



Title	デジタルツインを用いた非GNSS環境下の自動施工に関する研究
Author(s)	石田, 仁
Citation	大阪大学, 2025, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/101672
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

博士学位論文

デジタルツインを用いた非 GNSS 環境下の
自動施工に関する研究

石田 仁

2025 年 1 月

大阪大学大学院工学研究科

目次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景.....	1
1.2 山岳トンネルを対象とした自動施工の課題.....	3
1.3 研究の目的.....	3
1.4 研究の位置づけ	3
1.5 論文の構成.....	4
第2章 既往の研究.....	5
2.1 施工の遠隔化・自動化.....	5
2.2 複数の車両や施工機械の協調運転・協調作業	8
2.3 非 GNSS 環境下の自己位置推定	9
2.4 本研究の新規性	10
第3章 デジタルツインを用いた非GNSS環境下における自動施工手法の提案	13
3.1 本章の概要.....	13
3.2 使用するデジタルツイン	13
3.3 施工形状の自動作成の手法.....	19
3.4 非 GNSS 環境下における位置推定と移動の手法	22
3.5 システム構成	25
3.6 コソク作業への適用方法	29
3.7 インバート掘削作業への適用方法.....	32
第4章 自動施工の実証.....	37
4.1 本章の概要.....	37
4.2 デジタルツインによる施工形状の自動作成.....	41
4.2.1 概要.....	41
4.2.2 国道 57 号笹原トンネル新設工事におけるインバート掘削	41
4.2.3 平成 31 年度 設楽ダム廃棄岩骨材運搬路整備工事における工事用道路造成.....	45
4.2.4 結果.....	48
4.2.5 考察.....	49
4.3 坑内の自律移動	51
4.3.1 平成 29-32 年度 見の越トンネル工事における自律移動	51
4.3.2 結果.....	63
4.3.3 考察.....	64
4.4 自動施工（切羽のコソク作業）	66
4.4.1 平成 29-32 年度 見の越トンネル工事における切羽コソク作業の自動化	66
4.4.2 結果.....	69

4.4.3 考察	69
4.5 自動施工（インバート掘削作業）	70
4.5.1 国道 57 号笹原トンネル新設工事におけるインバート掘削作業の自動化	70
4.5.2 結果	78
4.5.3 考察	82
第 5 章 結論	85
5.1 本研究のまとめ	85
5.2 今後の展望	87
参考文献	89

第1章 序論

1.1 研究の背景

建設業は労働生産性が製造業などに比べて低く、労働力、とりわけ若年層が不足しており、災害が激甚化する中、今後必要となる量の建設を適切に遂行できるか懸念されている。そこで国土交通省は BIM/CIM (Building/Construction Information Modeling, Management) や i-Construction, インフラ分野の DX (Digital Transformation)¹⁾を推進し、デジタルデータの活用や、3次元データによるコミュニケーションの拡大、現場作業の遠隔化・自動化・自律化を通して、生産性を大幅に向上させようとしている。

デジタルデータの活用の観点では、建設現場から IoT データやスマートデバイスのデータを収集して BIM/CIM モデルに取り込むことで、最新の施工状況を反映したデジタルツイン (Digital Twin)²⁾³⁾を施工管理に活用する取り組みが増えている。デジタルツインは、物理製品を完全に表す仮想情報のセットであり、これらには予測や分析など、潜在的なデータも含まれるとされる。ここで物理製品とは、建設においては工事目的物自体を指すと考えられるが、本研究のように施工の効率化を目的とする場合は、施工中の工事現場の状況や段階的な工事の結果も含めるものとし、さらには施工においては維持管理のデータを残し納品することも重要な目的であることから、維持管理用のデータも含める。

3次元データによるコミュニケーションの観点では、BIM/CIM モデルと XR (Extended Reality/Cross Reality)の活用が進んでいる。実際の建設現場を BIM/CIM モデルを用いて VR (Virtual Reality)空間に再現し、複数人で没入して打合せを行う遠隔会議や、これに3次元点群データや映像を取り込み、工事目的物の検査を遠隔で実施する取り組みが進められている。実際の現場に BIM/CIM モデルを重畳し、建設物がどのように構築されていくか、完成したらどのようなようになるかといった具体的なイメージを、MR (Mixed Reality)を使うことにより実物大で、体感させながら現地打合せを行う取り組みも進められている。

現場作業の遠隔化・自動化・自律化の観点では、ICT 土工を中心に施工機械の遠隔化や半自動的な運転が実現されつつある⁴⁾。施工の遠隔化については、雲仙普賢岳の噴火による火砕流や土石流に対して1993年より始まった無人化施工の取り組みにおいて、様々な改良を加えながら発展している。現在では、地元の建設会社がレンタルの遠隔化機械を用いて実施することもあり、機材の供給も含め実用性が向上している。施工の自動化・自律化については、省人化を目的として多様な工種を対象とした研究が進められているところである。なお、これまで法整備等の共通ルールの確立も大きな課題であったが、国土交通省で2021年度より「建設機械の自動化・自律化協議会」を設置し、自動化・自律化の実現場導入に向けた環境整備が進められている⁵⁾。これによって自動化・自律化された施工手法は一部の実証にとど

まらず、一般現場に適用されるようになると考えられる。施工の自動化を行う際には、対象の建設機械の位置や方向の把握が必要となり、これには一般的に RTK-GNSS (Global Navigation Satellite System) が用いられている。高精度に建設機械の座標を取得できるため、建設機械が移動し、入れ替わりながら複数工種にわたる自動化を行うことが可能である。これに対して、山岳トンネルのような地下空間は、GNSS の電波を受信できない非 GNSS 環境下であることから、高精度な位置推定が難しい。この位置推定の問題は、山岳トンネル工事において複数の工種が連携して自動化・自律化施工を行うことを困難としている。なお、自動施工を確立する中でも、部分的には有人作業が必要となることが想定されており、その場合に作業員の配置を把握することは安全確保の上で非常に重要である。

また、山岳トンネル工事では、一般的に狭隘な空間において、多くの工種が入れ替わりながら施工を進めることから、施工機械や資材、作業員の位置、作業状況を把握して綿密に調整を行う必要があり、自動施工を実施するにあたっては、対象の施工機械について、高精度な位置推定が必要であるとともに、他の工種との位置関係や状況を適切に、かつリアルタイムに把握する必要がある。従来は、現場の職員や作業員が目視で観察し、無線等で状況を伝えていたが、最近ではこのような施工中の建設現場の状況をリアルタイムに可視化する手法として、デジタルツインが用いられている。デジタルツインには、遠隔地から現場の状況を把握できる他、現場全体が実現場通りに俯瞰的に可視化されることで、人が直感的に把握できるという利点がある。なお、山岳トンネル工事では、落盤による死亡災害が多く⁴⁾、その他にも、出水や可燃性ガスの発生といった安全上のリスクや、掘削やずり積み、コンクリート等吹付作業、ロックボルト打設に伴う粉塵の発生といった衛生上のリスクが大きいことから、坑内の無人化が望まれており⁶⁾、現場作業はもとより、施工管理を自動化したり、遠隔化したりすることで坑内を無人に近づけていく必要がある。

一方、自動施工を実施するにあたり、事前に各施工機械がどのように動けばよいかというタスクを定義する必要がある。タスクには施工の動作が含まれるが、この動作は、開始前に定義され終了まで変更されない場合と、開始前に定義された後、施工中に自動で変更される場合がある。一般的に長時間自動施工を行う場合には、状況に応じて動作を変更する必要があると考えられる。明かり工事の ICT 建機の運用では、一般的に施工範囲、施工内容を表す計画データを作成し、ICT 建機に読み込ませ、それに従って施工を行う。施工内容は、バックホウやブルドーザであれば土工形状等であり、振動ローラであれば締固め回数等を指定する。山岳トンネルの掘削や埋め戻し作業などを自動化する場合も、このような計画データをもとにタスクの施工動作を作成することができると考えられる。

近年では、土工の計画データの作成や変更を効率的に行うため、BIM/CIM モデルを活用する手法が用いられている。Kim⁷⁾ らは、施工中の道路土工工事における日々の ICT 建機の計画に BIM/CIM モデルを活用し、計画データ作成や変更の効率化を進めた。このような BIM/CIM モデルによる計画データの作成や変更は、自動施工の施工動作の更新を円滑化することにも応用可能と考えられる。

1.2 山岳トンネルを対象とした自動施工の課題

1.1 節に述べたように ICT 土工の自動化が進む中、依然、山岳トンネルを対象とした自動施工は困難である。自動施工を実用化するには、以下の課題がある。

- 1) 山岳トンネルは非 GNSS 環境であることから、正確な自己位置を取得することが難しく、施工機械の自律的な移動が困難である。
- 2) 山岳トンネルは非 GNSS 環境であることから、正確な自己位置を取得することが難しく、所要の施工位置に、正確に施工を行うために人を介した誘導や位置合わせが必要である。
- 3) 施工対象の状況が変化すると継続できない。例えば掘削であれば形状は変化し、動作を修正する必要がある。長時間連続で自動施工を行うためには、動作を自動的に変更する手法が必要である。
- 4) 安全確保の観点で、自動施工は無人のエリアを設定してその中で実施する必要がある。また、自動施工をしている場所に人が立ち入った場合は自動施工を止める必要がある。山岳トンネルは一般的に狭隘な長細い空間で多くの工種が入れ替わりながら施工を行うため、有人の状態と無人エリアの範囲の設定は細くなり、その切り替えも頻繁となることが想定され、管理が難しい。

1.3 研究の目的

本研究は、生産性向上が必要となり施工の自動化が注目されている建設現場の中で、非 GNSS 環境である山岳トンネルの施工に着目し、自動施工の効率化を検討するものである。非 GNSS 環境では、施工機械の自律的な移動や施工箇所の位置合わせが困難であり、自動施工の際に人が介在する必要が生じることが多いため、自動施工の流れが連続的に行うことが難しい。また、自動施工時にも施工箇所あるいはその近傍に人が配置される場合も多く、危険である。本研究の目的は、自動施工にできる限り人が介在しない、あるいは人が介在する頻度が少なくなることによる自動施工の連続性の向上と、自動施工の施工対象範囲の形状や、その周辺の有人、無人状態の管理による自動施工の効率化、安全性の確保である。

1.4 研究の位置づけ

本研究は、生産性向上が喫緊の課題である建設業において重要なテーマである自動施工の省人化効果の向上や、実用性の向上に貢献するものである。また、無人化可能な工種を拡大することにより、作業安全性の向上に貢献する。本研究では、既存の無人化施工機やマシ

ンガイダンスシステム，その他センサ，クラウドサーバを組み合わせ，デジタルツインを用いた非 GNSS 環境下における自動施工の連続性，円滑性を向上するシステムを構築した．

1.5 論文の構成

本論文は 5 章で構成する．

第 1 章では，研究の背景として，建設業の労働者不足と，ICT 活用や自動施工の必要性について触れ，研究の目的や位置づけを述べる．

第 2 章では，既往の研究および本研究の新規性について述べる．

第 3 章では，山岳トンネルのような非 GNSS 環境下で円滑な自動施工を行うために開発した自動施工手法について述べる．

第 4 章では，第 3 章で提案した手法の実証結果を述べる．

第 5 章では，本研究のまとめと結論を述べる．

第2章 既往の研究

2.1 施工の遠隔化・自動化

建設現場を無人化する手法について、雲仙普賢岳等の噴火や土石流に対して 1993 年より始まった無人化施工は、主に操縦者が遠隔地から操作を伝達する遠隔操作が行われており、様々な改良¹⁰⁾¹¹⁾を加えながら、現在では地元の建設会社がレンタル機械を用いて実施することもあり、機材の供給を含め、実用性が向上している。しかしながら、一般的な無人化施工は、通常の施工に比べ、施工効率が低下することが知られている。伊藤ら⁸⁾は、その要因として、遠隔操作をする際にオペレータが建設機械や施工対象を見るためのカメラ映像の解像度の不足と、それらの映像を映すモニタに奥行き情報が存在しない点を指摘し、両眼立体 3D や 4K 解像度の映像をオペレータに提供することにより、施工効率を向上したと報告している。このように、遠隔操作をより搭乗操作の環境に近付けることによって、施工効率を向上する取り組みが進められてきた。

藤野ら¹⁰⁾は、オペレータ個人の素養による施工効率の差に着目し、オペレータの習熟度判定の方法を提案しているが、その中で、車体を外から俯瞰して写している車外に設置したカメラの映像を理解できるか否かが重要であることを指摘している。藤野らの研究結果では、当時、遠隔操作を得意と位置付けたオペレータの割合は、20%であり、その場合においても、建設機械への搭乗操作と比較すると、サイクルタイムで1.5倍以上の時間がかかっている。他、最近では、ICT土工で用いられるマシンガイダンスシステムを併用することによって、掘削対象の土砂の3D形状（現況と仕上がり）を遠隔地のモニタで確認したり、マシンコントロールシステムを併用したりすることによって、仕上げ時の操作を半自動化したりすることで、施工効率の向上を図っている事例がある。しかしながら、これらの補助的なシステムを使用した場合にも、搭乗操作の施工効率には及ばない。

一方で、交通や工場のロボット分野で発展してきた自動運転技術が実用化されつつある。遠隔操作とは異なり、一人で複数の建設機械を稼働させることもできるため、現場全体の省人化や、建設業全体の省人化にも期待が寄せられている¹²⁾。加えて将来的には、単純な作業であれば人が操作するよりも速く効率的に進めることができると考えられている。自動化については、一定の作業を行う手法や、状況に応じて作業内容を自ら調整する自律的な動作を実現した手法（自律化）があるが、一連の工種、作業に対して、これらの手法を組み合わせ実現している。

鬼頭ら⁹⁾は、ダム工事において IoT データをリアルタイムにデジタルツインに反映し、施工管理を実施した。クレーンやその他建設機械、作業員の位置監視に GNSS を用い、安全性向上を実現するとともに、クレーンの自動運転の操作をデジタルツインから行い、生産性

の向上を進めている。菅井ら¹³⁾は、ダム工事において、ブルドーザ、振動ローラの自動施工を実施し、遠隔管制室の少数の管制員が複数の自動運転機械を稼働させることで、省人化を実現している。この取り組みでは、ダンプトラックによる土砂運搬を行い、ダンプトラックの荷下ろし箇所では、GNSSブルドーザによる敷き均し作業、GNSS振動ローラによる締固め作業を行っている。以上のように、GNSS環境下における自動施工の実証は、連続した複数の工種を対象とするなど、実用に向けて拡大しつつある。

一方で、山岳トンネルを対象とした自動施工も多くの工種に対して進められている。山岳トンネル工事においては、一般的に狭い空間の中、図-2.1に示すように多くの工種が入れ替わりながら進行する。図-2.1の右側の切羽作業の流れのうち、削孔から発破の部分については、コンピュータドリルジャンボによって部分的な作業を自動化することで、これまで2～4名必要であった削孔の操作を、1名のオペレータで行うことを可能としている。松田ら¹⁴⁾は、削孔の部分さらに改良し、自動削孔が困難であった鋼製支保工やガイドシェルとの干渉部の削孔を自動化した。地山条件に合わせて削孔パターンを微調整しながら、これまで自動化が困難であった箇所を含む全ての自動削孔を実現している。さらに自動削孔が従来のように熟練者のスキルに依存しない点、サイクルタイムが安定する点を指摘している。

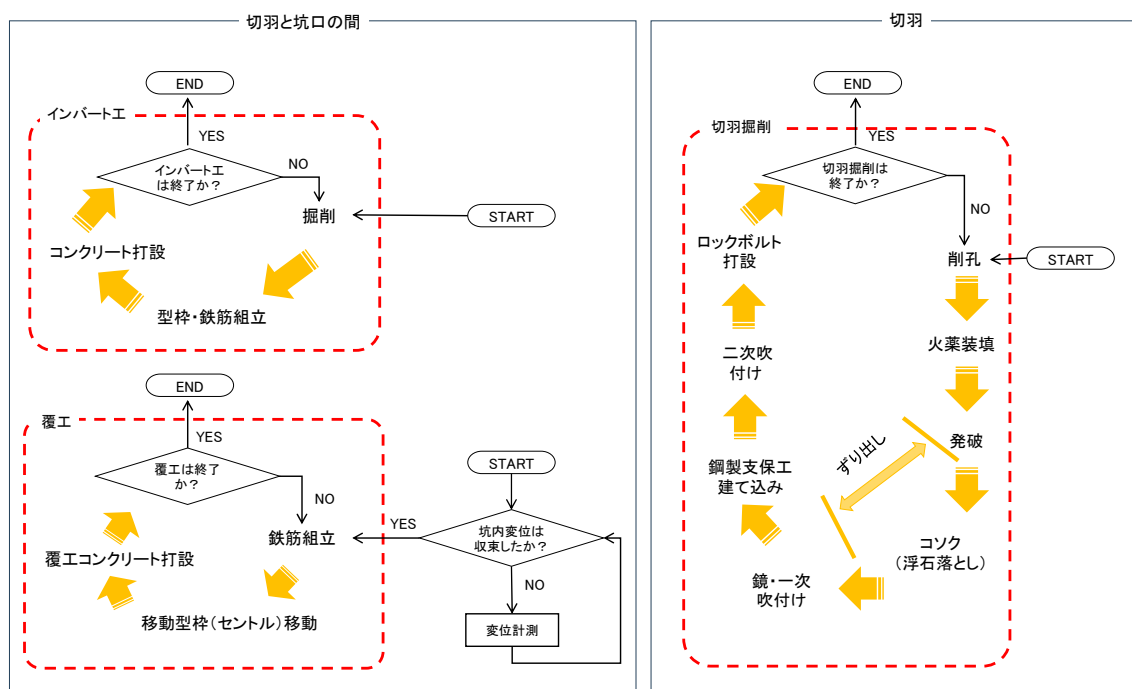


図-2.1 山岳トンネル施工 (NATM・発破掘削)の流れ

長幡ら¹⁵⁾は自動削孔の計画を事務所でシミュレーションすることにより事前に地山条件や干渉に対応している。篠原ら¹⁶⁾は、切羽写真や削孔・発破の実績データを自動削孔にフィードバックすることによって余掘り量やアタリ量を低減している。額瀬ら¹⁷⁾はドリルジ

ヤンボを遠隔操作室から操作し、切羽近傍での作業を無人化することにより、安全性を向上している。人の判断をどのように組み入れるかという点に課題はあるものの、これらの技術を組み合わせることで、効率的かつ安全に削孔作業を行うことが可能と考えられ、遠隔化による無人化実現の可能性は高い。しかしながら、削孔作業の際には切羽を観察しながら削孔位置や火薬量を決めたり、火薬の装填を行ったりするなど、人が介在する作業もあるため無人化に向けての課題はまだ多い¹⁸⁾¹⁹⁾。発破後のずりのかき込みや運搬については、田口ら²⁰⁾により、遠隔化の実証が行われている。渡辺ら²¹⁾は、3D スキャナを搭載した台車を用い、遠隔からの吹付け作業や厚さ確認の実験を行い、おおむね対応が可能であることを報告している。坂西ら²²⁾は、小型バックホウをベースとした自動吹付けシステムを構築し、手動で動作を記録し、反復させることで自動化を進め、実験を行っている。

吹付け作業に関しては、作業員による作業状況や吹付け面の観察が必要となり、吹付作業による粉塵の発生する中で、カメラやセンサによる状況把握が可能になるかどうかは遠隔化の重要な要素になると考えられる。渡辺ら²³⁾は、遠隔からの吹付作業を行うにあたって、VR ヘッドセットを用いて吹付面やノズルを立体視することにより、より適切な操作を実現している。

鋼製支保工の建込み作業については、水谷ら²⁴⁾が、自動化ロボットの位置合わせ用のミラーについて、これまで人力で行っていた回収作業をワイヤー等で自動化している。内藤ら²⁵⁾は、継手の接合手法を自動化向けに改良している。このように、ロボット本体の開発にとどまらず、関連する作業についても自動化に向けて改良されつつある。

覆工コンクリートの打設については、高流動コンクリートを用いるなど材料を改良し、配管の自動切り替えを実現することで、自動打設を実現している²⁶⁾。さらに、唐ら²⁷⁾は、コンクリートを打設する作業員にバイタルセンサを装着し、心拍数や飽和酸素濃度の変化を観測することで、従来の人力による打設の身体的負荷を評価し、セントル（移動型枠）内の移動や、配管の切り替え作業が不要となることで、大きな省力化効果が得られることを示した。しかしながら、コンクリートを運搬するアジテータ車の自動運転の事例はない。

西村ら²⁸⁾はロックボルトの自動打設を行っており、充填材料のカートリッジ化や、ロックボルトの自動打設機を用いることで、1名でのロックボルト打設を可能とした。ロックボルト打設作業の手順は複雑であることから、現状では運転席から人が目視しながら操作している。ガイダンス機能によって従来人力で行っていたマーキング作業が不要となったこと、充填剤が硬化するまでの間、打設機械がロックボルトを支えることにより、特に危険な箇所については人が近付く必要がなくなっていることを報告している。鉄筋の組立作業や型枠の組立作業については、現在のところ遠隔化や自動化の取り組みはみられないが、ユニット化を進めるなど、坑内作業をなくす方向で検討することも考えられる。さらに、遠隔や有人作業と組み合わせることで一連のずり出し作業を部分的に無人化する取り組みも見られる²⁹⁾。このずり出しの方法は、遠隔バックホウ、自動ホイールローダ、ホッパーフィーダ（積込中継機）、有人ダンプトラック、遠隔バックホウと自動ホイールローダを操作、監視

する現地の遠隔操作室で構成される。自動ホイールローダはあらかじめ無人エリアに指定した限られた区間において、SLAM (Simultaneous localization and mapping)により自己位置推定を行、切羽とホッパーフィーダ間を往復する。またずりの掬い取りについては、遠隔バックホウが集積したものを掬う仕組みとしている。

山岳トンネル工事については、このように多くの作業の自動化が検討、実証されており、作業中にどの程度人が介在するか、どの程度近くに配置するかといった点は様々であるものの、多くの局面で省人化が進められている。人が介在する理由の中に、現地を把握しながら機械を動かさなければならないということや、中には三次元可視化が必要とされている部分があることから、デジタルツインとの連携による効果にも期待ができる。しかしながら、非 GNSS 環境下であることから、自動的に施工場所の間を長距離移動したり、自動で工種が入れ替わったりするような取組みは見られない。

安全上きわめてリスクの高い、切羽の肌落ちに直結する浮石の除去（コソク）作業やインバート掘削作業の自動化が取り組まれていないのは、工種の入替わりが伴う施工場所間の移動や、各々の施工に必要とされる正確な座標の取得ができないためと考えられる。現状、発破作業後の切羽に人が近付かずに、コソク作業を自動で実施するには、バックホウが自己位置を把握し長距離を自律的に走行する必要がある。また、インバート掘削についても、バックホウが自走しながら掘削を行う必要がある。このようにトンネル内では精度よく自己位置を得るためのGNSSが使用できないことが課題である。

2.2 複数の車両や施工機械の協調運転・協調作業

岡田ら³⁰⁾は、道路上の走行車両について、空間基盤を介して車両の状態や進路の情報を他の車両に伝達し、協調走行を実現している。空間基盤の更新間隔は長いが、自動運転車両どうしの調整であることから、各車両の予定が頻繁に変わらなければ問題にならないとのことである。他の車両との衝突を防ぐための自動停止など、相手の動きに対応する場合の動作については、LiDAR (Light Detection And Ranging)に障害物を検知した場合に停止するというように自律動作を組み込んでおり、パターン化された走行動作と、緊急時の走行動作を組み合わせることで、自動走行を可能としている。同様に共通の空間基盤から自動施工を調整し、施工機械どうしの干渉し合う動作を自律動作とすることで、施工機械どうしの協調作業が可能であると考えられる。

Moriya³¹⁾らは、物流倉庫における配送関連の作業について、搬送、ピッキングや仕分け作業を、機能ごとに分かれた多様なロボットの自律動作、協調作業によって自動化している。このような異なるタスク間の協調作業については、何をどこまで行うか、どのような条件になったら次のロボットが動作するかといった厳密な定義が行われる。

建設分野においては、武石ら³²⁾がバックホウとダンプトラックの連携作業を実証してい

る。この実証においては、バックホウに設置した LiDAR を用いて検出したダンプトラックの荷台を AI で識別しながら、あらかじめ記録した動作パターンを用いて積み込み作業を行っている。積み込み作業においては、荷台の土砂の状態が変化することで、途中の判断が必要となったり、積み込み回数も一定とならなかったりすることが想定されるが、1 名で複数のバックホウを運転することが可能である。

Wolf³³⁾らは、道路建設のシナリオに沿って複数の転圧機械を連携させるにあたり、相互に施工状況を伝達し、それらの情報に基づいて各施工機械が施工を進めることを可能としている。施工時間や施工範囲など、状況が変化するため、予定を変更するための情報伝達が必要となるが、転圧作業どうしの調整は可能となっている。Raha ら³⁴⁾、Ishida³⁵⁾らは、建設現場における作業データをオンラインで収集し、計画の変更を施工に反映している。

中村ら³⁶⁾は、バックホウ、クローラダンプ、ブルドーザ、振動ローラを対象に、作業進捗と位置を一元的に監視し、各々のタスクを切り替える仕組みを構築し、協調運転を実証している。各々の役割が異なる建設機械のタスクの切り替えについては、一元的に作業を監視し、切り替えを行うシステムが有効と考えられる。また同じ実証の中で、労働基準監督署の指導のもと、無人（自動・遠隔施工）エリア、有人エリアの区分を明確にし、有人のリジッドダンプとの連携を実証している。有人との混在作業であることから、安全を確保するために作業状況を可視化することが有効と考えられる。

山岳トンネル工事においても、ずりのかき寄せと積み込み、ずり運搬など、狭い空間で近接して作業する場合が多々ある。また、図-2.1 に示すように、工種が刻々と進行するため、各々の工種の入れ替わり時に輻輳する。このような場合、複数の施工機械、車両が占有する位置や、動作のタイミングを調整しながら進行させる必要がある。各々の工種の中でも、人が現地で確認するタイミングや、作業自体に人が介在するタイミングが多いことから、より緻密に作業間の調整を行うことが必要と考えられる。

2.3 非 GNSS 環境下の自己位置推定

千野ら³⁷⁾は、振動ローラにステレオカメラを設置し、Visual SLAM による位置推定を行った。3 m ほどの高さに設置したカメラにより地表面を撮影し、50 cm 以内の精度で位置推定が可能であることを報告している。

藤田ら³⁸⁾は、トンネル坑内でドローンを自律飛行させるにあたり、地表面をステレオカメラで撮影し、Visual SLAM を適用したが、暗所であり、坑内照明の光で撮影映像に明暗のむらが生じやすいことから推定位置が安定せず、自律飛行も安定しないため、2D LiDAR による壁面との離隔計測を併用して安定性を向上した。Visual SLAM のみで自己位置推定を安定させることは難しい。

Sawada ら³⁹⁾は、海上の自律航行船について LiDAR による SLAM を適用し、GNSS 測

位のみに頼っていた位置や方位の取得を冗長化した。LiDAR 点群と海岸線の地図をマッチングした結果、方位については GNSS よりも精度が高い結果となったと報告している。GNSS コンパスは、アンテナ間の距離が数m程度であり、方位誤差は生じやすいのに対し、SLAM では距離の遠い海岸線と点群をマッチングしていることで、方位の精度が高くなったと考えられる。山岳トンネル坑内の自己位置推定では、近傍の特徴点を用いる可能性が高いため、方位の誤差は大きくなり、同様の手法では精度が下がる可能性が高い。

Zhou ら⁴⁰⁾は、物体を検出する AI を用いてターゲットを取得し、これによって飛行中の UAV (Unmanned Aerial Vehicle) をリアルタイムに座標合わせをしているが、山岳トンネル坑内の施工機械についても既知点から座標を取得することができれば、より正確に自己位置を推定することが可能となり、円滑に自動施工を行うことが可能となると考えられる。

以上のように、GNSS が利用できない場合、また、山岳トンネルのようにカメラ映像が不安定となる環境では、GNSS のような高精度の自己位置推定手法は実証されていない。山岳トンネル坑内の自動施工では、各々の施工内容に合わせ、必要な精度を得られる自己位置推定手法を検討する必要がある。

2.4 本研究の新規性

山岳トンネルにおける自動施工を省人化、効率化するためには、建機側としては自己位置を計測しながら長距離を自律的に移動可能である必要がある。また、デジタルツイン側としては、建設現場の形状を反映し、建機側に必要な施工の動作を自動作成する必要がある。建機側の自己位置の把握については、GNSS を利用できる環境であれば容易であるが⁸⁹⁾、山岳トンネル等の GNSS が利用できない地下空間では難しい。一方で、道路土工工事は盛土材料の変化や天候の変化、周辺住民との調整により、日々の計画の変更が生じやすい³⁵⁾ため、施工の動作を自動更新することによって、管理の負荷低減を行った例がある。本研究では、デジタルツインによる現場状況の把握、施工の動作の自動作成や自動更新、自動施工の制御を実現するとともに、従来は困難であった GNSS を利用できない環境において、人の手を介さずに連続的に自動施工を行うための手法を開発し、自動施工の効率化を実現した。本研究の新規性を以下に示す。

- 1) 山岳トンネル工事では、坑内で GNSS が利用できないため施工機械の自己位置推定が困難である。このため、坑内を長距離にわたって自動で走行したり、施工場所を自動で検出したり、自動で位置合わせを行ったりすることができない。トンネル坑内の自動施工は、従来、オペレータが施工場所に自動施工機械を配置して自動施工を開始するが、本研究で構築した自動運転バックホウは、SLAM を用いて自己位置推定を行い、位置を把握すると同時に、障害物を回避しながら自動運転で施工場所である切羽に到達し、切羽に到達した際に 3D LiDAR で切羽との位置関係を再取得し、自動でコソク作業を行

- う．このように，人が現地で位置合わせを行う必要がなく，コソク作業の一連の動作を自動で行う点に新規性がある．
- 2) 山岳トンネル工事のインバート掘削作業を自動化する場合，所定の出来形精度を確保するために高精度の自己位置推定精度が必要と考えられるが，1)に示した切羽のコソク作業用に構築した **SLAM** のみでは誤差が大きい．また，切羽のように周囲の **3D** 形状から位置を特定できる施工場所ではない．このため，自己位置推定の仕組みを改良した．改良点は，**SLAM** に加えて，施工場所に入った際にあらかじめ設置された標定点（既知点）をリアルタイムに検出し，自己位置の座標計算を行い，より高精度な自己位置推定を行った点であり，新規性がある．
 - 3) 建設現場において，1)や2)の技術を用いて自動施工を行うにあたり，安全対策として，自動施工を行うエリアを無人とし，人が作業を行うエリア（有人エリア）と区別する必要がある．山岳トンネル工事では，多くの自動施工が実証されつつあるものの，現地での有人作業を必要とする場面が多々ある．また，多くの工種が狭隘な施工場所に入れ替わりながら施工を進めることから，特に自動施工を行うエリアと有人エリアを詳細に管理する必要がある．本研究では，非 **GNSS** 環境において，有人，無人を含む複数の作業が輻輳する作業環境下でデジタルツインによって現場の状況を遠隔から確認しながら自動施工を行う仕組みを構築した点に新規性がある．
 - 4) さらに，施工現場を無人化し，かつ円滑に運用するためには，施工を直接行う作業だけでなく，施工の動作の設定等についても自動化する必要がある．本研究では，デジタルツインに実装したパラメトリック **BIM/CIM** モデルとデジタルツインに収集した現場情報により，それまでは人が介在して状況に合わせて調整していた施工の動作を自動作成する手法を構築した点に新規性がある．

第3章 デジタルツインを用いた非GNSS環境下における 自動施工手法の提案

3.1 本章の概要

本章では、山岳トンネル工事を対象に、デジタルツインを用いた自動施工手法を提案する。デジタルツインでトンネル内の作業員や有人車両の位置を管理し、無人であることを確認して自動施工を行うものとする。工種は、切羽のコソク作業とインバート掘削作業とする。デジタルツインから自動施工の開始の指示を行い、それに従って待機場所にいる自動施工機が施工場所へ移動し、自動で施工の位置合わせを行い、所定の作業を実施し、待機場所に戻る仕組みである。待機場所と施工場所の距離は 200 m 以上（異なる施工丁場間を移動）を想定し、移動する経路や施工する近傍では、他の施工も行われている状況を想定する。これによって、自動施工に人が介在することを不要としたり、あるいは人が介在する時間や頻度を減らしたりすることで、自動施工の連続性を向上する。

3.2 使用するデジタルツイン

デジタルツインには、施工前に作成するデジタルツイン・プロトタイプ (Digital Twin Prototype)、施工しながら作成するデジタルツイン・インスタンス (Digital Twin Instance)、インスタンスを集約したデジタルツイン・アグリゲート (Digital Twin Aggregate)がある²⁾³⁾。本研究では、図-3.1 のように区分する。Prototype は設計変更があれば修正され、それに施工中に得られるインスタンス(1)の情報が付与され、維持管理用のデータ (BIM/CIM モデル) となる。インスタンス(2)、(3)、(4)はそれぞれ施工中の現場の状態を表す。目的に応じて各インスタンスどうしを組み合わせ、現場の状態を分析することもできる。例えば、粉塵や照明など作業員の労働環境を分析、改善する場合はインスタンス(2)の粉塵濃度と照度の坑内分布データと(3)の坑内設備 (換気設備や照明)、(4)の作業員の位置を組み合わせることができる。

デジタルツインは物理ツインと情報を同期するが、コンテンツによってそれぞれ更新タイミングが異なる。例えば、プロトタイプの設計モデルや想定地層は、変更となった際のみ更新する。インスタンス(2)の粉塵濃度や照度、インスタンス(4)の人や車両の動きは、2～3秒で更新する。それぞれのコンテンツの想定更新タイミング、想定タイムラグ (リアルタイム性) を表-3.1 に示す。

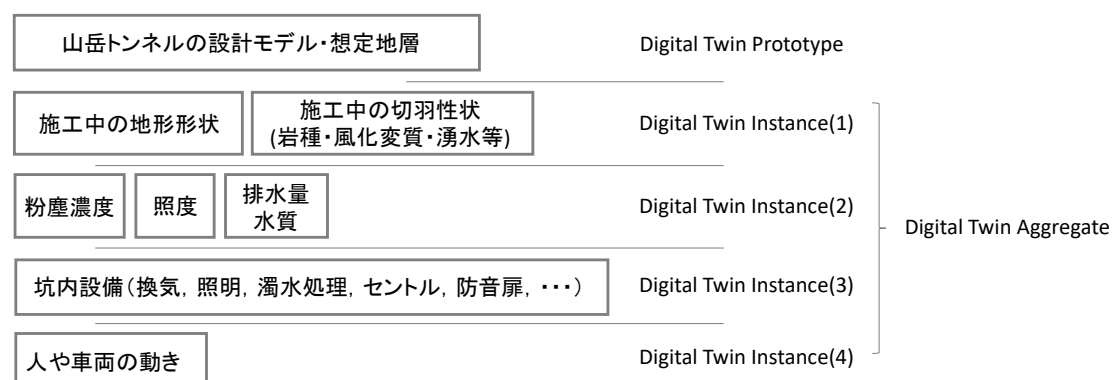


図-3.1 本研究のデジタルツインの分類

表-3.1 各コンテンツの種類と更新タイミング

区分	項目	作成時期	更新時期	更新頻度	タイムラグ
Prototype	山岳トンネルの設計モデル・想定地層	施工前・当初設計終了時	施工開始時・設計変更時	設計変更後一週間程度	一週間程度
Instance(1)	施工中の地形形状	トンネル掘削後 出来形管理時	出来形管理時	1～3カ月に1回程度	3日～1週間程度
	施工中の地形形状	施工中	トンネル掘削が進行し底盤の整地完了後 底盤の掘削や盛土（埋め戻しや仮置き含む）の実施前	底盤の掘削や盛土（埋め戻しや仮置き含む）の実施前に1回, 完了後に1回	5～10分程度
	施工中の地形形状	施工中	底盤の掘削や盛土（埋め戻しや仮置き含む）の実施時	底盤の掘削や盛土（埋め戻しや仮置き含む）の実施中に10分間隔程度、実施後に1回	5～10分程度
	施工中の切羽性状 (岩種・風化変質・湧水等)	トンネル掘削開始時	トンネルの掘削中切羽がある期間	1日に1回 (切羽観察時)	1～2分
Instance(2)	粉塵濃度・照度・排水量・水質・坑内風速・他	施工開始時	施工中観測が必要な期間	2～3秒に1回	2～3秒
Instance(3)	坑内設備	施工開始時	設備変更時・設備移動時	1日に1回	半日程度 但し必要な場合10分
Instance(4)	人や車両の動き	施工開始時	施工中観測が必要な期間	2～3秒に1回	2～3秒

本研究は、非 GNSS 環境における自動施工を対象とし、山岳トンネルの施工で実証を行う。山岳トンネルでは一般的に狭隘な細長い空間で多くの工種が入れ替わりながら施工が

進み、かつ、ほぼ全ての作業員が場所を変えて坑内で作業や管理を行うため、施工の状況を詳細に把握しながら自動施工を行う必要がある。コンテンツの更新タイミングは、施工状況を把握するために重要であり、インスタンス(1)の地形形状は施工範囲のデータ作成前に更新すればよく、インスタンス(2)のインスタンス(4)の人や車両の動きはどこで何の作業をしているかを表すので、自動施工前も自動施工中も常時監視するため、できる限り最新の状況を常に反映するのが望ましい。

なお、安全上の配慮から施工場所を無人にして自動施工を実施する必要がある⁴⁾が、有人と無人の切り替え頻度が多いと工程の遅延につながる。山岳トンネルの施工では、いずれかの工種で作業の遅延が発生すると、全体の工程に影響しやすいことも課題となり、有人と無人の切り替え等の段取りを含め円滑に無駄なく行う必要がある。しかしながら、山岳トンネル工事では、自動施工を行う際にも、近辺から人を完全に排除することは難しい。この対策として、近辺に人が居る場合に明確にわかるようにし、自動的に有人状態・無人状態を管理するものとした。

本研究では、人の検知のためにビーコン（図-3.2）を使用し、有人状態の施工箇所では自動施工を行うことができないよう設定する。ビーコンは BLE (Bluetooth Low Energy)方式であり、感知できる距離は 10 m 程度である。自動施工時に人が近づいた場合に警告や自動停止が間に合うよう、デジタルツインへのデータ送信、反映は 2～3 秒間隔で行う。車両については、移動速度が速いため、2～3 秒で 10 m 以上移動するが、100 m 等手前の受信機で判定することで対応可能である。



図-3.2 作業員ならびに工事車両の位置管理

インスタンス(1)の掘削時に用いる地形データは 3D スキャナあるいは 3D LiDAR によって取得し、デジタルツインにアップロードされる。地形形状データは、掘削の数日以内に取得するが、地形に変化が生じなければ過去のデータでもよい。施工中に形状を取得する場合は、施工中の区画だけを取得し続け、施工の管理、施工完了の判断等に使用する。この場合、10 分間隔程度で取得し、デジタルツインに反映する。また、デジタルツインへの反映前に施工場所で可視化し、判断することも可能とする。

切羽性状については、毎日 1 枚、タブレット PC によって切羽の写真を撮得、切羽の監察結果を添えてデジタルツインにアップロードされる。この際、切羽の進行位置もデジタルツインに登録される。切羽の掘削は 1 日当たり、0.5~1.5 m 程度進行する。デジタルツインへの登録は、技術者による切羽観察が終わった後であるため、日常的には半日程度後である。但し何らかの協議が必要な場合は即時共有され、タイムラグは 10 分程度である。

坑内設備の配置は、事前に報告され、その後施工の進行とともに移設され、手動でデジタルツインに反映される。移動したことを確認できるのは、報告を受けた後となるため、日常的には半日程度後である。但し何らかの協議が必要な場合は関係者に共有するために即時反映され、タイムラグは 10 分程度である。

本研究のデジタルツインと物理ツイン、自動施工機の間を図-3.3 に示す。デジタルツインの概念の中から、自動施工に必要と考えた項目をピックアップした。建設業の人材が不足する中で、ICT による生産性向上、省人化が進められているが、このような状況においてもベテランの経験に基づく知識と感覚は依然として重要である。これも、デジタルツインの概念の中で重要な要素となってきた⁴¹⁾。本研究では、人との知識と感覚を自動施工に活用するためのインタフェースとしても、デジタルツインが有効と位置付けている。

物理ツインからは、IoT センサやタブレット PC 等の管理ツールを介して、現場情報を集約する。これら多様な情報をデジタルツインの中で 3D 座標をもとに統合し、人が見た場合に理解しやすいように可視化する。デジタルツインには、前述の通り 3D スキャナや 3D LiDAR 等で計測した現況地形も集約されており、これと BIM/CIM モデルを用いて自動施工のための動作を定義し、自動施工機を制御する。デジタルツインが、人と自動施工機の橋渡しをすることにより、自動施工の管理を容易にする。

自動施工の対象とする土工の例として、山岳トンネル坑内の掘削の例を図-3.4 に示す。インバート掘削では、層の数は多くなく、2 層程度である。この図では現況地形が平坦だが、これに埋め戻しのための仮置き土が加わる場合もある。また掘削中であっても、断面の半分を走路として利用する場合もあるため、現況地形形状は様々であり、作業の整合性を確保するためには、デジタルツインに現場の地形を反映し統合・可視化することは重要である。

本研究のデジタルツインでは、坑内の掘削作業の動作を作成するにあたり、設計モデルと実測データとを使用する。設計モデルにはパラメトリック BIM/CIM モデル⁴²⁾が利用されており、数値を指定してプログラムによって形状を計算、描画する。パラメトリックモデリングにより、モデルの形状を自動的に計算し、人の手を介さずに変更することが可能となる。

また、デジタルツインのデータ容量を小さくし、計算コストを小さくすることができる。実測データとしては 3D スキャナや 3D LiDAR で取得した点群や、ICT 建機等の施工履歴データ（図-3.5）⁴³⁾⁴⁴⁾⁴⁵⁾が利用できる。現状の山岳トンネル坑内の施工においても、自動追尾式 TS (Total Station)を利用して締固め機械の追尾を行う場合⁴⁶⁾⁴⁷⁾は、その施工履歴が利用でき、別途計測する手間や時間を省略することができる。

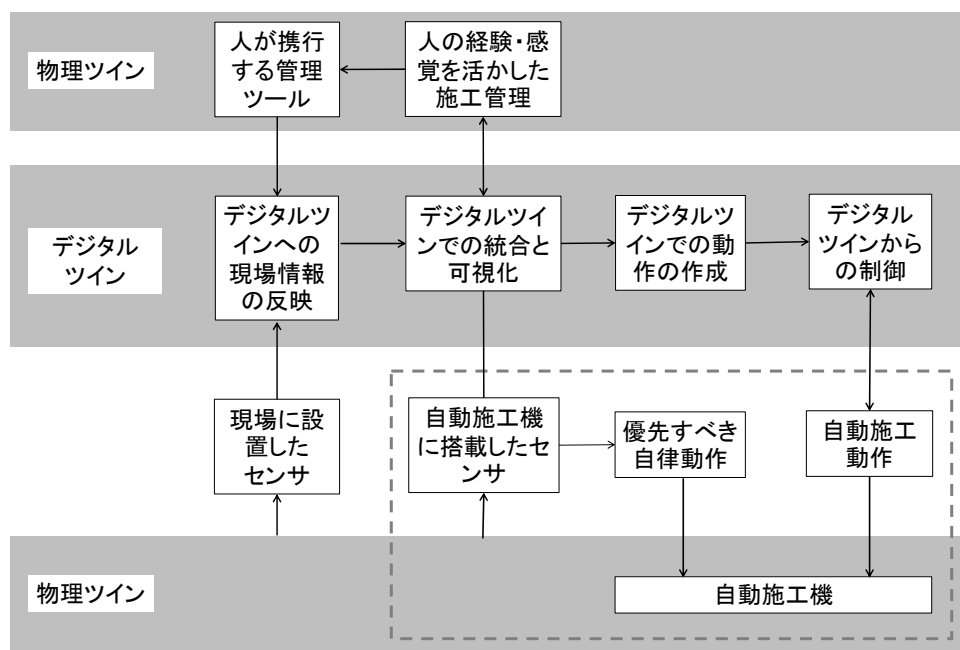


図-3.3 本研究のデジタルツインの構成

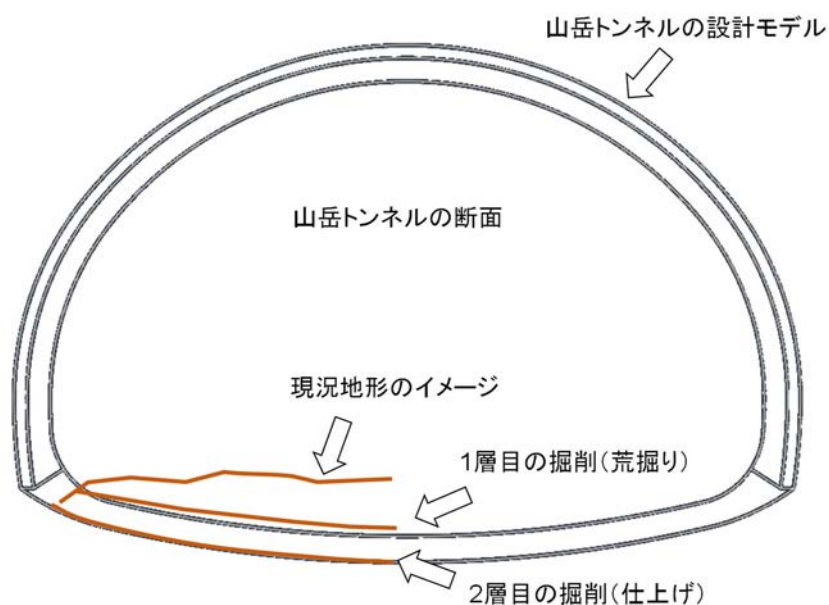


図-3.4 トンネル坑内の掘削（インバート）の例

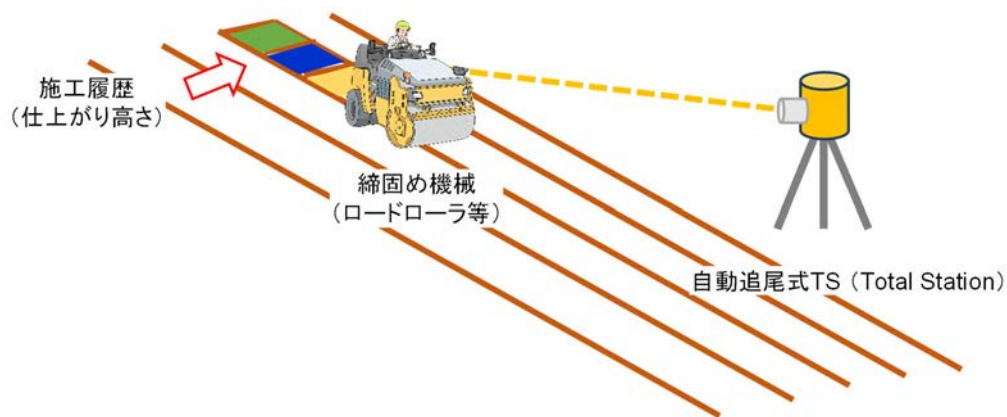


図-3.5 トンネル坑内の埋め戻し、締固め作業（インバート）における施工履歴取得のイメージ

本研究のデジタルツインでは、Web サーバにブラウザでアクセスする構成と、ローカル PC と VR ヘッドセットを使用する構成がある。前者は WebGL⁴⁸⁾⁴⁹⁾で 3 次元可視化を行い、後者は Unity⁵⁰⁾で VR 用の 3 次元可視化を行う。それぞれ 3 次元データが必要だが、両者のコンテンツは内容を同期しており、利用者が用途によって使い分けることができる。ここで、Web サーバは、日々の状況を自動的に共有するため、日常の管理に使われ、VR は経験や勘を伴う感覚的な議論をする会議の際に重要な役割を担う。図-3.6 にブラウザによる現場状況の確認例、図-3.7 に VR により現場に没入し、議論をしている例を示す。

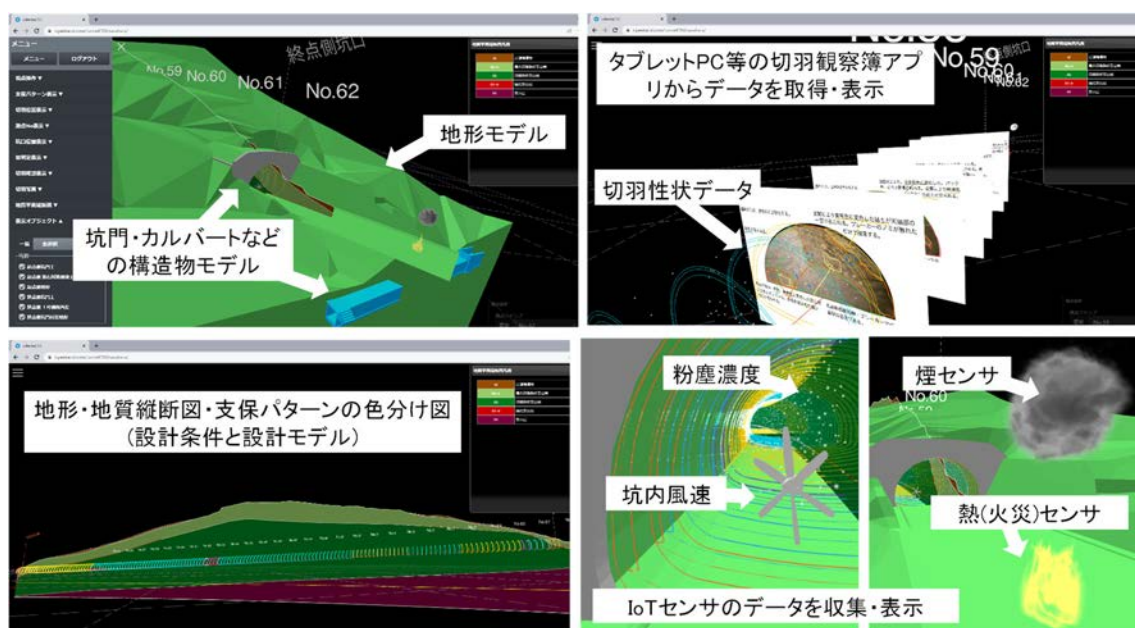


図-3.6 デジタルツインによる現場全体の俯瞰 (WebGL)

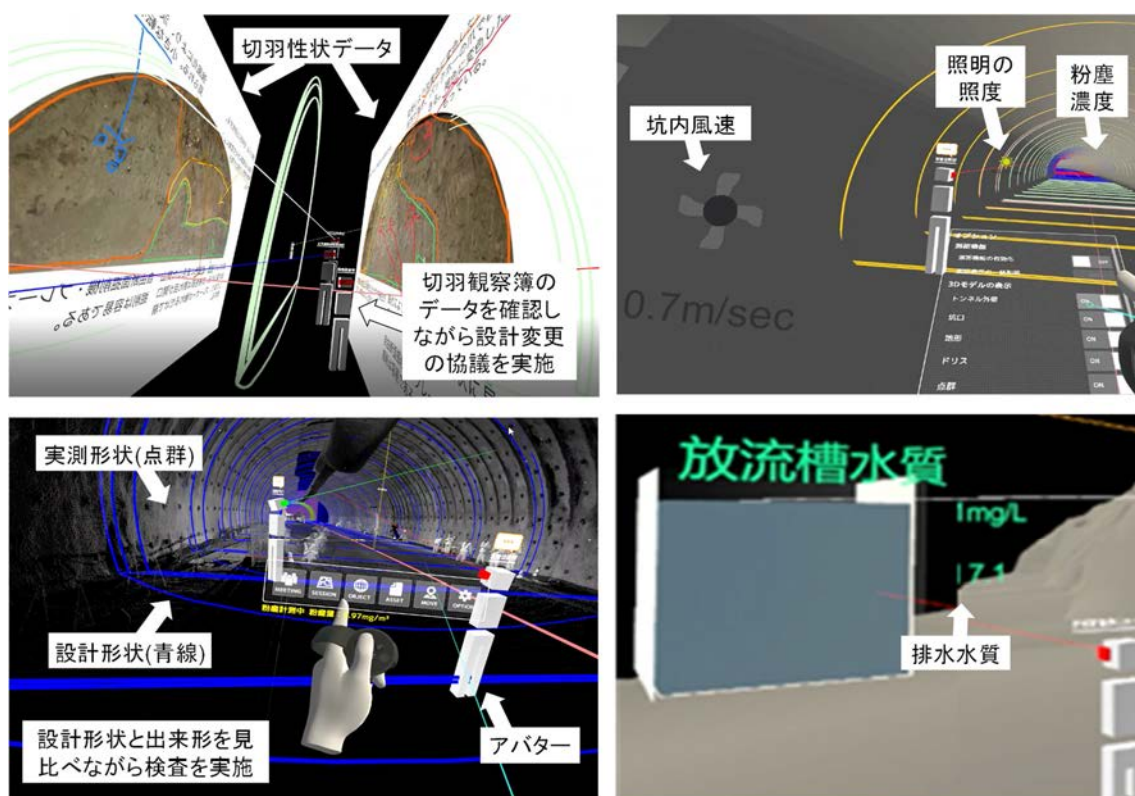


図-3.7 デジタルツインによる現場への没入 (VR)

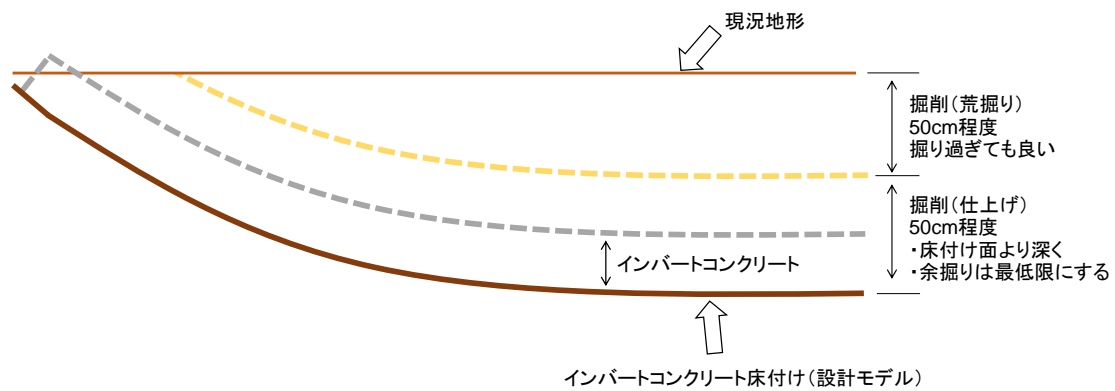
3.3 施工形状の自動作成の手法

本研究では、盛土作業や掘削作業に必要な土工形状の作成を自動で行う。自動施工中に、次の段階でどのような形状に施工するか定義するデータを自動で作成することにより、人が介在せずに連続的に自動施工を行う。埋め戻しや盛土の施工形状の計算方法、掘削の施工形状の計算方法を表-3.2に示す。また、施工形状の計算方法の断面図を図-3.8(a)～(c)に示す。インバート掘削は、深さにもよるが2層以上に分けて作業することが多い。まず、インバートコンクリートの床付けの手前の深さで荒掘りという工程を経て、ある程度床付けしやすいよう土砂を減らす。ブレイカ等で砕き、土砂を漉き取った後、仕上げの掘削を行う流れとなる。インバートの埋め戻しにあたっては、複数の層に分けて段階的に埋め戻す。各層の締固めを十分行うため、転圧後の層厚が30cm以内にするなど、所定の厚さ以内にすることが求められ、転圧により土砂が圧縮されて仕上がり面が下がることから、仕上がり形状を計測し、次の層の高さを決める。明かり工事の場合の盛土についても、埋め戻しと同じである。設計モデルと現況地形、施工履歴や出来形データを用いて施工形状を自動作成する。なお、通常はどの程度の厚さで敷き均すと、仕上がり高さがどの程度になるか予想し、ふかし量を設定するが、局所的に異なる高さになることもある。また、適切なふかし量は変動する場合がある。埋め戻し土砂は、現地発生土を使用する前提としているが、材料試験で不合

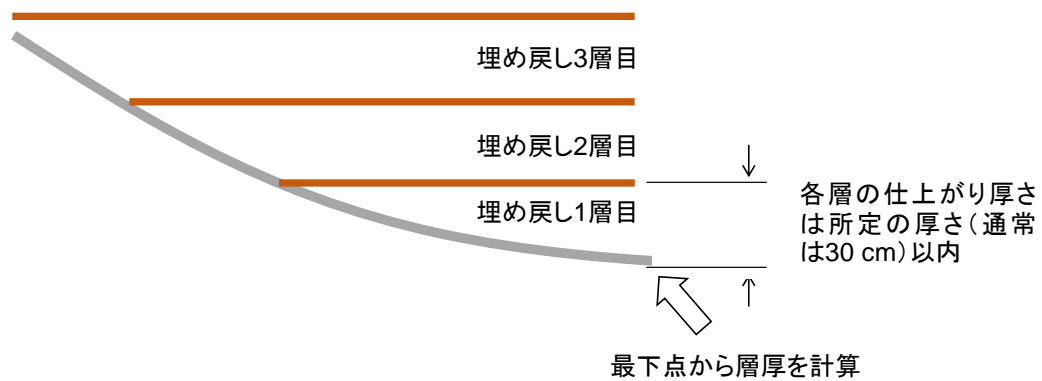
格となった場合は、外部から土砂を入れたり、セメント改良を行ったりする場合もある。これらの場合には、手順が変わるが、埋め戻し作業自体は、複雑にはならない。

表-3.2 土工の施工形状の計算方法

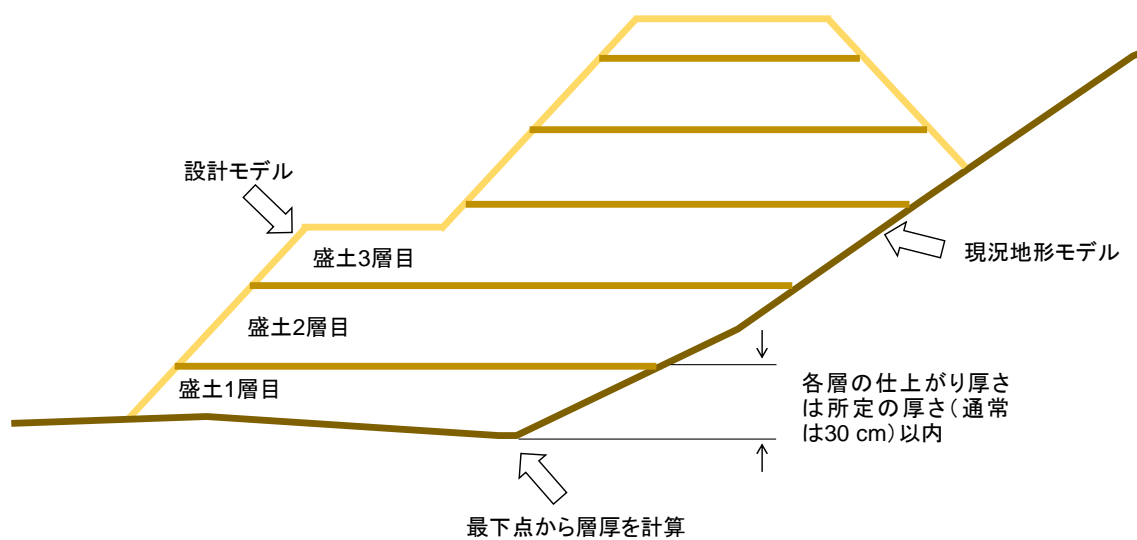
施工内容	施工前の形状データ	施工後の形状 (仕上がり形状等)	施工形状
インバート掘削1層目(荒掘り)	現況地形を3Dスキャナあるいは3D LiDARで取得	インバート掘削1層目終了後に3Dスキャナあるいは3D LiDARで取得	現況地形とインバート床付け面に挟まれた形状の1/2程度の深さ
インバート掘削2層目(仕上げ)	インバート掘削1層目出来形を3Dスキャナあるいは3D LiDARで取得	インバート掘削2層目終了後に3Dスキャナあるいは3D LiDARで取得	インバート掘削1層目出来形とインバート床付け面に挟まれた形状
インバート埋戻し1層目	コンクリート形状設計モデルを使用	インバート埋戻し1層目終了後に3Dスキャナあるいは3D LiDARで取得 あるいはインバート埋戻し1層目の締固め施工履歴を使用	コンクリート形状設計モデルの天端と、その最下点から1層分の層厚を加えた平面に挟まれた形状
インバート埋戻し2層目	埋戻し1層目の施工履歴	インバート埋戻し2層目終了後に3Dスキャナあるいは3D LiDARで取得 あるいはインバート埋戻し2層目の締固め施工履歴を使用	埋戻し1層目の天端と、その最下点から1層分の層厚を加えた平面に挟まれた形状
インバート埋戻し3層目	埋戻し2層目の施工履歴	インバート埋戻し3層目終了後に3Dスキャナあるいは3D LiDARで取得 あるいはインバート埋戻し3層目の締固め施工履歴を使用	埋戻し2層目の天端と、その最下点から1層分の層厚を加えた平面に挟まれた形状
盛土1層目	盛土範囲の現況地形を3Dスキャナあるいは3D LiDARで取得	盛土1層目の施工履歴	盛土範囲の現況地形の最下点に1層分の層厚を加えた平面と現況地形モデル、設計モデルに囲まれた形状
盛土2層目	盛土1層目の施工履歴	盛土2層目の施工履歴	盛土1層目の最下点に1層分の層厚を加えた平面と現況地形モデル、設計モデルに囲まれた形状
盛土3層目	盛土2層目の施工履歴	盛土3層目の施工履歴	盛土2層目の最下点に1層分の層厚を加えた平面と現況地形モデル、設計モデルに囲まれた形状



(a) 山岳トンネルのインバート掘削の施工形状



(b) 山岳トンネルのインバートの埋め戻しの施工形状



(c) 明かり工事の盛土の施工形状

図-3.8 土工の施工形状の計算方法

インバート掘削の1層目(荒掘り)の3D形状のイメージを図-3.9に示す。本研究のデジタルツインでは、自動施工の制御を行うにあたって、このように施工対象の3D領域、施工形状を設定し、それをメッシュデータとして自動施工機に送信する。

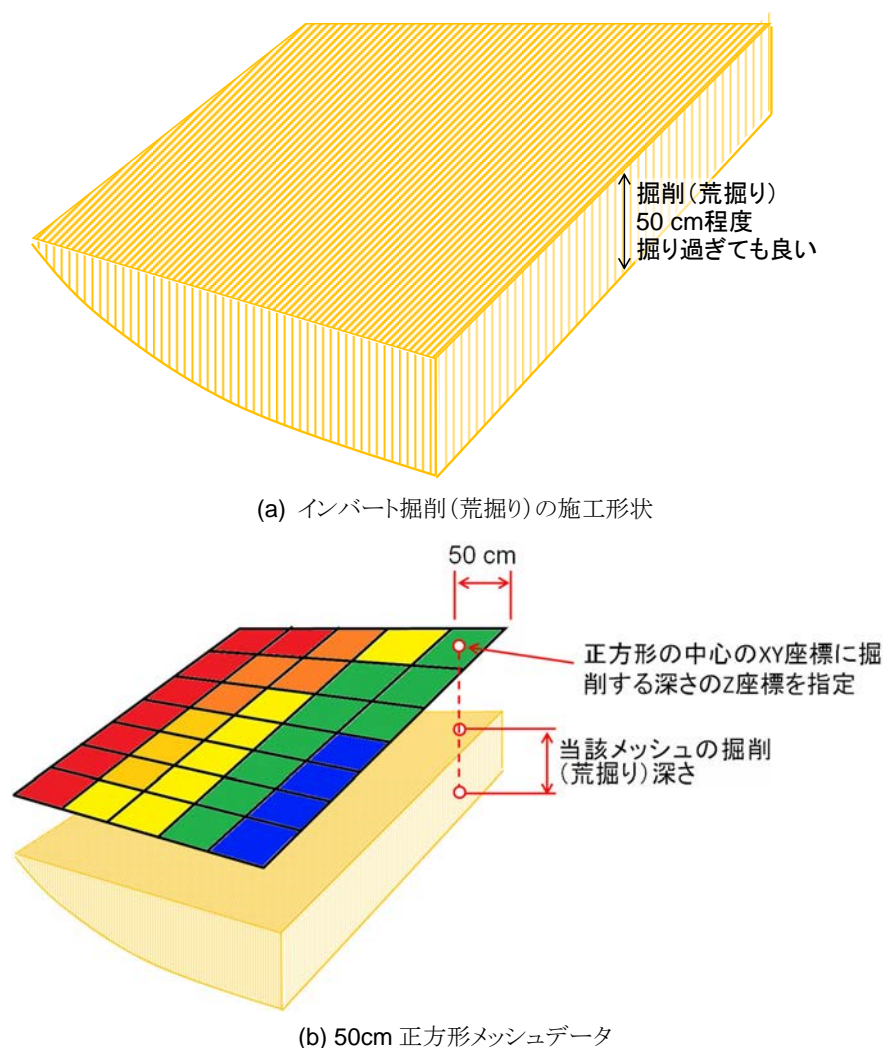


図-3.9 インバート掘削(荒掘り)の施工データのイメージ

3.4 非 GNSS 環境下における位置推定と移動の手法

本研究では、待機場所から施工場所への移動、施工に入る際の位置合わせを含め、連続的な施工の流れに沿って自動化するため、バックホウはトンネル坑内で自律的に移動する必要がある。移動の際の位置推定には主に LiDAR SLAM を使用する。本研究で対象とする施工中の山岳トンネル坑内の状態のイメージを図-3.10に示す。また、代表箇所の状態を写真-3.1(a)～(i)に示す。

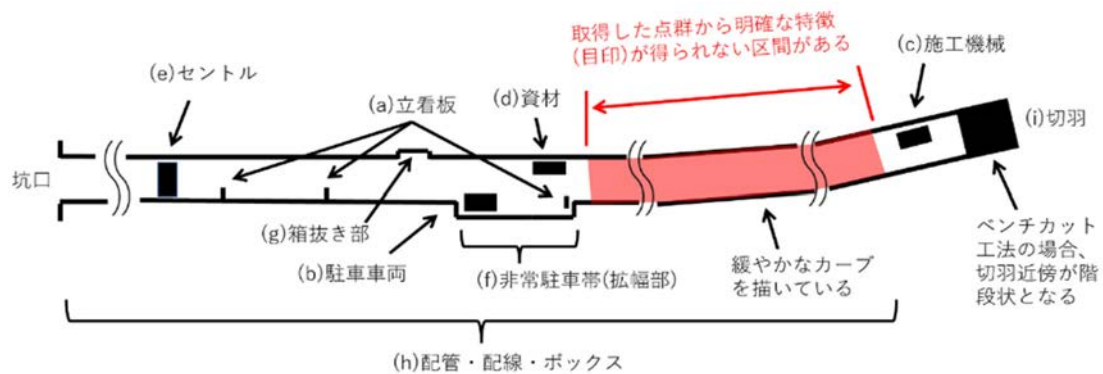
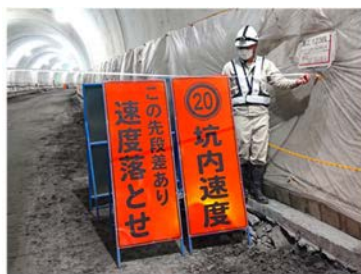


図-3.10 施工期間中の山岳トンネルのイメージ



(a) 立看板



(b) 駐車車両



(c) 施工機械



(d) 資材



(e) セントル(移動型枠)



(f) 非常駐車帯(拡幅部)



(g) 箱抜き部



(h) 配管・配線・ボックス



(i) 切羽

写真-3.1 施工中の山岳トンネル内の状況

施工中の山岳トンネル坑内には、立看板、駐車車両、施工機械、資材、セントル等、SLAMの特徴となり得る物体が所々に存在する。また、設計上、非常駐車帯（拡幅部）や箱抜き部が存在し、これもSLAMを用いる際の特徴として有効と考えられる。一方で、図-3.10の赤いハッチングの部分は、平坦で特徴となるものがない。また、切羽は日々先に進むため常に切羽の座標・形状が変わるという問題がある。このため、移動や位置合わせには、LiDAR SLAM以外の手法も併用する。LiDAR SLAMを使用した場合と未使用の場合の移動手法をそれぞれ、図-3.11、図-3.12に示す。

LiDAR SLAMが利用できる区間では、図-3.11のように座標によって走行経路を指定することが可能である。この手法では許容範囲（図-3.11では4 m）を超えた場合に、許容範囲に戻るよう旋回する。なお、図-3.11に示す大きな角となる目印がない区間（赤ハッチングで図示）については、LiDAR SLAMが使用できない可能性が高い。このため、座標を用いない別の方法で安全な自律走行を行う必要がある。バックホウは上部の作業機と下部の走行部があり、作業機の前方に走行するとは限らない。このため、2D LiDARを設置する際に全周を監視できるよう配慮する必要がある。なお、LiDARは、SLAMだけでなく、周囲の障害物の検知と回避に使用する。この障害物検知による回避によって、SLAMが利用できない区間の自動走行を行う（図-3.12）。

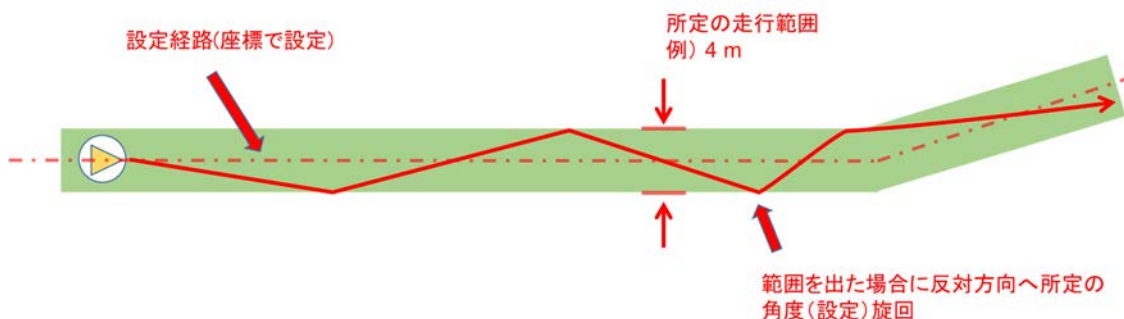


図-3.11 LiDAR SLAMを利用した場合の移動手法

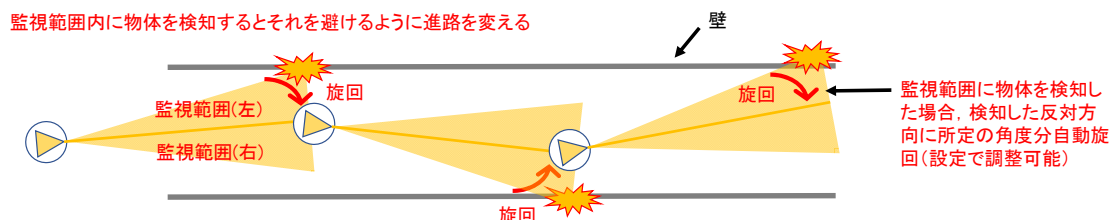


図-3.12 LiDAR SLAMを未使用の場合の移動手法（自動回避を連続で実施）

SLAM の方式の選定について、トンネル内では可視光の光量が小さく、また、照明が均一ではなく光のムラが大きいことから、可視光カメラ（ステレオ式を含む）を使用する Visual SLAM よりも、光（照明）の影響を受けにくい LiDAR SLAM が適していると判断した⁴⁹⁾。一方、SLAM には、移動距離が大きくなるに従い、位置推定の誤差が蓄積し、推定位置が徐々にずれることが知られており（ドリフト）、長距離走行中に十分な位置精度を確保するには、補正等の対策が必要である。トンネルでは、施工機械は長距離を移動するが、あらかじめトンネル内の設備や形状を把握し、それらを位置推定に用いることによって、例えばドリフトにより自己位置に大きな誤差が生じても、回復させることが可能である。また、施工中の現場では、物体の配置が変化することで、自己位置推定が困難となる状況も避けられず、自己位置を見失った場合でも、回復（自己位置を再取得するなど）あるいは別手法での位置推定を可能とすることが望ましい。

3.5 システム構成

システム構成を図-3.13 に示す。使用する自動施工機は、油圧制御装置とマシンガイダンスシステムを搭載したバックホウ（遠隔操縦方式）である。著者らが自動施工機に改造するにあたり、2D LiDAR, 3D LiDAR, 旋回角度計（走行部と作業機部の相対的な角度を取得）、デジタルツインと相互にデータを送受信可能で、かつ油圧制御ユニットとマシンガイダンスシステム、旋回角度計、LiDAR 等のデータを取得する演算装置を新たに設置した。図-3.13 の赤い破線の枠が既製のシステムを使用した部分である。左上段の赤破線で囲んだ部分は遠隔操縦のシステムであり、信号の送受信部は本研究では使用しない。また、左中段の赤破線で囲んだ部分、マシンガイダンスシステムの GNSS は本研究では使用しない。旋回角度計は、バックホウの走行部（下側）と作業機（上側）の回転角を把握するもので、遠隔操作の場合は、オペレータが車体を監視し車外モニターで回転角を把握するため必要ないが、自動運転では、走行開始時にどちらの向きに走り出すかを判別できないことが想定される（図-3.14）ため、必要である。なお、広く障害物のない場所であれば、走り出してから移動方向を検出して判断することは可能である。

通常の人化施工では、無線式のリモートコントローラで操作した内容が、操作信号受信部を経由して、油圧コントロールユニットに伝達され、遠隔でバックホウを動作させる。本研究では、バックホウに自動運転のための演算装置を搭載し、演算装置でリモートコントローラの操作信号を模擬した制御信号を自動的に生成する。制御信号によってバックホウの左右クローラの前後進、作業機の旋回、ブーム／アーム／バケットの各関節は、自己位置と傾斜計の数値を計測しながら駆動し、所定の位置と姿勢にする。この位置と姿勢を連続的に切り替えることによって、施工を行う。

演算装置はトンネル内の無線 LAN に接続され、設定作業や動作の開始・終了等の操作を

無線 LAN 経由で遠隔から実施することができる。演算装置をバックホウに搭載し、自律動作を可能としていることから、自動運転中は通信が途切れた場合にも、自動的に回避動作や停止動作を行う。なお、本試行中は、安全対策として通信が途切れた場合に自動運転を終了するよう設定した。この演算装置では、マシンガイダンスシステムからバックホウの車体の傾き、ブーム・アーム・バケットリンクの角度、それらによって計算されたブレイカの刃先の位置を取得、ブレイカの刃先を所定の位置に誘導するための演算を行う。実機の例を図-3.15 に示す。本システムは、一般的な油圧制御のバックホウであれば、建設機械メーカーを問わず、設置が可能である。

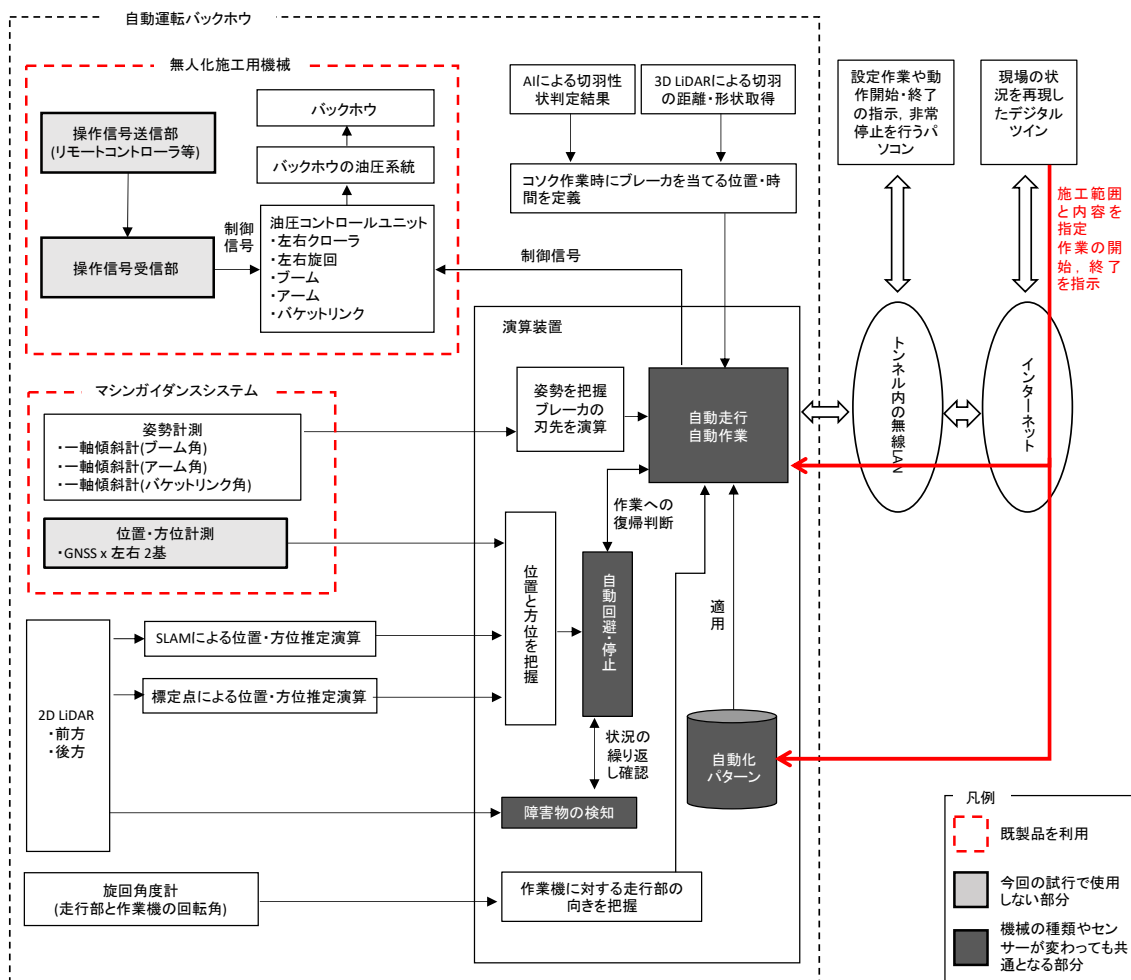


図-3.13 システム構成図

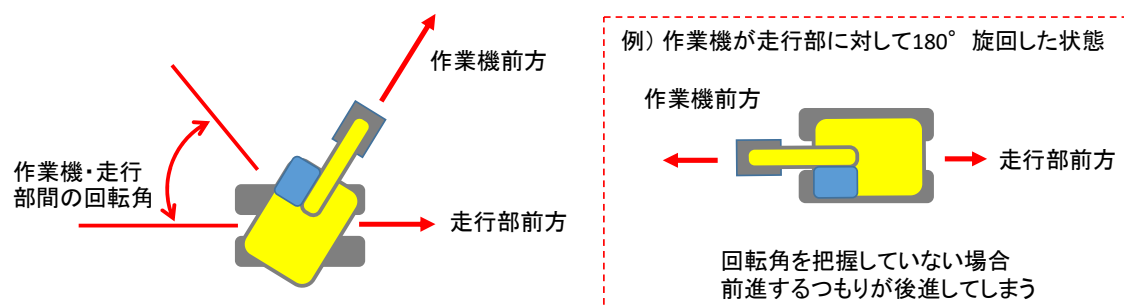


図-3.14 作業機と走行部の回転角を把握する重要性



図-3.15 自動施工用バックホウ（ブレーカユニット装着）

走行中の周囲の監視は 2D LiDAR によって行うが、全周囲を監視するためには、図-3.16、3.17 のように水平視野角が 270° 以上の LiDAR 装置を 2 箇所を設置する必要がある。さらに、2D LiDAR だけでは周囲の状況を捉えきれないことが想定される場合は、図-3.18 のように前方に 3D LiDAR を設置する。走行しながら前方を監視するため、アームの付根に、ブームとアームを畳んだ状態で前方を向くようにしている。

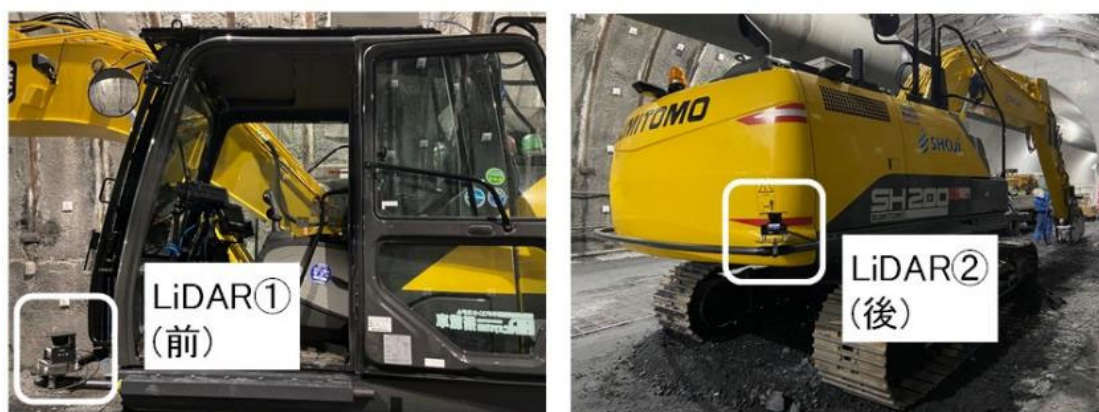


図-3.16 2D LiDAR の設置位置

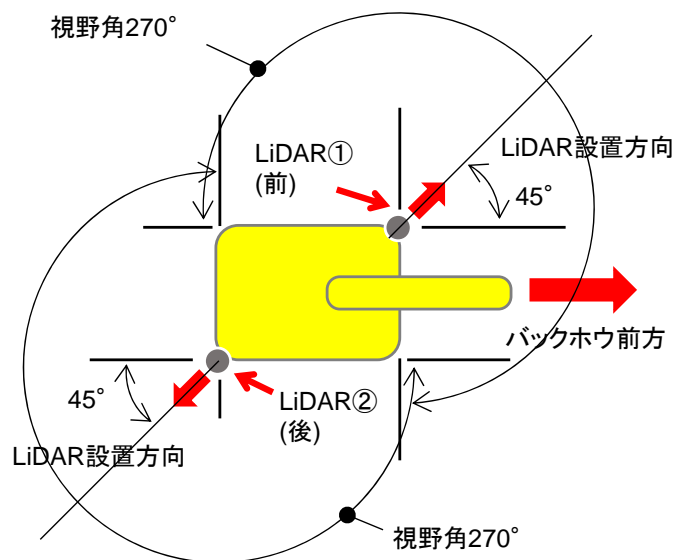


図-3.17 2D LiDAR の設置位置と監視範囲

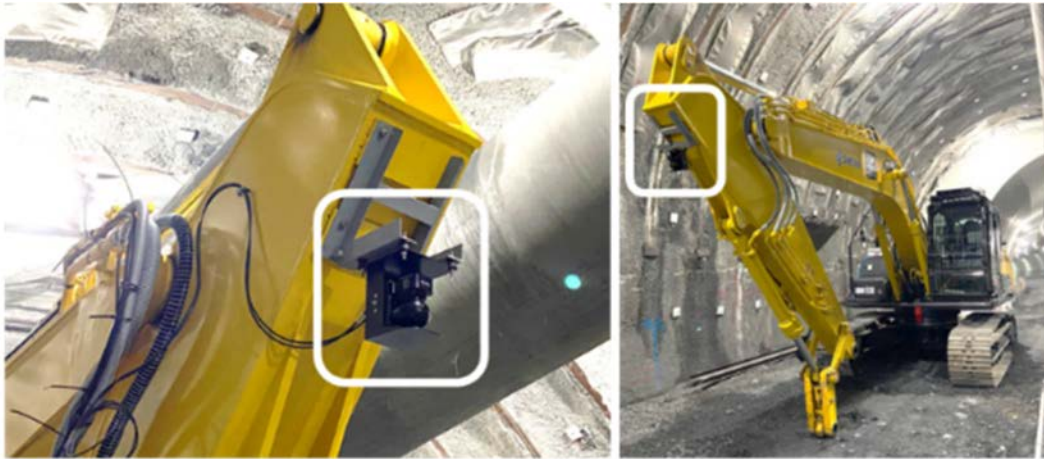


図-3.18 3D LiDAR の設置例

3.6 コソク作業への適用方法

本節では、山岳トンネル工事を対象に、コソク作業と呼ばれる切羽（写真-3.2）の浮石を落とす作業の自動化手法について述べる。山岳トンネルの切羽の施工は、一般的に図-3.19の流れで進み、切羽のコソク作業は、発破（火薬による掘削）の直後、吹付けの前に肌落ちが発生しやすい状況で行われることから危険性が特に高い。

山岳トンネル工事の切羽コソク作業を自動化するためには、非 GNSS 環境で、障害物を回避しながら切羽まで走行し、かつ、切羽の性状（脆さ）を判断し、切羽表面に対してブレーカを当てて作業を行う必要がある。



写真-3.2 山岳トンネルの切羽

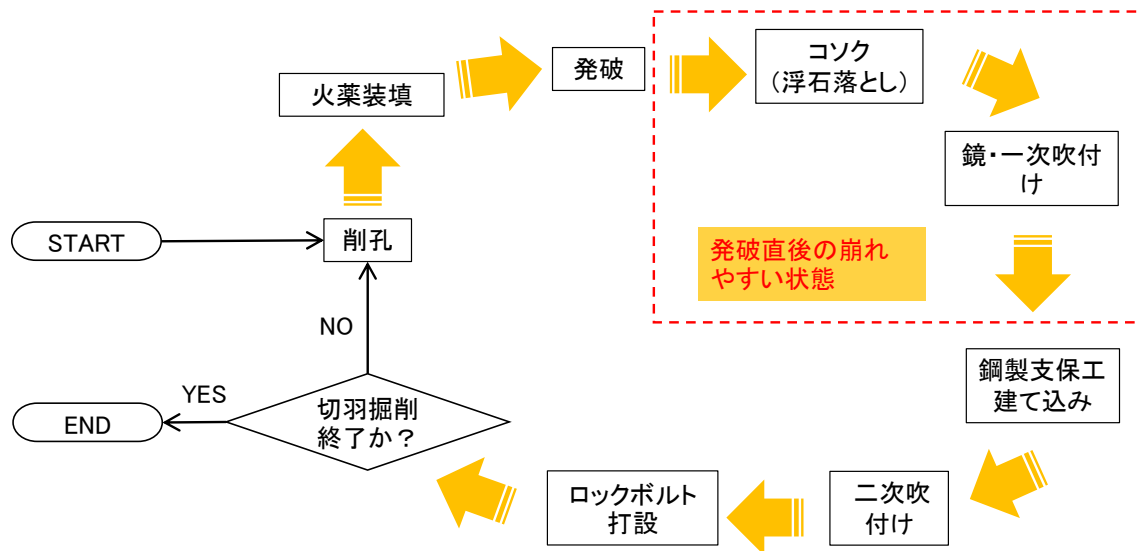


図-3.19 山岳トンネル工事(NATM・発破掘削)の流れ

山岳トンネル内は、GNSS を使用することができない地下空間であることから、自己位置の推定には、LiDAR による SLAM を適用した。提案手法の構成を図-3.20 に示す。切羽の自動コソク作業を実施するにあたり、ブレーカの刃先を誘導する目標位置は、3D LiDAR によってバックハウと切羽の面的な距離と AI 判定結果のメッシュ図 (図-3.21) を重畳することで得られる。自動走行を実施するにあたり、SLAM によってバックハウの位置座標と方位を取得し、所定の経路に対する誤差を計算しながら走行、進路の自動修正を行うものとした。自動回避を実施するにあたり、周囲を監視する 2D LiDAR によってバックハウの進路上 (監視角度・距離をあらかじめ設定) の障害物の相対座標を取得し、進路上に障害物を検出した場合に、障害物が進路に干渉しなくなるまで所定の角度ずつ旋回を繰り返すものとした。これらの自動コソク作業、自動走行、自動回避の自動化パターンは、リモートコントローラにより実際に遠隔操縦を行い、各操作に対応した制御信号を記録することで基本動作を作成し、さらにプログラムで類似の動作が可能のように調整した。

切羽付近に到達すると、座標による管理ではなく、切羽との相対距離を管理して移動する。切羽の手前まで近付いたら 3D LiDAR による切羽距離・形状取得を行う (図-3.22)。その後、コソク作業が可能な距離まで移動し、AI による岩種判定結果に基づいて、脆い箇所を重点的に叩く。所定の箇所を叩き終わったら、自動で待機場所に戻る。この作業の間、仕組み上は人の介入が不要となる。

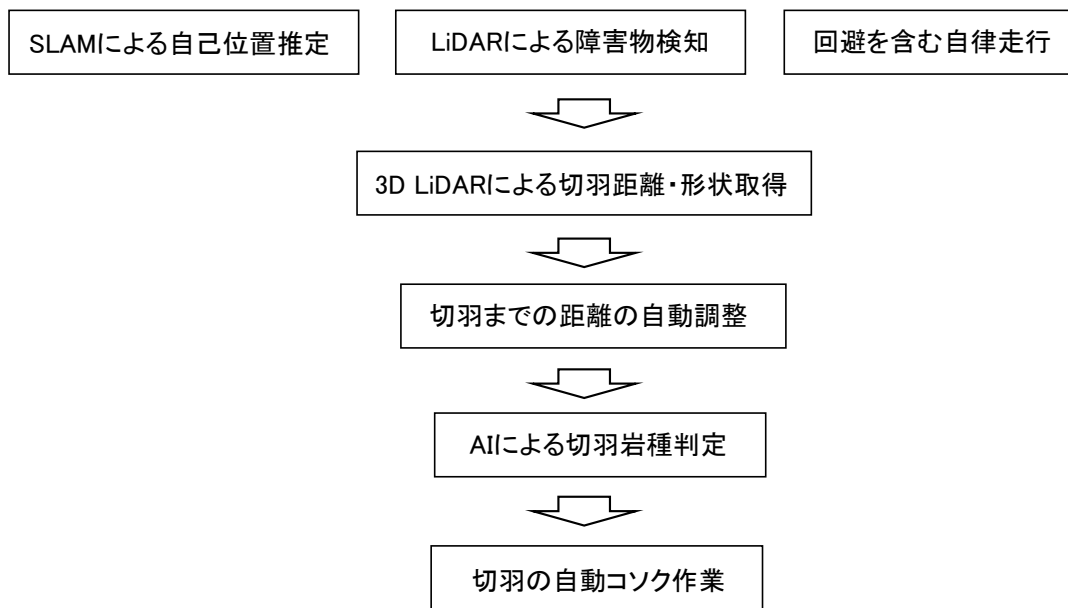


図-3.20 提案手法の構成

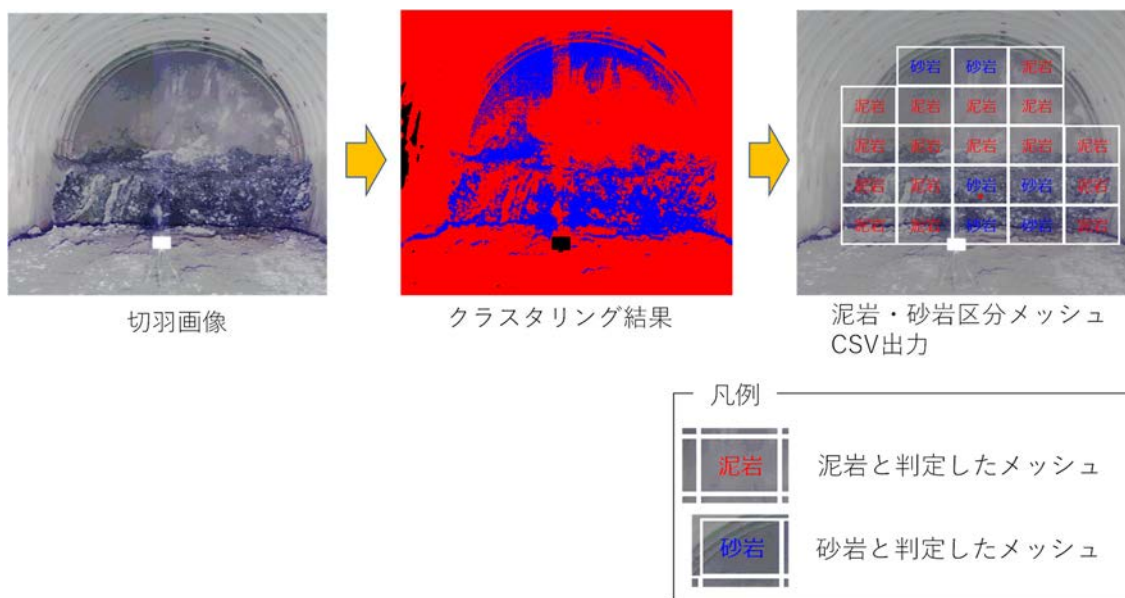


図-3.21 切羽岩種判定AIの結果例

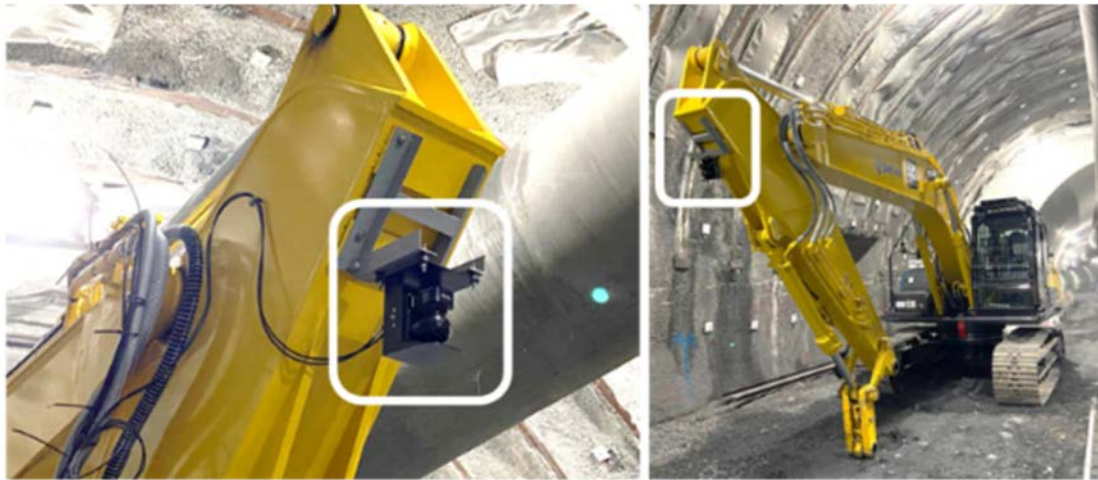
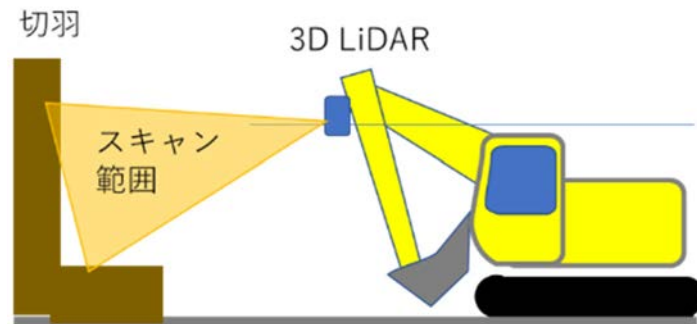


図-3.22 3D LiDAR設置例(アームの付根に設置)

3.7 インバート掘削作業への適用方法

図-3.23 に山岳トンネル施工現場のインバート部分を示す。赤枠で囲んだ部分がインバートの断面である。写真では手前からインバート掘削後の状態、鉄筋・型枠組立が完了した状態、インバートコンクリートの打設が完了した状態となっている。インバートは、底面の地盤が上向きの圧力に耐えられないと想定される部分で施工するものである(図-3.24)。インバート部分を掘削することにより底面側の土が排除されると、底盤を押さえている下向きの荷重が小さくなり、不安定となることから、掘削後はできる限り早期に下向きの荷重を確保する必要があり、コンクリート打設・埋め戻し作業までを連続して行うのが一般的な流れである。

インバート掘削は、図-3.25 のような施工の流れの中で行われる。図の右側に示す切羽作業が進行した後、左上側の枠、底面の地盤が弱い箇所に対してインバート工を施工する。インバート工は掘削、鉄筋・型枠組立(鉄筋がない場合もある)、コンクリート打設の順で施

工する。インバートの施工精度としてはインバートの厚さが設計値以上となるように管理しており、一般的には掘削時の余掘り（設計値を超える掘削深さ）を数 cm 以内に収めている。余掘り量が増えると、土砂の処分量が増え、同時に、コンクリートの打設量が増えることにつながるため、作業効率や環境配慮の面から、極端に大きくなることは避けなければならない。このため、インバート掘削作業を自動化するにあたっては、より高精度に位置推定を行う必要がある。

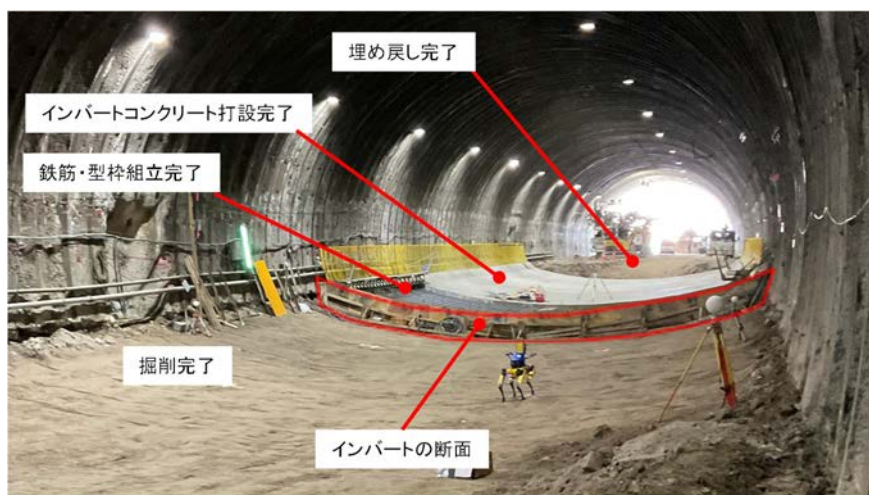


図-3.23 インバートの施工場所(例)

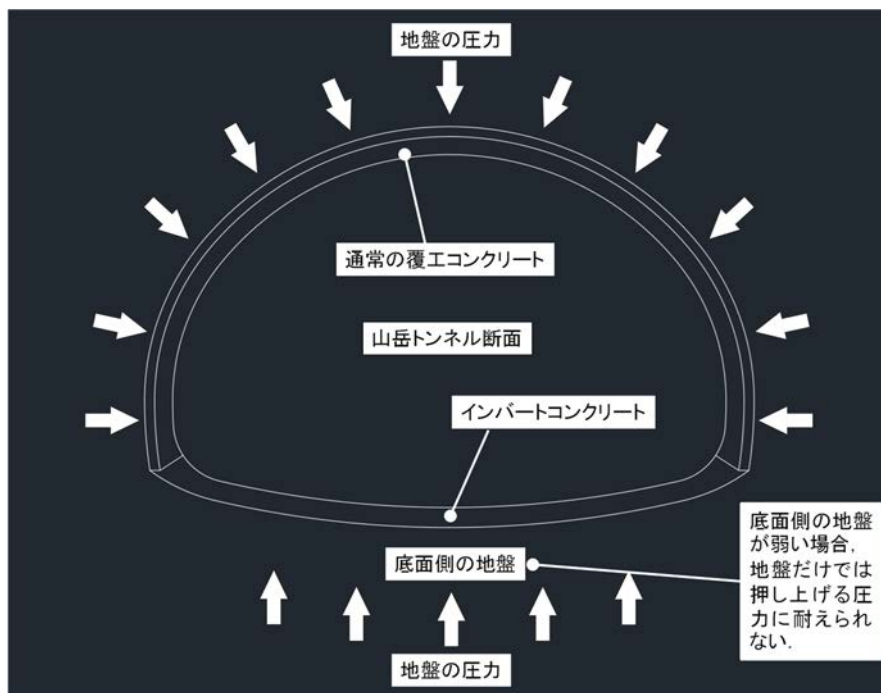


図-3.24 山岳トンネルのインバート部の意味

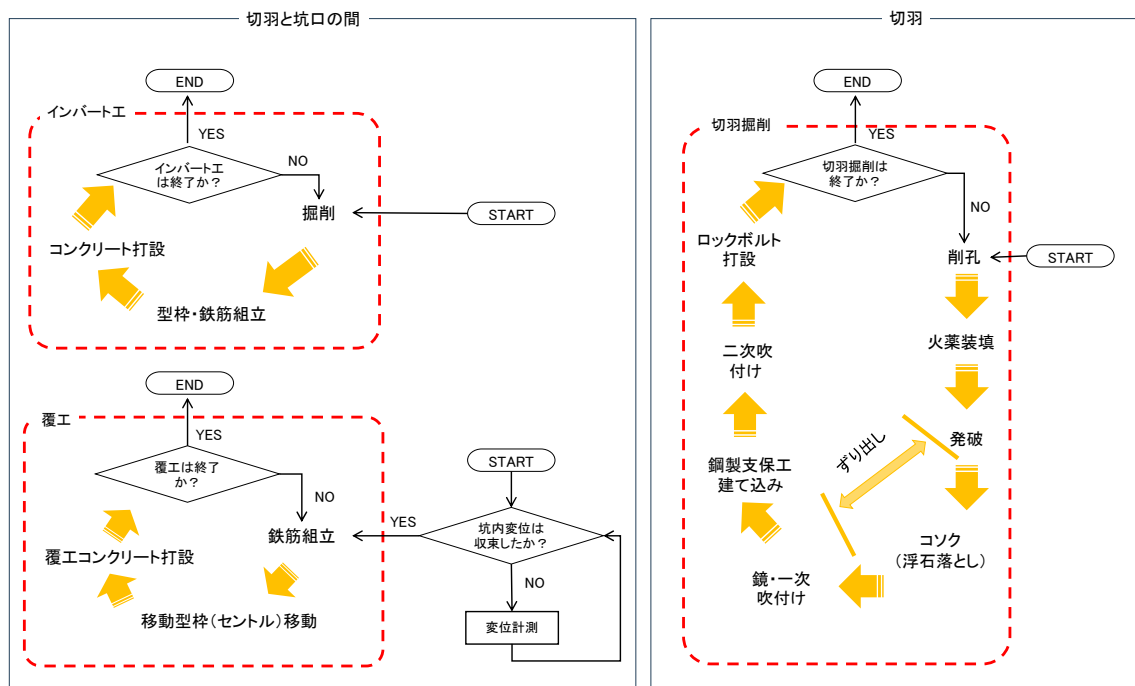


図-3.25 山岳トンネル施工（NATM・発破掘削）の流れ

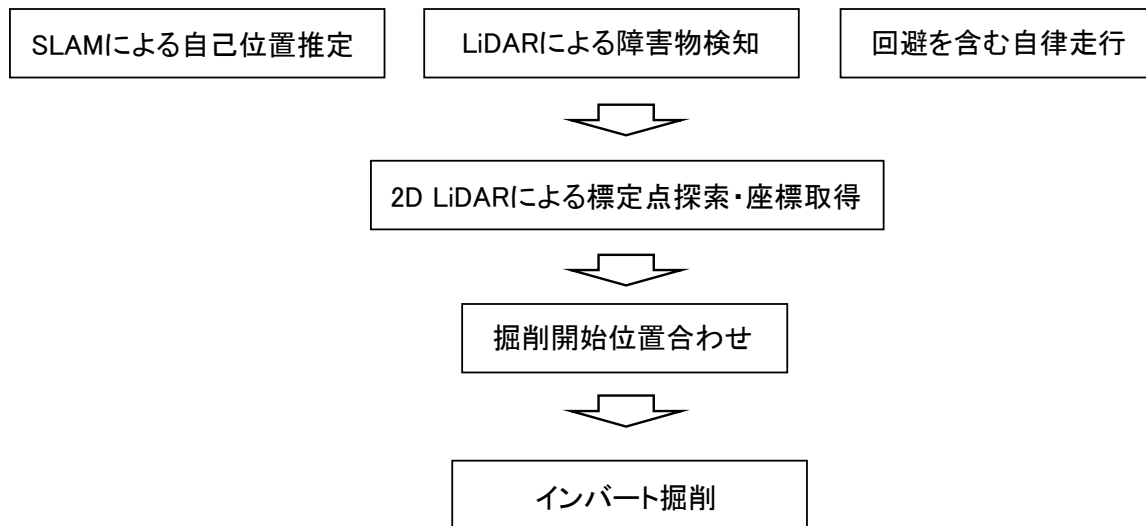


図-3.26 提案手法の構成

提案手法の構成を図-3.26 に示す。図の上段の移動手法については、3.4 節で述べたコソク作業と同じである。これに加えて、上から 2 段目の標定点探索・座標取得で施工場所の正確な座標を得るものとする。掘削作業における位置推定では、高い精度が必要となる。そこで、図-3.27 に示すように施工場所に 2 基の円筒型の標定点⁵⁾を設置し、位置推定精度の

向上を試みた。この手法はバックホウの車体に設置した 2D LiDAR によってバックホウの前方を探索しながら走行し、物体を検出した際に形状を判定し、円筒であれば標定点とみなし(図-3.28), 2 基検出した時点で自己位置と方位を推定するものである。この手法により, SLAM よりも高い精度が実現可能である。2D LiDAR によって, リアルタイムに標定点を検出する。本研究では, 山岳トンネル工事の施工単位の例としてブロック (1 ブロックの延長は主に 10.5 m) ごとに自動施工を行うことを想定し, 自動運転機が標定点の 10 m 以内に入ったら, SLAM による位置推定から標定点による位置推定に自動的に切り替え, 精度が向上する仕組みとした。

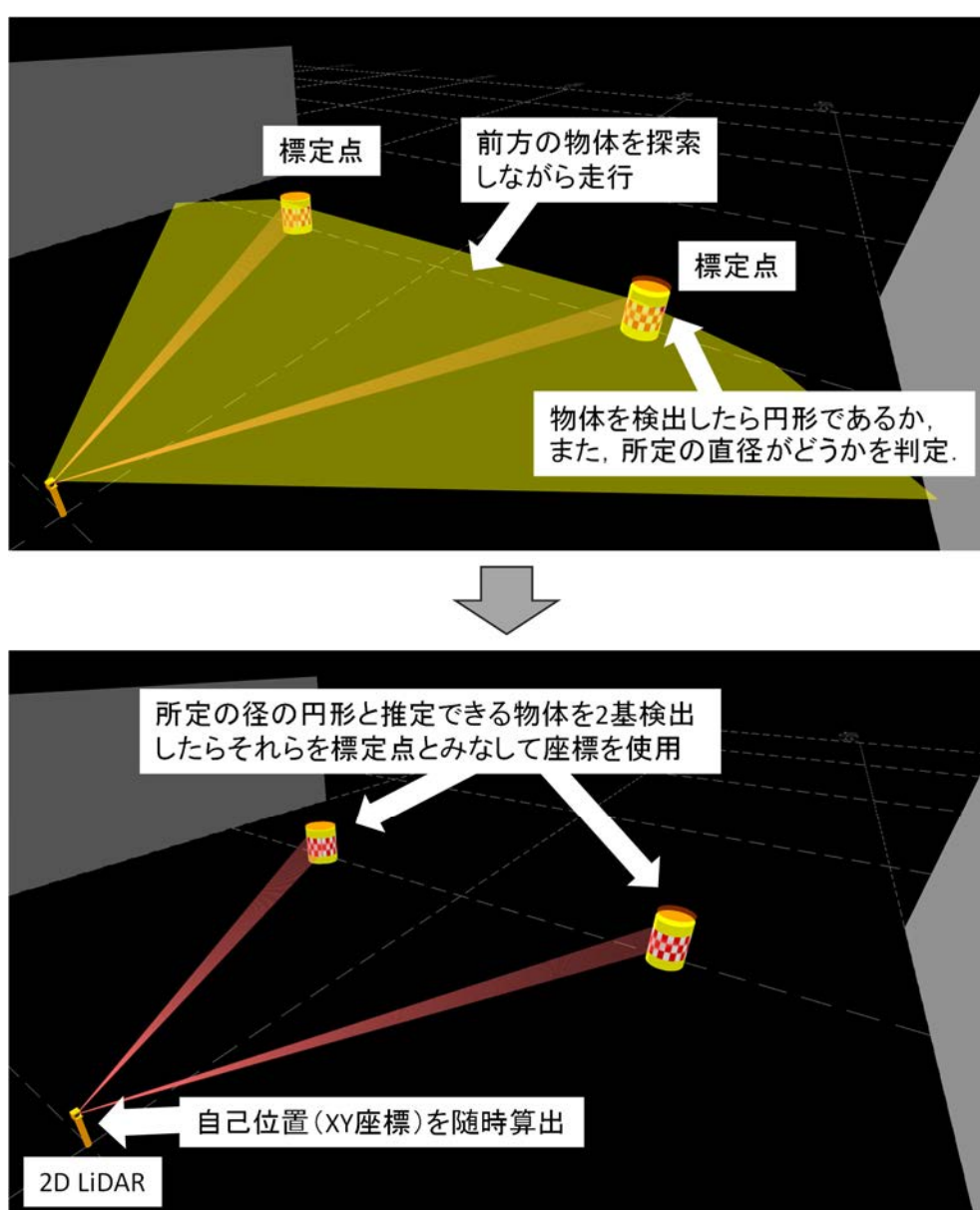


図-3.27 標定点による位置推定手法

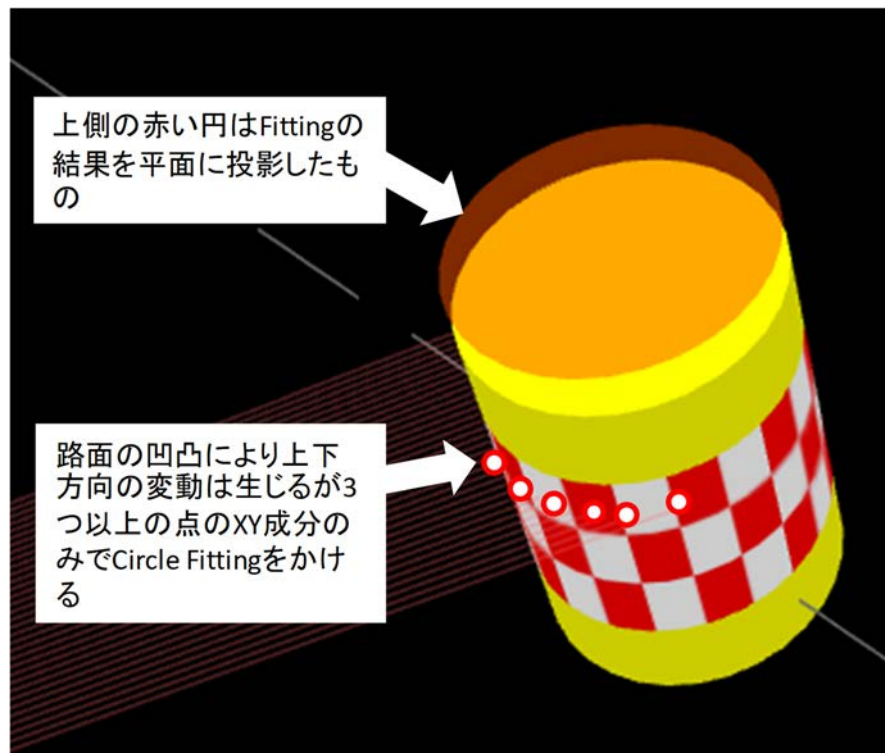


図-3.28 2D LiDAR の点群による標定点の検出

第4章 自動施工の実証

4.1 本章の概要

本章では、第3章で述べた手法を実現場に適用し、実証する。本研究で実証の対象とした工事は、国土交通省中部地方整備局発注の「平成31年度 設楽ダム廃棄岩骨材運搬路整備工事」、国土交通省四国地方整備局発注の「平成29-32年度 見の越トンネル工事」、国土交通省九州地方整備局発注の「国道57号笹原トンネル新設工事」である。実証項目を図-4.1に示す。また、現場別の実施項目を表-4.1に示す。デジタルツインに収集、可視化する現場情報は、各現場で施工管理に必要な項目を選定した。設計モデルと締固め形状を用いた盛土形状の自動作成については、山岳トンネル等非GNSS環境下で実証できる現場がなかったため、明かり工事ではあるが「平成31年度 設楽ダム廃棄岩骨材運搬路整備工事」で実証した。なお、当該実証項目については、非GNSS環境下であるか否かは影響しない。「平成31年度 設楽ダム廃棄岩骨材運搬路整備工事」の概要を表-4.2に示す。また、現場の概要を図-4.2に、現場の位置を図-4.3に示す。

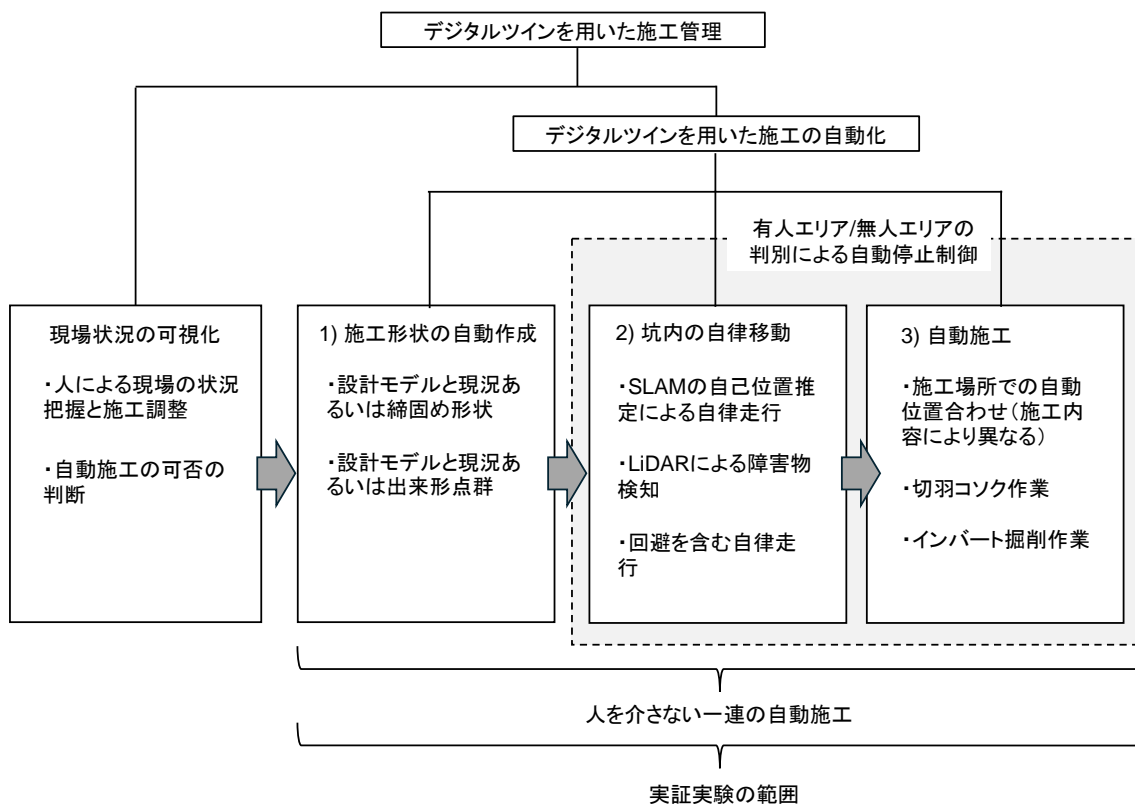


図-4.1 実証する項目

表-4.1 現場別の実施項目

工事名	実施項目
平成 31 年度 設楽ダム廃棄岩骨材運搬路整備工事	現場情報収集（締固め形状） 施工形状の自動作成（盛土：設計モデルと現況あるいは締固め形状）
平成 29-32 年度 見の越トンネル工事	現場情報収集（切羽性状・粉塵濃度・送風設備の稼働状況・排水設備の稼働状況・同水質・防音扉の開閉状況・人や車両の動き） トンネル坑内における長距離の自律移動（障害物検知と自動回避を含む） 施工形状の自動作成（3D LiDAR と切羽性状から） 自動施工コソク作業の自動施工
国道 57 号笹原トンネル新設工事	現場情報収集（切羽性状・出来形・粉塵濃度・坑内風速・排水設備の稼働状況・同水質・照度・人や車両の動き） 施工形状の自動作成（掘削：設計モデルと現況あるいは出来形点群） インバート掘削の自動施工

表-4.2 「平成 31 年度 設楽ダム廃棄岩骨材運搬路整備工事」の概要

工 事 名	平成31年度 設楽ダム廃棄岩骨材運搬路整備工事
工 事 場 所	愛知県北設楽郡設楽町田口地先
発 注 者	国土交通省 四国地方整備局
工事概要	設楽ダムの建設工事のために必要となる工事用の道路 【シウキ工区】 掘削 $V=187,970 \text{ m}^3$, 法面工 $A=13,460 \text{ m}^2$ 排水構造物工 1式 【江ヶ沢工区】 盛土 $V=154,920 \text{ m}^3$, 法面工 $A=1,987 \text{ m}^2$ 補強盛土 $V=30,300 \text{ m}^3$, 擁壁工1式 【田尻工区】 鋼製橋工 $L=568 \text{ m}$, 擁壁工 $A=319 \text{ m}^2$

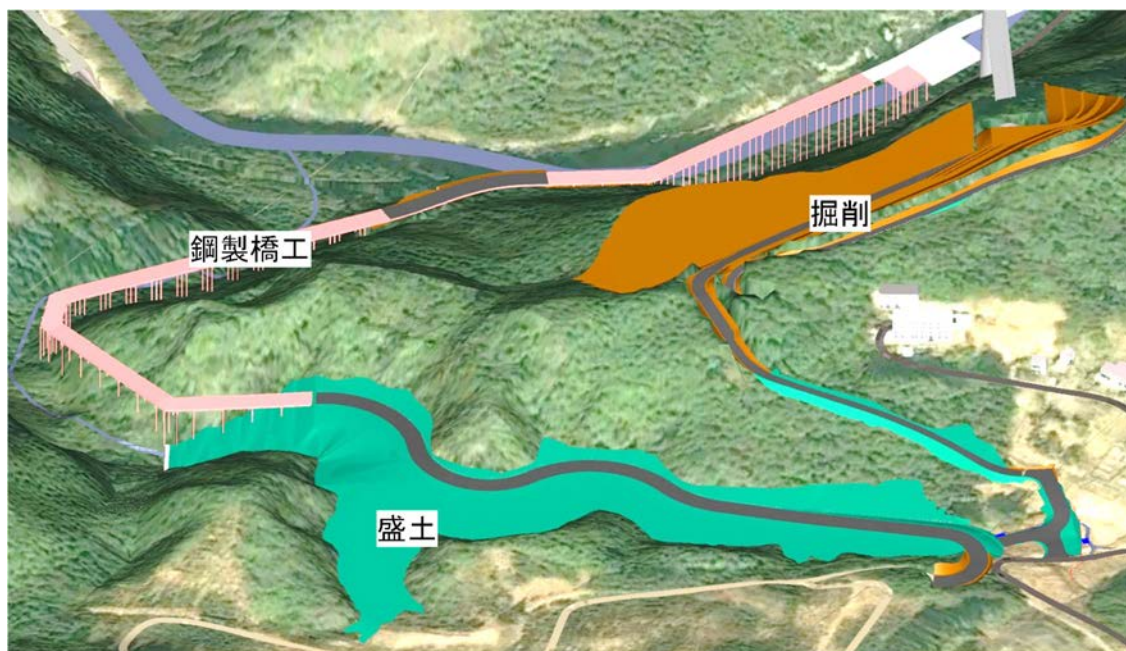


図-4.2 「平成 31 年度 設楽ダム廃棄岩骨材運搬路整備工事」の概要図



図-4.3 「平成 31 年度 設楽ダム廃棄岩骨材運搬路整備工事」の位置図

「平成 29-32 年度 見の越トンネル工事」の工事概要を表-4.3 に、現場の位置を図-4.4 に示す。「国道 57 号笹原トンネル新設工事」の工事概要を表-4.4 に、現場の位置を図-4.5 に示す。

表-4.3 「平成 29-32 年度 見の越トンネル工事」の概要

工 事 名 称	平成29-32年度 見の越トンネル工事
工 事 場 所	愛媛県大洲市肱川町見の越地先
発 注 者	国土交通省 四国地整整備局
工 事 概 要	県道一次付替区間(全長L=4.2 km)のうち、見の越トンネルをNATM(発破工法)で施工するもの。
工 事 内 容	完成延長 2,128 m 内空幅 約 8.8 m NATM(発破工法)／覆工コンクリート／インバート工 ／残土運搬 126,300 m ³



図-4.4 「平成 29-32 年度 見の越トンネル工事」の位置図

表-4.4 「国道 57 号笹原トンネル新設工事」の工事概要

工 事 名	熊本57号笹原トンネル新設工事
工 事 場 所	熊本県宇土市笹原町～熊本県宇土市網津町
発 注 者	国土交通省 九州地方整備局
工 事 概 要	熊本57号宇土道路(L=6.7 km)のうち全長L=679 mの 笹原トンネル終点側工区を施工するもの。 工事区間の総延長：748 m，トンネル工(NATM)： 679 m，ボックスカルバート(2 m×2 m, L=34 m)，残 土処理：69,590 m ³ ，路体盛土：4,080 m ³ ，路床盛 土：1,600 m ³ ，小構造物：一式



図-4.5 「国道 57 号笹原トンネル新設工事」の位置図

4.2 デジタルツインによる施工形状の自動作成

4.2.1 概要

本研究で提案する手法について、掘削形状については、山岳トンネル工事 1 件（国道 57 号笹原トンネル新設工事）、盛土形状については、道路土工工事 1 件（平成 31 年度 設楽ダム廃棄岩骨材運搬路整備工事）において実証を行った。盛土管理の方法は、山岳トンネルのインバートの埋め戻し管理と同じである。

4.2.2 国道 57 号笹原トンネル新設工事におけるインバート掘削

当工事では、インバートを含むトンネル本体の BIM/CIM モデルはパラメトリックモデルである。地形形状を取得する手法としては、四足歩行ロボットに搭載した測量用 3D スキャナと、トンネル壁面に設置した 3D LiDAR が利用可能であった。実証時のインバート施工箇所の状況を図-4.6 に示す。前述の通り、インバート工は、掘削によって底盤が膨れ上がることがないように、掘削後すみやかに埋め戻しまでの一連の施工を実施しなければならず、また、なるべく狭い範囲ごとに進める必要がある。さらには、インバート工の施工中であっても、必要な資材を運搬するなど、車両が通り抜けられるよう通路を確保しなければならない場合もある。実証時の掘削範囲を図-4.7 に示す。

自動施工用の地形形状の計測について、インバート掘削については、奥行き 10m、幅 4m ほどの狭い範囲であり、処理が早いほうが良いことからトンネルの壁面に設置した 3D LiDAR

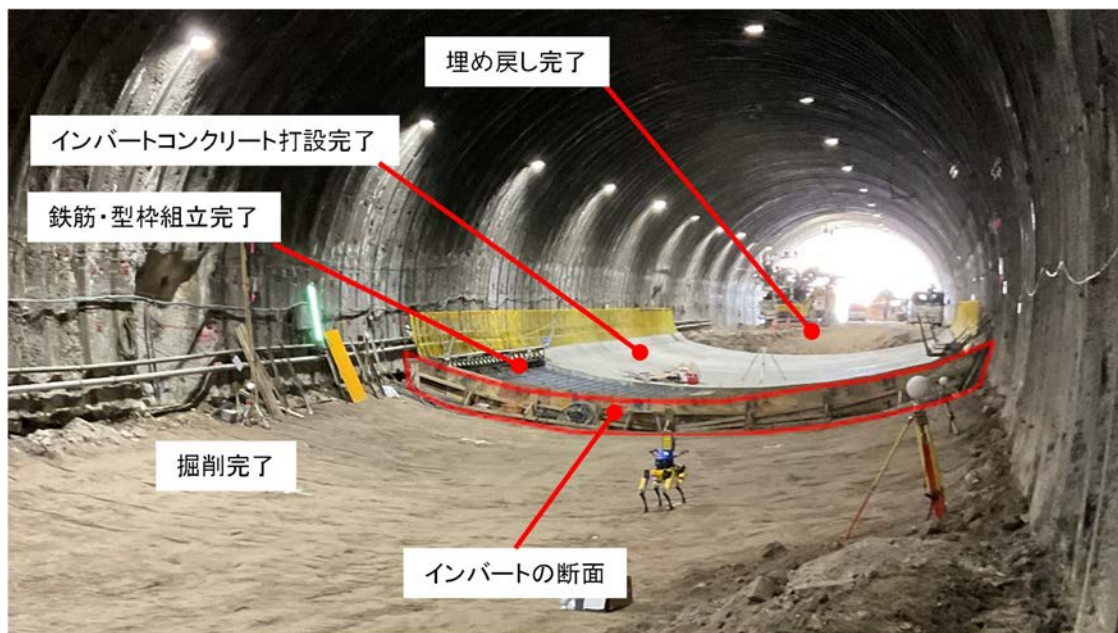


図-4.6 インバートの施工箇所

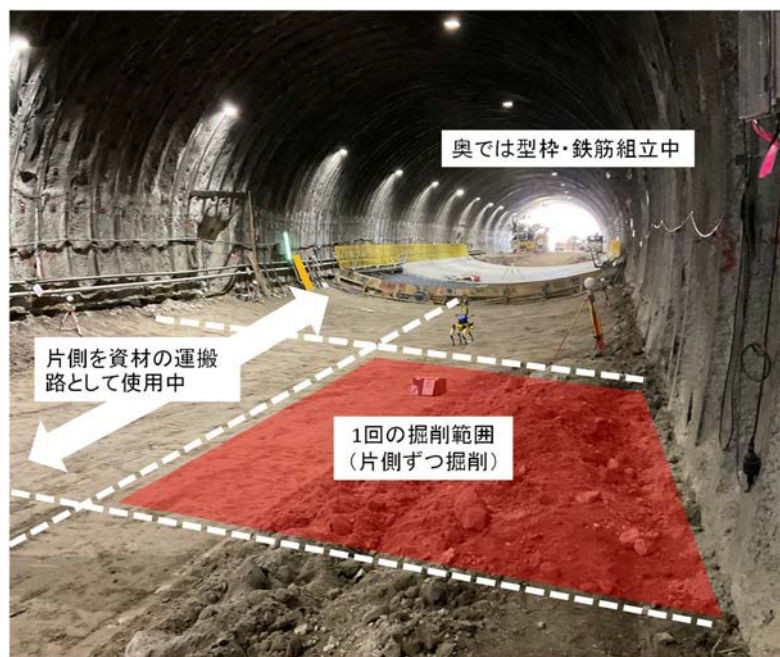


図-4.7 実証時の掘削範囲

(図-4.8)を用いた。なお、精密な測量あるいは広範囲の測量を行う際には測量用 3D スキャナ Nikon Trimble 製 x7 を使用した。

インバート掘削の層の割り付けについては、バックホウの施工能力を考慮して深くなり過ぎないように、かつ作業手間が大きくならないように設定する(図-4.9, 図-4.10)。本実証



図-4.8 トンネル壁面に設置した 3D LiDAR

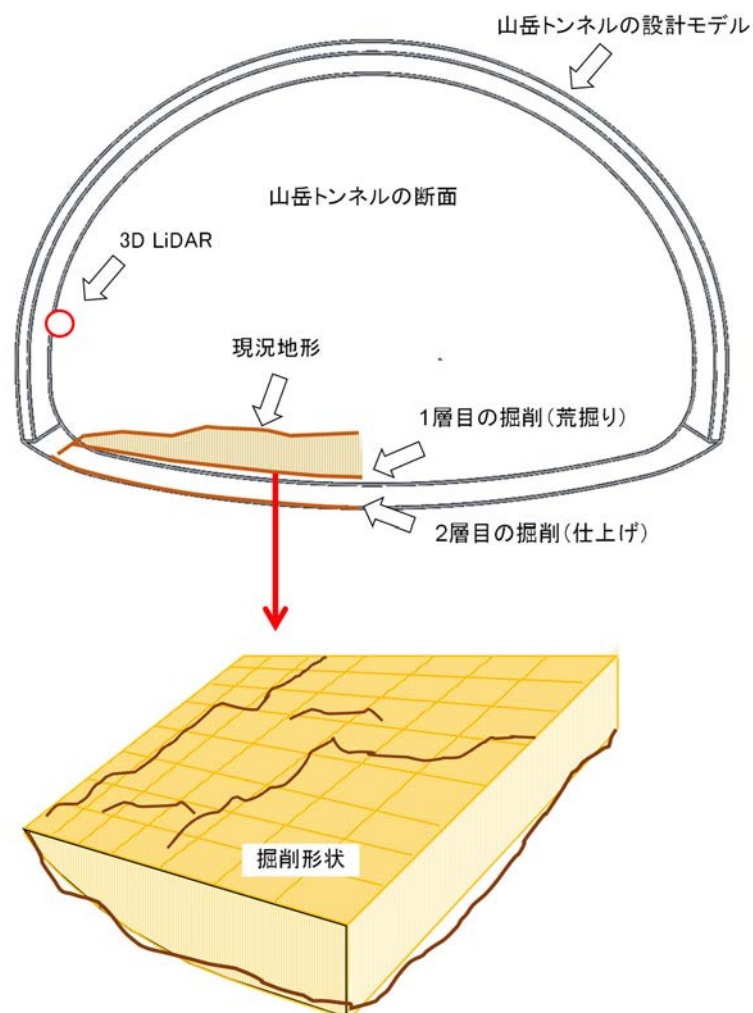


図-4.9 インバート掘削形状 1 層目の自動作成

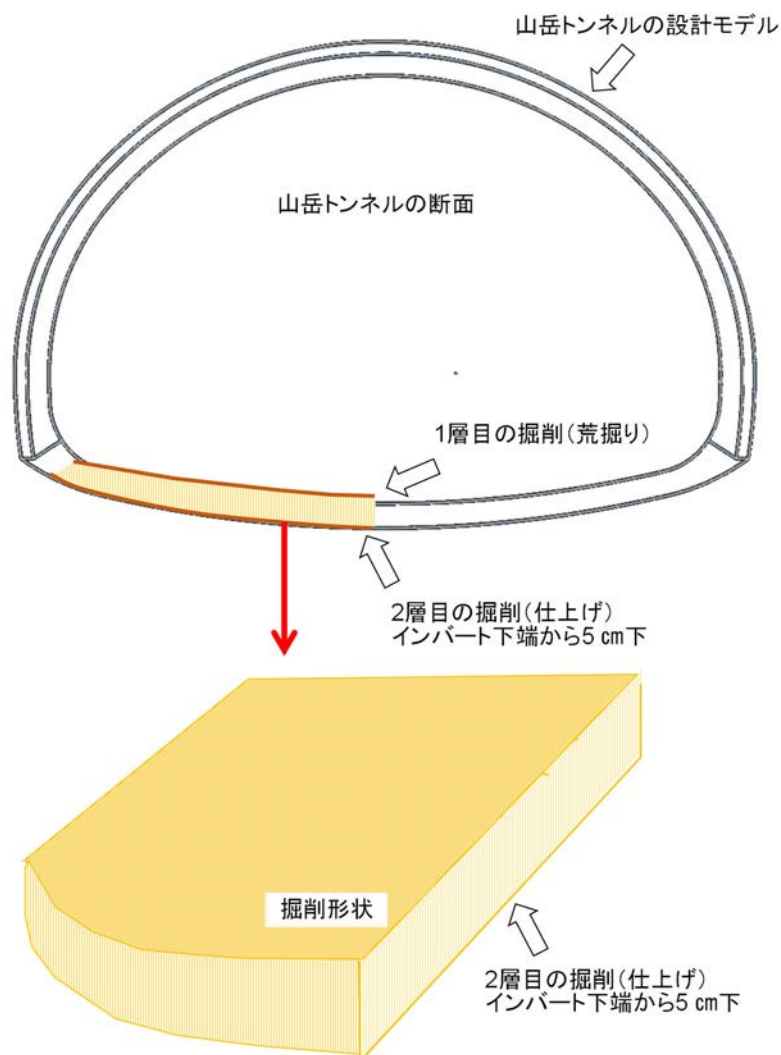


図-4.10 インバート掘削形状 2 層目の自動作成

では施工範囲の平均の掘削深さが 1 m 前後であったため、2 層の施工で収まる 50 cm 程度ずつとし、1 層目の掘削は現況地形から 50 cm 下をまでを掘削範囲とした。この程度であれば、若干の施工誤差が生じて、仕上げ面には到達しない。2 層目の掘削については、仕上げ面から 5 cm 下で計算した。これは、通常の搭乗操作による掘削の施工誤差を参考とした。余掘りが大きくなり過ぎないように配慮したものである。インバートの自動掘削計画を表示したデジタルツインの画面を、図-4.11 に示す。50 cm メッシュ表示とした。トンネルの線形が座標軸に対して斜めになっているが、メッシュは座標軸に沿って生成したため、がトンネルの延長方向に対して斜めに表示されている。作成時間は数秒程度であった。

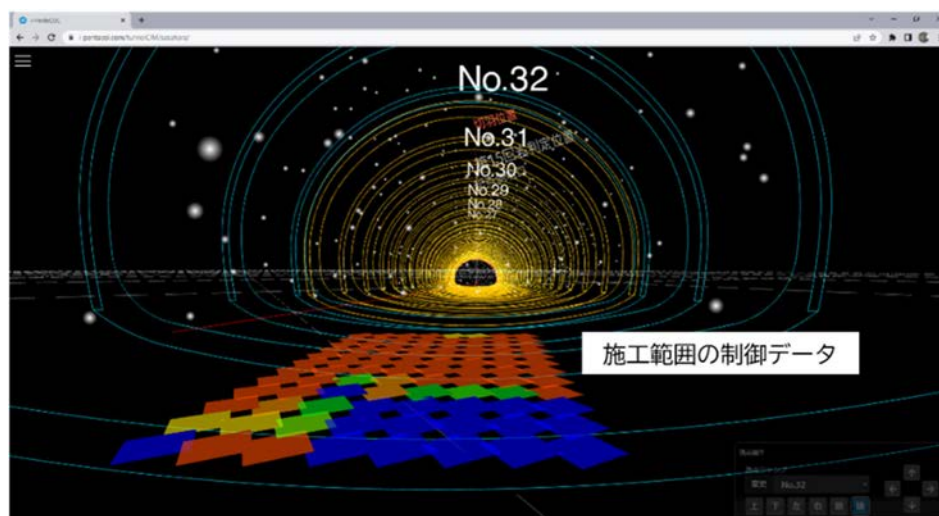


図-4.11 デジタルツインの表示画面（1層目）

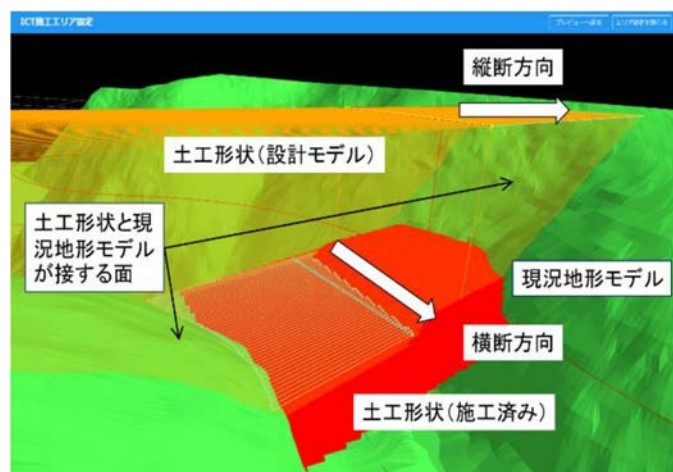


図-4.12 道路土工パラメトリックモデルの構成

4.2.3 平成 31 年度 設楽ダム廃棄岩骨材運搬路整備工事における工事用道路造成

当工事は、道路土工工事（明かり工事）であるが、施工形状データの作成については山岳トンネル内の埋め戻しと同じ仕組みであるため、当工事では実証を行った。当工事では GNSS を搭載した振動ローラに施工履歴を用いたが、山岳トンネルでは自動追尾式の TS を用いる。これについても、データとしては同じである。当工事の道路土工の BIM/CIM モデルはパラメトリックモデルであり、地形モデル、道路中心線形、横断面で構成される。道路土工のパラメトリックモデルを図-4.12 に示す。図中の左右に伸びるオレンジ色の半透明の部分は道路の設計モデルである。図の右上の矢印は道路の縦断方向、中央から

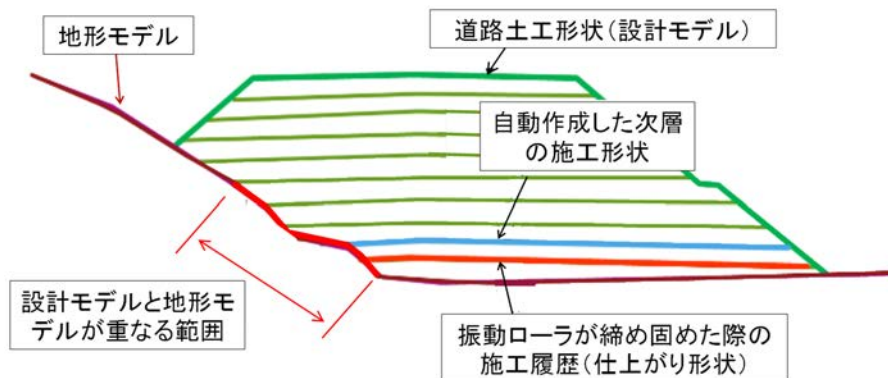
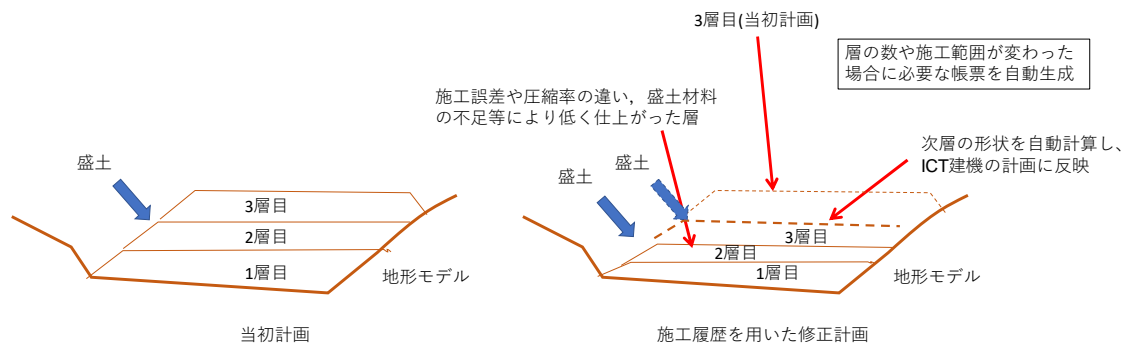


図-4.13 施工履歴データから次層の計画を作成する流れ

右下に伸びる矢印は道路の横断方向を示している。中央部下側の赤い部分は、施工中の盛土が下層から一層ずつ積み重ねられている様子を表す。この盛土の各層は、図の左右（縦断方向）で地形モデルに衝突しており、盛土の端部を自動算出している。これに対して、盛土の手前と奥方向は横断面の設計形状で端部を自動算出している。

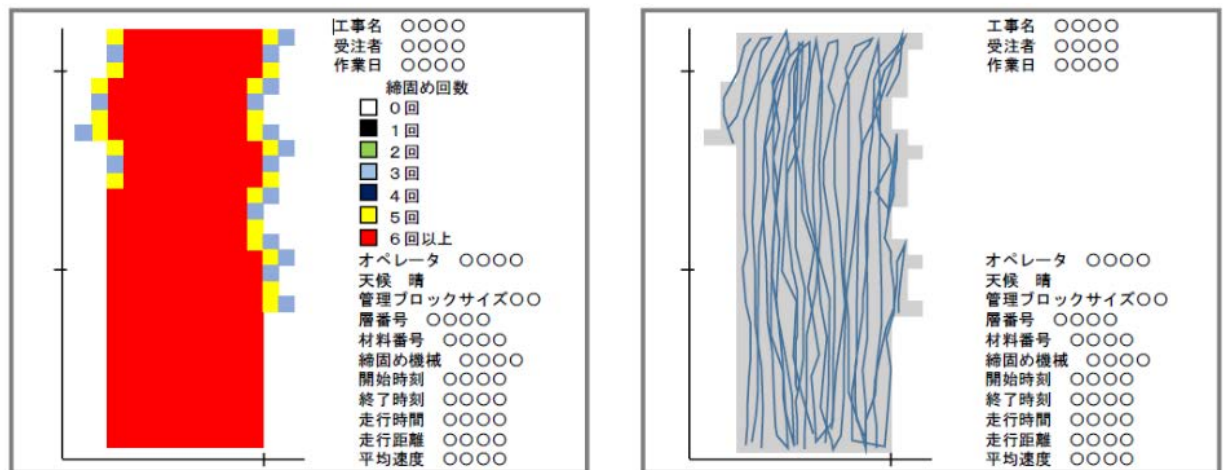
図-4.13 に各層の形状の計算方法を示す。左側が地形モデルとなっている。ICT 振動ローラで転圧が完了した層の 3D 形状を、振動ローラの施工履歴から自動作成し、これをもとに次層の計画形状を自動作成する。この際、左側のように地形モデルと交差する場合は地形モデルとの交点を端点とし、右側のように交差する地形がない場合は、横断面のパラメータを使用して端点を計算する。施工履歴を用いることにより、施工誤差や盛土材料の圧縮率の変化によって所定の高さにならなかった場合には、その分だけ自動的に次層の高さが調整される。Raza⁵⁶⁾⁵⁷⁾らは、BIM モデルを道路の建設プロジェクトに適用し、BIM による計画の有効性を実証している。この実証においても、道路中心線をパラメトリックに処理することで、日々の一層ごとの土工作業の計画についても変更を容易とした。地形モデルとしては、当初計画では国土地理院が提供する数値標高モデル(DEM) (5 m または 10 m メッシュ)、シャトルレーダーテレインミッション(SRTM)データ (30 m または 90 m メッシュ) 等を用いるが、施工に入る際、あるいは施工中に、ドローンの写真測量や 3D スキャナの点群データに差し替えることにより、より適切な土工計画を行うことを可能としている。地形を差し替えた場合にも、自動的に土工計画を更新することができる。この日々更新される土工計画をもとに、ブルドーザの敷き均し作業、振動ローラの転圧作業を行う。図-4.14 に示すように、施工履歴に合わせた日々の土工計画の調整は煩雑であり、また、発注者への提出書類(図-4.15) の整合性を保つことも難しく、従来の手法で行う場合は、できる限り当初計画に合わせるように施工を進めるのが一般的である。



(a) 当初計画

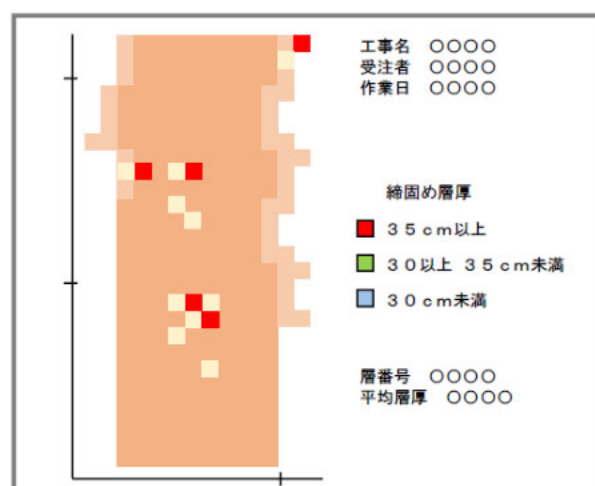
(b) 実際の仕上がり高さを反映した修正計画

図-4.14 施工履歴データから次層の計画を作成する流れ



(a) 締固め回数管理分布図

(b) 走行軌跡図



(c) 締固め層厚分布図

図-4.15 ICT 振動ローラによって得られる施工記録の帳票



(a)ICT ブルドーザ



(b)ICT 振動ローラ

図-4.16 GNSS を搭載した ICT 建機

施工履歴の取得は振動ローラを用いた。振動ローラの施工履歴を用いて次層の形状を自動作成し、それをブルドーザで施工した。使用した ICT 建機を図-4.16 に示す。以上のシステムを用いて盛土の施工形状の自動作成を実証した。なお、非 GNSS 環境下では、GNSS の代わりに TS が使用される。

4.2.4 結果

(1) インバート掘削

- 1) 1 層目、2 層目とも掘削形状を自動作成することができた。インバート掘削は 10m × 4m ほどの狭いエリアで区切ったため、数秒で作成が完了した。
- 2) 1 層目の掘削形状は現況地形をもとに計算しているが、仕上げ面に近接する部分が生じているため、荒掘りという扱いが適切かどうか検討の余地がある。
- 3) 2 層目の掘削形状はインバートの床付けから 5 cm 下まで掘削するものとした。
- 4) 3D LiDAR による地形計測は 1 分程度で終了するが、データのアップロードに 10 分ほどかかることがあった。

(2) 盛土

- 1) 山岳トンネル坑内のインバート埋め戻し作業の実証の代わりに、明かり工事における盛土で実証した。パラメトリックモデルと現況地形で計算する点は同じであり、特に問題ない。
- 2) 地形の精度によって、作成する盛土形状が現地と合わないため、オペレータが戸惑うことがあった (図-4.17)。
- 3) 施工履歴を使うことで計測時間や手間をかけずに円滑に次層の盛土形状を作成することができた。計画の変更の際にも有効であった (図-4.18, 4.19)。

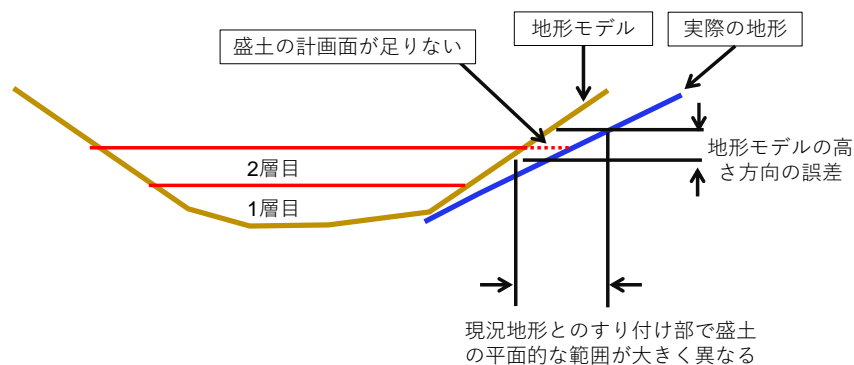
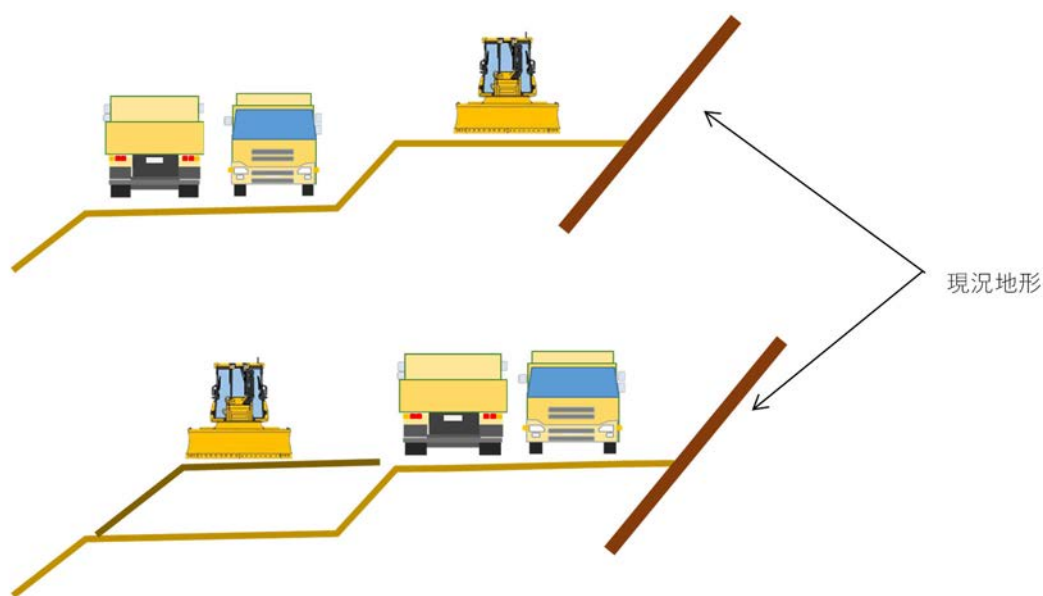


図-4.17 沢地の盛土範囲が計画よりも大きく広がった例



当初の盛土範囲を2分割して施工

図-4.18 土砂の運搬路を確保するために盛土範囲を分割して施工するイメージ

4.2.5 考察

本節では、デジタルツインを用いた施工形状の自動作成の実現性、実用性を実証した。山岳トンネル内の土工については、掘削、埋め戻し（盛土）とも問題なく施工形状を自動作成することができた。設計パラメトリックモデルと現況地形を用いる場合は、同様の手法が適用可能である。

インバート掘削については、1層目（荒掘り）の施工形状が仕上げ面に近接することがあり、制御をどのようにするか、より詳細に検討する必要がある（図-4.20）。同時に、荒掘り

については、仕上げ面までの余裕があれば、強く掘削しても良いため、施工形状だけでなく、

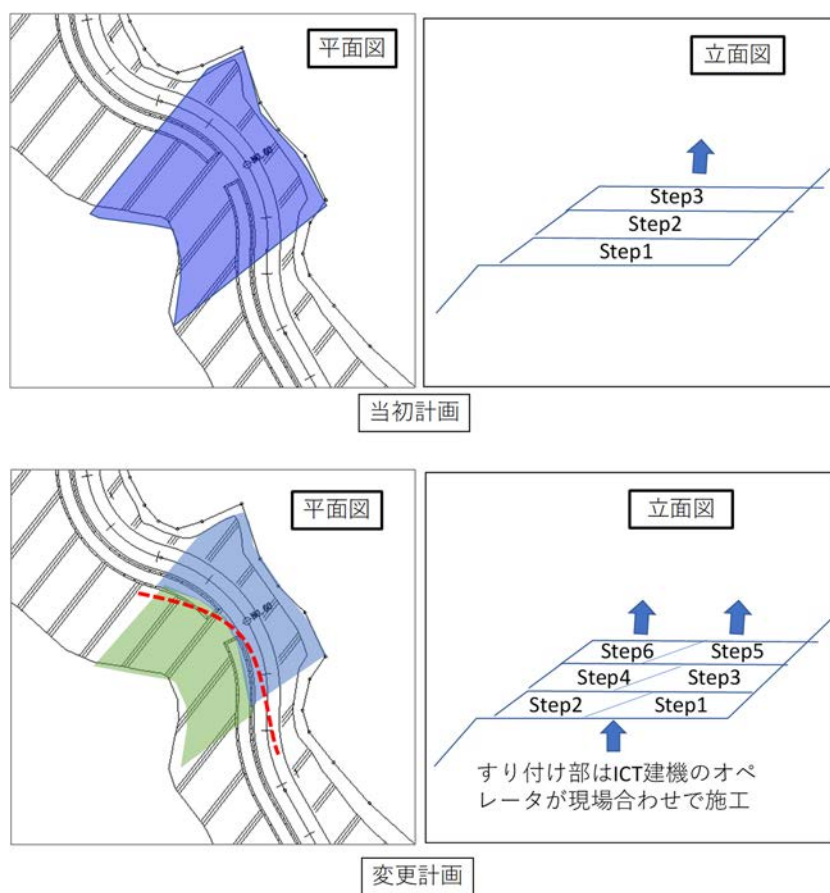


図-4.19 土砂の運搬路を確保するために盛土範囲を分割して施工した例（当初／変更の比較）

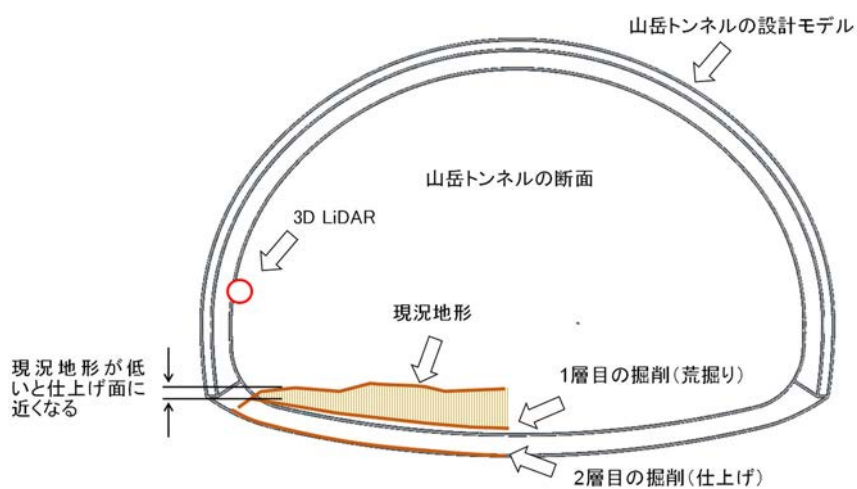


図-4.20 荒掘りの下端と仕上げ面が近いことがある

制御との連動を検討すべきと考える。

3D LiDAR による地形計測は、データが大きくなりやすくデジタルツインへのアップロードに時間を要する。施工速度によっては次層のデータ作成が間に合わない可能性もあるため、注意が必要である。

施工履歴を用いた次層の施工形状作成については、計測時間や手間がかからないため、効率化に期待ができるが、現状、自動追尾式の TS が必要となり、TS の設置や移設に手間がかかるため、それに代わる座標推定の手法が必要である。山岳トンネルでは、細長い空間であることから、TS と移動体の間の視線が通るように設置するのが難しく、多くの場合は狭いエリアを盛替えながら進めることになる。

4.3 坑内の自律移動

4.3.1 平成 29-32 年度 見の越トンネル工事における自律移動

山岳トンネル工事 1 件（平成 29-32 年度 見の越トンネル工事）において、坑内の自律移動の実証を行った。当工事は内空幅が 8.8 m と小さく、路面からの高さも 6 m 弱程度と低かった。このため、標準アームの 0.8 m³ バックホウ（写真-4.3）は、トンネル内壁や設備に接触しないよう、取れる姿勢が限られた。バックホウと天井との接触を避けるため、ブームを起こすことはできず、ブームを前方に倒して坑内走行を行った（図-4.21）。なお、バックホウには、西尾レントオール社の油圧制御装置ならびにマシンガイダンスシステムを搭載した。



写真-4.1 標準アームの無人化施工対応バックホウ（ブレイカ装着）（住友建機 SH200）

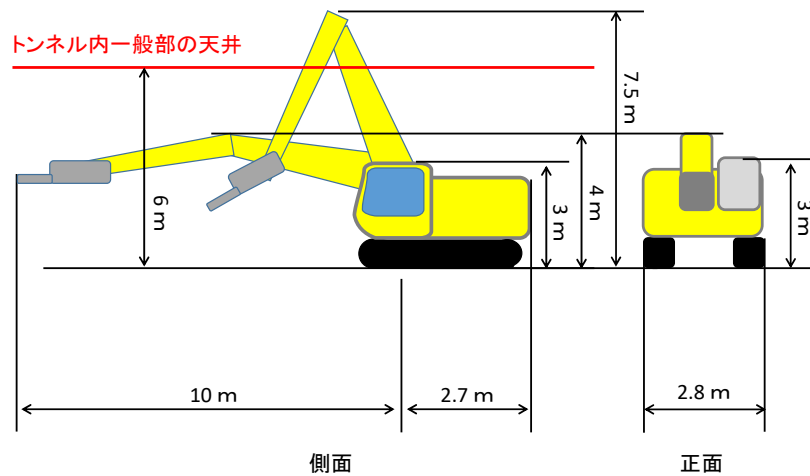


図-4.21 見の越トンネル坑内でのバックホウの走行姿勢(住友建機 SH200)

第3章で述べた通り、山岳トンネル内は、非GNSS環境であり、高精度な位置情報を得ることが難しい。このため、坑内の移動時に自己位置を推定する手法として、LiDAR SLAMを用いた。使用したLiDARは表-4.5の通り。これを図-4.22、4.23の通り前後に設置し、全周囲を取得できるようにした。LiDARは、バックホウの作業機側に設置した。これは、走行部に設置すると走行中に石等が跳ねて当たり故障することが懸念されること、また、走行部に電源を引くことが困難なためである。設置高さは、地上1.3mとした。これは、低すぎると路面の勾配や揺れ等で地面に当たりやすいこと、高すぎると周囲の資材や人を検知できなくなるためである。状況に応じて高さは変えて良い。複数の2D LiDARの点群を複合してSLAMの処理を行った。

本研究ではSLAMの装置として、日立産機製のICHIDASを使用した。この製品は、位置推定手法として、低解像度と高解像度の地図を用いて、自己位置を効率的に絞り込む多重解像度法の計算量をさらに軽減し、簡易なCPUボードでも稼働する車載向けの手法⁵²⁾⁵⁴⁾を選定するものとした。この手法では、近傍の物体が急に移動するなど、極端に大きな環境変化が生じた場合にも、その大きな変化に対して処理を間引くようになっており、トンネルのように狭い空間で車両や施工機械が動いている環境でも、自己位置をロストしにくいと考えた。トンネル内の設備や形状をあらかじめ地図として記録することが可能であり、これらの任意の目印を活用して自己位置を推定することも可能と考えている。本手法は、工場や物流センターでAGV (Auto Guided Vehicle)に利用されている。本来、車体の揺れが少ない平坦なフロアでの運用を想定しているもので、位置推定の精度は、榎ら⁵⁴⁾の実験結果から概ね20 mm以内と考えられる。

あらかじめ収集した点群データから、地図作成を行い、その地図と、リアルタイムで取得している点群データとのマッチングを行うことで、自己位置を推定することが可能である。この機能を用いて、トンネル形状や移動しない設備を地図に反映した。

表-4.5 2D LiDARの仕様

メーカー	北陽電機株式会社
型 番	URM-40LC-EW
検出距離	最大60 m 反射率90% 白ケント紙 精度保証範囲0.1～ 40 m 反射率10% 黒紙 精度保証範囲0.1～18 m
検出角度 範 囲	270°
検出角度 分 解 能	0.125° （高分解能モード）
距離平均 精 度	0.1～30 m: ± 20 mm 30～40 m: ± 30 mm

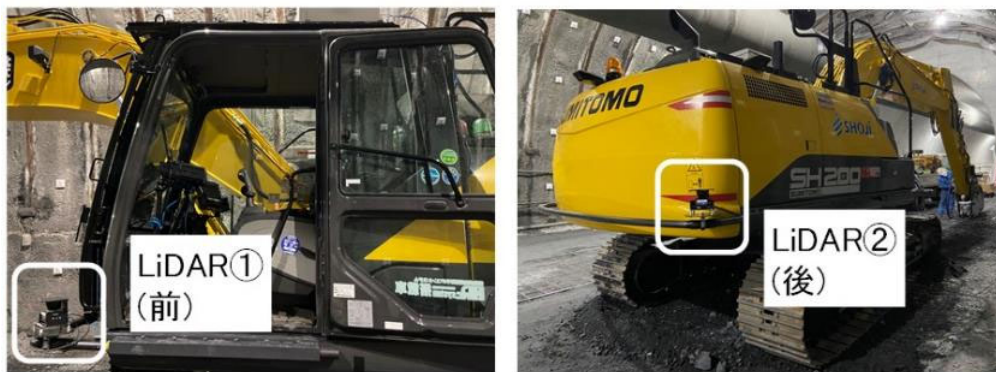


図-4.22 2D LiDAR の設置位置

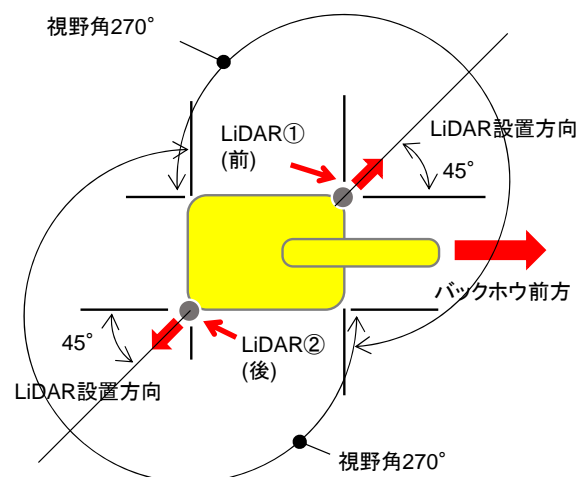


図-4.23 2D LiDAR の設置位置と監視範囲

実証は、SLAMを用いた自動走行（内空幅約8.8 mの一般部に加え、幅約4 m程度の狭所を含む）（写真-4.2, 4.3）、自動停止・自動回避（図-4.24）を実施した。トンネル内の自動走行中、人を障害物に見立て、進路上に入ってもらい、自動停止や自動回避が機能することを確認した（図-4.24(a)）。また、図-4.24(b)に、参考に工場で連続的に自動回避を行っている状況を示す。複数の障害物を検知すると、近い障害物を優先して回避するように設定してカラーコーンの間を通り抜けている。通路は6 m幅、曲率半径は9 mほどの急な円弧である。この場合には、旋回時にバックホウの後方部やクローラがカラーコーンに接触することがある。周囲360°の障害物を2D LiDARで監視しているが、現状は回避動作を進路方向だけで判断しているため、回避によって車体が周囲にどう干渉するかを加味する必要がある。山岳トンネル内では緩やかなカーブに対応できれば問題はないが、障害物を回避する際には同様に回避後の状態を加味して動作を決める必要があることがわかった。

また、坑内が狭く一般部ではバックホウが旋回ができないため実証後はバックで400 m先の非常駐車帯まで移動する必要性が生じ、走行ボタンと旋回ボタンを用いた半自動操作での移動を試みた。実験中、目視できる近傍に監視者を付け、常に手動の非常停止の用意をした。なお、バックでの長距離の走行は、有人運転の場合、オペレータの労力が大きいが、搭乗せずに車外からボタンのみで走行させる半自動運転では、容易に長距離を走行させることが可能であった。

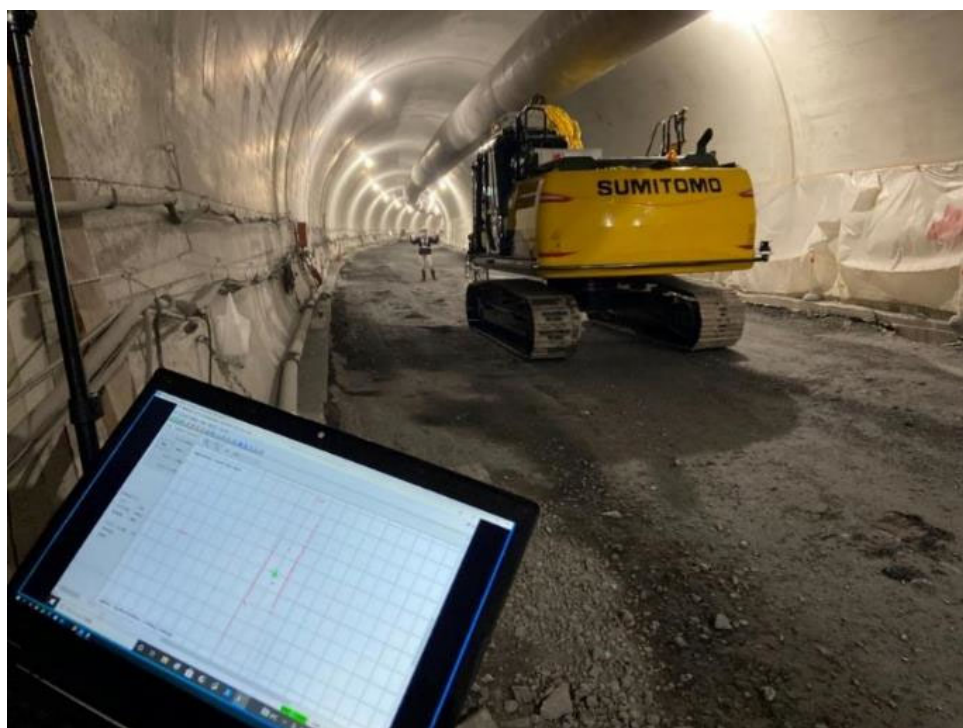


写真-4.2 SLAMを用いた自動走行（通路幅約8.8 mの一般部）



写真-4.3 狭所の走行試験 (通路幅約 4.0 m)



図-4.24 自動回避検証状況

SLAM により自己位置を把握して走行する場合、座標に 30～40 cm の誤差が生じていることがわかった。これに関連して、座標を指定 (図-4.25) して狭所 (通路幅約 4.0 m, 車体幅 2.8 m) を通り抜けることはできなかった。現状の SLAM では、山岳トンネル内のセントル (移動型柵) 等の狭所をくぐることは難しい。次に、図-4.26 に示した自動回避を用いて走行を行ったが、両側のカラーコーンやポール (写真-4.3) を障害物として検知し、前進させることができなかった。このため狭所の走行については、外側から離隔を目視しながら、半自動操作 (走行ボタン, 旋回ボタン) を行い、通行した。通路幅 4.0 m に対して車両の幅

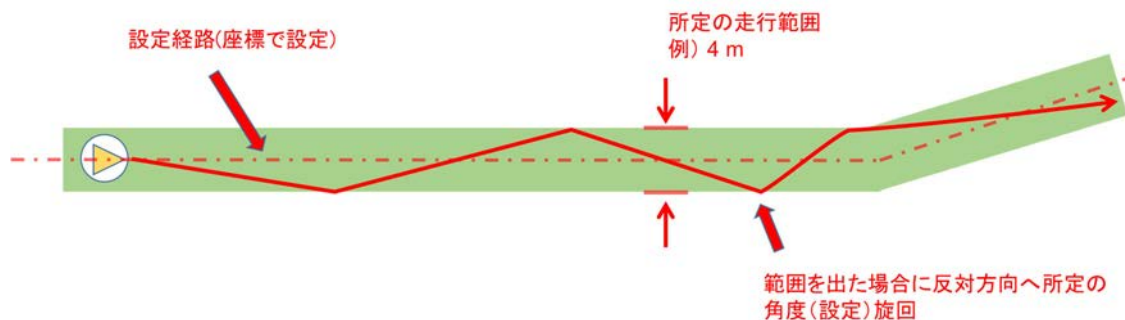


図-4.25 SLAMを利用した座標指定の自動走行

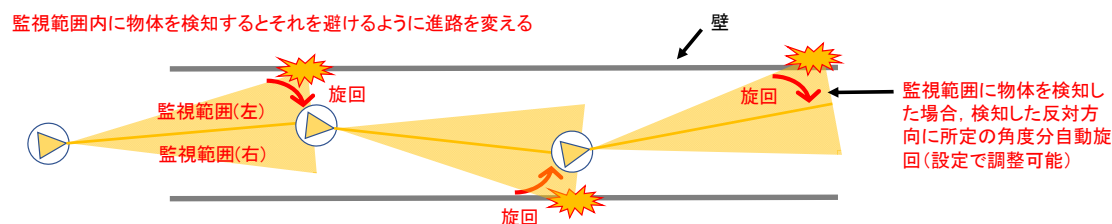


図-4.26 自動回避を連続で実施することによるトンネル内の自動走行

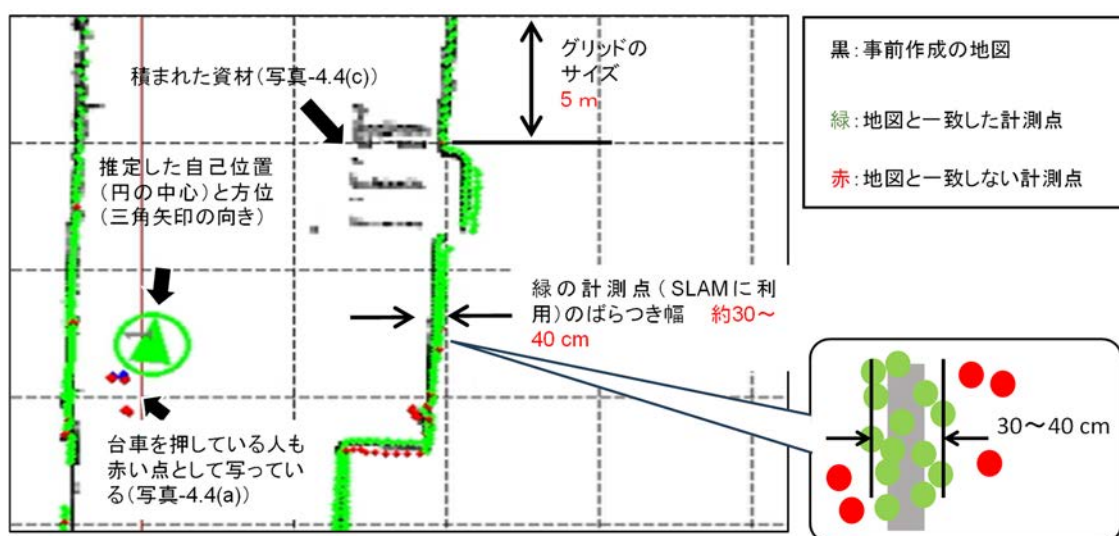
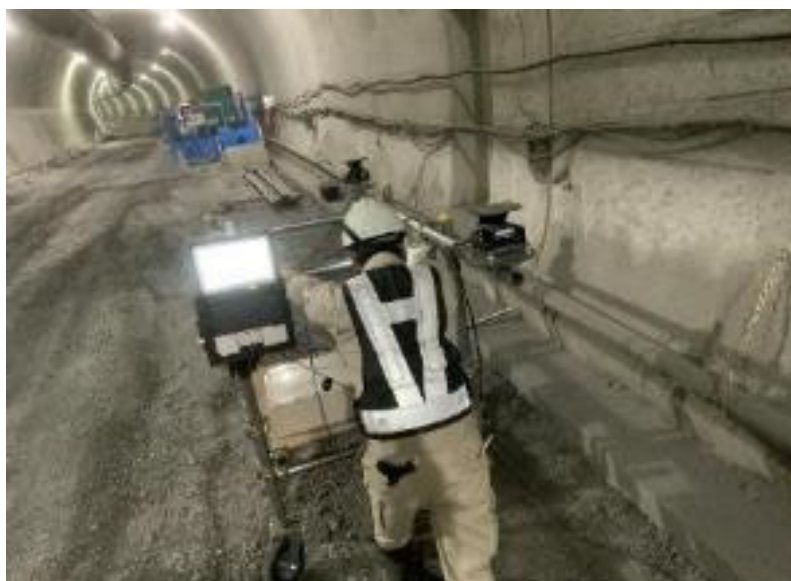


図-4.27 SLAM検証結果の例(非常駐車帯)

が 2.8 m, 左右計 1.2 m の余裕があるが, わずかな旋回動作によってポール際ぎりぎりまで車体の角が寄ることが多く, 狭所通行の自動化にあたっては, より細かい制御を行う必要があることがわかった. また, 路面とクローラの間で滑りが生じた場合, 車体がわずかに回転するが, 5° 程度の回転でも, 走行進路に大きく影響するため, 路面の変化については計画時に留意したほうが良い. 写真-4.3 の路面は急な登り勾配から, 下に移る箇所であり, クローラが滑りやすく注意を要した. 同じ写真-4.3 の上部に風管が見えるが, このような勾配や揺れの影響で走行時に離隔が小さくなる瞬間もある. キャビンの真上であり, 搭乗者からは見えにくい部分であるが, ベテランオペレータが操作する場合は, 窓から顔を出したり, 降車して周囲を確認したりするなど, 随時離隔を確認しながら通過している.

SLAM の誤差について, 検証結果を図-4.27 に示す. 検証は, LiDAR の設置高さをバックホウと合わせた台車によって行った. 事前作成の地図(黒)と自己位置推定時のリアルタイムのレーザ一点群の計測値(緑)との差分から自己位置推定を行っている状況である. 計測値(赤)は, 事前作成の地図(黒)と座標の差が大きいため, 除外したものである. トンネルの壁面は, 写真-4.4(a)に示すように曲面となっている他, 写真-4.4(b)に示すように凹凸や, 配管・配線・ボックスなどが存在している. 写真-4.4(c)に示す資材は, 図-4.27 の中央上側



(a) 台車によるSLAM実験状況



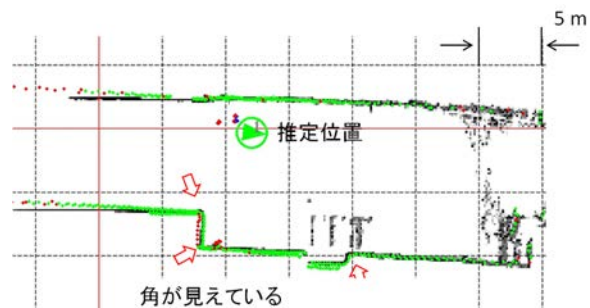
(b) 坑内の壁面



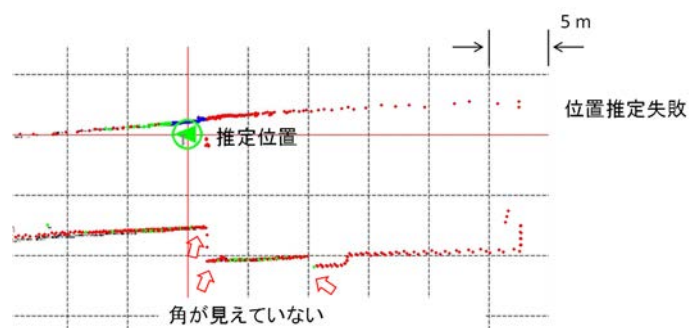
(c) 坑内に積まれた資材

写真-4.4 SLAM実験状況

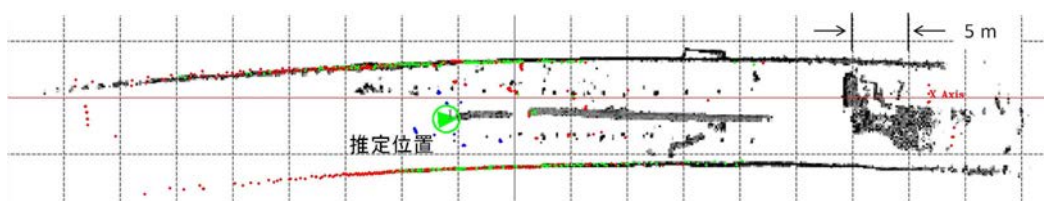
に示すように広く面的に写る．LiDAR SLAM による位置推定について，推定に失敗するケースがあったが，推定に成功している場合と失敗している場合の比較を図-4.28(a)～(d)に示す．



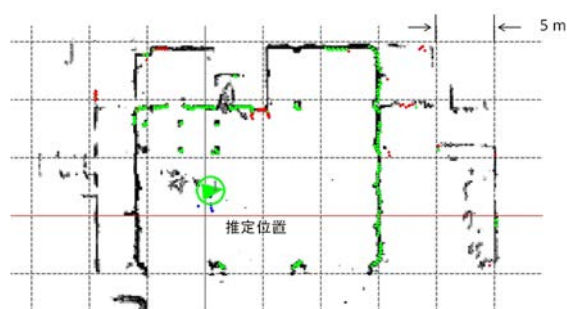
(a) 位置推定に成功している例



(b) 位置推定に失敗している例



(c) 位置推定に失敗している例(特徴が見つからず走行しても推定位置が動かない)



(d) 工場の壁や柱を多数特徴としてとらえた例（屋内実験）

図-4.28 LiDAR SLAM の推定状況比較

成功しているケースは、周囲に角となっている箇所を取得しているが、失敗しているケースは、同じ場所を走行していても角を取得することができていない。図-4.28(c)では、左右の壁面を認識しているが、走行している方向に位置を推定できる特徴を捉えておらず、走行しても推定位置が変わらない状態である。図-4.28(d)は屋内実験の状況である。20 m 四方の工場内では、比較的精度良く位置推定が可能である。工場内は、床面が平坦で LiDAR の点群が上下にずれにくく、壁面や柱も鉛直であるため、上下にずれた際の影響も小さいと考えられる。工場内における誤差計測の状況を図-4.29 に、TS により取得した座標との差分を表-4.6 に示す。

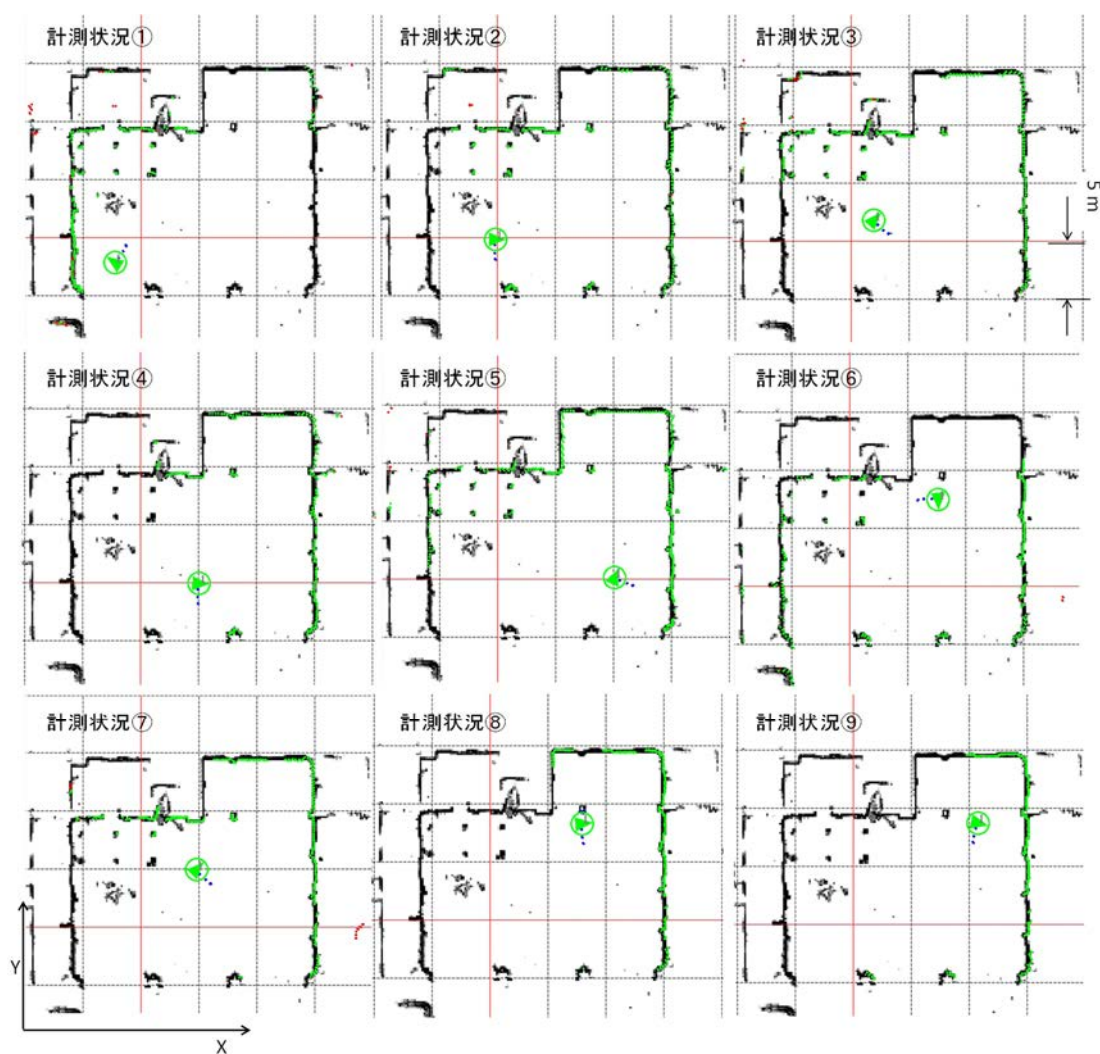


図-4.29 LiDAR SLAM の誤差計測状況(屋内実験)

表-4.6 LiDAR SLAM の計測誤差(屋内実験)

	TSの座標との差分(cm)		
	X	Y	$\sqrt{X^2+Y^2}$
計測状況①	8.3	15.4	17.5
計測状況②	6.9	5.8	9.0
計測状況③	11.1	14.2	18.0
計測状況④	12.1	15.1	19.3
計測状況⑤	7.8	11.2	13.6
計測状況⑥	8.9	15.0	17.4
計測状況⑦	13.9	12.0	18.4
計測状況⑧	10.8	6.1	12.4
計測状況⑨	11.4	5.8	12.8
平均	10.1	11.2	15.1

表-4.6 の通り, 工場内での検証では, XY 軸方向とも平均 10 cm 程度の誤差であった。これに対し, 施工中の山岳トンネルは路面が平坦ではないことから, レーザーの傾きを生じる。この傾きにより計測する点が変わることから計測距離も数 10 cm の範囲で大きく変化している。写真-4.4(c)の資材は図-4.27 中に示す事前作成の地図(黒)に壁(線)としてではなく平面的に広く表示されているが, レーザーの傾きにより斜め上から写ったためである。このように, 低く積まれた資材等が事前作成地図に反映される際のイメージを図-4.30 に示す。

トンネル壁面に対してレーザーの計測距離のばらつきの幅は, 約 30~40 cm (無作為に 10 箇所計測)であった。これには, 1) LiDAR の測距誤差 (30 m 以内: ± 20 mm), 2) トンネルの壁が曲面であることから車体の揺れによって壁に対する計測距離が変動すること, 3) 壁に設置された配管・配線・ボックスにレーザーが当たり壁面を捉えていないこと, という 3 つの要因が複合的に影響していると考えられ, 自己位置推定の誤差となっていると考えられる。この誤差の影響について, 走行に関してはセントル(移動型柵)のような狭所以外では問題は生じなかった。さらには, トンネルが細長い空間であることから, トンネル延長方向の特徴を捉える際に角度が浅く, 検出できない場合も多かった。

図-4.31 は, 車体が傾くことにより, 2D LiDAR と高さの異なる物体からも点群を取得することを示している。山岳トンネルでは, 位置推定時に目印となる物体は多くはなく, それらを常時捉えるには, 少なくとも 20 m 以上の範囲を対象として監視する必要があると考えている。ところが 20 m 先では, 車体が 1° 傾斜すると高さ方向に 30 cm 以上のずれを生じる。これは少しの車体の揺れによっても, 同じ物体が検出されたり, 消えたりすることを示す。この現象は自己位置推定の誤差要因となる。

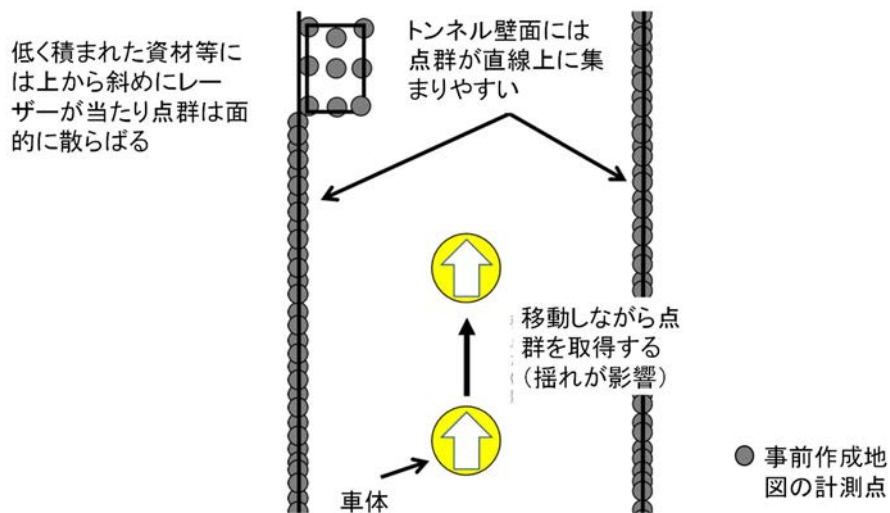


図-4.30 低く積まれた資材等が事前作成地図に反映される際の様子

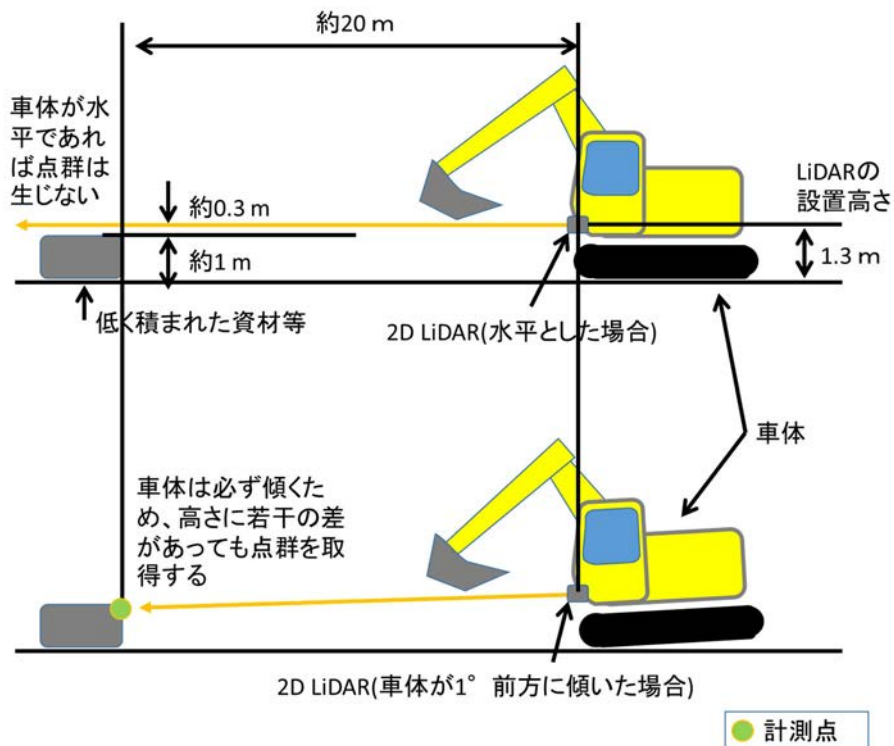


図-4.31 車体の傾きによる誤判定例



写真-4.5 壁面の配線や配管による誤差

トンネル壁面に設置された配管・配線・ボックスの点群は、壁面の点群と混ざって計測されており、大きな誤差要因となったと考えられる。極小さなずれでも、レーザーが壁面ではなく配管や配線に当たると、20 cm ほど計測距離が変わる（写真-4.5）。TS の座標と推定位置の差分を表-4.7 に示す。位置推定時に使用していると考えられる特徴としては、拡幅部や箱抜き部といった大きな角になっている箇所、立看板であった。誤差が大きくなると位置推定に失敗するため、当該現場内では、これよりも精度が悪くなることはなかった。位置推定に失敗した際には明確に判別できることから、自動で移動手法を切り替えることができた。図-4.28(c)のような誤った判定も稀に発生したが、前進していけば切羽等の施工場所に到達するため、当該現場では問題はなかった。しかしながら、現場内の状況によっては、留意する必要がある。また、自律移動中、前方の駐車車両が移動を始めた場合（図-4.32）、車両が自動施工機の車体から遠ざかることによって、前進しているはずの自動施工機を後進しているように判定することがわかった。

表-4.7 LiDAR SLAM の計測誤差(トンネル坑内)

計測No.	TSの座標との差分(cm)		
	X	Y	$\sqrt{X^2+Y^2}$
1	32.4	21.3	38.8
2	37.5	5.9	38.0
3	15.8	11.7	19.7
4	22.1	15.6	27.1
5	30.0	25.0	39.1
6	19.1	33.4	38.5
7	24.0	9.8	25.9
8	35.8	11.5	37.6
9	21.1	16.0	26.5
10	16.8	21.0	26.9
平均	25.5	17.1	30.7

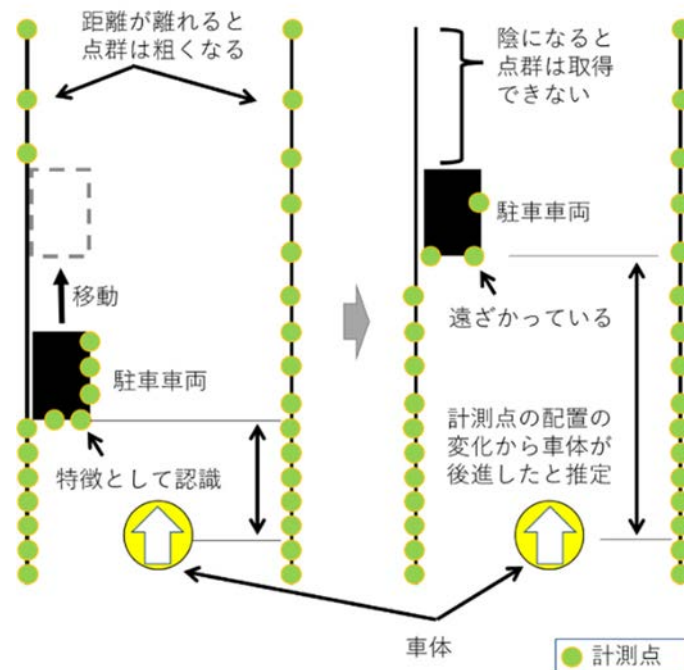


図-4.32 駐車車両等が移動した場合の誤判定例

4.3.2 結果

山岳トンネル坑内におけるバックホウの自律移動を実証し、以下の結果を得た。

- 1) 山岳トンネル坑内における自己位置推定と、長距離の自律移動を実現した。セントル（移動型枠）のような狭所を除き、可能であることが分かった。
- 2) 本実証で使用した 2D LiDAR について、施工中の山岳トンネル坑内では、SLAM の誤差は、条件により異なるものの概ね 30～40 cm であった。これ以上の誤差が出るときには、自己位置を推定出来なくなり、走行しても移動していないような判定をする場合もあった。拡幅部、箱抜き部、立看板、その他大型の設備が存在しない区間では、自己位置を推定できなかった。この場合は、代替手段としてトンネルの壁に対して距離を保ちながら前進をしていくことで切羽に到達することができた。
- 3) トンネル坑内は、細長い空間であるため、前方並びに後方の遠方の特徴に対しては、角度が小さくなり、存在する特徴が検出できない。
- 4) SLAM による自己位置推定が安定したのは、2D LiDAR の計測可能距離に 3 点以上の角が検出できている場合のみであった。
- 5) 20 m 四方位程度の平坦な工場において、垂直な壁や柱に囲まれている状態であれば、誤差 10 cm 程度で自己位置推定を行うことができた。実現場では、このような精度は期待できないと考えられる。

また、山岳トンネルの施工担当者のうち、現場所長経験のあるベテランの職員 4 名（本社、現場）による評価を、表-4.8 に示す。SLAM の誤差については特に問題とはしていない。また、狭所については自動でなくとも良いと考えている。

4.3.3 考察

本節では、LiDAR SLAM を用い、施工中の山岳トンネル坑内のバックホウの自律移動を実証した。LiDAR SLAM による自己位置推定は施工中の山岳トンネルでは、条件によるものの数 10 cm 程度（本実証では 30～40 cm）の誤差が生じることが分かった。誤差の原因としては、路面の凹凸等により車体が揺れ、トンネル壁面の距離計測に若干のずれが生じることがわかった。施工中の壁面には、配線や配管、ボックス等が設置され、これらに当たるか当たらないかで、20 cm もの距離の違いが生じていた。また、トンネル坑内は細長く、幅が狭いことから遠距離の特徴を捉えることがほとんどない。

本実証では、施工中の山岳トンネル坑内における LiDAR SLAM の位置推定誤差は 30～40 cm であり、文献では工場等理想的な環境での計測⁵⁴⁾においては誤差が 2 cm 程度であることと比較すると、精度が低いことが分かった。この原因としては、トンネルの壁が鉛直ではなく曲線であること、壁に多様な資材やケーブルが配置されていること、路面が平坦ではなく、走行中に車体が大きく揺れることが考えられる。図-4.28(d)の結果についても、工場には配線が露出していたり、スイッチボックスやレバー等の設備が壁や柱に設置されていたりするため、これらが誤差の要因となっている可能性がある。

この SLAM の誤差について、広い場所を通行する場合の自動移動では問題はないが、狭所を通行する際には障害物に近付く必要があるため、より高い精度が必要となる。コソク作業については、切羽到達後に 3D LiDAR による計測を行うことで SLAM の誤差は問題とならない。今後、坑内の他の作業を自動化する場合には、より高い精度が必要となる場合もあるため、別の手法も検討する必要がある。

自動移動について、セントル（移動型柵）等の狭所については自動で通過することができなかったが、あらかじめプログラミングした前進、後進や旋回など、ボタン押下による半自動操作に関して、通常無人化施工で行われるリモコンによる遠隔操作や、搭乗操作と比べ、周囲の離隔を把握しやすく運転がしやすい面が多いことがわかり、熟練オペレータの不足に対しても本システムが有効と考えられる。また、狭所を通行する際や障害物を避ける際、離隔が小さくなってから回避動作をするよりも、離隔が小さくならないような進路を取るような考え方を導入するほうが良いことが分かった。路面の傾斜についても天井への接触が起こり得るため、今後考慮する必要がある。また、自動走行がしやすい走路整備、マーカ一の設定などを検討することも考えられる。

表-4.8 山岳トンネル施工担当の評価

実施項目	結果	評価
非GNSS環境での自己位置推定と自動走行	問題なく実施。 風管との離隔が小さい箇所は、ブーム、アームの角度を調整し、前後進ボタンと旋回ボタンを使用した半自動走行により通過。搭乗操作よりも離隔の確認が容易で操縦が容易であった。 一般部であれば、自己位置推定の誤差が30～40 cmほどであっても問題はない。	良い。 半自動であっても、搭乗操作よりも容易と思う。
狭所の自動走行	左右の壁やカラーコーン、ポールを障害物として検知するため、自動運転は自動停止機能がはたらき、通り抜けられなかった。前後進ボタンと旋回ボタンを使用した半自動走行により通過。 搭乗操作よりも離隔の確認がしやすく、操縦は容易であった。 リモコンによる遠隔操縦と比較しても操縦が容易。	自動で止まるので問題はない。セントルやその他、狭所を通す場合は、トンネルの付属物や自動運転機の高さなども含めて注意を払う必要がある。現状では半自動走行が望ましい。 半自動であっても、搭乗操作よりも容易。
自動停止	問題なく実施。	良い。 全周囲を監視していることもあり、安全対策として有効。
自動回避	バックホウの大きさに対し、内空幅が非常に小さいため、トンネルの壁面との接触の恐れがあり、坑内では回避角度を小さく、5°程度に調整。その上では問題なく実施。 工場では、回避角度の制限なく、問題なく実施。	良い。 全周囲を監視していることもあり、安全対策としても有効。
半自動走行（後進）	坑内は狭く、旋回ができないため、非常駐車帯まで約400 mをバックで移動。一般部については問題なく実施。	バックでの長距離走行は搭乗操作では大変なので、誰でも簡単にできるという点が良い。

実際の現場運用では、SLAM 以外の手法も併用して自律移動を行うことが妥当と考える。本実証では、トンネルの左右が壁であることを利用し、2D LiDAR で左右の壁との離隔を取得しながら前進する手法を併用し、自律走行で切羽に到達することができた。但し、これらの手法では、施工に必要な精度が得られないことから、施工に入る際には別の手法で位置合わせを行う必要がある。

4.4 自動施工(切羽のコソク作業)

4.4.1 平成 29-32 年度 見の越トンネル工事における切羽コソク作業の自動化

本節では、切羽コソク作業の自動化について実証する。山岳トンネル坑内の自律走行については、4.3 節で述べた通り、LiDAR SLAM では周辺の特徴を捉えきれず、自己位置を取得できない場合や、取得できたとしても精度が十分でない場合があることがわかった。そこで各々の施工に入る際に別の手法で位置合わせをすることを提案した。

坑内を前進し続けると、切羽に到達するが、切羽自体は常に前進し続けており、1 日当たり 0.5～1.5 m 程度進んでいる。コソク作業を実施する時点では、正確な基準点がないことも多く、落盤等の可能性も高く危険であるため、余分な計測作業も行わないことが望ましい。切羽コソク作業の流れを図-4.33 に示す。発破作業の直後であり、周辺の形状も変化している。また、図-4.34 に示すように、ずり運搬も急ぐ状況となる。これに対して、切羽コソク作業時の位置合わせは、厳密である必要がなく、切羽の実測の相対距離や形状が分かれば施工を行うことが可能と考えられる。そこで、本実証では切羽への到達を相対距離で管理するものとした。切羽に到達すると、2D LiDAR の点群では、袋小路に見える。ベンチカット工法の場合は、車体の揺れに伴い 2 つの壁が見えるか、あるいは段差が見える。このような状況は他の箇所では生じないため、前方に壁が見えた段階で切羽と推定し、近付いて 3D LiDAR (表-4.9) で切羽の形状を取得するものとした。

3D LiDAR による切羽形状の計測状況を図-4.35 に示す。切羽までの距離、切羽の形状はリアルタイムに鮮明に取得できており、凹凸の変化を見ながらコソク作業を行うことが可能である。切羽に到達する前、移動中の自己位置推定の誤差が大きくとも、切羽に到達した

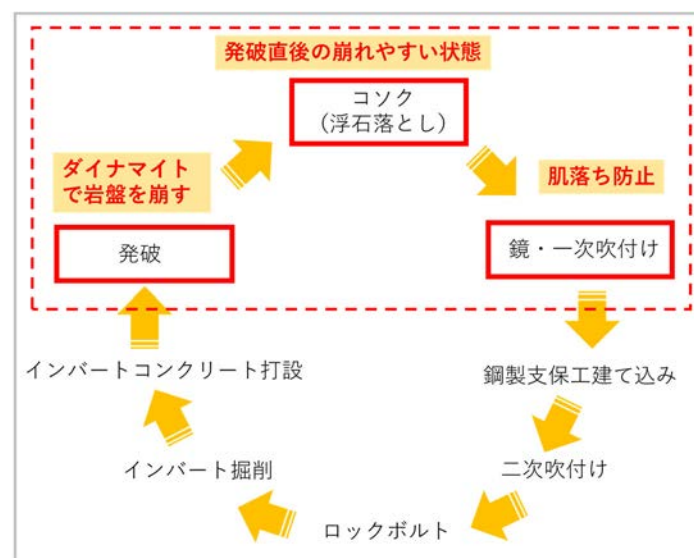


図-4.33 山岳トンネル工事(NATM・発破掘削)の流れ

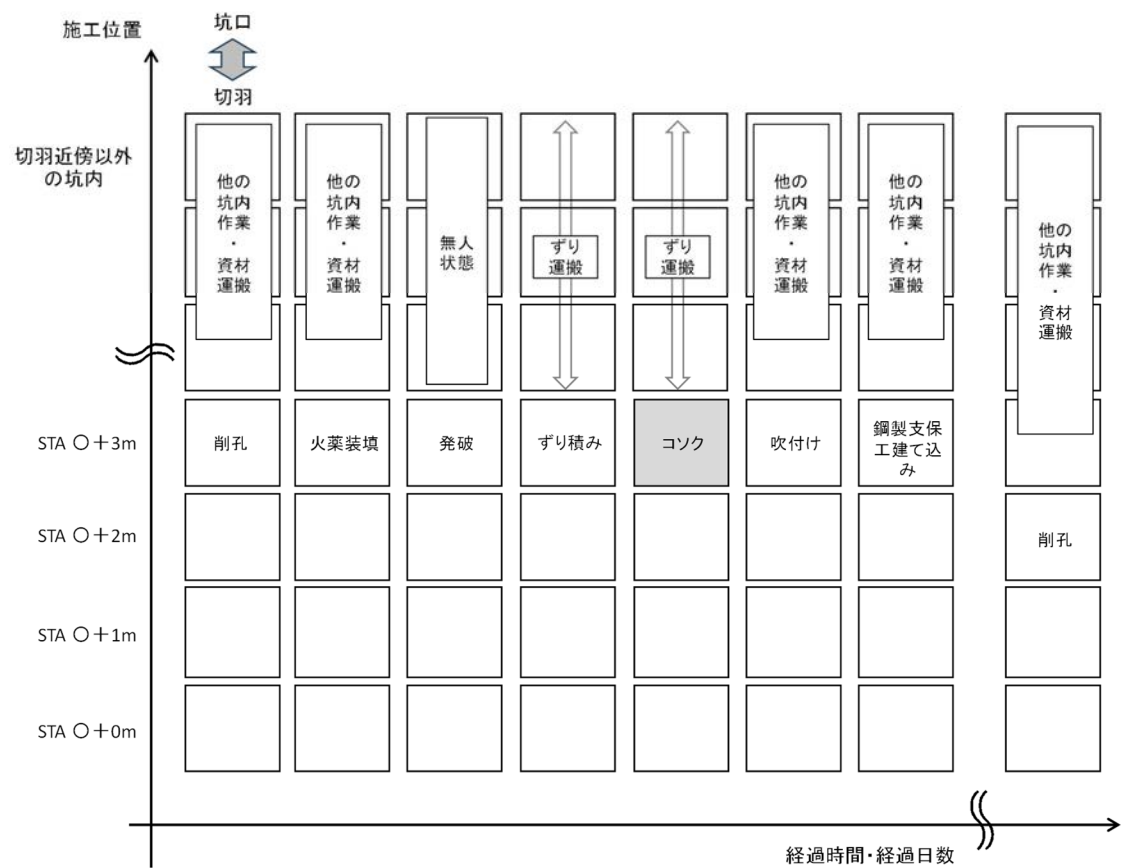


図-4.34 切羽における作業内容の時系列な変化

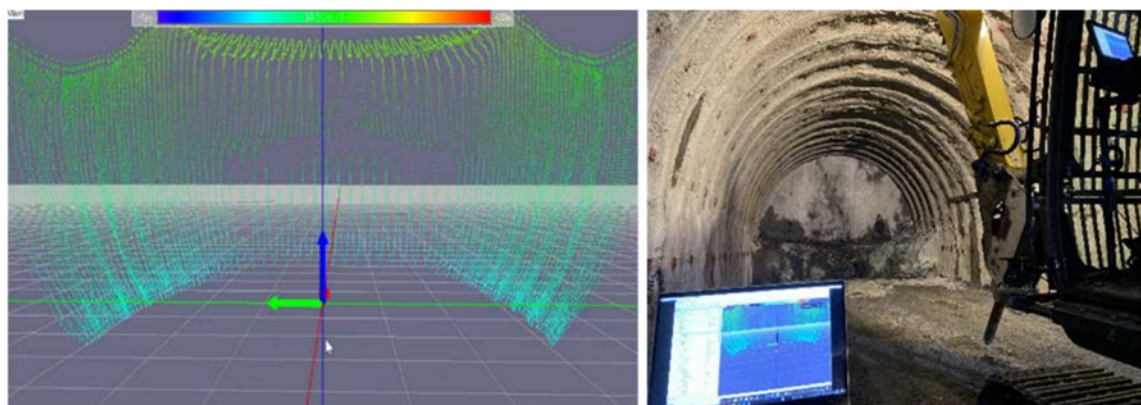


図-4.35 3D LiDARによる切羽形状取得

表-4.9 切羽の形状を取得する 3D LiDAR の仕様

型 式	YVT-35LX-F0		
水 平 走 査 角 度	210° 以上	ピッチ6°	精度±0.125°
垂 直 走 査 角 度	40°	(-5° ～35°)	精度±2°
デ ー タ 点 数	2590点以上 (インターレースなし、20 fps)		
(分 解 能)	518000点以上 (インターレースHDモード、0.1 fps)		
検 出 距 離	水平走査 $-45^{\circ} < \theta < 45^{\circ}$ 0.3-35 m (白紙) 0.3-11 m (黒紙 反射率10%) $-75^{\circ} < \theta \leq -45^{\circ}, 45^{\circ} \leq \theta < 75^{\circ}$ 0.3-20 m (白紙) 0.3- 6 m (黒紙 反射率10%) $\theta \leq -75^{\circ}, 75^{\circ} \leq \theta$ 0.3-10 m (白紙) 0.3-3 m (黒紙 反射率10%) ※上記は垂直走査の上向き15° (垂直走査中心)での値 上向き35°、下向き-5° では上記の70%に減衰する。		
測 距 精 度	白紙15 m以下：±50 mm		
(周 囲 25℃ 時)	白紙15 m～ ：±100 mm		

時点で、切羽形状を取得し、位置合わせを行うことが可能である。

AI 判定結果に基づく自動コソク作業状況を写真-4.6(a)に示す。自動コソク作業については、アームの付け根がトンネルの天井に接触することが危惧されたため、ブームを起こさず、下半のみを対象としたが、その範囲ではコソク作業を実施することができた。なお、工場実験では上半を含む全体を対象にコソク作業の動作を確認した (写真-4.6(b))。

現状は、ブレーカ先端を所定の座標に自動誘導し、叩く動作を繰り返すようにしているが、実際の運用にあたっては、それ以外の動作を加味する必要がある。例えば、自動コソクの実証中、ブレーカが岩盤に深く刺さり、抜けなくなるケースもあったため、このようなトラブルからの復旧手順を自動化するなど、トラブルに対する復旧のための動作を組み込むことも重要な課題である。



(a) トンネル内

(b) 工場

写真-4.6 AI判定結果に基づく切羽自動コソク作業

本研究では、画像 AI による岩種判定によって岩種区分のメッシュ図を作成し、脆いと考えられる泥岩部分のコソク作業時間を長くするよう設定した。将来的には、浮石を判定し、必要な部分だけにブレーカを当てることを可能とすることで、コソク作業時間を短縮することが可能である。

4.4.2 結果

山岳トンネルの切羽コソク作業の自動化を実証し、以下の結果を得た。

- 1) 4.3 節の通り自律走行によって切羽に到達したバックホウが、切羽を認識することができ、3D LiDAR による切羽との相対距離計測に切り替えることができた。また、切羽の形状を計測することができ、コソク作業に入ることができた。
- 2) 事前に画像 AI によって岩種判定を行った結果により、脆いと予想している箇所を重点的に叩くことができた。

山岳トンネルの施工担当者のうち、現場所長経験のあるベテランの職員 4 名（本社、現場）による評価を、表-4.10 に示す。コソク作業については、本来は浮石を叩くべきだが、現状、浮石を即座に検出する技術は存在しないため、今後の課題として検討したい。自動施工の補助を行うことが問題ないとの回答はあったが、現状の現場の状況から想定すると、切羽の周囲には作業員がいるためである。将来的には人は切羽からできる限り離れたいため、復旧を含めたより適切なコソク等の動作を開発すべきである。

4.4.3 考察

本節では、GNSS を利用できない山岳トンネル内におけるコソク作業の自動施工の実証結果を述べた。本実証では山岳トンネルのコソク作業の自動化を実現するために SLAM による自己位置推定、2D LiDAR による障害物検知と自動回避により切羽に到達したバックホウが、人が介在することなく自動的にコソク作業を実施することができた。

切羽に到達した後のコソク動作については、3D LiDAR による切羽までの距離計測、形状計測、また AI による岩種判定の結果を用いて自動化することができた。自動コソク中、岩にブレーカが刺さり抜けなくなることがあったため、今後、自動の復旧動作を作成する必要がある。コソク作業は発破直後に、地山が不安定な状況で実施するため、迅速に行う必要があり、トラブルへの対処も含め、高速化することが望まれる。コソク作業の動作について、現状は脆く崩れやすい岩種の範囲を念入りにという動作を組み込んでいるが、実際に崩れそうかどうかを直接判定できているわけではないため、不要な箇所も含めて突いていると考えられる。より効率的かつ適切な自動コソクの動作を作成するために、今後、浮石の判定についても検討する必要がある。

表-4.10 山岳トンネル施工担当の評価

実施項目	結果	評価
切羽形状把握	アーム付根に取り付けた3D LiDARにより、問題なく実施。 LiDARの機種について、今後、内空が大きいトンネルに対応する場合には、垂直走査角度が40°では足りない可能性がある。	岩種や形状だけでなく、浮石を検出する方法があればより良い。
AI岩判定結果に基づく自動コソク作業	坑内では、ブームと天井の接触のおそれがあったため、下半のみを対象として実施。 工場で上半を含む全体の動作を実施。 作業機の旋回動作が速く、指定の角度を通り過ぎることがあり、ブレーカーの方向を合わせるのに時間がかかる場合がある。 ブレーカーが岩盤に深く刺さる場合があり、ブレーカの破損の恐れがあったため自動運転を止めてベテランオペレータの搭乗運転で回復した。現状は補助役のオペレータが近くにいた方が良い。	近傍で別の作業をしているオペレータが必要時に補助をするのは十分実用的と考える。しかしながら、ベテランオペレータが高齢となっていること、また、切羽は危険であることから、将来的には人が不要となるのが理想。 コソクの動作のパターンを増やすなど、工夫することで、オペレータの補助を減らすことができると考える。

4.5 自動施工(インバート掘削作業)

4.5.1 国道 57 号笹原トンネル新設工事におけるインバート掘削作業の自動化

本節では、山岳トンネル工事を対象に、バックホウを用いたインバート部分の掘削作業（以下、インバート掘削）の自動施工手法について述べる。図-4.36 に実際の山岳トンネル施工現場のインバート部分を示す。赤枠で囲んだ部分がインバートの断面である。写真では



図-4.36 インバートの施工場所

手前からインバート掘削後の状態，鉄筋・型枠組立が完了した状態，インバートコンクリートの打設が完了した状態となっている．インバートは，底面の地盤が上向きの圧力に耐えられないと想定される部分で施工するものである（図-4.37）．インバート部分を掘削することにより底面側の土が排除されると，底盤を押さえている下向きの荷重が小さくなり，不安定となることから，掘削後はできる限り早期に下向きの荷重を確保する必要があり，コンクリート打設・埋め戻し作業までを連続して行うのが一般的な流れである．

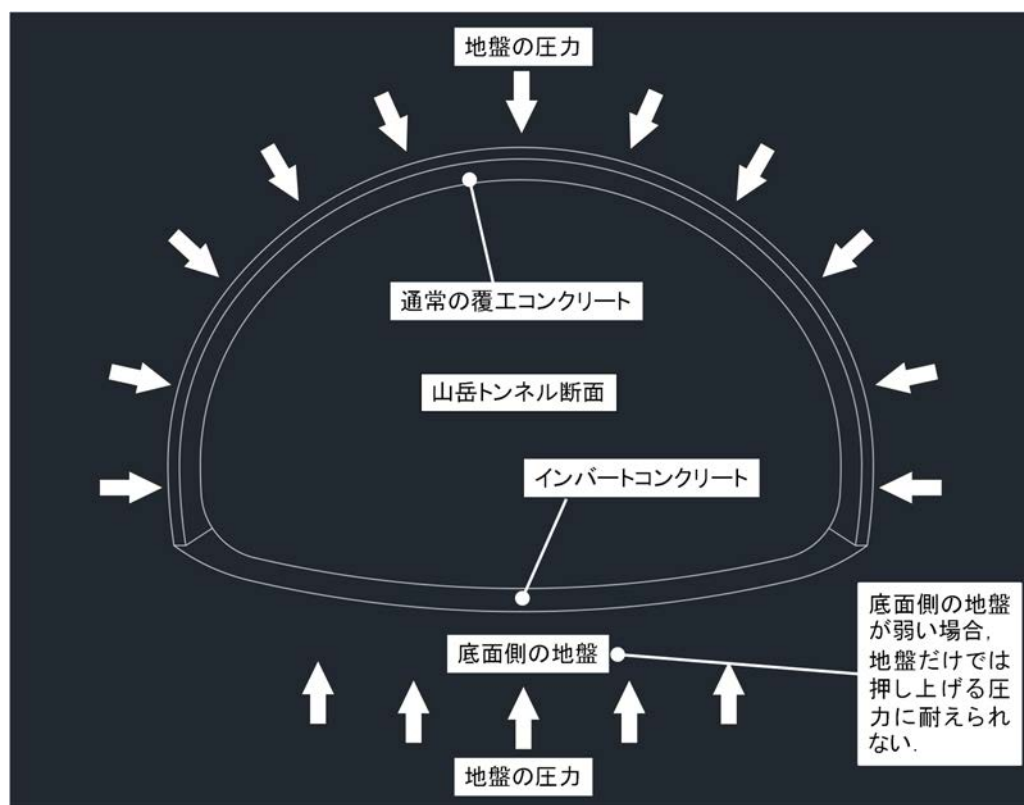


図-4.37 山岳トンネルのインバート部の意味

インバート掘削は，図-4.38 のような施工の流れの中で行われる．図の右側に示す切羽作業が進行した後，左上側の枠，底面の地盤が弱い箇所に対してインバート工を施工する．インバート工は掘削，鉄筋・型枠組立（鉄筋がない場合もある），コンクリート打設の順で施工する．インバートの施工精度としてはインバートの厚さが設計値以上となるように管理しており，一般的には掘削時の余掘り（設計値を超える掘削深さ）を数 cm 以内に収めている．余掘り量が増えると，土砂の処分量が増え，同時に，コンクリートの打設量が増えることにつながるため，作業効率や環境配慮の面から，極端に大きくなることは避けなければならない．このため，インバート掘削作業を自動化するにあたっては，より高精度に位置推定を行う必要がある．

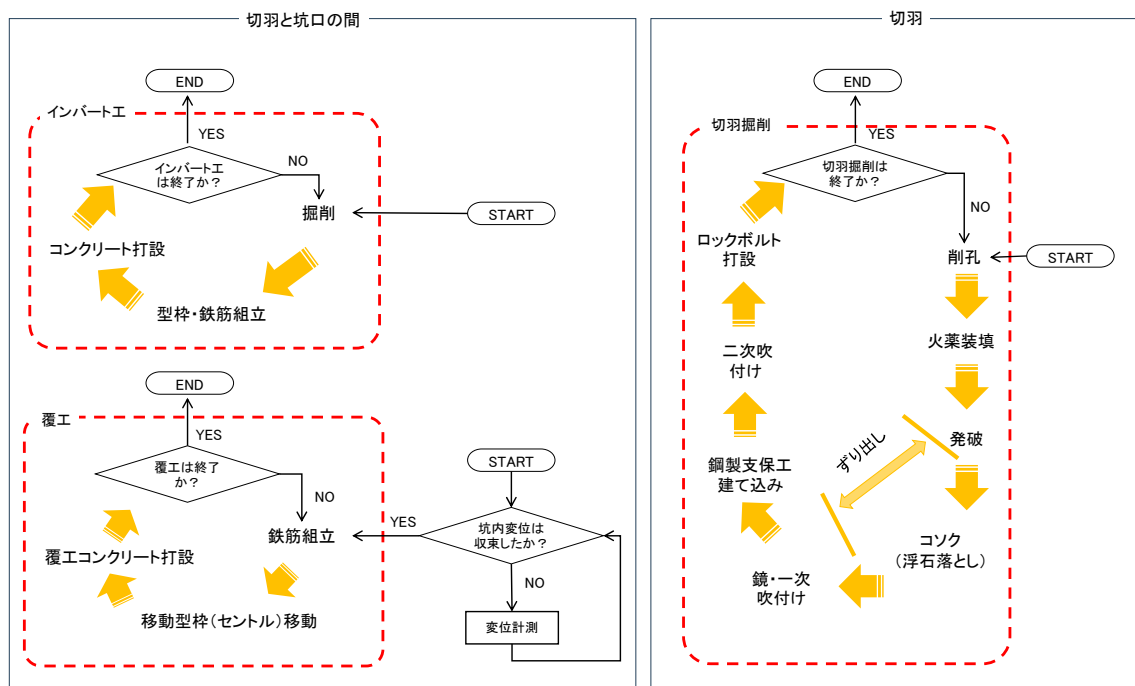


図-4.38 山岳トンネル施工（NATM・発破掘削）の流れ

インバート掘削を自動化した場合を例に、各々の施工場所における作業内容が、時系列でどのように変化するかを図-4.39に示す。ロックボルト打設等の切羽作業の後、一般的にはしばらく日数が経過した後、インバート工に入る。図-4.39のグレーの部分が自動インバート掘削時に無人エリアとする必要があるが、後工程の型枠・鉄筋組立は自動施工場所の近傍において有人で実施され、自動施工と同じブロックの左右反対側は多くの場合、コンクリートやその他資機材を運搬する通路となっている。また、インバート掘削の端部と仕上げについては有人作業となっていることから、自動化によって施工範囲を無人とすることができる時間は、限定される。なお、自動施工に関する既往の研究においても、現地での設定や補助的な作業については有人であることが多い。

このように従来の有人作業、自動施工や遠隔施工の準備等で必要となる有人作業が存在する場合、一連の施工を適切に進めるためには、自動施工の各工種の作業状況を一元管理する仕組みが必要である。本研究では、山岳トンネルのインバート掘削作業を対象に、現場全体の施工状況をリアルタイムに把握するデジタルツインを構築、現場担当者は、このデジタルツインによって、自動運転の管理を行った。図-4.39の通り、インバート掘削作業の前後は、同じインバート工の鉄筋・型枠組立や埋め戻し作業、また資材運搬があることが分かる。これらは有人作業であり、デジタルツインによって作業状態を監視した。掘削作業の施工範囲や施工動作（掘削深さ等）は、図-4.39の施工フローとデジタルツインに集約した出来形データによって自動作成され、自動施工機に転送される。施工動作の作成結果を図-4.40に示す。

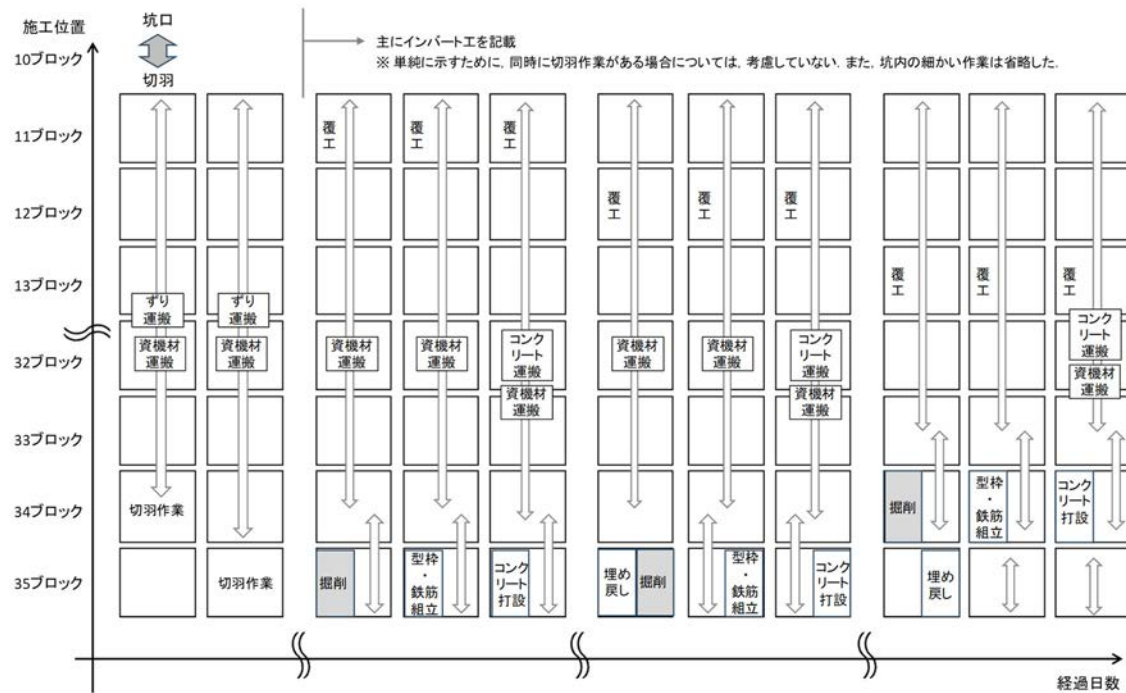


図-4.39 各々の施工場所における作業内容の時系列な変化（主にインバート工）



写真-4.7 山岳トンネル仕様の無人化施工対応バックホウ(大型ブレーカ) (コマツ PC228US)

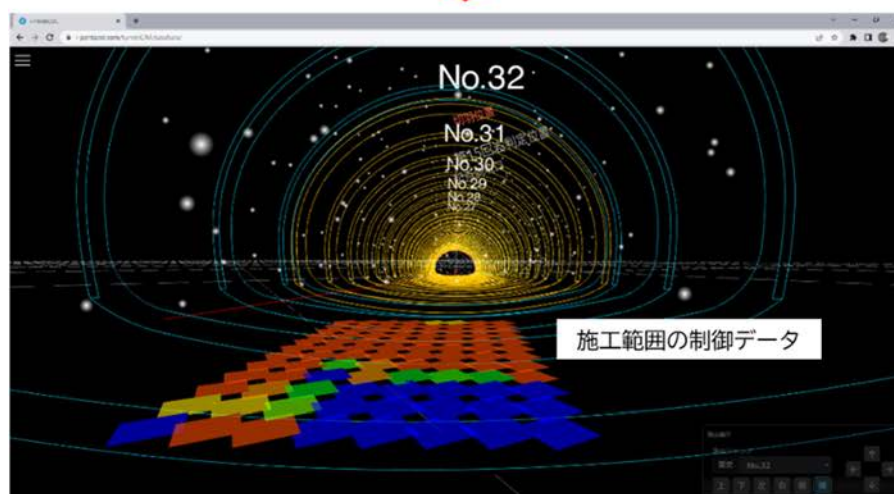
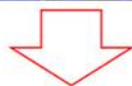
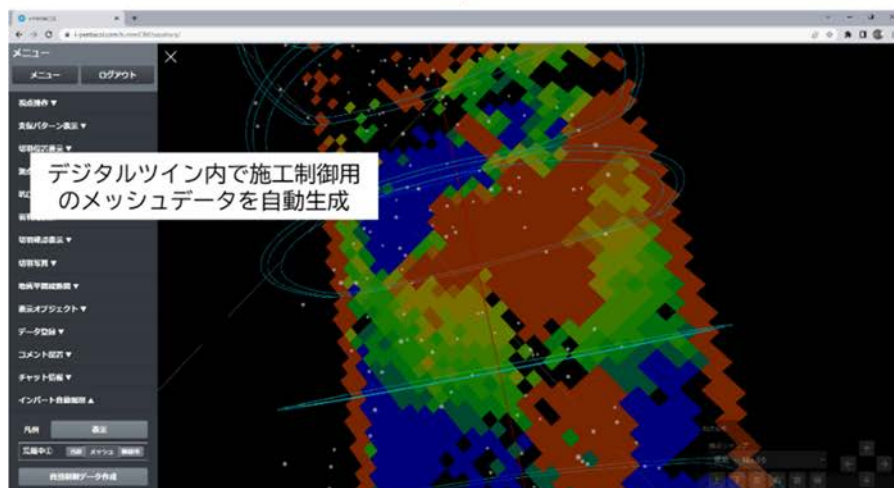
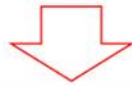
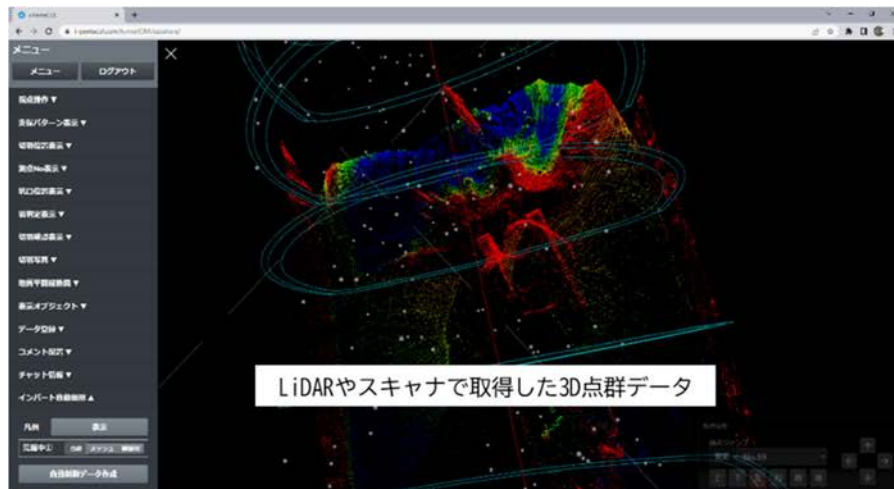


図-4.40 デジタルツインによる施工範囲・施工動作の自動作成

デジタルツインから施工範囲と施工動作が転送された自動施工機は、待機場所から施工場所に移動する。待機場所からの移動の様子を図-4.41 に、移動手法を図-4.42 に示す。自動運転機は、SLAM による位置推定をもとに施工位置手前まで移動し、円筒形の標定点を検出した後標定点による位置推定に切り替わる。その後は、あらかじめ設定した掘削箇所へ刃先を自動で移動させ、ブレーカによる掘削作業を行う。写真-4.8 に、インバートの自動掘削の状況を示す。また、自動掘削の制御画面を図-4.43 に示す。奥行 1.0 m 掘削ごとに自動で 1 m 後進し、掘削動作を繰り返した。精度の検証にあたっては、図-4.43 の左下のメッシュ図に示す 1～8 の計測点について自動掘削を実施した。なお、制御画面は確認と半自動運転のためのものであり、自動施工では操作は不要である。

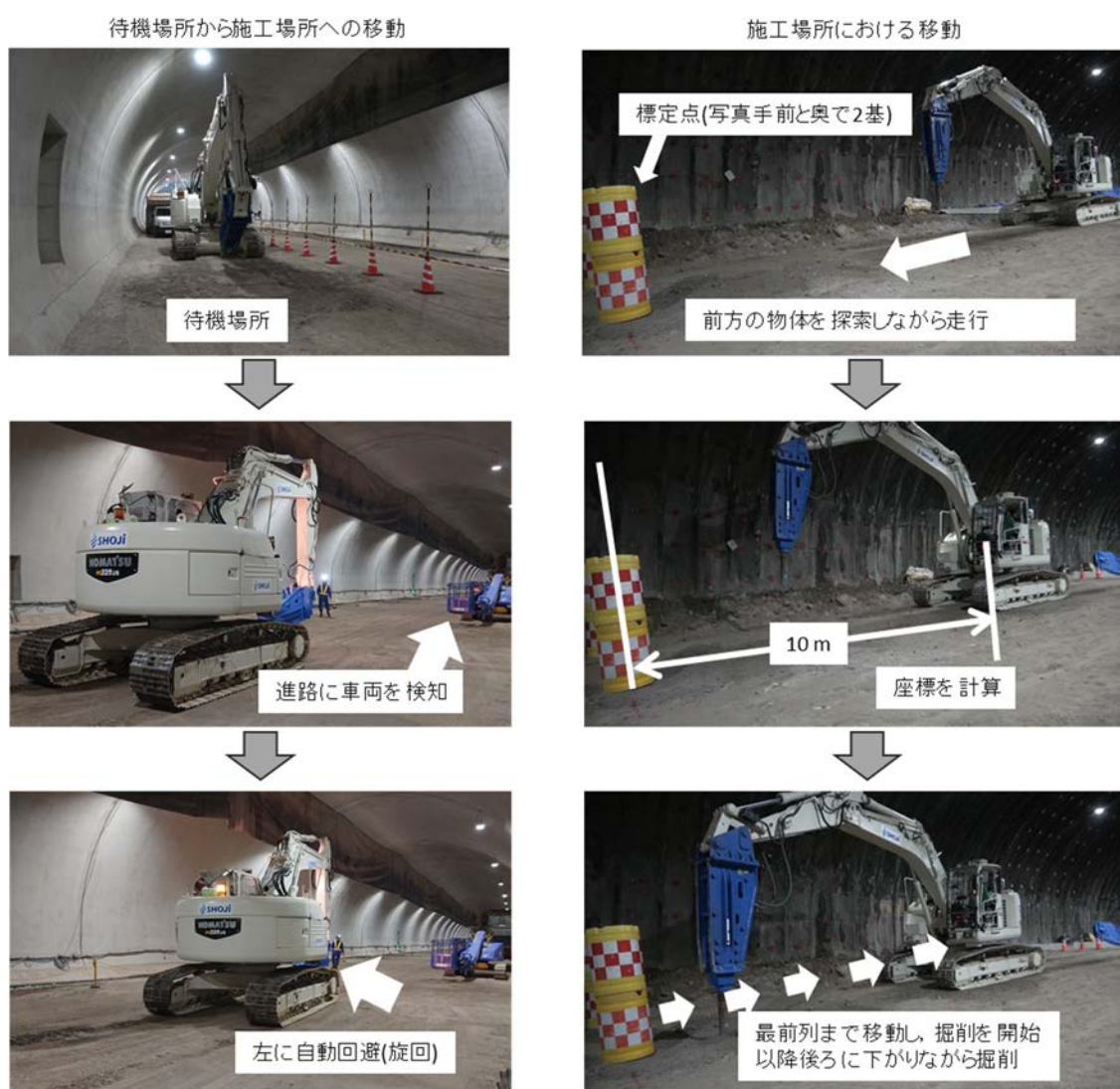


図-4.41 待機場所からの移動状況

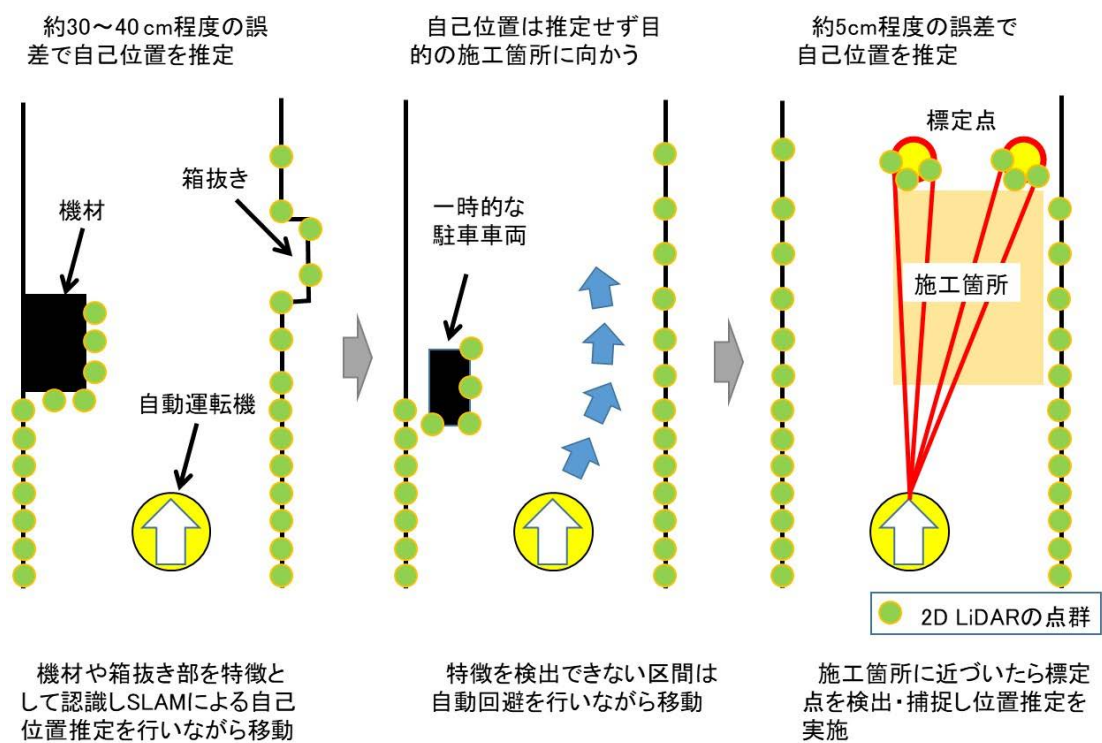
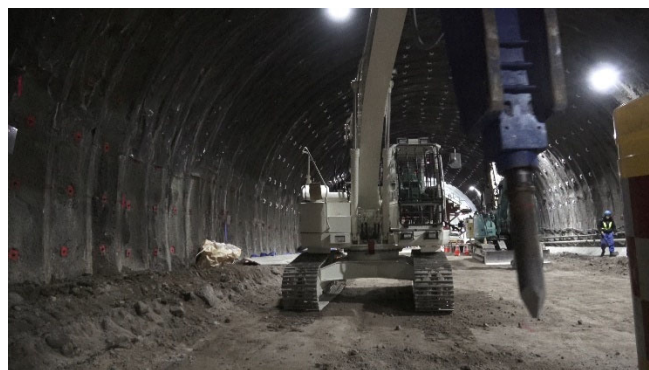


図-4.42 待機場所からの施工場所への移動手法



(a) 刃先を自動移動中



(b) 掘削中

写真-4.8 インバート自動掘削状況

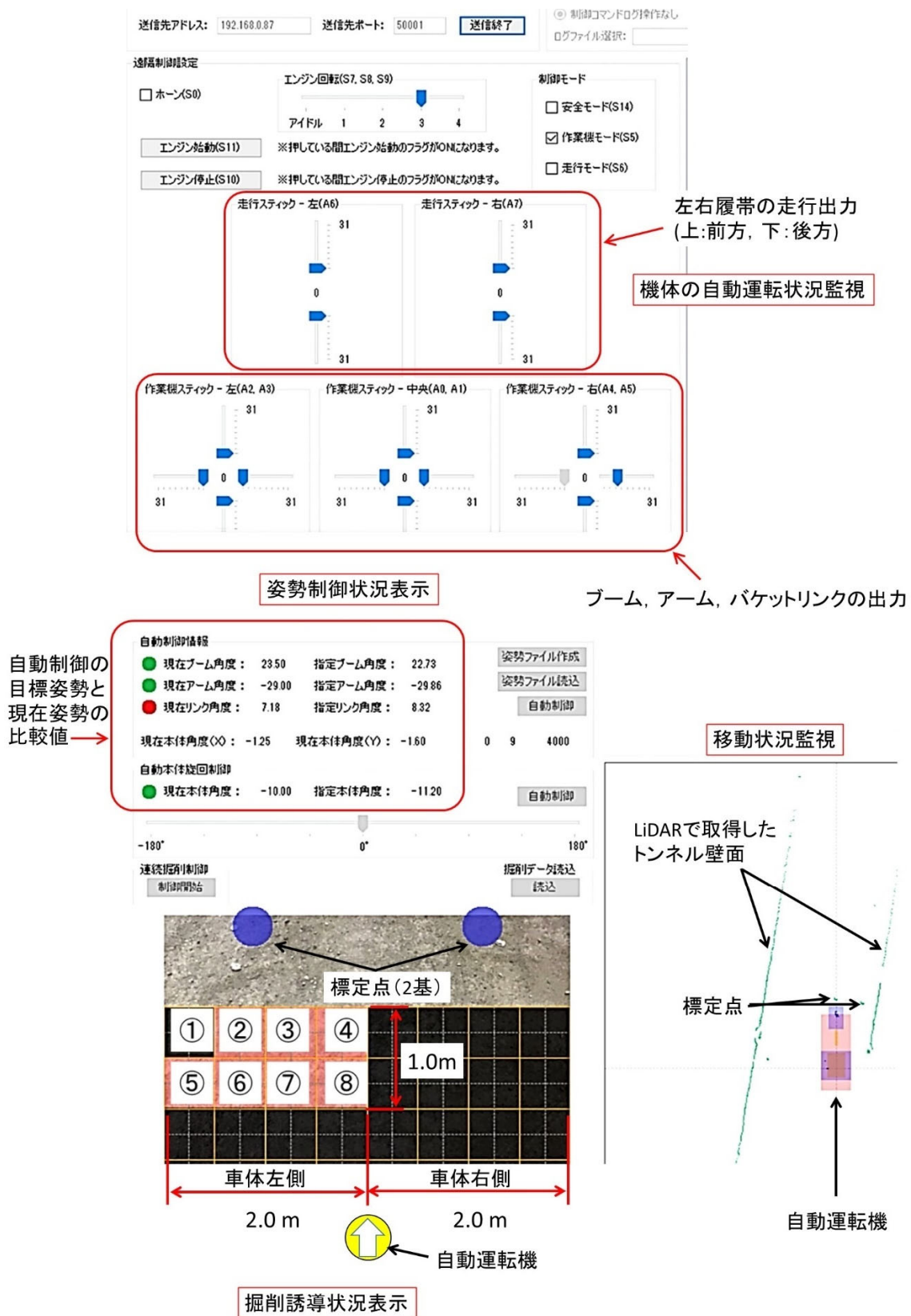


図-4.43 自動掘削の制御監視画面

表-4.11 掘削制御の精度確認結果

計測点	各測点3回の平均誤差		
	x (cm)	y (cm)	z (cm)
①	8.3	9.2	22.3
②	6.0	8.7	12.3
③	5.7	7.0	16.0
④	7.0	5.7	9.3
⑤	10.3	8.3	12.3
⑥	7.0	6.0	8.3
⑦	10.0	8.3	7.7
⑧	8.3	7.7	5.7

4.5.2 結果

山岳トンネルのインバート掘削作業の自動化を実証し、以下の結果を得た。

- 1) 自動インバート掘削では、出来形の管理が重要であり **LiDAR SLAM** の位置推定精度では不十分であるため、待機場所から施工場所の移動には **LiDAR SLAM** を使用し、施工場所に到達した時点で標定点による自己位置推定に切り替える手法を構築したところ、円滑に位置推定の手法を切替えて掘削作業を行うことができた。
- 2) 自動掘削の精度については、荒掘りであれば問題ないが、仕上げには精度が不十分であった。精度の検証方法については、掘削時のブレーカを最深部で停止し、誘導した刃先のずれ量を測定した。測定にあたっては、車体の前後方向を **X 軸**、左右方向を **Y 軸**、深さ方向を **Z 軸** とし、深さ方向の測定にはブレーカの上部に目印を設置し、目印の高さを測ることで深さを計算した。精度確認結果を表-4.11 に示す。キャビンにオペレータが乗り、掘削を手動で行う搭乗操作では余掘りを概ね **5 cm** 以内とすることができている。本実証の自動運転では、平均誤差が **5 cm** を超えており、搭乗操作よりも全体的に精度が低い。この中で計測点 1 については、他の測点に比べ深さ方向の誤差が大きい、ブレーカユニットの重量が大きいことから、車体から遠い箇所の揺れが大きいことが確認できており、その影響があると考えている。全般的に車体の揺れは、アームを伸ばした際に大きく、刃先が所定の位置に到達するまでに大きくふらつくことが多い。このため、端部の施工についても、壁面との接触の可能性があると判断し、搭乗操作で施工した。搭乗操作を観察したところ、車体が大きく揺れていてもその状態で施工を行っていた。オペレータは揺れの分を加えたときに刃先が合うようにしているのではないか、という予想ができる。対して自動施工機は、姿勢を計算して刃先の座標を合わせているが、揺れによって刃先がずれ、そのまま掘削をしている。
- 3) 同じく自動掘削の精度が低いことから、荒掘りであっても壁際等、端部の掘削につい

ては接触のおそれもあり、自動掘削の適用が難しいことがわかった。但し、図-4.43に示すように面積としては約 10%であり、この部分は有人運転を行っても大きな労力はかからない。

- 4) インバート掘削の前後の作業との調整について、インバート工の他の作業と資材運搬以外の作業に対する調整は不要であることがわかった。本研究のインバート掘削の作業の前工程は、切羽作業であったが、前工程から日数が経過しており、特に作業調整は生じなかった。なお、切羽作業とインバート工は、通常は連続して行われなため、本実証以外においても同様に作業調整は生じにくいと考えられる。
- 5) インバート掘削中の出来形確認、掘削誘導作業がインバート掘削箇所 frequently 立ち入ることがわかった。これについて、3D LiDAR による出来形の自動計測（図-4.44）を実施することで改善を図ることができた。従来の作業員による出来形管理・誘導の流れを図-4.45 (a)に、3D LiDAR による自動出来形管理を行った場合の流れを図-4.45 (b)に示す。前者はインバート掘削中、施工場所が無人状態と有人状態を繰り返しながら進行するのに対し、後者はインバート掘削作業の間、無人で作業が進行している。また、前者は、施工場所の近傍で、出来形計測の人員が 3 名待機する必要があるが、後者は施工場所から離れた場所に計測者が 1 名いるだけで実施可能となった。

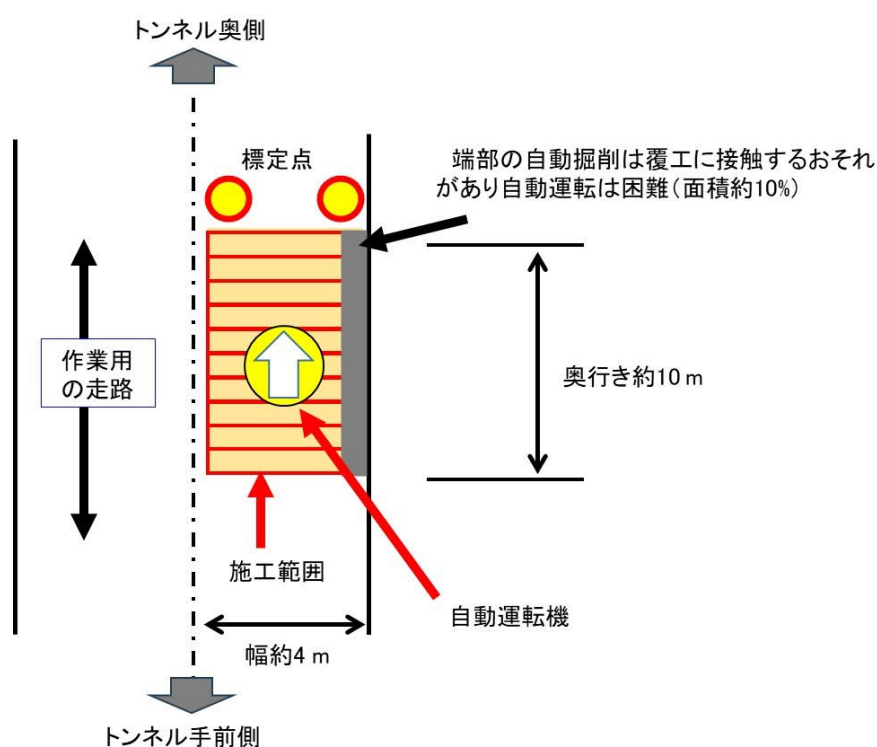
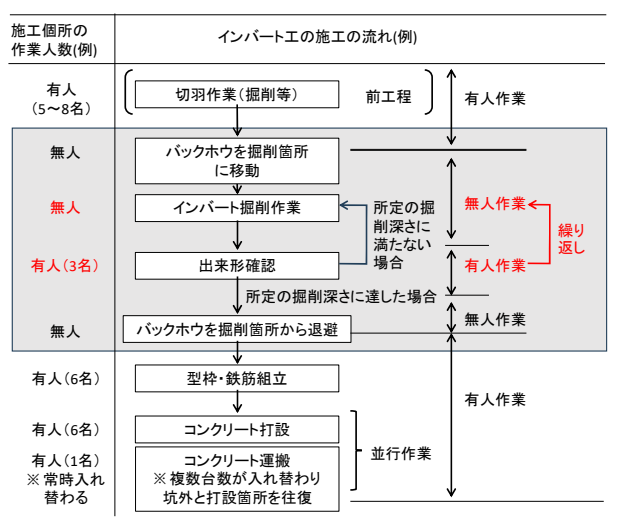


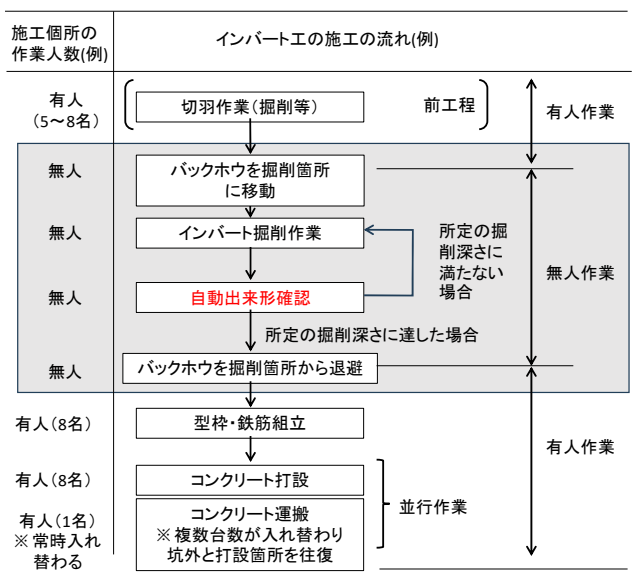
図-4.44 壁との接触のおそれから自動掘削できなかった範囲



図-4.45 インバート掘削の出来形管理を自動化するために施工箇所に設置した 3D LiDAR



(a) 従来の出来形計測を実施



(b) 3D LiDAR による自動出来形計測を実施

図-4.46 インバートの自動掘削実証時の施工の流れと有人作業の有無

実証内容および結果について、山岳トンネルの施工担当者のうち、現場所長経験のあるベテランの職員 4 名（本社、現場）による評価を、表-4.12、13 に示す。

表-4.12 山岳トンネル施工担当の自動掘削に対する評価

項目	現場の評価
精 度	有人運転に比べ施工精度が低く、壁際などの端部や仕上げ掘削には適用が難しい。 高い精度を必要としない荒掘りには適用可能。
安 全 性	有人運転と異なり、施工中に周囲を確認できないことから、施工範囲に人がいないことを前提となる。 移動中（走行中）は進路上の障害物や人を検知して回避あるいは停止するため、安全性は高い。
生 産 性	壁際などの端部の掘削や仕上げ掘削には適用できないが、荒掘りには適用でき、半日程度の自動施工を行うことが可能。その間、オペレータが別の作業を行うことも可能。
	出来形管理を従来法（作業員3名）で行う場合、自動施工を頻繁に止めて深さの確認を行う必要があるが、3D LiDARによって出来形の自動管理を組み合わせた場合には、連続して自動施工を行うことができる。
	ICT建機と同様、丁張が不要となり現場作業は容易である。
	刃先の座標で出来形管理ができたほうが良い。
	標定点や3D LiDARの設置作業が省けると良い。

表-4.13 山岳トンネル施工担当のデジタルツインに対する評価

項目	現場の評価
精 度	デジタルツインにより施工精度が直接向上することはないが、設計と出来形をデジタルツインで確認することができるため、施工の手直し等を適切に指示することができる。
安 全 性	デジタルツインで作業員がどこにいるか分かり、かつ作業員がいる場合には自動施工を停止するため、安全性が高い。複数の工種を扱う場合、現場で見るとよりわかりやすい可能性がある。
生 産 性	日々の施工を管理しているデジタルツインで自動運転の管理を行うため、手間が少ない。 設計（計画）形状の3次元データを自動で作成し、自動施工機械に連携することができるため、通常のICT建機よりも運用は容易である。
そ の 他	遠隔で自動施工を管理・制御するのは怖いですが、3Dで可視化することによって、現地の状況を直感的に把握でき、安心感が得られる。 デジタルツインにより現場全体を俯瞰することで、全体の作業状況が把握できるため、自動運転の管理は容易である。

自動掘削の精度が低く、仕上げ掘削を搭乗操作とせざるを得ない結果であったため、仕上げ掘りの段階では、追加でバックハウのオペレータを施工場所に配置する必要があった。このように、施工機械を自動化しただけでは、施工場所を無人状態にすることができず、無人化するためには付随する出来形確認等の作業を自動化あるいは遠隔化する必要があることが明らかとなった。

4.5.3 考察

本実証では、SLAM による自律移動では掘削作業での位置精度が不十分であることから標定点のリアルタイム探索と座標取得の手法を併用し、インバート掘削の施工位置合わせと、施工を実施した。今回、標定点として用いたクッションドラム（直径 830 mm）については、設置が人力作業であり、10.5 m×4 m の施工場所ごとに移設する必要がある。現状はインバート工の他の作業が有人であるため、設置が可能であるが、将来的には簡略化あるいは省略可能とすることが望ましい。簡略化するためには、標定点を小型化することも考えられるが、10 m の距離で円筒形状を推定するためには LiDAR の点群密度や計測精度の向上も必要である。標定点の設置を省略する手法としては、既存の特徴点、例えば支保工やロックボルト、移動しない仮設備等に座標を付与し、これらを自動検出することで、位置推定を行うことが考えられる。

インバート掘削の自動化には、待機場所から施工場所への移動、インバート掘削、施工場所から待機場所への退避を自動化することが必要であるが、それらの一連の動作を自動で切り替えながら人が介在せずに行うことができた。施工場所に到達した後の掘削の自動化については、搭乗操作による施工に比べ、施工精度が低いことから荒掘りに適用するにとどまったものの、荒掘りだけであっても、単純な繰り返し作業の間は重機オペレータが不要となるため、省人化に期待できることが明らかになった。誤差が生じる大きな要因としては、車体の揺れが挙げられるため、揺れの量をアームの制御にフィードバックしたり、揺れを抑制したりするような動作を検討したりすることが考えられる。ベテランのオペレータが搭乗操作を行った場合の操作を具体的に分析する必要もある。

なお、施工機械を自動化しても、自動施工中の出来形計測や誘導など、現地での作業が度々発生するが、これも自動化を進めることで自動施工の効率が向上することがわかった。これに関連して、3D LiDAR の設置が必要となる点について、将来的にブレーカの刃先の座標を推定することができれば施工履歴を出来形推定に利用でき、解消するものと考えられる。

自動施工におけるデジタルツインの役割については、単純に自動制御を進めるだけでなく、その可視化の機能を活かして人が積極的に管理できるようにすることも考えられる。実際の現場の作業は複数の工種が連続して行われる他、近傍で他の作業が発生することも多い。また、イレギュラーな事象が生じることも多い。このため、施工担当者からは、自動化

が進む中においても人間の判断や指示を介在させる仕組みが必要であるとの意見が強い。本実証の前は、自動施工に対して消極的であった現場職員についても、現場状況を可視化したデジタルツインによる管理が可能であれば抵抗感や恐怖心が低減できるとのことであった。

第5章 結論

5.1 本研究のまとめ

本研究では、山岳トンネルのように、特に危険性が高く、また輻輳する施工場所における自動施工を実現するための一環として、デジタルツインをプラットフォームとした切羽のコソク作業、インバートの掘削作業の自動化を実証した。この中で有人作業が混在し完全には無人化できない状況において、複数の自動施工を適切に管理・制御するためのプラットフォームとして、デジタルツインが有効であることを実証した。

切羽のコソク作業は、前面の切羽の脆い岩、落石となるような浮いた岩を落とす作業であり、ブレーカユニットを装着したバックホウによって行われているが、バックホウのような自走式の機械による自動施工では、位置情報が取得できるかどうかは課題となってきた。山岳トンネルのような地下空間で自動施工を行う場合、RTK-GNSSのように高精度な位置情報を得る手段がない。このため、コソク作業に用いるバックホウベースの自動運転機の開発にあたり、非 GNSS 環境下での高精度な位置情報の取得手段として、SLAM の適用性を実証した。施工中の山岳トンネルは、暗く、また多くの仮設備、仮置きされた資機材があり、施工の進行につれ、日々状態が変わっている。このため、暗所に強くかつ取得する特徴点の情報が比較的広い LiDAR SLAM を適用した。山岳トンネルでは、拡幅部や箱抜き部のように形状に明瞭な特徴がところどころ存在する一方で、形状的に特徴が存在しない区間も存在する。LiDAR SLAM が位置情報を得られない状況でも、移動に支障がないよう、LiDAR で得られる点群を用いた自動回避の仕組みを併用し、形状的な特徴が存在しない場合にも、自律的に障害物を回避しながら前進を続ける仕組みとした。自動施工の対象である切羽に到達した際には、到達したことが判別できることから、LiDAR で得られる点群を直接使い、距離計測を行って自動施工を行うことが可能であった。

切羽のコソク作業の自動制御については、従来の搭乗運転と比較するとトラブルに対する対処能力が低い。現場実証では、ブレーカの刃先が岩に深く刺さった場合に自動で抜くことができなかった。このようなトラブルに対する動作も、あらかじめ用意する必要がある。また、切羽のコソク作業を自動で行うにあたり、従来は人の目で落石が起きそうな箇所を見つけるが、切羽を無人とすることが重要であるため、代わりに切羽の岩種を判別する AI を適用した。この AI については本研究のテーマとはしておらず、他の判定方法についても、コソク作業の自動制御プログラムに組み込むことが考えられる。現状は、リアルタイムに落石を判定できる技術はまだ存在しない。いずれにしても切羽作業の危険性は非常に高いことから、将来的に完全な無人化を目指す必要があり、落石の観察も自動あるいは遠隔化するの望ましい。

インバート掘削作業については、地盤を破碎する動作を自動化した。これについてもコソク作業同様、自走するために高精度な位置情報が必要となるため、LiDAR SLAM で位置情報を得るとともに、形状的な特徴を捉えられない区間では LiDAR の点群を直接用いた自動回避を用いて移動を行った。しかしながら、インバート掘削作業では、切羽のように明瞭に施工場所を検出することができないこと、掘削の出来形精度を確保するために、より高精度な位置情報が必要であることから、リアルタイムに既知点を検出して座標を計算する手法を追加した。既知点には LiDAR で検出するための標定点として、直径 830 mm のクッションドラムを二基用いることで、自動運転機の座標ならびに方向を計算した。

自動掘削の制御については、掘削中のアームの動きによって、車体が大きく揺れるため周囲との接触が懸念され、また、車体から離れた箇所の掘削では、特に揺れが大きくなるため精度が低下することがわかった。このため、壁面近くの端部やインバートコンクリートの床付けとなる仕上げ掘削への適用はまだ難しい。しかしながら仕上げや端部を除いても、半分近い破碎作業を自動化できることから省人化の効果としては十分である。インバート掘削作業中、また、その前後は有人作業が混在しているため、必ずしも完全な無人化を想定せず、無人エリア、有人エリアの分けや、それらの切り替えを明確にする必要があることがわかった。

また、自動施工を管理するために施工の状況をリアルタイムに反映したデジタルツインで、施工の動作を自動で作成し、監視・制御する手法を実証した。本研究のデジタルツインには、施工管理記録や IoT センサの計測値等がリアルタイムに集約される。IoT センサには、作業員や工事車両の位置を検出するための BLE ビーコンも含まれ、これによってリアルタイムに坑内の人の配置を検知している。

従来の施工管理システムでは、コントロールパネルやダッシュボードと呼ばれるデータ等を羅列した画面が複数並ぶのに対し、現実空間を模したデジタルツインで現場の最新の状況を一元化したことにより、ICT に不慣れな一般の現場職員にとっても現場を把握しやすいことがわかった。VR を用い遠隔から現場に没入することにより、より直感的な判断も可能となっている。

このようにデジタルツインで施工管理をしながら、自動施工を制御する場合、人の目による従来の管理と自動化の良い部分を合わせて活用することが可能であり、現場職員にとっても、安心して自動化に取り組めるとのことであった。特に山岳トンネルでは検討が進められている自動施工の中に、多くの有人作業が存在することから、この手法は有効と考えられる。

以上、デジタルツインを用いた建設現場における自動施工の手法を実証した。自動運転機については、山岳トンネル用に構築したものではあるが、その他の工事においても利用可能である。デジタルツインによる現場管理や自動施工の施工動作の作成や制御についても、工事の種類を問わず可能と考えている。

5.2 今後の展望

本研究では、人による管理、現場での有人作業と自動施工をデジタルツインによって統合し、自動施工を適用しやすいプラットフォームを開発した。個別の自動施工については、本研究で扱ったのはバックホウの自動化のみであるが、既往の研究に示した通り、山岳トンネル工事だけでも、切羽の発破のための削孔、削孔した穴への火薬の装填、発破、ずりの積み込み・運搬、コソク、吹付け、鋼製支保工の建込み、インバート工、覆工など、多くの作業がある。建設現場の無人化については、建設業界全体で力を入れているところであり、各々の自動施工が実用化されることが考えられる。

本研究で構築したような BIM/CIM を応用したデジタルツインを自動施工のプラットフォームとすることで、これまで整理されていなかった自動施工における作業員の配置や、段取りを含む複数の自動施工間の連携なども、共通のプラットフォームで可視化することにより、合理化が進むと考えられる。今後、この研究成果が活用されて多様な自動施工の現場適用が促進されることを望む。

本研究で実証した個別の自動施工については、コソク作業、インバート掘削作業とも、改善が必要と考えている。まずコソク作業については、トラブルに対する復旧動作を自動化すること、インバート掘削については、施工精度を改善するために車体の揺れを抑制、または、揺れを考慮した制御の仕組みが必要である。周囲との接触防止の観点で考えると揺れの抑制は必要であるため、アーム等の制御や施工の手順を変えながら揺れの量を低減する手法を検討する。また、接触のおそれがない箇所など、揺れが許容される場合には施工の速度を優先し、揺れの量をアーム等の制御にフィードバックし、揺れがある状態でも正確に掘削できるよう検討する。バックホウをベースとした自動運転機については、一般の工事でも適用機会が多くなると考えており、普及に向けた検討を進めたい。

なお、デジタルツインについては、Zijian⁵⁹⁾、Yuhong⁶⁰⁾らが、安全リスクの評価や事故回避への適用を試みており、IoT センサや警報システム等と連携することで建設工事の安全性を向上できると結論付けている。本研究のデジタルツインについても、IoT センサや地質情報等の情報を安全性の向上に役立てることも検討したい。

参考文献

- 1) 国土交通省：インフラ分野の DX アクションプラン 2， pp.4-10， 2023.
- 2) Grieves, M.: Digital Twins: Past, Present, and Future, *The Digital Twin*, Springer International Publishing, pp.97-121, 2023.
- 3) Singh, M., Fuenmayor, E., Hinchy, E. P., Qiao, Y., Murray, N.: Digital Twin: Origin to Future, applied system innovation, 24 May, 2021.
- 4) 金森 宗一郎，味田 悟，加藤 和宣：建設施工機械の自動化・自律化技術の普及に向けた取組みについて，令和 4 年度建設施工と建設機械シンポジウム，一般社団法人 日本建設機械施工協会，2022.
- 5) 独立行政法人 労働者健康安全機構 労働安全衛生総合研究所：山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止対策に関する検討会 報告書，令和 5 年 3 月，2023.
- 6) 厚生労働省：ずい道等建設工事における粉じん対策に関するガイドライン，令和 2 年 7 月，2020.
- 7) Kim, J., Kim H., Tanoli, W. A., Seo, J. W.: 3D Earthwork BIM Design and its Application in an Advanced Construction Equipment Operation, *Architecture and Engineering* , Vol.4, No.2, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, pp.22-26, 2019.
- 8) 元村 亜紀，湯浅 知英，山中 哲志：建設施工段階の汎用的なデジタルツインの実現-CPS 施工管理システムの開発-，AI・データサイエンス論文集，4 巻 2 号，pp.89-96，2023.
- 9) 鬼頭 昂平，小俣 光弘，土橋 武夫，飯島 芳則：デジタルツインによる現場管理手法に関する提案，土木学会第 77 回年次学術講演会，VI-71，2022.
- 10) 伊藤 禎宣，坂野 雄一，藤野 健一，安藤 広志：無人化施工において遠隔操作の映像環境が作業効率へ与える影響について，土木学会論文集 F3 (土木情報学)，Vol.73, No.1，pp.15-24，2017.
- 11) 藤野 健一，橋本 毅，油田 信一，建山 和由：無人化施工に最適なオペレータの選抜方法に関する研究，土木学会論文集 F3 (土木情報学)，Vol.74, No.1，pp.11-17，2018.
- 12) 建山 和由，横山 隆明：ICT を利用した建設施工の高度化と将来展望，計測と制御，第 55 巻，6 月号，2016.
- 13) 菅井 貴洋，三浦 悟，出石 陽一，青木 恒，浜本 研一：自動化施工システムの台形 C S G ダム工事への適用（その 2），土木学会第 77 回年次学術講演会，VI-53，2022.
- 14) 松田 一輝，文村 賢一，浅井 伸弘，宮本 真吾，渡邊 慶一郎，石川 輝：山岳トンネルにおける ICT 搭載型ドリルジャンボによる完全自動削孔とその効果，土木学会第 76 回年次学術講演会，VI-976，2021.
- 15) 長幡 侑樹，木村 公一：情報通信技術 (ICT) の活用による発破掘削に伴う作業の生産

- 性向上, 土木学会第 78 回年次学術講演会, VI-779, 2023.
- 16) 篠原 孝希, 中山 泰起, 小熊 登: 切羽写真・削孔データを用いた発破システムの活用
取組み, 土木学会第 78 回年次学術講演会, III-386, 2023.
 - 17) 額 善孝, 塚田 純一, 棚島 秀一, 高橋 真琴: 山岳トンネルにおけるドリルジャンボ
遠隔操作システムの開発, 土木学会第 78 回年次学術講演会, VI-936, 2023.
 - 18) 水谷 和彦, 坂下 誠, 浅井 秀明, 小笠原 裕介, 五味 春香, 下山 悠, 鈴木 麟太郎:
山岳トンネル施工における自動装薬システムの開発, 土木学会第 77 回年次学術講演会,
VI-662, 2022.
 - 19) 小笠原 裕介, 坂下 誠, 浅井 秀明, 水谷 和彦, 五味 春香, 鈴木 麟太郎: 自動装薬シ
ステムにおける装薬孔位置検出システムの開発, 土木学会第 78 回年次学術講演会, VI
-957, 2023.
 - 20) 田口 毅, 本山 昇, 原圭 太, 角 和樹, 清水 亮, 塚田純一: 山岳トンネルにおけるホ
イールローダ遠隔操作システムの実施工への試験導入, 土木学会第 78 回年次学術講演
会, VI-764, 2023.
 - 21) 渡辺 淳, 谷口 信博, 白坂 紀彦: スキャナー搭載カメラ台車による吹付試験について,
土木学会第 77 回年次学術講演会, VI-794, 2022.
 - 22) 坂西 孝仁, 宮川 克己, 手塚 仁: 小断面トンネル用自動吹付機の開発, 土木学会第 76
回年次学術講演会, VI-677, 2021.
 - 23) 渡辺 正嘉, 竹中 計行, 木下 勇人, 宮本 真吾, 松田 一輝: HMD によるコンクリー
ト吹付機の遠隔操作技術の開発 (その 3), 土木学会第 76 回年次学術講演会, VI-529,
2021.
 - 24) 水谷 和彦, 坂下 誠, 浅井 秀明, 達 亮太: 鋼製支保工建込みロボット 測量用ミラー
自動回収機構の開発, 土木学会第 76 回年次学術講演会, VI-913, 2021.
 - 25) 内藤 将史, 関根 一郎, 辻川 泰人, 若竹 亮, 内藤 雅人: 鋼製支保工建て込み切羽無
人化施工システムの開発, 土木学会第 76 回年次学術講演会, VI-913, 2021.
 - 26) 手塚 康成, 松本 修治, 日野 博之, 青柳 隆浩: トンネル覆工コンクリートの自動打設
システムの開発, 土木学会第 76 回年次学術講演会, VI-677, 2021.
 - 27) 唐 志遠, 北川 士朗, 荒井 匠, 福田 毅, 垣見 康介: 山岳トンネル覆工自動施工シス
テムによる負担軽減効果の定量的評価, 土木学会第 78 回年次学術講演会, VI-948,
2023.
 - 28) 西村 風希, 堅田 篤史: 完全ワンオペレーターによるロックボルト自動打設の試験施
工, 土木学会第 78 回年次学術講演会, VI-777, 2023.
 - 29) 鹿島建設株式会社: プレス記事 山岳トンネル工事における「ずり出し」を自動化・無
人化～ホイールローダの自動運転を核としたずり出しの安全性向上と省人化の実現～,
<https://www.kajima.co.jp/news/press/202407/pdf/10c1-j.pdf>, (2024/12/25 入手)
 - 30) 岡田 成弘, 大前 学: 自動運転車の円滑な走行を実現するための空間情報基盤を介し

- た協調走行に関する研究, 自動車技術会論文集, 47 巻 5 号, pp1197-1204, 2016.
- 31) Moriya, T., Kimura, N., Ara, K., Watanabe, T.: Development of Autonomous and Collaborative Robotics Technologies for Advanced Automation, *Hitachi Review*, Vol.68, No.4, 2019.
 - 32) 武石 学, 伊藤 圭佑, 土井 隆行, 野田 大: 自動運転ショベルの複数台同時稼働・管理による省人化, 土木学会第 78 回年次学術講演会, VI-762, 2023.
 - 33) Wolf, P., Ropertz, T., Berns, K., Decker, P.: White Paper High Quality Road Construction using 5G-AMMCOA Autonomous Mobile Machine Communication for Off-Road Applications, Robotics Research Lab, 2019.
 - 34) Raha, L., Eldin, N.: Adaptive real-time tracking and simulation of heavy construction operations for look-ahead scheduling, *Automation in Construction*, Volume 27, November pp32-39, 2012.
 - 35) Ishida, H., Yabuki, N.: Improving the Efficiency of ICT Earthwork through Automated Planning Using BIM, *Proceedings of the 5th International Conference on Civil and Building Engineering Informatics (ICCBEI 2023)*, Bangkok, Thailand, 2023.
 - 36) 中村 凌, 佐野 和幸, 若山 真則, 佐藤 将, 中居 拓哉: 現行法に基づいた自動化施工の安全管理について, 土木学会第 78 回年次学術講演会, VI-793, 2023.
 - 37) 千野 雅紀, 掛川 直樹, 安保 篤康, 村石 辰徳, 小松 廉, 浅間 一, 山下 淳: 施工中の建設機械に搭載した Visual SLAM の位置推定精度に関する検証, 土木学会第 78 回年次学術講演会, VI-113, 2023.
 - 38) 藤田真司, 石田 仁, 前田 智之, 森屋 陽一: 覆工コンクリート初期ひび割れ点検への自律飛行ドローンの適用, 土木情報学シンポジウム講演集, Vol.4, pp.145-148, 2019.
 - 39) Sawada, R., Hirata, K.: Mapping and localization for autonomous ship using LiDAR SLAM on the sea, *Journal of Marine Science and Technology*, Vol.28, pp.410-421, 2023.
 - 40) Zhou, Y., Zhixiong, Y., Zhuang, M.: UAV Based In-door Localization and Objection Detection, *Front. Neuro-robot*, Vol.16, 2022.
 - 41) Grieves, M.: DIKW as a General and Digital Twin Action Framework: Data, Information, Knowledge, and Wisdom, *Knowledge*, 4(2), pp.120-140, MDPI, 2024.
 - 42) 国土技術政策総合研究所: データ交換を目的としたパラメトリックモデルの考え方 (素案), pp.8-41, 2021
 - 43) 国土交通省: 施工履歴データを用いた出来形管理の監督・検査要領 (土工編) (案), p.6, 2021.
 - 44) 今井 龍一, 谷口 寿俊, 松浦 弦三郎: 舗装工事における建設機械の施工履歴の出来形管理への適用性の評価, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), 土木学会, Vol.73, No.2,

pp.I_416-I_423, 2017.

- 45) 松浦 弦三郎, 今井 龍一, 谷口 寿俊: 舗装工事における建設機械の施工履歴を用いた 3 次元モデルの生成手法の精度検証, 土木情報学シンポジウム講演集, 土木学会, Vol.44, pp.149-152, 2019.
- 46) 国土交通省: TS・GNSS を用いた盛土の締固め管理要領, pp.30-35, 2020.
- 47) 国土交通省: TS・GNSS を用いた盛土の締固め管理の監督・検査要領, pp.13-17, 2021.
- 48) Khronos Group: WebGL, <https://www.khronos.org/webgl/>, accessed 2014.10.27
- 49) 石田 仁, 矢吹 信喜: WebGL の土木構造物の維持管理への応用, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol.71, No.2, pp.II_58-II_65, 2015.
- 50) Unity Technologies: Unity, <https://unity.com/>, accessed 2020.5.1
- 51) 国土交通省, 「地上型レーザースキャナーを用いた出来形管理の監督・検査要領 (土工編) (案)」, 令和 4 年 3 月 (入手 2023.3.27)
- 52) 榎 修一, 白根 一登, 正木 良三: 物流支援ロボットの地図とその応用, 日本ロボット学会誌, Vol.33, No.10, pp.732-737, 2015.
- 53) S. Thrun, W. Burgard, and D. Fox: Probabilistic Robotics, MIT Press, 2005.
- 54) 榎 修一, 松本 高斉, 正木 良三: 位置同定コンポーネントの開発と精度評価, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 2013 巻, 1P1-I04, 2013.
- 55) 翟 思敏, 大森 禎敏, 石田 仁, 野村 貴律: 複数の分析技術を組合せた切羽評価システムの開発について, トンネル工学報告集, 第 30 巻, I-17, pp.20-1-20-8, 2020.
- 56) Raza, H., Park, S., Lee, S. S., Tanoli, W. A., Seo, J. W.: 3D Earthwork BIM Design Process for a Road Project, *Journal of KIBIM*, Vol.7, No.2, pp8-15, 2017.
- 57) Raza, H., Tanoli, W. A., Lee, S. S., Seo, J. W.: Flexible Earthwork BIM Module Framework for Road Project, *Proceeding of the 34th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*, Taipei, Taiwan, pp.410-415, 2017.
- 58) Otsuki, T., Morikawa, H., Shiiba, Y., Ogata, S., and Moteki, M.: Research on standardization of construction site time-series change information as learning data for automatic generation of work plan of construction machinery in earthworks, *Proceeding of the 37th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*, Kitakyushu, Japan, pp.1053-1060, 2020.
- 59) Zijian, Y., Ying, Y., Chengping, Z., Zhiming, Z., Wei, L., Xuejie, W., Lei, W., Libin, W.: A digital twin approach for tunnel construction safety early warning and management, *Computers in Industry*, Vol.144, 2023.
- 60) Yuhong, Z., Naiqiang, W., Zhansheng, L.: An Established Theory of Digital Twin Model for Tunnel Construction Safety Assessment, *Applied Sciences*, Vol.12, Issue 23, 2022.