がれき特徴に対するレスキューロボットの踏破性能評価に関する研究

川 尻 将 大*・小野里 雅 彦*・田 中 文 基*

A Study on Evaluating the Traversing Performance of Rescue Robots
Moving over Rubble Fields with Various Features

Masahiro KAWAJIRI*, Masahiko ONOSATO* and Fumiki TANAKA*

A number of rescue robots have been developed for quick and safe rescue operations at the time of earthquake. In order to develop rescue robots suitable for disaster site, it is necessary to test traversing performance of rescue robots in various rubble fields. However, the inaccessibility of real rubble fields makes it difficult to accumulate enough knowledge about rubble and rescue robots. This study aims to construct a software system which enables to evaluate traversing performance of rescue robots in virtual rubble fields. In this paper, we present the configuration of this system and we show example of knowledge about rubble and rescue robots, which is obtained through using this system. In addition, we report the result of traversing performance tests in real and virtual rubble fields to demonstrate the effectiveness of this system.

Key Words: rubble, rescue robot, traversing performance evaluation, physics simulation

1. はじめに

1995年1月17日に発生した阪神・淡路大震災以降、大規模災害における人命救助対応の一つとして、二次災害の被害を回避しつつ迅速に要救助者を発見、救助するためのレスキューロボット開発が各所で取り組まれてきた¹⁾。しかし、これまで地震災害における中心的な救命活動の場である「がれき」に対して未だ十分な分析が行なわれておらず、がれきに適したロボット開発や現場での適切なロボット選択、走行経路選択、操作方針選択に必要な知見が蓄積されていない。知見蓄積のためには、異なる特徴をもったさまざまながれきを用いて走破試験を数多く行ない、性能と適合性を統計的に分析することが求められる。しかし、このアプローチは、がれき設置のコストや労力、運用の安全面で現状では困難である。

こうした課題に対して、本研究では仮想空間上の物理シミュレーションを利用したレスキューロボットのがれき踏破性能評価システムの開発を行なった。本論文ではがれきにおけるレスキューロボットの踏破性能評価の現状と課題について述べた後に、開発したシステムの概要を紹介し、本システムを用いて行なった走行シミュレーションの例を示す。また、小規模ながれきフィールドに対して実施したシミュレーション

の妥当性評価実験とその結果について述べる。

2. レスキューロボットの性能評価の現状と課題

がれきに対するレスキューロボットの踏破性能評価方法には大きくつぎの三つのアプローチが考えられる。

まず、実がれきを模したがれきフィールドを構築し、そこでレスキューロボットの評価を行なう方法がある^{2),3)}。これは実がれきに近い複雑さをもった環境での走行の可否や走行時間の評価が可能である。その一方で、がれきフィールドの種類が限定される、がれきフィールドの特徴を計測により定量的にとらえることが難しい、がれきフィールドでの作業に危険が伴う、などの問題がある。

二つ目のアプローチは、乱雑ながれきではなく、規格化された要素を組み合わせで制作された複数の標準フィールドを用いてレスキューロボットの踏破性能を多面的に評価するものである⁴⁾。この場合、フィールドに再現性があり、ロボット間の性能比較も容易であるが、各フィールドでのスコアの高低が、実際のがれきフィールドでの踏破性能にどのように結びつくのかは明確ではない。

最後のアプローチはコンピュータ内に仮想のがれきフィールドを構築し、そこをモデル化されたレスキューロボットで走行シミュレーションを行なうことで踏破性能を評価するものである。さまざまながれきフィールドとレスキューロボットでの試行を比較的容易に繰り返すことが可能であるが、これまでに開発されたUSARSimに代表されるシステム⁵⁾においては、がれきフィールドが単純で障害物回避や不整地走行のレベルに留まっていたことと、物理シミュレーションの妥

* 北海道大学大学院情報科学研究科
札幌市北区北14条西9丁目

* Graduate School of Information Science and Technology,
Hokkaido University, Kita 14-jo Nishi 9-chome Kita-ku,
Sapporo

(Received March 24, 2014)

(Revised July 16, 2014)

当性についての検証不足が問題となる。

本研究では、こうした三つのアプローチのもつ長短を踏まえて、実がれきの複雑さと、標準フィールドの定量的特徴を備えた仮想がれきフィールドに対して、物理的な挙動に妥当性をもつレスキューロボットのがれき踏破性能評価システムを構築することを目的とする。

3. レスキューロボットのがれき踏破性能評価システムの構築

3.1 システムの概要

本研究が提案するレスキューロボットのがれき踏破性能評価システムの概要について説明していく (Fig. 1 参照)。まず形状、寸法、重量、移動機構などが異なるさまざまなロボットの物理シミュレーション用モデルを作成し、ロボットライブラリとする。ロボットモデルは実機と同等の挙動を示すように物理パラメータや動作ロジックが設定される。また走行試験のために構造や性質などが異なるデジタルがれきフィールドを用意する。これらロボットモデルとデジタルがれきフィールドの任意の組み合わせに対して、PhysX⁶⁾を物理エンジンとする木造家屋倒壊シミュレータの機能を用いて物理シミュレーションを繰り返し実施し、走行時間や走行に伴うがれきの崩れ具合を統計的に分析する。この結果を用いて、ロボットとがれきフィールドの組に対して、どの程度迅速かつ二次倒壊を防ぐ安全な走行が可能かを評価する。

3.2 レスキューロボットのモデル化

本研究ではまず能動サブクローラを有するクローラ型ロボットのうち、千葉工大や東北大学などで開発された Kenaf⁷⁾と Quince⁸⁾を対象とし、PhysX のモデル要素を用いて Fig. 2 のように作成した。これらのモデルでは東北大の岡本らが提案したクローラ部分を車輪列で再現する手法⁹⁾を参考にしており、メインクローラ 1 列あたり 9 個、サブクローラ 1 個あたり 3 個の車輪を配置している。ただし、サブクローラの中間車輪は物理計算のためだけに使用し、描画はしていない。車輪列を用いる手法は、忠実にクローラベルト要素を多数連結して作る手法より物理計算が安定する点で優れている。

モデルの諸元は実機の数値と合わせて Kenaf モデルが全長 570 mm、高さ 180 mm、全幅 430 mm、重量 20.0 kg、Quince モデルが全長 710 mm、高さ 165 mm、全幅 480 mm、重量 27.0 kg で設定されている。各モデルの駆動力や摩擦に関するパラメータは、基本性能項目である超堤や登坂試験の結果が実機と同等になるように設定される。また、重心位置については実機の正確なデータが不明のため、Kenaf モデルでモーターやバッテリーを収容する本体直方体部の上面中央、Quince モデルでは本体直方体部の幾何学的重心に設定されている。これは、Kenaf は計測や通信機器が本体上部に設置されているのに対し、Quince は多くが本体に内蔵されているためである。

3.3 デジタルがれきフィールドの構築

デジタルがれきフィールドは、十字の溝をもつフィールドベースに直方体のがれき要素を配置することで作られる。十

Fig. 1 System overview

Fig. 2 Rescue robot models

Fig. 3 Test courses on virtual rubble field

字溝を用いる利点は、壁面の制約により高さをもったがれきを少ないがれき要素で形成できることと、五つの区画をフィールド内に設定できることにある。ここでのがれきの要素は柱や梁、家具といった家屋が倒壊した際に生成されるがれき要素を想定し、基準寸法は材木の規格などを参考に定めている。寸法や位置、姿勢は与えられた分布に従い確率的に定められる。形状は物理シミュレーション高速化のために直方体の剛体に限定している。物理的なパラメータとして木材のデータハンドブックなどを参考に比重 0.40 g/cm³、静摩擦係数 0.35、動摩擦係数 0.40、反発係数 0.50 に設定した。

Fig. 4 Two-D discrete Fourier transform of rubble

Fig. 5 Segmentation of power spectrum plane

今回は、柱状がれき要素が進行方向を横切る形で設置された進行方向起伏強-横方向起伏弱のコース (H-L コース, Fig. 3 (a) 参照), 柱状がれき要素の長手方向が進行方向に揃う進行方向起伏弱-横方向起伏強のコース (L-H コース, Fig. 3 (b) 参照), 立方体に近い箱状がれき要素が配向性をもたずに配置された進行方向起伏強-横方向起伏強のコース (H-H コース, Fig. 3 (c)) を走行試験に用いることとする。

3.4 がれき表面起伏特徴の周波数解析

地表面の起伏を分析する手法としては、2次元の周波数解析が広く用いられている¹⁰⁾。本研究では、上で述べたがれきフィールドの表面起伏を2次元離散フーリエ変換 (以下2DDFT) により周波数解析し、その特徴を定量化する手法を提案する。まずがれきの置かれた床面を1cmの格子間隔で分割し、各格子におけるがれき要素の最大高さを格納した2次元配列を入力関数 $f(x, y)$ とする。がれき起伏は一般に非周期的関数であるので、まず入力関数 $f(x, y)$ にハニング窓関数をかけ、周期関数 $f'(x, y)$ に変換を行なう。(1) 式にハニング窓関数の式を示す。

$$f'(x, y) = \frac{1}{4} f(x, y) (1 - \cos \frac{2\pi x}{N}) (1 - \cos \frac{2\pi y}{N}) \quad (1)$$

また $N \times N$ の2次元配列を入力とした際の2DDFTの一般式を(2)式に示す。

$$F(u, v) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f'(x, y) \exp \frac{-j2\pi(ux + vy)}{N} \quad (2)$$

H-L コースの中心部分に対して2DDFTを適用した結果をFig. 4に示す。入力関数は 256×256 の2次元配列である。パワースペクトルの u, v はそれぞれ入力関数の x, y に対応

Fig. 6 Surface relief features of test courses

しており、中心から離れているほど高周波成分を表わしている。Fig. 4の例ではがれき起伏は y 軸方向に細かく変化しており、その結果、スペクトルの v 軸上の原点から離れたところ (すなわち短い波長) で高いパワースペクトル値を示している。

つぎにパワースペクトルの2次元半平面 ($v \geq 0$) をFig. 5に示すような、進行方向 (Front), 左前 (Left), 右前 (Right), 横方向 (Side) の45度ずつの4方向、原点からの距離 (周波数) で4段階の合計、16の扇形の区画に分割する。ここで u 軸に沿って左 (負方向) の区画と右 (正方向) の区画はそれぞれ22.5度の広がりを持ち、対応する距離の正と負の区画を併せることで横方向を表わす45度の区画 (Fig. 5のS1~S4) を形成する。

波長の区分はレスキューロボットの全長や全幅、クローラベルトの幅などが区間に含まれるように設定する。区画ごとに算出したパワースペクトル値は、どの方向がどれくらいの波長で凸凹しているのかを表わしている。目標物への正面 (Front), 側面 (Side) に注目して各コースに対する起伏特徴を評価した結果をチャートにしたものをFig. 6に示す。縦横方向4波長区分での値は、Fig. 7に示す配向性をもたないランダムステップフィールドのパワースペクトル値を100%とした割合により与えている。

Fig. 6の評価結果において、横に配向して柱状がれき要素が設置されたH-Lコースの結果に注目すると、進行方向 (Front) の起伏に比べ横方向 (Side) の起伏が各波長区分にわたって少ないことが確認できる。また、箱状がれき要素からなるH-Hコースの場合、進行方向と横方向のどちらにも幅広い波長区分に起伏が存在している。このチャートの左右二本の折れ線の作るパターンががれき表面起伏の特徴を反映している。

3.5 レスキューロボットのオペレーションモデル構築

能動サブクローラを有するクローラ型ロボットのような自由度の高いロボットの性能を評価する場合、状況に応じた操作の優劣が問題となる。走行結果は操作者の熟練度に左右されるため、操作者の影響を除外したロボット単独での評価結果が得られない。また、走行シミュレーションの中に人間が入ると、実行速度が実時間に制約されてしまう。

そこで本研究では、シミュレーションのプロセスにおいて、

Fig. 7 Random step field and its power spectrum

Fig. 8 Algorithm for determining traveling direction

Fig. 9 Algorithm for autonomous controller for sub-crawlers

一定の基準でロボット操作を自動的に行なうオペレーションモデルの実装を行なった。今回は開発したオペレーションモデルでは、がれき上を走行する能動サブクローラを有するクローラ型ロボットに対して、自動的に進行方向やサブクローラアーム角度を決定する。サブクローラの操作方針として、路面形状の最小二乗平面に平行でかつ本体が接地する姿勢を目標姿勢とする接地走行と、本体のピッチ角が0度かつ本体に接地する姿勢を目標姿勢とする水平走行の二種類をサブクローラの制御アルゴリズムとしている。

A. 進行方向決定アルゴリズム

本体を覆う二つのメインクローラは進行方向と移動速度を決定する。今回はメインクローラの周速度を 500 mm/s に固定し、進行方向を自動決定するアルゴリズムを実装する。アルゴリズムのフローチャートを Fig. 8 に示し、概要を以下に説明する。

- (1) 1 秒ごとに本体前部に設定された角度範囲内に目標点があるかどうかを判定する。
- (2) 目標点が範囲内ならば前進する。範囲外右（左）ならば右（左）にその場で旋回するようメインクローラの回転の向きを制御し、(1)に戻る。目標点が本体下ならば目標

点到達と判定する。

- (3) つぎの目標点がある場合は目標点を変更して (1) に戻る。つぎの目標点がない場合は停止する。

目標点を事前にコース上の複数箇所設置することでコーナーも走行可能となる。また角度設定領域の境界線付近で頻繁に旋回を行なうことを避けるために、旋回中の設定角度範囲を 30 deg, 旋回中以外の設定角度範囲を 90 deg としている。

B. サブクローラ制御アルゴリズム

本体前後左右の四方に設置されたサブクローラにより不整地での安定した走行を行なう。今回は東北大の岡田らが提案したサブクローラの自動制御アルゴリズム¹¹⁾を参考に、独自の制御アルゴリズムを実装した。この概要を以下に説明する。

- (1) 進行方向 10 cm 先周辺の路面形状を取得する。
- (2) サブクローラの制御方式に従った目標姿勢を決定する。
- (3) 10 cm 先の地点において、目標姿勢になるべく近い姿勢を実現するサブクローラ角度を算出する。
- (4) 10 cm 移動後に目標姿勢を実現できるよう移動距離に応じて徐々にサブクローラ角度の位置制御を行なう。

本アルゴリズムのフローチャートを Fig. 9 に示す。

4. 踏破性能評価シミュレーション

4.1 実施内容

先に述べた Fig. 3 の各コースにおいて物理エンジン PhysX を用いた仮想がれきフィールドでの走行シミュレーションを行なう。ロボットは Quince と Kenaf を評価対象とする。Quince モデルでは接地走行と水平走行の二種類のオペレーションモデルによる操作、Kenaf モデルでは接地走行のオペレーションモデルによる操作を行なう。各組み合わせの走行試験を 8 回ずつ実施する。

評価項目としては、迅速かつ二次倒壊を防ぐ安全な移動を評価するために走行時間とがれき移動量を用いる。がれき移動量とはロボット走行に伴うがれき要素の変位を評価するために著者らが考案した指標であり、ロボット走行前後での各がれき要素に対して 8 頂点の平均移動距離の総和として定義される。位置エネルギーと違い、水平面での移動でもがれき移動量には反映される。

4.2 実施結果

接地走行におけるロボットとコースによる違いに注目した結果を Fig. 10 に、Quince における走行方式とコースによる違いに注目した結果を Fig. 11 にそれぞれ示す。各図中には 8 回の試行による各評価項目の平均値に最大値と最小値の幅を併記したグラフを示している。以下に結果の考察を述べる。

A. 走行時間とがれき移動量

Fig. 10 (a) より、Kenaf と Quince は両者ともに接地走行での試行ごとのばらつきも少なくほぼ同じ所要時間で目標地点に到達している。箱状がれき要素を用いた H-H コースはほかの二つのコースよりも長い走行時間を要している。これは Fig. 10 (b) でみると、H-H コースではがれき移動量が

Fig. 10 Result of ground contact traveling

Fig. 11 Result of traveling by Quince

きな値となっており、走行時のがれき移動による走行ロスが原因と推測される。がれき移動量では L-H コースにおいて、Kenaf が Quince と比べてがれきへの影響の少ない走行をしている。これはロボット重量が関係していると推測される。

B. サブクローラ制御方針間の比較

Fig. 11 より、Quince ではサブクローラの制御方式として接地走行と水平走行のどちらも三コースを走破できている。ただし、H-H コースでは水平走行のほうが走行時間とがれき移動量の最大値が大きな値となっている。これは水平走行は水平な姿勢を実現するためにサブクローラで機体をもち上げる必要があり、駆動力を効率よくがれき起伏面に伝達できなかったこと、水平走行はがれきの隙間にサブクローラが突き刺さり、がれきを大きく動かす場面がシミュレーション中に見られることが原因と考えられる。

これらの所見は今回のシミュレーション条件に限定したものであり、一般的に有効な知見を獲得するためには、多様な条件で繰り返し走行シミュレーションを数多く実施し、その結果を統計的に分析していくことが重要である。

5. シミュレーションの妥当性評価

5.1 実機挙動データを利用したロボットのモデル化

上で述べてきたシミュレーションは実機での結果比較を行っていないため、シミュレーションの妥当性に課題となる。本研究では受動サブクローラを有するクローラ型ロボットのトイモデルである ARM CRAWLER¹²⁾を対象にシミュレーションの妥当性評価を行なった。ARM CRAWLER の実機

Fig. 12 ARM CRAWLER (TAMIYA Inc.)

と作成したモデルを Fig. 12 に示す。本モデルにおいてもクローラ部分を車輪列で再現する手法¹¹⁾を採用しており、メインクローラ 1 列あたり 5 個、サブクローラ 1 個あたり 3 個の車輪を配置している。

使用した ARM CRAWLER の前方に設置されている二つのサブクローラアームは左右独立に回転でき、走行中にサブクローラが障害物にぶつくと斜面に沿うようにアームの角度を変えながら登り、アームを回転させることで本体を引っ張り上げる。最大で 45 mm 程度の段差を乗り越えることが可能である。

まず、高さが 30~45 mm の範囲で 5 mm 刻みの超堤シミュレーションを繰り返し行ない、その際の本体のピッチ角と左右のサブクローラアーム角度変化が実機に近づくようにジョイントパラメータの damping の設定を行なった。サブクローラアームの受動的な挙動は重力、摩擦力、接触による駆動力などの釣り合いで決まる複雑な系であるが、damping をサブクローラアームの角度に応じて区分的に変化させるモデル化を行なったことで再現を可能とした。

高さが 30 mm と 45 mm での実機とモデルの本体ピッチ角度変化、左右アーム角度変化の比較結果をそれぞれ Fig. 13 と Fig. 14 に示す。角度の値は 0.2 sec ごとに画像計測から取得している。段差高さが 30 mm のときは角度の時間変化は実機とはほぼ一致した。段差の高さが 45 mm の場合、サブクローラアームが一周する挙動は正しく再現できているが、モデル挙動の時間遅れが大きい。これは能力限界近くの超堤のため、クローラに滑りが発生し、登り動作開始までに時間がかかっていることが原因と考えられる。

5.2 実験内容

ARM CRAWLER モデルと、実機 ARM CRAWLER を用いてがれき上走行試験を行ない、仮想環境と実環境でのロボットとがれきの挙動を比較することでシミュレーションの妥当性評価を行なう。Fig. 15 に実環境の実験設備を示す。今回はがれき上を走行するロボットの位置・姿勢変化、走行前後における各がれき要素の位置・姿勢データを計測する。ロボットの位置・姿勢についてはマーカー追跡用ステレオラベリングカメラを用いてフィールドに設置された三つの基準マーカーとロボットに設置された三つのマーカーの座標値を計測し、それらから算出する。各がれき要素の位置・姿勢については 3 次元座標計測機 MicroScribe G2LX を用いて直方体形状のがれき要素の 4 頂点の座標値を計測し算出する。

実験フィールドはがれき要素が点やエッジで接する崩れやす

Fig. 13 Result of ascending step (30 mm)

Fig. 14 Result of ascending step (45 mm)

いフィールド (Fig. 16) と水平面で接する崩れにくいフィールド (Fig. 17) の二種類を用意した。崩れやすいフィールドはがれき要素間に隙間が多く存在しており、要素同士の接地部分が少ないためずれやすい。ただし Fig. 16 中の地面と接する正方形のがれき要素は動かないように固定している。一方崩れにくいフィールドではがれき要素同士の接触部分が多く動きにくい。仮想環境フィールドは実環境フィールドにおいて計測した各がれき要素の位置・姿勢データを用いて生成している。また、各がれき要素の重量は計測値を設定している。各種物理係数については静止摩擦係数 0.35, 動摩擦係数 0.30, 反発係数 0.50 と、木製の物体を想定した固定値を全要素に設定している。

実験では各フィールドにおいて 8 回ずつ走行試験を行なう。評価項目として走行時間、がれき移動量、および機体の最大ピッチ角と最小ピッチ角の差のピッチ角変化幅を用いる。

5.3 実験結果

各評価項目の全 8 回の試行の平均値に最大値と最小値の範囲を併記したグラフと平均値に関する比の関係を示したものを Fig. 18 に示し、以下に考察を述べる。

A. 実環境と仮想環境での計測値の直接比較

平均値については各評価項目においてはほぼ一定の比率で値に差が見られた。ロボットモデルのパラメータ調整不足や PhysX の物理モデルと実際の物理現象の違いなどが原因として考えられる。

Fig. 15 Experiment environment in real

値のばらつきについては各評価項目において実環境のほうが仮想環境より大きいことが確認できる。原因として仮想環境では毎試行同じ位置・姿勢でロボットとがれきを配置することができるが実環境では誤差が生じることが考えられる。

B. 異なるフィールド特性間の傾向の比較

平均値については各評価項目において同様の傾向が見られた。たとえばがれき移動量の結果に注目すると、実環境と仮想環境の両方において崩れやすいフィールドの値は崩れにくいフィールドの 2.1 倍になっていることがわかる。これよりほかのシミュレーション条件と比較し、傾向をつかむという

Fig. 16 Test field which is easy to collapse

Fig. 17 Test field which is hard to collapse

Fig. 18 Result of traversing performance tests in real and virtual rubble fields (R: Real, V: Virtual)

観点で本シミュレーションが有効であることが確認できる。

値のばらつきについては各評価項目において崩れやすいフィールドのほうが大きいことが確認できる。これはがれきの崩れ方によりロボットの走行経路や姿勢が大きく分岐していったことが原因と予想される。

6. おわりに

本論文では仮想空間上に構築したレスキューロボットのがれき踏破性能評価システムの概要について説明し、本システムを用いて異なるがれきフィールドとレスキューロボットを対象とした踏破性能評価の例を示した。また、小規模がれきフィールドを用いて実環境と仮想環境での挙動の比較を行ない、仮想環境における踏破性能評価の妥当性に関して評価を行ない、挙動傾向を評価する上での有効性を示した。

今後の課題としては、シミュレーション精度のさらなる向上と GPGPU などを用いたモデルの大規模化とシミュレーションの高速化の実現、さらに実スケール環境での実機を用いた試験で取得したデータとの比較によるシミュレーションの妥当性評価などが挙げられる。

謝辞 本研究の一部は科学研究費補助金（基盤研究 (B) 課題番号 25282096, 研究代表者：小野里雅彦）により行なわれたことを記し、支援に謝意を表する。

参考文献

- 1) 田所 諭：文部科学省大都市大震災軽減化特別プロジェクト—ロボット等次世代防災基盤技術の開発—, 日本ロボット学会誌, **23**-5, 541/543 (2005)
- 2) 綿末, 小野里, 田所：レスキューロボット実用化のためのテストフィールド, 日本ロボット学会誌, **22**-5, 572/573 (2004)
- 3) 吉村, 清水, 佐藤, 加古, 田所：US & R 訓練施設の整備と運用に関する研究—テキサス Disaster City の調査を通じて—, 地域安全学会論文集, **13**, 265/274 (2010)
- 4) NIST: Guide for Evaluating, Purchasing, and Training with Response Robots Using DHS-NIST-ASTM International Standard Test Method, E54.08.01, NIST, US (2013)
- 5) S. Carpin, M. Lewis, J. Wang, S. Balakirsky and C. Scrapper: USARSim: A robot simulator for research and education, Proc. the 2007 IEEE international Conference on Robotics and Automation, 1400/1405 (2007)
- 6) NVIDIA PhysX: <http://www.nvidia.co.jp/page/home.html>
- 7) T. Yoshida, E. Koyanagi, S. Tadokoro, K. Yoshida, K. Nagatani, K. Ohno, T. Tsubouchi, S. Maeyama, I. Noda, O. Takizawa and Y. Hada: A High Mobility 6-Crawler Mobile Robot “Kenaf”, Proc. the 4th International Workshop on Synthetic Simulation and Robotics to Mitigate Earthquake Disaster, 38 (2007)
- 8) E. Rohmer, K. Ohno, T. Yoshida, K. Nagatani, E. Konayagi and S. Tadokoro: Integration of a Sub-Crawler’s Autonomous Control in Quince Highly Mobile Rescue Robot, Proc. 2010 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, 78/83 (2010)
- 9) S. Okamoto, K. Kurose, S. Saga, K. Ohno, and S. Tadokoro: Validation of Simulated Robots with Realistically Modeled Dimensions and Mass in USARSim, Proc. the 2008 IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics, 77/82 (2008)
- 10) A.M. Booth, J.J. Roering and J.T. Perron: Automated landslide mapping using spectral analysis and high-resolution topographic data: Puget Sound lowlands, Washington, and Portland Hills, Oregon, Geomorphology, **109**, 132/147 (2009)
- 11) Y. Okada, K. Nagatani and K. Yoshida: Semi-Autonomous

Operation of Tracked Vehicles on Rough Terrain using Autonomous Control of Active Flippers, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2815/2820 (2009)

- 12) TAMIYA ARM CRAWLER: http://www.tamiya.com/japan/products/70211arm_crawler/

=====

[著 者 紹 介]

川 尻 将 大

2014 年北海道大学大学院情報科学研究科システム情報科学専攻修士課程修了。がれき特徴の定量的評価とレスキューロボットの踏破性能評価に関する研究に従事。2013 年第 9 回競基弘賞レスキュー工学奨励賞受賞, SICE SI2013 優秀講演賞受賞。2014 年より富士通 (株) 勤務。

小野里 雅 彦 (正会員)

1985 年東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻修士課程修了。同年東京大学工学部助手。その後、神戸大学工学部助手、大阪大学工学部助手、同助教授を経て 2003 年北海道大学大学院工学研究科教授、2004 年より北海道大学大学院情報科学研究科システム情報科学専攻教授、現在に至る。サイバーフィールドと防災情報システムの研究に従事。博士 (工学)。

田 中 文 基

1987 年北海道大学大学院工学研究科精密工学専攻修士課程修了。88 年北海道大学工学部精密工学科助手、2004 年北海道大学大学院情報科学研究科助教授となり、現在に至る。生産情報モデリングの研究に従事。博士 (工学)。

=====