移乗リフトと全方向移動車いす機能を有する変形 アシスト介護ロボットの一連の介護作業に対する設計と解析

船戸 一 弘^{*1} 田崎 良 佑^{*1} 三好 孝 典^{*1}
柿原 清 章^{*2} 寺嶋 一 彦^{*1}

Design and Analysis of Novel Nursing Transformative Assistive Robot Comprised of Transfer and Omnidirectional Carrying

Kazuhiro Funato^{*1}, Ryosuke Tasaki^{*1}, Takanori Miyoshi^{*1},
Kiyooki Kakihara^{*2} and Kazuhiko Terashima^{*1}

In this paper, we present design and analysis of a novel nursing lift and wheelchair which can run towards omnidirectional on the ground. The proposed assistive robot provides a power assist function for transfer aid system with hoisting, and also an omnidirectional motion function using DDSS (Differential Drive Steering System). By transforming the length of Boom, Shaft, and Leg Parts, novel power assist robot can easily transfer the person from wheelchair to bed, and vice versa, and furthermore can carry the person as a wheelchair. To show the usefulness of the proposed robot, several experiments with a series of nursing operation have been done in the present research.

Key Words: Nursing Robot, Omni-directional Mobile Robot, Power Assist Lift

1. は じ め に

我が国の総人口は平成 27 (2015) 年 10 月 1 日現在, 1 億 2,711 万人となり, 65 歳以上の高齢者人口は 3,392 万人, 総人口に占める 65 歳以上人口の割合 (高齢化率) は 26.7%となった. 介護保険制度における要介護者または要支援者と認定された人は, 平成 25 年度末で 569.1 万人となっており, 平成 15 年度末から 198.7 万人増加している. 身体が不自由になり, 自分自身で歩行移動ができない場合, 移動手段として車いすを用いることが一般的である. 車いすには様々なものがあり, 日中快適に過ごせるようにゆったりとしたもの, 移動時に利用されるように簡単に折りたためる軽量なものなど体格や用途に応じて多彩な選択肢がある. 駆動方法としては手でホイールを駆動させる手動式, インホイールモータなどを用い, バッテリーを搭載し, 手元にあるジョイスティックなどで移動ができる電動車いすなどがある.

一方, ベッドなどから車いすへ乗せる, もしくは車いすから降りる作業を移乗作業とよぶ. 人力で人を抱え, 別の場所に移動させることは大変な重労働であり, 実際の介護現場でも特に運動強度の高いものである. この移乗作業をアシストする装置として様々なものが開発, 販売されている.

固定設置式の介護リフトは, ベッド周りや風呂などに固定式のレールを設置し, 備え付けられたブームやワイヤーなどを用

いてつり下げを行うものである. つり下げられた対象者は車いすへ乗せるためにブームを旋回させるか, 横行式のレールを備えることによってベッドからの移乗を行う. これは, 装置本体を使用場所に敷設する必要がある, 設置した場所でしか使用できない.

固定式のリフトの敷設が困難な場合には, 装置本体を移動させることができるようにキャスターを付けた, つり下げた状態で人力によってベッドから移動させることができる移動式リフトがある. 固定式のように施設する場所は必要としないが, 移動を行う際に装置を人力で移動させるため, 移動には大きな力を要す. このとき, 被介護者は空中につり下げられたままとなり, 安定感がなく, 移動時の揺れも併せて恐怖感を感じる.

一般的なりフト装置の使い方としては, 被介護者につり下げ装具を巻き付け, ハンガー部に固定, 操作ペンダントのボタン操作にて上昇下降, 移動などを行う. 作業の利便性を考慮してハンガーの付け根部に回転機構が設けられており, これによってつり下げられた被介護者の向きを自由に変えることができる. 反面, その自由度から空中に安定して静止させることが困難になる. 安定させるためには両手で把持することが望ましいが, 操作ペンダントが邪魔になる. このようなケースに対応する技術として, つり荷にかかった荷重を計測し, これを操作トリガーとして巻き上げ動作を行うパワーアシスト技術の利用が考えられる [1]~[3].

介護現場での移乗作業は, 移動手段である車いすと, ベッド, トイレ, 風呂など日常生活での移動の目的地の間で行われている. 介護者は被介護者の姿勢を変え, 腰をかがめて抱きかかえて立ち上がらせ, 車いすやベッドまで移動させ, ゆっくりと降りる. この作業を支援する場合, これらの一連の作業がいつで

原稿受付 2018 年 1 月 31 日

^{*1}国立大学法人豊橋技術科学大学

^{*2}株式会社ケーイーアール

^{*1}Toyohashi University of Technology

^{*2}KER Co., Ltd.

■ 本論文は有用性 (システム設計・構築分野) で評価されました.

もどこでも行えることが不可欠である。また、介護者は被介護者を両手で把持した状態で上げ下げを行え、移動も全方向に移動できる装置であれば利便性も向上するものと思われる。

そこで本研究では、筆者らが従来行ってきたリフトのパワーアシスト制御[4]と、搬送における全方向移動機構[5]の技術を基に、持ち上げによる移乗、その装置による搬送、最後に目的地で降ろす、という一連の動作が行える新型のアシスト介護ロボットの開発を目指し、ロボットの变形機構の設計、そのデザイン、試作、システムの解析および検証実験を行い、提案するアシストロボットの有効性を検証することを目的とする。

2. 関 連 研 究

移乗介助作業のアシストとしては、リフト装置を用いる以外のアプローチもみられる。独立行政法人理化学研究所と東海ゴム工業株式会社は介護支援ロボット RIBA-II を開発[6][7]。このロボットは具備された双腕で被介護者を直接抱きかかえてベッドから車いすへの移乗を行うことができる。移動機構にオムニホイールを用いていることから全方向に移動が可能であるが、段差乗り越え能力に乏しく、カーペット敷きや延長コードなど実生活環境で見られる生活雑貨品による 10 [mm] 程度のわずかな段差を乗り越えられず、移動の障害になる。

マッスル株式会社は専用のスリングシートに装置腕部を差し入れ、抱きかかえる形で移乗作業が行える ROBOHELPER SASUKE を開発している。装置にはパワーアシストハンドルを具備し、傾動、昇降が可能となっており、抱きかかえ作業の軽減を図っている。装置下部にキャスターが取り付けられており移動が可能だが、人力での移動のため移動に大きな力を必要とする。

装着型とよばれる、人間が装置を装着し、人間の動作をサポートするパワーアシストスーツの開発も盛んに行われている。株式会社イノフィスは空気圧式 McKibben 型人工筋肉を用いたマッスルスーツを開発[8]。動力として空気圧タンクもしくは外部コンプレッサからの圧縮空気を用いており、呼吸スイッチやタッチスイッチを用いて人工筋肉を駆動し、装着者の筋力を増強する。CYBERDYNE 株式会社は装着型のロボットスーツ HAL [9] を開発。生体電位信号を読み取り、サーボモータを制御することによってパワーアシストを実現している。いずれも装着する必要がある、装着に手間を要する。

3. 一連の介護作業とトータルシステム

実際の移乗介助作業の一例を Fig. 1 に示す。ここでは二つのリフトを用い、リフト A でつり下げて車いすへ移乗し、車いすで移動、目的地でリフト B を使って目的地の場所へ降ろしている。ここで車いすを移動手段 (Fig. 1 中 2 重枠) として介在させる場合、スリングシートの着脱が 2 回必要となるが、このリフト自体が車いすのように自由に移動することができれば着脱作業を 1 回にすることができ、作業負荷低減に寄与する。

ここで、本装置を用いた場合の一連の動作を以下に示す。ここでは被介護者をスリングシートを用いて、いすから離れたベッドにまで移乗する作業を想定している。移動中は装置に備え付けられた折りたたみいすに着座させている。説明文中の下線部は、介護者が操作する対象 (機器や移動させる被介護者) を表し、操作ペンダントを用いた装置の变形動作以外はすべてパワーアシストによる操作となっている。パワーアシスト操作ができる場所は操作ペンダントからでも操作できるがここでは割愛

Fig. 1 Operation Overview

し、パワーアシストでの操作についてのみ記載する。

- (i) 従来のいすに座っている被介護者にスリングシートを装着する
- (ii) 操作ハンドル を用いて本ロボットを被介護者をつり下げることができる位置へ移動する
- (iii) 操作ペンダント を用いてつり上げ作業ができるよう装置を拡大 (メインシャフト前進, ブーム伸張) させる
- (iv) ワイヤー に下向きの力を加えてワイヤーを引き下ろす (Fig. 2 (a))
- (v) ワイヤー 先端に取り付けられたスリングバーにスリングシートを引っかける (Fig. 2 (b))
- (vi) スリングシートを両手でつかみ、被介護者 に上向きの力を加えて空中に引き上げる
- (vii) 被介護者 に横向きの力を加えてリフトを移動させ、いすから離れる (Fig. 2 (c))
- (viii) 操作ペンダント を用いて装置を縮小 (メインシャフト後退, ブーム収縮) させる
- (ix) 被介護者 に下向きの力を加えて引き下ろし、本装置の折りたたみいすに着座させる (Fig. 2 (d))
- (x) 操作ハンドル を用いてベッドへ移動させる (Fig. 2 (e))
- (xi) ドアなど低いところをくぐるときは、操作ペンダント を用いて装置の高さ方向を縮小させる (Fig. 2 (f))
- (xii) ベッド付近に到着したら、操作ペンダント を用いて装置を拡大 (メインシャフト前進, ブーム伸張) させる。こ

Fig. 2 Photo of a series of tasks

のとき安全のため手で被介護者を支えておく。装置に異常を感じたら 被介護者 を強く引くと装置は即停止する (Fig. 2 (g))

- (xiii) 被介護者 に横向きの力を加えてリフトを移動させ、ベッドに接近させる (Fig. 2 (i))
- (xiv) 被介護者 に下向きの力を加えてワイヤーを引き下ろし、ベッドに降ろす (Fig. 2 (j)). スリングシートが取り外せる高さまでワイヤーを引き下ろしたら、装置を安全停止状態にし、スリングバーからスリングシートを取り外す
- (xv) 装置の安全停止を解除し、ワイヤーの巻き上げ、リフトをベッド外へ移動させる

このように、装置の移動は操作ハンドルを用いて、被介護者の上げ下ろしはスリングシートに直接力を加えたパワーアシストにて作業を行うことができる。ベッドからいすへの移乗はこの反対の動作であるため省略する。これらの動作はトイレなど、ほかの多くのシーンで用いることができると思われる。この一連の実験の様子は第 7 章にて示す。

4. 提案アシストロボットの概要と変形機構の設計

4.1 全体構成

製作した装置は Fig. 3 のような外観となっている。被介護者をつり下げることができるワイヤー巻き取り式のリフト部と、装置を全方向に移動させることができる移動台車部を組み合わせた構造となっている。

リフト上部にウォームギアを用いたワイヤー巻取機をサーボモータで駆動するウインチボックスを設けた。ワイヤーにかかる力を検出するためにロードセルを用いる。従来はワイヤー先端とスリングバー（スリングシートを取り付けるハンガー状の治具）にロードセルを挟むように取り付け荷重の検出を行っていたが、巻き取り量がロードセル本体の大きさ分短くなってしまう、検出装置自体が介護作業側に出露することなどから、ウインチボックスをフローティング構造とし、ロードセルを介して本体に結合することによってワイヤーにかかる力を検出できる機構を考案した (Fig. 4)。ロードセルから出力される荷重情報は電圧信号として PC に取り込まれ、ノイズ除去の目的で 100 回の移動平均フィルタによって平滑化される。

つり下げワイヤーは伸縮するブーム上部を経由して出口部に導かれる。前後、左右 2 方向からのレーザセンサによってワイヤーの位置および太さを検出し、位置情報からワイヤーの角度を算出する。下から見た図を Fig. 5 に示す。ワイヤーの繰り出し長さは巻き取り用サーボモータのエンコードから算出する。

移動台車部には当研究室で開発された平歯車型差動駆動操舵機構 (Differential Drive Steering System: DDSS) [5] を用いた (Fig. 6)。これは一般的なゴムタイヤを用いた全方向移動機構であり、段差乗り越えや不整地走破性に優れ、振動が少ないこ

Fig. 3 Machine appearance

Fig. 4 Detection of wire load

Fig. 5 Detection of wire position and thickness

Fig. 6 Differential Drive Steering System (DDSS)

Fig. 7 Connection of control units

とから介護に使う装置[10]に有効である。オフセット付きキャスターを駆動輪化したDDSSは1台につきサーボモータが二つ用いられ、その回転速度と方向の組み合わせにより走行、旋回が瞬時に行える。二つのモータの出力を合成し、駆動と旋回に分配することができるため、同じ出力を得るのに一つあたりのモータ容量を半減することも可能である。キャスターの向きを検出する絶対値エンコーダを設け、各車輪の操舵角度を検出する。本装置では前2輪+後1輪の3輪駆動構成としている。

制御機器として、パワーアシスト制御などの演算処理のために組み込み用OSであるMicrosoft Windows Embeddedを搭載したPCを中心に構成する。一部、直動アクチュエータなど速度制御を要しない部分は産業用PLCに任せることとした。PCとPLC相互をシリアル通信で接続する。PCにはロードセルなどの信号処理に用いるためのアナログ入力、DDSSの操舵角検出用絶対値エンコーダ入力のためデジタル入出力を備える。本装置は3台のDDSSを用いているが、1台のDDSSには二つのサーボモータが必要となるため合計6軸、リフト部と合わせて合計7軸分のサーボアンプが必要になる。これらはControl Area Network (CAN) にて接続した (Fig. 7)。

本装置は蓄電池によって駆動できるように考慮した。安全性を考慮して電圧は直流24[V]とし、入手性を考慮して二つの直流12[V]の鉛蓄電池を直列に接続して生成している。鉛蓄電池は本体重量を増すウェイトとしての機能も兼ねている。

4.2 移乗リフト部と移動台車部の機構設計

ロボットをベッドサイドでの移乗リフト、および搬送車いすとして両用するためには、ロボットの重心を安定する位置に制御する必要がある。本研究ではブーム、シャフトおよび脚の長さを自由に變形できる構造とした。このロボットの必要寸法を検討する。装置は Fig. 8 (i) に示すとおりベッドの長辺方向に接近し、介護者をつり上げるものとする。これは日常の介助作業と同じ作業方向である。ベッドの幅方向サイズについて、介護ベッドの床幅 (適用マットレスの幅) は830, 910, 1,000 [mm]とあり、一般的なサイズとしては910 [mm] が用いられている。介護ベッドには手すりなどもあり、これらを加味するとベッド本体の幅はおおよそ970 [mm] となるため、ベッド中央までの距離485 [mm] をブームが必要なリーチ長と定めた。高さ方向について、本研究では市販のスリングシート (Liko 社製、ハイバックタイプ (Fig. 8 (ii))) を用いることにし、つり下げ補助具であるスリングバーを用いてつり下げる。スリングシートのサイズは被介護者の体格によって変化するが、日本人の成人男性 (60～

Fig. 8 Requirement size of the machine

Fig. 9 Transformer structure of the machine

64 歳) の平均身長が164.5 [cm] とのことなので、これに基づいてスリングシートを選定、スリングバーとスリングシートの組み合わせ寸法を1,000 [mm] とした。なお、成人女性 (60～64 歳) の平均身長が154.8 [cm] なので、同一装置でカバーできるものと判断した。介護ベッドは起床補助などのために電動アクチュエータが具備されており、また、介護者が作業しやすいように昇降機構が組み込まれていることが一般的であることから、床面から600 [mm] を作業高さとした。これにより、巻き上げ部の最低高さは1,600 [mm] となる。

病院などの施設はもちろんのこと、一般的な家屋での使用も考慮し、寝室以外の場所に移動できるようにするために本体サイズの制約条件を設定した。まず、ドアを通過できるサイズとして高さ1,800 [mm] × 幅750 [mm] とし、奥行きについてはエレベータなどで移動を考慮して1,100 [mm] を上限とした。これらの条件から、上部の牽引ブームは伸縮構造としたいが、強度的、重量的な問題から可能な限り少ない段数で構成したい。本装置では一段式の伸縮ブーム構造とした (Fig. 9 (i) (a))。一段式では設計要件の485 [mm] のリーチを確保することが難しいため、メインシャフト (Fig. 9 (i) (c)) を Fig. 9 (ii) (C) のように、移動台車前方へ移動する機構を組み込み、ベッド脇へ接近した際にも可能な限りブーム長が有効に利用できる構造とした。被介護者をつり下げるためにブームおよびメインシャフトを前方へ移動させると、重量物が装置上前部へ集中する。つり下げられた荷の重心はブーム先端にあるワイヤー出口の鉛直線上にあるが、脚部がこれよりも前側でない場合、装置が前傾して転倒する

ことになり、危険である。そこで本装置では、台車下部にメインシャフトに連結された脚部 (Fig. 9 (i) (d), (e)) を設けた。メインシャフトが前方へ移動した際、同期して脚部がせり出る構造とし、ワイヤー出口の鉛直下よりも前側に脚部が移動する構造とした。これにより装置の装置底面内より外側に重心が出ず、装置の転倒を防止する [11]。各部は (a) → (A), (b) → (B) のように変形を行うことができる。装置の最小時 (Fig. 9 (i)) の寸法は高さ 1,750 × 幅 720 × 奥行き 1,050 [mm]、最大時 (Fig. 9 (ii)) には高さ 2,100 × 幅 720 × 奥行き 1,600 [mm] となる。装置本体は構造物、バッテリー、制御機器など含めて 100 [kg] あり、その大半は装置下部の台車部に存在する。伸縮ブーム構造を多段化しなかったのは低重心化のためでもある。なお、本装置はブームを旋回させる構造を持たず、装置本体は左右に均等に重量物を配置する設計としているため、横方向の重心位置は装置左右中心に存在しているものとしている。

リフト部は高さ方向の伸張のメインシャフトとリーチ方向の伸張のブームの二つにより構成される。つり下げワイヤーを保持するウインチボックスはメインシャフトの上部にあるブーム部に取り付けられているため、ワイヤー長さはメインシャフトの伸張では影響を受けない。しかし、一段伸張するブームの上を通過しているため、その影響を受ける。ワイヤーの巻き上げ、巻き下げを行わずに、ブームを短くすると荷は下がり、ブームを伸ばすと荷は上がり、最悪の場合ワイヤーを破断させる。これを防止するため、ブームの伸張距離をポテンシオメーターによって検出し、伸縮した距離分ワイヤーの繰り出しを行い、破断事故を防止している。

メインシャフトおよびブームの伸縮は直流電源による市販の直動アクチュエータによって行われる。メインシャフトの前後進についてはつり荷がある状態での動作が考えられるため、歯付きプーリー、ボールネジを介して直流モーターにて駆動する。その移動速度は 8.5 [mm/s] である。

移動台車部分の設計であるが、介助作業の利便性を考慮し全方向移動機構にて構築した。全方向移動機構にはオムニホイール [12]、メカナムホイールなどがあるが、いずれも段差乗り越え能力に乏しく、また、走行時に振動をするため乗車型の介護装置に適さない。一方、当研究室の開発した平歯車型差動駆動操舵機構 (DDSS) は、キャスター型の構造をしており、駆動輪に一般的なゴムタイヤを用いることが可能である。このため、段差乗り越え能力に優れる。本装置では直径 130 [mm] のタイヤを用いているため、この半径である 65 [mm] が乗り越え能力となるが、装置前方に設けた補助輪の直径が 50 [mm] であるため、この制約を受け 25 [mm] の段差乗り越えが可能となる。同じくキャスター型の構造を持つ全方向移動機構 ACROBAT による対角 2 輪による全方向移動の研究 [13] も行われているが、当研究室で過去に製作された 4 輪構成の実験装置により、対角 2 輪、後 2 輪、前 2 輪などと機械構成を変えて検討したところ、重量物 (人 80 [kg]、装置 100 [kg]) を搬送する本研究の場合、安定性と移動性、また、荷吊り時に装置前方に荷重が偏ることを考慮し、前 2 輪 + 後 1 輪の合計 3 輪駆動構成とした。

5. パワーアシスト移乗リフト部

当研究室では、従来からつり下げワイヤーにかかる荷重をロードセルで計測し、これを元にワイヤーの巻き上げを行うパワーアシストシステムの開発が行われている。ロードセルは装置本体と対象の間に挿入され、対象の重量および対象に加えた力を

Fig. 10 Lifting mechanism

リアルタイムに計測することができる。この荷重情報の変位をワイヤーの巻き取りモーターの制御量に反映することによってパワーアシストを実現する。従来、筆者らのグループが行ってきたパワーアシストリフト制御の基本を Fig. 10 から説明する。

空中にある搬送物の質量 m [kg] に対し、操作者が搬送物に直接操作力を加える。搬送物重量を計測するロードセルは $f_{L(t)}$ [N] を検出する。これから重力による力 m_g [N] を差し引くことによって操作力 $f_{H(t)}$ [N] を算出する。コントローラはモーターの制御入力値を生成、モーターの制御を行って搬送物を昇降させることができる。しかしこの方法ではリミットサイクルとよばれる問題が発生する。これは巻き下げの際、搬送物が接地後にロープが緩み、ロードセルの検出する値が急激に小さくなると、差し引いた操作力を上向きの力と誤認することで巻き上げ動作をしてしまう。その後、搬送物が空中に浮いた状態で加えられている操作力で再び下降する動作を繰り返す [14]。この問題について、小島らはボボフの安定定理を用いたリミットサイクル抑制コントローラの設計を行った。これは空中にある時には速応性のあるコントローラを、接地後には安定性の高いコントローラの二つをロードセルの荷重情報によって切り替えることによってリミットサイクルを抑止した [4]。しかし、接地後に使用する安定性の高いコントローラにより接地後の操作性が悪い。寺嶋らは荷重値の変動状況から接地を判断し、接地時にコントローラを切り離すことによって抑止する [15]。この方法では接地後にペンダント操作による昇降動作が必要となる。

本研究では、実際の介護現場で行われているリフト作業に対し、従来型パワーアシスト技術を適用した際に発生する問題について検討した。前述のようなコントローラの場合、接地後になんらかの対策をしないと、スリングシートを外す際にペンダント操作が必要になる。そのままパワーアシスト機能でスリングシートが外せるまでワイヤーを緩めることができればペンダント操作をする必要はなくなる。

Fig. 11 に下降および接地時のリミットサイクル問題が発生せず、かつ、操作が連続的に行え、操作性の良いパワーアシスト制御手法のフローチャートを示す。以下に動作の説明を行う。 v はモーター速度を表し、正で下降、負で上昇となる。Step は Fig. 11 中の (1), (2) … に相当している。

【提案するパワーアシスト制御手法の手順】

非接地時

Step 1 ペンダントにて搬送物をつりあげ、ロードセルにて計測する。10 秒内の平均値を m_g [N] とし、ここからパワーアシストの開始とする

Step 2 ロードセルの指示値 f_L [N] と搬送物の重量 m_g [N] を

Note:

m_g : load net weight
 f_L : loadcell measurement value
 f_H : manual operation force
 f_{TH} : power assist control threshold
 v : motor velocity
 k_p : gain of P controller
 Δf_L : displacement weight

Fig. 11 Flowchart of Power assist control

差し引き、操作力 f_H [N] を得る

Step 3 ロードセルのノイズ対策のため、操作力の閾値 f_{TH} [N] を超えていれば制御開始

Step 4 コントローラにてモータ速度指令値 v を算出
 コントローラは P 制御でゲイン k_p は予備実験により検討し、本装置の場合、0.5 とした

Step 5 算出された速度 v でモータを駆動する

Step 6 モータ速度 v が 0 になっていないかを確認する。停止していなければ Step 2 へ、減速停止したときは Step 7 へ移行する

Step 7 作業者は接地させた際、モータが停止したと認識したときに一度手を離す（接地中処理移行トリガー）

Step 8 このときのロードセル重量 f_L [N] が搬送物の重量 m_g [N] 以下でない場合は Step 2 へ戻る

Step 9 f_H が失われたことによる巻き上げを防止するため、3 秒間、操作を無効にした後、接地中処理に移行する

この制御手法では、まず搬送物に操作力を与えずに空中にある場合、 $f_H = f_L - m_g$ は 0 を示し、 $v = 0$ となる (Step 2)。ここに操作者が閾値以上の力を加える (Step 3)。例えば 50 [N] の下向き（搬送物を引き下げる）の力を加えると $f_H = 50$ となり、 $v > 0$ (Step 4) となって搬送物を下降させる。操作者が搬送物から手を離すと、 $f_H = 0$ となり、モータは停止する。下降中に搬送物が接地を始めると、ある時刻において操作力 f_H と接地面からの上向きの力 f_{gnd} が釣り合った時点で見かけ上 $f_H = 0$ となり、 $v = 0$ となってモータは停止する (Step 6)。操作者は、五感（視覚と触覚）でモータが停止したことを認識した後、搬送物から手を離すと下向きの力が失われ (Step 7)、ロードセルには $f_L = m_g + f_{gnd}$ (f_{gnd} は上向きの力のため負) が現れる。これは $f_L < m_g$ であるから、ここでこの値をそのまま用いると $v < 0$ となり、モータは巻き上げを行ってしまう。そこで、このモータが停止している状態において、上向きの力を含む $m_g + f_{gnd}$ を搬送物の接地中の（見かけの）重量とみなすべく、 $f_L < m_g \times \alpha$ （本装置の場合 $\alpha = 95\%$ として）ならば接地中であると記憶する (Step 8)。このときの荷重変動を操作量と誤認したことによって巻き上げをさせないようにするため、3 秒間の操作を無効 (Step 9) としたのち、接地中動作に移行する。

接地中

Step 10 接地中と判断した場合、 f_H [N] はロードセルの現在指示値 $f_{L(t)}$ [N] と前回値 $f_{L(t-1)}$ [N] の差とする。

Step 11 操作力の閾値 f_{TH} [N] を超えていなければ Step 10 へ戻る

Step 12 操作力の符号（方向）によって速度 v を算出
 c は一定速度での制御のため、定数

Step 13 算出された速度 v でモータを駆動する

Step 14 接地中の搬送物の荷重変動量 Δf_L を算出

Step 15 Δf_L が制御スキャン中の一定量を超える変位（本装置は 20 [N] とした）を確認したら Step 18 へ

Step 16 モータ速度が正（下降）のとき、 f_L が前回値よりも小さいときは Step 13 へ戻ってモータは回転を続ける

Step 17 モータ速度が負（上昇）のとき、 f_L が前回値よりも大きいときは Step 13 へ戻ってモータは回転を続ける

Step 18 Step 15～18 のいずれかを満たさなかったとき、モータは停止させる

Step 19 停止後、 f_L が m_g よりも大きいときは搬送物が空中にあると判断して接地中処理をリセット

接地中と判断している場合、操作力を $f_H = f_{L(t)} - f_{L(t-1)}$ に置き換える (Step 10)。この後、接地中であっても下向きの力を加えて $f_{L(t)} > f_{L(t-1)}$ であるならば $\text{sgn}(f_H)$ は正を返し、上向きの力を加えて $f_{L(t)} < f_{L(t-1)}$ となるならば負を返す。操作力が f_{TH} を超えた場合、モータ速度を $v = c \times \text{sgn}(f_H)$ として (Step 12)、モータを回転させる (Step 13)。モータ回

転中は搬送物重量の変位を常に確認し、モータ速度が正のときは f_L が減少、負のときは f_L が増加しているとき、モータを回転させ続ける。変位が一定量（この制御手法では 20[N] よりも大きい（Step 15）、もしくは変位がモータ操作量と逆（下降時に大きく（重く）、上昇時に小さく（軽く））になったとき停止する（Step 18）。停止後、 f_L が m_g よりも大きくなったとき、搬送物は空中に引き上げられたと判断して非接地中処理へ戻る。

本装置において、接地中のモータ速度は一定速としたが、これは接地後の引き下げ動作はスリングシートの取り外しのために行うものとみなし、微細な速度制御が必要ないと規定したためである。多くの実験によりこの制御手法の妥当性の確認を行った。その実験結果の一例は 5 章で示す。

本手法において、操作閾値 (f_{TH}) よりも小さい操作量 (f_H) を検出した場合、モータは停止するため、小島らの手法 [4] に比べ、微速での操作はできない。しかし、操作閾値 (f_{TH}) 以下ではモータを停止させてしまうことからリミットサイクルの発生は抑止される。また、その後、搬送物重量 m_g に代替し、接地中の重量 f_L からの差分で方向を決定してモータ操作を行うことから、モータ停止後にコントローラを遮断してしまう寺嶋らの手法 [15] と異なり、スリングシートを取り外すような作業をパワーアシスト操作のみで行えるようになる。

本研究では、操作者はワイヤーを介してパワーアシスト操作を行っており、操作ペンダントが操作者のそばにないことが考えられる。このため、緊急停止操作などの安全停止作業が行いにくい。そこで本装置ではワイヤーの操作量に上限値を設け、それ以上の力が加わった際にソフトウェアで緊急停止することとした。緊急時にはワイヤーを上下いずれかの方向に強く引っ張ることによって安全に停止させることができる。

6. パワーアシスト全方向移動搬送部（車いす部）

つり下げ式のリフトでは、被介護者をスリングシートに包んだ状態でワイヤーを巻き上げて空中に引き上げる。このとき安全性の観点から、ワイヤーは鉛直方向に垂下している状態で引き上げることが望ましい。

本研究では全方向移動機構 DDSS を用いて、様々な方向へ移動できる台車システムを採用しているため、この機能を組み合わせることにより、引き上げ時のワイヤーを鉛直に保つことが可能となる。

台車の移動操作に関しては、本システムでは (i) 直感的なハンディタイプの液晶ペンダントによる移動、(ii) 台車後部に備えた操作ハンドルによるパワーアシスト移動、(iii) ワイヤーの振れた角度を検出し操作量としたパワーアシスト移動、の 3 種類を用いることができる。

(i) 操作ペンダント操作による移動（搭乗者自らが操作）：操作ペンダントはタッチパネルとなっており、画面上に備えられたボタンにより、前進・後退、横進、左右旋回を行うことができる。操作ペンダントはカールコードにて搭乗者の手元に引き寄せることができ、自ら移動操作することができる。

(ii) 操作ハンドルによる移動（移乗搬送中）：装置後方に Fig. 12 に示す操作ハンドルを取り付けた 6 軸力覚センサを備え、介護者が任意の方向に力を加えることにより台車を移動させることができる。DDSS を有する本装置は、前後進だけでなく横進およびその場での旋回が可能であるから、前後

Fig. 12 Operation handle of Power assist control

Fig. 13 Model of the vehicle

進の操作量を Fz 軸から、横進を Fx 軸から、旋回を My 軸から抽出している。この操作は主に介護者が本装置を素早く目的地に移動させるなどに用いることができる。

(iii) ワイヤーの振れ角を用いた移動（移乗作業中）：空中につり下げられた被介護者に横向きの力を加えることによって発生するつり下げワイヤーの傾きを検出し、その傾きを移動方向として台車の移動を行う。スリングシートの装着時であれば台車は常にワイヤーを鉛直に保つ動作となり、斜めつりを予防することができる。空中に引き上げた後であれば、操作ハンドルを用いなくてもベッドから離脱させることが可能となる。被介護者に両手を添えたまま移動が可能となっており、安心感が高い。被介護者がつり下げられた状態での移動となるため、安全性を考慮して一定速度の低速にて移動するようになっている。

操作ペンダントによる移動 (i) および操作ハンドルから生成 (ii) される目標速度指令値は、急激な車両の動作を抑止するため、一次遅れフィルタを介して生成する。

いずれかの方法にて車両の目標速度を生成し、各 DDSS への速度指令値として分解する。参考文献 [5] の Fig. 9 と同様、台車のモデルを Fig. 13 のように定義する。DDSS 3 輪構成における運動学モデルは式 (1) となる。実際の制御値の演算に用いる逆運動学モデルは式 (2) となる。

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_v \\ \dot{y}_v \\ \dot{\theta}_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & 0 & -\frac{1}{3}(x_{va}\sin\theta_v + y_{va}\cos\theta_v) \\ 0 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3}(x_{va}\cos\theta_v - y_{va}\sin\theta_v) \\ \frac{1}{3} & 0 & -\frac{1}{3}(x_{vb}\sin\theta_v + y_{vb}\cos\theta_v) \\ 0 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3}(x_{vb}\cos\theta_v - y_{vb}\sin\theta_v) \\ \frac{1}{3} & 0 & -\frac{1}{3}(x_{vc}\sin\theta_v + y_{vc}\cos\theta_v) \\ 0 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3}(x_{vc}\cos\theta_v - y_{vc}\sin\theta_v) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \dot{x}_a \\ \dot{y}_a \\ \dot{x}_b \\ \dot{y}_b \\ \dot{x}_c \\ \dot{y}_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

Fig. 14 Block diagram of the three-wheeled vehicle

Fig. 15 Control system of the vehicle

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_a \\ \dot{y}_a \\ \dot{x}_b \\ \dot{y}_b \\ \dot{x}_c \\ \dot{y}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -x_{va}\sin\theta_v + y_{va}\cos\theta_v \\ 0 & 1 & x_{va}\cos\theta_v - y_{va}\sin\theta_v \\ 1 & 0 & -x_{vb}\sin\theta_v + y_{vb}\cos\theta_v \\ 0 & 1 & x_{vb}\cos\theta_v - y_{vb}\sin\theta_v \\ 1 & 0 & -x_{vc}\sin\theta_v + y_{vc}\cos\theta_v \\ 0 & 1 & x_{vc}\cos\theta_v - y_{vc}\sin\theta_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_v \\ \dot{y}_v \\ \dot{\theta}_v \end{bmatrix} \quad (2)$$

各 DDSS に分解された指令速度から各モータの角速度を算出し、モータドライバーへ指令を与える。モータドライバーは指令速度に応じて角速度制御を行う。各 DDSS には操舵角を検出する絶対値エンコーダが設けられており、各モータの角速度および車輪角度を元に自己位置の算出を行う。3 輪台車のブロック図を Fig. 14、制御システムを Fig. 15 に示す。

7. トータルシステムの動作解析と制御実験

構築したシステムの有効性を検証するため実機実験を実証した。被験者は健康者である。実験は「国立大学法人豊橋技術科学大学人を対象とする研究規定」(承認番号ヒト 28-5) に則り、「豊橋技術科学大学研究倫理審査委員会」の承認を得て実施し、被験者には事前に研究の目的や内容を十分に説明したうえで同意を得た。また、実験中は担当教官が監督し、安全上の問題が生じたときは実験を即時中止できるような体制をとった。

Sitting on the chair (a) Lift in the air (b)

Fig. 16 Photo of Lift hoisting by power assist

Fig. 17 Experimental by power assist

Landing of foot (a) Landing of hip (b) Landing of whole body(c)

Fig. 18 Photo of Lift lowering by power assist

7.1 パワーアシストリフト部：いすから引き上げる

いすに座った被験者を、パワーアシストリフト機能にて引き上げる実験を行った。実験の様子を Fig. 16 に、その時の実験結果を Fig. 17 に示す。スリングシートを両手でつかみ、30[N] 程度の上向きの力を加える (Fig. 17 (a)) ことによってワイヤーを巻き上げが開始され、手を離す (Fig. 17 (b)) ことによって停止させることができています。このときロードセルは元の m_g [N] の値を示し、停止時に接地していないと判断できる。

7.2 パワーアシストリフト部：ベッドに降ろす

パワーアシストリフト機能にてつり下げられた被験者を下降させ、ベッドに接地させる実験を行った。実験の様子を Fig. 18 に、その時の実験結果を Fig. 19 に示す。スリングシートを両手でつかみ、80 [N] 程度の下向きの力を加えた (Fig. 19 (a)) ことにより下降動作が開始され、スリングシート中の被験者の脚がベッドに接地した際に発生した荷重変動により一度停止 (Fig. 18 (a), Fig. 19 (b)) する。操作者は一度手を離し (Fig. 19 (c)), その後再び下向きの力を加えて (Fig. 19 (d)) 下降を再開させ、臀部 (Fig. 18 (b)) が接地した段階で大きな荷重変化を検出 (Fig. 19 (e)), 再度下向きの力を加えて (Fig. 19 (g)), 全身の接地 (Fig. 18 (c), Fig. 19 (j)) をさせている。

接地時に発生した荷重変化の監視によってモータを巻き上げることなく停止させ、リミットサイクル問題を解消し、スムーズに下降動作をさせることができています。

7.3 全方向移動台車部：操作ペンダント

(搭乗した被介護者自ら操作することを想定)

操作ペンダントを用いて移動台車部の走行機能の検証を行った。走行エリアは前後 (x 軸) 方向 1.8 [m] × 左右 (y 軸) 方向 1.4 [m] の矩形エリアとした。前進、右行、後退、左行と、装置の向きを変えずに移動している。この実験による速度指令情報を **Fig. 20** に、車両速度情報および車輪角度を積算した自己位置推定情報を **Fig. 21** に示す。Fig. 20 中の矢印は移動させた方向を示す。

7.4 全方向移動台車部：操作ハンドル

(介護者が操作することを想定)

同じ矩形エリアを、操作ハンドルを用いて移動させる検証を行った。操作ペンダントの実験と同様に速度指令情報を **Fig. 22** に、自己位置推定情報を **Fig. 23** に示す。目視での操作のため、Fig. 23 によると真横に移動できていないことになっているが、本装置の用途であれば厳密な移動軌跡を必要としないため特に問題と考えていない。

Fig. 19 Experimental by power assist

Fig. 20 Reference speed of motor generated by the operation pendant

Fig. 24 Experimental by a series of tasks

7.5 統合された装置を用いた一連の作業

第 3 章で説明した一連の作業を行った実験データの一例を **Fig. 24** に示す。このときの実験の様子は Fig. 2 である。この実験において被験者は 21 歳健康者の男性、体重は 71.5 [kg] である。この実験でははじめにスリングシートを装着した被験者をいすに着座させた状態で実験を開始している。リフトで (Fig. 2 (a), Fig. 24 (a)) 空中へ引き上げる。本装置の折りたたみいすに着座させるために、ブームを収縮させ (Fig. 2 (b), Fig. 24 (b)), パワーアシストを用いて引き下げる (Fig. 2 (c)). リフトで 6 [m] 離れたベッドにハンドル操作で移動 (Fig. 2 (e), (f)), ベッドサ

Fig. 21 Experimental trajectory by the operation pendant

Fig. 22 Reference speed of motor generated by the operation handle

Fig. 23 Experimental trajectory by the operation handle

イドにて装置を伸張させワイヤー検出機構にてベッド上部に移動 (Fig. 2(h), Fig. 24(d)), リフトでベッドに降ろす (Fig. 2(j) (k), Fig. 24(e)) となっている。この実験をスリングシートに包まれた被験者だけではなく、砂袋やダミー人形を用いて複数回実験を行い、いずれも安定した動作を確認した。

従来の介護リフトと車いすを用いた場合の作業を説明する。介護リフトで普通のいすから車いすに移乗させる。その車いすを押して目的地へ移動、ベッド脇に固定設置された別の介護リフトを用いて車いすから引き上げ、リフトのアームを人力にてベッド上に移動させ、リフトでベッドに降ろす、という流れになる。介護施設の場合、介護リフトがベッド全数ないことも考えられ、このとおりいずれの移乗作業にもリフトが利用できるとは限らない。

本装置は介護リフトと移動台車 (車いす) が統合されていることから、普通のいすから引き上げ、装置に組み込まれたいすに着座させることによって車いすも兼ねることができ、また、いすから持ち上げる段階からリフト機構を使用することができるため、作業負荷の低減を果たすことができる。移動もパワーアシストによって軽い力で行うことができ、ベッドに移乗させることも容易である。

したがって、本装置は、車いすと寝室に備え付けられたリフトを組み合わせた一般的な移乗作業と比較すると

- 本装置が移動することにより、様々な場所でパワーアシストを使った移乗をすることができる
- パワーアシスト搬送台車として移動時に大きな力を使う必要がない
- ベッド脇にリフトを据え付ける必要がない

といった利点がある。なお、スリングシートを被介護者に装着するのに、訓練しても 1.5 分程度の時間がかかり、これは今後の課題である。

ロボットとしての今後の課題としては、つり下げ状況下におけるパワーアシスト制御手法に、制御ロジックの追加によって良好な結果を得たが、接地中の判断としているパラメータ α (Fig. 11 Step 8) の合理的決定手法の検討が必要である。また、今後、多人数や施設での検証に基づき、本装置の操作性についての検討を行い、改善を図る予定である。

8. お わ り に

本研究では、パワーアシストリフトと全方向移動台車という二つの技術を基に、介護現場において実用的に使用できるアシスト介護ロボット開発を目指して装置の考案、および基礎的な動作解析と制御実験を行った。その結果、

- パワーアシストリフトの問題点であるリミットサイクルの解決手法として、実情に即した機能を有する制御ロジックを追加することによる解決手法の提案を行い、良好な結果を得た

- 全方向移動技術とリフト技術を統合し、ベッドサイドでの車いすからのつり上げ、移動、ベッドへのつり下げ、接地、また、ベッドからのつり上げ、移動、車いすへつり下げ、接地、任意の場所への移動と一連の制御が良好に行えるリフトの機械構造およびソフトウェアを構築し、介護移乗、搬送動作が良好に行えることが確認できた

今後は本アシストロボットのフィールドテストを通じ、実用化に向けて研究を進めていきたい。

参 考 文 献

- [1] H. Kazerooni: "Extender: a case study for human-robot interaction via transfer of power and information signals," Proc. of 2nd IEEE International Workshop on Robot and Human Communication, pp.10-20, 1993.
- [2] D. Fotiosa, K. Panagiotis and A. Nikos: "Control of a Power Assisted Lifting Device," 21th International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region, pp.277-283, 2012.
- [3] J.T. Wen, D.O. Popa, G. Montemayor and P.L. Liu: "Human Assisted Impedance Control of Overhead Cranes," Proc. of the IEEE International Conference on Control Applications (CCA '01), pp.383-387, 2001.
- [4] 小島秀人, 三好孝典, 寺嶋一彦: "リミットサイクルを抑制したパワーアシストシステムの応用", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2006, "2A1-B06(1)"-"2A1-B06(4)", 2006.
- [5] 上野祐樹, 北川秀夫, 柿原清章, 寺嶋一彦: "全方向移動ロボットのための平衡車型差動駆動操舵機構の開発", 日本機械学会論文集 C 編, vol.78, no.789, pp.1872-1885, 2012.
- [6] 佐藤侑, 郭士傑, 稲田誠生, 向井利春: "介護支援ロボット RIBA-II の動作設計と評価実験", 日本機械学会論文集 C 編, vol.78, no.789, pp.1899-1912, 2012.
- [7] T. Mukai, S. Hirano, H. Nakashima, Y. Kato, Y. Sakaida, S. Guo and S. Hosoe: "Development of a nursing-care assistant robot RIBA that can lift a human in its arms," IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.5996-6001, 2010.
- [8] 佐藤裕, 何佳欧, 小林寛征, 村松慶紀, 橋本卓弥, 小林宏: "腰補助用マッスルスーツの開発と定量的評価", 日本機械学会論文集 C 編, vol.78, no.792, pp.2987-2999, 2012.
- [9] 佐藤帆紡, 川畑共良, 田中文英, 山海嘉之: "ロボットスーツ HAL による移乗介助動作の支援", 日本機械学会論文集 C 編, vol.76, no.762, pp.227-235, 2010.
- [10] 上野祐樹, 寺嶋一彦, 北川秀夫, 柿原清章: "全方向移動パワーアシストベッドの開発", 日本機械学会東海支部総会講演会講演論文集, vol.2011, no.60, "102-1"-"102-2", 2011.
- [11] 柿原清章, 寺嶋一彦, 三好孝典, 田崎良佑: 移動台車, 特許番号: 特開 2016-064082, 28 4 2016.
- [12] 藤原茂喜, 北野斉, 山下秀樹, 前田裕史, 福永秀雄: "全方向移動型パワーアシストカート", 日本ロボット学会誌, vol.20, no.1, pp.53-54, 2002.
- [13] 和田正義, 平間貴大: "球状伝達機構を用いたアクティブキャスタによる 2 輪全方向移動", 計測自動制御学会論文集, vol.51, no.6, pp.400-408, 2015.
- [14] T. Miyoshi and K. Terashima: "Control of Power-Assisted Crane System Using Direct Manual Manipulation," Proc. of the IEEE International Conference on Control Applications, pp.38-44, 2004.
- [15] 寺嶋一彦, 三好孝典, 牧野泰育: 昇降装置の制御システム, 特許番号: 特開 2007-314290, 6 12 2007.

船戸一弘 (Kazuhiro Funato)

1989 年愛知県立豊川工業高校電子機械科卒業。2002 年 9 月 (株) ケーイーアール入社。自動制御盤の設計、遠方監視システムなどの開発に携わる。2015 年より豊橋技術科学大学大学院博士後期課程機械工学専攻に社会人学生として在籍。
(日本ロボット学会学生会員)

田崎良佑 (Ryosuke Tasaki)

2011 年豊橋技術科学大学大学院博士後期課程電子・情報工学専攻修了。博士 (工学)。2012 年より豊橋技術科学大学機械工学系助教。現在に至る。知能機械、複雑造形プロセス制御、流体系・機械系の動的システムモデリングと制御に関する研究を行っている。IEEE、計測自動制御学会、日本機械学会会員。

三好孝典 (Takanori Miyoshi)

1989 年大阪大学工学部電気工学科卒業。ローランド (株) 入社。1996 年豊橋技術科学大学生産システム工学専攻に社会人入学。2002 年同社退職。同大学生産システム工学系に講師として赴任。ミュンヘン工科大学客員研究員等を経て、現在豊橋技術科学大学機械工学系准教授。制御工学、ロボット工学等の研究・教育に従事。博士 (工学)。
(日本ロボット学会正会員)

柿原清章 (Kiyoaki Kakihara)

1977 年豊田工業高等専門学校卒業。1977 年 4 月日本電装 (現: デンソー) 入社。2002 年 9 月 (株) ケーイーアール設立 (代表取締役社長)。介護、移動、サービスロボット等の研究開発に携る。〔研究分野〕機械設計、機構学、ロボット工学。

寺嶋一彦 (Kazuhiko Terashima)

1981 年京都大学大学院工学研究科博士後期課程修了。工学博士。1982 年豊橋技術科学大学生産システム工学系助手。講師、助教授を経て、1994 年教授。1991 年 9 月～1992 年 9 月ドイツ・ミュンヘン工科大学客員研究員。2018 年 4 月より豊橋技術科学大学 理事・副学長、同大学名誉教授。システム制御情報学会、日本機械学会、日本鑄造工学会、IEEE 会員。
(日本ロボット学会正会員)