

Title	デジタルツインを用いた除雪車運行計画による除雪作業支援システムに関する研究
Author(s)	石丸, 琴子
Citation	
Issue Date	2025-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/19782
Rights	
Description	Supervisor: 丹 康雄, 先端科学技術研究科, 修士 (情報科学)

修士論文

デジタルツインを用いた除雪車運行計画による除雪作業支援システムに関する研究

石丸 琴子

主指導教員 丹 康雄 教授

北陸先端科学技術大学院大学
先端科学技術研究科
(情報科学)

令和 7 年 3 月

Abstract

Many municipalities and government agencies are currently promoting smarter technology through the introduction of technology and the utilization of data, and the digital twin is attracting attention as a foundation for this. Especially in the field of disaster prevention, a common technology platform is available that collects real-time data from IoT sensors, accurately reproduces the situation, and performs highly accurate simulations. In this paper, we propose a system that utilizes the digital twin to realize optimal snowplow vehicle operation planning as a snow disaster prevention measure. Conventionally, snow removal decisions are made by supervisors after evening by checking weather forecasts, patrolling, and using observation point data, and work is performed during the night and morning. However, when sudden weather changes occur during the night, snow damage issues exist, such as large-scale vehicle stoppages and the resulting enormous damage. It is a heavy burden for the supervisor to predict the snow removal work environment with high accuracy over a long period of time and to make decisions on his or her own. To address this issue, a snow removal support system is required that automatically collects a wide range of information and can respond to changes in the environment after the decision to mobilize. In constructing a snow removal digital twin, sensing data such as thermometers and anemometers will be collected. To reproduce snow accumulation conditions, reference will be made to demonstration experiments conducted by PLATEAU, a project led by the Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism. A simulation of the spatial distribution of snow accumulation due to wind and melting snow (OpenFOAM solver) will be performed to reproduce snow accumulation conditions on a digital twin. Areas where the snow accumulation reaches the snow removal dispatch criteria defined for each region are extracted as snow removal points, and the shortest route for all snow removal vehicles to pass through the snow removal points in the relevant area is calculated. Using the simulation results, a visualization is presented to the supervisor, which allows the supervisor to see images of snowfall conditions, changes in snowpack, snowplow vehicle travel conditions, and proposed future routes. Based on the proposed optimal routes, which are updated at regular intervals using real-time data, the supervisor can immediately give work orders according to the snowfall and snow removal work conditions. The system configuration provides feedback to the virtual space when conditions change. The proposed system reduces the supervisor's burden of collecting and analyzing information. Management on the digital twin will facilitate coordination with operators and enable real-time proposals for each region. These effects are expected to improve the efficiency and accuracy of snow removal operations.

Furthermore, supervisors will be able to take into account multiple objectives when making decisions on snow removal operations and snow removal routes, such as securing routes for emergency vehicles, prioritizing routes based on frequency of use, and considering areas with large numbers of people in need of assistance, in addition to efficient completion of snow removal operations. A digital twin that responds to changes in real-time data, such as the one addressed in this paper, can be used as a common framework not only in the field of disaster management, but also in various other areas, such as traffic management and understanding the dynamics during urban events. Through such utilization, the effect of introducing the digital twin in public administration is expected to be very significant

概要

現在、多くの自治体や行政機関で、技術の導入やデータの利活用によるスマート化を進めており、その基盤としてデジタルツインが注目されている。特に防災分野では、IoT センサからリアルタイムデータを収集し、状況を正確に再現、高精度なシミュレーションを行う技術基盤が共通して利用可能である。本論文では、雪害対策としてデジタルツインを活用し、最適な除雪車運行計画を実現するシステムを提案する。

従来、除雪作業の判断は監督者が気象予報の確認、パトロール、観測点データの活用により夕方以降に行い、夜間から朝方にかけて作業を行う。しかし、夜間の急な気象変化が生じた際は、大規模な車両滞留などの災害発生、それによる莫大な損害の発生といった雪害の課題が存在する。監督者にとって、長時間にわたる除雪作業環境を高精度に予測し、一人で決定することは大きな負担である。これに対応するため、多岐にわたる情報を自動的に収集し、出動判断以降の環境変化にも対応できる除雪作業支援システムが求められる。

除雪デジタルツインを構築する上で、温度計・風速計などのセンシングデータを収集する。積雪状況の再現には、国土交通省主導のプロジェクトである PLATEAU が行った実証実験を参考にする。風雪・融雪による積雪量の空間分布シミュレーション（OpenFOAM のソルバー）を行い、デジタルツイン上に積雪状況を再現する。地域ごとに定められた除雪出動基準の積雪量に達する地域を除雪箇所として抽出し、該当エリアの除雪ポイントを除雪車が全て通る最短経路を算出する。シミュレーション結果を用いて、降雪状況の映像、積雪量の変化、除雪車の走行状況、今後の提案経路を確認できるビジュアライゼーションを監督者に提示する。リアルタイムデータにより、一定時間ごとに更新される最適な経路案に基づき、監督者は降雪状況・除雪作業状況に合わせ、即座に作業命令を下すことが可能となる。条件の変更がある際は仮想空間にフィードバックするシステム構成である。

提案したシステムにより、監督者の情報を収集・分析する負担が軽減される。デジタルツイン上での管理により、作業者との連携が容易になり、地域ごとのリアルタイムな提案が可能となる。これらの効果により、除雪作業の効率と精度向上が期待できる。さらに、監督者は除雪作業の実施判断や除雪経路を決定する際、効率的な作業完了以外にも、緊急車両の路線確保や利用頻度に応じた優先付け、要支援者の多い地域への配慮など、複数の目的を加味した判断が可能となる。

本論文で扱うようなリアルタイムデータの変化に対応するデジタルツインは、防災分野にとどまらず、交通管理や都市イベント時の動態把握など、さまざまな領域で共通のフレームワークとして活用できる。このような活用により、行政におけるデジタルツインの導入効果は非常に大きいと考えられる

目次

第 1 章	はじめに	1
1.1	研究背景	1
1.2	研究目的	1
1.3	本文の構成	2
第 2 章	関連研究・関連技術	4
2.1	現行の除雪作業	4
2.1.1	自治体での事例	4
2.2	デジタルツインおよび関連技術	5
2.2.1	デジタルツインとは	5
2.2.2	デジタルツインの事例	5
2.2.3	IoT	7
2.2.4	センシング、アクチュエータ	7
2.2.5	データ	9
2.2.6	シミュレーション	12
第 3 章	検討する除雪デジタルツイン	13
3.1	センシング	13
3.1.1	除雪作業実施の判断材料となるセンシング項目	13
3.1.2	既存の積雪センサ	14
3.2	シミュレーション	15
3.2.1	風雪・融雪シミュレーション	15
3.3	除雪探索アルゴリズム	17
3.3.1	巡回セールスマン問題	18
3.4	可視化技術	18

3.4.1	可視化ツール	19
3.4.2	比較と適性	21
3.4.3	結論	21
第 4 章	システム提案	22
4.1	システム全体図	22
4.2	ユーザーインターフェース	23
4.3	本システムにより最適化できる要素	23
第 5 章	評価	27
5.1	現状の除雪作業と提案システムの比較	27
5.2	現状の除雪作業と提案システムの比較	29
5.3	提案システムの評価	30
第 6 章	考察	32
6.1	導入検討	32
第 7 章	おわりに	34
7.1	結論とまとめ	34
	本研究に関する对外発表	35
	謝辞	36
	参考文献	37

図目次

1.1	除雪作業支援システム	2
2.1	LoD による詳細度の違い	10
3.1	風雪・融雪シミュレーションの流れ	16
3.2	ParaView による積雪深可視化	16
3.3	風雪・融雪シミュレーション結果	17
3.4	QGIS	20
4.1	デジタルツイン全体図	22
4.2	デジタルツイン全体図	23

表目次

2.1	検出信号と検出対象物	8
2.2	都市デジタルツインのセンサ	8
3.1	除雪作業に関するデータ・取得方法の種類	14
4.1	除雪車に関するデータ	24
4.2	道路に関するデータ	25
4.3	地域に関するデータ	25
5.1	除雪路線分類	28

第 1 章

はじめに

本章では、本研究の背景、目的、本文の構成について述べる。

1.1 研究背景

現在、日本は少子高齢化、生産人口不足、自然災害など様々な課題を抱えている。これらの課題に対処するため、スマートシティや DX などの政策が注目されている。多くの自治体や行政機関で、技術の導入やデータの利活用によるスマート化を進めており、その基盤としてデジタルツインが必要とされる。デジタルツインとは、現実世界から収集したデータをもとに、まるで双子であるかのような仮想空間で再現する技術である [1]。行政における都市デジタルツインの活用は、防災、交通・混雑、環境・エネルギー、まちづくり・観光など多岐にわたる分野で展開できる。

特に、土砂災害・水害・雪害などの防災においては、リアルタイムのデータを収集し、刻々と変わる状況を正確に再現し、高精度なシミュレーションを行い、災害対策を行うという技術基盤は共通して利用できる。

1.2 研究目的

本研究では、雪害対策としてデジタルツインを活用し、最適な除雪車運行計画を実現可能とするシステムを提案する。従来の雪害対策シミュレーションは、センサデータ・気象情報を用い、出動判断を支援するため作られてきた。本研究では、デジタルツインを用いることで、出動以降の環境変化に対応できるシステム構築を目指す。これにより、大規模な車両滞留発生などの災害防止、それによる莫大な損害を防ぐことが可能になる。

また、デジタルツインを用いることで、効率的な経路を提案するだけでなく、病院までの緊急車両の路線を優先的に確保するなど複数の目的を考慮した運行計画策定が可能となる。

図 1.1 に除雪作業支援システムを示す。出動判断を行う担当者と除雪支援システムが連携できるような形をとり、最終的な決定・判断は担当者が行うシステムを目指す。

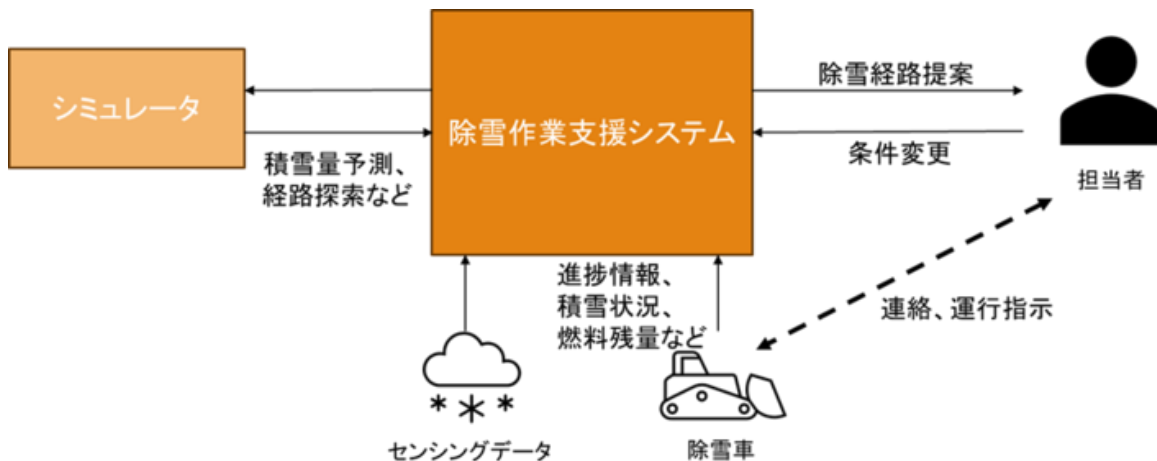


図 1.1 除雪作業支援システム

1.3 本文の構成

本文は、本章を含め、7 章で構成される。章毎の概要は以下のように示す。

- 第 1 章
 - 研究背景と研究目的、本論文の構成について述べる。
- 第 2 章
 - 除雪作業、デジタルツインについて調査した現状と連携技術について述べる。
- 第 3 章
 - 検討する除雪デジタルツインの要件について述べる。
- 第 4 章
 - システムの具体的な提案手法について述べる。
- 第 5 章
 - 本研究で提案するシステムの評価について述べる。

- 第6章
 - 本研究で提案するシステムの考察について述べる。
- 第7章
 - 本論文のまとめについて述べる。

第2章

関連研究・関連技術

本章では、除雪作業とデジタルツインについて調査した現状と連携技術について述べる。

2.1 現行の除雪作業

道路除雪業務は、積雪地帯における冬季の道路交通や生活インフラを維持する上で重要な役割を担う。一方で、除雪業務にはさまざまな課題があり、その実施には大きな責任が伴う。

冬季には、役所の担当者が夕方に夜間の除雪作業の実施を判断する。しかし、夕方以降の局地的な天候変化や、それまでの除雪状況が判断に大きく影響を与えるため、経験豊富な担当者であっても一度下した判断を覆さざるを得ないことがある。そのため、夕方の時点で出動が不要と判断された場合でも、除雪作業員は出動に備える必要があり、大きな負担となっている。

また、除雪出動の判断には、対象エリアを車で巡回し、積雪状況を確認する「雪見巡回」が行われる。この作業では、対象エリアを車で巡回し、積雪状況を確認する。具体的には、積雪した道路を走行しながら、エリアごとに定められた基準値の積雪深に達しているかを測量器具を用いて確認する。雪見巡回が完了するまで除雪作業の決定は下せず、その間にも積雪は進行するため、多大な労力と時間を要する。

2.1.1 自治体での事例

ある自治体では、除雪業務を担う民間請負業者の多くは地方の中小事業者である。近年の高齢化に伴い社員数や新規入場者が減少し、担い手の確保及び対応力の低下が深刻と

なっている。一方、行政においては、財政事情を背景に事業の効率化や大雪による経済損失の抑制が求められ、除雪作業を支援する IoT 技術や AI といったデジタル技術の導入が検討されている。しかし、導入のコストを考慮すると容易に実現できない現状である。

2.2 デジタルツインおよび関連技術

2.2.1 デジタルツインとは

デジタルツインとは、現実世界の対象物やプロセスを仮想空間に再現する技術であり、IoT 技術にけるセンサデータとシミュレーション技術を組み合わせることで、対象の挙動や状態をリアルタイムにシミュレートする [1]。

デジタルツインの概念は、2003 年に Michael Grieves と NASA の John Vickers が製品ライフサイクルに関する議論の中で提唱したものである。製品に関する情報が手作業や紙ベースで収集されていた時代、Grieves と Vickers は、製品の仮想モデルがライフサイクル管理の基盤になると考えた。コンピュータ技術の進化により、仮想モデルの構築やシミュレーションが可能になり、さらにマイクロチップやセンサ、通信技術の発展によって、物体の動作や環境の情報を収集することが現実のものとなった。シミュレーション技術の発展と製品データの収集・フィードバックを通じて、物理製品を仮想空間に再現する現在のデジタルツインの原型が形成された。NASA による詳細な定義の後、デジタルツインは航空宇宙分野や製品ライフサイクル管理の分野で研究が進められるようになる。初期の定義では物理製品を含む仮想的な表現が主軸であったが、Grieves はこれを拡張し、物理製品、仮想表現、それらを双方向で接続する 3 つの要素から構成されるものとした。

2.2.2 デジタルツインの事例

この技術は、製造業やインフラ管理、ヘルスケアなど、さまざまな分野で活用されており、効率化やパフォーマンスの向上、問題の予測や解決に役立つ手段として注目されている。代表的な例をいくつか紹介する。

製造

1. スマートファクトリー: 製造ラインや設備のデジタルツインを用いて、運用効率の最適化、不具合の予測、メンテナンスの自動化を実現している。例えば、自動車業界では生産工程のリアルタイムモニタリングや製品品質の向上に使用。
2. 製品開発: 製品のプロトタイプをデジタルでシミュレーションし、試作コストや時

間を削減。

インフラ

1. 発電所: 発電所のタービンや機器のデジタルツインを用い、効率の向上やダウンタイムの短縮を図る。風力発電では、風車の最適な配置や性能のモニタリングにも活用。
2. スマートグリッド: 電力ネットワーク全体のデジタルツインを構築し、電力需要の予測や供給の最適化を行う。

ヘルスケア

1. 人体のデジタルツイン: 患者のデータを基に個人のデジタルツインを作成し、疾患の予測や治療の最適化を目指す。医薬品の開発においても仮想試験を行うことで、開発期間の短縮が可能に。
2. 病院管理: 医療機器や病院設備のモニタリングに利用し、メンテナンスや稼働効率を向上。

都市計画

スマートシティを実現するために利用され、交通、建築物、インフラのデジタルツインを構築し、都市の設計や運用の効率化を目指す。建物の設計・管理においては、BIM (Building Information Modeling) とデジタルツインを組み合わせ、建設プロセスの最適化や維持管理の効率化を図る。

日本、シンガポールにおける都市のデジタルツイン事例を以下に示す。

1. Project PLATEAU(プロジェクト プラトール)

国土交通省が推進する「Project PLATEAU」は、現実の都市空間を 3D モデルとして再現し、都市計画や防災対策に活用する取り組みである。2023 年 12 月時点で、約 130 都市の 3D 都市モデルが公開されている。

2. 東京都デジタルツイン実現プロジェクト

東京都は、都市のデジタルツインの社会実装に向けたロードマップを策定し、3D データや動的データの活用を進めている。2023 年度には、デジタルツイン庁内データ連携基盤の構築や、産学官でのデータ連携に向けた課題検証などを実施した [2]。短期的にはデータ可視化や 3 次元地図を用いたシミュレーションを想定し、浸水シ

ミュレーションや都市開発に伴うシミュレーションが検討されている。

3. Virtual Singapore

Virtual Singapore はシンガポール政府がデジタルガバメント施策として、2014 年にスタートした国家規模のデジタルツインプロジェクトである。公的機関、民間企業、国民及び研究部門による使用を目的とし、都市全域を三次元都市モデルで再現したデジタルプラットフォームを基盤とする。これらを活用し、都市のデジタルツインを構築し、都市計画や自然災害のリスク評価、交通ルートの最適化などに活用している。

2.2.3 IoT

IoT(Internet of Things) は、家電や自動車、産業機械、センサ、ウェアラブルデバイスなどの「モノ」がインターネットに接続され、相互に通信し、情報の交換・分析を行う仕組みを指す。IoT の導入により、人間の介入を最小限に抑えた効率化や、リアルタイムでのデータ活用による利便性の向上、さらには故障予測による運用コストの削減といった効果が、多様な分野で発揮されている。都市のデジタルツインにおいても、IoT によるデータ収集が高度なシミュレーションや予測を可能にしており、IoT はデジタルツインを機能させるための重要な基盤技術であるといえる。

IoT 化が進むにつれ、様々なモノがインターネットにつながる一方で、サイバー攻撃の被害も増加している。NICT が運用するサイバー攻撃観測網（NICTER）が 2022 年に観測したサイバー攻撃関連通信では、依然として IoT 機器（特に DVR/NVR）が最も多く標的にされたことが示されている [3]。IoT の発展とともに、セキュリティ対策の強化が早急な課題である。

2.2.4 センシング、アクチュエータ

センサ

センサとは、熱、電気、磁気、光などの物理現象を計測し、取得したアナログデータをデジタル信号に変換する装置を指す。センサによって収集されるデータは、デジタルツインにおけるモデルの構築や更新、シミュレーションに活用される。これにより、物理空間を仮想空間に忠実に再現することが可能となり、センサはデジタルツインの基盤を支える重要な要素である。既存のセンサを検出対象物ごとに分類したものを表に示す。

表 2.1 に挙げたセンサの種類より、具体的に都市のデジタルツインを構築する上で使用

できるセンサを表 2.2 に示す。また、近年ドローンの市場規模が拡大しており、デジタルツインのセンサとしてのドローンの利用、画像解析がデジタルツインに貢献すると考えられる。

検出信号	検出対象物
光・放射線	照度、波長、位相、透過、線量
機械量	圧力、トルク、流量、体積、質量、変位、速度、加速度、真空度、音波
熱	温度、熱量、比熱、エントロピー、熱伝導率
電気	電圧、電流、電荷、抵抗、誘電率、静電容量
磁気	磁界、磁束、モーメント、磁化、透磁率
化学	ph、イオン、濃度、水分、ガス、酸素
その他	GPS

表 2.1 検出信号と検出対象物

表 2.2: 都市デジタルツインのセンサ	
使用分野	センサの種類
交通	交通量、車両識別、車載
環境	気象、空気質
エネルギー	電力使用量、ガス使用量、再生可能エネルギー発電量
水道	水質、水位、水圧
スマートビル	人流、室内温度・湿度、構造物の振動、監視カメラ
ウェアラブルデバイス	位置情報、身体モニタリング

表 2.2 都市デジタルツインのセンサ

これら既存のセンサを組み合わせることにより、都市情報を収集でき、デジタルツインを構築できる。また、これら様々なセンサを使用する上で、センサからのデータ取得、センサの保守管理、安定したネットワーク環境の構築、プライバシー保護、セキュリティなどの観点が導入する上で必要である。

アクチュエータ

アクチュエータとは、電気、油圧、空圧などのエネルギーを物理的な運動や力に変換する装置を指す。センサが収集したデータをデジタルツイン内で処理・分析した結果を実世界での具体的な動作として反映する役割を担う。

デジタルツイン内でのアクチュエータの事例を以下に示す。

- 物理空間との相互作用を実現するため、デジタルツインでの最適化やシミュレー

ション結果を実際の装置やシステムの動作として物理空間にフィードバックする。
交通デジタルツインにおいて、信号機を制御しリアルタイムで交通量を最適化。

- リアルタイムデータに基づいて物理環境を動的に制御する。スマートビル内の空調システムの調整や照明の自動点灯・消灯による省エネの実現。
- デジタルツイン内での分析や予測結果に基づき、自律的な操作を行う。自律走行車がセンサ情報とデジタルツインの指示を受け、走行。

2.2.5 データ

デジタルツインを構築する上で、扱うデータの種類は多岐にわたる。特に都市デジタルツインを実現する上で使用されるデータ、オープンデータの進展について述べる。

統計データ

統計データとは、特定の現象や対象について数値的に集計されたデータを指す。例えば、人口データには、居住者数、年齢分布、出生率などが含まれる。経済活動に関するデータとしては雇用率や平均所得が挙げられ、交通分野に関するデータとしては車両台数や公共交通機関の利用状況などが統計データとして扱われる。これらのデータは、都市計画だけでなく、市場調査、医療分析や社会科学研究など様々な分野で応用される。

日本では、総務省統計局により国勢調査が行われ、人口や世帯情報が調査され、公開されている。道路関係のデータは、国土交通省により全国道路・街路交通情勢調査が行われている。

GIS データ

GIS データとは、地理情報システム (GIS : Geographic Information System) で利用される空間データや地理データを指す。GIS データは場所を特定するための座標情報に加え、建物の高さや土地利用の種類など場所に関する属性データを持つ。GIS データは、地図データ、画像データ、3D データなど多様な形式である。

日本においては、「G 空間情報センター」や「国土数値情報ダウンロードサイト」といったオープンデータプラットフォームによって、交通データや人口統計、都市のインフラ情報などが公開されている。

City GML

City GML(City Geography Markup Language) は、都市や建築環境に関するデータを 3 次元でモデリング・表現するための標準フォーマットを指す。City GML は GIS データの国際標準規格を管理する Open Geospatial Consortium(OGC) によって策定されたフォーマットである。都市や建築環境のデータを統一フォーマットで扱うことで、分野ツールを超えてデータの相互運用性を確保できる。特徴として、オブジェクトを異なる詳細度 (LoD : Levels of Detail) で記述が可能であり、図 2.1 のように分類される [4]。



図 2.1 LoD による詳細度の違い

BIM/CIM

BIM(Building Information Modeling) とは、建物の設計や建設、運用に関する情報を統合した 3 次元デジタルモデルを指す技術およびプロセスを指す。3D 情報に加え、建築物の構造や材料、性能、コストなどといった属性情報が付加されたモデルを作成する。設計、建設、運用段階で情報を共有することで、設計ミスの防止やコスト削減に寄与する。

CIM(Civil Information Modeling) とは、BIM の考え方を土木分野に拡張したものである。道路や橋梁、河川、トンネルといったインフラの設計、施工、維持管理においてデータ

の統合管理のため利用される。建物単位の詳細データ (BIM) と広域なインフラデータ (CIM) を組み合わせることで、都市全体のエネルギー効率向上や災害対策に応用できる。

3 次元点群データ

3 次元点群データとは、航空機や地上のレーザースキャナーなどを用いて、地表面や建物、樹木などの対象物から得られる無数の点の集合体であり、3 次元 (X、Y、Z) の座標情報を持つポイントデータである [5]。3 次元点群データにより、建物の高さや形状、道路の勾配、樹木の配置など、都市環境の微細な特徴を正確に把握することが可能である。また、定期的にデータを取得・更新することにより、都市環境の変換を詳細にモニタリングでき、都市計画や資産管理、災害対策に利用される。

位置情報データ

位置情報とは、モバイル端末などの位置取得に関する情報である。

取得方法には、GPS、Wi-Fi、Beacon、基地局による信号を受信し、位置情報を取得している。これらにより、位置情報の精度、取得する端末・環境が決まる。取得方法により、山、室内、地下といった場所によらず、位置情報を把握することができる。

オープンデータの進展

データのオープン化は、都市計画のデジタルツインや他分野での活用を進める上で不可欠な要素である。一方で、プライバシーとセキュリティ、データの標準化、データ品質、利害関係者の調整といった課題が依然として存在する。特にデータの標準化は、都市デジタルツインを構築する上で、複数の分野のデータを組み合わせる必要があるため、この課題は顕著である。これらの課題を克服するためには、官民連携、技術的なソリューション、そして国際的な枠組みの構築が求められる。

国連や欧州連合 (EU) では、地理空間データや環境データの標準化とオープン化を進める取り組みが行われている。特に、EU の「INSPIRE Directive」は、地理情報を統一的に提供する枠組みを構築している。

日本においては、オープンデータプラットフォームによって、交通データや人口統計、都市のインフラ情報などが公開され、データ利用が容易となっている。また、都市デジタルツインの活用を促進するため、政府と民間企業が連携し、データを共有する仕組みの整備が行われている。「スーパーシティ構造」や「スマートシティガイドライン」でデータ連携基盤について整理されている [6]。

2.2.6 シミュレーション

デジタルツインは、防災の分野においての利用が期待され、雪害以外でのシミュレーションも過去にある。

水害避難シミュレーション

水害時に避難タイミングの参考となる根拠データ生成を目的に、被害状況の一元的な定量化を図る被害予測システム ARIA は、シミュレーション・エミュレーション連携基盤 Smithsonian を利用して、シミュレータを動作するシステムである [7]。

第3章

検討する除雪デジタルツイン

本章では、検討するデジタルツインに必要な要素について述べる。

3.1 センシング

デジタルツイン上で除雪作業環境を再現するため、積雪量や道路状況を把握できる情報を取得するセンシングシステムを検討する。

3.1.1 除雪作業実施の判断材料となるセンシング項目

除雪作業の実施を判断する役所の担当者は、まず気象庁などの積雪予測を確認する。積雪が始まると、各エリアの基準値に積雪深が達しているかを確認するため、地域内の複数地点を巡回し、測定を行ったうえで判断を下す。夕方の情報をもとに、翌朝までの作業計画を立てる必要があり、高精度な計画を立てることは難しい。

除雪作業開始後も気象予測を随時確認することで、急な大雪といった気象や作業状況の変化に備える。このように、除雪作業の実施判断を行う担当者や作業者は夕方から朝方にかけて、常に気象予測・積雪量・道路環境を確認しながら、作業を進め、走行除雪車数の増加などに対応する。

そこで、担当者が自ら収集・分析しなければならない情報をセンシング技術で代替することで、作業の効率化を図るとともに、作業計画の決定スピードや精度を向上させる。これにより、大雪への迅速な対応かつ臨機応変な対応が可能になると考えられる。また、本研究ではデジタルツイン上で必要な情報の可視化を実現するためのシステムを検討する。

担当者の判断材料となる情報、その情報の取得方法・取得できるセンサを表3.1に示す。

取得情報	取得方法・センサ
積雪量	雪尺、超音波式積雪計、レーザー式積雪計、積雪重量計
降雪量	降雪強度計
降水量	貯水型雨量計、転倒ます型雨量計、レーダー雨量計、感雨センサ
気温	電気式温度計
湿度	電気式湿度計
風速	風杯型風速計、風向風速計、ベーン式風速計
道路映像	カメラ、ドローン
気象情報	気象庁や民間気象事業者の気象予測を取得
除雪車の位置情報	除雪車の GPS データを取得

表 3.1 除雪作業に関するデータ・取得方法の種類

本提案システムにおいては、除雪車の GPS データとして公開されているオープンデータを利用し、道路映像には国土交通省北陸地方整備局が管理している「みちなび石川」などで公開されている道路監視カメラ映像が活用できる [8]。

また道路の除隊や雪質は、道路への積雪がなく路面が乾燥している状況、雪氷と水分が混ざり合っているシャーベット状態、乾燥した雪の圧雪状態、凍結した雪や氷に覆われている凍結状態と分類ができる。これらの状態により、除雪の必要回数、除雪に適した時間帯、除雪車の走行時間などが変化する [9]。

これらの路面状況を判断するため、静止画取得による画像解析、路面の水分量取得が有効であると考えられる。雪質を判断することができれば、より高度な除雪車の走行速度など走行環境の再現が実現できるといえる。

3.1.2 既存の積雪センサ

積雪量をセンシングする上で、既存のセンサ・センシング技術についていくつか紹介する。

山田技研 冬期気象センサ<ウィンターセンサ>

熱量計測盤上に降り積もる雪を融雪することで、この融雪に要した電気熱量を降雪熱量とし、算出する [10]。また、熱量計測盤上を凍結しない温度に保つために供給した電気熱量を凍結熱量として算出する。熱量により、降雪・凍結を計測を行う。

北海バネ株式会社 スノーハンター：ロードヒーティング用降雪センサ

外気温と水分を検出することにより、降雪を判断。地温センサを併用することにより、降雪があっても温度の変化がない場合は、ロードヒーティングを稼働させないなど、道路状況を推定できる [11]。

北海バネ株式会社 視程計測用マルチセンサ

温度・湿度・日射・気圧・風速・降雪強度の 6 種類の気象要素を計測することにより、視程を推定する [12]。反射光検出方式の光センサは、3 方向に配置されているため、降雪時の雪粒を確実に検出し、吹雪時の視程を推定する。

3.2 シミュレーション

降雪状況をカメラ・温度計・風速計などのセンシングデータにより再現し、地形・道路情報 GIS データなどとあわせて都市の状況を再現する。

除雪作業環境を再現したデジタルツイン上で、積雪の変化を予測するためのシミュレーション技術について述べる。

3.2.1 風雪・融雪シミュレーション

国土交通省が主導する「Project PLATEAU」では、3D 都市モデルの屋根形状や属性情報を活用した風雪・融雪シミュレーションを実施している [13]。このプロジェクトでは、建築物の積雪荷重に対する損壊および落雪リスクの評価・可視化ツールを開発し、雪害対策に役立てることを目的とした。風雪・融雪シミュレーションは、オープンソースの CFD 解析ソフトウェアである Open FOAM のソルバーをカスタマイズして開発し、3D 都市モデルを組み合わせることにより街区レベルで吹き溜まりや日陰部分の残雪等の詳細な解析が可能となった。

図 3.1 にシミュレーションの流れを示す。可視化ソフト ParaView を用いて、3D モデル

での結果を図 3.2 に示し、さらに ParaView で CVS 形式に出力した結果を図 3.3 に示す。
これにより、そのエリアの建物や勾配に沿った積雪深を得ることができるとわかる。

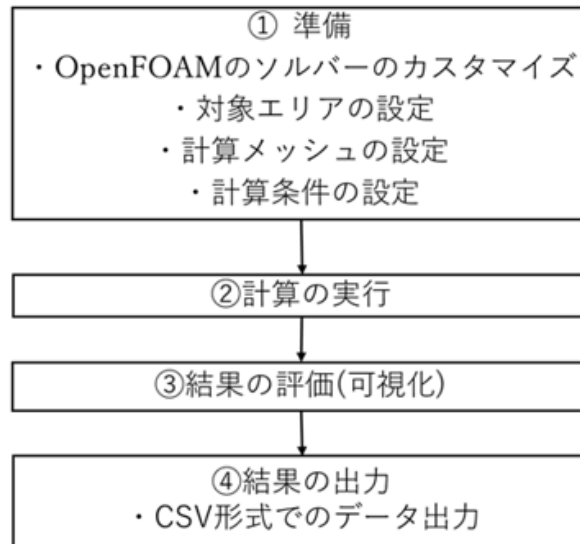


図 3.1 風雪・融雪シミュレーションの流れ



図 3.2 ParaView による積雪深可視化

Showing snowDrift.foam ▾		Attribute: Point Data ▾		Preci					
	Block Name	Point ID	Points			Points_Magnitude	snowDepth	snowDriftDensity	snowMass
0	ground	0	46966.8	-73182.9	73.9857	86957.6	0.0760147	0.00164	2.41193
1	ground	1	46965.9	-73182.8	74.3027	86957	0.075535	0.00164	1.973
2	ground	2	46966.5	-73182.7	74.3082	86957.3	0.076073	0.00164	1.0014
3	ground	3	46966.9	-73182.7	73.8367	86957.5	0.076073	0.00164	1.0014
4	ground	4	46960	-73171.4	73.6665	86944.3	0.076208	0.00164	0.84866
5	ground	5	46960.3	-73171.3	73.5299	86944.3	0.0762135	0.00164	1.67313
6	ground	6	46960.1	-73171.4	72.9044	86944.3	0.0762153	0.00164	1.99582
7	ground	7	46960	-73171.3	73.5465	86944.2	0.076208	0.00164	0.84866
8	ground	8	46949.3	-73175.8	74.1847	86942.2	0.0759043	0.00164	1.44872

図 3.3 風雪・融雪シミュレーション結果

また、シミュレーションにおいて入力である「snowProperties」の設定値である大気の温度や大気圧は、リアルタイムのセンシングデータや気象予測を取り込むことで、より実態に即した計算が可能となる。

3.3 除雪探索アルゴリズム

3.2 章で紹介したシミュレーションを行い、再現した仮想都市上で、シミュレーション結果の積雪深が基準値に達していたエリアを挙げる。そのエリアの道路を対象に、経路探索アルゴリズムを用い経路を算出する。

除雪車が走行する道路は決まっており、道路をエッジ、道路の始点・終点となりうる箇所をノードと考える。主に大通りを優先的に除雪するので、除雪走行道路は無向グラフとする。無向グラフ内を巡る最短経路を探索し、緊急車両の路線の走行や、除雪車の燃費の考慮など走行する上で複数の視点より生じる制約を加味した探索が求められる。

全探索による最短距離探索は可能だが、制約をつけることができる巡回セールスマン問題が最適なアルゴリズムとして使用できると考える。

3.3.1 巡回セールスマン問題

巡回セールスマン問題 (Traveling Salesman Problem : TSP) は最適化問題の一つであり、組合せ最適化の分野で広く研究されており、特に物流や製造業、通信ネットワークの分野で応用されている。

n 個の節点をもつネットワーク $G=(V, E)$ において、各枝 $(i, j) \in E$ の長さ a_{ij} が与えられたとき、すべての節点をちょうど一度ずつ訪問して元に戻る順回路のなかで最短のものを見つける問題である。巡回セールスマン問題は最短路問題と一見よく似ているが、すべての節点を必ず経由しなければならないという点が最短路問題と異なり、個の節点の最適な並べ換えを求める問題である。

巡回セールスマン問題はいくつかバリエーションがあり、制約付き TSP では、特定の都市を必ず訪れる、訪問順序を制限する、各地点の積雪量をコストとし、1 回の巡回での総コストに制限を設けるといった制約を加えて、解くことができる。また、除雪車の最大積雪量を登録しておくことで、どの除雪車が適切であるかを計算でき、除雪車の燃料、作業員を効率的に利用する計画が提案できる。

巡回セールスマン問題を解くうえで、Google が開発・提供するオープンソースの最適化ライブラリである「Google OR-Tools」などがツールとして導入できる。

3.4 可視化技術

住居、優先路線といった静的な情報に加え、移動する車両など動的な情報を含む多様な情報を重ねて表示することのできるユーザーインターフェースを開発する。

可視化するデータには以下のようなものがある。

1. 道路
2. 積雪量
3. 提案された除雪車走行経路、除雪完了が想定される時刻
4. 除雪車現在位置 (GPS データ)
5. 気象情報
6. 現在の道路映像、降雪状況
7. 交通量

これらに加え、経路・作業時間・コストの比較できるものなどが、監督者の判断の決め

手となると考えられる。

また、監督者が提案された経路に対して走行道路や走行車両台数、作業開始時間の変更が考えられ、監督者からの入力ができるようなユーザーインターフェースが必要である。

提案システムでは、道路の除雪作業支援が目的であり、道路以外の建築物の可視化がないと判断した。一方、地震や台風などのあらゆる災害対策のデジタルツインにおいては、建築物を含めた地理情報の再現が必要となる場合がある。これらの場面で使用できる可視化技術について、いくつかツールを紹介し比較する。

3.4.1 可視化ツール

QGIS と ArcGIS は、地理情報システム（GIS）ソフトウェアの代表的な 2 つである。

QGIS

QGIS は、無料でオープンソースの GIS ソフトウェアである。QGIS はラスターデータ、ベクターデータ、メッシュデータ、点群データなど、さまざまなデータ形式に対応。また、GRASS GIS、SAGA GIS、MapServer などの他のオープンソース GIS パッケージと統合されており、Python や C++ で記述されたプラグインを使用して機能を拡張して利用できる。QGIS は専門家だけでなく、一般ユーザーにも利用しやすいインターフェースを提供しており、教育機関や研究機関、民間企業など様々な分野で活用され、活発なユーザーコミュニティが存在する。図 3.4 に QGIS の使用イメージを示す。

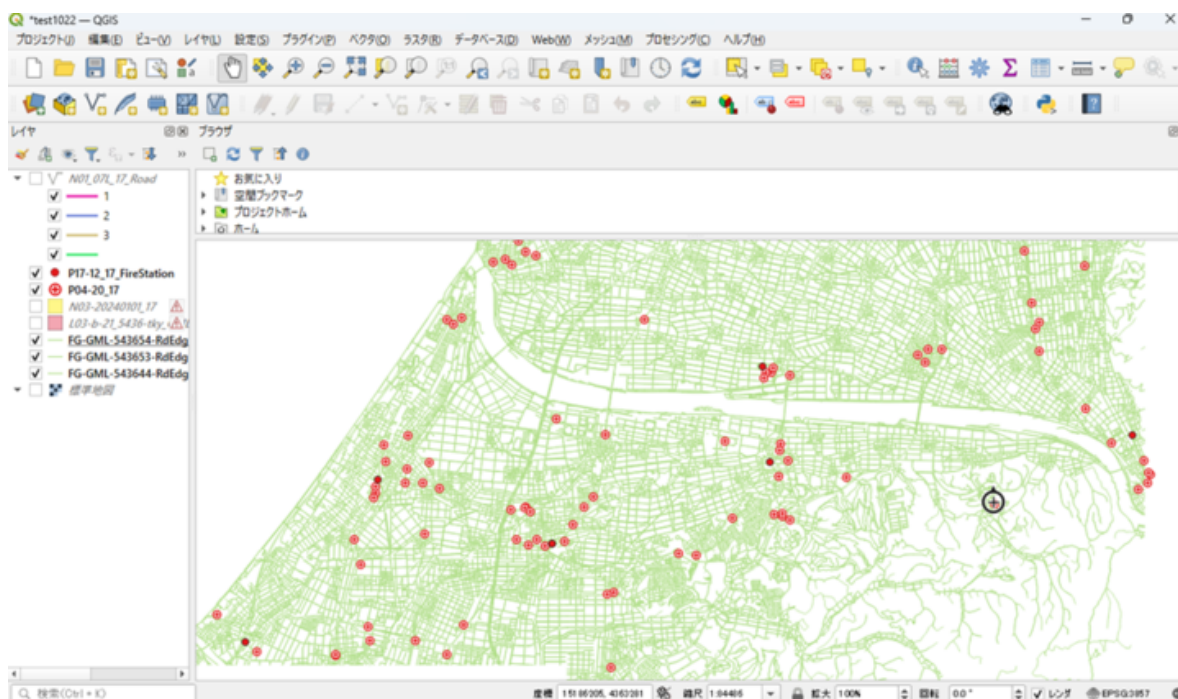


図 3.4 QGIS

ArcGIS

ArcGIS は、米国の Esri 社が提供する商用の GIS ソフトウェアであり、信頼性や公式サポートの充実、定期的なアップデートが利点である。特に 3D データの処理や高度な空間解析に優れており、大規模なデータセットの処理にも適している。そのうちの ArcGIS Online はクラウドベースのマッピングおよび解析ソリューションであり、豊富なベースマップや政府データなど、多彩な地理情報リソースにアクセスが可能である。政府機関や自治体、民間企業によって、都市計画や防災分野において活用されている。

Unity

Unity は、ゲーム開発やシミュレーション、インタラクティブな 3D コンテンツの作成に広く使用されているクロスプラットフォームの統合開発環境である [14]。仮想現実 (VR) や拡張現実 (AR) コンテンツの開発にも広く利用されている。また、物理エンジンが組み込まれているので、物体の衝突、重力、流体、剛体のシミュレーションが行える。さらにリアルタイムでのシミュレーションが可能のため、災害時の避難経路の人流可視化や津波被害の想定実験に使用されている [15]。

Blender

Blender は、主に 3D モデリング、アニメーション、レンダリング、シミュレーションのためのオープンソースソフトウェアある。フォトリアルな画像生成やリアルタイムレンダリングを行うエンジンを提供しているため、高精度な再現ができ、映画やゲームの制作、アーキテクチャビジュアライゼーションにおいて利用される。また、津波避難行動の可視化など、災害シミュレーションのモデル作成にも利用されている [16]。

Blender で 3D モデリングやアニメーションを作成し、そのデータを Unity にインポートして、ゲームやシミュレーションの実行を行い、それぞれの機能を組み合わせ使用できる。

3.4.2 比較と適性

1. **GIS**：地理情報の正確な解析とマッピングに優れている。現実の地理データを扱う場合や、地形解析が主な目的であれば適切。
2. **Unity**：リアルタイムのインタラクティブなシミュレーションや、ユーザーとの対話的な可視化が求められる場合に適している。災害時の避難シミュレーションや動的な状況再現が強み。
3. **Blender**：高度な 3D モデリングや静的なビジュアル表現に適している。詳細なモデル作成や高品質なビジュアルが必要な場合に適している。

3.4.3 結論

災害対策の可視化において、リアルタイムのシミュレーションやインタラクティブな要素が重要であれば、Unity が適切といえる。地理情報の正確な解析やマッピングが主な目的であれば、GIS が適しており、高度なビジュアル表現や詳細な 3D モデルが必要な場合は、Blender が適している。プロジェクトの具体的な要件に応じて、最適なツールを選定する必要がある。

第4章

システム提案

本章では、前章にあげた技術を組み込んだデジタルツインの具体的なシステム内容、本システムにおけるシミュレーションで最適化できる要素について述べる。

4.1 システム全体図

3章で紹介したセンシング・シミュレーション・経路アルゴリズム・可視化となるヒューマンインターフェースを含めたデジタルツインの全体図を図4.1に示す。

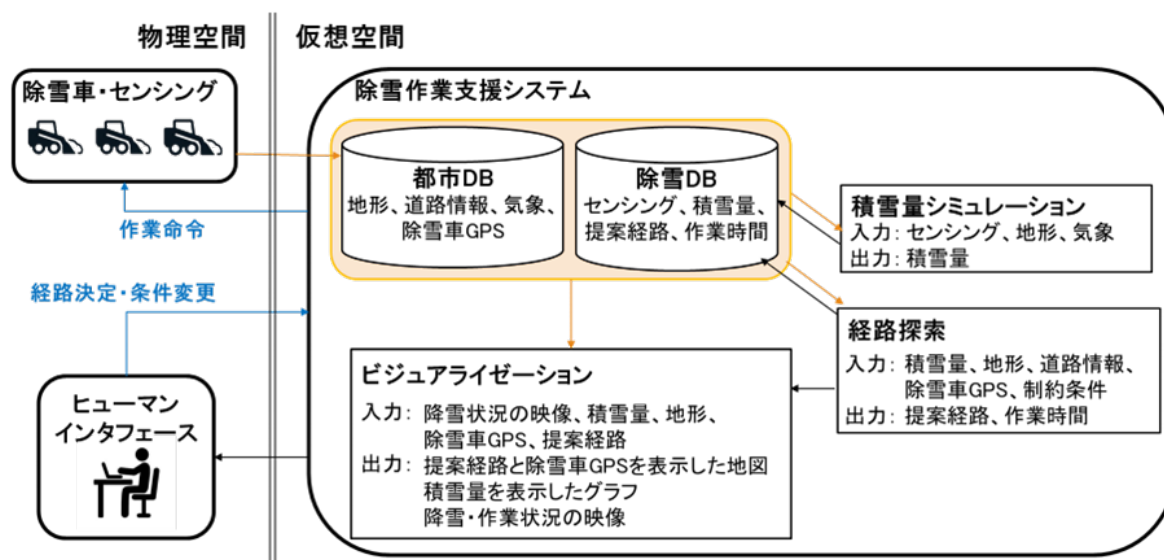


図 4.1 デジタルツイン全体図

4.2 ユーザーインターフェース

オペレータが確認する可視化ツールのイメージ図を図 4.2 に示す。

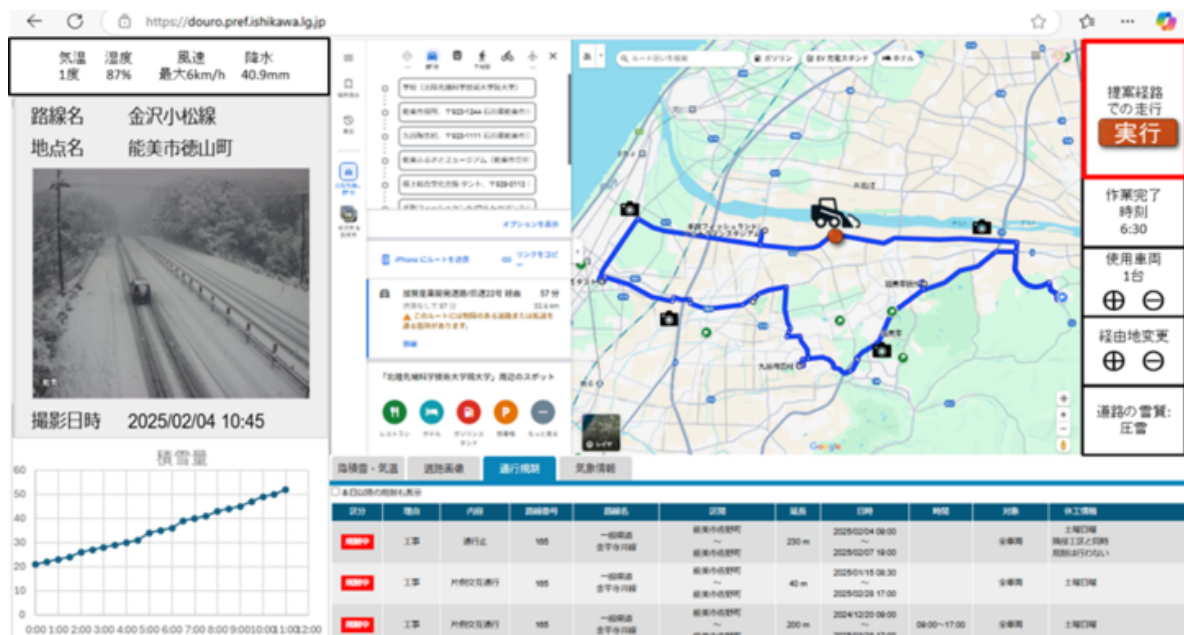


図 4.2 デジタルツイン全体図

監督者が現状・予測の積雪、作業状況を確認し、操作ボタンにより、提案された経路で実行するか、台車数を変更するか、経路順番を変更するかなどを入力する。

4.3 本システムにより最適化できる要素

作業状況、優先事項は、積雪・都市状況により変化する。例えば、保持している除雪作業スペック(作業者・除雪車)で対応しきれない豪雪に見舞われた時、緊急車両が走行する路線の確実な確保を優先する。山側での積雪が集中していることによる集落の孤立阻止のため、都市との路線確保といったような状況が、積雪時想定される。

または、都市デジタルツインを用い、平時の交通量のセンシングデータを活用し、優先的な除雪箇所の選定や積雪時の交通量を活用し、渋滞になりやすい箇所の優先的除雪をする。住民の生活スケジュールに合わせ、朝方から利用頻度の高いエリアの除雪を優先するなど、センシングデータを活用した最適化が考えられる。

3.3 章で述べた経路探索を行う時制約条件を課すことのできるアルゴリズムを用い、効率的な作業完了以外の目的を達成する。

以下に状況と対策をいくつか挙げる。

1. 走行予定である道の通行止め・渋滞: 走行不可能な道路を制約に課し再計算
2. 車両スタック事故による走行停止: 走行車両台数を減少させ再計算、他の除雪車の走行経路が更新される

あげた最適化できる要素を指定した除雪計画提案を、最終的にオペレータが判断することで現実との乖離を持たない計画を実行できると考える。

シミュレーションには、4.1、4.2、4.3 に示すようなデータを用いる。

除雪車の情報	内容
id	除雪車の識別子
type	車両タイプ (大型、中型、小型)
capacity	最大積雪処理量 (m ³ /h)
speed	平均除雪速度 (km/h)
fuelConsumption	燃料消費量 (L/h)
operatingHours	稼働可能時間 (h)
operator	運転者情報
location	現在位置 (緯度、経度)
status	稼働状態 (待機中、作業中、移動中)

表 4.1 除雪車に関するデータ

道路の情報	内容
id	道路の識別子
name	道路の名称
type	道路種別 (高速道路、主要道路、一般道など)
length	道路の長さ (m)
width	道路の幅 (m)
snowAccumulation	積雪量 (cm)
snowType	路面の雪質 (新雪、圧雪、シャーベットなど)
trafficVolume	交通量 (台/h)
priority	除雪優先度 (高、中、低)
restrictions	通行規制除法
coordinates	道路座標

表 4.2 道路に関するデータ

地域情報	内容
id	エリアの識別子
region	地域名 (市区町村、県など)
weather	気象情報 (天気、気温、降雪量、風速など)
elevation	標高 (m)
landUse	土地利用区分 (住宅地、商業地、農地など)
obstacles	障害物情報 (急勾配、橋、トンネルなど)
emergencyRoutes	緊急車両路線情報
landmarks	目印となる建物や施設

表 4.3 地域に関するデータ

これらのデータは、データベースで保存されている。監督者の指示によりシミュレーション条件が変わる場合、UI からの入力により、データベースの JSON ファイルが書き換わ

り、再度シミュレーションが行われる。

第 5 章

評価

本章では現状の除雪作業と比較し提案したシステムの有用性、除雪作業におけるデジタルツインの導入の重要性について論じる。

5.1 現状の除雪作業と提案システムの比較

現状の除雪作業について述べ、本論文の提案システムについて比較を行い、提案システムの効果について論じる。

現状の除雪作業

監督者の作業の流れ

現状の除雪作業を調査するために実施した、市役所でのヒアリング結果について述べる。

ヒアリングした自治体では、本論文における「監督者」は、除雪作業の実施判断を行う市役所の土木課の担当者であり、「作業員」は実際に除雪作業を行う地元の土木業者である。

監督者の作業の流れ

市役所職員の監督者は、降雪が予想される夕方に気象予測を確認し、市内の複数地点を巡回する。測量機器を用いて積雪深を測定し、基準値に達しているかを確認する。基準値に達していれば、土木業者である作業員に除雪作業の出動を依頼する。基準値に達しそうな状態であれば、出動を依頼する可能性があることを伝える。日中に積雪を確認した場合には、積雪深に応じて依頼を行う。

出動依頼後も監督者は市役所に常駐し、市民からの除雪作業に関するクレーム対応など

を行う。また、夕方の時点では降雪が確認されなかった場合でも、夜間に積雪深が基準値に達した際は、確認次第出動を依頼する。

作業員の作業の流れ

作業員は、夕方に監督者からの連絡を受け、出動準備または待機を行う。そして、夜間から朝方にかけて除雪作業を実施する。作業内容は、業者ごとに割り当てられた区画内の固定経路を走行するものであり、その経路には緊急車両路線などが含まれている。業者の規模によって走行範囲は異なり、細かい区分けは町の判断に委ねられる場合もある。走行終了後、作業員は除雪車のメーターで走行距離を確認し、稼働時間とともに監督者へ報告し、その日の業務を終える。

除雪道路の優先順位

除雪道路は、5.1 に示すように優先度が高い順に第1次、第2次、第3次路線と分類される。基準値は第1次路線が5cm、第2次および第3次路線が10cmと定められている。積雪深が5cmの場合は、第1次路線のみの除雪を依頼することがある。さらに、海側よりも山側で降雪が多いため、山側の路線の作業依頼を優先することがある。

第1次路線	バス・通学バス路線等の公共交通機関が通行する路線、または主要幹線路線
第2次路線	地域における主要な路線
第3次路線	上記以外の除雪路線

表 5.1 除雪路線分類

大雪時の対応

大雪時には、作業員に対し除雪車の増員を依頼するが、特別な対応は行わず、出動可能な限りの除雪車を動員し、朝方までの作業完了を目指す。また、国道や県道の除雪を担当する県庁や、隣接する市との連携は取っておらず、隣接する道路の作業状況を把握することもない。さらに、他の市町村へ作業の援助を要請することも行われていない。

費用算出と作業状況の記録

除雪作業に関して記録として残されているのは、除雪費用の算出に必要な作業員の報告内容である走行距離と稼働時間のみである。除雪費用は、出動の単価に稼働時間（または

稼働回数）を掛けて算出され、予算が立てられる。出動の単価は、除雪機械ごとの燃料費を考慮して決定され、不足が生じた場合は補正予算を使用する流れとなっている。そのため、除雪出動を判断した際の状況や、朝方までにどの程度作業を完遂できたか、除雪車を増員する判断の根拠といった記録は残されていない。その結果、現在の固定経路での走行による除雪計画が最適であるかを評価できるデータは存在しない。

作業内容の受け継ぎの課題

除雪車の増員に関する明確な基準はなく、大雪時にはその晩の担当である監督者の判断で作業が行われる。また、市役所職員の人事異動が頻繁に行われるため、除雪作業に関する引継ぎは口頭のみとなっている。その結果、前任の職員が大雪を経験しないまま異動すると、引継ぎを受けた職員は大雪時の対応方法を十分に理解しないまま業務にあたる可能性がある。

業者の現状と課題

人事異動のある市役所職員に比べ、土木業者の方が経験値が高いため、明確な基準がない凍結防止剤の散布は、土木業者の経験に頼って実施されている。また、市役所職員と比べると土木業者の入れ替わりは激しくないものの、高齢化に伴う担い手不足や廃業といった課題がある。除雪業者に携わることができる業者数が変化するため、走行経路は毎年市役所により更新されている。

今後の展望

市役所職員の監督者からは、「出動判断をするのが大変」「夜間のクレーム対応が負担」といった声が上がっている。デジタル化や IoT 技術を活用した除雪作業の支援ツールがあることは認識しているものの、費用面の問題から導入予定はない。

5.2 現状の除雪作業と提案システムの比較

出動判断材料

現状では、気象予測を確認し、積雪深を測定するために巡回パトロールを実施している。提案システムでは、監督者が除雪デジタルツインの UI を確認することにより、気象予測、積雪量予測、適切な除雪車の走行計画、道路状況などを一目で把握できる。これにより、監督者ごとの情報収集の差はなくなり、出動判断のばらつきもない。

走行経路

現状では、どのような状況でも、積雪深が基準値を超えた場合に固定の経路を走行している。提案システムでは、積雪深や雪質、除雪作業のリソース、道路状況に応じて、その都度最適な経路を算出する。これにより、固定経路では考慮できなかった除雪車燃料などの費用最小化、孤立地域対策などが実現できる。

連携

現状では、業者間や県・市などの自治体間での連携がなく、それぞれが独立して作業を進めている。提案システムでは、作業進捗や作業計画のデータをデータベースに定期的に更新し、権限を共有することで他地域の状況を把握できる。また、経路探索の範囲を広げ、リソースを適切に振り分けることで、より効率的な探索が可能となる。

大雪などの作業状況変化の対応

現状では、大雪時には作業員を増員する程度の対応にとどまっている。提案システムでは、除雪作業の条件を変更した上で経路探索を行い、増員に応じた最適な走行経路を提案することが可能となる。

作業記録

現状では、作業員が監督者に報告し、走行距離のデータが記録されている。提案システムでは、除雪車の走行距離が GPS のログとしてデータベースに自動保存されるため、作業員の負担が軽減される。さらに、走行距離や走行経路が把握できる GPS データに加え、積雪状況や道路状況など、出勤判断時の状況を再現できるデータも自動で保存される。これらの作業状況および作業実績のデータを評価することで、監督者は最適な作業計画を立てることができる。

5.3 提案システムの評価

提案システムにより、監督者の情報収集および分析の負担が軽減される。デジタルツインによる管理を通じて作業員との連携が容易になり、地域ごとにリアルタイムで適切な提案を行うことが可能となる。これらの効果により、除雪作業の効率および精度の向上が期待される。さらに、監督者は除雪作業の実施判断や除雪経路の決定において、作業の効率的な完了に加え、緊急車両の通行確保、利用頻度に応じた優先順位の設定、要支援者の多

い地域への配慮など、複数の要素を考慮した判断が可能となる。

第6章

考察

本章では、今回検討したデジタルツインについての考察を述べる。

6.1 導入検討

本研究での評価方法だが、積雪量のシミュレーションにおける評価と探索した経路での走行の評価を定量的に、可視化ツールを用いた提案の評価を定性的に行う必要がある。また、この結果によって、雪見巡回のパトロール回数が減少するといえる。

積雪量シミュレーションの評価をする場合、積雪深の計測を行い、積雪量センサの検証を行い、いくつかの積雪量センサを設置し、そのエリアでの積雪量とシミュレーション結果を評価する必要がある。

経路探索の評価においては、これまでの固定走行経路の作業時間や作業に使用した作業者台数・車両燃料、積雪量に対しての除雪完了率などを算出することで、デジタルツインを用いた探索結果との評価ができる。

可視化ツールの評価においては、監督者・作業者にシステム使用による出動判断が容易になったかなどをヒアリングを実施し、システムの有効性やユーザビリティを評価する。

上記の評価はこれまでの除雪作業のやり方と比較をすることで行うことで、効率化できたことを証明する。ヒアリングしたある自治体では、これまで除雪作業の記録は、費用を算出するためのメーターの稼働距離のみしか記録されていない。どのような降雪があった時に、いつ・どのように除雪作業を進めたかは把握できないため、こちらを調査し、除雪に関するデータの保存・分析が必要がある。しかし、全ての評価方法を通して、石川県のような出動回数が少ない地域では、検証を重ねることが難しいといえる。

出動回数が違うことからわかるように、石川県など北陸地方と北海道などでは降雪の傾

向や量、雪質が大きく異なる。降雪・積雪の様子をシミュレーションで予測し、その地域にあった除雪作業方法を提案できるのは、デジタルツインの強みである。さらに、デジタルツインのような共有できるプラットフォームを持つことで、災害といえるような豪雪などの状況になった際、状況を政府機関や交通や輸送に関わる企業、学校などあらゆる機関、住民への共有ツールとして用いることができるいえる。

4.3 章で述べたように積雪量以外のパラメータによる経路探索を行う時、使用する住民の生活スケジュールを把握するための人流データなどは、使用制限が考えられる。実際にシミュレーションする際は、オルタナティブデータやフェイクデータでの検証が望ましいといえる。

本論文では、データベースについての議論を行わなかったが、データの種類が多岐に渡り、大容量のデータを扱うため、同様な結果がでやすいと考えられる除雪状況のデータの計算結果をデータベースに保存しておくことで、必要な時に引き出すことでシミュレーション回数の減少を実現できる。デジタルツイン上では、常に値を更新し続けているため、データベースに保存するデータ数を考慮する必要がある。最適な除雪作業計画提案を明らかにすることにより、適当な範囲のデータ利用とデータの保存が実現すると考えられる。

第 7 章

おわりに

本章では、本論文でのまとめについて述べる。

7.1 結論とまとめ

本変化研究では、除雪作業における出動判断の困難さ、大雪のような気象変化などの状況に柔軟に対応できないという課題に対し、除雪環境を再現するためのデジタルツイン、デジタルツイン上での積雪量予測、除雪車走行計画提案、監督者が確認するためのビジュアライゼーションを提案した。

今回雪害に焦点をあてたシミュレーションを用い、デジタルツインを提案したが、同じ都市情報、道路情報、環境情報を持てば、他のシミュレーションを行うことで他の分野での応用ができるといえる。

リアルタイムで変わるものに対してということで、デジタルツインの機能を活かせるのは特に雪害を含む防災の分野であると言えるが、イベント時の混雑なんかも含めて共通のフレームワークで対処できるものは少なくないといえる。これらにより、行政においてデジタルツインを用いる効果は、非常に大きいといえる。

本研究に関する对外発表

- 石丸琴子・リム勇仁・丹康雄, “デジタルツインを用いた除雪車運行計画による除雪作業支援システムに関する研究”, 2024 年度電気・情報関係学会北陸支部連合大会, Sep. 2024.

謝辞

本論文を執筆するにあたり、多くの方々にご指導ご鞭撻を賜りました。主指導教員の丹康雄教授には、ゼミを通した研究議論の際にご丁寧な指導を承りました。審査員をお引き受けいただいたリム 勇仁准教授、BEURAN Razvan Florin 准教授、宇多 仁准教授には中間発表などを通じて新たな視点から示唆に富んだアドバイスをいただきました。本研究室の博士後期課程 XIN Tao 氏には、研究に関する活発な議論、技術的な指導を承りました。心から感謝致します。

最後に、学生生活を支えて頂いた家族に感謝いたします。ありがとうございます。

参考文献

- [1] 鈴木 大章. 自然災害がもたらす人的被害軽減のためのデジタルツイン実現に関する調査研究. URL: https://alinamin-kenko.jp/navi/navi_kizi_heatshock.html.
- [2] 東京都. デジタルツイン実現プロジェクト. URL: <https://info.tokyo-digitaltwin.metro.tokyo.lg.jp/>. (accessed: 01.18.2023).
- [3] 総務省. 情報通信白書 第2部 情報通信分野の現状と課題. URL: <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r05/html/nd255210.html>.
- [4] PLATEAU. *TOPIC 1 | 3D 都市モデルでできること [2/2] | 3D 都市モデルの特徴と活用法*. URL: <https://www.mlit.go.jp/plateau/learning/tpc01-2/>. (accessed: 1.11.2025).
- [5] 都市整備局 東京都 デジタルサービス局. 東京都デジタルツイン実現プロジェクト区部の「3次元点群データ」を公開!. URL: <https://www.metro.tokyo.lg.jp/tosei/hodohappyo/press/2024/10/31/11.html>. (accessed: 1.11.2025).
- [6] 内閣府国家戦略特区. スーパーシティ等におけるデータ連携基盤に求められる互換性・安全性・プライバシーに関する事項（概要版：第2版）. URL: https://www.chisou.go.jp/tiiki/kokusentoc/supercity/pdf/_supercity_240701_privacy.pdf. (accessed: 1.11.2025).
- [7] 慧 廣井 et al. “ARIA: シミュレーション・エミュレーション連携基盤を利用したインタラクティブな都市型水害の被害予測システム”. In: マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2019 論文集 2019 (June 2019), pp. 1837–1845. URL: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1050855522065475968>.
- [8] 国土交通省. みちなび石川 - 北陸地方整備局 - 国土交通省. URL: <https://www.hrr.mlit.go.jp/kanazawa/douro/michinavi/>. (accessed: 1.11.2025).

- [9] 田辺啓輔. 走行性と安全性を考慮した除雪オペレーションの検討. URL: <https://cee.nagaokaut.ac.jp/HTML/yoshisyu/2022/infra/pdf/kan22206.pdf>. (accessed: 1.11.2025).
- [10] 山田技研株式会社. 冬期気象センサ<ウィンターセンサ>. URL: https://www.yamada-giken.co.jp/products/winter_sensor. (accessed: 1.11.2025).
- [11] 北海バネ株式会社. ロードヒーティング用降雪センサ *SNOW HUNTER HBC-S4*. URL: <https://www.hokkai-bane.com/products/snow-hunter/>. (accessed: 1.11.2025).
- [12] 北海バネ株式会社. 視程計測用マルチセンサ. URL: <https://www.hokkaibane.com/products/multi-sensor/>. (accessed: 1.11.2025).
- [13] PLATEAU. 雪害対策支援ツール. URL: <https://www.mlit.go.jp/plateau/use-case/uc22-027/>. (accessed: 1.11.2025).
- [14] Unity Technologies. *Unity Real-Time Development Platform*. Accessed: 2025-01-04. URL: <https://unity.com>.
- [15] PLATEAU. ゲームエンジンで変わる都市空間シミュレーション～アカデミア研究開発事例～【前編】. URL: <https://www.mlit.go.jp/plateau/journal/j020-1/>. (accessed: 1.11.2025).
- [16] 康央 川合 and ゆりえ 海津. “ゲームエンジンを用いた津波ハザードマップ”. In: *エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2019 論文集 2019* (Sept. 2019), pp. 285–288. URL: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1050011097169520256>.