

# 生産管理のためのデジタルツインアプリケーション

川村 地平<sup>1</sup> 青谷 和真<sup>1</sup> 藤橋 貞光<sup>†1</sup> 稗田 啓介<sup>†1</sup> 中島 高英<sup>†1</sup> 塚田 学<sup>1</sup> 江崎 浩<sup>1</sup>

**概要**：Industry4.0の提唱や産業界が様々なIoTプラットフォームの提供などを行うことが多くなり、昨今デジタルツインに関する注目度も高まってきている。デジタルツインはIoTや人工知能、機械学習などの要素を取り入れることが可能で、これは施設管理や都市計画、自律走行車試験など様々な課題を解決するために用いられる。我々は、工場の生産管理というテーマに着目し、工場の生産能力の向上という課題に対し、デジタルツインアプリケーション、及び付随するコモングラウンドを作成し、検証した。これらはユーザがアプリケーションを利用するための手順を簡便化した、生産管理のためのデジタルツインアプリケーション、及び工場に設置された工作機械やIoTデバイスなどの情報を集積しアプリケーションに提供するためのAPIとDBである。本論文では、生産管理を行うことができるデジタルツインアプリケーション、及び工場の工作機械やIoTデバイスに搭載されたセンサなどから集積したデータを管理するクラウドサーバ、及びAPIをスマートファクトリーの一環として作成し、これらの性能評価を行った。

## Digital twin application for production control

Chihei Kawamura<sup>1</sup> Kazuma Aotani<sup>1</sup> Sadamitsu Fujihashi<sup>†1</sup> Keisuke Hieda<sup>†1</sup> Takahide Nakajima<sup>†1</sup>  
Manabu Tsukada<sup>1</sup> Hiroshi Esaki<sup>1</sup>

### 1. はじめに

昨今、デジタルツインやミラーワールドなどの言葉が注目され始めてきた。デジタルツインは、現実に関する課題に対し、物理空間の設備と同じものを仮想空間に構築し、物理空間の設備からデータを取得しながら仮想空間に用意したツインにてシミュレーションを行い、課題解決を行うシステムのことを指す言葉である。また、これに付随して、コモングラウンドという、物理空間と仮想空間を結ぶ基盤のことで、ハードウェアとその背後にあるソフトウェアを含めたインフラストラクチャーを指す言葉がある。デジタルツインの簡単な概略図を示すと図1のようになる。デジタルツインはIndustrial Internet of Things(IIoT)の形成技術として、複数の用途に用いられている。その内容は施設管理や都市計画、自律走行車試験など様々なものが挙げられる。また、デジタルツインは、ドイツ政府が提唱しているIndustry4.0のサイバーフィジカルシステム(現実世

界と仮想空間が一体となった高度な社会システム)のコンポーネントとしても注目され始めている。

デジタルツインのユースケースの一つとして、工場での使用が考えられる。工場では工作機械や人の流れ、作業効率など様々な要素が可視化され、管理されることが望まれるが、現在、様々な企業がスマートファクトリーを推進しているように、実際にデジタルツインを構築し、活用している工場はまだ多くなく、普及段階である。デジタルツインを構築するには、IoTプラットフォームやデジタルツインプラットフォームを保有している企業のサービスを利用するという方法以外にも自身で構築するといったことも考えられるが、それらはそれぞれ、

- 企業のサービスを利用することによるカスタマイズ性の低さやブラックボックス要素の出現
- ジオメトリ情報の生成、メタデータの取得、取得したデータの最適化、アプリケーションへのデータ輸送パイプラインなど、構築する要素の多さ

が問題になってくる。粕谷らが提案したスマートビルに向けたコモングラウンドである「futaba」[1]においても、上記の企業ごとのサイロ化を問題視し、対処している。

<sup>1</sup> 東京大学

The University of Tokyo

<sup>†1</sup> 現在、株式会社シムックスイニシアティブ  
Presently with CIMX INITIATIVE INC.

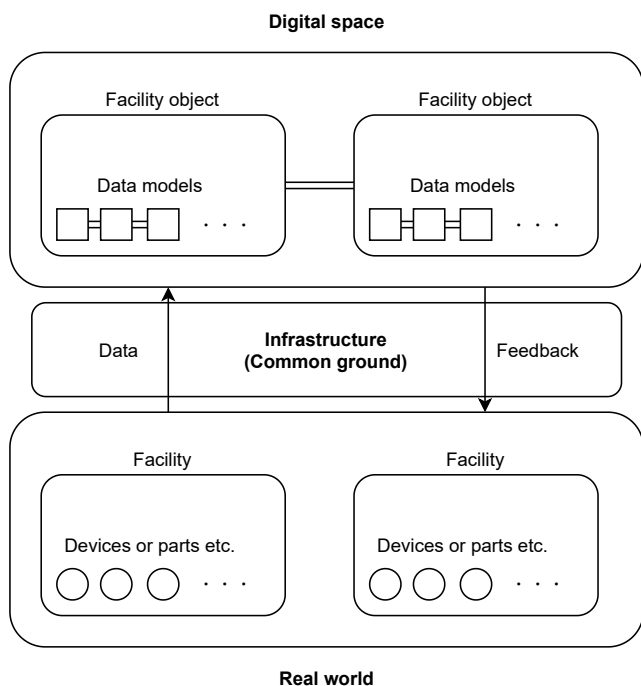


図 1 デジタルツインの概略図

これらの課題を解決するため、我々は、アプリケーションを利用するための手順を簡便化した、生産管理のためのデジタルツインアプリケーション(図3)、及び工場に設置された工作機械やIoTデバイスなどの情報を集積しアプリケーションに提供するためのAPIとDBを作成した。本アプリケーションでは、一般的に製作難易度が高い、Building Information Modeling(BIM)などといったメタデータを含んだ三次元モデルを必要とせず、三次元スキャニングやフォトグラメトリなどといった技術を用いて生成された簡易的なジオメトリを用いて、本アプリケーションを利用することが出来る。また、アプリケーション自体の構築プロセスを簡便化するためにゲームエンジンの一つであるUnityを用いて、クロスプラットフォームかつデプロイ易な環境で開発を行っている。本論文では、本アプリケーション、及びAPI, DBの概要、ユーザビリティテストによる利用評価、またこれらが工場の効率化や管理コストの低減などにどの程度寄与できるのか、そして最後に今後のアプリケーションの拡張について、報告する。

また、本研究の付随目標として、工場内での人や物、機械のデータを収集し、生産現場における人の動作、挙動等の動線を把握し、その行為の目的や要員を結びつけることで、工場内の暗黙知を解明し、作業員の仕事効率化を図り、工場全体の生産性を高めることができるかを模索する。

本稿の構成は以下である。まず、2章で本論文の関連研究となるデジタルツインアプリケーションに関する研究を紹介する。次に3章にて、本研究の目的、課題解決のために実装したデジタルツインアプリケーション、及びコモングラウンドについて詳細に説明する。4章では、本アプリケー

ション、及びコモングラウンドに関する定量的な評価を報告する。そして、5章では、本稿のまとめを行う。最後に、6章では、今後の課題を述べていく。

## 2. 関連技術・研究

この章では、デジタルツインやデジタルツインアプリケーション、工場の高効率化に関する基本事項や研究を紹介する。

### 2.1 デジタルツイン

2012年に米国航空宇宙局(NASA)は、デジタルツインの概念を再検討し、デジタルツインを物理モデルやセンシング、それらの過去のデータを利用し、対応した現実世界の対象のライフサイクルを反映するマルチフィジックスかつマルチスケールな統合システムと定義した[2]。デジタルツインとは、実空間における対象のツインを仮想空間上に用意し、そのライフサイクルを仮想空間上に反映させ、ツインの現在や過去のデータから対象をリアルタイムに監視することが出来るシステムである。そして、これら取得データから実空間の対象にフィードバックを行うことで、ライフサイクルや作業工程の最適化を図ることも目的とされる。

Taoらの研究[3]では、過去の産業界におけるデジタルツインアプリケーションに関する総合的なレビューを行い、デジタルツインの主要な理論構成やデジタルツイン研究の最先端を体系的に提示している。この研究では、デジタルツインの主要な理論構成として、

- DT Modeling, Simulation, and VV&A
- Data Fusion
- Interaction and Collaboration
- Service

の4点を挙げており、これらが現在の主要なデジタルツインを利用したアプローチであるとしている。また、この研究では、デジタルツインの構成モデルとして、三次元モデルと五次元モデルを提示している。三次元モデルでは、構成要素として物理世界、仮想世界、それら二つの接合部分の三つの要素を提示しており、五次元モデルでは、これらに加えてデータ(新しい知識体系を構築するための前提情報)やサービス(提供する課題解決能力)を付加している。

また、IoTの推進やRFID技術などのスマートセンサの出現により、よりモノからデータを集めやすくなった影響で、ビッグデータ環境が普遍的なものになってきている[4]。は、ビッグデータの環境下で先進的な製造システムを提案する一つの手法としてサイバーフィジカルシステム/デジタルツインを挙げており、これらはユーザが対象のライフサイクルの操作に対して、より良い判断を下すための洞察力を提供するとしている。

[5]では、サイバーフィジカルシステム/デジタルツインはIndustry4.0の主要技術であるとして、Industry4.0時代

の製造業におけるデジタルツインの役割を分析している。ここでは、デジタルツインは様々な分野でのシミュレーションを可能にし、設計段階での予知評価だけでなく、リアルタイムに取得されるセンシングデータを利用した、対象の継続的な更新もサポートしており、これらに基づいて対象の最適化や意思決定、予知保全を行うことが出来る技術であるとしている。また、デジタルツインの作成をサポートする市販のソフトウェアの出現からも産業界での注目が高いことを示唆している。

このようにデジタルツインは、データに関する技術との親和性も高く、Industry4.0の主要技術の一つであり、産業界での注目が高いことが示されている。

## 2.2 デジタルツインアプリケーション

デジタルツインアプリケーションとは、デジタルツインを課題解決の肝として利用しているアプリケーションのことである。その課題解決能力は主にクラウドに委ね、集積したデータをクラウドコンピューティングを利用しながら、活用し、実空間の対象のライフサイクルの可視化や対象に対するフィードバックを行う。

ここでは関連研究として、産業界においてデジタルツインアプリケーションによって具体的に課題解決を行っている研究をいくつか挙げていく。

デジタルツインアプリケーションとして課題解決を行っている例として、Zheng らのデジタルツイン技術の関連研究と応用について体系的に検討、及び製品ライフサイクル管理のためのデジタルツインのアプリケーションフレームワークを提案を行った研究 [6] があげられる。この研究では、デジタルツインアプリケーションのフレーム枠を物理、情報処理、仮想の三つの段階に分離して構成している。そして、そのフレームワークを溶接生産ラインを例にして構築し、検証している。

また、Zhou らは、電力網を解析するためのデジタルツインフレームワークを提案した [7]。この研究では、電力網のオンライン解析にデジタルツインを用い、実際のエネルギー管理システム (EMS) からエクスポートした中国国内の電力網を示した大規模なグリッドネットワークを使い、性能テストを行った。その結果、このデジタルツインアプリケーションでは、大規模電力網の運転状態をリアルタイムで追跡したり、ミラーリングしたりすることが、1秒以下の遅延で可能と示した。このように、現実世界の様々な課題をデジタルツインを用いて解決するための社会実装が行われており、その実装方法は多岐にわたっている。

## 2.3 工場の高効率化

ここでは、デジタルツインアプリケーションとして明記はしていないが、工場の高効率化に向け、各社が行っている取り組みについて紹介する。

棚橋らは鋳造工場に特化したエネルギー利用の効率化に取り組んだ [8]。ここでは、鋳造工場での製造プロセスに着目し、ライン全体のエネルギー消費をリアルタイムに監視する機能やグラフとして可視化する機能を作成することで、エネルギー消費の可視化を行った。ライン全体の工作機械の内、待機状態となる工作機械は溶解エネルギーのロスや生産性の低下が生じるとし、これらを可視化することも目的としている。

富士通グループでは、IoTを活用した工場の生産活動の最適化についての活動を行っている [9]。ここでは、IoTデバイスからリアルタイムにデータを取得し、それをクラウドサーバに蓄積し、利用するまでのシステムを提案している。そして、実際に会津若松の工場などで本システムを活用している。

このように、工場の高効率化というテーマにて、いくつもの産業用アプリケーションが構築されているが、三次元ジオメトリを活用し、現実の工場との対応付けを明確にすることやデジタルツインとして、仮想空間上でシミュレーションを行うといった試みはまだ少ない。

## 3. 生産管理のためのデジタルツインアプリケーション

### 3.1 本研究の目的

本研究では、1章で述べたように、システムのサイロ構造を回避しつつ、工場稼働効率を上げるためのデジタルツインアプリケーションを構築することである。そのためにも、システムのサイロ構造に関してはデータ処理をクラウド側に担うこととし、アプリケーション本体は処理されたデータを使用し可視化のみを担当することで機能構造を簡潔化する。次に、我々は工場効率化のために、電力状況について着目した。工場内の工作機械の電力消費量、稼働状況、パトランプに関する情報などを集積し、可視化するシステムを提案する。また、本システムでは、3Dビューワを搭載し、静的なジオメトリデータ上に工作機械の電力消費量から推定した稼働状況やパトランプによる異常状態、IoTデバイスに搭載されたセンサによって取得された温度情報や騒音情報などの環境状態、LiDARセンサから取得した点群データの投影を行うことで、リアルタイムに工場の状況を直感的に認識できるようにしている。工作機械から蓄積したデータは、電力消費量を棒グラフを、稼働状況をガントチャートを作成することで、過去のデータから工作機械の利用状況を可視化する。過去のデータについては、年、月、日といった時間に関する基準やエリアやグループなどと言った工作機械の所属するドメインによってまとめられており、データはこれらの項目によってカスタマイズされたものを表示する。そして、利用者の作業効率への影響という観点から、工場に設置した工作機械やIoTデバイスの情報を反映する速度を速めることで、工場内の

情報共有や緊急性の高い事象を逃さないようにリアルタイム性を高めることを目指した。

### 3.2 実装

デジタルツインは、物理デバイスや工作機械などの物体を保有する現実世界とシミュレーションを行うために現実世界のミラーリングを行った仮想世界、そしてそれらを繋ぐための部位によって構成される。

今回実装したシステムの概要図を図2に示した。本実装では、バックエンドとフロントエンドに分けている。バックエンドは、ジオメトリデータを格納し、IoTゲートウェイから取得した工作機械やIoTデバイスからの情報をリアルタイムに取得、集積、カスタマイズを行うクラウドサーバである。フロントエンドでは、ゲームエンジンであるUnity[10]を用いて、ジオメトリデータを用いたサイバースペース内のシミュレーションや3Dでの可視化、各種グラフの表示を行う。

#### 3.2.1 アプリケーション

アプリケーションの外観図を、図3に示した。本アプリケーションの構築にはゲームエンジンであるUnityを利用した。利用するデータは全て、後述するクラウドサーバから取得し、ここでは、3Dビューワ内での可視化、グラフ作成のためのデータとして利用している。なお、取得しているデータは以下のとおりである。

- ジオメトリデータ
- IoTデバイスからのセンシングデータ (温度、湿度、照度、騒音)
- LiDAR センサからの点群データ
- 工作機械のパトランプ
- 推定された工作機械の状態
- 工作機械の消費電力
- 顧客情報

なお、基本的にデータ改変を行うことでCPUリソースを使わないために、集積されたデータのカスタマイズについては後述するクラウドサーバ上でやっている。図3では、3Dビューワにて工作機械の稼働状況、電力消費量などを閲覧している。工作機械の稼働状況は、対応した色を割り当てており、利用者が一目で工場全体の工作機械の稼働状況を把握できるようにしている。また、パトランプに関する情報も取得しており、図3の画面上部にあるタブを稼働から警告に変更することで、工場内全ての工作機械のパトランプの情報を取得し、画面に反映する。また、図3に表示されているように、工作機械にマウスカーソルを合わせることで、工作機械に関する詳細情報(工作機械の名称、機械種別、稼働状況、消費電力、パトランプの状態)をポップアップにて表示する。工場内はいくつかのエリアに分けることが可能で、広い工場の中で目的のエリアだけを中止したい場合は、図4に示されているようにエリア別に3D

ビューワを利用することができる。また、エリアでのグループ分け以外にも機械種別ごとにグループ分けを行うことも出来る。これらのグループ分けは利用者が事前に決めることになる。工場の3Dジオメトリには、テキストチャが付与されている場合、そのテキストチャも表示されるが、その場合、工作機械を示すオブジェクトが見にくい場合がある。そのため、図5に示しているように、3Dジオメトリに割り当てられているテキストチャを単色かつ透過したものに変更する機能がある。これにより、視覚的に工作機械が捉えやすくなっている。そして、図5では、IoTデバイスから取得した環境情報をヒートマップとして3Dジオメトリの上にオーバーレイする機能も搭載しており、環境情報を数値だけでなく、可視化することを行っている。図6では、工作機械の稼働状況をガントチャートを用いて時間別に表示している。図7では、工作機械の電力消費量を稼働状況による積み上げ棒グラフにて表示している。ここでは、3Dビューワをリアルタイムに情報を把握するための機能として、グラフは過去や現在の履歴データから工場の状態変化を示すための機能である。

#### 3.2.2 クラウドサーバ/API

バックエンドであるクラウドサーバは図2に記載されているようにいくつかのサーバにより構成される。まず、IoTゲートウェイからアップロードされたデータはクラウド上のApache Kafka[11]に一時的に保存される。Apache Kafkaからは任意のタイミングでデータの取り出しが可能なので、バッチサーバ上ではKafka Consumerが常時動作しており、アップロードされたデータを即時データベース(Mongo DB[12])へと投入している。データベースに保存されるデータは大きく2種類に分類されており、1つは顧客情報、設備情報、3Dモデル内の座標情報といったマスターデータである。これらは原則的に運用前に事前に登録しておくもので、更新頻度は低い傾向にある。もう一方は、工作機械の電力値、周囲環境の気温、湿度などの毎分のセンサ測定値を保存するビッグデータである。こちらには前述のようにKafka Consumerから常時データが投入されるので、更新頻度は非常に高い。また、ビッグデータにはセンサの測定値そのものも保存されている一方で、これらの測定値から生成されるデータも同様に保存されている。例えば、バッチサーバでは工作機械の稼働判定処理を行なうプログラムが毎分動作しており、工作機械の主電源及び加工電源の電力値の大小に基づいて稼働状態(稼働・準備・待機・停止)を判定し、その判定結果をデータベースへと保存している。APIはPHPのWEBフレームワークであるLaravel[13]を用いて設計されており、ルーティングファイルにURLと実行処理を記述しておくことで、HTTPリクエストに対するレスポンスを規定している。URLはパスパラメータとして主に測定項目、対象(設備のID、設備のグループのIDなど)、期間、粒度(1分単位、60分単位、1日

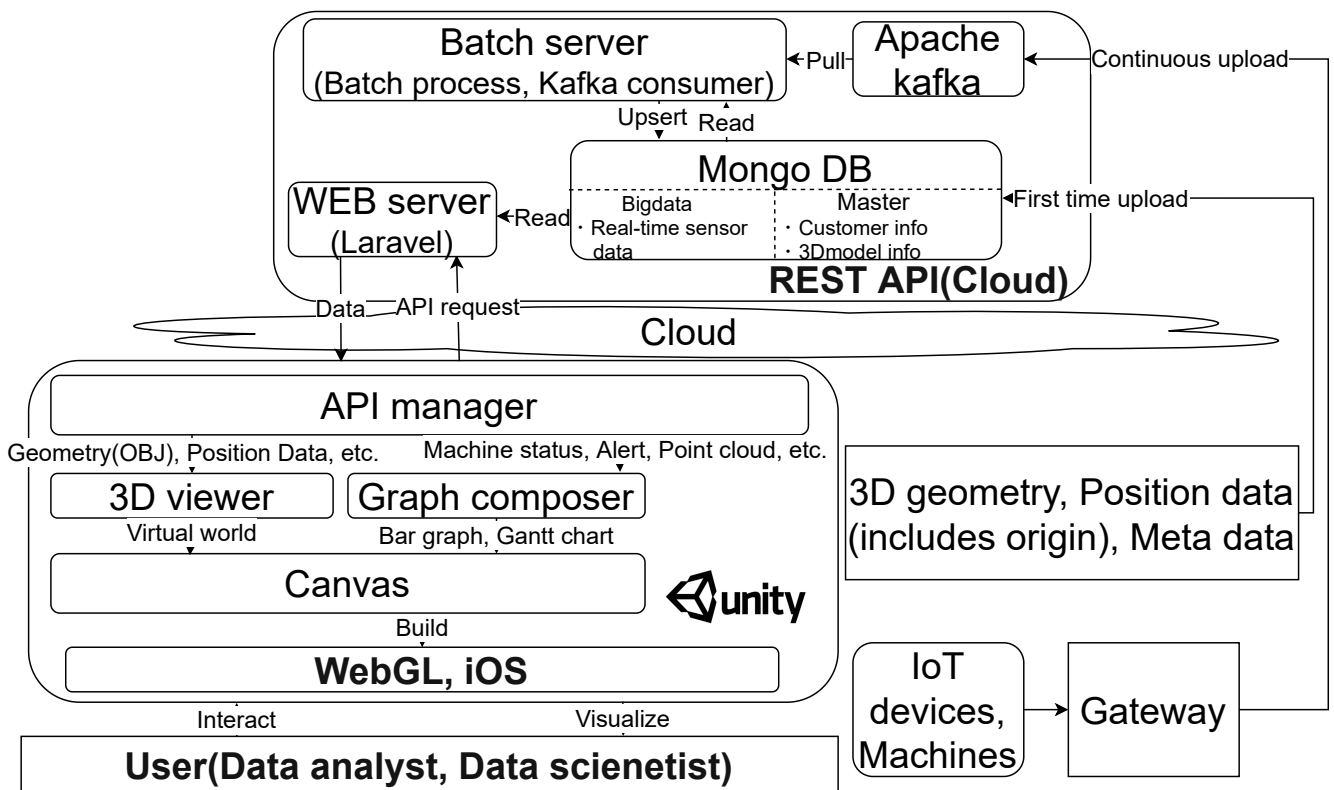


図 2 システム概要



図 3 デジタルツインアプリケーションのスクリーンショット

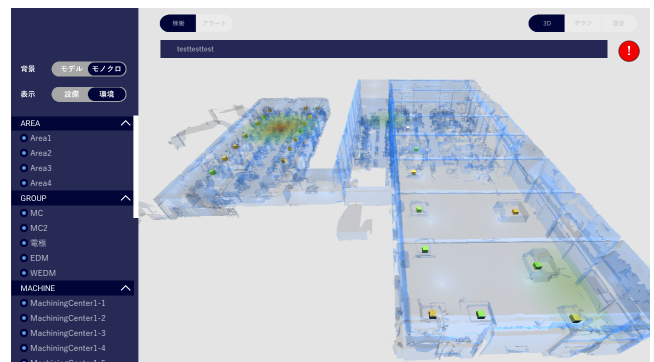


図 5 テキスチャ透過、ヒートマップ表示機能

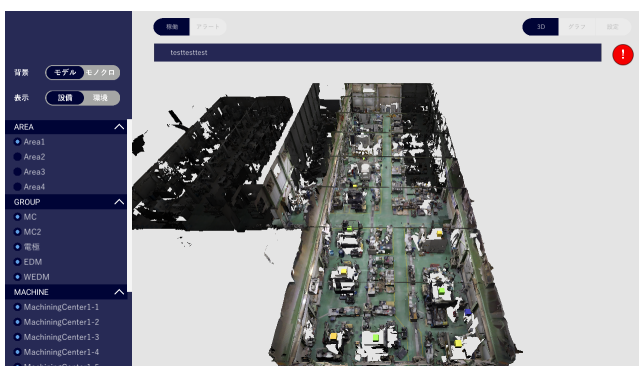


図 4 エリア別の強調表示機能

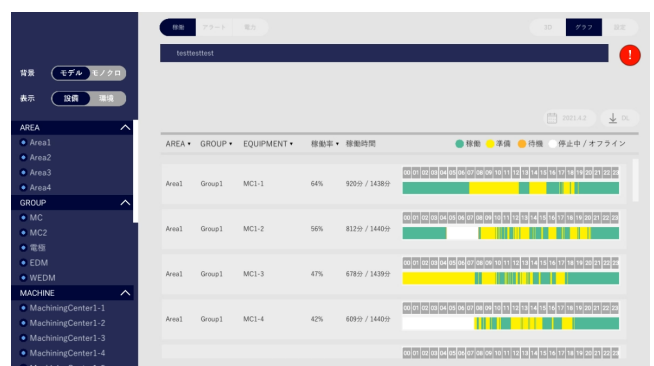


図 6 2021年4月2日の工作機械の稼働状況を示したガントチャート

単位など)を指定可能で、汎用的にデータの取得ができる設計となっている.APIはこれらのパラメータに基づいてデータベースから対応するデータを抽出するとともに、1

分単位のデータから60分単位のデータを作るといったような集計処理、フロントエンドに常に同じ形式でデータを渡すといった整形処理の役割も果たしている。



図 7 2021 年 4 月 1 日の工作機械の電力消費量を示した棒グラフ

## 4. 評価

今回行うべき評価として、以下の三つが考えられる。

- 設備総合効率 (Overall Equipment Effectiveness:OEE)[14]/設備機器総合有効生産力 (Total Effective Equipment Performance:TEEP)
- ユーザビリティテスト/ユーザアンケート
- デジタルツインアプリケーションやクラウドサーバの性能評価

ここで、OEE とは、設備の稼働スケジュール内にて、設備の設計上の稼働効率に対し、どの程度稼働しているかを定量化したものである。また、TEEP は OEE を暦上の時間に換算したものである。なお、OEE は時間稼働率、性能稼働率、良品率の乗算にて求められる。

また、別の評価方法としては、工場を対象としたユーザビリティテスト/ユーザアンケートを考慮している。これは、アプリケーションの使用感や工場の可視化、稼働率や電力消費を示したグラフの活用についてなどを調査することが考えられる。

しかし、これらは実際の工場に対し、本アプリケーションを導入した上でテストを行う必要があるが、本アプリケーションは実証段階で、導入している企業が存在しないため、これらは実モデルでテストすることが出来ず、評価は難しいと判断した。そのため、今回、利用評価を行うにあたって、利用者の作業効率への影響、情報の即時性という観点から、本アプリケーション、及びクラウドサーバの性能テストを行うことでこれの代替とする。具体的には、工作機械や IoT デバイスが情報を取得してから本アプリケーションに表示されるまでの時間を求め、これを評価する。

### 4.1 性能評価

本アプリケーションは工作機械や IoT デバイスからの情報を取得し、活用するが、その情報の運搬についてリアルタイム性が要求される。例えば、工作機械のパラライトが異常を示していた場合、直ちに利用者に伝える必要がある。本システムの総遅延  $D$  は図 8 に示すように、IoT デバ

イス/工作機械、クラウドサーバ、デジタルツインアプリケーションを伝わる情報の伝送遅延  $T_{mc}$ 、 $T_{cd}$  と、処理遅延  $P_m$ 、 $P_c$ 、 $P_d$  の総和となる (式 1)。

$$D = T_{mc} + T_{cd} + P_m + P_c + P_d \quad (1)$$

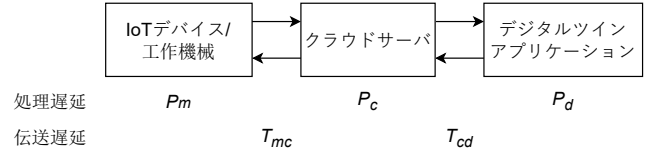


図 8 本システムにおける遅延

$T_{mc}$  は、工場に設置された IoT デバイスや工作機械からクラウドサーバへの伝達遅延、 $T_{cd}$  はクラウドサーバとアプリケーション間の伝送遅延であり、これらは IP ネットワークで送信されたパケットが宛先に到達するまでの時間を示す。 $P_m$  はセンサからデータを取得する処理時間やセンサの更新頻度による遅延が含まれる。 $P_c$  では、IoT デバイスや工作機械から取得したデータを集積、加工するための処理時間が含まれる。 $P_d$  では、クラウドサーバからデータを取得する間隔と取得した加工データを表示、グラフへ変更する場合の処理時間が含まれる。

まず、総遅延  $D$  を求める。IoT デバイスや工作機械では NTP との時刻同期機能を利用しており、データを取得するタイミングにて正確なタイムスタンプを保存している。次にデジタルツインアプリケーションにて、データを取得した後に画面に描画した後のタイムスタンプを求め、それらの差分を取ることで総遅延  $D$  を求めることが出来る。なお、今回使用した検証機材は表 4.1 の通りである。

図 9 では、実際に工場に敷設した特定の IoT デバイスからデジタルツインアプリケーションに表示するまでの総遅延  $D$  を箱ひげ図で示した。ここで、 $P_m$  に含まれるセンサの更新頻度は 1 分とし、 $P_d$  に含まれるクラウドサーバへのリクエスト頻度は 5 秒、15 秒、30 秒の三つを使用した。また、本アプリケーションは工場の利用者複数人が利用することを想定しているため、同時に複数の接続 (1,10,20) を行っている場合を想定し、実験を行った。結果として、 $P_m$  における、センサの更新頻度を含む  $P_m$  やクラウドサーバへのリクエスト頻度を含む  $P_d$  がボトルネックとなっており、総遅延  $D$  は 60 秒の間に幅広く収まる形となった。

図 9 では、総遅延  $D$  を求め、 $P_m$  や  $P_d$  がボトルネックとなっていることが分かったが、次に加工されたデータをデジタルツインアプリケーションに伝送するための  $T_{cd}$  を求めることで、クラウドサーバの同時アクセスの限界を求め、サーバの安定性を確認する。

図 10 では、クラウドサーバとデジタルツインアプリケーション間の伝送遅延である  $T_{cd}$  を箱ひげ図で示した。先ほどと同様に、クラウドサーバへのリクエスト頻度は

	OS	CPU	メモリ	ソフトウェア
クラウドサーバ	CentOS Linux release 7.9.2009	1vcpu	2GB	Laravel
PC	Windows 10 Pro	Intel®Core™ i9-10850K CPU 3.60GHz	32.0 GB	Unity2019.4.1f1

表 1 検証システムの構成

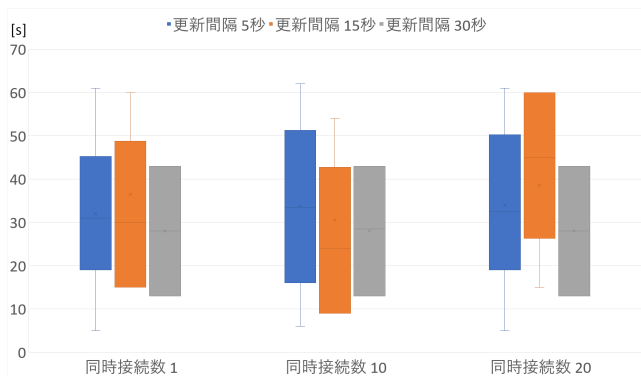


図 9 全体遅延

5 秒,15 秒,30 秒の三つを使用し、また、工場の利用者複数人が利用することを想定し、同時に複数の接続 (1,10,20) を行っている場合に分け、実験を行った。その結果、リクエスト数が 240/分を超えた場合に、伝送遅延に大きくばらつきが起きた。240/分未満では、伝送遅延のばらつきは少なく、同時接続数が 10 を切っている場合は、600ms を切っている事がわかる。だが、全体として伝送遅延は 1 秒を切っている場合が大半であり、システムのリアルタイム性を高めるにはセンサの更新頻度や API のリクエスト頻度を含む  $P_m$  や  $P_d$  に関して、高速化を行う必要がある。

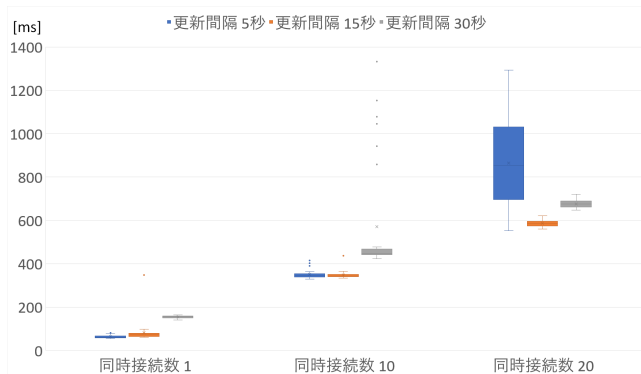


図 10 API 遅延

## 5. まとめ

本稿では、工場の稼働効率の向上をテーマに、一つのデジタルツインアプリケーション、及びそれを補佐するコモンクラウドとなるクラウドサーバと API を構築し、詳細を報告した。我々は、工場の稼働効率というテーマから電力消費に着目し、デジタルツインアプリケーションでは、電力消費の可視化を重点的に行った。評価を行うにあたって、本来は設備総合効率/設備機器総合有効生産力やユー

ザビリティテストを用いて本アプリケーションを評価するべきだが、本アプリケーションは実証段階であり、導入している企業が存在しないため、今回は工作機械や IoT デバイスでの情報の取得からデジタルツインアプリケーションにて取得できるまでの遅延を求め、利用者の作業効率、情報の即時性という観点からこれを評価した。その結果、デジタルツインアプリケーションから API にアクセスするまでの遅延は大半が 1 秒を切っており、通信環境での問題は少なかった。しかし、IoT デバイスや工作機械の情報の更新頻度やデジタルツインアプリケーションの API リクエスト頻度がボトルネックとなり、IoT デバイス/工作機械とデジタルツインアプリケーション間の総遅延は最大 1 分ほどの遅延が発生することが分かった。

## 6. 今後の課題

本章では、今後の課題として、本アプリケーションの改善点や他の評価方法について、また本アプリケーションを拡張したスマートビルディング向けアプリケーションについて、述べる。

### 6.1 本アプリケーションの改善点

4 章で述べたように、IoT デバイス/工作機械とデジタルツインアプリケーション間の総遅延は最大 1 分ほど発生し、パトライトなどの警告情報について、リアルタイム性が重要視される工場の中では、大きな問題となる。そのため、工場での一般的な許容遅延を模索し、センサの更新頻度を高める必要がある。また、デジタルツインアプリケーションからクラウドサーバへの API リクエスト頻度については、クラウドサーバ側に更新通知機能を付与し、接続しているデジタルツインアプリケーションに対し、通知を送るといった動作が考えられる。他にも、事前に IoT デバイス/工作機械のセンサの更新タイミングを静的な情報として把握しておき、デジタルツインアプリケーション側での更新タイミングをそれらに合わせるといったことが考えられる。

### 6.2 評価手法の選定、実行について

本稿では、IoT デバイス/工作機械、クラウドサーバ、デジタルツインアプリケーションに関する性能評価を行ったが、今後は 4 章にて述べたように、今後は実際の工場に本アプリケーションを導入し、設備総合効率 (OEE)/設備機器総合有効生産力 (TEEP) を計測し、本アプリケーションが工場の稼働効率の向上に寄与しているかを確認する必要

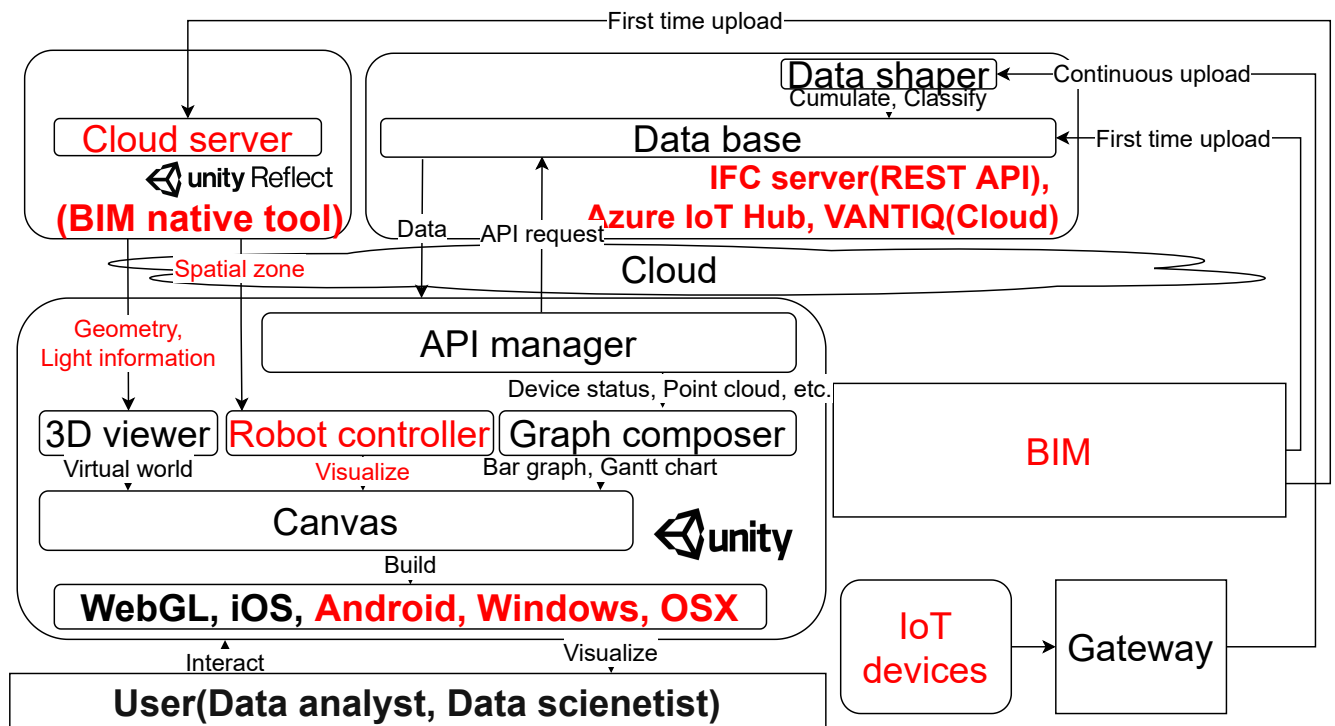


図 11 BIM 対応型システム概要

がある。また、ユーザビリティテスト/ユーザアンケートを行い、本アプリケーションの使用感や有用性を定性的に測定することも考えられる。

### 6.3 アプリケーションの拡張について

本稿では、BIM を利用しないジオメトリ情報のみで利用可能なアプリケーションを作成した。今回、データとして利用させていただいた工場では、工作機械や IoT デバイスの大まかな位置のみ把握する必要があり、厳密な精度のジオメトリや建物の建材に対するメタデータなどは必要としていなかった。現在、我々は、スマートファクトリーではなく、スマートシティ、スマートビルディングの枠組みでも研究活動を行っており、本アプリケーションの利用範囲を広げるための活動となっている。ここでは、ロボットプラットフォームを通して、デジタルツインアプリケーションからロボットの動作を制御する実証実験を行う予定である。しかし、現在のシステムでは、BIM データが利用できず、取得したジオメトリデータと実空間のずれからロボットの制御に支障をきたす可能性がある。また、BIM データが保有している各種ジオメトリの詳細な情報（基本的なものとしては、壁であるか床であるかなど）を利用することでロボットの経路探索をサポートすることもできる。そして、BIM データに内包される電灯の情報から実空間の仮想空間への投影、可視化に関してもより精度を高めた表現が可能となる。そのため、本アプリケーションを含めたシステムを図 11 のように変更し、厳密なジオメトリや詳細なメタデータを含む BIM データを利用可能とした。なお、

図 11 では、新しく追加されているコンポーネントについて、赤字で記載している。新しく追加されているコンポーネントとして顕著なのは、Unity Reflect[15] である。これは、現在使用しているゲームエンジンである Unity に対し、ネイティブな BIM サポートを行う拡張機能である。なお、ロボットの移動経路算出には、ジオメトリ情報を利用した動的ナビゲーションメッシュの算出や IoT デバイ스에搭載されたセンサ (LPS、LiDAR) を利用した位置推定などのサイバー空間内でのシミュレーションを利用する予定である。

### 参考文献

- [1] 粕谷 貴司 (TakashiKasuya). BIM を用いた Software Defined BACS の実現に関する研究 (The design and implementation of Software Defined BACS based on shared BIM repository). PhD thesis, Ph.D Thesis, The University of Tokyo, 2020.
- [2] Edward Glaessgen and David Stargel. The digital twin paradigm for future NASA and U.S. air force vehicles. In *53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Structures, Structural Dynamics, and Materials and Co-located Conferences*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, April 2012.
- [3] F Tao, H Zhang, A Liu, and A Y C Nee. Digital twin in industry: State-of-the-Art. *IEEE Trans. Ind. Inf.*, Vol. 15, No. 4, pp. 2405–2415, April 2019.
- [4] Jay Lee, Edzel Lapira, Behrad Bagheri, and Hung-An Kao. Recent advances and trends in predictive manufacturing systems in big data environment. *Manufacturing Letters*, Vol. 1, No. 1, pp. 38–41, October 2013.
- [5] Elisa Negri, Luca Fumagalli, and Marco Macchi. A review of the roles of digital twin in CPS-based production



- systems. *Procedia Manufacturing*, Vol. 11, pp. 939–948, January 2017.
- [6] Yu Zheng, Sen Yang, and Huanchong Cheng. An application framework of digital twin and its case study. *J. Ambient Intell. Humaniz. Comput.*, Vol. 10, No. 3, pp. 1141–1153, March 2019.
- [7] M Zhou, J Yan, and D Feng. Digital twin framework and its application to power grid online analysis. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, Vol. 5, No. 3, pp. 391–398, September 2019.
- [8] 棚橋尚貴. 鋳造工場向けエネルギー利用効率化システム『MiELCAST (みえるキャスト)』の開発. *エレクトロヒート*, Vol. 32, No. 5, pp. 24–27, 2012.
- [9] 地主岳史, 知崎一鉦, 川上裕介. IoT 活用による工場の生産活動最適化. 情報処理学会 デジタルプラクティス, 2017.
- [10] Unity. <https://unity.com/>. 2021 年 4 月 20 日閲覧.
- [11] Apache Kafka. <https://kafka.apache.org/>. 2021 年 5 月 1 日閲覧.
- [12] Mongo DB. <https://www.mongodb.com/>. 2021 年 5 月 1 日閲覧.
- [13] Laravel. <https://laravel.com/>. 2021 年 5 月 1 日閲覧.
- [14] Örjan Ljungberg. Measurement of overall equipment effectiveness as a basis for TPM activities. *Etica-ver=Z*, Vol. 39, p. 88, May 1998.
- [15] Unity Reflect. <https://unity.com/products/unity-reflect>. 2021 年 5 月 1 日閲覧.