

平成 26 年 2 月 11 日

2012－2013 年度日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス部門 ロードマップ委員会報告（案）

委員長：

2012 年度 大築 康生（新産業創造研究機構）

2013 年度 辰野 恭市（名城大学）* 文責

委員：

山田 陽滋（名古屋大学）

田中 博文（川崎重工）

安田 賢一（安川電機）

北野 幸彦（パナソニック）

曾根原 光治（IHI）

目次

1. 序論
2. ロードマップ作成指針
3. 製造業分野のロードマップ
4. サービス分野のロードマップ
5. 特殊環境分野のロードマップ
6. 総括

* 本報告書の文責は辰野恭市にある。

1. 序論（概要）

本報告は 2011-2013 年度の日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス分野 ロードマップ委員会が見直してきたロードマップ案を提示するものである。本ロードマップでは、ロボットという言葉コンピュータで動く機械という意味で使っている。

当ロードマップ委員会は日本機械学会のロードマップ委員会のもと、経産省技術ロードマップ¹⁾ 2)、日本ロボット学会らがまとめたアカデミックロードマップ³⁾の後を受け、社会におけるロボティクス・メカトロニクスの技術を普及・発展させる方策を提言することを目的に設置された。

2007 年日本機械学会のロードマップ委員会の意向を受けて、3つのキーワード（平均パワーレート密度、精度、厚生・教示時間）を挙げ、産業用ロボットの将来を展望した。その後、キーワードを増やして見直してきた。しかし、産業用ロボットだけではロボティクス・メカトロニクスの技術の発展の方向性を大局的な観点から示すことが難しいと考え、対象を製造業分野（産業用）・サービス分野・特殊環境分野に広げた。しかし、ロボットにはいろいろなロボットがあり、それらをまとめて議論することが大変難しいことから、上記3分野から1, 2のロボットを例に挙げ、それらについて実用化・事業化（普及）のロードマップを作成した。今回のロードマップに現れるロボットは、もう既に試作されているものも多いが、これらのロボットが何故実用化・事業化できないかその原因を探り、実用化・事業化の道を模索した。

本報告の構成は以下のとおりである。

この章（第1章第序論）に続いて、2章ロードマップ作成指針では、今回のロードマップの作成指針を述べた。作成指針は、先端技術の研究開発動向ではなく、どのようなロボットが実用化・事業化され社会に普及していくか、それに必要な要素技術、実用化・事業化のためのポイントを示すことである。また、製造業用・サービス用・特殊環境用の各分野で、一つ（あるいは二つ）のターゲットに絞った理由、ロードマップ表の縦軸・横軸（時間軸）の設定指針を述べる。

第3章製造業分野のロードマップでは、セル生産用のロボットを想定して、自動車・電機・物流と、最終的なロボットの応用先の一つである多種少量生産の例として衣料・靴のオーダメイドを挙げた。そのロードマップ表（表 3.1～表 3.4）を提示し、その解説を述べた。

第4章サービス分野のロードマップでは、ターゲットを介護・病院内作業支援ロボットに絞り、そのロードマップ表（表 4.1～表 4.4）を提示し、その解説をした。

第5章特殊環境分野のロードマップでは、原子力事故処理ロボットに絞って、ロードマップ（表 5.1～表 5.4）を提示し、その解説をした。

第6章総括では、3つの分野のロードマップ作成を通じて得られたロボットの実用化・事業化のポイントを挙げた。

このロードマップによりロボットの実用化・事業化の議論を立ち上げることができれば幸いである。ここらでもう一度、どのようなロボットを作ればよいのかを考え、そのロボットのロードマップを会員各自が書いて欲しい。

参考文献

- 1) 経産省技術戦略マップ

http://www.meti.go.jp/policy/economy/gijutsu_kakushin/kenkyu_kaihatu/str2010/Chap.1.pdf

2) 毎年、経産省技術技術戦略マップが更新されている。

http://www.meti.go.jp/policy/economy/gijutsu_kakushin/kenkyu_kaihatu/str-top.html

3) 特集アカデミックロードマップ, 日本ロボット学会誌, Vol.26, No.7(2008)

4) NEDO <http://www.nedo.go.jp/content/100109880.pdf>

5) 財団法人 中部産業・地域活性化センター: 中部産業レポート Vol.6 「次世代ロボット産業」
2009年10月

<http://www.criser.jp/report/documents/robo.pdf>

5) 日刊工業新聞・Robonable <http://www.robonable.jp/special/2013/01/rt1-rt.html>

2. ロードマップ作成指針

2.1 今回のロードマップは実用化・事業化のロードマップ

今回作成するものは実用化・事業化のロードマップである。先端技術の研究開発動向ではない。したがって、示したロードマップのシステム・技術は既に開発され、使用できる可能性を示されたものが多い。このロードマップの作成の目的は、どのようなロボットが必要とされているのかを、ロボットの適用作業を挙げながら示し、それを実行するために必要なロボットシステムのイメージ、そのシステムに必要な要素技術を挙げた後、実用化・事業化ポイントを洗い出してみた。

2.2 対象とするロボットの絞り込み

ロボットにはいろいろなものがある。それらを纏めて論じることは難しい。そこで、ロボットを製造業分野・サービス分野・特殊環境分野に分け、考えられている適用作業（表2）から一つ、あるいは二つの対象を選択した。以下、選択した理由を述べる。

製造業分野はセル生産用ロボットを選んだ。生産システムはライン生産からセル生産に移行することは、生産システムの効率化・メンテナンスの容易化から考えても将来も継続される。セル生産用ロボットの事業化は2011年2013年の国際ロボット展^{1, 2, 3)}の傾向からも、ユーザの要求が高まりつつあり、それにロボットメーカーも応えようという動きがある。今後、大きく展開すると思われ、その方向を予測してみようと考えた。

サービス分野は大変領域が広く、実用化・事業化を模索している領域である。まず、実用化・事業化が出来るような介護・病院内作業支援用のロボットを選択した。日本は本格的な高齢化社会になってきた。ロボット技術で介護支援・病院の効率化をすることにより、高齢者が豊かな生活ができる方法や、社会保障費の削減ができる道筋を模索してみたい。

特殊環境分野は、建設ロボットが実用化・事業化が進んでいる分野であるが、今回は原子力事故対応ロボットを選んだ。福島第1原子力発電所の事故収拾（原子力発電所廃止措置）は、緊急の課題であり、ロボット開発に携わっている者の使命でもある。我々ロボメカ関係者が解決すべき課題を挙げてみた。

2.3 ロードマップ表の見方

ロードマップの表（表3.1-3.4, 表4.1-4.4, 表5.1-5.4）は、ロボットの開発手順に沿って、ニーズ（適用作業）を探し、ニーズに沿ったロボットのイメージを提示し、必要な要素技術、実用化・事業化のポイントを挙げた。要素技術は、ロボットのサブシステムを意識して、機構・アクチュエータ・センサ・ヒューマンロボットインターフェイス・作業計画・マニピュレーション・システム技術・安全に分け、最後に実用化・事業化のポイントを挙げた。一方、横軸の時間軸は、大よその時間的な順序を示したもので、正確な実用化時期を示したものではない。ロードマップであるので時間軸は重要であるが、設定が大変難しいので、今回は曖昧になった。

参考文献

1) 2013 国際ロボット展 <http://www.nikkan.co.jp/eve/irex/index.html>

2) 2011 国際ロボット展 <http://www.nikkan.co.jp/eve/irex/pdf/irex2011report.pdf>

3) YouTube : <http://www.youtube.com/watch?v=3yNCpuPePRU>

表2 ロボットの適用

製造業分野

自動車大量生産ラインの組立

内装品・重量物

ボルト/ナット・ケーブルの接続

機械部品加工

工作機械（削り・バリ取り）

板金（曲げ・溶接・絞り）

研磨

塗装

電機の大量生産ラインの組立

家電（ディスプレイ含む）

IT・OA 機器（携帯・PC・プリンタ）

回路基板・実装

半導体

モータの組立

造船・電力機器などの少量生産

移動しながら溶接・塗装 重量物のハンドリング

オーダーメイド製品

衣料・靴

家具

リハビリ補助具

運送・倉庫

ダンボールの梱包/開梱

重量物のパレタイズ

自動倉庫の荷物の積み降ろし

サービス分野

医療

手術支援

血液などの取り扱い

病院業務の効率化

カルテ/血液の搬送・案内

リハビリ訓練

介護

移動支援（車椅子・歩行器）

排泄・お風呂・

徘徊・体調の監視

在宅医療・介護

ホーム

家電用全機能リモコン

セキュリティ

家事（掃除・洗濯・料理）

庭の手入れ（芝刈り・草取り）

スーパーマーケット・デパート

案内

自動レジ

買い物の搬送

ホテル・旅館

食事の後片付け（皿洗いなど）

掃除・ベッドメイキング

外食産業

食事の後片付け（皿洗いなど）

ウエイトレス

健康器具

特殊環境分野

原子力発電所

事故収拾・解体

日常点検・定期点検

各種プラントの保守点検

発電所・石油・鉄鋼

インフラのメンテナンス・復旧

電気（送配電線）・道路・水道・ガス

建設

重量物の搬送・吊下げ クレーンとの連動

コンクリート打ち・溶接

解体 切断・破砕・搬送

ブルドーザ・ショベルカー・ダンプカー

農業

種まき 草取り 収穫

漁業

養殖業務支援・潜水業務

警察・消防

交通取締 事故調書 特殊班支援

救助・消火

軍用

偵察・遠隔武器・自動兵器

環境調査

河川・海・大気

その他（ロボットからの切り口）

ヒューマノイド

双腕ロボット

自動走行自動車

表3.1 製造業分野の作業

適用分野	作業	ロボットおこなう基本作業		
		2018	2023	2028
自動車	車組立	大型部品（インパネ・エンジン・電池・タイヤ・シート・ドア）の把持（人が固定）	ボルトによる大型部品の固定（ロボットが固定）	
		ケーブルの接続	ホース・ベルトなどの柔軟物の組み付け	
	機械部品加工・組立 （エンジン・モーター・ドア・インパネ・減速機などの組立など）	生産セルにおけるバラ積み部品の配膳・取り出し		
		ピストンの挿入 鋳物加工後のバリ取り	ボルト・ナットの締付け ケーブルの接続 ホース・ベルトなどの柔軟物の組み付け	
制御装置の組立	生産セルにおけるバラ積み部品の配膳・取り出し	回路基板・コネクタ・電源をネジ・ボルト/ナットでシャーシに固定 ケーブル接続		
電機	電子回路製造	回路設計・回路基板設計のCAD/CAM化をより促進 生産セルにおけるバラ積み部品の配膳・取り出し取り出し	いろいろなタイプの回路基板製作・電子部品（IC・抵抗・コンデンサ）の実装 回路基板・コネクタ・電源をネジ・ボルト/ナットでシャーシに固定	
	IT機器（PC・スマホ）の組立	回路基板・コネクタ・電源をネジ・ボルト/ナットでシャーシに固定	ケーブルの接続	
	家電機器（冷蔵庫・洗濯機・炊飯器）の組立		重量物の組み付け（大型アーム・リフタとの協調） ホース・ベルトなどの柔軟物の組み付け	
物流		梱包・パレタイズ 自動倉庫の普及	運搬用自動車・自動倉庫への積み込み・積み下ろし	輸送自動車の無人運転
衣料・靴のオーダーメイド		人体・足の3次元形状測定	裁断	縫製
作業の完了の検出		カメラによる外観検査	視覚・力覚・触覚利用による組立作業状態の認識（コネクタ勘合・ボルト・ナットの締付トルクの確認など） 柔軟物の取付完了の確認	
セル共通		セル間の部品の自律搬送 作業台・部品のパレット・工具交換	セル間の部品の自律搬送の標準化 作業台・部品のパレット・工具交換の標準化	

表3.2 製造業分野のロボットのイメージ

ロボット	サブシステム	機能		
		2018	2023	2028
作業アーム	軽量の人腕アーム（図3.2.1）	人間の腕と同じ程度の細さ	アーム重量20Kg・可搬重量20Kg	アーム重量10Kg／可搬重量50Kg
		腕の力制御	柔軟アーム	
	大型アーム	可搬重量 200Kg 位置決め精度 1mm	アームのスリム化	
	ハンド	各種グリッパ	汎用3指 10Kg 触角によるハンドの力制御	汎用3指 20Kg
	工具	ロボット用インパクトレンチ ネジ・六角レンチ用ドライバ コネクタ接続工具	トルク制御レンチ 触角による工具の力制御	
	マスターアーム	教示の改善	作業教示用力帰還アーム	
搬送車	ロボットの移動台車	作業中のモーメントの支持（アウトリガなど？） 200Kg可搬で全方向移動 電源・通信線の送り出し・巻き取り	1t可搬で全方向移動	
	部品搬送用自律移動車	高速充電 充電システム（運用を含む）	移動車標準化・ラインアップ	
標準化セル			セルの標準化（部品トレイ・工具棚・作業治具 図3.2.2）	
視覚		作業対象ボルト・ナットと工具を画像訓練内で位置合わせ 作業環境の認識	障害物回避	

表3.3 製造業分野の要素技術

要素技術	機能	仕様		
		2018	2023	2028
機構		可搬重量の向上 リンクの軽量化	工具の機構を工夫 重力補償の改善	
アクチュエータ		モータのトルク重量比の改善 ワイヤ駆動	関節埋め込み型モータ 空気圧・水圧・油圧アクチュエータの制御性向上	化学反応・静電力を利用したアクチュエータ
センサ	画像認識(工業製品)	モデルベース(ボルト・ボルト穴・ナット) 誤認率 0.1% 処理時間 50msec	モデルベース(認識対象拡大) 誤認率 0.01% 処理時間 10msec	モデルなし
	3次元位置測定	ステレオカメラ・LRFによる3次元空間の認識(50msec/1フレーム) 高速SLAM	ステレオカメラ・LRFによる3次元空間の認識(10msec/1フレーム) 高速SLAM+CGモデル重畳	
	カセンサ	S/N 40dB 低価格化	ドリフトなし 応答1msec	
	触覚センサ	S/N 40dB 分解能 10g 低価格化	ドリフトなし 法線・接線方向の検出	分解能 10g
RMI(ロボット人間インターフェイス)		GUIや教示ペンダントの改良 作業をモニタするカメラ配置(ハンドアイ等)	GUIや教示ペンダントのウェアラブル化 教示用力帰還マスタアーム(廉価バージョン)	
作業計画(作業教示)	作業スキル	ボルトの挿入/ナット締付の作業スキル ケーブル接続のスキル	いろいろな作業スキルの獲得 作業の記述法 作業スキルのロバスト化(失敗率1/1000)	いろいろな作業スキルのライブラリ化
	教示	マスターアームによる力・位置の教示再生	CGIによるオフライン教示(ビジュアルフィードバック・力制御による現実空間への適応) タスクレベルの言語による指示・教示	
	障害物回避	アーム・移動台車の障害物回避	台車の自由度を生かしたアームの障害物回避	
アーム制御(マニピュレーション)	力制御	ボルトの挿入/ナット締付 作業時間5sec 市販力制御アームが普及	ボルトの挿入/ナット締付 作業時間1sec	
	ビジュアルフィードバック	グリッパを把持対象へ位置合わせ(位置決め精度 0.1mm サンプルング時間30msec)	工具・部品を作用箇所へ位置決め(位置決め精度 0.01mm サンプルング時間 1msec)	柔軟物の変形に対応した位置合わせ
	移動台車とアームの協調	移動台車も含めた軌道生成		
システム技術	システムインテグレーション	コンポーネントの標準化	設計支援ツール(CGIによる機能設計・モジュールによるロボットシステムの組立手法)	
	電源・通信	電源・通信線の送り出し・巻き取り 電池の大容量化	無線のエアポケットの解消	
安全	安全要求達成	安全規格成立(人とロボットの共存が可能になった) 安全ビジョン	天井固定型安全ビジョンを用いた人間協調作業の実用化 距離イメージセンサ、マット等が安全規格を満足	イメージセンサによる人間の運動検知

表3.4 製造業分野の実用化・事業化のポイント

開発ステップ	ポイント	行動			
			2018	2023	2028
ニーズに沿った機能設計	ユーザとの意思の疎通	機能仕様の明確な提示(CGアニメーションによるビジュアライズ)	導入後の評価		
		ユーザとの人的な交流・営業活動	生産技術のドキュメント化・CAM化		
ロボットに必要なコンポーネント(機能)を開発する	要素技術	ビジュアルフィードバック	作業スキル(作業教示)	小型・強力アクチュエータ	
		作業のための力制御			
	ロボット技術者はシステムインテグレータ。	プロジェクトチームで開発(ユーザ、機構・コントローラ・通信技術者を束ねる)	他分野の研究開発者(画像認識・通信・アクチュエータ)にロボットに必要な機能仕様を提示する。		
システムの完成度を上げる。(作業を確実に実行する)		継続した繰り返し検証試験を実施する	ロバストな作業スキルの研究		
		失敗する場合の理論的な分析	ユーザを運用支援しながら継続したシステムの改良		
安く作る	モジュールを組み合わせる。	設計支援ツールの開発			
		作業アーム・移動台車・セルの標準化(オープン化)	コントローラソフトのライブラリ化(OpenGLのような関数ライブラリ)		
			これまでに開発された技術の整理と継承方法	ビジュアルフィードバック・力制御による機構の加工精度軽減	
運用支援		サービスエンジニアリング(システム導入・教示・保守)事業に転換	インターネットを利用した遠隔運用支援		

表4.1 サービス分野(介護・病院業務支援)の作業

適用分野	作業	ロボットおこなう基本作業		
		2018	2023	2028
自立できる在宅高齢者の支援	移動支援(杖・歩行者・車椅子)	室内を杖・歩行者・車椅子で移動 屋外も移動(段差など)に対応	杖・歩行器等が体に密着し、体重を支える。(ウエアラブル化)	自律移動車椅子
	通信による仮想移動	遠隔の訪問者がTV電話による遠隔・問診	高齢者が遠隔買物・	軽作業の遠隔支援(お茶を入れるなど)
	家事支援	掃除・洗濯(乾燥まで)	食器の洗浄 料理の下ごしらえ	洗濯(折り畳み)
	リハビリ(軽いトレーニング)	ストレッチ・軽い筋トレ マッサージ		
	介護センターでの介助者支援(介助者を必要とする場合)	ベッドから車椅子への移乗	リフタなどで介助者の腰の負担を減らす。	ベッド・車椅子が介助者の支援
	移動支援(車椅子)	車椅子が段差・坂・凸凹道を移動するときのアシスト		
	排便	トイレに車椅子で移動、移動手摺を利用して立たせる、パンツを下ろしてお尻を出す、排便する、パンツを引き上げる(介助者) 睡眠中の排便のための自動排泄支援	同左(車椅子と介助者)	
	入浴	ベッド・車椅子上で介助者が服を脱がせる 介助者が車椅子のまま浴槽へ 介助者が浴槽に移乗させる	脱がせる際にベッド・車椅子が補助動作をする。 浴槽が上下に動く	車椅子が高齢者を浴槽に移乗させる。
	食事	食事を配る／下げる	高齢者に食べさせる	
病院内業務支援	搬送	薬・検体の搬送 病院内の案内 食器の搬送	治療用品の準備(棚からガーゼなどを必要分用意する。) 使用済みの用品の弁別廃棄	
	家事	掃除／洗濯(汚れものを洗濯槽に入れる)	食器の洗浄	
その他	エレベータなどのインフラ整備	家・病院・介護センター・駅・スーパーマーケットなどにエレベータが増設	バス・自動車のステップの昇降を自動化	
	補聴器・眼鏡	音の大きさ・高さ・速度が可変な補聴器	自動焦点眼鏡	

表4.2 サービス分野のロボットのイメージ

ロボット	サブシステム	機能		
		2018	2023	2028
杖		軽量化／双腕タイプ	アクチュエータを用いずに高さ自動調整・ローラ付	
歩行者		軽量化 高さ自動調整(段差に対応 図4.2.1)	4足歩行の前足 身体密着型歩行者(図4.2.2)	
車椅子		半自律移動電動車椅子 段差・坂・凸凹道対応車椅子	排便・入浴支援車椅子	自律移動車椅子
インターネットを利用した自律移動ロボット		TV電話付き自律移動ロボット(図4.2.3)	遠隔買物・観光	軽作業アーム付き自律移動ロボット
掃除機・洗濯機・食洗機		自動掃除機(図4.2.4) 狭い隙間に入れる掃除機 汚れものガゴ付き洗濯機	食器を簡単に入れることができる食器洗い機	下洗いもできる食器洗い機 洗濯物折り畳み機 ヒューマノイド型家事ロボット
リハビリ／マッサージロボット		いろいろな筋トレ・ストレッチができる手摺(手摺は手動、TVゲームが指導員) マッサージ(図4.2.5)	1台でいろいろな筋トレ・ストレッチができるトレーニングマシン(手摺型・ジム型・マッサージ機型)	
リフタ		リフタ(シーツ・吊り下げ用スーツを工夫)		
ベッド		ベッドが動いて移乗する(図4.2.7)。人との共同作業	ベッドが動いて自動で移乗する。	
搬送用自律移動ロボット		病院内の案内用自律移動ロボット(図4.2.8) 配膳機能付き自律搬送車 薬・検体の搬送用自律移動車(図4.2.9)		

表4.3 サービス分野の要素技術

要素技術	機能	仕様		
		2018	2023	2028
機構		機構のユニット化	オーダーメイド	
アクチュエータ	アクチュエータの小型/高出力化	低騒音化 杖・歩行器に内蔵する小型・高出力モータ+機構 ワイヤ駆動・スプリングによる補助・空気圧	リフタ・ベッド・車椅子が人を動かす(最大150Kg 自重20Kg) パワースーツ用の軽量・高出力アクチュエータ	
センサ	人の検知	人との接触・近接検知	画像などによる人の部位(足・腰・腕・頭など)まで検知	
RMI(ロボット人間インターフェイス)			音声入力(音声による操作)	マイクを通さない音声認識
作業計画	自律移動	衝突回避	目的地到達	完全自律移動
システム技術	ネットワーク(無線)	無線/有線通信容量の拡大 受信エリア(移動エリア)の拡大	無線のエアポケットの解消	どこでも繋がる無線ネットワーク
	電源	充電機器と利用方式	電池の容量拡大	
安全	安全規格適合型移動ロボットの実用化	安全規格適合速度パターン生成	安全規格適合型移動ロボット	
		安全規格適合屋外・屋内距離イメージセンサ	SLAM等アルゴリズムの安全化	

表4.4 サービス分野の実用化・事業化のポイント

開発ステップ	ポイント	行動		
		2018	2023	2028
ニーズに沿った機能設計	ロボット技術者とユーザ(医療福祉の現場で働く介護士・医師・看護師)との協力	CGIによる機能定義のビジュアライズ	ユーザとの合同プロジェクト	検証実験結果の忌憚のない評価
ロボットに必要なコンポーネント(機能)を開発する	杖・歩行器・車椅子・ベッドの機構	小型軽量化 車椅子に移乗するために、ベッドサイドに座らせるまでの同をおこなう機構 接触検知	杖は4足歩行の前足歩行器はウエアラブル化	そこでも接続できる無線ネットワーク
システムの完成度を上げる。(作業を確実に実行する)	継続した実証試験	開発者が自分の職場で常時使う。 作業を失敗する場合の理論的な分析	実現場で継続して実証試験 ロバスタな作業スキルの構築	
安く作る	機器の標準化・モジュール化	機構構成要素(支柱・ジョイントなど)の標準化 モジュールを組み合わせた設計 支援技術	コントローラソフトのライブラリ化	
運用支援	サービスを売るエンジニアリング事業へ変換	大量販売品ではない。レンタル。	地域・個人密着型ビジネス。	

表5.1 特殊環境分野の作業

適用分野	作業	ロボットおこなう基本作業		
		2018	2023	2028
圧力容器・格納容器内の燃料デブリが冷却されていることを確認		1, 2号機温度・水位・放射線センサを配置	3号機温度・水位・放射線センサを配置	
使用済燃料の取り出し		4号機使用済燃料の取り出し	1, 2, 3号機使用済燃料の取り出し 燃料取り出しの一部自動化	
人が原子炉建屋に入って作業ができるようにする。	作業用電源・通信ラインの敷設	作業用電源・通信ラインの敷設		
	原子炉建屋内を目視観察・放射線モニタ	原子炉建屋内を目視観察・放射線モニタ	原子炉建屋の3次元CGの作成	
	原子炉建屋の健全性検査	原子炉建屋の健全性検査	建屋の補強・作業用建屋の付加	
	瓦礫の除去	1号機瓦礫の除去	3号機瓦礫の除去	
	除染	1, 2号機除染 床・壁・天井・ケーブルトレイなどを除染	3号機除染	
格納容器の漏洩部の検出	格納容器外部から観察	1, 2号機ベント部・サンドクッションドレイン管・S/C・トラス室壁観察	3号機ベント管溶接部・サンドクッションドレイン管・S/C・トラス室壁観察	
格納容器内部の観察	燃料デブリの観察	ペネトレーションから観測用スコープ挿入	燃料デブリ・冷却水の状態を観察	
漏洩部の封止		トラス室の密閉(モルタルの注入・外壁の設置など)		
格納容器冷却系のコンパクト化			トラス室へ冷却系配管の挿入	
デブリの取り出し			格納容器上部の漏洩部の検出・封止	格納容器上部の漏洩部の封止・格納容器内の水張り 燃料デブリの取り出し

表5.2 特殊環境分野のロボットのイメージ

ロボット	サブシステム	機能		
		2018	2023	2028
温度・水位・放射線常時モニタシステム		温度・水位・放射線センサを多数配置し、常時モニタシステムを作成する。		
燃料取り出しクレーン		作業の視認性の向上	クレーンの位置決め精度を向上	
小型移動ロボット		小型高踏破性遠隔移動装置(図5.2.1)	高速化・頑強化	
瓦礫撤去用建設ロボット		建設用ロボット(バックホウ・ドーザ・破砕/切断機・キャリア・リフタなど)の小型化・遠隔操作性向上		
除染ロボット		除染ロボット(図5.2.2) 高所除染ロボット 清掃ロボット型		
長尺の観察スコープ		小型壁面ロボット(図5.2.3) ベント管・S/Cを調査するためのケーブル付の水陸壁移動用長尺スコープ(床・天井・壁・トレンチ・階段)(図5.2.4 気中・水中壁面移動) ヘビ型ロボット(気中・水中壁面移動)(図5.2.5)		
高所作業車		高所作業車(図5.2.6)		
漏洩部封止ロボット		トラス室封止ロボット	ベント管や格納容器封止ロボット	
人型双腕移動ロボット		4足(あるいはクローラ)双腕	水圧切断・溶接 ペネに観察スコープを設置	
燃料デブリの取り出し用のロボット				燃料交換用のクレーン型ロボットに類似のロボット(高精度位置決め)
ロボット自体の除染ビット		原子炉建屋1Fにロボットビット設置		

表5.3 特殊環境分野の要素技術

要素技術	機能	仕様		
		2018	2023	2028
機構	長尺観察／ヘビ型ロボット	観察用ヘビ型ロボット機構設計	格納容器観察用	デブリ取り出し用クレーンロボット機構設計
	建設ロボット	ケーブル付の水陸壁移動用ロボット(壁・天井・床移動 気中・水中兼用)		
		瓦礫処理用	トーラス室封止用ロボット機構設計	
センサ		耐放射線カメラ		
		漏洩検出方法		
		建屋内の3次元CG作成		
RMI(ロボット人間インターフェイス)		遠隔操縦室(広視野環境呈示・マスターアーム・カメラ用操作装置)	複数のロボットを動かす	
作業計画(作業教示)		障害物回避	除染作業の基本動作の教示	
		ケーブル付の水陸壁移動用ロボット・ヘビ型ロボットの軌道生成	使用済燃料引き抜きの基本作業の教示	
マニピュレーション(移動ロボット制御)		壁(床・天井・横壁)・水中の移動	ロボット用レールの敷設	
		グレーチング上の移動		
システム技術		作業シナリオの作成		
		無線LAN		
		電源・通信ラインの引き出し・巻き取り		
安全	リスクアセスメント結果を反映した高信頼作業移動	SIL3の距離イメージセンサ	SIL3の屋外イメージセンサ	ビジョンアルゴリズムの安全度水準定量化

表5.4 特殊環境分野の実用化・事業化のポイント

開発ステップ	ポイント	行動		
		2018	2023	2028
ニーズに沿った機能設計	作業シナリオ(手順書)の作成	作業シナリオの作成	作業者による検証実験結果の評価	
ロボットに必要なコンポーネント(機能)を開発する	遠隔操縦	CGアニメーションによる作業手順のビジュアライズ		
	水陸両用長尺スコープの機構開発	遠隔操縦室(広視野環境呈示・マスターアーム・カメラ用操作装置)	改良・付加機能の更新を容易に	
	耐放射線カメラ	水陸両用ヘビ型ロボットの軌道生成		
	電源・通信線の確保	ケーブル付の水陸壁移動用ロボット・ヘビ型ロボットの機構		
システムの完成度を上げる。(作業を確実に実行する)	作業訓練の繰り返し	耐放射線カメラ・制御装置		
	モジュールを組み合わせる。	電源・通信線引き出し／巻き取りドラム		
安く作る	作業実施体制の確立	人・ロボット合同作業訓練	単純な基本作業の自律化	
運用支援	メンテナンス	ケーブル付の水陸壁移動用ロボット・ヘビ型ロボットやをモジュールで構成する。	コントローラのソフトウェアのライブラリ化	
		作業実施体制の確立		
		ロボット用ピット	ロボットが停止した場合遠隔から回復できる。	
		ロボットを除染できる		

3. 製造業分野（セル生産用ロボット）のロードマップ

製造業分野におけるロボットの適用作業として、自動車・電機での組立セルと物流を挙げた。また、最終的なロボットの応用先の一つである多種少量生産の例として衣料・靴のオーダメイドも挙げ、ロードマップ（表 2.1－表 2.4）を作成した。本ロードマップは先端技術ではなく実用化・事業化を予測したものである。したがって、既に試作・実証はされているが、実用化・事業化（普及）の域に達していないものも多く含んでいる。以下、作成したロードマップを解説する。

3.1 作業（表 2.1）

1) 自動車

①車組立作業には、大型部品であるインパネ・エンジン・電池・タイヤ・シート・ドアなどの取付作業がある¹⁾。現在2名の作業を1人でできるように大型アームが大型部品を位置合わせし、人がボルトで固定する。その後、ボルトによる固定もロボットがする。また、ケーブルの接続作業、ホース・ベルトなどの柔軟物の組み付け作業もある。

ボルト・ナットの締め付け／取り外しは実験室のデモでは既に実行されている。しかし、ボルト・ナットの製造業者によるネジのバラツキなどのために、実際には製造ライン・セルに適用するには個別の教示などをおこなう必要がある。

②機械部品の加工・組立とは、エンジン・モータ・ドア・インパネ・減速機などの組立やそれらを構成する部品の加工である。それらの組立セルでは、セルにおけるバラ積み部品の配膳・取り出し作業や、ピストンの挿入、鋳造・プラスチック成型後のバリ取り作業などがある。ボルト・ナットによる各パーツの締め付けや嵌め合い作業を必要とし、配線のためのケーブルの接続などをおこなう。これらの作業をある程度高速（人手程度）でおこなう。現状は作業速度が遅く、失敗の確率が高いため普及していない。また、油圧系・燃料系のホース、伝達系のベルトなどの柔軟物の組み付け作業がある。

③制御装置の組立^{2、3)}では、生産セルにおけるバラ積み部品の配膳・取り出し、電子回路基板・コネクタ・電源をネジ・ボルト・ナットでシャーシに組み付けたり、ケーブルを接続するなどの作業がある。

2) 電機

①電子回路設計製造では、いろいろな電子回路を設計製作できるように、回路設計・回路基板設計のCAD/CAM化をより促進し、いろいろなタイプの回路基板製作・電子部品（IC・抵抗・コンデンサ）の実装がおこなえるようにしたい。信号処理用のデジタル回路だけでなく、モータドライバ回路のように大きな部品の回路も製作できるようにする。

②IT家電の組立^{2、3)}には、シャーシにコネクタ・回路基板・電源などの部品をネジ・ボルト・ナットで取り付ける作業、ケーブルの接続作業などがある。セル生産が適している作業である。

③大型家電の組立は、冷蔵庫・洗濯機・炊飯器などの組立で、車組立作業と同様、大型アームと人／ロボットとの協調作業である。また、ホースやゴムのベルトなどの変形部品を組み付けなければならない。

現状では、これらの作業セルにロボットを適用するには、セル個別に教示などを置くなう必要があり、ロボットの導入・運用を支援する必要がある。

3) 物流

自動化が大幅に進みつつある分野である。物を運ぶ作業であるので移動しながら作業をする必要がある。梱包・パレタイズにはじまり、輸送用自動車・自動倉庫への積込み・積み降ろし、最終的には輸送自

自動車の無人運転まで進むであろう。物流用トラック専用道路における無人運転は自動車の無人運転の最初のターゲットになると思われる。

4) 衣料・靴のオーダーメイド

ロボットの特徴は多品種少量生産に対応できることであると昔から言われてきた。その切り口として、個人に合わせたオーダーメイドの衣料・靴の製造セルの自動化が考えられる。特にオーダーメイドの靴を格安で提供したい。ロボットは変形する材料（布地・皮）を扱う必要がある。

5) 作業の完了の検出

ロボットによる自動化のネックになっている原因のひとつが作業の完了を検出できないことである。今後、この分野の研究開発が進まないとロボットを現場に導入できない。

6) セル共通

作業セルには必ず部品の搬送車が必要となる。また、部品のパレットや工具交換の標準化をおこない、セルシステム全体の標準化をする必要がある。

3.2 ロボットのイメージ²⁻⁷⁾ (表 2.2)

前節「3.1 作業」で示した作業を実行するのに必要と思われるロボットのイメージを挙げてみる。これらの中で、作業をする主体である作業アーム（人腕型）は重要である。可搬重量を上げ、ビジュアルフィードバックで作業対象物を認識しながら、いろいろな作業スキル（作業教示）を獲得していく。

1) 作業アーム

①細身の人腕アーム

人の腕と同程度以上の細さのアームで、シャーシ内部などの狭い作業領域に侵入できるようにする。人のできない作業をするために可搬重量は大きくしたい。接触を伴う作業を実行するには力制御が必要となり、ビジュアルフィードバックによりサーボ剛性を利用して、柔軟なアームを位置合わせできるようになる。現状の双臂アームの例⁵⁾を図 3.2.1 に示す。



図 3.2.1 双臂アーム（安川電機）

②大型アーム

人が把持できない大型の部品（インパネ・エンジン・電池・タイヤ・シート・ドアなど）をハンドリングする。最終的には大きいという威圧感のないアームで200t程度把持できるようにする。大型部品の位置決めも1mm以下を要求される。

③ハンド

小型の部品は真空吸着などで把持できるが、中型以上のいろいろなケーブル・コネクタなどを把持・接続するためのいろいろな形状のグリップが開発される。現在でも市販されているが、汎用の3指ハンドの改良が続けられる。ハンドは大幅な可搬重量・操作力の増大が求められる。

④工具

人並みの速さでボルト・ナットの締め付け、ケーブルの接続をするには専用の工具が必要となる。作業を実行するための工具の開発は必須である。トルク制御レンチや工具の力制御も必要となる。

⑤マスタアーム

位置と力の軌道の教示をするために、廉価な力帰還マスタアームが必要となるであろう。教示の効率

をあげるためにも改良したい。

2) 搬送車

① ロボットの移動台車

人腕アームでは作業範囲が狭すぎる。作業範囲を拡大するために移動台車は必須である。アームを搭載して作業位置へ移動するために最大 1 t 可搬の全方向移動が必要となる。作業中に掛かるモーメントの支持法を考えなければならない。また、電源・通信線の送り出し・巻き取りシステムが必要となる。

② 部品搬送用自律移動車

セル生産ではセル間の部品の搬送が必要になる。移動距離が長いので電池が必要となり、高速充電で、充電システムの運用も含めて検討しなければならない。また、いろいろな部品搬送のために、標準化しラインアップを揃えなければならない。技術的には完成度は高い。普及のポイントは安くすることである。

3) 標準化セル

セルを構築するには、部品トレイ・工具棚・作業治具や部品搬送車が必要である。現在はいろいろなセルを模索している時期であるが、できるだけ早い時期に標準化が必要となる。生産セルのイメージを図 3.2.2 に示す。この例はロボットと人が協調して作業をする場合である。

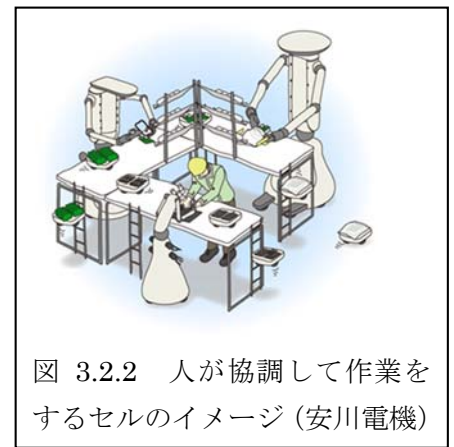


図 3.2.2 人が協調して作業をするセルのイメージ (安川電機)

4) 視覚

視覚は要素技術であるが、セル生産では移動に伴い作業対象物との位置決めが必要となるために、敢えてロボットのイメージの節でも言及した。特に、作業対象であるボルトとボルト穴、ナットと工具インパクトレンチなどを画像内で位置合わせする。また、障害物の無い空間でおこなった作業教示を、障害物のある場合に修正するために作業環境の認識と障害物回避が必要となる。

3.3 キーとなる要素技術 (表 2.3)

1) 機構

可搬重量の高いアームの開発は永遠の課題である。アクチュエータの開発と共に軽量高剛性のリンク材料や重力補償の改良を地道に継続しなければならない。また、作業をするための工具の機構を工夫することも重要である。

2) アクチュエータ

アームや脚の可搬重量を上げるために、ACサーボモータ・関節埋め込み型モータ・ワイヤ駆動・空気圧・油圧・水圧アクチュエータなどアクチュエータの継続した開発が必要である。

3) センサ

① 画像認識

作業範囲を拡大するために移動することになるので、ボルト・ナットなどの作業対象の画像認識は最重要である。生産現場に導入するためには、モデルベースでいいから誤認率を 0.1% 以下にする必要がある。また、ビジュアルフィードバックをするために精度 0.1 mm 以下で処理時間は少なくとも 1 フレーム 50 msec 以下が要求される。

② 3次元位置測定

ステレオカメラ・LRF (Laser Range Finder) による 3 次元位置測定では、処理時間を 1 フレーム 50msec 以下にする必要がある。測定範囲の拡大するために SLAM も普及する。普及のポイントはライブラリ化である。

③力センサ

コネクタの接続などの嵌め合い作業やボルト・ナットの締め付け作業をするには、アーム・工具の力制御が必要である。そのためには SN 比が 40 dB (できれば 60dB) ありドリフトの小さい力センサが必要となる。人並みの作業速度を達成するには応答も 1msec 以下にする必要があろう。

④触覚センサ

リストに配置した力センサでは工具の重量が測定に大きな影響を与える。そこで把持物体に加える力を測定するためにハンド・工具に触覚センサを付けたい。力センサと同様に SN 比が 40 dB (できれば 60dB) ありドリフトの小さいものが要求される。検出分解能は作業により異なるが、10 g 以下を目指し、法線方向と接線方向の力を検出できるようにする。

4) RMI (ロボット人間インターフェイス)

作業教示用の GUI や教示ペンダントの改良は継続しなければならない。作業をモニタするカメラ配置 (ハンドアイ等) も工夫しなければならない。これらの教示用のツールがウェアラブル化していく。また、位置と力を教示するために廉価な力帰還形マスタアームが必要となる。

5) 作業計画 (作業教示)

①作業スキル

自動車・電機の生産セルにおける組み立てには、部品の配膳・回路基板の取付・コネクタの取付・ケーブルの接続など、いろいろな作業があり、これらの作業を行うための作業スキルの獲得は重要である。そのためには作業をどのように記述するかを考えなければならない。また、作業の失敗率を最低でも 1/1000 以下にしないと現場には採用できない。ロバストな作業スキルにするための理論的な追及も必要となる。最終的には獲得した方法を全てのロボットで実行できるようにライブラリ化されていく。

②教示

位置のダイレクト教示を、力が関与する作業の場合にも適用されていく。ビジュアルフィードバックができるようになれば CG によるオフライン教示やタスクレベルの言語による指示・教示が可能となる。教示は作業自体は同じでも作業対象の形状の違いにより作業地点へのアプローチの仕方が異なったりし、それぞれの場合に対応しなければならない。ロボットを売るだけでなく、ロボットの導入・運用 (教示など) をビジネスにすることにより、教示の問題を解決していかねばならない。

③障害物回避

周りに障害物がない環境で教示した軌道を、作業環境に合わせて修正するためのアーム・移動台車の障害物回避は重要である。移動台車の自由度も生かした障害物回避をしないと現実的にはアームの障害物回避はできない。

6) アーム制御

①力制御

力制御によりボルトの挿入/ナットの締付作業が人並みの速度で実行することを目指す。まずは、力センサ・触覚センサの改良が必要である。力制御機能付きの市販のアームが出てきたので、力制御によ

るいろいろな作業実験ができるようになってきた。また、コントローラをオープン化して研究者・開発者の責任で力制御機能を付加できるようする必要がある。

②ビジュアルフィードバック

移動して作業したり、CGでの教示を現実の作業対象物に対して実行するためにはビジュアルフィードバックは必要不可欠である。カメラ画像空間あるいは3次元位置測定器の空間で、作業対象物とグリッパなどの工具の位置合わせをおこなえば、カメラキャリブレーション・アームのキャリブレーションが不要となる。柔軟物の変形に対応した位置合わせも必要となる。

③移動台車とアームの協調

作業アームを人腕程度の大きさにすると、作業アームだけでは動作範囲が狭すぎる。移動台車と協調して動作することにより作業範囲を拡大する必要がある。そのためには移動台車とアームの軌道生成が必要となる。

7) システム技術

①システムインテグレーション

ロボットは、いろいろなコンポーネント（機構もコントローラも）を組み合わせて作る。コンポーネントの標準化・モジュール化を図り、安価に製作できるようにしなければならない。システム設計を支援するツールとして、CGによる機能設計支援ツール・全体設計支援ツールなどを含んだロボット開発環境を作成し、標準化されたコンポーネントを組み合わせてシステムを作れるようにしたい。コントローラ用の基本プログラムはOpenGLのようなC言語のライブラリにまとめたい。ユーザとの意思の疎通を図るためにCGによる機能設計支援ツールは重要である。

②電源・通信

電源・通信の確保は必須である。電源・通信線の送り出し・巻取り、無線のエアポケットの解消もしなければならない。電池の大容量化も永遠のテーマである。

8) 安全

製造環境におけるロボットの安全要求事項⁸⁻¹¹⁾が2006年に規格化され、ある技術的条件の下で人間との協調作業が可能となった。さらに2014年には人間を作業対象とする人間共存型ロボット（パーソナルケアロボットと呼ぶ）の安全要求事項が国際規格となった。これにより、ロボットと人間との共存・協調が可能となった。

屋内環境では、異常状態になる確率を考慮した安全度水準（SIL）¹²⁾の定められた安全規格適合型ビジョンが普及し、また、他分野に先駆けて、人間共存型移動ロボットシステムの導入も可能になっていく。

3.4 実用化・事業化へのポイント（表 2.4）

実用化・事業化のポイントを、システム開発のステップに沿って挙げていく。

1) ニーズに沿った機能設計

ロボットの導入に懐疑的な生産技術者・経営者（ユーザ）は多い。それは機能設計時の意思の疎通が不十分であるからである。ロボットシステムの導入時に、CGアニメーションなどを利用してロボット導入の効果・メリットを明示できるようになり、ユーザと一緒に機能設計ができるようにしたい。現状ではロボット導入・運用の支援もしないと現場には普及しない。

2) ロボットに必要なコンポーネント（機能）を開発する

①要素技術

必要なコンポーネントとして、アームの制御技術としてビジュアルフィードバック・力制御、作業を実行するための作業スキルの獲得（教示）がある。力制御の普及には安価な力・接触センサが必須である。また、アームの力が不足してできない作業が多くある。小型・強力アクチュエータの改良の継続は永遠に続けなければならない。

②ロボットはプロジェクトチームを組んで開発

ロボットを開発するには、システム設計者が中心となって、ユーザ、機構・コントローラ・通信などの要素技術者が協力し、プロジェクトチームを運営して一つのシステムに仕上げなければならない。組織の垣根を越えてフレキシブルにチームを編成したい。

3) システムの完成度を上げる。（作業を確実に実行する）

我々はこれまでにいろいろなロボットの技術を開発して来たが、論文の中での技術だったり、実現可能性を示しただけに止まり、現場に導入できないことが多い。例えば、ボルトの締付作業も出来ることは示したが、生産現場で使用するためには作業の失敗確率を $1/1000 \sim 1/10000$ 以下にする必要がある。同様にビジュアルフィードバックのためには作業対象物の誤認率をそのためには、 $1/1000 \sim 1/10000$ 以下にする必要がある。継続した繰り返し検証実験と、失敗する場合の理論的な分析、ロバストな作業スキルの構築も研究開発しなければならない。

研究開発だけではシステムの完成度は上がらない。ユーザに安く商品として提供し、その後の運用支援をビジネスにしながら完成度を上げていかねばならない。

4) 安く作る

安く作るには要素技術を標準化・コンポーネント化し、それを組み合わせてユーザのニーズあったロボットシステムを構築しなければならない。アーム・移動台車・視覚のインターフェースを標準化（オープン化）し、コントローラのソフトのライブラリ化が必要となる。できればOpenGLのようなC言語で使える関数ライブラリが良いのではないかと思う。また、CGを利用した機能設計ツールをはじめとするロボットシステム開発環境の整備もおこなう必要がある。RTコンポーネントをはじめ、これまでに開発された技術の整理と継承方法の確立は重要である。また、ビジュアルフィードバック・力制御により機構の加工精度軽減もおこなう必要がある。

3) 運用支援

ロボットを使いこなせる事業者は大手自動車メーカーと大手電機メーカーだけである。ロボットを売るだけは普及しない。ビジネスモデルを、ロボットを売るものから、ロボットの導入コンサルタント・作業スキルの教示などの運用支援・システムのメンテナンスを中心としたエンジニアリング事業に転換する。エンジニアリングを効率良くおこなうために、インターネットを利用した遠隔運用支援技術も開発しなければならない。

3.5 まとめ

ここで、製造分野のロボットについての重要点をまとめておく。

1) これらの現場で必要とする基本作業には、①セルにおけるバラ積み部品の配膳・取り出し作業、②ボルト・ナットによる締め付け、③電子回路基板・コネクタ・電源をネジ・ボルト・ナットでシャーシに組

み付け、④ケーブルの接続、⑤大型重量物の組み付け、⑥ホース・ベルトなどの柔軟物の組み付けなどがある。

2) 作業セルで1) で挙げた作業を実行するためのロボットとしては移動台車付き人腕型の作業アームが適している。

どのような作業ニーズがあるのか、現場の生産技術者とのコミュニケーションが重要である。

3) 要素技術として、①移動して作業をするために、作業対象物に対してアームを位置合わせするためのビジュアルフィードバック、②いろいろな作業をするための作業スキル（教示）、③作業スキルを実行するために力制御、④力制御のための低雑音でドリフトのない安価な力センサ・触覚センサの開発する必要がある。

4) 実用化・事業化へのポイントは、①ユーザである現場の生産技術者との意志の疎通を図り、ニーズに沿って機能設計をすること、②作業を確実に実行するシステムに完成度を上げること、③ロボットシステムを安く作れるように標準化・モジュール化を促進すること、④ロボットを売るビジネスから、ロボットの導入・運用・保守を支援するエンジニアリング事業に転換することである。

- 1) ホンダ：<http://www.honda.co.jp/robotics/weight/>
<http://www.honda.co.jp/kengaku/auto/assemblyframe.html>
- 2) 三菱電機：<http://www.mitsubishielectric.co.jp/corporate/randd/spotlight/spotlight12.html>
- 3) IDEC：<http://jp.idec.com/ja/technology/monodzukuri/robot.html>
- 4) YouTube：<http://www.youtube.com/watch?v=3yNCpuPePRU>
- 5) 安川電機：<http://www.e-mechatronics.com/product/robot/index.html>
- 6) 川田工業：<http://nextage.kawada.jp/video/>
- 7) 川崎重工：<http://www.khi.co.jp/robot/field/index.html>
- 8) 産業用ロボット安全規格 <http://www.jaish.gr.jp/anzen/hor/hombun/hor1-7/hor1-7-13-1-0.htm>
- 9) JEMA 安全規格 <http://www.jema-net.or.jp/Japanese/standard/san-kouen/0802.pdf>
- 1 0) 産総研 <https://unit.aist.go.jp/ispd/ja/event/2013sympo/lecture04-1.pdf>
- 1 1) NEDO <http://www.nedo.go.jp/content/100388880.pdf>
- 1 2) SIL http://www.zuken.co.jp/club_Z/z/safety/02/s_100826_2.html

4. サービス分野（介護・病院内作業支援）のロードマップ

サービス分野の中、介護・病院内作業支援ロボットを選択し作成したロードマップを表 3.1～表 3.4 に示した。ここで、病院内作業支援には医療行為の支援は含まない。本ロードマップは実用化・事業化を予想したものである。既に試作・実証はされているが、実用化・事業化（普及）の域に達していないものも多く含んでいる。以下、作成したロードマップを解説する。

4.1 作業（表 3.1）

1) 自立できる在宅高齢者の支援

自立できる高齢者の場合は移動ができ、家事ができれば生活ができる。移動の補助・家事の支援に重点をおいて展望してみる。

①移動支援

室内を移動する場合は、ベッドで寝ている状態から上体を起こす、ベッドを横向きに座る、立ち上がる、歩く、歩いてトイレ・お風呂・食卓・台所と移動する。またはこの逆の経路でベッドに寝る。機械化したロボットを導入するというより、杖・歩行器が徐々に小型・軽量になり、段差・階段に対応し、その後身体に密着してウェアラブルになっていくであろう。電動にする前に、できるだけ機構で対応しても面白い。

散歩・買い物のために屋外に出る場合は、車椅子が家の段差（50cm）を降り、道路を坂・段差・凸凹道に対応しながら移動する。障害物回避などの自律・安全機能を付加しながら、最終的には自律移動車椅子になるであろう。

① 通信による仮想移動

高齢者が家だけでなく外の社会と接触するために、遠隔地の家族が、インターネットを介して TV 電話をおこない、ディスプレイに遠隔の訪問者の顔を映し出して仮想的に訪問する。また、高齢者がロボットを使って買い物をしたり観光地や映画館などを訪問したり、孫に会えたりできるようにもなる。また、軽量のアームを付けてお茶などを入れたりする。

② 家事支援

動くのがおっくうになると身の回りが汚くなる。掃除・洗濯・食器の洗浄・料理の下ごしらえ・洗濯物の折り畳みなどをして欲しい。

③ リハビリ（軽いトレーニング）

できる限り元気に動けるように、日常的にマッサージ・ストレッチや軽いトレーニングをする。筋力の維持が重要である。

2) 介護センターでの介助者支援

介助者の仕事には、ベッドから車椅子への移乗、排便・入浴・食事の支援がある。

① ベッドから車椅子への移乗

まず、介助者の腰の負担を軽減するため、寝ている人をベッドから車椅子への移乗させることが、是非解決したい問題である。リフタやベッドや車椅子が動いて移乗を補助する。リフタやベッド・車椅子を折り畳みで軽量にするために、電動にせずに介助者の体重を利用するのも面白い。

②室内・屋外移動支援

介助者が押している車椅子が段差・坂・凸凹時にアシストする。

③排便

排便のための動作は、トイレに車椅子で移動、車椅子や手摺を利用して立たせる、パンツを下ろしてお尻を出す、排便する、パンツを引き上げるという手順である。この動作を人と協力して支援する手摺・車椅子が必要となる。睡眠中の排便のための自動排泄支援¹⁾ 実用化されつつある。

④入浴

入浴のために次の動作をおこなう。浴室に車椅子で移動する、服を脱がせる、浴槽に入れる、浴槽から出す、身体・頭を洗う、拭く、服を着せる。最初は介助者がほとんどの動作を支援するが、徐々に車椅子や浴槽が動いて自動化する。

④ 食事の搬送・洗濯・掃除

介護センターの職員が、人の介護に専念できるように食事の搬送・洗濯・掃除をする。

3) 病院内業務支援

看護師は病院のバックヤードのいろいろな作業もしなければならない。バックヤードの仕事を自動化して看護師が本来の仕事に集中できるようにし、人件費を削減する。まずは、薬・検体の搬送や病院内の案内からはじめ、病院巡回時の治療用品（ガーゼなど）の準備・搬送、医療機器の洗浄などをおこなう。また、介護センターと同様に、食器の搬送・掃除・洗濯をする。

4) その他

エレベータなどのインフラ整備

家・病院・介護センター・駅・スーパーマーケットなどにエレベータが増設され、階段を昇降しなくても移動できるようにしたり、車椅子でバス・自動車に乗車できるようにバス・自動車のステップの昇降を自動化する。

補聴器・眼鏡

高齢者の行動のアクティビティが下がる原因は、筋力よりも眼・耳の機能低下の方が大きいかもしれない。音の大きさ・高さ・速度が可変な補聴器や自動焦点眼鏡が欲しい。

4.2 ロボットのイメージ (表 3.2)

ロボットを介護に適用するより、現在市販・レンタルされている介護機器¹⁾ を高機能化するという方が受け入れ易いと考える。高齢者にとって新しい機器を使いこなすのは難しい。

1) 杖

杖は最も普及している移動支援装置である。軽量化され、安定度をまし、スムーズに操作できるようにローラを付けたり、高さを変化するようになり、段差・凸凹道にも対応できるようになる。また、身体の重心が左右に振れないように、スキーのストックのような双腕の杖もいいたろう。軽量化は最優先であるので、できるだけアクチュエータを使わず、まずは機構で工夫したい。

2) 歩行器

病院で使われている歩行器も年々改善されている。道路を歩行するために、段差（10cm）を昇降できるようにする（図 4.2.1）。人が4足歩行をするために、2足歩行ロボットの前足のような歩行器はどうだろう。最終的には身体に密着させ（図 4.2.2）、着脱の容易なパワースーツとしてウェアラブル化されるであろう。

杖も歩行器も脚の筋力の低下を補助するだけでなく、身体のバランスをとることを補助するものであることを忘れてはならない。

3) 車椅子

自立している人が使用する場合、障害物を回避しながらジョイスティックで指示した方向に移動する半自律型が欲しい。段差（10cm）や凸凹道に対応できるようにしたい。

介助者が使用する場合、車椅子に排便・入浴時の動作支援もできるようにしたい。排便時は、トイレまで移動すると、車椅子の手摺が前方に動き、座席が立ち上がり、高齢者が腰を浮かすと、介助者がパンツを下ろし、同じ手摺を使って便座へ移乗する。入浴の際には、車椅子上で上着を脱がせて、座席が起き上がり立たせたのち、パンツを脱がせる。介助者が使用する場合の車椅子はまず、機構を工夫し人力（人の体重も利用）で動かし、その後アクチュエータを用いて自動化するステップを踏むであろう。

4) インターネットを利用した自律移動ロボット

図 4.2.3 に示すように、遠隔地の家族が、顔をディスプレイに表示して、あたかもロボットの中に人がいるようにして在宅・介護センターの高齢者を訪問する。軽量のアームを付けてお茶を煎れたり、ボタンを押す程度の軽作業をおこなう。また、高齢者がバチャル買物・観光したりする。

5) 掃除機・洗濯機・食器洗い機

介護センター・病院で自動掃除機を普及させたい。介護センター・病院では、図 4.2.4 のようなタイプが普及していくであろう。狭い箇所にも入れるノズル付ができれば家庭でも使える。普及のポイントは価格であろう。

汚れ物を洗濯機は籠に入れておくと自動的に洗濯槽に入れて乾燥までする。最終的には畳んでくれる。介護センター・病院のように大量の食器が洗える機械をユニット化し、洗う量により装置を増減できるようにしたい。

家庭用は現在の食器洗い機を改良し、食器を簡単に入れることができ、下洗いもしたい。

最終的にはヒューマノイド型家事ロボットもできるであろう。ヒューマノイドロボットには相応しい仕事かもしれない。

6) リハビリ/マッサージロボット

できるだけ自分で動けるように日頃から軽い筋トレ・ストレッチ・マッサージをしておく必要がある。手摺を利用しディスプレイを見ながらトレーニングするもの、図 4.2.5 のようなマッサージ機、このマッサージ機のようなトレーニングマシンなどが開発されている。最初は介護センター・病院（リハビリ）で使用され、徐々に在宅に普及していく。

7) リフタ

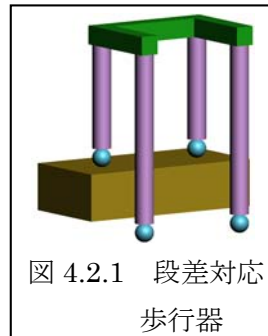


図 4.2.1 段差対応歩行器



図 4.2.2 身体密着型歩行器



図 4.2.3 遠隔訪問ロボット²⁾



図 4.2.4 業務用掃除ロボット（フィグラ）



図 4.2.5 マッサージ機（パナソニック）

ベッドから車椅子への移乗は介助者の腰に負担を掛ける。シーツの4隅に吊下げ用のリングを付け、これを小型のクレーン風のリフタ（図 4.2.6）で吊下げるものが市販されている。吊下げ時に高齢者に装着させるアタッチメントが工夫されていく。

8) ベッド

車椅子とベッドが一体になったベッドが試作されている（図 4.2.7）。ベッドから車椅子への移乗には、高齢者が仰向けに寝ている状態からベッドの脇に座る状態までベッドが動いて移動すると、後は移動式の手摺などを使って車椅子に移乗することができる。介助者の負担を軽減する人の起こし方などは近年いろいろ提案されている。介護の専門家や介護師と一緒にベッドの動きを工夫していくことが重要である。現場の人の声を反映した開発が求められる。ベッドもアクチュエータ抜きで、まず機構を工夫したい。

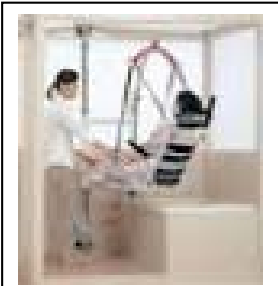


図 4.2.6 リフタ型
(モリトー)



図 4.2.7 車椅子・ベッド分離型
(パナソニック)



図 4.2.8 病院内案内ロボット
(パナソニック)

9) 搬送用自律移動ロボット

病院内業務支援では病院内の案内（図 4.2.8）や搬送用の自律移動ロボット（図 4.2.9）が試作されている。ロボット研究者が長年開発を進めてきた自律移動ロボットぐらいは普及させたいものである。技術的な完成度も高いと思われる。普及のカギとなる産業車両の国際安全規格の策定が中断されているが、今後は、製造環境におけるロボットのための安全検証データの規格化や、あるいは移動ロボットがその中心的対象となっているパーソナルケアロボットの国際安全規格の登場により、やっとな加速されるものと思われる。



図 4.2.9 病院内搬送ロボット
(パナソニック)

4.3 キーとなる要素技術（表 3.3）

1) 機構

介護機器（杖・歩行器・車椅子・ベッドなど）は人に合わせて、長さ・大きさ・負担重量を調節するようになる。機構のユニット化は必須である。また、ウェアラブルにするにはオーダーメイドとなる。昔の町のテーラーのように、介護機器を設計・製作できるような職業が成立できる条件は何であろうか？また、機構の設計・製作者は年々減っている機構設計・製作者の育成は重要である。

2) アクチュエータ

介護・病院用としては特に低騒音のアクチュエータが必要とされる。また、人の体重100Kg程度が負荷重量になるので、軽量高トルクのアクチュエータの開発は重要である。モータによる直接駆動だけでなく、ワイヤ駆動・スプリングによる補助・空気圧の利用も再考したい。

3) センサ

移動ロボットを人と混在する環境に普及させるためには安全が第1である。ロボットのどこかに触れると停止するための接触センサ・近接センサは必須である。ロボットのフレームやカバーに接触・近接すると静電容量が変化するスイッチの利用を工夫することになるであろう。また、車椅子やベッドの動きを人に合わせて動かすためには人の部位（足・腰・腕・頭など）を検知しなければならない。

4) RHI（ロボット・ヒューマン・インターフェイス）

介護・病院内支援のロボットのインターフェイスでは、音声入力ができる嬉しい。最終的には、マイクを通さない音声認識をして欲しい。

5) 作業計画

作業計画としては自律移動時の障害物回避が重要である。必要な技術は十分な完成度に達していると思う。もうそろそろ自律移動は普及してもよいと思われる。

6) システム技術

自律移動するには無線通信が必要となる。現状、どこでも繋がる無線通信ネットワークは無い。無線LANと携帯電話のネットワークどちらが今後の主流になるのであろうか？通信容量の拡大も永遠のテーマである。また、移動には電池が必要となる。充電方式の確立と電池の容量アップは避けて通れない。

7) 安全

自律移動を普及させるためには安全の確保が重要である。また、先行する自動車安全の影響を受けて、人間を作業対象とする人間共存型ロボット（パーソナルケアロボットと呼ぶ）の安全要求事項が国際規格³⁾となった。これにより、搭乗型やマニピュレータ搭載型の移動ロボットと人間との共存・協調が可能となった。安全基準³⁻⁸⁾が整備された意義は大きい。

安全基準を満足した屋外用のLRFやビジョンセンサも普及し、ロボットが社会・家庭へ浸透して行く。

4.4 実用化・事業化へのポイント（表 4.4）

1) ニーズに沿った機能設計

医療福祉の現場のユーザである介護師・医師・看護師とロボット技術者との協力・意思疎通が重要である。ユーザの意向を汲んだ機能仕様をきめるためにCGによる機能定義のビジュアルライズや、ユーザとの合同プロジェクトを組織できるようにしたい。徐々にではあるが介護師・医師・看護師とのパイプは出来つつある。もう一歩進んで、必要としている介護機器として杖・歩行器・車椅子を例に詳細なロードマップをユーザと協力して作成し、できれば製作プロジェクトを実行してはどうだろう。また、ユーザ側から忌憚のない評価をお願いしたい。

2) ロボットに必要なコンポーネント（機能）を開発する

介護機器の開発は機構の開発が重要である。歩行を支える杖・歩行器・車椅子と、介助のキーポイントであるベッドからの移乗を支援するためのベッドと車椅子の機構開発が重要である。自律搬送車を実用化するためには、どこでも接続できる無線ネットワークが必要となる。また、安全のために人・障害物を検出する接触センサ・近接センサ・ビジョンが必要となる。

3) システムの完成度を上げる。

完成度あげるためには常時使うことである。実験室では普及するに必要な完成度まで高められない。使用しながら改善するために、ロボットの導入・運用をおこなうエンジニアリング・サービス事業を立ち上げる必要がある。

4) 安く作る

安ければ普及するものは多い。安くつくるためには機構のコンポーネント・モジュール化やソフトのライブラリ化は必須である。また、モジュールを用いてシステムを設計するための支援技術（CAM）も必要となる。

5) 運用支援

基本的に生活を支援したり、介護の支援・病院業務の支援をするエンジニアリング・サービスがビジネスの中核である。地域・個人密着型のビジネスを開始すべきである。ビジネスのモデルケースを国・地方公共団体の事業として立ち上げて欲しい。

4.5 まとめ

ロードマップから重要な点を挙げてみる。

- 1) ロボットのニーズは、①自立できる人のための歩行支援、②介助者のための、ベッドから車椅子への移乗、③病院内で検体や食事を運ぶ自律移動車であろう。
- 2) その作業を実行するための機器としては、杖・歩行器・車椅子・ベッドを継続して改良する必要がある。これらは最終的にはウェアラブルになろう。また、病院内の搬送のための自律搬送車が必要とされる。
- 3) 要素技術として、①杖・歩行器・車椅子・ベッドの機構開発、②自律移動を実用化するためには、どこでも接続できる無線ネットワーク、③安全のために人・障害物を検出する接触センサ・近接センサが必要となる。
- 4) 実用化・事業化には、①医療福祉の現場のユーザである介護士・医師・看護師とロボット技術者との協力・意思疎通が重要であり、そのためにCGなどを利用して機能設計のビジュアル化、②ロボットを運用するためのエンジニアリングサービス、遠隔からの操作支援も重要となる。ロボットの導入・運用をビジネスとすることにより、システムを普及するのに必要な完成度まで上げることができる。

参考文献

- 1) 介護機器 <http://www.rentacom.jp/tools/cane/>
- 2) 川合, 福田ほか: インターネットを介した遠隔訪問ロボット, 2009年度ロボット学会学術講演会 2Q1-07 (2009)
- 3) パーソナルロボット 安全規格
<http://www.meti.go.jp/press/2013/02/20140205001/20140205001.html>
- 4) 産業用ロボット安全規格 <http://www.jaish.gr.jp/anzen/hor/hombun/hor1-7/hor1-7-13-1-0.htm>
- 5) JEMA 安全規格 <http://www.jema-net.or.jp/Japanese/standard/san-kouen/0802.pdf>
- 6) 産総研 <https://unit.aist.go.jp/ispd/ja/event/2013sympo/lecture04-1.pdf>
- 7) NEDO <http://www.nedo.go.jp/content/100388880.pdf>
- 8) SIL http://www.zuken.co.jp/club_Z/z/safety/02/s_100826_2.html

5. 特殊環境分野のロードマップ

原子力事故対応（福島第1原子力発電所の廃止措置）については、東京電力がホームページでロードマップと進捗報告を公開している¹⁻⁴⁾。その東京電力ロードマップを参考に、作業の内容と作業を実行するためのロボットのイメージを呈示し、これらのロボットに必要な要素技術を、本ロードマップにまとめた。表5.1～5.4に作成したロードマップを示した。ただし、本報告のロードマップは、この特殊環境分野の章を執筆した辰野が原子力発電所の状況を推測して作成したものであり、東京電力のロードマップとは別のものである。作業対象や想定するロボットも範囲を広げて検討した。したがって、これらの作業すべてを実行されることはない。今後の作業の進捗により、より良い作業方法・手順を選択しながら進められていく。この章で使用した作業環境の図・写真は、東京電力殿のホームページからの抜粋と、中部電力殿の協力を得て、福島第1原子力発電所と類似の浜岡原子力発電所1, 2号機（2009年より廃止措置中）で撮影したものである。

5.1 作業環境と作業（表 5.1）

想定される作業は次の様なものである。

1) 圧力容器・格納容器内の燃料デブリが冷却されていることを確認

格納容器・圧力容器内の温度・水位・放射線を測定し、燃料デブリが安定して冷却されていることを常時モニタする。

2) 使用済燃料の取り出し

1, 3, 4号機については、使用済み燃料プールの上部の瓦礫を除去し、燃料集合体を引き抜き、キャスクに入れて、共用プールに移す。現在4号機での燃料集合体の引き抜き作業を実施しているが、作業員の負荷を軽減するために、作業環境の視認を容易にしたり、クレーンの位置決めなどを自動化することも検討しておく必要がある。

3) 原子炉建屋内で人が作業し易くする（除染など）

実際の原子炉建屋内の様子を図 5.1.1 に示す。

① 原子炉建屋内の作業用電源・通信ラインの確保

遠隔操作機器をはじめ作業用の工具などを動かすための電源・通信（有線・無線）ラインを確保する。必要があれば新たにラインを敷設する。

② 原子炉建屋内の目視観察・放射線モニタ

遠隔操作の移動ロボットがカメラ・照明と放射線検出器を搭載し、原子炉建屋内を移動しながら目視観察・放射線モニタをする。また、3次元位置測定器やカメラ画像からの3次元復元を用い

て、原子炉建屋・格納容器内の3次元CGを作成する。CGは、ロボットの遠隔操作のRHI（Robot Human Interface）に使用すると共に、作業方法を検討し、遠隔操作の訓練シミュレータに用いる。

③ 原子炉建屋の健全性検査・補強

水素爆発で建屋が壊れた1, 3号機は原子炉建屋の健全性検査をおこなう。作業を安全且つ効率よく実施するために現在の原子炉建屋の外側に建屋を追加することも検討する必要がある。

④ 瓦礫の除去



図 5.1.1 原子炉建屋 1F の通路

原子炉建屋内の瓦礫を除去し、人や遠隔移動機器が動きやすくし、作業の効率を上げる。

⑤ 除染

人が作業できるように床・壁・天井・ケーブルトレイなどを除染する。床だけでなく、高所の壁・天井・ケーブルトレイも除染しなければならない(図 5.1.2)。

現在、原子炉建屋内の作業は人手で行われている。しかし、放射線の被曝を出来るだけ低減しないと今後の作業に支障を来す可能性もある。また、原子炉建屋内の常時目視や放射線モニタ、除染は福島以外の原子力発電所の監視・廃炉にも必要となる。

4) 格納容器の漏洩部の検出

現在、1, 2, 3号機の格納容器から燃料デブリを冷却した後の汚染水が漏れている。漏洩部の検出・封止は最重要課題の一つである。

① 格納容器下部の漏洩部を外部から調査

漏洩の可能性のある調査箇所は、格納容器に近い個所から、格納容器底部、ベント管(図 5.1.3)・サンドクッションドレイン管・S/C(サプレッションチャンバ 図 5.1.4)・トーラス室壁面(図 5.1.5)等である。ベント管の溶接部と格納容器のコンクリートの隙間が10cm以下と狭く、ロボットは階段・グレーチング・床・壁面を移動しなければならない。また、水陸両用でなければならない。濁った水中で撮影した画像の画質の改善も必要となる。

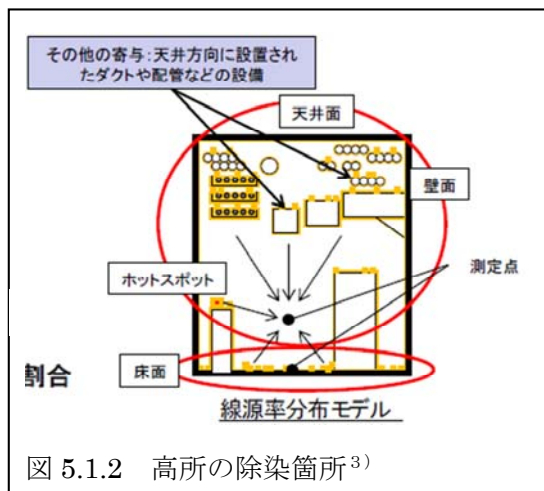


図 5.1.2 高所の除染箇所³⁾



図 5.1.3 ベント管溶接部

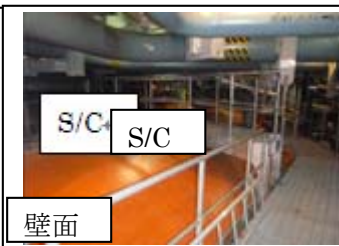


図 5.1.4 S/C 上部
(下面は濁った水に浸かっている)



図 5.1.5 S/C 下部・
トーラス室の壁面
(濁った水に浸かっている)

S/C 下部とトーラス室の壁面では水中に漏洩している水の流れを検出しなければならない。水の漏洩は、注水量5~6m³/時間(おおよそ15×15×15cm/秒)と同じと推定される。1か所で漏洩している場合は、家庭の水道栓を大きく開けた程度である。漏洩検出方法についてはカメラによる目視だけでなく、いろいろな方法を検討する必要がある。

最近(2013年11月)、1号機の格納容器を支えるサンドクッションのドレイン管からの水の漏洩が確認された。格納容器底部に漏洩箇所があると推測される。2, 3号機も同じ個所である可能性が高い。また、トーラス室の壁の貫通パイプの周りから地下水が浸入・漏洩していると思われる。トーラス室を密閉すれば汚染水の流出は止めることが出来、燃料デブリのコンパクトな冷却系を構成できる。トーラス室

への地下水の流入・冷却水の流失を、トーラス室内部・外部の両側から止める必要がある。

5) 格納容器内部の調査

図 5.1.6 に示すように、格納容器の貫通孔 (X6, X53 ペネ) を利用して、観察用スコープを挿入する。観察用スコープを貫通孔に設置し、観察用スコープを遠隔から操作しながら、漏洩部を内部から調査し、また、燃料デブリ・冷却水の状態を観察する。観察用スコープの設置も遠隔操作でおこなうことも検討しておかなければならない。図 5.1.7 に貫通孔、図 5.1.8 に正常時の格納容器内の様子を示す。格納容器内はポンプ・配管・バルブ等の機器が密集しており、見通しも悪い。

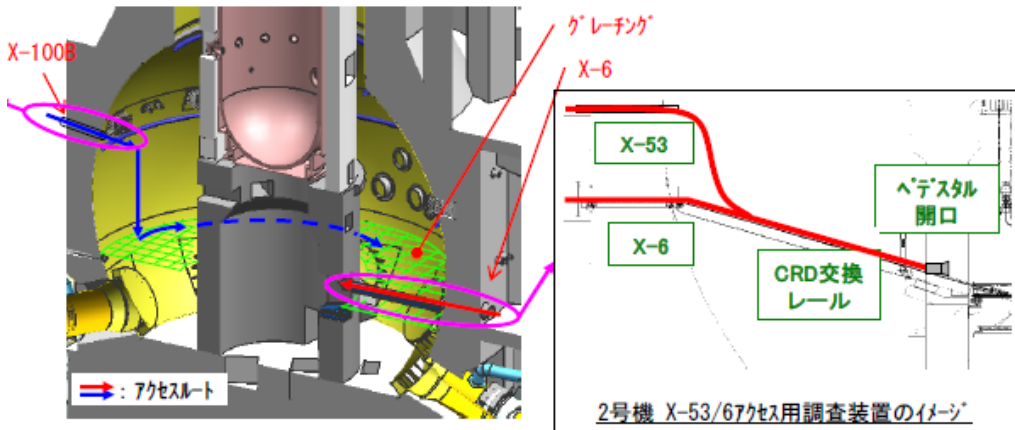


図 5.1.6 格納容器内内部の調査方法³⁾

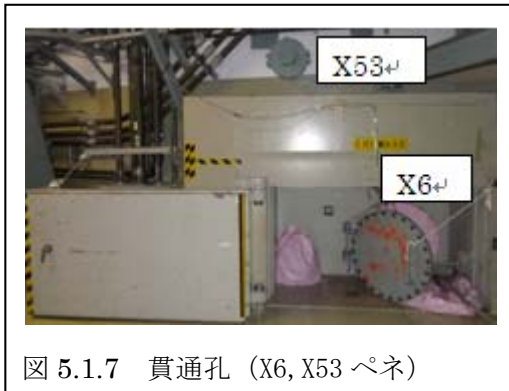


図 5.1.7 貫通孔 (X6, X53 ペネ)



図 5.1.8 格納容器内

6) 漏洩部の封止

格納容器底部に漏洩箇所がある可能性が高い。

高温の燃料デブリにより格納容器底部が破損したと考えられる。格納容器底部を補修することは困難である。そこで、トーラス室を密閉して、トーラス室も含めた格納容器を再構築することが考えられる。トーラス室漏洩部にモルタルを注入したり、トーラス室を包むように外側に遮蔽壁を設け、外部からの地下水・雨水の流入と燃料デブリ冷却水の外部への流出を防ぐことなどが考えられる。まずは作業方法・手順を作業者・遠隔機器開発が協力しながら作業シナリオを作成し、関係者のコンセンサスを得ることが必須である。

7) 格納容器冷却系のコンパクト化

現在、タービン建屋に流れ込んだ水をろ過して、圧力容器に注入して残存燃料を冷却しているが、この冷却系をコンパクトにする。その方法として、トーラス室を密閉し、地下水の流入、冷却水の流出を止め、トーラス室に冷却系の取水用配管を挿入することが考えられる。この作業は高放射線下での作業になる

ので遠隔操作でおこなうことになるであろう。

8) 燃料デブリの取り出し

格納容器上部の漏洩部の検出・封止した後、格納容器内を水で満たし、炉心内の構造物を除去しながら燃料デブリを取り出すことを想定している。まずは炉心内部を観察しなければならない。

5.2 ロボットのイメージ (表 5.2)

上記の作業をするロボット (遠隔操作機器) のイメージを描いてみる。一部は既に開発に着手され、用いられているものもある⁵⁾。

1) 温度・水位・放射線・目視常時モニタシステム

これはロボットではなく計測システムである。1, 2, 3号機のプラント (原子炉・格納容器・トーラス室など) 状態を常時モニタする。温度・水位・放射線センサと耐放射線カメラを必要な箇所に配置し、遠隔の操作室でモニタできるようにする。

2) 使用済み燃料取出しクレーンの改良

現在の使用済み燃料取出しクレーンで、作業者の負担を軽減するために、作業環境・作業対象物の視認性 (カメラ・ディスプレイの配置) を改善する。また、クレーンの位置決めを手先カメラを用いてビジュアルフィードバックすることにより一部自動化し、操作者の負担を軽減したい。

3) 小型移動ロボット

図 5.2.1 に示す小型高踏破性遠隔移動装置が試作されている。原子炉建屋内を移動し、搭載したカメラ・放射線センサで、目視観察と放射線モニタをおこなう。カメラとレーザーレンジセンサ (LRF) で取得したデータから 3次元復元をおこない、3次元CGを作成する。この作成は人間が介在してもよい。移動速度を向上し、小型ではあるが戦車の用に頑強にしたい。



図 5.2.1 小型高踏破性遠隔移動装置⁵⁾

4) 瓦礫撤去用ロボット

瓦礫の撤去には建設用ロボット (バックホー・ドーザ・破碎/切断機・キャリア・リフタなど) が必要となる。漏洩部の封止・格納容器冷却系の構築などでも建設ロボットが必要となる。原子炉建屋やトーラス室などに搬入できる小型のものを検討する必要がある。

5) 除染ロボット (図 5.2.2)

現在開発されている除染ロボットの例を挙げる。ビルの清掃ロボットのようなものも考えられる。除染を遠隔でおこなうので、操作訓練をおこない操作に習熟しておく必要がある。床だけでなく、壁・天井・ケーブルトレイなども除染する高所除染ロボットも必要となる。



図 5.2.2 除染ロボットの例³⁾

6) 長尺の観察スコープ

①漏洩の可能性があるベント管・S/Cを調査するための小型壁面移動ロボット (図 5.2.3) が試作されている。

②原子炉建屋1階の床に穴を空けて、そこからケーブル付の水陸両用移動ロボット (図 5.2.4) を入れて

カメラで観察する。カメラが付いた移動ロボットに長いケーブル（電源・通信ライン）がついたものになるであろう。ケーブルの引き出し／巻取りが必要となる。同様のロボットで貫通孔から格納容器内を観察する。

ちなみに、1号機では、船型ロボットを原子炉建屋1階の床の穴から挿入し、トラス室の水面を移動して、サンドクッションのドレイン管からの水の漏洩を観察した。格納容器の底部・ベント管で漏洩の可能性が高い。

先端にカメラが付いた水陸両用ヘビ型モジュールロボット（図 5.2.5）

格納容器内はいろいろな機器が詰まっている。これらの機器を回避しながら内部を観察するにはヘビ型ロボットも候補に挙がる。

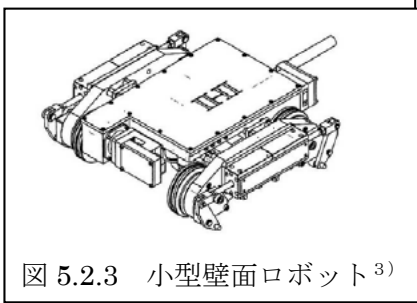


図 5.2.3 小型壁面ロボット³⁾

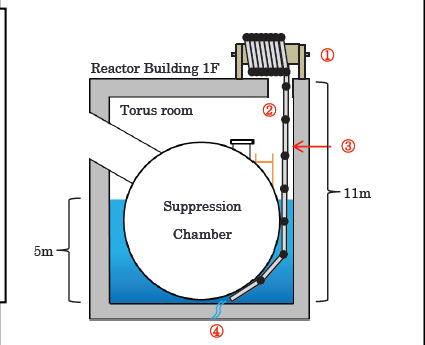


Fig. 1 Concept of Neutra-I
図 5.2.4 S/C下部・トラス室点検用長尺スコープ

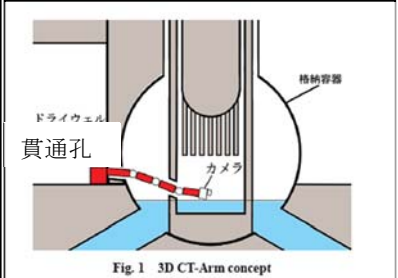


Fig. 1 3D CT-Arm concept

図 5.2.5 格納容器内観察用ヘビ型モジュールロボット（広瀬・山田ほか）

7) 高所作業車

格納容器の上部の漏洩検出や、天井・ケーブルトレイの除染などのために図 5.2.6 のような高所作業車⁶⁾が試作されている。

8) 漏洩部封止ロボット

ベント管や格納容器下部を封止するロボットやトラス室貫通パイプ部封止ロボットが必要となる。トラス室は外側に壁を設置し封止することになるかもしれない。これらのロボットは建設ロボットを小型化したものになるであろう。建設ロボットが必要となる場面は多い。



図 5.2.6 高所作業車⁵⁾

10) 人型双腕移動ロボット（図 5.2.7）

原子炉建屋の放射線レベルが下がらない場合も想定して、人の作業を代行するために、遠隔操作の双腕ロボットも用意しておいた方がよい（図 5.2.7）。4脚やクローラ移動台車の上に双腕とカメラが付いたものが考えられる。これらのロボットを遠隔から操作して、停止したロボットの修理、電源プラグの着脱、除染作業、構造物の切断・溶接作業、貫通孔のボルトを外し長尺の観察スコープを挿入する作業ができるように準備しておく方がよい。

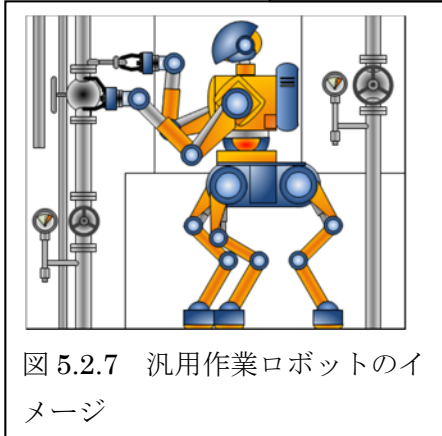


図 5.2.7 汎用作業ロボットのイメージ

11) 燃料デブリの取り出し用のロボット（図 5.2.8）

現在想定している取り出し工法イメージでは、燃料交換用のクレーン型ロボットに近い形になると想定している。大型クレーンを精度よく位置決めしなければならない。

1 2) ロボット自体の除染ピット

ロボットは原子炉建屋のピットに置いておくことも考えておく必要がある。このピットでロボットを除染することもできるようにする。

5.3 キーとなる要素技術 (表 5.3)

1) 機構

漏洩部観察のためのケーブル付の水陸両用壁移動用ロボット・水陸両用ヘビ型ロボットの機構設計が重要である。全長 20 - 30 m 程度で、いろいろな障害物を避けて、ベント管・S/C・トラス室の壁面を移動するものである。水中でも移動でき、また、除染が出来るように水洗いが可能なようにしなければならない。漏洩部の封止ロボットはまず、作業方法を検討しなければならない。デブリ取り出し用クレーンロボットも機構設計を中心に概念設計をして、準備をしておく必要がある。

2) センサ

耐放射線カメラを用意しなければならない。

目視以外の漏洩検出方法も用意しなければならない。水の漏洩は注水量 5 ~ 6 m³/時間、すなわちおおよそ 15 cm 立方/秒で、1 か所で漏洩している場合は家庭の水道栓を大きく開けた程度であると推定される。漏洩個所の検出方法に関してはカメラによる目視以外にも方法を検討する必要がある。水中に漏洩している水を検出する方法、トラス室の貫通パイプ周辺からの漏洩の検出法も必要である。

1) RMI (ロボット人間インターフェイス)

すべてのロボットは遠隔操縦室から操縦する。そのためのヒューマンロボットインターフェイス (HRI) が必要である。大型ディスプレイに映る画像・CG を見ながら、移動台車・アーム・カメラをジョイスティック・マスタアーム・タッチパネルなどで操作する。広視野の映像表示、カメラでは見ることができない方向からの CG 表示装置や、力帰還のあるマスタアームなどが必要となる。操作者が一人でカメラ・アーム・工具などを同時に操作でするのか、人形業瑠璃のように 3 名程度でするのか決めておかねばならない。また、複数のロボットを同時に動かすことを想定しておく必要がある。

2) 作業計画

ローカルな障害物回避、単純作業の自律化も操作者の負担軽減のために必要となる。特にケーブル付の水陸壁移動用ロボット・ヘビ型ロボットの軌道生成 (各関節が前の関節の通過位置を通過する) は必須となろう。また、作業者の負担を軽減するために除染作業等の基本動作の教示も必要となる。

3) マニピュレーション (移動ロボット制御)

気中の壁面 (格納容器外壁・S/C・ベント管・トラス室) や水中の空間や壁面 (格納容器外壁・S/C・ベント管・トラス室) を移動する制御方法を確立しなければならない。また、格納容器内の鉄のグレーチングや階段を確実に移動する方法を確立しておかねばならない。ロボットが移動するレールをまず敷設する方法もある。

6) システム技術

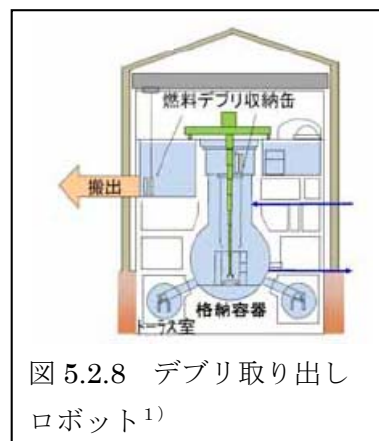


図 5.2.8 デブリ取り出しロボット¹⁾

①作業シナリオの作成

作業をするのであるから、人とロボットがどのように作業をするのか明確な作業シナリオを作成する必要がある。作業シナリオは文章・図とCGアニメーションで表現し、作業者とロボット開発者のコンセンサをとることが大きなポイントとなる。

②電源・通信ラインの確保

電源・通信ラインの確保は重要である。有線の場合は、ロボットの移動に伴ってドラムでケーブルを失敗なく出し入れする装置を開発しておかなければならない。

7) 安全

製造環境等他分野で定められた安全基準⁷⁻⁹⁾が適用されると思われる。高度な安全度水準を満たすようにビジョンや距離センサが開発・評価され、現場で人とロボットが共存できるようになる。また、リスクアセスメント技術が導入・反映され、ロボットの安全性に人々が信頼できるようになる。

5.4 開発を進める上でのポイント (表 5.4)

1) ニーズに沿った機能設計

何をおいてもまずは、どのようにして作業をおこなうか作業シナリオを作成し、関係者に周知しなければならない。作業シナリオを具体化・ビジュアル化するために、原子炉建屋・格納容器内のCGやロボットによるCGシミュレーションと、模擬作業環境による作業シミュレーションを繰り返しながら、作業シナリオ(手順)を確定していく。このために、作業の実施者と機器開発者が一緒になって何をすべきなのか、作業自体を明確にし、各作業の作業シナリオを作成することが最大のポイントである。作業実施者と機器開発者の協力こそ、廃止措置達成の大前提である。

2) ロボットに必要なコンポーネント(機能)を開発する

①遠隔操作

遠隔操作のための遠隔操縦室(広視野環境呈示・マスタアーム・カメラ用操作装置)をスムーズに改良出来るようにする。すなわち、開発した装置・技術を遠隔操縦室にスムーズに組み込むことができるようにシステム化しておく。

②水陸両用長尺スコープの機構開発

まずは、格納容器(格納容器底部・ベント管溶接部・トラス室壁など)からの水の漏洩を検出するためのケーブル付の水陸両用壁移動用ロボットと、ペネトレーションを通して格納容器内を観察する水陸両用ヘビ型ロボットの機構を作ることである。また、ヘビのように先端が移動した軌道を経由して関節やケーブルが移動するような軌道生成方法が必要となる。

③耐放射線カメラ

原子炉建屋や格納容器内は常時モニタしたい。そのためには耐放射線カメラ・制御装置を大至急手配する必要がある。

④電源・通信線の確保

パワーの要る工具・建設ロボットなどを動作させるためにも、電源・通信線の確保は必須である。移動ロボットのための電源・通信線を失敗なく引き出し/巻き取りドラムも開発しなければならない。

3) システムの完成度を上げる。(作業を確実に実行する)

遠隔操縦技術は、機器の性能が50%、操作する人の能力が50%分担して動かすものである。実際に

使わないと改良できない。模擬環境でロボット検証実験と人・ロボット合同作業訓練を繰り返さなければ、実作業に投入することはできない。作業シナリオの検証も含めて、類似の原子力発電所やCGを利用して作業訓練を繰り返す。また、マスタスレーブでの操作は負担が掛かるので、単純な基本作業を自律化して操作者の負担軽減も必要となる。

4) 安く作る

機構をモジュール化し、・コントローラはHRI, 作業計画, アーム/移動台車制御, ビジョンなどのサブシステムに分け、ソフトウェアをOpenGLのようなC言語のライブラリに蓄積するのがいいのではないかと思う。

5) 運用支援

①作業実施体制の確立

経済産業省・東京電力・プラントメーカー・作業実施者・ロボット開発者が、一つに纏って力を発揮できる作業設計・機器設計・実施体制を確立する必要がある。そして実施するための予算が必要である。

②メンテナンス

原子炉建屋内にロボットを置くピットが必要である。このピットでロボットの除染もおこないたい。また、ロボットが停止した場合、遠隔からシステムの再起動やメンテナンスをすることも必要となる。

4.5 まとめ

ロードマップから重要な点をまとめる。

1) 適用作業は、まずは、①原子炉建屋において人が入れる領域を広げるための除染、①格納容器漏洩部の観察、②格納容器・トーラス室漏洩部の封止である。それらの作業をどのように実施するか作業シナリオをアニメーションなどでビジュアライズしながら作成しなければならない。この作業シナリオを作業実施者と遠隔機器開発者が共有することが必須である。

2) 格納容器漏洩部の観察するための機器として、水陸両用長尺スコープ/ヘビ型ロボットなどが必要となる。瓦礫の処理と格納容器漏洩部/トーラス室の封止のための、小型の遠隔操作建設ロボットも必要となろう。

3) 要素技術として、①水陸両用長尺スコープ/ヘビ型ロボットの機構開発、②自律移動を実用化するためには、どこでも接続できる無線ネットワーク、③遠隔操縦技術の開発・操縦訓練が重要である。

4) 作業を実行するためには、①作業シナリオを作成し作業実施者と遠隔機器開発者が共有すること、②経済産業省・東京電力・プラントメーカー・原発建屋建設業者・作業実施者・ロボット開発者が、一つに纏って力を発揮できる作業設計・実施体制を確立する必要がある。そしてそのための予算が必要である。

参考文献

1) 経産省の「廃止措置に向けた取組」

(<http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/decommissioning.html>) の平成24年2月24日「東京電力

福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた燃料デブル取り出し準備の機器・装置開発等に係る技術カタログ検討ワークショップ」

2) 2012年12月25日「東京電力(株)福島第一原子力発電所1～4号機の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ進捗状況(概要版)」,

3) 2013年4月12日東京電力福島第一原子力発電所・廃炉対策推進会議事務局「研究開発プロジェクトのH24実績評価及びH25見直しの方向性」

4) 東電ホームページ 原子力発電所の現況 <http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/f1/genkyo/index-j.html>

5) NEDO 災害対応無人化システム研究開発プロジェクト
<http://www.nedo.go.jp/content/100516917.pdf>

6) 産総研
http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2013/pr20130617_2/pr20130617_2.html

7) 産業用ロボット安全規格 <http://www.jaish.gr.jp/anzen/hor/hombun/hor1-7/hor1-7-13-1-0.htm>

8) NEDO <http://www.nedo.go.jp/content/100388880.pdf>

9) SIL http://www.zuken.co.jp/club_Z/z/safety/02/s_100826_2.html

6. 総括

最後に、ロードマップ作成を通じて得られたロボットの実用化・事業化のポイントとロードマップ委員会からの提言をまとめる。

6.1 ロボットの実用化・事業化のポイント

1) ニーズに立脚した研究開発

シーズを提示するためのロボット開発が大学を中心におこなわれてきた。実用化・事業化のためには、ニーズに立脚した開発が必要となる。そのためにはユーザとの人的な交流が大切である。現状は、生産技術者や介護関係者・原発の作業者とのコミュニケーションが不足している。まずは、交流会などを通じて人的な交流の機会を増やすと共に、ユーザとの意思の疎通を取れるように、機能設計は CG アニメーションでビジュアライズする。

2) 必要な要素技術を獲得する

- ・作業を実行するための作業スキル（教示）を拡張すること。このために、力制御は必須である。力制御をするためには低雑音・ドリフトレスの力／触角センサを開発する必要がある。
- ・移動して作業をするためには、作業対象物に対して工具を位置合わせをする必要がある。そのためにはビジュアルフィードバックが必須である。ビジュアルフィードバックするためには作業対象物の認識が必要となる。認識確率を大幅に改善（誤認 1 / 1000 以下）しなければならない。
- ・現状のアームの可搬重量ではできない作業が多い。アクチュエータのトルク／重量比をあげることは永遠のテーマである。

3) プロジェクトチームで開発

ロボット開発はプロジェクトチームでおこなうものである。ユーザを始め機構設計者・コントローラ設計者や材料・熱・通信・情報など他分野の専門家も加えた幅広いプロジェクトを構成すべきである。閉鎖的なロボット村に閉じこもり、その中で開発をしようとしてはいけない。

4) 低価格化

ロボットの機構・制御ソフトを標準化・モジュール化し、低コストで製作できるようにする。ロボット業界が協力して標準化を推進すべきである。

5) 完成度を上げる。

これまで研究開発したロボットの中には筋の良い物も多い。しかし、完成度が低いために実用に供せずに終わっているものも多い。完成度を上げるためには製作したロボットを常時動かし続けるように、使用者を支援しながら使い続ける必要がある。ボルトの締付作業・ピンピッキングも出来るのであるが、生産現場で使用するためには作業の失敗確率を 1 / 1,000 ~ 1 / 10,000 以下にする必要がある。そのための理論的な分析、ロバストな作業スキルの構築も研究開発しなければならない。

我々はこれまでにいろいろなロボットの技術を開発して来たが、論文の中での技術だったり、実現可能性を示しただけに止まっている。研究開発の第 1 段階はそれでもよいが、完成度を上げ現場にロボットを導入する第 2 段階、普及・定着させる第 3 段階を構築しなければならない。実用化・事業化を実現するためには、①最先端の技術開発、②実用化のための技術のロバスト性を上げるための研究開発、③事業化のための設計・生産体制の確立・モジュール化・低コスト化と階層化しなければならない。現状は①のみで、②、③が余りに弱い。必要な人・お金は、①を 1 とすると、②は 10、③は 100 と言わ

れている。適用ターゲットを絞り、②、③へのリソースの配分と効率化は実用化・事業化には必須である。

6) ロボット事業は運用支援エンジニアリング

ロボットを普及するには、ロボットを売るビジネスから、導入・運用支援に重点をおいたビジネスにする必要がある。このことにより、初期導入コストの低減とシステムの完成度の低さをリカバーできる。

7) 安全

安全に関する規格¹⁻⁴⁾が整備され、安全なロボットにするための開発目標ができたことは大きな意義がある。安全を保証するための試験方法も考えられている。安全水準を満たすビジョンなどのセンシング方法が開発され、普及していくことになるだろう。

6.2 ロードマップ委員会からの提言

1) どんなロボットを作るのか？

ここらで、原点に帰って、どんなロボットが必要とされ、どんなロボットが役に立つのか、そのイメージを作り直す必要がある。CGなどでそのイメージをビジュアルライズして、議論してはどうだろう。

2) 各自のロードマップ作成の勧め

ロボットを開発する際に、各自が開発しているロボットのロードマップを作成して欲しい。要素技術を開発している人も、最終的にその技術が組み込まれるシステムのロードマップを設定して、開発仕様を策定して欲しい。

2) ROBOMECH のセッション設定

現在、ROBOMECH は会員が提案するオーガナイズドセッションが大半を占めている。今後ロードマップについて議論し、産業用ロボット・サービスロボット（介護・医用など）・特殊環境ロボット（建設ロボット・農業ロボット・原子力ロボットなど）のシステム開発や、HRI, 作業計画, アーム制御・ビジョンなどの要素技術に関する主要なセッションは学会（部門）が継続して設定すべきである。

3) 論文の評価

技術開発だけでなく、システム開発や実用化のための地味な研究に関する論文も高く評価し、採択して欲しい。そうすると、大学・産総研の研究者もシステム開発や実用化のための研究開発に参加できる。

4) プロジェクトによるシステム開発

ロボットは一人では開発できない。プロジェクト・チームを組んで完成度の高いシステムを開発しよう。

最後に一言。ロボットの実用化・事業化を目指したロードマップを模索してみた。定性的な議論に終わってしまったことは残念であるが、ここらでもう一度、作るべきロボットについて議論がなされるトリガになれば幸いである。

参考文献

1) SIL http://www.zuken.co.jp/club_Z/z/safety/02/s_100826_2.html

2) NEDO <http://www.nedo.go.jp/content/100388880.pdf>

3) 産業用ロボット安全規格 <http://www.jaish.gr.jp/anken/hor/hombun/hor1-7/hor1-7-13-1-0.htm>

4) パーソナルロボット 安全規格

<http://www.meti.go.jp/press/2013/02/20140205001/20140205001.html>