

ロボット遠隔操作のためのポテンシャル法を用いた注意環境の記録と提示手法

Storing and Warning Method of Perilous Environment Using Potential Field for Teleoperation of Robot

○ 河野 仁 (東大) 正 田村雄介 (東大) 正 山下 淳 (東大)
正 神村明哉 (産総研) 富田康治 (産総研) 正 鈴木 剛 (東電大)
正 浅間 一 (東大)

Hitoshi KONO, The University of Tokyo, kono@robot.t.u-tokyo.ac.jp

Yusuke TAMURA, The University of Tokyo

Atsushi YAMASHITA, The University of Tokyo

Akiya KAMIMURA, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

Kohji TOMITA, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

Tsuyoshi SUZUKI, Tokyo Denki University

Hajime ASAMA, The University of Tokyo

Teleoperated robot systems have recently been deployed in disaster response action such as gathering information in a disaster-stricken area. In that situation, it is important to utilize the failed operational information when the operator trains teleoperation skill. In this paper, we propose a storing and warning method of perilous environment for teleoperation of rescue robot using potential field. Further, we confirmed that proposed method can detect the perilousness of the current environment based on previous perilous environment and indicate it to the operator of the rescue robot.

Key Words: Operational Support, Teleoperated Robot, Rescue Robot, Perilous Environment

1 緒言

震災などの被災地における迅速かつ確実な情報収集活動の実現が喫緊の課題である。人手による直接的な情報収集活動だけでなく、2次災害の危険性などの理由から、近年では様々なロボットシステムが環境情報の収集のために被災地に導入され多くの成果を得ている [1]。しかし、それと同時にロボットが転倒し帰還不可能になる物や通信ケーブルの切断、スタックなど様々なトラブルに見舞われている。原因として想定外環境でのロボットシステムの利用や、訓練不足、ロボットシステムの周囲環境情報の不足など、様々な要因が考えられる。これらの事故や失敗はロボットシステムが回収できないだけでなく、被災地情報の収集という本来の目的を果たせず、その後の復旧・復興活動にも支障をきたす可能性がある。このようなトラブルを回避するために、頑健で高機動なロボットシステムの開発や、遠隔操作性の向上が重要であり様々な研究が行われている [2, 3]。これらのシステムは遠隔操作に必要不可欠であるといえる。また、ロボットシステムの動作における意思決定は基本的に人間が行う。そのため、ロボットシステムが置かれている環境の情報を多くオペレータに提示する場合、オペレータは様々な情報、画面に気を配る必要があるため、ある程度の情報はロボットシステム側で判断し、処理後の情報をオペレータに提示する半自律な遠隔操作支援技術も重要である。

一方、被災地におけるロボットシステムの導入の課題として、運用面でのアプローチも重要であると浅間は述べている [4]。これは、平時からのロボットシステムの活用や災害対応のための訓練を行うことで、ロボットシステムを被災地に即投入できるようにするためである。現在、ロボットシステムの性能向上に関する研究は多いが、運用を含めた研究は少ない。平時からロボットシステムの遠隔操作訓練を行うことを始め、実際の現場でロボットシステムを活用するためには、訓練時の事例を他者の訓練や実際の現場で活用することが重要である。実用化して間もない災害対応ロボットシステム（以下、レスキューロボット）における遠隔操作では、自動車や建設機械の運転と異なりエキスパートが少な

く、さらには被災地は環境状態が想定し難いため常に臨機応変な操縦が要求されると考えられる。そこで本研究では、臨機応変な遠隔操作を妨げず、少なくとも過去の遠隔操作ミスや失敗事例を再現させないことを目的として、遠隔操作訓練時における注意すべき環境を記録・活用することに着目する。具体的には、過去に経験したミスや失敗した環境を記録しておき、実際の現場において、遠隔操作の注意すべき環境に接近した場合、レスキューロボットはオペレータに注意喚起を行い、少なくとも危険な遠隔操作を実行させないように支援するコンセプトである。ロボットシステムの自律動作や自動車の自動運転などでは、障害物回避や移動物体との衝突リスクの計算にポテンシャル法が採用されている [5, 6]。本稿でもレスキューロボットが注意すべき環境と接近していることを検知するためにポテンシャル法を採用する。しかし、本稿の提案手法では文献 [5] や文献 [6] と異なりロボット自体がポテンシャルを基に意思決定は行わない。あくまでもロボットシステムの動作の判断はオペレータが行う。

本稿では上記提案システムの基礎的検討として、注意環境の記録手法と提示手法について検討を行ったので報告する。

2 提案手法

本研究で開発するシステムの概略図を図 1 に示す。また、本稿では図 2 に示すクローラ型レスキューロボットを前提に議論を進める。

図 1 において、まずオペレータは遠隔操作訓練時、遠隔操作ミスなどにより落下やスタックなどを起こした場合、その環境を記録するシグナルをユーザインタフェースを用いてレスキューロボットに送信する。そのシグナルを受信したロボットは、周囲の物体までの距離情報を環境情報として記録する。記録した注意すべき環境情報はレスキューロボット内で保存され、実際の現場にてレスキューロボットが注意環境と類似する環境を観測した場合、レスキューロボットはオペレータに注意喚起を行う。

提案手法の効果として、訓練時の情報を本番で活用できるだけ

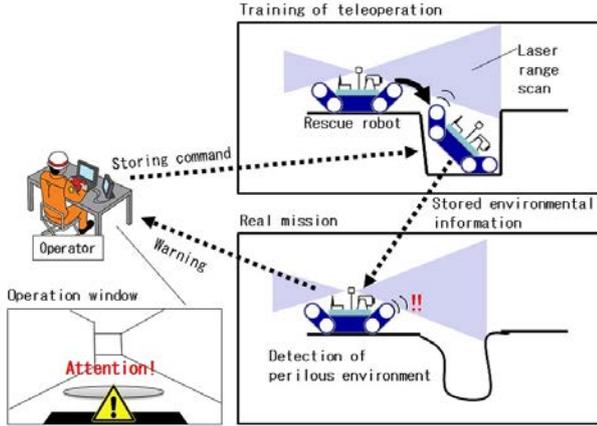


Fig.1 Simplified overview of proposed method

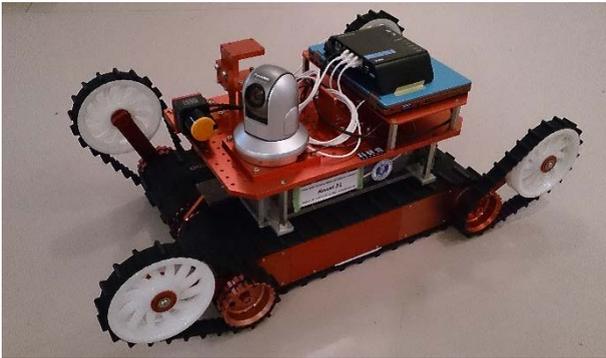


Fig.2 Rescue robot Kenaf-II

でなく、他者の訓練情報も保存・活用が可能となる。そのため、遠隔操作初心者への訓練支援などにも応用できると考えられる。

次節から各要素機能について詳細を述べる。

2.1 注意環境の記録

本稿では、環境情報の記録にレスキューロボット周囲の壁や天井、障害物までの距離を用いる。距離センサとしてはレーザ測距計 (Laser range finder: LRF) を用いる。レスキューロボットに実装された LRF から得られる情報は S とし、 $S = (s_1, s_2, \dots, s_n)$ を LRF から得られる各計測角度における距離データとする。注意環境の S は S_p と表記することとする。

LRF から得られる S は、データ数が多く処理の計算コストが高くなる可能性があると同時に、全ての距離情報を記録したとしても、類似した環境の検知が困難となる。一方、例えば 1 つの距離データのみで環境を観測すると、レスキューロボットは常に注意環境を検知する可能性も有り、LRF の使用データ数と類似環境の検出性能はトレードオフの関係にあるといえる。本稿では、LRF から有限個の距離情報が得られるとして注意環境 S_p を $S_p = (s_1^p, s_2^p, \dots, s_n^p)$ と定義する。

レスキューロボットが注意環境と遭遇した場合、オペレータが遠隔操作インタフェースを用いてレスキューロボットに適宜 S_p を記録する指示を与える。

2.2 注意環境の事前検知

前節で述べた方法により、遠隔操作時の注意環境が記録される。注意環境 S_p は既に事故に遭遇している状態であるため、 S_p に遭遇する前に検知し、オペレータへ注意を促さなければならない。そこで、注意環境とした環境状態に斥力ポテンシャル (以下ポテンシャル) を持たせ、レスキューロボットが現在観測している状態 S_c と、注意環境の状態 S_p 間のユークリッド距離を元に次式に示すポテンシャルを算出する。

$$U(S_c, S_p) = w \cdot \exp\left\{-\frac{d^2(S_c, S_p)}{\sigma^2}\right\} \quad (1)$$

ここで、 $S_c = (s_1^c, s_2^c, \dots, s_n^c)$ とする。 w はポテンシャルの重みパラメータであり、 σ はポテンシャルの拡がり制御パラメータである。ユークリッド平方距離 $d^2(S_c, S_p)$ は $\sum_i (s_i^c - s_i^p)^2$ である。

S_p から S_c へのポテンシャルを計算することで、 S_p に接近するごとに訓練時に経験した遠隔操作ミスが再発するリスクが高くなることを提示できるようになる。レスキューロボットはオペレータに対して常にポテンシャルを提示し、注意環境との接近を認識させる。

2.3 注意環境検知距離

本稿の手法では訓練時に記録された注意環境 S_p を事前に検知する必要があるが、事前に検知しなければならない注意環境からの距離 D_a を以下のように定義する。

$$D_a = 2T_d \cdot V_r \cdot F_s \quad (2)$$

ここで、 T_d は遠隔操作インフラにおける通信遅延時間であり、単位は [s] とする。 V_r はロボットシステムの最大移動速度であり単位は [m/s] とする。 F_s は安全率とする。

式 (2) は、ロボットが観測した情報 (e.g. カメラ画像やセンサ情報) を通信伝送路を介してオペレータの遠隔操作卓に送信し、それを見たオペレータが迅速に次の行動の指示を遠隔操作卓に入力、その指示がレスキューロボットに伝達されるまでの時間を計算する。その時間にロボット移動速度を掛けることにより、注意環境を回避するのに間に合わない距離が計算され、その距離より先に注意喚起することで注意環境との接近を避けることが可能である。ここでは、計算機の処理遅延や、人間の判断などによる時間遅延は考慮しないものとする。

前述の通り、提案手法は式 (1) を用いて注意環境の事前検知を行うが、注意環境に接近する前にポテンシャルによる注意喚起を行うため、式 (1) の σ に式 (2) の D_a を用いる。これにより移動速度の異なるレスキューロボットにおいても、式 (2) の V_r を用いることで、ポテンシャルが上昇し始めるタイミングを調整することが可能である。

3 動作検証実験

本実験の目的は、まず 1 つの注意環境をレスキューロボットに記録させ、その後レスキューロボットが同様の環境に遭遇した場合にポテンシャル値が上昇するか確認することである。また、類似した注意環境においても、上記と同様にポテンシャル値が高くなり、オペレータへの注意喚起が可能となることを確認する。

3.1 レスキューロボットのセットアップ

本稿では、レスキューロボット Kenaf-II を用いる (図 2) [7]。また、環境観測用の LRF を図 5 のように 1 機に実装する。LRF は地面からの高さ 250mm の位置に取り付けられている。LRF には北陽電機株式会社製 UST-10LX を用いており、最大 270 deg の範囲で周囲距離情報が取得可能である。走査ステップは 0.25 deg であるため、全てのデータを取得すると 1080 個の距離情報が取得できるが、前述の通り粗視化のために図 5 のように 3 方向の距離情報を取得する。

Kenaf-II は最大約 1 m/s での移動が可能のため、式 (2) における V_r は 1 とする。また、遠隔操作映像の伝送遅延が約 0.5 秒であったため、 $T_d = 0.5$ とし、 F_s は 1.2 とした。したがって、本実験での D_a は 1.2 とする。式 (1) のポテンシャルはレスキューロボット内で常に計算され、本実験では $w = 1$ とした。

遠隔操作の指令値は無線 LAN を介して、オペレータのラップトップに接続されたジョイスティックから送信される。また、注意環境を記録する指令もオペレータがレスキューロボットに手動で与える。

3.2 実験環境と条件

本稿では基礎的実験として、レスキューロボットが壁に衝突した環境を注意環境とする。まず、図 3 のように、壁から 2m 離れた場所をレスキューロボットの初期位置とし、そこから壁に向かって遠隔操作により移動する。壁に衝突した段階で、オペレータはレスキューロボットに注意環境を記録する指令値を与える。その後、図 3 を基に本実験では図 4 のように壁隣に置かれた箱

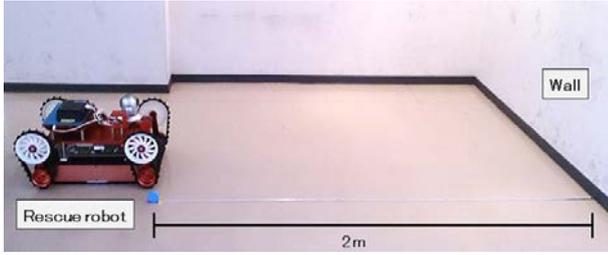


Fig.3 Example of the environmental setup

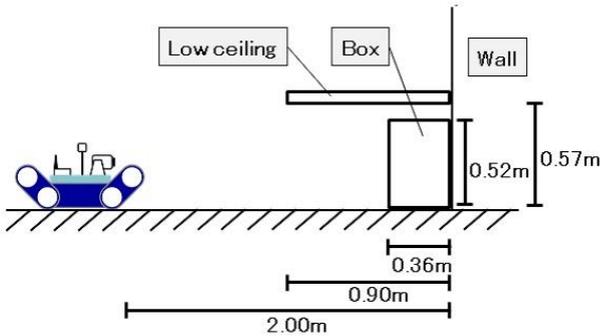


Fig.4 Artifacts in the experimental environment

やテーブルにより低い天井を再現した環境を用いて合計3種類用意する(表1)。

Setup 1の環境としては、壁のみを用いた環境である。この時、レスキューロボットは壁への衝突をポテンシャル値を用いてオペレータに出力する。Setup 2は壁の前面に箱を配置し、注意環境を記録した時と異なる形状を持つ壁に接近した際のポテンシャル値の変化を確認する。Setup 3は壁の前面に高さ680mmのテーブルを配置し、レスキューロボットから見て低い天井が存在する環境での壁へ接近した際のポテンシャル値の変化を確認する。

本稿では図5に示すように、レスキューロボットの移動方向に関する、正面の距離情報(s_2)と段差などを認識するための下方(s_1)、天井や背の高い障害物を認識するための情報(s_3)、の3方向を環境情報として記録する。そのため、注意環境 S_p は $S_p = (s_1^p, s_2^p, s_3^p)$ となる。同様に S_c も $S_c = (s_1^c, s_2^c, s_3^c)$ とする。

3.3 結果と考察

Setup 1からSetup 3までのポテンシャルの推移を図6に示す。Setup 1のポテンシャル値の推移(図6中の赤色プロット)では、壁に近づくにつれてポテンシャル値が上昇し、注意環境への接近をオペレータに提示できることを確認した。また、注意環境である壁から注意環境検知距離 $D_a = 1.2$ 手前の位置ではポテンシャル値の上昇が始まっている。このことから、オペレータからの遠隔操作指令値が通信遅延により遅れてレスキューロボットに伝達されるような遠隔操作環境であっても、レスキューロボットが壁に衝突する前にポテンシャル値によりオペレータへ注意喚起を行い、それからオペレータが停止指令をレスキューロボットに送信しても十分に注意環境を回避可能であることが示唆された。また、図7にポテンシャル値を算出する際に用いた式(1)中の S_p と S_c の推移を示す。カラーバーは各プロットのポテンシャル値を示している。本実験では、 $S_p = (0.140, 0.108, 0.127)$ という距離情報が注意環境の記録時にLRFから得られており、 S_c は(0.357, 2.003, 2.698)から S_p へ徐々に接近していることが

Table 1 Three kind of experimental environment

Setup no.	Artifact
Setup 1	Wall
Setup 2	Wall and box
Setup 3	Wall and low ceiling

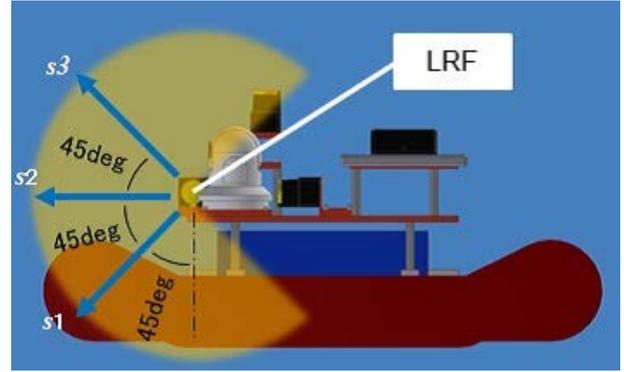


Fig.5 Scanning range of a LRF (side view)

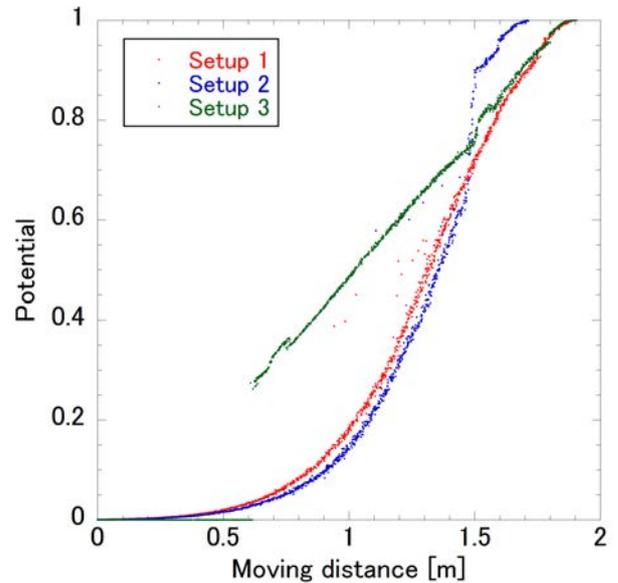


Fig.6 Result of change in potentials

見て取れる。これにより、 S_p から遠い S_c ではポテンシャル値は低く、注意が必要でない環境であることをオペレータが知ることができるといえる。

Setup 2では図6(青色プロット)において、Setup 1と異なり壁面に箱が置かれているため、ポテンシャル値の上昇が比較的緩やかである。しかし、レスキューロボットが箱に接近し、LRFが測定している3つの距離情報の全てが箱との距離を測定したとき、ポテンシャル値は0.9付近まで上昇している。これにより、 D_a より手前の位置でポテンシャルが上昇し、オペレータへ徐々に注意環境との接近を提示しながら箱との距離が近くなると急激にポテンシャル値を上昇させ注意喚起が可能である。図8における S_c の推移は、Setup 1と同様に徐々に S_p へ接近することを確認した。

Setup 3の図6(緑色プロット)では、低い天井付近に近づくまではポテンシャル値は他の実験条件と同様に低い傾向が発現しているが、0.6m前進した位置から急激にポテンシャル値が上昇している。これはレスキューロボットが正面の壁に近づき、 S_c の s_3 に低い天井までの距離が入力されたことが理由である。しかし、0.6m前進した段階では、ポテンシャル値は0.3付近であり、さらに注意環境に近づくにつれてポテンシャル値が上昇している。また、ポテンシャル値の上昇は D_a より前に起きている。図9における S_c の推移は、Setup 1やSetup 2と異なり、途中で急に S_p に接近していることが見て取れる。したがって、天井が低く正面に壁があるような環境においても、注意環境に接近するにつれてポテンシャル値が上昇し、オペレータへの注意喚起が可能となる。

図7から図9において、 s_1^c は注意環境に近づく直前まで変化

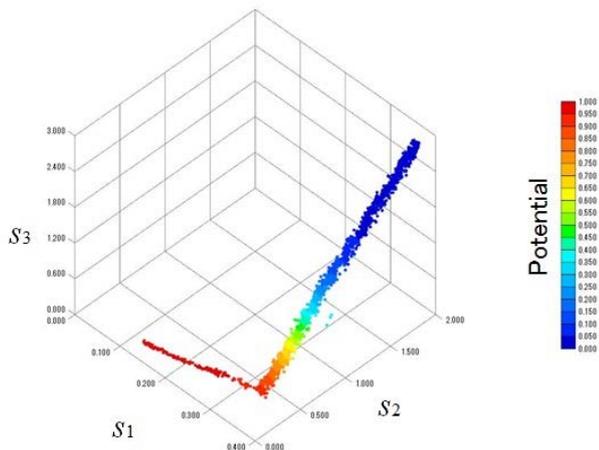


Fig.7 Change in observed states of setup 1

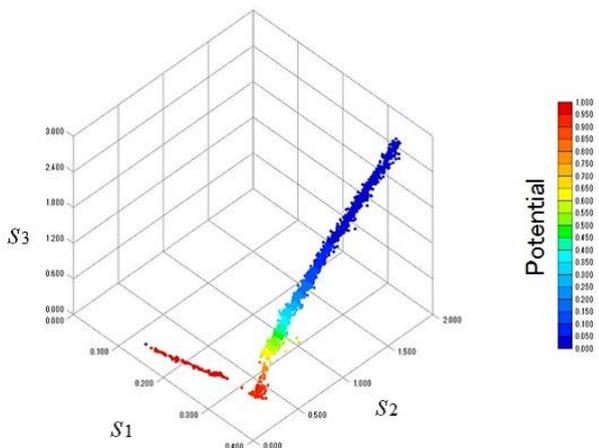


Fig.8 Change in observed states of setup 2

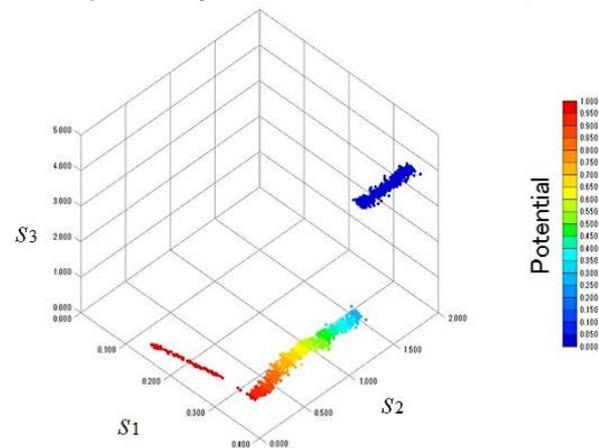


Fig.9 Change in observed states of setup 3

が少ない。 s_2^p と s_3^p が小さい値に推移してから、 s_1^p は急激に値が小さくなる。これは、 s_1^p は壁との距離であり、 s_1^c は注意環境に

近づくまで常に LRF から床までの距離を観測し、壁に接近するまで一定の距離が観測されるためである。これにより、複数の距離情報を用いることで、注意環境と現在環境の違いを表現することが可能であるとともに、ポテンシャル値の変化の実験結果から注意環境とは異なる類似環境においてもポテンシャルの上昇を観測でき、オペレータへの注意喚起が可能であることが示された。

4 結言

本稿では、レスキューロボットの遠隔操作ミスや失敗を未然に防ぐことを目的に、注意すべき環境を訓練時に記録し、実際の遠隔操作場面で注意環境と類似した環境を検知する手法について述べた。提案手法として、レスキューロボットに実装されている LRF の距離情報を用いた注意環境の記録と検知手法を提案し、ポテンシャル法を用いて注意環境に接近する前に注意喚起を行う手法も提案した。また、レスキューロボット Kenaf-II を用いて基礎的な実験を行った。壁に衝突した環境状態、すなわち注意環境を記録し、その後同様の環境でレスキューロボットが注意環境に接近するほど、提案手法によりポテンシャル値が上昇し、オペレータへの注意喚起が可能となることが実験結果から示された。さらに、壁の正面に箱を配置したり、テーブルなどを用いて低い天井を再現した環境においても、上記と同様の結果が得られ、注意環境と類似の関係にある環境においても、オペレータへの注意喚起が可能となることが示された。

上述の実験では、レスキューロボット正面方向における地面から直交する平面のみを観測するために LRF を 1 台用いた。今後の課題として、他の方向や面も環境状態として観測するために LRF を増設し、提案手法の実装を行う。これにより、レスキューロボットがより詳細な環境状態を観測可能となる。また、本稿の実験より複雑な環境での評価を行うとともに、実装された LRF からどれだけの距離情報を用いて、どのように環境状態を記述するのかについても議論が必要である。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 研究活動スタート支援 課題番号 15H06102, および総合科学技術・イノベーション会議により制度設計された革新的研究開発促進プログラム (ImPACT) 「タフ・ロボティクス・チャレンジ」の援助を受けた。

参考文献

- [1] R. R. Murphy, "Disaster Robotics," MIT Press, 2014.
- [2] K. Nagatani, S. Kiribayashi, Y. Okada, S. Tadokoro, T. Nishimura, T. Yoshida, E. Koyanagi, and Y. Hada "Redesign of rescue mobile robot Quince," In proceeding of the 2011 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR), pp.13–18, 2011.
- [3] 小松廉, 藤井浩光, 山下淳, 浅間一, "カメラ配置設計による故障時に備えたロボット遠隔操作のための俯瞰映像提示システムの開発," 精密工学会誌, vol.81, no.12, pp.1206–1212, 2015.
- [4] 浅間一, "災害時に活用可能なロボット技術の研究開発と運用システムの構築," 日本ロボット学会誌, vol.32, no.1, pp.37–41, 2014.
- [5] ポンサトーンラクシンチャーンサク, "リスクポテンシャル予測による自動車の障害物回避運動制御," 計測と制御, vol.54, no.11, pp.820–823, 2015.
- [6] Q. Zhang, D. Chen, and T. Chen, "An Obstacle Avoidance Method of Soccer Robot Based on Evolutionary Artificial Potential Field," Energy Procedia, vol.16, part C, pp.1792–1798, 2012.
- [7] 小柳栄次, "サブクローラを持つレスキューロボット," 日本ロボット学会誌, vol.28, no.2, pp.147–150, 2010.