

(別紙2)

建設技術研究開発費補助金総合研究報告書

1. 研究課題名 次世代無人化施工システムの開発

2. 研究期間 平成24年度～平成26年度

3. 代表者及び研究代表者、共同研究者

代表者	宮崎 裕道	大成建設(株)技術センター土木技術開発部
研究代表者		
共同研究者	松本三千緒	
	近藤 高弘	
	江田 正敏	
	青木 浩章	
	片山 三郎	
栗原 庸聡		

4. 補助金交付総額 34,680,000 円

5. 研究・技術開発の目的

5.1 無人化施工の概要

無人化施工は、ラジコンで建設機械を操作する無線操縦システムと、オペレーターが建設機械を操作して作業するのに必要な現場周辺の画像を伝送する画像伝送システムの2つを組み合わせ、安全な場所から遠隔操作を行う事である。図-5.1.1 に無人化施工のイメージ図を示す。1994年の雲仙普賢岳の噴火災害復旧工事では、どちらのシステムも確立された技術ではなかったため、雲仙普賢岳の復旧と共に様々な技術を考案し、問題を解決しながら、無人化施工技術として確立してきた。無人化施工では、モニターで建設機械の作業状況の映像を見ながら遠隔操作を行うため、オペレーターは現場周りの微妙な状況を直接五感で感じながら操作する事が出来ない。したがって、オペレーターの技量によって作業の出来が大きく異なることもあるため、緊急な現場や、複雑な操作を必要とする状況には対応が困難といった問題もある。



図-5.1.1 無人化施工イメージ図

5.2 無人化施工の歴史

当社初の無人化施工である雲仙普賢岳噴火災害復旧工事に適用できた機械は、複雑で大型化した制御装置を搭載できる大型機械が主であった。油圧ショベルでいえば1.0m³~4.0m³クラスといった大型機種であり、雲仙普賢岳噴火災害復旧工事で使用していない時は、遠隔無線装置を取外して通常の有人施工機械として使用することが定番となっていた(図-5.2.1)。また、当時の試験フィールド制度による施工条件に、「100m以上の遠隔操作」が含まれていたため、遠く離れた場所から現場の状況を見るための画像設備が必要となった。これまでは、目視できる範囲での遠隔操作が主流であったため、現場の情報をどのように工夫して取得するか、またその情報をどうやって伝送するかが課題となった。施工現場の画像情報の取得方法として以下のカメラ画像を検討した。

- 1.現場全体を見渡せる位置に固定して使う「固定カメラ」
- 2.移動用機械にカメラを搭載して機械の近くに移動して撮影する「移動カメラ」
- 3.建設機械の運転席に搭載して、オペレーターと同じ目線で見ることができる「車載カメラ」

これらのカメラ画像信号伝送用として旧電波法での微弱無線(現在は電波法が改訂され使用できない)を使用して、オペレーターがいる遠隔操作室まで画像伝送した。旧微弱無線は、免許申請の必要が無く無指向性であったため、任意の場所に移動してもアンテナの向きを変えずに済むため、作業する重機の搭載カメラ画像として使い勝手が良いものであった。しかし、画像伝送範囲は重機の無線操縦範囲と同程度であった。なお、遠隔操作室は、当時の雲仙普賢岳が未だ土石流等の自然災害等の懸念があったため、非常時に安全な場所へ迅速に避難できるように、車両の荷台等に操作室を積載する「移動式操作室」という仕様が一般的であった。当時、作業に従事したオペレーターは全員経験年数10年以上のベテランであったが、モニタを見ながら遠隔操作をする事に試行錯誤し、無線機等も電波の混信・無線機等の振動破損等の様々なトラブルを克服して試験フィールド工事を成功させている。これら雲仙普賢岳の試験フィールド施工において行った「遠隔操作式機械を、移動式操作室から固定・移動・車載カメラで支援しながら操縦する」という形は、現在に至るまで大きく変わることなく無人化施工の基本形となっている。(図-5.2.2)



図-5.2.1 雲仙普賢岳無人化施工



図-5.2.2 移動操作室

5.3 無人化施工機械の種類と現存台数

表-5.3.1 に示す様に、無人化施工機械には、カメラ車、クローラダンプ、振動ローラ、ブルドーザ、油圧ショベルなどがある。その中でも、カメラ車は有人施工では必要ないが、無人化施工では作業状況をオペレーターに伝える重要な役割を果たす。また、図-5.3.1 無人化施工の割合としては油圧ショベルの台数が一番多い結果となった。

表-5.3.1 無人化施工の種類と現存台数

機種	台数
カメラ車	11
クローラダンプ	24
振動ローラ	3
ブルドーザ	12
油圧ショベル	59
その他	4

2012.9.21 現在

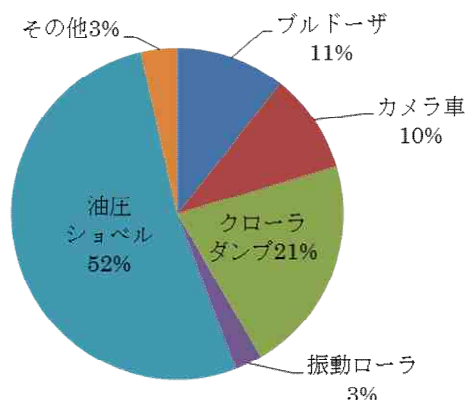


図-5.3.1 無人化施工機械の割合

5.4 無人化施工の施工例

当社の無人化施工の実績を表-5.4.1 に示す。雲仙普賢岳噴火災害復旧工事を機に様々な施工を行っている。

表-5.4.1 当社における無人化施工の実績

	工事件名	発注者
1	雲仙普賢岳水無除石工無人化施工試験(その5)工事	建設省九州地方建設局
2	水無川1号砂防ダムに関する試験工事	砂防・越すべり技術センター
3	水無川1号ダム補修工事	建設省九州地方建設局
4	水無川1号砂防ダム補修工事二期建設工事	建設省九州地方建設局
5	水無川1号砂防ダム補修工事三期建設工事	建設省九州地方建設局
6	水無川2号砂防ダム上流除石工事	建設省九州地方建設局
7	水無川上流除石工事	建設省九州地方建設局
8	板谷川決壊箇所緊急砂防工事	北海道室蘭土木現業所
9	西山川決壊対策工事施工計画	北海道室蘭土木現業所
10	西山川無人化施工実行調査	北海道室蘭土木現業所
11	西山川衛生通河放流設備工事	北海道室蘭土木現業所
12	西山川災害復旧工事(応急)	北海道室蘭土木現業所
13	板谷川決壊箇所緊急砂防工事その2	北海道室蘭土木現業所
14	西山川災害復旧工事(応急)その2	北海道室蘭土木現業所
15	西山川砂防工事	北海道室蘭土木現業所
16	西山川砂防工事(その2)	北海道室蘭土木現業所
17	西山川砂防工事(その3)	北海道室蘭土木現業所
18	赤松谷川3号砂防工事	国土交通省九州地方整備局
19	水無川(赤松谷1工区)地区水山地域総合治山工事	長崎県島原振興局
20	赤松谷川7号砂防工事	国土交通省九州地方整備局
21	湯大隈除石工事	鹿児島県大隈地域振興局

5.5 本件研究課題の目的

無人化施工は、雲仙普賢岳等の災害復旧工事にて様々な構造施設物を展開してゆくに従い新たな施工機械の開発や、ICT 機器の普及もあって施工技術が急速に発展している。発展の年代と経過・特徴は下記の通りである。

第1世代・・・～1990年（直接操作方式）・・・目視による遠隔操作

第2世代・・・～2000年（モニター操作方式）：カメラ映像を用いた遠隔操作

第3世代・・・～2006年（情報化施工方式）：GPSやTSによる測位技術と設計データを利用したソフトウェア支援による遠隔操作

第4世代・・・～現在（ネットワーク型遠隔操作方式）：情報化施工に対応した通信方式を導入し、通信範囲や伝送情報が拡張した現在主流となっている無人化施工

近年の無人化施工は第4世代のネットワーク型遠隔操作方式として無線LAN通信システムが適用されている。最近の雲仙普賢岳復旧災害工事においては、技術提案として「特定小電力無線の干渉回避」を課題にあげており、第4世代以前に遠隔操作の屋台骨を支えた特定小電力無線に代わって、無線LAN通信システムを提案し採用されるケースが増えている。しかしながら、この無線LAN通信システムでは1波で複数の重機械をリモートコントロールするため、常時安定した通信が必要となり、通信の途切れや通信装置がトラブルを起こすと、現場全体に波及してしまうという大きな欠点も有する。したがって、「電波干渉の回避」という課題に対しては目標を達成していると言えるが、現在のところは無人化施工システムとして磐石であるとは言い難いシステムである。

また、近年の無人化施工の問題として技術継承が挙げられる。無人化施工技術は雲仙普賢岳で発展を続けているが、全国的に見ても雲仙普賢岳以外で無人化施工の要求が出る事は稀である。さらに、雲仙普賢岳でも被災した当時に比べて復旧工事が進んだ事も有って、工事の数や規模が年々縮小しており、中には半年以下のたったの数ヶ月程度という小規模工事も珍しくは無い。そういった中で技術継承を行うという事は、無人化施工の目的である「非常時に危険作業を安全かつ即効性を以て行う」という最も重要な事が危ぶまれる可能性があることや、ミス・ロスの発生に伴う経済的な観点から見ても非常に難しい。しかし、年々経験者が減っているのが現状であり、これは施工を請け負った元請側にも実工事を行う専門工事会社にも言えることである。従来無人化施工におけるシステムイメージを図5.5.1に示す。

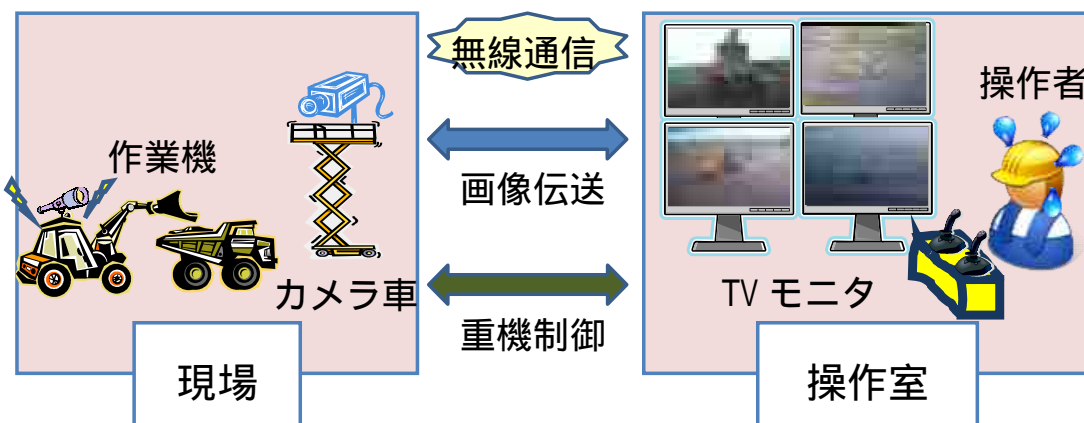


図-5.5.1 従来無人化施工システムイメージ図

そこで、これらの現在抱える問題の解決のために、下記のような概念の次世代（第X世代）の無人化施工技術の開発を研究の目的とする。

第X世代・・・2015年頃～（半自律遠隔操作方式）：従来のように常時相互通信を行わず、ある一定規模の作業を1ユニット化して「作業開始」を命令すれば、1ユニットの作業をオペレーターが常時遠隔操作をしなくても、機械が自ら判断して自律的に作業を進めることのできる建設機械を用いた無人化施工

この方法によれば、通信が必要となるのは「命令」を与える時のみとなり、常時通信を行う必要が無くなるので、電波干渉の問題は第4世代以上に発生しにくくなる。また、機械が自ら判断して自律的に作業を進めるため、熟練操作者が必要とされた難易度の高い作業を、非熟練操作者でも実現することができるようになる。これが、次世代（第X世代）の無人化施工である。図-5.5.2に次世代無人化施工システムのイメージ図を示す。

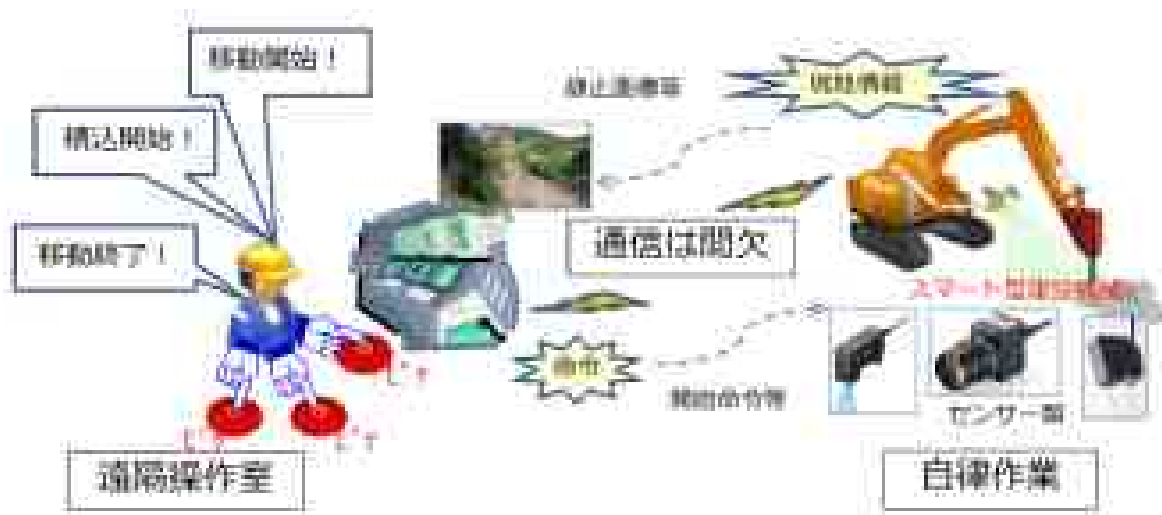


図-5.2.2 次世代無人化施工システムイメージ図

6. 研究・技術開発の内容と成果

6.1 研究開発の概要

今回、自律型建設機械として二つの作業の自律化を目指した。

(1) 振動ローラによる自律締固め作業

1つ目が無人化施工適用の砂防ダム工事に良く使用される11t級振動ローラによる締固め作業である。締固め作業は踏み残しを無くするため一定長の重複幅を持たせて施工する。高い精度で走行ができれば重複幅を減らせるので施工効率向上につながる事が期待できる。無人化施工においては一般施工と比べ操作が難しいことから無人化施工の重複幅は大きいのが一般的である。この様に無人化施工ならではの難しい点が挙げられるためそういった作業のオペレーターの負担軽減を考え選定した。図-6.1.1に自律型振動ローラの施工イメージを示す。

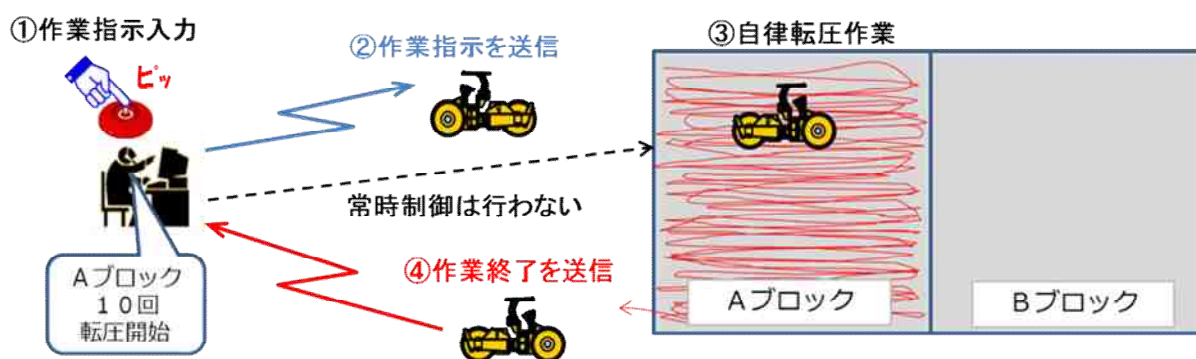


図-6.1.1 自律型振動ローラの施工イメージ

(2) ブレーカー搭載バックホウによる自律割岩作業

2 つ目は砂防工事等で大型の岩石をダンプトラックに積み込み可能な大きさにするための割岩作業とした。この作業に使われるベースマシンの油圧ショベルはアタッチメントを交換するだけで様々な作業ができる最も汎用的な建設機械である。数あるアタッチメントの中、無人化施工で最も使用頻度が高く、操作の正確性が要求されるのはジャイアントブレーカーであり、この高い正確性をカメラ映像で操作することに難を持っているオペレーターは多い。図-6.1.2 にイメージ図を示す。

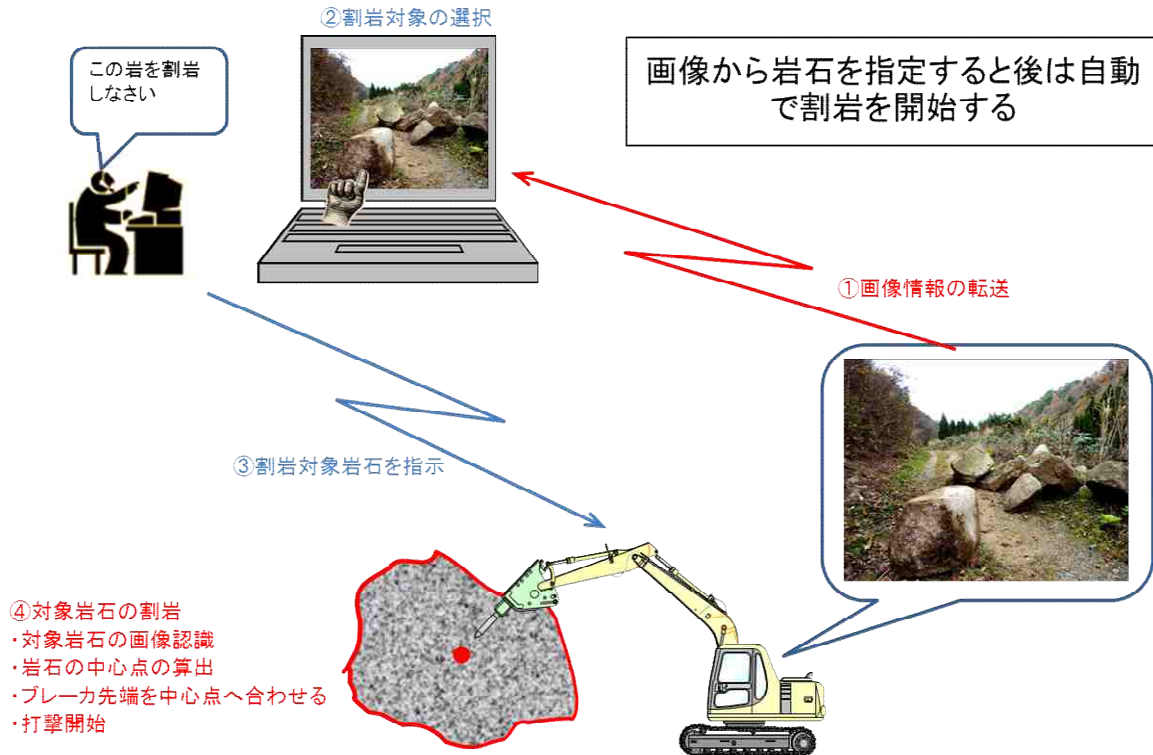


図-6.1.2 自律型ブレーカー搭載バックホウの施工イメージ

(3) 開発フロー

自律型建設機械を本研究開発では下記フローにより開発をおこなった。開発フローのポイントは第一段階で模型等を用いた室内検証を実施し、自律制御アルゴリズムの妥当性を検証した後に実機ベースによる実証実験をおこなった。図-6.1.3 に開発フロー図を示す。

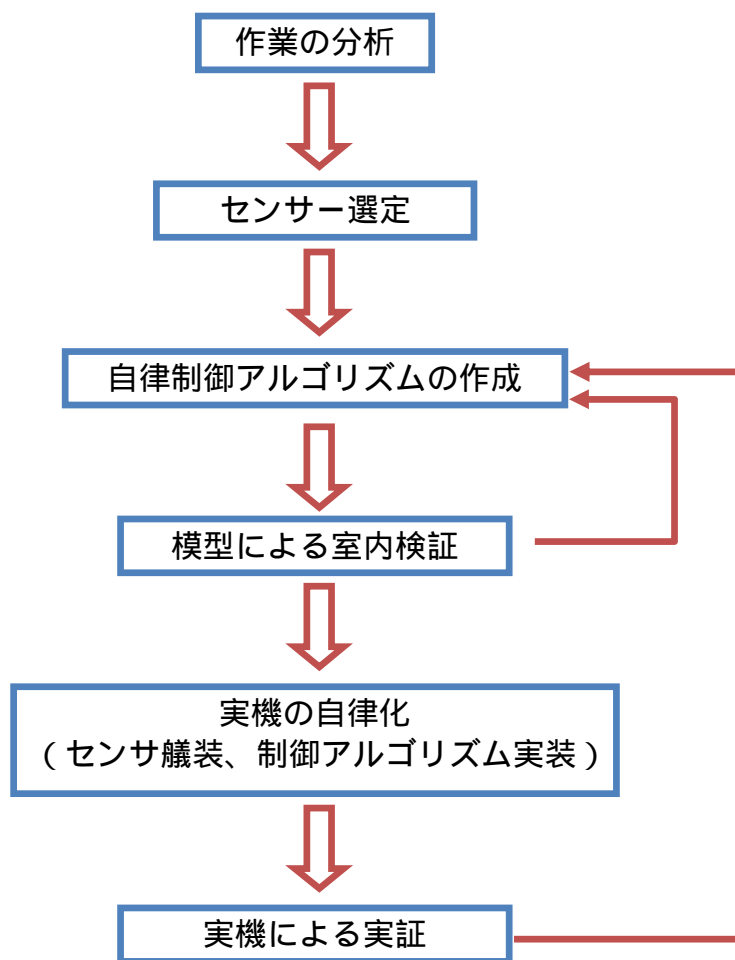


図-6.1.3 次世代無人化施工システム開発フロー図

6.2 自律型振動ローラの開発

6.2.1 機種調査

振動ローラとは機械の重量に加えてドラムに装備している起振器により鋼製ドラムを振動させ起振力を付加することで締固め効果を増幅させることができる形式の締固め機械である。図-6.2.1 に振動ローラの種類を示す。



ハンドガイド式

タンデム型

コンバインド型

図-6.2.1 振動ローラの種類

- ・ハンドガイド式：
前輪、後輪とも鉄輪で、棒状のハンドルを歩きながら操作する。ステアリング角度は、左右各 15° で小回りがきき、あらゆる現場で機動性にすぐれた作業が行えるため、小規模な締固め作業や隅角部の仕上げ転圧に適している。
- ・タンデム型：
鉄輪を前後に配置した振動ローラ。前後輪とも振動するため、少ない転圧回数で高い締固め密度が得られ、作業効率がきわめて高い。アスファルト舗装の表面仕上げに適した形であるが、最近では土工事やダムへの盛り立てでも多く使用されている。
- ・コンバインド型：
片輪が鉄輪でもう一方がタイヤで構成される振動ローラである。鉄輪とタイヤの両方を装備しているため一次転圧から仕上げ転圧まで幅広い用途として使用できる。

この中でも無人化施工で採用されている機種は締固め効率の高いタンデム型である。そのため本研究においてはこのタンデム型をターゲットとして採用しこの形式の振動ローラの自律化を目標とした。

6.2.2 振動ローラの機械的構造

(1) 全体構造

振動ローラは、エンジン、動力伝達装置、車体・操向装置、起振装置などで構成されている。車体重量は、150kgの小型から19tの大型まであり、用途に応じて幅広い選択が可能である。また、ロールサイズ、ロール質量、フレーム質量、振動力、振動数などのバランスが最適状態に設計されており、振動力が締固め力としてきわめて効果的に作用する（図-6.2.2）。

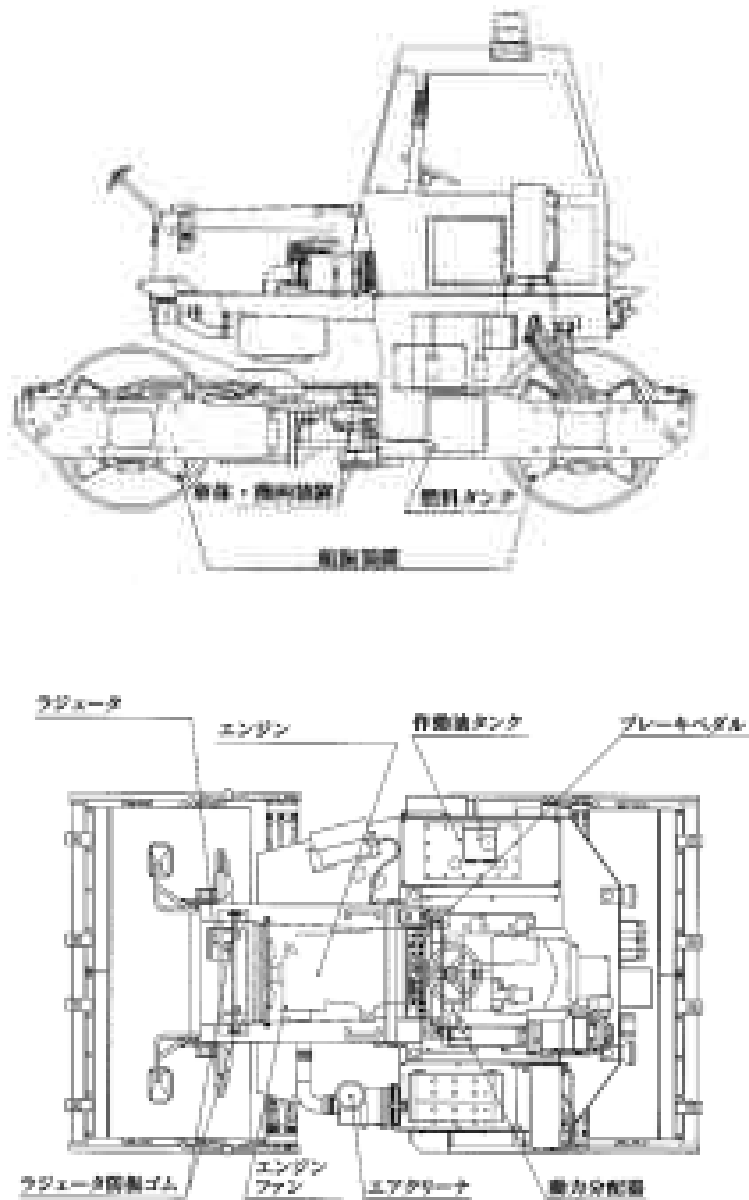


図-6.2.2 振動ローラ機械構造図

(2) 動力伝達装置

振動ローラに使用されている、油圧駆動式の一般的な動力伝達機構を図-6.2.3 に示す。HST(Hydro-Static-Transmission)とは可変容量型の油圧ポンプと油圧モータとを閉回路にて組み合わせた油圧駆動の走行方式である。油圧ポンプより送り出された作動油は油圧モータの出力軸を回し、ローラを駆動する(図-6.2.4)。

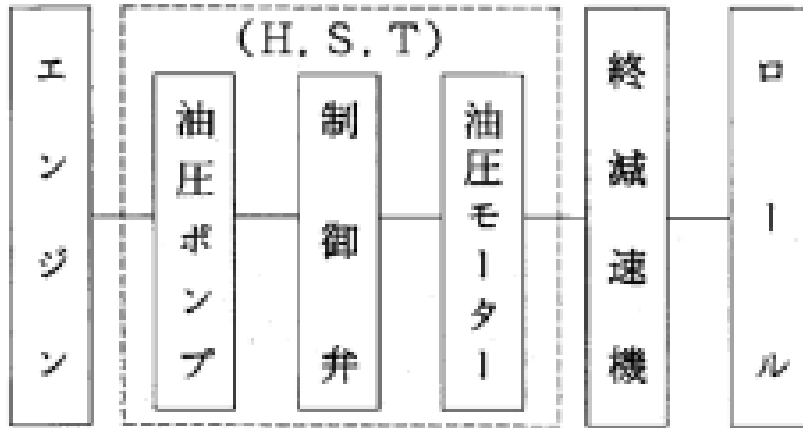


図-6.2.3 動力伝達系統図

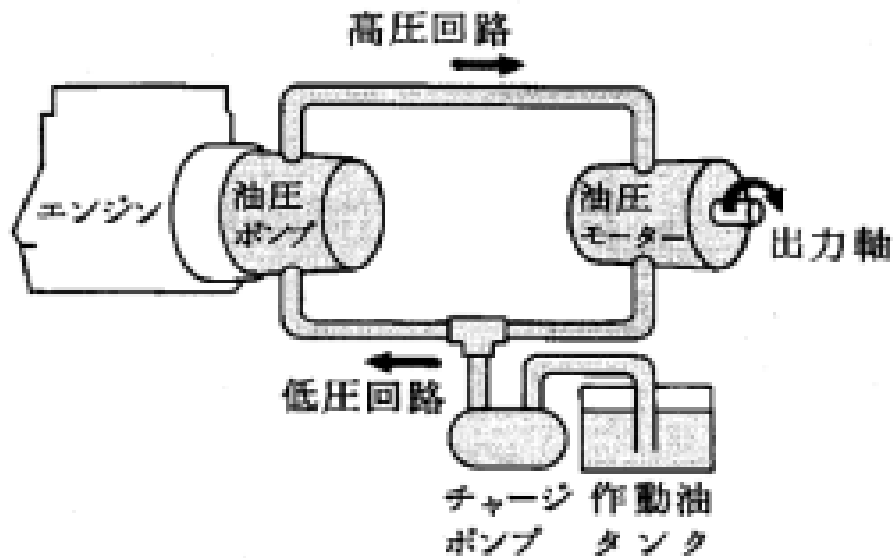


図-6.2.4 HST(Hydro-Static-Transmission)

【特徴】

- ・無段変速が可能で、車速範囲が広い。
- ・動力の断続、加速、前後進の切換、変速、制動が一本のレバーで連続的かつスムーズに行うことができる。
- ・エンジンプレーキの効きが良い。

(3) 車体・操向装置

タンデム型の振動ローラのステアリング機構は、一般的にアーティキュレート型である。車体の前と後がセンターピンで連結されており、このピンで屈折して操向する。図-6.2.5 にアーティキュレート構造を示す。

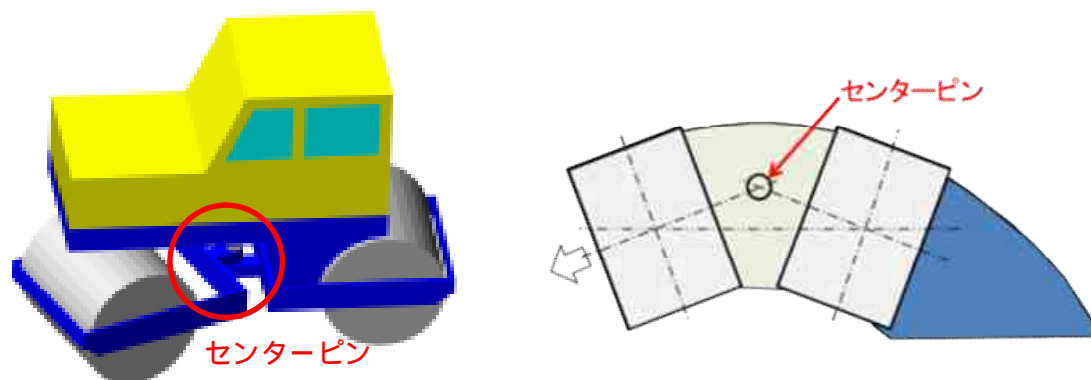


図-6.2.5 アーティキュレート構造

【特徴】

- ・ 車体中央が屈折するため走行性が良い。
- ・ 中央が屈曲するため最小旋回半径小さく小回りが利く。
- ・ 前後輪は同一軌跡上を走行する。

(4) 起振装置

振動ローラは、前輪と後輪に起振装置が装着されている。起振装置の偏心シャフトを回転させることにより遠心力が働き振動が発生する。締固めの際に作用する力は、遠心力とローラ質量およびロールにかかる機体の質量を総合したものになり、材料の固有振動に近い振動を与えると効果的な締固めを行うことができる（図-6.2.6 および図-6.2.7）

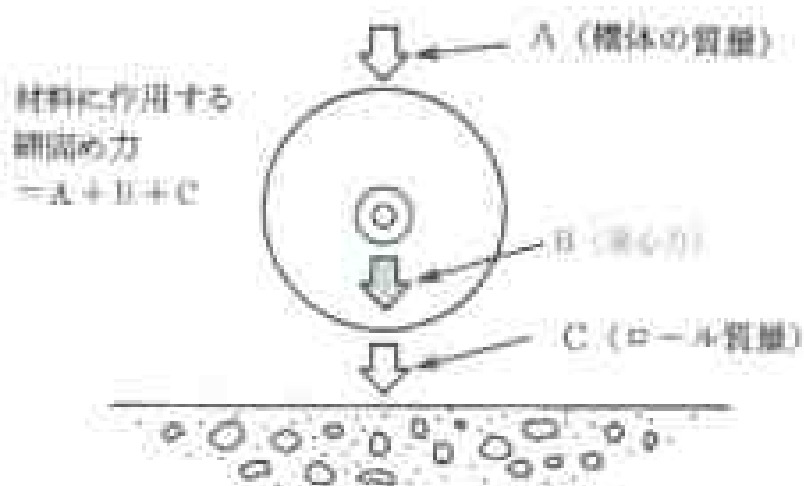


図-6.2.6 振動ローラの締固め力



図-6.2.7 起振部

(5) 使用する振動ローラ

機械仕様

本研究開発においてベース機械として下記の振動ローラを使用した。本機は雲仙普賢岳で実際に使用されていた振動ローラで、遠隔制御仕様となっている。このため、操作系が電子制御仕様となっているため自律制御と相性が良い。また、この機種は無人化施工に採用されることが多い。表-6.2.1 に機械仕様、図-6.2.8 に機械の全景を示す。

～機械仕様～

- ・メーカー：酒井重工業
- ・型式：SD451（遠隔操作仕様）

表-6.2.1 機械仕様

型 式		SD451			機 種	振 動	振 動 数	振 動 幅	振 動 重	
重 量	運 搬 重 量	11,000 kg						上 昇	シ ン ク	2,800 rpm
	自動配分	前 輪	5,350 kg		配 重 力	17,000 kg	23,000 kg			
		後 輪	5,750 kg			空 転 能 力	16 度			
寸 法	全 全 高	4,020 mm			シ ン ク		シ ン ク	2,100 mm	踏 踏 面 積	2,100 mm
	全 全 幅	2,270 mm				最 小 回 転 半 徑			5.0 m	
	全 全 深	2,600 mm							型 式	イナハ「BB-8001T」 ディーゼルエンジン
	軸 間 距	2,100 mm				総 行 程 容 積				5,404 cc
法 定 容 積	前 輪	D-4 (型×型) 1,000 mm × 2,100 mm			定 額 馬 力		108 PS / 2,200 rpm			
		D-4 (型×型) 1,000 mm × 2,100 mm				最 大 ト ル ク	57 kgm / 1,800 rpm			
性 能	走行速度 (0級減速等時)	1速	2速	3速	燃 料 タ ン ク		100 l			
		0-1 km/h	0-2 km/h	0-4 km/h		作 業 油 タ ン ク	50 l			



図-6.2.8 機械全景

振動ローラの操作系

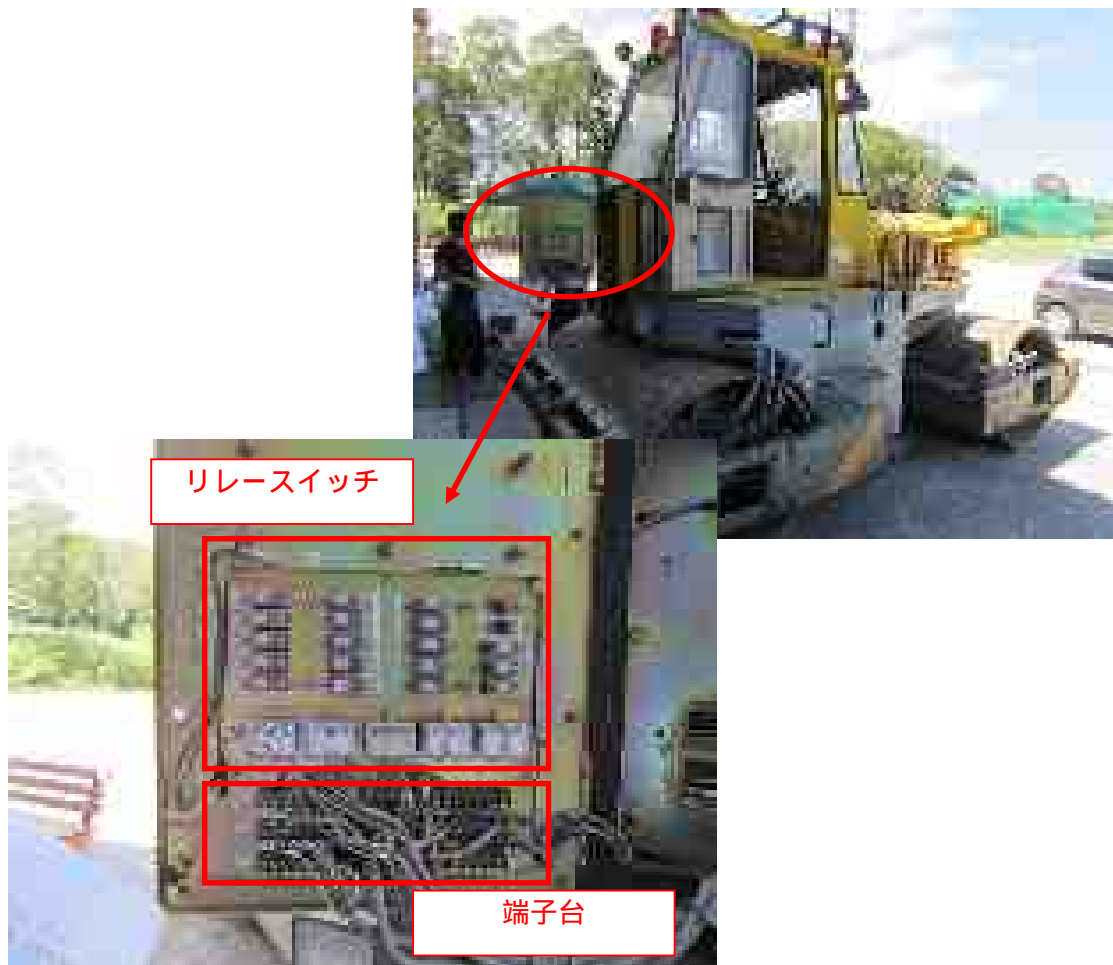
図-6.2.9 に SD451 の運転席内の操作系を示す。この内遠隔操作対応されている操作は下記の項目である。自律走行に必要な走行や振動、エンジンの起動停止等の一連の動作は制御可能となっている。また、走行速度を可変する前後進レバーは比例電磁弁を採用しており走行速度の微調整が可能となっている。その他の操作に関してはリレースイッチによる単純な ON-OFF 制御であった。図-6.2.10 に遠隔操作系統を示す。

～ 遠隔操作対応項目 ～

<p>1) 走行系</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 前後進 ・ ステアリング ・ 変速 (1 速、2 速) 	<p>2) 振動系</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 振動強度 (低、高) ・ 前輪振動 (入、切) ・ 後輪振動 (入、切) 	<p>3) その他</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 起動/停止 ・ スロットル (3 段階) ・ エンジン (始動、予熱) ・ ブレーキ (解除、制動)
---	--	---



図-6.2.9 SD451 運転席内操作パネル



予熱エンジン始動				リレー型式 02R-1-SDN
RY 10 前振入	RY 15 エンジン始動	RY 20 ホーン	予備スペース	
振動高				
RY 9 エンジン停止・低	RY 14 ブレーキ解除	RY 19 起動	予備スペース	
			予熱	
RY 8 エンジン高	RY 13 振動高	RY 18 前進	RY 23 前振入	
	予熱エンジン始動		後	
RY 7 ステアリング左	RY 12 後振入	RY 17 後進	RY 22	
	振動高			
RY 6 ステアリング右	RY 11 振動高	RY 16 予熱	RY 21 2速	

RY 1 ラジコン ON	RY 2 ラジコン ON	RY 3 ラジコン ON	RY 4 ラジコン ON	RY 5 ラジコン ON	リレー型式 LY4ND-2
-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	------------------

図-6.2.10 SD451 遠隔操作リレー

6.2.3 締固め作業分析

(1) 締固め作業

締固め作業は機体の幅、機体重量、起振力などが対象土質に対して所定の密度を確保できる様に仕様を決定している。転圧仕様には走行速度や時間、無振動回数、有振動回数、施工重複幅などがある。転圧作業はこの条件に則って所定の範囲内を走行する。転圧作業時の走行の種類は以下の3種類である。図-6.2.11 に締固め作業における走行の種類を示す。

- 開始点に移動する進入路走行
- 本作業となる転圧路走行
- 隣の走行レーンに移動するための車線変更

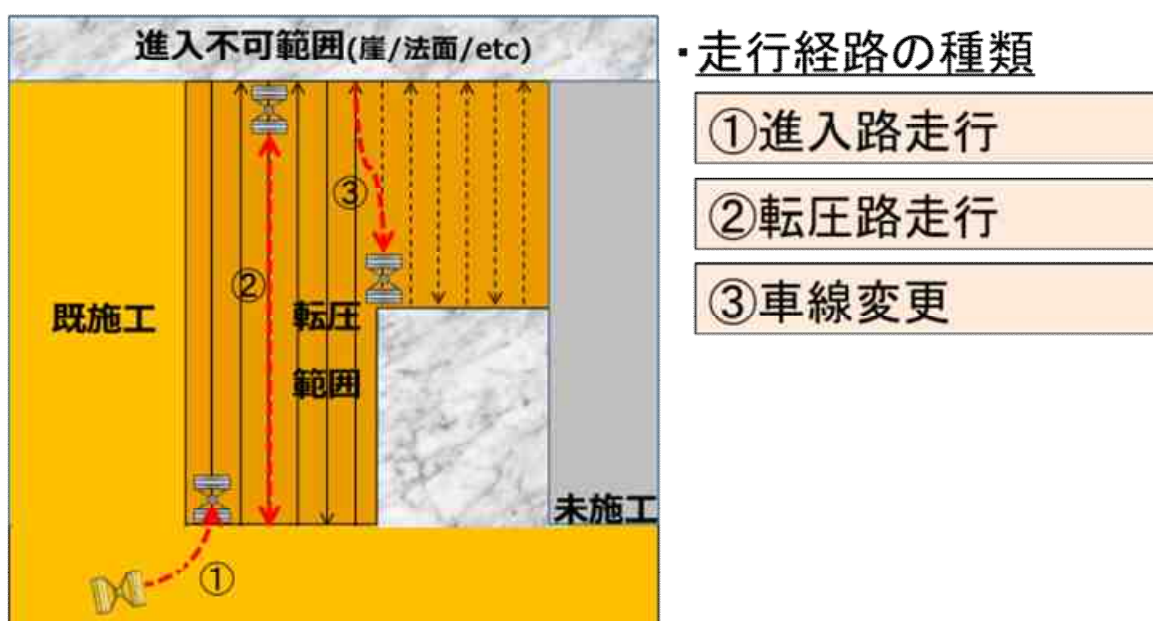


図-6.2.11 締固め作業における走行種類

(2) 無人化施工における締固め作業仕様

自律締固め作業において重要なことは所定の締固め範囲を精度良く走行させ従来無人化施工と同等以上の施工効率を実現することである。走行精度は施工重複幅に影響しており、一般施工においては通常 20cm 程度であり、有人運転と比較して運転の難しい無人化施工においては 50cm と規定されることが多い。図-6.2.12 に雲仙普賢岳赤松谷川 7 号床固工工事における締固め作業に関する仕様書を示す。

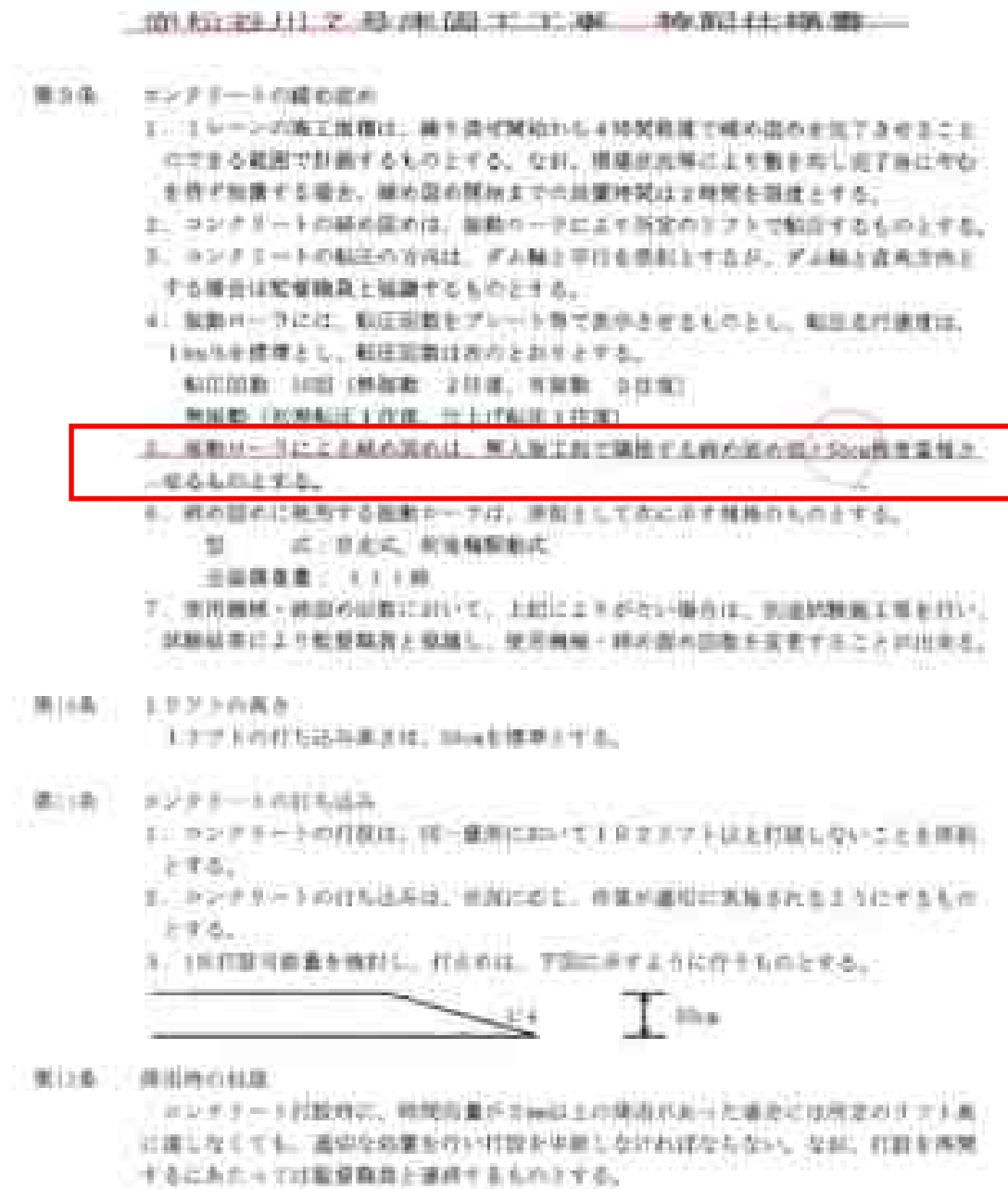


図 6.2.12 赤松谷川 7 号床固工工事 仕様書

6.2.4 搭載センサー

自律走行を支える技術の一つとしてセンサー技術がある。自律作業は人間の五感に代わるセンサーを建設機械に取付けることで機械の状態把握と周辺状況の把握をおこなう。このセンサーにより周辺状況と機械との間にある状況を的確に把握することができるようになる。

(1) センサー要求仕様

センサーの今回の要件に対して下記の通りの要求仕様とした。

～要求仕様～

- ・姿勢検出センサー：姿勢検出角度は $\pm 30^\circ$ 以上
- ・速度検出センサー：検出速度は1km/h以上
- ・ステア角度検出センサー：検出角度は $\pm 60^\circ$ （絶対角）以上
- ・前方探査センサー：検出範囲は前方および後方3m
- ・車載カメラ：設置条件として雲台無しでも可能なもの
- ・自己位置検出：測定距離として自動追尾が30m以上

また、センサーの選定において性能と同時に重要な仕様として耐環境性能がある。特に建設機械運転時の振動は大きくこの振動に耐えうるセンサー選びが重要となる。そのため事前に振動ローラに係る振動の調査を実施した(図-6.2.13)。その結果を図-6.2.14に示す。この調査では同機種振動ローラ(SD451)においてキャビン内に加速度計を設置して締固め作業時の振動加速度データを取得した。結果最大加速度は11～13G程度であった。本開発ではこの加速度を基準としてセンサー選定をおこないどうしてもこの要求を満たさないものに関しては個別に防振GELで振動対策を実施した。(図-6.2.15)



図-6.2.13 振動加速度実験状況

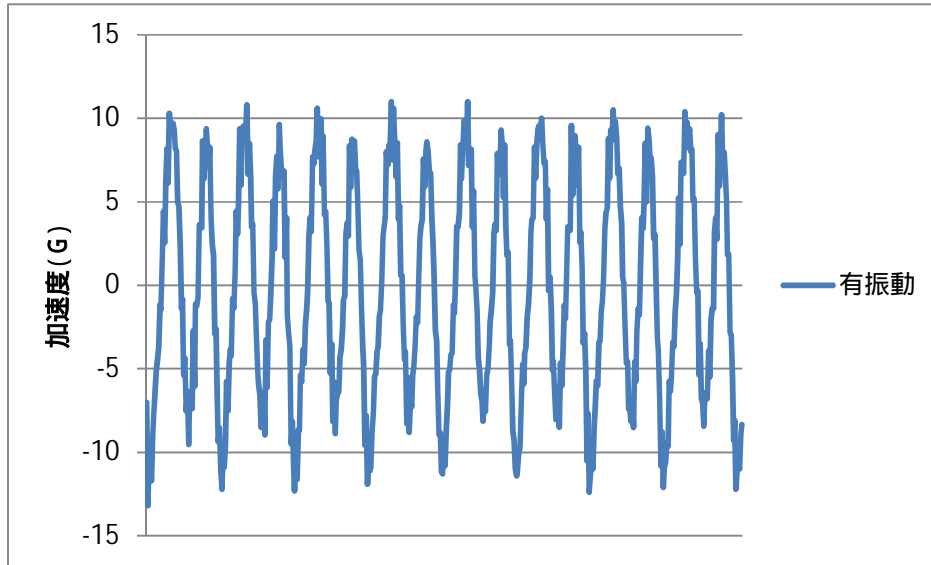


図-6.2.14 有振動作業時におけるキャビン内での振動加速度



図-6.2.15 センサーの振動対策

(2) 選定したセンサー

選定したセンサーを表-6.2.2、搭載状況を図-6.2.16 に示す。センサーは大きく 2 種類に分類され、機体自身の状態を把握するセンサーと周辺状況を把握するセンサーがある。

機体状態把握センサーとして

- ・ 機械の姿勢検出には 3 軸ジャイロセンサー（ロール角、ピッチ角、ヨー角）
- ・ 速度検出には回転センサー
- ・ ステアリング角度には変位センサー（ストロークセンサ）
- ・ 建設機械の自己位置検出には自動追尾型トータルステーション

周辺状況把握センサーとして

- ・ 前方探査センサーには 2D スキャナー
- ・ 車載カメラにはネットワーク型カメラを選定した。

表-6.2.2 搭載センサー一覧

分類	項目	適用センサ
機体状態	姿勢検出	MEMS3軸ジャイロ
	速度検出	回転センサ
	ステアリング角検出	変位センサ
	位置検出	自動追尾型トータルステーション
周辺状況	前方探査センサ	2 D スキャナ
	車載カメラ	ネットワーク型カメラ

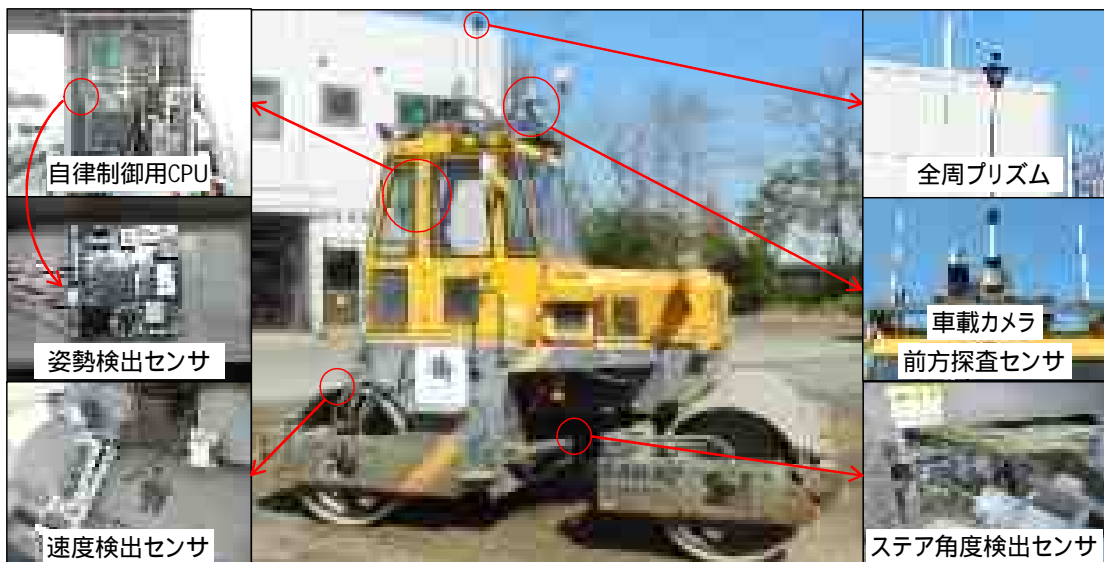


図-6.2.16 センサー搭載状況

3 軸ジャイロセンサー

ジャイロセンサーにより振動ローラの姿勢を図-6.2.17 の様に定義する。定義したジャイロセンサーはヨー角により建設機械の方向を検出し、ロール角とピッチ角により振動ローラの傾斜を検出している。また、ジャイロセンサーのヨー角は地球の自転によりドリフト現象（静止状態においても検出角度がある一定量ずれてくる現象）(図-6.2.18)が発生するため定期的に自動追尾型トータルステーションにより方向補正をおこない精度を確保した。

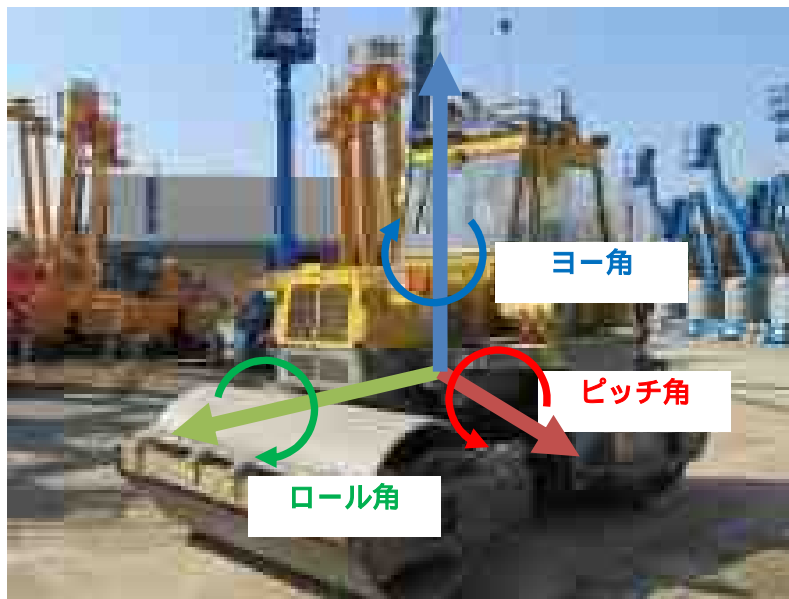


図-6.2.17 3軸ジャイロの定義

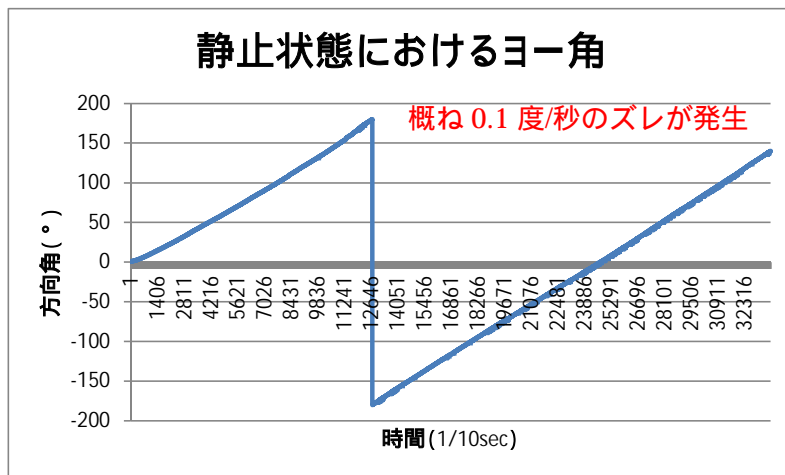


図-6.2.18 ジャイロドリフト現象

速度検出センサー

振動ローラの走行速度の検出に回転検出器を使用した。走行速度を検出するのに最も良いセンサーの設置場所は回転輪のセンター同軸上に設置するのが望ましいが、本機ではそれが困難であったため機械の回転輪に検出用のタイヤを押し当てそのタイヤの回転から間接的に検出した。図-6.2.19 に検出イメージ、図-6.2.20 に実際の取り付け状況を示す。またセンサーを直接、振動ローラの回転輪側に取付けると振動に耐えることができないのでフレキシブルシャフトを使いキャビン側の振動の減衰している位置にセンサーを取り付けた。

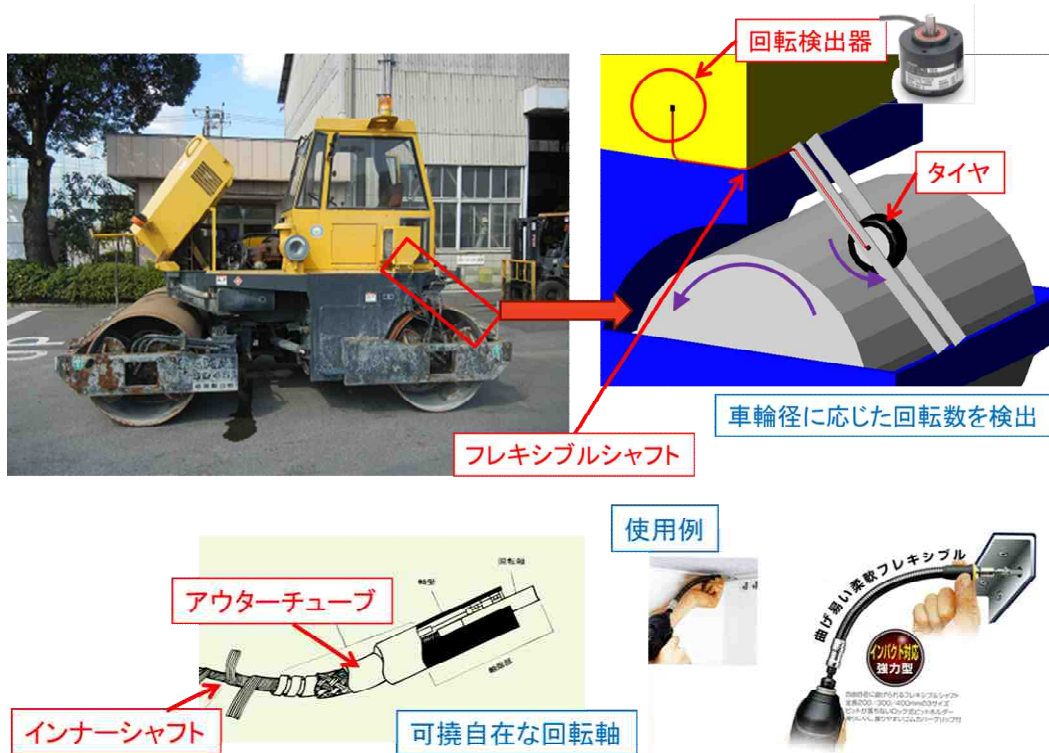


図-6.2.19 速度検出イメージ



図-6.2.20 速度検出センサー設置状況

ステアリング角検出センサー

振動ローラのステアリング操作は前後輪がピン結合されている左右の両側に油圧シリンダーが取り付けられておりこの油圧シリンダーによって行っている。そのため走行速度同様回転同心軸上にセンサーを設置することが望ましいがセンサー自体が地面に接近する位置となるため、間接的にこの油圧シリンダーの伸び量から回転角度に変換を行った。図-6.2.21にステアリング構造イメージ、図-6.2.22にセンサー設置状況を示す。

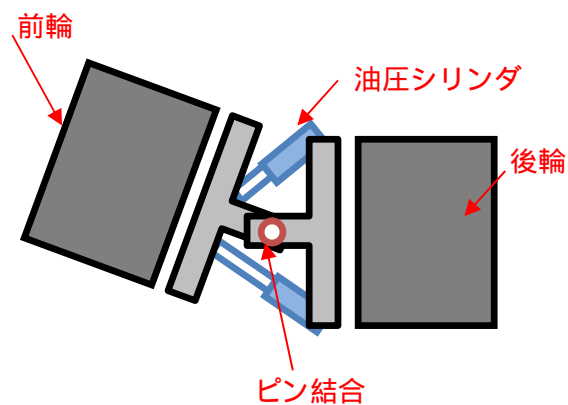


図-6.2.21 ステアリング構造イメージ

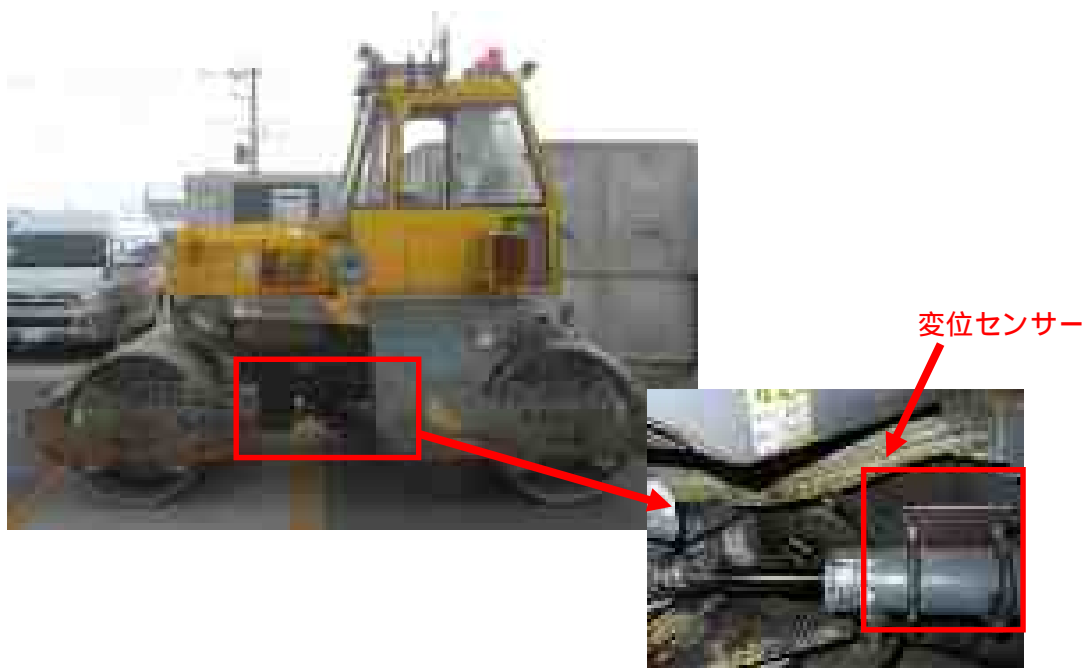


図-6.2.22 ステアリング角度検出センサー設置状況

ステアリング角度と油圧シリンダーとの関係式

油圧シリンダーの伸び量とステアリング角度の関係は図-6.2.23 の様に各変数を定義すると次式で与えられる。この式を用いた角度変換値とその時の実測値を比較したグラフを図-6.2.24 に示す。実測値と変換値はほぼ一致しており、精度上問題ないことを確認している。

～ステアリング角度 と油圧シリンダー長 L の関係式～

$$\theta = \pi - \beta - \gamma - a \times \cos \frac{a^2 + b^2 - L^2}{2ab}$$

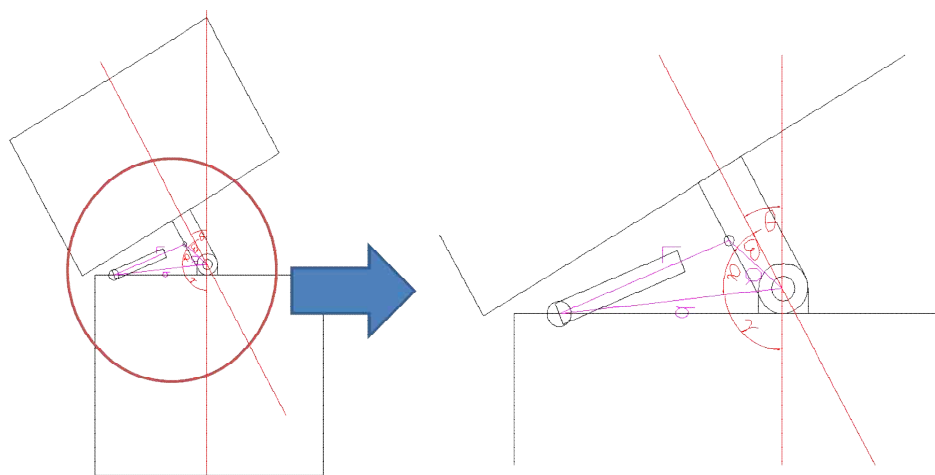


図-6.2.23 油圧シリンダーの伸びとステアリング角の関係

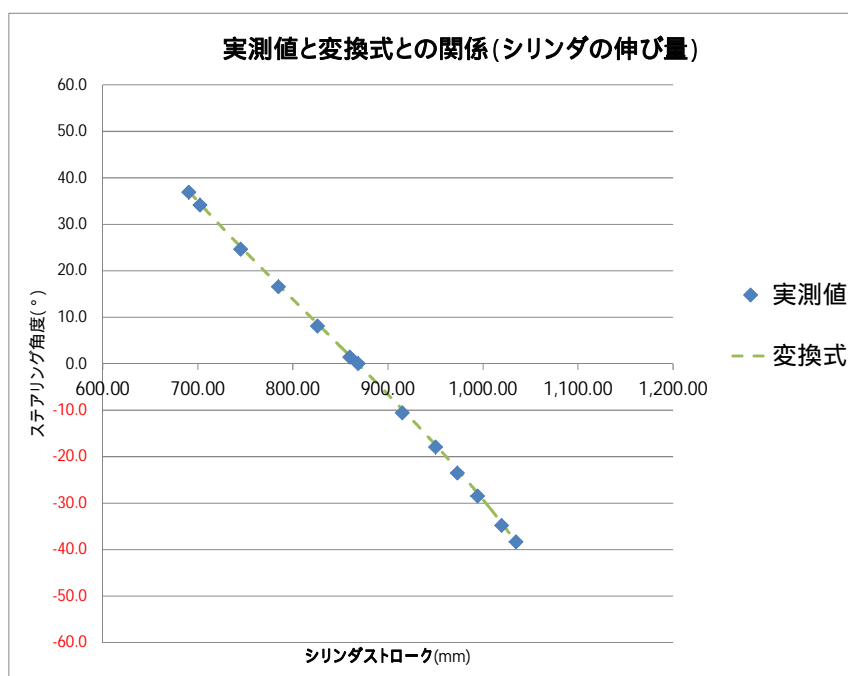


図-6.2.24 変換値と実測値との比較

6.2.5 自律制御システム

(1) 全体システム構成

システム構成を図-6.2.25 に示す。本システムは自動追尾型トータルステーション、振動ローラ内の自律制御用 CPU、ホスト PC で構成されており、機器間は Wi-Fi で通信を行う。ホスト PC では転圧回数や幅などの作業計画の入力を行う。また自動追尾型トータルステーションはジャイロ補正情報取得のため、常時測距を行い、ホスト PC を介して振動ローラ内の自律制御用 CPU に位置情報を転送している。一方、振動ローラでは自律制御用 CPU で、取得したセンサー情報をもとに周辺状況や機体姿勢の把握、「慣性航法」(後述)による自己位置推定をしており、このセンシングに基づき駆動部を制御して自律走行および締固め作業を行っている。



図-6.2.25 振動ローラの全体システム構成図

図-6.2.26 にホスト PC に表示される画面を示す。ホスト PC の表示画面では、振動ローラによる転圧回数における施工状況および振動ローラの機体情報を表示する。また、画面上のボタンにて、振動ローラに自律制御開始命令を送信することができる。



図-6.2.26 ホスト PC 画面

(2) 振動ローラ側システム構成

ホスト PC で入力した作業計画を基に振動ローラに搭載する車載 PC で機械を制御し自律締固め作業をおこなう。その車載側のシステム構成図を図-6.2.27、振動ローラ内に設置した制御ユニットを図-6.2.28 に示す。車載側のシステムは周辺・機械の状態を把握するセンサー情報とそのセンサー情報を基に振動ローラを動作させる駆動部の制御がある。センサー情報は 100msec の周期で常時、情報を更新して、目標値に達するまで駆動系を動作させるフィードバック制御をおこなっている。CPU 基盤は駆動系とセンサー系にそれぞれ個別に配置しておりそれぞれ独立した分散型のシステム構成とした。頭脳となる CUP は車載 CPU だけで、センサー CPU はセンサーデータを読み込むだけ、駆動部は車載 CPU から動作命令があるときにだけ動作させる。これによりシステムの系を単純化することができ軽くなる。そして動作が安定することが期待できる。

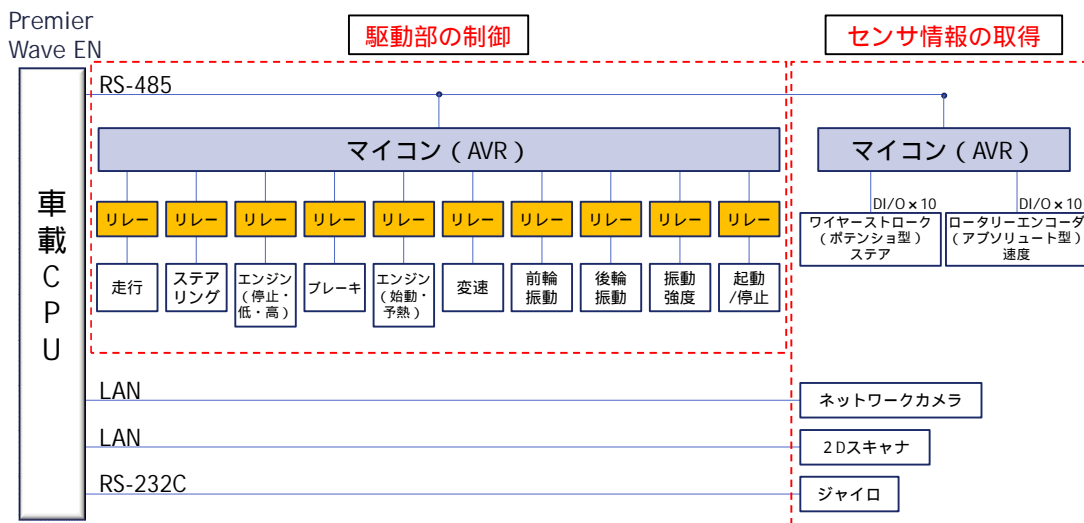


図-6.2.27 振動ローラ側システム構成図

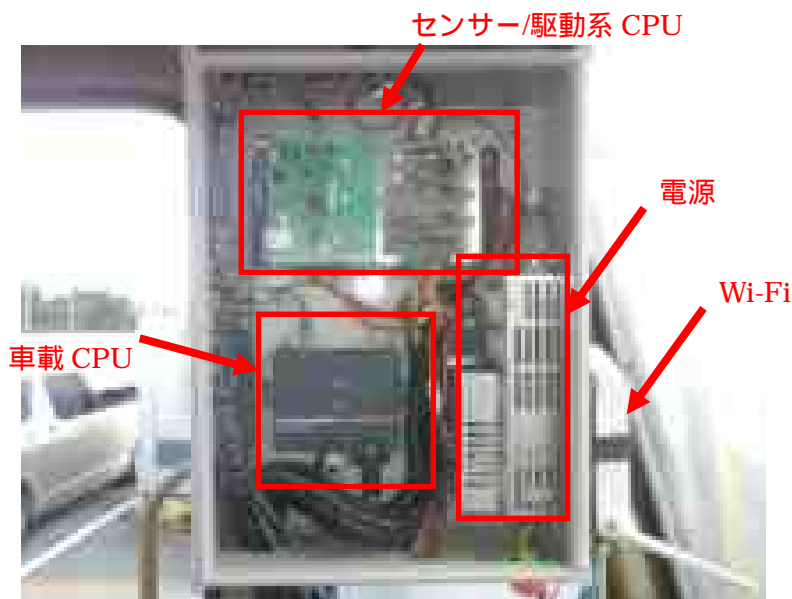


図-6.2.28 振動ローラ内制御ユニット

6.2.6 自律制御アルゴリズム

作業分析をした結果から考案した振動ローラを自律化するためのアルゴリズムを以下に記す。また、自律制御アルゴリズムのフローチャートを添付資料として最項に示す。

図-6.2.29 に、自律制御の全体フローを示す。自律制御アルゴリズムでは、作業の種類を判別し進入路走行、転圧路走行、車線変更、退出路走行を状況に応じて区別するアルゴリズムとした。また、障害物回避が存在した場合に、障害物に衝突しないアルゴリズムも追加した。ジャイロ補正では、ジャイロのドリフトを補正、目標点到達判定では、事前に計画した走行経路を通過したかどうかの判定、トレース走行では事前計画した走行経路をトレース走行するためステアリング角度などの演算を行っている。また、基本的な自律走行のための自己位置情報の考え方は慣性航法を基に算出している。

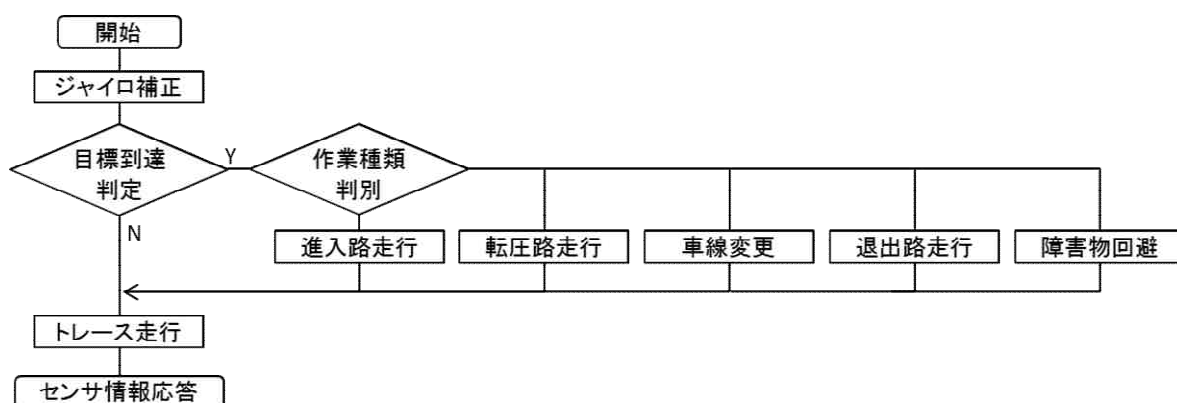


図-6.2.29 アルゴリズム全体フロー図

(1) 振動ローラの自己位置算出手法

精度良く走行させるためには計画線と自己位置との位置関係を把握することが重要である。土木施工では自己位置推定方法としてマシンガイダンス(MG)等の情報化施工において良く使用される GNSS や自動追尾型トータルステーションが用いられる。一方、自律制御においては最低でも 10~100msec 程度の更新レートが欲しいが、これらの機器はこの仕様に適さない。そこで本研究では機体の方向と走行速度から自己位置を推定する慣性航法を用いた。しかしこの手法は誤差累積型の位置計測であるため誤差が累積し、また方向角度を検出するジャイロセンサーは方位角が地球自転の影響でドリフトしていくなどの問題点がある。そのため、自動追尾型トータルステーションを補助的に使用し、お互いの手法の弱点を補完するような自己位置推定アルゴリズムとした。図-6.2.30 に慣性航法による自己位置算出方法、表-6.2.3 に自動追尾トータルステーションと慣性航法の比較、図-6.2.31 に本開発で採用した慣性航法と自動追尾トータルステーションを用いた自己位置推定手法概念を示す。

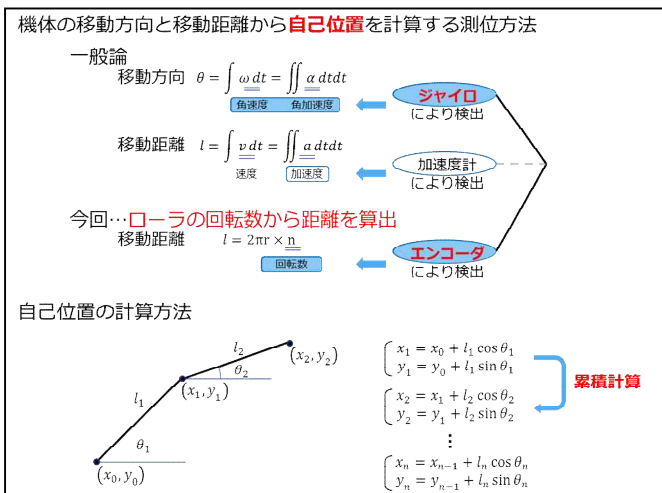


図-6.2.30 慣性航法による自己位置算出方法

表-6.2.2 自己位置算出手法の比較

	自動追尾トータルステーション	慣性航法
取得できる情報	三次元位置情報	三次元位置情報 方位情報 加速度および速度情報
情報の取得間隔	1~数Hz程度(間欠的)	リアルタイム(連続的)
座標	絶対座標	相対座標
誤差	累積されない	累積される
外部からの影響	障害物・天候等	影響なし(異常事態に対応可)

慣性航法の

- 〔メリット〕 : 機体の方位・位置が連続的にわかる
- 〔デメリット〕 : 誤差が累積される

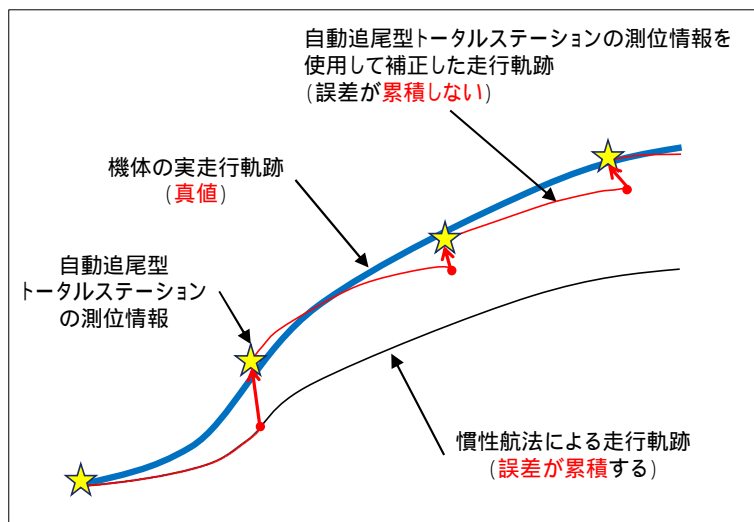


図-6.2.31 本開発での自己位置算出方法

(2) 進入路走行

振動ローラは、転圧エリア内を前後進して転圧を行うため、転圧路に進入した際にローラ
の方向線と転圧路が平行になることが望ましい。そのため、振動ローラの進入経路は、振動
ローラの方角線と転圧路に内接する円を用いて算出する方法とした(図-6.2.32)。これによ
り、現在地から振動ローラは、ローラの方角線と内接円が接する点まで前進し内接円上を通
過するだけで、ローラの方角線と転圧路が平行な状態で転圧路に進入することが可能となる。

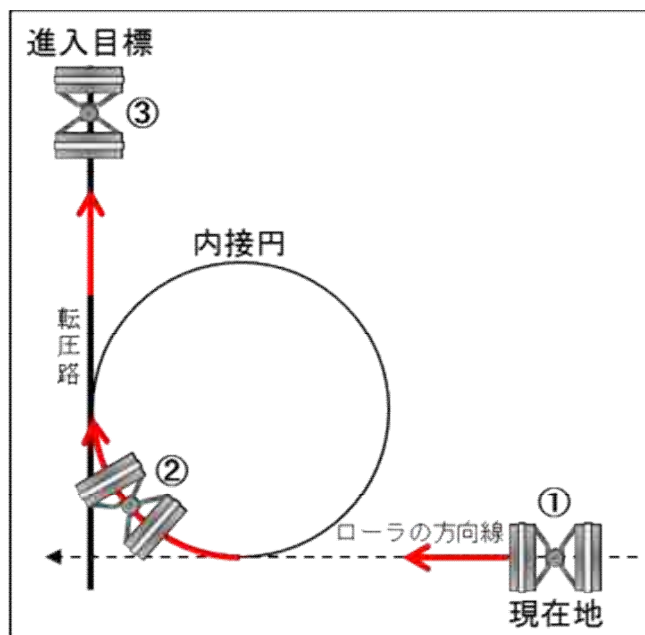


図-6.2.32 内接円を用いた進入

(3) 転圧路走行

振動ローラは、転圧のムラを無くすために、1レーンの同じ範囲を転圧回数だけ前後進する必要があり、計画した転圧路から機体の位置が大きくずれた場合は施工ムラができる。そのため、計画した転圧路と機体の位置が近い場合は、目標点に機体の方向を向けて走行し、転圧路と機体の位置が遠く離れてしまった場合には、ステアリングを大きく曲げて転圧路上に最短距離で戻すアルゴリズムとした。また、1レーンの始点と目標点間が長い場合には、目標点に向かって走行した際に修正が遅くなってしまうため、分割点を設けることにより適切に機体の位置を修正できるようにした(図-6.2.33)。

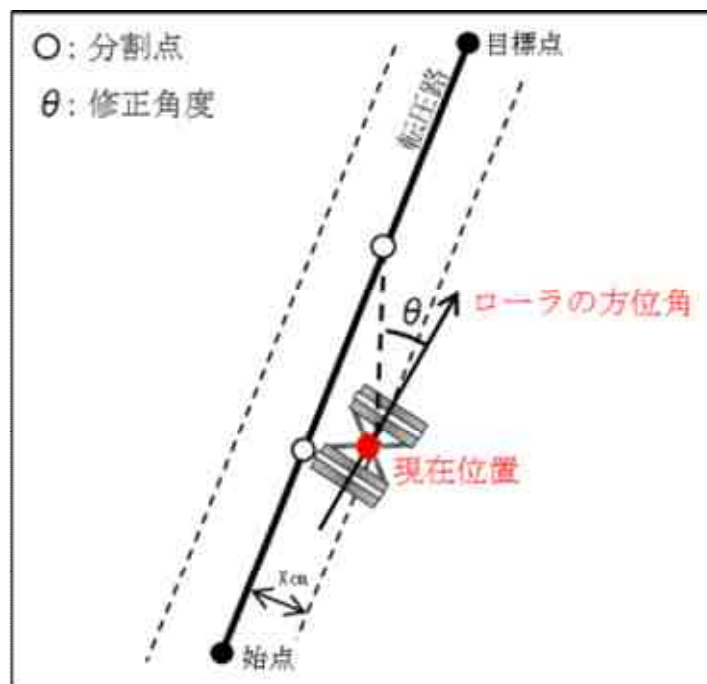


図-6.2.33 締固め作業アルゴリズム

(4) 車線変更

振動ローラの転圧作業において、車線変更幅 W は施工条件によって変化するため、車線変更幅 W を自在に変化することが可能なアルゴリズムを構築することとした。以下に、任意に決定された車線変更幅 W に対応する、目標点 (X_n, Y_n) を算出するための数式を示す。さらに、表-6.2.2 に車線変更の経路の緩やかさを決定する係数の値を示す。それぞれの係数の値は、ラジコンで振動ローラを操作して、車線変更幅 W が 400 ~ 1000mm の場合の走行軌跡を記録し、記録した走行軌跡を目安に、振動ローラが走行可能な車線変更の目標点 (X_n, Y_n) となるように求めた。図-6.2.34 に、振動ローラをラジコンで操作して記録した車線変更幅 W が 400 ~ 1000mm の場合の走行軌跡と、数式を用いて算出した車線変更幅 W が 1000mm の場合の目標点 (X_n, Y_n) を示す。算出した目標点 (X_n, Y_n) と走行軌跡が重なっていることから、以下の数式を用いることにより、任意の車線変更幅 W に対応し、振動ローラが走行可能な目標点 (X_n, Y_n) の算出が可能となる。

$$X_n = \frac{3 \cdot (n-1)}{3} \times \frac{W}{2} - X_1 \quad (1)$$

$$Y_n = \beta \times \tan[\alpha \times \{90 - 30(n-1)\}] \quad (2)$$

$$\beta = \frac{A_1 \times W + A_2}{2 \times \tan \theta} \quad (3)$$

X_n : n 番目の経路の X 座標 (mm)

Y_n : n 番目の経路の Y 座標 (mm)

α : 曲線長決定係数 (実験により算出)

β : 曲率決定係数 (実験により算出) (mm)

W : 車線変更幅 (mm)

表-6.2.2 係数

A	0.833
β_1	2.262
β_2	3894 (mm)
θ	1.309 (rad)

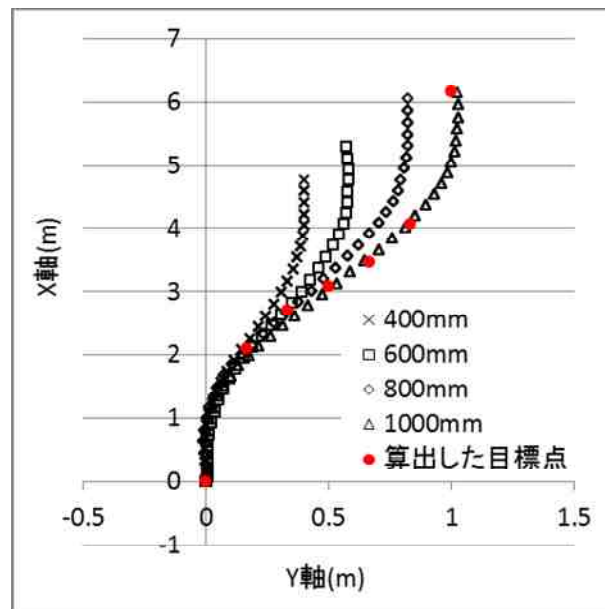


図-6.2.34 走行軌跡と計算値

(5) 障害物回避

障害物の対処方法として、図-6.2.35 に示すような 2D スキャナで障害物を検出し迂回経路を算出するアルゴリズムを開発した。障害物を検知した際はオペレーターに通知が行き、前進、迂回といった動作をオペレーターが指定する。迂回経路は、障害物の大きさおよび長さによって変化し、迂回した場所を後程確認することも可能である。

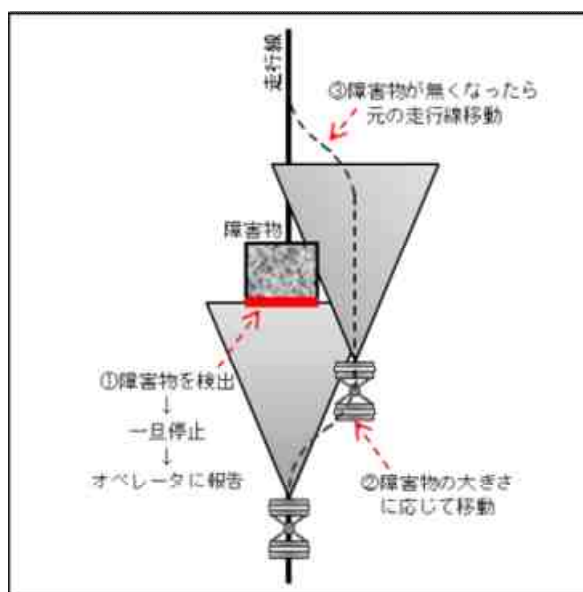
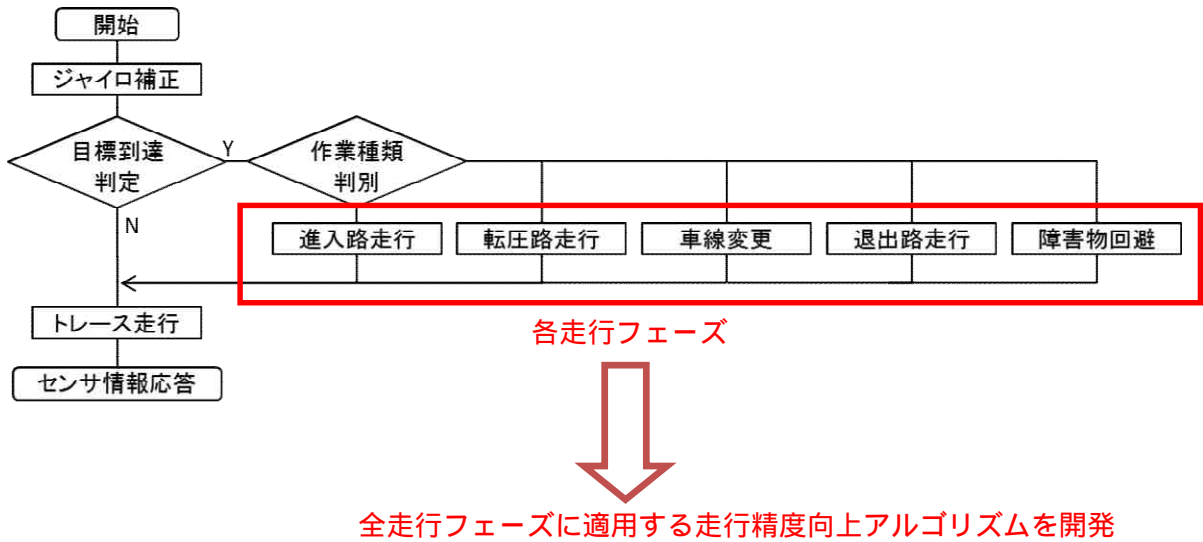


図-6.2.35 障害物回避

(6) 走行精度向上アルゴリズム

前項までの(1)～(5)までが各走行フェーズにおける基本動作アルゴリズムである。各フェーズにおいて走行自体の精度を向上させるため、個別に実環境において振動ローラの挙動に対して別途走行精度向上アルゴリズムを開発した。図-6.2.36 に基本動作アルゴリズムを示す。



全走行フェーズに適用する走行精度向上アルゴリズムを開発

図-6.2.37 基本動作アルゴリズム

走行精度向上アルゴリズムは以下の3つである。

- ・ 閾値を用いた角度制御
- ・ 不陸補正

(7) 閾値を用いた角度制御

建設機械に一般的に採用されている油圧アクチュエータは、電動アクチュエータと比較して制御精度に劣る部分がある。油圧アクチュエータは大きい動力を生み出す点で優れているが、精密な制御が難しいデメリットがある。このため、制御において目標値に正確に制御するのが難しく、目標値に対しての誤差が大きくなる。(図-6.2.38) これは走行精度に影響を及ぼす。走行計画線とのズレが少ない場合は目標点に対して方向制御をしない方が精度良く走行できる。走行計画線とのズレが少ない場合はステアリング角度が 0 度となるアルゴリズムを組み込んだ。図-6.2.39 にアルゴリズムイメージを示す。

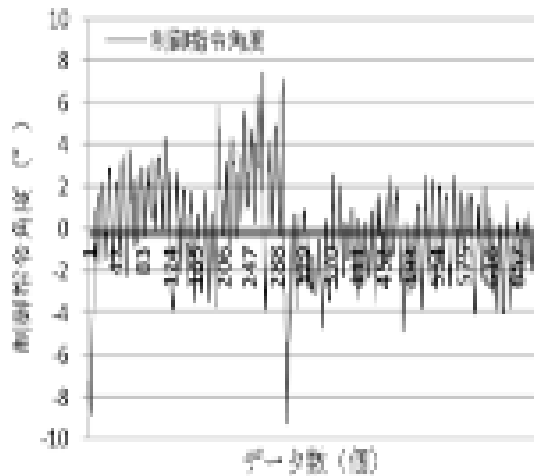


図-6.2.38 不安定な制御指令



図-6.2.39 走行計画線とのズレが少ない時の走行

(8) 不陸補正

振動ローラの位置情報は自動追尾型トータルステーションでおこなう。その際、振動ローラ側には全周プリズムを設置しこれを視準している。視準が外れないようにするため機械の高い位置に設置するため、地盤のちょっとした傾きに対しても誤差が大きくなる。図-6.2.40に誤差のイメージ図を示す。そこでジャイロセンサーから得られるピッチ角度とロール角度を使いプリズム位置の補正をするアルゴリズムとした。(図-6.2.41)

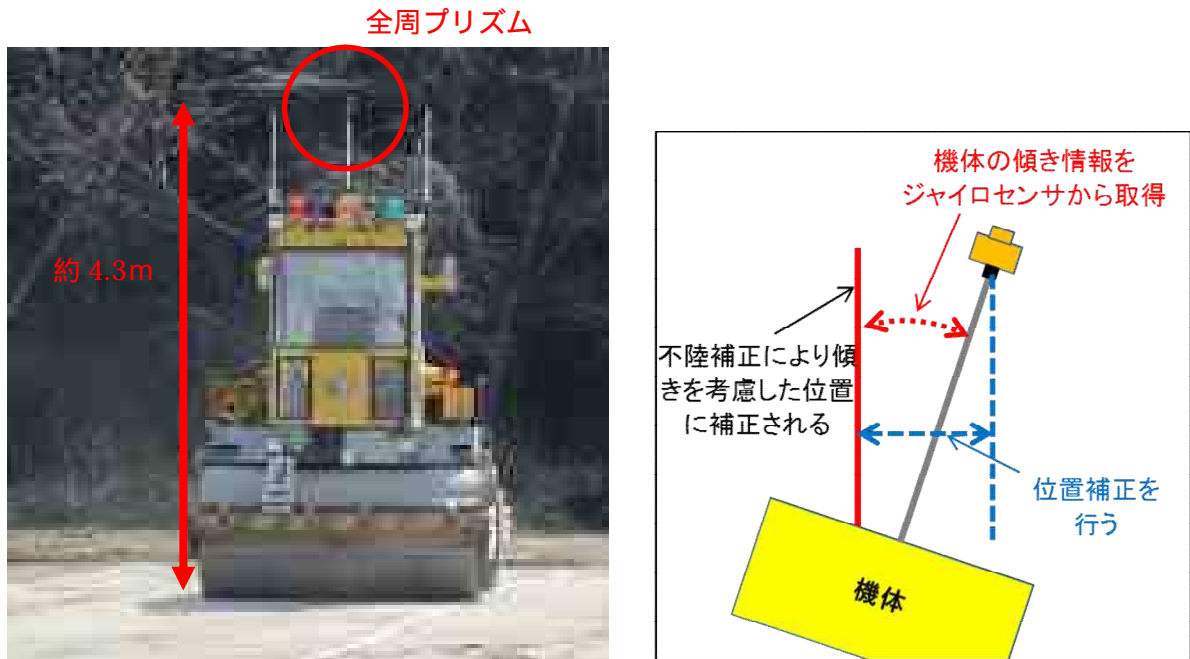


図-6.2.40 傾きによる誤差イメージ図

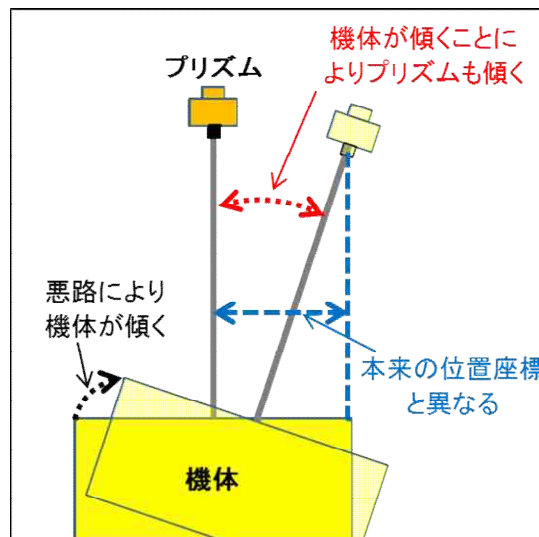


図-6.2.41 不陸補正アルゴリズム

6.2.7 実操作手順

開発した振動ローラの自律作業をおこなうまでの操作フローを図-6.2.42、図-6.2.43 に示す。操作は事務所で人間が締固め作業データの作成をおこない、そのデータを車載 PC に読み込ませる。一方でジャイロセンサーの方向角度はドリフトが存在するので、角度を補正する必要がある。方法は一定距離を直線走行させることで補正される。ここまでの手順が人間の行う準備作業で、後はホスト PC 上のスタートボタンを押せば自律締固め作業が開始する。そして設定した回数、範囲などの締固め作業が終了した時点でホスト PC に作業終了の通知が送信される。

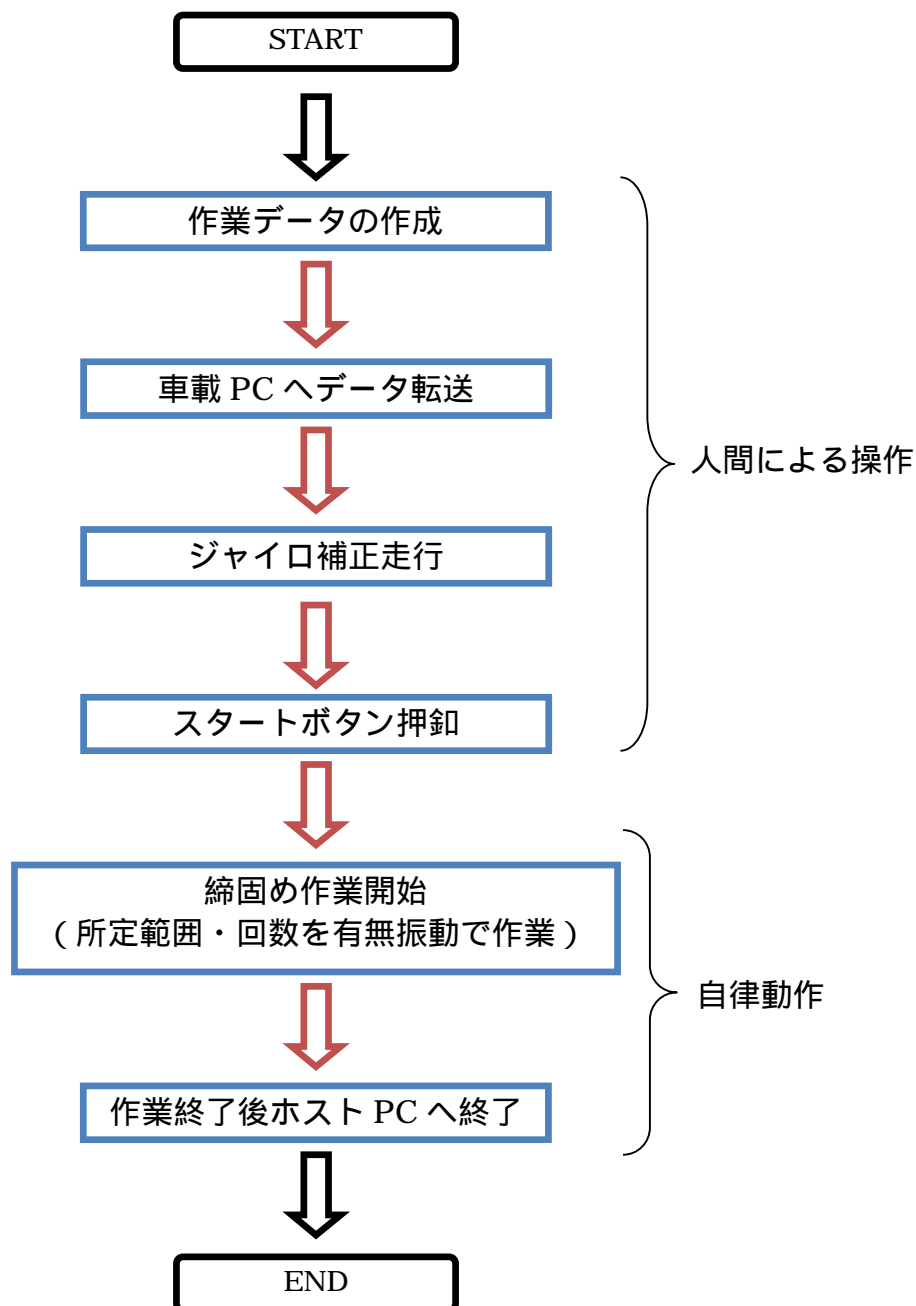


図-6.2.42 本システムの実操作フロー

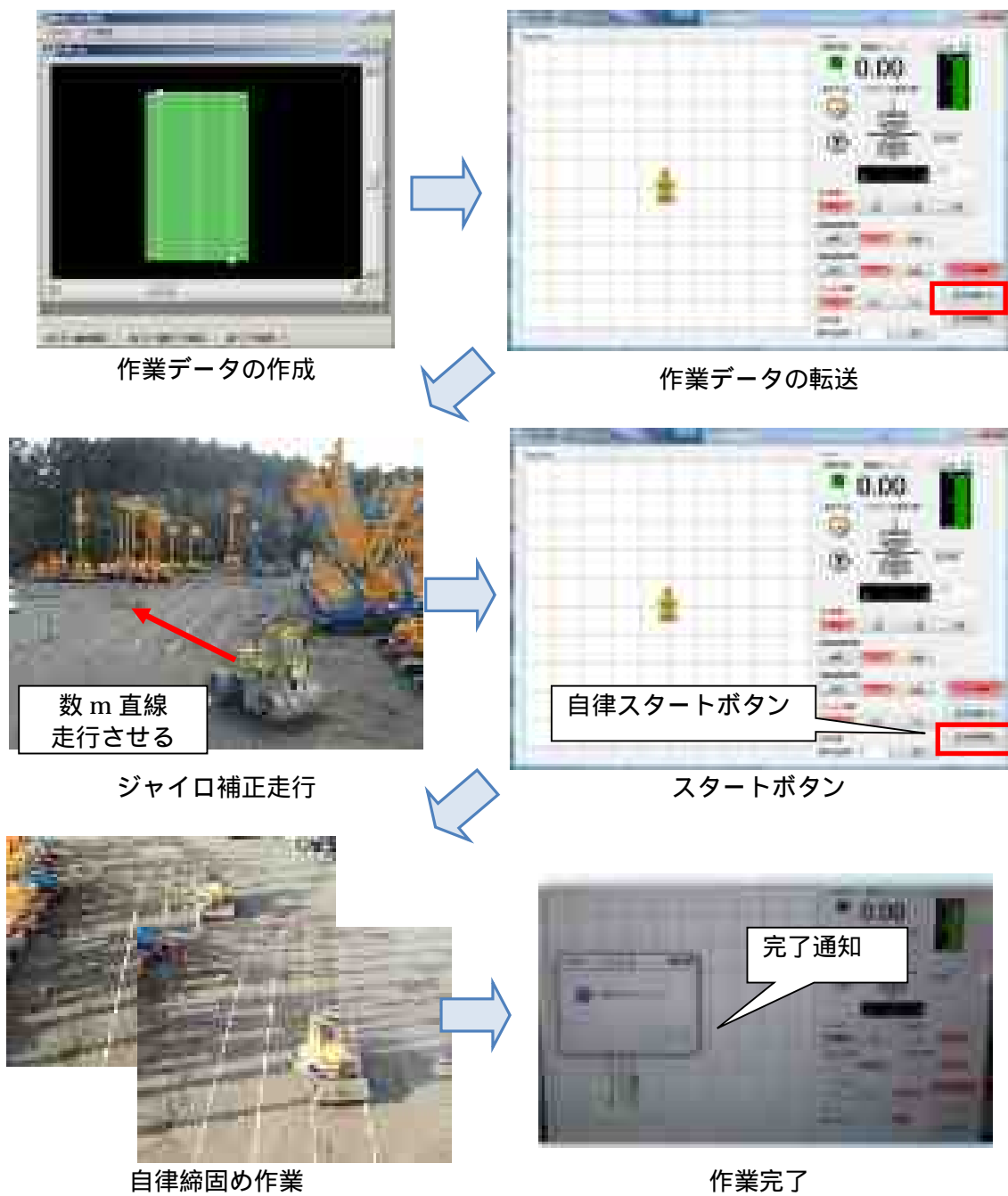


図-6.2.43 実操作流れ図

6.2.8 自律締固め作業実証

(1) 模型を用いた室内検証

使用した模型振動ローラ

実機振動ローラで実験する前に 3 分の 1 のサイズの模型を用いてアルゴリズムの評価を室内において検証した。図-6.2.44 に模型振動ローラを示す。



図-6.2.44 模型振動ローラ

この模型ローラを用いて行った実験条件は以下の通りである。締固め範囲を図-6.2.45、実験システム全体を図-6.2.46 に示す。

- 実験条件 -

- ・ 転圧回数：無振動 2 回/レーン
- ・ レーン長：13m
- ・ 転圧路：3 レーン
- ・ 施工重複幅：0mm
- ・ 走行速度：0.5km/h

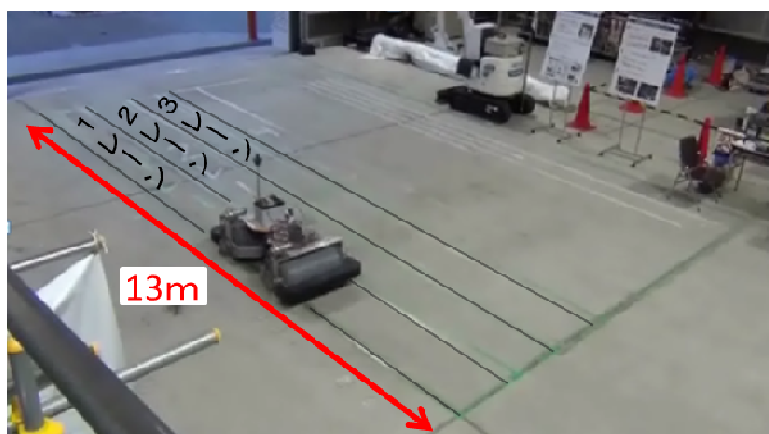


図-6.2.45 模型振動ローラ実験締固め範囲

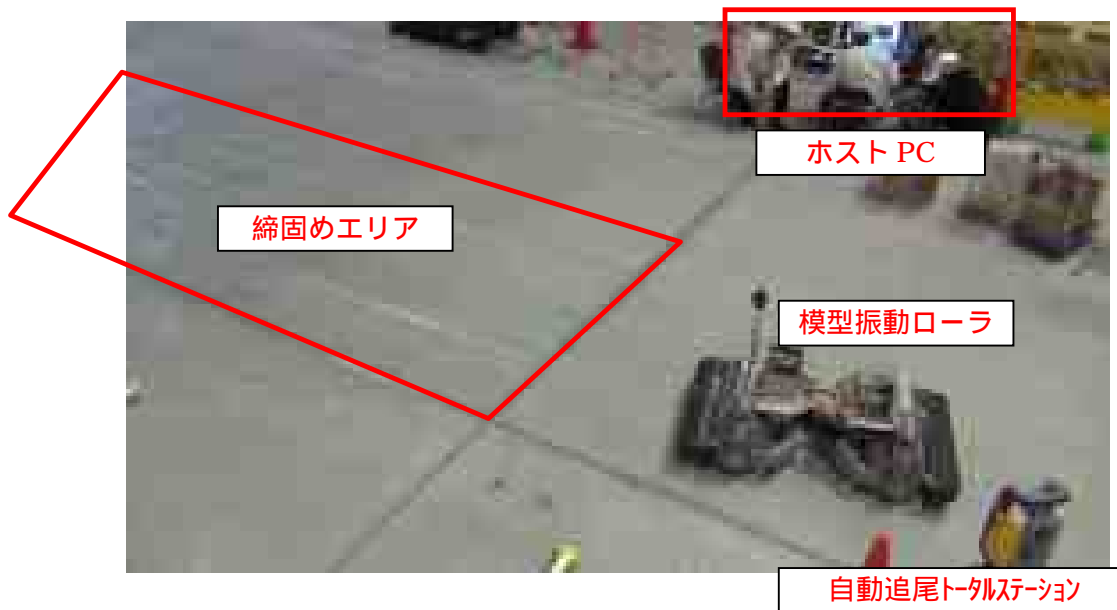


図-6.2.46 模型振動ローラシステム全体図

実験結果

前述の実験条件に基づいて走行実験を実施した結果を図-6.2.47 に示す。この実験結果の図は1～3レーンまで走行させた時の隣り合う走行レーンに対して踏み残しがどれだけあるかどうかを示した図である。この図は実験条件からもし誤差ゼロの走行精度で走行した場合隣り合う2レーンにおいて離れがゼロになることを示す。言い換えると最大離れとなる距離だけ重複長が必要とすることが言える。模型振動ローラにおいては最大離れが10cmという結果が得られた。

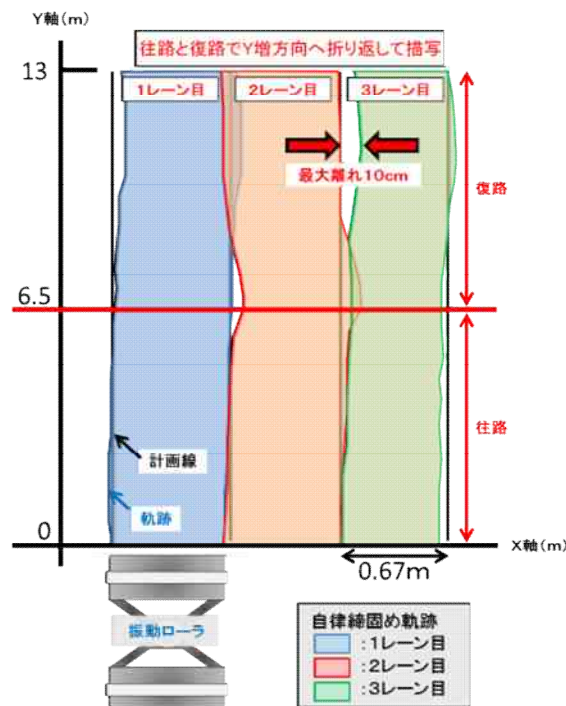


図-6.2.47 模型振動ローラによる走行実験結果

(2) 実機振動ローラ

実験条件

本研究開発で開発した自律制御システムを 11t 級振動ローラ(SD451)に搭載し走行検証を行った。実験条件は下記の通りである。図-6.2.48 に実験状況を示す。

- 実験条件 -

- ・ 転圧回数：有振動 2 回/レーン
- ・ レーン長：25m
- ・ 転圧路：3 レーン
- ・ 施工重複幅：0mm
- ・ 走行速度：1km/h



図-6.2.48 実験状況

走行実験
前述の条件における実験状況シーケンスを図-6.2.49 に示す。



図-6.2.49 実験状況シーケンス

実験結果

以下に実験結果を示す。

- ・ 自律作業は有/無振動における走行精度には大差がなく、搭載センサ類の耐振動性は十分であった。
- ・ 車体中央を屈曲させ方向転換する方式であるアーティキュレート機構の機械制御において、車体中央が屈曲する際に前後輪間で発生する不規則な挙動は、演算を工夫し制御することができた。
- ・ 重複幅に影響のある隣り合う二レーン間の最大離れは 400mm であった。図-6.2.50 に走行軌跡を示す。

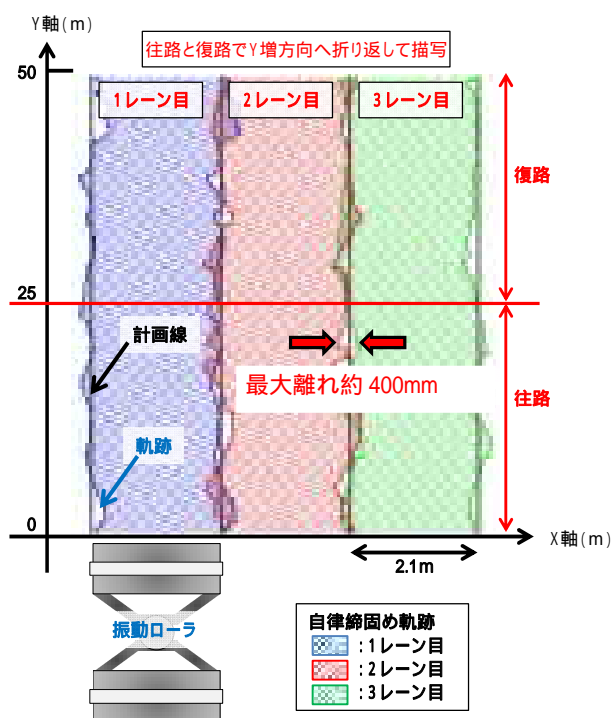


図-6.2.50 実機振動ローラによる走行実験結果

考察

今回の実験では施工重複幅を 0mm で設定し走行させた時に最大 400mm 離れた。この結果は、施工重複幅を 400mm で設定した時、転圧残しゼロが可能であることを示している。この結果から無人化施工の基準である 500mm の施工重複幅を減じ、これに伴う走行レーン数の減少による施工効率向上が期待できる。図-6.2.51 に施工効率向上イメージ図を示す。

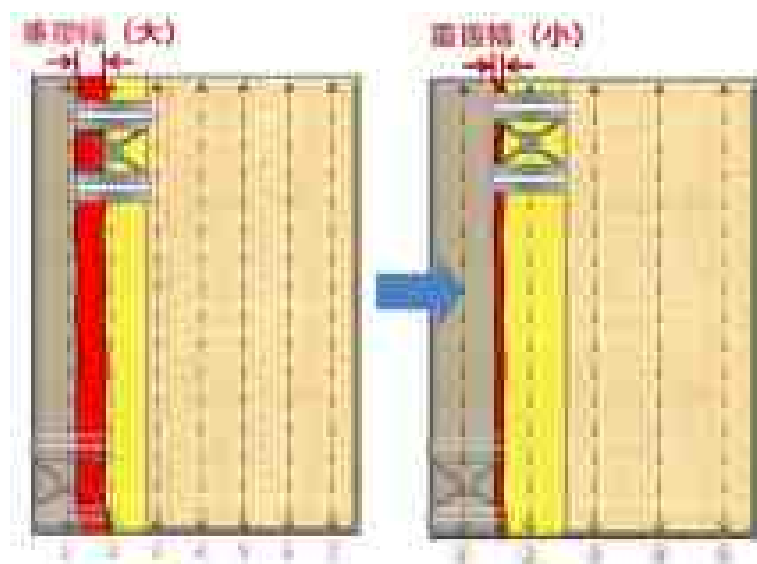


図-6.2.51 施工効率向上イメージ図

6.3 自律型ブレイカー搭載バックホウの開発

油圧ショベルは先端のアタッチメントを交換することで、多様な作業が可能となる大変便利な機械である。遠隔操作による無人化施工においても、アタッチメントを交換して岩石やコンクリート構造物の破碎・圧砕、鉄骨・配管等の切断はもちろん、緑化のための大型樹木の把持や種子吹付、その他の共通作業でロボットアームとして資材の移動等にも用いられている。大半のオペレーターは、バケット作業においては、扱うものが土砂であることから、操作の正確性は高く要求されないため短期間で適応できる傾向にあるが、バケット以外の作業への適応については、扱うものが製品である場合や、カメラ映像を見ながら土砂取扱い時以上の正確性を求められることに難を持っている者が多い。そこで、無人化施工における油圧ショベルのアタッチメント作業の支援技術として、最も使用頻度がある「ブレイカー」の割岩作業に注目して研究のターゲットとした。

6.3.1 油圧ブレイカー搭載バックホウ

(1) 機械的構造および特徴

油圧ブレイカー搭載バックホウはマニピュレータの位置決めのために4軸（ブレイカー、アーム、ブーム、旋回）を有している。（図-6.3.1）また走行機構はキャタピラである。これらのマニピュレータは油圧シリンダーおよび油圧モータなどの油圧アクチュエータによって稼働されている。この様な油圧をメインとした建設機械で特にブレイカー作業における留意点として、油圧シリンダーのブームエンドの姿勢で打撃操作をするべきではない。それは、シリンダエンドにおいて打撃衝撃がシリンダー内の端部に生じるために機械の損傷につながる。（図-6.3.2）また、バックホウのマニピュレータ部はピンで結合されており当該箇所ガタツキは大きくこれが位置決め精度に大きく影響する。（図-6.3.3）

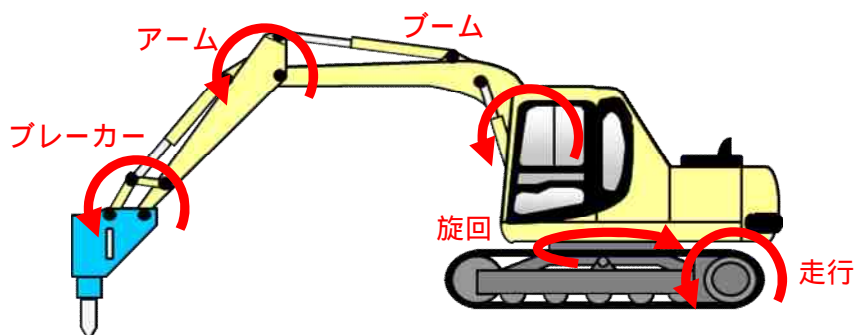


図-6.3.1 油圧ブレイカー搭載バックホウの可動部

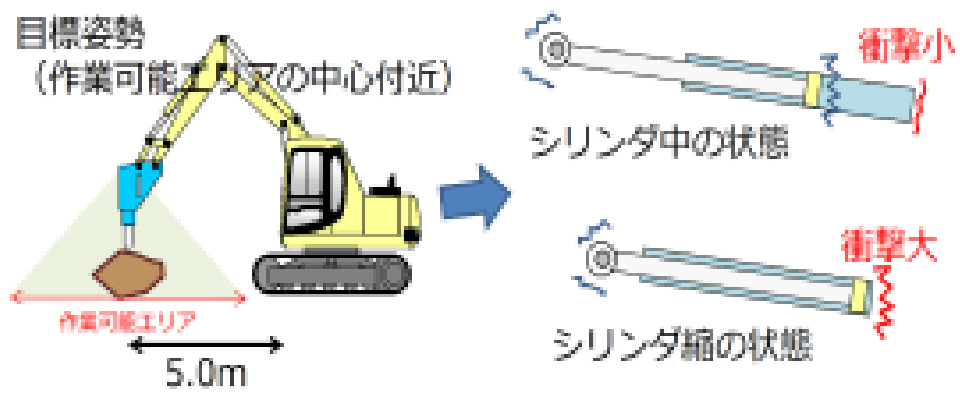


図-6.3.2 油圧シリンダーにかかる衝撃



図-6.3.3 バックホウのガタツキ

(2) 選定機械

機械仕様

本研究におけるベース機械として下記の機種を使用した。本機械は汎用クラスの0.45m³の油圧バックホウをベースとしており使用頻度も高い。また、本機種に西尾レントオール社製のHRCシステムを搭載することで油圧パイロット方式の建設機械を遠隔操作仕様に容易な変換が可能なシステムである。これによって油圧機器の操作系が電子制御化されるので、自律制御と機械とのインターフェースとしてHRCシステムを活用することができる。図-6.3.4に選定機種、表-6.3.1に使用一覧を示す。



図-6.3.4 選定機種（0.45m³級ブレーカー搭載バックホウ）

表-6.3.1 使用一覧

項目	仕様	標準仕様	
		標準仕様	標準仕様
基本仕様	作業容量	0.45m ³	0.45m ³
	作業容量	0.45m ³	0.45m ³
	作業容量	0.45m ³	0.45m ³
	作業容量	0.45m ³	0.45m ³
作業仕様	作業容量	0.45m ³	0.45m ³
	作業容量	0.45m ³	0.45m ³
	作業容量	0.45m ³	0.45m ³
	作業容量	0.45m ³	0.45m ³
作業仕様	作業容量	0.45m ³	0.45m ³
	作業容量	0.45m ³	0.45m ³
	作業容量	0.45m ³	0.45m ³
	作業容量	0.45m ³	0.45m ³
作業仕様	作業容量	0.45m ³	0.45m ³
	作業容量	0.45m ³	0.45m ³
	作業容量	0.45m ³	0.45m ³
	作業容量	0.45m ³	0.45m ³
作業仕様	作業容量	0.45m ³	0.45m ³
	作業容量	0.45m ³	0.45m ³
	作業容量	0.45m ³	0.45m ³
	作業容量	0.45m ³	0.45m ³

システム系統図

自律制御と HRC システムおよび建設機械と関係系統図を図-6.3.5 に示す。油圧機器と HRC システムは電磁バルブを介して結合される。また HRC システムと自律制御システムは RS422 インターフェースを介して接続される。これにより、自律制御システムから建設機械のマニピュレータである油圧機器を動作させることができる。

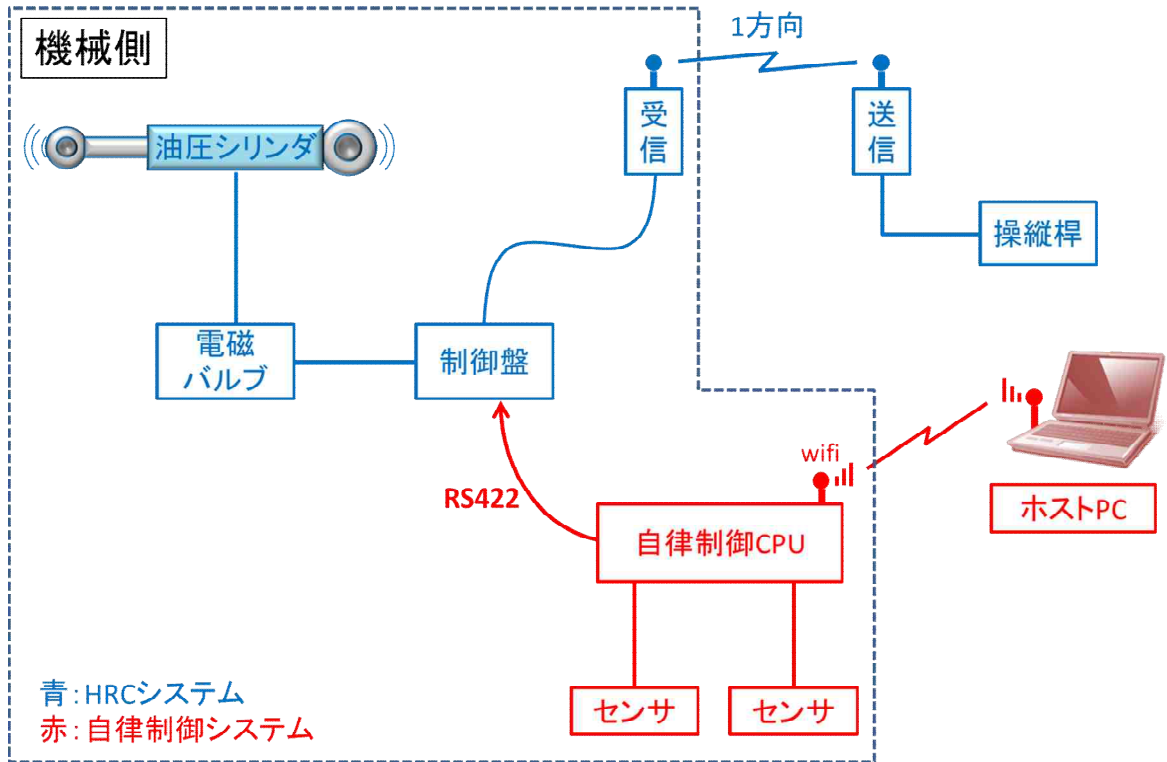


図-6.3.5 システム系統図

6.3.2 割岩作業分析

(1) 無人化施工における割岩作業

ブレイカーによる割岩作業は、砂防工事等で大型の岩石をダンプトラックに積込が可能な500mm程度迄の小割に必要な作業である。岩塊の重心辺りを目掛けて地面と垂直にブレイカーのノミ（以下、ノミと記）を圧接し、油圧ショベルの重量を掛けて打撃しないと割れないばかりか、重心を外して打撃した場合は打撃開始後にノミが岩を押し当てるバランスが崩れるため岩塊が転回し、地面に向かっての打撃や、角度を付けて無理に押し当てて打撃を開始するとノミの折損やブレイカー本体が損傷するという事態も考えられるため、無人化施工の中でも難易度の高い作業に相当する(図-6.3.6)。そういった難易度の高い作業を人間が判断して操作をする従来型の方法から、建設機械に搭載したセンサーと演算等により実行できる事は無人化施工において画期的な事で、遠隔操作時のオペレーターの負担軽減や一人のオペレーターで複数台の遠隔総操作も期待できる技術である。



図-6.3.6 無人化施工における割岩状況

(2) 作業分析

有人操作でブレイカーによる割岩作業を行った場合のブレイカー先端の当てる位置や角度の調査をした。オペレーター目線と周辺から目線の二方向からの映像を撮影した。図-6.3.7 にオペレーター目線撮影用のカメラ、図-6.3.8 に周辺からの目線を示す。



図-6.3.7 オペレーター目線撮影用カメラ



図-6.3.8 周辺からの目線

(3) 割岩作業について

ブレイカー先端の当てる位置：概ね岩の重心

- ・明らかに岩に凹みがあればそこに合わせている
- ・目視で確認するレベルであり、きっちり合わせている感じではない

ブレイカー先端の岩に対しての角度：地面に対して直角

- ・岩の面に直角に当てている感じはほとんどなく反力を地面からとるため地面に対して直角にブレイカー先端を合わせている。



図-6.3.9 割岩作業分析

(4) 座標系の考え方

通常、機械位置が作業フィールドに対してどこにいるか把握するために絶対座標系を用いることが多い。ここで絶対座標系とは機械と作業場所が一つの座標系中に存在するという考え方でこれに対する座標系として相対座標系と呼ぶ。相対座標系は常に一か所から見た座標を原点とする考え方で定義した系が動くと共にそれに伴って周辺の座標値 (X, Y, Z, x, y, z) 六軸も変わる考え方である。例えばバックホウの中心を原点とした場合、この中心を常に原点として考え、バックホウの位置関係で座標値が決まる。図-6.3.10 に座標制御イメージ、表 6.3.2 に互いの長所と短所一覧を示す。

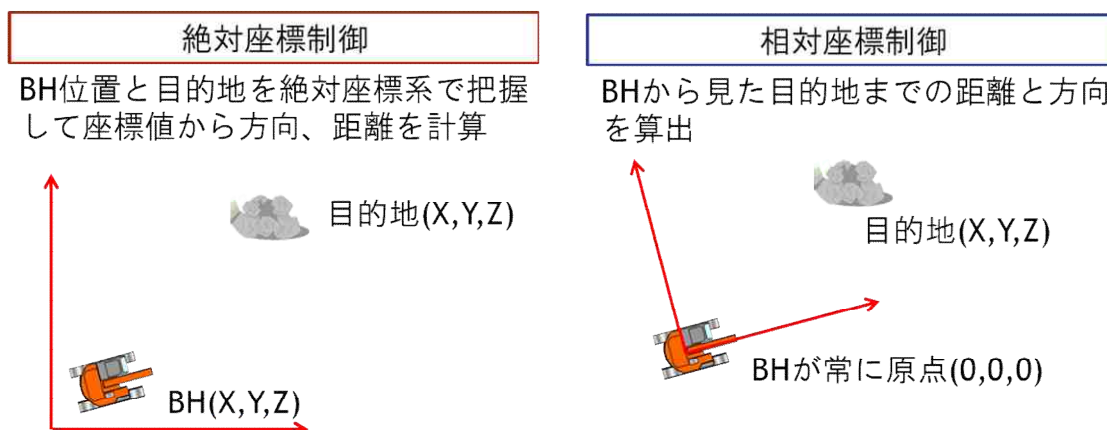


図-6.3.10 座標制御イメージ

表 6.3.2 長所と短所

	長所	短所
絶対座標制御	<ul style="list-style-type: none"> ・高精度な走行が可能 ・作業箇所を座標で定義できる場所では有効 	<ul style="list-style-type: none"> ・GPS や TS などの測位機器が必要 ・屋内に不向き
相対座標制御	<ul style="list-style-type: none"> ・屋内作業可 ・測位機器不要でシステムが軽くなる 	<ul style="list-style-type: none"> ・低精度

振動ローラの自律締固め作業の様に、作業する範囲が絶対座標として定義が容易な場合、(設計図、施工計画図等がある)においては絶対座標で取り扱った方が良い。一方、割岩作業の様なあらかじめ岩の位置が分からない場合において、絶対座標は不向きであり、また実際に建設機械と岩の位置関係だけで作業可能である。有人作業において、オペレーターは目測で岩の位置を把握し、作業範囲まで機械を近づけ、打撃点を概ね定めその点にブレーカーのノミを当てる。この間にオペレーターは座標を意識せず作業できる。このため、本件においては相対座標系を用いることとした。

6.3.3 搭載センサー

自律割岩作業をするためのセンサーの選定について、基本的には要求する環境性能や機体状態・周辺環境の把握などが重要という考え方は自律締固め作業と同じである。

6.3.3.1 耐振動性について

(1) 耐振動性について

キャビン(運転席)には運転手に負担のかからないよう防振ゴムの様な耐衝撃対策が施されているため(図-6.3.11、図-6.3.12) センサーをキャビン周辺に設置する場合はともかく、その他の部位についてはキャビンほどの対策が施されていないため、作業機械の各部位に掛かり得る衝撃を把握し、センサー選びの条件とする必要がある。そのため振動ローラと同様にブレーカー搭載バックホウについても振動加速度計測を行った。

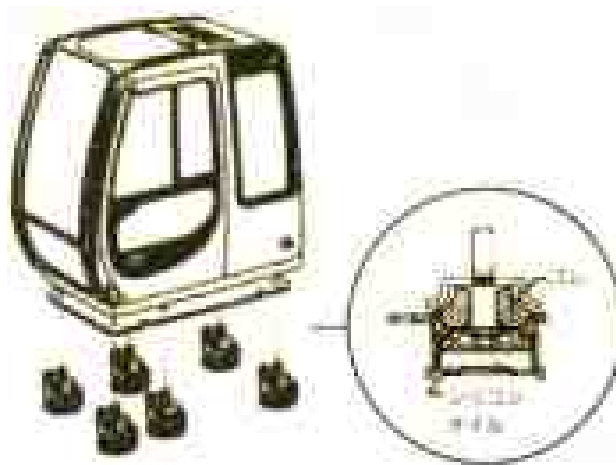


図-6.3.11 キャビンの防振対策



図-6.3.12 実際のバックホウでの防振位置

(2) 衝撃加速度計測

各部位毎 - 作業種別

作業機械の各部位の衝撃を計測するため、振動加速度計測をおこなった。(図-6.3.13)



図-6.3.13 加速度計測実施箇所

計測箇所は油圧ショベルの主たる構成から図-6.3.14 に示すようキャビンを含めた五か所において、様々なエンジン回転数、様々な作業における衝撃を部位毎に計測した結果、表-6.3.3 を得ることができた。(0.45m³ 級油圧ショベル、0.9t ブレーカー使用)これによると、キャビンが他の部位と比較して圧倒的に衝撃負担が少ないことが確認できるため、センサー類はキャビン周辺に設置する事を第一に考慮するべきである。

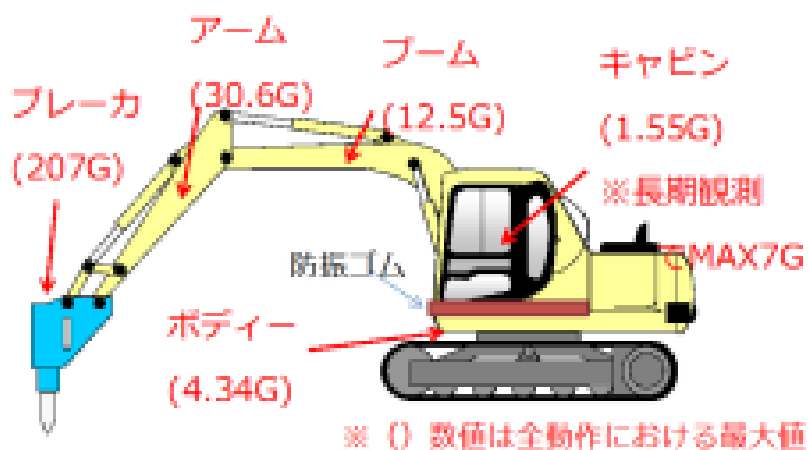


図-6.3.14 油圧ショベルにおける各部の加速度

表-6.3.3 諸動作下における加速度一覧

	スロットル	計測箇所	最大加速度 (G)
動作開始 (打撃以外)	低	ブレーカ	1.40
		ボディー	0.32
		キャビン	1.55
打撃動作	高	ブレーカ	207
		アーム	30.6
		ブーム	12.5
		ボディー	4.34
		キャビン	0.49
走行動作	低	ボディー	1.40
		キャビン	0.50
	中	ボディー	3.04
		キャビン	0.69
	高	ボディー	4.34
		キャビン	1.02

長期観測

採石場で稼働する油圧ショベルのキャビンに約一ヵ月間衝撃センサーの設置(図-6.3.15)を行い、ブレーカ - 作業の他、通常のバケット作業(500mm程度の割石の収集と積込作業)と、場内の不整地走行移動における連続衝撃も計測した。その結果、作業時の最大衝撃度が3~4Gに対し、走行移動時の最大は7G程度という結果が得られている(図-6.3.16)。



図-6.3.15 加速度計設置状況

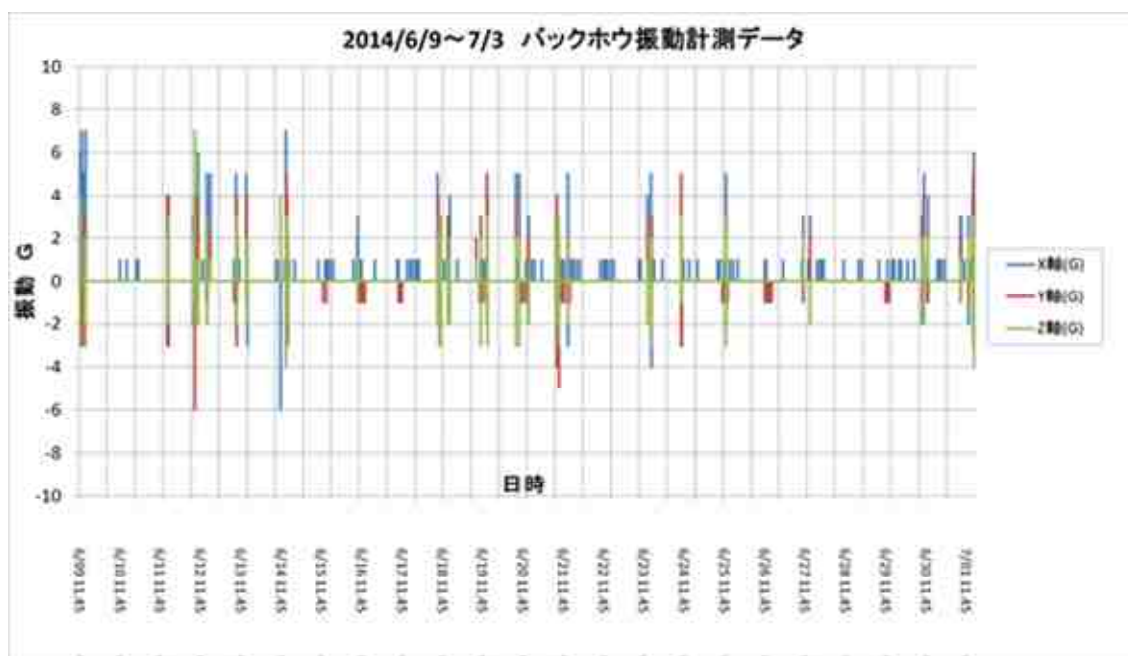


図-6.3.16 長期観測加速度結果

(3) 耐振動性性能
振動加速度実験の結果から

- ・耐衝撃性：7G 程度

センサー類は性能を最大に引き出すためキャビンガラスを通して計測する事のない様にキャビンの上部外側に設置すると考える事とした。その他の部位に設置するセンサーについては の条件に実験結果を加味して選択する事とした。

6.3.3.2 選定したセンサー

(1) ステレオカメラ（岩の認識）

無人化施工とカメラ映像

無人化施工において操作対象機械上にカメラを設置し(以下、車載カメラと記: 図-6.3.17)、運転手目線の作業映像を取得しながら操作を行う事はほぼ一般化しており、大半の機械に設置され、多くの運転手がこの手法に対応できていることから、この車載カメラに付加機能を与える事が割岩作業に資すると考えた。カメラは五感の部分で必要最低限情報である「視覚」となるため、通常時は車載カメラとして搭乗者目線の映像情報取得を行い、カメラを通して得た映像情報を解析する事で対物計測等ができる装置として利用する事が出来れば、従来システムに対応してきた運転者に新たなシステムを付加する事が無く、馴染みやすいシステムになるという観点から車載カメラをステレオカメラ化し、「立体計測が出来る車載カメラ」を主センサーとする事とした(図-6.3.18)。



図-6.3.17 車載カメラ



図-6.3.18 ステレオカメラ

ステレオカメラ

自律割岩作業においてステレオカメラの用途は下記の二点である。

- a) 岩までの距離と方向検出
- b) 岩の打撃点の計算

a) 岩までの距離と方向検出

ステレオカメラを人の目の代わりとし、対象までの距離と方向を認識した。図-6.3.19 に方位・距離認識イメージ図、図-6.3.20 に実際の認識状況を示す。実際はバックホウが岩に近づきながら対象岩を常に自動追尾するため本ステレオカメラには自動追尾機能も搭載してある。

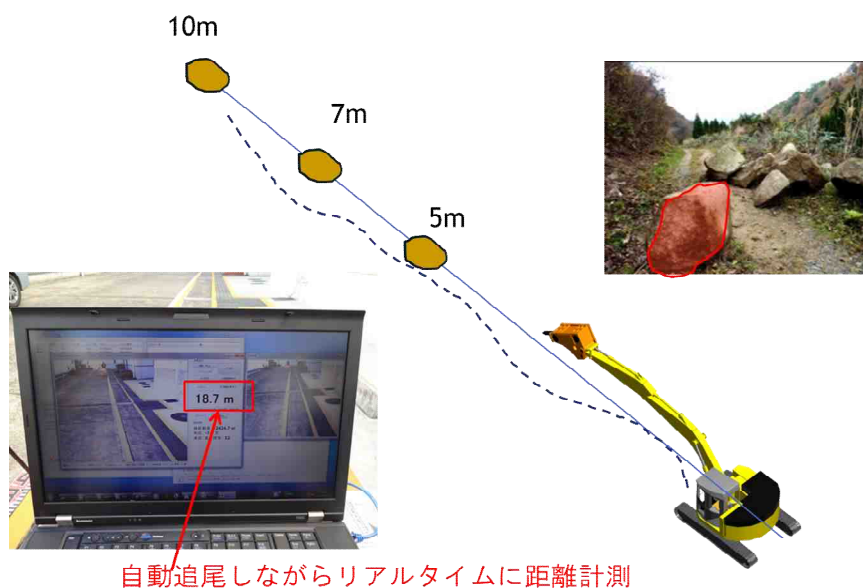


図-6.3.19 ステレオカメラによる対象までの距離・方位認識イメージ



図-6.3.20 ステレオカメラによる対象までの距離・方位認識状況

b) 岩の打撃点の計算

対物計測は近年の MEMS 技術等の発達により、高価であるがスキャナ系の計測機が躍進している傾向にあり、土木業界でも利用が広がっているが、耐環境性能として満足できない機種が多い。そういった計測機の多くは内部に可動部分が存在するため耐衝撃に弱い。逆に、内部不可動型の計測機を耐振雲台等に搭載して活用する方法は有るが、雲台の損傷の可能性もゼロではないため、システムの安定性を考慮すると可動部分が無い計測機が望ましい。そういった観点からも可動部を含まず、耐塵・耐水性に優れ衝撃性を持つカメラを含むステレオカメラシステムは建設機械搭載に適していると考える。図-6.3.21 に 3 次元計測技術を示す。打撃点は岩を 3 次元計測し重心位置を算出する。計算された重心位置は岩内部の点であるので実際にはその重心位置の直上の岩表面の点である。図-6.3.21 に打撃点算出イメージを示す。

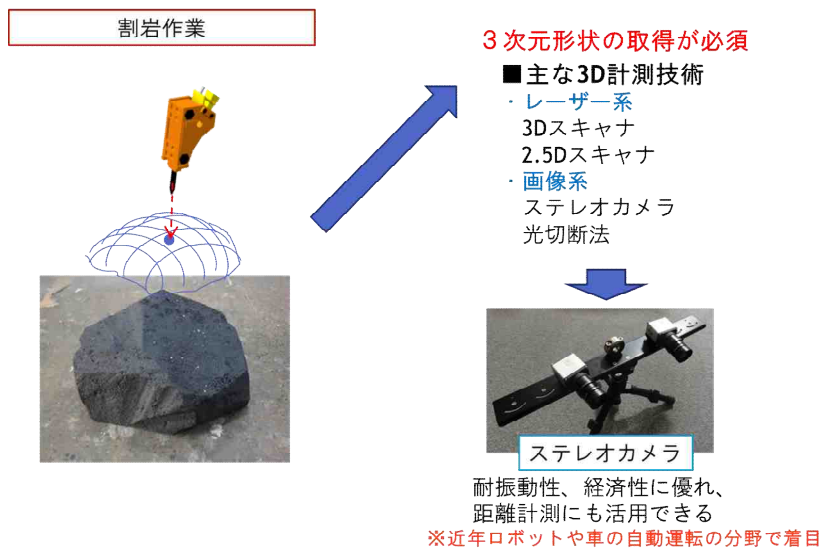


図-6.3.21 3次元計測技術による打撃点算出

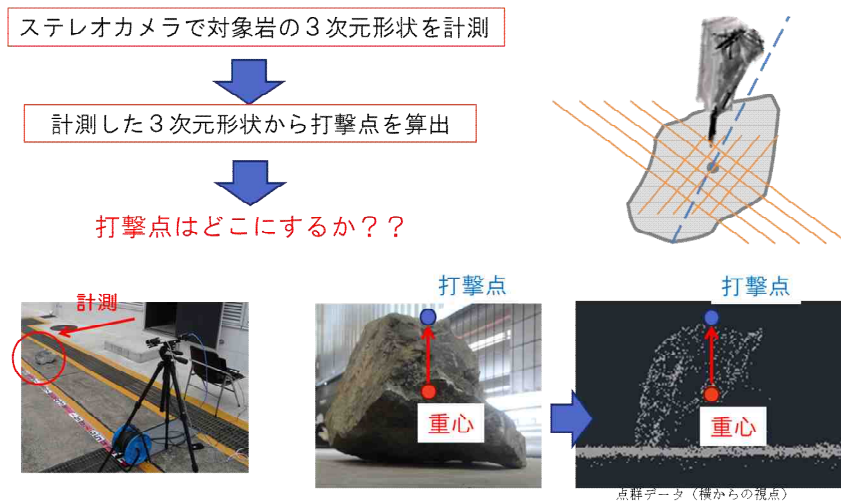


図-6.3.22 打撃点算出イメージ

ステレオカメラの能力検証実験

ステレオカメラの本件に係る自律割岩作業に必要な能力として下記 2 点が挙げられる。自動追尾能力とはバックホウが岩を認識しながら移動した時の振動や移動速度に対して目標となる岩をターゲットとして外さない能力である。これらの要素を実験により確認した。また、重心位置の計測精度に影響する要素として、一般的にステレオカメラ設置条件の基線長と設置角度がある。重心位置計測精度ではこれらの決定も合わせて実施した。

- a) 自動追尾能力
- b) 重心位置計測精度

なお、要求仕様として下記の通りとした。

～仕様～

- ・岩サイズ： 1000mm
- ・自律走行距離：10m
- ・設置高さ：3.1m
- ・割岩範囲：4～7m

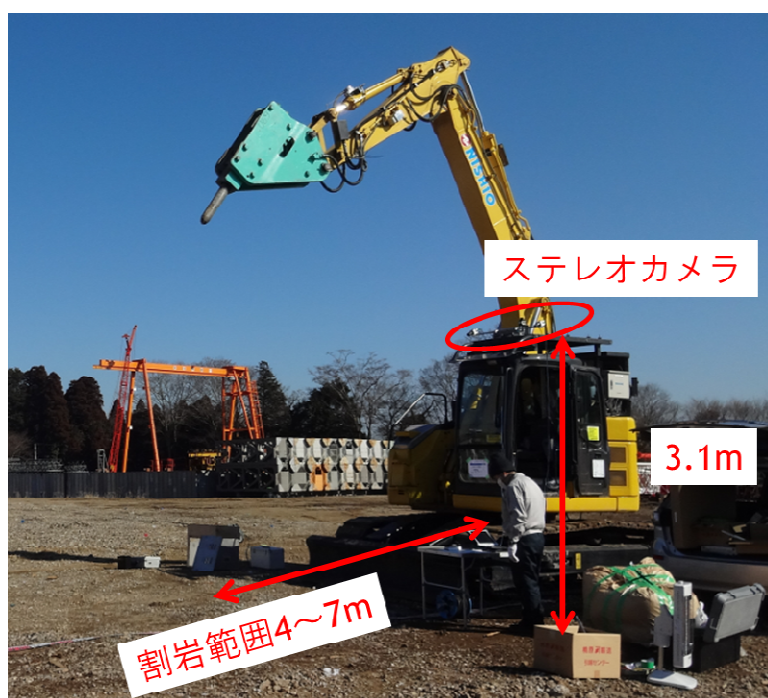


図-6.3.23 ステレオカメラの設置個所および作業範囲図

a) 自動追尾能力確認実験

図-6.3.24 に実験状況を示す。計測対象として 100cm 程度の模擬岩と自動車を利用して 20m の距離から 1m 毎に近づけその時の計測精度を見た。図-6.3.25 に計測結果を示す。計測結果から以下のことを確認した。

- ・ 15m を境に精度が著しく変化（近いほど精度良い）
- ・ バックホウの作業範囲（5m 程度においては誤差は 0.1m）
- ・ 相関の取りやすい自動車の方が、精度が良い（特に 15m 以上）



図-6.3.24 実験状況

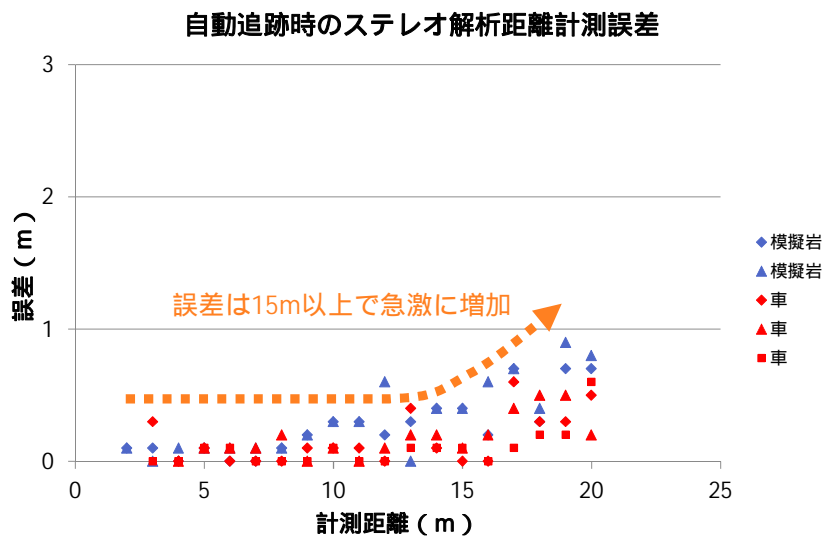


図-6.3.25 実験結果

b) 重心位置計測精度

打撃点となる重心位置計測の基となるステレオカメラの基線長と設置角度を決定するためにバックハウ環境に整えたステレオカメラで下記の実験を行った。図-6.3.26 に実験イメージ図、図-6.3.27 に実験状況を示す。

- 実験 : カメラ角度と Y 方向の視野範囲の検証
- 実験 : カメラ角度と重心検出精度
- 実験 : 基線長と重心検出精度

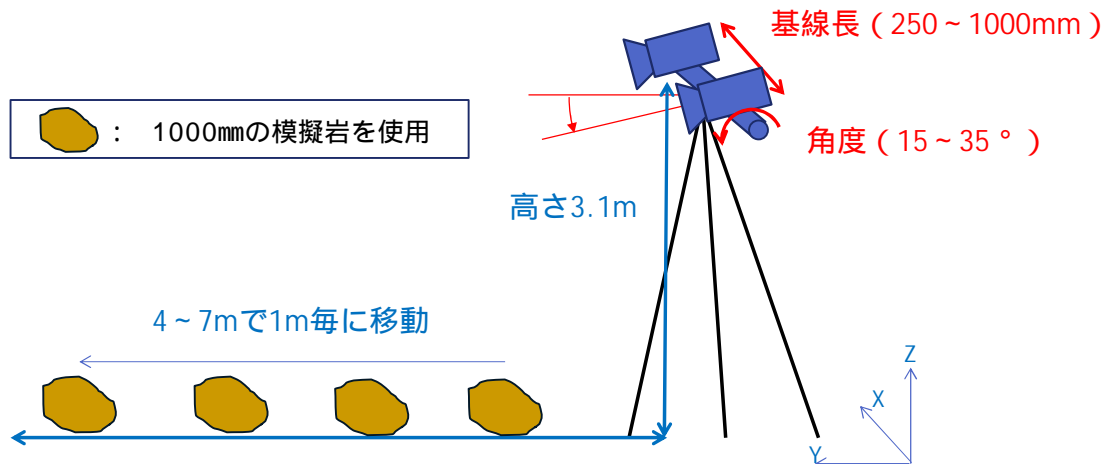
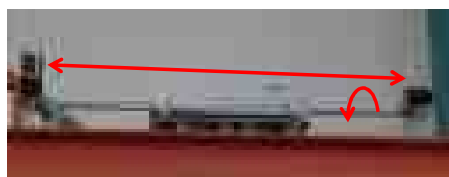


図-6.3.26 実験イメージ図

- ・ステレオカメラ仕様
- グローバルシャッター
- 130万画素
- CMOSセンサ : $l = 6.784\text{mm} \times 5.427$
- 焦点距離 : $f = 8\text{mm}$



カメラ治具



実験状況

図-6.3.27 実験状況

実験結果


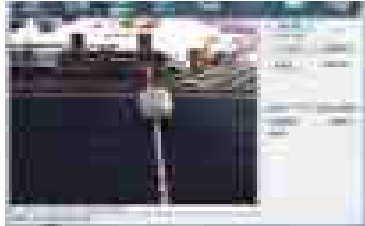
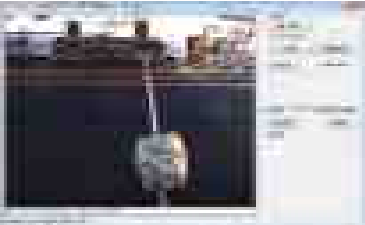
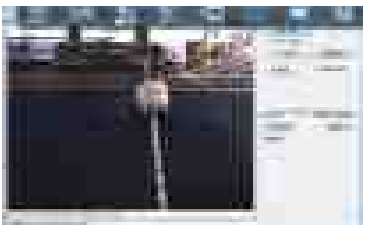


実験：

カメラ角度とY方向の視野範囲の検証

図-6.3.28～図-6.3.30 に実験結果を示す。カメラ角度 22.5° 以上で岩はすべて認識可能で 30° 以上では奥行 10m が視野として限界であった。



図-6.3.28 カメラ角度と視野範囲 ($15.0^\circ \sim 20.0^\circ$)

		模擬岩位置	
		4m	7m
カメラ角度	22.5 °		
	25.0 °		
	27.5 °		

岩が見える

図-6.3.29 カメラ角度と視野範囲 (22.5 ° ~ 27.5 °)

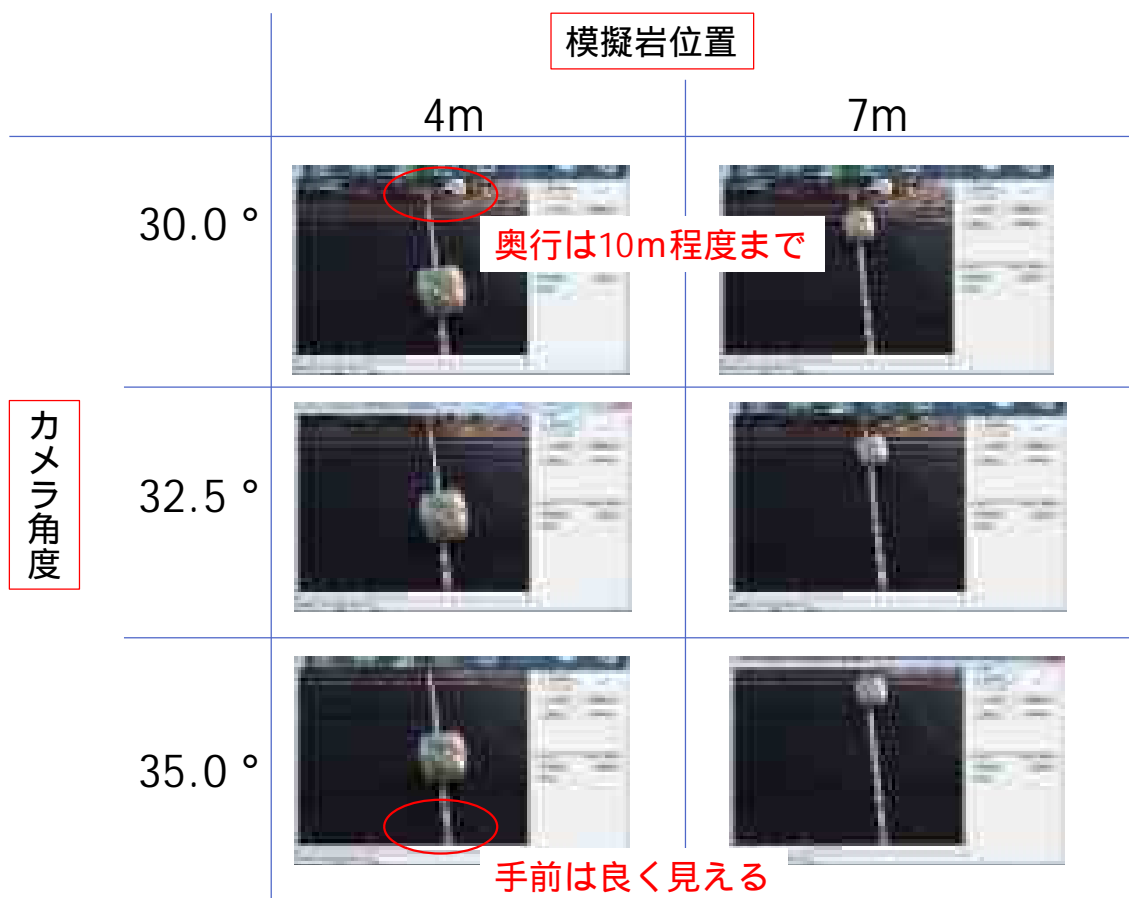


図-6.3.30 カメラ角度と視野範囲 (30.0 ° ~ 35.0 °)

実験 :

カメラ角度と重心検出精度

図-6.3.31 に計測位置を 4 ~ 7m に 1m 毎に重心計測した結果を示す。グラフは縦軸に精度、横軸にカメラ角度とする。カメラの設置角度による影響は少なく全体的に精度としては概ね 100mm 以内であった。

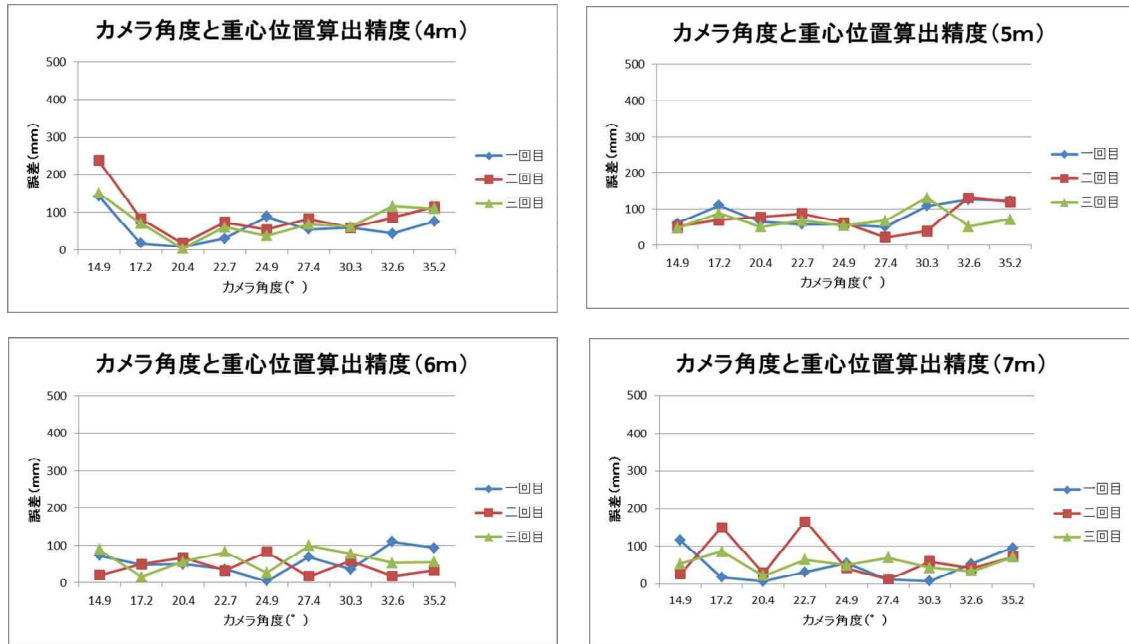


図-6.3.31 カメラ角度と重心位置算出精度結果

実験 :

基線長と重心検出精度

図-6.3.32 に実験結果を示す。実験結果は計測距離 4m ~ 7m における基線長と重心位置精度算出結果であり、縦軸に精度、横軸に基線長とした。一般的には、基線長が長いほど精度が良いとされている。その傾向は概ね一致する結果が得られ、最も良い結果は基線長 750mm であった。

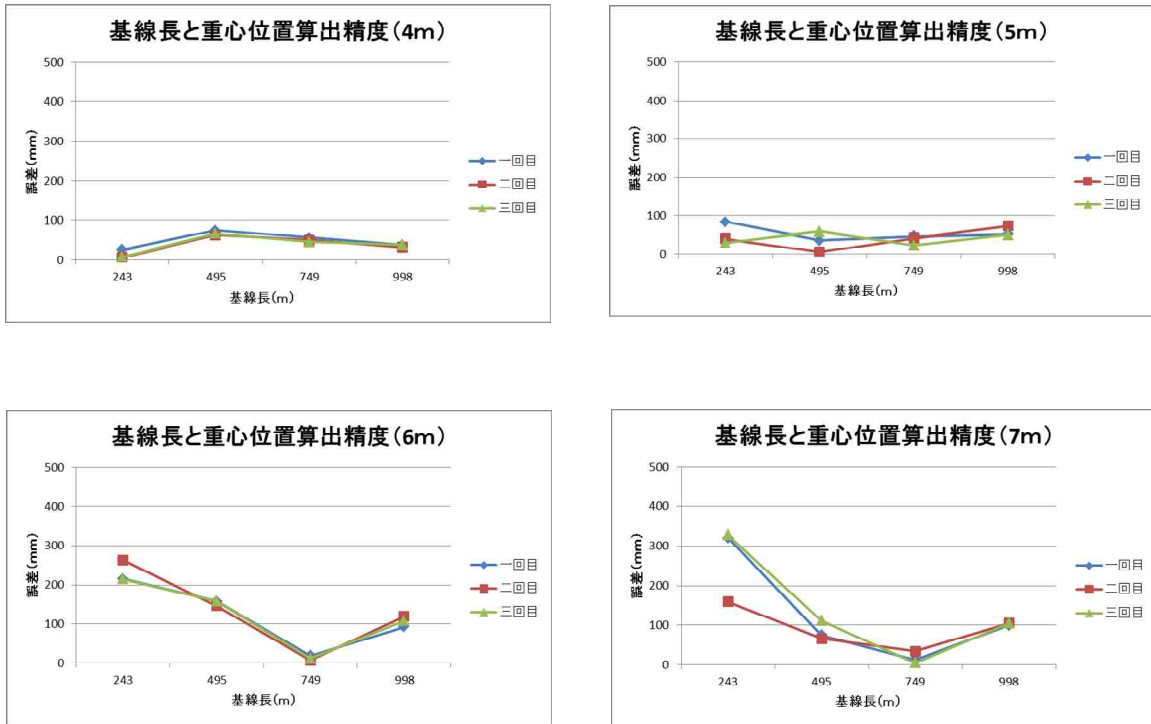


図-6.3.32 基線長と重心位置算出精度結果

【結論】

実験：

カメラ角度と Y 方向の視野範囲の検証

- ・カメラ角度 22.5° 以上において、すべての岩が認識できた。
- ・カメラ角度 30° 以上では、奥行 10m までしか見えない。

実験

- ・カメラ設置角度に影響なし
- ・概ね 100mm 程度の誤差

実験

- ・最も良い基線長は 750mm

これらの結果から

- ・カメラ角度： 22.5°
- ・基線長：750mm

を本開発におけるステレオカメラの設置位置とした。

(2) その他の選定センサー

選定したセンサーを表-6.3.4、搭載状況を図-6.3.33 に示す。センサーは振動ローラと同様、大きく 2 種類に分類され、機体自身の状態を把握するセンサーと周辺状況を把握するセンサーがある。

機体状態把握センサーとして

- ・機械の姿勢検出には 3 軸ジャイロセンサー（ロール角、ピッチ角、ヨー角）
- ・マニピュレータ位置検出にはシリンダ長検出センサー
- ・旋回角度には角度センサー
- ・割岩判定には油圧検出センサー

周辺状況把握センサーとして

- ・岩認識はステレオカメラ
- ・車載カメラにはネットワーク型カメラを選定した。

表-6.3.4 搭載センサー一覧

分類	項目	適用センサ
機体状態	姿勢検出	MEMS3軸ジャイロ
	マニピュレータ位置検出	シリンダ長検出センサ
	旋回角検出	角度センサ
	割岩判定	油圧検出センサ
周辺状況	岩認識	ステレオカメラ
	車載カメラ	ネットワーク型カメラ



図-6.3.33 センサー搭載状況

6.3.4 自律制御システム

(1) 全体システム構成

全体システム構成図を図-6.3.34 に示す。本システムは岩認識ステレオカメラ、機械状態を示すセンサー、油圧制御する HRC システムおよび作業開始命令を出す PC から構成される。図-6.3.35 にホスト PC での操作画面を示す。ホスト PC 画面にはカメラ映像が表示されており、この表示上の岩を選択し自律開始ボタンを押すと作業が開始する。

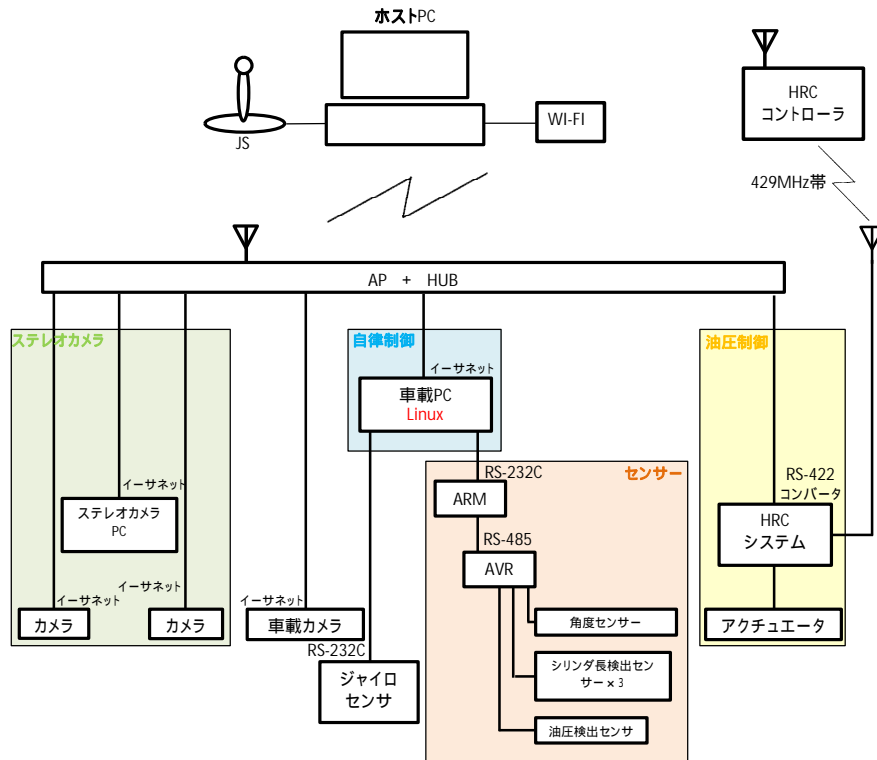


図-6.3.34 全体システム構成図



図-6.3.35 ホスト PC 操作画面

6.3.5 自律制御アルゴリズム

自律割岩作業アルゴリズムとして全体概略フロー図を図-6.3.36 に示す。作業フローはホスト PC 上の岩を選択した後、ステレオカメラで岩までの距離と方向を計測する。計測した後に作業範囲内まで自動追尾しながら移動する。その後、ステレオカメラで岩の重心位置をスキャンしその点にブレーカーのノミ先を制御する。岩にノミを押し当てた後に打撃を加え岩が割れたら作業終了となる。

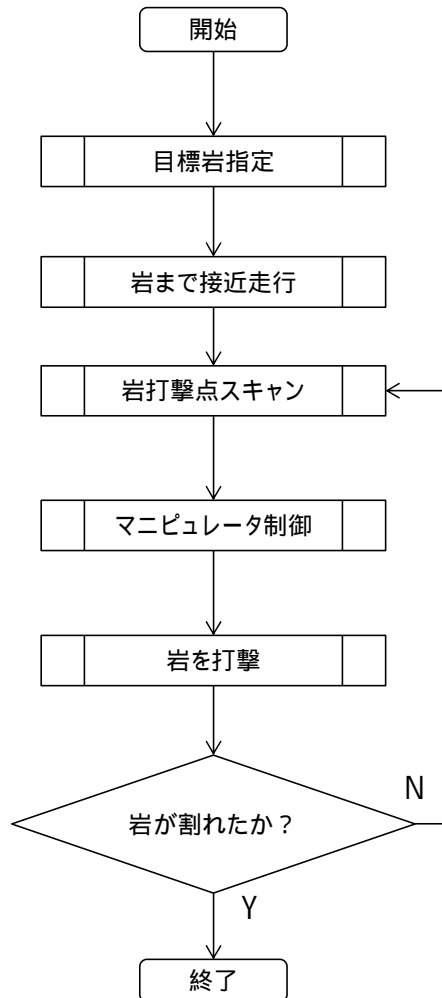


図-6.3.36 割岩作業全体概略フロー図

(1) 目標岩の指定

自律割岩作業を実行するには最初にホスト PC の車載カメラ映像に写っている岩を選択する。目標とする岩を選択したら自律開始ボタンを押すことで作業が開始する。図-6.3.37 に岩選択中のホスト PC 画面を示す。



図-6.3.37 岩選択中のホスト PC 画面

(2) 岩までの接近走行
アルゴリズム

自律開始スタートすると、岩までの方向と距離をステレオカメラで検出して打撃作業範囲に入る距離まで移動する。この時、岩目がけて走行するようにするために方向角度がズレている場合、左右のキャタピラに速度差により岩の方向を向くように制御する。バックホウの移動に伴って常に岩との距離と方向を検出できるようにするため、画像毎の岩の相関を取り続けることで岩を自動追尾することを可能とし岩の指定は最初の一度きりで後は自動で算出される。図-6.3.38 に岩までの接近走行イメージを示す。



図-6.3.38 岩までの接近走行イメージ図

バックホウ搭載時のステレオカメラの精度

バックホウに搭載したステレオカメラにより岩認識精度を検証した。また、ステレオカメラは一般的に中心付近の精度が良く、画像端部においては精度が悪くなるので中心からどのくらいの範囲までが適しているのかを検証した(図-6.3.39)。検証には 250mm の小岩と 1000mm の模擬岩を使用した。図-6.3.40 に実験結果を示す。グラフは縦軸に精度、横軸にバックホウに対して横方向位置である。結果から中心付近が最も精度よく端部での精度が悪かった。端部では明らかに精度が落ちている結果もあり、これはステレオカメラの左右画像が端部でかけてしまい左右の相関が取れなかったためである。



図-6.3.39 バックホウ搭載時のステレオカメラ精度検証

小岩 (Φ250mm)



模擬岩 (Φ1000mm)

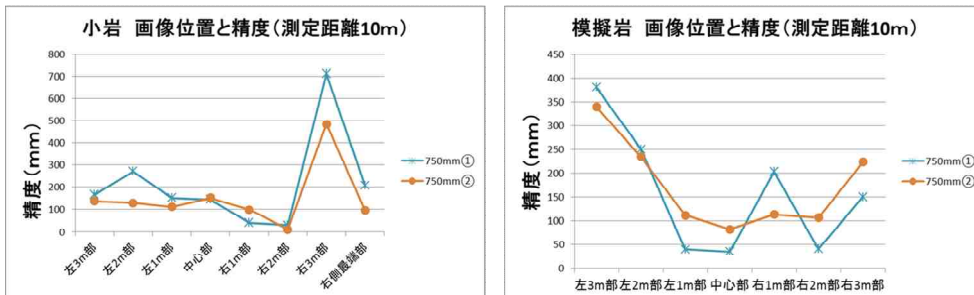


図-6.3.40 検証結果

(3) 打撃点スキャン

岩を打撃可能な範囲まで移動したら、ロックオンした岩の打撃点を計算するため、岩の3次元形状をスキャンする。この時もステレオカメラを使用しておこなう。ステレオカメラで得た3Dデータから重心位置を計算する。実際に打撃する点は岩の表面であるので得られた重心点の直上の点を打撃点とした。図-6.3.41 にスキャン実施状況、図 6.3.42 に3Dデータと実際の岩の写真、図-6.3.42 に打撃点の算出イメージを示す。



図-6.3.41 岩のスキャン中の画像

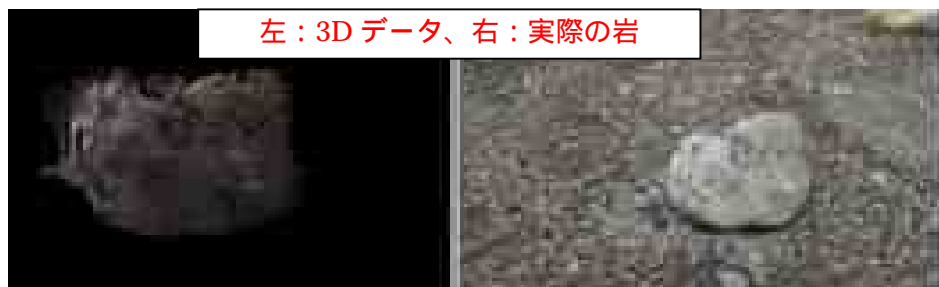


図 3D データと実際の岩

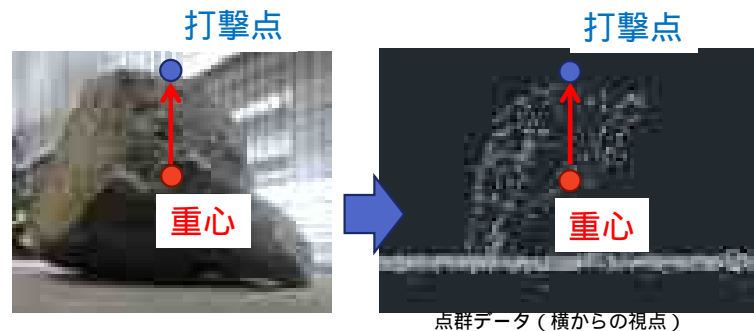


図-6.3.42 打撃点算出イメージ

(4) マニピュレータ制御
アルゴリズム

打撃点の位置が計算できたらその点にブレイカー、アーム、ブーム、旋回の4つの可動部（図-6.3.43）を制御してブレイカーの先端が計算された打撃点に来るように制御する。この時の制御方法としてブーム動作を最後に制御して岩に対してブレイカーを振り下ろすような動作になるようにした。図-6.3.44 にスキャン後～打撃点への制御前後の状況を示す。

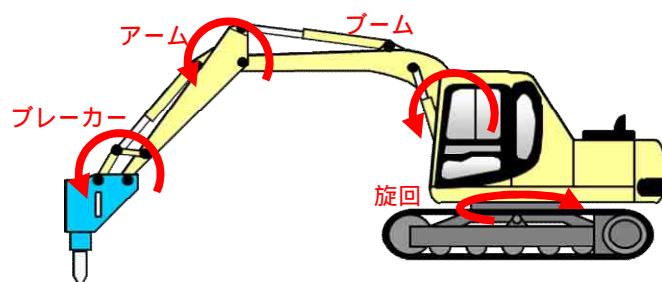


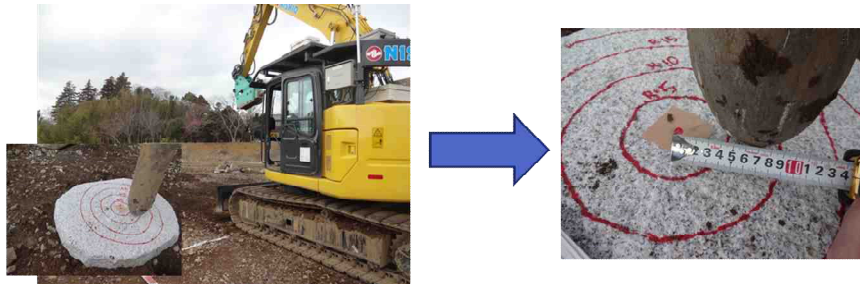
図-6.3.43 制御する可動部（マニピュレータ）



図-6.3.44 スキャン後～打撃点への制御前後の状況

ブレーカー先端位置決め精度

ブレーカー先端の位置決め精度を検証した。検証方法は 500～600 の的を使いど真ん中の点を指定しブレーカー先端の位置を制御した時のズレを見た(図-6.3.45)。また、油圧バルブの開閉量を変えマニピュレータの移動速度を変えた時の精度を検証した。結果を図-6.3.46 に示す。グラフは縦軸に精度、横軸にバルブの開閉量を取る。結果から最も良い時で精度±10cmであった。またバルブ開閉量と精度の関係についても開閉量を大きくするに従い精度が悪くなった。今回の位置決め精度の結果はステレオカメラ、機械の遊び、センサの精度などすべてを含んだ総合的なものである。



Φ500-600



使用した的

図-6.3.45 マニピュレータ位置決め精度検証

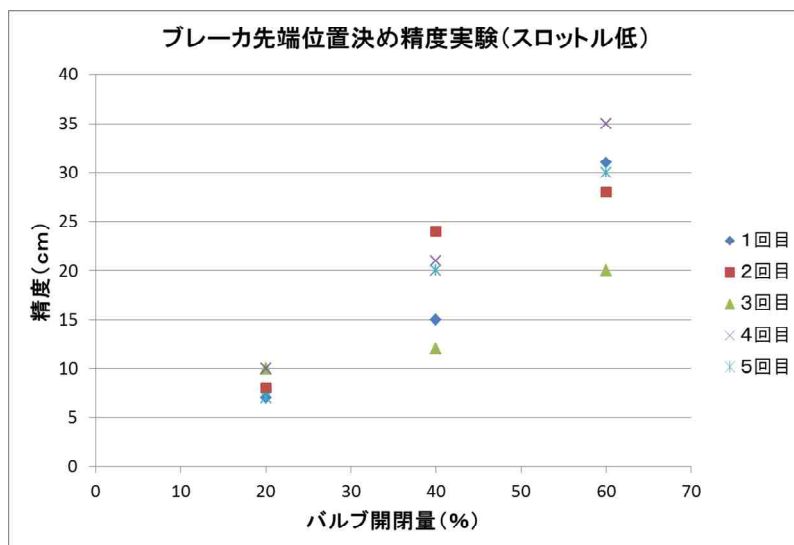


図-6.3.46 検証結果

(5) 岩の打撃（割岩判定）

岩の打撃点にブレイカー先端を押し当てたら打撃を開始する。打撃動作から打撃終了を判断するために岩が割れたかどうかを判断する必要がある。割岩作業はブレイカーを押し当てることでブーム油圧シリンダーの引き側の圧力が上昇する。この状態で打撃動作を加え岩が破碎されたときに一気に機体が下に下がることでブーム油圧シリンダーの引き側圧力が下がる。（図-6.3.47）この現象からブーム油圧シリンダーの引き側圧力の変化から岩が割れたかどうかの判断ができる。また、図-6.3.48 に岩への照準、押当・打撃、割岩時のブーム油圧シリンダー引き側圧力変化を示す。このグラフから押当・打撃時には圧力が 20MPa 程度まで上昇し割岩した時に 10～14MPa まで下がった。割岩判定圧力設定をこの間に設けることで割岩を判断できる。

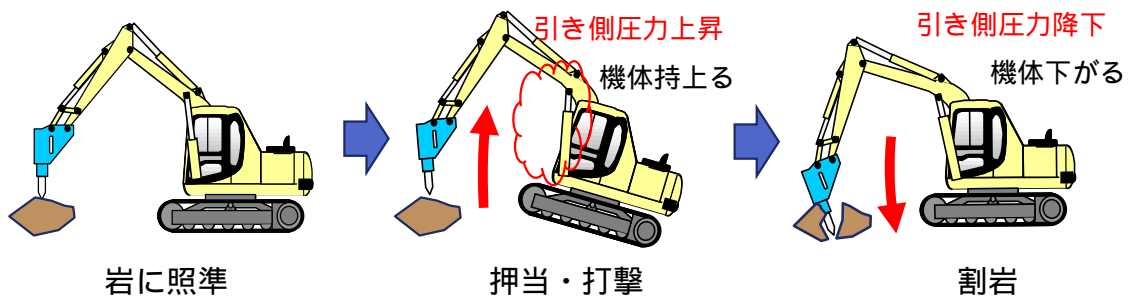


図-6.3.47 岩への照準から割岩までの動作イメージ

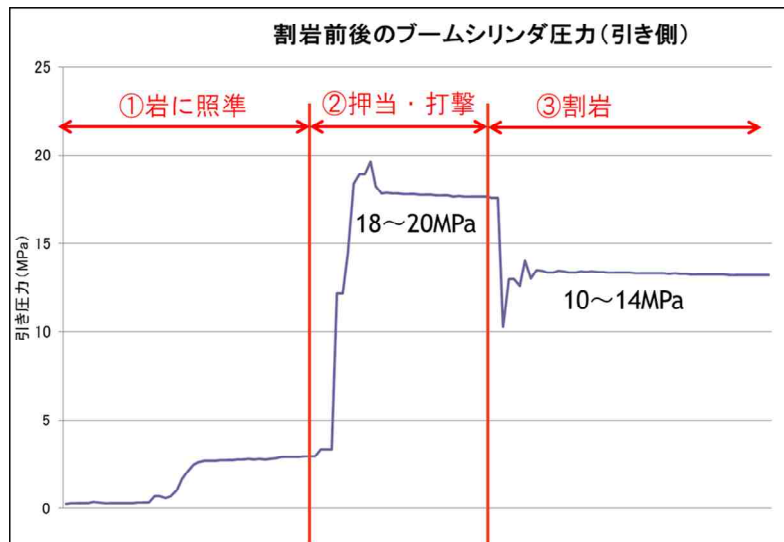


図-6.3.48 岩への照準、押当・打撃、割岩時のブーム油圧シリンダー引き側圧力変化

6.3.6 自律割岩作業

(1) 自律ブレイカー搭載バックホウによる自律割岩作業

開発した機械を使用しての割岩作業を実施した。図-6.3.49 に割岩作業シーケンスを示す。実際に割った岩を図-6.3.50 に示す。実験に使った岩で一つだけ硬くて割れなかった岩があったが、岩はどれも重心位置を捉え打撃を加えていることが分かる。図



図-6.3.49 割岩作業シーケンス

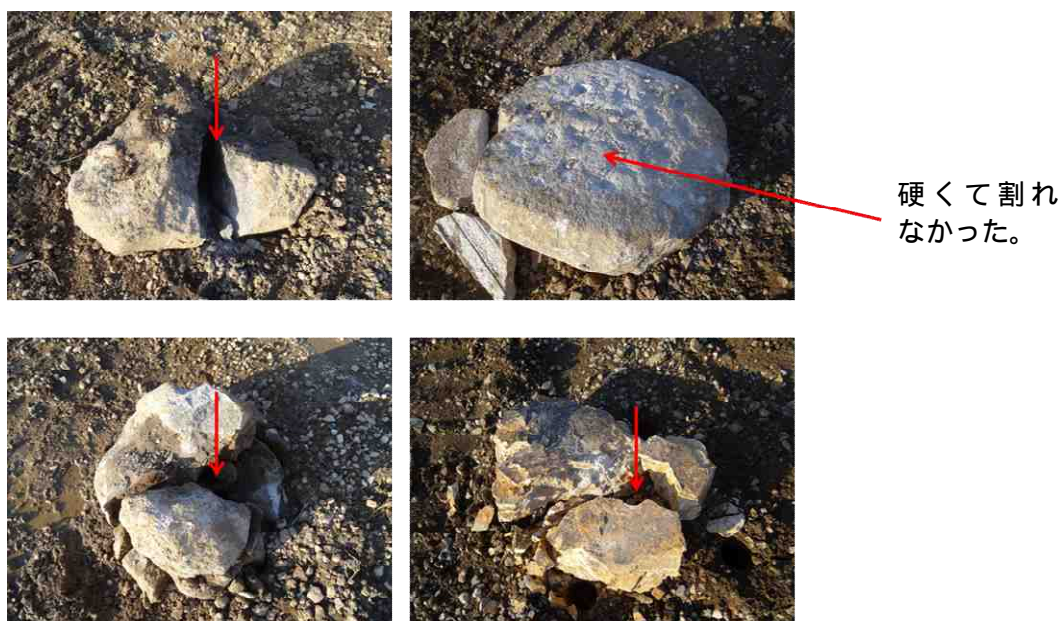


図-6.3.50 割岩作業をした岩 (700 ~ 1000mm)

(2) 割岩作業にかかる時間と成功率

割岩作業を繰り返し実行し、0.45m³級油圧ショベルにおいて10m程度離れた場所から割岩対象を決定し、機械の作業可能範囲に入るまで接近後、打撃位置にノミを当てて割岩体制に入るまでの所要時間と成功回数を実験した(図-6.3.51)。



図-6.3.51 割岩作業にかかる時間と成功率検証実験

実験結果

- ・ 所要時間：32秒～48秒(平均37秒)
- ・ 成功回数：56回/60回(93%)

内訳は、作業命令後岩塊迄のステレオカメラ計測を実施し走行開始までが3～5秒、接近走行が20～25秒、再スキャンが3～5秒、打撃体制迄が6～13秒という結果であった。

(3) 従来無人化施工との比較実験

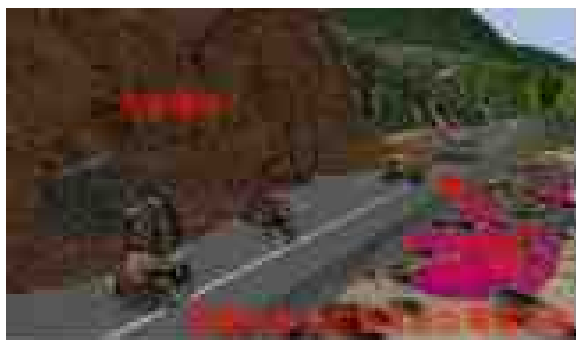
従来の無人化施工において、目視ができない50m程度以上の遠隔操作を行う場合は、作業機械に搭載したオペレーター目線のカメラ映像と作業場所が俯瞰できる数台のカメラ映像によって作業を行っている。作業場所の俯瞰カメラは作業内容やオペレーターの経験により、台数や配置場所が決定される無人化施工の効率を左右する重要な支援機械である。図-6.3.52はその一例で、履帯式の移動機構と耐震雲台付きカメラを高所に揚げることのできるマニピュレータを持つ油圧ショベルの様な機械をベースマシンとした構造で、一般的に移動カメラ車等と呼ばれている。



図-6.3.52 移動カメラ車

この移動カメラ車は非常に使い勝手が良く、雲仙普賢岳のような大規模な復旧災害現場であれば必要不可欠であるが、作業機程度のベースマシンを持つ特殊機械であること等から高価である事と、操作室内においては、重機オペレータが要求するモニタを切替表示作業や、走行移動する作業機を追尾するための「カメラ専用オペレータ」が必要となり、経済面と労務面で現場負担が少なくない。

また、近年は無人化施工の適用が増加しており、突発豪雨によって発生した土砂災害により寸断された道路復旧等の比較的小規模な現場においても無人化施工が採用されるケースも散見されるようになった。そういった現場においては、場所の狭隘さや立地や地形等の条件から作業場所を俯瞰できる位置に移動カメラ車が配置できない現場（図-6.3.53 左：陸続きで作業場所が見渡せる場所有。右：被災箇所が水辺に近いため作業場所を見渡せる場所無）も存在する。作業機械の車載カメラのみでは「奥行」が把握しにくいいため、作業効率が上がらないというケースもしばしば存在する。そういったとき、操作命令のみで一定の作業を実施できる本件の開発の利用が期待できる。



この箇所は極が取得可能

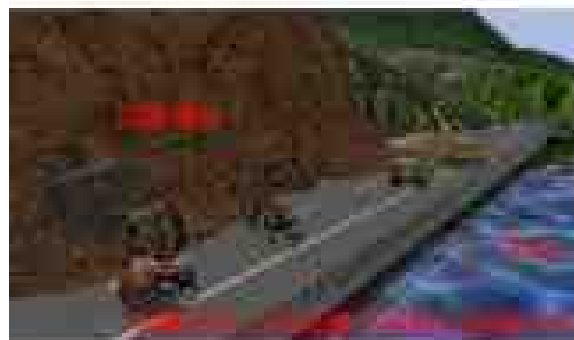


図-6.3.53 災害現場の例

実験条件

本研究開発のアルゴリズムを着脱式遠隔操作方式 0.45m³ 級油圧ショベルに適用し（ブレーカーは 0.9t）、下記の三名により作業にかかる時間を比較した。

- ・一般施工経験 40 年（含、20 年の無人化施工経験）のベテランオペレータ
- ・一般施工経験 20 年の一般オペレーター
- ・本研究開発に従事した研究員

自機から 10m の位置に設置した 1,000mm 程度の割岩作業を、モニタのみを見て遠隔操作する作業時間を比較する実験をそれぞれ 3 回連続 1 セットとして 3 日間に分けて 5 回実施した。なお、時間はノミを岩塊に圧接する「割岩体勢」迄としており、エンジン回転数は「低速」という条件とした。

実験は下記の二通りのパターンで実施した。

従来の無人化施工で実施するような俯瞰映像と車載カメラの 2 画面で作業
俯瞰映像が無い車載カメラのみの 1 画面での作業

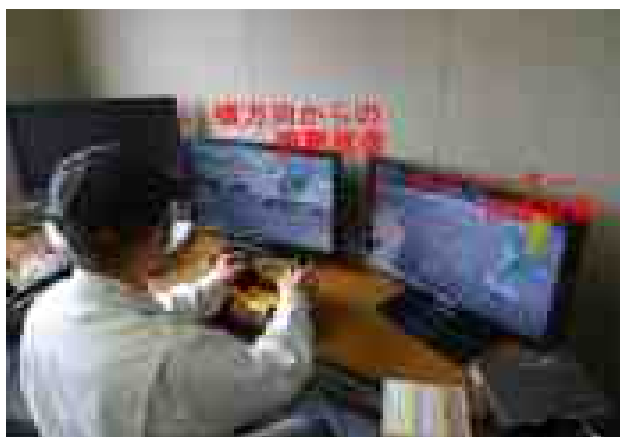


図-6.3.54 二画面による作業

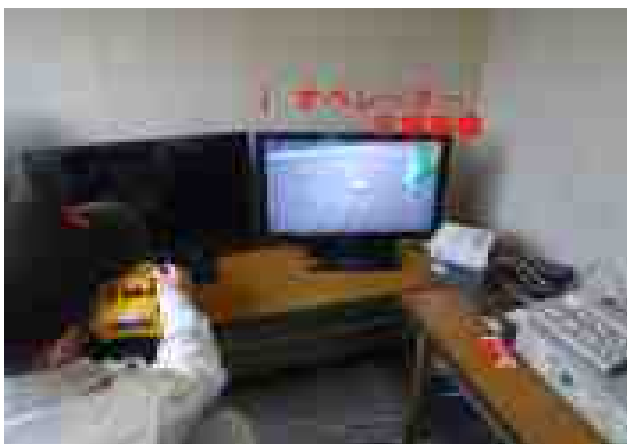


図-6.3.55 一画面による作業

実験結果

表-6.3.5の結果から、従来の無人化施工方式で実施した場合は、経験の差が如実に出る結果となっている。研究員はともかく、一般施工経験20年のオペレーターといえども、無人化施工経験オペレーターと差が付く結果となっており、遠隔操作が誰もが簡単に実施できるものではないという事を証明する結果になっている。

本研究開発である自律制御式と比較したいのが、俯瞰映像が無い車載カメラのみで作業した場合である。これも、経験の差の順に時間がかかっている事と、俯瞰画面が無いことによる奥行き感の不透明さが各オペレーターの作業効率を低下させている事がわかる。それらに対し、自律制御式はベテランオペレータ位の作業時間となり、遠隔操作オペレーターが確保できない現場において無人化施工を行うとき、支援する技術として期待ができるものであることが証明された。

本実験では、ベテランオペレータでさえ、1回でノミを圧接させる事ができないという事も発生しており、俯瞰映像の重要性を改めて確認する事となったが、逆に俯瞰映像用機器が無くても、自律制御を用いればここまで出来るという可能性を示すものとなった。ベテランオペレータの作業時間は、今後の割岩自律制御の性能向上の指標としたい。また、自律制御された場合はノミを正確に岩塊の重心に当て、地面に向かって垂直に捉えているようであったが、オペレーター操作の場合の正確さについては本実験では評価の対象としていなかったが、恐らく自律制御の物と比較してばらつきがあったものと考え（図-6.3.56）。

表-6.3.5 タイムトライアルの結果

	ベテラン OP	一般Op	研究員	自律制御
2画面利用 【車載+ 横俯瞰】	35~ 45秒	40~ 50秒	50~ 60秒	
1画面のみ 【車載のみ、 自律制御比較】	40~ 50秒	50~ 60秒	70~ 80秒	32~ 48秒



図-6.3.56 カメラ映像操作によるブレーカーの岩への圧接

6.3.7 まとめ

本技術は冒頭でも触れたよう、従来の無人化施工技術を進化させた技術で有り、オペレーター支援への可能性だけでなく、熟練工不足への対応としても期待が持てる技術であるため、次世代へ向けて本技術を発展させたいと考えている。無人化施工技術は、雲仙普賢岳等で行ってきた除石工・砂防堰堤構築等の土木工事の施工技術だけではなく、人間にとって苦渋な作業や、酷所環境における作業技術として多用され、改良・発展してゆくことが期待されている。よって将来的には、今回の様な単機種の単作業だけでなく複合機種の連携によって成り立つ単工種において自律化を実現する事が次世代無人化施工の向かうべき方向の一つであると考えられる。単工種において自律化が実現可能であれば、例として、近年突発的に発生する大型台風や局所豪雨がもたらす土砂災害は、道路を寸断させる等の災害をもたらすケースが少なくない。この場合、早期復旧のため24時間連続施工等が望まれるが、視認性の下がる夜間においては実施できないのが実情である。複合機種による単工種において夜間対応のセンサーにより自律化が実現できれば、図-6.3.57 の様に積込～処理に至る単工種の24時間連続施工等も期待が出来る。あるいは、無人化施工でない通常施工時のオペレーター支援技術として、自動車にアクセルペダルを常時踏まなくても一定速度を維持する機能が有るように、建設機械のある一つの作業について操縦桿を操作しなくても、一つのボタンを押したら実施するような技術に応用する事も不可能ではない(図-6.3.58)。例として、前述した割岩作業はノミを正確に岩塊の重心に当て、地面に向かって垂直に捉える事が作業のポイントであるが、技量と経験の浅いオペレーターでは搭乗していても垂直に当てる事が困難である。そういったシーンにおいて、本技術を応用して一つのボタンを押したら、ノミを最適圧接位置付近まで自動的に誘導する技術として本技術を展開できれば、建設生産システムに貢献でき国土の安全・安心に寄与していくことに期待ができる。



図-6.3.57 単工種における自律作業



図-6.3.58 操作支援ツールとしての活用

7. 研究成果の刊行に関する一覧表

刊行書籍又は雑誌名（雑誌のときは雑誌名、巻号数、論文名）	刊行年月日	刊行書店名	執筆者氏名
【雑誌、新聞】 ・ 建機ジャーナル ・ 日経ヴェリタス ・ 日本経済新聞 ・ 日経コンストラクション ・ 建設マネジメント技術 ・ 建設機械施工 ・ 建設機械	平成 25 年 10 月号 2014 年 5 月 4 日 2014 年 7 月 8 日 2014 年 8 月 25 日 2014 年 5 月 1 日 2015 年 3 月 25 日 2015 年 9 月(掲載予定)	共同メディア通信社 日本経済新聞社 日本経済新聞社 日本 BP 社 経済調査会 日本建設機械施工協会 日本工業出版	
【学協会等】 ・ “建設機械による無人化・自律施工”, 平成 26 年度建設技術報告会	2014 年 9 月 25 日	国土交通省北陸地方整備局北陸技術事務所	片山 三郎
・ “次世代無人化施工システムの開発～建設技術研究開発助成制度を活用した振動ローラの自律走行の実証～”, 第 69 回土木学会年次学術講演会	2014 年 9 月 12 日	公益社団法人土木学会	栗原 庸聡
・ “振動ローラの自律転圧走行の実証～次世代無人化施工システムの開発”, 平成 26 年度建設施工と建設機械シンポジウム	2014 年 10 月 26 日	一般社団法人日本建設機械施工協会	青木 浩章
・ “次世代無人化施工システムの開発 - 自律制御による転圧作業 - ”, 第 15 回建設ロボットシンポジウム	2015 年 9 月 7 日～9 日(投稿予定)	建設ロボット研究連絡協議会	片山 三郎
・ “次世代無人化施工システムの開発 - 自律制御による割岩作業 - ”, 第 15 回建設ロボットシンポジウム	2015 年 9 月 7 日～9 日(投稿予定)	建設ロボット研究連絡協議会	青木 浩章
・ “次世代無人化施工システムの開発～油圧ショベル装着ジャイアントブレイカーによる自律割岩作業～”, 第	2015 年 9 月 16 日～18 日(投稿予定)	公益社団法人土木学会	青木 浩章

<p>70 回土木学会年次学術講演会</p> <p>・“次世代無人化施工システムの開発”,平成 27 年度建設施工と建設機械シンポジウム</p>	<p>2015 年 12 月 1 日 ~ 2 日 (投稿予定)</p>	<p>一般社団法人日本 建設機械施工協会</p>	<p>青木 浩章</p>
--	---	------------------------------	--------------

8. 研究成果による知的財産権の出願・取得状況

知的財産権の内容	知的財産権の種類、番号	出願年月日	取得年月日	権利者名
無人化施工方法および自律走行用制御装置	特 願 2014-249176	平成 26 年 12 月 9 日	出願中	青木浩章 片山三郎 栗原庸聡

9. 成果の実用化の見通し

本研究開発により、振動ローラによる締固め作業とブレーカー搭載バックホウによる割岩作業の自律化に成功したことで、建設機械の自律による施工の可能性を見出すことができた。一方で本研究に得られた成果を実用化していく上でまず重要になっていくことが、人間との隔離や接触事故に関する制度作りやハードウェア的な安全機能の付加と言ったことが挙げられる。今後はこれら実用化に向けて必要になる研究を継続していくとともに、自律制御システムの実用化の方法として、全国に営業所を持つ西尾レントオール(株)の油圧建設機械遠隔操作化技術「HRC システム」のオプション機能として本開発技術を展開していくことを検討していく。

10. その他

特になし