

# マニピュレータの自律性に関する 情報要件と機能構造の整理



Pick & Place を対象として

## マニピュレータ小WG 2025年度活動報告



2026年6月  
ロボット革命・産業IoTイニシアティブ協議会  
ロボットイノベーションWG  
ソフトウェアアーキテクチャ調査検討委員会

発行者 ロボット革命・産業IoTイニシアティブ協議会  
〒169-0075 東京都新宿区高田馬場1-31-18  
高田馬場センタービル12階日本機械工業連合会内  
TEL 03-6302-1861  
E-mail office@jmfri.gr.jp  
URL <https://www.jmfri.gr.jp/>

Copyright © 2026 ロボット革命・産業IoTイニシアティブ協議会 All Rights Reserved.

本文書は、著作権法および国際条約により保護されています。個人または会社（または会社に準ずるもの）内部での使用を目的として、本文書をダウンロード、印刷、または電子的に閲覧することができます。本資料の内容の全部又は一部については、私的使用又は引用等著作権法上認められた行為として、適宜の方法により出所を明示することにより、引用・転載複製を行うことができます。内容の全部又は一部について、ロボット革命・産業IoTイニシアティブ協議会に無断で改変を行うことはできません。

ロボット革命・産業IoTイニシアティブ協議会はいかなる目的においても使用可能性を保証するものではなく、本文書の内容を使用したいかなる場合においても責任を負いません。本文書の利用者は、本文書に記載された内容の使用に関連して発生したすべての要求、請求、訴訟、損失、損害（人身事故による損害を含む）、費用、経費（弁護士費用を含む）について、ロボット革命・産業IoTイニシアティブ協議会に何らの損害も与えないことに同意するものとします。

# 目次

1	はじめに	5
1.1	本報告書の対象とするユーザ	5
1.2	本報告書のスコープ	6
1.3	参考文献	6
1.4	委員名簿	7
1.5	本書の構成および読み方ガイド	8
2	人とロボットの協調関係の整理	11
2.1	背景：なぜ人とロボットの協調が必要か	11
2.2	従来の産業用ロボットにおける役割分担	11
2.3	自律ロボットの必要性和従来の産業用ロボットとの比較	11
3	本WGにおける「自律ロボット」の定義	13
3.1	本WGにおける「自律」の定義	13
3.2	自律ロボットにおける協調の考え方	13
3.3	判断・制御・実行の分担構造	14
3.4	「半自律」という概念の整理	14
3.5	自律ロボットのレベル	15
3.6	本年度の検討対象範囲(Pick & Place に限定した議論)	16
4	自律動作における課題と要件	17
4.1	自律動作における不確実性と失敗	17
4.2	失敗の分類(要因・状態・結果)	17
4.3	動作の段階と失敗(Pick & Place における整理)	18
4.4	自律ロボットに求められる基本機能(検知・予測・回避・リカバリ)	18
4.5	本章のまとめ	19
5	エラー検知とリカバリ	20

5.1	エラー検知の考え方.....	20
5.2	状態推定・確信度・逸脱判定.....	20
5.3	リカバリの基本構造(トリガ・手段・目標状態).....	21
5.4	リカバリとリスクアセスメントの関係.....	21
5.5	自律リカバリと人の介入の境界.....	21
5.6	本章のまとめ.....	22
6	エラー予測と回避.....	23
6.1	予測の必要性和位置づけ.....	23
6.2	余裕度(マージン)の概念.....	23
6.3	不確かさの成長とリスク.....	23
6.4	失敗モードとその兆候.....	24
6.5	予測に基づく回避行動の設計.....	24
6.6	本章のまとめ.....	25
7	人の介入と遠隔操作.....	26
7.1	遠隔介入の必要性.....	26
7.2	介入の形態(判断・制御・操作).....	26
7.3	モード遷移(自律/停止/遠隔判断/遠隔操作/再自律).....	27
7.4	制御権限と責務の定義.....	30
7.5	遠隔介入における課題(遅延・認知負荷・安全).....	31
7.6	本章のまとめ.....	32
8	情報要件の整理.....	33
8.1	情報要件の基本的な考え方.....	33
8.2	情報要件の4階層構造.....	34
8.3	各階層における具体的な情報内容.....	36
8.4	判断主体に依存しない共通情報基盤.....	39
8.5	最小情報要件と段階的導入.....	40

8.6	情報要件とインターフェース設計への示唆 .....	40
8.7	本章のまとめ .....	42
9	インターフェース仕様への示唆 .....	43
9.1	情報要件とインターフェースの関係 .....	43
9.2	マニピュレーションモジュールとの関係 .....	44
9.3	外部システム(監視・遠隔制御)との連携 .....	45
9.4	仕様化に向けた論点整理 .....	46
9.5	競争領域と標準化領域の切り分け .....	48
9.6	本章のまとめ .....	49
10	まとめと今後の課題 .....	50
10.1	本WGの成果の整理 .....	50
10.2	本報告の位置づけ .....	51
10.3	残された課題 .....	51
10.4	次年度に向けた展望 .....	52

# 1 はじめに

産業用ロボットは、ものづくりを支える不可欠な要素であるが、近年の適用範囲の拡大に伴い、従来の少品種大量生産を前提とした「事前の厳密な環境整備とティーチング」に基づく運用ではコストや柔軟性の面で限界を迎えている。特に三品産業や物流分野では、対象物や環境の不確実性が高く、ロボットが自ら状況を「判断」し、適応的に振る舞う能力が求められるようになってきている。

こうした背景から、本報告書では人とロボットが固定的な役割分担を超え状況に応じて判断や制御の責務を動的に移行し合う「半自律」や「遠隔介入」の考え方を体系化するとともに、単なる自動化の追求だけではなく、不確実性の下で作業継続性を最大化するための仕組みを整理している。

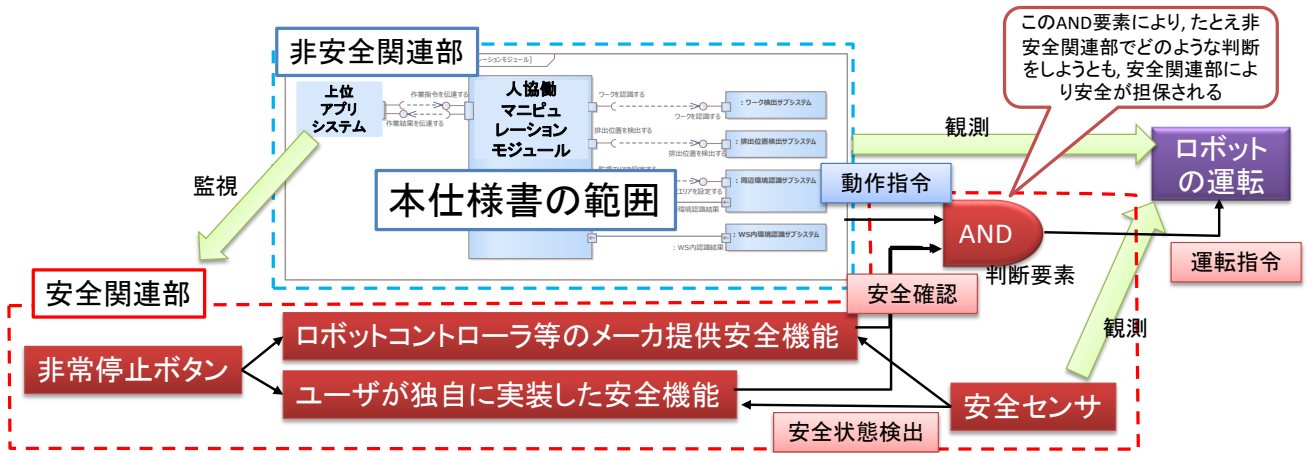
本報告書の内容は、モバイルマニピュレータへの応用やサービスロボット用途まで広く拡張可能な汎用性を備えたものであり、現時点では仕様化に向けた検討の途上ではあるが議論の経緯には実務上の重要な示唆が含まれており、ロボットに関わる多くの技術者・研究者に広くご覧いただきたい。

## 1.1 本報告書の対象とするユーザ

- ロボットメーカー
- ロボットシステムインテグレータ
- ロボットユーザ
- その他ロボット要素技術開発者・研究者など、ロボットシステムに関与される方

## 1.2 本報告書のスコープ

本報告書のスコープは、マニピュレーション機能を中心とした非安全関連部のシステム要素間のインターフェースを主眼に置いている。このため、安全関連部は別途利用するマニピュレータ、もしくは運用者により用意されているものと仮定し、その詳細までは言及しない。以下に、本仕様書の範囲を表す概略図を示す。



なお、非安全関連部と安全関連部は分離されているため、非常停止ボタンが押下された場合などに発生する非常停止信号は、「人協働マニピュレーションモジュール」は明示的には取得しないと仮定している。ただし、上図に示すように「人協働マニピュレーションモジュール」も、マニピュレータ本体の運転状態は観測しているため、指定した動作指令に従って動作していない場合は、(間接的に)非常停止ボタンの作動を検知することは可能である。その場合、

- ・安全関連部の動作は考慮せず、指定された動作指令を送り続ける
- ・一旦、一時停止状態に移り、上位アプリシステムに状況を伝達する

などの対応が考えられるが、これらの対応方法の詳細については、本仕様書では規定していない。

また、安全関連部に関する詳細については本仕様書では規定していないが、安全関連部の状態を外部から確認できるものと想定している。更に、「非安全関連部への外部からの介入」という状況も想定しているが、この場合も上記の概略図の通り安全関連部が安全を担保しているという前提とする。

ISO-10218規格などによって規定される安全機能により停止した場合の復帰方法については、本仕様書の対象外とする。

## 1.3 参考文献

[SysML] Object Management Group, OMG Systems Modeling Language (OMG SysML), Version 1.7, OMG document number formal/24-01-04, 2024

[ISO-10218-1] Robotics — Safety requirements — Part 1: Industrial robots, 2025

[ISO-19111-2] Geographic information - Spatial referencing by coordinates - Part 2: Extension for parametric values, 2019

[RLS] Object Management Group, Robotic Localization Service (RLS), Version 1.1, OMG document number formal/12-08-01, 2012

## 1.4 委員名簿

(委員長)	名城大学	(敬称略)	大原 賢一
(副委員長)	産業技術総合研究所		安藤 慶昭
<b>【委員メンバー】</b>			
I H I		山崎	峻一
I H I		木村	麻衣
I D E C		延廣	正毅
会津大学		成瀬	継太郎
会津大学		屋代	眞
NTT 西日本		岩峰	晴也
NTT 西日本		長濱	星斗
NTT 西日本		細川	周秀
NTT 西日本		松村	誠明
オリエンタルモーター		近藤	大生
神奈川県立産業技術総合研究所		宮澤	以鋼
川崎重工		蓮沼	仁志
川田テクノロジーズ		長嶋	功一
キビテク		前原	賢一
国際航業		武田	浩志
国土館大学		山本	大介
サイバネット MBSE		三好	崇生
産業技術総合研究所		中坊	嘉宏
セイコーエプソン		長谷川	浩
セイコーエプソン		木本	吉則
セック		中本	啓之
大同大学		吹田	和嗣
T H K		氏家	弘貴
T H K		鈴木	麻友
T H K		和田	成広
東芝		貞本	敦史
東芝		森	明慧
日本品質保証機構		駒澤	香介
パナソニックホールディングス		安藤	健
日立製作所		大塚	敏史
日立製作所		坂井	亮
富士ソフト		酒井	貴史
本田技術研究所		小川	直秀
三菱電機		山隅	允裕
ヤンマーホールディングス		杉浦	恒
ヤンマーホールディングス		空閑	融
ロボット工業会		岡本	珠夫
早稲田大学		菅	佑樹
<b>【オブザーバ】</b>			
経済産業省	ロボット政策室	梁島	拓郎
経済産業省	ロボット政策室	武藤	圭亮
新エネルギー・産業技術総合開発機構		土井	浩史
新エネルギー・産業技術総合開発機構		小崎	勇輝
新エネルギー・産業技術総合開発機構		藤堂	泰英

## 1.5 本書の構成および読み方ガイド

本書は、自律ロボットに関する考え方から具体的な仕様検討への接続までを一連の流れとして整理したものである。本節では各章の位置づけと相互関係、および読者の関心に応じた読み進め方について説明する。

### 1.5.1. 本書全体の構造

本書は、大きく以下の4つのブロックから構成される。

- 第2章～第3章：背景および基本的な考え方
- 第4章～第7章：課題構造と機能の整理(概念整理)
- 第8章～第9章：本WGの検討成果(情報要件とインタフェース)
- 第10章：まとめと今後の課題

これらの関係を概念的に示すと、以下のような構造となる。



本書は「なぜ必要か」から始まり、「何が問題か」「どう整理するか」を経て、「何を定義すべきか(情報要件)」に到達し、最終的に「どのように仕様化するか」へと接続する構成となっている。

### 1.5.2. 各章ブロックの内容

#### ■ 第2章～第3章(導入・前提共有)

本ブロックでは、本WGが対象とする問題意識および基本的な考え方を提示する。

- なぜ従来の産業用ロボットの枠組みでは不十分なのか
- 人とロボットの協調関係をどのように捉えるべきか
- 本WGで扱う「自律ロボット」とは何か

といった点について整理している。

これらの章は、本書全体の前提を共有することを目的としており、後続の議論を理解するための基盤となる。

#### ■ 第4章～第7章(課題構造と機能の整理)

本ブロックでは、自律ロボットにおける本質的な課題を「不確実性」と「失敗」の観点から整理し、それに対応する機能を体系化している。

- 失敗と状態遷移の関係(第4章)
- エラー検知とリカバリ(第5章)
- エラー予測と回避(第6章)
- 人の介入および遠隔操作(第7章)

これらは本WGとしての「概念整理」に相当する部分であり、特定の実装や方式に依存しない共通的な枠組みを提示している。本ブロックの内容は相互に密接に関連しているため、原則として一連の流れとして読み進めることが望ましい。

## ■ 第8章～第9章(本WGの検討成果)

本ブロックが本WGの議論の中核となる成果である。第8章では、第4章～第7章で整理した機能を支える基盤として、「情報要件」を4階層構造として体系化している。この情報要件は判断主体(ロボット/人)に依存しない共通の情報基盤として定義される点に特徴がある。第9章では、この情報要件をもとに、インターフェース仕様への展開に向けた考え方と論点を整理している。

本報告書において実際に活用を想定している内容は主にこのブロックであり、特に第8章は今後の仕様検討やシステム設計の出発点となるものである。

## ■ 第10章(まとめと今後の課題)

本章では、本WGの成果を総括するとともに、情報要件の具体化やインターフェース仕様への落とし込みに向けた課題を整理している。特に、次年度以降に予定している仕様検討に向けた論点を提示しており、本報告書を起点とした今後の活動の方向性を示す位置づけとなっている。

### 1.5.3. 読者別の読み方の例

本書は対象読者の関心に応じて、以下のような読み方を想定している。

- **全体像を把握したい読者**

第2章～第3章を起点として、第8章および第10章を中心に読むことで、本WGの問題意識と成果の概要を把握することができる。

- **技術的な構造を理解したい読者**

第4章～第7章を通読することで、自律ロボットにおける課題構造および必要な機能の体系を理解することができる。

- **実装・仕様検討に関わる読者**

第8章および第9章を中心に読むことで、情報要件およびインターフェース設計に関する論点を把握することができる。必要に応じて、第4章～第7章を参照することで背景理解を補うことが望ましい。

### 1.5.4. 本書の読み進め方に関する補足

第4章～第7章は概念的な整理を目的としているため、内容が抽象的に感じられる場合がある。この場合は、第8章を先に参照し、「どのような情報が必要とされているか」という観点から読み返すことで、理解が容易になる場合がある。

また、第8章以降は比較的独立性が高いため、目的に応じて先に参照することも可能である。

# 本書の構成と読み方ガイド

## 第1～3章

### 背景と基本的考え方

人とロボットの協調関係 自律ロボットの定義  
半自律の概念

## 第4～7章

### 課題構造と機能の整理

不確実性・失敗の分類 エラー検知・リカバリ  
エラー予測・回避 人の介入・遠隔操作

## 第8～9章

### 本WGの検討成果

情報要件（4階層構造）  
インターフェース仕様への示唆

## 第10章

### まとめと今後の課題

成果の整理 残された課題 次年度の展望

読み進める流れ

読者別おすすめルート

### 全体像を把握したい読者

第1～3章 → 第8章 → 第10章

問題意識と成果の概要を効率的に把握

### 技術的な構造を理解したい読者

第4～7章 を通読

課題構造・機能の体系を深く理解

### 実装・仕様検討に関わる読者

第8～9章（→ 第4～7章で補完）

情報要件とインターフェース設計の論点を把握

💡 補足：第4～7章が抽象的に感じられる場合は、第8章を先に読むと理解しやすい。第8章以降は比較的独立しており、目的に応じて先読み可。

## 2 人とロボットの協調関係の整理

### 2.1 背景：なぜ人とロボットの協調が必要か

近年、製造業においては多品種少量生産や変種変量生産への対応が求められており、従来の大量生産を前提とした自動化手法では対応が困難な場面が増えている。このような状況において、環境を厳密に整備し、事前に定義された動作を繰り返す従来型の産業用ロボットだけでは、柔軟性と経済性の両立が難しい。

一方で、人は環境の変化や不確実性に対して柔軟に対応する能力を有しており、状況に応じた判断や例外処理を行うことができる。このため、ロボットによる自動化を高度化するにあたっては、人とロボットがそれぞれの特性を活かしながら協調することが重要となる。

本ワーキンググループ(以下、本WG)では、このような背景のもと、人とロボットが協調して作業を行うための構造を整理し、特に自律ロボットにおける協調のあり方について検討を行った。

### 2.2 従来の産業用ロボットにおける役割分担

従来の産業用ロボットシステムにおいては、人とロボットの役割分担は比較的明確である。すなわち、人は作業設計やティーチング、異常時の対応などを担い、ロボットはあらかじめ定義された動作を高精度かつ繰り返し実行する役割を担ってきた。

この構造では、ロボットは基本的に「実行主体」として機能し、「判断」は人が事前に行うことを前提としている。そのため、ロボットの動作は環境や対象物が一定であることを前提として最適化されており、想定外の事象に対する対応能力は限定的である。

また、異常が発生した場合には、ロボットは停止し、人が現場で状況を確認したうえで復旧作業を行うという運用が一般的である。このような構造は高い安定性と安全性を確保しやすい一方で、柔軟性や運用効率の面で課題を有している。

### 2.3 自律ロボットの必要性と従来の産業用ロボットとの比較

この課題に対して、センシング情報に基づいて環境や対象物の状態を認識し、その場で動作を生成・調整できるロボット、すなわち「自律ロボット」の導入が有効であると考えられる。自律ロボットは、環境変動や不確実性に対応しながら作業を継続できるため、従来の自動化手法に比べて柔軟性の高いシステム構築が可能となる。

従来の産業用ロボットは、高い繰り返し精度と安定性を特徴としており、あらかじめ設計された環境と工程のもとで、高効率な生産を実現してきた。一方で、その性能は環境の事前整備やティーチングに大きく依存しており、対象物や作業条件の変動に対する適応能力は限定的である。

これに対し、自律ロボットは、センサを用いて環境や対象物の状態を把握し、その情報に基づいて動作を生成する点に特徴がある。さらに、作業実行中に得られる情報をもとに、動作の修正や再計画を行うことで、不確実性の影響を低減しながら作業を継続することが可能である。

また、従来のロボットシステムでは、異常発生時には人が現場で対応することが前提となっていたが、自律ロボットにおいては、異常の検知やリカバリの一部をロボット自身が担うことが期待される。この点において、両者は単なる機能拡張ではなく、システム構成や運用の考え方において本質的な違いを有している。

以下の表は、本WGにおいて従来の産業用ロボットに対して自律ロボットの望ましいあり方に関して比較した議論の結果をまとめたものである。

表1 従来の産業用ロボットと自律ロボットの比較

比較項目	従来の産業用ロボット	自律ロボット（今後普及を想定）	考え方
① 作業対象・環境条件	・対象物・位置・姿勢・照明が固定前提 ・治具や供給装置で環境を整備	・ばらつき・変動を許容 ・周辺環境や対象認識込みで動作	「環境を整えるロボット」から 「環境に適応するロボット」へ転換
② 教示・プログラミング方法	・ティーチングペンダント ・オフラインプログラム ・事前固定軌道	・自然言語/GUI/例示学習 ・実演・模倣・目的指示型	「軌道を教える」から 「目的を伝える」に変化
③ センサ・外部情報の扱い	・補助的（例外検知・簡易補正） ・最小限の使用	・必須要素（認識・判断・状態推定） ・視覚・力覚・環境連携	センサが「安全装置」から 「行動判断の中核」へ格上げ
④ 判断・制御の主体	・コントローラが命令を忠実実行 ・判断機能なし	・ロボット／人／外部AIが状況に応じて分担	「命令実行機械」から 「判断主体を含む協調要素」へ
⑤ 柔軟性・変更対応力	・変更＝再ティーチング・治具改造 ・工程適応力が低い	・環境変動・作業変更に対応可能 ・再学習・認識・再指示で対応	「固い生産設備」から 「再構成可能セル」へ
⑥ 想定ユーザ・必要スキル	・専門技術者・Sterが前提	・現場作業員・運用担当も直接操作可能	専門職限定→非専門人材も利用可能

これらの検討に基づいて、次章では本WGにおける「自律ロボット」を定義し考察する。

## 3 本WGにおける「自律ロボット」の定義

### 3.1 本WGにおける「自律」の定義

本WGでは、「自律ロボット」を以下のように定義する。

あらかじめ定義された作業を対象として、センシングに基づき動作を生成・実行し、実行中に生じる不確実性や失敗に対して、人の即時介入なしに作業完遂を目指して振る舞いを調整できる能力を有するロボット

この定義において重要な点は以下の通りである。

第一に、対象とする作業はあらかじめ定義されていることを前提とする。本WGでは汎用的な知能の実現を目的とするものではなく、特定の作業領域において実用的な自律性を実現することを目指している。

第二に、自律性は単に動作を生成する能力にとどまらず、実行中の不確実性や失敗に対して適応的に振る舞う能力を含む。すなわち、失敗の検知や予測、およびそれに基づく回避やリカバリは、自律性の重要な構成要素である。

第三に、すべての機能をロボット単体で実現することを必須とはしない。作業監視システムや遠隔制御システムなどの外部システムが機能の一部を担う構成も含めて、「自律ロボットシステム」として捉える。

なお、上述の通り「自律ロボット」は「センシングに基づいて状態を把握し、その情報に応じて動作を生成・実行する主体」であるが、「自律ロボットシステム」は「動作主体であるロボットに加えて、作業監視、遠隔判断、遠隔操作、情報共有等を担う外部システムまで含む全体」を意味する。

### 3.2 自律ロボットにおける協調の考え方

本WGで対象とする自律ロボットは、従来のように人がすべての判断を事前に与えるのではなく、ロボット自身が一定の判断を行うことを前提としている。その結果、人とロボットの関係は「事前に完全に役割を分離する構造」から「状況に応じて役割を分担・移行する構造」へと変化する。

すなわち、通常時にはロボットが自律的に作業を実行しつつ、不確実性の増大や判断の困難性が高まった場合には人が介入して判断を補完する、といった協調が求められる。このような構造においては人とロボットの役割は固定的なものではなく、状況に応じて動的に変化するものとして捉える必要がある。

### 3.3 判断・制御・実行の分担構造

本WGでは、人とロボットの協調関係を整理するために、作業に関わる機能を「判断」「制御」「実行」の3つに分解して捉える枠組みを採用した。

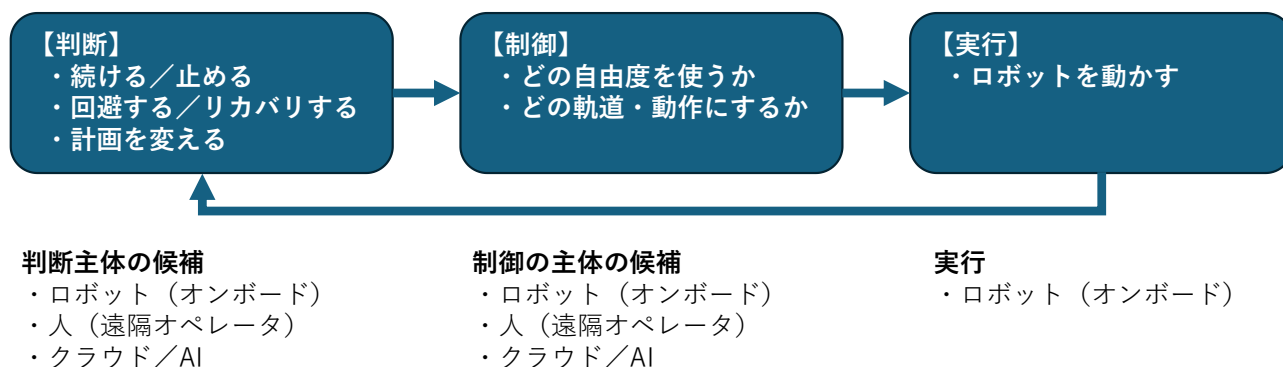


図1 作業に関わる機能の分解

- **判断**：作業を継続するか停止するか、回避やリカバリを行うかなど意思決定
- **制御**：具体的な動作や軌道、パラメータの選択および生成
- **実行**：ロボットのハードウェアを動作させる行為

従来の産業用ロボットでは、「判断」は主に人が担い、「制御」と「実行」をロボットが担う構造であった。一方、自律ロボットにおいては、「判断」の一部をロボットが担うようになり、さらに状況に応じて人や外部システムが判断に関与することも想定される。

このように、「判断」「制御」「実行」の各機能について、どの主体(ロボット、人、外部システム)が担うのかを明確にし、かつその分担を状況に応じて切り替えることが、協調関係を設計する上で重要となる。

### 3.4 「半自律」という概念の整理

本WGでは、自律ロボットと人の協調関係を表現する概念として「半自律」という用語を用いる。この「半自律」とは、判断および制御の責務を複数の主体で分担する構造を意味する。すなわち、半自律とは「どの判断を誰が担うか」「どのタイミングでその責務を移行するか」を設計する問題であり、単一のモードとして固定的に定義されるものではない。

例えば、ロボットが通常時の作業を自律的に実行しつつ、失敗の兆候が検出された場合には一時停止して人に判断を委ねる、あるいは遠隔からの指示に基づいて動作を継続するといった構造が考えられる。このとき、ロボットは安全確保のための最低限の制約を維持しつつ、人は高次の判断を担うことになる。

このような半自律の考え方は、自律ロボットの実用化において不可欠であり、不確実性の高い環境においても作業の継続性と安全性を両立するための基本的な枠組みである。

### 3.5 自律ロボットのレベル

自動車の自動運転ではレベルという概念が広く共有され受け入れられており、機械(コンピュータ)による支援が全くないレベル0から全領域・全条件で完全に自動であるレベル5までが技術分類として定義されている。同様に自律ロボットの自律能力に関しても複数のレベルが存在するとして整理することが有効であると考え、本WGでは、自律性を段階的に実現するための枠組みとして、以下のようなレベル分けを行った。

表2 自律ロボットのレベル

自律レベル	機能	内容	事例やコメント
レベル0	前提条件としての環境設計	<ul style="list-style-type: none"><li>可動範囲の限定・制限・障害物がないことの保証</li><li>あらかじめ決められた軌道を動く</li></ul>	これは自律ではない (広い意味では自律の場合もある)
レベル1	知覚に基づく動作生成	<ul style="list-style-type: none"><li>センシングによる位置姿勢推定</li><li>動作経路の自動生成</li></ul>	ビジョンピッキング 現行の産ロボ
レベル2	実行中の状態評価と適応	<ul style="list-style-type: none"><li>失敗の予兆検知</li><li>パラメータ変更による失敗の回避</li><li>再計画 (同一タスク内)</li></ul>	<b>失敗の予測と回避</b> <b>失敗検知・リカバリ</b>
レベル3	タスク構造の再構成	P&Pに邪魔なものをどかす (P&Pの後で戻す) 扉の開閉 (メンテナンスなど) 手順そのものを組み替える	タスク構造やビヘイビアツリーの作成など

自律の階層構造：レベル2までを議論の対象とした

まず、基本的な自律レベル(自律レベル1：知覚に基づく動作生成)として、センシング情報に基づいて対象物の位置・姿勢を認識し、それに応じて動作を生成する機能が挙げられる。従来の産業用ロボットにおけるビジョンピッキングシステムはこのレベルに相当する。

これに対して次のレベル(自律レベル2)として、作業実行中の状態を評価し、異常や失敗の兆候を検知・予測し、それに応じて動作を修正する機能を持つものとした。未知の状況や環境においても安定に作業を実現できる能力としての自律機能である。本WGではこの機能を主に議論の対象とした。

さらに、状況に応じて作業手順を変更するような高度な計画機能も考えられるが(自律レベル3)、本WGではこのレベルの整理は行わなかった。

### 3.6 本年度の検討対象範囲(Pick & Place に限定した議論)

本WGでは、議論の具体性と実用性を確保するために、対象とする作業をPick & Placeに限定して検討を行った。Pick & Placeは、産業用ロボットにおいて広く用いられている基本的な作業でありながら、対象物のばらつきや環境条件の変化に起因する不確実性を多く含んでおり、自律ロボットの適用事例として適切であると考えたためである。

また、Pick & Placeは、把持・搬送・配置といった複数の作業の段階から構成され、それぞれの段階において異なる失敗モードが存在する。ここでいう「失敗モード」とは、把持・搬送・配置といった各段階に生じる、ロボットの動作結果が望ましくない状態の類型を意味する。このため、自律ロボットに求められる検知・予測・リカバリの機能を体系的に議論するための適切な題材である。

さらに、本WGでは自律の階層のうち主として以下の範囲を対象としている。

- センシングに基づく動作生成 (自律レベル1)
- 実行中の状態評価と適応(失敗の検知・予測・リカバリ：自律レベル2)

一方で、複雑な作業計画の自動生成や、未知タスクへの対応といった高レベルの自律機能については、本年度の検討対象外とした。このように検討範囲を明確に限定することで、現実の産業応用に資する具体的な議論を行うことを目指した。

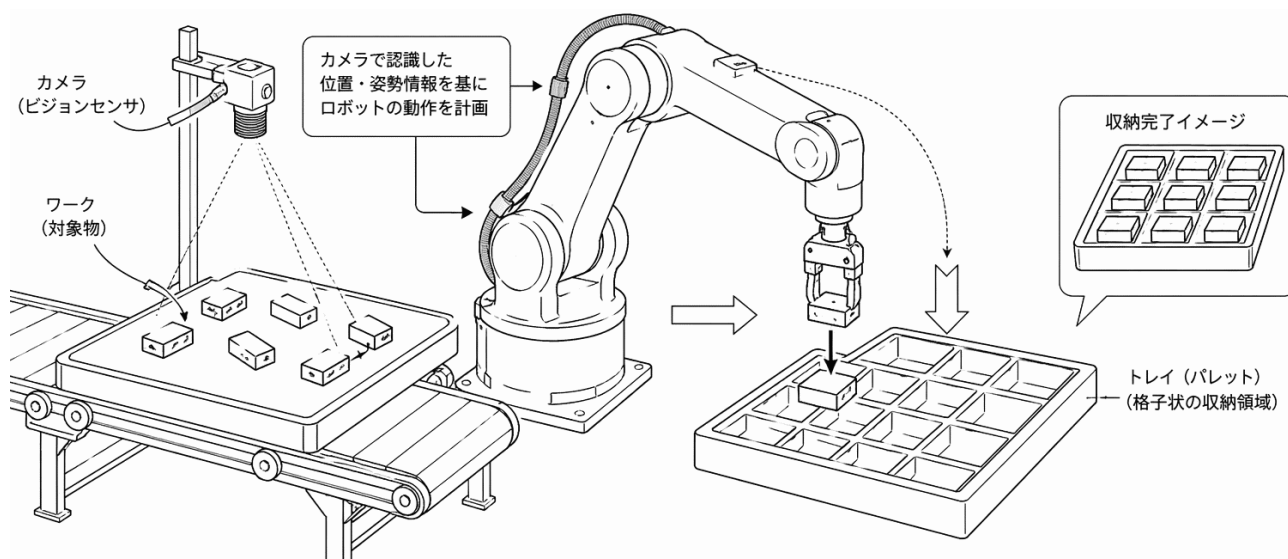


図2 Pick & Place の全体システム構成イメージ

## 4 自律動作における課題と要件

### 4.1 自律動作における不確実性と失敗

第3章で定義した自律ロボットは、センシングに基づいて動作を生成し、実行中の状態に応じて振る舞いを調整する能力を有する。しかし、実環境における作業には多様な不確実性が存在し、それらが自律動作の成立を困難にしている。

不確実性の要因としては、対象物の位置や姿勢のばらつき、形状や物性の個体差、環境条件の変動（照明、障害物、人の介入など）、さらにはセンサの誤差や認識の不確実性などが挙げられる。これらの要因は単独で存在するだけでなく、複合的に作用することで、動作の失敗や品質低下を引き起こす。

従来の産業用ロボットでは、これらの不確実性を事前に排除または低減することで、安定した動作を実現してきた。一方で、自律ロボットにおいては、不確実性の存在を前提とし、それに対応しながら作業を継続することが求められる。このため、自律ロボットの設計においては、「失敗が発生し得ること」を前提とし、その検知、予測、および対処の仕組みを組み込むことが不可欠である。

### 4.2 失敗の分類(要因・状態・結果)

自律ロボットにおける失敗を適切に扱うためには、失敗を一様なものとして捉えるのではなく、その構造を整理することが重要である。本WGでは、失敗を「要因」「状態」「結果」の3つの観点から分類する枠組みを採用した。

- **要因 (Cause)**：失敗を引き起こす根本的な原因  
例：認識誤差、把持条件の不適合、環境変動など
- **状態 (State)**：失敗に至る過程で生じる中間的な状態  
例：把持不安定、姿勢ずれ、接触状態の異常など
- **結果 (Outcome)**：顕在化した失敗事象  
例：落下、衝突、破損、作業未完了など

このように分類することで、単に結果としての失敗を検出するだけでなく、その前段階にある状態や要因に着目した対応が可能となる。特に、自律ロボットにおいては、結果が発生する前の段階で異常を検知し、適切な対処を行うことが重要である。

### 4.3 動作の段階と失敗(Pick & Place における整理)

Pick & Place は、複数の状態遷移から構成される典型的なマニピュレーションタスクである。本WGでは、この作業をいくつかの段階(例：未把持、把持直前、把持成立、搬送中、配置直前、解放後など)に分解し、それぞれの段階において想定される失敗を整理した。

例えば、把持直前の段階では対象物の認識誤りや位置ずれが問題となり、把持成立後の搬送中には把持の不安定性や外乱による姿勢変化が失敗につながるリスクとなる。また、配置時には接地判定の誤りや位置精度不足が失敗につながる要因となる。

このように、段階ごとに発生し得る失敗の種類やその原因は異なるため、それぞれの段階に応じた検知・予測・対処の仕組みを設計する必要がある。

さらに、状態遷移の連続性を考慮すると、ある段階における小さな逸脱が、次の段階で重大な失敗として顕在化する場合もある。このため、単一の時点での判断だけでなく、時間的な変化や傾向を捉えることも重要となる。

### 4.4 自律ロボットに求められる基本機能(検知・予測・回避・リカバリ)

前節までの整理を踏まえ、本WGでは、自律ロボットもしくは自律ロボットシステムが不確実性の下で作業を継続するために必要な基本機能として、以下の4つを整理した。

#### (1)エラー検知

現在の状態が想定された範囲から逸脱していることを認識する機能である。これは、センサ情報や推定された状態をもとに、作業の成立条件との整合性を評価することによって実現される。

#### (2)エラー予測

現時点では問題が顕在化していないものの、将来的に失敗に至る可能性を評価する機能である。これは、状態の変化傾向や不確かさの増大、余裕度(6.2章参照)の低下などをもとに判断される。

#### (3)回避

予測されたリスクに対して、失敗を未然に防ぐために動作や条件を変更する機能である。例えば、把持条件の調整や経路の再計画などが含まれる。

#### (4)リカバリ

失敗が発生した、またはその直前の状態において、作業を継続可能な状態へ戻すための機能である。再試行、動作の変更、人へのエスカレーションなどが含まれる。

これらの機能は独立したものではなく、相互に関連しながら動作する。特に、検知と予測は判断の基盤となり、回避とリカバリはそれに基づく行動として位置づけられる。また、これらの機能の一部または全部をロボットが担うのか、人や外部システムが担うのかは、状況やシステム設計に依存する。この点は第2章で述べた「半自律」の枠組みと密接に関係している。

## 4.5 本章のまとめ

本章では、自律ロボットが直面する不確実性と失敗の構造を整理し、それに対応するために必要な基本機能として、「エラー検知」「予測」「回避」「リカバリ」の4つを提示した。これらの機能は自律ロボットの信頼性と実用性を支える中核的な要素であり、単なる動作生成能力に加えて、実行中の状態を評価し適応的に振る舞うために不可欠である。

次章以降では、これらの機能のうち、まずエラー検知とリカバリに焦点を当て、その成立条件や設計上の論点について詳細に検討する。

## 第4章 自律動作における課題と要件

### ① 自律動作における不確実性と失敗 (4.1節)

	従来の産業用ロボット	自律ロボット
不確実性への対応	事前に排除・低減	存在を前提として継続
異常発生時	停止→人が現場対応	検知・予測・対処を内包
設計前提	環境・条件を固定化	変動・逸脱を許容する

主な不確実性要因：

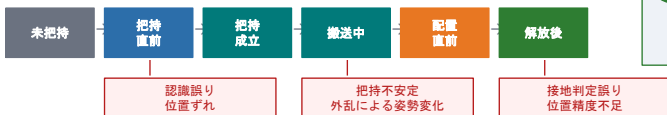
対象物のばらつき	環境条件の変動	センサ誤差・認識不確実性
----------	---------	--------------

### ② 失敗の分類 (要因・状態・結果) (4.2節)

要因 Cause	状態 State	結果 Outcome
根本的な原因 例：認識誤差・把持条件不適合・環境変動	失敗に至る中間状態 例：把持不安定・姿勢ずれ・接触異常	顕在化した失敗事象 例：落下・衝突・破損・作業未完了

結果が発生する前の段階で異常を検知し対処することが自律ロボットの重要な設計要件

### ③ 状態遷移と失敗の関係 — Pick & Place (4.3節)



### ④ 自律ロボットに求められる4つの基本機能 (4.4節)

**① エラー検知**  
*Error Detection*

現在状態が成立条件から逸脱していることを認識  
センサ情報・推定状態と成立条件の整合性を評価

→ 第5章で詳述

**② エラー予測**  
*Error Prediction*

問題が顕在化する前に将来的な失敗可能性を評価  
状態変化傾向・余裕度低下・不確かさ増大をもとに判断

→ 第6章で詳述

**③ 回避**  
*Avoidance*

予測されたリスクに対して動作・条件を変更し失敗を未然に防ぐ  
把持条件の調整・経路の再計画など

→ 第6章で詳述

**④ リカバリ**  
*Recovery*

失敗発生時または直前の状態から作業継続可能な状態へ戻す  
再試行・動作変更・人へのエスカレーションなど

→ 第5章で詳述

検知・予測 = 判断の基盤    回避・リカバリ = それに基づく行動  
 どの機能をロボット/人/外部システムが担うかは「半自律」の設計による  
 (第2章・第7章参照)

## 5 エラー検知とリカバリ

### 5.1 エラー検知の考え方

自律ロボットが作業を安定して継続するためには、現在の状態が想定された範囲内にあるかどうかを継続的に評価し、逸脱を早期に検知することが不可欠である。本WGでは、このような評価を「エラー検知」と位置づける。

エラー検知は単なるセンサ値の閾値判定ではなく、「現在の作業状態が成立しているかどうか」を判断するプロセスである。すなわち、あらかじめ定義された作業の成功条件や制約条件と、観測された状態との整合性を評価することによって成立する。

### 5.2 状態推定・確信度・逸脱判定

エラー検知を成立させるためには、単にセンサ値を取得するだけでは不十分であり、それらをもとにした状態評価の枠組みが必要となる。本WGでは、エラー検知を構成する要素として、以下の3点が重要であると整理した。

#### (1) 状態推定 (State Estimation)

ロボット、対象物、環境の状態を推定することである。例えば、ロボットの関節状態、エンドエフェクタの位置・姿勢、把持状態、対象物の位置・姿勢や運動状態などが含まれる。これらは複数のセンサ情報を統合することで得られる場合も多い。

#### (2) 確信度 (Confidence)

推定された状態がどの程度信頼できるかを示す指標である。センサのノイズ、視認性の低下、追跡の不安定さなどにより、状態推定には不確実性が伴う。このため、単に状態を推定するだけでなく、その推定結果の信頼性を定量的または定性的に評価することが重要である。

#### (3) 逸脱判定 (Deviation Judgment)

推定された状態が、現在の作業において許容される範囲内にあるかどうかを判断することである。これは、作業の成功条件や品質要求、禁止事項などと照らし合わせて評価される。

これら3つの要素が組み合わさることで、エラー検知は初めて意味を持つ。すなわち、「何が起きているか(状態推定)」「それをどれだけ信じてよいか(確信度)」「許容範囲内かどうか(逸脱判定)」を一体として扱う必要がある。

### 5.3 リカバリの基本構造(トリガ・手段・目標状態)

エラー検知によって異常が認識された場合、次に必要となるのがリカバリである。本WGでは、リカバ리를「作業を継続可能な状態へ戻すための行動」と定義する。リカバリは以下の3つの要素から構成される。

#### (1) トリガ (Trigger)

リカバ리를開始する契機である。これは、エラー検知によって逸脱が確認された場合や、確信度の低下、あるいは人からの介入要求などによって発生する。

#### (2) 手段 (Action)

リカバ리를実現するための具体的な行動である。代表的な手段としては、再試行、動作パラメータの変更、経路の再計画、退避動作の実行、あるいは人へのエスカレーションなどが挙げられる。

#### (3) 目標状態 (Target State)

リカバリによって到達すべき状態である。これは必ずしも元の状態への完全な復帰を意味するものではなく、「作業を安全かつ継続可能な状態」に戻すことを指す。

このように、リカバリは単なる「やり直し」ではなく、現在の状態と目的に応じて柔軟に設計されるべきものである。

### 5.4 リカバリとリスクアセスメントの関係

リカバ리의設計においては、安全との関係を明確にすることが重要である。本WGでは、リカバリとリスクアセスメントは密接に関連しつつも、異なる性質を持つものとして整理した。

リスクアセスメントは、危険状態に至らないように人が事前に条件や制約を定める「規範的」な活動であり、主に設計時や評価時に実施される。一方、リカバリは、実行中に発生した異常に対して動的に対応する「行動的」なプロセスである。すなわち、リスクアセスメントは「どこまでが許容されるか」という境界を定めるものであり、リカバリは「その境界に近づいた、あるいは一部を逸脱した場合にどう対処するか」を扱うものである。

このように両者を区別することで、安全に関する議論と、自律動作における適応的な振る舞いの議論を整理して扱うことが可能となる。

### 5.5 自律リカバリと人の介入の境界

すべてのリカバ리를ロボットが自律的に実行できるとは限らない。特に、不確実性が高い状況や、複数の選択肢の中から判断が必要な場合には、人の介入が有効となる。このため、どの範囲までをロボットが自律的に対応し、どの段階で人に判断を委ねるかを設計することが重要である。本WGでは、この境界は固定的なものではなく、状況や確信度に応じて動的に変化するものとして捉える。

例えば、軽微な逸脱であればロボットが自動的に補正を行い、より重大な逸脱や不確実性の増大が検知された場合には一時停止して人に判断を委ねる、といった段階的な対応が考えられる。また、人が介入する場合であっても、ロボットは安全確保のための基本的な制約(速度制限や衝突回避など)を維持し続ける必要がある。このような責務分担は、第3章で述べた「半自律」の考え方に対応するものである。

## 5.6 本章のまとめ

本章では、エラー検知とリカバリの基本的な考え方および構造について整理した。エラー検知は、「状態推定」「確信度」「逸脱判定」の組み合わせによって成立し、リカバリは「トリガ」「手段」「目標状態」の観点から構成される。また、リカバリは安全に関するリスクアセスメントとは異なる役割を持ちつつ、密接に関連しており、さらに人との役割分担(半自律)とも深く関係している。

次章では、これらに加えて失敗を未然に防ぐための「エラー予測」と「回避」に焦点を当て、その成立条件と設計上の論点について検討する。

## 第5章 エラー検知とリカバリ

### ① エラー検知の3要素 (5.2節)

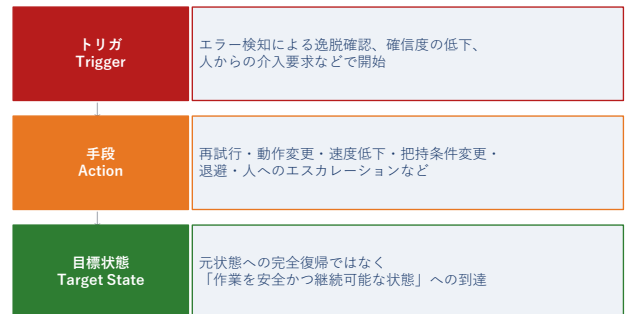
エラー検知 = 単なる閾値判定ではなく「作業成立性の評価」



= 「何が起きているか」「どの程度信頼できるか」「許容範囲内か」を一体として判断

### ② リカバリの基本構造 (5.3節)

リカバリ = 「作業を継続可能な状態へ戻すための行動」



### ③ リカバリとリスクアセスメントの関係 (5.4節)

	リスクアセスメント	リカバリ
性格	規範的 (境界を定める)	行動的 (動的に対処する)
タイミング	設計時・評価時	実行中 (リアルタイム)
役割	「どこまでが許容か」を定義	「逸脱時にどう対処するか」を実行

### ④ 自律リカバリと人の介入の境界 (5.5節)

軽微な逸脱 → ロボットが自律補正 / 重大な逸脱・不確実性増大 → 停止して人に委ねる  
境界は固定ではなく、状況・確信度に応じて動的に変化

## 6 エラー予測と回避

### 6.1 予測の必要性と位置づけ

第5章で述べたエラー検知とリカバリは、異常が顕在化した後、または顕在化直前の状態に対処するための機能である。一方で、より高い信頼性と作業継続性を実現するためには、失敗が発生する前の段階でその兆候を捉え、未然に対処することが重要となる。本WGでは、このような機能を「エラー予測」と位置づける。エラー予測とは、現在の状態およびその変化傾向に基づいて、将来的に失敗に至る可能性を評価するプロセスである。

エラー検知が「現在の状態が許容範囲内かどうか」を判断するのに対し、エラー予測は「将来的に許容範囲を逸脱する可能性があるかどうか」を評価する点に特徴がある。このため、予測は時間的な広がりを持った判断であり、単一時点の情報だけでなく、状態の変化や不確かさの推移を考慮する必要がある。

### 6.2 余裕度(マージン)の概念

エラー予測の中核となる概念の一つが「余裕度(マージン)」である。余裕度とは、現在の状態が許容範囲の境界からどの程度離れているかを示す指標であり、いわば「安全マージン」や「成立余裕」として捉えることができる。例えば、以下のような余裕度が考えられる。

- **把持余裕**：必要な把持力に対する余裕、滑りに対する安定性
- **衝突余裕**：障害物や人との最小距離
- **可到達余裕**：関節限界や特異点までの距離
- **停止余裕**：現在の速度に対して安全に停止できる距離
- **時間余裕**：作業完了までの残時間

これらの余裕度が十分に大きい場合には作業は安定していると判断できるが、余裕度が小さくなるにつれて、失敗に至るリスクが高まる。したがって、エラー予測においては、これらの余裕度を定量的または定性的に評価し、その変化を監視することが重要となる。

### 6.3 不確かさの成長とリスク

エラー予測においては、余裕度だけでなく「不確かさ」の観点も重要である。状態推定には必ず不確実性が伴い、その大きさは時間とともに変化する。

例えば、対象物がセンサの視野から外れる、照明条件が変化する、あるいは対象物が揺れるといった状況では、状態推定の精度が低下し、不確かさが増大する。このような不確かさの増大は、たとえ現在の状態が許容範囲内にあったとしても、将来的な失敗のリスクを高める要因となる。したがって、エラー予測においては、単に現在の推定値だけでなく、その信頼性やばらつき、さらにはそれらがどのように変化しているかを評価する必要がある。特に、「余裕度が減少している」かつ「不確かさが増大している」状況は、失敗に至る可能性が高い状態であり、早期の対応が求められる。

## 6.4 失敗モードとその兆候

エラー予測を実現するためには、どのような失敗が起こり得るのか、すなわち「失敗モード」に関する知識が重要となる。失敗モードとは、作業中に発生し得る典型的な失敗のパターン(類型)であり、それぞれに対応する兆候が存在する。

例えば、Pick & Placeにおいては、以下のような失敗モードが考えられる。

- 対象物の認識失敗
- 把持不良(未把持, 多重把持, 滑り)
- 搬送中の姿勢崩れ
- 衝突・干渉
- 過大力による損傷

これらの失敗モードに対しては、それぞれ特有の兆候が存在する。例えば、滑りに関しては微小な振動や接触状態の変化、姿勢崩れに関しては角度や位置の変動傾向などが挙げられる。このような兆候をあらかじめ整理し、それに基づいて現在の状態がどの失敗モードに近づいているかを評価することで、より精度の高い予測が可能となる。

## 6.5 予測に基づく回避行動の設計

エラー予測の目的は、単に失敗するリスクを把握することではなく、それに基づいて適切な回避行動を選択することである。回避行動とは、失敗を未然に防ぐために、動作や条件を変更することである。代表的な回避行動としては、以下が挙げられる。

- 動作パラメータの調整(速度, 加速度, 把持力など)
- 経路や姿勢の変更(障害物回避, 接近角の変更など)
- 認識条件の再設定(視点変更, 再スキャンなど)
- 作業手順の変更(別の把持点の選択など)

これらの回避行動は、予測されたリスクの種類や大きさに応じて選択されるべきであり、そのためには「どのような変更が可能か」をあらかじめ整理しておく必要がある。また、回避行動の選択においては、安全性、品質、作業時間といった複数の評価軸のトレードオフが存在する。このため、単一の最適解を求めるのではなく、複数の選択肢の中から状況に応じて適切なものを選択する枠組みが求められる。

## 6.6 本章のまとめ

本章では、エラー予測と回避の考え方について整理した。エラー予測は、余裕度や不確かさの変化、失敗モードに関する知識に基づいて、将来的な失敗の可能性を評価するプロセスである。また、回避は、その予測結果に基づいて、動作や条件を変更することで失敗を未然に防ぐ機能であり、複数の選択肢の中から状況に応じた判断を行う必要がある。これらの機能は、第5章で述べたエラー検知・リカバリと連携しながら、自律ロボットの信頼性と作業継続性を向上させる役割を担う。

次章では、これらの判断や行動を支える仕組みとして、人の介入および遠隔操作の役割について整理する。

## 第6章 エラー予測と回避

### ① エラー予測の位置づけ (6.1節)

	エラー検知 (第5章)	エラー予測 (第6章)
対象	現在の状態が許容範囲内か	将来的に逸脱する可能性があるか
時間軸	現時点の評価	時間的な変化・傾向を考慮
目的	異常の顕在化を検出	顕在化前に兆候を捉える

### ② 余裕度 (マージン) の概念 (6.2節)

<b>把持余裕</b>	必要把持力への余裕・滑りに対する安定性	<b>停止余裕</b>	現在速度から安全に停止できる距離
<b>衝突余裕</b>	障害物・人との最小距離	<b>時間余裕</b>	作業完了までの残時間
<b>可到達余裕</b>	関節限界・特異点までの距離		

### ③ 不確かさの成長とリスク (6.3節)

<b>△高リスク条件</b>	余裕度が減少している かつ 不確かさが増大している
視野外れ・照明変化・対象物揺れなどにより状態推定精度が低下→たとえ現在が許容範囲内でも将来の失敗リスクが高まる	

### ④ 失敗モードとその兆候 (6.4節)

失敗モード	典型的な兆候
<b>認識失敗</b>	検出スコア低下・視認性の悪化
<b>把持不良 (未把持/多重/滑り)</b>	把持力の変動・接触状態の変化・微小振動
<b>搬送中の姿勢崩れ</b>	角度・位置の変動傾向、重心ずれ
<b>衝突・干渉</b>	衝突余裕の急減・動作不安定
<b>過大力による損傷</b>	接触力・トルクの増大傾向

### ⑤ 予測に基づく回避行動の設計 (6.5節)

<b>動作パラメータ調整</b> 速度・加速度・把持力の変更	<b>経路・姿勢の変更</b> 障害物回避・接近角の変更
<b>認識条件の再設定</b> 視点変更・再スキャン	<b>作業手順の変更</b> 別の把持点の選択など
💡 回避行動の選択には安全性・品質・作業時間のトレードオフがある。複数候補の中から状況に応じて選択する枠組みが必要	

## 7 人の介入と遠隔操作

### 7.1 遠隔介入の必要性

第5章および第6章で述べたように、自律ロボットは「エラー検知」「予測」「回避」「リカバリ」といった機能を備えることで、不確実性の下でも作業を継続することが可能となる。しかし、すべての状況においてロボット単独で適切な判断を行うことは現実的ではない。

特に、不確実性が高い場合や、複数の対応策の中から選択が必要な場合、あるいは品質や安全に関する判断が求められる場合には、人の判断が有効である。このため、自律ロボットシステムにおいては、人が適切なタイミングで介入し、判断や操作を補完できる仕組みを組み込むことが重要となる。

また、現場に常時人が配置されない運用形態(無人化ラインや遠隔監視)を想定した場合には、物理的に離れた場所からの介入、すなわち遠隔介入が不可欠となる。

遠隔介入は、ロボットの自律性を否定するものではなく、自律機能では扱いにくい高不確実性下の判断や、品質・運用上の意思決定を補完するための仕組みとして位置づけられる。したがって、遠隔介入の設計においては、ロボットがどこまでを自律的に担い、どの段階で人へ判断を引き渡すかを明確にすることが重要である。

### 7.2 介入の形態(判断・制御・操作)

人の介入は、その関与のレベルに応じていくつかの形態に分類することができる。本WGでは、第2章で整理した「判断」「制御」「実行」の枠組みに基づき、以下のように整理した。

- **判断への介入**

ロボットが提示する状態や選択肢に基づいて、人が意思決定を行う形態である。例えば、作業の継続可否の判断、回避手段の選択、リカバリ方法の決定などが含まれる。

- **制御への介入**

人がロボットの動作パラメータや目標を指示する形態である。例えば、目標位置の修正、速度や力の調整などが該当する。

- **操作(実行)への介入**

人が直接ロボットを操作する形態であり、いわゆる遠隔操作(テレオペレーション)に相当する。これは最も低レベルの介入であり、ロボットの自律性が十分でない場合や、緊急時の対応として用いられる。

これらの介入形態は排他的なものではなく、状況に応じて組み合わせて用いられる。また、どのレベルまで人が関与するかは、システムの設計や運用方針によって決定される。

判断への介入	作業継続可否・回避手段の決定
制御への介入	目標位置・速度・力の調整指示
操作への介入	遠隔操作（テレオペレーション）

図3 介入の形態(判断・制御・操作)

なお、ここで述べる介入形態は、人がどの機能レベルに関与するかを示す分類であり、次節で述べる運用モードは、その関与を含むシステム全体の状態を表すものである。したがって、介入形態と運用モードは一対一対応ではなく、運用モードの中で複数の介入形態が現れ得る。

### 7.3 モード遷移(自律／停止／遠隔判断／遠隔操作／再自律)

自律ロボットと人の協調を実現するためには、システムの運用状態をいくつかの代表的モードとして定義し、それらのあいだの遷移を整理することが重要である。本WGでは、モードを単なる内部状態としてではなく、誰が判断を担い、誰が制御を担い、どのような条件で作業を継続・停止・復帰するかを表す運用上の状態として位置づける。すなわち、モード定義は、半自律システムにおける責務分担と情報授受の単位を明確にするためのものである。

また、本WGで扱うモード遷移は、作業の継続性と安全性を両立するための枠組みとして理解されるべきである。通常時にはロボットが自律的に作業を遂行しつつ、異常の顕在化、失敗の兆候、不確実性の増大、あるいは人からの指示などに応じて、停止、遠隔判断、遠隔操作へと移行し、必要条件が満たされた場合には再び自律実行へ復帰する。このような遷移を明示的に定義することにより、異常時の振る舞いを場当たりの扱うのではなく、システム設計上の一貫した構造として整理することが可能となる。

本WGで検討を行った各モードの定義およびその詳細を以下に示す。

#### ・自律モード

ロボットが与えられた成立条件および評価基準に基づいて、現在状態を評価し、必要な動作を自律的に選択・実行する状態である。このモードでは、判断および制御の主体は主としてロボット側にあり、通常時の作業遂行はこの状態を基本とする。ただし、自律モードであっても、無制約に動作を許容するものではなく、速度制限、衝突回避、禁止領域回避などの基本的な安全制約は継続的に維持されるべきである。すなわち、自律モードは「人が関与しない状態」ではなく、ロボットが主体となって判断・制御を行う通常運用状態として定義される。

#### ・停止モード

安全確保、状態確認、または後続の判断・介入を可能にするために、ロボットの能動的な作業動作を停止した状態である。停止モードは、異常が検知された場合、将来的な失敗可能性が高まった場合、確信度が低下した場合、あるいは人から停止指示が与えられた場合などに遷移し得る。ここでいう停

止は、単なる「作業中断」を意味するものではなく、後続の遠隔判断、退避、再試行、再自律などへ接続するための中間状態として位置づけられる。したがって、停止モードは、作業断念の宣言ではなく、安全側へ遷移したうえで次の判断を可能とする待機状態として理解されるべきである。

#### ・遠隔判断モード

ロボットが停止状態または低速の保持状態を維持しつつ、人が提示された情報に基づいて、継続可否、対応方針、回避手段、リカバリ方法などを判断する状態である。このモードでは、判断主体は人へ移行するが、制御主体が直ちに全面的に人へ移るわけではない。ロボットは引き続き安全制約を維持し、必要に応じて状態保持や情報提示を行う一方、人は高位の判断を担う。したがって、遠隔判断モードは、遠隔操作よりも一段高いレベルの介入であり、ロボットが候補や状態を提示し、人の中から方針を選択または承認する運用状態として整理される。

#### ・遠隔操作モード

遠隔判断モードに対し、人がロボットの動作に対して直接的な制御入力または操作入力を与える状態である。このモードは、遠隔判断の結果として直接介入が必要と判断された場合や、ロボットの自律的対応では十分でない場合に遷移することが想定される。ここでは、制御および操作の主体は人となるが、それでも速度制限、衝突回避、危険領域制約などの基本的な安全制約はロボット側で維持されることを原則とする。すなわち、遠隔操作モードは、いわゆるテレオペレーションに相当するが、安全制約まで人へ全面移譲するものではなく、人の操作をロボット側の安全の制約(たとえば従来の機械安全や機能安全による安全担保の仕組み)の下で実行する状態として理解される。

#### ・再自律モード

人による判断または操作の介入後に、所定の復帰条件が満たされたことを確認したうえで、ロボットが再び自律モードへ戻る状態である。再自律は、単に人の操作が終わったから直ちに移行するものではなく、少なくとも現在状態が作業継続可能であること、安全条件が満たされていること、必要に応じて人の承認が得られていることなどを前提とする。したがって、再自律モードは、遠隔介入後の復帰手続きを含む運用状態であり、停止・遠隔判断・遠隔操作から自律実行へ戻るための遷移状態として位置づけられる。

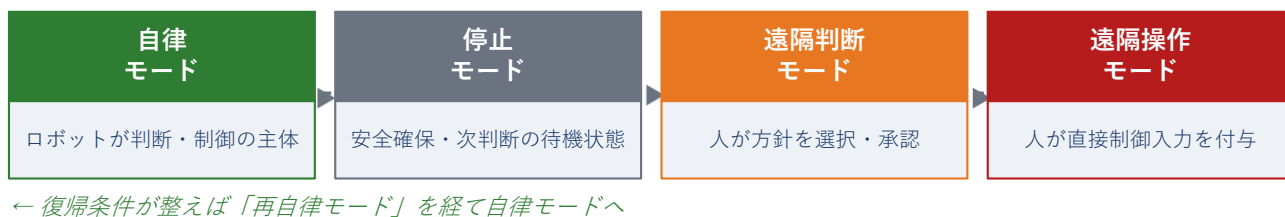


図4 モードの定義

以上の各モードは、互いに独立したものではなく、異常の顕在化、不確実性の増大、人の指示、状態回復などを契機として相互に遷移する。典型的には、自律モードを基本状態とし、異常の検知またはリスク上昇に応じて停止モードへ移行し、必要に応じて遠隔判断モードまたは遠隔操作モードへ遷移する。その後、復帰条件が満たされた場合には再自律モードを経て自律モードへ戻る。このように、モー

ド遷移は、単なる状態遷移図としてではなく、判断主体・制御主体・責務分担の変化を明示する運用設計の枠組みとして捉えることが重要である。

また、本WGにおいては、これらのモードに共通する原則として、安全確保に関する基本制約は、いずれのモードにおいてもロボット側で維持されるべきであるという立場を採る。したがって、自律モードから遠隔操作モードへ移行した場合であっても、安全制約が解除されるわけではない。これは、半自律システムにおいて責務分担を設計する際の基本原則であり、モード定義を運用可能なものとするうえで不可欠である。今後、これらのモードは、情報要件やインターフェース仕様の議論と対応づけながら、どの情報をどのモードで参照し、どの条件で遷移を許容するかという観点から、さらに具体化されることが望まれる。

表3 半自律運用におけるモード定義と主体の役割

モード	定義	判断主体	制御主体	実行主体	主な遷移（例）	備考
自律モード	ロボットが、与えられた成立条件・評価基準に基づいて現在状態を評価し、必要な動作を自律的に選択・実行する状態	ロボット	ロボット	ロボット	作業開始、再自律条件の成立後の復帰など	通常時の基本モードである。安全確保に関する基本制約は継続して維持される
停止モード	安全確保、状態確認、または後続の判断・介入のために、ロボットの能動動作を停止した状態	ロボットまたは人（停止後の後続判断は別モードで実施）	ロボット（停止維持）	ロボットは能動作業を行わず、必要に応じて保持・監視を継続	異常の検知、リスク上昇、確信度低下、人からの停止指示など	停止は最終状態ではなく、退避、遠隔判断、再試行、再自律への中間状態として扱う
遠隔判断モード	ロボットは停止または低速状態を維持しつつ、人が提示情報を参照して継続可否、対応方針、介入方法などを判断する状態	人	ロボット（停止または低速維持）、必要に応じて人が高位指示	ロボット	停止後の判断移行、確信度不足、複数対応策からの選択が必要な場合など	人は主として判断を担い、ロボットは安全制約を維持しながら状態保持と情報提示を行う
遠隔操作モード	人がロボットの動作を直接操作し、必要な制御入力または操作指示を与える状態。	人	人（ただし安全制約はロボット側で維持）	ロボット	遠隔判断の結果、直接介入が必要と判断された場合、または緊急時の手動介入が必要な場合	いわゆるテレオペレーションに相当する。操作主体は人であるが、速度制限・衝突回避等の基本安全制約はロボット側で維持する
再自律モード	人の判断または操作による介入後、所定の復帰条件が満たされたことを確認したうえで、ロボットが再び自律モードへ移行する状態。	復帰可否の最終判断は人またはロボット（設計による）	ロボット	ロボット	遠隔判断または遠隔操作後に、作業継続条件・安全条件・状態整合条件が満たされた場合	単なる「自律へ戻る」ではなく、復帰条件を満たしたことを確認したうえで許容される遷移状態として扱う。

なお、各モードは固定的な機能分離を意味するものではなく、作業条件、異常の程度、確信度、遠隔介入の可否等に応じて動的に移行し得る運用状態として理解することが重要である。

## 7.4 制御権限と責務の定義

前節で定義した各モードは、単なる運用状態ではなく、判断主体、制御主体、実行主体、および安全責務の配分が異なる状態として理解されるべきである。本節では、その違いを制御権限と責務の観点から整理する。

人とロボットが協調して動作するためには、各モードにおける制御権限と責務を明確に定義することが不可欠である。

例えば、自律モードにおいてはロボットが判断および制御の主体となるが、遠隔判断モードでは判断の主体が人に移行し、遠隔操作モードでは制御および実行も人が担うことになる。このような切替においては、「誰が最終的な意思決定権を持つのか」を明確にする必要がある。

また、責務の観点では、安全確保に関する基本的な機能(衝突回避、速度制限など)は、いかなるモードにおいてもロボット側で維持されるべきである。一方で、作業品質や効率に関する判断は、人が担うことが適切な場合も多い。

このように、制御権限と責務を分離して整理することで、人とロボットの協調関係をより明確に設計することが可能となる。

表4 制御権限と責務の定義

モード	判断主体	制御主体	安全制約の維持主体
自律モード	ロボット	ロボット	ロボット (常時維持)
停止モード	ロボット / 人	ロボット (待機)	ロボット (常時維持)
遠隔判断モード	人	ロボット	ロボット (常時維持)
遠隔操作モード	人	人	ロボット (常時維持)

このような責務分担を運用可能なものとするためには、モード情報、権限情報、遷移条件、提示情報等を共通に扱える情報基盤が必要であり、この点は次章で述べる情報要件の整理と密接に関係する。

## 7.5 遠隔介入における課題(遅延・認知負荷・安全)

遠隔介入を実現するにあたっては、いくつかの重要な課題が存在する。まず通信遅延の問題がある。遠隔操作においては、操作入力とロボットの応答の間に遅延が生じるため、精密な操作や迅速な対応が難しくなる。このため、遅延を前提としたインターフェース設計や、ローカルでの自律補助機能が求められる。

次に認知負荷の問題がある。遠隔地からロボットの状態を把握するためには、映像やセンサ情報などを通じて状況を理解する必要があるが、情報の不足や過多は判断の質に影響を与える。このため、必要な情報を適切に提示する仕組みが重要となる。

さらに安全の観点も重要である。人が遠隔から介入する場合であっても、ロボットの動作が安全制約を逸脱しないようにする必要がある。このため、遠隔操作に対しても安全制約を適用する仕組みが求められる。

通信遅延	認知負荷	安全確保
操作入力とロボット応答のタイムラグ。 ローカル側での自律補助機能が必要	情報の不足・過多が判断の質に影響。 必要情報を適切に提示する設計が重要	遠隔操作時もロボット側で安全制約を維持。 速度・衝突回避・禁止領域は常時有効

図5 遠隔介入における課題

これらの課題は、単に通信やインターフェースの問題にとどまらず、システム全体の設計に関わる重要な論点である。

これらの課題は、単に通信やUIの問題ではなく、どの情報をどの粒度で提示するか、どのモードでどの主体が判断・制御を担うか、どの安全制約をローカル側で維持するかといった情報要件およびインターフェース設計の問題と密接に関係する。

## 7.6 本章のまとめ

本章では、自律ロボットにおける人の介入および遠隔操作の役割について整理した。人の介入は、自律機能を補完し、不確実性の高い状況における判断や対応を可能にする重要な要素である。また、介入の形態、モード遷移、制御権限と責務の定義といった観点から、半自律システムとしての設計の枠組みを示した。さらに、遠隔介入に特有の課題として、通信遅延、認知負荷、安全性の問題を指摘した。

これらのモード遷移と責務分担を実運用上成立させるためには、各主体が共通に参照できる情報基盤と、介入に必要な情報の整理が不可欠であり、この点は次章で述べる情報要件の整理に直接つながる。

次章では、これまでに整理したエラー検知、予測、回避、リカバリ、および人の介入といった機能を支える基盤として、「情報要件」の観点から必要な情報の種類と構造について整理する。

## 第7章 人の介入と遠隔操作

### ① 介入の形態 (7.2節)

判断への介入	作業継続可否・回避手段の決定
制御への介入	目標位置・速度・力の調整指示
操作への介入	遠隔操作 (テレオペレーション)

### ② モード遷移 (7.3節)



### ③ 制御権限と責務の定義 (7.4節)

モード	判断主体	制御主体	安全制約の維持主体
自律モード	ロボット	ロボット	ロボット (常時維持)
停止モード	ロボット / 人	ロボット (待機)	ロボット (常時維持)
遠隔判断モード	人	ロボット	ロボット (常時維持)
遠隔操作モード	人	人	ロボット (常時維持)

### ④ 遠隔介入における課題 (7.5節)

<b>通信遅延</b> 操作入力とロボット応答のタイムラグ。 ローカル側での自律補助機能が必要	<b>認知負荷</b> 情報の不足・過多が判断の質に影響。 必要情報を適切に提示する設計が重要	<b>安全確保</b> 遠隔操作時もロボット側で安全制約を維持。 速度・衝突回避・禁止領域は常時有効
---	---	--

## 8 情報要件の整理

### 8.1 情報要件の基本的な考え方

第5章から第7章にかけて、自律ロボットに必要な機能として、現在状態の評価、将来リスクの評価、回避、リカバリ、人の介入および遠隔操作の役割を整理してきた。これらの機能は、単にセンサを追加し、動作生成を高度化するだけでは成立しない。重要なのは、

- ・何をもって作業が成立しているとみなすか
- ・現在どのような状態にあるか
- ・その状態をどの程度信頼できるか
- ・このまま継続した場合にどのような事態が起こり得るか
- ・必要に応じて誰がどのように介入するか

を判断できるよう、必要な情報を明示的に定義することである。したがって、本章でいう情報要件とは、個別の実装やセンサ仕様そのものではなく、**判断と行動を成立させるために必要な情報の意味構造に関する要求**を指す。

従来の産業用ロボットでは、環境条件や対象物条件を事前に整備し、異常時には人が現場で状況を確認して対応する運用が一般的であったため、判断に必要な情報の多くは暗黙の前提として扱われてきた。これに対し、自律ロボットでは、不確実性を含む環境のもとで、実行中に状態を評価し、必要に応じて回避、リカバリ、遠隔介入へ接続することが求められる。このため、従来は暗黙的であった評価基準や状態解釈の前提を、情報要件として明示的に整理する必要がある。

なお、本章では用語の混乱を避けるため、以下のように整理する。

- ・「異常」：**通常想定される範囲からの逸脱状態を指す。**
- ・「失敗」：**結果として作業目的や品質要求を満たせない状態、またはそれに至った事象を指す。**
- ・「エラー」：**本報告では主として検知・予測・対処の対象となる異常または失敗の兆候を含む概念として用いる。**

したがって、本章では、現在状態に対する評価では「異常」、作業結果や将来の不達可能性に関する文脈では「失敗」、機能名称や総称としては「エラー」を用いる。

また、本WGでは、自律ロボットをロボット単体の機能としてではなく、人の判断や外部システムを含む「自律ロボットシステム」として捉えている。このため、情報要件はロボット内部だけで完結するものではなく、上位タスク系、監視系、遠隔介入系、人の判断支援系などの間で共有されるべき情報構造として定義する必要がある。特に半自律運用では、ロボットが自律的に判断する場合と、人が(遠隔から)判断する場合とで、参照する情報の意味が一致していなければ、責務分担やモード遷移の整合性が保てない。したがって、情報要件は、判断主体に依存しない共通情報基盤を形成するための要件として位置づけることが重要である。

さらに、情報要件を整理することは、今後のインターフェース仕様化および標準化に向けた出発点でもある。必要な情報の意味構造が定まれば、どの主体がその情報を生成し、どの主体が利用し、どの粒

度・更新頻度・信頼性で共有すべきかという論点を整理しやすくなる。逆に、必要な情報の意味構造が曖昧なままでは、システム間の役割分担も、標準化対象と競争領域の切り分けも困難となる。本章では、この観点から、自律ロボットに必要な情報を判断するための要件を整理し、その基本構造を明らかにする。

## 8.2 情報要件の4階層構造

前節で述べたように、自律ロボットに必要な情報要件は、単なるデータ項目の列挙ではなく、**判断と行動を成立させるために必要な意味構造**として捉える必要がある。これを具体的な設計論に落とし込むためには、必要な情報を一括して扱うのではなく、**どの判断段階に用いられる情報なのか**に応じて整理することが重要である。本WGでは、この観点から、情報要件を

**第1階層：成立条件・評価基準**

**第2階層：観測・状態**

**第3階層：予測・リスク**

**第4階層：介入・制御**

の4階層で構成することを提案する。

この4階層構造を採る理由の第一は、**評価基準と観測事実を明確に分離する必要があるため**である。自律ロボットの判断では、対象物が持ち上がっている、所定方向へ移動している、といった観測事実だけでは作業成立性を判断できない。例えば、対象物の変形が許されるか、接触が許容されるか、上物の落下が問題となるかどうかは、タスクや品質要求によって異なる。したがって、「何が起きているか」を表す情報と、「それをどう評価するか」を定める情報は分けて扱う必要がある。この分離がなければ、同一の状態に対してタスク条件ごとに異なる判断を行うことが難しくなる。

第二の理由は、**現在の異常と将来の失敗可能性とでは、判断対象も必要情報も異なるため**である。現在の異常を評価する際には、現在状態とその確信度、そして成立条件に対する逸脱の有無が中心となる。一方、将来の失敗可能性を評価するためには、現在状態に加えて、余裕度、不確かさの成長、状態遷移の見通し、失敗類型への接近といった情報が必要となる。すなわち、「今すでに問題が起きているか」と「このまま進むと問題が起ころうか」は、同じ状態情報を入力にしても、異なる種類の判断である。この区別を曖昧にすると、停止すべき場面と、事前に回避すべき場面の設計が混在しやすくなる。

第三の理由は、**判断結果をどのように行動へ接続するか、さらに誰が責務を担うかを明示する必要があるため**である。自律ロボットでは、現在状態や将来リスクを評価しただけでは意味がなく、その結果に基づいて、速度変更、把持条件変更、経路変更、停止、退避、遠隔照会、遠隔操作への切替などを選択できなければならない。また、その際には、どの主体が判断するか、どの主体が制御するか、どの制約はロボット側で維持されるかといった責務分担が伴う。このため、行動接続と責務分担を扱う情報を、独立した第4階層として整理することが有効である。

この4階層を、判断の流れとして見直すと、その役割はさらに明確になる。まず第1階層(成立条件・評価基準)は「作業が成立しているとはどういうことか」を定める。次に第2階層(観測・状態)は、「現在ど

のような状態にあるか」を意味のある形で記述する。第3階層(予測・リスク)は、「このまま継続すると、どの程度の確からしさでどのような問題が起こり得るか」を表す。そして第4階層(介入・制御)は、「その結果に応じて何を換え、どの主体がどのように対応するか」を定める。このように、4階層は並列的な分類ではなく、

**前提(成立条件・評価基準) → 現在把握(観測・状態) → 将来評価(予測・リスク) → 行動選択(介入・制御)**

という連鎖を構成している。ここに本構造の意義がある。

さらに、この構造は、Pick & Place を題材とした場合にも自然に対応している。例えば、対象物を所定位置に配置するという目的や品質要求は第1階層に属する。把持状態、対象物姿勢、接触状態、環境占有などは第2階層に属する。滑り余裕、衝突余裕、視認性低下、搬送中の揺れ増加などは第3階層に属する。そして、速度低下、再把持、退避、遠隔判断、再自律といった対応は第4階層に属する。このように、4階層構造は具体ユースケースと対応づけやすく、抽象論にとどまらない実用性を持つ。

また、4階層構造には、共通情報基盤やインターフェース仕様化へ展開しやすいという利点がある。成立条件は上位タスク系や運用設計から与えられ、観測・状態はセンサ系や制御系から得られ、予測・リスクは判断系やマニピュレーションモジュールで生成され、介入・制御情報は監視系・遠隔系・制御系の間で共有される。このように見ると、4階層は情報の意味だけでなく、**生成主体・利用主体・更新頻度・共有範囲**の整理にもつながる。したがって、本構造は概念整理にとどまらず、仕様化や相互運用性の議論に接続しやすい。

以上により、本WGでは情報要件を4階層で整理することが妥当であると考え。これは、判断の根拠、現在状態の把握、将来リスクの評価、介入と責務分担を混同なく扱うための最小構成であり、かつ人とロボットの協調、遠隔介入、インターフェース設計、段階的導入といった後続の論点を支える基本構造でもある。したがって、以下ではこの4階層構造を前提として、各階層の具体的内容を整理する。

## 8.3 各階層における具体的な情報内容

前節では、情報要件を4階層構造で整理する理由と、その意義について述べた。本節では、その4階層をさらに具体化し、それぞれの階層においてどのような情報を扱うべきかを整理する。ここで示す情報内容は、特定のセンサ構成や推定アルゴリズム、UI設計を前提としたものではなく、**判断を成立させるために必要な情報の意味的な内容**を示すものである。したがって、以下に挙げる項目は代表例であり、具体的な測定方法、算出方法、表現方法は用途や実装に応じて異なり得る。

### 8.3.1 第1階層：成立条件・評価基準に関する情報

「成立条件・評価基準」に関する情報は、作業をどのような条件のもとで「成立」とみなすかを定める情報である。この階層の中心は、作業指示そのものではなく、**観測された状態をどのように評価するかを定める基準**にある。例えば、対象物がどこに、どの姿勢で配置されるべきか、どの程度の姿勢誤差が許容されるか、解放後にどのような安定状態であるべきかといった情報は、この階層に属する。これらは作業完了判定の条件であると同時に、異常や失敗を判定する際の基準でもある。

また、この階層には品質要求と許容不具合条件が含まれる。自律ロボットでは、動作が完了したように見えても、傷、変形、把持痕、振動、衝撃、上物落下などの観点から、結果が受け入れられない場合がある。反対に、一定の品質低下や付随的事象が許容される場合もある。この違いを明示することにより、同じ状態であっても、作業条件に応じて異なる判断が可能となる。したがって、品質要求・許容不具合条件は、失敗定義のあいまいさを避けるための重要な情報である。

さらに、禁止事項・制約条件も本階層の重要な要素である。これは、接触禁止対象、侵入禁止領域、速度上限、許容力・許容圧、干渉禁止条件など、作業中に超えてはならない境界を表す。これらは安全関連部そのものの仕様ではないが、少なくとも非安全関連部が判断や行動選択を行う際に参照すべき境界条件として必要である。

あわせて、安全、品質、時間、生産性などの優先順位や、異常時に停止・退避・再試行・遠隔照会のどれを優先するかといった運用ポリシーも、本階層に含めて扱うことが妥当である。これにより、異常時の判断が場当たりのにならない、一貫性を保ちやすくなる。

最後に、本階層には工程定義や対象物属性、ODD<sup>1</sup>条件のような前提情報も含まれる。Pick・搬送・Place など工程ごとに成立条件が異なるため、どの工程で何を評価するかを定義しておくことが必要である。また、対象物の形状、質量、脆弱性、許容把持条件、環境条件なども、観測結果の評価に直接関わる。このように、本階層は、後続の状態評価やリスク評価の前提を定める基盤的情報層である。

### 8.3.2 第2階層：観測・状態に関する情報

「観測・状態」に関する情報は、ロボット、対象物、環境の**現在状態を意味のある形で記述する情報**である。この階層では、生のセンサデータそのものではなく、判断に用いる状態表現として情報を整理することが重要である。例えば、ロボットの関節状態や運転状態、エンドエフェクタの位置・姿勢や開閉状態、対象物の位置・姿勢・揺れ、環境中の障害物や人の位置などは、いずれも作業成立性を評価する

---

<sup>1</sup> ODD : Operational Design Domain 「運行設計領域」…自動運転システムなどの自律動作システムが正常に動作するように設計された特定の環境条件のこと。

ための現在状態を構成する。こうした情報は、単一センサの出力である場合もあれば、複数情報源を統合した状態推定の結果となる場合もある。

特に Pick & Place において重要なのは、把持・接触状態に関する情報である。把持力、接触状態、荷重移行、滑り兆候、変形兆候などは、対象物を適切に支持し、搬送可能な状態にあるかを判断するうえで中心的な役割を果たす。これらは、単に触れているか否かという二値ではなく、どの程度安定しているか、品質要求を満たしているかという意味を持つ状態として解釈されるべきである。そのため、本階層では、対象物やエンドエフェクタの状態を個別に見るだけでなく、**両者の関係状態**として把持・接触を扱うことが有効である。

また、本階層では、状態そのものと併せて、その**確信度や観測健全性<sup>2</sup>**を扱うことが重要である。対象物姿勢が推定されていても、その推定が遮蔽や照度変化、追跡不安定性の影響を受けている場合、その状態をどの程度信じてよいかは別途判断されなければならない。したがって、本階層は「現在何が起きているか」だけでなく、「その把握がどの程度信頼できるか」まで含めて構成される必要がある。

さらに、工程によって重点的に監視すべき状態は異なるため、観測・状態情報は工程依存で整理されることが望ましい。これにより、現在状態の把握を、単なるデータ収集ではなく、判断可能な状態表現として運用しやすくなる。

### 8.3.3 第3階層：予測・リスクに関する情報

「予測・リスク」に関する情報は、現在状態が成立条件を満たしている場合でも、**このまま継続した場合に将来的な失敗へ至る可能性**を評価するための情報である。この階層では、現在状態そのものではなく、余裕度、不確かさの成長、失敗類型への接近など、将来リスクを表す情報を扱う。ここで重要なのは、異常の顕在化を待って停止するのではなく、顕在化前にリスクを把握し、事前の回避行動へ接続する視点である。

代表的な情報としては、把持余裕、衝突余裕、可到達余裕、停止余裕、時間余裕などの概念がある。これらは、現在状態が成立していても、どの程度の余地を持って成立しているかを表す情報であり、失敗の手前にある「成立余裕」を示す。また、不確かさの成長、例えば視認性低下、遮蔽発生、揺れ増加、環境変動なども、将来のリスクを高める要因として扱う必要がある。さらに、滑り、視認ロスト、衝突、置き不成立といった代表的失敗類型に対して、どの類型へ近づいているのかを解釈できる形でリスクを表すことが望ましい。

本階層で扱う余裕度やリスク指標の具体的算出方法は、用途や実装によって異なり得る。しかし、少なくとも「どのような種類の余裕やリスクを評価すべきか」という意味構造は、共通化しやすい。こうした情報を持つことにより、現在の異常検知とは別に、**将来に向けた事前回避の判断**を設計できるようになる。これは、単に作業を止めるのではなく、継続性を高める自律運用を成立させるうえで重要な情報層である。

---

<sup>2</sup> 観測健全性(Structural/System Health)：橋梁、建物、機械設備などの物理的な「健全性」を測定・診断するシステム（センサ、データ配信装置など）が、故障なく正常に機能している状態

### 8.3.4 第4階層：介入・制御に関する情報

「介入・制御」に関する情報は、前節までで評価された結果を受けて、**何を変更し、どの主体がどの責務を担い、どのモードで作業を継続・停止・復帰するか**を定める情報である。この階層の特徴は、状態評価やリスク評価の結果を、具体的な行動へ接続する点にある。したがって、ここでは単なる制御コマンドだけでなく、運用モード、モード遷移条件、制御権限、責務分担、変更可能な条件、遠隔提示情報、介入履歴などを扱う必要がある。

まず、現在どの運用モードにあるか、自律・停止・遠隔判断・遠隔操作・再自律のいずれかを表すモード情報が必要である。さらに、どのような異常やリスク条件でモードが移行するのかを定める遷移条件が必要である。加えて、誰が判断し、誰が制御し、どの制約は常にロボット側で維持されるかを表す権限・責務情報も重要である。半自律運用では、判断主体と制御主体が一致しない場合があるため、責務分担を情報として扱う意義は大きい。

また、本階層では、速度、把持条件、軌道、再認識、退避など、何が変更可能かを示す介入レバー<sup>3</sup>の情報が必要である。これがなければ、予測や検知の結果を行動へ接続できない。さらに、人が遠隔から判断する場合には、現在工程、異常理由、状態変化、候補行動など、判断に必要な情報を要約した形で提示することが望ましい。これらは具体的なUI設計の詳細というより、**遠隔判断を成立させるために必要な情報の種類**として位置づけるのが適切である。あわせて、介入履歴や判断ログ、安全退避条件、復帰条件なども、継続運用と説明責任の観点から重要な情報となる。

### 8.3.5 まとめ

以上のように、4階層は、**何をもって成立とみなすか、現在何が起きているか、将来どうなる可能性があるか、では何をすべきか**という一連の判断の流れを構成している。したがって、この構造は単なる項目分類ではなく、エラー検知、エラー予測、回避、リカバリ、人の介入を一貫した情報構造の上で扱うための基本枠組みである。本節で整理した内容は、後続の共通情報基盤、段階的導入、インターフェース設計の議論の基礎となる。

---

<sup>3</sup> 介入レバー (intervention lever) : 主に自律動作するロボットシステムにおいて、人間が遠隔操作や手動操作によって、その動きに物理的または電子的に介入するための手段のこと



図6 4階層情報要件の構造

## 8.4 判断主体に依存しない共通情報基盤

前節で整理した4階層の情報要件は、ロボットが自律的に判断する場合だけでなく、人が(遠隔から)判断する場合にも、一貫して利用されるべきものである。半自律システムでは、通常時にはロボットが判断・制御の主体となり、不確実性や異常の顕在化に応じて人が判断を補完することが想定される。このとき、ロボットと人が異なる情報意味を前提にしていると、同じ状態に対して異なる判断を下しやすくなり、モード遷移や責務分担の整合性が損なわれる。そのため、本WGでは、情報要件を**判断主体に依存しない共通情報基盤**として扱うことを重視する。

ここで共通化すべきなのは、データ取得手段や内部アルゴリズムではなく、**判断に必要な意味構造**である。例えば、対象物姿勢の推定方法やリスク評価ロジックは実装に応じて異なり得るが、最終的に共有されるべき情報としては、「対象物の現在状態」「その信頼性」「どの種類の失敗に対してどの程度の余裕があるか」「現在モード」「権限主体」などが考えられる。このような意味構造を共通化することにより、内部実装の差異を残しつつ、システム間の整合性と相互運用性を確保しやすくなる。

また、共通情報基盤は、ロボットと人のあいだだけでなく、上位タスク系、マニピュレーションモジュール、下位制御系、監視系、遠隔介入系など、複数のシステム要素のあいだで共有されることが望ましい。これは、個別モジュールの内部仕様を統一することを意味するのではなく、**システム間で意味を**

共有できる最小限の情報構造を定めるということである。この考え方は、後に述べる標準化領域と競争領域の切り分けにもつながる。

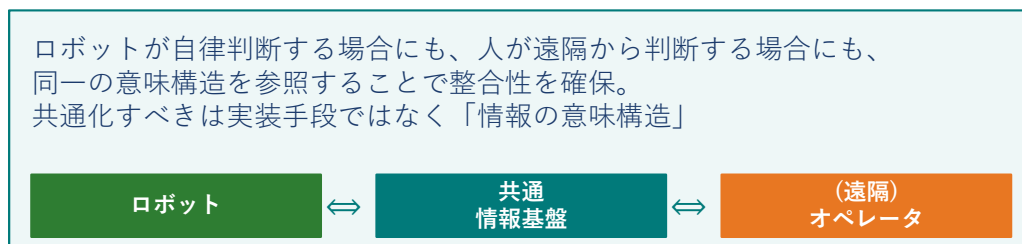


図7 判断主体に依存しない共通情報基盤

## 8.5 最小情報要件と段階的導入

4階層の情報要件は、自律ロボットの判断と行動を支える包括的な構造であるが、導入初期からそのすべてを完全な形で整備することは現実的でない場合が多い。そのため、本WGでは、機能ごとに最低限必要な情報を**最小情報要件**として整理し、それを基礎として段階的に機能を拡張する考え方を採る。これは、情報要件を単なる理想像ではなく、実装・導入に結びつく指針として扱うために重要である。

例えば、現在の異常評価を成立させるためには、成立条件、現在状態、確信度が最低限必要である。将来リスク評価を加えるためには、これに余裕度、不確かさの成長要因、基本的な失敗類型の知識が加わる。さらに、回避を成立させるためには、変更可能な条件、すなわち介入レバーが必要となる。遠隔判断やリカバリを成立させるには、停止・退避条件、要約提示情報、責務分担情報が必要となる。このように、機能ごとに必要な情報を整理することで、どの段階で何を整備すべきかが見えやすくなる。

段階的導入の観点からは、まず「止めて守る」構造を成立させることが現実的である。次に、余裕度やリスク評価を導入して「事前に避ける」構造へ拡張する。さらに、失敗類型別の評価や遠隔支援を高度化して、「継続性を高める」運用へ発展させる。このように整理することで、情報要件は、最初からすべてを要求するものではなく、段階的に高度化し得る共通基盤として理解しやすくなる。



図8 最小情報要件と段階的導入

## 8.6 情報要件とインターフェース設計への示唆

本章で整理した情報要件は、自律ロボットの判断基盤を明確化するだけでなく、そのままインターフェース設計の論点を可視化する枠組みでもある。どの情報をどの主体が生成し、どの主体が利用し、どの粒度・更新頻度・信頼性で共有する必要があるかを定めることは、すなわちインターフェース設計である。したがって、情報要件整理は、今後の仕様化検討の前提として位置づけられる。

インターフェース設計上の論点としては、まず、情報の生成主体と利用主体の整理がある。成立条件は上位から与えられ、観測・状態はセンサや制御系から得られ、予測・リスクは判断系が生成し、介入・制御情報は監視系や遠隔系と共有される。次に、情報の粒度と抽象度がある。生データを共有するのか、意味づけ済みの状態や評価結果を共有するのかによって、責務分担や拡張性は変わる。さらに、更新頻度とリアルタイム性、信頼性と整合性、拡張性と相互運用性といった論点も重要である。

4階層構造を用いると、これらの論点を整理しやすい。第1階層は上位から与えられる条件情報、第2階層は状態把握のための情報、第3階層は判断系が生成する将来評価情報、第4階層は人とロボットまたはシステム間で共有される介入情報として捉えられる。この見方により、マニピュレーションモジュールを中心とした情報流通、遠隔介入を含む半自律運用、将来的な標準化対象と競争領域の切り分けといった論点にも接続しやすくなる。したがって、本章の情報要件整理は、次章のインターフェース仕様議論への橋渡しとしても重要である。

## 8.7 本章のまとめ

本章では、自律ロボットに必要な判断基盤を、情報要件という観点から整理した。まず、情報要件を、「成立条件・評価基準」「観測・状態」「予測・リスク」「介入・制御」の4階層として構造化することで、判断の前提、現在状態の把握、将来リスクの評価、行動への接続を一貫した枠組みとして扱えることを示した。次に、各階層に含まれる情報の意味を整理し、それらを判断主体に依存しない共通情報基盤として位置づける必要があることを示した。さらに、最小情報要件と段階的導入の考え方を示し、最後に、それらがインターフェース設計や将来の仕様化・標準化に接続することを確認した。

以上により、本章で提示した情報要件の整理は、自律ロボットに必要なエラー検知、エラー予測、回避、リカバリ、人の介入を一体として支える**基本構造**であり、同時に、今後の仕様化・標準化に向けた出発点であると位置づけられる。特に本WGでは、Pick & Place を題材として具体的な検討を行ってきたが、本章で整理した枠組みは、それらをより一般的な情報基盤として再構成したものであり、他のマニピュレーション作業へも拡張可能な考え方である。次章では、この情報要件の整理を踏まえ、マニピュレーションモジュールを中心としたインターフェース仕様への展開可能性と、その際の設計論点について検討する。

### 第8章 情報要件の整理

#### 4階層情報要件の構造 (8.2節)

##### 第1層 成立条件・評価基準

「何をもって作業成立とみなすか」

作業指示・品質要求・禁止事項・優先順位・ODD条件

##### 第2層 観測・状態

「現在何が起きているか」

ロボット状態・対象物位置姿勢・把持状態・確信度・環境状態

##### 第3層 予測・リスク

「このまま続けるとどうなるか」

余裕度（把持・衝突・停止等）・不確かさの成長・失敗類型への接近

##### 第4層 介入・制御

「では何をすべきか」

モード情報・遷移条件・制御権限・介入レバー・遠隔判断支援情報

#### 判断主体に依存しない共通情報基盤 (8.4節)

ロボットが自律判断する場合にも、人が遠隔から判断する場合にも、同一の意味構造を参照することで整合性を確保。共通化すべきは実装手段ではなく「情報の意味構造」



#### 最小情報要件と段階的導入 (8.5節)



#### インターフェース設計の主要論点 (8.6節 / 9.4節)

情報の粒度と抽象度	誰の判断を成立させるかに応じた抽象化レベルの設定
リアルタイム性と同期	情報種別ごとの時間特性・更新頻度・時刻同期を区別
標準化領域	意味構造・用語・基本情報モデル（4階層枠組み）
競争領域	状態推定・リスク算出・回避戦略・遠隔提示UIなど

## 9 インターフェース仕様への示唆

### 9.1 情報要件とインターフェースの関係

第8章で整理した情報要件は、自律ロボットに必要な判断基盤を明確にするものであると同時に、そのままインターフェース仕様を検討するための前提条件でもある。自律ロボットシステムでは、上位タスク系、マニピュレーションモジュール、下位制御系、監視系、遠隔介入系など、複数の機能要素が相互に連携しながら作業を成立させる。このとき、どの情報をどの主体が生成し、どの主体が利用し、どのタイミングで、どの粒度で共有する必要があるかを定めることは、すなわちインターフェース設計そのものである。したがって、情報要件整理は、個別機能の理解にとどまらず、システム構成全体の整合を支える設計基盤として位置づけられる。

従来の産業用ロボットにおけるインターフェースは、主として動作指令や状態通知といった比較的限定的な情報授受を対象としてきた。これに対し、本WGで対象とする自律ロボットでは、動作指令や状態通知に加えて、**成立条件、状態推定とその確信度、余裕度や将来リスク、モード情報、制御権限、遠隔判断に必要な要約情報**など、より高次の意味を持つ情報を扱う必要がある。このため、今後のインターフェース設計では、単なる信号一覧やデータ項目定義だけではなく、**それぞれの情報がどのような判断や行動に用いられるのか**を明示した設計が求められる。

また、第8章で整理した4階層構造は、インターフェース設計の観点からも有効である。第1階層の「成立条件・評価基準」は、上位タスク系や運用条件設定側から与えられる情報として扱われる。第2階層の「観測・状態」は、センサ系や制御系から取得され、判断系や監視系へ渡される情報として捉えられる。第3階層の「予測・リスク」は、判断系やマニピュレーションモジュールが生成し、回避行動選択やモード遷移判断、遠隔判断支援へ接続される。第4階層の「介入・制御」は、監視系、遠隔系、制御系のあいだで共有され、実際の行動変更と責務移行を支える情報として位置づけられる。このように、4階層構造は、**意味構造と情報流通構造を接続する枠組み**としても機能する。

さらに、情報要件をインターフェースへ展開する意義は、単に個別システムの設計効率を高めることにとどまらない。意味構造に基づいて情報を定義することにより、異なる開発主体や異なるシステム構成のあいだでも、どの情報がどの意味を持つかを共通理解しやすくなる。これは、今後の相互運用性確保や標準化検討において重要な前提となる。したがって、本章では、第8章で整理した情報要件を踏まえ、インターフェース仕様へと接続するうえでの設計上の示唆を整理する。

## 9.2 マニピュレーションモジュールとの関係

自律ロボットシステムにおいて、マニピュレーションモジュールは、対象物を把持し、搬送し、配置し、必要に応じて状態を補正する中核機能を担う。本WGで整理してきた情報要件は、このマニピュレーションモジュールを中心とした情報の流れとして捉えることができる。すなわち、マニピュレーションモジュールは、センサ系や制御系から第2階層の観測・状態情報を受け取り、第1階層の成立条件・評価基準に照らして現在状態を評価し、必要に応じて第3階層の予測・リスク情報を生成し、第4階層の介入・制御情報へと接続する役割を担う。したがって、本モジュールは、単なる動作生成器ではなく、**状態評価と行動選択の結節点**として位置づけられる。

具体的な例としては、マニピュレーションモジュールは、上位から与えられるタスク条件や品質要求を参照しつつ、対象物の位置・姿勢、把持状態、環境状態などの現在情報を解釈し、作業が成立しているかどうかを評価する。このとき、単に対象物を動かすことだけでなく、所定の品質や禁止条件を満たしているかどうかを含めて評価する必要がある。また、現在状態が成立している場合であっても、余裕度の低下や不確かさの成長、代表的失敗類型への接近を評価し、必要に応じて速度低下、姿勢変更、再認識、再試行などの対応候補を生成する。この意味で、マニピュレーションモジュールは、第1～第4階層を横断的に扱う中心的存在となることができる。

一方で、マニピュレーションモジュールが扱うべき情報と、他の要素系が扱うべき情報を切り分けることも重要である。例えば、上位タスク系は作業目的や成立条件の設定を担い、下位制御系はリアルタイムな運動実行を担い、監視系や遠隔系は判断支援や介入を担う。したがって、マニピュレーションモジュールにすべての情報処理を集中させるのではなく、**何を本モジュール内部で評価し、何を外部から受け取り、何を外部へ引き渡すのか**を明確にすることが、インターフェース設計の観点から重要である。特に、状態推定そのものをすべて内部で持つのか、あるいは外部から意味づけされた状態として受け取るのかによって、モジュール境界の設計は大きく変わる。

また、マニピュレーションモジュールとの関係で重要なのは、**どのレベルの抽象度で情報をやり取りするか**である。例えば、対象物姿勢を生画像や点群で受け取るのか、それとも位置・姿勢として意味づけされた状態で受け取るのかによって、モジュール内部の責務は異なる。同様に、予測結果を単一の危険度として外部へ渡すのか、失敗類型別の余裕度や理由づけを含めて渡すのかによって、監視系や遠隔系で可能な判断も変わる。このため、マニピュレーションモジュールとのインターフェースを設計する際には、**必要な判断をどこで行うのか**という責務分担と、**必要な情報の粒度**を一体で検討する必要がある。

さらに、マニピュレーションモジュールは、異常時における回避・リカバリ候補の生成主体としても重要である。第8章で整理したように、介入・制御に関する情報には、モード遷移条件、介入レバー、遠隔提示情報などが含まれる。このうち、どのような動作変更が可能か、どの候補が現在状態に対して妥当かといった情報は、マニピュレーションモジュールが最も把握しやすい。

一方で、その候補の中からどれを採るかは、人が判断する場合もあり得る。このように、**候補生成はマニピュレーションモジュール、最終選択は状況に応じてロボットまたは人**という構図を取りやすいことも、本モジュールとの関係における重要な示唆である。

以上より、マニピュレーションモジュールは、第8章で整理した情報要件を実際の作業遂行へつなぐ中核要素であり、そのインターフェースは、状態把握・評価・予測・介入候補生成という一連の役割に対応して設計される必要がある。今後の仕様化では、マニピュレーションモジュールを中心に、上位タスク系、下位制御系、監視系、遠隔系とのあいだで、どの情報をどの粒度で授受すべきかを具体化していくことが重要である。

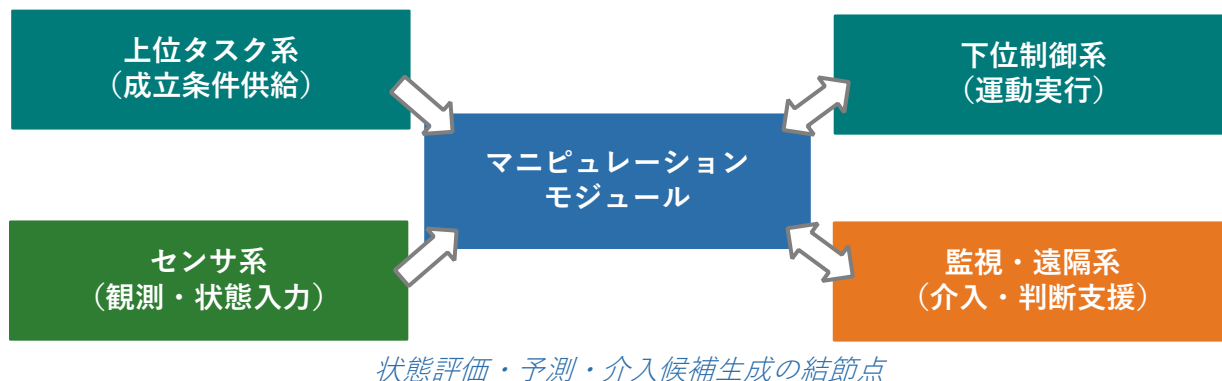


図9 マニピュレーションモジュールの位置づけ

### 9.3 外部システム(監視・遠隔制御)との連携

自律ロボットにおいては、すべての判断と対処をロボット単独で完結できるとは限らない。不確実性が高い状況、複数の対応策の中から選択が必要な状況、品質や運用上の判断が求められる状況では、人または外部システムによる介入が有効である。このため、マニピュレーションモジュール内部の情報だけでなく、監視系や遠隔判断系、遠隔操作系との間で、必要な情報を適切に授受するためのインターフェース設計が重要となる。第8章で整理した第4階層の介入・制御情報は、この外部連携を成立させるうえで中心的な役割を果たす。

まず、監視・遠隔系との連携において重要なのは、**状態の可視化**である。遠隔地からロボットの状態を把握するためには、単なる映像や生センサデータだけではなく、現在工程、対象物状態、異常の有無、確信度、余裕度などが意味づけされた形で提示されることが望ましい。これは、情報量を増やすことが目的ではなく、遠隔側が状況を判断可能な形で理解できるようにするためである。そのため、外部システムへ渡すべき情報は、生データの丸投げではなく、**判断に必要な要約情報**として構成されるべきである。

次に重要なのは、**判断支援情報の提供**である。遠隔側が適切に判断するためには、現在状態だけでなく、どのような異常が疑われているか、どの程度のリスクがあるか、どのような対応候補が考えられるか、といった情報が必要となる。例えば、滑りの疑いがある、視認性が低下している、配置余裕が不足している、といった要約は、単なる状態値よりも判断支援として有効である。また、候補行動を併せて提示することで、人がゼロから対処方法を考える負担を軽減することができる。したがって、遠隔系とのインターフェースでは、**判断そのものを置き換えるのではなく、判断を支援する情報**をいかに設計するかが重要な論点となる。

さらに、外部システム連携では、**介入手段の提供**も必要である。遠隔判断のみを行う場合と、制御パラメータを変更する場合、さらに直接操作に介入する場合とでは、必要なインターフェースは異なる。少なくとも、モード切替、停止・再開指示、条件変更、再試行指示、退避指示などの基本的介入手段は定義されている必要がある。一方で、どこまでを遠隔から許容するかは、責務分担や安全制約の考え方に依存するため、インターフェース設計では、**何が変更可能で、何がロボット側に固定されるのか**を明確にしておく必要がある。

また、外部システムとの連携では、**通信遅延、情報欠落、認知負荷**といった現実的課題を考慮する必要がある。遠隔地との通信には遅延や欠落が生じ得るため、すべての判断や操作を遠隔前提で設計することは適切ではない。したがって、異常時においても、最低限の安全制約や停止・退避機能はローカル側(ロボット側)<sup>4</sup>で維持されるべきである。また、遠隔側へ提示する情報が過剰であれば判断負荷が高まり、不足すれば正しい判断が難しくなる。このため、外部システムとの連携は、単に通信路を設けることではなく、**遅延・認知負荷・安全制約を考慮した情報授受設計**として捉える必要がある。

以上より、監視・遠隔制御系との連携においては、状態の可視化、判断支援情報の提供、介入手段の定義、通信・認知・安全制約への対応が主要論点となる。これらは、第8章で整理した情報要件を外部主体との連携という観点で再解釈したものであり、半自律運用を実際に成立させるうえで重要なインターフェース設計の論点である。

## 9.4 仕様化に向けた論点整理

第8章および本章前半で整理した情報要件を実際のインターフェース仕様へ落とし込むためには、いくつかの基本的論点をさらに整理する必要がある。本節では、その中でも特に重要なものとして、**情報の粒度と抽象度、リアルタイム性と同期、信頼性と整合性、拡張性と相互運用性**の4点を取り上げる。これらは個別実装を定めるものではないが、仕様化にあたって必ず検討すべき設計上の観点である。

### 9.4.1 情報の粒度と抽象度

インターフェース仕様を設計するうえで、まず重要なのは、**どのレベルの抽象化で情報を授受するか**である。例えば、対象物状態を画像や点群のような生データとして渡すのか、位置・姿勢として意味づけられた状態として渡すのか、あるいは「把持成立」「配置成立」のような判定済み状態として渡すのかによって、モジュールの責務は大きく変わる。同様に、リスク情報も、単一のスコアとして表現するか、余裕度や失敗類型別の指標として表現するかによって、外部で可能な判断の深さは異なる。したがって、仕様化においては、**誰がどの判断を担うのか**と対応づけながら、必要な抽象度を定める必要がある。

また、粒度と抽象度の選択は、拡張性や説明可能性にも影響する。過度に生データ寄りにすると相互運用性や再利用性が低下しやすく、逆に過度に抽象化すると、受け手側での柔軟な判断や将来的な機能追加が難しくなる。このため、仕様化においては、「最小限必要な意味づけを持ちつつ、過度に内部実装へ踏み込まない」粒度設定が望ましい。

---

<sup>4</sup> 人が遠隔地からロボットに介入する場合、人間を主体と考える立場（人がローカル側でロボットが遠隔側）と、ロボットを主体と考える立場（ロボットがローカル側で人が遠隔側）があるが、本WGでは後者（自律ロボットが主役）の立場をとる。

#### 9.4.2 リアルタイム性と同期

第二の論点は、**情報の更新頻度と同期要求**である。すべての情報が同じリアルタイム性を必要とするわけではない。例えば、下位制御系とのあいだでやり取りされる運動指令やフィードバックは高い周期性と低遅延が要求される。一方で、成立条件や運用ポリシーのような情報は、タスク切替時に更新されれば十分な場合が多い。また、遠隔判断支援に用いる要約情報は、制御ループほどの周期性を必要としないが、判断に支障のない時間範囲で総合的に提示される必要がある。したがって、仕様化にあたっては、**情報ごとに求められる時間特性を区別して整理することが重要**である。

さらに、複数情報源を利用する場合には、**時刻同期**の考え方も重要となる。対象物状態、把持状態、環境状態、リスク評価などが異なる時点の情報として扱われると、判断の一貫性が損なわれるおそれがある。そのため、仕様化では、情報値そのものだけでなく、取得時刻、更新時刻、同期方法なども含めて扱うことが望ましい。

#### 9.4.3 信頼性と整合性

第三の論点は、**情報の信頼性と整合性**である。自律ロボットでは、複数のセンサや推定器、外部システムから得られる情報を統合して判断を行うため、情報同士の矛盾や欠落が生じる可能性がある。例えば、対象物位置に関する複数推定結果が一致しない場合、あるいは通信遅延によって一部の状態が古いまま残る場合には、どの情報を優先するか、どの条件で異常とみなすかが問題となる。このため、仕様化においては、情報項目の定義だけでなく、**信頼性指標、確信度、欠落時の扱い、整合性確認の考え方**も考慮する必要がある。

特に、半自律運用では、ロボットと人が同じ状態を総合的に理解できることが重要である。そのため、遠隔側へ提示される情報がローカルでの判断情報と大きく乖離していないこと、また更新の遅れや欠落が認識可能であることが望ましい。この意味で、信頼性と整合性は、単に通信品質の問題ではなく、**判断の一貫性を支える仕様論点**として位置づけられる。

#### 9.4.4 拡張性と相互運用性

第四の論点は、**拡張性と相互運用性**である。自律ロボットシステムは今後、多様なセンサ、判断系、遠隔支援系、学習機能などを取り込みながら拡張される可能性が高い。このため、インターフェース仕様は、特定機器や特定アルゴリズムに強く依存するものではなく、意味構造を基盤とした拡張可能な形で設計されることが望ましい。例えば、新たなセンサや推定器が導入されても、最終的に共有される状態表現や余裕度、モード、責務情報の意味が維持されるのであれば、システム全体の整合性を保ちやすい。

また、相互運用性の観点では、異なる開発主体・異なる機器・異なるモジュール間で、最低限共有すべき意味構造を明確にしておくことが重要である。これは、WG活動として協調領域を形成するうえでも重要な視点であり、どの情報を標準化候補とし、どの部分を個社実装に委ねるかを議論する基盤ともなる。したがって、拡張性と相互運用性は、単なる将来対応のための配慮ではなく、**仕様化と標準化をつなぐ論点**として位置づけられる。

## 9.5 競争領域と標準化領域の切り分け

インターフェース仕様を検討する際には、どの部分を業界内で共有する標準化の対象とし、どの部分を各社・各システムの競争領域として残すかを明確にすることが重要である。本WGで第8章から整理してきた情報要件の考え方に基づけば、**標準化が望ましいのは、判断に必要な意味構造や情報枠組みであり、競争領域となりやすいのは、それらを生成・活用する具体的手法**である。

まず、標準化が望ましい領域としては、情報要件の4階層構造そのもの、状態・余裕度・確信度・モード・権限といった用語と意味の定義、ならびに基本的な情報モデルの考え方が挙げられる。これらは、異なるシステムのあいだで共通理解を形成し、相互運用性を高めるための基盤であり、協調領域として共有する意義が大きい。また、インターフェース仕様を議論するうえで、最低限必要なデータ項目や意味構造の整理も、標準化候補として検討しやすい領域である。

一方で、競争領域となりやすいのは、状態推定アルゴリズム、余裕度やリスクの算出方法、異常検知ロジック、回避・リカバリ戦略、遠隔提示UIやインタラクション設計などである。これらは、同じ意味構造を扱っていても、具体的な性能、使い勝手、コスト、ロバスト性に直結する部分であり、各社が技術的差別化を行う余地が大きい。そのため、本WG報告としては、これらを細部まで規定するのではなく、**何のための情報が必要か、どのような意味構造を共有すべきかに**重心を置くことが妥当である。

また、この切り分けは固定的なものではなく、技術成熟度や産業界の合意形成状況に応じて見直され得る。現時点では競争領域と考えられる部分であっても、将来的に広く共通化の必要性が認識されれば、標準化候補へ移る可能性がある。逆に、現時点で共通化しやすいと考えられる項目であっても、具体的実装に近づきすぎれば個社差別化に関わる場合がある。このため、本WGとしては、**意味構造レベルの共有を優先し、具体的手法レベルは各社の裁量を残す**という立場を採ることが適切である。

以上より、情報要件をめぐる議論においては、標準化領域と競争領域を対立的に捉えるのではなく、**共通基盤を形成する部分と差別化を発揮する部分を適切に分離**することが重要である。本WGの議論は、その分離を可能にするための意味構造整理として位置づけられる。

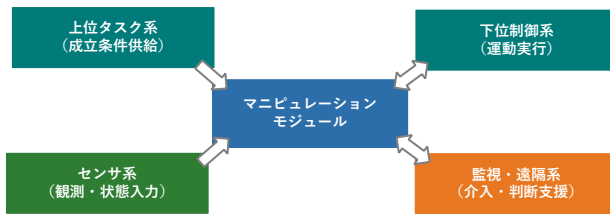
## 9.6 本章のまとめ

本章では、第8章で整理した情報要件を踏まえ、それをインターフェース仕様へ展開する際の考え方と主要論点を整理した。まず、情報要件がそのままインターフェース設計の前提であることを示し、次に、マニピュレーションモジュールを中心とした情報流通、監視・遠隔制御系との連携のあり方を述べた。さらに、仕様化に向けた論点として、情報の粒度と抽象度、リアルタイム性と同期、信頼性と整合性、拡張性と相互運用性を整理し、最後に標準化領域と競争領域の切り分けの考え方を示した。

これにより、第8章で整理した4階層の情報要件は、単なる概念整理ではなく、マニピュレーションモジュールを中心とする自律ロボットシステムの情報流通を設計するための基盤であることが明確になった。また、判断主体に依存しない共通情報基盤という考え方は、相互運用性や標準化に向けた議論とも整合し、今後の仕様化の出発点となる。本WGとしては、今後、この章で整理した論点を踏まえ、具体的なデータモデル、情報授受方式、ユースケースベースの検証へと議論を進めることが望まれる。

## 第9章 インタフェース仕様への示唆

### ① マニピュレーションモジュールの位置づけ (9.2節)



状態評価・予測・介入候補生成の結節点

### ② 4階層構造と情報流通の対応 (9.1節)

第1層 成立条件・評価基準	上位タスク系 → モジュール
第2層 観測・状態	センサ系・制御系 → 判断系・監視系
第3層 予測・リスク	モジュール → 回避選択・遠隔支援
第4層 介入・制御	監視系・遠隔系・制御系で共有

### ③ 外部システム（監視・遠隔制御）との連携 (9.3節)

<b>状態の可視化</b>	現在工程・対象物状態・異常有無・確信度・余裕度を意味づけされた形で提示
<b>判断支援情報の提供</b>	異常の種類・リスク程度・対応候補を要約。人がゼロから考える負担を軽減
<b>介入手段の定義</b>	モード切替・停止/再開・条件変更・再試行・回避指示の基本セットを整備
<b>通信・認知・安全制約</b>	遅延や欠落を前提に設計。ローカル側で安全制約を常時維持

### ④ 仕様化に向けた論点整理 (9.4節)

<b>情報の粒度と抽象度</b>	「最小限の意味づけ×実装非依存」が理想的な粒度設定
<b>リアルタイム性と同期</b>	情報種別ごとに時間特性を区別。時刻同期の考え方も整備
<b>信頼性と整合性</b>	確信度・欠落時の扱い・ロボットと遠隔側の情報整合性
<b>拡張性と相互運用性</b>	意味構造を基盤とし、機器・アルゴリズムの変更に耐える設計

● 標準化領域：4階層意味構造・用語定義・基本情報モデル

● 競争領域：状態推定・リスク算出・回避戦略・遠隔UI設計

## 10 まとめと今後の課題

### 10.1 本WGの成果の整理

本WGでは、産業用途における自律ロボットの実現に向けて、個別技術の優劣を論じるのではなく、人とロボットが協調して作業を遂行するために必要な考え方と情報構造を整理することを目的として検討を進めてきた。

まず、人とロボットの関係を、従来のような固定的な役割分担としてではなく、状況や不確実性にに応じて判断および制御の責務が移行し得る構造として捉え直し、その枠組みを「半自律」という概念で整理した。この点により、自律ロボットを単なる自動化の延長としてではなく、人との協調を前提としたシステムとして位置づけ直したことが、本WGの第一の成果である。

次に、本WGでは、自律ロボットの機能を、単なる動作生成能力ではなく、「**現在状態の評価**」「**将来リスクの評価**」「**回避**」「**リカバリ**」「**人の介入**」を含む一連の機能として整理した。特に、Pick & Place を題材として、作業には不確実性が内在し、異常や失敗が発生し得ることを前提としたうえで、現在状態を評価する機能、失敗へ至る前に兆候を捉える機能、必要に応じて動作や条件を変更する機能、さらに人が判断や操作を補完する機能が相互に関係していることを示した。この整理により、自律ロボットを「動作を作る機械」ではなく、「不確実性の下で作業継続性を支えるシステム」として捉える視点を明確にした。

さらに、本WGの中核的成果として、自律ロボットに必要な情報を**情報要件**として整理し、これを「**成立条件・評価基準**」「**観測・状態**」「**予測・リスク**」「**介入・制御**」の4階層構造として体系化した。この構造により、作業成立の基準、現在状態の把握、将来リスクの評価、行動への接続という流れを、一貫した情報モデルとして扱えることを示した。また、この4階層は、ロボットが判断する場合にも、人が遠隔から判断する場合にも共通して参照されるべき意味構造として整理されており、判断主体に依存しない共通情報基盤という考え方を明確にした。これは、今後の仕様化・標準化の議論においても基盤となる成果である。

加えて、本WGでは、情報要件の整理を理想的な概念図にとどめず、**最小情報要件と段階的導入**の考え方を提示した。すなわち、すべての情報を初期段階から完全に整備するのではなく、まずは現在状態評価と停止・退避を中心とした「**止めて守る**」構造を成立させ、その後に予測・回避機能を追加し、さらに遠隔支援や継続性向上へと発展させるという導入の考え方である。この整理により、情報要件の議論を実装・導入に接続しやすいものとしたことも、本WGの重要な成果である。

最後に、本WGでは、これらの情報要件整理が、そのまま**インターフェース仕様検討への出発点**となることを示した。情報の意味構造を整理することにより、どの主体がどの情報を生成し、どの主体がどの粒度・更新頻度・信頼性で利用するかという設計論点を明確化できる。また、意味構造を共有しつつ、状態推定手法、予測ロジック、回避戦略、UI設計などの具体手法は各実装に委ねることで、協調領

域と競争領域を切り分ける考え方も示した。これにより、本WGの成果は、概念整理にとどまらず、今後の業界内連携や相互運用性確保のための実務的基盤として位置づけられる。

## 10.2 本報告の位置づけ

本報告は、自律ロボットに関する**具体的なアルゴリズム仕様や製品実装方式を規定するものではない**。本WGの目的は、個社の技術的優位性に直結する実装詳細を定めることではなく、業界内で共有可能な形で、自律ロボットの議論に必要な意味構造、用語、情報要件、設計上の観点を整理することにある。したがって、本報告の位置づけは、特定方式の推奨や比較評価を行う技術報告ではなく、**今後の仕様化・相互運用性確保・標準化議論のための共通基盤を提示する報告**である。

また、本報告は、ロボット単体の智能化を論じるものではなく、**人、ロボット、外部システムを含む自律ロボットシステム**を対象としている。このため、本報告で扱う内容は、単なる制御アルゴリズムや認識アルゴリズムの議論ではなく、判断主体の移行、責務分担、遠隔介入、情報共有、インターフェース設計といった、システム全体の設計論として位置づけられる。特に、本WGでは Pick & Place を題材として議論を行っているが、その狙いは個別ユースケース固有の実装方式を示すことではなく、マニピュレーション作業に広く適用可能な考え方を、具体例を通じて明確にすることにある。

さらに、本報告は、協調領域と競争領域を意識して構成されている。すなわち、業界内で共有すべきものとしては、情報要件の4階層構造、状態・余裕度・確信度・モード・責務といった意味構造、最小情報要件や段階的導入の考え方、インターフェース設計上の主要論点などを扱っている。一方で、状態推定アルゴリズム、予測・回避ロジック、リカバリ戦略、遠隔提示UIなど、個社ごとの差別化につながる具体手法については、可能な限り抽象化して取り扱っている。したがって、本報告は、**共通化すべき基盤的知見を整理し、具体実装は各社の裁量に委ねる**という位置づけを明確に持つ。

この意味で、本報告は、現時点での最終仕様書ではなく、**今後の仕様化・検証・合意形成を進めるための中間成果物**として理解されるべきである。特に第8章および第9章で整理した情報要件とインターフェース設計の考え方は、そのまま具体的データモデルやメッセージ構造へ直結するものではないが、それらを検討する際の前提条件を整理した点に価値がある。したがって、本報告は、今後の詳細仕様化やユースケース検証に向けた「考え方の共通化」と「論点の見える化」を担う文書として位置づけられる。

## 10.3 残された課題

本WGの検討により、自律ロボットに関する基本的な考え方、情報要件の枠組み、インターフェース設計上の主要論点は整理された。しかし、実用化および標準化に向けては、なおいくつかの重要課題が残されている。

第一に、**情報要件の具体化**である。本報告では、必要な情報を意味構造として整理し、4階層で体系化した。が、実際に仕様として用いるためには、各情報項目の詳細な定義、表現単位、精度、更新条件、参照関係などをさらに詰める必要がある。意味構造の整理から、実際に交換可能な情報モデルへ落とし込む段階においては、曖昧なまま残っている概念をさらに明確化する必要がある。

第二に、**インターフェース仕様への具体的展開**である。第9章では、情報要件がそのままインターフェース設計上の論点につながることを示したが、実際にシステム間で情報をやり取りするためには、データモデル、メッセージ構造、更新周期、同期方法、異常時の扱い、信頼性指標の表現方法など、より具体的な設計を行う必要がある。特に、マニピュレーションモジュール、上位タスク系、遠隔介入系、監視系のあいだで、どの粒度で何を受け渡すかについては、今後さらにユースケースベースの検討が必要である。

第三に、**ユースケースに基づく妥当性検証**である。本WGでは Pick & Place を題材として議論を進めているが、本報告で示した情報要件とインターフェース設計の考え方が、他のマニピュレーション作業や、より複雑な工程にも適用可能かどうかは、追加検証を要する。また、Pick & Place においても、対象物特性、品質要求、環境条件、遠隔介入形態などが異なる場合に、どの程度まで共通化可能かを検証する必要がある。したがって、今後は具体的なユースケースに即した試行を通じて、本報告で整理した枠組みの有効性と限界を見極めることが求められる。

第四に、**安全およびセキュリティとの関係整理**である。本WGでは、主として非安全関連部における情報要件とインターフェース設計の考え方を扱ってきたが、自律ロボットの実運用においては、安全関連部との関係、停止・復帰時の扱い、遠隔介入時の安全制約、外部システム連携におけるセキュリティ確保など、統合的に考慮すべき論点が存在する。本報告では、それらの詳細仕様そのものには踏み込んでいないが、今後の実用化や標準化を考えるうえでは、他WGや関連活動と連携しながら検討を深める必要がある。

第五に、**協調領域と競争領域の境界の継続的見直し**である。本報告では、意味構造や基本枠組みを協調領域として整理し、具体手法や実装ロジックを競争領域として残す立場を採った。しかし、技術成熟や業界内の合意形成が進めば、現時点では競争領域と考えられる部分の一部が、将来的には共通化候補となる可能性もある。逆に、共通化しやすいと考えられた項目が、実装に近づくことで個社差別化と強く結びつく場合もある。このため、本報告で示した切り分けは固定的なものではなく、今後の議論と検証を通じて継続的に見直す必要がある。

## 10.4 次年度に向けた展望

本WGでは、次年度以降の活動として、本報告で整理した情報要件を基礎に、**具体的なインターフェース仕様の検討**を進めることが望まれる。特に、意味構造として整理した各階層の情報を、どのようなデータモデルとして表現するか、どの主体がどのタイミングで生成・利用するか、異常時やモード遷移時にどのような追加情報が必要となるかといった点を、より具体的に詰めていく必要がある。このとき、単に網羅的な情報項目表を作るのではなく、ユースケースに照らして「何の判断を成立させるための情報か」を意識しながら仕様化することが重要である。

また、次年度には、**ユースケースベースの検証活動**を通じて、本報告で整理した枠組みの妥当性を確認していくことが有効である。Pick & Place を起点としつつも、対象物特性、品質要求、工程構成、遠隔介入形態が異なる複数ケースを用いて、4階層情報要件の汎用性と限界を検証することが望ましい。

これにより、どの情報が本当に共通基盤として必要か、どの部分はユースケース依存として扱うべきかをより具体的に把握できるようになる。

さらに、仕様化と並行して、他WGや関連活動との連携強化も重要である。特に、安全に関する検討を行うグループ、遠隔運用や監視システムを扱うグループ、マニピュレーション要素技術を扱うグループとのあいだで、本報告で整理した意味構造や情報モデルを共有し、相互参照可能な形で議論を進めることが望ましい。このような連携により、本WGの成果を個別文書に閉じず、より広い枠組みの中で活用しやすくなる。

加えて、次年度に向けては、標準化候補の具体化も視野に入れるべきである。現時点では、4階層構造、状態・余裕度・確信度・モード・権限といった意味構造が共通化候補として整理されている。今後は、これらの概念のうち、どの部分を優先的に共通モデルとして整備するか、またそのためにどの粒度まで定義を与えるかを検討することが望ましい。このとき、具体手法やアルゴリズムを規定するのではなく、相互運用性と理解容易性に資する最小限の意味共有を目指すことが重要である。

以上より、次年度以降の活動では、本報告で整理した考え方を出発点として、情報要件の詳細定義、インターフェース仕様化、ユースケース検証、関連活動との連携、標準化候補の絞り込みを段階的に進めていくことが望まれる。本WGの成果は、現時点では考え方と枠組みの整理に重点を置くものであるが、今後これを具体的仕様と検証に接続することにより、自律ロボットシステムの実用化と業界内での共通理解形成に資する基盤へと発展させていくことが期待される。

## 第10章 まとめと今後の課題

### ① 本WGの成果の整理 (10.1節)

成果①	<b>半自律の概念整理</b> 固定的役割分担 → 状況に応じた責務移行の構造として「半自律」を定義
成果②	<b>自律機能の体系化</b> 検知・予測・回避・リカバリ・人介入を一連の機能として整理 (第4～7章)
成果③	<b>情報要件の4階層構造</b> 成立条件・観測状態・予測リスク・介入制御を判断主体依存しない共通基盤として体系化
成果④	<b>インターフェース仕様への接続</b> 意味構造整理 → 生成主体・利用主体・粒度・更新頻度の設計論点を可視化

### ② 残された課題 (10.3節)

課題①	<b>情報要件の具体化</b> 各情報項目の定義・表現単位・精度・更新条件を詳細化
課題②	<b>IF仕様への具体的展開</b> データモデル・更新周期・信頼性指標の設計
課題③	<b>ユースケース検証</b> 他マニピュレーション作業・異なる条件での適用確認
課題④	<b>安全・セキュリティ整理</b> 安全関連部との境界・遠隔介入時の制約整合
課題⑤	<b>協調/競争領域の継続的見直し</b> 技術成熟・合意形成に応じて境界を柔軟に更新

### ③ 次年度に向けた展望 (10.4節)

仕様化	検証	連携	標準化
4階層情報をデータモデルへ	ユースケースベースで確認	他WG・関連活動と相互参照	共通モデルの候補を絞り込み

### ④ 本報告の位置づけ (10.2節)

本報告は最終仕様書ではなく、今後の「仕様化・検証・合意形成」に向けた中間成果物。具体実装ではなく「考え方の共通化」と「論点の見える化」を担う文書として位置づけられる。



**ロボット革命・産業IoTイニシアティブ協議会**  
**Robot Revolution & Industrial IoT Initiative**