

知っておきたいHOTキーワード

✓ デジタルツイン ✓ 箱庭 ✓ コモングラウンド ✓ ドローン

いま知りたいデジタルツインの現状と今後

松尾 裕一、青木 健、立川 智章

東京理科大学工学部情報工学科 TUSデジタルツインラボラトリ

このところ、あちこちで「デジタルツイン」という言葉を目にする機会が多くなった。デジタルツイン (Digital Twin、以下DTと表記) は、直感的 (狭義) には、現実空間にある「モノ」「実体」 (Physical Twin、以下PTと表記) の仮想空間 (コンピュータ上) へのコピーを表すが、広義には、PTとDT間のデータ・情報の交換をリアルタイムに行うことにより、PTの監視、予測、制御、最適化などを行うことを目的とする仕組みや手段を表す。

最近、ものづくりにおいては、DT活用による生産性向上や技術継承、工程の最適化といった課題解決への期待が高まっている。また、医療、スマートシティなどへのDT利用も始まっている。しかしながら、DTの応用が各分野で急速に進んだために、DTの定義や解釈に関して混乱が生じているのも事実だ。そこで、本稿ではまず「DTとは何か」、すなわちDTの定義を明確にするところから始め、DTの現状や課題、今後の展開について製造業分野を中心に解説したい。

デジタルツインの歴史と定義

DTを語る際、いろいろな用語が出て来て混乱のもとになるので、まずはそれを整

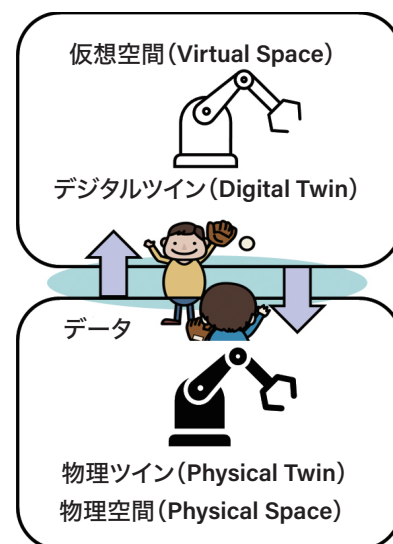
理する。PTが存在する空間を物理空間 (Physical Space) と呼ぶ。PTは、オブジェクト (Object)、エンティティ (Entity)、アセット (Asset) などと言い換えられる。一方、DTが存在する空間は、仮想空間 (Virtual Space)、サイバー空間 (Cyber Space) などと呼ばれ、DTは、コピー (Copy)、レプリカ (Replica)、ミラー (Mirror) などと言い換えられる。英語のTwinは双子の片方を示すのに対し、日本語で「双子」と言うときは両方を示す場合が多いことに注意したい。

図1は、物理と仮想の対応関係を示したものである。DTが仕組みや手段を表す場合は、DT、PT、それらの接続の3つの要素が含まれる。

1990年代に端緒

DTの概念を最初に唱えたのは、2003年、当時ミシガン大のGrievesと言われていたが、それからしばらくの間はあまり注目されず、DTをはじめて明確に定義したのは、2012年、NASAのGlaessgenとStargelであり、「利用可能な最良の物理モデル、センサーの更新、履歴などを使用する完成時の車両またはシステムのマルチフィジックス、マルチスケール、確率的シ

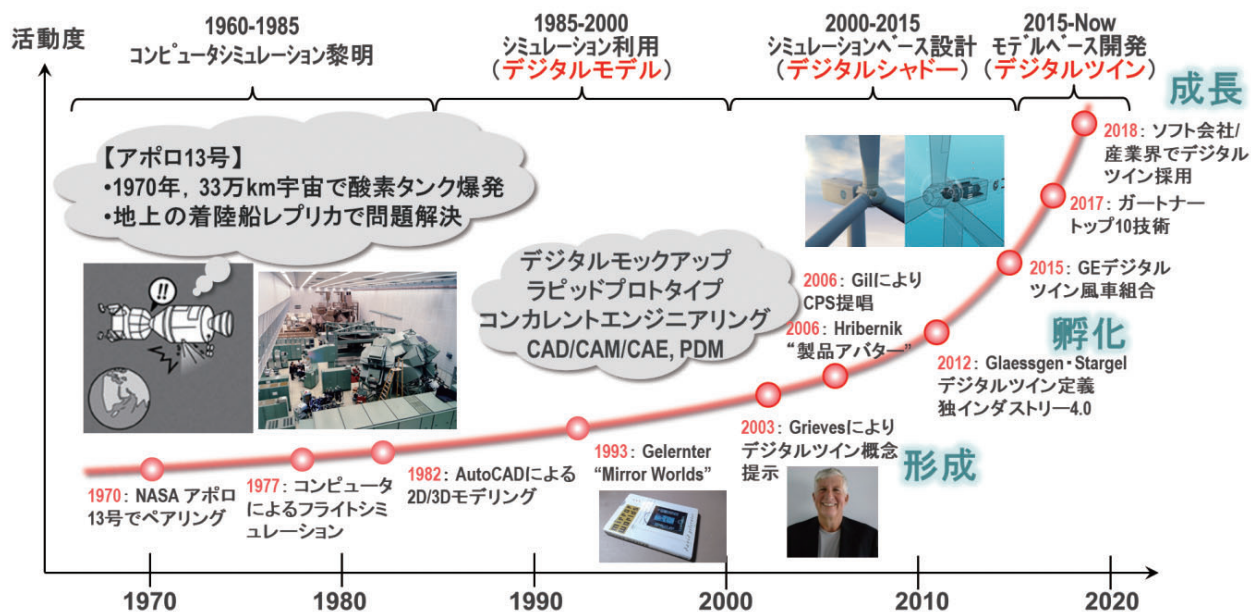
図1 物理と仮想の対応関係と用語



ミュレーション」とした¹⁾。ただ、この定義は、当時としては妥当だったものの、現代のDTの定義とは異なり、「DTはシミュレーション」という解釈の遠因となった。

その後思いのほかいろいろな (勝手な) 定義が現れたため、2018年頃から標準化の機運が高まり、製造業に関しては2021年にISO 23347が発行された。そこでは、DTは「適切な同期速度で要素とそのデジタル表現間の収束を可能にする手段を備えた観察可能な製造要素のデジタル表現」と定義されている。ただし、「要素」に

図2 デジタルツインの発展経緯



は、人員、設備、材料、プロセス、環境、製品、サポート、ドキュメント等が含まれるとし、広い適用範囲を見ていると同時に、同期や収束といった言葉が使われており、物理と仮想の「連携」が前面に出たものとなっている²⁾。

図2は、DTの発展経緯をデジタルの大きな流れとともに示したものである。DTの読み物には、1970年のアポロ13号の宇宙船爆発事故に地上のレプリカを用いて対応したのがDTの始まりとされているが、これは後付けの理屈に近く、1990年代のCAD/CAM/CAE、それらを使ったデジタルモックアップやラピッドプロトタイピングといったデジタル化やコンピュータ化の進展の中から生まれて来たのがDTであると云っても過言ではない。

また、近年DTが急発展した背景として、デジタル・トランスフォーメーション(DX)に対する世の中の流れや期待、道路・橋梁・下水道などの社会インフラの老朽化問題、モノからコトへのサービスのXaaS化、機械学習に代表されるデータ科学の発展などがあると言われている。これに、コロナ禍によって生じた不確実性への対応、サプライチェーン強靱化への要請などが加わり、物理と仮想の距離を縮める実務的な

必要性から今日、DTに強い注目が集まっているという見方ができるであろう。

モデルと特性、応用の現状、意義

Grievessは、DTは3つの基本要素、すなわち物理部分、仮想部分、接続部分から成り、図1に示したように、物理から仮想にはデータが、仮想から物理には情報が移動するとした³⁾が、これがDTの一番わかりやすくシンプルなモデルである。イラストに示したように「リアルとデジタルのキャッチボール」と捉えればイメージしやすいので

はないだろうか。

その後、Taoら⁴⁾やThelenら⁵⁾がもう少し手の込んだ(実用を意識した)5要素モデルを提案している。Taoらの5要素モデルでは、DTは、物理、仮想、接続の3要素に加え、データ、サービスの部分が加わっている。Thelenらは、物理、仮想に加えて、更新エンジン(物理⇒仮想)、予測エンジン(仮想⇒物理)、最適化エンジンの5要素を基本とするモデルを提案している。

一方、DTとは別に2006年、NSF(アメリカ国立科学財団)のGillがサイバーフィジカルシステム(Cyber Physical System、

図3 デジタルツインの仕組みに関するTUSモデル

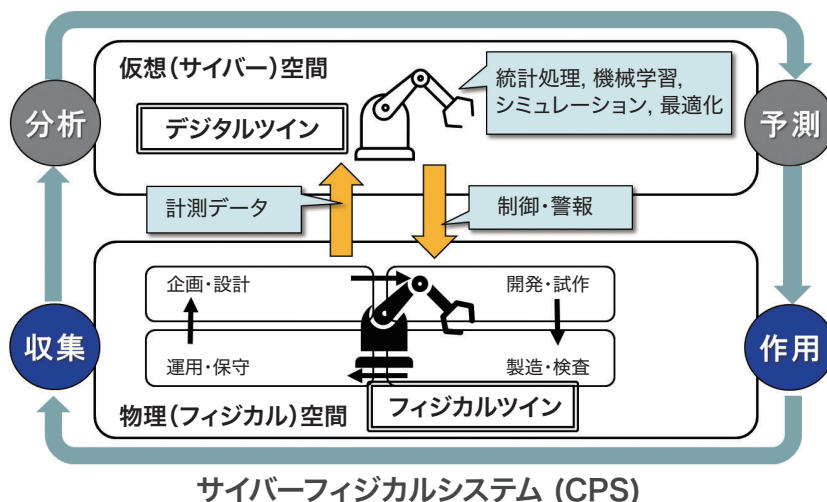
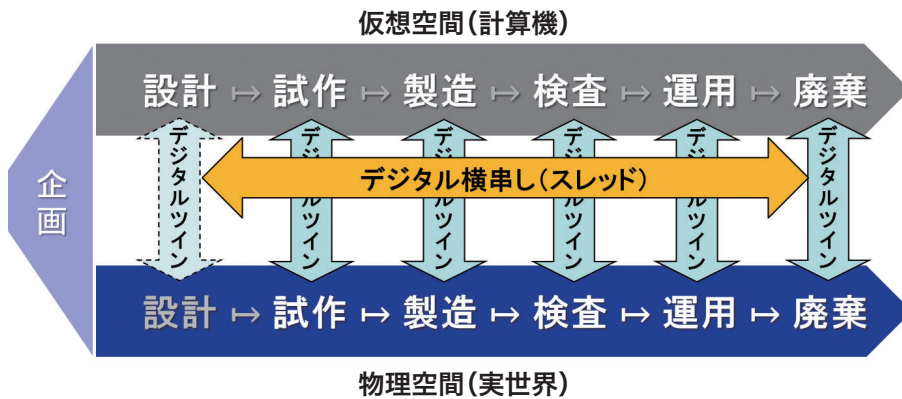


図4 ものづくりデジタルツインの工程間の連携に関するTUSモデル



以下CPSと表記)を提唱した⁶⁾。CPSは、物理空間からデータを収集し、仮想空間で分析・予測し、物理空間にフィードバックするというループを回す組込み系の仕組みが元祖になっている。

広義のDTの仕組みも基本的には同じであるが、DTの場合は、デジタルモデルやモデリングを強く意識する点がCPSとは異なる。また、OT (Operational Technology) 側からアプローチの帰結がCPS、IT (Information Technology) 側からの帰結がDTという理解・整理も可能であろう。

我々の考えるものづくりデジタルツインの仕組みの描像を図3に示す⁷⁾。DTとPTの違いを明確化し、CPSループが回るといことがわかるようにしている。

持つべき3つの特性

DTの持つべき主な特性として以下の3点が挙げられている⁸⁾。

- 1) 自己進化 (Self-Evolution) または共進化 (Co-Evolution) : リアルタイムで物理ツインから得た情報を活用し、自己適応・自己最適化により成長する。
- 2) 同期性 (Synchronization) : PTとDTの状態がリアルタイムに同期 (サイバーフィジカル同期) する。
- 3) 自律性 (Autonomy) : AIを活用し、人手を介さず機器が最適な意思決定・選択を行う。

無論、これらの特性は最終形、理想形であり、実際はいろいろなレベルのDTがあり得るし、提案・実践されている。実用面では、PTのデータを収集し、可視化したり監視したりする機会が多い。Krizingerら⁹⁾はこれを「デジタルシャドウ (Digital Shadow)」と呼んだ。

また、製品のDTは、プロダクト・ツイン (Product DT)、生産整備のDTは、プロダクション・ツイン (Production DT) と呼ばれる。さらに、製品が未だない設計段階でのDTはプロトタイプ (Prototype)、PTが存在する試作から下流のDTはインスタンス (Instance) と呼ばれる。規模的には、部品やユニット単位のDTから、システムオブシステムレベルのDT (SoS DT)、DTどうしの連結 (フェデレーションDT) などがあり得る。また、物理空間へのフィードバックも、警報、制御、意思決定といった様々な形態、ロボットのようなリアルタイムから設計変更のような週単位まで様々な時間スケールが考えられる。

ものづくりを考えたとき、設計から製造、運用保守へと工程が進んで行き、DTはPTとともに共進化するというシナリオが理想形であるが、これだと実体が掴みにくいため、我々は「各工程でDTを作ることができて、それらにデジタルの横串を通す (データ連携する) のがデジタルスレッド (Digital Thread)」という工程モデルを作った。図4に我々の考えたものづくりデジタルツイン

の工程間の連携に関する描像を示す⁷⁾。Taoら⁴⁾によれば、設計2割、製造3割、運用保守4割といった適用割合であり、運用保守では、DTを使った予知保全 (Predictive Maintenance) が最近では注目を集めている。

都市と医療における成長が著しい

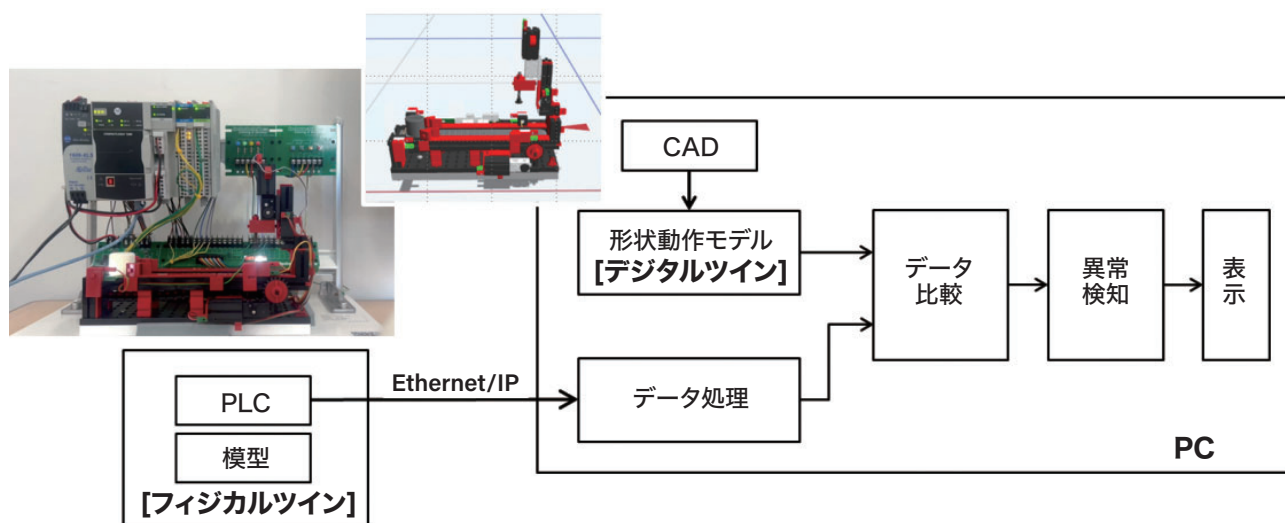
上記では、DT応用の6割を占める製造業を中心に説明したが、今日、DTの応用範囲は、輸送、エネルギー、都市、医療、海洋、石油、農業、物流、電力、教育など多方面に及んでいる。特に都市と医療は成長が著しい。都市では、スマートシティと呼ばれる都市全体をDT化する試みが、バーチャルシンガポールや国交省のPLATEAUをはじめ、世界各地で進んでいる。医療では、個別化医療に向けたデジタルヒューマンの構築が進められている。

これらの応用分野の製造業との違いは、目的や規模もさることながら、大きな違いはデータの扱いと人間との係わり方である。特に医療や都市では個人情報や機密情報の観点でデータの慎重な扱いが必要である。また、判断や意思決定は多くの場合人間が行う必要があることも念頭に置く必要がある。

では、こうしたDTがどんな場面・状況で役に立つのだろうか。

まずは、リアルタイムで機械やシステムの状態を知りたいという場合がある。これはIoTとほぼ同じ路線である。次は、直接データを取れない、危険でできない、試しに何かをやってみたい、リスクを知りたいといった場合である。表面状態から内部状態を予測する (仮想計測、バーチャルセンサ)、異常データが少ない場合の異常検知、仮想的なテスト (what-if分析)、仮想試運転 (バーチャル・コミッショニング) などがある。現状状態から将来予測したいという場合にもDTは有効であり、特別に予測的DT (Predictive DT) と呼ばれることもある。

図5 ベルトコンベア模型を対象としたDTによる異常検知システムのブロック図



要素技術とアーキテクチャ

DTの実現に必要な技術(Enabling Technologies)は、応用分野によっても違ってくるが、一般に言われているものを大きくくると、分析技術、モデリングとシミュレーション技術、接続技術、同期技術、セキュリティ技術、可視化技術などになる。とりわけ最近発展の著しいIoT技術、通信技術、ビッグデータ処理技術、機械学習技術、クラウド技術、XR技術などのNew ITと呼ばれる新興技術がDTの発展を牽引したと言われている。

中でも、IoT技術は、家電、自動車などさまざまな「モノ」をインターネットに繋ぐ技術で、1999年にMITのAshtonがIoTという言葉を使用して以来、2025年には世界のIoTデバイスは70億以上になると予測されており、DT発展の大きな原動力の一つである。

DTのアーキテクチャとして、物理層、通信層、モデル層、機能層から成る4層モデルなどが提案されている。今日、実務で使えるDTの構築は、もはや単一ベンダーでは難しいという認識が一般的であり、必要な機能を一覧表から選択し仕様を決めて行く機能周期表といったツールも登場している¹⁰⁾。

課題と研究・教育事例、今後の展望

DTは未だに発展途上の技術・仕組みであり課題もある。ここでは身近な課題を3点挙げる。

第一は、導入に関する課題で、DTのメリットの検証と定量化が不十分な点である。上記でDTのメリットや効用について述べたが、コストと利益のトレードオフに関する実績データはほとんど公表されていない。実際、現状の良く知られている成功事例は、航空機、鉄道、海運、電力、都市といった大規模で複雑な製品・対象に係わる分野、すなわちスケールメリットが働く分野のものが多く、結果として、企業がDTを導入する際のスタート点や初期投資量が不明であり、スモールスタートが困難という話はよく耳にする。

第二は、センサやデータに関する課題で、センサの最適な取り付け位置や数は自動的に決まらない、センサ自体の異常が発生した場合の対処法、大量に取得されたデータの処理時間とコスト、といった問題である。センサ位置は、簡易なDTを構築してから調整して行くという手段もあり得るが、そうしたノウハウはあまり蓄積・公開されていないのが現状である。

第三は、構築に関するもので、モデリン

グの忠実度の調整(勘所の把握)、既存のIT環境との統合、日本型ものづくりへの適応、様々な専門知識を持つ人材の育成といった課題である。特に、匠の技や現場力と称される日本のものづくりの底流をDTにどう反映させるかは重い課題である。

東京理科大における先駆的取組み

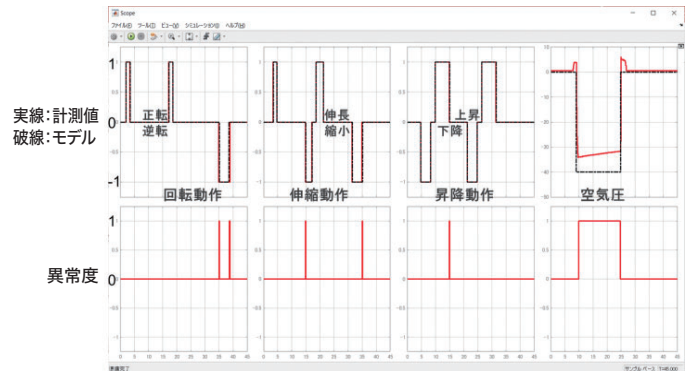
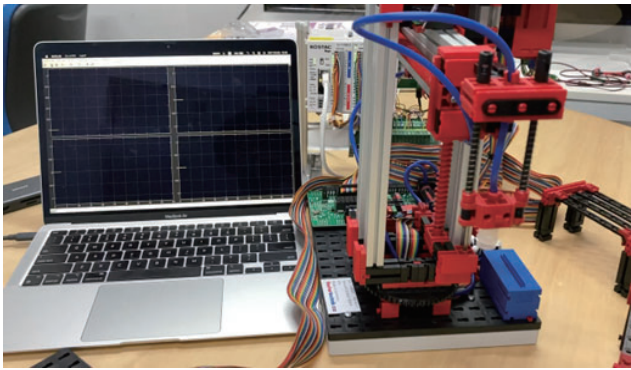
東京理科大では、これらの課題克服に向けて幾つかの先駆的取組みを行っている。

まず、工場などの実務においてDTを構築しPOCを実践する際、実物の機械や設備を利用するのは安全性やコスト面で難しいこと、試行錯誤によりモデリングの勘所を掴むのが重要なことに鑑み、PLCで制御する機械等の模型を使い、Matlab/Simulink、Emulate3D、Unity3Dといったツールでハンドリングするシステムを構築し、DTにより簡単な異常検知を行う実験を行っている。

図5は、模型を用いたDTによる異常検知システムのブロック図を示す。模型やPLC、ソフトウェアを変えることで、様々なテスト環境を構築することができる。

図6は、グリッパーロボットの動作の異常検知を行った例である。図6右上の図は、ロボットの動作(回転、伸縮、昇降)と空気圧の実際(赤線)とモデル(黒線)の比較を

図6 グリッパーロボット模型を対象としたDTによる異常検知システムと検知結果



示したもので、右下の図は異常度を示したものである。模型の実動作はDTモデルと微妙にずれるため、ところどころで動作異常が検出されている。空気圧は、モデルの値ほどには下がっていなかったため異常判定が出ていない。異常をLEDの点灯に反映させることでCPSサイクルを構築できる。

もう一つの取組みは、教育や人材育成である。上記実験からわかったことは、DTの仕組みはIT技術とOT技術の融合という側面があり、OTの理解が重要ということである。そこで我々は、ITOT融合教育「YouGo」と題して、学科の演習授業にOT演習を取り入れることにした。

具体的には、PCとPLCを接続し、ラダーコードを自作して模型を動かすという内容で、学生がOT技術に容易に馴染めるようにした。また、DT構築には多くの専門知識が必要なことから、STEAM教育の方法論を取り入れたバーチャルファクトリを構築し

ている。STEAM教育とは、Science、Technology、Engineering、Arts、Mathematicsを学際的に学び、ICTを通じて自発性・創造性・問題解決能力の醸成を目指すものであり¹¹⁾、コロナで普及したりモートアクセス環境を通じてオンラインで教材にアクセスし、DTの仕組みに触れることで、総合力、課題解決力を効率よく身に付けることを狙っている。

今後の展望など

以上、DTの定義、現状、課題などについて論じてきたが、その捉え方や解釈、実装などにはある程度の幅や独自性があっても良いのだと思う。なぜなら、DTは手段であって目的ではないし、もともと各種の技術をうまく使った相乗効果を引き出すのがDTの狙いだからである。したがって、今後必要になるのはDTの理屈の深堀りではなく、ユースケースの集積やノウハウの共有

であろう。我々は、日本機械学会計算力学部門の配下に「ものづくりデジタルツイン研究会 (<https://dtlab.it.tus.ac.jp/dtim/>)」を作り、議論を開始している。

また、DTには、リアルとデジタルの融合、物理駆動とデータ駆動の融合、ITとOTの融合といったいろいろな「融合」が含まれ、実現には「異分野融合」や「多面的思考」が不可欠になる。生産性向上や低炭素持続可能性などの社会課題の解決に向けた起爆剤となる可能性も秘めており、DTの今後の動向に注目して行く必要がある。

謝辞

DTの実験や教育を進めるにあたり、株式会社テクノプロ テクノプロ・デザイン社の伯田誠氏、ロックウェルオートメーションジャパン株式会社の高松典彦氏にご協力いただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献：

- 1) Glaessgen, E. and Stargel, D.: The digital twin paradigm for future NASA and U.S. Air Force vehicles, AIAA Paper 2012-1818, 2012
- 2) ISO 23247: Automation systems and integration - Digital twin framework for manufacturing, 2021
- 3) Grieves, M.: Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication. White Paper, 2014.
- 4) Tao, F., et al.: Digital Twin Driven Smart Manufacturing, Academic Press 2019.
- 5) Thelen, A., et al.: A comprehensive review of digital twin — part 1: modeling and twinning enabling technologies, Structural and Multidisciplinary Optimization, Vol. 65, 2022.
- 6) Cyber Physical Systems Public Working Group: Framework for Cyber-Physical Systems, Release 1.0, NIST 2016.
- 7) 松尾裕一、藤井孝蔵: 東京理科大学におけるデジタルツイン人材の育成、日本機械学会誌 Vol.125, No.1248, 2022.
- 8) Sharma, A., et al.: Digital Twins: State of the art theory and practice, challenges, and open research questions, Journal of Industrial Information Integration Vol. 30, 2022.
- 9) Krzinger, W., et al.: Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification, IFAC PaperOnline, Vol. 51-11, 2011.
- 10) Schalkwyk, P.: Digital Twin Capabilities Periodic Table, Digital Twin Consortium, 2022.
- 11) Yakman, G.: What is the point of STEAM? –A Brief Overview. Notes, 2010.

デジタルツイン時代のプラットフォームとしての箱庭

森 崇 合同会社 箱庭ラボ

箱庭とは、統合シミュレーションを実現するためのプラットフォームである。単一のシミュレータではなく、異なる機能やプログラム、シミュレータなどを統合する「シミュレーション・ハブ」として機能する(図1)。

ここで言う統合シミュレーションとは何か。従来のシミュレータの場合、例えば、ロボットの物理挙動を再現するGazeboや、視覚的な再現性に優れたUnity、Unreal Engineのようなシミュレータは、それぞれ特定の用途に特化して利用されることが一般的である。これらのシミュレータは、単体で想定されるユースケースに対応することを前提に設計されており、その目的においては最適な選択肢であると言える。

一方で、これからの時代、デジタルツインやデジタルライフライン¹⁾のように、多様な分野が連携する複雑なシミュレーション(これが統合シミュレーション)が求められる可能性が高まっている。例えば、以下のようなユースケースに対応できる柔軟な統合システムが必要である。

- ロボットとドローンの協調動作: 効率的な作業を実現するためのシミュレーション。
- 産業オートメーションとIoTデバイスの連携: 機器間の通信や動作をリアルタイムで検証し、製造業DXでの生産プロセス最適化に利用する。
- AIエージェントとの協働: 自律的な意思決定や動作をシミュレーションし、最適なアルゴリズムの検証、安全性の検証に利用する。

このような複雑なシミュレーションを実現するために、既存のシミュレータを拡張することは可能ではある。しかし、特定用途に特化したシステムに陥りやすく、汎用性を



欠く問題がある。また、オープンソースのシミュレータでは、コードの理解や環境のカスタマイズに高度な専門知識が必要であり、導入や改造に時間とコストがかかることが課題となる。さらに、分野ごとに独立したシミュレータが複数あり、それらを繋げて1つの時間で動作するようなヘテロ・シミュレータ環境も今後必要となる。

箱庭は、これらの課題に対して、様々な分野のシミュレータやプログラムを統合できる柔軟で汎用的なプラットフォームを目指している。その大きな特徴が、オープンソースであることだ。オープンソースであることで、コードの透明性が確保され、異なる分野のエンジニアが開発に参加できる。また、コミュニティを通じて様々な専門知識が集約されることで、新たな技術や要件にも柔軟に対応できる可能性が期待される。

こうした特性により箱庭は、異種シミュレータ間の連携を促し、多様な分野のニーズに対応する柔軟で汎用的な統合基盤として、未来を切り拓く存在となりつつある。

箱庭の位置づけ

デジタルツインは、現実空間の物理的な対象(機械、建物、プロセスなど)を仮想空

間に再現し、シミュレーションやモニタリングを通じてリアルタイムにデータを活用するための考え方である(図2)。つまり、デジタルツインそのものは概念であり、それを具体的に実現するには、適切な技術やツール、プラットフォームが必要となる。

特に、現実空間と仮想空間を効果的に繋げるためには、いくつかの重要な課題をクリアする必要がある。

デジタルツインにおける課題

・データ交換の互換性の確保

現実空間と仮想空間の間でデータを交換する際、プロトコルや通信方式が違っていても統一的に扱える仕組みが求められる

・システム導入の容易化

新しいシステムや技術を導入する際に、初期設定や運用が簡単で、追加の教育コストや高度なスキルを必要としないことが重要である

・システムの拡張性の確保

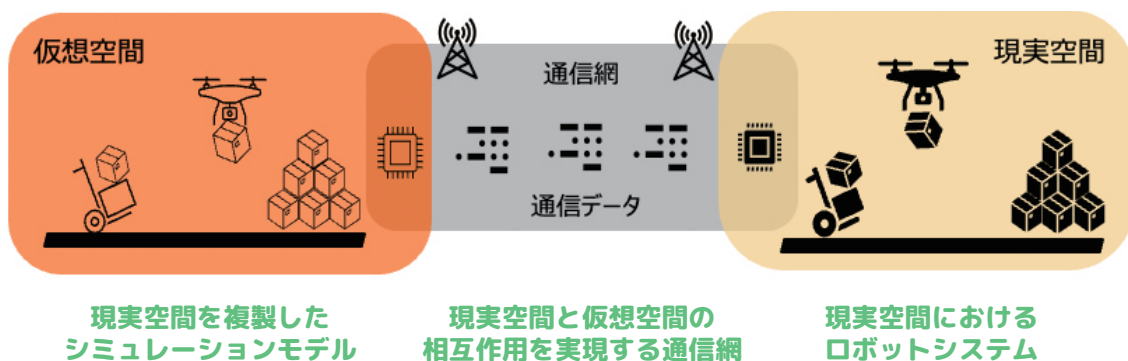
必要に応じて機能の追加やシステムをスケールアップできる柔軟性が求められる

・通信のリアルタイム性の確保

通信遅延を最小化し、リアルタイムでデータの授受を行う技術が必要となる場合が多い

デジタルライフラインとは、ドローン航路や自動運転支援道などで構成される、デジタル時代における社会インフラの総称である。(https://bp-platinum.com/platinum/view/files/sps/trend/tr20231226-1/))

図2



・多様な開発環境・ネットワーク構成への対応
多様なプログラミング言語や開発環境 (Windows/Mac/Linux)、およびネットワーク構成 (Wi-Fiや5Gなど) に対応し、開発者が誰でも柔軟に活用できることが求められる

柔軟で拡張性の高いアーキテクチャ

デジタルツイン時代における箱庭の位置づけは、アーキテクチャレベルで実装を支える技術と言える。

箱庭は、用途に応じた柔軟で拡張性の高いネットワークアーキテクチャを指向している。大きく4つの構成から成る (図3)。

1. 基本構成

単一のパソコン上で複数のシミュレータを統合し、簡易的かつ効率的なシミュレーションを実現する。小規模での利用に適し

ており、迅速なシステム検証に最適である。

2. 負荷分散構成

大規模なシステム運用の課題に対応するため、箱庭コンダクタ (サーバー/クライアント) を通じて負荷を分散させながら、シミュレーション時刻同期とデータ通信を可能にする。この構成により、負荷の集中を回避しながら高いパフォーマンスを維持する。

3. リアル連携構成

現実空間に存在するIoTデバイスやARデバイスなどをシミュレータと結びつけるために、箱庭ブリッジという箱庭コンポーネントを活用する。この構成により、様々な通信プロトコルを吸収し、仮想空間と物理空間のリアルタイムな相互作用を実現する。

4. クラウド連携構成

クラウド環境に独立したシミュレーション環境を設置し、基本構成のシミュレータ

と緩やかに接続し、必要なデータだけを効率よく交換する構成を目指している。この構成は、離れた拠点間の統合や計算リソースの効率的な利用を想定している。

このアーキテクチャにおいて、リアル連携構成は、デジタルツインを実現する構成として活用できる。さらに、箱庭のアーキテクチャは、分散構成やリアルタイム同期といった複雑な課題に対応する強力な基盤を提供するだけでなく、デジタルツインの可能性を広げ、新たな価値創出を促進する原動力となり得る。

機能と適用範囲、応用事例

箱庭はシミュレーション・ハブとして機能するために、中核となる「箱庭コア機能」を提供している。これは、いわばシミュレータ用のリアルタイムOSのような役割を果たし、複数のシミュレータやシステムを連携させ、統一されたシミュレーション環境を実現するための基盤である。

図4に示されているように、箱庭コア機能は以下の5つの要素で構成されている。

コア機能

1. 箱庭アセット

既存のシミュレータやプログラムを、後述する箱庭APIを通して箱庭アセット化することで、異なるシミュレータやシステム間の通信を統一的に扱えるようにする。例えば、Gazeboで物理シミュレーションを行いながら、Unityでのビジュアライズを統合

図3

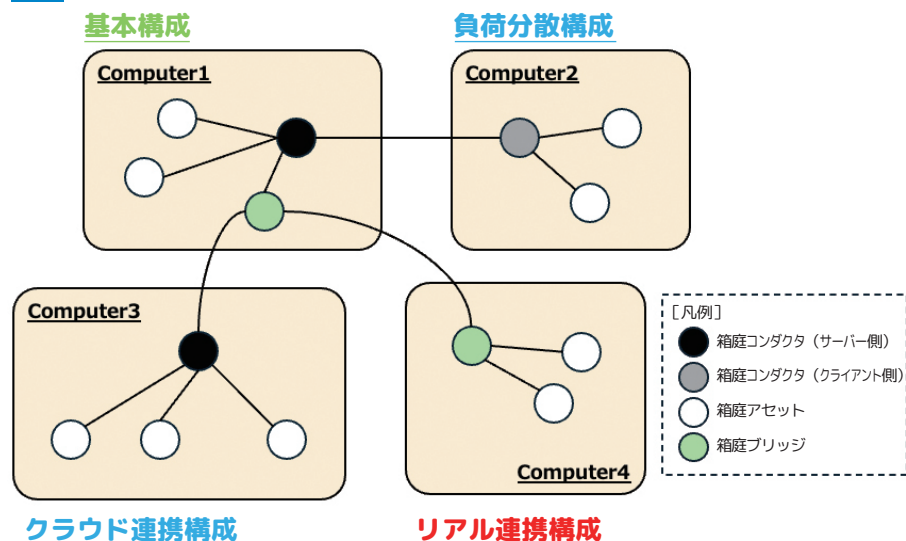
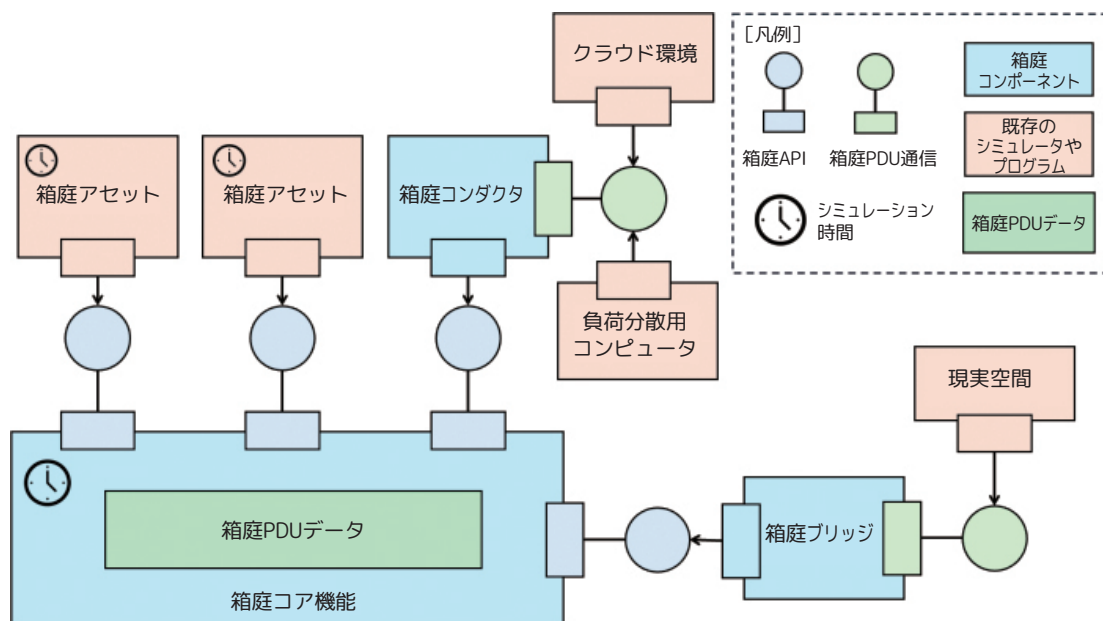


図4



的に運用できる環境を構築することが可能である。

2. 箱庭API

箱庭APIは、モジュール性を実現するための中核的な役割を果たしている。また、APIは、異なるプログラミング言語や環境に依存しない設計（例：Python、C/C++、C#、Rust、Elixirなどへの対応）を採用しており、幅広いカスタマイズニーズに応えることができる。

3. 箱庭時刻同期

箱庭アセット間のシミュレーション整合性を保つためには、時刻の同期が必要である。箱庭は分散シミュレーションを可能にする独自の「時刻同期機能」を備えており、リアルタイム性と再現性のあるシミュレーションを実現する。

4. 箱庭PDUデータ

箱庭アセット間の通信データの形式を標準化している。特に、ROS IDL (Interface Definition Language) を用いることで通信データの構造を共通化し、各システム間でスムーズなデータ交換を実現する。また、箱庭は多様な通信プロトコル（例：ROS、Zenoh、MQTT、UDP、共有メモリ）に対応しており、異なる環境や要件に柔軟に適応できる。

5. 箱庭コンポーネント

箱庭コンダクタや箱庭ブリッジといった主要なコンポーネントを提供する。箱庭コンダクタは、シミュレーション環境全体の制御を担い、時刻同期や負荷分散を実現する。一方、箱庭ブリッジは、仮想空間と現実空間を繋ぐ中継役として機能し、リアルタイム通信を円滑に行う。

適用範囲

箱庭のアーキテクチャは、複数のシミュレータやシステムを統合し、統一されたシミュレーション環境を構築する基盤として機能する。製造業や物流の最適化、教育現場での技術者育成、さらには医療や宇宙開発に至るまで、多様な分野で新たな価値を創出するポテンシャルを持つ。

一方で、このアーキテクチャを実現するためには、多様な技術要素を適切に組み合わせる必要がある。これらの技術要素を「技術軸」として整理し、箱庭の主要コンポーネントにマッピングすることで、全体像がより明確に見えてくる。

特に、デジタルツインの実現において重要な役割を果たす箱庭のコンポーネントには、箱庭アセット、箱庭ブリッジ、IoTデバイスが挙げられる。図5に、それぞれの技術

軸を色分けし、これらの主要コンポーネントと技術軸の関係性を示す。

■箱庭アセットに関連する技術軸

「箱庭アセット」は、異なるシミュレータやプログラムを統合するための中核的なコンポーネントであり、以下の技術軸がその実現において重要な役割を果たす。

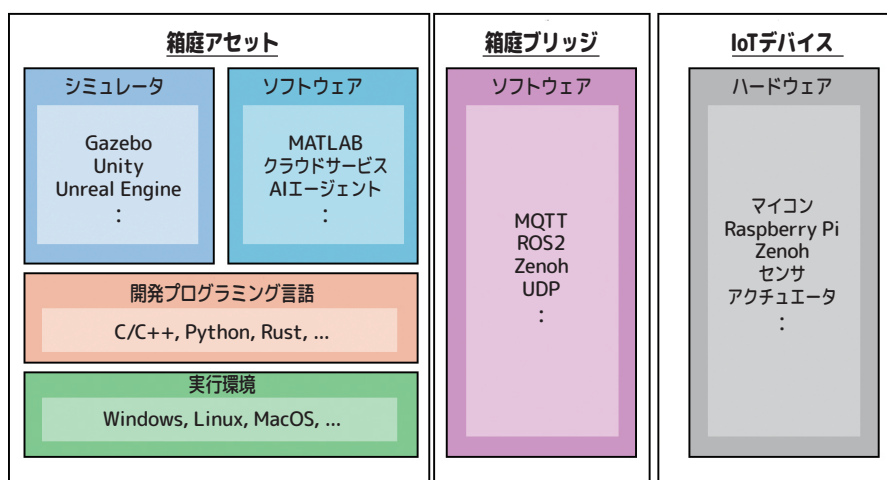
・シミュレータ

シミュレータは、現実世界を仮想空間に再現する基盤であり、箱庭の機能において欠かせない要素である。例えば、GazeboやUnityといったシミュレータを統合することで、ロボットやドローンの動作をリアルタイムで再現し、シミュレーションの一貫性と精度を確保する。これにより、複数のシミュレータ間のデータ連携を可能にし、複雑なシステムの挙動をより正確に予測できる環境を提供する。

・ソフトウェア

MATLABやAIエージェントなどの専門的な解析・設計ツールとの連携は、箱庭の適用範囲を拡張する上で重要な役割を果たす。これにより、シミュレーション環境内でのAIアルゴリズムの学習や、物理モデルの最適化が容易になる。ソフトウェア連携を通じて、開発者は仮想空間内で得られた成果を現実世界的设计や運用に即座に反

図5



映させることができる。

・プログラミング言語

多様なプログラミング言語（Python、C++、Rustなど）への対応は、開発者の自由度を高め、箱庭を活用するためのハードルを下げる。異なるバックグラウンドを持つ技術者が、各自の得意とする言語で開発を進められる環境を提供することで、異分野のコラボレーションが促進される。また、この柔軟性は、箱庭を複数の分野やシステムにまたがる統合基盤として活用する際に不可欠な特性である。

・実行環境

Windows、Linux、MacOSといった多様なOSへの対応は、箱庭の実用性と普及性を支える重要なポイントである。異なる環境でも統一された動作を保証することで、開発者や運用者は柔軟に環境を選択でき、開発の初期コストや運用上のリスクを大幅に軽減できる。この対応力は、特に産業界や教育分野など、多様なニーズを持つユーザーにとって大きな価値を持つ。

■デジタルツインを支える技術軸

「デジタルツイン」を実現するためには、仮想空間と現実空間を繋ぐ「箱庭ブリッジ」の役割が極めて重要である。このコンポーネントを支える技術軸として、以下の2つが挙げられる。

・通信プロトコル

通信プロトコルは、異なるシステム間で

のデータ連携を可能にする基盤技術である。箱庭は、MQTT、ROS 2、Zenoh、UDPなど多様な通信プロトコルに対応しており、デバイスやシステム間のデータ交換をシームレスに行える。これにより、現実空間と仮想空間のリアルタイム同期を実現し、異種システム間の連携が円滑に進む。例えば、Zenohは低遅延通信を可能にし、農業用ロボットやIoTセンサーが環境データをリアルタイムに仮想空間へ送信するシナリオで利用される。

・IoTデバイス

IoTデバイスは、現実空間のデータを仮想空間に反映する役割を担う重要な技術軸である。箱庭ブリッジを介することで、Raspberry Pi、センサー、アクチュエータ、ロボットなど多様なデバイスをデジタルツイン環境に統合できる。この柔軟性により、現実世界の状態を正確かつタイムリーに仮想空間で再現できる。例えば、Raspberry Piが土壌センサーから収集したデータを箱庭ブリッジ経由で仮想空間に送信し、農業分野での最適化やモニタリングに活用される。

応用事例

箱庭のアーキテクチャとコア機能、さらにそれを支える6つの技術軸は、幅広い分野への応用を可能にしている。以下の具体例は、それらがどのように活用され、新たな価値を生み出しているかを示すものである。

■ETロボコンのシミュレーション環境

2020年のコロナ禍において、ETロボコンは仮想環境での開催を余儀なくされた。TOPPERS/箱庭WGはJASAのETロボコン実行委員と協力し、ETロボコン・シミュレータを開発（図6）。μs（マイクロ秒）以下の精度で動作するマイコンシミュレータAthrilと、Unity上のロボットシミュレーションをリアルタイムかつ高い再現性で統合した。

このシステムにより、競技会の継続が可能となり、遠隔地からの参加も実現できた。箱庭の時刻同期機能がその柔軟性と信頼性を発揮した。

■ドローンのシミュレーション環境

ドローンの飛行挙動や複数機体の協調動作の検証においても、箱庭はその力を発揮している。1ms単位の高精度時刻同期やPX4との通信プロトコル(MAVLink)連携により、リアルタイムかつ再現性の高いシミュレーションを実現。また、物理モデル、制御、ビジュアライズを分離し、それらを箱庭アセットとして統合するアーキテクチャを採用。これにより、ARデバイス上でのドローン操縦訓練環境など、多岐にわたる応用を可能にしている。

図7の左側は、Visual Studio Codeの画面である。箱庭ドローンシミュレータを実行するための環境であり、箱庭およびPX4（オープンソースのフライトコントロー

図6



右上には、MacBook Pro上で動作する箱庭の仮想空間が表示されている。この空間では、現実のロボットのツインが仮想空間に再現される。また、バーチャルドローンが飛行しており、信号や荷物が存在する場面がシミュレートされている。さらに、「QUEST3」の位置情報もバーチャル空間内で青色のオブジェクトとしてフィードバックされ、バーチャルとリアル双方の位置関係が統合されている様子が視覚的に表現される。

箱庭の現状と課題、そして未来

現状

箱庭は、複数のシミュレータや異なるシステムを統合するシミュレーション・ハブとして、その価値が徐々に認知されつつある。特に、以下のような成果が挙げられる。

・シミュレーション環境の多様性

ETロボコンやドローンシミュレーションなど、異なる応用分野において、その柔軟性と汎用性を実証している。

・技術的な優位性

高精度な時刻同期機能や、通信プロトコルへの柔軟な対応を通じて、リアルタイム性と信頼性の高いシミュレーション環境を提供している。これらの技術は、学会向けに論文や発表が進んでいる。

・オープンソースの普及

JASAコモングラウンド委員会／ドローンWG、TOPPERS/箱庭WG、合同会社箱

ラー)が動作している。シミュレータの設定や制御プログラムの編集がここで行われる、右上はUnity画面であり、ドローンの動作を可視化するためのUnityビジュアライズ部分である。ドローンや周囲の3D環境の状況をリアルタイムで確認することができる。右下のQGroundControl (QGC)の画面で、地上局としてドローンを遠隔操作の様子を示している。ドローンの飛行経路、位置、速度、状態を監視しながら操作を行うことが可能である。

デジタルツインの構築と運用

デジタルツインの課題であるデータ交換、リアルタイム性、拡張性の確保に対し、箱庭は次の解決策を提供している。

1.データ交換の互換性:箱庭PDUとZenoh、ROS2を活用し、既存のROSシステムとUnityのシームレスな連携を実現。

2.リアルタイム性:Zenohを用いた低遅延通信により、現実空間と仮想空間間のリアルタイム通信を実現。

3.拡張性と容易な導入:箱庭ブリッジにより仮想空間と現実空間を統合し、スムーズな導入とシステム拡張を可能にした。

特に、仮想空間内のドローンと現実空間内のTurtleBot3を連携させたデモ(図8)は、物流や製造業、教育といった多分野へ

の応用可能性を実証した。リアルタイム通信による協調動作や高精度なシミュレーションが、多様な課題解決に寄与することを示した。

図8の中央は、現実世界に存在するロボットとLiDAR(URG-04LX-UG01)を基に、リアル空間とバーチャル空間が融合している状態を表す。現実空間では、ロボットとLiDARのみが存在しているが、VRゴーグル「QUEST3」を通して見ると、バーチャル空間上のドローンや荷物が重ね合わされて表示され、リアルとバーチャルが統合されたシーンを視覚的に確認することができる。左下のグラフは、LiDARを用いてロボットの位置情報を計算している様子を示す。この位置情報はバーチャル空間にフィードバックされ、ロボットの正確な位置がバーチャル上でも反映されていることを意味する。

図7

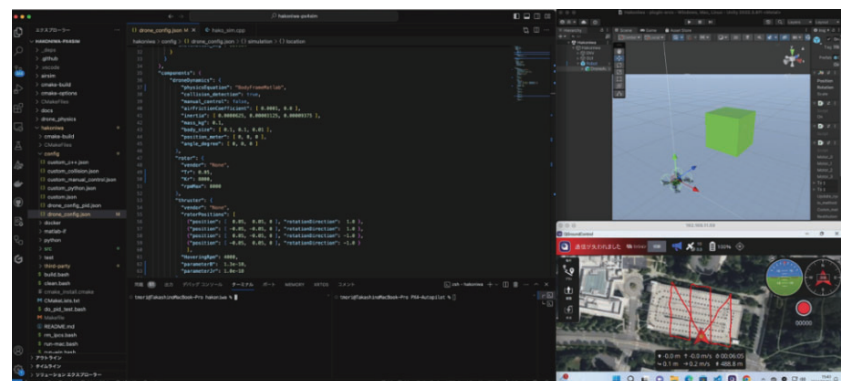
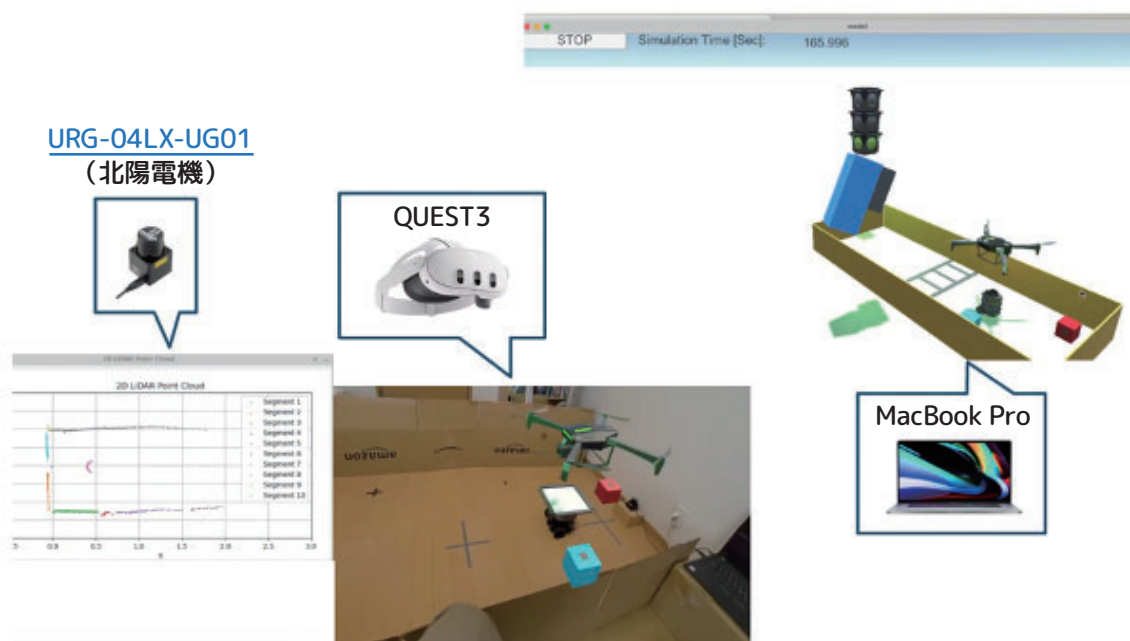


図8



庭ラボといったコミュニティ主導の開発体制が進行しており、多様な関係者との連携が深化している。

こうした取り組みを通じて、箱庭はデジタルツインや分野横断型シミュレーションを支えるプラットフォームとしての可能性を広げている。

課題

一方で、さらなる成長に向けて解決すべき課題も存在する。

・開発リソースの拡充

オープンソースプロジェクトとしての強みを活かす一方で、より多くの技術者やコミュニティメンバーを巻き込む仕組み作りが求められる。

・使いやすさの向上

ドキュメントの拡充、チュートリアルを追加、GUIでの操作可能なアプリなどを整備して、初心者がスムーズに導入できる環境を提供する必要がある。

・実社会での実例の実績

研究開発を超え、産業分野など実際の業務などでの実績を増やしていき、更に箱庭の進化をさせていくことが重要となる。

これらの課題は、箱庭が次のステージへと進むためのステップであり、成長の余地

を示している。

未来

箱庭は、これからのデジタルツイン時代において、中核的なプラットフォームとして進化するポテンシャルを持っている。そのためには、以下の取り組みが鍵となる。

・エコシステムの拡大

技術者、産業界、教育機関との連携を深め、多様なプロジェクトを通じて箱庭の活用を促進する。

・ユーザー体験の向上

簡単に導入できる環境構築のツールや、直感的に使えるGUIを開発することで、より多くのユーザーが参入しやすいプラットフォームを目指す。

・応用分野の拡大

製造業、物流、教育、医療、宇宙開発といった分野での成功事例を積み重ね、さらなる可能性を切り拓く。

・プレゼンス強化

箱庭の技術は、単なるツール/シミュレータの枠を超え、新たなプラットフォームとして国内外に認知されるべきだと考えている。その施策の一環として、大阪万博に向けて箱庭のドローン技術やデジタルツインの可能性を広く発信することを目指している。

万博という国際的な舞台を活用し、デジタルツインの実装例や産業・教育分野での具体的な活用シナリオを提示することで、次世代のプラットフォームとしての地位を確立し、さらなる発展を目指していきたい。

箱庭の技術は、シミュレーション・ハブとして独自の価値を発揮しながら進化し続けている。大阪万博をはじめ、国内外での認知拡大の機会を活用し、技術力と柔軟性を武器に課題を克服しつつ、デジタルツイン時代における新たな価値を提供する革新的なプラットフォームへ成長させることを目指している。

日本は、これまで産業的に組込み技術に強いエンジニアを育成してきた。これまでの機械、電気・電子、制御、通信、ソフトウェアといったエンジニアリング領域のシミュレーションだけでなく、今後はビジネス企画、事業開発、AI活用といったビジネス領域のシミュレーションも求められるようになるだろう。箱庭は、こうした分野を横断するエンジニアの協調の場として、「コラボレーション・フィールド＝箱庭」という価値を持つ。さらに、人を含めた活用シーンを広げることで、異分野協調関係を誘発するきっかけとなる存在を目指している。

デジタルツインと インフラ協調型ロボット制御

國井 雄介 コモングラウンド委員会 委員長

近年、多くの業種や産業においてロボットの導入が進み、人々の生活やものづくりの現場が大きく変化しつつある。このような変化を背景に、組込みシステム技術協会（JASA）のコモングラウンド委員会は、「Society5.0」と呼ばれる未来社会のビジョンを実現するため、デジタルツイン関連技術、特にエッジ（組込み）側の調査・研究を行っている。

コモングラウンド委員会においては、Society5.0を「人とロボット（人型ロボットだけでなく、ドローンや自動運転車、バーチャル世界のバーチャルエージェントなどを含む）や、ロボット同士が協調して社会課題を解決し、新たな価値を創出する次世代の社会」であると捉えている。そして、この社会を実現するための技術調査や議論、実証実験を継続し、得られた知見や課題を整理し、解決策を提案する活動を続けている。

コモングラウンド委員会が賛同しているのは、東京大学の豊田啓介教授らが提唱する「コモングラウンド(Common Ground)」^{※1}という考え方である。コモングラウンドは、汎用的な3次元空間記述を体系化したうえで、現実空間（フィジカル）と情報空間（デジタル）を双方向に接続し、人とNHA（Non-Human Agent: パーチャルエージェントやロボットなど）が同じ情報基盤を用いてリアルタイムに協働できるようにするプラットフォームである。「コモングラウンド・リビングラボ」^{※2}において社会実装が進められており、コモングラウンド委員会も定期的に情報交換を行っている。

このコモングラウンドを実現するためには、ロボット本体を高性能化するだけでは不十分である。組込み技術の観点からインフラ側のセンサやネットワークと連携し、より高度な制御や効率化を行う「インフラ協調型」のアプローチが欠かせない。こうした

システム全体を支える要素技術の確立には、リアルタイム性の高い通信プロトコルや、多様なセンサデータを統合する仕組みづくりなど、組込みならではのノウハウが求められる。

そこで当委員会は、企業や大学、研究機関との連携を進めながら、実証実験や勉強会を通じて組込み視点の技術的ノウハウを蓄積している。これらの取り組みによって、ロボットとインフラが互いに情報を補完し合う環境をつくり、より多彩なユースケースでの協調動作を実現することを目指している。

具体的には、毎月の委員会で有識者を招いた勉強会を開催し、展示会でのJASAセミナーでは最新の技術や事例を共有している。また、デジタルツインの実証実験を継続的に実施し、現場で発生する課題を洗い出しながら改善策を検討している。本記事では、これらの活動の中でも特に「イ

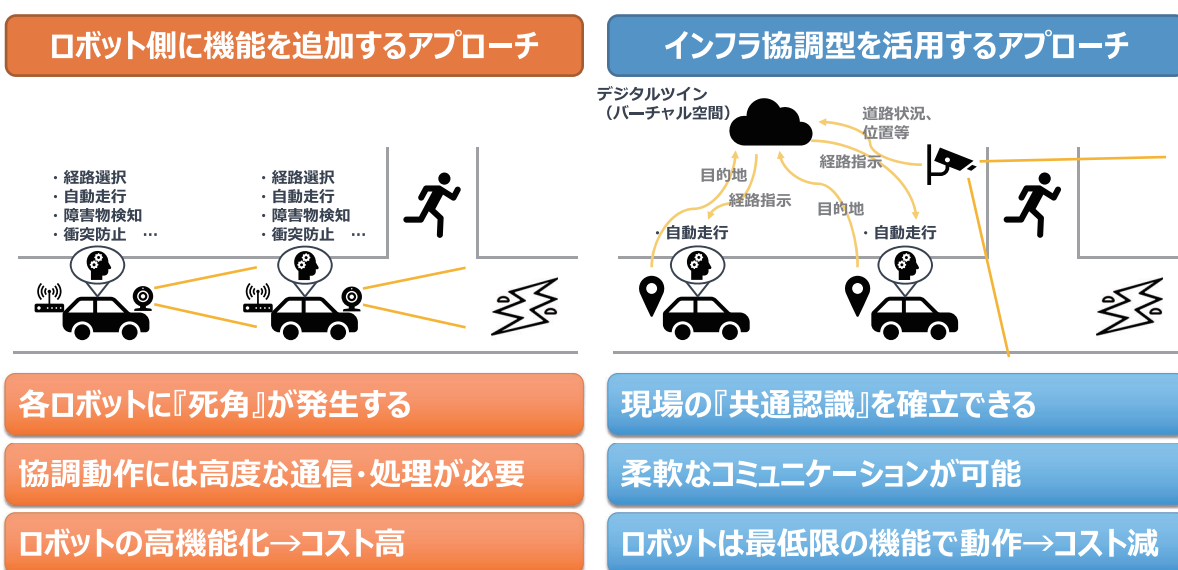


図1 ロボット側に機能を追加するアプローチとインフラ協調型を活用するアプローチの比較

※1) <https://www.commonground.iis.u-tokyo.ac.jp/ja/> ※2) <https://www.cgll.osaka/>

「インフラ協調型ロボット制御」と「エッジ側の技術的課題」に焦点を当て、JASAが構築したデジタルツインデモの概要と、その成果を紹介する。

バーチャルとリアルを融合

コモングラウンドを実現するためには、バーチャル(情報空間)とリアル(物理空間)の情報をやり取りしながらロボットを制御することが欠かせない。従来のロボット制御では、ロボット本体に多くのセンサや演算機能を搭載し、ロボット自身が状況を把握して動くことが一般的であった。しかし、この方法では各ロボットのコストや消費電力が高くなり、複数のロボットを同時に動かす際には制御が複雑化しやすい。たとえば、ロボット同士の衝突を防ぐために通信方法を細かく決めたり、1台1台に高性能の画像処理装置(GPU)を搭載したりすると、開発コストおよび導入コストが上昇する。

そこで注目されているのが、インフラ協調型ロボット制御という考え方である。これは、工場や倉庫、公共施設などのインフラ側にあらかじめセンサやカメラ、通信機器を設置しておき、それらの情報を一元管理したうえでロボットに必要な指令を送る仕組みを指す。空港の管制塔が全体を見渡

して飛行機を誘導するイメージに近い。この方法を採用することで、ロボット本体に搭載するセンサを減らせるため、ハードウェアコストの削減や省電力化につながる。

さらに、インフラ協調型の仕組みでは、ロボット側が見えない範囲(死角)や、ロボット同士がお互いを認識できない状況でも、インフラ側のセンサ情報を共有することで衝突を回避しやすくなるという利点がある。一方で、すべての情報をインフラ側で管理する性質上、通信が遅延したり障害が発生した場合に備えたフェイルセーフ対策が不可欠である。また、インフラ設備を設置するコストや、既存の現場に導入する際のハードルを検討しなければならない。

コモングラウンド委員会では、こうしたインフラ協調型の仕組みを実現するために、バーチャル空間(デジタルツイン)を活用することを検討している。具体的には、複数のロボットの位置やセンサ情報をリアルタイムでバーチャル側に反映し、そこで障害物の位置や経路計算を行い、バーチャル側からの指示によって実際のロボットを制御する方法を模索中である。さらに、人がAR(拡張現実)デバイスを利用し、リアル空間とバーチャル空間を重ね合わせて表示することで、ロボットとの協調作業を効率よく進めることも検討している。

実現に向けた組込み技術の重要性

インフラ協調型ロボット制御を構築するうえで、エッジ(組込みシステム)技術の検討は必要不可欠である。エッジとは、クラウド(遠隔のサーバ)ではなく、現場に近い場所でデータ処理や制御を行う仕組みを指す。リアルタイム性や安全性が求められる現場においては、ロボット本体やゲートウェイデバイス、産業用パソコンなどのエッジ機器が中心的な役割を担う。以下では、組込み側で特に検討すべき主なポイントを示す。

1. 多様なセンサの情報収集とフィードバック

カメラ、LiDAR、温度センサ、加速度センサなど、多種多様なデバイスから得られる情報を安定的かつタイムリーに収集し、ロボットへ適切にフィードバックすることが重要である。センサごとに出力フォーマットや通信プロトコルが異なる場合もあるため、標準化や統合的な管理を検討する必要がある。

2. ロボット制御とセキュリティ

インフラ側から得られる情報を利用し、ロボット本体をどのように制御するかが大きなポイントとなる。リアルタイムOS(オペレーティングシステム)の選定や、ロボットオペレーティングシステム(ROS)との連携方法など、組込み技術特有のノウハウが不可欠である。また、外部からの攻撃や誤作動を防ぐため、通信暗号化や機器認証などのセキュリティ対策にも十分な注意が必要となる。

3. 大量データの通信とフェイルセーフ設計

インフラ協調型システムでは、ネットワークを介して大量のデータが常時やり取りされる。複数のロボットを同時に運用する現場では、通信帯域の確保や遅延の制御が非常に重要である。さらに、通信が途切れたり遅延した場合でも、ロボットがどこまで自律的に動作できるかを明確にし、フェイルセーフ設計を考慮する必要がある。



図2 JASA の考える自律化した工場イメージ。コンセプトムービーの一部

コモングラウンド委員会では、これらのエッジ側で検討すべき内容を整理し、最終的には「インフラ協調型ロボット制御のエッジ側ガイドライン」として取りまとめる方針である。このガイドラインは、JASA会員企業がロボットシステムを導入する際の参考になるだけでなく、異なるメーカーの装置を同一環境で共存させるための基盤整備にも寄与すると考えている。こうした取り組みを通じ、安全かつリアルタイムに動作するロボット制御システムの実現を引き続き推進していきたいと考える。

『箱庭』を活用した デジタルツインデモ構築 ～工場の自律運用ユースケース～

前章までの背景を踏まえ、コモングラウンド委員会ではインフラ協調型ロボット制御のユースケースとして工場の自律化を検討している。工場内でトラブルが発生した際に生産が長時間停止しないよう、デジタルツイン技術を使って現場の状況を遠隔で再現し、ロボットやドローンによって迅速に対応する仕組みを目指している。^{※3}

この取り組みの一環として、TOPPERSプロジェクトが開発・公開しているオープンソースソフトウェア（OSS）「箱庭（hakoniwa）」^{※4}を活用し、JASA版デジタ

ルツインデモを構築して実証実験を進めている。今回のデモにおいては、以下の2点が大きな特徴である。

1.カメラ画像だけで位置や向きを検出

デモ環境の上部に設置したカメラから俯瞰画像を取得し、ロボットに貼った赤い丸シールを画像解析することで位置座標や向きを算出している。ロボット側ではLiDARなどの追加センサを用いないため、ハードウェア構成をシンプルに保てる点が利点である。

2.制御指示をバーチャル空間から行う

カメラで取得したロボットの位置情報は、リアルタイムでバーチャル空間へ送られる。バーチャル空間側ではロボットのモデルを動かしながら実空間と常時同期し、さらにリアル空間に設置されたスイッチの押下情報も連携している。スイッチが押されたタイミングに合わせて、バーチャル側が“司令塔”となりロボットに前進や後退といった指示を出すため、ロボット本体の制御ロジックは必要最低限で済む。

このデモを構築することで、リアル空間とデジタル空間が常に同期し、“インフラ協調型”ならではのロボット制御を実験できる環境が整った。今後は、インフラ側のセンサの追加や障害物の回避、複数台のロボット制御など、工場の自律運用に必要なユースケースを順次検証しながら、実証実

験を継続していく予定である。

実証結果、課題と今後への期待

今回のデモを構築・運用した結果、いくつかの成果と課題が明らかになった。今後は、これらの知見を踏まえ、さらなる技術検証を進める予定である。

得られた成果

- ・通信処理の抽象化による開発効率向上
箱庭がバーチャル空間とリアル空間をつなぐ通信部分を抽象化しているおかげで、事前にPDU（プロトコルデータユニット）の形式を決めておくだけで、各開発者が独立してプログラムを作成してもスムーズに連携できることがわかった。利用者側が通信プロトコルを意識する必要がない点も大きな利点である。

・ROSとのスムーズな連携

箱庭にはROSとの連携機能が備わっており、ROS対応のロボットであればデジタルツイン環境への組み込みが容易であることが判明した。今後のセンサ追加でも、ROS対応の機器を採用すれば連携がさらに簡単になる。

- ・インフラ協調型制御の実現可能性を確認
カメラだけでロボットの位置や向きを認識し、スイッチ操作で動作指示を行う実験を通じ、ロボット本体を過度に複雑化しなくてもシステム全体を構築できることがわかった。インフラ協調型の利点が具体的に示された点は大きな成果である。

明らかになった課題

- ・位置情報の誤差と向きの誤認識
カメラ画像を解析してロボットの位置、向きを判定しているため、誤認識が起こる場合がある。誤差が積み重なり、バーチャル側とリアル側の位置ズレることや、向きを間違えた場合、経路情報が破綻し、制御が失敗するケースが見受けられた。
- ・ネットワーク品質とフェイルセーフ設計

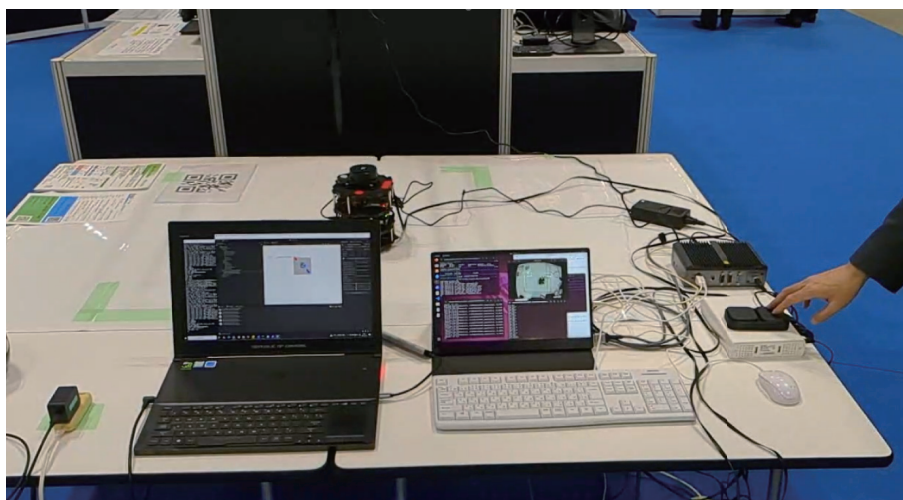


図3 EdgeTech+2024 コモングラウンド委員会ブースでのデモ展示の様子

※3) https://y-kunii.github.io/jasa_common_ground/FACTORYTL_2025-03-02_HD.mp4

大量のデータをインフラ側で扱うため、通信遅延や帯域不足への対策が不可欠である。また、通信が途絶した際にロボットがどの程度まで自律的に動作できるか、フェイルセーフの仕組みを検討する必要がある。

・セキュリティの確保

常時ネットワークに接続する構成では、外部からの攻撃や不正アクセスを防ぐためのセキュリティ対策が必須である。通信暗号化や機器認証など、実運用レベルでの検討が必要である。

今後の展望

・センサの多様化とハイブリッド自己位置推定

カメラだけでなく、LiDARやロボットが持っているIMUなどのセンサを組み合わせることで、位置認識の精度や安定性をさらに向上させたいと考えている。

・3Dバーチャル空間での高度な経路計画

実際の室内点群データを活用して、よりリアルな仮想工場を構築し、障害物回避のパスプランニングを高度化していく方針

である。

・会員企業との知見共有とビジネス創出

これらの成果やノウハウは、ロボット導入を検討している会員企業に向けて広く提供し、インフラ協調型ロボット制御の導入事例を増やすことで、新たなビジネスやサービスが生まれる契機となることを期待している。

コモングラウンド委員会としては、引き続きデジタルツインを活用したインフラ協調型ロボット制御の可能性を探り、実運用に近い環境での検証を継続しながら、Society5.0に貢献する技術や手法を確立していく考えである。

最後に、コモングラウンド委員会の今後の展望と、JASA会員企業へのメッセージを示す。委員会が目指す「インフラ協調型ロボット制御」は、1社のみの取り組みでは限界がある。ロボットメーカー、センサメーカー、通信事業者、ソフトウェアベンダー、大学、研究機関など、多様なステークホルダーが力を合わせ、共創によってこそ大きな成果を生み出せる領域である。

そこで、業界団体として中立的な立場を持つJASAの存在意義が大きい。JASAは、組込み技術に関わる多様な企業や団体を結ぶハブとして、特定の企業の利益に偏らず、共通のプラットフォームや技術指針を整備し、情報共有を促進する役割を担っている。ロボット制御に用いられる組込み技術はもちろん、クラウドやネットワークなどの隣接分野の知見も不可欠であるため、複数の業界が連携しやすいJASAの枠組みが重要だと考えている。

すでにコモングラウンド委員会は、東京大学やコモングラウンド・リビングラボとの連携や、TOPPERSプロジェクト箱庭WG（ワーキンググループ）との協力を通じ、複数の実証実験を進めている。そこでは、ロボットの協調動作や3Dシミュレーション、AI（人工知能）を用いた高度な制御手法など、最先端の研究や技術開発が活発に行われている。今後も、様々な企業や大学、研究機関との連携を強化し、技術調査と課題解決を推進していく方針である。

また、JASA会員企業には、ぜひ本委員会の活動に参加してほしいと考えている。インフラ協調型ロボット制御のデモの構築や勉強会に参加することで、新たなビジネスの着想を得る機会が得られるはずである。たとえば、「自社製品をコモングラウンドに適合させたい」「自律運用の技術を取り入れたサービスを開発したい」といった具体的なアイデアや要望があれば、委員会メンバーと意見交換しながら実装や検証を行うことが可能である。

Society5.0の世界は、人だけでなく、ロボットやAI、ドローン、自動運転車など、多彩なエージェントが役割を分担しながら共存する社会である。その社会を現実化するには、バーチャルとリアルの融合による効率化や、インフラ側の協調制御といった要素技術の確立が不可欠である。JASAコモングラウンド委員会は活動を続け、成果を広く共有していく所存である。多くの参加と協力を願っている。

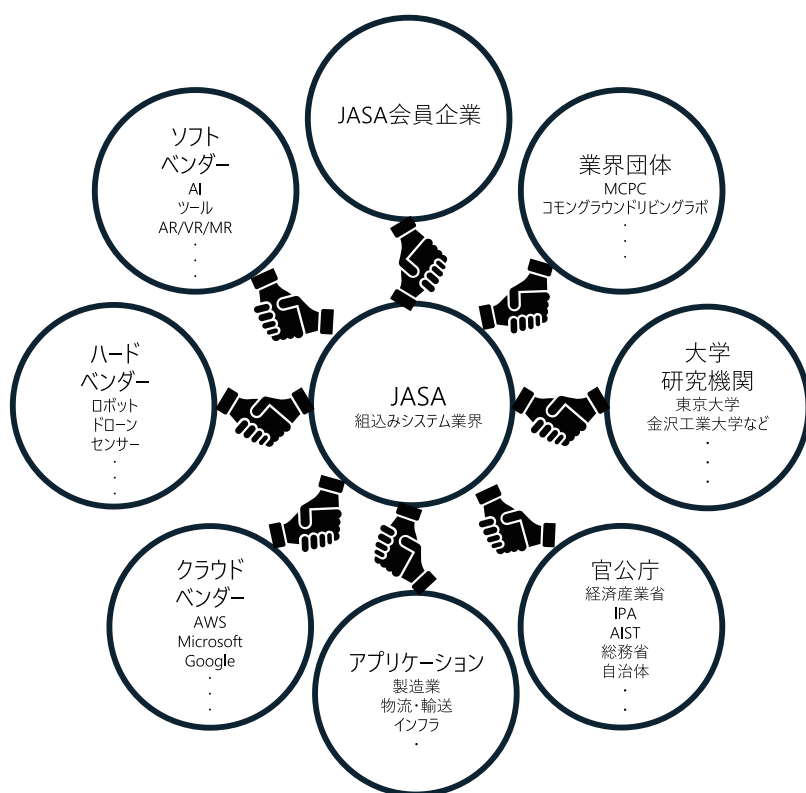


図4 業界団体であるJASAをHUBとしての産学官、会員企業での連携

※4) 箱庭は、複数のシミュレータやプログラムを結合する“シミュレーションHUB”として利用できるプラットフォームである。バーチャル空間（仮想）と実際のロボットやセンサ（リアル）を簡潔につなぐ仕組みを提供している。詳細は以下URLを参照。 <https://toppers.github.io/hakoniwa/>

デジタルツイン技術で ドローンのラスト・ワンマイルを検証する

牧野進二 ドローンWG 主査

ドローンにおける安全性・信頼性の確保と検証が不可欠になっている。本記事ではシミュレータ技術を活用し、ドローンの利用にあたっての安全性・信頼性を検証した事例を紹介する。

ドローンの安全性確保が不可欠に

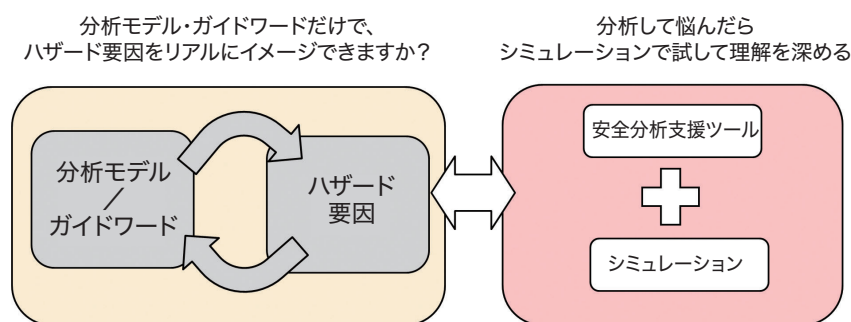
ドローンの利活用にあたっては、「レベル」と「カテゴリ」の大きく2つの飛行基準が定められている。「レベル」はドローンの飛行技術で、飛行の難易度を示す。レベル1～4が定義されている。「カテゴリ」はドローンの飛行リスクに応じた分類である。カテゴリⅠ～Ⅲが定義されている。ドローンの利活用にあたってレベル4(有人地区、補助者なし、目視外飛行)の活用が望まれており、飛行時の安全基準遵守が必要となっている。

ドローンをレベル4活用するための安全基準として、国土交通省が改定した「航空法等の一部改正する法律」がある。法改正で、ドローンの機体認証と無人航空機のライセンス制度が設けられた。機体認証では、第一種/第二種の2種類の認証制度が創設された。

無人航空機のライセンス制度では、ドローンの飛行用途のカテゴリによって一等/二等の無人航空操縦のライセンス制度が設けられた。このほか経済産業省などが出している「空のロードマップ」でも機体認証を軸に様々な安全基準確立の必要性をうたっており、ドローン開発時に部品レベルの評価を求める動きも存在する。

ドローンの機体開発と利用にあたっての安全基準としては、国土交通省の「無人航空機の型式認証における安全基準及び均

図1 安全分析とシミュレータでの可視化イメージ



一性基準に対する検査要領」がある。NEDOのReAMo (Realization of Advanced air Mobility) プロジェクトが各パートの解説文書を出している。安全基準として、305個の起こり得る故障のパートがあり、このパートについて検査要領を満たさなければならない。安全性の分析にはFTA、FMEA、STAMP/STPAなどの手法が挙げられているが、具体的な検証方法は開発側で確立する必要がある。

安全分析においては様々な手法が存在するものの、分析者の力量や経験則などに左右される傾向がある。また安全分析結果の正否が、実装段階の後工程で判明することが少なくない。上流工程で正否を証明する手法も存在するが、安全分析結果を正しくイメージすることは容易ではない。この問題を解決する手段の一つがシミュレーション技術の利用である。

上流工程でシミュレーション技術を用い安全分析結果を可視化すれば、安全分析結果が正しい方向になっていることを早期に判断することが可能となる。また分析不足を判断する材料にもなり、新しい安全分析スタイルの確立につながる。JASAドローンWGはこのように考え、ドローン利活用に

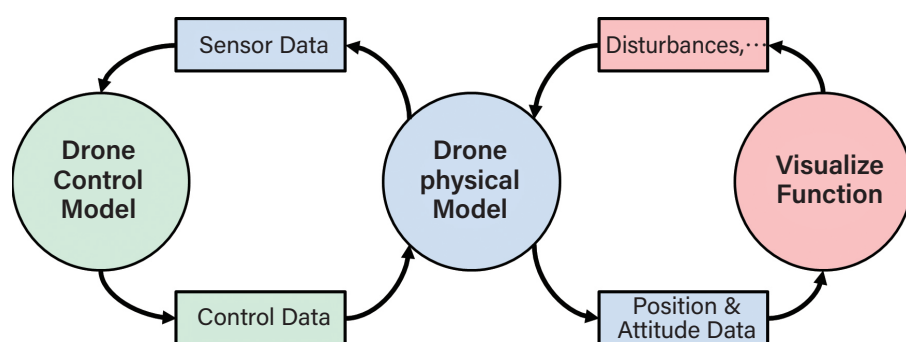
おける安全性・信頼性の分析に、シミュレータ技術を応用することにした(図1)。

箱庭シミュレータを活用

シミュレータ技術には様々なものが存在する。そのなかでドローンWGはTOPPERSプロジェクトが開発している「箱庭」を選んだ。箱庭を選んだ理由としては、①手軽に使える環境、②機能拡張性が高い、③時間制約(リアルタイム性)が正確、といった要件を満たす無償のツールであることが挙げられる。コモングラウンド委員会で活用していることも選定理由の一つだった(詳しくはp.18～21を参照)。

箱庭を利用するメリットとして拡張性が挙げられる。箱庭は、シミュレータに必要な機能をアセットとして定義することで様々なシミュレーション環境を作り出すことができる(詳しくはp.12～17を参照)。アセットの要素が増えても時間同期のズレがなく、シミュレーション対象のリアルタイム性を確保できる特徴もある。これは各アセットと箱庭間の時間同期に分散制御方式を用いて、時間同期の並列化を行っているからである。このためアセットの要素が増えても、影響を受けにくい。

図2 ドローンシミュレータのアーキテクチャ構造



時間同期については、TOPPERSで数学的な証明(箱庭時刻同期の数学的証明)¹⁾もされており、組み込みシステムでのmsオーダーの動作に対応できると考えた。

もう一つの利点はビジュアライズ機能との連携である。法規制などでドローンが手軽に飛ばせないため、バーチャル空間でドローンを飛ばす仕組みを作る必要があったが、箱庭では、Unityなどのゲームエンジンと連携できるアセットが既に用意されているので、ドローンの飛行を手軽に可視化できると考えた。

実機を忠実に再現するモデル

ドローンシミュレータの開発では、より実機に近い形でのシミュレーションができるアーキテクチャを考えた。ゲームエンジンの機能をそのまま使うことも可能だが、実機の動作と同等にするため2つのモデルを定義した。ドローンの物理制御モデル(Drone Physical Model)と機体を制御するモデル(Drone Control Model)である(図2)。

物理制御モデルはドローンの物理的な部分のPID制御を相当する。機体を制御するモデルは物理的な機体の座標制御、ロータ(プロペラ)の推力、ドローンの速度、加速度などの動力制御を担う。ちなみにゲームエンジンは描画だけに使っている。このほかバッテリー、センサーなどのモデルを用意して、実機をシミュレーション空間で検証できるアーキテクチャとした。

開発は、箱庭ラボの森氏、永和システム

マネジメントの平鍋氏、TOPPER箱庭WGの助けを借りながら進めた。ドローンのハードウェア/ソフトウェアやデバイスの情報、過去に金沢工業大学と共同研究していた機体開発のノウハウなど、ドローンWGの資産を活用しながら開発を進めた。

2023年7月の開発着手から半年後、正確なロータ制御といった実機と同等な飛行の実現に至った(図3)。図3のシミュレーション結果を見ると、ホバリング状態ではロータ制御が均一になっている。一方、前進状態では後方のロータを強くして推力を得ているため、機首が少し下がって飛んでいることが分かる。障害物への衝突も忠実に再現できた。

次に検討したのが「手軽にバーチャル空間で飛ばす」機能拡張である。PCにゲームコントローラを接続し、シミュレーション空間でドローン飛行ができるように機能を拡張した。次に拡張したのが、ドローンの飛



図3 ドローンシミュレータを使ったバーチャルドローンの飛行

行レベル3以上を検証するための自動航行機能である。DJI社の一部機種が備えるPythonで自動航行をプログラミングする仕組みを用いた。Pythonで制御できるAPIを用意し、自動航行の検証ができる仕組みを実現した。これらの拡張機能によって、大学での授業など学術的な活用がされるようになった。

デジタルツインを実現

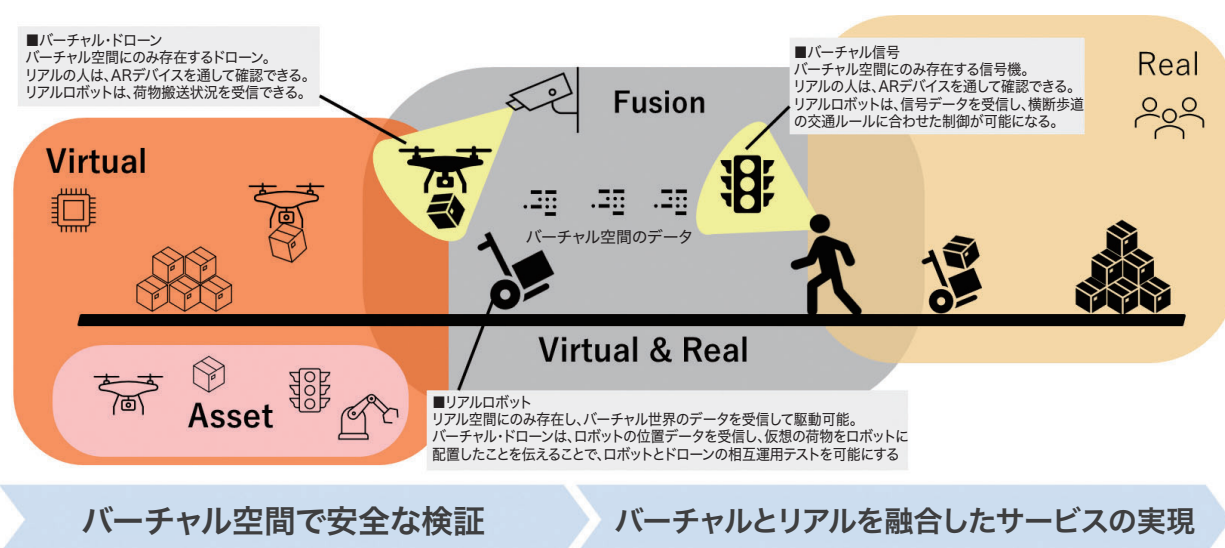
ドローンシミュレータの開発当初、2つの分野への適用を念頭に置いていた。1つはドローンの安全分析である。ドローン飛行時のフェールセーフ分析のために使う。もう1つは経済産業省の「デジタルライフライン」である。

デジタルライフラインは、様々なモノとモノが連携動作することでライフラインを実現する。ドローンが重要な役割を果たすのが「ラスト・ワンマイル」である。しかし、法規制などから手軽にドローンの実機を飛ばすことは難しい。そこで、ラスト・ワンマイルでの様々なモノとの連携動作を検証するためにドローンシミュレータを用いる。

デジタルライフラインの検証では、バーチャル空間とリアル空間を融合した検証が必要になる。そこでバーチャル空間とリアル空間を融合させるブリッジ機能を開発して、バーチャル空間とリアル空間を融合させることにした。バーチャル空間とリアル空間が融合した空間をここではフュージョン空間と定義する(図4)。例えばバーチャル空間と

1) <https://github.com/toppers/hakoniwa-core-cpp-client/blob/main/math/README.md>

図4 実空間とバーチャル空間を融合するためのアーキテクチャ構造



バーチャル空間で安全な検証

バーチャルとリアルを融合したサービスの実現

リアル空間の位置情報は、ブリッジ機能を介して送受信するアーキテクチャである。

ブリッジ機能を介した通信によって、リアル空間とバーチャル空間の連携や同期が行えるようになった。図5は、デジタルツインの初期段階でのデモである。バーチャル空間およびリアル空間のロボットとドローンがブリッジ機能を介して通信を行う。ドローンが荷物をロボットに届ける動作を、バーチャル空間とバーチャル空間の両方で実現できた。

AR技術を使ってリアリティをもたせる

ドローン操作のリアリティを出すためにAR(拡張現実)を利用した。XRゴーグルを装着してドローンを操作することで、実機に近いライブ感を味わってもらえるようにし

た。より現実世界に近い形で、デジタルライフラインの検証ができるようになる。

ARの活用にあたっては手軽さも大切である。そこでXRデバイスだけでドローン利活用を検証ができる機能を追加した。現実世界でXRゴーグルを利用して、ドローンの飛行計画の立案や最適化ルートの検証が可能になる。例えば農作業での利活用である。実際に農地に行き、バーチャルドローンを使いながら効率的な農業散布方法などを検証できる。このほかドローンを操縦した経験のない農家の方の訓練にも、XRゴーグルを使ったドローンシミュレータが使える。

このほか、インフラ点検の高所作業における建機とドローンとの連携や、製造業でのUGV(unmanned ground vehicle)とドローンとの連携など、幅広い応用が考え

られる。さらにリアリティを高めるために、障害物の検知や衝突時の破損再現などにも必要になる。今後の課題である。

将来展望

上記のようにドローンシミュレータ開発は、初期段階を終えたと考えている。次のステップとして手掛けないといけないのは、ドローン飛行時のフェールセーフ分析など安全性分析への活用、AR活用の拡大、技術教育での利用である。以下で簡単に説明する。

安全分析に活用

安全分析の重要性は、法規制の動向を踏まえても言を俟たない。図6に安全分析に適用する上での課題をまとめた。ペイロードや天候の変化、墜落時のフェールセーフ機能の検討など課題は多岐にわたる。今後は安全分析のシナリオ検証をシミュレーションで実現するための活動を進めていく。

世界の動向を見ると、BLUE UAS²⁾のようなドローン開発時の部品選定や利用レベルでの検証も必要になるだろう。利用部品については、情報漏えいやサプライチェーンにおけるセキュリティリスクも考えなければならない。安全性だけでなく、サイバーセ

図5 ドローンシミュレータを使ったデジタルツイン技術の検証



図6 ドローン利用事の安全制約の要約

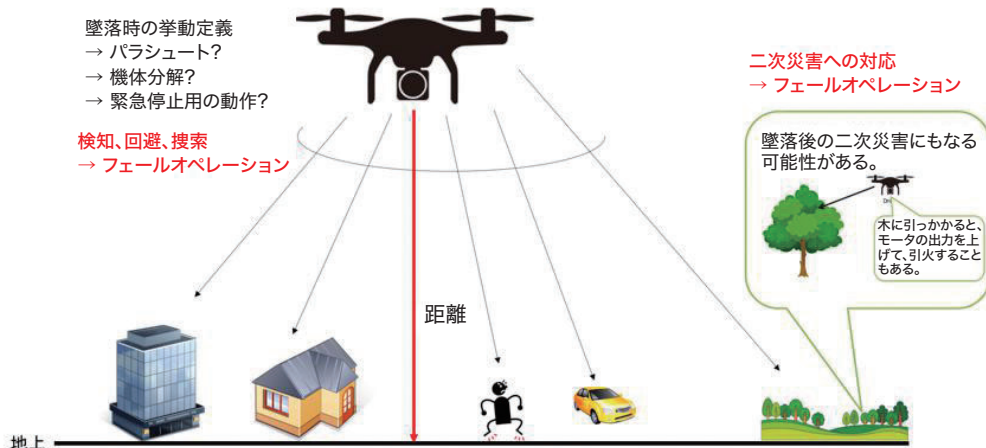
■ペイロードの変化による安全性担保



■自然災害 (強風など) 安全性担保



■墜落しそうになったら...



セキュリティの観点での分析が必要になると予想される。この点でも、今回開発したドローンシミュレータは有用と考える。センサー機器など部品レベルのモデルを組み込んでいるので、各デバイスモデルに対して安全性・セキュリティの分析を可能にする機能を今後追加することで対応できるだろう。

また安全分析とセキュリティ分析を組み合わせた場合、セキュリティ観点の分析結果がセーフティ機能を低下させないように注意しなければならない。しかしセキュリティとセーフティの両方のスキルを身に付けるのは容易ではなく、実務上の大きな課題である。この点については、シミュレータの可視化機能やAIを活用することで、分析者・設計者のスキルを補完する機能を提供したいと考えている。

2) Blue UAS: <https://www.diu.mil/blue-uas/framework>

ドローンパイロットの育成

展示会や大学でのデモンストレーションを踏まえると、ドローンパイロットの育成にAR空間でのドローン操縦訓練は十分に使えるであろう。AR空間でのドローン操縦訓練によって、実機を操縦する技能は確実に向上する。実際、トイドローンを障害物に衝突させたり墜落させていた操縦者が、AR空間での訓練によってメキメキ腕を上げるケースが少なくない。今後は訓練データを収集し大学と共同研究することで、AR空間でのドローン操縦の有効性を定量的に裏付けたいと考えている。

技術者の育成

箱庭の活用・開発が、技術スキルの向上につながることは間違いない。Python

やC#などのコンピュータ言語、TCP/IPなどの通信技術、Unityなどのゲームエンジンを使ったバーチャル開発、Windowsインストーラの開発、制御工学の知識など、身に付けられるスキルは多岐にわたる。組み込み技術者が普通では体験できない技術部分が多く含まれている。バーチャル空間の良さを活かした「失敗して学ぶ」カリキュラム作りを行い、大学などと連携した人材育成に繋げていきたいと考えている。

ドローンシミュレータが備えるデジタルツイン技術を活用したデモンストレーションを、2025年4月29日に関西・大阪万博の大阪ヘルスケアパビリオンの催事イベントで披露する予定である。