建築現場に適応する内装資材自動搬送ロボットの構造提案

奥畑 一男^{*1} 猪野 真吾^{*1} 溝渕 宣誠^{*1}
岡村 甫^{*2} 王 碩玉^{*2} 楊 光^{*2}

Proposal of Structure of Automatic Interior Material Transfer Robot Adapting to Construction Site

Kazuo Okuhata^{*1}, Shingo Ino^{*1}, Yoshinobu Mizobuchi^{*1}, Hajime Okamura^{*2},
Shuoyu Wang^{*2} and Guang Yang^{*2}

Various types of material handling robots (AGVs, Automatic Guided Vehicles) have been developed to improve the work efficiency at construction sites, yet neither of them has been popularized. In this work, we present a gate-type robot suitable for automatic material handling during interior construction. The effectiveness of the robot has been evaluated through experiments in real construction sites. A gate-type robot has the following three characteristics: (i) the payload-weight ratio is near 5; (ii) picking and placing of randomly located carts (loaded with building materials) is possible; (iii) complex environments at construction sites can be navigated smoothly without unnecessary movement.

Key Words: AGV, Automatic Transfer, Autonomous Transport, Construction Site, Material Transportation

1. 背景

本報告では、建築現場での作業効率向上を目的とし、不定で複雑な建築現場環境において、多種多様な建築資材を安定して自動搬送できる新型ロボットの構造を提案し、試作機の性能測定実験と現場実証実験の結果を報告する。

建物を建築する過程において、内装工事はプロジェクトの中で大きな割合を占める重要な工程であり [1]、施工に必要な内装資材を定められた地点に都度搬送する必要がある。搬送作業の難点として、1) 人的労力と時間の確保、2) 力と力のモーメントを適切に運用するノウハウ、3) 複雑で日々変化する現場環境に適応できる経験、の3点が挙げられる。難点1)の例として、内装用石膏ボードを大量に積載した台車の総重量は1,000 [kg] 近くになり、それを動かすには通常3人程度の作業者を必要とする。それらが大量に存在する場合、搬送作業だけで多くの時間が必要となる。難点2)では、資材には長さが数[m]に及ぶものや不定形物もあり、単に重心を動かす力だけではなく、資材の形状や状態に応じて姿勢を制御する力のモーメントを適切に運用しなければならない。難点3)では、定物定置で良い倉庫や工場と異なり、建築現場では常に多数の重機が縦横無尽に稼働し、大量の資材がフロア上に煩雑に据置されており、その環境は常に一定ではない。その環境下ではほかの資材や施設に衝突させて破損させないように、複数の作業員で周辺状況に注意し

Fig. 1 Environmental changes and careful work

て慎重に作業する必要がある (Fig. 1)。これらの難点から、搬送業務に特化した揚重業者が存在し、作業を一手に担っている。現在、建築業では高齢化問題により将来の若い作業員不足に直面し、労働力確保が難しくなっている [2]。揚重業者も例外ではなく、資材搬送にかかる時間は工事の作業効率に直接影響を与えるため、自動省力化による効率向上が強く求められている。

建築業界では様々な資材自動搬送システム (以下「AGV」) が開発されているが、まだ普及には至っていない。主な問題点として、1) 多種多様な資材搬送に最適なメカ構造開発、2) 不定で複雑な環境に適応する自律制御の構築、が難しいことが考えられる。本報告では問題点1)を解決できるメカ構造を提案し、メカニズムの特徴を説明し、実験による性能と現場での有用性を示す。問題点2)に関する詳細な報告は文献 [7] で説明する。

2. 代表的既存構造

メカ構造設計にあたり、代表的な搬送装置の機体構造、およ

原稿受付 2020 年 8 月 18 日

^{*1} 有限会社サット・システムズ

^{*2} 高知工科大学

^{*1} SATT SYSTEMS Ltd.

^{*2} Kochi University of Technology

■ 本論文は有用性 (実証実験分野) で評価されました。

び特徴について調査し、開発の参考とした。搬送装置には人を運ぶものと物を運ぶものがあるが、物である内装資材を運ぶことに適すると思われる4タイプの構造をピックアップした。

2.1 吊り上げタイプ

クレーンのように資材を吊り上げて搬送する方法である (Fig. 2)。基本的に吊りロープは1本であり、加速や停止時に慣性力で資材が揺れ動くことになる。運転を自動化し、高速搬送するには揺れ止め制御が必要となり、速度、重心、ロープ長などを常に監視し、フィードバックしなければならない[3]。また、クレーン運転免許と玉掛け資格が必要になる可能性があり、容易に運用できるシステムにならない。

2.2 リフトアップタイプ

機器が資材の下に潜り込み、昇降装置で持ち上げて搬送する方法である (Fig. 3)。機器のサイズが資材の水平方向面積内に収まれば、狭い通路を走行するには有利である。しかし、Fig. 1のように建築現場では床上に直接資材を置くことが多く、機器の超低床設計が求められる。また、走行姿勢の安定化には資材の重心を検知する力覚センサが必要となる[4]など、構造設計のハードルが高い。

2.3 フォークリフトタイプ

フォークを資材の下に挿し込み、持ち上げて搬送する方法である (Fig. 4)。搬送資材を垂直方向に積み重ねたり、棚上に持ち上げたりするのに適している。一方、資材の過積載や重量の片寄り、マストの高位置持ち上げ、急旋回などの複合的な要因による転倒が発生する可能性がある[5]。運転の自動化にはそれらの要因を検知する多数のセンサと、重心を安定させる高度な制御が必要となり、安全性を高めるのが難しい。

Fig. 2 Hang up type

Fig. 3 Lift up type

Fig. 4 Forklift type

2.4 牽引タイプ

トレーラーのように資材を牽引して搬送する方法である (Fig. 5)。資材を直接持ち上げないため、重量の大きい資材を搬送しやすく、機器の出力や重量を小さくできる。一方、前後の全長が長くなり、大きな内輪差や後退時のジャックナイフ現象が発生する[6]。運転の自動化において、安全な走行軌道を追従する制御が確立できれば運用しやすい。

2.5 調査のまとめ

前節 2.1～3 は機器が直接資材を持ち上げるため、高い剛性と高出力のモータ等が必要となり、機器の大型化と高重量化につながってしまう。2.4 節の牽引方式にて、機器が小型軽量で、資材を連結した状態でも省スペースで小回りが利き、重心が走行中心に近く、走行状況による重心位置変化が小さければ運転自動化の制御構築も容易になり、建築現場に適していると考え、それらを実現できるメカ構造を設計することとした。

3. 採用 構 造

「物を運ぶ」とは物の姿勢を制御しながら物の重心を動かすことである。一般的に、小さな力で大きなものを動かせることが望まれる。建築現場の環境と、前節の調査結果を踏まえて下記8項目の要素を洗い出し、総合的に考慮した結果「門型構造 (Fig. 6-1)」を採用したこと、およびその特徴について報告する。

- ①最大搬送重量/AGV 自重の値を大きくする。資材の垂直荷重が AGV にかからないようにする。
- ②荷取と荷置動作を簡易な機構で容易に行う。
- ③水平搬送のみ行う。垂直搬送はエレベータに乗り込むことで実現し、リフト動作はしない。
- ④水平面において多様な資材の姿勢を安定させるため、力点と資材重心の距離を大きくする。

Fig. 5 Tow type

Fig. 6 Machine appearance

Fig. 7 Connection part details

- ⑤小さな力で搬送できるよう、作用点と資材重心の距離を小さくし、力点の配置は資材重心に対して対称にする。
- ⑥特に AGV の幅サイズを小さくし、資材の幅に近づけて狭い通路を走行しやすくする。
- ⑦全方向移動により任意の姿勢で任意の方向に走行し、複雑な経路を走行可能にする。
- ⑧現場内の段差を乗り越え、傾斜地面を登坂できる。

①と③について、搬送台車 (Fig. 6-2) に資材を載せて牽引する手法とし、資材の重量を搬送台車がすべて受けることにより、AGV にはその垂直荷重が掛からないようにした。それにより、フレーム構造設計の簡易化、低出力の駆動輪モータ採用、およびリフト装置等を省くことによって車体の軽量化を実現している。実測値として自重 200 [kg] の AGV は 1,000 [kg] の資材を搬送可能で、最大搬送重量/AGV 自重=5 となっており、効率が良い。

②について、AGV 内側に設けた左右対称の連結機構 (Fig. 6-3) が、連結金具を装着した搬送台車と連結することにより、容易な荷取と荷置動作を実現している。連結機構には電磁ソレノイドによって開放動作をコントロールできるラッチングロック機構を備えており (Fig. 7-1)、搬送台車に取り付けた連結金具両端の連結ピン (Fig. 7-2) がラッチングロックに挿入されることで自動的にロックし、連結される。その状態から電磁ソレノイドによってロックを開放することにより、連結を解除できる。

④と⑤について、AGV は前後左右対称形状に設計しており重心は中央にある。また、4 輪の交点が行走中心となり、重心とほぼ同位置にある。さらに、連結した搬送台車も積載した資材に極端な偏りが無ければ重心はほぼ中央となる。それらすべてが近いポイントに集まることで、非常に高い走行性能を発揮し、資材の姿勢制御と重心移動の容易さを実現している (Fig. 8)。

⑥について、門型構造により AGV の内側に資材を抱え込むことで全幅を抑えている。AGV 内幅は内装工事によく使用される石膏ボードが入る幅とし、AGV 外幅は極力小さく設計することで人力搬送時に必要な幅スペースと大差なくしており、狭い通路での走行が可能であることを実現している。

⑦について、AGV の駆動輪にはメカナムホイールを採用している (Fig. 6-4)。それにより、旋回半径を小さくでき、左右移動、斜め移動、および定点回転が可能となり、狭い通路の走行や、エレベータへの乗り込み等の容易さを実現している。

⑧について、Fig. 7 の連結部に一定の遊びを確保している。それにより、AGV と搬送台車の高低差と角度差を吸収することができる。例えば、登りスロープで先に搬送台車の前車輪がスロープに差し掛かると、搬送台車の前側だけが浮き上がる。しかし、連結部の遊びにより高低差と角度差を吸収し、連結部にねじれ力が加わるのを防いでいる (Fig. 9)。また、メカナムホイール

Fig. 8 Top view

Fig. 9 Absorption of angle difference

Fig. 10 Suspension mechanism

4 輪のうち片側 2 輪に車軸懸架式のサスペンション機構を設けている。2 輪を繋げるフレームの中央に回転軸構造 (Fig. 10-1) と両端に衝撃吸収用スプリングを設け (Fig. 10-2)、その軸を中心にフレームが最大 $\pm 5^\circ$ 傾き、段差を吸収して常にメカナムホイール 4 輪を接地させることができる。

4. 性能測定実験と現場実証実験

実験を二つの段階に分け、第一段階として実機性能が設計目標性能に達しているか性能測定実験を実施した。項目と目標値は建築施工業関係者にヒアリングし、下記のとおり設定した。

- ①最大牽引重量：建築現場でよく使用される平台車の最大積載重量が 1,000 [kg] であり、その数値を目標とする。
- ②最大走行速度：1,000 [kg] の資材を人が搬送する際の速度が 2 ~ 3 [km/h] であり、それと同等の 40 [m/min] を目標とする。
- ③乗り越え溝幅：建築現場には排水やケーブル収納用等で幅が最大 50 [mm] 程度の溝が存在し、それを乗り越える必要があるため、その数値を目標とする。
- ④乗り越え段差：建築現場には最大 20 [mm] 厚さのベニヤ板による養生やスロープが存在し、それを乗り越える必要がある

Table 1 Performance test results

	Item	Target value	Measured value
①	Maximum towing weight [kg]	1000	1000
②	Maximum running speed [m/min]	40	36
③	Overcoming the groove [mm]	50	30
④	Overcoming the steps [mm]	20	15
⑤	Slope climbing [%]	10	10
⑥	Continuous operating time [min]	240	180
⑦	Successful for take luggage [times]	30	30
	Successful for put luggage [times]	30	30
⑧	Move in all directions [°]	360	30i i=0,1,...,11

ため、その数値を目標とする。

- ⑤傾斜登坂：建築現場には 10%程度の傾斜が存在し、それを登坂できる必要があるため、その数値を目標とする。
- ⑥連続稼働時間：1 日にトータル 8 時間稼働させ、途中の充電回数は極力少なくしたいとの要望があり、充電回数が 1 回ですむ 4 時間 = 240 [min] を目標とする。
- ⑦荷取・荷置動作：荷取と荷置動作の失敗率が高いと自動運転時の不安となるため、それぞれ 30 回連続で動作成功することを目標とする。
- ⑧全方向走行性能：任意の姿勢で全方向に走行できるか確認するが、360 度にわたって連続的に測定できないため、30 度ずつ 12 分割を目標とする。

実験結果を **Table 1** に示す。設定目標に達していない結果について考察する。②～④は 1,000 [kg]、⑤は 500 [kg] の資材を牽引状態で測定した結果である。②は目標値より少し小さい数値となったが、複雑な建築現場ではそれほど速度が出せないため、許容範囲と判断された。③と④は目標値の 7 割程度となり、よく観察すると AGV のメカナムホイールではなく、資材を載せた搬送台車の車輪が溝や段差を乗り越えられなかったことが分かった。当面は、現場の走行経路側で段差を小さくする等の対策を施すか、搭載する資材の重量を小さくする対策を取ることにした。⑥も目標値の 7 割程度となったが、搭載しているリチウム電池が約 1 時間で高速充電可能であり、充電回数が 2 回でも問題ないと判断された。ほかの項目は目標値を達成しており、初号機としては一定の結果が出せたと考える。

第二段階として、実際の建築現場で現場検証実験を夜間に実施した (**Fig. 11**)。現場の経路を走行し、傾斜や段差をどの程度乗り越えられるかを重点的に検証した。その際、夜間照度が小さいことによる AR マーカー誤認識等、現場ならではの問題を確認した。これらについては今後も現場実証実験を継続し、

Fig. 11 Field test scene

対策方法を検討していく。本運用を想定した自動運転システムの有用性については、文献 [7] の自律化制御アルゴリズムを実装し、一台車あたり 40 缶 $\times$ 15 [kg] = 600 [kg] の塗料を搬送台車に積載し、搬送実験を実施して検証した。その詳細と結果については文献 [7] をご参考いただきたい。

5. ま と め

本報告では、建築現場における作業効率向上、および労働力不足の問題解決に貢献する資材自動搬送システムの開発において、多種多様の建築資材の自動搬送に適した AGV の構造を提案し、その特徴と性能、および現場での有用性を示した。今後の最終目標である実用化を目指し、現場の粉塵や夜間照度等の環境対策、長期稼働による機器の耐久性確認、安全対策や法令対応等の課題点解決を図るため、研究を継続する。

参 考 文 献

- [1] A. Ahmadian F.F, A. Akbarnezhad, T.H. Rashidi and S.T. Waller: "Importance of Planning for the Transport Stage in Procurement of Construction Materials," 31st International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining (ISARC2014), pp.460–467, 2014.
- [2] N. Muramatsu and H. Akiyama: "Super-Aging Society Preparing for the Future," The Gerontologist, vol.51, no.4, pp.425–432, 2011.
- [3] 森下 巖: "走行クレーン運転自動化のための振れ止め制御", 計測自動制御学会論文集, vol.14, no.6, pp.739–744, 1978.
- [4] 中村陽介, 前山祥一, 田中豊: "リフトアップ型重量物搬送ロボットの開発", ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, pp.2P1-I02.1–4, 2007.
- [5] 笠原美左和: "フォークリフトの重心位置と転倒の関係", 東京都立産業技術高等専門学校研究紀要, vol.11, pp.100–105, 2017.
- [6] 三平満司: "厳密な線形化とそのけん引車両の軌道制御への応用", 計測と制御, vol.31, no.8, pp.851–858, 1992.
- [7] 楊光, 王碩王, 岡村甫, 猪野真吾, 奥畑一男, 溝渕宣誠: "資材自動搬送ロボットの自律化制御", 第 38 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 DVD-ROM, 1F1-07, 2020.