

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H00271

研究課題名（和文）建築施工現場でのロボットアームの高度活用を可能にする統合技術研究

研究課題名（英文）A Study on Integrated Technologies to Enable Advanced Utilization of Robotic Arms in Construction Sites

研究代表者

平沢 岳人（HIRASAWA, Gakuhiro）

千葉大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：30268578

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 15,800,000円

研究成果の概要（和文）：建築現場でのロボット活用には工場でのそれと異なり解決すべき問題が数多い。工場と異なり、現場でのロボットの利用では周辺環境をロボットの活動にとって理想的な状況にすることがそもそも困難である。本研究では障害物を避けて現場内を自由に移動するための技術、雑然とした施工現場でも効率的に稼働させるための小さなフットプリントに納めた双腕ロボットの開発、同ロボットを仮設を含む障害物を迂回して活動させるためのモーションプランニング技術、移動先で誤差なく仕事を完遂するための補正技術等を開発した。

これらの技術開発ではドローンで取得した点群処理、強化学習(AI)によるモーションプランニング等を実装して用いた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

日本社会は慢性的な人手不足に悩まされているが建築業においても同様の問題を抱えている。本研究では、ロボットの導入が難しい建築現場にロボットを導入するための基盤技術の開発を行った。

ロボットに建築現場で自由に移動するための機能、移動先で柔軟かつ正確に活動するための障害物迂回機能および作業位置の自律調整機能を実装した。これらの機能は最先端の点群処理技術と強化学習(AI)を実装したソフトウェアにより達成された。

建築現場でロボットを活用するためには安全面での労働法的制限が残るが、建築現場におけるロボット活用の展開に期待を抱かせる成果が得られた。

研究成果の概要（英文）：In contrast to the utilization of robots in factories, the application of robots on construction sites faces numerous challenges that need to be addressed. Unlike factory environments, creating an ideal situation for robotic activities on construction sites is inherently difficult due to the surrounding conditions. This study focuses on developing technologies that enable robots to navigate freely within the site by avoiding obstacles, the development of a dual-arm robot with a compact footprint for efficient operation in cluttered construction environments, motion planning technology that allows the robot to maneuver around obstacles including temporary structures, and correction techniques to ensure precise task completion at the destination.

These technological developments incorporate point cloud processing obtained from drones and motion planning through reinforcement learning (AI).

研究分野：建築学

キーワード：双腕ロボットアーム 建築施工 AGV ロボット3Dプリント 工学マーカ 点群処理 経路探索 強化学習

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

自動車産業等、多くの製造業の現場ではロボットが活躍している。我が国の製造業は、高齢化や若年人口の減少に対して、主にロボットを活用した自動化で対応してきた。

翻って建築分野ではどうだろうか。建材単位で見れば、それぞれの工場ではロボット活用はそれなりに進んでいる場合もあるが、最終成果物が得られる施工現場ではロボットは全くと言ってよいほどに使われていない。使われない理由は、現時点での産業用ロボットの仕様が建築現場には適さないからである。施工現場においてもロボットを運用可能にするためには、複数の要件を達成するロボットの革新的な性能向上を待つ必要があるが、理想的な仕様のロボットを前提として施工現場におけるオペレーション技術の詳細を検討しておくことは学術的に価値がある。逼迫する現場労働者不足への具体的な対応策としても社会的に強く求められており、部分的であっても早期の現場運用の実現が期待されている。さらに、この研究の検討結果から、建築業側からロボット製造業へ向けての本質的ニーズの提示となり、そのニーズに応じた技術開発を促進する役割を担える。

2. 研究の目的

建築分野でのロボットの活用は研究レベルではいくつか事例が見られるが、実用段階にある成果は特に知られていない。このような状況において、申請者の研究室で開発中の大断面集成材加工用ロボットは既に実用に達している。プレカット工場などで現在稼働している用途が限定された旧型の加工機は、近い将来にはロボット応用型加工機に順次置き換わってゆくと言われる。この研究では、ロボットの姿勢・動作を仕事の内容に応じて動的に生成する、いわゆるティーチング・レスを基本としており、多品種少量生産が求められる場面でも低コストで対応可能となっている。ティーチングとはロボットに仕事を教えることをいい、これに必要とされるコストを生産効率の改善による利益が上回るときにのみロボットが採用される。多くの場合ティーチングそのものが困難でコスト高となりロボットは採用されない。ティーチング・レスとはこの工程を特殊な技法をもって省くものであり、コスト増を心配することなくロボットそのものの可用性を格段に向上させる。ただし、ロボットに持たせるツール(工具のこと)毎にツールパス生成器が必要であり、例えば当研究室の事例では四種類の木工用ツールに対応するパス生成器を独自開発して対応した。今後の応用では、新しいツールを導入する度にパス生成器を実装する必要があるが、加工対象の3D形状データからツールパスを生成することでロボットによる最終製品の加工まで行い、上流の設計段階から下流の施工段階までシームレスにデータ連係させるという本研究室が実現したワークフローは合理的で汎用性が高い。他の類似の研究と異なり実用に到達できた一番の理由は、ツールパス生成器を独自開発可能なほどに、応用システムソフトウェア開発における高い能力である。この能力が本研究の独自性および創造性を支えている。

これまでの研究では、「建築分野でのロボット応用」や「多品種少量生産の実現」など、掲げた目標は同じでもロボットを運用する場はあくまでも工場を前提としていた。工場ではなく施工現場でのロボット運用には解決しなければならない課題が山積している。本研究はこれらの諸問題のうち、解決可能と思われるものから段階的に施工現場用ロボット運用の知見を獲得しようとするものである。

3. 研究の方法

当研究室では木質系建築部材加工に関してティーチング・レスでのロボット運用技術の実用化に成功している。この技術は従来のプレカット工場の旧式の非ロボット加工機を代替するもので、加工の速度、対応可能な加工形状、導入コストなど、多くの評価項目で革新的に勝る。ティーチング不要で、完全一品生産を含む多品種少量生産に対応でき、建築での活用にも期待が持てる。しかしながら、現状では工場での運用に留まる。実はティーチング・レスだけが施工現場でのロボット運用の要件ではない。

施工現場でのロボット運用には、次の要件を解決する必要がある。ロボットが、**1)**ティーチング・レス運用で仕事ができること、**2)**自ら移動し、移動先で仕事ができること、**3)**狭い空間でも巧みな身のこなしで仕事ができること、**4)**軽量であること、**5)**ペイロード(可搬重量)が人間以上であること、**6)**反力が必要な仕事では、反力を得る手段を持つこと、**7)**人との協働において安全であること、が必要である。要件**1)**については一部を解決済だが、施工現場における様々な仕事の種類を想定すると、新たなツールの開発とそれに付随するロボットモーション生成器の開発が必要であり、残されている課題は多い。**2)~7)**はロボット製作会社によるハードウェアの革新的な性能向上が必須だが、それのみでなく、並行して施工現場での運用を前提としたソフトウェアの整備も必要である。例えば、ロボットが移動能力を近い将来に獲得しても、施工現場での移動の計画は工程管理と密接に関係するソフトウェアで実行するであろう。ロボットのオペレーションを必須項目として工程管理に組み込む技術開発は必須である。これらの要件の解決はいずれも重要であるが、限られた研究期間で網羅的な検証はできないため、本研究では主として**1)**および**3)**に関して実施した。**1)**および**3)**に関しては、既存の七軸かつ双腕のロボットを用いることで、ハードウェアの革新的な進歩を待たずにいくつかの研究を先取的に実施することを

目指した。

4. 研究成果

4.1 ロボット周辺の状況理解（論文番号 2）

関連労働法との絡みで、重量のある高ペイロードのロボットは同一の空間で人間と協働できないのが現状である。しかしながら、建築現場においては工事種類も多岐にわたり、全てをロボットに任せられるに至るには相当の困難を伴うと予想する。建築施工現場へのロボットの導入においては、少なくともその初期段階においては、人とロボットとの共存を目指す必要がある。

本研究ではまず、ロボット周辺の人の動きを解析し、それがロボットの運用において（安全である | 危険である）かを判定する技術の実装を行った。ロボット周辺の人物検出と関節の画像内における二次元位置の推定を行うアルゴリズムである **Openpose** でカメラ映像を処理し、検出された関節位置を人物、動作、位置の推定に活用した。動作の推定ではトラッキングした関節位置のシーケンスによる分別を試み、深度カメラの映像から人物、動作、位置の推定が可能であることを確認した。

学内の工房での実験では、カメラ映像から、人物の特定と作業内容を推定させた。この実験により、ロボット周辺において許（される | されない）作業、近接して（良い | わるい）（人物 | 振る舞い）などをカメラ映像の中から自動分別できることを示せた。これにより、必要があればロボットの活動を停止して人の安全を確保する一方、人が近接していても安全が確認できる場合にはロボットの活動を停止しないことも可能となった。

4.2 強化学習(AI)を用いた迂回動作の自動生成（論文番号 1、3、6）

本研究で採用した双腕ロボットは、片腕に 7 つの関節を持つもので、このタイプは通常の 6 軸タイプに比較して、同一の **TCP** に対して取り得る姿勢の選択肢が格段に増える。この特性を利用すれば、既設部位の裏側にツールを伸ばしての工事や、既設・仮設の部位に接触することなく工事を続けるなど、建築現場におけるロボットの可用性が大幅に向上する。7 軸ロボット特有の冗長性を活かした「迂回」動作（姿勢）のモーション生成を強化学習等により実装した。

強化学習を用いた理由は、7 軸以上のロボットの姿勢は計算では決定できない（解が無限にある）ためであり、また、個々のモーションを起点から終点まで無事に完遂できることをシミュレータで確認する必要もあるからである。本研究ではシミュレータに **AI** 手法を用いた解決ロジックを統合して実装したが、これは優れたソリューションとなった。

4.3 建築現場内でのロボットの移動（論文番号 5）

ロボットを作業場所まで移動させるという問題においても、既設部分や仮設・資材などをやはり障害物であるとみなすことができる。この問題に関してはロボットを積載する移動手段で解決すべき課題となるが、導入した **AGV** に附属する **AI** 動作（回避行動が可能）および独自に開発中の強化学習による障害物回避ルート発見アルゴリズム両方で試験を行ったが、両者において優劣のない結果が得られた。以後の複合試験(4.4 節)において使用可能な性能が得られた。

ロボットが作業場所まで移動するという問題において、建築現場では既設部分や仮設・資材の仮置きの状態が日々変化するため、これらの障害物をその都度短時間に検知して移動経路を決定しなければならない。小型ドローンをロボットシステムに統合し、ロボットの移動前にドローンにより観察した周辺状況から経路を決定し、現在地から目的地までの確実な移動経路を導くことに成功した。移動先での周辺環境とロボットの位置あわせに関しても、ロボットに装着したカメラを用いてある程度の位置合わせし、移動先での作業の実行についてもその場での微調整を行うことで後続の作業（工事）を連続して実行する目処も得られた。

4.4 ロボットの移動先での精度の高い仕事の実行（論文番号 4、7、8）

この実験は、4.1 ~ 4.3 の全ての研究成果を統合した最終的な試験と位置づけられる。

本実験においては、規模の大きな施工現場を想定した比較的長い移動経路を学内に設けた。形状は方向転換のあるコの字型とし、出発地点から目的地に到着するまでに 2 回の 90 度転回を必要とする総延長約 30 メートルの経路を設定した。ロボットを搭載した **AGV** がこの経路の始点から終点まで移動し、終点付近に設置した施工空間において工事を行う。**AGV** の機能のみで実現できる位置決め精度は、ロボットによる工事に要求される精度には遠く及ばないため、工事を始める前に作業対象とロボットの位置合わせが必要である。この位置合わせにおいては、作業対象に配置した光学マーカから、ロボット座標系における作業対象の位置および姿勢を取得し、これらから得られた変換行列を、設計データより事前に生成しておいたロボットのモーションデータに乗じて実行時用のモーションデータを得た。実行時用のモーションデータを **AGV** に搭載したロボットで実行することにより工事を行う。

実行前の座標系調整の成否を検証するため、工事種類としてはロボットによるインプレイスな **3D** プリントを採用した。**3D** プリントでは、**TCP** の最初の軌跡が対象部位にもし近すぎればエクストルーダが接触し、接触の程度によってはエクストルーダが破損してしまう。逆に、対象部位から離れすぎれば十分な定着が得られず **3D** プリントを完遂できない。近すぎず遠すぎない適切な位置を **TCP** に通過させる必要があるため、この工事手法の特性により、移動場所での作業開始前の位置合わせ処理の正確さを実証することが出来る。複数回の実験の成功により、長距離を

移動後でも直前に適切な補正処理を行うことで、精度十分なロボットによる仕事の実行が可能であることを示した。

4.5 まとめ

本研究の目的は、建築施工現場におけるロボットの利活用に必要な基盤技術の開発とその検証であったが、研究期間内に初期の目的を達成することができた。

参考文献

本研究に関連した発表した査読付き論文一覧（審査有搭載済み、登載決定、投稿中を含む）

（以下、審査有搭載済み）

1. 藤岡 凌司、古庄 玄樹、平沢 岳人、深層強化学習による五軸加工機の迂回パス生成に関する研究、日本建築学会技術報告集、第 67 号、pp. 1553-1558、2021.10

2. 上田 航平、平沢 岳人、施工現場の安全のための画像による人物・動作・位置の推定手法に関する研究 -施工現場におけるコンピュータビジョンの活用に関する研究-、日本建築学会技術報告集、第 68 号、pp. 1602-1606、2022.10

3. 藤岡 凌司、中尾 洋祐、平沢 岳人、深層強化学習による 7 軸多関節ロボットの迂回パス生成に関する研究、日本建築学会技術報告集、第 70 号、pp. 1602-1606、2022.10

4. 寺田 泰地、平沢 岳人、3D プリンティングにおける積層可能性を考慮したパス生成に関する研究、日本建築学会技術報告集、第 71 号、pp. 447-452、2023.02

5. 仲 遊人、中村 優介、平沢 岳人、AGV の経路移動学習とドローンによる障害物検知の連携、日本建築学会技術報告集、第 74 号、pp.502-505、2024.2

（以下、審査済み登載決定）

6. 岩城圭祐、中尾洋祐、中村優介、平沢岳人、7 軸多関節ロボットの迂回シミュレーションに関する研究、日本建築学会技術報告集、(掲載号未定)

7. 中尾 洋祐、中村 優介、平沢 岳人、左右で異なる作業を実行させる双腕ロボットを用いたブロック積み工事に関する研究、日本建築学会技術報告集、(掲載号未定)

（以下、投稿中）

8. 中村 優介、寺嶋拓己、井本大雅、平沢 岳人、移動可能なロボットによるオンサイト作業に関する研究、日本建築学会技術報告集

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 NAKA Yuto, NAKAMURA Yusuke, HIRASAWA Gakuhito	4. 巻 30
2. 論文標題 COOPERATION WITH ROUTE MOVEMENT LEARNING OF AN AGV AND OBSTACLE DETECTION OF A DRONE	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 AIJ Journal of Technology and Design	6. 最初と最後の頁 502 ~ 505
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijt.30.502	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 TERADA Taichi, HIRASAWA Gakuhito	4. 巻 29
2. 論文標題 ロボット3Dプリンティングにおける積層可能性を考慮したパス生成に関する研究	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 AIJ Journal of Technology and Design	6. 最初と最後の頁 447 ~ 452
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijt.29.447	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 TERADA Taichi, HIRASAWA Gakuhito	4. 巻 29
2. 論文標題 ロボット3Dプリンティングにおける積層可能性を考慮したパス生成に関する研究	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 AIJ Journal of Technology and Design	6. 最初と最後の頁 447 ~ 452
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijt.29.447	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 FUJIOKA Ryoji, NAKAO Yosuke, HIRASAWA Gakuhito	4. 巻 28
2. 論文標題 STUDY ON DETOUR PATH DERIVATION FOR 7-AXIS ROBOT USING DEEP REINFORCEMENT LEARNING	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 AIJ Journal of Technology and Design	6. 最初と最後の頁 1602 ~ 1606
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijt.28.1602	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 NAKAMURA Yusuke、HIRASAWA Gakuhiro	4. 巻 28
2. 論文標題 STUDY ON ACHIEVEMENT EVALUATION OF ROBOT MACHINING BY FEEDBACK CONTROL	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 AIJ Journal of Technology and Design	6. 最初と最後の頁 1607 ~ 1612
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijt.28.1607	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 FURUSHO Genki、NAKAMURA Yusuke、HIRASAWA Gakuhiro	4. 巻 28
2. 論文標題 CHANGEOVER PROCESSING FOR ROW-WOOD USING POSITION AND POSTURE ESTIMATION SYSTEM	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 AIJ Journal of Technology and Design	6. 最初と最後の頁 1613 ~ 1616
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijt.28.1613	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nakamura Yusuke、Hirasawa Gakuhiro	4. 巻 1
2. 論文標題 DYNAMIC PATH GENERATION VIA LOAD MONITORING WITH A FORCE SENSOR FOR ROBOT PROCESSING USING A CHISEL	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 38th International Symposium on Automation and Robotics in Construction	6. 最初と最後の頁 763-768
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22260/isarc2021/0103	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Furusho Genki、Nakamura Yusuke、Hirasawa Gakuhiro	4. 巻 1
2. 論文標題 Raw Wood Fabrication with Computer Vision	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 38th International Symposium on Automation and Robotics in Construction	6. 最初と最後の頁 741-746
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22260/isarc2021/0100	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 藤岡凌司、平沢岳人、他	4. 巻 67
2. 論文標題 深層強化学習による五軸加工機の迂回パス生成に関する研究	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本建築学会技術報告集	6. 最初と最後の頁 1553-1558
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 上田 航平、平沢岳人、他	4. 巻 68
2. 論文標題 施工現場の安全のための画像による人物・動作・位置の推定手法 に関する研究 施工現場におけるコンピュータビジョンの活用に関する研究	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本建築学会技術報告集	6. 最初と最後の頁 500-503
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 上田航平、本田悠樹、加戸啓太、平沢岳人	4. 巻 1
2. 論文標題 現場安全性・生産性向上のための深層学習とコンピュータビジョンによる人物・位置・動作の認識に関する研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 第43回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集(社)日本建築学会・情報システム技術委員会	6. 最初と最後の頁 348-351
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件(うち招待講演 0件/うち国際学会 0件)

1. 発表者名 岩城 圭祐 / 中尾 洋祐 / 中村 優介 / 平沢 岳人
2. 発表標題 7軸多関節ロボットの迂回シミュレーションに関する研究
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鈴木 日菜 / 平沢 岳人 / 中村 優介 / 中尾 洋祐
2. 発表標題 画像認識技術を用いたロボットハンドの物体把持判定に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 寺嶋 拓己 / 高山 司希 / 仲 遊人 / 中村 優介 / 平沢 岳人
2. 発表標題 GVの経路移動学習とドローンによる障害物検知の連携
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高山 司希 / 寺嶋 拓己 / 中村 優介 / 平沢 岳人
2. 発表標題 造形時の姿勢と射出量を制御した3Dプリンティングロボットに関する研究
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中尾 洋祐 / 中村 優介 / 平沢 岳人
2. 発表標題 双腕ロボットによるブロック積み工事に関する研究(その1)(その2)
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	加戸 啓太 (CADO Keita) (60727379)	千葉大学・大学院工学研究院・助教 (12501)	申請時の研究分担の計画を研究開始後の調整により一部を修正したため、実質的な分担者とはならなかった(科研システムへの登録抹消は依頼済み)

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------