

## 4. 無人化施工の作業性に関する AI 適用研究

株式会社熊谷組  
株式会社まざらん  
株式会社キック

○ 北原 成郎  
西垣 重臣  
才原 勝敏

### 1. はじめに

搭乗操作オペレータは、自らの視点で空間を認識し、建設機械の車体姿勢、振動、衝撃などを体感することができる。そのため、自らの経験と勘で、計器に頼らず、反射的に判断し、建設機械を操作することができる。搭乗操作のイメージを図-1に示す。



図-1 搭乗操作のイメージ

一方、遠隔操作オペレータは建設機械の車体姿勢、振動、衝撃などを体感することができない。遠隔操作のイメージを図-2に示す。

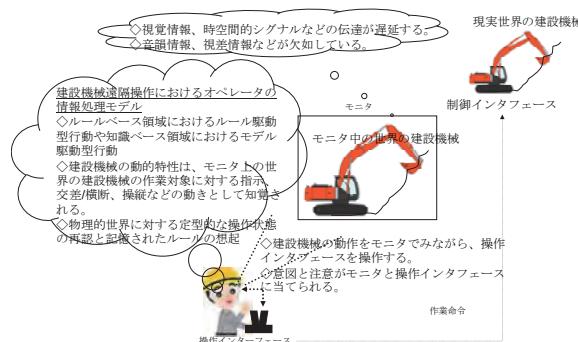


図-2 遠隔操作のイメージ

遠隔操オペレータは、遠隔操作用モニタを通じて、固定カメラ映像や車載カメラ映像から新たな空間を認識して建設機械の遠隔操作を行う。ここでは、操作・映像の各遅延を伴いながら、建設機械の振る舞いに基づいて、その状況がどのように変化するかを投影または予測して、遠隔操作することを強いられる。オペレータの心的負荷は大き

い。具体的には、つぎに示す負荷が想定される。

- (1) 時間遅延に伴う連続的または間欠的な作業負荷
- (2) 空間を認知するための空間的視点取得、心的回転、直動などに関わる心的負荷
- (3) 建設機械の振る舞いとその外界を検知するための
  - 1) 物理的なヒントの欠如
  - 2) 視野限界
- (4) 満足度（操作性、生産性、安全性）評価の欠如

従って、オペレータには、追跡/追従過誤、過剰/過小操作、断続的操作などが発生しやすい。現場管理者は、施工現場に立ち入れないため、遠隔操作用モニタをみて、またはオペレータからの口頭報告や作業日報により無人化施工状況を推測することになる。

遠隔操作オペレータと現場管理者にかかる負荷を軽減するための判断支援情報として、施工プロファイルのインフォグラフィックスを提供する。施工プロファイルとは、施工に伴って発生する事象の特徴、その特徴のパターンを示す指標などに関するデータ項目の集合である<sup>1)</sup>。インフォグラフィックスとは、データ、情報、グラフィックなどの視覚的な混合表現である。施工プロファイルのインフォグラフィックスは図-3に示す軸ごとに生成し、オペレータに提供する。

施工プロファイルのインフォグラフィックスを動的に提供することで、働き手の状況認識を促し、作業性（安全性、生産性）の向上を狙う。ここで動的とは情報の経時変化をいう。状況認識とは、自らの周囲に何が起きているかを知る能力をいう<sup>2)</sup>。施工プロファイルのインフォグラフィックス提供機能を、強化学習(reinforcement learning)手法の一つである Actor-Critic の枠組みに基づき構築する。強化学習とは Agent(制御器)が Environment(環境)から得る Reward(報酬)が大きくなるように行動を学習していく枠組みである。施工プロファイルを提供することで、説明可能な AI、いわゆる XAI(Explainable Artificial Intelligence)<sup>3)</sup>を目指す。

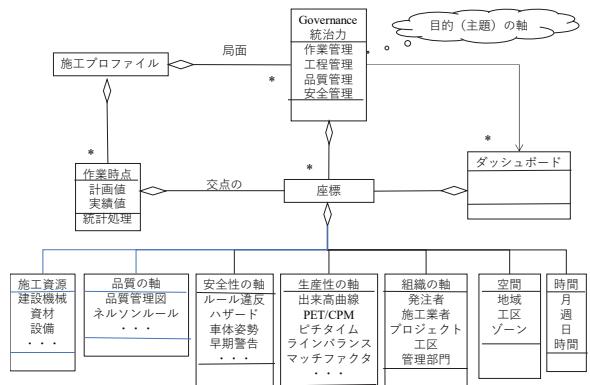


図-3 施工プロファイルのインフォグラフィックスの提供軸

本論文は、安全性と生産性の軸に注目して、遠隔操作オペレータの心的負荷を軽減する判断支援情報出力機能について報告する。判断支援情報は、遠隔操作性向の定量的評価と無人化施工領域に潜むハザードの同定、並びに、これらの時空間変化の検知などで構成される。つぎに、不整地運搬車の搭乗操作と遠隔操作の比較分析について報告する。ここでは、作業性を操作性評価指標と安全性評価指標、そして生産性評価指標を活用し、その適用性を評価する。最後に、現在研究中のActor-Criticの枠組みと判断支援情報出力機能の概要について述べる。

## 2. 判断支援情報を生成する定量的評価指標

作業性を操作性評価指標と安全性評価指標、そして生産性評価指標を活用し評価する。

### 2.1 操作性評価指標

操作性評価指標を以下に列挙する。

#### (1) 加減速性向

加速度分布の形状（歪度、尖り度、単峰性、二峰性など）に基づいて加減速性向を判断する。

#### (2) エネルギー性評価指標

##### 1) 力積 (impulse)

計測した加速度に基づいて算出した力積の和（速度応答の和）をエネルギー評価尺度とする。速度応答はエネルギーの大きさを示す尺度である。計測された加速度応答に基づいて力積の和は、つぎの式により求められる。

$$I = \sum_{i=1}^{\tau} \sqrt{v_{xi}^2 + v_{yi}^2 + v_{zi}^2} \quad (1)$$

#### 2) 加速度の外れ値数：中央値絶対偏差に基づいて外れ値数を計算する。

加速度の外れ値の数を数え上げる。外れ値のイメージを図-4に示す。

中央値は、データの中心性を計る尺度であり、平均値よりは外れ値の影響を受けない。中央値を中心としたバラツキを考慮したい。そこ

で、中央値絶対偏差(median absolute deviation)を活用する。中央値絶対偏差は、観測データの各値からその中央値を引いた値の絶対値の中央値として(2)式と(3)式により計算される。

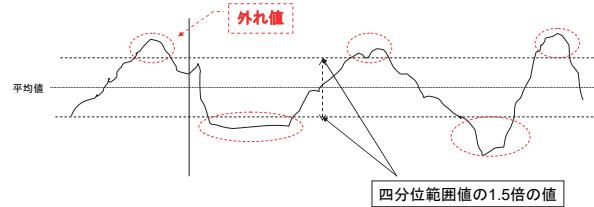


図-4 外れ値のイメージ

$$\text{outlierMAD} = K \times \text{abs}(x - \text{median}(x)) / \text{MAD}(x) \quad (2)$$

$$\text{MAD}(x) = \text{median}(\text{abs}(x_i - \text{median}(x))) \quad (3)$$

ここで、MAD: 中央値絶対偏差、abs(): 絶対値、median()は中央値を計算する関数である。作業種別ごとの範囲値（上限値、下限値）の計算と外れ値の検出に(3)式を用いる。

#### 3) 躍度(jerk)指標

図-5に示すように、躍度は加速度の第一階差分である。躍度が小さいことは加速度の変化が小さいことを示し、その運動は滑らかである。



図-5 躍度(jerk)のイメージ

#### (3) 動的変位の評価尺度

主に建設機械の追従制御性の評価に用いる。

##### 1) リアプノフ指数(Lyapunov exponent)：

リアプノフ指数はごく接近した軌道が離れていく度合いを表す量である。

##### 2) 転向角(turn angle)のバラツキ

転向角は建設機械の操舵角を示す。直線追従制御のターゲットである基準線は直線である。そのため、転向角のバラツキは建設機械の直進性を表現する。

##### 3) 行走軌跡の乱れ（直進性からの乖離度合い）正矢(Versine)を計算する。正矢の定義式をつぎに示す。

$$ver \sin e = 1 - \cos \alpha \quad (4)$$

#### 4) 旋回指標

操舵角とヨー角度の推移グラフを描画し、緩旋回、信地旋回、超信地旋回などを観察する。

- ・緩旋回：左右の履帶の速度に差をつけて、前進あるいは後退しながら弧を描いて進路を変えること。
- ・信地旋回（ピボットターン）：片側の履帶を停止して反対側の履帶だけを回転させ、停止側の履帶を軸（pivot）として旋回するもの。
- ・超信地旋回（スピントーン）：左右の履帶を互いに逆方向に等速回転させることにより、車体の中心を軸としてその場で旋回することをいう。

これらの不用意な旋回は、地表面を痛め、施工品質に悪影響を与えると思われる。

#### (4) 困難性指標

困難性を、ユーザ・インターフェースのデバイス（カーソル、マウス、ジョイスティックなど）の操作性評価に用いられている Fitts' Law や Steering lawなどを参考にして<sup>4)</sup>、目標物の大きさと目標物までの移動距離に基づいて困難性を示す(図-6)。つぎに示す評価尺度により表現する。

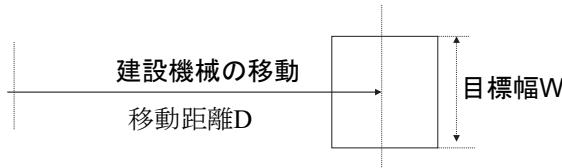


図-6 困難性を表す模式図

$$MT = a + bID$$

$$ID = \log_2 \left( \frac{D}{W} + 1 \right) \quad (5)$$

ここで、MT:目標までの移動時間、D: 開始点から、対象の中心までの距離、W: 動きの方向に測った対象物の幅、a, b: 定数である。a:建設機械の開始・停止時間、b:建設機械の速度などである。IDは困難性指標である。

#### (5) 意図形成の安定度

1) 学習能力: オペレータは、試行回数が増えるにつれて、作業環境に慣れる。そこで、作業所要時間と試行回数の関係をみる。

2) 作業環境の変化への素早い対応: 作業所要時間と困難性指標の関係をみる。

3) 作業所要時間と熟練と未熟練: 特定の課題の試行回数に対する反応時間の対数をみる。

## 2.2 安全性評価指標

安全性評価指標を以下に列挙する。

#### (1) 衝撃と自由落下

三軸加速度の計測値に基づいて、次式により時刻 t における三軸合成値 force を計算する。三軸合成値は次式で得られる。

$$force = \sqrt{\alpha_x^2 + \alpha_y^2 + \alpha_z^2} \quad (6)$$

ここで、force: 三軸合成値、 $\alpha_x$ : 左右方向加速度、 $\alpha_y$ : 前後方向加速度、 $\alpha_z$ : 上下方向加速度である。

スマートフォンの自由落下に関して色々な研究がある<sup>5)</sup>。これらの研究を参考にして、自由落下と衝撃を検知するための判断ルールをつぎのように設定している。

三軸合成値=<0.7g のとき自由落下の途中

三軸合成値>=1.2g のとき衝撃

三軸合成値>=1.4g のときやや強い衝撃

三軸合成値>=2g のとき強い衝撃

#### (2) 転倒危険

前後方向加速度と左右方向加速度に相補フィルタを適用して車体姿勢（ピッキングとローリング）を計算する(図-7)。車体姿勢の時系列が連(run)を形成するときに、転倒危険が発生したとする。

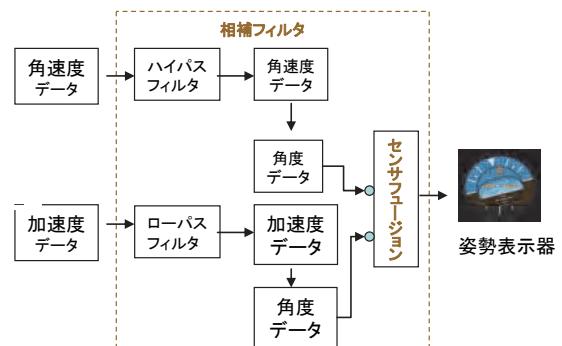


図-7 相補フィルタを適用した車体姿勢の計算

#### (3) 操舵危険指標

操舵危険指標(=走行速度/曲率半径)を計算する。

## 2.3 生産性評価指標

生産性評価指標を以下に列挙する。

#### (1) 進捗率

施工日の施工実績数量を施工目標数量で除した比率である。進捗率を進捗率ゲージで示す。

#### (2) 掘削土量と荷下ろし土量

経度と緯度の平面に対して、それぞれの土量を高さで表現した三次元ヒストグラムを示す。

#### (3) 積込場と荷下ろし場の作業状況

積込場と荷下ろし場の作業状況を示すために、それぞれの作業場におけるダンプトラックの到着

発進状況を発着累積グラフで示す。

#### (4) 実稼動時間と実稼働率

三軸加速度の分散の変化点を捉え、待機状態、アイドリング状態、稼動状態を識別とともにそれぞれの時間と全時間を自動計算する。そして、実稼動時間と実稼働率を計算する。これらの情報を作業時間表と作業時間バーチャートで示す。さらに、積込と荷下ろしの所要時間とサイクルタイムの経時変化を折れ線グラフで示す。

#### (5) ピッチタイム（サイクルタイム）

ピッチタイムは実稼動時間を施工実績数量で除した比率である。言い換れば、1仕事量に対するサイクルタイムを表す。各工程のピッチタイムをピッチダイヤグラムで示し、ラインバランス・ロス率を計算する。ピッチダイヤグラムとは各建設機械の稼働時間のバランス状態を図示したものである。ラインバランス・ロス率は(7)式で求められる。ここでピッチタイムはサイクルタイムを指す。

$$\text{ラインバランス・ロス率} = \frac{(\text{工程数} \times \text{ボトルネック工程のピッチタイム} - \text{各工程のピッチタイムの合計時間})}{(\text{工程数} \times \text{ボトルネック工程のピッチタイム})} \quad (7)$$

### 3. ケーススタディ

前述した判断支援情報を生成する定量的評価指標の適用性を評価するために、不整地運搬車の模擬動作を想定した搭乗操作と遠隔操作の比較実験を実施した。その概要を以下に示す。

(1) 実施期間：2018年3月22日～2018年4月15日

(2) 実施場所：(株)熊谷組技術研究所内走行試験ヤード

(3) 実験に使用した不整地運搬車

この不整地運搬車の写真を写真-1に示す。



写真-1 実験に使用した不整地運搬車

#### (4) センサ

スマートフォン内臓の三軸加速度計、三軸角速度計、GPS受信器を活用する。不整地運搬車キャビン室内のスマートフォン車載状況を写真-2に示す。



写真-2 スマートフォン車載状況

#### (5) 不整地運搬車の模擬動作

操作性能はつぎの3つに分けられる。

- ① 旋回性能：少ない範囲で針路を変える性能
- ② 停止性能：速やかに停止する性能

③ 保針・変針性能：針路を安定に保つ性能  
これらの操作性能に注目し、つぎに示す模擬動作項目を実施した。

- ① 直進と停止
- ② 走行旋回：右回り、左回り
- ③ スピンターン：右回り、左回り
- ④ zig-zag 走行

⑤ ダンピング操作：直進→Uターン→後進→荷下ろし→直進

#### (6) 搭乗操作と遠隔操作の比較分析

搭乗操作と遠隔操作による不整地運搬車の模擬動作に伴い励起される三軸加速度応答値と三軸角速度応答値、そしてGPS受信器より自己位置を示す緯度、経度などを計測した。そして、これらの計測データに、前述した判断支援情報生成の数理モデルを適用することでインフォグラフィックスを作成し、データ解析を行った。

##### 3.1 遠隔リアルタイムモニタリング・ダッシュボード

関係者は遠隔リアルタイムモニタリング・ダッシュボードにアクセスすることで、これらのインフォグラフィックスを閲覧することができる。遠隔リアルタイムモニタリング・ダッシュボードの画面例を図-8と図-9に示す。



図-8 メイン画面

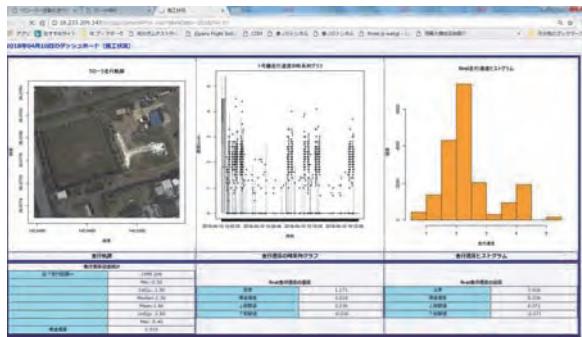


図-9 インフォグラフィックス表示画面

### 3.2 インフォグラフィックスの例

作成したインフォグラフィックスの一部を以下に示す

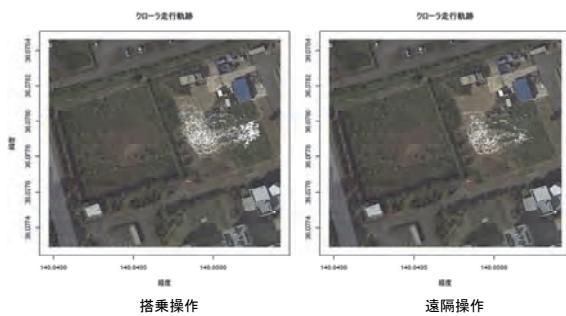


図-10 不整地運搬車の走行軌跡

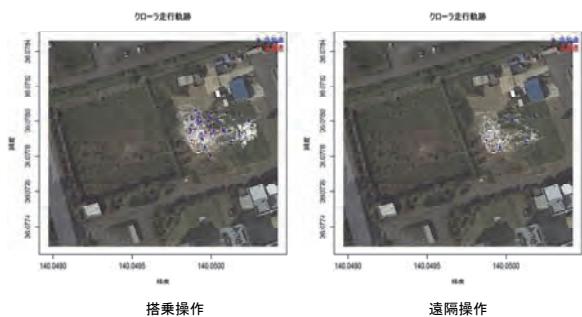


図-11 不整地運搬車の急加減速発生箇所

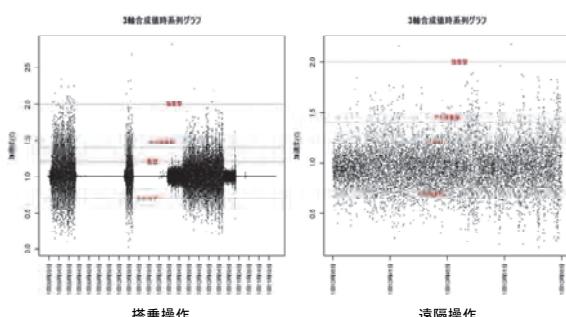


図-12 三軸合成値の時系列グラフ

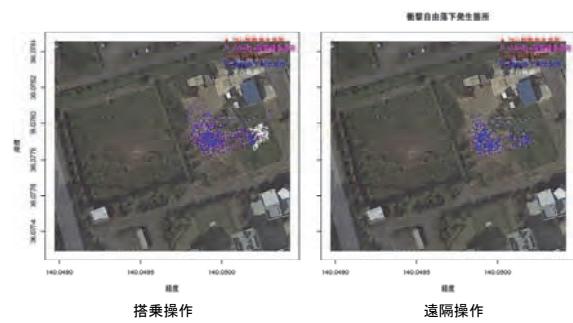


図-13 衝撃と自由落下

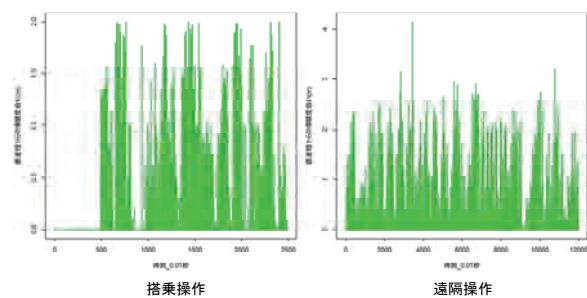


図-14 走行軌跡の乱れ（直進性からの乖離度合い）

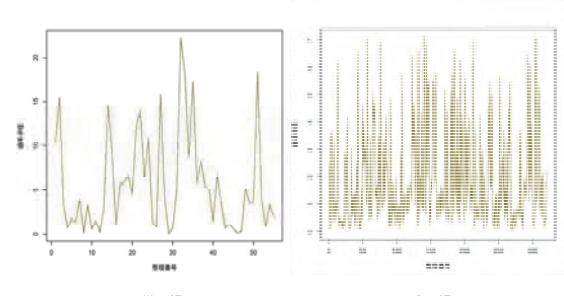


図-15 曲率半径

### 3.2 比較分析結果のまとめ

データ解析結果のうち、重要な特性値を表-1 に示す。

表-1 重要な特性値

模擬動作	
搭乗操作	遠隔操作
走行速度平均値(km/hr)	4.62
走行速度躍度標準偏差	0.00125
3軸合成値標準偏差	0.246
曲率半径平均値(m)	5.63
直進性からの乖離度合い(m)	0.076902
	2.77
	0.000267
	0.205
	1.89
	0.097828

表-1よりつぎのことことがいえる。

- (1) 平均走行速度は搭乗操作が遠隔操作よりも早い。搭乗操作の平均走行速度は、歩行平均速度にほぼ等しい。

- (2) 走行速度の躍度標準偏差については、搭乗操作が遠隔操作より大きい。言い換れば、搭乗操作は、遠隔操作よりも急加減速が発生しやすい。
- (3) 搭乗操作の3軸合成値標準偏差が遠隔操作よりも大きい。言い換れば、搭乗操作は、遠隔操作や自動走行よりも自由落下、衝撃などの事象が生起しやすい。
- (4) 曲率半径は搭乗操作が遠隔操作よりも大きい。言い換れば、搭乗操作による走行が描く曲線は緩やかであり、遠隔操作による走行が描く曲線は非常に急である。
- (5) 搭乗操作、遠隔操作のいずれも直進性は非常に良い。

これらの分析結果は、前述した搭乗操作と遠隔操作の特質をよく表している。無人化施工の作業性評価に活用できると思われる。

#### 4. Actor-Critic の枠組みと判断支援情報出力機能

前述したように、施工プロファイルのインフォグラフィックス提供機能を、強化学習(reinforcement learning)手法の一つであるActor-Criticの枠組みに基づき構築する研究を行っている。強化学習とは Agent(制御器)がEnvironment(環境)から得るReward(報酬)が大きくなるように行動を学習していく枠組みである。

Actor-Criticアルゴリズムは、Criticにおいて状態の評価値をTemporal Difference(TD)法で学習しながら政策を改善するアルゴリズムである。Actor-Critic法は、TD学習の一種のアルゴリズムである。Actor-Critic法では、エージェント内部に価値評価部分(critic)と行動選択部分(actor)が独立して存在する。criticは状態価値関数を評価し、その出力(TD誤差)に基づいてactorは方策を学習する。

Actor-Critic法は、状態や行動を評価するCritic部分と、確率的政策を保持するActor部分より構成され、Criticの評価値に基づいてActorの政策を改善していく。

Actor-Critic学習システムは、報酬の遅れを取り扱い可能な強化学習法の一つであり、以下の実用的利点を持つ。

- (1) 連続値を含む行動出力への拡張が容易
- (2) 確率的政策により、隠れ状態を含む環境やマルチエージェント、ゲームなどへの適用も可能
- (3) 従来の教師付学習をActorへ適用することにより、エキスパートの知識との統合が容易

Actorは、複数の手の中から、最適な解を導出するというタイプの写像である。そのため、エキスパートの知識を導入しやすい。

Actor-Criticの枠組みに基づく予測判別と判断支援モデルの構成を図-16に示す。

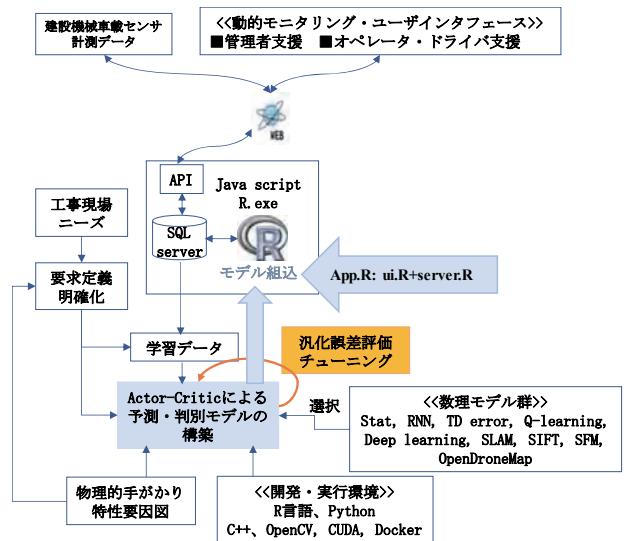


図-16 Actor-Criticの枠組みに基づく予測判別と判断支援モデルの構成

#### 5. 今後の課題

判断支援情報を生成する定量的評価指標を無人化施工で活躍する建設機械に適用し、知見を積み重ねる。つぎに、求められる判断支援情報を整理する。そして問題に応じてCriticに組み込む定量的評価指標を整理するとともに、Actorに組み込むべき判断支援情報のフィードバック方法を構築する。これらが今後の課題である。

#### 参考文献

- 1) S. Nishigaki, H. Sugiura, T. Takamura, H. Ogura and K. Hatori: "STUDY ON FRAMEWORK OF CONSTRUCTION PROFILE FOR COLLABORATIVE AND INTELLIGENT CONSTRUCTION," Journal of Applied Computing in Civil Engineering, Vol.14, 2005.
- 2) Team Coordination Training (TCT): "SITUATIONAL AWARENESS," The U.S. Coast Guard's Boating Safety Division, 2004.
- 3) David Gunning: Explainable Artificial Intelligence (XAI), DARPA/I2O. On line:  
[https://www.cc.gatech.edu/~alanwags/DLAI2016/\(Gunning\)%20IJCAI-16%20DLAI%20WS.pdf](https://www.cc.gatech.edu/~alanwags/DLAI2016/(Gunning)%20IJCAI-16%20DLAI%20WS.pdf)
- 4) Paul M. Fitts: The Information Capacity of the Human Motor System in Controlling the Amplitude of Movement, the Journal of Experimental Psychology, 47, 381-391, 1954.
- 5) Kire Serafimov, Natasa Koceska: "PERVASIVE ALERT SYSTEM FOR FALL DETECTION BASED ON MOBILE PHONES," UGD Academic Repository, 2012.