

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「実用化を目指した組込みシステム用
ディペンダブル・オペレーティングシステム」
研究課題「実時間並列ディペンダブル OS と
その分散ネットワークの研究」

研究終了報告書

研究期間 平成20年10月～平成26年 3月

研究代表者:加賀美 聡
((独)産業技術総合研究所、副研究センター長)

§ 1 研究実施の概要

(1) 実施概要

本研究では、ロボットを始めとした実時間システムが複数 CPU コアを利用する際に、システム全体のディペンダビリティを向上させることを目的として、非実時間 SMP と実時間 AMP の組み合わせによりハードウェアリソースをソフトウェア的に分割して利用する方法を提案する。このようなシステムは、非実時間 SMP システムの側でオープンソースの汎用ソフトウェアやデバイスを利用できる一方で、実時間 AMP の側では、専用の IO を利用しながら、制御系、安全系、監視系、高信頼のための二重系などのディペンダビリティ機能を、お互いに非干渉な形で独立に実装できるという利点がある。

5年間のプロジェクトで、ART-Linux と名付けた、ユーザー空間から実時間タスクを実行するシステムコールを提供する OS をベースに、非実時間 SMP と実時間 AMP の組み合わせでマルチコアを利用するシステムの設計と開発を行った。開発した OS は開発グループでの、最大で 8 コア、12GB メモリのマシンを利用した α テスト、内部ユーザーグループや一部の外部協力者の協力を得て、ヒューマノイドロボット HRP2、車輪型ロボット Pen2、Segway、産業用マニピュレータなどを利用した β テストを経て、4 年目の終了時(2012 年 3 月)に開発した OS を Sourceforge より公開し、現在、月間 400 ダウンロード程度の利用数がある。

また、DEOS プロジェクト全体で取り組んだ DEOS Process の中では D-RE(Runtime Environment) として、モニタリング機能や検査機能を組み込んだ OS を担当した。ここではロボットのアプリケーションを用いて、D-Case を用いたスタークスホルダ合意と DEOS Process の二重ループの切り替え、説明責任のためのログ抽出などを、開発した ART-Linux から行うシステムを構築し、日本科学未来館での案内用ロボット、つくばチャレンジ 2013 用探索ロボット、ITS 世界会議 2013 デモ用自律走行車など、数台のロボットにおいて開発から継続的な実証実験まで開発プロセスを回し続けた。この検証実験の結果、DEOS Process が、変化する環境やスタークスホルダーの要求、システムの変更などにロバストに追従可能であること、また開発した ART-Linux がこれを実時間でディペンダブルに動作させるプラットフォームとして有効であることが示された。

(2) 顕著な成果

①優れた基礎研究としての成果

1. 実時間 OS により実現するロバストな不整地二足歩行手法

概要: (200 字程度)

レーザー距離センサからの地形計測、衝突干渉や足裏の地形評価を考慮した足跡計画手法、ジャイロとオドメトリから短遅延・高周波数な姿勢推定、現在姿勢から将来への安定性を考慮する短周期歩行軌道生成手法、などを統合した不整地二足歩行手法の提案を行い、実際に開発した ART-Linux の上で統合することにより、大小の段差、細かいガレキ、砂などを含むの多様な環境で世界最高レベルの不整地二足歩行を実現した。

2. 人環境の中での安全な移動手法

概要: (200 字程度)

多層型レーザースキャナを用いた地図作成、位置認識、人発見と追跡、障害物発見、安全を考慮した経路計画と経路追従制御などを統合した、人と安全を意識した移動手法を提案し、実際に開発した ART-Linux の上で統合することにより、累積数万人の人の中で安全に移動できる移動知能を実現した。

3. D-Case のロボットアプリケーション実証

概要: (200 字程度)

D-Case を用いたステークスホルダ合意と DEOS Process の二重ループの切り替え、説明責任のためのログ抽出などを、開発した ART-Linux から行うシステムを構築し、数台のロボットにおいて開発から継続的な実証実験まで開発プロセスを回し続けた。この検証実験の結果、DEOS Process が、変化する環境やステークスホルダーの要求、システムの変更などにロバストに追従可能であること、また開発した ART-Linux がこれを実時間でディペンダブルに動作させるプラットフォームとして有効であることが示された。

② 科学技術イノベーションに大きく寄与する成果

1. x86/Linux で最もハードリアルタイム性能の高い OS の設計と開発

概要: (200 字程度)

割り込みハンドラの周期実行、プライオリティインヘリタンス機構の導入、タイマソースの選択機能、固定優先度スケジューラなどにより、現在インテル x86 アーキテクチャで動作する Linux 互換のシステムとして、システムに付加をかけた状態での最大優先度のタスクにおいて最小のジッタ(数 μ sec)と最短の周期実行性能(約十 μ sec)を実現。対応しているカーネルバージョン、ディストリビューションにおいても現在世界一。開発した OS を 2009 年より公開中。これまで月間平均約 300 ダウンロード。これまでに 100 体以上のロボット、50 以上の機関で利用されている。特許 2 件。

2. x86/Linux で複数 CPU コアを非実時間 SMP と実時間 AMP を組み合わせて利用する OS の設計と開発

概要: (200 字程度)

x86 系で Linux 互換のシステムとしては初めて、複数コアを非実時間 SMP と実時間 AMP の組み合わせにより利用可能な OS を開発した。組み込み系の専用 OS では当該機能は存在していたが、これらは一般にオープンソースのソフトウェアとの整合性が取れず、大規模ソフトウェア開発には向かない傾向がある。特許 1 件を出願。また開発した OS を 2013 年より公開。これまで月平均 400 ダウンロード。

§ 2. 研究構想

(1) 当初の研究構想

研究開始時に研究代表者らは既に10年来、ART-Linux と名付けた実時間周期タスク実行機能を持つ OS を開発してきており、ディペンダブル組み込み OS に必要な機能の一部を実現していた。本 OS は Linux 本体の汎用性と相まって、特に実時間処理と汎用な開発実行環境の双方が重要なロボットの研究分野で用いられてきた実績を持っている。本研究では、新規に Linux2.6 に対応した形で、この OS を複数 CPU コアを非対称に利用する機能拡張を行うことを目指した。開発した ART-Linux2.6 を初年度より順次公開し、更なるユーザーの獲得と実績を積む計画である。

これらにより、ネットワークインターフェース、ストレージ、グラフィックスなどの I/O 処理を頻繁に行いながら最高で数十 khz オーダーの周期タスクを実行し、この分散ネットワークが市販の組み込みシステムに利用可能な長期の安定性に優れたディペンダビリティを持つことを目標とする。初年度からの公開と、その後のユーザーからのフィードバックへの対応により、5年後に実時間ディペンダブルな OS として実用的なシステムに広く使われることが可能なレベルを実現し、ロボットを中心に 100 体以上の採用例を達成する計画であった。

(2) 新たに追加・修正など変更した研究構想

① 中間評価で受けた指摘や助言、それを踏まえて対応した結果について

中間評価において、開発した OS が DEOS プロセスの D-RE として機能するかどうか検証し、プロジェクト全体の重要な一角を占めるようにとの指摘があり、そのために2つの研究開発を行った。1つは説明責任機能を示すことであり、2つめは D-Case との統合である。

説明責任機能については、AMP 機能を利用することにより、実行中のシステムが状態を共有メモリに書きだすコストのみで、別のコアで独立して実行される ART-Linux から、システムの状態をして保護された領域から、カーネルとその上で実行されるアプリケーションを a) 観察、b) 記録することが可能になる。倉光チームと協力して、ロギングの機能として LTTng をベースにしたものを開発し、これを D-Monitor として利用可能な形にシステム化した。またこのシステムを用いることにより、優先度逆転が発生していないかどうかを Time Series Theory によりオンラインで監視する手法についての研究を行った。

D-Case との統合ではロボットのアプリケーションを用いて、D-Case を用いたステークスホルダ合意と DEOS Process の二重ループの切り替え、説明責任のためのログ抽出などを、開発した ART-Linux から行うシステムを構築し、日本科学未来館での案内用ロボット、つくばチャレンジ 2013 用探索ロボット、I T S 世界会議 2013 デモ用自律走行車など、数台のロボットにおいて開発から継続的な実証実験まで開発プロセスを回し続けた。この検証実験の結果、DEOS Process が、変化する環境やステークスホルダーの要求、システムの変更などにロバストに追従可能であること、また開発した ART-Linux がこれを実時間でディペンダブルに動作させるプラットフォームとして有効であることが示された。

② 中間報告書 § 7. 今後の研究の進め方、および研究成果の見通しの記載事項に関し、研究を進めた結果について

(1)開発した複数 CPU コアを非実時間 SMPと実時間 AMPを組み合わせて利用するOSの公開、および(5)内部ユーザーによるOSの検証については、開発と検証を進め、H24年度末に sourceforge より公開し、毎月約 400 ダウンロード程度の利用を得ている。

(2)D-Visor 機能の実現、(3)ログ機能の拡充については、中間評価でも重要との指摘があったために前項に記載した。

(4)の数十コア&百 GB メモリ対応のための AMP 機能のメモリ管理の仕組みの改善については、現在開発を進めており、今年度末のプロジェクト終了時に α テストに入る予定である。今後内部で検証を進め、最終的には外部に公開する。

③ 上記①②以外で生まれた新たな展開について

研究推進委員からの勧めにより、割り込み即応機能を H 2 2 年次に取り組み、年度内にこの分野において最高レベルの割り込み即応性能を達成できた。

また Linux のメインラインへの統合を視野に入れ、これらの新規バージョンアップに追従しながら、各バージョンアップと各ディストリビューションへの作業ログの充実、バックポートの充実を図り、複数バージョンの同時サポートを実現してきた。

§ 3 研究実施体制

(1)研究チームの体制について

① 産業技術総合研究所

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
加賀美 聡	産業技術総合研究所	副研究センター長	H20.10～H26.3
松井 俊浩	産業技術総合研究所	部門長	H20.10～H26.3
西脇 光一	産業技術総合研究所	主任研究員	H20.10～H26.3
Thompson, Simon	産業技術総合研究所	主任研究員	H20.10～H26.3
梶田 秀司	産業技術総合研究所	主任研究員	H20.10～H26.3
金広 文男	産業技術総合研究所	主任研究員	H20.10～H26.3
尹 祐根	産業技術総合研究所	主任研究員	H20.10～H26.3
安藤 慶昭	産業技術総合研究所	主任研究員	H20.10～H26.3
佐々木 洋子	産業技術総合研究所	主任研究員	H20.10～H26.3
石綿 陽一	産業技術総合研究所	派遣	H20.10～H26.3
畑尾 直孝	産業技術総合研究所	産総研特別研究員	H23.4～H26.3
椋澤 光隆	産業技術総合研究所	テクニカルスタッフ	H23.4～H26.3
鮫島 一平	産総研／奈良先端大	D1	H23.4～H26.3
土屋 孝介	産総研／東京理科大	M2	H24.4～H26.3
仁瓶 雄真	産総研／東京理科大	M2	H24.4～H26.3
豊吉 政彦	産総研／奈良先端大	M2	H24.4～H26.3
江川 拓良	産総研／東京理科大	M1	H25.4～H26.3
久塚 愛之	産総研／東京理科大	M1	H25.4～H26.3
Kuffner, James	産業技術総合研究所	招へい研究員	H20.10～H23.3

Chestnutt, Joel	産業技術総合研究所	産総研特別研究員	H20.10～H23.3
荒井 優輝	産総研／奈良先端大	M2	H20.10～H21.3
野村 尚央	産総研／奈良先端大	M2	H20.10～H21.3
池田 篤史	産総研／東京理科大	M2	H20.10～H21.3
藤原 交亜起	産総研／東京理科大	M2	H20.10～H21.3
中田 貴丈	産総研／東京理科大	M2	H20.10～H22.3
鈴木 夢見子	産総研／奈良先端大	D3	H20.10～H22.3
濱田 薫	産総研／奈良先端大	M2	H22.4～H23.3
山内 允孝	産総研／東京理科大	M2	H21.4～H23.3
福島 安秀	産総研／東京理科大	M2	H21.4～H23.3
金吉 雅人	産業技術総合研究所	テクニカルスタッフ	H20.10～H23.6
久保田 崇	産総研／東京理科大	M2	H22.4～H24.3
牧 桂太郎	産総研／東京理科大	M2	H22.4～H24.3
本山 裕之	産総研／奈良先端大	M2	H22.4～H24.3
吉崎 航	産総研／奈良先端大	D3	H20.10～H25.3
坪田 英史	産総研／東京理科大	M2	H23.4～H25.3
大庭 亮	産総研／奈良先端大	M2	H23.8～H25.3

研究項目

- ・複数コアを非実時間SMPと実時間AMPの組み合わせで利用するOSの設計と開発
- ・アプリケーションからのディペンダビリティ機能の検討と開発したOSの実証

(2) 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

国内外に、約 100 の機関からの利用者があり、メーリングリストを通じてバグの報告やサポート等を行っている。

§ 4 研究実施内容及び成果

全てを単一の研究グループで行ったので、グループ毎でなく、研究項目別に表記する。

研究項目：1. 複数コアを非実時間SMPと実時間AMPの組み合わせで利用するOSの設計と開発

① 研究実施方法

近年のCPU はx86 系から組み込みプロセッサに至るまで、マルチコアプロセッサ化してきている。非実時間の汎用OS であるLinux やWindows ではプログラミングモデルの簡単さからSMP(Symmetric Multi-Processing) が一般的に用いられてきている。ロボットに重要な実時間制御をSMP(Symmetric Multi-Processing) として行うものとしてx86 系でLinux に対応したものとして Realtime Preemptive Patch が公開され、例えばWillow GarageのPR2 などで用いられてきている。SMP システムとは、図1(左) に示すように、複数のコアの上に単一のOS が存在し、メモリを共有するシステムのことである。

しかしSMP システムにおける実時間OS は、単一CPU におけるRMS(Rate Monotonic Scheduling) やEDF(Earliest Deadline First) のような確立されたスケジュール手法が存在せず、

理論的な完全性が保証できない。このために実時間SMP システムで動作するソフトウェアは、非実時間の通常のSMP のソフトウェアのように、単一CPU を対象としたプログラミングとの互換性や移植性が一般的に低い。また全体として単一システムとして動作するために、開発時にまたは運用時の想定外のソフトウェアの挙動によりシステムの挙動が設計時に期待したものとは異なったり、OSを含めたシステム全体がストップしたりする危険性を常に含んでいる。

今後システムがより複雑化し、例えば実際に実世界で自律的に活動するロボットを実現するために、多数の入出力、認識・計画・制御を行うさまざまな実行周期の実時間タスク、説明責任やデバッグのためのログ機能、非常用の安全システムなど、複雑な実時間処理システムを実現する必要が出てくるが、複数コアを実時間SMP によって利用するためにこれらの全てのリソース配分を完全に設計することは現状では非常に困難であると考えられる。

そこで、このような問題を解決するための方策として、AMP(Asymmetric Multi-Processing) により複数のコアにそれぞれ別々の実時間OS を起動するシステムや、AMP とSMP 混在のシステムが考えられる。AMP システムとは、図1(中) に示すように、複数のコアの上にそれぞれ別のOS が存在し、メモリも独立に用いるシステムのことである。またAMP とSMP の混在システムは、図1(右) に示すように、任意の個数のプロセッサをSMP で、残りを別々にAMP システムが利用する物である。

これまでVxWorks, QNXなどのx86 系を対象とした組み込み専用の実時間OS において、このようなAMP とSMP 混在可能なシステムが実現されてきているが、残念ながらこのような組み込みシステムでは、オープンソースのソフトウェアを動作させるのには困難である。一方でLinux で実時間なAMP とSMP 混在可能なシステムは存在していなかった。

そこで本研究項目では、申請者らが10年来開発を続けてきたLinuxベースの実時間OSであるART-Linuxを、複数の実時間AMP と通常の実時間SMP のLinux が任意の割合で混在可能なOS を設計し、開発を行った。

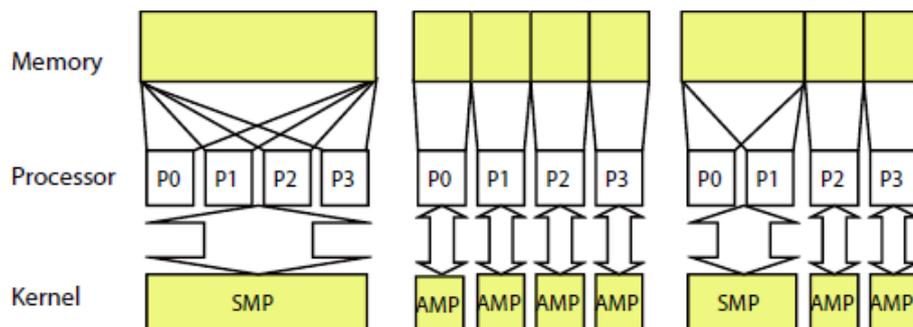


図1: SMPシステム(左)、AMPシステム(中)、SMPとAMPの混在システム(右)

② 研究実施内容

ART-Linux の主な設計・開発項目は下記である。以下では、最初にBIOS によって起動されるプロセッサをBSP (Bootstrap Processor)、BSP 上で動作するOSカーネルをBSP カーネルと呼び、また、BSP カーネルによって起動されるプロセッサをAP (Application Processor)、AP 上で動作するOS カーネルをAP カーネルと呼ぶ。

- 各システムのメモリ配分はBSP のシステム起動時に任意にアサイン可能とする。
- BSP にはSMP またはAMP システムをブート可能にし、AP にはAMP システムをリロケートしてブート可能とする。
- 全システムに単一のクロックを供給し同期して動作させるが、別システムの挙動により実

時間性を阻害されない。

- BSP のシステムと各AP のシステム間に仮想ネットワークデバイスと仮想シリアルコンソールを準備し、システムの外部との通信や、システムのOSのシリアルデバッグを可能とする。仮想ネットワークデバイスを利用したNFS ブートも可能とする。
- メモリの一部をどのプロセッサからも見える共有領域として設定し、この領域を通じて、システム間で高速に通信が可能な仕組みを導入する。
- デバイスを任意のシステムに振り分けを可能とする。

各システムへのメモリ割り当て： 図2(上)はLinux カーネルの物理メモリ管理法を示している。

動的なメモリはページフレーム番号をインデックスとするpage 構造体の配列によって管理されている。まず、add_active_range 関数によって登録された物理アドレス領域を、物理メモリとして利用するように設定する。またpage 構造体配列自身の領域やクラッシュカーネルのための領域の物理アドレスを、reserve_bootmem関数によって指定し、動的なメモリ管理割り当てから除外するように設定する。システムにLinux を複数起動するためには、物理メモリを分割して使用することになる。まずBSP カーネルへの引数で、AP 用の物理メモリ領域をLow memory とHigh memory にわけて指定することとする。BSP カーネルではAPに割り当てる領域をreserve_bootmem関数で動的割り当てから除外する。AP カーネルでは、低位メモリ全体と、割り当てられた高位メモリ領域を、add_active_range 関数で登録する。AP カーネルの物理メモリ管理法を図2(下)に示す。

複数のAMP システムを起動する場合、APカーネルでは、低位メモリと高位メモリの間に大きな未利用物理アドレス領域がある場合がある。未利用領域を管理するpage 構造体を割り当てるのはメモリの無駄となるため、ページフレーム番号とpage 構造体配列インデックスとの間の計算方法を変更し、無駄を回避する。

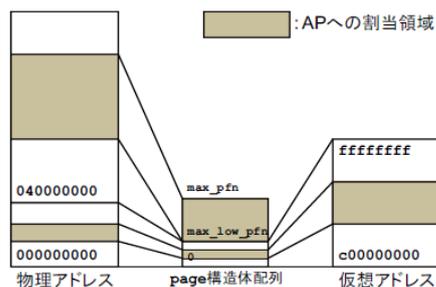
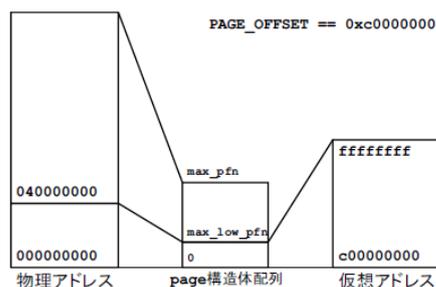


図2 Linux のメモリ配置 (上) と ART-Linux の AMP カーネルのメモリ配置 (下)

AMPカーネルのリロケーション: AMPカーネルを動作させるには、メモリのリロケーションが必要となる。Linux カーネルは固定物理アドレスにロードされることを前提にコンパイルされている。しかしAP に割り当てられる物理メモリのアドレスは可変となってしまう、アドレスが変わるたびに、カーネルをコンパイルしなおすのは使いづらい。幸いなことに2.6.20 から圧縮カーネルについてはリロケータブルになった。この場合、圧縮されたカーネルと共に、グローバルシンボルのリロケーション情報が組み込まれており、低位メモリの任意のアドレスにロード可能となった。カーネルがメモリに読み込まれ、解凍処理の後、ロードされたアドレスに基づいて、グローバルシンボルのリロケーション処理が行われる。そこでAPにはこのリロケート可能な圧縮カーネルを利用する。

タイマ割り込み: x86 システムは歴史的な経緯から下記のタイマを有している。

- ・ PIT (Programmable Interval Timer)
- ・ Local APIC (Advanced Programmable Interrupt Controller) Timer
- ・ HPET (High Precision Event Timer)

ART-Linux カーネルでは引数でこれらのタイマを指定できるようになっている。図3 にマルチコアシステムにおける各信号源の接続関係を示す。この信号を利用して、各コアにタイマ割り込みを与える方法として、以下の3 つの方法が考えられる。

- ・ Local APIC Timer からの割込
- ・ BSP カーネルからのIPI
- ・ IO-APIC から全てのコアにブロードキャスト割込

これらの利点と欠点を鑑み、IO-APIC から全てのコアに割込をブロードキャストする方法を採用する。実装としては、IO-APIC における割込入力ピンの信号からコアへの割込への変換方式の設定において、RedirectionTable のDelivery Mode フィールドをタイマ割込をブロードキャストするように設定した。

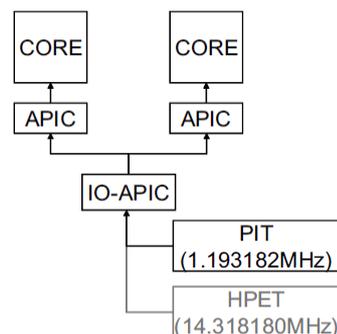


図3 マルチコアシステムのタイマ割り込み源

コア間通信: 3つのコア間通信方法を準備する。

- ・ 共有メモリ
- ・ 仮想ネットワークデバイス通信できるネットワークデバイス。
- ・ 仮想シリアルデバイス

AP カーネルをブートする際に仮想ネットワークデバイスこれを利用して、ルートファイルシステムをNFSマウントすることを可能としている。

デバイス振り替え: 各サブシステムが任意のデバイスにアクセスできることは大変に重要である。基本的にデバイスはPCI バスに接続されていると認識されているので、PCI デバイスを、そのデバイス番号毎に指定したプロセッサに分配する。

APでのAMPカーネルのブート: まず、BSPカーネルの起動時に、引数でAP が使用するメモリを指定し、その領域を前述のように使わないように設定する。その後、AP でのAMP カーネルのブートは下記の手順となる。

1. BSP のシステムで/dev/mem を介して、圧縮カーネルファイルをAP に割り当てた物理メモリにコピーする。
2. 新規実装したamp_exec システムコールによって、AP のプロセッサ番号とプロテクトモード実行開始アドレスをカーネルに通知する。
3. BIOS 領域にリアルモード実行開始アドレスを設定し、INIT IPI (Inter-Processor Interrupt) によって指定されたプロセッサをリセットする。
4. AP は、まずリアルモード実行開始アドレスからリアルモードで実行を開始し、初期アドレス変換テーブルを用いてプロテクトモードへ移行する。
5. プロテクトモード実行開始アドレスへジャンプし、カーネルの解凍と、リローションを行う。
6. カーネルの開始アドレスへジャンプすることによりAMP カーネルがAP で立ち上がる。

③ 成果

現状では linux 2.6.32~36 および 3.0~3.6 のカーネルと Ubuntu10.04LTS, 12.04LTS, Debian GNU/Linux 5.0 のディストリビューションに対応した開発を行っており、svn へのコミット総数は約 3,350 回である。最大では DELL の T5500 (Intel Xeon E5504 2GHz4core Dual,

memory 12GB) および M6500 (Intel Corei7 X940 2.13GHz 4core を HT で利用, memory 8GB)の2つのシステムで、AMP システムが 8 つまたは SMP で4つと AMP システムが4つの動作を確認している。本 OS を内部での α テスト、協力ユーザーを含んだ β テストの検証後に、H25.3 に公開し、これまでのところ月間 400 ダウンロード程度の利用を得ている。

また Linux のメインラインへの統合を視野に入れ、これらの新規バージョンアップに追従しながら、各バージョンアップと各ディストリビューションへの作業ログの充実、バックポートの充実を図り、複数バージョンの同時サポートを実現しながら、OS の継続的メンテナンスと新規機能搭載の PDCA サイクルを回している。

研究項目：2. アプリケーションからのディペンダビリティ機能の検討と開発したOSの実証

① 研究実施方法

ここでは実時間AMP と非実時間SMP の混在により、単一CPU での実時間システムやマルチコア環境での実時間SMP システムに比較して、どのようなシステムのディペンダビリティの向上が可能になるかを研究する。

② 研究実施内容

図4 に、開発したART-Linux により可能となるシステムの構成例を示す。この図では現在利用可能なCPU の例として8 個のコアがあるものを挙げ、そのうちの3 個で通常の非実時間なLinux が動作し、また残りの5つのコアに対してそれぞれ独立に実時間OS であるART-Linux が動作している例を示している。

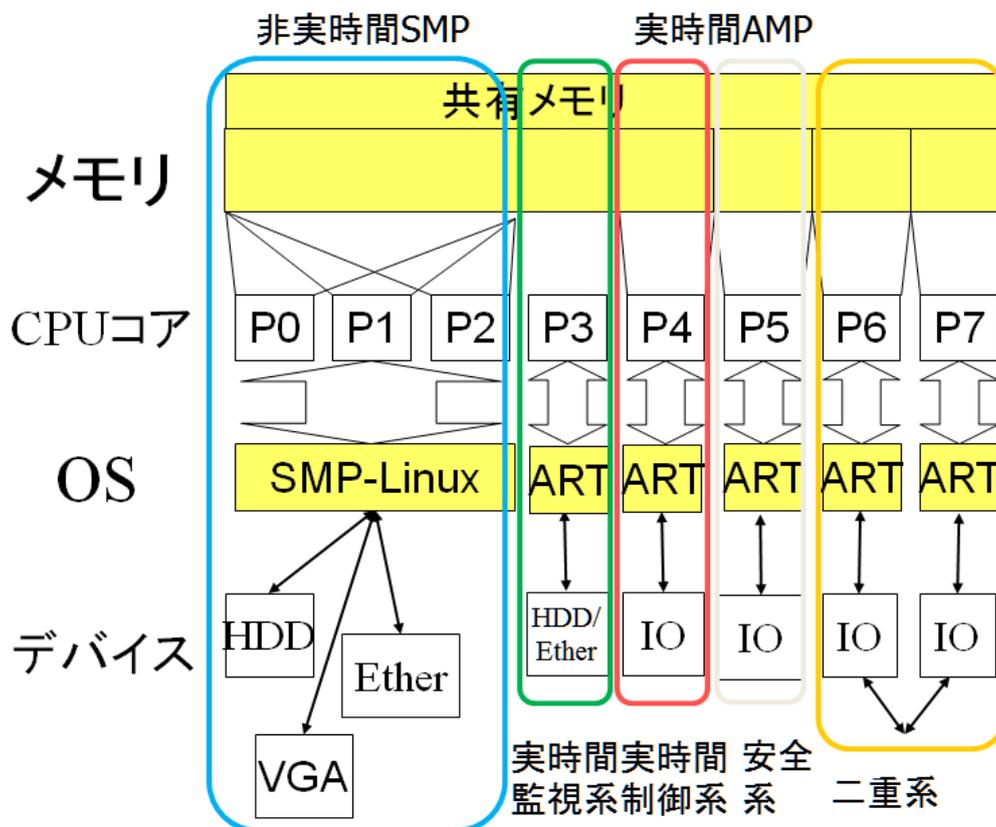


図4 提案する非実時間 SMP と実時間 AMP の混在するシステム構成例

非実時間SMP-Linux：図4 では、P0～P2のプロセッサにアサインされた非実時間のSMP システムとして示している。図中に示すように、SMP のLinux にはデバイスとして通常のディスクやグラフィックス、ネットワークなどをアサインしている。このシステムの役割としては下記のようなものが考えられる。

- ・ ユーザーインターフェース等。
- ・ グラフィックハードウェア、イーサネットを始めとしてロボットの直接制御に用いないIO を行うハードウェアの処理。これらは多数の割り込みを発生させることから実時間システムにとっての障害となりやすい。
- ・ 長期のプランニング、地図作成、モデルマッチングによる認識処理などの、ロボットの知能処理のうちでも非実時間の処理を行う。これらの結果は、仮想ネットワークあるいは共有メモリを通じて、実時間制御系などに伝える。
- ・ 実時間用途に開発されていない多くのオープンソースライブラリの利用。

本システムはメモリアサインメント部を除けば、ほぼ通常のSMP-Linux であるために、通常のLinux のために開発されたものが、改変なしにそのまま動作するという特徴がある。

実時間監視AMP-Linux：図4 では、P3 のプロセッサにアサインされたAMP 実時間システムとして示している。この実時間監視系はログを保存するためのディスクや外部のシステムに警告するための別のネットワークデバイスをアサインしている。

本システムは他のSMP& システムの内部状態を共有メモリを通じて監視し(他のシステムは自分で共有メモリに状態を書き出す必要がある)、ログを残すとともに、他のシステムの異常をリアルタイムで検知し、後に述べる非常系に知らせるなどの機能を果たす。

この機能を利用する例として、倉光チームと協力して、LTTng を利用し、システムに優先度逆転が発生していないかどうかをTimeSeries Theory によりオンラインで監視する手法を実現した。

実時間制御AMP-Linux：図4 では、P4 のプロセッサにアサインされたAMP 実時間システムとして示している。制御のために必要なIO ボードをアサインしている。本システムは他のオーバーヘッドがなく、制御のみに専念することが出来るために、低いジッターによる高い実時間制御性能や、リソース配分の簡単化によるシステム設計の容易さと障害の起きにくさが期待できる。

次に述べる実時間監視系のために、内部状態を共有メモリに書き出すことによりシステムの監視をオンラインで行うことができる。

非常用AMP-Linux：図4 では、P5 のプロセッサにアサインされたAMP 実時間システムとして示している。非常系も独自のIO システムをアサインしている。前述の実時間監視系を通じて、あるいは共有メモリや仮想ネットワークを通じた他システムからの通知や他システムの監視、あるいはIO を介して得られるセンサの値などから、システムの異常を検知し、モーター電源断を始めとする緊急停止などの安全策を行う。

このシステムを他のシステムから独立にすることにより、非常システムが他の実時間システムに阻害されて動作しないなどの影響を避けることができる。また一方で、例えばヒューマノイドロボットの歩行、また高速で走行している車、アームで人の上に重量物を持ちあげている、などのいきなり電源断すると被害が大きくなるような状況では、その状況を回避するための計算機能と能力を有している必要がある。そのような状況に備えて、実時間計算能力を他のシステムから独立に温存することが、本システムの目的である。

二重系用AMP-Linux：複雑なソフトウェアの論理検証等は未だに部分的に(あるいはサンプリングベースにしか)行えないためにシステムの信頼性を確保する方法として二重系による方法が良く用いられている。ここでは本システムによる二重系の構成法について述べる。図4 では、P6～P7 のプロセッサにアサインされたAMP 実時間システムとして示している。2つのシステムは、それぞれ独立にIO ボードをアサインすることも、IO ボードへのアクセスを排他的に制御することも可能であり、柔軟な二重系を構成することが可能である。(ただし排他的アクセスにはIO ボ

ードの制限も存在する)

システムが複雑になり、実世界において安全に行動するためには、二重系や多重系による信頼性の確保が重要になると考えている。

これらのディペンダブル機能を、内部ユーザーグループが考察し、必要な場合にはOS開発グループへ要求仕様を提供する。また内部ユーザーグループは開発したOSの実用性を実証するためのターゲット計算機と実験環境の作成を行う。

③ 成果

始めに内部ユーザーは自分の担当するアプリケーションで必要となるディペンダブル機能を列挙し、OS開発グループへ要求仕様としてフィードバックを行った。図5に内部ユーザーグループのロボットの例を示す。次に実験環境を整備し、開発したOSを内部ユーザーが各環境に適用してβ検証を行いつつ、必要なディペンダビリティ機能の検証を行っている段階である。上記の各ディペンダブル機能のうち、二重系用 AMP-Linux を除いては既の実証例が挙げられている。



図 5 内部ユーザーグループのロボットアプリへの実装例（上段左から、ヒューマノイドロボット HRP2, HRP4-c, 全方位望遠マイクロフォンアレイ、車輪移動ロボット Pioneer、下段左から Segway、PMR、上肢に障害のある人用小型軽量ロボットアーム Rapuda）

また開発した OS の実時間機能の部分を 2009 年より公開中。これまで月間平均約 300 ダウンロード。これまでに 100 体以上のロボット、50 以上の機関で利用されている。

研究項目：3. DEOS プロセスのロボット応用

① 研究実施方法

異なるステークホルダー間の合意について、数台のサービスロボットを例に取り、議論を進めながらシステムの完全性、機能性、安全性、説明責任などについての合意形成を行うDEOSプロセス

スを回すことにより、その効果を検証する実証研究を行った。

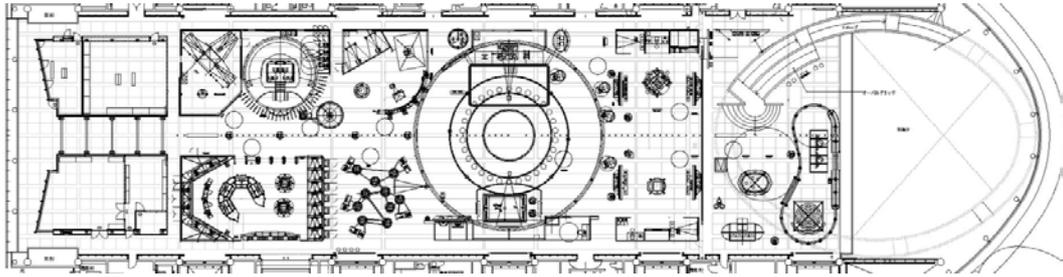


図6 日本科学未来館のフロア図面

②研究実施内容

ここではその一つとして、日本科学未来館の展示フロア用のサービスロボットについて述べる。ロボットのタスクは、展示フロアの中を人や障害物を避けて巡回しながら、来館者との対話、デモの予定時刻と内容の宣伝などを行うことを目的としている。このサービスロボットにおいて、ロボットの設計者とサービス提供者が設計から実証に至る合意形成を行うために、機能、運用、安全、説明責任、改善の5項目に関して作成した D-Case木による議論と合意形成について研究を行った。

図面に示したフロアは3階の展示部分約30 x 130m の領域である。ここに一日当たり1万人程度の来館者が訪れる。

作成したD-Caseは、機能、運用、安全、説明責任、改善の5項目に関して議論を行ったものである。要素数はゴール 66、エビデンス 29、ストラテジ 28、コンテキスト 12、アンディベロプド 7、モニターノード 17の合計159ノードである。

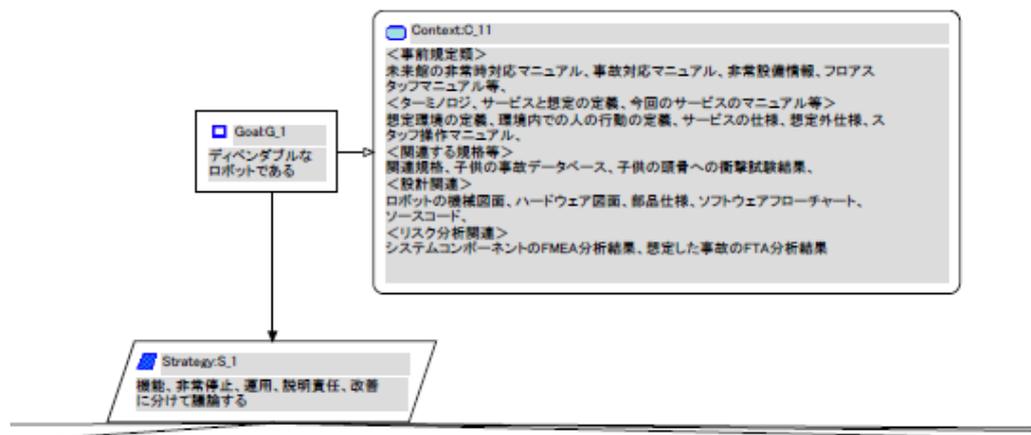


図7 トップゴールとそのコンテキスト



図8 開発したロボットの運用実験

果、緩衝材の硬さ試験の結果がエビデンスとして付随する。

説明責任については、システムが正常に動作していること、想定外に係る何らかの異常が発生したことなどを示すためには、システムの個々の要素の入力や出力の記録が実時間で記録され、保存されていることが重要である。ART-Linux の D-RE 機能により、モニターノードのデータを共有メモリにコピーだけで、別プロセッサ上で実行されているロギングシステムがデータを保存する。このために必要に応じてデータを記録することができる。本ロボットでは、毎秒数十 MB の圧縮データを本システムを通じてモニタしながらロギングする。システムの個々の要素や、外界の現象において異常の発生を検知すると、モニターノードとして設置したデータ収集システムがアラートを発行し、システムは安全に停止状態に移行すると共に、その記録を保存することにより、何が起きたか、どの要素が異常を示したのかを示すことができ、改善のループに移行することができる。このためにどのような異常を想定し、記録を行うかの議論を行い、すべてのセンサやモーターへの入出力、各機能毎の入出力、運用担当者の持つジョイパッドの操作入力など合計17か所のモニターノードを配している。各異常に対して正常に記録が取れることを示したテスト結果がエビデンスとなっている。

改善に関する議論では、システムが想定外の事故を起こしたり、事故に至らないまでも異常な挙動を起こしたり、センサやモーター等のサブシステムが故障したりした場合において、現場の運用担当者によるオペレーションだけではサービスの継続が不可能な場合には、サービスを停止し、変化対応サイクルと呼ぶ改善のループに入ることになる。故障、想定した想定外、想定しない想定外などの個々の事象について議論した後で、故障と想定した想定外に対しては、前述のモニターノードにより何が起きたのか再現し、システムの改善等の対処を行う。一方で想定しない想定外に対しては、モニターノードが適切に配置されているかどうかは不明である。各種センサの記録、追従していたスタッフからの聞き取りなどから現象の再現を試み、改善を試みるという議論を行った。

③成果

これらの実証研究を通じて、D-Case 木を用いることによりスコープ、レギュレーション、エビデンス、設計書、試験結果、マニュアルなどを統合した議論が行えるという特性について理解できた。

またこれらの議論は、設計から運用まで、システムのライフサイクルを通じて常時更新されていくと共に、その動作の記録としてのモニターノードが常時記録され、不具合あるいは更新の対象の議論を行うことができるようになっている。

D-Case 木により議論を行いながら合意形成を行うことには、次のような利点が存在することが分かった。

- 問題全体のスコープの明確化
- 障害対応サイクルと変化対応サイクルの遷移条件の明示化
- 議論に用いる資料の明示化
- 個々の FTA, FMEA 等の望ましくない事象のリスク分析結果の統合
- 既存の安全や技術規格との適合判定との統合
- 個々のゴールに対する問題設定と合意条件の議論の記録
- モニターノードにより得られる説明責任情報の明示化
- 運用、整備などのマニュアルの明示化
- 想定する想定外の明示化
- ターミノロジーやパラメータの定義の明示化
- 精度などの条件の明示化

一方で、D-Case 木の議論の完全性、木の部分改変における木全体の一貫性の保証、各ゴールに誰が合意したか、上のゴールに合意するための下の方の木の理解、などは利用者に任されており、使用上の注意が必要である。

§ 5 成果発表等

(1) ソフトウェア/ハードウェア

1. <http://sourceforge.net/projects/art-linux/>
2. 高精度な実時間 OS「ART-Linux」を公開, 2013 年 3 月 7 日産総研プレス発表

(2)規格

(3)知財出願

① 国内出願 (3件)

1. マルチタスク処理装置、及びマルチタスク処理方法、並びに、プログラム, 石綿 陽一, 加賀美 聡, 西脇 光一, 松井 俊浩, 2007 年 9 月 12 日出願, 特願 2007-236087, 特開 2009-70014
2. 実時間タスクにおけるブロック回避方法, 石綿 陽一, 加賀美 聡, 西脇 光一, 松井 俊浩, 2007 年 9 月 12 日出願, 特願 2007-236390, 特開 2009-70043, 特許第 4984153 号
3. 複数の OS のメモリ使用の効率化手法, 加賀美 聡, 石綿 陽一, 2012 年 9 月 3 日出願, 特願 2012-193079

②海外出願 0件)

③その他の知的財産権

1. RT-Linux ソースコード。Linux 2.6.24～33 に対応。産総研に知財登録の上、Sourceforge より公開。

(4)原著論文発表 (国内(和文)誌 14件、国際(欧文)誌 40件)

1. 著者、論文タイトル、掲載誌 巻、号、発行年

〈国内・ただし査読のある国内会議を含む〉

1. Simon Thompson, 佐々木 洋子, 加賀美 聡, Associating Spoken Commands with Multiple Human Users in a Dynamic Environment, 第 14 回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp. 313-318, 2009
2. 西脇 光一, 加賀美 聡, オンライン軌道生成による歩行バランス維持のための目標 ZMP 調節, 第 15 回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp. 86-93, 2010
3. 西脇 光一, 加賀美 聡, 推定絶対運動状態を始点とする短周期軌道生成を用いたヒューマノイドの不整地適応歩行制御, 日本ロボット学会誌, Vol. 29, No. 1, pp. 111-121, 2011
4. 西脇 光一, 加賀美 聡, ヒューマノイドの歩行軌道生成における質点も出ると剛体リンクモデルの相互変換, 第 16 回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp. 237-242, 2011
5. 加賀美 聡, 石綿 陽一, 西脇 光一, 梶田 秀司, 金広 文男, 尹 祐根, 安藤 慶昭, 佐々木 洋子, Simon THOMPSON, 松井 俊浩, 複数コアを SMP・AMP 分割利用可能な ART-Linux の設計と開発, 第 17 回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp. 521-526, 2012
6. 西脇 光一, チェスナット ジョエル, 加賀美 聡, ヒューマノイドによる未知不整地のレーザ距離センサを用いた自律移動, 第 17 回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp. 611-617, 2012
7. 西脇 光一, 加賀美 聡, 将来にわたる ZMP 許容領域を考慮したオンライン 2 足歩

- 行軌道生成法, 日本ロボット学会誌, Vol. 30, No. 7, pp. 702-710, 2012
8. 西脇 光一, 加賀美 聡, 不整地適応能力向上のためのエッジ着地を用いた二足歩行動作の設計と制御, 第 18 回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp. 135-140, 2013
 9. 鮫島 一平, 仁瓶 雄真, 畑尾 直孝, 加賀美 聡, 竹村 裕, 溝口 博, 大崎 章弘, 日本科学未来館におけるサービスロボットの人のための人環境情報地図の構築, 第 18 回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp. 270-277, 2013
 10. 畑尾 直孝, 加賀美 聡, リサージュ走査型 3D LRF によるパーティクルフィルタを用いた複数歩行者の追跡, 第 18 回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp. 439-446, 2013
 11. 鮫島 一平, 加賀美 聡, 溝口 博, 河内 まき子, Kinect を用いた少数の計測項目からの人体寸法推定, 日本ロボット学会誌, Vol. 31, No. 8, pp. 761-768, 2013
 12. 畑尾 直孝, 鮫島 一平, 加賀美 聡, 角度ベース複数仮説を用いた LRF による複数種類・複数個の移動体追跡手法, 第 19 回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp. 23-30, 2014
 13. 佐々木 洋子, 畑尾 直孝, 鶴崎 彰吾, 加賀美 聡, ネスト型無限混合ガウスモデルによる実環境データの分類と識別, 第 19 回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp. 128-133, 2014
 14. 鮫島 一平, 江川 拓良, 仁瓶 雄真, 梶澤 光隆, 畑尾 直孝, Simon Thompson, 加賀美 聡, 竹村 裕, 溝口 博, 屋外環境における人環境情報地図の構築, 第 19 回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp. 612-617, 2014

〈国際〉

1. Michel Philipp, Joel Chestnutt, Satoshi Kagami, Koichi Nishiwaki, James Kuffner, Takeo Kanade, Humanoid Navigation Planning using Future Perceptive Capability, Proceedings of 2008 8th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, pp. 507-514, 2008
2. Simon Thompson, Yoko Sasaki, Satoshi Kagami Associating Spoken Commands with Multiple Human Users in a Dynamic Environment, Proceedings of The Fourth International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing, pp. 207-212, 2008
3. S. Kagami, S. Thompson, Y. Sasaki, H. Mizoguchi, T. Enomoto, 2D Sound Source Mapping from Mobile Robot Using Beamforming and Particle Filtering, Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, pp. 3689-3692, 2009
4. K. Nishiwaki, S. Kagami, Online Walking Control System for Humanoids with Short Cycle Pattern Generation, The International Journal of Robotics Research, Vol. 28, No. 6, pp. 729-742, 2009
5. Philipp Michel, Joel Chestnutt, Satoshi Kagami, Koichi Nishiwaki, James J. Kuffner, Takeo Kanade, Motion Planning using Predicted Perceptive Capability, International Journal of Humanoid Robotics, Vol. 6, No. 3, pp. 435-457, 2009
6. Joel Chestnutt, Koichi Nishiwaki, James Kuffner, Satoshi Kagami, Interactive Control of Humanoid Navigation, Proceedings of The 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 3519-3524, 2009
7. Joel Chestnutt, Yutaka Takaoka, Keisuke Suga, Koichi Nishiwaki, James Kuffner, Satoshi Kagami, Biped Navigation in Rough Environments using On-board Sensing, Proceedings of The 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 3543-3548, 2009

8. Dmitry Berenson, Joel Chestnutt, Siddhartha S. Srinivasa, James J. Kuffner, Satoshi Kagami, Pose-Constrained Whole-Body Planning using Task Space Region Chains, Proceedings of 9th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, pp.181-187, 2009
9. Koichi Nishiwaki, Satoshi Kagami, Frequent Walking Pattern Generation that Uses Estimated Actual Posture for Robust Walking Control, Proceedings of 9th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, pp.535-541, 2009
10. Koichi Nishiwaki, Satoshi Kagami, Strategies for Adjusting the ZMP Reference Trajectory for Maintaining Balance in Humanoid Walking, Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 4230-4236, 2010
11. Simon Thompson, Satoshi Kagami, Masafumi Okajima, Constrained 6DOF Localisation for Autonomous Vehicles, Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, pp.330-335, 2010
12. Takahiro Nakada, Satoshi Kagami, Hiroshi Mizoguchi, SIFT-Cloud-Model for Object Detection and Pose Estimation with GPGPU Acceleration, Proceedings of The 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1748-1753, 2010
13. Shuuji Kajita, Mitsuharu Morisawa, Kanako Miura, Shin'ichiro Nakaoka, Kensuke Harada, Kenji Kaneko, Fumio Kanehiro, Kazuhito Yokoi, Biped Walking Stabilization Based on Linear Inverted Pendulum Tracking, Proceedings of The 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 4489-4496, 2010
14. Simon Thompson, Satoshi Kagami, Masafumi Okajima, Facet Classification in 3D Polygon Maps for Autonomous Vehicle Localisation, Proceedings of International Conference on Intelligent Unmanned Systems, pp.357-364, 2010
15. Simon Thompson, Satoshi Kagami, Predictability of Human Motion for Mobile Robot Control, Proceedings of IASTED International Conference Robotics, pp.97-102, 2010
16. Wataru Yoshizaki, Yuta Sugiura, Albert C Chiou, Sunao Hashimoto, Masahito Inami, Takeo Igarashi, Yoshiaki Akazawa, Katsuaki Kawachi, Satoshi Kagami, Masaaki Mochimaru, An Actuated Physical Puppet as an Input Device for Controlling a Digital Manikin, Proceedings of The 29th Annual CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp.637-646, 2011
17. Koichi Nishiwaki, Satoshi Kagami, Online Design of Torso Height Trajectories for Walking Patterns that takes Future Kinematic Limits into Consideration, Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2029-2034, 2011
18. Midori Sugaya, Ken Igarashi, Masaaki Goshima, Shinpei Nakata, Kimio Kuramitsu, Yoichi Ishiwata, Satoshi Kagami, Extensible Online Log Analysis System for Improving Adaptation Cycles, Proceedings of 13th European Workshop on Dependable Computing, 2011
19. W. Yoshizaki, Y. Sugiura, A.C. Chiou, S. Hashimono, M. Inami, T. Igarashi, Y. Akazawa, K. Kawachi, S. Kagami, M. Mochimaru, Actuated Physical Puppet as Input Device for Controlling Digital Human Model, Proceedings of the First International Symposium on Digital Human Modeling, 2011
20. Yoko Sasaki, Tomoaki Fujihara, Satoshi Kagami, Hiroshi Mizoguchi, Kyoichi Oro, 32-Channel Omni-directional Microphone Array Design and Implementation, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.23, No.3, pp.378-385, 2011
21. Simon Thompson, Satoshi Kagami, Masafumi Okajima, Selection of Polygon Sets

- for 6DOF Localisation of Autonomous Vehicles, Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, pp.2369-2374, 2011
22. Hideshi Tsubota, Satoshi Kagami, Hiroshi Mizoguchi, SIFT-Cloud-Model Generation Method for 6D Pose Estimation and its Evaluation, Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, pp.3323-3328, 2011
 23. Koichi Nishiwaki, Joel Chestnutt, Satoshi Kagami, Autonomous Navigation of a Humanoid Robot over Unknown Rough Terrain using a Laser Range Sensor, International Journal of Robotics Research, Vol.31, No.11, pp.1251-1262, 2012
 24. Junichi Urata, Koichi Nishiwaki, Yuto Nakanishi, Kei Okada, Satoshi Kagami, Masayuki Inaba, Online Walking Pattern Generation for Push Recovery and Minimum Delay to Commanded Change of Direction and Speed, Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.3411-3416, 2012
 25. Koichi Nishiwaki, Satoshi Kagami, Trajectory Design and Control of Edge-landing Walking of a Humanoid for Higher Adaptability to Rough Terrains, Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.3432-3439, 2012
 26. Midori Sugaya, Hiroki Takemura, Youichi Ishiwata, Satoshi Kagami, Kimio Kuramitsu, Online Kernel Logging and Analysis for Real-time Robotics Applications, Journal of Information Processing, Vol.21, No.1, pp.245-250, 2012
 27. Naotaka Hatao, Satoshi Kagami, Ryo Hanai, Kimitoshi Yamazaki, Masayuki Inaba, Construction of Semantic Maps for Personal Mobility Robots in Dynamic Outdoor Environments, Proceedings of The 8th International Conference on Field and Service Robotics, 2012
 28. Koichi Nishiwaki, Satoshi Kagami, Online Walking Pattern Generation for a Humanoid that uses Estimated Actual Velocity of the Robot, Proceedings of 10th IFAC Symposium on Robot Control, 2012
 29. Junichi Urata, Koichi Nishiwaki, Yuto Nakanishi, Kei Okada, Satoshi Kagami, Masayuki Inaba, Online Walking Pattern Generation for Push Recovery and Minimum Delay to Commanded Change of Direction and Speed, Proceedings of 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.3411-3416, 2012
 30. Koichi Nishiwaki, Satoshi Kagami, Trajectory Desing and Control of Edge-landing Walking of a Humanoid for Higher Adaptability to Rough Terrain, Proceedings of 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.3432-3439, 2012
 31. Kosuke Tsuchiya, Satoshi Kagami, Wataru Yoshizaki, Hiroshi Mizoguchi, Grasp Planning Precomputation by Considering Center of Gravity of Objects and its Evaluation using OpenRAVE, Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, pp.2091-2096, 2012
 32. Ippei Samejima, Keitarou Maki, Satoshi Kagami, Makiko Kouchi, Hiroshi Mizoguchi, A Body Dimensions Estimation Method of Subject from a few Measurement Items using KINECT, Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, pp.3366-3371, 2012
 33. Simon Thompson, Satoshi Kagami, Masafumi Okajima, An Autonomous Mobile

- Inspection Robot for an Electric Power Sub-station, Proceedings of 10th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, pp. 300-306, 2013
34. Satoshi Kagami, Simon Thompson, Ippei Samejima, Tsuyoshi Hamada, Shimpei Kato, Naotaka Hatao, Yuma Nihei, Takuro Egawa, Kazuya Takeda, Hiroshi Takemura, Hiroshi Mizoguchi, Autonomous Vehicle Navigation by Building 3D Map and by Detecting Human Trajectory using LIDAR, Proceedings of the 1st IEEE International Conference on Cyber-Physical Systems, Networks, and Applications, 2013
 35. Simon Thompson, Satoshi Kagami, Evaluating 3D Polygon Maps for Mobile Robot Localisation, Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 2013
 36. Naruyuki Hisatsuka, Ippei Samejima, Satoshi Kagami, Makiko Kouchi, Hiroshi Takemura, A Hand Grasped Object Segmentation Method using Kinect Sensor and Body Dimension Database, Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 2013
 37. Takuro Egawa, Ippei Samejima, Yuma Nihei, Satoshi Kagami, Hiroshi Mizoguchi, A Tabletop Objects Observation Method from Mobile Robot using Kinect Sensor, Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 2013
 38. Yoko Sasaki, Naotaka Hatao, Kazuyoshi Yoshii, Satoshi Kagami, Nested iGMM Recognition and Multiple Hypothesis Tracking of Moving Sound Sources for Mobile Robot Audition, Proceedings of 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 3930-3936, 2013
 39. Naotaka Hatao, Satoshi Kagami, Cluster-Based SJPDAFs for Classification and Tracking of Multiple Moving Objects, Proceedings of The 9th Conference on Field and Service Robotics, 2013
 40. Ippei Samejima, Yuma Nihei, Naotaka Hatao, Satoshi Kagami, Hiroshi Mizoguchi, Hiroshi Takemura, Akihiro Osaki, Building Environmental Maps of Human Activity for a Mobile Service Robot at the "Mirailan" Museum, Proceedings of The 9th Conference on Field and Service Robotics, 2013

(5)その他の著作物(総説、書籍など)

1. 西脇 光一, 6 編 1 章 二足歩行, ロボットテクノロジー, pp. 230-233, オーム社, ISBN:978-4274210723, 2011. 8. 30
2. Mario Tokoro (Ed.), Open Systems Dependability: Dependability Engineering for Ever-Changing Systems (6 章を主に担当), CRC Press, ISBN:978-1466577510, 2012
3. 加賀美 聡, ロボットシステム開発のための実時間 OS "ART-Linux", 日本ロボット学会誌, Vol. 31, No. 3, pp. 8-11, 2013

(6)国際学会発表及び主要な国内学会発表

① 招待講演 (国内会議 13件、国際会議 7件)

(国内)

1. 加賀美 聡(産総研), 実時間ディペンダブル OS カーネル ART-Linux とそのロボット応用, 産学官ビジネスフェア 2009 「未来を見据えて取り組む先端材料・RT(ロボットテクノロジー)アドバンスセミナー, 東京ビッグサイト, 2009. 11. 26
2. 加賀美 聡(産総研), QoL 用サービスロボット事例と今後の研究課題, 神奈川県

産業競争力強化戦略推進事業(エレクトロニクス有望技術実用化促進)「QoL(リハビリ・介護)用ロボット」研究成果発表会, かながわ県民センター, 2010. 1. 19

3. 加賀美 聡, デザインとインタラクションのためのデジタルヒューマン技術, JST ERATO 五十嵐デザインインタフェースプロジェクト第 1 回公開シンポジウム「デザインのためのインタフェース」, 東京都江東区(日本科学未来館), 2011. 7. 23
4. 加賀美 聡, CPS の観点からのロボット分野の動向, 第 13 回組込みシステム技術に関するサマーワークショップ, 下呂温泉, 2011. 9. 2
5. 加賀美 聡, センサ情報に基づく自律走行ロボットの現状と実用化に向けて, 放射線セミナー, 放射線科学センター, 2012. 4. 18
6. 西脇 光一, 人型ロボットの自律移動実現研究とモーションキャプチャシステムの活用, MAC3D ユーザーミーティング 2012, (株)ナックイメージテクノロジー本社, 2012. 11. 21
7. 加賀美 聡, 3次元地図作成と 6 自由度位置認識を用いた自律走行, 日本ロボット学会カーボティクス研究専門委員会, 自動車技術会本部, 2012. 12. 10
8. 加賀美 聡, D-Case を使ったロボットのディペンダビリティの保証, 第 3 階 D-Case 実証評価研究会, 慶応大学日吉キャンパス, 2013. 4. 19
9. 加賀美 聡, レーザー距離センサからの三次元地図・人流地図・音源地図作成, 測位勉強会ワークショップ, つくばサイエンス・インフォメーションセンター, 2013. 8. 27
10. 加賀美 聡, 人環境で行動するロボットの実時間実世界処理, CEATEC JAPAN 2013, 幕張メッセ, 2013. 10. 2
11. 加賀美 聡, 人と環境の理解に基づくロボットの自律知能, 第 16 回情報論的学習理論ワークショップ, 東京工業大学, 2013. 11. 13
12. 加賀美 聡, D-Case の移動ロボット適用事例紹介, Embedded Technology 2013/組込み総合技術展, パシフィコ横浜, 2013. 11. 22
13. 加賀美 聡, ロボットのリアルタイムシステム自律移動機能と音環境理解, 第 38 回人工知能学会 AI チャレンジ研究会, 早稲田大学, 2013. 12. 6

〈国際〉

1. Satoshi Kagami, Simon Thompson, Michel Philipp, Takahiro Nakada, Koichi Nishiwaki, Joel Chestnutt, James Kuffner, Localization, Mapping, Object Finding & Tracking for Humanoid HRP2-12, Workshop in Humanoid Autonomy at 8th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, Daejeon, Korea, 2008. 12. 12
2. Shuji Kajita, Development of cybernetic Human HRP-4C -- struggle to realize human walking, Dynamic Walking 2010, Boston, USA, 2010. 7. 11
3. Satoshi Kagami, Mobile Manipulation: Integrating Perception and Manipulation, 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Shanghai, China, 2011. 5. 13
4. Koichi Nishiwaki, Autonomous Navigation of a Humanoid Robot on Unknown Rough Terrain, 15th International Symposium on Robotics Research, Flagstaff, USA, 2011. 8. 30
5. Koichi Nishiwaki, Autonomous Navigation on HRP-2, 2012 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, Business Innovation Center Osaka, 2012. 12. 10
6. Koichi Nishiwaki, Autonomous Navigation of a Full-size Humanoid over Unknown Rough Terrains, 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation Workshop, Karlsruhe, Germany, 2013. 5. 6
7. Satoshi Kagami, Youichi Ishiwata, Koichi Nishiwaki, ART-Linux for

High-Frequency System Control, The 1st IEEE International Conference on Cyber-Physical Systems, Networks, and Applications, 2013.8.20

② 口頭発表 (国内会議 21件、国際会議 2件)
(国内)

1. 尹 祐根, 清水 昌幸, ARTLinux2.6によるPA-10高速制御, 第26回日本ロボット学会学術講演会, 神戸, 2008.9.11
2. 加賀美 聡, 佐々木 洋子, Simon Thompson, 溝口 博, 榎本 格士, 移動ロボットに搭載した低サイドローブマイクアレイによる二次元音源地図作成, 第28回人工知能学会AIチャレンジ研究会(SIG-Challenge), 京都大学, 2008.11.18
3. 尹 祐根, 山野辺 夏樹, 音田 弘, ARTLinux2.6によるHaptic Inteface高速制御, 第51回自動制御連合講演会, 山形, 2008.11.22
4. 西脇 光一, 加賀美 聡, ヒューマノイド歩行における将来の運動学的制約を考慮した腰高さ軌道のオンライン設計, 第28回日本ロボット学会学術講演会, 名古屋工業大学, 2010.9.22
5. 尹 祐根, 加賀美 聡, 石綿 陽一, 上肢に障害のある人の生活を支援するロボットアームRAPUDAの実時間制御, 第28回日本ロボット学会学術講演会, 名古屋工業大学, 2010.9.22
6. 浦田 順一, 西脇 光一, 中西 雄飛, 岡田 慧, 加賀美 聡, 稲葉 雅幸, 最適予見レギュレータの入力重み0とした極限を用いた二足歩行におけるオンライン着地位置・時刻最適化の実現, 第29回日本ロボット学会学術講演会, 東京都, 芝浦工業大学, 2011.9.7
7. 西脇 光一, 加賀美 聡, 将来にわたるZMP許容領域を考慮した歩行軌道生成法, 第29回日本ロボット学会学術講演会, 東京都, 芝浦工業大学, 2011.9.7
8. 畑尾 直孝, 加賀美 聡, 花井 亮, 山崎 公俊, 稲葉 雅幸, パーソナルモビリティによる動的屋外環境セマンティックマップの獲得と応用, 第29回日本ロボット学会学術講演会, 東京都, 芝浦工業大学, 2011.9.9
9. 吉崎 航, 加賀美 聡, ヒューマノイドのための統合操縦ソフト“V-Sido”, 第12回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 京都府, 京都大学, 2011.12.23
10. 加賀美 聡, 石綿 陽一, 西脇 光一, 梶田 秀司, 金広 文男, 尹 祐根, 安藤 慶昭, 佐々木 洋子, Simon THOMPSON, 松井 俊浩, ART-Linuxの複数コア利用機能によるソフトウェアディペンダビリティ向上, 第12回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 京都府, 京都大学, 2011.12.23
11. 仁瓶 雄真, 鮫島 一平, 畑尾 直孝, 竹村 裕, 加賀美 聡, LRFとKinectを統合した人の体幹軌跡および着座・立位情報の地図化手法, 日本ロボット学会第30回記念学術講演会, 札幌コンベンションセンター, 2012.9.18
12. 鮫島 一平, 加賀美 聡, 河内 まき子, 溝口 博, Kinectを用いた二方向からの人体寸法推定, 日本ロボット学会第30回記念学術講演会, 札幌コンベンションセンター, 2012.9.19
13. 清水 昌幸, 石綿 陽一, 尹 祐根, 加賀美 聡, AMP版ART-Linuxの共有メモリを用いたRTコンポーネント間のデータ通信の実現, 第13回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 福岡国際会議場, 2012.12.19
14. 畑尾 直孝, 加賀美 聡, リサージュ走査型3D LRFを用いた歩行者の追跡と形状復元, 第13回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 福岡国際会議場, 2012.12.19
15. 坪田 英史, 加賀美 聡, 溝口 博, RGB-D画像からの部分モデルを用いた隠れに頑健な物体認識手法, 第13回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 福岡国際会議場, 2012.12.20
16. 豊吉 政彦, 山崎 俊太郎, 加賀美 聡, 小笠原 司, RGB-D画像からの Random

Hough Forests による物体認識, 第 31 回日本ロボット学会学術講演会, 首都大学東京, 2013. 9. 4

17. 畑尾 直孝, 鮫島 一平, 加賀美 聡, LRF を用いた複数移動体の隠れと接近に頑健な追跡手法, 第 31 回日本ロボット学会学術講演会, 首都大学東京, 2013. 9. 4
18. 鮫島 一平, 加賀美 聡, 畑尾 直孝, 多層型レーザースキャナによる人追跡にもとづく身長推定, 第 31 回日本ロボット学会学術講演会, 首都大学東京, 2013. 9. 6
19. 江川 拓良, 鮫島 一平, 仁瓶 雄真, Simon Thompson, 畑尾 直孝, 梶澤 光隆, 加賀美 聡, 竹村 裕, 溝口 博, 3 次元 LIDAR を用いた 2 次元環境地図の作成手法とそれを利用したナビゲーション, 第 14 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 神戸国際会議場, 2013. 12. 18
20. 豊吉 政彦, 山崎 俊太郎, 加賀美 聡, 小笠原 司, 学習に異なる RGB-D センサを用いた際の RHF 手法の性能評価, 第 14 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 神戸国際会議場, 2013. 12. 19
21. 清水 昌幸, 石綿 陽一, 尹 祐根, 加賀美 聡, ART-Linux を用いた PC 間データ通信の実時間化の検討, 第 14 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 神戸国際会議場, 2013. 12. 20

〈国際〉

1. Koichi Nishiwaki, Satoshi Kagami, Inertial Measurement System for Biped Robots that takes Scheduled Centrifugal Effect into Consideration, Proceedings of The 9th Annual IEEE Conference on Sensors, Waikoloa, Hawaii, November 2, 2010
2. Koichi Nishiwaki, Joel Chestnutt, Satoshi Kagami, Planning and Control of a Humanoid Robot for Navigation on Uneven Multi-scale Terrain, 12th International Symposium on Experimental Robotics 2010, New Delhi, India, December 19, 2010

③ ポスター発表 (国内会議 20件、国際会議 0件)

1. 金広 文男, 石綿 陽一, 梶田 秀司, 加賀美 聡, ART-Linux 用タスクスイッチ履歴可視化ツールの開発, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2010, 旭川大雪アリーナ, 2010. 6. 16
2. 坪田 英史, 加賀美 聡, 溝口 博, 6 次元姿勢推定に用いる SIFT-Cloud-Model の自動生成システムの開発及びモデルの評価, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2011, 岡山県岡山コンベンションセンター, 2011. 5. 27
3. 西脇 光一, 加賀美 聡, 推定した絶対速度情報を用いるヒューマノイドの短周期歩行軌道生成, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2011, 岡山県岡山コンベンションセンター, 2011. 5. 28
4. 鮫島 一平, 濱田 薫, 福島 安秀, 加賀美 聡, 溝口 博, 人環境情報地図の生成とそれを用いた移動ロボットナビゲーション, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2011, 岡山県岡山コンベンションセンター, 2011. 5. 28
5. 久保田 崇, 牧 桂太郎, 吉崎 航, 加賀美 聡, 溝口 博, パラメトリックスピーカーを用いた対人伝達システムの研究, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2011, 岡山県岡山コンベンションセンター, 2011. 5. 28
6. 本山 裕之, 加賀美 聡, 拡張現実感による移動ロボットナビゲーションの操作支援法の研究, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2011, 岡山県岡山コンベンションセンター, 2011. 5. 28
7. 吉崎 航, 加賀美 聡, Kinect を用いた人型ロボットの全身制御, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2011, 岡山県岡山コンベンションセンター, 2011. 5. 28

8. 栢澤 光隆, サイモン トンプソン, 加賀美 聡, 岡嶋 雅史, 倒立二輪ロボットのための台形リンク式能動脚の開発, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012, アクトシティ浜松, 2012. 5. 28
9. 清水 昌幸, 石綿 陽一, 尹 祐根, 加賀美 聡, AMP 対応 ART-Linux と RT ミドルウェアを用いたロボット制御系の構築と実時間性能の検討, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012, アクトシティ浜松, 2012. 5. 28
10. 畑尾 直孝, 時田 陽一, 加賀美 聡, クラスタベース SJPDAFs を用いた移動物体追跡・識別手法, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012, アクトシティ浜松, 2012. 5. 29
11. 土屋 孝介, 大庭 亮, 吉崎 航, 加賀美 聡, 溝口 博, OpenRAVE を用いた物体の重心を考慮した事前計算に基づく把持計画, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012, アクトシティ浜松, 2012. 5. 29
12. 仁瓶 雄真, 鮫島 一平, 畑尾 直孝, 竹村 裕, 加賀美 聡, LRF と Kinect を用いた人の軌跡、着座、立位位置の地図情報統合, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012, アクトシティ浜松, 2012. 5. 29
13. 牧 桂太郎, 鮫島 一平, 加賀美 聡, 河内 まき子, 溝口 博, 距離画像センサを用いた形状データによる個人特徴量推定, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012, アクトシティ浜松, 2012. 5. 29
14. 吉崎 航, 杉浦 裕太, Albert C. Chiou, 橋本 直, 稲見 昌彦, 五十嵐 健夫, 赤澤 由章, 川地 克明, 加賀美 聡 持丸 正明, キャラクタ姿勢入力のための双方向インターフェイス, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012, アクトシティ浜松, 2012. 5. 29
15. Simon Thompson, Satoshi Kagami, Makoto Oshio, Kenniti Hamamoto, Constrained 6DOF Localisation for Autonomous Navigation of a GolfCart, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013, つくば国際会議場, 2013. 5. 23
16. 清水 昌幸, 石綿 陽一, 尹 祐根, 加賀美 聡, ART-Linux における RT コンポーネント間の同期方法の検討, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013, つくば国際会議場, 2013. 5. 23
17. 久塚 愛之, 鮫島 一平, 竹村 裕, 河内 まき子, 加賀美 聡, Kinect と人体寸法データを用いた人の把持物体の情報取得, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013, つくば国際会議場, 2013. 5. 23
18. 江川 拓良, 鮫島 一平, 仁瓶 雄真, 加賀美 聡, 溝口 博, 3 次元視覚と環境地図を用いた移動ロボットの机上物体観測システムの構築, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013, つくば国際会議場, 2013. 5. 23
19. 豊吉 政彦, 加賀美 聡, 小笠原 司, 山崎 俊太郎, Random Forest を用いた RGB-D 画像からの物体識別, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013, つくば国際会議場, 2013. 5. 24
20. 坪田 英史, 加賀美 聡, 溝口 博, RGB-D 特徴を用いた Part-based Model による隠れに頑健な物体認識手法, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013, つくば国際会議場, 2013. 5. 24

(7)受賞・報道等

① 受賞

1. 石綿 陽一, 計測自動制御学会 SI 部門賞 技術業績賞, ART-Linux の開発, 社団法人計測自動制御学会システムインテグレーション部門, 2008. 12. 6
2. 加賀美 聡, ベストプレゼンテーション表彰, 移動ロボットの速度と安全性を両立する経路探索のための地図情報に関する研究, 社団法人日本機械学会ロボティクスメカトロニクス部門, 2010. 6. 15
3. 吉崎 航, 加賀美 聡, SI2011 優秀講演, ヒューマノイドロボットのための統合

操縦ソフト“V-SIdo”，2011.12.25

4. 畑尾 直孝, 加賀美 聡, SI2012 優秀講演, リサジュー走査型 3D LRF を用いた歩行者の追跡と形状復元, 2012.12.20
 5. 佐々木 洋子, 日本機械学会奨励賞, モバイルオーディションによる空間的音理解のための移動ロボット聴覚の研究, 2013.4.19
 6. 畑尾 直孝, 若手奨励賞, リサジュー走査型 3D LRF を用いた歩行者の追跡と形状復元, 2013.12.18
 7. 鮫島 一平, 若手奨励賞, 日本科学未来館におけるサービスロボットののための人環境情報地図の構築, 2013.12.18
 8. 江川 拓良, 鮫島 一平, 仁瓶 雄真, Simon Thompson, 畑尾 直孝, 梶澤 光隆, 加賀美 聡, 竹村 裕, 溝口 博, SI2013 優秀講演賞, 3次元 LIDAR を用いた 2次元環境地図の作成手法とそれを利用したナビゲーション, 2013.12.20
 9. 畑尾 直孝, 鮫島 一平, 加賀美 聡, 優秀論文賞, 角度ベース複数仮説を用いた LRF による複数種類・複数個の移動体追跡手法, 2014.3.13
- ② マスコミ (新聞・TV等) 報道
1. 「人間に近い外観と動作機能を備えたロボットの開発に成功—エンターテインメント分野への応用を期待—」, 産総研知能システム研究部門, 産総研プレスリリース, 2009.3.16
 2. 「人型ロボ、動作正確に 産総研など、制御 OS 改良 無償で公開」, 日経産業新聞 10 面, 2009.3.19
 3. 「ロボット、日本はなぜ人型 2 足歩行の壁、超えて飛躍」, 日本経済新聞 10 面, 2009.4.26
 4. 「日本科学未来館で実施中の「ロボット OS プロジェクトツアー」同行レポート～普段は入れない研究室でロボットと研究者に会える人気研究棟ツアー」, Robot Watch, 2009.5.12
 5. 「2009 産学官ビジネスフェア 出展企業・紙上プレビュー」, 日刊工業新聞 26 面, 2009.11.10
 6. 「森山和道の「ヒトと機械の境界線」自己表現のためのインターフェイスデザインとは～五十嵐デザインインタフェースプロジェクト公開シンポジウム」, PC Watch, 2011.7.27
 7. 「産総研、リナックスに実時間拡張した OS 開発—複数コア使用で高機能化」, 朝日新聞 (Web), 2013.3.8
 8. 「産総研、リナックスに実時間拡張—「ART-Linux」開発、複数コア使用」, 日刊工業新聞 (Web), 2013.3.8
 9. 「リナックスに実時間拡張 産総研が OS 開発」, 日刊工業新聞 20 面, 2013.3.8
 10. 「産総研が「ART-Linux」をマルチコア対応に、Linux で SMP と AMP を混在」, Tech-On! (Web), 2013.3.11
 11. 「産総研、高精度な実時間 OS「ART-Linux」を公開」, EDR, LLC (Web), 2013.3.12
 12. 「リアルタイム Linux を公開 産総研 安全性と汎用性共存 複数コアでアプリを稼働」, 日本情報産業新聞 1 面, 2013.3.18
 13. 「未来の車、すぐそこ 各社、実用化へ開発競争 交通システム世界会議始まる」, 朝日新聞デジタル (Web), 2013.10.16
 14. 「【ITS 東京 2013】一般ユーザーも参加できる「高度運転支援・自動運転デモ」を実施」, Impress Car Watch (Web), 2013.10.16
 15. 「自動で運転夢のような車」, 中日新聞 CHUNICHI Web (Web), 2013.11.3
 16. 「自動運転技術はここまで来た—ITS 世界会議の公道デモ体験レポート」, マイナビニュース (Web), 2013.11.6
- ③ その他
1. 開発した ART-Linux ソースコードを GNU Public License により Sourceforge

から公開。1年間のダウンロード回数は約3200回。国内外で100台を超えるロボットの基盤OSとして利用されている。

(8)成果展開事例

- ①実用化に向けての展開
- ②社会還元的な展開活動

§6 研究期間中の活動

(1) 主なワークショップ、シンポジウム、アウトリーチ等の活動

2008年10月 ～毎月第2・4 土曜日	日本科学未来館研究棟 ツアー	日本科学未 来館研究棟 308号室	計約1,500 名	約100回開催
2009年9月 26日	日本科学未来館ウラ Miraikan ツアー	日本科学未 来館研究 棟・産総研 DHRC	40名	
2010年9月 11日	日本科学未来館ウラ Miraikan ツアー	日本科学未 来館研究 棟・産総研 DHRC	40名	
2011年2月 26日	日本科学未来館ウラ Miraikan ツアー	日本科学未 来館研究 棟・産総研 DHRC	40名	
2011年9月 10日	日本科学未来館ウラ Miraikan ツアー	日本科学未 来館研究 棟・産総研 DHRC	40名	
2011年11月 16～18日	組込み総合技術展 (ET2011)	パシフィコ 横浜		DEOSブースに出展
2012年2月 25日	日本科学未来館ウラ Miraikan ツアー	日本科学未 来館研究 棟・産総研 DHRC	40名	
2012年10月 25～26日	産総研オープンラボ	産総研つく ばセンター	200名	
2012年11月 14～16日	組込み総合技術展 (ET2012)	パシフィコ 横浜		DEOSブースに出展
2013年3月 8日	デジタルヒューマン・シ ンポジウム2013	日本科学未 来館みらい CANホール	315名	CRESTの成果発表会
2013年5月 8～10日	第22回ソフトウェア開発 環境展	東京ビッグ サイト		DEOSブースに出展
2013年11月 20～22日	組込み総合技術展 (ET2013)	パシフィコ 横浜		DEOSブースに出展予定

§ 7 最後に

研究計画時に目的としていた、実時間システムが複数 CPU コアを利用する際に、システム全体のディペンダビリティを向上させることを目的として、非実時間 SMP と実時間 AMP の組み合わせることの可能な OS の開発については、H25.3 に公開し、ユーザーのダウンロードが 2,400 を超え、さまざまなシステムやロボットで利用されていることから、所定の目的を達成したといえる。

また当初は計画に無かった割り込み即応機能を H22 年次に取り組み、年度内にこの分野において最高レベルの割り込み即応性能を達成できたことも、自己評価している。

本 CREST 全体として領域総括の所先生のリーダーシップのもとで、DEOS プロセスの D-RE の部分を担当し、ロボットへの実証研究を通じてその有効性を示せたことは、ロボットの分野にとっても今後同技術が重要になるという確信を得た。