

学 術

レスキューロボドッグ

ー災害救助犬の行動計測スーツの開発と探査行動の可視化ー

大野和則¹⁾・古森雄一²⁾・山口峻平³⁾・鈴木高宏¹⁾・田所 諭²⁾

1) 東北大学未来科学技術共同研究センター

2) 東北大学大学院情報科学研究科

3) 東北大学工学部機械知能・航空工学科

I. はじめに

著者らは、人と動物とロボット技術を融合して、瓦礫の中に取り残された被災者を探査・発見する方法について研究を行っている。著者らが注目した動物は災害救助犬で、本開発プロジェクトの名称はロボドッグである。本稿では、著者らがロボドッグPJで取り組んでいる、災害救助犬の探査を高度化する研究（図1）について紹介する。

災害救助犬は、高い身体能力で瓦礫の上を移動し、鋭敏な嗅覚で瓦礫に埋もれている被災者の臭いをかぎ分け、発見することができる。犬の嗅覚は、感度だけでなく、臭いをかぎ分けるという点で現在のセンサではまねすることができないすぐれた能力を持っている。

著者らは、これまでレスキューロボットについて研究を行ってきた。レスキューロボットの目的は、

被災した建物内部の状況や、取り残された被災者を、人の代わりに安全に探査することである。これまで、足場が不安定な瓦礫の上を移動するために、クローラロボット、蛇型ロボット、飛行ロボットなど、様々なタイプのレスキューロボットを研究開発した。これらのロボットは、災害現場を探索するロボットとして優れた能力を持っている。その一例として、NEDOの支援を受けて東北大学や千葉工業大学などで共同開発したクローラロボットQuinceは、福島第一原発の内部の調査にも利用され、建屋内の階段を上って、2階以上の階の線量を計測することに貢献した^{1,2)}。このような優れた移動能力を持ったレスキューロボットでも、地震や自然災害の現場では、移動できない場所が数多く存在する。

また、他の研究グループでは、被災者を発見する技術の開発も行われてきた^{3,4)}。カラーカメラ、熱画像カメラで被災者の体の一部を発見する技術や、CO₂センサで瓦礫の中の被災者の呼吸を発見する方法、ウルトラワイドバンドレーダーで心拍を検出する方法などが研究されている。しかし、災害現場で、瓦礫に埋もれた被災者を発見するには、まだ多くの課題が残っている。

災害救助犬の探査は、これらロボット技術の限界や課題を、大きく飛び越え、実際の現場で人を発見することが出来る方法である。また、ロボット技術を災害救助犬の探査に利用することで、災害救助犬の探査を現在よりも高度化することができる。本ブ

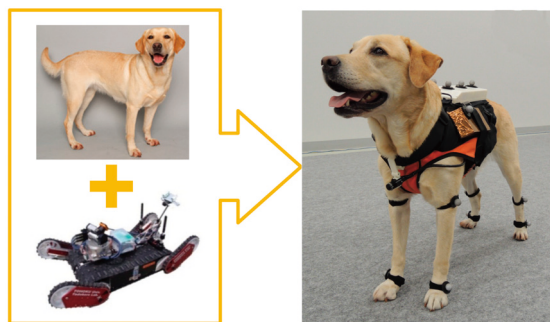


図1 ロボドッグ：人と犬とロボット技術を融合した被災者探査の方法

ロジェクトで考える、ロボット技術の利用方法は、

1. 災害救助犬の探査軌跡や速度を記録し探査した場所を可視化すること、2. 犬の生体信号や行動パターンから犬の内部状態や被災者探査の信頼性を評価すること、3. 再度探査したい場所に災害救助犬を誘導することを考えている。このような成果をえるためには、犬の行動学や生理学的な知見が必要不可欠であり、本稿をご覧いただいている方の知恵もお借りして、研究開発と、実用化を進めていきたい。

Ⅱ. 災害救助犬の探査とロボット技術を利用した探査の高度化

災害救助犬は、ハンドラーの指示に従って災害現場を探査し、優れた嗅覚で人間の発する臭いをかぎ分けて被災者を発見する。ハンドラーとは、犬に行動の指示を出して、ハンドリングする人間のことを指す言葉である。空気中をただよう複数の人間の臭いの中から、犬の周囲で活動している人間と、被災者の臭いをかぎ分けて、臭いを頼りに被災者を発見し、吠えて発見した被災者の位置をハンドラーに教える。

災害救助犬は、瓦礫、林、森、土砂災害など、あらゆる場所で被災者を探査することができる。人間よりも軽い体重（約15kg～30kg）と、軽快なフットワークで、足場の悪い所や、木が生い茂った茂みの中も探索することができる。1000㎡を超える森や瓦礫の中で、臭いを頼りに被災者を発見することができる。災害救助犬の探査方法は非常に有効で、条件が整えば、人よりも遙かに短い時間（数分）で、臭いを手がかりに被災者を発見することができる。

著者らは、災害救助犬の探索をよりよくする方法を探るため、日本救助犬協会⁵⁾の探査犬の訓練に参加し、調査を行った。この調査から、災害救助犬の探査の有効性を再確認すると共に、さらに探索をよくするための開発項目が分かってきた。著者らが注目した改善点は、1. 災害救助犬の探査軌跡や速度を記録し探査した場所を可視化すること、2. 犬の生体信号や行動パターンから犬の内部状態や被災者探査の信頼性を評価すること、3. 再度探査したい

場所に災害救助犬を誘導することである。

探査を記録して地図上に探査結果を集約することで、災害救助犬が探査した場所や、被災者を発見した場所を、レスキュー隊員に伝えることが出来る。また、リアルタイムに犬の探査軌跡や、探査の信頼性を可視化することで、ハンドラーも探査した場所を確認しながら、見落としがないように災害救助犬を誘導し、探査を行うことができる。また、平常時は、犬の訓練や、犬の探査の有効性を確認するデータとして利用することを目指している。このような探査記録が蓄積されることで、犬の探査の有効性についての社会的認知も高まると考えている。

Ⅲ. レスキューロボドッグ

災害救助犬に行動計測スーツを身に付けて、探査中の活動を記録する。計測したデータから探査活動をリアルタイムに可視化する方法を開発する。救助犬が装着するスーツには、カメラ、マイク、GPSに加えて、加速度、角速度、地磁気、高度計、温度が計測できるセンサが搭載されている。そのセンサデータを基に、救助犬の探査中の軌跡、被災者を発見した位置、犬の内部状態を推定し、見ている映像と合わせて地図上に集約する。ハンドラーは、手元のタブレットなどで地図を見て犬の探査活動を把握し、次の探索場所に災害救助犬を誘導する。被災者を発見した際は、レスキュー隊員に地図を見せることで被災者位置の情報を共有する。

これまでも、ハンドラーが災害救助犬の探査を記憶して、口頭やメモを利用して探査場所を伝えることが行われてきた。しかし、記憶やメモでは正確な情報が伝わらないこと、また、探査の履歴が残らないため、犬の探査の有効性を示す資料が乏しいことが課題であった。地図の一例として、著者がメモ帳に書き取った、災害救助犬の建物内の探査軌跡を図2に示す。図2の左側が1人目の模擬被災者を発見したときの軌跡、右側が2人目の模擬被災者を発見した時の軌跡である。同じフロアに2人の模擬被災者が隠れていた。図中のVと書かれているところに模擬被災者が隠れていた。軌跡を見ると、Vの近

くを何度も繰り返し移動してから発見に至っていることや、フロア全体をまんべんなく探査していることが分かる。しかし、探査軌跡をメモに残す際、全ての犬の行動を目で追うことは出来ず、一部は、およその軌跡になっている。また、メモからは、現場の大きさや、探査スピード、滞在時間等の情報は欠落している。実際の現場では、この軌跡から見落としがなかったかを判断することは難しい。レスキューロボットで培った探査を記録する技術を利用することでこのような問題を解決する。



図2 建物内を探索する災害救助犬の探索軌跡のメモ：ビルの1フロアに隠れている模擬被災者の2名を探索した時の探索軌跡。数字の順番で移動。

IV. 行動計測スーツの開発

著者らが開発した動作計測スーツの一部を図4に示す。著者らはこれまで複数の計測スーツを開発した^{6,7)}。図3の左側が大型犬用の動作計測スーツ（3号機）になる。図3の右側が、その後改良を加えた、大型犬と中型犬用の動作計測スーツ（4号機）になる。表1に、3号機と4号機の仕様を示す。行動計測スーツは、市販の犬用のベストをベースに開発を行った。ベストに、行動を計測するセンサ、センサデータの記録・解析用の小型情報処理装置、通信機器、電池を搭載した。脱着がしやすいようにベストの留め具をかえるなどの改良を行った。

本研究では、行動計測スーツが着けやすい、大型犬、中型犬を対象に装置の開発を行った。大型犬の体重が20～30kg、中型犬の体重が15～25kgと想定して装置の開発をおこなった。行動計測スーツは、次の点に気をつけて開発を行った。i.行動計測スーツ

の重量が体重の10%未満になること、ii. 災害救助犬の探査時間は1時間程度なので2時間程度の稼働すること、iii. 犬の動きを妨げない装置のレイアウトと周囲に引っかからない形状であること、iv. 行動計測スーツを簡単に装着・脱着できること。

生物のバイオリギングの観点では、2時間程度のバッテリーの稼働時間は短いと感じる方もいると思われる。本研究では、探査中のデータをリアルタイムに記録、解析、無線通信を介して外部でモニタリングすることが目的であり、省電力化よりも、短い時間でもしっかり行動が計測できることを目指した。

iii.のレイアウトは、重い物を左右に均等に配置すること、搭載した装置の重さが前足にかかるように工夫した。均等に配置することでベストに復元力が働き、装置が傾いても元の位置に戻ることができる。また、前足が重さを支えることで、体重の10%程度ある行動計測スーツを装着しても、走ったり、飛び跳ねたりすることが可能になる。

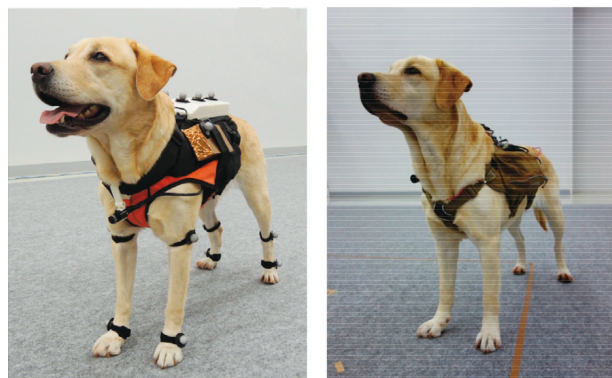


図3 災害救助犬用の行動計測スーツ：大型犬用の行動計測スーツ（3号機）(左)、大型・中型犬用の行動計測スーツ（4号機）(右)

表1 行動計測スーツの仕様

	3号機	4号機
重さ	2.8kg	1.1kg
稼働時間	2.5h	2.5h以上
カメラ（解像度、視野）	1280×720、114°	1920×1080、160°
マイク	なし	48 kHz、モノラル
IMU	1個	3個
GPS	単独測位、5Hz	単独測位、5Hz
無線通信	25m程度	50m程度
防塵・防水	防滴	防滴

V. 災害救助犬の行動計測実験

著者らは、日本救助犬協会の協力のもと、開発した災害救助犬用の行動計測スーツを、実際の災害救助犬に付けて、訓練中の探査活動を記録する試みを行っている。災害救助犬の訓練は、日本救助犬協会が所有する訓練施設や、解体作業途中の建物を借りて行った。これまで、山間部、林、崖、建物、瓦礫などの模擬フィールドで探査行動を記録した。ここでは、1例として、瓦礫を模擬した訓練で計測したデータを紹介する。

図4に、計測スーツ（3号機）を装着した災害救助犬を示す。犬種はラブラドル、体重が約30kgの大型犬で、スーツは体重の10%未満の重さであった。図5に解体中の瓦礫を利用して作成したコンクリート瓦礫の訓練フィールドを示す。図5のvictimと書かれている場所に、2名の模擬被災者が隠れていた。

災害救助犬は、風下から現場に入り、数字の順に、矢印の方向に移動しながら、瓦礫に埋もれた2名の被災者を発見した。災害救助犬の首元に付けたカメラの映像を図6に示す。映像の右上に犬の下あごから首にかけて部位が写っている。また、円で囲ったところに、模擬被災者の顔が写っている。このように、犬が探査中の見ている風景と犬の顔の向きを記録することが出来た。また、図6の映像を観察すると、コンクリートの瓦礫から引っかかりやすい鉄骨などが多数でている。スーツの突起を少なくすることで、このような鉄骨にも引っかからずに、その合間を縫って被災者の臭いを確認することが出来た。

図7に、GPSで計測した探査軌跡を示す。背景の



図4 大型犬用の行動計測スーツ（3号機）を装着した日本救助犬協会の災害救助犬

衛星写真は、建物を取り壊す前の写真になっている。この建物を壊したあとのコンクリート瓦礫を探査した。建物があつた所を何度も回るように軌跡が描かれている。軌跡が密集しているところは、何度も行き来して臭いを確認したことを示している。またGPSの一個一個のデータはタイムスタンプを持っていて、数分でそれぞれの被災者を発見したことを確認した。

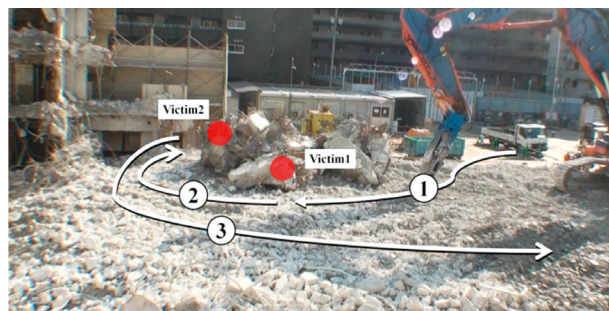


図5 模擬瓦礫に隠れた被災者を探査：数字の順に救助犬は探査



図6 搭載カメラが捕らえた瓦礫中の模擬被災者



図7 搭載センサで計測した探査軌跡：GPSデータをGoogle Mapの機能を利用して、解体される前の建物が写っている衛星写真の上に描画

VI. 記録したデータの可視化の取り組み

記録したデータの可視化の取り組みについて紹介

する。これまでに紹介した探査軌跡は、探査が終わったあとデータを吸い上げて、オフラインで表示していた。ハンドラーやレスキュー隊員が現場でリアルタイムにデータが確認できるように、1. 複数のタブレットでリアルタイムに探査軌跡を表示する取り組みを行っている。また、被災者の発見位置を地図に付加するために、2. 被災者発見位置の自動マーキングの取り組みをおこなっている。

複数のタブレットでリアルタイムに探査軌跡を表示する取り組みでは、インターネット上のクラウドサーバを利用して、複数の端末から同時に表示することを試みた。行動計測スーツに搭載したGPSやIMUのデータを、無線ネットワーク経由でクラウドサーバに自動で登録する。データを確認したいユーザーは、地図表示のウェブページにアクセスすることで、サーバに登録した探査軌跡等を確認する(図8)。地図に軌跡や現在位置を表示する機能はGoogle Mapを利用して構築した。図9に、山間部

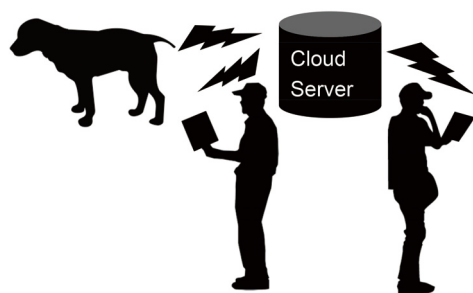


図8 クラウドサーバを利用した複数端末からの探査軌跡の閲覧

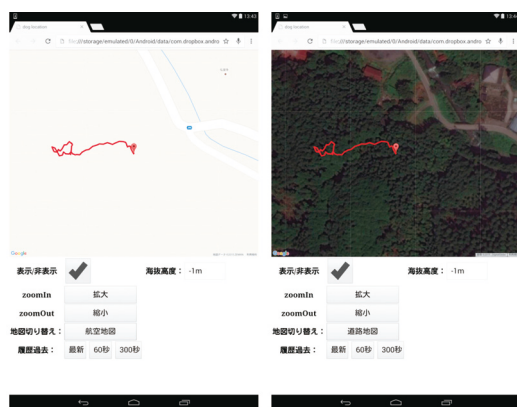


図9 Google Mapを利用した地図と探査軌跡の表示画面：(左)道路地図の背景に軌跡と現在位置を表示、(右)航空写真の背景に軌跡と現在位置を表示

を探査した際の災害救助犬の探査軌跡、及び、現在位置を示す。サーバに登録したデータを複数の端末で表示することができた。背景は道路地図と航空写真から選択することができる。また、グローブを付けた手や、屋外の見づらい環境でも操作できるように、拡大・縮小など必要なボタンを大きく表示した。

災害救助犬が被災者を発見した位置を自動でマーキングする方法も開発している。ハンドラーが、地図上に被災者を見つけた位置をマークする方法も考えられるが、手袋をした状態でタブレットなどの操作を極力少なくするために、自動マーキングの方法を開発している。

被災者を発見した際に、災害救助犬が行う共通の行動について調査を行った。著者らが記録した災害救助犬の訓練動画をもとに、17頭の災害救助犬について、被災者を発見した時の共通の行動について調査した。表2に調査結果を示す。

犬は連続で吠えるように訓練されている。そのため、全ての犬で、連続で吠える行動が観察された。興味深いのは、被災者を発見した時の他の行動としては、尻尾を振る動作と、臭いがする場所を掘るといった動作も同時に観察された。これらの動作を手がかりに被災者を発見したことを検出し、その時刻のGPSデータと紐付けることで、地図上に被災者位置をマッピングする。

最初の取り組みとして、音声と体の動きから連続吠えを検出して、被災者位置をマッピングすることを試みた。音声だけでなく、体の動きについても検討した理由は、災害現場では、ヘリや重機の音がノイズになり、犬の鳴き声が検出できない可能性もあると考えたからである。

体の動きについては、背中に付けた加速度センサで計測した。図10に加速度センサのデータを示す。矢印のところが吠えた瞬間の加速度の値である。このグラフから、体の動きのデータにも、連続に吠える動作を検出するための特徴が存在することが確認できた。手法の詳細は、参考文献^{7,8)}に譲るが、大型犬の連続吠えについては、音声、体の動きを元に、約90%の高い精度で検出することができた。図11に、探査中の軌跡と、体の動きで被災者を検出した結果

を示す。被災者を発見した位置のマークだけ色を変えて表示することができた。

表2 被災者発見の自動マーキングに利用可能な災害救助犬の行動：17頭の解析結果

観察された動作	頻出度[%]	平均継続時間[s]	動作の周期[Hz]
連続吠え	100	28	1~2
尻尾を振る	100	28 以上	1~3 (大型犬) 1~2 (中型犬)
掘る (引っ掻く)	12	1	6~8

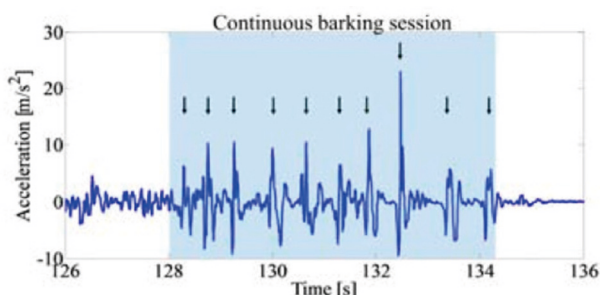


図10 連続的に吠えている時の慣性センサのデータの例

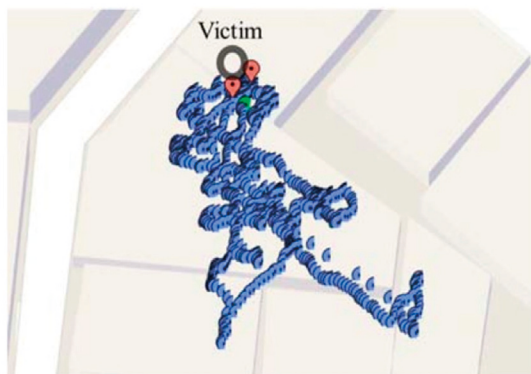


図11 被災者を発見した位置と探索軌跡を地図上に記載

VII. 今後の展開

著者らは、今後の研究の展開として、1. 行動計測スーツの改良、2. GPSが利用できないエリアの探索軌跡の推定、3. 犬の内部状態の推定、4. 犬の行動誘導を考えている。これらの研究を行うためには、犬の行動学的、生理学的な知見が必要不可欠になると考えている。

行動計測スーツの改良としては、防塵・防水性能の向上、計測スーツのつけ心地の改善、さらなる軽量化が考えられる。防水・防塵性能の向上と軽量化

については、使用する機器の見直しを行うことで解決ができる。一方、計測スーツの付け心地などは、犬が言葉をしゃべることができないため、主観評価を行うことが出来ない。そこで、犬のストレス指標などを計測して、評価を行う方向などが考えられる。犬のストレス指標としては、古くから唾液中のコルチゾイルの変化が用いられてきた。著者らも従来研究を参考に、装置の付け心地を評価する。他の良い指標があれば教えていただきたい。

GPSが計測できない場所の探索軌跡の推定方法は、カメラの映像から軌跡を推定するVisual SLAMという方法や、搭載した慣性センサの値を積分して求める方法などが考えられる。著者らは、後者の方法で軌跡の推定を行っている。人間の軌跡の推定では、足の着地に注目して積分誤差をキャンセルする方法が提案されている。同様の手法を犬に適用することはできないものの、同じように、累積誤差をキャンセルするのに利用できる犬の歩容の特徴について調査を行った。図12に示すように、犬にマーカーを付けて、犬の歩容をモーションキャプチャで計測し、推定の誤差を打ち消すのに利用できる歩容の特徴について調査した。図13に瓦礫を移動する際の犬の速度を示す。犬に固定した座標系で計測した速度のため周期的に速度が大きくなっていることが確認できる。この速度データとIMUで計測したデータを解析することで、加速度の積分から推定した速度の誤差をキャンセルする方法を発見し、精度の検証をおこなった^{9,10)}。今後も、動作の解析を行い、工学的に利用出来そうな歩容の特徴を見つけていきたい。

犬の内部状態の推定では、特に、探索の信頼性に関係する、疲れや、集中力の低下といった状態を判断したい。これまでも心拍から身体的なストレスを



図12 歩容を計測するためのマーカーを貼り付けた犬

計測する方法などは提案されているものの、著者らのロボドッグで利用できそうな方法はまだ見つかっていない。行動誘導については、犬や牛を対象に、音や振動で誘導する方法が研究されていて、これらを参考にしながら研究開発を行おうと思っている。

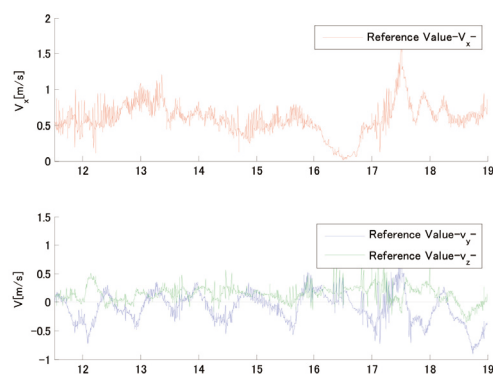


図13 犬の速度の解析：瓦礫を移動した時の犬の速度

VIII. まとめ

本稿では、ロボドッグの紹介と、現在の取り組みについて説明した。災害救助犬とその探査を高度化する取り組み、災害救助犬の行動計測するスーツの開発、実際の災害救助犬に行動計測スーツを身に付けて計測したデータの紹介を行った。また、現在取り組んでいる探査行動の可視化と、今後の展望についても説明した。今後の展望では、犬の行動学や生理学的な知見が必要不可欠であり、その分野の方とも共同で研究を進めたいと思っている。

参考文献

- 1) Eric Rohmer, Kazunori Ohno, Tomoaki Yoshida, Keiji Nagatani, Eiji Konayagi, Satoshi Tadokoro, "Integration of a Sub-Crawlers' Autonomous Control in Quince Highly Mobile Rescue Robot," Proc. of 2010 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, A3-4, 2010.
- 2) Eric Rohmer, Tomoaki Yoshida, Kazunori Ohno, Keiji Nagatani, Satoshi Tadokoro, Eiji Koyanagi, "Quince: A Collaborative Mobile Robotic Platform for Rescue Robots Research and Development," Proc. of International Conference on Advanced Mechatronics, pp. 225-230, 2010.
- 3) Minh Huu Nguyen, T. Takamori, S. Kobayashi, S. Takashima, "Development of carbon dioxide sensing system for searching victims in large scale disasters," Proc. of SICE 2004 Annual Conference, pp. 1358-1361, 2004.
- 4) A. Nezirovic, A.G. Yarovoy, L.P. Ligthart, "Signal Processing for Improved Detection of Trapped Victims Using UWB Radar," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 48, No. 4, pp. 2005-2014, 2010.
- 5) 日本救助犬協会HP <http://www.kinet.or.jp/kyujoken/>
- 6) 坂口尚己, 大野和則, 竹内栄二郎, 田所 諭, "災害救助犬の動作計測," ロボティクス・メカトロニクス講演会, 1A2-B11, 2012.
- 7) 古森雄一, 藤枝卓明, 大野和則, 鈴木高宏, 田所諭 "音声と慣性センサに基づく災害救助犬の吠え検出" ロボティクス・メカトロニクス講演会, 1A1-U10, 2015.
- 8) Yuichi Komori, Kazunori Ohno, Takuaki Fujieda, Takahiro Suzuki, Satoshi Tadokoro, "Detection of Continuous Barking Actions from Search and Rescue Dogs' Activities Datsda," Proc. of 2015 IEEE/RSJ Inc. Conf. on Intelligent Robots and Systems, 2015 (To appear).
- 9) Sakaguchi, N., Ohno, K., Takeuchi, E., and Tadokoro, S. Precise velocity estimation for dog using its gait. In Proceedings of The 9th Conference on Field and Service Robotics, 2013.
- 10) 藤枝卓明, 大野和則, 古森雄一, 田所諭 "瓦礫や階段上の犬の移動速度の高精度化に向けた歩容解析" ロボティクス・メカトロニクス講演会, 1P2-H05, 2015.

謝 辞

本研究は、日本救助犬協会のチームさくらの災害救助犬達の協力のもと行われた。また本研究開発は、科研費若手A、ImPACT、CRESTの支援を受けて行われた。