

IAM Discussion Paper Series #028

ロボット技術のオープンイノベーション(その2)

Robot-OS(ROS)のグローバル戦略と
日本のロボットソフトウェア基盤開発の方向性

Robotics Technology and Open Innovation (Part-2)

IAM

Intellectual Asset-Based Management

2013年6月

産業技術大学院大学 成田 雅彦, 中川 幸子
東京大学政策ビジョン研究センター 小川 紘一

東京大学 知的資産経営研究講座

Intellectual Asset-Based Management Research and Education Program The University of Tokyo

※ IAMディスカッション・ペーパー・シリーズは、研究者間の議論を目的に、研究過程における未定稿を公開するものです。当講座もしくは執筆者による許可のない引用や転載、複製、頒布を禁止します。

<http://pari.u-tokyo.ac.jp/unit/iam/index.html>

要約

近年、多くのロボットの要素技術がオープン化されており、ロボットのオープンイノベーションが注目されている。さらに、ROS (Robot Operating System) や、クラウドベースのロボットサービスの登場により、これらの要素技術を集約し、統合プラットフォーム化する動きが活発化している。これは、ロボットのオープンイノベーションが、ビジネス化へ向けたシステム構造の確立、つまりドミナントアーキテクチャ確立のフェーズへ移ったことを示している。このフェーズにおいては、システム構造がビジネス化へ向けて再編成される可能性が非常に高い。我が国のロボット産業も、オープン化と統合を見据えた新たな取り組みへ転換させないとビジネスの仕組み作りで裂蹄に追い込まれる。

2013年2月、Willow Garage社はビジネスモデル変更を発表し、オープンソースのロボット研究開発をリードしてきたその役割を、ロボットのオープンソース団体であるOSRF (Open Source Robotics Foundation) へ引き継いだ。OSRFの牽引するROS体系は、イノベーション戦略をさらに強化しつつある。

本レポートでは、上記の流れを背景に、ROSとこれを補完する体系を報告する。また、IT産業の事例をあげ、産業構造の変革の際に、ソフトウェアプラットフォームへの取組みが非常に重要な意味を持つことを示す。さらに、RTミドルウェア、RSiなど、我が国のロボットプラットフォームの課題についても分析し、技術と組織体制の観点から、RTミドルウェアとRSiを融合したプラットフォーム戦略を提案する。

キーワード

オープンソースロボティクス, Web サービス, OSRF, ROS, RSi, RTM, Willow Garage

目次

1	はじめに.....	4
2	ROS.....	6
2.1	OSRF の設立.....	6
2.2	OSRF の活動.....	7
2.2.1	プロジェクト.....	7
2.2.2	活動.....	9
2.3	まとめ.....	13
3	欧米政府のロボット施策と民間企業連携.....	14
3.1	米国政府のロボット施策 -NRI と DARPA-	14
3.2	欧州連合のロボット施策 -FP7 と Horizon2020-	22
3.3	民間企業連携 -ROS 産業コンソーシアム-	26
3.4	まとめ.....	32
4	ロボット技術開発の展開と ROS.....	34
4.1	低価格ロボット.....	34
4.2	ロボット要素技術のオープンソース団体.....	36
4.3	ロボットへのクラウドコンピューティング技術適用の研究開発事例.....	47
4.4	まとめ.....	51
5	日本のロボット産業技術の現状と提案.....	52
5.1	日本のロボット産業のリスク.....	52
5.2	日本の現状.....	56
5.2.1	RT ミドルウェアと知能化プロジェクト.....	56
5.2.2	RSi : Robot Service Initiative.....	57
5.2.3	RT ミドルウェアの利点と課題.....	57
5.3	提案.....	60
5.3.1	ソフトウェアプラットフォーム戦略.....	60
5.3.2	組織構造の戦略.....	61
6	おわりに.....	63
7	参照文献.....	64

1 はじめに

ROS (Robot Operating System) は、2007 年より始動したオープンソースロボティクスのソフトウェア開発プロジェクトである。筆者らは、ROS と、これまで ROS を率いてきた米国の Willow Garage 社に焦点を当て、ロボット技術開発とオープン化を軸としたビジネス展開に関する動向調査を 2012 年初頭に行った。そこで、Willow Garage 社が、オープンソースロボティクスの発展を目的として、ROS のこれまでの発展にイニシアティブをとってきたことを報告した¹。

とくに、2009 年から 2011 年には、Willow Garage 社はコンテスト型のチャレンジプログラムである PR2 ベータプログラムを開催し、これを軸として、各国の大学機関を中心としたロボット研究成果を集約し、ROS の普及と Wiki 形式によるドキュメント整備を行った。さらに、コミュニティ活動による共創のための活動基盤を育て、ROS の知名度と利用をグローバルなものとした。そして、2012 年 4 月には、オープンソースロボット財団（以下、OSRF）を、非営利団体として米国カリフォルニア州に設立し、ROS プロジェクトをスピンアウトした。

また、これまでに、Willow Garage 社は、複数のロボット関連研究分野及び研究者をスピンアウトし、米国内団体／企業設立をも推進してきた。そして、ROS は研究分野だけでなく、産業用ロボット分野、低価格ロボットへの展開、インターネット／クラウド分野への適用もはじまっている。

2013 年 2 月、Willow Garage 社はビジネスモデル変更を発表し、オープンソースのロボット研究開発をリードしてきたその役割を、完全に OSRF へ引き継いだ。現在の ROS は、本国回帰が大きな流れになりつつある米国産業、特に製造業を海外拠点から国内へのシフトする米国内施策や、オバマ大統領のロボット政策である National Robotics Initiative (NRI) と連携し、また、DARPA 主催のロボティクスチャレンジへの技術提供を行う米国家プロジェクトとなりつつある。

さらに、欧州連合による開発プロジェクトである FP7 でも ROS を採用するプロジェクトがある。OSRF は、欧州のクラウドロボティクス団体である RoboEarth の産業諮問委員会や、米国と欧州の民間企業が連携した ROS 産業コンソーシアムへも参加しており、グローバルな展開も行われている。

本報告書は、2012 年の Willow Garage 社からの ROS のスピンアウト後の、OSRF の活動に焦点を当てたロボット技術のオープン化動向に関する継続調査の報告である。2 章で OSRF

¹ 参照文献[33].

設立後の活動を紹介後、3章では、3.1章で米国のロボット政策、3.2章で欧州の第7次FPプロジェクト内のROS利用について取り上げる。また、3.3章ではROSの産業用ロボットへの適用と民間企業の連携として、ROS産業コンソーシアムについて記載し、官と民の連携したROS普及戦略の仕掛けを概観する。

4章ではロボット技術開発の展開として、4.1章でロボットの低価格化について述べ、4.2章では、ロボットソフトウェアのオープンソース団体についてROSとの関連性を含めて記載する。4.3章では、ロボットへのクラウド技術の適用事例をあげ、インターネット/クラウドコンテンツとしてのロボットサービス展開を目指してROSを利用する研究開発を取り上げる。5章で、これまでの記載をもとに日本の産業リスクの考察を日本のロボット技術開発戦略への提言を行う。ここでは、我が国の国家プロジェクトであり、日本発のオープンソースロボティクス技術であるRTミドルウェア(RT-Middleware, RTM)についても議論する。6章をまとめとし、7章に主要な参照文献を掲載する。

2 ROS

2013年2月、これまでROSプロジェクトを率いてきた民間企業であるWillow Garage社は、ビジネスモデルの変更を発表²した。オープンソースのロボット研究開発をリードしてきたその役割を完全にOSRFへ引き継ぎ、一企業として商用路線を強化していく旨を発表したのである。同時に、OSRFは、米国家ロボット施策であるNational Robotics Initiative (NRI)からの支援を発表した³。国家施策については、3章に詳述するので、以下ではまずROSの概要を述べ、併せて最近1年のOSRF内の活動について記載する。

2.1 OSRFの設立

OSRFは、オープンソースロボット財団 (Open Source Robotics Foundation) の略である。2012年4月に、Willow Garage社からのROS (Robot Operating System) プロジェクトのスピンアウトにより設立した。米国カリフォルニア州非営利公益法人に位置づけられ、取締役会によって監督される⁴。OSRFのCEOであるDr. Brian Gerkeyは、OSRF設立直後のI Heart Robotics社のインタビューに答え、OSRFのコアミッションは、「ロボットの研究・教育・製品開発に、オープンソースソフトウェアを使用するための開発・配布・導入の支援」と述べている⁵。また、ROSの互換性 (ROS Compatible) については、例えばROS産業などの特定のドメインでは一つの焦点になるであろうとしている。

OSRFは、2013年2月時点で、次のメンバーで構成される。CEOは元Willow Garage社のBrian Gerkey、取締役会として、ドイツのフライブルグ大学教授Wolfram Burgard、Willow Garage社CEOのSteve Cousins、Clearpath Robotics社CTOのRyan Gariepy、iRobot社の創設者の一人でCyPhyWorks社CEOのHelen Greiner、韓国Yujin Robot社のSam Parkである。

また、2013年2月時点のスポンサーは、BOSCHパルアトル技術研究センター、米国国防高等研究計画局 (以下、DARPA)、Rodney Brooksにより開発されたBAXTERのRethink Robotics社、米国エネルギー省が管轄するサンディヤ国立研究所、Willow Garage社、韓国

² UPDATED: Willow Garage to Shut Down? Company Says 'No, Just Changing'

<http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/robotics-software/willow-garage-to-shut-down> (2013.2.11)
-Willow Garage is changing,

<http://www.willowgarage.com/blog/2013/02/11/willow-garage-changing> (2013.2.11)

³ <http://www.osrfoundation.org/blog/ros-at-osrf.html>

⁴ OSRFのWebサイトは以下を参照のこと。

<http://osrfoundation.org/>

⁵ Open Source Robotics Foundation Interview,

<http://www.iheartrobotics.com/2012/07/open-source-robotics-foundation.html> (2012.7.20)

の Yujin Robot 社である。

また、Willow Garage 社のビジネスモデル変更発表後、アメリカ航空宇宙局：NASA、米国テキサス州の独立非営利研究開発機関の Southwest Research Institute の率いる ROS 産業コンソーシアム⁶もスポンサーに名を連ね、計 8 団体が支援している。アメリカ企業だけでなく、ヨーロッパと韓国企業の参加が特に注目される。

2.2 OSRF の活動

2012 年 4 月の団体設立時に示された OSRF のプロジェクトは、「ROS」と「GAZEBO」である。以下で、各プロジェクトについて概観する。また OSRF で組織されるオープンソースロボティクスのための「ROS コンサルティングネットワーク」、2012 年より開始した「ROS コンテスト」、2013 年参加予定の「Google Summer of Code」についてとりあげる。

2.2.1 プロジェクト

▶ ROS

ROS は、Robot Operating System の略である。従来 Willow Garage 社のサポートにより、ロボットのオープンソースの共通プラットフォームとして欧米を中心に急速にユーザ数を拡大してきた。2012 年 11 月時点では、研究機関を中心に 170 程の機関や個人が利用しているとされる。図 1 に ROS を利用する機関の分布を示す。

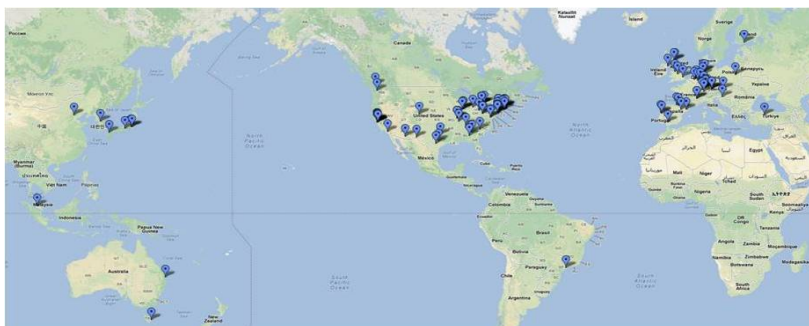


図 1: ROS 利用機関の分布

出典：<https://maps.google.com/maps/ms?ie=UTF&msa=0&msid=209668390659853657363.00049c608b78bc7779683>

⁶ ROS 産業コンソーシアムについては、3.3 章に詳述。

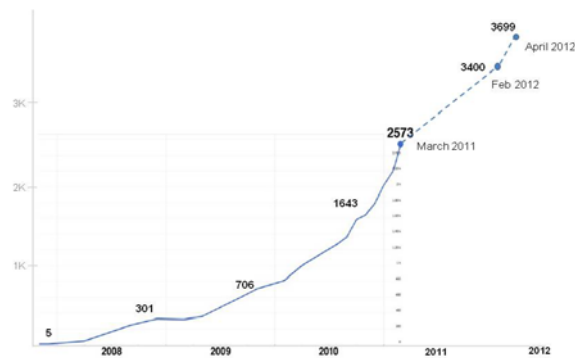


図 2: ROS コードパッケージ数の推移 (2007 年 11 月~2012 年 4 月)

出典 : R. Hickman, D. Kohler, K. Conley, B. Gerkey “Cloud Robotics” ,
Google I/O 2011 Sessions 資料, 2011.5.13 より加工

ROS とは何か? について, 元 WillowGrage 社の取締役であり, 現在 OSRF の CEO である Dr. Brian Gerkey は, 「ROS = 通信 (plumbing)+ツール群 (tools)+機能群 (capabilities) + エコシステム (ecosystem)」と答えている⁷. ROS は, 分散システム指向であり, ネットワークと親和性の高い出版/購読型のメッセージ通信を行う。

また, システム設定, モニタリングやログ取得, デバッグを行う開発ツールの提供も行っている. さらに, ROS は, 移動/操作/認識を中心とした, ロボットソフトウェアのライブラリ群をもち, これらを, “パッケージ(Packages)”, もしくは“スタック(Stacks: パッケージのコレクション)”として Wiki 形式で配布し, 容易にシェアできる仕組みとして ROS-Wiki を展開する.

ROS-Wiki は, 1 ファイルレベルのプログラム部品から共同体レベルのソフトウェアパッケージのシェアまでサポートしており, 独自のパッケージ管理システム, ツール類の提供, バグ報告や機能提案, 質問共有サイトの展開も行う. 図 2 に ROS コードパッケージ数の推移を示す.

ROS は, バージョン管理されたスタックのセットを, ディストリビューションとして配布している. これは, Linux のディストリビューションと同じ概念である. 不具合があれば, 修正パッチを配布する. 最新ディストリビューションは, 2013 年 1 月にリリースされた ROS Groovy Galapagos である. 以下に ROS のディストリビューションを示す.

- 2010 年 3 月 2 日 : ROS Box Turtle (ROS1.0 版相当)
- 2010 年 8 月 2 日 : ROS C Turtle
- 2011 年 3 月 2 日 : ROS Diamondback

⁷ Brian Gerkey, “What is ROS exactly? Middleware, Framework, Operating System?”
<http://answers.ros.org/question/12230/what-is-ros-exactly-middleware-framework-operating-system/>
(2012.12)

- 2011年8月30日：ROS Electric Emys
- 2012年4月23日：ROS Fuerte Turtle（OSRF 設立直後）
- 2013年1月1日：ROS Groovy Galapagos（現時点の最新バージョン）

▶ GAZEBO

GAZEBOは、OSRFのプロジェクトの一つであり、ROSをサポートする3Dのマルチロボットシミュレーターである。センサの反応やフィードバック、複数のロボットや物体の相互作用を3Dでシミュレーションすることができる。

本ツールは、DARPA主催のロボットチャレンジの公式ツールとして採用されている。つまり、OSRFがDARPAの受託開発を行っている。その一環として、GAZEBOをクラウド化し、クラウド型シミュレーター“CloudSim”としてサービス提供する取組みも進行している。GAZEBOについてはDARPAによる調達とあわせ、3.1章に詳述する。

2.2.2 活動

▶ グローバルコンサルティングネットワーク

OSRFでは、オープンソースロボティクスの、コンサルティングサービスの提供を目的として、表1の11の企業及び個人を連絡先として掲載している。掲載団体は欧州とアジア圏を含む各地域である。また、OSRF設立を皮切りにした2012年のWillow Garage社の動向に、研究分野及び研究者の積極的なスピナウトがあるが、hiDOFはWillow Garage社からスピナウトしたベンチャー企業の一つである。

表1: OSRFのコンサルティングネットワーク

会社及び個人	場所	Webサイト/備考
Arkapravo Bhaumik	New Delhi, India	http://robotica.blogspot.in/
Clearpath Robotics	Kitchener-Waterloo, Ontario, Canada	http://www.clearpathrobotics.com
Fraunhofer IPA	Stuttgart, Germany	http://www.ipa.fraunhofer.de
Heuristic Labs	Cambridge, Massachusetts & Oakland, California, USA	http://www.heuristiclabs.com
hiDOF	Menlo Park, California, USA	http://hidof.com (Willow Garage社からスピナウト)
I Heart Engineering	Brooklyn, New York, USA	http://www.iheartengineering.com
Lorenzo Riano, PhD	Berkeley, California, USA	http://www.eecs.berkeley.edu/~riano/
LP-Research	Tokyo, Japan	http://www.lp-research.com (早稲田大学理工学術院高西淳夫研究室を)

		背景)
Robotnik	Valencia, Spain	http://www.robotnik.es/
Shadow Robot Company	London, UK	http://www.shadowrobot.com (FP7-ICT:HANDLE プロジェクトに参加)
Southwest Research Institute	San Antonio, Texas USA	http://robotics.swri.org (ROS 産業コンソーシアムを主導)

出典 : <http://www.osrfoundation.org/consultants-network/>

▶ ROS コンテストの開催

ROS コンテストとして、2012年5月19～20日にかけて米国ミネソタ州で、ROS Con2012が開催された。このコンテストは、Willow Garage社が提供する研究用ロボットPR2に依存しない、ROSを使ったロボット開発の成果発表である。コンテスト運営委員会が設置され、ROS開発者のカンファレンスとして開催される。

ROSCon2012では、企業5社(Google, General Motors, Aptima Inc, Yujin Robot, BOSCH)と、大学機関5校(ワシントン大学, トロント大学, フライブルグ大学, アーバン大学, カーネギーメロン大学(MREC)), 及びWillow Garageに所属の計18人の研究者が発表、産学連携によりROS利用について議論する場となった。以下の表2にプログラムを示す。尚、各スピーカーの発表詳細についてはROS Con 2012のプログラムに、ビデオムービーとスライド資料が公開されている⁸。

表 2: ROS Con 2012 プログラム

Date	Time	発表者	タイトル	所属
5/19	9:15	Brian Gerkey	Opening Remarks	
	9:30	Morgan Quigley	Keynote: ROS: Past, present, and future	
	10:30	Break		
	11:00	David Lu!!	URDF and You	ワシントン大学(アメリカ)
	11:45	Ioan Sucan, Sachin Chitta	Motion Planning in ROS	Willow Garage
	12:30	Lunch		
	2:00	Damon Kohler	Introduction to rosjava	Google (Netty Project)
	2:45	John Hsu, Nate Koenig	The Gazebo Simulator as a Development Tool in ROS	Willow Garage
	3:30	Break		
	4:00	Jonathan Gammell, Chi Hay Tong	Using ROS on Field Robotic Experiments in Remote Locations	トロント大学; 自律的宇宙ロボティクス研究室(カナダ)
4:20	Armin Hornung	ROS for Humanoid Robots	フライブルグ大学(ドイツ)	

⁸ http://roscon.ros.org/2012/?page_id=33

	4:40	William Woodall	"Moe" The Autonomous Lawnmower	アーバン大学 (アメリカ)
	5:00	Ken Conley 他	Lightning Talks (ROS 関連キーマン達が少しづつトーク)	
	6:00	Fin		
5/20	9:15	Matt Williamson	Opening Remarks	
	9:30	Stephen W. Hart	Keynote: Architecting Real-time Control of Robonaut 2 using ROS and Orocos	General Motors R&D (GM と NASA の共同研究) http://open.nasa.gov/
	10:30	Break		
	11:00	Tully Foote	Understanding tf	WillowGarage
	11:45	Jeff Rousseau	The current state and future of multi-master, multi-robot systems using ROS	Aptima, Inc. ※U.S. Air Force (ヒューマンセントリック技術) the MM SIG: https://groups.google.com/group/ros-sig-mm
	12:30	Lunch		
	2:00	Chad Rockey	Writing Hardware Drivers	National Robotics Engineering Center カーネギーメロン大学内 (アメリカ)
	2:45	Patrick Mihelich	Understanding the Kinect	WillowGarage
	3:30	Break		
	4:00	Daniel Stonier	ROS on Windows	Yujin Robot
	4:20	Melonee Wise	The ROS wiki how to make the best use of it	WillowGarage
	4:40	Benjamin Pitzer	Measuring and Tracking Code Quality in ROS	BOSCH
	5:00	Bill Smart	Teaching Robotics with ROS: Experiences, Suggestions, and Tales of Woe	ワシントン大学セントルイス校
	5:20	Sarah Osentoski (given by Benjamin Pitzer)	Robot Web Applications	BOSCH http://ros.org/wiki/remote_lab
	5:40	Michael Carroll	Using Open Sound Control Hardware and Software with ROS	アーバン大学 (アメリカ) http://opensoundcontrol.org/
	6:00	Ryan Garipey	Closing Remarks	

出典 : http://roscon.ros.org/2012/?page_id=33

本コンテストは、2013 年も開催されている。プラチナスポンサーは、BOSCH 社、rethink robotics 社 (旧 Heartland Robotics 社)、CLEARPATH 社、Willow Garage 社であり、ゴールドスポンサーに、Google 社、ドイツの研究機関である Fraunhofer IPA が加わったことは特筆に値する。2012 年と 2013 年のスポンサーを図 3 に掲載する。

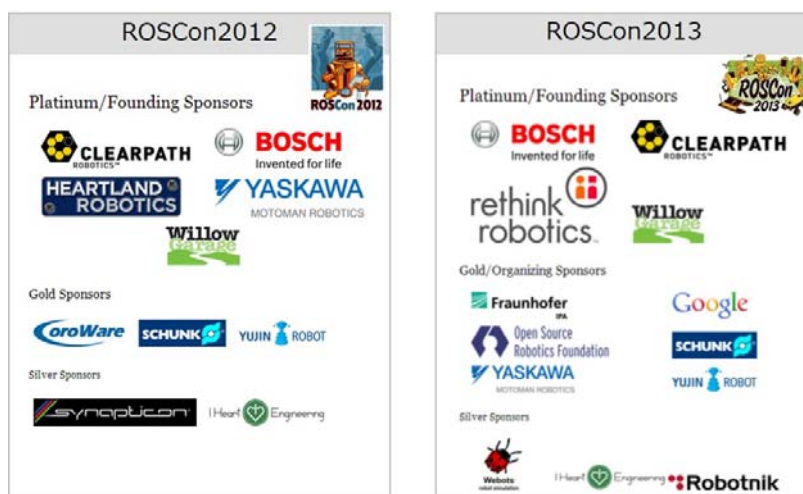


図 3 : ROSCon スポンサー

出典 : <http://roscon.ros.org/> より一部加工

▶ The Google Summer of Code へ参加

The Google Summer of Code (GSoC) は、2005 年 5 月から 8 月に初めて開催され、以降、毎年開催されている。Google が指定したフリーソフトウェアやオープンソースプロジェクトで、期間中に課題をクリアした数百人の学生に賞金を支払う制度である。これまでも PCL や OpenCV 等のロボットの要素技術のオープンソース団体が参加している。

OSRF は、GSoC の各プロジェクトに対し、以下の課題を準備している。

- **(GAZEBO プロジェクト)** ビジョンセンサ用のレンズの歪みのシミュレート/環境ペーシングシステム/分散リソース管理/位置測定のための GPS センサシミュレーション/シミュレーション記述形式 (SDF) のエディタ/パスプランナー/流体力学/Google マップインターフェイス
- **(ROS プロジェクト)** ROS システムの依存性を解決するための独立した ROS ライブラリの開発/ ROS クライアント用の新しいパラメータ API の開発
- **(CloudSim プロジェクト)** AmazonWebService に限定されない異なるクラウドプロバイダのためのレイヤー開発, CloudSim の一般化 (python, javascript)/クラウドインスタンスの管理とプロビジョニングのための Vagrant と Puppet の改良/プライベートクラウドで CloudSim を利用するためのオープンスタック/CloudSim とガゼボを利用した教材開発/CloudSim による自動テストツール開発

2.3 まとめ

Willow Garage 社が育てた ROS というイノベーションは、その技術的優劣に関わらず、オープンソースロボティクスの研究コミュニティとして拡大し、いまや高い知名度をもつ。ROS は、大学機関や他のオープンソース団体のロボットのソフトウェアの研究成果を ROS 基盤上に取り込み、これらを研究用のオープンな参照モデルとして提供する。また、メーリングリストなどでの活発な議論により、多くのロボット開発者を ROS というキーワードのもとに集めてきた。

本章では、Willow Garage 社からのスピンアウト後の OSRF の活動として、ROS のサポート機関としてのコンサルティングネットワークの形成、コンテスト、及び、コードスプリントの開催をあげた。これは、利用者と開発者コミュニティの拡大を指向するオープンソース団体らしい運営の側面である。ただし、他国の参加を含めたコンテスト開催、ベンチャー企業等による ROS サポート機関を形成している点は、ROS の事業化をも視野にいれた技術と市場の相互作用を誘発する取組みであり、着目すべき点といえる。

一方、米国家及び産業界のロボットへの取組みと OSRF との関係を概観した場合、ROS の拡大には、次世代ロボット開発とロボットのビジネス展開を視野にいれた多くの仕掛けがある。Willow Garage 社のビジネスモデルの変更、商用路線の強化はその一端にすぎない。以降の章で、国家施策やビジネス戦略との関連性に言及しながら、OSRF 及び ROS の活動について述べる。

3 欧米政府のロボット施策と民間企業連携

2 章冒頭で述べた通り，Willow Garage 社からオープンソースのロボット研究開発をリードしてきたその役割を引継いだ OSRF は，2013 年 2 月に，米国家ロボット施策である National Robotics Initiative (NRI) からの支援を発表した．これにより，ROS は，一民間企業の主導するプロジェクトから，米国の省庁横断型の国家プロジェクトの担い手となった．また，欧州連合の研究開発プログラムである FP7 においても ROS を採用するプロジェクトがある．さらに，ドイツ，カナダの研究所を含む民間企業を中心としたコンソーシアムを形成するなどグローバルな普及がすすんでいる．

以降，3.1 章で，米国政府のロボット施策として，NRI (National Robotics Initiative) 及び，DARPA のロボット関連プロジェクトについて述べる．とくに，DARPA 主催のロボティクスチャレンジプログラムにおける政府調達シミュレーターは OSRF が受託開発を行っているため，その開発要件と競技参加者のシミュレーターの利用形態についても記載する．また，2013 年 3 月に発表された，米国ロボット産業のロードマップと，Robotics Virtual Organization (VO) にも触れる．3.2 章では，欧州連合のロボット施策に触れ，ROS を採用する FP7 内のプロジェクトを記載する．3.3 章で民間企業の動向として，ROS 産業コンソーシアムの活動について述べる．

3.1 米国政府のロボット施策 –NRI と DARPA–

▶ NRI (National Robotics Initiative)

2011 年 6 月 24 日，米国オバマ大統領はカーネギーメロン大学における演説にて，米国の製造業の再活性化をめざし，先端製造パートナーシップ (Advanced Manufacturing Partnership: AMP) を新施策として発表した．この新施策 AMP⁹の核として，次世代ロボット研究開発に取り組む方針を発表し，National Robotics Initiative (NRI) プログラムを起ち上げた¹⁰．

NRI は，米国立科学財団 (the National Science Foundation : 以下 NSF) が主導¹¹し，航空宇

⁹ AMP のホワイトハウス発表詳細については以下を参照のこと

<http://www.whitehouse.gov/the-press-office/2011/06/24/president-obama-launches-advanced-manufacturing-partnership>

¹⁰ NRI のホワイトハウス発表詳細については以下を参照のこと

<http://www.whitehouse.gov/blog/2011/06/24/developing-next-generation-robots>

¹¹ 主導機関である NSF は，2012 年度予算において 3,000 万ドルを NRI に拠出している．

宙局（NASA），米国立衛生研究所（NHI），および農務省（USDA）の全 4 機関が省庁横断型で次世代ロボット研究開発費を 7,000 万ドルまで拠出するとし，共同で公募を実施している．NRI は，人間と共に働き人間をサポートする協働型ロボット開発に力をいれており，製造業の生産性向上だけではなく，4 機関の各々の専門分野で活躍できる能力を持つロボット開発をも視野にいれる¹²．NRI プログラムの詳細は，同日，NSF の文章番号 nsf11553 により発表された¹³．

ここでは，次世代のロボット開発のコンセプトを“Co-robots”としている．これはロボットの稼働のために人間がロボットから離れて作業するモデルではなく，人間の横で直接人々の作業を支援しながら安全稼働する知能をもつ協働型ロボットの実現を意味する．NRI の扱う研究領域イメージを図 4 に，応用領域イメージを図 5 に示す．

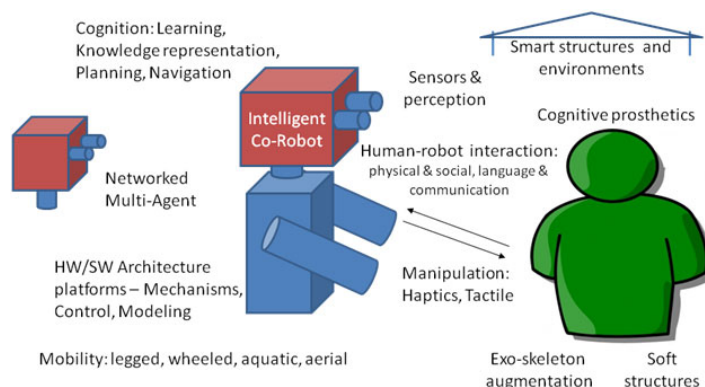


図 4: NRI の研究領域

出典： <http://www.nsf.gov/pubs/2012/nsf12607/nsf12607.htm> (Fig 1. Representative NRI Technology Space)

http://nsf.gov/about/budget/fy2012/pdf/fy2012_rollup.pdf

¹² 4 機関の専門分野で活躍できるロボットとして以下があげられている．

- 製造業部門の労働者の生産性の向上
- 危険かつ高度な任務における宇宙飛行士の支援業務
- 科学者の新たな医療薬品の迅速な発見の支援
- 微生物による汚染を迅速な検出による食品の安全性向上

<http://www.whitehouse.gov/blog/2011/06/24/developing-next-generation-robot>

¹³ NRI プログラムの詳細は以下を参照のこと

http://www.nsf.gov/publications/pub_summ.jsp?ods_key=nsf11553&org=NSF

尚，本プログラムは 2012 年 9 月 11 日に，文章番号 nsf12607 により更新版が発行されている．更新版は以下を参照のこと

http://www.nsf.gov/publications/pub_summ.jsp?ods_key=nsf12607

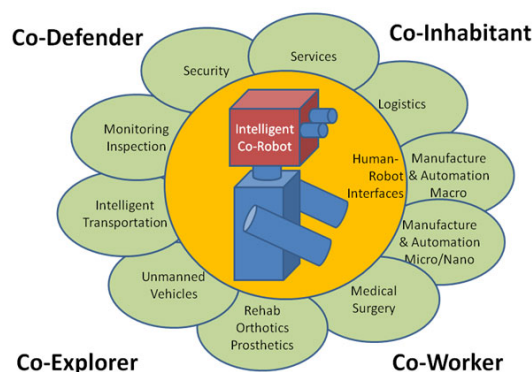


図 5: NRI の応用領域

出典 : <http://www.nsf.gov/pubs/2012/nsf12607/nsf12607.htm> (Fig 2. Representative NRI Application Space)

さらに、2011 年 8 月 3 日、米国防総省 (Department of Defense : DOD) も、the Defense University Research Instrumentation Program (DURIP)を通して NRI の支持を発表した¹⁴。DURIP は、大学機関研究における国家防衛に重要な分野の科学者およびエンジニア教育の強化を目的とする 4,000 万ドル規模のプログラムである。

DURIP は、the Army Research Office (陸軍研究事務所)、the Office of Naval Research (海軍研究所)、the Air Force Office of Scientific Research (空軍科学調査室)、および the Office of the Secretary of Defense (国防長官府)によって支援される。2012 年度の公募では、特に、ロボット工学研究をサポートする装備を獲得するための提案を奨励している。

尚、無人の陸空海及び海底用の車輜と自律システムを含む広範囲の防衛技術研究、及び応用研究は継続的に優先事項であるとされるが、当発表では、DOD による投資が産学連携へさらなる貢献を望む旨で締めくくられる。

補足： 米国特許法改正

このような国家プロジェクトによる次世代ロボット研究開発の促進と時同じく、2011 年 9 月 16 日、The Leanhy-Smith American Invents Act (AIA) と称される米国特許改革法がオバマ大統領によって署名され成立した¹⁵。米国特許法は、先発明者主義から先願主義へ移行し、

¹⁴ DOD の NRI 支持の発表詳細は以下を参照のこと

<http://www.whitehouse.gov/blog/2011/08/03/supporting-president-s-national-robotics-initiative>

<http://www.whitehouse.gov/blog/2012/05/17/robotics-initiative-gets-dod-boost>

DURIP プログラムについては以下を参照のこと

<http://www.onr.navy.mil/~media/Files/Funding-Announcements/BAA/2011/BAA-AFOSR-DURIP-2011.ashx>

¹⁵ オバマ大統領の特許施策のホワイトハウス発表は以下を参照のこと

<http://www.whitehouse.gov/issues/technology>

特許権利化や訴訟における新たな制度が設けられた¹⁶.

▶ DARPA のロボットプロジェクト

DARPA（米国防高等研究計画局）は、軍隊使用のための新技術開発及び研究を行う米国防総省の機関である。大統領と国防長官の直轄組織であり、軍による直接的な干渉を受けないため、比較的自由な研究が行われているといわれる。DARPA は、これまでにいくつかのロボット開発プログラムを主催してきた。

とくに“DARPA グランドチャレンジ”と呼ばれる自律走行車によるロボットカーレースの知名度は高く、2004 年、2005 年と継続的に開催され、2007 年には“DARPA アーバンチャレンジ”として市街地でのロボットカーレースが開催された。この 2007 年のチャレンジでは、スタンフォード大学の自動走行車である“Junior”が、障害物検出システムに ROS の知覚ライブラリを利用しており¹⁷、ROS の自動走行車への適用事例となっている。

近年の DARPA のロボット開発プログラムには、2010 年 2 月頃から始動したマニピュレーション開発のための“ARM (AUTONOMOUS ROBOTIC MANIPULATION)”¹⁸ プログラムがあり、ROS と OpenRAVE¹⁹を利用したマニピュレーションのための統合環境が、カーネギーメロン大学より提案されている²⁰。また、ロボットの機動力と操作性向上のための“M3 (Maximum Mobility and Manipulation)”²¹ プログラムも、現在も進行中である。さらに、2012 年 10 月より開始した DARPA Robotics Challenge もある。以降で、OSRF の提供するロ

¹⁶ 米国特許法改正については以下を参考にした
吉田直樹“2011 年米国特許法改正の概要”，特許研究 PATENT STUDIES No.53, 2012.3
(<http://www.inpit.go.jp/content/100488243.pdf>)

¹⁷ <http://www.ros.org/news/2010/03/robots-using-ros-stanfords-junior.html>

¹⁸ ARM プログラムについては、以下を参照のこと
[http://www.darpa.mil/Our_Work/DSO/Programs/Autonomous_Robotic_Manipulation_\(ARM\).aspx](http://www.darpa.mil/Our_Work/DSO/Programs/Autonomous_Robotic_Manipulation_(ARM).aspx)
<http://thearmrobot.com/aboutProgram.html>
<https://sites.google.com/site/moslemk/home/arm>
<http://www.robotshop.com/blog/en/darpa-develops-affordable-robotic-hand-217>

¹⁹ OpenRAVE については、4.2 章 (6) に詳述。

²⁰ 参照文献[3]

²¹ M3 プログラムについては、以下を参照のこと
[http://www.darpa.mil/Our_Work/DSO/Programs/Maximum_Mobility_and_Manipulation_\(M3\).aspx](http://www.darpa.mil/Our_Work/DSO/Programs/Maximum_Mobility_and_Manipulation_(M3).aspx)
https://www.fbo.gov/index?s=opportunity&mode=form&id=7977e4d033fe1362b836537285d9aae8&tab=core&_cview=1
<http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/military-robots/darpa-wants-robots-that-are-20x-more-efficient-so-do-we>

ボット用シミュレーター “GAZEBO” にとくに着目し、DARPA Robotics Challenge をとりあげる。

▶ DARPA Robotics Challenge

DARPA Robotics Challenge とは、災害発生直後の劣悪な環境下で人の代わりに現場で活動するロボット、つまり非構造環境で活動可能な災害対応型ロボット開発プロジェクトである。2012 年 10 月から 27 ヶ月にわたって開催される。災害現場での活動のため、人間の使う道具を扱えることや、遠隔操作によって非専門オペレーターでもロボットを操作できるインタフェースを兼ね備えたロボットシステム開発をめざしている。

さらに、低価格で利用しやすいソフトウェアを展開し、ロボット開発のコストを下げることをも目的とする。DARPA は、本プログラムの賞金として総額 3,400 万米ドルまで拠出する。

この DARPA Robotics Challenge (以下、DRC) においては、ROS シミュレーターである GAZEBO が、政府調達 (Government Furnished Equipment : GFE) シミュレーターとして採択された²²。従来、GAZEBO は、Willow Garage 社がオープンソースのシミュレーターとして ROS をサポートするために提供していたものであり、現在は OSRF のプロジェクトの一つと位置づけられている。

DRC プログラム 用の GAZEBO は、DARPA 要求に合わせてカスタマイズされており、DRC プログラム内のロボット検証用のテストベッドに位置づけられる。また、GFE シミュレーターは、DRC プログラム内で、リリース更新を続けるとされている。これは競技者の成果を適用した実用テストで、GAZEBO をさらにブラッシュアップしていくということであろう。

とくに、DRC プログラムの初期フェーズは、シミュレーションフェーズと位置づけられており、GFE シミュレーターの開発評価期間になる。以下、DARPA-BAA-12-39 AMENDMENT 1²³より、GFE シミュレーターの調達要件を次に引用する。

²² DRC プログラムの DARPA 発表は以下を参照のこと

http://www.darpa.mil/Our_Work/TTO/Programs/DARPA_Robotics_Challenge.aspx

https://www.fbo.gov/index?s=opportunity&mode=form&id=474a97a4e8ecbfa007d2f805a23e13cd&tab=core&_cview=1

²³ 出典 DARPA-BAA-12-39 AMENDMENT 1 pp.16

<https://www.fbo.gov/index?tabmode=form&subtab=step1&tabid=da874be53bfcd352abee0be9b1cbba0b>
(April 30, 2012)

Expectations for the GFE Simulator include the following:

- (1) Models the three-dimensional environment*
- (2) Allows developers to import kinematic, dynamic, and sensor models of a robot*
- (3) Allows users to send commands (identical to those sent to a physical robot) over a network to and receive data (similar to that received from a physical robot) from the simulated robot*
- (4) Uses physics-based models of inertia, actuation, contact, and environment dynamics to simulate the robot's motion*
- (5) Runs in real-time on the "cloud," likely on Graphics Processing Units (GPUs)*
- (6) Cloud computing resources will be funded by DARPA for up to 100 teams*

上記引用の項 3) にネットワーク利用, 項 5) にクラウド上でのリアルタイム実行, 項 6) にはクラウドからのリソース提供が要件とされているが, この GAZEBO のクラウド化については, 競技開始後, 半年経過した現在では既の実現されている²⁴. また, 別途, 一般ユーザ向け CloudSim が AmazonWebService (AWS) 上へリリースされ, クラウドシミュレーターの Web サービス提供を開始している²⁵.

尚, DRC プログラムは, トラック A から D の 4 つの競技形態があるが, GFE シミュレーターの使用について, トラック B と C の競技者には GFE シミュレーターでの競技が義務付けられて (Required) いる. トラック A と D の競技者は, 使用が望まれる (Desired) とされる²⁶. 参考までに, DRC プログラムの 4 つの競技形態を以下にまとめる. 尚, トラック A に, JSK の出身者らによるチームが, 唯一米国外のメンバーで構成されるトラック A 参加チームとして採択されている.

- トラック A : 独自のシステム (ハード&ソフト) を開発する. このうち事前審査を通過した最大 5 チームに対し, DARPA が 1 チームあたり最大 300 万ドルまで資金援助する.
- トラック B : 制御用ソフトのみを開発し, シミュレーションで競技する. 最大 12 チームに対し, DARPA が 1 チームあたり最大 37 万 5,000 ドルまで資金援助する
- トラック C : DARPA の資金援助なしに制御ソフトを開発し, シミュレーション競技に

²⁴ <http://gazebosim.org/wiki/DRC>

²⁵ <http://gazebosim.org/wiki/CloudSim>

²⁶ 出典 DARPA-BAA-12-39 AMENDMENT 1 pp.9-11
<https://www.fbo.gov/index?tabmode=form&subtab=step1&tabid=da874be53bfcd352abee0be9b1cbba0b>
(April 30, 2012)

参加する。DARPA は最大 100 チームに対し、クラウドコンピューティングのリソースを提供する

- **トラック D:** ハードとソフトを含む完全なシステムを DARPA の資金援助なしに開発して競技に参加する。事前の参加資格審査を通る必要があるが、通れば DARPA が資金援助するチームと同じ条件で競技できる

▶ A Roadmap for US Robotics: From Internet to Robotics

連邦議会ロボット推進議員連盟 (Congressional Robotics Caucus) の会合で、ロボット研究・開発及び教育に関する新しい報告書「アメリカにおけるロボティクスのロードマップ：インターネットからロボティクスへ (A Roadmap for US Robotics: From Internet to Robotics)」が、米国ロボット産業界から発表された²⁷。この報告書は連邦補助金の一部を使って作成されており、アメリカのロボット開発の最新情報や製造業・医療分野におけるロボットの役割について書かれている。

また、ロボットが活躍するであろう分野の将来予測や、今後のロボット市場、関連産業の新規雇用、人間生活の質の向上にどのような影響があるかなどについても触れている。このロードマップは 2009 年に発表されたレポートの改訂版であり、NRI の方針に基づいている。

ロードマップの 1 章 4.10 節 “Cloud” Robotics and Automation for Manufacturing において、Google 社の自動運転車をクラウドロボティクスとして例示。また、クラウドロボティクスによるパフォーマンス向上について、5 項目の指摘があり、その中で ROS についてもふれられている。

5 項目は、1) 幾何学及び機械的情報をあわせもつ、画像、地図、物体データのグローバルライブラリの提供、2) サンプルベースの統計的モデリングと動作計画のためオンデマンドでの超並列計算、3) 軌道、動作制御ポリシー、結果等のロボット間共有、4) ROS のようなポピュラーになりつつある、オープンソースコード、データ、プログラミング設計、検証結果、ハードウェア構成の、人間どうしの共有、5) 問題を検知して、オンデマンドで人に診断を要求する、等である。また、課題としては、セキュリティ、プライバシー、通信状態に伴う QoS/レイテンシがあげられている。

²⁷ 出典 The Road to Cutting-Edge Robots

<http://www.whitehouse.gov/blog/2013/03/20/road-cutting-edge-robots> (March 20, 2013)

▶ Robotics Virtual Organization (VO)

米国のロボティクスロードマップのホワイトハウス発表にあわせ、NRI による Robotics Virtual Organization (VO)²⁸が発表された。当面は、NSF によって支援される。VO は、上記ロードマップの発行を行い、さらに、アメリカにおけるロボティクスが、基礎研究、経済的影響、幅広いコミュニティとのつながり、プロモーションの質などの面で、世界最高であるために、ネットワーキング・プラットフォームを提供し、科学・エンジニアリング・工学・数学分野等で躍進をめざすとしている。VO の具体的な活動を以下にあげる。

- 米国のロボティクスロードマップの維持，拡大
- ロボット利用に関する機関・企業へのコンサルテーション
- K-12（幼稚園から高等学校卒業までの教育期間）からの，ロボット工学を含めた米国経済成長のための人材育成を行う教育組織体制。教育ツール提供やサマースクールの開催を含む
- 基礎研究から商業アプリケーションへ移行するための仕組みとベストプラクティスの研究。これには，標準化，共通プラットフォームの活用における課題を含む
- 社会に広くロボティクス情報を展開し，普及するためのメカニズムを整理，確保する
- 研究やトピックスの調整の観点から，Special Interest Group を整備，支援し，リソースを提供する。これには特に，Web 配備，メーリングリスト，ディスカッションフォーラムの形成などがあげられる
- 政府投資と，産業界・学界・一般社会全般をコーディネートする仕組みづくりを行う

²⁸ <http://www.robotics-vo.us/>（Robotics VO サイト）

3.2 欧州連合のロボット施策 –FP7 と Horizon2020–

2007 年から開始された EU の研究開発プログラム FP7 内でも、情報通信技術分野 (FP7-ICT) の枠組みで、認知システムとロボット工学 (Challenge2 : Cognitive Systems and Robotics) を課題とし、ロボット研究を重点化している。過去 5 年で 120 余りのロボット研究プロジェクトが発足し約 6 億ユーロの資金が投入された。FP7 は、2014 年以降は研究革新プログラム Horizon2020 へ引き継がれることが発表されており、2014 年～2020 年のプログラム全体の予算規模は約 800 億ユーロである。

2012 年 9 月に、欧州委員会は、官民連携でのロボット分野へのさらなる取組み強化 (PPP) を発表しており、年間 150 億ユーロ規模のロボット市場を欧州企業が獲得することを目指す。とくに、レスキュー、セキュリティ、クリーニング分野に着目し、EU 内のプロフェッショナルサービスロボットの今後数年間の 40% 成長を予測している²⁹。

以降、FP7 内で ROS を採用するロボット研究プロジェクトの 3 例を示す。

▶ RoboEarth プロジェクト³⁰

RoboEarth は、クラウドコンピューティングを利用した、ロボットのための World Wide Web を実現しようとするクラウドロボティクスプロジェクトである。FP7-ICT プロジェクト内では、実世界環境モデリングと行動学習のための知識ベースのロボット間共有を目指し、2009 年 12 月～2013 年 11 月をプロジェクト期間とし³¹、6 団体から構成される。

コーディネーターは、アイントホーフエン工科大学 (オランダ)、参加者は、シュトゥットガルト大学 (ドイツ)、ミュンヘン工科大学 (ドイツ)、チューリッヒ工科大学 (スイス)、サラゴサ大学 (スペイン)、産業界から Philips エレクトロニクスである。

RoboEarth は、民間企業団体に構成される産業諮問委員会を有し、FP7 の枠組みを超えたグローバルなコンソーシアム団体としても活動している。委員会のメンバーは、Aethon 社 CTO の Spencer Allen, KUKA 社の Rainer Bischoff, Philips ヘルスケアの Caspar Garos, 元

²⁹ FP7-ICT 及び Horizon2020 のロボットへの取組みは以下を参照のこと。

http://cordis.europa.eu/fp7/ict/home_en.html

http://europa.eu/rapid/press-release_IP-12-978_en.htm?locale=en

<http://ec.europa.eu/digital-agenda/en/news/commission-and-european-industry-commit-bigger-and-better-robotics-sector>

³⁰ RoboEarth 公式サイトは以下を参照のこと。

<http://www.roboearth.org/>

³¹ FP7 内の RoboEarth プロジェクトの詳細は以下を参照のこと。

http://cordis.europa.eu/projects/rcn/93278_en.html

WillowGarage 社 Director で OSR 財団 CEO の Brian Gerkey, Google リサーチの Ryan Hickman と James Kuffner, Adept テクノロジーの Paul James, ABB ロボティクス社の Volker Miegel, サービスロボットの SCHUNK 社の Christopher Parlitz, Demcon 社 CEO の Dennis Schipper, KIVA システムの Pete Wurman である。つまり, RoboEarth プロジェクトは, 共同研究プロジェクト組織と企業コンソーシアム組織の 2 重構造を持つ。

IROS2013 (2013 年 11 月東京開催) では, RoboEarth によるワークショップが開催される³²。メイン主催者は, スイス連邦工科大学チューリッヒ校の Dr. Markus Waibel であり, カリフォルニア大学バークレー校 (米国), スウェーデン王立工科大学 (スウェーデン), FP7 共同プロジェクトに参加するサラゴサ大学 (スペイン), チューリッヒ工科大学 (スイス), WillowGarage 社 (米国) の各研究者が主催者として参加する。

RoboEarth は, クラウド技術の分散データベース共有により, 迅速な学習を可能とし, ロボットをより複雑なタスクに適用すること, あらかじめ計画されていないタスク実行をも可能とすることを旨とする。RoboEarth のアーキテクチャを図 6 に示す。尚, RoboEarth のソフトウェアコンポーネントには推論エンジン “KowRob³³”, クラウドエンジンとしての “ラピュタ³⁴”, “RoboEarth データベース” 等がある。

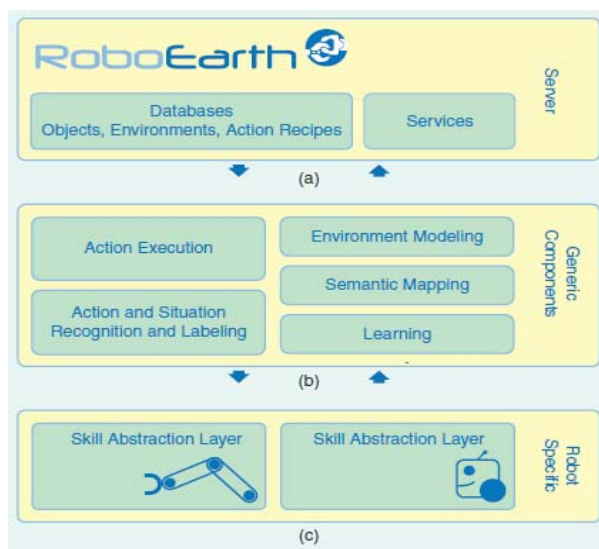


図 6: RoboEarth’s three-layered architecture

出典 : M. Waibel et. al. “Robo Earth”, Robotics & Automation Magazine, IEEE, June 2011, pp.69-82, 2011

³² <http://www.robearth.org/iros2013>

³³ RoboEarth の推論エンジン “KnowRob” については, 4.2 章 (5) に詳述。

³⁴ RoboEarth のクラウドエンジン “ラピュタ” については, 4.3 章 “RoboEarth クラウドエンジン: ラピュタ” の項に詳述。

▶ HANDLE プロジェクト ³⁵

HANDLE プロジェクトは 2009 年 2 月～2013 年 2 月に行われ、認識と学習と推論を組み合わせ、将来的には義手としての利用も視野にいたした人間の手に近似したロボットハンド開発を目指している。プロジェクトは EU 加盟国の大学機関、民間企業、政府機関の 9 団体から構成される。

コーディネーターは、大学機関の UPMC (フランス)，参加者は、大学機関として、オrebro 大学 (スウェーデン)，UC3M (スペイン)，コインブラ国立大学 (ポルトガル)，IST (ポルトガル)，KCL (英国)，ハンブルグ大学 (ドイツ)，産業界から Shadow Robot Company (英国)，政府機関としてフランスの原子力・新エネルギー庁 (CEA) が参加する。

Shadow Robot Company は OSRF のグローバルコンサルティングネットワークにも参加しており、特に ROS と関連が深い。2012 年 10 月 7 日より開催された IROS2012 では「Handling ROS Tutorial」として、Willow Garage の研究者と HANDLE プロジェクトへの参加団体との合同で、ROS を用いたロボットハンドのサンプルプログラムのチュートリアルが開催された³⁶。

HANDLE プロジェクトで公開されている実装構成を図 7 に示す。各団体の下位の制御プロセスに対し、ROS の環境センシング、障害検知、環境分析等の上位のタスクプロセスを利用している。とくに、認識や姿勢推定に 3D 点群処理の PCL (Point Cloud Library) ³⁷を適用するため ROS を利用したといえる。

³⁵ HANDLE プロジェクトの詳細は以下を参照のこと。

<http://www.handle-project.eu/>

http://cordis.europa.eu/projects/rcn/089250_en.html

³⁶ Handling ROS Tutorial の詳細は以下を参照のこと。

<http://mrl.isr.uc.pt/events/iros2012tutorial/>

<http://mrl.isr.uc.pt/events/iros2012tutorial/download/leaflet-ROSTutorial-IROS2012-forDownload.pdf>

³⁷ 3D 点群処理の“PCL (Point Cloud Library)”については、4.2 章 (2) に詳述。

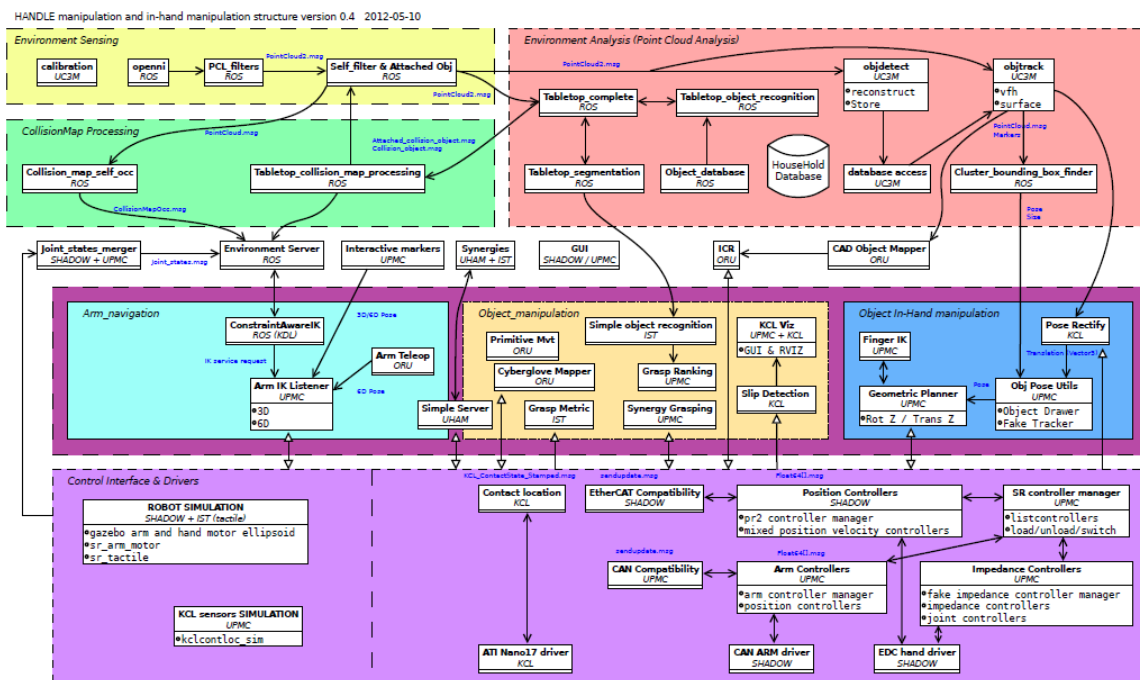


図 7: HANDLE manipulation and in-hand manipulation structure ver.0.4

出典 : <http://www.handle-project.eu/index.php/project/software-architecture>

▶ CLoPeMa プロジェクト 38

CLoPeMa とは、Clothes Perception and Manipulation の略であり、プロジェクト期間は 2012 年 2 月～2015 年 1 月である。アームによる衣服や織物の知覚とマニピュレーション操作によるロボットサービスの汎用化を目指している。プロジェクトは 4 つの EU 加盟国からの 5 団体から構成され、コーディネーターは、CERTH (ギリシャの総合研究機関)、参加者は、NEOVISION (チェコの視覚技術企業)、チェコ工科大学 (チェコ)、グレスゴー大学 (英国)、ジェノバ大学 (イタリア) が参加する。担当分野は、CERTH がプロジェクト管理と知能プランニング、NEOVISION がシステムインテグレーション、チェコ工科大学が産業用ロボットの統合と深度データ解析、グレスゴー大学が 3D ビジョンのハードウェア開発、ジェノバ大学が触覚センシングの用いたグリッパー開発を行う。異なる分野の研究機関が一つのプロジェクトに参加し、ロボットサービス開発を推進する。

³⁸ CLoPeMa プロジェクトの詳細は以下を参照のこと。
<http://www.clopema.eu/>
http://cordis.europa.eu/projects/rcn/100800_en.html

アームは、YASUKAWA MOTOMAN 製の MA1400 を双腕に組み合わせ（図 8），これを操作するために ROS-I³⁹を利用し，ROS をベースとした C++と Python による開発を行っている⁴⁰。成果はオープンソースでリリース予定である。



図 8: MA1400 の双腕利用

出典：
<http://rosindustrial.tumblr.com/post/29802285320/clopema-project-leverages-ros-industrial>

尚，このプロジェクトは，FP7-ICT 内の別プロジェクトでロボットの触覚センシングや知覚タスクなどの認知研究に取り組む ROBOSKIN とも関連がある⁴¹。

3.3 民間企業連携 –ROS 産業コンソーシアム–

本章では，民間企業を中心としたのグローバルな連携の取組みとして，“産業用ロボット”の ROS 利用の取組みである ROS 産業コンソーシアムについて記載する。

▶ ROS 産業コンソーシアム

ROS 産業コンソーシアムは，“産業用ロボット”の ROS 利用の取組みである。ROS 産業コンソーシアムは，米国テキサス州の独立非営利研究開発機関の Southwest Research Institute®（サウスウェスト研究所：以下，SwRI）が中心となって推進し，欧州からドイツの Fraunhofer 研究所生産技術・オートメーション部門（IPA）が参加している。また，OSRF も，2013 年 2 月の Willow Garage 社のビジネスモデル変更直後（つまり，NRI の OSRF への支援発表の直後）に，ROS 産業コンソーシアムへの正式参加を表明した⁴²。

ROS 産業コンソーシアムは，2012 年 2 月に発表された ROS 産業プロジェクトから発展した。同プロジェクトは，当時 ROS を率いていた Willow Garages 社と，米国の産業ロボット企業の Adept Technology, Inc.（アデプト・テクノロジー），SwRI の，共同プロジェクトと

³⁹ ROS-I とは，ROS を産業用ロボットへ適用したオープンソースのライブラリ群である。ROS-I については，3.3 章の ROS-I の項に詳述。

⁴⁰ CLoPeMa プロジェクトの ROS-I 利用については，以下を参照のこと。
<http://rosindustrial.tumblr.com/post/29802285320/clopema-project-leverages-ros-industrial>

⁴¹ ROBOSKIN プロジェクトの詳細は以下を参照のこと。
<http://www.roboskin.eu/>

⁴² OSRF の ROS 産業コンソーシアム参加発表記事は以下を参照のこと。
<http://www.osrfoundation.org/blog/osrf-to-participate-in-ros-industrial-consortium.html>

して発足したが、2012年8月頃に、ROS 産業コンソーシアムと名称を変更し、現在は、ROS-Industrial open-source software（以下、ROS-I）による高度な産業技術を育成するためのオートメーション開発の国際ネットワーク組織と位置づけられている⁴³。

ROS 産業コンソーシアムは、産業用ロボットのもつ信頼性と、オープンコミュニティの柔軟性を組み合わせた、ROS によるロボットアプリケーション開発により産業用ロボット開発を容易にし、開発コストを削減することを目指している。現在は、とくに従来のロボットシステムやその開発ツールやコミュニティと、ROS のソフトウェアやライブラリ間のブリッジ提供、及び、コラボレーションのための共通のフレームワーク提供を行うとする。ROS 産業コンソーシアムの目的は以下である。

- 産業用ロボットの研究者や専門家のコミュニティをつくる
- 産業に関連する ROS アプリケーションを一箇所にあつめる場（one-stop location）を提供する
- 産業用途のニーズを満たす、堅牢で信頼性の高いソフトウェアを開発する
- ROS の長所と既存の産業技術を組み合わせる。例えば、ROS の上位レベルの機能と産業用コントローラの下位レベルの信頼性や安全性を組み合わせる
- インタフェースの標準化により、ハードウェアに依存しないソフトウェアを促進する。
- ROS 共通アーキテクチャを利用して、最先端の産業用アプリケーションを簡単に適用する手法（an easy path）を提供する
- シンプル、かつ使いやすく、しっかりとドキュメント化された API を提供する

ROS 産業コンソーシアムの当面の目標は産業用オートメーション分野の多様なマニピュレーションとその周辺機器を、ROS 機能によりクロスプラットフォームにサポートすることである。長期的な目標としては ROS 産業ロードマップを示しており、図9が公開されている。

⁴³ ROS 産業コンソーシアムの詳細は以下を参照のこと。
<http://rosindustrial.org>

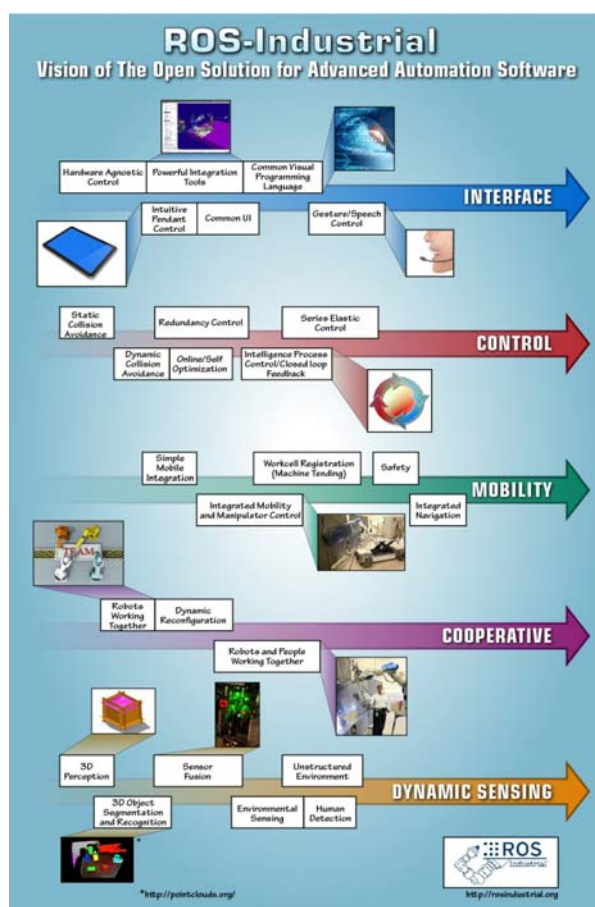


図 9: ROS 産業ロードマップ

出典 : <http://www.swri.org/4org/d10/msd/automation/ros-industrial-consortium.htm>

▶ ROS-I

ROS 産業のソフトウェア技術要素を ROS-I と呼ぶ。ROS-I は、BSD ライセンスを基本とする ROS ソフトウェア一式である⁴⁴。ROS-I には、産業用ロボットハードウェアのためのドライバ、ツール、ライブラリ群がある。ROS のみならず、OpenCV や PCL で培われた 3D / 2D の知覚処理技術やライブラリも利用しており、ROS-I の長所として以下があげられている。

- ROS の活用：逆運動学を利用したマニピュレーション、高度な 2 次元（画像）と 3 次元（点群）知覚処理、開発環境／シミュレーター／視覚化ツールの充実

⁴⁴ ROS-I の詳細は、ROS-Wiki（ROS の技術支援サイト）内に公開されている。

<http://www.ros.org/wiki/Industrial>

ROS-I のソースコードは以下に公開されている。

<https://code.google.com/p/swri-ros-pkg/>

- 適用分野の拡大：ロボットの作業ピース（robot work pieces）を識別する知覚処理技術を利用して非構造の動的な環境へ対応し、クローズドフィードバック制御による動的経路計画を可能とする
- タスクレベルのロボットプログラミングを簡素化：経路計画と教示を無くす。最適パスは、終点を与えることで自動計算し、障害回避を行う。また、抽象プログラミングの原則を適用している
- コストの削減：BSD ライセンスを適用。産業用ロボットのプラットフォーム間、及びセンサのインタフェースを標準化

インタフェースの標準化について、SwRI の研究者 Shaun Edwards らにより、産業用マニピュレータの ROS 互換について述べられている。ROS-I の提供機能と定義を表 3 に、サポート実績のある産業用マニピュレータ機器情報と機能を表 4 に示す。

表 3: ROS-I の提供機能と定義

機能名	定義
位置ストリーミング	ジョイントの位置がコントローラにストリーミングされる。移動速度は、コントローラにより固定される
軌道ダウンロード	関節位置の完全な軌道がコントローラにダウンロードされる。コントローラに速度に制約される場合もある
軌道ストリーミング	軌道がコントローラにストリーミングされる。軌道速度がコントローラに制約される場合を除き、位置ストリーミングと似ている
トルク制御	トルクコマンドは、コントローラに直接送信される。これはリアルタイムインターフェースである（まだ ROS 内ではサポートされていない）
アームナビゲーションパッケージ	ロボット特有の計算幾何学が、アームナビゲーションパッケージと関連付けられて定義される必要がある。この情報は、経路計画と干渉チェックのために使用される。各ロボットモデルのために作成されているが、全体のロボットセルに対して再作成する必要がある。再作成については、別途チュートリアルを参照

出典：http://www.ros.org/wiki/Industrial/supported_hardware

表 4: ROS-I の産業用ロボット検証実績

メーカー	コントローラ	位置ストリーミング	軌道ダウンロード	軌道ストリーミング	トルク制御	マニピュレータ	Arm Nav. Pkg
Motoman	DX100	YES	NO	NO	NO	SIA10D	YES
						SIA20D	YES
						Other	NO
Fanuc	r30iA	YES	NO	NO	NO	m430iA2F	YES
						m10iA	YES
						m16iB20	YES
						Other	NO
Adept	CX, CS	YES	NO	NO	NO	Viper 650	YES

Universal Robot	UR 5	YES	NO	NO	NO	UR 5	YES
ABB	IRC5	NO	YES	NO	NO	IRB-2400	YES
						IRB-5400	YES

出典 : http://www.ros.org/wiki/Industrial/supported_hardware

▶ ROS 産業カンファレンス

Fraunhofer IPA により、2012年10月17日に、ROS 産業に関するカンファレンスがドイツで開催された⁴⁵。ドイツ、イタリア、デンマーク、キルギス の欧州勢と米国から SwRI と YASUKAWA 米国法人が参加した。総司会は Fraunhofer IPA の取締役の Alexander Verl が、進行は同社の Ulrich Reiser がつとめた。当日プログラムを表 5 に示す。

表 5: ROS 産業カンファレンスプログラム (2012年10月17日開催)

	発表者	タイトル	所属	役職
8:30	Coffee Break			
9:00	Alexander Verl	Welcome and Introduction	Fraunhofer IPA, Stuttgart	Director
9:15	Shaun Edwards	ROS Industrial - Open Software Components for Industrial Automation - The ROS Industrial Consortium, commercial support for an open source solution - Overview of the open source Robot Operating System - Open software components for industrial automation	Southwest Research Institute, Texas, USA	Manufacturing System Department
10:15	Alexander Bubeck	Model driven engineering: A Way to Handle Complexity, Quality and Processes in component based Robot Systems - Introduction to model driven engineering (MDE) - Application of process and component models to ROS - Development of ROS systems with the BRICS IDE, an Eclipse based MDE-toolchain	Fraunhofer IPA, Stuttgart	Project Manager
10:45	Coffee Break			
11.15	Christopher Parlitz	Industrial Gripping Technology and Components for mobile Production Assistants - Components of mobile manipulation - Robotics as "science of integration" - Example applications - ROS as possible enabler	Schunk GmbH & Co. KG, Lauffen/Nekar	Product Specialist Mobile Gripping Systems

⁴⁵ プログラム詳細は、以下を参照のこと。

http://www.ros.org/news/2012/09/11/ROSIndustrialWorkshop.pdf/Flyer_17-10-2012_eng.pdf

11:45	Florian Weißhardt	Accelerating Technology Transfer through Open Source Components - Existing open source components - Description of application and hardware components - Experiences on system integration und application development	Fraunhofer IPA, Stuttgart	Project Manager ROS Industrial
12:15	Lunch			
13:15	Lab Tour at the Fraunhofer IPA facilitie			
14:00	Benjamin Pitzer	ROS for Product Development - ROS - A platform for academic research only? - Analysis of ROS quality of code compared to code developed according to industrial standards - Customization of ROS to industrial computation architectures	Robert Bosch LLC, Palo Alto, California, USA	Senior Research Engineer
14:30	Cristina Cristalli	New Challenges for Mobile Service Robots conceived to Work in Industrial Environments - Service and industrial robotics: two different worlds? - Application case: Mo.Di.Bot: Mobile Diagnostic Robot - Hardware setup, software architecture and system capabilities - Validation in real-world scenarios	Loccioni Group, Italy	Research for Innovation Manager Loccioni Group
15:00	Robert Eidenberger	Developing Industrial Applications with ROS - Robotics at Siemens Corporate Technology: A survey and application examples - The Active Perception Framework and the impact of ROS - Key requirements of ROS towards industrial applications	Siemens AG, München	Corporate Research and Technologies
15:30	Coffee Break			
16:00	Erik Nieves	Why Industrial Robot Manufacturers Should Care about ROS - ROS speeds time to market by acting as a force multiplier for development - The implications of ROS for peripherals and associated technologies - ROS Industrial as an enabler for wide adoption	Yasukawa Motoman Robotics, USA	Technology Director
16:30	Kurt Nielsen	How to Work with Innovation, Automation and Research when being a Manufacturing Company? - How to select and implement strategic automation solutions - Project examples (videos)	Danish Institute of Technology Institute, Odense, DK	Team leader Robot Technology
17:00	Final Discussion			
17:30	End of Conference			

出典 : http://www.ros.org/news/2012/09/11/ROSIndustrialWorkshop.pdf/Flyer_17-10-2012_eng.pdf

▶ ROS 産業コンソーシアムキックオフミーティングと FTP

2013年3月6日から7日にかけて、ROS 産業コンソーシアムキックオフミーティングが SwRI にて開催された⁴⁶。コーディネーターは、SwRI であるが、参加組織は、ドイツ Fraunhofer 協会 IPA, カナダ国立研究所, OSRF, 民間企業としては、Boeing, Edison Welding Institute, HDT Robotics, Intuitive Research and Technology, Kawasaki Robotics, Rockwell Automation, Spirit AeroSystems, UT Austin Nuclear Robotics Group, Willow Garage, Yaskawa Motoman Robotics の計 14 組織である。

キックオフミーティングでは、SwRI の研究者スタッフ等による ROS 産業コンソーシアムの説明、Willow Garage 社の Dr. Sachin Chitta により、同社のサポートする運動計画フレームワークである MoveIt! や Yaskawa Motoman Robotics の Erik Nieves 氏による産業用ロボットの ROS 対応の必然性についての発表等が行われた。

この会合では、“Focused Technical Projects (FTP)”⁴⁷ が紹介された。FTP とは、ROS 産業の参加企業で、特定の研究テーマに対し研究グループを形成する。この FTP グループで、新規研究開発における機器や人件費を、グループメンバーで分担して負担し、負担したメンバーで、研究成果を共有する。

ROS-I は、オープンソースプロジェクトのため、既定ではすべてのデータが公開される。だが、FTP で推進した研究成果については、各 FTP グループの参加メンバーの審議により、研究成果のリリース時期の決定（一般公開を遅らせる等）や、特定のリソースや情報について公開不可とすることができる。このように、ROS-I では知財マネジメントへの取組みが開始している。

3.4 まとめ

米国では、政府の OSRF 支援による「官と民」の連携により次世代ロボット開発体制を強化、一方の欧州連合でも、FP7 と Horizon2020 によりロボット研究を着実に推進している。これに加え、企業コンソーシアムの形成による米国と欧州の民間連携も活発化している。

本章では、これらの動向を背景とし、米国政府組織とそのロボット開発プログラム、それらのプログラム内の ROS 利用と OSRF の受託開発、FP7 共同プロジェクトの ROS 利用、米国独立非営利研究機関 SwRI が主導する ROS 産業コンソーシアムをとりあげた。これらから、ROS を支える組織体制がみえてくる。

⁴⁶ <http://rosindustrial.org/ric/announce2.htm>

⁴⁷ <http://www.rosindustrial.org/ric/focused.htm>

OSRF のスポンサー関係を中心に、組織間のつながりを図 10 に示す。ここでは OSRF にフォーカスし、FP7 共同プロジェクト内の構造は簡単のため省略するが、この図より、OSRF は官と民をつなぐポイントとして機能すると同時に、国際展開への起点となっていることがわかる。

例えば、2章であげた、OSRF が抱える ROS コンサルティング企業ネットワークを構成する一企業である Shadow Robot Company (英国企業) が、3.2 章の欧州 FP7 プロジェクト内で大学や政府機関と共同研究を行うなど、官と民の相互作用により ROS ネットワークを強化する仕掛けがされている。

また、OSRF が国家機関の受け皿としての役割色が強いのに対し、ROS 産業コンソーシアムが既存のロボット企業や研究機関連携の受け皿の役割をもつともいえる。つまり、OSRF は、官とのパイプを強化すると同時に、スポンサーとなる大手民間企業、既存のロボット企業、さらに、ROS による事業化に新規に取り組むベンチャー企業をとり入れた、民間連携の体系をも形成し、「官と民」の資金と技術の交流ポイントとして機能する組織体であることがわかる。

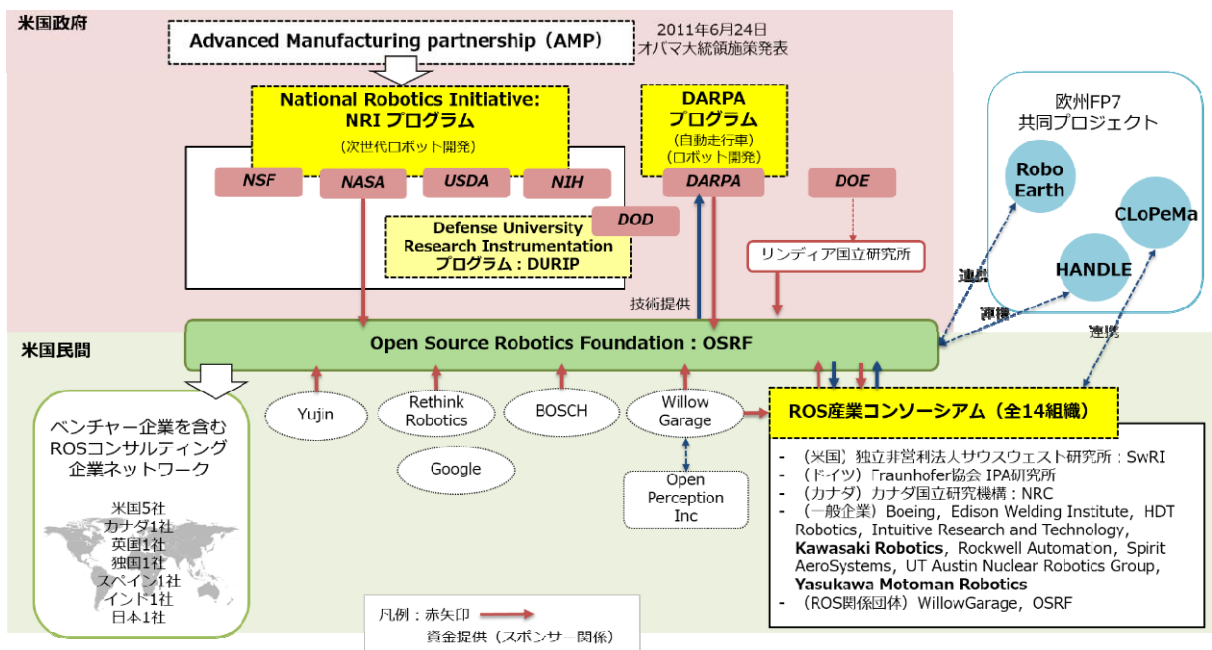


図 10 : OSRF の組織間のつながり

4 ロボット技術開発の展開と ROS

本章では，ROS の台頭と時を同じく展開する，オープンソースロボティクス技術と，そのビジネス展開を視野にいたれた取組みを捉える．4.1 章でロボットの低価格化，4.2 章で ROS と関連性のある OSRF 以外のオープンソース団体によるロボット要素技術の展開，4.3 章でロボットへのクラウドコンピューティング技術適用の研究開発事例を紹介する．

4.1 低価格ロボット

ROS プロジェクトの進行と時を同じくして進行していた低価格ハードウェアの開発として，Rethink Robotics 社の BAXTER 開発と，スタンフォード大学の Dr. Morgan Quigley ら低価格研究用ロボット開発をとりあげる．尚，前者の Rethink Robotics 社は現在 OSRF のスポンサーであり，後者の Dr. Morgan Quigley は，OSRF のメンバーである．

▶ BAXTER

2012 年 9 月，Rethink Robotics 社の Dr. Rodney Brooks⁴⁸ が，低価格ロボット BAXTER を発表した（図 11 参照）．販売価格は，1 体 22,000 米ドルである．BAXTER は非構造化における活動，人間のいる空間での稼働を主眼とした協働型ロボットであり，投資機関である Bezos Expeditions や Charles River Ventures の 6,200 万米ドルの出資により約 5 年間かけて開発された．

リリース発表では，米国のリショアリングの流れが強く意識され，とくに米国内の中小製造企業での活用がうたわれている．筐体は約 75kg，7 軸双腕型で可搬質量は各アーム 2.25kg，5つの内蔵カメラ，操作パネル用 LCD，環境探知のためのサウンドセンサーをもつ．最大速度は 1.0m/sec であり作業の高速性を追求したものではない．

低価格を実現するために，安いハード部品を組み合わせて構成され，例えば，ギアを従



図 11: BAXTER

出典：Erico Guizzo “The Rise of the ROBOT WORKER” IEEE Spectrum 2012.10 pp28-35

⁴⁸ Dr. Rodney Brooks は，サブサンプション・アーキテクチャの提唱者であり，MIT コンピュータ科学の人工知能研究所元所長，及び，MIT ロボティクスの元教授である．また，iRobot 社の共同創設者兼 CTO として Roomba をリリースした．現在は，Rethink Robotics 社を設立し，会長兼 CTO として BAXTER の開発を行っている．

来の 5 分の 1 の価格で調達したとされる。また、部品の 75%は米国内で調達している。アームには、SEA (Series Elastic Actuator : 直列弾性アクチュエータ) と呼ばれる弾性要素を減速機に直列に結合した機構を採用している。

ソフトウェア基盤には Linux ベースの ROS を利用し、これも低価格の一因といえる。BAXTER は、プログラミングに拠らないタッチパネル操作による教示が可能であり、その簡易性を特徴としているが、ROS 互換の SDK もリリース予定であり、BAXTER のためのオープンソースフレームワーク開発も検討されている⁴⁹。

▶ 低価格研究用ロボット

初期の ROS 提案者であり、現在 OSRF のメンバーでもあるスタンフォード大学の Dr.

Morgan Quigley らは、ロボット研究の普及拡大には低価格マニピュレータが不可欠である

とし、IROS2011 においてロボットの低価格化を目指した 7-DOF マニピュレータを提案した⁵⁰。

提案では、ロボット工学研究室で使われるハイエンド機器を、実際に研究室で安全に稼働させるための調整を加えた状態（つまり、人が近くにいるにも安全といえる状態）と同等程度のパフォーマンスを目指している。

部品価格の合計は 4,135 米ドルと算出しており⁵¹。コストダウンの工夫として、低価格のステッピングモータにタイミングベルトとケーブル制御を組み合わせることでバックラッシュの影響をなくしている。また、コストとトレードオフであるが、コンパクトな減速機を採用しアーム体積は大きめである。

アームの付け根側 4-DOF には BAXTER と同様に、直列弾性の機構を採用し、先端側

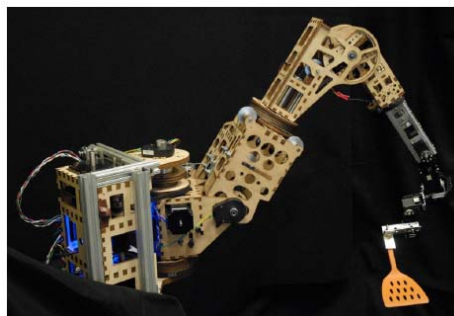


図 12: 低価格マニピュレータ

出典 : Morgan Quigley, Alan Asbeck, and Andrew Y. Ng, "A Low-cost Compliant 7-DOF Robotic Manipulator (Fig. 1)" IROS 2011, 2011

⁴⁹ How Rethink Robotics Built Its New Baxter Robot Worker, <http://spectrum.ieee.org/robotics/industrial-robots/rethink-robotics-baxter-robot-factory-worker> (2012.10)

⁵⁰ 参照文献[10].

⁵¹ 文献[10]より、部品価格合計 4,135 米ドルの内訳は、以下となる。

Motors 2,035 米ドル (Steppers 700 米ドル + Robotics servos 1,335 米ドル) , Electronics 750 米ドル, Hardware 960 米ドル, Encoders 390 米ドル。ただし、これは部品の費用であり、実際の販売の場合は、目的に応じた追加デザイン費用、テスト、梱包などのため、もう少し費用は割高になるとの記載がある。

3-DOF には Dynamixel 製サーボモータ RX-64 を採用する。さらに地面近くにモータ位置を維持することでアームの空中移動を最小限にし、人への安全性を考慮した協働型モデルとしている。図 12 に、プロトタイプを示す。プロトタイプ実装では、全質量 11.4kg、可搬質量 2kg、最大速度 1.5m/s、繰り返し位置決め精度 3mm を測定している。

4.2 ロボット要素技術のオープンソース団体

ROS の周辺には、ROS と連携したロボット要素技術開発を行う民間や大学機関の主導するオープンソースソフトウェア団体の活動がある。これらの団体は、単純な要素技術にとどまるものから、プラットフォーム指向の団体までであるが、これらの技術を利用することでロボットシステムを構築できる。

本章では、ロボットの環境やオブジェクトの知覚/視覚認識の“OpenNI”“OpenCV”“PCL”，ロボット移動のための空間地図作成の“OctoMap”，推論エンジンの“KnowRob”，アームとハンドの軌道計算エンジンの“OpenRAVE”，WillowGarage 社のサポートする MoveIt! をとりあげ、各技術について概観する。

(1) OpenNI ⁵²

OpenNI は、“the Open Natural Interaction”の略である。Kinect の深度センサを開発した PrimeSense 社が中心となって、2010 年 11 月に非営利団体として設立された。Kinect をはじめとする NI (Natural Interaction) デバイスの共通インタフェースとして、3D センシングのソフトウェア開発フレームワークを提供する。

OpenNI の組織メンバーは、Kinect 深度センサを開発した PrimeSense 社をはじめとして、Willow Garage 社、PCL をサポートする非営利団体である OpenPerception (本章 (2) 項にて後述)、Kinect とほぼ同形の汎用深度センサ Xtion を発売した ASUS 社等で構成される。

Kinect とは、Xbox360 のゲームコントローラーとして Microsoft から発売されている入力装置である。RGB カメラ、深度画像センサ、赤外線 (IR) センサ、マルチアレイマイク、加速度センサ、チルトモータなどを搭載する。とくに、これまで高価だった深度センサが 150 米ドル程度で手に入るようになったことは特筆に値する。これに、OpenNI により提供される姿勢認識技術を組み合わせることにより、人の声やジェスチャーやモーショントラッキング等、人の動作検出を含めた実環境データ利用のアプリケーション開発が可能とな

⁵² <http://www.openni.org/>

った。

これが Web 開発者をも取り込んだ普及につながり、Kinect は、汎用深度センサと姿勢認識技術にブレイクスルーをもたらしたといわれている。ただし、このブレイクスルー技術のオープン化は Microsoft によって推進されたのではなく、Kinect のオープン化を推し進める多方面からのアプローチによって実現された。

ROS は OpenNI をいち早くサポートし、ROS から OpenNI を利用するパッケージは現在も更新されている⁵³。また、Willow Garage 社は、安価なパーソナルロボット・キット⁵⁴として、Kinect と他社の製品を組み合わせ“TurtleBot”として販売している（図 13）⁵⁵。このロボット部品は、Microsoft 社の Kinect がロボットの視覚・認識機能を担い、iRobot 社の“Create”（同社ルンバと同形の移動型ロボット）と、ASUS のラップトップ型パソコン、専用ボードで構成されている。また、ユーザが自分で部品買い揃えて組み立てることも想定されており、パーツ販売も行っている。

また、2012 年 5 月には、移動部パーツの Create を、Yujin Robot 社（韓国）の“Kobuki”に置き換えた“TurtleBot2”も発表され⁵⁶、販売が行われている。これは、アジア・欧州圏への輸出対応のためのリリースとされている。



図 13: Willow Garage “TurtleBot”

出典 : B. Garkey et. al. “Robot Developer Kits”IEEE Robotics & Automation Magazine; 2011.9

⁵³ ROS-Wiki サイト内の OpenNI 説明は以下を参照のこと

http://www.ros.org/wiki/openni_kinect

⁵⁴ ROS ロボット開発キット “TurtleBot” の詳細は以下を参照のこと

Brian Gerkey and Ken Conley “Robot Developer Kits” Robotics & Automation Magazine, IEEE, September 2011, pp.15, 2011

⁵⁵ <http://turtlebot.com/>

⁵⁶ TurtleBot 2 Prototype Unveiled at ROSCon; IEEE Spectrum 2012 年 5 月 21 日

<http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/diy/turtlebot-2-prototypes-unveiled-at-roscon-2>

OpenNI SDK2 のアーキテクチャを図 14 に示す。Middleware 層として、PrimeSense 社が開発した NITE という姿勢認識ライブラリが用意されている。NITE により、スケルトントラッキング、ハンドトラッキング、ジェスチャー認識といった機能が利用可能になるが、NITE は隠ぺいされており、PrimeSense 社は、赤外線プロジェクターで特徴パターンを照射してそのパターンの歪みから三角測量の手法で距離を導出する方式、その照射パターン技術、深度画像から骨格モデルを推測する方式のそれぞれに対し特許出願している⁵⁷。

尚、OpenNI は、NITE 制御機能や NITE アルゴリズムを利用しているため、実際の開発環境では NITE を直接利用しない場合でも、NITE が必要になる。ライセンスキーは公開されており、自由に利用可能である。

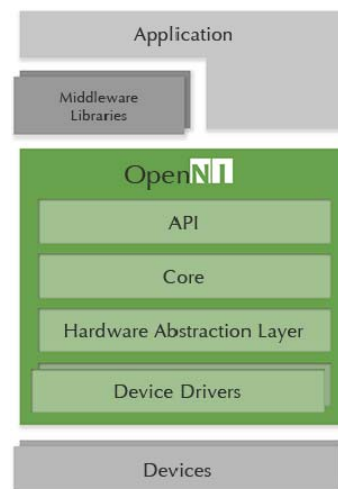


図 14: OpenNI SDK2 構成図

出典 : <http://www.openni.org/about/>

(2) PCL (Point Cloud Library) ⁵⁸

PCL は “Point Cloud Library” の略であり、大規模な 3D 点群処理、つまり物体の 3 次元形状処理や空間情報を取り扱うためのライブラリ群である。PCL には、フィルタリング、特徴量処理、キーポイント抽出、サーフェス処理、レジストレーション (位置合わせ)、モデルフィッティング、セグメンテーション、探索、距離画像の生成など、ロボットの知覚認識機能に対応したアルゴリズムをモジュールとして提供する。実環境からの取得データの可視化ツールの提供も行っており、このツールはマルチスレッド処理に対応している。各モジュールの構成例を図 15 に示す。

⁵⁷ PrimeSense 社の NITE 関連特許については以下を参照のこと
<http://www.freepatentsonline.com/y2009/0096783.pdf>
<http://www.freepatentsonline.com/y2010/0118123.pdf>
<http://www.freepatentsonline.com/y2011/0052006.pdf>

⁵⁸ <http://pointclouds.org/>

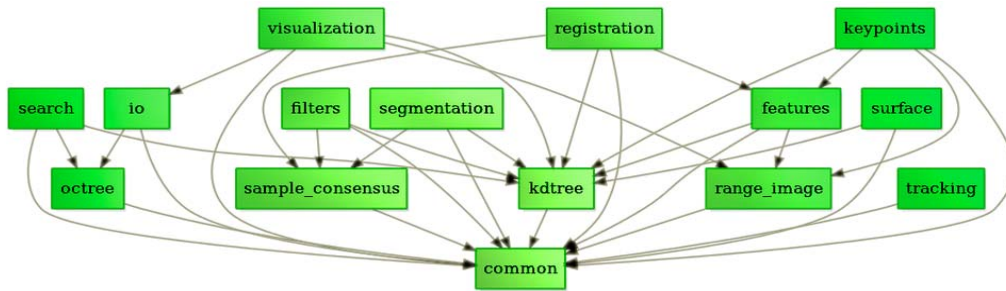


図 15: PCL の構成例

出典 : <http://www.pointclouds.org/about/>

PCL は ROS に統合されており⁵⁹, さらに Kinect から OpenNI 経由でリアルタイムにデータを取得するためのフレームワークである OpenNI Grabber を提供するなど OpenNI との連携もあり, 注目が集まっている. スポンサーは, 2012 年 6 月に Willow Garage 社からスピンアウトした非営利団体である OpenPerception⁶⁰をはじめ, Willow Garage 社, NVidia 社, Google (GSoC 2011), TOYOTA, Trimble, Urban Robotics, Honda Research Institute らである (図 16 参照). またコンピュータビジョン分野やロボティクス分野に取り組む多くの機関によって研究開発が行われている (図 17 参照).



図 16: PCL のスポンサー機関

出典 : <http://www.pointclouds.org/about/>

⁵⁹ ROS-Wiki サイト内の, PCL 説明は以下を参照のこと.

<http://www.ros.org/wiki/pcl>

<http://www.ros.org/wiki/pcl/Overview>

<http://www.ros.org/wiki/pcl/Tutorials>

IROS2011 で開催された PCL チュートリアルについては, 以下を参照のこと.

<http://www.pointclouds.org/media/iros2011.html>

⁶⁰ OpenPerception とは, 3 次元知覚ソフトウェアの開発を行い, PCL のオープンソースプロジェクトをサポートするカリフォルニア州非営利公益法人である. 2012 年に, Willow Garage 社よりスピンアウトし, PCL プロジェクトのサポート機関として, PCL ライブラリのドキュメント化やチュートリアルを実施する. また, 研究発表や企業とのコードスプリントを実施し, PCL の普及活動を行っている. OpenPerception の CEO は, 元 Willow Garage 社の研究者である Radu B. Rusu, ボードメンバーは, Willow Garage 社の代表取締役である Steve Cousins, URC Ventures 社の創設者兼 CEO である David Boardman, NASA の人工知能ロボティクス研究のディレクターである Terry Fong 等で構成される.

<http://www.openperception.org/>



図 17: PCL 開発参加機関

出典 : <http://www.pointclouds.org/about/>

PCL は、BSD ライセンスであり、学術と商用の双方にて利用できる。C++に対応し、Linux, Mac, Windows, Android/iOS をサポートする。ファイルデータ形式は、PCD (Point Cloud Data) という独自のファイル形式を使用し、ライブラリには PCL 専用の点群データ形式である pcd ファイルが用意されている⁶¹。

(3) OpenCV ⁶²

OpenCV は “the Open Source Computer Vision Library” の略である。1998 年にインテル社が開発をはじめ、2006 年に

Version1.0 がリリースされた。その後は、Willow Garage 社が引き継いで開発してきたコンピュータビジョンライブラリであり、ロボットに必要な視覚機能をサポートしている。

画像処理を中心として、物体認識、顔認識、ジェスチャー認識、モーション解析と物体追跡、パターン認識、構造解析、2D 及び 3D のカメラキャリブレーション、機械学習等の機能

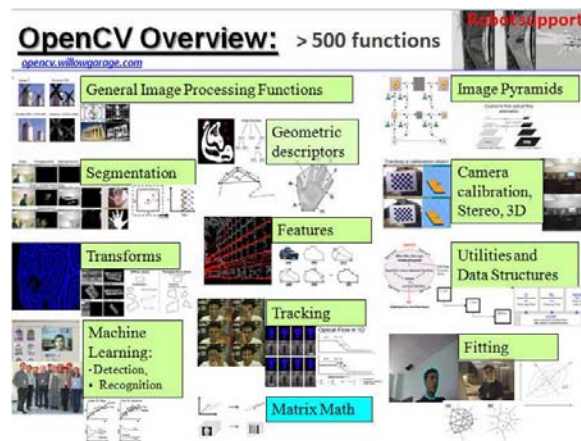


図 18: OpenCV の機能概要

出典 : <http://opencv.willowgarage.com/wiki/>

⁶¹ ファイルフォーマットに関する詳細は以下を参照のこと。

http://pointclouds.org/documentation/tutorials/pcd_file_format.php

⁶² <http://opencv.jp/> (OpenCV 公式サイト)

<http://code.opencv.org/projects/OpenCV/wiki/WikiStart> (OpenCV-wiki サイト)

<http://opencv.willowgarage.com/wiki/> (WillowGarage 社の OpenCV サイト)

をもち、2500以上のライブラリを持つ。OpenCVの機能概要を、図18に示す。

OpenCVは、ROSに統合されている。また、OpenCV 2.3からは、ビルド時にOpenNIを利用してコンパイルするオプション指定が可能となり、OpenCVのインタフェースからKinectの深度画像、ビデオカメラ画像が利用可能となった。また、知能化プロジェクトのモジュールも、OpenCVと依存関係があるモジュールがある。

OpenCVは、BSDライセンスであり、学術と商用の双方にて利用できる。C++、C、Pythonに対応しており、Windows、Linux、Android、Macをサポートする。

また、2013年2月に、OpenCV2.4.4でAndroidを含むJAVAに対応した。

(4) OctoMap ⁶³

OctoMapは、ドイツのフレイブルグ大学の研究者によって提案されている、3次元環境モデリングのためのオープンソースのフレームワークである。ロボットの移動空間に対する3次元SLAMのアプローチであり、Octreeアルゴリズムを利用した確率モデルによる実空間のデータ構造化と、地図及び環境モデル、可視化ツールを提供する。情報は適宜更新できる。

また、マルチ解像度により実行タスクに応じた地図及び環境モデルを、解像度を変化させて動的に提供できる“柔軟さ (*Flexible*)”と、圧縮技術によりメモリ及びディスク領域への効率的な保存や帯域幅の制約を考慮した“軽さ (*Compact*)”を特徴とする。

2011年8月30日にリリースされたROS Electric Emysまでは、ROSにより実装されていたが、2012年4月23日にリリースされたROS Fuerte Turtle以降、ROS固有のビルドツールを利用しなくても実装可能となり、非ROS環境で利用できるようになった⁶⁴。ライブラリはC++に対応する。OctoMapは新BSDライセンスのもとで、ビューアのoctovisは、GNU-GPL Licence (Ver.2)のもとでリリースされる。

⁶³ <http://octomap.github.com/> (OctoMap公式サイト)

⁶⁴ ROS-Wiki内のOctoMapの説明は以下を参照のこと
<http://www.ros.org/wiki/octomap>

(6) OpenRAVE ⁶⁷

OpenRAVE は “the Open Robotics and Animation Virtual Environment” の略である。OpenRAVE は、2006 年に Dr. Rosen Diankov (出杏光魯仙) によって、カーネギーメロン大学ロボティクス研究所で設立された。Dr. James Kuffner が 1995 年に開発をはじめた RAVE シミュレーターが元となっており、東京大学情報システム工学研究室 (JSK) によって積極的にサポートされている。

コアは 3 次元シミュレーションによるアーム軌道計算エンジンである。OpenRAVE は計算幾何学と動力学のシミュレーションと解析に焦点をおくため、制御ドライバ、通信規格、認識システム等を焦点とする他のロボットシステムとの容易な共存が可能であるとされ、ROS 互換である⁶⁸。

OpenRAVE の概念図を図 21 に示す。

図 21 は、以下の 4 つで構成される。

- コアで動作計画に必要なインタフェースを定義。これにより、動力学的な計算や衝突検知、環境変化への対応などの下位の動作制御にわずらわされることなく、上位のタスクプラン開発に取り組むことができる
- 把持やマニピュレーション動作のシミュレーション、計画法、視認性計算、逆運動学計算 (ikfast) のプラグイン
- Python でのデモ環境とスクリプト開発環境。Matlab と Octave のためのインタフェース
- ロボットと対象物のデータベース

Dr. R. Diankov は、ロボットアームの仮想環境構成を図 22 で示し、OpenRAVE の知識ベースの、各コンポーネントの依存関係を図 23 として示している。

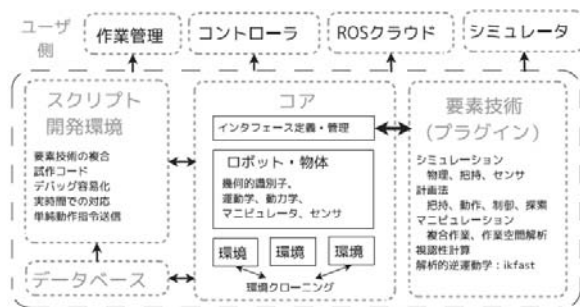


図 21: OpneRAVE の概念図

出典：出杏光 魯仙 “海外の動向：ROS・OpenRAVE の新オープンソース開発環境が活かす知的マニピュレーション”，日本ロボット学会誌 Vol.28 No.5, pp.585-855, 2010

⁶⁷ <http://openrave.org/> (OpenRAVE 公式サイト)

⁶⁸ ROS と OpenRAVE の互換については以下を参照のこと
<http://www.willowgarage.com/blog/2009/01/21/openrave-and-ros>
<http://openrave.programmingvision.com/wiki/index.php/ROS:Index>

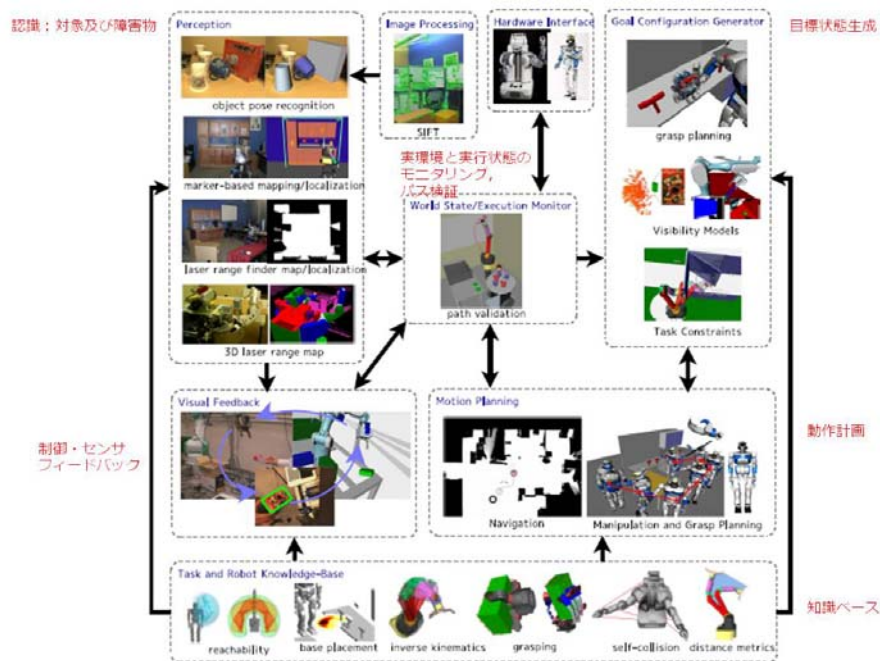


図 22: マニピュレーションシステムのモジュール構成

出典：出杏光 魯仙，“動作計画”，東京大学大学院情報理工学系研究科平成 23 年度夏学期大学院講義エージェントシステム第 4 回，2011 年 5 月 18 日より一部加工，<https://code.google.com/p/rtm-ros-robotics/>



図 23: OpenRAVE の知識ベースの依存関係

出典：出杏光 魯仙“海外の動向：ROS・OpenRAVE の新オープンソース開発環境が活かす知的マニピュレーション”，日本ロボット学会誌 Vol.28 No.5, pp.585-855, 2010

逆運動学計算モジュール (ikfast) は OpenRAVE のプラグインであり、6 自由度のアームに対し逆運動学計算を行う解析ツールである⁶⁹。COLLADA 記述によりロボットのアームとハンド、把持対象物を指定すると、自動的に把持可能位置姿勢空間を計算し、解を C++ファイルに出力する。

μ 秒単位での計算速度での出力を測定しており、この速さには ROS 産業も注目している。尚、ROS 産業において、OpenRAVE の ikfast モジュールを、OpenRAVE 環境なしに ROS 上で利用する方法が公開されている⁷⁰。

2011 年 7 月には OpenRAVE を利用したロボットベンチャー企業「MUJIN」が日本で設立された。OpenRAVE の 3D シミュレーターによるアーム軌道計算技術を使い、産業用ロボットティーチング作業のコストを削減し、ティーチングでは困難な作業（例えば双腕ロボットによる作業）の動作計画をも可能にすることを目指している。

商品として“干渉自動回避システム”，“複数ロボットによる動作生成システム”，“ロボット配置の最適化”，“把持計画システム”を展開。また、COLLADA, IGES, STEP, IV/VRML, STL, DirectX の CAD ファイル形式に対応し、特定の CAD ソフトに依存しないことを特長とする⁷¹。

MUJIN は、2012 年 9 月の東京大学エッジキャピタルによる 7,500 万円の増資により、2013 年に中小型産業用ロボットハンド向けを中心に動作計画と配置最適化を行う、クラウドを利用した産業用ロボットシステムとして「MUJIN コントローラ」の販売⁷²。これにより、メーカーごとに異なるロボットプログラムを自動出力し、従来、数日かかるとされているプログラミングを含む作業工数を大幅に短縮するとする。MUJIN コントローラのシステム構成を図 24 に示す

⁶⁹ ikfast モジュールの利用については、以下を参照のこと

http://openrave.org/docs/latest_stable/openravepy/ikfast/#ik-typesOpne-RAVE

⁷⁰ ikfast モジュールの ROS 互換については、以下を参照のこと

http://ros.org/wiki/Industrial/Tutorials/Create_a_Fast_IK_Solution

http://kaist-ros-pkg.googlecode.com/svn/trunk/arm_kinematics_tools/src/ikfastdemo/ikfastdemo.cpp

⁷¹ <http://mujin.co.jp/> (MUJIN 公式サイト)

⁷² “東京大学発ベンチャーの株式会社 MUJIN, 75 百万円のシリーズ A 資金を東京大学エッジキャピタル (UTEK) から調達”, 2012.09.19,

<http://www.ut-ec.co.jp/cgi-bin/WebObjects/1201dac04a1.woa/wa/read/139dc82123a/>

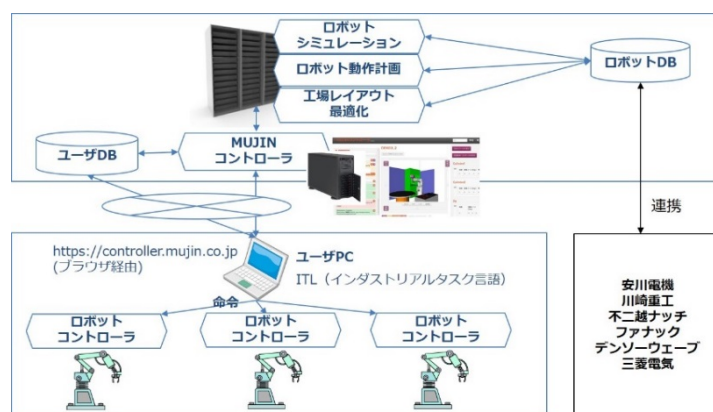


図 24: MUJIN コントローラのシステム構成

出典 : <http://mujin.co.jp/products> より筆者加工

(7) MoveIt! ⁷³

MoveIt! は、WillowGarage 社で開発及びサポートされている運動計画フレームワークである。ライス大学で開発されたサンプリングベースの運動計画アルゴリズムのライブラリ群である OMPL (The Open Motion Planning Library) ⁷⁴を、WillowGarage 社がフレームワーク化し、さらに、アームナビゲーションについて改良がすすめられている。

MoveIt! は、異なる種類のロボットの運動計画と実行に対応しており、デバックツール、可視化ツール、ベンチマークを含む。産業タスクにおける検証も行われている。MoveIt! は、ROS Con 2012 で発表され、さらに ROS 産業への適用、DRC ロボットや NASA の Robonaut への適用が積極的に行われている。

⁷³ <http://moveit.ros.org/wiki/index.php/MoveIt!> (MoveIt! サイト)

⁷⁴ <http://ompl.kavrakilab.org/>

4.3 ロボットへのクラウドコンピューティング技術適用の研究開発事例

民間企業，及びそれと共同研究を行う大学機関などにより，ROS を利用したロボットへのクラウド技術，及び Web 技術の適用研究が活発に行われている．以下に，インターネット／ネットワーク環境でのロボットコンテンツ利用を目指した研究開発事例を列挙する．

▶ Google の認識エンジンを利用したクラウドベースロボットの把持⁷⁵

Google 社とコロンビア大学の共同研究グループが，Google ゴーグル⁷⁶を利用したオブジェクト認識エンジンをクラウドに搭載したロボットサービスを ICRA2013 にて発表した．姿勢推定に PCL(Point Cloud Library)⁷⁷，把持モジュールとして GraspIT!⁷⁸ と OpenRAVE⁷⁹ 等，各オープンソースプロジェクトのソフトウェアモジュールを組み合わせて利用し，Willow Garage 社製の PR2 にプロトタイプを実装している．アーキテクチャは，Offline フェーズと Online フェーズとで構成される．

図 25 に Offline フェーズを示す．Offline フェーズでは，対象物体のラベルマッピングを認識エンジンによりサーバに蓄積し，同時に PCL の提供するツールと Kinect を利用して対象物体の 3D-CAD モデルの参照データ作成を行う．

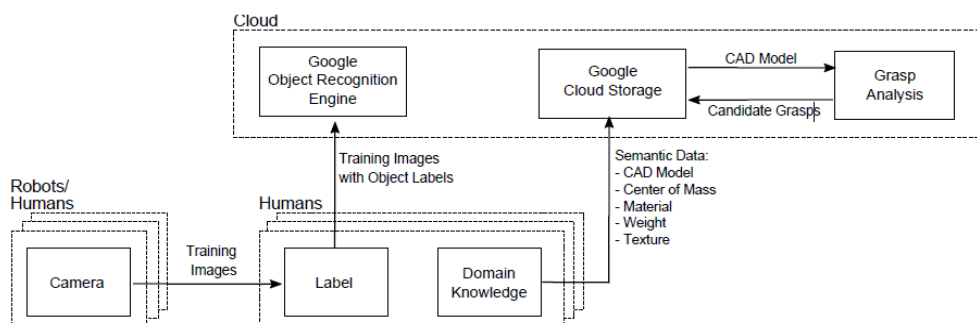


図 25: Offline フェーズのアーキテクチャ

出典 B. Kehoe et. al. "Cloud-Based Robot Grasping with the Google Object Recognition Engine", ICRA, 2013, Fig.2

⁷⁵ 参照文献 [17].

⁷⁶ Google ゴーグルとは，カメラで撮影した画像認識による検索するアプリケーションである．現在は，モバイルアプリケーションとして公開されている．

<http://www.google.com/mobile/goggles/>

⁷⁷ PCL については，4.2 章 (2) に詳述．

⁷⁸ GraspIT! は，コロンビア大学のロボティクス研究室による，ロボットハンドのためのオープンソースシミュレーター開発のプロジェクトである．

<http://www.cs.columbia.edu/~cmatei/graspit/>

⁷⁹ OpenRAVE については，4.2 章 (6) に詳述．

他方の Online フェーズを図 26 に示す。Online フェーズでは、対象が検出されるとカメライメージをサーバへ送付し、あらかじめ蓄積したデータを参照する。同時に 3D センサによる点群処理により、姿勢推定を行い、把持のモーションプランニングを実現する。

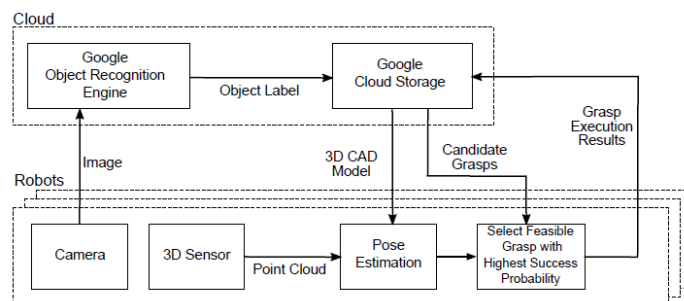


図 26: Online フェーズのアーキテクチャ

出典 B. Kehoe et. al. "Cloud-Based Robot Grasping with the Google Object Recognition Engine", ICRA, 2013, Fig.3

▶ RoboEarth クラウドエンジン：ラピユタ⁸⁰

RoboEarth⁸¹ のクラウドエンジンとして“ラピユタ⁸²”が、チューリッヒ工科大学の D. Hunziker 氏らによって、ICRA2013 にて発表された。ラピユタは、クラウドロボティクスのための、オープンソース⁸³の PaaS 型のフレームワークである。ロボットのローカル環境では高負荷となる複雑なタスク計算をクラウド側で行うことを目指す。クローンベースモデルに基づいて構築されており、複数ロボットのクラウドへの相互接続をめざす。

クラウドへ接続された各ロボットは、システムレベルのクローンをクラウド側にもつ。クローンは、Linux コンテナで実装されており、通信には WebSocket プロトコルを利用する。ロボットとクラウド間のデータ記述言語は JSON であり、ROS インタフェースと互換である。今後、Google の IDL である Protocol Buffers のサポート、及び、ROS 以外のプラットフォームとの統合も予定している。尚、ラピユタの名称については、宮崎駿作品の『天空の城ラピユタ』より命名された⁸⁴。

⁸⁰ 参考文献 [18].

⁸¹ RoboEarth は、欧州のクラウドロボティクスのプロジェクトである。EU-FP7 に参加している。RoboEarth については、3.2 章に詳述。

⁸² <http://rappyuta.org/>

⁸³ ソースコードは以下より入手可能である。

<https://github.com/IDSCETHZurich/rce>

⁸⁴ Cloud Robotics Engine Goes Live with Rappyuta Service,

<http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/robotics-software/roboearth-cloud-robotics-rappyuta-service/> (2013.3.12)

▶ rosbridge ⁸⁵

“rosbridge”は、米国ブラウン大学のロボット研究室の Jonathan Mace 氏によって開発された。この研究室は、BOSCH との共同研究により、インターネットを介した遠隔操作ロボットのリモートラボ⁸⁶を運用し、ROS を利用したリモートロボットのパッケージを公開している⁸⁷。rosbridge は、同氏が Willow Garage 社のインターンシップ期間に開発した非 ROS クライアントプロセスを ROS に接続するブリッジである⁸⁸。相互運用性とユビキタス性とを重視し、ROS の Web 接続を可能にする。

とくにサーバ/クライアントモデルでの利用に有効なアプリケーション層のネットワークプロトコルであり、Pub/Sub 通信によりサーバのランタイム環境を呼び出し、TCP/Websocket により JSON 形式のメッセージを転送する。ブラウン大学は、rosbridge を利用して、遠隔操作を利用した PR2 ロボットのリモートラボ、ROS 環境の Web テストベット⁸⁹、websocket_gui⁹⁰の提供などを行っている。rosbridge は、ROS-Wiki に公開されている⁹¹。

▶ Android/ROS-java

Android で ROS を稼働させることにより、クラウド環境への適用を前提としたネットワークサービスとしてのロボットサービスが、Google と Willow Garage 社の両研究者の共同開発として提案されている⁹²。この Android でのロボットサービスの実装は、ロボットの小型化、低価格化の一実装といえる。

2011 年 5 月の Google I/O では、「Cloud Robotics, ROS for Java and Android ⁹³」と題し、クラウド環境を利用したインターネットによるロボットサービス展開の可能性の発表が行わ

⁸⁵ <http://www.rosbridge.org/doku.php>

⁸⁶ <http://pr2-remotelab.com/>

⁸⁷ http://ros.org/wiki/remote_lab

⁸⁸ Advancements In Connecting To ROS Via Web With The Rosbridge Suite,
<http://www.willowgarage.com/blog/2012/12/04/advancements-connecting-ros-web-rosbridge-suite>
(2012.12.5)

⁸⁹ <http://www.brown-robotics.org/demo/www/webtools/>

⁹⁰ http://www.ros.org/wiki/websocket_gui

⁹¹ <http://www.ros.org/wiki/rosbridge>
http://www.ros.org/wiki/rosbridge_suite

⁹² Google I/O 2011: Cloud Robotics, ROS for Java and Android,
<http://www.willowgarage.com/blog/2011/05/12/google-io-2011-cloud-robotics-ros-java-and-android?page=5> (2011.5.12)

⁹³ <http://www.google.com/events/io/2011/sessions/cloud-robotics.html>

れた。同時に、ROS 最初の pure-Java 実装となる rosjava による Android との連携デモが行われ、ムービー及び rosjava ライブラリが公開⁹⁴されている。

▶ クラウドロボティクスのためのフレームワーク : DAvinCi ⁹⁵

“DAvinCi” は、ROS をクラウド環境へ適用することで、クラウドロボティクスの実現を目指したフレームワークである。フレームワークを図 27 に示す。このフレームワークは、シンガポールのデータセンターである “A*STAR” の R. Arumugam らによって発表された。クラウド側の Hadoop 分散ファイルシステムとロボットを、ROS 通信による HTTP 接続による、サービスの実現を目指している。

論文の関心の対象は、SLAM (Simultaneous localization and mapping) のクラウド実装であり、ロボットから集められたデータのクラウド上での共有利用を目的とする。この論文は、カーネギーメロン大学の准教授であり、Google のエンジニアリング・マネージャーでもある Dr. James Kuffner の、IEEE ICRA2010 の WorkShop⁹⁶でも引用されている。

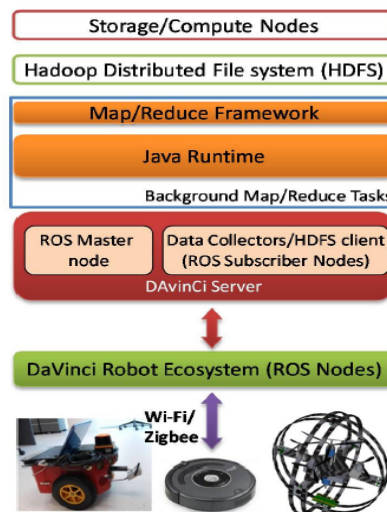


図 27: ROS を利用したクラウドロボティクスのフレームワーク例

出典 : R. Arumugam et. al. "DAvinCi:"A Cloud Computing Framework for Service Robots: Fig.2 Architecture of the DavinCi Cloud computing Platform " IEEE ICRA2010, 2010

⁹⁴ <https://code.google.com/p/rosjava/>

⁹⁵ 参照文献 [20].

⁹⁶ 参照文献 [21].

4.4 まとめ

本章では、OSRF以外の民間や大学機関の主導するオープンソースソフトウェア団体、ロボット要素技術と、それらのROSとの連携、及び、ビジネス展開を含めた取組みについて述べた。

4.1章では、ロボットの低価格化については、ローエンドの汎用ロボット開発をとりあげた。これらでは、ローエンドロボットのためのシステム要求を新しく定義しなおし、ロボットシステムを構築している。また、認識・汎用アーム制御等の基本ソフトウェアにROS基盤を利用することで、ロボットの低価格化を実現している。

ROSは、4.2章であげた民間や大学機関の主導するオープンソースソフトウェア団体等のロボットのソフトウェアの研究成果を、ROS基盤上に取り込み、これらを研究用のオープンな参照モデルとして提供してきた。

これにより、ロボット開発者のみならず、他分野のソフトウェア開発者をもROSというキーワードのもとに集め、技術交流と連携を促進し、多角的な視点でソフトウェアのあり方を検討する基盤を育てたといえる。

さらに、前3章でとりあげたDARPAロボティクスチャレンジのCloudSim開発や、4.3章のクラウドコンピューティング技術適用の研究開発事例をみての通り、ROSのロボットソフトウェア開発は、既存のロボット技術分野にとどまらず、Webサービス技術やクラウドとの連携を、システム構造にとりいれた展開が推進されている。

他方では、Willow Garage社の商用路線への変更を機に、自社の技術をROSのシステム構造に組み込み、いかにビジネス化するかの模索が現れてきている。例えば、MoveIt!の展開は、Willow Garage社が自社開発した研究用ロボットであるPR2への搭載からはじまったが、現在は、GM社製のRobonaut、Boston Dynamics社製のDRC-Robot、Rethink Robotics社製のBAXTERへの適用事例が報告されており、米国内市場への展開を意識した商用モデルへ移行しつつあることがわかる。

また、Google Googleを利用したGoogleとコロンビア大学の共同研究も、Google社の付加価値技術を組み込んだロボットの、市場投入のための取組みといえる。

5 日本のロボット産業技術の現状と提案

ROS は、NRI や DARPA 連携する米国家レベル、及び、民間企業連携や欧州 FP7 共同プロジェクトでの利用を含めた超国家レベルのプロジェクトになりつつある。さらに、オープンイノベーションによる次世代ロボット開発は、ビジネスモデルと一体となった国際的なソフトウェア競争戦略の潮流にある。

その技術潮流は、ロボットの低価格化のみならず、ロボット要素技術のオープン化、Web 技術やクラウドコンピューティングをとり入れた、ビジネス展開のためのシステム構造の再編成と統合の流れである。以上をふまえ、日本のロボット産業と技術、そのリスクと現状、提案を記載する。

5.1 日本のロボット産業のリスク

日本のこれまでのロボット産業は、位置決め精度の高さやくり返し作業の高速性など、ニーズに対するロボット機器の絶妙な調整や、国内の産ロボメーカーの開発ノウハウの共有によりハイエンドモデルを提供してきた。

一方、ROS 及びその周辺のオープンイノベーションの流れは、ロボットの知覚認識による教示と学習の単純化、認識結果に AI と 3D ビジョンを組み合わせた上位層での再プログラミングにより、ローエンドの汎用ロボット機能を高度なソフトウェアで補完する方向へ進みつつある。

さらに、Web 技術を組み合わせた複雑な機能（知能）提供と計算技術の高度化を目指すクラウドロボティクスの流れもある。この場合、OS 層とネットワーク層の影響力が強まるとともに、基本ソフトウェアの汎用化がすすみ、ハードウェア中心のこれまでの産業構造は大きく変化する。その結果、既存のロボット企業の技術が適用できない分野ができ、既存のロボット企業が参入できないまま、日本のロボット産業の競争力が低下していく可能性が極めて高い。

オープンロボティクスの要素技術については、日本でも RT ミドルウェアプロジェクトや知能化プロジェクトにより、多くのモジュールが開発されたが、今後は、普及期のビジネス戦略を見据えた取組みが重要となる。この時、これらのモジュールを呼び出す OS 層、ネットワーク層とあわせ、ロボットソフトウェア実行環境を再編成し、統合ソフトウェア基盤として提供する必要がある。なぜならば、この統合ソフトウェア基盤を提供する企業が、プラットフォームリーダーとして、市場を支配するためである。

ここで、改めて、統合ソフトウェア基盤への取組みの重要性を指摘したい。そのため、

ソフトウェアプラットフォーム戦略が、ビジネス構造を変革した IT 分野での事例を紹介する。事例は、Google 社の提供する携帯端末 OS の Android と、Microsoft 社の提供するパソコン OS の Windows である。

2 社とも、現在の IT 分野のプラットフォームリーダー企業である。Android では地図提供の GoogleMap、Windows であれば業務利用のための表計算ソフトである Excel とワープロソフトの Word 等、各社とも強みとなる特徴的なソフトウェアがある。それらに、端末利用に必要な基本ソフト（ブラウザやメール等）を、ソフトウェア実行環境と組み合わせて提供することにより、開発者やユーザをロックインしてビジネスを拡大、市場の主導権を握っている。

また、ソフトウェア実行環境と基本ソフトウェアが統合開発環境として提供されることにより、開発者は基本機能を利用してアプリケーションを開発することが可能となる。このため、アプリケーション開発が促進され、基盤に応じたユニークなコンテンツが提供されている。

ここで、Android と Windows の成長期における、日本のビジネス状況を考察する。Android 普及期の日本の携帯端末分野をみた場合、日本の携帯端末製品の特徴はハードウェアに集中した状態にあった。端末メーカー各社は個別にハードウェアを中心とした付加価値の提供を中心とした製品開発を行ってきたため、統合ソフトウェア基盤への戦略が希薄となり、Android という統合ソフトウェア基盤の普及と、それに伴うハードウェアの汎用化は、国内端末メーカーの付加価値を無力化した。

また、Windows の例は、ビジネスモデルがアプリケーション開発に集中し、ソフトウェア基盤への戦略が希薄となったことにより、国内ソフトウェア産業が、米国ソフトウェア産業に席卷にされた例である。以下に、Android と Windows の詳細を記載する。

▶ Android

Android は、スマートフォンやタブレットなどの携帯情報端末を主なターゲットとして開発されたプラットフォームであり、Google 社と、Google 社が中心となって設立した Open Handset Alliance（OHA）によって開発される。

Android は、Linux ベースのモバイル用 OS と基本ソフトウェア群から構成されるソフトウェア一式のパッケージで提供される。このパッケージには、カーネル、ミドルウェア、OS に加え、ユーザインタフェース、及び電話帳や Web ブラウザ、Google Map など、携帯端末に標準的な基本ソフトウェア群までが含まれる。

ソースコードのライセンスは、Apache2.0 に準じており、アプリケーションフレームワー

クから、標準ライブラリ、ランタイム、カーネルまではすべて公開されている。

Android のアーキテクチャを図 28 に示す。Android プラットフォームの競争力として、容易で柔軟なソフトウェア開発環境を、統合的に提供している点があげられる。また、基本ソフトウェアがパッケージされているため、サービス開発者は、これらを掛け合わせることで新たなサービスアプリケーションを開発することができる。

さらには、無線 LAN 等の通信を利用したクラウド上の Web サービス連携や、クラウドストレージとのリソース分散、Bluetooth 通信を利用した他端末との連携など、ネットワークを利用したアプリケーション開発に対して柔軟な開発環境を提供している点は、これまでの i アプリや BREW と大きく異なる点である。

一方、Android には、Google Maps 等が標準搭載されている。これは OS 層ではなく、一アプリケーションの位置づけであるが、他のアプリケーションもこの機能を利用してサービス提供を行っている場合が多いため、Android 用基本ソフトウェアの地位を確立している。公開されている API を利用することにより、誰もが Google Map を利用した Web サービス開発を行うことが可能である。しかし、従来無料で提供されていた API が、2011 年 4 月の利用規定の改定により利用頻度に応じて有料となった。

他にも、メールサービスの Gmail やメッセージャーサービスの Google Talk など、Android 機能と密に連携するアプリケーションが、プロプライエタリな手法⁹⁷で提供されるなど、プラットフォームリーダーである Google 社が、Android 機能の主導権を握る構造となっている

98 .

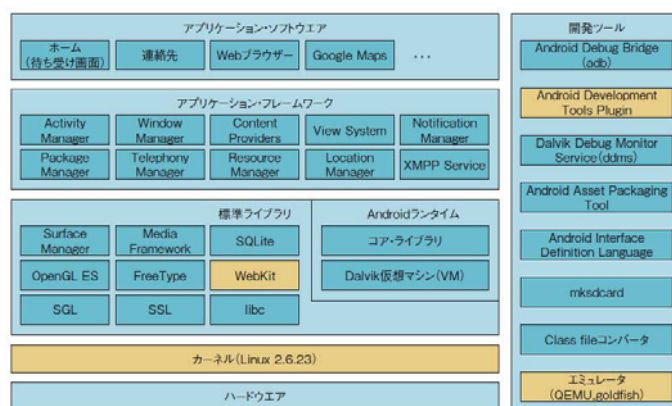


図 28 Android のアーキテクチャ

蓬田宏樹, 他著「Android の野望」日経エレクトロニクス 2007 年 12 月 17 日号 p.47-69

⁹⁷ ソフトウェアの使用, 改変, 複製を制限するための法的・技術的な手法を施すこと.

⁹⁸ Android のオープン性については, 常に議論的となっている. 例えば, 以下のような記事がある. Is Android really free software? (2011.9.19)

<http://www.guardian.co.uk/technology/2011/sep/19/android-free-software-stallman>

▶ Windows

ビジネスモデルがアプリケーション開発に集中し、ソフトウェア基盤への戦略が希薄となったことにより、国内ソフトウェア産業が米国ソフトウェア産業に席卷にされた例として、ワープロソフトである米国 Microsoft 社の「Word」による日本国 JustSystem 社の「一太郎」のシェアの席卷があげられる。

「一太郎」は、1980 年半ばから販売を継続した JustSystem 社を代表するアプリケーションソフトウェアである。一方の Microsoft 社のパソコン OS である Windows は、1990 年から 1995 年の間にリリースされた Windows3.x が、全世界で 1 億台、日本国内でも 400 万台出荷⁹⁹され、この時期にデファクト標準の地位を確立しつつあったといわれる。

ただし、パソコン OS の過渡期であった当時の Windows は、単なるアプリケーションランチャーとしての色合いが強く、また、日本語入力機能の扱いも十分ではなかったため、JustSystem 社は Windows3.x の普及を軽視し、アプリケーションソフトウェアメーカーごとにウィンドウシステムを用意すべきであるとの立場をとったとされている¹⁰⁰。そのため WindowsOS への対応には遅れが生じ、Windows 3.x の後継 OS バージョンである Windows95 と同時に発売されたワープロソフト「Word95」により、「一太郎」は大きくシェアを奪われた。

Windows95 は TCP/IP などのネットワーク機能を標準装備したことで世界的なヒット商品となった¹⁰¹。さらに、Microsoft 社の販売拡大戦略として WindowsOS に、Microsoft 社のクライアントアプリケーションともいえる表計算ソフト「Excel」が搭載され、そのバンドリングとしてワープロソフトである「Word」が搭載もしくは同梱されたこと¹⁰²、一方の JustSystem 社は Windows とは異なるアーキテクチャを採用したことにより、国内企業においても互換性やスケールメリットが得られにくくなり、国内での「一太郎」の出荷数は減少し、2002 年にリリースされた WindowsXP では「一太郎」をプリインストールで販売するパソコンは無くなった。

一方の OS 層の主導者である Microsoft 社の Word は、現在も MS-Office シリーズとして WindowsOS の基本ソフトウェア地位を保持している。

⁹⁹ Windows3.x の出荷台数については以下を参照した。

トム佐藤, “マイクロソフト戦記 -世界標準の作られ方- ” pp.8, 新潮社, 2009

¹⁰⁰ <http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%80%E5%A4%AA%E9%83%8E>

¹⁰¹ 時同じく 1995 年にインテル社がハードウェアのプラットフォーム戦略を完成。以降、パソコンのハードウェアが急速に低価格下へ向かうことは特筆すべき点である。

¹⁰² Word のバンドリング販売については、1998 年に公正取引委員会から排除勧告が出るなど、当時の騒然とした状況が理解される。

<http://pc.watch.impress.co.jp/docs/article/981124/koutori.htm>

5.2 日本の現状

ここで、日本のロボット分野における、ソフトウェア基盤への取組みの現状を取り上げる。代表的なロボットソフトウェア共通プラットフォームとして「RTミドルウェア (RT-Middleware, RTM) プロジェクト」、その後継として「次世代ロボット知能化技術開発プロジェクト (知能化プロジェクト)」がある。これらは、国家プロジェクトとして研究開発が推進された。他方、民間企業団体による共通プラットフォームへの取組みとして「RSi (Robot Service initiative)」がある。以下に、RTミドルウェアと、RSiの概要を記載する。

5.2.1 RT ミドルウェアと知能化プロジェクト

RT ミドルウェアは、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(以下、NEDO)の21世紀ロボットチャレンジプログラム(2002～2004年度)において、研究・開発および仕様のオープン化が行われたロボットのためのソフトウェアプラットフォームである。

プロジェクトの予算規模は、全体で267.3百万円である。プロジェクトの成果は、RTミドルウェアの参照実装 OpenRTM-aist-0.2、及び、そのインタフェース仕様として2005年に一般に公開された。後継の、知能化プロジェクトは、経済産業省とNEDOによって2007～2011年度に推進された。

プロジェクトの規模は、全体で7,000百万円である。このプロジェクトでは、RTミドルウェアに搭載するためのロボット機能要素である知能モジュールを、再利用可能なコンポーネントとして提供可能とした。現在は、これらの成果をあわせ、知能ロボットソフトウェア開発プラットフォーム ROBOSSA¹⁰³として公開されている。

RTミドルウェア (OpenRTM-aist) は、分散オブジェクト指向に基づくソフトウェア開発基盤と実行環境を提供している。また、ロボットの機能要素をRTコンポーネント (RTC) と呼ばれるソフトウェア単位でモジュール化し、それらを組み合わせることでロボットシステムを構築するために、CORBA (Common Object Request Broker Architecture) ベースでRTCをモデル化している。複数のRTCの組み合わせを可能にしているのは、共通化されたRTCインタフェースである。

RTコンポーネントのインタフェース仕様は、国際標準化団体であるOMG (Object Management Group) の公式標準仕様 “Robotic Technology Component Specification (RTC Specification)” として公開された。また、RTミドルウェアでは、機能安全の国際規格であるIEC 61508 SIL3 Capableの認証を取得した「RTM Safety」の実装や、RTMミドルウェア対

¹⁰³ <http://robossa.org/> (ROBOSSA サイト)

応組込みプラットフォーム群などがある。

5.2.2 RSi : Robot Service Initiative

RSi (Robot Service Initiative)¹⁰⁴ は、2004 年に設立された、インターネット／クラウドを指向したロボットサービス基盤の業界標準仕様の策定、実証実験、及び、商用化を前提とした研究開発を推進してきた業界団体である。

ロボット向けソフトウェア基盤の取り組みの多くが、ロボットやセンサ等のロボットの機能要素であるハードウェアに注目している中、ネットワークや公共空間や生活空間でサービスを提供するロボットを対象としたソフトウェア基盤の整備を推進してきた。また、ロボットサービスの普及のため、ロボットと連携したインターネット上のクラウド実行環境、サービスを継続的に運用している。また、会員各社の企業戦略との整合をとりながら、国際標準化の動きにも注目している。

RSi の組織は、正会員として三菱重工業、富士通、富士通研究所、セック、東芝、日本気象協会、日本電気通信システム、安川電機、ライトウエア、産業技術大学院大学、はこだて未来大学、また、協力会員として、奈良先端科学技術大学院大学、中京大学、東京大学、名城大学、金沢工業大学、首都大学東京、芝浦工業大学、及び、産業技術総合研究所の 19 会員で構成され、運営は各団体の持ち寄りとボランティア活動で賄われている（2011 年 9 月現在）。

RSi は、ロボットソフトウェア基盤の仕様を RSNP (Robot Service Network Protocol) とし、異なるベンダが独立して開発したロボット／サービス間での相互運用を実現している。RSNP のアーキテクチャは、通信のための共通機能である「RSi 共通サービス」と、ロボットの機能要素を提供する「プロファイル群」から構成される。

RSNP では、これらを IT 業界のオープンな標準仕様であり、Web サービス基盤のプロトコルを記述するための言語である WSDL (Web Service Description Language) を用いてプロトコルとして規定しており、異なる実装間での曖昧性を排除している。

5.2.3 RT ミドルウェアの利点と課題

次に、ROS の動向と比較しながら、RT ミドルウェア (OpenRTM-aist) の利点と課題について、技術の側面と、組織体制の側面から考察する。

¹⁰⁴ <http://robotservices.org/> (RSi サイト)

▶ 技術

RT ミドルウェアは、部品化、OS 非依存性のために分散オブジェクトミドルウェアである CORBA を用いて実装している。コンポーネントモデルが明確な優れたモジュールであり、分散した RT コンポーネント間の通信も容易に行うことができる。

しかし、RT ミドルウェアをクラウドに適用しようとするとき、この CORBA の採用が、大きな技術課題となる。ROS の潮流と、そのビジネス化のためのロボットシステム技術動向を捉えた場合、インターネットを活用したロボットサービス提供や、リソースへのアクセスが顕著であることは既に指摘した。インターネット環境では、異なるシステム間の相互運用が当然となる。ただし、インターネット環境では、通常、各システムリソースは、ファイアウォールで遮られた環境に配置されており、異なるシステム間で通信を行ってサービスを連携させるためには、標準的な HTTP プロトコルでのリソースへのアクセスが必須である。だが、CORBA、つまり RT ミドルウェアは、Web 標準とは異なる独自のプロトコルを採用している。CORBA によるオブジェクト呼出し手続きは LAN 環境内での閉じたシステムを前提に行われている。したがって、インターネット経由での適用には原理的な困難を伴う。

他方、RSi では、設立当初よりインターネットによるロボットサービスを対象としており、ロボットソフトウェア基盤の通信層の一つに HTTP をベースにした Web サービス基盤を適用している。ロボットとサーバ、及び、ロボット間の、インターネット経由での双方向通信を可能とする通信モデル、Web サービス技術で標準化された高信頼メッセージング等を用いており、インターネット環境と整合性の高いロボットシステム構築を可能としている。

▶ 組織体制

次に、RT ミドルウェアの普及とビジネス化の課題の考察のため、オープンソースロボティクス普及における組織的・体制的な側面に言及する。RT ミドルウェアが国家プロジェクトでの、(独)産業技術総合研究所(以下、産総研)を中心とした研究成果であること、その成果である ROBOSSA のサポートを産総研が行っていることに着目し、RT ミドルウェアの担い手である産総研と、ROS の担い手である OSRF を入手できる資料レベルで比較する。

RT ミドルウェア、及び、知能化プロジェクトは国プロであるため、プロジェクトが終了すれば活動も終息する。現在の ROBOSSA のサポートは産総研の一部の研究者の手弁当によって賄われているとも聞く。つまり、RT ミドルウェアの継続的な運営は、現状では特定の個人の活動成果への依存度が高い状態にあるように見うけられる。

一方の OSRF は、世界各地のベンチャー企業や ROS に参加する団体を、ROS グローバルコンサルティングネットワークとして組織化し、ROS のサポート窓口として体系化している。つまり、ベンチャー企業等が、ROS 普及とビジネス化を視野にいたした活動を担っている。さらに SwRI が主導する ROS 産業コンソーシアムとの連携により、既存の民間ロボット大企業をも取り込み、複数企業の共同での ROS の応用研究体制も組織化されている。これらの体系の中で、新規事業化が模索されているということであろう。

OSRF は団体設立から未だ 1 年の経過であり、現在は、国家プロジェクトの受託機関であるかのようなものである。しかし、OSRF の出生は Willow Garage 社という技術志向型のベンチャー企業であり、その性格上、あらかじめ組織内に、企（起）業家精神¹⁰⁵を内包する。OSRF ではこれを拡張し、3.4 章図 10 にまとめたとおり、将来的に生成される ROS の関与する国家プロジェクトの成果と、民間企業及び一般ユーザをつなぐ、官と民の統合機関としての組織構造をもつ。また、この体系から、例えば OSRF 自身が ROS プロジェクトの推進を手放すことがあっても、ROS をサポートできるバックアップ団体が存在し得る仕組みを形成しつつあることがうかがえる。

RT ミドルウェアには、ROS のように、ビジネス展開を視野に置いて、自主的に応用研究や事業化に取り組む民間企業へのパスが存在しない。企（起）業家のための機能も存在しない。また、オープンソース団体の普及と運営存続のための十分な体制があるとも言い難い。この課題は、RT ミドルウェアのビジネス化の課題と同様、組織構造にも一因があるといえるのではないだろうか。

他方の RSi は、民間企業による業界団体であるため、企業主体のコンソーシアム団体としての特徴をもつ。また、RSNP の普及活動として、NEDO や APEN (Asia Professional Education Network) を共催とした国際展開を視野にいたしたコンテスト開催を行っている。ただし、現状は産学連携モデルであり、官へのパスは希薄である。

また、国内外の中小企業やベンチャー企業を巻き込むまでには時間がかかる。つまり、RT ミドルウェアのみならず RSi を含めても、ROS グローバルコンサルティングネットワークをはじめとする ROS 体系に該当するような、日本発のオープンソースロボティクスを担うベンチャー企業群や組織体系への取組みは大きな課題であるといえる。

¹⁰⁵ ここでいう企（起）業家精神とは、精神のあり方ではなく、イノベーションを遂行する能力、機能、仕組みをさす。

5.3 提案

このような状況で、ロボット技術のオープンイノベーションを経済成果に結びつけるためには、技術施策としてのソフトウェアプラットフォーム戦略と、ビジネス展開のための組織構造戦略との、双方からのアプローチが必須である。

5.3.1 ソフトウェアプラットフォーム戦略

技術施策としてのプラットフォーム戦略としては、「クラウドベースのロボットソフトウェア統合基盤の構築」を提案する。ロボットに必要な基本機能は、4章で概観したオープンソース団体のライブラリをはじめ、5.2章にあげたRTミドルウェアや知能化プロジェクトなどの成果により、様々なソースやコンポーネントが入手できるようになったとは言え、ロボットの非専門家が容易に利用できるほどには、ROSも含めて十分に整備されているとは言い難い。

また、RTミドルウェアは、元来、コンポーネント指向を目指したものであり、優れた部品を揃えていても、それらを統合するソフトウェア基盤への取組みは十分とはいえない。つまり、現状のオープンロボティクス技術は、ビジネスへ適用するための視点から見た場合、統合基盤としてのソフトウェアアーキテクチャとして十分ではない。

逆にいえば、ロボットソフトウェアのオープンイノベーションにおけるドミナントポジション、つまり支配的なアーキテクチャは過渡期にあり、まだ決定はしていない。しかし、AndroidがLinuxベースにソフトウェア実行環境を整備して、Linuxのそれと意識させずに携帯電話端末のソフトウェア基盤の提供を行っているように、近々、ROSをROSとして意識させずに、ソフトウェアのアーキテクチャ革新によるROSベースの統合ソフトウェア基盤が市場に投入され、それが支配的なアーキテクチャとなる可能性は、米国や欧州の動向から十分想定される。

4.3章にあげたオープンソース団体によるロボット技術要素は、いずれもROSと統合もしくは連携している。また、Willow Garage社の商用路線の強化は、ROSが、ロボットソフトウェアビジネスにおけるドミナントアーキテクチャ確立のフェーズへ移ったことを示している。

さらに、5.1章に示したとおり、普及期においては、システム構造がビジネス化へ向けて再編成される。そのため、プラットフォーム戦略への取組みが、非常に重要な意味を持つ。これへの対応を急ぐ必要がある。

したがって、ロボットサービスの統合基盤の要件は以下である。

- (1) マルチ実装を許容する相互運用可能なソフトウェア統合基盤を実現する。これにより、ROSにより体系化されたクロスプラットフォーム戦略にロックインされない相互運用可能な仕組みを構築する。相互運用性向上への取組みは、今後の日本のロボット産業のシェア維持、及び、拡大に必要な多極化戦略である。
- (2) クラウドベースのソフトウェア統合基盤は、インターネット上で、ロボット及びロボット周辺のソフトウェアモジュールを、コンテンツサービス化して提供する。インターネット上でのコンテンツサービス化には、RTコンポーネントや、知能化モジュール、RSiサービスを初めとする既存研究の成果をはじめとして、本報告書で概観した各種のオープンソースロボット機能モジュールもあわせて集約することで、リソース共有を可能とする。
- (3) 同時に、上位／実用レベルの付加価値サービスアプリケーションへ発展する「核」を提供する。産業用ロボット分野から、汎用ロボット分野への適用が進行するに従い、アプリケーションプログラムやサービスの比重が大きくなり、大きな投資が必要な部分である。
「核」は近い将来プラットフォームの一部に組み入れられる部分である。これら(2),(3)により、上位／実用レベルの付加価値を検討する基盤として、迅速かつ容易に利用可能とする。
- (4) プログラムのソースコードを公開せずに、ロボット機能（ソフトウェアモジュール）を利用者（開発者）に提供する。これは、クラウドベースのアプリケーションに対する知財マネジメントへの取組みであり、(2)のロボットのソフトウェア機能モジュールのコンテンツサービス化にあわせて実現する。

上記により、ロボットのブレイクスルー技術を、研究開発者が迅速かつ容易に利用できるソフトウェア実行環境を整備し、これまでのロボット研究成果の実装支援を推進する。これは、日本がこれまで蓄積してきた高度な技術力のみならず、ROSをはじめとする海外の技術をも集約し、知財マネジメントを行いながら効率的にビジネスを展開、市場を形成するための基盤戦略である。

5.3.2 組織構造の戦略

組織構造への提案として、1つ目には、RTミドルウェアとRSiの連携を強化し、日本が国際市場競争においても優るための組織体制づくり提案する。5.2.3節で指摘したとおり、現在のRTミドルウェアの運営体制は脆弱である。また、民間との組織的なパスを持たない

ため、普及とビジネス展開への担い手が不在であり、民間の力を活かした展開が困難な状況にあるといえる。

他方の RSi は、企業主体のコンソーシアム団体の特徴をもつが、官へのパスは脆弱である。技術面では、RT ミドルウェアと RSi は、RTM-gateway による相互運用の多くの試みがなされている。今後は、RT ミドルウェアと RSi の組織的な連携を強化することで、官と民をつなぐ組織として機能する OSRF の組織構造への対抗策とし、国際競争力を高めると考えている。

2つ目には、ベンチャー企業ネットワークの形成と育成を提案する。ただし、これは、独立型のベンチャー企業に限定せず、企業内ベンチャーをも視野に入れる。元来、日本はロボット先進国である。それに由来し、すでに既存のロボット企業各社は、自社内にロボット技術を保有しており、改めて費用を投じて RT ミドルウェアをはじめとするオープンソースロボティクス技術を利用することに、積極的にはなりにくいと思われる。

したがって、オープンソースロボティクス技術の担い手は、既存のロボット企業ではなく、ベンチャー企業や中小企業といえる。一方、ロボットの適用分野が汎用化するに従い、アプリケーションプログラムやサービスの比重が増大し、小規模な企業では単独な開発困難になる。

これを解決するために、企業ネットワークが必要になる。これらの日本のロボットイノベーション技術であるオープンソースロボティクスの担い手としてのベンチャー企業、中小企業とそのネットワークの育成が必要である。

ただし、ROS が展開するような、スピリアウト型の米国型のベンチャービジネスが、そのまま日本の風土に馴染むとは一概には言い難い。さらに、ここで、既存ロボット企業も、オープンソースロボティクス技術のキャッチアップを本格的に開始しなければ、産業構造の変革に立ち遅れることになる。

よって、既存のロボット企業や製造分野、IT 分野等の大企業でも、企業内ベンチャーとして、オープンソースロボティクスを取り入れたロボット開発への取組みを推進し得る体制づくりを提案する。

6 おわりに

本レポートでは、ROS の組織体系と、ROS 周辺技術も含めたソフトウェア技術体系をとりあげ、技術の側面と、組織の側面から、日本の現状と比較を行った。そこから、オープンソースロボティクス技術を効率的にビジネス展開し、市場を形成するためのシステム化技術の提案と、国際競争力を強化するための組織間ネットワークを強化した体制づくりの提案を行った。

普及期においては、システム構造が商用モデルに即して再編成される。Willow Garage 社のビジネスモデル変更は、商用へと向かうシステム構造への変化への対応の現れである。今後、モジュール化の進行、クラウド技術の進行など、システム構造の変化を伴って、産業用ロボット分野、汎用ロボット分野への適用が進行し、ロボット産業構造は大きく変革する。

ROS やクラウドベースのロボットサービスをはじめとするロボットの要素技術のオープン化と統合の潮流は、ソフトウェア基盤のイノベーション競争である。ソフトウェアプラットフォームには、ハードウェアと同様の機能的な要件の他に、他社との競合関係、アプリケーションやサービスの開発、提供、囲い込み（ロックイン）などのマーケティング戦略、価格戦略など、物理的な実体のあるハードウェアとは異なる側面がある。これらを理解した戦略立案が必要である。

しかしながら、垂直統合モデルを歩んできたこれまでのロボット業界、ロボット関連の研究者や開発者は、これらを体得するチャンスが少なかったと思われる。今後、日本のロボット産業に協力的な、国際的なソフトウェア戦略や企業活動、標準化の実績を持つ人材と協業した、ロボットソフトウェア基盤戦略と開発が必須である。

7 参考文献

以下に、主要な参考文献を列挙する。尚、Web サイト参照情報は、本文内脚注を参照のこと。

■ 2章 ROS

- [1] Morgan Quigley, Brian Gerkey, Ken Conley, Josh Faust, Tully Foote, Jeremy Leibs, Eric Berger, Rob Wheeler, Andrew Ng, “ROS: an open-source Robot Operating System” Proc.of the IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation (ICRA) Workshop on Open Source Robotics, 2009.
- [2] 岡田 慧, “ROS (ロボット・オペレーティング・システム)”, 日本ロボット学会誌 Vol.30 No.9, pp.830-835, 2012

■ 3章 欧米政府のロボット施策と民間企業連携

- [3] J. Andrew Bagnell, Felipe Cavalcanti, Lei Cui, Thomas Galluzzo, Martial Hebert, Moslem Kazemi, Matthew Klingensmith, Jacqueline Libby, Tian Yu Liu, Nancy Pollard, Mihail Pivtoraiko, Jean-Sebastien Valois and Ranqi Zhu, “An integrated system for autonomous robotics manipulation”, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp.2955-2962, 2012
- [4] DARPA-BAA-12-39 AMENDMENT 1
<https://www.fbo.gov/index?tabmode=form&subtab=step1&tabid=da874be53bfcd352abee0be9b1cbba0b> (April 30, 2012)
- [5] Robotics VO, “A Roadmap for U.S. Robotics - From Internet to Robotics 2013 Edition”, 2013
- [6] Markus Waibel, Michael Beetz, Javier Civera, Raffaello D'Andrea, Jos Elfring, Dorian Galvez-Lopez, Kai-Haussermann, Rob Janssen, J.M.M. Montiel, Alexander Perzylo, Bjorn Schiessle, Moritz Tenorth, Oliver Zweigle, and Rene van de Molengraft, “Robo Earth - World Wide Web for Robots -”, Robotics & Automation Magazine, IEEE, June 2011, pp.69-82, 2011
- [7] Shaun Edwards et. al. “ROS-Industrial - Applying the Robot Operating System (ROS) to Industrial Applications”, ICRA ECHORD Workshop, May-2012
- [8] 小川紘一, 立本博文, “欧州型オープン・イノベーションシステムとしての Framwork Program—日本型イノベーションシステムと企業制度 (2) —”, IAM Discussion Paper

■ 4 章 ロボット技術開発の展開と ROS

- [9] Erico Guizzo “The Rise of the ROBOT WORKER” IEEE Specturm 2012.10 pp28-35, 2012
- [10] Morgan Quigley, Alan Asbeck, and Andrew Y. Ng, “A Low-cost Compliant 7-DOF Robotic Manipulator”, Proc. of the IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), pp.6051 – 6058, 2011
- [11] Kai M. Wurm, Armin Hornung, Maren Bennewitz, Cyrill Stachniss, Wolfram Burgard, “OctoMap: A Probabilistic, Flexible, and Compact - 3D Map Representation for Robotic Systems”, Autonomous Robots, 2013.
- [12] Moritz Tenorth and Michael Beetz, “KNOWROB — Knowledge Processing for Autonomous Personal Robots”, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) pp.4261-4266, 2009
- [13] Rosen Diankov and James Kuffner, “OpenRAVE: A Planning Architecture for Autonomous Robotics”, tech. report CMU-RI-TR-08-34, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, July, 2008
- [14] 出杏光 魯仙 “海外の動向：ROS・OpenRAVE の新オープンソース開発環境が活かす知的マニピュレーション”, 日本ロボット学会誌 Vol.28 No.5, pp.585-855, 2010
- [15] 出杏光 魯仙, 滝野一征, “株式会社 MUJIN とオープンソースツールの OpenRAVE” , 第 13 回計測自動制御学会 SI 部門講演会, 2012
- [16] 稲葉雅幸, “知能ロボットのソフトウェア”, 日本ロボット学会誌 Vol.30 No.9, pp.824-829, 2012
- [17] Ben Kehoe, Akihiro Matsukawa, Sal Candido, James Kuffner, and Ken Goldberg, “Cloud-Based Robot Grasping with the Google Object Recognition Engine”, IEEE International Conference on Robotics and Automation. Karlsruhe, Germany, May-2013
- [18] Dominique Hunziker, Mohanarajah Gajamohan, Markus Waibel, and Raffaello D’Andrea, “Rapyuta: The RoboEarth Cloud Engine”, IEEE the International Conference on Robotics and Automation, May-2013
- [19] Ryan Hickman, Damon Kohler, Ken Conley, Brian Gerkey. “Cloud Robotics”, Google I/O 2011 Sessions 資料, 2011.5.13
- [20] Rajesh Arumugam, Reddy Enti, Liu Bingbing, Wu Xiaojun, Krishnamoorthy

Baskaran, Foong Foo Kong, A.Senthil Kumar, Kang Dee Meng, and Goh Wai KitVikas. “DAvinCi: A Cloud Computing Framework for Service Robots”. IEEE International Conference on Robotics and Automation, May-2010.

[21] James J. Kuffner, “Cloud-Enabled Robots”. In IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, Nashville, TN, 2010.

(<http://i61www.ira.uka.de/users/asfour/Workshop-Humanoids2010/talks/James-Kuffner-Humanoids2010.pdf>)

[22] Guoqiang Hu, Wee Peng tay, and Yonggang Wen, "Cloud Robotics: Architecture, Challenges and Applications", IEEE Network, May/June-2012

[23] IEEE Specturm “Cloud Robotics: Connected to the Cloud, Robots Get Smarter” ; <http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/robotics-software/cloud-robotics>

[Online](2011.1.24)

■ 5章 日本のロボット産業技術の現状と提案

[24] Noriaki Ando, Takashi Suehiro, Kosei Kitagaki, Tetsuo Kotoku and Woo-Keun Yoon, “RT-Middleware: Distributed Component Middlewarefor RT (Robot Technology)”, Proc. 2005 IEEE/RSJ international Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2005), pp. 3555-3560, 2005

[25] 佐藤知正, 有木孝夫, “プロジェクトの概要と総括”, 日本ロボット学会誌 Vol.31 No.1, pp.2～pp.3, 2013(1)

[26] 原功, “知能ロボットソフトウェア開発プラットフォーム ROBOSSA”, 日本ロボット学会誌 Vol.31 No.1, pp.5～pp.6, 2013(1)

[27] 中本啓之, “機能安全認証取得 RT ミドルウェア”, 日本ロボット学会誌 Vol.31 No.1, pp.37～pp.39, 2013(1)

[28] 安藤慶昭, “OMGにおける Robotic Technology Component (RTC) および関連仕様の標準化動向”, 日本ロボット学会誌 Vol.29 No.4, pp333～336, 2011(5)

[29] 小川紘一, “国際標準化と事業戦略—日本型イノベーションとしての標準化ビジネスモデル”, 白桃書房, 2009

[30] 徳田昭雄, 立本博文, 小川紘一 (編), “オープン・イノベーションシステム—欧州における自動車組込みシステムの開発と標準化—”, 晃洋書房, 2011

[31] 成田雅彦, 村川賀彦, 植木美和, 岡林桂樹, 秋口忠三, 日浦亮太, 蔵田英之, 加藤由花, “インターネットを活用したロボットサービスの実現と開発を支援する RSi (Robot Service Initiative)の取り組み”, 日本ロボット学会誌, Vol.28, No.7, pp.829~840, 2010

- [32] 成田雅彦, 村川賀彦, "ロボット技術の標準化と RSi (Robot Service Initiative)の取り組み,"日本ロボット学会誌 Vol.29 No.4, pp353~356, 2011(5)
- [33] 成田雅彦, 加藤由花, 中川幸子, 小川紘一, "ロボット技術のオープンイノベーション—Robot-OS(ROS)の戦略と我が国ロボット技術開発の方向性—", IAM Discussion Paper Series #27,新 NEDO 社会連携講座 (知的資産経営研究講座) ,2012

その他, 主要な参照先は本文内脚注に記載した.