解説

ロボカップレスキューロボットリーグにおけるリスク管理と評価フィールド設計

Risk Management and Evaluation Test Field Design in RoboCup Rescue Robot League

木村 哲也^{*1} 大金 一二^{*2} ^{*1}長岡技術科学大学 ^{*2}新潟工科大学

Tetsuya Kimura^{*1} and Katsuji Oogane^{*2} ^{*1}Nagaoka University of Technology ^{*2}Niigata Institute of Technology

1. はじめに

2001 年から開始されたロボカップレスキューロボットリーグ (RoboCup Rescue Robot League, RRRL) [1] は、日本だけでなく、タイ、ドイツ、イラン等でも国内大会が実施され、各国代表が集まる世界大会は大きな盛り上がりを見せている。RRRL の継続的实施により、参加するロボットの能力が着実に向上しており、レスキューロボットの実用化への期待も高まっている反面、暴走等による競技中の事故も危惧されるようになってきている。本稿では RRRL 日本大会におけるリスク管理の考え方を説明し、RRRL を持続的に発展させるあり方について考察する。また、競技のリスクに大きな影響を与えるフィールド設計の現状を紹介する。

2. RRRL におけるリスク管理

2.1 競技概要

RRRL は、主に大地震を想定した被災地を模擬した迷路状の競技フィールドで、ロボットによる被災者を模擬した人形 (ビクティム) の発見の速さと正確さを競う競技である。ロボットは遠隔操縦型と自律型の両方での競技が実施されており、遠隔操縦型の競技フィールドのほうが凹凸が激しく難易度が高い。また、ビクティムは箱の中に隠されており、長さ 1~1.5[m] 程度のカメラアームによる探査が必要である。競技に参加しているロボットの特徴はおおむね以下のとおりである。

- 重さ：20~40 [kg] 程度。
- 移動速度：0.1~1 [m/s] 程度。
- 登坂能力：遠隔操縦型は 45° の階段の昇降可能。自律型は 20° の坂道の昇降可能。

図 1 に RRRL に参加しているロボットの例を示す。ま

た図 1 の写真奥に見える積み木状の凹凸は Random Step Field (RSF) と呼ばれる障害物で、ロボットの移動能力の良否を判断するために用いられる。RSF の最も難しい設定では、10 [cm] 角で最大 40 [cm] の高さの様々な長さの木材がランダムに並べられている。この RSF は人間では移動することが困難であるが、RRRL の競技結果上位のロボットは移動ができる。

これらのロボットが暴走して衝突した場合、ロボットの重量と速度から、大型犬に飛びかかれた程度の衝撃が予想される。よって、成人ならば一定の回避も期待されるが、子供ならば押し倒しによる転倒等重大事故も想定される。またロボットには剛体の凸部があるため、ロボットと人との衝突は、同じ重さと速度の犬との衝突より被害が大きくなりやすいと考えられる。

2.2 安全コンセプト

一般の工作機械や家電製品と比較して、RRRL はリスク管理上次の特徴があると考えられる：

- ロボットは、ガレキ乗り越え能力やセンサ搭載が必要であり、軽量小型化には限界がある (本質安全設計の限界がある)。
- RRRL は研究開発の加速のための競技であり、研究開発中のロボットが競技に参加する。よって製品レベルの高い安全方策を参加チームに要求することは困難である。

図 1 RRRL に参加しているロボットの例 (右手前) と RSF (左奥)

原稿受付 2009 年 12 月 13 日

キーワード：RoboCup, Rescue Robot, Safety, Management, Earthquake

^{*1}〒 940-2188 長岡市上富岡 1603-1

^{*2}〒 945-1103 柏崎市藤橋 1719

^{*1}Nagaoka-shi, Niigata

^{*2}Kashiwazaki-shi, Niigata

- 一般観客に見てもらうことで、社会の科学リテラシーの向上を図ることも RRRL の目的である。特に子供に見てもらうことが重要である。

以上の特徴を踏まえ、RRRL のリスクアセスメント [2] を実施すると RRRL の特徴的代表的[†]な危険事象として次のことが予見される：

D1：電気回路の短絡等によるロボットの発火

D2：ロボット暴走による観客・スタッフへのロボットの衝突

これらの考察結果と安全設計の 3 ステップメソッド [3]、安全の ALARP 原則^{††}から、RRRL の安全コンセプトは次としている：

- ロボット開発者は、研究開発の目的とのバランスを考えながら、できるだけ本質安全設計を行う（例：軽量化、鋭利部の除去等）。
- 運営者は、観客の視野確保と評価の適切性に配慮しながら、安全性に配慮したフィールド設計を行う（可燃物の排除、柵の設置等）
- ロボットの暴走に対応する安全監視員を配置する。安全監視員は暴走の兆候が理解できる等ロボットの特徴を十分理解しているものとする。
- 運営者は観客に安全上の指示（主として柵外に出ない）を出し、観客はそれに従う。従えない観客は退場させる。
- 最終的な残留リスクに起因する事故にはイベント保険で対応をする。

2.3 安全管理の実施例

図 2 (a)(b) に 2008 年の RRRL 日本大会の様子を示す。観客は高さ約 40 [cm] のパネルとチェーンでロボットと区切られている（図 2 (a)）。パネルの高さはロボットが直接乗り越えられない高さになっている。柵は完全に床面には固定されていないため、ロボットが暴走した場合はこの柵ごと観客に衝突することが想定される。しかし柵は連結されており成人男子が蹴っても大きく移動することはなく、また柵によりロボットの凸部が直接観客に接触しないため、保護方策として有効に機能していると考えている。その他チェーンを用いることで、観客の視野を大きく妨げることなくパネル内に身体を入れないよう注意をしている。この注意は、特に子供とその保護者に強く喚起しており、競技中に場内アナウンスでも伝えている。

競技中にはフィールド内や近くに次のスタッフが活動している：

(a) 柵により隔離されたロボットと観客

(b) スタッフワーク例（カメラマン（A）、安全監視員（B）、審判（C））

図 2 RRRL 日本大会 2008 の様子

- 審判：ロボットの違反等の判断をする。ロボットのすぐ近くにいる必要はないが、フィールド内でロボットの活動全体が確認できる位置に常にいる必要がある。
- 安全監視員：ロボットが暴走したときに非常停止を押す必要があるため、フィールド内のロボットの近傍に常にいる必要がある。
- カメラマン：ロボットの活動がおおむね見える位置にいればよい。このためフィールド内への進入は必ずしも必要ではない。

フィールド内は RSF、角材のほか紙や布などのスタッフの転倒につながる障害物が散乱している。一方、これらのスタッフはいずれも RRRL 期間のみ該当業務を実施する一過的なボランティアスタッフであり、職業作業者と同等な安全教育の実施は困難である。このため理解が容易でかつ効果的に安全を向上させるよう、スタッフの作業特性に応じて個人保護具の利用と安全作業に関して次のように指示を出している：

- 審判：フィールド内の作業であり転倒のリスクが高いため保護帽^{†††}を使用する。必要以上にロボットには近づかない。移動時、特に後退時に足元に注意する。

[†]イベントとしての危険事象も RRRL では考慮しているが、本稿では誌面の都合上記述を省略する。興味ある読者は文献（兵庫県警、雑踏警備の手引き、2002）を参考にされたい。

^{††}経済的合理性の下に最高の安全性を達成すること。

^{†††}ここで用いている保護帽は入手が容易で安価な落下物に対する安全を主として考えている工場用のものである。転倒事故に対する安全性をさらに考慮した保護帽が必要であるかは今後継続的に検討していく。

- 安全監視員：保護帽を使用する。移動時、特に後退時に足元に注意する。ロボットの暴走の兆候に注意するとともに、観客の行動にも注意する。ロボットの非常停止の位置を常に確認し、迅速に非常停止が押せるようにする。安全監視に集中するために、写真撮影などの他の作業は禁止する。
- カメラマン：フィールド内への進入は必ずしも必要でないため、撮影は特設ステージ上からに限定し、ロボットと直接接触しないようにする。

現在のRRRL世界大会ルールでは、ロボットを大型化して不整地上の移動能力を向上させたほうが高得点を得やすい傾向がある。このことはリスク管理上好ましくなく、また崩れやすい倒壊日本家屋への対応との乖離にもつながる。次章では、RRRL日本大会で独自に用いている日本家屋の被災を考慮した評価フィールドの説明を行う。

3. 日本家屋の被災を考慮した評価フィールド設計

RRRLでは世界共通の評価フィールドの利用を前提にしている。このことにより、各国で実施されている競技の結果を相互に参照することができるという利点がある。一方、この評価フィールドは日本の木造建築物の特性を十分に反映しておらず、日本で必要とされるレスキューロボット技術の育成とのバランスを考える必要がある。実際、筆者らが被災した2004年11月、2007年7月にそれぞれ発生した中越、中越沖地震によって被災し半壊、全壊した家屋に見られる被災状況は、石やコンクリート構造物が多い他国における被災状況とは異なる点が多数見られた。

この被災状況の差異はそこで求められるロボットの性能の差異を示しており、ロボットを評価するためのフィールドもその差異を考慮し検討、設定する必要がある。以下では中越、中越沖地震で被災した日本家屋の特徴を考慮したフィールド設定について述べる。

3.1 日本家屋型の被災状況

多くの日本家屋は細長い木材の部材を多用している。中越沖地震で被災した多くの家はふすま、障子などが多く使われている伝統的な日本家屋の作りであった。図3に中越沖地震で被災した日本家屋の例を示す。このような家屋では壁の造作にも細い木材、竹などの部材が多用されており、全壊、半壊した家屋ではそれらが露出している状況がみられた。また、家屋内部においてはこれらの部材の重なり合い、絡み合いといった状況がみられた。これら細長い部材は曲げには弱い軸方向への耐力は高く、これが倒壊家屋の壁などの崩落を防いでいることが多々あった。実際の被災現場でこの部材をロボットが踏み折ってしまうと、壁の崩落等を招き二次災害につながる可能性がある。このような被災現場は日本家屋特有のものであり、ここでは日本家屋型の被災状況と呼ぶ。ガレキ上の移動において、ロボッ

図3 中越沖地震で倒壊した日本家屋

図4 Flexible Step

トが被災現場に与える影響を極力少なくするような注意が必要であるが、日本家屋型の被災状況においてはさらなる注意が必要であると考えられる。

3.2 日本大会のフィールド障害物

2008年、2009年のRRRL日本大会においては、特徴的な日本家屋型の被災状況を踏まえ、図4に示す‘Flexible Step (FS)’と呼んでいる障害物を設けている。これは次の特徴を持っている：

- FSは針金でできた格子と細い木材によって作られており、格子はロボットが通過時に揺れる程度の剛性を持っている。
- FSは用いる細い木材の配置、形状（断面形状、太さ）により難易度を容易に変更することが可能である。
- ロボットは細い木材上を通過するが、クローラによる過度な駆動力あるいは進路調整により、木材を落とす、木材を踏み折ることになり、ロボットの進行上大きな問題を起こすような設定になっている。

FS上の走行時にロボットは揺れ操縦者にストレスを与える。この状況下で慎重な操縦を要求することは、実際の災

図5 “ジャングルジム”

害現場での緊張感を反映することにもつながる。この障害物を安全に通過するためにはロボットの慎重な操作はもちろんのこと、ロボットの設計・開発時においてロボットの重量、接地圧のバランス、移動機構の制御等について十分に考慮する必要がある。

図5に示すのは“ジャングルジム”と呼ぶ障害物であり、次の特徴を持っている：

- 上部（天井）に格子状に組まれたパイプと地面に向けて突出したパイプで構成。高さは60[cm]程度で、ロボット上部からの俯瞰カメラの使用が困難な状況を設定している。
- 天井部から突出したパイプは天井部を支点として一方方向に回転するようになっており、ロボットの接触時にはその方向には容易に回転するが、方向を誤ると回転しない設定になっている。操縦者にはパイプを避けてロボットを進行させることを求めている。

3.1節でも述べたが、日本家屋型の被災状況では多数の柱状の部材が様々な方向から突出している。ジャングルジムはそのような被災現場を再現している。現在開発が行われている遠隔操縦型のレスキューロボットは、ロボット搭載カメラからの映像情報をもとに現場への進入を行っている。カメラの多くは、広い視界を得るため焦点距離の短いレンズを使用する傾向があるが、そこから得られる映像情報では柱状部材までの距離、奥行き情報は非常に分かりにくい。

さらに柱状部材が重なり合うような状況においてはなおさらである。この障害物の中にあるロボットを操作するためには自動車の運転という車幅感覚がかなり高いレベルが必要となる。

FSやジャングルジムを評価フィールドの一部に用いることで、小型で軽量の日本家屋型の被災状況に適したロボットの開発が期待され、リスク管理上も好ましい方向にロボットの特性が誘導されると考えている。

4. おわりに

本稿ではRRRL日本大会におけるリスク管理の考え方と、日本家屋の被災状況を反映した日本独自のフィールド障害物について説明した。このフィールド障害物の導入により、日本の被災状況に適したロボット開発が期待されるほか、ロボットの単純な大型化大出力化が抑制され、リスク管理上も好ましいロボットの開発が期待される。日本独自のフィールド障害物の導入後も日本のロボットはRRRL世界大会で活躍しており、日本家屋型の被災状況に適したロボットが海外の被災状況にまったく適さないということはないと考えている。

ロボットの性能向上とあわせてリスク管理やフィールド設計も向上することがRRRLの持続的発展には重要であるが、ロボットそのものの開発と比較してリスク管理やフィールド設計は注目を集めにくい。一方アメリカでは、国家技術標準局（NIST）が中心となりレスキューロボット評価フィールド設計を進めており[4]、ロボット開発と評価フィールド開発の両面を国家的に勧めている。日本でも同様なバランスの取れた取り組みが進むことを期待する。

参考文献

- [1] ロボカップ公式ホームページ：www.robocup.org
- [2] JIS-B-9702, 機械類の安全性—リスクアセスメントの原則, 2000.
- [3] JIS-B-9700-1, 機械類の安全性—設計のための基本概念, 一般原則—第1部：基本用語, 方法論, 2004.
- [4] E. Messina, A. Jacoff, et al.: Statement of Requirements for Urban Search and Rescue Robot Performance Standards, Department of Homeland Security Science and Technology Directorate and National Institute of Standards and Technology, 2006.

木村哲也 (Tetsuya Kimura)

1995年東京工業大学後期博士課程中退。神戸大学助手等を経て2001年より現職。ロボカップ世界大会レスキューロボットリーグ実行委員。NPO安全工学研究所理事。安全技術を中心にレスキューロボットの実用化研究に従事。博士（工学）。（日本ロボット学会正会員）

大金一二 (Katsuji Oogane)

1992年長岡技術科学大学博士後期課程修了。青山学院大学助手等を経て現職。ロボカップ日本委員会レスキューロボットリーグチーフ。レスキューロボットをはじめ農地用、海上用のフィールドロボットに関する研究に従事。博士（工学）。（日本ロボット学会正会員）