1 位置計測におけるカメラとプロジェクタの双対性

4. 研究成果

関連研究

以前から利用されている光学式の位置計測装置には、Optotrak や VICON, QuickMAG などに代表されるようにカメラを利用し、赤外線発光装置やカラーボールなど特定波長の重心位置を求めることにより位置計測を実現するシステムがあげられる。また、ARToolKit のようにカメラから得られた画像から、特定のパターンを認識することにより位置計測を実現するシステムも存在する。こういった方式の位置計測においては、対象の位置を計算するのにカメラから得られた画像の全画素の情報を元に計算するため計算量が非常に多く、更にはカメラ画像の解像度を高くするほど計算量は増大していく。

画像提示装置を利用した位置計測

本研究で提案する位置計測の手法は、カメラのような撮像装置とは対の関係となる画像提示装置を主に利用する。また、計測対象の物体には十字に 5 つの受光素子(フォトランジスタ)を配置した受光部(図 2)と呼ぶ装置を取り付け、画像提示装置から対象の物体に対して特殊なパターンの画像を局所的に提示する。本研究では、画像提示装置を用いて計測対象に提示する光学情報を指標画像と呼称している。

追従による位置・姿勢計測は、まず、受光部の初期位置・姿勢を計測後、受光部に対して局所的に指標画像を提示する。そして受光部に搭載されている受光素子によって指標画像の輝度情報を読み取り、指標画像に対する受光部の相対位置・姿勢を算出する。指標画像を提示した絶対位置を受光部と指標画像の相対位置に加算することで提示面上での受光部の絶対位置・姿勢を求めることができる。また求めた絶対位置・姿勢が新たな指標画像の提示位置となる。この局所的な指標画像の提示と計測を繰り返すことにより追従計測を行っている。(図 3)

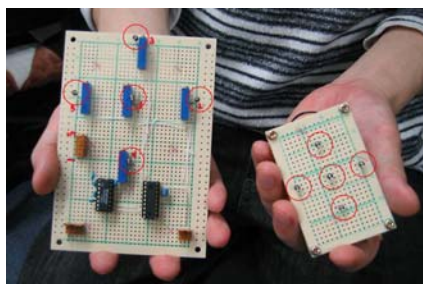


図 2 受光部

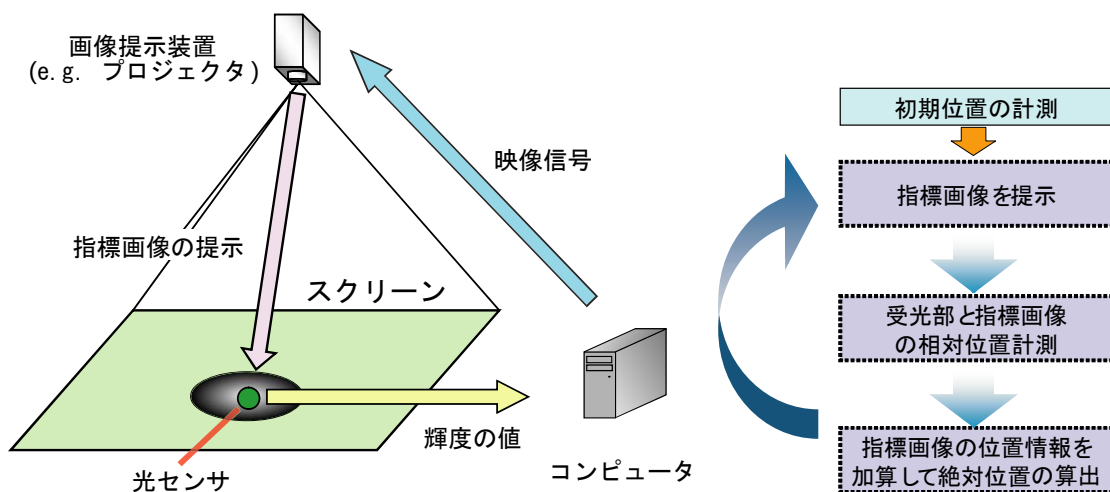


図 3 追従計測概要

計測の流れ

本研究の計測手法では、あくまで指標画像に対する相対位置および相対姿勢しか求めることができない。そのため、最初に計測対象の画像提示装置の提示面上での絶対座標を求めなければならない。静止している受光部に対し、図 4に示すように画面の半分を明暗の二値のパターンに分け中心の受光素子の値を読み取ることで、どちらに受光部が存在するのか判別することができる。さらに、半分を明暗に分け順次繰り返し判別していくことで、受光部の提示面内での絶対位置を絞り込んでいくことが可能である。この手法では、複数の受光部が存在した場合、ひとつずつ絞り込んでいかなければならないため非効率的である。より効率的な計測方法として、複数の受光部を一回のパターン提示で絶対位置を計測する手法も存在する。

初期位置を計測した後、初期姿勢計測用の指標画像を受光部に対して提示し初期姿勢を求める。この指標画像は、極座標に従って明暗するグラデーションのパターンで、受光部の姿勢を絶対値で計測できるものである。図 5 は初期姿勢計測用指標画像である。緑色の丸い点は、受光部の受光素子を表している。十字に配置された 5 つの受光素子から取得した輝度値をそれぞれ a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 とすると、以下に示す式 1 により初期姿勢を求めることができる。ただし、 x_i, y_i は受光素子 a_i の位置、 n は受光素子の個数、 j は複素記号とする。また、受光素子から得られる純粋な値は明るくなるにつれて増加していくが線形性はない。そこで、 a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 の各受光素子の値はガンマ補正をした結果となっており、各値は明るくなるにつれて線形的に増加するようになっている。

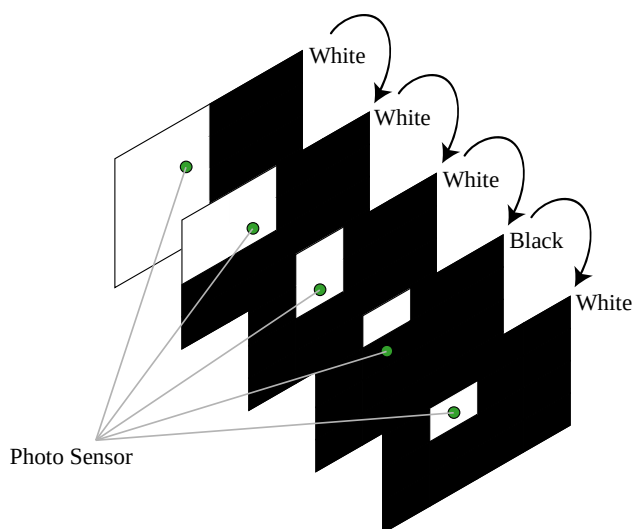


図 4 初期位置計測パターン

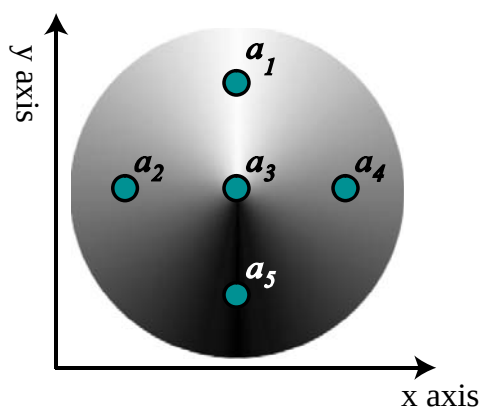


図 5 初期姿勢計測用指標画像

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n (a_i \times x_i)}{\sum_{i=1}^n a_i}$$

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^n (a_i \times y_i)}{\sum_{i=1}^n a_i}$$

$$\theta = \arg(X + Yj)$$

式 1 初期姿勢計測

初期位置と初期姿勢の計測後は、次に述べる指標画像を受光部に局所的に提示し、指標画像との相対ずれを計測し、計測された結果を基に指標画像を提示しなおし追従計測を行っていく。

図 5、図 6は、位置・姿勢のずれを同時に計測できる指標画像である。先と同じように、緑色の丸い点は受光部の受光素子を表しており、5つの受光素子から取得した輝度値をそれぞれ a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 としている。その場合、以下に示す式 2により受光部の指標画像とのずれ、 $dx, dy, d\theta$ を求めることができる。ただし、 a'_i は a_i から a_3 の値を引いたものである。これは、この指標画像の中心部分はずっと 50%のグレーになっており、この輝度値を引くことで少しでも環境光の影響を減らすためである。

例えば、単純に受光部がx軸方向に並進移動した場合(図 5)を考える。左の図では5個の受光素子の出力はすべて 50%のグレーで均衡が取れているが、右の図では受光部が右に並進移動し、受光素子 a_1 と a_5 が指標画像内の濃淡を移動している。すると受光素子の出力に変化が生じ、位置の変化量 dx は式 2に示すように a_1 と a_5 の差分として求められる。y軸方向に平行移動した場合も同様に求めることができる。次に、受光部が回転した場合(図 6)を考える。先と同じように、左の図では受光素子の出力値は均衡が取れている。右の図では受光部が右回りに回転し、受光素子 a_1, a_2, a_4, a_5 それぞれが指標画像内の濃淡を移動し、この場合では各受光素子が暗い方へと移動している。したがって、回転角は式 2のように各受光素子の値から中心輝度である a_3 の値を引いた値の総和から求めることができる。

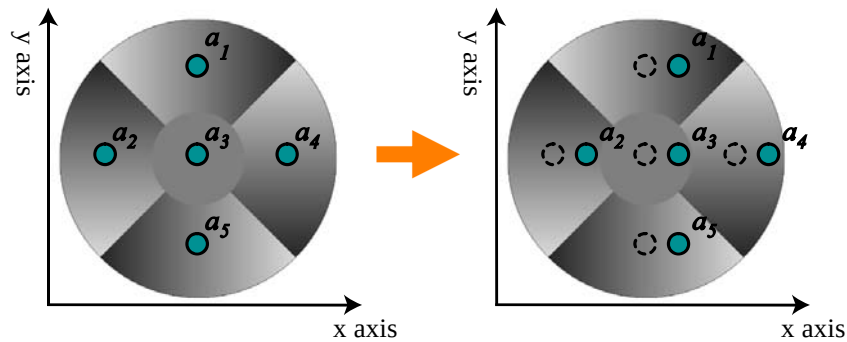


図 6 位置・姿勢同時計測用指標画像(並進時)

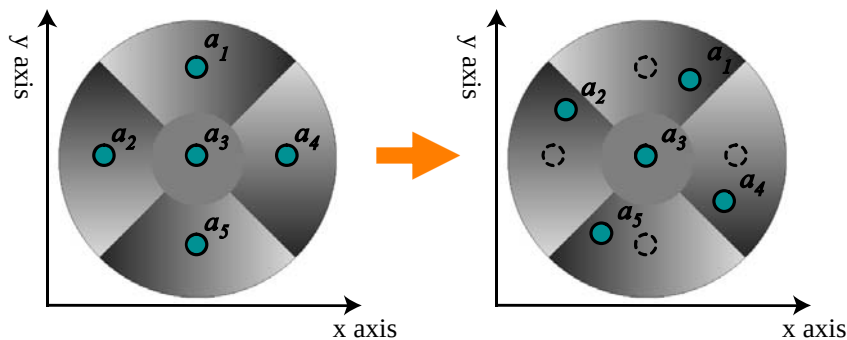


図 7 位置・姿勢同時計測用指標画像(回転時)

$$\begin{aligned}
a'_i &= a_i - a_3 \\
dx &\propto a'_1 - a'_5 \\
dy &\propto a'_2 - a'_4 \\
\sin d\theta &\propto a'_1 + a'_2 + a'_4 + a'_5 \\
\text{式 2 位置・姿勢計測}
\end{aligned}$$

図 8の指標画像は、先の指標画像を改良したものである。先の指標画像の異なる点は、 a_1 , a_5 に関する濃淡の変化の方向を、先の指標画像とは逆の方向へ変化させていることと、 a_3 に関する中心輝度を示すための部分を削除していることである。

これは、 a_1 , a_5 に関する濃淡の方向を逆にしたため、位置・姿勢を求める式が先の式 2 の a'_1 , a'_5 の符号を逆にしたものになり、これを計算すると以下の式 3 に示すように、中心輝度を得るための受光素子 a_3 の値が必要なくなるためである。また、先の指標画像では、濃淡の境目が不連続であったのに対し、 a_1 , a_5 に関する濃淡の変化の方向を逆にすることで連続した濃淡の変化になった。このことで、例えば先の指標画像において受光素子が境目付近まで移動した際に、素子から得られる値が、境目の急激な輝度の変化に強い影響を受ける可能性があったのに対して、この指標画像ではそのような影響を受けることが無くなったという利点も生まれた。

この指標画像では環境光の影響を極力減らしながら、安定した計測結果を得ることができた。また、中心の受光素子 a_3 は計測には使用されなくなったので、別の情報のために使用することも可能となる。

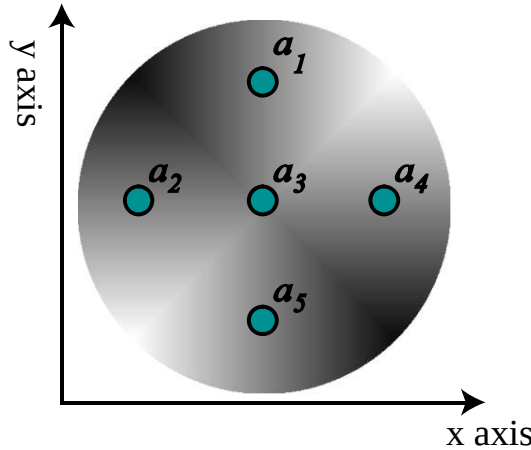


図 8 相対位置・姿勢同時計測用指標画像

$$\begin{aligned}
dx &\propto a_5 - a_1 \\
dy &\propto a_2 - a_4 \\
\sin d\theta &\propto a_2 + a_4 - a_1 - a_5 \\
\text{式 3 位置・姿勢計測}
\end{aligned}$$

本計測手法の有用性

本研究で提案する計測方式では、5つの受光素子から得られる輝度の値から簡単な数式で位置の計測を行うことができるため計算量は非常に少ない。また、画像提示装置自体を計測装置として利用するため、使用する画像提示装置のピクセル座標で位置の計測結果を得ることができる。そのため、カメラを利用した時のようにカメラの座標系と画像提示装置の座標系とのレジストレーションが不要となり、実物体に対して画像を正確に重畳表示させることが可能となる。したがって、これらの技術を応用することで複合現実感(MR: Mixed Reality)環境を構築することが容易になると考えられる。センサユニットを小型化することでペン型インタフェースとしての実装も容易に可能である。(図 9)

プロジェクタからの直接光を計測しているため、図 10に示すように白屋の屋外にて計測を行うことも可能であ

る。

現在提案されている指標画像・受光素子の配置が位置および姿勢の計測に対して最も良いという根拠はなく、指標画像のパターンや受光素子の工夫によってより精度の高い計測や他にも高さ方向の計測など、位置以外の計測を行うことができる可能性がある。

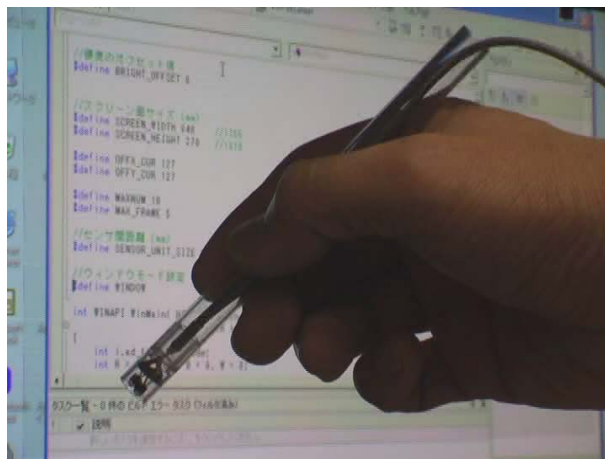


図 9 ペン型センシングユニット



図 10 屋外での実験風景

MR ゲーム環境 ～Augmented Coliseum～

画像提示装置を利用した位置計測技術のアプリケーションとして、Augmented Coliseumと名付けたMRゲームを制作した。これは、ユーザが小型ロボットを操縦して戦うバトルゲームである。小型ロボットは、車輪を左右に有した車両型のロボットで、動き回ることしかできない。しかし、上部からプロジェクタで小型ロボットの周りにミサイルやレーザーなどのCGを重畳投影することで、ゲームの機能を付加している。

図 11は、本システムの概要を示している。小型ロボットの上部には、5つの受光素子が取り付けられており、それらから得られる輝度情報をPCへと送信している。その輝度情報を基に、位置・姿勢を計算し、その結果をPCから新たな位置への指標画像の表示・ゲームの処理・衝突判定などへと利用している。また、ユーザは市販のゲームパッドを使いロボットを操縦することができ、その入力情報から、小型ロボットのモータの回転情報を決定して送信している。位置・姿勢の計算とゲームプログラムの処理は同一のPCで行っている。

ゲームのための拡張機能を付与する対象の実物体とした小型ロボットを図 12に示す。プレイヤー同士は、この小型ロボットを操作しゲームを行う。この小型ロボットは、位置・姿勢計測のために画像提示装置から投影された映像信号の輝度情報を計測する計測部と、PCから送られてくるプレイヤーの操作情報により、モータを制御して装着された2つの車輪でロボット自体を動かす制御部に分かれている。輝度を測る光センサとしてはフォトトランジスタを用い、図 12のロボットの上部に5つ配置した。このセンサ情報はPCからの指令に基づきマイク

ロコントローラユニットで、AD変換されWiPortを用いPCに送信される。

プレイヤーが実世界に存在する小型ロボットを操作しお互いに戦うというゲームにおいて、ロボットの攻撃に相当する機能をロボットの位置に合わせて映像での修飾により与えた。具体的にはレーザー光線、ミサイル、爆発、シールドゲージ、ロボットの方向を表現するため矢印を重畳表示した。

図 13に、本研究で試作したゲームの一場面を示す。この場面では、一方のロボットがレーザーを用いて、他方を攻撃しようとしている。本来、模型やロボットは物理的に実装した機能しかもつことをできないが、本システム内では上記の映像を用いることで、実物体である小型ロボットに対してゲームに必要な拡張機能を与えることができた。

このシステムを用いれば、情報処理装置内に実世界の対象物体のモデルを準備し、実世界の対象物体と同期させることで実世界と情報世界双方にインタラクション可能な環境を実現することができる。さらに、物理計算エンジンを実装することにより、実世界には存在しない仮想物体と対象物体のモデルとのインタラクションを実現できる。実世界と同期した情報世界内での物理計算は、例えばシューティングゲームにおける当たり判定や、物体同士の衝突判定などとして実装し、ゲームを実現可能にする。また、ユーザがこのシステムを操作することは、実世界における対象物体を物理的に動かすか、情報世界における対象のモデルにコントローラーなどを經由して操作情報を与えることにより実現できる。

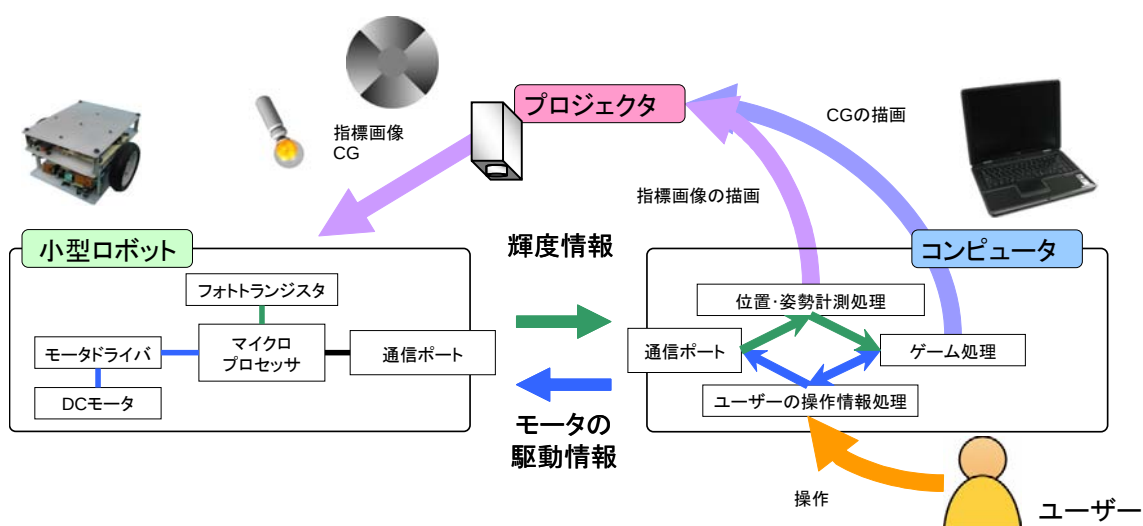


図 11 システム概要

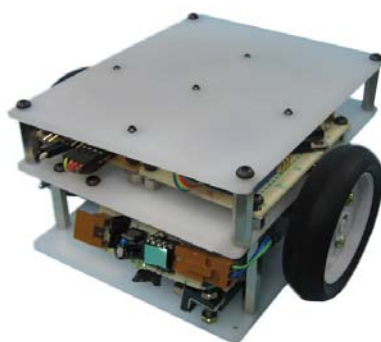


図 12 小型ロボット

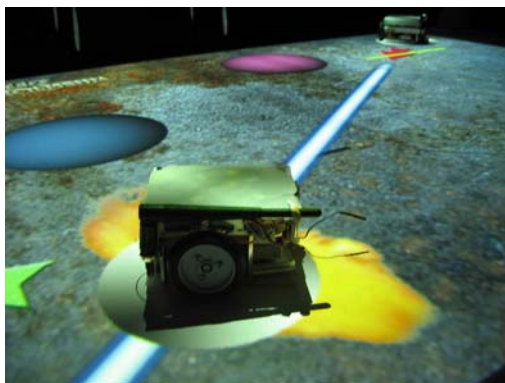


図 13 Augmented Coliseum

今回、実世界と情報世界とのインタラクションを実現するために、簡単な物理シミュレーションを実装し、情報世界のCGで描かれたブロックと小型ロボットとの衝突を表現した。物理シミュレーションには、バネ・ダンパモデルを用いて衝突時に働く力を求めるペナルティ法[6]という手法を用いた。

以上のように DBC の複合現実感への応用として、実世界に存在する車両型の小型ロボットに対して、プロジェクタからの投影される映像を正確に重畳させることでロボットを修飾することを実現した。さらに、それを利用した実世界指向のゲーム環境を提案しシステムを構築した。これにより、物理的に実装した機能しかもつことをできない実在する小型ロボットに対して、ゲームとしての拡張機能を与えることができた。また、簡単な物理シミュレーションを実装することで、簡単な情報世界オブジェクトと実世界オブジェクトとのインタラクションを実装することができた。本システムで提案したゲーム環境は、簡単なセンサ等を付加することで市販されている玩具等のエンターテインメント性を高めることが可能である。さらに、制御と計測のモデルがあるため、複数の箇所で同一のシステムを用意してネットワークを介した対戦を実現できる可能性がある。

ディスプレイを用いたロボットの制御

画像情報によりコントロールされるロボットとして、ライントレースロボットがある。これは黒地に描かれた白線、あるいは白地に描かれた黒線にそって走行する自立型ロボットで、工場内の自動搬送車として実用化されている。最近では、単に線に沿って走るだけでなく、線に埋め込まれたバーコードからの情報により速度の制御などが可能なものも開発されている。しかし、従来のライントレースロボットはあらかじめ用意されたラインに沿って走行するのみで、走行中に経路を動的に変化させることは不可能だった。それはロボットが追従するためのラインが床などに印刷されており、空間的・時間的に固定されていたからである。

ここで画像提示装置は時・空間光を変調可能なデバイスである。この特徴をライントレースロボットに応用した場合、つまりラインを画像提示装置で提示した場合、ラインを空間的・時間的に任意に提示することが可能になり、Jarvis らが試験的な実装を行っている。Jarvis らの手法によりロボットは動的に変化する任意のライン画像に沿って走行可能となる。しかし、ロボットの軌跡のみの指示に留まっており、位置・姿勢・速度等の制御は実現していない。

研究者らは画像提示装置により指標画像を表示し、表示された画像に従って適切な動作をするようにプログラムされたロボットを用いることでロボットに対し多様な動作を指示する手法を提案する。

ライントレースロボットの例では、指標画像は白黒のラインであった。この指標画像は文字通りラインなので、ロボットに対しラインからの変位 x しか情報として与えることができない。しかし、指標画像を工夫することにより、さらに多くの情報をロボットに与え、より複雑な動作をロボットに指示することが可能となる。

指標画像はモノクロ2階調だけではなく、グレースケール画像やカラー画像、時変画像を利用することで、目的に応じ情報量を増やすことが可能である。また、指標画像に関しても多様なパターンを用いることが可能となる。

提案手法は指標画像に工夫を加えることで計測側は単純な受光素子にて構成できる。よって、従来の Computer Vision による計測速度はカメラのフレームレートによって制約されたが本手法は画像提示装置のフレームレートではなく受光素子のサンプリングスピードにより制約されるという特徴も有する。

本研究では画像提示装置と安価なフォトセンサを利用して、ロボットを制御することを試みる。

なお、本手法はディスプレイを用いることで従来の人に対しての画像提示と容易に組み合わせることができるという点も大きな特徴である。

指標画像を用いたロボットの制御

画像提示装置を用いてロボットを制御するためのシステムを図 14に示す。ロボットに受光部を取り付け、ロボット上の受光部に対し指標画像を表示する。ロボットは受光部のセンサ出力から指標画像とのずれを算出し、そのずれを修正するようにプログラムしておけば、ロボットは指標画像に追従する。したがって指標画像の位置姿勢をコントロールすることで、間接的にロボットの位置姿勢をコントロールすることができる。

なお、このシステムはオープンループであるためロボットが指標画像から外れた状態では制御することはできない。

ロボットをコントロールするための画像提示装置にはプロジェクタや液晶ディスプレイなど様々な装置を利用することが可能である。例えば、プロジェクタを利用する場合は受光部をロボットの上に配置し、ロボットの上から指標画像を投影すればよい。また、液晶ディスプレイを利用する場合には受光部をロボットの底面に配置し、水平に設置したディスプレイ上でロボットを走行させ、ロボットの下面から指標画像を提示すればよい。

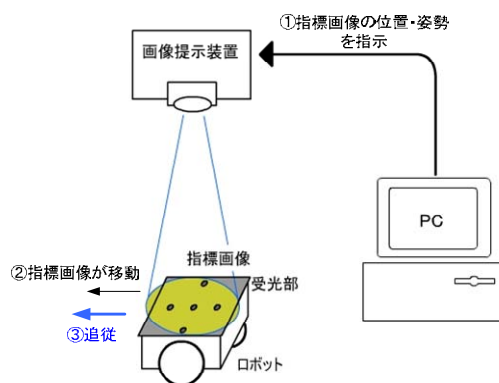


図 14 画像提示装置を用いたロボットの制御

試作したロボットはノートPCの画面上で制御することを想定し、センサはロボットの底面に配置し、ロボット本体は 40mm 角と小型に設計した。(図 15)

このロボットは、ノート PC のディスプレイに表示された指標画像に追従することが可能である。また、本ロボットはシリアル通信によるデバッグ機能を備えているので、ロボットと PC を RS232C ケーブルで接続すれば、各センサの生データ、および算出された指標画像からのずれを PC でモニタすることができる。

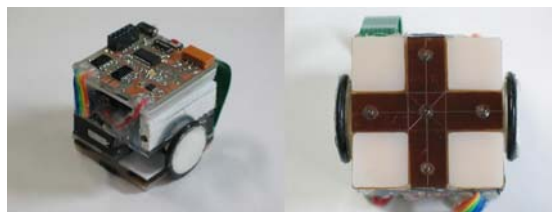


図 15 試作した小型ロボット

ロボットは左右独立2輪駆動方式で、左右2つのタイヤにより走行する。駆動モータには小型の DC ギヤドモータを用いた。ロボットの底面には5つのセンサを配置したセンサ基板が固定されている。マイコンは5つのセンサの出力から、指標画像とロボット自身とのずれ(x-y 方向のずれ、角度のずれ)を算出する。そして、マイコンはそのずれが0になるように、モータドライバに指令を送る。この一連の流れがメインループで常に繰り返されるこ

とにより、ロボットは指標画像に追従することができる。

今回開発したコントロールソフトは、マウスやキーボードの入力によって指標画像の位置・角度を自由に動かす機能を持っている。ロボットは指標画像に追従するので、結果としてディスプレイを介してロボットの位置・姿勢を自由にコントロールすることができる。

また、図 16に示すようにアームを装着し、その開閉を指標画像中心部の明滅パタンによりシリアル通信で指示することで物体を把持し、移動するようなタスクを行うことにも成功した。

図 17に示すように複数の指標画像を用いることで複数台のロボットを同時に制御することも可能である。

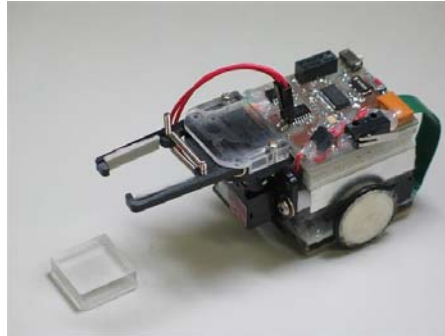


図 16 アーム付き小型ロボット



図 17 複数台のロボットの同時制御

PC 側のコントロールソフトの開発には Macromedia 社(現 Adobe 社)の FLASH MX を用いた。FLASH は主にインタラクティブな web コンテンツを製作するためのデファクトスタンダードのソフトウェアであり、FLASH を利用することで初心者でも、簡便にアニメーションを作成することができる。また、ActionScript というアニメーションを制御するスクリプトを記述することにより、単調なアニメーションだけではなく、例えばマウスやキーボードの操作によって複雑に変化するアニメーションも簡単に製作することができる。もちろん FLASH が得意とする音楽と同期した動作も可能である。

つまり本システムはインタラクティブな web オーサリングの要領で、モーターの制御や通信に関する詳しい知識が無くても小型ロボットを制御することを可能とするフレームワークととらえることもできる。

本システムの追従性能を検証するため、ノートPCのディスプレイを水平に設置して、そのディスプレイ上でロボットを指標画像に追従させた。図 18の結果に示されているように数ミリ以内の誤差で指標画像とほぼ同等の軌跡を追従していることが確認できた。

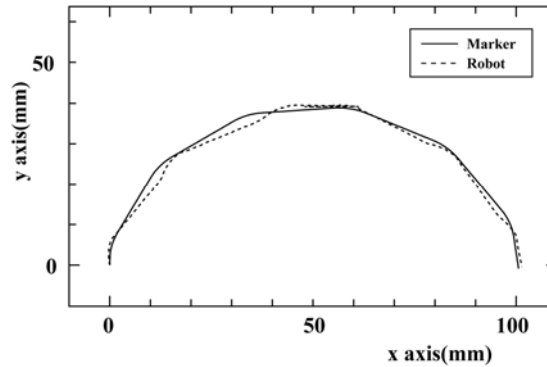


図 18 指標画像の軌跡(実線)とロボットの軌跡(点線)

まとめ

本研究課題においてディスプレイを時空間変調素子ととらえ、ディスプレイを用い空間を光学的に構造化するための手法 Display-Based Computing を提案し、指標画像を用いることで簡便に複数台のセンサの位置を計測すると共に、小型ロボットを制御するための手法を提案した。

本手法は

- ディスプレイの構成デバイスの種類に依存せず利用可能
- ディスプレイのフレームレートでなくセンサのサンプリングレートにより速度が規定されるため、カメラを用いる手法と比較し高速化が容易
- 指標画像を移動するだけでロボットの位置・姿勢を制御できるため web コンテンツを作るように誰もが容易にロボットを操作可能

といった特徴を有し、試作システムを実装することで提案システムの評価を行った。

5. 自己評価

Display-Based Computing の提案と試験的実装に成功

当初の計画ではプロジェクタによる時空間変調光と高速カメラ及びセンサユニットを用いることで生活空間に分散された多数の素子と超多チャンネルで同時通信可能な再帰性光通信技術を研究することを目指していた。

しかしながら研究の過程で高速カメラを用いずともプロジェクタと安価な光センサユニットのみで高速・高精度にセンサユニットの座標を検出可能な Projector-based Tracking System(PTS)を発案し実装に成功した。

研究者は PTS に関する研究を遂行していく過程で、「ヒューマンインタフェース」そのものが持つハードウェアインタフェースとしての汎用性に気づいた。

つまり、ヒューマンインタフェースは情報世界とユーザとをつなぐための各種機器であり、その入出力様式は個人差があるもののヒトの入出力器官である感覚器、効果器により定められている。例えばディスプレイもデバイスとしてはブラウン管、液晶、プラズマ、有機 EL、DLP 等きわめて多様であるが、可視光の時空間変調素子という点ではディスプレイ共通の特徴である。

PTS 成功からユビキタスかつ汎用的なハードウェアインタフェースとしてのディスプレイの可能性に思い至り Display-Based Computing(DBC)というコンセプトを提唱するに至った。

DBC とはまさに本来ヒューマンインタフェースの一種であるディスプレイをコンピュータとセンサ・ロボットとのハードウェアインタフェースとして用いることで、ディスプレイデバイスに依存しない汎用性を獲得することが出来た。

ユビキタス空間とは情報と人と様々な機器が適切に共存している環境と換言することができる。本設計指針を敷衍すれば触覚入出力装置、音声入出力装置等視覚以外の五感の入出力のために用いられているヒューマンインタフェースをユビキタス環境におけるハードウェアインタフェースとして応用可能であると考えられる。

DBC というコンセプトは内外でも受け入れられ、米国、オーストリア、オーストラリア、韓国などと DBC の応用技術に関する共同研究や製品化を目指した開発も企業と共同で行われている。

以上のことから当初提案した再帰性光通信技術に関する研究項目すべてを実現しただけでなく、当初計画を上回る萌芽的コンセプト Display-Based Computing を提案し、多くの試験的実装を持ってその有効性を示すこと

ができたことで研究計画を十二分に達成できたと評価できる。

DBCにより誰もが簡単に移動ロボットを制御可能な方法を実現

当初より最終年度にはPhase3として群デバイスの試作を計画していた。研究者はDBCのコンセプトに基づきディスプレイにより簡便にロボットを制御可能な手法を考案し試験的実装を行った。

従来の移動ロボットを自由に制御するためにはセンサ、電子回路、プログラム、通信に関し多くの専門知識を必要とした。よって工学系の大学院生クラスでようやく扱うことが可能となっていた。

研究者がさがけ期間中考案したDBCによるロボット制御を行うことで、Webページを作成するのと同様のスキルで自由に移動ロボットを制御可能なシステムを構築可能となった。

Webページも90年代中盤までは大学・企業の研究者が中心となり作成していた。しかし様々なWebオーサリングツールの登場により高校生やデザイナーが簡便にWebページを作成可能となった。提案手法を用いることで今後はロボットを「デジタルメディア」として研究者だけでなく一般の方が安価に用いることが可能となる。一般過程への普及が伸び悩んでいるロボットの新たな展開への手がかりとなることが期待でき、本研究課題が研究終了時に伴い完結するのではなく、将来に展開可能な研究開発の「さがけ」としての役割を十分果たすことが出来たと評価できる。

6. 研究総括の見解

プロジェクタや液晶などの画像提示装置を映像提示だけでなく計測・制御・通信等に用いることを提案し、画像提示装置を用い時空間変調可能な指標画像を表示することでカメラに代わり複数の受光素子のみで高速に位置計測を行う事が可能となることを実証した。そして、画像提示装置を用い複数の小型移動ロボットを同時に計測・制御することを可能とするシステムの試験的実装を行った。これは誰もが簡単に移動ロボットを制御可能な方法を実現したとすることができる。独創性豊かなアイデアとアイデアを素早く実現するシステム構築能力により大きな成果に結びつけることができた。本技術は多数のデバイスが遍在するユビキタス社会における情報通信のためのキーテクノロジーの一つとなると考えられ、今後の大きな発展が期待される。

7. 主な論文等

論文(国際、国内)

- (1) Maki Sugimoto, Georges Kagotani, Hideaki Nii, Naoji Shiroma, Masahiko Inami and Fumitoshi Matsuno, Time Follower's Vision: A Tele-Operation Interface with Past Images, IEEE Computer Graphics and Applications, Vol.25, No.1, pp.54-63, 2005
- (2) 杉本麻樹, 小島稔, 中村亨大, 新居英明, 稲見昌彦, 画像提示装置で表示した指標画像を用いた位置・姿勢計測, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.10, no.4, pp.485-494, 2005

口頭発表(国際、査読付き)

- (1) M. Inami, N. Kawakami and S. Tachi, Optical Camouflage Using Retro-reflective Projection Technology, Proceedings of IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, pp.348-349, 2003.10
- (2) M. Sugimoto, G. Kagotani, H. Nii, N. Shiroma, M. Inami and F. Matsuno, Time Follower's Vision: A Tele-Operation Interface with Past Images, ACM SIGGRAPH 2004 Conference Abstracts and Applications, CD-ROM, 2004.8
- (3) Maki Sugimoto, Masahiko Inami, Georges Kagotani, Minoru Kojima, Akihiro Nakamura and Hideaki Nii, Augmented Coliseum: Display-Based Computing for Augmented Reality Inspiration Computing Robot, ACM SIGGRAPH 2005 Conference Abstracts and Applications, CD-ROM, 2005.8
- (4) Minoru KOJIMA, Maki SUGIMOTO, Akihiro NAKAMURA, Masahiro TOMITA, Hideaki NII and Masahiko INAMI,

Augmented Coliseum: An Augmented Game Environment with Small Vehicles, The First IEEE International Workshop on Horizontal Interactive Human-Computer Systems, pp.3-8, 2006

口頭発表(国内、査読無し)

- (1) 稲見昌彦, 新居英明, 再帰性光通信技術の研究(第二報)-試験的実装-, 第4回 SICE システムインテグレーション部門(SI部門)講演会, CD-ROM, 2003
- (2) 杉本麻樹, 新居英明, 稲見昌彦, Projector-based Tracking System, 第 47 回 自動制御連合講演会 CD-ROM, 2004
- (3) 稲見昌彦, 杉本麻樹, 新居英明, Display-Based Computing の研究 第一報: 画像提示装置を主体とした実世界指向情報システム, 日本バーチャルリアリティ学会 第 10 回大会論文集, CD-ROM, 2005
- (4) 新居英明, 橋本悠希, 杉本麻樹, 稲見昌彦, Display-Based Computing の研究(第四報): プロジェクタを使用した位置検出システム, 日本バーチャルリアリティ学会第 10 回大会論文集, 2005
- (5) 稲見昌彦, 富田正浩, 杉本麻樹, 新居英明, 小島稔, Display-Based Computing の研究 第七報: Display-based Computing によるロボットとのインタラクション, 情報処理学会研究報告, 2006-CVIM-156-10, 2006

特許出願

- (1) 新居英明, 稲見昌彦, 白方博, 指示位置検出装置, 特願 2004-116481, H16.4.12
- (2) 稲見昌彦, 杉本麻樹, 新居英明, 位置検出装置及び位置検出方法, 特願 2004-340967, H16.11.25
- (3) 杉本麻樹, 中村享大, 新居英明, 稲見昌彦, 複合現実表現装置及び複合現実表現方法, 特願 2005-174257, H17.8.14

招待講演

- (1) Masahiko INAMI, Augmented Human Perception :Interfaces to enhance human capacity of perception and expression, IEEE International Symposium on Wearable Computers, 2006.10

受賞等

- (1) 米国「TIME」誌 Coolest Inventions 2003, 平成15年11月
- (2) IEEE Virtual Reality 2004 Best Paper Award, 平成16年 3月
- (3) Laval Virtual 2004 Technopole Mayenne Trophée, 平成16年 5月
- (4) 日本バーチャルリアリティ学会 論文賞, 平成16年 9月
- (5) ACM ACE2006 Excellent Paper Award, 平成18年 6月

研究課題別評価

1 研究課題名: 安全で低消費エネルギーなプロセッサに関する研究

2 研究者氏名: 井上 弘士

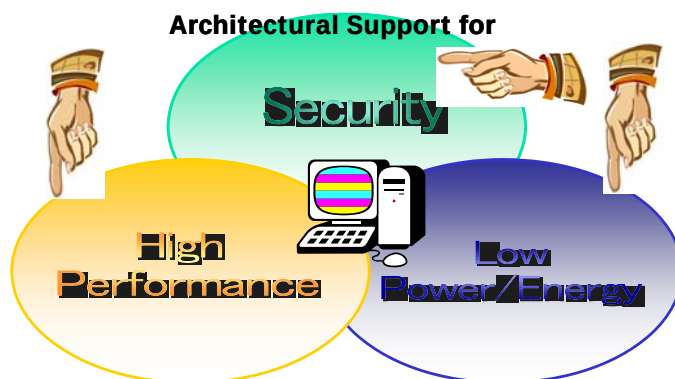
3 研究の狙い:

現在、我々はインターネットを利用して世界中の様々な情報に用意にアクセスできる。実際、産業界はもちろんのこと、一般市民の生活においてもインターネットは極めて重要かつ重宝な道具として大きな役割を果たしている。しかしながら、これは、我々のコンピュータがインターネットに接続した瞬間から、目に見えない大多数の悪意ある攻撃の対象と成り得ることを意味する。悪意ある攻撃は、我々の日常生活から社会経済にまで多岐に渡り極めて大きな被害をもたらす。例えば、コンピュータ・ウイルスやワームなどの悪質プログラムは深刻な社会問題を引き起こしており、IPA(Information-Technology Promotion Agency, Japan)の「国内・国外におけるコンピュータウイルス被害状況調査(2004年4月)」によれば、世界で発生したウイルス被害額は2003年で135億ドル(およそ1.5兆円)にもなる。

これまで、データの暗号化やインターネットを介した不正アクセスの検出、ソフトウェアによるウイルス検索など、様々な安全性向上技術に関する研究・開発が進められてきた。そして、これらの多くがアルゴリズム・レベル、ネットワーク・レベル、OSなどのソフトウェア・レベルでの議論であった。しかしながら、例えば、コンピュータ・ウイルスと言えども、それを実行するのはハードウェアである、また、重要な秘密情報を記憶し処理を施すのもプロセッサやメモリといったハードウェアである。これに対し、1970年代初頭に開発されて以来、ハードウェアの代表であるマイクロプロセッサに関する研究開発は高性能化や低コスト化、低消費電力化に焦点が当てられており、安全性の向上を目的とする議論は極めて少ないのが実情であった。

これまで、データの暗号化やインターネットを介した不正アクセスの検出、ソフトウェアによるウイルス検索など、様々な安全性向上技術に関する研究・開発が進められてきた。そして、これらの多くがアルゴリズム・レベル、ネットワーク・レベル、OSなどのソフトウェア・レベルでの議論であった。しかしながら、例えば、コンピュータ・ウイルスと言えども、それを実行するのはハードウェアである、また、重要な秘密情報を記憶し処理を施すのもプロセッサやメモリといったハードウェアである。これに対し、1970年代初頭に開発されて以来、ハードウェアの代表であるマイクロプロセッサに関する研究開発は高性能化や低コスト化、低消費電力化に焦点が当てられており、安全性の向上を目的とする議論は極めて少ないのが実情であった。

そこで本研究では、コンピュータ・システムにおいて実際に処理を行うハードウェア・レベルでの安全性確保が「最後の砦になる」と考え、それを実現するハードウェア・アーキテクチャの確立を目指している。特に、コンピュータの核となる(実際にプログラムを実行する)プロセッサとメモリに焦点を当て、安全性を向上するメカニズムの考案、ならびに、その際に生じる性能や消費電力オーバーヘッドを最小限にするための技術を開発する。システムの安全性を向上するには、様々な攻撃からの防衛策を考案するのはもちろんのこと、性能や消費電力も含めたコストとのトレードオフを考慮することが重要となる。高い安全性を確保できる方式を考案したとしても、その実現において極めて高いコストを要する(例えば、プログラム実行時間や消費電力が数倍になるなど)場合には適用することが難しい。そのため、安全対策を施すこと事態が難しくなり、より危険性を高める結果となりかねない。つまり、「如何に低コストで安全性を高めることができるか?」が極めて重要となる。

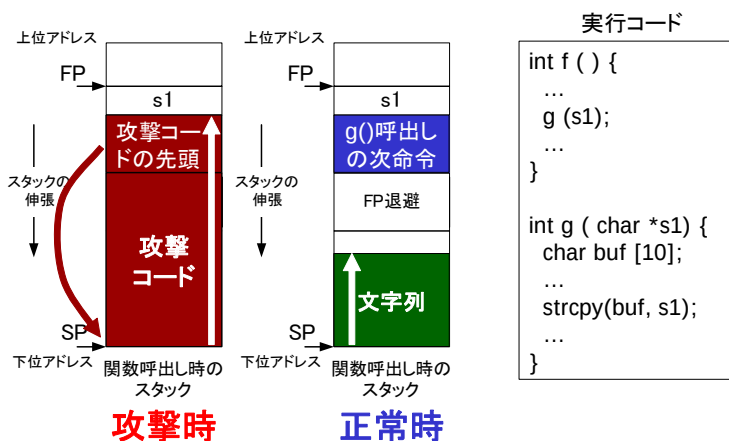


4 研究成果:

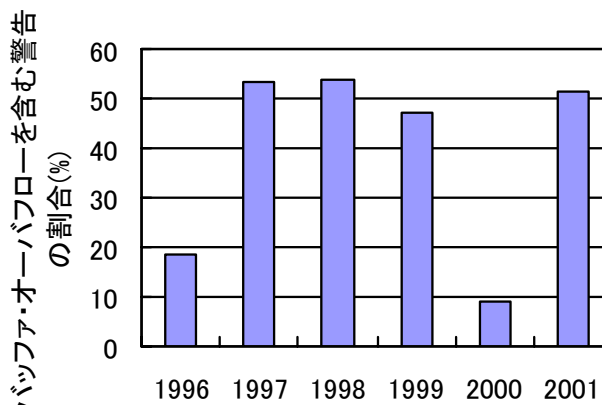
本研究では、1)ウィルス等の悪質プログラムからコンピュータを守る、2)秘密情報の漏洩を防ぐ、の2点に着目し、これらを実現もしくはサポートするためのハードウェア・アーキテクチャを開発した。本節ではこれら研究成果の詳細を説明する。

4. 1 悪質プログラムの実行を防ぐ～バッファオーバーフロー攻撃の動的検出～

近年、バッファ・オーバーフローの脆弱性を活用した悪質プログラムによる被害が急増している。例えば、代表的なものとして 2001 年に猛威を振るった Code Red や、2003 年の Blaster などがある。悪質プログラムは、攻撃対象となるコンピュータが正規アプリケーションを実行している最中にバッファ・オーバーフローを引き起こさせ、強制的にプログラムの実行制御を乗っ取る。したがって、特権モードでの実行中にバッファ・オーバーフローが発生した場合、悪質プログラムは特権モードで実行されることになる。その結果、ファイルの削除や改ざんが可能となり多大なる被害をもたらす。あるアプリケーションにおいてバッファ・オーバーフローに関する脆弱性が既知の場合、ダウンロード等によるアプリケーション・プログラムの更新により解決できる。しかしながら、未知の脆弱性には対応できないため、依然として多くの被害が発生しているのが現状である。例えば、右図に示すよう



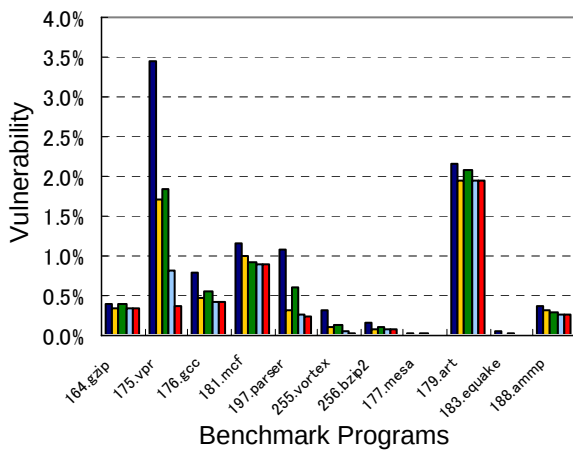
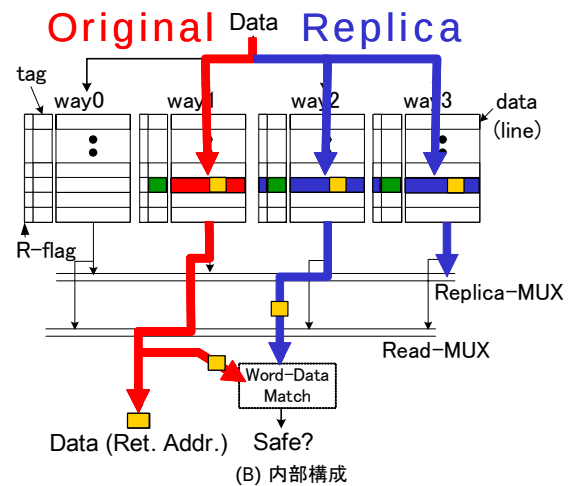
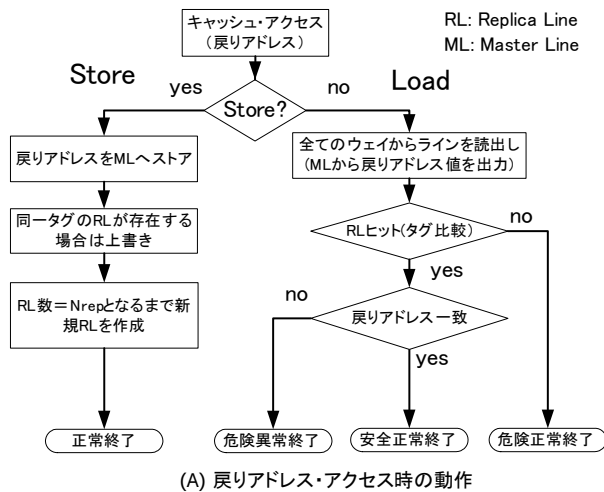
バッファオーバーフロー攻撃による実行制御の乗っ取り



CERT バッファオーバーフロー勧告

に、CERT によって発せられた勧告(1996～2001 年)の内、バッファ・オーバーフローに関連するものが高い割合を占めている。

多くの悪質プログラムは、関数呼び出し後にバッファ・オーバーフローを引き起こしてスタックを破壊する(スタック・スマッシングと呼ばれる)。そして、関数呼び出し側への戻りアドレスを悪質プログラム・コードの先頭アドレスへと改ざんすることで、プログラムの実行制御を乗っ取る。右図を用いてバッファ・オーバーフローによる攻撃の様子を簡単に説明する。ここでは、C 標準ライブラリである strcpy を用いて文字列コピーを行う関数 g が、関数 f によって呼出される場合を想定している。通常、関数 g が呼出された際、関数 f への戻りアドレスをスタックに保存する。そして、関数 g での処理終了後、この戻りアドレスを PC に還元する事で関数呼び出し側へと実行制御が移る。これに対し、バッファ境界をチェックしない文字列コピーによりスタックの破壊(スタック・スマッシング)が発生した場合、スタック領域に対して悪質プログラム・コードが上書きさ

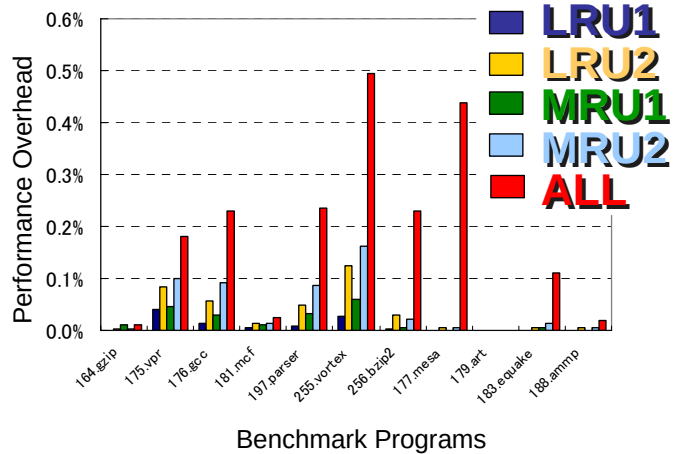


(A) 危険度 (保護できない戻りアドレスの割合)

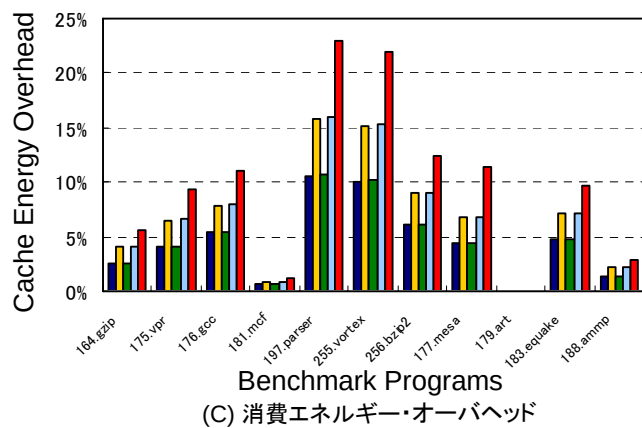
れる。また、関数 f への戻りアドレスが悪質コードの先頭アドレスへと改ざんされる。そして、呼出し元関数 f へ復帰する際には改ざんされた戻りアドレスが用いられ、その結果としてスタック内部の悪質プログラム・コードへと実行制御が移る。

本研究では、このようなバッファ・オーバーフローによる実行制御の乗っ取りを動的に検出するアーキテクチャ・アプローチとして、セキュア・キャッシュ (**SCache**) を提案した。

通常、関数呼出し時にスタック領域へプッシュされる戻りアドレスは、一旦キャッシュにストアされる。また、呼出し元関数へ復帰する際、プロセッサはキャッシュから戻りアドレスをポップする。スタック・スマッシングによるプログラム制御の乗っ取りにおいて、その本質的な問題点は戻りアドレスが改ざんされることにある。そこで SCache では、戻りアドレスがストアされる際、読み出し専用の複製ライン (レプリカ・ラインと呼ぶ) を同一セット内に作成する。その後、戻りアドレスをロードする時、スタック領域から読み出される値と、レプリカ・ラインの値を比較する。もし、比較結果が一致であれば戻りアドレスの安全性が保障され、不一致の場合



(B) 性能オーバーヘッド



(C) 消費エネルギー・オーバーヘッド

にはスタック・スマッシングの発生を検出する。つまり、キャッシュが本来有する冗長性を有効に活用することで戻りアドレスデータの改ざんを動的に検出する。

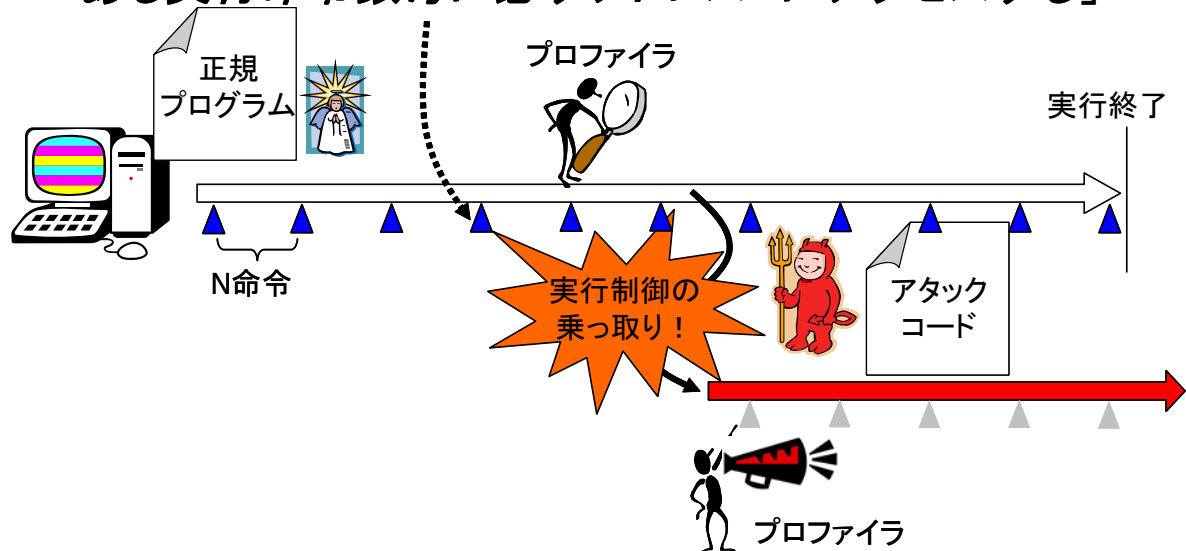
SCache のシミュレータ作成、ならびに、キャッシュ構成要素の実設計を行い定量的評価を実施した。その結果、多くのプログラムにおいて、99%以上の戻りアドレス書き込みを保護できることが分かった。また、その時の性能ならびに消費エネルギー・オーバヘッドは、それぞれ、0.5%ならびに 20%以下であった。なお、評価結果を示す図において、各評価対象モデル名の最後の数字は生成される複製データの数、LRU ならびに MRU は複製データの配置アルゴリズムを表している。また、ALL に関しては、最大数の複製(実際には 3 個)を作成するモデルである。

2. 2 認められたプログラムだけを実行する～動的なプログラム認証～

攻撃対象となるシステムの脆弱性が既知の場合には、前節で説明した SCache のようにハードウェアで対策を施すことができる。しかしながら、システム開発者にとって未知の脆弱性に関しては対応することができない。この問題の解決策として、実行対象となるプログラムが不正コードを含まない事を保障(安全性を保障)し、このような認められたプログラムのみを実行可能とする方法が挙げられる(いわゆる、ホワイトリスト方式)。つまり、システム内部に如何なるセキュリティ・ホールが存在するとしても、実行対象となるプログラムが安全であれば問題は発生しないという考えに基づく。この方式においては、「如何にして対象プログラムがウィルスフリーである事を検査するか?」、また、「如何にしてプロセッサが承認済みプログラムコードであることを認知するか?」が重要となる。前者に関しては、アプリケーション・プログラム発行者が保障する、または、既存のウィルス検索ソフト等によりチェックする方法が考えられる。しかしながら、後者に関しては、現在のプロセッサで実現することは難しい。プロセッサから見たプログラム実行とは単なる「命令シーケンスの処理」にしかすぎないためである。つまり、悪質プログラムの実行においても、安全であると保障された正規プログラムの実行と同様に「ただの命令シーケンスの実行」としてしか認識でない。

現在、アプリケーション発行時に正しいプログラムである事を証明する鍵(または証明書)を作成し、プログラムを実行する際に OS(オペレーティング・システム)が照合する方法が実用化されている。つまり、OS レベルでのプログラム認証である。しかしながら、最近のウィルスは OS を書き換えるような物も少なくない。

「ある実行命令数毎に必ずアドレスAにアクセスする」

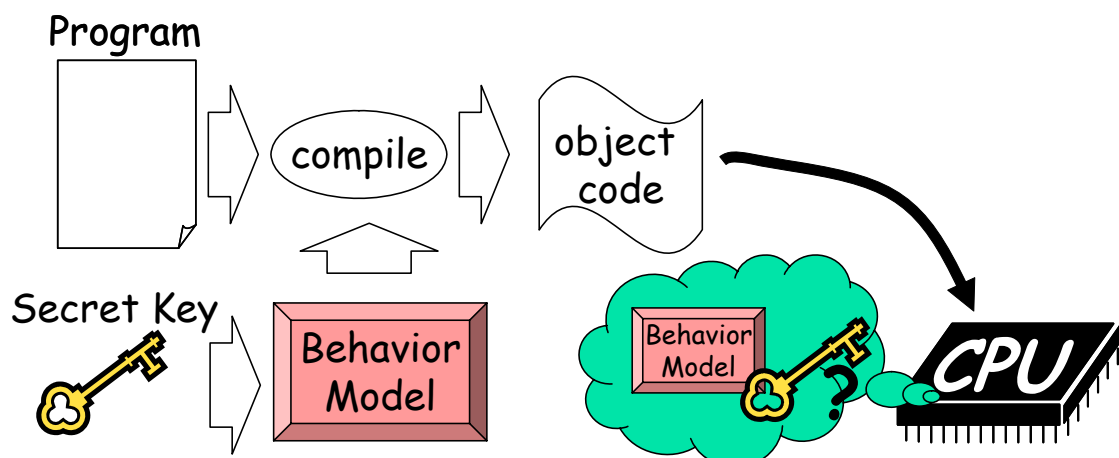


また、プログラム起動時にのみ鍵の照合が行われるため、正規のアプリケーション・プログラムを実行中に突然悪質プログラムが暴走し始めた場合にはそれを停止する手段がない。現在のプロセッサは、いったんプログラムの実行を開始すると、それが悪質プログラムであるか否かは関係なくその実行を完了しようとする。そのため、OS レベルでのプログラム認証を通過した悪質プログラムはコンピュータ・システム内で暴走し多大な被害を与える。

そこで本研究では、実行の振舞いを鍵情報とする動的プログラム認証方式を提案している。提案方式の基本動作を下図に示す。ここでは、利用者側とアプリケーション発行側で共通の秘密鍵を保有していると仮定している。アプリケーション発行側では、この秘密鍵から決定される「プログラム実行の振舞い」を実現するオブジェクト・コードを生成する。一方、利用者側では、秘密鍵から決定される「プログラム実行の振舞い」を検出するための専用プロファイラを生成し、再構成可能ハードウェア上に実装する(複数の秘密鍵を有する場合等にも対応できるよう、専用プロファイラの実装デバイスは再構成可能ハードウェアとしている)。そして、アプリケーション・プログラム実行時、このプロファイラによって常に実行の振舞いを監視する。もし、「鍵としての実行の振舞い」が検出できなかった場合には即座にプロセッサに実行停止割り込みを発行する。なお、ここではプログラム発行者側と利用者側でのデータ転送は暗号化技術等により安全性は保たれていると仮定する。

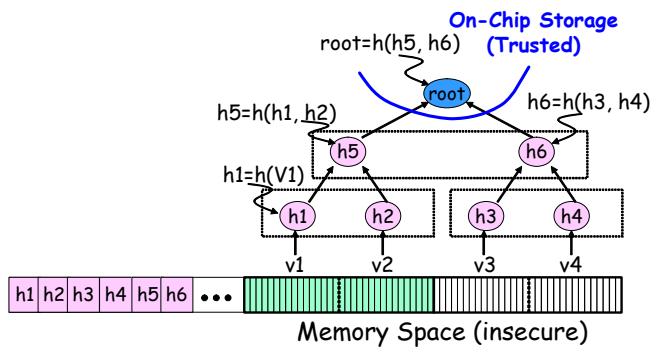
このような動的認証機能を有するプログラム実行方式を実現するには、プログラムのコンパイル時にその実行振舞いを制御する必要がある。しかしながら、一般にプログラム実行の流れは入力データに依存する。また、各基本ブロック・サイズはそれぞれ異なるため、実行振舞いを生成するよう各鍵命令を一定間隔に挿入することが困難となる。この問題を解決するため、本研究では実行振舞いを静的制御可能とするコード生成技術を開発した。プログラムの全基本ブロック・サイズを同一サイズに統一し、各基本ブロックの同一位置に鍵ロード命令を挿入する。これにより、固定命令数毎に鍵ロード命令が実行される。ただし、基本ブロック・サイズを統一するために冗長な NOP 命令を挿入する必要があるが、コード・サイズの増加ならびにプログラム実行時間の増大といった欠点がある。

組み込み用途で多く使用される StrongARM プロセッサを想定し、提案手法適用における性能ならびにコード・サイズのオーバーヘッドを評価した。その結果、コードサイズは約 80%増加した。一方、プロセッサ性能の低下に関しては 9%程度であった。これらの結果より、コード・サイズの増加は比較的大きいが、10%以下の性能低下で動的プログラム認証が可能となり、安全性を向上できることが分かった。



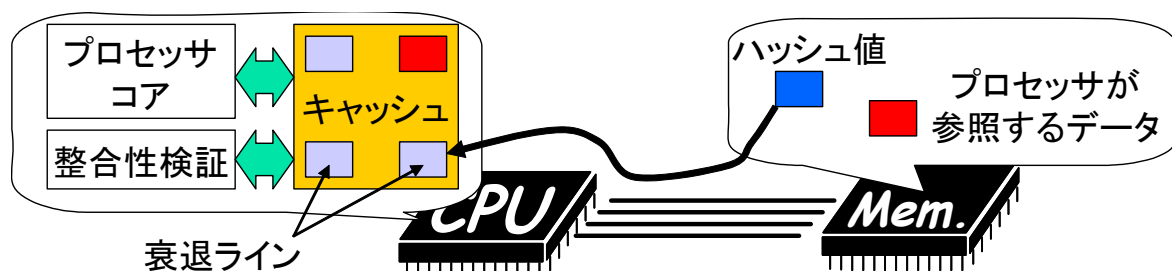
2.3 メモリデータの改ざんを高速に検出する～メモリ整合性検証の高速化～

プログラムを正しく実行するためには、その制御フローだけでなく、実行途中に生成される中間結果（データ）も守らなければならない。通常、プログラム実行において必要となる全てのデータをプロセッサ・チップ内部に保存することは難しい。そのため、外部に接続されたメモリ（例えば主記憶）とのデータ通信が発生する。このような状況において、Spoofing アタック、Splicing アタック、Replay アタックなどの攻撃が知られている。このような、メモリデータの改ざんに基づく攻撃の

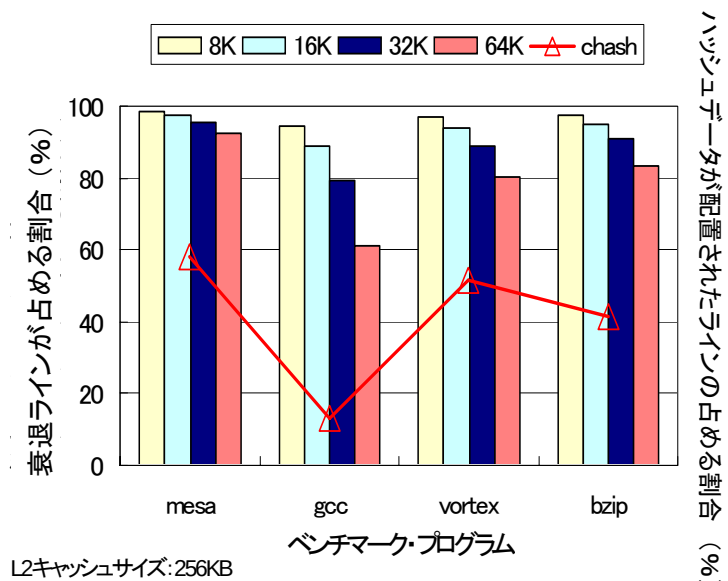


防御策として、ハッシュ木の利用がある。右図で示すように、保護すべきメモリ空間をあるデータ・ブロックに分割（例えば 64 バイト）し、それをリーフとするハッシュ木を構成する。各ノードはデータ・ブロックまたは子ノードのハッシュ値である。主記憶へのライトバック発生時に毎回ハッシュ木を更新するため、ルートは常に保護対象メモリ空間の最新状態を表現することになる。通常、ルートは安全なプロセッサ・チップ内部に保存される。そして、主記憶からキャッシュへデータをロードする際にはルートの値を計算し、チップ内部に保存している値と比較する。もし不一致であれば、以前のメモリ更新から現在までの間に何らかのデータ改竄が発生したことになる。

このハッシュ木を用いたメモリ整合性検証は、オフチップ・メモリアクセスが発生する度に実行される。そのため、単純な実装方法では、ハッシュ値の比較や更新のためにもオフチップ・メモリアクセスが発生し、プロセッサ性能を大幅に低下させる。この解決策として、プログラム実行時に参照されるデータと同様に、ハッシュ木を構成するハッシュ値もオンチップ・キャッシュに格納し、それをハッシュ木のルート値とみなす方法が提案されている（Chash 法と呼ぶ）。しかしながら、この場合にはプログラム実行時に参照されるデータとハッシュ値との間でキャッシュ内競合が発生し、キャッシュ・ヒット率を低下させるといった問題が新たに生じる。その結果、オフチップ・アクセス回数が増加し、引いては、メモリ整合性検証のためのハッシュ木アクセスが新たに生じる。そして、再度キャッシュ内競合が発生し、キャッシュミス率の増加により再びメモリ整合性を繰り返すといった悪循環が生じる。



そこで本研究では、キャッシュ・メモリの衰退ラインを利用したメモリ整合性検証の高速化方式を提案した。一般に、キャッシュ・ラインはミスに伴うデータロードの直後にアクセスが集中し、その後全くアクセスされないという特徴がある。このように、アクセスされなくなったキャッシュ・ラインを衰退ラインと呼ぶ。実際には、ある一定の時間(衰退インターバルと呼ぶ)を設定し、非アクセス時間が衰退インターバルを超えた時点で当該ラインを衰退ラインと判定する。本提案手法では、図に示すように、ハッシュ



値は衰退ラインにのみ配置可能とする。これにより、ハッシュ値がプログラム実行時に参照されるデータをオンチップ・キャッシュから追い出す確率を低減し、プロセッサ性能を向上する。実際、衰退インターバルを 8K/16K/32K/64K クロック・サイクルと設定した際、256KB の L2 キャッシュにおいては 60%～95%以上の領域が使用済みである衰退ラインとなる(右図の棒グラフ)。これに対し、Chash 法にてハッシュ値をキャッシングするのに必要となる要領は、総衰退ライン要領より少ない(右図の折れ線グラフ)。ベンチマーク・プログラムを用いた定量的評価を行った結果、従来方式と比較して、大きな性能オーバーヘッド削減効果を得ることができた。

5 自己評価:

本研究では、「最後の砦」としてのハードウェア・レベル、特にプロセッサ・レベルでの 1)安全性向上技術の確立、ならびに、2)安全性と性能/消費エネルギー・オーバーヘッドのトレードオフを考慮した新アーキテクチャの提案が目標であった。特に、不正プログラム実行の防御を対象とし、プロセッサ構成法に関する研究を進めてきた。

まず、バッファ・オーバフローを動的に検出する SCache アーキテクチャに関しては、キャッシュ・メモリを拡張することで容易に戻りアドレス改ざんの攻撃を検出可能である事をしめした。また、安全性と性能ならびに消費エネルギーのトレードオフを解析し、安全性重視の場合と消費エネルギー重視の場合で調整可能である事を示した。本研究テーマに関しては、当初の目的を十分に達成できたと考える。次に、プログラム実行の動的認証技術については、実行の振舞いを静的に制御するコード生成技術を考案し、その実現可能性を示した。また、プロセッサ性能の低下は 10%程度である事をしめした。しかしながら、当初の目的であった消費エネルギーとのトレードオフ解析は完了しておらず、今度の課題である。最後に、メモリ整合性検証の高速化に関しては、本研究スタート時には計画していないテーマであった。さきがけ研究を進める過程において考案したアイデアであり、情報漏えいの防止を考慮したセキュア・ハードウェアへの応用が期待できる。

以上で述べたように、安全性を考慮したプロセッサ構成法に関して一定の成果を達成することができた。しかしながら、真の意味で安全なコンピュータを実現するためには、解決すべき課題は多い。今後、ハードウェアからソフトウェアまでのシステム階層を跨いだ、安全性向上技術の確立が必要である。

6 研究総括の見解:

コンピュータ・システムの安全性向上のために、1) バッファ・オーバフローによる実行制御の乗っ取りを動的に検出するセキュア・キャッシュ(*SCache*)の提案、2) 実行の振舞いを鍵情報とする動的プログラム認証方式の提案、3) メモリデータの改ざんを高速に検出するためにキャッシュ・メモリの衰退ラインを利用したメモリ整合性検証の高速化方式の提案をおこない、その有効性を示した。しかしながら、安全性向上のためにはまだ多くの課題が残されている。今後も引続き更なる挑戦を期待している。

7 主な論文等:

論文

- (1) K. Inoue, "Return Address Protection on Cache Memories," *IEICE Trans. On Electronics*, Dec. 2006.
- (2) Koji Inoue, "Lock and Unlock: A Data Management Algorithm for A Security-Aware Cache," *IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems*, Dec. 2006.
- (3) Koji Inoue, "Supporting A Dynamic Program Signature: An Intrusion Detection Framework for Microprocessors," *IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems*, Dec. 2006.
- (4) K. Inoue, "Secure Cache: Run-Time Detection and Prevention of Buffer Overflow Attacks," *Proc. of the Asia and South Pacific International Conference on Embedded SoCs*, July 2005.
- (5) K. Inoue, "Energy-Security Tradeoff in a Secure Cache Architecture Against Buffer Overflow Attacks," *ACM Computer Architecture News*, vol33, no.1, pp.81-89, Mar. 2005.

特許

- (1) 発明者:井上弘士, 発明の名称:プログラム認証システム, 出願人:JST, 出願日: 2003年12月10日
- (2) 発明者:井上弘士, 発明の名称:キャッシュ・メモリ及びその制御方法, 出願人:JST, 出願日: 2004年5月24日

受賞

特になし

招待講演

- (1)「10年後のシステム LSI」、第 10 回システム LSI ワークショップ イブニングパネル、パネリスト

研究課題別評価

1 研究課題名:超分散マイク・スピーカーによる複数の音焦点形成

2 研究者氏名:加賀美 聡

3 研究の狙い:

本研究は広い範囲で動き回る人に離れたところから選択的に高品質に音を授受する手法を確立することを目的とする。対象とする人の頭部周辺に「スポット状」の高感度・高音圧分布を作り出して S/N 比の高い集音と音声伝送とを実現し、たとえその人が動いてもオンラインで追従させることが可能なシステムの実現を目指す。言わば「聞き耳をたてる」ような形で音声を集音し、「耳元で語りかける」ような形でその場所だけ音を聴かせる技術を確立する。

音の焦点を絞るためには、マイクロフォンアレイやスピーカーアレイを用いて特定の場所で位相が揃うように各素子を制御することにより望遠マイクや望遠スピーカーを構成可能である。電波望遠鏡や開口合成レーダーなども同様の原理に依っている。しかし可聴音の周波数帯域は 1000 倍オーダーで広がっていること、波長が長いために装置の規模が大きくなること、などからこれまでは S/N 比の高いシステムの実現が困難であった。音場シミュレーションでは十分な S/N 比を得るためには数十以上の素子が必要であるとの結論が得られた。そこで従来はアナログロジック回路やDSPにより構成された固定焦点の望遠マイクアレイなどの研究が行われている。

しかし近年、計算機が劇的に高速化し、リアルタイムOSのソフトウェア技術の進歩と相まって、例えば CD クオリティーの音を発生させる数十マイクロ秒の間に十分な入出力と計算能力を備えるようになってきた。また同時に広帯域のネットワーク機能をローカルに用いることができるようになった。このため本研究で提案する数百～千のオーダーのマイク・スピーカーネットワークを構築し、多焦点を形成することが可能になってきた。

このように距離の異なる素子からその場で位相を揃えることにより生成された焦点で聞こえる音は、球面上に広がる一般の音と異なり、その場だけで急激に音圧が上昇するため、その場所から離れるとほとんど聞こえない。そのために対象となる人の頭のなかに直接音がするような印象を与える。またマイクアレイでは、全ての入力を保存することにより、その環境内の全ての場所に「後から」焦点を当てることができるようになる。この手法を用いると三次元の環境+時間軸の四次元の音場を全て記録できることになり、例えば話者がどこにいるかと言った音源位置計測、あるいは任意の場所では音がどのように聞こえていたかを再現する任意の場所での音再生などが可能になる。

そこで本研究では 10 以上の焦点に対して S/N 比を 20dB 以上得るために数百オーダーのシステムを実現し、多焦点形成アルゴリズムの研究を行った。

4 研究成果:

以下の 3 つのサブテーマの研究開発を行った。

1) 多焦点形成・取得アルゴリズムの研究

- 2) 超分散マイク・スピーカーアレイシステムの設計・開発
- 3) 会議記録システムの開発

4.1 多焦点形成・取得アルゴリズムの研究

本研究では主たる方法として古くから知られている遅延和音焦点形成法(Delayed-Sum Beam Forming Method, DSBF)を用いている。この手法は各音素子の配置が既知であるとして、対象となる位置から各音素子までの距離を同一となるように時間方向にずらすことにより、対象位置で感度を高くするものである。図1に手法の原理を示す。図2は 4×4 [m]の部屋の四面の壁面に合計1024個の音素子(スピーカーやマイク)を配置し、(3.0, 3.0, 3.0)の位置へ音焦点を形成したときの1kHzでの感度分布を示す。音素子の間隔は27cmである。この図で示すように、DSBFだけで直径約50cmのエリアで、周辺に対して20dBの音圧比が得られている。このことから多数の音素子を準備し、効果的に配置すれば高感度の音焦点が形成できることがわかる。

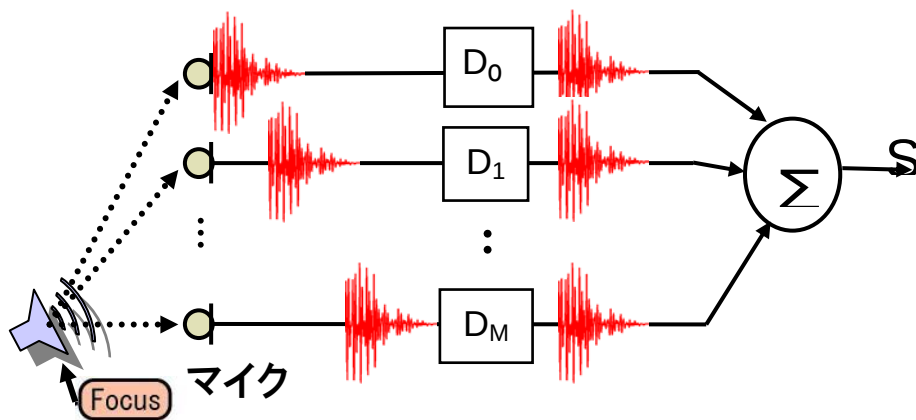


図1 遅延和音焦点形成法(DSBF)の原理

つぎに人間の音声は周波数領域では比較的まばらであるという知見を利用し、同時にはある狭いバンド幅(本研究では通常は2Hz)では単一の音焦点だけがその音に関係していると仮定する。この性質を利用した手法として青木らにより提案された周波数帯域選択手法(Frequency Band Selection)がある。本研究では多数の音素子からDSBF法で任意の方角に望遠マイク(あるいはスピーカー)となることができる。そこでさまざまな方角に聞き耳をたて、音焦点とされた場所での音を周波数領域で細かく見ることにより、音焦点の音を決定する。

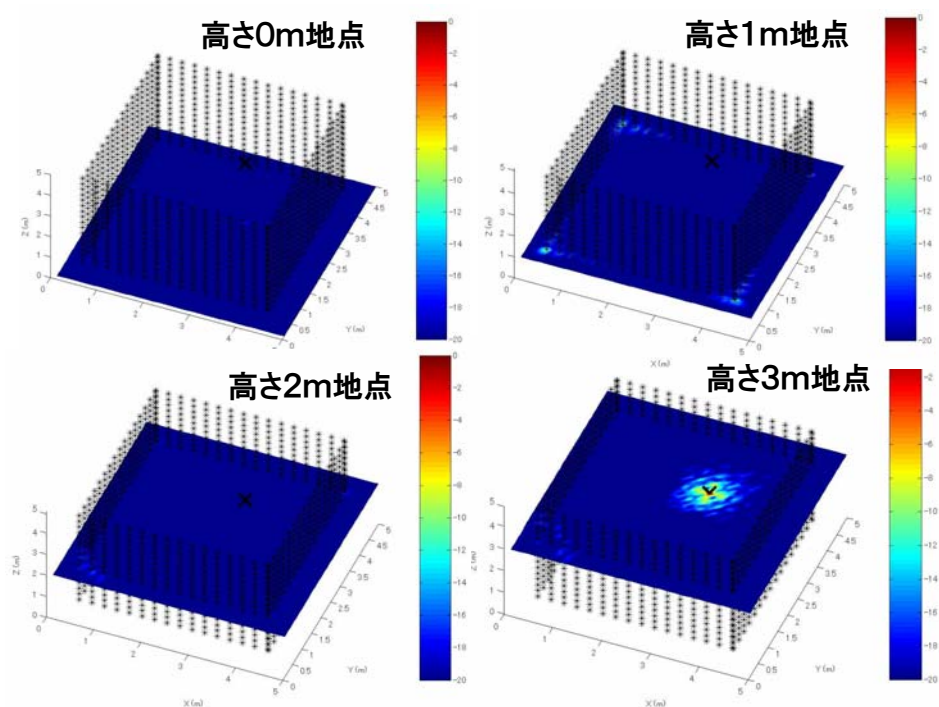


図 2 4面1024素子 1kHz での(3.0, 3.0, 3.0)への音焦点形成シミュレーション

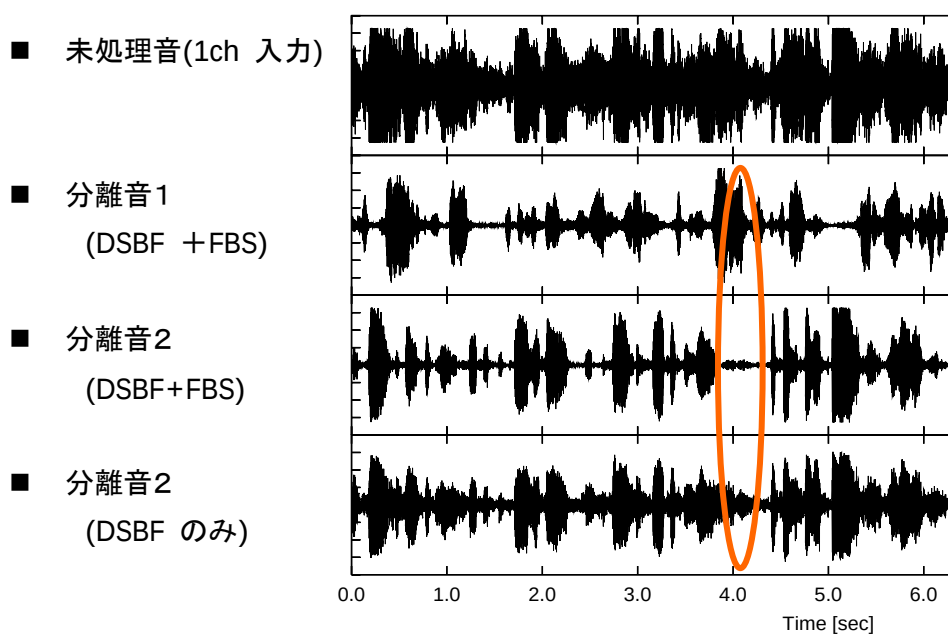


図 3 32ch マイクアレイによる音源分離における各手法の結果

図3に開発した 32ch マイクアレイを例にとって、これらの手法の結果を示す。実験ではマイクアレイを中心に 1.5m 離れた3方向に、スピーカー（音楽）、男性話者、女性話者が同時に音を出している際の音源分離結果を示す。このときシステムは音源の位置や数に関する前提知識は持っていない。図

3の最上段は一つのマイクから得られた入力であるが、すべての音が混ざって聞こえることから、このような波形が得られている。2段目および3段目は提案手法(DSBF+FSB)により得られた音源分離の結果である。また4段目は DSBF のみを用いて音源2を分離したものであるが、丸く示した領域では音源1の音が混ざってしまっている。DSBF 手法は音源位置で音を強めあう手法であるが、それ以外の方向へ感度を持たないわけではないので、聞き耳を立てている方角以外から強い音が入ってくると、その音も重なってしまう。

4. 2 超分散マイク・スピーカーアレイシステムの設計・開発

前述のシミュレーション手法を用いて、音素子の最適配置を検討し、マイク、スピーカーアレイのシステムを構築した。はじめに効果を検証するために、図4左に示すような 128ch のスピーカーを用いて平面システムを構築した。シミュレーションによって得られた音圧分布を図4右に示す。このようにトンネル状の高音圧領域が形成される。この現象は実機でも精度よく再現されており、本研究の実現性が期待できることがわかった。そこで次に図5に示すような二面、四面のシステムを構築した。また密なシステムを空間に疎に配置するシステムを検証する目的で、図6に示すような実験ハウスの天井に 8ch のマイクシステムを合計 16 ユニット設置した。

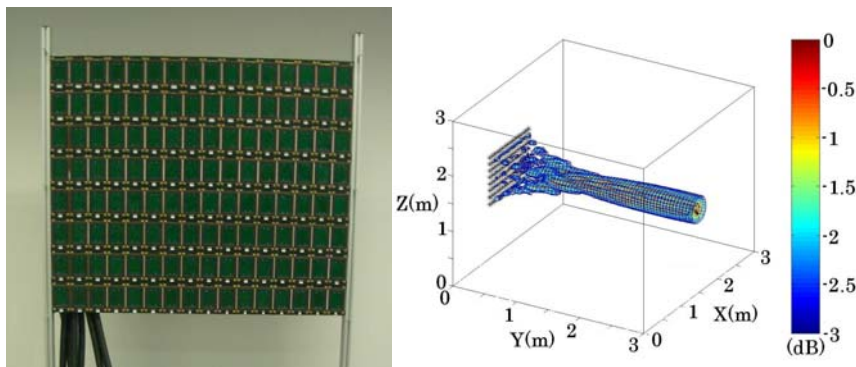


図 4 128ch 平面スピーカーシステム(左), 2kHz 時の音圧分布シミュレーション(右)



図 5 384ch 二面スピーカーシステム, 480ch 四面マイク・スピーカーシステム



図 6 天井設置型 8ch マイクシステム合計 16 ユニット

4. 3 会議記録システムの開発

アルゴリズムの有効性を示すために、会議記録システムをアプリケーションとして、卓上やロボット搭載型のシステムを開発した。図7に開発したシステム Ver1, Ver2 を示す。また図8に最終成果である Ver3 を示す。図8の下段に 1, 1.4, 2kHz 時の感度分布シミュレーションを示す。サイドローブのない望遠マイクが実現できている。

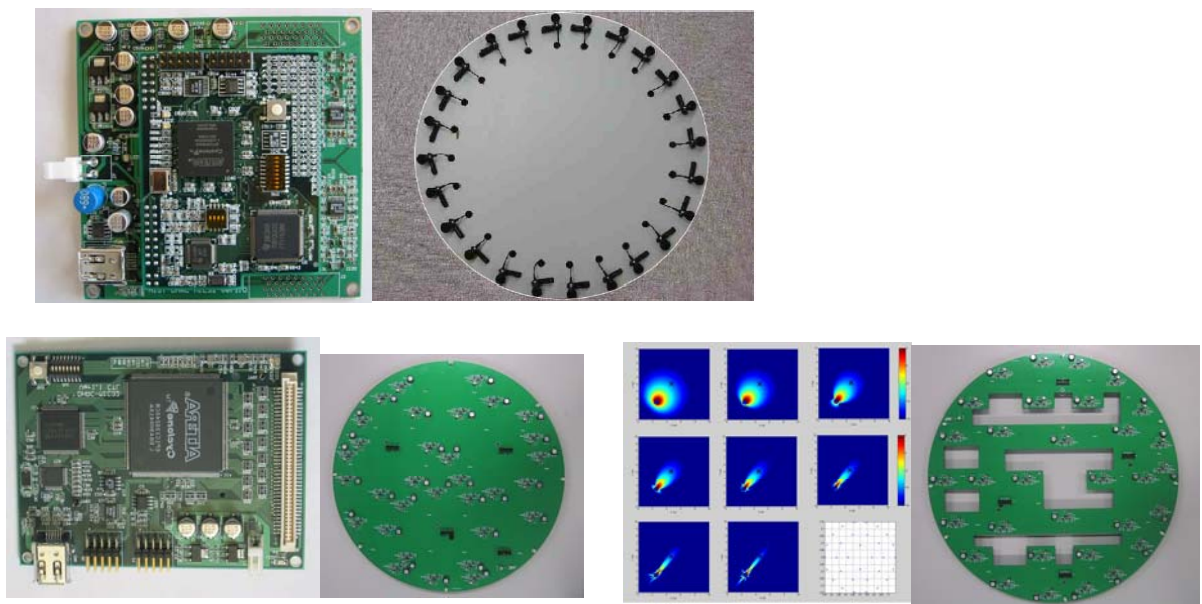


図 7 32ch マイクアレイ Ver.1(上段), Ver.2(下段)

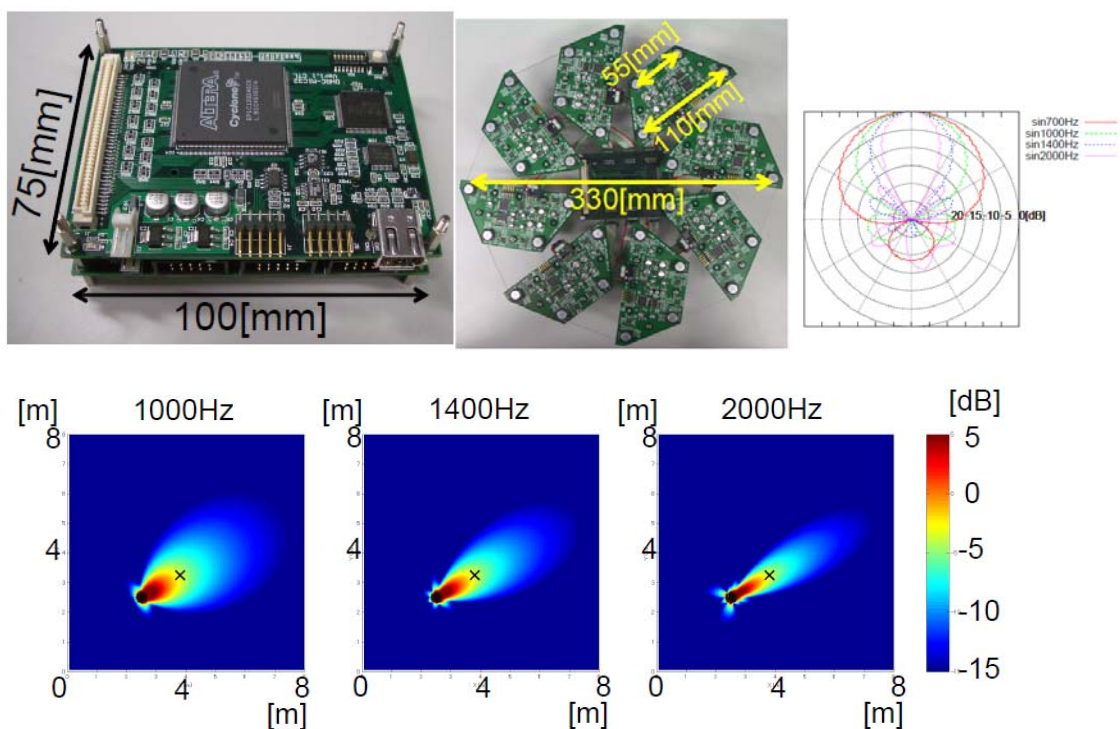


図 8 32ch マイクアレイ Ver.3

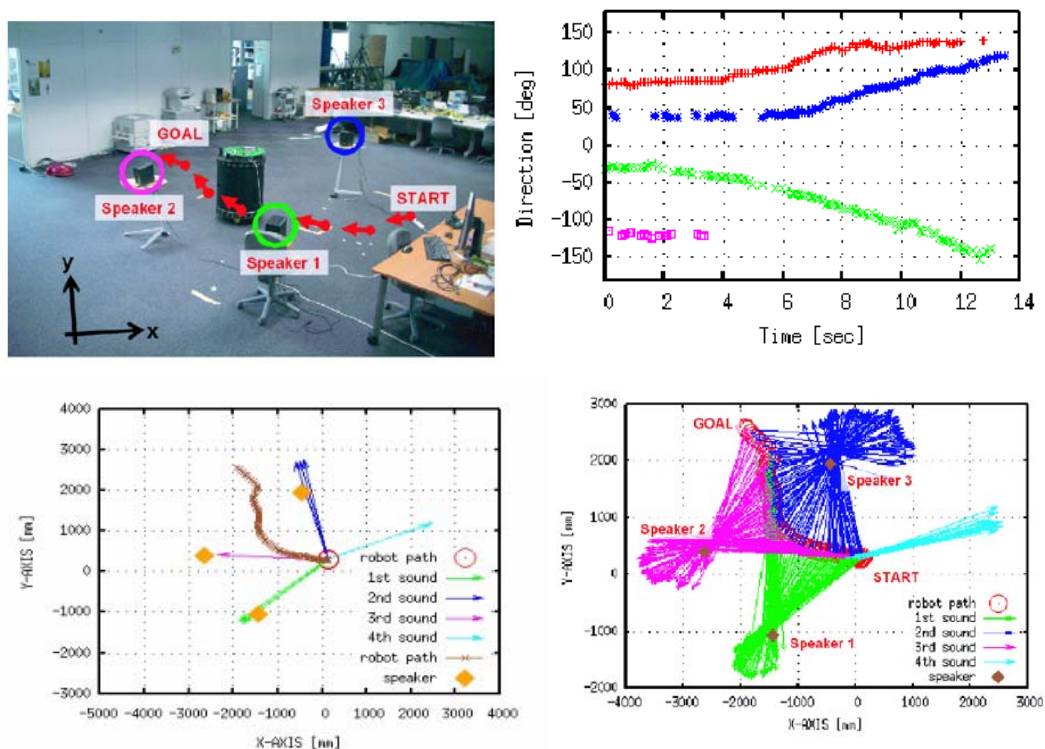


図 9 移動中の音源定位, 音源地図の作成

開発したシステムを用いて, 図9に示すように世界で始めて移動ロボットで移動中に音源を定位, 分離することにより, 音源の地図を作成することに成功した. 実験の配置を左上に, 定位した音源の

方向を右上に示す。ロボットの移動はデッドレコニングで知り、そこに短時間の移動ごとに定位した方向から三角測量することにより(左下)、音源位置を推定し、それらの結果を RANSAC により統計的に推定し結果、右下の図に示すように音源位置をロバストに推定できた。

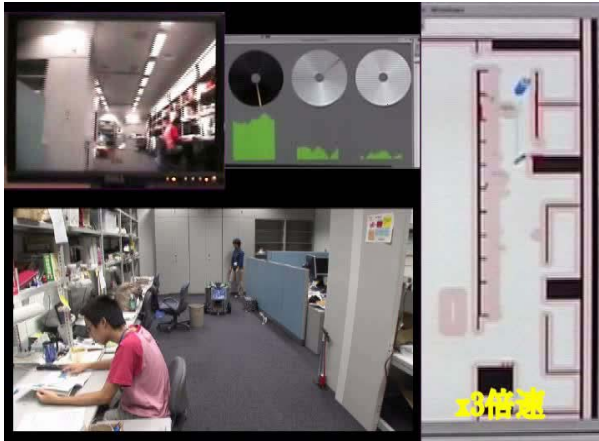


図 10 移動ロボットの遠隔操作における音源定位インターフェース

また図10に示すように移動ロボットを遠隔操縦するタスクにおいて、開発したマイクアレイを搭載し、操作者に音源方向を提示することにより360度方向の情報を容易に知ることができるシステムを開発した。

4. 4 今後の展望

多数の場所に音を発生させ、逆に集音することが出来れば、例えば会議において話者の発言を口元にマイクがあるように高感度に記録したり、同時通訳のソフトウェアを通して特定の人に変換された言葉を伝達したりすることが可能になる。また離れた二人の人があたかも隣通しにいるかのように声を張り上げずに会話することや、特定の人にだけプロンプタのように情報を伝達することが可能になる。コンファレンス会場や大教室においてフロアからの質問をそこに焦点を形成することにより増幅することも可能になる。

音を発生させる技術は、例えば家庭における臨場感に溢れる劇場システムを、周りには聞こえない状態で構築を可能にしたり、バーチャルなヘッドホンを実現することを可能にする。また美術館などの展示において展示物の場所でのみ説明を聞かせるシステムを構築できる。公共の場において不審な動きや危険な行動を取っている人に対しても、現場に行かずにその場遠くから注意や警告を与えることができる。

また離れた場所の音を集音する機能は、ロボットが人の話し声や足音などからその位置を特定する人を検出する機能に用いることが出来る。セキュリティ上の意義も大きい。警備室のモニタ画面で異常を検知したら、現場に行かずにまずその場所の音を聴いてみる事ができる。また演劇や舞台においてマイクを装着する必要がなくなる。また例えばコンサートを分散マイクで記録することにより、

あたかも演奏家の中にいるかのような音場を再現するなど、四次元的な音場を記録することが可能になる。そのほか、現状では音声認識システムは口元にマイクを設置しなければ認識率を上げられないが、本システムにより仮想的に口元にマイクがあるように音声を取得することが出来るようになる。

5 自己評価:

本研究により、環境中に多数配置した音素子の位相を制御し、環境中の複数の場所に焦点を合わせて音を取得したり、複数の焦点に音を発生させたりする多焦点形成について、アルゴリズム、システム構成法、アプリケーションの3つの側面から研究を行い、成果を得た。提案した位相差の重ね合わせ、周波数帯域選択手法により、効果的に音焦点が形成できることが、シミュレーションからも実際に構築したシステムからも確認できた。これにより当初目標としてきた音圧比 20dB を達成し、複数の人がしゃべっている状態で、それぞれの人の位置と発話内容を取り出す、といったことが実現された。このようなシステムはマイク・スピーカー両面で応用分野が広く、さまざまなアプリケーションが期待される。スピーカーやマイクといった音素子、およびシステムの構成要素そのものは低価格であるために近い将来の実用化を期している。

一方、研究を進めるうちに、音の波長のダイナミックレンジが広いために、周波数に依存して形成される焦点の形状が異なることがわかってきた。そのために特に複数の音源が近いときに、周波数によって分離される音に影響を与えてしまうという知見が得られた。この点に関しては、より精密な焦点形成手法、人間の知覚のモデル化の二点からあらたに研究を進めている。

6 研究総括の見解:

千個程度配置した音素子の位相を制御し、複数の場所に焦点を合わせて音を取得したり、複数の焦点に音を発生させたりする多焦点形成の手法について研究し、その実現のために種々の技術を提案し、実環境で実証する成果を挙げた。このシステムは特定の人にだけに音情報を提供する、特定の話者の音声のみを記録する、などが可能になり家庭、会議の場、美術館など多くの人が集まるさまざまな場面においていろいろな応用が考えられるものと思われる。システムの完成度が高く、また装置が比較的低価格で構成できると思われるので早期の実用化を期待している。

7 主な論文等:

論文

- (1) **Virtual Earphone: Integration of Beam Forming by Speaker Array and Real-time Visual Face Tracking**
H. Mizoguchi, T. Kanamori, S. Kagami, K. Hiraoka, M. Tanaka, T. Shigehara
Key Engineering Material, Vol. 243-244, pp. 117-122, 2003
- (2) **Microphone Array for 2D Sound Localization and Capture**
Satoshi Kagami, Hiroshi Mizoguchi, Yuuki Tamai, Takeo Kanade

Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics & Automation(ICRA04), pp. 703--708. , Apr. , 2004

(3) **Detecting and Segmenting Sound Sources by Using Microphone Array**

Satoshi Kagami, Yuki Tamai, Hiroshi Mizoguchi, Koichi Nishiwaki, Hirochika Inoue

Proceedings of 2004 IEEE-RAS/RSJ International Conference on Humanoid Robots(Humanoids2004), pp. 67paper(CD-ROM). , Nov. , 2004

(4) **Home Robot Service by Ceiling Ultrasonic Locator and Microphone Array**

Satoshi Kagami, Simon Thompson, Yoshifumi Nishida, Tadashi Enomoto, Toshihiro Matsui

Proceedings of 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2006) , Orlando, Florida, pp. 3171--3176. , May. , 2006

(5) **Combining Ubiquitous and On-Board Audio Sensing for Human-Robot Interaction**

Simon Thompson, Satoshi Kagami, Yoko Sasaki, Yoshifumi Nishida, Hiroshi Mizoguchi, Tadashi Enomoto.

Proceedings of the 2nd ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction, March 2007 (to appear).

受賞

- (1) 「ヒューマノイドの知的行動の研究」により 平成 18 年度文部科学大臣表彰・若手科学者賞を受賞.
2006 年 4 月.

招待講演

(1) **バイオメカニクスで進歩するヒューマノイドロボット**

加賀美聡

日本バイオメカニクス学会 特別講演, 鹿屋, 2004 年 9 月.

(2) **Autonomous and Interactive Behaviors of Humanoid Robots**

Satoshi Kagami

Fifth Japan-America Frontiers of Engineering Symposium, San-Jose, USA, November, 2005.

研究課題別評価

1 研究課題名： 主記憶上のデータの高速かつ高信頼な処理の実現

2 研究者氏名： 宮崎 純

3 研究の狙い：

高度情報化社会において最重要な事柄は、より多くの情報を安全に蓄積し、蓄積された大量のデータから必要な情報を高速に検索し加工する技術である。これはデータベースとして過去四十年以上に渡り研究開発され、ビジネスの世界は言うまでに及ばず、多岐多彩に渡る分野で広く利用されている。しかし、昨今の技術革新による半導体デバイス技術や計算機システムの変化、多様化にほとんど対応できていない。

従来のデータベースは高価なサーバ型計算機で大量のデータを処理していたが、近年二極化しつつある。一つは需要が減少しつつあるが、より高性能、より大容量を目指したサーバ型計算機への展開、もう一つは需要が増加しつつある、PC や PDA、組込システムといった小型計算機への展開である(図 1)。特に、後者は従来のデータベースだけでなく、センサーデータ、ストリームデータ等の新しいデータ処理を行うためにデータベース技術が利用されるようになってきた。

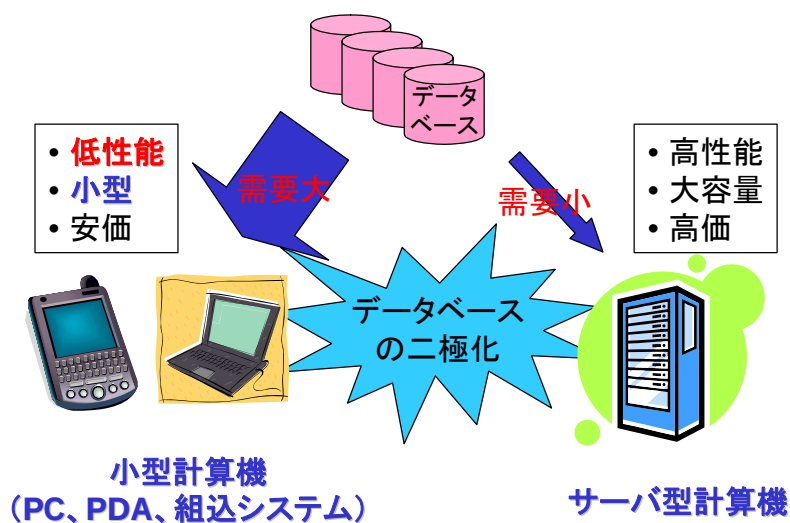


図1: データベースの利用状況の変化

一方でデバイス技術の発展により、半導体メモリ、特に計算機の主記憶に使われる DRAM は、急速にそのビット単価が下がってきている。このため、今までディスク上でしか格納できなかったデータベースを、主記憶上に全て格納する主記憶データベースが現実的なものとなりつつある。主記憶データベースはディスク格納型データベースよりも高速なデータアクセスが可能であり、データベースへの問合せ処理の高速化が可能である。このような背景のもと、近年安価となった半導体メモリを利用し、小型計算機上で効率の良いデータ処理を実現することにより、高速データベ

ースだけでなく、高速ストリーム処理やセンサーデータ処理等、将来不可欠となる高度なデータ処理のための基礎技術を築くことが本研究の狙いである。

この目的を実現するために、ディスクを主ストレージとした従来のデータ処理ではなく、大容量記憶領域を安価に利用できるようになった半導体メモリに着目し、メモリ上で高速、高度かつ新しいデータ処理方法の研究を行った。主記憶に使用される半導体メモリである DRAM は、その記憶容量を上げるためにアクセス速度が犠牲となっている。そこで、サーバ型計算機のような高価かつ大掛かりな技術による解決ではなく、PC や PDA、組込システムといった小型計算機の利用を前提として、DRAM の特徴を最大限に利用しつつ、主記憶上のデータの効率の良い読み出し方法とその効果的な利用方法に関して、ハードウェアとソフトウェアを連携させることにより、小型計算機上でより高速なデータベース処理の実現を目指す。

4 研究の成果：

主記憶に利用される DRAM のアクセス速度は、最近の著しいプロセッサの速度向上と比較すれば、この二十年間ほとんど改善が無かったに等しく、プロセッサとメモリのアクセスギャップは開く一方である。つまり、主記憶にデータをアクセスすること自体が非常に時間のかかる処理であり、いわゆるメモリの壁(図 2)が問題となっている。このメモリの壁の問題が生じる以前に、主記憶上のデータベースの研究が盛んに行われたが、当然ながらメモリの壁の解決を目指したものはない。メモリの壁を解決する一手段としてキャッシュの利用が挙げられるが、データベースは扱うデータ量が膨大なため、キャッシュが有効に働かない場合が多い。そこで、DRAM の持つ特徴を最大限に利用して、メモリから効率よくデータを読み出す方法を開発することにより、アクセスするデータ量の多いデータベースでも高速処理を可能にし、メモリの壁の問題を解決する。

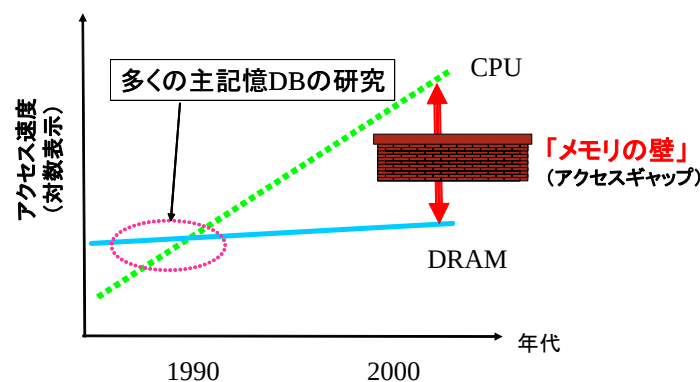


図 1: メモリの壁

本研究では、現在主流である関係データベースのデータベース演算を前提として、以前の研究成果である固定ストライドデータのデータ読み出し方式(stride data transfer; SDT)以外に、新しいメモリからのデータ読み出し方式として、

- ビットマップ形式のアドレス指定に基づくデータ読み出し方式 (Bitmap-based data transfer; BDT)

- 比較器を利用した読み出しデータの圧縮化方式 (Comparator-based data compression; CMP)

を提案し、これらを用いた演算アルゴリズムだけでなく、

- SDT、BDT、CMP ならびに従来のキャッシュ指向のデータ読み出し方式を組み合わせたデータベース問合せの最適化

に関しても、研究を行った。

関係データベースは、図 3 のように複数の属性からなるタプルを一つのデータ単位として、それらを表構造にしたテーブルに対して演算を行うことを基本としている。そのため、通常はタプルごとに連続したメモリアドレス上に順に配置される(図 3)。ここで、例えば文字列データ等はその長さを一定にできない可能性があるため、表領域以外の空間に配置することで、表構造へのアクセスと、データそのものへのアクセスを分離して、データベース処理を効率化することが可能である。

関係データベースの演算で最も基本となるのは、選択演算、結合演算、射影演算である。選択演算とは、一つの表に関して、タプルの属性値がある条件を満たすものを取り出す演算であり、結合演算とは、二つの表から取り出した任意のタプルの組み合わせのうち、それぞれのタプルの属性値の関係が、ある条件を満たす場合のみそれらのタプル同士をつなぎ合わせて、一つの表に統合する操作のことである。射影演算は、ある属性のみを無条件に取り出す操作である。

いずれのデータベース演算についても、データアクセスは特定の属性に対して行われるため、その参照アドレスは不連続(図 3 の赤矢印)となる。つまり、データベース演算は、連続アドレス上のデータへのアクセスを大前提としている現在のプロセッサのキャッシュ指向データアクセスに適合しない。属性へのアクセスを連続化するために、タプル単位でなく、同一属性を単位としてメモリアドレスに配置する PAX(Partition Attributes Across)方式が Ailamaki らにより提案されているが、表からタプルが削除されればメモリ空間上に空きが生じるため、一般的には、連続して属性を読み出せる場合の方が稀である。つまり、データの参照アドレスが不連続となることは避けられない。

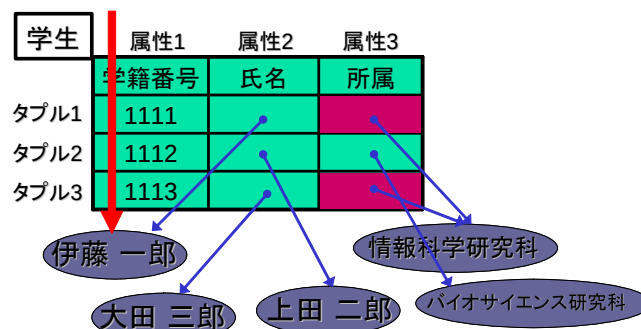


図 3: 関係データベースの表構造とそのアクセス

現在のプロセッサのキャッシュ指向アクセスにより、不連続アドレスのデータを読み出す場合には、計算に不要なデータの読み出しを伴う(図 4 上)。さらに、プロセッサ外部はプロセッサ内部よりも数分の一から数十分の一の遅い速度で動作しているため、計算に不要なデータの読み出しに、

非常に長い無駄な時間を費やすことになる。この無駄な時間をなくすためには、理想的には図 4 下に示すように、真に必要なデータだけをメモリから読み出してプロセッサに転送すればよい。

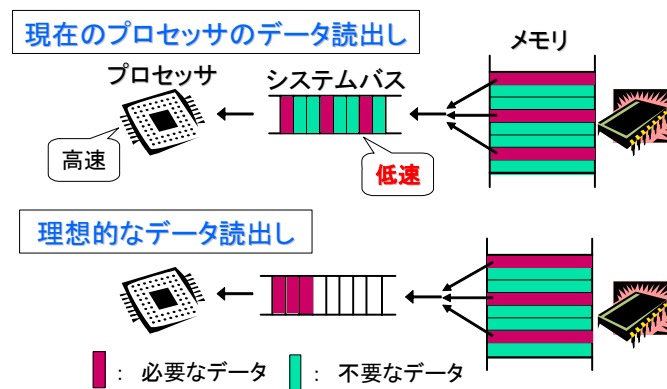


図 4: メモリからプロセッサへのデータ読み出し

理想的なデータ読み出しを実現するには、DRAM の持つページモードと呼ばれる機能を利用することで解決できる。ページモードとは、DRAM 中の数 KB の領域を、たとえ参照アドレスが不連続であっても、データを連続して出力できるモードのことである。近年の DRAM ではページモードをサポートしていないが、擬似的にページモードに相当する機能を実現することは可能である。

4.1 ビットマップ形式のアドレス指定に基づくデータ読み出し方式

このページモードを利用して、読み出したい属性の先頭アドレス、データ間隔、データ数を指定して、ある一つの属性を効率よく読み出す Stride Data Transfer (SDT)方式がある。しかし、SDT 方式ではタプル中の複数の属性を同時に読み出したり、削除されたタプルの属性を読み飛ばしたりといった、要求するデータのアドレスに規則性がない場合には対処できないという問題がある。

この問題を解決するために、参照アドレスを実番地で指定するのではなく、アクセスするデータの先頭アドレスとそれに対する相対位置を 0 もしくは 1 からなるビットマップで指定する、Bitmap-based Data Transfer (BDT)方式を開発した(図 5)。BDT 方式ではビットマップを任意に設定することにより、任意のアドレスのデータを無駄なく読み出せる。

例えば、図 5 右は緑の属性値のみ読み出したい場合であり、読み出す必要のある属性位置を 1、読み出しが不要な属性位置を 0 で表し、それらのビットをアドレスの順に並べると参照アドレスパターンを示すビットマップができる。DRAM には最終的に物理アドレスを入力しなくてはならないため、ビットマップから物理アドレスへの変換のためのハードウェアが必要となる。そのハードウェアに関する詳細については後述する。

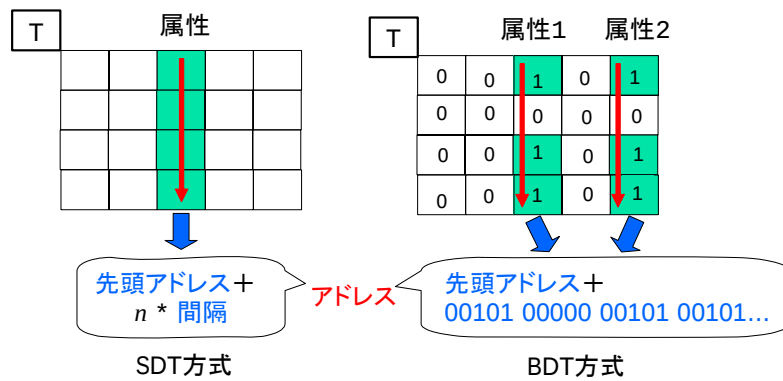


図 5: SDT 方式と BDT 方式の参照アドレス指定

BDT 方式の効果を確認するために、プロセッサ内部と外部の速度比を 10:1 としてシミュレーションにより評価を行った。図 6 はタプル中の三つの属性を同時にアクセスする選択演算の問合せ、図 7 は選択演算と結合演算の組み合わせを含んだ現実的な問合せをそれぞれ実行した際の、問合せ処理が終了するまでのプロセッサのクロック数、すなわち実行時間を計測したものである。"Normal"はタプル単位 of データ格納方式における従来のキャッシュ指向データ読み出し方式、"PAX"は属性単位 of データ格納方式におけるキャッシュ指向データ読み出し方式、SDT、BDT は、タプル単位 of データ格納方式における本研究で開発したデータ読み出し方式である。

図中の "i-cache hit" (紫色) は、プロセッサが休みなく働いており、効率の良い処理が行われている部分、"d-cache miss" (水色) はプロセッサが計算に必要なデータをメモリから到着するのを待っている状態であり、無駄な待ち時間を意味する。両図から明らかなように、現在のプロセッサのキャッシュ指向データアクセスでは、d-cache miss を頻発し、非常に効率が悪いことが分かる。PAX 方式によりキャッシュ指向アクセスに適合するように工夫しても、d-cache miss の発生や、PAX 方式特有の処理のために効率が悪い。一方、BDT 方式は複数の属性を同時にアクセスする場合に有効である。現実的な問合せでは SDT 方式より劣るように見えるが、SDT 方式は、タプルが削除されている場合等には対応できないため、結局、いかなる参照アドレスパターンにも柔軟に対応できる BDT 方式が優れていると結論付けることができる。

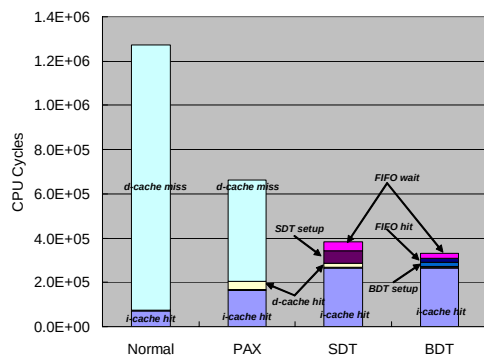


図 6: 三属性同時にアクセスする問合せ

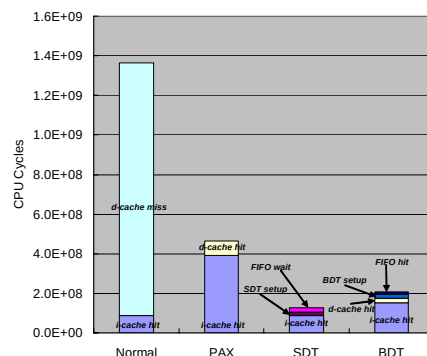


図 7: 現実的な問合せ

DDR2 を利用した通常のメモリモジュールでは、8bit や 16bit のデータ幅の DDR2 チップを複数並べ、ワードデータを垂直分割してそれぞれのチップにデータフラグメントを格納する。例えば、8bit 幅のデータ幅を持つ DDR2 チップを四つ使用し、32bit ワード単位でデータ転送を行うメモリモジュールを考える。DDR2 には posted コマンド機能があり、ACTV コマンド入力後、規定されている遅延時間を待たずに additive レイテンシと呼ばれるバスクロック数だけ先行して READ もしくは WRITE コマンドを入力できる。posted コマンドはコマンド入力のタイミングを調整し、コマンド間の衝突を回避するためのものである。ここで規定遅延時間を 4、additive レイテンシ 3、CAS レイテンシ 4、バースト長 4 と仮定すれば、posted READ コマンドを入力後、additive ならびに CAS レイテンシ分遅れてワードデータが 0.5 バスクロックごとに出力される。図 8 左では、{D0.0, D0.1, D0.2, D0.3}、{D1.0, D1.1, D1.2, D1.3}、…がそれぞれワードを構成する。ACTV コマンドを入力してからバーストデータ転送が完了するまでの時間は、この例では 10 バスクロックとなる。

このデータ読み出し方式では、連続アドレスのデータがバースト長分だけ読み出されるため、ページモードのような不連続アドレスのデータを読み出すことができない。しかし、データを水平分割して各チップへ格納し、各チップの動作を 0.5 バスクロックずつずらせることにより、ページモードに相当するデータ読み出しが可能である(図 8 右参照)。水平分割方式でも、{D0.0, D0.1, D0.2, D0.3}、{D1.0, D1.1, D1.2, D1.3}、…がそれぞれワードを構成する。しかし、ワードデータが揃うまでの間データフラグメントを保存するバッファが必要となる。垂直分割方式の例と同じチップとパラメータを用いた場合、この構成では、4 ワードのバースト転送の完了には、Chip0 の最初の ACTV コマンドを発行してから 11.5 バスクロック必要である。外部からみれば、通常の垂直分割方式より 1.5 バスクロック長いレイテンシ、すなわち高々 15% 遅延時間が長いモジュールのように見える。しかし、各チップごとに posted READ コマンドと同時にそれぞれ不連続の列アドレスを入力すれば、不連続アドレスのデータを読み出せるため、ページモードと同等の機能が得られる。

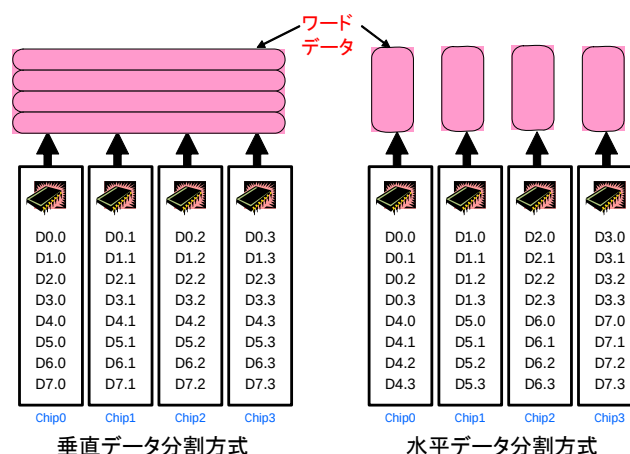


図 8: DDR2-DRAM を利用した BDT 用のデータ格納方式

ここで注意が必要なのは、ストライド間隔が DRAM チップ数の倍数となると、前述の例では 4 の倍数になると、同じチップからデータを読み出す必要があり、アクセスの衝突が生じる。これはベクトル計算機のバンク衝突問題と同じである。図 3 で示したタプル長を固定サイズとするデータ構造の場合、この問題を軽減するためには、(i) タプル長がチップ数の倍数となる場合はダミーの属性を一つ追加する、(ii) 同時に読出される可能性の高い属性同士はその配置間隔をチップ数の倍数とならないように格納する等の対策が必要である。

BDT を実現するためには、通常の小規模計算機の構成と異なる点として、メモリコントローラへの BDT を実現するためのビットマップから DRAM の列アドレスに変換するためのハードウェアの追加、ならびに BDT により得られたデータストリームを CPU で受信するための FIFO の追加が挙げられる。ビットマップからのアドレス変換部分に関して、Altera 社の QuartusII 論理合成ツールを用いてアドレスバス幅およびデータバス幅がそれぞれ 32bit のアドレス変換器を、StratixII シリーズの FPGA を対象に作成したところ、論理回路のゲート数に対応する ALUT 数が 1511、レジスタ数 1139 となった。なお、比較として、DRAM コントローラ部分の回路規模は、Altera 社の提供する評価版の DDR/DDR2-SDRAM コントローラコアの場合、ALUT 数 2237、レジスタ数 1639、メモリ数 2304 であった。

4.2 比較器の利用した読み出しデータの圧縮化方式

基本データベース演算、特に選択演算と結合演算を突き詰めて考えると、単純な属性値の比較、例えば図 3 において所属が“情報科学研究科”かどうか、等の比較に過ぎない。すなわち、データベース演算の核心は、属性値の比較条件が成立するか成立しないかの二者択一を判定することである。この単純な比較をプロセッサで行うために、一つのデータの単位が 32bit や 64bit である情報を、プロセッサ外部の遅い経路を経由してメモリからプロセッサへ読み出すのは非効率である。

そこで、メモリモジュール内に比較器を導入し、メモリモジュール内部でデータベース演算の比較条件の検査を行い、その比較条件が成立するかしないかを、1 と 0 の 1bit に圧縮してプロセッサに比較結果を返す Comparator-based data compression (CMP)方式を開発した。先ほどの結果から、BDT 方式のアドレス指定方式が有効であると分かったため、CMP 方式のアドレス指定も BDT 方式と同じくビットマップにより指定することにする。CMP 方式により、複数の比較演算結果をメモリからプロセッサへビットマップの形で一括して転送でき、プロセッサ外部の低速なデータ転送経路を有効に利用できるようになる。

この CMP 方式を、選択演算に関してシミュレーションで評価した結果を図 9 に示す。この結果から、CMP 方式は、タプルのサイズが小さい場合に有効であることが分かる。結合演算に関しても調べたが、同じくタプルのサイズが小さい場合に有効であった。

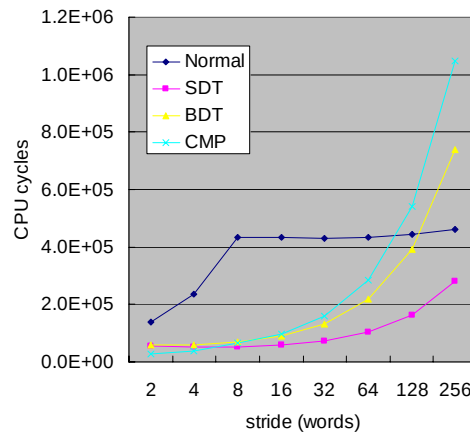


図 9: CMP 方式での選択演算の効率

4.3 データ読み出し方式を組み合わせたデータベース問合せの最適化

ここまでで、SDT 方式、BDT 方式、CMP 方式に加えて現在のプロセッサのキャッシュ指向メモリ読み出し方式(Normal)の、合計四種類のデータ読み出し方式が登場した。それぞれのデータ読み出し方式にはそれぞれ利点、欠点があり、状況に応じて、四種類の中から最も適切なデータ読み出し方法を選択することができれば、データベースの問合せ処理全体の効率化が図れる。このようなデータ読み出し方法の組み合わせ選択は、問合せ最適化と呼ばれる問題の一種である。

データベースの問合せは、選択演算のみといった単一の基本演算だけで構成されるものではなく、通常、複数の基本演算の組み合わせから構成される。例えば、図 9 の問合せでは、二つの表から、一方の表をある条件の下で選択演算を行い、引続いて、もう一方の表と先ほどの選択演算の結果である中間結果の表との間で、ある条件で結合演算を行う。このとき、選択演算にどのデータ読み出し方式を利用し、結合演算にどのデータ読み出し方式を利用するかは、40 通りの組み合わせの中から選ぶこととなる。

図 9 の問合せ例について、図 10 のように、ある表からデータを読み出し(a)、選択演算を行い、その中間結果の表を出力し、引き続いて行われる結合演算でその中間結果の表からデータを読み出す(b)ときのデータの流れに着目すると、(a)の読み出しに CMP 方式、(b)の読み出しに BDT 方式を利用すれば、(a)の出力結果のビットマップが、(b)の BDT 方式のデータ読み出し時の参照アドレスパターンとして直接利用できることが分かる。さらに、中間結果の表への書き出しデータはタプルそのものではなく、ビットマップとして圧縮されており、メモリへ書き込む際にデータがキャッシュから溢れ出す割合を低く抑えることができる、という二つの興味深い優れた特徴を見出すことができる。

しかしながら、この組み合わせがいかなる状況においても最善であるとは限らない。そこで、選択演算に成功するタプル数の割合を変化させた場合の数種類のデータ読み出し方式の組み合わせに関して、シミュレーションにより問合せ処理性能の比較を行った。

図 10 の(c)-(a)の組み合わせに関してその結果を図 11 に示す。(b)は、(a)が CMP 方式の場合は BDT 方式を、それ以外の場合は SDT 方式としている。

選択演算に成功するタプルの割合がかなり低い場合を除き、(a)と(b)に CMP-BDT 方式を組み合わせ、選択演算から結合演算にデータを流すことにより、著しい問合せ処理の効率化を実現できることが分かる(特に図 11 中の黄色の組み合わせ)。

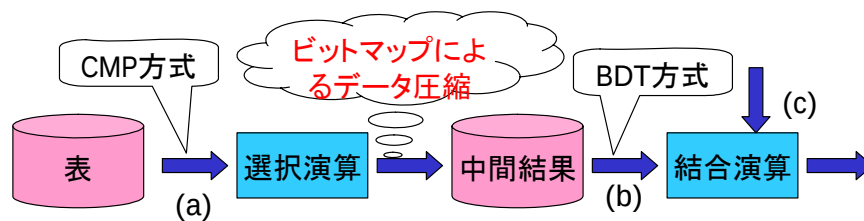


図 10: CMP・BDT 方式の適用による問合せ処理の流れ

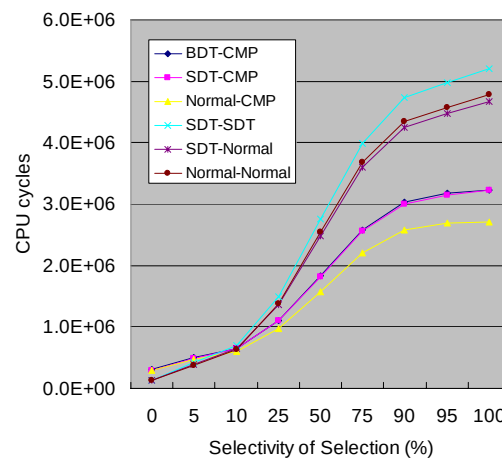


図 11: データ読み出し方式の組み合わせと問合せ処理時間

4.4 研究成果のまとめ

小型計算機において、効率の良いデータベース処理を行うためには、メモリからのデータ読み出しが全体の性能を大きく左右する。そこで、データベース演算に適したメモリ読み出し方法を提案し、それぞれの特性について明らかにした。また、与えられた問合せに対して、複数のメモリ読み出し方式から適切に選択するための組み合わせに関して、今回開発したメモリ読み出し方法がうまく利用できることを明らかにした。これらの結果は、現在の計算機の構成がデータベース演算に適していないことを如実に物語っているが、現在利用できる技術を工夫すれば、データベース処理の著しい高速化が可能であることを実証した。

5 自己評価:

本研究は、非常に多くの分野での利用実績を誇る関係データベースに関して、その演算処理が現在のプロセッサの仮定するキャッシュメモリを前提としたメモリアクセス方式ではデータ構造のチューニング等のソフトウェア技術を用いても不十分であることを明らかにし、現在利用可能な

技術でデータベース処理をどこまで高速化できるか、という問題に取り組んだ。

具体的には、主記憶に利用される DRAM の特性に着目し、固定ストライドデータ読み出し(SDT)、ビットマップ形式のアドレス指定に基づくデータ読み出し方式 (BDT)、比較器を利用した読み出し方式(CMP)を提案するとともに、これらの機能をソフトウェアと連携させ、データベースの問合せ最適化にまで踏み込んでデータベース処理の高速化を追求した。その結果、現在のデータベース処理上の問題であった主記憶からのデータアクセス待ちを著しく減少させ、プロセッサの実質的な利用効率を高めることができることを明らかにした。このような主記憶上のデータベース処理に関して、ハードウェアおよびソフトウェアの両面から検討した例は、世界的にみて極めて独創的かつ挑戦的な研究であり、水準の高い成果を上げることができたと考えている。

近年、センサーデータ処理やストリームデータ処理等で、データベース技術の利用が盛んに行われている。これらは、今後さまざまな場所に組み込みシステムとして埋め込まれ、個々のシステムにおいて、主記憶上のデータベースの問合せ処理の高速化が要求される。このような組み込みシステムには、小型化のためにプロセッサと DRAM メモリが一つの LSI に搭載される DRAM 混載 LSI が利用されると考えられる。DRAM 混載 LSI は、現在の DRAM チップとは異なり、メモリ周りの設計が自由となる。その際に、本研究で得られた成果がそのまま利用可能であると考えている。

一方で、既存の関係データベースとは概念の異なる XML データベースが脚光を浴びている。XML データベースは木構造が基本であり、表構造の関係データベースよりも遥かにメモリ参照パターンが複雑という問題点がある。しかし、XML の木構造を、本研究と同様の原始データ型による表構造に変換することにより、本研究成果が利用できる可能性は極めて高く、関係データベースだけでなく XML データベース処理の高速化にも貢献できると考えている。

本研究では、主要なデータベースの問合せ処理技術のうち、索引のみが課題として残されている。しかしながら、CMP 方式を利用することにより複数のキーの比較を同時に行うことにより、既存の B 木をより効率的に扱うことが可能であると考えられる。今後は、索引等のデータベースシステム技術だけにとらわれず、一段階抽象度の高いデータ工学システムの観点から、計算機システムの性能を最大限に引き出すための方法論の一般化を行い、XML データベース、ストリームデータ処理、センサーデータ処理、データマイニング等の様々なデータ工学領域の問題に対して、効率的にデータ処理を行うための共通の枠組について検討していく予定である。

6 研究総括の見解：

主記憶に利用される DRAM の特性に着目し、固定ストライドデータ読み出し(SDT)、ビットマップ形式のアドレス指定に基づくデータ読み出し方式 (BDT)、比較器を利用した読み出し方式(CMP)を提案し、それらがプロセッサの実質的な利用効率を著しく高めることを示した。主記憶上のデータベース処理に関して、ハードウェアおよびソフトウェアの両面から検討した研究は独創的であり、水準の高い成果と考えられる。今後の更なる展開や体系化とともに、本研究で得られた成果が DRAM 混載 LSI などで実用化されることを期待する。

7 主な論文等:

論文

- (1) 宮崎純: “ビットマップに基づくデータアクセスを利用した小規模計算機向け主記憶データベース処理”, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J90-D, No.2, (2007)(採録決定)
- (2) Jun Miyazaki: “Query Optimization for Main Memory Databases Using a Memory System with a Comparator Array”, 情報処理学会 DBWeb2006 シンポジウム, (2006)
- (3) Jun Miyazaki: “A Memory Subsystem with Comparator Arrays for Main Memory Database Operations”, Proc. of the 21st Annual ACM Symposium on Applied Computing (SAC 2006), Special Track on Database Theory, Technology and Applications (DTTA), pp.511-512, (2006)
- (4) Jun Miyazaki: “Hardware Supported Memory Access for High Performance Main Memory Databases”, ACM First International Workshop on Data Management on New Hardware (DaMoN 2005), pp.41-46, (2005)
- (5) 宮崎純, 府川智治, 田中清文: “スライドデータアクセスによる主記憶データベースの問合せ処理の評価”, 日本データベース学会 Letters, Vol.3, No.2, pp.41-44, (2004)

特許

- (1) 宮崎純: “メモリコントローラ、情報処理システム及びリードアクセス方法”, 国際出願 PCT/JP2006/311628, 奈良先端科学技術大学院大学, 2006 年 6 月 9 日
- (2) 宮崎純: “メモリコントローラ、情報処理システム及びリードアクセス方法”, 特願 2005-171073, 奈良先端科学技術大学院大学, 2005 年 6 月 10 日