

# 2012－2014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）

2014年度 柳原 好孝（東急建設）

委員：

2012－2013年度

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）

2014年度

辰野 恭市（名城大学）

藤井 正和（IHI）

三宅 徳久（千葉大学）

安田 賢一（安川電機）

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

\*本報告書の文責はロボティクス・メカトロニクス部門ロードマップ委員会にある。

## 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・メカトロニクス部門 ロードマップ委員会 が策定したものを 2014 年度に見直し（ローリング）し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<sup>1)</sup> 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<sup>3)</sup> 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。また、2015年1月にロボット革命実現会議により公表された「ロボット新戦略」では、ロボットを活用・普及する分野として、①ものづくり分野、②サービス分野、③介護・医療分野、④インフラ・災害・建設分野、⑤農林水産業・食品産業分野と定められており、これらを俯瞰する形で、ローリングを実施した。

本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、いくつか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、2013年度に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・靴のオーダーメイドを挙げた。2014年度には今後のロボット適用が期待される食品・医薬品・化粧品分野を取り上げた。これらのロードマップ表（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、2013年度にはターゲットを介護・病院内作業支援ロボット、2014年度には医療福祉・生活支援に絞り、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、また、インフラ維持管理用のロボットについて、ロードマップ（表 5.1.1～表 5.4.2）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](http://www.meti.go.jp/policy/economy/gijutsu_kakushin/kenkyu_kaihatu/str2010/Chap.1.pdf)

2) 毎年、経産省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](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) N E D O <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>

6) ロボット新戦略 <http://www.meti.go.jp/press/2014/01/20150123004/20150123004.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）からいくつかの対象を選択した。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<sup>1, 2, 3)</sup>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。加えて、三品業界と呼ばれる食品・医薬品・化粧品業界を選んだ。最終製品の性質から自動化によるクリーン環境での製造が期待される一方で、ロボットによる自動化が進んでいないと言われる業界であるためである。これらの理由により今後ロボットの適用が増えると期待されているが、この業界に適した技術を予測し、より適したロボットの開発につなげたい。

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。2013年度は、実用化・事業化が出来そうな介護・病院内作業支援用のロボットを選択した。2014年度は、医療福祉・生活支援として範囲を拡大し、福祉については使用者を念頭に置いて自立支援、介護支援、リハビリ支援に細分化した。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、2013年度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。また、2014年度はインフラ維持管理対応を選んだ。これは、社会的にインフラの老朽化に伴う事故発生リスク低減策として、特に橋梁、トンネル、水中の各分野の、目視および打音検査を代替するロボットシステムが事業者サイドから求められており、重点的にロードマップを示す必要があった。

### 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5.1.1-5.4.2）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

三品（食品・医薬品・化粧品）の生産

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

介護・福祉

リハビリ訓練

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

橋梁・トンネル・水中  
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	ロボットが行う基本作業		
		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・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
食品・医薬品・化粧品	材料投入 次工程への搬送	固形物の個数計測と投入	粉体の計量と投入	複数の性状の計量と投入 中間物のハンドリング、容器での搬送と内容物入れ替え
	成形、包装、検査	検査精度向上(不純物の判定)		成形・包装と検査の同時化による不純物・不良品判定と排出
	製品の出荷準備(箱詰め、パレット積載)	定形物の把持とプログラムレスでのパレット積載・箱詰め	不定形物の把持とプログラムレスでのパレット積載・箱詰め	変種・変量の定形物/不定形物の把持とプログラムレスでのパレット積載・箱詰め
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 腕の力制御	アーム重量20Kg・可搬重量20Kg 柔軟アーム 低繰り返し位置精度・高速動作 低繰り返し位置精度・大可搬重量	アーム重量10Kg/可搬重量50Kg
	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	
	安全アーム	人間との衝突に対し機能安全(トルク計測と制御)を実現するアーム	人間との衝突に対し機能安全(トルク計測と制御)を実現する高速動作可能なアーム	人間との衝突に対し本質安全を実現する高速軽量アーム
	ハンド	各種グリップ 小型・軽量ハンド交換機構と標準化	汎用3指 10Kg 触角によるハンドの力制御 柔軟物把持	汎用3指 20Kg 不定形物ハンドリング 自動把持計画
	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)とラインナップ化・モジュール化	
視覚		作業対象ボルト・ナットと工具を画像訓内で位置合わせ 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	工具の機構の工夫 重力補償の改善 高速・柔軟(低精度)	
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 ダイレクトドライブモータのロボット適用普及(高バックドライバビリティ) 空気圧・水圧・油圧アクチュエータの制御性向上 自己診断機能	化学反応・静電力を利用した アクチュエータ
センサ	2次元画像処理画像認識(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	モデルレス
	2次元画像処理(その他)	不定形物の位置計測 可視画像以外の利用 微小物の存在検知	輪郭が曖昧なもの位置・量の計測	隠れた・見えない微小物の存在検知
	3次元計測位置測定	ステレオカメラ・LRFによる3次元空間の認識(50msec/17フレーム) 高速SLAM 作業環境計測	ステレオカメラ・LRFによる3次元空間の認識(10msec/17フレーム) 高速SLAM+CGモデル重畳 柔軟物の3次元位置計測	不定形物の3次元位置計測
	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ーアーム(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	CG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  市販力制御アームの普及	ボルトの挿入/ナット締付 作業時間1sec  力あいによる箱詰め 柔軟アームによる力制御	
	ビジュアルフィードバック	グリッパの把持対象への位置合わせ(位置決め精度 0.1mm サンプルリング時間30msec)	工具・部品の作用個所への位置決め(位置決め精度 0.01mm サンプルリング時間 1msec)	柔軟物の変形に対応した位置合わせ
	軌道生成	作業環境計測結果に基づく局所的な動作軌道のオンライン自動生成	作業環境計測結果に基づく局所的な最適動作軌道のオンライン自動生成	障害物回避と組み合わせた大域的な動作軌道のオンライン自動生成
	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(機械・電気・ソフトウェアのインタフェース)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設計手法)	
	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 複数の周波数帯・プロトコルを取り扱える無線通信ユニット	無線のエアポケットの解消 非接触給電 工業用無線通信の規格化と普及(フィールドバスの無線化)	電源・通信が無線化されたセンサ(イメージセンサ、カセンサなど)
	異常処理	ハンドリングミスの自動復旧(異物となった把持対象物の除去)	異常停止後のアーム自動復旧	
	遠隔運転、リモートメンテナンス	LANによるリモート遠隔運転支援(動作状況の把握と動作開始・停止および異常処理の指示)	各コンポーネントの動作データに基づく予防保全(故障前の交換・メンテナンスの実現) インターネットを利用した遠隔運転支援	リモートでの部品交換指示(ロボット自身による部品交換)
安全	安全要求達成	安全関連の法規成立(法規面での人とロボットの共存・協調の実現)  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 トルク計測・制御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、カセンサ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) ユーザとの人的な交流・営業活動	導入後の評価 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)の開発	要素技術	ビジュアルフィードバック 作業のための力制御(高速化)	作業スキル(作業教示) 柔軟アクチュエータ 柔軟物把持のためのエンドエフェクタ	小型・強力アクチュエータ 不定形物ハンドリングのためのエンドエフェクタ
	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	
システムの完成度向上(作業を確実に実行)		継続した繰り返し検証試験の実施  失敗事象する場合の理論的な分析	ロバスタな作業スキルの研究  ユーザを運用支援しながら継続したシステムの改良 予防保全によるシステム稼働率の向上	異常処理の自動化
コストダウン	標準化されたモジュールの活用	設計支援ツールの開発 作業アーム・移動台車・セル・コントローラ・センサの標準化(オープン化) ミドルウェアやシミュレータの標準化と普及	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	
	制御・アルゴリズムによるセンサレス化と動作精度補償	センサレスでの力制御の実現(高精度な組立・加工作業への適用)	センサレスでの力制御の実現(高速・粘性係数低減)	ビジュアルフィードバック・力制御による動作精度の補償(ロボットの機構自体の加工精度軽減)
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)事業への転換	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	ロボットがおこなう基本作業		
		2018	2023	2028
在宅高齢者の自立支援	移動支援(杖・歩行器・車椅子)	室内を杖・歩行器・車椅子で移動 屋外も移動(段差など)に対応 段差解消機(昇降リフト)	杖・歩行器が体に密着し、体重を支える。(ウエアラブル化)	自律移動車椅子 段差解消、障害物回避、転倒防止機能靴
	コミュニケーション支援	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 話相手ロボット(対話機能)	
	日常動作支援		振戦抑制システム	脳波操作型アーム
	排泄	ベッドサイドのポータブルトイレ	水洗式ポータブルトイレ	自律移動水洗ポータブルトイレ
	入浴	手すり	自己操作式防水型リフト	セルフヘルプ移乗機構
	認知力支援	投薬管理箱	お知らせタイマ	作業行動ガイド(RT取説)
	見守り	徘徊検知、安否確認器	転倒検知	体調チェック
	健康維持(介護予防)(軽いトレーニング)	ストレッチ・軽い筋トレ マッサージ	体調を配慮したバランス訓練	
生活支援	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)
	買い物・外出支援			自動運転配送システム
介護施設での介護者支援	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装着型	自動で移乗
	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	傾斜地における自重補償	
	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)	更衣支援ロボット
	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	更衣支援ロボット 自動洗浄機構 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	本人意志に応じた食べる支援
	見守り	離床検知	離床引き留め	離床予測
病院内業務支援	リハビリテーション支援	歩行リハ	転倒防止訓練装置	
	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	
その他	保守業務	掃除／洗濯(汚れものを洗濯槽に入れる)	ベッド洗浄機	循環クリーン型リネン
	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 ユーザフレンドリ改札	商業施設等内移動支援ロボット ホーム・車両間ギャップ解消
	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	障害物等回避ナビ機能
歩行器(屋内用)		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 身体密着型歩行器(図4.2.2)	
歩行車(屋外用)		軽量化 段差乗り越え	傾斜地における自重補償 身体密着型歩行器	4足歩行の前足 障害物回避ナビ
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
ネットワークロボット		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
家事支援機器		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
メンタルサポートロボット		パロ	対話支援ロボット	行動ガイド(認知症対応)
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) 歩行リハビリ装置	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)	
排泄支援システム		自動吸引式小便器	水洗式ポータブルトイレ	更衣支援ロボット
入浴支援システム		風呂用リフト 自動洗髪ロボット	昇降浴槽 本人操作型リフト	更衣支援ロボット 自動洗浄機構
装着型ロボット(自立支援)		HAL(リハビリ用)	簡易着脱機構	意図センシング
装着型ロボット(介護支援)		HAL(介護用)、マッスルスーツ	同上	
移乗支援機・ベッド		リフタ(シーツ・吊り下げ用スーツを工夫) ベッドが動いて移乗する(図4.2.7)。人との共同作業 離床センサ内蔵	ベッドが動いて自動で移乗する。 自動寝返り機能	座位誘導
見守りシステム		離床、徘徊検出、通報	離床予知、本人への働きかけ	
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)		
病院・施設保守業務用システム		清掃、洗濯	ベッド洗浄、滅菌	循環型シーツ
公共交通		エレベータ、エスカレータ	ノンタッチ式自動改札	ホームギャップ解消機

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 安全規格適合屋外・屋内距離イメージセンサ	安全規格適合型移動ロボット 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ルイズ	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ェアラブル化	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 ロバスト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。	個人フィッティングの自動化 メンテナンス体制の充実
社会環境 (法整備等)		安全認証制度制定 個人情報、プライバシー保護	道路交通法等の改正	安全認証制度および保険制度の社会的認知

表5.1.1 特殊環境分野(原子力事故対応)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 原子炉建屋内を目視観察・放射線モニタ 原子炉建屋の健全性検査 瓦礫の除去 除染	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 原子炉建屋の健全性検査 1号機瓦礫の除去 1,2号機除染 床・壁・天井・ケーブルトレイなどを除染	原子炉建屋の3次元CGの作成 建屋の補強・作業用建屋の付加 3号機瓦礫の除去 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5.1.2 特殊環境分野(社会インフラ)の作業

適用分野	作業	ロボットが行う基本作業		
		2018	2023	2028
橋梁・橋脚維持管理	道路の異常等を確認し、交通に支障を及ぼさないように対応するとともに、道路施設や構造物の健全性を確認・点検し、補修等により機能回復及び強化を図る	近接目視、打音検査に代替する	簡易な補修作業	人間と同等の補修作業
トンネル維持管理		近接目視、打音検査に代替する	簡易な補修作業	人間と同等の補修作業
水中維持管理	・河川、港湾施設の異常、水中の堆積物等を日常的に確認 ・河川管理敷設の健全性を確認し、機能を回復	比較的透明度の高い水中における異常個所の特定	透明度が低い水中における異常個所の特定と簡易な補修作業	カメラ等により視認できない箇所の異常検知、補修作業の実施
管路維持管理	管路・ポンプ場、処理場等の下水道敷設について、点検・調査・清掃や運転管理等の維持管理	管路内を使用停止状態で点検・調査・清掃を行う	管路内の溶接、簡易補修作業	水流のある状態で点検
公営住宅維持管理	・給排水設備の補修、EVの保守点検など、住宅機能の維持を目的とするもの ・空家となった住戸の修繕を行うもの	—	—	—
公園	・公園施設の日常的な維持管理として行う、清掃、保守、修繕 ・敷設の寿命を延ばすことを目的に行う、防食塗装や部材交換、大幅な修繕	自動草刈	自動雑草除去(抜き取り)作業	敷設の巡回点検
鉄道	レール・枕木の維持管理	—	—	—

表5.2.1 特殊環境分野(原子力事故対応)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(バックホー・ドーザ・破碎機・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にロボットピット設置		

表5.2.2 特殊環境分野(社会インフラ)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
常時モニタシステム	ネットワーク	変位センサを多数配置し、常時モニタシステムを行う	センサネットワークによる複合的なモニタリング	
マルチコプタ型ロボット	近接目視(画像処理)	高解像度のカメラにより0.2mm程度以上のクラックを認識できる		
	打音検査	広範囲のコンクリート構造物、鋼構造物の打音ができる打撃装置		
蛇型ロボット	水陸両用	小径の配管内を上下動を含めて移動可能	φ100程度の中径の配管内を上下動を含めて移動可能	管径に係わらず上下動を含め移動可能
蜘蛛型ロボット	吸着	鋼構造物の移動を三次元で行える	コンクリート構造物面(壁、柱)の移動を三次元で行える	
移動台車型	ガイドフレーム	ロボットを支える台車の開発	検査装置を任意の場所に移動するガイド	

表5.3.1 特殊環境分野(原子力事故対応)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 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	格納容器観察用  トラス室封止用ロボット機構設計	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			
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 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	除染作業の基本動作の教示 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 グレーチング上の移動	ロボット用レールの敷設	
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	ビジョナルゴリズムの安全度水準定量化

表5.3.2 特殊環境分野(社会インフラ)の要素技術

要素技術	機能	仕様		
		2018	2023	2028
機構	検査装置	単独動作	複数同時動作	自律動作
	補修装置	たたき落とし装置	クラック充填装置	浮き剥離補修装置
	移動・走行装置	手動走行・飛行	半自律走行・飛行	自律走行・飛行
センサ	画像取得、三次元形状取得	浮き剥離検出 ひび割れ検出(露出部) マッピング	ひび割れ検出(内部)	
RMI(ロボット人間インターフェイス)		遠隔操作	複数のロボットを動かす	自律動作への割り込み
システム技術(作業計画)		作業シナリオの作成	エキスパートシステムの実装	データベースの統合
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	第三者災害を含めた安全システム	故障診断機能	故障回復機能

表5.4.1 特殊環境分野(原子力事故対応)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	改良・付加機能の更新を容易に	
	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)		
	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	単純な基本作業の自律化	
		電源・通信線引き出し/巻き取りドラム		
コストダウン	モジュールを組み合わせる。	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	
運用支援	作業実施体制の確立	作業実施体制の確立		
	メンテナンス	ロボット用ビット	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		

表5.4.2 特殊環境分野(社会インフラ)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	
			多種の検査対象について繰返しの実証実験	
ロボットに必要なコンポーネント(機能)を開発する	電源供給	通常の発電機	ロボット専用の通信手段	燃料電池などの新電源
	通信	通常の通信手段		
システムの完成度を上げる。(作業を確実に実行する)	実現場での作業の繰り返し	人・ロボット合同作業訓練	単純な基本作業の自律化	複雑な作業の自律化
コストダウン	モジュールを組み合わせる。	ロボットやをモジュールで構成する。	検査補修対象に対してフレキシブルな構成を選択できる	自動構成選定機能
運用支援	作業実施体制の確立		作業実施体制の確立	
	メンテナンス			ロボットが停止した場合遠隔から回復できる。

### 3. 製造業分野のロードマップ

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・靴のオーダーメイドと、現在ロボットの適用が増えつつある業界である三品業界（食品・医薬品・化粧品）を挙げ、ロードマップ（表 3.1 - 表 3.4）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 3.1）

##### 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<sup>1)</sup>。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に普及していない。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付け作業がある。

③制御装置の組立<sup>2、3)</sup>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<sup>2、3)</sup>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ど必要があり、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) 食品・医薬品・化粧品

食品・医薬品・化粧品の生産工程は、大別すると「材料の投入」「混合・加熱・加圧などの加工」「工程間の輸送」「製品の形への成形や梱包、検査」「製品の出荷準備（箱詰め、パレット積載）」である。生産量が多い場合はプラント化（ライン化）されている場合もあるが、多品種少量生産のことも多く、この場合は加工を行う容器・釜に材料や中間物を入れ、加工し、終われば次の容器・釜に移すというバッチ生産となる。また、材料や中間物は粉体・液体など不定形、製品は粉体・液体やこれらを包装した柔軟物であることが多いことも特徴である。以上のように、頻繁に段取り変更が必要なこと、ロボットでのハンドリングが難しいことから、ロボットの導入が進んでいないと言える。最終製品の性質上、クリーン・無菌環境での作業が求められるため、要求のグレードによっては人による作業が行えない、あるいは段取り替えて人が介入することを嫌う場合もある。これらの環境で段取り替えや修理・メンテナンスで人が介入すると、汚染された環境をクリーン・無菌に戻す手間と時間が必要となり、稼働率低下につながる。

次に、ライン化されていない多品種少量生産の場合について、各工程の詳細を示す。

材料の投入では、水など頻繁かつ大量に使われるものはタンクから容器・釜に配管され、離れた場所にある制御室からの操作で投入が行える。しかしバッチ生産においては別の製品を生産するときは容器・釜を確実に洗浄しなくては次の製品生産時にコンタミネーションの原因となるため、配管が多いと洗浄時に洗い残しが増える可能性がある。また材料は固体だけでなく粉体や液体もあり、液体も粘性が様々であるため、配管や自動投入機などは極力用いず、人が適切な道具で適切に計量して投入することが多い。

混合・加熱・加圧などの加工では、容器や釜が有する攪拌や加熱の機能を用いることが多いため、人の介入は少ない。ただし加工中の監視の役割は人が担っている。またろ過材投入やろ紙交換なども人の手によることが多い。

工程間の輸送は、加工によって得られた中間物・製品を次の工程へ移す作業である。容器や釜の間が配管でつながれている場合が多く、人の介入は少ない。

製品の形への成形や梱包も、粉体から錠剤を作る錠剤機、容器に梱包する梱包機などが多く市販されている。しかし生産量や扱う製品によっては人による作業が多い。たとえば弁当の盛り付け作業は、人であれば食材をトングやスプーンなど適切な道具でハンドリングし、おおよその位置が合うよう盛り付けられる。これをロボット化すると多くのエンドエフェクタの開発とツール交換、画像センサなどによる位置姿勢の補正が必要となり、投資効果・作業時間の両面で人作業に届かない。検査も、画像センサによる自動化が試みられている場面もあるが、多品種少量に対応できる（なんでもできる）システムとするとコスト増加や信頼性の低下につながることもあり、生産量や求められる検査品質によっては人によって検査されている。

製品の出荷準備（箱詰め、パレット積載）においては、成形・梱包が自動化されている場合、成形・梱包機から出てくる製品の位置姿勢が定まる場合が多いため、ロボットでハンドリングして箱やパレットに積載しやすい。しかし、他工程同様、多品種少量の製品では人による作業も多い。特に個人向け製品となるほど多品種少量かつ人がハンドリングできる程度の重量であるため、自動化が進んでいない。

今後ロボットの導入を促進するためには、多品種少量生産に対応できること、ロボット化によるプロセス改善によるメリットも含めて投資効果が得られることが重要である。速度や可搬重量を増やしてロボット台数あたりの生産量を増やすだけでなく、稼働率を上げる仕組みも必要である。

### 6) 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。

### 7) 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<sup>2-7)</sup> (表 3.2)

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<sup>5)</sup>を図 3.2.1 に示す。

製品の箱詰めなどの作業によっては、一般的な工業製品の製造に用いるロボットの繰り返し位置精度は高すぎる場合もあり、繰り返し位置精度を下げてでも軽量化して高速動作するロボット、あるいはコストを下げたロボットが適することもある。この場合でも不足する位置精度は前述のようにビジュアルフィードバックなどの制御で補うことも考えられる。



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 200 t 程度把持できるようにする。大型部品の位置決めも 1 mm 以下を要求される。

#### ③安全アーム

セル生産を始めとした多品種少量ラインでは、人とロボットの共存・協調による人も含めたシステム

構築が増え、安全規格（ISO10218-1/2:2011 など）に沿ったシステム設計が必要となる。ロボット単体としては、トルクセンサなどで人との衝突を検知し動作を停止することが考えられる。低速動作時はもちろん、高速に動作していても衝突検知と停止が行え、これによって安全規格が満足されるシステムが構築できれば、高速に動作するロボットの傍でも人が作業できるようになる。

トルクセンサでの衝突検知と停止は機能安全となるが、外形も含めて本質安全を実現するロボットも期待される。

#### ④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。これによって柔軟物や不定形物のハンドリングが実現できれば、作業範囲が拡大する。しかし指の動作をプログラムすることは自由度が多い分手間がかかり、かつ把持対象物の形状が不定形の場合は事前にプログラムすること自体が難しい。把持計画など制御側の技術も必要である。ハンドは大幅な可搬重量・操作力の増大が求められる。

多様な物体の把持を一種類のハンドで行えるよう設計される場合も多いが、把持対象が幅広い場合はハンド交換を行うことも多い。エア・電力・信号も含めた交換機構は広く市販されているが、人の作業を代替するような小型ロボットでも適用できるよう、一層の小型・軽量化が望まれる。また様々な交換機構がメーカーを超えて相互に使えるよう標準化を行うことで、システムインテグレータやロボットユーザの選択肢が増える。これにより、一種類のハンドに設計の手間とコストをかけて万能性を持たせるのではなく、簡便なハンドを多数用意して使い分けるほうが最終的にコストダウンになることもあり得るため、設計プロセスの変革にもつながる。

#### ⑤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。

#### ⑥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、標準化シリ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。実際の利用場面では、ロボットの可搬重量や可動範囲・動作速度、設置場所のインフラや各種制約を想定したセル設計が必要となる。よってモジュール化・ラインナップ化などにより標準化セルが活用可能な場面を増やし、システムインテグレーションに要する手間とコストを下げる工夫も必要である。



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 3.3)

### 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。一方、低繰り返し位置精度となることを許容すれば剛性が低くても高速・柔軟に動くことが可能となる。この場合は疲労も考慮する必要があり、軽量高剛性の機構とは異なる設計思想が必要となるため別途工夫が必要である。

### 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。またギアやベルトを介することによるバックラッシュや故障・メンテナンスを減らす、あるいは人共存ロボットで高いバックドライバビリティを確保するため、ロボットに適用可能なダイレクトドライブモータの開発と普及が期待される。

現在、アクチュエータの交換は故障してからか、故障前に累積運転時間に応じて事前交換している。アクチュエータの内部状態を推定して異常・故障を予見できれば、ロボットの停止を防ぎつつ過剰な事前交換を防ぐことができる。予防保全のための自己診断機能の拡充も必要である。

### 3) センサ

#### ① 2次元画像処理

セル生産ロボットは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、認識対象のモデルを用いるなどして誤認率を 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 0.1mm 以下で処理時間は少なくとも 1 フレーム 50msec 以下が要求される。

さらに広く見れば、不定形物や輪郭が曖昧な物の存在や位置の計測が期待される。これにより作業場所での異物混入を見つけることができ、信頼性向上に寄与する。このためには、可視画像だけでなく近赤外画像や熱画像などの利用も検討すべきである。

### ②3次元計測

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。

また、形状が定まらず2次元のモデルベースでの計測が難しい柔軟物・不定形物の位置も、ステレオカメラ・LRFを用いることで精度よく計測できる可能性がある。

### 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40dB（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40dB（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、10g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ース)

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なければならない。

### 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。柔軟アームなど剛性が低いロボットでの力制御が行えると、工業用品の製造現場以外でも箱詰めなど様々な作業が行える。

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はある。

### 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軌道生成

複雑な作業環境・セル構成となるにつれ、衝突を防ぎながら早く作業を行う動作の教示は難しくなる。ワーク類の有無や位置など環境が大きく動的に変わる場合は教示した通りに動作させること自体が不可能なこともある。視覚センサなどで環境を計測し、オンラインで動作軌道を生成する技術が確立すればこれらの課題が解決される。特に異常処理は事前に想定できない状況での処理が必要となる場合があるため、稼働率向上の観点でも必要な技術である。

### ④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（機構だけでなく、電気・ソフトを含めたコントローラも）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のようなライブラリにまとめた。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・巻取りは地味ながら問題となることも多い。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が、非接

触給電が可能となると継ぎ足し充電が容易となるため、大きな容量は不要となる。容量不足の課題解決法のひとつと言える。

無線については、エアポケットの解消が必要である。また、周波数帯や出力が異なる規格が複数存在しているが、これらをまとめて取り扱える無線通信ユニットがあればシステムインテグレーションの際に通信設計が容易となる。さらには工業規格に耐えうる高信頼な無線通信の普及が期待される。

通信・給電ともに無線化されたセンサがあれば、配線の問題が解決する。単純なスイッチだけでなく、力センサやイメージセンサが完全無線化されると適用先が広がる。

### ③異常処理

システム設計においては、通常の動作に対する設計よりも、起こり得る異常の洗い出しと異常処理の設計のほうが、分量が多く手間もかかることが一般である。また、異常処理を含めたにも関わらず想定外の異常が起こった場合は、ユーザが教示ペンダントなどでロボットを手動操作し、さらにシステム内に介入して異常を解消することとなるため、ユーザにも復旧のスキルが必要となる。想定しないものであっても異常状態を検出し、自動で復旧する技術が強く求められる。たとえばハンドが把持を失敗した部品があれば、イメージセンサで検出して邪魔にならない場所に部品を寄せる、衝突しないで初期位置へアームを復帰させるなどの技術が一部でも実現すれば、自動異常処理も含めたシステム稼働率向上に寄与する。

### ④遠隔運転，リモートメンテナンス

ユーザがロボットに不慣れな場合、ロボットメーカーやシステムインテグレータ、ユーザの生産技術担当者が遠隔での監視・メンテナンスによりユーザを支援できることが望まれる。そのためには、ユーザの事業所間での遠隔支援（LANでの接続）だけでなく、セキュリティも考慮したインターネット経由での運転支援を拡大する必要がある。

ロボットがネットワークに接続されることでデータの取集と解析もバッチやオンラインで行えるようになるため、データを解析することでロボットの健全性を評価できる。評価結果に基づいて故障の発生と部位を予測して生産運転時間外に計画的に部品交換を行ったり、ロボット自身の不具合が生じつつあるハンドやセンサなどをツール交換機構で交換するなどの予防保全が望まれる。

## 8) 安全

製造環境におけるロボットの安全要求事項<sup>8-11)</sup>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）<sup>12)</sup>の定められた安全規格適合型ビジョンや力センサが普及し、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 3.4）

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）の開発

### 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・接触センサと動作の高速化が必須である。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。人の傍で人の作業を代替・自動化するならば、柔軟アクチュエータや柔軟物・不定形物の把持も必要な技術である。

### 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) システムの完成度向上（作業を確実に実行）

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、ロバスタな作業スキルの構築も研究開発しなければならない。それでも失敗・異常はゼロとすることはできない。異常処理の自動化により人を介在させずに動き続けるシステムを実現しなくてはならない。また、予防保全の考え方を取り入れ、故障する前にメンテナンスしてシステムの稼働率を向上させることもシステムの完成度向上には重要である。

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) コストダウン

### ①標準化されたモジュールの活用

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・視覚などのセンサ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 のような関数ライブラリが良いのではないかと思う。ミドルウェアによる開発プラットフォームの標準化も効果的である。また、CG を利用した機能設計ツールやシミュレータなど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。

## 5) 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付け、④ケーブルの接続、⑤大型重量物の組付け、⑥ホース・ベルトなどの柔軟物の組付け、⑦柔軟物や不定形物の搬送、⑧検査などがある。また多品種少量生産となる場合が多いことも注目すべきである。

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の力制御、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、⑤様々な柔軟物・不定形物のハンドリング、⑥人の傍で作業できるアームとこれを実現する機構・アクチュエータ・安全、⑦高度な画像センサ、⑧移動して作業をするための通信やエネルギー供給技術、⑨自動での異常処理や遠隔運転・リモートメンテナンス技術を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作業を確実に実行し異常があっても自ら復旧でき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/anken/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>

10) 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](http://www.zuken.co.jp/club_Z/z/safety/02/s_100826_2.html)

#### 4. サービス分野（医療福祉・生活支援）のロードマップ

2013年度はサービス分野の中、介護・病院内作業支援ロボットを選択し、ロードマップを作成した。2014年度は、個人の居宅を中心として日常生活の支援を行う「生活支援ロボット」を追加するとともに、「介護」をより広い概念を表わす「福祉」という名称に変更し、使用する人と用途とに着目して、更に自立支援、介護支援、リハビリ支援、の3つの分野に細分しなおした。「介護」とは生活行為を成立させるための肉体的、精神的な援助であり、より具体的には、食事、排泄、睡眠、清潔化（掃除、洗濯、食器洗）などの生活行為に対する援助を通して、命を守り、生きる意欲を引き出し、生活を維持することである。そして、この目的を実現する手段が生活支援ということになる。この意味において、介護ロボットと生活支援ロボットとは一部重複する概念であるが、ここでは「生活」、すなわち人間が人間らしく生きるために行う諸活動を、

I 群：コミュニケーション（意志伝達と理解、視力、聴力）

I I 群：ADL（日常生活活動：寝返り、移乗、歩行、着衣、食事、排泄、入浴）、

I I I 群：I ADL（手段的生活動作：調理、掃除、洗濯、買い物、金銭管理、服薬、  
交通機関の利用）

I V 群：余暇活動（休息、楽しみ、教養）

の4群に大別した。

この中のI、II群に示す基本的活動動作に関して、本人自身が使用するものを「自立支援」、介護者が使用するものを「介護支援」として分類し、これらの活動動作を行うための基本的動作をトレーニングするものを「リハビリ支援」ロボットとして区別する。また、III、IV群に示すより複合的な家事レベルの活動に対する支援を「生活支援」と呼ぶこととする。

作成したロードマップを表4.1～表4.4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) 在宅高齢者の自立支援

高齢者の場合は移動ができ、家事ができれば自立した生活ができる。現状でも、介護施設に入居するために長期間待たなければならない事実があるが、今後はこの状況が更に厳しくなる方向であり、地域包括医療、在宅医療などの流れとともに自宅で最期を迎える人が多くなって行くことを考えれば、自宅で自立した生活を送れるための支援は喫緊の課題である。ここでは、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・機械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することが実用化の近道である。

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、あるいは段差解消や障害物回避、さらには転倒防止機能を備えた靴のような形になって行くであろう。

## ② コミュニケーションの支援

外の社会との関わりを持ち、何らかの形で社会に参加することは、移動を含む活動の原動力となる。この意味において、高齢者の身体能力の衰えが認知機能の能力低下を招く可能性は大きく、その結果として更に身体能力が衰え、一段と認知能力が低下してしまう、という悪循環に陥る。この悪循環を断ち切る意味で、高齢者が家だけでなく外の社会と接触する機会を仮想的に持てることも重要である。このために、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。

## ③ 日常動作支援

着替えなどの身繕いや食事の動作は、移動、排泄、入浴などと並んで日常生活における基本動作であり、関節可動域の縮小、手先巧緻性の低下、振戦などの影響を大きく受ける動作である。振戦を抑制する治具、あるいは将来的には脳波等で簡単に操作できるアームなど、このような基本的な動作をアシストするような機器類も必要となる。

## ④ 排泄・入浴支援

居宅での生活が出来なくなり、施設等で介護を受けなければならなくなる主因は、移動機能の衰えが最も大きく、①に記載したような機器の開発が望まれるところであるが、独居での生活のためには、それだけでは不十分であり、排泄、入浴の支援が不可欠となる。排泄に関しては、ベッドの近くで使用でき、かつ排泄物の処理も自動で行えるものがあれば良い訳であり、ポータブル（位置の移動が可能）でありながら水洗式のトイレが実用化されれば大きな福音となるであろう。

同様に、一人で入浴できるような支援を行うシステムがあれば、その意義は極めて大きい。既存の浴室で用いることのできるリフトなどを使用者本人が操作できるようにすることも考えられるが、ベッド上に居ながらにして身体の清拭をしてくれるロボットベッドのようなものも決して非現実的なものではないかも知れない。3) ④に述べる洗髪ロボットなども、小型低コスト化により個人の居宅でも利用できるようなになれば良い。

## ⑤ 認知力支援

身体能力の低下とともに認知機能や記憶力の低下は、②にも記載したように高齢化において避けて通れない課題である。衰えたこれらの機能を、ロボット技術を用いて補完することも大いに期待される場所である。例えば、キッチンや洗面所等にモニタ画面を設置して、炊事や洗面などの日常生活行為のガイダンスを行うことで、病気ではない単なる物忘れや、場合によっては初期の認知症患者の行動支援を実現する、といったことも一つの方向であろう。健常な若年者でも忘れる可能性のある服薬管理なども、ロボット技術を取り入れた簡単な装置ないしは道具を用いることで解決できるものと思われる。

## ⑥ 見守り

独居者の孤独死は社会問題にもなった。これを防止するためには、緊急事態であることを検知して近隣のケア拠点や救急に連絡する、といった見守り機能を装備した住宅が必要である。サービス付き高齢

者住宅の制度化も進んでいるが、人的サービスには限界もあり、ロボット技術の導入が望まれるところである。ただし、見守りが監視になってしまえば意味が無く、安全の確保とプライバシーとの両立が最大の課題となろう。このような見守りにおいては、日常の体調チェック機能も重要なポイントとなる。

#### ⑦ 健康維持

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。筋力の維持のみならずバランス能力の維持が重要である。高齢化に伴う医療費増大の抑制はもとより、健康社会の構築のためにも、これを飽きずに続けられるように支援する機器あるいは仕組みが必要となる。また、これらに加えて、認知機能の低下を防止するための機器として、例えばゲーム的要素を取り入れた機器なども現れて来るだろう。

## 2) 生活支援

動くことに不自由が生じ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・洗濯物干しや、その折り畳みなどをして欲しい。こういったいわゆる家事に加えて、食事の配膳・下膳をアシストするような機器類も必要となる。また、こういった個々の家事作業の物理的な支援も然ることながら、少し視点を変えると精神的、認知能力的な観点からの支援システムも必要となる。

このような生活支援ロボットは、心身に何等かの不自由を抱える高齢者が自宅で生活をするために不可欠なものとなるだけでなく、同時に働き盛りの世代にとっても、女性の社会進出、共働き世帯の増加に資するという意味において、大きな役割を果たすものとなる。

#### ① 家事支援

室内や窓の掃除、洗濯・物干し・折り畳み、調理・食器の洗浄・片づけ、といったいわゆる家事の遂行には、1) に記した日常生活動作の一連の複合動作が必要とされる。したがって、日常生活動作を支援する装置があれば、一定の範囲で家事をアシストすることが可能であると考えられる。しかし、いわゆる家電品として存在する、掃除機、洗濯乾燥機などを見ても明らかなように、これらの作業の遂行には、必ずしも人間がその作業を行う際と同一の動作が必要な訳ではない。このように考えると、掃除ロボットに見られるようなロボット化が、他の家電品においても期待される場所である。

また、軽量のアームを身近な場所に取り付けてお茶などを入れたりするシステムの開発も望まれる。

#### ② 買い物・外出の支援

買い物の支援については食材の宅配サービスなどの手段によるサポートが普及して行くものと思われる。その際、配送に使用する車やドローンなどの自動運転を含めて、ロボット技術の導入が期待される側面も多い。

交通機関の利用に関しては、6) に纏めて示す。

## 3) 介護施設での介護者支援

介護者の仕事には、ベッドから車椅子への移乗、排泄・入浴・食事の支援などがある。

#### ① ベッドから車椅子への移乗

まず、介護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

介護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 排泄

排泄のための動作は、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、排泄する、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。排泄は他人に見せたくない恥ずかしい行為でもあり、介護される側の人がこれらの動作を一人で出来るように支援するものが望ましいが、技術的な観点から見ると、まずは介護者を支援するものから実用化されて行くであろう。既に、ベッド上で臥位での排便や睡眠中の排尿のための自動排泄支援<sup>1)</sup>も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。排泄の場合と同様に、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方向であろう。現状では洗髪を行うロボットなども開発が行われている。

## ⑤ 食事の搬送

介護施設の職員が、人の介護に専念できるように食事の搬送をする機器等も考えられるだろう。

## ⑥ 見守り

2) ③とは異なり、事故件数の多いベッドサイドでの転倒あるいは徘徊を検知してケアステーションに通報する、といったシステムが開発されつつある。最初は、離床の事実をセンシングすることからスタートして、離床の兆候を検知すること、それに応じて発話などにより行動の引き留めを行うこと、さらには離床を予測することへと進んで行くと考えられる。これについても、監視にならないよう、プライバシーの保護に細心の注意を払うことが重要な課題である。

## 4) リハビリテーション支援

リハビリテーションとは、単に失われたり衰えたりした機能を訓練により回復することではなく、本来は社会的権利・資格・名誉の回復を意味し、社会復帰・更生・療育などの語が当てられる言葉である。狭義のリハビリテーションを支援するもの、すなわち怪我や病気などにより一度低下した身体機能を回復するための訓練を行う機器として、歩行訓練、バランス訓練、関節可動域訓練のための機器などが既に現れている。今後は、これら機器の利用意欲の向上、エビデンスに基づくリハビリ効果の向上、コンパクト化、などとともに、筋力やバランス能力だけでなく、高齢化に伴い低下が著しい持久力や敏捷性などの訓練機器が求められるようになると思われる。一方、認知機能に関しては「回復」は困難であるとしても、少なくとも機能の低下を食い止めるためのシステムなどが求められよう。

## 5) 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の保守業

務をおこなうシステムの開発という方向であろう。とりわけ、マットレスやリネン類の清拭や洗浄、洗濯といった作業の負担軽減が望まれる。また、介護センターと同様に、食器の搬送・掃除・洗濯をする。

## 6) その他

### エレベータなどのインフラ整備

歩行が不自由な方に対する配慮に関しては、ハートビル法による公共空間内の移動支援に関する施策が施行された結果、家・病院・介護センター・駅・スーパーマーケットなどへのエレベータ導入が進み、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動きが加速した。更には、ホームと車内との移動が車いすで簡単に行えるように、車いすの高度化あるいはホーム、電車側の改良といったことも望まれる。IC自動改札などに関しても、人体通信技術などの利用により更に高齢者のユーザーフレンドリなインターフェースが開発されて行くであろう。

### 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<sup>1)</sup>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、高さが変化できるようになり、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・歩行車

病院などの屋内で使われている歩行器や屋外で使用する歩行車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

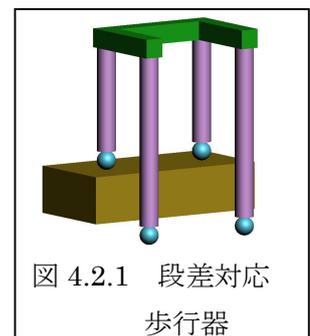


図 4.2.1 段差対応歩行器

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) ネットワークロボット

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入れたり、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) 家事支援機器（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、マッサージ機、トレーニングマシンなどが開発されている。

#### 7) 入浴支援システム

図 4.2.5 のような洗髪ロボットが開発されている。最初は介護施設・病院で使用され、徐々に在宅に普及していくであろう。

#### 8) 移乗支援機・ベッド



図 4.2.5 洗髪ロボット  
(パナソニック)



図 4.2.2 身体密着型  
歩行器



図 4.2.3 遠隔訪問  
ロボット<sup>2)</sup>



図 4.2.4 業務用掃除  
ロボット (フィグラ)

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ト（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。



図 4.2.6 リフタ型  
(モリトー)

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 4.2.7 車椅子・ベッド分離型  
(パナソニック)

また、人の動きを検知するセンサをベッドに内蔵して離床を検出したり、予知したりすることも可能であり、これは見守りシステムとしても位置付けられるベッドということになる。

### 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、やっと加速されるものと思われる。



図 4.2.8 病院内案内ロボット  
(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

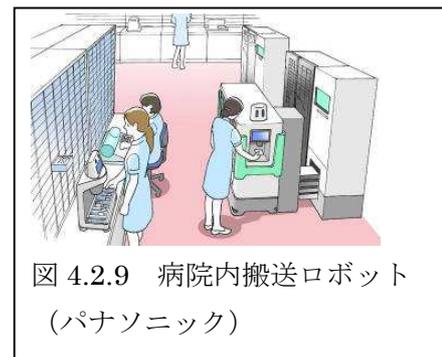


図 4.2.9 病院内搬送ロボット  
(パナソニック)

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ースでは、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<sup>3)</sup>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<sup>3-8)</sup>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、介助のキープ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) コストダウン

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。

### 6) 社会環境整備

これら支援機器を取り巻く社会環境として、社会的認知度を向上させ、受容性を高めるための様々な方策が立法、行政の両面からも必要となる。例えば、機器の安全認証制度、免責、道路交通法などの規制緩和と改正、損害保険制度などはその代表的なものであると考えられる。医療機器の進歩に対応すべく、薬事法が「医薬品、医療機器等の品質、有効性及び安全性の確保等に関する法律」として2014年末に改正施行されているが、今後この分野へのロボット技術の導入に伴って、より柔軟な制度改革も必要となろう。また、個人情報を含むプライバシーの保護についても十分な配慮が必要であることは言うまでも無い。

## 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](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

### (Ⅰ) 原子力事故対応

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<sup>1-4)</sup>。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。

### (Ⅱ) インフラ維持管理対応

2012年12月に発生した中央自動車道笹子トンネルの崩落事故を契機に、これまで社会インフラの維持管理に必要な点検体制の見直し、ロボット技術やセンサ技術を活用したトンネルや橋などの点検、補修といった維持管理技術の必要性が社会的課題として取り上げられるようになった。

2014年度に入り、経済産業省と国土交通省は、「インフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発プロジェクト（NEDO）」による研究開発と、「次世代社会インフラ用ロボット開発・導入の推進（国交省）」を同時に実施し、さらに内閣府主導のSIP\*において「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」を開始した。

\*総合科学技術会議が自らの司令塔機能を發揮して、府省の枠や旧来の分野の枠を超えたマネジメントに主導的な役割を果たすことを通じて、科学技術イノベーションを実現するために新たに創設するプログラム

## 5.1 作業環境と作業

### (I) 原子力事故対応 (表 5.1.1)

#### 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。

##### ① 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。

##### ② 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。

##### ③ 瓦礫の除去

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。

##### ④ 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



図 5.1.1 原子炉建屋 1F の通路

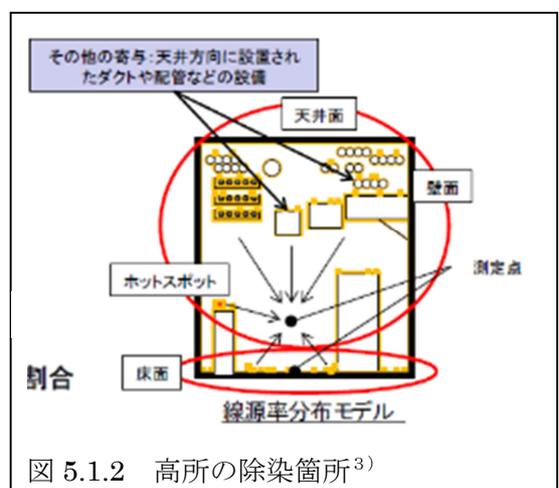


図 5.1.2 高所の除染箇所<sup>3)</sup>

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。



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5～6 m<sup>3</sup>/時間（おおよそ 15×15×15 cm/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。観察スコープを貫通孔に設置し、観察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。

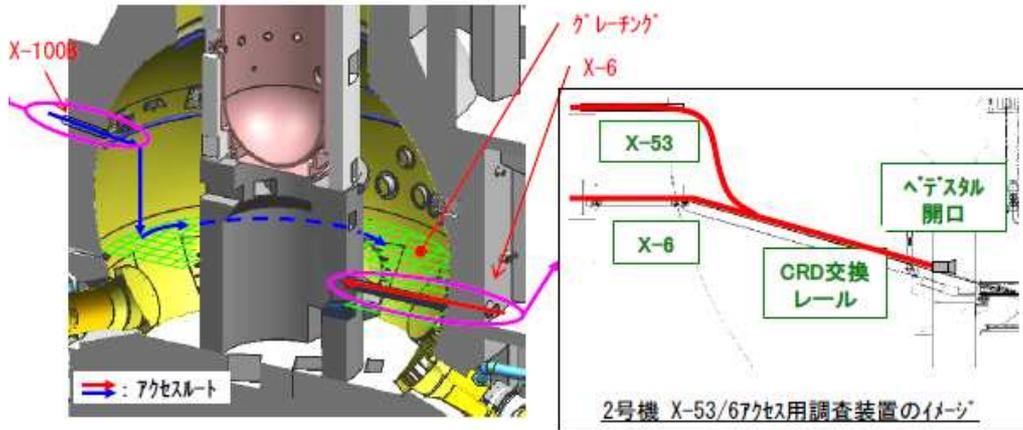


図 5.1.6 格納容器内内部の調査方法<sup>3)</sup>

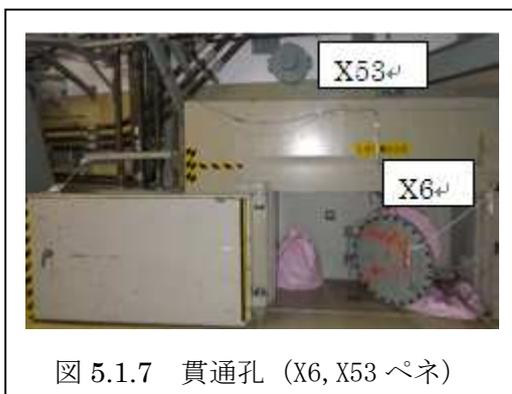


図 5.1.7 貫通孔 (X6, X53 ペネ)



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・手順を作業員・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。

## (II) インフラ維持管理対応 (表5.1.2)

2014年度に国土交通省が「次世代社会インフラ用ロボット開発・導入の推進」において作業として示した基本要件とした事項を記す。

### 1) 橋梁、橋脚維持管理

- ① 鋼橋において、桁の「腐食、亀裂、ゆるみ・脱落、破断、防食機能の劣化」について、点検要領に基づく近接目視の代替または支援ができる技術・システム
- ② コンクリート橋において、桁の「ひび割れ、剥離・鉄筋露出、漏水・遊離石灰、うき」、点検用要領に基づく近接目視の代替または支援ができる技術・システム
- ③ 鋼橋・コンクリート橋の床版において、「床版ひび割れ、剥離・鉄筋露出、漏水・遊離石灰、抜け落ち、うき」、点検要領に基づく近接目視の代替または支援ができる技術・システム
- ④ 鋼橋においては、桁の添接部のボルトやリベットの「ゆるみ・脱落、破断」、コンクリート橋において、桁の「うき」について、点検要領に基づく打音検査の代替または支援ができる技術・システム
- ⑤ 鋼橋・コンクリート橋の床版において、「うき」について点検要領に基づく打音検査の代替ま



図 5.1.9 橋梁点検

たは支援ができる技術・システム

- ⑥ 鋼橋・コンクリート橋において、点検者を点検箇所近づけることができる技術・システム

### 2) トンネル維持管理

- ① トンネルにおいて、覆工、坑門等に発生した変状（ひび割れ、うき、はく離、はく落、変形、漏水など）の全てまたは一部に対して、近接目視の代替または支援ができる技術・システム
- ② トンネルにおいて、覆工、坑門等に発生した変状（うき、はく離、はく落、打継目の目地切れなど）の全てまたは一部に対して、打音検査の代替または支援ができる技術・システム
- ③ トンネルにおいて、点検者を点検箇所近づけて移動できる技術・システム



図 5.1.10 トンネル点検

### 3) 水中維持管理

- ① ダムにおいて、ゲート設備の「腐食、損傷、変形」、堤体等のコンクリート構造物の「損傷等」及び洪水吐き水叩き部の「洗掘等」について潜水士による近接目視の代替または支援ができる技術・システム
- ② ダムの貯水池において、堆砂等の「堆積物の状況」について全体像が効率的に把握出来る技術・システム
- ③ 河床の「洗掘等」について、全体像が効率的に把握できる技術・システム・また、河川護岸において、「コンクリート部の損傷、うき・剥離・剥落、豆板や、コールドジョイント部のうき・剥離・剥落等」について、潜水士による近接目視の代替または支援ができる技術・システム



図 5.1.11 水中点検

これ以外のものとして、管路維持管理、公共住宅維持管理、公園、鉄道などあるが上記3種の維持管理に重点的に対応すべきとされている。

## 5.2 ロボットのイメージ

### (I) 原子力事故対応 (表 5.2.1)

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<sup>5)</sup>。

#### 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<sup>5)</sup>

#### 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・破砕/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<sup>3)</sup>

#### 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、トー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。

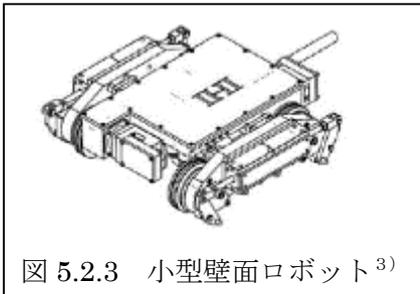


図 5.2.3 小型壁面ロボット<sup>3)</sup>

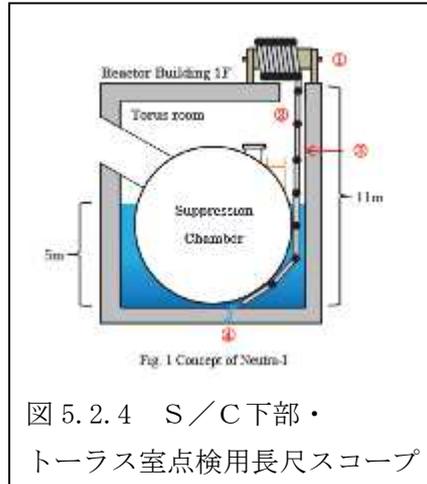


図 5.2.4 S/C下部・トラス室点検用長尺スコープ

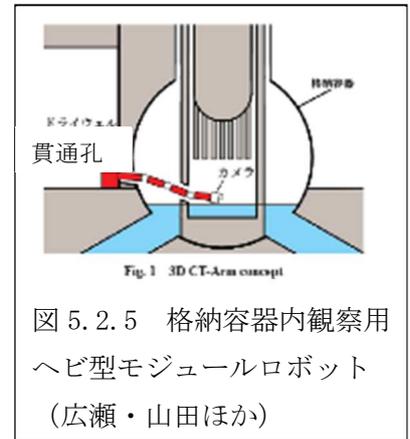


図 5.2.5 格納容器内観察用ヘビ型モジュールロボット (広瀬・山田ほか)

### 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<sup>6)</sup> 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。

### 9) 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。

### 10) 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。

### 11) ロボット自体の除染ピット

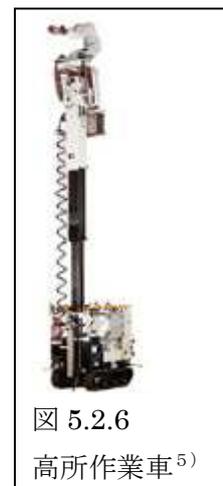


図 5.2.6 高所作業車<sup>5)</sup>

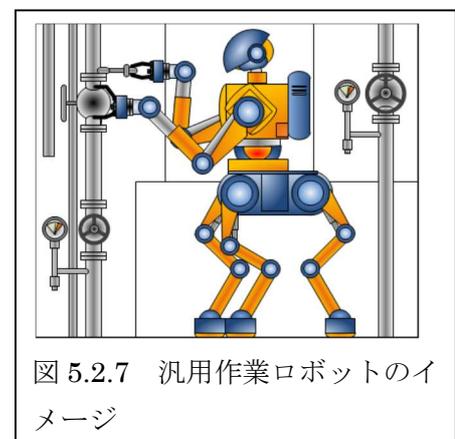


図 5.2.7 汎用作業ロボットのイメージ

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。



図 5.2.8 デブリ取り出し  
ロボット<sup>1)</sup>

(II) インフラ維持管理対応 (表5.2.2)

1) 橋梁、橋脚維持管理

橋梁、橋脚で使用するロボットには、マルチコプタ型ロボットが多く提案されている (図 5.2.9)。マルチコプタの長所は、簡易に高所などの近接目視ができることにあるが、飛行時間や風環境に脆弱であるなどの課題があり、これらの解決が必須である。

そのほか、アームを装備した移動台車型は現状作業員搭乗が主流であるが、将来的には吸着型などの新たな移動機構や点検装置を具備したシステムが開発されていくと予想される (図 5.2.10)。

2) トンネル維持管理

トンネル維持管理で使用するロボットは、非接触で計測する走行型 (図 5.2.11) とマルチコプタや移動台車に打音検査装置を具備し計測するシステムが提案されている (図 5.2.12、図 5.2.13)。今後は、従来の検査員にかわり点検ができる移動型のロボットが開発されていくと予想される。

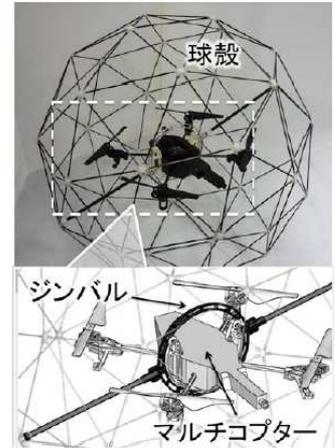


図 5.2.9 マルチコプタ (東北大)

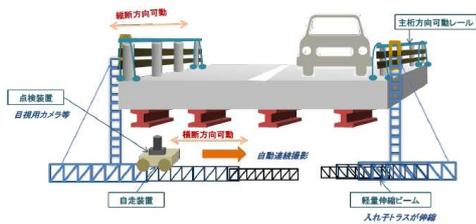


図 5.2.10 移動台車・アーム型



レーザー計測車 (TC2)

図 5.2.11 走行型

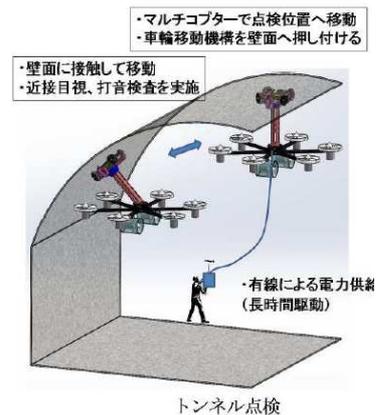


図 5.2.12 マルチコプタ

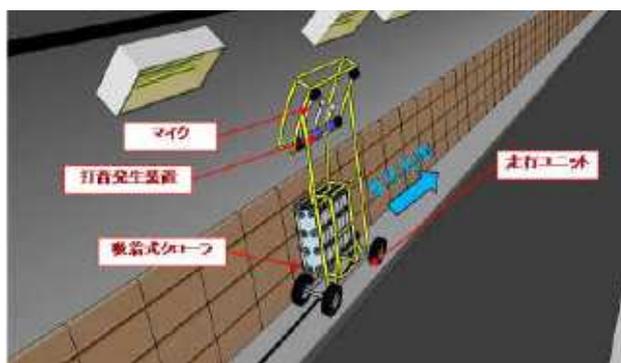


図 5.2.13 打音装置および走行装置

### 3) 水中維持管理

ダムや河川、港湾の維持管理では水中の構造物の検査が可能なロボットが求められる。

特に潜水士による近接目視の代替または支援ができる技術が求められるため、潜水士と同様の水中移動、画像取得、変状箇所の抽出などができる。



図 5.2.14 水中ロボット

### 5.3 キーとなる要素技術

#### (I) 原子力事故対応 (表 5.3. 1)

##### 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20～30m程度で、いろいろな障害物を避けて、ベント管・S/C・トー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5～6m<sup>3</sup>/時間、すなわちおおよそ15cm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、トー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。

##### 3) RMI (ロボット人間インターフェース)

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ース (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。

##### 4) 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。

##### 5) 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・トーラス室) や水中の空間や壁面 (格納容器外壁・S/C・ベント管・トーラス室) 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

###### 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ねばならない。

## 7) 安全

製造環境等他分野で定められた安全基準<sup>7-9)</sup>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。

### (Ⅱ) インフラ維持管理対応 (表5.3.2)

#### 1) 機構

インフラ維持管理対応で必ず装備が必要な機構としては、検査装置、補修装置、移動・走行装置であろう。その他、近接目視のためのカメラ雲台やサンプリングのための穿孔、切削機構なども必要となる。

まず、検査装置としては、橋梁・橋脚、トンネルでは、クラックや浮きなどの変状を打音で検査することが求められており、打撃力を与えるために検査対象物に接触させる機構が必要となる。

水中対応では、そのほかに付着物の除去機構なども必要になる。

#### 2) センサ

インフラ維持管理で必要とされるセンサは、画像取得、および三次元の形状取得が代表的であると考えられるが、将来にわたっては、内部の損傷を可視化するセンサを実装する必要があると考えられる。

また、打音検査の機構で取得する打撃音に関しても、音響、振動を取得可能なセンサも必要とされる。

#### 3) RMI (ロボット人間インターフェース)

ロボットの自律点検を将来的な目標であるとしても、それぞれの段階での実用性を考慮するとその道程において点検専門家の判定やロボットの操作など人間を介在するシステムが望まれる。従って、人間が得意とする領域でのセンサ取得結果の提示や、操作に慣れた建設機械に近い操作方法の選択などを考慮して開発を進めるべきと考える。

さらに、操作者は、全国に配備された点検システムを担当することも想定し、複数同時動作できる通信技術も必要である。

#### 4) システム技術 (作業計画)

まず重要なのは、ロボットシステムの作業シナリオの標準化が必要であろう。

次いで、熟練者の判断と同レベルの検査結果の判定が可能なエキスパートシステム、最終段階としては検査結果をデータベース化し、過去の検査結果との照合や補修結果立案など検査から補修までの流れを全てシステム内で完結できる構成を期待したい。

#### 5) 安全

橋梁、トンネルの点検においては、常に走行中の車両や歩行者の安全を確保できるシステムである必要がある。

さらに、故障診断機能や最低限の故障回復機能などの実証が望ましい。

## 5.4 開発を進める上でのポイント

### (I)原子力事故対応 (表 5.4.1)

#### 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) コストダウン

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。

## (Ⅱ) インフラ維持管理対応 (表5.4.2)

### 1) ニーズに沿った機能設計

作業シナリオを作成し、関係者に周知。作業シナリオを具体化・ビジュアル化するために、点検対象のCGやロボットによる実環境での実証実験の繰返し実施と、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、実用化、普及の前提となる。

なお、前提条件として橋梁点検においては、「橋梁定期点検要領(案)平成16年3月発出」、「総点検実施要領(案)【橋両辺編】平成25年2月国土交通省道路局」、「橋梁における第三者被害予防措置要領(案)平成16年3月国土交通省道路局国道・防災課」、道路トンネルにおいては、「道路トンネル定期点検要領(案)平成14年4月国土交通省道路局国道課」に従うことが現状必須である。

### 2) ロボットに必要なコンポーネント(機能)を開発する

#### ①電源供給

屋外で実施されることがほとんどのインフラのメンテナンスでは、商用電力を前提に設計はできない。したがって、発電機(車載を含む)もしくは、バッテリー駆動である必要があり、ロボット側の省電力対策とともに、電源の安定化など一次側の対策は必須である。

#### ②通信機能

トンネルや水中におけるデータ通信については、現在様々な通信手段が日進月歩で変更または強化されており、今後の動向を見守り、最適な通信機器を選定できるように入出力をコンポーネント化しておく必要がある。

### 3) システムの完成度を上げる。(作業を確実に実行する)

研究室レベルの構成要素でロボットを製作するのではなく、耐朽性、耐環境性の高いシステムとすることが重要である。例えば、コネクタ部の処理や点検、故障時に解体組立が手順どおりに簡単にできるなど。

### 4) コストダウン

機構をモジュール化し、検査装置、足場等の代替となる機構を人による点検時においても使用できるような構成とし、あらゆる検査の場面においてその要素技術が活用できるようにすることが、コストダウンに寄与すると考えられる。

### 5) 運用支援

#### ①作業実施体制の確立

教習、資格制度などの教育面、問い合わせ等のサポート体制は、民間レベルでの恒常的使用には不可欠であり、ある一定量が市場に供給されるまでには体制の構築が必要である。

#### ②メンテナンス

自動車や家電製品など汎用機械は、メンテナンスサービスを行う専門の業者が存在し、開発者が自らメンテナンス等を行うことはない。上記と同様に一定量が市場に供給されるまでに体制を構築する必要がある。

## 5.5 まとめ

ロードマップから重要な点をまとめる。

### (I)原子力事故対応

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・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。

### (II) インフラ維持管理対応

1) インフラ維持管理は、今後人口減少が予想される国内全域で実施されるため、専門家（検査、運用両面）が不在でも適切な補修計画や積算などを行える計画から作業までの一連の流れを一気通貫で実施できる発注形態の変更が望ましい。

2) 国内の人口減少などを見据えて、閉鎖するインフラ、重点的に補修するインフラ等が仕分けられることを想定し、要求しようを絞り込み、効率の良いロボット点検へと移行できるようラインナップを充実させる。

3) 要素技術としては、橋梁では、マルチコプタ、トンネルでは打診装置、水中では水中での近接目視がキーテクノロジーとなると考えられる。それぞれ、ブレイクスルーが不可欠である。

### 参考文献

1) 次世代社会インフラ用ロボット技術・ロボットシステム～現場実証ポータルサイト～

<http://www.c-robotech.info/>

2) 次世代社会インフラ用ロボット現場検証委員会

[https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/constplan/sosei\\_constplan\\_fr\\_000024.html](https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/constplan/sosei_constplan_fr_000024.html)

## 6. 総括

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。

今回、2012-2013年に作成したロードマップを「製造業分野」、「サービス分野」、「特殊環境分野」に最低一項目ずつ追記するスタイルとした。これにより、より多くの実用化・事業化が求められる対象ロボットを、このロードマップを参考とする研究開発者に示すことができたと考えている。

### 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

実用的なロボットを開発する最大のポイントはニーズの高い・役に立つロボットを明確にして開発することである。これまで、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。また、高速で画像認識するために、高速度カメラ・画像処理装置（ハードも含め）・3次元点群測定装置（色も同時に）の低価格化と普及が必要となる。
- ・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。

福島原発の廃炉処理・インフラの保守点検・産業用ロボットの標準化などに対して、経済的な組織の枠を超えて、真に機能するプロジェクトチームで対応すべきである。

#### 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・ビ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<sup>1-4)</sup>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・接触センサ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日本機械学会への提言

#### 1) どんなロボットを作るのか?

日本機械学会として、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しては如何か。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。

#### 3) 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。

#### 4) 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。

#### 5) 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、今年度のロードマップにおいても繰り返すが、もう一度原点に戻って、ロボットの研究開発者は、どんなロボットがユーザから必要とされているのかを議論を深め、目的を意識した研究開発を推進すべきである。

#### 参考文献

- 1) SIL [http://www.zuken.co.jp/club\\_Z/z/safety/02/s\\_100826\\_2.html](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/anzen/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>