



TCPAI

Tough Cyberphysical AI Research Center
Tohoku University



TOHOKU
UNIVERSITY

屋内外の困難フィールドにおける ロボット活用のニーズと課題 の調査

田所 諭

東北大学

タフ・サイバーフィジカルAI研究センター

大学院情報科学研究科

災害科学国際研究所

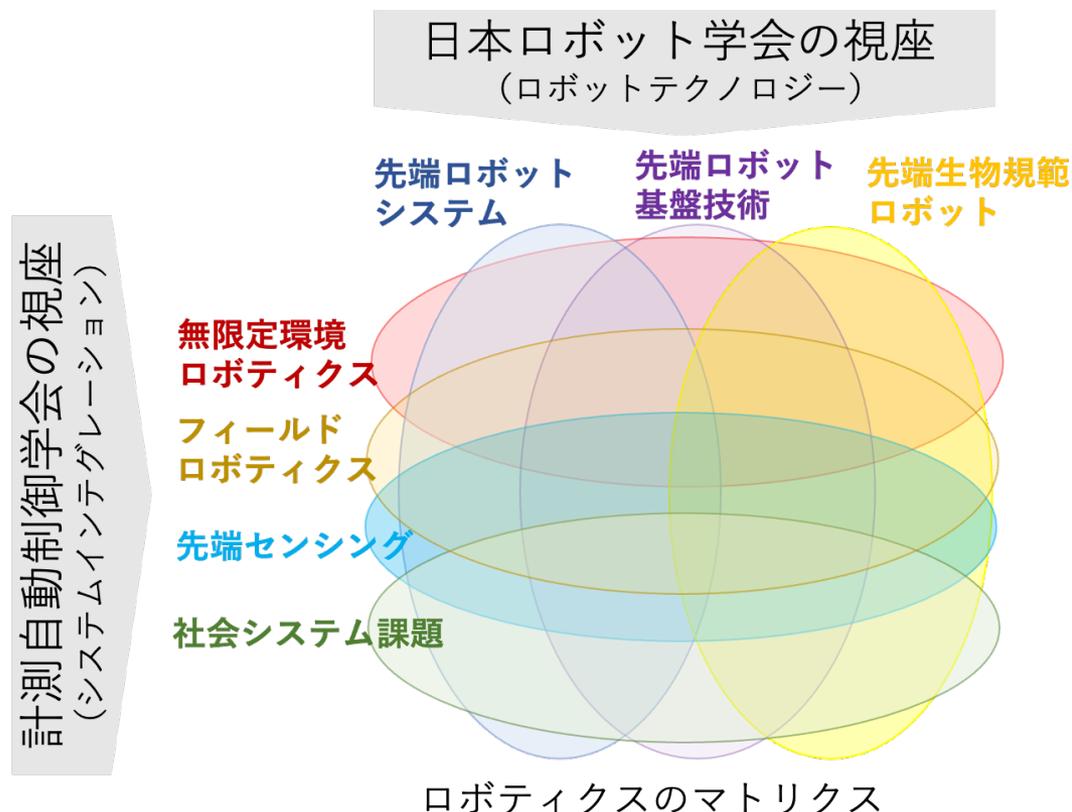
国際レスキューシステム研究機構

調査の目的と分担

- 福島国際研究教育機構(F-REI)からの委託
- 3学会が受託
 - 計測自動制御学会:屋内外の困難フィールドにおけるロボットやドローン活用のニーズと課題に関する調査
 - 日本ロボット学会:屋内外の困難フィールドにおけるロボティクスの技術調査
 - 日本機械学会:屋内外の困難フィールドにおけるドローンに関する調査
- F-REIの目標・評価軸に基づき,考えた調査の目的
 - 復興に寄与するための手段として,困難環境に関する研究教育の戦略的方針を検討する.
 - 学術的・産業的な科学技術研究とその発展,社会的な課題の解決と社会実装の両輪を目指す.
 - 能登半島地震など,頻発する災害に対して,より良い防災の手段を提供することを目指す.
 - 科学技術と社会におけるステークホルダーの協力を促進する.

調査の目的と分担

- 計測自動制御学会と日本ロボット学会の役割分担
 - 計測自動制御学会：ロボットの利用現場の目線で、システムインテグレーションを軸に
 - 日本ロボット学会：ロボットの先端技術の目線で、ロボット技術を軸に



計測自動制御学会調査の基本戦略方針

■ 集中目標

- 活用場面を想定して、ロボットの主要なニーズにおける、さまざまな「課題」を明らかにする
- ロボットやドローン本体はもとより、エコシステム全体を設計する、というSIの立場
- 今後重要になる「ニーズと課題」を発掘
- その実現に必要な技術・ハード・ソフトの現状と、将来の姿を俯瞰する
- 先端的なセンサとその周辺技術について調査する

■ 明確な集中と選択

- ロボット事例などの一次データは、他学会に譲る
- 俯瞰してエッセンスを抽出した、本当のニーズや、本当の課題の二次データに注力する
- 当該分野の著名な研究者の経験に基づくフィルタリングにより、コンパクトに全体を理解する
- ハンドブックのような網羅的な調査は行わず、シャープな論点を提示する

■ 尖った内容とするために

- 執筆者によるバイアスを避けることは、しない
- 意見の相違を著者間で議論して合意を形成することは、しない

■ その結果

- 類似点を持つ分野を複数、平行して調査し、執筆者の意見が独立に反映されている
- 関連する複数の章を読み、相互に比較することにより、多様な視点を確保できる

- 委員長： 田所， 副委員長： 金広
- まえがき： 大須賀， 田所
- 1. はじめに： 田所
- 2. 建設工事・点検： 永谷， 竹囲， 橋本， 大野， 岡田， 羽田
- 3. 原子力・廃炉： 川端， 岡田
- 4. プラント： 井川， 大西， 藤田， 奥川， 大坪， 佐藤， 小島， 屋代， 中村
- 5. モビリティ・自動運転： 鈴木， 蓑田， 出口， 奥田， 赤木， 伊藤
- 6. 災害・安全安心： 田所， 天野， 越村
- 7. 農業： 徳田， 太田， 飯嶋， 美保
- 8. 宇宙： 久保田， 上野， 木村
- 9. センシング技術： 小林
- 10. 論文及び特許調査報告： 村上
- 11. 困難環境と技術課題： 田所

建設工事・点検(土木施工)

- 施工の計画・管理の自動化
 - スケジューリング:重機30台12時間で, 1,500の作業
 - モニタリング, 進捗管理, 再計画, 人間の介入, 評価
- 重機の走行制御・作業の自動化
 - 環境変化(対象, 形状, 天候)
 - 少量多種作業
 - 想定外への適応, 自動変更, リアルタイム再計画
- 求められる技術の方向性
 - 情報化施工, デジタルツイン, 仮想環境
 - 自動運転, 自動施工
 - 現場の工場化
 - 困難条件下でのモニタリング, 制約限定下でのセンシング, 作業進捗評価
 - システム全体の連携, イレギュラ事象対応, の自動化
 - 人間の介入
 - システムインテグレータ
- 自動化の困難性
 - モデルと現実のギャップ
 - 定型化しがたい多様性・複雑性
 - 想定外の変化
 - リアルタイムな適応
 - 人間の介入
 - 経済性
 - 安全性
- 社会実装の課題
 - 安全法令等の整備
 - 協調領域の明確化(インタフェース・機能の標準化など)
 - 参入障壁を下げたオープンイノベーション(他業種, 大学等)
 - 役割分担(施工計画, 施工・労務・機材管理, 多社連携など, エコシステムの根本的再設計)

- 困難な環境条件
 - 高所, 斜面, 谷, 山, 狭隘, 暗所, 水中, 地中, 凹凸・曲面, 添架物, 障害物, 植生, 住宅・私有地との干渉
 - 天候, 雨, 風, 雪, 霧, 海水, 波, 水の濁り
 - 対象部材, 場所などの条件の多様性
 - 作業の複雑性, 必要精度, 必要距離・面積, 安全性
- 困難性の種類
 - 移動, 作業, センシング
- 点検システムに望まれる技術
 - 収集データ管理, 点検調書作成
 - ビッグデータ解析,
 - 準備の簡易性, コスト低減
 - 人間との協力
 - ハードウェア性能, タフさの向上
 - 移動体通信の速度, エリア, ハンドオーバー, 信頼性向上
- 自動点検に望まれる技術
 - 移動・作業・センシングの自律性の向上
 - 点検の上位タスクの立案の自律性の向上
 - 自律知能の耐久性・信頼性の向上
 - 失敗時のリカバリ(やり直し, 別の方法に工夫, 修理する)性能の向上
 - タスクに合わせたハード・ソフトの最適化
- ドローンに望まれる技術
 - 点検できる時間の長時間化
 - テザードローンの逸走防止, 運動性能向上
 - 補修, 撤去作業の実現
- ロボットに望まれる技術
 - 変状の発見と補修をその場で実施
 - 補修材料などの重量物の運搬能力
 - 補修に必要な大きな力を発生する能力
- インフラのホメオスタシス技術
 - 自己治癒, 自己修復
 - タフ・ロボット, ソフトロボット
 - 極限センシング
 - 信頼できるAI
 - 次世代移動体通信

建設工事・点検(降灰後土石流・河道閉塞)

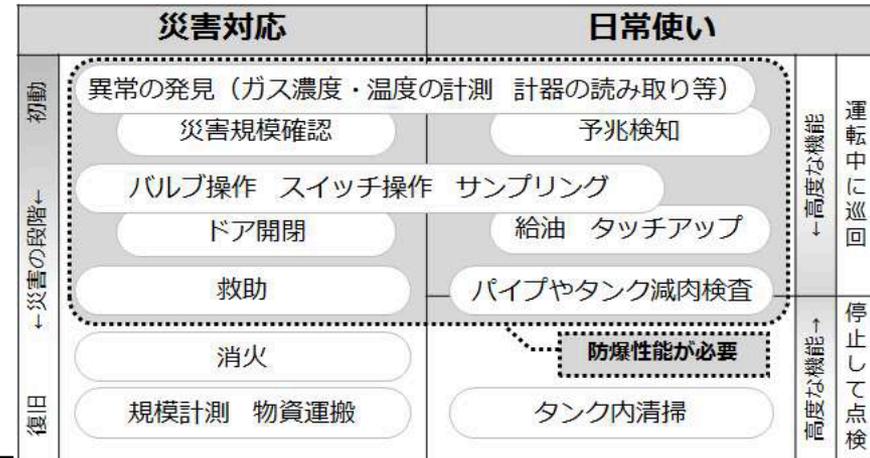
- 火山降灰調査
 - マニュアルに基づく, 堆積範囲, 厚さ, 地形変化, 粒径, 土質, 降雨量履歴, 等の計測
- 困難な課題
 - 崩壊の発生・成長過程の調査技術, および, 調査終了の判断
 - 崩壊箇所下流の土砂堆積の計測による土石流の事前予測
 - 長期モニタリングデバイス(バッテリー, 通信, 設置, 耐環境性能)
 - マニュアルの整備, 調査から避難までの体系化, デバイスの量産販売, など, 法制, 人材, 社会, ビジネス面からのシステム設計と研究開発
- 河道閉塞対応
 - 水路工事: 排水しながら土砂を除去, ホース敷設によるポンプ排水
 - 土砂崩れ, 水に浸かった軟弱地盤での作業
 - 山間部の現場までのアクセス, 資機材運搬, 通信
- 河道閉塞対応の困難な課題
 - 地盤状態のセンシングと, オペレータへの提示方法
 - 建設機械の省人化, 複数機の連携, 電動化, エネルギー補給, メンテナンス性向上
 - 通信の長距離化, 高速, 低遅延, 自営網通信回線設計技術

原子力・廃炉(事故炉廃炉の課題)

- 放射線対策・遮蔽技術: Sv/hレベル, 重量
- 移動: 困難, 動作制限, 遠隔操作, ケーブル制約, 風による飛散
 - センサやツールのデリバリ
 - 狭隘通路, 階段: 段差, グレーチング, 瓦礫, 塵埃
 - 高所: 直接確認困難
 - 貫通孔: 0.1m程度
- マニピュレーション: 制御性, 操作性
 - アクセスルート確保
 - (ドア開放, 障害物・干渉物撤去)
 - 構造物の分解
 - 放射化したダストの除去
 - 拭き取りサンプリング(スミア法)
 - コンクリートのコアサンプリング
- 除染: 高所, 複雑形状, ロボットの汚染, メンテナンス
- ケーブル・テザーマネジメント: 絡まり防止, 送り出し・巻き取り, 引きずり, 水中
- 無線化: 安定化, 機器影響, セキュリティ
- 遠隔操作支援: 操作員の負担軽減, 的確な状況判断, リスク低減
 - 映像: 視点, 3D情報, ノイズ, 視認性, 情報整理
 - 操作IF: 標準化, AR, 操作指令デバイス
 - 1台のロボットで遠隔作業を完遂できるシステム
- 操作訓練: 仮想環境の再現性(精度・応答)
- 自動化: 操作者の負担軽減, エラー防止
 - 担保すべき要件:
 - 作業の安全性を十分に確認できる
 - 導入局面の見極め,
 - オペレータの任意介入,
 - デジタルモックアップ
 - 関連情報取得, 動作計画計算,
 - リスクアセスメント, モニタリング,
 - 環境変化・変容検出, 異常検出
- 情報通信, マッピング, 設置型IoT
- 性能評価手法
 - 客観的評価手法の開発
 - 研究開発の方向の正準化

プラント(スマート保安)

- スマート保安の流れ
 - デジタルツイン
 - プラント操業のAI化の流れ
 - 異常診断・事故分析のAI化
 - 情報を収集するためのセンサ
フュージョンIoT, ロボット
 - ドローンの安全な運用に関するガイドライン
 - 平時からの連続性, 自律巡回監視+事故対応



- 引火性ガスプラント点検ロボットの課題
 - 防爆: 石油ガス化学, 食品, 半導体プラントなど
インシデント時, 日常点検業務
耐圧防爆, 内圧防爆
 - 引火性ガス環境での無線通信: 4G/LTE
 - 防爆規格: IEC60079 (IECEX), 防爆技術指針(日本), ATEX(欧), Divisionシステム(米)

■ 点検と異常対応に必要な基本性能と困難性

- PA1: 移動性能: 空間的制約, 経路の制約, 路面形態, 環境条件
- PA2: 作業性能: マニピュレーション, 位置決め, 姿勢制御下での作業, バルブ調整, 触診, など
- PA3: インタラクション性: 狭隘, 閉所, 暗所での操作性, 操縦学習時間, 操縦支援性能, 自律制御性能, オペレータの介入, 教示, 複数ロボット
- PA4: 点検能力: 目視検査, 打音検査
- PA5: 健全性評価診断能力: 診断デバイス使用, データ解析能力
- PA6: 点検調査結果報告能力: マッピング, 結果提示, レポート作成, 分析・解析, 事象の特定
- PA7: 環境ロバスト・適応能力: 路面状態, 通信障害, 視界不良, メータ不良, 風, 音, 漏電など

■ ロボットシステムのサイバーセキュリティの困難性

- 情報システムのセキュリティと, 制御システムのセキュリティの相違
- 資源の制約: 暗号などセキュリティ機能は負荷が大きい
- 可用性の制約: ソフトウェアのアップデートが難しい
- 長期のライフサイクル: サポート終了OSの継続使用など
- 多様な攻撃経路: リモート保守回線, 保守用端末, フラッシュメモリ, ソフトウェアライブラリなど
- セキュリティ管理体制の不備: メーカーサポート, ユーザ対応, インシデントレスポンスの困難性

■ 消防における困難課題

- 消火：隊員のリスク低減，大規模火災への対応
住宅，倉庫，構想，石油化学プラント，自動車，高齢者施設，トンネル，
林野，震災津波，市街地大規模火災
被災建築物のモデル化
- 救助：創作能力の向上，隊員のリスク低減
水中探査，土砂災害，震災
- 救急：家屋，閉鎖空間での搬送の課題
- 火災予防・危険物施設：スマート保安

■ 都市型捜索救助における困難課題

- ユーザミッションの中で，資機材としてのロボットの役割と位置づけ
- 移動技術，検査技術，作業，環境認識，自律知能，ヒューマンインタフェースの課題
- 通信，耐環境性，防爆の課題
- 社会受容，普及の課題

■ 災害デジタルツイン

- 広域被害把握と社会動態把握
- センシングとリアルタイム予測

- 自己位置推定技術の困難課題
 - 特徴の少ない空間
 - 中長期的な環境変化に対するロバスト性
 - 自己位置推定の信頼度・自己位置推定可能性の推定
 - 高精度ナビゲーション地図作成の自動化・半自動化
 - 自己位置推定やその精度に依存しない自動運転アーキテクチャ
- 環境認識技術の困難課題
 - 悪環境：天候など
 - 悪条件：遠距離，写真や鏡との区別など
 - 大量学習データの問題
- 制御の困難課題
 - 対象のモデル化が困難
 - 制御入力の計算が困難
- 行動計画の困難課題
 - 他者の行動の予測，他者への配慮，社会的受容性の確保
 - 目的関数の定め方，解き方
- 自動運転の実証試験，受容性評価の困難課題
 - 実証実験実施時の課題
 - 実証試験をサービス化段階へ移行する際の課題
- 自動運転技術の製品化における困難課題
 - 手段から目的に主眼を置いた製品規格・技術開発への転換
 - 製品化に向けた自動運転システムの要件定義
 - 技術開発から製品開発への移行

■ 宇宙探査の課題

- 着陸技術
- 不整地走破技術
- 宇宙環境適応技術
- 自動化自律化技術
- 搭載機器小型省力化技術
- 複数ロボットの協調技術
- 小天体内部探査技術
- 探査ロボットの修理・修復技術
- 月面インフラ構築技術

■ 軌道上サービスの課題

- 時間遅延下での遠隔操作技術
- 非協力的衛星へのサービス技術
- 修理交換・推薬補給サービスの共通化・標準化技術

■ 有人支援ロボットの課題

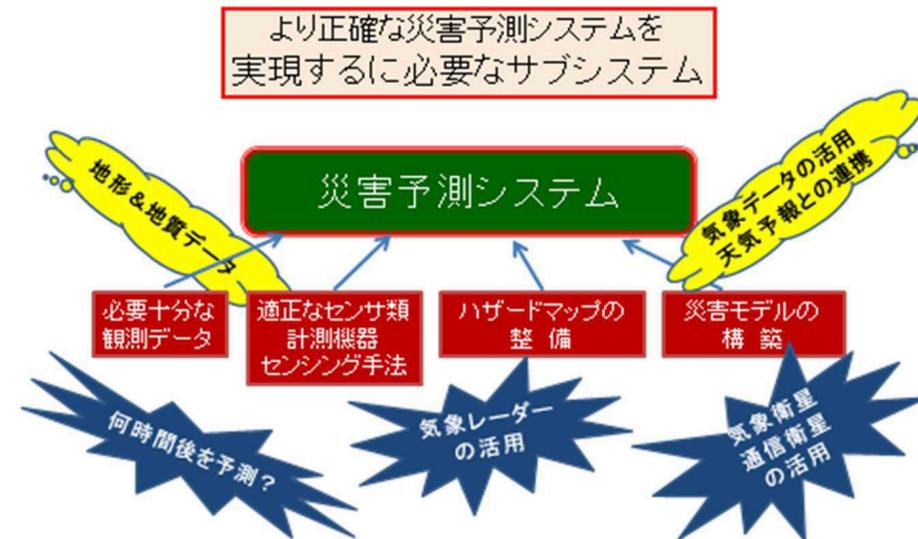
- 有人ミッションにおける協調運用技術
- 有人安全要求対応技術
- 飛行士介在可能なロボット制御技術
- 船内実験・船内作業の自動化・自律化技術
- 長期滞在での健康管理・遠隔医療技術
- 現地資源利用・食物生産工場・月面拠点とロボット技術

■ 小型衛星の課題

- スペースデブリ除去の課題
- フォーメーションフライトの課題

- センシングの課題
 - 作物の部位の判別, 外乱の影響
- アクチュエータの課題
 - 軟弱果実のハンドリング
- 移動・行動計画の課題
 - 圃場条件
- 実用化・汎用化の課題
 - コスト低減, 普及

- センシングの利用拡大
- 雑音
- 認定使用要件 (LOS; List of Specifications)
- センシング系の設計
- 複合計測 (データマイニング)
- 予知・予測

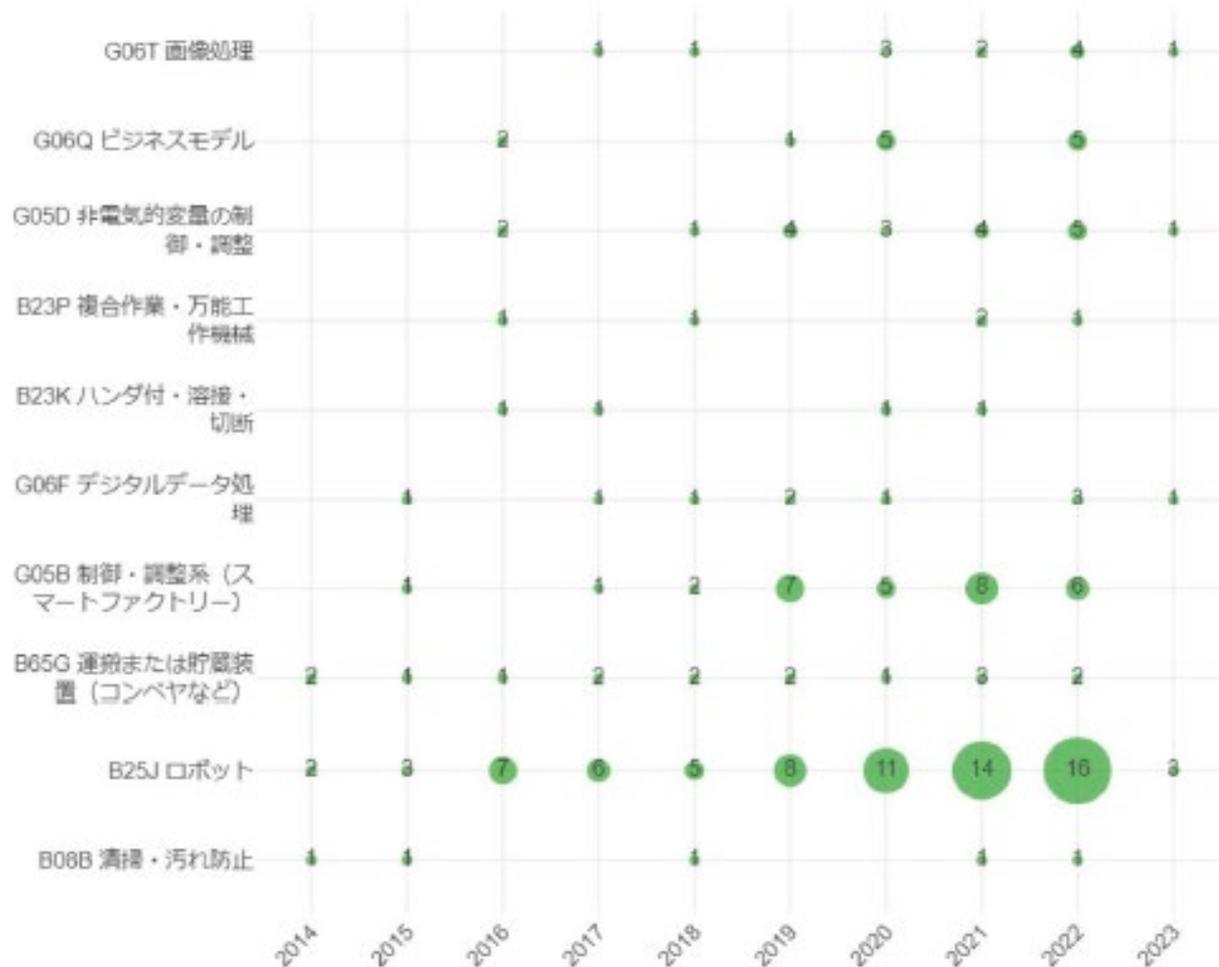


論文及び特許調査

- 各分野における特許動向の調査(例:ロボットのプラント応用に関する特許)
- 論文調査(例)

分類項目

- 人間との協調
- 自律性の実現
- ナビゲーション・経路計画
- 障害物回避
- 制御
- ロボットの構成・機構
- デジタルツイン
- 生産・加工
- 輸送・物流
- 検査・保全・保安・防災・救助
- 洗浄
- 廃棄物選別



調査結果から共通課題を抽出

■ 技術課題

- 移動
- センシング
- 作業
- 認識
- 自動化, 自律知能, 複数協調
- 遠隔技術
- ヒューマンインタフェース
- 通信
- エネルギー源
- 人間へのアシスト
- 仮想環境と意思決定支援
- 耐環境性, 信頼性
- メンテナンス性
- 設計最適化
- 汎用性
- データ収集
- 試験法

■ ユーザニーズ課題

- ミッション計画・工法
- 情報収集整理
- 人の安全, リスク低減
- ロボット作業の安全
- ミッションモニタリング
- ミッションと現場の理解
- 現場状況不明
- 平時と緊急時の切り替え

■ 社会課題

- 人手不足
- 経済性
- 産官学民, 事業者間連携
- 標準化
- 法制・制度整備
- 社会受容
- 販売
- 事業企画, 導入戦略

共通課題(移動)

センサやツールのデリバリ, 人間や荷物の運搬
高所, 斜面, 切り立った谷間
階段等の段差, 瓦礫, グレーチング, 縞鋼板, 梯子
凹凸, 曲面, 複雑形状, 土路面, 耕作地, 丘, 山
水中, 河川, 海洋, 水たまり, 砂利, 泥
地中, 土砂崩れ, 軟弱地盤, 樹木を含む
空中, 強風, 狭隘, 降雨
貫通孔, 狭隘通路, 太さ, 曲率, 分岐, エッジ
タンク内面
無重力, 小重力
砂地, 柔らかい土壌での沈下, 横滑り
縦穴, クレータ崖
狭隘, 屋内, 閉鎖空間,
懸架物, 植生, 枝葉, 草
決壊の恐れ
遠距離アクセス
通信不良
低温環境
設置場所
暗所
ケーブルによる反力

プロペラによるダウンウォッシュ
危険物汚染, 放射能汚染, 感染環境, 酸
欠, 高温, 高湿
経路の制約
センシングが困難
動的障害物
火災, 高温, 爆発性雰囲気, 爆発
動作時間, 飛行時間
逸走, 安全不足
位置決め, 速度精度, 力制御精度
隙間に対する做い動作
ケーブルの送り出し, 絡まり防止, 絡ま
りを解く, 絡まりに影響されない
重心バランス
狭隘地での旋回
広い動作空間
スタック回避, リカバリ
耐衝撃
コスト, 速度
低消費電力
長距離移動
複雑機構, ドリフト, スリップ, 劣駆動
系, 冗長系の制御

共通課題(センシング)

目的とする情報収集のためのセンシング (異常状態, 変状など)
ロボット動作のためのセンシング
土量, 転圧, 他の工事データ
写真測量
雨水の浸透能力
水深, 水中地形
降灰厚, 水野浸透能
地盤状態
放射線量, 線源分布
保全状態の判定
寿命診断
配管肉厚予測
隠れた場所の目視点検 (配管保温材, 耐火材の下, 構造物の隙間など)
保温材剥離箇所の発見
狭隘閉所空間のモニタリング
崩落箇所の調査
打音検査の代替
軌跡と現在位置の誤差
火災, 鎮火後の状態
位置計測, 推定

外部からの被害把握
果実, 茎, 枝葉,
鳥獣侵入検知
添架物, 植生
狭所, 閉所, 閉鎖空間など, 空間的制約
電磁気外乱, 衝撃外乱
死角, オクルージョン, 煙, 霧, 水蒸気
暗所, 外乱光
断熱材 (撤去・復旧)
タンクの解放が不要にしたい
高温, 高湿
暗騒音
水中, 地中
非GNSS
太陽光, 表面状態の影響, 土壌付着
種類が多すぎて, 個別対応が必要
センシングできるデバイスがない
自動センシング
障害物をよけた, 排除したセンシング
小型, 軽量でロボットに搭載可
診断
精度, 分解能,

信頼性
エネルギー
メンテナンス
長寿命化
故障の通知
動作環境条件
環境改善

共通課題(作業)

ドローンによる補修, 撤去作業
人ではできなかった建設作業
土砂崩れ, 水につかった軟弱地盤作業
サンプリング
除染
移動マニピュレーション
水中作業
重量物ハンドリング
機器保守, 点検
バルブ操作
触診, 非破壊検査
消火の放水
活動のための開口部作成
人命救助のための土砂掘削搬出
物資運搬, 被災者搬送, 遺体収容
小天体内部探査, 掘削
月面インフラ構築, 軌道上での製造・組立,
食物生産, 資源利用
衛星・スペースデブリの撤去, 非協力対象
へのサービス
衛星の軌道の修正
他の手段では困難な環境条件での作業

アクセス困難
不定型な対象
種類が多すぎる
コスト, 速度, 効率
失敗時リカバリ
変状を発見したら, すぐにその場で補修
大出力, 衝撃力, 高重量
高精度
有線ケーブル
長時間, 繰り返し
高効率, 確実性, 信頼性
果実に損傷を与えない
汎用性, 複数作業実施で, コスト低減
小型軽量化
1台で作業を完遂
作業を容易にする環境整備

共通課題(認識)

データの解析, 解釈, 過去との比較
3D空間マッピング
自己位置推定
デジタルツイン
死角, 見えない状態の推定
異常検知, 変状の早期発見
センサフュージョン
寿命診断
将来予測, 他者の行動予測
故障判断
計器読み取り
結果呈示, レポート作成
事象の特定, 原因推定
対象物の属性認識, 特徴認識, 意味情報抽出
認識の信頼度の定量化
認識可能性の推定
歩行者, 自転車
果実, 枝葉など, 不定型なものの認識

種類が多すぎる
侵入の検知
出荷タイミングの推定と, 生育の予測
相対的な運動の推定, 位置推定
時間変化(植生, 建物形状など)
動的障害物による自己位置推定の問題
少ないデータ量, 少ないアノテーション量での学習
巨大学習モデルのエッジへの搭載
リアルタイム化
オクルージョン, 霧, 豪雨時の画像認識
困難環境での学習データ不足
解像度不足
ポスターや鏡に映った対象のご認識
未学習物体は認識できない
学習データの動的な選別
モデルが大規模
学習モデルの説明可能性
信号発生場所の特定
非GNSS環境
家屋被害, 瓦礫, 被災者捜索における, 観測の迅速性の確保(衛星, 無人機)

共通課題(自動化, 自律知能, 複数協調)

環境に設置した機器の協調
作業計画の立案
変状の発見と補修を一気通貫に
省人化, 無人化, 遠隔化
複数連動のための自動調整
膨大な数をこなす, 長時間作業
デジタルツインとの連動
障害物回避, 行動計画
交通弱者の行動への対応
構造モジュールの自動展開・結合・自律移動・
自己修復・再構成
障害時の動作変更, 適応の自動化
機械の個体差, 環境の差異, 気象条件によるば
らつきの調整, 学習
有人機と無人機の協働
自律機能の耐久性, 信頼性
失敗時の自動的なリカバリ
定型化しがたい, 作業の種類が多く, イレギュ
ラが多いケース
協調作業
部分的自動化

ロボットに搭載しての健全性評価診断
次のアクションや対策の自動策定
少ないデータ量, 少ないアノテーションでの
学習
学習モデルのサイズ, エッジへの搭載, 説明
可能性
他者とのインタラクション
現場でのリアルタイムな行動の修正
災害環境の困難性
イレギュラ事象の理解と, それに基づく判断
情報共有
センシング制約と時間遅れ
安全かつ効率的な移動探査
中途での人間の介在
人間の誤判断, 人為ミスを許容するシステム
デジタルツイン
連携協調, 役割分担した作業の実施
他者とのインタラクションを考慮した行動
協調による冗長性の活用
コスト, 手間

共通課題（遠隔技術，ヒューマンインタフェース）

遠隔技術

施工管理自動化
人間との協働
遠隔操作を前提とした工法
移動（広域，狭隘など），センシング，通信（遮蔽，時間遅れ，不安定など）の制約下での遠隔操作
オペレータの **situation awareness**
誤操作の防止，操縦訓練の容易性
オペレータの意思決定支援，情報強化，部分的な作業代替，操縦者の環境

ヒューマンインタフェース

人間の指示，知見の有効な活用
オペレータの **situation awareness**
遠隔操作HIの標準化
直感的にわかりやすく，間違えない
手袋装着，騒音環境でも操作可能
習得が容易
自動機能による支援（マッピング，結果呈示，レポート作成，分析，事象特定など）
予測による未来の状態，記録による過去状態の呈示
単一UIで，さまざまな作業に対応できる汎用性
高いユーザビリティ（効果，効率，満足の3点について）
自動制御に対するオペレータのスムーズな介入
破綻を引き起こさないための，人間の介入の制限
作業者のミスや見落としが問題を起こさない，誤りを許容するシステム設計

共通課題(通信・エネルギー源・耐環境性, 信頼性)

通信

通信容量, レイテンシー, 通信エリア, 長距離, ハンドオーバー時間, 信頼性, 接続維持性能の向上
自営網通信, 一時的無線空間設置閉鎖空間, 水中での無線通信
通信ケーブルの取り回し
情報セキュリティ確保, アクチュエータを持つロボットのセキュリティ技術
無線通信の法規の国による差異, 国家保安上の制限
リソースの制約(エネルギー, 計算量, バンド幅, 電波出力, 無線規格)
データ圧縮, リアルタイム性
インフラの整備

エネルギー源

低温バッテリー
遠隔動力供給
小型省電力化, 放熱対策
エネルギー補給容易

耐環境性, 信頼性

気象条件
環境条件や個体差によるばらつきや変化へのロバスト性
汚染環境, 感染環境, 酸欠, 真空, , 高放射線, 火災, 高温, 高湿, 塵埃, 水中, 地中, などの困難環境
高所, 狭所, など, 場所の困難性
防爆
植生, 障害物
リカバリ, 自己修復
ロボットの除染が容易, メンテナンスが容易, 自己修復

共通課題(人間アシスト, 仮想環境と意思決定支援)

非熟練者でも作業できる
オペレータが容易に作業できるための使いやすさや自動機能
ヒューマンエラーが起きにくい情報呈示, 操作指示
短時間に人間が認知できる
人間の意思決定を支援できる
人間の困難な作業, 長時間で辛い作業, 過度な集中が必要な作業を代替できる
高いユーザビリティ (効果, 効率, 満足)
人間の行動を理解した設計
利用者の状態の確認
想定外の危険時の危険回避行動を支援し, 隊員の安全を守る
被災者の生活支援とメンタルケア
有人ミッションの支援
対人関係, 健康管理, 遠隔医療の支援
人間の指示, 知見の活用
人間への支援
人間の行動の理解不足, 行動の説明変数・行動規範
操作訓練の効率化, 仮想環境の活用など

データ収集, 連携のリアルタイム化
仮想環境上での, 情報取得, 動作計画, モニタリング, 実施確認
仮想環境上での, 変化検出, 異常検知, 事象のモデリング, 推論, 理解
仮想環境上での, 対応策の策定, 意思決定支援
仮想環境での, リスクアセスメント, 検証, 供用適正評価
デジタルツインの構築, 高精度化
仮想環境による学習データ生成
学習によるデジタルツインの成長
リスク状態, 運転条件, サイバーセキュリティなどの情報の呈示
デジタルツインとの接続APIの標準化
デジタルツインによる運用最適化
デジタルツインによるリアルタイム予測活動, 優先優位付けのための参考情報, 延焼防御戦, 放水位置の提案
必要リソースの見積, 指揮統制のための参考情報の提示
イレギュラな現象の理解を支援する

共通課題(メンテナンス, 設計最適化, 汎用性, データ収集, 試験法)

メンテナンス性

被ばく量を抑えるためのエネルギー補給,
メンテナンス容易性
ソフトウェアのアップデート
無人化と補給の矛盾
遠隔におけるシステム不具合への対応
健全性の診断と補修を一気通貫に
機器のメンテナンス体制の整備
遠隔での故障修理

設計最適化

タスクと制約条件に合わせた最適工法,
最適設計
ハードとソフトの同時最適化
スケーラビリティの確保
異常時の機能実現
困難環境のモデル化
大規模システムの設計と運用
多種多様な対象への合わせられる汎用性
材料やからくりによる課題解決

汎用性

多様なニーズに応え, コストを低減するための汎用性
異なる現場で技術の公約数を見いだし
共通性を確保する
ロボット技術の波及

データ収集

困難環境のデータが収集できない
目的を持ったデータ収集と利用方法を
体系化
収集データの秘匿性と活用

試験法

実証試験と実導入とのギャップ
実証試験の計画, 設計法, 管理体制
実証地域での周知, 受容性
危険物質, 爆発, 倒壊家屋など, 危険性を伴う実証試験の実施
評価法と評価基準の策定
限定的な試験からの評価, 真値推定

操作・指令・教示・認識・判断 (人間操作, 自律知能)

- ・直感的提示: マルチモーダル, 3D, 没入感, 空間把握, 疲労, 違和感
- ・人間の意図・意志の伝達・推定
- ・不足情報の能動的収集, 確認
- ・自律機能・部分自動化の知能: 作業教示, 機械学習, 記憶, 推定, 計画, 分散協調
- ・人間要素: 分担協力, 融合化
- ・無人化, 省力化

災害条件での行動決定

- ・状況認識・解釈と予測
- ・移動・作業の戦略計画知能
- ・失敗時のリカバリ, 修正

システム化の課題

- ・機能と制約条件のトレードオフ
- ・他システムとの整合
- ・システムマインドによる問題解決

無線通信・有線通信

- ・伝送遅延, 伝送容量, 通信距離
- ・障害物, 安定性, 切断復旧
- ・アドホックネット, メッシュ
- ・通信状態予測
- ・マップ: 位相, 反射, 回折, 干渉
- ・有線ケーブル: 切断, 絡まり, 運動・作業への影響, 引きずり負荷, ケーブルハンドリング, ルーティング
- ・通信改善のロボ知能

移動・静止・位置決め・力制御性能の課題

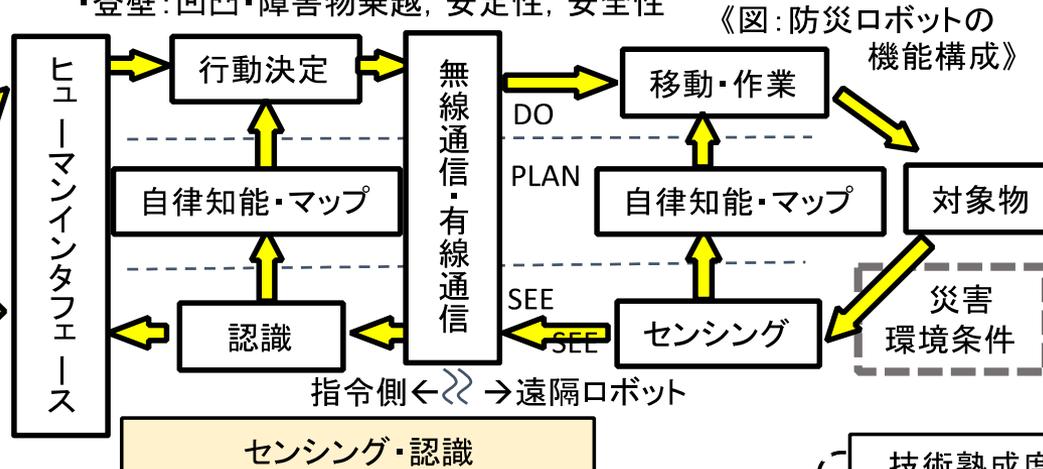
- ・車輪・履帯: 踏破限界, 段差, ギャップ, 斜面, 穴, 狭所, 不整地, 軟弱地盤, 低摩擦面, 地盤崩壊, 落下, 状況適応, 速度, 安定性, リカバリ, 引っかかり回避, 効率
- ・多脚: +狭所, 障害物, 耐衝突, 引っかけ防止, 耐久性, 信頼性, 車輪・履帯に対する優位性, 可搬重量
- ・ヘビ: +運動性能, 横転, 旋回半径, 引っかかり, 後退
- ・飛行: +強風, 空力, 障害物, 狭隘, 可搬重量, 飛行時間, 離着陸, 安全性
- ・水中上: 水流, 狭所, 位置決め, 係留索, 行方不明
- ・登壁: 凹凸・障害物乗越, 安定性, 安全性

災害条件下での作業性能の課題

- ・センサ位置決め: 汎用, 速度, 小型
- ・ドア・ハッチ開閉: 汎用, 自由度
- ・障害物除去: 双腕作業, 安全, 力
- ・サンプリング: 除染, 格納, 小型
- ・補強作業: 汎用, 実用化
- ・除染作業: 除染ツール, 範囲
- ・マニピュレーション: 双腕, 干渉, 自由度, 可搬重量, 把持力

災害環境条件の課題

- ・サイズ・重量
- ・運搬, 設置時間
- ・必要付加機材
- ・稼働時間・エネルギー補給・メンテナンス
- ・天候
- ・信頼性, 耐久性, 耐熱, 耐水, 湿度, 耐環境
- ・防爆, 現場悪影響防止
- ・予期しない状況へ対応



センシング・認識

- ・画像(赤外, 放射線, 距離, マルチスペクトル): 小型軽量, 精度, 照明条件ロバスト, 認識, 耐環境
- ・音声認識・定位: 雑音, 反響, 環境条件
- ・移動環境認識: 地面形状, 地盤, むれ
- ・触力覚: 状況判断, 空間認識, 小型軽量
- ・オドメトリ: すべり, ドリフト, 変形誤差
- ・自己位置推定: 環境条件, 精度
- ・マッピング: 精度, 破綻検知, 矛盾
- ・能動・分散協調: マルチモーダル, 時空間統合
- ・意味解釈, データマイニング, ビッグデータ

技術熟成度レベル(TRL)

- [9] 実機を配備してよく使われる
- [8] 実機を災害現場で実証
- [7] 試験機を災害現場でデモ
- [6] 試験機を模擬現場でデモ
- [5] 要素部品を模擬現場で実証
- [4] 要素部品を研究室で実証
- [3] 機能性能を解析と実験
- [2] 技術コンセプトと適用法発明
- [1] 科学技術の発見

TRLに
応じた
レベル
アップ

調査結果から共通課題を抽出

■ 技術課題

- 移動
- センシング
- 作業
- 認識
- 自動化, 自律知能, 複数協調
- 遠隔技術
- ヒューマンインタフェース
- 通信
- エネルギー源
- 人間へのアシスト
- 仮想環境と意思決定支援
- 耐環境性, 信頼性
- メンテナンス性
- 設計最適化
- 汎用性
- データ収集
- 試験法

■ ユーザニーズ課題

- ミッション計画・工法
- 情報収集整理
- 人の安全, リスク低減
- ロボット作業の安全
- ミッションモニタリング
- ミッションと現場の理解
- 現場状況不明
- 平時と緊急時の切り替え

■ 社会課題

- 人手不足
- 経済性
- 産官学民, 事業者間連携
- 標準化
- 法制・制度整備
- 社会受容
- 販売
- 事業企画, 導入戦略

共通課題(ミッション計画・工法)

作業全体の計画が必要で、時間・コスト・安全性を最適化する必要がある
進捗に応じたダイナミックな計画の変更、適応を自動化する

準備作業（事前現場調査、足場、交通規制、住民など）の時間コスト

多様な対象それぞれに対して合わせこんだ計画が必要

ロボットに適した工法，生産方法，流通方法，サービス方法の開発

自動的な計画の策定

ロボット作業環境整備（現場アクセス，運搬，インフラ構築，セットアップなど）の時間コスト

災害避難計画と，調査，対応計画との整合

作業全体を総合的に管理する3D情報基盤システム

想定外があることを想定した計画

1台で作業を完遂

オペレータの介入

デジタルツインによる運用の最適化

動作環境の整理と，そこで必要なタスクの整理，システムとしてのまとめあげ

要求事項が不明確で，理想と現実にギャップがある

目的を明確に定義し，分類し，ユーザ目線でのソリューションを計画すること

ユーザの深い関与による，仕様策定，使用法の開発

ユーザに対する活動支援の資機材としての総合性能

仕様現場の類型化と，適用範囲の限定

センシングと時間遅れの制約によって現場状況が不明な環境での，安全かつ効率的な移動探査

ロボット以外のソリューションとのシステム化

自動化が困難な場面の抽出

共通課題(情報収集整理)

遠隔リアルタイムモニタリング

情報の記録, 調書の作成, 記録の活用

その場での情報確認, データ取り直しや, 追加情報の収集

情報を統合的に管理するための3D情報基盤システム

仮想環境への情報収集

実データの仮想空間への3Dマッピング

さまざまなシステムと, デジタルツインとの間のデータ連係

仮想環境上のデータの分析, リスクアセスメント, 動作計画,

ロボット作業実施確認, 検出, 検知

データ量の爆発, ストレージ, 通信, データ処理能力の圧迫

災害時の情報収集困難性

データのアーカイブ化, アーカイブの利活用

平時データの収集と, 災害時の利活用

イレギュラな現象を理解して判断に繋げていく方法論

共通課題(人の安全, ロボット作業の安全)

人の安全, リスク低減

インフラ, 土砂

放射線量

潜在リスクの呈示, 事故・災害リスクの見積・予測,

パワー作業

爆発

火災消火活動の過酷性, 危険性

EVなどバッテリー火災

高齢者向け施設, 福祉施設の火災

震災火災, 津波火災

救助活動における二次災害のリスク

ロボット作業の安全

ドローンの逸走, 墜落

アクチュエータを持つロボットのセキュリティ

計算資源, エネルギーの制約による, エッジでのセキュリティ対策の限界

多様なサイバー攻撃経路

セキュリティ管理体制 (インシデント対応, サプライチェーン, ライフサイクル)

交通弱者の行動, ユーザの行動への対応

実証試験の危険性

システムの異常時における安全性の確保

有人安全要求対応技術, 2つの故障を許容する安全要求

予期しない危険が起きにくいシステム設計, 作業設計

共通課題（ミッション監視，ミッションと現場の理解）

ミッションモニタリング

問題発生時の動作の変更，適応の自動化
故障による影響を最小限に抑える
作業完了を検査して判断する技術
作業情報を総合的に管理するための3D情報基盤システム
デジタルツインでの，情報取得，動作計画、リスクアセスメント、実施
確認、環境変化／変容の検出、異常検出
データの位置情報への紐付け
オペレータによる計画と，ミッション実施中の介入

ミッションと現場の理解

事象の原因や過程に関する分析と理解
平時データの不足により比較不能
想定外があることを想定すること
ロボットが動作する環境の認知と，未来の状態の予測
どのような行動を良しとするか
発見した異常を，自動的に詳しく調べられる技術
平時からの連続性，平時の知見や体制を災害時に活用する方法論

共通課題（現場状況不明，平時と緊急時の切替）

現場状況不明

現場状況がわからない状態でのミッション遂行
想定外があることを想定すること
動作環境が刻一刻と変わること前提としたロボットの運用
イレギュラな困難状況下で自律ロボットの運用を可能にする
未知環境への適応のための学習機能
リアルタイム予測，予測に基づく行動計画

平時と緊急時の切り替え

通常時と緊急時・異常時の対応モードの即座切り替え
平時からの連続性，平時の知見や体制を災害時に活用する方法論
オペレータの介入
イレギュラ困難環境で自律運用を可能にする
問題発生時に問題箇所をその場でさらに詳しく調べる方法論
想定外の事態の対処に備え，オペレータやシステムが相互に介入可能
で，破綻を避けられる仕組み

共通課題(社会課題)

- 人手不足
- 経済性
- 産官学民, 事業者間連携
- 標準化
- 法令・制度整備
- 社会受容
- 販売
- 事業企画, 導入戦略

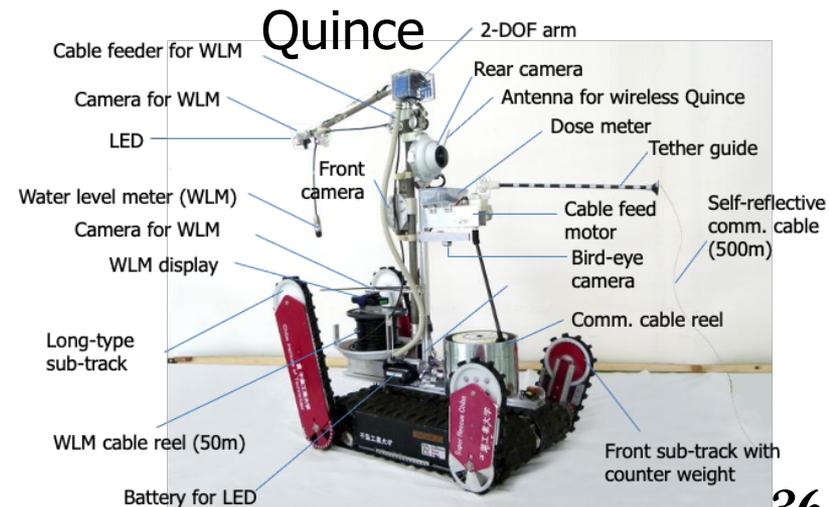
災害におけるロボットの役割

■ ロボットの役割

「遠隔自律機能により、人間の仕事を代替することによって、困難な仕事を可能にする」

■ ロボットが有効な場面：人間のための道具として

- 人間では不可能な作業を遂行（飛行、狭隘部、繰り返し作業）
- リスクが高い状況での作業遂行（汚染、感染、高所、狭所）
- 効率的に、短時間で、低コストで、作業遂行（自動化）



災害対応ロボット

予防: 狭所の点検

緊急: 上空・瓦礫内で被災者発見

復旧: 土砂ダムの調査・工事

予防: 高所の点検

緊急: 原発建屋内の調査

復旧: 無人化施工

人間では不可能・限界

人間では危険

災害ロボットは減災の切り札

迅速性向上, コスト低減

2つの用途

- 情報収集
- 作業遂行

予防: 足場不要・点検調査の自動マッピング

緊急: 広域自動調査

復旧: 足場不要・点検・調査



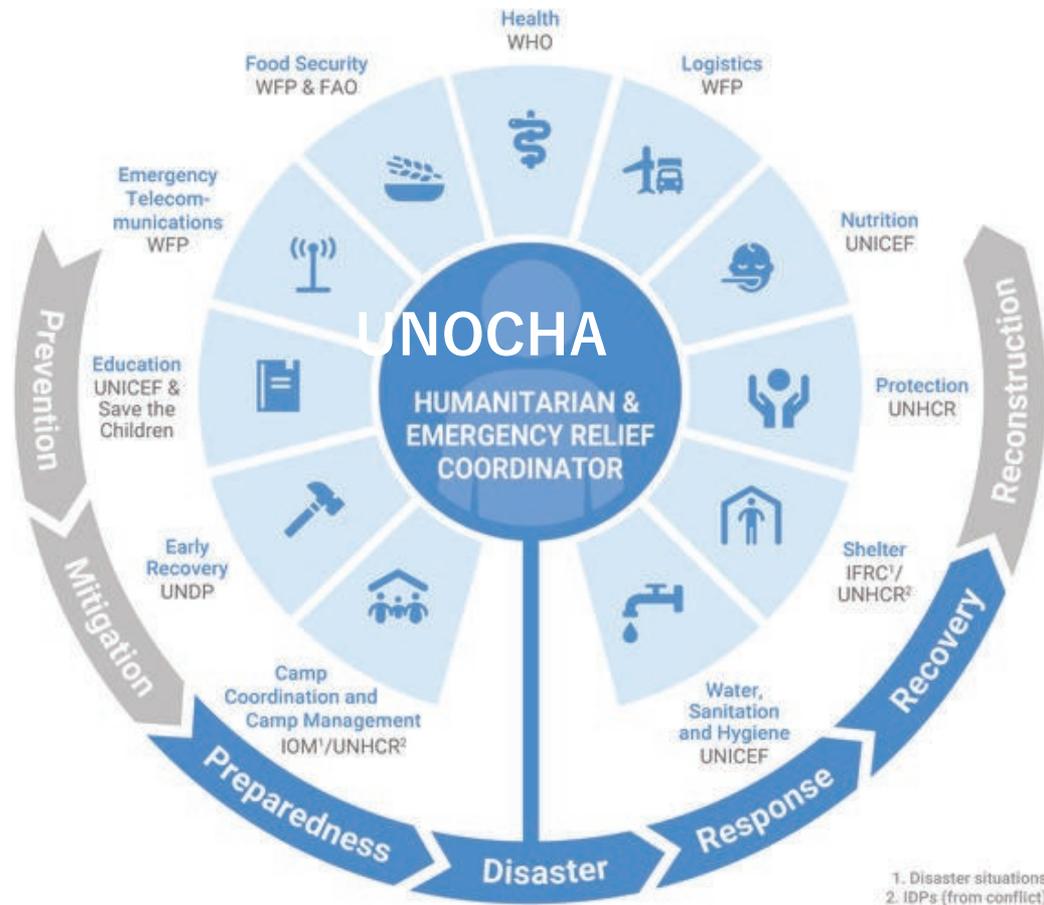
➤ OCHA (UN Office for the Coordination of Humanitarian Affairs)

- ✓ 自然災害・紛争災害での人道支援を効果的に行えるよう、国際機関や政府と協力して調整



➤ INSARAG (International Search and Rescue Advisory Group)

- ✓ UNOCHAの組織
- ✓ 都市型災害救助(USAR)と現場活動調整
- ✓ 国際救助チームのためのさまざまな標準化や級付け
- ✓ 地震災害、建物倒壊災害における、国際緊急対応の方法論の確立



災害における搜索救助の進め方に関する、国際標準としてのガイドライン

➤ ASR Level 1 (広域評価)

- 被災区域の予備的調査、活動準備
- 災害の範囲規模の特定、損害の範囲・位置・種類の特定、必要リソース推定、セクター分け、優先順位付け、全般的なハザードの特定、インフラの問題の特定、活動拠点候補地の特定

➤ ASR Level 2 (作業現場トリアージ評価)

- 担当セクター内で実行可能な生存者救助現場特定、活動優先順位付け、行動計画の決定
- 地元住民や地元対応者からの情報収集

➤ ASR Level 3 (迅速搜索活動)

- 速度を重視した、エリア全体の搜索救助活動
- 生存者救出機会を最大限に高めるため、時間のかかる活動を行わない
- 物理的搜索、救助犬、救助搜索用資機材の使用。
- 瓦礫撤去、限定的な支持施工・破壊・突破、構造物・瓦礫内への限定的な進入

➤ ASR Level 4 (全面的搜索救助)

- 救出困難な少数の生存者の特定と救助
- 生存可能な空隙のほとんど全てに進入
- 考えられるすべての搜索技術、資機材の活用
- 大がかりな支持施工、大規模な切断、突破
- 大型部材の昇降、移動。建物の解体
- 複数チームの長時間の活動のため、指揮統制が必要

➤ ASR Level 5 (全範囲をカバーする搜索と復旧)

- 遺体の収容
- 全ての空隙の搜索、進入、大型構造物の解体、重機使用

ロボット・ドローン = ガイドラインに従った活動を高度化するための
技術搜索用の資機材の一種

- ▶ ユーザは、ソリューションを求めている（災害緊急対応、災害復旧、災害予防）
 - ✓ 災害対応におけるリスクの低下
 - ✓ 災害に対応できるための情報
 - ✓ 災害被害を軽減するための作業
 - ✓ 活動を実施し、成果達成を容易にするための支援

- ▶ ユーザは、機材やロボットを求めていない（機材やロボット = 必要悪）
 - ✓ 高度技術を求めていない
 - ✓ 高価な機器を求めていない

◎例：災害空間を自律的に調査するロボット

- ▶ ロボットや技術を導入するベネフィットは何なのか
 - ✓ 人間がリスクを犯さず必要な調査ができるか
 - ✓ 人間が災害に対応できるための十分な情報が得られるか
 - ✓ 災害被害を軽減するための作業ができるか
 - ✓ 活動を支援できるか
- ▶ 人間を代替する場合、人間と同等以上のベネフィット、が求められる
 - ✓ そうでなければ、総合的にクオリティが低下する
- ▶ ロボットの自律性や知能は、目的ではなく手段
 - ✓ それが必要な場面もあり、ベネフィットをもたらすこともある

➤ ロボットの遠隔自律のレベル

- ✓ Full Autonomy – ロボットが自分で考えて行動
- ✓ Adjusted Autonomy – 人間の介入レベルを状況に応じて調整
- ✓ Supervised Autonomy – 人間の管理下で自律行動
- ✓ Shared Autonomy – 自律機能に人間が介入
- ✓ Guided Teleoperation – 自律機能によるガイドを受けながら遠隔操作
- ✓ Assisted Teleoperation – 自律機能に支援されながら遠隔操作
- ✓ Manual Teleoperation – 人間が遠隔操作

➤ ロボットの自律の種類（例）

- ✓ 認識系
 - センシング ⇔ データ解釈 ⇔ 計測条件改変 ⇔ マッピング ⇔ 環境理解 ⇔ 現象理解
- ✓ 移動系
 - 運動制御 ⇔ 環境対応 ⇔ リカバリ ⇔ ナビゲーション ⇔ 移動計画・変更 ⇔ 行動計画
- ✓ マニピュレーション
 - 運動・力制御 ⇔ 環境対応 ⇔ リカバリ ⇔ マニピュレーション計画・変更 ⇔ 行動計画
- ✓ 作業系
 - 認識系, 移動系, マニピュレーション, 他の, 総合
 - 行動計画 ⇔ 作業分析・変更 ⇔ 機能分解・変更 ⇔ 作業分析 ⇔ 目的
- ✓ 知能系
 - 認識系, 移動系, マニピュレーション, 作業系, 他の, オーケストレーション
 - 行動計画 ⇔ 行動案 ⇔ 目的 ⇔ 目的最適化 ⇔ 目的立案 ⇔ 意志 ⇔ 価値観
- ✓ 協調
 - 他者（ロボット, IoT, 人間など）との協力
 - 空間の改変

- ▶ ロボットのインテリジェンスの進化と限界
 - ✓ インテリジェンスの構造（ロボット単体）
 - センシング, 移動, 作業, 環境・対象モデル, 知能, ヒューマンインタフェース, 通信, 他
 - 仮想空間の知能 ⇔ 実空間の知能
 - ✓ インテリジェンスの構造（複数のヘテロジニアスな知能体やIoTや人間の協力）
 - 集中管理と自律分散, 複数協調作業, SWARM
 - ✓ AIとフィジカル・インテリジェンス
 - サイバー空間とフィジカル空間の間にある大きなギャップ
 - ✓ タフさの限界
 - タフ = 困難環境でもシステムが所望の機能を果たせること

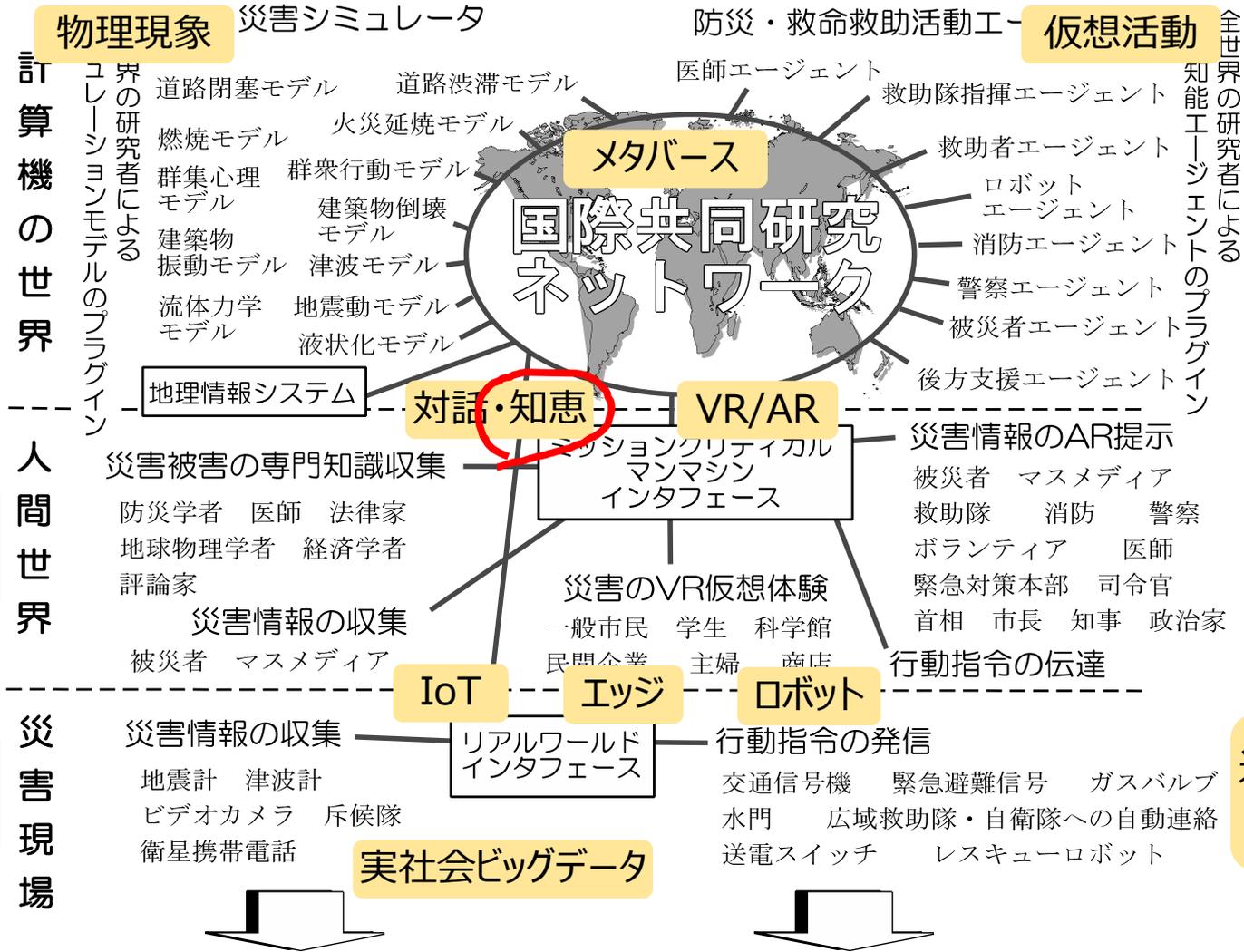
- ▶ フィジカル空間の知能
 - ✓ 20年前のサイバーフィジカル

サイバー空間

人間の空間

フィジカル空間

波及応用



AIによる認識・判断・行動計画

人間の知能

人間の行動

遠隔自律システムの防災行動

活用効果

- ・災害と防災活動の一般への啓蒙
- ・シミュレーションによる総合的災害被害予測
- ・防災都市計画の立案
- ・災害のリアルタイムモニタリング
- ・実データに基づき災害と同期したリアルタイム被害シミュレーション

- ・災害や防災・救助救命活動の仮想体験・訓練
- ・災害時の最適行動の条件付け
- ・救助隊、消防隊の活動のシミュレーション
- ・緊急災害対策のシミュレーション
- ・緊急災害における意思決定支援
- ・救助隊、後方支援隊などの効率的統括

➤ ロボットのインテリジェンスの進化と限界

- ✓ インテリジェンスの構造（ロボット単体）
 - センシング，移動，作業，環境・対象モデル，知能，ヒューマンインタフェース，通信，他
 - 仮想空間の知能 ⇔ 実空間の知能
- ✓ インテリジェンスの構造（複数のヘテロジニアスな知能体やIoTや人間の協力）
 - 集中管理と自律分散，複数協調作業，SWARM
- ✓ AIとフィジカル・インテリジェンス
 - サイバー空間とフィジカル空間の間にある大きなギャップ
- ✓ タフさの限界
 - タフ = 困難環境でもシステムが所望の機能を果たせること

➤ フィジカル空間の知能

- ✓ 20年前のサイバーフィジカル
- ✓ フィジカル空間のインテリジェントな理解
 - センシング（画像，音声，各種信号認識），モデル（SLAM，学習）
 - モデル有り，モデル無し（Deep Learningなど）
 - モデル化可能な対象，学習可能な対象
- ✓ フィジカル空間におけるインテリジェントな行動
 - 行動計画（自律行動，自動運転）
 - ロボット自体の運動と，環境とのインタラクション
 - 人間が構造化した環境と，無限定な自然環境
 - センシング・推定可能，アクチュエーション・作業可能
- ✓ フィジカル空間における集団知能
 - 複数のロボット，多数のIoT，既存のインフラ，人間の共同による集団知能
- ✓ **タフさを実現する知能**
 - **イレギュラな事態であっても，適切な判断と行動ができる知恵**

◎ユーザが求める自律知能

- ▶ 熟練者より優れた判断・行動を、災害現場の環境下で、実施できるか
 - ✓ 例1：異常発見（放っておくと異常が拡大し、事故、災害被害に発展する）
詳細情報収集→原因究明→緊急処置→修理手配→修理実施→報告
 - ✓ 例2：災害人命救助（災害被害に発展してしまった）
概観情報収集→対応計画立案→詳細情報→迅速救助→再計画→困難救助→遺体回収

- ▶ ロボットの自律性に求められること
 - ✓ 自分でセンシングできる＝センシング能力とデータ処理能力を有している（計測技術者）
 - ✓ 自分で分析・理解できる＝データの意味を理解し、それに即した分析解釈ができる（技術者）
 - ✓ 自分で動ける＝動くための必要な能力があり、それに伴う問題を解決できる（自動車の運転手）
 - ✓ 自分で作業できる＝作業に必要な能力があり、それに伴う問題を解決できる（作業員）
 - ✓ 自分で判断できる＝ドメイン知識、分析・理解能力、判断能力、決断力を有している（管理者）
 - ✓ 自分で何をやるべきか決められる
 - ✓ 自分で計画できる＝業務全体を理解し、最適な業務計画を策定し、実施させられる（経営者）
 - ✓ 自分で問題を発見できる、将来を見通せる

- ▶ 現在の自律的な概観情報収集
 - ✓ 人間が指令した経路・方法で情報収集する → 指令するのか、自律的に計画するのか？
→ 人間がついていないとロボットは役に立たない
 - ✓ 異常が発見された場合、より詳細な情報が必要 → 自律的に、現場に応じて行動の変更が必須
→ 遠隔操作が必要
 - ✓ 詳細な情報はどうやって得られるか？ → ドメイン知識が必要
→ 現場に人間が行かねばならない
 - ✓ 異常現場で求められる行動＝安全措置 → 現場に応じた安全措置の実施が必須
→ 人間が全てを指示しなければならない
 - ✓ 異常拡大（事故）防止に必要な緊急処置は？ → 緊急処置は何をやらねばならないのか？
→ 人間が全てを指示しなければならない



おわりに

■ 集中目標

- 活用場面を想定して、ロボットの主要なニーズにおける、さまざまな「課題」を明らかにする
- ロボットやドローン本体はもとより、エコシステム全体を設計する、というSIの立場
- 今後重要になる「ニーズと課題」を発掘
- その実現に必要な技術・ハード・ソフトの現状と、将来の姿を俯瞰する
- 先端的なセンサとその周辺技術について調査する

■ 明確な集中と選択

- ロボット事例などの一次データは、他学会に譲る
- 俯瞰してエッセンスを抽出した、本当のニーズや、本当の課題の二次データに注力する
- 当該分野の著名な研究者の経験に基づくフィルタリングにより、コンパクトに全体を理解する
- ハンドブックのような網羅的な調査は行わず、シャープな論点を提示する

■ 尖った内容とするために

- 執筆者によるバイアスを避けることは、しない
- 意見の相違を著者間で議論して合意を形成することは、しない

■ その結果

- 類似点を持つ分野を複数、平行して調査し、執筆者の意見が独立に反映されている
- 関連する複数の章を読み、相互に比較することにより、多様な視点を確保できる