

舗装現場の人力作業を軽減する自走式ロボットの導入と効果検証

(株)NIPPO 総合技術部 生産開発センター	立花 洋平
(株)NIPPO 総合技術部 生産開発センター	相田 尚
(株)NIPPO 総合技術部 生産開発センター	梶原 覚
(株)NIPPO 総合技術部 生産開発センター	駒坂 翼

1. はじめに

近年、今後の深刻化が予想される労働人口減少に対し、国交省が推進する i-Construction をはじめ、生産性向上に向けた様々な取り組みが行われている。最近では DX（デジタルトランスフォーメーション）という言葉を目や耳にすることが多くなり、デジタル技術を活用することで生産性の向上を図り、多様な働き方を選択できる社会の実現を目指す取り組みや技術開発が、社会全体で進行中である。

その一方、現状の舗装現場では、従来から変わらず人力で行われる作業が依然として多く、その作業のほとんどは人手を要し、時には身体的苦渋や危険を伴う作業も少なくない。3次元マシンコントロール、自動化といった一見華やかに映る技術の陰で、実際には人力による作業に多くの時間と労力が費やされている。

そこで、舗装の前後で行われている様々な作業に着目し、作業の省力化を図る目的で自動走行ロボットの導入を試みた。本論文では、自動走行ロボットの導入による効果、ならびに新たに開発した自走式ロボットについての概要を述べる。

2. 舗装現場における人力作業

舗設作業に際し、主に人力で行われている作業を以下に示す。

- ① 舗装のレーン割りおよび通り出しマーキング
⇒ 施工機械の幅員や材料運搬車両の動線を考慮し、

舗装型枠を設置するための基準線の明示

⇒ 切削オーバーレイ工では路面切削端部の明示
(写真-1)

- ② 舗装型枠の設置、撤去
⇒ 舗装型枠の配置と鉄ピンや釘を使用した固定および舗設完了後の撤去
- ③ 舗装端部への乳剤塗布
⇒ 縦横断ジョイント部への刷毛を使った乳剤塗布
- ④ 舗設作業時の端部整形（レーキ作業）
- ⑤ プレートを使用した端部締固め、ジョイント処理
- ⑥ 舗設終点での余剰材撤去および整形
- ⑦ 出来形検測の位置出し



写真-1 高速道路での通り出し作業状況

上記作業において、共通している課題が以下の3点である。

- 1) 連続した中腰作業や、『しゃがむ』と『立つ』を繰り返すため身体的な苦渋を伴う

- 2) 規制内の供用車線側の作業は、走行する一般車両に隣接しての作業となるほか、複数の重機が稼働する中で作業では、重機オペレータの死角に入る場合もあり危険である
- 3) ほとんどが複数人を要する作業であり、非効率的である

まずは、規制の有無を問わず、舗設作業前に必ず行われる路面マーキング作業に着目し、当該作業を自動で行う装置について調査を開始した。

3. 既存技術の調査

調査を進めると、道路標示を自動作図する装置や建築現場での墨出し作業を自動で行うロボット技術が国内に存在していた。しかし、屋外かつ延長が長い舗装工事の特性や走行可能な勾配、位置の制御方法などの観点から舗装現場への導入は難しいと判断した。

海外に目を向けると、特にサッカーやラグビーの盛んな欧州では、全球測位衛星システム（以下、GNSS）による位置情報やターゲットを基準とした自動制御によるラインマーキング装置が多く存在した。これらの中に、市販の路面標示用スプレー缶を使用し、GNSSによる誘導で自動描写する自走式ロボットがあった。日本国内でも適用可能と判断したうえ、座標通りに走行できればマーキング以外の様々な用途での活用が考えられ、導入することとした。

4. GNSS を用いた自動走行ロボット

4.1 導入した自動走行ロボットの概要

当該ロボット（写真-2）は、仮想基準点方式のGNSSにて自己位置を取得し、あらかじめ現場座標に合わせた線形（dxf）データを読み込み、その線形通りに自動走行しながらスプレーマーキングを行う機能を有している。表-1 に主要諸元を示す。



写真-2 自動走行ロボット（右上；後部写真）

表-1 自動走行ロボット諸元

項目	単位	諸元	
重量	kg	22（バッテリー:4kg）	
寸法	縦	mm	804
	横	mm	688（オフセットなし時）
	高さ	mm	491
連続稼働時間	h	8	
充電時間	h	5（0%～満充電まで）	
マーキング精度	cm	±2	
バッテリー	-	リチウムイオン式	
マーキング	-	市販スプレー缶使用	

ロボットの操作は専用アプリがインストールされたタブレットで行う。このアプリ内で線形のオフセットや延長などの編集が可能である。現場の形状にもよるが、基準となる線形データが1本あれば、アプリ内での編集により現場条件に合わせたラインマーキングが可能であり、CADシステムによるデータ作成は比較的容易に行える。

4.2 試用状況

2019 年末に試験導入し国内での使用環境を整え、2020 年末までに関東、東海を中心に約 20 現場にて試用した。規制を伴わない工事をメインとし、多くのレーンを施工する広大な民間工事、港湾ヤードの舗装工事など、他、高速道路の修繕工事にて試用し効果を検証した。写真-3 にその状況を示す。



写真-3 現場試用状況

4.3 効果検証

4.3.1 身体的負荷

現場作業員から聞き取り調査を行ったところ、路面マーキング作業においては、方法にもよるが、概ね延長 50m で息切れや足腰の疲労を感じるという結果であった。そこで、人力作業とロボット作業での身体的負荷を比較検証した。

検証方法は、年齢 20 代、30 代、40 代の 3 名に心拍数を測定できる端末を装着し、延長 500m 区間における作業での心拍状態を比較した。人力作業は縦断 20m ピッチにメジャーを用いてポイントを出した後、スプレーによる通り出しと、パッチンと呼ばれる粉チョークを使用した墨つぼによる通り出しの 2 通りとした。図-1 に各作業での被験者の状態を示す。検証は 2 日間行い、1 日目に人力作業、2 日目にロボット作業とした。比較表を表-2 に、代表として被験者 A (40 代) の心拍数変化グラフを図-2 に示す。

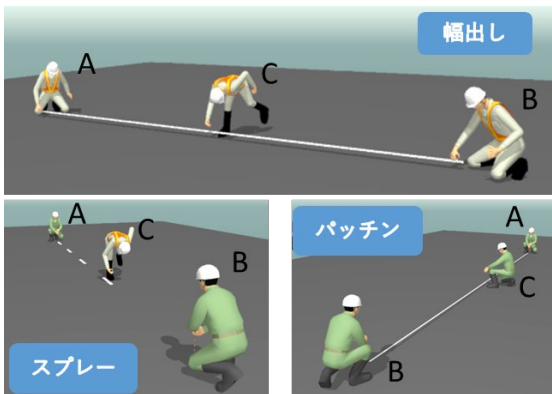


図-1 被験者の状態

表-2 作業および個人別心拍数比較 (bpm)

作業	被験者	開始	終了	上昇値	平均	
人力作業	幅出し	A	112	120	8	21
		B	78	111	33	
		C	98	119	21	
	スプレー	A	105	124	19	21
		B	87	116	29	
		C	111	126	15	
	パッチン	A	134	144	10	24
		B	94	127	33	
		C	87	116	29	
ロボット作業	A	113	113	0	-3	
	C	104	100	-4		
	A	119	108	-11		
	C	121	126	5		

検証データより、人力作業では、作業開始 10 分程度で各人の心拍数が平均 20bpm 上昇し、短時間に大幅な心拍数の上昇が認められた。10 分経過以降の心拍数は高めを維持し、緩やかだが上昇傾向にあることがグラフより読み取れる。

一方、ロボット作業においては、各人を平均すると目立った心拍数の上昇は確認できず、むしろ開始時より数

値が下がる場合もあった。自動走行ロボットに並走する必要はあるが、一般的な歩行と同レベルの負荷であり、人力作業と比較すると大幅に負荷が低減されることが分かった。施工レーン数の多い工事ではより効果が大いいと推測される。

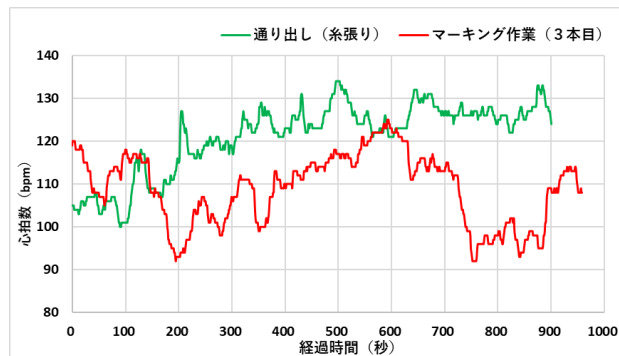


図-2 心拍数の変化 (被験者 A)

4.3.2 安全性

規制内での供用車線側のマーキング作業は、作業員においてだけでなく、供用車線を通過する一般車両の運転者も危険と感じる。

ロボットを操作する人員は立ったままの状態であるため、しゃがんで作業する従来作業よりも走行車両から視認されやすい。また、当該ロボットはスプレー機構部を左右へオフセットすることが可能であり、規制端から離れた位置で作業できるため、安全性は格段に向上する。万が一の逸脱に備え非常停止スイッチを追加した。写真-4 に作業状況を示す。

しゃがんだ状態での作業がなくなったことで、規制を伴わない工事で複数の重機が稼働する現場においても、重機オペレータからの視認性が向上し、死角に入ることが軽減され、安全性の向上が図れる。



写真-4 規制際での自動走行ロボット作業と非常停止スイッチ (左上)

4.3.3 作業効率

試用した 5 現場について、人力作業とロボット作業状

況の比較、およびロボットの使用による効果を検証した。その結果を表-3に示す。A～D工事は規制を伴わない工事、E工事は高速道路の切削オーバーレイ工事である。表の値は、同じ面積においてマーキング作業に掛かる人員数と時間を実際に計測した値であり、人員数に時間を乗じた値を作業効率として比較したものである。

表-3より、規制を伴わない広大な面積を施工する工事では、人力作業に比べロボット作業では作業人員で約1/5、作業時間で約1/2、作業効率は平均10倍程度の向上効果を得られることが分かった。

表-3 作業状況比較

		A工事	B工事	C工事	D工事	E工事
施工規模	延長(m)	300	500	120	60	400
	面積(m ²)	60,000	12,500	15,000	65,000	1,820
人力作業	人員(人)	4	5	4	6	4
	時間(h)	28.0	5.0	6.0	0.8	0.4
ロボット作業	人員(人)	1	1	1	1	1
	時間(h)	7.5	2.3	3.5	0.25	0.67
効率比較	人員削減(%)	75.0	80.0	75.0	83.3	75.0
	時間削減(%)	73.2	54.0	41.7	68.8	-67.5
	効率(倍)	14.9	10.9	6.9	19.2	2.4

単純作業での効果は以上の数値となるが、自動走行ロボットの導入によりマーキング作業に掛かる人員が減るため、削減された人員を別作業へ配置することも可能となる。これにより他の準備工に掛かる時間も削減され、現場全体の進捗に寄与することができる。

以上を踏まえ、当該ロボットの導入効果は大きく、身体的負担、安全性、作業効率、いずれも大幅に改善されることが分かった。特に面積が広く、施工レーンの数が多い現場では、当該ロボットの性能を最大限に活かすことができる。

5. 規制工事におけるマーキング作業への対応

表-3において、E工事は高速道路の切削オーバーレイ工での検証結果である。この工事では、作業人員は減るものの作業時間は削減されない。これは、修繕工事では

図面や座標を使用しない工事がほとんどであり、事前に行う自動走行ロボットの線形データ作成に必要な測量作業やCAD作業の手間が増えたためである。修繕工事においては、現場入場後、いかに早くマーキング作業を済ませ、路面切削作業を始めるかが、重要である。そこで、座標や線形データを使用せず、現地合わせでマーキング作業ができる装置が有用と判断した。

まず、高速道路の修繕各工事を調査したところ、大半の工事で車線中央の破線を幅出しの基準としていることから、破線のインターバル区間を補完する装置を開発することとした。

5.1 基準物追従型自走式ロボットの開発

前述の調査結果を基に装置のコンセプトは、基準となるターゲットを破線の端部に置き、そのターゲットに向かって自動走行しながらインターバル区間のマーキングを行う自走式ロボットとした。作業イメージを図-3に示す。

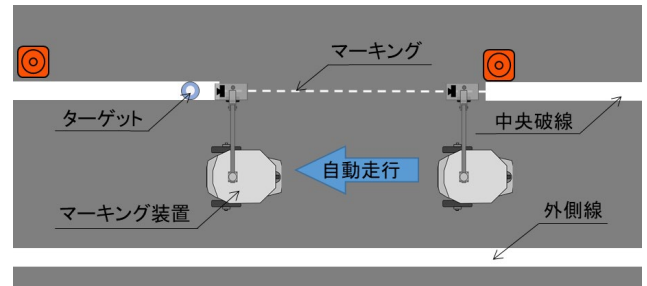


図-3 規制工事における作業イメージ

ターゲットは自発光マーカとし、ロボットに取り付けられた小型カメラで、そのマーカを画像認識して、直進するロボットとした。この自発光マーカは、供用車線を通す一般車両への影響を考慮し不可視光LEDとした。また検知精度を高めるため太陽光に含まれない波長の光源を使用することとした。

これらの条件を基に、小型カメラ、自発光マーカを選定し要素試験を行った結果、太陽光のエネルギーが高く、選定した小型カメラでは背景の映り込みを完全に防止できず、自発光マーカと背景が同化するため、区別がつかないことが分かった。そこで、自発光マーカに裏板を設置し画像内から孤立させ、また、縦長で上下2分割形状にし、自然界にも人工物にも存在しえない形状に改良した。カメラ側もPC設定により、露光時間調整や検知面積設定などの処理を施し、自発光マーカのみ認識できるようにした。写真-5に小型カメラの画像を示す。



写真-5 小型カメラによる画像（左；処理前 右；処理後）
※、赤丸部が自発光マーカ

認識された自発光マーカが画像中央に来るように左右のモータ駆動を自動調整するアルゴリズムを設定し、自走式ロボットの試作機が完成した。完成した自走式ロボットと自発光マーカを写真-6に示す。有線コントローラを有し、自動ボタンを押している間のみ自動走行する。これは、暴走や逸脱時に安全圏内で即時停止できる設計としたものである。

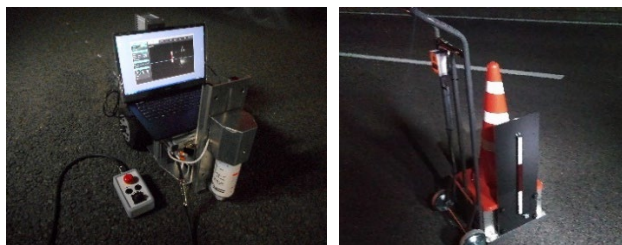


写真-6 自走式ロボット（左）と自発光マーカの試作機（右）

5.2 現場供用試験

試作機の完成後に性能確認試験を行ったところ、目標精度とした基準線からのずれ量 $\pm 2.5\text{cm}$ をクリアし、自発光マーカの認識状況、マーキング状況などは良好な結果であった。これを受けて、まずは一般国道の修繕工事にて現場供用試験を実施した。写真-7に試験状況を示す。



写真-7 現場供用試験状況

供用試験は、作業人員や時間の他に、規制と自発光マーカの位置関係やロボットの走行位置、路面勾配や走行車両から受ける風圧の影響、路面切削実施面での走行性能などを確認し、いずれについても良好な結果を得た。表-4に試験結果を示す。

表-4 現場供用試験結果

項目	人員	100m当り 作業時間	基準からの ズレ幅	規制端での 作業
	(人)	(分/100m)	(cm)	(分/100m)
人力作業 (パッチン)	2~3	7	-	7
ロボット作業	2	5.6	± 1.0	1

表-4より、当該ロボットにおいても、人員および作業時間ともに、人力作業に比べ削減できることが分かった。人員については、自発光マーカ設置に1名、ロボット操作に1名の計2名を必要とするが、身体的負担や規制端での作業時間は大きく軽減されており、省力化および安全性の向上は図れる。

当該ロボットは座標や線形データ作成が不要であり、現地の既設白線に合わせたマーキングが可能であるため、高速測道路路修繕工事の切削オーバーレイ工での使用に最適と考える。

6. 自動走行ロボットの応用

前述した2つの自走式ロボットにより工事種別を問わず、舗設作業前における路面マーキング作業の省力化と効率化を図ることが分かった。そこで、路面マーキング作業以外へ活用範囲を広げるべく応用を検討した。特にGNSSを用いた自動走行ロボットは、プログラムされた線形を高精度で走行する機能を持つが、これは、UAVが設定された飛行経路を自動飛行する機能と同じであり、「地上型ドローン」、あるいは「走るドローン」とも言える。この特性を活かし、以下の用途での適用を検討した。

- ① 自動追尾トータルステーション（以下、TS）を併用した出来形検測
- ② 平坦性試験
- ③ 舗装端部への乳剤散布
- ④ 電磁波レーダを搭載しての路面下（地中）調査
- ⑤ AIカメラを搭載し、現場調査や安全パトロールでの活用

上記、5項目のうち、出来形検測と平坦性試験について、検証を始めた。

6.1 検証の概要

写真-8のように、自動走行ロボットにTS用360°プリズムを取付け、当該ロボットの自動走行およびTSの

自動記録機能を併用し、延長 500m 区間の各測点 (20m ピッチ) における高さ、および検測時間について、TS による通常の検測方法と比較した。測定区間の勾配は縦断方向がレベルで、横断勾配は一定である。



写真-8 自動走行ロボットでの検測状況

6.2 検証結果

検証の結果、自動走行ロボットで取得した高さは、標準偏差で 3mm 程度と満足できる数値であった。

検測時間については、人力作業約 2 時間に対し、ロボット使用では 1 時間程度とおおよそ半分の作業時間となった。また、測定員が検測ポールを持って移動することがなくなり測定員の身体的負担が減るため、大きく省力化されることがわかった。

自動走行ロボットを用いた出来形検測と同様の方法で、測定ピッチを 1.5m で自動記録し、その高さデータから標準偏差を算出することも可能である。さらに、人力でけん引していた 3m プロフィールメータを当該ロボットでけん引することもできた (写真-9)。



写真-9 自動走行ロボットによる 3m プロフィールメータのけん引状況

これらの応用技術は、品質管理業務の手間を大幅に軽減できると考えられる。今後、精度検証を進め、適正な走行速度など使用条件を定めマニュアルを整備する予定である。

7. まとめ

今回、導入した 2 つの自走式ロボットは、路面マーキ

ング作業において従来作業と比較し、作業員の身体的負担、安全性、作業効率、いずれにおいても大幅に改善されることがわかった。以下にその効果をまとめる。

1) 身体的負担

身体的負担は、作業中の心拍数比較で人力作業においては平均 22bpm の上昇に対し、当該ロボット作業ではほぼ上昇しない。

2) 安全性

2 つの自走式ロボットともに、規制端から離れての作業が可能であり、従来作業では 100m あたり 7 分間あった規制端での作業が 1 分程度に軽減される。また、しゃがんで作業することがないため、供用車線を通行する一般車両や重機オペレータからの視認性も上がり、安全性の向上が図れる。

3) 作業効率

規制を伴わない工事に GNSS を用いた自動走行ロボットを適用した場合、人力作業と比較し、作業人員は約 1/5、作業時間は約 1/2、作業効率は 10 倍程度向上する。

規制工事に基準物追従型自走式ロボットを適用した場合、100m あたり約 20%作業時間が短縮されることがわかった。

4) 他作業への適用

どちらの自走式ロボットも走行精度は高いが、GNSS を用いたロボットのプログラムされた線形を高精度でトレースする特性を活用し出来形検測などへ応用でき、品質管理業務でも省力化を図れることがわかった。

8. おわりに

本報告は、従来現場で当たり前のように行っていた作業が、小さなロボット 1 台で大きく変わった一例である。何かを変えるためには、まず現場で働く一人ひとりがこれまでのやり方に疑問を持ち課題と認識し、新しいやり方に挑戦、実践することが重要と考える。

建設現場にはまだまだ改善できる作業が多く存在する。今後も生産性・安全性向上に向けた取り組みを推進して働き方を見直し、更には舗装業界全体のイメージアップにつなげていく所存である。

<参考文献>

- 1) 立花ほか；令和 2 年度 建設施工と建設機械シンポジウム、路面自走ロボットを活用した舗装工事の省人化技術