JAEA-Technology 2021-033

DOI:10.11484/jaea-technology-2021-033

原子力災害対応用ロボットの性能試験法 ーロボットアームによる障害物の乗り越えを介した接近試験

(JAEA-TM-0006) -

Test Methods for Robots for Nuclear Emergency Response and Decommissioning
-Test for Maneuvering Robot Arm Over an Obstacle
(JAEA-TM-0006)-

山田 大地 川端 邦明 阿部 浩之

Taichi YAMADA, Kuniaki KAWABATA and Hiroyuki ABE

福島研究開発部門 福島研究開発拠点 楢葉遠隔技術開発センター

Naraha Center for Remote Control Technology Development Fukushima Research Institute Sector of Fukushima Research and Development

March 2022

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構



本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。 本レポートの転載等の著作権利用は許可が必要です。本レポートの入手並びに成果の利用(データを含む)は、 下記までお問い合わせ下さい。

なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト(https://www.jaea.go.jp)より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 JAEA イノベーションハブ 研究成果利活用課 〒 319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2 番地 4 電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.

Reuse and reproduction of this report (including data) is required permission.

Availability and use of the results of this report, please contact

Institutional Repository and Utilization Section, JAEA Innovation Hub,

Japan Atomic Energy Agency.

2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan

Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2022

原子力災害対応用ロボットの性能試験法
- ロボットアームによる障害物の乗り越えを介した接近試験
(JAEA-TM-0006) -

日本原子力研究開発機構 福島研究開発部門 福島研究開発拠点 楢葉遠隔技術開発センター

山田 大地、川端 邦明、阿部 浩之*

(2021年12月2日受理)

本稿は、原子力災害対応および廃炉作業に用いるロボット等の遠隔操作機器(以下、ロボット)の性能を定量的に評価するとともに、その性能を比較するための試験法について記述したものである。東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所での事故発生後、多くの遠隔操作ロボットが作業に活用されている。災害は発生件数が少ないため、実際の事故対応の作業経験と教訓は、将来の遠隔操作ロボットの開発において重要となる。そこで、我々は福島第一原子力発電所での遠隔操作ロボットによる作業を参考にしてロボット性能評価のための試験方法の開発に取り組んでいる。福島第一原子力発電所の事故対応では、ロボットアームを備えたロボットがロボットアームにより作業対象への接触や作業対象の移動、作業対象を撮影するタスクがあった。また、それらの中には、壁などの障害物により作業対象までの直線的なアクセスを物理的、視覚的に遮られるため、ロボットアームにより障害物の上方を越えて作業対象に接近、接触するタスクがあった。本稿は、壁状の障害物の上方または障害物の奥にある作業対象への接近に関する性能を定量的に評価するための試験手順について記述するものである。試験実施の参考のために、具体的な試験環境の例とテスト実行のデモンストレーションの様子についても掲載している。

楢葉遠隔技術開発センター:〒979-0513 福島県双葉郡楢葉町大字山田岡字仲丸 1-22 *株式会社 アセンド Test Methods for Robots for Nuclear Emergency Response and Decommissioning

– Test for Maneuvering Robot Arm Over an Obstacle

(JAEA-TM-0006)–

Taichi YAMADA, Kuniaki KAWABATA and Hiroyuki ABE*

Naraha Center for Remote Control Technology Development
Fukushima Research Institute
Sector of Fukushima Research and Development
Japan Atomic Energy Agency
Naraha-machi, Futaba-gun, Fukushima-ken

(Received December 2, 2021)

This report describes the test procedures for evaluating performances involved in robot arm maneuvering of remotely operated robot utilized for nuclear emergency responses and decommissioning. After the accident at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station of the Tokyo Electric Power Company Holdings Inc. (FDNPS) occurred, remotely operated robots have been deployed and utilized in the response tasks. Such post-accident work experience and lessons learned are very valuable for developing the robots in the future. Therefore, we were motivated to develop the test methods for performance evaluation of the robot by referring with such experiences and lessons. In the response and the decommissioning tasks, robots with a robot arm were deployed for door opening, removal objects, decontamination and cleanup and so on. Some of these tasks were conducted in an environment with obstacles by robot arms maneuvering. This report describes test procedures for quantitatively evaluating the performances which are for maneuvering involving in robot arm to approach target objects in an environment with obstacles. A typical course layout and the demonstration of test are also illustrated for the references.

Keywords: Test Methods for Robot, Test for Maneuvering Robot Arm

ii

^{*}Ascend Co., Ltd.

目 次

| 1 | 緒言 | = | 1 | | | | | | | |
|---------------------------------------|-------|--|--------|--|--|--|--|--|--|--|
| 2 | 原一 | 子力災害対応用ロボットの性能評価のための試験法について | 3 | | | | | | | |
| 3 | 原一 | 原子力災害対応におけるロボットを用いた作業と経験 | | | | | | | | |
| 4 障害物の乗り越えを介した接近性能試験(番号 JAEA-TM-0006) | | | | | | | | | | |
| | 4.1 | 目的 | 7 | | | | | | | |
| | 4.2 | 評価対象 | 7 | | | | | | | |
| | 4.3 | 評価の概要 | 7 | | | | | | | |
| | 4.3 | 3.1 試験方法 | 7 | | | | | | | |
| | 4.4 | 具体的な試験環境の例 | 10 | | | | | | | |
| | 4.5 | 4.5 試験実施の例 | | | | | | | | |
| | 4. | 5.1 試験記録の例 | 13 | | | | | | | |
| | 4.6 | 参考事例 | 15 | | | | | | | |
| 5 | まる | <u> </u> | 16 | | | | | | | |
| 参 | 考文 | 献 | 17 | | | | | | | |
| | | Contents | | | | | | | | |
| 1 | In≠ | roduction | 1 | | | | | | | |
| 2 | | st Method for Performance Evaluation | 1 | | | | | | | |
| 4 | res | for Nuclear Emergency Response Robots | 3 | | | | | | | |
| 3 | F | ecuted Tasks by the Robots and Experiences | 5 5 | | | | | | | |
| о 4 | | et for Running Through Narrow Passage (JAEA-TM-0006) | อ 7 | | | | | | | |
| | 4.1 | Purpose | 7 | | | | | | | |
| | 4.1 | Evaluation Target | 7 | | | | | | | |
| | 4.3 | Examination Outline | 7 | | | | | | | |
| | | 3.1 Test Method ····· | 7 | | | | | | | |
| | 4.4 | Test Conditions to Consider | 10 | | | | | | | |
| | 4.5 | Examples of Demonstration | 12 | | | | | | | |
| | | 5.1 An Examples of Test Result Record | 13 | | | | | | | |
| | | Reference Cases | 15 | | | | | | | |
| 5 | - | mmary | 16 | | | | | | | |
| | efere | | 17 | | | | | | | |
| | | | _ | | | | | | | |

This is a blank page.

1 緒言

2011年3月11日に発生した東日本大震災の影響により東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所(以下、1F)において事故が発生し、原子炉建屋内は人の立ち入りが困難な状態となった。このため、作業員の危険を低減するために、ロボットの遠隔操作により作業が実施されている「ロートラー」。これまで行われたロボットによる作業のほとんどが成功裏に実施されているが、ロボットの遠隔操作による作業の実施は容易ではないため、作業中にトラブルが発生したケース「G」もある。これらの経験や事例は、今後の原子力災害対応用ロボットの開発時や現場展開時に、ロボットの性能として留意すべき点を示唆していると考えられる。

原子力災害対応や 1F 廃炉作業のように、事前想定が難しい要素が含まれる中で作業を実施する場合、その作業環境や要求されるタスクに応じてどのロボットを適用するべきかを現場で判断する必要がある。したがって、その判断材料としてロボットの性能を事前に評価しておくことは、災害現場や 1F 廃炉作業でのロボットの実用のために大変重要となる。このような観点から、米国の標準技術研究所(National Institute of Standard and Technology、以下、NIST)では、災害対応現場でのロボットの実用のためにロボットの性能を比較可能な形で評価することを目的とした標準的な試験法、災害対応ロボット用標準試験法(Standard Test Methods for response robots、以下、STM)「同」「同」の開発が行われている。STM の対象は災害対応ロボットの性能評価であることから、一部原子力災害対応で要求されると考えられる性能の評価方法も含まれているが、1F での作業例を見れば、必ずしも十分ではない。このため我々は、1F でのロボットの遠隔操作による作業の経験を参考に、原子力施設内における災害対応を行うためのロボットに必要とされる性能を評価するための手段を構築することを目的として、原子力災害対応用ロボットの性能試験法について研究開発に取り組んでいる。また、この性能試験法は、複数の種類のロボットについてその性能を相対的に比較可能とするためにロボットの性能を定量化した値で示す。

これまでに我々は、原子力災害対応ロボットの持つべき性能として、原子力施設内での作業実施のために必要不可欠となる走破性能を試験する方法について開発を行い、その手順について報告している[10][11]。これに引き続き本稿では、ロボットに搭載したロボットアームの操作に関する試験について記述している。原子力災害において、ロボットは空間線量が特に高くなると予想される建屋内での作業が多く要求されると考えられ、この際建屋内の構造物がロボットアームの動作に対する障害物となり、ロボットアームの操作が難しくなることが考えられる。また、これまでの1Fにおけるロボットの作業記録(例えば[12][13][14])に基づいて、障害物となるものがある中でのロボットアームの操作の状況を考慮すると、壁等の障害物を乗り越えた先にある対象にロボットアームによりアクセスする性能が評価されるべき項目であると判断した。

我々は、性能試験法の開発のために、壁等の障害物を乗り越えた先にある対象にロボットアームにより接近/接触する動作において、試験のために考慮すべき要素を抜き出し、それを簡易に実現する試験環境と手順を具体化するアプローチをとった。試験のために考慮すべき要素としては、ロボットアームの操作に適した位置にロボット本体を位置づけるために必要となる環境の空間的な広さ、ロボットアームで乗り越えられる障害物の高さと乗り越えた先にある対象物の位置が重要となる。

本稿では、これらを基にして、ロボットアームによる障害物の乗り越えを介した接近について

性能を評価する試験 (JAEA-TM-0006) についてまとめた。試験実施者が本稿を一読することで 試験が実施可能となるよう留意して、試験方法や具体的な試験環境の例、試験実施の例等を記し たものである。

【用語の定義】

本稿で用いる用語について、以下のように定義する。

ロボット: 物理的世界で目標を達成するため、センシングと行動を制御できるように設計された機械システム。

試験実施者:試験実施にあたり、ロボットへの動作指令および管理を行う者を指す。

試験監督者:試験実施にあたり、試験前の各手順の確認、試験実行管理、試験結果・内容の記録 を客観的に行う者を指す。

試験監視者:試験実施にあたり、試験環境周辺にて試験中のロボットの状態を監視する者を指す。試験中の緊急時には試験実施者および試験監督者に試験の継続不能と申告する。試験対象であるロボットの挙動やスペックに詳しい者が望ましい。

2 原子力災害対応用ロボットの性能評価のための試験法について

本章では、本稿で扱う性能評価のための試験法の考え方と、本取り組みにおける試験法の設定プロセス等について述べる。

1F での事故の大きな要因である津波が想定外の大きさであった例を見るように災害現場の状 況を予測することは難しい。しかし、想定外の状況であっても、災害対応では被害を軽減し、事 態を収束させるための作業を安全、着実、迅速に実施することが求められる。従って、遠隔操作 ロボットを用いて災害対応の作業を実施するためには、災害現場で要求される作業に対して適し たロボットを迅速に判断する必要がある。同時に、適したロボットであるか判断するためには、 まず、ロボットの性能の評価が必要となる。性能の評価について「性能標準」(製品に求められ る性能を指定すること)を設定し、これを満たすか否かで評価するアプローチがある。しかし、 災害現場の状況が予測困難であり、予測のつかない場面で使用されるロボットの性能標準をどう 設定すべきかの議論は要領を得なくなってしまう。このため、災害対応においては、予め各ロボ ットの性能を測っておき、災害時には現場での作業要求とロボットの性能を照らし合わせること で作業に対する各ロボットの適性を比較し、適したロボットを選択する、というアプローチが実 際的である。このことから、NISTでは、災害現場でロボットの性能を評価する標準的な試験方法 を提供することを目的として、STM の開発に取り組んでいる。ここで、STM におけるロボット の性能評価の考え方は、ロボットが災害現場で要求される作業を遂行するために重要な性能に関 して性能標準を定めて評価するものではなく、ロボットの性能を定量化する標準的な試験方法を 提供し、試験結果として得られた定量値によってロボットの性能を客観的に示し、ロボット間で の性能比較できるようにすることにある(図 2-1)。

前述のように災害対応のように現場の状況が予測困難な状況に対しては、性能標準のように求められる性能を規定することは困難となる一方で、STM のようなロボットの性能を客観的な定量値で示し、性能を把握・比較する考え方は実際的で有効なアプローチとなる。このことから我々は STM の考え方を参考に原子力災害対応ロボットに必要とされる性能を定量的に評価するための標準的な試験法の開発に取り組んでいる。

本開発では、STM の考え方を参考に、標準的な試験法は以下を満たすものとしている。

- 試験を実施する者が、共通した試験条件、試験手順によって試験が実施できること
- 試験環境は、試験での評価対象となる性能が要求される状況を抽象化したものになって おり、かつ、特殊な施設や装置を用いずに設置できること
- 試験での評価対象となる性能を分かりやすい定量値で示すこと、また、特殊な機器を用いずとも測定可能であること
- 試験環境について、試験での評価対象となる性能にかかわる主要な(できるだけ少数の) パラメータを可変とし、試験条件や手順を変容させずに難易度を調節できること

また、試験法の開発にあたって、具体的には以下のような手順で実施している。まず、1Fでのロボットの遠隔操作による作業事例に関して、ロボットに要求される動作や作業環境に調査し、そこで必要となるロボットの性能を抽出する。次に、抽出された性能のうち、すでに NIST の STM 開発で取り上げられている性能については試験法の開発の対象から除外し、残った性能について原子力災害対応ロボットのための試験法として開発を検討する。試験法の開発対象となる性能に

ついて、その性能を分かりやすく示す定量値を設定する。また、その性能が要求される作業環境を抽象化した模擬環境(試験場)を設計し、設定した定量値を図るための試験手順を定め、この試験場と試験手順をあわせて試験法としてまとめていく。試験法としてまとめていく過程では、実際に試験場を設置し、ロボットを用いて検証実験を行い、実験結果に基づいて修正・改善を行っていく。

次章以降では、試験法の開発対象を決めるために行った調査、開発した試験の実施手順および 諸条件、具体的な試験場の例等について記載している。



図 2-1 性能評価のための試験法の概念図

3 原子力災害対応におけるロボットを用いた作業と経験

本章では、前節でふれた 1F での事故への対応、つまり原子力災害対応の作業のうち、原子炉建屋内での遠隔操作ロボットによる作業においてロボットアームを用いた例とその成果、また、作業実施の際に得られた経験について述べる。

ロボットによる作業の実施においては、センサやグリッパなどの作用する部分(エフェクタ)を任意の位置(向きを含む場合もある)へ移動させる必要がある。例えば、画像の取得のためにはカメラを対象物が見える位置と向きに移動させる、瓦礫の撤去にはまず瓦礫がつかめる位置にグリッパを移動させる必要がある。ロボットアームは高い自由度をもってアームの先端を移動させられるため、先端にエフェクタを搭載することで、特定の対象物に接近または接触させる必要がある作業において有効である。また、安定した移動機構であり、多くのロボットで採用されている地上走行型の移動機構は床面の移動、つまり、水平方向の移動が中心となるため、エフェクタを垂直方向への移動する必要がある作業においてもロボットアームは有効である。1Fにおける実例として、Packbot がロボットアームを用いて 1 および 3 号機のタービン建屋の扉を開放し、アクセスルートの確保に成功している[15]。ほかにも、ロボットアームを有したロボットによって瓦礫の撤去[16]、高線量物品の容器への収納[17]、除染[18]などが実施されている。

しかしながら、駆動できる関節を多く有するロボットアームは一般的に操作が難しい。さらに は、原子炉建屋内の作業では建屋構造物や仮設物が、ロボットアームの移動を妨げる、ロボット アームの操作に必要な画像の取得を妨げるなど、障害物となり操作がより困難となる。このよう な障害物となるものがある状況での作業例を紹介する。高所調査用ロボットが高所 PCV 貫通部 の調査のために、高所の狭隘部にロボットアームを侵入させロボットアームに取り付けられたカ メラにより、画像を取得する作業を実施している[12]。結果として、貫通部周辺の様子は確認でき たが、一方で障害物のために貫通部へのアクセスは困難であり、貫通部の確認はできなかった。 オペレーティングフロアの床面コンクリートのコアサンプリングにおいて、採取場所までの経路 の確保のため、ロボットアームを用いてフェンスの撤去が実施されている^[13]。このフェンスの撤 去では、ロボット本体からフェンスの反対側にあるフェンス脚部の切断のために、ロボットアー ムによりフェンスの上部を乗り越えて、ロボットアーム先端に取り付けた切断ツールをフェンス 脚部にアクセスさせる。しかしながら、このフェンス脚部の切断の作業時に、周囲に資材が散乱 し床面に凹凸があったことも原因し、ロボットが半転倒するトラブルが生じている。PCV 内部調 査の事前作業として、ロボットアームを用いて貫通部前に設置していた遮へいブロックの撤去を 実施している[14]。このとき、撤去する遮へいブロックの代替の遮へい体となる鉄板の壁を設置し、 代替遮へい体を挟んで遮へいブロックの反対側にロボット本体を位置づけし、ロボットアームに より代替遮へい体の上部を乗り越えて、遮へいブロックにアクセスし、撤去作業を実施している。

これらの作業は共通して、ロボットアームにより障害物となるものの上部を乗り越えて作用する部分を対象物に接近または接触する作業となっている。これらの事例を参考に、屋内でのロボットアームを用いた作業では、障害物の上部を乗り越えて対象物に接近/接触する性能について要求が高いと考え、その性能について評価を行うための試験法について開発に取り組んだ。前述のように、開発した性能試験法のねらいとは、性能について定量化を行うことで、他者との比較の基盤を提供するものである。

次章で、試験を実施するための諸条件、手順等をまとめたものについて記す。

4 障害物の乗り越えを介した接近性能試験(番号 JAEA-TM-0006)

4.1 目的

本試験は、原子力施設内において遠隔操作で動作するロボットアームを搭載した地上走行型ロボットを対象とし、建屋構造物や仮設物がロボットアームの動作の障害となる状況でロボットアームに取り付けられたカメラによる調査を実施することを想定して「ロボットアームによる障害物の乗り越えを介して調査対象に接近するための性能」について定量的に評価することを目的としている。

4.2 評価対象

本試験の評価対象は、ロボットアームによる障害物の乗り越えを介して調査対象に接近するための性能として、ロボットアームの操作に適した位置にロボット本体を位置づけする操作に要する広さ、障害物を乗り越えてロボットアームが届く範囲、および、その操作の容易さ/難しさである。

4.3 評価の概要

本試験においては、下記に記した試験方法および試験環境によって評価を行うものとする。尚、 試験結果については必要事項(4.3.1.4 を参照)を記載することで記録を残す。

4.3.1 試験方法

4.3.1.1 試験条件と試験環境構成要素

ここでは、試験実施に関する諸条件と試験環境を具備すべき構成要素について記述している。

- 試験実施者はロボットから知覚的に隔離されており、ロボットに搭載したセンサ から取得されたデータに基づいて操作することで試験を実施する。
- 制限時間は30分間とする。
 - 試験対象ロボットの同一機体を用いて同日に複数種類の性能試験を実施すること(充電やバッテリ交換作業の時間、操作者の休憩時間等のインターバルも含めて)を考慮して時間制約を設けた。
- 試験環境の具備すべき構成要素として、以下をコース内に含むものとする。
 - ロボットの動作する範囲を規定する正方形のエリア(以下、動作エリア)
 - 動作エリアの外周の1辺に隣接したスタートエリア
 - 動作エリアのうちスタートエリアの向かいの 1 辺に 2 つの壁上の障害物を 設置する。なお、2 つの障害物の高さは共通とする。
 - 障害物を挟んで動作エリアの反対側に対象物を設置する。なお、2つの対象 物間の距離は、動作エリア外周の1辺の長さの3分の1とし、2つの対象物 を設置する高さは共通とする。

4.3.1.2 試験課題

ここでは、試験実施に関して、試験実施者がロボットの遠隔操作により実施する試験課題につ

いて記述している。試験課題では以下の項目を順次実施する。

- ロボットアームがニュートラルポジション (起動後、動作を始めるための初期の 配置) にある状態で、スタートエリアから動作エリアに移動する。
- ロボットアームに取り付けられたカメラにより対象の全体を正面からカメラに写す。
- ロボットアームに取り付けられたカメラによりもう1つの対象の全体を正面から カメラに写す。
- ロボットアームがニュートラルポジションにある状態にし、動作エリアからスタートエリアへ移動する(ここまでを前半とする)。
- 再度、ロボットアームがニュートラルポジションにある状態で、スタートエリア から動作エリアに移動する。
- ロボットアームに取り付けられたカメラにより、前半とは逆順に対象を正面から 全体をカメラに写す。
- ロボットアームに取り付けられたカメラにより、前半とは逆順にもう1つの対象 を正面から全体をカメラに写す。
- ロボットアームがニュートラルポジションにある状態にし、動作エリアからスタートエリアへ移動する。

試験課題の達成の成否の判断に関する事柄について以下に記す。なお、試験課題の達成について否であってもその試験結果はロボットの性能を示す有意な情報となる。したがって、試験課題達成について否となった場合でも、試験の継続が可能であれば試験を継続し、試験結果を記録する。

- ロボットが障害物に接触し、障害物を移動させた場合、試験課題の達成は否とする。
- 動作エリアからスタートエリアへの移動を除いて、ロボットが動作エリアから逸 脱した場合、試験課題達成は否とする。
- 制限時間内に試験課題が達成できない場合、試験課題の達成は否とする。
- 試験実施者または試験監視者が試験の継続が不可能と判断し、これを試験監督に 申告した場合、試験課題の達成は否とする。

4.3.1.3 試験実施手順

前述の諸条件等を確認の上、試験の開始から終了までを以下の手順で行うものとする。

- 試験の開始
 - 試験監督者は、後述の試験実施条件として記録すべき事項を記録する。
 - 試験実施者は、ロボットをスタートエリアに設置する。このとき、ロボット 本体が動作エリア上にはみ出さないようにする。
 - 試験実施者は、試験を開始する準備が整った時点で準備完了を試験監督者に 通知する。
 - 試験監督者は、試験実施者から準備が整った旨の通知を受けたのちに、試験 開始を宣言する。

試験の実施

- 試験実施者は、課題項目を順次実施する。
- 試験監督者は、適宜、試験実施者に実施すべき課題項目を通知し、円滑な試験の実施を促す。
- ロボットがエリアを移動する課題項目について、試験監督者は、課題項目の 完了、未完了を確認し、適宜、その確認結果を試験実施者に通知し、円滑な 課題の実施を促す。なお、ロボットがエリアを移動する課題項目は、ロボットの全体が移動先のエリアに入ったことをもって完了とする。
- 対象物をカメラで写す課題項目について、試験実施者は、試験監督者に対象物をカメラで写したことを通知し、試験監督にそのカメラ映像を見せる。試験監督者は、対象物の全体が写っていることを確認し、その結果を試験実施者に通知する。対象物をカメラに写す課題項目は、試験監督者が対象物の全体が写っていること確認したことをもって完了とする。

- 試験の終了

- 試験実施者は、試験が終了した場合もしくは、試験継続不能となった場合には、試験監督者にこれを通知する。試験監督者は、試験実施者からの通知に基づいて試験結果を記録する。
- 試験監視者は、試験の継続が不能と判断した場合、試験実施者および試験監督者にこれを通知する。試験監督者は、試験監視者からの通知に基づいて結果を試験記録する。

4.3.1.4 記録項目

ここでは、試験監督が、試験実施の条件として記録する事柄、および、試験の結果として記録する事柄ついて記す。

- 試験実施条件

- ロボットアームの操作に適した位置にロボット本体を位置づけする操作に 要する広さを示すものとして、動作エリアの広さを記録する。
- 障害物を乗り越えてロボットアームが届く範囲を示すものとして、障害物の 高さと対象物の設置位置の深さ(障害物の高さに対する対象物の設置位置の 低さ)と向きを記録する。

- 試験結果

- 課題達成の成否を記録する。
- 操作の容易さ/難しさを示すものとして、試験開始から終了までの時間を記録する。
- ロボットが障害物との接触し、障害物を移動させた場合、これを記録する。
- ロボットが動作エリアを逸脱した場合、これを記録する。
- 試験が継続不能となった場合、これを記録する。

本試験を実施するにあたり、環境条件として下記の点について留意することも重要であり、備 考として記録する。

- 外部照明の有無について記録する。
- 試験を実施したロボットが必要とする通信に関する環境条件として、ロボットの通信方式(有線、無線)について記録する。

4.4 具体的な試験環境の例

前述の条件を満たし、原子力災害対応作業を想定したコースの具体的な構成例を示す(図 4.4-1 を参照)。

- 動作エリアは一辺3メートルの正方形として、テープで囲う。
- 障害物の高さは1.3メートルとする。
- 障害物の上面から対象物までの深さは 0.1 メートルとする (図 4.4-2 参照)。
- 対象物は垂直上向き筒の底に設置し、この筒は内径 0.05 メートル、高さ 0.1 メートルとする (図 4.4-3 参照)。
- 対象物は紙に印刷した直径 0.04 メートルの黒色の円形とする。
 - ・ 対象物となる黒い円形の周囲 360 度に白い箇所を視認できることをもってして全体が写っているとみなす(図 4.4-4 参照)。

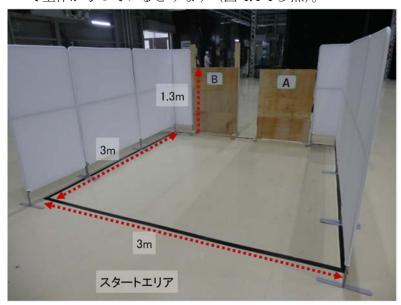


図 4.4-1 原子力災害対応作業を想定したコース例 1 の外観・レイアウト



図 4.4-2 障害物と対象物

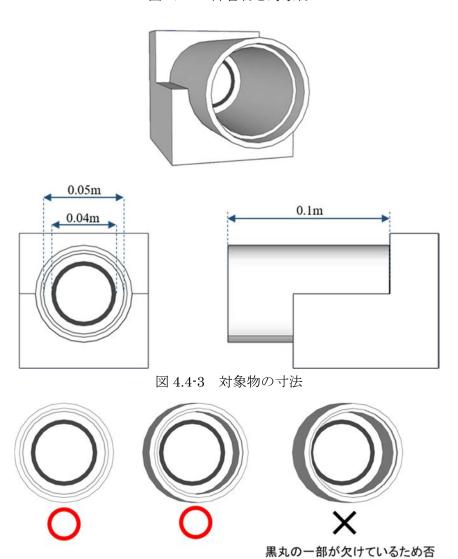


図 4.4-4 対象物の確認

4.5 試験実施の例

参考として、4.4 にて記述した試験環境例において実際に試験を行った様子を図 4.5-1 に示す。

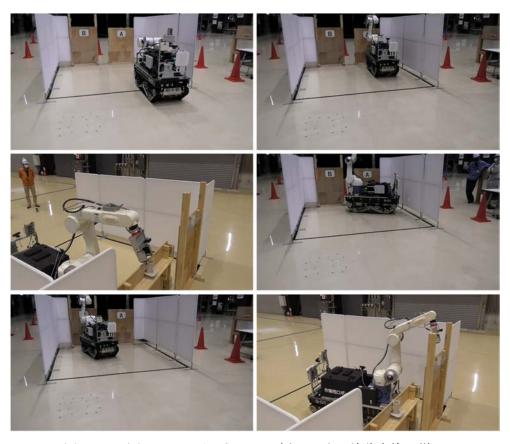
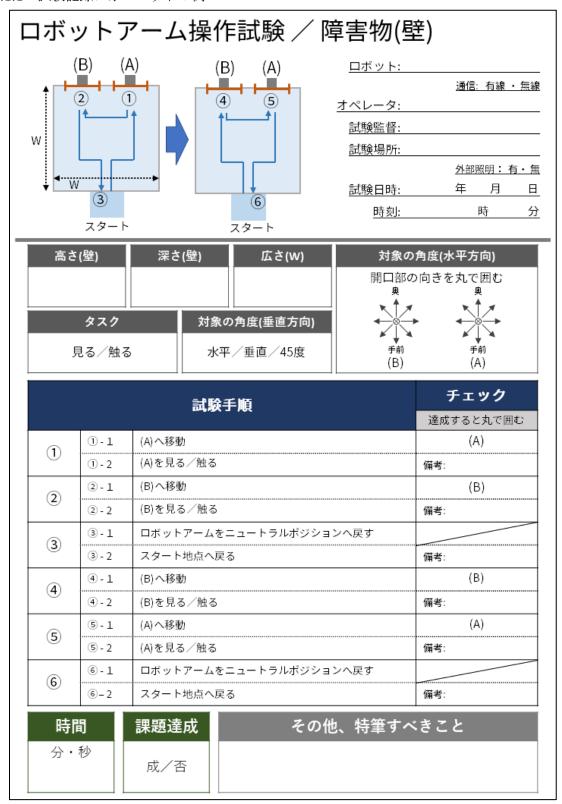


図 4.5-1 図 4.4-1 で示したコース例における試験実施の様子

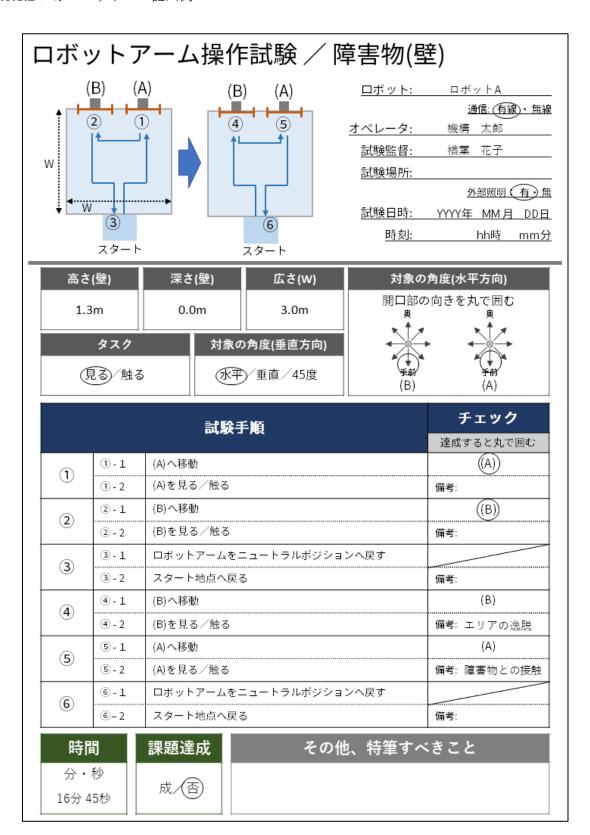
4.5.1 試験記録の例

前述した試験実施の例をもとにその記録用フォーマットの例とその記入例について示す。

4.5.1.1 試験記録フォーマットの例



4.5.1.2 フォーマットへの記入例



4.6 参考事例

本試験の参考とした、1Fでの遠隔操作走行ロボットによる緊急時対応や廃炉作業の具体的な事例は以下のものがある。

- 2 号機 原子炉建屋 1 階 高所 PCV 貫通部周辺の調査結果について(STEP2 の実施)(掲載日 2013 年 7 月 25 日) [出典:東京電力株式会社] https://www.tepco.co.jp/decommision/principles/technology/robot/robot_upper/pdf/high_altituderobot01.pdf (参照 2021-8-31).
- 2 号機原子炉建屋オペレーティングフロア フェンス撤去およびコアサンプル採取について (結果報告) (掲載日 2014年3月27日) [出典:東京電力株式会社] https://www.tepco.co.jp/decommision/principles/technology/robot/robot_upper/pdf/meister02.pdf

(参照 2021-8-31).

- 「原子炉格納容器内部調査技術の開発」2 号機原子炉格納容器内部調査(A2 調査) X-6ペネ用遮へいブロック撤去の状況について(掲載日 2015 年 7 月 13 日) [出典:東京電力株式会社]

https://irid.or.jp/wp-content/uploads/2015/07/20150713.pdf (参照 2021-8-31) .

5 まとめ

本稿では、1Fでの事故対応や廃炉作業での記録や経験を参考にして開発を行った。原子力災害対応用ロボットのための性能試験法のうち、障害物の乗り越えを介した接近性能試験(JAEA-TM-0006)に関する試験方法や諸条件についてまとめたものである。

これは、ロボットの性能を定量的に示す物差しにあたるものであり、既存のロボットの比較を可能にし、今後開発が行われるロボットの目標性能の設置等に活用することが期待される。尚、具体的に示した試験環境や試験実施の例については、楢葉遠隔技術開発センターにおいて設計、開発を行ったものである。

今後も同様のアプローチで、現在進められているロボットによる廃炉作業を参考に、原子力災 害対応用ロボットに要求される性能とそれに要求されるエッセンスに基づいた試験要件を抽出し、 性能試験法の開発を引き続き進めていく計画である。

参考文献

- [1] 東京電力ホールディングス, 動画・写真ライブラリー, https://www.tepco.co.jp/library/(参照 2021-9-10).
- [2] Kawatsuma S., Fukushima M. and Okada T., Emergency response by robots to Fukushima-Daiichi accident: summary and lessons learned, Industrial Robot: International Journal, Vol. 39, 2012, pp.428-435, DOI 10.1108/01439911211249715.
- [3] 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構, http://irid.or.jp (参照 2021-9-10).
- [4] Kawatsuma S., Mimura R. and Asama H., Unitization for portability of emergency response surveillance robot system: Experiences and lessons learned from the deployment of the JAEA-3 emergency response robot at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plants, ROBOMECH Journal, Vol. 4, Article Number 6, 2017, DOI 10.1186/s40648-017-0073-7.
- [5] Nagatani K. et al, Emergency response to the nuclear accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plants using mobile rescue robots, Journal of Field Robotics, Vol. 30, No. 1, 2013, pp.44-63, DOI 10.1002/rob.21439.
- [6] Kawatsuma S., Kawabata K., Tsuchida Y. and Tanifuji Y., Analysis of emergency response robots deployed for Fukushima Daiichi Nuclear Power Plants' accidents, Proceedings of Decommissioning and Remote Systems, 2016, pp.67-69.
- [7] National Institute of Standards and Technology, Standard Test Methods for Response Robots, https://nist.gov/el/intelligent-systems-division-73500/standard-test-methods-response
 - robots (参照 2021-9-10).
- [8] Jacoff A., Downs A., Virts A. and Messina E., Stepfield pallets: repeatable terrain for evaluating robot mobility, Proceedings of 8th Workshop on Performance Metrics for Intelligent Systems, 2008, pp.29-34, DOI 10.1145/1774674.1774680.
- [9] ASTM INTERNATIONAL, Standard Test Method for Evaluating Response Robot Mobility Using Symmetric Stepfields Terrains, E2828 / E2828M-20, https://www.astm.org/e2828_e2828m-20.html(参照 2021-9-10).
- [10] 川端 邦明, 山田 大地, 阿部 浩之, 原子力災害対応用ロボットの性能試験法; 走破性能試験 (JAEA-TM-0001, JAEA-TM-0002, JAEA-TM-0003), JAEA-Technology 2020-015, 2020, 37p.
- [11] 川端 邦明, 山田 大地, 阿部 浩之, 原子力災害対応用ロボットの性能試験法; 貫通孔を介した展開後の走破性能試験(JAEA-TM-0004, JAEA-TM-0005), JAEA-Technology 2021-021, 2021, 30p.
- [12] 東京電力,2 号機 原子炉建屋 1 階 高所 PCV 貫通部周辺の調査結果について(STEP2 の 実施),
 - https://www.tepco.co.jp/decommision/principles/technology/robot/robot_upper/pdf/high_al tituderobot01.pdf(参照 2021-8-31).

- [13] 東京電力,2号機原子炉建屋オペレーティングフロア フェンス撤去およびコアサンプル採取 について (結果報告),
 - https://www.tepco.co.jp/decommision/principles/technology/robot/robot_upper/pdf/meister 02.pdf(参照 2021-8-31).
- [14] 東京電力,「原子炉格納容器内部調査技術の開発」2 号機原子炉格納容器内部調査 (A2 調査) X-6 ペネ用遮へいブロック撤去の状況について,
 - https://irid.or.jp/wp-content/uploads/2015/07/20150713.pdf(参照 2021-8-31).
- [15] 東京電力ホールディングス,福島第一原子力発電所3号機原子力建屋内パックボット作業, https://photo.tepco.co.jp/date/2011/201104-j/110417-01j.html (参照 2021-9-10).
- [16] 東京電力, 福島第一原子力発電所 1・3 号機原子炉建屋 1 階ガレキ等の障害物の撤去について, https://www.tepco.co.jp/decommision/principles/technology/robot/robot_upper/pdf/astaco_sora02.pdf (参照 2021-9-10).
- [17] 東京電力, 3 号機 R/B1FL 高線量物品の移動について, https://www.tepco.co.jp/decommision/principles/technology/robot/robot_upper/pdf/astaco_sora01.pdf(参照 2021-9-10).
- [18] 東京電力, $1\sim3$ 号機 原子炉建屋 1 階 原子炉建屋 1 階 除染・遮へい作業の実施について(除 染効果の検証を含む),
 - https://www.tepco.co.jp/decommision/principles/technology/robot/robot_upper/pdf/around er04.pdf(参照 2021-9-10).