

情報化機器技術の調査テーマ：自律化・遠隔化に関する技術調査票

機能を起点に、要素機能・実現技術・要件・課題・代表的な適用事例を対応づけて整理する。

F・G列：◎不可欠、○必要または有効、△方式によって必要、－基本的に不要。J～L列：該当する公式事例が確認できた行のみ記載。

| 大分類   | 必要機能       | 要素機能           | 実現技術・機器                                                            | 自律化 | 遠隔化 | 主な技術要件                                  | 適用上の課題                                     | 1. 建機OEM・システム製品の商用事例                                                                                                                                                                         | 2. センサ・通信・計算基盤等の代表製品                                   | 3. 安全・セキュリティ等の規格・実装方式              |
|-------|------------|----------------|--------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------------|
| 認識・計測 | 自車位置・姿勢認識  | 絶対位置計測         | GNSS、RTK-GNSS、PPP-RTK                                              | △   | ○   | 必要位置精度・更新周期、初期捕捉時間、補正情報の可用性、座標系整合、完全性監視 | 遮蔽・マルチパス・電離層影響、基地局/補正配信停止、アンテナ設置制約、測地系の不一致 | Trimble Earthworks〔Trimble〕：GNSS/RTKを用いた建機の3D位置・設計面誘導〔商用〕<br>Intelligent Machine Control〔IMC〕〔コマツ〕：GNSSと3D設計データを用いた建機位置・施工面管理〔商用〕                                                            | NovAtel SMART7-S/SPAN：RTK-GNSS・GNSS/INS統合の代表例          | RTCM 3.x/Ntrip：RTK補正情報の標準的配信方式     |
|       |            | 相対位置・自己位置推定    | LiDAR SLAM、Visual SLAM、LiDAR-IMU Odometry、Visual-Inertial Odometry | △   | △   | 累積誤差抑制、リアルタイム性、再局在性能、地図整合性、センサ同期        | 粉塵・降雨・逆光・単調環境で特徴量不足、地図変化、計算負荷、ドリフト         | Cat MineStar Command/Komatsu FrontRunner：GNSS遮蔽時も含む複合自己位置推定を自律走行に利用〔商用〕                                                                                                                      | Autoware Localization/ROS 2 SLAM Toolbox：SLAM・オドメトリ実装例 | ISO 17757：自律・半自律建機システムの位置認識を含む安全設計 |
|       |            | 姿勢・方位計測        | IMU、ジャイロセンサ、加速度センサ、傾斜センサ、デュアルアンテナGNSS                              | ◎   | ○   | 角度精度、バイアス安定性、更新周期、振動耐性、温度補償、取付け校正       | 磁気外乱、振動・衝撃、温度ドリフト、GNSS遮蔽、取付け誤差             | Trimble Earthworks：デュアルGNSSアンテナで車体・作業機の方位を算出〔商用〕                                                                                                                                             | NovAtel SPAN Dual Antenna：GNSS/INS方位・姿勢計測              |                                    |
|       |            | 車速・移動量計測       | 車輪速センサ、エンコーダ、GNSS速度、ドップラーレーダー                                      | ◎   | ○   | 低速域精度、更新周期、スリップ検知、双方向計測、他センサとの整合        | タイヤ/履帯スリップ、径変化、泥付着、凹凸路面、センサ断線              |                                                                                                                                                                                              |                                                        |                                    |
|       | 車両・作業機状態認識 | 操舵・旋回状態計測      | 操舵角センサ、磁気センサ、旋回角センサ、エンコーダ                                          | ◎   | ○   | 計測精度、更新周期、異常検知閾値、診断カバレッジ、車載通信整合、耐環境性    | 振動・衝撃・温度、センサドリフト、配線/コネクタ故障、個体差、DTC定義差      |                                                                                                                                                                                              |                                                        |                                    |
|       |            | 作業機姿勢計測        | IMU、傾斜センサ、シリンダ長センサ、角度センサ                                           | ◎   | ○   |                                         |                                            | Trimble Earthworks：ブーム・アーム・バケット姿勢を用いた3Dガイダンス/自動制御〔商用〕<br>Intelligent Machine Control〔IMC〕〔コマツ〕：作業機姿勢を用いた半自動掘削・整地制御〔商用〕                                                                       | 傾斜センサ、IMU、シリンダストロークセンサの組合せ                             | ISO 10968：土工機械の直接操作系に関する要求・指針      |
|       |            | 駆動・制動状態計測      | エンジンECU、モータインバータ、ブレーキ圧センサ、回転数センサ                                   | ◎   | ○   |                                         |                                            |                                                                                                                                                                                              |                                                        |                                    |
|       |            | 油圧状態計測         | 圧力センサ、流量センサ、油温センサ、バルブ開度センサ                                         | ○   | ○   |                                         |                                            |                                                                                                                                                                                              |                                                        |                                    |
|       |            | 車体・機器健全性監視     | 振動センサ、温度センサ、電流・電圧センサ、診断情報(DTC)                                     | ○   | ○   |                                         |                                            | KOMTRAX/Cat Product Link等：稼働・故障コード・機体状態の遠隔監視〔商用〕<br>KOMTRAX〔コマツ〕：稼働時間、燃料、位置、故障情報等を遠隔収集・監視〔商用〕                                                                                                | 産業用振動・温度・電流センサ、DTCロガー                                  | SAE J1939診断メッセージ、状態監視・予知保全の実装      |
|       |            | 障害物・人・車両検出     | LiDAR、2D/3Dカメラ、ミリ波レーダー、超音波センサ                                      | ◎   | ○   | 検出距離・視野、検出率/誤検出率、更新周期、対象分類、悪天候性能、冗長性    | 死角、粉塵・霧・雨雪・逆光、遮蔽、小物体、学習データ偏り、センサ汚損         | Cat MineStar Detect Object Detection：レーダーとカメラで車両周辺の危険物を検出〔商用〕<br>KomVision人検知衝突軽減システム〔コマツ〕：4台のカメラで機体周囲の人を検知し、衝突リスク低減を支援〔商用〕<br>PC200i-12 KomVision衝突検知ブレーキシステム〔コマツ〕：カメラ等で周囲の人・物を検知し減速・停止〔商用〕 | Ouster OSシリーズLiDAR、車載カメラ、77GHzレーダー                     | ISO 17757：自律機械の障害物検出・保護領域を含む安全要求   |
|       | 周囲環境認識     | 距離・奥行き計測       | LiDAR、ステレオカメラ、ToFカメラ、超音波センサ                                        | ◎   | ○   | 距離精度、最小/最大測距、分解能、視野角、更新周期、反射率依存性        | 粉塵・降雨・低反射物・多重反射、カメラ露出差、近距離死角               | Cat MineStar Detect/自律運搬システム：周辺距離計測にレーダー・LiDAR等を利用〔商用〕<br>PC200i-12 KomVision〔コマツ〕：機械周囲360度の監視と対象物検知に活用〔商用〕                                                                                  | 3D LiDAR、ステレオカメラ、ToFカメラ                                | ISO 17757に基づく検出性能・故障時安全設計          |
|       |            | 走行可能領域認識       | LiDAR点群、ステレオカメラ、セマンティックセグメンテーション                                   | ◎   | △   | 境界精度、路面分類精度、勾配・段差検出、リアルタイム性、未知領域処理      | 叢・水たまり・草木・土砂堆積、照明変化、地形変化、誤分類による進入          | Komatsu FrontRunner/Cat Command for Hauling：走行可能領域と経路を管理して無人走行〔商用〕                                                                                                                           | Autoware Perception：点群・画像によるDrivable Area認識            | ISO 17757：定義された運用環境内での自律走行安全       |
|       |            | 路面・地形形状計測      | 3D LiDAR、ステレオカメラ、GNSS測量、地形マッピング                                    | ○   | ○   | 高さ精度、点密度、測定範囲、座標精度、更新頻度、地図生成時間          | 粉塵による欠測、動的物体混入、植生、GNSS誤差、データ量増大            | Trimble Earthworks：3D設計面・地形データを使った掘削/整地支援〔商用〕<br>Smart Construction Dashboard〔コマツ/EARTHBRAIN〕：3D現場モデルで地形・施工状況を可視化〔商用〕                                                                        | 3D LiDAR、GNSSローバ、地上レーザスキャナ                             | LandXML/IFC：地形・設計データ交換方式           |
|       |            | 標識・マーカ・ジェスチャ認識 | RGBカメラ、画像認識、AprilTag・ArUco等のマーカ                                    | △   | △   | 精度、分解能、更新周期、検出範囲、センサ同期、耐環境性、自己診断性       | 粉塵・泥・雨雪・逆光、振動・衝撃、センサ汚損、遮蔽、温度変化、校正ずれ        | 自律運搬現場の標識・停止位置マーカ、遠隔施工のARガイダンス〔運用例〕                                                                                                                                                          | AprilTag、ArUco、産業用RGBカメラ                               | ISO 17757に基づく運用環境・標識管理             |
|       |            | 視界・気象状態検出      | 照度センサ、雨滴センサ、温湿度センサ、視程推定カメラ                                         | ○   | ○   |                                         |                                            |                                                                                                                                                                                              |                                                        |                                    |
|       |            | 周囲音・警報音取得      | マイク、マイクアレイ、騒音抑制処理                                                  | △   | ○   |                                         |                                            |                                                                                                                                                                                              |                                                        |                                    |
|       |            | 土砂・岩・積荷認識      | LiDAR、3Dカメラ、RGBカメラ、画像認識                                            | ○   | △   |                                         |                                            |                                                                                                                                                                                              |                                                        |                                    |
|       |            | 荷重・ペイロード計測     | 油圧圧力センサ、ロードセル、車体姿勢センサ、ペイロード計測器                                     | △   | △   |                                         |                                            | Cat Payload/Komatsu Payload Meter：積載量をオンボード計測〔商用〕<br>Smart Quarry Site〔コマツ〕：機械・ペイロード・生産データを統合し積込み判断を支援〔商用〕                                                                                   | 油圧圧力センサ、ロードセル、姿勢センサ                                    |                                    |
|       |            | 土量・出来高計測       | LiDAR、ステレオカメラ、ドローン測量、点群差分処理                                        | △   | △   |                                         |                                            | Trimble WorksOS/Earthworks：機械からの施工実績を使い土量・進捗を可視化〔商用〕<br>Smart Construction Dashboard〔コマツ/EARTHBRAIN〕：現況地形と施工データから土量・進捗を可視化〔商用〕                                                               | ドローン測量、3Dレーザスキャナ、点群差分ソフト                               | LandXML/IFCによる地形・施工データ連携           |

情報化機器技術の調査テーマ：自律化・遠隔化に関する技術調査票

機能を起点に、要素機能・実現技術・要件・課題・代表的な適用事例を対応づけて整理する。

F・G列：◎不可欠、○必要または有効、△方式によって必要、－基本的に不要。J～L列：該当する公式事例が確認できた行のみ記載。

| 大分類      | 必要機能       | 要素機能          | 実現技術・機器                                           | 自律化 | 遠隔化 | 主な技術要件                               | 適用上の課題                                    | 1. 建機OEM・システム製品の商用事例                                                                                                          | 2. センサ・通信・計算基盤等の代表製品                             | 3. 安全・セキュリティ等の規格・実装方式              |
|----------|------------|---------------|---------------------------------------------------|-----|-----|--------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------|
|          |            | 出来形計測         | GNSS、TS、3Dスキャナ、施工履歴・As-Builtデータ                   | △   | △   |                                      |                                           | Trimble Earthworks：施工中のAs-Builtデータを記録・共有（商用）<br>Smart Construction Dashboard（コマツ/EARTHBRAIN）：3D現場モデル上で出来形・施工履歴を共有（商用）         | GNSS、トータルステーション、3Dスキャナ                           | LandXML／IFC、国土交通省BIM/CIM成果品仕様等     |
|          |            | 積みみ・掘削状態判定    | 作業機姿勢、油圧、ペイロード、カメラ映像のセンサフュージョン                    | △   | △   |                                      |                                           |                                                                                                                               |                                                  |                                    |
| 判断・計画    | 位置・地図処理    | センサ統合自己位置推定   | GNSS/IMU統合、EKF・UKF、Factor Graph、SLAM              | ◎   | △   | 位置・地図精度、更新周期、座標系/時刻整合、再局在性、地図版管理     | GNSS遮蔽、地図陳腐化、現場形状変化、ドリフト、座標系不一致           | Komatsu FrontRunner／Cat Command：GNSS・IMU・車輪速等の統合測位を自律走行に適用（商用）                                                                | NovAtel SPAN、Autware EKF Localizer               | ISO 17757の安全要求に基づく位置完全性監視          |
|          |            | 地図生成・更新       | LiDAR SLAM、Visual SLAM、点群地図、占有格子地図                | △   | △   |                                      |                                           | 自律運搬システムの走路マップ、Trimble Earthworksの3D現場モデル（商用）<br>Smart Construction Dashboard（コマツ/EARTHBRAIN）：複数デバイスの点群・地形データを統合し現場モデルを更新（商用） |                                                  |                                    |
|          |            | 走行・作業エリア管理    | 高精度地図、ジオフェンス、作業区画データ、進入禁止領域                       | ◎   | ○   |                                      |                                           | Komatsu FrontRunner／Cat Command：走行路、速度制限、進入禁止区域を管制（商用）<br>PC200i-12 ジオフェンス機能（3D）（コマツ）：作業制限面への接近時に自動停止（商用）                     | ジオフェンス、HD Map、作業区画管理ソフト                          | ISO 17757：定義された機能環境・立入管理           |
|          | 状況認識       | 物体認識・分類       | 深層学習画像認識、3D物体検出、センサフュージョン                         | ◎   | △   | 計算時間、決定周期、再現性、制約遵守、未知状況への安全側処理、検証可能性 | 想定外状況、モデル誤差、学習データ偏り、計算量、地図・現場変化、説明・検証の難しさ | Cat MineStar Detect：カメラ/レーダーによる対象物検出・警報（商用）<br>KomVision人検知衝突軽減システム（コマツ）：カメラ画像から機体周囲の人を認識し、モニター表示・警報へ連携（商用）                   | NVIDIA Jetson AGX Orin＋物体検出AI、Autware Perception | ISO 17757：検出・分類の安全妥当性確認            |
|          |            | 物体追跡・挙動推定     | Multi Object Tracking、カルマンフィルタ、軌跡予測               | ○   | △   |                                      |                                           |                                                                                                                               |                                                  |                                    |
|          |            | 作業状況理解        | ルールベース判定、画像認識、時系列解析、状態推定                          | △   | △   |                                      |                                           |                                                                                                                               |                                                  |                                    |
|          | 行動・経路計画    | 大域経路計画        | A*、Dijkstra、グラフ探索、高精度地図                           | ○   | △   | 衝突回避制約、計画周期、経路品質、車両運動制約、再計画性能、安全余裕   | 動的障害物、狭隘、不整地、局所解、計算時間超過、地図誤差              | Komatsu FrontRunner／Cat Command：積込・運搬・排土地点間の自律経路生成（商用）<br>FrontRunner AHS（コマツ）：積込・運搬・排土地点間の運搬経路を自律走行（商用）                      | Autware Planning（A*等）、ROS 2 Nav2                 | ISO 17757：経路計画・運行管理を含むASAMS安全      |
|          |            | 局所経路・回避経路生成   | Hybrid A*、RRT/RRT*、Optimization-based Planning    | ◎   | △   |                                      |                                           | FrontRunner AHS（コマツ）：現場状況に応じた走行経路・速度の自律制御（商用）                                                                                 |                                                  |                                    |
|          |            | 動作・軌道計画       | 軌道最適化、速度プロファイル生成、格子ベース／サンプリングベース計画                | ◎   | △   |                                      |                                           | FrontRunner AHS（コマツ）：無人ダンプの速度プロファイルと走行軌道を生成・実行（商用）                                                                            |                                                  |                                    |
|          |            | 障害物回避判断       | 衝突予測、TTC判定、回避軌道生成、安全領域判定                          | ◎   | ○   |                                      |                                           | Cat Command for Hauling：他車両・人員を考慮した自律停止・回避（商用）<br>KomVision衝突検知ブレーキシステム（コマツ）：人・物の検知結果に応じて注意、減速、停止（商用）                         | TTC計算、衝突予測、Autware obstacle avoidance            | ISO 17757：衝突リスク低減と安全停止             |
|          | 作業計画・意思決定  | 作業手順・シーケンス生成  | 状態機械（State Machine）、Behavior Tree、ルールエンジン、タスクプランナ | ○   | △   | 作業状態遷移の妥当性、例外処理、目標達成度、再計画性、説明可能性     | 作業対象のばらつき、未知条件、ルール統合、学習モデルの一般化不足          |                                                                                                                               |                                                  |                                    |
|          |            | 作業条件に応じた動作選択  | 機械学習、強化学習、ルールベース、最適化                              | ○   | △   |                                      |                                           |                                                                                                                               |                                                  |                                    |
|          |            | 施工計画・シミュレーション | 施工シミュレータ、デジタルツイン、離散事象シミュレーション                     | △   | △   |                                      |                                           | Trimble WorksOS／鉱山FMS：施工計画と実績を比較し運用を最適化（商用）<br>Smart Construction Simulation（コマツ/EARTHBRAIN）：AIを用いて施工計画を短時間で策定・比較（商用）         | NVIDIA Omniverse等のデジタルツイン/シミュレーション基盤             | ISO 17757：ライフサイクルを通じた検証・妥当性確認      |
|          | 予測・最適化     | 機械挙動予測        | 車両ダイナミクスモデル、油圧モデル、データ駆動モデル                        | ○   | △   | 計算時間、決定周期、再現性、制約遵守、未知状況への安全側処理、検証可能性 | 想定外状況、モデル誤差、学習データ偏り、計算量、地図・現場変化、説明・検証の難しさ |                                                                                                                               |                                                  |                                    |
|          |            | 故障・劣化予測       | 時系列解析、異常検知、予知保全モデル                                | △   | △   |                                      |                                           | KOMTRAX／Cat Product Link：稼働・故障情報を用いた予防保全（商用）                                                                                  | 時系列DB、異常検知AI、振動診断センサ                             | SAE J1939診断、NIST SSDF（分析ソフトの安全な開発） |
|          |            | 生産性・燃費最適化     | 数理最適化、MPC、シミュレーション、AI最適化                          | △   | △   |                                      |                                           | Smart Construction Simulation（コマツ/EARTHBRAIN）：施工条件をシミュレーションし生産性を最適化（商用）                                                       |                                                  |                                    |
| 車両・作業機制御 | 走行・操舵・制動制御 | 駆動力・速度制御      | エンジン/モータ制御、アクセルBy-Wire、PID制御、MPC                  | ◎   | ◎   | 制御周期、応答・追従精度、停止距離、安定性、アクチュエータ診断、冗長性  | 路面摩擦変動、積載量変化、油圧遅れ、スリップ、アクチュエータ故障          | Komatsu FrontRunner／Cat Command：無人ダンプの速度・駆動力を自動制御（商用）                                                                         | 車載ECU、エンジン/モータコントローラ、MPC実装                       | ISO 17757、ISO 19014：自律機能・安全関連制御    |
|          |            | 操舵制御          | Steer-by-Wire、電動油圧バルブ、操舵アクチュエータ                   | ◎   | ◎   |                                      |                                           | Cat Command for Dozing／自律ダンプ：遠隔・自律で操舵制御（商用）                                                                                   |                                                  |                                    |
|          |            | 制動・停止制御       | Brake-by-Wire、サービスブレーキ、リターダ、駐車ブレーキ制御              | ◎   | ◎   |                                      |                                           | 自律運搬システム：サービスブレーキ・リターダ・駐車ブレーキを統合制御（商用）                                                                                        | Brake-by-Wire、ブレーキセンサ、安全ECU                      | ISO 3450：土工機械の制動装置、ISO 19014       |
|          |            | 経路・軌道追従制御     | Pure Pursuit、Stanley、LQR、MPC                      | ◎   | △   |                                      |                                           | FrontRunner AHS（コマツ）：設定走路に沿ったダンプトラックの自律軌道追従（商用）                                                                               |                                                  |                                    |
|          |            |               |                                                   |     |     |                                      |                                           |                                                                                                                               |                                                  |                                    |

情報化機器技術の調査テーマ：自律化・遠隔化に関する技術調査票

機能を起点に、要素機能・実現技術・要件・課題・代表的な適用事例を対応づけて整理する。

F・G列：◎不可欠、○必要または有効、△方式によって必要、－基本的に不要。J～L列：該当する公式事例が確認できた行のみ記載。

| 大分類         | 必要機能    | 要素機能             | 実現技術・機器                                       | 自律化 | 遠隔化 | 主な技術要件                                   | 適用上の課題                                | 1. 建機OEM・システム製品の商用事例                                                                                                                                                                                        | 2. センサ・通信・計算基盤等の代表製品                          | 3. 安全・セキュリティ等の規格・実装方式                   |
|-------------|---------|------------------|-----------------------------------------------|-----|-----|------------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------|
|             | 作業機制御   | 油圧アクチュエータ制御      | 電磁比例弁、サーボ弁、油圧コントローラ、圧力・流量フィードバック              | △   | △   | 軌道・姿勢・力の制御精度、応答性、負荷制限、油圧効率、干渉防止          | 土質・岩質変動、油圧非線形、衝撃荷重、摩擦、車体姿勢変化          | Trimble Earthworks：ドーザブレード/ショベルバケットの自動油圧制御〔商用〕<br>Intelligent Machine Control (IMC)〔コマツ〕：油圧作業機を3D設計面に沿って半自動制御〔商用〕                                                                                           | 比例弁、油圧コントローラ、圧力/流量センサ                         | ISO 10968、ISO 19014                     |
|             |         | 作業機位置・姿勢制御       | シリンダ長制御、角度制御、逆運動学、フィードフォワード制御                 | ○   | △   |                                          |                                       | Intelligent Machine Control (IMC)〔コマツ〕：バケット・ブレード位置を設計面に追従させる自動制御〔商用〕                                                                                                                                        |                                               |                                         |
|             |         | 掘削・横込み・整地等の自動制御  | 作業モデル、力制御、インピーダンス制御、MPC、AI制御                  | △   | △   |                                          |                                       | Trimble Earthworks automatics/Cat Command for Dozing：整地・掘削の自動/半自動制御〔商用〕<br>IMC油圧ショベル/ブルドーザ〔コマツ〕：掘削、法面、整地を半自動・自動制御〔商用〕                                                                                       | 自動ブレード/バケット制御、力制御、MPC                         | ISO 17757 (ASAMSの場合)、ISO 19014          |
|             |         | ペイロード連動制御        | 荷重推定、出力補正、速度制限、作業機軌道補正                        | △   | △   |                                          |                                       | iMC 3.0 Advanced Payload Meter (コマツ)：積載量計測を施工支援へ連携〔商用〕                                                                                                                                                      |                                               |                                         |
|             |         |                  |                                               |     |     |                                          |                                       |                                                                                                                                                                                                             |                                               |                                         |
|             | 統合・協調制御 | 車体と作業機の協調制御      | 統合車両制御、マルチレート制御、モデルベース制御                      | ○   | △   | 制御周期、追従精度、安定性、応答性、飽和・制約処理、異常時安全動作        | 油圧遅れ・非線形、負荷変動、スリップ、個体差・経年劣化、通信/センサ異常  | PC200i-12〔コマツ〕：3Dマシンコントロール、自動旋回、走行を統合した施工支援〔商用〕                                                                                                                                                             |                                               |                                         |
|             |         | 複数ECU協調・リアルタイム制御 | リアルタイムOS、車載ECU、CAN-FD、Automotive Ethernet     | ◎   | ◎   |                                          |                                       | 建機の分散ECU制御：エンジン、走行、作業機、安全ECUを車載ネットワークで協調〔商用一般〕                                                                                                                                                              | CAN-FD、SAE J1939、Automotive Ethernet、リアルタイムOS | SAE J1939、CiA CAN FD、IEEE TSN           |
|             | 適応・補正制御 | 自動キャリブレーション      | センサゼロ点補正、アクチュエータ特性同定、オンライン校正                  | △   | △   |                                          |                                       |                                                                                                                                                                                                             |                                               |                                         |
|             |         | 個体差・経年変化適応       | 適応制御、パラメータ推定、学習制御                             | ○   | ○   |                                          |                                       |                                                                                                                                                                                                             |                                               |                                         |
|             | 安全制御    | 衝突回避・安全停止        | 独立安全コントローラ、非常停止回路、安全PLC、ブレーキ制御                | ◎   | ◎   |                                          |                                       | 自律運搬/遠隔操作システム：障害物・非常停止入力で安全停止〔商用〕<br>KomVision人検知衝突軽減システム〔コマツ〕：走行・旋回起動時の発進抑制、低速走行中の人検知時に停止〔商用〕<br>PC200i-12 KomVision衝突検知ブレーキ/ジオフェンス〔コマツ〕：危険接近時の減速・停止〔商用〕                                                   | 安全PLC、安全リレー、独立ブレーキ回路                          | ISO 17757、ISO 15817、ISO 19014、ISO 3450  |
|             |         | 通信断・センサ異常時制御     | 安全状態への移行、縮退運転、ウォッチドッグ、タイムアウト監視                | ◎   | ◎   |                                          |                                       | 日立建機RBT/Cat Command：通信断や異常時に停止・制限動作〔商用〕                                                                                                                                                                     | ウォッチドッグ、タイムアウト監視、縮退制御                         | ISO 15817 (遠隔)、ISO 17757 (自律)、ISO 19014 |
| 遠隔操作・人間機械協調 | 遠隔状況提示  | 前方・周囲映像提示        | 2D/3Dカメラ、広角カメラ、PTZカメラ、マルチモニタ                  | △   | ◎   | 十分な視野・解像度・フレームレート、低遅延、夜間性能、カメラ切替、映像同期    | 死角、レンズ汚損、逆光・暗所、通信帯域不足、映像酔い、距離感低下      | 日立建機 RBT Remote Cab/RBT Portable：複数カメラ映像による遠隔操縦〔商用〕<br>K-DIVE〔コベルコ建機〕：機体搭載カメラ映像を遠隔コックピットへ提示し、油圧ショベルを遠隔操作〔商用・実用化検証〕<br>Smart Construction Teleoperation〔コマツ/EARTHBRAIN〕：複数カメラ映像を用いた油圧ショベル遠隔操作〔商用〕            | 産業用広角/PTZカメラ、マルチモニタ                           | ISO 15817：遠隔操縦システムの安全要求                 |
|             |         | 低遅延映像伝送          | H.264/AVC、H.265/HEVC、AV1、ハードウェアエンコーダ、適応ビットレート | －   | ◎   | エンドツーエンド遅延、ジッタ、フレーム欠落率、帯域効率、適応ビットレート、暗号化 | 回線混雑・ハンドオーバー、遅延変動、パケット損失、画質劣化、符号化処理遅延 | 日立建機RBT等：遠隔操作向け低遅延映像伝送〔商用〕<br>Smart Construction Teleoperation〔コマツ/EARTHBRAIN〕：広域通信を介した遠隔映像・操作伝送〔商用〕                                                                                                        | H.264/AVC・H.265/HEVCハードウェアCodec、WebRTC        | ISO 15817：通信異常を含む遠隔操作安全                 |
|             |         | 3D・俯瞰表示          | サラウンドビュー、点群表示、3D再構成、VRヘッドセット                  | △   | ○   | 低遅延、状況認識性、操作性、誤操作防止、疲労低減、権限管理            | 通信遅延・瞬断、死角・距離感低下、操作者疲労、誤操作、複数情報の過負荷   | Trimble Earthworks AR/遠隔操作のサラウンドビュー：3D・俯瞰表示〔商用〕<br>KomVision〔コマツ〕：4台の単眼カメラ映像による機械周囲の俯瞰表示・死角低減〔商用〕<br>Smart Construction Teleoperation対応PC200i-12〔コマツ〕：KomVisionの機械周囲映像を遠隔操作下で活用〔商用〕                         | VR HMD、3D点群ビューア、サラウンドビューECU                   | ISO 15817、人間工学に基づく表示設計                  |
|             |         | 音声・周囲音提示         | マイク、マイクアレイ、スピーカ、立体音響、ノイズ抑制                    | －   | ○   |                                          |                                       | K-DIVE〔コベルコ建機〕：現場音声を遠隔コックピットへ伝送し、現場状況の把握を支援〔実用化検証〕                                                                                                                                                          |                                               |                                         |
|             |         |                  |                                               |     |     |                                          |                                       |                                                                                                                                                                                                             |                                               |                                         |
|             | 操作入力    | 遠隔操縦入力           | ジョイスティック、ステアリング、ペダル、物理スイッチ、操作コンソール            | －   | ◎   | 入力応答性、分解能、デッドバンド、フェイルセーフ、誤操作防止、操作者識別     | 通信遅延、入力装置故障、操作感覚の差、疲労、権限競合、誤接続        | 日立建機 RBT Remote Cab/RBT Portable、Cat Command remote operator station〔商用〕<br>K-DIVE〔コベルコ建機〕：専用コックピットから走行・旋回・作業機を遠隔操作〔商用・実用化検証〕<br>Smart Construction Teleoperation〔コマツ/EARTHBRAIN〕：専用コックピットから油圧ショベルを遠隔操作〔商用〕 | 産業用ジョイスティック、ステアリング、ペダル、操作コンソール                | ISO 15817、ISO 10968                     |
|             |         | タスク・目標指示         | HMIパネル、タブレット、地図UI、作業指示端末                      | △   | △   |                                          |                                       | Cat Command半自律ドーシング：操作者が目標を指定し機械が作業を実行〔商用〕<br>Smart Construction/FrontRunner〔コマツ〕：現場・管制側から施工目標や運搬タスクを指示〔商用〕                                                                                                 | タブレット/地図UI、タスク指示端末                            | ISO 17757 (半自律)、ISO 15817 (遠隔操縦)        |
|             |         | 力覚・触覚フィードバック     | フォースフィードバックジョイスティック、振動デバイス、ハプティクス             | －   | △   |                                          |                                       | K-DIVE〔コベルコ建機〕：現場の傾きや微細な振動をモーションシートへフィードバック〔実用化検証〕                                                                                                                                                          |                                               |                                         |

情報化機器技術の調査テーマ：自律化・遠隔化に関する技術調査票

機能を起点に、要素機能・実現技術・要件・課題・代表的な適用事例を対応づけて整理する。

F・G列：◎不可欠、○必要または有効、△方式によって必要、－基本的に不要。J～L列：該当する公式事例が確認できた行のみ記載。

| 大分類       | 必要機能     | 要素機能           | 実現技術・機器                         | 自律化 | 遠隔化 | 主な技術要件                              | 適用上の課題                              | 1. 建機OEM・システム製品の商用事例                                                                                                                                     | 2. センサ・通信・計算基盤等の代表製品                                                                        | 3. 安全・セキュリティ等の規格・実装方式            |                        |  |
|-----------|----------|----------------|---------------------------------|-----|-----|-------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|------------------------|--|
|           | 操作支援     | 視覚ガイダンス・注意喚起   | ARオーバーレイ、軌跡表示、死角警告、衝突警報         | △   | ○   | 低遅延、状況認識性、操作性、誤操作防止、疲労低減、権限管理       | 通信遅延・瞬断、死角・距離感低下、操作者疲労、誤操作、複数情報の過負荷 | KomVision人検知衝突軽減システム（コマツ）：検知した人をモニター上のマーカ―とブザーで注意喚起〔商用〕<br>PC200i-12 KomVision（コマツ）：周囲検知結果をモニター・警報で提示〔商用〕                                                |                                                                                             |                                  |                        |  |
|           |          | 操作補正・半自動化      | 入力平滑化、姿勢安定化、衝突防止、作業機自動制御        | △   | ○   |                                     |                                     | Cat Command for Dozing：遠隔操作に半自律支援を組み合わせ、1人で複数台管理〔商用〕<br>Smart Construction Teleoperation＋PC200i-12（コマツ）：遠隔操作に3Dマシンコントロール・自動旋回を併用〔商用〕                     | 入力平滑化、姿勢安定化、衝突防止コントローラ                                                                      | ISO 15817＋ISO 17757の適用範囲を機能別に整理  |                        |  |
|           |          | 通信品質に応じた操作制御   | 遅延補償、予測表示、デッドレコニング、速度制限         | －   | ○   |                                     |                                     | 遅延・ジッタ・損失率の連続監視、速度制限、予測表示、安全側の曖昧さ                                                                                                                        | 遠隔操縦システム：回線品質低下時の速度制限・停止、予測表示〔実装例〕<br>K-DIVE（コベルコ建機）：広域ネットワークを介した長距離遠隔操作と安定した映像・操作伝送〔実用化検証〕 | RTT/Jitter監視、デッドレコニング、回線適応制御     | ISO 15817：通信断・異常時の安全要求 |  |
|           | UI/UX・運用 | 状況認識支援HMI      | 優先度表示、アラーム管理、機体状態表示、カメラ自動切替     | △   | ○   | 低遅延、状況認識性、操作性、誤操作防止、疲労低減、権限管理       | 通信遅延・瞬断、死角・距離感低下、操作者疲労、誤操作、複数情報の過負荷 | K-DIVE（コベルコ建機）：複数映像、機械状態、現場音・振動を統合した遠隔操作HMI〔商用・実用化検証〕<br>Smart Construction Teleoperation〔コマツ／EARTHBRAIN〕：機体映像・ダンプ稼働状況を統合した遠隔操作HMI〔商用〕                   |                                                                                             |                                  |                        |  |
|           |          | 操作権限・モード切替     | ローカル/遠隔/自律モード管理、権限移譲、インターロック    | ◎   | ◎   |                                     |                                     | 日立建機RBT／Cat Command：現地・遠隔・自律の操作モードと権限を切替〔商用〕<br>Smart Construction Teleoperation対応機（コマツ）：現地操作と遠隔操作のモード・安全インターロックを管理〔商用〕                                  | モードセレクト、認証、インターロック、安全PLC                                                                    | ISO 15817、ISO 17757、ISO 19014    |                        |  |
|           |          | 複数台ワンオペ支援      | タスク監視UI、例外時呼出し、優先度管理、オペレータ割当    | ○   | ○   |                                     |                                     | Cat Command for Dozing：1人のオペレータが最大4台を遠隔管理〔商用〕<br>Smart Construction Teleoperation〔コマツ／EARTHBRAIN〕：1台のコックピットから複数建機を切替操作〔商用〕                               | 複数台監視HMI、例外通知、オペレータ割当                                                                       | ISO 15817／ISO 17757に基づく責任分担・安全設計 |                        |  |
| 複数機械・現場連携 | タスク・運行管理 | タスク生成・割当       | 管制システム、ディスパッチ、最適化アルゴリズム、FMS     | ○   | △   | 情報更新周期、整合性、競合解消、スケーラビリティ、相互運用性、障害分離 | 通信断、情報不整合、競合・デッドロック、異種機械間差、現場運用変更   | Komatsu FrontRunner＋DISPATCH、Cat MineStar Command：配車・タスク割当〔商用〕<br>FrontRunner AHS（コマツ）：フリート内の運搬タスクと車両運行を中央管理〔商用〕                                         | FMS、最適化エンジン、ディスパッチサーバ                                                                       | ISO 17757：システム・インフラを含むASAMS安全    |                        |  |
|           |          | 進捗・状態監視        | テレマティクス、ダッシュボード、イベント管理、KPI監視    | ○   | ○   |                                     |                                     | Trimble WorksOS／鉱山FMS：機械状態・進捗・KPIを集中監視〔商用〕<br>K-DIVE（コベルコ建機）：重機・オペレータの稼働データを用いた作業状況・現場課題の可視化〔商用〕<br>Smart Quarry Site（コマツ）：機械移動、生産、機械健全性、操作者KPIを遠隔監視〔商用〕 | テレマティクスゲートウェイ、BIダッシュボード                                                                     | OPC UA／MQTTによる状態データ連携            |                        |  |
|           | 交通・経路管理  | 交差点・優先通行制御     | Traffic Management、V2X、予約型交差点制御 | ○   | △   |                                     |                                     | Komatsu FrontRunner／Cat Command：交差点・合流・優先通行を中央管制〔商用〕<br>FrontRunner AHS（コマツ）：交差点・合流・優先通行を含むフリート交通管理〔商用〕                                                  | V2X、予約型交差点制御、Traffic Management                                                             | ISO 17757：現場インフラと交通管理を含む安全要求     |                        |  |
|           |          | 走行ルート・規制管理     | ルートデータ、速度制限、ジオフェンス、通行止め情報       | ○   | ○   |                                     |                                     | Komatsu FrontRunner／Cat Command：速度制限、通行止め、走行ルートを管理〔商用〕<br>FrontRunner AHS（コマツ）：走行ルート、速度、通行規制を管制〔商用〕                                                      | ジオフェンス、ルートサーバ、HD Map                                                                        | ISO 17757：機能環境・ルート変更管理           |                        |  |
|           | 機械間協調    | 機械間状態・意図共有     | V2V/V2X、協調メッセージ、位置・進路・タスク共有     | ○   | △   |                                     |                                     |                                                                                                                                                          |                                                                                             |                                  |                        |  |
|           |          | 協調作業制御         | 同期制御、協調計画、作業領域排他、隊列走行           | △   | △   |                                     |                                     | Cat Command for Dozing：複数機を一人で管理、FrontRunner：フリート協調運搬〔商用〕<br>FrontRunner AHS（コマツ）：無人ダンプ群と有人積込機を協調運用〔商用〕                                                  | 協調計画、排他制御、隊列/間隔制御                                                                           | ISO 17757：複数機械システムの安全            |                        |  |
|           | 外部連携     | 他建機・作業者との連携I/F | API、タブレット指示、デジタルサイネージ、作業者端末     | ○   | ○   |                                     |                                     |                                                                                                                                                          |                                                                                             |                                  |                        |  |
|           |          | 測量・施工管理システム連携  | BIM/CIM、施工計画データ、測量機器、MC/MGシステム  | △   | △   |                                     |                                     | Trimble Earthworks＋WorksManager：3D設計データを現場機械へ配信〔商用〕<br>Smart Construction（コマツ/EARTHBRAIN）：3D設計・測量データをICT建機へ連携〔商用〕                                        | Trimble Siteworks/WorksManager、BIM/CIMクラウド                                                  | IFC、LandXML                      |                        |  |

## 情報化機器技術の調査テーマ：自律化・遠隔化に関する技術調査票

機能を起点に、要素機能・実現技術・要件・課題・代表的な適用事例を対応づけて整理する。

F・G列：◎不可欠、○必要または有効、△方式によって必要、－基本的に不要。J～L列：該当する公式事例が確認できた行のみ記載。

| 大分類        | 必要機能         | 要素機能            | 実現技術・機器                                    | 自律化                            | 遠隔化 | 主な技術要件                               | 適用上の課題                                   | 1. 建機OEM・システム製品の商用事例                                                                                                                                                                | 2. センサ・通信・計算基盤等の代表製品                                                                                                       | 3. 安全・セキュリティ等の規格・実装方式             |                           |
|------------|--------------|-----------------|--------------------------------------------|--------------------------------|-----|--------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|
| 通信・計算基盤    | 現場外部通信       | 広域・公衆通信         | LTE/5G、ローカル5G、LEO衛星通信、専用無線（将来候補：HAPS、6G）   | △                              | △   | 通信範囲、より帯域、遅延・ジッタ、可用性、ハンドオーバー、QoS、暗号化 | 山間部・掘削部の不感地帯、基地局障害、輻射、事業者依存、衛星遮蔽         | 遠隔施工・鉱山通信：プライベートLTE/5Gや衛星回線をバックホールに利用〔商用一般〕<br>K-DIVE（コベルコ建機）：光回線等の広域ネットワークを利用した長距離遠隔操作〔商用・実用化検証〕<br>Smart Construction Teleoperation／FrontRunner（コマツ）：広域無線・現場ネットワークを遠隔・自律運用に利用〔商用〕 | 5G SA基地局、Starlink Business、産業用LTEルータ                                                                                       | 3GPP 5G System、ISO 15817（遠隔操作安全）  |                           |
|            |              | 構内・近距離通信        | Wi-Fi 6/6E/7、専用無線、LPWA、Bluetooth           | △                              | △   | カバレッジ、同時接続数、より帯域、干渉耐性、ローミング、セキュリティ   | 遮蔽物・反射、チャネル干渉、移動時切替、アクセスポイント配置、電波法制約     | 現場内無線LANによる遠隔映像・機械データ通信〔商用一般〕                                                                                                                                                       | Wi-Fi 6/6Eアクセスポイント、産業用無線機                                                                                                  | Wi-Fi CERTIFIED 6、ISO 15817       |                           |
|            |              | 測位補正情報配信        | RTK補正、Ntrip、基地局無線、PPP-RTK補正配信              | △                              | △   | 補正データ遅延、更新周期、通信可用性、基準局座標精度、整合性監視     | 通信断、基準局障害、距離依存誤差、フォーマット非互換、誤補正           | Trimble Earthworks：RTK補正を利用した高精度施工〔商用〕                                                                                                                                              | GNSS基地局、Ntrip caster、PPP-RTKサービス                                                                                           | RTCM 3.x、Ntrip                    |                           |
|            | 車載ネットワーク     | 制御系ネットワーク       | CAN/CAN-FD、SAE J1939、FlexRay               | ○                              | ○   | 確定的遅延、同期通信、バス負荷管理、エラー検出、冗長性、診断性      | バス過負荷、配線断・短絡、EMC、ノード暴走、レガシー機器との互換性       | 建機ECU間通信：エンジン・走行・作業機・診断情報をCAN/J1939で共有〔商用一般〕                                                                                                                                        | CAN-FDトランシーバ、J1939対応ECU                                                                                                    | SAE J1939、CIA CAN FD              |                           |
|            |              | 大容量センサネットワーク    | Automotive Ethernet、TSN、GMSL、FPD-Link      | ◎                              | ○   | 必要帯域、低遅延、時刻同期、QoS、パケット損失抑制、EMC耐性     | 帯域集中、コネクタ耐久、ノイズ、熱、配線重量、規格・ベンダ互換性         | 自律建機のカメラ/LiDAR接続：車載EthernetやSerDesを利用〔商用一般〕                                                                                                                                         | 100/1000BASE-T1、GMSL、FPD-Link、TSNスイッチ                                                                                      | IEEE 802.1 TSN関連規格                |                           |
|            |              | 時刻同期            | GNSS時刻、IEEE 1588 PTP、IEEE 802.1AS gPTP     | ◎                              | ○   | サブシステム間の同期精度、ホールドオーバー、時刻源冗長、同期状態監視   | GNSS喪失、ネットワーク遅延非対称、設定不整合、時刻跳躍、同期故障の波及    | 自律車載センサのタイムスタンプ整合：GNSS時刻/PTP同期〔実装例〕                                                                                                                                                 | PTP Grandmaster、GNSS disciplined clock                                                                                     | IEEE 1588 PTP、IEEE 802.1AS gPTP   |                           |
|            | 通信品質・冗長化     | 複数回線冗長・切替       | マルチSIM、Bonding、SD-WAN、複数無線機                | ○                              | ○   | 切替時間、セッション継続性、回線多様性、経路独立性、切替判定精度     | 同一障害点、切替時パケット欠落、コスト、複雑化、電波干渉             | 遠隔操作システム：公衆LTE/5G・Wi-Fi・衛星の冗長化〔実装例〕<br>Smart Construction Teleoperation（コマツ/EARTHBRAIN）：現場条件に応じた通信構成で遠隔操作を提供〔商用〕                                                                    | マルチSIMルータ、回線Bonding、SD-WAN                                                                                                 | ISO 15817：通信異常時の安全動作              |                           |
|            |              | QoS・帯域制御        | QoS、優先制御、帯域予約、適応ビットレート                     | ○                              | ◎   | 安全制御・操作・映像の優先順位、帯域保証、輻輳制御、動的配分       | 設定不備、過負荷時の映像劣化、優先度逆転、異種ネットワーク間のQoS非整合    |                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                            |                                   |                           |
|            |              | 遅延・パケットロス監視     | RTT/Jitter計測、パケットロス監視、通信品質推定               | ○                              | ◎   | RTT/片道遅延・ジッタ・損失率の測定精度、監視周期、閾値管理      | 片道遅延測定の時刻同期依存、瞬断検出漏れ、誤警報、品質変動の予測困難       |                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                            |                                   |                           |
|            | エッジコンピューティング | 車載AI・リアルタイム処理   | CPU、GPU、NPU、FPGA、車載コンピュータ（例：NVIDIA Jetson） | ◎                              | ○   | 処理性能、最悪実行時間、消費電力、熱設計、ECC、起動時間、長期供給   | 高温・振動・粉塵、冷却不足、電源変動、モデル肥大化、部品陳腐化          | 自律建機・ロボットの車載AI処理〔商用/開発基盤〕                                                                                                                                                           | NVIDIA Jetson AGX Orin Industrial：画像・点群・AI推論用エッジ計算機                                                                        | IEC/ISO系機能安全要求に応じた安全分離・監視を別系統で実装  |                           |
|            |              | 映像・点群圧縮処理       | ハードウェアCodec、点群圧縮、ROI伝送、データ削減               | ○                              | ◎   | 圧縮率、画質/幾何精度、符号化遅延、ROI制御、ハードウェア支援     | 圧縮アーティファクト、重要情報欠落、処理負荷、方式互換性、再送回難        |                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                            |                                   |                           |
|            |              | 分散処理・負荷配分       | 車載/現場エッジ/クラウド分散、コンテナ、ミドルウェア                | △                              | △   | 遅延、帯域、ジッタ、可用性、冗長性、耐環境性、セキュリティ、保守性    | 不感地帯、輻輳・干渉、電源変動、高温・振動、帯域不足、部品陳腐化         | 車載・現場エッジ・クラウドで認識/監視処理を分担〔実装例〕<br>DXスマートコンストラクション（コマツ）：車載・現場IoT・クラウドを連携した分散処理〔商用〕                                                                                                    | ROS 2、コンテナ、Kubernetes/K3s、エッジサーバ                                                                                           | NISTゼロトラスト、セキュアな分散構成              |                           |
|            | データ・システム連携   | データ収集・蓄積        | 車両・施工データ収集                                 | データロガー、テレマティクス、時系列DB、クラウドストレージ | ○   | ○                                    | 欠損防止、時刻同期、保存容量、書き込み耐久、検索性、アクセス制御         | KOMTRAX／Trimble WorksOS：車両・施工データを収集しクラウドで可視化〔商用〕<br>K-DIVE（コベルコ建機）：重機・オペレータの稼働データを収集し、現場改善に活用〔商用〕<br>KOMTRAX／DXスマートコンストラクション（コマツ）：建機・IoTデータをクラウドへ収集〔商用〕                             | テレマティクス端末、時系列DB、クラウドストレージ                                                                                                  | MQTT／OPC UA                       |                           |
|            |              |                 | 映像・センサログ管理                                 | イベント記録、リングバッファ、メタデータ管理、データレイク  | ○   | ○                                    |                                          |                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                            |                                   |                           |
|            |              | 施工・設計データ連携      | BIM/CIM・設計データ連携                            | IFC、LandXML、点群、3D設計データ、施工計画データ | △   | △                                    |                                          |                                                                                                                                                                                     | Trimble Earthworks/WorksManager：3D設計モデルを建機へ配信〔商用〕<br>Smart Construction（コマツ/EARTHBRAIN）：3D設計データ、測量、ICT建機を施工プロセスで連携〔商用〕     | IFCビューア、LandXML対応施工ソフト、点群処理       | buildingSMART IFC、LandXML |
|            |              |                 | 出来形・As-Built連携                             | 施工履歴、3D点群、出来形帳票、クラウド施工管理       | △   | △                                    |                                          |                                                                                                                                                                                     | Trimble Earthworks/WorksOS：施工履歴・As-Builtを現場/事務所で共有〔商用〕<br>Smart Construction Dashboard（コマツ/EARTHBRAIN）：施工履歴・現況地形を3Dで共有〔商用〕 | 3D点群、施工履歴DB、クラウド帳票                | IFC、LandXML               |
| プラットフォーム連携 |              | クラウド監視・分析       | クラウドプラットフォーム、BI、ダッシュボード、API                | ○                              | ○   | データ品質、時刻・座標整合、標準形式、追跡性、アクセス制御、保存期間   | 形式・意味の不一致、欠損・重複、時刻/座標ずれ、クラウド依存、データ権利・機密性 | Trimble WorksOS等：現場連抄・機械稼働をクラウド監視〔商用〕<br>K-DIVE（コベルコ建機）：クラウド上で稼働データを可視化し、現場改善を支援〔商用〕<br>Smart Construction Dashboard／Smart Quarry Site（コマツ）：現場・機械・生産データをクラウド監視・分析〔商用〕               | クラウドBI、REST API、時系列分析                                                                                                      | NISTゼロトラストによるクラウドアクセス制御           |                           |
|            |              | システム間API・データモデル | REST/GraphQL、MQTT、OPC UA、共通データモデル          | ○                              | ○   |                                      |                                          | 建機・施工プラットフォーム間のAPI連携〔商用一般〕                                                                                                                                                          | REST、MQTT broker、OPC UA Server                                                                                             | OPC UA、MQTT                       |                           |
|            |              | デジタルツイン         | 3D現場モデル、機械状態モデル、シミュレーション基盤                 | △                              | △   |                                      |                                          | 施工現場/鉱山の3Dモデルと機械状態を統合した運用シミュレーション〔実証・商用展開中〕<br>Smart Construction Dashboard（コマツ/EARTHBRAIN）：現場を3Dデジタルツインとして再現・分析〔商用〕                                                                | NVIDIA Omniverse、3D GIS、シミュレーション基盤                                                                                         | ISO 17757：シミュレーションを含む検証・ライフサイクル管理 |                           |

情報化機器技術の調査テーマ：自律化・遠隔化に関する技術調査票

機能を起点に、要素機能・実現技術・要件・課題・代表的な適用事例を対応づけて整理する。

F・G列：◎不可欠、○必要または有効、△方式によって必要、―基本的に不要。J～L列：該当する公式事例が確認できた行のみ記載。

| 大分類           | 必要機能        | 要素機能         | 実現技術・機器                                               | 自律化 | 遠隔化 | 主な技術要件                               | 適用上の課題                                | 1. 建機OEM・システム製品の商用事例                                                                                           | 2. センサ・通信・計算基盤等の代表製品                      | 3. 安全・セキュリティ等の規格・実装方式                    |
|---------------|-------------|--------------|-------------------------------------------------------|-----|-----|--------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------|
|               | ライフサイクル管理   | ソフトウェア・設定更新  | OTA、構成管理、バージョン管理、ロールバック                               | ○   | ○   | 構成追跡、互換性、段階配信、ロールバック、署名検証、保守性        | 更新失敗、構成不一致、通信断、旧機種対応、サプライチェーン脆弱性      | 建機テレマティクス/車載ECUの遠隔ソフト更新〔商用一般〕                                                                                  | OTAサーバ、A/Bバージョン、署名付き更新                    | NIST SSDF、Secure Boot、ロールバック保護           |
|               |             | 診断・保守支援      | 遠隔診断、DTC、ログ解析、予知保全、サービスツール                            | ○   | ○   |                                      |                                       | KOMTRAX／Cat Product Link等：遠隔診断・故障コード解析〔商用〕<br>KOMTRAX〔コマツ〕：故障コード・稼働情報を用いた遠隔診断と保守支援〔商用〕                         | J1939診断ツール、ログ解析基盤、サービス端末                  | SAE J1939、アクセス制御・監査ログ                    |
| 安全・信頼性・セキュリティ | 安全設計        | リスク評価・安全分析   | リスクアセスメント、HAZOP、FMEA/FMEDA、FTA、シミュレーション               | ◎   | ◎   | 対象ユースケース・危険源の網羅、リスク低減要求、追跡性、検証可能性    | 想定外シナリオ、運用条件変更、組織間責任分界、分析更新不足         | 自律運搬・遠隔操作システムの導入前リスクアセスメント〔実務適用〕                                                                               | HAZOP、FMEA/FMEDA、FTAツール                   | ISO 17757、ISO 15817、ISO 12100のリスク低減プロセス  |
|               |             | 機能安全・安全要求管理  | MPL (ISO 19014)、安全コンセプト、安全要求管理、安全ケース（必要に応じPL/SIL等を参照） | ○   | ○   | MPL要求と達成度、独立性、診断カバレッジ、要求追跡、V&V、安全ケース | 安全要求漏れ、共通原因故障、ソフトウェア複雑化、変更影響管理、証拠不足   | 自律建機/安全関連制御の安全要求管理〔実務適用〕                                                                                       | 安全要求DB、トレーサビリティ、Safety Caseツール            | ISO 19014 (MPL)、ISO 17757                |
|               | フェイルセーフ・冗長化 | 非常停止         | 有線/無線E-Stop、安全リレー、安全PLC、独立停止回路                        | ◎   | ◎   | 独立性、停止時間・停止距離、到達性、通信断時動作、復帰防止、定期診断   | 無線E-Stop不達、誤作動、停止後の二次災害、再始動手順不備、保守不良  | 日立建機RBT／自律運搬システム：独立非常停止による機械停止〔商用〕                                                                             | 無線E-Stop、安全リレー、安全PLC、独立停止回路               | ISO 15817、ISO 17757、ISO 19014            |
|               |             | センサ冗長・相互監視   | 異種センサ冗長、クロスチェック、故障診断、投票ロジック                           | ◎   | ○   | リスクに応じた安全度、独立性、診断性、可用性、追跡性、継続的改善     | 共通原因故障、要求漏れ、誤検知/未検知、鍵・脆弱性管理、変更時の再評価不足 | 自律運搬システム：LiDAR・レーダー・カメラの異種冗長で周辺監視〔商用〕<br>FrontRunner AHS〔コマツ〕：複数センサとシステム監視による自律運搬の安全確保〔商用〕                     | 異種センサ、投票ロジック、クロスチェックECU                   | ISO 17757、ISO 19014                      |
|               |             | 制御・電源・通信冗長   | 二重ECU、冗長電源、冗長通信、フェイルオーバーショナル構成                        | ◎   | ○   |                                      |                                       | 自律建機：制御ECU・電源・通信を冗長化し故障時に安全継続/停止〔実装例〕                                                                          | 二重ECU、冗長電源、デュアルCAN/Ethernet               | ISO 19014、ISO 17757                      |
|               |             | 異常検知・縮退運転    | ウォッチドッグ、健全性監視、故障分離、安全状態への移行、縮退運転                      | ◎   | ◎   |                                      |                                       | 自律/遠隔建機：異常検出後に速度制限・安全停止へ移行〔実装例〕<br>FrontRunner AHS/Smart Construction Teleoperation〔コマツ〕：異常・通信断時に安全側へ停止・移行〔商用〕 | ウォッチドッグ、ヘルスモニタ、故障分離                       | ISO 17757、ISO 15817、ISO 19014            |
|               |             | 通信暗号化・完全性保護  | TLS、IPsec/VPN、メッセージ認証コード (MAC)、セキュア通信プロトコル            | ◎   | ◎   | 機密性・完全性・真正性、鍵強度、低遅延、鍵更新、証明書管理        | 鍵漏えい、期限切れ、計算負荷、レガシー機器非対応、復旧手順不足       | 遠隔操作・クラウド接続建機の通信暗号化〔実装一般〕                                                                                      | TLS 1.3、IPsec VPN、メッセージ認証コード              | NIST SP 800-207 (Zero Trust)、TLS/IPsec標準 |
|               |             | 認証・アクセス管理    | 多要素認証、証明書、RBAC、最小権限、ゼロトラスト                            | ◎   | ◎   | 利用者・端末の相互認証、最小権限、MFA、セッション管理、監査ログ    | 共有ID、権限過大、資格情報盗難、緊急時アクセスとの両立、運用負荷     | 遠隔操作センターの操作者認証・権限管理〔実装一般〕                                                                                      | MFA、証明書、RBAC、Privileged Access Management | NIST SP 800-207：継続的認証・最小権限               |
|               | サイバーセキュリティ  | 侵入・異常通信検知    | IDS/IPS、車載IDS、ログ監視、SIEM                               | ○   | ○   | 検知率・誤警報率、リアルタイム性、車載プロトコル対応、ログ保全      | 暗号化通信の可視性低下、未知攻撃、誤警報過多、学習データ不足        | 車載/現場ネットワークの異常通信検知〔実装一般〕                                                                                       | 車載IDS、ネットワークIDS/IPS、SIEM                  | NISTゼロトラスト、ログ監視・インシデント対応                 |
|               |             | セキュア起動・更新    | Secure Boot、コード署名、HSM/TPM、セキュアOTA                     | ◎   | ◎   | 署名検証、信頼の起点、ロールバック防止/安全な復旧、更新完全性      | 更新失敗による停止、鍵管理、供給網攻撃、通信断、旧版互換性         | 車載ECU・エッジ計算機の署名付き起動/OTA〔実装一般〕                                                                                  | Secure Boot、TPM/HSM、コード署名、A/B更新           | NIST SSDF、セキュア更新・サプライチェーン管理              |
|               |             | 個人・機密データ保護   | データ最小化、匿名化、暗号化、アクセスログ、GDPR等への対応                       | △   | ○   | リスクに応じた安全度、独立性、診断性、可用性、追跡性、継続的改善     | 共通原因故障、要求漏れ、誤検知/未検知、鍵・脆弱性管理、変更時の再評価不足 | 遠隔映像・位置・操作者情報の保護〔実装一般〕                                                                                         | 匿名化、暗号化、保存期間制御、監査ログ                       | EU GDPR等のデータ保護法制                         |
|               | データ・法規対応    | 製品セキュリティ法規対応 | 脆弱性管理、SBOM、インシデント対応、CRA等への対応                          | △   | △   |                                      |                                       | EU向け接続製品の脆弱性管理・SBOM・報告体制〔法規対応〕                                                                                 | SBOM生成、PSIRT、脆弱性管理プラットフォーム                | EU Cyber Resilience Act、NIST SSDF        |

自律化・遠隔化 必要度判定基準

| 記号 | 意味       | 判定の考え方                             | 補足                     |
|----|----------|------------------------------------|------------------------|
| ◎  | 不可欠      | 対象方式の成立または基本安全機能に欠かせない。            | 個別機器ではなく要素機能として判定。     |
| ○  | 必要または有効  | 一般的に必要性が高い、または安全性・性能・運用性を大きく高める。   | 代替手段があっても、多くの構成で採用される。 |
| △  | 方式によって必要 | 機種、作業、ODD、通信・測位方式、直接操縦／監視型などに依存する。 | 特定の実現技術が他方式で代替できる場合を含  |
| －  | 基本的に不要   | 対象方式の基本構成には通常含まれない。                | 付加機能として採用される可能性はある。    |

| 判定前提                                                    |
|---------------------------------------------------------|
| 自律化：機械が周辺認識、判断、走行・作業制御を行い、オペレータの継続的な直接操作なしに機能する方式を想定。   |
| 遠隔化：機械外のオペレータが映像・状態情報等を用いて直接操縦する方式を主基準とし、監視型・タスク指示型も考慮。 |
| 建設機械・鉱山機械全般を対象とするため、作業機固有機能やペイロード機能は機種依存として△を用いた。       |
| 通信媒体、測位方式、センサ種類など複数の代替方式がある個別手段は、機能全体が必須でも△とする場合がある。    |

| 主なWeb情報源（公式・一次情報） |                                                                |                                                                                               |
|-------------------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| ISO 17757:2019    | 自律・半自律式土工機械・鉱山機械システムの安全要求。機械だけでなく関連システム・インフラ、HW/SW、ライフサイクルを対象。 | <a href="https://www.iso.org/standard/76126.html">https://www.iso.org/standard/76126.html</a> |
| ISO 15817:2012    | 土工機械の遠隔操縦システムに対する基本安全要求。自律制御とは区別される。                           | <a href="https://www.iso.org/standard/46237.html">https://www.iso.org/standard/46237.html</a> |
| ISO 19014-1:2018  | 土工機械の安全関連制御システムに必要な性能レベルを決める方法論。                               | <a href="https://www.iso.org/standard/70715.html">https://www.iso.org/standard/70715.html</a> |
| ISO 19014-2:2022  | 機械動作を制御または危険を低減する安全制御システムのHW・アーキテクチャ評価。                        | <a href="https://www.iso.org/standard/73568.html">https://www.iso.org/standard/73568.html</a> |
| ISO 10968:2020    | 土工機械の直接操作用コントロールに関する要求・指針。遠隔操作はISO 15817を参照。                   | <a href="https://www.iso.org/standard/77145.html">https://www.iso.org/standard/77145.html</a> |
| ISO 3450:2011     | 土工機械のサービス、二次、駐車ブレーキの最低性能と試験。遠隔操作機械も適用対象。                       | <a href="https://www.iso.org/standard/42076.html">https://www.iso.org/standard/42076.html</a> |

| 区分     | 情報源                              | 主な参照内容                          | URL                                                                                                                                                                                 |
|--------|----------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 自律・安全  | ISO 17757                        | 自律・半自律の土工機械システムに関する安全要求と運用上の考慮  | <a href="https://www.iso.org/standard/76126.html">https://www.iso.org/standard/76126.html</a>                                                                                       |
| 遠隔操作   | ISO 15817                        | 土工機械の遠隔操縦システムに関する基本安全要求         | <a href="https://www.iso.org/standard/46237.html">https://www.iso.org/standard/46237.html</a>                                                                                       |
| 機能安全   | ISO 19014-2                      | 安全制御システムのハードウェア・アーキテクチャ評価、MPL   | <a href="https://www.iso.org/standard/73568.html">https://www.iso.org/standard/73568.html</a>                                                                                       |
| 機能安全   | ISO/TS 19014-5                   | 土工機械の機能別MPL要求表                  | <a href="https://www.iso.org/standard/80996.html">https://www.iso.org/standard/80996.html</a>                                                                                       |
| 測位・姿勢  | NovAtel SPAN Documentation       | GNSS/INS統合、デュアルアンテナ方位、遮蔽・校正上の考慮 | <a href="https://docs.novatel.com/OEM7/Content/SPAN_Operation/SPAN_Overview.htm">https://docs.novatel.com/OEM7/Content/SPAN_Operation/SPAN_Overview.htm</a>                         |
| 耐環境・計算 | NVIDIA Jetson Ruggedized Systems | 建設・産業用途での温度、衝撃、振動等の耐環境設計        | <a href="https://developer.nvidia.com/embedded/jetson/jetson-ruggedized-systems">https://developer.nvidia.com/embedded/jetson/jetson-ruggedized-systems</a>                         |
| サイバー   | NIST SP 800-207                  | ゼロトラスト、利用者・端末認証、最小権限、継続的評価      | <a href="https://csrc.nist.gov/pubs/sp/800/207/final">https://csrc.nist.gov/pubs/sp/800/207/final</a>                                                                               |
| 遠隔アクセス | NIST SP 800-46 Rev.2             | 遠隔アクセスの脅威モデル、認証、通信保護、端末保護       | <a href="https://csrc.nist.gov/pubs/sp/800/46/r2/final">https://csrc.nist.gov/pubs/sp/800/46/r2/final</a>                                                                           |
| AI保証   | NIST AI Assurance                | 重要システムにおけるAIの継続的検証・保証           | <a href="https://www.nist.gov/publications/ai-assurance-public-trust-verify-continuously">https://www.nist.gov/publications/ai-assurance-public-trust-verify-continuously</a>       |
| 車載通信   | IEEE 1588 / 802.1AS              | 分散システムの高精度時刻同期、車載ネットワーク同期の考え方   | <a href="https://standards.ieee.org/ieee/1588/6825/">https://standards.ieee.org/ieee/1588/6825/</a>                                                                                 |
| 施工データ  | buildingSMART IFC                | BIM/CIM連携に用いるオープンなデータモデル        | <a href="https://www.buildingsmart.org/standards/bsi-standards/industry-foundation-classes/">https://www.buildingsmart.org/standards/bsi-standards/industry-foundation-classes/</a> |

| 区分                 | 名称                                   | 概要                                     | 公式URL                                                                                                                                                                                                                 |
|--------------------|--------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 商用事例               | Komatsu FrontRunner AHS              | 鉱山用ダンプの自律運搬・配車・交通管理                    | <a href="https://www.komatsu.com/en-us/technology/smart-mining/loading-and-haulage/autonomous-haulage-system">https://www.komatsu.com/en-us/technology/smart-mining/loading-and-haulage/autonomous-haulage-system</a> |
| 商用事例               | Cat MineStar Command                 | 自律運搬、遠隔/半自律ドーピング                       | <a href="https://www.cat.com/en_US/by-industry/mining/surface-mining/surface-technology/command.html">https://www.cat.com/en_US/by-industry/mining/surface-mining/surface-technology/command.html</a>                 |
| 商用事例               | Cat MineStar Detect                  | レーダー・カメラによる周辺障害物検出                     | <a href="https://www.cat.com/en_US/by-industry/mining/surface-mining/surface-technology/loading-hauling.html">https://www.cat.com/en_US/by-industry/mining/surface-mining/surface-technology/loading-hauling.html</a> |
| 商用事例               | 日立建機 RBTシリーズ                         | 油圧ショベルの遠隔操作システム                        | <a href="https://www.hitachicm.com/global/ja/news/press-releases/2026/26-06-11/">https://www.hitachicm.com/global/ja/news/press-releases/2026/26-06-11/</a>                                                           |
| 商用事例               | Trimble Earthworks                   | GNSS/3D設計を用いた建機ガイダンス・自動制御              | <a href="https://civilconstruction.trimble.com/en/products/machine-control-and-guidance/trimble-earthworks">https://civilconstruction.trimble.com/en/products/machine-control-and-guidance/trimble-earthworks</a>     |
| 代表製品               | NVIDIA Jetson AGX Orin Industrial    | 車載・産業用エッジAI計算基盤                        | <a href="https://www.nvidia.com/ja-jp/autonomous-machines/embedded-systems/jetson-orin/">https://www.nvidia.com/ja-jp/autonomous-machines/embedded-systems/jetson-orin/</a>                                           |
| 代表製品               | NovAtel SPAN Dual Antenna            | GNSS/INS統合による姿勢・方位計測                   | <a href="https://docs.novatel.com/OEM7/Content/SPAN_Operation/Dual_Antenna_Install_Operation.htm">https://docs.novatel.com/OEM7/Content/SPAN_Operation/Dual_Antenna_Install_Operation.htm</a>                         |
| 実装基盤               | ROS 2                                | ロボット向け分散ミドルウェア                         | <a href="https://docs.ros.org/en/rolling/">https://docs.ros.org/en/rolling/</a>                                                                                                                                       |
| 実装基盤               | Autoware                             | 自律走行ソフトウェア基盤                           | <a href="https://autoware.org/">https://autoware.org/</a>                                                                                                                                                             |
| 通信/データ             | OPC UA                               | 産業システム間の相互運用データ通信                      | <a href="https://opcfoundation.org/about/opc-technologies/opc-ua/">https://opcfoundation.org/about/opc-technologies/opc-ua/</a>                                                                                       |
| 通信/データ             | MQTT                                 | 軽量Publish/Subscribe通信                  | <a href="https://mqtt.org/">https://mqtt.org/</a>                                                                                                                                                                     |
| 規格                 | ISO 17757:2019                       | 自律・半自律土工/鉱山機械システム安全                    | <a href="https://www.iso.org/standard/76126.html">https://www.iso.org/standard/76126.html</a>                                                                                                                         |
| 規格                 | ISO 15817:2012                       | 土工機械の遠隔操縦システム安全                        | <a href="https://www.iso.org/standard/46237.html">https://www.iso.org/standard/46237.html</a>                                                                                                                         |
| 規格                 | ISO 19014シリーズ                        | 土工機械の安全関連制御とMPL                        | <a href="https://www.iso.org/standard/80996.html">https://www.iso.org/standard/80996.html</a>                                                                                                                         |
| 規格                 | ISO 3450                             | 土工機械の制動装置                              | <a href="https://www.iso.org/standard/70928.html">https://www.iso.org/standard/70928.html</a>                                                                                                                         |
| セキュリティ             | NIST SP 800-207                      | Zero Trust Architecture                | <a href="https://csrc.nist.gov/pubs/sp/800/207/final">https://csrc.nist.gov/pubs/sp/800/207/final</a>                                                                                                                 |
| セキュリティ             | NIST SP 800-218                      | Secure Software Development Framework  | <a href="https://csrc.nist.gov/pubs/sp/800/218/final">https://csrc.nist.gov/pubs/sp/800/218/final</a>                                                                                                                 |
| 法規                 | EU Cyber Resilience Act              | 接続製品のサイバーセキュリティ要求                      | <a href="https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/cyber-resilience-act">https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/cyber-resilience-act</a>                                                           |
| 法規                 | EU GDPR                              | 個人データ保護                                | <a href="https://commission.europa.eu/law/law-topic/data-protection/data-protection-eu_en">https://commission.europa.eu/law/law-topic/data-protection/data-protection-eu_en</a>                                       |
| コマツ                | KomVision人検知衝突軽減システム                 | 周囲カメラ、人検知、警報、発進抑制、低速走行時停止              | <a href="https://www.komatsu.jp/ja/newsroom/2020/20200330">https://www.komatsu.jp/ja/newsroom/2020/20200330</a>                                                                                                       |
| コマツ                | PC200i-12／KomVision衝突検知ブレーキ・ジオフェンス   | 360度周囲監視、人・物検知、減速・停止、3D作業制限            | <a href="https://www.komatsu.jp/ja/newsroom/2024/20241127">https://www.komatsu.jp/ja/newsroom/2024/20241127</a>                                                                                                       |
| コマツ<br>/EARTHBRAIN | Smart Construction Teleoperation     | 油圧ショベル遠隔操作、複数台切替、施工ソリューション連携           | <a href="https://www.komatsu.jp/ja/newsroom/2024/20240521_2">https://www.komatsu.jp/ja/newsroom/2024/20240521_2</a>                                                                                                   |
| コマツ<br>/EARTHBRAIN | PC200i-12 遠隔システム仕様                   | 遠隔下で3Dマシンコントロール、自動旋回、KomVision、安全機能を利用 | <a href="https://www.komatsu.jp/ja/newsroom/2026/20260616_1">https://www.komatsu.jp/ja/newsroom/2026/20260616_1</a>                                                                                                   |
| コマツ<br>/EARTHBRAIN | DXスマートコンストラクション／Dashboard／Simulation | 3Dデジタルツイン、施工データ統合、AI施工計画               | <a href="https://www.komatsu.jp/ja/aboutus/innovation/technology">https://www.komatsu.jp/ja/aboutus/innovation/technology</a>                                                                                         |
| コマツ                | Intelligent Machine Control          | GNSS・3D設計データと油圧制御による半自動施工              | <a href="https://www.komatsu.com/en-us/technology/smart-construction/intelligent-machine-control">https://www.komatsu.com/en-us/technology/smart-construction/intelligent-machine-control</a>                         |
| コマツ                | Intelligent Machine Control 3.0      | 自動旋回、走行ライン支援、3D境界制御、ペイロード機能            | <a href="https://www.komatsu.com/en-us/technology/smart-construction/imc-3-0">https://www.komatsu.com/en-us/technology/smart-construction/imc-3-0</a>                                                                 |
| コマツ                | Smart Quarry／Smart Quarry Site       | 採石向け生産・機械・ペイロード・KPI統合管理                | <a href="https://www.komatsu.com/en-us/technology/smart-quarry">https://www.komatsu.com/en-us/technology/smart-quarry</a>                                                                                             |