

電気駆動と手動操作が切替可能な非産業用スタッククレーン

-電気駆動への拡張と拡張性の評価-

福井 類^{*1}, 上阪 周平^{*1}, 佐藤 知正^{*1} 下坂 正倫^{*1}

Non-Industrial Stacker Crane with Compatibility/Extensibility between Manual Operation and Electrical Driving

-Implementation of Electrical Driving and Compatibility/Extensibility Evaluation-

Rui FUKUI^{*1}, Shuhei KOUSAKA^{*1} Tomomasa SATO^{*1} and Masamichi SHIMOSAKA^{*1}

^{*1} Department of Mechano-Informatics, the University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656 Japan

The goal of this research is development of a novel non-industrial stacker crane that enables humans to utilize high place for storage. Our proposing instrument has two features for cost reduction and easy-installation. One is a novel storage style that does not use shelves but uses specially designed wall hangers with high tolerance to positioning errors. The other is a mechanism configuration with a T-shaped timing belt and torque diodes, and they realize compatibility between manual operation and electrical driving in the common framework. That means the configuration has expansive capability to conform to changing user's requirements and environments. In this paper, we develop a prototype of the non-industrial stacker crane, and execute experiments both in manual operation by a user and in automatic control by a motor. The experimental results confirm that the proposed stacker crane has enough compatibility between two operation modes, and demonstrate the validity of our novel storage style and mechanism configuration.

Key Words : Home Robot, Switchable Driving Source, Storage Instrument, Human-robot symbiosis

1. 緒 論

人間は開放感のある天井の高い居住空間を好む傾向にある。しかし一方で現在の棚を用いた収納方法では、高所空間へアクセスするには人間が梯子や台座などを用いて昇る必要がある。そのためたとえ居住空間を高くまで確保しても、収納空間として有効に活用できない(図1)。そこで本研究では効率よく空間を利用するために、物流現場で普及しているスタッククレーン⁽¹⁾を生活空間に導入する。スタッククレーンは高所に安全かつ高速にアクセスすることができ、その結果収納容量と空間利用効率の向上が見込めるとともに、搬送対象を特定のコンテナに限定するため、制御と機構を単純化できる。本研究では装置価格の低減、人間の空間に低干渉、装置の設置が容易といった導入しやすさを考慮したスタッククレーンの開発を目的とする。

産業用途の場合、安全を確保するためにロボット専用の空間は人間の作業空間から分離することが一般的だが、生活空間など非産業応用の場合、その空間に暮

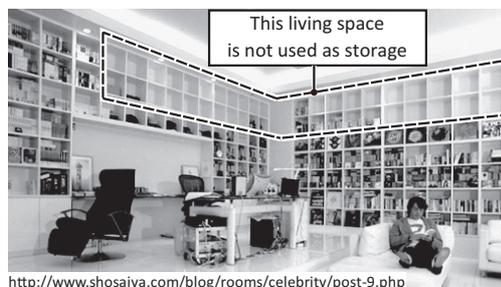


Fig. 1 High place storage cannot be used efficiently (Den of Ira Ishida; a novelist)

らす人間との共棲を考えなければならない。つまり生活空間では全自動機器は、衝突検知や暴走の防止などを実現する安全装置に多くのコストが必要となり、ロボットを生活空間に導入する妨げとなる。

そこで我々のスタッククレーンでは、まず基本的な収納・取り出し動作を手動操作で可能な構成によって実現する。さらに手動操作が困難な高齢者や障害者、もしくは人が在室しない間のバックグラウンド動作を希望するユーザのために、手動操作型の装置にモータやセンサの後付けのみで電動化可能な構成を開発する。

^{*1} 東京大学大学院情報理工学系研究科(〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1){fukui, kousaka, tsato, simosaka}@ics.t.u-tokyo.ac.jp

ロボット研究においては全自動化のために、とかく人をシステムから排除しがちである。しかし、ロボットの不完全な知能を補填する意味でも、積極的な人の介入を許容する枠組みの方が、全自動で駆動する枠組みよりも現状では実用的に見える。

これまでも人間をコントローラとしてシステムに組み込み、ロボットの性能を最大限発揮させる（もしくは不足する能力を補う）というアプローチが取り組まれてきた。代表例がマススレーブ構成のマニピュレータで、これらは大域的な判断及び計画はマスタの操縦者に一任されており、手術ロボット⁽²⁾が代表的な応用先である。介護や重量物の運搬における人の身体的負担を低減する目的で、外骨格型のロボットが開発されているが^{(3)~(5)}、重要な判断や環境認識能力を人に委ねるという意味で全自動ロボットよりも早い実用化が期待される。製造現場では、古くから人の手によって教え込まれた動作を直接再生するダイレクトティーチング機能⁽⁶⁾は工業用ロボットの経路計画において欠かせないものとなっている。これらのシステム構成は全て人間がロボットの”計画・認識・制御”に積極的に関与することで、全自動のロボットに比べて安全かつ容易にユーザが望む動作が得られるという例である。

これに対して我々のアプローチではロボットの”計画・認識・制御”だけでなく、”駆動源”としても人の助けを借りることで、装置の構成を簡素にして導入しやすい機械とすることを目指している。これに類する研究として、Peshkinらの開発したCobot⁽⁷⁾は、ステアリング等の軌道のコントロールのみを行い、搬送の主動力源は人間からの外部入力を用いている。また、歩行支援装置においては人の歩くという動作を制御指令とすることによって、支援者の歩行能力が低下しないように配慮した装置(Tred Walker)も開発されている⁽⁸⁾。

導入しやすい装置を実現する上では、機能だけでなく導入コストも無視できない。これらの装置を実装する際に、仮に電動駆動と手動操作の装置を別々に設計製作すると多大なコストがかかる。したがって、本研究ではコスト低減を狙って電気駆動と手動操作を同一の筐体で実装する。この機械構成ならば、手動操作型の機械を所持するユーザは最小限のコストで自身の装置を電動駆動型に拡張することができる。

我々は先行研究⁽⁹⁾で生活空間に手動操作型のスタッカクレーンを導入する上での課題を吟味し、それに応える機械構成を考案した。そして図2に示す非産業用スタッカクレーンの、新しい収納様式のための壁掛け金具と電気駆動への拡張性を備えた手動操作機構を開発した。人間の手動による操作実験を行った結果、壁

掛け金具の許容可能な位置決め誤差の範囲に、人間は本装置の機構を用いた手動操作で十分に位置決めできることを確認している。本論文では構築してきた手動操作機構に電装系を実装し、電気駆動への拡張を実現する。そして性能評価試験を行い、電気駆動と手動操作の性能の違いを検証する。

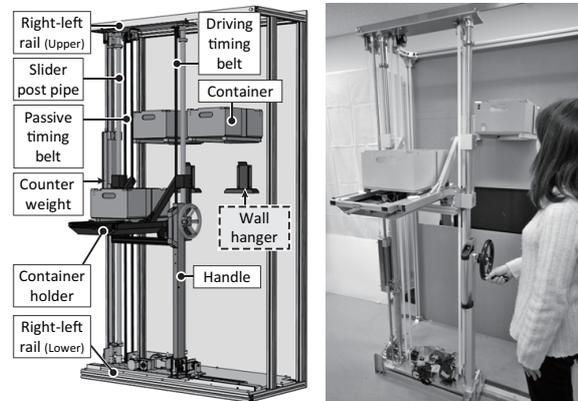


Fig. 2 Snapshot of the non-industrial stacker crane

2. スタッカクレーンの設計と手動操作の実現

本章では本装置の主要なシステム構成に関して、主に手動操作を念頭とした機械構成を述べる。

2.1 装置の概要 本装置は、コンテナを搭載し壁掛け金具への引っ掛け・取り出し操作を行うコンテナ積載部と水平方向にスライドを行うローラ・レール構造、垂直構造にスライドを行うスライダ・円柱パイプ構造より構成される。人による手動操作は側方に設置されたバー及び回転ハンドルを介して行うようになっている。図3に本装置を用いてコンテナを収納するまでの操作の流れを示す。装置全体を左右にスライドさせて左右に位置決めをし、ハンドルを駆動してコンテナの昇降と挿入を行う。この操作は出力軸を回転させるという点で電動駆動でも手動操作でも同様である。手動操作では、ユーザは装置の大まかな位置を直接視認しておおまかに位置合わせをして、ハンドル上に取り付けられた液晶モニターとLEDから目標位置にあるか否かを判定して詳細な位置合わせを行う。

2.2 壁掛け金具による収納様式 本研究では収納機器として空間を圧迫する大きな棚の代わりに、金具を壁に取り付けて、そこにコンテナを掛けるという手法を採用する。この手法は棚を用いた従来の収納様式に比べて搬入や設置などの導入コストを低減できる。

壁を直接収納空間として活用するために、図4に示すコンテナを拘束する壁掛け金具を開発した。壁掛け金具によるコンテナの拘束する手法として、我々の先行研究で開発した装置と同様に、ケーシングの概念に

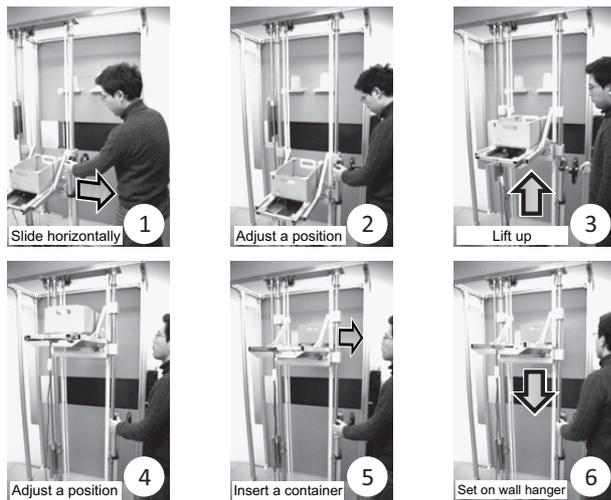


Fig. 3 Sequential snapshots of storing motion

より幾何的に対象物を拘束する手法を採用する⁽¹⁰⁾。金具の底面でコンテナの脚を拘束し、コンテナの取っ手を金具の上部のフックで保持することで、コンテナを水平方向の2自由度において幾何的に拘束している。壁掛け金具にはガイドテーパが取り付けられており、テーパ上を滑ることでコンテナ設置の際に発生する位置決め誤差を吸収して安定した位置に固定できる。



Fig. 4 Snapshot of wall hanger for i-Container.

2.3 手動操作のための2自由度駆動機構の共通化
手動操作における大きな拘束条件として人は地面から離れられないということがあり、人間がアクセスできる対象の高さには制限がある。つまり、コンテナの挿入操作をする部位が高所にある場合でも、床面にいる人の駆動動力を伝達しなければならない。

そこでコンテナの昇降と挿入という2自由度の駆動機構を共通化し、一体の動力伝達系の構成とする。コンテナを昇降させる駆動機構にスタッククレーンの上端から下端まで構造を持つ機構を採用し、その下端側を人の操作入力箇所とすることで、人が地面に接地したまま操作が可能となる。コンテナの昇降と挿入を共通の機構で行うモデルを図5に示す。T字型のタイミングベルトのブレーキを切り替えることで、共通の機構で2自由度の駆動を実現する。

2.4 状態認識用センサ群 本装置ではコスト低減の観点から可能な限り簡素なセンサにより状態認識

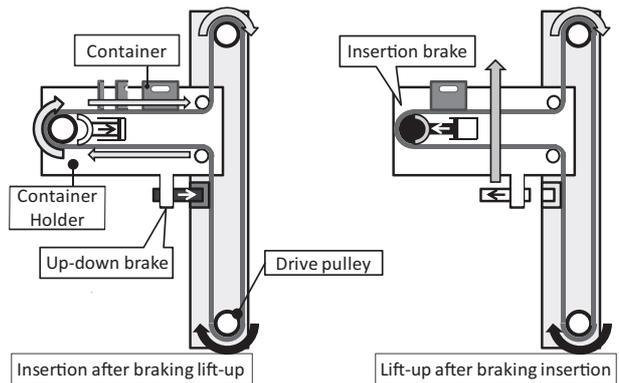


Fig. 5 Sketch of the 2 DOF sharing mechanism

を行うことを目指す。左右方向の位置認識は、下側のレールにマーカを取り付け、そのマーカを底板に搭載されたフォトフレクタにより読み取る方式とする。これらのマーカは各々壁掛け金具のある位置に搭載されている。今回はアブソリュート型のバイナリマーカ方式としたため、左右方向に列が多くなるに応じて、マーカのビット数も多くなり、読み取るためのフォトフレクタの個数も多くなる。

垂直方向の位置認識はアブソリュート型ロータリーエンコーダと多回転ポテンショメータの複合によって行う。この手法は起動の際に初期化が不要なことが特徴である。左右方向の位置認識と異なり、垂直方向の位置認識で厳密に自己位置を認識する理由は、後に示す電動駆動におけるコンテナ把持部の下降の制御にも適用するためである。

コンテナの挿入は図6に示すラッチ機構を用いたストップ構造によって物理的に位置決めが可能である。よってフォトインタラプタでラッチ機構にロックがかかったことを検知するという簡素な方式を採用する。

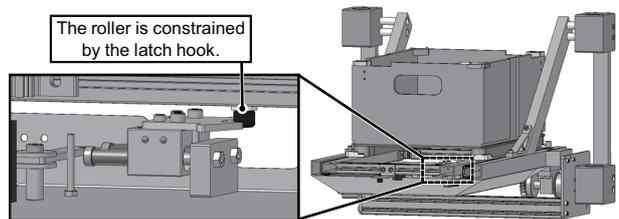


Fig. 6 Overview of the latch stopper.

2.5 ユーザインタフェース 手動操作においてはユーザが動作方向を選択する必要がある。そのため図7に示すユーザインタフェースを製作し、ハンドル頭頂部に取り付けた。スイッチにより各自由度のブレーキのON-OFFが切り換えられるようになっており、液晶画面にはセンサで認識された位置・状態が表示される。

コンテナ挿入動作時は、手動操作であってもコンテナ把持部上のラッチ機構のソレノイドを操作する必要があるが、コンテナ把持部とユーザインタフェースを有線で繋ぐのは困難である。そこでコンテナ把持部にバッテリー及び制御回路を搭載し、無線通信によってハンドルからの駆動指令を伝達させる。

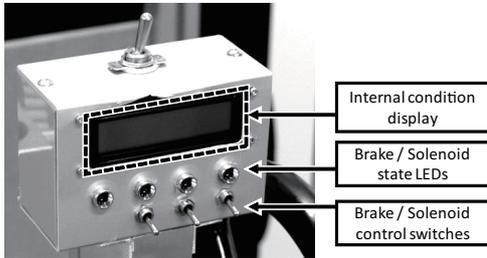


Fig. 7 Snapshot of user interface

3. 電気駆動への拡張

本章では電気駆動に拡張する際に必要となるコンポーネントの実装について述べる。電気駆動拡張後に必要な電装系全体のブロック図を図8に示す。電気駆動ではスタックレーン全体を制御するコンピュータからXBeeを用いたシリアル通信によって制御指令が各部に伝達されるようになっている。

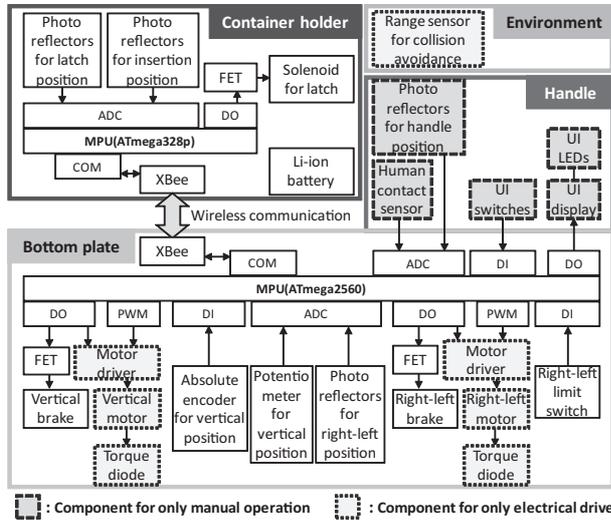


Fig. 8 Block diagram of expansive components for electrical drive

3.1 電気駆動の駆動源 本装置の電気駆動の駆動源は上下、左右駆動共にブラシレス DC モータを用いた。図9に示すように、この二つのモータは底板に搭載され、図9では省略されている制御基板も同様に底板に搭載されている。

コンテナ把持部の上昇はモータでタイミングベルトを巻き上げることで実現できる。一方で、コンテナ

把持部の下降は昇降のブレーキを解除して重力によって自然に下降させるという方式を採用した。コンテナに荷重が載っていない場合は機構の摩擦によって下降しないので、下降する方向にモータを低速で回転させる。下降がモータの回転よりも速くなった場合はトルクダイオードの作用によって軸が空転するので、モータは下降に影響を与えない。コンテナに荷重が載っている場合には、制動なしでは自由落下に近い下降をして暴走の危険がある。そこで制御により安全限界速度(200mm/s)を超えるとブレーキをかけて制動をかける。

一方の左右駆動は地面側の水平レールの横に図9に示すように、ラックギアを平行に配置し、中央部のピニオンギアをモータが駆動する方式とする。

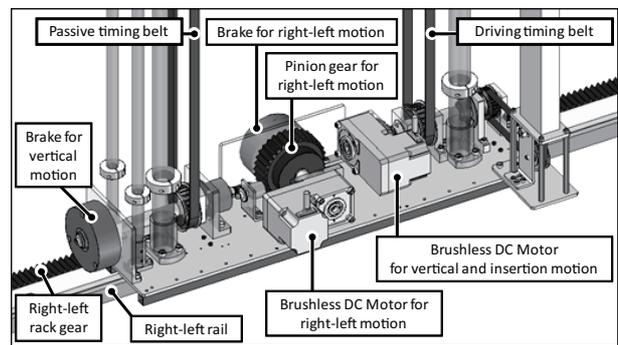


Fig. 9 Brushless DC motors and rack-and-pinion at the bottom plate

3.2 入力トルクを選択 電動駆動と手動操作を共通の機構で実現するには人(ハンドル)と機械(モータ)の2つの入力を選択的に伝達する必要がある。これはトルクが双方向に流れるのを許容した場合、次の2つの問題があるからである。

1. モータによる電動駆動時にハンドルが回転してしまい、人に危害を加えてしまう。
2. 人がハンドル操作をするときに、モータの減速機の摩擦が抵抗となる。

一般的にハイブリッド車などの2入力1出力の装置のトルクの伝導を制御する機械要素としては遊星歯車が用いられている。この機械要素は2つの入力を同時に駆動しトルクの加算を行うことが主機能だが、本装置で求められている機能は2つの入力から駆動に使うトルクを選択することである。

そこで本研究ではモータとハンドルの両入力軸経路上にトルクの伝導を一方に制限するトルクダイオードを搭載する。用いたトルクダイオードは図10(左)に示す、NTN株式会社の”TDF18”である。トルクダイオードは図10(右)に示すように、入力軸にトルクがかかっていないときは入力軸と出力軸の接続が切れて出

力軸は空転し、入力軸にトルクがかかるとかかった方向に機構のロックがかかり入力軸と出力軸が一つにつながる。これにより同一の機構で電気駆動に拡張し、2つの入力を有する駆動系にした場合でも出力軸から入力軸へのトルクの逆流の遮断が可能となった。

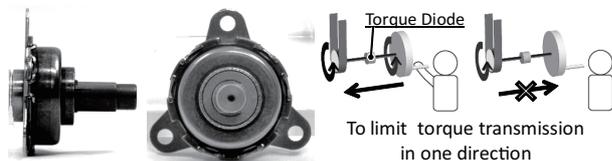


Fig. 10 Snapshot and function sketch of torque diode

3.3 位置決め制御 目標の範囲は先行研究⁽⁹⁾で行ったコンテナ把持部のガイド性能試験の結果から、余裕を含めて左右、垂直共に $\pm 5\text{mm}$ と定め、その範囲に収まるように単純なヒステリシス制御によって位置合わせを行う。この手法は数値的に自己位置を取得できる垂直方向と異なり、左右方向ではフォトリフレクタで目標のマーカを検出するので、マーカの検出に失敗した場合自己位置を特定できない。そこでモータの回転速度及び回転時間を基に、行き過ぎを防止する制御が必要となる。

4. 性能評価実験

4.1 実験の目的 本章では製作したスタックレーンが手動操作と電動駆動ともに要求する動作が実現されているかどうかを確認する。特に人間の能力を機械システムの駆動源として利用することの実現性についての検証する。そこで電動駆動における性能の確認及び手動操作により駆動する本機構の操作性を実験により確認する。

本装置の3動作のうち、コンテナ挿入動作はラッチ機構によるストッパに押し当てる単純な動作となっているため、位置合わせが必要なクレーン全体の左右運搬と、コンテナの昇降の2動作に関して実験を行った。

4.2 共通実験設定 図11に実験設定を示す。左右方向の駆動系には自己位置を数値的に取得するセンサは取り付けられていないので、ワイヤ巻き取り式のロータリーエンコーダを追加した。

目標位置から一定距離(垂直駆動:600mm, 左右駆動:200mm)離れた位置から装置を駆動し目標地点に位置合わせをする。そして駆動開始から設置完了までの時間と目標位置に達するまでの変位を計測した。コンテナに積載する荷重は0kgと5kgの、2通りの試験を左右・垂直各駆動において実施した。但し、コンテナ把持部自身とコンテナの重量はカウンターウェイトにより打ち消されている。

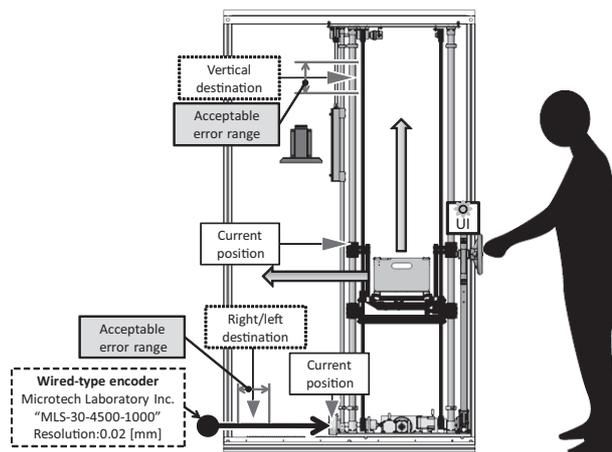


Fig. 11 Experimental set-up

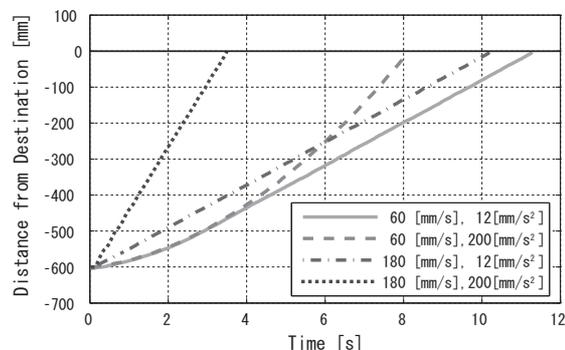


Fig. 12 Measured data examples of vertical lift-up motion by electrical drive

4.3 電気駆動実験 モータの加速度を、ブラシレスDCモータの最低値 12mm/s^2 及び最高値 600mm/s^2 に設定し実験した。駆動速度は垂直方向では 60mm/s , 120mm/s , 180mm/s の3条件で行った。垂直巻き上げ駆動の試験の結果例を図12に示す。どの条件でもオーバーシュートはなく、位置決め成功していることがわかる。これは制御の目標範囲が広いからであるが、この目標範囲は壁掛け金具の許容誤差によって決められたものであるため、壁掛け金具が制御を容易にしているといえる。表1に各実験設定において位置決めが完了し、最終的な停止位置と完全に停止するまでの時間のまとめを示す。各表において上段が平均値、下段が[最大値, 最小値]を示している。

垂直巻き上げ駆動ではどの試行においても加速時間と最高速度が同じであればほぼ同じ時間に、かつ同じ位置にオーバーシュートなく設置できることがいえる。そしてコンテナの重量は電気駆動に大きな影響は与えないことも確認できた。

続いて垂直巻き下げ実験を行った。目標位置から一定距離(500mmと300mm)高い位置から5kgの荷重を

Table 1 Summary of vertical lift-up motion by electrical drive

(a) Controlled position [mm]					
Acceleration		600 [mm/s ²]		12 [mm/s ²]	
Load		0 [kg]	5 [kg]	0 [kg]	5 [kg]
Velocity [mm/s]	60	-3.15 [-3.15 - -3.15]	-3.15 [-3.15 - -3.15]	-2.86 [-3.15 - -2.40]	-3.15 [-3.15 - -3.15]
	120	-2.00 [-2.00 - -2.00]	-2.40 [-2.40 - -2.40]	-1.9 [-1.65 - -2.00]	-2.00 [-2.00 - -2.00]
Velocity [mm/s]	180	0.33 [0.6 - -0.15]	0.05 [0.25 - -0.15]	-1.5 [-1.25 - -2.00]	-1.83 [-1.65 - -2.00]

(b) Elapsed time [s]					
Acceleration		600[mm/s ²]		12 [mm/s ²]	
Load		0 [kg]	5 [kg]	0 [kg]	5 [kg]
Velocity [mm/s]	60	10.17 [10.19 - 10.16]	10.29 [10.31 - 10.25]	11.33 [11.38 - 11.28]	11.42 [11.44 - 11.41]
	120	5.27 [5.28 - 5.25]	5.23 [5.25 - 5.22]	8.18 [8.19 - 8.16]	8.23 [8.25 - 8.19]
Velocity [mm/s]	180	3.47 [3.5 - 3.44]	3.48 [3.5 - 3.47]	8.15 [8.19 - 8.13]	8.19 [8.19 - 8.19]

載せたコンテナ把持部を重力により下降させ、目標範囲に入ったときに停止させる。下降試験のコンテナ把持部の軌道と速度の変化を図 13 に示す。速度の変化は激しいが、全体でみると 150mm/s 程度の速度で下降している。そして目標位置からおよそ 4.9mm 上で静止しており、目標範囲に容易に収めることができた。このようにトルクダイオードとブレーキを用いて

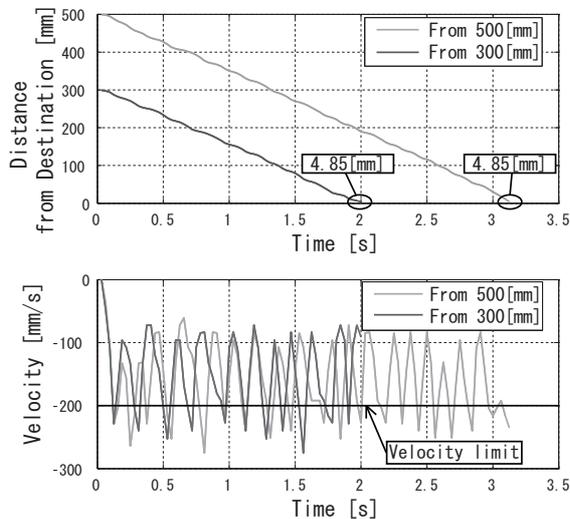


Fig. 13 Result examples of lifting down motion by brake control

電気駆動実験の最後として、左右駆動の実験を行った。駆動速度は 60mm/s と 120mm/s の 2 条件で行った。実験結果を図 14 に示す。速度 120mm/s ではオーバーシュートが大きく、目標付近を繰り返し往復している。これはセンサが目標位置を認識してからブレーキがかかるまでに目標位置を越えてしまったために起こった。制御プログラムで静止位置が目標範囲に入

ていなかった場合それまで駆動していた方向と逆向きに駆動させる制御のため、目標位置か否かしか判定できないセンサ系でも最終的には目標位置に収めることができている¹。左右駆動は垂直駆動と異なり、装置の自重の慣性が打ち消されていない点と、ブレーキと回転軸の間にわずかに遊びがあることから、ブレーキがかかってから完全に停止するまでにブレーキの遊びの範囲で回転軸が繰り返し振動してしまっている。このことは表 2 で最終的な停止位置と所要時間に大きなばらつきがあることからわかる。

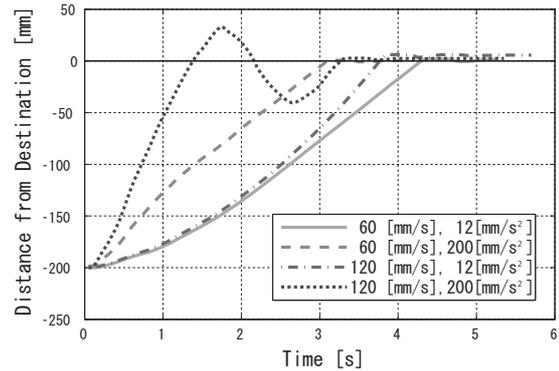


Fig. 14 Measured data examples of right-left motion by electrical drive

Table 2 Summary of right-left motion by electrical drive

(a) Controlled position [mm]					
Acceleration		600[mm/s ²]		12 [mm/s ²]	
Load		0 [kg]	5 [kg]	0 [kg]	5 [kg]
Velocity [mm/s]	60	1.23 [1.90 - 0.43]	1.68 [2.42 - 0.90]	1.48 [1.90 - 0.92]	1.41 [1.82 - 0.46]
	120	0.20 [2.39 - -4.92]	3.08 [4.35 - 2.39]	5.44 [6.05 - 4.75]	4.83 [5.20 - 4.33]

(b) Elapsed time [s]					
Acceleration		600[mm/s ²]		12 [mm/s ²]	
Load		0 [kg]	5 [kg]	0 [kg]	5 [kg]
Velocity [mm/s]	60	4.84 [6.20 - 4.20]	4.51 [4.75 - 4.30]	5.34 [5.50 - 5.20]	5.70 [5.90 - 5.45]
	120	4.84 [5.35 - 4.10]	4.9 [5.00 - 4.75]	5.54 [5.70 - 5.25]	5.30 [5.65 - 5.15]

4.4 手動操作実験 手動操作試験の被験者は 40 代男性 1 人、20 代男性 2 人、20 代女性 1 人の計 4 人が行った。手動操作ではユーザはハンドルに取り付けられたユーザインタフェース(図 7)の LED 表示を頼りに位置決め操作をすることになる。

¹加速度が小さい場合には最高速度に達する前に目標に達してしまっているためオーバーシュートがない

被験者の一人(20代男性)の水平駆動と垂直駆動の計測結果の例を図15に示す。操作性を検討する指標として、目標位置から飛び出した量の最大値 Overshoot と目標範囲に到達してから位置合わせが完了するまでの時間 Adjusting Time を用いた。

各条件における Overshoot と Adjusting Time をまとめた結果を図16に示す。各々の点はそれぞれ実験の測定値に対応している。左右駆動は垂直駆動に比べて Overshoot は平均20.7mm, Adjusting Time は平均3.04秒増加していることから、左右駆動は垂直駆動に比べて位置合わせが難しいということが分かる。

この要因の一つは垂直駆動機構と異なり、水平駆動機構はカウンターウェイトによって重量が打ち消されていないことから、駆動に大きな力が必要であり制御が難しかったためと考えられる。この問題を解決するために、機構全体を軽量化して重量を小さく抑える必要がある。特にコンテナ把持部の軽量化を行うと同時にカウンターウェイトも軽量化できるため、重点的に軽量化を行う必要がある。また、水平駆動は滑らかに動かせるように摩擦を小さく設計していることも要因だが、これは実際の運用では移動距離が長くなることを考えて設計しているため、予想したとおりの結果といえる。

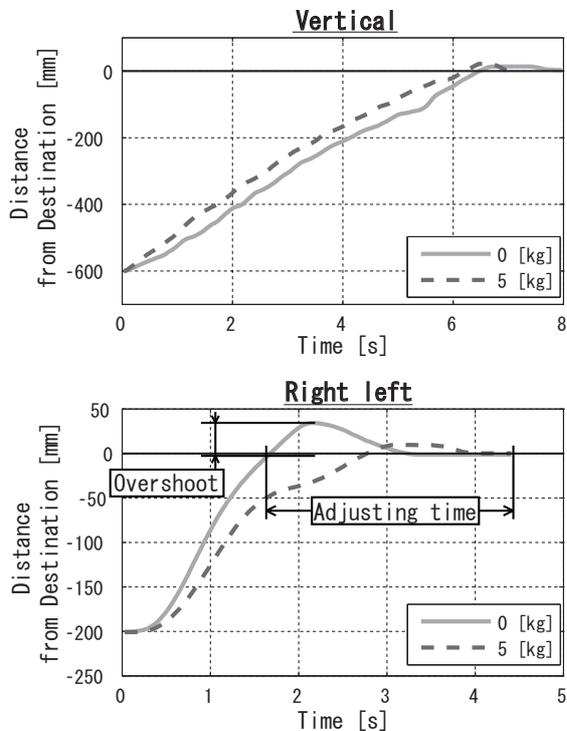


Fig. 15 Measured data examples of vertical and right-left motion by manual operation

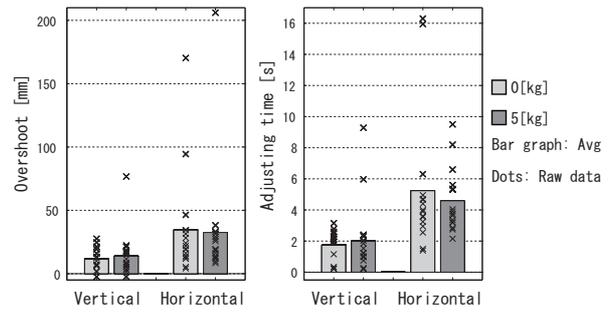


Fig. 16 Averages and distributions of overshoot and adjusting time in manual operation

加えて大きく目標を越えてしまった原因は操作者が目標位置を見逃して通り過ぎてしまったことである。これは目標位置付近も認識対象にし、目標が近いことをユーザに提示するなどのユーザインタフェースの向上により解決可能な問題であると考えている。

- 以上をまとめると次の2つのことが明らかになった。
- 本機構は2自由度を共通化しつつも必要とされる位置決め精度への制御を十分に実現可能な操作性を持つ機構であること
 - 人間は簡便なセンサ及びその計測結果表示による補助のみで装置の手動操作が可能である一方で、操作性の向上のためには本体の軽量化及びユーザインタフェースの改良が課題であること。

5. 結 論

本研究では、日常生活で物品の収納を支援するツールとして、電動駆動と手動操作が切替可能な非産業用スタッククレーンの実現を目標とした。先行研究で開発した手動操作型スタッククレーンにセンサ、アクチュエータなどの電装系を追加し、電気駆動へ拡張した。試作機を用いた実験により性能を評価し、以下に示す2つのことが分かった。

1. 電気駆動では単純な制御で十分に製作した壁掛け金具の許容可能誤差に収められること。
2. 手動による搬送は電動に比べて速度や制御の収束性などの点で劣る面があるが、開発した壁掛け金具の許容誤差の範囲で手動でも十分に制御が可能であること。

本論文では、手動操作を基本とし、同一の筐体で電動駆動に拡張可能であるという新しいロボットシステムの構成を提案した。このような構成はシステムを最初に導入するコストという点で大きなアドバンテージがあると考えており、耐震安定性など実際の運用の実現性を精査した上で、今後様々な装置に応用し、その有効性を検証して行きたい。

参考文献

- (1) Jolyon Drury and Peter Falconer. *Buildings for Industrial Storage and Distribution*. Architectural Press, second edition, 2003.
- (2) Paolo Dario, et al. Smart surgical tools and augmenting devices. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 19, No. 5, pp. 782 – 792, 2003.
- (3) Adam Zoss, et al. On the mechanical design of the berkeley lower extremity exoskeleton (bleex). In *Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 3465 – 3472, 2005.
- (4) Homayoon Kazerooni, et al. On the control of the berkeley lower extremity exoskeleton (bleex). In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 4353–4360, 2005.
- (5) Suwoong Lee and Yoshiyuki Sankai. Power assist control for walking aid with HAL-3 based on emg and impedance adjustment around knee joint. In *Proceedings of International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 2, pp. 1499 – 1504, 2002.
- (6) Daisuke Kushida, et al. Human direct teaching of industrial articulated robot arms based on force-free control. *Journal of Artificial Life and Robotics*, Vol. 5, No. 1, pp. 26–32, 2001.
- (7) Michael A. Peshkin, et al. Cobot architecture. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 17, No. 4, pp. 377 – 390, 2001.
- (8) Yuzo Kaneshige, et al. Development of new mobility assistive robot for elderly people with body functional control. In *IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*, pp. 118 – 123, 2006.
- (9) 福井類ほか. 電気駆動と手動操作が切替可能な非産業用スタッククレーン～棚板を用いない収納方法の考案と手動操作を実現する基本機構の開発～. 第29回日本ロボット学会学術講演会, 1E3-2, 2011.
- (10) Rui Fukui, et al. Application of caging manipulation and compliant mechanism for a container case hand-over task. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 4511–4518, 2010.