

災害対応ロボットにおける移動能力の定量的な評価方法

大金 一二* , 木村 哲也**

(平成 26 年 10 月 31 日受理)

Quantitative Evaluation Method of Mobility Performance of the Disaster Response Robot

Katsuji OOGANE* , Tetsuya KIMURA **

In the paper, quantitative evaluation methods for a test field and the mobility of a disaster response robot have been proposed. In order to determine the difficulty of the field, an evaluation equation has been proposed, where the associated field parameters, including a field evaluation value, path length, and unit difficulty, have been used. To determine the mobility of the disaster response robot, the quotient of the evaluated field value and transit time that the robot passes the path of the field has been used. In addition, the proposed evaluation methods have been applied to a robot competition field, and it has been verified that the proposed method can evaluate the field difficulty and the mobility of the robot.

Key words: Test Field, Disaster Response Robot, RoboCup Rescue, Robot Evaluation

1. はじめに

災害対応ロボットは福島第 1 原子力発電所での線量調査等に代表される作業のように人間が行うことがきわめて厳しい環境での作業が期待されている。また、災害現場でロボットを使用する場合、その性能が使用環境での要求性能を満たしているかを判断するためにはロボットの性能を定量的に評価する必要がある。このような災害対応ロボットの評価には評価フィールドが用いられ、動作、性能の検証が行われておりその重要性は高い。評価フィールドを用いたロボットの評価についてはアメリカ国立標準技術研究所 (NIST:National Institute of Standards and Technology) により主に瓦礫上の不整地での移動能力を評価するための障害物やフィールドの設置、評価方法が提唱されており、ASTM(American Society for Testing and Materials) インターナショナルにてその詳細がまとめられている [1]。しかしながら、災害対応ロボットの評価を定量的に行うためには評価フィールドにもその難易度について定量的な評価が必要であるが、これらの評価フィールドにおいてもその難易度の定量

* 機械制御システム工学科 准教授 Department of Mechanical and Control Engineering, Associate Professor

** 長岡技術科学大学 システム安全系 准教授 Nagaoka Univ. of Tech., Associate Professor

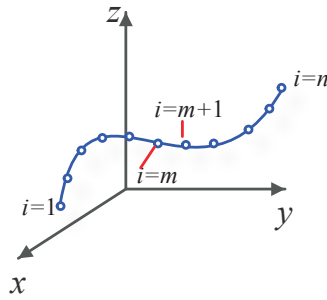


Fig.1: Travel Path of a Robot on the Test Field

的な指標は示されていない。そこで、本研究ではフィールドの難易度を定量的に示す方法を示し、そのフィールドを使用した災害対応ロボットの定量的な評価方法を提案する。なお、災害対応ロボットはその目的に応じて、様々な機能が実装され様々な性能の指標が必要となるが、本研究では移動能力の評価を目的とする。

2. 評価フィールドとパレット

2.1 評価フィールドのパラメータとロボットの性能評価

災害対応ロボットは目的に応じて様々な機能が実装され、それらの性能の指標が必要となるが、本研究では移動能力の評価を目的とする。移動能力の評価は評価フィールドにより行うが、評価フィールドには評価を定量的に表すパラメータが必要であり、フィールドの難易度やロボットの移動距離が考えられる。パラメータのうち、フィールドの難易度の決定には、ロボットの移動能力の高低を評価するための難易度の定義が必要である。本研究では、その定義として、ロボットが移動する行程において、移動距離や姿勢変化が多いことが高い難易度の移動であるとし、それらを多く求める評価フィールドの難易度が高いと考え、評価フィールドの評価式を求めた。

評価フィールドではロボットはフィールド内の出発地点からある地点への移動経路を想定している。その経路におけるロボットの位置を i で表すと、始点は $i = 1$ 、終点は $i = n$ と表すことができる (Fig.1 参照)。この経路の過程でロボットの示す挙動としては Fig.2 に示すように移動方向として、 x , y , z 、姿勢変化は x 方向を移動方向とすると、 x , y , z 各軸周りの回転角度であるロール角 ϕ 、ピッチ角 θ 、ヨー角 ψ がある。この経路のある地点を m とすると、ロボットが $i = m$ の地点から $i = m + 1$ に移動するするときの難易度の評価値 P_i は上で述べた評価フィールドの難易度の定義から、移動距離と姿勢変化角度の合計として式 (1) と表すことができ、フィールド全体の難易度評価値 P は式 (2) となる。ここで、 Δx_i , Δy_i , Δz_i , $\Delta \phi_i$, $\Delta \theta_i$, $\Delta \psi_i$ は 1 区間の移動距離と姿勢変化角度である。また、 w_{xi} , w_{yi} , w_{zi} , $w_{\phi i}$, $w_{\theta i}$, $w_{\psi i}$ は各方向への移動、回転の困難さを示す重みであり、フィールドの条件により決定される。

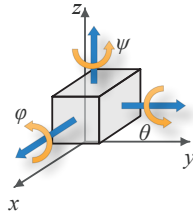
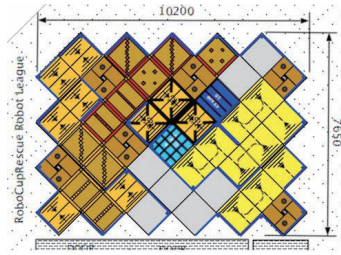


Fig.2: Behavior of the Robot in 3-Dimensional Space



(a) Palette Layout



(b) Photograph of Competition Field

Fig.3: Competition Field (RoboCup World Championship U.S 2009)

$$P_i = |\Delta x_i \cdot w_{xi}| + |\Delta y_i \cdot w_{yi}| + |\Delta z_i \cdot w_{zi}| + |\Delta \phi_i \cdot w_{\phi i}| + |\Delta \theta_i \cdot w_{\theta i}| + |\Delta \psi_i \cdot w_{\psi i}| \quad (1)$$

$$P = \sum_{i=1}^n P_i \quad (2)$$

フィールド経路の長さはロボットの移動距離であり、ロボットの稼働時間や移動速度等の性能に大きく関わる。移動経路距離 D [m] は式 (3) で求められる。また、フィールド評価値を移動経路の長さ D [m] で除した、単位長さあたりのフィールド難易度の評価値 Q [m⁻¹] をフィールドの単位難易度と呼び、式 (4) で表す。フィールドの評価値はロボットの移動経路が長いほど大きくなることから、使用するフィールドの規模により値が大きく異なる。単位難易度は、フィールド規模の大小に関わらずフィールド間での評価値の比較を行うために用いることができる。

$$D = \sum_{i=1}^n (|\Delta x_i| + |\Delta y_i| + |\Delta z_i|) \quad [\text{m}] \quad (3)$$

$$Q = \frac{P}{D} \quad [\text{m}^{-1}] \quad (4)$$

以上、フィールドの評価値 P 、移動経路距離 D [m]、単位難易度 Q [m^{-1}] がフィールドの難易度を示すパラメータとなり、本研究ではフィールドパラメータと呼ぶ。

ロボットの移動能力は指定した場所に到達するまでに要した時間により評価するため、本研究では、フィールドの評価値 P をフィールドの経路の始点から終点まで移動に要した時間 T (min.) で除した値 E を移動性能値と呼び、ロボットの移動能力の指標として用いる (式 (5) 参照)。この指標はロボットが単位時間あたりに達成できるフィールドの難易度となり、ロボットの移動能力の定量的な性能を示すことができる。

$$E = \frac{P}{T} \quad [\text{min.}^{-1}] \quad (5)$$

なお、実際の災害現場等においても、計画された移動経路ですべての重みを決定することができれば、災害現場の評価値 P を求めることが可能となる。また、以上のことは、3次元空間内を移動するすべてのロボットにおいて適応が可能であり、地上を移動する UGV(Unmanned Ground Vehicle) だけでなく、水中、空中を移動する ROV(Remotely Operated Vehicle) や UAV(Unmanned Aerial Vehicle) についても適応可能である。

2.2 パレットによるフィールド平面の離散化

評価フィールドは再現性が重要である。そのため、ロボットの移動空間となるフィールドの平面を離散化し、平面上の移動単位を規格化したパレットが用いられている。パレットは2007年のRoboCupレスキュー実機リーグの世界大会より導入されている [2]。パレットの形状は正方形でフィールドの大きさの基本的な単位となる区画であり、フィールドを構成する基本的な要素である。評価フィールドは、パレットを組み合わせて配置し、壁や障害物を設置することで構成されている。Fig.3にRoboCupレスキュー実機リーグ世界大会で使用されたパレットの例を示す。パレットの大きさは世界大会では北米で用いられる建築モジュールであるインチモジュールを基準に1200mm × 1200mmの正方形が用いられている。一方、RoboCupの日本大会では、2004年の中越地震、2007年の中越沖地震での被災現場からの知見から、災害対応ロボットに求められる能力として、災害現場の奥に入り込み、要救助者の探索や情報収集能力が重要と考え、著者らの提案により広い空間から狭い空間への移動能力を評価することを目的に大きさの異なるパレットを連続的に接合したパレットレイアウトを2014年より採用している [3](Fig.4参照)。なお、基準のパレットは日本の建築モジュールのメータモジュールを基準とした1000mm × 1000mmの正方形のパレットを採用している。Fig.4に示すパレットにおいて、(A)はこれまで日本大会で使用される1000mm × 1000mmのパレット、(B)は(A)のパレットの対角線の長さをパレット幅としたパレットであり大きさは700mm × 700mmである。同様に(C)は(B)のパレットの対角線の長さをパレット幅とし、大きさは500mm × 500mmである。このようにパレット幅を斜辺とした直角三角形を挟み、異なる大きさのパレットとを連続的に接続している。Fig.5に競技・評価を想定したフィールドの例を示す。

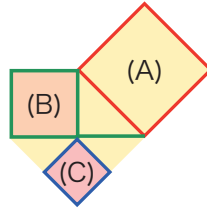


Fig.4: Palette Layout using the Palette of Three Kinds of Size

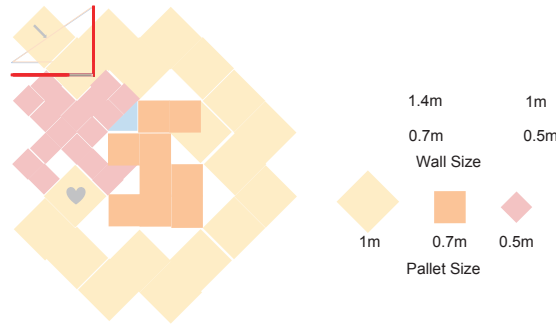


Fig.5: Example of the Palette Layout of the Test Field

2.3 パレットにより構成された評価フィールドを用いたロボットの性能評価

評価フィールドではガレキを模した障害物や段差等が配置されている。UGV は段差や起伏のある不整地を走行することから 3 次元の姿勢変形等が求められるため、フィールド評価には式 (2) を適応し、ロボットの移動性能値を求める必要がある。しかしながら、段差等の移動に関わる重み w の評価は難しいため、ここでは、高低差のある不整地、段差等を考慮せず、 xy 平面上での移動に関わる重みのみを考慮し、式 (2) を適応してロボットの移動性能値を求める。

フィールドで想定された経路のロボットの移動距離を ΔS_i と表す。進行方向に対する転進角度は $\Delta \psi_i$ となり、フィールド内での xy 平面上の移動に関する評価値 P_{xy} は式 (2) から式 (6) と表すことができる。

ここで、 w_{S_i} 、 w_{ψ_i} は移動、転進に関わる難易度の重みである。

$$P_{xy} = \sum_{i=1}^n (|\Delta S_i \cdot w_{S_i}| + |\Delta \psi_i \cdot w_{\psi_i}|) \quad (6)$$

パレットはフィールドを構成する基本単位である。式 (6) において ΔS_i はパレットからパレットへの移動であり、パレットの大きさは決められているため、 ΔS_i は移動したパレット数となる。 $\Delta \psi_i$ はパレット内で転進角度であるが、パレットの接合角度が決められているため、 $\Delta \psi_i$ は転進回数となる。また、平面上の移動や転進について、それら重み w は通路の幅や周りの空間の広さに大きく影響されるため、重み w_{S_i} 、 w_{ψ_i} はパレットの大きさにより

求められる。

以上のことより，Fig.4 に示すような 3 種類の異なる大きさのパレットを用いる場合，添え字にパレットの大きさを表す数字を用いると，それぞれのパレットの重み w は以下のように表すことができる。

$$\left. \begin{array}{ccc} w_{S1} & w_{S2} & w_{S3} \\ w_{\psi1} & w_{\psi2} & w_{\psi3} \end{array} \right\}$$

ここで，最大のパレットを基準パレットとし，その重み， w_{S0} ， $w_{\psi0}$ の逆数で正規化し，各重みを式 (7) と表す。

$$\left. \begin{array}{ccc} W_{S1} = \frac{w_{S0}}{w_{S1}} & W_{S2} = \frac{w_{S0}}{w_{S2}} & W_{S3} = \frac{w_{S0}}{w_{S3}} \\ W_{\psi1} = \frac{w_{\psi0}}{w_{\psi1}} & W_{\psi2} = \frac{w_{\psi0}}{w_{\psi2}} & W_{\psi3} = \frac{w_{\psi0}}{w_{\psi3}} \end{array} \right\} \quad (7)$$

また，基準パレットの大きさと建築モジュールを用いたパレットの大きさを等しくすると， $w_{S0} = w_{S1}$ ， $w_{\psi0} = w_{\psi1}$ となり， $W_{S1} = W_{\psi1} = 1$ となる。

遠隔操作される災害対応ロボットの操縦は，ボタン操作の場合，前進であれば，前進のボタンを押す，転進であれば，転進ボタンを押すことでロボットは動作を行う。ジョイスティックによる操作については前進の場合，ジョイスティックを前に傾け，転進の場合は横に傾ける事でロボットは動作を行う。これら操縦インターフェースによる操作の違いはあるが，基本的には前後進，転進に対して，1つの動作を行うことは共通である。ロボットの操縦において，操作の回数が操縦の難しさとなるため，前後進，転進を1つの動作として考え，さらに，進行方向への移動と転進の重みを同一と考えると式 (8) と表すことができる。

$$\left. \begin{array}{l} W_{S1} = W_{\psi1} = W_1 = 1 \\ W_{S2} = W_{\psi2} = W_2 \\ W_{S3} = W_{\psi3} = W_3 \end{array} \right\} \quad (8)$$

ここで，パレットの大きさを表す数字 j を添え字に用いると，式 (8) の各重みは W_j と表すことができる。同様に移動したパレットの数を N_j ，パレット内での転進数を R_j と表すと，評価フィールドの難易度を表す評価値 P_{xy} は式 (9) となる。

$$P_{xy} = \sum_{j=1}^3 (N_j + R_j) W_j \quad (9)$$

また，移動経路距離 D は移動したパレット数 N_j とパレットの大きさ w_{Sj} の積であり，式 (10) となる。

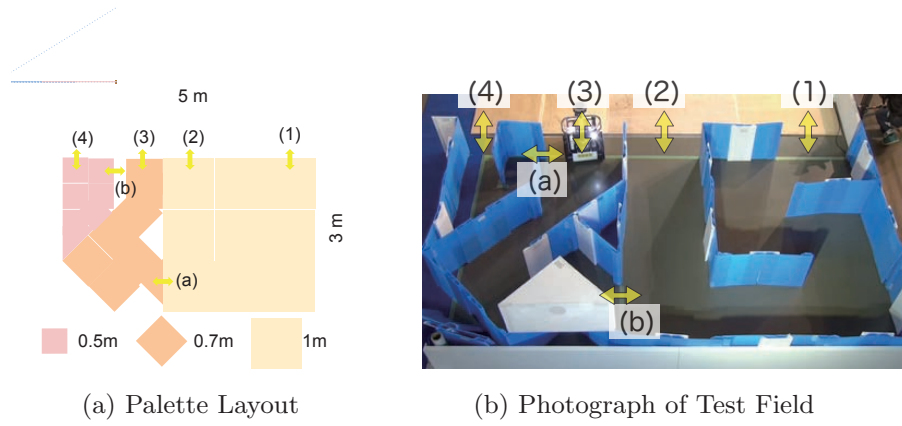


Fig.6: Test Field of the Event of the Disaster Response Robot (Tsuruga, Fukui)

$$D_{xy} = \sum_{j=1}^3 (N_j \cdot w_{Sj}) \quad [\text{m}] \quad (10)$$

以上のことから, xy 平面におけるフィールドの単位難易度 Q_{xy} , ロボットの移動性能値 E_{xy} はそれぞれ以下ようになる.

$$Q_{xy} = \frac{P_{xy}}{D_{xy}} \quad [\text{m}^{-1}] \quad (11)$$

$$E_{xy} = \frac{P_{xy}}{T} \quad [\text{min.}^{-1}] \quad (12)$$

3. 評価フィールドでのロボットの性能評価

3.1 簡易なフィールドでの評価

Fig.6 に 2014 年 1 月 24, 25 日に福井県敦賀市で実施された災害対応ロボット技術交流会で著者らが設置した実演用の評価フィールドを示す. 本フィールドはイベント会場の一部を利用して設置されたため, 省スペースのフィールド構成 [3] としている. このような簡易なパレットレイアウトのフィールドでは, 経路毎のフィールド評価値が得られるようにフィールドへの進入, 退出位置を定めることで, 容易にロボットの性能評価値を得ることができ. Fig.6 において, (a), (b) は異なる大きさのパレットへの出入り口を示し, (1)~(4) はロボットの進入, 退出位置を示している. また, 評価フィールドは Fig.4 に示す 3 つの大きさのパレットにより構成しており, 各パレットの大きさによる難易度の重み W_j はそれぞれ $W_1 = 1$, $W_2 = 1.43$, $W_3 = 2$ である. また, 基準パレットの大きさは $1000\text{mm} \times 1000\text{mm}$ である. Fig.6 のフィールドにおいて, 進入, 退出位置の組み合わせによる, 各経路の移動,

Table 1: Field Parameters of the Evaluation Test Field

W_j	1		1.43		2		-			
Path	N_1	R_1	N_2	R_2	N_3	R_3	P_{xy}	D_{xy} (m)	Q_{xy} (m^{-1})	E_{xy} (min.^{-1})
(1) \Leftrightarrow (2)	9	6	-	-	-	-	15.00	9.00	1.67	5.00
(1) \Leftrightarrow (3)	8	5	5	3	-	-	24.43	11.50	2.12	8.14
(1) \Leftrightarrow (4)	8	5	5	3	4	4	38.43	13.50	2.85	12.81
(2) \Leftrightarrow (3)	4	1	5	3	-	-	16.43	7.50	2.19	5.48
(2) \Leftrightarrow (4)	4	1	5	3	4	3	30.43	9.50	3.20	10.14
(3) \Leftrightarrow (4)	1	1	-	-	4	3	16.00	3.00	5.33	5.33

転進パレット数 N_j , R_j とフィールドパラメータ, ロボットの移動性能値を Table 1 に示す. なお, Table 1 において, ロボットの移動性能値 E_{xy} は入口から出口までの移動に要した時間を 3 分として求めている*1.

Table 1 から, フィールドの評価値 P_{xy} は移動経路が最も長い経路 (1) \Leftrightarrow (4) で最大となるが, 単位難易度 Q_{xy} では狭い経路を通過する経路 (3) \Leftrightarrow (4) が最大となる. 経路 (1) \Leftrightarrow (3) と経路 (2) \Leftrightarrow (3) では経路距離に 8m の差があるが, 単位難易度には 0.02 ポイントの差しかない. これは 8メートルの経路が難易度の低い経路のためである. ロボットの性能評価値は経路の通過に要した時間が同一であれば, 経路 (1) \Leftrightarrow (4) を通過したロボットの移動性能値が最大値となる. また, ロボットへの要求使用として, 12[min.^{-1}] 以上が要求されるとした場合, このフィールドを用いると, 経路 (1) \Leftrightarrow (4) を 3 分 12 秒以内で通過する必要があり, 経路 (3) \Leftrightarrow (4) では 1 分 20 秒以内で通過する必要がある.

以上のように, パレットを用いた評価フィールドに式 (9) を適応し, ロボットの通過経路における移動, 転進に必要なパレット数をカウントすることで, フィールドやロボットの定量的な評価値を得ることができ, ロボットの要求仕様による, 通過時間の目標設定が容易となる.

3.2 RoboCup レスキュー実機リーグへの適応

ここでは, 実用的な評価フィールド設置の例として RoboCup レスキュー実機リーグ (Rescue Real Robot League) の競技フィールドによる評価例を示す.

RoboCup レスキュー実機リーグは 1995 年の阪神・淡路大震災を契機にロボットの災害対応利用が注目され, 大規模災害時の被災者探索への応用を目的に設置が検討され, 2000 年のメルボルン大会におけるエキシビションを経て, 2001 年のシアトル大会より公式競技が行われている. 現在は, 国際大会である世界大会の他に各国の国内大会が実施されており, 多数の大学等が参加している. RoboCup ジャパンオープンは日本の国内大会であり, 2003 年

*1 実演会ではロボットのデモンストレーションを主な目的としていたため, 経路途中で移動を停止し来場者に説明等を行っていたため, 正確な時間計測はできなかったため.

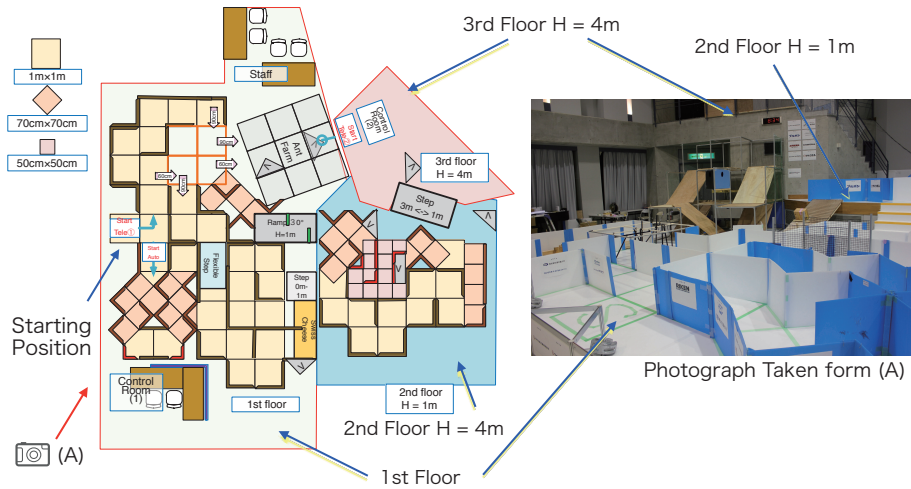


Fig.7: Competition Field of RoboCup Japan Open Rescue Robot League 2014 (Kashiwazaki, Niigata)

の新潟大会から開催されている [4]。レスキュー実機リーグでは決められた時間内にフィールド内にある被災者を模した人形やタグ等 (以降 Victim と表記) を探索し、その数と状態、そして、場所を示した地図の作成精度を競う競技や [2][5] や移動能力の競技である Best in Class Mobility 競技等がある。2014 年の国内大会は各リーグの分散開催となり、2014 年 5 月 4 日 ~6 日に新潟工科大学において「RoboCup ジャパンオープンレスキュー実機リーグ 2014 in 柏崎」として実施された。参加チームは海外チームからの 1 チームを含む 12 チームであった。Fig.7 に本競技会で設置した競技フィールドを示す。本大会から式 (9) が適用できるように構成されたフィールドを用いることにより、これまで設置者の感覚により設定されてきた難易度を定量的に設定することが可能となった。競技フィールドは段差等の障害物がパレットの一部に配置されている。また、階段やスロープによる高さ 1m の 2 階や高さ 4m の 3 階が設置された構成となっている。

このようなフィールドでロボットの評価を行う場合、ロボットの通過経路を記録し、通過パレット数等のカウントを行う。Fig.8 に Best in Class Mobility 競技におけるロボット経路の記録を示す。また、Table 2 に Best in Class Mobility 競技において各チームのロボットが通過した経路のフィールドパラメータとロボット移動性能値、順位を示す。Best in Class Mobility 競技は規定時間内にフィールド内のゴールを目指す競技であり、本大会では 10 分間を競技時間とした。10 分以内にゴールに達することができない場合はその位置までのフィールドパラメータにより評価した。また、競技では障害物を配置されたパレットを通過する場合や 2 階への移動について評価値を加点したが、定量的な評価方法が確定していないため、Table 2 では加えていない。Table 2 からわかるように、競技の結果は順位だけではなく、定量的なロボットの移動性能値として表すことが出来るため、ロボット相互の性能比較も定量的にできる。また、フィールドでの到達位置や通過時間等の大会によって異なる



Fig.8: Evaluation Sheet of the Best in Class Mobility Competition

Table 2: Field Parameters of the Competition Filed and Mobility Performance Value of the Robots

Team (Robot)	N_1	R_1	N_2	R_2	N_3	N_3	P_{xy}	D_{xy} (m)	Q_{xy} (m^{-1})	T (min.)	E_{xy} ($min.^{-1}$)	Rank
A	7	4	1	1			13.86	7.70	1.80	10:00	1.39	8
B	44	25	6	5			84.71	48.20	1.76	7:28	11.36	1
C	43	27	2	2			75.71	44.40	1.71	10:00	7.57	3
D	43	27	2	2			75.71	44.40	1.71	10:00	7.57	3
E	7	4	1	1			13.86	7.70	1.80	10:00	1.39	8
F	3	1					4.00	3.00	1.33	10:00	0.40	12
G	35	19	12	9			84.00	43.40	1.94	10:00	8.40	2
H	17	6	2	2			28.71	18.40	1.56	10:00	2.87	5
I	11	5	2	2			21.71	12.40	1.75	10:00	2.17	6
J					4	2	12.00	3.00	4.00	10:00	1.20	10
K	4	1	1	1			7.86	4.70	1.67	10:00	0.79	11
L	10	5	1	1			17.86	10.70	1.67	10:00	1.79	7

フィールドで変化する評価値ではなく共通の評価値であるロボットの性能評価値により、ロボットの性能向上等を定量的な値として示すことができる。

4. まとめ

災害対応ロボットの移動能力の定量的評価を目的に、評価フィールドの定量的な評価方法を示し、災害対応ロボットの移動能力の定量的評価方法を示した。フィールドの難易度につ

いてはロボットの移動、姿勢変形を多く求めるフィールドの難易度が高いと定義し、フィールドの評価式を求め、フィールド評価値、経路距離、単位難易度のフィールドパラメータによりフィールドの難易度を定量的に示す方法を提案した。災害対応ロボットの移動能力についてはフィールド評価値とフィールド経路の通過時間の商であるロボットの移動性能値が定量的な性能となることを示した。以上により、災害現場等ですべての重みを決定することができれば、災害現場のフィールドパラメータを求めることが可能となり、災害現場にロボットを投入する場合、想定される経路距離等からロボットに必要な性能として移動性能値を指標として示すことでロボットの選定を行う事が可能となる。また、事前の訓練において、想定する災害現場の評価値と同等の評価フィールドを用意することは災害現場の規模の大きさによっては難しい場合、想定する災害現場と同等の単位難易度をもつ訓練フィールドを用いることで、同等の訓練過程が実現できると考えられる。本研究では2次元平面内の移動についてのみ評価をしたが、災害対応ロボットの真価は不整地の移動である。今後は不整地、段差、坂等の難易度の評価方法について検討し、不整地での移動能力の評価方法について検討する。また、災害現場等の評価について検討を行う。

謝辞

本研究は新潟工科大学「大学魅力アップ教育研究プロジェクト（平成 24,25 年度）」の一部として実施された。また、フィールド構築に関わり、イベント関係機関や多くの学生の協力を得た。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] “Standard Test Method for Evaluating Emergency Response Robot Capabilities:Mobility:Confined Area Terrains:Symmetric Stepfields” ASTM International Designation:E2828-11, 2012
- [2] Adam Jacoff: “Standard Test Methods For Response Robots”; Intelligent Systems Division National Institute of Standards and Technology, 2011
- [3] 小林 仁, 大金 一二, 木村 哲也: RoboCup Japan Open レスキュー実機リーグにおけるフィールドの定式化; 第 14 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2013) 論文集 DVD-ROM, pp.294-296, (2013).
- [4] 浅田 稔, 松原 仁: ロボカップ創世記; 情報処理 vol.51, No.9, Sep.2010
- [5] RoboCup Rescue Robot League Technical Committee: RoboCup Rescue Robot League Rules 2009.1