

垂直・水平自動搬送システムの概要と現場適用

DEVELOPMENT OF A VERTICAL AND HORIZONTAL AUTOMATIC TRANSFER SYSTEM AND PRACTICAL APPLICATION

岡田 大輔*¹, 市村 元*¹, 松岡 明彦*¹, 鈴木 信也*¹, 山本 真之*¹

Daisuke OKADA, Hajime ICHIMURA, Akihiko MATSUOKA, Shinya SUZUKI and Masayuki YAMAMOTO

In order to enhance productivity for hauling, the authors have developed an automatic material-hauling system using a link between an ELV for construction and an ultra-lowdeck AGV, which can be operated in both horizontal and vertical directions, starting from the temporary storage area on the access floor to the destination storage (hauling destination) on the destination floor.

This paper reports the configuration of the system, the verified functions at the site and the operation at the actual site. The test at the construction site confirms that this new system is able to produce desired transportation productivity at construction sites.

Keywords : Automated Guided Vehicle, Radio Frequency Identifier, Simultaneous Localization and Mapping, Labor saving AGV, RFID, SLAM, 省力化

1. はじめに

従来の建設現場における建築資機材の搬入では、搬入車両からの荷下ろしをはじめ、工事用 ELV による目的フロア到着後の所定の位置への移動のすべてを人の手で行ってきた。これらの運搬作業は重労働であり、多くの人手を必要とする一方で、建設業界は作業員の減少や高齢化が進んでおり、作業の省力化が求められていた。

筆者らは搬送作業の生産性向上を目的として、垂直・水平自動搬送システムを開発した。本報では、本システムの概要および現場環境における検証、本システムを適用した現場における運用について報告する。

2. 概要

2.1 垂直・水平自動搬送システム概要

本システムの概要図を図 1 に示す。本システムは、工事用 ELV と超低床型 AGV^{注1} (以下、SL-AGV) を連動させることにより、搬入階の仮置き場から搬送階のストックヤード(搬送先)まで自動で搬送するものである。

事前に管理者は管理 PC にて搬送する資材の情報(搬送日時、搬送階、搬送先、資材名、資材サイズ等)を RFID^{注2} タグに入力し、搬入階および搬送階の SL-AGV の走行ルートを設定する。搬送当日は搬入車両から資材を下ろし、搬入階にて仮置き場に集積する。その際、仮置き場前に設置された RFID アンテナにて各資材の RFID タグを読み取り、読取可否をパトライトにて管理者に通知する。それにより、入力された情報をもとに管理 PC が工事用 ELV および

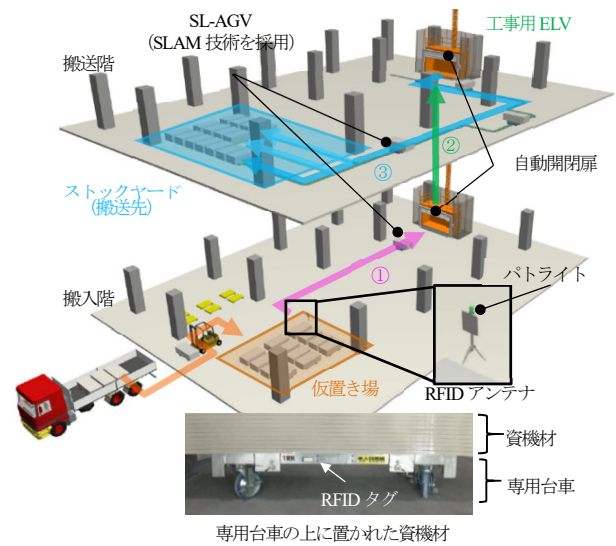


図 1 垂直・水平自動搬送システム概要図



写真 1 SL-AGV 写真 2 自動開閉扉設置状況 写真 3 RFID タグ

*1 戸田建設株式会社技術開発センター

SL-AGV を制御する。仮置き場に資材が集積された状態で管理 PC からスタート指示を行うと、搬入階に配置された SL-AGV が仮置き場から資材を取り出し、工所用 ELV 内に積み込む。資材の積み込みが完了されたと同時に、工所用 ELV 前に設置された自動開閉扉が閉まり、工所用 ELV が搬送階へ移動する。搬送階へ着床すると、搬送階の自動開閉扉が開き、SL-AGV が工所用 ELV 内から荷を取り出してストックヤードまで資材を搬送する。資材の取り出しが完了されたと同時に、工所用 ELV は自動開閉扉が閉まり、搬入階へ戻る。（この一連動作を繰り返すことができる。）この自動搬送までのフローを図2に示す。

従来はELV オペを含めると3人～5人で行っていたところ、本システムを適用すると管理者1人で行うことが可能になり、省力化を図ることができる。

2.2 SL-AGV 仕様

本システムで使用する SL-AGV の基本仕様を表1に示し、SL-AGV の平面図を図3に示す。SL-AGV は車高170mmの超低床型となっており、資材（専用台車）の下部に潜り込める設計となっている。資材の搬送方法は専用台車の下部で牽引ピンを上昇させ、専用台車受け穴に接続させることにより搬送する牽引搬送と、資材の下部で直載せテーブルを上昇させることにより搬送する直載せ搬送の2種類がある。牽引搬送はSL-AGV の天端より昇降する牽引ピンの先端および専用台車裏面の受け穴がテーパー状になっているため、直載せ搬送に比べて荷取り精度の安定性が高い。写真4に示す専用台車は前面にあるレバーを水平方向にすることにより、キャスターのブレーキが効くようになっており、SL-AGV の牽引ピンが接続するとそのブレーキが解除される機構となっている。また、SL-AGV の天板に写真5に示すガイド金物およびストッパーを取り付けることで、前後左右の位置が誘導されることにより、荷取り精度がさらに向上する。

SL-AGV のステアリング方式は二輪速度差方式を採用しており、基本的な旋回は一度停止してからその場で左右の駆動輪を反転させることで旋回し、進行方向を変えて直進する。牽引搬送状況を写真6に示し、直載せ搬送状況を写真7に示す。

SL-AGV は SLAM^{注3} 技術を採用することで、磁気テープやマーカー等のガイドを設置せずに自律走行することが可能となっている。その準備作業として、搬送するエリアを事前に走行させて周辺の地図を作成（マッピング）する。その地図と搬送時の周辺環境と照合させて自己位置推定および自動搬送を行っている。マッピングによって作成した地図を図4に示し、管理 PC にて設定した SL-AGV の走行ルートを図5に示す。



図2 自動搬送フロー図

表1 SL-AGV 基本仕様

本体寸法	W680mm×L1200mm×H170mm
速度	最大 30m/min
牽引・積載荷重	最大 1000kg (推奨 800kg)
車体重量	約 200kg
連続走行可能時間	4H (充電時間 1H)
ステアリング方式	二輪速度差方式
走行可能段差/勾配	最大 12mm/9% (実験結果)
安全機構	前後に1個ずつレーザー測域センサ搭載 障害物検知機能あり (衝突回避)

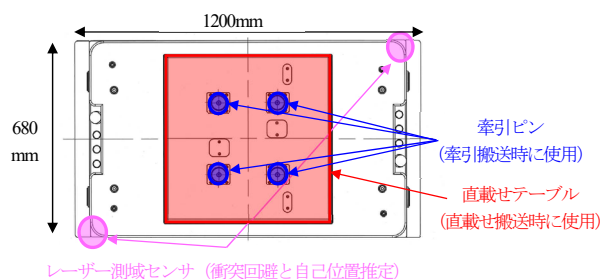


図3 SL-AGV 平面図

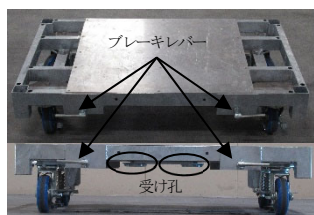


写真4 専用台車

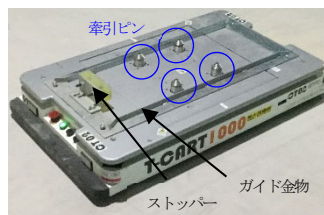


写真5 ガイド金物およびストッパー



写真6 牽引搬送状況



写真7 直載せ搬送状況

3. 現場環境における検証

建設現場へ本システムを適用するにあたって実施した検証について示す¹⁾。

3.1 現場環境の変化への対応

SL-AGV が SLAM 技術により自己位置推定を行う際、マッピングで作成した地図と実際に自動搬送する際の周辺環境に差異が少ないこと、差異を表す数値である座標信頼度を 50%以上確保することが条件になる。特に仮置き場および工事用 ELV などの荷取り点付近は SL-AGV の 4 本の牽引ピンを専用台車に接続するため、精度を確保する必要がある。しかし、建設現場における周辺環境は工事の進捗が進むにつれて変化しやすいため、マッピングで作成した地図との差異を少なくすることが困難である。そこで、自動水平搬送時の現場環境において座標信頼度を 50%以上確保する方法を確認するための検証を実施した。図 6 に検証の平面計画図を示す。図の通りに仕切りとなるものとしてスタイロフォーム H200mm (以下、仕切り材) を設置し、自動搬送を行った。仕切り材の設置状況を写真 8 に示す。その結果、荷取り点付近や環境が変化しやすい地点において座標信頼度を 50%以上確保できることが確認できた。

しかし、建設現場では毎日周辺環境が変化するため、それに合わせて仕切り材を設置しなければならない。また、マッピング作業もその度を実施しなければならないため、搬送準備の手間がかかってしまう。

そこで、自己位置推定のために周辺環境を見るのではなく、図 7 に示す反射シートを貼り付けたポール (ランドマーク) を見るランドマーク測位を採用した。走行中、ランドマークを常時 3 点以上検出することで、景色変動がある中でも安定的な走行が可能になる。これにより、仕切り材を設置する必要がなくなり、搬送ルートが変化しなければマッピングでの作成地図も転用することができ、搬送準備の手間も削減することができる。

3.2 SL-AGV の走行軌跡

SL-AGV にて自動搬送を実施すると、搬送する資材の荷重に応じて 90 度旋回後に蛇行したような走行軌跡となり、事前に設定したルートと実際の走行軌跡に差が生じる。蛇行状況を写真 9 に示す。

設定ルートと走行軌跡との差を確認するための検証を実施した。空荷の専用台車(基準とする)とせっこうボード(約 300kg, 約 500kg, 約 650kg, 約 800kg) を載せた専用台車を SL-AGV にて牽引し、直進後に左旋回させた際の走行軌跡を計測し、搬送ルートとして設定した走行軌跡との差を確認した。検証状況を写真 10 に示し、検証結果を表 2 に示す。X 方向の基準との差の最大は 800kg 積載時に 45.0cm であった。

設定ルートと走行軌跡とに差が生じる原因として、資材を載せた専用台車を牽引する際、従来の旋回方法で牽引すると、SL-AGV 旋回後の専用台車内側のキャスター向きが進行方向に対して垂直になる。それにより、SL-AGV の進行が妨げられることで、蛇行したような走行軌跡となることが確認できた。SL-AGV 旋回時の専用台車内側のキャスター挙動を図 8 に示す。

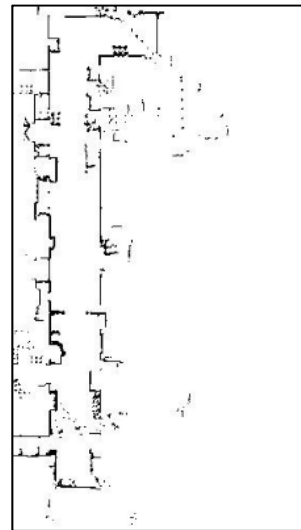


図 4 マッピングした地図

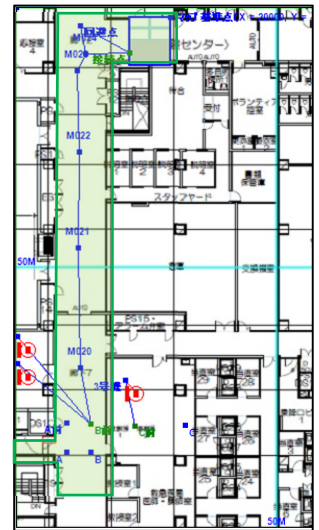


図 5 設定した搬送ルート

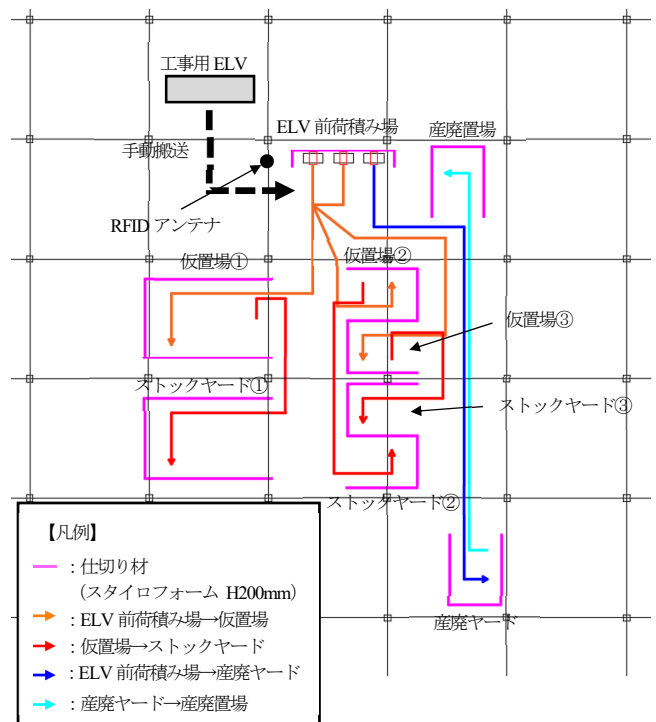


図 6 平面計画図

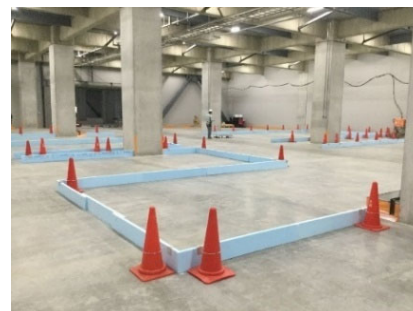


写真 8 仕切り材設置状況

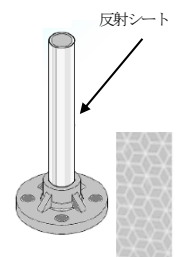


図 7 ランドマーク

表2 検証結果

積載荷重	回数	基準との差		積載荷重	回数	基準との差	
		X (cm)	Y (cm)			X (cm)	Y (cm)
800kg 積載	1回目	45.0	27.5	500kg 積載	1回目	18.0	10.5
	2回目	43.5	25.0		2回目	21.0	10.5
	3回目	44.5	27.0		3回目	23.5	10.5
	4回目	42.5	26.5		4回目	16.5	9.0
	5回目	44.0	24.0		5回目	20.5	10.0
	平均	43.9	26.0		平均	19.9	10.1
650kg 積載	1回目	32.0	17.0	300kg 積載	1回目	3.5	3.5
	2回目	30.5	18.0		2回目	6.5	4.5
	3回目	29.5	17.5		3回目	6.0	4.0
	4回目	30.0	16.0		4回目	9.0	4.0
	5回目	29.5	16.0		5回目	5.0	4.5
	平均	30.3	16.9		平均	6.0	4.1

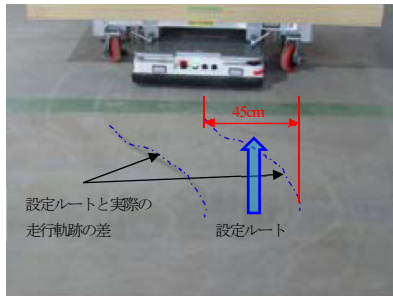
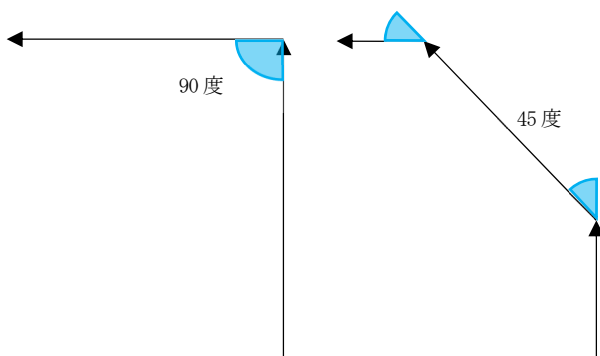


写真9 蛇行状況



写真10 検証状況



(1) 従来 (2) 改良後

図9 従来と改良後の旋回数と旋回角度

この問題の改善策としてまず、SL-AGV の制御ソフトを改良し、一度に90度旋回するのではなく、二度に分けて45度ずつ旋回するようにルートを設定することとした。一度の旋回角度が小さくなっ

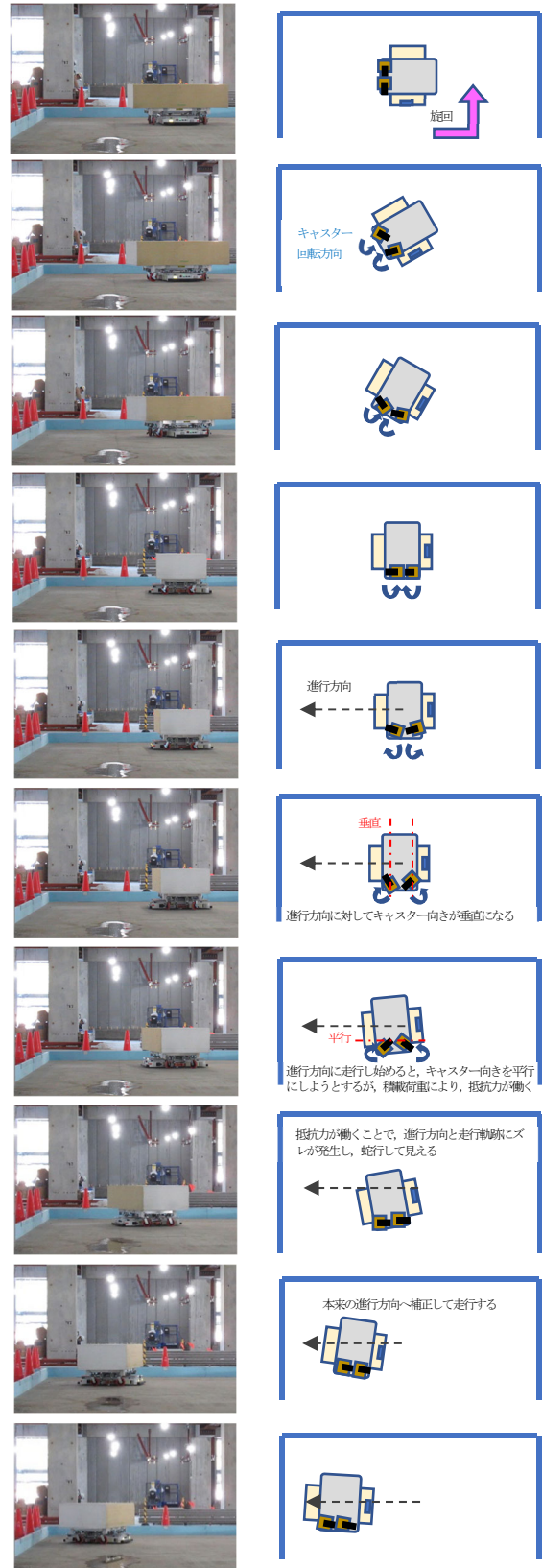


図8 SL-AGV 旋回時の専用台車内側キャスター挙動

たことにより、蛇行はやや軽減されたが、解消には至らなかった。従来と改良後の旋回数と旋回角度を図9に示す。

次に、SL-AGV の従来の旋回方法を変更し、左右の駆動輪を同方向に回転速度を変えて曲がる方法とすることとした。従来と変更後の旋回方法を図10に示す。さらに、SL-AGV の駆動補助輪を改良し、転がり抵抗および旋回抵抗を低減する仕様とした。駆動補助輪改良前後の仕様を表3に示す。

それらによって、SL-AGV 旋回時に専用台車内側のキャスター向きが進行方向に対して平行になるため、SL-AGV の進行が妨げられず、蛇行がほぼ解消された。

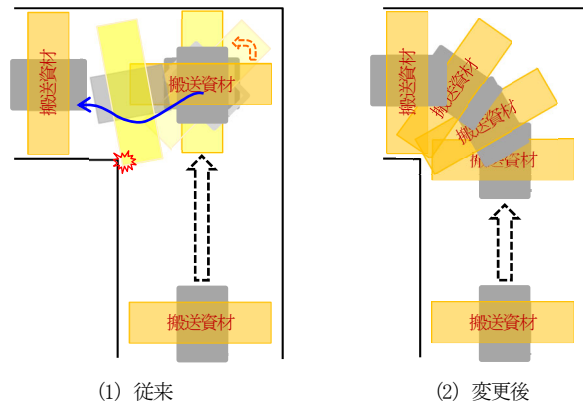


図10 従来と変更後の旋回方法

3.3 RFID タグの読取距離

仮置き場に資材を集積後、RFID アンテナにて搬送する資材の RFID タグの情報を読み取る。その際の RFID アンテナが読み取ることのできる目安となる範囲を確認するための検証を実施した。写真11に検証状況を示す。RFID アンテナおよび RFID タグの設置高さを 250mm に設定する。RFID アンテナと RFID タグの距離を 1.0m, 2.0m, 3.0m とし、RFID タグが RFID アンテナと正対するように通過させ、読み取ることのできる目安となる範囲を確認した。検証結果を図11に示す。3.0m の距離で RFID アンテナを中心に 0.92m の範囲で読み取ることができ、2.0m の距離で 1.17m の範囲、1.0m の距離で 0.76m の範囲で読み取ることができた。この結果から、RFID タグを RFID アンテナの位置から 2.0m 前後の範囲で通過させれば読取の信頼性が高いことが確認できた。

表3 SL-AGV 駆動補助輪の仕様

	改良前	改良後
車輪径	φ75mm	φ75mm
車輪材質	ポリウレタン	MC ナイロン
許容荷重	350kg/個	500kg/個

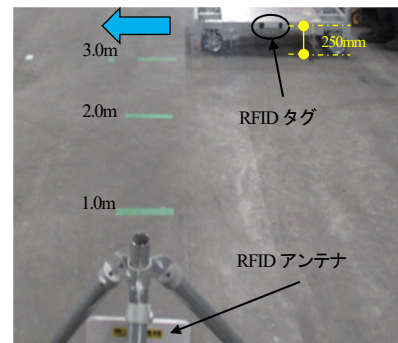


写真11 検証状況

3.4 レーザー測域センサの精度確保

SL-AGV は SLAM 技術を採用しており、前後に搭載しているレーザー測域センサによって、自己位置を推定している。しかし、建設現場のようなコンクリート仕上げの床を走行させると、レーザー測域センサの表面に埃および粉塵等が付着してしまい、自己位置推定の精度が低下してしまう。レーザー測域センサの精度を確保するため、建設現場等で使用する場合は始業点検等で定期的な表面を清掃する必要がある。

従来の清掃では、前後のレーザー測域センサの表面に付着した微小な埃および粉塵等を目視にて確認して行うが、目視にて確認できないものについては手当たり次第に清掃を行い、レーザー測域センサの精度を確認するといった作業を繰り返すしかなかった。そのため、レーザー測域センサの精度を確保するのに多くの手間を要していた。

そこで、レーザー測域センサの精度確保の手間を削減するため、レーザー測域センサの検知範囲を管理 PC 画面上にてリアルタイムで確認できるソフトを導入した。管理 PC と SL-AGV を無線通信にて接続することにより、埃および粉塵等が付着している範囲を画面上で確認することができる。その範囲を重点的に清掃することで精度低下を解消でき、レーザー測域センサの精度確保に要する手間を削減することができる。図12にレーザー測域センサの検知範囲確認状況を示す。

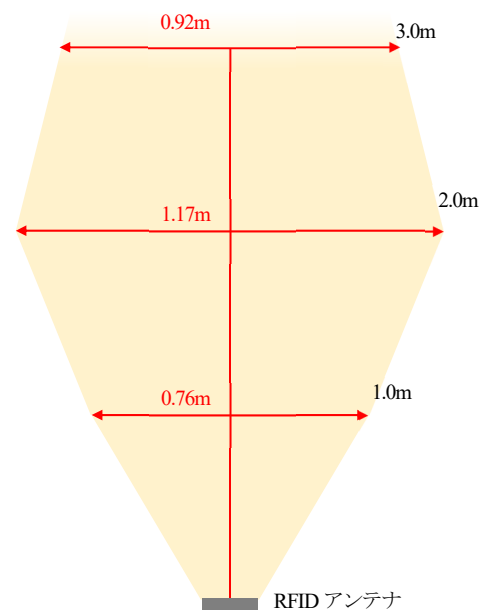


図11 検証結果

4. 現場における適用

鉄骨造地上 38 階の事務所ビル新築工事現場にて本システムを用いた場合の搬送効率を確認するために実験を実施した。8 階を搬入階、14 階を搬送階に設定し、それぞれに SL-AGV を 2 機ずつ配置した。実験の断面計画図を図 13 に示し、8 階および 14 階の平面計画図を図 14 に示す。8 階の仮置き場から 14 階のストックヤードまで 1 台約 600kg のせっこうボードを牽引搬送にて搬送した。工事用 ELV での搬送は 1 回につき 2 台ずつとなっており、2 往復させて合計 4 台の搬送を 1 セットとし、合計 4 セット実施した。各セットにおける 8 階での搬送時間、8 階から 14 階までの工事用 ELV の移動時間、14 階での搬送時間、14 階の SL-AGV が工事用 ELV 前に戻る時間を計測し、搬送効率を確認した。

動作にかかる時間を以下の 4 つの区間とし、それぞれの区間の計測結果を表 4 に示す。8 階で 1・2 台目を工事用 ELV に積み込み、14 階へ着床した後、4 階の SL-AGV はストックヤードまで搬送する。工事用 ELV は 2 台とも取り出されたことを確認して 8 階まで戻るため、14 階での搬送と並行して 8 階で 3・4 台目の搬送を行うことができる。搬送階搬送での作業時間よりも搬入階搬送および垂直搬送にかかる作業時間が短いため、3・4 台目の a および b については考慮しないこととした。

- a : 8 階での搬送時間
- b : 8 階から 14 階までの工事用 ELV 移動時間
- c : 14 階での搬送時間
- d : 14 階の SL-AGV が工事用 ELV 前に戻る時間

①～④ : セット数

各セットの合計時間を下記にて算出した。

1・2 台目の搬送に要する合計時間 : a + b + c + d

3・4 台目の搬送に要する合計時間 : c + d

上記にて算出した合計時間をもとに平均時間を算出したところ、1・2 台目の搬送に要する平均時間が 13 分 9 秒、3・4 台目の搬送に要する平均時間が 7 分 39 秒となった。

搬送効率を確認するため、1 時間で自動搬送し続けた場合の搬送回数を算出したところ、59 分 3 秒で 7 回となった。

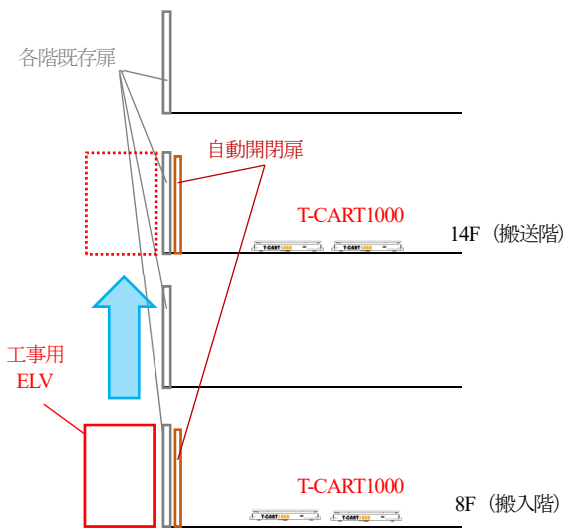


図 13 断面計画図

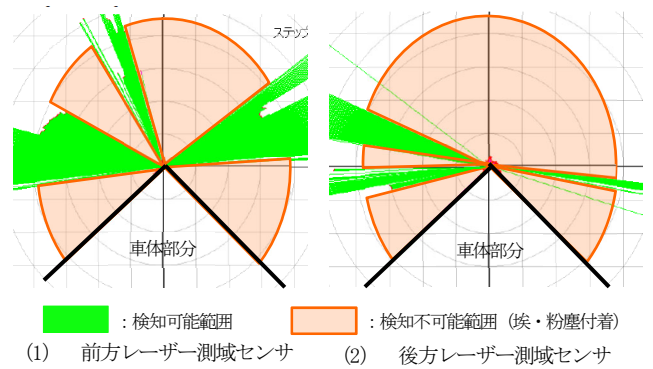


図 12 レーザー測域センサ検知範囲確認状況

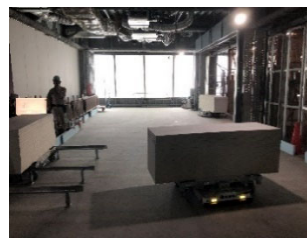
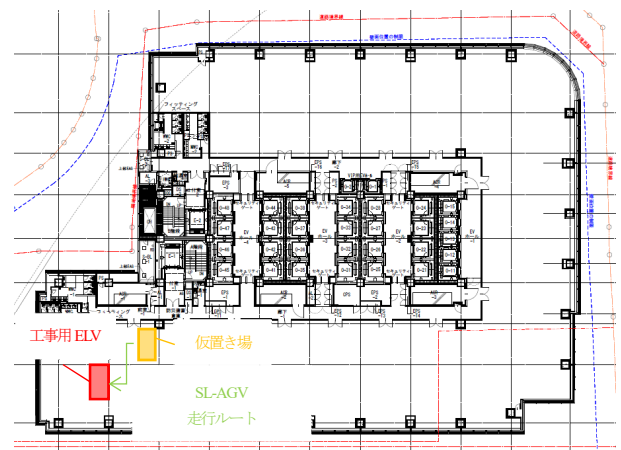


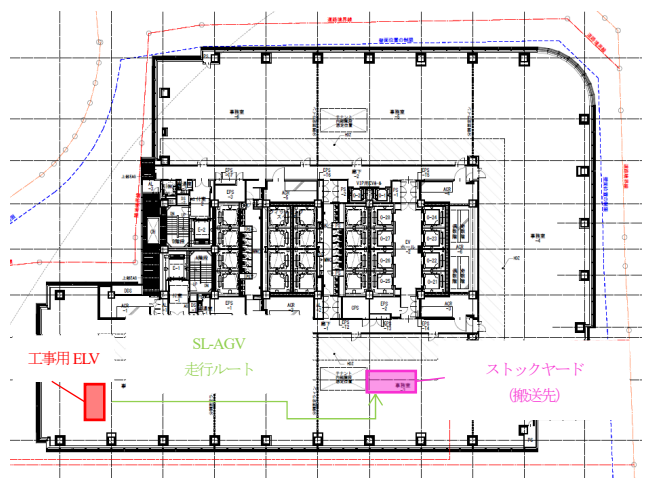
写真 12 8階 (搬入階) 搬送状況



写真 13 14階 (搬送階) 搬送状況



(1) 8階



(2) 14階

図 14 平面計画図

5. まとめ

本報では、本システムの概要および本システムを適用した現場における運用について報告した。実験での計測結果では、1 時間で自動搬送し続けた場合の搬送回数を算出し、建設現場における搬送効率を確認することができた。今後も制御ソフトやハードの改良を引き続き行うことで、搬送効率の向上に繋げていきたいと考えている。

参考文献

- 岡田大輔, 市村元, 鈴木信也, 山内博史:「垂直・水平搬送の自動化システムの開発 その 2 自動水平搬送システムの概要と現場環境における実証実験」日本建築学会大会学術講演梗概集 材料施工 p.1255-1256 2019.7

注釈

- Automated Guided Vehicle の略称。コンピュータ制御により無人で走行し、搬送や荷役を行う車両。誘導方式は、磁気、電磁、光学、レーザー誘導などがある。
- Radio Frequency Identifier の略称。ID 情報を埋め込んだ RF タグから、電磁界や電波などを用いた近距離(周波数帯によって数cm~数m)の無線通信によって情報を取得できる技術。
- Simultaneous Localization and Mapping の略称。測域センサ等を用いて、自己位置推定と周辺環境の地図作成を同時に行う技術。

表 4 計測結果

		搬入階搬送	垂直搬送	搬送階搬送		合計時間
		a	b	c	d	
①	1・2 台目	0:03:46	0:01:16	0:06:10	0:01:39	0:12:51
	3・4 台目			0:05:58	0:01:37	0:07:35
②	1・2 台目	0:03:45	0:01:16	0:07:15	0:01:40	0:13:56
	3・4 台目			0:06:06	0:01:37	0:07:43
③	1・2 台目	0:03:49	0:01:16	0:06:14	0:01:40	0:12:59
	3・4 台目			0:06:04	0:01:37	0:07:41
④	1・2 台目	0:03:41	0:01:16	0:06:13	0:01:39	0:12:49
	3・4 台目			0:06:02	0:01:37	0:07:39