

革新的研究開発推進プログラム（ImPACT）

終了時評価報告書（平成30年度）

「タフ・ロボティクス・チャレンジ」

平成31年3月31日

P M 名：田所 諭
P M補佐名：高木 公彦
：岡田 晋輔

評価視点に関する自己評価と対応する報告書のページ

本報告書の「7.(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」(pp.314-320)が評価視点に対応したページである。

産業や社会のあり方の変革をもたらす見通しは得られたか。

自己評価：

ユーザや産業界の課題整理に基づき研究を計画し、非連続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、プロジェクトに取り込む配備されれば災害対応のあり方を大きく変革するような、世界初、世界一のロボット技術を、多数産み出した。フィードバック評価会(模擬空間デモ)と実災害への適用を通じて、ユーザや産業界へ訴求し、高い評価を受けた。今後、社会実装に向けた取り組みをロードマップに沿って進め、ユーザと共に安全安心に関する社会の変革を実施していく。また、産業波及を進め、技術循環を図っていく。

対応するページ：

- ・7.(1)(p.314)
- ・表2-0-2, 2-0-3 各プラットフォームの主な成果(p.29)

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

自己評価：

犬の行動モニタリングができるサイバー救助犬スーツ、能動スコープカメラ、飛行する消火ホースロボ、プラントの困難箇所を移動する索状ロボ、尖った熱い物体も把持できるハントなど、災害対応の方法を根本的に変える数多くの世界初、世界一の研究成果が得られた。

対応するページ：

- ・7.(1)(1)(pp.315-317)
- ・表2-0-2, 2-0-3 各プラットフォームの主な成果(p.29)

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

自己評価：

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て取り組んだ。

対応するページ：

- ・7.(1)(2)(p.317)

3) 戦略の実現に向けた課題が整理・明確化されたか

自己評価：

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産業競争力懇談会で明確に整理し、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。

対応するページ：

- ・7.(1)(3)(pp.317-318)
- ・表2-0-1(p.28)
- ・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.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

自己評価：

トップ研究者を集め、新しい取り組みを奨励し、フィールト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。

対応するページ：

- ・ 7 . (1) 4) (p.318)
- ・ 表2-0-2, 2-0-3 各プラットフォームの主な成果 (p.29)
- ・ 7 . (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) の , 海外研究者のコメント (pp.325)

5) 戦略の実現に向けたロードマップが適切に描けたか

自己評価：

TRL の高いロボットを中心として、研究開発、ユーザ訴求、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た。その結果、飛行ロボ・索状ロボ・サイバー救助犬・建設ロボなどの災害適用・事業化・実用化・限界試験等が進んだ。

対応するページ：

- ・ 7 . (1) 5) (p.318)
- ・ 2 . 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)

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

自己評価：

多くの企業が社内リソースを持ち出して研究開発に参加・協力し、ベンチャー企業が設立され、事業化検討、実証試験、共同研究が行われている。災害適用やフィールト評価会を通じてユーザへの訴求が進み、適用試験などを多数実施している。

対応するページ：

- ・ 7 . (1) 6) (p.318-319)
- ・ 7 . (2) 関係者の巻き込み (pp.321-322)
- ・ 表2-0-7 災害への出勤・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) 成果の展開 (pp.323-324)

7) 知財・標準化戦略は明確かつ適正か

自己評価：

災害ロボットの市場に適した知財戦略として、重要な基本特許に絞って特許取得を進めた。ソフトウェアについてはオープンソース戦略をとり、成果活用を促進した。性能評価法の標準化を NIST との協力で進め、ユーザ調達環境の整備に努めた。

対応するページ：

- ・ 7 . (1) 7) (p.319)

派生的な効果

自己評価：

破壊的イノベーションのために、予期しない「気付き」を生むことを重視したマネジメントを行い、多くの派生成果、学術的知見を産み出した。たとえば、柔軟ハンドOmni-GripperはSoft Roboticsの学術的知見に加えて、精密位置決めなしに熱い尖った多様な物体を把持できる実用性を実現した。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は非線形分布定数系の学術的知

見に加えて，木造家屋密集地域の消火に有効な可能性を示した．
対応するページ：

- ・ 7 . (1) (p.319-320)
- ・ 7 . (2) 全体 (pp.326-327)

目次

評価視点に関する自己評価と対応する報告書のページ

i

目次

1．研究開発プログラムの全体計画	
（１）研究開発プログラムの構想	1
（２）研究開発プログラムの達成目標	3
（３）研究開発プログラムの全体構成図	4
（４）具体的な取り組み	16
（５）～（７）研究開発プログラムのロードマップ，マイルストーン，実施期間	18
2．研究開発プロジェクト毎の実施状況及び成果	
プロジェクトの計画	20
プロジェクトの体制	26
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	
成果のサマリー	28
成果の詳細	
（１）サイバー救助犬	32
（２）索状ロボット（細径）	62
（３）索状ロボット（太径）	97
（４）脚ロボット	116
（５）飛行ロボット	157
（６）建設ロボット	195
（７）極限油圧コンポーネント	219
（８）シミュレータ	252
（９）フィールド評価・安全・STM	271
競合する技術・アプローチに対するベンチマーク	281
3．研究開発プログラムの全体成果	
（１）目標達成の状況	296
（２）参考指標	297
4．研究開発プログラム予算の推移	302
5．研究開発プログラムの推進体制	304
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	307
（２）研究成果の展開に向けた取り組み	309
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	314
（２）PM自身の活動（プログラム・マネジメント）に関する評価	320
（３）その他，ImPACTプログラム全体に対する所感・提言（自由記載）	327

1. 研究開発プログラムの全体計画

(1) 研究開発プログラムの構想

解決すべき社会的課題

災害大国ニッポンには地震・津波・風水害・原発・プラント・インフラ事故が毎年発生し、防災能力の飛躍的向上は急務の課題。その切り札は、防災の問題に対してロボット技術を集中させること。現在の福島第一原発事故・インフラ老朽化・自然災害対応のロボット開発は場当たり的であり、基盤技術不足のため、廃炉40年を支えきれず、早晚行き詰まることは自明。本研究は、そのボトルネックを根本的に解消するものであり、我が国の災害緊急対応、災害復旧、災害予防に対するロボットの活用の基盤、世界の防災能力を飛躍的に高める技術立国ならではの人道貢献の礎を築く。

上記の社会的課題を解決し、産業や社会のあり方に大きな変革をもたらす PM の構想

- ・災害対応・復旧・予防の能力を飛躍的に高める。
- ・ロボット技術の集中によってこれらの問題を解決する。そのために現在不足している、タフなロボットを実現するための基盤技術を研究開発する。
- ・その成果を社会実装するための地盤整備を行い、タフ・ロボティクスの技術が社会に定着できるための礎を創る。
- ・災害極限環境で有効なロボットの基盤技術を開発し、将来広い市場が期待される屋外の新しいビジネスの基礎を創る。

出口目標及び出口に至る将来的なシナリオ

1) サイバー救助犬

サイバー救助犬では、救助犬の運動・映像・声・生体信号の遠隔モニタリング・マッピングができ、救助犬への作業指示・情動推定が可能なサイバースーツを開発する。日本救助犬協会、イタリア山岳救助隊等の訓練使用とフィードバックによって、完成度を高め、実用化を図る（目標TRL：9）。ImPACT期間後には、実訓練使用での問題点を解決し、改良を加えることによって、製品化を目指す。また、国連INSARAGを通じた全世界の救助隊での試験を通じて、ODAなどを活用しながら、世界の救助隊での試験配備を目指す。

2) 建設ロボット

建設ロボットでは、支えながら作業ができ、重量物を持つパワーと自在な力のコントロールが可能な双腕建機を実現し、その上に、オペレータが双腕を使いこなせるようにするための遠隔操作支援を搭載する。限界性能試験（福島第一原発模擬瓦礫片付けなど）にてミッション遂行能力の確認と改良のループを回すことによって、実用化を図る（目標TRL：8）。ImPACT研究期間中からWorld Robot Summit（ロボットオリンピック）への適用によりトンネル災害対応での使用法の開発を行う。ImPACT期間後には、双腕ロボットを使用した新しい工法の開発を進め、実工事への適用を通じて、無人化施工への配備と、それに必要な施工基準（土木工事共通仕様書など）の改訂を目指す。

3) 索状ロボット

細径型として、索状体が空中に浮上してターゲットにアクセスできるシステムに調査・マッピング・視聴触覚遠隔操作を搭載することにより移動能力と遠隔操作能力を飛躍的に向上させた2種類のシステムを開発する。倒壊瓦礫人命搜索システムとしては、瓦礫内での実用性能を限界性能試験を通じて実現する。建物内消火システムについては、窓から建物内に侵入して火元消火できることを実証する。ImPACT終了後は、消防や原子力での試験（倒壊瓦礫、火災）を進め、実用化を図り、製品化・認証取得を目指す（目標TRL：8）。

太径型として、索状体が配管を巻き付き、あるいは、階段等を含む狭い通路を走行して、プラ

ント構造内をくまなく移動できるシステムに、調査・マッピング・遠隔操作を搭載することにより、従来アクセス不能だった場所へ移動してプラントの異常を点検するシステムを実現し、実ノ模擬プラントでの試験により点検が可能であることを実証する（目標TRL：8）。

ImPACT終了後は、ユーザとの協力により、耐久性・防爆等の実用化を進め、プラント点検への配備を目指す。

4) 飛行ロボット

飛行ロボットでは、災害の厳しい環境での飛行ロバスト性として、次を実現する。強風15m/s、豪雨100mm/h、構造隣接飛行50cm、水上離発着、急激な負荷変動5kg、プロペラ1枚故障時リカバリ、他。その上に音声・映像情報収集、マッピング・ロバスト無線・物体操作機能を搭載して、飛行ロボットの災害対応・復旧・予防用途の拡大を図る。ImPACT研究期間中からミニサーベイヤへの製品搭載を進め、期間内に実災害への適用を目指す（目標TRL：9）。

ImPACT終了後は、研究成果の先端的なペイロードにより飛行ロボットの適用分野の拡大を進め、新しいサービスの開拓と市場拡大に貢献することを目指す。

5) 脚ロボット

脚ロボットでは、プラント災害の環境下（がれき、はしご等）で移動でき、15 kgのワークを運搬マニピュレーションできる4脚ロボットのプラットフォームを開発し、その上に高出力精密作業ハンド、環境計測・モデリング・遠隔操作機能を搭載して、プラント内の非破壊検査や重作業が可能であることを示す（目標TRL：6）。ImPACT研究期間中よりWorld Robot Summitへの適用により、プラント災害予防やトンネル災害対応での使用法開発を行い、ImPACT終了後は研究開発した要素技術の実システムへの適用を進め、新しいサービスの開拓への貢献を目指す。

解決のための発想・アイデア及びブレークスルーのポイント

（現状分析）

- ・現在のロボットは「ひよわ」であり、災害極限環境では作業ができず、想定外に対応できない。
- ・この10年間で物理的・情動的の両面から極限環境に適用可能なコンポーネントの性能向上と小型軽量化が爆発的に進み、ロボットにシステムインテグレーションする準備が整ってきた。

（課題解決法）

- ・「能動ロバスト性」、「大規模実時間情報」、「生物機械融合」に関する技術的に非連続な研究開発を行い、5種類のボディへシステムインテグレーションし、世界一のタフ・ロボットを実現する。そのための、ロボティクスの基盤技術確立する。
- ・適用現場を模擬したフィールドにおける評価会を頻繁に開催。それによって、研究者間の緩やかな競争と、自主的な情報交換を促進する。
- ・COCN参加企業・ユーザに研究課題詳細化の段階から入ってもらい、研究計画に対する意見をもらうことによって、各企業のニーズにあった研究を奨励する。
- ・共同研究とフィールド試験評価を通じてビジネスマッチングを行うことによって、防災事業はもとより、企業独自の事業計画との結合を図る。
- ・企業に積極的に研究の過程に参加してもらうことによって、事業化のタイムラグを最小化する。
- ・オープンイノベーションでなければならないが、同時にクローズドな部分を工夫する。
- ・ユーザとPMが頻繁に研究者と交流し、研究の方向性について議論する。
- ・ImPACT予算から事業化のためのブーストアップ研究資金を臨機応変に提供する。

（困難性）

- ・各要素技術とロボットシステムの性能・耐久性・信頼性が、極限環境において、どこまでの範囲をカバーできるかには技術的な困難性がある。
- ・災害対応ロボット自体は、災害への緊急対応をターゲットとする限り市場規模は小さいため、事後の災害復旧および事前の災害予防を含めた取り組みが必要であるが、それを産業界がどの程度直接的な事業にしていけるかには産業的な困難性がある。また、災害対応・復旧・予防のユーザが研究開発成果としてのロボットをどのように配備できるかは今後の課題である。
- ・研究を進めていく過程において、企業やユーザにとっての事業化の魅力をどのようにして育て

- ていけるかは困難な課題であり、臨機応変に様々な施策を工夫していくことが必要である。
- ・災害ロボティクスから屋外サービスへの技術循環を促進できるかどうかは今後の課題である。
- (波及効果)
- ・屋外サービスの高度化、原発問題の解決、セキュリティの高性能化、産業基盤リスクの低下。
 - ・ビジネス主体や一般国民がロボットを見て感じることで、新規事業へのインスピレーションを喚起し、タフ・ロボティクスを活用した新しい屋外事業を興し、我が国の産業競争力を高める。
 - ・社会的ニーズは高いものの、確立した市場によって駆動されないために、ソリューションが根付かない分野における、新たな技術循環と破壊的イノベーションのモデルケースとなる。

(2) 研究開発プログラムの達成目標

厳しい災害環境条件では性能を発揮できない現在のロボット技術のひ弱さを克服し、タフでへこたれないロボットを具現化する。ロボットをユーザや参加企業とともにフィールド評価試験を行い、高いTRLの成果に関しては実用化をさらに加速して社会実装につなげ、低いTRLの成果に関しては技術の持続的発展と将来の実用化への道筋をつける。

各プラットフォーム毎に目標をまとめると、下記の通り。

1) サイバー救助犬

サイバー救助犬では、救助犬の運動・映像・声・生体信号の遠隔モニタリング・マッピングができ、救助犬への作業指示・情動推定が可能なサイバースーツを開発する。日本救助犬協会、イタリア山岳救助隊等の訓練使用とフィードバックによって、完成度を高め、実用化を図る(目標TRL:9)。

2) 建設ロボット

建設ロボットでは、支えながら作業ができ、重量物を持つパワーと自在な力のコントロールが可能な双腕建機を実現し、その上に、オペレータが双腕を使いこなせるようにするための遠隔操作支援を搭載する。限界性能試験(福島第一原発模擬瓦礫片付けなど)にてミッション遂行能力の確認と改良のループを回すことによって、実用化を図る(目標TRL:8)。ImPACT研究期間中からWorld Robot Summit(ロボットオリンピック)への適用によりトンネル災害対応での使用法の開発を行う。

3) 索状ロボット

細径型として、索状体が空中に浮上してターゲットにアクセスできるシステムに調査・マッピング・視聴触覚遠隔操作を搭載することにより移動能力と遠隔操作能力を飛躍的に向上させた2種類のシステムを開発する。倒壊瓦礫人命捜索システムとしては、瓦礫内での実用性能を限界性能試験を通じて実現する。建物内消火システムについては、窓から建物内に侵入して火元消火できることを実証する。

太径型として、索状体が配管を巻き付き、あるいは、階段等を含む狭い通路を走行して、プラント構造内をくまなく移動できるシステムに、調査・マッピング・遠隔操作を搭載することにより、従来アクセス不能だった場所に移動してプラントの異常を点検するシステムを実現し、実/模擬プラントでの試験により点検が可能であることを実証する(目標TRL:8)。

4) 飛行ロボット

飛行ロボットでは、災害の厳しい環境での飛行ロバスト性として、次を実現する。強風15m/s、豪雨100mm/h、構造隣接飛行50cm、水上離発着、急激な負荷変動5kg、プロペラ1枚故障時リカバリ、他。その上に音声・映像情報収集、マッピング・ロバスト無線・物体操作機能を搭載して、飛行ロボットの災害対応・復旧・予防用途の拡大を図る。ImPACT研究期間中からミニサーベイヤへの製品搭載を進め、期間内に実災害への適用を目指す(目標TRL:9)。

5) 脚ロボット

脚ロボットでは、プラント災害の環境下(がれき、はしご等)で移動でき、15 kgのワークを運搬マニピュレーションできる4脚ロボットのプラットフォームを開発し、その上に高出力精密作業ハンド、環境計測・モデリング・遠隔操作機能を搭載して、プラント内の非破壊検査や重作業が可能であることを示す(目標TRL:6)。ImPACT研究期間中よりWorld Robot Summitへの適用により、プラント災害予防やトンネル災害対応での使用法開発を行う。

(3) 研究開発プログラムの全体構成図

図1-1にImPACTタフ・ロボティクス・チャレンジの研究開発プログラム構成を示す．ここでは，次の4つのプロジェクトの研究開発を進める．

(1) ロボットプラットフォーム：5種類のロボットプラットフォーム（サイバー救助犬，索状ロボット，飛行ロボット，脚ロボット，建設ロボット）の研究開発

(2) ロボットコンポーネント：タフ・ロボティクスを実現するための機械コンポーネント共通技術の研究開発

(3) ロボットインテリジェンス：タフ・ロボティクスを実現するための電子・情報コンポーネント共通技術の研究開発

(4) フィールド評価試験・安全：研究開発手段として，ロボットシミュレータを開発し，研究成果のフィールド評価試験，ヒューマンファクター評価を行い，安全性の解析を行うことによって，実用化を促進する研究開発

これらはすべて強い協力関係にあり，(2)，(3)で開発した共通技術は，(1)のプラットフォームに統合され，(4)でフィールド評価試験がなされる．その関係を図1-2に示す．



図1-1 ImPACTタフ・ロボティクス・チャレンジの構成

開発手段		安全	○	○	○	○	○
		シミュレータ		○	○		
		ヒューマンファクター 評価	○	○	○	○	○
		フィードバック評価	○	○	○	○	○
共通技術	インテリジェンス	ビッグデータ	○				
		失敗時リカバリ				○	○
		ヒューマン インタフェース	○	○	○	○	○
		極限制御			○	○	
		極限通信	○		○		
		極限触覚		○		○	○
		極限音響処理	○	○	○	○	○
		極限画像処理	○	○	○	○	○
	コボット	極限機構		○	○	○	
		極限油圧				○	○
	プラットフォーム	サイバー 救助犬					

図1-2 各プロジェクトと各プラットフォームロボットとの関係

(各プラットフォーム等の概要)

それぞれの技術は5種類のロボットプラットフォームに統合されるため、研究開発開始後の運営会議でのディスカッションにより、上記(1)～(4)のプロジェクト毎を単位として研究を進めるよりも、5種類のプラットフォームごとを単位として分科会を構成して研究を進めた方が、明確な成果を上げることができる、という結論にいたった。そのため、ロボットプラットフォーム上で発揮される性能として出口イメージ、研究開発目標を定め、成果や進捗を整理することとした。

ここでは、その方針に従って、目標、成果、進捗等がわかりやすいよう、次のようにロボットプラットフォームごとに整理して、2017年度時点でのQuad Chartにより、その概要を示すこととする。

(a) 飛行ロボットプラットフォームを中心とする研究開発：図1-3

(b) 脚ロボットプラットフォームを中心とする研究開発：図1-4

(c) 建設ロボットプラットフォーム：を中心とする研究開発：図1-5

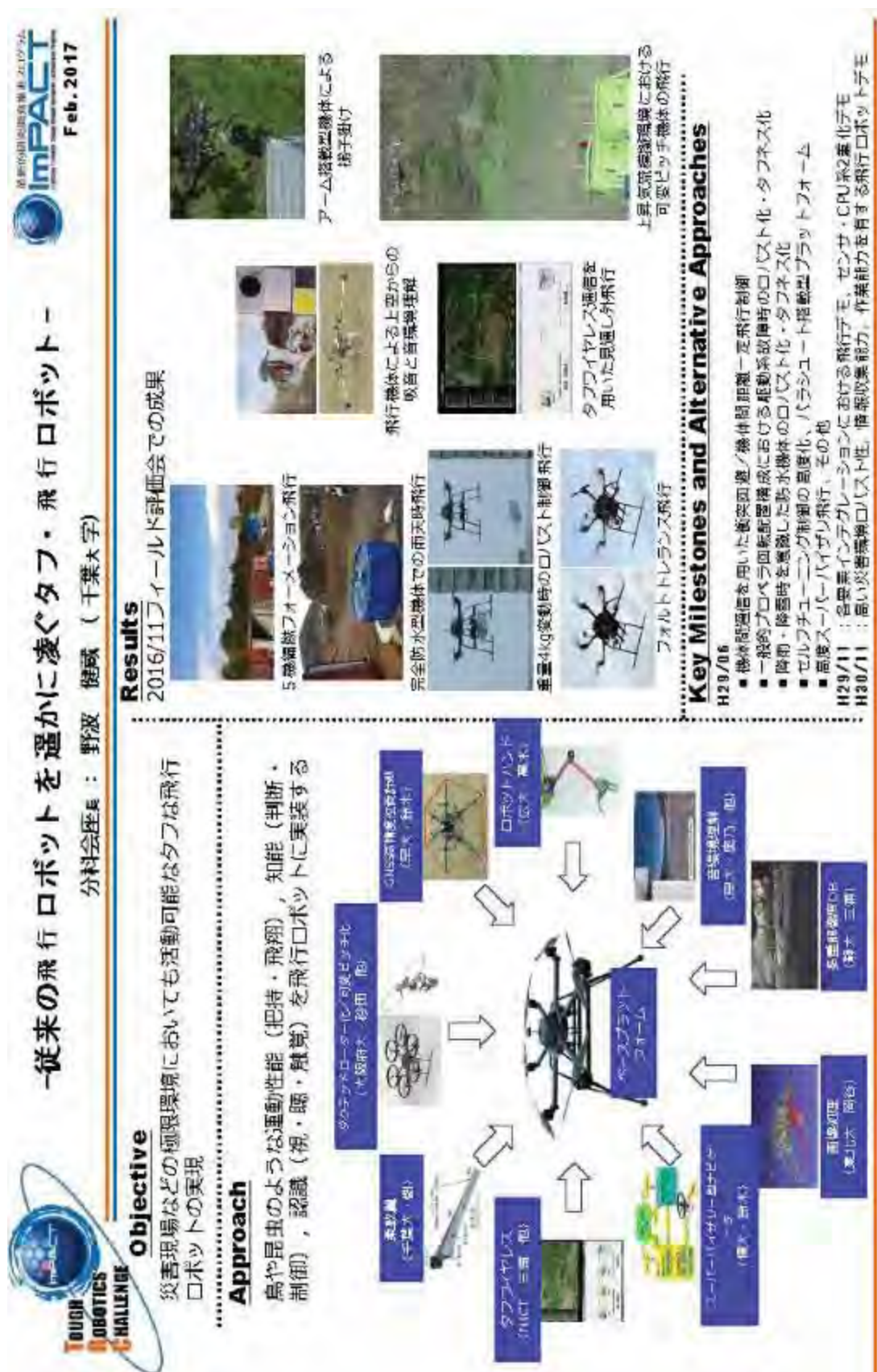


図1-3 飛行ロボット

脚口ボット分科ト分科会

リダー：高西 淳夫（早稲田大学）

Objective

被災ノラント等の危険箇所を調査・点検ができる期口ロボット技術の開発

- [illegible]

Approach

- [illegible]



Key Milestones and Alternative Approaches

2017年06月；登録標榜方式（2型，4型，特選，特選特選）；

中飽WARECの還元操作

2017年11月：以心之入の想ひとて、心響・心響言ひ（木田照秋）+ 福岡制作；

双座WALLCUT™的连隔操作学

2018年06月 WARFC-1 奈良県にて、移動と作業のタスクを同時に実現

2018年11月: WAREC-1改向機にて、移動と作業のタスクを連続的に実行

醫學博士佐藤三郎、初等師範校長佐藤三郎、

Results

- 緑に加工された、フットコートWAH C-1 (WASSELING Co. N.J.)
 - 全幅1690mm (2体の足幅)。質量150kg、全28山由度 (1山7.2山由度)
 - 中や様運動アクティビタリーターミネートの間隔により、要出力化を促進化を要する



- アニメーションの活用
過去の数分間、利用した遠隔操作インターフェース
- CGモデルの活用
仮想的に機械動作を生成



- 登山刀・増設作業用ハンマー ■ 道路の段差可能な道路幅作システム



図1-4 脚口ボット

建設ロボット分科会

リーダー：吉野 裕 (大阪大学)

Results

- (1) 車製モジュール製作完了
- (2) 各要素技術を順次申請しデタルに記載
- (3) 2主旋回モジュールの詳細設計を実施中
- (4) 遠隔操作 1/F のプロトタイプ製作完了
- (5) 動力アシストフレア完成、機能試験を進めている
- (6) 要素技術の研究開発実施中

Objective

技術的目標：
従来国産だった産業事件でも作製が
可能で、建設設備はベースとした更
新対応のバリエーション

營業的目標：
即進口、販賣上の平均は、用商品の研究・
販賣也。

Approach



Key Milestones and Alternative Approaches

- 2016/11：車輪モデルのフィールド評価（主な要素技術を図載）
2017/06：2車輪国モデルのフィールド試験（限定条件下で評価）
2017/11：改善・満・局・狭縫部がある不整地での走行試験、
福島県 原研所の模擬瓦礫片付作業試験、に若干
2018/06：急傾斜地での工事作業試験、小型鉄骨コンクリート建築、
高速道路修繕型、トンネル内パネル組立作業試験、に若干
2018/11：掘削試験

図1-5 建設ロボット

Objective

- 1) 地震、津波、火災等の瓦風内救助のための要状ロケットの開発。
瓦風内救助のためのベントアツと吸引（連続可、瓦風上へ、隔離、エネルギー源）
瓦風内へ進入できる（5 cm の隙間、50 cm まで行く）
進入位置がわかる（30 D位置）、瓦風内のマッピングができる（30 マップ）
瓦風内でセンシングでできる（形状、人体、ガス、温度、放射能、など）
進入を感知しながら通信操作できる
2) 産業設備の点検と災害予防のための要状ロケットの開発
各種配置（プラント内、ガス、水道、電気、など）内部の点検を行う
点検に分解工事が必要な配置（細径、2.54以下、多数箇所、10箇所以上）
供給を続けながらの点検（距離点検）安全性の確保（防壊、傷つけない）
産業設備等の狭く入り込んだ場所の点検を点検し
3) 配管検出、設備点検のためにベントアツと吸引
進入位置がわかる（30 D位置）、配管内、設備内のマッピングができる（30 マップ）
配管内、設備内でセンシングできる（漏洩、さび、腐蝕、スラッジ、など）
進入を感知しながら通信操作できる
4) 建物内メカニカルシステムの開発
建物内に熱気が入り、火元に向って放水できるシステムを開発し、消火できることを実証

Approach

1. 移動方式、機構、制御—瓦葺、配管仕様を移動の困難度でラシングづけ、制度的に決める。
 田舎（荒状焼燬、制割一進入、交代、引っぱり回落、リカバリ）
 清水型—田舎が下りながら下方は連一初期ブラストホールドして提供
 中盤型—ぶら下がりながら自由推進、がれきのサイドから上左右に自由推進（飛行）
 飛行滑りシステム、地上中の建初型に入らず、遠隔操作（飛行）
 しほ型—貯留庫内推進—組を活動型よりおはるかに簡単に遠隔に移動
 多田型（シャベル表型、移動機構、部分的に動く）新機構、有線ロボットの総まり防止
 制（空用移動機構）清水型の底面に敷いた岩機械損傷を食い止めるがら足踏
 2. 遠隔操作
 田舎、遠隔センシング、視覚・インフラエース、提示
 3. センシング—瓦葺、配管仕様を認識の困難度でラシングづけ、制度的に対象を限定し、後で拡大
 4. 動力—普通軽便車による位置特定、普通定位置、音マシク、音無推測、自己生成抑制、通信破壊化
 5. 同谷—SINUSOIDマシク、位置特定、ローリングマシク、シーンの時間変化、従来の騒音状況
 6. 山岳—瓦葺内物体表面性状認識、新制御装置、後述、瓦葺内騒音音聞き分け
 7. ワールド計画
 8. 構築、フィールド（校）設計、評価基準、方法の開発、木材、安全、防障
 9. 性、管、グレイズマシク、面々材料、形状感知（使用感、ほたる、引っかかる）
 10. 表面性状（ペイント、メッキ、さび、埃、雪れ、油、地めり、ガラス）境界環境



Key Milestones and Alternative Approaches

- H27/08: 燃焼試験フィードル完成、瓦礫内データ、ブラストホーム燃焼
H27/11 第1回フィードル評価会(表裏技術確認、目標の具体化)
H28/06 第2回(統合して試験、想定性能を評価、重要技術性能向上)
 ケーブル性能化(平面図移動)
H28/11 第3回(統合して性能を示す、瓦礫を下向き(10m進入) + 瓦
 礫内移動 + 瓦礫内橋架設置 + 直下掘削 + 橋架固定、配管(埋設配管、
 50A、鉛直工員、水廻)、瓦礫横向き移動(掘削3m進入)、消火(水
 圧注上が可能)、ケーブル性能化(瓦礫内固定物移動)、50m回性能
 化)
H29/06: 第4回(信頼性向上、瓦礫横向き移動、SIVの統合)
H29/11: 第5回(移動能力向上、遠隔操作、試験用統合機開発)
H30/06 第6回(移動能力向上、遠隔操作、限界性能試験)
H30/11 第7回(限界性能試験、運用化)

田所諭・昆陽雅司・東北大学

図1-6 索状口ボット（細径）

目 録

技術的目標：出口ロボットでは進入できない空間がコアコアベースコープでは到達できない場所へのアプローチを実現し、加圧経路環境への検査・検知・シミュレーションを提供する。コアコアベースコープとしてヘビ型ロボット (ASB)、(b)ムカデ型ロボットを開発し、狭い環境への進入性と柔軟性をもち、タスク失敗の予防と復旧が可能となる。索状ロボットのためのコアコアベースシステムを開発する。

産業的目標：コアコアベースロボットや加圧システムを災害現場に適用する新たな応用を生み出し、産業化に貢献する。

社会的目標：これまでできなかったタスクを要請できるコアコアベースロボットおよび加圧制御システムを開発し、社会実装することにより安全・安心な社会の構築に貢献する。

研究開発体制・フロー



研究開発項目

(a)ヘビ型ロボット (太径)

- (a)ヘビ型ロボットと型ロボットの開発
- プラント領域をコアコアに移転
- 全周検知・検知の検知・検知位置・検知位置・検知位置
- 防塵防水機能の開発

(b)ムカデ型ロボット (太径)

- 近接センサの搭載と検知機能の開発
- センサ・カメラを用いた検知機能の開発
- タスク失敗の予防と復旧・検知機能の開発
- 検知機能を用いた検知機能の開発
- 検知機能を用いた検知機能の開発

(c)環境認識・検知機能の開発

- 検知機能を用いた検知機能の開発
- 検知機能を用いた検知機能の開発
- 検知機能を用いた検知機能の開発
- 検知機能を用いた検知機能の開発
- 検知機能を用いた検知機能の開発

(d)ムカデ型ロボット (太径)

- 検知機能を用いた検知機能の開発
- 検知機能を用いた検知機能の開発
- 検知機能を用いた検知機能の開発
- 検知機能を用いた検知機能の開発
- 検知機能を用いた検知機能の開発

(e)環境認識・検知機能の開発

- 検知機能を用いた検知機能の開発
- 検知機能を用いた検知機能の開発
- 検知機能を用いた検知機能の開発
- 検知機能を用いた検知機能の開発
- 検知機能を用いた検知機能の開発

(f)ムカデ型ロボット (太径)

- 検知機能を用いた検知機能の開発
- 検知機能を用いた検知機能の開発
- 検知機能を用いた検知機能の開発
- 検知機能を用いた検知機能の開発
- 検知機能を用いた検知機能の開発

(g)環境認識・検知機能の開発

- 検知機能を用いた検知機能の開発
- 検知機能を用いた検知機能の開発
- 検知機能を用いた検知機能の開発
- 検知機能を用いた検知機能の開発
- 検知機能を用いた検知機能の開発

(h)ムカデ型ロボット (太径)

- 検知機能を用いた検知機能の開発
- 検知機能を用いた検知機能の開発
- 検知機能を用いた検知機能の開発
- 検知機能を用いた検知機能の開発
- 検知機能を用いた検知機能の開発

(i)環境認識・検知機能の開発

- 検知機能を用いた検知機能の開発
- 検知機能を用いた検知機能の開発
- 検知機能を用いた検知機能の開発
- 検知機能を用いた検知機能の開発
- 検知機能を用いた検知機能の開発

図1-7 索状ロボット (太径)

サイバー救助犬分科会

リーダー：大野 和則 (東北大学)

Objective



サイバー救助犬：
人間と犬とロボット技術を融合した新しい被災者捜索方法の提案

社会目標：
日本列島で、世界の安全に貢献する技術の創出と、被災者の救済に貢献！

技術目標：
従来出来なかった、災害救助犬の探査状況の共有、探査の信頼性の可視化、及び、犬の行動の遠隔監視を非侵襲で行う技術を開発

産業目標：
人間の伴侶動物に要するペット産業の開拓や、飼い主の生活の質の向上にも貢献

Approach



行動の可視化：災害救助犬の位置・行動の可視化

リバイバー救助犬で開発する技術

1. 中型・大型救助犬 (13~30kg) の探査行動を記録・配信する非侵襲のサイバースーツの開発 (大野和)
 - ・ 探査中に探査状況の可視化
 - ・ 心電など生体計測が可能でサイバースーツ
 - ・ 全周周力メスを搭載したサイバースーツ
2. 探査活動の解析と可視化
 - ・ 犬の探査行動の記録 (山崎G)
 - ・ 探査活動の可視化 (山崎G、大野和)
 - ・ 生体信号や行動から犬の行動や内部状態を推定 (山崎G、大野和)
3. 離れた場所から犬の行動を誘導
 - ・ 光や音を利用した非侵襲の行動誘導 (大野和、山崎G)
4. 現場適用ユーザーによる実証評価
 - ・ 救助犬、警察犬、山岳救助犬と連携 (大野和)

Results

- (1) 中型・大型犬のサイバースーツ製作が完了
- (2) 各要素技術を実証評価する新サイバースーツ製作と実証評価
- (3) 機械学習を利用した、犬の位置・行動の認識
- (4) 動物行動学の知見に基づく非侵襲で行動・行動推定
- (5) GPS、非GPS環境で犬の探索軌跡を推定
- (6) 犬を遠隔監視する行動誘導技術の開発



Key Milestones and Alternative Approaches

- H28：・サイバースーツの改良、防水性能向上、生体信号計測
・各グループが開発した技術の統合と、オンライン推定
- H29：・サイバースーツの実用化と国内・外ユーザーとの連携
・誘導を行うサイバースーツの開発、複数機能を有した統合機開発
- H30：・他プラットフォームと連携したフィールド評価

東北大学・NICHe



図1-8 サイバー救助犬

Objective

「強さ」と「俊しさ」を併せ持つタフロボット用油圧コンポーネント技術確立

1. 建設ロボットの仕様に基いた油圧コンポーネントの開発と適用

- ・バケット/多指ハンド切替多機能エンドエフェクタ
- ・形状適応性を持つ把持動作
- ・「センサレス制御」による高信頼性

2. 脚ロボットの仕様に基いた油圧コンポーネントの開発と適用

- ・高「力/自重比」、長時間自立動作
- ・梯子登り時に用いる「高力把持機構」
- ・耐衝撃/耐振動/耐飽和→転倒時後方吸収、折り作業
- ・作業用コンプライアンス手袋

3. タフロボット/メカトロニクス機器用、タフ油圧コンポーネントの実用化

- ・一般産業機器への用途拡大
- ・ベンチャー起業による実用化

*)強さ：力、耐振動/衝撃、悪天候下動作、高エネルギー効率
俊しさ：小型軽量、多自由度、力制御、コンプライアンス、形状記憶

Approach

1. 建設ロボGr.および脚ロボGr.との連携

2. 産学連携(大学と油圧専門メーカーとの共同研究)

3. 油圧工学とロボット工学の融合(油圧タフロボ研究会)



Results

■ ベースとなる主な油圧コンポーネントの開発

- ・シリンダ/モータ
 - ・小型シリンダ(径φ30mm)
 - ・径φ30mm/行程φ30mm
 - ・群集(マップ)シリンダ-弁弁、モータ弁弁の活用、中速(100mm/s)
 - ・群集(マップ)シリンダ-弁弁、モータ弁弁の活用、中速(100mm/s)
 - ・群集(マップ)シリンダ-弁弁、モータ弁弁の活用、中速(100mm/s)
 - ・群集(マップ)シリンダ-弁弁、モータ弁弁の活用、中速(100mm/s)
- ・群集(マップ)シリンダ-弁弁、モータ弁弁の活用、中速(100mm/s)
- ・群集(マップ)シリンダ-弁弁、モータ弁弁の活用、中速(100mm/s)
- ・群集(マップ)シリンダ-弁弁、モータ弁弁の活用、中速(100mm/s)
- ・群集(マップ)シリンダ-弁弁、モータ弁弁の活用、中速(100mm/s)

■ ハイパワームエータ

- ・新設計/高圧力/高速度/高効率/高信頼性
- ・新設計/高圧力/高速度/高効率/高信頼性
- ・新設計/高圧力/高速度/高効率/高信頼性
- ・新設計/高圧力/高速度/高効率/高信頼性



■ 建設ロボット/脚ロボットへの応用



- ・1年以内/1000kg
- ・1年以内/1000kg
- ・1年以内/1000kg
- ・1年以内/1000kg
- ・1年以内/1000kg

Key Milestones and Alternative Approaches



ImpACT:油圧コンポーネント P.1: 鈴森 康一

図1-9 超高出力タフ油圧

シミュレータ研究会
—シミュレーションによるロボット開発の低コスト化と高効率化—
リーダー：金広 文男（産業技術総合研究所）

リーダー：金広 文男

Choreonoid (コレオノイド) とは？

環境基盤可能なグラフィカルロボティクス環境

Theromachiaは、コンピュータに接続された超小型のロボットを用いたことで、ロボットの設計、開発、運用のあらゆるフェーズを単一システムに高度化することをサポートする。システムは専用装置、システムとしての設計、加工、コンピュータの設計、製造、ソフトウェアにも利用可能であり、更に、新技術を利用し、コンピュータが時にロボットであり、システムにも利用可能である。

何者

- ・ロケットモデルを扱う基本現象を統合
・多様な物理的エネルギーがシステムとして相互作用
・主要なコンピュータ用システムに対応
・航空の物理計算エンジンを利用することで計算可能
・航空機の飛行状態を定式
・航空システム・システム・システム (M1777) で

[illegible]

活用事例

始力學シミュレータ

- ・「アパレル・ファッション・ロケーション・スタイル」
- ・「アパレル・ファッション・ロケーション・スタイル」
- ・「アパレル・ファッション・ロケーション・スタイル」



ロボットの応用はインタフェース

- DARA Robotics Qualifying Interview Questions



ロボットの動作振り付け

- ・ 読者研究で開発したヒューマン・インテロポリティクス・トランスラクションの動向を月に1回、各メディア・プラットフォームに発表



Contents

[illegible]

コミュニティ活用ポイント

- さまざまなロボットデザインを賞状で作ることにし、流行できるロボットを応用、危機を回避することなく、チャレンジャーとなる。賞状の授与者が同業他社にだけ進められる。
- ロボットの台数よりも多数のオペレーターが同時に制御できる。ロボットを建設し、知人を通じて知人に望む国を建設し、発展しに繋ぐことが出来る。



建設項目
建設口米の上
(平積目式提灯)

- これらの2つの拡張機能及びGazeからの移動支援機能
 及びTop形式での入力機能
 シミュレーションの条件設定、マウス・キーボード
 等の入力などのGazeからの移動支援機能の拡張



- [illegible]



ImpACT: 単眼は視シミュレーションプラットフォームChoreonoidの開発PI: 金広文明



Objective

技術的目標

フィールド評価：TRCで開発されるロボット群に対する明確な評価体制の構築。
評価フィールド（実証試験の場）の開発と評価試験の実施。
安全：非遠隔インペーシブなシミュレーションで想定される多様な、新規性を有する試験を実施し、「想定外」の事故を徹底的に最小化した（フィードバック）システムを構築するシステム安全の確立。

産業的目標

フィールド評価：TRCの開発に基き新規産業用ロボット製品等の性能および安全性の標準化。システム改善化への貢献。
安全：新規産業用ロボットに必要となる安全上の課題の明確化と標準化TRCでの検証と、その内実化による事業化促進。

社会的目標

フィールド評価：災害ロボットにおけるロボットシステムの性能・安全に対する標準化と安心できる社会の形成に貢献。
安全：最終的安全課題の非遠隔インペーシブなState of the Artの安全の実現と、その社会への導入による安全安心の増進とシミュレーションの普及。

Approach

フィールド評価：

1. 国内外で既に発表・実行されているロボットの評価法と評価フィールドについての調査分析。
2. TRCにおけるロボット実証試験状況の入手と各種ロボットへの目的に適合する評価法の開発
3. CADによる、安全基準の構築を含めた評価フィールドの設計とその実現
4. 評価フィールドにおけるフロー・プロセスの評価法の構築
5. 評価法での性能評価に基づく、各種ロボットへのシミュレーションとの連携
6. 大規模評価フィールドの実現に向け、COONとの連携

安全：

1. SIAMP等を模範としたシステム安全標準を適用し、日本の規格安全・機能安全の両方を安全規格としてのIEC61508安全条件を適用。
2. 安全規格としてIEC61508安全条件を適用。
3. 既存規格と新規格による安全条件の比較と適用。
4. ロボットシステム安全規格で提示されるロボット・シミュレーション、システム安全を構築。
5. 市販ノードロボットやロボット・シミュレーションを用いて評価試験。
6. フィールド性能評価、実証試験の安全基準を適用した開発するシステム安全の妥当性検証。

Results

・ 評価フィールドの実現（成果の一部のみ掲載）



小規模フィールド

ロボット（自主制御）

ロボット（自主制御）

ロボット（自主制御）

ロボット（自主制御）

大規模フィールド

大規模フィールド

- ・ TRCを考慮した技術力やロボット作成と共有によるインペーシブな安全評価
- ・ TRCを考慮した安全評価・開発の拠点（IEC61508安全規格の適用）を考慮したフィールド評価法の開発と安全評価・安全管理の連携
- ・ フィールド評価法を通じた性能評価・安全管理の連携と改良
- ・ ロボット評価法・安全管理手法の開発によるロボットシステムへの適用と改良

Future Task

1. 安全評価のための評価法の開発
2. DHS-NIST-ASIMへの新しい評価法の提案
3. シミュレーションに基づく総合的評価法の検討と評価法によるシステム安全の構築
4. ニーズとシミュレーションの連携による実用的評価法の検討
5. 国内外で広く発表・実行されているロボットへの評価法と評価フィールドについての調査分析の継続
6. TRCにおけるロボット実証試験状況の入手と各種ロボットへの目的に適合する評価法の開発・改良

図1-11 フィールド評価

(4) 具体的な取組

1) ロボットプラットフォーム

プロジェクトリーダー：田所諭 (IMPACT PM)

1-1) 研究開発の概要

飛行ロボ、脚ロボ、建設ロボ、索状ロボ、サイバー救助犬のロボットプラットフォームの研究開発を、アクセシビリティ、環境ロバスト性などを含め研究する。

1-2) 研究開発の目標

アクセシビリティ、環境ロバスト性に優れ、さまざまな要素技術を搭載可能な、災害対応・復旧・予防に有効なロボットのボディやシステムを研究開発する。模擬環境フィールドや災害現場で試験を行い、その有効性を示す。さまざまなロボットコンポーネントを搭載可能なプラットフォームを、プロジェクト全体に対して提供する。

飛行ロボットとしては、チューニングが不要でロバストな制御系、障害物や異常を検知してオートパイロットを行うコントローラ、GPS・SLAM・IMUの融合、作業アーム等の搭載、複数ロボットの自律分散ミッション、他の研究を行う。

脚ロボットとしては、プラントを想定した不整地・はしご・マンホールなどでの極限環境アクセシビリティ、転倒時の衝撃吸収機構と制御、脚が故障した場合のリカバリ、等について研究する。

建設ロボットとしては、建機等の遠隔自律ロボットプラットフォーム化、不整地・閉鎖空間・植生・泥沼・山岳環境でのセンシング・制御・ヒューマンインタフェース、等について研究する。

索状ロボットとしては、水陸両用3次元管路内移動ロボット、細径配管内推進防爆ロボット、狭所不整地極限環境推進ロボット、浮上式建物内消火システム、閉鎖空間でのセンシング・情報統合・位置推定・感覚フィードバックインタフェース、等について研究する。

サイバー救助犬としては、救助犬の行動・状態モニタリング・推定、非侵襲的な手段による遠隔操作、等について研究する。また、これらのロボットに各種センサを搭載し、極限環境においてリアルタイムデータを収集することにより、ベンチマークのためのセンサデータアーカイブを作成する。

これらの詳細については、ユーザやメーカからの要望を考慮して設定することとする。

2) ロボットコンポーネント (超小型油圧システム、極限機構、他)

プロジェクトリーダー：鈴森康一 (東工大)

2-1) 研究開発の概要

超高出力油圧システム、極限機構、他 (公募) のハードウェアを研究する。

2-2) 研究開発の目標

タフなロボットを構成するためのボトルネックとなっている種々のハードウェアコンポーネントを研究開発する。要素技術としての試験をそれぞれに応じた環境 (実験室環境～模擬環境フィールド～災害現場) で試験を行い、ロボットプラットフォームに搭載することにより、その有効性を示す。

超高出力油圧システムとしては、油空圧機器メーカ等との協力の下、小型・軽量・高出力で、力・変位センサ・制御バルブ・ローカルコントローラ・通信機能と一体化し、ロボット関節駆動用に設計されたアクチュエータの開発、小型・軽量・高出力で、オンデマンド吐出、駆動装置・アキュムレータ・制御装置と一体化された油圧ポンプ、油圧補機、および、それらの制御技術等を研究開発する。脚ロボット、建設ロボット等に搭載する。

極限機構としては、環境適合性・ロバスト性を持つ全方向移動機構、未知異形対象物に対して柔軟・ロバストに把持できるグリッパ機構、高所からの落下に対して衝撃を吸収できる機構、環境に適応して形態・機能を変えるモジュラーロボット機構、脚ロボット用多指ハンド、飛行ロボット用多指ハンド、索状ロボット用壁面吸着機構、飛行ロボット用柔軟翼、飛行ロボットの性能向上のためのダクトドロータ、索状ロボット用能動セグメントなどを研究開発する。

また、関連課題に関する研究計画を公募し、研究開発を行う。これらの詳細については、ユーザやメーカからの要望を考慮して設定することとする。これらすべてを模擬フィールド試験で実証する。

3) ロボットインテリジェンス(センシング・推定, リカバリ・自律分散制御・ヒューマンインタフェース, ビッグデータ解析, その他)
プロジェクトリーダー: 松野文俊(京大)

3-1) 研究開発の概要

極限音響処理, 極限画像処理, 極限触覚, 失敗時リカバリ, ヒューマンインタフェース, 自律分散, 他(公募)のソフトウェアを研究する。

3-2) 研究開発の目標

タフなロボットを実現するためのボトルネックとなっている種々のソフトウェアコンポーネントを研究開発する。要素技術としての試験をそれぞれに応じた環境(実験室環境~模擬環境フィールド~災害現場)で試験を行い, ロボットプラットフォームに搭載することにより, その有効性を示す。

極限音響処理としては, 瓦礫内・飛行ロボットなど極限環境での音源定位・分離・同定, 多数の飛行ロボットによる音源探索, 騒音環境下における音響診断, 3次元音響マップ作成, ブラインド音源分離, などを研究する。

極限画像処理としては, ディープラーニングによるシーン中のオブジェクト(アスファルト, コンクリート, 瓦礫など)の画素単位の高精度認識, センシングできない量(ヒトの感性に依存した量)の画像認識, 大量画像データによる都市環境の4次元モデリング, 敏捷移動体搭載カメラのVisual SLAM, 劣悪環境の視野明瞭化・3次元センシング, 見えない場所のセンシング, マルチモーダルイメージ処理, 不定形パターン認識, などを研究する。

触覚としては, 狭隘部の手探りによる状態推定とイメージング, オペレータへの触覚提示, などを研究する。

失敗時リカバリ・自律分散制御・ヒューマンインタフェースとしては, 多数群ロボットの協調・分担によるリカバリ動作・作業, 限定情報下での自律分散制御, 複数ロボットによる無線ネットワークリカバリ, 超広範囲映像情報認識を可能にするHI, 音と画像による環境理解情報提示, 自分が動かししている感覚を高めるHI, などを研究する。

ビッグデータ解析としては, センサストリームの構造化圧縮技術, 学習による予測機能, 画像・音声等の情報の融合・知識化と検索・判断支援, などについて研究する。

極限通信としては, 遅延時間保証型マルチホップ通信技術, 周波数冗長型ダイバシティ通信制御技術, 空間冗長型動的ルーティング制御技術, サイバーセキュリティ技術, などについて研究する。

極限センシングとしては, 脚ロボットハンド用遠隔操縦インタフェース, 建設ロボット遠隔操作用高臨場感インタフェース, 建設ロボットの状態提示技術, 救助犬の行動推定技術, GPSを用いた高精度測位技術, 皮膚型近接触センサの開発, 多重解像度データベースによる被災状況の把握技術の開発, 構造周辺の微少風の3次元計測などを研究開発する。

制御としては, スーパーバイザ型ナビゲーション・制御システムの開発, 操作ゲインの決定・適応技術に関する研究, などを研究する。

また, 関連課題に関する研究計画を公募し, 研究開発を行う。これらの詳細については, ユーザやメカからの要望を考慮して設定することとする。これらを5種類のボディヘシシステムインテグレーションし, 模擬フィールド試験で実証する。

4) フィールド試験評価・安全

プロジェクトリーダー: 高森年(国際レスキューシステム研究機構), 木村哲也(長岡技科大)

4-1) 研究開発の概要

フィールド性能評価試験, ヒューマンファクター評価, 実証試験, および, 安全性に関する研究を行う。

4-2) 研究開発の目標

研究開発成果を評価するための模擬環境フィールドと評価方法, 明確な評価軸を開発・設置し, 評価試験を行う。タフ・ロボットの安全性に関する研究を行う。模擬環境フィールドと評価方法につい

ては，COCNの調査結果やユーザ・メーカの要望に基づき，NISTの性能評価などを参考にして協力を得ながら，設計・設置する．各研究者がサイトに設置する小規模なローカルフィールド（H26～27年度に設置開始，各研究サイトの予算），拠点となる場所に設置する中規模な拠点フィールド（H27年度に設置，フィールド性能試験の予算），大規模な実験を行う大規模実証フィールド（H30年度より利用，ImPACT外の当該実証フィールドの予算）を設ける．これらを活用し，頻繁に評価会を開催する．実用化のためのヒューマンファクターの分析を行い，研究開発にフィードバックする．

安全性に関しては，作業効率を落とさずに安全性を確保できる安全技術・管理できるシステム安全手法を開発検証，システム安全知データベースの構築，などを行う．これらの詳細については，ユーザやメーカからの要望を考慮して設定する．

シミュレータに関しては，各種ロボット研究開発のための共通プラットフォームとして，極限環境でのロボット動作を含むシミュレーションが可能なロボットシミュレータを開発する．また，極限環境をシミュレーションする技術として，土砂の掘削のためのシミュレーションエンジンを開発する．

（５）研究開発プログラムの全体ロードマップ

下記の図1-12の通り．

プロジェクト	H26	H27	H28	H29	H30
(1)ロボットプラットフォーム	■	■	■	■	■
(2)ロボットコンポーネント	■	■	■	■	■
(3)ロボットインテリジェンス	■	■	■	■	■
(4)フィールド評価試験・安全	■	■	■	■	■

図1-12 ロードマップ

（６）研究開発プログラムのマイルストーン

（マイルストーン）

- (H26) 研究開始，各グループチーム決定，第１次公募，試験評価法検討，現場模擬フィールド設計，プラットフォームロボ設計，コンポーネント搭載目標明確化．
- (H27) 第２次公募．模擬フィールドでのコンポーネント評価試験，性能・耐久性・信頼性とそれらの問題点の定量的評価，事業化マッチング開始．
- (H28) 第１次知能ロボット技術搭載，模擬フィールドでの公開システム総合評価試験，模擬環境でのタフさの実現，ユーザマッチング開始，現場でのシステム総合評価試験，第１次事業化商品試作販売（コンポーネント・既存製品への組み込み）．プロジェクトの見直し．
- (H29) 第２次知能ロボット技術搭載，現場フィールドでの公開システム総合評価試験，建設ロボットの極限性能試験，現場フィールドでのタフさの実現，第２次事業化商品試作販売（コンポーネント・システム），ベンチャー起業，ユーザへの試験配備．
- (H30) 第３次知能ロボット技術搭載，第３次商品試作販売（システム），建設ロボットの極限性能試験，タフなロボティクスの技術的実現，第３次商品試作販売（コンポーネント・システム・サービス），ユーザへの仮配備．
- （プロジェクト終了後）タフ・ロボティクスが様々な災害緊急対応・復旧・予防のためのシステムに組み込まれる．タフ・ロボティクスの研究開発と事業化とユーザ使用のサイクルが継続的に回り，技術循環が円滑に進む．産業や社会の問題解決と変革の一翼を担う．

（成功判断の基準）

- ・技術的な観点からは，各技術レベルを模擬フィールドにおける試験で確認し，災害極限環境において「タフ」に総合作業ができるレベルを確認し，それが非連続なイノベーションと言える段階に至っているか．
- ・社会波及効果の観点からは，本研究で開発するロボットシステムが十分に災害緊急対応・復旧・予防に革新的なソリューションをもたらしているか（これまで不可能だった現場を可能に

- する，効率が飛躍的に高まるなど）．
- ・産業波及効果の観点からは，ユーザ・事業者・技術開発者の間の技術循環が円滑に進み，それらの協業が非連続なイノベーションと言えるレベルにまで発展しているか（これまで顕在化していなかった事業を開始できる，これまで未知だった技術活用が起きるなど）．

（ 7 ） 研究開発プログラム実施期間

平成 2 6 年 1 1 月 1 日から平成 3 1 年 3 月 3 1 日まで（ 5 年間）

2．研究開発プロジェクト毎の実施状況及び成果

本プログラムでは、各ロボットプラットホームに各ロボットコンポーネント、各ロボットインテリジェンス、を搭載し、フィールド試験評価・安全プロジェクトで評価を行う構造となっている。それぞれの成果はロボットプラットホームに統合されたシステムとしての成果であり、不可分である。この理由により、この項目については、各プラットホーム毎に記述することとする。

プロジェクトの計画

(1) ロボットプラットホーム

(研究開発課題)

下記の通り。

研究開発課題	内容，研究開発プロジェクトにおける役割等	研究開発機関	主協力企業・団体
1．飛行ロボット	ロボットプラットホームの開発とプロジェクトへの提供．チューニングが不要でロバストな制御系，障害物や異常を検知してオートパイロットを行うコントローラ，GPS・SLAM・IMUの融合，作業アーム等の搭載，複数ロボットの自律分散ミッション，他．	野波健蔵 ((株) 自律制御システム研究所)	(株) 自律制御システム研究所
2．脚ロボット	ロボットプラットホームの開発とプロジェクトへの提供．プラントを想定した不整地・はしご・マンホールなどでの極限環境アクセシビリティ，転倒時の衝撃吸収機構と制御，脚が故障した場合のリカバリ，他	高西淳夫 (早稲田大学)	三菱重工業 (株)
3．建設ロボット	ロボットプラットホームの開発とプロジェクトへの提供．建機等の遠隔自律ロボットプラットホーム化，不整地・閉鎖空間・植生・泥沼・山岳環境でのセンシング・制御・ヒューマンインタフェース，限界性能試験	吉灘裕 (大阪大学)・(株) 小松製作所	
4．索状ロボット	ロボットプラットホームの開発とプロジェクトへの提供．水陸両用3次元管路内移動ロボット，細径配管内推進防爆ロボット，狭所不整地極限環境推進ロボット，浮上式建物内消火システム，閉鎖空間でのセンシング・情報統合・位置推定・感覚フィードバックインタフェース，限界性能試験	田所諭・昆陽雅司 (東北大学)，松野文俊 (京都大学)	(株) モリタHD，オリンパス (株)，三菱日立パワーシステムズ (株)
5．サイバー救助犬	ロボットプラットホームの開発とプロジェクトへの提供．救助犬の行動・状態モニタリング・推定，非侵襲的な手段による遠隔操作，ユーザ現場試験による実用化	大野和則 (東北大学)	(特非) 日本救助犬協会，古野電気

(計画)

下記の通り。

研究開発課題	平成 26年度 (6ヵ月)	平成 27年度	平成 28年度	平成 29年度	平成 30年度 (9ヵ月)
1. 飛行ロボット ・共通プラットフォーム・ベンチマークデータ提供 ・コントローラ ・GPS・SLAM・IMU融合 ・作業 ・複数自律分散ミッション					
2. 脚ロボット ・共通プラットフォーム・ベンチマークデータ提供 ・極限環境アクセシビリティ ・衝撃吸収機構・転倒制御 ・故障時リカバリ					
3. 建設ロボット ・共通プラットフォーム・ベンチマークデータ提供 ・単腕ショベル開発 ・双腕ショベル開発 ・極限環境でのセンシング・制御・HI ・限界性能試験					
4. 索状ロボット ・共通プラットフォーム・ベンチマークデータ提供 ・水陸両用3次元管路内移動 ・細径配管推進防爆 ・瓦礫内探索システム ・浮上型消火システム ・閉鎖空間センシング・情報統合・位置推定・感覚フィードバックIF ・ケーブルからまり解除 ・限界性能試験					
5. サイバー救助犬 ・共通プラットフォーム・ベンチマークデータ提供 ・救助犬の行動・状態モニタリング・推定 ・非侵襲遠隔操作 ・ユーザ現場試験					

(研究開発課題間の相互関係)

5 種類のプラットフォームの上に、(2) ~ (3) で開発する様々な技術を搭載，システムインテグレーションし，その有効性を (4) のフィールド試験で実証する．それぞれのボディは，それぞれに適した災害空間を主たる対象とするが，同じ模擬フィールドでの性能試験によりその特性を明らかにするとともに，競争と情報交換を促進する．

(2) ロボットコンポーネント

(研究開発課題)

下記の通り．

研究開発課題	内容，研究開発プロジェクトにおける役割等	研究開発機関	主協力企業・団体
1．超高出力油圧システム	ロボットハードウェアの開発，フィールド実証，プラットフォームロボットへの組み込み．油空圧機器メーカー等との協力の下，小型・軽量・高出力で，力・変位センサ・制御バルブ・ローカルコントローラ・通信機能と一体化し，ロボット関節	鈴森康一（東京工業大学），（株）ブリヂストン，KYB（株），JPN（株），神田岳文（岡山大学），玄相昊（立命館大学）	油研工業，日立建機，ホンダ，東芝，コマツ，IHI，東京ガス，共栄産業

	駆動用に設計されたアクチュエータの開発，小型・軽量・高出力で，オンデマンド吐出，駆動装置・アキュムレータ・制御装置と一体化された油圧ポンプ，油圧補機，および，それらの制御技術等．		
2．極限機構	ロボットハードウェアコンポーネントの研究開発とフィールド実証．環境適合性・ロバスト性を持つ全方向移動機構，未知異形対象物に対して柔軟・ロバストに把持できるグリッパ機構，高所からの落下に対して衝撃を吸収できる機構，環境に適応して形態・機能を買えるモジュラーロボット機構，脚ロボット用ロボットハンド，飛行ロボット用ロボットハンド，索状ロボット用壁面吸着機構，飛行ロボット用柔軟翼，飛行ロボットのダクトドロータ化，索状ロボット用能動セグメントなど．	多田隈建二郎（東北大学），中村一也（並木精密宝石株），大道武生（名城大学），高木健（広島大学），小澤隆太（明治大学），劉浩（千葉大学），砂田茂（名古屋大学），鄭心知（（公財）京都高度技術研究所）	

（計画）

下記の通り．

研究開発課題	平成 26年度 (6ヵ月)	平成 27年度	平成 28年度	平成 29年度	平成 30年度 (9ヵ月)
1. 超高出力油圧システム					
・機能検証モデル開発					
・実用モデル供給・統合(脚, ハンド)					
・油圧制御					
2. 極限機構					
・全方向移動機構					
・グリッパ機構					
・落下衝撃吸収機構					
・モジュラーロボット機構					
・脚ロボット用パワーロボットハンド					
・飛行ロボット用ロボットハンド					
・壁面吸着機構					
・脚ロボット用劣駆動ロボットハンド					
・柔軟翼，静音					
・デルタドロータ化ロバスト飛行					
・能動セグメント					

（研究開発課題間の相互関係）

（１）で開発する５種類のプラットフォームの上に搭載し，システムインテグレーションする．同種のハードウェア研究開発を含めて公募で採択し，（４）のフィールド評価会で協調的競争を行うことによって，研究開発成果を最大化する．

（３） ロボットインテリジェンス

（研究開発課題）

下記の通り．

研究開発課題	内容，研究開発プロジェクトにおける役割等	研究開発機関
1．極限音響処理	ロボットソフトウェアの開発，フィールド実証，プラットホームロボットへの組み込み．瓦礫内・飛行ロボットなど極限環境での音源定位・分離・同定，多数の飛行ロボットによる音源探索，騒音環境下における音響診断，3次元音響マップ作成，ブラインド音源分離など．	奥乃博（早稲田大学），佐々木洋子（産業技術総合研究所），猿渡洋（東京大学）
2．極限画像処理	ロボットソフトウェアの開発，フィールド実証，プラットホームロボットへの組み込み．ディープラーニングによるシーン中のオブジェクト（アスファルト，コンクリート，瓦礫など）の画素単位の高精度認識，センシングできない量（ヒトの感性に依存した量）の画像認識，大量画像データによる都市環境の4次元モデリング，敏捷移動体搭載カメラのVisual SLAM，劣悪環境の視野明瞭化・3次元センシング，見えない場所のセンシング，マルチモーダルイメージ処理，不定形パターン認識など	山下淳（東京大学），岡谷貴之（東北大学），山崎公俊（信州大学），田中正行（産業技術総合研究所），久保田直行（首都大学東京）
3．極限触覚処理	ロボットソフトウェアの開発，フィールド実証，プラットホームロボットへの組み込み．狭隘部の手探りによる状態推定とイメージング，オペレータへの触覚提示，など．	昆陽雅司（東北大学）
4．失敗時リカバリ・自律分散・ヒューマンインタフェース	ロボットソフトウェアの開発，フィールド実証，プラットホームロボットへの組み込み．多数群ロボットの協調・分担によるリカバリ動作・作業，限定情報下での自律分散制御，複数ロボットによる無線ネットワークリカバリ，超広範囲映像情報認識を可能にするHI，音と画像による環境理解情報提示，自分が動かしている感覚を高めるHI，など	松野文俊（京都大学），浅間一（東京大学）
5．ビッグデータ処理	ロボットソフトウェアの開発，フィールド実証，プラットホームロボットへの組み込み．ビッグデータ解析としては，センサストリームの構造化圧縮技術，学習による予測機能，画像・音声等の情報の融合・知識化と検索・判断支援，など．	徳山豪（東北大学）
6．極限通信	遅延時間保証型マルチホップ通信技術，周波数冗長型ダイバシティ通信制御技術，空間冗長型動的ルーティング制御技術，サイバーセキュリティ技術，など	三浦龍（情報通信研究機構）
7．極限センシング	脚ロボットハンド用遠隔操縦インタフェース，建設ロボット遠隔操作用高臨場感インタフェース，建設ロボットの状態提示技術，救助犬の行動推定技術，GPSを用いた高精度測位技術，皮膚型近接触センサの開発，多重解像度データベースによる被災状況の把握技術の開発，構造周辺の微小風の分布計測，など	並木明夫（千葉大学），横小路泰義（神戸大学），永谷圭司（東北大学），菊水健史（麻布大学），鈴木太郎（早稲田大学），鈴木陽介（金沢大学），三浦憲二郎（静岡大学），古本淳一（京都大学）
8．制御	スーパーバイザ型ナビゲーション・制御システムの開発，操作ゲインの決定・適応技術に関する研究，など	鈴木智（信州大学），岩田浩康（早稲田大学）

（計画）

下記の通り．

研究開発課題	平成 26年度 (6ヵ月)	平成 27年度	平成 28年度	平成 29年度	平成 30年度 (9ヵ月)
1. 極限音響処理					
・極限環境音源定位・分離・同定					
・多数の飛行ロボットによる音源探索					
・騒音環境下における音響診断					
・3次元音響マップ作成					
・ブラインド音源分離					
2. 極限画像処理					
・オブジェクト画素単位高精度認識					
・機械ではセンシング困難な量の画像認識					
・敏捷移動体Visual SLAM					
・劣悪環境3次元視野明瞭化					
・見えない場所のセンシング					
・マルチモーダルイメージ処理					
・不定形パターン認識					
・ロボット周囲環境モデリング					
3. 極限触覚処理					
・手探り位置推定・イメージング					
・オペレータへの触覚提示Ht					
4. 失敗時リカバリ・自律分散・Ht					
・群ロボット協調リカバリ動作					
・限定環境下での自律分散制御					
・群ロボットによる無線ネットリカバリ					
・超広範囲映像情報提示Ht					
・音と画像による環境理解情報提示					
・自分が動かしている感覚を高めるHt					
5. ビッグデータ					
・センサストリーム構造化圧縮					
・学習予測					
・画像・音声情報融合・知識化と検索・判断支援					
6. 極限通信					
・マルチホップ通信技術					
・ダイバシティ通信制御技術					
・飛行ロボット位置共有・衝突回避					
・サイバーセキュリティ技術					
7. 極限センシング					
・ロボットハンドインタフェース					
・建設ロボット高臨場感インタフェース					
・建設ロボット状態提示技術					
・救助犬の行動・情動推定技術					
・高精度測位技術					
・皮膚型センサ					
・多重解像度データベース					
・微小風の分布計測					
8. 制御					
・スーパーバイザ型ナビゲーション					
・操作ゲイン制御					
・救助犬誘導					

(研究開発課題間の相互関係)

(1) で開発する 5 種類のプラットフォームの上に搭載し , システムインテグレーションする . 同種のハードウェア研究開発を含めて公募で採択し , (4) のフィールド評価会で協調的競争を行うことによって , 研究開発成果を最大化する .

(4) フィールド試験評価・安全

(研究開発課題)

下記の通り。

研究開発課題	内容，研究開発プロジェクトにおける役割等	研究開発機関
1. フィールド性能試験評価，実証試験	研究開発成果を評価するための模擬環境フィールドと評価方法，明確な評価軸を開発・設置し，評価試験を行う．COCNの調査結果やユーザ・メーカの要望に基づき，NISTの性能評価などを参考にしながら，設計・設置する．各研究者がサイトに設置する小規模なローカルフィールド（1年目に設置），拠点となる場所に設置する中規模な拠点フィールド（2年目に設置），大規模な実験を行う大規模実証フィールド（3年目に公募で設置）を設ける．これらを活用し，頻繁に評価会を開催する．サイバー救助犬，建設ロボット等の実用化のためのヒューマンファクター評価，改良案の提示を行う．	高森年（国際レスキューシステム研究機構），Robin Murphy（Texas A&M大学）
2. 安全性	タフ・ロボットの安全性に関する研究を行う．作業効率を落とさずに安全性を確保できる安全技術・管理できるシステム安全手法を開発検証，システム安全知データベースの構築，など．開発ロボットに対する安全性・信頼性確保に関する指導．	木村哲也（長岡技術科学大学）
3. ロボットシミュレータ	極限環境シミュレーションプラットフォームとしてのロボットシミュレータの開発，建設ロボット用掘削シミュレータの開発，など	金広文男（産業技術総合研究所），石上玄也（慶応義塾大学）

(計画)

下記の通り。

研究開発課題	平成 26年度 (6ヵ月)	平成 27年度	平成 28年度	平成 29年度	平成 30年度 (9ヵ月)
1. フィールド性能試験評価・実証試験					
・ローカルフィールド設置					
・拠点フィールド設置・運用					
・クローズド拠点フィールド評価会開催		各1回以上	各1回以上	各1回以上	各1回以上
・大規模実証フィールド借用・利用					
・公開フィールド評価会開催			6月 11月	6月 11月	6月 11月
・ヒューマンファクター評価					
2. 安全性					
・システム安全手法の開発検証					
・システム安全知データベース構築					
・安全性・信頼性確保の指導					
3. ロボットシミュレータ					
・極限環境シミュレーションプラットフォーム開発					
・掘削シミュレータの開発					

(研究開発課題間の相互関係)

本プロジェクトの(1)～(3)の研究開発成果をフィールド評価する。(1)～(3)で開発する技術に関して，安全性・信頼性を高めるための指導を行う。

(5) 戦略的研究推進加速資金

以上，(1)～(4)の課題について，戦略的に研究推進加速資金を用意し，進捗状況や必要性に応じてPMの判断で増額する．この方法によって，そもそもあらかじめ正確に見積もることはできず，研究の進展に伴って予想だにしない新しい必要性が生じるという性質を持った基盤研究予算を，適切かつ効率的に使用することができる。

建設ロボットの限界性能調査のために増額を申請し，それによって災害現場で必要な極限環境での性能をロボットが壊れることを恐れずに実施し，実用的な性能を実現する．

(計画)

下記の通り．

研究開発課題	平成 26年度 (6ヵ月)	平成 27年度	平成 28年度	平成 29年度	平成 30年度 (9ヵ月)
1. 戦略的研究開発加速資金 ・戦略的な増額					
2. 増額申請 ・建設ロボットの限界性能試験					

(研究開発課題間の相互関係)

進捗状況と必要性に応じて，(1)～(4)を増額する．

プロジェクトの体制

(1) ロボットプラットホーム

(a) 研究開発機関選定に際して重要視するポイント等

5種類のロボットプラットホームに関する世界的な実績を持ち，アクセシビリティ，環境ロバスト性等に関する最先端の研究成果が出せる見込みがあり，かつ，企業等との協力の下，プロジェクト全体に対してプラットホームを提供でき，かつ，拠点実験フィールドを確保できる可能性が高いこと

(b) 選定に至る考え方・理由

この能力を持つ研究者は国内には限られているため，誰しもが認めるトップランナーを非公募指名して願います．

(c) 選定結果

非公募指名研究者：飛行ロボット：野波健蔵（自律制御システム研究所），脚ロボット：高西淳夫（早稲田大），建設ロボット：吉瀬裕（大阪大学），索状ロボット：田所諭・昆陽雅司（東北大），松野文俊（京都大），サイバー救助犬：大野和則（東北大）

(2) ロボットコンポーネント

(a) 研究開発機関選定に際して重要視するポイント等

タフ・ロボットを構成するためのボトルネックとなっている種々の機械的ハードウェアに関する高い実績を持ち，最先端の研究成果を出せる見込みがあり，プラットホームへの組み込み，フィールド試験評価などによって非連続イノベーションを示すことができる可能性が高いこと．

超高出力油圧システムに関しては，それに加えて，油空圧機器メーカー各社との協力の下，実用的なシステムのためのコンポーネントを事業化まで結びつけることができる可能性が高いこと．

(b) 選定に至る考え方・理由

超高出力油圧システムは研究者と業界の協力が得られる必要があり，人材が限られていることから，非公募指名して願います．先端機構について，誰しもが認める若手のトップランナーを非公募指名し，公募研究者をリードしてもらう．また，公募を行って，広く叡智を結集する．

(c) 選定結果

非公募指名研究者：油圧：鈴森康一（東工大），櫻井良（ブリヂストン），伊藤和巳（KYB），日沖清弘（JPN），神田岳文（岡山大），機構：多田隈建二郎（東北大）

第1次公募採択研究者：油圧：玄相昊（立命館大），機構：中村一也（並木精密宝石），大道武生（名城大），高木健（広島大）

第2次公募採択研究者：機構：小澤隆太（明治大），劉浩（千葉大），砂田茂（名古屋大），鄭心知（ASTEM）

(3) ロボットインテリジェンス

(a) 研究開発機関選定に際して重要視するポイント等

タフ・ロボットを構成するための種々のソフトウェアコンポーネント，センシング技術に関する高い実績を持ち，最先端の研究成果を出せる見込みがあり，プラットフォームへの組み込み，フィールド試験評価などによって非連続イノベーションを示すことができる可能性が高いこと．

(b) 選定に至る考え方・理由

極限音響・画像・触感センシング，リカバリ・自律分散，ビッグデータはいずれも重要テーマであり，誰しもが認める国内のトップランナーを非公募指名し，公募研究者をリードしてもらう．また，公募を行って，広く叡智を結集する．

(c) 選定結果

非公募指名研究者：音響：奥乃博（早稲田大），画像：山下淳（東大），岡谷貴之（東北大），リカバリ・自律分散：松野文俊（京大），浅間一（東大），ビッグデータ：徳山豪（東北大），微小風の分布計測：古本淳一（京大）

第1次公募採択研究者：画像：田中正行（産総研），山崎公俊（信州大），制御：鈴木智（信州大），三浦龍（NICT）

第2次公募採択研究者：佐々木洋子（産総研），猿渡洋（東大），並木明夫（千葉大），横小路泰義（神戸大），永谷圭司（東北大），菊水健史（麻布大），鈴木太郎（早稲田大），鈴木陽介（金沢大），久保田直行（首都大），三浦憲二郎（静岡大），岩田浩康（早稲田大）

(4) フィールド試験評価・安全

(a) 研究開発機関選定に際して重要視するポイント等

研究開発成果を評価するための模擬環境フィールド・評価法・評価試験，および，タフ・ロボットの安全性に関する高い実績を持ち，フィールド評価試験を運営して事業的・社会的非連続イノベーションにつなげられる可能性が高いこと．

(b) 選定に至る考え方・理由

災害ロボットのフィールド試験評価の実績と能力を持つ機関は国内に1つしかないため，非公募指名して願います．災害ロボットのヒューマンファクター評価は世界的に有名なRobin Murphyを非公募指名して願います．フィールドロボットの安全性の研究者は国内には限られているため，誰しもが認めるトップランナーを非公募指名して願います．シミュレータについては公募する．

(c) 選定結果

非公募指名機関・研究者：フィールド試験評価：高森年（国際レスキューシステム研究機構），安全：木村哲也（長岡技科大），ヒューマンファクター：Robin Murphy（Texas A&M 大）

第1次公募採択研究者：金広文男（産業技術総合研究所）

第2次公募採択研究者：石上玄也（慶応義塾大学）

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

(成果のサマリー)

プロジェクトの達成目標，進捗状況の概要は表 2-0-1 の通りである．これらの成果は，年に 2 回開催してきたフィールド評価会にて，公開実演により，来場者に対して披露を行い，研究開発や社会実装に対するフィードバックを得るとともに，これを使用するユーザや，活用する産業界に対してのプロモーションの機会とした．

表 2-0-1 達成目標と進捗

ロボ	出口戦略	プログラム終了時の達成目標	達成	TRI 達成/目標
サイバー救助犬	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% 救助犬組織へ貸出	5-9 / 9
索状ロボット	瓦礫，プラント配管等の狭隘部・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% プラットフォームを福島第一原発に適用	6-9 / 8
脚口ロボット	被災プラント等の危険箇所での調査・点検ができる脚口ロボット技術の実用化	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	悪環境下でのロボラスト飛行（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% 九州北部豪雨災害適用	6-9 / 9
建設ロボット	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

各プラットホームにおける，主な成果を表 2-0-2，表 2-0-3 に挙げる．

ただし，ここに示した「世界初」は，タフ・ロボティクス・チャレンジに参加した研究者の持つ知識の限りにおいて世界初の実績であることを意味しており，同様に，「世界一」は，実現された時点において研究者の持つ知識の限りにおいて世界一の実績であることを意味している．世界初や世界一であることを示すためには，世界中のすべての研究開発との比較が必要であるが，それは原理的に不可能なので，上記の定義としている．なお，これまで講演会などで世界初，世界一との説明を行ってきたが，それを否定する事実は今のところ発見されていない．

研究成果の産業への波及効果は表 2-0-4，2-0-5，2-0-6 の通りで，研究協力企業以外で，30 社以上に成果波及．表の中で「**」は，企業名を伏せたものである．また，ロボットオリンピック（トンネル災害対応，プラント災害）で活用予定．脚口ロボット，建設ロボットがトンネル災害対応競技のシミュレーションプラットホームに採用された．

研究成果の災害への適用効果は表 2-0-7 の通りであり，社会実装に向けて一步一步進んでいると考えている．

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）

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		・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） ・非侵襲的に犬に作業を指示する方法（世界初） ・軽量で疲れないスーツ（世界一） ・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）	・心拍・加速度から、犬のやる気を精度高く推定（世界一） ・犬の運動と、何をしているかを推定（世界一） ・遠隔映像伝送、機械学習での遺留品発見 ・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
	細径	・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） ・ボディを浮上させて移動能力と搜索能力を向上（世界初） ・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） ・騒音を除去し瓦礫内の音声聞き取り（世界初）	・音響で索状ロボの姿勢推定（世界初） ・瓦礫内で触覚により操作支援（世界初） ・狭隘、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） ・空気圧による高速配管内移動 ・機械学習による瓦礫内物体の識別・発見 ・福島原発でプロトタイプ使用
索状ロボ	太径	・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） ・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） ・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）	・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） ・配管内での位置推定とマッピング ・ボディ接触分布を計測する接触・近接覚センサ ・超多自由度を遠隔操作する自律機能 ・プラントや建築物での試験

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）

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	・プラント内を移動し、遠隔自律で点検ができるロボット ・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） ・脚ロボットによる高トルク(100Nm)のバルブ開閉（世界有数） ・4足、2足、はらばい、車輪移動、垂直はしご昇降（世界有数）	・過去画像による遠隔操作のための仮想俯瞰映像支援 ・自己位置推定と周囲環境の3次元地図作成 ・周囲の音源定位情報マップ ・VRと仮想高速による遠隔操作支援 ・フィールド評価試験により、プラント災害対応機能確認
飛行ロボ	・悪環境での飛行と情報収集（世界有数） ・搭載マルチマイクロフォンによる地上音声聞き取り、位置推定（世界初） ・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） ・プロペラ2枚停止でも飛行継続（世界有数） ・荷重2kg変化で高度変化50mm（世界有数）	・アームによる物体把持、運搬 ・飛行ロボの位置共有システム ・高精度3次元地図作成 ・多重解像度データベース ・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
建設ロボ	・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） ・双腕作業に必要な高出力・高精度制御を実現（世界有数） ・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） ・低滑動摩擦油圧シリンダ（世界有数）	・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 ・煙霧を透過する視覚 ・没入型遠隔操作コクピット ・腕で支えながら遠隔操作による移動 ・片腕で支えながらもう片腕で遠隔作業

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）
（**は企業名を伏せたもの）

ロボ	研究者	所属	活用企業	活用・波及内容（+ COCN災害ロボットPJ参加企業）
犬	大野	東北大	古野電気 ドーン	サイバー救助犬スーツの製造を委託 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* 清水建設* 三徳商事 ** ** **	Dragon Firefighterの本格開発を検討（共同研究） 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 触覚インタフェースの利用を検討（共同研究） 福島第一原発廃炉に使用検討（共同研究） 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） ビルメンテナンス検査への活用検討（試験検討）
索状	亀川・ 田中	岡山大・ 電通大	住友重機械 ** 多数 ** WRS	索状ロボのボイラー点検活用を検討（共同研究） 索状ロボの発電設備点検活用を検討（現場試験） 配管・ダクト内，天井裏，床下の点検作業を検討（現場試験） 製品化の相談 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* ** 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） 産業用としての活用を検討（現場試験） 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
脚	高西	早大	JAXA* ** **	真空対応アクチュエータユニットの開発（JAXA予算） 脚ロボのビルドインモータ技術での協力を相談 脚の使用の検討
脚	中村	並木精密	** **	福島第一原発内作業へのハンドの適用を検討（発注） 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）（**は企業名を伏せたもの）

ロボ	研究者	所属	活用企業	活用・波及内容（+ COCN災害ロボットPJ参加企業）
飛行	野波	ACSL	ACSL	開発技術を搭載，他社との明確な差別化
飛行	高木	広島大	モーチュ，啓文社 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	** 電源開発 スカパー 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） 山中電力設備点検への実験評価（実証試験） ドローン位置情報共有技術の小型化（共同研究） 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* 鉄道* ** **	土木建設工事への適用の検討 架線工事への適用の検討 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 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 ** **	建設機械の遠隔操作にドローンの適用を評価（共同研究） 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 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	** NEC	可視・遠赤外線同軸カメラの防塵対策を活用 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）（**は企業名を伏せたもの）

口承	研究者	所属	活用企業	活用・波及内容（* COCN災害ロボットPJ参加企業）
油圧	鈴森	東工大	H-Muscle ** **	高出力低摩擦油圧コンポーネントのベンチャーH-Muscle設立 産業用油圧ロボの開発への応用（受注） 重量物運搬用歩行ロボットへの適用の検討
油圧	桜井	ブリジストン	** **	油圧人工筋の使用に関する問い合わせ 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 臺	早大・ ホンダ	オープンソース ** ** **	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， 問い合わせ多数 タブレット端末の音声認識フロントエンドに適用 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 レータ	金広	産総研	オープンソース JAEA 福島県 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 植葉遠隔技術開発センターへの導入 福島ロボットテストフィールドへの導入 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 ルド評 価	木村・ Sheh	長岡技 科大・ Curtin	WRS 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 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 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

ロボット	災害出動・調査・訓練等の事例
飛行ロボット ・PF-1, ACSL ・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（2 cm/pixel）を収集，消防庁，防災科学技術研究所，他に提供。 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。 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。 2016年台風10号被災地 地形と地盤構造の調査を実施。 2008年岩手宮城内陸地震被災地 断面の地形計測を実施。
細索状ロボット ・能動スコープカメラ， 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。 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 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 ・太索状ロボ，京大， 岡山大，電通大 ・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 ・サイバー救助犬スーツ， 東北大	スタンバイ（多数） 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。 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。 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。

（成果の詳細）

（１）サイバー救助犬

１）サマリー

サイバー救助犬の分科会は、災害救助犬の被災者探査を支援・高度化することを目的に、15kg以上の中型・大型の救助犬が装着できるサイバー救助犬スーツや、素早く動くイヌに搭載できるタフなセンシング技術を開発した。5年間の研究開発で得られた主な成果は、中型・大型の救助犬が2時間以上の長時間に渡って装着可能な実用的なサイバー救助犬スーツとユーザーインターフェースを開発したこと、日本救助犬協会の認定救助犬や実働認定救助犬の探査活動を記録・可視化したことである。離れた場所にいるハンドラーや指揮本部の人間が、インターフェースを介してリアルタイムに救助犬が探査した場所、周囲の映像・音声、過去の犬カメラ映像に映る遺留品の検索結果、イヌの心拍数と情動の変化、イヌの吠える・匂いを嗅ぐ・走るといった行動を把握することが出来ることを実証評価した。また、収集したデータを解析することで救助犬の探査能力を評価することが可能になった。また、消防、国際レスキュー隊、警察、山岳救助隊、国の機関にもデモや研究の紹介を行い、救助犬以外の使役犬への適応先があることを明らかにした。2018年6月にサイバー救助犬スーツとタブレット2式を日本救助犬協会に無償で貸出、災害が起こった際に利用する体制を整えた。

２）技術的成果

２-１）サイバー救助犬スーツとユーザーインターフェースの開発

２-１-１）概要

救助犬は、優れた運動能力で瓦礫の上を動き回り、優れた嗅覚で瓦礫に埋もれた見えない被災者の匂いをかぎ分けて、生体反応を検知した場所を吠えたり、その場に留まったりすることでハンドラーや周囲の人にその位置を知らせる。生体反応のあった付近を、救助隊員が捜索することで、被災者を発見し、救出する。

災害救助犬を利用した探査の課題は、救助に入る消防隊員に十分な情報を提供出来ないことである。消防隊員の救助活動には、被災者の位置に加えて、被災者の健康や傷の状態、被災者の人数、周囲の状況などが必要になる。消防隊員はこれらの情報をもとにトリアージ（救助に利用する機材や、救助の優先順位を決めること）を行ってから救出を行う。救助犬は探査の過程でこれらの情報を見ているものの、言葉でこれらの情報をハンドラーや消防隊員に伝えることができない。また、救助犬はハンドラーから離れた場所を探査することもある。その際、救助犬が生体反応を発見した場合、何に反応したのか、何処で反応したのかを離れた場所にいるハンドラーが正確に把握することが難しく、ハンドラーから消防隊員への情報伝達が円滑に行えないこともある。

本研究では、ロボットの記録・可視化する技術を利用して、イヌの行動を計測・記録するイヌ用スーツの開発と、収集した情報を確認するインターフェースの開発を行う。図2-1-1にサイバー救助犬のシステム構成を示す。サイバー救助犬システムは、イヌに装着したセンサで探査を計測・記録する。スーツに搭載したセンサデータをリアルタイムにクラウドサーバを介して離れた場所にいるハンドラーや指揮本部に届ける。クラウドサーバを利用することで、同時に複数の場所で探査状況を確認することができるようになる。また、飛行ロボットなどの他の災害対応ロボットが収集した情報もクラウドサーバを介して共有し、現場の災害状況を適切に把握する。一例として、飛行ロボットが撮影した災害現場の航空写真を共有することで、災害後の現場で行われている救助犬の探索を適切に把握することが可能になる。

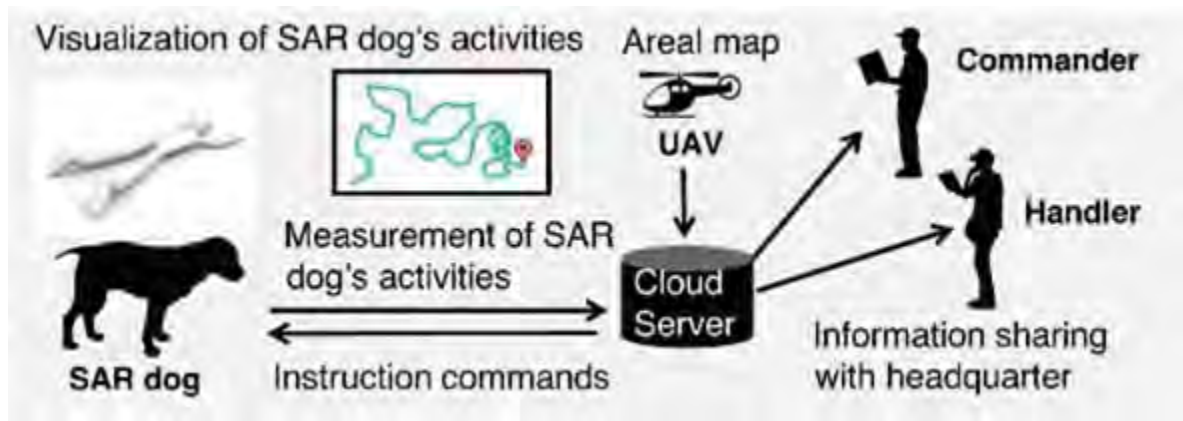


図2-1-1 サイバー救助犬システムの構成

2 -1 -2) サイバー救助犬スーツの開発

開発したサイバー救助犬スーツの一部を図2-1-2に示す．体重の10%未満の重さであれば，イヌが長時間にわたってイヌ用スーツを装着することができる．日本の救助犬の多くは，体重15kg以上の中型犬，大型犬であり，1.5kg未満のイヌ用スーツを開発することで，中型・大型の救助犬が長時間にわたってスーツを装着することが可能になる．また，救助犬は1回の探査の間で，10分程度の探査を3～4回，休憩を取りながら行う．スーツの準備や待機時間を考えて，2時間以上の間装着ができるスーツが必要である．4号機が15kg以上の中型・大型犬に2時間以上の長時間装着することが可能になった初めてのイヌ用スーツで，重さが約1.3kgであった．スーツの重量以外では下記の工夫をすることでイヌが長時間装着可能なスーツを開発した．

- ・ スーツの左右のバランスを均等にすること，スーツの内部形状を工夫することで，運動中のイヌ用のスーツの傾きを抑制する工夫
- ・ イヌが立っている時は体にフィットし，イヌが休んでいる時はお腹周りを圧迫しないイヌ用スーツの固定方法を工夫
- ・ イヌの体の変形になじみ，スーツやカメラが周囲の物にぶつかっても壊れないように，柔らかくて頑丈な素材を利用してスーツを製作する工夫
- ・ 雨に濡れてスーツが重くなると救助犬の探査に影響を与える．そこで，雨に濡れても重くならないようにスーツの素材を工夫

その後，4号機をベースに機能を改善したイヌ用スーツの開発を行った．低遅延カメラ映像伝送システムと，高精度位置計測が可能なGNSS受信器を搭載した5号機を開発した．5号機では，4G回線を利用することで，複数の地点に0.8s未満の低遅延で映像と音声配信することが可能になった．オフラインで解析することで，イヌの位置を高精度に計測することができるようになった．次に，心電計測機能を搭載した6号機を開発した．心電計測機能を搭載することで，イヌの情動を推定することが可能になった．また，エンドユーザーに貸し出せる実用的なサイバー救助犬スーツとして，7号機を古野電気株式会社やドーン株式会社と共同で開発を行った．5号機～7号機のイヌ用スーツは重さが約1.5kgであり，中型・大型犬が装着可能なスーツができあがった．4～7号機以外にも，視覚SLAM（Visual SLAM）と，行動誘導（Remote Instruction）用のスーツも開発した．各サイバー救助犬スーツが搭載している機能を表2-1-1に示す．また，表の下段にスーツの評価を行ったフィールドを記載した．このように，4～7号機はImPACTの評価フィールドや日本救助犬協会の訓練施設を利用して繰り返し評価と改善をおこなった．



図2-1-2 ImPACT TRCの研究期間に開発した各種サイバー救助犬スーツ

表2-1-1. 各サイバー救助犬スーツの機能と評価実験を行ったフィールド

CRC suit	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	Visual SLAM	Remote instruction
Technology						
1. Lightweight CRC suit	○	○	○	○	○	○
2. Retroactive object search	○	○	○	○	-	-
3. Emotion estimation	-	-	○	-	-	-
4. Behavior estimation	-	-	○	○	-	-
5. Trajectory in non-GNSS	○	○	○	○	○	-
	IMU	IMU	IMU	IMU	Camera	-
	Offline	Offline	Offline	Offline	Online,Offline	-
6. Remote instruction	-	-	-	-	-	○
Subject						
House dogs	○	○	○	○	○	○
JRDA SAR dogs	○	○	○	○	○	-
Mountain rescue dogs	○	-	-	-	-	-
Fields for evaluation						
ImPACT test fields	○	○	○	○	○	-
JRDA training fields	○	○	○	○	○	-

7号機を利用して開発したイヌ用スーツの機能を説明する．図2-1-3に7号機のイヌ用スーツの外観とセンサの取付位置とシステム構成を示す．イヌ用スーツには，Global Navigation Satellite System (GNSS) 受信器，慣性センサ（IMU），ビデオカメラとマイク，ボードPC，無線ルータを搭載している．GNSS受信器は，衛星からの電波を利用して位置や速度を計測する．イヌの背中に搭載した慣性センサでイヌの動きの計測と認識を行う．また，慣性航法を利用した位置推定はこの慣性センサを利用する．カメラはイヌの左側の前足の付け根の上に装着した．救助犬は右側にハンドラがたってイヌに指示を与えるため，ハンドラのジャマにならない左側に装着した．無線ルータは3G/4Gの携帯電話網や無線LANに接続することができる．

カメラサーバはSoftBank Co.が開発したソフトを利用した。カメラ映像は、ボードPC上のハードウェアエンコーダで圧縮され、WebRTCを利用して動画としてクラウドサーバに登録される。WebRTCを利用することで、携帯電話網の帯域に応じて映像の圧縮やフレームレートが自動で調整される。ハンドラーは、個人の携帯電話、タブレット端末、ノートPCを通じて、救助犬の探査を確認することができる。OSに依存しないようにブラウザを利用してインタフェースを構築した。ネットワークが繋がる所であれば、国内に限らず、海外からも確認することができる。

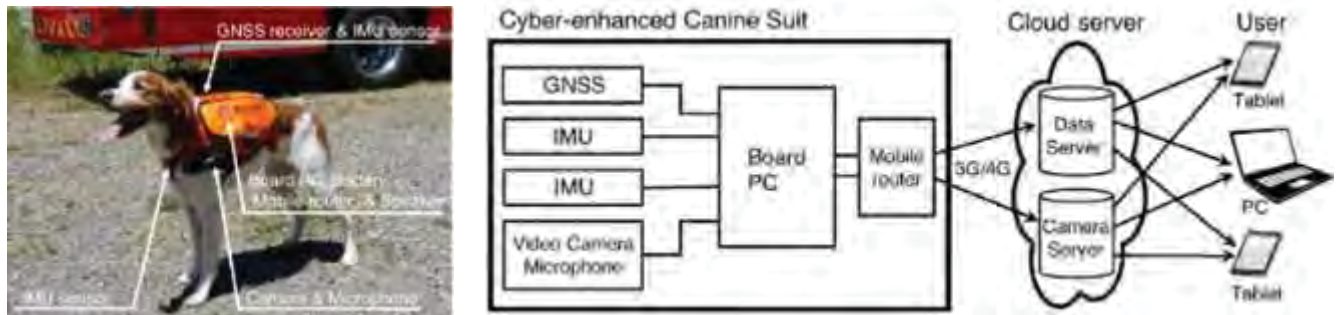


図2-1-3 実用的なサイバー救助犬スーツ（7号機）の外観（左）とシステム構成（右）

2 -1 -3) インタフェースの開発

ユーザが使いやすいインタフェースをTexas A&MのRobin Murphy先生とドーン株式会社と東北大学で共同開発した。図2-1-4に開発したユーザーインタフェースの画面を示す。このユーザーインタフェースの特徴は下記の通りである。

- 同時に3頭の救助犬の探査を確認することができる。映像を確認するウィンドウが右側に、イヌの位置を確認する地図のウィンドウが左側に配置。イヌごとに異なる色（青、緑、赤）を使って、地図上の探査軌跡と、カメラ映像のタブやフレームを描画することで、映像と軌跡を直感的に対応付けられるように工夫。
- カメラ映像からの情報収集が重要なので、カメラウィンドウには1頭の救助犬のカメラ映像を大きく表示。カメラウィンドウ上のタブをタップするか、ウィンドウを左右にスワイプすることで、異なる救助犬のカメラ映像に切り換えることが可能。
- カメラウィンドウの下には、日付や時間に関する情報を表示し、探査時間の確認が行える様に工夫。
- 地図ウィンドウには、飛行ロボットが撮影した最新の航空写真を背景として貼り付けることができる。地図はジェスチャー等で拡大・縮小することができる。また、複数の探査領域を色分けして描画することができる。探査領域を描画することで、探査すべき箇所を見ながら、探査計画を立てることができる。
- 遺留品検索結果の表示、行動認識の結果の表示、犬カメラに写るものの撮影とメモ機能などのオプション機能は、画面左下のアイコンをクリックすることで選択することが出来るように工夫。通常は必要ない機能をアイコン化することで、画面全体を見やすくしつつ、手袋を付けた手でも操作しやすいように工夫。

このような工夫を行うことで、ユーザーが利用しやすいインタフェースを開発した。実証実験を通して、以前のインタフェースよりも見やすくなったとの評価をいただいた。



図2-1-4 ユーザーが理解しやすいインターフェースの開発

2 -1 -4) 実証評価

開発したサイバー救助犬スーツやユーザーインターフェースを，日本救助犬協会の認定救助犬に装着し，評価を行った．これまで，森林，模擬瓦礫，半倒壊建物，模擬土砂崩れの現場の被災者探査の記録と可視化に取り組んだ．図2-1-5に評価を行った環境の一例を示す．探査中にイヌが周囲の木々や建物の壁にぶつかることがあったが，スーツが壊れること無く，かつ，スーツが引っかかり探査を続けられないといったことも無く，救助犬の探査を記録，可視化することができた．図2-1-5の山岳部では携帯電話網が通じない所もあった．その場合は，内部に記録したデータをもとに後で探査を確認した．また，タブレット端末の無線が届く範囲では映像だけをリアルタイムに確認出来ることを確認した．

図2-1-6は，日本救助犬協会が埼玉県富士見市に所有する瓦礫で探査をした際の様子を示す．スーツを装着した状態でイヌは足場の悪い瓦礫を搜索することができた．瓦礫の下を周回し，匂いを取った後，瓦礫に上って被災者の位置まで移動し，被災者を発見した．記録された探査軌跡から，イヌの探査行動と，被災者を発見した場所，吠えた場所を確認することが出来た．



図2-1-5 探査した環境の一例



図2-1-6 日本救助犬協会の模擬瓦礫訓練で実用的なサイバー救助犬スーツとインターフェースを評価：
（左）瓦礫を搜索する認定救助犬，（右）被災者を発見した位置と搜索した軌跡とカメラ映像

ImPACT TRCの実証評価では、非公開・公開実験として災害救助犬の探査の記録と可視化を行った。図2-1-7に2018年6月に公開デモとして行った実証評の様子を示す。この実験では、実用的なサイバー救助犬スーツ（7号機）を日本救助犬協会の認定救助犬レイラに装着し、探査の可視化を行った。この実験では、Dog2としてカメラ映像と探査軌跡を表示した。GNSSで計測した軌跡を表示するとともに、軌跡を背中に搭載した慣性センサで認識した歩く、走る、吠えるの検出結果に応じて色分けして表示した。軌跡から探査した場所と、イヌの動きや吠えた位置が確認できるようになっている。図2-1-7はイヌが生体反応を感知して、吠えてその位置を知らせているシーンで、地図ウィンドウにはイヌが吠えた位置に赤いマーカが自動で置かれていることが確認出来た。地図を見ることで生体反応があった場所を、消防隊員や指揮本部で正確に把握することが出来た。

また、日本救助犬協会以外の使役犬でもイヌ用スーツが利用できることを確認した。図2-1-8の例では、イタリアの山岳救助犬にイヌ用スーツを貸し出した例である。他の使役犬でも探査中のイヌの状態のモニタリングが役に立つことを確認した。



図2-1-7 2018年6月のImPACT TRCの評価実験の探査の一例



図2-1-8 イタリアの山岳救助犬がイヌ用スーツ4号機を試着した例

2 -1 -5)まとめと今後の課題

サイバー救助犬スーツとインタフェースの開発では、15kg以上の中型・大型の認定救助犬が、2時間以上の長時間装着することができるサイバー救助犬スーツと、ユーザーが見やすいインタフェースを開発することができた。また、開発したスーツやインタフェースは、実証評価を通じて、改善点の洗い出し、改善を行った。実用的なサイバー救助犬スーツとインタフェースを表示するタブレット端末2式を、2018年6月以降、日本救助犬協会に無償で貸与するまでに至った。

一方で、現場適用に向けた課題も明らかになった。2018年9月に発生した北海道地震では、サイバー救助犬スーツを現地の被災者探索に利用することができなかった。この原因は、日本救助犬協会のメンバーがイヌを北海道に運ぶ際に、大規模停電により飛行機で北海道に移動した後の移動手段であるレンタカーを確保出来なかったこと、初期の出動依頼がないと仕事を休んで出動することが難しいことなど、救助犬を現地にどのように送り込むかという所に課題があり、実現しなかった。今後は、開発したサイバー救助犬スーツを日本救助犬協会以外の団体にも貸出を行い、現場で役立てる機会を増やして行きたい。

2 -2) 激しく動く犬の視線カメラに写る対象を認識

2 -2 -1) 概要

本研究の目的は、被災現場における活動を補助するための画像認識システムの構築である。遠隔移動体にカメラを搭載し、そこから得られる画像に対して認識処理をおこない、その結果を操作者等に提示する。検索対象をあらかじめ画像認識システムに与えておくと、該当するものがカメラ映像に映るたびにアラートを鳴らしたり、記録を取ったりすることができる。それにより、遠隔操作中に対象の見逃しを防止する目的や、録画映像から重要な映像を抽出する目的に利用できる。遠隔操作者が継続的には映像を閲覧できないような状況での利用も有効である。また、検索対象をあらかじめ指定しなくても、後程定義される検索対象を記録された映像から素早く見つけ出す機能で、検索状況の変化に柔軟に対応できる。

サイバー救助犬で想定するシナリオは以下の通りである。災害発生後、サイバー救助犬を用いて行方不明者の探索を開始。探索活動の間に、行方不明者についての情報が救助チームに届く。例えば行方不明者の家族や友人から行方不明者の服装や携行品について、特徴の説明や写真が届く。写真が類似するものが映った画像をベースに認識対象の登録し、そこまでの救助犬の探索活動で記録された映像に該当しそうなものを認識システムにより自動的に検出し、地図上にその位置を表示する。

近年、画像認識の技術が非常に速いペースで進歩しているが、災害対応への応用は未だ難しい。災害対応を難しくする理由として、以下の理由が挙げられる。

1. 災害対応ロボットに搭載したカメラから送られてくる映像は、画像認識の研究において普段想定される映像とは特性が異なる。例えば、特有の視点や狭い視野で撮影される。厳しい光条件の下で撮影される場合がある。救助犬の場合は特に動きが激しく、映像にブレが含まれる。また、サイバー救助犬は映像を限られた帯域の無線接続での配信するため、映像の圧縮によるダメージが激しいときもある。
2. 主流の画像認識手法では、事前の学習が不可欠である。すなわち、識別対象のカテゴリを決め、そのカテゴリに所属する対象が映っている画像を集め、それらから認識器を構築する必要がある。しかし、災害対応においては、未知のカテゴリに対しても短時間で識別できるようにすることが求められる。
3. 上述 2.と関連するが、活動中の状況の変化に合わせて識別対象のカテゴリを変更することも、従来手法では難しい。災害対応においては、探索活動の最中に検索対象の追加だけでなく、追加された対象に該当するものがそこまでの探索の中で撮影されていたかを迅速に判断する機能も望ましいが、こういったシナリオは主流の画像認識手法では考慮されない。

これらの難しさを解決する画像処理や認識方法を新たに開発する。

2 -2 -2) 災害対応のニーズを考慮した画像認識技術

以下、本研究で開発された技術について説明する．本研究の初期においては，従来の畳み込みニューラルネットワーク(Convolutional Neural Network, CNN)にいくつかの工夫を加えたアプローチで一定の成果を挙げたが，学習に必要な訓練データの量を減らしながらも，実用上十分の減少には至らなかった．そのためシステムの構成を大幅に変更し，認識の過程を二つのプロセスに分けた構成を提案した：1)画像から識別に有用な「特徴量」(画像領域の特性をコンパクトに表す数字列)を抽出する処理と2)特徴量をベースに画像に映り込んだ物体を識別する処理．



図2-1-9 画像認識システムとプラットフォームとのやり取りの大まかな構成

前者の処理には認識対象の情報は原則として不要であるため，対象を知らず事前に用意できる．汎用な特徴量抽出器を用意することにより，対象が分かっているからの準備時間と，対象の定義に必要なデータ量を最低限に減らすことを目指した構成である．処理(1)に畳み込み自己符号化器(Convolutional Auto-Encoder, CAE)というニューラルネットワークを採用した．処理(2)に関しては二つそれぞれ違う長所を持つアプローチを試した．以下はそれぞれの要素について説明する．

- 特徴量抽出器

画像認識にニューラルネットワークが広く利用されるようになるまでは，多くの特徴量抽出法が提案されてきた．しかし，当時の手法は画像のブレ・変形・圧縮ダメージ等に対するロバスト性が低いため，災害ロボティクスにおける画像認識には向かないと思われる．ここでは特徴量抽出の処理には畳み込み自己符号化器(Convolutional Auto-Encoder, CAE)を採用した．CAEはニューラルネットワークの一種であり，荒い映像に対してより高いロバスト性が期待できる．ニューラルネットワークでありながらも，現在画像認識に広く使用されているニューラルネットワーク(CNN)とは学習の仕方が大きく異なる．CNNは画像を入力とし，その画像に映りこんでいるもののカテゴリ所属を判断するように学習する．そのため，学習前に認識の対象になるカテゴリを定義する必要がある．尚，カテゴリ所属の情報が付与された大量の訓練データが必要になる．CAEは入力画像に対して，その画像をできるだけそのまま再現するように学習する．ネットワークの構造が砂時計状になるため，画像を再現するにはまず，画像を少量の情報へと圧縮する必要がある．つまり，CAEは画像の圧縮と展開を学習する．CAEの内部に生じる圧縮表現は，入力画像の特性をコンパクトに記述する特徴量として利用することができる．CAEの学習過程はカテゴリとは無関係であるため，事前にカテゴリを定義する必要がなく，学習にカテゴリ所属の情報が付与された訓練データも不要である．こういった学習は「教師なし学習」と呼ばれる．十分に多様な画像データを用いて学習したCAEは，汎用性の高い特徴量抽出器として利用できる．しかし，CAEを用いた特徴量抽出器を本研究で目指す画像認識へ応用するにはいくつかの工夫が必要となる．まずは画像の空間的構造を考慮する必要がある．既存のCAEで得られる特徴量は入力画像全体に対応するものであり，画像内における局所的な物体認識には向かない．ここでは，画像全体ではなく，その一つ一つの領域に対応する特徴量を，多数の領域に対して効率よく同時に抽出する手法を開発した．これに加えて，CAE内の圧縮過程の多段階から特徴量を抽出する工夫を取り入れた．認識対象の定義に利用される画像と，カメラ映像に出現する対象物体に関して，その類似性が対象の特性によって違う圧縮段階に出てくるため，圧縮過程の多段階から特徴量を利用することによってより高い認識性能が得られると思われる．

- 識別器

CAEを用いて抽出された特徴量をベースに，認識処理の次の段階で認識対象の識別を行う．以上述べたように，識別処理に大きく分けて二つのアプローチを提案した．以下このアプローチについて説

明する．

- 識別器#1

一つ目の識別器は小型のニューラルネットワーク(NN)である．構成としては単純な三層の全結合のNN(Multi-Layer Perceptron, MLP)を採用した．この識別NNは画像領域に対応した特徴量を入力とし，その画像領域に認識対象が映っている可能性と，(複数の対象がある場合)どの対象が映っているかを確率として出力する．特徴量とカテゴリを，NNを用いて関連付けることには，特徴量とカテゴリの間に複雑な非線形的な関係が存在しても対応できるというメリットがある．識別NNの学習には認識対象の情報が必要であるが，カメラ映像を識別に有利な特徴量という形で与えることにより，学習に必要なデータ量を一枚か数枚の静止画まで，学習時間を数十秒の時間とまで減らした．

学習に必要なデータ量を減らすための工夫の一つとして，対象が映っていない画像データ(負例)を利用した学習処理を導入した．少ない訓練データから，カテゴリの範囲(つまり，訓練データとどれ程類似すれば同じカテゴリと判断するべきか)が学びにくい．そこで識別器から一定の反応を起こす負例を訓練データに加えることで，カテゴリの範囲の学習を促進することができる．対象が映らない映像から，有効な負例を自動的に採取することができるため，負例の導入により少ない操作数で認識性能を向上させることが可能になった．

特徴量抽出器を用意する際は汎用性を目標にするが，認識対象が定義された後では，特徴量抽出器をその対象の識別へと特殊化させることで性能を向上させることができる．この原理に基づき，識別器内に生じる学習信号を特徴量抽出器に持ち込み，特徴量の特殊化させる仕組み(表現ずらし)を導入した．

しかし，この識別手法には，実用を困難にする短所が残っている．一つは認識対象に対する学習の加減である．学習を終了するタイミングを自動的に判断することが望ましいが，現在はユーザの判断で終了される．学習時間の短縮と学習処理の安定性にトレードオフが見られる．こういった課題により，操作には慣れと，システム内のプロセスに関してある程度の理解が必要であるため，まだ実用できる段階には至っていないと思われる．

- 識別器#2

二つ目の識別器は#1より簡単であり，スピードと使いやすさを追究したものである．訓練データから抽出された特徴量と映像から抽出された特徴量を直接的に比較することにより，その類似性を判断する手法である．識別器#2の表現力(特徴量とカテゴリの間にどれ程複雑な関係に対応できるか)は識別器#1の表現力に及ばないが，識別器の学習が不要になり，学習処理による手間と不安定性が回避される．

処理の概要は次のとおりである．ユーザにより対象が認識定義された時点で，その画像データから特徴量の抽出を行う．次に，得られた特徴量に関してはクラスタリングを行い，対象の構成を簡単に分析する．対象が複数のパーツから構成されている場合はクラスタリングによりその構成が分かる．この分析の結果を保存する．そして，カメラ映像にその対象が映っている可能性を判断するには次の処理を行う．映像の特徴量を認識対象の分析結果に照らし合わせ，二つのスコアを計算する．一つのスコアはパーツ毎に，そのパーツと映像の内容の類似性を測る．もう一つのスコアは，映像内に対象のパーツがどれ程揃っているかを測る．最後に，二つのスコアを統合し，対象が映像のフレームに映っている可能性を定量的に判断する．対象をパーツに分割することにより，単純で計算が軽い比較処理でも，特徴量とカテゴリの関係がやや複雑な場合でも認識が可能になった．尚，フレーム全体に渡ってパーツの情報を統合することにより，パーツ一つ一つの訓練データとの類似性が低めに出る場合(例えば光条件により色合いが違う場合)に関してもシステムのロバスト性が向上した．

- 識別器#2を用いた「遡り認識」

この識別手法の利点の一つは処理の軽さにある．この軽さを利用し，搜索対象が搜索の最中に分かったシナリオへの対応を行った．搜索の最中に新しい搜索対象が登録される場合は，その対象に関して，そこからの認識だけでなく，そこまでの認識も行うことが望ましい．つまり，そこまで記録された映像の中に，新しい対象に該当しそうなものが存在した場合，それを短時間で見つけ出す機能が必要となる．オペレータがサイバー救助犬のカメラ映像を継続的に観察する場合でも，映像の詳細な記録は人の記憶に残らないため，この機能は人間による認識では実現しがたいと思われる．

この機能を次のように実現した．映像のフレームを処理した際に，その特徴量を記録する．そして新しい対象が定義された時点で，この記録に対して識別の処理を実行する．識別処理をGPU上で実行可能な並列処理として実装することにより，GPUが搭載されたノートパソコンでは一秒に300フレーム分の識別処理を行うことが可能になった．例えば毎秒10フレームの記録を残した場合，一分間分の記録に対する認識処理の所有時間がおよそ2秒にまで圧縮される．この過去に対する認識処理を「遡り認識」と呼ぶ．

上記の，識別器に関するアプローチについて，現状では一番実用性が高いのは識別器#2を用いた手法であると判断し，ロボットプラットフォームとの統合においては識別器#2を採用した．しかし，識別器#1の方は表現力が高いと思われるため，識別器#1の安定性と実用性を向上させる方法を引き続き検討している．

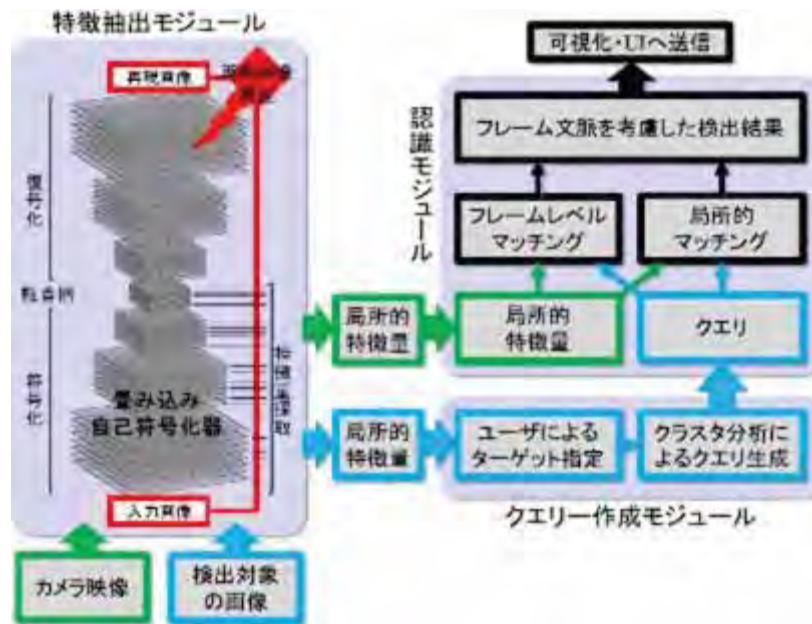


図2-1-10 認識システムの構成(特徴量抽出器と識別器#2)

2 -2 -3) ユーザ向けUI

二種類のUIを開発した：開発用のUIとユーザ向けUI．ここでは後者について説明する．ユーザ向けUIの主な機能は，認識処理の開始・終了と，検索対象の登録と，システム設定の調整である．検索対象に関しては，手間少なく，簡単な手順で対象が登録できることが実用上重要であると思われる．登録手順を次のように単純化した．画像を読み込むボタンを押し，対象の定義に利用する画像を選択する．そして画像がUI上に表示される．次に，マウスのカーソルを認識対象に指定したいものに置き，マウスのスクロール機能(若しくはキーワードのキー)で，選択領域を調整する．その際，特徴量の類似性を利用して，選択領域が自動的に画像内の輪郭になじむように調整する．選択が完了すると，ボタンを押し対象に名前を付与し，対象の保存や認識の開始を行う．ここにも特徴量を生かすことで，ユーザの手間を削減した．



図2-1-11 左：ユーザ向けUI(検索対象登録中の画面)．右：認識結果の一例．

2 -2 -4) サイバー救助犬プラットフォームとの統合

上記のシステムをサイバー救助犬と索状ロボット(細径)の二つのプラットフォームと統合した．以下はサイバー救助犬との統合について説明する．

- 映像受信

カメラ映像がスーツに搭載されたボードコンピュータによってエンコードされWebRTC経由でストリーミング配信される．このストリームをブラウザから受信し，認識システムが映像をブラウザから取得する仕組みを実装した．

- 位置情報の取得・補間

スーツに搭載されたGNSSセンサーで測定される位置情報(経緯度)がAWSサーバーのデータベースに保存される．認識システム側ではこの位置情報をデータベースから取得し，位置情報に付与されているタイムスタンプを用いて映像との関連付を行う．位置情報は映像と比べて低い頻度(1Hz程度)で記録されるため，位置情報を補間し映像にフレーム毎に記録位置の推定を付与する．

- 認識結果のメタデータ付けとアップロード

メインUI上での認識結果の表示を可能にするため，認識結果にメタデータを付与しAWSデータベースへアップロードする．認識結果はフレーム単位でアップロードされる．メタデータとしてそのフレームが撮影された時間，位置の推定，フレームに映っている可能性が高いとされたラベル，フレーム内にその対象が映った領域の座標，フレームを撮影したスーツのID等が付与される．メインUI側にて，認識結果の画像とそのメタデータがAWSのデータベースから取得され，認識結果とその地図上の位置が表示される．

2 -2 -5) ベンチマーク

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．

2 -2 -6) 成果

本研究の主な成果は以下の通りである．

- ・災害ロボティクスのニーズに応じた画像認識システムを開発した．
 - ・災害ロボティクスにおける映像の特性を考慮した特徴量抽出法と識別手法．
 - ・画像認識に必要な準備時間を大幅に短縮．
 - ・随時に検索対象を追加可能．
 - ・新しい検索対象を記録された映像から素早く見つけ出す「遡り認識」．
 - ・短時間と少ない操作で容易に検索対象が定義できるUI．
- ・このシステムをサイバー救助犬と統合．
 - ・救助犬が動きながらのリアルタイム認識を実現．

- ・認識結果がサイバー救助犬のUIにて地図上に表示．

2 -2 -7) 今後の課題

本研究の今後の発展に関しては以下の課題が挙げられる．

- 性能向上

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．現在まだ対応が難しい例を挙げる．認識対象は特性が少なく，似た色のものが環境に存在する場合．例えば無地の布でできた物体である．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．こういった場合は色が似た物体との区別は非常に難しくなる(一方，複数の無地の布で構成された対象に関しては，その組み合わせを検出することでより容易に認識ができる)．認識を困難にする環境条件の一例として，明暗が激しい場面がある．例えば夕方に，救助犬が東方向に向いているとき，映像の一部が強く照らされながら，もう一部が救助犬とハンドラーの濃い影に覆われる．こういった場合は明るさの自動調整がうまく機能しないため，影に入るものが非常に認識しにくくなる．上記のような場面に関しては対策が必要と思われる．

- 認識対象登録UIとメインUIの統合

現在は認識結果がプラットフォームのメインUIにて地図上に位置付けられて表示されるが，搜索対象を登録するには，認識対象登録用のUIを独立したプログラムとして立ち上げる必要がある．使いやすさの側面から，認識対象登録UIをメインUIに組み込むことが望ましいと思われる．

- 複数のサイバー救助犬を用いた捜査への対応

スーツのメインUIに関しては，同時に複数のサイバー救助犬を用いた捜査への対応が進んでいる．画像認識システムに関しては，こういった捜査への対応がまだ限定的である．救助犬毎に認識システムのインスタンスを実行することで対応は可能であるが，実用上は次のような機能拡張が望ましいと思われる．1)同一のインスタンスで同時に複数のスーツの映像を処理する機能．複数の映像ストリームの同時処理が可能な計算性能を備えた計算機が利用可能な場合，認識をまとめてその計算機で行うことが望ましい．2)インスタンス間の搜索対象の自動共有．現在は複数の計算機を用いた場合，ファイルとして保存された搜索対象の手動共有が可能であるが，対象が定義される時点で自動的にインスタンス間で共有されることが望ましい．

2 -3) 犬の生体信号と行動から犬の情動を推定

2 -3 -1) 概要

災害救助犬はその訓練の過程で，特定の匂いに対して応答するように強化学習を行う．この強化学習では，特定の匂いに対して吠える，あるいは座などの応答を示した場面で，餌やおもちゃなどの強化子を提示し，その行動を強化させる．実際の災害救助の場面では，研ぎ澄まされた嗅覚能力を基に，強化されたターゲットの匂いを発見し，適切な行動でハンドラーに発見を伝える．この探索行動は犬にとって負担が大きく，そのため，1回の探索が10分から20分程度になる．ハンドラーは適切なタイミングで犬を呼び戻して，休憩させ，他の犬に交換して作業を継続することになる．災害救助犬の情動，特に「やる気」や「疲労」の状態を適切に理解し，犬の使用を判断することは，災害救助場面において，非常に重要となる．しかし，犬が作業をする場所は，常にハンドラーから見えるわけではなく，場合によっては完全に視野からいなくなることもある．このような場面において，犬の内的な情動状態をリアルタイムに可視化し，ハンドラーが把握できることが求められてきた．

災害救助犬における情動状態のリアルタイム可視化に向けて以下の点が重要である．1)犬の情動状態の客観的な測定，2)計測されたデータのハンドラーに使いやすいGUI，3)犬の地理情報のリアルタイム表示，である．ここでは3)は他の報告にあるため，割愛し，1)と2)に関して報告する．さらに，1)と2)を達成するための技術革新としては，客観的計測を可能とする心電計スーツの開発，ならびに計測された心電情報を基にした情動推定とその結果表示，が求められる．このことから，以下はこの2つの技術開発の成果としてまとめる．

2 -3 -2) 心電計測スーツの開発

情動は、中枢神経系の機能の1つであり、外部刺激に応答して変化し、適応的な反応を導く。例えば、捕食者からの脅威は、動物におけるすくみ行動、逃走、あるいは闘争のいずれかを誘発する。行動変化と並行して、血圧や心拍、発汗の反応が観察される。これらのことから、情動状態は、自律神経系や内分泌系、筋肉の緊張、などに表出され、定量的に評価することが可能である。基本的な情動は、喜びやうれしさなどの正の軸と、恐怖や不安などの負の軸、さらに覚醒状態が高い低い、の2つの軸による平面上に分類することができる。これまでのヒトや動物を用いた研究において、情動の分類と自律神経系の応答との関係が調べられてきた。このことから、本システムの開発に向けて、心電の計測による情動状態の可視化を目指した。

電極の素材、固定位置、固定方法：今回、開発した心電計測スーツの外見は図2-1-12 Aの通りである。電極はNihon Kohden Vitrode Mを用いた。犬の体表面のM-X誘導となるように、3点に配置した。この際、犬の激しい運動時にも筋電位のノイズが低くなるように、骨との距離が近い場所を選択した（図2-1-12 B）。

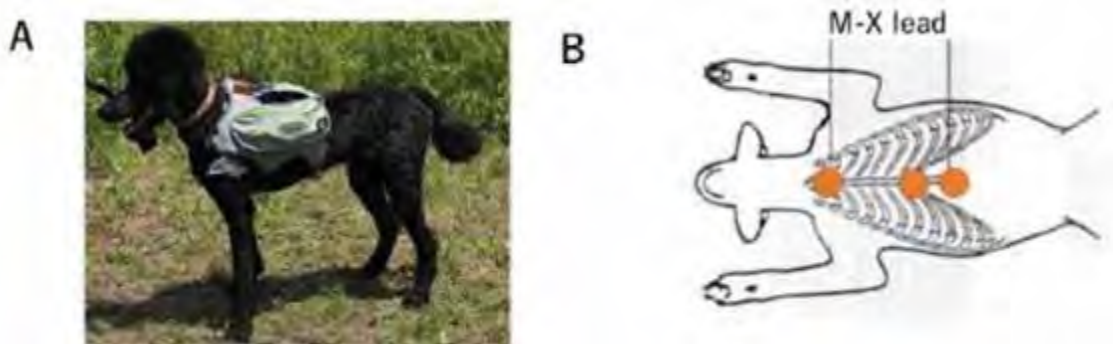


図2-1-12 心電計測スーツ（A）と今回採択した電極のM-X誘導に従った装着位置（B）

犬の腹部は、ベースに縫い付けられた伸縮性の布で覆い、電極に圧をかけることで、運動中の摩擦やずれを軽減した。この弾性のある布には、5対の伸縮性マジックテープにて、犬への装着を容易にし、またそのマジックテープによって、電極に圧をかけるように位置を決定した（図2-1-13 A）。電極と身体との接点は、アルコール洗浄し、油脂成分を除去した。油脂成分は電気伝導率に悪影響を与える。電極と身体との接点の間には生理的食塩水を含んだ乾綿を入れ、数時間の電位伝達が可能となるようにした（図2-1-13 A）。さらに、電極は電極の形状にくりぬいたスポンジで覆い、最後に伸縮性マジックテープで圧を与えた（図2-1-13 B）。これらの装着装置により、電極の安定した固定化が可能となった（図2-1-13 C）。

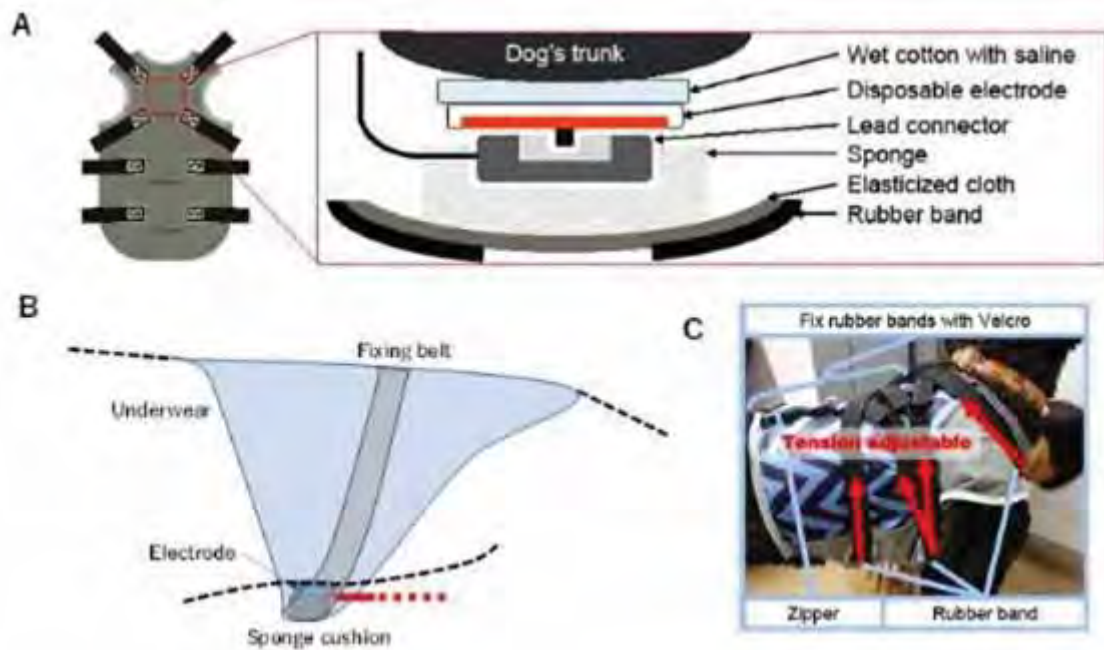


図2-1-13 心電計測スーツの形状と強化のための伸縮性マジックテープの位置，各電極の装着構造と（A），装着の差異の圧のかけ方（B），ならびに装着後の様子（C）。

心電計測用の電位計測デバイスを，既存のものを基に新たに開発した．サンプリング周波数は1000 Hzとし，電気信号はLow-passでフィルタリングし，さらに犬のもつ固有の電位の適した閾値で処理することでR波（心電図で最も大きな波をもつ電位誘導）を検出した．具体的には，3つの電極（+，-，GND）で測定された電位を増幅調整し，1次のLow-passでフィルタリングによって，高周波ノイズを低減した．増幅率は $R2 / RC$ の抵抗比によって決定した．ここで， RC は可変の抵抗値とし，マイクロコントローラに内蔵されている自動データ取得制御プログラムによって計算，決定した．今回導入したLow-passでフィルタリングはR波の振幅を減少させるが，自動制御された増幅器により十分に増幅されるため，解析には十分な振幅が得られた．

心機能は，情動だけでなく運動の影響も強く受ける．また運動自体も情動の影響を受けることから，今回のシステムに慣性センサを搭載し，その融合的計算により，精度の向上を目指した．慣性センサとしてXsens MTi-G-710を選択し，加速度データと緯度経度を取得した．緯度と経度の情報はデータサーバーに送り，位置情報として処理した．最終的な心電計測スーツには，心電計装置，単一ボードコンピュータとしてラズベリーパイ2モデルBR，慣性センサ，グローバルナビゲーション衛星システム（GNSS）アンテナ，バッテリーを搭載した．スーツの重量は1.5kg未満で，中型および大型の犬に着用可能とした．

データ処理：得られた電位からRaspberry Pi2上で，R波のピーク時間を検出した．Rと次のRの時間間隔（RRI）値は，携帯電話ネットワーク上でAT&Tが提供するIoTデータサーバM2Xに送信した．計算サーバにおいて，RRI値を，犬の感情状態を推定するための特徴的指標として計算した．具体的には後述の心拍変動（HRV）の指標として後述する時間領域の指標を計算した．複数の指標を用い，最終的には計算サーバ上でランダムフォレストによる機械学習を経て推定された情動状態がGUIで視覚化され，リアルタイムでハンドラーの手元で確認できるよう，開発した（図2-1-14）。

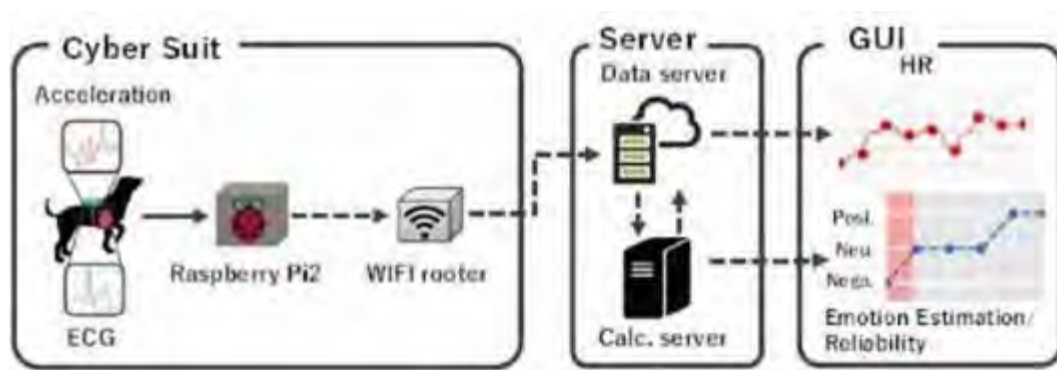


図2-1-14 開発した心電計測のデータフロー．取得したデータはRaspberry Pi2を介してデータサーバに送信，計算サーバ上で処理，結果をGUI上でリアルタイムで可視化した．

2 -3 -3) 心拍変動からの情動推定 + 表示結果

心拍数は交感神経系と副交感神経系の両方によって制御され，これらの2つの系のバランスが心拍の間隔を決定する．心拍の間隔はR波の間隔（RRI）として指標化されるが，RRIは一定ではなく変動性を含んでおり，そのゆらぎは心拍変動（HRV）と呼ばれる．心拍変動の指標として複数のパラメータが提案されてきた．RRIにおける逐次差の二乗平均平方根（RMSSD）は，心拍における各拍間の変動を反映するが，HRVに強い影響を与える副交感神経系の一つである迷走神経によって媒介される変動が推定可能である．また，交感神経系と副交感神経系の両方がRRIの標準偏差の平均（SDNN）に寄与する．このようにHRVのパラメータは，情動状態によって引き起こされる自律神経系の活動を測定するための有用な指標となる．動物では，ストレスや不安などといったネガティブな情動を伴うHRVの関連性に関する多くの研究が行われてきた．また最近，HRVに関連する喜びやリラックスなどの正の情動状態を示す研究も報告された．我々は，イヌを対象に，情動の正の反応と負の反応がそれぞれ異なったHRおよびHRVの変動として別個に検出できることを報告した．すなわち，ネガティブな情動とポジティブな情動は，それぞれRMSSDの低下およびSDNNの低下と関連していた．これらの結果は，RRIおよびHRVパラメータが，情動の変動を客観的な計測に有用であることを示している．

興味深いことに，げっ歯類を用いた研究では，HRVパラメータを用いることで，ポジティブな情動（リラックスなどの快刺激）だけでなく，報酬を期待するモチベーションも検出できることが報告されている．このことから，HRVを用いることで，災害救助犬における，トレーニングされた標的の匂いに対する期待の高まりや，あるいは探索の動機付けのレベルの検出が可能となることを意味する．副交感神経は1秒未満といった急激な変化を呈し，交感神経の変化は5秒以上を必要とするため変動が遅い．この異なった時間制御機構は，心拍を早めるあるいは鈍化させるなどの異なった作用をもたらすことがある．時間領域分析を用いることで，15秒間のRRI値を用いた犬の情動状態の推定が可能であることから，秒単位で変化すると想定される災害救助犬の情動状態をリアルタイムで評価するためには，HRVの時間領域分析が有用と考え，このパラメータを採択した（表2-1-2）．

表2-1-2 災害救助犬の情動状態の推定のために使用したHRVパラメーター一覧

Index	Calculation
Mean RRI	Mean values of RRIs
SDNN	Standard deviation of RRIs
Total power	Variance of RRIs
RMSSD	Root mean square of differences between adjacent RRIs
NN50	Counts of differences between adjacent RRIs bigger than 50ms

まず，HRVによって感情推定が信頼できるかどうかを調べるために，安静時または歩行状態のRRIを測定した．R波は，MATLABの関数findpeaksを用い，記録された生のECGデータ上にて検出，その結果

を人為的に再確認した．心電計測スーツを改良することで，安静時のみならず歩行時においても安定して検出することが可能となった．一方，イヌが高速で走る場合には，R波に筋電位が混入するため，ピークの検出が困難となった（図2-1-15）．これらの結果は，デバイス装置が探査中の犬のRRIを測定するに十分であることを示す．また，加速度により，イヌの運動がある一定以上になった場合は，筋電位の混入の可能性が高まるため，その時間帯のデータを解析から除外することで，誤推定結果を回避できることが明らかとなった．

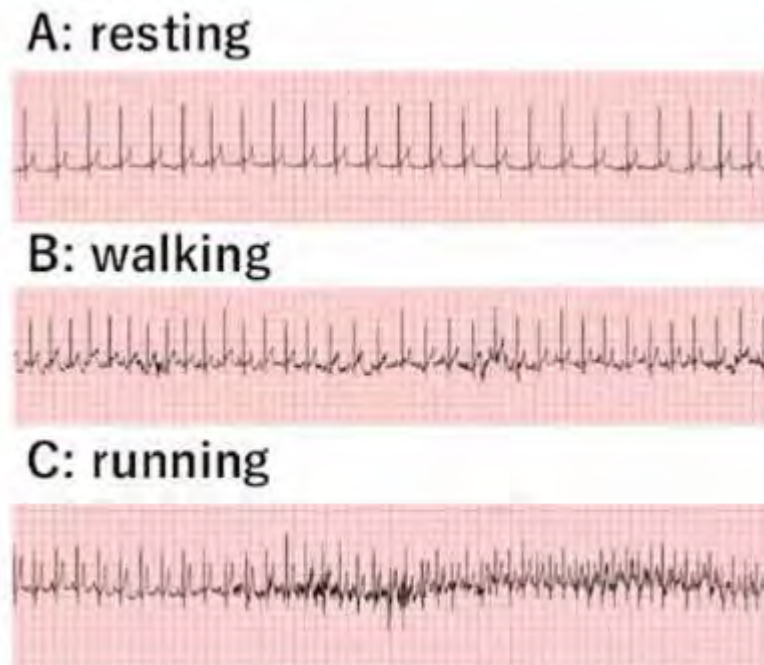


図2-1-15 災害救助犬の心電計測スーツによって記録された心電図．休息（A）や歩行（B）ではRピークを見失うことなく解析できるが，高速での走行になると，筋電位の混入により，検出が困難となった（C）．

本システムを用い，まずは一般家庭犬を対象に，イヌに刺激のないベースライン条件およびポジティブまたはネガティブな刺激を伴う2つの条件の下で，行動およびHRVを記録した．ポジティブな条件では，犬はハンドラーに従って伴走し，ハンドラーから報酬を得た（強化子の提示）．一方，ネガティブ状態では，犬はハンドラーから指示を受け，伴走するが，強化子は与えられなかった．ネガティブ条件では，イヌは最終的にコマンドに従わなくなり，伴走の動機を失い，与えられた課題ではない他の刺激に注意を払った．このことから，これらの2つの条件は，災害救助犬の探査課題と同様と考えることができた．

記録されたHRVのパラメータを用い，教師付きのアンサンブル機械学習法の1つであるランダムフォレスト法によって情動の分類と推定を試みた．ランダムフォレストの学習は，トレーニングデータセットをブートストラップすることで実施した．記録されたデータの80%をパラメータ学習に使用し，残りを分類の精度検証に用いた．これらの計算に加えて，上述の通り，加速度データから，高速での走行時データのデータを判別して除外した．その結果，停止時，歩行時，低速走行時における情動状態の推定の正答率は73.6%であった．特に，予測に加速度データを追加すると正答率が向上した．この結果は，HRVの時間領域解析のパラメータを用いたイヌの情動状態の予測が可能であることを示している．

本システムでは，リアルタイム性を向上させるため，計算サーバでの処理に工夫を加えた．HRVの時間領域パラメータは，最新のRRIを連続的に取得し，リアルタイムで5秒の時間窓で計算した．休息状態のイヌのRRI値は通常0.6-1.0秒であることから，計算サーバでは最新の8つのRRIを基にパラメータを計算することになる．さらにランダムフォレストを用いた分類器によって，ポジティブまたはネガティブに分類される確率を出力した．推定された情動状態の最終決定として，いずれの情動状態の推定確率が0.7未満となった場合，情動状態は中立として判定した．

GUIでは、リアルタイムで心拍数および情動状態の視覚化した。心拍数のグラフは1秒ごとに更新した。また犬の地理位置はGoogleマップに表示した。情動の推定結果は5秒ごとに表示した（図2-1-16）。実際に災害救助犬を用いたトライアルでは、災害救助犬が被災者役の人物が隠れている場所に近づいた際に、情動推定結果がポジティブになることが確認され、実用場面での利用の可能性が示された。



図2-1-16 災害救助犬の心電計測スーツの実用場面．Aに実際の災害救助犬の探査の様子が映っている．BとCが、ユーザーのGUIであり、Bに地理情報と心拍の変化が、Cに犬に搭載した小型カメラの映像と、推定された情動状態の結果がリアルタイムで表示されている．

2 -4) 犬に搭載したセンサデータから行動を推定

2 -4 -1) 概要

救助犬のサイバースーツに装着したセンサから得られるデータに対して機械学習の手法を適用することによって救助犬の行動推定を行い、その推定結果を可視化して表示するシステムを開発した（図2-1-17）。

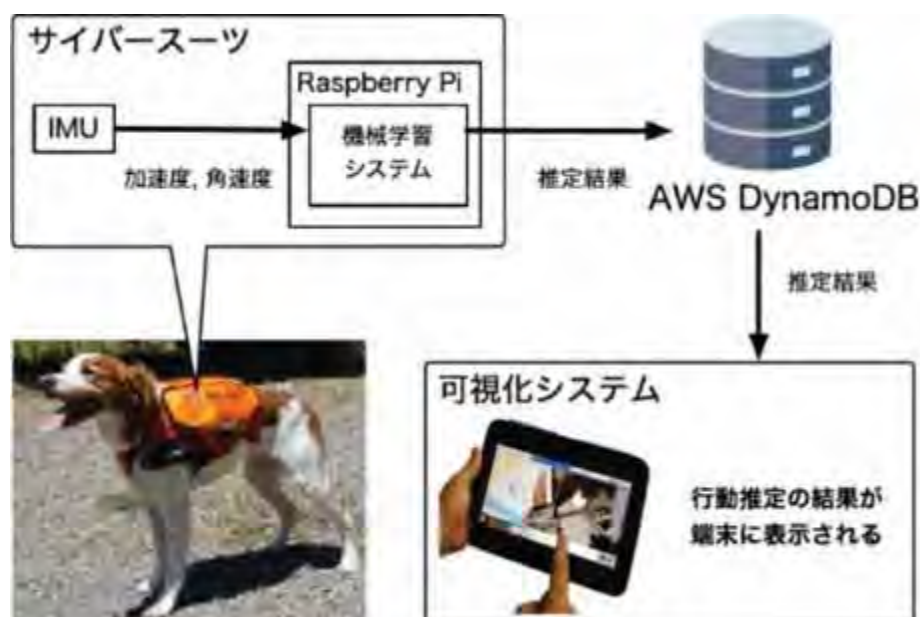


図2-1-17 イヌの行動推定のシステム構成

本システムでは、サイバースーツに装着したセンサから加速度(X軸,Y軸,Z軸の3軸)、角加速度(X軸,Y軸,Z軸の3軸)と姿勢(roll軸,pitch軸,yaw軸の3軸)の合計3種の慣性データを取得する。次に、これらの慣性データを本装置に取り付けられた小型コンピュータRaspberry Piに入力し、機械学習システムを用いて救助犬の行動推定を行う。そして、得られた推定結果を本装置に搭載されたモバイルWi-Fiルータを利用して3G/4G携帯電話網を介して、Amazon Web Service (AWS)のクラウドデータベースへ送信し保存する。最後に、可視化システムはAWSから行動推定の結果を取得し、これをリアルタイムにハンドラに提示する。このようにAWSを経由することで通信の遅延のために表示の際のリアルタイム性が若干損なわれるが、推定結果の保管の信頼性を確保することができ、さらに事後利用や他のシステムでの利用などを容易にすることができる。

2 -4 -2) 機械学習システム

機械学習システムでは、慣性センサによって計測された加速度、角速度の情報を利用して、救助犬の行動推定を行う。推定する行動は、「走る」、「歩く」、「止まる」、「物体臭を嗅ぐ」、「浮遊臭を嗅ぐ」、「吠える」の6つで、同時刻に複数の行動を許すマルチラベル分類問題として扱う。このマルチラベル分類問題をbinary relevanceを用いてシングルラベル問題に変換して扱う。Binary relevanceは、各クラスについて、そのクラスに属するか属さないかの2値分類を行う分類器を作成し、各分類器の結果を統合して出力する方法である。

センサデータの各波形を 200Hzで線形補完し、短時間フーリエ変換 (STFT) を用いて振幅スペクトルに変換して分類器の入力とする。そしてSTFTの窓の中心の時刻において救助犬が何の行動を行っているのかを推定する。STFTの窓関数をハミング窓とし、窓幅を0.64 秒、移動幅を0.32 秒とした。また推定の精度とリアルタイム性というトレードオフを勘案して、0.96秒毎に前処理と推定を行っている。推定結果は各クラスに属する確率として表現され、クラウドデータベースに対して送信される。

分類器には、高次元の振幅スペクトルのデータに対して、サイバースーツのRaspberry Pi上で各クラスに対して高精度かつリアルタイムに推定を行うことが要請されるため、高速に動作する勾配ブースティング決定木の実装であるXGBoostを用いている。XGBoostにはいくつかのハイパーパラメータがあるので、交差検証による予備実験を積み重ねた結果として表2-1-3を選択した。また、可能な限り次元数を削減してより高速に処理を行うため、振幅スペクトルのうち精度にほとんど貢献しない高周波の成分を取り除き、低周波の成分のみを用いて学習および推定を行っている。

表2-1-3 XGBoost のハイパーパラメータの設定

パラメータ名	値
Objective	Binary:logistic
Subsample	0.7
Colsample_bytree	0.7
Max_depth	4
Max_delta_step	1

テストデータに対するROC曲線 (Receiver Operating Characteristic Curve) を図2-1-18に示す。ROC曲線は分類器の評価指標の1つで、理想的な分類器であれば曲線下面積 (AUC: Area under the curve) は1.0となる。実験の結果、「走る」、「歩く」、「止まる」、「吠える」に関して高い精度で分類することができた。一方、「物体臭を嗅ぐ」と「浮遊臭を嗅ぐ」は、上手く分類することができなかった。「物体臭を嗅ぐ」、「浮遊臭を嗅ぐ」の分類が上手くいかなかった理由として、以下の二点が考えられる。まず、「物体臭を嗅ぐ」、「浮遊臭を嗅ぐ」のラベルが付いた訓練データの数が不十分であったことが挙げられる。

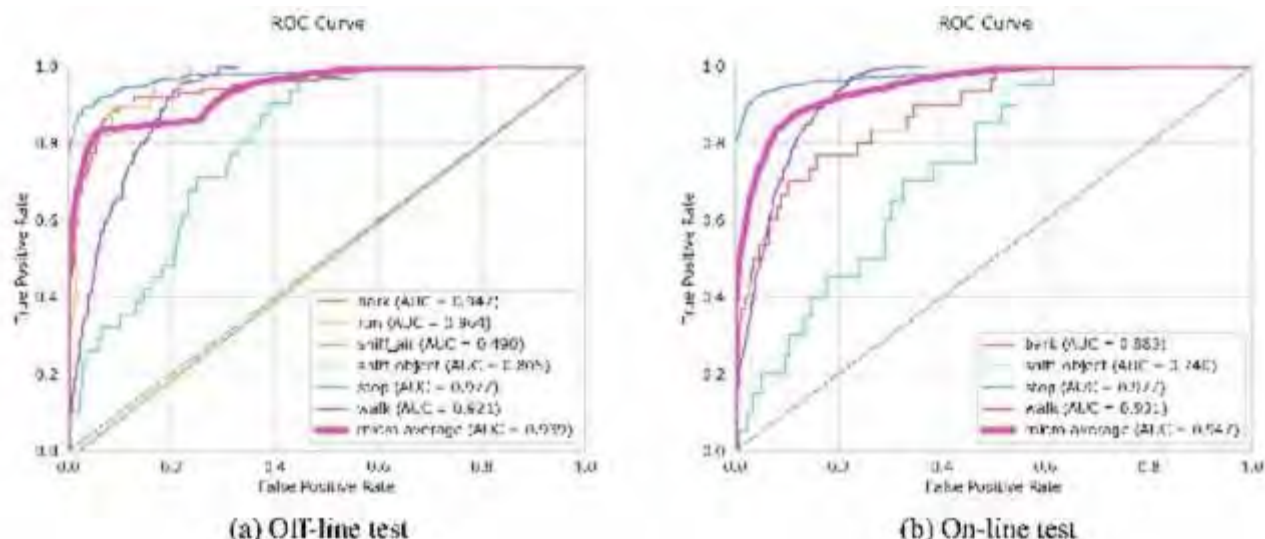


図2-1-18 ROC曲線

訓練データとテストデータに含まれる各ラベルの数を表2-1-4に示す．最も数が多い「歩く」のラベルが3226個あるのに対して，「物体臭を嗅ぐ」のラベルは1328個，「浮遊臭を嗅ぐ」のラベルは336個と少なかった．今後は，より多くの学習データを収集することに加えて，不均衡データに対応した学習アルゴリズムを使うことを検討したい．次に，「物体臭を嗅ぐ」，「浮遊臭を嗅ぐ」行動が，慣性センサによって計測された加速度，角速度の振幅スペクトルからは十分に検知できなかった可能性が挙げられる．これらの精度を向上させるためには，マイクロフォンアレイなどの局所的な収音が可能なセンサを救助犬の首元に装着して呼吸音を分析することが有用ではないかと思われる．

表2-1-4 データセットに含まれる例の個数

ラベル	訓練データ	テストデータ
走る	2347	28
歩く	3226	181
止まる	3205	476
物体臭を嗅ぐ	1328	31
浮遊臭を嗅ぐ	336	22
吠える	1376	101

2 -4 -3) ハンドラのための可視化システム

本システムでは，AWS経由で得られたGNSSデータと，機械学習システムの出力を用いて，サイバー救助犬の行動推定結果をリアルタイムに地図へと表示する．なお，AWSからのデータの取得は，AWS上のデータベースに蓄積されているデータから直近のものを取得するためのAPIを用意し，このAPIを可視化システムからHTTP経由で呼び出すことによって実現した．実際のシステムの動作例を図2-1-19に示す．

可視化システムの画面左側には，救助犬の探索した軌跡と行動推定の結果が表示される．救助犬が走った部分が赤い線で，ゆっくり歩いた部分が黄色い線で表示され，また吠えた部分や臭いを嗅いだと推定された部分にはマーカーが表示される．またこの地図上に表示された青や緑の領域は，探索の対象として指定された領域を表している．一方，画面の右側には救助犬のスーツに装着したカメラからの映像がリアルタイムに表示される．ユーザは，画面右上のタブを切り替えることによって，複数の救助犬の行動をこの可視化システムで選択しながら観察することができる．またそれぞれの救助犬の軌跡を一時的に非表示にしたり，すべてを同時に表示したりすることもできる．



図2-1-19 ハンドラのための可視化システムと表示されるマーカー

2 -4 -4) 開発者のための可視化システム

この機械学習システムの開発とデバッグを効率よく行うために、開発者用の可視化システムも別に構築している（図2-1-20）。この図の画面左上と右上に表示されるものは、前述のハンドラに対する可視化システムと同じ内容である。一方、画面の左下には、機械学習システムによる推定結果として、各ラベルに対する確率を過去30秒間の時系列として表示している。このグラフを確認することで、機械学習システムの推定が期待通りに行われていることをより詳細に検証することが可能となっている。これらのデータもすべてリアルタイムに更新される。またこの可視化システムは、画面レイアウトを状況にあわせて変更できるよう、マウス操作で柔軟に移動・拡大できるようになっている。この目的のためにGoldenLayoutライブラリを採用した。また、グラフの表示にはHighchartsライブラリを用いており、ユーザは対話的にその数値を確認することができる。例えば、マウスポインタをグラフの線上にもっていくと、その厳密な値がタイムスタンプとともにポップアップ表示されるようになっている。このような機能は、ハンドラ用の可視化システムには不要であるが、開発者には必要であるため、機能を切り分けた2つの可視化システムとして別に開発を行っている。



図2-1-20 開発用の可視化システム

2 -4 -5) フィールド評価

2018年6月に福島ロボットフィールドで行った公開フィールド評価実験において、本システムのデモ実行を行った。ここでは1頭の救助犬とそのハンドラが被災地を想定した場所で探索活動を行った。この機械学習システムは、サイバースーツに装着したRaspberry Pi2 の上で、ビデオ転送やデータのロギング機能と並行して実行した。この環境下で、推定結果が欠けることなく行えることが確認できた。ネットワークの混雑によって推定結果をデータベースに登録する際に多少の遅延が発生したが、推定そのものには遅延なく行えた。これはデータの登録と推定を別スレッドにしていた恩恵である。この実証実験の終了後に、その前日のリハーサル時に記録したデータに対して行動予測の推定結果の精度を検証した。その結果、オフラインでの実験と同程度の精度で推定が行っていたことが確認できた。またハンドラ用と開発者用それぞれの可視化システムについても、この実証実験での動作確認が行えた。

2 -4 -6) まとめと今後の課題

慣性センサから取得した3軸の加速度、角速度、姿勢の情報を用いて災害救助犬の行動をリアルタイムに推定、可視化するシステムを開発した。実験の結果、「走る」、「歩く」、「止まる」、「吠える」に関しては高い精度で推定できたが、「物体臭を嗅ぐ」、「浮遊臭を嗅ぐ」に関しては精度が低く、さらなる改良の必要がある。ここで用いた訓練データ中にはこれら2つの行動のサンプルが不足していたため、さらに多くの訓練データを収集するとともに、不均衡データを扱うことに適したアルゴリズムを導入することによって精度の向上を目指したい。また、慣性データだけでは救助犬の臭いを嗅ぐ動作を十分な精度では推定できないようであるので、現在のシステムにマイクロフォンアレイを導入し、空間的な音声データを学習に活用することも検討したい。

可視化システムに関しては、救助犬の探索軌跡と行動推定の結果を地図上にプロットすることによって直感的に分かりやすい可視化を実現できた。また、AWSを経由することによって災害現場における通信環境への頑健性を強化するとともに、複数の端末間でのデータの共有、およびデータの保管、事後解析を可能とした。一方で、データの送受信に伴う遅延時間や一部データの損失などといった問題の解決が望まれる。

2 -5) イヌ搭載センサを利用した軌跡推定

サイバー救助犬の基本的な機能の一つは、探査活動等を行うイヌの移動軌跡を、表示あるいは記録のために実時間で計測することである。GNSSが使用可能でない屋内環境や、屋外であっても安定して

衛星を捕捉できない環境で利用する場合，スーツに搭載可能なセンサ等を利用して，広い空間を移動する救助犬の移動軌跡を計測する手段はほとんどない．本研究では，スーツに搭載したカメラを入力に視覚SLAMを行う方法と，スーツに搭載した慣性センサ（Internal Measurement Unit（IMU）センサ）と歩容を利用した慣性航法で移動軌跡を求める方法を開発した．

2-5-1）イヌ搭載カメラを利用した視覚SLAM

A）概要

視覚SLAMの研究開発では，スーツに搭載したカメラの撮影映像を入力に視覚SLAMを行い，周囲環境の3次元地図と犬の移動軌跡を同時計算する方法を開発した．視覚SLAM（Simultaneous Localization And Mapping）とは，カメラを移動させつつその空間を撮影した動画像を元に，同空間の3次元形状およびカメラの運動を推定する方法である．図2-1-21に開発したイヌ用カメラスーツを救助犬に装着した様子を示す．スーツにはカメラとIMU（慣性計測装置），演算処理装置（オンボードPC）が搭載されている．



図2-1-21 イヌ用カメラスーツを装着した救助犬：カメラ，IMU，ボードPCを搭載

B）技術的課題

視覚SLAMの技術自体は長い研究の歴史があり，いくつかの実用的なシステムが開発されている．しかしながら，犬やその他の動物にカメラを搭載して得られる映像にそのまま適用可能な視覚SLAMのシステムはなかった．犬が自由に歩き，走る状況で搭載カメラから撮影される動画像では，連続する画像フレーム間での画像変化が急激かつ大きく変化しやすいことが最大の理由である．一般に速く大きい画像変化は，視覚SLAMにとって障害となる．視覚SLAMの処理のパイプラインは，特徴（例えば点）を動画像の異なるフレーム間で対応づけることから開始される．その成否はこの最初の処理のステップにかかっているからである．

その他にも視覚SLAMを困難にする要因がいくつかあり，モーションブラーとローリングシャッタが誘発する画像の幾何学的な歪みとその筆頭に挙げられる．モーションブラーは，カメラの動きによって生じる映像のブレを言う．原理的には，カメラのシャッターが開いている時間内にカメラが動くことで，撮影される映像にボケが生じることによる．ローリングシャッタ歪みは，ローリングシャッタを備えたカメラが，画像フレーム1枚を撮影する間に速い動きをすると生じる．救助犬の搭載カメラの場合，絶えずカメラが犬の背中で動くため，これが生じやすい条件下にある．最近，性能のよいグローバルシャッタカメラが入手可能になってきたが，ローリングシャッタカメラはその設計上の特性から，低照度環境での画質の面で有利である．ローリングシャッタカメラはこの点で依然として有用であり，その場合，ローリングシャッタ歪みを適切に処理することは重要である．

C）技術的成果

ローリングシャッタ歪みへの対策

ローリングシャッタ歪みに対策を行った視覚SLAMのシステムを開発した．技術的な核は，ローリングシャッタ歪みの新たな近似モデルである（図2-1-22(a)）．このモデルは，カメラの光学系を基準とする座標系の各軸まわりの微小回転角をパラメータとするもので，さらにこれを仮想的なカメラとし

て表現し直し，それによって歪みの補正を，カメラの自己校正の問題として再定式化したことが技術的な新規性である．この新たな定式化のおかげで，ローリングシャッタ歪みの補正を行えるようになっただけでなく，その場合の視覚SLAMの臨界運動（critical motion sequence）を理論的に導出することに成功した．臨界運動とは，カメラが特定の運動をすると問題が縮退する（解が求まらない）場合のカメラ運動を指す．例えば，カメラの光軸周りの回転を一切しない状態で，カメラを自由に動かす運動が臨界運動の一つであることが明らかになった．



図2-1-22 開発したローリングシャッタ歪みモデルの概念図．

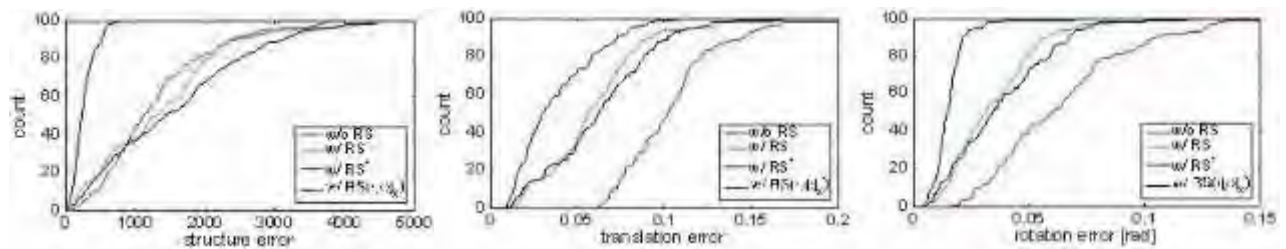


図2-1-23 3次元復元の誤差．100回の試行の誤差の累積ヒストグラム．青がローリングシャッタ歪みに対策した提案方法，赤が歪みを考慮しない従来方法，緑と黒は縮退への対策が不完全な場合．

（点群）と，カメラの並進移動および回転運動が計算される．図の左から1，2，3番目が，この3つの推定誤差を，ローリングシャッタ歪みを考慮した場合とそうでない場合で比較したものである．図は100回試行時の誤差の累積ヒストグラムであり，横軸が誤差であるので，プロット（色線）が左側（誤差0の側）に寄るほど精度が高い．青が提案手法，赤がローリングシャッタ歪みの考慮がない場合，緑と黒はそれぞれ，臨界運動であることを無視し，ローリングシャッタ歪みの対策を行った場合である．このように，提案手法は安定して高精度な3次元復元を行えることがわかる．



図2-1-24 開発したモーションブラー除去技術の適用例．左が入力画像．中央が処理結果．最後がブラーのない目標画像．

モーションブラーとその他の画質劣化要因からの画質改善

視覚SLAMや画像認識など，その他の課題解決のため，画像からモーションブラーを除去する技術を開発した．この手法は，深層ニューラルネットワークを用いるもので，各種ベンチマークテストで世界最高水準の精度と計算量の小ささ（ネットワークの小ささ）を両立している．具体的には，「二重残差結合」と名付けたネットワーク構造を用いることで，従来方法よりも高精度かつ効率よく，画像の画質を改善することを可能にしている．同一の枠組みで，TRCが想定する利用環境・状態で問題になる様々な画質劣化の要因，具体的にはモーションブラーに加えて，画像のノイズ，雨筋，霧，（レンズ表面などに付着した）雨滴，の5つの画質劣化要因を，適切に除去できる技術である．これら5つの画質改善に対するわれわれの手法を評価するため，9つの公開されているベンチマークテストを行ったところ，そのほとんどすべてで従来手法を上回る性能を達成した．



図2-1-25 モーションブラー除去と同じ技術により，霧・霞，雨滴，雨筋をそれぞれ除去した例．いずれも左側が入力，右側が開発した手法による出力．

適応的フレーム選択により実時間性と頑健性を両立した視覚 SLAM の開発

画像変化が急峻で大きい場合の単純な解決策は，フレームレートの高いカメラを使用することである．これにより，フレーム間の画像変化はフレームレートの高さだけ小さなものとなり，上述の困難さから解放される．ただしその場合，視覚SLAMの実行速度が新たなボトルネックになる．最近の視覚SLAMのシステムは，高性能なデスクトップPCを用いた場合，毎秒10から最大50フレーム程度の速度で実行可能である．この速さを超えるフレームレートで画像を取得しても，すべての画像を実時間の計算で扱うことは不可能である．サイバー救助犬での視覚SLAMの利用目的に照らせば，一定の時間遅れは許容されるため，高フレームレートで撮影される画像列から，適応的に必要な画像を選択し，視覚SLAMを実行する方法を新たに開発した．この手法は，索状ロボット（細径）の能動スコープカメラ（ASC）でも利用している．

慣性計測装置（IMU）との統合

以上に加え，さらに視覚SLAMの頑健性を向上させるべく，搭載IMUが出力するカメラの姿勢情報を，視覚SLAMのランドマーク追跡処理で利用し，計算量を低減しつつ頑健性を向上させる方法を開発した．視覚SLAMでは毎サイクルの処理の先頭で，ランドマークを最新フレーム内で追跡する処理を行う．この際の位置の予測に，IMUによるカメラの姿勢情報を利用する方法である．

D) 評価

ImPACTのTRCプロジェクトにおいて，毎年2回実施してきたフィールド評価会において，上記技術を何度も繰り返しテストしてきた．上述の技術的ブレークスルーと，さらに様々なノウハウや細かい技術等を積み重ね，ある程度まで安定動作するシステムを実現した（図2-1-26）．一方で課題も明確になった．

救助犬が自由に，激しく動きまわる場合，背中に搭載したカメラの映像はかなり急激な変化を伴うものとなるため，以上の技術をすべて用いても，視覚SLAMの画像追跡（ランドマーク追跡）が失敗することがある．視覚SLAMの処理を行う演算装置の処理能力を向上させることで，この問題は解決するが，主に消費電力の制約（つまり，バッテリーの容量の制約）により，現時点で入手できるハードウェアの範囲内では，本質的な解決策にはなっておらず，TRCで求めるレベルの実用性を達成するには，引き続き研究開発が必要である．

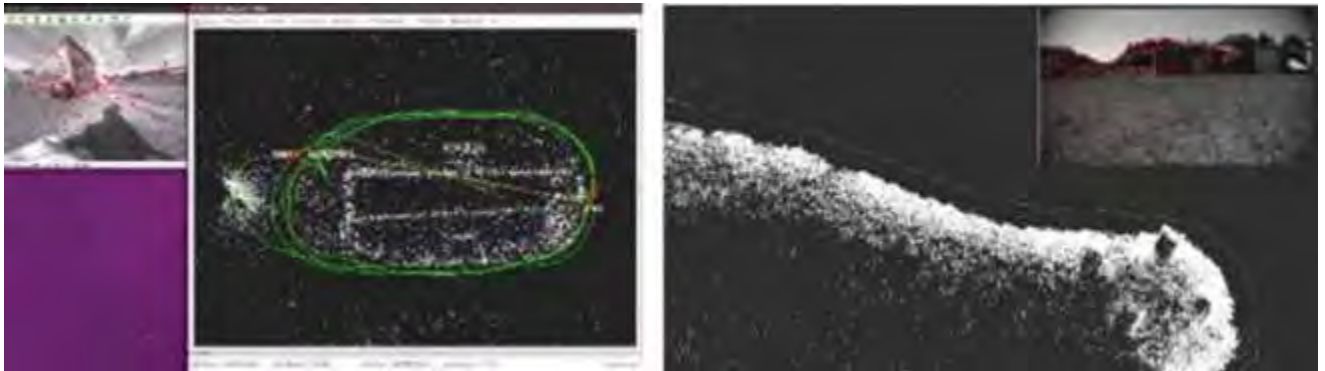


図2-1-26 左：フィールド評価会での実験の様子．カメラのライブ映像と実時間での救助犬の移動軌跡を示す．右：別のフィールドでの実験風景．同様にカメラのライブ映像と移動軌跡＋点群．

2 -5 -2) イヌ搭載慣性センサと歩容を利用した軌跡推定

A) 概要

本研究では，イヌに搭載した慣性センサやGNSSや歩容の特徴を利用して位置推定を行う方法を開発する．視覚SLAMの開発で移動中のイヌの位置を計測することが出来るようになった．一方で，救助犬が探査の対象としている倒壊瓦礫や森林では，スーツに突起があると周囲にある瓦礫や木々に引っかかりイヌが怪我をする恐れがある．そのような不安が残る機器の場合，現場では利用してもらえない．そこで，図2-1-27に示すサイバー救助犬スーツで利用可能な方法を開発する．これらのスーツは，森林や倒壊瓦礫での救助犬の探査の計測・記録の実績があり，周囲の瓦礫や森林に触れても，引っかかる事無く探査を続けることができるスーツである．これらのスーツには，慣性センサ，GNSSセンサが搭載されていて，GNSSが得られる環境ではGNSSを利用して位置を計測し，GNSSが利用出来ない環境では，慣性センサと歩容を利用して位置を計測する．



図2-1-27 サイバー救助犬スーツ（左）5号機，（右）7号機：IMUセンサとGNSSとボードPCを搭載

B) 方法

慣性センサから得られる加速度を積分することで速度を，速度を積分することで位置を計測することができる．また，角速度を積分することで姿勢を計測することができる．このように慣性センサを利用して位置や姿勢を計測する方法を慣性航法といい，古くから研究が行われている．慣性航法の課題は，累積誤差をキャンセルする方法である．加速度の値には計測誤差が存在し，積分して計算した速度や位置には大きな累積誤差が生じる．本研究では，イヌの歩容の特徴を利用して，速度がゼロになる瞬間を検出し，その時に，速度の累積誤差を修正する方法を新たに提案する．速度がゼロになるポイントはZero Velocity Point (ZVP)と呼ばれ，人間の歩容等でもあることが知られている．人間の場合，足の裏に付けたセンサーでZVPを検出し，誤差をキャンセルする方法が用いられているが，この方法は救助犬では利用出来ない．救助犬が靴を履くと，足の裏で感じている地面の情報がえられなくなり動きが悪くなることや，靴が瓦礫に引っかかり怪我をするからである．そこで，本研究では，スーツに搭載した加速度センサーから歩容を解析してZVPを検出し，キャンセルする方法を新たに開発した．推定はカルマンフィルタを利用して行った．

C) 評価

図2-1-28に平面を移動したときに軌跡と，階段を上り下りする時の軌跡を推定した結果を示す．図2-1-28の左側の平面の移動では，GPSの計測値を参考までにプロットしているが，軌跡の推定は慣性センサと歩容だけで行っている．このように，慣性センサと歩容を利用することでGPSよりも細かい周期で，連続的な軌跡を推定出来ていることが確認出来た．また，段差の踏破では，累積誤差により徐々にずれては行くものの，最初の段差の乗り越えの軌跡を見ると，段差の高さや斜度がわかるほど正確な軌跡が推定出来ることを確認した．

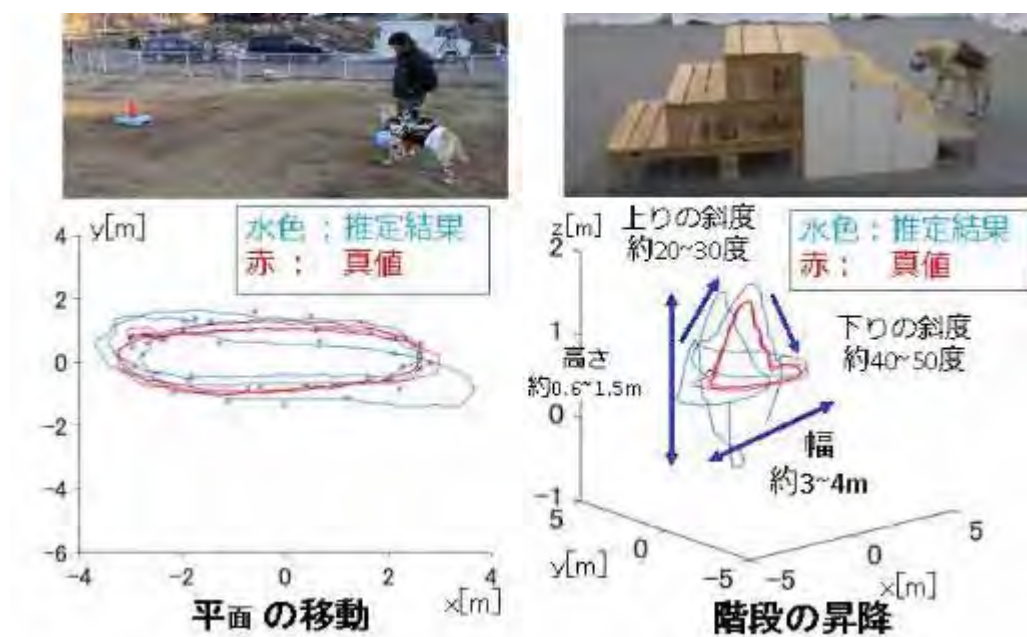


図2-1-28 IMUセンサと歩容から推定された軌跡の例

加えて、ImPACT TRCのフィールド評価会では、高さ1.48mの土砂の山を作成し、イヌがその山を登る時の軌跡を推定し、軌跡から山の高さを求める実験を行った。図2-1-29に実証実験の様子と、推定された軌跡をしめす。イヌは約4秒で山を駆け上り下った。推定した軌跡から、高さが1.72mと計測された。山の高さを誤差が数十cm程度で計測出来ることを確認した。土砂災害の現場では、土砂が堆積している場所に人間が流されている可能性がたかく、そのような土砂の堆積がある場所の計測にも利用出来る可能性があることが確認出来た。



図2-1-29 IMUセンサと歩容から推定された軌跡の例

2 -6) 非侵襲な刺激を利用したイヌの行動誘導

人が容易に立ち入ることができない瓦礫や山岳地帯や狭所において、救助犬が負傷者の確認や被災状況を確認するのを補助することを目標として、光を利用してイヌの行動を操る行動誘導スーツを開発した。救助犬がハンドラから直接目視できない瓦礫や狭所を探索し、負傷者や被災地の状況を確認するためには、離れた場所からイヌに行動を指示する方法が必要である。これまでハンドラの声や身振りで行ってきた行動の指示では、イヌを直接目視できない状況においては適切な指示を行うことが困難である。本研究ではこの課題を解決するためにイヌ用行動誘導スーツの開発を目指した。本研究開発を通して、イヌ用スーツに搭載した光源でイヌを操る世界初の行動誘導スーツを開発した(図2-1-30, 図2-1-31)。



図2-1-30 小型レーザー光源を搭載した行動誘導スーツ（左）と小型レーザー光源（右）



図2-1-31 LEDスポット光源を搭載した行動誘導スーツ（左）とLEDスポット光源（右）

表2-1-5 開発した各光源と利用出来る環境

	レーザー光源	LEDスポット光源
屋内		
屋外		

イヌが輪郭のはっきりした明るい光を発見して追いかけるという特性を利用して、非侵襲な光の刺激で行動を操る。輪郭のある明るい光として、緑色の高輝度レーザを利用したレーザー光源（図2-1-30）とLEDと凸レンズを利用したLEDスポット光源（図2-1-31）の2つを開発した。最初は、レーザーを利用して、イヌが見つけやすい色や形について検証を行った。赤色、緑色、青色の3色と、点、円、線分の3つの形状について比較したところ、色は何色でも反応は変わらず、形状は点がもっとも反応が良いことが分かった。形状については、点レーザーをプリズムで偏光して円や線分の形状をつくっていたため、円や線分では輝度が暗くなり見つけにくいことが分かった。そこで、入手しやすい緑色のレーザーを利用して、点形状の小型レーザー光源を開発した。レーザー光源を利用してイヌの誘導実験を行ったところ、屋内ではイヌの誘導が出来ることが確認できた。一方で、屋外の芝生や雑草が生えている場所では、点の大きさが小さく、芝生や草むらの間に埋もれてしまい、イヌが光を発見

出来ないことが分かった．そこで，屋外の芝生や草むらでも見つけることができる数cmの大きさをもったスポット光を，LEDと凸レンズを利用して照射する方法を新たに開発した．開発したLEDスポット光源を利用して，前方の地面に輪郭がはっきりした明るいスポット光を照射することで，屋内・屋外の両方でイヌが見つけられる光源を開発することができた（表2-1-5）．

光源を，イヌの視野のどこに照射するのが適しているか検証を行い，イヌが見つけやすい光の照射位置の条件を明らかにした（図2-1-32）．図には2頭の光に反応した際に反応があった場所が書かれている．この多角形の中心を照射位置に相当する場所（角度）に決定した．このイヌの照射位置の条件をもとにイヌの行動誘導スーツの光源の設置位置と，光源の角度を決めた．



図2-1-32 イヌが光を発見した視野の調査結果の一例

行動誘導スーツには，前側，右側，左側の3つの異なる向きを照らす光源が搭載されていて，離れた場所にいるオペレータがジョイバットで光を照射する向きを切り換えることで，イヌの進む向きを切り換えることができる．イヌが本来持ち備えている明るい光を追う性質を利用し，光を追う訓練を組み合わせて行うことで数十秒の長い時間にわたり，連続してイヌに行動を指示することができるようになった．この結果，屋内と屋外の環境において，スーツ搭載光源を利用してイヌを誘導出来ることを確認した（図2-1-33，図2-1-34）．

行動誘導スーツは，訓練を受けたイヌで利用出来ることを実験から確認し，ImPACT TRC のフィールド評価会の公開実験において，部屋の中の遺留品を捜索するデモと，廊下から部屋に入り特定の場所まで移動するデモを行った．参加者や，公開実験の動画から有効性を確認することができた．一方で，報告書執筆時点で，災害救助犬への適応までは至らなかった．今後，災害救助犬にも光を追う訓練を行うことで，行動誘導が出来るように取組を継続して行う．加えて，本技術は，救助犬以外の使役犬やペットの仕付け等での利用できる技術であり，新しい研究領域の開拓を行う．



図2-1-33 屋内フィールドで高輝度LEDスポット光源を利用したイヌの行動誘導



図2-1-34 屋外フィールドで高輝度LEDスポット光源を利用したイヌの行動誘導

3) 成果の活用

- ・古野電気にサイバー救助犬スーツの製造を委託し、ドーンにスマホHIの製造を委託し、実用化を進めてきた。
- ・日本救助犬協会に貸し出しを行っており、定期訓練にて実際の使用を想定した訓練を継続的に実施している。日本救助犬協会からは、現場で使用可能なレベルにあると評価されており、貸し出しスーツは出動可能な形で預けられていることから、実災害出動時に使用されるのは時間の問題であると考えている。ただし、1で述べたように、2018年末現在の段階では実災害への適用には至っていない。

そのほかには、下記のような要請があった。

- ・山岳救助隊からの活用の要請があった。2017年度、2018年度に依頼があったが、直前の依頼で日程が合わず、現場適応には至っていない。
- ・地方自治体からの鳥獣被害の調査への活用の要請があった。スーツを装着できる使役犬を選定中。今年度は適合できるイヌの確保が出来ないため、来年度に現場適応を行う。
- ・省庁が管轄する部署の使役犬に対して、情動推定の適応の依頼があり、麻布大学の動物実験として心電計測スーツ（6号機）を使役犬に装着し現場の課題に適応出来るか検証を行った。データを解析した結果、有効性であることを示すデータが得られ、依頼主に報告を行った。来年度の現場適応に向けて検討中。

社会実装を進めるために、下記のようなマイルストーンを策定した。

