

日本原子力研究開発機構における 性能試験法に関する取組み

国立研究開発法人 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
廃炉環境国際共同研究センター 遠隔技術ディビジョン
空間情報応用制御研究グループ グループリーダー

川端 邦明



本日の内容

性能試験法について

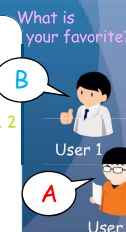
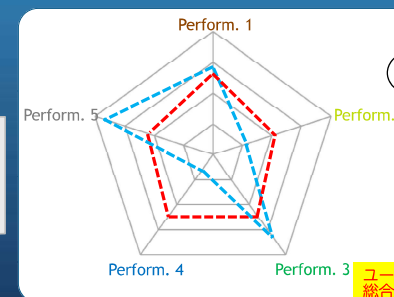
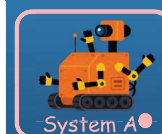
- 具体的な研究開発例
 - 原子力災害対応用ロボットの性能試験法
- ドローン飛行性能評価手法の開発

性能試験法について

- 技術と性能試験は、技術発展を駆動する両輪
 - 技術の特徴づけ、既存技術からの進展、適切な開発方向性の認識
 - 標準的な性能を（適切に）評価する手法を持つことは技術開発者、技術ユーザにメリットが大きい
- システムの性能と評価
 - システムの性能
 - 構成する複数要素からの出力の一連もしくは組み合わせにより表出される（単機能でなく多機能）
 - システムの評価
 - （ユーザの）想定使用法・局面によって期待される性質が変わるため性能基準が一定とは限らない（決まらない）
 - 標準的な評価方法を構築し、性能を定量的かつ相対的な比較を可能とする枠組みの構築

性能試験法の開発・提供

- ねらい：対象の持つ要素的・基盤的な性能を定量化して評価する標準的な試験方法を構築、提供すること。
 - 「性能基準」を設定して、それを満たすか否かの評価、議論を指向するものにあらず
 - 試験条件・課題の設定によって対象における性能を定量化する
 - 定量化された値（量）は対象間の性能比較に用いられる
 - 同一性能試験カテゴリで定量化された値（量）が多数集まることで性能に関する基準もできる
 - 複数の性能試験カテゴリにおいて定量化された値（量）の束ねによって、その対象が総体として持つ（相対的な）性能を見ることができる

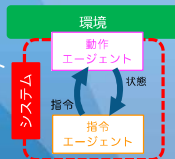


試験によって対象性能を量量化して抽出する

ユーザーが望む機体を総合的かつ相対的に見出すための参照情報の生成、提示

考え方, スタンス

- 対象
 - 指令を行うエージェントと指令によって動作するエージェントから構成される「システム」の振る舞い、パフォーマンス
 - 遠隔操縦型システム から 自律制御型システムまで
- 評価対象性能の抽出
 - 選定する際に確認できるとよいもの（評価すべきもの）
 - 評価可能なもの
- 定量的な評価方法の設定
 - 特殊なツールを使わずとも測定可能なもの
- ユーザーが自ら試験環境を再現可能, 試験実施可能
 - 特殊な施設, 素材, 加工等を極力避ける（部材調達の容易性）
 - KISS(Keep It Simple and Stupid)の原則 で設計
- Adjustability & Scalability
 - 試験環境や条件の主要パラメータ（サイズや規模等）の変更, 調節が可能（難易度・ランク評価）
 - 難し過ぎず, 簡単過ぎず（目的は技術の向上や技術の特徴づけ, 良い塩梅の課題設定）



本日の内容

- 性能試験法について
- 具体的な研究開発例
 - 原子力災害対応用ロボットの性能試験法
 - ドローン飛行性能評価手法の開発

原子力災害対応用ロボットの性能試験法の研究開発

Standard Test Methods For Response robots(NIST)

廃炉作業に必要なロボットの性能を定量的に評価し, 相対的な比較を可能とするための試験法の開発

福島第一原子力発電所での作業

-遠隔作業ロボット等の作業記録・経験 (タスク, 作業環境, トラブル事例等)



出典: 東京電力ホールディングス



廃炉作業の経験・知見から評価すべき性能をみるための試験条件・手順を提供することでロボットの開発・性能向上へ貢献

開発のアプローチ, 進め方

- 廃炉作業事例をもとに原子力施設での災害対応を行なうロボットへの要求事項を抽出し, それを判定する指標（評価軸）の設定するとともに, 評価軸への適合程度を数値化（定量化）するための標準的（誰もが容易に可能な, 共通した環境・手順に基づく）な試験方法の構築
- アプローチ
 - たたき台開発・提案 と アジャイル開発

実施項目	
①	・ 廃炉作業実施者にヒアリング調査を実施 ・ 廃炉作業状況の映像情報収集と内容調査
②	・ ロボット動作を要素単位に解析 ・ 要素単位での性能で定量的に評価可能なものを選定, 試験法の検討
③	・ 検討した試験法とNIST-STMの比較及び適合性検討 ・ 適合性のあるNIST-STMの試験設備の選定及び整備, 確認実験
④	・ NIST-STMに無い試験法について, 具体的な試験方法案と試験設備の整備
⑤	・ ロボット性能評価試験会の開催（競技会形式, 個別意見交換等） ・ 試験手順や実施感に関するコメント集約 ・ 試験法としての妥当性検証

標準化
プロセス
対象性能測定
基礎的試験フェーズ

狭隘通路走破性能試験 ①

(屋内の狭隘な通路を走破する性能を定量評価する試験)



階段走破性能試験 ①

(屋内の階段上および踊り場を走破する性能を定量評価する試験)



ケーブル牽引走破性能試験法 ①

(屋内構造物存在環境下でケーブルを牽引し走破する性能を定量評価する試験)



貫通孔を介した展開後における ①

床面上走破性能試験

(貫通孔から展開されたケーブル付きロボットの床面上における走破性能を定量評価する試験)



貫通孔を介した展開後における ①

傾斜面上走破性能試験

(貫通孔から展開されたケーブル付きロボットの傾斜面上における走破性能を定量評価する試験)



ロボットアームによる障害物の ①

乗り越えを介した接近試験

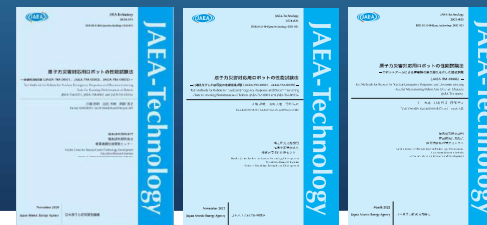
(作業対象にアクセスする途中に障害物がある状況下でのロボットアームの操作性を評価する試験)



性能試験手順に関する資料

- 狭隘通路走破性能試験, 階段走破性能試験, ケーブル牽引走破性能試験法
 - JAEA-Technology 2020-015, <https://jopss.jaea.go.jp/search/servlet/search?5069495>
- 貫通孔を介した展開後における床面上走破性能試験, 貫通孔を介した展開後における傾斜面上走破性能試験
 - JAEA-Technology 2021-021, <https://jopss.jaea.go.jp/search/servlet/search?5072009>
- 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-Technology 2021-033, <https://jopss.jaea.go.jp/search/servlet/search?5073118>

にて公開中.



試験法の妥当性確認および改良の取り組み

- 日本原電美浜原子力緊急事態支援センター (M-NEACE) および JAEA 遠隔機材整備運用課の協力のもと、意見交換会を実施

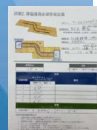
狭隘通路走破性能試験



狭隘通路走破性能試験



狭隘通路走破性能試験



階段走破性能試験



階段走破性能試験



階段走破性能試験



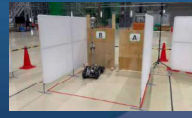
アーム操作性試験



アーム操作性試験



アーム操作性試験



意見反映

意見反映

2021/6/10-11@NARREC,JAEA

2021/10/18, 22@NARREC,JAEA

2021/12/1-2@NARREC,JAEA (M-NEACEと合同)

ユーザーで準備可能な程度に簡易かつ妥当な試験条件の模索

RoboCup Rescue Leagueを通じた普及活動

- Rescue Robot League
 - 米国標準技術研究所が開発を行っている災害対応ロボット用の標準的な性能試験法をベースとした競技課題 (タスク) 設定
 - 競技を通じた開発中の試験法やアイデアへの意見聴取 (妥当性検証) の機会
- 2022年7月開催のRoboCup2022@BITEC, Bangkok, Thailand
 - 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 が決勝戦に採用
 - 決勝3チームのうち2チームがJAEAタスクにトライ



SHINOBI(Kyoto Univ., Japan)

IRAP(King Mongkut's Univ. of Tech. North Bangkok, Thailand)

<https://jopss.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Technology-2021-033.pdf>

開発フェーズから利用展開フェーズへ

- JAEA 楢葉遠隔技術開発センター利用促進課により、利用者への展開を検討
- RSJ2023企業展示ブース E06番
 - 既存施設情報紹介・利用相談とともに、性能試験法の利活用についての相談、要望についてお聞かせください



評価・検証のサービス提供

遠隔操作システム/ロボット技術の応用分野

- 遠隔操作: デバイスの保守・大規模設置・機体運用
- 遠隔監視: 安全監視・映像監視
- 遠隔制御: トラッキング・アラート・記録

業務技術

- 遠隔操作システム
- 遠隔監視システム
- 遠隔制御システム

試験・計測環境の提供、相談

性能試験法: JAEA-TM, NIST-STM

技術検証: 現場適合性の確認、特性の理解

データ解析: 作業内容の検証、技術評価

性能試験法設備

原子力災害対応用ロボットの試験 (JAEA-TM)

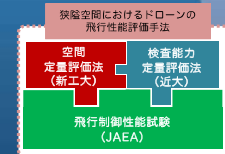
災害対応用ロボットの標準性能試験法 (NIST-STM)

本日の内容

- 性能試験法について
- 具体的な研究開発例
 - 原子力災害対応用ロボットの性能試験法
- ドローン飛行性能評価手法の開発

ドローン飛行性能評価手法の開発

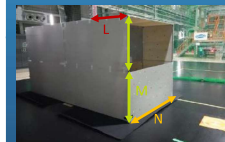
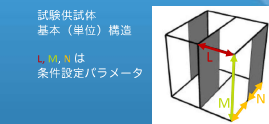
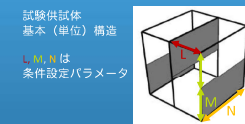
- 無人航空機に求められる安全基準策定のための研究開発 (NEDO DRESSプロジェクト(2021-2022))
- 非GPS飛行性能試験法
 - 小型飛行体の狭隘な環境下での飛行性能試験法開発 (新工大との共同実施)
- 制約環境下におけるドローンの性能評価法の研究開発 (NEDO ReAMoプロジェクト(2022-))
- 狭隘空間におけるドローンの飛行性能評価手法 (新工大、近大と共同実施)
- ドローン飛行制御性能に関する試験方法の開発
- アプローチ
 - たたき台開発・提案 と アジャイル開発
 - 試験法 = (試験供試体 + 試験実施プロシージャ + 試験記録票)
 - 2回/年の意見交換会の実施 (次回, 9/21@新潟工科大学)



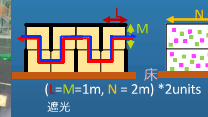
開発した飛行制御性能試験 (2021~)

進行方向に対する鉛直方向制御性能試験

進行方向に対する水平方向制御性能試験



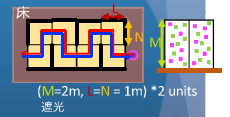
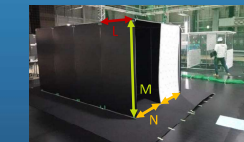
LiberaWare社 IBIS
寸法 0.191×0.179×0.054m



(L=M=1m, N=2m) *2units
遮光



試験記録票



(L=2m, N=1m) *2 units
遮光



DJI社 Mavic Air 2
寸法 対角長さ0.302m



試験記録票

開発中の性能試験 (2022~)

移動方向	制御方向・調整対象	対応状況
縦方向	縦向き方向・位置	-
横方向	横向き方向・位置	DRESS 設置
斜め方向	斜向き方向・位置	DRESS 未実
縦方向	縦向き方向・位置	予備実験中
横方向	横向き方向・位置	予備実験中
斜め方向	斜向き方向・位置	予備実験中
縦方向	縦向き方向・位置	予備実験中
横方向	横向き方向・位置	予備実験中
斜め方向	斜向き方向・位置	予備実験中

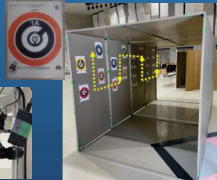
世界最狭小での点検の点 (上図の交差点) を 超えるため、狭小空間での点検

- 縦方向移動・縦開口部通過に関する試験



前回意見交換時

- 狭隘空間での点検飛行に関する試験



前回意見交換時

2023/9/21@新潟工科大学 開催の意見交換会 (2回目) にて最新版を御紹介
得られた実験結果, 成果については随時学会等で発表

成果に関する最近の文献

- SICE 「計測と制御」 Vol.62, No.5
特集:システムの性能および安全性評価に
向けた試験方法-実世界動作・作業のため
の基盤技術の標準化への取り組み-

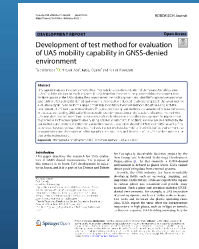
- 原子力災害対応
- ドローン



<https://www.sice.jp/pub/journal/mokuji/sice62-5.html>

- Yamada, et. al. "Development of test method for evaluation of UAS mobility capability in GNSS-denied environment", *ROBOMECH Journal*, (2023)10:13,

- ドローン



<https://doi.org/10.1186/s40648-023-00251-1>

- 3H2-03@RSJ2023 山田ら, "狭隘空間における小型ドローンの飛行制御性能の評価手法の開発"

性能評価工学の展開へ向けて

- 性能評価の研究開発分野としての認知度向上, 文化醸成
 - 技術発展の片輪になるためには, 研究コミュニティ拡大・若手研究者人口の増強 (多様な意見集約)
 - 学としての発展のための継続的な議論
 - 積極的な学会発表, ワークショップ企画
 - 単発のアイデア開発発表だけでなく, アジャイル的進化やエビデンスベースの議論展開
- (工学として) 試験・評価手法の設計についての体系化
 - 設計論的議論
 - タスクの抽象表現化, 最小実現化 => ある種の最適設計課題
 - (試験・評価手法の評価手法?)
- 技術研究者・開発・提供者への情報提供, ユーザとの対話
 - 適切な 性能評価を介した 技術の特徴づけ と 技術レベル認識の 共通化・共有化

おわりに

- 性能試験法について
- 日本原子力研究開発機構における性能試験法に関する取り組みについて紹介
 - 原子力災害対応用ロボットの性能試験法
 - ドローン飛行制御評価手法
- etc.

謝辞

本講演の内容は, JAEA CLADS空間情報応用制御研究グループ, NARREC 利用促進課, NARREC 遠隔機材整備運用課, 日本原子力発電 美浜原子力緊急事態支援センター, 名古屋工業大学, 新潟工科大学, 近畿大学, 千葉大学, 産総研, 東大 各位との議論, 協力によるものを含みます。ここに記して感謝の意を表します