

平成18年度

『ロボット技術戦略マップ』のローリング
に関する調査研究

成 果 報 告 書

平成19年3月

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
(委託先) 財団法人 製造科学技術センター

『平成18年度 『ロボット技術戦略マップ』のローリングに関する調査研究』

財団法人 製造科学技術センター

平成19年3月

調査目的：

産業用ロボット分野に限定されてきた実質的なロボットの活動領域は、近年、業務用清掃サービスロボットや食事支援ロボットなど、その領域を広げつつある。本調査研究では、ロボットの自立的活動の促進、適用範囲の拡大を目的に、「ロボットの知能化、環境の構造化」を主眼とした調査研究を行い「ロボット技術戦略マップ」のローリングを行う。また、ロボットの市場を新しい視点により調査・予測し、「導入シナリオ」を精査して経済産業省の政策、NEDO事業活動の指針作りに反映させることを本調査研究の目的とする。

はじめに

ロボット技術戦略マップの策定は、政府の研究開発投資を持続的および一貫性をもって行うための指針となるものとして、平成16年度から開始され、昨年度、今年度と2回のローリングを行なった。

最初に行なわれた平成16年度のマップ策定では、従来と大きく異なるロボットシステムが着目され、オフィスや家庭で人と共に働き、人の作業を支援する人間共存ロボットというコンセプトで技術分析や導入シナリオの検討などが行われた。具体的には、従来の典型的な産業用ロボット、工場の中で単純作業を人に替わって行なうという位置づけから、全く新しい産業環境と対象、いわゆる生活支援のロボットを検討対象とした点に大きな特色があった。また、基盤技術としても、経済産業省・日本ロボット工業会の調査報告書「21世紀ロボット産業技術戦略」で提言されたRTのコンセプトをベースとしたことも特徴的であった。RTのコンセプトとは、ロボット技術の定義を、ロボットのステレオタイプとなっているヒューマノイドロボットに代表されるような形のロボットに拘ることなく、ネットワークを介して空間に分散配置されたロボット要素機器（RTコンポーネント）群の集積・連携で人々にサービスを提供するロボットシステムにまで拡張することで、ロボット技術をベースとしながら、これまでに無いロボット製品、ニーズへの対応技術を創成しようというものである。また、ロボットシステム構築のインフラをユビキタスコンピュータの技術やGPS技術などを用いて、部屋や街路などに埋め込み、環境を情動的に構造化することでロボットの導入を容易にする環境構造化の導入もロボット技術の発展の中では斬新なものであった。

平成17年度のローリングにおいては、RTおよび環境構造化の技術基盤は変わらず、ロボットの作業対象、作業場所を通常の産業ロボットによる製造現場やレスキューロボットによる災害現場などに拡張、検討をおこなった。

今年度は、これまでの流れと少し変わり、知能ロボットを対象として技術マップの作成を行なった。知能ロボット、あるいはロボットの知能というのは必ずしも新しい話題ではない。ロボットの黎明期といわれる1960年代からすでに知能ロボット、ロボットビジョンなどが研究されている。しかしながら、かつて研究が盛んに行われた知能ロボット、あるいはいわゆる人工知能の研究成果で実用にまで至っているのはごく一部に過ぎないと言われている。この理由はさまざまに考えられる。ひとつは、そもそも知能というものの自体、定義の難しい概念で、何をすればよいのか、何ができればよいのか、具体的な目標課題を設定することがうまくいかなかった点である。今回とくにこの観点について、人工知能の分野における典型的研究課題であるようないわゆるゲームをする知能のようなものではなく、ロボットにふつうに期待されている人間の作業の代行や支援といった作業分野に焦点を絞った議論を行うこととした。

また、17年度までのネットワークを活用したRTや環境構造化などの基盤技術との連

続性については次のように考えた。

R Tや環境構造化はロボットを導入するための、I Tを活用したインフラの一つであるが、このインフラがロボットに提供する主な機能は、空間内での位置情報の取得や、作業環境内にある作業対象物や壁、ドアといった環境構造物の同定を助ける手段であって、ロボットの作業実行機能を高めるものであるが、知能そのものではない。部分的にはロボットの知能の肩代わりをできるが、すべてを入れ替えられるものでもない。物体の組み立て、作業支援などにおいて作業状況を理解し、適応的に作業を遂行するような機能、人間とインタラクションするための機能などは、そのようなものとして研究開発を進める必要がある。そして、これらの知能要素が実現され、それがR Tコンポーネントとなって利用されることはまさにR Tという基盤の上でロボットの機能がつみかさねられていくことであって、一連の技術戦略の趣旨にかなったものなのである。この観点からは、今回、ロボット知能を対象とした技術戦略マップ作成が行われたことは極めてタイムリーなことである。

この報告書がそのような新しい観点からの、発展性、拡張性のあるロボット知能技術の全体像をまとめたものであり、ロボット産業に関わるさまざまな人々の参考となることを期待する。

平成19年3月

技術戦略マップ2007

タスクフォース（TF）委員会委員長

平井 成興

目 次

はじめに	i
目 次	iii
調査研究の概要	v
第1章 調査研究実施内容	
1. 1 調査研究の目的	1
1. 2 調査研究の概要	1
1. 3 調査研究の内容	1
1. 4 調査研究体制	4
1. 5 委員会・WG開催状況	4
1. 6 委員会・WG名簿	5
第2章 本調査研究の背景	
2. 1 ロボットの知能化に対する考え方	8
2. 2 標準化の考え方	8
2. 3 ロボット技術戦略マップ2007	10
第3章 ロボットの知能化・環境の構造化WG	
3. 1 はじめに	14
3. 1. 1 ロボット知能とは	14
3. 1. 2 ロボット分野とロボット知能	15
3. 1. 3 検討方針	17
3. 1. 4 報告書のまとめかた	17
3. 1. 5 報告書の構成	19
3. 1. 6 WG検討日程	20
3. 2 ファクトリオリエンテッド知能について	21
3. 2. 1 視覚制御ロボット知能	24
3. 2. 2 ラピッドオートメーションロボット知能	27
3. 2. 3 迅速教示生産支援知能	39
3. 2. 4 セル生産支援視覚制御知能	45
3. 3 ソサエティオリエンテッド知能について	52
3. 3. 1 屋外人環境モビリティ知能	54
3. 3. 2 自動車分散協調型移動知能	64
3. 3. 3 ロバスト屋内環境モビリティ知能	77
3. 3. 4 知能ロボットソサエティデザイン	82
3. 4 パーソンオリエンテッド知能について	87
3. 4. 1 ロバストロボットコミュニケーション知能	90
3. 4. 2 パーソナル作業支援ロボット知能	102
3. 4. 3 パーソナルQOL向上ロボット知能	110
3. 4. 4 パーソナルモビリティロボット知能	119

3. 5	知能ロボットシステム基盤について	1 2 5
3. 5. 1	環境の構造化・環境の知能化	1 2 7
3. 5. 2	知能のモジュールと統合手段	1 3 1
3. 5. 3	知能ロボットの安全性	1 3 6
3. 5. 4	ロバスト知能ロボットアーキテクチャ	1 4 8
3. 6	まとめ	1 5 7
第4章 次世代ロボット知能化技術開発プロジェクト基本計画 WG		
4. 1	基本計画の考え方	1 5 8
4. 2	プロジェクトの基本計画	1 5 8
第5章 ロボット及びR Tの市場調査		
5. 1	ロボット及びR Tの市場規模算出の考え方	1 5 9
5. 2	ロボット市場調査結果のまとめ	1 6 4
おわりに		1 7 1
別添資料 「次世代ロボット知能化技術開発プロジェクト」基本計画（案）		

調査研究の概要

(和 文)

(1) 平成17年度に検討した「ロボット技術戦略マップ2006」のローリング作業として、「愛・地球博」等で得られた知見を基に、さらなるロボット技術の進展を目指した場合の課題を整理し、重要技術のピックアップを様々な視点から行った。

現状ではロボットを自律的に活動させようとした場合、ロボット自身での環境認識性能はかなり低く、今後、産業化が大きく期待されている次世代産業用ロボットやサービスロボットにおいてもロボットの適用範囲など、大きなネックとなっている。一方、3次元空間認識技術や画像解析技術、音声認識技術、自動地図作製アルゴリズムなど、各種ロボットの知能化に関する要素技術の進展が見受けられる。また、ロボットが活動する各種フィールドにおいて、GPSや各種のICタグ、カメラやセンサーノードを用いて周辺環境を捉え、ロボットとの位置関係や各種の情報データをインタラクションするインフラ手段を「環境の構造化」とする様々な検討がとりおこなわれている。

そこで、有識者による委員会にてロボット技術をローリングし、特に政策的に行うべき「ロボットの知能化、環境の構造化」に関する重要技術を抽出し、整理を行い「ロボット技術戦略マップ2007」を作成した。

(2) 今回、我々はロボットの市場予測に関し、以下の仮説を基に、ある程度必然性が見られる予測を試算し、「ロボット市場調査」を実施した。

①ロボットの定義としては、平成18年4月に発表された経済産業省の「ロボット政策研究会」報告書に記載されているものを用い、広くRTとして定義し、自動車や住宅、情報家電でのRT機能搭載システムを一部RTシステムと捉えその市場を試算計上する。

②RTシステムは、防災や人命救助の観点、ITSの進化との融合などの観点を含めると、人命の救済や社会経済的損失の軽減という大きな効果が考えられる。この点にも着目し、統計上では表れにくい経済効果も試算計上する。

③連携施策群において検討されている2005年度のロボット市場規模精査をもとに、将来予測をする。

(3) 平成19年度に経済産業省が新たな研究開発プロジェクトとして、「次世代ロボット知能化技術開発プロジェクト」を計画している。これは、次世代の産業用ロボットや各種サービスロボットに対し、ロバストな知能により頑健な作業ができるようにロボットの知能化を促進させようとするものである。

しかしながら、現時点におけるロボットは、状況の変化にフレキシブルに対応することは難しく、様々な課題が考えられる。

今回検討するロボット技術領域として、この「ロボットの知能化」を主体に「環境の構造化」との関連施策、技術的融合、現在進めている各種施策（RTミドルウェア、ロボットデバイス共通化など）との連携など有機的な検討をふまえ、技術領域のセグメントとロードマップを詳細に描いた。

ここでの成果をもとに、経済産業省新規プロジェクトの基本計画を立案した。

- (4) 本年度においては、過去の「ロボット技術マップ」、「ロボット導入シナリオ」をベースに、上記(2)の市場調査、(3)の新たなロボット技術領域の検討を基に、関係者での議論を行い、安全性の検討、市場導入施策、倫理問題、標準規格化などの見直しを行って、「ロボット技術マップ2007」、「ロボット導入シナリオ2007」を描いた。

(欧 文)

RESEARCH OUTLINE

- (1) As the follow-on works of “Robotics technology strategy map 2006” studied in fiscal year 2005, we have picked up the important technology components from various viewpoints, through the arrangement work of issues which were anticipated assuming further development of robotics technology based on the knowledge that was acquired from “Love earth expo” etc.

As of now, if you want to make a robot to act autonomously its functional ability to recognize its environment is substantially low, and this limitation causes a big bottleneck including the application range of robotics even in such areas as next generation industry robot and/or service robots both of which get a large expectation for industry applications. On the other hand, there observed is development in certain component technologies which are relevant to intellectualization of various type of robots, such as 3-D space recognition, graphics analysis, voice recognition, automatic map creation algorithm, etc. Also in various type of field space, capturing surrounding environment using GPS, various IC Tags, cameras, and/or sensor nodes, a variety of studies are being made to re-arrange the information communication infrastructure which supports interactions among various information data such as those of robot positioning so that the arrangement can be viewed as “structurization of environment.”

Therefore, we have drawn “Robotics technology strategy map 2007,” through continual update discussion of robotics technology at knowledgeable members committees, and extraction and arrangement of important technologies concerning “intellectualization of robots,” and “structurization of environment” in particular.

- (2) This time we have tried some calculation on the figures of inevitability to a certain degree regarding robot market forecast, based on the following assumption, thus made “Robots market research.

① For definition of robot, we use the one stated in the report from METI, “Robot policy study group” announced in April, 2006, and named RT with a broader sense even including robot system parts in automobile, housing, and information appliance.

② A big effectiveness to save human lives and/or socio-economical losses can be thought for RT systems if including viewpoint on disaster prevention/human life

saving and/or ITS evolution and systems fusion. From this standpoint we include the calculation of economical effectiveness in the forecasting.

③ Future forecast is based on the detailed investigation of robot market in FY2005, which has been discussed in the linking policies.

- (3) METI plans “Research and development project on next generation robot intellectualization” as a new one in fiscal year 2007. The purpose of this project is to facilitate intellectualization of robots in order for the next generation industrial robots and/or service robots to be able to perform works with intelligence in harsh environments which would require sturdiness of them.

However, robots as of now could not respond to changes of their environments flexibly. In order to overcome this hurdle, a variety of issues can be thought.

The technology region to be studied this time, namely “intellectualization of robot” as the main body, relevant policies of it with “structurization of environment,” technological fusion, and cooperation with currently on-going initiatives, i.e., RT middleware, communalization of robot devices, etc. were discussed and studied. Through this organic study, we drew the segmentation and the roadmap of the technological region in detail.

Based on this result, we designed the basic plan for the METI New Project.

- (4) In this fiscal year, we have done the discussion, starting from the past result of “Robotics technology map” and “Robot introduction scenario,” as the base, on the market research as above (2) and the new robot technology region as above (3), reviewed such themes as safety study, market introduction measures, ethical issues, standardization, etc. and finally drew up the “Robotics technology map 2007” and the “Introducing robot scenario 2007.”

第1章 調査研究実施内容

1. 1 調査研究の目的

産業用ロボット分野に限定されてきた実質的なロボットの活動領域は、近年、業務用清掃サービスロボットや食事支援ロボットなど、その領域を広げつつある。本調査研究では、ロボットの自立的活動の促進、適用範囲の拡大を目的に、「ロボットの知能化、環境の構造化」を主眼とした調査研究を行う。また、ロボットの市場を新しい視点により調査・予測し、「導入シナリオ」を精査して経済産業省の政策、NEDO事業活動の指針作りに反映させることを本調査研究の目標とする。

1. 2 調査研究の概要

過去2年にわたり「ロボット技術戦略マップ」を取りまとめ、作成してきたが、ロボットの自立的活動には、いまだ課題が多い。今回「ロボットの知能化、環境の構造化」をメインテーマに捉え、有識者による委員会での検討により、「ロボット技術戦略マップ2007」の3要素である「ロボット導入シナリオ2007」「ロボット技術マップ2007」「ロボットロードマップ2007」を作成し、経済産業省の政策、NEDO事業活動の指針作りに反映させる。また、ロボットの市場予測に関し、新たな視点をを用いた調査を行い、各種ロボット政策の基礎資料にする。

さらに、平成19年度に新規発足する国家プロジェクト「次世代ロボット知能化技術開発プロジェクト」の基本計画を立案し、「21世紀ロボットチャレンジプログラム」の一環として実施することとした。

1. 3 調査研究の内容

1. 3. 1 ロボット技術のローリング

平成16年度の「ロボット技術戦略マップ」調査研究においては、人間支援型ロボットに関して、マーケティングによる検証を行った上で10年後、20年後のロボット像を描いた。このロボット像を基に技術の方向性を検討して「ロボット分野技術戦略マップ2005」をまとめた。

平成17年度の「ロボット技術戦略マップ」のローリングに関する調査研究においては、①次世代産業用ロボット、②サービスロボット、③特殊環境用ロボットの3分野における10年後を想定したミッションの検討とそれぞれの分野におけるロボット技術の検討、さらには自動車や住宅、情報家電分野へのRT (Robot Technology) の進展を検討し、「ロボット技術戦略マップ2006」をまとめた。

本年度のローリングは、平成17年度に検討した3つの分野における重要技術を網羅した「技術マップ」のレビューを中心に、愛知万博で得られた知見を基にさらなる

ロボット技術の進展を目指した場合の課題を整理し、重要技術のピックアップを様々な視点から行う。

現状ではロボットを自律的に活動させようとした場合、ロボット自身での環境認識性能はかなり低く、今後、産業化が大きく期待されている次世代産業用ロボットやサービスロボットにおいてもロボットの適用範囲など、大きなネックとなっている。一方、3次元空間認識技術や画像解析技術、音声認識技術、自動地図作製アルゴリズムなど、各種ロボットの知能化に関する要素技術の進展が見受けられる。また、ロボットが活動する各種フィールドにおいて、GPSや各種のICタグ、カメラやセンサーノードを用いて周辺環境を捉え、ロボットとの位置関係や各種の情報データをインタラクションするインフラ手段を「環境の構造化」とする様々な検討がとりおこなわれている。

そこで、有識者による委員会にてロボット技術をローリングし、特に政策的に行うべき「ロボットの知能化、環境の構造化」に関する重要技術を抽出し、整理を行う。

これらをまとめて、「ロボット技術戦略マップ2007」を作成する。

1. 3. 2 ロボット市場の調査

ロボットの市場予測に関しては、2000年に日本ロボット工業会での調査事業において行った市場予測がベースとなっており、若干見直しが行われているが、2015年で3.1兆円、2025年で6.2兆円の市場と予測されている。この算出の根拠としては、GDPの伸び率の予測と労働者人口の減少、女性の社会進出を勘案し、労働者の一部がRTにより置き換えられるという仮定の上で計算されている。しかしながら、2006年現在においてロボット市場は産業用ロボットの7000億円弱が明確な市場となっており、大幅な見直しが急務となっている。例えば、2025年における新たなサービスロボット単価を仮に100万円で、年間100万台売れると仮定しても、その市場は、1兆円であり、産業用ロボットの市場と合わせても、上記予測にはほど遠いと言わざるを得ない。

今回、我々はロボットの市場予測に関し、以下の仮説を基に、ある程度必然性が見られる予測を試算した。

- ①ロボットの定義としては、平成18年4月に発表された経済産業省の「ロボット政策研究会」報告書に記載されているものを用い、広くRTとして定義し、自動車や住宅、情報家電でのRT機能搭載システムを一部RTシステムと捉えその市場を試算計上する
- ②RTシステムは、防災や人命救助の観点、ITSの進化との融合などの観点を含めると、人命の救済や社会経済的損失の軽減という大きな効果が考えられる。この点にも着目し、統計上では表れにくい経済効果も試算計上する。

③連携施策群において検討されている2005年度のロボット市場規模精査をもとに、将来予測をする。

上記3点を加味した「ロボット市場調査」を実施した。

1. 3. 3 新たなロボット技術領域の検討

平成19年度に経済産業省が新たな研究開発プロジェクトとして、「次世代ロボット知能化研究開発プロジェクト」を計画している(初年度19億円の概算要求)。これは、次世代の産業用ロボットや各種サービスロボットに対し、ロバストな知能により頑健な作業ができるようにロボットの知能化を促進させようとするものである。

しかしながら、現時点におけるロボットは、状況の変化にフレキシブルに対応することは難しく、様々な課題が考えられる。

今回検討するロボット技術領域として、この「ロボットの知能化」を主体に「環境の構造化」との関連施策、技術的融合、現在進めている各種施策(RTミドルウェア、ロボットデバイス共通化など)との連携など有機的な検討をふまえ、技術領域のセグメントとロードマップを詳細に描いた。

ここでの成果をもとに、経済産業省新規プロジェクトの基本計画を立案した。

1. 3. 4 導入シナリオの検討

過去、2年における「ロボット技術戦略マップ」の調査研究において、有識者と政策実行側である経済産業省、NEDO等とで委員会を構成し、「導入シナリオ」を描いてきた。

本年度においては、過去の「導入シナリオ」をベースに、上記(2)の市場調査、(3)の新たなロボット技術領域の検討を基に、関係者での議論を行い、安全性の検討、市場導入施策、倫理問題、標準規格化などの見直しを行って、「導入シナリオ2007」を描いた。

1. 4 調査研究体制

上記調査研究を行うため、総括的な「ロボット技術戦略マップ2007TF（タスクフォース委員会）」を設置。また、具体的な調査分析に関しては、委員会の下にWG（ワーキンググループ）を設置して検討を行った。

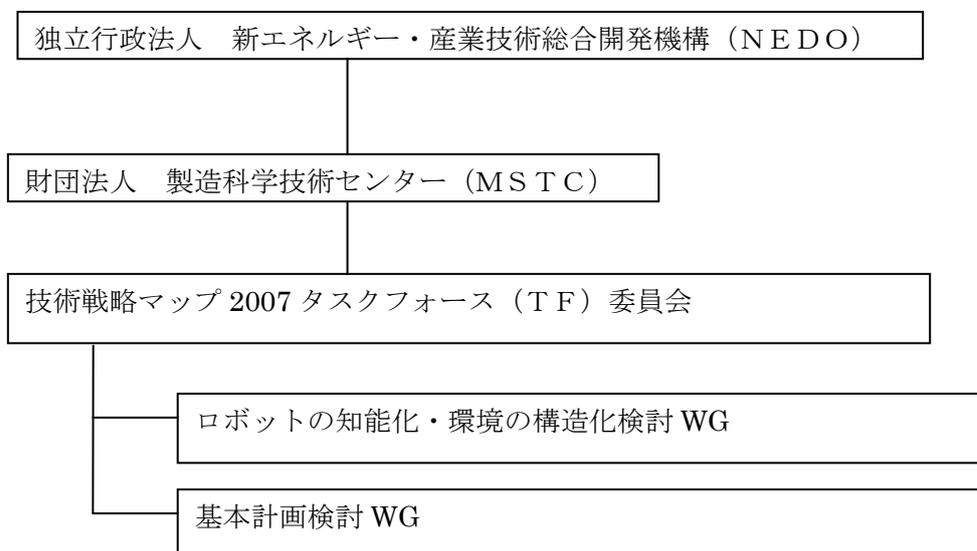


図1. 4 検討体制図

1. 5 委員会・WG開催状況

以下の状況で委員会・WGは開催された。

ロボット技術戦略マップ2007TF、知能化・環境の構造化WG、基本計画検討WG 開催一覧

	第1回	第2回	第3回		
ロボット技術戦略マップ2007 タスクフォース(TF)	H18.11.9 15:00-17:00 MSTC 第1会議室	H18.12.25 15:00-17:00 MSTC 第1会議室	H19.3.6 15:00-17:30 MSTC 第1会議室		
	第1回	第2回	第3回	第4回	第5回
ロボット技術戦略マップ2007 知能化・環境の構造化WG	H18.11.17 15:00-17:00 東京大学 工学部2号館	H18.12.5 15:00-17:30 東京大学 工学部2号館	H18.12.27 15:00-17:30 東京大学 工学部2号館	H19.1.16 13:30-17:30 東京大学 工学部2号館	H19.2.27 15:00-17:30 東京大学 工学部2号館
	第1回	第2回	第3回	第4回	
ロボット技術戦略マップ2007 基本計画検討WG	H18.2.1 10:00-12:00 東京大学 工学部6号館	H18.2.23 10:00-12:00 MSTC 第1会議室	H18.3.7 10:00-12:00 東京大学 工学部2号館	H18.3.16 15:00-17:30 東京大学 工学部2号館	

1. 6 委員会・WG名簿（平成19年3月20日現在）

以下の委員により、TF（タスクフォース）委員会・WG（ワーキンググループ）は構成された。

（1）技術戦略マップローリングタスクフォース（TF）委員会

委員長 平井 成興（独）産業技術総合研究所 知能システム研究部門
研究部門長

委員兼

WG主査 佐藤 知正 東京大学 大学院 情報理工学系研究科
知能機械情報学専攻 教授

委員 新井 民夫 東京大学 大学院 工学系研究科 精密機械工学専攻 教授

委員 石正 茂（独）科学技術振興機構 研究開発戦略センター フェロー

委員 内山 隆（株）富士通研究所 取締役

委員 小菅 一弘 東北大学 大学院 工学研究科
バイオロボティクス専攻 教授

委員 清水 雅史 NTT未来ねっと研究所
ワイヤレスシステムイノベーション研究部 主幹研究員

委員 杉本 浩一 東京工業大学 大学院 理工学研究科
機械物理工学専攻 教授

委員 高木 宗谷 トヨタ自動車（株）パートナーロボット開発部 部長

委員 田中 雅人（株）安川電機 技術開発本部 開発研究所
つくば研究所 所長

委員 萩田 紀博（株）国際電気通信基礎技術研究所
知能ロボティクス研究所 所長

委員 松日楽信人（株）東芝 研究開発センター
ヒューマンセントリックラボラトリー 研究主幹

（2）知能化・環境の構造化WG

主査 佐藤 知正 東京大学 大学院 情報理工学系研究科
知能機械情報学専攻 教授

幹事 森田 俊彦（株）富士通研究所 ストレージ・
インテリジェントシステム研究所 自律システム研究部長

幹事 藤田 善弘 日本電気（株）メディア情報研究所
ロボット開発センター 研究部長

委員 青木 仁 東京電力（株） 技術開発研究所 主席研究員

- 委員 石原 英 オムロン（株） センシング機器統括事業部
アプリセンサ事業部 技術部 部長
- 委員 尾崎 文夫 （株）東芝 研究開発センター
ヒューマンセントリックラボラトリー 主任研究員
- 委員 金丸 孝夫 川崎重工業（株） 技術開発本部
システム技術開発センター メカトロ開発部 部長
- 委員 小山 俊彦 （株）デンソーウェーブ 制御システム事業部
技術企画部 部長
- 委員 榊原 伸介 ファナック（株） ロボット研究所 名誉所長
- 委員 高木 宗谷 トヨタ自動車（株） パートナーロボット開発部 部長
- 委員 田中 健一 三菱電機（株）先端技術総合研究所
システム技術部門 部門統轄
- 委員 田中 雅人 （株）安川電機 技術開発本部 開発研究所
つくば研究所 所長
- 委員 蓮沼 茂 （財）日本自動車研究所 ITSセンター 次長
- 委員 比留川博久 （独）産業技術総合研究所
知能システム研究部門 副研究部門長
- 委員 堀 浩一 東京大学 先端科学技術研究センター 教授
- 委員 堀内 敏彦 （株）日立製作所 機械研究所 ロボティクスプロジェクト
プロジェクトリーダー
- 委員 松井 俊浩 （独）産業技術総合研究所
デジタルヒューマン研究センター 副センター長
- 委員 宮下 敬宏 （株）国際電気通信基礎技術研究所
知能ロボティクス研究所 上級研究員
- 委員 油田 信一 筑波大学 大学院 システム情報工学研究科
知能機能システム専攻 教授

(3) 基本計画検討WG

- 主査 佐藤 知正 東京大学 大学院 情報理工学系研究科
知能機械情報学専攻 教授
- 委員 青山 元 富士重工業(株) 経営企画部 クリーンロボット部 部長
- 委員 田中 健一 三菱電機（株）先端技術総合研究所
システム技術部門 部門統轄
- 委員 蓮沼 茂 （財）日本自動車研究所 ITSセンター 次長
- 委員 比留川博久 （独）産業技術総合研究所
知能システム研究部門 副研究部門長

委	員	藤田 善弘	日本電気(株)メディア情報研究所		
				ロボット開発センター研究部	研究部長
委	員	森田 俊彦	(株)富士通研究所	ストレージ・	
				インテリジェントシステム研究所	自律システム研究部長
委	員	横山 和彦	(株)安川電機	技術開発本部	開発研究所 技術担当部長

(4) オブザーバー・事務局等

経済産業省	安永 裕幸	産業技術環境局	研究開発課	課長
	山根 正慎	産業技術環境局	研究開発課	課長補佐
	長町 英彦	産業技術環境局	研究開発課	産業技術・医療係長

	高橋 泰三	製造産業局	産業機械課	課長
	土屋 博史	製造産業局	産業機械課	課長補佐
	加賀 善弘	製造産業局	産業機械課	技術係長

JARA	飯倉 督夫	社団法人	日本ロボット工業会	専務理事
	濱田 彰一	社団法人	日本ロボット工業会	技術部長

NEDO	小澤 純夫	機械システム技術開発部	部長
	本多 庸悟	機械システム技術開発部	プログラママネージャー
	阿部 一也	機械システム技術開発部	主任研究員
	安川 裕介	機械システム技術開発部	主査
	堀野 正也	機械システム技術開発部	主査

事務局	瀬戸屋 英雄	財団法人製造科学技術センター	専務理事
	橋本 安弘	財団法人製造科学技術センター	
			ロボット技術推進室 室長
	間野 隆久	財団法人製造科学技術センター	調査研究部 課長

第2章 本調査研究の背景

2.1 ロボットの知能化に対する考え方

ロボット技術戦略マップの作成は、平成16年度に初めて行い、そのターゲットを、ヒューマンサポートロボット（HSR）とし、それに付随する社会環境や法制度、安全問題の検討を行った。技術的には、システムLSI、ミドルウェア、要素技術の体系化の検討を行った。

平成17年度は、ローリング作業を行うと共に、産業用ロボット、サービスロボット、特殊環境用ロボットの3分野の技術戦略マップを構築し、各マップの関連性を共通コンセプトとして描いた。さらには自動車や住宅、情報家電分野へのRTの展開にも言及し、「ロボット技術戦略マップ2006」としてまとめた。

今年度のロボット技術戦略マップ作成にあたり、以下の観点から「ロボットの知能化、環境の構造化」を主題とし、検討を行うことにした。

- (1) 「愛・地球博」を契機に、産業用ロボット分野だけでなく、掃除ロボットや食事支援ロボットなどの次世代サービスロボットが着実に産業として成長してきている。
- (2) 産業用ロボット分野でも、産業用ロボットやセル生産システムを高度化するためには、教示時間の短縮や確実に頑健な作業実施能力の向上が必要。
- (3) 街や社会・公共施設においても、身体が不自由な人の移動支援や作業支援、自動車における分散協調などサービスをロボストに実現する手段が必要。
- (4) 人へのサービスを実現するためには、コミュニケーションや作業支援、QOLの向上などをロボストに実現する手段が必要

上記のように、次世代ロボットをロボストで頑健なシステムとして実現させるための、各種ロボット知能を検討し、分かり易く分類するとともに、ロボット知能研究にとって何が大事であるかを検討した。

また、「21世紀ロボットチャレンジプログラム」の一環として実施される平成19年度から5年間の新規研究開発プロジェクト「次世代ロボット知能化技術開発プロジェクト」の基本計画を立案し、①我が国に蓄積されたロボット技術を活用して、ロボットの基盤的要素技術及びシステム開発のさらなる推進、②製造分野をはじめとする一部の分野に限られているロボット適応分野の拡大、③ロボット産業を我が国における基幹産業の一つに成長させる、ことを目的とする。

2.2 標準化の考え方

現在、日本のロボットの安全性、規格関係は、経済産業省、社団法人日本ロボット工

業会、ロボットビジネス推進協議会（共通規格部会）で連携をとりつつ各種ロボット規格を検討中である。従来から確立している産業用ロボットは別として、新たにサービスロボットをターゲットに国際標準化への作業を以下のように推進中であるが、確たる市場の形成されていない同分野の各種規格化には相当の時間が必要と考えられている。

2. 2. 1 安全性の標準化

2006年6月のISO/TC184/SC2パリ会議において、サービスロボットの国際標準化

が開始される決議がなされ、サービスロボットに関する安全性の規格作成作業が開始された。

2006年度の実施内容は次のとおりである。

- (1) サービスロボットの安全性に関する国際標準提案に向けて、昨年度方向づけを行ったガイドラインに基づいて、国際標準案の骨子の検討及び策定を行った。
 - (2) サービスロボットの標準化について検討を行っているISO/TC184/SC2のプロジェクトチーム及びアドバイザーグループ国際会議に出席し、日本の意見を述べると共に、関係諸国の状況を調査し、我が国としての具体的対応について検討を行った。
 - (3) サービスロボット分野の用語及び定義の国際標準提案に向けて、既存の関係するJIS等から用語抽出のための、用語の合理的な分類について検討を行った
 - (4) サービスロボットの安全性と密接に関連する産業用ロボットの安全性に関する国際規格の改訂状況について、ISO10218改訂プロジェクト会議の調査を行った。
- また、今後の予定としては、下記の通りである。

2008. 6 CD化（6ヶ月間の意見収集→2009）

2009 DIS化→投票→FDIS化

2010 規格化

2011 JIS化

2. 2. 2 ロボット用語の標準化

ロボット分野のJIS・国際規格の現状と動向は次のとおりである。

- (1) JISについては、現在関係する用語規格が3規格（B0185知能ロボットー用語、B0186移動ロボットー用語、B0187サービスロボットー用語）制定されている。今後はISOでサービスロボット分野の国際標準化活動が開始されたので、ISOで制定される規格をJIS化することになる。
- (2) 国際規格については、上述のとおり、これまでは検討の場がISOになかったが、2006年6月のISO/TC184/SC2パリ会議でサービスロボットの国際標準化が開始され、現在、安全性の規格作成作業がプロジェクトチーム（プロジェクト

リーダー：英国) を設置して開始されたところである。また、安全性以外の規格作成の可能性についてはアドバイザーグループで検討を行っており、用語の規格作成を開始するよう次回SC2会議で上申する予定である。

2. 3 ロボット技術戦略マップ2007

平成17年度に作成した「ロボット技術戦略マップ2006」の3要素である「ロボット導入シナリオ2006」「ロボット技術マップ2006」「ロボット技術ロードマップ2006」を今回、上記の検討結果、第3章以降記載の内容をもとに見直した「ロボット導入シナリオ2007」を図2. 3. 1に、「ロボット技術マップ2007」を図2. 3. 2に、「ロボット技術ロードマップ2007」を図2. 3. 3に示す。

図2.3.1 ロボット導入シナリオ2007

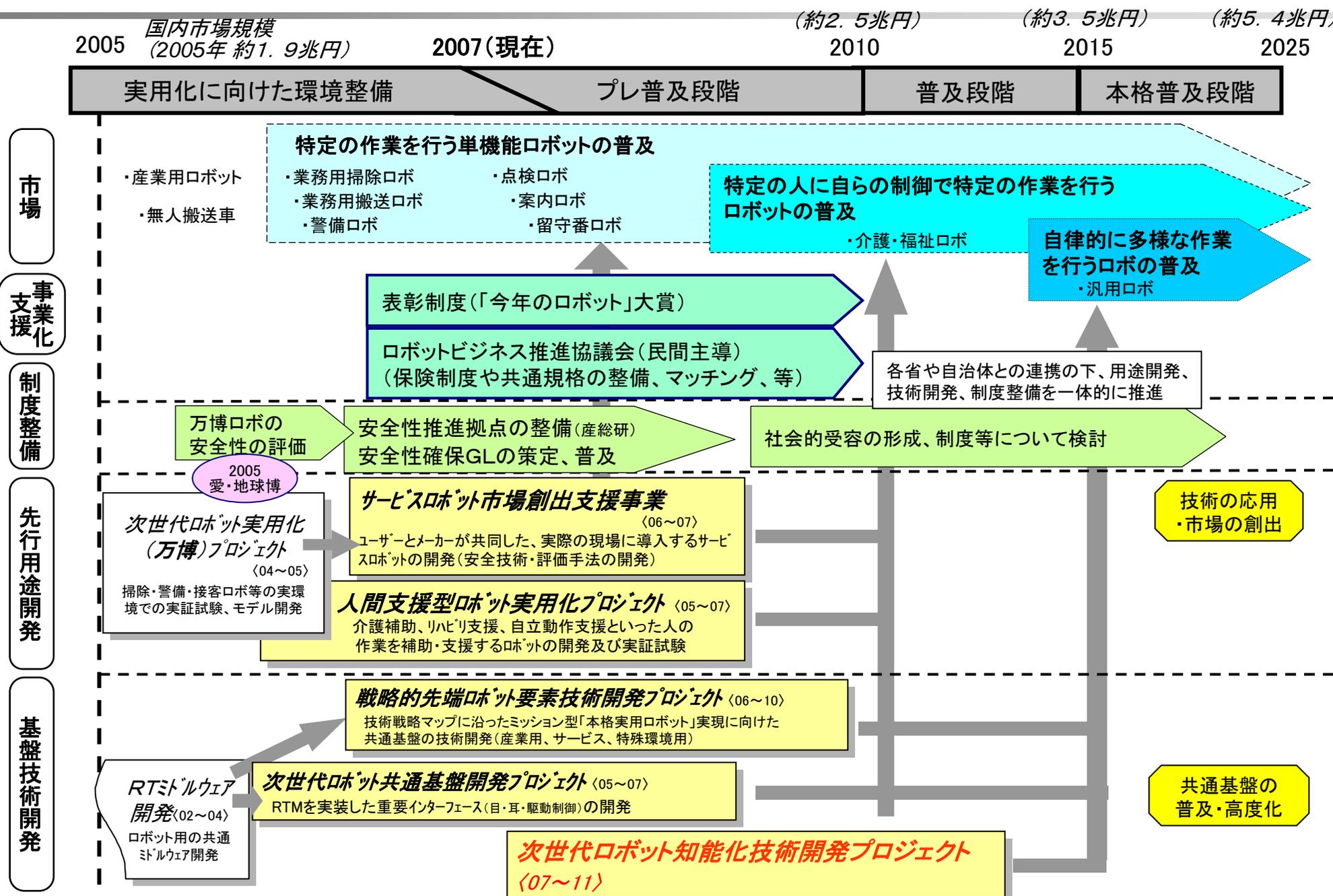


図2.3.2 ロボット技術マップ2007

(注)重点化の評価: 1.日本の技術競争力優位
2.共通基盤性
3.ブレークスルー技術
4.市場のインパクト
5.基礎技術の開発が必要
6.安全・安心の確保のために必要
7.標準化すべき技術

ロボットの種類	目的・必要機能	技術分類	要素技術	重点化の評価						
				1	2	3	4	5	6	7
<p>【次世代産業用ロボット分野】</p> <p>組立てロボット *① セル生産対応 人との共同作業 工具操作 簡単教示 柔軟物ハンドリング</p> <p>搬送ロボット *① セル間を移動 セルへの部品供給 セルからの製品回収</p>	<p>A<環境構造化・標準化> ・ロボット用コンテンツサービス ・他のRT機器と通信できる ・情報家電と通信できる ・他のロボット要素と互換性がとれる ・迅速な開発ができる ・再利用性を高める ・他標準規格と連携する(ex.医療情報交換規約) ・施工情報連携(設計、施工対象、施工結果など) ・施工工程間の施工情報交換</p>	<p><システム化技術> A,B,C,D,E,F,G *② ・総合デザイン技術 ・インテグレーション技術(耐環境性、小型軽量) ・サービス科学 *② A ・RTプロセッサ ・RTミドルウェア</p>	<p>サービス開発ツール *① 作業教示ツール *① モデリング・分析 *① インターオペラビリティ *① 開発環境・ツール *① RTミドルウェア組込デバイス *① ハンドリングデータベース利用技術 *① RFIDタグ(RT用) *② センサーネットワーク(短期設置・高速通信) *③ ユビキタスセンサ融合 *② 自動地図・軌道生成 *② 3D自動地図・軌道生成(SLAM) *②,③ CAD情報利用目標生成 *③ 音声認識アルゴリズム *② 対話アルゴリズム *② ジェスチャ認識アルゴリズム *② 身体モデル・姿勢推定アルゴリズム *② 状況推定アルゴリズム *② メンタルモデル・意図推定アルゴリズム *② 五感融合技術 *② 熟練者スキルの学習アルゴリズム *③ 作業対象状態・作業状況認識 *③ 作業指示理解 *③ 視覚・力覚・触覚・聴覚融合型情報提示 *③ 屋内GPS、アドホック設置GPS *③ 音源分離(アレイマイク) *② 多自由度アクティブビジョン *② フレキシブル2次元触覚センサ *② 3次元位置検出センサ *② 高精度角度・方位センシング *③ 土質センシング(リアルタイム) *③ スマートセンサの小型化 *② 広帯域・高解像度・高感度ビジョンセンサ *② 感度自律調整ビジョンセンサ *② 高速画像処理アルゴリズム・チップ *② 距離画像センサ *② 屋内測位センサ(スードライト、ビーコンなど) *② 足場センシング・認識 *③ 材質センシング・認識 *③ 多自由度協調制御 *② 力制御 *③ 大型重量物ハンドリング制御 *③ 作業計画(簡単指示で掘削・積込等) *③ テレオペレーション *③ 人間との協調 *③ 環境対応移動機構・制御 *② 人追従移動制御 *② 省電力制御 *② 瞬間充放電・回生制御 *② バッテリー制御 *② コンプライアンス調整制御 *② 五感フィードバック制御 *② 階層・重量制御 *② 転倒・荷崩れ防止制御 *③ 軽量マニピュレータ *③ テザーマニピュレーション *③ 多機能ハンド *① 教示用ハンド *① 小型独立関節機構 *③ 不整地・段差・狭隙地・狭窄空間等でのモビリティ *③ 冗長可変剛性機構(人の関節) *③ 一体型小型プラグインアクチュエータ *③ 負荷予測過負荷適合制御 *③ 大容量アクチュエータ(電動・油圧動力系) *③ コンポーネント *③ プロファイリング *③ 技術要素流出監視システム *① RTプラットフォーム *③ 無線技術(超音波通信、アドホック通信を含む) *③ 単純動作利用方法蓄積技術 *① ネットプラグイン(ex.UbPnP拡張) *③ スーパーキャパシタ *③ 小型・軽量電池 *③ 燃料電池 *③ 軽量機構 *③ フェイルセーフ *③ ログ蓄積・解析 *③ 性能評価法・評価基準・オントロジー *③</p>	<p><環境構造化> A,G *② ・ユビキタスセンサ ・個人対応サービス ・ロボット同士の連携 ・機器シンプル化 ・外部情報連携(施工情報) *③ ・移動体高速通信インフラ *③ ・アドホック通信とUWB通信インフラ *③</p>	<p><認識処理> B *③ ・音声処理、対話処理 ・ジェスチャ、姿勢認識 ・状況・意図推定/理解 ・学習/適応技術 ・作業対象物状態認識 *③ ・作業指示理解 *③ ・最適情報提示 *③</p>	<p><センシング> B *③ ・話者方向センサ ・ビジョンセンサ C *③ ・触覚センサ ・ビジョンセンサ 大型構造物姿勢位置センシング *③ 作業対象性質(土質)センシング *③ センサの小型化 *③ D *③ ・ビジョンセンサ ・測位センサ ・環境認識センサ ・拳動検出センサ</p>	<p><制御> C *③ ・マニピュレータ制御 大型重量マニピュレータ制御 *③ ・作業計画 *③ D *③ ・経路計画 ・自律移動制御 ・全天候自律移動 多数ロボットの協調制御 *③ 人とロボットのハイブリッド制御 *③ E,G *③ ・自己エネルギー管理 F *③ ・安全予測制御 ・接触安全制御</p>	<p><機構> C *③ ・アーム ・ハンド D *③ ・2足~多足 ・脚車輪 不整地、段差、狭隙地、狭窄空間でのモビリティ *③</p>	<p><アクチュエータ> A,C,D,E,F *③ ・ロボット適合アクチュエータ ・過負荷適合制御 *③ ・重量物可搬アクチュエータ、動力系 *③</p>	<p><標準化> A *② ・要素互換性 ・標準規格互換 E *② ・エネルギー供給 F,G *② ・事故原因解析</p>
<p>【サービスロボット分野】</p> <p>搬送、案内ロボット *② 警備(安全・安心)、お供(見守り)ロボット 清掃ロボット サービスプロバイダ経由の個人サービス</p> <p>メディアサービスロボット *② 情報支援 エンタテインメント 教育支援</p> <p>日常生活支援ロボット 対個人サービス</p> <p>介護・福祉従事者支援ロボット 移動・移乗支援 検査支援 リハビリ支援</p>	<p>B<コミュニケーション> ・話者の方向を向く ・対話できる ・ジェスチャを理解できる ・データベース情報を提供できる ・人の状況が理解できる ・人の意図が理解できる ・人について学習し、適応できる ・人にとって好ましいインターフェイスとして働く ・メディアとして働く ・オペレータ操作の補助、補完 ・オペレータ操作への情報提示 ・作業対象物の状況提示(視覚、力覚...) ・複雑な作業装置(アーム等)の簡便な操作系 ・タスク的な作業指示</p>	<p><移動> D *③ ・障害物の識別 ・オープンエリアでの測位 ・人の動きの検出 ・環境認識と把握 ・衝突の回避 ・行動の学習と計画 ・自分の位置が解る ・必要に応じて高精度で停止できる ・ラフロード・ラフロード、瓦礫上での安定な姿勢での作業、瓦礫上での効率よい移動</p>	<p>E<エネルギー源・パワーマネジメント> ・長寿命・省電力 ・電源コードが不要 ・重量物可搬なアクチュエータ *③ ・重量物可搬な動力系 *③</p>	<p>F<安全技術> ・ぶつかっても危険でない ・人に対して安全である。 ・高い信頼性を持つ ・再び同じ事故を起こさない ・故障予知をすることができる ・周囲の人員、物体にぶつからない ・足下崩壊など危険な作業環境認識</p>	<p>G<運用技術> ・LCAができる *② ・サービスモデル *② (ユーザ、開発者、サービス提供者の役割分担)が規定できる *②</p>	<p>*①: 特に「次世代産業用ロボット分野」に必要な項目 *②: 特に「サービスロボット分野」に必要な項目 *③: 特に「特殊環境用ロボット分野」に必要な項目 本技術マップは平成17年度検討項目を中心に作成している。</p>				
<p>【特殊環境用ロボット分野】</p> <p>建設ロボット *③ 土木建築施工 構造物解体、廃棄物処理 構造物組立 無人化施工</p> <p>水中作業ロボット *③ 環境計測 漁業資源保全</p> <p>防災ロボット *③ 情報収集 救出支援 被害軽減</p> <p>プラント保全ロボット *③ 点検作業 補修作業</p>	<p>C<マニピュレーション> ・複数のアーム等でいろいろな形状のものを掴める ・安全な軽量化 ・組み立て分解作業ができる。 ・道具を使って作業ができる。 ・多様な形状のものを迅速かつ高精度・高信頼度でハンドリングできる ・人間の動作をスケールアップした作業装置(大きさ、力...) ・重い(大きい)対象物を安全に思い通りにハンドリング ・土などのように性質の変化にも安定した掘削に思い通りにハンドリング</p>	<p><制御> D *③ ・経路計画 ・自律移動制御 ・全天候自律移動 多数ロボットの協調制御 *③ 人とロボットのハイブリッド制御 *③ E,G *③ ・自己エネルギー管理 F *③ ・安全予測制御 ・接触安全制御</p>	<p><機構> D *③ ・2足~多足 ・脚車輪 不整地、段差、狭隙地、狭窄空間でのモビリティ *③</p>	<p><アクチュエータ> A,C,D,E,F *③ ・ロボット適合アクチュエータ ・過負荷適合制御 *③ ・重量物可搬アクチュエータ、動力系 *③</p>	<p><標準化> A *② ・要素互換性 ・標準規格互換 E *② ・エネルギー供給 F,G *② ・事故原因解析</p>	<p>*①: 特に「次世代産業用ロボット分野」に必要な項目 *②: 特に「サービスロボット分野」に必要な項目 *③: 特に「特殊環境用ロボット分野」に必要な項目 本技術マップは平成17年度検討項目を中心に作成している。</p>				

		2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2025			
社会環境変化	情報通信	Giga Bit/Mega Bit			Tera Bit/Giga Bit					Peta Bit/Tera Bit							
	環境	ハイエンドCPU	3GHz 7GIPS, < 100W			6GHz 2CPU 25GIPS, < 100W			9GHz 4CPU 64GIPS, < 100W								
		ネットワーク	公共空間			家庭					都市空間						
		技術普及				RFID普及		IPv6普及		屋内GPS							
	社会	家庭	パソコン・Wireless LAN			情報家電・ホームネットワーク			セキュリティ・センサネットワーク		ユビキタスネットワーク						
		外国人労働者	FTA			> 90万人					> 100万人						
		セキュリティ	顔認証			バイOMETRICS認証					DNA認証						
	法整備 安全・安心	屋外	現行道路交通法・現行電波法										移動アシストなど普及	道路交通法改正			
		保険	PL保険										ロボット関連保険				
		規格	玩具・家電規格					分野別ロボット関連規格					パワーアシスト				
制度・改正		製品安全・法改正					資格制度・・・					公的補助(介護保険など)、特区建築基準法改正					
社会ニーズ	普及パターン	専門家の管理する環境(専門業務支援(病院・施設等))			専門家の管理する環境(一般対象サービス)			コストダウン		一般家庭・オフィス(定型作業支援)への普及			都市空間への展開				
		情報ネットワーク、ロボット移動環境構造化(施設)			屋内センサネットワーク、ネット家電			モビリティ		屋外センサネットワーク、ロボット移動環境構造化(一般家庭・屋外)							
RT環境・作業・移動・コミュニケーション知能化	次世代産業用ロボット知能(フットリオリエント知能)	作業環境認識	トレー整列部品認識		少数部品の3次元認識(〜5種類)	バラ積み状態の部品認識		多数部品の3次元認識(〜50種類)	光沢面物体認識	透明・鏡面物体認識							
	社会・公共用サービスロボット知能(ソサエティオリエント知能)	移動環境認識	床面ガイド、ランドマーク等		事前地図利用	2次元SLAM		3次元SLAM	視覚による自然ランドマーク認識		動的地図構築の標準化						
	パーソナルサービスロボット知能(パーソナオリエント知能)	コミュニケーション	利他的コミュニケーション		短期的適応コミュニケーション	長期的適応コミュニケーション		音環境理解/脳-マシンインターフェース		日常的コミュニケーション							
標準化	知能のモジュール化と統合手法	個別ツール/RTM標準化策定		個別ツール普及/RTM標準化普及		標準ツール普及/RTM標準化普及		音環境理解/脳-マシンインターフェース									
		RMコンポーネント試作#10(標準デバイス)		RTコンポーネント普及#100		RTコンポーネント普及#1000		統一環境普及/世界標準確立									
	基盤ソフトウェア共通化技術(RT=Robot Technology)	ネットワークエージェントロボット(移動→搬送→作業)		モジュール構成ロボットアーキテクチャの普及		高年齢支援ロボット		就労支援ロボット(在宅および会社)									
		コンポーネントインタフェースプロファイリング		産業機器連携1(各種標準連携)		産業機器連携2(相互運用, PnP)		家庭環境インフラへの浸透									
社会インフラ	環境構造化	機能	位置同定機能 物体無し 信頼性 50% m単		非リアルタイム方式 10Mbps		RT要素の分散配置		位置同定機能(整理された部屋) 信頼性95%, 数十cm単位		高信頼非リアルタイム方式 100Mbps		位置同定機能(乱雑物体下)信頼性95% cm単位		リアルタイム方式 1 Gbps	位置同定機能(乱雑未知物体)信頼性99%, mm~cm単位	
		センシング	状態・行動センシング技術(特定作業動作レベル)		環境マップ生成技術(位置ベース)		環境マップ生成技術(位置・関係性)		環境マップ生成技術(位置・関係性・履歴)								
		データベース	小型センサノード		実用的センサフェーゾ環境認識技術		人間行動マイニング技術(特定作業動作レベル)		人間行動マイニング技術(一般動作レベル)		人間行動マイニング技術(一般作業レベル)						
		インフラ整備	行動データベース技術(居場所レベル)		行動データベース技術(特定作業動作レベル)		行動データベース技術(一般動作レベル)		行動データベース技術(一般作業レベル)								

図2.3.3 ロボット技術ロードマップ2007

第3章 ロボットの知能化・環境の構造化WG

3. 1 はじめに

3. 1. 1 ロボット知能とは

ロボットの知能化・環境の構造化を検討するにあたっては、ロボット、知能ロボット、ロボット知能、環境の構造化について、ある程度のコンセンサスが不可欠である。本ロボットの知能化・環境の構造化WG（以下本WGと記す）では、次のように考えることにした。

ロボットとは：人や生物の機能を全て、あるいは一部有する機械

知能ロボットとは：人や環境の変化に適応して巧みに働くロボット

ロボット知能：ロボットを人や環境の変化に適応して巧みに働かせる能力

環境の構造化：ロボットシステムの働きを高度化するために、ロボットとして機能する環境に工夫を加えること、あるいは個体のロボットをより高度に機能させるためのロボットの環境インフラを構築すること

現時点でロボットの知能に求められる最も重要な特徴は、そのロバストネスである。

本WGでは、ロボット知能のロバストネスを下記の観点で考察することとした。

観点1：（環境変化（外乱）のバリエーション）環境変化（外乱を含む）に強い

観点2：（対象物のバリエーション）対象物のバラエティに耐えられる

観点3：（作業回数のバリエーション）働く回数が増えても（常時の場合も含む）性能が低下しない

観点4：（サービス内容のバリエーション）サービス内容のバラエティもこなせる

本WGでは、ロボットの利用の促進、ロボットの実用化、さらに一段高い機能実現のためには、上記のようなロボットやRTの知能化が必須であるという認識のもと、検討をすすめることとした。

ロボット技術戦略マップ（技術ロードマップ）とは：

本WGの目的は、ロボット知能の技術戦略マップ（技術ロードマップ）を作成することである。技術ロードマップの使命は、多様であろうが、本WGでは、それをみれば、ロボット知能の技術分野に関して、何が重要なのか、なぜどのように重要なのか、時間経過をふまえて一目でわかるものを追及することとした。なお、本年度（技術戦略マップ2007）のロードマップ作成にあたっては、一昨年度（技術戦略マップ2005）および昨年度（技術戦略マップ2006）のロードマップのロボット知能という観点からのローリングという意味と、平成19年度から次世代ロボット知能化研究開発プロジェクトが開始されることを十分ふまえて取り組むこととした。

3. 1. 2 ロボット分野とロボット知能

ロボット知能は、一般的には議論しえない。そこで本WGでは、まず、ロボットの働く分野別にロボットの機能を考察することとした。とりあげたロボットの分野は、ファクトリオリエンテッド分野、ソサエティオリエンテッド分野、パーソンオリエンテッド分野とした。それぞれの詳細は、次のようである。

(1) ファクトリオリエンテッド知能：

対象となる分野は工場内で活動するロボット分野で、産業用ロボットやセル生産を支えるロボットなどである。

ロボット支援セル生産など先端産業用ロボットの知能で、高度な生産作業を、場合によっては人間と協調しながら確実に実行するための知能である。例えば、次の様な知能モジュールの全部あるいは一部から構成される。

- ①視覚制御ロボット知能
- ②迅速生産ロボット知能
- ③セル生産支援視覚制御知能
- ④セル生産人機能補間知能

(2) ソサエティオリエンテッド知能：

社会の中で活動するロボットで、施設内で老人をケアするロボットやビル内で案内や掃除をするロボットなどが対象となる。

I T Sや社会で働くサービスロボットの知能で、都市やサービス施設において、位置情報・案内情報などを頑健に提供する知能である。例えば、次の様なモジュールの一部あるいは全部から構成される。

- ①屋内外人環境モビリティ知能
- ②自動車分散協調型移動知能

(3) パーソンオリエンテッド知能：

個人向けサービスを実施するロボットで、家庭内の介護ロボットやヘルスケアロボットなどが対象となる。

家庭用ロボット、福祉用ロボット、個人向けサービスロボットの知能分野で、個人に物理/情報支援サービスを頑健に提供するための知能である。次の様な知能モジュールの一部あるいは全部から構成される。

- ①ロボットコミュニケーション知能
- ②パーソナルモビリティ知能
- ③パーソナル作業支援知能

なお、これらの分野で働くロボット知能を分析してゆくとはじめて、共通なロボット知能が浮き彫りになってくる。そこで、本WGは、上記の分類でのロボット知能の

考察とともに、これと直交する軸からのロボット知能の検討もその視野に入れることとした。それらは、ロバストパフォーマンスロボット知能であるが、本WGでは、これを知能ロボットシステム基盤と総称することとした。

(4) 知能ロボットシステム基盤（ロバストパフォーマンスロボット知能）：

新しい原理やアーキテクチャにもとづくロボット知能で、社会において十分な頑健性をもって機能し、それぞれの組み合わせが可能となるようにモジュール化された知能である。次の様な知能モジュールが代表的なものである。上記（1）から（3）のロボット分野に応用される。

- ①視・触覚知能
- ②マニピュレーション知能
- ③ナビゲーション知能
- ④環境の構造化・分散知能
- ⑤学習知能
- ⑥安全知能
- ⑦ロボット知能のオープン化・統合化技術

ここで、環境の構造化について、本WGでの方針を記しておきたい。まず、環境の構造化のロボット知能における意義を説明するために、環境の構造化そのものの意義を、自動車交通の対比で説明する。

現代社会において自動車は、交通分野で重要な役割を果たしているが、これは、単に自動車の高度化のみによってもたらされたものではない。舗装道路や高速道路網など交通インフラの整備に負う部分も大きい。ロボットが街や家庭に入ってゆく場合も同様に、ロボット自体の高度化とともに、ロボットが働く環境（環境インフラ）の整備（環境の知能化）が欠かせない。特に昨今その必要性が叫ばれている安全・安心・快適社会実現のためにロボットを役立てる場合には、ロボットの働く場が空間的に広がりをもつ人間の活動の場であるため人を取りまく環境を整備し知能化することになる。具体的にいうならば、ロボットによって防犯防災のための危険回避や、事故防止のための安全確保、みまもりによる安心確保、さらに快適さの向上をはかろうとする時、ロボットが工場や、社会施設（道路や福祉施設）公共の場（駅や空港）、一般家庭（家や部屋）で人を支えるためには、人を取りまく社会インフラや設備インフラをそのシステム知能の一部として利用する環境構造化の考えが重要となる。

産業用ロボットにおいてはその作業対象（工業部品や製品）が産業用ロボットの外に存在するのに対し、環境の構造化を前提とするロボット（ここでは、環境型ロボットと総称する）の作業対象は人間でありロボットの内側に存在する。このように環境型ロボットでは、産業用ロボットなどの従来のロボティクスとは、作業主体と作業対象の内外関係が逆転した相補的な世界を構成しており、この環境型ロボットは、従来

のロボティクスを外側からとらえなおすことにつながる。そのため最近広い研究分野を構成することが認識されるに至っているのである。

このような状況をふまえ、本WGでは、ロボットを働く分野別に検討する段階では、これらの分野別の検討の中に環境の構造化をふくめることとし、一方、共通知能としてロボット知能を検討する段階では、これを独立してとりだして、検討することとした。上記の（１）から（４）の検討項目は、このような考察にもとづいた結果である。

最後にロボット知能の検討にあたっては、汎用をめざすべきか、専用でもよいのかの問題に方針を与える必要があった。本WGでは、（１）から（３）の分野別検討においては、その扱うロボット知能は専用でもよいとした。それらの検討をふまえ、（４）の共通知能を検討する段階で、汎用に意をもちいることとした。

3. 1. 3 検討方針

上述したように、ロボット知能を一般的に検討するのではなく、本WGでは、まず、ロボットの働く分野毎にロボット知能の考察を深めることとした。その検討方針を次に示す。

- （１）まず、ロボットの働く分野ごとに、そのロボットに必要な機能を、ロボットシステムの形で描き出す。
- （２）次に、そのロボットシステムを実現するうえで必要となるロボット知能を考察する。
- （３）ロボット知能は、ソフトウェアのみで実現されるものではない。その知能を実現するために不可欠なロボットデバイスが重要な役割を果たすことが多い。そこで、本WGでは、（２）のロボット知能を実現するロボットデバイスについてもその考察の対象とすることとした。

そのうえで、それらの共通基盤として、ロバストパフォーマンスロボット知能を、知能ロボットシステム基盤として考察することとした。

3. 1. 4 報告書のまとめかた

上記の検討方針のもと、報告書のロードマップは次のように作成することとした。

出口を（１）ファクトリオリエンテッド知能ロボット分野

（２）ソサエティオリエンテッド知能ロボット分野

（３）パーソンオリエンテッド知能ロボット分野

の3分野（働く領域（場所）による分類）および

（４）知能ロボットシステム基盤（ロバストパフォーマンスロボット知能）

とし、

（１）から（３）に関しては、それぞれのロボット分野について具体的応用領域を選び、その各々の領域を

①ロボットシステム

②その分野のロボット知能とその分野のロバストなロボット知能

③ロバストロボット知能デバイス

の3レイヤで整理し、これを縦軸とした表とすることとした。

また、横軸（時間軸）は、

従来、現在、近未来（3年まで、5年まで）、未来（理想）

で刻むこととした。

②の新ロボット知能では、その分野の一般的なロボット知能に加え、従来にない（新しい）ロバストなロボット知能を項目として選ぶ。これを明示することで、本WGとしての考えを明確に表現することを目指した。そして、これら知能を知能モジュールとして、(a)、(b)、・・・のように項目訳下上で、それぞれをブレイクダウンしつつマップ化することとした。産業用ロボット知能領域の例でこれを説明すると次のようになる。

（例）産業用ロボット知能

（a）マニピュレーション知能

（b）センシング知能

（c）高速度産業用ロボット知能（← 新知能候補）

（i）高速度マニピュレーション知能モジュール

（ii）高速度物体認識知能モジュール

（iii）高速度センサリフィードバック知能モジュール

③の新ロボット知能デバイスでは、②を実現するのに不可欠なデバイスを記載することとした。

（例）（a-1）高速マニピュレータ

（a-2）高速視覚センサ

（a-3）高速度制御デバイス

一方、①のロボットシステムにおいては、②の新しいロボット知能を含む技術領域における概要説明（領域概観を表現するキーワード）と、②の知能をロボットシステムの中での位置づけられるよう構成を工夫するとともに、その問題点（課題）もキーワードで指摘できるようにすることとした。

（例）産業用ロボット

マニピュレーション

従来（できていたもの）

剛体ハンドリング

力制御による組み立て作業

課題

高速化がなされないと国際競争力をもてない

近未来

高速度産業用ロボット

未来（理想）

高速度ファクトリ

またロードマップとして、(1)～(3)の出口分野毎の知能に分類しにくい基盤的技術を(4)のロバストパフォーマンスロボット知能の項で考察、記述する。その初期状態としては、次の5つの基盤技術とした。

- ①環境の構造化・分散知能
- ②学習知能
- ③安全知能
- ④ロボット知能のオープン化・統合化技術

これは、前述した7つのロバストパフォーマンスロボット知能のうち、視・触覚、マニピュレーション、および、ナビゲーションの知能については、出口分野を想定してマップ化した方が、切り込みが深くなるのと、そのようにしても一般性が失われることはないと判断したからである。

3. 1. 5 報告書の構成

上記の検討方針、および、報告書のまとめかたを踏まえて本WGの報告書は

- (1) ファクトリオリエンテッド知能ロボット分野
- (2) ソサエティオリエンテッド知能ロボット分野
- (3) パーソンオリエンテッド知能ロボット分野
- (4) 知能ロボットシステム基盤（ロボット知能基盤）

の3分野（働く領域による分類）と基盤領域について、それぞれを3. 2、 3. 3、 3. 4、および3. 5の章とする。

前の3つの各章において取り扱う領域とその知能に関しては、

- ①ロボットシステム
- ②新ロボット知能
- ③新ロボット知能デバイス

の3つの節を設ける。

最後の章つまり、知能ロボットシステム基盤に関しては、その章の中に

- (a) ファクトリオリエンテッド知能ロボット分野
- (b) ソサエティオリエンテッド知能ロボット分野
- (c) パーソンオリエンテッド知能ロボット分野

の3つの分野に関して記述を行うこととした。

具体的に述べるならば、たとえば、①の産業ロボットの章（第 X 章とする）では、
X-1 で、産業ロボット分野の特徴を整理し
X-2 で、その技術分野の歴史的流れを書く（従来）
その上で、現在の状況と問題点（課題）を整理する（現在）
X-3 で、そのあるべき姿をロボット知能の形で明らかにする（近未来）
X-4 で、それをふまえて、産業用ロボットの未来（理想）を書く
②の新ロボット知能の章では、その分野の知能を概観するとともに、ブレークダウン
を行い、新しい知能を記述することとした。

このようにしてまとめられたのが本報告書である。なお、この報告書では、わかりやすさのために、各分野、および基盤技術毎にまず概要の技術ロードマップを示し、その後
にその詳細の技術ロードマップと説明が続くように構成した。

3. 1. 6 WG 検討日程：

最後に本WGの活動日程とおおまかな作業内容は、以下の通りであった。

- 1 1 月 1 7 日 WG の趣旨説明と作業方針、および分野分担の決定
- 1 2 月 5 日 第一次検討結果の紹介と作業方針の見直しをふくむ議論
- 1 2 月 2 7 日 第二次検討結果の紹介と収束のための方針をふくむ議論
- 1 月 1 6 日 第三次検討結果の紹介と基本計画をみすえたその深化の議論
- 2 月 2 7 日 とりまとめへむけての最終調整

3. 2 ファクトリオリエンテッド知能について

表3. 2 ファクトリオリエンテッド知能 ロードマップ

(1) 視覚制御ロボット知能

(注)「#」はrobustness index

	従来	現在(2006)	近未来(3年後)	近未来(5年後)	未来(2025以降)	
知能	視覚制御ロボット知能					
	①ロバスト視覚ロボット知能	部品位置・姿勢補正	ピンピッキング	複雑形状対象物のピンピッキング	柔軟物ハンドリング	工場内の全ての対象物および環境、人間の視覚認識
		直線検出・円検出	部品位置・姿勢検出	複数の視覚認識アルゴリズムの使い分け・融合	センサ融合	
	#対象物認識時間	#200	#100	#30	#20	#5
デバイス	視覚制御ロボット知能デバイス					
	①画像プロセッサ	低速マイクロプロセッサ	マイクロプロセッサ	高速マイクロプロセッサ	高速画像処理チップ 高速パラレルプロセッシング	超高速画像処理チップ 超高速パラレルプロセッシング

(2) ラビッドオートメーションロボット知能

	従来	現在(2006)	近未来(3年後)	近未来(5年後)	未来(2025以降)	
知能	ラビッドオートメーションロボット知能					
	①エラーリカバリ知能	作りこみ 熟練者による復旧	想定範囲内適応 熟練者による復旧	事前知識に基づく再構成 一般者による復旧	仮説検定による自律生成 一般者による復旧	自律的問題解決 自動復旧
	#直行率=通過数/投入数	#85%	#90%	#95%	#98%	#99.9
	②動作の習熟知能	現物合わせ	人為上位レベル修正	人為習熟化支援	半自動習熟化	自律的動作習熟
	#習熟化誤差	#1	#0.90	#0.60	#0.40	#0.20
	③ヒト・ロボット協調知能	実機オンライン教示 設備・工程の人為設備	一部オフライン オフライン設計	組立工程オフライン教示 半自動設計	オフライン大局的作業指示 大局的ツール+半自動設計	自律的行動計画 自動設計
	#設備立上げ期間	#2週	#1週	#4日	#2日	#半日
デバイス	ラビッドオートメーション知能デバイス					
	①ハンド	専用	専用+チェンジャ	リセット型調整ハンド	間隔調整型ハンド	可変構造ハンド
	#1サイクルでのハンド数	#100	#100	#50	#25	#5
	②アクチュエータ	モータ+ギア	ギアの小型化	ギアの小型化	モータ+ギアの複合化	機能性駆動デバイス
	#サイズ(現在を100)	#150	#100	#80	#50	#10
	③センサ	ON/OFF型	距離センサ, 2Dビジョン	3Dビジョン	実時間の3Dビジョン	複数センサ融合、習熟
	#単一センサでのセンシング可能状況数	#1	#5	#10	#20	#50

(3) 迅速教示生産支援知能

	従来	現在(2006)	近未来(3年後)	近未来(5年後)	未来(2025以降)	
知能	迅速教示生産支援知能					
	①作業計画		オフライン、事前検証	シミュレーションによる最適配置 サイクルタイム事前検証		教示レス DBによる勤・コツの定量化
	②プログラミング	動作レベル	動作ライブラリ	作業レベル(アプリ特化)	作業レベル、ライブラリ(異常復帰)	自動プログラミング
	③位置教示	ティーチングペンダント	オフライン干渉検出	オフライン干渉回避	センサベース干渉回避(2D)	センサベース実時間回避
	④微修正		2D視覚補正	3D視覚補正	センサ情報による修正	センサフュージョン
	#教示時間	#80	#100	#80	#50	#30
デバイス	迅速教示生産支援知能デバイス					
	①教示ツール	ティーチングペンダント	PC	PC(3DCADデータ取り込み)	無線ティーチングペンダント	3D環境認識
	②センサ		2D視覚	3D視覚	センサ(力、接触、人検知)	センサフュージョン
	③データ処理		ORiN	ベジアンネット、多変量解析	勤・コツ/ノウハウの定量化	DB活用、モデル構築

(4) セル生産支援視覚制御知能

	従来	現在(2006)	近未来(3年後)	近未来(5年後)	未来(2025以降)	
知能	セル生産支援視覚制御知能					
	①対象物認識知能	単品ワーク(平面物体) 単独配置	単品ワーク(多面体) トレー整列状態	単品ワーク(曲面含む) 箱内積み重ね状態	複数ワーク(光沢面含む) 箱内バラ積み	複数ワーク(透明/鏡面) バラ積み
	②環境ロバスト知能	背景均一 専用照明	テクスチャ付き背景 専用照明	テクスチャ・奥行き有 専用照明	テクスチャ・奥行き有 一般照明	複雑背景 一般照明
	③人・ロボット協調知能	部品現物提示・登録	同左	CAD入力・登録	同左+現物から特徴抽出	模倣
デバイス	セル生産支援視覚制御知能デバイス					
		レーザ光切断	白黒2D視覚	カラー3D視覚、 高ダイナミックレンジカメラ	カラー3D小型カメラ、 高解像度カメラ、ハイブリッド	動画像認識デバイス、 網膜撮像デバイス

生産現場では、既に溶接・板金・塗装などの分野で多くの産業用ロボットが用いられており、昨今では機械部品の組立て作業の一部もロボット化されている。しかしながら、国際競争が激しさを増しつつある中、今後より多くの作業にロボットを適用し生産性を高めるためには、産業用ロボットの一層の知能化が不可欠である。本章では、産業用ロボット分野で求められる知能化技術として、以下の4つを抽出した。なお、表3. 2に各知能の概略技術マップを示す。「#」を付した数値は、ロバスト性の定量的評価指標である。

(1) 視覚制御ロボット知能

組立て作業のロボット化を進め、生産効率の向上を図るためには、機械部品の3次元的位置・姿勢を計測する視覚認識技術の発展が必要となる。5年後を目処に、複雑形状や柔軟物を含め、工場で使用される大部分の部品を認識可能とすることを目指すべきであり、また環境変動による認識ミスが少ない信頼性の高い手法の実現が望まれる。またこれを実現するためには、高速な処理を可能とする画像処理専用チップの開発もポイントとなる。

(2) ラピッドオートメーション知能

工場では、生産のタクトタイムを短縮し生産効率を高めることが至上命題であるが、そのためには、ロボットが高速に動作するだけでなく、環境変動や突発事象に対応できる自律性を備え、様々なエラーに起因する短時間停止(チョコ停)等を防ぐ必要がある。このような自律的行動計画に関する知能は、エラーリカバリ知能、動作の習熟知能、ヒト・ロボット協調知能の3つから構成される。5年後を目処に、事前に準備された知識のみならず、ロボットが能動的に状況を予測し、仮説を立てながら、問題の解決を図る自律性の実現を目指すべきである。

(3) 迅速教示生産支援知能

生産設備の立ち上げや作業手順の変更を迅速に行うためには、動作教示の簡素化も必要となる。定常作業については、作業のライブラリ化、データベース化を推し進めることが重要である。5年後には、異常復帰等の非定常作業のプログラミングについても、場面を限定した上での部分的実用化を目指すべきである。その際、製造設備全体のモデリングが必要となるが、設備設計での3D-CADの普及が進まない現状を踏まえると、センサによる環境モデリング・干渉回避・微修正などが重要な要素知能となる。

(4) セル生産支援視覚制御知能

多品種少量生産向けの生産方式であるセル生産システムでは、人による作業を支援する視覚制御知能の実現が重要である。セル生産では、部品が整列して配置されていないことが多いため、ばら積み部品の位置・姿勢の視覚認識が鍵となる。また、セル生産で

は段取り替えが頻繁に発生することから、5年後を目処に、現物をカメラに見せるだけで、認識物体を登録できる手法の実現が望まれる。

表3. 2. 1. 1 視覚制御ロボット知能 ロードマップ(概要)

	従来	現在（2006）	近未来（3年後）	近未来（5年後）	未来（理想、2025年以降）
産業視覚ロボットシステム	<p>教示した通りの動作を繰り返すだけ。</p> <p>キーワード：プレイバック方式</p>	<p>機械部品の高精度組立が可能となっている。一部ピンピッキング機能の実用化等により、人による事前のお膳立てが軽減されている。ロボットへの教示の工数削減が課題となっている。また、エラー発生時は停止するしかなく、チョコ停をなくすことが課題である。</p> <p>キーワード：ピンピッキング</p>	<p>複雑形状対象物のピンピッキングが可能となる。</p>	<p>柔軟物を視覚認識して取り扱いが可能となる。ロボットが自分の置かれた環境を一部理解し、教示作業が簡単になる。</p> <p>キーワード：柔軟物ハンドリング</p>	<p>教示作業が不要となり、人が作業指示を与えるとロボットがそれに従って作業する。また、万一エラーが発生しても、重篤なエラーでない限り、ロボットが自分の判断でリカバリする。</p> <p>キーワード：作業指示、エラーリカバリ</p>
<p>課題：産業視覚ロボットでは、人と比べて視覚認識のロバスト性が低いこと、および、視覚認識に要する時間が長いことが普及を妨げる大きな要因であり、ロバスト性向上および高速化が課題である。</p>					
産業視覚ロボット知能	<p>対象物の穴や稜線の平面内の位置・回転角度の簡単な検出。</p> <p>キーワード：2次元ビジョン、バイナリ、グレイスケール</p>	<p>対象物の3次元位置・姿勢検出が可能となる。視覚処理速度は満足いくレベルではない。視覚認識できる対象物に制限がある。</p> <p>キーワード：3次元ビジョン、ストラクチャードライト方式、ステレオ方式</p>	<p>複数の視覚認識アルゴリズムを有し、認識対象に応じて、それらを適宜使い分け、あるいは融合する。工場で使用される多くの対象物が視覚認識可能となる。</p>	<p>視覚、触覚など、複数センサ処理の融合が進む。視覚認識の処理速度が一応満足できるレベルとなる。</p> <p>工場で使用される大部分の対象物が視覚認識可能となる。環境の視覚認識が一部可能となる。</p> <p>キーワード：センサ融合</p>	<p>工場で使用されるすべての対象物および環境、人間の動作を高速に視覚認識できる。</p>
Index（対象物認識時間）	200	100	30	20	5
産業視覚ロボット知能デバイス	<p>外部接続のPCを使うことが多く、高価格</p>	<p>ロボットコントローラ内の画像処理専用ボード</p>	<p>画像処理専用チップ</p>	<p>高速画像処理専用チップ</p>	<p>超高速画像処理専用チップ</p>

(1) システム

産業用ロボットは、プログラム通りに繰り返し動作する機械として発明されたが、C Dカメラによる部品画像を白と黒の2値で処理するバイナリ視覚センサの登場により、部品の稜線や穴位置が検出できるようになり、部品の位置ずれを補正できるようになった。その後、白から黒までの間を256、512などの灰色階調に分けたグレースケール視覚センサが開発され、光源・環境光の明暗の変化、対象物表面材質の影響等による誤検出に対してロバスト性が高まった。最近では、部品の平面位置だけでなく空間的な位置・姿勢検出が可能な3次元視覚センサが登場している。これには、レーザスリット光などのストラクチャードライトによる対象物表面の距離画像をグレースケール視覚センサと組み合わせたタイプや、2つのカメラを使ったステレオビジョン等がある。視覚センサはマイクロプロセッサの処理速度向上やカメラ価格低下等に伴い、近年では、工場現場での実用に耐え得るものとなりつつあるが、視覚センサの工場現場での使用例が増加するに従い、当然ではあるが、視覚センサの誤検出に起因するロボットシステムの短時間停止（チョコ停）も増え、これを減らしロバスト性をさらに高めることが課題となっている。また、国際競争が厳しさを増しつつあり、生産性向上のため視覚ロボットにもより一層の高速化が求められつつある。

産業視覚ロボットが用いられる工場環境は、工場外環境に比べて一般的によく整備されており、視覚認識の点から有利と考えられる（well-structured）。しかしながら、工場内の設備機械類に比べると、工場内での物流（部品供給・排出・搬送）領域は不確定要素が多い（ill-structured）。視覚ロボットは、この不確定要素の多い領域と設備機械類等の不確定要素の少ない領域との仲立ちをする役割を担っていると考えることが出来る。しかるに、現状の産業用視覚センサは、部品の穴や稜線の検出が主であって、部品そのものや周囲の環境との関係といった意味付けを含めて認識している訳ではない。産業用視覚センサのあるべき姿としては、視覚ロボット動作領域内における工場内環境認識知能の実現が挙げられる。その開発のための技術ステップとしては、まず、部品認識、工場内の設備機械類の環境認識、続いてそれ以外の環境認識の順に行うのがよいと思われる。

(2) 知能

視覚センサを活用することによりロボットの動作にある程度の自律性とも言える知能を持たせることを示した大学等での研究成果が既に多く存在しており、例えばバラ積みされた部品を一つひとつ取り出すピンピッキング機能が実用化されている。視覚機能がさらに向上すれば、ロボットが稼働している環境を認識する知能をロボットに持たせることが期待される。

前述のように、視覚センサの工場現場での使用例が増加するに従い、視覚センサの誤検出に起因するロボットシステムの短時間停止（チョコ停）も増え、これを減らしロバ

スト性をさらに高めることが課題となっている。

視覚センサ自身が、視野内に見える画像を複数のアルゴリズムで検証することができれば、視覚認識可能な対象物形状の範囲を拡大し、さらに視覚認識のロバスト性を高めることが期待できる。前述のように、3次元ビジョンセンサには、距離画像を利用したものやステレオビジョンがあるが、この他に、オプティカルフローを利用したものなど、多くのタイプ、アルゴリズムが存在し、それぞれ、得失がある。これらを対象物や環境に応じて適宜、使い分けたり、融合したりすることで視覚認識機能を向上させる。

さらに、対象物や環境の一部で3次元形状データの存在するものは、その知識を視覚認識のために積極的に利用する。これにより、単に、対象物の穴や稜線の検出にとどまらず、その対象物そのものの認識に近づくことが期待される。

このように視覚センサが対象物や工場環境をある程度ロバストにかつ高速に理解できるようになれば、視覚ロボットは、環境内を自律的に動作できる可能性がでてくる。例えば、旋盤のチャック位置を視覚ロボットが自分で見つけ、これに対するワークのローディング・アンローディングのプログラムを自動生成することなどが考えられる。

不測の事態、例えば、ロボットがワークを落としてしまったような場合、そのワークがどこに行ったかを予測するのは非常に難しい。その場合は、ワークが落ちた先と思われるテーブルや床を視覚ロボットがサーチし、落ちたワークかどうかを詳細に計測する。また、作業者が不用意に置いた工具等も、同様に処理する。

(3) デバイス

上記のロバスト産業用視覚センサを実現するデバイスとしては、現状では、ロボットコントローラに内蔵された専用の画像処理ボードを使うことが多いが、近年の電子技術の急速な発展により、高速あるいは超高速な画像処理チップを比較的安価に利用できるようになることが期待される。

表3. 2. 2. 1 ラピッドオートメーションロボット知能 ロードマップ (概要)

	従来	現在(2006)	近未来(3年後)	近未来(5年後)	未来(理想、2025年以降)
システム:システム概要	ティーチングフレイバック 現場作業による治具の改良など、生産ラインの改善提案活動	ビジョンセンサによるセンサーフィードバック制御の一部実用化 教示作業に要する高コスト、チョコ停による連続生産の阻害問題が顕在化	事例テーブルに基づくエラーリカバリの実用化 教示支援ツールによる作業時間短縮 チョコ停から一部自律的復帰	環境変動・突発事象への対応 ロボット動作軌道の自動改良 設計支援ツールによる生産セルの自動設計	時々刻々変化する環境下における適応行動可能な自律型ロボットの実現 すばやくしなやかな行動の計画と実行
知能 :ラピッドオートメーション知能概要	設計者によるエラーリカバリの作りこみ 熟練作業による復旧 現物合わせによる作業動作レベルの改善 実機を用いたオンラインティーチング 設計者による手書き図面上での生産設備と工程の設計	想定範囲内での適応動作 熟練作業による復旧 人手による作業順序、動作軌道レベルの修正 オフラインティーチングの併用 設計者によるCAD図面、オフラインシミュレータ上での生産設備と工程の設計	事前知識に基づく行動パターンの再構成 一般作業による復旧が可能 作業によるロボット動作習熟化の支援 組立作業工程のためのオフラインティーチング 設計支援ツールによる生産設備と工程の半自動設計	仮説検定による自律的行動パターンの生成 一般作業による復旧 ロボット動作習熟の半自動化 大局的作業指示方式によるオフラインティーチング 大局的設計支援ツールによる生産設備と工程の半自動設計	自律的問題解決行動(先天的行動と後天的行動のモデル化) 完全自動復旧 ロボットによる自律的動作習熟 大局的作業指示に基づいた自律的行動計画 生産設備と工程の自動設計
エラーリカバリ知能	設計者によるエラーリカバリの作りこみ 熟練作業による復旧	想定範囲内での適応動作 熟練作業による復旧	事前知識に基づく行動パターンの再構成 一般作業による復旧	仮説検定による自律的行動パターンの生成 一般作業による復旧	自律的問題解決行動(先天的行動と後天的行動のモデル化) 完全自動復旧
インデックス: 直行率=通過数/投入総数	85%	90%	95%	98%	99.9%
動作の習熟知能	現物合わせによる作業動作レベルの改善	人手による作業順序、動作軌道レベルの修正	作業によるロボット動作習熟化の支援	ロボット動作習熟化の半自動化	ロボットによる自律的動作習熟
インデックス:習熟化誤差 =(1-改善直行率)/(1-初期直行率)	1	0.90	0.60	0.40	0.20
ヒト・ロボット協調知能	実機を用いたオンラインティーチング 設計者による手書き図面上での生産設備と工程の設計	オフラインティーチングの併用 設計者によるCAD図面、オフラインシミュレータ上での生産設備と工程の設計	組立作業工程のためのオフラインティーチング 設計支援ツールによる生産設備と工程の半自動設計	大局的作業指示方式によるオフラインティーチング 大局的設計支援ツールによる生産設備と工程の半自動設計	大局的作業指示に基づいた自律的行動計画 生産設備と工程の自動設計
インデックス:生産設備設計立上期間	2week	1week	4日	2日	半日(データ入力のみ)
知能デバイス					
ハンド	専用ハンドによる固定構造・固定動作(単一工程)	専用ハンド+チェンジャによる複数工程対応	プリセット型調整ハンド+チェンジャ(複数工程対応)	間隔調整型ハンド+チェンジャ(複数工程対応)	可変構造型ハンド(複数工程対応)
インデックス: 作業サイクルでの延べハンド数	100	100	50	25	5
アクチュエータ	モータ+減速ギア	モータ+減速ギアの小型化	モータ+減速ギアの小型化(現在形態の進化形)	モータ、減速ギアの複合化による小型化	機能性駆動デバイスによる小型・大出力化
インデックス:サイズ(現在を100)	150	100	80	50	10
センサ	ON/OFF型状態検出(光電センサなど)	ギャップ量等の定量値検出(距離センサ、2次元ビジョンセンサなど)	立体的状態検出(3次元ビジョンセンサなど)	立体的状態検出のリアルタイム化(3次元ビジョンセンサなど)	複数センシング信号からの習熟型状態検出
インデックス: 単一センサでのセンシング可能状況数	1	5	10	20	50

表 3. 2. 2. 2 ラビットオートメーションロボット知能（詳細）

	従来	現在(2006)	近未来(3年後)	近未来(5年後)	未来(理想、2025年以降)
システム:システム概要	ティーチングプレイバック 現場作業員による治具の改良など、生産ラインの改善提案活動	ビジョンセンサによるセンサフィードバック制御の一部実用化 教示作業に要する高コスト、チョコ停による連続生産の阻害問題が問題化	事例テーブルに基づくエラーリカバリの実用化 教示支援ツールによる作業時間短縮 チョコ停から一部自律的復帰	環境変動・突発事象への対応 ロボット動作軌道の自動改良 設計支援ツールによる生産セルの自動設計	時々刻々変化する環境下における適応行動可能な自律型ロボットの実現 すばやくしなやかな行動の計画と実行
知能 :ラビットオートメーション知能概要	設計者によるエラーリカバリの作りこみ 熟練作業員による復旧 現物合わせによる作業動作レベルの改善 実機を用いたオンラインティーチング 設計者による手書き図面上での生産設備と工程の設計	想定範囲内での適応動作 熟練作業員による復旧 人手による作業順序、動作軌道レベルの修正 オフラインティーチングの併用 設計者によるCAD図面、オフラインシミュレータ上での生産設備と工程の設計	事前知識に基づく行動パターンへの再構成 一般作業員による復旧が可能 作業員によるロボット動作習熟化の支援 組立作業工程のためのオフラインティーチング 設計支援ツールによる生産設備と工程の半自動設計	仮説検定による自律的行動パターンへの生成 一般作業員による復旧 ロボット動作習熟の半自動化 大局的作業指示方式によるオフラインティーチング 大局的設計支援ツールによる生産設備と工程の半自動設計	自律的問題解決行動(先天的行動と後天的行動のモデル化) 完全自動復旧 ロボットによる自律的動作習熟 大局的作業指示に基づいた自律的行動計画 生産設備と工程の自動設計
エラーリカバリー知能	設計者によるエラーリカバリの作りこみ 表象主義的記号処理AIとその限界	想定範囲内での適応動作 センサフィードバック ソフトウェアデバッグ ソフトウェアデバッグ 機械学習 サブサンクションアーキテクチャ 学習した機械	事前知識に基づく行動パターンへの再構成 故障状態認識 事前に準備された知識(事例テーブルなど)に基づく不具合解消 学習した機械	仮説検定による自律的行動パターンへの生成 限定的ではあるが能動的に予測や仮説を立てながら問題解決 実作業中に得た経験データを問題解決に利用 学習する機械	自律的問題解決行動(先天的行動と後天的行動のモデル化) 事前準備知識(事例テーブルなど)無しで不具合作業建て直し 自動的な作業熟達によるエラーの予防 原理・原則に立ち返った自律的行動生成 学習する機械
	熟練作業員による復旧 そのシステムを熟知した作業員による作業	熟練作業員による復旧 そのシステムを熟知した作業員による作業	一般作業員による復旧 単純なリカバリー動作が可能なデバイスと知能的駆動の利用	一般作業員による復旧 既知のエラーに対するリカバリー可能なデバイス構造と知能的駆動の利用	完全自動復旧 未知のエラーに対してもリカバリー可能なデバイス構造と知能的駆動の利用
インデックス:直行率=通過数/投入総数	85%	90%	95%	98%	99.9%
動作の習熟知能	現物合わせによる作業動作レベルの改善 作業員による作業動作修正	人手による作業順序、動作軌道レベルの修正 作業員による作業順序、動作軌道修正	作業員によるロボット動作習熟化の支援 動作軌道改良支援ツールによる動作習熟の実現 タクトタイム短縮作業支援の実現	ロボット動作習熟化の半自動化 動作軌道の自動反復学習方式を備える動作軌道改良支援ツール タクトタイム短縮の実現 ミス誘発動作排除の実現	ロボットによる自律的動作習熟 後天的行動獲得による作業動作の自動改良 タクトタイム短縮の実現 ミス誘発動作排除の実現 ロボットによる作業の品質向上の実現
	単一の固定デバイスによる動作	複数の固定デバイスの切り替え	軌道改良に適したデバイスと知能的駆動の利用	軌道習熟に適したデバイスと知能的駆動の利用	後天的行動実現に適したデバイスと知能的駆動の利用
インデックス:習熟化誤差=(1-改善直行率)/(1-初期直行率)	1	0.90	0.60	0.40	0.20
ヒト・ロボット協調知能	実機を用いたオンラインティーチング ダイレクトティーチング方式、リモートティーチング方式によるオンラインティーチング作業の実施	オフラインティーチングの併用 ソリッドモデル、シミュレータを用いたオフラインティーチング作業支援ツールの利用開始	組立作業工程のためのオフラインティーチング チョコ停解析方式の確立、シミュレーションシステムの高度化、センサフィードバックの高度化 作業員・作業軌道候補を提示するHMIデバイスを備えた教示作業支援ツールの実用化によるティーチングに要する時間と手間の減少	大局的作業指示方式によるオフラインティーチング 作業内容大局的の指示方式およびデバイスを用いたオフラインティーチングの実現 大局的の指示後に、自動的作業軌道生成する。	大局的作業指示に基づいた自律的行動計画 作業員の大局的作業指示により、自律的に作業点、作業軌道を自律的に生成するツールの実用化
	設計者による手書き図面上での生産設備と工程の設計 手書き設計+実機検討 設計者による手書き図面設計 実際に生産設備を作って検討	設計者によるCAD図面、オフラインシミュレータ上での生産設備と工程の設計 CAD設計+コンカレントエンジニアリング 設計者によるCAD図面、オフラインシミュレータ上での設計 ある程度の事前机上検討	設計支援ツールによる生産設備と工程の半自動設計 ヒト・ロボット作業分担設計支援ツール 限定された作業に対して机上検討による動作軌道プログラミング支援ツール 教示作業支援ツール(HMI構築指標、HMD、レーザーポインタなど) 単一目的最適化設計 いくつかの評価指標にもとづく生産システムの最適設計	大局的設計支援ツールによる生産設備と工程の半自動設計 ヒト・ロボット作業分担設計支援ツール ロボットを用いた作業全般について、作業軌道を自律的に生成 大局的作業指示方式 複数目的最適化設計 複数の評価指標にもとづく生産システムの多目的最適設計	生産設備と工程の自動設計 ヒト・ロボット作業分担指標の定式化 大局的作業指示に基づいた教示レス自律的行動計画 環境理解と行動計画案の数学モデル 多目的最適化の実用 環境者虚型多品種少量短寿命生産対応型生産システムの多目的最適設計
インデックス:生産設備設計立上期間	2week	1week	4日	2日	半日(データ入力のみ)
知能デバイス					
ハンド	専用ハンドによる固定構造・固定動作(単一工程) 固定構造・固定動作 オフラインでのハードデバイス調整	専用ハンド+チェンジャによる複数工程対応 固定構造・固定動作 オフラインでのハードデバイス調整	プリセット型調整ハンド+チェンジャ(複数工程対応) プリセット位置(複数)での調整構造 オンラインでの間隔調整	間隔調整型ハンド+チェンジャ(複数工程対応) 部品ごとの間隔パラメータ適応 オンラインでの間隔調整	可変構造型ハンド(複数工程対応) 立体的な可変構造 駆動方法の習熟
インデックス:作業サイクルでの延べハンド数	100	100	50	25	5
アクチュエータ	モータ+減速ギア 独立した構成要素	モータ+減速ギアの小型化 独立した構成要素 小型モータ、中空モータ 小型ギア(ハーモニックドライブなど)	モータ+減速ギアの小型化(現在形態の進化形) 独立した構成要素 磁性配向の最適化によるモータの小型化 小型ギア(ハーモニックドライブなど)	モータ、減速ギアの複合化による小型化 複合要素が複合した小型機構 磁性配向の最適化によるモータ機能の小型化	機能性駆動デバイスによる小型・大出力化 複合要素が複合した小型機構 機能性デバイスによる直接駆動機構
インデックス:サイズ(現在を100)	150	100	80	50	10
センサ	ON/OFF型状態検出 規定状態のみの検出 光電センサなど	ギャップ量等の定値検出 ギャップ、シフト量検出 距離センサ、2次元ビジョンセンサなど	立体的状態検出 空間状況検知 3次元ビジョンセンサ	立体的状態検出のリアルタイム化 時空間状況検知 リアルタイム3次元ビジョンセンサ	複数センシング信号からの習熟型状態検出 複数センシング信号からの習熟型状況把握 可変構造型センシング
インデックス:単一センサでのセンシング可能状況数	1	5	10	20	50

(1) システム

①産業ロボット分野の特徴

産業ロボットは、人工的な環境下で動作するため、環境構造化の恩恵を受けやすいといえる。工場内職制に根ざした小集団活動における改善提案も環境構造化に寄与し、日本型工場経営として長らくこれはうまく機能してきた。しかしながら、近年の市場競争環境の要請による多品種変量生産かつ製品の短寿命化に対応するためにはセル生産方式が有効との認識が一般的となり、さらには少子高齢化による就業人口の減少傾向によりヒト・セルからロボット・セルへの移行が注目を集めている状況にあっては、生産設備を頻繁に作り変え、したがってより短期間でフル生産を立ち上げる必要に迫られている。しかしながら、ロボットはそのような新しいパラダイムに寄与すべき頼みの存在となるべきものであり、メカ系、電気回路系の改良に支えられロボットの高速度高精度化は進展しつつあるものの、ロボットの立上作業は旧態依然として時間を要するし、複雑な作業工程（例えば集積された部品箱からのピンピッキングを伴うキッティング作業や組立て作業など）へのロボット適用は進んでいない。これは今後の情報処理系を中心とするブレークスルーへの期待が高まっていることを示唆している。

一般的に、ロボットの情報処理系は、(1) 感覚情報処理系、(2) 環境理解・行動計画系、(3) 運動制御系の3つのサブシステムに分けることができる。感覚情報処理系は視覚、触覚などの各種センサで得られる環境データからその特徴量を抽出し、運動制御系は与えられた指令に沿って、各種アクチュエータを動かし、環境に対して働きかけを行う。これら2つのサブシステムを結ぶものとして、感覚情報処理系からの出力をもとに、環境に関するモデルを構築あるいは修正し、そのモデルに基づいて目的遂行のための行動計画を立案する環境理解・行動計画系がある。

産業ロボットでは作業速度が重要で、ひととおりの繰り返し作業の実行時間のことをタクトタイムと呼んでいる。また、作業中に発生する無数の明らかではない原因による生産停止のことはチョコ停と呼んでいる。なによりロボットが作業を開始する前には、ロボットの作業計画を立てた上で、ロボットの具体的な動作軌道を、経由点を含めてロボットに教え込むという教示作業が行われてきた。そこでは、タクトタイムを短くすること、チョコ停をなくすこと、教示時間を短くして生産設備としての立上時間を短くすることは当然の命題とされ、各情報処理系に対して人手による知識集約的努力が注ぎ込まれることによって解決がなされてきた。

②従来（技術分野の歴史的流れ）と現在の状況と問題点（課題）

上述のようなロボットの情報処理系のうち、従来の行動計画系は、設計者が想定可能な状況に対応する行動パターンをあらかじめ教えることで実現されていた。そのため、想定された状況には対応できたが、それ以外の状況が発生するとロボットは停止

するか、あるいは誤った動作を続けるという問題が生じていた。例えば、ワークを掴もうとするとそこにワークが無くハンドが空を切った、ワークの初期位置がずれていたため誤った姿勢で掴んでしまった、あるいはワークとハンドをぶつけてしまった、ワークの形状が規格外であったのでつかみ上げる途中でハンドがすべりワークを落としてしまった、というような場合に、その状態を認識してやり直す、停止する、掴みなおすことができず、その後の作業を継続できないなどの障害が発生していた。環境の変動や突発事象が生じた場合に対応するための行動パターンは非常に多くあるが、実際に教えることができる行動パターンは、その一部分に限られており、これはフレーミング問題と呼ばれ、実世界の環境下で行動できるロボットをこの方式で実現することは非常に困難である。また、近年では、センサデバイスやセンサフィードバックの発達により、当初想定していなかった環境の変動や突発事象が生じても、簡単な場合であれば、それに対応できる行動を実現できるようになり、教え込みの手間が少しは軽減されるようになったが、ロボットの動作の基本はあらかじめ教えられた行動パターンである。さらに、ソフトコンピューティング、機械学習などの学習アルゴリズムやサブサンプリングアーキテクチャに代表される創発アルゴリズムを用いたロボットでは、あらかじめ埋め込まれた行動パターンを組み合わせ、未知の状況に対応できる行動パターンを生成し、この問題をある程度解決できることが報告されているが、どのような状況に対応可能かという適応範囲が明確に示されていないため、汎化性という観点からは改善の余地がある。

③近未来（あるべき姿）

環境変動・突発事象に対応するためには、あらかじめ教え込まれた対処行動のみならず、想定外の状態を認識し、事前に教えられた知識(数学モデル、事例テーブルなど)から新たな行動パターンを再生成して、教えられていない状況に対しても、より対処できる確率を高めるための行動計画アルゴリズムの確立が必要であり、そのベースとなるのは、上で述べた学習に基礎をおく行動計画知能である。あらかじめ教え込まれた対処行動は例えば事例テーブルにより記述される。事例テーブルはセンサ情報値により表現される「場面」と、その場面でのとるべき「行動パターン」の組み合わせを数多く列挙したものである。例えば、ワークのつかみそこねの状態をセンサで検知し、どのようにやり直せばよいのかという行動を組み合わせるのである。このとき学習とは事例の追加、あるいは個々の事例の修正である。さらに進んだ学習においては、ロボット自身が、事例が足りていないことを検知し自律的に事例を事例テーブルに追加すること、あるいは事例を自律的に修正することが自動的に行われる。

このような知能は環境変動・突発事象への対応を第一の目的としているが、その副次的メリットとして、学習の結果得られる作業の熟達によるエラーの予防や動作の高速化も合わせて期待される。さらに、次のステップとして、ロボット自身による自律

的な問題解決に向け、事前知識も活用しながら、能動的に仮説を立てて動作の建て直しを可能とするための行動計画アルゴリズムも長期的な課題として挙げられる。

④産業用ロボットの未来（理想）

時々刻々変化する環境の中で、その環境を認識、理解し、与えられた目的達成のために、その環境に適応した行動計画を立案し、実行する自律型ロボットでは行動パターンはその環境に応じて再生成される必要がある。よって、このロボットの行動計画知能は、その情報処理方式に応じて大きく二つに分類される。一つは、感覚情報処理系の出力をある一定のルールに従って処理し、行動パターンを生成するものであり、他方は感覚情報処理系の出力を過去の経験の蓄積である記憶系との相互作用を通して処理し、行動パターンを生成するものである。前者は生物の先天的行動（定型行動）における情報処理に対応し、上で述べたセンサフィードバックによる動作の適応はこの範疇に属する。後者は学習に基礎をおく後天的行動における情報処理に対応し、上で述べたソフトコンピューティングや機械学習による動作の学習・習熟はこの範疇に属する。今後、高度な作業機能を持つ自律型ロボットの実現においては、後天的行動を模擬できるような環境理解・行動計画系の機能の明確化とその数学モデルの提案が重要である。

（2）知能

①概観

産業ロボットの行動計画においては、それらロボットを含む生産設備の配置設計に始まり、ロボットの動作軌道計画、チョコ停に代表されるエラー発生時の復旧動作軌道計画に至るまでの課題を知能・デバイス・センサを統合的に利用して解決することが求められる。これらの計画は作業者の知見と技量に依存する知識集約作業であることから、従来まさしく知能化技術を用いることで、問題の解消に向けてのさまざまな取り組みがなされてきた。知能化には表象主義的記号処理AIが用いられ、あらかじめ想定された事象には対応できたが、それ以外の事象が発生すると停止するか、誤った動作を続けるかであった。停止の原因が想定していなかった事象の発生にあることがわかると新たに想定した事象として知識を追加するのであるが、想定して教えるべき事象が無限にあることはフレーミング問題と呼ばれ、解決の目途がない。これに対しヒト作業者は大局的指示を受けるのみで自律的に詳細な行動計画を生成して作業を開始しつつ環境変動や突発事象に対応しつつ作業に熟達する能力があり、しかもこの能力は生産活動のロバスト性に大きく寄与している。今後はロボット知能にこうしたロバスト性を発現させることが重要となる。

つまりファクトリオリエンテッドロボットにとって重要な課題の一つは、すばやくしなやかな自律的行動の実現である。本報告ではこれを「ラピッドオートメーション

知能」と呼び、ロバスト知能として取り上げることにする。ラピッドオートメーション知能は、エラーリカバリ知能、動作の習熟知能、ヒト・ロボット協調知能の3つから構成される。以下の各節でそれぞれについて述べる。

②エラーリカバリ知能

(a) 従来

従来、エラー発生時にロボットが停止した場合、作業員への通知が行われ、熟練作業員レベルの復旧作業員の到着を待っていた。これは生産性の大きなロスとなるため、エラー発生自体を減らす努力が続けられてきた。さらに従来は物理的コンタクトを行う作用デバイスが固定的な構造となっており、エラー発生時に行えるリカバリ動作は設計者による設計段階での作り込みに依存し、実現される動作もせいぜい退避、開放といったような単純なものであるなど限界があったことも大きな要因である。

近年、センサフィードバック制御の発達やソフトコンピューティングや機械学習といった情報処理アルゴリズムの発展により簡単な類推が実現し、想定範囲内で適応動作が可能となり、エラーの発生、初期教示・教示手直しの手間が少し軽減された。しかし学習とは言いつても、実生産においては学習後にパラメータを固定する方法が用いられており、生産を続けたからといって作業が熟達するわけではない。エラー発生時の作業員への通知は、携帯電話の動画など現代的な方法がとられるが復旧作業員の到着を待つ点では以前と違いはない。固定デバイス利用形態についても大きな変化はなく、その点からもエラーリカバリ動作の対応範囲が限定されている状況に大きな変化はない。

(b) 理想

理想的なエラーリカバリとは次のようなものであろう。一常に変化し続ける動的な環境のもと、的確に状況判断し、自身にとって未知の状況に遭遇しているとわかったときには原理・原則に立ち返った自律的な問題解決行動生成により、すばやくしなやかな行動で切り抜け経験を積んでいく。つまり事前に教えられた知識に基づく先天的行動と後天的に獲得した行動を場面に応じて組み合わせて繰り返すことでエラー状態からの復旧が完了し、その経験を蓄積することにより将来発生するエラーの予防も実現する。また、はからずも生産設備の機能の一部が失われているときには、次善の策として故障していない部分を使いまわして作業を再開し、最後は這ってでも動き続けるロボットとなる—このような理想的なエラーリカバリ知能を実現するためには、先天的行動と後天的行動のモデル化技術、完全自動復旧技術の開発が課題となる。一方こうした自動復旧動作を実現していくためには、さまざまな状況に対してより柔軟なセンシングが可能なように、リアルタイム3次元センサな

どを用いた高速な環境・状況把握技術が必要である。これに加え単純な距離検出アレイなどのローレベルなセンサからでも習熟的に状態把握可能な環境・状況把握技術が必要である。さらに、完全自動復旧における物理コンタクトを行う動作デバイス、例えば可変構造などにより複数の工程に対応できるフレキシブルな構造のハンドを開発するとともに、これを知的駆動するための体系的制御技術を確立していく必要がある。

(c) 近未来の技術課題

あらかじめ教え込まれたエラーリカバリ方法のみならず、作業状態を表すセンサ入力を用いて、事前に準備された知識（事例テーブルなど）に基づく簡単な類推を行うことで不具合解消を可能とする知能の開発が課題となる。そのため、教えていないことに対しても対処できる確率を高めるための行動計画アルゴリズムの確立が必要であり、学習に基礎をおくエラーリカバリのための事前知識に基づく行動パターンの再構成の実現が重要な課題である。例えばエラー時に観測されるセンサ状態とそのエラー時にとるべき行動パターンの組み合わせを数多く列挙した事例テーブルを事前知識として用意し、実際に行動しているときに観測されるセンサ状態を事例テーブルと照合する。このとき事例テーブルと一致した事例が示す行動パターンを実行することでエラー状態からのリカバリを目指す。完全に一致する事例がない場合には、似た事例間の行動パターンを内挿し、エラーリカバリを目指す。また、事例テーブルへの事例追加、および各事例におけるセンサ状態あるいは行動パターンの修正により学習が実現する。このような構成が学習に基礎をおくエラーリカバリのための事前知識に基づく行動パターンの再構成技術の一実現例である。目標とする知能レベルの定量化は難しいが、例えば次のように表現できる。エラー発生時にロボットが停止した場合、その場に居合わせたロボットの操作ができる一般作業員に対して復旧動作に関する意思決定支援・作業指示を行い、作業員が所為を施すことで復旧することが可能となるレベルである。一方、デバイスについては、本来の目的作業動作の発現に加え、リカバリ動作のための駆動が可能なデバイスの開発が課題となる。それは例えばエラーリカバリのための付加軸などを備えたプリセット形調整ハンドであり、これを工程に応じて複数用意しチェンジャーで切り替えて使用することにする。ただし、当面は知的な動作はあまり含まれず、規定の動作をいくつか組み合わせて実行するレベルが目標となろう。センサについてもエラーリカバリに用いるためのリアルタイム性の実現はさておき、立体的状態検出が可能な3次元ビジョンセンサなどの開発が必要となる。これらによりロバストインデックスとして直行率＝通過ワーク数／投入ワーク数を用いることにすると95%程度となることが予想される。

次のステップとして以下に述べるような項目が課題となる。まず、類推あるいは

事例テーブルにより不具合解決する部分を一部に残しつつ、ロボットが能動的に状況を予測し、あるいは仮説を立てながら、問題の解決に対し効果的と検定される行動をとる自律的行動パターンの生成技術の開発が課題となる。そこでは、エラーが発生してロボットが停止した場合、その場に居合わせたそれほどロボットの操作に詳しくない一般作業者が復旧開始を指示する程度で復旧動作が行われる知能レベルの実現が目標となる。具体的には、事例テーブルの例で説明した内挿でなく、外挿を用いて行動パターンを生成することになる。内挿は、2と4が入力されたら $(2+4) \div 2 = 3$ を出力するという考え方で、外挿は2と4が入力されたら6や8を出力するという考え方である。つまり外挿によれば当然有り得ないような行動も生成されるが、これが仮説を立てるということであり、有り得ない行動パターンは検定により棄却すればよい。効果があると検定される行動を実際に実行することでエラーからの復帰を試みるのである。一方、デバイスについては、立体的状態を高速に把握するリアルタイム3次元ビジョンセンサなど状態把握、解析を行うためのセンシング手法を進化させるとともに、ハンドについても自由な間隔調整機能およびこれを知的駆動する駆動手法の体系化を備えた間隔調整型ハンドを複数(ただし工程数以下)用意しチェンジャーで付け替えることを課題とする。これらによりロバストインデックスは、98%程度となろう。

③動作の習熟知能

(a) 従来

従来、全体の作業シーケンスは作業者が、思い描いた内容をロボット言語、ラダー言語を用いて表現し、ロボットに教え込んでいた。ロボット動作の改善については、作業者が物理的コンタクトを行う環境や対象物との現物あわせにより教示内容やハンドの治具を改良する現物合わせによる作業動作レベルの改善により実現されていた。研究レベルでは繰り返し動作により動作軌道を徐々に改良する Betterment Process や適応制御などのスキームが用いられたが、実用化レベルにはなかった。近年では、停止位置、作業軌道などの改善については、センサフィードバックキャリブレーション、制御補償方式の発達によって簡単なレベルであれば実用範囲内に入り始めたが、依然として大局的な作業動作の最適化は作業者の手作業による作業順序、動作軌道修正が必要となっている。また、物理的なコンタクトを行う作用デバイスについては固定的な構造となっており、実現される動作は設計時に規定した範囲のものであった。

(b) 理想

後天的行動獲得により、ロボット自体・ワーク・治具の経年変化を自動補正でき、さらに不具合を誘発する動作をも修正できるようにするため、ロボット自身による

自律的動作習熟技術を確立することが理想である。これにより、ワーク寸法公差から統計的に補正軌道を生成できるようになったり、ロボット動作の接続による作業において、目的に沿った作業品質を向上させたりすることが、ロボット自身が作業動作を繰り返すことで可能となる。

一方、さまざまな状況に対してより柔軟なセンシングを実現するためには、リアルタイム 3 次元センサを開発し、これを用いた高速な環境・状況把握技術が必要となる。さらに単純な距離検出アレイなどのローレベルなセンサを含む複数のセンシング信号からの習熟的な状態検出を可能としていく必要がある。また、未知の状況に対して対応可能な範囲を拡大するためには、物理コンタクトを行う動作部分に関して可変構造などのフレキシブルなメカニズムを開発するとともに、これを知的駆動するための体系的制御技術を確立する必要がある。アクチュエータについても機能性駆動デバイスによる小型大出力化により、軽量かつ低容積のアーム構造化技術の確立により、対応作業の拡大を図っていく必要がある。

(c) 近未来の技術課題

教示したロボット軌道の改善のための停止位置、作業軌道の微修正においては、センサフィードバックキャリブレーション、制御補償方式をさらに発達させ、完全に実用の範囲内とすることが重要な課題である。また、大局的な作業動作の最適化においては、作業支援ツールにより提示される解候補の指示により、その動作結果を調べる作業を可能とし、作業順序、動作軌道修正を楽に行えるようにする作業によるロボット動作習熟化の支援を実現することが重要である。

具体的には、例えば障害物となる物体ぎりぎりを通る軌道が取れるようにするために、経由点として指定されている教示点を作業者が微修正する際に、移動すべき教示点と移動させる方向が教示ツールにより提示され、作業者がこれに従って再教示作業を繰り返す例が有効であるといえる。したがって、上記機能を備えた教示作業支援技術を開発することが課題となる。

なお、ロボットの作業動作を改善するためには、デバイス面においても本来の作業目的とは異なる動作をする必要がある。よって、冗長自由度を持った動作機構構造の開発が課題となる。それは例えば、動作改善のために必要な間隔調整構造を持ったハンド機構などである。

センサについてもエラーリカバリに用いるためのリアルタイム性の実現はさておき、立体的状態検出が可能な 3 次元ビジョンセンサのなど開発が必要となる。また、アクチュエータに対してもモータ+減速ギアの小型化による全体構造の軽量化、それによる動作の高速化などを図ることが必要である。ロボストインデックスとして習熟化誤差 $= (1 - \text{改善直交率}) / (1 - \text{初期直交率})$ というものを定義することにする、上記課題の達成により習熟化誤差 $= 0.6$ 程度となることが予想される。

次のステップとして、ロボットが自動的に実動作を反復することで最適軌道候補が自動生成されるロボット動作習熟化の半自動化技術の実現が重要な課題となる。半自動化の意味は、作業者がロボット自動運転モードを停止させて（すなわち生産を止めて）習熟化モードに遷移させ、ロボットシステムからの作業提示に従って作業をすすめることで習熟化が進み、再び作業者がロボットを自動運転モードに遷移させるためという点にある。さて、この習熟化において上述のごとく機構系が高性能なものに変化しているため、動作速度高速化が進むとより高度な非線形制御技術が必要となってくる。このとき、非線形制御において精密な制御対象モデル同定が重要であるにもかかわらず実際は困難という問題がある。また、動的作業環境モデルの構築が困難という問題がある。実動作を繰り返すことでモデルが正確化しロボット動作が習熟する技術を確立することでこれらの問題の解決を目指す。これは動作加速度、動作速度、動作姿勢を観測することによりモデル同定を進め、モデルパラメータを徐々に正確なものにしていく考え方である。

一方、立体的状態を高速に把握することは動作の習熟に対して非常に効果的である。したがって、リアルタイム3次元ビジョンセンサなど状態把握、解析を行うためのセンシング技術の高度化が必要となる。また、習熟した動作を実際に実施するため、ハンドについても自由な間隔調整機能の開発と、これを知的駆動する体系的制御技術が必要となってくる。アクチュエータもついても、より細かい作業を高速で実行するためには軽量かつ低容積のアーム構造が要求されるため、モータ+減速ギアの複合化による小型化技術が必要となる。これにより対応作業の拡大も見込める。これらによりロボスティック習熟化誤差=0.4程度となることが予想される。

④ヒト・ロボット協調知能

(a) 従来

ここでいうヒト・ロボット協調は、実生産における協調作業だけを指しているのではなく、生産設備の構築・運用における負荷の分担という意味での協調をも考えている。その目的は、短寿命化する製品、環境負荷への配慮、グローバル化など、市場環境の激化に対応するための生産活動の垂直立ち上げに対する要求に応えるためである。

さて従来、生産設備設計における最初の段階では、設備・ロボットの配置は作業者が図面上で検討し、ロボットの動作軌道計画については設計者が手書き図面上で検討し、設計作業を進めていた。その次の段階でロボットに与えられる移動先位置、経由点、動作軌道が、やはり作業者により教え込まれていた。2次元図面上でわからない不具合、例えば立体形状の干渉に代表される不具合は模型あるいは実際に生産設備を作ってみて始めてわかることが多く、設計期間、立上期間を合わせて時間

とコストを要していた。

近年、ソリッドモデラを持つシミュレータにより、溶接・塗装・レーザ加工などロボット本体によるワークへの力学的作用がない工程において、実機が存在しない設計段階の机上検討による動作プログラミングが実用化されはじめている。しかしシミュレーションは生産設備とワークのモデル化が必要であることからその作成コストが問題となり、かつ、モデルと現物の違いを吸収するため現場でのティーチング作業は依然として不可欠である。全体の生産作業シーケンスについても、設計作業が思い描いた内容をロボット言語、ラダー言語を用いて表現することには従来と変化はない。ただし一部の範囲で自動軌道生成を支援するツールが実用化されはじめている。例えば完全無人の溶接ラインといったような限定された範囲では実際の生産設備を作る前に机上検討が可能となった。しかし多くの場合に、設備配置、軌道計画に作業者の知力が注がれている状況には変化がない。

(b) 理想

ロボットの自律的行動が理想的に実現すると、教示作業の様相は激変する。このためにはベルンシュタイン問題の解決・エナクティブ・アプローチの展開により、作業者がロボットに対し大局的な作業指示を行うだけで自律的に作業点、作業軌道が生成される自律的行動計画ツールの開発が課題となる。一方、理想的な設計では、低コスト・低環境負荷をも同時に考慮した上で多品種少量短寿命生産設備の最適設計が可能な生産設備と工程の自動設計も課題となる。これには、ヒト・ロボット作業分担指標の定式化技術の完成が必要である。

(c) 近未来の技術課題

まず、ワークに対する物理的作用を伴う組立作業を含む工程に対するオフラインティーチングの実用化が課題となる。その実現には、ヒト・ロボット協調システムの解析手法の確立、安全性・信頼性解析の確立、シミュレータシステムの高度化、センサフィードバックを高度化させ、実機が存在しない設計段階で机上検討による動作プログラミング技術としてまとめる必要がある。

また、ティーチングに要する時間と手間の減少を図るためには、設計支援ツールによる生産設備と工程の半自動設計が課題となる。そこでは作業点・作業軌道候補を教示作業者に提示するデバイス(HMI構築指標、HMD、レーザポインタなど)の検討を要する。

一方、生産設備の高度化・コスト最適化も重要である。これにはヒト・ロボット作業分担設計指標を明らかにし、それを設計支援ツールで活用することが課題となる。さらに、設備配置、工程計画についての最適化が必要である。これらの評価指標の定式化を行い設計支援ツールで活用する。ここではロボスタインデックスとし

て生産設備設計立上期間をとることにする。例えば、ある生産設備設計立上期間が4日となった場合には、ロバストインデックスは4日である。

次のステップでは、大局的設計支援ツールによる生産設備と工程の半自動設計の実現が課題となる。ロボットを用いた生産設備全般において、作業者の大局的作業指示により、自律的に作業点、作業軌道を自律的に生成する方式を備えたオフラインティーチング技術および同技術を応用した設計支援ツールの開発が求められている。これによりロボットに対して事細かに教示をする必要はなくなり、ティーチングに要する期間が激減する。同時にヒト・ロボット作業分担設計指標をより精密なものにし設計支援ツールに組み込む。設備配置・軌道計画の最適化についても、リーン生産の加速のため、複数の評価指標を同時に考慮可能な多目的最適化技術も設計支援ツールに組み込む。以上により、上で述べたロバストインデックス=4日の生産設備について、ロバストインデックスは2日にまで短縮される。

(3) 知能デバイス

これまで述べてきたようなリアルタイム3次元センサなどのハイレベルセンサ、および単純な距離検出アレイなどのローレベルなセンサ、力覚センサの開発が、エラーリカバリ、動作の習熟に対して有効となる。それと同時に、これらセンサと組み合わせることで所望する信号を抽出するための情報処理技術の開発が必要となる。

また、自動復旧においては、エラー状態にあるワークやロボット、動作デバイスに対し、物理的作用すなわち力をかけて物体を動かす操作を加えることでエラー状態からの脱出を試みることになる。したがって動作デバイスについて、例えば可変構造などにより、ワーク、周辺機器、動作デバイスの固着状態に対して力を加えられる構造を与えるとともに、これを知的に駆動するための体系的制御技術を開発する必要がある。

表3. 2. 3. 1 迅速教示生産支援知能 ロードマップ (概要)

	従来	現在(2006)	近未来(3年後)	近未来(5年後)	未来(理想、2025年以降)
システム: *システム概要 アプリケーション	Pick & Place 直線作業	曲線倣い作業 セル制御(周辺機器制御)	複雑形状嵌め合い作業	柔軟物組付け 人間と混在作業/共同作業	自律型ロボット
ロボット制御方式	位置制御、 力制限機能	コンプライアンス制御 付加軸/複数ロボット同期制御 双腕アーム	センサーFB	複数ロボット協調+センサーFB	センサーフュージョンFB (センサベース干渉チェック)
Index3 想定ユーザプログラム規模 (06年1000STEPSとして、推定)	500 STEPS (ロボット動作+周辺インタロックの み)	1000 STEPS (周辺機器制御)		3000 STEPS → 1500 STEPS (一部 異常復帰プログラム)	500 STEPS (非正常作業の自律動作)
知能 :~知能概要	[ロボット動作教示]	[周辺機器同期動作教示]	[オフライン教示支援ツール、 視覚補正]	[作業別ソフトモジュール]	[3次元環境認識&パソコンへ のデータ反映] [自律、教示レス]
:~ロボスト知能			[視覚による位置補正]	[センサ情報による作業修正、 人の動作判断(共存)]	[非正常作業(エラーリカバリ 等)の自動対応]
~~作業計画		オフライン(シミュレータによる) 配置、サイクルタイム事前検証	シミュレータによる最適配置計算 サイクルタイム自動検証		教示レス DBによる作業の勤・コソデータの 定量化
~~プログラミング	ロボット動作レベル記述言語	動作ライブラリ(定常作業) アイコンックプログラミング	作業レベル記述言語 (アプリケーション特化) ←	作業レベル記述言語 動作ライブラリ(異常復帰) ←	自動プログラミング (エラーリカバリの自動対応含)
~~位置教示(作業点教示) (障害物回避)	ティーチングペンダント	← オフライン干渉チェック 衝突検出停止	← オフラインベース自動障害物回避 経路生成	無線ティーチングペンダント センサベース自動障害物回避経路 生成(2D)	センサベースリアルタイム自動障害 物回避
~~微修正 ロボスト知能		絶対精度向上キャリブレーション 2D視覚による位置補正	3D視覚による位置補正	センサ情報による作業修正 (触覚、力等)	センサフュージョン(複数センサシン クロ)作業修正
Index3 教示時間(簡単組付け) 06年の教示時間を100として推定		80	100	80	50
デバイス : オンライン教示ツール	ティーチングペンダント	3ポジションイネーブルSW付ティー チングペンダント	←	無線ティーチングペンダント	音声教示装置、データグローブ等
オフライン教示ツール	パソコン (プログラミング、データ保 存)	パソコン (オフラインシミュレータ)	パソコン (3DCADデータ取り込 み)	パソコン (プログラムライブラリDB)	3次元環境認識装置 (パソコンへの環境取り込み)
センサ技術		2D視覚装置	3D視覚装置	力、接触センサ 代用特性センサ 人間侵入感知センサ(レーザ、視 覚)	センサフュージョン技術
データ処理技術		ロボット内データ転送インフラ (ORiN)	ベイジアンネット、多変量解析 (オフライン処理)	データ処理による 勤・コソ・ノウハウの定量化 (定型作業のノウハウ)	DBによる作業の勤・コソデータの 定量化と モデル構築 (非定型作業のノウハウ)

(1) ロボットシステム

①産業ロボット分野の特徴

この章では、組立セルのアプリケーションを想定する。従って、小型組立ロボットの技術の技術ロードマップである。溶接等の大型ロボットが得意とするアプリケーションは除かれている。

②現在の状況と問題点（現状と課題）を整理

小型ロボットのアプリケーションのほとんどが、部品の移載，Pick & Place（今後P & Pと記載）である。ロボットの動作もPoint to Point（Pt to P）、もしくは直線動作を主としており、制御方法は位置制御がほとんどであり、一部力制限機能等が適用されている。

最近では、シール材塗布等のアプリケーションも実用化され、その場合は、任意曲線における倣い作業がある。また、ロボットのみでなく、周辺機器の制御（ミニPLC機能）、付加軸もしくは他のロボットとの協調制御、さらに、双腕ロボットの制御が実用化されている。

小型組立ロボットのほとんどが位置制御であるため、その教示のほとんどは、プログラミングとティーチングペンダントによる位置教示で行われている。近年、パソコン（PC）上でプログラミング、動作確認を行うオフラインプログラミングも活用されつつあるが、その大きな技術課題として、3次元環境のPC上への取り込みがある。PC上でロボットの教示を行うためには、設備全体の周辺環境をPC上に入力しなくてはならないが、その入力工数が大きいため、オフラインプログラミング、自動経路生成等の実用化が進まない。設備設計における3DCADの普及が期待されているが、下記の問題がある。①量産製品設計での3DCADの普及に比べ、設備設計では3DCADの普及は進んでいない。（3DCADが高価、入力工数がかかる、データの再利用性が低い、等の理由が考えられる）②3DCADデータは、そのフォーマット（3DCADデータ）変換時誤差の問題があり（接合部分に大きなコブ、針が発生したりする）、その補正のために手動補正もしくは数百万円のツールが必要となる。③設備設計では現場で設備製作を行うことが多く、3DCADによる環境をそのまま信用していいかという疑問が残る。そのため、設備の3DCAD化に頼らない環境入力方法が大きな課題となる。

プログラミングにおいては、ユーザによるプログラミング（周辺設備とのインタロックを含む）によって行われている。定常作業のプログラミングについてはそのシーケンス等もわかりやすいため、一部ライブラリ化等も検討されているが、異常処理等の非定常作業については一部の上級プログラマにより実現されているのみで、ほとんどの工程では考慮されていない。そのため、チョコ停等が発生するとロボット退避等の操作をオペレータがマニュアル動作で行わせる等、異常復帰に時間がかかる等の課

題がある。

③そのあるべき姿をロボット知能の形で明らかにする（理想）

産業ロボット知能のひとつの理想とする方向は、人ができる作業をロボットが実現できることである。人間の作業は、位置だけでなく、周辺の環境認識、触覚、力、音等を利用して高度な作業を行っている。今後、位置制御だけでなく、他の感覚器（センサ）を用いて状態把握を行い高度な作業を行うことが期待される。

そして、複数のセンサを用い、自律的に作業計画を実行でき（教示レス、お膳立てレス）、また、なんらかの要因（ワーク寸法誤差大等）で作業が失敗したとき、自律的に復帰可能なロボットが、産業用ロボットの究極の形といえる。

但し、人間ができる作業を行えるように高度な知能を持つことは、産業ロボットにおけるひとつの究極の形ではあるが、実際に産業用ロボットがそのロボスタ知能化の方向に進むかどうかは疑問である。それは、現場で生産性を考えた場合、機械が得意な作業、人間が得意な作業があり、コスト的には無理に人間が得意な作業分野を自動化することは、センサ数のアップ、制御軸数のアップ、知覚機能のアップ等コストアップになるため、リーズナブルでなく、普及が進むとは思にくい。ある意味、人とは異なった機械の得意な分野（多くのデータの一括処理）、その作業にあった最適な機構等、知能とは別の方向に進む可能性があることも追記しておく。

④それをふまえて、産業用ロボットの技術開発課題（3、5年後）

但し、周辺の3次元環境認識、作業計画の立案、エラーリカバリ等の非定常作業の自動化は3、5年での広範囲での実用化は困難と考えが、研究レベルもしくは、アプリを特化した特殊なケースにおいて、一部実用化が期待される。その前段階として、触覚、力覚を利用し、柔軟物組付け、寸法精度の低いワークの組付け、複雑形状の嵌め合い作業の実現が期待される。

その触覚、力覚使うための作業ノウハウの蓄積、ノウハウの定量化が大きな課題である。また、安全機能を搭載し、人間との混在、協調した作業の実現が期待される。

(2) ロバストロボット知能

知能概観

教示方法は、ロボットシステム構成・制御方法に関連し、発達、発展する。

現状の教示のフェーズとしては以下の4つに分類できる。

- ① 作業計画 —— 工程設計、サイクルタイム検証、レイアウト確認。ここでの検証の精度が高いと、④の現場における微修正が簡単となる。
- ② プログラミング —— ロボットの作業手順の記述、周辺機器とのインタロック記述、付帯設備制御の記述等が含まれる。エラー発生時のリカバリ手順も通常ここで

記述される。

- ③ 位置教示 —— 作業点教示以外に、障害物回避を含む経路教示、視覚キャリブレーション等が含まれる。
- ④ 微修正 —— 現場での流動確認。作業確認、サイクルタイム確認、作業点の微修正、周辺機器とのやりとりの微修正等がある。

教示の簡易化については大きく3つに分けられる。

(a) 動作シーケンス (プログラミング) の簡易化

— 教示フェーズの②の簡易化

(b) PCのバーチャル環境で行うオフラインプログラミング

— 教示フェーズ①、③の簡易化

(c) 現場で行う動作の微調整の削減

— 教示フェーズ④の簡易化

(a) 動作シーケンス (プログラミング) の簡易化では、定常作業のプログラミングと非定常作業のプログラミングの2つに層別される。定常作業については、作業のライブラリ化、データベース化、アプリケーションの特定によるパッケージ化等により、現実的に進められる。一方、異常復帰等の非定常作業のプログラミングは、その事例が少なく、モデルの設定が困難であるため、実用化の可能性については議論の余地がある。実際、実工程では、非定常 (異常時) の想定がしにくく、プログラムの検証もしにくい等のため、非定常作業のプログラムは一部の上級ユーザーによってのみ行われているのが現状である。ロボットを停止させない、人と同じレベルで自動化するという、ロバスト知能の意味では、定常作業の繰返しの実行ではなくは、異常復帰等の非定常作業は、その状況把握、次の作業計画、動作プランといった、高度な知能を持った動作が必要であり、自律ロボット実現に極めて近いレベルの動作実現といえる。

(b) 教示フェーズ①と③は密接に関わっているため、オフラインプログラミングはその双方に関連する。オフラインプログラミングでは、構想設計時に工程設計、レイアウト構想、サイクルタイムを行う。当然、レイアウト構想、サイクルタイム検討時はその動作の概略のシミュレーションを行うため、動作教示はレイアウト構想と密接に関わる。そのオフラインプログラミングにおける最も大きな技術課題は、3次元環境のPC上への取り込みである。パソコン上に十分な環境を構築できれば、自動経路生成、自動レイアウト検証は技術的には十分可能と推測する。しかし、現状ではオフライン上でロボットの教示を行うためには、設備全体の周辺環境をPC上に入力しなくてはならず、現段階では、その入力工数が大きいため、オフラインプログラミング、自動経路生成等の実用化が進まない。(ロボットを中

心とした大体の環境入力行える、ロボットの配置、サイクルタイム検証までしか行われたい。) 近年、量産製品設計では、3DCADの使用が普及しているが、設備設計では3DCADの普及は進んでいない。(1) - (2)で前述) また、仮に、3DCADによる設備設計が普及したとしても、設備設計では現合で設備製作を行うことが多く、3DCADによる環境をそのまま信用して経路を作成していいかという疑問が残る。従って、視覚、レーザ等により周辺環境がパソコン上に簡単に取り込める技術が必要となる。それが可能となれば、パソコン上で、オフラインによる最適配置、最適経路生成、障害物回避が、実用化・普及すると考える。①で述べた異常復帰等の非定常作業の自動化(作業計画)はパソコン上でオフラインで先に実現されると予想される。

- (c) 作業の微修正は、教示というより、制御方法に大きく関連する。現在は、ロボットは位置制御をベースとしており、そのため、その微修正は、視覚装置が用いられている、現在は、一部3次元認識の視覚装置が実用化されているが、ほとんどが2次元ベースである(3次元認識でも奥行き方向の精度が低い)。今後、カメラ等のコストダウン、機能アップにより、3次元認識の普及が進むと期待される。一方、嵌め合い作業、柔軟物組付け、組付け品質向上では、位置制御だけでは困難な作業の自動化が期待されている。その方法として、力覚、触覚等が昔から議論されているが、普及に至っていない。その理由のひとつが、それぞれの作業に対して、その目標値が不明確な点である。たとえば、人間は嵌め合い作業の時、その力を感じながら、手の動き、力加減を調整して行っている。ところが、その力がどのようになるどのような動きをするばいいか、定量的に示せない。作業のノウハウ(勘・コツ)が全く定量化されていない点である。今後、ロボットによりその作業データを収集し、その成否結果とリンクさせることにより、作業ノウハウの定量化が進むことが期待される。それにより、より高度な知能を持った(ロバストな)ロボット作業及びその教示方法の実現可能と推測する。

ロバスト知能

先に述べた3つの課題、(i) 異常復帰等非定常作業の実現 (ii) 周辺環境認識、(iii) 作業の微修正、は、いずれもロバスト知能といえる。

すなわち、(i) 異常復帰は、失敗作業に対してのロバストな知能、(ii) 周辺環境認識は、3DCADには実現されない(誤差がある)実環境を認識するロバスト知能

(iii) 作業の微修正 は、寸法精度が低いワーク、位置決め精度が低い治具を吸収するロバスト知能 といえる。

(3) ロバストロボット知能デバイス

ロバスト知能を実現するデバイス、ツールとして、①プログラミングツール(オフラ

インツール)を含む。②センサ技術、③データ処理技術 の3つに分類される。

①プログラミングツール

大きくは、ティーチングペンダントとオフラインプログラミング装置（パソコン+シミュレータ）がある。

ティーチングペンダントは現場での位置教示、微修正、テスト動作に用いられるツールである。可搬性を向上した無線式ティーチングペンダントの実用化が検討されている。また、将来的には音声もしくはデータグローブ等の補助入力装置の実用化も期待される。

オフラインプログラミング装置では、その装置より、そこに周辺環境を取り込む3次元環境認識装置（オフライン実行可）の実用化が自律型ロボットの実現に重要となる。

②センサ技術

現在は、位置認識が中心のため、視覚装置が重要なデバイスとなる。今後、複雑な作業の実現のために、安価で、使いやすい接触センサ、力センサの実用化及び、人間協調のために、人の侵入を感知するセンサの実用化が大きなキーとなる。

③データ処理技術

ロボットの取得したデータから、作業ノウハウの定量化を実現するためには、大量のデータから特徴を抜き出すためのデータ処理の手法が重要となる。データマイニング、多変量解析、ベイジアンネット等の活用により、作業ノウハウの定量化が実現されることが期待される。

表 3. 2. 4. 1 セル生産支援視覚制御知能 ロードマップ (概要)

	従来	現在(2006)	近未来(3年後)	近未来(5年後)	未来(理想、2025年以降)
システム: *システム概要	完全人型セル生産システム ・視覚なしロボット	簡易組立自動化セル生産システム ・スカラーロボット用視覚 ・XYZロボット用視覚 セル生産の工程の中で、一部をロボットが行う(工程内の動作がロボットだけで完結する)。	ピッキング自動化セル生産システム ・多関節ロボット用視覚 ・山積み部品用ロボット用視覚 セル生産の部品のピッキング工程をロボットが行う(工程内動作がロボットだけで完結する)。	ロボット協調型セル生産システム ・ロボット協調用視覚 ・ピッキングロボット用視覚 一部の工程をロボットが担当し、他のロボットと協調して、セル生産を実現する(各ロボットにセンサが有り、ロボット間の協調動作で、工程作業を実現)。	人協調型セル生産システム ・多能工型ロボット用視覚 ・双腕ロボット用視覚 ・作業用ウェアラブル視覚 複数の工程を1つのロボットが担当し、人間と及び他のロボットと協調して、セル生産を実現する。
知能: セル生産支援視覚制御知能概要	視覚なしロボット	・整列部品認識 ・固定形状認識 ・モデル教示型認識 ・照明条件の安定した環境での認識 ・高精度キャリブレーションを前提とした認識	・山積み部品認識 ・光沢金属ワーク認識 ・簡易キャリブレーションを前提とした認識 ・2D-CADデータによる部品登録	・バラ積み部品認識(ピンピッキング) ・曲面を含む光沢金属ワーク認識 ・不定形状(ハーネスなど)部品認識 ・3D-CADデータによる部品登録 ・セルフキャリブレーション ・ロボット間の協調を行うための通信プロトコル(ワーク状態の記述、環境状態の記述)	・CAD/CAM情報、セル構造情報、過去生産情報を生かした任意形状も含む部品の完全認識(透明、鏡面、柔軟変形物体) ・作業者の手・腕の動き認識 ・作業者の動作認識 ・キャリブレーションレス ・エージェント型ロボット通信
対象物認識知能 →認識する対象物の、モノそのものの複雑度、重なりなど置かれている複雑度に影響されずに認識する知能	単品ワーク(平面だけで認識できる、拡散反射成分が主な物体) 単独で置かれた状態	単品ワーク(直線で構成され、拡散反射成分が主な物体) トレー整列状態	単品ワーク(直線や曲線で構成され、輪郭がはっきりしている、拡散反射成分が主な物体) 通い箱内で積み重ね状態	複数ワーク(直線や曲線で構成され、光沢も含んだ物体) 通い箱内でバラ積み状態	複数ワーク(透明/鏡面の物体、柔軟変形物体) バラ積み状態
Robustness Index(セル生産で扱える部品の中で、認識できる部品点数の割合)	5%	10%	30%	75%	100%
環境ロバスト知能 →視覚が認識する空間の大きさ、背景や照明条件の複雑度に影響されない知能	背景均一 専用照明	背景にテクスチャ有り 専用照明	背景にテクスチャ、奥行きあり 専用照明	背景にテクスチャ、奥行きあり 一般照明下でOK	複雑背景 一般照明下でOK
Robustness Index(認識空間の大きさと奥行きも含めた認識精度)	100mm×100mmの平面で、 1mm	100mm×100mmの平面トレー 0.5mm	100mm×100mm×100mmの箱 0.1mm	500mm×500mm×500mmの箱 0.1mm	1000mm×1000mm×1000mmの空間 0.1mm
人・ロボット協調知能 →人が部品をティーチングを簡単化する知能。将来的には最初にマスターとなる人が組み立てものをロボットが自己学習するイメージ	部品現物を提示して、部品を登録	部品現物を提示して、部品を登録	部品のCADを入力して、部品を登録	部品のCADを入力し、部品を登録。その後該当部品の現物から、特徴情報を抽出する。	人が部品を組立るを見て、情報を収集し、不足情報は、知識などを使って補って統合処理を実現する。
Robustness Index(ティーチング時間:ある製品を組み立てるのに必要な部品全ての登録時間)	1日	半日	2時間	1時間	30分
デバイス: セル生産支援視覚制御知能デバイス	レーザー方式光切断 ON/OFFセンサ	モノクロ2次元視覚(単眼)	カラー3次元視覚(複眼) ハイダイナミックレンジカメラ LED高輝度照明	カラー3次元小型カメラ(協調型) 高解像度カメラ アクティブ方式+パッシブ方式などハイブリッドカメラ(複合的な情報(高さ画像等)を収集するカメラ)	小型3次元+動画認識デバイス 網膜撮像デバイス

表 3. 2. 4. 2 セル生産支援視覚制御知能（詳細）

	従来	現在(2006)	近未来(3年後)	近未来(5年後)	未来(理想、2025年以降)
システム：*システム概要	完全人型セル生産システム ・視覚なしロボット	簡易組立自動化セル生産システム ・スカラーロボット用視覚 ・XYZロボット用視覚	ピッキング自動化セル生産システム ・多関節ロボット用視覚 ・山積み部品用ロボット用視覚	ロボット協調型セル生産システム ・ロボット協調用視覚 ・ピッキングロボット用視覚	人協調型セル生産システム ・多能工型ロボット用視覚 ・双腕ロボット用視覚 ・作業用ウェアラブル視覚
セル生産の工程の中で、一部をロボットが行う(工程内の動作がロボットだけで完結する)。		セル生産の工程の中で、一部をロボットが行う(工程内の動作がロボットだけで完結する)。	セル生産の部品のピッキング工程をロボットが行う(工程内動作がロボットだけで完結する)。	一部の工程をロボットが担当し、他のロボットと協調して、セル生産を実現する(各ロボットにセンサが有り、ロボット間の協調動作で、工程作業を実現)。	複数の工程を1つのロボットが担当し、人間と及び他のロボットと協調して、セル生産を実現する。
知能： セル生産支援視覚制御知能概要	視覚なしロボット	・整列部品認識 ・固定形状認識 ・モデル教示型認識 ・照明条件の安定した環境での認識 ・高精度キャリブレーションを前提とした認識	・山積み部品認識 ・光沢金属ワーク認識 ・簡易キャリブレーションを前提とした認識 ・2D-CADデータによる部品登録	・バラ積み部品認識(ピッキング) ・曲面を含む光沢金属ワーク認識 ・不定形状(ハースなど)部品認識 ・3D-CADデータによる部品登録 ・セルフキャリブレーション ・ロボット間の協調を行うための通信プロトコル(ワーク状態の記述、環境状態の記述)	・CAD/CAM情報、セル構造情報、過去生産情報を生かした任意形状も含む部品の完全認識(透明、鏡面、柔軟変形物体) ・作業者の手・腕の動き認識 ・作業者の動作認識 ・キャリブレーションレス ・エージェント型ロボット通信
対象物認識知能 →認識する対象物の、モノそのものの複雑度、重なりなど置かれている複雑度に影響されずに認識する知能	単品ワーク(平面だけで認識できる、拡散反射成分が主な物体) 単独で置かれた状態	単品ワーク(直線で構成され、拡散反射成分が主な物体) トレイ-整列状態	単品ワーク(直線や曲線で構成され、輪郭がはっきりしている、拡散反射成分が主な物体) 通い箱内で積み重ね状態	複数ワーク(直線や曲線で構成され、光沢も含んだ物体) 通い箱内でバラ積み状態	複数ワーク(透明/鏡面の物体、柔軟変形物体) バラ積み状態
キャリブレーション		高精度キャリブレーション	3次元高精度キャリブレーション 多眼キャリブレーション	セルフキャリブレーション	キャリブレーションレス
部品認識	パターンマッチング	正規化相関	セグメントマッチング	点群マッチング	変形推定マッチング
環境ロバスト知能 →視覚が認識する空間の大きさ、背景や照明条件の複雑度に影響されない知能	背景均一 専用照明	背景にテクスチャ有り 専用照明	背景にテクスチャ、奥行きあり 専用照明	背景にテクスチャ、奥行きあり 一般照明下でOK	複雑背景 一般照明下でOK
カメラ		モノクロ2次元視覚(単眼)	カラー3次元視覚(複眼) ハイダイナミックレンジカメラ	カラー3次元小型カメラ(協調型) 高解像度カメラ アクティブ方式+パッシブ方式などハイブリッドカメラ(複合的な情報(高さ画像等)を収集するカメラ)	小型3次元+動画認識デバイス 網膜撮像デバイス
キャリブレーション		座標軸キャリブレーション	ワールド座標キャリブレーション	セルフキャリブレーション	キャリブレーションレス
照明	直接光照明 ライン照明	面発光照明 可視光/紫外光/赤外光照明 平行光照明 ドーム/リング照明	高輝度照明 パターン照明 集光照明	最適化照明	
人・ロボット協調知能 →人が部品をティーチングのを簡単化する知能。 将来的には最初にマスターとなる人が組み立てものをロボットが自己学習するイメージ	部品現物を提示して、部品を登録	部品現物を提示して、部品を登録	部品のCADを入力して、部品を登録	部品のCADを入力し、部品を登録。その後該当部品の現物から、特徴情報を抽出する。	人が部品を組立るを見て、情報を収集し、不足情報は、知識などを使って補って統合処理を実現する。
部品登録	現物画像登録(パターン)	現物画像登録(エッジ)	CADデータ(セグメント)登録	CADデータ(曲面)登録 面とセグメントのマージ登録 登録データと現物テクスチャーのマージ登録	CADデータから歪み推定
知識	現物情報	不具合(エラー)情報	不具合(傾向)情報	環境情報	工程情報
通信	センサ単体	センサ-I/O間通信(RS-232Cなどのシリアル通信) 専用LAN通信(DeviceNetなど)	専用LANのイーサネット化(FL-net)	汎用LAN(データ通信系)と専用LAN(制御系)の融合	WANとの接続 エージェント通信(不足知識の探索)
作業者認識	-	ID認識	端末認識	バイOMETRICS(個人認識)	モーションキャプチャー(動作認識)
デバイス： セル生産支援視覚制御知能デバイス	レーザ方式光切断 ON/OFFセンサ	モノクロ2次元視覚(単眼)	カラー3次元視覚(複眼) ハイダイナミックレンジカメラ LED高輝度照明	カラー3次元小型カメラ(協調型) 高解像度カメラ アクティブ方式+パッシブ方式などハイブリッドカメラ(複合的な情報(高さ画像等)を収集するカメラ)	小型3次元+動画認識デバイス 網膜撮像デバイス

(1) システムの特徴

①セル生産の特徴と視覚制御の重要性

セル生産とは、多品種少量生産に強みを発揮する製造業における生産方式の一つであり、一人屋台方式やU字ラインなどとも呼ばれている。一人または複数の作業員によって、多種類の製品の生産に関わる準備・組み立てから検査まで、一貫してフレキシブルに対応することであり、人の役割が非常に重要な生産方式である。

人が受け持つ役割は、組み立てという直接作業に加え、段取り替え時の部品や治具の準備、組み立て作業時の確認・判断作業、様々な製品や作業工程に対応できるだけの能力の習熟など多岐にわたる。

このように人中心の生産方式であるため、多品種少量生産に適しており、在庫の圧縮や必要最小限の設備による高効率生産ができるという効果がある。一方、作業員によって工数や質にばらつきが発生したり、多能工化するための習熟に時間を要したりする課題もある。

人は、情報の約80%を視覚から得ており、セル生産においては、上記効果を最大化するためにも、課題を解決するためにも、人間の目と脳に変わる視覚制御知能を持ったロボットを導入することが重要である。

②セル生産における視覚制御の課題

ロボット用の視覚は、1980年代から研究されているが、ここ最近まで実用化に至っていなかった。しかし、CCDやCMOSといった撮像デバイスの技術進化、認識処理を主に司るコンピュータ技術の飛躍的進化によって、ばら積みされた部品をロボットでつかむことが実用レベルで達成されようとしている。

ただし、そのレベルは、限定された条件で実現されているものであり、産業分野に視覚制御知能を持ったロボットを普及させるためには、さらなる能力アップや適用アプリケーションの拡大が重要であるし、なによりも重要なのは、ロボットの導入によって、今まで確立してきた現場の高い生産性を落とすことなく、積極的に生産性をあげる方向に生かすことである。特にセル生産方式においては、習熟した作業員の高い能力が、多品種少量生産において極めて高い生産性を実現しており、ロボットの導入によって、その生産性が低下することはあってはならないことである。

③セル生産における視覚制御のあるべき姿

習熟した作業員を完全に置き換えるロボットを実現することが、今後数十年では技術的に困難という前提にたてば、人の能力を最大限に生かすロボットの実現が必要であり、人とロボットの協調によって、その生産性が上がり続けるシステムを構築することが重要である。さらには、生産現場の強みである自律的改善行為にも貢献していけるシステムが究極の形といえる。

現実的には、ロボットの技術進化の状況をふまえ、その実力が生かせる適用アプリケーションを決め、適用できるところから導入し、そこでの課題をフィードバックすることで、生産現場の生産性向上とロボットの技術進化を図っていくことが最適な進め方と考える。

(2) 知能

①知能の概要

セル生産において、人の目の果たす役割は、作業員自身として、複雑で変動要素の多い環境においてもその影響を受けることなく、セル生産で扱う様々なものを正しく認識できることである。また習熟した作業員の動作を非熟練者が見て覚えることも、人の目の重要な役割である。

つまり、次の3つの知能が重要であると考えられる。

(a) 対象物認識知能

- (i) セル生産で取り扱われる様々な部品、組み付け位置あるいは組み上がった製品の仕上がり状態を正しく認識する知能。
- (ii) 特にセル生産においては、光沢のある成型品、透明なプラスチック部品、ケーブルなど柔軟な部品の認識知能が必要。
- (iii) また部品が置かれている状態も、整列してなかったり、重なっていたり、ばら積みされていたりと規定されていない状態で、一つ一つの部品認識が必要。

(b) 環境ロバスト知能

- (i) セル生産は、屋台方式やU字ラインのように比較的狭い空間に様々な部品や治具が配置されおり、また作業場所は、平面的ではなく立体的であることが特徴である。
- (ii) そのような空間において、人は対象とする物体だけを抽出して探し出すことができ、そのような知能がロボットの視覚制御知能として必要である。
- (iii) また、セル生産はレイアウトや工程の組み替えの変更が多く、照明のあたる方向が変わったり、影ができたりするが、それらの影響を受けることなくロバストに認識する知能が重要である。

(c) 人・ロボット協調知能

- (i) セル生産方式は、高い生産性を維持するために、重厚な作業指示書は存在せず、人が柔軟に作業手順を考え、判断し、習熟しながら作業している。特に段取り替えにおいて、その能力を発揮している。
- (ii) この作業を機械化するためには、ロボットが部品を認識するのに必要なティーチング知能や、作業員が作業している手・腕あるいは体の動きなどを認識して作業員の動作を学習する知能が必要となってくる。

②対象物認識知能

ロボットが認識すべき対象物は様々であるが、現状、認識できる対象物は、単純な形状のつやなしプラスチック部品や、ナットなど直線成分で構成された拡散反射物体である。しかも専用トレーやパレットなどに整列して置かれている必要がある。

今後は、ステレオカメラなど画像を複数方向から撮像するセンサの活用と、画像のエッジ情報をセグメント化するアルゴリズムの進化により、物体の立体形状を計測することができ、曲線も含むある程度のエッジ情報があれば物体形状を類推できる。その結果、重なったり、ばら積みされたりした物体の認識もできるようになる。

セル生産で扱う部品や製品は、高精度のものが多く、部品の認識も高い精度で行う必要がある。視覚センサに使われる撮像素子は時代とともにその解像度はあがっているが、0.1mm以下の精度での認識には、ステレオカメラなどパッシブ方式と、レーザスリット光照射によるレンジファインダなどアクティブ方式の併用が必要と考える。高精度を実現するうえで、センサの分解能だけではなく、そのセンサが設置されている位置と対象物の位置の関係を知る必要があり、そのためにキャリブレーション技術が必要となる。現状は、あらかじめ治具に印刷された規定のパターンを視覚センサなどに見せることで、その位置関係を計算しているが、精度が高くないのと、キャリブレーションそのものの作業に手間がかかっている。今後は、キャリブレーションのアルゴリズムの改良により、精度が高まるのと手間が減っていく。将来的にはシステムそのものが自律的に環境を認識し、キャリブレーションレスで高精度な位置合わせができるようになるかと予測する。

また、視覚センサに搭載されている撮像素子のダイナミックレンジは年々拡大し、暗い画像からハレーションを伴う明るい画像まで一様に処理ができるのと、ハイパワーなLEDなどの光を対象物に積極的に照射したり、パターンを持った照明を投影したりすることで、対象物の特徴を際立たせることが可能となり、認識できる物体の表面状態も拡大する。

理想的には、鏡面反射があつたり、透明であつたり、形状も固定でなくケーブルなど柔軟性を持っていたり、あるいは人の手や腕など図面では表現しない対象物が、どんな状態に置かれていても、どんな動きをしても、人間よりも速く正確に認識できることである。

③環境ロバスト知能

視覚センサなどで物体を認識する際、その視野には対象となる物体のみならず、他の部品や治具が写ったり、模様のある背景やなんらかの物体の影が写っていたり、認識の妨げとなるものが多く存在する。またセル生産の設置環境はラフな場合が多く、朝と夜とで部屋の明るさが変わり、レイアウト変更などによる周囲環境の影響

を受けやすい。

そういう環境変化に対しても安定して物体を認識することが必要であるが、現状は、必要とする物体の認識精度の1000倍くらいの平面視野内で、専用の照明を設置して安定した環境で、特定の形状のものだけが認識できるレベルである。具体的には平面トレーに整列して置かれた単純形状部品をスカラーロボットや直行型ロボットに搭載された2次元視覚センサで位置認識している状態である。

今後は、ある程度の安定した照明条件のもと、奥行きも伴った立体空間内の立体物を認識できるようになると、その視野・空間内に対象物以外のものがあったとしても認識できるようになる。将来的には、認識できる空間は、セル生産における作業者の作業領域くらいに拡大し、その空間内にある部品や製品を照明や複雑な模様の影響を受けることなく認識できるようになる。ただし、ここで言う照明の影響を受けないとは、現場で特別な照明を用意する必要がないという意味であって、視覚センサに最適な照明条件を作り出すデバイスが組み込まれた一体型センサは、その一つの実現手段としてあり得る。また自律的に環境変化に対応するため、動画認識や必要な情報だけを抽出する網膜撮像デバイスなどの登場が期待される。

④人・ロボット協調知能

ロボットに物体を認識させるには、対象物の情報をあらかじめ登録したりティーチングしたりする必要がある。

現状は、対象物の穴位置やエッジ位置など図形的特徴をティーチングしたり、パターンマッチング手法で物体の位置サーチや認識したりしている。対象物を視覚センサに見せて、画像そのものを登録する手法が一般的である。しかし、セル生産で扱う部品の種類は非常に多く、段取り替えのたびに全ての部品を登録し、正しく認識するためにチューニングするには1日仕事となるため、現実的には一部の部品、工程に限って、ロボットが採用されている状態である。

セル生産で扱う部品の外形形状はCADで生成されていること、および物体認識の手法がエッジベースの処理になることから、今後はCADデータから部品の登録が可能となり、ティーチングの手間が大幅にされる。

人とロボットの協調は、ロボットが部品を認識しハンドリングするためにだけあるのではなく、セル生産の最大の特徴である、人が考え、判断しながら作業する工程においても協調し、支援することが将来的には発生し、重要な役割を担うと考える。たとえば、習熟した作業者が製品を組み立てていく手順を、ロボットに搭載された視覚センサなどが見て、システムが学習し、その学習内容を非習熟者にフィードバックして正しい作業手順を指導することも可能になると考える。また習熟者に対してもフィードバックすることでミスを防ぎ、最適な工程管理に生かすことも可能である。

そのためには、システムが認識する対象は、部品や製品のみならず、作業者の手・腕・体の動きも含めたものに拡大し、技術的には、動画処理が必要であり、1方向のみからの観察ではなく、複数の視覚センサがそれぞれの認識結果をエージェント知能として高速な通信媒体を介して統合的に判断することが必要になると考える。

(3) デバイス

セル生産において活用されているセンシングデバイスは、従来、物体の有無や通過検知を行うためのON/OFFセンサや簡単なレンジファインダが主であった。現状は、スカラーロボットや直行ロボットに2次元のモノクロ視覚センサが搭載され、簡単な物体の位置認識ができるようになってきた。今後は、ステレオカメラなど複眼による物体認識が可能になると、視覚センサ自身も波長レンジの拡大とハイダイナミックレンジ化し、照明も高輝度LEDなどでハイパワー化して、認識できる物体が拡大すると、環境ロバスト性も向上する。

また、高精度に物体形状を認識するためには、カメラのようなパッシブ方式だけでなく、光切断などアクティブ型センサとの併用によるハイブリッド型のデバイスが登場すると思われる。またその形態も小型化・一体化し、セル生産現場への取り付けが容易で、作業者自身がそのデバイスを身につけることも想定される。その際、それらのデバイス同士が協調するのに、デバイス内である程度の知識処理も行う必要があり、人工網膜のようなインテリジェントな撮像デバイスの登場が期待される。

3.3 ソサエティオリエンテッド知能について

表3.3 ソサエティオリエンテッド知能 ロードマップ

(注)「#」はrobustness index

(1) 屋外人環境モビリティ知能

	従来	現在(2006)	近未来(3年後)	近未来(5年後)	未来(2025以降)
知能	屋外人環境モビリティ知能				
	①目的地対話知能	選択肢指定	地図での指示	自然言語に近い表現	表現方法の拡充 人並みの自由なI/F
	②動的環境状況の認識	事前地図利用		一般モデル+センシング	人の存在認識 環境理解
	③自己位置認識・推定	オドメトリ、ランドマーク、GPS		環境認識による位置認識のレベル向上	グローバル自己位置認識系
	④環境地図構築	理論研究レベル	実用化トライアル	2DSLAM確立	市街地等の広域環境地図 3DSLAM 動的地図構築の標準化
	⑤大域的バスプランニング	道路上(カーナビ)		市街地ガイド	局所センシングマップ融合 体系化
	⑥局所的バスプランニング +動的障害物回避		体系なし	低速障害物の標準的回避	屋外実環境での障害物回避 人間と同等の回避
	⑦安全・高効率移動	凹凸対処の研究 車両軌跡設計と制御		自己のセンサに基づく歩行	高速化、ロバスト化 身体の柔軟さの活用
デバイス	屋外人環境モビリティ知能デバイス				
	①環境認識センサ	視覚、レンジセンサ	ロバスト化 高速化、小型化 低価格化	3D計測のロバスト化	物体識別モジュール 人と同レベルの視覚モジュール
	②移動機構		動物のような柔軟さはない	環境対応性UP 移動の高速化	柔軟化(制御・メカ) 機械的柔軟さ 動物並みのエネルギー効率
	③自己位置認識センサおよび環境埋め込み型デバイス				市街地の設置型GPSの実用化 大半の屋外環境を網羅

(2) 自動車分散協調型移動知能

	従来	現在(2006)	近未来(3年後)	近未来(5年後)	未来(2025以降)
知能	自動車分散協調型移動知能				
	①車両状態検知知能	車両内部状態検知	走行状態の検知	走行状態+位置検知	同左を精度よく 非常に精度よく
	#位置検知精度	#30m	#10m	#5m	#1m #数十cm
	②周辺環境検知知能	内部機関の作動に必要な環境情報を検知	障害物、車線を検知	自車に必要な情報を、路側から入手 他車に必要な情報を路側に提供	路側や他の車両から入手 危険事象を検知 障害物や他の移動体との位置関係を検知
	③判断・制御知能	内部機関の適応制御	走行状態や障害物を判断して制御	自車情報・路側情報からドライバに状況を知らせる	自車・路側・他車情報から状況を判断し制御 周辺環境を精緻に把握 衝突回避・合流制御 ドライバ意図理解
デバイス	自動車分散協調型移動知能デバイス				
	各種センサ	+衛星測位デバイス	+路車間通信デバイス	+車車間通信デバイス	

(3) ロバスト屋内環境モビリティ知能

	従来	現在(2006)	近未来(3年後)	近未来(5年後)	未来(2025以降)
知能	ロバスト屋内環境モビリティ知能				
	①ロバスト移動環境認識	床面ガイド	床面/壁面ランドマーク CAD地図参照同定	2次元SLAM 電子タグ、無線LAN	3次元SLAM 3次元リアルタイムマップ生成 視覚による自然環境ランドマーク認識
	#対応可能条件	#ガイド敷設領域	#ランドマーク敷設領域	#壁のある任意領域	#構造物内任意領域 #屋内外任意領域
	②戦略的経路生成	人為指定	地図上経路指定	経路と迂回の自動計画	周囲移動体の運動予測 記号地図ベースの計画
	#対応可能条件	#ガイド敷設領域	#ランドマーク敷設領域	#屋内、地図がある範囲	#屋内、地図がある範囲 #屋内外任意領域
	③動的障害物回避	検知&停止	同左	動的回避	戦略的回避 群集間動的回避
	#許容移動速度	#数km/h		#約6km/h	#約6km/h #10km/h以上
	#対応可能条件	#解除まで停留		#回避し無停止で走行	#高効率に回避 #人の俊敏性に対応
デバイス	ロバスト屋内環境モビリティ知能デバイス				
	磁気・光反射ガイド 赤外線センサ 超音波センサ	3D距離画像センサ レンジファインダ 固定ランドマーク	視覚+レンジファインダ融合 電子タグ、無線LAN(UWB)	ロバスト画像処理 3D&長距離レンジファインダ 環境構造化、標準化	屋内外3D距離画像センサ 実時間ビジョンチップ 屋内GPS

本章では、屋内外の公共空間で用いられるロボットの知能化を考える。昨今、オフィス・商業施設・交通施設・展示施設・介護福祉施設などで用いられるサービスロボットの開発が活発に行われている。人が往来する公共空間でのロボットの活用は、今後新しい市場を形成するものと期待される一方で、複雑な動作環境への対応や安全性の面で、未だ多くの技術課題を残している。ここでは、公共空間で活躍するロボットの普及に必要な知能化技術として、以下の3つを抽出した。なお、表3.3に各知能の概略技術マップを示す。「#」を付した数値は、ロバスト性の定量的評価指標である。

(1) 屋外人環境モビリティ知能

屋外の自律移動を可能とするためには、移動環境の一層の多様性に対応する必要がある。当面、人通りのまばらな市街地や商店街、あるいは建物周辺や公園などが対象となるであろうが、日照条件の影響を直接受けるため、環境認識知能の一層のロバスト化が必要となる。また、路面の起伏がバラエティに富むことから、足回りを見ながら移動するための局所的な経路計画知能、ならびに移動機構の柔軟化がポイントとなる。

(2) 自動車分散協調型移動知能

屋外の移動体である自動車についても、ロボットの知能化技術を適用することで、安全性の向上や環境負荷の軽減を図ることが考えられる。ここでは、路側や他の車両が持つ分散知能を協調的に利用することによって、自動車の環境認識機能を飛躍的に高めることを考え、5年後を目処に、車車協調によって遙か前方の交通情報や危険事象を取得する知能を実現することを提唱する。

(3) ロバスト屋内環境モビリティ知能

屋内を自律移動するロボットは、物品の搬送、移動による案内・警備などのサービスを提供するものとして、今後特に発展が期待されている分野である。工場での無人搬送車と異なり、人が生活する一般的な空間を移動するロボットであるため、環境変動に対するロバスト性や対人安全性の点で、高度な技術が必要となる。具体的には、①環境をセンシングし自身の位置を認識する知能、②目的地に至る経路を自動生成する知能、そして③人や障害物を動的に回避する知能が必要となる。特に①については、5年後を目処に、ロボット自身が環境の地図を生成・更新し、立体構造物からなる任意領域を移動する機能の実現が望まれる。

なお、本章の最後では、機械と人との関わりを歴史的観点から振り返った上で、今後到来するであろうロボット社会について、人とロボットの関係、社会生活におけるロボットの位置付け等を考察する。

表 3. 3. 1. 1 屋外人環境モビリティ知能 ロードマップ (概要)

	従来	現在(2006)	近未来(3年後)	近未来(5年後)	未来(理想、2025年以降)
システム: 屋外人環境モビリティロボットシステム	静的に整備された環境に対して研究開発	実験的にいくつかのデモンストレーション	人間が歩いている歩道で低速で移動	人間を認識して長距離(一つの街の中すべてなど)を走行・歩行する。	階段を含む非平坦地や駅のラッシュ時のような人混みの中で働く。
課題: 人々が日常的に利用している屋外環境を自由に目的地まで移動できること。その際に人々に不安を与えないこと。					
知能: 屋外人環境モビリティ知能	整備された平坦地環境	人がいて動いている環境への努力	歩道等におけるモビリティ知能	歩道等を長距離にわたり移動できるモビリティ知能	通常の生活空間の中で移動できるモビリティ知能
・環境や目的についての人間との対話をする知能	準備された目的地から指示。	地図を用いた指示方式などの研究	自然言語に近い表現など	表現方法の拡充	人と人が話をする時と同様の自由なインタフェース。
・環境のダイナミックな状況を認識する知能	予め準備した地図を利用		一般的なモデルを持ちセンシングによって得た情報から環境認識を行う。	動いている人間を人間として認識	動くものを人間とを区別して認識し、環境を理解する。
・自分の位置を認識・推定する知能	オドメトリ、ランドマーク利用、GPS		環境認識に基づく位置認識のレベルの向上		グローバルな自己位置認識系を実現
・センサで環境を認識し環境地図を構築する知能(SLAM)	理論的には研究。	実用化に向けた努力	平面上環境地図作成(SLAM)技術の確立	・広域環境地図の作成 ・三次元環境のモデル化	動的地図構築という枠組みの標準化。
・大域的パスプランニング	自動車用のカーナビ		市街地におけるナビゲーションガイドシステム。	自分のセンサで得た環境マップとの融合。	体系化。
・動的障害物回避と局所的なパスプランニング		体系的な取り扱いはない	ゆっくり動く動的障害物に対する標準的回避法	屋外実環境における障害物回避	間と同等の動的環境認識と動的障害物回避能力
・安全かつ効率よく移動する知能	・歩行における地面の凹凸に対する対処の研究。 ・車両の軌跡設計と制御		自己のセンサに基づく歩行。	高速化とロバスト化	外界センサと身体の柔軟さを活かした歩容、動作の制御
デバイス: 屋外人環境モビリティロボット知能デバイス		環境の限定を減らす努力	標準的な研究用プラットフォーム	人間並の速さで動く汎用な移動機械プラットフォームの実現	・動物のような柔軟な環境対応性をもつエネルギー効率の良い移動機械。 ・リサイクル可能性
・環境を認識するためのセンサ	視覚および、レーザや超音波によるレンジセンサなど	・ロバスト化の努力 ・高速化、小型化、低価格化の努力	・三次元計測のロバスト化	環境中の対象物体を識別するセンサモジュール。	人間の視覚と同等の能力・速度の視覚モジュール
・実環境を信頼性高く移動(走行・歩行)する移動機構		動物のような柔軟さはない	・環境対応能力を強化 ・移動の高速化	制御による柔軟化とメカニズムによる柔軟化。	・ぶつかっても被害のない機械的柔軟さ。 ・動物並みのエネルギー効率。
・自己位置を認識するためのセンサ及び環境埋め込み型の支援デバイス				市街地における設置形GPSの実用化。	日本の大半の屋外環境において自己位置がわかるポジショニングシステム

表 3. 3. 1. 2 屋外人環境モビリティ知能 (詳細)

	従来	現在(2006)	近未来(3年後)	近未来(5年後)	未来(理想、2025年以降)
システム: 屋外人環境モビリティロボットシステム	原則として静的に整備された環境に対して研究開発がなされてきた。	実験的にいくつかのデモンストレーションは行われているが、一般の人々がいる環境の中を自由に動けるロボットはない。	人間が歩いている歩道などの平坦地環境や若干凹凸のある環境で低速で移動するシステムの実現	例えば市街地のそれ程混んでいない歩道等の環境で人間を人間と認識してそれを避けたり追従したりしながら、同時に地面の形状にも対応して、長距離(一つの街の中すべて)を走行・歩行する。	・人が行くところにはどこへでも(市街地や階段のある歩道環境あるいは棚田のような農耕地など)ついて来て、移動能力により人々の手助けをする移動ロボット ・駅のラッシュ時のような混みの中でのロボスタな移動 ・自動車システムとの融合(高速化・高効率化)
index					
課題: 人々が生活・仕事の空間として日常的に利用している屋外環境(市街地、駅などの公共空間、山地を含む歩道、人が歩き働くことのあるすべての空間)を信頼性高く安全かつ自由かつ効率的に目的地まで移動(走行、歩行)できること。その際に人々に不安を与えないこと。地図あるいは空間情報に関して人間とのマルチモーダルな対話。					
知能: 屋外人環境モビリティ知能	静的で予めよくわかっている整備された平坦地環境におけるモビリティ知能	人間はロボットに対して十分にアウェアネスを持つ前提で、人がいて動いている環境におけるモビリティへの努力	普通のゆっくりした通行人のいる歩道等におけるモビリティ知能	街の中の歩道等を長距離にわたり、(道路の横断、歩道橋の踏破)移動できるモビリティ知能	人間の通常の生活空間の中で移動できるモビリティ知能(まわりの人間には悪意のない場合)
・(人間と対話して)環境や目的地を認識する知能	タッチパネルなどでいくつかの地を認識する知能	地図を用いたオペレータによる指示方式などが研究されている。	限定的な目的地に対して地図を利用したグラフィカルな指示や、自然言語に近い表現など、いろいろな表現方法で対話的に指示。	表現方法の拡充と多くの表現方法の一元的取り扱い	場所について地図などを使い、また現地を指さしながら、人と人が話をする時と同様の自由なインタフェース。
Robustness Index1: 自由に自由なコミュニケーションが可能か				マニュアルなしに目的地を指示	対人間の自由な対話
・自分の知識とセンサデータにより環境のダイナミックな状況を認識する知能	予め準備した地図を利用。視覚やレンジセンサで静的な環境の形状を認識	三次元環境の形状や動的な環境に対するセンシングと実時間的視覚の研究	・一般的なモデルを持ちセンシングによって得た情報からセマンティックな環境認識を行う。 ・人間の発見	動いている人間を人間として認識し、その人の動作のパターンを識別する。	視覚と予め持つ知識や地図データにより、環境に固定されているものと動き得るもの・人間とを区別して認識し、環境を理解する。
Robustness Index2: 認識できる環境の多様さ				歩道や公共空間	人が歩くところすべてを認識
・環境内で自分の位置を認識・推定する知能	オドメトリ、環境の中に準備されたランドマーク利用、GPSなどいくつかの方法が開発され利用されてきた。	従来開発された方式を融合して互いの欠点を補い信頼性を高める努力がなされている。	環境認識に基づく現在位置認識のレベルの向上	・セマンティックな地図における位置認識 ・広域はGPS、局所には環境中の自然なランドマーク(特徴)の認識を利用した位置認識。	自己位置認識は、地図の生成や制御、ヒューマンインタフェースの基本となるものであり、いろいろな環境の表現法に対して、人間よりはるかに信頼性レベルの高いグローバルな自己位置認識系を実現する。

Robustness Index3: 対応できる環境の多様さ、精度、実時間性			屋内、市街地		日本中どこでも
・移動しながらセンサで環境を認識し環境地図を構築する知能 (SLAM)	・人工知能の一分野として理論的に研究。 ・不確実な情報の取り扱いの理論	・従来の理論の実用化に向けた努力 ・ベイズ論的なデータ処理	・地図のセマンティックな表現 ・レンジセンサを用いた屋外環境の平面上環境地図作成 (SLAM) 技術の確立、標準化。 ・広域的な動的環境のモデル化に着手	・移動視覚による市街地等の広域環境地図の作成。 ・三次元環境のモデル化 (SLAM) ・環境地図上に人の存在と動きを合わせて表現し動作計画に利用できるものとする。	・自分自身が動きまわりながらの動的環境の理解が、動的地図構築という枠組みで標準化される。
Robustness Index4: 対応できる環境の種類、作られた地図の確かさ			二次元の限定環境	3次元	人間のメンタルマップ生成に匹敵
・目的地までの適切な経路等動作を決める知能－①大域的パスプランニング	自動車用のカーナビで道路上の経路計画は実用化されている。	同左	自動車用道路以外の市街地などにおけるナビゲーションガイドシステムの実現。	自分のセンサで得た環境マップと市街地ナビゲーションシステムの融合。	ロボットがどこでも指示された目的地まで行くことを可能とする大域的経路計画システムとSLAMにより生成される地図が一緒に体系化される。
Robustness Index5: 対象とする地図表現の豊かさ、計画されたパスの質、処理時間	自動車道路		市街地・歩行用道路		屋内から遠隔地までの多層な経路計画
・目的地までの適切な経路等動作を決める知能－②動的障害物回避と局所的なパスプランニング	地図にない障害物を見つけて回避するデモンストレーション。	・センサ能力の進歩に伴いリアルタイム障害回避が現実化してきた。 ・しかし、道路を除いて屋外環境で動的な障害物を避けるシステム構築例は事実上ない。 ・体系的な取り扱いはなくいくつかのシミュレーション等の例があるだけ。	・障害物回避のための動作計画について、自分の動きやすさと、動的障害物の速さ、あるいは、自分の動作のコスト等によって、問題を整理し、体系化する。 ・ゆっくり動く動的障害物に対する標準的回避法を定式化する。	・センサ能力の評価に基づいて屋外実環境における障害物回避の信頼性が議論できる。 ・平坦地ではない所で動的な環境への対処の定式化	・階段等を含む非平坦地において人間が走る速さで人間と同等の動的環境認識と動的障害物回避能力 ・悪意ある対象物体との衝突の回避
Robustness Index6: 対象とする環境の多様性、対象物体の速さ、自分の速さ		静止障害物	平坦地、低速移動障害物	起伏や階段のある環境	
・求められた経路に沿って安全かつ効率よく移動 (走行・歩行) する知能	・四足、二足歩行における平坦地の歩行制御。 ・多足歩行における地面の凹凸に対する対処の研究。 ・ある程度のスピードを持って走行する車両の軌跡設計と制御	従来の技術を実環境・実センサに適應させる努力が払われている。しかし、現実に屋外の不正理や不整地な環境ではかなりゆっくりとした動作しかできない。	自己のセンサに基づく局所的環境の認識とそれに基づく歩容制御・軌道制御。	・自己のセンサに基づく歩容制御、軌道制御により不確定環境における高速化とロバスト化。 ・力センサや柔軟な身体を用いたロバストな歩行や走行。	犬猫や馬のような外界センサと身体の柔軟さを活かした歩容、動作の制御と障害物回避
Robustness Index7: 非平坦地を安全に走行・歩行する速度				人間の歩行速度	人間が走る速さ

<p>デバイス: 屋外人環境モビリティロボット知能デバイス</p>	<p>ヒューマノイド、四脚歩行機械、車輪型移動体 TVカメラ、レンジセンサ 各々環境対応能力は、人間や動物にはるかに劣る。ものによっては環境を限定して人間並の速さをもつ。</p>	<p>環境の限定を減らす努力</p>	<p>標準的な研究用プラットフォーム</p>	<p>人間並みの速さで動く汎用な標準的移動機械プラットフォームの実現</p>	<ul style="list-style-type: none"> 人間の知的能力と動物のような柔軟な環境対応性をもつエネルギー効率の良い移動機械。 リサイクル可能な材料の構造。
<p>・環境を認識するためのセンサ</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・視覚および、レーザや超音波によるレンジセンサなど動的な中距離を認識するためのセンサ。 ・視覚については三次元的測定のためのアルゴリズムの研究。原理的には多眼ステレオ、モーションステレオ等ストラクチャーフロムモーションなどの手法が開発されている。明るさの条件や距離条件など、ロバスト性精度とも十分ではない。 ・レーザレンジセンサや超音波センサについては速度、精度に制限。 	<ul style="list-style-type: none"> ・視覚については、ロバスト化の努力がなされ、商品化も進んでいる。 ・レーザレンジセンサについては、高速化、小型化、低価格化の努力がされている。 ・人間を検出するための赤外線カメラの開発もある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・視覚による三次元計測のロバスト化。 ・人間を人間として認識するセンサモジュール。 ・レンジセンサによる環境と人間の動きの検出のロバスト化。 	<ul style="list-style-type: none"> ・自分が動きながら対象物の動きを計測する方式の定式化、標準化 ・レーザレンジセンサの(目に対する)安全化と高速化、高精細化。 ・環境中の対象物体を物体として識別するセンサモジュール。 	<ul style="list-style-type: none"> ・人間の視覚と同等の能力・速度で環境を認識する視覚モジュール。 ・人間の視覚と同等の方位分解能および視野角を有する高精度レンジセンサ。
<p>・凹凸のある実環境を信頼性高く移動(走行・歩行)する移動機構</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・四足、二足歩行などのメカニズム。(低速) ・車輪型移動機構。(中速) ・脚・車輪ハイブリッドメカニズム(低中速) 	<p>開発されたメカニズムに対する信頼性高い制御方式が研究されている。しかし、これらのメカニズムには動物のような柔軟さはない。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・より多くのセンサ(接触センサや力センサ)とそれに対応する制御アルゴリズムを埋め込んで環境対応能力を強化したメカニズム。 ・移動の高速化 	<ul style="list-style-type: none"> ・制御による柔軟化とメカニズムによる柔軟化、ロバスト化の推進。 ・衝突してもダメージのないメカニズムと制御の研究開発。 ・狭い空間をぶつかりながら通り抜けることの可能なメカニズムへのアプローチ。 	<ul style="list-style-type: none"> ・犬猫や馬などの動物のような柔軟さを持つロバストで安全かつ高速な移動体。 ・人間がぶつかっても被害のない柔軟さ。 ・動物並みのエネルギー効率。 ・リサイクルの可能な材料の構成。
<p>・自己位置を認識するためのセンサ及び環境埋め込み型の支援デバイス</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・GPS ・環境設置形のビーコン ・オドメトリ・慣性センサ 	<ul style="list-style-type: none"> ・GPSによる位置推定精度数10cm。 ・GPSはビルの脇では使えない。 ・環境設置形の位置認識エイドの研究が進められている。 	<ul style="list-style-type: none"> ・市街地において衛星によるGPSに代わる(又はGPSを補助する)位置推定エイドの標準案の設定。 	<ul style="list-style-type: none"> ・準天頂衛星等を用いたGPSによるGPS精度の向上と衛星数の増加によるカバー領域の拡大。 ・市街地における設置形GPSの実用化。 	<p>日本の大半の屋外環境において自己位置が数cmの精度でわかるポジショニングシステムの実現。[数cmでわかることがロボットの走行制御に利用するための条件]</p>

(1) 序

屋外人環境モビリティ知能の技術において開発すべき方向は、機械に複雑な環境下で自律的に目的地まで移動できる能力を付加することである。この目的地まで自律的、自動的に移動する能力は、移動ロボットの基本機能であり、あらゆる自律的なサービスの基礎となる。ここではとくに、整備された建物の中でなく、ある程度自然な人々が生活し活動する環境の中でこの目的地まで移動するための知能やそれを現実化するデバイスについて検討する。

この能力については、

- ①対応できる環境の幅（複雑さ）。
 - ②自律的に働くその自律性と程度と動作の速度。
 - ③動作実行の信頼性。環境や人間への安全性。
 - ④これを利用する人間から見た使い易さ。
 - ⑤エネルギー効率、及び、使用後の廃棄物の量やリサイクル性。
- 等をパラメータにその実現と性能の向上を図ってゆく必要がある。

(2) 自律的移動能力を実現する屋外人環境

遠い将来に人間が有する程度の判断力、作業遂行能力を有する自律的移動機械（ロボット）を実現することを目的としても、その目的に到達する現実的なパスを考えると、まず、ロボットが働く環境を制限せざるを得ない。また、環境を厳しく限定すれば産業用無人搬送車等、自律的に目的地まで走行する機械は現存している。したがって、この制限をいかにはずすかを記述的課題と考えることもできる。

①現在

2005年の愛知地球博ではいくつかの屋外を動く自律移動ロボットが披露され、掃除、整備、道案内等の作業を行った。これは実際の屋外環境とは言え、ある意味でデモンストレーションのために準備した環境と言うことが出来る。もっとも、ここで、人々が歩く環境内の数百メートルの距離に渡って自律的な走行がデモンストレーションされたことは特記に値する。

自動車においては、車庫入れのようなローカルな動きから高速道路における自動的車線追従などに至るまで、いくつかの限定した環境で限定された自律かが実用化されつつある。

②将来

遠い将来には、屋内外問わず人々が歩いたり、または乗り物を使って行ける場所のどこへでも自律的に行くことが出来るモビリティ知能が期待される。

ここでとくに重要となるのはラッシュアワー時の駅の雑踏などの密度高く人が混雑した環境への対応性であろう。

③近未来の課題

当面、人通りのまばらな市街地や商店街等、あるいは、建物周辺や公園などが対象となる。また、住宅などの建物内とのシームレスな接続も求められる。夜間における警備や、歩く人々をサポートする荷物の運搬などが具体的に考えられる応用であろう。

④評価インデックス

ロボットが対応できる環境の多様性を評価することが必要である。その定量化は難しいが、市街地の歩道に限定すれば対応できる広さ（100m四方から一つの市中の全域など）は一つの基準になり得る。従って、例えば「皇居一周の自律走行の機能」の可能性などは評価のインデックスとしても意味があろう。ただし、その際、自然なままの通行人がいるか、又は、それなりに通行人がコントロールされているか（もしくは通行人は排除されているか）は広さ以上に重要な評価要素である。

(3) 自律性の程度と動作速度

自律的な移動能力を問題にする時、色々なレベルが存在するため、自律化しているかについても徐々に進歩させて行く必要がある。どれだけ環境のデータを事前に与えるか、移動体が自ら取得するかには重要な違いがある。これについても、具体的にはさらに多くのパラメータが存在する。

移動速度についてはも、秒速10cm程度から人間と同等の秒速1m、更に運搬車両に期待される秒速10m程度の範囲が考えられ、その違いによりそれに必要とする技術も大幅に異なる。また、移動体にとっては環境もそれ自体変化している。どれだけの変化の速度に対応できるかも重要な要素である。

①現在

今までに実用化あるいは実用性がデモンストレーションされた移動体においては、環境の静的データは開発者が丁寧に与えることとして、通行人等の環境の変化分にはロボットが自主的、自律的に対応することを前提としている。人々が歩いている中でのロボットの走行速度は人間よりひとまわり遅い秒速50cm程度のものでデモンストレーションされている。

②将来

まず、移動体は環境データ（地図）が与えられていない未知の環境の中でも動きまわることができ、それによって環境のデータを自らの中に蓄積して働くことが期待される。これによって最低限の情報と指示を与えるだけで自由に目的地を見つけ、そこまで到達できることが望まれる。また、移動速度については「人が走る速さで」が目標となろう。

③近未来の課題

環境の地図を自分で更新できること。人手で与えられた地図を自ら得た環境データと総合して利用できること。人間が歩く速さで、動き、他にその速さで歩いている人々に対処できること。

④評価インデックス

環境のデータをどれだけ詳しく与えるかは何らかの表現形式を定めた上で面積に対するデータの量（メモリ容量）が一つの基準になる。但し、単にメモリ容量を圧縮する技術は本質ではない。

移動速度と環境の変化速度は人の歩行速度を基準として比較することにより定量できよう。

（４）動作実行の信頼性と安全性

機械が実環境で働く以上、仕事の完遂率を100%とすることは不可能である。しかし、有用な機械であるためには動作の完遂の比率を限りなく100%に近づけることが求められる。機械の信頼性、ロバスト化とは、それを十分に高くすることである。しかし、人間の場合と同じく、行うべき作業や環境が難しく複雑になれば、当然、動作完遂の信頼性は低下する。何らかの事情で目的地に到達できなかった時、それを補完する機能の準備も必要であろう。

技術的には、先に環境の複雑さや求められる自律性の程度を決めた上で、動作完遂の信頼性を評価するより、むしろ、まず、動作完遂の比率について条件を定めた上で、環境対応や自律性の性能を追求する方が良いと考えられる。

また、安全性とは、通常の動作条件に基づき、悪意のある環境であっても、人々に直接的な被害を与えないことであり、これにも特別な配慮が必要である。

①現在

「ロボット」は先端的な動作を実現する機械につけられた名称であり、ここでは信頼性より機能や知能が重視されるという宿命がある。これが信頼性を前提とする産業化を阻む大きな要因となっている。

また、安全性についても物理的に多様な動きをする機械という「ロボット」の前提を考えるとかなり厳しい。従って、人が入らない場所に限定するか、又は、ロボットのサイズを小さくするなどにより、知能ではなく条件設定による安全化が図られている。

②将来

人間（や動物）は例えそれ程賢くなくてもそれなりの信頼性の下に、他人に不安を（それ程）感じさせることもなく活動している。ロボットがこのモデルで扱われるよう、考え方と技術の整理がなされる必要がある。

そのためには、前提として、色々なレベルで失敗してもやり直しが容易な動作手順や、ぶつかっても互いに大きいダメージを受けない柔軟な機構や材料等の開発が求

められる。

③近未来の課題

想定し得る環境条件の下での動作の完遂率が信頼性であるとしても、それを具体化し、まず、信頼性、安全性を評価する方法論を開発しなければならない。それに基づき、ある一定の信頼性を確保しつつ移動ロボットが対応できる環境の幅と自律性を追求するという枠組みを構築する必要がある。

これは、ロボットの知能についての考え方を、今までの先端的（に見える）機能に関する研究成果を重視する体質から色々な条件下での動作完遂率である信頼性。ロバスト性を重視する体質への変換してゆくことを意味する。具体的な評価法を定めることにより、その評価基準による信頼性（やロバスト性）を重視する体制を作る必要がある。

④評価インデックス

ロボットの動作実験のデータに具体的な実験の条件と動作の成功率を必ず付すことにする。これにより偶然発生したチャンピオンデータや、環境を制限することによって生じた恣意的になり得るデータなどを評価の対象から排除する。

(5) 人にとっての使い易さ

屋外環境モビリティ知能の中心が目的地までの自律的な走行・歩行機能であるとしても、実際にこの機能を使うのは人間でありその使用者にとって使い易いものでなければ意味はない。具体的には、目的地までの指示方法、あるいは、環境に関する情報の移動体とオペレータの共有の方法が開発される必要がある。

①現在

屋内の環境にたいしては、画面上に環境の地図を表示して、目的地をカーソルやタッチパネル等で指示する方法、あるいは、データベースに登録された地名で指示する方法等がある。これらはいずれもカーナビのシステム等でも実用化されており、それなりに使い易いものとなっている。しかし、その地図のデータは予め与えられたものに限定される。

②将来

移動体が自ら得た地図情報をオペレータに提示して、その上で目的地を与える方法。あるいは地図を持っていない環境に対し、目的地を見つけるための条件やヒントのみを与えて指示する方法など。地理や場所あるいはその上の動的な状況の情報について、人間同士が対話しているのと同じレベルでオペレータと機械が指示、情報の共有や交換を可能とすること。

③近未来への課題

移動体が自ら得た環境情報（地図）を予め与えられた地図と統合して、オペレータに呈示し、それをを用いて目的地の指示ができること。屋外環境の平坦地のみでな

く斜面や階段のある環境においてそれを可能にすること。

④評価インデックス

基本的にはオペレータの使い勝手、オペレータへの負荷、指示に要する時間等、及び、オペレータに必要な訓練・練習時間によって評価される。

(6) エネルギー効率及び環境への配慮

自律的な移動体が多数使われる状態になると、その環境への影響を考える必要性が発生する。まず、必要なことは、移動におけるエネルギーの効率的な使用と、機械の寿命延長及びリサイクル等の体制である。バッテリーを重視せざるを得ない移動体にとってエネルギー効率は従来より大きく考慮されるパラメータである。しかし、バッテリーが廃棄物となった時の環境への負荷等までは考えられていない。また、この日進月歩の此の分野においては、全く同じ機械を長い間使うことは、考え難く、単に機械の寿命を延ばすことには意味がない。不幸にして(?)現状では、屋外環境モデリティ知能を実装するロボットの数が多いことが、問題になっていないが、近い将来に向けて考え方の整理と必要な技術の開発を行う必要がある。

①現在

全ての移動体がバッテリーを用いているが、移動体ではエネルギー効率が重視されるため、現状ではほとんどエネルギー効率については考慮されている。廃棄物やリサイクルについては数が少なく量産体制にないため、一部の部品を除いてほとんど考慮されていない。

②将来

限られた資源と環境を維持するため、産業化に当たっては当初より、廃棄物問題など環境維持を配慮したものとする必要がある。また、将来に渡って技術の進歩は早いスピードで進むと考えられるので、移動体のシステムについても部分的に入れ換えや更新の可能なアーキテクチャとなっている必要がある。

③近未来の課題

エネルギー源については、エネルギー効率化に合わせて、燃料電池を用いる方式など全体システムとしての環境負荷軽減の配慮を行いつつ、システムの開発を進める必要がある。

当面ロボットシステムのパフォーマンスの向上はそれなりのスピードで推移することが期待されるため、移動体(ロボット)のパフォーマンス対比で考えると、大きな努力がロボットのパフォーマンス向上に向けられることは必然である。但し、システムの進歩が機械の使い捨てを助長することにならないよう、機能の更新や拡張性を考慮して、可能な部分は長期間にわたって使えるロボットシステムのアーキテクチャを開発する必要がある。

④評価インデックス

移動体にとってエネルギー系統そのものの効率の評価はできても、エネルギーや環境への負荷をロボットのパフォーマンスへの対比で表すことは、近い将来においても難しい。

従って、むしろ環境負荷軽減の努力を評価することにせざるを得ない。

表3. 3. 2. 1 自動車分散協調型移動知能 ロードマップ (概要)

	従来	現在(2006)	近未来(3年後)	近未来(5年後)	未来(理想、2025年以降)
<p>●システム: 自動車分散協調型移動知能 システム</p> <p>自律的な移動知能を持つ自動車が、路側や他の車両が持つ分散知能を協調的に利用することにより、環境認識機能を飛躍的に高めた、安全で環境に優しい自動車交通システム</p>	<p>●自律型の内部機関制御</p> <p>・車両の内部監視センサを利用した走行支援や制御を行う</p> <p>・(例)トルコン、オートクルーズ、ABS、エアバッグ等</p>	<p>●自律型の走行支援・走行制御</p> <p>・車両の外部監視センサを利用した走行支援や制御を行う</p> <p>・(例)車間距離制御型クルーズコントロール、車線逸脱警報等</p>	<p>●路車協調による走行支援</p> <p>・路側の検知情報を利用した走行支援や、路側を介して他の車両や交通運用に有益な情報を提供する</p> <p>・(例)出合い頭衝突警報、赤信号警報、歩行者存在警報、プローブ情報提供等</p>	<p>●路車協調による走行制御</p> <p>・路側の検知情報を利用した走行制御を行う</p> <p>・(例)緊急時自動ブレーキ、インテリジェント速度制御等</p> <p>●車車協調による走行支援</p> <p>・車車間の情報交換により、危険情報の伝達や重要情報の伝達を行う</p> <p>・(例)出合い頭衝突警報、歩行者存在警報、重要情報(事故・渋滞・路面凍結等)伝達等</p>	<p>●車車(歩車)協調による走行制御</p> <p>・車車間(歩行者・車間)の情報交換により、自律分散的に衝突を避けたり、円滑な交通流形成のための走行制御を行う</p> <p>・(例)自動衝突回避、自動分合流、車群追従走行制御、隊列走行等</p> <p>●人車協調による走行制御</p> <p>・ドライバーの意図を踏まえつつ、人・車一体となった制御を行う</p>
<p>●知能 : 自動車分散協調型移動知能 概要</p>	<p>(分散知能との協調なし)</p> <p>・車両の内部機関を検知・制御する知能</p>	<p>(分散知能との協調なし)</p> <p>・車両の外部環境を検知・制御する知能</p>	<p>(分散知能との協調小)</p> <p>・路側の検知情報を走行支援に利用する知能</p> <p>・路側を介して他の車両や交通運用に有益な情報を提供する知能</p>	<p>(分散知能との協調中)</p> <p>・路側の検知情報を走行制御に利用する知能</p> <p>・危険情報や重要情報を車車間で伝達する知能</p>	<p>(分散知能との協調大)</p> <p>・他の車両の検知情報を走行制御に利用する知能</p> <p>・ドライバーの意図を把握し、人・車一体となった制御を行う知能</p>
<p>○車両状態検知知能 (要素知能1) (自車両の状態を検知する知能)</p> <p>Robustness Index: 検知内容、検知精度</p>	<p>・車両の内部機関の作動状態を検知する知能</p>	<p>・車両の走行状態や位置を検知する知能</p>	<p>・車両の走行状態や位置を検知する知能</p>	<p>・車両の走行状態や位置を精度良く検知する知能</p>	<p>・車両の走行状態や位置を非常に精度良く検知する知能</p>
<p>○周辺環境検知知能 (要素知能2) (自車両の周辺環境を検知する知能)</p> <p>Robustness Index: 検知内容、検知精度、検知速度</p>	<p>・外気温、道路勾配等、内部機関の作動に必要な環境情報を検知する知能</p>	<p>・障害物や車線等周辺環境を検知する知能</p>	<p>・自車両に必要な情報を、路側から入手する知能</p> <p>・他の車両に有益な情報を検知し、路側を介して提供する知能</p>	<p>・自車両に必要な情報を、路側や他の車両から入手する知能</p> <p>・危険事象(対向車や歩行者)や重要なインシデント(事故や渋滞)の存在や位置を検知する知能</p>	<p>・移動体(車や歩行者)同士の情報交換によって、障害物や他の移動体との位置関係を正確に検知する知能</p>
<p>○判断・制御知能 (要素知能3) (状況を判断し、制御を行う知能)</p> <p>Robustness Index: 処理時間、処理速度、信頼性</p>	<p>・エンジンやミッション等内部機関の制御を、外気温や道路勾配等に適応させながら行う知能</p>	<p>・車両の走行状態や障害物との距離等を判断して、必要な制御を行う知能</p>	<p>・自車が持つ情報と路側の情報から、状況を判断して、ドライバーに知らせる知能</p>	<p>・自車が持つ情報と路側の情報から、状況を判断して、必要な制御を行う知能</p> <p>・自車が持つ情報と他の車両から得た情報から、状況を判断して、必要な制御を行う知能</p>	<p>・周辺環境を精緻に把握し、衝突回避や合流制御を行う知能</p> <p>・ドライバーの意図を把握し、制御に反映する知能</p>
<p>●デバイス: 自動車分散協調型移動知能デバイス</p>	<p>・各種センサ</p>	<p>・各種センサ ・衛星測位デバイス</p>	<p>・各種センサ ・衛星測位デバイス ・路車間通信デバイス ・危険判断アルゴリズム</p>	<p>・各種センサ ・衛星測位デバイス ・路車間通信デバイス ・車車間通信デバイス ・危険事象の位置検出アルゴリズム ・重要インシデント検出アルゴリズム ・車車間情報伝達アルゴリズム</p>	<p>・各種センサ ・衛星測位デバイス ・車車間通信デバイス ・障害物回避、分合流制御等のアルゴリズム ・車群追従走行制御、隊列走行等のアルゴリズム ・ドライバー意向判断アルゴリズム</p>

表 3. 3. 2. 2 自動車分散協調型移動知能（詳細）

	従来	現在(2006)	近未来(3年後)	近未来(5年後)	未来(理想、2025年以降)
<p>●システム： 自動車分散協調型移動知能 システム</p> <p>自律的な移動知能を持つ自動車、路側や他の車両が持つ分散知能を協調的に利用することにより、環境認識機能を飛躍的に高めた、安全で環境に優しい自動車交通システム</p>	<p>●自律型の内部機関制御</p> <p>・車両の内部監視センサを利用した走行支援や制御を行う</p> <p>・(例)トルコン、オートクルーズ、ABS、エアバッグ等</p>	<p>●自律型の走行支援・走行制御</p> <p>・車両の外部監視センサを利用した走行支援や制御を行う</p> <p>・(例)車間距離制御型クルーズコントロール、車線逸脱警報等</p>	<p>●路車協調による走行支援</p> <p>・路側の検知情報を利用した走行支援や、路側を介して他の車両や交通運用に有益な情報を提供する</p> <p>・(例)出会い頭衝突警報、赤信号警報、歩行者存在警報、プローブ情報提供等</p>	<p>●路車協調による走行制御</p> <p>・路側の検知情報を利用した走行制御を行う</p> <p>・(例)緊急時自動ブレーキ、インテリジェント速度制御等</p> <p>●車車協調による走行支援</p> <p>・車車間の情報交換により、危険情報の伝達や重要情報の伝達を行う</p> <p>・(例)出会い頭衝突警報、歩行者存在警報、重要情報(事故・渋滞・路面凍結等)伝達等</p>	<p>●車車(歩車)協調による走行制御</p> <p>・車車間(歩行者・車間)の情報交換により、自律分散的に衝突を避けたり、円滑な交通流形成のための走行制御を行う</p> <p>・(例)自動衝突回避、自動分合流、車群追従走行制御、隊列走行等</p> <p>●人車協調による走行制御</p> <p>・ドライバーの意図を踏まえつつ、人・車一体となった制御を行う</p>
<p>●知能： 自動車分散協調型移動知能 概要</p>	<p>(分散知能との協調なし)</p> <p>・車両の内部機関を検知・制御する知能</p>	<p>(分散知能との協調なし)</p> <p>・車両の外部環境を検知・制御する知能</p>	<p>(分散知能との協調小)</p> <p>・路側の検知情報を走行支援に利用する知能</p> <p>・路側を介して他の車両や交通運用に有益な情報を提供する知能</p>	<p>(分散知能との協調中)</p> <p>・路側の検知情報を走行制御に利用する知能</p> <p>・危険情報や重要情報を車両間で伝達する知能</p>	<p>(分散知能との協調大)</p> <p>・他の車両の検知情報を走行制御に利用する知能</p> <p>・ドライバーの意図を把握し、人・車一体となった制御を行う知能</p>
<p>◎車両状態検知知能（要素知能1） (自車両の状態を検知する知能)</p> <p>Robustness Index: 検知内容、検知精度</p>	<p>・車両の内部機関の作動状態を検知する知能</p>	<p>・車両の走行状態や位置を検知する知能</p>	<p>・車両の走行状態や位置を検知する知能</p>	<p>・車両の走行状態や位置を精度良く検知する知能</p>	<p>・車両の走行状態や位置を非常に精度良く検知する知能</p>
<p>○自車両位置検知知能（要素知能1-1）</p> <p>Robustness Index: 位置精度、信頼性、カバーレージ</p>	<p>・補正なしGPS位置検知(30mレベル、信頼性中)</p>	<p>・補正ありGPS位置検知(10mレベル、信頼性中)</p>	<p>・高度補正ありGPS位置検知(5mレベル、信頼性大)</p>	<p>・高精度位置検知(1mレベル、信頼性大、エリア制約あり)</p>	<p>・超高精度、高信頼性位置検知(数cmレベル、信頼性大、エリア制約なし)</p>
<p>◎周辺環境検知知能（要素知能2） (自車両の周辺環境を検知する知能)</p> <p>Robustness Index: 検知内容、検知精度、検知速度</p>	<p>・外気温、道路勾配等、内部機関の作動に必要な環境情報を検知する知能</p>	<p>・障害物や車線等周辺環境を検知する知能</p>	<p>・自車両に必要な情報を、路側から入手する知能</p> <p>・他の車両に有益な情報を検知し、路側を介して提供する知能</p>	<p>・自車両に必要な情報を、路側や他の車両から入手する知能</p> <p>・危険事象(対向車や歩行者)や重要なインシデント(事故や渋滞)の存在や位置を検知する知能</p>	<p>・移動体(車や歩行者)同士の情報交換によって、障害物や他の移動体との位置関係を正確に検知する知能</p>
<p>○障害物検知知能（要素知能2-1）</p> <p>Robustness Index: 検知内容、検知精度</p>	<p>・障害物検知(低速度・至近距離) バックソナー、コーナーセンサ</p>	<p>・障害物検知(前方)</p>	<p>・障害物検知(前後方、後側方)</p>	<p>・障害物検知(全方位) ・重要インシデント検知(事故・渋滞・路面凍結等)</p>	<p>・他の移動体の位置検知(他車両、歩行者、二輪車等) ・時空間モデリング</p>

○歩行者検知知能（要素知能2-2） Robustness Index: カバーレージ、検知精度	*****	・夜間存在検知 (見通し内)	・昼間存在検知 (見通し内)	・昼/夜間存在検知 (見通し外、歩行者端末所持)	・昼/夜間存在検知 (見通し外、歩行者端末不要)
○移動体通信知能（要素知能2-3） Robustness Index: 許容通信遅れ時間、通信信頼性	・センター・車間通信 (許容通信遅れ時間大・通信信頼性小、広域交通情報)	・路・車間通信 (許容通信遅れ時間中・通信信頼性中、狭域交通情報)	・路・車間通信 (許容通信遅れ時間小・通信信頼性大、局所危険情報)	・路・車間通信、車・車間通信 (許容通信遅れ時間小・通信信頼性大、局所危険情報、許容通信遅れ時間中・通信信頼性大、遠方有益情報)	・車・車間通信、歩・車間通信(許容通信遅れ時間小・通信信頼性大、高精度走行制御用情報)
◎判断・制御知能（要素知能3） (状況を判断し、制御を行う知能) Robustness Index: 処理時間、処理速度、信頼性	・エンジンやミッション等内部機関の制御を、外気温や道路勾配等に適応させながら行う知能	・車両の走行状態や障害物との距離等を判断して、必要な制御を行う知能	・自車が持つ情報と路側の情報から、状況を判断して、ドライバーに知らせる知能	・自車が持つ情報と路側の情報から、状況を判断して、必要な制御を行う知能 ・自車が持つ情報と他の車両から得た情報から、状況を判断して、必要な制御を行う知能	・周辺環境を精緻に把握し、衝突回避や合流制御を行う知能 ・ドライバの意図を把握し、制御に反映する知能
○状況判断・制御知能（要素知能3-1） Robustness Index: 危険事象認識レベル	*****	・自律系個別システム対応	・自律系複合システム対応	・路車協調システム対応統合処理 ・学習知能 ・外部データベース活用	・高度危険事象予測 ・相手側処理能力判断・対応
○HMI知能（要素知能3-2） Robustness Index: ドライバ状態認識レベル	*****	・音声・画像表示優先判断(ナビ、ラジオ)	・覚醒度検知	・注意力検知 ・エージェント知能	・ドライバ状態総合把握 ・ドライバ意向総合把握
●デバイス: 自動車分散協調型移動知能デバイス	・各種センサ	・各種センサ ・衛星測位デバイス	・各種センサ ・衛星測位デバイス ・路車間通信デバイス ・危険判断アルゴリズム	・各種センサ ・衛星測位デバイス ・路車間通信デバイス ・車車間通信デバイス ・危険事象の位置検出アルゴリズム ・重要インシデント検出アルゴリズム ・車車間情報伝達アルゴリズム	・各種センサ ・衛星測位デバイス ・車車間通信デバイス ・障害物回避、分合流制御等のアルゴリズム ・車群追従走行制御、隊列走行等のアルゴリズム ・ドライバー意向判断アルゴリズム
○自車両位置検知デバイス	・補正なしGPS位置検知 (30mレベル、信頼性中)	・DGPS補正位置検知 (10mレベル、信頼性中)	・RTK補正位置検知 (5mレベル、信頼性大)	・高精度位置検知 (1mレベル、信頼性大、エリア制約あり)	・高精度、高信頼性位置検知 (数10cmレベル、信頼性大、エリア制約なし)
○周辺環境検知知能デバイス	・画像センサ ・近距離レーダ	・画像センサ ・レーザーレーダ、ミリ波レーダ	・レーザーレーダ、ミリ波レーダ	・複合センサ	・複合センサ
○歩行者検知知能デバイス	*****	・遠・近赤外線センサ	・レーダセンサ ・遠・近赤外線センサ	・画像センサ ・レーダセンサ ・センサフュージョン	・画像センサ ・レーダセンサ(高分解能化) ・センサフュージョン

○移動体通通知能デバイス	・センター・車間通信:ラジオ、テレビ、FM多重放送	・路車間通信(DSRC、光ビーコン、電波ビーコン)	・路車間通信(DSRC、無線LAN、光ビーコン、電波ビーコン)	・車車間通信(携帯電話、無線LAN)	・車車間通信(携帯電話、無線LAN) ・歩車間通信(携帯電話、電波ビーコン)
○状況判断・制御知能デバイス	・.....	・音声、画像切り替え制御ロジック	・高速演算処理デバイス	・状況判断アルゴリズム ・大容量蓄積ストレージ	・高度状況判断アルゴリズム ・大容量蓄積ストレージ ・外部DB利用デバイス
○HMI知能デバイス	・チャイム	・音声/画像警報	・瞳孔検知 ・振動デバイス	・視線検知 ・音声対話	・注視対象検知 ・非接触生態検知

(1) システム

①分野の特徴

知能化された自動車は、公共空間での高速移動を支援するロボットそのものと言えるが、現状では自動車は人間が運転することを前提としており、現在進められている知能化は人間の運転負荷を軽減したり、運転ミスを防ぐことを中心に進められている。また自動車交通システムとしての知能化は、自動車の知能化とインフラの知能化を連携させながら、社会システムとしての安全、環境、利便分野での課題解決を主目的に推進されている。

将来的には、個々の車の知能化を進めるとともに、インフラや他の車両が持つ知能を相互に利用し合い、周辺の交通環境認識機能を大幅に高めることにより安全性の向上や環境負荷の軽減を図った、自動車分散協調型の交通システムに発展させて行くことが期待される。

②分野の歴史的流れ

自動車の知能化は、自動車の本来機能の向上を目的として、エンジンの電子制御化、ATの電子制御化などパワートレイン分野の知能化に始まり、その後電子制御サスペンションやABS（アンチロックブレーキシステム）などの足回り分野、エアバッグや自動巻取り式シートベルトなどの安全装置分野、オートライトや音声対応ナビゲーションなどの利便装置分野など、幅広く知能化が展開されている。

現在、自動車の衝突安全対策（乗員保護対策）および自動車単体としての大気環境対策（排出ガス対策）は、カーメーカを中心とした努力により、当面の課題は目処がついたと言ってよいレベルに達しており、今後は、交通事故を未然に防ぐための予防安全対策と地球温暖化防止対策（単体および交通流改善による燃費の向上）への知能化技術活用が期待されている。

このうち、予防安全対策においては、走行車線からの逸脱を検知して警告するシステムや、前方の障害物を検知して自動的にブレーキをかけるシステムなどが実用化されるなど、自動車単体で可能となる対策は相当高度なところまで進んできており、今後は他の車両やインフラと協調することにより、自車両からは見えないあるいは見えにくい場所における予防安全性を高めることが期待されている。

こうした背景から、近年路車協調型の予防安全システムの検討が活発になりつつあるが、自動車同士の協調による車・車協調システムや、歩行者や自転車など歩・車協調による安全確保の検討はさらに難しく、まだあまり進んでいないのが現状である。

また、地球温暖化防止対策においても、自動車単体としての燃費性能の向上を一層図るとともに、インフラや他の車両と協調することによって、自動的にアイドリングストップをかけたり、交差点やサグ部（道路が緩やかな上り勾配に変わる地点）

など渋滞多発地点における交通流の円滑化を進め、実走行における燃費向上を図って行くことが期待されている。

③あるべき姿と技術開発の方向

現状の自動車交通システムでは、信号や標識など路側インフラを中心とした交通管理が行われているが、まだまだ年間数千人規模の交通事故死者、百万人を超える負傷者、年間12兆円とも言われる渋滞損失、地球環境問題などを発生させている不安全、不完全な交通システムと言える。

今後は、自動車と路側インフラとの間で交信することにより、個々の車両の状況に応じた運転支援サービスを充実させるとともに、他の自動車や歩行者など移動体同士がお互いに情報交換しながら協調して走行することにより、衝突を回避したり、渋滞を発生させないように走行することができる自動車分散協調型の自動車交通システムに発展させて行くことが望まれる。以下、その実現に向けての道筋（ロードマップ）を示す。

(a) 近未来（3年後）

(i) 路車協調による走行支援

3年後位の近未来では、路側から危険情報等を入手し、ドライバーに注意喚起することにより、交差点や見通しが悪い場所における交通事故を未然に防ぐ路車協調による走行支援技術の実現が期待されている。

また逆に、事故や渋滞の場所や程度など、近傍を走行中の他の車両にとって有益な交通情報を検知した車両が路側を介して他の車両に提供するような技術の実現も期待される。

(b) 近未来（5年後）

(i) 路車協調による走行制御

5年後には、路車で交信することにより、赤信号の見落とし時や、出会い頭衝突の危険があるような緊急時に、車両側で自動的にブレーキ制御を行うような路車協調による走行制御技術の実現が期待される。

また逆に、車両から路側に直前の走行ルート of 交通情報を提供することにより、きめ細かい道路交通情報の収集に貢献するとともに、その情報を動的な交通運用（動的な信号制御等）にも利用することが可能となるような技術の実現が期待される。

(ii) 車車協調による走行支援

また5年後には、各車両のセンシング能力を高めるとともに、車両同士や歩行者と車両との間で交信することにより、路側インフラに頼ることなく、交差点や見通しが悪い場所における危険事象（対向車や歩行者）の存在や位

置を特定し、交通事故を未然に防止する技術の実用化が期待される。

また、事故や渋滞、路面凍結などの重要なプローブ情報（検知情報）を、車両同士で伝達する技術の実用化なども期待されるところである。

（c）未来

（i）車車・歩車（歩行者・車両）協調による走行制御

将来的には、自車両のセンシング能力を高めるとともに、車両同士や歩行者と車両との間で交信することにより危険事象を検知し、自動的に衝突を回避したり、円滑な分合流等を行うことにより、車両同士で協調して、安全・円滑な交通を実現することが期待される。

さらに、先頭車両以外は自動運転モードでの隊列走行を、車両間隔を車両1台分（約5m）程度の長さまで狭めて行うことが可能になれば、ドライバーの運転負荷が軽減されるとともに、交通密度を10倍以上に高められ、高速道路等での渋滞解消に資することができる。

（ii）人車（ドライバー・車両）協調による走行制御

自動車の知能化が進んでも最終的な運転の責任はドライバーに残ることから、自動車の知能化が進めば進むほど、ドライバーと車両との間の意思疎通が重要になってくる。将来的には、車両がドライバーの意図を踏まえながら障害物回避や合流を行うなど、人・車一体となった走行制御が行えるようになることが期待される。

（2）知能

①知能概観

従来、自動車の知能化は車両内部の検知や制御が中心であり、エンジンやトランスミッション、タイヤのスリップの状態など、車両内部機関の作動状態をきめ細かく検知し、制御することにより、走る、曲がる、止まるといった自動車本来機能の性能向上、および安全・環境性能の向上が図られてきた。

現在では、自動車の安全性や利便性の向上を狙いとして、車両が自分自身のセンサを用いて走行状態を詳細に把握するとともに、周辺環境を検知しながら必要な制御を行う知能が発達しており、前方走行車両との車間距離を自動的に制御して追従走行するシステムや、カーブや坂道などでナビゲーションと連動させたATシフト制御を行うシステムなどが実用化されている。

3年程度の将来で期待される知能としては、路側の設備からの検知情報を利用することにより、交差点や見通しが悪い場所における危険情報をドライバーに知らせる知能の実用化が期待される。

5年程度の将来で期待される知能としては、路側の設備との交信により、衝突の

危険があると状況判断した場合に車両を自動的に制御する知能や、路側に最新の交通情報を提供する知能が期待される。

また、車両同士や歩行者との間で交信することにより、路側インフラに頼ることなく交差点や見通しが悪い場所における危険事象（対向車や歩行者）の存在や位置を特定し、交通事故を未然に防止したり、事故や渋滞、路面凍結などの重要なプローブ情報（検知情報）を必要となる車両に限定して伝達する知能の実現が期待される。

将来的には、必要に応じて車両同士や歩行者との間で協調制御することにより、周辺環境認識機能を飛躍的に高めた協調制御を行うことにより、自動的な衝突回避や、自動分合流、隊列走行などを行える知能の実現が期待される。

② ロバスト知能

(a) 概要

自動車の運転操作を分解すると、「認知」、「判断」、「操作」という機能に細分化される。現時点では、自動車はあくまで人間が運転するものであって、最終的な運転責任は人間が担うことになっているため、自動車の知能化は、上記のいずれかの機能面でドライバーの支援を行う知能の高度化ということになる。

このうち「操作」機能の知能化は、カーメーカの競争領域として開発が進められており、また交通事故のほとんどは、ドライバーの「認知」あるいは「判断」の遅れ、あるいはミスによって引き起こされていることから、特に「認知」および「判断」機能の知能化を進め、ドライバーと知能化された自動車を合わせた「人・車系」としての環境認識機能を大幅に高めることにより、交通事故を減らしたり、交通円滑化を進めることが期待されているところである。

こうした知能面では、従来からエンジンやミッション、ブレーキといった自動車の内部機関の作動状態や異常を検知し制御する知能が開発されてきたが、今後は自車両の状態を周辺環境やドライバーの認識状況を含めて、どういった状況か検知・判断し、制御する知能、すなわち、(i) 車両の状態を検知する知能、(ii) 周辺環境を検知する知能、(iii) 状況を判断・制御する知能、の高度化が必要となっている。

また、ここで求められるロバスト性は、自車両の走行状態と、天候や混雑状況など周辺の交通環境が複雑に変化する中で、どのような交通環境下においても、正確に検知・判断・制御できる知能である。

(b) 車両状態検知知能

車両自らの状態を検知する知能であり、エンジンやミッションなど内部機関の作動状態を検知する知能と、どこをどのような状態で走行しているかといっ

た走行状態を検知する知能である。

今後、外部のセンシング機能を積極的に利用して行くためには、まず自車両がどこを走行しているかの位置検知が重要であり、路側や他の車両のセンシング情報から得られる障害物や歩行者の位置と自車両との位置関係を判断し、危険な状態かどうかを判断するために必須となってくる。

現在、カーナビゲーションで用いられているGPS（全世界測位システム）は、衛星からの電波を利用しているため一定の誤差があることと、高層ビルの谷間などでは必要となる衛星数（4個）が確保できない場合が多いことなどから、誤差を減少させる技術や、車両自身の自律航法（ジャイロや距離センサを利用）との組み合わせによって精度を上げている。

将来、移動体同士での衝突回避や円滑な分合流等の協調制御を行う上では、あらゆる場所において最低でも誤差数10cmレベル（横方向の制御レベル）の絶対位置精度が実現できる検知知能が必要となる。

一方、自車両の走行状態の検知に関しては、すでに高度な知能が開発されている。すなわち近年のスポーツカーや高級車には、車両の運動性能向上と安全性性能向上を目的とした車両運動の統合制御知能が組み込まれているものもあり、カーブ等での車両の走行状態やタイヤの滑り具合を検知しながら、エンジンの出力を制御したり、各車輪毎のブレーキ制御を行うことが可能となってきたため、今後はそれらの検知情報を他の情報と組み合わせて活用するための知能の検討を行えば良いと思われる。

（c）周辺環境検知知能

（i）障害物・歩行者検知知能

走行車両の周辺にある障害物や、経路上の道路交通環境などを検知する知能である。駐車などの運転支援を行う際に利用するコーナーセンサやバックソナーなど、低速域・近距離における障害物検知知能が早くから実用化されたが、近年前方障害物との衝突防止システムや車線変更時の後側方警報などで、高速域・遠距離での障害物検知知能も実用化され始めている。

今後の予防安全の方向としては、見通しが悪い場所における対向車や歩行者の存在を事前に検知することによって、出合頭の衝突事故や歩行者事故を防ぐことが必要であり、外部の知能すなわち、見通しがきく場所に立つ路側のセンサや、他の車両のセンサによって検知された情報を相互に利用することによって、環境認識能力を飛躍的に向上させる知能の実用化が期待される。

特に歩行者については、自動車とは移動速度が異なること、行動の予測を行うことが難しいこと、交信を行う手段が限られることなどから、位置の特定や危険予知の判断を行うことが極めて難しく、特別な検知対象として分け

て技術開発を進める必要がある。

(ii) 道路交通状況検知知能

また、走行経路の状況把握や経路選択を行う上で、周辺道路や経路上の重要な交通状況を把握する知能も必要となる。現在でもナビゲーションやVICS（道路交通情報通信システム）で、経路上の施設情報や混雑状況が分かるようになってきているが、VICS情報が提供されていない道路も含めて、よりきめ細かく道路交通状況が把握できるようになって行くことが望まれる。

こうした面でも他の車両のセンシング情報を相互利用することが可能であり、事故や渋滞、路面凍結などを検知した車両が周辺の車両にその検知情報（プローブ情報）を効率的に伝達する知能が実現できれば、インフラに頼らずとも車両同士で有益な情報を共有化することが可能と思われる。

将来的には、経路上の遠方については通過予定時刻の交通状況が事前に予知でき、車両の周辺については、見通しがきかない場所も含めて他の移動体の存在や位置が全てデジタル的に把握できるような検知知能（時空間モデリング知能）の実現が期待される。

(iii) 移動体通信知能

当然のことながら、路側や他の車両のセンシング情報を利用するためには、移動体通信知能が必要であり、通信相手により、センター・車間通信、路・車間通信、車・車間通信、歩・車間通信等に区分される。

移動体通信を利用したサービスを行う際、利便系のサービスや情報提供で留まるサービスの場合は、通信のリアルタイム性や信頼性は強く求められないが、安全系のサービスや車両の制御までつなげるサービスになるほど、リアルタイム性と信頼性が強く要求される。

また、車・車間通信により、他の車両にとって重要なプローブ情報（周辺道路や走行経路に関わる事故・渋滞・路面凍結等）を必要となる車両に限定して効率的に伝達する上では、伝達する情報を方向や時間等によって制御する知能が必要となってくる。

(d) 判断・制御知能

検知した情報をもとに自車両がおかれた状況を判断し、ドライバーに注意喚起したり、必要な制御を行う知能である。前方障害物の検知・警告など、特定の事象を目的としたサービスを実現する際には、そのサービスで閉じた情報処理・判断を行える知能があれば良いが、実際の交通社会で発生する様々な危険事象に優先順位をつけながら協調制御を行うためには、自車両に搭載されているセンサ情報と他の車両からのセンシング情報から、自車両の状態と周辺環境の状態を瞬時に判断して自動制御あるいはドライバーの行動支援につなげる統

合処理知能が必要となる。

さらに、我が国だけでも8千万台の保有を数える自動車に全て同じ車載端末を装備させることは当面は不可能であり、車両同士で協調した制御を行う上では、相手側の通信端末や情報処理能力を判断した上で必要な情報を的確に発信するという、ロバストな相手側処理能力判断・制御知能が必要になってくる。

また、自動車の知能化が進み、人と車が一体となった「人・車系」の移動体になればなるほど、車両がおかれた状況をドライバーがどこまで認識しているかを判断しながら、注意喚起や制御を行う必要が出てくるため、ドライバーとシステムとの間のHMI（ヒューマンインターフェース）知能や、ドライバーの状態検知・判断知能が必要となってこよう。

（3）知能デバイス

①知能デバイス概観

前述のように、移動体同士が協調して制御する場合にキーとなる知能は、車両状態検知、歩行者を含めた周辺環境検知、判断・制御知能の3つであり、これらを実現するデバイスとしての方向性は、いずれも、個々のデバイスの高度化を進めるとともに、単一のデバイス利用から複数デバイス利用あるいは統合デバイス利用の方向に向かって行くと考えられる。

すなわち、自車両の位置や周辺環境の検知においては、サービスが高度化するほど、複数センサを用いることによって信頼性や精度を確保する必要が出てくるため、複数の通信デバイスに対応できることや、複数のデバイスから得られる異なる情報を統合して効率的に利用できる情報処理デバイスが重要となってくる。

②車両状態検知知能デバイス

カーナビゲーションに用いられているGPS測位の誤差を低減する技術として、全国にあるFM放送の基地局における誤差情報を近隣の車両に送信するD-GPS（デファレンシャルGPS）技術が広く用いられているが、今後米国でGPSの高精度化計画（GPS近代化計画）があることや、欧州やロシアでも衛星測位システムが立ち上がることなどから、測位に必要な衛星を確実に捕捉できるエリアであれば高精度での測位が可能となる方向にある。

しかしながら、トンネル内や都市部の高層ビルの谷間などでは、衛星が捕捉できなかったり、マルチパス（反射波等）の影響により誤差が発生する問題があり、この点が高精度化の最大の課題となっている。こうした点では、現在でもカーナビゲーションは、GPSで検知した絶対位置情報と、車両の自律航法情報を併用するとともに、マップマッチング技術によりデジタル地図の誤差を含めた誤差を補正しており、現在実用化されているサービス（走行車線の判別までは必要としない経路誘

導等)では実用上は問題ないレベルで実現している。

今後、移動体同士での協調制御など高精度の測位技術が必要となるサービスを実現していくためには、測位に必要な数の衛星が捕捉できないエリア(不感地帯)の対策として、マルチパスの影響を除去する技術や、路側設備(RFID等)やランドマーク認識などを利用した絶対位置補正情報の取得技術が必要となってくる。

③周辺環境検知知能デバイス

(a) センシングデバイス

人間の眼に代わって周辺環境を検知するデバイスとしては、至近距離では超音波センサ、それ以外では画像によるセンシングデバイスやレーダーによるセンシングデバイスが代表的である。前方の障害物のセンシングデバイスとしては、レーザーレーダーやミリ波レーダーが実用化されており、レーザーレーダーはコスト的には有利なもの、天候による影響を受けるため、ミリ波レーダーの低コスト化と高分解能化が望まれる。

夜間における歩行者を検知するデバイスとしては、遠赤外線あるいは近赤外線を利用したものが既に実用化されており、動物との判別ロジックを組み込んだものや、レーダーによる障害物検知と組み合わせられているものもある。

また近年では、画像センサやミリ波帯や準ミリ波帯のレーダーを用いて昼間でも歩行者を検知できる技術が開発されつつあるため、今後は位置検知技術等と組み合わせることにより、より精緻な検知を行う知能デバイスの開発が期待される。

将来的には、複数のセンサを融合させながら、車両周辺の時空間環境をデジタル的に把握する知能デバイスの実用化が望まれる。

(b) 移動体通信デバイス

従来のようにセンターや路側から一方的に自動車へ交通情報等を提供する場合は、ラジオやテレビ、ビーコンなどの放送型の通信で十分であったが、個々の車両との間で個別に双方向通信を行う場合には、状況に応じた通信手段の確保が必要となってくる。

現在実用化されている路側と車両との間での通信では、ローカルな交通情報が路側のビーコンから車両に提供されているだけであるが、近い将来リアルタイム性の高い危険情報等を提供するようになると、より信頼性やリアルタイム性が高く、かつ対象を特定できる通信デバイスが必要となってくる。

また、車車間での通信を行う際に、時間的に余裕があり、かつお互いのアドレスが判明している場合は携帯電話(セルラー)が利用できるが、リアルタイム性の高い危険情報を授受する場合は、どんな通信環境下でも確実に通信できる必要があり、専用の周波数を割り当てた電波や無線LANなどを利用した新

しい通信方式を開発する必要がある。

④状況判断・制御知能デバイス

最も期待されているのは、危険事象に対する状況判断知能であり、車両に搭載されている様々なセンシングデバイスから得られる情報を統合的に処理する知能とともに、過去の知見や外部データベースを活用することによって、人間と同じように危険予測（ヒヤリハット予測）ができるようになることが期待される。

自動車の制御デバイス自体はカーメーカが競って開発を進めている分野であるものの、車両単独で得られるセンシング情報と外部から得られる情報を統合的に処理・判断し、制御すべき優先順位を定める部分には、幅広い知見を投入しながら開発すべきアイテムが多いと思われる。

表 3. 3. 3. 1 ロバスト屋内環境モビリティ知能 ロードマップ (概要)

	従来	現在(2006)	近未来(3年後)	近未来(5年後)	未来(理想、2025年以降)
システム: 屋内自律移動ロボット(概要)	<製造現場の通路での自律移動作業:無人に近い通路空間での移動作業> ・軌道誘導型搬送ロボット	<夜間のビル内通路での自律移動作業:無人に近い通路空間での移動作業> ・巡回警備ロボット ・ビル掃除ロボット	<製造現場通路、屋間ビル内通路での自律移動作業:人、他走行体が存在する通路空間での移動作業> ・フレキシブル工場物流ロボット ・ビル受付/案内ロボット	<オフィス内空間での自律移動作業:複雑かつ変化する人共存空間での効率的な移動作業> ・オフィス内物流ロボット	<駅、空港などの公共空間での自律移動作業:移動環境変化が激しく群集が往来する中でのロバストな移動作業> ・駅/空港構内サービスロボット(行先案内、不自由な人の支援)
運用の前提とする安全ルール	JIS D6802 無人搬送車システム-安全通則	経産省:サービスロボット安全ガイドライン(2007)	工場、ビル通路上自走ロボット運用規則	オフィス空間内自走ロボット運用規則	公共空間運用のための道路交通法相当の規則
知能: 屋内人環境モビリティ知能(概観)	・床面ガイドラインなどの連続型環境インフラ活用による定型自律移動制御 ・低速走行及び障害物検知停止制御による安全性の確保	・床面や壁面ランドマークなどの離散型環境インフラ活用による定型自律移動制御 ・低速走行及び障害物検知停止制御による安全性の確保	・SLAM等の環境インフラ自己位置同定手段の実用化と電子タグ等の環境インフラの融合利用による自己位置センシングのロバスト化 ・動的障害物回避制御による安全かつ高効率な移動	・環境インフラ自己位置同定手段の高度化 ・周囲対象物の移動状況に応じた戦略的な経路生成及び障害物回避行動生成	・ランドマークとしての自然移動目標の識別性能の向上と行程障害の戦略的かつ高速な回避の実現による未知環境に対する高効率ロバスト自律移動の実現
屋内人環境モビリティロバスト知能 ロバスト移動環境認識 [ロバスト指標: 移動可能環境条件]	・床面ガイドライン誘導制御 [屋内通路ガイドライン敷設領域上のみを移動]	・床面/壁面ランドマーク活用オドメトリ誤差校正 ・CAD地図参照自己位置同定 [屋内通路ランドマーク敷設領域上のみを移動]	・2次元SLAM活用自律走行(環境モデルの自己生成/更新) ・電子タグ、無線LANによる環境情報取得、位置補正 [屋内通路上で周囲に環境形状参照対象となる壁・構造物のある任意領域を移動]	・3次元SLAM活用自律走行 ・3次元リアルタイムマップ生成 [複雑な形状の立体構造物が混在し頻りに配置や形状が変動する屋内の任意領域を移動]	・視覚による自然環境ランドマーク認識 [屋内外を問わず任意領域を移動]
戦略的経路生成 [ロバスト指標: 移動可能環境条件]	・ガイドライン遊行シーケンス人為指定 [屋内通路ガイドライン敷設領域上のみを移動]	・CAD地図上経路人為指定 [屋内通路ランドマーク敷設領域上のみを移動]	・獲得環境モデル上での最短時間移動経路計画と認識された行程障害事象に応じた最適迂回経路計画 [屋内通路上で周囲に環境形状参照対象となる壁・構造物のある任意領域を移動]	・周囲移動物体の運動パターン予測に基づく高効率安全移動経路/手順計画 [複雑な形状の立体構造物が混在し頻りに配置や形状が変動する屋内の任意領域を移動]	・記号地図ベース移動計画 [手書地図を手がかりに屋内外を問わず任意領域を移動]
動的障害物回避 [ロバスト指標: 許容移動速度、 移動条件]	・障害物検知停止制御 [数km/h、 障害物が消失するまで停留]	・同左	・複数の人/物体の実時間位置追跡及び自身の動的安定性に基づく動的障害物回避制御 [約6km/h、 複数移動障害物を回避し無停止で走行続行]	・人/物体の判別及び衝突リスク推定に基づく戦略的障害物回避行動生成 [約6km/h、 障害物の移動傾向に応じて高効率回避行動を選択]	・群集間動的障害物回避制御 [10km/h以上、 人移動の俊敏性に対応:JR駅構内の雑踏程度]
デバイス: 人環境モビリティロボット知能デバイス	・磁気・光反射ガイドライン ・赤外線反射センサ ・超音波センサ	・屋内環境対応3次元距離画像センサ ・レンジファインダ ・固定ランドマーク利用三角測量(無線、レーザ等)	・視覚+レンジファインダ融合による周囲認識 ・電子タグ、無線LAN(UWB適用)による環境情報取得、位置補正	・ロバスト画像処理(晴天外乱光量から夜間照明下光量に対応可能なダイナミックレンジ) ・3次元レンジファインダ ・屋外活用可能な長距離(100mオーダー)レンジファインダの低価格化 ・ロボット移動環境構造化/標準化	・屋内外対応3次元距離画像センサ ・3次元形状認識 ・実時間ビジョンチップ(SVGA、実世界認識) ・環境知識DB活用による画像認識ロバスト化 ・屋内GPS

(1) ロボットシステム

屋内を自律移動するロボットは、物品運搬や移動による情報提示(案内)などのサービスを提供するものとして今後の発展が期待されている。

現状で実用化されたものでは、工場内の部品運搬に使用される軌道誘導型搬送ロボットが代表例であるが、無人に近い通路空間の移動作業にとどまっている。より一般的な環境で稼動するものとして、巡回警備ロボットやビル掃除ロボットなどが実用化の段階に入ってきたが、これらはいずれも夜間の建物内という無人に近い通路空間が移動環境であることは同様である。

このように現状では「無人」「通路空間」という限定が必要なのは、次の理由による。前者は、移動ロボットに対する対人安全性が必ずしも満たされていないためである。後者は、移動の誘導のために不可欠な位置同定に基準となるものが必要とされるからである。したがって、将来においてロボットが高度なサービスをするために必要である「移動環境変化が激しく群集が往来する中でのロバストな移動作業」を実現するためには、対人安全性の確保、複雑かつ変化する環境の中での位置同定とそれに基づく経路生成、が不可欠である。

現状では、無人搬送車システムの安全性に関して J I S D 6 8 0 2 という安全通則があるが、きわめて保守的であり、人の間で移動してサービスを提供する将来のサービスロボットへの適用は不適切である。ロボットの対人安全性について考えるためには、自動車の安全性を考えることが有効である。自動車そのものの安全性を高め、かつ、運転技能を向上させても、歩行者の動きによっては交通事故は避けられない。そこで、自動車側と歩行者側の責任範囲を明確にし、事故を未然に防ぐために道路交通法が制定され運用されている。自律移動ロボットにおいても、ロボット自体の安全性をどこまでも高めても周辺に存在する人の動きによっては事故が発生しうるため、ロボットの対人安全性の十分条件を決めることができず、ロボットの実用化の障害となる恐れがある。したがって、人が存在する環境の中でのロボット運用と人の行動について、道路交通法並みの規則が制定され、また、運用者や利用者に対して教育がなされ、一般的コンセンサスが形成されることが望ましい。

上記が達成される過程においては、比較的限定された環境である、工場やビルのロビーなどで稼動する物流ロボット、案内ロボットが3年後程度で実用化され、さらには、さらに変化の大きいオフィス内などで運用されるにいたると予想される。

(2) ロバストロボット知能

屋内自律移動ロボットを実現するための、屋内人環境モビリティ知能について概略を述べる。

この知能は、ロボットが自らの存在する環境について地図情報を含めて認識し(ロバスト移動環境認識知能)、その中で指定された目的地までの効率的な移動経路を生成し

(戦略的経路生成知能)、その移動の過程で発生する非定常な事象に対して安全性を確保する(動的障害物回避知能)ことを達成するものである。その知能は上記に括弧内で示したロバスト知能で構成されている。この屋内人環境モビリティ知能の発展により、自律移動ロボットは、より一般的な環境で動作可能となり、また、その変化にも対応できるようになる。すなわち、従来は床面ガイドラインなどの連続型環境インフラのもとに一次元的な定型自律移動をおこなっていたものが、床面や壁面ランドマークなどの離散的環境インフラを活用することにより、二次元的な定型自律移動が可能となってきている。将来的には、与えられた指示から抽象的な意味を解釈して、対象となる物体を環境からランドマークとして抽出し、移動経路を生成すること(たとえば、「3階の廊下に面した2番目のドア」など)が最終目標であろう。その過程としては、SLAM(Simultaneous Localization and Mapping)と呼ばれる、自己位置の逐次同定と環境地図の作成・修正を同時に実施する手法の実用展開と高度化が3~5年の間に行われるであろう。また、同時期に環境インフラの構造化、標準化も望まれる。SLAMとはロボット等の移動体が、移動しつつ周辺物体の距離を計測し自己の相対的な移動情報との組み合わせから地図データを作成・修正する(Mapping)とともに、計測されたデータとすでに保有する地図データとのマッチングをとることで事故位置を逆算する(Localization)ものである。

これに加えて安全性と効率性のバランスをとる面からは、障害物検知停止制御から動的障害物回避制御、その高速化というトレンドが予想される。その信頼性レベルについては、ロボット運用規則の策定と一般的コンセンサスの形成が前提となることは、前述のとおりである。

次に、前述のロバスト知能のそれぞれについて説明する。

ロバスト移動環境認識知能は、ロボットが自らの存在する環境について地図情報を認識し、かつ、その中で自己位置を同定する知能である。現状は床面のガイドラインを使用して数cmの精度で認識し、ガイドライン敷設領域を動作環境とすることができる。また、最近実用化がされつつあるのは、床面/壁面においたランドマークを活用し、オドメトリ(移動ロボットの車輪の回転数などをもとに、相対移動距離を求めること)による位置同定を補正するという手法である。動作環境としてあらかじめ、物体配置の位置座標を数値で持つCAD地図を与えておけば、数cm~十数cmの精度で位置同定しランドマーク敷設領域を移動することができる。この知能の発展形は前述のようにSLAMという技術にまとめられつつあり、3年後には2次元SLAM(周辺物体距離計測を行う平面領域における物体認識、という意味で「2次元」と呼ぶ)による環境モデルの自己生成・更新による自律走行が実用レベルに達し、数cm~十数cmの精度で周囲に壁のある任意領域を移動できるようになると考えられる。さらに5年後にはSLAMが3次元化され、周囲に立体構造物が存在する任意領域の移動が数cm~十数cmの精度でできるようになると予想される。視覚により自然環境ランドマークを認

識し、任意領域の移動が可能となることが理想レベルである。

戦略的経路生成知能は、指定された目的地までの効率的な移動経路を生成する知能である。現状はガイドライン上の移動シーケンスを与えており、近年実用化されつつある床面・壁面ランドマーク活用移動制御でも、経路を指定することは同様である。3年後には、自己生成した地図に基づき、最短時間移動経路生成が実現し、さらには、5年後には周囲移動物体の運動パターン予測により効率的な移動経路を計画するという、より高度な経路生成知能が実現すると考えられる。さらには、手書き地図のようなあいまいな情報を自ら得た環境知識で補完して移動計画を計画するという高度な知能が実現することが望まれる。

動的障害物回避知能は、移動の過程で発生する非定常な事象(人などの障害物の発生)に対して安全性を確保する知能である。現状では、障害物を検知すると停止することで衝突を回避し、障害物が消失するまでは停留するという制御を行っている。3～5年後には、複数の周辺の人/物体の位置を実時間で追跡し、自らの動的安定性を加味しつつ、無停止で衝突を回避して6 km/h程度で移動を継続することが実現すると考えられる。駅や空港など群集が存在する中でも10 km/h程度の速度で安全に移動することが最終目標である。

(3) ロバストロボット知能デバイス

人を含む、ダイナミックに変動する環境の中でロボットが安全かつ効率的に移動するためには、上述の知能を支える、周辺環境認識、自己位置同定のためのセンシングデバイスが極めて重要である。

従来の軌道誘導型ロボットにおいては、床面に設置した磁気・白線などのガイドラインを認識するための磁気センサ、光学センサが使用されている。また、衝突防止のために近距離の超音波センサも活用されている。

ロボットをよりフレキシブルに移動させるため、床面や壁面に設置されるランドマークを使用する様々な自律移動制御技術が開発され実用に供されつつある。このためには、ランドマークに応じた様々なセンシングデバイスが必要である。固定ランドマークを使った三角測量方式による位置同定では、無線センサや光学センサなどが必要である。このときに、距離のみならず対象位置の方向まで計測できるレンジファインダはきわめて有効である。また、図形を認識する方法では、画像センサが使用される。

近未来(3～5年後)においては、さらに移動の自由度を高めるため、SLAMが有効であると考えられる。そのためには、高精度なレンジファインダが必要となってくる。計測範囲が3次元化されればさらに望ましい。レンジファインダによる計測では、計測領域がある程度限定されること、認識物体の属性までは同定できないこと、などから視覚画像センシングを融合させることが望ましい。すなわち、画像センシングのややあいまいではあるが広範囲のセンシングと、レンジファインダの正確ではあるが領域の限定さ

れた計測の、それぞれの長所を組み合わせることで、環境認識の精度が高まることが期待できるからである。ロボット自体が持つセンシングデバイスからの情報だけではなく、環境側がもつインフラ（電子タグ、無線LAN基地局）などを活用することも、SLAMを補完するために有効である。特にUWB活用の無線位置同定は精度数cmの位置計測が可能となるため期待できる。理想としては、人間の視覚に近いダイナミックレンジのきわめて広く、かつ、画像の意味解析を行うために十分な高分解能の実時間ビジョンチップや、人間の視覚には困難な、広範囲の高精度な定量的距離センシングデバイスが現れることが望まれる。さらには、ロボットが存在する環境が構造化、標準化され、ロボット自体が知識をもたないが未知環境におかれても支障なく移動できるような状況が構築されることが期待される。

表3. 3. 4. 1 知能ロボットソサエティデザイン ロードマップ (概要)

	第一の時代 機械化以前の時代 17世紀まで	第二の時代 単純機械の時代 機械による人の代替 18世紀から20世紀半ばまで	第三の時代 ロボット機械の時代 機械による人の補完 20世紀後半以降現在まで	第四の時代 機械の人間化としてのロボットの時代 ロボットと人の協働 これから
主要イベント	<p>人の能力を拡張するものとしての道具の発明と利用</p> <p>人の力を効率的に発揮させる 石斧、弓矢、槌子、コロ、クルマ</p> <p>動力源としての牛馬の馴化 馬車、粉挽き、井戸汲み上げ</p> <p>動力源としての水力・風力利用 水車、風車</p> <p>熱源としての薪・石炭の利用</p> <p>ゼンマイ、弾み車とカラクリの出現 「ロボットの端緒」</p>	<p>熱を動力に転換する蒸気機関の発明 揚水ポンプ、織機、機関車、自動車</p> <p>発電システムの登場 水力発電、火力発電</p> <p>石油利用の開始</p> <p>機械の普及と多様化</p>	<p>コンピュータの出現 機械の知能化＝ロボット化の端緒</p> <p>工作機械の自動制御化 ロボット機械の出現</p> <p>コンピュータのユビキタス化 機械全般のロボット化の進展</p> <p>一方で、機械と人間の衝突 クルマと交通事故</p>	<p>求められる機械のヒト親和性の向上 ヒトとの親和性を高めた機械としてのロボット設計というシナリオの必要性</p>

(1) 21世紀における機械工学のチャレンジ=機械の人間化

20世紀後半の経済社会を牽引してきた機械の双璧はクルマとコンピュータだろう。特にクルマは、私たちのライフスタイルのみならず、生活環境や都市構造までも激変させる力をもっていた。途上国の人々にとってはいまだにマイカー所有が富の象徴である。しかし、このクルマと言う機械と人間との関係を見直してみると、多くの問題点の存在が見えてくる。クルマはこの百年間その性能を向上させてきたものの、その駆動機構は一つのエンジンと4つの車輪、その制御機構はハンドルとペダル、感知機構はドライバーの視覚と聴覚のままに止まっている。駆動機構は旧態依然、制御機構、感知機構はドライバーの技量とモラル頼りでは、昨今の無謀運転、飲酒運転等に起因するリスクが解消されないのは当然である。現状でのクルマの性能（ヒトを感知できない、回転に広いスペースが要る、騒音や排ガスを発生させる等など）を前提としたままで、クルマの高速走行化が求められ、そのための道路整備が推進されるため、歩行者や沿道住民は、常に、スピード、排ガス、騒音等によって脅威を受け、生活の質は低下し、都市そのものが非人間化されることになってしまっている。

今こそこれらの問題を再認識し、一からクルマを設計し直し、さらに道路の再設計も行き、最終的に都市の再人間化を実現する試みを開始する必要があるのではないだろうか。

だからといって、クルマの再設計が、猛スピードから一瞬のうちに静止できる制御性能を実現しようとする形で行われるのは誤った方向である。そのような形でクルマが近づいてくることは、歩行者にとっては大きなストレス源(恐怖)以外の何ものでもない。むしろ、遠方から横断歩道を渡るヒトを発見して、徐々に速度を減速する「穏やかな」態度(制御機構)を目指すべきである。ヒトに関心を向け、ヒトの気持ちを慮るようになること、これこそが機械の進化の方向すなわち知能化だろう。

また、クルマがよりスムーズに通行できるように都市内に新たに自動車専用道路網を整備し直すことは実態的に不可能である。半世紀前に東京の街に自動車専用道路を造ろうとしたときですら、スペースは、川の埋め立て、川の上空、既存道路の上空にしか求められなかった。現在の首都高速道路整備は道路の地下で行われている。空間がないからと言って、歩行者中心の道路空間として最後まで残されてきた細街路を、クルマのための抜け道に転換すべきでないことは当然である。都市にはこれ以上の車道のためのスペースはないと観念すべきである。

そもそもヒトの時間4km程度の歩行速度とクルマの都市内道路での制限速度60kmの差は大きすぎる。歩行者のいない自動車専用的高速道路、ほとんど歩行者のいない都市外の都市間連絡幹線道路であればクルマが時速100kmで走行することは許容され得るが、歩道と車道が分離されていない、あるいは分離されてはいても空間的には隣接している都市内幹線道路において、歩行者のすぐ脇を歩行者のスピードの10倍を超えるスピードで鉄の塊であるクルマが疾駆していくこと自体が問題である。

クルマのスピード性能は年々進化し、クルマの大きさは年々拡大し、クルマの対衝撃性能は向上してきた。クルマはその内部のドライバーや搭乗者にとって、年々便利、快適、安全なものになっているかもしれないが、クルマの外にいる歩行者にとっては、ますます危険なモノになっている。自動車メーカーの展示場に40年前の旧型車が展示されていることがあるが、それは小さく、軽いブリキ玩具のような、可愛らしく微笑ましいものに見える。その傍らに置かれた最新のオフロード4WD車は、それとは正反対にまるで戦車のような。エアバッグ等の対衝突安全装置も、クルマ同士の事故の際のクルマの中にいるヒトの安全は守ってくれるが、クルマとヒトとの事故の際に、歩行者やサイクリスト、車椅子やベビーカーの搭乗者にとっての安全は一つも向上していない。

クルマの社会的役割を再定義（具体的には要求走行スピードの減速化、「狭い日本そんなに急いでどこへ行く」意識を徹底）することを中心に、歩行者とクルマの主従関係を再設定（具体的にはクルマ優先から歩行者優先の交通体系へと転換）し、道路の設計そのものを見直すこと（具体的には、車道から歩道・自転車走路への道路空間の再配分）によって都市空間そのものを、より人間的なものへと再構築することを考えるのである。

クルマの駆動システム、制御システム、感知システム、車体システム等の抜本的な再設計によって、ヒトのようにしなやかに動き、ヒトのようにきめ細かい気配りのできる人間的なクルマ造りを目指すこと、それこそが21世紀わが国機械工学界の主要挑戦課題になるべきではないだろうか。

一つのアイデアとして、クルマを二つの概念に分化する考え方があるのではないだろうか。従来型のクルマは、馬車をより強力かつ高速にするという発想の延長線上にある。これに対して最近出現している電動シニアカート（あるいは電動クルマ椅子）等は、言わば杖や手押しクルマ椅子、介助者による歩行支援を代替する性格が強く、そもそも馬車代替の発想とは異なる。この両者が同じように見えることで、クルマのデザインに混乱が生じているように思える。アニメの世界ではないがモビルスーツのような、あるいは開発されているパワードスーツのような人の運動能力の代替・補完を起点にした新たなクルマの開発が意識的に志向されるべきだと考えられる。

（2）ROBOTに関するいくつかの前提条件

①生活環境の構造化に関して

ROBOTの作動のために私たちの生活する空間の構造化を企図するのでは本末転倒ではないか。クルマに即して言えば、過去においてはクルマの走行の円滑化のために都市空間を道路によって改造・分断してきたが、そのことの非人間親和性、非環境親和性が今、反省されつつあることを想起すべきである。

カーナビの音声認識機能に認識してもらうために、ドライバーの方が不自然な話し方になってしまうのでは悲喜劇である。

都市空間・生活空間を人間のために再構造化することこそが、今後の課題であって、ROBOTはその構造化の役割を（例えば、自動街角見守りROBOTのような形で）担うべきものとして位置付けるべきではないか。

この際に、参考となる考え方に、バリアフリー・デザイン、ユニバーサル・デザインがある。バリアフリーとは、主に移動能力の劣る高齢者や障害者に配慮して空間整備を目指すもので、床や歩道の段差の解消、車椅子利用者等のためのスロープ、階段への手摺や滑り止め設置、あるいは視覚障害者のための誘導ブロックや音声信号の設置を進める考え方である。ユニバーサル・デザインはさらに進んで、およそ人の使う道具や機器、空間は、運動能力や知覚能力を十全に発揮できる健常の成人を前提にデザインされるべきではなく、幼児、高齢者、障害者などの制約条件を抱えた人を含む全ての人が利用可能な形でデザインされていなければならないという発想である。

人の社会全体においてこのバリアフリー・デザイン化、ユニバーサル・デザイン化が進むことは、一般的に人よりも総合的能力の劣るROBOTの社会への統合のための前提条件整備に働く有利条件となることが期待される。

②人とROBOTの関係について

政治・経済・社会の分野での最大の課題は人々の生活保障をいかにして実現するか、その最大の受け皿としての所得＝雇用機会をいかにして確保するかにある。人間のための雇用機会の創出につながる形としての「ROBOTと人の協働」のシステムが目指されるべきではないか。

現代世界の社会経済システムが直面する最大の問題は「失業」である。欧米先進諸国にせよ、わが国にせよ、発展途上国にせよ、失業こそが、貧困を生み、Underclassを生み、社会対立を生む最大の要因となっている。したがって、経済成長も雇用機会の創出に繋がらなければ（逆に言えば、経済格差の拡大にのみ寄与するようでは）社会的目標とはならない。中国、インド、ブラジル、ナイジェリア等で、今後発生する膨大な雇用機会需要に応えるためにも、人の介在を前提とした生産システムが必要とされている。

ヨーロッパにおいて特に失業率の高い国々は、かつて農業が機械化されていく過程で余剰となった農業労働力を都市セクターが吸収できなかったことに端を発しているという分析がある。その原因は、多世代家族や専業主婦のいる核家族が根強かったことによって、家庭内（無償）労働との競争で経済のサービス化が進みにくく、雇用機会の創出が不足したからであるとされている。これに対して北欧の国々では、育児、教育、介護、医療等を軸にケアワーカー、ヘルパーと言った人的サービスを充実させることによって雇用機会の創出を図ってきた。

この意味で、社会の全領域にわたって人を完全に代替するシステムとしてROBO

Tを構想するのではなく、社会の中でのROBOTと人との役割分担を前提とした「協働社会」のグランドデザインが必要とされている。人を補助させる、常に人と協働させる、あるいは人と役割分担して生産システムのある部分を集約的にROBOTに担わせるといった人とROBOTの関係の前提条件を十分に議論する必要がある。

③ROBOTとは何か

そもそも、機械（ROBOT）の意義・役割・効果として認められているのは、
人に代わって苦役を担ってくれる（牛馬の延長としてのクルマ、農機、建機）
人の能力を拡張してくれる（算盤、計算尺の延長としての電卓、コンピュータ）
（体力の延長としてのパワードスーツ）
（記憶力の延長としての録音・録画・DB装置）
生物としての制約を解消してくれる（飼い犬の延長としてのペットロボット）
（身体の延長としての生命維持装置）
空間制約を拡張してくれる（電話、ネット、ELV） e t c .

ものとして、であろう。

人が感じる苦痛や限界、制約を取り除くという役割である。

ということは、個々人が苦痛や限界を感じていないにもかかわらず、政治や経済という非人格的システムが、その効率性を高めるといった目的のためだけに、人をROBOTによって代替しようと企図するのは誤りであろう。

常に、人にとってどのような意味（経済的利益であれ、時間的利益であれ、快感であれ、ストレス解消であれ）があるのかを出発点にROBOTシステムを構想すべきである。逆に、そのように発想することでROBOTの将来像が明確になると考えられる。

3. 4 パーソンオリエンテッド知能について

表3. 4 パーソンオリエンテッド知能 ロードマップ

(1) ロバストロボットコミュニケーション知能

(注)「#」はrobustness index

知能	従来	現在(2006)	近未来(3年後)	近未来(5年後)	未来(2025以降)
ロボットのコミュニケーション知能 ①コミュニケーション情報認識・取 #認識環境 ②コミュニケーション情報表現 #表現環境 ③インタラクション知能 #トピック数	パーバル情報認識 (ヘッドセット音声認 #無人環境 ②固定動作表現再生 録音音声 #無人環境 ③固定的インタラクショ 単一シナリオ再生 #1	パーバル情報認識 (マイク利用音声認 #静かなオフィス 複数の動作表現再生 平坦な音声合成 #静かなオフィス Q&A的インタラクショ マルチシナリオ再生 #1	ノンパーバル情報認識 (非音声雑音下音声認識) #ショッピンセンタ特定エリ ジェスチャの生成 感情的音声の合成 #ショッピンセンタ特定エリ インタラクション追加可能 知識、語彙の逐次追加 #3~5	ノンパーバル情報構造化 (音声雑音下での音声認識) #ショッピンセンタ複数エリ ニュアンスの生成 愛想の表現 #ショッピンセンタ複数エリ 設計外インタラクションに対処 インタラクション履歴逐次利用 #10~20	パーバル・ノンパーバル統合 #日常環境 人にわかりやすい表現の生 愛想の表現 #日常環境 人間のようなインタラクション インタラクション自動生成 #∞
ロボットのコミュニケーション知能デバイス ①情報認識・取得デバイス ②情報表現デバイス ③インタラクション知能デバイス	ヘッドセット ボタン/タッチパネル	ノイズキャンセラ レーザ距離センサ GPS	特定領域情報取得デバイス 指示語表現 ジェスチャ用デバイス インタラクション情報取得デバイス インタラクション蓄積デバイス	広域情報取得デバイス 広域移動デバイス 安全ジェスチャ生成デバイス 集団インタラクション情報取得 インタラクション高速検索デバイス	インフラ型情報取得デバイス 脳-マシンインタフェース アンドロイド (人と変わらない表現デバイス) インフラ型情報提供デバイス

(2) パーソナル作業支援ロボット知能

知能	従来	現在(2006)	近未来(3年後)	近未来(5年後)	未来(2025以降)
パーソナル作業支援ロボット知能 ①作業指示認識知能 ②作業対象物位置管理知能 ③作業対象物認識知能 ④マニピュレーション知能	スイッチ操作 なし 事前プログラムによる動作 なし	スイッチ操作 なし 事前プログラムによる動作 なし	「携帯っつて」という作業指 示から作業計画を生成 ロボットが動かした物体の追 跡・管理 テーブルの上の携帯をの位置 と姿勢を認識する 不定形物をマニピュレーションす る	「テーブルを片付けて」という作 業指示から作業計画を生成 人が動かしても、追跡・管理す る 重ねて置かれた皿等の作業対 象物の種類、位置・姿勢を認識 準柔軟物(袋物など)形状が変化 する物体)もマニピュレーション する	「あれっつて」という作業指示 から作業計画を生成 人が動かしても、追跡・管理す る 上に物があり見えなくても、 そこにある物の種類を認識 不定形物もマニピュレーション する
パーソナル作業支援ロボット知能デバイス ①ハンド用力覚センサ #構成 #検出軸数 #最小検出モーメント(N・cm) ②ハンド用触覚センサ #構成 ③ビジョンセンサ #環境適応レベル ④ハンドユニット #指令レベル ⑤アームユニット #環境適応レベル	アンプ分離型 #3 #0.15 #処理部分離型 #均一照明 #各軸のトルク/位 #なし	アンプ内蔵型 #3 #0.15 #処理部分離型 #変化しない室内光 #各軸のトルク/位 #エンドエフェクタ部 力制御	処理部一体型(アーム内蔵) #6 #0.015 #処理部アーム内蔵型 #変化しない室内光 #作業(掴む、回す、押す等) #同左+アーム部力制御	処理部一体型(ハンド内蔵) #6 #0.015 #処理部ハンド内蔵型 #太陽の間接光を含む室内光 #同左+作業(握める等) #同左+ハンドユニットと協調	処理部一体型(ハンド内蔵) #6 #0.015 #処理部ハンド内蔵型 #屋外 #同左+作業(道具の操作) #同左+環境認識センサ 情報にもとづく姿勢変更

(3) パーソナルQOL向上ロボット知能

知能	従来	現在(2006)	近未来(3年後)	近未来(5年後)	未来(2025以降)
パーソナルQOL向上ロボット知能 ①知能的人間計測とインタフェ ース ②柔らかい動作	近距離での視線追跡 EMG認識 筋電制御 コンプライアンス制御	筋電の解釈による少 数の自由度の制御 ウェアラブル機器に よる心拍、呼吸、発 汗などの計測 全身骨格モデル 力覚フィードバック	ウェアラブルセンサによる、生 理量の長時間計測による健 視覚による不審行動の識別 や行動のラベル付け 筋骨格モデルと人間の動きを 元にした冗長関節制御 人間の動作の予測	血圧、呼吸、筋電を加えた、よ り多面的な個人の健康状態管理 認知心理と行動の因果モデル から、個人の嗜好性モデルと快 適性・感性評価 柔軟物の幾何モデルと接触・変 形シミュレーション 不定形柔軟物体の視覚・触覚 認識、マニピュレーション	意図理解 ブレイン(神経)インタフェース 不整地を含む任意環境の移 動と人間の歩行補助 体内(血管、消化管)移動
パーソナルQOL向上ロボット知能デバイス 電動アシスト機構 モーションキャプチャ 筋電センサ、視線検 出	振動ジャイロ、高速 度ビジョン 体温、発汗、動き、心 拍などのウェアラ ブル生体計測 細込みプロセス、 RFIDタグ	街角ユビキタスセンサ、情報 家電埋め込みセンサ ウェアラブル非侵襲生理量 センサ、ポディスキヤナ 小型省電力組み込みプロセ サ、力提示、小型力センサ	ストレスセンサ、面接触圧カセ ンサ、 フレキシブルマニピュレータ、人 工筋肉、多指ハンド ライフLOGGER	体内埋め込みセンサ 冗長系 小型分散系	

(4) パーソナルモビリティロボット知能

知能	従来	現在(2006)	近未来(3年後)	近未来(5年後)	未来(2025以降)
パーソナルモビリティロボット知能 ①自律走行知能 #位置精度 ②走行能力知能 #段差、登板角度 ③障害物の検知・回避知能 #検出距離 ④搭乗者操作知能 #操作デバイス	教示経路・速度で、 磁気マーカ等で位置 を補正して自動走行 #軌跡精度10mm 専用の水平面走行 路の走行 #10mm 障害物の接触、近接 を検出して自動停止 #接触~100mm 基本動作を専用の教 示装置で事前設定 #ティーチングBOX	教示経路・速度で、 磁気マーカ等で位置 を補正して自動走行 #軌跡精度10mm 整地された平面路走 行 #10mm、2° 障害物との距離測定 により停止・回避 #~3m 走行路のCADデータ 上でのオフライン設 定 #GUI	地図で目的地を教示し、走行 経路自動生成。専用ラ ンク自動検出で自己位置同 位 段差などの不整地や建築基 準法のバリアフリー領域の走 行 #100mm、10° 近距離の障害物を三次元的 に検出し自動回避 #~10m 操縦桿型運転装置での搭乗 者運転操作。地図で目的地設 定	経路自動生成とルート学習機 能。 周辺環境の認識による自己位 置 階段昇り降りなど、人間の歩行 に近い走行能力 #200mm、20° 動的障害物検知による走行へ の影響判断と回避経路の自動 生成 #~20m 音声認識・合成などのヒューマ ンフレンドリーなデバイスで操作	路・ロボット間通信インフラ。 施設内情報に基づく最適 ルート選定。複数ロボット協 働 #施設内10mm 坂路登板、段差踏破などで 人間と同等の走行能力を突 破 #~300mm、~30° 視覚情報や路・ロボット間通 信による最適回避/バタ ーン #見通しの利かない交差点 施設内情報インフラ連携によ る各種情報提供サービス #直感的認知インターフェイ
パーソナルモビリティロボット知能デバイス ①位置特定デバイス ②環境認識デバイス ③HMIデバイス ④モビリティ通信デバイス	磁気マーカ 超音波センサ 電氣的なスイッチ 赤外線通信	GPS、地図マッピング 無線測位システム レーザ測距センサ 生体検出赤外線セン タッチパネル等のGUI 無線LAN、光ビーコン	高精度GPS 三次元光学センサ 不特定話者音声認識技術 RFIDタグ	周辺画像の認識による位置同 位 3次元画像処理による環境認識	高精度GPS 施設内ポジショニングシステ ム等との統合自己位置同定 施設内案内システムなどと連 携した環境認識

本章では、ロボットによる個人へのサービスを目的として、人間とのコミュニケーション、生活の質の向上、作業支援、移動支援を実現するためのロボット知能について考える。少子高齢化が加速する中、今後ロボット技術が高度化・知能化し、家庭においてロボットがさまざまな役割を果たすことが期待されている。しかしながら、家庭環境は、工場の限られたエリアで人間との接触を避けて動作する産業用ロボットとは対極にある利用環境である。段差や障害物を多く含む移動環境は複雑かつ多種多様であり、また、認識技術の適用時に問題となる雑音や照明の環境も多様であり、さらに、ロボットと接触する人間も、乳幼児から高齢者まで多種多様なケースが想定される。このような環境で安全・確実にサービスするロボットを実現するためには、知能技術の高度化が必須である。本章では、個人にサービスするロボットに今後必要となる知能化技術の種類、達成すべきレベル、および必要となるデバイスについて、以下の4つの分類に従って解説する。

(1) ロバストロボットコミュニケーション知能

ロボットと人間とのコミュニケーション技術として、音声対話技術が盛んに研究されている。しかし、多様な環境で、多様な相手に対して、多様なサービスを提供するためのコミュニケーションを的確に行うためには、音声のみならず、各種の認識技術・表現技術を組み合わせて実行する必要がある。これらの技術を、入力手段である「コミュニケーション情報認識・取得知能」、出力手段である「コミュニケーション情報表現知能」、および、それらを組み合わせ、本来の目的であるユーザとのコミュニケーションを実現する「インタラクション知能」、の3つに分類して解説する。

(2) パーソナル作業支援ロボット知能

人間が生活する環境において作業支援を行うためには、人間の指示を理解し、また対象物の位置を把握して、指示内容を的確に実行する必要がある。ここでは、指示を理解し、位置を記憶・管理している対象物をどう扱うかを計画する知能を「作業計画知能」と呼ぶことにする。作業計画知能は、①人間の指示を理解し、動作計画を立案するための「作業指示認識知能」と、②環境とそこにおかれた物体の位置・形状を認識し、対象物を把握するための「作業対象物位置管理知能」から構成させる。また、作業計画知能が立案した作業計画に基づき、実際にロボットを操作し作業を実現する知能を、ここでは「作業遂行知能」と呼ぶことにする。作業遂行知能には、③作業対象物の種類・位置・姿勢を認識する「作業対象認識知能」と、④実際に対象物に対する操作を行う「マニピュレーション知能」に分類される。

(3) パーソナルQOL向上ロボット知能

今後家庭にロボットが入ってきたとき、人間と触れ合い、人間の機能を補助して、人間の福祉に直接的に貢献するロボットが期待される。ここでは、このようなロボット実

現するための知能「パーソナルQOL向上ロボット知能」と呼ぶことにする。本知能の特徴としては、生体信号などを観測して、それによってロボットを制御して人間に直接働きかけることであり、人間と濃密なインタラクションを行い、人間にとって快い方法で機能を補助することが期待される。これを実現するための技術として、「知能的人間計測とインタフェース」と「柔らかい動作」を実現する知能について解説する。

(4) パーソナルモビリティロボット知能

今後、ロボット技術を応用して、駅、空港、商業施設などにおいて、人間の移動を支援する、パーソナルユースの移動体の実現が期待されている。この実現のためには、人間と混在する環境で、迷わず安全に移動する必要があり、次のような知能の実現が必要になる。すなわち、①地図やマーカ情報、センシング情報を用いた的確な移動を実現する「自律走行知能」、②段差やスロープ、階段などに対処し、人間と同等の移動能力を実現する「走行能力知能」、③人間や物体にぶつかることなく安全に移動するための「障害物の検知・回避知能」、④ユーザが簡易に的確に指示を与えられるようにするための「搭乗者操作知能」である。

表3. 4. 1. 1 ロバストロボットコミュニケーション知能 ロードマップ (概要)

	従来	現在(2006)	近未来(3年後)	近未来(5年後)	未来(2025以降)
システム	<ul style="list-style-type: none"> ●博物館などでの自動説明 <p>・固定的コミュニケーション ・一方的情報提供</p> <p>#満足度の高い対話の 平均継続時間</p>	<ul style="list-style-type: none"> ●オンライン予約システム ●自動応答システム <p>・利他的コミュニケーション ・Q&Aの情報提供</p> <p>#0分(利他的)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ●店員(販売員)支援ロボット ●記憶支援ロボット ●買い物支援ロボット <p>・特定領域内で設計者が意図して いなかったコミュニケーションにも段階的 に対応</p> <p>#5分/トピック</p>	<ul style="list-style-type: none"> ●店員ロボット ●秘書ロボット ●おでかけ支援ロボット <p>・複数領域内で設計者が意図して いなかったコミュニケーションにも対応</p> <p>#10分/トピック</p>	<ul style="list-style-type: none"> ●家事支援ロボット <p>・日常的コミュニケーション</p> <p>#10分以上/トピック</p>
知能	<p>ロバストロボットコミュニケーション知能</p> <p>①コミュニケーション情報認識・取得</p> <p>・バーバル情報認識 (ヘッドセットによる音声認識)</p> <p>・相手の位置情報</p> <p>#認識環境</p>	<p>・バーバル情報認識 (1m先のマイクによる音声認識)</p> <p>・位置情報シームレス取得</p> <p>#静かなオフィス</p>	<p>・ノンバーバル情報認識 (ジェスチャ・表情・視線・生体情報)</p> <p>・バーバル情報認識 (非音声雑音下での音声認識)</p> <p>・環境情報構造化</p> <p>#ショッピングセンタの特定エリア</p>	<p>・ノンバーバル情報構造化 (周期的な規則性や順序性の抽出)</p> <p>・バーバル情報認識 (音声雑音下での音声認識)</p> <p>#ショッピングセンタの複数エリア</p>	<p>・バーバル・ノンバーバル 組み合わせ認識</p> <p>#日常環境</p>
	<p>②コミュニケーション情報表現</p> <p>・固定的動作表現再生</p> <p>・文字 ・録音音声/身体表現再生</p> <p>#表現環境</p>	<p>・複数動作表現再生</p> <p>・平坦な音声合成 ・身体表現変換</p> <p>#無人環境</p>	<p>・指示語表現および 指さしなどのジェスチャの生成</p> <p>・感情的音声の合成 ・適応的身体表現合成</p> <p>#ショッピングセンタの特定エリア</p>	<p>・ニュアンスの生成</p> <p>・愛想の表現 ・バーバル・ノンバーバル表現の 組み合わせ</p> <p>#ショッピングセンタの複数エリア</p>	<p>・人にわかりやすい表現の生成</p> <p>#日常環境</p>
	<p>③インタラクション知能</p> <p>・固定的なインタラクション</p> <p>・単一シナリオ再生</p> <p>#トピック数</p>	<p>・Q&A的なインタラクション</p> <p>・マルチシナリオ再生</p> <p>#1</p>	<p>・特定領域内で、設計者が意図してい なかったインタラクションを追加可能</p> <p>・インタラクションプリミティブの組合せと 知識・語彙の逐次追加による シナリオ組立て</p> <p>・インタラクション情報DB構築</p> <p>#3~5</p>	<p>・複数領域内で、設計者が意図して いなかったインタラクションにも対処</p> <p>・インタラクションプリミティブの組合せと インタラクション履歴の逐次利用による シナリオ組立て</p> <p>・インタラクション情報構造化</p> <p>#10~20</p>	<p>・人のようなインタラクション</p> <p>・インタラクションシナリオ自動生成</p> <p>#∞</p>
デバイス	<p>ロバストロボットコミュニケーション知能デバイス</p> <p>①コミュ情報認識・取得デバイス</p> <p>・ヘッドセット ・ボタン/タッチパネル</p>	<p>・ノイズキャンセラ ・レーザ距離センサ ・GPS</p>	<p>・特定領域コミュ情報取得デバイス (視聴触覚のセンサネットワーク)</p>	<p>・広域コミュ情報取得デバイス</p>	<p>・インフラ型コミュ情報取得デバイス ・脳-マシンインタフェース(BMI)</p>
	<p>②コミュ情報表現デバイス</p> <p>・CRT/LCDなど ・人形型ロボット(動くマネキン)</p>	<p>・人型ロボット ・表情表現デバイス</p>	<p>・指示語表現・ジェスチャ用デバイス ・視線表現デバイス ・手指表現デバイス</p>	<p>・広域移動デバイス ・安全確保型ジェスチャ生成デバイス</p>	<p>・アンドロイド (人と変わらない表現デバイス)</p>
	<p>③インタラクション知能デバイス</p>		<p>・インタラクション情報取得デバイス ・インタラクション蓄積デバイス</p>	<p>・集団インタラクション情報取得デバイス ・インタラクション高速検索デバイス</p>	<p>・インフラ型インタラクション情報提供デバイス</p>

(1) ロボットシステム

① ロボットコミュニケーション分野の特徴

人と人のコミュニケーションには、音声（発話）を使ったもの、身体（ジェスチャ）を使ったもの、文字を使ったもの、物を使ったものなど、様々な形態がある。人は、これらの形態を単独あるいは組み合わせて使用し、相手にメッセージを伝えている。ロボットコミュニケーション分野では、人と人のコミュニケーションのように、人とロボットがコミュニケーションするための様々な技術を扱う。この分野で対象となるロボットは、主にパーソンオリエンテッド知能ロボットのように、人に日常生活で必要となる情報を提供したり、人の日常的な作業を物理的に支援したりするロボットである。

人がコミュニケーション相手にメッセージを伝えるために利用する情報をまとめて、ここではコミュニケーション情報と呼ぶ。コミュニケーション情報は、音声・ジェスチャ・姿勢・立ち位置・視線・表情・文字など、人が昔から日常的にコミュニケーションに利用してきたものに加えて、天気や時事ニュースのようにインターネットなどのサイバー空間を検索して取得できる情報や、近年研究開発が進められている構造化された環境情報（意味づけされた空間情報）など、現在や未来の情報化社会で、人やロボットがコミュニケーションに利用可能な情報も含む。ロボットコミュニケーション分野の技術は、コミュニケーション情報に基づいて分類すると、大まかに以下の3つの技術に分けられる。

(a) コミュニケーション情報認識・取得技術

コミュニケーション情報を認識する技術、あるいはサイバー空間や環境情報構造化プラットフォームからコミュニケーション情報を取得するための技術。人が利用するあらゆるコミュニケーション情報を認識・取得することが目標。

(b) コミュニケーション情報表現技術

コミュニケーション情報を、ロボットの機構やディスプレイ・スピーカなどの表現デバイスを使って表現する技術。人にとってわかりやすい表現を実現することが目標。

(c) インタラクション技術

インタラクションとは、ここではコミュニケーション情報のやりとりを指す。インタラクション技術とは、コミュニケーション情報の認識・取得・表現の連なりを作るための技術であり、あるコミュニケーション情報を認識したときに、ロボットがどんなコミュニケーション情報をどのように表現するか、以後のコミュニケーションに反映しやすい形式で話した履歴を残しておくか、などを決定する技術。人のようなインタラクションを実現することが目標。

人にサービスを提供するロボットであるパーソンオリエンテッド知能ロボットに

とって、人とのコミュニケーションは不可欠である。上記の3つの技術の研究開発の結果として実現されるロボットシステムは、人が意識的・無意識的に発しているコミュニケーション情報を認識・取得し、それに応じて適切なコミュニケーション情報を表現するシステムとなり、パーソンオリエンテッド知能ロボットの基本システムの一つとなる。

②ロボットコミュニケーション分野の歴史的な流れ（従来から現在）

従来、ロボットコミュニケーション分野では、視覚のみや聴覚のみの単一モダリティ（感覚）、文字情報のみや音声のみの単一チャネル（表現媒体）による、コミュニケーション情報の認識・取得および表現のための技術が重点的に研究開発されてきた。現在では、一人から数名を相手に、バーバル（言語）情報を中心としたコミュニケーションが可能なロボットの実現を目指して、複数モダリティ、複数チャネルを使ったコミュニケーション情報の認識・取得・表現の研究開発が盛んに行われている。

特に、コミュニケーション情報の認識に関する研究開発は、従来は無人環境、現在は日常生活環境の中でも静かなオフィス環境など雑音が少ない特定の領域で、使用可能な技術をターゲットとしており、雑音や照明条件の変化が大きい環境でも安定してコミュニケーション情報を認識するための技術の研究開発が進められている。一方、単体のロボットでは知り得ないコミュニケーション情報を取得するための研究開発としては、例えば、ロボットがインターネットから天気などの情報を取得し人に提供するサービスをロボットサービスイニシアチブ（R s i）などが進めている。また、混みやすい場所、迷いやすい場所など、意味づけされた空間の情報も、ロボット単体では知り得ないコミュニケーション情報の代表的な例であり、これは、内閣府総合科学技術会議が進めている環境情報構造化プラットフォームなどの研究をさらに推進することで取得できるようになる。

しかし、それらの成果からコミュニケーション情報の認識・取得・表現が可能となっても実現できないことは、システム設計者が意図していないコミュニケーションをユーザから求められたときの対処である。先に述べた三つの技術分類において、（c）インタラクション技術がこれにあたるが、現在のインタラクションは固定的であり、予め用意されているシナリオに沿ったインタラクションにとどまっている。この技術が進まない限り、人のようなわかりやすく気の利いたコミュニケーションを行うことは困難である。設計者の想定外の状況に対処するためには、ロボット単体では知り得ないコミュニケーション情報や、人と他のロボット／人と人のインタラクション情報を、取得・蓄積・構造化し、ロボットコミュニケーションシステムに、逐次、適切に利用していく能力が必要となる。ここでは、この能力を実現するための知能を、ロバストロボットコミュニケーション知能と呼ぶ。ロバストロボッ

トコミュニケーション知能とは、多用途で（何にでも・what）／環境が変わっても（どこでも・where）／だれとでも（who）／いつでも（when）、コミュニケーションを実現するための知能である。

③ロボットコミュニケーション分野の3年後、5年後（近未来）

ロボットコミュニケーションシステムは、ロバストロボットコミュニケーション知能によって、次のように進展する。まず3年後には、特定の領域で、ジェスチャや音声の認識・構造化された環境情報の取得・ジェスチャと音声による指示語表現などが可能なロボットが、設計者が意図していなかったコミュニケーションにも逐次的・段階的に対応可能になる。5年後は、複数の領域で、ジェスチャや音声による指示語表現の認識・ニュアンスの表現などが可能なロボットが、設計者が意図していなかったコミュニケーションに対応可能になる。

ロボットコミュニケーションシステムによって実現される具体的なロボットとしては、サービス型業務ロボット（警備・案内・受付・見守りなど）が挙げられる。独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）が2004年度から2年間実施した次世代ロボット実用化プロジェクトにおいては、警備ロボットや掃除ロボットなどが研究開発され、様々な人が行き交う愛・地球博会場で実際に長期間活動していた。また、受付・案内をするロボットが病院に導入された例もあり、サービス型業務ロボットの需要は高まりつつある。コミュニケーションを中心としたサービス型業務ロボットとしては、実際のショッピングセンタで初級クラスの販売員支援として、お買い得情報の提供や場所案内などのサービスを提供する実験が行われている。

これらは、前節で述べたような固定的なインタラクションに基づくコミュニケーションを行うロボットであるが、病院やショッピングセンタなどの実際の環境での音声やタッチパネルによるコミュニケーション情報取得技術やロボットの身体を使ったコミュニケーション情報表現の技術など、実用的な技術開発が行われている。これらの技術と、ロバストロボットコミュニケーション知能を用いれば、さらに高度な人にわかりやすいコミュニケーション手段を用いたサービス型業務ロボットが実現できる。例えば、ショッピングセンタの販売員であれば、お買い得情報の提供や場所案内だけでなく、顧客の欲しい商品の紹介や販売の折衝など、初級から中級クラスの販売員の支援が可能となる。したがって、ロボットコミュニケーションシステムによって実現される具体的なロボットの近未来のイメージは、3年後には、ある特定の売り場（例えば液晶テレビコーナー）の初級から中級クラスの販売員の販売作業を支援するロボットが実現でき、5年後には、液晶テレビ・パソコン・洗濯機など複数の売り場での販売員の作業を代行するロボットが実現できる。

上述した販売員のように情報提供を主としたサービス型業務ロボットは、他にも、

電子秘書、記憶支援などが考えられる。また、買い物支援や外出支援などの物理的な運搬や移動を伴う業務においても、ロバストロボットコミュニケーション知能による人への適応的なコミュニケーションは効果的に働く。例えば、外出支援における歩行補助では、人の位置を取得し、それに応じてロボット自身の位置を決める、あるいは人の移動速度の履歴や生体情報から疲れ度合いを取得し、その人に適した移動速度や移動経路を調整する、など、人が意識的・無意識的に表すメッセージを読み取り、それにあわせて情動的・物理的支援を行うことが出来るようになる。

④ ロボットコミュニケーション分野の未来（理想）

さらにこの研究開発が進んだ先には、人のあらゆる表現を的確に理解できるようにコミュニケーション情報を認識・取得し、人に伝えるべき情報を適切にわかりやすく表現できるコミュニケーションロボットが、日常的な環境において我々の生活を支援する未来（例えば、気の利いた家事支援ロボットの実現など）が期待できる。

(2) ロバストロボットコミュニケーション知能

① ロボットコミュニケーション知能概観

前節で述べたロボットコミュニケーションシステムを実現するために必要となる知能、すなわちロボットコミュニケーション知能を概観する。ロボットコミュニケーション知能では、従来は、モダリティやチャンネルが少なく、コミュニケーション情報の認識能力や表現能力が低かったため、その知能によって実現されるコミュニケーションは、一方的な情報提示、あるいは、予め決められたコミュニケーションシナリオに基づく単一モダリティ・単一チャンネルによる固定的なコミュニケーションとなっていた。近年では、モダリティやチャンネルの増加により認識能力・表現能力が向上するだけでなく、天気予報などのインターネット情報を利用して最新の情報を簡易に検索・取得することが可能になり、一人から数名と1～2分だけコミュニケーションを行う、非常に短い時間で終わる刹那的なコミュニケーションが実現されつつある。

今後は、複数モダリティ・複数チャンネルを適切に統合し、バーバル情報だけでなくノンバーバル（非言語）情報、シンボル形式で取得可能なインターネット情報や構造化された環境情報もあわせたコミュニケーション情報の認識・取得・表現を行う知能の研究開発が進む。ノンバーバル情報は、現在はジェスチャや表情などの認識・提示が主に研究されているが、これらに加えて、人の体温やスキンコンダクタンスなどの生体情報や人の生活のリズムなども含め、これらのパターン情報をシンボル形式に変換するために認識処理を行う。パターン情報からシンボル化された情報は、インターネット上の検索エンジンなどを用いて、関連情報をインターネットから引き出したり、シンボル形式で取得可能な環境情報と組み合わせたりすること

で、ユーザの状況にあった、より高度なサービスを提供できるようにする。このようなコミュニケーション情報を利用することで、ロボットコミュニケーションは、ユーザの状況に応じた、より適切なものへと変化する。さらに、前節で既に述べたが、ロボットコミュニケーションにおける問題となっている、システム設計者が意図していないコミュニケーションをユーザから求められたときの対処を可能にする方向で研究開発が進めば、これまでは利他的であったコミュニケーションが、ユーザの満足度の高いコミュニケーションを、ユーザが望めば5分から10分程度続けることが可能となる。また、その満足度の高さから、これまで手段としてやむを得ず利用していたコミュニケーションが、ユーザが利用したくなるコミュニケーションサービスへと変化する。

このロボットコミュニケーション知能は、質と量、それぞれの方向から評価する必要があるが、それらを間接的に測る尺度としては、あるタスク領域においてユーザが満足できる対話の継続時間が考えられる。継続時間のみが尺度にはなり得ないが、ユーザがロボットとのコミュニケーションを望んだときに、ユーザの満足度が高い状態でコミュニケーションした時間を計測できれば、その長さをユーザが望んでいる対話時間などで正規化することで、ロボットコミュニケーション知能の尺度の一つとして考えることが出来る。

②ロバストロボットコミュニケーション知能

ロバストなロボットコミュニケーション知能とは、多用途で（何にでも・what）／環境が変わっても（どこでも・where）／だれとでも（who）／いつでも（when）、実現可能なコミュニケーションを達成するための知能である。本節では、ロバストロボットコミュニケーション知能を構成する3つの要素について述べる。すなわち（1）人が利用する様々なコミュニケーション情報を認識・取得するための知能（コミュニケーション情報認識・取得知能）、（2）人が利用する様々なコミュニケーション情報をロボットや表現デバイスで表現するための知能（コミュニケーション情報表現知能）、（3）コミュニケーション情報の認識・取得と表現を組合せて人と対話するための知能（インタラクション知能）、である。

（a）要素知能1：コミュニケーション情報認識・取得知能

この要素知能では、人が利用する様々なコミュニケーション情報を、環境が変わっても（where）、誰とでも（who）、いつでも（when）、ロバストに認識・取得するためのロボットコミュニケーション知能を扱う。コミュニケーションにおいて人が表す情報の認識は、人の場合は、五感（視覚・聴覚・触覚・嗅覚・味覚）を用いており、特に視覚・聴覚・触覚に関しては、従来、様々な研究が行われてきた。それぞれの感覚は、主として個別に研究され、認識の目的が人とのコミュ

ニケーションである場合は、バーバル（言語）情報の認識が対象とされてきた。

勿論、バーバル情報を認識・取得するための技術の向上は、コミュニケーション情報認識・取得知能において重要であり、音声認識技術はその中核をなす。従来の音声認識技術は、無人環境でのヘッドセットマイクを利用した音声取得・認識が主に行われていたが、現在では、マイクと人との距離が1 m程度で、静かなオフィス環境のようにレベルの小さい非音声雑音下での音声取得・認識が主に行われている。今後は、駅などのレベルの大きい非音声雑音がある環境での音声認識が実現され、さらに、大型ショッピングセンタなどの非音声雑音・音声雑音が混ざった環境での音声認識が実現される。

しかし、コミュニケーション情報認識・取得知能において、必要となる技術は音声認識技術だけではない。人は、五感を適切に統合して利用しており（マルチモーダル）、また、その五感を利用したノンバーバル（非言語）情報が人のコミュニケーションにおいて重要な役割を果たしている。ノンバーバル情報は、例えば、人の指さしやお辞儀などのジェスチャや表情、視線、など様々なものが挙げられる。現在は、このようなノンバーバル情報も含めた認識・取得のために、視覚と聴覚の統合に関する研究が進められている。今後、人とのコミュニケーションにおけるコミュニケーション情報認識・取得能力を向上させ、人が用いるあらゆる表現をロボットコミュニケーションシステムが認識できるようにするためには、視聴覚統合だけではなく、様々な感覚を統合していく必要がある。このとき、人の五感に加えて、センサシステムに特有の距離情報や人の位置情報、あるいは人の体温やスキンコンダクタンスなどの生体情報などを取得する感覚の統合も重要となる。また、このような情報は、単体のロボットやセンサシステムによる認識・取得だけでは限界があるため、感覚の統合に加えて、膨大なインターネット上の情報を検索・利用する方法、あるいは環境情報構造化プラットフォームから情報を取得する方法なども重要となる。

さらに、人とのコミュニケーションにおいては「あれ」「それ」「あっち」「こっち」などの曖昧な指示語や、「いつもの…」「この前の…」などの履歴に係る言葉が頻繁に利用されており、これらがなにに対応しているのかを対話から理解することも、人の様々な表現の認識において重要となる。この認識は実現が困難であるが、ジェスチャや人の位置情報、生体情報などのノンバーバル情報を蓄積し構造化することが解決の糸口となる。例えば、特定のユーザのノンバーバル情報の履歴から、周期的な規則性や順序性を見いだすことが出来れば、ユーザ特有の行動・生活サイクル・性格などの情報を取得・推定することができるようになり、そこから人の曖昧な表現に対処するための知識が得られる可能性がある。以上を踏まえて、コミュニケーション情報認識・取得では、3年後にノンバーバル情報認識能力の五感モダリティ統合による向上、コミュニケーション相

手の位置情報に基づく環境情報構造化手法の確立が行われ、5年後には構造化された環境情報を含むノンバーバル情報の構造化が実現される。

このとき、コミュニケーション情報認識・取得の評価尺度は、認識する環境の複雑さが考えられる。環境の複雑さは数値で表すことは難しい。これを段階的に記述すると、まず従来は、整えられた実験環境、例えば無人の環境においてコミュニケーション情報の認識・取得が行われてきた。現在は、静かなオフィス環境（微少な非音声雑音のみ）での情報認識・取得が行われている。これが今後はさらに複雑になり、3年後は、ショッピングセンタのある限定されたエリア（音声雑音を含む）、5年後には複数エリアでの情報認識・取得に拡張される。未来は、これまでの環境を全て含む日常環境でのコミュニケーション情報認識・取得が実現される。

(b) 要素知能2：コミュニケーション情報表現知能

この要素知能では、様々な表現方法・表現媒体（チャンネル）を用いて、人が利用する情報伝達のため表現を、多用途に（what）、だれにでも（who）、いつでも（when）、どこでも（where）、ロボットがロボストに表現するためのロボットコミュニケーション知能を扱う。

従来、ロボットコミュニケーションシステムにおいて実現されてきたコミュニケーション情報表現方法は、記録した動作表現（ジェスチャ）や音声の再生であり、その表現は固定的なものであった。現在では、記録動作表現の再生もそのバリエーションが豊富になり、音声も新聞読み上げのような平坦な音声であれば合成が可能になっている。しかし、記録された動作を再生するという点では、動作表現は従来から現在まで根本的には変わっていない。コミュニケーション相手の状態にあわせたわかりやすく親しみやすい指さしなどのジェスチャを伴った対話行動は、コミュニケーション情報表現として効果的であることが知られており、また、音声合成においても、人とのコミュニケーションには読み上げ音声ではなく、感情的な音声望ましい。さらに、これらの複数のチャンネルによる表現をどのように組み合わせるかで伝わる意味も変化する。人にわかりやすい・親しみやすい表現を実現するためには、これらの問題を解決する必要がある。特に、わかりやすい表現として重要な点は、日常あるものの名称を正確に呼ぶことは現実的ではなく、コミュニケーション情報認識・取得知能でも述べたが、「あれ」「これ」「それ」「あっち」「こっち」「この前の…」などの曖昧な指示語や履歴に基づく指示語の表現である。このような表現が可能になれば、適切に利用することで、人とのコミュニケーションは円滑になっていく。

そこで、以上を踏まえて、3年後は、コミュニケーション相手の状態にあわせた指示語表現およびジェスチャの生成、感情的音声の合成、5年後には、複数

チャネルの組合せ（バーバル・ノンバーバル表現の組合せ）によるニュアンスの生成、愛想の表現などが実現される。

(c) 要素知能3：インタラクション知能

この要素知能は、コミュニケーション情報を認識・取得し、その情報に適したコミュニケーション情報を選び、表現するための知能であり、人とのコミュニケーションにおけるシナリオ生成能力に該当する。この知能によってロボットは、あるコミュニケーション情報を認識したときに、どんなコミュニケーション情報をどのように表現するか、今後のコミュニケーションに反映しやすい形式で話した履歴をどうやって残しておくか、などを決定することが可能となり、用途に合わせて（what）、環境に合わせて（where）、相手に合わせて（who）、ロボストに人とインタラクションできるようになる。

コミュニケーション情報の認識・取得、あるいはコミュニケーション情報の表現に関する研究は、現在広く行われているが、シナリオ生成に関するものはあまりなされていない。ここでシナリオとは、ロボットと人のインタラクションの系列を指す。従来のロボットコミュニケーションシステムでは、単一のシナリオを再生する固定的なインタラクションが行われていた。現在では、それが複数のシナリオ（マルチシナリオ）となり、簡単なQ&A的なインタラクションに発展している。これを人のようなインタラクションまで進めるためには、ロボットコミュニケーションシステム的设计者が意図していないインタラクション（コミュニケーション）をユーザから求められたときにどのように対処するのか、が鍵となる。様々なコミュニケーション情報の認識・取得、あるいはコミュニケーション情報の提示が可能なシステムでも、認識・取得した情報に対して、どのように振る舞い、情報を提示するのか、といったシナリオを予め全て書き下すことは極めて困難であり、シナリオがあれば対処可能なユーザの反応も、シナリオがないために想定外となり、対処できないのが現在のシステムである。これを対処可能にしていくためには、まず、人とロボット／人と人のインタラクション情報を取得・蓄積していくこと（インタラクションデータベース）が、その第一歩となる。インタラクション情報を取得・蓄積することができれば、その履歴情報には、ロボットに対して人がどのように反応しているのか、あるいは人と人がどのように対話しているのか、といった情報が含まれており、そこから規則性を見いだすような構造化を行うことで、インタラクション情報をロボットが人の意図が何かを聞きなおす、聞いてみて再度判断するなどのインタラクション演出を利用したコミュニケーションが可能となる。履歴に基づくインタラクションの演出は今後重要な知能技術になるが、インタラクション情報の履歴から、周期性・規則性を抽出する技術を、ここではインタラクション情報構造化と呼び、構造化によって抽

出されたインタラクションにおける規則・知識を、ここではインタラクションプリミティブと呼ぶ。

以上を踏まえて3年後は、インタラクション情報をインタラクション情報取得デバイスによって取得し、それを蓄積・データベース化する。これを利用し、特定領域内での知識・語彙の逐次追加などによって、その領域内でのコミュニケーションのためのシナリオを組み立てる技術が実現される。5年後には、インタラクション情報の構造化を行い、インタラクションプリミティブの組合せとインタラクション履歴の逐次利用などによるシナリオを組み立てる技術が実現される。未来は、インタラクションのシナリオが自動的に生成され、人のようなインタラクションを実現出来るようになる。

インタラクション知能は、インタラクション時に扱えるトピック数が評価尺度となりうる。

(3) ロバストロボットコミュニケーション知能デバイス

①要素知能デバイス1：コミュニケーション情報認識・取得デバイス

ロボットコミュニケーションシステムが、人とのコミュニケーションに必要となる情報、すなわちコミュニケーション情報を認識・取得するデバイスには、従来は、ボタンやタッチパネルなどが挙げられる。これらのデバイスを用いれば、人は明示的に自分の意図をシステムに伝えることができる。従来他のデバイスとしては、ヘッドセットがある。これは、単一話者のバーバル情報を取得するために利用されており、現在でも多くのロボットコミュニケーションシステムで用いられている。しかし、これらの単純なデバイスのみで微妙なニュアンスを含むコミュニケーションの情報を取得することは難しい。

現在は、聴覚情報からノイズを除去するノイズキャンセラや、コミュニケーション相手の位置情報を正確に取得するためのレーザ距離センサ、屋外での位置情報を取得するためのGPS、などを使ったコミュニケーション情報の認識・取得が行われている。

さて、過去の履歴に基づく発話や行動は、円滑なコミュニケーションにおいて重要である。そのためには対話を記録する手段と、精度の良い認識が必要であり、多地点での同時計測、計測結果の統合が不可欠となる。3年後には、複数のセンサを統合し、ある特定の領域でのコミュニケーション情報の取得デバイス（特定領域コミュニケーション情報取得デバイス）が実現されるべきである。

さらに、複数の領域でのコミュニケーション情報の認識・取得を可能にするため、5年後には、広域のコミュニケーション情報を精度良く認識・取得するためのデバイスと、大量のデータから規則性を高速で検出するデバイスが必要となる（広域コミュニケーション情報取得デバイス）。

未来には、人に負担をかけることなく、日常生活環境に含まれる多くの領域でのコミュニケーション情報を認識・取得するため、複数のセンサを用いた高精細高精度な認識・取得装置と、また、大量の対話データベースから長期間のデータを高速に統合できる感覚統合処理装置が必要となる。

②要素知能2デバイス： コミュニケーション情報表現デバイス

コミュニケーション情報を表現するためのデバイスとしては、従来、ディスプレイや人形型ロボット（博物館などでの動くマネキン）などが挙げられる。これらの表現デバイスは、固定的な動作再生・音声再生・文字提示を行うための最小限の機能を有する。

現在は、表情のない子供サイズの人型ロボットや、顔や頭部に数十のアクチュエータを持つ表情生成デバイスがある。また、人間のようにしなやかな動きを実現するためのエアアクチュエータの開発も行われ、コミュニケーションを多様に、かつ、身近にする開発が行われている。

さらに、ロボットが豊かな表現能力を持つために、3年後には、指示語を表現するデバイス、指さしなどのジェスチャのためのデバイス、視線を表現するデバイス、手・指を用いた表現を行うデバイスなどが必要となる。5年後には、広範囲な人の行動に応じた対話を行うため、広範囲な場所で多様な身体表現を行うことができる安定した移動機構デバイスが必要となる。また、人とロボットのコミュニケーションでは、人とロボットの接触の危険が常に伴う。そこで、情報提示デバイスとしても、コミュニケーション相手となる人の安全を確保しつつジェスチャを生成できるデバイスが必要となる。

未来においては、多くの場面で人間と同様な対話表現を行う必要が有るため、人間と同じ行動範囲を実現するデバイス、また、人間と同様の表現機構を持たせるためのアクチュエータ、外観、などを持つアンドロイドの開発が重要となる。

③要素知能3デバイス： インタラクシオン知能デバイス

従来から現在まで、ロボットコミュニケーションシステムでは、コミュニケーション情報の認識・取得、あるいは提示に重点が置かれ、そのデバイスの開発が行われてきた。しかし、コミュニケーション情報を認識した後に適切な表現を返すインタラクシオンをどのように実現するのか、といったインタラクシオン知能に関する研究開発・デバイスの開発はあまり行われなかった。

ロボストロボットコミュニケーション知能においては、インタラクシオン知能の実現が鍵となる。そのためのデバイスとしては、まず3年後には、人と人が、あるいは人とロボットがどのようにインタラクシオンしているのかを取得するデバイスが必要となる。ここでは、その総称をインタラクシオン情報取得デバイスと呼ぶ。

具体的には、例えば、お互いの視線方向や物理的な接触を取得するデバイスなどが含まれる。インタラクション情報は、コミュニケーション情報の認識と表現の繰り返しを記録し、そのコーパスから抽出されるが、コーパス解析の自動化は難しく、現実的ではない。そこで、人やロボットが何処を見ていたのか、何を見ながら話していたのか、などのインタラクションに直接関係する情報を取得する装置を開発する。また、そのようなインタラクション情報は、画像や音声を含む膨大な量となるため、インタラクション情報を蓄積するためのデバイスも必要となる。

5年後は、蓄積したインタラクション情報をロボットや人が利用する際に、高速に検索するためのデバイスが必要になる。このデバイスによって、インタラクション情報の逐次解析・利用が可能になる。また、コミュニケーション相手が人の集団になった場合、その集団のインタラクション情報が必要となる。そのための集団インタラクション情報取得デバイスの開発も行う。

未来は、インタラクション情報を提供するプラットフォームが、ロボットの活動環境にインフラとして整備され、人のようなインタラクションが実現される。

表3. 4. 2. 1 パーソナル作業支援ロボット知能 ロードマップ (概要)

	従来	現在(2006)	近未来(3年後)	近未来(5年後)	未来(理想、2025年以降)
システム : 生活支援ロボット	留守番代行ロボット、自走式掃除ロボット		携帯電話を取ってくる	テーブルの上を片付ける	ハウスキーピング・ロボットシステム (多機能ロボットシステム)
作業計画知能 作業指示認識知能 情報が不足している作業指示に情報を補完して作業計画を生成する 作業対象物位置管理知能 作業対象物や人の位置を追跡・管理する	スイッチ操作 (ジョイスティックによりスプーンを操作)		「携帯とって」という作業指示から作業計画を生成	「テーブルを片付けて」という作業指示から作業計画を生成	「あれとって」という作業指示から作業計画を生成
作業遂行知能 作業対象物認識知能 作業対象物の種類・位置・姿勢を認識する マニピュレーション知能 作業対象物に応じたマニピュレーションを行う	事前プログラムによる動作 (事前プログラムによる動作/ジョイスティック・手動操作) なし		ロボットが動かした場合のみ追跡・管理する。人が動かしたときは、当該知能に通知する 定形物をマニピュレーションする	人が動かしても、追跡・管理する 重ねて置かれた皿等の一番上にある作業対象物の種類、位置・姿勢を認識する 準柔軟物(袋物のように把持すると形状が多少変化する物体)もマニピュレーションする	同左 上に物があり見えなくても、そこにある物の種類を認識する 不定形物もマニピュレーションする
デバイス ハンド用力覚センサ #構成 #検出軸数 #最小検出モーメント(N・cm)	アンプ分離型 3 0.15	アンプ内臓型 同左 同左	処理部一体型(アーム内臓) 6 0.015	同左(ハンド内臓) 同左 同左	同左 同左 同左
ハンド用触覚センサ #構成	処理部分離型	同左	処理部アーム内臓型	処理部ハンド内臓型	同左
ビジョンセンサ #環境適応レベル	均一照明	変化しない室内光	同左	太陽の間接光を含む室内光	屋外
ハンドユニット #指令レベル	各軸のトルク/位置	同左	作業(掴む、回す、押す等)	同左+作業(嵌める等)	同左+作業(道具の操作)
アームユニット #環境適応レベル	なし	エンドエフェクタ部力制御	同左+アーム部力制御	同左+ハンドユニットと協調	同左+環境認識センサ情報にもとづく姿勢変更

表3. 4. 2. 2 パーソナル作業支援ロボット知能（詳細）

	従来	現在(2006)	近未来(3年後)	近未来(5年後)	未来(理想、2025年以降)
システム：生活支援ロボット	留守番代行ロボット、自走式掃除ロボット (食事支援ロボット、移乗支援ロボット)		携帯電話を取ってくる	テーブルの上を片付ける	ハウスキーピング・ロボットシステム (多機能ロボットシステム)
作業計画知能 作業指示認識知能 情報が不足している作業指示に情報を補完して作業計画を生成する #補完する情報 #人への問い合わせ回数	スイッチ操作 (ジョイスティックによりスプーンを操作) 100作業で100回		「携帯とって」という作業指示から作業計画を生成 作業対象物の置かれている位置人のいる位置 100作業で50回	「テーブルを片付けて」という作業指示から作業計画を生成 作業対象物の種類・位置 搬送先 100作業で20回	「あれとって」という作業指示から作業計画を生成 作業対象物の特定 同左 100作業で10回
作業対象物位置管理知能 作業対象物や人の位置を追跡・管理する #管理する作業対象物の数 #見失う頻度	なし		ロボットが動かした場合のみ追跡・管理する。人が動かしたときは、当該知能に通知する 20個 100回移動して10回	人が動かしても、追跡・管理する 40個 100回移動して20回	同左 200個 100回移動して10回
作業遂行知能 作業対象物認識知能 作業対象物の種類・位置・姿勢を認識する #置かれている状態 #検出位置の誤差 #検出姿勢の誤差 #人の手の位置の認識誤差 #人の認識率	事前プログラムによる動作 (事前プログラムによる動作/ジョイスティック・手動操作)		テーブルの上の携帯電話の位置と姿勢を認識する 平積み ±1mm ±2度 ±50mm 70%	重ねて置かれた皿等の一番上にある作業対象物の種類、位置・姿勢を認識する バラ積み ±0.5mm ±1度 ±10mm 90%	上に物があり見えなくても、そこにある物の種類を認識する 同左 同左 同左 同左 100%
マニピュレーション知能 作業対象物に応じたマニピュレーションを行う #作業対象物の種類 #安全機能 #動作環境	なし 接触したら止まる		定形物をマニピュレーションする 10種類 接触したら止まる テーブルの様な開放空間	準柔軟物(袋物のように把持すると形状が多少変化する物体)もマニピュレーションする 20種類 接触を予測して止まる 収納庫のような閉鎖空間	不定形物もマニピュレーションする 100種類 接触を予測して軌道を変える 同左
デバイス ハンド用力覚センサ #構成 #インタフェース #検出軸数 #最小検出モーメント(N・cm)	アンプ分離型 アナログ 3 0.15	アンプ内臓型 同左 同左 同左	処理部一体型(アーム内臓) デジタル 6 0.015	同左(ハンド内臓) デジタル 同左 同左	同左 同左 同左 同左
ハンド用触覚センサ #構成 #インタフェース #分解能(bit) #検出範囲	処理部分離型 パラレル/シリアル 8 製作時に決定	同左 同左 同左 同左	処理部アーム内臓型 同左 同左 同左	処理部ハンド内臓型 同左 同左 同左	同左 同左 同左 同左

ビジョンセンサ #カメラ設置位置 #インタフェース #方式 #環境適応レベル #認識対象物の教示方式 #検出精度(mm)	作業場所 内部バス/シリアル 単眼、複眼 均一照明 プログラム変更 ±1	ロボット頭部 イーサネット(CORBA) 同左+光切断方式 変化しない室内光 同左 同左	ロボット手首 イーサネット(RTミドルウェア) 同左 同左 データベース登録(5種類) 同左	ロボットハンド内 同左 同左 太陽の間接光を含む室内光 同左(10種類) ±0.5	同左 同左 同左 屋外 同左(20種類) 同左
ハンドユニット #構成 #インタフェース #指令レベル #環境適応レベル #最大可搬重要(g) #把持力(g)	アンブ分離型 アナログ 各軸のトルク/位置 指先力制御+多指協調 1,000 500	アンブ一体型 イーサネット(CORBA) 同左 同左 1,000 500	制御部一体型 イーサネット(RTミドルウェア) 作業(掴む、回す、押す等) 同左+把持部接触力制御 1,200 700	同左 同左 同左+作業(嵌める等) 同左+アームユニットと協調 1,500 900	同左 同左 同左+作業(道具の操作) 同左+ビジュアルフィードバック 同左 同左
アームユニット #構成 #インタフェース #指令レベル #環境適応レベル #自由度(DOF) #可搬重量(kg)	なし	制御部一体型 イーサネット(CORBA) 軌跡(CP)+手首部力 覚 エンドエフェクタ部力制 御 7	同左+双腕 イーサネット(RTミドルウェア) 同左 同左+アーム部力制御 同左 4.0	同左 同左 同左 同左+ハンドユニットと協調 同左 5.0	同左 同左 同左 同左+環境認識センサ情報にもとづく 姿勢変更 同左 10.0

本節では、人が生活する環境において日常的に行っている作業をロボットが支援するために必要なパーソナル作業支援ロボット知能のロードマップについて解説する。なお、本知能の出口イメージを明確にするため、生活支援ロボットを本知能の応用システムの代表例として取り上げている。

(1) 生活支援ロボット分野の特徴

人が日常的に行っている収納、片付け、手渡しといった作業の支援が本分野のロボットシステムは求められる。これらの作業を支援するためには、それぞれの作業に固有なスキル（技術）が不可欠であり、大きさ、形や柔らかさ等が多種多様な作業対象物を扱う必要がある。また、作業環境は、工場のように構造化されておらず、環境自体も変化する。例えば、テーブルの上に置かれている携帯電話は、人が別の場所に移動してしまう可能性があり、常に机の上を探せば見つかるという保証は無い。さらに携帯電話が置かれているはずのテーブルの場所自体が移動している可能性がある。このような多様性を考えると、本分野のロボットシステムには、他分野に求められる以上の高いロバストネス（環境の変化に対する対応）が要求される。

(2) 生活支援ロボット分野の現在

本分野へのロボットシステムの例としては、ITを応用して情報を提供するロボットシステム（wakamaru：三菱重工業）や、留守宅に侵入者が入った事を外出中のユーザに連絡するロボットシステム（ロボリア：テムザック、MARON：富士通）等が市販あるいはレンタルされている。また、室内を掃除するロボットシステム（ルンバ：iRobot、トリロバイト：エレクトロラックス（国内では東芝が販売））が市販されている。さらに福祉分野では、専用トレイに盛り付けられた食事を口元まで運ぶ食事支援ロボット（マイスプーン：セコム、Handy1：Rehab Robotics Lim I Ted）やベッドから車椅子等への移乗を支援するロボット（レジーナ：日本ロジックマシン）が市販されている。これらのロボットシステムは、生活支援ロボットシステムや福祉分野ロボットの先駆けであり、これまで工場でしか活用されていなかったロボットシステムを、家庭という環境でも利用できることを示した点で高く評価できる。しかし、残念ながら福祉分野以外で、作業対象物のマニピュレーションを伴うロボットシステムは現在実用化されていない。

(3) 生活支援ロボット知能のあるべき姿（近未来）

外出する際に玄関で携帯電話を居間に忘れたことに気が付いたとき、家人に「居間のテーブルの上にある私の携帯電話を、玄関まで持ってきて、私に手渡しして下さい」と伝える人がいるだろうか？おそらく「携帯とって」で済ませるに違いない。家人は「何処に置いたの？」くらいは問い返してくるかもしれないが、普通この程度の遣り取りで事

は済むはずである。さらに「私の携帯電話の色は黒で、形状は是是しかじか、何処其処を掴んで下さい」等と説明する人は皆無だろう。しかし相手が家人ではなく現在のロボットであったならば、このような詳しい説明をしても、携帯は手元に届かないかもしれない。

この例のように「〇〇を△△」（〇〇は作業対象物、△△は作業）という指示で、人が期待する作業をする事が、生活支援ロボットに求められる基本的な機能である。この機能を実現するために必用な知能を生活支援知能と呼ぶことにする。以下、この生活支援知能を、作業を計画する知能（作業計画知能）と作業を遂行する知能（作業遂行知能）に分けて考察する。

①作業計画知能

人から与えられた作業指示を、ロボットが実行可能な作業計画を生成する役割を担うのが作業計画知能である。この知能を作業指示認識知能と作業対象物位置管理知能に分けて考える。

(a) 作業指示認識知能

物を運ぶ作業指示の場合、「作業対象物が何処にあつて、何処へ運ぶ」という情報が必要である。この知能に求められる基本的な機能は、作業指示に欠けている情報を補完することである。

携帯電話の例では、作業対象物が指定されるが、置かれている場所と目的地に関する情報が含まれていない。まず作業対象物が何処にあるかという情報を補完するには、環境認識センサを利用して周辺を探索することが考えられるが、常に発見できるという保証はない。発見できなければ、後で考察する作業対象物位置管理知能や人に問合せることになる。次に何処へ運ぶのかという情報を補完しなければならない。携帯電話の例では、「とって」という作業が「作業指示を出した人の所へ運ぶ」と置き換えられれば、人が何処にいるかを調べることになるであろう。

次に「テーブルの上を片付けて」という作業指示を考えてみる。作業対象物が直接指定されていないので、テーブルの置かれている場所を知り、其処に移動し、テーブル上に置かれている作業対象物を調べるという作業計画を立てる必要がある。また、「片付けて」という作業から「流し台へ」と補完できるかも知れないが、作業対象物によっては、「マガジンラックへ」と補完することも考えられる。後で考察する作業対象物認識知能と連動して再計画する機能が必要である。

以上、物を運ぶという人にとっては簡単な作業を例に考察したが、作業計画の概略をたてているに過ぎない。ロボットが作業するためには、この概略に従い、更に細かい作業計画を立てる必要があり、非常に多くの研究課題を含んでおり、今後の研究開発に期待するところが大きい。

(b) 作業対象物位置管理知能

前述の作業指示認識知能が必要とする作業対象物の位置を管理するのが本知能である。テーブルのような家具が位置を変えることは稀であろうが、常に同じ位置にあるという保証はない。ましてや携帯電話のような小物は、頻繁に位置が変わるであろう。また、人に作業対象物を手渡しするような場合は、移動することが多い人の位置に関する情報も必要である。現在、環境の構造化に関する研究では、電子タグ応用による作業対象物の位置の追跡、床に埋め込んだ圧力センサや室内に複数配置したビジョンセンサによる人の位置のモニタリングに取り組んでいる例がある。これらの研究が本知能の開発に大きく貢献することが期待される。

②作業遂行知能

前述の作業指示認識知能が生成した作業計画に従い、実際にロボットを制御する役割を担うのが作業遂行知能である。この知能を作業対象物認識知能とマニピュレーション知能に分けて考える。

(a) 作業対象物認識知能

ロボットが作業対象物をマニピュレーションするには、作業対象物の位置・姿勢と種類に関する情報が必要である。これらの情報を得るにはビジョンセンサ等により対象物を計測し、予め登録されているモデルや特徴点情報と比較するという手法が広く用いられている。しかし、この手法では個々の作業対象物の正確なモデル等を準備しなければならない事が多い。生活支援分野のように作業対象物が多様な場合には、類似形状の物は1つのモデルで対応できるような手法の確立が必要であると考えられる。また、作業対象物の種類の認識には、電子タグを応用するという手法もあり、両者の併用が有効だと思われる。

さらに、人への作業対象物の手渡しを行う場合、人の位置・姿勢から手の位置を認識できる必要があり、人の顔や声から人物を特定できると作業指示理解知能の機能向上に貢献すると思われる。

(b) マニピュレーション知能

作業対象物認識知能で得られた情報に基づき作業対象物の把持、目的の場所へ置くためにエンドエフェクタ（アーム先端に取り付けられたハンドやグリッパ）やアーム（以下では、この二つを合わせてマニピュレータと呼ぶ）を制御するのがマニピュレーション知能であり、少なくとも以下のような機能が要求される。

(i) 作業対象物に応じた把持位置の決定、エンドエフェクタの誘導

把持位置のデータベース化が方策の1つとして考えられるが、作業対象物認識のモデルと同様に、類似形状は1つの登録で対応できるような変換機能が求められる。

(ii) 位置・姿勢情報が誤差を含んでいた場合の対応

作業対象物認識知能で得られた情報も誤差を含んでいることが考えられるため、ビジョンセンサ、手先の力覚センサや指部の触覚センサ等から得られる情報を組み合わせて、動的に把持位置を調整することが求められる。

(iii) 準不定形物（袋物のように掴むと形状が多少変化する物体）の安定的な把持

手先の力覚センサや指部の触覚センサ等を利用してエンドエフェクタと作業対象物の接触状態を監視し、動的に把持位置や把持力を調整することが求められる。

(iv) マニピュレータと作業環境との干渉回避

ビジョンセンサ等の環境認識センサにより動作領域を監視し、危険があれば即時停止や軌道の変更を行う必要がある。仮に干渉した場合は、マニピュレータを安全方向に逃がすことが求められる。マニピュレータのカバー全体に触覚センサを配置し干渉を検出することも考えられるが、産業用ロボットで実用化されている関節を駆動しているアクチュエータのトルク監視という手法の応用も有効であろう。

(v) 人の手元へのエンドエフェクタの誘導

人へ作業対象物を手渡す場合、人の手元に差し出すのが自然な動作であろう。このためには、作業対象物認識知能をリアルタイムに使用してエンドエフェクタを人の手元に誘導する必要がある。

上記の機能は、個別には研究開発が進められていると思われるが、これらの研究成果を統合することが重要であるとする。

(4) 生活支援ロボット用デバイス

以下では、上記の各知能を実現に不可欠と思われる代表的なデバイスについて考察する。

①ハンド用力覚センサ

センサヘッド自体は、歪ゲージ型や静電容量型など非常に小型軽量の物が市販されているが、計測した信号を処理する装置がハンド用として大きすぎるようである。ハンドに内蔵できる小型軽量な処理装置の開発が望まれる。また、最小検出モーメントも $0.15\text{ N}\cdot\text{m}$ 程度であり、指先で細かい作業を行うためには一桁以上の向上を期待したい。

②ハンド用触覚センサ

厚さが 0.1 mm 程度で形状や検出力もカスタマイズ可能なシート状センサが市販されているが、力覚センサと同様に、計測した信号を処理する装置がハンド用として大きすぎるようである。ハンドに内蔵できる小型軽量な処理装置の開発が望まれる。

③ビジョンセンサ

産業用ロボットでも用いられており、数多くのセンサが市販されている。ロボット頭部に搭載して、ロボット手先部分での検出精度が±0.5mm程度のものが開発されることを期待する。また、ビジョンセンサの最大の弱点であると考えられている照明条件の変化に対しても直射日光が入らない室内照明下での安定した計測・認識が望まれる。

④ハンドユニット

数種類のハンドが市販されたり、研究開発されているがアンプや制御装置を含めると人の手のようにコンパクトな物がないようである。生活支援分野のように人の生活する環境の中で人が扱っている日用品を扱うには、制御装置を含めて大人の手と同程度の大きさのハンドが期待される。また、制御装置には、対象物を掴んだり、回したり、押したりする基本的な技量（スキル）を実行するソフトウェアを実装されていることが望ましい。また、生活支援作業を考慮すると指部で把持できる作業対象物の質量も1.5kg以上は必要であろう。

⑤アームユニット

人と同様に7つの関節を有するアームと直線に沿うように手先を動かすといった基本ソフトウェアを実装した制御装置が一体となったユニットの研究開発が進んでいるが、人の腕と比べるとまだ過ぎるようと思われる。制御的には、双腕協調動作や、力覚制御、ハンドユニットとの協調動作などの実装が望まれる。また可搬重量は5kg（小さい米袋）以上を期待したい。

(5) 生活支援ロボットの未来（理想）

生活支援ロボットの理想は、日常生活全般の作業を支援するハウスキーピング・ロボットシステム（お手伝いさんロボット）である。しかし、生活支援作業の種類は非常に多いため、一つの組織（企業や研究機関）が全ての作業知能を開発するのは困難であると考えられる。そこで、各組織が開発した生活支援知能を簡単に統合できる枠組みが望まれる。このような枠組みの実現が、個別の作業知能を開発するビジネス、必要な作業知能を統合化したロボットを製造・販売するビジネスを生み、大きな生活支援ロボット市場を構築すると期待される。

表3. 4. 3. 1 パーソナルQOL向上ロボット知能 ロードマップ (概要)

QoL指向ロボット分野	従来	現在(2007)	近未来(3年後)	近未来(5年後)	未来(理想)
QoL指向ロボット概要	パッシブな機構あるいは電動アシスト付車いすなど限られた自由度のパワーアシスト、健康機器	ヒトとの接触が少ないサービスロボット 癒しロボットやリハビリテーション補助具、手術ロボット。運動を伴うゲーム機やエンタテインメント向きの機器	管理された環境での移動サービスロボット 高機能車いす、エンタテインメント、パワーアシストスーツ 介護施設等での見守り	人との接触がある作業へのロボット応用 パワーアシストによる介護支援 健康管理、スポーツ応用 手術室の自動化	認知・生理・運動機能の個人差モデルを持ち、作業の完全代行でなく、個人の健康を維持し達成感を与えるちょうど良い補助をするロボット。家庭での日常作業、オフィスでの知的作業、軽作業、またエンタテインメント応用
QoL指向ロボット知能		生理、動作、行動計測の導入 屋外GPSを用いたヒト位置・経路計測 視覚による人の発見、部位の識別 聴覚による音源推定、話者分離	生理、動作、行動の計測と識別の高度化 ウェアラブルセンサによる生理量の連続計測、加速度センサによる動作認識 屋内での人の行動追跡、人の歩行経路予測	生理、動作、行動のモデルに基づく状態推定 視覚による動作や行動認識→模倣による教示、個人属性推定 個人差を考慮した嗜好性モデルと快適性・感性評価 感覚の代行、感覚の複合	行動予測、意図理解 ブレイン(神経)インタフェース 人間の力学・生理・感覚・認知モデルとシミュレータ 人間の感覚や動作のオントロジ
識別できる人間の状態情報量(bit)	2~3	3~6	4~7	6~8	10~(1024以上の人間の動作、行動、感覚を予測)
柔らかい動作	筋電制御 コンプライアンス制御	少ない自由度の制御と人間機能の解析 力覚フィードバック 全身の筋骨格モデル 全身動作の生成(ヒューマノイド)	多自由度化と力制御による柔らかさ 冗長関節動作生成 視聴覚情報の触覚表現 事故データベースと危険予測	力を含む多感覚化とモデルからの予測に基づく柔らかさ 柔軟物体の視覚・触覚認識と柔軟物操作、安全性評価法 人間運動機能の発達・加齢モデル 道具使用と協調作業	予測制御、任意環境の移動体内(血管、消化管)移動 人間(生物)規範型ロボット、環境規範(アフォーダンス) 個人差適合
動作の自由度、軸数	1~3	3~6	4~8	6~10	
デバイス	電動アシスト機構 加速度センサ、力センサ、光ファイバジャイロ モーションキャプチャ 単純な生理量計測器	ビジョンセンサ、多次元マイクロフォン ウェアラブルセンサ、ウェアラブルコンピュータ	ユビキタスセンサ、非侵襲のウェアラブル計測器	ストレスセンサ フレキシブルマニピュレータ、人工筋肉 多指ハンド	触覚提示、また嗅覚、味覚を含む五感提示、体内埋め込みセンサ ソフトマテリアルなセンサとアクチュエータ 冗長系、小型分散系

表 3. 4. 3. 2 パーソナルQOL向上ロボット知能 (詳細)

QoL指向ロボット分野	従来	現在(2007)	近未来(3年後)	近未来(5年後)	未来(理想)
QoL指向ロボット概要					
製品	見守り温水ポット 電動アシスト車いすや自転車 各種福祉機器、介護リフト ペットロボット(AIBO) 健康ロボット(ジョーバ) 電動義手	高機能移動(SegWay, i-bot) 清掃(Roomba、富士重工) 介護(レジーナ、Handy-1) 病院内搬送HOSPI(松下電工) ホーム(ワカマル)ポータブルゲーム機(NintenDogs、WII) 癒しロボット(パロ、タマ、うなづき君) 手術(Da Vinci、Zeus)食事支援(マイスプーン、MUNUS) リハビリ(歩行訓練、セラピー補助) ヒューマノイド(HRP-2、HOAP)、二足歩行ロボットキット	ジェスチャや簡単な操作で機器を操作するリモコン 動作の認識を用いたマンマシンインタフェースとエンタテインメント応用 段差などの踏破性にすぐれた高機能車いす ユビキタスセンサによる見守り支援	補助アーム付車いすやパワーアシスト付介護ベッド 警備、清掃などの対人サービス 病院内の搬送、給仕などの自動化 健康管理ネットワーク	必要な適度な補助を押し量り、器用な手作業を含む家庭内作業、介護、身障者支援、育児などを協調的に支援するロボット より安価な作業への適用 人間の発達・加齢に伴う、生理、運動、認知機能や嗜好・感性をモデルとして持ち、個人差に適合した製品を設計するためのソフトウェアツール 大規模なセンサネットワーク
プロトタイプ	MELDOG、情報サービス 移動ロボット (Jijo-2)	恐竜ロボット(産総研、川田工業) ロボットスーツ(HAL、Bleex) 新車いす(TAO Aicle、トヨタ) Aware Home(ジョージア工科大学) アンドロイド、リーマン(理研)	ホーム移動ロボット、オフィス移動ロボット 受付嬢 エンタテインメント、スポーツ、ゲーム、RoboCup	案内、受付、配達などの対人業務 インテリジェントな調理機械 運搬サービス、配達 力制御を含む手術 センサホームと各種健康機器のオンライン化による健康モニタ、電子カルテとの結合	除草、洗車、操縦代行 日常作業、軽作業代行

<p>QoL指向ロボット知能</p> <p>知能的人間計測とインタフェース</p>	<p>近距離での視線追跡 EMG認識</p>	<p>筋電の解釈による義手やロボットの少数の自由度の制御 使用者が直接指示することによる、アシスト機器の制御 ウェアラブル機器による心拍、呼吸、発汗などの計測とその健康・スポーツ応用 ユビキタスセンサーによる人間や物の位置、動きの計測 音源位置推定、動作認識等、視聴覚による人の発見と識別 手話の認識が試みられているが不完全</p>	<p>ウェアラブルセンサによる、体温、加速度(動作)、発汗などの生理量の長時間計測による健康診断 視覚による不審行動の識別や行動のラベル付け 超音波ロケーションや無線LANあるいは屋内GPSを用いた人間の位置計測と位置に基づくサービス</p>	<p>血圧、呼吸、筋電を加えた、より多角的な個人の健康状態管理 認知心理と行動の因果モデルから、個人の嗜好性モデルと快適性・感性評価 力や動作の観察からの意図(指示)の推定、また性別、年齢、障害の程度など個人属性の推定 人間の生理反応モデルのコンピュータ化、感覚や情動などの非理性的な知能のモデル、加齢による変化のモデル、また喪失した感覚の他の感覚による代行 ヒトの発達モデルや加齢モデルを考慮した、ヒューマンエラーの発生しにくいマンマシンインタフェース</p>	<p>意図理解 ブレイン(神経)インタフェース 人間の力学・生理・感覚・認知モデルとシミュレータ</p>
<p>柔らかい動作</p>	<p>筋電制御 コンプライアンス制御</p>	<p>全身骨格モデル 全身動作の生成(ヒューマノイド) 力覚フィードバック</p>	<p>筋骨格モデルと人間の動きを元にした冗長関節制御 人間の動作の予測 大変形FEM、損傷解析と安全性の検証 視聴覚の触覚による提示 事故データベースから起こりうる事故の予測、危険性評価</p>	<p>柔軟物の幾何モデルと接触・変形シミュレーション、不定形柔軟物体の視覚・触覚認識、マニピュレーション 日常的な道具の使用と、部屋内の片づけ、探索、拾い上げ、手渡しなどの軽作業 力や合図を媒介にした協調作業</p>	<p>不整地を含む任意環境の移動と人間の歩行補助 体内(血管、消化管)移動 人間(生物)規範型ロボット、環境規範(アフォーダンス) 個人差適合</p>
<p>デバイス</p>	<p>1-2軸の電動アシスト機構 モーションキャプチャ 筋電センサ、視線検出 加速度センサ、力センサ 光ファイバジャイロ、赤外線レンジファインダ</p>	<p>振動ジャイロ、高速ビジョン、ステレオビジョン(距離画像の実時間生成)、超音波ロケーション(数cm精度)、音源方向計測のためのマイクロフォンアレイ 体温、発汗、動き、心拍などのウェアラブル生体計測、fMRI・光トポグラフィなど脳機能計測装置 組込みプロセッサ、実時間OS/通信、RF-tag</p>	<p>街角ユビキタスセンサ、情報家電埋め込みセンサ、ウェアラブル非侵襲生理量センサ、屋内GPS、小型移動プラットフォーム 小型省電力組み込みプロセッサ、力提示、小型力センサ、ボディスキャナ</p>	<p>ストレスセンサ フレキシブルマニピュレータ、人工筋肉 面接触圧力センサ 多指ハンド ライフログ</p>	<p>体内埋め込みセンサ 冗長系、小型分散系</p>

(1) 分野の特徴

工場の自動機械として自律動作するのではなく、人間と触れあい、人間の機能を補助することで、人間の福祉に直接的に貢献するロボットをQoL指向ロボットと捉える。このようなロボットは、少子高齢化社会において、運動的、認知的な機能の衰えた高齢者や身体障害者を補助することが重要なミッションであるが、同時にこれらの人々の介護をする健常者の補助であり、さらに健常者が自身の生活をより容易で豊かなものにする、ユニバーサルな機能を発揮する物である。

QoL指向ロボットが、産業用ロボットと異なるのは、人間との濃密なインタラクションを含み、人間にとって快い方法で機能を補助することである。そのための重要な知能要素は、知能的人間計測：人間の意図や生理的状态を抽出・認識する処理と、柔らかい動作：人間、個人差を持った人間に安全に接するための柔軟さである。この分野の技術開発は、ロボット工学者だけでなく、医療福祉分野やバイオメカニクスの研究との交流に負うところが大きい。

(2) 技術の歴史と方向性

QoL向き機械の原型は、車いすや介護ベッドなど旧来からの福祉機器に見ることができる。これらは動力やコンピュータを持たないパッシブな機械であり、知能的、自発的動作をするものではない。これらにエネルギーを加えて人間の動作をアシストしようとしたり、動きにより多くの自由度を持たせようとするのがQoLへのロボット技術適用の始まりである。一方、主に情動的なアシストに注目し、使用者の安否を知らせたり、いわゆる癒し効果、セラピー効果をねらった機器やロボットが作られてきた。

①マンマシンインタフェース

エネルギー的補助は電池やモータから得られても、どのような動作をさせるかの知能部分は、使用者である人間の指示を待たなければならない。そのためQoLの一つの研究の方向は、十分な機能を発揮できない人間から、いかに情報や知能を引き出すかというマンマシンインタフェースの改善に向けられてきた。電動車いすはジョイスティックで操縦できるが、手が使えなければアゴなどの動かせる部位や音声インタフェースを使う。音声の発声も健常者と身障者では異なることがある。義手では、筋電を取り出して人の意志を読み取るインタフェースが考えられる。この方向での研究は、より自由度を高めたExoskeleton型のパワーアシストロボットに進化しつつある。

明確なコミュニケーション法以外に人間から情報を取り出すには、生理的な信号(vital sign)に注目する方法がある。眼球像の画像処理から視線を追跡する技術が実用化されており、注視点の情報を得ることができる。筋電センシングも一般的になりつつあり、リハビリロボット・ジョーバの開発には使用者の筋肉の弛緩・緊張を捉えて適切な運動パターンを生成するのに使われた。義手への応用が試みられているほか、

外骨格型(exoskeleton)のパワーアシストロボットに意志を伝える方法にも使われている。また、ロボットをなでる・叩く、言語の内容ではなく発話の抑揚を読み取る、ジェスチャを認識するなどのマルチモーダル情報を有効利用しようとする動きがある。

このような言語以外のインタフェースで言語的、意識的動作を引き出した格好の例として、筋委縮性側索硬化症の宇宙物理学者ホーキング博士の電動車いすと音声合成インタフェースが有名である。また、ニンテンドーWii は、ゲームパッド中の加速度センサからプレイヤーの意志を的確に取り出せること、それによって従来以上の心理効果や興奮を与えられることを如実に示した。

意志の伝達ではなく、自律神経の活動、すなわち身体や精神の正直なステータスを捕まえることで、健康状態やストレスのモニタリングや診断への応用が追求されている。医療目的で開発された心拍、呼吸、血圧などの計測装置を、病気になる前の健康管理、またスポーツ効果の計測に用いる製品が開発されている。

表では、人間から取り出せる(認識できる)意図や状態の情報量をインデクスとして示した。ジェスチャで上下左右を指示できれば2ビット、血圧の正常値、正常高値、高血圧を識別できれば1.5ビットなどとなる。より多くの意図、状態、詳細な指示を識別できる方向に知能化が進む。レベル1-4とレムの5種類がある睡眠の深さを識別できれば2.3ビットの情報得られるが、現在は脳波、心電図、呼吸など多数のセンサを組み合わせた睡眠ポリグラフが必要である。ウェアラブルセンサなどでより簡便に同様の情報を得る技術の開発も進むであろう。

②ヒューマノイドロボット

人間に似た動作をさせるという方向では、1996年、ホンダによるヒューマノイドロボットP-2のスムーズな2足歩行を実現が大きなブレイクスルーとなった。従来、非常に難しく実現には何年もかかると思われていた2足歩行だが、P-2の発表以後短期間でASIMO(ホンダ)、QRIO(ソニー)、HOAP(富士通)、HRP-2(産総研と川田工業)などの研究向けではあるが2足歩行ロボットの商業版が登場し、2足歩行ロボット同士の格闘技ゲームにまで登場する技術となったのは、技術史的にも興味深い現象である。「難しい」とあきらめていた技術が、手法の詳細はわからずとも、「可能だ」という1ビットの情報得られただけで、広く普及することになった。ロボットの知能化も極めて難しいが、一つのブレイクスルーが大きな前進を産む可能性がある。人間にとっては、「可能だ」ということがすでにわかっているのだから、その機械的実現も可能なはずだ、と考えるべきであろう。

2足歩行は、不整地や階段の踏破性が高く、対象物にぎりぎりまで近寄れる、ロボットの視点を高くし多くの情報をキャッチできるなど多くの特徴がある。また、人間やさまざまな動物に似せた形に作ることができる。その特性を利用して、愛知万博で

公開された恐竜ロボット（産総研、川田工業）は、数あるロボット展示の中でもひときわ人気を集めたし、アンドロイドロボット（ATR）も注目されている。これらは、介護ロボット、ペットロボット、また人間と協調して働くロボットにとって重要な機能となる。しかし、2足歩行は、多くの関節の複雑な制御が必要である上に、本質的に不安定、すなわち危険である。そのため、人と接触する場面にひんばんに登場するようになるとは考えにくい。残念ながら、対象にぎりぎりまで近寄れるという特長を生かし、人間を介護するというQoLの機能を果たすのは当分難しいであろう。受付、警備など、非接触でありながら人間の形をしていることに意味のある応用で技術を確認していく必要がある。等身大ではなく、より小型に作ることは、危険性を打ち消す効果があり、チョロメテ（ジェネラルロボティクス）のようなエンタテインメント向きである。

ヒューマノイドロボットの特徴には、2足歩行の他に、たくさんの自由度を備えている点がある。30以上の関節軌道の自動生成は困難であり、人間らしい動作を獲得するために、モーションキャプチャが活用されている。高次元の動作計画技術も進展を見せており、伝い歩き、転倒復帰、不整地歩行など多様な動作が開発されている。ダンスや芸能への応用も考えられており、将来は、ロボット工学が芸術や伝統に影響するようになるかもしれない。

表では、ロボットがより多数の自由度を獲得し、柔軟な動作が可能になる尺度、すなわちロボットの自由度数＝モータや関節の数、を柔軟な動作をするロボット知能のインデクスとして示した。最も簡単なのは、電動アシスト自転車のような1自由度である。産業用ロボットのようなマニピュレータでは、6自由度を下回る機械は不完全なロボットだが、QoL応用では、たとえば4自由度の食事支援マニピュレータのスプーンの先に口を差し出すなど、ロボットの不完全さを人間が補うことができるので、また安価にするために、少ない自由度でも実用になりうる。しかし、多様なQoLの実現のため、たくさんの自由度を制御できることが、柔軟な動作に必要な知能要素となる。

③安全性とコスト

人間と共存し、人間の知能や動作を補助するために、QoLロボットには、高い安全性が求められる。また、整備された環境ではなく、オフィスあるいは病院や家庭のような日常的かつ雑多な環境でのメンテナンスフリーの信頼性を求められる。製品開発の方向としては、ヒトとの接触が少ない作業から、管理された環境でのアクティブなサービスを経て、ヒトとの接触を含む高度な応用に進むであろう。初期の段階では、安全性の検証が十分でなく、知能の程度も低いので、癒しのようなパッシブな接触、リハビリテーションや手術のような専門家が扱う機器、エンタテインメント応用のような深刻度の小さい応用に限定せざるを得ない。ロボットの知能が高まるにつれて、

高機能車いす、パワーアシスト、見守り支援などに応用領域が広がる。さらに進めば、配達、案内、受付、警備などの対人サービスをも対象とできるであろう。

QoL向きのロボットは、産業用ロボットのように高い生産性によって富を生むことはなく、介護等に吸収されるマンパワーの代替や社会コストの削減を目的としているので、高いコストがかけられない。皮肉なことに、ロボット化が困難な作業は、一見簡単な、人間がやれば安価な作業である。手術のような高価な機能、専門的な機能は、一部で実用化されているが、障害者の階段昇降に手を貸すとか、洗濯物を畳むなどの誰にでもできて報酬が得られにくい作業への適用が遅れている。これは、人工知能の研究が、定理の証明のような高度に理性的な研究から始まり、きれいな文章は理解できるようになったが、間違いだらけの価値が低い日常使われている非文の理解ができないこと、まして幼児の発揮する爆発的な学習能力を模擬することができない状況に似ている。これらの機能は、簡単に見えるが、実は産業用ロボットが部品を取り付ける作業よりも、はるかに大量の神経活動が動員される、高い知能の産物と考えるべきである。にも関わらず、これらの作業から相当の対価を引き出すことが難しい。したがって、一足飛びに日常の軽作業を補助するロボットを目指すのではなく、これらの人間として当たり前の機能を活用して高い価値を引き出せる業務、たとえば医療やオフィスの補助をまず検討すべきと考えられる。

低コストで高信頼の動作を実現するために、機能を限定してツボにはまったアシストをするのも有効であるが、残存する人間機能、特に知能を生かす方向での解決があり得る。人は、すべての機能を機械に代替して欲しいのではなく、衰えつつある機能を何とか延命させ、得意とする機能はフルに発揮させること、個人差に適応した、過度ではない適度なアシストで達成感を得たいと願っている。QoL分野では、人間機能を完全に代行する自律ロボットの知能ではなく、人間とロボットの協調（役割分担）が、重要なテーマになる。

(3) 将来のQoL指向ロボット知能技術

ユーザであり、アシストの対象である人間は、少しでも簡単に楽しい思いをしたいのだろうか。痛いこと、危ないこと、面倒なことは、全部ロボットが代行して上げるのがよいのだろうか？確かに、細かいことを指示しなくても、いつもやっていることをもっと簡単にできるのがよいが、私の代わりに全部やってくれる必要はない、肝心のことは自分の自由にさせて欲しいし、自分のため、家族のため、社会のためになることなら精一杯自分の力を発揮したいと思っているのではないだろうか。私が一番幸せを感じるのは、私のやったことをみんなが誉めてくれて、人を喜ばすことだから、それを手伝って欲しい。私がみんなと同じと思われるのは心外で、私のユニークな能力を活用したい。できることなら、私の自尊心を傷つけずに、得意の能力を伸ばすような指導もしてもらいたい。

こんな身勝手な個人のアシストをするのが、将来の理想のQ o Lロボットであろう。身勝手というのは、結局何をしたいのかよくわからないということである。そのため、人間からできるだけ豊かな情報を自然な方法で引き出すことが研究開発の柱の一つとなろう。そのための究極の方法は、BMI (brain-machine interface)かもしれないが、痛みを感じさせないためには、非侵襲で、人をさまざまに計測・観測することで意図や感情を読み取る技術がターゲットとなる。表では、それを知能的人間計測とインタフェースとして示した。その技術では、特別なセンサデバイスの開発というよりは、人間の感覚・認知機能の刺激-反応モデルをソフトウェアとして実装し、センサ情報を解釈して人間の行動を予測する手法が重要であろう。そのような予測技法は、現在ロボット制御の主流となっている、極めて短い過去の情報から次の瞬間の出力を決定するフィードバック制御にも一石を投ずるものである。

一方、固い機械部品を扱うのではなく、人間の日常的な行為をアシストするには、柔らかい動作の実現が不可欠である。最終的には、金属のマニピュレータではなく、フレキシブルなアクチュエータやソフトマテリアルを用いたセンサが必要であり、各種の研究が実施されているが、その実現は非常に困難であると考えられている。むしろ柔らかさとは、コンプライアンス制御のような主に力を対象とした物理から、マルチモーダルな感覚に依拠し、状況に応じて適切な出力を選択するような、より情動的、知能的な方向を目指す。すなわち、ブレークスルーすべき障壁は、触覚や視覚のような3次元的な情報の解釈、対象となる人間や日常物質の空間的・時間的変動を表しうる柔軟モデル、多自由度の動作生成、最終的には生物や環境に導かれるマニピュレーションの実現となろう。また、小型化、低廉化の観点からは、組込型コンピューティング技術とロボット要素技術のモジュール化と標準化が重要となろう。

Q o Lを必要とする人々は、環境や機械に適応する機能も低下している。環境や機械が人間に適者生存を求めるのではなく、機械の側で人間に適応する必要がある。人によって障害の程度や嗜好性は千差万別であり、個人差に適合する柔らかさも求められる。そのためには、人間が取りうる動作、行動をモデル化し、発達・加齢による変化を予測し、適切な補助をプランニングする機能が必要となる。

(4) デバイス

先に挙げた、人間からの情報の抽出のために、各種のセンサの研究や小型化が必要である。ロボットが動作を計画するための、自分自身やロボット、また環境のモデルの構築にビジョンの研究が長期にわたって続けられているが、実用上は、超音波タグ、RFタグなどで簡便に位置を取得する方法が近道である。組込系の発達により、ウェアラブルデバイスの開発が容易になっている。すでに、スポーツ応用で心拍センサなどが実用化しているが、体温、発汗、加速度、呼吸などを検出するデバイスにより、健康管理だけでなく、人の状態を推定してQ o Lサービスをプランするのに必要な情報が取得でき

る。特に加速度センサの進歩はめざましく、ビジョンによらずとも人や対象物の動きを正確に検出できるようになったことがさまざまな応用を生み出している。

柔らかな動作のためには、自由度の高いマニピュレータ、特に実用的な多指ハンドの開発が重要なマイルストーンとなる。力覚フィードバックは、有望と思われているが、実用化は少ない。機構が複雑で計算量も多く高価である割に、力覚なしでできてしまう作業が多いためだが、柔らかさとは力の制御であり、いずれブレークスルーしなければならない技術である。同時に、触覚の重要性が増し、面接触圧力センサの実用化が切望されている。

表3. 4. 4. 1 パーソナルモビリティロボット知能 ロードマップ (概要)

	従来	現在(2006)	近未来(3年後)	近未来(5年後)	未来(理想、2025年以降)
システム: パーソナルモビリティロボットシステム	整備された環境における、主に物品運搬用の誘導型移動体 ・AGV	実用化されている自動移動体は従来技術と同じ。 搭乗型のパーソナルユースの自律移動体の市販例は無い	歩行者や障害物が少ない環境において、人が搭乗可能な自律移動体	施設内などの環境で、一般歩行者と共存できる搭乗型自律移動体	施設内通路などの限定された空間で、歩行者や他の移動体と共存できる搭乗型移動体。施設インフラや複数のロボットと協調したモビリティシステム
知能: パーソナルモビリティ知能概要	プログラミングされた走行条件の誘導制御によるプレイバック走行	(同左)	人・障害物が比較的小さい空間において、障害物を回避して自律走行	不特定な障害物を検出・判断・予測し回避する自律走行	施設通路・人・ロボットの協調による安全かつ効率的な自律走行を実現し、施設システムコンポーネントとしてのモビリティ機能を実現
ロバスト知能: 自律走行知能 Robustness Index: [位置精度]	予め教示された経路、速度などの運転条件に基づいて、磁気マーカなどで位置を補正しながら自動走行 [軌跡精度10mm]	(同左)	地図情報などで目的地を教示することにより走行経路を自動生成。 ロボットのための専用ランドマークを自動検出して自己位置を補正	経路自動生成とルート学習機能。 周辺環境の三次元画像認識などによる自己位置補正と路面状況を認識し安定走行。	ITS技術を応用した路・ロボット間通信インフラを利用して、施設内情報に基づく最適ルート選定や、複数のロボット協調走行を実現
走行能力知能 Robustness Index: [段差、登板角度]	専用の水平面走行路の走行 [10mm]	整地された平面路走行 [10mm, 2°]	段差などの不整地走行および、建築基準法に定めるバリアフリー傾斜路の走行 [100mm, 10°]	階段昇り降りなど、人の歩行に近い走行能力 [200mm, 20°]	坂路登板、段差踏破など人の運動能力と同等の走行能力を実現
障害物の検知・回避知能 Robustness Index: [検出距離]	人・障害物の接触、近接を検知して自動停止 [接触~100mm]	障害物との距離測定により危険を認識し、停止、回避 [~3m]	近距離の人・障害物を三次元的に検出し自動回避 [~10m]	動的障害物検知による走行への影響判断と回避経路の自動生成	視覚情報や路・ロボット間通信を利用して、複数の動的障害物を検知、動作予測し最適回避パターンを自動生成 [見通しの利かない交差点]
搭乗者操作知能 Robustness Index: [操作デバイス]	”動く、止まる、曲がる”の基本動作を専用の教示装置でプログラミング [専用ティーチングボックス]	走行路のCADデータ上でのオフラインプログラミング [グラフィカルディスプレイ]	操縦桿型運転装置などでの搭乗者運転操作。 自動走行の経路作成は、地図データ上で目的地設定。	音声認識、音声出力などのヒューマンフレンドリーな入出力デバイスで搭乗者運転操作	左記のロボットとの情報交換のほか、施設内情報インフラと連携した搭乗者への各種情報提供サービス [人の直感的認知インターフェイス]
デバイス: 位置特定デバイス	磁気マーカ	・GPS、地図マッピング ・無線測位システム	高精度GPS	周辺画像の認識による位置同定	高精度GPSなどのセンサ技術や、施設内ポジショニングシステム等を複合した自己位置同定
環境認識デバイス	反射型赤外線センサ 超音波センサ	レーザーレーダ測距センサ 生体検出赤外線センサ	三次元光学センサ	3次元画像処理による環境認識	施設内案内システムなどと連携した環境認識
HMIデバイス	・電気的なスイッチ	・不特定話者音声認識技術 ・タッチパネル等のグラフィカルディスプレイと一体化した入出力装置	同左	音声認識による自然言語理解	人の五感に訴える入出力装置
モビリティ通信デバイス	・赤外線通信	・多重無線通信(無線LAN) ・光ビーコン ・RFID	同左	通路・ロボット間通信	通路・ロボット、ロボット・ロボット間通信。ユビキタス通信インフラとの融合

(1) システム

駅、空港、商業施設などの大規模施設において、不特定多数の歩行者や他の移動体と同一空間内に共存し、人が搭乗して自律運転および搭乗者の運転操作が可能なパーソナルユースの移動体を提案する。施設内の人の移動に利用することで、利用者ごとに異なる目的地へ即時性の高い、安全かつ快適なモビリティ手段を提供することを目的としている。

既に実用化されている技術は、物品運搬を主目的にした無人搬送車（AGV）が代表事例である。これは起点、終点、経路などの運転条件を幾つかパターン化して予めティーチングしておき、移動時はプレイバック動作で運転条件を再現して走行し、磁気マーカなどの誘導方式を利用した自己位置補正により位置精度を確保するものである。また、一部の研究やアトラクション等の限定された目的では人の搭乗が可能な移動体の事例が公表されているが、汎用性が高い自律移動体としての実用化や市販には至っていない。一方、人が搭乗可能な移動体は、シニアカー、電動車椅子やゴルフカートに代表されるように搭乗者の運転操作で走行するため、目的地選定や走行経路の自由度は高いものの、自律移動や人と同等レベルの運動能力には到達していない。

このパーソナルモビリティロボットの利用シーンは人がロボットに搭乗して、例えば駅、空港のコンコースを一般歩行者と共存する環境下で搭乗者の意図する目的地まで走行したり、ショッピングモールなどの商業施設においては店舗間や店舗と駐車場間の移動などが考えられる。また、公道での走行は対象としていないが、一般歩行者との安全な共存のためには道路交通法に準じたルールに従って、無人で自律走行することを想定している。

(2) 知能

①概観

パーソナルモビリティロボットは、目的地を教示することで経路や運転条件を自動生成し、自己位置を特定しながら走行し、また、搭乗者による運転操作を可能にすることを基本機能とする。限られた施設内での走行を想定しているが、搭乗者の安全と周囲の歩行者や他の移動体および施設構造物への安全性確保は重要な技術課題である。一般の歩行者や他の移動体と共存するためには、それらの自動検知と挙動予測に基づく最適な回避動作が必要となり、一旦停止のほか経路修正など動的な回避パターンの生成が求められる。

走行範囲を施設内に特定することで、バリアフリー環境での走行能力が必要条件であるが、段差走破や階段昇降などの能力も併せ持つことを目標としたい。また、搭乗者の意図に従った走行や快適性を確保するために、搭乗者とのコミュニケーション能力や、搭乗者への情報提供能力などの付加機能も望まれる。

以下に、ロボット実現に必要なロボスト知能を考察する。

②ロボスト知能

(a) 自律走行知能

自律走行にとって必要な機能は、目的地までの走行経路の自動生成技術と、現在の自己位置を特定して走行経路をトレースする技術に大別できるが、搭乗者の意思に従って走行中に目的地を変更したり、突然発生する障害物回避などの外的要因に対応するダイナミックな経路修正技術などの付加機能も必要となる。

今後の技術トレンドを考察すると、まず3～5年後には、現在研究が進められているSLAMなどの経路作成技術の発展が期待できる。搭乗者は施設内地図データから目的地を指定することで、GPSや施設内のランドマーク識別で自己位置を同定して走行経路を自動作成したり、ルート学習機能による自律移動を可能にする。また、自己位置認識は高精度GPSや周辺の画像認識により誤差10mm程度までの精度向上が予想される。さらに、路面状況をリアルタイムに識別して姿勢、走行特性を制御することで走行安定性や搭乗者の快適性を向上させることも期待できる。

将来は、施設内に設置した通信インフラとの情報交換で目的地ガイダンスやルート選定のシステム化も予想される。例えば、通路・ロボット間通信にて施設内の交通規制情報や混雑状況を情報入手して最適経路選択支援が期待できる。また、複数のロボットの隊列走行や、施設内交通規則（例えば、すれ違い時は左側通行）遵守に必要な知識データベースに基づくロボット同士の協調走行なども研究対象と考えられる。

(b) 走行能力

施設内を走行するパーソナルモビリティロボットの走行能力の目標を設定するにあたり、将来の走行環境を考えると、施設のバリアフリー化は一層進むことが期待される。この結果、段差や階段は少なくなり、これに代わるスロープが設けられると予想される。このような環境下でロボット専用の走行路を設けることなく、人の歩行能力と同程度の走行能力が求められる。走行速度は安全性を確保しつつ、歩行者に威圧感を与えない速度である時速4～6km程度で、可搬重量は100kg程度が当面の目標と考える。水平面走行だけでなく、安全かつ効率的な走行には階段の昇り降りや、20cm程度の段差走破などの運動能力も必要であり、バリアフリー化が進展しても階段に代わるスロープに相当する7°程度（建築基準法より）の傾斜路を安定走行する能力が不可欠と考えられる。より快適な魅力あるモビリティ手段としてモビリティロボットを実現するには、これらの目標を上回る走行能力が望まれる。

まず、3年後にはバリアフリー環境での走行を目指し、10°程度の傾斜路や100mm程度の段差を走破できる走行能力が期待される。5年後には人の歩行能力に近い階段昇降が安定して実現できれば施設内でのモビリティロボットとしての要件を具備することになる。最終的な目標は魅力あるモビリティロボットとして、人の運動能力と同等以上の走行能力が望まれる。

(c) 障害物の検知、回避知能

最終目標である、歩行者や他の移動体との共存を実現するためには安全性の確保が必須条件であり、まず障害物を検知する機能と、その障害物の動的挙動を予測して危険性を判断し、的確な回避行動を実行する機能が必要となる。

障害物の検知は後述の環境認識デバイスにて述べるが、3～5年後にはレーザレーダなどの手法で周辺の人や障害物を三次元的に検出、測定し、その障害物の移動方向、移動速度と自己の走行経路を照合して接触の危険性を判断する技術の開発が期待される。この危険性を回避するため、走行経路修正や停止などの最適な回避パターンを自律的に選択、生成することが可能になると考えられる。

これらの手法では電波やレーザが到達する範囲即ち、見通せる範囲の障害物の検知には有効であるが、モビリティロボットの走行が高度化するにつれ、交差点や曲がり角など走行先が見通せない場所での障害物認識も必要になる。このため将来は、施設内のインフラと協調した認識技術も考えられる。例えば、施設に設けたレーザレーダ等で検知した障害物情報をロボットに通知するなどシステム化で補完して、死角をなくす工夫が必要となる。

デバイスごとに認識範囲、精度などの環境認識特性が異なり、デバイスを組み合わせて利用することで夫々の特性を補完し、安全冗長性を高めることが可能となる。また、ロボットの回避行動が歩行者や搭乗者の危険を増長させることがないように、周囲の人が違和感を感じないような回避行動の研究が行動心理学的な見地からも進むことが望まれる。

(d) 搭乗者とのコミュニケーション知能

自律運転においては目的地などの最低限の運転条件をロボットに教示する必要がある。視覚的なインターフェイスとしてはカーナビゲーションシステムのように地図情報をグラフィック表示し搭乗者が目的地を教示する方法にくわえ、例えば施設案内システムと連携して搭乗者の曖昧な目的地指示を正確にガイドする機能も有効である。また、搭乗者の運転操作機能として“動く、止まる、曲がる”の動作指示が必要となる。

さらに、施設案内情報提供サービスなどで付加価値を向上させることも可能

となる。このためには施設案内システムと連携して、情報の種類に応じて視覚、聴覚などの手段で情報授受するコミュニケーション能力が望まれる。また、例えば空港における利用では多言語対応が必要となり、ユニバーサルデザインを考慮したコミュニケーション手段の研究開発が期待される。

(3) デバイス

パーソナルモビリティロボットのロバスト知能を実現するための構成デバイスについて考察する。

①位置特定デバイス

従来の誘導型無人搬送車においては、磁気マーカなどで自己位置を較正することで規定の経路の走行は可能であったが、自動生成した移動経路にしたがって自律走行するモデルにおいては、自己位置をリアルタイムに測位する必要がある。

自動車にはGPSによるカーナビゲーションシステムが既に普及しており、モビリティロボットにおける絶対位置特定においても有効な手段である。GPSの位置精度は理論的には誤差20cm以下、民生用に公開されている信号処理では誤差10m以下といわれている。さらに精度を向上させるため、DGPS、RTK-GPSや準天頂衛星システムにより誤差20cm程度の測位が期待できる。しかしながら施設内での利用においては衛星からの信号が受信できない環境も予想され、安定した測位には施設内で利用可能なデバイスが必要となる。GPSと同様な原理の無線測位システムも実用化されており、走行範囲が特定されるモビリティロボットには有効な手段である。このような電波伝播時間に基づく絶対位置測定では20cm程度の精度が限界であり、大まかな位置同定には有用であるが、更に精度が要求される制御には、施設内のランドマークを光学的あるいは電磁的に検出し地図データと照合して自己位置を特定する手段や、周辺の画像を特徴抽出する方法で誤差精度の向上が期待される。将来はこれらの複数のデバイスを併用して、連続的かつ高精度な測位が実現できると考えられる。

②環境認識デバイス

自律走行体の安全性確保に必要な障害物を検知する認識デバイスとして、従来の誘導型無人搬送車においては、電氣的スイッチを組み込んだ安全バンパでの接触検知や、超音波センサによる近接検知が採用されていた。これは危険回避措置として自車停止を基本としており、この安全の原則は将来も不変であるが、より高度な危険回避行動を実現するための環境認識デバイスが求められる。

自動車の先進安全技術としてミリ波レーダや赤外線レーザーレーダが開発、実用化されているが、ロボットおよび歩行者や障害物の移動速度が比較的遅い用途に

は赤外線レーザーレーダの光学的手法で20～30mの距離を1mm以下の精度で測距でき、三次元画像を再現することで障害物形状の認識も可能となる。また、ドップラーレーダで障害物の移動方向や移動速度を検知してロボットの障害回避行動に利用されることも期待できる。

③ヒューマンインターフェイス（HMI）デバイス

ロボットと搭乗者のインターフェイスデバイス（HMI）は、ロボットの自律走行に必要な目的地の教示や運転操作などに、データの種類に応じて人間の五感を利用した親和性の高い入出力装置が求められる。地図データ上での目的地入力には、視覚的なHMIとしてはカーナビゲーションシステムのように地図情報をグラフィック表示し搭乗者が目的地をタッチパネルで教示する方法や、音声入力などが考えられる。音声入力は単語認識から自然言語理解へ研究が進んでおり、音声合成によるアンサーバックと組み合わせることが一般的な利用方法であり、ハンズフリー、アイズフリーなHMIと考えられる。

搭乗者によるモビリティロボットの運転操作には、自動車や搭乗型移動体などで既に確立された技術として操縦桿型の運転操作装置などがあり、今後も利用されると考えられる。

これらのHMIはロボットに限らず他の民生機器にも共通の課題であり、今後の新しいデバイス開発に伴い、最適な選択が可能になると期待される。

④通信デバイス

モビリティロボットの通信は、施設インフラとの通路・ロボット間通信や、他のモビリティロボットとのデータ通信が中心であり、無線LANや狭域無線通信の利用が今後も予想される。モビリティロボットに地図データや施設案内などの情報提供サービス機能を付加したり、多台のロボットの運行管制をシステム化するためには、通路・ロボット間通信が不可欠なデバイスとなる。

3. 5 知能ロボットシステム基盤について

表 3. 5 知能ロボットシステム基盤 ロードマップ

(注)「#」はrobustness index

(1) 環境の構造化・環境の知能化		従来	現在(2006)	近未来(3年後)	近未来(5年後)	未来(2025以降)	
知能	環境の構造化・環境の知能化						
	①環境整備	ファクトリ ソサエティ	簡辺構器による精密位置決め。磁気ワイヤ・反射テープによる2次元地図情報	バラ積み部品の認識 反射板・磁気テープ Differential GPS、RTK-GPS	作業環境の機器構成・配置の標準化。環境埋め込み情報表現(色・コード)の提案	作業手順の標準化。環境埋め込み情報表現(色・コード)の提案	
	②GPS-UWB		GPS	屋内GPS	屋内外シームレスGPSサービス	屋内GPSの普及	
	③RFIDタグ		パッシブRFIDタグ	アクティブRFIDタグ	UHF帯(パッシブ)と433MHz帯(アクティブ)RFIDタグ	普及開始	ユビキタス
	④提供情報	ファクトリ ソサエティ パーソン	教示による作業環境の提示	位置情報	教示データによる作業情報の取り込み。環境組み込みデータを利用した作業情報の精緻場面情報	作業情報 計算機援用設計による作業生成。環境組み込みデータを利用した作業教示の単純化と意味づ	国際標準作業情報の提供。知能ロボットによる作業教示内容の理解 国際標準位置・場面・作業情報の提供 国際標準位置・作業情報の多機能・百個以上のノード・低コスト・数十ホップ・小型化
	⑤センサード		単機能・少数ノード・高コスト・ワンホップ	単機能・10個程度のノード・中コスト・数	複数機能・数十個程度のノード・中コスト・数十ホップ	複数機能・数十個程度のノード・低コスト・数十ホップ	作業実行に必要な多様な情報の提供・作業環境の安全性確保
	⑥環境ビジョン	ファクトリ ソサエティ パーソン	2次元位置情報	バラ積み部品位置姿勢情報。キャリブレーションの自動化	3次元位置・姿勢情報。環境認識。作業対象認識の教示作業の簡易化。環境認識用図形・色の標準化	ロボット・人間共存環境における安全の確保。標準色・形状の利用による知能化の推進	個人識別を含めた人物の位置情報提供・形状情報を含めた物体の位置情報提供 形状情報を含めた物体の位置情報の提供
⑦RT環境インフラ			API、ライブラリ	RTC、ORINなど分散コンポーネント、ミドルウェア		RTオントロジー	
デバイス	環境の構造化・環境の知能化デバイス	パッシブRFIDタグ	アクティブRFIDタグ				

(2) 知能のモジュールと統合手段

(2) 知能のモジュールと統合手段		従来	現在(2006)	近未来(3年後)	近未来(5年後)	未来(2025以降)	
知能	知能のモジュールと統合手段						
	①ソフトウェア開発環境		個別ツール	シミュレータ コンポーネント作成ツール	シナリオ・モーションエディタ システム作成ツール	シナリオ・モーション半自動生成 ロボット自動設計	
	②通信プロトコル	ファクトリ ソサエティ パーソン	標準なし	ORIN Rsi Rsi	標準化普及 RSI普及進展 RSI普及進展	標準化普及 標準化普及 標準化普及	世界標準確立 世界標準確立 世界標準確立
	③ミドルウェア		標準なし	個別開発	RTM標準化策定中	標準化普及	標準化普及 世界標準確立
	④知能モジュール		なし	モジュール化開始	数機関が開発した知能モジュール利用可能	標準化普及	世界中の機関が開発した知能モジュールが相互利用可能 世界中の知能モジュールが統一アーキテクチャに統合
	⑤統合アーキテクチャ		なし	複数アーキテクチャ提案中	標準アーキテクチャ策定開始	標準アーキテクチャ普及	標準アーキテクチャに統合
⑥ロボットシステムモデル		個別記法	XML等複数提案	標準仕様記述モデル普及	標準仕様記述モデル普及	仕様記述モデル世界標準化	
デバイス	知能のモジュールと統合デバイス	ハードウェア個別仕様	RTコンポーネント化開始	RTコンポーネント普及	RTコンポーネントデータベース普及	RTコンポーネントデータベース普及	

(3) 知能ロボットの安全性

(3) 知能ロボットの安全性		従来	現在(2006)	近未来(3年後)	近未来(5年後)	未来(2025以降)	
知能	知能ロボットの安全性						
	①危険領域進入制限の知能		安全柵、教示プラグ、インタロック、パナスイッチ	使用場所を限定することで安全を確保するシステム	リアルタイムビジョン等による人の進入検知	リアルタイムビジョン等による人の行動監視	人の行動・動作予測による進入制限
	②動作保証の知能		ウォッチドッグタイマー、メカストップ、ソフトリミット	フェールセーフ、マップに基づく動作範囲制限、監視人	制御二重化、センシング多重化、センサ情報を基にした自己診断、安全監視	外界センサによる安全監視、遠隔診断	自己修復
	③干渉検知・回避の知能		モデルに基づくロボット間干渉チェック	センサによる人/物体との干渉検知、干渉回避、動作停止	ロボット動作予測による人/物体との干渉検知、干渉回避、動作停止	人の行動・動作予測に基づく干渉検知、干渉回避、動作停止	人の意図を理解したロボットの自己安全機能(現代版ロボット三原則)
	④安全HMIの知能		人操作による非常停止(非常停止スイッチ)	安全な人操作/自動制御のモード移行(非常停止スイッチ)	認知心理学に基づいた安全HMI	緊急/異常時における人の対応や人の認知過程を考慮した自律動作システム	筋電位、脳内活動検出などによる意思理解/動作指示インタフェース
	⑤情報セキュリティの知能		LANセキュリティ強化	無線LANセキュリティ強化	セキュリティホームネットワーク(家庭内)	セキュリティセンサネットワーク(家庭内)	セキュリティユビキタスネットワーク、セキュリティユビキタスセンサネットワーク(都市空DNA認証)
⑥認証の知能		暗証番号、パスワード	指紋認証、暗号化	顔・静脈・虹彩・網膜認証	複合バイオメトリクス認証		
デバイス	知能ロボットの安全性デバイス						
①安全回路デバイス		ハードロジック(リレー、スイッチ、個別汎用ボード)	安全リレーモジュール、安全PLC	安全無線LAN	安全広域ネットワーク	安全コンピュータ	
②安全制御デバイス		発生力制限(小型モータ利用)	発生力制限(小型モータ利用)	二重化制御回路、二重化センサ回路	センサ処理回路多重化制御デバイス	安全制御統合小型チップ	
③本質安全機構デバイス		超音波センサ、エンコーダ	レーザレンジファインダ、画像センサ、ジャイロ	リアルタイムビジョン、室内GPS	リアルタイムビジョン、屋外GPS	環境認識統合センサシステム	

(4) ロバスト知能ロボットアーキテクチャ

(4) ロバスト知能ロボットアーキテクチャ		従来	現在(2006)	近未来(3年後)	近未来(5年後)	未来(2025以降)
知能	ロバスト知能ロボットアーキテクチャ					
	①アーキテクチャ		階層構造、水平分散	階層構造・階層構造ハイブリッド	水平分散・階層構造ハイブリッド型	フラット・非階層アーキテクチャ
	②ロバスト知能知識		ロボットのローカル知識	空間知(受動的データ)	空間知(能動的エージェント)	空間・インターネット、ロボット自身の知能の融合
	③ロバスト認識知識		記号(機械段階)	オブジェクトの一次的認識(知識段階)	オブジェクトのカテゴリ認識(知識段階)	多義的物体認識(知能)
④ロバスト命令知識		固定型	設計者記述型	設計者記述型から自律獲得	自律獲得型	相互獲得型
デバイス	ロバスト知能ロボットアーキテクチャデバイス					
①CPU		WorkStation、組み込みCPUボード	マルチスレッド、マルチコア	Cell、RMTP	次世代RMTP	超並列・低消費電力CPU、リコンフィギュラブル・プロセッサ
②ネットワークインフラ		ロボット内部のセンサ・アクチュエータ間	Ethernet、USB、Bluetooth、ZigBee	IEEE1394、USB2.0、UWB	RealTimeEthernet	RealTime無線
③OS		DOS、アセンブラによるモニタプログラム、組み込みリアルタイム	Windows、汎用Linux、リアルタイムLinux、組み込みリア	リアルタイムLinux、組み込み汎用リアルタイムOS	リアルタイムLinux、組み込み汎用リアルタイムOS	リアルタイムLinux、組み込み汎用リアルタイムOS、ロボット用CPU向けリアルタイムOS

これまで述べてきたように、今後各種のロボット知能技術やそのモジュールが開発され、ファクトリ、ソサエティ、パーソンの各領域への適用・普及が進むことが期待されている。このとき、知能モジュールを、標準化された共通システム基盤の上に構築することによって、必要な知能モジュールを適宜組み合わせることや、必要なモジュールを購入して独自のロボットシステムを構築することなどが容易になり、知能化技術の普及に資することが予想される。本章では、次世代ロボットを普及させるために必要となる共通的な技術を、環境の知能化や構造化、安全性、知能のモジュール化と統合手法、アーキテクチャという4つの観点で解説する。

(1) 環境の構造化・知能化

移動ロボットのナビゲーション、対象物の情報、また家庭用ロボットにおける人間の状況の把握などは、ロボットに搭載されたセンサや情報で全て解決することは困難であり、環境自体を構造化・知能化し、それとロボットが連携することにより高度なロボット知能を達成することが検討されている。環境整備、GPS・UWB・RFID、情報提供、センサノード、環境ビジョン、RTインフラなどの各技術について、ファクトリ、ソサエティ、パーソンのそれぞれの領域における環境の構造化・知能化技術と、環境とロボットとの連携について解説する。

(2) 知能のモジュールと統合化手法

今後開発される知能化技術をモジュール化し、また統合手法を提供することによって、次世代ロボットの普及に資することが期待されている。サービスロボット向けモジュールの標準インタフェースとして、OMG (Object Management Group) でRTミドルウェアの国際標準化作業が進められているが、今後開発される知能モジュールも、このような標準インタフェースに基づき集積し、普及を促すことが必要であり、その考え方について解説する。

(3) 知能ロボットの安全性

次世代ロボットは、ファクトリ分野であれ、ソサエティ・パーソン分野であれ、人間と同じ空間で動作することや、接触を伴いながら動作する場合は増え、協働することやロボットが人間を支援するケースが広がるであろう。このような状況下での、安全システムや安全知能、および安全知能デバイスについて解説する。

(4) ロバスト知能ロボットアーキテクチャ

知能モジュールを組み合わせ、システムとして知的に振る舞い与えられたタスクを実行するロボットを実現するためのアーキテクチャについて解説する。まずアーキテクチャの設計論を述べ、その後、知能用知識、認識用知識、命令用知識という観点で、必要となる技術を解説する。

表3. 5. 1. 1 環境の構造化・環境の知能化 ロードマップ (概要)

		従来	現在(2006)	近未来(3年後)	近未来(5年後)	未来(理想、2025年以降)
		工場内環境	屋内限定環境	屋内外限定環境	屋内外整備環境	ユービキタス
システム: 移動ロボット 知能: ~知能概要						
環境整備	ファクトリ	・周辺機器による精密位置決め ・磁気ワイヤ、反射テープによる誘導	・バラ積み部品の認識	・作業環境の機器構成・配置の標準化 ・環境埋め込み情報表現(色、コード)	・作業手順の標準化 ・環境埋め込み情報表現(色、コード)の提案	
GPS	ソサエティ パーソン	2次元地図情報なし GPS	反射板・磁気テープなし Differential GPS RTK-GPS	屋内GPS UWB測位 UHF帯(パッシブ)と433MHz帯(アクティブ)RF-ID	屋内外シームレスGPSサービス	屋内GPSの普及
RF-ID		パッシブRF-ID	アクティブRF-ID	普及開始		ユービキタス
提供情報	ファクトリ	・教示による作業環境の提示		・教示データによる作業情報の取り込み ・環境組み込みデータを利用した作業情報の精緻化	・計算機援用設計による作業生成 ・環境組み込みデータを利用した作業教示の簡単化と意味づけの高度	・国際標準作業情報の提供 ・知能ロボットによる作業教示内容の理解
センサノード	ソサエティ パーソン	単機能・少数ノード・高コスト・ワンホップ	位置情報 単機能・十個程度のノード・中コスト・数ホップ	位置情報 複数機能・数十個程度のノード・中コスト・数ホップ ・3次元位置・姿勢情報	作業情報 複数機能・数十個程度のノード・低コスト・数十ホップ	国際標準位置・場面・作業情報の提供 国際標準位置・作業情報の提供 多機能・百個以上のノード・低コスト・数十ホップ・小型化
環境ビジョン	ファクトリ	2次元位置情報	・バラ積み部品位置姿勢情報 ・キャリブレーションの自動化	・環境認識、作業対象認識の教示作業の簡易化 ・環境認識用図形・色の標準化	・ロボット・人間共存環境における安全の確保 ・標準色・形状の利用による知能化の推進	作業実行に必要な多様な情報の提供・作業環境の安全性確保
	ソサエティ		通行人数の計数	特定人物・物体の位置情報提供	個人識別を含めた人物の位置情報提供・形状情報を含めた物体の位置情報提供	多数人物の行動理解・多数物体の形状・位置情報提供
	パーソン			特定人物・物体の位置情報提供	形状情報を含めた物体の位置情報の提供	多数人物の行動理解蓄積・多数物体の形状・位置情報提供
RT環境インフラ		API,ライブラリ	RTC, ORiNなど分散コンポーネント, ミドルウェア			RTオントロジー
デバイス: ~知能デバイス		パッシブRF-ID	アクティブRF-ID			

(1) ファクトリオリエンテッド知能ロボット分野

環境の構造化あるいは知能化がファクトリの現場で貢献する主要な応用としては、移動ロボットのナビゲーションおよび部品等の情報の提供が挙げられる。従来、工場内で使われてきた移動ロボットは、床埋め込み磁気ワイヤガイド、あるいは銀色ガイドテープ等に従って固定経路を移動する場合がほとんどであったが、現在では慣性航法とレーザー測位や磁気テープを用いた位置補正を組み合わせることにより、自律走行するものが徐々に実用化されつつある。今後はRF-IDや屋内GPS等の導入により環境が構造化され、さらなる普及が進むものと思われる。

また、2次元バーコードやRF-IDを用いて、作業の対象となるワークの形状・重量・用途・把持可能位置・表面反射等の多様な情報を提供することができれば、これらの情報を用いて3次元視覚処理を単純化したり、自律的なマニピュレーションのプランニングをおこなったりすることが可能となる。すでに元となる形状情報はCAD上に存在するので、情報提示は可能だが、現場での処理レベルが低いので、形状情報の提供は進んでいないが、現場に知能ロボットの導入が進めば、環境からの情報提供の必要性がますます高まり、その情報提供によって現場での知能処理レベルが高まるという正のスパイラルになると予想される。

環境ビジョンについては、従来は2次元位置情報のみの提供が可能であったが、現在は2次元ビジョンを用いてバラ積みされた部品の位置姿勢を提供することが可能になりつつある。今後は、3次元位置・姿勢情報の提供、ロボット・人間共存環境における安全の確保の実現が望まれる。現場では、設定機器のキャリブレーションがやっと自動化されつつある段階で、キャリブレーション、照明条件の管理などの簡素化が強く望まれる。また、認識対象の教示とその信頼度の向上が常に求められる技術で、これを素人の作業でも簡単に修正できるソフトウェアシステムなしには画像処理も導入しにくい。

(2) ソサエティオリエンテッド知能ロボット分野

上述したファクトリオリエンテッド知能分野と同様に、移動ロボットのナビゲーション、対象物体のマニピュレーションを行うために、環境の構造化・知能化が進み、共通利用されるものと考えられる。現在、読み取り距離を伸ばすため、UHF帯を用いたパッシブタグ、433MHz帯を用いたアクティブタグ、ADコンバータ内蔵のセンサ機能を有するタグ等の開発が進んでいる。今後は、タグのコストダウンにより、センサ応用タグの普及が急速に進むものと予想される。

また、マイクロサーバ、センサノードなどと呼ばれる小型デバイスの開発が加速することが予想される。これらの特徴は、デバイス間で無線通信を行い、センサネットワークを形成できる点にあり、アドホックにそれを形成する技術も開発されている。デバイスに様々なセンサを接続・内蔵させ、空間に多数配置することにより、広域にわたる情

報を収集することが可能であり、その情報に基づきロボットを動作させることが可能になる。またセンサネットワークをインフラとして用い、ロボットが収集した情報を配信したり、ロボット間で情報交換をさせることも可能となる。

屋内GPSに関しては、工場外でのロボットの本格的な普及はこれからであることから、一般の環境での普及は進んでいない。むしろ、非常通報時に場所情報を付加することが義務づけられれば、非常時通報システム用として屋内においてGPS信号を発信する機器の普及が進み低価格化する可能性があり、ロボットも同じインフラを利用できる可能性がある。また、UWB測位技術も発展の可能性はある。

これまで、RF-IDを利用した本の片付けシステム、RF-IDを利用したインテリジェント車椅子、屋内GPSの試作、ロボット特区における実験タウンでの実証実験等が行われてきている。今後は、物流支援システムへの応用等を皮切りに、実用化が進んでいくものと思われる。提供情報も、位置情報から意味情報を含む場面情報、作業情報の提供へと進んでいくものと予想される。

環境ビジョンについては、現在通行人数の計数等の技術が実現してきている。今後は、特定人物や物体の位置情報の提供、個人識別を含めた人物の位置情報の提供、形状情報を含めた物体の位置・姿勢情報の提供、多数人物の行動理解・多数物体の形状・位置情報の提供へと進んでいくものと予想される。

(3) パーソンオリエンテッド知能ロボット分野

パーソンオリエンテッドという観点からは、高齢者支援(エイジフリーな生活空間)、女性の社会進出支援(ジェンダーフリーな生活空間インフラ)の観点から課題を抽出し、解決することにより、RTが人を支えるための本質問題を解くことができる。

ICタグに関しては、ロボットに対して利用者個人の特定・利用者の概略位置情報の提供、利用状況による人の行動の把握等を行うために利用される可能性がある。また、概略位置情報は独居高齢者の安否確認等の応用に利用できる。対象物体の情報は、ファクトリオリエンテッド知能ロボット分野の場合と同様に、介助サービスの提供に利用できる可能性がある。

屋内GPSに関しては、コストの観点から個人用として利用するのは困難であろう。

環境ビジョンに関しては、特定人物や物体の位置情報提供、形状情報を含めた物体の位置・姿勢情報の提供、多数人物の行動理解・蓄積、多数物体の形状・位置姿勢情報の提供へと発展すると予想される。

環境・ロボットとのコミュニケーション機能としては、音声対話、ジェスチャ、行動による違和感のないコミュニケーション機能が求められる。

以上は、センサネットワークとの連携により、分散インフラとして情報構造化を加速する。

これらを、統合し、インテグレーションするためのRTオントロジーおよびサービス

レイヤに応じたサービスモデルおよび、アプリケーションならびにモジュールに対する共通サービスを提供する階層化したミドルウェアおよび運用フレームワークを規定することにより、モデルベースの設計が可能となる。これにより、R T開発成果の相互利用を促進し、ロボット技術（R T）の普及促進を加速することが可能となる。

環境構造化によるR Tビルトインサービスインフラの提供により、トータル社会コストの低減により、エイジフリー、ジェンダーフリーの生活環境が実現できると期待される。

表3.5.2.1 知能のモジュールと統合手段 ロードマップ (概要)

		従来	現在(2006)	近未来(3年後)	近未来(5年後)	未来(理想、2025年以降)
システム:ソフトウェア開発環境		個別ツール	シミュレータ コンポーネント作成ツール	シナリオエディタ モーションエディタ システム作成ツール	シナリオ半自動生成 モーション半自動生成 設計支援ツール	シナリオ自動生成 モーション自動生成 ロボット自動設計
知能 : ~知能概要 ~~ロバスト知能						
通信プロトコル	ファクトリ ソサエティ パーソン	標準なし 標準なし 標準なし	ORiN RSi RSi	ORiN普及進展 RSi普及進展 RSi普及進展	標準化普及 標準化普及 標準化普及	世界標準確立 世界標準確立 世界標準確立
ミドルウェア		個別開発	RTM標準化策定中	標準化普及開始	標準化普及	世界標準確立
知能モジュール		なし	モジュール化開始	数機関が開発した知能モジュール利用可能	数十機関が開発した知能モジュール利用可能	世界中の機関が開発した知能モジュールが相互利用可能
統合アーキテクチャ		なし	複数アーキテクチャ提案中	標準アーキテクチャ策定開始	標準アーキテクチャ普及	世界中の知能モジュールが統一アーキテクチャに統合
ロボットシステムモデル		個別記法	XML等複数提案	標準仕様記述モデル普及開始	標準仕様記述モデル普及	仕様記述モデル世界標準化
デバイス: ~知能デバイス		ハードウェア 個別仕様	RTコンポーネント化開始	RTコンポーネント普及	RTコンポーネントデータベース普及	世界標準RTコンポーネントデータベース普及

(1) ファクトリオリエンテッド知能ロボット分野

既存の第2次産業用ロボットのソフトウェアは、個々の企業独自の仕様に基づいて開発されてきた歴史があり、これらを標準的なインターフェイスを用いて細粒度にモジュール化して統合し直すのは非現実的である。また、製造現場で使われるロボットには高い信頼性が要求されるので、ある意味枯れたシステムが適しており、この意味からもシステムを再構成するのは困難である。

一方、第2次産業用ロボットで利用されている知能は非常に限定されているのが現状であり、3次元視覚や高度マニピュレーション等の実用化はこれからと言っても過言ではない。このような次世代の知能については、標準的なインターフェイスを持ったモジュールで提供していくことも可能である。

第2次産業用ロボット用の通信インターフェイスの標準化活動としては、OR i N (Open Resource interface for The Network) がある。詳細はOR i N協議会 (<http://www.Orin.jp/>) の資料に譲るが、比較的大きな粒度・高い通信層でインターフェイス規約を定めているのが特徴である。第2次産業用ロボットの通信インターフェイスの標準化としては現実的な選択であると思われる。

第2次産業用ロボット用知能モジュールの提供方法には自明な解はない。既存ロボットのコントローラが利用しているプロセッサ、RTOS、通信ネットワークの制約があり、利用可能な資源も限定されていることから、フル規格のRTミドルウェアの実装は容易ではない。限定された仕様の標準的な通信インターフェイスを利用することを検討するのが妥当な選択と思われる。

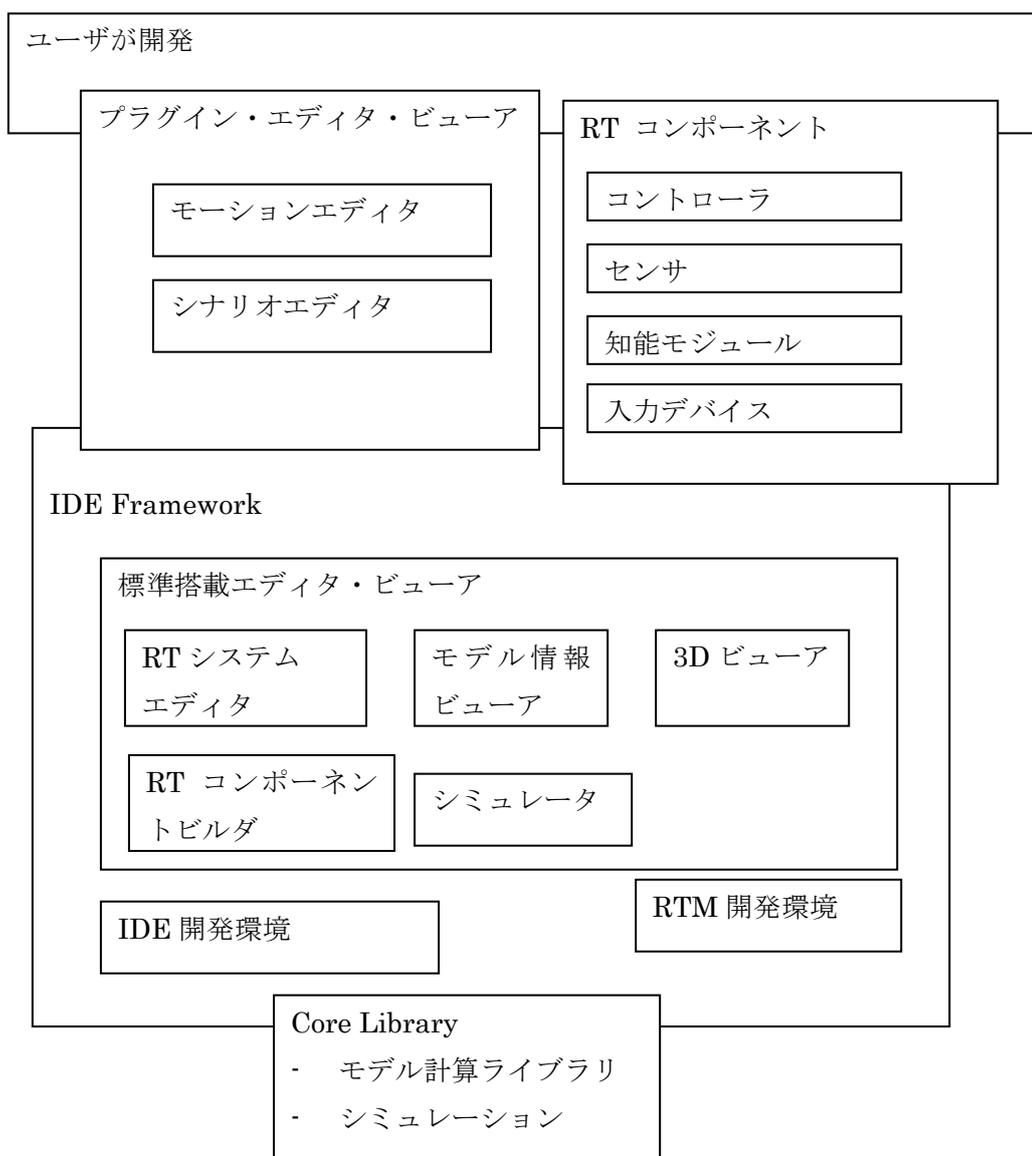
(2) ソサエティオリエンテッド知能ロボット分野

第1次産業用ロボット、第3次産業用ロボット、公共ロボット、ITS等の本格的な普及はこれからであることから、知能のモジュール化と標準的な統合手法の適用が最も求められる分野である。これまで、RTミドルウェア、OROCOS、ORCA/ORCA2、OPEN-R等の多くのモジュール化・統合手法が提案されてきている。また、ネットワークを介してロボットが提供する情報サービスもしくは物理的サービスを推進するための業界団体R s i (Robot Service initiative)も設立され、高レベルのインターフェイスの標準を策定中である。また、Microsoftも、Netをミドルウェアとして用いたRobotics Studioの提供を開始し、LEGOやiRobot等の主要ハードウェアベンダの幾つかが協力し始めており、求心力が働きはじめている。

このような状況を鑑みると、我が国のロボット業界では知能のモジュール化・統合手法について早期に合意点を見出し、この上に知能モジュールコンテンツを集積していくことが急務である。上述したように、これまでに多くのモジュール化・統合手法が提案されているが、基本的な考え方は「標準インターフェイスに基づくモジュール化により

ソフトウェアの再利用性を高める」ことであって、提案内容に本質的な差があるとは思えない。早期に合意することが重要である。有力候補はOMG（Object Management Group）で国際標準規格案に採用されたRTミドルウェアであるが、現時点では業界全体の合意が得られている状況にはない。今後は真摯な意見交換を通して仕様の策定を急ぎ、コンテンツの集積を早期に開始することが求められる。

また、RTミドルウェアに加えて、関連する開発環境の整備も急務である。次図に構成例を示す。



RT開発環境とは、RTミドルウェアの実装に関する専門的知識を有しないユーザが、RTコンポーネントを効率良く開発・デバッグできる機能、RTシステムを効率よく開

発・デバッグできる機能を実現するものであり、次の要素から構成される。

- ①RTコンポーネントビルダ。RTコンポーネントのコード作成、デバッグ、パッケージ化等の一連の作業をシームレスに行うことのできるツール。
- ②RTコンポーネントデバッガ。データポートのモニタ、サービスポートの手動コール、アクティビティのステップ実行等RTコンポーネントをデバッグできるツール。
- ③RTシステムエディタ。RTコンポーネントで構成されるネットワークの設計・デバッグができるツール。

また、応用ソフトウェア開発ツールとして、RTミドルウェアを用いてコンポーネント化された知能コンポーネントを統合して、応用システムを効率よく開発するシステムの開発が望まれる。これは、以下の要素から構成される。

- ④作業シナリオ設計ツール。タイムライン・イベントに対して、RTコンポーネント間の起動・停止・接続等、一連のシーケンスとして実行するシナリオの作成ができること。このため、作業シナリオの標準記述方式を提案すること。
- ⑤動作設計ツール。ロボットの移動・作業等の動作の作成ができること。
- ⑥実時間ソフトウェア設計ツール。作成されたシナリオに対して、実時間制御を実行するソフトウェアの作成支援ができること。
- ⑦シミュレータ。マニピュレータ・車輪型移動ロボット・脚型移動ロボットを含む多様なロボットを対象として、運動学・動力学・視野画像のシミュレーションが行えること。距離センサ・加速度センサ・ジャイロ・力センサ・アクチュエータを含むRTコンポーネントの機能のシミュレーションが行えること。

さらに、設計支援ツールとして、RTミドルウェアを用いてモジュール化された知能モジュールと上記応用ソフトウェア開発ツールを用いて、知能ロボットシステムを効率よく設計するシステムの実現が望まれる。これは、以下の要素から構成される。

- ⑧ロボットシステム構築ツール。RTモジュールを組み合わせて、知能ロボットシステムのモデルを作成できる。
- ⑨RTコンポーネントデータベース。RTコンポーネントをコンテンツとするネットワーク分散型データベースを管理する機能を実現すること。

以上のRT開発環境を開発するための前提として、RTシステム仕様の記述モデルの標準化、RTコンポーネント仕様の記述モデルの標準化、行動履歴記述モデルの標準化が必要である。

(3) パーソンオリエンテッド知能ロボット分野

これまで、清掃ロボット、ホビーロボット、セラピーロボット、セキュリティロボット等が商品化され、一定の市場は形成してきているが、この分野もソサエティオリエンテッド知能ロボット分野と同様本格的な市場形成はこれからであり、知能のモジュール

化と標準的な統合手法の適用が重要な分野である。上述した R s i もこの分野を重要な応用分野と位置づけている。

この分野の特徴は、

- ①単価が安いので利用可能な計算資源が限定される。
- ②要求される信頼性は他の2分野程は高くない。
- ③コミュニケーション知能が重要な役割を果たす。

と言ったところである。これらの特徴に応じたモジュール化・統合手法が求められる。

表 3. 5. 3. 1 知能ロボットの安全性 ロードマップ (概要)

	従来	現在	近未来(3年後)	近未来(5年後)	未来(理想、2025以降)
【安全システム】					
全体	<ul style="list-style-type: none"> ・完全分離型安全システム ・小型モータ使用による本質安全システム ・ISO12100対応 ・機械安全の基本概念 	<ul style="list-style-type: none"> ・簡易分離型安全システム ・小型モータ等使用による本質安全システム ・ISO10218改定(人とロボットの共存) ・次世代ロボット安全確保ガイドライン(METI)の制定 ・暗号化／第三者認証機関 ・情報系安全システム 	<ul style="list-style-type: none"> ・時間的／空間的限定安全システム ・ISO12100(機械安全の基本概念)およびISO10218-1(新しい産業用ロボットの安全規格を意識した安全システム) ・次世代ロボット安全規則(METI)の制定 	<ul style="list-style-type: none"> ・一時的／一部空間的限定安全システム ・使用場所限定による安全システム ・次世代ロボット安全確保ガイドライン(METI)に沿った安全システム ・ISO12100(機械安全の基本概念)、ISO10218(産業用ロボットの安全規格)に沿った安全システム 	<ul style="list-style-type: none"> ・常時安全システム ・使用場所限定のない安全システム
ファクトリ	<ul style="list-style-type: none"> ・安全柵 ・教示プラグ 	<ul style="list-style-type: none"> ・ライトカーテン、エリアセンサなど ・産業用ロボットの安全規格改定 	<ul style="list-style-type: none"> ・人とロボットの共存(時間的、空間的に隔離することで干渉がない共存) 	<ul style="list-style-type: none"> ・人とロボットの緩やかな干渉を含む共存(同一ワークの作業など) 	<ul style="list-style-type: none"> ・人とロボットが常時干渉しながら作業できる安全システム
ソサエティ	<ul style="list-style-type: none"> ・移動体の専用軌道 ・愛知万博プロジェクト 	<ul style="list-style-type: none"> ・機体形状改善による安全システム ・使用場所限定による安全システム 	<ul style="list-style-type: none"> ・狭い使用範囲限定による安全システム ・移動体の場合、ビル、建物内の一定エリアで走行可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・一定範囲で使用できる安全システム ・移動体の場合、一定の工場やビル、建物内で走行可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・広範囲に使用できる安全システム ・移動体では一般道路走行可能
パーソナル	<ul style="list-style-type: none"> ・愛知万博プロジェクト 	<ul style="list-style-type: none"> ・機体形状改善による安全システム ・使用場所限定による安全システム 	<ul style="list-style-type: none"> ・狭い使用範囲限定による安全システム ・移動体の場合、家庭内の整備されたエリアのみで使用可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・一定範囲で使用できる安全システム ・移動体の場合、家庭内の限られた複数室で使用可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・広範囲に使用できる安全システム ・一般的な家庭内で使用可能
【安全知能】					
危険領域進入制限の知能	<ul style="list-style-type: none"> ・安全柵 ・インタロック ・パンパススイッチ 	<ul style="list-style-type: none"> ・ライトカーテン ・エリアセンサ 	<ul style="list-style-type: none"> ・リアルタイムビジョン等による人の進入検知 	<ul style="list-style-type: none"> ・リアルタイムビジョン等による人の行動監視 	<ul style="list-style-type: none"> ・人の行動・動作予測による進入制限
動作保証の知能(※1)	<ul style="list-style-type: none"> ・ウォッチドッグタイマ ・メカストップ ・ソフトリミット 	<ul style="list-style-type: none"> ・フェールセーフ ・マップに基づく動作範囲制限 ・監視人(愛知万博) 	<ul style="list-style-type: none"> ・制御二重化、センシング多重化 ・センサ情報を基にした自己診断・安全監視 	<ul style="list-style-type: none"> ・外界センサによる安全監視、遠隔診断 	<ul style="list-style-type: none"> ・自己修復
干渉検知・回避の知能	<ul style="list-style-type: none"> ・モデルに基づくロボット間干渉チェック 	<ul style="list-style-type: none"> ・センサによる人/物体との干渉検知、干渉回避、動作停止 	<ul style="list-style-type: none"> ・ロボット動作予測による人/物体との干渉検知、干渉回避、動作停止 	<ul style="list-style-type: none"> ・人の行動・動作予測に基づく干渉検知、干渉回避、動作停止 	<ul style="list-style-type: none"> ・人の意図を理解したロボットの自己安全機能(現代版ロボット三原則)
安全HMIの知能	<ul style="list-style-type: none"> ・人操作による非常停止(非常停止スイッチ) 	<ul style="list-style-type: none"> ・安全な人操作／自動制御のモード移行(非常停止／無線停止スイッチ) 	<ul style="list-style-type: none"> ・認知心理学に基づいた安全HMI 	<ul style="list-style-type: none"> ・緊急／異常時における人の対応や人の認知過程を考慮した自律動作システム 	<ul style="list-style-type: none"> ・筋電位、脳内活動検出などによる意思理解／動作指示インタフェース
情報セキュリティの知能	<ul style="list-style-type: none"> ・LANセキュリティ強化 	<ul style="list-style-type: none"> ・無線LANセキュリティ強化 	<ul style="list-style-type: none"> ・セキュリティホームネットワーク(家庭内) 	<ul style="list-style-type: none"> ・セキュリティセンサネットワーク(家庭内) 	<ul style="list-style-type: none"> ・セキュリティユビキタスネットワークや同センサネットワーク(都市空間)
認証の知能	<ul style="list-style-type: none"> ・暗証番号 ・パスワード 	<ul style="list-style-type: none"> ・指紋認証 ・暗号化 	<ul style="list-style-type: none"> ・顔認証、静脈パターン認証、虹彩パターン認証、網膜パターン認証 	<ul style="list-style-type: none"> ・複合バイオメトリクス認証 	<ul style="list-style-type: none"> ・DNA認証
【デバイス】					
安全回路デバイス	<ul style="list-style-type: none"> ・ハードロジック(リレー、スイッチ、個別配線) 	<ul style="list-style-type: none"> ・安全リレーモジュール ・安全PLC ・安全フィールドバス(DeviceNet Safety, ASi Safety など) 	<ul style="list-style-type: none"> ・安全無線LAN 	<ul style="list-style-type: none"> ・安全広域ネットワーク 	<ul style="list-style-type: none"> ・安全コンピュータ
安全制御デバイス	<ul style="list-style-type: none"> ・汎用ボード 	<ul style="list-style-type: none"> ・統合型汎用ボード ・モジュール化 	<ul style="list-style-type: none"> ・二重化制御回路、二重化センサ回路 	<ul style="list-style-type: none"> ・センサ処理回路多重化制御デバイス 	<ul style="list-style-type: none"> ・安全制御統合小型チップ
本質安全機構デバイス	<ul style="list-style-type: none"> ・発生力制限(小型モータ利用) 	<ul style="list-style-type: none"> ・発生力制限(小型モータ利用) 	<ul style="list-style-type: none"> ・本質安全外殻材 	<ul style="list-style-type: none"> ・本質安全アクチュエータ・減速機 	<ul style="list-style-type: none"> ・本質安全大出力アクチュエータ・減速機
自己位置検知センサ 障害物検知センサ	<ul style="list-style-type: none"> ・超音波センサ ・エンコーダ 	<ul style="list-style-type: none"> ・レーザレンジファインダ ・TVカメラ、画像センサ ・ジャイロ 	<ul style="list-style-type: none"> ・リアルタイムビジョン ・室内GPS 	<ul style="list-style-type: none"> ・リアルタイムビジョン ・屋外GPS 	<ul style="list-style-type: none"> ・環境認識統合センサシステム

※1)暴走等想定しない動作を防止する機能

表3. 5. 3. 2 知能ロボットの安全性（詳細）

	従来	現在	近未来(3年後)	近未来(5年後)	未来(理想、2025以降)
【安全システム】					
全体	<ul style="list-style-type: none"> ・完全分離型安全システム 原則として物理的に場所を隔離することによって安全を確保する。 ・アクチュエータの制限による安全システム 一定以上のパワーを出せない、小型モータを使用することによる安全システム ・ISO12100(機械安全の基本理念)対応(愛知万博) 	<ul style="list-style-type: none"> ・簡易分離型安全システム 物理的に場所を隔離する安全システムと実効的に場所を隔離できる安全装置類を用いて安全を確保する。 ・アクチュエータの制限による安全システム 小型モータ使用による本質安全システム ・機体形状による安全システム ・使用場所限定による安全システム ・ISO10218(産業用ロボットの安全規格)の改定(人とロボットの共存可能に) ・情報の安全を図るための安全システム 情報の安全を図るための安全システムとしては、情報の暗号化や情報の漏洩を防ぐための第三者認証機関による認証などがある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・時間的・空間的に分離された安全システム 時間的・空間的に分離された安全システムとしては、時々刻々のロボット位置と人間等危害を受ける対象物を時間的、空間的に分離することで安全を確保するシステムの導入が図られる。 ・緩い使用場所限定による安全システム ・次世代ロボット安全確保ガイドライン(METI)の制定 ・ISO12100(機械安全の基本理念)、ISO10218-1(新しい産業用ロボットの安全規格)を意識した安全システム ・「250mm/s以下の速度を安全レベルのカテゴリ3、SIL2で監視」「ソフトによる動作制限を安全レベルのカテゴリ3、SIL2で実施」「80W以下の動力または静的推力が150N以下」など 	<ul style="list-style-type: none"> ・一時的、一部空間的に分離された安全システム ロボット位置と人間等危害を受ける対象物を時々刻々認識したり、ロボットが人間等危害を受ける対象物を検知して安全を確保するシステムの導入が図られる。 ・一定の決められた工場等敷地内や建物内での安全システム ・次世代ロボット安全確保ガイドライン(METI)に沿った安全システム ・ISO12100(機械安全の基本理念)、ISO10218(産業用ロボットの安全規格)に沿った安全システム 	<ul style="list-style-type: none"> ・常時安全システム ・使用場所の制限のない安全システム ・移動体の場合、一般道路でも走行可能な安全システム
ファクトリ	物理的に隔離するものとしては、「安全柵」があり、作業者の安全を確保するものとして「教示プラグ」がある。	実効的な場所隔離装置や安全確保のツールとしては、「安全柵」や「教示プラグ」のほか、「ライトカーテン」や「エリアセンサ」などが上げられる。	時間的・空間的に分離された安全システムとして、時々刻々のロボット位置と人間等危害を受ける対象物を認識し、両者が干渉しないよう時間的、空間的に分離することで安全を確保するシステムの導入が図られる。	一時的、一部空間的に分離された安全システムとして、時々刻々のロボット位置と人間等危害を受ける対象物を認識し、両者を時間的、空間的に分離すると共に、特定の限られた作業では両者が干渉しても安全を確保するシステムの導入が図られる。	常時安全システムとしては、ロボットと人間が常時干渉しながら作業できるシステムの導入が図られる。
ソサエティ	物理的に隔離するものとしては、移動体の場合の「専用軌道」がある。	<ul style="list-style-type: none"> ・機体形状による安全システムとしては、ロボットが危害を与えることを防ぐ機体形状や動作時の安全システムで、主なものには「挟込み防止」や「目突き防止」、「転倒防止」、「転倒時の被害軽減」などがある。 ・使用場所限定による安全システム例としては、行動範囲を1階のみに限ることにより安全を確保するシステムや定量的な制限を設けて平坦地のみに使用を限ることで安全を確保するシステム等がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・時間的／空間的に分離された安全システムとして、ロボットが人間等危害を受ける対象物を検知して、その対象物との接触を時間的、空間的に分離することで安全を確保するシステムの導入が図られる。 ・緩い使用場所限定による安全システムの導入が図られる。例えば、同一階であれば数cm以内の段差なら使用可能とする。 ・安全に関する規格やガイドラインを一部考慮したソサエティロボットやパーソナルロボットが開発される。 	<ul style="list-style-type: none"> ・一時的、一部空間的に分離された安全システムとして、ロボットが人間等危害を受ける対象物を検知して、特定の限られた接触を除き、対象物と接触しないように分離することで安全を確保するシステムの導入が図られる。 ・一定の範囲で使用できる安全システムの導入が図られる。例えば、移動ロボットの場合、敷地内であれば階段や不整地でも走行可能になる場合が考えられる。 ・安全に関する規格やガイドラインに準拠したソサエティロボットやパーソナルロボットが開発される。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ロボットが常時人間等危害を受ける対象物を認識し、対象物と接触しながら安全にサービスできる安全システムの導入が図られる。
パーソナル	一般に、一定以上のパワーを出せない、小型モータを使用する。	・同上	・同上	・同上	・同上
【安全知能】		・使用場所限定による安全システム			
危険領域進入制限の知能	危険領域への進入を制限するものとしては、従来から下記のものがある。 ・安全柵、教示プラグ ・インタロック ・パンパスイッチ	ソサエティ及びパーソナル用において、使用場所を限定することで安全を確保するシステム。例としては、行動範囲を1階のみに限ることにより安全を確保するシステムや定量的な制限を設けて平坦地のみに使用を限ることで安全を確保するシステム等がある。	3年後に危険領域への進入を制限するものとしては、下記のものと考えられる。 ・リアルタイムビジョン等による人の進入検知	5年後に危険領域への進入を制限するものとしては下記のものと考えられる。 ・リアルタイムビジョン等による人の行動監視	未来の理想としての、危険領域への進入を制限するものとしては下記のものと考えられる。 ・人の行動・動作予測による進入制限
動作保証の知能(※1)	正常動作を保証するものとしては、従来から下記のものがある。 ・ウォッチドッグタイマ ・メカストッパ ・ソフトリミット	現在、正常動作を保証するものとしては、下記のものがある。 ・フェールセーフ ・マップに基づく動作範囲制限 ・監視人(愛知万博)	正常動作を保証するものとしては、3年後には下記のものと考えられる。 ・制御二重化、センシング多重化 ・センサ情報を基にした自己診断・安全監視	正常動作を保証するものとしては、5年後では下記のものと考えられる。 ・外界センサによる安全監視、遠隔診断	未来の理想としての、正常動作を保証するものとしては下記のものと考えられる。 ・自己修復

干渉検知・回避の知能	人との干渉を検知し、回避するものとしては、従来から下記のものがある。 ・モデルに基づくロボット間干渉チェック	現在、人との干渉を検知し、回避するものとしては、下記のものがある。 ・センサによる人/物体との干渉検知、干渉回避、動作停止	3年後に、人との干渉を検知し、回避するものとしては、下記のものがある。 ・ロボット動作予測による人/物体との干渉検知、干渉回避、動作停止	5年後に、人との干渉を検知し、回避するものとしては、下記のものがある。 ・人の行動・動作予測に基づく干渉検知、干渉回避、動作停止	未来の理想として、人との干渉を検知し、回避するものとしては、下記のものがある。 ・人の意図を理解したロボットの自己安全機能 (現代版ロボット三原則)
安全HMIの知能	安全のためのヒューマン・マシン・インターフェイスとしては、従来から下記のものがある。 ・人操作による非常停止 (非常停止スイッチ)	現在、安全のためのヒューマン・マシン・インターフェイスとしては、下記のものがある。 ・安全な操作/自動制御のモード移行 (非常停止/無線停止スイッチ)	3年後の、安全のためのヒューマン・マシン・インターフェイスとしては、下記のものがある。 ・認知心理学に基づいた安全HMI	5年後の、安全のためのヒューマン・マシン・インターフェイスとしては、下記のものがある。 ・緊急/異常時における人の対応や人の認知過程を考慮した自律動作システム	未来の理想としての、安全のためのヒューマン・マシン・インターフェイスとしては、下記のものがある。 ・筋電位、脳内活動検出などによる意思理解/動作指示インタフェース
情報セキュリティの知能	情報セキュリティとしては、従来から下記のものがある。 ・LANセキュリティ強化	情報セキュリティとしては、現在下記のものがある。 ・無線LANセキュリティ強化	3年後の情報セキュリティとしては、下記のものがある。 ・セキュリティホームネットワーク(家庭内)	5年後の情報セキュリティとしては、下記のものがある。 ・セキュリティセンサネットワーク(家庭内)	未来の理想として、情報セキュリティとしては、下記のものがある。 ・セキュリティユビキタスネットワーク(都市空間) ・セキュリティユビキタスセンサネットワーク(都市空間)
認証の知能	安全のための認証機能としては、従来、下記のものがある。 ・暗証番号 ・パスワード	安全のための認証機能としては、現在下記のものがある。 ・指紋認証 ・暗号化	3年後の安全のための認証機能としては、下記のものがある。 ・顔認証、静脈パターン認証、虹彩パターン認証、網膜パターン認証	5年後の安全のための認証機能としては、下記のものがある。 ・複合バイオメトリクス認証	未来の、理想としての安全のための認証機能としては、下記のものがある。 ・DNA認証
【デバイス】					
安全回路デバイス	従来の安全回路デバイスとしては、下記のものがあった。 ・ハードロジック (リレー、スイッチ、個別配線)	現在の、安全回路デバイスとしては、下記のものがある。 ・安全リレーモジュール ・安全PLC ・安全フィールドバス (DeviceNet Safety, ASi Safety など)	3年後の、安全回路デバイスとしては、下記のものがある。 ・安全無線LAN	5年後の、安全回路デバイスとしては、下記のものがある。 ・安全広域ネットワーク	未来の理想としての、安全回路デバイスとしては、下記のものがある。 ・安全コンピュータ
安全制御デバイス	従来の、安全制御デバイスとしては、下記のものがあった。 ・汎用ボード	現在の安全制御デバイスとしては、下記のものがある。 ・統合型汎用ボード ・モジュール化	3年後の、安全制御デバイスとしては、下記のものがある。 ・二重化制御回路、二重化センサ回路	5年後の、安全制御デバイスとしては、下記のものがある。 ・センサ処理回路多重化制御デバイス	未来の理想としての、安全制御デバイスとしては、下記のものがある。 ・安全制御統合小型チップ
本質安全機構デバイス	従来の、本質安全機構デバイスとしては、下記のものがあった。 ・発生力制限 (小型モータ利用)	現在の、本質安全機構デバイスとしては、下記のものがある。 ・発生力制限 (小型モータ利用)	3年後の、本質安全機構デバイスとしては、下記のものがある。 ・本質安全外殻材	5年後の、本質安全機構デバイスとしては、下記のものがある。 ・本質安全アクチュエータ・減速機	未来の理想としての、本質安全機構デバイスとしては、下記のものがある。 ・本質安全大出力アクチュエータ・減速機
自己位置検知センサ、障害物検知センサ	従来の、障害物検知センサ及び自己位置検知センサとしては、下記のものがあった。 ・超音波センサ ・エンコーダ	現在の、障害物検知センサ及び自己位置検知センサとしては、下記のものがある。 ・レーザレンジファインダ ・TVカメラ、画像センサ ・ジャイロ	3年後の、障害物検知センサ及び自己位置検知センサとしては、下記のものがある。 ・リアルタイムビジョン ・室内GPS	5年後の、障害物検知センサ及び自己位置検知センサとしては、下記のものがある。 ・リアルタイムビジョン ・屋外GPS	未来の理想としての、障害物検知センサ及び自己位置検知センサとしては、下記のものがある。 ・環境認識統合センサシステム

※1) 暴走等想定しない動作を防止する機能

(1) 序

ロボットの智能化に伴い、取り扱うタスクも従来のロボット中心から人中心へと移行していき、空間的、時間的に限定されていたロボットと人との接触度合いはますます増加していくことが想定される。このとき、ロボットの安全性は非常に重要な問題となってくる。近年ではISO12100（機械安全の基本概念）やISO10218（産業用ロボットの安全規格）など、ロボットなどの機械に適用する安全に関する国際規格の制定・改定もあり、安全性を確保することはロボットの普及に対しても大きな影響を与える。

また、ファクトリオリエンテッド、ソサエティオリエンテッド、パーソンオリエンテッドの各ロボットにおいては、以下のような特徴を有し、それぞれに応じた安全知能が求められる。

①ファクトリオリエンテッドロボット

完全自動化を目指した動きと共に、自動化が困難である適用について人との協働が進む。パワー、高速動作速度が要求されるが、作業空間、作業者は限定的である。

②ソサエティオリエンテッドロボット

人に重大な傷害を与える可能性があり、安全に関する高い信頼性が必要。航空機事故（※）に見られるような、人の意図と反した自律動作による事故に対する考慮も必要である。

③パーソンオリエンテッドロボット

情報系ヒューマンI/Fロボット、物理的作業支援ロボット（介護福祉、家事、搬送、パワーアシスト他）など、作業空間、作業者の特定は困難であり、想定しないロボットの使われ方もあり得る。多様なタスクがあり、制御ソフトが多様化・複雑化している。情報系では情報の安全性についての考慮も必要である。

以下に知能ロボットの安全性を確保する上で重要となるロバスト知能のロードマップについて概観する。ここでは、基盤技術としての安全性は共通する部分も多いが、以下の展開ではファクトリ、ソサエティ、パーソンの3分野に分けて記載する。

(2) 安全システム

①ファクトリオリエンテッド知能ロボット分野

ファクトリオリエンテッド知能ロボットにおける安全システムとしては、従来から現在に至るまで、人とロボットを完全に分離させる形態の安全装置が使われている。これらの例としては、安全柵（ロボットと人を格子状のフェンス等で完全に分離するもの）、ライトカーテンやエリアセンサ（人などがロボット動作エリアに入るのを検出してロボットの非常停止をかける）、インタロック（何らかの形でロボット動作エリア内に人やものが侵入する場合、ロボットを一時的に停止させるか、非常停止をか

ける)、教示プラグ（ロボットのあるエリア内に作業員が入る場合、それはずして持って入れば、他の作業員がロボットを誤って動作状態にしてもそのエリアのロボットが動作しない装置）などの安全システムがあった。今後は、分離の形態は徐々に簡易化、省力化する方向に発展し、そのために必要な安全システムが要求されるようになる。さらに、空間的、時間的に対しても徐々に安全の提供範囲を広げるための技術が要求される。具体的には、まず人とロボットを時間的、空間的に隔離することで人とロボットが同じエリアで共存して作業できるシステムの完成が望まれる。この場合、人とロボットの接触が一切ない初歩的な段階から、一定距離を開けて協働で同一ワークを搬送したり、加工するなど、ある程度双方が接触する段階を経て、最終的には人とロボットが広範囲で常時接触しながら作業できる安全システムの実現が望まれる。

②ソサエティオリエンテッド知能ロボット分野

ソサエティオリエンテッドロボットにおいて、従来、移動体の場合では専用軌道を使う場合など、使用できるエリアや使用場所を限定することで安全を確保する努力がなされていた。また、必要な場合は操作員など人間が監視・サポートすることで安全を確保する努力がなされていた。また、パーソンオリエンテッドロボットと同様に、挟み込みなどの被害を防ぐための機体形状の改善や、ロボットが倒れこんだ時に人が怪我をしないかの試験を行った上での機体の改良や使用制限などで安全を確保する努力がなされてきた。今後は、移動体の場合、ビルや建物内など一定のエリアで走行できる安全システムの実現や、使用制限エリアを将来にわたって小さくしていける安全システムの実現が望まれている。最終的には、広い範囲でロボットが使用できる安全システムや、一般道路を走行可能な移動体のための安全システムの実現が望まれている。

③パーソンオリエンテッド知能ロボット分野

パーソンオリエンテッドロボットにおいて、従来では、人や物に危害を与えない極めて小出力のアクチュエータを使った本質安全システムで安全を確保する努力がなされていた。また、パーソンオリエンテッドロボットは訓練や教育等を受けていない一般の人間が扱うため、挟み込みなどの被害を防ぐための機体形状の改善や、ロボットが倒れこんだ時に人が怪我をしないかと言った試験を行った上で改良や使用場所の限定などで安全を確保する努力がなされていた。今後は、移動体の場合、家庭内の整備された一定のエリアで使用できる安全システムの実現や、将来にわたって使用制限を小さくしていける安全システムの実現が望まれている。最終的には、広い範囲に使用できる安全システムや一般家庭内で使用可能な安全システムの実現が望まれている。

(3) 安全知能

①ファクトリオリエンテッド知能ロボット分野

(a) 危険領域進入制限知能

主にファクトリオリエンテッドロボットにおいては、人がロボットの動作領域に進入することを防止するための安全柵やインタロックなどが従来から設けられていた。ISO 10218の改定は産業用ロボットと人との共存を可能にするものであり、今後この規格に基づいたロボットの本質安全設計が進むことによって、安全柵のような安全防護策はより簡略化、省略化の方向に進むと考えられる。現在でも従来のような安全柵を用いず、光電センサなどによって人の進入を検出するライトカーテンや、マット状のエリアセンサで人の存在を検出する技術があるが、今後はリアルタイムビジョン等による人の行動監視や、その情報から人の行動や動作を予測して危険領域への進入を事前に防止させる、あるいはロボットを減速・停止させるなどの技術が発展することが望まれている。

(b) 動作保証の知能

ロボットの暴走などを防止する、あるいは暴走しても周囲に危害を与えないという目的で、従来はソフト的な対策としてウオッチドッグタイマやソフトリミット、ハード的な対策としてメカストップなどが用いられてきた。現在はフェールセーフ機能などが開発されているが、今後はISO 10218改定への対応もあり、特にファクトリオリエンテッドロボットなど高い信頼性を要求される大出力・高速動作型のアプリケーション分野においては、制御回路やセンサ回路の二重化が進むと思われる。また、自己診断機能も発展し、リアルタイムでロボット自身の状態を監視して安全を確保する技術や、構成部品などの不具合を予知して壊れる前に事前に更新させる機能、一部機能が壊れた場合でも他の機能要素を使ってその機能を代替する自己修復機能などの実現が望まれている。

(c) 干渉検知・回避の知能

ファクトリオリエンテッドロボットでは今後、複数のロボットが同時に協調して使用される場合や、人とロボットが共存して作業する機会が増加してくると思われる。この場合、ロボット間の動作干渉、あるいは人とロボットとの想定されていない干渉や衝突を回避するための機能が重要となる。ロボット間やロボットとワークの干渉については従来、モデルベースの計算による干渉チェックが行われていたが、今後は人を含む動的な環境間の干渉をいかに検出・回避するかが課題となる。まずはロボットの動作を先読みした干渉回避が実現するが、その後は、人の存在領域をリアルタイムビジョンなどにより検出してロボットとの干渉を回避する技術が、そして人の行動や動作を予測することでロボットの動作を制御して干渉を回避する技術などの実現が望まれている。将来は、人の意図を理解し、人の動作・行動を予測することで干渉を回避するとともに人の意図に沿ったロボット動作を実現する制御

方法の開発が望まれる。

(d) 安全ヒューマンインタフェース知能

安全用のヒューマンマシンインタフェースとしては、従来は人が操作する非常停止スイッチが主として用いられて来たが、今後ファクトリオリエンテッドロボットにおいても、ロボットによる自律動作が実現するようになると人とロボットのインタフェースに関する安全性も課題となる。この場合、人操作モードとロボット自律動作モードのスムーズかつ安全な移行を実現する必要があり、今後は人間の認知心理を考慮したヒューマン・マシンインタフェース(HMI)の設計や、緊急/異常時における人の対応や人の認知過程を考慮した自律動作システムなどの実現が望まれる。

(e) 情報セキュリティの知能、認証の知能

ファクトリオリエンテッドロボットでは、従来パソコンと同様なパスワードレベルの情報セキュリティ機能しかなく、それらも十分機能していない場合が多かった。近年、ファクトリにおけるロボットでも相互にネットワーク接続して情報交換することが普通になっており、ネットワーク上でのセキュリティ機能が重要である。また、ロボットの機能が飛躍的に拡大、複雑化するに従い、ロボット操作をどのレベルまで許可して良い人かどうか、どのレベルの情報を提供しても良い人かどうかなど、複数のレベルで人を認証する機能も重要になり、それらがより高速で簡単・確実に行えることが望まれている。

②ソサエティオリエンテッド知能ロボット分野

(a) 危険領域進入制限知能

ソサエティオリエンテッドロボットの中でも移動を伴うロボットでは、バンパスイッチなどの各種センサ類で危険領域への進入を事前に防止させる技術が用いられているが、今後はリアルタイムビジョン等による周辺の人や障害物の認識・監視等を行うことで危険状態への進入を事前に防止させ、ロボットを減速・停止させることで、周囲の人間や環境の安全を図ると共にロボット自身の安全を図る技術の発展も望まれる。

(b) 動作保証の知能

ソサエティオリエンテッドロボットではロボットの暴走などを防止する、あるいは暴走しても周囲に危害を与えないという目的で、従来はソフト的な対策としてウォッチドッグタイマやソフトリミット、ハード的な対策としてメカストップなどに加え、マップに基づく動作範囲制限や、愛知万博でも用いられた監視人の配置による動作保証が行われている。今後はISO10218改定への対応もあり、ソサエティオリエンテッドロボットにおいても、高い信頼性を要求される大出力・高速動作型のアプリケーション分野で、フェールセーフ機能などに加えて制御回路やセン

サ回路の二重化が進むと思われる。また、自己診断機能やリアルタイムでロボット自身の状態を監視して安全を確保する技術や、構成部品などの不具合を予知して壊れる前に事前に更新させる機能や、一部機能が壊れた場合にも他の機能要素を使ってその機能を代替する自己修復機能などの実現が望まれている。

(c) 干渉検知・回避の知能

今後、ソサエティオリエンテッドロボットでも複数のロボットが同時に使用される場合や、人とロボットが干渉する機会が増加してくると、ロボット間の動作干渉やロボットと人との衝突などを回避するための機能が重要となる。今後は、特に移動を前提とするソサエティオリエンテッドロボットにおいて、人を含む動的な環境との干渉をいかに検出・回避するかが課題となる。まずロボットが人の存在領域や周囲の状況をリアルタイムビジョンなどにより検出し、人や周囲との干渉を回避する技術が発展するが、その後はロボットが周囲の状況変化や、人の行動・動作を予測して干渉を回避する技術が実現する。将来は、人の意図や周囲の状況を理解して干渉を回避するロボット動作を実現する制御方法の開発が望まれる。

(d) 安全ヒューマンインタフェース知能

人間搭乗型モバイルロボットのように、人による手動操作とロボットによる自律動作が混在するようなソサエティロボットの場合には、人とロボットのインタフェースに関する安全性も課題となる。航空機では手動操縦と自動操縦の二つの系統の制御コンフリクトが原因と見られる事故が発生した事例などもある。(※) 当面は、人操作モードとロボット自律動作モードのスムーズかつ安全な移行を実現する必要があるが、今後は人間の認知心理を考慮したヒューマン・マシンインタフェース(HMI)の設計や、緊急／異常時における人の対応や人の認知過程を考慮した自律動作システムなどの実現が望まれる。

※ 1994年名古屋空港中華航空エアバス機が着陸に失敗炎上。自動操縦と手動操縦の二つの系統の制御コンフリクトが原因。

(e) 情報セキュリティの知能、認証の知能

ソサエティオリエンテッドロボットでもネットワークと接続して情報を交換することになるため、ネットワーク上でのセキュリティ機能が重要である。特にソサエティオリエンテッドロボットは都市やサービス施設など不特定の人間が自由に入れるエリアで活動するケースが多く、ファクトリオリエンテッドやパーソンオリエンテッドロボットの工場内や家庭内での利用に比べて、一般的な都市空間でのユビキタスネットワークのセキュリティ強化が課題となってくる。また、ロボットの操作を許可しても良い人かどうか、情報を提供しても良い人かどうかなど、人を認証する機能も同様に重要である。ATMや入退室管理システムでは暗証番号などのような認証機能が用いられてきたが、ロボットへの適用ではより高速で簡単に行うことができる認証の方法が必要である。ロボットに搭載されたカメラなどを用いて顔、虹

彩パターン、網膜パターンを認識する方法やそれらを複合的に用いる複合バイオメトリクス認証、さらにはロボット本体や操作装置に触れただけで汗などから人を認証するDNA認証、などがロボット分野の認証知能の開発が望まれる。

③ パーソンオリエンテッド知能ロボット分野

(a) 危険領域進入制限知能

パーソンオリエンテッドロボットにおいては、人間とロボットが非常に近い距離で接する機会が多く、干渉を防止すべき危険領域があってはならないが、今後はリアルタイムビジョン等による人の行動や周辺の監視を行うことで危険な状態（エリア）への侵入を事前に防止させる技術の発展が望まれる。

(b) 動作保証の知能

パーソンオリエンテッドロボットでもマップに基づく動作範囲制限や、愛知万博でも用いられた監視人の配置による動作保証が行われているが、今後は、自己診断機能やリアルタイムでロボット自身の状態を監視して安全を確保する技術や、機能の不具合を予知して動作を停止させる機能などの実現が望まれる。

(c) 干渉検知・回避の知能

パーソンオリエンテッドロボットにおいては、人間とロボットが非常に近い距離で接する機会が多く、ロボットと人間の干渉は大前提であるが、今後は、特に移動を前提とするパーソンオリエンテッドロボットにおいては、人を含む動的な環境との干渉をいかに検出・回避するかが課題となる。ロボットがリアルタイムビジョンなどによって人や周囲との干渉を回避する技術の実現が望まれる。その後はロボットが周囲の状況変化や、人の行動・動作を予測した干渉回避を行い、将来は人の意図や周囲の状況を理解して干渉回避を行う技術が望まれる。

(d) 安全ヒューマンインタフェース知能

パーソンオリエンテッドロボットにおいても、将来人による手動操作とロボットによる自律動作が混在する場合、人とロボットのインタフェースに関する安全性も課題となる。今後は人間の認知心理を考慮したヒューマン・マシンインタフェース(HMI)の設計や、緊急/異常時における人の対応や人の認知過程を考慮した自律動作システムなどの実現が望まれる。

(e) 情報セキュリティの知能、認証の知能

パーソンオリエンテッドロボットの中で特に情報系ヒューマンインタフェースロボットの場合、情報の安全(セキュリティ)を考慮する必要がある。これらのロボットではネットワークと接続して情報を交換することになるため、ネットワーク上でのセキュリティ機能が重要である。パーソンオリエンテッドロボットの導入期においては家庭内のような閉じた世界で利用されることからホームネットワークや家庭内センサネットワークでのセキュリティが当面の課題であるが、今後、パーソン

オリエンテッドロボットにおいても家庭外での都市やサービス施設における利用を考えると、都市空間でのユビキタスネットワークのセキュリティ強化が課題となってくる。また、ロボットの使用を許可しても良い人かどうかの人を認証する機能も重要である。

(4) 安全知能デバイス

①ファクトリオリエンテッド知能ロボット分野

(a) 安全回路デバイス、安全制御デバイス

従来、ファクトリオリエンテッドロボットを制御するためのデバイスについては、汎用的なCPUボード、ADDAボード、カウンタボード、ハードロジック（リレー、スイッチ、個別配線）等を用いていた。現在は、必要な機能を集約した統合型の汎用ボードや、モジュール化された制御システムボードが使われると共に、安全に重点を置いたデバイスとして、安全リレーモジュール、安全PLCなどが製品化されている。また、安全フィールドバス（DeviceNet Safety, ASi Safty など）の規格についても提案されている。今後はより信頼性の高い安全機能を提供するために、二重化制御回路や二重化センサ回路、安全フィールドバスの利用技術の開発が望まれる。さらにこれらが統合され、小型化されて、将来は1チップでロボット制御に必要な機能を持ちながら二重化回路など安全機能も充実したデバイスの開発が期待される。

(b) 本質安全機構デバイス

前章の、危険領域進入制限知能、動作保証知能、干渉検知・停止知能、安全HMI知能などは、安全知能を付加することによってロボットの安全性を確保するものであるが、そのような知能を付加しなくても本質的に安全なロボットを構成することができるが、本来は最も望ましい。従来は人に危害を与えない極めて小出力のモータを使用することで本質安全を実現していたが、現在の大部分のファクトリオリエンテッドロボットは、動作速度や可搬質量の関係から本質的に安全であるロボットを構成することはかなり難しい。今後、より大出力でありながら本質安全を実現する外殻材・構造、新型アクチュエータ、減速機の開発が進むことで、部分的にでもファクトリオリエンテッドロボットの本質安全が実現されることが望まれる。

(c) 自己位置検知センサ、障害物検知センサ

ファクトリオリエンテッドロボットの自己位置認識や、ロボット周辺の障害物や人の検知は現状では行われていない。今後、関連する技術が進歩することにより、そのようなデバイスが使用される可能性が増加していくと思われる。特に、障害物検知用センサや加速度センサ、角度センサなどの利用は有効であると思われる。

② ソサエティオリエンテッド知能ロボット分野

(a) 安全回路デバイス、安全制御デバイス

従来、ソサエティオリエンテッドロボットを制御するデバイスについても、汎用的なCPUボード、ADDAボード、カウンタボード、ハードロジック（リレー、スイッチ、個別配線）等を用いていた。現在は、必要な機能を集約した統合型の汎用ボードや、モジュール化された制御システムボードが使われると共に、安全に重点を置いたデバイスとして、安全リレーモジュール、安全PLCなどが製品化されている。また、安全フィールドバス（DeviceNet Safety, ASi Safty など）の規格についても提案されている。今後は、ソサエティオリエンテッドロボットにおいてもより信頼性の高い安全機能を提供するために、二重化制御回路や二重化センサ回路、安全フィールドバスの利用技術の開発が望まれる。さらにこれらが統合され、小型化されて、将来は1チップでロボット制御に必要な機能を持ちながら二重化回路など安全機能も充実したデバイスの開発が期待される。

(b) 本質安全機構デバイス

ソサエティオリエンテッドロボットにおいても、前記の各種安全機能を付加することによらずに、ロボットの安全性を確保できる本質的に安全なロボットを構成することができることが最も望ましい。今後、より大出力でありながら本質安全を実現する外殻材・構造、新型アクチュエータ、減速機の開発が進むことで、一部のソサエティオリエンテッドロボットの本質安全が実現されることが望まれる。

(c) 自己位置検知センサ、障害物検知センサ

ソサエティオリエンテッドロボットにおいては、ロボットの自己位置を認識し、ロボット周辺の障害物や人を検知することは、安全上重要である。自己位置の認識では、ランドマークの利用やGPSなどを用いた方法が一般的に利用されている。また、障害物検知用センサの性能は向上してきたが、加速度センサや角度センサなど複数のセンサを組合せてより信頼性の高い検知を行う技術の開発が望まれる。

③ パーソンオリエンテッド知能ロボット分野

(a) 安全回路デバイス、安全制御デバイス

パーソンオリエンテッドロボットについても、従来は汎用的なCPUボード、ADDAボード、カウンタボード、ハードロジック（リレー、スイッチ、個別配線）等を用いていたが、現在は、必要な機能を集約した統合型の汎用的ボードやモジュール化された制御システムボードが使われると共に、安全に重点を置いた安全リレーモジュール、安全PLC、安全フィールドバス（DeviceNet Safety, ASi Safty など）などが利用される。今後はこれらが統合され、小型化されて、将来は1チップでロボット制御に必要な機能を持ちながら二重化回路など安全機能も充実したデバイスの開発が望まれる。

(b) 本質安全機構デバイス

パーソンオリエンテッドロボットにおいても、前章の各種安全知能を付加することによらずに、ロボットの安全性を確保することが最も望ましい。パーソンオリエンテッドロボットはファクトリオリエンテッドロボットやソサエティオリエンテッドロボットに比べて、より少ない出力のモータ使用のケースが多く、本質安全実現の要求もより大きくなると思われる。今後さまざまなタスクに対応できる、パーソンオリエンテッドロボットに十分な出力でありながら本質安全を容易に実現する外殻材・構造、新型アクチュエータ、減速機の開発が進むことが望まれる。

(c) 自己位置検知センサ、障害物検知センサ

パーソンオリエンテッドロボットにおいても、ロボットの自己位置を認識し、ロボット周辺の障害物や人を検知することは、安全上重要である。自己位置の認識では、ランドマークの利用やGPSなどを用いた方法が一般的に利用されている。また、障害物検知用センサの性能は向上してきたが、加速度センサや角度センサなど複数のセンサを組合せてより信頼性の高い検知を行う技術の開発が望まれる。

(5) 安全規格及びガイドラインについて

今までの、安全に関する規格への対応としては、2005年に開催された愛知万博においてはISO12100（機械安全の基本概念）に対応した安全システムの検討がなされ、2006年にはISO10218（産業用ロボットの安全規格）が改定されて人とロボットが共存することを前提とした安全システムを検討することが規格面からも可能になった。さらに、経済産業省が主導する「次世代ロボット安全確保ガイドライン」の制定に関する議論がスタートするとともにその他の安全に関する議論も活発になって来ており、今後それらの規格やガイドライン、思想を取り込んだ安全システムに関する技術が発展していくものと思われる。

表 3. 5. 4. 1 ロバスト知能ロボットアーキテクチャ ロードマップ (概要)

	従来	現在(2006)	近未来(3年後)	近未来(5年後)	未来(理想、2025年以降)
システム: 自律ロボット	SHAKY Jijo-2 宇宙ロボット	Asimo QRIO DARPAグランドチャレンジ ネットワークロボット	DARPAグランドチャレンジ 皇居1周マラソンのような 標準タスクの解決 ネットワーク上のリソース の利用	案内ロボット Robocup@Home ネットワークエージェント とロボットの自律的な協 調	自律介護ロボット 自家用サービスロボット 鉄腕アトム
知能: ロバスト知能ロ ボットアーキテクチャ	階層構造 水平分散	水平分散	水平分散と階層構造のハイブリッド型		周辺環境知能のプラット フォームに依存しないアー キテクチャー設計
知能アーキテクチャ例	古典的AI NASREM(NASA/NIST Standard Reference Model, NASA/NIST) NHC(Nested Hierarchy Controller, Meystel) RCS(Real Time Control System, NIST) SA(Subsumption Architecture, Brooks)	Behavior Based ロボビーの統合型アーキテ クチャ AuRA	分散知識ベース行動フレームワーク ネットワーク利用型行動フレームワーク Probabilistic Robotics		統合知識DBを利用したロ ボット行動フレームワーク
ロバスト知能用知識	ロボットのローカル知識	ロボットのローカル知識	空間知(受動的データ)	空間知(能動的エージェ ント)	空間、インターネット、ロ ボット自身の知能の融合
ロバスト認識用知識	記号(機械段階)	オブジェクトの一意的認識 (知識段階)	オブジェクトのカテゴリ認識(知識段階)		多義的物体認識(知能)
ロバスト命令用知識	固定型	設計者記述型	設計者記述型から自律獲 得型へ	自律獲得型	相互獲得型
....
デバイス: 知能ロボット アーキテクチャデバイス	WorkStation 組み込みCPUボード	マルチスレッド マルチコア	Cell RMTP	次世代RMTP	超並列・低消費電力CPU リコンフィギュアブル・プロ セッサ
ネットワークインフラ	ロボット内部のセンサ・アクチュエータ に閉じた世界	Ethernet USB 無線LAN Bluetooth ZigBee RFID	IEEE1394 USB2.0 UWB	RealTimeEthernet	RealTime無線
OS	DOS アセンブラによるモニタプログラム 組み込み独自リアルタイムOS 組み込み汎用リアルタイムOS	Windows 汎用Linux リアルタイムLinux 組み込み独自リアルタイム OS 組み込み汎用リアルタイム OS	リアルタイムLinux 組み込み汎用リアルタイムOS		リアルタイムLinux 組み込み汎用リアルタイ ムOS ロボット用CPUアーキテク チャの特性を使いきるリア ルタイムOS

表3. 5. 4. 2 ロバスト知能ロボットアーキテクチャ (詳細)

	従来	現在(2006)	近未来(3年後)	近未来(5年後)	未来(理想、2025年以降)
システム: 自律ロボット	環境が事前に整備され、ロボットは環境に対する知識をほぼ保持している中でタスクを遂行した。	不確かさが限られた範囲で存在する環境内でロボットがタスクを遂行する。	DARPAグランドチャレンジや油田先生ご提案の皇居1周ロボットマラソンなどの実世界の一部をロボットへのチャレンジとして見せる環境において主に移動タスクを遂行する。	ほぼ実世界のテスト環境でロボットがタスクを遂行する。	実世界でロボットが人間と共存する中でタスクを遂行する。
知能: ロバスト知能ロボットアーキテクチャ	階層構造により計画・実行・確認サイクルを順に繰り返していくようなアーキテクチャ。刺激反応の1対1対応による水平分散アーキテクチャ。	センシング、プランニング、行動だけでなく、学習、記憶も扱うことのできる水平分散アーキテクチャー。	環境に分散配置された知識ベースとロボットとのインタラクションによりロボットの行動が決まる行動フレームワークが実現する。認識結果を抽象化し、構築された知識が環境内に配置され(環境知能)、ロボットはこれらを利用しながらコマンドを実行していくアーキテクチャー。	環境知能のプラットフォーム、リソースの違いに依存せず、ロボットが自律的に行動を獲得し、自身の知識体系の再構築までも可能となる。	
知能アーキテクチャ例	古典的AI NASREM(NASA/NIST Standard Reference Model, NASA/NIST) NHC(Nested Hierarchy Controller, Meystel) RCS(Real Time Control System, NIST) SA(Subsumption Architecture, Brooks)	Behavior Based ロボビの統合型アーキテクチャ AuRA	分散知識ベース行動フレームワーク ネットワーク利用型行動フレームワーク Probabilistic Robotics		統合知識DBを利用したロボット行動フレームワーク
ロバスト知能知識	知識はすべてロボット上の記憶部に記憶され、ロボットはこの知識のみを用いて行動する。	知識はほぼロボット上の記憶部に記憶され、ロボットはこの知識のみを用いて行動する。一部の知識はRFIDなどで環境側にあることもある。	RFIDやPCサーバなど、環境に配置された知識を利用する。	環境に配置された知識自身が活動し、ロボットに情報を供給することによりロボットの行動が決定する。	空間に配置されたエージェントの知識、インターネット情報、ロボット自身の知識などをエージェントとロボットとの相互作用しつつ利用することによりロボットの行動が発現する。
ロバスト認識知識	知識は1, 2などの記号として表され、これと1対1にマッピングされたオブジェクトをロボットが固定プログラムを利用して処理する。	1対1にマッピングされたオブジェクトの認識を名称レベルで行い人間とのコミュニケーションの手がかりとする。	物体を1対1のマッピングではなく、カテゴリレベルで認識することにより汎化された抽象的事象を扱う。		本来なら箱と命名されるものでも、必要とあれば椅子に应用したりなど、使用法をアレンジする認識ができる。
ロバスト命令知識	ロボット言語あるいはプログラミング言語による直接書き込み知識を利用する。	ロボット言語やプログラミング言語を用いてこれらのプログラムとは分離された知識データベースを利用する。	知識データベースの一部は学習などにより自己獲得する。	知識は環境とのインタラクションにより自律的に獲得していく。	人間との相互作用の中でロボットが新たな知識を獲得していくことが出来る。
....
デバイス: 知能ロボットアーキテクチャデバイス	WorkStationの利用、あるいは専用組み込みCPUボードの利用。	市販高速CPUコアの利用	特殊/ロボット専用高速CPUコアの利用。	CPU間的高速リアルタイム通信機能を含んだロボット専用高速CPUコアの利用。	CPU間的高速リアルタイム通信機能を含んだ高速・超並列・低消費電力CPUおよびリコンフィギュラブル・プロセッサの利用。
ネットワークインフラ	内部専用バスあるいはネットワークの利用。	標準ネットワークのロボットコントローラでの利用。	標準ネットワークを利用したソフトリアルタイムプロトコルの普及。	RealTimeEthernetハードリアルタイム可能なプロトコルを持ち、10MByte/s(ネットワークを介したサーボ)の通信速度を持つ。	RealTime無線ハードリアルタイム可能なプロトコルを持ち、1GByte/s(VGAカラー画像の1ms転送)の通信速度を持つ。
OS	汎用PC用OSの利用。CPUに特化した独自OSや割り込み記述により対応。	汎用PC用OSやオープンソースの汎用OSのリアルタイム化されたOSの利用。汎用/独自リアルタイムOSの利用。	オープンソース汎用リアルタイムOSの利用。組み込み汎用リアルタイムOSの利用。		オープンソース汎用リアルタイムOSの利用。組み込み汎用リアルタイムOSの利用。ロボット用CPUアーキテクチャの特性を使いこなすようなCPU依存のリアルタイムOSの利用。仮想化したCPU用の汎用リアルタイムOSの利用。

(1) 序

本節では知能ロボットシステム基盤としてのアーキテクチャについて概説する。

①知能ロボットアーキテクチャの特徴

本節にて扱う知能ロボットアーキテクチャはこれまでの3つのロボット分野に分類するには境界が極めてあいまいで、また分類する意義もやや薄いと思われる。その理由は、知能ロボットアーキテクチャが、

(a) 知能的に振舞うにはアーキテクチャの存在が必要不可欠であり、

(b) 効率的なロボット開発のためのインフラ基盤として扱われる

ものであるからと考えられる。したがって、以下の各項目においては、(1) - ②の知能ロボットアーキテクチャの歴史においてのみこの分類を利用し、その他の節においては特に分野を限らず、知能共通として記述する。

そもそもロボットにおける知能アーキテクチャとはロボットの自律的な行動を発現するための枠組みである。ここでは知能アーキテクチャを、知識を取り込み、取り込んだ知識からロボットの行動に結びつけるマッピングアーキテクチャとして捉え検討していく。

②知能ロボットアーキテクチャの歴史

(a) ファクトリオリエンテッド知能ロボット分野

ファクトリオリエンテッド知能ロボット分野のアーキテクチャの歴史としてはまずロボット言語による標準化を目指した動きがあげられるであろう。最初に日本に導入された産業用ロボット「ユニメート」ではVALというロボット言語が使われた。複雑な作業をスクリプト形式で書き下すことが出来、ロボットの動作教示に役立った。ユーザはメーカにより提供されたAPI群をスクリプト言語であるロボット言語を利用して呼び出すことでロボットに作業を指示することが出来る。

VALに続きGMF u n u c のKARELやA d e p t のV+などが次々に開発され、日本でも新井らによりSLIMがJISで制定された。さらに研究的にはRAPTやAUTOPASS、LAMAなどの野心的なロボット言語も提案されたが完成には至っていない。

ロボット言語は通常1つのロボットを制御するだけであるが、工場などでの生産管理には複数のロボットの状態を監視したり、協調して制御したりする必要がある。複数のロボットコントローラをネットワーク経由で接続し、工場全体の生産管理などを行うためにOpen Resource interface for the Network/Open Robot interface for the Network (ORiN)の規格化が行われ、現在に至っている。ORiNでは異なるメーカのコントローラをネットワークで接続し、情報共

有が出来るようになった。

このようにファクトリオリエンテッド知能アーキテクチャとしてはロボットコントローラのリソースをユーザが自由に使えるようなアーキテクチャが出来、さらにコントローラのリソースを工場全体で利用できるような枠組みが研究され現在に至っている。

*1)「産業用ロボット言語“SLIM”」 新井民夫著 日本規格協会 1995/04

(b) ソサエティオリエンテッド知能ロボット分野、パーソンオリエンテッド知能ロボット分野

ソサエティオリエンテッド知能ロボット分野やパーソンオリエンテッド知能ロボット分野の自律ロボットの知能アーキテクチャとしては、従来からNASA/NIST Standard Reference Model (NASREM) やMITのBrooksがGood old-fashioned AI (GOFAI) と呼んだセンシング-プランニング-実行というような階層化アーキテクチャが研究されてきた。そのような階層化アーキテクチャを利用して実現したロボットの例としてスタンフォード研究所のSHAKELYが挙げられる。SHAKELYは周囲環境を認識し、指示されたタスクを実行することが出来た。環境は事前にSHAKELYの中に教え込まれており、また環境も認識しやすいいわゆるブロックワールドであったが、階層化アーキテクチャを実世界のロボットに適用できたことが特筆される。

しかしほぼ同時期にJ. McCarthyとP. HayesによってAIにおいてはフレーム問題と呼ばれる問題の存在が指摘された。有限の計算資源しか持たないロボットでは与えられた世界のすべてを有限の時間で計算し終えることは出来ないというものである。そのためセンシング-プランニング-実行という階層化アーキテクチャにおいて利用されているロボットの周りの環境モデルが正確になればなるほど、ロボットが行動計画を立てるのに時間がかかってしまい、実世界でロボットが行動できなくなる。

これに対してBrooksはSubsumption Architecture (SA) と呼ばれる、多数のセンシング-実行対を組み合わせたアーキテクチャを提案し、難解な行動計画を行わなくても十分複雑な行動を行えるロボットを実現した。SAでは環境に関するモデルは持たず、環境そのものをロボットが使うモデルとして利用している。

実際にはSAだけでは知的な計画行動が実現できないため、上記の階層化アーキテクチャとSAのような行動規範型アーキテクチャのハイブリッドアーキテクチャが精力的に研究されている。代表的なアーキテクチャにArkinのAutonomous Robot Architecture (AuRA) やCMUのXavierのアーキテクチャ、SRIのSaphira、ATRのRobovieの統合型アーキテクチャなどがある。また糀らのFD-netのような人間の脳を規範とした水平分散アーキテクチャの研究も進んでいる。

この分野におけるオープン化の動きとしては、ペットロボットのAIBOの開発環境としてOpen-Rが提供され、APIを利用してユーザがAIBOの振る舞いを自在に生成することが出来た。またNECからはRoboStudioというロボット開発環境が発売され、多様なロボット開発の負荷を少しでも軽減しようというアプローチとなっている。さらにインターネット上のニュースや気象情報などのコンテンツとロボットを組み合わせるロボットサービスを提供しようという枠組みを、ロボットサービスイニシアチブ(Rsi)が提案している。これは既存のインターネット技術を用いて、インターネット上のコンテンツとロボットを双方向から組み合わせ新たなサービスを創出しようというアーキテクチャである。以上、さまざまな形態のアーキテクチャが提案・開発されてきているが、現時点において普及を妨げている問題点として、各アーキテクチャが目標としているプラットフォーム非依存、アプリケーションからの独立性が完全には実現できていないことが挙げられる。インフラ整備という面から実装言語に依存しないプラットフォーム非依存性が重要であると同時に、アーキテクチャの適用性という面において、対象アプリケーションに非依存であって欲しいが、上記のように各アプリケーションを対象として開発されており、他の分野への広がりには欠けているのが現状である。これは対象アプリケーションの特性を活かしてアーキテクチャを設計することによるシステムのパフォーマンス向上とのトレードオフの関係になっているからであろう。

*2)「レスキューロボットのための水平分散型アーキテクチャ」 糀、田所、徳田他 日本ロボット学会創立20周年記念学術講演会論文集 3B25 2002

③知能ロボットアーキテクチャの技術開発課題（3、5年後）

一足飛びに汎用知能アーキテクチャの開発を行うことは技術的に非常に困難であることから、ある限定されたドメイン(動作環境、対象作業)を対象とした知能アーキテクチャの開発が数年後実現可能なマイルストーンとして設定されるであろう。例えば、食器片付けなどの日常生活環境下におけるハンドリング作業・動的障害物の中での自律移動・セル生産支援システムなどの具体的な作業設定をし、このドメイン内での開発を進める必要がある。ドメインごとの特徴を活かして設計すると汎用性に欠けるが、限定された領域であっても要求仕様を充たすシステムをまず構築する。実用化の成功例を数多く出現させることにより、社会にロボットあるいはロボットシステムが広く受け入れられる土壌を育成していくことが重要と考える。

また、タスクや環境が複雑になるにつれ、様々な状況に対処できる知識を特定の設計者が全て設計することや、ロボットという有限リソース上に全ての知識を搭載することは困難となる。そこで、アーキテクチャの構成としてはロボットにすべての環境モデルを持つという階層型アーキテクチャの発展系として環境モデルを環境側に持た

せることでロボットと設計者の負担を軽減し、分散開発も可能とする分散アーキテクチャが開発されることが期待される。分散知識という面では環境内に配置された知的エージェント（空間知）とロボットの相互作用により、ロボットの行動が発現していくような行動フレームワークが出来てくる。

さらにこのような分散知識が最初はタグに埋め込まれただけの情報（受動的な情報）から発信型（能動的エージェント）への移行がなされ、ネットワークインフラを利用したユビキタス環境でロボットおよび環境内のエージェントが必要な知識を補完しあいながら行動するようなフレームワークとなる。

④ 知能ロボットアーキテクチャの展開

ロボットの機能、構成要素によってモジュール化され、与えられたコマンドあるいは環境からの情報をトリガとして、適切な行動が選択、実行されるというアーキテクチャの基本動作フローは変わらないであろう。モジュール化、あるいはそのモジュールのオープン化により分散開発が可能となり、開発効率の向上が促進される。さらにモジュール間の連携や再利用を考えた設計パターンが確立されてくることが期待される。

またロボットの属する環境をも含めてシステムとして扱う環境知能アーキテクチャも提案されている。例えば、外部カメラからの情報をもとに自己位置を推定し、ロボットが移動したり、目の前の皿の位置情報、あるいは属性情報をRF-IDタグから得てハンドリングを行うといったように、環境下のさまざまなオブジェクトの持つ情報を構造化し、この情報を基にロボットが行動するというものである。

今後は、環境下のデバイスはより知能的なデバイスとして整備され、環境知能とも言うべきある種のエージェントとして振舞うようになり、最終的にはこうした環境知能を利用したプラットフォーム非依存なアーキテクチャの設計論が確立されるであろう。このとき環境知能とロボットではプラットフォームだけでなくリソースやパフォーマンスが異なっており、こうした情報操作能力格差を考慮したアーキテクチャ提案がなされてくるだろう。

対象とする領域についても展望してみると、すぐさま汎用的に適用できるアーキテクチャの設計は困難が伴う。まずはドメインを限定した開発から始め、ノウハウを蓄積することが必要である。徐々に汎用性を見出しながらその適用範囲を広げていくことで、より一般的な汎用知能アーキテクチャとして確立されるであろう。

(2) ロバスト知能アーキテクチャ

本節ではロバスト知能アーキテクチャで扱う、より抽象度の高い情報を「知識」と呼ぶこととし、知能用・認識用・命令用の3つの視点から知識について考察する。

ロボットが本質的に実世界を扱うシステムであることから、単なる記号を扱う知能では

なく、不確実性を伴う情報、あるいは必要な情報を得ることが出来ない状況、さらには指示された行動が確実に実行できないなどの実世界で起こりうる情報の不確実性を扱えるアーキテクチャであることが必要である。さらに知能アーキテクチャではセンサ・アクチュエータからのデータ・情報をそのまま扱うだけでなく、知識と称せられるような、抽象化された情報を扱う必要がある。

知能用知識としては、従来においては予め設計者によって与えられることが多くこれをデータベース（DB）として利用してロボットは行動をしていたが、センサから得られた情報を基に構成した情報をDBに蓄えたり、環境下のデバイスがこれらの情報を保持し、ロボットが必要に応じて利用したりする形態が提案されつつある。数年後にはこうした環境下デバイスが知能的に振舞い、情報を積極的に発信し、ロボットがこれを利用するようになるであろう。また環境知能と相互作用することにより、互いのDBを更新することも予想される。この場合、いかにして確度あるいは信頼度の高い情報を得ることができるかがポイントとなる。

認識用知識としては実ロボットが利用する各種センサ（ロボット搭載のセンサ、環境に配置されたセンサ）が取得する情報を一対一対応でラベル付けを行い、これを利用して、より抽象化させてシンボル化することで人間が理解できる情報となり、特に人間とのコミュニケーションにおいてその効果が発揮されている。今後は知識のつながりを重視しこれをカテゴリ化することで(カテゴリマッチング)、よりロバストな認識が可能となる。さらには認識用知識からロボットがその意図するところを汲み取り、合目的であるかの判断を自律的に行うことができれば、設計者の意図を超えてロボットがより自律的に、汎用的に行動することが可能となるであろう。

命令用知識は、従来ロボット言語に代表されるように行動モジュールにつけられたラベルとして記述されており、現在においてもこれを踏襲しているに過ぎない。分散知能化に伴い、環境下のデバイスにおいても同様のルールで記述された命令セットを保持しておくことで環境をどう操作すればよいかという知識を環境自身に埋め込めるようになる。ロボットがより自律的に行動するためには、学習などを用いてタスクに応じた行動を修正していく必要があり、段階的にロボットが行動を獲得できる枠組みを作ることが重要である。

以上のようにロボットがより自律的にロバストな行動を行い、タスクに合わせて適宜修正し、これまでの行動履歴から新規行動を獲得するためには、アーキテクチャにおいて扱われる情報の記述方法とその操作を行うツールの開発が重要である。これまでいくつかエポック的な技術（例えば強化学習、人工ニューラルネット、進化的アルゴリズム、シミュレーテッドアニーリングなど）が開発されたが、いずれも長所短所があるため汎用的に適用できるわけではない。知能ロボットの実用化に向けては（1）－③で述べたように適用する範囲を実用に耐えうる程度の範囲に限定した上で、最初の段階としてはアプリケーションの特性を十分に考慮に入れつつも、発展可能なロバスト知能を実現す

る枠組みを構築することが重要であろう。その上で、適用範囲の拡大や、より自律的行動の獲得へのフレームワークの提案が期待される。

(3) 知能ロボットアーキテクチャをサポートするデバイス

①CPU

知能を実現する基本デバイスとしてCPUは不可欠のものである。知能ロボットアーキテクチャをサポートするデバイスとして第一にCPUについて見てみる。まず知能ロボットにはWorkStationの利用、あるいは専用組込みCPUボードの利用が行われた。現在では汎用のCPUボードが安価かつ高速になっているため汎用CPUが使われることが多くなっている。今後はこのような汎用CPUとともに、ロボット専用に複数スレッドがハードウェアで走るような現在次世代ロボット基盤プロジェクトで開発されているResponsive Multi Threading Processor (RMT P)のようなCPUが使われるだろう。さらに複数CPU間をリアルタイムのネットワークで結べるようなアーキテクチャのCPUおよびネットワークが出現し、最終的にはこのようなCPUが高速・超並列・低消費電力となって提供されることが期待される。

②ネットワーク

CPUに続いて重要な要素としてネットワークが挙げられる。一体のロボットも複数のCPUを分散させて制御されることが多く、さらには複数のロボットの協調や環境に埋め込まれたデバイスとの協調のためにネットワークの重要性は今後ますます上がってくると考えられる。このようにネットワーク下のさまざまなシステムが相互作用するような形態が主流となる以上、アーキテクチャを構成するネットワークインフラについても言及する必要があるだろう。

従来は、ロボット内部において、センサアクチュエータ系を構成する、ある意味”閉じた”世界でのネットワークが利用されていた。現在は、個々のモジュールがネットワークで結合しているが、その形態は主にEthernetを基本としている。他にはUSB、無線LAN、Bluetooth、ZigBee、またモジュールを識別する手段としてRF-IDも普及の兆しを見せている。

今後は個々のモジュールを同期制御するにはEthernetでは十分とはいえない。ただしこれも要求精度に依存するが、よりロバストに安定したシステムの構成にはやはりリアルタイム性が要求される。これをハードウェア、特にネットワークインフラにおいてサポートするならば、RealTimeEthernet、さらに進んだWirelessRealTimeEthernetが考えられる。これらはまだまだ技術的に未完成であるが、IEEE1394、USB2.0、UWB(Ultra Wide Band)などのような転送速度の比較的大きいロバストな通信によって、ネットワークを構成するようなアーキテクチャが数年後には現れるであろう。

③オペレーティングシステム（OS）

最後にロボットに使われるOSについて見てみる。ロボットの知能はロボットの身体とソフトウェアにより実現される。ソフトウェアを走らせる基盤としてのOSはロボットの知能にとって非常に重要な役割を持つ。

従来ロボット用のOSとしては、研究用にはDOS上で単ースレッドのプログラムを走らせたり、アセンブラによるモニタプログラムを試作したりしていた。商用ロボットでは組み込み独自リアルタイムOSやVXWor ksやiTRON、VRTX、iRMX、OS-9、PSOS、QNXなどの組み込み汎用リアルタイムOSが使われた。

現在においても産業用ロボットの分野では依然組み込み独自リアルタイムOSや組み込み汎用リアルタイムOSが多く使われているが、研究用途では、WindowsやLinuxなどの汎用OSの利用や、オープンソースのリアルタイムLinuxの利用が盛んに行われている。オープンソース開発では1社寡占での開発に比べ、いろいろな視点を持つ開発者の参加により、よりロバストなソフトウェアの開発が期待できる。

将来的にはオープンソースのリアルタイムLinuxの利用がさらに増すであろうが、組み込み汎用リアルタイムOSはそのCPU依存性ゆえにパフォーマンスを必要とする分野で生き残り、さらにはロボット用CPUアーキテクチャの特性を使いきるようなリアルタイムOSが期待される。

3. 6 まとめ

「ロボットの知能」として「本当に役に立つロボット」を目指して「ロバスト性」を第一の重要視点としてまとめた。現在、世の中で役に立っているロボットの大半は、いわゆる「産業用ロボット」であり、長年の地道な研究開発により、工場内での限られた環境での「ロバスト性」を実現している唯一の分野と言っても過言ではない。

しかしながら近年、2005年の「愛・地球博」を契機に清掃ロボットや食事支援ロボットなど、着実にロボット産業が新たな成長段階を迎えようとしている。

ロボット産業の確実な成長に答えるためにも、「ロボットの知能化技術」は不可欠で、特に公共空間や生活空間等で状況が変わりやすい環境下においても、ロボットがロバスト性をもって稼働するためには、ロボットの環境・状況認識能力や自律的な判断および作業実施能力の向上が必要である。

このような観点から、今回ロボットを周辺環境も含めたシステムとして捉え、作業や人に対するサービスを頑健に機能させるロバストロボット知能を描いた。

また、これらの検討を基に、第4章で述べる（21世紀ロボットチャレンジプログラム）「次世代ロボット知能化技術プロジェクト」（平成19年～平成23年）の基本計画を策定し、我が国のロボット技術のさらなる推進とロボットの適用分野拡大によるロボット産業を基幹産業の一つに成長させる目的に資するものと確信している。

第4章 次世代ロボット知能化技術開発プロジェクト基本計画WG

4. 1 基本計画の考え方

「21世紀ロボットチャレンジプログラム」の一環として、平成19年度から5年間の技術開発プロジェクトが実施されることとなった。このプロジェクトでは、(1) 我が国に蓄積されたロボット技術を活用して、ロボットの基盤的要素技術及びシステム開発をさらに推進する、(2) 製造分野をはじめとする一部の分野に限られているロボット適応分野を拡大する、(3) ロボット産業を我が国における基幹産業の一つに成長させる、この3つを目的としている。この新規プロジェクトの基本計画を立案することとなり、本調査研究の中でWGとして検討を進めた。

第3章で述べた「ロボットの知能化」をもとに、上記プロジェクトの中で取り上げるべき課題を絞り込み、研究開発の目的・目標・内容や具体的な実施方式を立案し、まとめた。

なお、まとめるにあたっては、プロジェクトにおいて研究開発されたロボット知能ソフトウェアの再利用を確実にするためのしくみづくりと、ロバストなロボット知能ソフトウェアモジュールの着実な研究開発推進を可能にするしくみづくりを盛り込むことに意をもちいた。

4. 2 プロジェクトの基本計画

別添資料として、「次世代ロボット知能化技術開発プロジェクト基本計画」(案：平成19年3月20日現在)を添付する。

第5章 ロボット及びRTの市場調査

5.1 ロボット及びRTの市場規模算出の考え方

5.1.1 はじめに

ロボットの市場予測に関しては、2000年に日本ロボット工業会での調査事業において行った市場予測がベースとなっており、若干見直しが行われているが、2015年で3.1兆円、2025年で6.2兆円の市場と予測されている。この算出の根拠としては、GDPの伸び率の予測と労働者人口の減少、女性の社会進出を勘案し、労働者の一部がRTにより置き換えられるという仮定の上で計算されている。しかしながら、2006年現在においてロボット市場は産業用ロボットの7000億円弱が明確な市場となっており、大幅な見直しが必要となっている。

また、ロボットの定義としては、2006年4月に発表された経済産業省の「ロボット政策研究会」報告書において、「センサ、知能・制御系、駆動系の3つの技術要素を有する知能化した機械システム」と定義されており、ロボットを広く捉える考え方が示されている。

こうした背景をふまえ、以下では、「ロボット政策研究会」報告書に記載されたロボットの定義を基に、自動車や家電等においてRT機能を搭載したRT製品の市場を試算するとともに、RTシステムに期待される人命救済や事故減少等による社会経済的損失の軽減といった経済効果の試算を行う。

5.1.2 RTの概念整理

RTは、「平成12年度 21世紀におけるロボット社会創造のための技術戦略調査報告書」(平成13年5月)において提唱された概念である。同報告書では、「これまでの狭義のロボット概念から脱却し、「ロボット技術を活用した、実世界に働きかける機能を持つ知能化システム」を広い意味のロボットとしてとらえ、その技術の総称を「RT=Robot Technology」と呼ぶ」としている。

ロボットについては、上記の定義に限らず、用語の使用者によって様々な定義がなされており、必ずしも確立された定義が存在しているわけではない。また、その技術の総称とされるRTについてもロボットの定義によって様々な捉え方が可能となる。

RT製品の市場規模算出にあたっては、調査対象となるRT製品の範囲を明確にする必要がある。ここでは、ロボット、RTについて、「ロボット政策研究会報告書」(平成18年5月、ロボット政策研究会)におけるロボットの定義＝「センサ、知能・制御系、駆動系の3つの技術要素を有する知能化した機械システム」を基に、ロボット、RTの概念を次のように整理する。

(1) RT要素：ロボットを構成するセンサ、知能・制御系、駆動系の個別要素技術

- (2) RT：RT要素を組み合わせ、機械を作動するためのシステム
- (3) RT応用製品：機械製品のうち、RTを利用した製品で少なくともセンサと知能・制御系の要素を持つもの
- (4) RT製品：機械製品のうち、その製品の主たる役割を果たすために必要な行為の全部又は一部を、センサ、知能・制御系、駆動系の3つの技術要素を組み合わせたRTを活用して自律的に行うもの
- (5) ロボット：RT製品のうち、それ自体が完結した機械システムとして、特定の目的を達成するために開発・製作されたもの

(1)～(5)の関係を整理すると、図5.1のようになる。

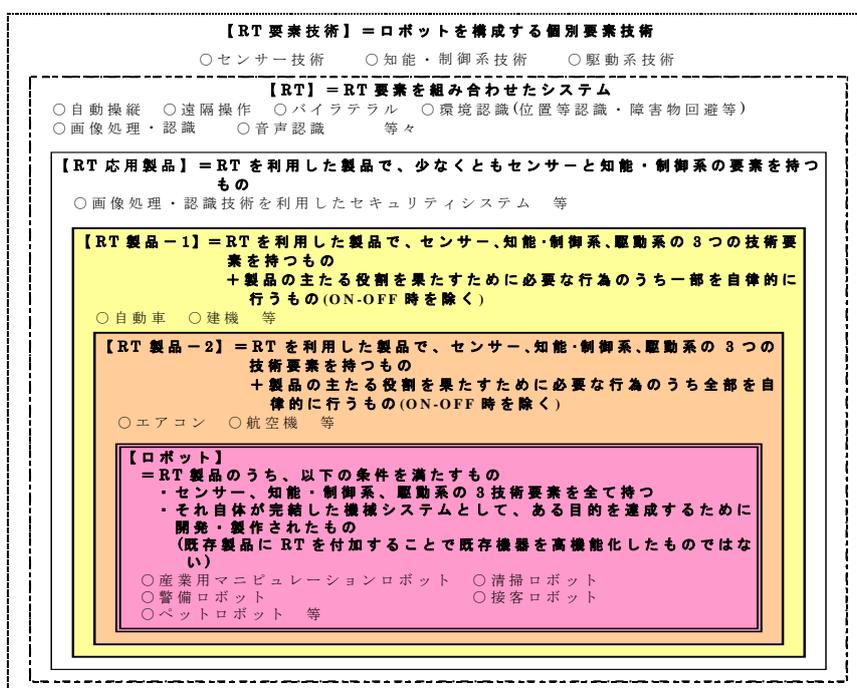


図5.1 ロボット及びRTの概念整理

5.1.3 ロボット及びRT製品の市場の捉え方

ロボット及びRT製品の市場規模算出にあたり、算出対象となる市場を図5.2のように捉えるものとする。

ロボットについては、産業用ロボット、次世代ロボット(業務ロボット、コンシューマロボット)のほか、業務分野における自動機械(既存機械のロボットの発展型で、無人・遠隔・自動・自律等の要点を満たすもの)を対象とする。

また、RT製品では、既存機械製品のうち、現在の市場規模が大きく、RTを利用

することにより高機能化したもので、2) で設定したR T製品の概念に該当するものを対象とする。具体的には、自動車をはじめとする輸送用機器、家電・住宅設備、建設機械等を対象とする。

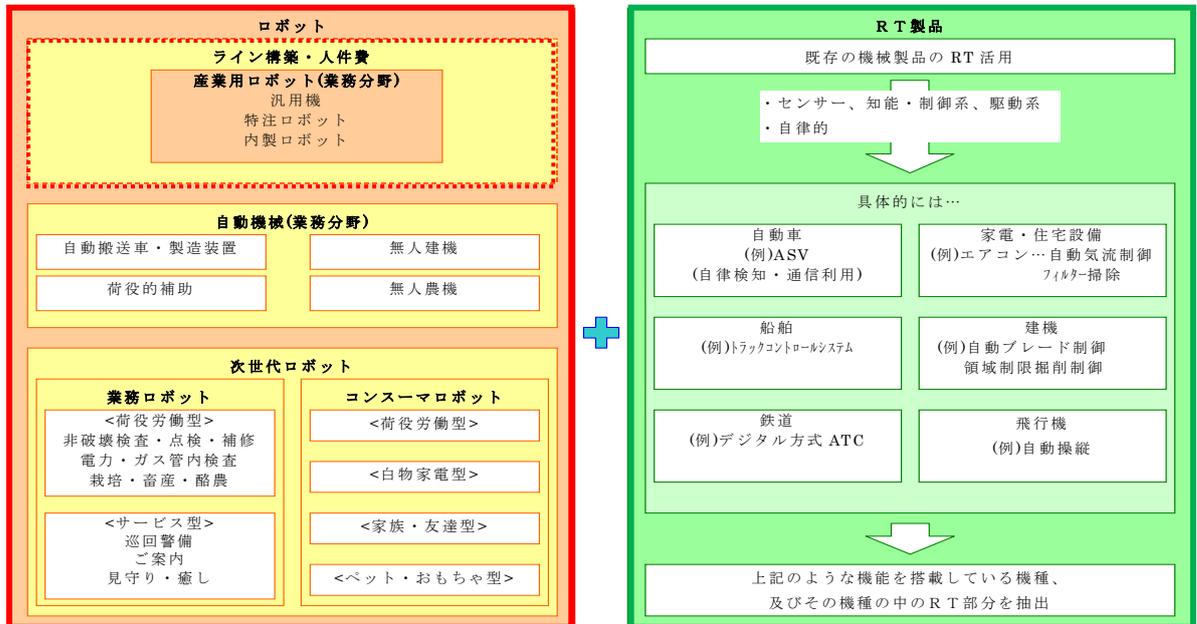


図 5. 2 ロボット及びR T製品の市場の捉え方

5. 1. 4 R T製品の市場規模推計の方法

(1) 市場規模推計の対象製品及び機能の選定

5. 1. 2 のR T製品の概念を基に、以下では市場規模推計の対象となるR T製品について、以下のような視点から対象を選定する。

- ①既存の機械製品のR T搭載による高機能化
- ②センサ、知能・制御系、駆動系の3つの要素技術を持つ
- ③自律的に作動する(人の手を借りずに自動的に動く、人の操作を支援・補完する)
- ④外に対して作用する

例えば、以下のような機能を搭載したものがR T製品に該当すると考えられる。

- (a) 自動車：ASV(先進安全自動車)技術のうち、車両の動作を自動的に制御するもの
- (b) 建設機械：3CADデータとGPS情報によるブレード位置の自動調整
- (c) エアコン：可動式センサによる床・壁面温度計測結果に基づく自動気流、制御等

既存製品のうち、表 5. 1 にあげる機能を搭載するR T製品を市場規模推計の対象とする。

表5. 1 RT製品の市場規模算出の対象製品及び機能

		RT 対象機能	機能概要	
家電	エアコン	自動気流制御	可動式赤外線センサによる床・壁面温度計測結果を基にした気流制御	
		自動フィルター掃除	エアコンが一定時間運転すると、内蔵のブラシがフィルタを自動的に清掃	
輸送機	乗用車	自律検知 前方障害物追突軽減制御装置(被害軽減ブレーキ)	センサにより前方障害物と自車との距離・相対速度等を検出し、衝突危険時には運転者に警告、ブレーキ作動	
		定速走行・車間距離制御装置(高速ACC)	レーザーレーダで前方を監視し、速度を一定に保ち、先行車がいる場合には一定の車間距離を保つ	
		低速度域車間距離制御装置(低速ACC)		
		車線維持支援制御装置	カメラ映像を画像処理することで白線を認識し、車線中央を走行するように電動パワーステアリングシステムにより運転手のステアリング操作を支援	
		後退時駐車支援制御装置	後退駐車(車庫入れ、縦列駐車)時に運転者が設定した目標駐車位置付近に駐車できるように、ハンドルを操作	
		車両横滑り時制動力・駆動力制御装置(ESC)	走行中に横滑りを感知すると、自動的に車両の進行方向を保つように各車輪に適切にブレーキをかけて、車両の進行方向を修正、維持	
	通信利用	路側情報利用型運転支援システム(路車間)	道路インフラから路車間通信を介して得られる情報に基づき衝突の回避、車線からの逸脱防止等の運転補助を行い、運転者の安全運転等を支援	
		情報交換型運転支援システム(車車間)	車車間通信を介して交通参加者が情報を交換し、その情報に基づいて運転支援を行う	
	大型車	乗用車	前方障害物追突軽減制御装置(被害軽減ブレーキ)	センサにより前方障害物と自車との距離・相対速度などを検出し、衝突危険性がある場合には運転者に警告、ブレーキ作動
			定速走行・車間距離制御装置(高速ACC)	レーザーレーダで前方を監視し、速度を一定に保ち、先行車がいる場合には一定の車間距離を保つ
船舶		トラックコントロールシステム	船舶の針路を一定に保持するヘディングコントロールシステム(HCS)、自船位置を検出するGPS、航路設定に必要なECDIS(電子海図情報表示装置)等との統合により船舶が設定された航路を逸脱しないように自動制御	
鉄道		デジタル方式自動列車制御装置	走行速度から減速が必要な速度まで連続したブレーキ曲線を車上で計算し、そのパターンに沿った滑らかな減速を行う	
航空機		自動操縦装置	飛行状態を計器で把握し、航空機の姿勢変化に応じコンピュータを使って操縦装置を動力で操作し、航法装置を結合することにより、所定の方向に飛行を続ける	
建設機械	油圧ショベル	領域制限掘削制御	設定深さ近くになるとバケットが設定深さより下側へ行かないように、アームとブームを自動制御	
	ブルドーザ	自動ブレード制御システム	電子化された設計情報とレーダ又はGPSによる地形情報を基に、ブレードを自動制御	

(2) 市場規模の推計方法

ここでは、R T製品の市場規模について、下式のような考え方によりR T製品の市場規模を推計する。

①R T製品の市場規模

$$= \text{調査対象製品全体の市場規模} \times \text{R T機能搭載機種割合} \times \text{R T機能の比率}$$

例えば、自動車について、上記の考え方に基づいてR T製品の市場規模を推計する場合、以下のようなになる。

②自動車のうちR T製品の市場規模

$$= \text{自動車全体の市場規模(出荷額)} \\ \times \text{ASV技術のうち車両動作を自動的に制御する機能(R T機能)の搭載車種の割合} \\ \times \text{自動車1台に占めるR T機能の割合}$$

ただし、製品によって、データ入手条件等、市場規模を推計にあたり条件が異なるため、上記の考え方を基本としつつ、対象製品毎に推計方法を検討する。

なお、上記の考え方に基づき市場規模を推計する上で必要となる、調査対象製品全体の市場規模、R T機能搭載機種割合、R T機能の比率のデータについては、既存統計、業界団体等による既存調査、及びメーカー等に対するヒアリングにより必要な情報を収集する。

ヒアリング等によるR T製品の市場規模を推計するための前提条件を表5. 2にまとめる。

表5. 1. 4. 2 R T製品の市場規模推計の前提条件等

		調査対象製品の市場規模	R T機能搭載機種割合	R T比率
家電	エアコン	経済産業省「機械統計」 日本冷凍空調工業会「中期 需要予測」	メーカー情報からR T機能搭載機種の生産台数を算出 →機械統計の出荷台数に占める割合を算出 →2005～2007年度の割合の伸びを基に将来値を推計	R T機能搭載製品と搭載していない製品の価格差

輸送機	自動車	経済産業省「機械統計」	国土交通省「ASV技術普及状況」と機械統計の出荷台数からASV技術の搭載率を算出 →(財)日本自動車研究所「ITS産業動向に関する調査研究報告書」等の情報を基に将来の搭載率を推計	ASV技術部分のオプション価格 →(財)日本自動車研究所「ITS産業動向に関する調査研究報告書」等の情報を基に将来の将来的な価格低下を想定
	鉄道	国土交通省「平成17年度鉄道車両等生産動態統計調査」	新幹線の制御車、電車の制御車を対象	車上用列車自動制御装置用品の単価(国土交通省「平成17年度鉄道車両等生産動態統計調査」)
	船舶	国土交通省「造船造機統計調査」 日本造船工業会「新造船建造需要予測」	関連装置義務づけの対象となる規模の船舶を対象	メーカーヒアリングによるシステムの価格
	航空機	日本航空機開発協会「民間航空機の需要予測」から国産ジェットMJの市場規模を把握	全機種を対象	
建機	油圧ショベル	経済産業省「機械統計」	メーカーヒアリング	メーカーヒアリングによるRT比率
	ブルドーザ	経済産業省「機械統計」	メーカーヒアリング	メーカーヒアリングによるシステム価格

5. 2 ロボット市場調査結果のまとめ

5. 2. 1 RT製品の市場規模

(1) 自動車関連

自動車におけるRT製品の市場規模については、ASV(先進安全自動車)技術のうち、車両の動作を自動的に制御する機能を対象として推計する。なお、ASVのうち警報のみを発する機能についてはロボットの3技術要素のうち駆動系を持たないものとして推計対象に含めないこととする。

これらの機能の中には個々の車両において自律検知を行うものと、通信を利用した路車間、車車間の情報交換により車両動作を制御するものがある。

2005年度における自動車におけるRT製品の市場規模を推計すると540億円となる。将来的に自動車出荷台数が現状の水準を維持すると仮定すると、RT機能を搭載機種の割合が高まることが予想されるため、2010年度には4,800億円、2025年度には7,700億円に拡大することが見込まれる。

(2) 船舶関連

船舶におけるR T製品の市場規模については、船舶の針路を一定に保持するH C S (ヘディングコントロールシステム)、自船位置を検出するG P S、航路設定に必要なE C D I S (電子海図情報表示装置)等との統合により船舶が設定された航路を逸脱しないように自動制御する機能(トラックコントロールシステム)を対象として推計する。

2005年度における船舶のR T製品の市場規模を推計すると2億円程度である。将来的には、一定規模以上の船舶におけるE D I C S (電子海図情報表示装置)の搭載義務づけの可能性があり、既に搭載を義務づけられているH C Sと組み合わせることでトラックコントロールシステムの導入が促進されることが予想されるため、2025年度には40億円程度になることが見込まれる。

(3) 航空機関連

航空機におけるR T製品の市場規模については、自動操縦装置の機能を対象として推計する。

2005年度には国産航空機(旅客機)が存在しないため市場規模は0である。将来的には、現在開発が進められている国産旅客機の実用化に伴って航空機分野におけるR T製品市場規模も顕在化してくることが予想されるため、現在開発中の国産旅客機と同規模の既存航空機を基に2025年度には30億円程度になることが見込まれる。

(4) 鉄道関連

鉄道におけるR T製品の市場規模については、走行速度から減速が必要な速度まで連続したブレーキ曲線を車上で計算し滑らかな減速を行うデジタル方式自動列車制御装置(デジタルA T C)の機能を搭載する車両を対象として推計する。

現在、デジタル方式自動列車制御装置は新幹線のほか、京浜東北線等の一部路線で導入されている。2005年度における鉄道車両のR T製品の市場規模を推計すると8億円程度である。将来的に、デジタル方式自動列車制御装置が導入される路線の増加等を想定し、2025年度には15億円程度になることが見込まれる。

(5) 建設機械関連

建設機械におけるR T製品の市場規模については、油圧ショベルにおける設定深さより下側へ行かないようにアームとブームを自動制御する機能や、ブルドーザ等における電子設計情報とレーダ又はG P Sによる地形情報を基にブレードを自動制御する機能など、操縦者の操作を支援・補完する機能が導入されており、それらの機能を対象として推計する。

2005年度における船舶のRT製品の市場規模を推計すると220億円程度である。将来的には1000億円程度になることが見込まれる。

(6) 家電・住宅設備関連

家電・住宅設備のうち、現在、RT製品の定義に該当する既存製品・機能としてはエアコンの可動式赤外線センサによる床・壁面温度計測結果を基にした自動気流制御の機能があげられる。

また、外に対して作用するものではないが、エアコンに内蔵されているフィルタ自動掃除機能も対象機能として取り上げる。

2005年度におけるエアコンのRT製品の市場規模を推計すると60億円程度である。将来的には搭載機種を増加等を想定し、2010年度には230億円、2025年度には850億円程度になると見込まれる。

また、エアコン以外の家電・住宅設備については、現在、RT製品の条件に該当するものは見当たらないものの、将来的には家電・住宅設備のネットワーク化が進展し、それに伴って家電や防犯システム等においてRTを活用し高機能化した製品が実用化されることが予想される。

国立社会保障・人口問題研究所の推計によると、わが国の人口は2005年をピークに減少に転じているが、総世帯数は増加を続け2015年をピークに減少に転じ2025年にはピーク時から2%程度減少することが見込まれている。その中で高齢者世帯を含む単独世帯や夫婦のみ世帯は増加することが見込まれており、住宅における自動化の必要性は高まることが予想される。

家電・住宅設備のネットワークインフラ整備やそれに伴うRTを活用した家電・住宅設備の高機能化(自動化)の市場規模を推計すると、住宅投資やエアコンにおけるRTの普及状況等を踏まえ、2025年度には1000億円程度になると見込まれる。

(7) RT製品市場規模のまとめ

(1)～(6)のRT製品の市場規模の推計結果についてまとめると、2005年度には830億円程度だが、2010年度には5800億円、2025年度には1兆2千億円程度になると考えられる。

図5.3にRT製品の市場規模推計を示す。

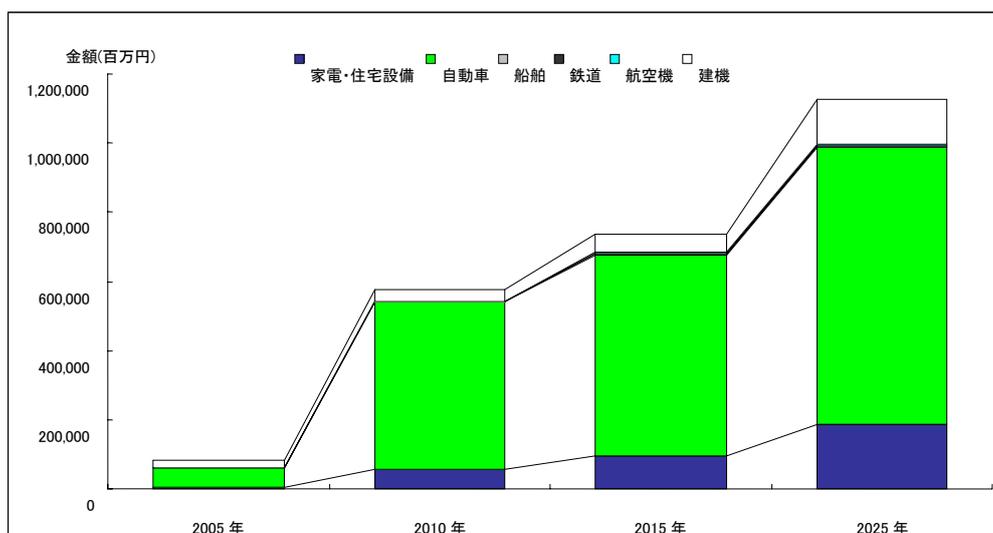


図 5. 3 RT製品の市場規模

5. 2. 2 ロボットの市場規模

ロボットの全体市場規模について、平成18年度に内閣府連携施策群が実施した「ロボット総合市場調査」の結果およびその調査を行った株式会社富士キメラ総研へのヒアリングをもとに、ロボットの市場規模を整理する。

同調査では、調査対象として、(1) 産業用ロボット、(2) 自動機械(業務分野)、(3) 次世代ロボット(業務用ロボット、コンシューマロボット)を取り上げ、それらの市場規模について2005年度の実績統計を行っている。

同調査結果によると、2005年度におけるロボットの市場規模は、ハードウェアのみで見ると、産業用ロボット3,895億円、自動機械3,433億円、次世代ロボット(業務用ロボット)229億円、次世代ロボット(コンシューマロボット)44億円で計7,601億円となっている。なお、次世代ロボットを併せてここではサービスロボットと定義する。

また、産業用ロボットについては、その機能を発揮するためにはハードウェア単体だけでなく、スポット溶接用ガンや電源、自動車の姿勢制御装置、ライン構築やシステム設計等が必要であり、これらの費用を含めると産業用ロボット(ハードウェア+ライン構築等)は1兆7,563億円となり、ロボット全体の市場規模は1兆7,840億円となる。

将来的な市場規模予測として、ヒアリングをもとに我々が推計した結果、ハードウェア(産業用ロボット+サービスロボット)のみでは2010年度に8,450億円、2015年度1兆2,540億円、2025年度には2兆1,170億円が見込まれる。また、産業用ロボットのライン構築等を含めると、2010年度に1兆9,080億円、2015年度2兆6,290億円、2025年度には4兆1,620億円と

推計した。

5. 2. 3 ロボット、R T製品の普及による効果

ロボットやR T製品の普及により期待される効果のうち、ここでは人命救済や事故減少等による社会経済的損失の軽減といった経済効果について検討する。

(1) 自動車事故の減少

R T製品の普及による社会経済的損失の軽減効果については、平成18年1月にI T戦略本部が発表した「I T新改革戦略」において、2012年末の交通事故死者数5,000人以下の政府目標の達成に向けた方策のうち、R Tに関連するものとして以下のような方策を掲げている。

- ① 2010年度からインフラ協調による安全運転支援システムを事故の多発地点を中心に全国への展開を図るとともに、同システムに対応した車載機の普及を促進する。
- ② 歩行者の交通事故死者数削減に寄与するための「歩行者・道路・車両による相互通信システム」について、官民連携により2010年度までに必要な技術を開発する。

2005年の交通事故死者数は6,871人であり、政府目標達成のためには7年間で1,800人以上の減少を図る必要がある。この目標が達成され、うち5割が安全運転支援システムや相互通信システムといったR Tに関わる技術導入による効果と仮定すると、R T普及による死亡者数減少に伴う損失額減少は300億円となる。さらに死亡者数が4,000人まで減少すると仮定すると損失額減少は470億円程度になる。

また、2005年の交通事故件数は82万件で、これが死亡者数と同様に減少すると仮定すると、交通事故件数減少に伴う物的損失額の減少は270億円～420億円程度になる。

(2) 火災による人的被害の減少

2005年の火災による死者数は2,195人である。R Tやロボットの普及により、火災による死者数が5～20%程度減少すると仮定すると、死者減少により、2005年の死者数に対して36～140億円程度損失額が減少する。

(3) 自然災害による人的被害の減少

自然災害による死者数は、大規模地震等の発生時を除き、概ね50～100人程

度で推移しており、2005年の死者数は44人であった。

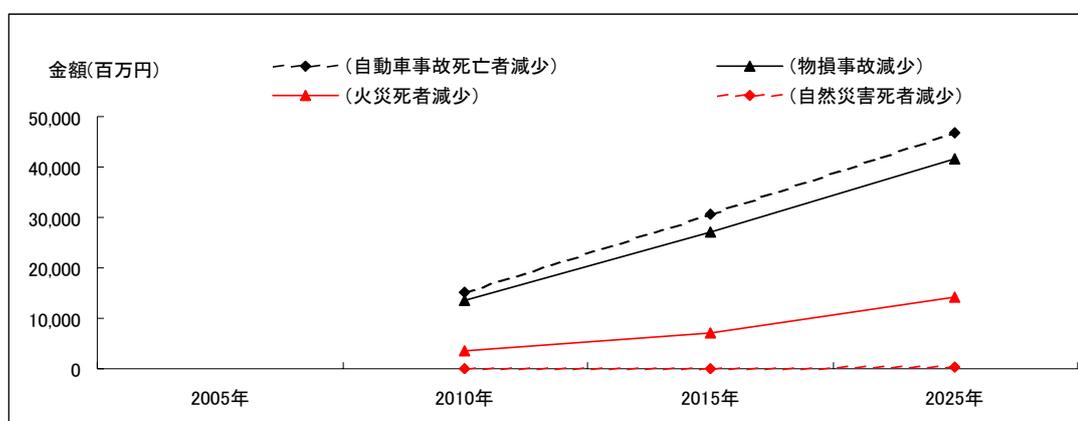
RTやロボットの普及により、土砂災害時の救助活動の支援が行われるようになり、死者数が5～20%程度減少すると仮定すると、死者減少により、2005年の死者数に対して1～3億円程度損失額が減少する。

また、大規模地震については、東海地震、南海・東南海地震の発生が危惧されている。中央防災会議による被害想定(最大値)では、建物倒壊と斜面災害による死者数は、東海地震で7,400人、南海・東南海地震で8,700人と想定されている。

阪神・淡路大震災の際には、救助時の生存率が、発生1日目の75%程度から、2日目には25%、3日目には15%に低下したといわれており、地震発生後早急な救助活動が求められる。

レスキューロボット等の活用により、生存者の早期発見・早期救助が可能になるとすれば、死者数が減少することが期待できる。中央防災会議の被害想定及び阪神・淡路大震災時の救助活動の状況等を前提に死者数減少に伴う損失額の減少は、東海地震で230億円、南海・東南海地震で270億円程度になると考えられる。

図5.4に各種災害に対する社会的損失をロボット、RT製品により軽減できる効果を示す。



(注) 東海地震、南海・東南海地震における被害軽減分は、発生時期が特定できないためグラフには反映していない。

図5.4 ロボット、RT製品の普及に伴う社会経済的損失の軽減効果

5.2.4 ロボット、RT製品市場規模のまとめ

以上をもとに、ロボット、RT製品の市場規模、及びその普及に伴う社会経済的損失軽減効果についてまとめる。

図5.5は、ロボットおよびRT関連製品、さらにはRTによる経済損失低減効果

も含めた2005年度の調査結果と将来的な推計を示したものである。

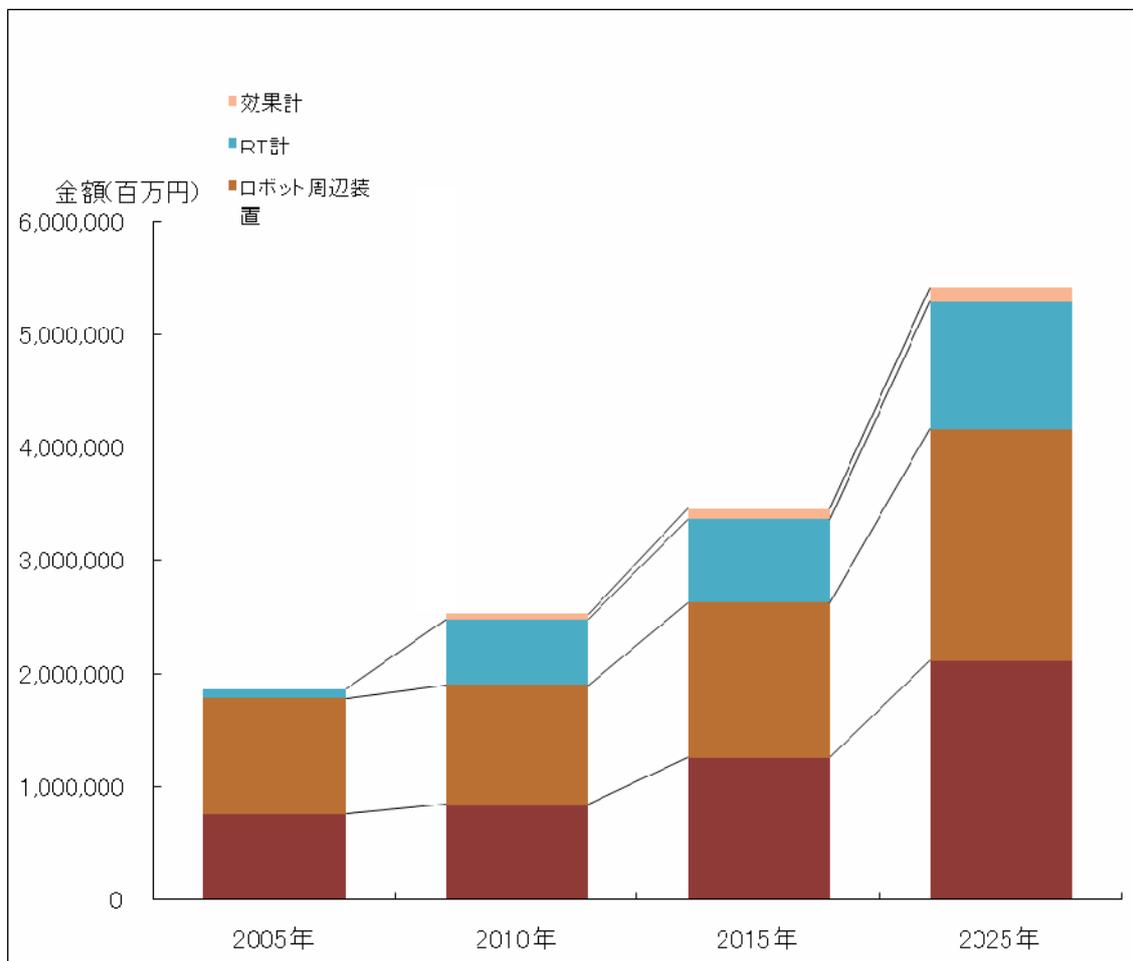


図5.5 ロボット、RT製品及びRTによる社会経済的損失軽減効果の推計

おわりに

第3次科学技術基本計画の狙いであるイノベーション25においても、ロボットは人々の活動を支援するべく社会の様々な場面に導入されることが期待されている。ロボット王国と言われている日本は、いわゆるものづくりが得意でハードウェアでは世界をリードしてきているが、ソフトウェアは必ずしもそうではない。欧米に比して不得意な分野と言われてきている。最近では、中国やベトナム、インドなどに比しても遅れをとっているといわれている。

ロボット知能もその例外ではないであろう。何らかの強化策が求められているところである。その観点からすれば、はじめにでも指摘したように、今回、このようなタイミングでこの技術マップの検討・策定がなされたことは極めてタイムリーなことである。いわゆる製造現場以外でロボットの新産業、市場を創生することが強く求められており、そのための重要な技術軸がロボットの知能であり、ロボットソフトウェアである。この場合のソフトウェアとは、いわゆるプログラム、C言語やJ A V A言語で記述されたコードのかたまりというより、ロボットを使いこなす知恵を明示的な知識やアルゴリズムで記述したものであると考えられる。そのためには、ロボットのハードウェアの特性、ロボットが行う作業の実世界的特性を熟知したうえで、適切な作業方法を発見、客観化、プログラムすることという総合的、分野融合的な能力が求められる。

この報告書で提言されたさまざまなロボット知能の実現にはまさにこのような実世界的、分野融合的な課題となっている。これらを実現する努力のなかで、新しいロボットソフトウェアを研究開発する能力をそなえた人材が我が国においても多数活躍し、また育っていくことを願ってやまない。

平成19年3月

技術戦略マップ2007

タスクフォース（TF）委員会委員長

平井 成興

別添資料

(21世紀ロボットチャレンジプログラム)
「次世代ロボット知能化技術開発プロジェクト」
基本計画 (案)

(21世紀ロボットチャレンジプログラム)
「次世代ロボット知能化技術開発プロジェクト」基本計画(案)

1. 研究開発の目的・目標・内容

(1) 研究開発の目的

我が国では、1980年代以降、自動車や電機・電子産業等のユーザ産業の成長や人手不足を背景に、産業用ロボットの本格的な導入が進んだ。現在、我が国は、国際的にもトップレベルのロボット技術を有するとともに、生産現場においても、全世界で稼働している産業用ロボットの約4割が日本で稼働している等、自他ともに認める「ロボット大国」といえる。ただし、1990年代以降、産業用ロボットの市場規模は緩やかな成長にとどまり、用途も特定の産業分野に限られていた。

しかし、ロボットを巡る状況は、着実に変わりつつある。製造業においては、ロボット・セルのように、さらに高度化した産業用ロボットが生産現場に投入されつつある。また、サービス業の分野においても、2005年の愛知万博では、サービスロボットの実用化に向けた実証実験が行われるとともに、実際のビジネスにおいても、清掃ロボットや食事支援ロボット、災害復旧作業を行う遠隔操作型ロボット等の導入が進んでいる。このように、我が国のロボット産業・技術は、次の成長段階に踏みだし、まさに「第2の普及元年」の幕開けを迎えている。

他方、我が国は、少子高齢化・人口減少、アジア諸国の台頭等を背景とした国際競争の激化や、地震や水害等大規模災害に対する不安といった社会的課題に直面している。このような中、製造現場や社会・生活空間でのサービス等様々な分野における諸課題に対し、基盤的なロボット技術(RT)の開発・活用により、解決に取り組むことが期待されている。

上記解決に求められる最重要な技術課題の一つは、「知能化技術」である。特に、生活空間等の状況が変わりやすい環境下においても、ロボットがロバスト性をもって稼働するためには、ロボットの環境・状況認識能力や自律的な判断能力及び作業の遂行能力の向上が必要である。また、当該技術の継続的な発展に向けて、アーキテクチャーについては、ロボットの知能要素をモジュール化し、その蓄積・管理及び組み合わせ等を可能とすることが必要である。これにより、ロボットのみならず、それ以外の製品分野(自動車、家電、住宅・オフィスビル、航空機、船舶、各種産業機械等)にも広く波及することが期待される。

本プロジェクトは、「我が国に蓄積されたロボット技術を活用して、ロボットの基盤的要素技術及びシステム開発をさらに推進することにより、製造分野をはじめとする一部の分野に限られているロボット適応分野を拡大し、ロボット産業を我が国における基幹産業の一つに成長させること」を目的とする「21世紀ロボットチャレンジプログラム」の一環として実施する。

(2) 研究開発の目標

(最終目標)

本プロジェクトでは、次の3項目全てを最終目標とし、次世代ロボットに必要な基盤技術を確立する。

① ロボット知能ソフトウェアプラットフォームの開発

以下②にて開発するモジュールの蓄積管理フレームワークの構築及び当該モジュールの統合等により、知能ロボットシステムの設計・開発を支援するシステムの開発を行う。

② モジュール型知能化技術の開発

周辺環境が変化しても所期の仕事を行うことができるロバスト性に優れ、かつ汎用性のあるモジュール型知能化技術の開発を行って、その成果である知能モジュールを実行可能なソフトウェアモジュールの形で提供（有償を含む。）する。

③ 有効性の検証

上記①及び②に関し、開発した知能モジュールをロボットシステムに組み込む等により、その有効性を検証するとともに、その成果であるソフトウェアモジュールを、利用できる形で提供（有償を含む。）する。

(中間目標)

最終目標に対して、必要な要素技術開発の具体的な見通しを得る。なお、ロボット知能ソフトウェアプラットフォームの開発については、モジュール型知能化技術を組み込むために必要な情報を提供するとともに、基本部分の開発を完了する。また、モジュール型知能技術の開発については、各年度末にそのパフォーマンスの検証・評価を受けた後に、ソフトウェアモジュールの提供（有償を含む。）を可能とし、プロジェクトの進展に資するものとする。

(3) 研究開発の内容

上記目標を達成するために、次の7つの研究開発項目について、別紙の研究開発計画に基づき研究開発を実施する。また、開発したモジュールの有効性を検証するため、システムに組み込み実証試験を行うとともに、当該システムに必要なとなる技術開発も併せて行う。

研究開発項目	①ロボット知能ソフトウェアプラットフォームの開発
研究開発項目	②作業知能（生産分野）の開発
研究開発項目	③作業知能（社会・生活支援分野）の開発
研究開発項目	④移動知能（社会サービス産業分野）の開発
研究開発項目	⑤高速移動知能（公共空間移動支援分野）の開発

研究開発項目 ⑥移動知能（生活支援分野）の開発
研究開発項目 ⑦コミュニケーション知能（社会サービス産業分野及び生活支援分野）の開発

2. 研究開発の実施方式

(1) 研究開発の実施体制

本研究開発は、経済産業省が、企業、民間研究機関、独立行政法人、大学等（委託先から再委託された研究開発実施者を含む）から公募によって研究開発実施予定者を選定後、共同研究契約等を締結する研究体を構築し、委託して実施する。なお、起業を意図する者、ソフトベンダー等の参加も推奨する。また、上記研究開発項目②から⑦については、密接な連携により研究開発成果が上がるよう研究体を構築する。

本研究開発は、経済産業省が指名する研究開発責任者（プロジェクトリーダー）の下に各研究体の責任者を置き、それぞれの研究テーマの達成目標を実現すべく効率的な研究開発を実施する。

(2) 研究開発の運営管理

経済産業省は、プロジェクトリーダーと密接な関係を維持しつつ、本研究開発の目的及び目標に照らして適切な運営管理を実施する。具体的には、外部有識者の意見を運営管理に反映させる他、プロジェクトリーダー等を通じてプロジェクトの進捗について報告を受けること等を行う。

また、経済産業省は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下「NEDO 技術開発機構」という。）が行う調査結果や専門的知見を活用し、NEDO技術開発機構の協力を得ながら、本研究開発の運営管理を行う。

3. 研究開発の実施期間

本研究開発の実施期間は、平成19年度から平成23年度までの5年間とする。

4. 評価に関する事項

経済産業省は、経済産業省技術評価指針（平成14年告示第167号）に基づき、研究開発の目標達成度の把握や社会経済情勢等の変化を踏まえた改善・見直しのため、外部有識者による研究開発の中間評価を平成21年度に、事後評価を平成24年度に実施する。なお、平成23年度までの各年度末に推進委員会等で各研究開発内容を内部評価し、必要に応じ、その結果を後年度の研究開発に反映することとする。

なお、評価の時期については、当該研究開発に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況に応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。

5. 成果の取扱い

(1) 成果の普及と知的財産権の所属

得られた研究開発成果については、経済産業省、受託者とも普及に努めるものとするとともに、再利用性を担保するため、公開を前提とする。委託研究開発の成果に関わる知的財産権については、「産業活力再生特別措置法（平成11年法第131号）」第30条及び同法施行令第12条の規定等に基づき、同法令を遵守することを条件に原則として、すべて委託先に帰属させることとする。

(2) 成果の産業化

- a) 受託者は、本研究開発から得られる研究開発成果の産業面での着実な活用を図るため、本研究開発の終了後に実施すべき取り組みのあり方や研究開発成果の産業面での活用のビジネスモデルを立案するとともに、立案した取り組みのあり方とビジネスモデルについて、研究開発の進捗等を考慮して、本研究開発期間中に必要な見直しを行う。また、当該ビジネスモデルを勘案し、開発したモジュールの標準化について検討する。
- b) 受託者は、上記a)で立案した取組みとビジネスモデルを本研究開発終了後、実行に移し、成果の産業面での活用を努めるものとする。また、各受託者においては、本研究開発終了後も内容物等の保守管理及びモジュールの蓄積に努める。

6. その他重要事項

(1) 基本計画の変更

経済産業省は、研究開発内容の妥当性を確保するため、社会・経済的状況、内外の研究開発動向、産業技術政策動向、プログラム基本計画の変更、第三者の視点からの評価結果、研究開発費の確保状況、当該研究開発の進捗状況等を総合的に勘案し、達成目標、実施期間、研究開発体制等基本計画の見直しを弾力的に行うものとする。

(2) 担当課

本基本計画の作成責任課は、産業技術環境局研究開発課及び製造産業局産業機械課である。

7. 基本計画の改訂履歴

平成19年3月、制定。

(別紙) 研究開発計画

研究開発項目①： ロボット知能ソフトウェアプラットフォームの開発

1. 研究開発の必要性

従来の産業用ロボットは、大量生産方式に対応する比較的単機能なものであったことから、ユーザニーズに合致した多くの製品を垂直統合型の研究開発を行い事業化することが可能であった。しかしながら、生産方式の多様化への対応や製造現場以外の多種多様なサービスロボットの実用化を確たるものとするためには、作業知能、移動知能、コミュニケーション知能を含む多様な知能を研究開発するだけでなく、これらの知能技術をモジュール化し再利用可能なものとするとともに、それらの統合を容易にするこれまでにない新たなフレームワーク、すなわち、ロボット知能ソフトウェアプラットフォームを開発し、次世代知能ロボットシステムの効率・効果的な開発環境を構築していく必要がある。

以上の観点から、本事業ではロボット知能化技術を RT コンポーネントとしてモジュール化するとともに、これらを統合してロボットの作業の計画・運用・制御、また、知能ロボットの設計を支援するフレームワークを開発することが必要である。具体的には、知能ロボットシステムとこれを構成する知能モジュールの仕様技術方式、知能モジュールの RT コンポーネント化を支援する技術、応用ソフトウェア開発システム、知能ロボット設計支援システムの開発が必要である。また、RT コンポーネントが統合されたリファレンスハードウェアシステムを開発し、これらのソフトウェアの有効性の検証を行うことが併せて求められる。

以上の研究開発により、本プロジェクトで開発される知能モジュールの再利用性が確保され、次世代ロボットシステムの基盤が確立されるものと期待される。

2. 研究開発の具体的内容

(1) ロボット知能ソフトウェアプラットフォームの開発

RT コンポーネント化された知能モジュール群を統合し、次世代知能ロボットシステムのシミュレーション・動作生成・シナリオ生成・システム設計を行うことのできるロボット知能ソフトウェアプラットフォームの研究開発を行う。具体的には以下のとおり。

①RT コンポーネント開発支援機能

- (a) 知能ロボットシステム、知能モジュール、ハードウェアの仕様の記述方式、作業シナリオの記述方式の設計を行い、他の研究開発項目の実施者に提供する。ロボットシステムの仕様記述は、ロボットの運動学・動力学パラメータ・センサの配置・アクチュエータの配置等ロボットシステムを構築するために必要な情報を含

むものとする。なお、本仕様記述方式については、他の研究開発項目の実施者と協議の上決定する。

- (b) RT コンポーネントのコード作成、デバッグ、パッケージ化等の一連の作業をシームレスに行い、知能コンポーネント・部品コンポーネントを含む RT 部品コンポーネントを開発することができる RT コンポーネントビルダ等 RT コンポーネントをデバッグできる RT コンポーネントデバッガ、RT コンポーネントで構成されるネットワークの設計・デバッグができる RT システムエディタの開発を行う。

②応用ソフトウェア開発支援機能

タイムライン・イベントに対して、RT コンポーネント間の起動・停止・接続等、一連のシーケンスとして実行するシナリオの作成ができる作業シナリオ設計ツール、ロボットの移動・作業等の動作の作成ができる動作設計ツール、作成されたシナリオに対して、実時間制御を実行するソフトウェアの作成支援ができる実時間ソフトウェア設計ツール、マニピュレータ・車輪型移動ロボット・脚型移動ロボットを含む多様なロボットを対象として、運動学・動力学・視野画像のシミュレーション、距離センサ・加速度センサ・ジャイロ・力センサ・アクチュエータを含む RT 部品機能のシミュレーションが行えるシミュレータを開発する。

③知能ロボットシステム設計支援機能

RT コンポーネントを組み合わせ、上記知能ロボットシステムの仕様記述を作成できるロボットシステム構築ツールを開発する。このため、上記の知能モジュール・ハードウェア仕様技術に基づいて、RT コンポーネントをコンテンツとする分散型データベースを管理する機能を開発する。

(2) ロボット知能ソフトウェアプラットフォームの有効性検証

知能モジュールの具体例及びこれを搭載するリファレンスハードウェアを研究開発し、ロボット知能ソフトウェアプラットフォームの有効性の検証及び改良を行う。具体的には以下のとおり。

①検証用知能モジュール群の開発

作業知能、移動知能、コミュニケーション知能それぞれ少なくとも一つ含む知能モジュール群を研究開発し、RT コンポーネント化する。開発する知能モジュール群の内容については、作業知能、移動知能、コミュニケーション知能の公募内容を参考にして、応募者が提案するものとする。

②リファレンスハードウェアの開発

開発する RT コンポーネントを搭載可能なリファレンスロボットハードウェアの開発を行う。構成要素である RT コンポーネントはハードウェア的にもモジュール化され、RT コンポーネントの追加・削除が容易な構成とする。研究開発用として利用するため、低コストで製造可能であることを要件とする。

③ロボット知能ソフトウェアプラットフォームの検証

検証用知能モジュール群をリファレンスハードウェアシステムに RT コンポーネントとして搭載し、ロボットシステムのシミュレーション、動作生成、シナリオ生成を行うことによりロボット知能ソフトウェアプラットフォームの検証を行う。

3. 達成目標

(1) 最終目標

- ①次世代知能ロボットシステムの応用ソフトウェアの開発が、ロボット知能ソフトウェアプラットフォームを用いて効率よく実施できること。
- ②本プロジェクトで開発される、作業知能モジュール、移動知能モジュール、コミュニケーション知能モジュールの全てが組み込み可能となること。
- ③次世代知能ロボットシステムの設計を支援する機能が実現すること。

(2) 中間目標

本研究開発項目の成果は、本プロジェクトの他の研究開発に利用される必要があるため、以下の項目を中間目標とする。

①RT コンポーネント開発支援機能

- (a)本プロジェクトで開発される全ての知能モジュールの仕様が記述可能となること。
- (b) RT コンポーネントの実装に関する専門的知識を有しないユーザが、RT コンポーネントを効率良く開発・デバッグできる機能、RT システムを効率よく開発・デバッグできる機能が実現されること。
- (c)本目標の基本部分については第2年度に達成されること。

②応用ソフトウェア開発支援機能

- (a) RT コンポーネント化された作業知能モジュール、移動知能モジュール、コミュニケーション知能モジュールをそれぞれ少なくとも一つ含む知能モジュールを統合し、知能ロボットシステムの運動学・動力学・視野画像のシミュレーション、動作生成、シナリオ生成が実施できること。
- (b)本目標の基本部分については第2年度に達成されること。

③知能ロボット設計ツール

- (a) RT コンポーネント化された知能コンポーネントと応用ソフトウェア開発支援機能を用いて、本プロジェクトで開発される検証用知能ロボットシステムを効率よく設計するシステムを実現すること。
- (b)本目標の基本部分については、第3年度に達成されること。

④リファレンスハードウェア

- (a) RT コンポーネントの集合体で構成され、各 RT コンポーネントはハードウェア的にもモジュール化され、RT コンポーネントの追加・削除が容易であり、作業知

能、移動知能、コミュニケーション知能の RT コンポーネントを少なくとも一つずつ含むハードウェアを開発すること。

(b) また、これらの知能の一部を含むシステムとしても構成可能であること。

(c) 低コストで製造可能であること。

(d) 本目標については、第2年度に達成されること。

⑤リファレンスハードウェアシステムを用いた検証

(a) リファレンスハードウェアシステム及び構成する RT コンポーネントの仕様が知能ロボット仕様技術方式で記述可能であり、リファレンスハードウェアシステムを構成する RT コンポーネントの開発 RT コンポーネント開発ツールを用いて行え、作業シナリオ、動作生成、実時間制御が応用ソフトウェア開発ツールを用いて行えること。

(b) 本目標については、第3年度に達成されること。

4. 特記事項

(1) RT コンポーネントは、下記の仕様書に準拠するものとする。

The Robotic Technology Component Specification、Adopted Specification、OMG。

http://www.omg.org/technology/documents/domain_spec_catalog.htm

(2) リファレンスハードウェアシステムの開発に当たっては、NEDO 技術開発機構「次世代ロボット共通基盤開発プロジェクト」で開発中のデバイス（別紙参照）を利用することを推奨する。

(3) 本研究開発項目の詳細目標については、他の研究開発項目の実施者と適宜協議の上、決定する。

研究開発項目②： 作業知能（生産分野）の開発

1. 研究開発の必要性

市場の要請による多品種変量生産に対応するためにはセル生産方式が一つの有効な手段であり、近年の少子高齢化による就業人口の減少傾向によりヒト・セルからロボット・セルへの移行が注目を集めている。しかしながら、ロボット・セルの実現に不可欠な複雑な作業工程（例えば、集積された部品箱からのピンピッキングを伴うキッティング作業、狭い環境内で動き回る配膳作業、微妙な位置修正を必要とする組立て作業等）へのロボットの適用は進んでいない。

例えば、生産設備立上げ時におけるロボット動作の教示時間の短縮は重要な課題であり、塗装等の単純な作業工程では、オフラインシミュレータによりその負荷が軽減されつつある。しかし、ピンピッキングや組立て等、ロボットと作業対象物との物理的接触を伴う複雑な作業や、手先姿勢に強い拘束がある作業では、依然として多くの教示時間がかかっている。また、実際の生産ラインへロボット・セルを導入するためには、長期間にわたる安定的な動作が必須であり、そのためには、いわゆるチョコ停の事前回避やエラー状態からのリカバリは重要な課題である。また、これらと同時に作業対象物や周囲環境のロバストな計測、認識技術を用いた高度な状況把握能力も不可欠である。

このため、本事業では様々な状況で利用でき、周囲の状況が変化しても所期の仕事を確実に遂行できるロバスト性を備えた汎用的な作業知能モジュールの開発を行うとともに、当該モジュールをロボットシステム等に搭載してその有効性を検証することを目的とする。この結果、当該モジュールが幅広いロボットシステムに利用可能な基盤技術となるだけでなく、ロボットシステムの実用化にも資することが期待される。

2. 研究開発の具体的内容

生産分野において想定される複雑作業の実現、生産設備立上時間の短縮、人手を介さない長期に亘る作業動作の安定化を実現するため、汎用的な作業知能モジュールの開発及びその検証を行う。具体的には以下のとおり。なお、各知能モジュールの使用に当たっては、安全が確保されることを必須とする。

(1) 教示知能の開発

①教示支援に関する知能モジュール群

ロボット動作の教示作業において、その教示時間を短縮できる機能を実現する知能モジュール群。例えば、視覚制御のプログラミングが容易にできるようになる機能、また、複雑な部品の情報を容易に計算機に取り込める機能、人間が微調整作業する手間が軽減されるようにする機能などにより教示作業時間が短縮できること。

(2) 実行知能の開発

①チョコ停回避に関する知能モジュール群

作業中に一時的なエラーが発生し作業が停止した場合（チョコ停）でも各種センシング情報を利用して、把持や運搬動作の補正等によりチョコ停状態から正常状態へ復帰できる機能を実現するモジュール群。

(3) 認識知能の開発

①ロバスト認識に関する知能モジュール群

上記（1）及び（2）の実現のため、作業対象物や周囲環境等の状態やロボットとの接触状態等をロバストにセンシングできる機能を実現するモジュール群。

(4) 作業知能モジュールの有効性検証

ロボットシステム等に当該モジュールを搭載し、後述する達成目標に照らし合わせ、その有効性を検証する。なお、実環境の実タスクでの検証が望ましいが、特段の支障がある場合には、模擬の検証システムを構築しても構わない。ただし、模擬システムでの検証は実態にあった環境下・作業で行うこと。また、当該ロボットシステム等に必要とされる要素技術開発も併せて行うこととする。例えば、以下の技術開発が想定されるが、これを必要条件とするものではない。

- ① エンドエフェクタやティーチングボックス等のデバイス。
- ② 生産設備計画ツール等のシステム技術。
- ③ 環境側へのセンサ配置や知識の分散配置等を行う環境構造化手法等。

3. 達成目標

(1) 最終目標

- ① 教示における作業時間が、知能モジュールを利用しない場合に比較して 1/3 以下に減少し、かつ、同一作業を繰り返すときのタクトタイムが初期状態に比べて短くなること。
- ② チョコ停を誘発する頻度が高い原因（規定外のワークの混入、位置ずらし等）を、人為的に検証システムに与えた時、多少のタクトタイムの増加を伴いながらも自動リカバリが実現すること。

(2) 中間目標

①教示支援に関する知能モジュール群

教示作業時間が従来に比べ 2/3 以下に低減されること。

②チョコ停回避に関する知能モジュール群

エラー状態認識信号を擬似入力したとき、エラー状態から正常状態へ復帰するこ

と。その際、形状(3種類以上)・材質(2種類以上)が異なる複数の作業対象物を用いて検証すること。

③ロボスト認識に関する知能モジュール群

形状・材質が異なる10種類の作業対象物の位置・姿勢がそれぞれ5秒以下で認識できること。

4. 特記事項

(1) 下記のRTコンポーネントの仕様書に準拠することを推奨する。

The Robotic Technology Component Specification、Adopted Specification、OMG。
http://www.omg.org/technology/documents/domain_spec_catalog.htm

(2) NEDO 技術開発機構「次世代ロボット共通基盤開発プロジェクト」で開発中のデバイス(別紙参照)を利用することを推奨する。

(3) 環境構造化技術を開発対象とする場合は、連携施策の共通プラットフォーム(別紙参照)との連携を推奨する。

(4) 上記研究開発の具体的内容において、研究開発知能を一体のモジュールとせず、モジュール群で構成する理由は、本プロジェクトでは知能化技術の継続的発展のために知能要素を適切な粒度で構成し、蓄積管理を可能とすることが必須であり、またこれらのモジュールがロボット以外の製品分野にも波及することを期待するためである。従って提案する知能モジュール群は、有効に再利用可能なよう適度に分割されたモジュールとし、最小単位とすることが望ましい。

(5) 提案者は、提案書に次の3つ事項を明確に記載すること。

①各知能モジュール群を構成する具体的な知能モジュールの内容とその構成。

②各知能モジュールの年度毎の達成目標とその評価方法。

③各知能モジュールの提供に関する事項(内容の範囲、有償・無償の別、対象者及び時期等)。例えば、研究開発のマイルストーンに従い、各年度末に実行可能なプログラムモジュールの形で成果を得た上で、その検証を受け、仕様書及びマニュアルを含め、特定又は一般に無償若しくは有償で提供(共用可能、有償を含む。)にすることなど具体的に記載すること。

なお、当初2年各年毎の実現形は、各社の個別対応とするが、3年度以降はロボット知能ソフトウェアプラットフォームを用いた実現とすること。また、中間評価以降の研究計画においては、その研究開発の中心を、知能モジュール群の統合に移し、知能モジュールの高度化を図りつつ、その提供(有償を含む。)に注力するようにすること。

(6) 知能モジュールの再利用性を確保するため、各実施者は開発した知能モジュールを研究開発項目①で開発する「ロボット知能ソフトウェアプラットフォーム」のシミュレータ上で動作させ、保守管理を行うものとする。なお、詳細に当たっては当

- 該プラットフォーム開発者と密接に連携をとるものとする。
- (7) 本事業に関連する記述以外の知能モジュール開発も推奨する。

研究開発項目③： 作業知能（社会・生活支援分野）の開発

1. 研究開発の必要性

少子高齢化、労働力不足等の社会問題が顕著化する中、家庭での一人暮らしや施設での共同生活をする高齢者の増加や女性の社会進出の加速に伴い、日常生活を営むための作業（片付け、取寄せ、調理、掃除、洗濯等を支援するロボットの実用化に期待が寄せられている。また、サービス分野においてもレストランの食器の下膳、自動販売機の商品補充等の手作業を人に代わって行うロボットが期待されている。

しかしながら、対象とする作業は幅広い上、扱う作業対象物も多種多様である。さらに、作業対象物が置かれている場所もテーブルや床の上といった開放的な空間から収納棚、冷蔵庫、自動販売機の中といった閉鎖的な空間が想定される上、作業対象物の置かれている場所も不変であるとは限らないことから、次世代ロボットの実用化・普及が加速度的に進展しないとの問題がある。

このため、本事業では、上記のような作業や作業環境の多様性に対応できる汎用的な作業知能モジュールを開発する。例えば「落ちた眼鏡を拾って」や、「テーブルの上を片付けて」を可能とする作業知能モジュールを開発する。また、当該モジュールをロボットシステムに搭載してその有効性を検証することを目的とする。

2. 研究開発の具体的内容

本事業では、人間が日常生活において指示した作業を遂行する社会サービス産業分野及び生活支援分野で活躍が期待されるロボットに必要な作業知能モジュールの開発及びその検証を行う。具体的には以下のとおり。なお、当該モジュールは、社会サービス産業分野及び生活支援分野のみではなく、他分野の知能ロボットにも利用可能な汎用性を有することとする。

(1) 作業計画知能の開発

①作業計画に関する知能モジュール群

人から受けた指示をもとにロボットが遂行可能な作業計画を構築する機能を実現するモジュール群。作業計画を立てるために必要な情報が指示に含まれていない場合（例えば、作業対象物の置かれている場所等）は、作業対象物追跡・位置管理知能モジュール等を利用して情報を補完して計画すること。なお、指示や問い合わせは、音声認識・音声合成や持ち運びが容易な携帯端末装置の利用を推奨する。

②作業対象物追跡・位置管理に関する知能モジュール群

人やロボットによる日常物の移動を監視し、対象物が置かれている位置を管理できる機能を実現するモジュール群。作業対象物を追跡する際に、環境認識センサにより得られた情報のみを利用することを推奨するが、作業対象物に電子タグ等を付加する

環境構造化技術を利用してもよい。また、作業対象物の特定が困難な場合には人への問い合わせをしてもよい。

(2) 作業遂行知能の開発

①作業対象物認識に関する知能モジュール群

ロボットが日常物をマニピュレーションするために必要な情報（種類、位置、姿勢・状態等）を必要な精度で認識する機能を実現するモジュール群。作業対象物を認識する際に、環境認識センサにより得られた情報のみを利用することを推奨するが、作業対象物に電子タグ等を付加する環境構造化技術を利用してもよい。また、作業対象物の特定が困難な場合には人への問い合わせをしてもよい。

②対人作業に関する知能モジュール群

- (i) 作業計画知能モジュールや作業対象物認識知能モジュールで得た情報に基づき、作業対象物を把持し指示された場所まで作業対象物をマニピュレーションする機能を実現するモジュール群。
- (ii) マニピュレーション中に新たな作業指示（中断、停止、変更など）が出た場合は、作業計画を変更して遂行できること。
- (iii) 作業対象物をマニピュレーションする場合に、その妨げとなるような物体（重なっている物や収納庫の扉等）があった場合、それを検知し回避する動作を行うこと。
- (iv) 作業対象物を人に手渡しする場合は、人の位置・姿勢等を計測して、人に手渡すこと。作業対象物をマニピュレーションする範囲が、ロボットのアームの動作範囲を超える場合は、ロボット本体を移動させる機構を利用することや、別のロボットと協調することにより作業を遂行すること。

(3) 作業知能モジュールの有効性検証

施設や家庭等の実際の作業環境又はそれを模した環境において、当該知能モジュールを実装した実証ロボットを試験運用し、最終目標を達成していることを含め、その有効性を検証する。

3. 達成目標

(1) 最終目標

実際の作業環境あるいはそれを模した模擬環境において、6つ以上の作業対象物に対する3つ以上の作業指示を、成功率80%以上で達成すること。なお、作業環境の条件は以下のとおり。

- a. 騒音レベル：40デシベル以上（生活支援分野）、60デシベル以上（社会サービス産業分野）

- b. 照明条件：家庭や施設で一般的に使用されている照明器具のみを光源とすること（ロボットに光源等を搭載する場合は、この限りではない）。なお、直射日光は入らないと仮定してもよい。

(2) 中間目標

①作業計画に関する知能モジュール群

作業計画を立てる上で情報が不足している「落ちた眼鏡を拾って」のような作業指示を3つ以上認識し、ロボットが遂行可能な具体的な作業計画を立てること。

②作業対象物追跡・位置管理に関する知能モジュール群

作業対象物が置かれている位置を管理し、その場所（テーブル上、収納庫内等）を提示できること。また床のように広い場所の場合、500mm以下の精度で位置が提示できること。管理する作業対象物は6つ以上であること。

③作業対象物認識に関する知能モジュール群

距離が500mm離れた位置から広さ500mm×500mmの領域に置かれた6種類以上の形状が異なる作業対象物に対して、マニピュレーションに必要な情報（種類、位置・姿勢等）を認識し、提示できること。作業対象物が重なった状態で置かれている場合、一番上にある作業対象物の情報を提示できること。

④対人作業に関する知能モジュール群

6種類以上の形状が異なる作業対象物に対して、下記のマニピュレーション機能を4つ以上実行できること。またそれらを組み合わせて、作業対象物の移動作業を行うこと。さらにマニピュレーション中に新たな作業指示（中断、停止、変更）が出た場合は、作業計画を変更し遂行できること。

- (a-1) 開放的な場所（テーブル上など）や床に置かれた作業対象物を取り上げる。
- (a-2) 開放的な場所（テーブル上など）に作業対象物を置く。
- (b-1) 人から作業対象物を受取る（人がロボットの動作に合わせる行為が無いこと）。
- (b-2) 人へ作業対象物を手渡す（人がロボットの動作に合わせる行為が無いこと）。
- (c-1) 閉鎖的な場所（扉が付いた収納庫など）から作業対象物を取り出す。
- (c-2) 閉鎖的な場所（扉が付いた収納庫など）へ作業対象物を収納する。
- (d-1) 籠などの中にバラ積みされた作業対象物を取り出す。
- (d-2) 籠などの中へ作業対象物を入れる。

4. 特記事項

- (1) 下記の RT コンポーネントの仕様書に準拠することを推奨する。

The Robotic Technology Component Specification、Adopted Specification、OMG。
http://www.omg.org/technology/documents/domain_spec_catalog.htm

- (2) NEDO 技術開発機構「次世代ロボット共通基盤開発プロジェクト」で開発中のデバ

イス（別紙参照）を利用することを推奨する。

- (3) 環境構造化技術を開発対象とする場合は、連携施策の共通プラットフォーム（別紙参照）との連携を推奨する。
- (4) 上記研究開発の具体的内容において、研究開発知能を一体のモジュールとせず、モジュール群で構成する理由は、本プロジェクトでは知能化技術の継続的発展のために知能要素を適切な粒度で構成し、蓄積管理を可能とすることが必須であり、またこれらのモジュールがロボット以外の製品分野にも波及することを期待するためである。従って提案する知能モジュール群は、有効に再利用可能なよう適度に分割されたモジュールとし、最小単位とすることが望ましい。
- (5) 提案者は、提案書に次の3つ事項を明確に記載すること。
 - ①各知能モジュール群を構成する具体的な知能モジュールの内容とその構成。
 - ②各知能モジュールの年度毎の達成目標とその評価方法。
 - ③各知能モジュールの提供に関する事項（内容の範囲、有償・無償の別、対象者及び時期等）。例えば、研究開発のマイルストーンに従い、各年度末に実行可能なプログラムモジュールの形で成果を得た上で、その検証を受け、仕様書及びマニュアルを含め、特定又は一般に無償若しくは有償で提供（共用可能、有償を含む。）にすることなど具体的に記載すること。

なお、当初2年各年毎の実現形は、各社の個別対応とするが、3年度以降はロボット知能ソフトウェアプラットフォームを用いた実現とすること。また、中間評価以降の研究計画においては、その研究開発の中心を、知能モジュール群の統合に移し、知能モジュールの高度化を図りつつ、その提供（有償を含む。）に注力するようにすること。
- (6) 知能モジュールの再利用性を確保するため、各実施者は開発した知能モジュールを研究開発項目①で開発する「ロボット知能ソフトウェアプラットフォーム」のシミュレータ上で動作させ、保守管理を行うものとする。なお、詳細に当たっては当該プラットフォーム開発者と密接に連携をとるものとする。
- (7) 本事業に関連する記述以外の知能モジュール開発も推奨する。

研究開発項目④： 移動知能（社会サービス産業分野）の研究開発

1. 研究開発の必要性

少子高齢化、労働力不足等の社会問題が顕在化する中、商業施設・交通施設・オフィス等時間的・空間的に変動し、人間・障害物が混在する環境において、安全かつ適切な速度で移動し、各種サービス（清掃、案内・誘導、搬送等）を提供するロボットが、今後の高齢者の社会生活の質的向上及びサービス産業の発展に寄与する等大きな期待が寄せられている。しかしながら、現在の自律移動ロボットは、誘導ガイド・ランドマーク・反射板等によって位置を同定し、予め入力した経路地図により移動しながら仕事を行う等、その活用範囲は限定的なものとなっている。

このため、本事業では、人や障害物が混在する等様々な状況で利用でき、周囲の状況が変化しても所期の仕事を確実に遂行できるロボスタ性を備えた汎用的な移動知能モジュールの開発を行うとともに、当該モジュールをロボットシステムに搭載してその有効性を検証することを目的とする。この結果、当該モジュールが幅広いRTシステムに利用可能な基盤技術となるだけでなく、RTシステムの実用化にも資することが期待される。

2. 研究開発の具体的内容

人の往来や障害物が混在し複雑に変化する環境の中で、ロボット自身の位置を認識し、確実に目的地に到達するとともに、障害物や人に衝突することなく移動できる汎用的な移動知能モジュールの開発及びその検証を行う。具体的には以下のとおり。

(1) 移動環境認識知能の開発

複雑かつ変化する環境の中でロボット自身の位置を認識する知能モジュールを開発する。当該知能は少なくとも以下の2つのモジュールから構成される。

①自己位置認識に関する知能モジュール群

周囲環境のセンシング結果を手がかりに、記憶している地図等の環境記述上で自己位置を認識する機能を実現するモジュール群。

②地図情報生成に関する知能モジュール群

新規環境での動作開始に至るまでの準備作業を簡便にし、物品の配置変化等にも速やかに対応するために、ロボットに搭載されたセンサ情報を用いて、移動に必要な地図等の環境記述を生成する機能を実現するモジュール群。(1)①の自己位置認識は、ここで生成した環境記述を用いて行う機能を実現すること。

(2) 人環境安全移動知能の開発

人が往来する環境の中で、確実に目的地に到達するとともに、障害物や人に衝突す

ることなく移動する知能を開発する。当該知能は少なくとも以下の3つのモジュールから構成される。

①人・障害物認識に関する知能モジュール群

静止障害物の位置、ならびに人等の移動障害物の位置・動きを認識する機能を実現するモジュール群。

②動的経路計画に関する知能モジュール群

(a) 現在地と目的地を結ぶ経路を求め、経路から外れたり一部経路が塞がれたりしても、補正又は再計画を自動的にしながら、目的地に到達可能な機能を実現するモジュール群。

(b) 人等の移動障害物の動きを予測し、状況に応じて、安全に回避できる機能を実現するモジュール群。

③安全移動制御に関する知能モジュール群

移動環境及びその状況に応じて、移動速度の制御を行いつつ、安全に移動可能な機能を実現するモジュール群。

(3) 移動知能モジュールの有効性検証

ロボットシステムに当該モジュールを搭載し、その有効性を実環境の実タスクで検証する。また、当該ロボットシステムに必要とされる要素技術の開発も併せて行うこととする。例えば、以下の技術開発が想定されるが、これを必要条件とするものではない。

①画像処理ハードウェア技術

開発する知能モジュールを移動ロボット上で実時間動作させるために必要な画像処理ハードウェア技術。

②環境構造化技術

環境側に機器等を設置することで、移動のロバスト性を高める技術。ただし、建物のデザインに影響を与えないこと。施工が容易であり、インフラ設置コストが内界センサ（現場での調整・試験コストも含む）に比較して安価であること。

3. 達成目標

(1) 最終目標

ロボットシステムに移動知能モジュールを組み込み、人が往来する実際の公共空間における移動作業を実行し、80%以上、所期の仕事が完遂することを目標とする。

(2) 中間目標

①移動環境認識知能

(a) 自己位置認識に関する知能モジュール群

実際の公共空間で必要となる狭隘な通路やオープンスペースを含む10種類以上の環境条件を設定し、安定に自己位置を同定できることを確認する。日光が差し込むガラス窓がある環境を含めること。

(b) 地図情報生成に関する知能モジュール群

上記(a)で設定した環境において、移動に必要な地図等の環境記述を生成できること。

②人環境安全移動知能

(a) 人・障害物認識に関する知能モジュール群

人が0.5m/秒以下の速度で往来する実際の公共空間において、起こり得る人や障害物の状況を10ケース以上抽出し、全ケースにおいて、回避が必要な人・障害物を認識できること。

(b) 経路計画に関する知能モジュール群

(i) 人が往来する実際の公共空間において、10組以上の現在地・目的地を指定し、安定に経路を生成できること。

(ii) 2組以上の現在地・目的地について、経路の一部を塞いだ場合も、目的地に到達する別の経路を再計画できること。

(iii) 上記(2)①で抽出した人・障害物状況の全ケースについて、安全な回避経路を生成できること。

(c) 安全移動制御に関する知能モジュール群

人が往来する実際の公共空間において、路面の状況・周囲状況に応じ、スムーズな速度制御を可能とし、車体に大きな振動的運動を起こさないこと。

4. 特記事項

(1) 下記の RT コンポーネントの仕様書に準拠することを推奨する。

The Robotic Technology Component Specification、Adopted Specification、OMG。
http://www.omg.org/technology/documents/domain_spec_catalog.htm

(2) NEDO 技術開発機構「次世代ロボット共通基盤開発プロジェクト」で開発中のデバイス（別紙参照）を利用することを推奨する。

(3) 環境構造化技術を開発対象とする場合は、連携施策の共通プラットフォーム（別紙参照）との連携を推奨する。

(4) 上記研究開発の具体的内容において、研究開発知能を一体のモジュールとせず、モジュール群で構成する理由は、本プロジェクトでは知能化技術の継続的発展のために知能要素を適切な粒度で構成し、蓄積管理を可能とすることが必須であり、またこれらのモジュールがロボット以外の製品分野にも波及することを期待するためである。従って提案する知能モジュール群は、有効に再利用可能なよう適度に分割されたモジュールとし、最小単位とすることが望ましい。

(5) 提案者は、提案書に次の3つ事項を明確に記載すること。

①各知能モジュール群を構成する具体的な知能モジュールの内容とその構成。

②各知能モジュールの年度毎の達成目標とその評価方法。

③各知能モジュールの提供に関する事項（内容の範囲、有償・無償の別、対象者及び時期等）。例えば、研究開発のマイルストーンに従い、各年度末に実行可能なプログラムモジュールの形で成果を得た上で、その検証を受け、仕様書及びマニュアルを含め、特定又は一般に無償若しくは有償で提供（共用可能、有償を含む。）にすることなど具体的に記載すること。

なお、当初2年各年毎の実現形は、各社の個別対応とするが、3年度以降はロボット知能ソフトウェアプラットフォームを用いた実現とすること。また、中間評価以降の研究計画においては、その研究開発の中心を、知能モジュール群の統合に移し、知能モジュールの高度化を図りつつ、その提供（有償を含む。）に注力するようにすること。

(6) 知能モジュールの再利用性を確保するため、各実施者は開発した知能モジュールを研究開発項目①で開発する「ロボット知能ソフトウェアプラットフォーム」のシミュレータ上で動作させ、保守管理を行うものとする。なお、詳細に当たっては当該プラットフォーム開発者と密接に連携をとるものとする。

(7) 本事業に関連する記述以外の知能モジュール開発も推奨する。

研究開発項目⑤： 高速移動知能（公共空間分野）の開発

1. 研究開発の必要性

交通システムの発達によって人々の生活は便利になった一方、高齢化の進展やモビリティの増加を背景に、高齢者の身体機能低下による事故、渋滞に起因する経済損失ロス（渋滞損失だけで年間12兆円）、環境汚染の社会的問題が顕在化している。このような問題の解決は国民一般が希求するところであるが、現状の技術では限界があり、RT技術を用いた新たなイノベーションが期待されている。例えば、公共空間を移動するロボット（自動車等を含む。）が高速移動中に瞬時に周囲状況を認識し、その情報を複数で共有・制御することが可能となれば、上記問題の解決に大きく寄与できる。

このため、本事業では、高速移動ロボットが瞬時に周囲環境を認識し、複数の移動ロボット間で情報を共有し、最適な判断・制御を可能とする汎用的な高速移動知能モジュールの開発を行うとともに、当該モジュールを移動ロボットに搭載し、公共空間にてその有用性を検証することを目的とする。

2. 研究開発の具体的内容

公共空間を高速で移動するロボットが周囲状況を瞬時に認識し、複数の移動ロボット間で情報を共有し、最適な判断・制御を可能とする汎用的かつロバストな高速移動知能モジュールを開発するとともに、その有効性を検証する。具体的には以下のとおり。

(1) 高速移動認知知能の開発

①交通状況認知に関する知能モジュール群

センサから取得した情報や他の移動ロボットから伝達される知識を含めて、交通状況等周囲の状況を高速移動（100km/時）中に確実に認知することが可能な機能を実現するモジュール群。他の移動ロボットから入手した知識には、古いものや、ロボットの性能の違いによる誤差を含んだものも含まれていることなどを適切に判断できること。また、認知した情報は知識として知識ベースに格納されること。

②知識共有に関する知能モジュール群

知識ベースに格納された知識を、移動ロボット同士の直接通信によって必要なときに共有できる機能を実現するモジュール群。ただし、新たな通信インフラの敷設を前提としないこと。

③交通支援に関する知能モジュール群

信頼性が高い周囲状況に関する知識を操縦者に提示できる機能を実現するモジュール群。以下を要件とすること。

- (a) 交通情報の生成、統合処理が可能なこと。
- (b) 危険回避を支援できること。渋滞を回避し最適な経路の計画策定及び目的地まで

の移動時間と平均速度情報を生成可能なこと。

(2) 高速移動知能モジュールの有効性検証

高速移動ロボットに当該モジュールを搭載し、実環境に近い環境下でその有効性を検証する。なお、検証する高速移動ロボットに求められる最低要件は以下のとおり。

- ①安全性能：人間が危険と判断した場合に、移動ロボットの行動を制限できること。
- ②移動効率向上：通信インフラが敷設されていない地域も含め、渋滞を回避する等効率的に移動が可能なこと。
- ③全天候性：屋外での利用を想定し、全天候性を確保すること。
- ④一般性：最低3種の周囲状況に関する知識（走行路に関する知識、周囲の移動ロボットに関する知識、自然環境に関する知識等）を獲得可能であること。
- ⑤連続稼働時間：24時間連続動作が可能であること。
- ⑥規模性：半径150mのエリアに120台の移動ロボットが集合しているのと同等の環境において、意図した周囲状況が認知可能であること。
- ⑦移動耐性：公共空間における高速移動速度（100km/時）において、知識伝達が可能であること。
- ⑧メディア非依存性：特定の通信メディアに依存したシステムではないこと。

3. 達成目標

(1) 最終目標

- ①公共空間を移動するロボットに当該知能モジュールを組み込み、十分な密度で移動するロボットが存在する条件下で、時刻や天候、季節、場所、移動速度に適応して周囲交通状況を認知し、操縦者に提示可能なこと。また、認知した情報を移動ロボット間で交換することによって、安全性、円滑性、環境等に関する5種以上の知識を共有可能であること。
- ②移動ロボットが事故等を認知してから5分以内に、1km以上離れた場所に伝達可能であること。
- ③移動する公共空間、天候、都市部か郊外部か等の違いに柔軟に対応し、安全性及び円滑性が向上した走行が可能であること。

(2) 中間目標

①交通状況認知に関する知能モジュール群

地図情報の利用とともに、移動ロボットの走行に有益な3種以上の知識（走行路に関する知識、周囲の移動ロボットに関する知識、自然環境に関する知識等）を獲得できること。周辺状況を認知する時、大きな誤差を含むセンサ情報は、自律的に削除する機能を有すること。

②知識共有に関する知能モジュール群

特定の位置で発生した情報を移動ロボット間で共有可能であること。ランダムに知識を配信した場合と比較して、リソース消費、知識伝達時間等において有意な性能向上が認められること。また、60km/時の移動速度においても知識伝達が可能であること。

③交通支援に関する知能モジュール群

信頼性が高い周囲状況に関する知識を、その知識を欲している移動ロボットの存在位置を予測しながら、当該ロボットに提供可能であること。ランダムに知識を配信した場合と比較して、リソース消費、知識伝達時間等において有意な性能向上が認められること。また、60km/時の移動速度においても知識伝達が可能であること。

4. 特記事項

- (1) 下記の RT コンポーネントの仕様書に準拠することを推奨する。

The Robotic Technology Component Specification, Adopted Specification, OMG.
http://www.omg.org/technology/documents/domain_spec_catalog.htm

- (2) NEDO 技術開発機構「次世代ロボット共通基盤開発プロジェクト」で開発中のデバイス（別紙参照）を利用することを推奨する。
- (3) 環境構造化技術を開発対象とする場合は、連携施策の共通プラットフォーム（別紙参照）との連携を推奨する。
- (4) 上記研究開発の具体的内容において、研究開発知能を一体のモジュールとせず、モジュール群で構成する理由は、本プロジェクトでは知能化技術の継続的発展のために知能要素を適切な粒度で構成し、蓄積管理を可能とすることが必須であり、またこれらのモジュールがロボット以外の製品分野にも波及することを期待するためである。従って提案する知能モジュール群は、有効に再利用可能なよう適度に分割されたモジュールとし、最小単位とすることが望ましい。
- (5) 提案者は、提案書に次の3つ事項を明確に記載すること。
- ①各知能モジュール群を構成する具体的な知能モジュールの内容とその構成。
 - ②各知能モジュールの年度毎の達成目標とその評価方法。
 - ③各知能モジュールの提供に関する事項（内容の範囲、有償・無償の別、対象者及び時期等）。例えば、研究開発のマイルストーンに従い、各年度末に実行可能なプログラムモジュールの形で成果を得た上で、その検証を受け、仕様書及びマニュアルを含め、特定又は一般に無償若しくは有償で提供（共用可能、有償を含む。）にすることなど具体的に記載すること。

なお、当初2年各年毎の実現形は、各社の個別対応とするが、3年度以降はロボット知能ソフトウェアプラットフォームを用いた実現とすること。また、中間評価以降の研究計画においては、その研究開発の中心を、知能モジュール群の統合

に移し、知能モジュールの高度化を図りつつ、その提供（有償を含む。）に注力するようにすること。

- (6) 知能モジュールの再利用性を確保するため、各実施者は開発した知能モジュールを研究開発項目①で開発する「ロボット知能ソフトウェアプラットフォーム」のシミュレータ上で動作させ、保守管理を行うものとする。なお、詳細に当たっては当該プラットフォーム開発者と密接に連携をとるものとする。
- (7) 本事業に関連する記述以外の知能モジュール開発も推奨する。

研究開発項目⑥： 移動知能（生活支援分野）の開発

1. 研究開発の必要性

今後の少子高齢化が進む中において、人間の移動欲求に継続的に応え、さらに行動の自由度を拡大する機会を提供することが社会要請となっている。昨今インテリジェント車イスや米国で開発されたマイクロモビリティ等、新しい移動形態に対応するモビリティも提案されつつあるが、現在までに実現されているものは、その用途と利用者が固定的で限定されている。そのため、家の中から外への移動や、目的とする遠距離の場所に移動し、さらに現地で買物や観光その他の行動に至るまでの間すべてを自由に移動できるという、本来のモビリティ要求を満たさず、市場拡大の可能性も乏しいものにとどまっている。

一方、社会基盤としてすでに確立されている自動車は、環境への適応要請から電動化が進むが、移動速度や寸法の面でマイクロモビリティの目的とするような移動形態までカバー領域を拡大できない。またパーク&ライド活動にみられるようにその移動範囲も限定される傾向にあり、例えば京都市街等の自由な観光探索ニーズに応えるソリューションにはならない。

これらの現状から、新しいパーソナルな移動手段の将来として、既存のモビリティとも融合可能で機能の広がりを実現する諸知能化技術を具備したパーソナルモビリティが考えられる。具体的には、長距離の高速移動を担う主モビリティ（例えば自動車）と、これに格納され持ち運びが簡便で、個人の短距離移動に用いられる従モビリティ（マイクロモビリティ）を組合せ、後者を使いたい場面だけで使うことができれば自由度が拡大する。ここでの利用可能性は乗車に限定されず、大きな荷物の運搬、高齢者用の移動補助具、あるいは遊具としての使途もあり得る。

このため、本事業では、従モビリティを構成する姿勢、運動制御、衝突回避等の基本的な知能モジュールに加え、主モビリティとの融合を可能とする相互通信知能モジュール、利用者の状況推定の知能モジュール等を開発することを目的とする。

2. 研究開発の具体的内容

上記1. に記載した課題に対応する開発を行うとともに、その有効性を検証する。具体的には以下のとおり。

(1) 操縦移動知能の開発

人を乗せて、操縦者の指令にしたがって安全に、かつ自在に移動する基本的な機能を実現する。そのための基本知能モジュール群として、具体的には以下のとおり。

①安定走行に関する知能モジュール群

指令値に基づく駆動力制御に加え、走行加速度や外力、未知環境等に対して自動的

に姿勢を安定化する機能等基本的な移動機能群を備えているモジュール群。

②障害物回避に関する知能モジュール群

外界センサを利用した障害物（人を含む）検知機能、衝突リスク見積もり機能、回避行動生成機能等、外界との衝突を避けるための回避機能群を備えているモジュール群。

③操縦者の意図推定・操縦支援に関する知能モジュール群

広範な利用者層に対してマイクロモビリティの使用を簡便にするため、習熟が不要な新しい操作インタフェースに必要な機能群を備えているモジュール群。

(2) 自律移動知能の開発

上記（1）に記載した操縦者の直接指令による移動知能に加え、モビリティの価値を大幅に高めるために必要となる機能として、自律的な走行機能を開発する。具体的には以下のとおり。

①自律走行に関する知能モジュール群

高精度自己位置推定、リアルタイム経路計画、操縦移動と自律移動の自然な融合機能等、操縦者不在時や操縦アシスト時を含めた自律・半自律走行に必要な機能群を備えているモジュール群。

②協調走行に関する知能モジュール群

マイクロモビリティ間及びマイクロモビリティと使用者間の相対位置・方位検出機能、それに基づく追従制御機能等、荷物運搬時、操縦が困難な高齢者等の使用状況等における協調行動に必要な機能群を備えているモジュール群。

(3) 検証システムの開発

①モジュール型移動プラットフォームの開発

知能モジュール群の有効性検証を実行するため、各知能モジュールを搭載、実装するプラットフォームを開発する。ハードウェアの主要要件は以下とする。

- (a) 小型軽量化：バッテリー、駆動ユニット、躯体を含めて携行利用も可能な重量（12.5kg以下）、寸法とする。
- (b) 走行性能：人間の速歩程度の速度（最大10km/時）、最小航続距離2km、安全で十分な回避、最大登坂性能10度。
- (c) 結合ユニット：モビリティ間の結合、分離機構を有し、人、荷物運搬等多様な用途に適応。

②マイクロモビリティ単体による有効性検証

上記プラットフォームに基本知能モジュール群を実装する。姿勢安定、操縦、障害物回避の各機能を確認することにより、操縦移動知能についての検証を行う。

③複数マイクロモビリティによる有効性検証

複数のモビリティでの自律的な空間移動から結合分離や追従走行等安全自律移動機能を確認し、自律移動知能の検証を行う。

3. 達成目標

(1) 最終目標

- ①主モビリティは軽自動車、コンパクトカー程度のサイズでマイクロモビリティを組み込み可能なこと。
- ②マイクロモビリティは携行可能な重量で乗車以外にも荷物運搬にも利用可能なものとし、年少者から高齢者まで簡便に利用できること。さらに、主モビリティとマイクロモビリティ、または、マイクロモビリティ間で、簡単に電動でドッキングする機能を有すること。
- ③開発した知能モジュール群を統合して完成した主モビリティ、マイクロモビリティを含んだパーソナルモビリティサービスの技術実証試験が都市型もしくは郊外型コミュニティ等において長期間（3ヶ月程度）行われ、パーソナルモビリティサービスの事業案が提示されると共にコスト面を含んだ市場受容性に関する見通しが得られること。

(2) 中間目標

①操縦移動知能の開発

(a) 安定走行に関する知能モジュール群

人間が押す程度の外力に対してロバストであり、最大10度の斜面上でも安定走行可能であること。

(b) 障害物回避に関する知能モジュール群

通常の歩行速度（4km/時）で接近する人を含む障害物を安全に回避できること。危険度に応じて使用者に警告を与えることができること。

(c) 操縦者の意図推定・操縦支援に関する知能モジュール群

年少者から高齢者まで簡便に利用できる操作インタフェースを実現すること。

②自律移動知能の開発

(a) 自律走行に関する知能モジュール群

環境地図情報または移動履歴情報が利用可能な条件下において、マイクロモビリティが主モビリティの場所まで自律的に帰還できること。操縦者に違和感を与えることなくナビゲーションできること。

(b) 協調走行に関する知能モジュール群

マイクロモビリティ間及びマイクロモビリティと利用者間の協調行動により、複数台のマイクロモビリティによる移動と利用者への追従を実現すること。

4. 特記事項

- (1) 下記の RT コンポーネントの仕様書に準拠することを推奨する。
The Robotic Technology Component Specification、Adopted Specification、OMG。
http://www.omg.org/technology/documents/domain_spec_catalog.htm
- (2) NEDO 技術開発機構「次世代ロボット共通基盤開発プロジェクト」で開発中のデバイス（別紙参照）を利用することを推奨する。
- (3) 環境構造化技術を開発対象とする場合は、連携施策の共通プラットフォーム（別紙参照）との連携を推奨する。
- (4) 上記研究開発の具体的内容において、研究開発知能を一体のモジュールとせず、モジュール群で構成する理由は、本プロジェクトでは知能化技術の継続的発展のために知能要素を適切な粒度で構成し、蓄積管理を可能とすることが必須であり、またこれらのモジュールがロボット以外の製品分野にも波及することを期待するためである。従って提案する知能モジュール群は、有効に再利用可能なよう適度に分割されたモジュールとし、最小単位とすることが望ましい。
- (5) 提案者は、提案書に次の3つ事項を明確に記載すること。
 - ①各知能モジュール群を構成する具体的な知能モジュールの内容とその構成。
 - ②各知能モジュールの年度毎の達成目標とその評価方法。
 - ③各知能モジュールの提供に関する事項（内容の範囲、有償・無償の別、対象者及び時期等）。例えば、研究開発のマイルストーンに従い、各年度末に実行可能なプログラムモジュールの形で成果を得た上で、その検証を受け、仕様書及びマニュアルを含め、特定又は一般に無償若しくは有償で提供（共用可能、有償を含む。）にすることなど具体的に記載すること。

なお、当初2年各年毎の実現形は、各社の個別対応とするが、3年度以降はロボット知能ソフトウェアプラットフォームを用いた実現とすること。また、中間評価以降の研究計画においては、その研究開発の中心を、知能モジュール群の統合に移し、知能モジュールの高度化を図りつつ、その提供（有償を含む。）に注力するようにすること。
- (6) 知能モジュールの再利用性を確保するため、各実施者は開発した知能モジュールを研究開発項目①で開発する「ロボット知能ソフトウェアプラットフォーム」のシミュレータ上で動作させ、保守管理を行うものとする。なお、詳細に当たっては当該プラットフォーム開発者と密接に連携をとるものとする。
- (7) 本事業に関連する記述以外の知能モジュール開発も推奨する。

研究開発項目⑦：コミュニケーション知能（社会サービス及び生活支援分野） の開発

1. 研究開発の必要性

少子高齢化、労働力不足等の社会問題が顕在化する中、人と自然にコミュニケーションを行いながら各種サービスを提供し、国民生活の質の向上に役立つ次世代ロボットの実用化・普及が期待されている。近年では音声認識・合成技術や画像認識技術の進歩及び愛知万博等での実証実験を背景に、ロボット技術は向上しているものの、未だ限られた環境下での特定用途に適用されているのみであり、またそれも実証実験レベルに留まっている。今後、駅構内、遊園地、デパート、スーパー、役場、ロビー、老人ホーム、託児所、幼稚園、学校等の公共エリアで受け付け、案内、商品案内、見守り等社会空間で活躍するロボットや、家庭で家電操作支援、見守り、セキュリティ、癒し等を行う生活支援ロボットを実用化・普及していくためには、ロボスタ性に優れたコミュニケーション知能を研究開発し、多様なロボットに直接・間接的に適用していくことが必須である。また、当該技術を独自開発する企業・研究機関だけでなく、上記ロボットを製造・販売する事業者も容易に利用可能な知能モジュールとして提供され、ダイナミックな次世代ロボット開発を展開していくことが必要である。

このため、本事業では、周囲環境が変化しても所期の仕事を確実に遂行できる汎用的なコミュニケーション知能モジュールの開発を行うとともに、当該モジュールをロボットシステムに搭載してその有効性を検証することを目的とする。

2. 研究開発の具体的内容

社会サービス産業分野及び生活支援分野において活用されるロボットに、ロボスタなコミュニケーション能力を付与するために必要な汎用性を有する知能モジュールの開発及びその検証を行う。具体的には以下のとおり。

(1) 環境・状況・対象認識知能の開発

① 環境・状況認識に関する知能モジュール群

ロボット前方の範囲内の人物の状況（人数、向き、接近等の動き）を把握すること、及びロボットと対話する相手の人数や位置を把握することが可能な機能を実現するモジュール群。

(2) 対話支援知能の開発

① 音声認識に関する知能モジュール群

ロボットと対話しようとしている人の音声と周囲雑音を分離し、騒がしい環境であっても、子供や高齢者を含む対象者の音声を認識することが可能である機能を実

現するモジュール群。

②音声合成に関する知能モジュール群

対話すべき内容が与えられたとき、周囲環境や子供や高齢者を含む対象者の属性に応じて、適切な話し方で、聞き取りやすい発話を行うことが可能とする機能を実現するモジュール群。

③行動理解に関する知能モジュール群

以下の機能を実現するモジュール群。

- (a)人の身振りや仕草の認識により、人の指示や意図を理解する機能。
- (b)人の表情や非言語の発声の認識により、人の理解度や感情を認識する機能。
- (c)ロボットの形状や仕草により、人に適切に情報やロボットの状況を伝える機能。

(3) 対話制御知能の開発

①対話コンテンツ管理に関する知能モジュール群

ロボットの機能・用途に応じて予め準備された多数の対話コンテンツを保持・管理し、対話者の属性や状況に応じて適切な対話コンテンツを選択することが可能な機能を実現するモジュール群。

②対話制御に関する知能モジュール群

以下の機能を実現するモジュール群。

- (a)対話者の反応や状況に応じて対話の流れを切り替えながら、対話フローを制御し、対話タスク（ある目的を達成するための対話コンテンツの実行）を実現することが可能な機能。
- (b)複数の人物が話しかけてきたときに複数の人物からの話しかけであることを検出し、少なくとも1人の人物との対話を継続できる機能。

(4) 対話管理等知能の開発

老人ホームや家庭等にて対話者が限定される用途を想定している場合には、以下の知能モジュールの開発も行う。

①対話対象同定に関する知能モジュール群

顔認識等による人物同定機能や、対話しながら随時顔等を記憶することのできる人物登録機能を実現するモジュール群。

②対話履歴管理に関する知能モジュール群

対話対象人物毎の情報やコミュニケーションの履歴を蓄積・管理して、同じ内容を繰り返さない、興味のある話題を提供する等、履歴から得られた知識・情報を対話内容に反映することが可能な機能を実現するモジュール群。

(5) コミュニケーション知能モジュールの有効性検証

ロボットシステムに当該モジュールを搭載し、その有効性を実環境の実タスクで検証する。また、当該ロボットシステムに必要とされる要素技術の開発も併せて行うこととする。例えば、以下の技術開発が想定されるが、これを必要条件とするものではない。

①環境・状況・対象認識知能技術

- (a)近傍の人物全員を追跡し、新しく人物が登場したこと、ある人物がいなくなったこと、一度対話した人物との対話の再開であること等が認識できる技術。
- (b)環境を構造化することにより、ロボットが環境・状況・対象を認識することを助ける技術。
- (c)対話中の人の顔、音声、体型その他の特徴から、年齢、属性を推定する技術。
- (d)近傍に複数の人物がいる場合、人物の音声の方向、口の動き等から、ロボットに話しかけられている状況であること、及びその人物を特定する技術。

②対話支援知能技術

- (a)音声認識において、多様な言い回し・表現や方言に対応する技術。
- (b)音声認識において、ロボットが発話中や動作中であっても、対話者の音声を認識する技術。
- (c)音声認識において、複数の対話者が同時に話しかけた場合でも、それを適切に選別ないしは同時に認識する技術。
- (d)音声合成において、感情を込めた発声を可能にする技術。
- (e)音声合成において、多様な音声を低コストで開発することを可能にする技術。
- (f)ロボットが、話す内容に応じて自動的に適切な仕草を生成することを可能にする技術。
- (g)身振り、仕草を用いたコミュニケーション技術。

③対話制御知能技術

- (a)周囲に、対話妨害者（タスクの遂行を阻害する子供等）がいる場合でもタスク遂行が可能な対話制御技術。
- (b)複数の人物がロボットと対話しようとするときに、複数の人物と同時に対話を進めることのできる対話制御技術。
- (c)対話履歴管理モジュールにおいて、内容の履歴だけではなく、対象者の発話の特徴（声の質、明瞭さ、方言）等を記憶して、認識の成功率を高める技術。
- (d)予めコンテンツとして準備されたタスクだけではなく、言語・非言語のインタラクションを自動的に生成し実行する技術。
- (e)対話内容がユーザに伝わっていないことを検出して表現手段と変更することや、ユーザの発話が認識できないときに、適切に聞きなおしたりすることのできる対話エラーリカバリ技術。

(f)外部のコンテンツ管理サーバと連携し、随時新しいコンテンツを獲得することにより、対話の内容を変化させ、ロボットへの興味を持続させる技術。

3. 達成目標

(1) 最終目標

- ①実用的なロボットシステムに中間目標を達成したコミュニケーション知能サブモジュールを組み込み、3種類以上の実用的なコミュニケーションのタスクを実行し、成功率70%以上のタスク達成率と、70%以上のユーザ満足度を得ることを目標とする。
- ②なお、少なくとも(a-1)、(a-2)いずれかのタスクを含むこととする。
 - (a-1)社会サービス産業分野向けを対象とする研究開発の場合は、BGM や人の話し声が聞こえる、一般的な騒がしさのスーパー等の商業施設において、顧客からの商品に関する質問の聞き取りや商品説明を行う対話が行えること。
 - (a-2)生活支援分野向けを対象とする研究開発の場合、テレビのついた状態のリビングで高齢者と対話して、ビデオの制御や録画・再生をアシストすることができること。
- (b)タスク内での対話内容と対話対象を組み合わせたバリエーションは、少なくとも200以上とする。バリエーションとは、例えば、「テレビをつけて」「エアコンの温度を20度にして」等の指示の種類を指す。

(2) 中間目標

①環境・状況認識に関する知能モジュール群

ロボットの前方5m以内の人物の配置が70%以上の精度で検出できること。

②音声認識に関する知能モジュール群

BGMが聞こえるスーパーや、TVがついているリビング等の実用的な環境において、子供や高齢者を含む不特定話者の音声を70%以上の精度で認識できること。

③音声合成に関する知能モジュール群

子供や高齢者を含む不特定の相手とのコミュニケーションにおいて、70%以上の精度で内容が伝達できること。

④行動理解に関する知能モジュール群

「人の身振りや仕草の認識により、人の指示や意図を理解する技術」「人の表情や非言語の発声の認識により、人の理解度や感情を認識する技術」について、それぞれ少なくとも3種類の要素（例えば、3種類の身振り、3種類の表情等）の認識技術を開発し、実用的なロボットタスクの実証実験において、その効果を実証すること。また、「ロボットの形状や仕草により、人に適切に情報やロボットの状況を伝える技術」に関しては、仕草を伴うことの効果を、ユーザへのアンケートで実証する

こと。

⑤対話コンテンツ管理に関する知能モジュール群

200以上の対話コンテンツを格納でき、また状況に応じて対話コンテンツを選択する機能を有すること。

⑥対話制御に関する知能モジュール群

選択された対話コンテンツのフローを制御し、初心者ユーザに対して70%以上の成功率でタスクを達成できること。

⑦老人ホームや家庭等にて対話者が限定される用途を想定している場合には、以下の知能モジュールについて、その中間目標とする。

(a)対話対象同定に関する知能モジュール群

100人を対象に80%以上の精度で人物を同定できること。

(b)対話履歴管理に関する知能モジュール群

100人以上の対話履歴を管理し、その履歴から得られた情報を対話に反映する機能を有すること。

4. 特記事項

- (1) 下記の RT コンポーネントの仕様書に準拠することを推奨する。

The Robotic Technology Component Specification、Adopted Specification、OMG。
http://www.omg.org/technology/documents/domain_spec_catalog.htm

- (2) NEDO 技術開発機構「次世代ロボット共通基盤開発プロジェクト」で開発中のデバイス（別紙参照）を利用することを推奨する。
- (3) 環境構造化技術を開発対象とする場合は、連携施策の共通プラットフォーム（別紙参照）との連携を推奨する。
- (4) 上記研究開発の具体的内容において、研究開発知能を一体のモジュールとせず、モジュール群で構成する理由は、本プロジェクトでは知能化技術の継続的発展のために知能要素を適切な粒度で構成し、蓄積管理を可能とすることが必須であり、またこれらのモジュールがロボット以外の製品分野にも波及することを期待するためである。従って提案する知能モジュール群は、有効に再利用可能なよう適度に分割されたモジュールとし、最小単位とすることが望ましい。
- (5) 提案者は、提案書に次の3つ事項を明確に記載すること。
- ①各知能モジュール群を構成する具体的な知能モジュールの内容とその構成。
 - ②各知能モジュールの年度毎の達成目標とその評価方法。
 - ③各知能モジュールの提供に関する事項（内容の範囲、有償・無償の別、対象者及び時期等）。例えば、研究開発のマイルストーンに従い、各年度末に実行可能なプログラムモジュールの形で成果を得た上で、その検証を受け、仕様書及びマニュアルを含め、特定又は一般に無償若しくは有償で提供（共用可能、有償を含む。）

にすることなど具体的に記載すること。

なお、当初2年各年毎の実現形は、各社の個別対応とするが、3年度以降はロボット知能ソフトウェアプラットフォームを用いた実現とすること。また、中間評価以降の研究計画においては、その研究開発の中心を、知能モジュール群の統合に移し、知能モジュールの高度化を図りつつ、その提供（有償を含む。）に注力するようにすること。

- (6) 知能モジュールの再利用性を確保するため、各実施者は開発した知能モジュールを研究開発項目①で開発する「ロボット知能ソフトウェアプラットフォーム」のシミュレータ上で動作させ、保守管理を行うものとする。なお、詳細に当たっては当該プラットフォーム開発者と密接に連携をとるものとする。
- (7) 本事業に関連する記述以外の知能モジュール開発も推奨する。

別紙1 画像認識用デバイス及びモジュールの仕様

1. 基本性能

生活空間等の実環境で稼働するロボットのステレオカメラの画像を処理し、ロボットの自己位置同定、環境の3次元マップ取得をリアルタイムで実行するために以下の性能を備える。

- ・ 2系統以上のカメラ画像をフレームレート30fps以上、16ビット以上のカラー解像度で同時入力・処理可能であること。
- ・ カメラ画像の入力と画像処理を毎フレーム実行可能であること。
- ・ 移動しながら自己位置同定と環境の3次元マップの取得を行うための処理能力としてシーン内の1000箇所以上の特徴的な領域(8×8画素以上)について、ステレオ計測と動き計測を100ms以下で実行可能であること。
- ・ 2m先の対象物を10cm以下の精度で検出可能であること。
- ・ 各計測データについての信頼性評価値の出力が可能であること。

2. RTコンポーネントとしての動作

開発したモジュールを以下のRTM(RTミドルウェア)の仕様に基づくRTコンポーネントとして提供できること。

The Robotic Technology Component Specification, Adopted Specification, OMG.
http://www.omg.org/technology/documents/domain_spec_catalog.htm

3. 低消費電力・低発熱量

次世代ロボットは、画像認識に高い処理能力が求められると同時にバッテリーで駆動することが想定されるため、ピーク動作に必要な消費電力が20W以下であること。

4. 小型軽量化

ロボットに搭載可能な面積150cm²以下、質量250g以下であること。

5. 耐ノイズ性

強電系と共存して安定に動作すること。

6. 付加的機能

- (1) 照明条件への適応やノイズ除去のための画像前処理機能として、階調補正及びフィルタリング処理の適用が可能であること。
- (2) 人物の検出及び顔の登録・照合を行うことが可能であること。
- (3) 人のジェスチャを認識する機能を有すること。
- (4) 部屋内を移動することにより、部屋の3次元マップを構築可能であること。
- (5) 部屋のマップと現在のセンサ入力情報から、自己位置を同定可能であること。
- (6) 省配線：組立工数を削減し、スペースの制約を満たし、高信頼性を実現できること。

別紙2 音声認識用デバイス及びモジュールの仕様

1. 基本性能

ロボットが稼働する生活空間等の実環境で音声情報を処理し、人間とのコミュニケーションを行うために以下の性能を備えること。

- ・様々な処理の搭載・入れ替え、性能の改善、個別ロボット向けのカスタマイズが可能であること。
- ・不特定話者の単語認識が可能な処理能力を備えること。
- ・日常生活空間の雑音環境下で耐雑音処理により 70%以上の単語認識率を実現可能な処理能力を備えること。
- ・音源方向の検出が可能であること。
- ・8ch 以上の多チャンネル入力が可能であること。

2. RTコンポーネントとしての動作

開発したモジュールを以下の RTM (RT ミドルウェア) の仕様に基づく RT コンポーネントとして提供できること。

The Robotic Technology Component Specification, Adopted Specification, OMG.
http://www.omg.org/technology/documents/domain_spec_catalog.htm

3. 低消費電力・低発熱量

次世代ロボットの音声認識は常時動作させる必要があり、高い処理能力が求められると同時に、バッテリーで駆動することが想定されるため、必要な消費電力が最大で 20W 以下であること。

4. 小型軽量化

ロボットに搭載可能な面積 75cm²以下、質量 150g以下であること。

5. 耐ノイズ性

強電系と共存して安定に動作すること。

6. 付加的機能

- (1) ロボット発話やメカノイズをキャンセルできること (雑音発生時の認識率 70%以上)。
- (2) 自由発話の大語彙音声認識が可能であること。
- (3) 認識すべき音声以外の音に対する誤認識を30%以下に抑えること。
- (4) 発話者の口とマイクの距離が 50cm以上でも目標性能が達成可能であること。
- (5) 省配線：組立工数を削減し、スペースの制約を満たし、高信頼性を実現できること。

別紙3 運動制御用デバイス及びモジュールの仕様

1. 基本性能

実運用環境下で動作する多自由度ロボットの分散処理を可能とする高度な処理機能を実現するために以下の性能を備えること。

- ・ 1軸以上のアクチュエータを制御できる性能を有すること。
- ・ 多自由度協調動作を行うための制御情報、状態量等を出力できること。
- ・ 1ms以下の周期処理が実現可能であること。
- ・ 実時間通信インタフェースを複数種類備えること。
- ・ 汎用OSが稼働すること。

2. RTコンポーネントとしての動作

開発したモジュールを以下のRTM (RTミドルウェア)の仕様に基づくRTコンポーネントとして提供できること。

The Robotic Technology Component Specification, Adopted Specification, OMG.
http://www.omg.org/technology/documents/domain_spec_catalog.htm

サーバ系などの高速処理に関わる通信に関しては他のプロトコルを採用することを認めるが、開発したモジュールで制御する各パーツ(腕、指、移動機構等)と上位制御装置間に関しては、上記の条件を満たし、ネットワーク上で実時間稼働すること。

3. 低消費電力・耐熱性

次世代ロボットは、多自由度系の制御等に高い処理能力が求められると同時に、バッテリーで駆動することが想定されるために

- ・ 制御部が必要とする消費電力が最大で15W以下であること。
- ・ アクチュエータ等の発熱源近傍で安定に動作すること。
- ・ 要素モジュールを構成した際にパワー部ピーク動作に必要な消費電力を低減すること。

4. 耐ノイズ性

強電系と共存して安定に動作すること。

5. 小型軽量化

ロボットに搭載可能なサイズ、質量であること。但し、パワー部を除いた要素モジュールは面積50cm²以下、質量150g以下であること。

6. 付加的機能

- (1) 加速度センサ、ジャイロ、力センサやレーザレーダ等のセンサからの信号を入力し、その信号を処理すること。
- (2) 省配線：組立工数を削減し、スペースの制約を満たし、高信頼性を実現できること。

別紙4 次世代ロボット共通プラットフォーム技術について

総合科学技術会議科学技術連携施策群

次世代ロボット連携群

主監 谷江和雄

「平成17年度科学技術関係予算の改革について」（平成16年7月23日総合科学技術会議決定）に基づき、各府省の縦割りの施策に横串を通す観点から、科学技術連携施策群（以下「連携施策群」という。）について、総合科学技術会議のイニシアティブの下にコーディネーター等を配置し不必要な重複の排除、連携の強化等の各施策間の調整を推進します。その上で補完的に実施すべき研究開発課題について、内容・達成目標等を具体的に設定して研究開発を推進することになりました。

科学技術連携施策群次世代ロボット連携群では、上を受けて各府省、研究機関などで共通で使えるロボット基盤・インフラ技術として共通プラットフォーム技術の研究開発に着手しました。

ここでは、室内、室外など環境内でのロボットや人、物体の位置計測技術、機器間の通信技術、ロボットサービスAPIが研究開発されるとともに、プラットフォーム環境が、九州、けいはんな、神奈川に2008年度、2009年度に順次公開されます。

また、ソフトウェア構築のためのロボットワールドシミュレータに関しても、2007年度よりリリースされていきます。

各研究機関や研究開発者が、このような技術や環境を利用していくことで、ロボット開発の効率向上、国際競争力の強化が図れると考えていますので、関係各位におかれましては、ご活用の際、宜しくお願い致します。

以下の4課題が現在、実施中です。

http://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/17/10/05102801/001.htm

http://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/18/05/06051814/001.htm

1. ロボットタウンの実証的研究（九州大学）
2. 分散コンポーネント型ロボットシミュレータ（独立行政法人産業技術総合研究所）
3. 施設内外の人計測と環境情報構造化の研究（株式会社国際電気通信基礎技術研究所）
4. 環境と作業構造のユニバーサルデザイン（独立行政法人産業技術総合研究所）