

2.2.6 フィールドロボット

(1) 研究開発領域の定義

日本では、高度経済成長期に集中的に整備された膨大な社会資本が老朽化し、インフラの維持管理・更新の作業の自動化が急務である。また、近年、自然災害、特に地球温暖化が原因とみられる集中豪雨や台風による河川の氾濫が多発しているため、災害発生時の災害調査や応急復旧は重要な課題であり、これを遠隔から実施するためのシステムの研究開発が進められている。一方、建設分野においては、少子化に起因する若年就業者数の減少が進むと共に、高齢化に起因する熟練技術者や技能者の不足が問題となっている。この問題を解決するため、現在、ICTやロボット工学を用いた、建設における自動化や省人化が期待されており、そのための研究開発が進められている。以上に示す通り、インフラ保守・建設ロボット分野では、問題解決型の研究開発が幅広く行われている。いずれも、対象とする環境が屋外であるため、不整地走行性能、センサーのロバスト性、機器の耐環境性能が求められる。そのため、多くの発展が期待される領域である。

(2) キーワード

ロボット技術、ICT（情報通信技術）、RTK-GNSS（Real Time Kinematic-Global Navigation Satellite System）、インフラ点検、無人化施工、情報化施工、ドローン、建設機械、マシンコントロール

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

日本では、昭和30年代からの高度経済成長期に集中的に整備された社会資本の老朽化が現在急速に進んでおり、2012年に発生した笹子トンネル天井板落下事故に代表されるように、老朽化が重大事故につながるケースが存在する。このような事故を未然に防ぐためには、インフラの維持管理・更新の作業が急務である。そこで、国土交通省は、2014年7月より、日本国内の全トンネルと橋梁で一律に、5年に1度の点検を義務付けた。このため、日本国内に存在する70万橋の橋梁と1万本のトンネルに関する点検が実施されてきたが、点検コストが膨大となること、さらに、熟練点検員の不足が明らかとなってきた。これらインフラの点検を効率的に進めるため、ロボット技術に対する期待は大きい。

一方、建設現場においては、少子化に起因する若年就業者数の減少や、高齢化に起因する熟練した技術者・技能者の不足が問題となっている。特に、地方の土木建設工事においては、その状況は深刻化している。そこで、国土交通省は、2016年を生産性革命元年と位置づけ、建設施工分野で「i-Construction」と銘打って、ICT（Information Communication Technology）土工を推進してきた。この施策をさらに進めるため、ICTならびにロボット技術を用いた建設機械の自動化に関する研究開発が求められている。

さらに、日本は、世界的に見て非常に地震、火山噴火、風水害などの自然災害が発生しやすい地域にある。近年、地球温暖化が原因とみられる集中豪雨や台風は、各地に大きな災害をもたらした。自然災害発生時には、災害調査や応急復旧が重要となるが、一般に、対象とする災害現場は非常に過酷であり、二次災害の危険も存在する。したがって、遠隔より調査可能な無人の調査機器ならびに、遠隔より操作可能な建設機械を用いた応急復旧技術が求められている。

以上に示した通り、現在、インフラ点検ならびに建設現場における自動化や省人化が急務であり、ICTやロボット工学を用いた点検技術や建設機械の自動化／省人化技術の研究開発が、現在、求められている。

【研究開発の動向】

2013年3月、国土交通省は建設ロボット技術に関する懇談会を開催し、建設ロボット技術の開発・活用に向け、省庁連携の下で、(1) 情報化施工推進戦略に基づく建設機械の自動化、(2) ロボット技術によるインフラの無人点検や補修の高度化、(3) ロボット技術による災害現場調査技術の開発、(4) ロボット技術による応急復旧技術の開発を重点的に進める旨の提言を発表した¹⁾。これに伴い、これまで、省庁間連携ならびに産官学連携により、これら4つの重点項目を中心に研究開発が進められてきた。以下、この提言で示された区分けにしたがい、インフラ保守・点検ロボットに関する研究開発の動向について紹介する。

- (1) 建設機械の自動化については、国土交通省が主導する情報化施工戦略²⁾の下、継続してICT技術を導入した自動制御建設機械の研究開発が進められてきた³⁾。この施策は、i-Constructionと呼ばれる施策中の「ICTの全面的な活用 (ICT土工等)⁴⁾」に引き継がれ、「建設現場の生産性を2025年までに20%向上させる」ことを目指し、2020年現在も継続している。「ICT土工」とは、ドローンなどを使った3次元測量を行い、3次元設計データなどにより、建設機械を自動制御して施工し、再びドローンなどを使って3次元で出来形を検査するといった、3次元データとICTを全面的に活用する工事である。現在、RTK-GNSSをベースとした建設機械のオペレーターに情報を提示するマシンガイダンス、建設機械の操作を補助するマシンコントロール技術が向上し、建設現場への導入が進められている。一方アカデミアでは、ゼネコンやコンサルタント会社からの寄付を得て、i-Constructionを推進する技術ならびに技術者を育成することを目的として、東京大学大学院工学系研究科に「i-Construction システム学」寄付講座が2018年10月に設置された⁵⁾。またコマツは、大阪大学内にコマツみらい建機協働研究所を設置し⁶⁾、コベルコも、広島大学内にコベルコ建機夢源力共創研究所を設置している⁷⁾。このように、建設機械の自動化に向けた研究開発について、大学と企業が共同で進めるプロジェクトが生まれつつある。
- (2) ロボット技術によるインフラの無人点検や補修の高度化については、2014年より、インフラの点検ならびに維持管理を効率的に進めるため、ロボット技術を導入する試みが、戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) の「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」⁸⁾ (2014年度～2018年度) や国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 「インフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発プロジェクト」⁹⁾ の主導で進められてきた。これと並行し国土交通省は、2014年より実業務への導入が期待できる点検ロボットについて民間企業等への公募を行い、全国各地の実現場において実用性等の検証を実施した¹⁰⁾。このロボット技術の検証に関する取り組みは、2020年現在も継続して続けられており、現在、各社の技術は、国土交通省の新技术情報提供システム (NETIS) のテーマ設定型実証という枠組みで評価を行うことができる。上述のプロジェクトならびに国土交通省の現場検証により、足場をかけずに橋梁の目視点検実施を可能とするドローンシステムの開発¹¹⁾ や、トンネル内を走行しつつトンネル壁面のヒビや剥離の点検実施を可能とするトンネル点検車の開発が進められてきた¹²⁾。このように、公共インフラの維持管理のためのロボット技術開発が産官学の連携で進められており、一部は実用化の段階に達している。
- (3) 災害調査技術についても、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 「インフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発プロジェクト」⁹⁾ の主導で進められてきた。例えば、火山災害対応を行うための、立ち入り制限区域の情報収集を行うことを目的とした、長距離飛行が可能なドローンシステムの開発が行われた¹³⁾。さらに、2018年にスタートしたWorld Robot Summit (WRS) では、トンネル事故災害対応・復旧チャレンジが実施され、競技会形式による研究開発も進

2.2

俯瞰区分と研究開発領域 ロボティクス

められている¹⁴⁾。この競技会は2020年にも実施予定であったが、新型コロナウイルス感染症の影響で2021年に延期され、福島ロボットテストフィールドにて実施される予定である¹⁵⁾。近年は、災害現場においてドローンに搭載したカメラによる災害調査が積極的に行われている。

- (4) 1991年の雲仙普賢岳の噴火以降、立ち入り制限区域内における応急復旧工事（土石流をせき止める砂防堰堤の工事）を行うため、遠隔操作型の建設機械による無人化施工技術の開発が進められてきた¹⁶⁾。この無人化施工は、建設機械や環境中に設置したカメラから取得した画像情報を元に、油圧ショベルなどの建設機械をオペレーターが遠隔から操縦するものである。先の福島第一原子力発電所の事故においても、がれき撤去作業の際にも活用され、また、2016年の熊本地震の際に発生した阿蘇地域の土砂崩れの応急復旧工事においても、無人化施工が利用された。なお、無人化施工技術に情報化施工技術を導入することで、施工効率が向上することが指摘されており、(1)と(4)の分野は、相互補完の関係にある³⁾。

上述の技術をさらに向上させるためには、基礎研究の推進も重要である。具体的には、移動ロボットの移動技術の研究、特に不整地や軟弱土壌における移動体の移動性能の向上に関する研究、ロボットの位置を精度良く推定する技術に関する研究、移動ロボットやドローンの自律動作に関する研究、作業現場の臨場感を遠隔地のオペレーターに伝える遠隔操作性向上に関する研究、ロボットとオペレーター間の安定した通信を確保するための通信技術に関する研究、数多くのセンサーや駆動系を必要とする大規模なロボットシステムを長時間安定して動作させるためのロボットシステムに関する研究などが重要となると考えられる。なお、現状では、建設機械の絶対位置を検知する手法として、RTK-GNSSが主として利用されているが、受信する衛星の配置が悪くなる時間帯に位置精度が低下する問題や、作業環境に遮蔽（しゃへい）物が存在する場合に推定位置が大きくずれる問題が存在する。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

注目すべき技術トピックは、マシンガイダンス（MG）、マシンコントロール（MC）技術の進歩である¹⁷⁾。MGとは、建設機械の位置・姿勢をRTK-GNSSやIMU（Inertial Measurement Unit）等で精度良く取得すると共に、その位置・姿勢と三次元の施工図をオペレーターに提示することで、丁張りや水糸を必要とせずに工事を実施する技術である。MCは、MGで取得した建設機械の位置・姿勢ならびに、施工図面に応じて、建設機械の作業機の一部を自動制御することで、オペレーターの作業負荷を低減する技術である。これらの技術は、これまでも研究開発が継続して行われてきたが、ここ数年で大きく進歩し、実施工にも積極的に利用され始めた。いずれにおいても建設機械の姿勢推定が重要な要素技術となる。建設機械メーカーは、油圧シリンダーにストロークセンサーを埋め込むことで姿勢推定の問題を解決している。特に、CATERPILLER社は、機体全体が電子制御化された「デジタルプラットフォーム」という枠組みにより、全ての建設機械を自動化する準備を整えつつある¹⁸⁾。一方、TrimbleやNovatronなど、建設機械を製造しないメーカーは、IMUを油圧ショベルのブームやアームに後付けすることで姿勢推定を行い、MC、MGを実現している¹⁹⁾。この技術は、既存の建設機械のMG化を実現できるため、比較的多くの建設会社が導入を進めている。

一方、コマツは、スマートコンストラクションという枠組みを提案し、その中で、情報化施工ならびにIoTをベースとした施工システムの開発を進めてきた²⁰⁾。ここでは、ドローンで取得した三次元データをもとに、

施工計画からICT建設機械を用いた施工や、これらを統括するシステムをパッケージ化し、熟練工でなければ施工が困難であった法面成型などを容易に実現するシステムを提供している。鹿島建設は、クワッドアクセルという建設機械の自動化による建設生産システムを提案し、大分川ダム等において試験施工を実施している²¹⁾。ここでは、汎用の建設機械にGPS、ジャイロ、レーザースキャナーなどの計測機器および制御用PCを搭載することによって自動機能を付加し、自動運転を実現した。大成建設は、キャタピラージャパン社製の次世代油圧ショベルCat 320に、独自に開発した「自律割岩システム」を実装した²²⁾。上記に示す通り、ゼネコン各社は建設機械メーカーと組み、建設機械の自動化に関する研究開発を進めている。

アカデミアによる建設ロボット技術として、スイスETHの建設機械が注目されている。特に、Marco Hatterのグループは、台車の姿勢を大きく変動させることで不整地走行を可能とした脚車輪を有する油圧ショベルに対し、搭乗型遠隔操作装置を開発した。この装置では、遠隔地にある操作対象の建設機械の姿勢に応じてオペレーター用の椅子の姿勢が変動することで、臨場感の高い遠隔操作が可能となる。また、この建設機械に対し、遠隔操作する際の衝突回避に関する技術を開発した²³⁾。この技術にバーチャルリアリティ技術なども融合させることで、遠隔操作時の作業効率の向上が期待できる。一方、フィンランドのRauno Heikkiläの研究グループも、「SmartBoomsproject」という枠組みで建設機械の自動化を進めている²⁴⁾。日本でも、先に述べた通り、コマツやコベルコなどが大学との産学連携を進めており、学術的な成果が発表されている。これらの取り組みは、2019年の日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会における「建設&インフラ用ロボット・メカトロニクス」セッションにて41件の研究成果が発表され、アカデミアにおけるこの分野のロボット技術のプレゼンスが向上していることが伺える。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

2014年度から2019年度にかけて実施された内閣府のImPACTタフ ロボティクス チャレンジでは、走行性能や作業性の高い新たな建設ロボットの実現を目指して、二本腕を有する建設ロボットが開発された²⁵⁾。この建設ロボットは、腰部で両腕が回転する2重旋回・複腕機構を搭載しており、両腕のレイアウトが自由に変更できるため、腕とクローラを用いた急坂・段差のよじ登りや、双腕を用いた繊細・器用な作業が可能である。また、このプロジェクトでは、遠隔操作性の飛躍的改善を目指し、有線給電ドローンによるロボット周囲状況の把握、任意視点の俯瞰映像生成、霧の透過視、画像ノイズ除去、半消失映像の生成、音源探索、AR操作アシスト、動力学シミュレーターを用いた操作トレーニングなど、多様な情報提示と操作支援システムの開発が行われた。このように、従来の建設機械とは一線を画す建設ロボットに関する研究開発が進められた。

一方、インフラ検査ロボットや災害調査ロボットに関しては、前述の通り、2014年以降、戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）や国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の主導の研究開発が行われると共に、国土交通省がトンネルや橋梁といった試行現場を提供するなど、省庁間連携による実用化研究が強力に進められてきた^{8), 9)}。この中の、トンネル検査用可変形状フレームの機構については、トンネルの目視/打音検査を実現可能な可変形状フレームを製作し、トンネル内でのフレームの走行ならびに変形制御を実現した。そのシステムは、搭載された視覚センサーならびに打音検査機を用いて、交通を妨げることなく、トンネル点検を実現する技術を有しており、実用化に向けた実装と試験運用が、現在も進められている²⁶⁾。なお、SIPは2018年度末で終了となったが、官民研究開発投資拡大プログラム（Public/Private R&D Investment Strategic Expansion PrograM：PRISM）²⁷⁾にて、これらの技術に関する研究開発が進められている。また、2020年に開始されたムーンショット型研究開発制度では、「ムーン

ショット目標3：2050年までに、AIとロボットの共進化により、自ら学習・行動し人と共生するロボットを実現」というカテゴリにおいて、インフラ建設の革新に関するテーマが採択された²⁸⁾。これにより、ムーンショット型研究開発制度においても、建設ロボットに関する研究開発が進められる予定である。その他、World Robot Summitについては(3)研究開発の動向に述べた通りである。

(5) 科学技術的課題

本分野における科学技術的課題については、「新技術の創出を期待する」ことよりも、既存のロボット技術を建設ロボット分野に適用し、新たな価値を創出することの方が期待されているように見受けられる。対象となる環境が屋外の自然環境であるため、屋内環境で培ったロボット工学の基礎技術が、そのままでは屋外環境で適用困難となることも少なくなく、各技術には屋外でも安定して動作する頑強性が求められる。以下に、今後インフラ保守・建設ロボットに必要と考えられる技術的課題について列挙する。

- (1) 建設機械における移動技術については、対象とする環境が不整地または軟弱土壌であることから、建設機械の走破性能（トラフィカビリティ）の検証ならびに、走行性能の向上が重要となる。軟弱土壌については、テラメカニクス²⁹⁾をベースとした研究が、建設機械に対しても進められてきたが、現実の環境は均一土壌といったテラメカニクスに必要となる条件を満たすことが不可能であるため、実問題に対して、直接適用することが困難といわれている。また、走行性能の検証には、土壌パラメータの取得が重要となるが、これを非接触で計測する手段も未解決の問題である。さらに、走行性能の向上については、サブローラや油圧ショベルのアームを利用した、不整地走破性能の向上に関する研究が進められているが、この分野の研究についても、今後の発展が期待される。
- (2) 建設機械やドローンの位置推定については、基本的にはRTK-GNSSで行うものが多いが、橋梁点検などのアプリケーションでは、衛星からの信号が遮られるため、GNSSによる位置推定を行うことが困難な場合がある。これを解決するための手法として、レーザー距離センサーや画像を用いた位置推定技術（SLAM：Simultaneously Localization And Mapping）技術³⁰⁾を利用したさまざまな方法が提案されている。しかしながら、これらの手法を用いて自然地形や特徴量の少ない橋梁/トンネルにおける位置推定を行うことは、環境によっては困難である。そのため、今後、位置推定技術の頑強性の進展が期待される。
- (3) 無人化施工において、特に建設機械から遠く離れた場所から操作する場合、建設機械や作業エリアに設置したカメラから得られる画像情報を用いて作業を行う。これにより、通常の搭乗操作と比較し、作業効率は50%程度まで低下するといわれている³¹⁾。この作業効率を向上させることは、無人化施工において非常に重要な課題であるが、これを実現するための方策については研究段階にある。一つの方策として、作業現場の臨場感をオペレーターに伝えるためのVR技術に関する研究が挙げられる³²⁾。しかしながら、現場に導入するまでには、大きなブレイクスルーが必要であると考えられる。
- (4) インフラ保守・建設ロボットは、数多くのセンサーや駆動系を必要とする規模の大きいロボットシステムとなる。現状では、ゼネコンや建機メーカーが一对一で組み、開発が行われているが、開発効率が低いという問題や、複数社の建設機械を同時に制御することができないといった問題がある。そこで、

(6) その他の課題

ロボットとオペレーター間の無線通信を安定して確保することは、フィールドロボットの分野を進めていく上で必要不可欠である。しかしながら、現状では、通信距離の問題、通信遅延の問題、複雑な自然地形での遮蔽（しゃへい）物による通信遮断の問題などが存在し、これらが問題とならない範囲でのみ、実用化が図られてきた。無線通信については、通信帯域の確保の問題も含むため、政策的課題の側面もあるが、5Gの活用を含め³⁵⁾、今後、ハード面、ソフト面共に、通信に関する目覚ましい技術革新を起こすことができれば、インフラ保守・建設ロボットの適用範囲が大きく広がる可能性がある。移動体の通信技術については、通信帯域確保ならびに、通信出力の上限に関する問題が存在する。なお、国土の狭い日本では、無線通信の干渉をできる限り低減するため、無線通信に利用可能な通信出力が抑えられている。また、災害時などの非常時に占有可能な通信帯域も確保できていなかった。そこで、2016年8月、総務省は、移動体を対象とした5.7GHz帯、2.4GHz帯、169MHz帯の無人移動体用無線通信を可能とするように、電波法施行規則を改正した³⁶⁾。この改正により、通信に関する問題がどの程度解決されるかは、現状では未知数であるが、今後も、ロボットの活用において、無人移動体が利用しやすい無線帯域の確保が必要となると考えられる。そのため法の整備ならびに、非常時におけるルールの設定など、総務省の対応が期待される。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	不整地移動に関する基礎研究、遠隔操作性向上に関する基礎研究、ロボット運用の際の安全に関する基礎研究は全般に継続して成果が出ていると見受けられる。
	応用研究・開発	○	→	インフラ点検ロボットや建設ロボットの応用研究や実用化については、継続して成果が出ているが、大規模なプロジェクトが終了した後、現状では、新しいアクティビティーが生まれていない。
米国	基礎研究	○	→	不整地の走行に関する研究では、特にカーネギーメロン大学 ³⁷⁾ が、継続して、高い成果を挙げている。
	応用研究・開発	◎	↗	ブルドーザー、グレーダー、油圧ショベルなどの自動制御の建設機械については、日本と同等（またはそれ以上）に実用化が進められている ³⁸⁾ 。また、ドローンを用いたビジネスは多数立ち上がり、そのビジネスの中でも技術開発が大きく進んでいる ³⁹⁾ 。

欧州	基礎研究	○	→	遠隔操作の臨場感に関する基礎研究において、近年、スイスのETHのグループが成果を挙げている ²³⁾ 。
	応用研究・開発	◎	↗	ブルドーザー、グレーダー、油圧ショベルなどの自動制御の建設機械については、日本と同等に実用化が進められている ⁴⁰⁾ 。特に、フィンランドやスウェーデンなどにおいて、マシンコントロールを用いた工事が数多く実施されている。

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている

○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) テレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

参考文献

- 1) 国土交通省総合政策局、“建設ロボット技術の開発・活用に向けて～災害・老朽化に立ち向かい、建設現場を変える力～”，<http://www.mlit.go.jp/common/000995047.pdf>（最終アクセス 2020）
- 2) 国土交通省，“情報化施工推進戦略”，<http://www.mlit.go.jp/common/000993270.pdf>（最終アクセス 2020）
- 3) 建山和由，横山隆明，“ICTを利用した建設施工の高度化と将来展望” 計測と制御 55巻6号（2016）477-482.
- 4) 国土交通省，“ICTの全面的な活用”，https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/constplan/sosei_constplan_tk_000031.html（最終アクセス 2020）
- 5) 小澤一雅，“東京大学「i-Construction システム学」 寄付講座における取り組み”，建設マネジメント技術 2019 年 6 月号，pp61-64（2019）
- 6) 大島陽二郎，“コマツみらい建機協働研究所”，システム/制御/情報，Vol.64, No.3, pp.111-113, (2020)
- 7) “コベルコ建機夢源力共創研究所”，<http://dream-driven.hiroshima-u.ac.jp/>（最終アクセス 2020）
- 8) Nagatani K and Fujino Y, "Research and Development on Robotic Technologies for Infrastructure Maintenance", Journal of Robotics and Mechatronics., December, 2019. Vol. 31 (6) , pp. 744-751, (2019)
- 9) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 ロボット・AI 部，“インフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発プロジェクト”，<http://www.nedo.go.jp/content/100871665.pdf>（最終アクセス 2020）
- 10) 特集「次世代社会インフラ用ロボット現場検証」，日本ロボット学会誌 Vol.34, No.8-9（2016）。
- 11) 大野和則，岡田佳都，原島正豪，横江政和，“橋梁の近接目視点検を支援する飛行ロボットシステムの開発”，精密工学会誌，83（12），1066-1070（2017）。
- 12) 水口尚司，大西有三，徳田浩一郎，西山哲，石村勝伸，“道路トンネル走行型計測車両におけるひび割れ精度検証の報告”，土木学会論文集 F2（地下空間研究），73（1），1-10（2017）。
- 13) 永谷 圭司，羽田 靖史，“火山災害地域で活躍するセンシングロボットの開発”，電波技術協会報，Issue

315, pp. 14-17 (2017) .

- 14) World Robot Summit 2020, <https://worldrobotsummit.org/> (最終アクセス 2020)
- 15) 北島明文, "福島ロボットテストフィールド", 日本ロボット学会誌, Vol.35, No.10, pp.731-734 (2017)
- 16) 植木 睦央, 猪原 幸司, 北原 成郎, "「無人化施工」による災害復旧と今後の取り組みについて", 建設マネジメント技術 2013年6月号, pp.45-53 (2013) .
- 17) 原田 純仁, "ICTブルドーザーとICT油圧ショベルの開発", 計測と制御, Vol.55, No.6, pp.523-526, (2016)
- 18) デジタルクロス, "日本キャタピラー、油圧ショベルのIoT機能を標準装備にし i-Construction 対応を推進", <https://dcross.impress.co.jp/docs/usecase/000134.html>, (最終アクセス 2020)
- 19) NOVATRON, "Machine Control Systems", <https://novatron.fi/en/systems/> (最終アクセス 2020)
- 20) 四家千佳史, 小野寺昭則, 高橋正光, "建機メーカーが描く ICT 建機施工を中心とした建設現場の未来 (「スマートコンストラクション」の導入) ", 一般社団法人 日本建設機械施工協会誌, 67 (12) , 16-20 (2015) .
- 21) 木村駿, "鹿島のクワッドアクセルを徹底解剖 自動化の秘密, 教えます", 日経コンストラクション, (684), 43-47 (2018)
- 22) 大成建設, 次世代油圧ショベルによる作業自動化を実証, https://www.taisei.co.jp/about_us/wn/2019/190426_4636.html (最終アクセス 2020)
- 23) Dominic Jud, Philipp Leemann, Simon Kerscher and Marco Hutter, "Autonomous Free-Form Trenching using a Walking Excavator", IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) , Macau, China, pp.3208-3215, (2019)
- 24) Heikkilä, R., et al. "Development of an Earthmoving Machinery Autonomous Excavator Development Platform." ISARC. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction. Vol. 36. IAARC Publications, 2019.
- 25) S.Tadokoro, "Disaster Robotics -- Results from the ImPACT Tough Robotics Challenge", Springer, (2019)
- 26) 権純洙, 井上文宏, 中村聡, 柳原好孝, "トンネル検査用可変形状フレームの機構と形状制御に関する研究", ロボティクス・メカトロニクス講演会予稿集, 2A1-C01, C02 (2018) .
- 27) 内閣府, "官民研究開発投資拡大プログラム (PRISM) ", <https://www8.cao.go.jp/cstp/prism/index.html> (最終アクセス 2020)
- 28) 国立研究開発法人科学技術振興機構, "ムーンショット型研究開発事業," <https://www.jst.go.jp/moonshot/>, (最終アクセス 2020)
- 29) Wong, J. Y., "Theory of ground vehicles", John Wiley & Sons (2008) .
- 30) Aulinas, J., Petillot, Y. R., Salvi, J., Lladó, X., "The SLAM problem : a survey", CCIA, 184 (1) , 363-371 (2008)
- 31) 茂木正晴, 山元弘, "無人化施工による災害への迅速・安全な復旧活動", 計測と制御, 55 (6) , 495-500 (2016) .
- 32) 山内 元貴, 橋本 毅, 新田 恭士, " 無人化施工におけるHMDを用いた画像表示システムの効果", 建設機械 Vol. 56, No.1, pp.25-29, (2020)

2.2

俯瞰区分と研究開発領域 ロボティクス

- 33) 山内元貴, 橋本 毅, 山田 充, 新田恭士, 油田信一, "建設機械施工における標準プラットフォームの提案", ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2P1-A08 (1) (2020)
- 34) 新井健生, "安心なロボットを考える", 日本ロボット学会誌, 36 (4), 266-269 (2018)
- 35) 青木浩章, 片山三郎, 進藤秀樹, 中島真二, "次世代通信規格 (5G) を用いたクローラダンプの自動走行システムのフィールド検証-建設現場における可搬型 5G の活用-", 第 19 回 建設ロボットシンポジウム 予稿集, O1-2, (2019)
- 36) 総務省 総合通信基盤局, "ロボット・IoTにおける電波利用の高度化など最新の電波政策について", <http://kiaigr.jp/jigyoku/h28/PDF/0617p1.pdf> (2016) .
- 37) Kohanbash, David, Scott Moreland, and David Wettergreen. "Plowing for rover control on extreme slopes." Field and Service Robotics. Springer Berlin Heidelberg, pp. 399-413 (2014).
- 38) 椎葉祐士, 建山和由, 宮武一郎, 古屋弘, "米国における情報化施工の導入環境調査報告." 建設機械施工: 一般社団法人日本建設機械施工協会誌: journal of JCMA 65.7, pp.21-24 (2013) .
- 39) "Near Earth Autonomy", <https://www.nearearth.aero/> (最終アクセス 2020)
- 40) 山口崇. "欧州における情報化施工等の状況." 建設機械施工: 一般社団法人日本建設機械施工協会誌: journal of JCMA 65.7, pp.25-28 (2013) .