

# 学習結果を現実に直接適用可能なロボットシミュレータの開発

山梨県若手研究者奨励事業 研究成果報告書

山梨大学 メカトロニクス工学科

助教 孫瀟

## はじめに

本研究は、実環境を学習することで現実を可能な限り如実に再現するシミュレータを開発し、それを架け橋にすることで今まで実体を持たないデータのみを対象とした機械学習等の AI 技術を拡張し、現実世界にも直接機械学習を適用できるロボット・AI 融合技術の開発を目的とする。

提案者が今まで行ってきた研究成果から得られた知見に基づき、ロボットとその操作対象物および周辺環境を開発した環境学習型シミュレータ内で再現し、ロボット実機に適用することを事例として技術の開発・検証を行う。

## 研究背景

近年よりロボットと AI 技術が多くの注目を浴びており、急速な発展とともに応用が広がっている。ロボットはその高出力・高速度と高精度、長持続性などの特徴から産業界をメインとする領域で活躍しており、AI 技術に関しては主にデータ分析や画像認識等の分野で人間以上のパフォーマンスを達成しているケースも珍しくない。

しかしながら、これら両者にはそれぞれの限界が存在する。従来のロボットはプログラミングされた動作を如実に再現する事に長けているが、その分柔軟性に欠け、想定されていない状況への対応が比較的困難といった課題を抱えている。AI に関してはデータの処理が非常に得意だが、実体を持たないため実物に直接作用し、影響を与えることが難しい。

そのため、ロボットと AI を融合することで両者の弱点を補い、それぞれの

長所を存分に発揮する発想は自然と提案され、AI 技術の爆発的な進歩に伴い多くの試みがあった。しかし残念ながら、現時点での AI とロボットの融合はまだ理想的なものとは程遠い。その理由は両者がそれぞれサイバー（データ）空間とフィジカル（物理）空間という異なる空間に存在しているため、その融合も両空間の「橋渡し役」がなければかなり限定されることにあると考えられる。

### 先行研究

2016 年に Google は図 1 [1] のように 14 台のロボットアームとグリッパを用いて 800,000 回を超える物体把持を約 3,000 時間実行し、そのデータを深層学習のニューラルネットワークに学習させた結果、物体把持の失敗率を最大で 10% にまで抑えることに成功した[2]とのことだが、これは同時に AI とロボットの融合を物量作戦に任せるとどれだけ非効率的で膨大なコストが必要になるかが検証された事例となってしまった。当然ながら、このような「贅沢」な実験はほとんどのロボット研究者や企業にとっては非現実的なものであるため、もっと効率的で低コストな代替手法を探索する必要があると思われる。



図 1 Google の「物量作戦」（一部風景）

ハードウェアであるロボットを AI と融合するためにはソフトウェア内でデータとして扱えるようにする必要があり、それにはロボットシミュレータを用い

てロボットと環境をその中でモデル化する手法が主流であるが、そこで人々を悩ませたのはシミュレータと現実世界の差異である。多くの手間をかけてシミュレータ内にモデルを構築し、何とか機械学習等の AI 手法を用いることができるようになったと思えば、ロボット実機に適用しようとした途端シミュレーションのように動かず、所望するパフォーマンスを実現できない問題点があった。

そこで提案者はサイバー空間とフィジカル空間の橋渡しとして、環境要素をロボットシミュレータ内に取り入れることでシミュレーション内の学習結果を直接現実世界に適応し、現実世界における学習コストを大幅に削減可能な成果を挙げ、その成果を[3]として発表した。その経緯と結果を下記の通りに示す。

提案者らは図 2 に示された等身大四肢型ロボット「WAREC-1」の遠隔操作による電動ドリル把持のアシスト制御という研究課題において、モデル構築済の既存シミュレータを用いて参考としてドリル把持のアシスト制御の機械学習を行った。

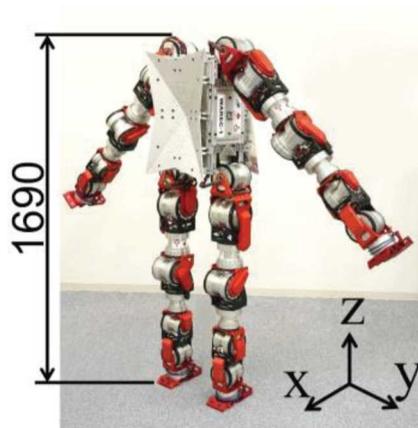


図 2 WAREC-1[4]

研究の初期段階ではシミュレータと実環境の差によりシミュレータ内の学習結果がロボット実機に適用できなかったが、その差を無くすためにシミュレータ内に

- (1) ランダムな位置にあり、ランダムな色を発する光源
- (2) ランダムな物体 (壁、木、建物など)

を生成し、再度学習したデータをロボット実機で検証したところ、問題なくドリル把持のアシストが実現された。具体的には、深層強化学習 Deep Q Network (DQN)と物体認識アルゴリズム Yolo v3 を用いることで遠隔操作時の電動ドリルを認識し、ロボットハンドが上手くそれを把持しドリルのトリガーを引くことでドリルが動作できるようになった (図 3)。これにより、従来では必要不可欠であったロボット実機の数千、数万回もしくはそれ以上の動作による学習データ収集が不要となり、シミュレータ内での学習が直接ロボット実機に使えるようになった。

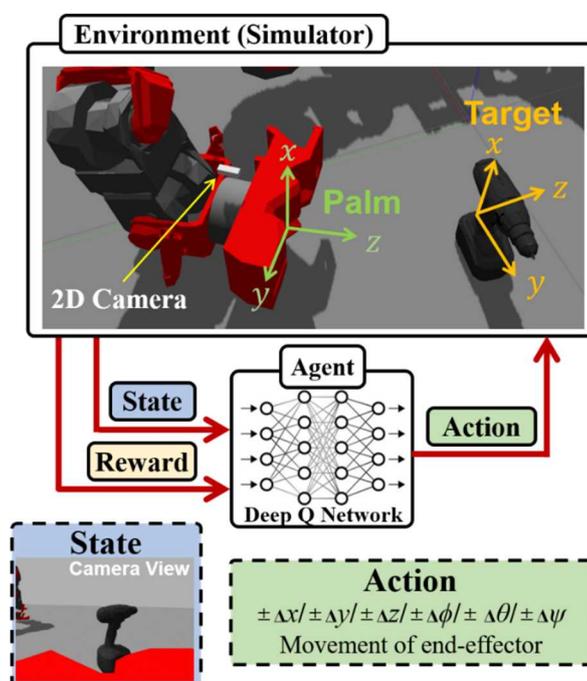


図 3 深層強化学習のシステム構成図

結果としては、従来のロボット実機を動かす学習手法と比べて概算で速度が 100 倍以上、コストは 1/100 以下に収まることが分かり、飛躍的な効率向上とコスト削減が確認できた。また、アシストシステムの支援により電動ドリルの把持成功率が従来と比べて平均 66% (10%から 76%に) 向上した。

#### 研究目的 & 研究内容

上記の提案者の過去研究では、現実世界の環境に近づけ、学習結果を直接ロボ

ット実機に適用するためにシミュレータ内のオプションを活用し、ランダムに背景と光を生成することにとどまっていた。一方で本研究ではロボットの対象物を含む環境の位置と力をセンシングし、それを学習することで実物と近い特性（硬さ、形状や摩擦など）を持つモデル自体をシミュレータ内に生成し、限りなく現実に近いシミュレータを開発する。これによりロボットに限らず、実物のシミュレータ内の AI 学習を可能とすれば、今まで非常に困難であった実物の AI 学習がソフトウェア内で実現できると考える。上記の目標を実現するためには、図4のようなシステムが必要であると考えられる。

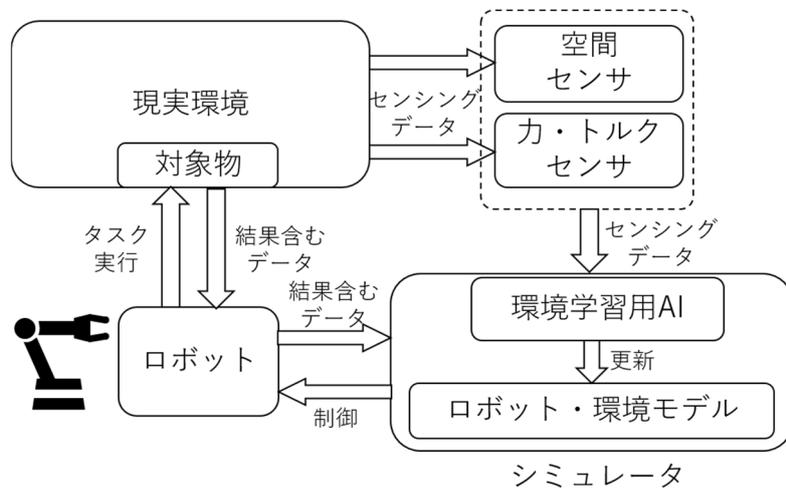


図4 本研究のシステム図

システムのメイン要素としてロボットだけでなく、センサ群とシミュレータ、特に環境を学習できる AI が必要不可欠である。ロボットは汎用性、再現性を考慮し市販のロボットアームを想定し、センサに関しては空間データ（距離・大きさなど）と力・トルクデータが取得できる物を想定する。図7の「空間センサ」ではステレオカメラなどを用いて対象物・環境を認識するだけでなく、ロボットとの相対位置・姿勢関係を把握することで、ロボットが常に精確かつ適切な動作を用いて対象物に対するタスクを実行できるようにする。「力・トルクセンサ」に関しては、環境を含む対象物と接触し、様々な動作（押す、擦る、掴むなど）を活用することで形状、硬さや摩擦などの物理特性データを取得し、シミュレータ内の実物のモデル化とその学習に用いる。

## システム構築（ハードウェア）

前節では研究目的と研究内容を説明したが、本節では実際にそれを実現するために構築したハードウェアシステムについて説明する。



図5 SCARA ロボットプラットフォーム

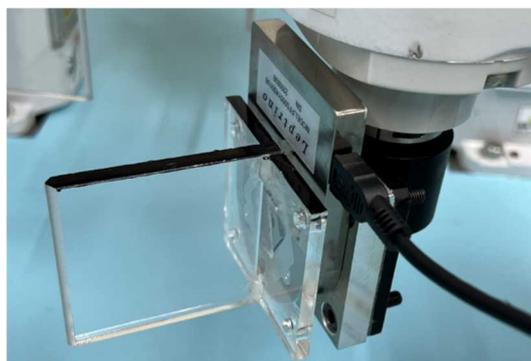


図6 SCARA ロボットプラットフォーム

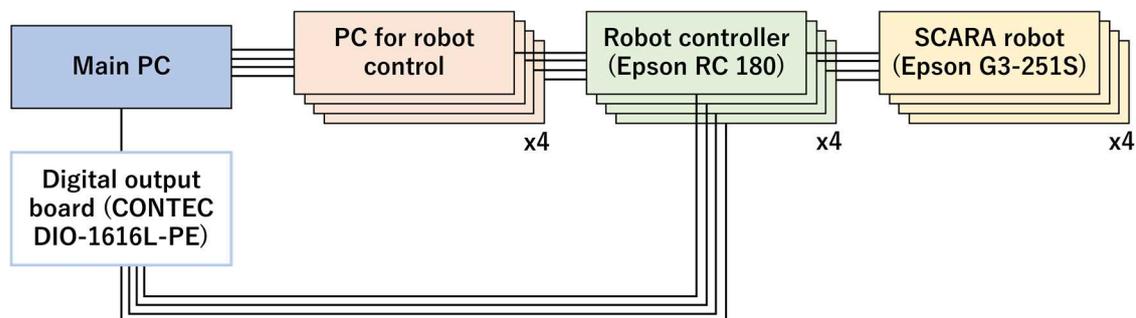


図7 システム構成図

提案者が2021年4月より所属する山梨大学寺田研究室では、牧野洋名誉教授らが提案・開発したSCARAロボット4台を有しており、提案者は図5に示され

たロボットシステムを構築した。左図は 4 台のロボットによって構成されるロボットプラットフォームの全体図であり、右図はロボット単体図（エプソン G3-251S）である。

また、既存の SCARA ロボットは先端が下向きになっているが、本研究では機械学習を十分に活用するため図 6 のような仮エンドエフェクタ（2022 年より本エンドエフェクタに交換する予定）を 4 台の SCARA ロボットに装着し、またその中の 1 台にはロボットと仮エンドエフェクタの間に 6 軸力・トルクセンサを装着し、今後の研究において力・トルクデータのセンシングのみならず、環境学習において欠かせない学習データを取得する機能を果たす重要な一環となる。

提案者が構築したロボットシステムの具体的な構成を図 7 に示す。4 台の SCARA ロボットだけでなく、それらを制御する 4 台のロボットコントローラ、ロボット制御用 PC 及び 4 台のロボットの運動軌道計算・制御と指令送信・データ受信を担当するメイン PC1 台を使っており、さらにメイン PC と 4 台のロボットコントローラの間でデジタル出力ボードを接続し実際に出力されるデジタル信号で 4 台のロボットがバラバラにならず同期が取れた運動を可能にする。

#### システム構築（ソフトウェア） & シミュレータの開発進捗

世界規模の半導体不足の状況により本研究においての力・トルクセンサの納期が長引き、本報告書が作成された 1 か月前ほどにようやく納品された。そのためセンサが納品されるまでの研究期間では力・トルクセンサが必要なロボットマニピュレーションではなくロボット環境の認識とロボットシミュレータの開発、並びにそれを用いたロボット運動制御と衝突回避技術を開発・検証した。

提案者は Python を用いて 4 台の SCARA ロボットの運動制御・衝突回避技術の検証用に図 8 のような運動シミュレータを開発した。順運動学・逆運動学を統合しロボット 4 台の運動を模擬することだけでなく、図 8 の右図のように衝突があるかを判定し、あった場合は該当部分を赤色でハイライトすることも可能である。さらに提案者は図 9 に示された環境認識センサで認識したロボット位

置データに基づき、図 10 のスナップショットに示されるようなエンドエフェクタ衝突回避制御システム技術を開発した。具体的には、マルチエージェントシステムにおける衝突回避アルゴリズムとして近年より注目を集めている Buffered Voronoi Cells を本研究で使われるロボットプラットフォームに適した形に調整し、また失敗を起こす可能性のあるケース（ロボット先端回避に成功するがロボット本体がお互い衝突する場合）を回避するためロボット先端の回避方向に拘束を追加した。

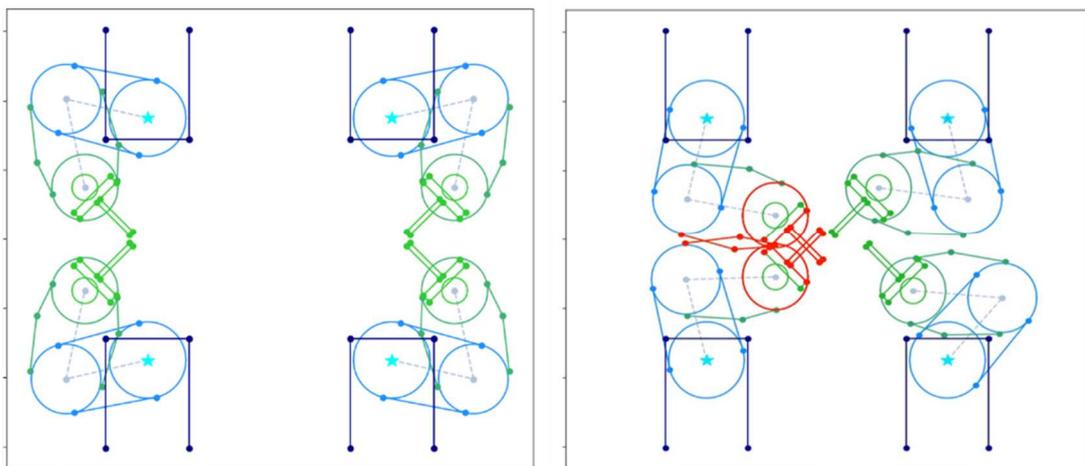


図 8 開発した運動シミュレータ（右図：衝突判定の例）



図 9 本研究に用いた環境認識センサ（ZED 2）

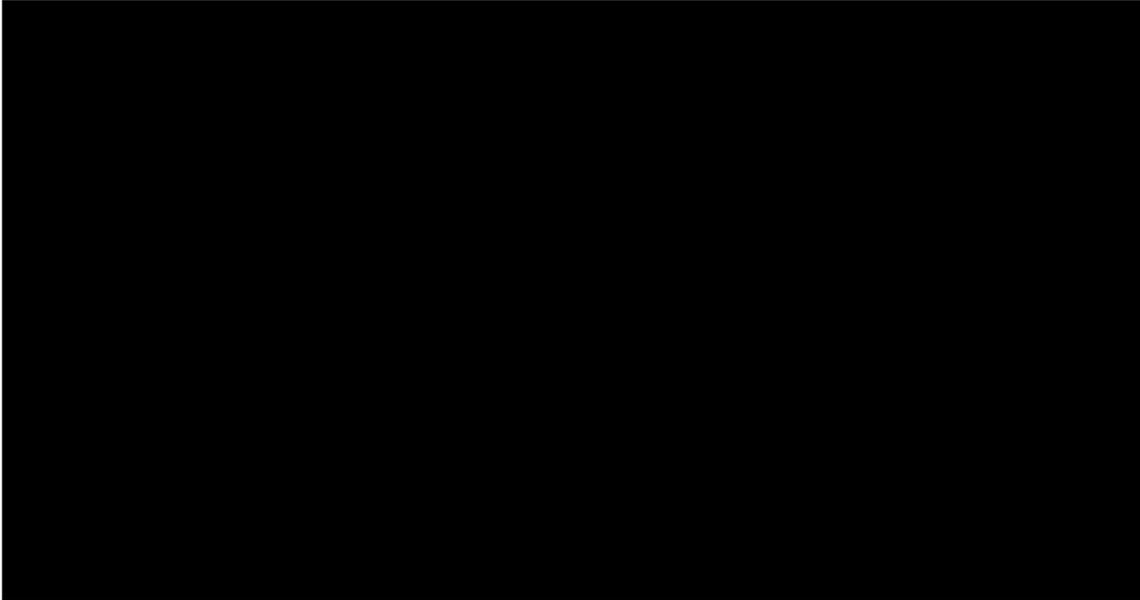


図 10 ロボットの衝突回避制御の結果：成功（後日公表可能）

これまでには上記の通り環境認識と衝突回避アルゴリズムの統合で 4 台の SCARA ロボットの 2D 平面における衝突回避技術の開発と検証を行った。また、力・トルクセンサも納品され運動制御からマニピュレーション、すなわち本研究のメイン内容となる部分にシフトすることができるようになった。現段階では図 11 に示された SCARA ロボットの 3D モデルを実際に開発予定の Gazebo シミュレータ（Ubuntu システム、ROS ミドルウェア）、に導入し、シミュレータ内での 3D モデルに基づくロボット運動と物理特性や力・トルク等のモデルパラメータの調整を行っており、調整が完了次第実際にシミュレータの環境学習の実装と検証に入る予定である。

#### 今後の研究方針・内容

力・トルクセンサの入手が遅れるという予想外の事態があったものの、本研究の計画通りこれまでに環境やハードウェア・ソフトウェア面両方においてのシステム構築がおおよそ整ったことをここまでの内容で説明した。これから 2022 年夏季までには、引き続き計画通りロボットだけでなくマニピュレーショ

ン対象物や環境もシミュレータに統合し、環境学習を行う予定である。それが完成次第ロボットのマニピュレーションタスクをシミュレータ内で実施し、現実に適用できるまで学習を重ね、改良を繰り返す予定である。

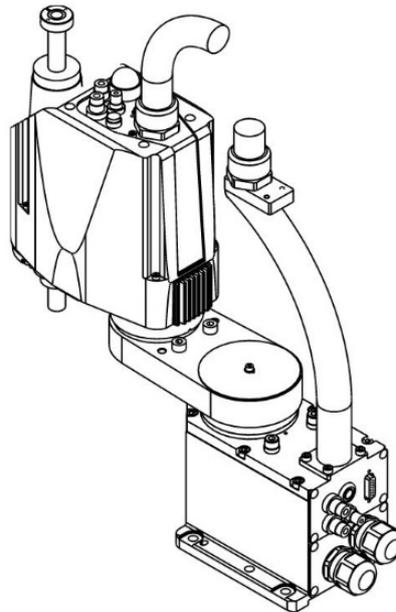


図 11 シミュレータに導入された SCARA ロボットの 3D モデル

## 参考文献

- [1] <https://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/artificial-intelligence/google-large-scale-robotic-grasping-project>
- [2] Levine, Sergey, et al. "Learning hand-eye coordination for robotic grasping with deep learning and large-scale data collection." *The International Journal of Robotics Research* 37.4-5 (2018): 421-436.
- [3] X. Sun, H. Naito, A. Namiki, Y. Liu, T. Matsuzawa and A. Takanishi, "Assist System for Remote Manipulation of Electric Drills by the Robot "WAREC-1R" using Deep Reinforcement Learning", *Robotica*, pp.1-12, 2021. DOI: 10.1017/S0263574721000618
- [4] Hashimoto, Kenji, et al. "WAREC-1—A four-limbed robot having high locomotion ability with versatility in locomotion styles." 2017 IEEE International Symposium on Safety, Security and Rescue Robotics (SSRR). IEEE, 2017.
- [5] D. Zhou, Z. Wang, S. Bandyopadhyay and M. Schwager, "Fast, On-line Collision Avoidance for Dynamic Vehicles Using Buffered Voronoi Cells," in *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 2, no. 2, pp. 1047-1054, April 2017, doi: 10.1109/LRA.2017.2656241.