

#### 2-3-4) 順動力学計算アルゴリズムの高速化

実際にロボットが作業する状況を再現する場合、それを構成する物体の数は数百～千程度に上る。計算速度向上は、実用的なシミュレータ開発における重要な課題である。上述の接触力計算アルゴリズムや地盤との相互作用計算アルゴリズムは、精度を確保するためにある程度複雑な計算を要求する。したがって鍵となるのは、相互作用計算を行う物体対の絞り込みと、頻繁に呼び出される基本的なベクトル・行列計算の高速化の二者である。

前者に関して、相互作用している全ての物体群で構成される拘束条件式は疎な連立方程式になり、反復解法によって効率的に解けることが知られている。ゲーム用の物理計算エンジンではこのような解法が採用されているが、基礎式が力学的に整合しておらず精度が低い。比較的高精度な反復計算アルゴリズムを構成するために、基礎式を見直し、立体積に基づく接触力計算を応用する方法を考案した。現在も実装と評価を継続している。

後者に関しては、基本ライブラリのベクトル・行列演算を見直し、関数呼び出し時のオーバーヘッドを極力削減するようコードリファクタリングした。その結果、剛体シミュレーションの計算時間を50%程度削減できた。

#### 2-4) ミクロ・マクロアプローチに基づく掘削シミュレーション

シミュレータ研究会の慶應大グループおよび横国大グループでは、「機械と土壌の相互力学におけるマクロ・ミクロアプローチに基づいた建設ロボットシミュレータの開発」について、2015年9月から2018年12月までの期間に渡って取り組んだ。主な研究課題は、土壌掘削時のバケットに加わる抵抗力を推定する高精度な力学モデルの構築であり、これに加え、建設ロボットの走行システムの力学解析、同ロボットのシミュレータ開発と作業検証である。これらの研究課題から獲得した技術的成果を以下に要約する。

##### 2-4-1) 掘削実験装置

掘削時の抵抗力を実験的に計測することを目的として、建設ロボットの1/2スケールを想定した土壌掘削実験装置を開発した。同実験装置は、垂直、水平、バケット手首回転の3自由度を有しているため、バケットの掘削軌道を任意に再現することができる。また手首部には、様々なアタッチメントの取り付けが可能な治具と高精度・高レンジの六分力計を備えており、掘削時の力・トルクを計測できる。また、レーザー距離計およびステレオカメラにより、掘削時の土壌の変形を時系列データとして計測が可能となっている。さらに、アレイ状の小型接触圧力計を搭載したセンサ内蔵型バケットにより、バケット各部に発生する土壌の圧力も計測可能である。以上のセンサ計測一式により、土壌掘削時の「掘削抵抗力」、「バケット内部の圧力分布」、「土壌変形と崩壊の幾何学情報」を連続的に取得することが可能となった。同様の実験装置は国際的に見ても稀有であり、国外のロボットシミュレータ開発会社、国内建設機械メーカーから利用の打診がある。また、同装置は汎用性が高く、実フィールドへの展開を想定した各種ロボット（例：飛行ロボット着地時、脚ロボットの不整地移動時）などの検証装置としても活用が可能と目される。

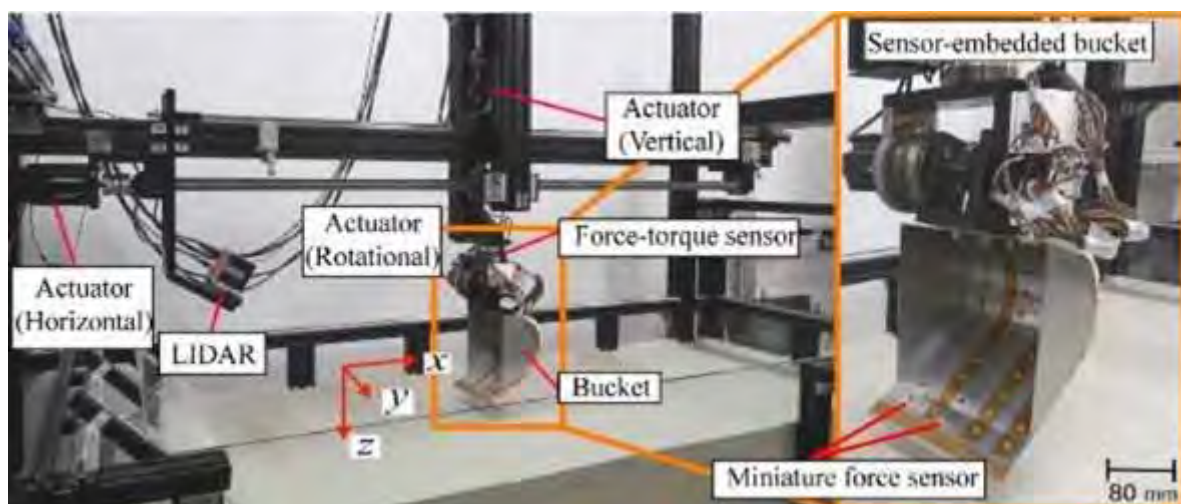
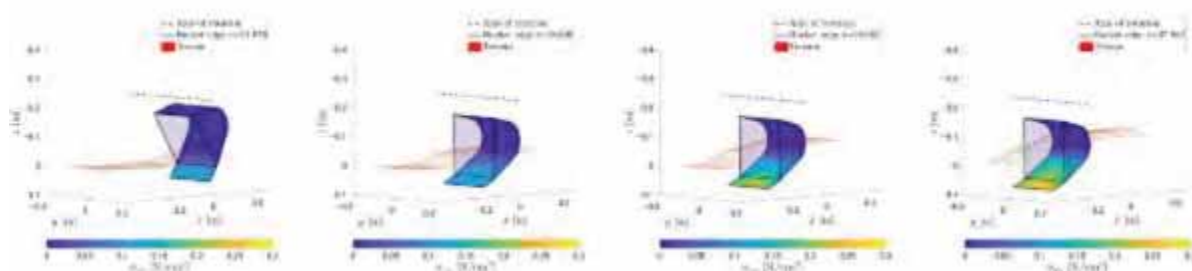


図2-8-15 3自由度土壌掘削実験装置



上段：3自由度掘削実験設備を用いたブルドーzing掘削実験  
下段：i-RFTに基づいた応力分布（LiDARによる地形変形データ含）

図2-8-16 ブルドーzing掘削実験

#### 2-4-2) マクロアプローチに基づいた掘削力学モデル

一般的な接触力学問題においては、実現現象との一致を目的としたモデルの高精度化、および実時間で計算を目的としたモデルの低計算コスト化というトレードオフ問題が知られている。本研究課題では、マクロ・ミクロアプローチによって、機械・土壌の諸問題を連続的に取り扱い、高精度化・低計算コストをそれぞれ満足する力学モデルの構築をおこなった。

このうち、マクロアプローチにおいては、Resistive Force Theory (RFT) と呼ばれる構成則に基づいた掘削力の推定モデルの構築をおこなった。従来のRFTの理論に加え、本研究では土壌の移動や堆積といった3次元の土壌変形を考慮した掘削モデルの改良をおこなった。前述の実験装置を用いて、土壌変形を精密に計測し、土壌の堆積を示す係数を従来のRFTに付加することによって、計算コストを抑制しかつ掘削力推定が可能なモデルの構築を達成した。

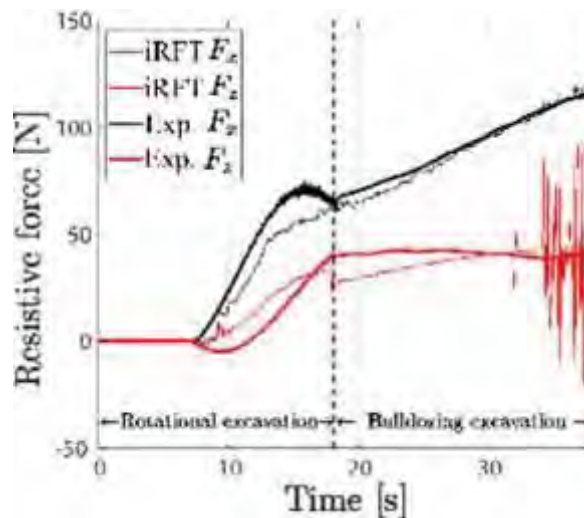


図2-8-17 マクロアプローチによる掘削力推定と実験検証

#### 2-4-3) ミクロアプローチに基づいた掘削力学モデル

一方、ミクロアプローチでは、個別要素法（DEM）に基づいた掘削力学の数値解析を推進した。土壌の土粒子あるいは土塊を精密にシミュレートし、機械と土壌の接触問題を詳細にわたって計算することができることがDEMの特長である。よって、マクロアプローチにおける定式化への現象理解への数値的支持ができ、さらに実験では直接計測することが不可能な土壌内部の土塊の動き（バケット幅方向の断面部分）を精緻にシミュレートし、実験結果への相補的情報を示唆することが可能である。

本研究課題では、ミクロアプローチとして、Voigtモデルに基づいた粒子間挙動をDEMによって計算し、バケット掘削時の掘削力推算ならびに土壌の変形を視覚化している。また、土壌パラメータを調整することによって、粘着成分の異なる土壌の掘削シミュレーションも達成している。

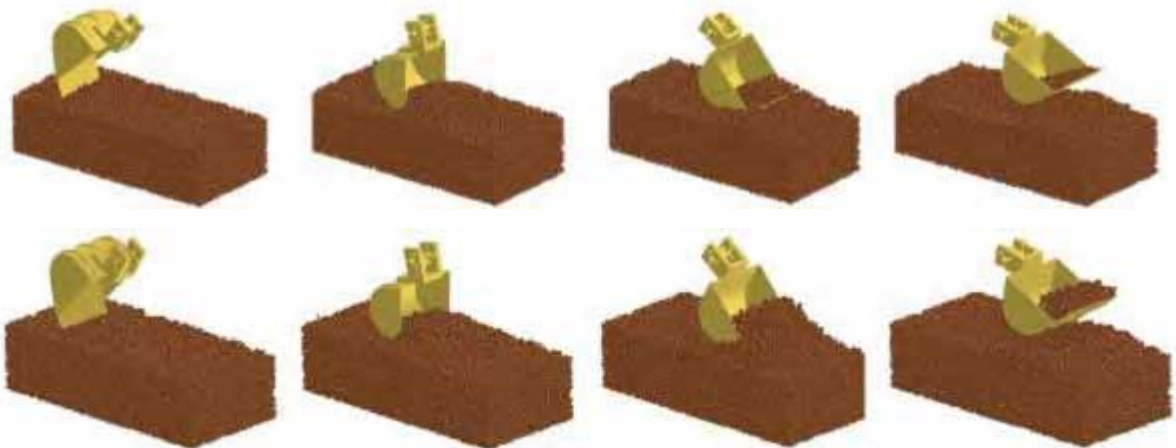


図2-8-18 DEMによる掘削シミュレーション（上：粘性低い，下：粘性高）

#### 2-4-4) マクロ・ミクロアプローチの相対比較と実験検証

本研究課題では、前述のとおりモデルの高精度化とモデルの低計算コスト化を、それぞれマクロ・ミクロアプローチによって実現する。それぞれのアプローチによる数値解析データに対して、同一条件下での掘削実験データとの相対的な比較検討を達成し、効率的な掘削現象の解明、高速なシミュレーション実施に資する掘削モデルの要件を明らかにした。マクロアプローチは実時間の1/10から1/20の計算コストを達成し、一方、ミクロアプローチは精緻な土壌の変形を含めた3次元解析が可能であることを示した。図2-8-20に示すとおり、限定的な掘削軌道ではあるものの、実験値に対する数値計算結果の誤差が10%程度という、当初の目標を達成した。



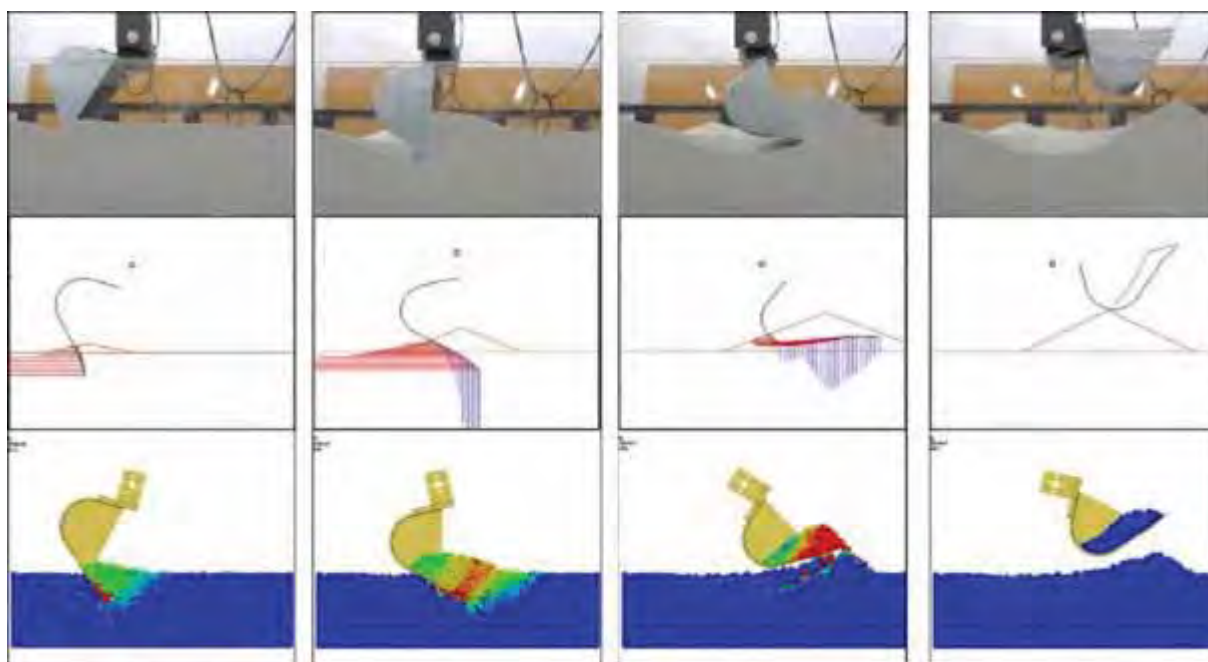


図2-8-19 実験とマクロ・ミクロアプローチによる数値計算結果の比較  
(上：実験，中：マクロアプローチ，下：ミクロアプローチ)

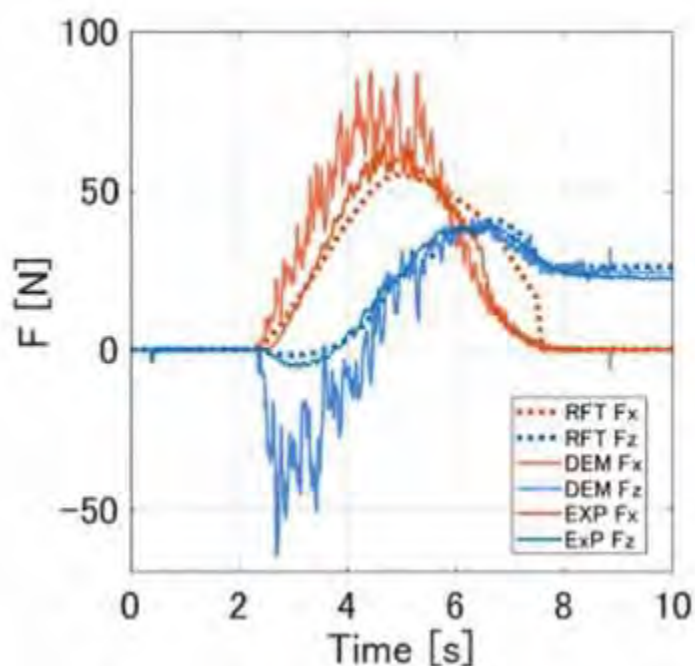


図2-8-20 上図の回転掘削に関する掘削力（並進，垂直）の計測結果と数値計算結果  
(実太線：実験結果，細線：ミクロアプローチ計算結果，  
点線：マクロアプローチ計算結果)

#### 2-4-5) 動力学エンジンへの接触モデルの導入

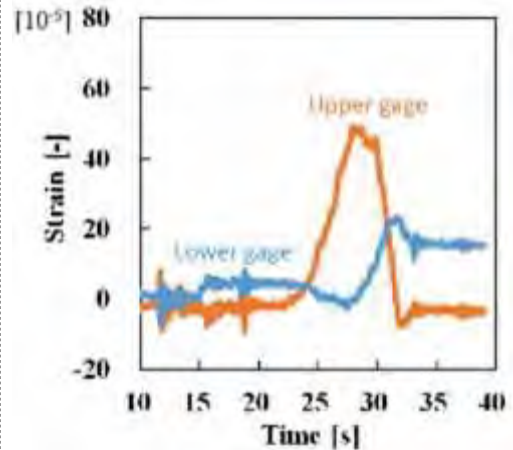
本研究課題において構築したマクロアプローチについて，掘削バケットおよびクローラ部分の力学モデルについてユーザサブルーチン化を推し進め，シミュレータ研究会において開発されているChoreonoidへの実装，またオープンソースである動力学エンジンへの実装を達成した。

#### 2-4-6) 実機バックホウを用いた実証実験

構築した各アプローチの応用性・汎用性を検証することを目的とし、国立研究開発法人土木研究所の協力のもと、実際のバックホウを用いた掘削実験も実施した。初期解析データとして、バックホウのブーム部に取り付けたひずみゲージの時刻歴データを図2-8-21に示す。同実験では、手先軌道、車体の振動、土壌変形の3次元データを取得済みであり、今後、これらデータの解析を進めることにより、提案アプローチならびに動力学シミュレータの検証に活用していく。



実機バックホウによる掘削実験



掘削実験時のひずみゲージの時刻歴

図2-8-21 掘削実験

#### 2-5) 建設ロボットでのシミュレータの活用

開発したソフトウェアはTRC内で共有し、以下のような用途で相互に活用された。

- 建設ロボットの2重旋回機構などの事前検証
- 建設ロボットに搭載するカメラ配置の検討
- 建設ロボットのエラーリカバリ検討
- 多指ハンドの掘削性解析
- 多指ハンド及び建設ロボットの作業検証
- 脚ロボットによる梯子登り動作のシミュレータ上での再現
- 脚ロボットの遠隔操作によってロボットの状態がどの様に変化するかの予測

一部を以下に紹介する。

##### 2-5-1) 多指ハンドの掘削性解析

TRCにおいて開発されている多指ハンドの掘削性能解析を、マクロおよびミクロアプローチに基づいて実施した。マクロアプローチにおいては、多指ハンドの指それぞれをRFTに基づいてモデル化し掘削抵抗力を計算した。一方、ミクロアプローチでは、多指ハンドのCADモデルをDEMシミュレータ内に導入し、幾何学情報を正確に取り扱った。これによりハンドの土工量を高精度で推定することができ、より土工量を最大化するためには、ハンドの両端の指を適切な位置に制御することが求められるという知見を獲得している。同ハンドは、TRCのフィールドデモンストレーションにて掘削動作をさせており、同現象との定性的な比較をおこなうことができた。

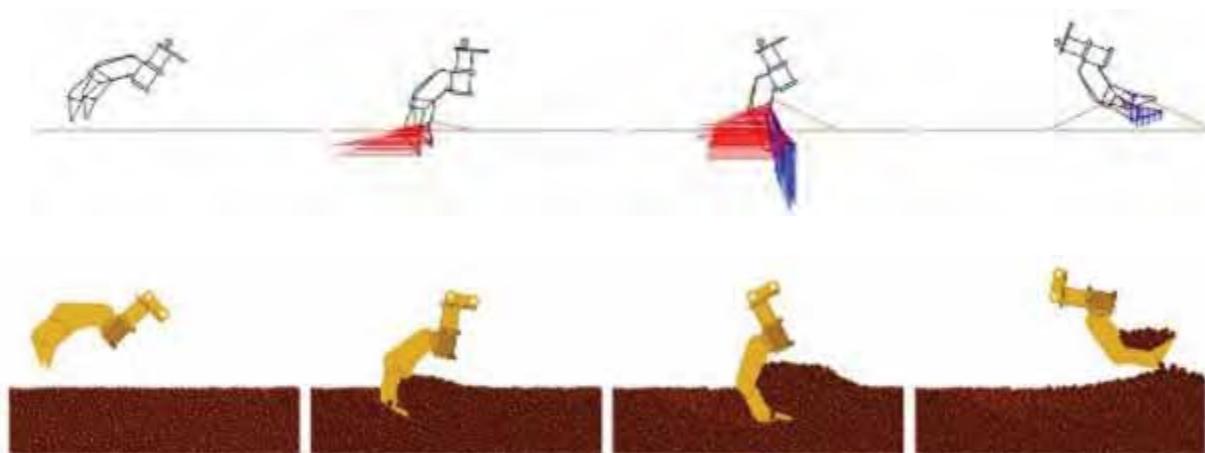


図2-8-22 マクロ・ミクロアプローチによる多指ハンドの解析

#### 2-5-2) 作業検証1: 多様な物体ハンドリングへの適用

ミクロアプローチを援用することによって、建設ロボットのバケットあるいは多指ハンドによる木材や瓦礫の破壊シミュレーションや、木材・土壌が混成した地面の掘削シミュレーションを実施し、想定以上の成果を得ることが出来た。これらシミュレーションデータは、バーチャルテストデータとしてマクロアプローチの解析やモデル改善のサポートデータとなる。

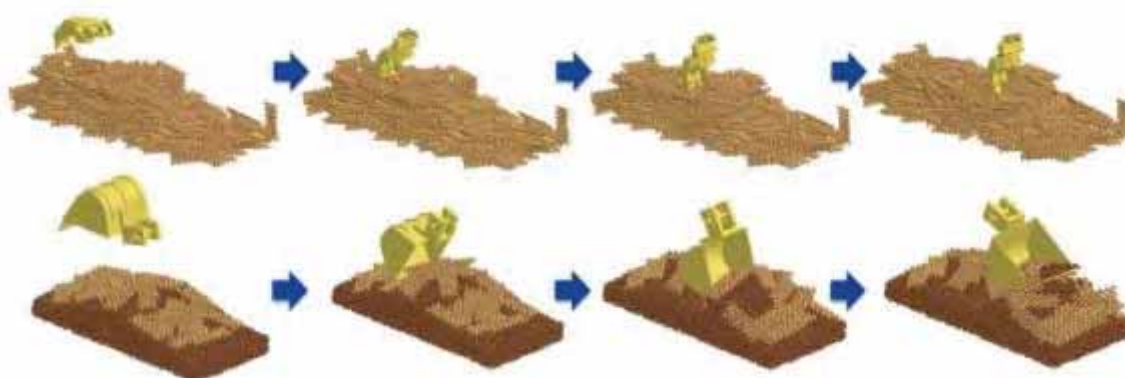


図2-8-23 ミクロアプローチによる多様な環境での掘削シミュレーション  
(上：多指ハンドと木材，下：木材と土壌の混成)

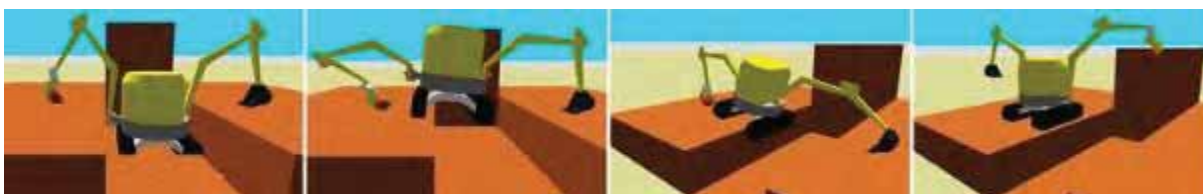
#### 2-5-3) 作業検証2: 建設ロボットの挙動解析

TRC建設ロボット分科会において開発された複腕ロボットの作業シミュレーション（例：急斜面での掘削作業，狹隘地帯での段差乗り越え）に取り組み，同ロボットの高移動性や応用可能性を示す一助となったと考える。さらに，建設ロボットによる屋根の持ち上げ作業について，その安全性やフィージビリティを当課題において開発したシミュレーションにより事前検証した。同検証では，地面の摩擦係数，持ち上げる屋根重量を変化させ，計9ケースの作業検証をおこなった。いずれのケースにおいてもロボットの滑り量，ピッチ角変動は微小であることを事前検証として明らかにした。





急斜面での掘削作業（斜面上方の物体把持による車体の安定性確保）



狭隘地帯での段差乗り越え（複腕による横方向への段差移動）



建設ロボットの屋根持ち上げ検証シミュレーション  
（上段：動力学シミュレーションによる検証，下段：実際のフィールド実証における作業）

図2-8-24 建設ロボットの作業シミュレーション

### 3) 成果の活用

#### 3-1) ソフトウェアの公開

開発した以下のソフトウェアを公開し，広く一般に利用可能とした．

- ロボットシミュレータ Choreonoid 本体（脚ロボット，建設ロボットのモデルを含む）：  
<https://github.com/s-nakaoka/choreonoid>
- Choreonoid の SDF, URDF 読み込みのための拡張機能：  
<https://github.com/fkanehiro/choreonoid-sdfloader-plugin>
- Choreonoid の ROS との連携のための ROS パッケージ：  
[https://github.com/fkanehiro/choreonoid\\_ros\\_pkg](https://github.com/fkanehiro/choreonoid_ros_pkg)
- Choreonoid のモデルファイル作成支援のための拡張機能：  
<https://github.com/fkanehiro/choreonoid-editor>
- 立体積に基づく接触力計算，物体の破断・切断，地盤変形計算を含む物理計算エンジン：  
<https://www.mi.ams.eng.osaka-u.ac.jp/open-j.html>

#### 3-2) 檜葉遠隔技術開発センターへの導入

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（JAEA）が整備した櫛葉遠隔技術開発センターに、ロボットの開発や操縦訓練を支援するためのシミュレータとして採用され、導入に際しての技術的支援や JAEA が実施した追加機能開発に対するコンサルティングを行った。

### 3-3) 福島ロボットテストフィールドへの導入

福島県「模擬プラント用ロボットシミュレータ開発業務」に対して、株式会社 FSK、株式会社ブイエムシー、国際レスキューシステム研究機構（IRS）、会津大学と合同で応募したものが採択され、福島ロボットテストフィールドに建設される模擬プラントに導入されることとなった。同プラントで活動する様々なロボットのシミュレーションを行うため、各機関と連携し、機能拡張や環境モデル、サンプルロボットモデルの整備を行った。

### 3-4) World Robot Summit 2018 での活用

World Robot Summit 2018 のインフラ・災害対応カテゴリー、トンネル事故災害対応・復旧チャレンジのシミュレーション競技用シミュレータとして活用されることとなり、同競技の公式プラットフォームプラットフォームとして採用された脚ロボット、建設ロボットへの対応、ソースコードパッケージへの同梱等を行った。NEDO「ロボット・ドローンが活躍する省エネルギー社会の実現プロジェクト」において、競技の実施に必要な技術支援を行った。



## (9) フィールド評価・安全・STM

### 1) サマリー

フィールド評価では、COCNの調査結果等ユーザ側の要望と共に、ロボット研究開発者ならびにメーカ側の意見を文献調査・ヒヤリングにより十分に取り入れた評価基準・フィールドの開発を行い、計7回の総合的なフィールド評価会を実施した。フィールド評価会では各研究開発結果のとりまとめである「技術カタログ」と評価会参加者アンケートを、ユーザー側・開発側とのコミュニケーションの一助として用い、開発した評価基準・フィールドの妥当性を確認し、その内容のスパイラルアップを図った。

安全では、「データベースの構築」と「システム安全の開発」を実施し、技術成熟度(TRL)も考慮した国際安全規格に基づく論理的安全管理手法を開発し、その有効性をフィールド評価会で検証し、安全性向上に努めた。TRLの高いロボットには国際的安全認証に必要な情報の提供も行い、成果の社会実装加速に努めた。

STM(標準性能試験法)では、NISTの性能評価などを参考にし、複数のロボットに適用可能なsurvey accuracy(探査精度)に関するSTMの開発を行い、主に飛行ロボットに対してその有効性の検討をフィールド評価会を中心に行った。

### 2) 技術的成果

#### 2-1) フィールド評価

##### 2-1-1) 「タフロボティクス」評価法の検討

該当する資料のサーベイを実施した結果、以下の資料についての調査が最も妥当であるとの結論に達した。

- ・ NIST/ASTM規格：米国、国土安全保障省(U.S. Department of Homeland Security, DHS)が主導し、国立標準技術研究所(National Institute of Standards and Technology, NIST)が中心となり、災害対応ロボットの性能を測定するための標準化試験法(Standard Test Method, STM)を開発。作成されたSTMは米国材料試験協(American Society for Testing and Materials, ASTM)のCommittee E54 on Homeland Security Applicationsから12のカテゴリーに分かれて規格として出版。
- ・ MIL規格：米国軍が必要とする資機材(物質)を調達する際に使われる規格の総称。主として、物質の耐久性(耐熱, 耐寒, 耐衝撃, etc.)についてのカテゴリーおよびその評価試験法についての規格。

上記二つの資料より、本プロジェクトに関連する部分を調査した結果を以下に示す。

[NIST/ASTM規格(災害対応ロボットの性能評価のための標準評価試験および試験法)]

- ・ E2826-11: モビリティ: 閉鎖空間におけるピッチ/ロール連続傾斜面
- ・ E2827-11: モビリティ: 閉鎖空間におけるピッチロール斜面横断
- ・ E2828-11: モビリティ: 閉鎖空間における対称ステップフィールド
- ・ E2829-11: モビリティ: 操作タスク(持続可能な速さ)
- ・ E2830-11: 牽引タスク(掴まれたソリ)
- ・ E2801-11: モビリティ: 閉鎖空間における障害物(ギャップ)
- ・ E2802-11: モビリティ: 閉鎖空間におけるハードル
- ・ E2803-11: モビリティ: 閉鎖空間における障害物(傾斜面)
- ・ E2804-11: モビリティ: 閉鎖空間における障害物(階段/踊り場)
- ・ E2854-12: 無線通信(見通し範囲)
- ・ E2855-12: 無線通信(非見通し範囲)
- ・ E2853-12: ヒューマンシステムインタラクション(HSI)
- ・ E2566-08: 遠隔操作型ロボットのビデオシステムの視力と視野角の決定のための試験法

[MIL規格]

- ・ 温度/高温(High Temperature): No.501(pp. 501.5-1~501.5-1)
- ・ 温度/低温(Low Temperature): No.502(pp. 502.5-1~502.5-9)

- ・ 防爆(Explosive Atmosphere):No.511(pp. 511.5-1～511.5-8)
- ・ 衝撃(Shock):No.516(pp. 516.6-i～516.6C-4)
- ・ 雨(Rain) : No.506(pp. 506.5-1～506.5-1)
- ・ 砂・ほこり(Sand and Dust) : No.510(pp. 510.5-1～510.5-13)
- ・ 騒音(Acoustic Noise) : No.515(pp. 515.6-1～515.6B-2)

以上の調査結果を踏まえ以下に示すフィールドの開発を行った。

また、フィールド評価会毎に評価会「技術カタログ」の発行とアンケートの収集・まとめを実施し、これまでの成果に対する評価と各研究開発課題に対する進め方についての指針を明示した。

## 2-1-2) 小規模ローカルフィールド設置

各研究機関または研究室で用いる小規模ローカルフィールドを設置し、フィールド試験をクローズドに開催するための支援を行った。設置のために各ロボットの緒元情報収集を行い、京都大学、法政大学、東北大学等への小規模ローカルフィールド設置に協力した。

## 2-1-3) 拠点フィールド設置

### A) 屋内フィールド

- ・ 設置場所：東北大学レアメタル棟内
- ・ 目的：プラント・インフラ構造物で想定されるロボット極限作業の評価
- ・ 評価項目：梯子昇降、壁昇降、階段昇降、配管内外移動・探査、瓦礫内移動・探査、各種不整地走行（米国DHS-NIST-ASTM準拠不整地および任意の不整地設計）



図2-9-1 屋内拠点フィールド（東北大学内に設置）

### B) 屋外フィールド

- ・ 設置場所：東北大学青葉山キャンパス内
- ・ 目的：森林・山地・市街地・インフラ等で想定されるロボット極限作業・生物機械融合を評価
- ・ 評価項目：
  - 飛行ロボット対応：ポート離発着、水中離発着、情報ターゲット探査、風トンネル飛行、雨トンネル飛行)
  - 動物サイボーグ対応：Dogシェルターによる被災者発見
  - 複合ロボット対応：障害物の切断・撤去



図2-9-2 屋外拠点フィールド（東北大学内に設置）

### C) 情報収集制御システム

- ・ 目的：情報収集のためのカメラ配置が，対象とするロボットの特性に応じてカメラ設置場所が変更可能な画像計測システム。
- ・ 構成：実時間で設置場所が変更可能なハンディカメラ（2台程度）のほか，準実時間（数分程度）で設置場所が変更可能なアクションカメラ（10台程度）で構成されており，スイッチャー機能で任意の画像を出力できる。





図2-9-3 情報収集制御システム（構成例）

## 2-1-4) クローズドフィールド評価会開催

具体的なビジネスマッチングの推進を指向したクローズドなフィールド評価会を表2-9-1の日程で開催した。

表2-9-1 クローズドフィールド評価会の日程

| 回数 | 日程         | 場所                         |
|----|------------|----------------------------|
| 1  | H27年11月14日 | 拠点フィールド（東北大学）              |
| 2  | H28年6月2日   | 拠点フィールド（東北大学）              |
| 3  | H28年11月12日 | 拠点フィールド（東北大学）              |
| 4  | H29年6月20日  | 拠点フィールド（東北大学）              |
| 5  | H29年11月11日 | 拠点フィールド（東北大学）              |
| 6* | H30年6月14日  | 大規模実証フィールド（福島ロボットテストフィールド） |
| 7* | H30年11月2日  | 大規模実証フィールド（福島ロボットテストフィールド） |

\*公開フィールド評価会のみ実施。クローズドフィールド評価会は開催せず。

平成29年11月11日のクローズドフィールド評価会のスケジュールを実施例として表2-9-2に示す。

表2-9-2 クローズドフィールド評価会のスケジュールの例

|       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 会場                                                                                                            |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 9:30  | 受付開始                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 災害研ロビー                                                                                                        |
| 10:20 | 全体説明：田所 (15分)<br>安全説明：木村 (5分)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 屋外フィールド                                                                                                       |
| 10:40 | <p>10:40~12:30 屋外フィールドデモ(サイバー犬・建設・飛行)</p> <p>～サイバー犬説明(大野) 3分</p> <p>1) 低遅延(&lt;1s)映像配信+単独測位2分</p> <p>2) 遺留品の時間さかのぼり認識+マッピング3分</p> <p>3) 情動推定3分</p> <p>4) 行動推定2分</p> <p>5) 光による行動誘導(屋内)2分</p> <p>～入替時間:細索状(昆陽) 3分</p> <p>1) ASC統合機の技術紹介デモ 5分(昆陽)</p> <p>2) 音響Gによるデモ 4分(猿渡)</p> <p>～入替時間:建設ロボ説明(吉瀬) 3分</p> <p>1) 障害物除去と移動 10分(永谷, 山下, 吉瀬)(ドローン離陸, 俯瞰映像デモ含む)</p> <p>2) ドローン位置制御デモ 3分(永谷)</p> <p>3) 遠赤外パノラマカメラデモ 3分(田中)</p> <p>4) 触覚デモ 5分(昆陽)</p> <p>5) 力覚デモ 5分(横小路)</p> <p>6) ピン嵌合デモ 3分(吉瀬)</p> <p>7) ドローン着陸 1分(永谷)</p> <p>～入替時間:飛行ロボ説明(野波) 3分</p> <p>1) 極限音響タフワイヤレス(中臺)4分</p> <p>2) 可変ピッチ 5~10分(砂田)</p> <p>3) 微小風観測システム 5分(古本, 東)</p> <p>～自由見学 32分</p> | <p>屋外フィールド</p> <p>犬(15分)</p> <p>細索状(12分)</p> <p>建設(30分)</p> <p>飛行(22分)</p> <p>合計:約79分</p> <p>自由見学時間:約31分</p>  |
| 12:30 | 12:30~13:30 昼食                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | <移動15分>                                                                                                       |
| 13:30 | 全体説明：田所 (5分)<br>安全説明：木村 (5分)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | レアメタル棟                                                                                                        |
| 13:40 | <p>13:40~16:00 レアメタル棟デモ(太索状, 細索状, 脚)</p> <p>～太索状説明(亀川) 3分</p> <p>1) 車輪型ヘビによる双腕作業(電通大・田中, 東北大・多田隈)12分</p> <p>2) ジャミンググリッパの新展開(車輪グリッパ・大型グリッパ・線状ジャミングなど)(東北大・多田隈) 13分</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | <p>レアメタル棟</p> <p>太索状(28分)</p> <p>細索状(21分)</p> <p>脚(56分)</p> <p>合計:約105分</p> <p>(移動) 3分</p> <p>自由見学時間:約30分</p> |

|       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                    |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
|       | ～細索状説明(昆陽) 3分<br>1) しゅぼ型によるデモ 5分(昆陽)<br>2) 鄭先生によるデモ 7分(鄭)<br>～脚口ボ説明(橋本) 3分<br>1) 未知環境での移動のためのシステム統合 (名工大・佐藤、他) 15分<br>(はしご検出とはしご昇降、音源追跡、遠隔操作インターフェース)<br>2) 単腕WARECにて電動ドリルの把持とトリガ操作(千葉大・並木、他) 5分<br>3) ハンド単体での反射把持 (立命館大・小澤) 3分<br>4) タフロボット用油圧コンポーネント (東工大・鈴森、他) 3分<br>細索状3) 水噴射による浮上デモ説明(東北大・安部) 1分<br>(屋外へ移動、3分)<br>細索状3) 複数の水噴射による浮上デモ (東北大・安部) 5分<br>(ロビーへ移動、3分)<br>5) タフロボット用油圧コンポーネント (東工大・鈴森、他) 5分<br>6) ハンド単体での反射把持 (立命館大・小澤) 5分<br>7) 単腕WARECにて電動ドリルの把持とトリガ操作(千葉大・並木) 5分<br>～自由見学 約30分 | レアメタル棟             |
| 16:00 | ポスター・機器展示コアタイム (説明員を配置)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 災害研1F<br>レアメタル棟ロビー |
| 17:30 | 終了・撤収                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                    |
| 18:00 | 宅配業者集荷                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                    |

## 2 -1 -5) 大規模実証フィールド設置

ImPACT-TRCでは、福島ロボットテストフィールドのプラントタワーを大規模実証フィールドに選定し、平成30年度以降の評価会の実施場所として利用する方針であった。しかし諸般に事情により竣工が遅れ、図2-9-4に示すような、同上プラントタワーの2F部分のみの暫定仮設模擬プラントにより、平成30年度6,11月開催の評価会を実施することとなった。これの設計に当たっては、評価グループが主導的に設計作業を進めた。



図2-9-4 大規模実証フィールド (福島ロボットテストフィールド内に設置)



## 2-1-6) 公開フィールド評価会開催

公開フィールド評価会を表 2-9-3 の日程で開催した。

表 2-9-3 公開フィールド評価会の日程

| 回数 | 日程         | 場所                         |
|----|------------|----------------------------|
| 1* | H27年11月14日 | 拠点フィールド（東北大学）              |
| 2  | H28年6月1日   | 拠点フィールド（東北大学）              |
| 3  | H28年11月11日 | 拠点フィールド（東北大学）              |
| 4  | H29年6月19日  | 拠点フィールド（東北大学）              |
| 5  | H29年11月10日 | 拠点フィールド（東北大学）              |
| 6  | H30年6月14日  | 大規模実証フィールド（福島ロボットテストフィールド） |
| 7  | H30年11月2日  | 大規模実証フィールド（福島ロボットテストフィールド） |

\*クローズドフィールド評価会のみ実施。公開フィールド評価会は開催せず。

平成 29 年 11 月 10 日の公開フィールド評価会のスケジュールを実施例として表 2-9-4 に示す。

表 2-9-4 公開フィールド評価会のスケジュールの例

|       | 第一部:メディア・一般 ・ 第二部:VIP、COCN                                                                                              | 会場                                       |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| 10:30 | 第一部受付開始(資料配布)                                                                                                           | 災害研ロビー                                   |
| 11:00 | 全体説明：田所 (15分) 安全説明：木村 (2分)                                                                                              | レアメタル棟                                   |
| 11:17 | レアメタル棟デモ(脚、太索状) (23分)<br>～デモ内容説明(田所) 3分<br>■脚ロボ:(橋本)+油圧(鈴森) 10分<br>■太索状:10分(亀川)<br>質疑応答質疑応答(30分)                        | レアメタル棟<br><br>12時～第二部<br>受付開始@災<br>害研ロビー |
| 12:10 | 休憩(15分)、移動(15分)                                                                                                         |                                          |
| 12:40 | 全体説明：田所 (15分) 安全説明：木村 (2分)                                                                                              | 屋外フィールド                                  |
| 12:57 | 屋外シナリオデモ(飛行、建設、犬、細索状) (65分)<br>～デモ内容説明(田所) 5分<br>■飛行 15分<br>■建設 10分<br>■サイバー犬 10分<br>■細索状 10分<br>■救助/他 15分<br>質疑応答(50分) | 屋外フィールド<br><br>第一部の<br>メディア・一般<br>は退場    |
| 14:55 | 昼食(35分)                                                                                                                 |                                          |
| 15:30 | 全体説明：田所 (10分) 安全説明：木村 (2分)                                                                                              | 屋外フィールド                                  |
| 15:42 | レアメタル棟デモ(脚、太索状) (23分)<br>～デモ内容説明(田所) 3分<br>■脚ロボ:(橋本)+油圧(鈴森) 10分<br>■太索状:10分(亀川)                                         | レアメタル棟                                   |
| 16:05 | 終了                                                                                                                      |                                          |

## 2-2) 安全

非連続な技術開発を求めるタフ・ロボティクス・チャレンジ（TRC）では、既存の経験則に基づく安全では対応できず、システム安全※として論理的に構築していく必要がある。ここでは「非連続イノベーションを支えるシステム安全知データベースの構築」と「能動ロバスト性に対応したシステム安全の開発」を実施し、TRCの達成目標実現に取り組んだ。

※システム安全：安全規格・法規の上に立ち、システムの災害、リスク及び安全の解析プロセスを対象に、安全技術とマネジメントスキルを統合して応用すること。

具体的には、以下の項目を実施した。

### 2-2-1) 非連続イノベーションを支えるシステム安全知データベースの構築

#### A) 既存情報のデータベース化

次の情報データベース化し、ファイル共有サーバを用いて関係者と共有した。

- ・ 国際安全規格概論
- ・ リスクアセスメントの手順(ISO 12100, ISO TR 14121-2)
- ・ サービスロボット安全規格 ISO13482 の概要
- ・ 関連する判例
- ・ 関連する分野毎の公開情報

データベースの作成においては、TRC参加者の幅広いTRLに対応可能できるよう基礎的内容から判例などの現実問題までを、システム安全の観点から系統的に提供できるよう配慮した。

#### B) リスクアセスメント情報のデータベース化

全ての分科会のロボットに関して、拠点フィールドでのデモンストレーションを前提としたリスクアセスメントを行い、ファイル共有サーバを用いてリスクアセスメントの雛型としてその結果を関係者と共有した。個別の要請に応じたリスクアセスメントシートや安全認証に必要な情報の提供も行い、各分科会毎の安全に関する取り組みを支援した。

#### C) データベースの妥当性検証

評価会での視察と分科会での対面会議等も利用して、データベースの妥当性に関する情報（不具合事例、ヒヤリハット事例等）を収集し、データベースの改良に利用した。

### 2-2-2) 能動ロバスト性に対応したシステム安全の開発

#### A) 能動ロバスト性を有するロボットシステムの安全性解析

TRCで開発が想定される能動ロバスト性を有するロボットシステムのフィールド評価試験の内容を調査し、能動ロバスト性の基本となるロボットのリカバリ能力やロボット間連携が安全上どのような影響を与えるか、情報収集と解析を行った。情報収集は、A-2で開発されるリスクアセスメントの雛形も利用して、カメラ画像と関係者へのヒヤリングを中心に実施した。

#### B) 能動ロバスト性に対応したシステム安全の開発

A)の解析結果を基に、どのような安全技術と安全管理が、全体のリスクを効果的に低下させるか、システム安全の開発を行った。TRCで研究開発中のロボットは利用回数が少く、変更が多いため、このロボットに製品レベルの技術的安全性を期待する事は経済的合理性から困難と考える(欧州機械指令でも研究用は除外)。よってTRCでは次の2つをシステム安全の原則とした。

- ・ [隔離の原則]危険源（ロボット）と人とを時間的・空間的に隔離することで安全を確保する。  
例：UAV用のシェルターの設置
- ・ [停止の原則]停止が確認されたときのみ危険源に人は触れる。例：ロボット稼働を示す回転灯の設置

これらの原則のもと安全管理を実施したほか、ドローン用シェルターの設置や安全管理マニュアルの整備などを行った。



図2-9-5 ドローン用シェルター（左：観客用大型、右：スタッフ用小型）



図2-9-6 屋内フィールド安全管理マニュアル（抜粋）



図2-9-7 リスクアセスメント結果を考慮した権利放棄書

### C) 能動口バスト性に対応したシステム安全の妥当性検証

評価会での視察と分科会での対面会議等も利用して、データベースの妥当性に関する情報（不具合事例、ヒヤリハット事例等）を収集し、システム安全の改良に利用した。

### 2-2-3) STM

災害対応ロボットの各種性能の標準試験法（Standard Test Method, STM）はNISTにより整備がされ、ASTMより規格として発行されている。ここでは既存STM規格の調査を行い、TRCとして新たに整備すべきSTMとしてSurvey Acuity（探査精度）を提案した。Survey Acuityは既存のカメラ性能単体を評価するVisual Acuity（画像精度）(ASTM E2566-17a:Standard Test Method for Evaluating Response Robot Sensing: Visual Acuity)を基盤とし、ロボットの移動能力も合わせて考慮するロボットの探査能力の総合的な性能評価法となっている。





図2-9-8 既存のVisual Acuity(ASTM E2566-17a)のSTM(イメージ)

ここで提案する Visual Acuity の S T Mは次の特徴を持っている：

- ・ ロボットの探査目的に応じた大きさの異なるQ Rコードを用いることで、異なるロボットの探査性能を標準化された手法で評価することができる。
- ・ Q Rコードの読み取りは自動化することが可能であり、人手を介さず自動的に探査性能を評価することが可能である。
- ・ Q Rコードの設置場所は事前に把握可能であり、地図作成能力の評価にも利用できる。
- ・ 標準化された試験法であるため、異なる環境要因（障害物、風、光、水など）の間で比較可能なデータが測定可能である。このことにより、提案されたロボットがどのくらいタフな探査能力を持っているか、試験可能である。



図.2-9-9 Survey Acuity STMの利用例（左：索状ロボット．右：飛行ロボット）

### 3) 成果の活用

- ・ ロボット国際競技 Ⅰ会 (World Robot Summit) プレ大会インフラ災害対応分野(H30 年 10 月 17-21 日, 東京ビックサイト)のプラント災害予防チャレンジの競技フィールド開発において、屋内拠点フィールド（東北大学に設置）と大規模実証フィールド（福島ロボットテストフィールドに設置）でのフィールド開発ノウハウを提供した。
- ・ また災害対応標準性能評価チャレンジに対しては情報収集制御システムを提供し、競技結果のリアルタイム広報と分析に協力した。
- ・ 災害対応ロボットの標準性能試験法（S T M）の整備を進める NIST に対し、T R Cで得られた災害対応ロボット開発の先駆的情報を提供し意見交換を進めてきた。このことは災害対応ロボットの標準化活動推進の基盤構築に寄与し、新たなS T Mである Visual Acuity の提案にも繋がった。

#### ④競合する技術・アプローチに対するベンチマーク

##### (1) サイバー救助犬

###### 1) 獲得成果の革新性（社会や産業に対するイノベーションの観点から）

・サイバー救助犬スーツ：中型・大型の使役犬が2時間以上装着し、探査をリアルタイムに遠隔モニタリングできる実用的なイヌ用スーツほとんど存在せず。これまで経験で語られてきたイヌの能力をデータで評価することができるようになった。

・心電計測スーツ：これまで運動中の犬の情動状態の推定をリアルタイムで可視化する技術は存在せず、世界初の技術となった。

・行動誘導スーツ：イヌに搭載した光源で、離れた場所からイヌに行動を指示する技術は存在せず、世界初の技術となった。

###### 2) 獲得成果の独創性（技術やサービスの観点から）

・サイバー救助犬スーツ：使役犬は、災害救助犬に限らず、麻薬探知犬、検疫探知犬、盲導犬、聴導犬、警察犬など多々存在していることから、これらの技術の移転と活用が大きく期待される。

・心電計測スーツ：使役犬は、災害救助犬に限らず、麻薬探知犬、検疫探知犬、盲導犬、聴導犬、警察犬など多々存在していることから、これらの技術の移転と活用が大きく期待される。また、糖尿病や心臓病などの疾患を持つイヌの飼い主や獣医師に向けた、医療サービスも可能となる。

・行動誘導スーツ：使役犬は、災害救助犬に限らず、麻薬探知犬、検疫探知犬、盲導犬、聴導犬、警察犬など多々存在していることから、これらの技術の移転と活用が大きく期待される。

###### 3) 競合する技術開発や類似のアプローチが行われている場合には、それら取組との比較（優位性・劣位性）、今後の課題等

・サイバー救助犬スーツ：軍事・防衛用でイヌにカメラを搭載して映像を配信するスーツが存在する。これらのスーツは背中やイヌの頭にカメラを装着している。これらのスーツに比べて、格段に軽量で、狭い場所に入っていって映像を撮影出来るイヌ用スーツである。また、映像配信以外にも多くの機能をもったイヌ用のスーツが完成している。今後の課題は、災害現場での適用である。ユーザーを増やして、適用できる機会を増やす。

・心電計測スーツ：犬において脈波を用いたRRI計測を試みている企業が世界的にも複数見受けられるが、脈波でのRRIが不安定であること、静止中以外は測定できないことから、今回開発したスーツならびに推定、結果表示システムは、その信頼性、有用性をみても群を抜いている。また、救助犬以外の使役犬での適応先もあり、有望な技術である。

・行動誘導スーツ：環境に固定した装置から光を照射することで、イヌや猫と遊ぶ装置が市販されているが、装置から光が届く範囲でしか利用できなかった。イヌ用のスーツに搭載した光源でイヌに行動を指示することで、広範囲にわたってイヌに行動を指示することが可能になる。今後の課題は、救助犬への適応と装置の小型化と低消費電力化である。

##### (2) 索状ロボット（細径）

###### 1) 獲得成果の革新性

#### (全体)

- ・ 数 cm の隙間から進入し倒壊家屋奥深くの人命搜索するロボット技術の開発。(阪神淡路以降、大震災が世界中で発生。人命・人材の損失甚大)
- ・ 空飛ぶ消火ホースという全く新しい消火技術により、建物内の火元へのアクセス・消火を可能に(従来は大規模火災に打つ手がなく、火元に近づいて直接放水することは、消防士にとってもリスクも高く困難であった)

#### 2) 獲得成果の独創性

##### (全体)

- ・ 索状体を浮上させて、ターゲットにアクセスする技術。流体を噴射して索状ロボットを浮上させた実現例はなかった。一般に流体によって柔軟なロボットを制御することは困難という問題を克服した。
- ・ 瓦礫内部の調査・マッピングする技術。瓦礫内はカメラとの距離が近く、ロボットの早い動きの中で特徴点をトラッキングし続けることが困難だった。高速カメラの導入と、処理が重くなる問題を解決し、リアルタイム処理を実現。
- ・ 索状ロボットにおいて、オペレータが見ながら、聞きながら、触りながら遠隔操作する技術。これまで細径・長尺のロボットで、高度なセンサ群を搭載することが困難であり、騒音・音響反射などノイズが大きな状況化で、人の声や接触状況を抽出することに成功。

##### (空気噴射)

- ・ 空気噴射を用いて浮上することで段差踏破性能と操縦性能を飛躍的に向上し、災害現場におけるロボットが探査可能な範囲が増大した。
- ・ 空気噴射で浮上する蛇型ロボットの実現は世界初である。
- ・ 噴射方向を制御可能なノズルは流体噴射を駆動源とするそのほかのロボットに応用できる。

##### (水噴射)

- ・ 水を噴射して空中に浮上し建物内に突入できる空飛ぶロボット消火ホースのプロトタイプを製作し、安定浮上と方向切り替え、簡単な消火実験に成功した。
- ・ 水噴射で胴体全体を浮上させる蛇型ロボットの実現は世界初である。
- ・ 長尺化を含めた実用化開発を続けることで、消火ホースが消防に実践配備され、最小水量で迅速な消火を実現するとともに、消火活動の安全性向上に貢献する可能性がある。

##### (実用機)

- ・ 空気ポンペを用いて携帯性を大幅に向上させ、災害現場への応用可能性が高まった
- ・ 金属ノズルを搭載して先端を浮上できる蛇型ロボットの実現は世界初である。

##### (奥乃・坂東 G)

- ・ 姿勢推定：従来、GPS や地磁気センサが使用できない瓦礫環境での姿勢推定は、累積誤差が蓄積するなど困難だった。瓦礫環境で音響センシングを用いる研究は世界初である。
- ・ 音声強調：従来の索状ロボットの殆どはマイクロフォンを搭載するものの、オペレータの耳で周囲の音を聞き分ける必要があった。本プロジェクトは、マイクロフォンアレイによる「ロボット聴覚」を索状ロボットに搭載する革新的な研究である。

##### (山崎 G)

- ・ 準備時間を大幅に短縮し、随時に搜索対象を追加可能にすることにより、災害ロボティクスのニーズに応じた柔軟性を持つ画像認識技術を実現。



- たまった搜索映像から認識対象を素早く見つけ出す「遡り認識」。
- 短時間と少ない操作で認識対象が容易に追加できる UI。
- 画像認識システムを索状ロボット(細径)と統合し、搜索空間内のどこに何が見つかったかを分かりやすく提示。

### 3) 競合・類似するアプローチとの比較

#### (空気噴射)

- 従来のスコープカメラでは先端に能動関節を搭載して段差乗り越えに取り組んでいたが、索状体は長く柔らかいため、高く先端を持ち上げることができなかった。本手法により、従来不可能だった 200 mmの段差を踏破可能とした。

#### (水噴射)

- 従来の消防ロボットは、遠隔から放水することで消火を目指したものがほとんどであり、胴体全体を浮上させて火元に直接到達できる蛇型ロボットの開発は世界初である。

#### (奥乃・坂東 G)

- 姿勢推定：慣性センサのみ用いた姿勢推定法では、長時間の運用で累積誤差が蓄積する。10 分以上ロボットを駆動させながら衝撃的な姿勢変動を生じさせたとき、慣性センサのみを用いた場合は、先端位置誤差が 0.4~1.5m 程度となったが、音響・慣性センサを用いた場合、先端位置誤差を 0.2~0.5m 程度に抑圧できた。
- 音声強調：単チャンネル音声強調法の従来法である RPCA と RNTF を比較したとき、全てのマイクロフォンで音声を収録した信号対雑音比が -10dB の混合音に対し、信号対歪比(SDR)が約 2dB 向上した。また、半数のマイクロフォンが遮蔽されても、RPCA と同程度の性能を達成した。多チャンネルブラインド分離の従来法である独立ベクトル分析と比較したとき、同条件で 10dB 以上の性能向上を達成した。

#### (山崎 G)

- 画像認識の分野においては、多くのベンチマーク用のデータセットが使用されている。しかし、災害対応を課題にする公開のデータセットがなく、本研究のように準備時間の短縮や柔軟性を課題にするベンチマークも、我々に確認できた限り公開されたものがない。そのため、本研究で開発されたシステムを定量的に評価する目標で、兵庫県立三木総合防災公園の瓦礫フィールドにてデータ収集を行い、このデータを用いて小規模の定量的評価を行い、その結果を国際ジャーナルにて報告した。

### 4) 今後の課題

#### (空気噴射)

- 先端に瓦礫が引っかかるなど、先端が拘束された状態で空気を強く噴射すると、拘束が取れた際に急激に先端が動いて暴れてしまう状況が存在する。状況を予測した噴射力制御などの工夫が必要である。

#### (水噴射)

- 実際の環境で用いるためには、ロボットの長尺化や耐熱設計が必要である。今後は 10m 程度の長さを目指して長尺化に取り組む。

#### (実用機)

- 本ロボットの運動性能評価試験を行う。エンドユーザーに実際に使用してもらいフィードバックを得て改良を進める必要がある。

(奥乃・坂東 G)

- ・ 姿勢推定：慣性センサの誤差はランダムウォークを仮定しているため、大きな温度ドリフトなどで性能劣化することがある。本問題を解決するため、累積誤差の時間微分などを推定する必要がある。
- ・ 音声強調：教師なしで動作する RNTF は実時間動作が可能だが、空気噴射音や TSP を抑圧できる半教師あり・畳み込み型の SB-CRNTF は現在オフライン処理として設計されているため、オンライン処理への拡張やリアルタイム実装が必要である。

(山崎 G)

- ・ 画像認識：システムの認識性能については、多様な環境条件において多様な搜索対象に対して実験を行う中で、一部充分に認識できないケースが見られた。物体を特定するテクスチャ(模様)情報が得られにくく、形状の可変性により形状も手掛かりにならない。上記のような場面に関しては対策が必要と思われる。環境が暗い場合、ものがロボットに搭載されたライトに入るまでほとんど映らない。こういった場面を考慮し、パーツが一枚の映像フレームに映らなくても、視覚 SLAM の情報と統合して、空間的な情報を認識処理の中まで持ち込むことで克服できると考えられる

(昆陽 G)

- ・ 触覚：様々な接触対象においても、接触推定が行えるか、精度の定量的な評価が必要。また、ロボットの構成が変わる度に再学習が必要なため、素早く学習データを取得して、学習結果を更新していく手段が必要である。

(3) 索状ロボット (太径)

1) 防塵防水無線化ヘビ型ロボット

- ・ 獲得成果の革新性（社会や産業に対するイノベーションの観点から）と独創性（技術やサービスの観点から）

これまでに様々なヘビ型ロボットが研究開発されてきたが、防塵防水無線化になっているヘビ型ロボットはあまり例がない。これは、昨今のモータ、バッテリー、計算機の小型化の技術によるところが大きい。これらの要素技術を組み合わせてヘビ型ロボットを構築し、評価会のような場所でデモンストレーションを実施したことで、そのフィージビリティを実証して見せた。有線タイプのヘビ型ロボットと比較して、ロボットが無線化されることで、ロボットがケーブルをけん引するという制約条件がなくなるため、ヘビ型ロボットの適用範囲は拡大される。そもそも、ヘビ型ロボットは大規模災害により倒壊した建築物のような瓦礫環境内を探索するというタスクにおいて、そのメリットが最大限に生かせるのであるが、そのような災害対応時のタスクだけではヘビ型ロボットを市場に投入する採算性が出せないため、それ以外のタスクにも対応させて日常時にも活用しておくことで、非日常時での活用が見込める。本プロジェクトで特に配管環境やダクト環境でのヘビ型ロボットの活用について検討を重ねてきたのはそのためである。本プロジェクトでは、従来のヘビ型ロボットでは走破することができなかった環境として、曲管部分を含む配管内部やダクトの内部を螺旋縦波運動で移動したり、分岐のある配管の外周も螺旋縦波運動で分岐部分をすり抜けて移動したりできることを実証してみせた。さらにロボットの走破性に関する研究開発のみならず、カメラはもちろんのこと音響センサや圧力センサをロボットに組み込むことで、配管の点検をしたり、配管内のロボットの位置を推定できたりするようになり、配管内を検査するシステムとしての完成度を高めた。これらは世界的にも例を見ない研究開発事例であり、本プロジェクトの成果といえる。

皮膚型触覚センサに関しフィールド試験により実用性を示した事例は数少なく、特にヘビ型ロボットの全身に触覚センサを被覆した事例は他に無い。環境との接触状態を推定するセンサとして、構造内部に埋め込まれた力覚センサを使用することは広く行われているが、表面全体に触覚センサを配置する方法は接触力の作用位置が直接的に求められるうえ内部構造を大きく変更する

ことなくロボットに組み込める点で利点大きい。開発した触覚センサは表面形状に合わせて形状のカスタマイズが可能であり、また、構造的工夫により高い防水防塵性や耐久性が得られることが確認できたため、ヘビ型ロボット以外のロボットに付与できると期待できる。特に期待されるのはロボットハンドへの実装であり、今後の産業現場でロボット化が望まれているとされる食品等の不定形物体の把持・梱包作業や部品組立作業に貢献することが示されてきている。直流単電源で駆動可能としたため、様々な移動ロボットの路面計測用センサとして利用できる。

配管内進入距離推定に関して、従来、GPS や地磁気センサが使用できない配管内環境での距離推定は、累積誤差が蓄積するなど困難だった。配管内環境で音響センサを用いる研究は世界初である。配管地図推定に関しては、配管内進入ロボットを用いて未知の配管の形状を推定する技術は世界初である。また、進入距離とロボット姿勢のみという限られたセンサ情報から環境地図を推定する試みは革新的な研究である。

皮膚型触覚センサと関節角度情報を用いたオドメトリによってヘビ型ロボットの三次元位置姿勢を推定する研究およびその接触点履歴の表示により環境情報を提示する研究は他に例がなく、音響センサを用いる方法等と合わせて直接視認することが難しいヘビ型ロボットの遠隔操作に大いに貢献する取り組みである。

索状ロボットに期待される作業内容から滑落は当然想定される事態であるが、その検出についての議論はなされていなかった。本研究は滑落への対応を考える最初のものである。

- ・ 競合する技術開発や類似のアプローチが行われている場合には、それら取組との比較（優位性・劣位性）、今後の課題等

米国カーネギーメロン大学で開発されているヘビ型ロボットも、我々の研究開発をしているヘビ型ロボットと、ロボットの関節構成は同じである。しかしながら、我々のヘビ型ロボットは防塵防水無線化の仕様になっており、カーネギーメロン大学の有線タイプのヘビ型ロボットに対して優位性がある。さらに、我々のロボットには全周圧力センサがロボットの全リンクに取り付けられており、このようなセンサ機能を備えたヘビ型ロボットは世界発のハードウェアである。音響センサもヘビ型ロボットに取り付けられており、これで配管内部の位置を推定できるシステムが我々のロボットシステムには組み込まれている。これも世界に類を見ない。ハードウェアの新規性のみならず、ロボットの制御手法についても、新しい成果が生み出されている。円柱外周にある分岐部分をすり抜ける螺旋縦波方式を提案してロボットで実証したのは、世界初の成果である。このように、本プロジェクトをとおして、世界レベルのハードウェアならびにソフトウェアの研究開発がなされた。今後の課題は、倒壊家屋のがれきのような複雑環境において適応的にヘビ型ロボットが運動して内部の調査をおこなうようなロボット制御手法を実現することである。

非車輪型ヘビ型ロボットによる配管上のフランジ乗り越え、およびはしご昇降は他に実現された例はない。非車輪型ヘビ型ロボットによる不整地移動についてはカーネギーメロン大学[M. Travers2018]でも実現されているが、文献[M. Travers2018]で示されている実験は高低差の小さい岩場で行われており、また移動方向を制御する手法は示されていない。一方、本プロジェクトで提案した crawler-gait という手法では、傾斜角度 45 度、高さ 40cm 程度のステップフィールドの移動を実現しており、操舵も可能であることから、走破性の高さにおいてより優れていると言える。

配管内進入距離推定に関しては、画像を用いた SLAM が取り組まれているが、配管内面のテクスチャや特徴的な配管形状が観測される必要があり、それらの少ないのっぺりとした配管では評価されていない。音響センサのみを用いた手法では 6m の模擬配管で推定誤差 7%以下を達成した

(図 2-10-1, 図 2-10-2)。今後の課題として、マイクロホンを配管入口に配置する場合、配管外部からの雑音によって距離推定精度が劣化することがあるため、マイクロホンを線型アレイ化することで配管外部からの雑音の影響を減らし、配管内部からの試験音のみを抽出するように改良する必要がある。配管地図推定に関しては、距離推定と同様に画像を用いた SLAM が取り組まれているが、評価環境は同様に限定的である。音響センサと慣性センサを用いた手法では 3 種類の模擬配管に対して 68%以上の推定精度を達成した(図 2-10-3)。また、本プロジェクトで開発した口



ボットは螺旋捻転によって配管内を移動するため、先頭カメラからのシーンが激しく変動し、Visual Odometry による SLAM を適用することが困難である。このようなロボットにおいては音を用いた手法が有利である。今後の課題として、配管が枝分かれする場合やループを含む場合に、スピーカからマイクロホンまでの実際の最短経路と状態空間モデルに基づく最短経路が一致せず地図を適切に推定できない場合がある。オドメトリに基づく自己位置推定との組み合わせ、複数地点へのマイクロホンの設置などを検討する必要がある。

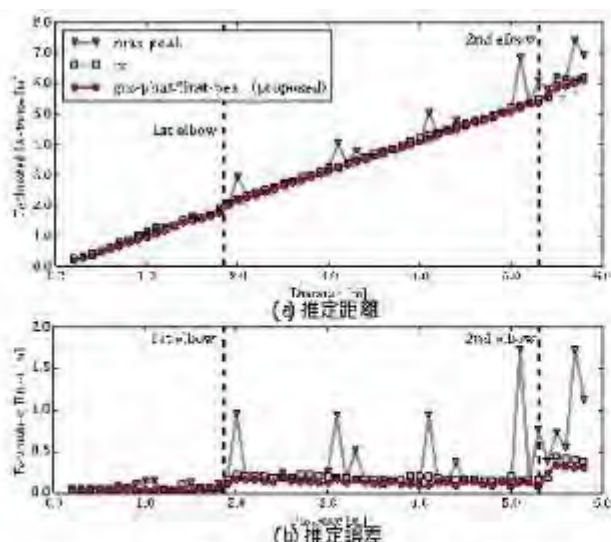


図 2-10-1 有線接続ロボットでの距離推定結果

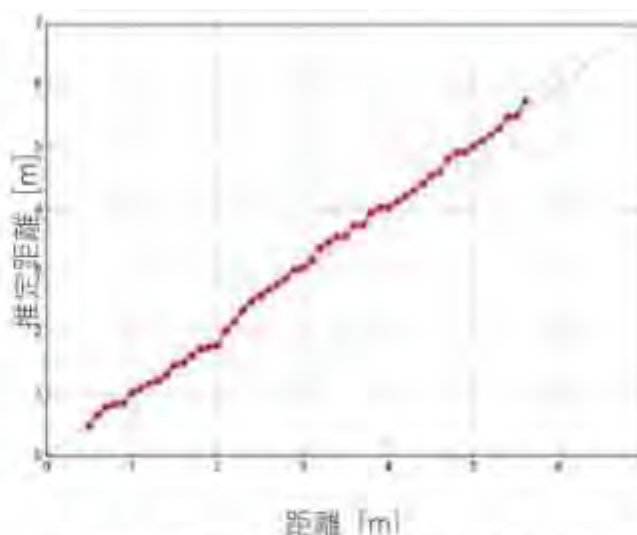


図 2-10-2 無線接続ロボットでの距離推定結果

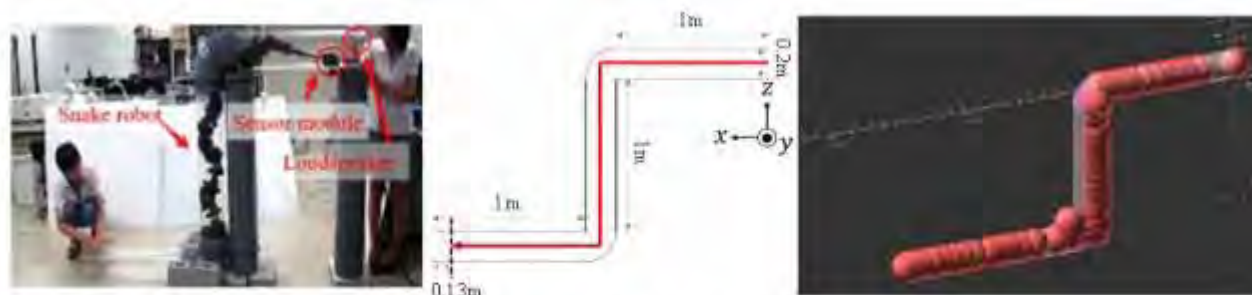


図 2-10-3 配管地図推定実験(左)、配管形状(中)、推定結果(右)

接触点情報を用いたオドメトリに関して、カーネギーメロン大学で開発されているヘビ型ロボットにおいて、円柱形状、平地であるという既知の環境情報を活用して関節角度履歴より移動量を推定する研究が行われているが、本研究においては接触点情報を用いることにより未知の環境にも適用できるようになった点で優位である。接触点が滑らないことを前提とした推定方法であるが、実際には重力は表面性状により滑りが発生し、推定結果に影響することがわかっており、滑り量を推定して補正する必要がある。

滑落検知に関して、問題設定から異常検知の応用がまず想定されるが、一般に用いられる対数尤度分布に基づく異常検知では、提案法で用いたモデルを応用した場合であっても、滑落検出は難しいことを確認している。一方で、提案手法の理論的な根拠づけは難しく、有用性を主張するために、より多くのデータから検証を続けていく必要がある。

## 2) スムースタイプヘビ型ロボット

- ・ 獲得成果の革新性（社会や産業に対するイノベーションの観点から）と独創性（技術やサービスの観点から）

非車輪搭載型ヘビ型ロボットは、単純な機構で構成することができ、同じ形状のユニットを連結して構成できるモジュール構成であるためメンテナンス性が高い。また、車輪がないため全体をカバーで覆うだけで防水防塵化することができるため、タフな構成にしやすい。一方で、手足のない形状と、自由度の高さから制御が難しく、適用環境が限られてきた。この課題に対し、単純形状を連結することによる目標形状設計手法と、それを用いた独創的な移動形態を提案した。これにより、ヘビ型ロボットでは配管上のフランジ乗り越え、険しい不整地の移動、はしご昇降を実現し、ヘビ型ロボットの適用可能な環境を飛躍的に拡大した。さらに、不整地を移動したのち自らはしごへ取り付け、はしご昇降を行うという一連の動作を実現したように、異なる環境間の遷移を実現したことは実際の点検作業への適用のために非常に有意義である。これらの実現は全て世界初の成果であり、非常に独創的である。狭所だけでなく、不整地やはしごも移動できるようになったことで、点検箇所まで一台で移動できるようになり、従来では到達不能であった箇所の点検作業を実現する可能性を拓いた。

- 競合する技術開発や類似のアプローチが行われている場合には、それら取組との比較（優位性・劣位性）、今後の課題等

非車輪型ヘビ型ロボットによる配管上のフランジ乗り越え、およびはしご昇降は他に実現された例はない。非車輪型ヘビ型ロボットによる不整地移動についてはカーネギーメロン大学[M. Travers2018]でも実現されているが、文献[M. Travers2018]で示されている実験は高低差の小さい岩場で行われており、また移動方向を制御する手法は示されていない。一方、本プロジェクトで提案した crawler-gait という手法では、傾斜角度 45 度、高さ 40cm 程度のステップフィールドの移動を実現しており、操舵も可能であることから、走破性の高さにおいてより優れていると言える。

### 3) 能動車輪ヘビ型ロボット

- 獲得成果の革新性（社会や産業に対するイノベーションの観点から）と独創性（技術やサービスの観点から）

非常に多くのアクチュエータをもつ多連結移動ロボットは、その自由度の大きさから操縦が難しい。この課題に対し、車輪の接地/非接地の切替えを利用した制御（その場での姿勢変化、作業時の関節可動限界角度からの復帰）、関節の脱力と曲線再構成を用いた複雑環境における 3 次元操舵、センサ情報を用いた半自律階段昇降制御など、独創的かつ有効な制御方法を提案した。これらは全て査読付き学術論文（海外）に掲載されており、高い独創性を有すると言える。さらに、これらは全て現実の用途に即した制御方法となっており、多連結ロボットを無線遠隔で操縦する際にその操縦難易度を大きく下げるものである。例えば、半自律階段昇降制御は操縦者が先頭に対して指示を行うと、胴体部分の動作はセンサ情報をもとにロボットが自律的に決定するため、操縦が大変容易である。一般的には階段昇降は胴体を階段の傾斜に沿わせて車輪を回転させて行うが、その場合は階段と車輪との摩擦が昇降の成否に大きく影響するため、ロボットによる階段昇降の可否の事前予測が難しい。これに対し、新たに提案した手法は地面との摩擦にほとんど依存しない特徴的な登り方であるため、幾何学関係さえ合えば階段昇降の成否が事前に予想できる点もとても有用な特徴である。さらに、従来は移動手法が主に研究対象とされていた多連結移動ロボットに対して、「作業」に着目しこれを容易に行うための制御方法の提案を行った。作業時には空中に持ち上げたアーム部のみではなく体全体を利用して手先のグリップ部を移動させるが、その際にロボットの各関節が可動限界角度に到達し動作が継続できなくなる場合がある。この問題は既存手法では全く解決することができない問題であった。この問題を、田中（電通大）ら独自の手法である車輪の接地/非接地の切替えを利用して解決している点が独創的かつ革新的である。

また、T2 Snake-3 は小型軽量にも関わらず 1 m 段差を越える性能があるため、従来のロボットでは到達不能であった環境の点検や作業といった新たな市場を切り拓く可能性がある。

近接覚センサに関して、フィールド試験により実用性を示した事例は数少ない。光学反射型の近接覚センサによって距離や姿勢誤差を検出する手法を走行路面のように下面に対して用いる事



例はほとんどない。直流単電源で駆動可能としたため、様々な移動ロボットの路面計測用センサとして利用できる。

- ・ 競合する技術開発や類似のアプローチが行われている場合には、それら取組との比較（優位性・劣位性）、今後の課題等

段差登り性能および階段昇降性能の比較を表 2-10-1 に示す。段差登りの性能はロボットの全長に大きく依存するため全長で正規化しているが、本プロジェクトで開発した T2 Snake-3 が高い性能を示していることがわかる。小型軽量でかつ非常に高い段差乗越え性能があり、特徴的である。

多連結移動ロボットによる作業については、ACM-R8（東工大）でも実現されている[古村 SI2017]。文献[古村 SI2017]では制御方法も含めて作業の詳細が述べられていないため優劣はつけ難いが、本プロジェクトで提案した手法は前述のように独創的であり、かつ操縦しやすく実用的であると言える。

表 2-10-1 多連結ロボットの段差・階段登りの性能比較

([1][4][5]東工大, [2]Univ. of Michigan, [3]岡山理科大)

|                           | T <sup>2</sup> Snake-3 | 蒼龍 V<br>[1] | OT-4<br>[2] | RT04-<br>NAGA [3] | ACM-<br>R4.2 [4] | ACM-<br>R8 [5] |
|---------------------------|------------------------|-------------|-------------|-------------------|------------------|----------------|
| 全長 [cm]                   | 173                    | 116         | 94          | 126               | 98               | 201            |
| 重量 [kg]                   | 9.2                    | 16.5        | 4.0<br>※有線  | 20                | 5.0<br>※有線       | 36.5<br>※有線    |
| 最大段差高さ [cm]<br>(全長に対する割合) | 100<br>(60%)           | 64<br>(55%) | 40<br>(43%) | 50<br>(40%)       | 37<br>(38%)      | 60<br>(30%)    |
| 階段の最大傾斜 [deg]             | 54.5                   | -           | 40          | 40                |                  | 55             |

#### （４）脚ロボット

##### 1) 脚ロボットのプラットフォーム

瓦礫上の移動や垂直はしご昇降を可能な脚ロボットは数少なく、世界有数の成果をあげた。開発した WAREC-1 は、高い移動能力だけでなく、開口トルクが約 100Nm という固いバルブの開閉も実現し、力強い作業が可能などところにも他の類似研究と比較して優位性がある。今後の課題として、同プログラム内で開発された油圧アクチュエータを利用して脚ロボットの出力を向上し、耐環境性を向上することがあげられる。

##### 2) 高出力ロボットハンド

脚ロボット用ハンドについて、全長 300mm 程度のロボットハンドにおいて高出力かつ無通電把持が実現できるハンドは世の中に存在しない。高出力さと無通電での物体把持の能力は災害支援作業だけでなく、生産現場等にも応用が可能である。今後は、災害現場での活用するためには防塵性と防水性の向上が必要である。

##### 3) 非干渉連動機構を用いた劣駆動ロボットハンド

・これまでのロボットハンドは指の設計コストが大きいいため、全ての指でほぼ同じ構造を用いるモジュール化に基づく設計がとられることが多かった。そのため、ハンド全体として把持機能の観点から指の機能を個別に変えることが難しかった。しかしながら、本ロボットハンドでは把持機能を考慮して指の個別設計を行っている。その結果、例えば、拇指の根元のリンクに大きな母指球を配し、そのモータの出力を上げることで、ロボットハンドに大きな許容モーメントを持たせることができた。

・本ロボットハンドには指の自由度を減らすための劣駆動機構が導入されている。この劣駆動ハンドは通常、ワイヤや多リンク系により構成されている。一方、本研究では、同様な機構を特殊な歯車列



駆動機構により実現している．この歯車列機構は，関節間の連動比からその構成を容易に設計可能である．

#### 4) はしご検出

円柱情報の獲得に関する研究として，円柱あてはめを用いた樹幹検出の研究[1]や，Hough 変換による円柱あてはめの研究[2]などがある．[1]の研究は対象が樹幹であり，実際には円柱ではないものに対する手法であるため梯子の棧などの円柱形状の物体に対しての精度については述べられていない．これらの従来研究に対し，我々の研究では，円柱部位を把持するために必要な情報として，円柱領域から円柱直径を推定する方法を提案した．そして，細い円柱や離れた距離からでも円柱直径を高精度（直径の1%程度の誤差）に推定できることを示した．

[1] 堀内栄一，” 三次元点群への円柱あてはめによる樹幹の自動検出 ”，日本ロボット学会誌，Vol.31,Np.6,pp605-613,2013

[2] T.Rabbani and F.v.d.Heuvel: “Efficient Hough transform for automatic detection of cylinders in point clouds,” Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 36 (Part 3/W19),pp.60-65,2005

#### 5) 音源検出

一般的に音響情報処理には部屋の伝達関数を始め環境情報を使うことが多く，動きながら音を扱う技術は少ない．本研究で開発した音検出システムでは，音源数や音圧変化といった動的に変化する未知条件に強く，移動しながら複数の音源を同時に扱える，という点に優位性がある．一方で空間的な情報を使うため，同一方向の複数音源を分離できない原理上の限界がある．最新研究で扱われている深層ベイズ学習に基づく手法を始め，大量のデータから学習する手法では，まだ性能は低いものの今後この問題を解決する可能性を持っている．今後の課題として，両者の利点を統合することで，無数に音源があるような雑踏環境に対応していくことがあげられる．

#### 6) 過去画像履歴を用いた俯瞰映像提示システム

俯瞰映像を提示する手法として，ボールの先にカメラを搭載し，ロボットを見下ろす視点で映像を提示するものや，LiDAR を用いてリアルタイムに三次元環境地図を生成し，ロボットの CG モデルを表示することで俯瞰映像を提示するものがあるが，ロボットのサイズが大きくなることから狭い空間への進入に不利であり，また一般に通信量が多く，通信制約のある災害環境には適さない．過去画像履歴を用いた俯瞰映像提示システムでは，連続した画像は不要であるため，画像の取得頻度を低く設定することで通信量の問題を解決することができる．

#### 7) 移動ユーザインタフェース

前述したように従来の脚ロボットの遠隔操作システムは仮想空間内の目標位置をマウスによって入力するものが一般的であった．これに対して提案するタンジブル UI は仮想的にロボットを直接操作できるシステムであり，革新的かつ独創的である．また，移動タスクと変形タスクの被験者実験において，従来の遠隔操作手法に対しタスク達成時間・タスク成功率・主観評価の全てにおいて良い結果となり，優位なシステムである．しかし，一方で目視操作に比べるとまだ劣っている部分が多いため，目視操作と同等になるようなシステムを開発することが今後の課題である．

#### 8) 操作ゲイン

同構造マスタ・スレーブ(MS)システムは，人の身体動作「そのもの」を「そのまま」ロボットに伝達する遠隔操作システムである．人の身体動作「そのもの」を伝えられることが最大の利点となる一方，人の身体動作そのものを「そのまま」ロボットに伝達するため，ヒューマンファクターに起因する位置決め精度限界や身体動作に係る疲労が課題となっていた．精度限界を打ち破り，かつ疲労を抑えるには，「そのまま」ではなく「かえて」へ伝達する「スケール・ゲイン調整」が重要と考え，本研究では，限られた時間の中で複雑な作業を連続的に行うことが要求される災害対応ロボットを対象とした「MSシステムのスケール・ゲイン調整手法」を開発する．救助・復旧の早期化を目指す社会的意義の高い研究となることが期待される．

スケールやゲインを決めるための理論モデルとして、Fitts の法則や困難度指標 (Ide) などが提案されている。多くは、手術用ロボットや細胞作用ロボットへ応用され、その方法論として Position-Force Scaling などが提案されている。それらの研究では、位置入力スケールダウンし、カフィードバックはスケールアップするものであった。一方、災害対応ロボットへ応用を考えると、作業は一樣ではなく、操作者には極度の緊張と時間的プレッシャーがかかる。災害対応作業では、位置・力のスケール変更は正負の双方向に必要であり、またダイナミックに調整する必要がある。さらに、疲労が精度不足・効率低下をまねく悪循環に陥ることにも考慮が必要である。つまり、本研究では、災害対応作業が有する「複雑性・連続性・時限性」の考慮することが新規性であり、ヒューマンファクターを考慮した「精度、疲労、効率」を改善する「かえて」伝達する方法の構築を行う点に独自性がある。これらの点を同時に考慮した、「かえて」伝達する技術はいままでに提案されていない。

## (5) 飛行ロボット

### 1) タフロボット型災害対応飛行ロボットに関する研究

一般的にドローンは、安定した気候の中で目視内での飛行を想定した機体開発がなされている。災害対応飛行ロボットとして、悪天（特に風雨）に強い機体開発を行うことによって、より迅速で2次被害を避けられる現場調査が可能になると考えている。

### 2) 飛行ロボットのための軽量高把持力ロボットハンドの開発

アームをドローンに取り付けた場合、アームを操作すると、その反動でドローンの姿勢が崩れてしまう可能性がある。ドローンにアームを取り付け物体を操る研究は行われていが、上記の問題を多くの場合はドローンの制御方法（フライトコントローラ）を改良することにより解決しようとしている。一方、本研究ではアーム自体にその反動を相殺する機構が組み込まれており、一般のフライトコントローラを用いた汎用機に取り付けても、ドローンの姿勢を崩すことなく、アームを動作させることができる。

### 3) 生物の柔軟構造を規範とした超口バスト回転翼

低騒音化のための試みとして、自律研のドローンにおいても、東芝製の ESC を用いた低騒音化の試みが行われてきた。しかし、ドローンの騒音の大半は回転するプロペラから生じる空力音であり、音源探査や夜間の搜索の精度向上や、被災者への心理的圧迫を軽減するには、この空力音を抑制する必要がある。DJI 社のプロペラも形状が工夫されており、低騒音化が実現されたと報告されているが、効率等の他の性能を維持しつつ騒音特性を著しく改善するのは容易ではない。本研究では、効率等の他の性能を犠牲にしつつも、より騒音の抑制に特化したプロペラの開発に成功した。

### 4) ピッチ角制御方式への変更とモータ集約化によるミニサーベイヤーの機動性向上

本研究におけるキーテクノロジーであるピッチ制御方式は、シングルロータヘリコプタでは通常の技術である。シングルロータヘリコプタでは、コレクティブピッチに加えロータ面を傾けるサイクリックピッチも変化させている。エンジン機においてロータの回転数を変えるためには時間がかかるため、機体の運動制御には不向きであったためである。近年のモータの性能向上によって、モータであれば短時間で回転数を変化可能になったため、マルチロータ機では回転数制御方式が採用されている。コレクティブピッチを変更するサーボモータも不必要で製作費が抑えられ、またメカニズムの理解も容易になる。しかし、上記の様に現状でも、ピッチ制御方式の方が短い時間でロータ推力のコントロールが可能である。ロータ推力コントロールのための時間が短いことの有意性は、飛行制御に要求される時定数との比較で決まるものであり、使用目的、使用環境に依存する。また、ピッチ制御では負の推力も発生可能で、負の推力による大きな推力変化、モーメント変化の優位性もマルチロータ機の使用目的、使用環境に依存することは同様である。既述のピッチ制御方式ゆえに取り込める上記 1) - 4) のメリットも含め、使用目的、使用環境によって本研究で提案するピッチ制御方式の優位性が決まる。

ピッチ制御方式は多くのマルチロータ機開発者が考える方式であって、我々のグループの1号機（図2-10-4に示した機体、以前のもの）を2016年4月に国際ドローン展で展示した際には、企業も同方式のマルチロータ機を発表していた。我々のグループでは、ピッチ制御方式を採用することによる

メリットの分析を進めたが、上記企業は、ピッチ制御方式マルチロータ機を利用したミッション遂行を主に進めた様である。我々の研究開発は、航空工学、ヘリコプタ工学をベースに将来のマルチロータ機の性能向上の可能性を広く検討したものである。



図2-10-4 当該研究グループの1号機

#### 5) UAV 搭載マイクロホンアレイを用いた音源探索・同定

日岡らの「パワースペクトル密度推定に基づく実用的な音源信号分離」, 音響学会誌, vol 73, No 8, pp. 499-508, 2017 に基づき, NTT グループからドローン用ノイズキャンセラ 50 万円で発売されている。( <http://www.ntt-ats.com/product/dronenoisecanceller.html>) 人とコミュニケーションするという点を主体に考えているようで, 要救助者を発見するという我々の目的とは異なる。機能的には音源の信号を強調する処理をしている点では競合する部分があるが, 音源探索, 防水対策といった機能は競合になり技術である

#### 6) タフ・ロボティクスのためのタフ・ワイヤレス技術の研究開発

##### A) コマンドホッパー

本システムと同じ 920MHz 帯を用いてドローンの制御およびテレメトリ取得をするシステムはドローンメーカーまたは通信器メーカーから発売されているものもあるが, 以下に挙げるような機能は本システム独自のものである。

- メイン回線(920MHz)が不通となった場合に緊急的に 169MHz のバックアップ回線に切り替える機能
- 耐干渉性向上のため, 通信チャネルを周期的に切り替える機能
- コントロール信号の遅延時間を一定値以内に収める機能
- マルチホップにおける 1～3 ホップ高速経路切替え機能
- マルチプラットフォーム機能 (フライトコントローラの機種を選ばない)
- 任意の少量センサデータも C2 データに多重化してマルチホップ伝送可能な機能

##### B) ドローンマッパー

有人航空機間で位置情報を通知する装置は航空業界で用いられているが, ドローンで用いられているものは本システム以外には無い。航空業界で用いられているシステム (ADS-B) をそのままドローンで用いることは既存の航空機管制に与える影響が大きく, 現実的ではない。以下に挙げる機能は本システム独自のものである。

- 市販の安価なデバイス及び免許不要な周波数を用いて構成することができ, 有人機の既存システムやドローンのプロポ信号に影響を与えない。
- 10km 程度の十分な距離をカバーすることが可能で, 小型のドローンにも導入が容易。見通し外のドローンの ID や位置も他のドローンを経由してマルチホップで把握可能。

#### 7) マルチ GNSS アンテナによるロバストかつ高精度な位置姿勢推定と超高精度レーザ計測の実現

本システムとは別の LiDAR+GNSS システムでは, 姿勢を計測するために IMU (ジャイロセンサー, 加速度センサー)を必要とする。このような機器は精密かつ効果で, 実装をするために大きな工数と費用を必要とする。また飛行する際には初期化飛行などの複雑な操作を必要とする。



一方、本システムでは、この構成の中で姿勢計測を行うことができるため、従来技術に比して低コストで、容易に操作を行うことが可能である

#### 8) 地勢の多重解像度データベースを用いた飛行プラットフォームによる被災状況の効率的な把握と情報提示

災害時の情報収集にはマルチコプタが用いられる。マルチコプタは、カメラや位置姿勢情報を得るためのセンサ等を取り付けることで、情報の取得を行うことができる。マルチコプタで得た情報と災害発生前に取得した地勢データを比較することで、被災状況を把握できる。地勢データの取得には地上設置型レーザスキャナや車載型レーザスキャナが用いられる。これらのレーザスキャナを用いて高解像度の地勢データを都市全体にわたって取得したとき、膨大な数の点群となる。大規模な点群を高解像度かつ広範囲に扱う場合、メモリを大きく消費してしまうほか処理時間が長くなるといった問題が発生するため、マルチコプタを用いたマッチングを迅速かつ効率的に行うことが困難になる。

本研究グループでは、この問題を解決するため、大規模点群から多数の解像度のデータベース(以下、多重解像度データベースとする)を構築し、飛行ロボットの位置情報からデータベース内の任意の視点を再現することで被災状況を迅速かつ効率的に把握するシステムを開発した。

#### 9) 劇的な周囲環境変化に対してタフなスーパーバイザ型ナビゲーション・制御システムの開発

まず、ナビゲーションシステムに関して従来技術では GPS 環境または非 GPS 環境のどちらかに対するシステムを構築・実証している例は存在するが、GPS・非 GPS 環境及びその境界付近において安定したナビゲーションシステムの実証例は見られない。

制御システムについては、モデル予測制御を屋内モーションキャプチャ環境などの集中型システムにおいて実装および検証している例は存在しているが、組み込み PC に実装し、その有効性を示している例は、本研究開発以外には存在していないと思われる。

#### 10) コヒーレント・ドップラー・ライダーによるドローンの落下を防ぐ橋梁近傍の微小風観測システム

競合技術のうち、三菱電機株式会社とロッキード・マーチン社は、価格が数億円程度・大きさ、メンテナンス性の観点から直接の競合とはならないが、フランス Leosphere 社の技術が最大の競合となりうる。本研究グループで開発している可搬型ドップラー・ライダーで実現させる性能向上については、現時点で他社のドップラーライダーで行なっているところはなく、京都大学とメトロウエザーがもつ信号処理のコア技術との組み合わせによって実現されるため、市場に投入した後、少なくとも3年程度のリードタイムはあると考えられる。

京都大学生存圏研究所は、Middle and Upper Atmosphere Radar(MU RADAR)に代表されるように、リモートセンシング技術で30年以上の経験を持っており、リモートセンサー特有の低いSN比での高精度信号抽出技術に優れたノウハウを持っている。その技術が、八木アンテナ・富士山レーダー・東海道新幹線に続き平成27年に電気電子情報通信分野におけるIEEEマイルストーンに認定されている。この信号処理技術を光に応用した技術をPIの古本がコーディングを行い(このプログラムの詳細は現在非公開)、その概要のみが特許化されている。このアルゴリズムは競合の追従を許さない精度を持ち、また機器や環境に合わせて様々なチューニングが出来る拡張性をもっている。本研究グループのドップラー・ライダーは上記のコア技術に基づき開発を行ってきた。

#### 11) 防災分野におけるドローンの性能評価・実証

(実証活動のため、とくになし)

#### 12) 飛行プラットフォーム用柔軟ロボットハンド機構

従来の指で把持するグリッパは大きな把持力が生成できる一方、把持・着地対象の形状が限定されること、厳密な位置・姿勢の制御が必要なこと、飛行時にグリッパが対象物に接触すると大きな反力を受けることが問題となる。これらへの対処には、飛行体の制御法を改良・改善することが多い。

また、柔軟袋状のグリッパの研究例はいくつか報告されているが、鋭利対象物で袋が損傷しやすいことや、把持時に多大な押付力が要求されることが課題となっていた。

これに対し、本研究は可変剛性機能を有する耐切創性柔軟袋状グリッパ機構を活用することで解決を図る。不定形・脆弱・鋭利対象物など、多様な対象に対して把持・着地することが可能となった。

## (6) 建設ロボット

- ・2本の腕を有する重機械には先例があるが、2本の腕の機能を十分に活かせるものではなかった。本プロジェクトでは、新しい複腕機構である2重旋回・複腕機構と力覚やコンプライアンスなどの制御手法を開発し、これにより、従来に比べて、はるかに自在な2本腕の作業が可能であることを実証した。本ロボットにより初めて重機械による本当の複腕協調作業が実現されたと考えられる。
- ・実証実験のひとつとして、本ロボットにより直径60mm、隙間50 $\mu$ mのピン嵌合作業が可能なことを示した。1tを超える手先の発生力と、このような繊細で器用な作業性を両立したロボットは前例がない。
- ・2重旋回・複腕機構により、腕とクローラを協調動作した不整地の移動やロボット本体の姿勢の安定化が実現できることを実証した。これらは従来の重機では実現が不可能なものである。
- ・有線で給電するドローンのコンセプトは本プロジェクト以外にもあるが、本プロジェクトで開発したケーブル張力調整機構により、初めて実用に供することのできる有線給電ドローンが実現できたと考えられる。また有線の特徴を活かしてGPSを使わないドローン位置推定とそれによる位置制御技術を開発し、ドローンの自律飛行を可能とした。これらは災害対応に限らず、平時の土木施工における建設機械への有線ドローンの搭載・活用に向けて、大きく道を拓いたものと考えられる。
- ・重機械での力覚や触覚の提示機能を初めて実現した。本プロジェクトで開発した力覚・触覚の提示システムは、いずれもセンサの手先への装着が不要で、ヘビーデューティーな用途に適合したものであり実用性が高い。またリストバンド式の触覚提示デバイスを開発し、多様な操縦デバイスとの組み合わせや既存の機械へのレトロフィットが容易であることも特筆に値する。
- ・車体に取り付けたカメラで人工的に俯瞰映像を合成する技術は、自動車の周囲情報提示システム(アラウンドビューなど)などに用いられているが、視点は一点(通常は真上)に固定されている。本プロジェクトでは、任意の視点からの俯瞰映像を、リアルタイムに合成するシステムを開発した。災害対応ロボットでは、自動車の運転のような2次元平面内の移動だけではなく、3次元の複雑な走路を移動する必要がある。任意視点からの俯瞰映像は不可欠である。また本プロジェクトで開発した遠赤外線パノラマカメラと本技術を組み合わせることにより、夜間や霧、煙の中でも周囲状況の確認が可能となり、タフな災害ロボットの実現に大きく寄与するものである。
- ・本プロジェクトで開発した半円筒の曲面スクリーンを用いた遠隔操作映像提示システムは、これまで無人化施工など各種の遠隔操作で用いられてきたマルチモニタシステムと比較して、オペレータの視認性が高く、また身体的負荷が小さい。さらに提示する映像の大きさ、レイアウトも自由に変更可能であり、作業内容に最も適合した提示方式に瞬時に変更できる。軽量で分解・組立が容易であることから現場への可搬性にも優れている。災害対応に限らず、多方面の遠隔操作映像提示システムへの展開が期待される。

## (7) 極限油圧コンポーネント

### 1) シリンダ、モータ

- ・シリンダ、モータとも、従来の同等製品の約3~6倍の高「力(またはトルク)/自重」比を有する。
- ・シリンダ、モータとも、従来の同等製品の約1/3~1/10の低摺動摩擦である。
- ・シリンダ、モータとも、サーボバルブ、位置センサ、圧力センサ、コントローラを内蔵し、外部よりCAN等の汎用通信により制御できる。
- ・油圧WAREC用に開発した揺動モータは、中空出力軸を有する。

### 2) 油圧人工筋

- ・獲得成果の革新性(社会や産業に対するイノベーションの観点から)  
今回の圧力レベル(5MPa)で、高い出力レベル(5kN)を実現し、かつ柔軟性を持つアクチュエー

タはなく、革新的なアクチュエータと言える

- ・獲得成果の独創性（技術やサービスの観点から）

高圧での油圧駆動を実用レベルで実現した事例はなく、ゴム材料、繊維、金具加締め技術に独創性がある（特許出願中）

- ・競合する技術開発や類似のアプローチが行われている場合には、それら取組との比較（優位性・劣位性）、今後の課題等

ソフトマテリアルを活用した柔軟性を持つアクチュエータは多数存在するが、本プロジェクトで開発したマッキベン型油圧人工筋肉同等の高い出力を発現するアクチュエータはない。一方、開発した人工筋肉の課題としては圧力源であり、使用条件により小型化が必要な場合が想定される。

### 3) 圧電振動子駆動微粒子励振型小型制御弁

製品化されている流量制御弁ではサーボモータ等が駆動に用いられることから二方弁でも100g以下のものはほとんどなく、ImPACTでの試作例のように三方弁としても数十gに収まっているのは極めて特徴的である。また、小型であることから、既存のサーボバルブでは難しい人工筋アクチュエータの端末内に組み込みが可能であるなど、ユニット化が容易である点で大きな優位性を持つ。ロボット用油圧コンポーネントの小型軽量化を目指すうえで重要な成果である。一方で対応できる作動流体の供給圧力は最大でも数MPaにとどまり、サーボモータを使用した制御弁に比べて低く、現状では人工筋アクチュエータの制御など適用対象が制限されている。対応流量の増大と併せて今後の課題である。

### 4) 油圧ハイブリッドサーボブースター

競合技術との技術的な比較と、最近の展開を表2-10-2にまとめた。

今後の課題は次の2点である。

- ・既存の市販コンポーネントを組み合わせるだけでは機器サイズが大きくなるため、バルブとポンプをさらにコンパクト化する必要がある。
- ・EHAモードやブーストモードでは原理的にスピードが出せないため、負荷が小さい領域では開回路によるバルブ制御を用いるが、遅れが大きい安価なバルブでは、高速駆動時にシリンダがストロークエンドに達するまでの制御時間が短い。そのため現在取り組んでいる課題はモデル予測制御のソフトウェア整備である。

表2-10-2 油圧ハイブリッドサーボブースターの競合技術との比較

|       | a <b>サーボ用</b><br>サーボ弁 | b <b>EHA（閉回路）</b>         | c <b>汎用</b><br>通常の開回路    | d <b>本研究</b>          |  |
|-------|-----------------------|---------------------------|--------------------------|-----------------------|--|
| 用途    | 航空機、防衛機器、一部のロボット      | 一部の産業機器（プレス機等）            | 建機など、全産業油圧機器の9割以上        | マニピュレータ、等の多軸サーボ       |  |
| 利点    | 高応答、コンパクト             | 高効率、高精度                   | 低コスト、頑健、長寿命              | 高精度、高速、低コスト           |  |
| 欠点    | ゴミに弱い、発熱              | 機器サイズ大                    | 制御性劣る                    | 機器サイズ大                |  |
| 最近の展開 | 歩行ロボットのトルク制御 (Hyon)   | 建機への応用、ロボットハンド (Kaminaga) | 独立メタリング法による高効率駆動が建機分野で顕著 | スライダと3軸ロボットで位置・力制御を実現 |  |
|       |                       |                           |                          |                       |  |

## (8) シミュレータ

### 1) 獲得成果の革新性

- ・開発したシミュレータは通常の剛体多リンク系のシミュレーションに加えて、極限環境において発生する煙や雪等の自然現象や路面の変形等の現象を再現可能である。これらの個々の機能の中にはコンピュータグラフィックスの分野等で既に利用されていたものもあるが、すべての機能を一つのシミュレータフレームワークとして提供しているものは他に例を見ない。シミュレータは災害対応ロボットの開発・運用を効率化するものであり、それ自体が直接社会に変革を与えるものではないが、災害対応ロボットを始め、他の用途のロボットのシミュレーションにも利用可能



であり、これらのロボットが巻き起こす革新を加速するものとする。

- 様々な動力学シミュレータ、特に建設機械に特化したシミュレータはいくつか提案あるいは市販されているが、同種のシミュレータを開発している企業でも、実現象との定量的な検証が重要課題となっている。本研究開発が提示するモデルはスケールモデルおよび実機を用いた検証、評価を行っており、これら競合するシミュレータ開発企業にとっても有用である。

## 2) 獲得成果の独創性

- 剛体接触近似（いわゆる拘束法）をベースとする接触力計算において立体積を用いた方法は他に例を見ない。接触力に課せられる制約条件を接触応力に課せられる制約条件に分解した後、再構成して上界計算を行うという発想が、物理的に正しい計算を可能にした。また、拘束条件の緩和によって接触点の微小な摂動を許容しつつ、静止摩擦条件のままでこれを抑制することで、既存製品にない力計算の安定性を実現した。このことは、代表的な既存方法の追試と比較評価によって確認している。
- 従来、状況を限定することで、地盤の大変形や硬い物体の破壊・切断等を含む複雑な相互作用をシミュレートする方法や事例は多く存在したが、それらは現象の再現に興味があり、軽量の汎用シミュレータに馴染むものではなかった。精度と計算コストのバランスを取り、極限環境ロボットのシステム開発で利用可能な形でこれらを提供した点に獲得成果の独創性がある。

## (9) フィールド評価・安全・STM

- 開発を目的としたプロジェクトで、性能評価と安全を独立したグループが担当することで、プロジェクトリソースの効果的利用が図られたと考える。このような開発マネジメントはわが国では限定的であり、独創的な取り組みと考える。
- ここでの安全は国際安全規格に基づくものであり、安全認証に必要なリスクアセスメント等の基礎的データも提供している。このデータは、国際市場展開に必要な安全認証にも利用可能なものであり、成果の産業化に安全面からも貢献していることは、我が国の研究開発プロジェクトマネジメントの観点からは革新的と考える。
- 災害対応ロボット性能のSTMは米国NISTの主導で行われているが、ここで開発を進めているロボットによる画像探査精度を総合的に評価するSurvey AcuityのSTMはNISTでの取り組みは限定的であり、本プロジェクトでのSurvey Acuityの開発はNISTと相補的となっており、標準化活動におけるリソースの国際連携を通じた効率的利用につながっている。

### 3. 研究開発プログラムの全体成果

(1) 目標達成の状況（目標達成できた場合の要因分析、目標達成が困難となった場合の原因分析も記載）

「2. 研究開発プロジェクト毎の実施状況及び成果、③プロジェクトの進捗状況、獲得成果及びのく表達成への貢献度」で述べたように、当初設定した目標に向けた取り組みを行い、表2-0-1（再掲）のように、目標を達成した。

各プラットフォームにおける主な技術的成果は、表2-0-2、2-0-3（再掲）の通りである。

社会的成果は表2-0-7（（2）に再掲）の通りである。

産業的成果は表2-0-4～2-0-6（（2）に再掲）の通りである。

これらの詳細については、「2. 研究開発プロジェクト毎の実施状況及び成果、③プロジェクトの進捗状況、獲得成果及びのく表達成への貢献度」を参照のこと。

目標達成できた要因の分析は、「6. 研究開発プログラムの実施管理状況」、および、「7. PMの自己評価」に、まとめて整理して記すこととした。

表 2-0-1 達成目標と進捗（再掲）

| ロボ              | 出口戦略                                 | プログラム終了時の達成目標                                                                       | 達成                         | TRL<br>達成/目標 |
|-----------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|--------------|
| サイ<br>バー救<br>助犬 | サイバー救助犬スーツによる救助犬能力の飛躍的拡大と全世界の救助隊への配備 | モニタリング・マッピング・作業指示・情動推定の機能を持つサイバー救助犬スーツの実現。日本救助犬協会、イタリア山岳救助隊他の訓練使用とフィードバック。          | 100%<br>救助犬組織へ貸出           | 5-9 / 9      |
| 索状ロ<br>ボット      | 瓦礫、プラント配管等の狭隙部・入り組んだ場所での捜索・調査・点検の実用化 | アクセスが困難な瓦礫内（倒壊家屋等）、プラント内（配管のジャングル等）、火災家屋内の移動と、状況の計測・伝送・認識・マッピングによる救助活動、点検作業支援、消火の実現 | 100%<br>プラットフォームを福島第一原発に適用 | 6-9 / 8      |
| 脚ロ<br>ボット       | 被災プラント等の危険箇所での調査・点検ができる脚ロボットの技術の実用化  | プラント内移動（梯子・階段昇降等）と非破壊検査（超音波探傷等）、修繕作業（ハンマードリルでのボア穴開、バルブ開閉操作等）                        | 100%                       | 4-6 / 6      |
| 飛行ロ<br>ボット      | 従来の飛行ロボットをはるかにしのぐタフな飛行ロボットによるサービス実現  | 悪環境下でのロボスタ飛行（風15m/s,雨100mm/h,構造物近傍30cm）と状況の計測・伝送・認識・マッピングによる作業支援の実現                 | 100%<br>九州北部豪雨災害適用         | 6-9 / 9      |
| 建設ロ<br>ボット      | 災害・鉱山開発・都市土木における遠隔自律双腕化による作業効率・安全性向上 | 従来の遠隔自律建機が不可能な移動（ギャップ越え、登板など）と、双腕作業（ドアこじ開けなど）による作業支援の実現                             | 100%                       | 6-8 / 8      |



表 2-0-2 各プラットフォームの主な成果（サイバー救助犬、索状ロボット）（再掲）

| ロボ         | 主要な成果：ロボットシステム および 要素技術                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                          |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| サイバー救助犬    | <ul style="list-style-type: none"> <li>犬の行動モニタリングと行動指示ができるサイバー救助犬スーツ（世界初）</li> <li>非侵襲的に犬に作業を指示する方法（世界初）</li> <li>軽量で疲れないスーツ（世界一）</li> <li>激しく動く映像から3次元運動とマップを推定（SLAM）（世界一）</li> </ul>           | <ul style="list-style-type: none"> <li>心拍・加速度から、犬のやる気を精度高く推定（世界一）</li> <li>犬の運動と、何をしているかを推定（世界一）</li> <li>遠隔映像伝送、機械学習での遺留品発見</li> <li>日本救助犬協会訓練に毎月参加、行動計測は試験により実用化に近づく</li> </ul>                                                        |
| 細径<br>索状ロボ | <ul style="list-style-type: none"> <li>瓦礫内の数cmの隙間を自走・浮上しながら進入し、内部を調査（世界初）</li> <li>ボディを浮上させて移動能力と探索能力を向上（世界初）</li> <li>飛行する消火ホースロボドラゴンファイヤーファイター（世界初）</li> <li>騒音を除去し瓦礫内の音声聞き取り（世界初）</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>音響で索状ロボの姿勢推定（世界初）</li> <li>瓦礫内で触覚により操作支援（世界初）</li> <li>狭路、急激姿勢変化、照明移動、超小型の条件下でカメラ映像から3Dマップ作成と位置推定（SLAM）（世界一）</li> <li>空気圧による高速配管内移動</li> <li>機械学習による瓦礫内物体の識別・発見</li> <li>福島原発でプロトタイプ使用</li> </ul> |
| 太径         | <ul style="list-style-type: none"> <li>配管内外・ダクト・不整地・垂直はしごを自立移動できる索状ロボ（世界初）</li> <li>様々な物体を精密位置決め無しに把持可能で、尖った物体でも持てる、柔軟ロボットハンド Omni-Gripper（世界初）</li> <li>火の中でも物体を把持できる、柔軟ロボットハンド（世界初）</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>ボディ長さ1.7mに対して、1mの高さの段差を昇降可能な索状ロボ（世界一）</li> <li>配管内での位置推定とマッピング</li> <li>ボディ接触分布を計測する接触・近接覚センサ</li> <li>超多自由度を遠隔操作する自律機能</li> <li>プラントや建築物での試験</li> </ul>                                          |

表 2-0-3 各プラットフォームの主な成果（脚ロボット、飛行ロボット、建設ロボット）（再掲）

| ロボ   | 主要な成果：ロボットシステム および 要素技術                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                           |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 脚ロボ  | <ul style="list-style-type: none"> <li>プラント内を移動し、遠隔自律で点検ができるロボット</li> <li>50kgの物体を無通電把持できる30cmサイズのロボットハンド（世界初）</li> <li>脚ロボットによる高トルク(100Nm)のバレーブ開閉（世界有数）</li> <li>4足、2足、はらばい、車輪移動、垂直はしご昇降（世界有数）</li> </ul>                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>過去画像による遠隔操作のための仮想俯瞰映像支援</li> <li>自己位置推定と周囲環境の3次元地図作成</li> <li>周囲の音源定位情報マップ</li> <li>VRと仮想高速による遠隔操作支援</li> <li>フィールド評価試験により、プラント災害対応機能確認</li> </ul> |
| 飛行ロボ | <ul style="list-style-type: none"> <li>悪環境での飛行と情報収集（世界有数）</li> <li>搭載マルチマイクローフォンによる地上音声聞き取り、位置推定（世界初）</li> <li>悪環境下のロバスト飛行（強風15m/s、降雨300mm/h、構造物隣接1m）（世界有数）</li> <li>プロペラ2枚停止でも飛行継続（世界有数）</li> <li>荷重2kg変化で高度変化50mm（世界有数）</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>アームによる物体把持、運搬</li> <li>飛行ロボの位置共有システム</li> <li>高精度3次元地図作成</li> <li>多重解像度データベース</li> <li>九州北部豪雨災害における有視界外自律飛行、高精細映像撮影、2Dオルソ画像の提供</li> </ul>          |
| 建設ロボ | <ul style="list-style-type: none"> <li>二重旋回機構による重作業と精密作業の両方が可能な双腕ロボット（世界一）</li> <li>双腕作業に必要な高出力・高精度制御を実現（世界有数）</li> <li>ハンド先端にセンサを搭載しない力覚・触覚フィードバックによる遠隔操作（世界有数）</li> <li>関節・動摩擦油圧シリンダ（世界有数）</li> </ul>                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>ドローンによる実俯瞰映像、および、複数カメラによる仮想俯瞰映像による遠隔操作支援</li> <li>煙霧を透過する視覚</li> <li>没入型遠隔操作コックピット</li> <li>腕で支えながら遠隔操作による移動</li> <li>片腕で支えながらもう片腕で遠隔作業</li> </ul> |

## （2） 参考指標

### ①民間企業等とのマッチング及び橋渡しの状況

|         | 目標値 | 26年度 | 27年度 | 28年度 | 29年度 | 30年度 |
|---------|-----|------|------|------|------|------|
| 企業の研究者数 | 100 | 45   | 70   | 90   | 90   | 87   |
| 協力企業数   | 20  | 9    | 14   | 18   | 18   | 17   |



主な成果の活用・波及企業等，災害への出動・調査・訓練等の事例は，表 2-0-4～2-0-7（再掲）のとおり。

表 2-0-4 成果の活用・波及企業等（サイバー救助犬，索状ロボット，脚ロボット）（再掲）

| ロボ | 研究者       | 所属          | 活用企業                                      | 活用・波及内容<br>(+ COCN災害ロボットP.参加企業)                                                                                                                                                   |
|----|-----------|-------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 犬  | 大野        | 東北大         | 古野電気<br>ドーン                               | サイバー救助犬スーツの製造を委託<br>スマホHIの製造委託。山岳救助用ドローンとの連携（共同研究）                                                                                                                                |
| 索状 | 昆陽        | 東北大         | モリタHD*<br>清水建設*<br>三徳商事<br>**<br>**<br>** | Dragon Firefighterの本格開発を検討（共同研究）<br><b>能動スコープカメラプロトタイプを福島第一原発内調査に使用</b><br>触覚インタフェースの利用を検討（共同研究）<br>福島第一原発廃炉に使用検討（共同研究）<br>高速道路料金所設備定期メンテナンス活用の検討（試験検討）<br>ビルメンテナンス検査への活用検討（試験検討） |
| 索状 | 亀川・<br>田中 | 岡山大・<br>電通大 | 住友重機械<br>**<br>多数<br>**<br>WRS            | 索状ロボのボイラー点検活用を検討（共同研究）<br>索状ロボの発電設備点検活用を検討（現場試験）<br>配管・ダクト内，天井裏，床下の点検作業を検討（現場試験）<br>製品化の相談<br>ロボットテストフィールドでの実証試験                                                                  |
| 索状 | 多田隈       | 東北大         | 日立製作所*<br>**<br>ベンチャー                     | 福島第一原発の格納容器内調査での利用検討（共同研究）<br>産業用としての活用を検討（現場試験）<br><b>ベンチャー設立準備中，官民ファンド東北大学ベンチャーパートナーズBIP投資採択</b>                                                                                |
| 脚  | 高西        | 早大          | JAXA*<br>**<br>**                         | 真空対応アクチュエータユニットの開発（JAXA予算）<br>脚ロボのビルドインモータ技術での協力を相談<br>脚の使用の検討                                                                                                                    |
| 脚  | 中村        | 並木精密        | **<br>**                                  | 福島第一原発内作業へのハンドの適用を検討（発注）<br>ロボットハンドとしての使用検討                                                                                                                                       |

表 2-0-5 成果の活用・波及企業等（飛行ロボット，建設ロボット）（再掲）

| ロボ | 研究者 | 所属   | 活用企業                        | 活用・波及内容<br>(+ COCN災害ロボットP.参加企業)                                                                          |
|----|-----|------|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 飛行 | 野波  | ACSL | ACSL                        | <b>開発技術を搭載，DJI等との明確な差別化，東証マザーズ上場</b>                                                                     |
| 飛行 | 高木  | 広島大  | モーチュ，啓文社<br>製作所，HIVEC       | 実用化アームの開発，操法・教育のメニュー化，商品販売を目指す（共同研究）                                                                     |
| 飛行 | 三浦  | NICT | **<br>電源開発<br>スカパー<br>東北通信局 | 無人航空機運航管理システムへの拡張と実用化（共同研究）<br>山中電力設備点検への実験評価（実証試験）<br>ドローン位置情報共有技術の小型化（共同研究）<br>ドローンの飛行位置把握に関する調査（実証試験） |
| 飛行 | 鈴木  | 早大   | テラドローン                      | 製品化・実用化に向けた協議                                                                                            |
| 飛行 | 鈴木  | 信州大  | **                          | インフラ点検ドローンの開発（共同研究）                                                                                      |
| 建設 | 吉澤  | 阪大   | ゼネコン*<br>鉄道*<br>**<br>**    | 土木建設工事への適用の検討<br>架線工事への適用の検討<br>工場内での重量物ハンドリング，組み立て機への適用の検討<br>次世代遠隔操作ステーションへの適用（共同研究）                   |
| 建設 | 永谷  | 東北大  | 土木研究所<br>**<br>**           | 建設機械の遠隔操作にドローンの適用を評価（共同研究）<br>橋梁点検での有線給電ケーブルを使った位置計測の検討<br>ヘリパッド張力調整機構に関する技術提供と製品開発                      |
| 建設 | 山下  | 東京大  | 清水建設                        | 福島第一原発の建設機械の遠隔操作に適用を検討（共同研究）                                                                             |
| 建設 | 田中  | 東工大  | **<br>NEC                   | 可視・遠赤外線同軸カメラの防塵対策を活用<br>煙環境模擬装置の活用                                                                       |
| 建設 | 大道  | 名城大  | **                          | 不定形状の把持ハンドとして適用を検討                                                                                       |



表 2-0-6 成果の活用・波及企業等（油圧、画像処理、音響処理、機械学習、ヒューマンインタフェース、シミュレータ、フィールド評価）（再掲）

| ロボ              | 研究者         | 所属                   | 活用企業                          | 活用・波及内容<br>（+ COGN災害ロボット P.参加企業）                                                                     |
|-----------------|-------------|----------------------|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 油圧              | 鈴森          | 東工大                  | H-Muscle<br>**<br>**          | 高出力低厚油圧コンポーネントのベンチャーH-Muscle設立<br>産業用油圧ロボの開発への応用（受注）<br>重量物運搬用歩行ロボットへの適用の検討                          |
| 油圧              | 桜井          | プリジ<br>ストン           | **<br>**                      | 油圧人工筋の使用に関する問い合わせ<br>災害現場への適用に関する検討                                                                  |
| 油圧              | 神田          | 岡山大                  | **                            | 冷媒の流量制御への使用の検討                                                                                       |
| 画像              | 岡谷          | 東北大                  | オープンソース                       | 活用事例多数、問い合わせ多数                                                                                       |
| 画像              | 山崎          | 信州大                  | IHI*                          | 物体性状識別の自社製品への適用を検討（共同研究）                                                                             |
| 音響              | 奥乃・中<br>臺   | 早大・<br>ホンダ           | オープンソース<br>**<br>**<br>**     | オープンソースHARKのパッケージとして公開、活用事例多数、<br>問い合わせ多数<br>タブレット端末の音声認識フロントエンドに適用<br>音源探索ドローンの活用の検討                |
| 学習              | 多数          | 複数                   | 多数                            | 問い合わせ、共同研究等多数                                                                                        |
| HI              | 佐藤          | 名工大                  | **                            | 点検作業に使用を検討                                                                                           |
| シミュ<br>レータ      | 金広          | 産総研                  | オープンソース<br>JAEA<br>福島県<br>WRS | シミュレータのソフトウェアを公開、広く利用可能とした<br>橋葉遠隔技術開発センターへの導入<br>福島ロボットテストフィールドへの導入<br>トンネル事故災害対応復旧チャレンジシミュレータとして活用 |
| フィー<br>ルド評<br>価 | 木村・<br>Sheh | 長岡技<br>科大・<br>Curtin | WRS<br>NIST                   | プラント災害予防チャレンジ、災害対応標準性能評価チャレン<br>ジの競技フィールド開発・情報収集制御システムへの適用<br>災害ロボットの標準評価試験法の検討（共同研究）                |

表 2-0-7 災害への出動・調査・訓練等の事例（再掲）

| ロボット                                                    | 災害出動・調査・訓練等の事例                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 飛行ロボット<br>・ PF-1, ACSL<br>・ ロボハンド、広島大                   | 九州北部豪雨災害（2018年7月7～8日）ドローンPF-1（ACSL）が、3 kmのエリアを 60 km/h で飛行し、高解像度オルソ画像（1 cm/pixel）を収集、消防庁、防災科学技術研究所、他に提供。<br>尾道市防災フェア公開訓練（2018年10月14日）消防局、自衛隊との公開訓練で、海で溺れているよう救助者に浮き輪を搬送する実証試験デモを実施。<br>南相馬市立病院（2018年11月2日）病院からの情報把握、対応指示を実施。<br>2016年台風10号被災地 地形と地盤構造の調査を実施。<br>2008年岩手宮城内陸地震被災地 断層の地形計測を実施。 |
| 細索状ロボット<br>・ 能動スコープカメラ、<br>東北大                          | 福島第一原発事故（2016年4月、2016年12月～2017年2月）能動スコープカメラプロトタイプが、福島原発1号機の瓦礫内狭隙箇所内部の映像を撮影し、燃料棒搬送機、ウェルプラグ等の状況の3D把握に寄与。ウェルプラグ内の線量を測定。<br>熊本地震（2016年4月）能動スコープカメラによる建物被害調査<br>西日本豪雨災害（2018年7月25～26日）岡山市半田山土砂崩れ倒壊家屋調査                                                                                            |
| 太索状ロボット<br>・ 太索状ロボ、京大、<br>岡山大、電通大<br>・ Omni-Gripper、東北大 | 西日本豪雨災害（2018年7月25～26日）Omni-Gripper、車輪型太索状ロボットが、倒壊家屋から貴重品を回収、家屋内調査の実証試験を実施                                                                                                                                                                                                                    |
| サイバー救助犬<br>・ サイバー救助犬スーツ、<br>東北大                         | スタンバイ（多数）<br>日本救助犬協会と定期訓練を実施。イタリア国立山岳救助隊の救助犬で試験。<br>2017年より、救助犬組織に貸し出され、実災害への適用のためにスタンバイ。<br>山岳救助隊からの活用の要請あり、地方自治体からの鳥獣被害調査への活用の要請あり、省庁の管轄する使役犬に対して適用試験。                                                                                                                                     |

② 論文

|                   | 目標値                                                                | 26年度 | 27年度 | 28年度 | 29年度 | 30年度 |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|
| 全 体 数             | 400                                                                | 0    | 45   | 74   | 107  | 90   |
| うち IP ファクター 10 以上 | ロボティクス分野には、ジャーナルインパクトファクター10以上のジャーナルは存在しないので、該当無し。存在しない根拠は表3-1の通り。 |      |      |      |      |      |

表3-1 RoboticsカテゴリーにおけるJournal Impact Factor 2016 (Thomson Reuter)

| Rank | Full Journal Title                         | Total Cites | Journal Impact Factor |
|------|--------------------------------------------|-------------|-----------------------|
| 1    | Soft Robotics                              | 356         | 8.649                 |
| 2    | International Journal of Robotics Research | 8,754       | 5.301                 |
| 3    | Journal of Field Robotics                  | 2,267       | 4.882                 |
| 4    | IEEE Transactions on Robotics              | 12,478      | 4.036                 |
| 5    | IEEE Robotics and Automation Magazine      | 2,383       | 3.276                 |
| 6    | Swarm Intelligence                         | 562         | 3.115                 |
| 7    | Bioinspiration and Biomimetics             | 1,824       | 2.939                 |

③ 学会発表

|          | 目標値  | 26年度 | 27年度 | 28年度 | 29年度 | 30年度 |
|----------|------|------|------|------|------|------|
| 全 体 数    | 1000 | 2    | 64   | 214  | 257  | 215  |
| 学会賞等の受賞数 | 150  | 0    | 13   | 15   | 21   | 7    |

④ 国際学会における招待講演

|       | 目標値 | 26年度 | 27年度 | 28年度 | 29年度 | 30年度 |
|-------|-----|------|------|------|------|------|
| 全 体 数 | 50  | 0    | 16   | 20   | 20   | 13   |

⑤ 特許出願件数

|     | 目標値 | 26年度 | 27年度 | 28年度 | 29年度 | 30年度 |
|-----|-----|------|------|------|------|------|
| 国内  | 45  | 0    | 2    | 20   | 14   | 3    |
| 海外  | 5   | 0    | 0    | 0    | 5    | 0    |
| 合 計 | 50  | 0    | 2    | 20   | 19   | 3    |

⑥ 知財・標準化等の取組状況

知財や標準化に関しては、「7. PMの自己評価, (1) PMが実施管理を行った研究開発プログラムに関する評価, ①産業や社会のあり方の変革, 7) 知財・標準化戦略は明確かつ適正か」, にまとめて記すこととした。



⑦ アウトリーチ等の状況

|            | 目標値  | 26年度 | 27年度 | 28年度 | 29年度 | 30年度 |
|------------|------|------|------|------|------|------|
| アウトリーチ回数   | 28   | 2    | 10   | 25   | 36   | 32   |
| 新聞、TV等の報道数 | 1000 | 0    | 37   | 182  | 147  | 64   |

⑧ その他特筆すべき取り組み

下記のような特筆すべき取り組みを行った。

- ・技術的な破壊的イノベーション，社会的な破壊的イノベーション，産業的な破壊的イノベーションの実現のための，三位一体の取り組み
- ・フィールド評価会の実施と，それを活用した破壊的イノベーションの創出への戦略的取り組み
- ・災害ロボット分野の技術的，社会的，産業的特性の分析と，それに合わせた戦略的取り組み
- ・世界初，世界一，世界有数を産み出すための工夫
- ・出口イメージと目標の共有による目的指向の研究開発
- ・研究グループの自主性の尊重
- ・自由な発想を促進するマネジメント
- ・フィールド評価会の活用
- ・重点的予算配分
- ・災害への適用，訓練での使用の促進
- ・企業の現場での試験の実施の促進
- ・一般への広報の重視
- ・World Robot Summitへの接続

これらの詳細については，「6．研究開発プログラムの実施管理状況」，および，「7．PMの自己評価」に，まとめて記すこととした。

## 4. 研究開発プログラム予算の推移

### (1) 大学、企業、その他別

各年度における配分額の予算の推移は表4-1の通り。

表4-1 ImPACT 各プログラムの配分額(大学、企業、その他)

(千円)

| プログラム・マネージャー | プログラム名          | プロジェクト名 | H26年度  | H27年度   | H28年度   | H29年度     | H30年度   | 計         |      |
|--------------|-----------------|---------|--------|---------|---------|-----------|---------|-----------|------|
|              |                 |         |        |         |         |           |         | 金額        | 割合   |
| 田所PM         | タフ・ロボティクス・チャレンジ | 大学等     | 62,667 | 670,381 | 620,404 | 794,856   | 670,895 | 2,819,203 | 79%  |
|              |                 | 企業      | 0      | 76,395  | 92,427  | 152,378   | 110,170 | 431,370   | 12%  |
|              |                 | その他     | 6,000  | 70,354  | 66,545  | 118,538   | 68,883  | 330,320   | 9%   |
|              |                 | 計       | 68,667 | 817,130 | 779,376 | 1,065,772 | 849,948 | 3,580,893 | 100% |

H26-29：執行ベース、但し、返金があったものについては執行額から削減

H30：契約ベース

大学等：国立大学、公立大学、私立大学、大学共同利用機関法人、独立行政法人、高等専門学校、国・地方公共団体、海外大学

企業：民間企業（コマツ、プリンス、JPN、KYB、並木精密宝石、自律制御システム研究所）

その他：社団法人、財団法人、非営利法人（NPO等）（国際レスキューシステム研究機構、京都高度技術研究所、電力中央研究所）

### (2) プロジェクト別

各プロジェクト別の配分額の予算の推移は表4-2の通り。

表4-2 ImPACTタフ・ロボティクス・チャレンジ 各プロジェクトの予算推移

(千円)

| プログラム・マネージャー | プログラム名          | プロジェクト名       | H26年度  | H27年度   | H28年度   | H29年度     | H30年度   | 計         |      |
|--------------|-----------------|---------------|--------|---------|---------|-----------|---------|-----------|------|
|              |                 |               |        |         |         |           |         | 金額        | 割合   |
| 田所PM         | タフ・ロボティクス・チャレンジ | 飛行ロボット        | 13,000 | 99,192  | 97,647  | 127,681   | 98,878  | 436,398   | 12%  |
|              |                 | 脚ロボット         | 30,000 | 177,223 | 118,619 | 167,041   | 97,807  | 590,690   | 16%  |
|              |                 | 建設ロボット        | 2,000  | 130,190 | 137,151 | 179,320   | 130,991 | 579,652   | 16%  |
|              |                 | 超高出力油圧システム    | 847    | 74,495  | 67,677  | 76,407    | 69,751  | 289,177   | 8%   |
|              |                 | 素体ロボット（細径）    | 10,520 | 125,304 | 125,645 | 162,406   | 137,928 | 561,803   | 16%  |
|              |                 | 素体ロボット（太径）    | 2,670  | 41,570  | 42,100  | 75,464    | 79,839  | 241,643   | 7%   |
|              |                 | サイバー救助犬       | 1,630  | 78,630  | 81,239  | 107,000   | 105,000 | 373,499   | 10%  |
|              |                 | フィールド性能評価試験評価 | 6,000  | 60,000  | 60,500  | 119,515   | 73,263  | 319,278   | 9%   |
|              |                 | 安全性           | 2,000  | 10,000  | 18,000  | 23,000    | 28,000  | 81,000    | 2%   |
|              |                 | ロボットシミュレータ    | 0      | 20,526  | 25,146  | 16,673    | 17,826  | 80,171    | 2%   |
|              |                 | ヒューマンフクター     | 0      | 0       | 5,652   | 11,265    | 10,665  | 27,582    | 1%   |
|              |                 | 計             | 68,667 | 817,130 | 779,376 | 1,065,772 | 849,948 | 3,580,893 | 100% |
|              |                 | 割合            | 2%     | 23%     | 22%     | 30%       | 24%     | 100%      |      |

H26-29：執行ベース、但し、返金があったものについては執行額から削減

H30：契約ベース

※ (5)戦略的研究開発加速資金から配分した予算については、各研究開発項目の予算金額として記述してある。

※ フィールド評価会にかかるリスクヘッジのための保留、海外委託の為替差益等により、予算に未使用額が生じ、合計金額が上記となっている。

### (3) PI配分額内訳

PI毎の配分額の予算の推移は表4-3の通り。

上野動物園で学ぶ「動物の生態・行動・飼育」 総合動物学プログラム 卒業生 佐藤 大

305



## 5. 研究開発プログラムの推進体制

図5-1, 図5-2, 図5-3の通り.

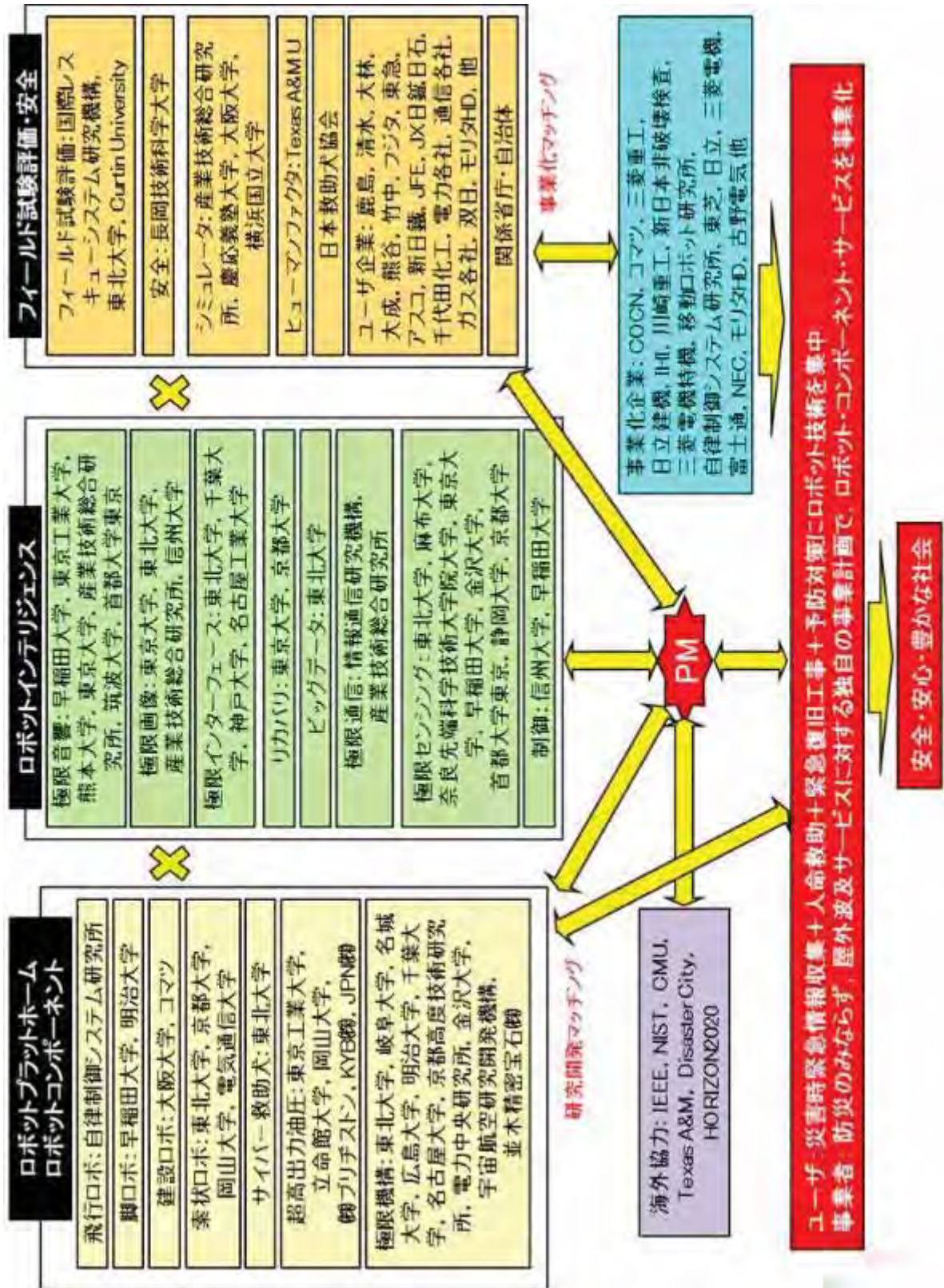


図5-1 実施体制



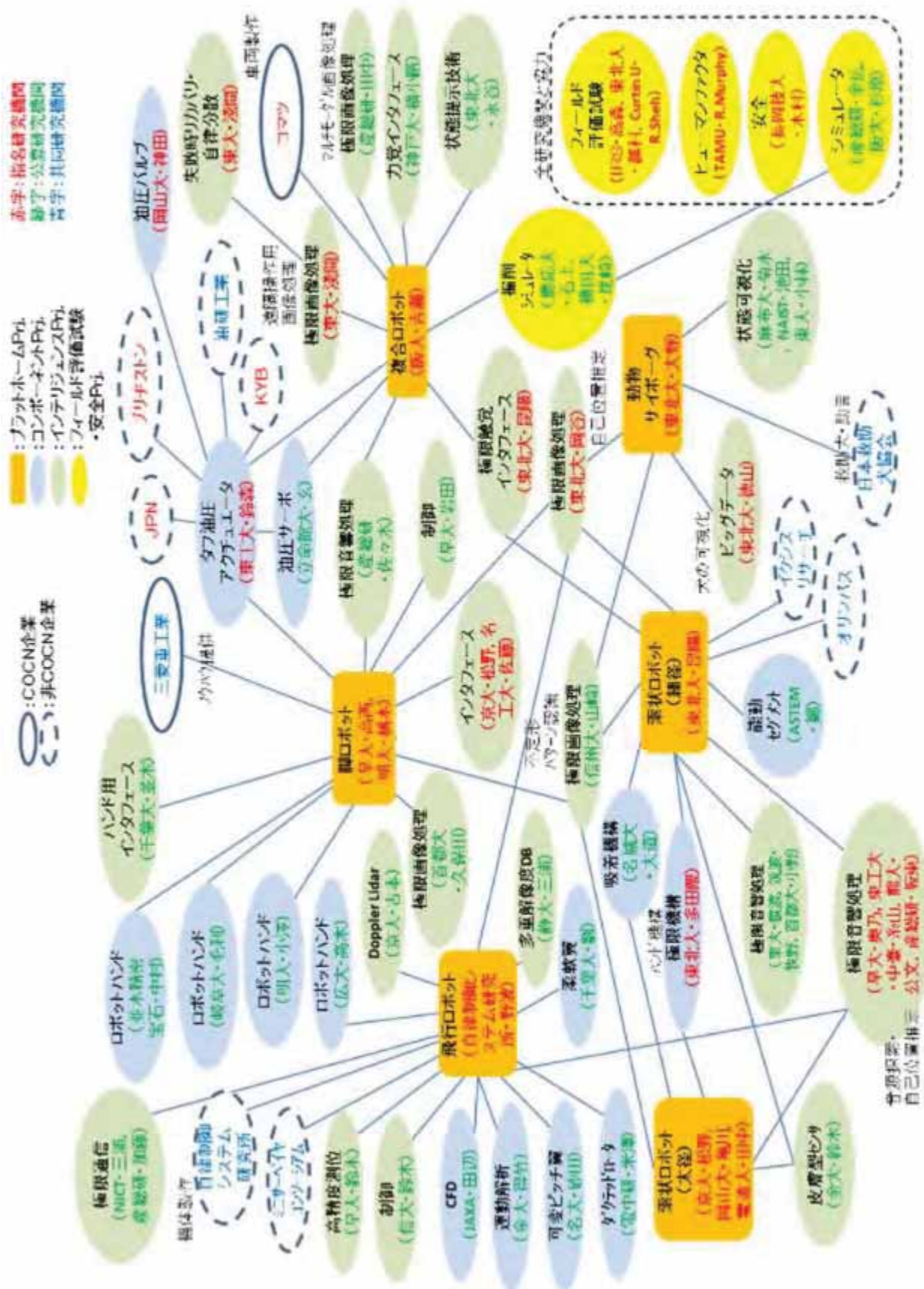


図5-2 各研究開発機関の関係

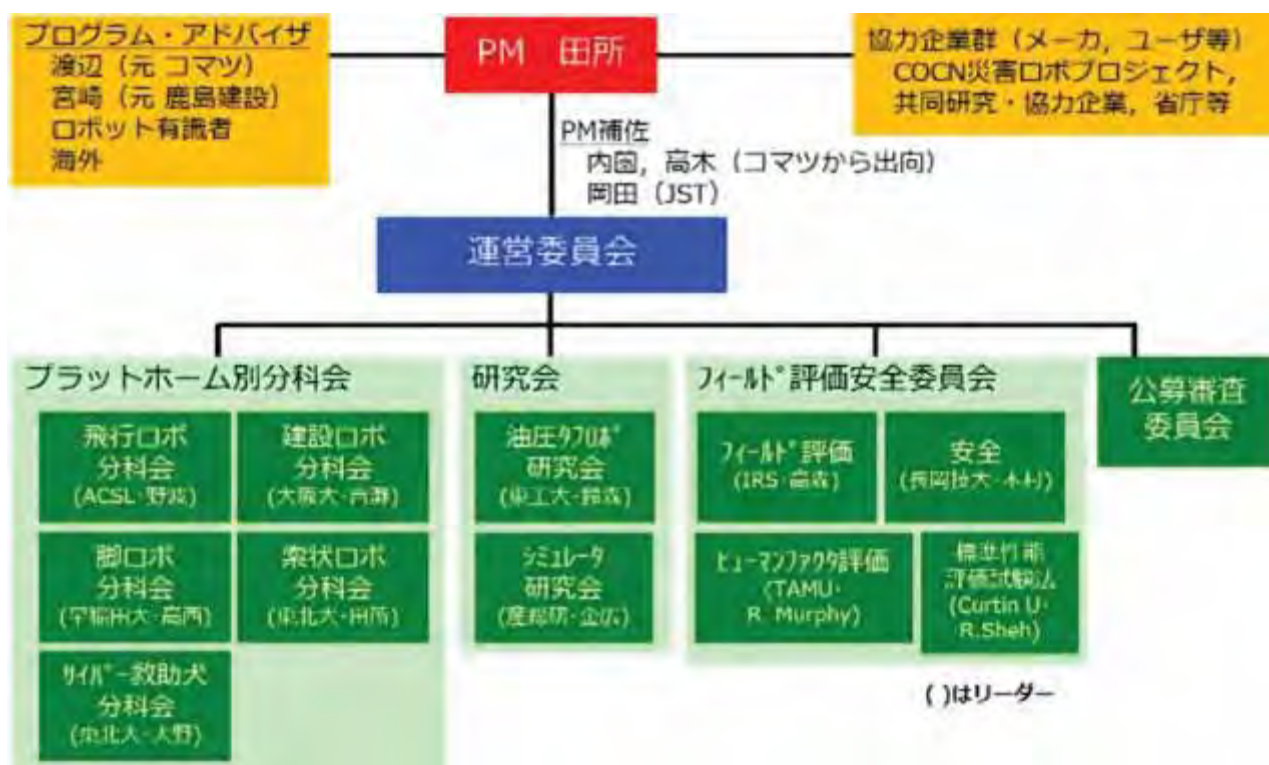


図5-3 推進体制



## 6. 研究開発プログラムの実施管理状況

### (1) 研究開発プログラムのガバナンス

#### ① 進捗状況の把握及び指導・管理状況

| PL<br>(プロジェクト名)                              | 各PLとの調整状況、今後の方針                                                                                                                                                                                                     |
|----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 大野和則<br>(サイバー救助犬)                            | 1～2ヶ月毎に分科会を開催し、サイバー救助犬に関係するPIおよび研究者が出席し、進捗の報告、研究開発の方針、技術統合、フィールド評価会、研究会、勉強会、事業化、他について、議論を行ってきた。また、必要に応じて、個別にPIや研究者との相談を行ってきた。また、技術統合しての共同実験、フィールド評価会、現場適用訓練を毎月のように開催してきた。                                           |
| 松野文俊<br>(索状ロボット(太径))<br>昆陽雅司<br>(索状ロボット(細径)) | 1～2ヶ月毎に分科会を開催し、索状ロボットに関係するPIおよび研究者が出席し、進捗の報告、研究開発の方針、技術統合、フィールド評価会、研究会、勉強会、事業化、他について、議論を行ってきた。索状ロボット(細径)と、索状ロボット(太径)に分かれて、より詳細な技術的検討を行ってきた。また、必要に応じて、個別にPIや研究者との相談を行った。フィールド評価会等をマイルストーンとして、技術統合のための集中開発会を開催してきている。 |
| 吉瀬裕<br>(建設ロボット)                              | 1～2ヶ月毎に分科会を開催し、建設ロボットに関係するPIおよび研究者が出席し、進捗の報告、研究開発の方針、技術統合、フィールド評価会、研究会、勉強会、事業化、他について、議論を行ってきた。また、必要に応じて、個別にPIや研究者との相談を行った。フィールド評価会をマイルストーンとして、技術統合のための集中開発会を開催してきた。                                                 |
| 野波健蔵<br>(飛行ロボット)                             | 1～2ヶ月毎に分科会を開催し、建設ロボットに関係するPIおよび研究者が出席し、進捗の報告、研究開発の方針、技術統合、フィールド評価会、研究会、勉強会、事業化、他について、議論を行ってきた。また、必要に応じて、個別にPIや研究者との相談を行ってきた。フィールド評価会をマイルストーンとして集中的に開発を進めた。                                                          |
| 高西淳夫・橋本健二<br>(脚ロボット)                         | 1～2ヶ月毎に分科会を開催し、建設ロボットに関係するPIおよび研究者が出席し、進捗の報告、研究開発の方針、技術統合、フィールド評価会、研究会、勉強会、事業化、他について、議論を行ってきた。また、必要に応じて、個別にPIや研究者との相談を行った。フィールド評価会をマイルストーンとして、技術統合のための集中開発会を開催した。                                                   |
| 鈴森康一<br>(タフ油圧)                               | 3～4ヶ月毎に研究会を開催し、タフ油圧システムに関係するPI、研究者、関連する企業等が出席し、最新技術に関する情報交換、進捗の報告、研究開発補方針、技術統合、フィールド評価会、事業化、他について、議論を行ってきた。また、必要に応じて、個別にPIや研究者との相談を行ってきた。フィールド評価会をマイルストーンとして、建設ロボットや脚ロボットへの適用を目的と定め、集中的に開発を進めた。                     |

|              | 26年度 | 27年度 | 28年度 | 29年度 | 30年度 |
|--------------|------|------|------|------|------|
| 運営会議等の開催数    | 9    | 35   | 60   | 52   | 44   |
| 研究開発機関等の訪問回数 | 20   | 50   | 80   | 60   | 50   |

## ② 新たな発想・アイデアの採用（若手・女性人材の育成を含む。）に関する取り組み

ImPACTは、非連続イノベーションを起こすための取り組みであることから、イノベーションのための新たな発想・アイデアを精力的に創り出し、それをプロジェクトに積極的に取り込んでいくことがその生命線である。この考えに基づき、様々な取り組みを面的に実施した。

### 1) 出口イメージと目標の共有による目的指向の研究開発

各ロボットについて、分科会の中でシステムインテグレーションを行い、実際に模擬した環境の中でミッションを果せるようになることを、最低限の技術的目標として、分科会の中で主査を中心としてディスカッションを行いながら、研究開発を進めた。

分科会の中では、出口イメージを共有し、それに基づいてその実現に貢献する技術を自主的に工夫して、提案する形を取った。それによって、個別成果を重視するのではなく、出口イメージの実現を行うことに対するモチベーションが高まった。各研究者間のすりあわせが自主的に進み、出口イメージを強化する研究内容が公募の提案の範囲を超えて提案された。研究の進展に応じて変化するPMや他の研究者からのリクエストに対して、方法論の改良にとどまらず、新しい方法論を含めた開発が進んだ。

### 2) 研究グループの自主性の尊重

各PIや研究者の自主性をできるだけ尊重し、一緒に問題を解決する方法論を編み出すことに尽力した。

本PJでは、指名と公募により、幸いにして、本分野におけるトップクラスの一流研究者を集めることができた。シニア研究者はもちろんのこと、若手研究者であっても、自分がその分野については最もよく知っていると認識しており、トップクラスであるが故の高いプライドを持っている。その認識は多くの場合において事実であり、問題に対して最も適切な方法論を提案し、実施する優れた能力があると考えられる。そのため、方法論について細かいことを指示したり強制することは得策ではないと考えた。

以上の考え方から、何を実現して欲しいのか、その価値が何かをディスカッションし、情報を与え、理解していただくことにつとめた。それに基づいて、自主的にその問題を解決する方法を提案し、実施し、それを他の研究者と協力しながらシステムインテグレーションして、ロボットのプラットフォーム上で実現する。また、フィールド評価会において、多くの見学者の目の前で実際に動かす、その成果を目に見える形で見せることをお願いした。

この方針はよく機能し、多くの成果初、世界一の成果を生み出すことにつながった。

### 3) 自由な発想を促進するマネジメント

研究者が専門とする既存の分野が通常扱う範囲を拡大して、研究開発をお願いした。その分野の枠の中にとどまるのではなく、それ以外の部分への取り組みもお願いすることによって、新しい価値が生まれた。

統合した形での最終目的にかなう技術を、これまでの経緯にこだわらず、ブロードレンジで提案してもらった。それによって、問題の本質に関する新たな気づきや、問題を解くために方法論を問わないアプローチ、を可能とした。

### 4) フィールド評価会の活用

年に2回フィールド評価会を開催し、他の研究者と共に技術を統合しながら、実際に模擬した現場で試験する機会を提供した。それによって、問題の本質や隠れた問題点が明確になり、出口を実現するという観点から、問題に対しての自主的な「気づき」を促進した。それは、一流研究者が自己のモチベーションとして可能な限り高い成果を出そうとする機運を創り出し、成果管理や出口管理というネガティブなマネジメントではなく、ポジティブなマネジメントとなった。

フィールド評価会は、他の分科会の研究者、フィールド評価会の見学者（研究者、ユーザ、産業界など）からのフィードバックを得る絶好の機会であり、直接のディスカッション、アンケート、事後のコンタクト、などによって、新しい発想やアイデアを創り出すきっかけとなった。

フィールド評価会で、成果を目に見える形でデモンストレーションするためには、確実に動作することが求められ、それを十分に準備するために、成果のレベルがより実用的なものとなり、より高いTRLを実現するためのモチベーションとなった。高いTRL実現のために必要な、新しいアイデアや発想を促進した。

## 5) 重点的予算配分

戦略的研究開発資金を設け、成果が出そうな新たな試みに対して、また、出てきた成果をさらに発展させるための研究開発に対して、機動的に重点的に予算を配分した。予算の増額によって、さらにもう一步踏み込んだ予算の重点配分が可能になった。これによって、プロジェクト全体として高い成果の実現につながった。また、研究成果の実用化が進み、災害現場への適用、訓練、フィールド評価試験、実証試験、を進めることができた。

## ③ 研究開発機関等の評価及び追加変更の状況 および ④ 「選択と集中」に向けた取り組み

|          | 26年度 | 27年度 | 28年度 | 29年度 | 30年度 |
|----------|------|------|------|------|------|
| 参画研究機関数  | 17   | 59   | 63   | 65   | 64   |
| 参画研究者数   | 90   | 349  | 449  | 542  | 519  |
| うち中止（解任） | 9    | 53   | 67   | 24   | -    |
| 追加（新任）   | 90   | 268  | 152  | 160  | 1    |

各PIおよび分科会が出す研究開発成果は、フィールド評価会、分科会会合、サイトビジット、論文や国際会議等の研究発表、研究者とのディスカッション等によって評価を行い、それによって研究の追加、方向性の修正、方向性の変更、研究の削減、研究の中止を実施した。

成果が出ており、増額により、実用化、あるいは、さらなる成果が見込まれる研究に対しては、研究費増額、および、戦略的研究推進加速資金を活用して、研究費を集中させた。成果が出ていても、その後のさらなる発展やイノベーションに結びつく可能性が低いテーマに対しては、研究費を減額したり、研究を中止した。成果が出ていないテーマについては、研究の方向性の修正、方向性の変更、研究の削減、研究の中止を実施した。

## (2) 研究成果の展開に向けた取り組み

### ① これまでの取り組み

#### 1) フィールド評価会

フィールド評価会に対して重点的に取り組み、技術的成果のポリッシュアップとともに、ユーザや産業界や一般への訴求を推進した。

フィールド評価会にて、研究チームが顕在的・潜在的ユーザ（災害関係者、産業界など）と直接対話することによって、ユーザに対して研究成果によって何が可能になったか、どこに限界があるか、などを相談する機会を作った。それによって、ユーザが研究成果を「お買い求めになる」きっかけを積極的に作った。

また、研究に対してユーザからの様々な意見をいただく絶好の機会となった。それによって、本PJがターゲットとする問題をユーザニーズに沿った形に修正していくことができた。

さらには、ユーザが持つ本PJとは異なる問題について、解けるかどうかを研究者が検討する機会を



作った。それによって、成果の実証試験、成果の活用、新たな共同研究の実施につながった。

フィールド評価会では、国交省が実施する新技術情報データベースNETISを参考として、研究成果の情報を「技術カタログ」としてまとめ、毎回アップデートして配布した。これは、調達用のデータベースであり、その項目はユーザが購入して仕事に使うことを目的として構成されている。そのため、本PJで開発した技術を購入する、という視点から、ユーザや産業界に理解していただくことができた。

フィールド評価会では、アンケートを実施した。アンケートの結果は毎回分析され、各分科会にて詳細の説明がなされた。各ロボットや技術について、ユーザ、産業界、研究者から、注目しているか、技術的に優れた点、どこが評価されたか、どこに課題があるか、実利用に供するために必要な事項など、様々な観点からの意見をいただいた。その結果は研究グループに対してフィードバックされ、研究の方向性や進め方を再考する機会となった。また、それを参考にして研究成果の展開のための取り組みを計画した。

## 2) 災害への適用、訓練での使用

災害ロボットは、実際に災害で活用され、実績を上げることによって、その導入が飛躍的に進む、という歴史をたどってきている。災害模擬現場では、実際の災害でのオペレーションやニーズを反映できない点が数多く、災害模擬現場で有効性を示しても、実際の災害で有効であるかどうかはわからない。そのため、実災害にロボットを適用することは、研究成果の展開のために重要である。

そのための前提条件として、ロボットを使用する訓練ができていることが必須である。すなわち、緊急事態への対応は、訓練が十分になされた資機材を使用して実施するものであり、それまで使ったことのない新しい方法論が適用される余地はない。そのため、仮配備され、災害対応専門家の訓練メニューに組み込まれ、常日頃から訓練しておくことが必要である。

以上の方針から、「2. 研究開発プロジェクト毎の実施状況及び成果、③プロジェクトの進捗状況、獲得成果及び目標達成への貢献度、表2-0-7 災害への出動・調査・訓練等の事例」に挙げたような取り組みを実施した。

九州北部豪雨災害への飛行ロボットの適用は、高性能のドローンの必要性を総務省消防庁が強く認識するきっかけとなり、消防庁の予算化によって各地の自治体消防へのドローン配備が行われた。

## 3) 企業の現場での試験

災害に対応するための資機材は、災害対応専門組織に配備されるだけでは数量が不足する。たとえば、大規模災害の緊急工事には地元の工事業者や、自治体との協定に基づく事業者が大きな役割を果たす必要がある。物資の運搬には、配送業者や大規模小売店舗、コンビニエンスストアが協力してあたることが重要であり、運搬の専門ではない国や自治体が直接実施する範囲は限定的である。災害ロボットも同じで、災害対応専門組織に配備されたロボットだけでなく、平時の事業用途のロボットが活躍することが求められる。

すなわち、災害ロボットやその技術は、災害の緊急対応・復旧・予防だけでなく、平時の建物・インフラ点検、設備メンテナンス、等に使われ、それによって社会に数多く配備されることが必要である。たとえば、飛行ロボット（ドローン）は、この数年間で普及が進み、災害時に広く使われるようになったが、その多くは測量業者、撮影業者、建設業者などが保有するドローンであり、自治体等からの要請に基づいて上空からの調査を行ってきており、実績を上げている。平時市場に大量に供給されることによって、価格が飛躍的に低下することも、極めて重要である。ロボット技術も同じであり、平時の民生用として使用されることで、高い性能を安価に使用できるようになる。

以上の考えから、本PJで研究開発するロボットやその技術が、そのような形で平時に使われるために、積極的に事業を行う企業に「お買い求めいただき」、災害に限らず企業内の事業や製品に活用されることが重要である、という方針を立て、研究者に対して積極的に活用を進めるように機会のある毎にお願いした。また、フィールド評価会、COCN、事業者の会合、展示会、学会、研究会、などにより、研究者自身、PM、国際レスキューシステム研究機構などより、企業への売り込みを進めた。

その結果、「2. 研究開発プロジェクト毎の実施状況及び成果、③プロジェクトの進捗状況、獲得成果及び目標達成への貢献度、表2-0-4～表2-0-6 災害への出動・調査・訓練等の事例」に挙げたよ

うな取り組みを実施し、多くの企業による事業への活用検討が行われた。

また、企業からの要望の高まりに基づき、研究開発成果を事業化するベンチャー企業の設立、及びその検討、が実施された。

#### 4) 一般への広報

災害ロボットを社会実装するためには、広く社会の理解を育てていく必要がある。

そのため、研究開発成果を、フィールド評価会（一般にも公開）、展示会、などでデモンストレーションを行い、多くの方々に実際に動作するところを見ていただいた。また、プレスリリースを頻繁に行った。その結果、顕著な成果について、新聞やTVやウェブページ等のメディアを通じて、国内外に広く知られることとなった。

成果をまとめた10分程度のムービーをフィールド評価会毎に作成し、個々の研究成果を説明する短いムービーを含め、YouTubeに掲載し、多くの一般の方々からの視聴を得ることができた。

研究成果は学術専門誌、国際会議の原著論文として発表することはもちろんのこと、日本ロボット学会学会誌のタフ・ロボティクス特集号、ロボット分野でメジャーな国際会議IROSのワークショップ、ロボット分野でメジャーな国内会議ROBOMECのオーガナイズドセッション（毎年）、それに併設するシンポジウムなどの形で、成果の公開に努めた。

Springerから、Disaster Robotics - Results from the ImPACT Tough Robotics Challenge を出版し、成果の公表に努めた。



図6-1 Disaster Robotics (Springer)、日本ロボット学会誌特集号の表紙

## ② 今後の方針と具体的な取り組み計画

### 1) サイバー救助犬

- ・日本救助犬協会を初めとする救助犬組織との継続した訓練などの連携活動を実施し、災害への適用事例と成果を作っていく。それに基づき、全世界の救助犬組織に有効なツールとして配備されることを目指す。

- ・政府自治体関係等の使役犬を指標する組織に対して、継続して実証試験やデモンストレーションを実施し、採用を働きかける。

- ・それらによって、小規模な事業としての目処が立つところまで持っていく。
- ・技術研究としては、研究プロジェクトとして継続し、性能の向上とさらなる実用化を図っていく。

## 2) 索状ロボット（細径）

- ・能動スコープカメラについては、消防等のユーザや企業との共同試験を進め、実用化を進めるとともに、災害への適用事例を成果を作っていく。
- ・また、福島第一原発、配管内検査、インフラ点検等の企業等からのニーズに応え、共同研究として事業者のもつ課題の解決を図っていく。
- ・それらによって、小規模な事業としての目処が立つところまで持っていく。
- ・ドラゴンファイヤーファイターについては、総務省消防庁等の研究開発予算を活用して、企業とも連携して、実用化を進めていく。
- ・技術研究としては、研究プロジェクトとして継続し、性能の向上とさらなる実用化を図っていく。

## 3) 索状ロボット（太径）

- ・索状ロボットは、プラント点検等の企業等からのニーズに応え、共同試験として、事業者の持つ課題の解決を図っていく。
- ・それらによって、小規模な事業としての目処が立つところまで持っていく。
- ・柔軟ハンドは、ベンチャーを設立し、広く産業用、フィールド用として販売する。
- ・技術研究としては、研究プロジェクトとして継続し、性能の向上とさらなる実用化を図っていく。

## 4) 脚ロボット

- ・World Robot Summitで、プラットフォームロボットとして活用する。
- ・技術活用を求める企業との共同研究として、研究開発を継続する。
- ・ロボットハンドは、求める企業等に対して販売し、ニーズに応じて改良を行っていく。

## 5) 飛行ロボット

- ・PF-1、その改良機として、販売を行う。
- ・要素技術について、共同研究を継続し、実用化を図って、製品に搭載する。
- ・アームについて、実用化と商品化を進める。
- ・共同研究により、企業に対するソリューションとして提供する。
- ・災害への適用を継続して進め、実績を作っていく。

## 6) 建設ロボット

- ・ロボット本体について、遠隔土木建設工事への適用を、ユーザ企業と共に検討する。
- ・有線給電ドローン、遠隔操作支援システム、吸着ハンドについて、ユーザ企業との共同研究として遠隔工事への適用を進める。
- ・World Robot Summit (WRS)で、プラットフォームロボットとして活用する。

## 7) 油圧システム

- ・ベンチャー企業H-Muscleが販売し、ユーザからのニーズに基づいて改良を進める。
- ・技術研究としては、研究プロジェクトとして継続し、性能の向上とさらなる実用化を図っていく。

## 8) 画像処理、音響処理、学習、ヒューマンインタフェース、シミュレータ

- ・オープンソースにより広く公開を進めるとともに、ユーザとの共同研究として活用を図る。



- ・ 共同研究として，企業に対するソリューションとして提供する．
- ・ 技術研究としては，研究プロジェクトとして継続し，性能の向上とさらなる実用化を図っていく．

#### 9) フィールド評価，安全

- ・ NIST等と連携して，共同研究として国際標準化を進める．
- ・ WRSに活用する．

## 7. PMの自己評価

### (1) PMが実施管理を行った研究開発プログラム（研究成果）に関する評価

#### ① 産業や社会のあり方の変革（漸進的でなく、非連続的なイノベーション）をもたらす見通しは得られたか。

本PJは、災害への緊急対応、復旧、予防を目的として、ロボット技術の適用によって非連続イノベーションを実現するために実施した。非連続イノベーション（Disruptive Innovation）は、Clayton Christensen が著書 *The Innovator's Dilemma*（邦訳：イノベーションのジレンマ）で指摘した経営学の分野でよく知られた概念であり、一般には破壊的イノベーションと呼ばれている。破壊的イノベーションは、大企業や組織が得意とする連続的イノベーションとは全く異なったイノベーションの形態である。Christensen は、ディスクドライブ、掘削機などの例を挙げ、破壊的技術によって従来の市場が完全に取って代わられた現象を説明している。ImPACTにおける将来の産業や社会のありかたの変革という言葉は、この破壊的イノベーションを言い換えたものと解釈する。

これを、災害ロボットの問題にあてはめると、ロボットの導入によって災害対応のあり方をこれまでと大きく変えることを意味している。すなわち、従来型の災害対応の技術的性能を向上させて、従来型のオペレーションを高度化することが目的ではなく、従来にない災害対応の方法論を開拓することが課題であると解釈する。さらには、技術的に新しく優れたものを実現するだけではなく、それを社会的価値として災害の問題に対して社会実装を進めていくこと、そして、それが産業として成立するようにしていくことが求められている。ユーザへの配備のためには事業化されることが必須である。また、高い技術の革新が継続的に進むためには、大きな市場との技術循環が必須である。

なお、災害への緊急対応、復旧、予防は、もともと産業的に大きな市場がある分野ではなく、その市場規模は調達規模であって、官の政策で決まるため、市場規模で破壊的イノベーションのレベルを評価することは不適切である。もしも市場規模で決まるのなら、調達を促進することを目的とした政治家や省庁へのロビー活動が破壊的イノベーションのための最適な方策となる。災害への対応は、民生産業としては成立せず、市場自体が官製であり公共事業であるため、そもそも政府・自治体が行う責務を有するものである。

したがって、破壊的イノベーションとしての評価を行う際には、「世界の国民の安全安心」について、Christensenが定義したようなイノベーションがどの程度あったか、を評価しなければならない。

産業競争力懇談会で、災害対応に関係する企業、省庁などとともに災害ロボットの問題を分析した。その結果、ロボット技術を「タフ」にすることが、様々な形態のロボットに共通する破壊的イノベーションのキーポイントである、という結論に達した。「タフ」の定義は、ロボット技術が機能するための制約条件を緩和し、厳しい環境下でも技術が能力を発揮することである。ここでは、具体的には、アクセシビリティ、センシング、リカバリ、環境条件適合性、の4つについて、制約条件を緩和することを試みる計画とした。したがって、「タフ」は壊れにくいということを意味しているわけではない。壊れにくいということは環境条件適合性のひとつに過ぎない。

すなわち、災害ロボットにおける破壊的イノベーションは、タフなロボット技術がどれだけ創り出されたか、それが社会の安全安心のために適用されたか、効果を上げたか、によって最終的には評価されなければならない。社会実装には時間がかかることから、それら適用や効果までの段階をどの程度踏み、今後の見通しが得られたか、で評価することも必要である。

この観点から考え、産業や社会のあり方の変革をもたらす見通しが得られた、と考えている。その理由は、「6. 研究開発プログラムの実施管理状況（pp.307-313）」に加えて、以下に記す。

## 1) 将来の産業や社会のあり方の変革をもたらすような革新性を有する研究成果が獲得されたか

本PJでは、「2. 研究開発プロジェクト毎の実施状況及び成果、③プロジェクトの進捗状況、獲得成果、及び目標達成への貢献度」の中の、表2-0-2、2-0-3 各プラットフォームの主な成果（p.29）に示すような、世界初、世界一の技術的成果が多数得られた。これらのうち、Christensenが定義する破壊的イノベーションに最もふさわしい成果として、次を挙げることができる。

### ・犬の行動モニタリングと行動指示ができるサイバー救助犬スーツ

救助犬や使役犬は欧米を中心として人命救助などの様々な用途で使用されており、その高度化は強く望まれている。しかしながら、遠隔では犬の場所を把握することができず、マッピングができなかったため、人を発見して吠えてもそれを救助に繋げることができなかった。また、吠えた理由を知ることができず、犬が何をしているかや、やる気が高まっているかどうかを知ることができない。犬が探索を行うためには、人間がある程度指示をする必要があるが、遠隔で指示をすることはできなかった。そのため、犬を使うハンドラーの側でしか使用することができなかった。

サイバー救助犬スーツは、この問題に対する根本的な解決法を提供した。救助犬や使役犬の使い方やその効果が根本的に変わるため、救助犬・使役犬の世界における破壊的イノベーションであると考えられる。

また、犬の行動誘導ができる技術は、犬に対して遠隔から行動指示ができるため、人命救助に対する効果が高いと考えられる。これが実用化に至った場合には、同様に救助犬・使役犬の世界における破壊的イノベーションとなる可能性が高いと考えられる。

### ・浮上する索状ロボット「能動スコープカメラ」

狭い場所の人命救助ではビデオスコープが使用されている。それに運動性能を加えて瓦礫の奥を調べることができるようにした能動スコープカメラが開発されており、プラットフォームが福島第一原発事故、建設現場倒壊事故の調査に使用されるなどの実績を上げてきた。しかしながら、瓦礫における運動能力が不足していること、瓦礫内を見渡せないこと、瓦礫内での位置特定が困難なこと、が問題で、広く使用されることを妨げてきた。

本PJで開発した空気圧で先端を浮上させる能動スコープカメラと、狭隘部で使用できるビジュアルSLAMは、これらの問題を解決した。そのため、能動スコープカメラの現場適用上の困難な問題の多くが解決されたと考えられ、今後、ビデオスコープの置き換えが進んでいく可能性がある。そうなった場合には瓦礫内の人命救助の世界における破壊的イノベーションである。

### ・飛行する消火ホースロボット「ドラゴンファイヤーファイター」

これまでの火災の消火は、遠隔から水や消化剤を噴射することにより、火災の温度を下げ、酸素の供給を遮断することにより、鎮火させる方法がとられてきた。大規模火災においては、放水が火炎ですぐに蒸発してしまうため、燃焼物の温度を下げることができず、消火の効果が低かった。閉鎖空間の火災では、消防士が進入することができないため、スプリンクラーから外れた場所にある燃焼物には放水することができず、消火が困難だった。

本PJで開発したドラゴンファイヤーファイターは、水を噴射することによってホースが空中を飛んで移動することができるため、大規模火災や閉鎖空間火災に対して、直接火元に水をかけることができる。すなわち、従来は不可能だった火元消火が可能になると考えられるため、今後実用化に至った場合には、消火の世界における破壊的イノベーションである。

### ・プラントの配管・ダクト・不整地・急階段・段差・狭所・垂直梯子などを移動できる索状ロボット（太径）

プラント・インフラ・建物などの構造物の点検に対するロボットの適用は、点検作業の省力化・効



率化・安全化を図ること、従来困難な場所（狭所や高所などのアクセス困難性）の点検を可能にすること、を目的としており、世界中で様々な取り組みが進められている。

本PJで開発した索状ロボット（太径）は、これまで不可能だった条件でのアクセスを可能にした（梯子、ダクト、狭く急な階段、天井裏など）。そのため、従来は不可能だった点検が可能になると考えるため、今後実用化に至った場合には、プラント・インフラ・建物など構造物点検の世界における破壊的イノベーションである。

#### ・尖った物体や熱い物体も把持可能な柔軟ロボットハンド

様々な対象物を精密位置決め不要で把持可能な柔軟ロボットハンドは、耐久性に大きな課題があり、つかめる物体のバリエーションも不足していたため、災害はもとより産業利用も限定的だった。

本PJで開発したOmni-Gripperは、軽い押しつけ力で従来よりもはるかに多様な物体を把持することが可能になり、尖った物体を把持しても壊れない耐久性を実現することができた。ガラスや鉄条網や壊れたバルブをハンドリングするムービーは多くの人たちに視聴され、高い注目を受けた。これを事業化することを目的として、ベンチャー企業設立の準備を進めている。そのため、今後産業用のグリップパとして世界中で広く使われ、おそらく、ある範囲の対象物・環境に関して、従来のグリップパをすべて置き換えてしまう可能性まである、と言っている産業界の人もいる。したがって、ロボットハンドの世界における破壊的イノベーションであると考えられる。

本PJで開発したArmadillo Gripperは、柔軟ハンドの構成法を根本的に見直すことにより、火の中でも柔軟ハンドとしての機能を果たすことを可能にした。炎の中の物体を掴むムービーは、多くの人たちに視聴され高い注目を受けた。これは従来不可能だったので、どのような用途があるかが現在のところ明らかでないが、用途が見つかった場合には、不可能を可能にする技術となると考えられる、

#### ・50kgの物体を無通電把持できる30cmサイズのロボットハンド

重量物をハンドリングできる多自由度ハンドは大型のものしかなく、小型ハンドは器用でも発生力が小さすぎるため、災害や産業施設で使用できなかった。把持力を維持するために電力を使用しなければならず、それが熱を発生させ、高温になることが、その原因の一つであった。

本PJで開発したロボットハンドは、把持力の維持のためには通電が必要でなく、エネルギーを消費しないため、指一本あたり150Nの把持力を発生し、それを長時間維持することができる。そのため、従来は不可能だった産業施設や災害への適用が可能になると考えられるため、そのような現場における破壊的イノベーションである。

#### ・騒音を除去して上空から地上の音声を聞き取り、音声の位置推定もできる音響探査ドローン

津波や洪水の災害救助において、音声は地上に残された人を発見するために大きな役割を果たすと考えられる。地震災害による瓦礫や土砂崩れにおいても、瓦礫内に取り残された人の発する音声は発見の重要な手がかりである。一方、ドローンは上空からの情報収集に有効であり、短時間に広域をカバーできることから、近年活用が進んでいる。ところが、マイクロフォンと搭載した音声による要救助者発見は、これまで全く不可能だった。それは、プロペラの風切り音が大きいため、搭載マイクロフォンにより外部の音を聞き取ることは困難だったためである。

本PJで開発した、搭載マルチマイクロフォンを使った音響処理技術は、プロペラの風切り音を音響処理技術により消して、地上の音声を強調することができる。また、音声の発生する方向がわかるため、地上の人の位置を推定することができる。そのため、従来は不可能だった、上空から音声を使った要救助者の搜索が可能になるため、搜索の効率が飛躍的に向上すると考えられ、津波等の災害救助における破壊的イノベーションとなる可能性が高い。

以上のことから、社会を変革する破壊的イノベーションに至る革新性を有する研究成果が得られたと考える。

なお、世界の災害直接被害額は金額が大きい2017年の場合で35兆円程度であり、半導体市場の40兆

円と同等であるものの、自動車市場175兆円、インフラメンテナンス市場200兆円と比較すると、大きくない。本PJが最も貢献すると考えられる人的損失の減少は、災害直接被害額には計上されるわけではなく、人間一人の命の価値は損害賠償で算出される金額とは異なることから、金額として計算することはできず、その効果を金額というものさしで測ることはできない。

## 2) 将来の産業や社会のあり方変革に向けた戦略が具体的かつ明確となったか

災害ロボットの問題の性質を踏まえ、技術を「タフ」にすること、従来にない災害対応の方法論を開拓すること、災害問題に対する社会実装を進めること、技術循環が進むようにすること、を、それぞれのロボットに関する具体的な戦略として明確化し、取り組んだ。

災害ロボットは図7-1に示すような社会構造を有しており、イノベーションを実現するためには研究開発、産業、ユーザ、社会の4つの側面からの取り組みが必要である。

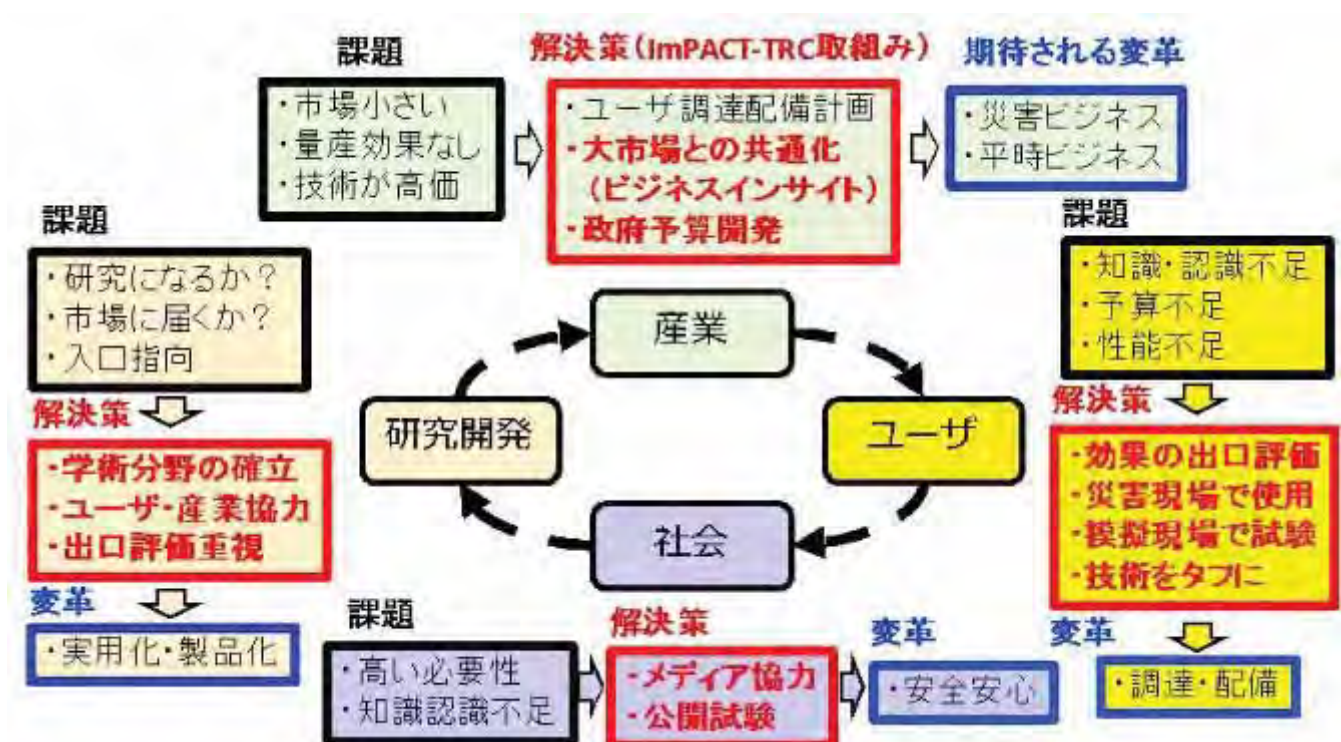


図7-1 社会的ニーズは高いが確立した市場によって駆動されないill-posed分野における、技術循環モデルと破壊的イノベーション

## 3) 戦略の実現に向けた課題が整理・明確化されたか

5種類のロボット、関連する技術それぞれについて、上記を実現するための技術的課題、社会的課題、産業的課題、現状とのギャップを明確に整理し、実現すべき成果の目標を定め、それらの課題解決に取り組んだ。

その概要（出口戦略、達成目標、達成度、TRL）については、下記を参照のこと。

- ・表2-0-1 (p.28)

その具体的な詳細については、本報告書の下記の部分、および、外部資料を参照のこと。

- ・1. (2) の研究開発プログラムの達成目標 (p.3)

- ・図1-3～1-11 各ロボットの研究計画Quad Chart (pp.7-15)
- ・2. ③の成果の詳細 (pp.32-280)
- ・資料：産業競争力懇談会2013年プロジェクト最終報告，災害対応ロボットセンター設立構想 (<http://www.cocn.jp>)

#### 4) 技術的課題を克服するためのアイデア・着眼点の斬新さ，技術的なサプライズは存在したか

トップ研究者を集め，新しい取り組みを奨励し，フィールド評価会を通じてそれを広く世の中に問う，という方法論によって，多数の世界初，世界一の技術的成果が得られ，国内外の専門家からの反響も大きく，連続的でない，破壊的イノベーションの核を創った，と考える．

その概要については，本報告書の下記を参照のこと．

- ・表2-0-2, 2-0-3 (p.29)
- ・7. (1) ①の1) 革新性を有する研究成果が獲得されたか (pp.315-316)
- ・7. (2) ⑦の，海外研究者のコメント (pp.325)

その具体的な詳細については，本報告書の下記の部分参照のこと．

- ・2. ③の成果の詳細 (pp.32-280)

#### 5) 戦略の実現に向けたロードマップが適切に描けたか

5種類のロボットおよび関連技術のそれぞれについて，戦略の実現に向けたロードマップを描いた．特にTRLの高い，飛行ロボット，索状ロボット，サイバー救助犬，建設ロボット，については，ユーザへの訴求，配備に向けた取り組み，産業化などのロードマップを描き，改訂をしながら取り組みを進めてきた．その結果，飛行ロボットの実用化・災害適用・事業化は順調に進み，索状ロボットの実用化・災害適用が進み，サイバー救助犬の実用化・ユーザ組織配備が進み，建設ロボットの限界性能試験とユーザへの訴求が進んだ．それらの詳細については，下記を参照のこと．

- ・2. ③の成果の詳細 (pp.32-280)
- 特に，(1) サイバー救助犬 3) 成果の活用 (p.61)
- (2) 索状ロボット (細径) 3) 成果の活用 (p.96)
- (6) 建設ロボット 3) 成果の活用 (p.218)

社会的な非連続イノベーション，産業的な非連続イノベーションを産み出すためにはまだ時間がかかるため，ロードマップが適切かどうかを現段階では結論づけることはできないが，本報告書で述べたファクトから考えると，研究成果がイノベーションの核を創り出したことは間違いない．

したがって，ロードマップはある程度適切に描けたと考えている．

#### 6) 戦略の実現に向けた産業界との連携・橋渡し等が行われたか

上で述べた事例，および，上には書かなかったそれ以外の成果を技術的に実現するためには，産業界との連携協力は必須であり，社内のリソースを大きく持ち出して貢献していただいた企業は数多い．その事業化についても，上で述べた事例では企業が検討を進めている，あるいは，ベンチャー企業が設立されている．具体的な事例については，下記を参照のこと．

- ・7. (2) ④関係者の巻き込み (pp.321-322)

また，多数の企業による成果活用のための実証試験，共同研究，受注などが進んでいる．その一覧については，下記を参照のこと．



・表2-0-4, 2-0-5, 2-0-6 成果の活用・波及企業等 (pp.30-31)  
以上のように、産業界との連携・橋渡し等を数多く行った。

この分野においては、戦略の実現のためには、ユーザとの連携が最も重要である。事業化はユーザが調達するから成立するのであって、産業界との連携だけではイノベーションを起こすことはできない。逆に、ユーザが強く望むロボットであれば、産業界はそれに沿って事業化したいと考えている。これを踏まえ、災害にロボットを実際に適用し、フィールド評価会にユーザを毎回多数招待し、展示会にも出展するなどして、成果を見ていただいた。それを契機としてユーザとの対話が進み、ユーザサイドからのリクエストによって、ユーザ事業所における説明、デモ、適用試験などを多数実施した。以上のように、ユーザとの連携・橋渡し等を数多く行った。具体的には下記を参照のこと。

- ・表2-0-7 災害への出動・調査・訓練等の事例 (p.31)
- ・表2-0-4, 2-0-5, 2-0-6 成果の活用・波及企業等 (pp.30-31)
- ・7. (2) ⑤成果の展開 (pp.323-324)

## 7) 知財・標準化戦略は明確かつ適正か

知財の取得、性能評価の標準化は進んでおり、適正と考えている。

市場が確立していない破壊的イノベーションの分野で知財をどのように押さえていくかは、大きな課題である。本分野は民生市場での技術革新が速いが、災害としての産業規模は小さい、ということがその特徴である。トップクラスの研究者に特許取得の推進を強力にお願いした場合、特許申請の件数は合計で数百件になることは間違いなく、それを維持できないことは初めから明らかである。将来見込まれる事業規模に見合ったレベルでの特許取得を考えるだけでなく、研究者がIMPACT終了後にそれを維持する費用をどう負担するかを考慮することが必要である。大規模市場が確立した分野のように、多数の特許を取得することは、経営の観点からも、リソース配分の観点からも、不適切である。

以上の戦略に従い、重要な基本特許についての申請を奨励することとした。連続的イノベーションでよく行われるような、関連特許を面的に押さえるような方法は、あきらかに不適切であると考え、採用しなかった。

さらには、ソフトウェアで一般的に行われているオープンソース戦略をとった。音響処理技術や画像処理技術において、オープンソースによりソースコードの公開を行っている。それにより、研究成果の一部が広く活用されている。

性能評価の標準評価法の研究を行い、NISTとの協力でASTMでの標準化を進めてきた。これは、ユーザの調達環境の整備に効果的であり、配備を促進する効果があるとされている。

② 上記①以外の派生的な効果（派生的に生み出された成果、新たな学術的知見の創出、失敗から得られた知見等）として、どのようなものが得られたか。

破壊的イノベーションの種子は、必ずしも計画的に産み出されるものではなく、研究開発を含む様々な活動の中で発見されるものが多い、とされている。本PJでは、そのような予期しない「気付き」を数多く生むことを重視したマネジメントを行ってきた。その結果として、派生的な効果は多数得られたし、新たな学術的知見も成功と失敗を通じて多数得られた。

たとえば、上記①でも述べたが、Omni-Gripper, Armadillo Gripperは、発見により産み出された成果である。最近になってSoft Roboticsがロボットの学術分野として注目を集めているが、これらはSoft Roboticsの顕著な成果であり、学術研究としての貢献にとどまらず、高い実用性を実現していることが、他のSoft Robotics研究とは一線を画している。

もう一つの例として、上記①でも述べたドラゴンファイヤーファイターは、空気で浮上する能動スコープカメラの研究から派生した、当初の計画になかった成果である。このシステムは、流体と構造

がカップリングした非線形分布定数系であり、その安定化と制御は学術的にも困難な課題である。その制御に成功したことは新たな学術的知見であるだけでなく、その条件を緩和して高い性能を実現することは比較的大きな学術研究課題であり、ロボット制御学における一つの新分野を創りつつあると考えられる。現状では、長尺のホースを飛行させることには成功しておらず、その原因についての学術的考察を進めることによって、問題を避けるための技術的な知見を得ることができている。一方で、消火における現在の大きな課題（木造家屋密集地域の火災消火、閉鎖空間の消火、高層ビルの消火など）を解決できる非連続技術となる可能性があり、実用面からも価値が高いという意見を、ユーザや消防専門家からいただいている。

失敗は様々あったが、対策を講じて、解決を図っていった。その分析から得られた知見に関しては、下記を参照のこと。

・ 7. (2) ⑩全体 (pp.326-327)

## (2) PM自身の活動（プログラム・マネジメント）に関する評価

① <目標設定> 産業や社会のあり方変革を目指した研究開発プログラムとして、目標設定の水準は妥当であったか。

本PJでは、災害への緊急対応、復旧、予防を直接的な目的として、5種類のロボットプラットフォームを研究し、ロボット技術をタフにすることを目指した。また、技術的な破壊的イノベーションだけでなく、社会的な破壊的イノベーションにより社会実装を進め、産業的な破壊的イノベーションにより産業波及を進めた。その結果、上に述べたように、世界初、世界一の技術を多数生み出すことができ、災害への適用が行われ、産業界での活用も進むなど、一定の成果を得ることができた。市場が成立しつつある飛行ロボット（ドローン）については、製品に搭載されるなど社会実装が進んだが、それ以外のロボットや技術については、市場が未成熟なため、研究開発成果がユーザに配備されるためにはまだ時間がかかると考えられる。これらは、PJ開始時に立てた見通し通りである。

以上から、目標設定の水準は妥当であったと考えている。

② <作り込み> トップ研究者の採用や異分野研究者との融合、外部専門家からの助言聴取など、国内外から斬新なアイデアや最先端の知見等を結集して研究開発を推進できたか。また、研究開発の実施体制は適切であったか。

本PJでは、指名と公募によって、関連する広い分野で高い実績や能力を持つトップクラスの国内研究者に参加してもらうことができた。ヒューマンインタフェース、標準性能評価試験法に関しては、国外から世界トップの研究者に参加してもらうことができた。行動計画に関しても米国からトップ研究者に参加してもらおうとしたが、ImPACTが定めた契約条件と米国大学の契約条件が合わないため、実現することはできなかった。

ロボットはシステムなので、すぐれた機能を実現するためには幅広い専門分野が協力し、それを有機的に結合することが重要である。それらの広い分野のトップ研究者の研究者の斬新なアイデアや最先端の知見と、技術をプラットフォームに統合するという旗印の下に行われた協力によって、システムとしての総合的な新しい価値を、研究開発成果として創り出すことができた。トップ研究者なので、大きな方針や方向性を周知して理解し、共感していただくことを重視した。細かい点についてはできるだけ自主性を重んじるよう、それでありながら目的を果たしていただくよう、可能な限りの努力を払った。フィールド評価会を通じて、互いに切磋琢磨し合い、刺激しあう機会を提供し、人よりも先に進んでいたいという一流のプライドを最大限に利用した。互いが協力することによって、大きな価値が生まれることを実感してもらい、プラットフォームへの技術の結集を図り、数多くの世界初、世界一の成果を得ることができた。

様々な技術の融合を図ることが重要であるため、当初計画ではプラットフォームロボットのプロジェクト、要素技術のプロジェクト、といった横型の組織を作り、その間のマッチングを取ることを計画していた。その理由は、技術的共通性が高いPIが集まることによる相乗効果を狙ったものだった。しかしながら、作り込みの段階でのディスカッションにより、プラットフォームロボット毎に研究者が集結したプロジェクトを立てる縦型の組織による運営に変更した。その理由は、ロボットとしてのシステム化に労力を要すること、プラットフォーム主体とした方が目的指向での技術開発ターゲットの絞り込みが研究者にとってわかりやすいこと、技術が見えやすいためにユーザに訴求することが容易で事業化に結びつきやすいこと。である。逆に、要素技術だけで固まると、出口がはっきりしないぼやけた研究となりがちであると予想された。この変更により、研究の進捗管理をプラットフォームへの統合に従う形でスムーズに進めることができ、効果を上げることができた。

フィールド評価会は、ユーザや産業界からの意見を集めるために大きく機能し、ロボット研究者も含む多くの外部専門家からのアドバイスをいただくことができた。フィールド評価会が重要な役割を果たせるために、フィールド評価を専門に行うチームを作り、重点的に実施した。それによって、大きな成果が得られた。フィールド評価会を年に2回行い、COCN災害ロボットPJからも全面的なバックアップを得ることによって、様々な立場の多くの方々から長期に亘って定期的に有意義な助言をいただくことができた。

PM補佐としてコマツからの出向者（内園、高木）にプロジェクトマネジメントと技術営業でご貢献いただき、アドバイザーとしてコマツ（渡辺）、鹿島建設（宮崎）からご助言をいただいた。研究開発成果をユーザに対して売り込む技術営業専門担当をPM補佐として雇用することを考えたが、実現しなかった。国際レスキューシステム研究機構の事務局長（村田）、理事（高森）、特別研究員（村尾）を初めとする方々にも、プロジェクトマネジメントと技術営業でご支援をいただいた。

2016～17年には世界トップの国際学会IEEE Robotics and Automation Societyの会長に就任したが、それに先立つ次期会長や副会長、その後の元会長の立場を活用して、世界中からの最先端の知見に基づいた意見を伺うことができるなど、多くの方々にご協力をいただくことができた。

以上のように、国内外から斬新なアイデアや最先端の知見等を結集して研究開発を進めることができた。研究実施体制も適切だったと考えている。

③ <進捗管理> 研究開発の進捗状況や国内外における研究開発動向（ベンチマーク）等に応じ、各プロジェクトの加速、減速、中止、方向転換等を果敢に行うことができたか。

研究開発の進捗状況については、分科会の会合、フィールド評価会、サイトビジット、研究者からの聞き取りなどによりチェックを行った。研究開発の成果が芳しくない場合には、テーマの変更や中止を求めた。成果が出ていても、将来の大きな発展が見込めないものについても、テーマの変更や中止を求めた。大きな発展が見込めるテーマについては、思い切った予算措置や、企業とのマッチング、アドバイスなどを行い、加速することができた。

学会、展示会、企業団体会合に出席し、国外のプロジェクトのアドバイザーとして会合に出席し、国内外の会合でオーガナイズドセッションやワークショップを開催するなど、世界の研究開発動向の情報収集に努めた。

その結果、高い成果を上げることができ、目標とするTRLを実現することができた。以上から、進捗管理は適切だったと考えている。

④ <関係者の巻き込み> 研究開発に関連する産業界を巻き込み、それら関係者の自発的な研究開発投



資を誘導することはできたか。

本PJの計画は、経団連の有志企業からなる産業競争力懇談会（COCN）の災害ロボットプロジェクトにおいて立案されたものである。その経緯もあって、COCNプロジェクト参加企業には全面的な協力をいただいた。

ACSLは、飛行ロボットの研究開発実施に関して、研究開発主体として自社内のリソースを自発的に投資し、自社の飛行ロボットに研究開発技術を搭載することはもとより、各種要素技術の試験にも積極的に取り組んだ。九州北部豪雨災害では、飛行ロボットを適用した情報収集を行い、消防庁による配備検討に貢献するとともに、タフな飛行ロボットとしての実績を積んでブランド力を高めた。その成功以降、ImPACTの取り組みが会社の価値を高めて経営に貢献することが明確になり、ACSLの経営陣からも積極的な支援が得られるようになった。

コマツからは、建設ロボットの研究開発実施に関して、何名もの社員が4年間にわたってかわり、相応の人件費等の自主的研究開発投資が行われた。それによって、実用に近い建設ロボットを実現することができ、各種要素技術を統合して、現実問題に近づいたフィールド評価試験を実施することができた。

三菱重工業は、脚ロボットの研究開発に当初より加わり、全面的に協力を行った。特に、ImPACT開始前から脚ロボットのプロトタイプの開発に投資し、最初のプロトタイプを完成させた。

サイバー救助犬には、古野電気が実用版のサイバー救助犬スーツを製作し、ドーンがユーザインタフェースを製作し、信頼性と使い勝手を向上し、救助犬協会に貸し出して訓練に定期的に使用することができるレベルにまで至った。それには自社内の多くのリソースを使用していただいた。これは典型的なG-U-B連携（政府-大学-企業の連携）であり、図7-2に示すような協力関係が結ばれた。

その他、多数の企業が自社のリソースを費やし、本PJの課題実現のための研究開発に協力していた。

また、年に2回開催してきたフィールド評価会には、COCN関係のみならず全国から数多くの企業（毎回100社近く）に参加していただき、様々な立場からの有益なアドバイスをいただいた。

以上のように、産業界の巻き込みと自発的な研究開発投資の誘導には成功したと考えている。



図7-2 サイバー救助犬におけるG-U-B連携（政府-大学-企業連携）

⑤ ＜成果の展開＞得られた研究成果の産業界への橋渡しや将来的な実用化・事業化に向けた戦略（知財及び標準化を含む。）及び体制が構築できたか。

2002年にPMが中心となって設立した特定非営利活動法人国際レスキューシステム研究機構は、災害ロボットに関する橋渡しや事業化に関する支援を行う団体として、18年間にわたって活動を行ってきた。その成果は、東日本大震災や福島第一原発事故に代表される様々な震災等におけるロボットの活用、ロボット活用施策の立案、さまざまな災害ロボット研究開発プロジェクトの実施、災害ロボット評価標準化への取り組み、災害ロボット安全に関する取り組み、ロボカップレスキューやレスキューロボットコンテストなど競技会の実施、ロボット産業振興の支援、各種展示会等への対応、一般への啓発・広報、など、災害ロボットに関する広い範囲にわたる。原子力は本来の活動範囲の外であるが、福島第一原発の事故に際しては、Quinceの投入に大きな役割を果たし、東京電力からは感謝状を受けた。

本PJでは、国際レスキューシステム研究機構はフィールド評価試験を実施する機関として参加し、さまざまなユーザや産業界からの意見を集めて、研究者に対してフィードバックを行い、実用化や事業化に対する支援を行った。フィールド評価会は本PJの成果を生み出すことに最も重要な役割を果たした方法論であり、研究成果の橋渡しや事業化に大きく貢献したと考えるが、その成功は国際レスキューシステム研究機構の働きによるところが大きい。

国際レスキューシステム研究機構の活動はImPACT終了後も継続され、研究成果のユーザや産業界への橋渡しや実用化・事業化の支援を行っていく。経産省の施策として福島ロボットテストフィールドが立ち上がったことから、災害ロボットの試験場所として今後機能していくと期待される。国際レスキューシステム研究機構との協力によって、その利用を促進し、本PJの目的を果たしていく。

すでに始まっているImPACT終了後まで続く活動の例として、ImPACT成果の活用の促進、神戸市消防局との協力による研究成果の活用の試み、World Robot Summitを2020年以降も継続して世界持ち回りで開催することによる研究成果の活用や発展、総務省消防庁関係のプロジェクト提案、EU HORIZON 2020関係の救助ロボットプロジェクト提案などを挙げることができる。

ACSLは飛行ロボットを事業化しており、ImPACTの研究開発成果を活用しながら事業を展開してい

る。特に、災害のような厳しい環境でタフに信頼性高く飛行できる技術は、国産ドローンとしての価値を著しく高めるものであり、事業への貢献は少なくない。さらなるImPACT成果活用と共同研究の推進により、飛行ロボットの価値を高めていくことを計画している。

サイバー救助犬スーツは、日本救助犬協会を初めとして、全国の救助犬団体や、公安関係組織に対して貸し出しや試用が進められている。大企業が事業化できるほどの市場規模を現在のところ見通すことはできないが、ニーズに応じて受注生産することは技術的には可能であり、企業としての今後の取り組みは経営判断による。

索状ロボットは、プラットフォームが福島第一原発の一号機内部調査のために使用され、2016～17年に狭い部の撮影や放射線量測定の実績を上げたが、現在も同原発の別の課題への適用が検討されている。様々な企業から、床下・天井裏点検、配管内点検、プラント設備点検、での協力要請があり、使用検討や試験が行われている。これらは、研究者や国際レスキューシステム研究機構と産業界との相談に基づくものであり、継続していく計画である。索状ロボットを事業化する企業がまだ決まっていないことは今後の課題である。

タフ油圧コンポーネントは、ImPACT-TRC発の東工大発ベンチャー企業として2018年末にH-Muscleが立ち上がり、今後事業を行っていく。

柔軟ハンドは、ベンチャー企業を設立する準備を進めており、東北大ベンチャーキャピタルからの投資を受けた。

建設ロボットは、国際ロボット競技会World Robot Summitのプロトタイプロボットとして、そのシミュレーションモデルが採用され、2018年のWRSプレ大会から、使用法についてのオープンイノベーションによる検討が開始された。2020年の本大会までこの活動が継続される。建設ロボット実機は困難環境での試験が行われたが、事業化や研究継続は経営判断による。

脚ロボットは、World Robot Summitのプロトタイプロボットとして、シミュレーションモデルが採用され、2018年のWRSプレ大会で使用された。

知財や標準化に関しては、「7. PMの自己評価、(1) PMが実施管理を行った研究開発プログラムに関する評価、①産業や社会のあり方の変革、7) 知財・標準化戦略は明確かつ適正か」に述べた方針で進めてきた。

以上のように、橋渡しや事業化に向けた戦略や体制は構築されていると考えている。

⑥ <PM 支援機能の活用>PM 補佐や JST、外部支援の活用など PM 支援機能を有効に活用できたか。

PM補佐として、コマツからの出向者（内園、その後、高木）とJSTプロパー職員（岡田）が就任し、本プロジェクトの運営を積極的に行った。企業との折衝、展示会等への積極的な出展、広報の充実、研究管理の支援などを実施した。その他、様々なことで協力し、相談しながら事業を進めた。

以上から、ほぼ有効に活用できたと考えている。

⑦ <アウトリーチ>アウトリーチ活動等が積極的に行われ、研究開発の意義・重要性等に関し、関連する産業界や一般の理解が深まったか。

ユーザ、企業、研究者、一般に対して、研究開発成果を十分に理解してもらうことは重要であると考え、アウトリーチ活動を積極的に行った。その結果、国内外に研究開発成果を広く知ってもらうこ



とができた。

具体的な活動として下記を挙げることができる。

- ・フィールド評価会には、毎回500名程度の参加者があり、研究者はもとより、関係するユーザや産業界や一般の方々に広く成果が周知された。海外の消防から見学があった。その内容は、TVや新聞、ウェブページにて、国内外に広く配信された。多くの国内外の研究者や消防関係者から本PJの研究開発成果について直接意見をいただいたのは、これらの報道によるところが大きい。
- ・YouTubeのImPACTチャンネル他で、フィールド評価会の様子のウェブ配信を全世界に対して行い、また、成果をまとめたムービーを掲載するなど、国内外に広く研究成果を発信した。研究者や産業界やユーザはもちろんのこと、広く一般の方々にも知っていただくことができた。
- ・顕著な成果については、プレスリリースを多数行い、成果を広く報道していただいた。
- ・防災危機管理関係、ロボット関係の各種展示会に出展し、多くの見学者に対してデモを行った。
- ・Springerから成果をまとめた本、Disaster Robotics - Results from the ImPACT Tough Robotics Challenge を出版し（2018年1月頃に出版予定）、成果の公開に努めた。
- ・学会誌等に特集号を組み、成果を研究者に対して周知した。
- ・国際会議でワークショップを行い、まとめた成果を発表した。プレナリー、キーノート、招待講演などでその成果を発表した。
- ・ジャーナル論文、国際・国内会議で原著論文の発表を行った。これらの論文は、多数の賞を受賞した。
- ・その他さまざまな講演会等で、ImPACTの成果について紹介した。

一つの例として、ドラゴンファイヤーファイターを挙げる。この空飛ぶロボットホースについては、国内外の多数のメディアに取り上げられ、海外メディアからの問い合わせもあった。IEEE Spectrumや多数のウェブニュースを通じ、国外のロボット関係者にも周知されることとなった。海外で報道されると、Gill Prattなど、何人もの海外研究者、知人から質問を受けた。ある海外研究者からは次のような意味の賛辞を受けた。

「世界の多くのロボット研究は既存の問題に対してよりよい解決法を創り出す取り組みを進めているが、日本の研究はそれまでになかった方法論を創り出してパラダイム変換を起こし、これからの新しい流れを創り出しており、他とは一線を画している。非常に素晴らしい。」

これはまさに技術的な破壊的イノベーションを興そうとして推進してきた方向性であり、それを海外研究者から指摘されることは大変喜ばしいことだった。

以上のように、アウトリーチ活動を積極的行い、広く国内外に研究成果に対する理解が深まったと考えている。

⑧ <人材育成> 若手や女性を含め研究人材の育成にどの程度貢献できたか。また、基礎研究からイノベーションを産み出す取り組みに関する参画研究者の意識改革がどのように進んだか。

PJ開始時より、若手を育成することを重視し、運営会議や分科会にて、各分科会主査やPIに対して次のお願いをした。

「10年経って若手の方々がビッグになったときに、あのプロジェクトがあったから今の自分があるのだ、と言ってもらえるようにして欲しい。若手のいい研究活動が目立ち、将来のポジションにつながるようにして欲しい。」

この方針は、プロジェクトの期間を通じて、多くのシニアおよびジュニア研究者によって努力して実行された。その成果として、本PJはフィールド評価会や技術統合を強いられて多大な労力を要するに

もかわらず、若手研究者の大きな共感を得ることができた。顕著な成果がImPACT-TRCのネームバリューに乗って宣伝され、それを実施し、実現した本人という位置づけで、若手の名前や顔が知られることとなった。その結果、実際に学生を含む多くの若手研究者が、個人的な評価やプロモーションという点でも、通常の研究活動を行っていた場合と比べると、はるかに高いステージに立つことができたケースが多い。

大学の研究者は研究のための研究によって効率よく論文を書くことを優先しがちだが、本PJにおいては、出口を重視し、目的指向で問題解決にあたることをお願いした。そのために、目標を定めて解くべき問題とその方向性を明確化し、その実現のために必ずしも専門分野でないことや論文に書ける研究にならない種類の仕事もやっていただいた。PJ開始当初は、専門分野に狭く閉じた成果を出すことを重視する研究者も少なからず存在し、研究開発の統合や共創的な価値の創出、また、フィールド評価会を活用した出口意識の共有に対して懐疑的な意見もあったが、PJが進展するにつれて、これまで不可能だった成果が出せることを研究者自身が実感し、意識の変革が進んだ。また、通常だとなかなか実現しないようなレベルで、多数の企業や自治体からの問い合わせや、現場試験、共同研究などの依頼が研究者の元に舞い込むこととなり、災害ロボットやその技術の社会実装に向けた取り組みが、各研究グループで積極的に進められ、また、それによって研究開発の成果と意義を研究者が実感することとなった。その結果、研究者の間に出口を重視した研究の流れが定着し、今後、ロボットがもたらすべき社会のイノベーションの実現に直接的に貢献できる人材やその考え方が育ってきた。

プラットフォームに各種技術を統合することを重視して、研究者間の協力を進めた。それによって、ロボットのイノベーションに必要な価値を生み出すためのシステムインテグレーションや、協力によって広い問題を解決する方法論の意義を、研究者が実感することができた。これは、今後さらなる協力に発展していくと期待され、実際にそのための取り組みも始まっている。

以上のように、人材育成に大きく貢献することができ、イノベーションを生み出す取り組みに関する意識改革が大いに進んだと考えている。

⑨ <全体> 更なる研究開発の発展や、我が国の産業競争力の強化、困難な社会課題の解決に向け、どれほどの貢献ができたか。

これまでフィールドロボティクスは日本では諸外国ほど研究投資が行われておらず、得意とする分野ではなかったが、本PJにおいては、世界的に見て新規性が高い世界初、世界一の成果を数多く出すことができた。研究コミュニティの中で社会課題を解くことを目的とした出口指向の研究開発の精神が広く共有され、さらなる研究開発の発展につながっていくと考える。

産業界においても、研究成果を活用した取り組みが活性化しており、次のステージに向けた具体的な研究や活動も進められている。これはあきらかに産業競争力の強化に資するものであり、短期だけでなく、長期的に大きな果実をもたらすと考える。また、数多くの世界初、世界一の技術成果と、それを生み出せる人材の育成は、我が国の潜在的産業競争力の強化に寄与していると考えている。

九州北部豪雨災害や福島第一原発事故など、困難な災害問題に対して本PJで研究開発を進めているロボットやそのプラットフォームが適用され、一定の実績を上げた。それをきっかけとして飛行ロボットの全国の消防に対する配備が予算化された。災害対応組織による訓練や実証試験も頻繁に行われ、ロボットやその技術の配備や活用が検討されるようになっていく。

以上のように、研究開発のさらなる発展、産業競争力の強化、社会問題の解決に対して、大いに貢献できたと考えている。

⑩ <全体> 目標通りの成果が得られなかった事例等の原因分析や解析が適切に行われ、そこから得ら

れた知見や教訓を次の挑戦に活かすことができるか。失敗を通して次の挑戦につながる道筋は描けたか。

様々な失敗もあったが、それらに対して対策を講じて、解決を図っていった。それらの分析は対策を講じる過程で実施した。

成果が出ない事例は、概ね下記のような原因と分析された。

- ・そもそも当初の計画に無理があった。
- ・受託者の能力やリソースが不足していた。
- ・興味を持つ受託者を見つけられなかった。
- ・ユーザや企業等の方針に合わなかった。
- ・契約条件などで合意が得られなかった。
- ・各種規制やルールに適合しなかった。
- ・人間関係に問題が生じた。
- ・他人からの推薦等を断れなかった。
- ・筋が悪い意見に対して、それを明確に否定して、潰すことができなかった。
- ・無理解による誤解を解けなかった。
- ・悪意と思わざるをえないような中傷があった。

これらによって生じた失敗事例は、解決できると見込まれたもの、中止することが適切だったもの、失敗として受け入れることが適切だったもの、などがあった。

それらの知見を通じ、災害ロボットの社会構造の問題点についても、さらに深く理解が進んだ。その要約は、図7-1 (p.317) に示した。このような社会構造を踏まえた上で、さまざまな活動の実施計画を立てることが肝要である。

以上のように、失敗の分析を行い、次の挑戦に活かすことができた。

### (3) その他、ImPACTプログラム全体に対する所感・提言（自由記載）

特になし。