自動連結ロボットによる手動型車いすのための移動支援システム

竹 森 史 暁^{*1} 本 池 優 菜^{*2}Implementation of Traveling Supportive System for Manual Wheelchair
with Autonomous Connecting RobotFumiaki Takemori^{*1} and Yuna Motoike^{*2}

This paper proposes a mobile robot system which realizes mobility assistance with a manual wheelchair when a handcar chair user needs moving assistance. The mobility assistance is triggered by recognizing wheelchair user's demand by using visual sensor. We suggest a task consisting of three phases for realizing automatic connection of a wheelchair by a robot. The first phase is a proposal and verification of a method to estimate the actual position and orientation of a wheelchair from the depth information of the Kinect v2 sensor. The second phase is the implementation of the path planning of the robot using the estimated position and orientation of the wheelchair as the target value coordinates and its running control mode. The third phase is a mode in which the robot connects to the wheelchair hand unit from behind the wheelchair, and is integrated with the wheelchair as it is in the steering mode and autonomous driving mode. The effectiveness of automatic wheelchair connection system that integrates the tasks of each phase is verified by actual traveling experiments.

Key Words: Estimation of Wheelchair Posture, Traveling Supportive Robot, Planning of Robot Motional Route, Automatic Connecting System with Wheelchair

1. は じ め に

2019年に施行された改正バリアフリー法[1]では、ホテルや旅館の客室総数が50室以上の場合は、客室総数の1%以上の車いす使用者用客室を設けることが義務付けられている。さらに同法では、施設等に対しても高齢者や障害者等を含めた誰もが利用しやすく汎用性のある製品を開発・普及するよう事業者に促している。また総務省では、車いす使用者用駐車施設の適切な利用の確保を推進しており[2]、公共施設や高速道路のSA・PA、大型ショッピングセンターの駐車場等に車いす使用者用施設の設置を義務付けている。このように社会インフラのバリアフリー化が進みつつあることから、電動車いすの普及や手漕ぎ型車いすに電動駆動ユニットを後付けし電動走行化する装置[3]も市販されている。しかしながら、車いす使用者の中には必ずしも電動型を使用しているわけではなく、コスト面や収納性・可搬性の観点から手動型（手漕ぎ型）のニーズも依然あるといえる。実社会でも病院や福祉施設はもちろんのこと、最近では官公庁や学校などの公共施設、駅・空港施設、銀行や大型ショッピングセンターの商業施設にも手動型車いすが複数台備え置きされている。

車いすを利用する被介護者の中には自分で車いすを十分に操

縦することができず介助者の補助を必要とする人も少なくない。手動車いすを搭乗者が操作するときの負荷解析の観点では、連続使用において上腕の筋疲労が蓄積すること[4][5]や、スロープ移動時は平地移動よりも身体的負荷が大きいこと[6]、駅利用時の移動負荷[7]、など車いす搭乗者の疲労度の定量的評価法が報告されている。また、車いすを介助する側の負荷の評価に関して、車いすの推進速度と介助者のエネルギー消費との関連を定量的に示唆している研究例[8]や、カーフェリーの乗下船時の車いす介助負荷を評価した実環境での研究例[9]が報告されている。さらに被介護者は他者に対して「気兼ね」を感じ介護要求を躊躇するという報告もある[10]。これらの先行研究より、車いす搭乗者・介助者双方とも移動時に身体的・心理的負荷を伴うことが考察され、近年の被介護者に対する介護者の比の減少に伴う人手不足の問題[11]ともリンクして手動車いすの移動支援対策が望まれる。

手動車いすの移動支援システムの先行研究として、アクティブキャスト型駆動装置[12]、オムニホイール型駆動装置[13]をアドオンする方式、車いす後方から段差移動を支援する介護ロボット[14]~[17]などが提案されている。文献[12]のアクティブキャスト型では、左右の方向転換（特に超信地旋回）の際、所望のキャスト角に位置決め制御する必要があるために所望の旋回が完了するまでに時間を要することや、駆動装置と車いすが常時接続されているため支援が不要のときのパッシブ性やオンデマンド性には言及していない。文献[13]のオムニホイール型は洗練された機構ではあるが、その操作方法は従来のジョイスティック方式ではないために特に高齢利用者にとって従来型との親和性に違和感を持つものと思われる。文献[15][16]は、段差移動

原稿受付 2020年3月20日

^{*1}鳥取大学大学院工学研究科

^{*2}三菱電機株式会社

^{*1}Graduate School of Engineering, Tottori University

^{*2}Mitsubishi Electric Cooperation

■ 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。

■ J-STAGE では本論文の電子付録として動画が閲覧できます。

Fig. 1 Example of operation of wheelchair traveling supportive robot; (1) Approach for connection by sensing wheelchair posture, (2) Connecting and Travelling with wheelchair by lifting handles

支援に特化しているため手動車いす後方に専用のアタッチメントを取り付ける必要があることや、文献[14]と同様にロボットと車いすの連結制御はオペレータによる遠隔操作で実行されることになり運用面で汎用的であるとはいえない。

そこで本論文では、手動車いす利用者が移動補助を必要とするときにその要求を判別し、自動で車いすを認識および連結することで移動支援を実現する移動ロボットシステムを提案する。運用場面としては、医療・介護施設のみならず先に挙げた宿泊施設のフロアや車いす利用者駐車場から目的施設への移動を想定している。2章で連結方式について述べるが車いすとロボットを脱着方式にする理由は、例えば車いすユーザが施設内で同伴者と伴走して移動したいときや、車いす利用者駐車場から施設内に移動する際、車いすユーザが移動支援を要求するとき本ロボットの走行機能による支援が役立つものと考ええる。さらに、車いすユーザへモノを搬送するようなアシスタント的な用途のほか、大型ショッピングセンターでショッピングカート自動回収の用途にも応用できるものと考えからである。

車いすの連結に関して文献[17]では、人の挙手合図で双腕ロボットが車いすを配送するシステムを提案しているが、あらかじめロボットが車いすを把持している状態であるため自動連結については言及していない。ロボットが車いすに自動連結するためにはその位置・姿勢を推定する必要がある。関連研究として、座面圧力センサとKinectの深度センサを用いて車いす搭乗者の体幹の姿勢推定を論じた研究[18]や、床反力計とマーカー解析による人搭乗時の車いす重心位置推定を論じた研究[19]があるが、単一の非接触センサで車いすの位置・姿勢を推定した研究例はない。

本論文では、ロボットによる車いす自動連結を実現するに当たり三つのフェーズからなるタスクを提案する。第1フェーズは、Kinect v2 センサの深度情報から実際の車いすの位置・姿勢を推定する手法の提案と検証。第2フェーズは、推定された車いすの位置姿勢を目標値座標とするロボットの経路計画とその走行制御モードの実装。そして第3フェーズは、車いすの背後から車いすハンド部に連結し、そのまま車いすと一体化となって操縦モード・自律走行を行うモードである。このような各フェーズのタスクを統合した車いす自動連結システムを提案し、その有効性を実機実験により検証する。

2. 車いす移動支援ロボットの概要

本論文で実装するロボットと車いすの自動連結の概要をFig. 1に示す。ロボットは、まずFig.1に示すようにKinect センサにより車いすの位置姿勢を推定した後、車いす後方に移動する。次にFig. 2に示すように、車いすハンドルをリフトアップする

Fig. 2 Connecting action with wheelchair by lift up its handles

Fig. 3 Wheelchair traveling supportive robot

ことで連結を完了し、その後は車いすと一体となって自律移動する。このような車いすの移動補助を実現するために、本論文ではFig. 3に示す車いす移動支援ロボットを提案する。

本ロボットには、自律走行用の対向二輪駆動部と車いす後方をリフトアップする直動アクチュエータ、さらに車いすの姿勢計測するための視覚センサ (Kinect v2) が備わっている。視覚センサは搭乗者の挙手動作判定も兼用する。アクチュエータの計測制御はRaspberry Piで処理し、KinectによるセンシングはWindows PCに実装した。

3. Kinectによる車いすの姿勢推定法

本論文では車いすの位置姿勢 (x_w, z_w, θ_w) をFig. 4のように定義する。Fig. 4に示すように θ_w は、Kinect から見たとき車いすの前後の向きを考慮して反時計方向に $0 [\text{deg}] \leq \theta_w < 360 [\text{deg}]$ を定義域とし、 θ_w の定義域を $90 [\text{deg}]$ ずつ四つの範囲に分けた区間を車いす角度範囲とよび、 $0 [\text{deg}]$ から $90 [\text{deg}]$ を範囲A、 $90 [\text{deg}]$ から $180 [\text{deg}]$ を範囲B、 $180 [\text{deg}]$ から $270 [\text{deg}]$ を範囲C、 $270 [\text{deg}]$ から $360 [\text{deg}]$ ($0 [\text{deg}]$) を範囲Dと定義する。

Fig. 4 Definition of wheelchair posture θ_w

Fig. 5 Image of Kinect at raising object person's hand

3.1 補助合図の認識と等高位置データの取得

本論文ではロボットに搭載している Kinect を用いて、車いす付近の等高位置データを取得しそれを解析することで姿勢推定を行う手法を提案する。等高位置データ（以下位置データ）とは、高さ y 座標の値が等しい点の x, z 座標からなる二次元平面座標の集まりである（Fig. 5）。位置データをプロットした図は車いすを xz 平面で見たときの輪郭を捉えることができる。これを利用して Fig. 4 で定義した車いす角度と位置を求める。

位置データは車いす搭乗者がロボット呼び寄せ合図として挙手動作を行ったタイミングで取得する。なお本論文では、現在検出した人物が車いすに搭乗しているかどうかの判定機能は実装されていないため、呼び寄せ合図を行った人物が搭乗者であると判定する。挙手動作の認識と等高深度データの取得の流れを以下に示す。

- (1) 検出した人物の推定関節位置を取得し、左右どちらかの手首の y 座標が頭部の y 座標より 0.1 [m] 以上大きくなったとき挙手動作と認識する。
- (2) Kinect の人骨格推定機能を用いて車いす搭乗者の挙手合図

Fig. 6 Measured result of wheelchair contour points D_w and human contour points D_s at $\theta_w = 210$ [deg]Table 1 Analysis result of $\|A_s - A_w\|$

Set angle [deg]	30	60	120	150	210	240	300	330
$\ A_s - A_w\ $ [m]	0.21	0.15	0.13	0.19	0.41	0.44	0.49	0.38

を認識した後、腹部位置 $S(x_s, y_s, z_s)$ [m] を取得する。

- (3) y_s と y 座標が等しい点の集合を位置データ D^s として取得する。

$$D^s = \{(x_1^s, z_1^s), \dots, (x_N^s, z_N^s)\}$$

- (4) 床からの高さが 0.4 ± 0.01 [m], 0.3 ± 0.01 [m], 0.2 ± 0.01 [m] の 3 層の点集合を位置データ D^{w_k} として取得する。

$$D^{w_k} = \{(x_1^{w_k}, z_1^{w_k}), \dots, (x_N^{w_k}, z_N^{w_k})\}, \quad (k = 1, 2, 3)$$

ただし、位置データ D^w の各点は腹部座標から 1 [m] 未満の範囲内に存在するデータを採用する。

上記実装の有用性を確認するため、計測例として $\theta_w = 210$ [deg] に設定したときの挙手判定の画像を Fig. 5 に、車いすの輪郭点を Fig. 6 にそれぞれ示す。これらの結果より、Kinect センサによる搭乗者の体幹輪郭および車いす輪郭の計測が可能であることが分かる。

3.2 車いすの角度範囲判定

本節では、前節で取得した等高深度データを俯瞰的に合成しその輪郭から、任意の位置に置かれた車いすが Fig. 4 に示す角度範囲 A～D のどの方向を向いているかを判定する手法を提案する。判別に関して D^w と D^s のそれぞれの重心 A_w と A_s の相対位置に注目する。これらの重心は以下で定義する。

$$A_w(\tilde{x}_w, \tilde{z}_w) = \left(\frac{1}{N_w} \sum_{i=1}^{N_w} x_i^w, \frac{1}{N_w} \sum_{i=1}^{N_w} z_i^w \right) \quad (1)$$

$$A_s(\tilde{x}_s, \tilde{z}_s) = \left(\frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} x_i^s, \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} z_i^s \right) \quad (2)$$

A_s と A_w の相対距離 $\|A_s - A_w\|$ を各姿勢において解析したところ Table 1 に示す結果を得た。この結果より、車椅子が A と B の範囲にあるとき、車椅子の輪郭重心が搭乗者側に近くなること、逆に車椅子が C と D の範囲にあるとき、車椅子の輪郭重心が搭乗者より遠くなる特徴を見いだすことができる。したがって本論文では、このような計測結果に基づき姿

Table 2 Judgment rule for wheelchair posture

	$x_s \geq x_w$	$x_s < x_w$
$\ A_w - A_s\ < 0.20 \vee z_s < z_w$	B	A
$\ A_w - A_s\ \geq 0.20 \wedge z_s > z_w$	C	D

Fig. 7 Relative relation between A_s and A_w and definition of vertex

勢判定の指標として $\|A_s - A_w\|$ の閾値を 0.2 [m] と判断した。さらに、二つの重心の位置関係から車いすの角度範囲は次に示す基準で判定する。

- (i) $\|A_w - A_s\| < 0.20$ [m] または $\tilde{z}_s > \tilde{z}_w$ ならば範囲を A または B と判定、そうでなければ範囲を C または D と判定。
 - (ii) (i) で範囲が A または B と判定された場合、 $\tilde{x}_s > \tilde{x}_w$ であれば A、そうでなければ B と判定。
 - (iii) (i) で範囲が C または D と判定された場合、 $\tilde{x}_s < \tilde{x}_w$ であれば C、そうでなければ D と判定。
- (i)～(iii) の条件をまとめた表を **Table 2** に、および各フェーズの判定例を **Fig. 7** に示す。

3.3 車いすの姿勢推定

車いすの姿勢を判別するために、車輪側面の直線を判定する手法を以下に示す。本論文では搭乗者を含む車いすの輪郭をおおよそ長方形とみなす。その長方形は、車いす左右の側面を長編、ハンドルおよび足置き側を短辺と定義する。長方形の長辺および短辺を推測しそれら角度を推定することで、車いすの位置・姿勢を推定する。まず、以下の手順で長方形の四つの頂点座標を定める (Fig. 7 参照)。

- (a) 輪郭データ D^w の各点で、その点を通る傾き 1 の直線の切片および傾きが -1 の直線の切片を求める。
- (b) 傾き -1 の直線の切片が最大となる点を頂点 $P_1 (x_1, y_1)$ 、最小となる点を頂点 $P_3 (x_3, y_3)$ とおく。
- (c) 傾き 1 の直線の切片が最大となる点を頂点 $P_2 (x_2, y_2)$ 、最小となる点を頂点 $P_4 (x_4, y_4)$ とおく。

次に、頂点 P_m と P_n を結んだ直線を直線 l_{mn} と定義する。Fig. 7 に示すように車いす側面の頂点のペアは (P_2, P_3) または (P_3, P_4) である。ここで、前節で提案した姿勢範囲の判定ルールに従うと、車いすの側面を捉えていると判定した直線 l_{mn} の傾き角度は、四つの範囲 (A～D) に対応して以下のように算出される。

(a) Set angle is 0 [deg] ~ 150 [deg]

(b) Set angle is 180 [deg] ~ 330 [deg]

Fig. 8 Estimated results of posture angle of wheelchair**Table 3** Estimate accuracy corresponding to Fig. 8 (a)

Set angle [deg]	0/360	30	60	90	120	150
Maximum absolute error [deg]	9	10	9	10	6	10
Mean absolute error [deg]	6.9	4.1	5.1	6.9	4.9	2.9

Table 4 Estimate accuracy corresponding to Fig. 8 (b)

Set angle [deg]	180	210	240	270	300	330
Maximum absolute error [deg]	11	9	10	9	10	6
Mean absolute error [deg]	6.1	6.9	4.1	5.1	6.9	4.9

$$\left. \begin{aligned} \theta_w^A &= \text{atan2}(y_4 - y_3, x_4 - x_3) \\ \theta_w^B &= \text{atan2}(y_3 - y_2, x_3 - x_2) + \pi \\ \theta_w^C &= \text{atan2}(y_4 - y_3, x_4 - x_3) + \pi \\ \theta_w^D &= \text{atan2}(y_3 - y_2, x_3 - x_2) + 2\pi \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

提案する姿勢推定式 (3) の有用性を検証するために、車いすを 0 [deg] から 360 [deg] まで 30 [deg] 刻みに設定し、各設定角度に対して 10 回計測を行った結果を **Fig. 8** に示す。またそれらの推定精度を **Table 3** および **Table 4** に示す。これらの推定結果について次のように考察する。

本論文では、車いす角度は車輪側面と Kinect の x 軸がなす角度と定義している。 xz 平面での車いすの輪郭は正確には長方形ではないため絶対角度誤差は生じてしまい、その最大絶対誤差は Table 4 より 11 [deg] となった。しかしながら詳細は 5 章で後述するが、車いすとの連結動作においてハンドル位置は角

Fig. 9 Measured result of wheelchair contour points D_w and human contour points D_s at $\theta_w = 210$ [deg]

度推定の誤差が 20 [deg] 以下であれば取得可能であるため、提案する角度推定法で生じる誤差は、連結システム全体においては許容できるものといえる。以上に提案する車いす姿勢判別に関する計測結果を **Fig. 9** に示す。本結果より、四つの領域における車いすの側面判定およびその角度推定が行えていることが分かる。

4. 車いす後方への移動計画とその実装

提案するロボットの移動機構は、対向二輪モデルであるため速度拘束を持つ非ホロノミック系[20]として扱われている。このような系に対して文献[21]では可変拘束制御を提案しているが、対向二輪モデルの経路制御には言及していない。対向二輪モデルの経路制御に関連する先行研究として、文献[22][23]では時間軸状態制御に基づいた経路制御則を実装している。これは、目標経路を座標変換したパラメータを時間相当の変数とみなした制御法であるが、最終的には二輪モデルの左右の速度目標値を算出した速度制御系である。また経路上のロボットの実最大速度の拘束条件は陽に考慮されていない。そこで本論文では、経路上のロボットの実最大速度を制限値以下に抑える終端時間を算出し、その終端時間内で経路曲線を形成する手法を提案・実装する。

4.1 三次補間曲線を用いた経路計画

本論文では、ロボットの初期位置から車いすの後方までの移動経路の計画には三次補間曲線[24]を用いる。補間経路を計画するにあたり初期姿勢 $S(x_0, z_0, \theta_0)$ と終点姿勢 $F(x_f, z_f, \theta_f)$ を定義する必要があるが、本論文では **Fig. 10** に示すように、移動計画における座標設定はロボット車軸の中心を原点とし本体正面を z 軸と定義する。また終点姿勢 $F(x_f, z_f, \theta_f)$ の定義として、計測された車いす輪郭の端点 $W(x_w, z_w)$ から内側に 0.3 [m] および後方に 0.7 [m] の位置とする。この 0.7 [m] の値は Kinect の計測可能な最短距離 0.5 [m] 以上の値で実験的に最適値を採用した。 θ_f は式 (3) の車いすの推定角度とする。

本論文では、 z 軸の変数を単調増加なパラメータとみなして初期点と終端点を繋ぐ経路曲線を次式で定義する。

Fig. 10 Route planning with cubic interpolation curve

$$x(z) = a_0 + a_1 z + a_2 z^2 + a_3 z^3 \quad (4)$$

$$\frac{dx}{dz} = \tan\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) \quad (5)$$

補間係数 $a_0 \sim a_3$ は端点の以下の境界条件より決定される。

$$\begin{cases} x_0 = a_0 + a_1 z_0 + a_2 z_0^2 + a_3 z_0^3 \\ x_f = a_0 + a_1 z_f + a_2 z_f^2 + a_3 z_f^3 \\ \tan\left(\frac{\pi}{2} - \theta_0\right) = a_1 + 2a_2 z_0 + 3a_3 z_0^2 \\ \tan\left(\frac{\pi}{2} - \theta_f\right) = a_1 + 2a_2 z_f + 3a_3 z_f^2 \end{cases} \quad (6)$$

ここで、式 (6) を解くに当たり初期姿勢を $S(0, 0, \pi/2)$ とおけば、補間係数の二つは $a_0 = a_1 = 0$ と定まる。残りの a_2, a_3 は終端条件から求めることができる。

4.2 対向二輪型への実装

提案するロボットの移動機構は対向二輪型であるため、制御アルゴリズムの実装は容易である。本節では目標経路曲線 (4) と式 (5) の拘束条件の下、 z 方向の変位を時間領域でパラメータ化した速度制御系を実装する。

まず対向二輪型の左右の車輪速度は次式で与えられる。ここで V_{ref} , ω_{ref} はそれぞれロボット本体の中心速度、旋回角速度で、 d は車輪間長さである。

$$\begin{bmatrix} V_R \\ V_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{d}{2} \\ 1 & -\frac{d}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ref} \\ \omega_{ref} \end{bmatrix} \quad (7)$$

適宜、変数変換を施せば経路上の中心速度は次式となる。

$$V_{ref} = \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2} = \frac{dz}{dt} \sqrt{1 + \left(\frac{dx}{dz}\right)^2} \quad (8)$$

次に、終端時間を t_f とし、曲線 (4) の定義域 z に対して、初期と終端の速度がともに 0 になる時間関数の候補として以下のように与える。

$$z(t) = \frac{z_f}{2}(1 - \cos \alpha t), \quad \alpha = \frac{\pi}{t_f} \quad (9)$$

$$\frac{dz}{dt} = \frac{\pi z_f}{2t_f} \sin \alpha t, \quad (0 \leq t \leq t_f) \quad (10)$$

旋回角速度については、式 (5) を t で微分することにより次式で与えられる。

$$\omega_{ref} = \dot{\theta} = -\frac{d}{dt} \left\{ \frac{dx}{dz} \right\} \frac{1}{1 + \left(\frac{dx}{dz} \right)^2} \quad (11)$$

以上のように、式 (8) と式 (11) より、終端姿勢 $F(x_f, z_f, \theta_f)$ を与えることでロボットの中心速度 V_{ref} と旋回角速度 ω_{ref} を算出することができる。

4.3 最大速度を考慮した終端時間の算出

経路走行を実現するときその終端時間 t_f は、ロボットの実速度に依存することから、以下では t_f の選定について述べる。まず、式 (4) と $a_0 = a_1 = 0$ より

$$\frac{dx}{dz} = 2a_2z + 3a_3z^2 = 3a_3 \left(z + \frac{a_2}{3a_3} \right)^2 - \frac{a_2^2}{3a_3} \quad (12)$$

と整理できる。次に、この式 (12) と式 (10) を式 (8) に代入すれば、直進速度に関して以下の関係が成り立つ。

$$V_{\max} \leq \left(\frac{dz}{dt} \right)_{\max} \sqrt{1 + \left(\frac{dx}{dz} \right)_{\max}^2} = \frac{\pi z_f}{2t_f} \sqrt{1 + \left(\frac{a_2^2}{3a_3} \right)^2} \quad (13)$$

したがって、式 (13) に対してロボットが出し得る実際の最大速度 $V_{\max}$ を与え、 t_f について解くことで終端時間は

$$t_f \geq \frac{\pi z_f}{2V_{\max}} \sqrt{1 + \left(\frac{a_2^2}{3a_3} \right)^2} \quad (14)$$

と算出できる。

数値シミュレーションを以下に示す。例として目標姿勢を $F(0.5, 2, 120^\circ)$ とおけば、境界条件式 (6) より、 $a_0 = a_1 = 0$ 、 $a_2 = 0.6637$ 、 $a_3 = -0.2693$ と求まる。次に、ロボットの最高速度を $V_{\max} = 0.35$ [m/s] と設定すれば、式 (14) より終端時間は $t_f = 10.22$ [s] と算出される。**Fig. 11** に補間経路を示す。**Fig. 12** には、目標速度と旋回角速度および左右の目標車輪速度を示す。これらの結果より所望の移動経路および速度計画が実現できることが示される。

最終的に **Fig. 13** に示すように、式 (7) の左右車輪速度を時間積分した車輪角度を目標値として、位置フィードバック制御系を実装することで目標経路追従が可能となる。

5. ハンドル位置取得法

4 章ではロボットが車いす後方への移動計画を述べたが、3 章で言及したように車いすの推定角度には誤差を含んでいる可能性がある。ロボットが車いすと連結するにはこの誤差を解消する必要がある。そこで、本章では連結動作を確実に実現するためのハンドル位置取得法について提案する。

5.1 深度値の最小点探索によるハンドル位置推定

以下に、Kinect の深度値解析によるハンドル位置推定手順を示す。

(1) **Fig. 14** に示す深度マップの Range A において、 z 座標

Fig. 11 Interpolation curve from initial posture $S(0, 0, 90^\circ)$ to final posture $F(0.5, 2, 120^\circ)$

Fig. 12 V_{ref} , ω_{ref} and right and left wheel velocities

Fig. 13 Control system with wheel angle reference

Fig. 14 Definition of analysis area for getting handle position

が最小となる点（ハンドル 1）の座標を取得する。ここで、Range A を、深度マップの上端中心から横に ± 206 [pixel] かつ上端から 300 [pixel] の矩形領域と定義する。

Fig. 15 Definition of right-and-left handle points and angle θ_h

- (2) Fig. 14 中の Range B で囲まれた範囲で z 座標が最小となる点（ハンドル 2）の座標を取得する。ただし、Range B の範囲は深度取得画面中のハンドル 1 を基準に縦 40 [pixel] の範囲、かつ (1) で求めた最小点周り横 80 [pixel] を除いた範囲である。
- (3) Fig. 15 に示すように、二つのハンドルのうち、 x 座標の値が小さいほうを左ハンドル $H_L(x_L^h, z_L^h)$ 、大きいほうを右ハンドル $H_R(x_R^h, z_R^h)$ とする。

上記に提案する推定法の精度検証の考察を以下に示す。検証用の車椅子は幸和製作所 BM01 を用いた。Kinect の深度計測の最小距離が 0.5 [m] であることから、計測対象物から 0.5 [m] 以上離れていれば深度計測可能である。しかしながら、車椅子のハンドル部分は突起形状であるためその座標計測にノイズを含む傾向がある。そこで、ハンドル推定に最適なパターンを見いだすため計測距離に応じた計測精度の傾向を事前に検証しておく必要がある。計測精度の評価変数として、以下のハンドル中央座標を用いた (Fig. 15 参照)。

$$H_m(x_m^h, z_m^h) = \left(\frac{x_R^h + x_L^h}{2}, \frac{z_R^h + z_L^h}{2} \right) \quad (15)$$

検証結果を Fig. 16 および Fig. 17 に示す。実験条件として、Fig. 16 では Kinect からハンドル中央までの距離を $z_1 = 550$ [mm], $z_2 = 610$ [mm], $z_3 = 800$ [mm] に設定し、各距離におけるハンドルの中央座標 (Kinect 原点からの相対座標) を計測した。Fig. 16 (a) に示すようにハンドルの z 座標は設定距離に対して計測ノイズは少ないが、Fig. 16 (b) ではセンサ距離が近いほど x 座標の推定にノイズが大きく発生することが分かる。また Fig. 17 に、センサ距離を $z = 800$ [mm] に置き、車椅子をセンサ中央から左右にそれぞれ 150 [mm] ずらした位置に置いたときのハンドル中央の推定結果を示す。この結果から車椅子がセンサ中央からずれた位置にあってもハンドル位置の推定は可能であることを確認した。

5.2 ハンドル角度推定とその取得可能限界

ロボットは、Fig. 10 に示す車椅子後方の点 $F(x_f, z_f, \theta_f)$ を目標点として移動制御されるのであるが、初期の車椅子姿勢推定に誤差が含まれることを考慮して、ロボットが向かうべき最終的な目標姿勢 θ_f' を調整する必要がある。この調整角度は、Fig. 15 に示すように、Kinect から見た左右のハンドルを結んだ線の傾きとして定義し、その値は以下で算出する。

$$\theta_f' = \theta_h, \quad \theta_h = \tan^{-1} \left(\frac{z_R^h - z_L^h}{x_R^h - x_L^h} \right) \quad (16)$$

(a) Depth of center of handle z_m^h

(b) Position of center of handle x_m^h

Fig. 16 Estimate accuracy

Fig. 17 Position of center of handle x_m^h at left and right shifting

(a) $|\theta_h| = 20$ [deg] (Success) (b) $|\theta_h| = 30$ [deg] (Failure)

Fig. 18 Recognition for handles in depth map

このハンドル角度 θ_h の絶対値が大きくなると、搭乗者の背中の方の位置のほうが z 座標の値が小さいほうのハンドルよりも z 座標の値が近距離になってしまうため、二つのハンドル位置を

正しく取得することができない。Fig. 18 は θ_h を 20 [deg] と 30 [deg] に設定し、ハンドル位置を取得したときの Kinect 深度画面を示したものである。20 [deg] のときはハンドル位置を取得できているが、30 [deg] では取得できていないことが分かる。

4 章で述べたように、ハンドル位置取得時のロボットの姿勢は車いす角度の推定結果に依存している。 xz 座標平面で考えたとき、二つのハンドルがなす直線と車いすの車輪側面は直行であるとすると、ハンドル角度の絶対値と車いす角度の推定誤差は等しくなると考えられる。よって、ハンドル角度の絶対値が 20 [deg] 以下であればハンドル位置が取得可能であることから、車いす角度の推定誤差も 20 [deg] 以下であれば許容できると言える。

したがって、本節および先の 5.1 節で示したハンドル推定パターンから、本論文ではハンドル位置推定に許容されるセンサ位置として、車椅子後方中央から見て x 方向に ± 0.15 [m] 以内、 z 方向に 0.8 [m]、傾き ± 20 [deg] 以内と設定した。

6. 連結実験

6.1 連結動作検証

本章ではこれまで提案してきた経路制御とハンドル位置推定の各動作を連続的に行った実験の結果を述べる。自動連結の実行ルーチンの基本は、各フェーズに実行終了のフラグを立て、前フェーズの実行が終了したタイミングで次フェーズに移行する構成とした。例えば経路追従制御フェーズにおいて、ロボットは終端時間 t_f に車いすの背面 F 点への到達するものとして、 t_f 経過のフラグを立てる。その後ハンドル位置取得フェーズに移る。ハンドル位置取得フェーズでは、ハンドル中央座標の値が安定する判定ルーチンを組み込んで判定終了のフラグを立てる。その後、ハンドルリフトアップの制御ルーチンを実行する。ハンドルリフトアップ制御は直動モータへのステップ入力的位置決め制御とする。

実験条件は Fig. 19 に示すように、車いすは Kinect から見えているほうの車輪の中心が点 (0.0, 2.5) [m] に位置するように設置した。なお、Kinect とロボットの車軸の間は 0.15 [m] の距離があることから、取得した位置データは車軸からの距離に合わせるため z 座標について 0.15 [m] を引いている。また、連

Fig. 19 Motion scheme from initial posture to final connecting posture

結軌道計画において Fig. 19 (b) に示すように車いす前面がセンサ側を向いている場合、連結軌道曲線が大きく外側に湾曲するのを回避するため、三次補間曲線の終端角度を車いすの姿勢に応じて $\pi/2$ の補正を施すこととし、その後 $\pi/2$ 回転して最終的に車いす後方 ($F \rightarrow H_m \rightarrow E$) に接近する軌道を計画する。車いすに搭乗するのは身長 1.55 [m] の筆者である。

Fig. 20 に、車いすを (a) 120 [deg] および (b) 210 [deg] の角度に設置したときのロボットの連結動作を示す。Fig. 21 には、Fig. 20 に対応したロボットの左右の車輪速度の目標値と実験応答および姿勢角の目標値と実験値をそれぞれ示す。ただし姿勢角の算出は車輪のエンコーダの差を用いて解析している。本実験でもロボットの最大速度を $V_{\max} = 0.35$ [m/s] と与えた。実験応答より最大速度を超えることなく目標速度に追従して走行していることが分かる。

Fig. 22 には、ロボットに対する目標軌道 (破線) と中心座標の軌跡 (実線) をそれぞれ示す。図中の F, H_m, E は Fig. 19 に示す各目標座標を意味する。実験結果より、ロボットは車いすの角度に応じた経路を移動し、アームリフトアップによる連結動作まで行えていることが確認できた。ハンドル中央位置 H_m の目標値と移動後の解析値の誤差は、実験 (a) では $(|\Delta x|, |\Delta z|) = (5, 3)$ [mm]、実験 (b) では $(|\Delta x|, |\Delta z|) = (15, 13)$ [mm] であったがリフトアップ時の許容誤差の範囲内であると確認した。また、二つの車いす設置角度にするロボットの最終角度はそれぞれ 123.2 [deg] と 211.0 [deg] となり、連結動作に問題ない誤差と判断できる。このような誤差が生じる原因としては、車いすの設置時に設定角度に誤差が生じたことや、車いすの車輪側面と二つのハンドルがなす角度が正確に直角ではないこと、およびロボット側の

Fig. 20 A sequence of action from signaling call forward to connecting with wheelchair handle

(a) In case of $\theta_w = 120$ [deg] (b) In case of $\theta_w = 210$ [deg]**Fig. 21** Experimental responses of right and left wheel velocity and robot posture **Fig. 22** Moving locus at robot central coordinate, where the symbol F, H_m and E corresponds to them illustrated in Fig. 19

オドメトリの積分誤差が挙げられる。しかしながら、実際には連結動作を実現できていることから、上述した誤差は許容範囲とみなす。

6.2 連結移動支援モード

医療・介護現場のみならず公共施設での運用や商業施設での同伴者との伴走などを想定して、ロボットと車いすが連結したまま車いす搭乗者の移動支援が可能かどうかの検証を行った。走行手法としてはジョイスティック操作を実装した。式 (7) の V_{ref} , ω_{ref} の代わりにジョイスティックの二軸の電圧を適当なスケールに変換して置き換えた。Fig. 23 に、呼び寄せ合図

Fig. 23 Traveling mode with detachable joystick installed arm end **Fig. 24** Traveling mode by combined with manual wheelchair

時のロボットの初期状態および搭乗者がジョイスティックを取り出す様子を示す。本実験では、呼び寄せ合図の認識は、Kinect の人骨格推定機能を利用している。ジョイスティックはロボットのアーム端に脱着式で取り付けられており、リフトアップ後は搭乗者がジョイスティックを取り出し手で操縦走行が可能となる。Fig. 24 に搭乗者のジョイスティック操作による連結走行実験の様子を示す。本実験より、手動型車いすロボットが連結状態のまま、搭乗者が電動車いすと同等な操縦感覚で移動できることを確認した。

本実験結果から、手動型車いすの使用者が移動支援を必要とするとき、その要求を人に代わってロボットが実現できる可能性を見いだした。

7. おわりに

本論文では、医療施設などにおいて車いす搭乗者の移動支援を目的とする移動ロボットのシステム構成について提案した。具体的には、人搭乗時の車いすの輪郭を Kinect の深度マップより抽出することによる車いすの位置・姿勢の推定法およびロボットの連結計画法を提案しその有用性を実験で示した。このシステムの実装により、補助を求める搭乗者の呼び寄せ合図をロボットが認識し、車いすに連結可能位置までの移動と連結までのすべての動作を自動で行える可能性を見いだした。また車いすに連結したまま搭乗者がロボットを操縦走行できることも検証した。このような成果は、車いす利用者が他人に頼ることなくロボットにオンデマンドな移動支援をリクエストできるといふ面で医療・介護現場における人的負担軽減に期待できる。

現在の問題点や改善点としては、車いす背面からロボットが接近するにつれて Kinect v2 の計測範囲外となるため、誤検出や誤動作を防止するための近距離用センサやタッチセンサを併用したシステムの実装が望まれる。また、ジョイスティックは試行的に有線型としたが実用面の観点から無線型の操縦パッドに代用することが望まれる。また、ロボットの移動経路上に障害物が存在する場合はロボットが接触してしまうことが挙げられる。この問題を解決するために、車いすの姿勢推定を行ったタイミングで同時に環境センシングも行うことによる障害物を回避する最適経路計画が挙げられる。

本システムの有効性を検証した車いすは JIS 規格に準拠した型であるため、メーカーが異なっても JIS 規格に準拠したサイズであれば、今回と同様な姿勢推定は可能と考える。同型機種

の検証については今後の検討課題としたい。

参 考 文 献

- [1] 国土交通省：高齢者，障害者等の移動等の円滑化の促進に関する法律（6月22日閲覧），<https://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/build/barrier-free.files/guideline12.pdf>
- [2] 総務省：車いす使用者用駐車施設の適切な利用の確保（6月25日閲覧），https://www.soumu.go.jp/main_sosiki/hyouka/pdf/090515_2.pdf
- [3] ヤマハ発動機（株）（6月25日閲覧）：<https://www.yamaha-motor.co.jp/wheelchair/lineup/jux-plus/>
- [4] 佐々木誠，巖見武裕，大日方五郎，土岐仁，宮脇和人，金城正治：“車いす駆動における上肢負荷の解析”，日本機械学会論文集 C，vol.71，no.702，pp.645-660，2005.
- [5] 本田洋介，堀潤一：“手動車いすの繰り返し操作におけるストロークバターンの評価”，電気学会論文誌 C，vol.132，no.11，pp.1798-1805，2012.
- [6] 毛利太一，橋詰努，佐藤伸一，藤澤正一郎：“スロープ登坂時における車いす利用者の身体的負荷の評価”，日本機械学会生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会 2010 講演論文集，pp.207-208，2010.
- [7] 小美濃幸司，藤浪浩平：“車椅子利用者の駅利用時の移動負担計測”，人間工学，vol.39，Supplement 号，pp.41-42，2003.
- [8] 久保見，丸山仁司：“車椅子推進介助時における介助者と被介助者間の体重差と運動強度との関係”，理学療法科学，vol.17，no.4，pp.249-252，2002.
- [9] 奥本泰久，高柴克俊：“カーフェリー乗下船時の車椅子介助者の身体負担”，日本船舶海洋工学論文集，vol.1，pp.63-69，2005.
- [10] 高橋（松嶋）甲枝，井上範江，児玉有子：“高齢者夫婦二人暮らしの介護継続の意思を支える要素と妨げる要素—介護する配偶者の内的心情を中心に”，日本看護科学会誌，vol.26，no.3，pp.58-66，2006.
- [11] 厚生労働省：平成 28 年度版厚生労働白書—人口高齢化を乗り越える社会モデルを考える—（3月8日閲覧），<https://www.mhlw.go.jp/wp/hakusyo/kousei/16/>
- [12] 宗方宥，和田正義：“アクティブキャストを用いた簡易電動車いす駆動システムに関する研究”，日本ロボット学会誌，vol.32，no.2，pp.172-182，2014.
- [13] SmartDrive（3月9日閲覧），<http://www.max-mobility.com/>
- [14] 山島信幸，池田英俊：“ネットワーク経路による遠隔操作と自律制御を融合させた介護ロボットによる車いすとの連結実験”，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012 講演概要集，2A1-G04，2012.
- [15] 池田英俊，勝俣嘉一，庄司道彦，高橋隆行，中野栄二：“車輪型ロボットと車いすによる協調段差乗り上げ手法”，日本ロボット学会誌，vol.26，no.2，pp.200-209，2008.
- [16] 池田英俊，神田暉，山中法文，佐藤圭祐，中野栄二：“手動車いすと受動制御マニピュレータを有する介護ロボットによる協調段差移動”，日本ロボット学会誌，vol.33，no.1，pp.45-54，2015.
- [17] 村垣光基，竹森史暁：“双腕型移動マニピュレータを用いた車椅子補助のための動的経路計画”，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015 講演概要集，1P1-K03，2015.
- [18] T. Kikuchi and I. Abe: “Seating System with Adjustable Sheet and Body Surface Measurement,” Journal of Robotics and Mechatronics, vol.28, no.1, pp.79-85, 2016.
- [19] 朝原早苗，山本澄子：“手動車いす駆動時の重心位置計測：車軸位置別における平地・上り勾配条件下での試み”，福祉工学シンポジウム講演論文集，pp.17-20，2006.
- [20] 石川将人：“非ホロノミックシステムの制御—拘束条件の非線形性を活かす—”，日本ロボット学会誌，vol.27，no.4，pp.384-387，2009.
- [21] 池田貴幸，南澤権，美多努：“浮遊機械のノンホロノミック可変拘束制御の提案と収束性の検討”，日本ロボット学会誌，vol.18，no.6，pp.847-855，2000.
- [22] 江上正，望月光一郎，中崎哲：“任意曲線経路に対する移動車両の経路制御”，計測自動制御学会論文集，vol.41，no.1，pp.85-87，2005.
- [23] 飯島裕樹，江上正：“交差点認識と経路制御を用いた電動車椅子の走行制御”，システム制御情報学会論文集，vol.27，no.5，pp.207-215，2015.
- [24] 中野，小森谷，米田，高橋：高知能移動ロボティクス，pp.181-184，講談社サイエンティフィック，2004.

竹森史暁（Fumiaki Takemori）

1992 年鳥取大学大学院工学研究科生産機械工学専攻修了，1994 年鳥取大学工学部助手。その後講師，助教授を経て，現在鳥取大学大学院工学研究科情報エレクトロニクス専攻准教授，博士（工学）。モーションコントロール，車椅子の高知能化等の研究に従事，日本機械学会，計測自動制御学会の会員。（日本ロボット学会正会員）

本池優菜（Yuna Motoike）

2017 年鳥取大学工学部知能情報工学科卒業，2019 年鳥取大学大学院持続性社会創生科学研究科博士前期課程工学専攻情報エレクトロニクスコース修了。同年三菱電機（株）に入社。