

平成23年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「直感的操作性と機能拡張性を有するロボット用組込みソフトウェアの開発」

研究開発成果等報告書

平成24年3月

委託者 関東経済産業局
委託先 財団法人理工学振興会

目 次

1. 研究開発の概要	1
1-1. 研究開発の背景・研究目的および目標	1
1-1-1. 研究開発の背景	1
1-1-2. 研究の目的および目標	5
1-2. 研究体制	8
1-2-1. 研究組織	8
1-2-2. 管理体制	8
1-2-3. 研究者氏名	9
1-2-4. 協力者	9
1-3. 成果概要	10
1-4. 当該研究開発の連絡窓口	10
2. 研究内容および成果	11
2-1. Web アプリケーションの開発	11
2-1-1. GUI の開発	12
2-1-2. クライアント（ユーザー）側各種サービスの開発	13
2-1-3. サーバ側各種サービスの開発	14
2-1-4. クラウドコンピューティング用各種サービスの開発	15
2-1-5. RT ミドルウェアとの親和的なインターフェイスの開発	15
2-2. 制御基板等の Web アプリケーションへの対応化	16
2-2-1. マイコン制御システムの開発	16
2-2-2. PC 制御システムの開発	17
2-3. 製造業者による Web アプリケーションとハードウェア基板の評価	18
2-3-1. ロボット装置の開発	18
2-3-2. 評価試験	19
2-4. サービス業者による開発品を搭載したロボットの信頼性と安全性評価	23
3. 全体総括	26
3-1. 研究開発成果	26
3-2. 事業化展開	27

1. 研究開発の概要

1-1. 研究開発の背景・研究目的および目標

1-1-1. 研究開発の背景

従来からのサービスロボットの高機能化に向けた制御用組込みソフトウェアの設計・開発プロセスには、高度な専門知識が必要であるため、その高度化・高機能化には膨大な開発時間とコストが掛かっていた。また必要とされる知識の専門性故にソフトウェア開発専属のエンジニアが担当せざるを得ず、ハードウェア系までを含んだシステム全体を見通した総合的立場でのソフトウェア開発が難しく、システム全体としての信頼性や安全性に支障が出やすかった。そのため、直感的操作性と機能拡張性を有するロボット制御用組込みソフトウェアとその開発基盤の開発が望まれていた。以下に当該分野における研究開発動向を述べ本研究開発の意義を明確化する。

(1) 次世代ロボット産業創出に向けた国内での研究開発状況

これまで、非産業用の次世代ロボット、いわゆるサービスロボットの市場を創出し拡大させるためのプロジェクトがいくつか行われている。たとえば、経済産業省とNEDOの「戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクト(2006-2010)」や、生活空間においてロボストで自律的な稼働をするロボット開発とそのための再利用可能な知能化モジュール（ソフトウェア）開発を行う「次世代ロボット知能化技術開発プロジェクト（2007-2011）」、そしてRT要素デバイス開発や活用事例の創出を目指した「基盤ロボット技術活用型オープンイノベーション促進プロジェクト（2008-2011）」などである。また、ロボット要素部品の接続の共通化を目指したRTM（ロボット・テクノロジー・ミドルウェア）プロジェクトでは、OMG（ソフトウェア技術の国際標準化団体）から2007年12月に標準仕様（OpenRTM-aist）となった高性能なロボット制御用組込みソフトウェアを開発している。なお、このミドルウェア開発については、ロボット以外では自動車業界でAUTOSARやJASPAR、また携帯電話業界ではSH-Mobileなどが規格化されている。

(2) 世界標準のロボットソフトウェアプラットフォームによる国際競争力の強化

上述したRTミドルウェアでは、単体のロボットだけでなく、さまざまなロボット技術に基づく機能要素(センサ、アクチュエータ、制御スキーム、アルゴリズム等)をも含む、人々の間で共有される機器を統合する共通ソフトウェアモデルとして、オープンな仕様を提供

する目的で開発が進められ、現在でも下記の開発が推進されている。

(ア) RTミドルウェアを基盤としたロボットソフトウェア開発のための統合プラットフォーム開発

(イ) TOPPERSによる組込み機器への展開 (リアルタイムOS対応)

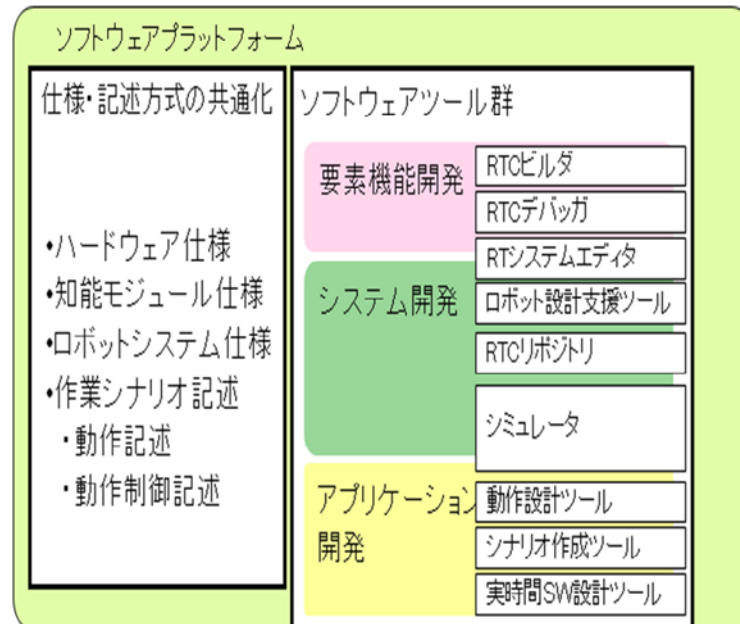


図1-1-1 RTミドルウェアを基盤としたロボットソフトウェア開発のための統合プラットフォーム

[安藤慶昭, “RTミドルウェア –TOPPERSによる組込み機器への展開–”, 情報処理学会連続セミナー2009, pp. 39]

表 1－1－1 世界のロボットソフトウェアプラットフォームの比較表

	<u>RT</u> <u>Middleware</u>	<u>ROS</u>	<u>OROCOS</u>	<u>iRobot</u> <u>AWARE 2.0</u>	<u>Evolution</u> <u>Robotics ERSP</u> <u>3.1</u>	<u>Microsoft</u> <u>Robotics Studio</u> <u>1.5</u>
<u>Open Source</u>	○/△	○	○	×	×	×
<u>Free of Charge</u>	○/△	○	○	×	×	Edu/hb y
<u>Windows</u>	○	○	△	○	○	○
<u>Linux</u>	○	○	○	○	○	×
<u>Fault-Tolerance</u>	△	×	×	○	×	×
<u>Robotic Arm Control</u>	○	○	○	○	×	×
<u>Object Recognition</u>	○	○	×	×	○	×
<u>Localization System</u>	○	○	×	△	○	×
<u>Real-Time</u>	△	△	○	△	×	×

そしてRTミドルウェアはサービスロボットの実運用に不可欠な安全機能も考慮され、研究用だけでなく実用ロボット用としても十分安心して利用可能なように開発が進められている。そのため、世界的に数多く開発されている他のロボットソフトウェアプラットフォーム（表 1 にはその一部のみを示す）に対してもその優位性は高い。

また、RTミドルウェアは、表 1－1－1 に示すように高度な知能や機能性（例えば、アームの制御、物体認識、位置同定等）を再利用できるソフトウェアモジュールとして提供しているため、高機能な知能ロボットへの展開を行いやすい。また、たとえばモータ制御部やカメラ入力部等のハードウェア部の入出力を制御するソフトウェアは、RTコンポーネントとすることで、ロボットの動作プログラムを比較的短期間で構築できる、と謳われている。

（3）川下中小企業ロボット製造メーカーも簡単に使える開発ツールの開発が求められている

RTミドルウェア開発環境の例
(高度なツールであるが、インストールの手間と時間、学習時間がかかる)



RTCBuilder
RTコンポーネント設計・
コード生成



RTSystemEditor
RTCを組み合わせでシス
テムを設計



番号	ライブラリ名	ファイル名	説明
①	ACE	ACE-5.6_vc9.msi	複数のOSで共通のソケット通信用クラスを提供するライブラリ
②	Python	python-2.4.2.msi	オブジェクト指向スクリプト言語のひとつ
③	PyYAML	PyYAML-3.05.win32-py2.4.exe	PythonでYAMLを利用するためのライブラリ
④	omniORB	omniORB4.1.2_vc9.msi	CORBA準拠のソフトウェア/ライブラリ群
⑤	OpenCV	OpenCV_1.0.exe	フリーの画像処理ライブラリ
⑤	OpenRTM-aist	OpenRTM-aist-0.4.2-jp_vc9.msi	RTミドルウェア本体
⑥	Visual C++ 2008 Express Edition	vcsetup.exe	マイクロソフト製のC++開発環境 無料
⑦	JDK6		Javaの実行環境+コンパイラなどの開発ツール
⑧	Eclipse (Windows用全部入り)	openrtm_tools_042.zip	RTC用コードの自動生成やシステム全体の管理・構築に必要

図2 RTミドルウェア開発環境でインストールするもの

Think IT連載記事 ロボット開発にフル活用するRTミドルウェア
第1回:RTミドルウェアを用いたロボットシステム開発
著者: 早稲田大学 菅 佑樹 公開日: 2009/06/02

図1-1-2 RTミドルウェアによるソフトウェア開発方法

しかし、RTミドルウェアを十分に使いこなすには、開発言語（C++、Python、Java、C#など）、分散オブジェクト技術（IDL等）の基本概念、OSや開発環境のインストールや設定、プログラミング、デバッグ等のソフトウェア開発に関する多くの知識が前提として必要である。また、例えば図1-1-2に示すようなライブラリやツールをインストールすることも必要であり、この手間や時間だけでも、一般のユーザーにとっては大変な手間と感じられる。そのため、普通の機械技術者にとって最新のRTミドルウェア技術は近寄り難く感じられ、結果的に高付加価値を生み出す最新のRTミドルウェア技術は、ロボット開発にはあまり活用されていない状況が続いている。

日本は世界に誇るロボット大国であると広く認識されているが、それは主としてロボットハードウェアの分野であり、ソフトウェア分野の整備を進めないと、将来的にはIT教育を集中的に受けている諸外国の技術者（プログラマー）が、不可価値の高いソフトウェア部分（アプリケーション）を独占してしまい、ロボット大国としての日本の地位も確保できなくなることが懸念される。

1-1-2. 研究の目的および目標

(1) 研究開発の高度化目標

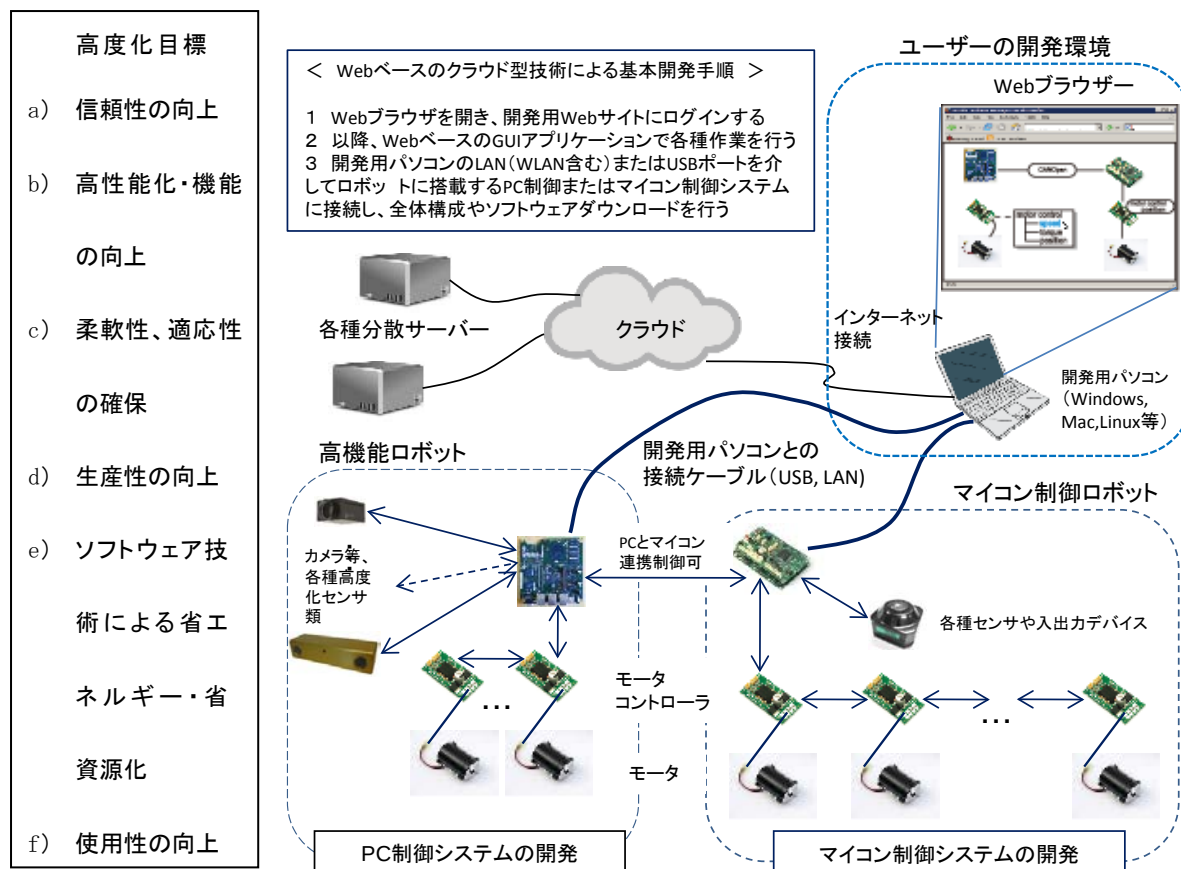


図 1-1-3 提案するソフトウェア開発方法と高度化目標

本計画では、サービスロボットを構成する駆動制御センサ系の各要素、そして各機能を実現する組込みソフトウェアの実装手法や支援ツールについて、その取り扱い性の向上を最大限配慮しながら、a) 信頼性の向上、b) 高性能化・機能の向上、そして、c) 柔軟性、適応性の確保、の各項目の高度化を図る。

具体的には、RTミドルウェアによるとサービスロボット開発者はハードウェア依存部の組込みソフトウェアの開発から解放され、付加価値の高い上位アプリケーションソフトウェアの開発に専念でき、製品全体の高性能化・機能の向上、また柔軟性、適応性の確保ができるが、依然としてそのミドルウェア自体の開発ツールや規格の学習に膨大な時間が必要であるため、新規にWebベースのソフトウェア実装手法や支援ツールを提供することに

よって使用性を格段に向上させ、同時にRTミドルウェアとの親和的インターフェイスも導入して、RTミドルウェア特有の高性能性、柔軟性、適応性を確保できるロボット組込みソフトウェアとその開発基盤を導入する。なお、別項目ではあるが高度化目標として、「技術指針」の（一）組込ソフトウェアに係る技術の、（５）川下分野横断的な共通基盤に係る項目にも対応し、生産性の向上、ソフトウェア技術による省エネルギー・省資源化、についての高度化も図る。

（２）研究開発の実施段階と技術目標値

本計画は、下記の研究開発項目（サブテーマ）に分割して実施する。各高度化指標に対して、目標を達成するために必要なサブテーマは表１－１－２の最右列に示す。表１－１－２では、従来手法、現在のRTミドルウェア開発手法、そして新たに提案する手法について、それらの優劣を予測できる範囲で定量的に比較している。なおこの定量的な比較は、ソフトウェア品質特性(ISO/IEC9126)、またNEM (Novice Expert ratio Method) に基づいた所要時間の測定で行う予定である。なお、表１－１－２で生産性の向上を５倍としたのは、RTミドルウェアに関する講習会や実習時間を考慮した従来の開発期間に対する、本システムの開発期間の短さを考慮して誘導した値である。高性能化・機能の向上や柔軟性、適応性の確保に関しても、機械系技術者がRTミドルウェアを使いこなそうとするのに比較すると、本提案のような直感的操作性のあるソフトウェアで作業した方が格段に性能は向上すると考えられるが、基本機能はRTミドルウェアのものを活用するので、ここでは同等として評価している。省エネルギー・省資源化に関しては、定量評価が難しいため目標値を挙げていない。

１． Web アプリケーションの開発

１－１ GUIの開発

１－２ クライアント（ユーザー）側各種サービスの開発

１－３ サーバ側各種サービスの開発

1-4 クラウドコンピューティング用各種サービスの開発

1-5 RT ミドルウェアとの親和的なインターフェースの開発

2. 制御基板等の Web アプリケーションへの対応化

2-1 マイコン制御システムの開発

2-2 PC 制御システムの開発

3. 製造業者による Web アプリケーションとハードウェア基板の評価 >

3-1 ロボット装置の開発

3-2 評価試験

4. サービス業者による開発品を搭載したロボットの信頼性と安全性評価

4-1 サービス提供者による信頼性と安全性の最終評価試験

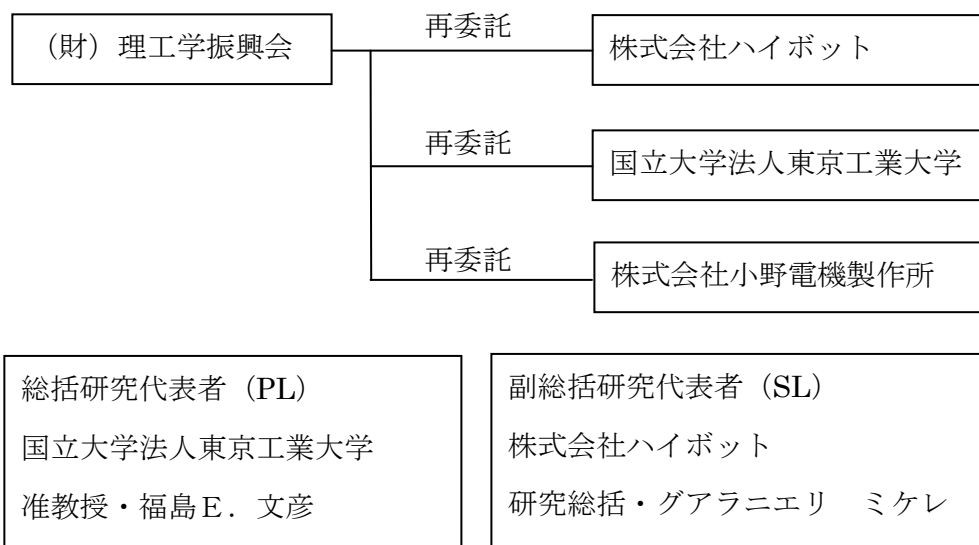
表 1-1-2 : ソフトウェア実装手法や支援ツールの比較表

(× : 悪い、△ : 普通、○ : 良、◎ : 優)

手法 高度化指標	従来 手法	RT ミドル ウェア	提案する手法 (RT ミドルウ ェアとの比較)	関連する サブテーマ
使用性の向上	×	△	◎ (2 倍)	1-1、2-1 2-2、3
信頼性の向上	×	△	○ (2 倍)	1-4、2-1 2-2、4-1
高性能化・機能の向上	△	◎	◎ (同等)	1-5、2-1、 2-2
柔軟性、適応性の確保	△	◎	◎ (同等)	1-2、1-3 2-1、2-2
生産性の向上	×	△	◎ (5 倍)	1、2、3
ソフトウェア技術による 省エネルギー・省資源化	×	×	○	1、2、3、4

1－2 研究体制

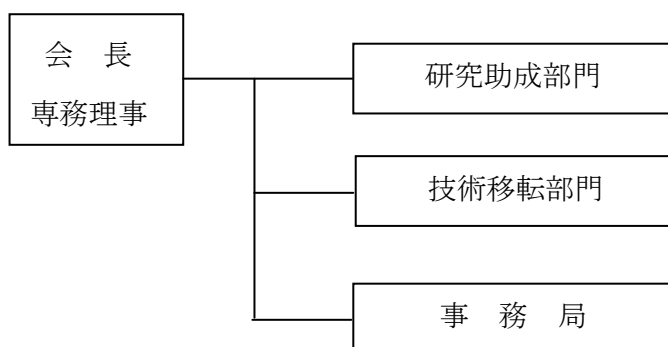
1－2－1．研究組織



1－2－2．管理体制

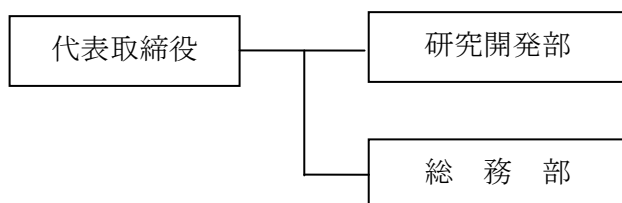
(1) 事業管理者

財団法人理工学振興会

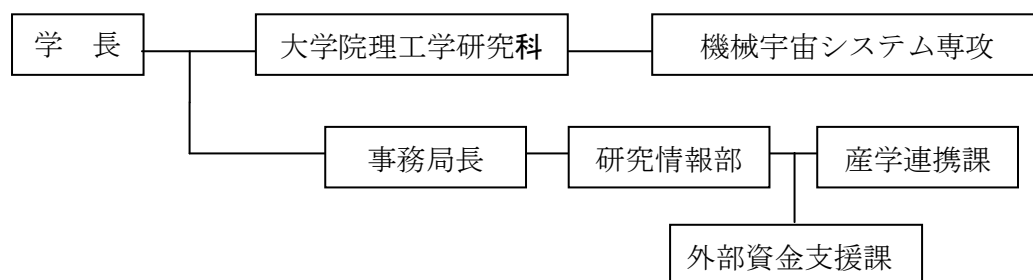


(2) 再委託先

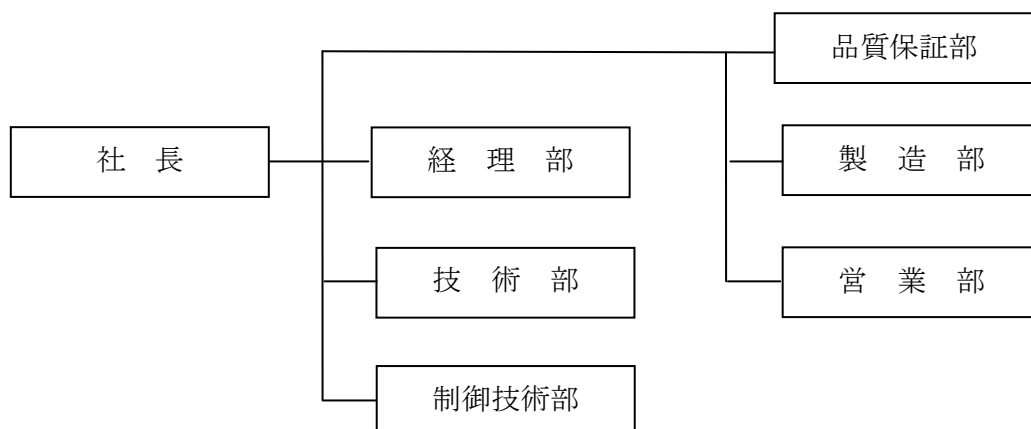
(ア) 株式会社ハイボット



(イ) 国立大学法人東京工業大学



(ウ) 株式会社小野電機製作所



1-2-3. 研究者

氏名	所属・役職	注
福島 E. 文彦	東京工業大学大学院理工学研究科准教授	プロジェクトリーダー
グアラニエリ ミケレ	ハイボット研究総括	サブリーダー
パウロ デベネスト	ハイボット代表取締役	
山中 一	ハイボット研究員	
広瀬 茂男	東京工業大学大学院理工学研究科教授	
玉田 守	東京工業大学大学院理工学研究科研究員	
岩崎 泰洋	小野電機製作所技術部課長	
吉村 由紀也	小野電機製作所制御技術部係長	

1-2-4. 協力者

氏名	所属・役職	注
横井 一仁	独立行政法人産業技術総合研究所 知能システム研究部門	アドバイザー
平井 成興	千葉工業大学 未来ロボット技術研究センター副所長	アドバイザー

1－3．成果概要

本研究開発では、クラウド上の各種分散サーバーと開発者 PC 用 Web アプリケーションや各種サービスの開発（開発項目 1）、通信制御駆動部の試作と Web アプリケーションへの対応化（開発項目 2）、評価用ロボットの構成と評価（開発項目 3）を行った。

開発項目 1 では GUI を駆使した Web アプリケーションを開発し、機械的構成要素の 3D 表示、ソフトウェア・アルゴリズム機能要素（アームの IK 制御、脚軌道やセンサ入力等）の「ドラッグ・アンド・ドロップ」方式による全体駆動制御系の構成が行えるようなインターフェースを実現した。特に、ユーザーが使うコンピュータの演算性能、OS、ウェブブラウザの種類による制限をできるだけ受けないようにするために、Web アプリケーションは仮想コンピュータ技術によってクラウド上のサーバーから実行する環境を構築した。

開発項目 2 では、実際のロボットに搭載される制御基板を試作し、サービスロボットの高性能化に適した通信インターフェース（IEEE1394、USB3.0、Ethernet や CAN）を介して Web アプリケーションからファームウェアのダウンロードや諸設定の変更を簡単に行える環境を構築して汎用性を高めた。これにより、ユーザーはマイコン等のファームウェア開発に伴うインストール、コンパイル、デバッグなどの作業からも解放させる方法を確認した。

開発項目 3 では、従来手法、RT ミドルウェア、本研究で開発した手法により、ロボット制御系を実際に構成させ、作業時間の比較によって本開発品の有効性を検証し、現場の機械設計技術者からも高く評価され、下表の通り最終的な高度化目標も達成したことを確認した。

高度化指標 \ 手法	従来	RTM	本開発の成果 RTM に対して(目標)
使用性の向上	×	△	◎ 12 倍 (2 倍)
信頼性の向上	×	△	◎ 3 倍 (2 倍)
高性能化・機能の向上	△	◎	◎ 同等(同等)
柔軟性、適応性の確保	△	◎	◎ 同等(同等)
生産性の向上	×	△	◎ 11 倍 (5 倍)

1－4．当該研究開発の連絡窓口

財団法人理工学振興会 事務局長 泉洋一郎

TEL : 045-921-4391 FAX : 045-921-4395

2. 研究内容および成果

2-1. Web アプリケーションの開発

本研究開発では、サービスロボットのソフトウェア開発が Web アプリケーションを介してすべて行えるような方法を検討した。具体的には、1) ユーザーはインターネットに接続されたコンピュータと、Web を閲覧できるブラウザ（以下、ウェブブラウザ）を介して Web アプリケーションをアクセスし、開発ソフトウェアのインストールや更新などは一切不要、2) ユーザーは同じく Web アプリケーション上でロボットに実現したい機能（アームの IK 制御、脚軌道やセンサ入力等）を選択してロボットを構成し、クラウドサーバからコンパイルされたオブジェクトファイル等が自動的に各マイコンや PC 制御システムにダウンロードできるように構成し、ユーザーはソフトウェア開発に伴うインストール、コンパイル、デバッグなどの作業から完全に解放可能な環境を開発した。

Web アプリケーションの動作環境の考察：当初は、Web アプリケーションを直接ウェブブラウザのスクリプト言語で実装することを考え、Java または .net で開発することを検討した。実際、ウェブブラウザにて高度な GUI を含めた Web アプリケーションを記述するには、基本的な HTML 言語以外に高度なインタラクションを伴うスクリプト言語が必須である。ところが、下表に示すように、Java と .net では特に最近シェアを大幅に拡大している携帯端末製品に対応していないため、これらのスクリプトに依存した開発成果は今後の製品展開を考えると戦略的に望ましくないと判断した。

ユーザーのコンピュータ演算性能、OS、ウェブブラウザの種類による制限を受けないために、今回は仮想コンピュータ技術を用いて本研究開発で前提にしている、サービスロボットのソフトウェア開発をすべて Web アプリケーションを介して行う環境を実現することにした。

表 2-1-1 各種ウェブブラウザの機能対応状況

ウェブ ブラウザ スクリプト 言語	 Internet Explorer	 Firefox (Mozilla)	 Opera	 Google Chrome	 Safari (OSX)	 Safari (iOS)
Flash	○	○	○	○	○	×
Java (applet)	○	○	○	○	△	×
Java (script)	○	○	○	○	○	×
ActiveX control (.net)	○	×	△	×	×	×

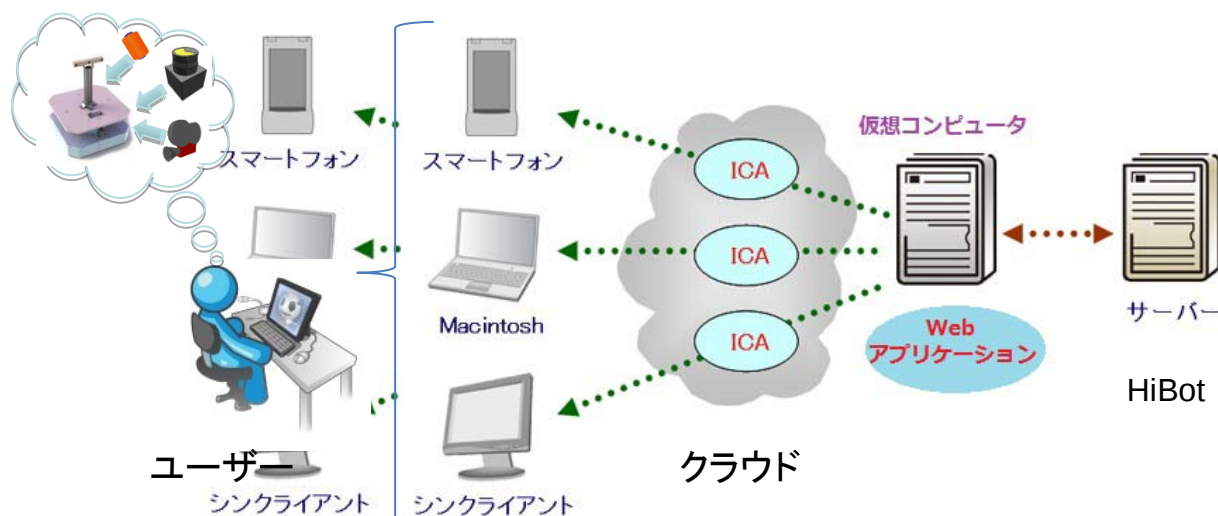


図 2-1-1 クラウドサーバと仮想コンピュータ接続例

具体的には、サーバ上に 1 ユーザーに対して 1 つの仮想コンピュータを構築し、この仮想コンピュータにあらかじめ Web アプリケーションをインストールした環境を用意する。仮想コンピュータは物理的なサーバ上で動作する。仮想コンピュータはユーザーの数だけ用意するが、能力に余裕があればサーバは 1 台のみでもよい。仮にユーザー数が増え負荷が増大した場合、サーバを物理的に増やして処理能力を増強することも可能である。なお、今回の実装では仮想コンピュータとユーザーの端末の通信にシトリックス社が開発した ICA (Independent Computing Architecture) プロトコルを適用した。このプロトコルは、画面、キーボード、マウス信号を高速にやりとりできるという特徴を有する。

仮想コンピュータ技術は大変有用な方法論であったが、ユーザーインターフェイスのさらなる高速化と、第三社に依存しないサービス提供を実現するために、今後の事業化展開段階で十分な資金調達が可能であれば、次世代の HTML として策定されている HTML5 仕様 (<http://www.html5.jp/>) に対応化することも予定している。

2-1-1. GUI の開発

開発期間の短縮と効率化のために、株式会社ハイボットで以前から商品として取り扱っている既存のロボットシミュレータ (V-REP、<http://www.hibot.co.jp/vrep.php>) をベースにして、本開発特有の Web アプリケーションと必要な GUI 要素を取り入れることにした。特に、ソフトウェア品質特性(ISO/IEC9126)の使用性 (理解性、習得性、運用性、魅力性、標準適

合性)、効率性等を意識し、より直感的で容易に使える開発環境の構築に努め、完成度の高い GUI を装備した開発環境を短期間で開発することに成功した。本開発特有の機能は、2-1-2～2-1-6 節で説明している。

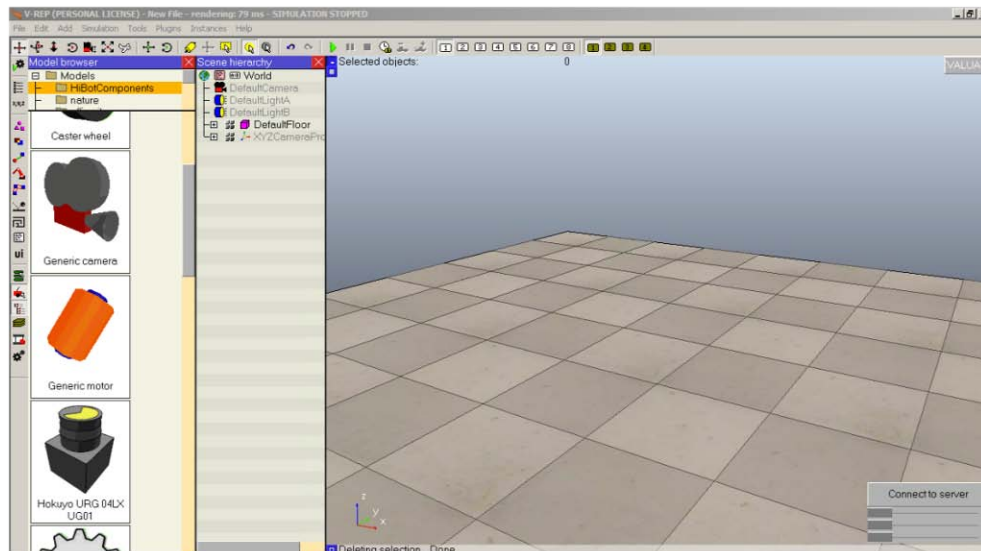


図 2-1-2 Web アプリケーション例
(ロボットシミュレータ (VREP) の拡張機能として実装)

2-1-2. クライアント (ユーザー) 側各種サービスの開発

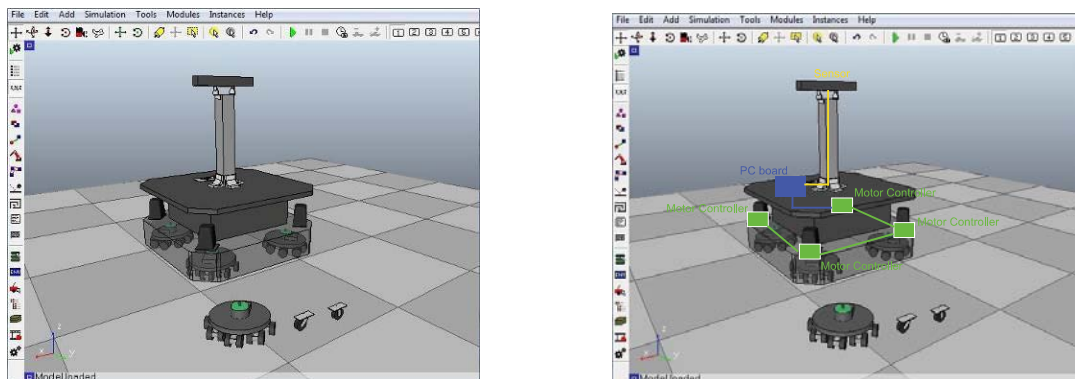


図 2-1-3 : (左) 機構要素インポート (右) 構成図自動生成

ユーザー側端末から操作する主なサービスとして、下記を実装した。

- 1) 機構要素 CAD モデルのインポートサービス : 機械 CAD アプリケーションのデータファイルをインポートし、ロボットの機構を構築する。
- 2) センサと機構要素の配置サービス : センサや機械要素 を GUI のツールバーから選択し

配置する。

- 3) シミュレーション：センサと機構要素の構築が正常に実行されたか確認するサービス。
- 4) 構成図自動生成サービス：クラウドサーバで必要な制御基板や各種センサを自動生成し、ユーザー側に通知する。クライアント側では各部品の電氣的な接続図も表示する。

2-1-3. サーバ側各種サービスの開発

サーバ側では、まずはクライアント側で発行されたサービス要求に対応する基本サービスを実装した。これに加え、ロボット構成情報生成用データベースサービスを構築し、主なロボットコントローラ、モータドライバ、センサ等の情報を効果的に管理する各種機能を、DLL(Dynamic Link Library)の形で実装した。

表 2-1-3 各種センサへの対応 (DLL 作成表)

センサ名	メーカー・型番等	外観
レンジファINDER	北陽電機・UTM-30LX	
レンジファINDER	SICK・LMS400-1000	
赤外線前方監視カメラ	Tau Fine・S-T 19mm	
二次元非冷却センサ	NECAvio・C100V-0008N-0	
デジタルステレオビジョン	Point Grey・BBX3-13S2C-38	
レンジファINDER	北陽電機・URG-04LX-UG01	

さらには、ロボットの高度な運動生成機能等、たとえばセンサ情報を用いた障害物回避動作

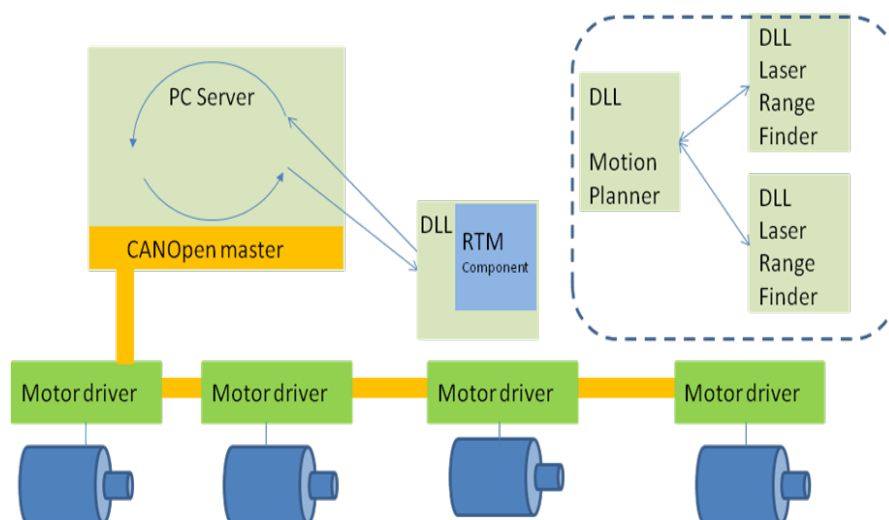
等も、DLL の形でサーバ側のサービスとして実装する方法を確立した。これにより、サービスロボットを構成する機構要素、制御系、センサ系を統一した GUI と Web アプリケーションから操作できる枠組みを確立できた。

2-1-4. クラウドコンピューティング用各種サービスの開発

前述の通り、ユーザーのコンピュータ演算性能、OS、ウェブブラウザの種類による制限を受けないために、本研究開発ではクラウドサーバを利用した仮想コンピュータ技術を採用することにした。よって、クラウドコンピューティング用の各種サービスの開発は ICA (Independent Computing Architecture) という通信技術を提供するサーバの実装と運用に集約され、全体の開発効率を向上できた。

2-1-5. RT ミドルウェアとの親和的なインターフェースの開発

上記 2-1-3 節で説明した通り、ロボットの高度な運動生成機能等はサーバ側の DLL として実装した。そのため、RT ミドルウェアによるソフトウェアコンポーネントを本研究開発の DLL で内包することが容易に実現可能となった。これにより、ソフトウェアインターフェースの違いを意識することなく、本研究開発で提案する Web アプリケーションと GUI 環境で統一的に RT ミドルウェアの成果も利用できるような枠組みを準備した。



2-2. 制御基板等のWebアプリケーションへの対応化

2-2-1. マイコン制御システムの開発

ハードウェア構成：低価格で省電力なロボット制御システムを構成するための、マイコン制御基板を作成した（図2-2-1-1）。平成22年度には72MHz動作のARM Cortex M-3 コア 32bit マイコン、平成23年度には160 MHz動作のARM Cortex M-4 コア 32bit マイコンを採用した。開発基板には、3軸加速度センサー、3軸ジャイロセンサー、3軸地磁気センサ、PWM、ADC、DAC、CANといったロボット制御に必須の機能に加えて、本研究のWebアプリケーションと連携するために必要なEther NETポートやWebコンテンツを保存するためのSD CARDなどの機能も備えている。

ソフトウェア構成：規模やコストの面から、当初の計画ではマイコンに有料のOSは搭載せずに動作させることを目標としたが、全体のWebアプリケーションと統合化するためには、TCP/IP プロトコルスタックやWebサーバソフトウェアを使用することにした。OSなしでもこれらの機能は実装可能であるが、ソフトウェア開発の時間短縮と信頼性確保のためには、タスク管理が行えるリアルタイムOSの搭載が有効である。そのため、今回はマイコン制御システムのOSにKeil社のRTXを使用し、TCP/IPプロトコルスタックには同社のRL-ARMソフトウェアライブラリを使用した。これらは製品出荷時にライセンス料がかからないため、ユーザーはソフトウェアのコストを新たに負担する必要がないという利点がある。

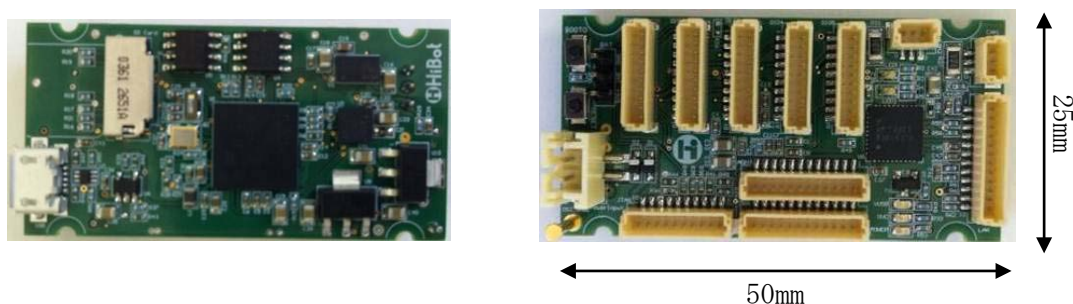


図2-2-1-1 開発したマイコン制御基板の外観

モータコントローラソフトウェア実装：マイコン基板の各種ペリフェラル操作部やCANopenの通信プロファイルの実装を行った。デジタルI/O制御プロファイルのDS-401、そしてモーションコントロールプロファイルの内、速度制御プロファイルの実装に注力し、実装を完了した。CANopenプロトコルを介して、搭載されているエンコーダの分解能の変更、指令に対する速度制限、加減速制限等が行える。

2-2-2. PC 制御システムの開発

ハードウェア構成：本プロジェクトでは、省電力化と小型化を実現すると同時に高い演算能力を確保するために、COM Express 規格のキャリアボードを開発した。COM Express 規格の CPU モジュールは独立に多くのメーカーより市販されているため、ユーザーはキャリアボードに実装したいコネクタ類や追加機能の設計に集中できる。サービスロボットに必要なインターフェイスとして CAN、LAN、USB3.0、IEEE1394 ポート等を実装した。CPU モジュールとしては、intel 社の Core i7 までを搭載できる。

ソフトウェア構成：PC 制御システムソフトウェアの実装に当初は OS に Windows を用い、CANopen のマスタとなるソフトウェアの設計を行った。なお、このマスタとなるソフトウェアはマイコン制御システムにも流用可能になるように、CPU システム、OS のタスク管理など、ハードウェアや OS に依存した部分は独立したモジュールとして実装し、移行を容易にした。さらに PC 制御システムに Web サーバを構築し、PHP を動作させるようにした。これにより、クラウドサービスによって生成されたコンフィギュレーション情報を、Web ブラウザを使って送信することができるようになった。



図 2-2-2-1 開発した PC 制御基板
(COM Express キャリアボード) の外観 (95mm x 125mm)

CAN ポート：4CH、LAN ポート：1CH、USB3.0 ポート：2CH、IEEE1394b ポート：3CH

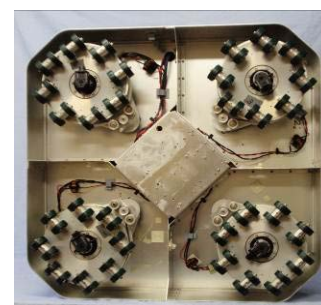
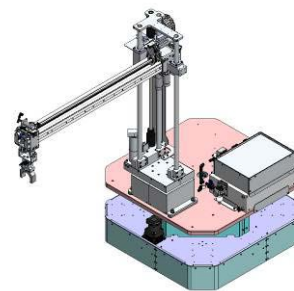
2-3. 製造業者による Web アプリケーションとハードウェア基板の評価

2-3-1. ロボット装置の開発

評価試験用ロボット装置として、小野電機製作所製の「全方向移動対応型ロボット」を導入した（表3-1-1と図3-1-1）。本装置は、狭い場所を切返し運転によらず、瞬時に任意方向に自由自在（全方向）に動き回ることが可能であり、工場、倉庫、病院、各種施設など狭い場所でのサービスロボットとして期待できる。また、必要なセンサ類（カメラ・レーザーレンジファインダー等）を搭載することにより、外界の状況を判断する移動が可能となる。今後、搬送ロボット、配膳片付けロボット、案内ロボット、パトロールロボット等として実用化が期待されている。

表3-1-1 評価試験用ロボット装置の仕様

項目	仕様
サイズ[WxDxH]	640mm×640mm×777mm (アーム部含まず)
重量	26 kg (バッテリー搭載時)
最大積載量	120 kg
駆動モータ	150W24V DC モータ × 4 個
操作パネル	主電源スイッチ
	メイン PC 電源スイッチ
	非常停止スイッチ
表示 LED	上記 各スイッチに LED を搭載
サーボシステム	ユーザー側で選定し搭載する
制御方式	ユーザー側で選定し搭載する
基板間通信	ユーザー側で選定し搭載する
上位 PC 用 I/F	ユーザー側で選定し搭載する
電源	小型鉛蓄電池 12V×2 又は外部電源
搭載可能機器	ステレオビジョンカメラ レーザーレンジファインダー他



非公開

図 3 - 1 - 1 評価試験用ロボット装置の基本図面

本装置は機構的に完成度が高く、小野電機製作所では従来から全方向移動を実現するための基本的なモータ制御プログラムも提供して納品することも可能であったが、たとえばセンサによる障害物回避等のさらに高度なプログラムを社内で開発するのは極めて困難であった。

本研究開発で新規に開発した Web アプリケーションの導入により、高度な専門知識がなくても直観的に高度なロボットアプリケーションを開発可能になった。

2 - 3 - 2. 評価試験

任意の初期位置に置かれた評価用ロボット装置を、ユーザーの指令に従って数メートル離れた場所まで移動させるプログラムの開発を評価対象とした。ただし、目標軌道上に位置の定まっていない障害物が配置され、ロボット装置は自動的に障害物を回避しつつユーザーに指令された目標位置まで移動しなければならない。この際、評価試験用ロボット装置の前後に搭載されたレーザーレンジファインダー(北陽電機・URG-04LX-UG01)を使用しなければならない。

この一連の動作を実現する障害物回避プログラムを、評価者の小野電機製作所が実装し、各開発工程の所要時間の測定を行い、i) 従来手法、ii) RT ミドルウェアによる方法、iii) Web アプリケーションによる方法を比較した。

評価試験結果を表 2-3-2-1、表 2-3-2-2 に示す。表中、技術者 Y はソフトウェア開発の経験もある者であるが、技術者 I は機械設計のみに従事し、ソフトウェア開発はほとんど行ったことがない。結果からも分かるように、技術者 Y はかなり時間をかけているが、既存方法と RT ミドルウェアによる方法でも目標の運動を達成できているのに対して、技術者 I は、既存方法と RT ミドルウェアによる開発方法では、実機の短軸動作も設定した時間内に実現できなかった。しかしながら、Web アプリケーションによる開発は最後まで遂行している。そしてもっとも興味深いのは、Web アプリケーションを使用することによって、技術者 I がソフトウェア開発の経験者である技術者 Y よりも短時間で開発を完成できていることである。

特に機械技術者からのコメントを下記にまとめる。

Web アプリケーションの主な利点

1. 組込みプログラムの知識は必要なくまた、3D CAD の操作性に近いため機械設計技術者のほうが組込み系プログラム経験者より習得時間が短い。
2. すべて 3D GUI 上で、コンポーネント配置からシミュレーションまでを行えるためロボット技術者以外の人にも取り入れやすい。
3. コンポーネントがあらかじめ作成されて、そのコンポーネントのパラメータで設定できる範囲であれば、ロボットを全く知らない人だけでなくロボットに精通している人でも短時間でロボットを操作することができる。
4. 自分の PC を端末（表示機）として利用するため、PC の環境を傷めず、PC の相性の問題が少ないと思われる。

表 2-3-2-1 開発手法による時間比較（既存方法・RT ミドルウェア・Web アプリケーション開発環境構築から実機動作）

	既存方法 (SH2 または ARM の場合)			RT ミドルウェア			Web アプリケーション			
必要な主な知識	プログラミング言語 (C・C++・アセンブラ)			RT ミドルウェア操作知識			Web アプリケーション操作知識			
	マイコン・周辺アーキテクチャ・統合開発環境操作知識			Eclipse 操作知識			3D CAD 知識			
	ハードウェア知識 (デバック時)			VisualC++ (コンポーネント作成時)			JAVA (コンポーネント作成時)			
	技術者 Y	技術者 I	備考	技術者 Y	技術者 I	備考	技術者 Y	技術者 I		
	時間 (h)			時間 (h)			時間 *2			
							1 回目	1 回目	2 回目	3 回目
開発環境構築 (ダウンロード時間含む)	3	20		×	×	6 時間を使用した構築できず (Version0.4.2) *1	2 分	2 分	2 分	2 分
				7	4	Version1.1.0				
運動シミュレーション	— (機能を持たない)			— (機能を持たない)			151 分	116 分	51 分	43 分
実機単軸動作まで	200	×	技術者 I は 70 時間使用したが動作のめどが全く立たず中断	41	×	技術者 I は 70 時間使用したが動作のめどが全く立たず中断	164 分	146 分	65 分	57 分
実機応用動作まで	220	×	技術者 I は作業中断	46	×	技術者 I は作業中断	198 分	181 分	66 分	58 分
画像認識動作まで	250	×	技術者 I は作業中断	91	×	技術者 I は作業中断	215 分	191 分	75 分	65 分

* 1 パッケージになっておらず、URL リンク切れ等で内容ソフトを収集出来なかった

* 2 1 回目のみ操作説明有でそれにかかった時間も含まれる、以後操作説明は無

表 2-3-2-2 最終的目標と達成度 (×：悪い、△：普通、○：良、◎：優)

高度化指標 \ 手法	従来手法	RTミドルウェア	提案する手法 (RTミドルウェアとの比較)		関連するサブテーマ
			目標値	達成値	
使用性の向上	×	△	◎ (2倍)	◎ 12.7倍*1	【1-1、2-1、2-2、3】
信頼性の向上	×	△	○ (2倍)	◎ 3倍 *3	【1-4、2-1、2-2、4-1】
高性能化・機能の向上	△	◎	◎ (同等)	◎ 同等	【1-5、2-1、2-2】
柔軟性、適応性の確保	△	◎	◎ (同等)	◎ 同等	【1-2、1-3、2-1、2-2】
生産性の向上	×	△	◎ (5倍)	◎ 11.8倍*2	【1、2、3】
ソフトウェア技術による省エネルギー・省資源化	×	×	○	◎ 設計上達成	【1、2、3、4】

*1：表 2-3-2-1 中の画像認識までの全作業時間を基準にした

RTミドルウェア：91h

提案する手法：3.58h, ×2 (詳しく説明を聞きながら行ったので2倍した)

達成値=91/(3.58*2) = 12.7

*2：画像認識までの作業時間（開発環境構築を除いた）を基準にした

RTミドルウェア：91-7 = 84h

提案する手法：(215-2)min = 3.55h, ×2 (詳しく説明を聞きながら行ったので2倍)

達成値=84/(3.55*2) = 11.8

*3：ユーザー自身が信頼性の高い RT コンポーネントを自作することは不可能ではないが、RT コンポーネントの信頼性評価として問題となるのは、一般的には開発元の保障が得られないことにある。また、他社のコンポーネントが保障されていても自作コンポーネントと組み合わせた際の信頼性は保障されない。それに対して、提案する手法ではソフトウェア開発手順が明確であり、同じ Web アプリケーション上で組み合わせたソフト部品の動作が保証される。よって、本製品の開発方法論の性格上、品質と信頼性は一般の RT ミドルウェア開発方法に対して格段に高いと考えられる。数値評価を行うのは大変困難であるが、ここでは少なくとも3倍以上とした。

2-4. サービス業者による開発品を搭載したロボットの信頼性と安全性評価

Web アプリケーションを用いて、倉庫内での物資運搬作業を行う「運搬作業用ロボット」を想定したロボット（図2-4-1）のソフトウェアを小野電機製作所が構成し、完成したシステムの評価試験を外部のサービス業者に実施依頼した。

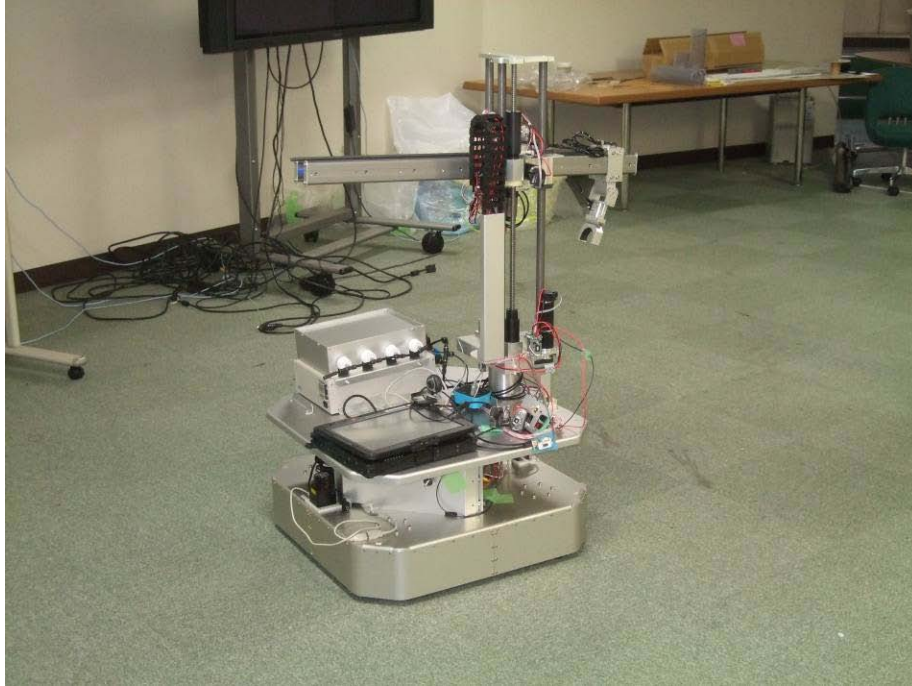


図2-4-1. 構成した試験機（運搬作業ロボットを想定）

以下の点を基準として安全性評価を行った。

- ・人間とぶつからないこと
- ・障害物（壁やテーブルなど）とぶつからないこと
- ・荷重による走行障害が現れず、安定した障害物回避走行が保たれること

また、以下の動作を行なって信頼性評価を行った。

- ・5パターンの経路と障害物環境を設定して、各パターンを4回走行させる。

試験方法、試験結果と最終評価の詳細を以下に説明する。

2-4-1. 試験方法

試験環境： カーペット床で、5m × 5m のオープンスペースを試験用に確保した。照明は通常の蛍光灯である。

想定環境： 次の5パターンの状況を想定した。

1.コンコース

駅のコンコースのような雑踏で、障害物が不規則に分布している状況

2.コンビニ店内

コンビニエンスストア内で、障害物が規則正しく並ぶが、その間を人がゆっくり移動する状況

3.作業所内

工場の作業所内で、規則正しく並んだ障害物もあるが、人や物の移動もある状況

4.空港内

空港のチェックインカウンター付近の空間で、ロボットが人を先導案内する状況

5.オフィス内

オフィス内で、障害物が比較的密に分布し、人の移動もある状況

障害物と配置： 障害物としてパーティション、テーブル、椅子やプランタなど想定して、ダンボール箱、ベニヤ板や椅子などを配置した。障害物の配置は原則として各走行試験毎に変更した(図2-4-2)。試験中には適宜人がロボットの周囲を歩いたり、前に立ったりして走行させた。また、走行コースに障害物を投げて妨害した試験も行った。



図2-4-2 ロボットと障害物設置作業中の状況

走行試験: 上述の 5 パターン毎にそれぞれ 4 回の走行試験を実施した(全部で 20 回)。そして、各走行試験毎に障害物の設置状況を少し変更したり、同じ設置状況でも走行方向を変えたりした。したがって、全く同じ走行試験はなかったが回避動作などの再現性には問題ないと判断した。1 回の試験での移動時間は 5 分程度、移動距離はおよそ 10m～20m 程度であったため、総移動距離はおよそ 300m 程度である。

2-4-2. 試験結果

表 2-4-2 に示すように、全体的には問題なく実施できた。機能の改善の余地ありと評価された項目については、直ちに改善するように対応した。

表 2-4-2 評価表

試験 No	パター ン No	想定環 境	走行	評 価					
				対人 回避	対物 回避	対人・対 物迂回	荷重搭 載時	色 追 尾	ロボッ ト制御
1	1	コン コース	1	○	○	△	-	-	○
2			2	○	○	△	-	-	○
3			3	○	○	△	-	-	△
4			4	○	○	△	○	-	○
5	2	コンビ ニ店内	1	○	○	△	○	-	○
6			2	○	○	△	○	-	○
7			3	-	△	△	○	-	△
8			4	○	△	△	○	-	○
9	3	作業所 内	1	○	○	△	○	-	○
10			2	○	○	△	○	-	○
11			3	○	○	△	○	-	○
12			4	○	○	△	○	-	○
13	4	空港内	1	○	○	△	○	△	○
14			2	-	-	-	-	△	○
15			3	○	○	△	-	-	○
16			4	-	○	△	-	-	○
17	5	オフィ ス内	1	○	○	△	○	-	○
18			2	○	○	△	○	-	○
19			3	○	○	△	○	-	○
20			4	○	○	△	-	-	○

注) ○: 合格, △: 機能の改善の余地あり, -: 実施せず

試験の結果（実施業者の判定）：

- ・障害物回避動作については，対人，対物とも問題なかった
- ・障害物迂回動作については，手動で行うかぎり問題なかった
- ・加重時動作については，荷物(7kg)の常時加重や走行中の荷重増減による動作の変化はなく，安定動作した
- ・追尾機能は，マーカーとの距離が近く，また十分な照明が与えられるかぎり問題なかった

実施業者から指摘された課題：

- ・走行方向の変更に際して，ロボットの動作が急すぎると思われた。方向転換動作をスムーズに行えるよう，モーター制御を工夫することが期待される。
- ・迂回制御を自動化して，障害物回避後にも自動的に目的地へ向かうようにすることが，将来は必要になると思われる（ロボットの操作仕様に関わることはあるが）。
- ・追尾機能は工夫の余地があると思われる。ロボットに搭載するセンサー機能や情報処理機能とマーカーの大きさがマッチしていないと思われる。

3. 全体総括

3-1. 研究開発成果

本研究開発では、クラウド上の各種分散サーバーと開発者 PC 用 Web アプリケーションや各種サービスの開発（開発項目 1）、通信制御駆動部の試作と Web アプリケーションへの対応化（開発項目 2）、評価用ロボットの構成と評価（開発項目 3）を行った。

開発項目 1 では GUI を駆使した Web アプリケーションを開発し、機械的構成要素の 3D 表示、ソフトウェア・アルゴリズム機能要素（アームの IK 制御、脚軌道やセンサ入力等）の「ドラッグ・アンド・ドロップ」方式による全体駆動制御系の構成が行えるようなインターフェースを実現した。特に、ユーザーが使うコンピュータの演算性能、OS、ウェブブラウザの種類による制限をできるだけ受けないようにするために、Web アプリケーションは仮想コンピュータ技術によってクラウド上のサーバーから実行する環境を構築した。

開発項目 2 では、実際のロボットに搭載される制御基板を試作し、サービスロボットの高性能化に適した通信インターフェース（IEEE1394、USB3.0、Ethernet や CAN）を介して Web アプリケーションからファームウェアのダウンロードや諸設定の変更を簡単に行える環境を構築して汎用性を高めた。これにより、ユーザーはマイコン等のファームウェア開発に伴うインストール、コンパイル、デバッグなどの作業からも解放させる方法を確認した。

開発項目3では、従来手法、RTミドルウェア、本研究で開発した手法により、ロボット制御系を実際に構成させ、作業時間の比較によって本開発品の有効性を検証し、現場の機械設計技術者からも高く評価され、下表の通り最終的な高度化目標も達成したことを確認した。

(×：悪い、△：普通、○：良、◎：優)

高度化指標 \ 手法	従来	RTM	本開発の成果 RTMに対して(目標)
使用性の向上	×	△	◎ 12倍 (2倍)
信頼性の向上	×	△	◎ 3倍 (2倍)
高性能化・機能の向上	△	◎	◎ 同等(同等)
柔軟性、適応性の確保	△	◎	◎ 同等(同等)
生産性の向上	×	△	◎ 11倍 (5倍)

このように、本研究開発では、サービスロボット市場における川中企業である製造業者の優秀な機械設計技術者が、高度なプログラミング知識がなくても短期間で信頼性の高いサービスロボットを開発できる総合的なソフトウェアソリューションを実現できた。本開発品が今後の川中企業や川下企業の発展に大きく貢献できることが期待される。

3-2. 事業化展開

株式会社ハイボットが事業化する。当初計画した事業は、(1) サービスロボット制御システム開発用 Web ツールのライセンス事業および(2) Web リンク機能を搭載したロボット組込用制御部品の製作販売事業の2つであり、いずれも設備投資ののち2013年から販売開始の予定であった。

(1) については、本研究成果を市場に出す製品としてするために、今後、①インターネット上の接続性とセキュリティについての機能、②エンドユーザーが利用できる新しいコンポーネント、③ウェブインターフェースの利便性の向上などの追加・改良を実施する。そのうえで、まず、ローカルのネットワーク内のサーバ稼働型(特定センサ・モータ限定版ロボット試作テスト用ツール)ソフトウェア製品として、2014年度中に市場に出す。そして、エンジニア達に利用してもらいながらそのフィードバックを継続的に技術開発および製品改良に反映していく。また、2016年度までには、Webベースのクラウド型技術を利用したツール製品を市場に出す。

(2) については、(1) にもかかわらず、予定通り2013年度から販売を開始する。開発されたマイコン制御基板は、Web リンク機能以外にも多種の新機能を有しており、マイコン制御基板市場で魅力的な製品になり得る。

以上