

車椅子使用者を周囲の人と遠隔介助者に繋ぐ遠隔車椅子システム

高木 瑠名* 宮藤 詩緒* Jefferson Pardomuan* 小池 英樹*

概要. 本システムは、全天周映像を用いて、遠隔介助者と車椅子使用者、車椅子周囲の第三者を繋ぐ、遠隔操作・コミュニケーションシステムである。近年車椅子のニーズが高まっている中、多くの車椅子に関する研究は、完全自動運転や遠隔操作等、車椅子の操作に焦点を当てている。だが、車椅子使用者にとっては、操作だけでなく、周りにいる介助者や第三者との会話も生きるために重要な要素である。そこで我々は、全天周カメラを用いて車椅子使用者と遠隔介助者を繋ぎ、遠隔介助者が車椅子使用者とその周囲の状況を観察しながら車椅子を操作し、三者がコミュニケーションを行うシステムを提案する。本システムでは、遠隔介助者側にお椀型ディスプレイ、車椅子側に球体ディスプレイを使用することで、操作だけでなくコミュニケーションにも焦点を当てた。提案システムにより全天周理解が向上することを実証するため、技術的評価・ユーザ実験を行い、最後に考察を行った。



図 1. 遠隔車椅子システム: (左) 遠隔介助者を見る車椅子使用者, (中央) コンセプト, (右) 車椅子使用者とその周囲を観察する遠隔介助者.

1 はじめに

最近の車椅子は、重度障害者だけでなく、移動性向上を目的として使用されることも多く、高齢者においてこのニーズは顕著である。しかし、車椅子使用者の増加に伴い介助者が不足する現状では、介助者が常に隣でマンツーマンサービスを提供することは困難である。この問題を解決するため、介助者の負担を軽減する様々な研究が行われている [2, 10, 14, 22, 26, 29]。このような自動運転は技術が不完全で危険なため、現代の技術では半自動運転等を伴う、遠隔操作が有効である [7, 8, 9]。しかし、これらの研究では平面ディスプレイやヘッドマウントディスプレイ (HMD) を使用しており、全天周映像を観察する場合、一度に見える範囲が限定されてしまい、危険な操作に繋がってしまう。

車椅子使用者にとって、周囲の第三者との会話は生活や健康に不可欠な要素である。しかし、第三者に介助を頼むのは心理的負担が大きい。また、自立した車椅子使用者にとっても見知らぬ第三者との会話は性格や疲労度等に左右され、難しい問題である。通常の車椅子上のコミュニケーションでは、介助者が使用者と第三者の間に繋ぐファシリテータとして、

三者間のコミュニケーションの円滑化を促進する。しかし、既存の遠隔操作の研究は、双方向の遠隔会話ではなく遠隔者による一方的な操作のみ議論されている [7, 8, 9]。また、介助者の隣で会話を行うシステムでは、介助者が常に付き添っていなければならない [11, 12, 13, 24]。これらの問題を解決するため、テレプレゼンスを利用した研究 [6, 23, 25] も存在するが、介助者の顔が見えない、介助者を第三者に提示できないという問題がある。

本論文では、車椅子使用者を周囲の人と遠隔介助者に繋ぐ遠隔車椅子システムを提案する (図 1)。介助者が安全に車椅子周辺を観察するため、Display-Bowl [17, 19] と呼ばれるお椀型ディスプレイを使用する。遠隔介助者は、お椀型ディスプレイの特徴を活用することで、車椅子の全周囲映像だけでなく、車椅子使用者の顔・視線も同時に観察し、使用者と周囲とのコミュニケーションを図る。さらに、車椅子側では、介助者の存在を車椅子上の球体ディスプレイに表示することで、車椅子使用者や第三者が遠隔介助者がそばにいることを実感でき、車椅子使用者の孤独感や社会的孤立、負担を軽減させ、周囲とのコミュニケーションに繋げる。

2 関連研究

自動運転 自動運転は介助者の負担や立会いを必要とせず、車椅子使用者が行きたいところへ連れて行く。近年、空港や病院等で車椅子の自動運転が実用化されているが、一時的に発生する興味を反映できない。これに対し、使用者の視線や頭部等の情報を利用して目的地まで誘導するシステム [2, 10, 14, 22, 26, 29] は、障害を持つ方にとって有用なシステムだが、倫理的・技術的課題が多く実用化には程遠い。また、操作にのみ焦点があり介助者がいないため、必ず必要となる周囲の第三者へのサポート要求が困難である。

* 東京工業大学 情報理工学

表 1. 車椅子での外出に必要な要素と発言内容. (C1 と C2, W2 と C5 と C6 はそれぞれグループで行った.)

要素	W1	W2	W3	C1	C2 & C3	C4	C5 & C6
周囲の状況把握	①	③	⑥	⑨	⑫	⑮	⑱
周囲の人とのコミュニケーション	②	④	⑦	⑩	⑬	⑯	⑲
車椅子使用者の意思の尊重	—	⑤	⑧	⑪	⑭	⑰	—

遠隔操作 自動運転の欠点解消のため、人間が車椅子を遠隔操作するシステムも開発されている [7, 8, 9]. これらのシステムは、介助者がそばにいない必要がないが、平面ディスプレイや HMD を用いて車椅子周辺の環境と車椅子使用者を観測するため、車椅子側の状況を全て感知することが難しく、危険を伴う. この問題を解決するため、衝突回避による半自動運転システムが提案されているが、動的な環境下での衝突回避は非常に複雑であり [27], 特定シナリオでの実用化に留まっている. また、これら遠隔操作システムでは、遠隔操作を行う介助者の情報が提供されず、車椅子使用者の恐怖心を煽り [30], 周辺の第三者とのコミュニケーションに支障をきたす.

車椅子でのコミュニケーション 主に車椅子を利用する高齢者や障害を持つ方にとって、周囲とのコミュニケーションは生きるために必要な手段であり、孤独感や社会的孤立感、健康面においても重要な要素である. 車椅子使用者の手 [3] や腕 [1] を拡張するシステムは、会話に必要な指や腕を活用することで、周囲とのコミュニケーションを支援する. 介助者の車椅子を押すという役割をなくすシステム [11, 12, 13, 24] では、介助者が車椅子使用者の隣を歩きながら、両者が等しく会話を行うが、介助者が常に車椅子の近くにいる必要がある. ロボットを用いて車椅子の周囲や車椅子使用者と対話するシステム [6] では、ロボットが簡単な動作をするものの、人の顔が見えず使用者に不安感や孤独感を与える可能性がある. タブレット端末に遠隔介助者の顔を表示するシステム [25] は、使用者が介助者の存在を確認し安心感を得ることができるが、平面ディスプレイであるため、第三者が介助者の存在を認識できず、介助者が第三者とのコミュニケーションをサポートできない.

3 車椅子に関わる人の要求

車椅子使用者と介助者を対象に半構造化インタビューを行い、車椅子での外出で直面する課題や介助者が気をつける点について、実体験から潜在的な要求事項を引き出すことを試みた. 車椅子使用者 3 名 (W1-W3) と介助経験者 6 名 (C1-C6) の計 9 名に協力してもらった. インタビューは、参加者情報を調査し、論文掲載の許可を得ることから始まり、参加者にシステムの簡単な説明を行った. その後、車椅子の遠隔操作やコミュニケーションに関する質問を行い、具体的な体験に基づく意見を求めた. 各イン

タビューは 1 時間から 1 時間半程度で終了した.

インタビューから、車椅子外出に必要な要素「周囲の状況把握」「周囲の人とのコミュニケーション」「車椅子使用者の意思の尊重」を明らかにした (表 1).

周囲の状況把握 車椅子で外出する際に最も重要なことは、安全のために周囲の物理的環境を認識することである. 「(W3⑥) 誰かと会話しながら歩いている際にも、常に周囲の環境に意識を向けなければならない. このような別のことへの意識により、疲労具合が大きくなった気がする」「(C1⑨) 操作してなくても、周囲を確認して危険を察知してあげたい」

周囲の環境は危険情報だけでなく、視野を広げるためにも必要となる. 車椅子に乗ると小学校低学年程の身長となり、周囲や後方が見えにくく、自分より視野の広い介助者からの提案を求める. 「(W1①) 介助者に知人を見つけてもらったりして、あの人に話しかけてみたらどう? という提案をしてほしい」

これら周囲の環境認識には、ある程度の知識、経験、感覚、体力が必要だ. そのため、普段介助者のサポートを受けている車椅子使用者や使用経験の少ない使用者、W3 のような自立した車椅子使用者にとっても、介助者の支援が必要である. 車椅子使用者が行いたい作業と、周囲の環境の認識を切り離すことで、本来の作業に集中することができる [30].

周囲の人とのコミュニケーション 全ての参加者が、車椅子での外出には、他者とのコミュニケーションが不可欠であると述べた. 代表的な意見として「(C1⑩) コミュニケーションは車椅子使用者にとって、生きるための手段であり、普通に生活する人と比較すると、コミュニケーションの負担は大きい」

コミュニケーションにも介助者の存在が必要だ. 一人では外出できない車椅子使用者は、介助者の存在で安心感を得、見知らぬ人との会話が困難な使用者は、介助者の第一声のサポートが精神的な支えになる (C1). 介助者が遠隔地にいても、その存在が周囲との会話のファシリテータとして機能することで、社会的孤立を回避できると考えられている [5].

この周囲とのコミュニケーションを車椅子使用者だけに負わせることは余計な負担となる. 第三者とコミュニケーションをとる際、本来の目的を達成するためと、車椅子使用のためのコミュニケーションの 2 つが発生する. 例えば、買い物の際、欲しい物の情報 (サイズ、色等) は目的のためのコミュニケーションだが、動作の制約による情報 (財布の場所、で



図 2. 二つの全天周ディスプレイ: (左) 車椅子側の球体ディスプレイ, (右) 遠隔側のお椀型ディスプレイ.

きないことの伝達等)は車椅子使用により発生するコミュニケーションである. 前者を車椅子使用者, 後者を介助者に割り振ることで, 負担軽減に繋がる.

車椅子使用者の意思の尊重 また, 車椅子で外出する際, 介助者や第三者の行動を車椅子使用者の意思に合わせて修正すべきである. 車椅子使用者は過度な心配や助けを被ることが多く, 喋りかけられたくない場面も存在する (W3⑧, C4⑬). W3 は普通に行っているだけで, 特別な目で見られることが多く, 見えなくなりたいと思うことが多いと言う.

操作に関しても, 介助者の操作は介助者の意思だけによってはいけない. 車椅子使用者の興味が湧いたときには, その意思を反映させる操作が必要である. C1 の学生 (車椅子使用者) からは, 行きたい場所や意思があるときに, 自分の考えと操作の齟齬がストレスになるという意見が複数出された.

4 システム設計

本システムの主な目的は, 車椅子使用者と遠隔介助者が, 離れていても隣にいるように操作やコミュニケーションを行い, 車椅子周囲の第三者とのコミュニケーションに繋げることである (図 1, 中央). しかし, 関連研究では前章で述べた 3 つの要求等, 遠隔での操作とコミュニケーションの両立を実現していない. そこで, 全天周映像を用いてこれら両面を実現し, 車椅子使用者と遠隔介助者のコミュニケーションに第三者を含めるシステム設計を提案する.

全天周操作とコミュニケーション 遠隔介助者側: 車椅子を操作しコミュニケーションをとるため, 遠隔介助者が車椅子周囲を観察し, 車椅子使用者の安全を確保するとともに, 話し相手となる第三者を発見する必要がある. 遠隔介助者が車椅子使用者の代わりに周囲を認識することで, 負担を軽減し, 見えない視界を拡大する. 全天周観察には, 平面ディスプレイや HMD よりも安全な周辺観察を行うことができると実証された [17], お椀型ディスプレイ (図 2, 右) を使用する. お椀型ディスプレイは, 俯瞰視点 (TDV), 一人称視点 (FPV), 疑似三人称視点 (TPV) という特徴を持ち, 前後方向の感覚を失うことなく全天周を観察できる. 特に TDV は, 地図の観察によく使

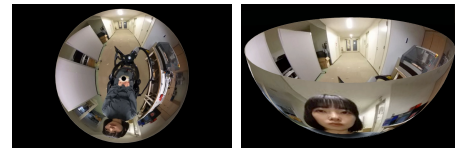


図 3. お椀型ディスプレイの見え方: (左) 俯瞰視点 (TDV), (右) 疑似三人称視点 (TPV).

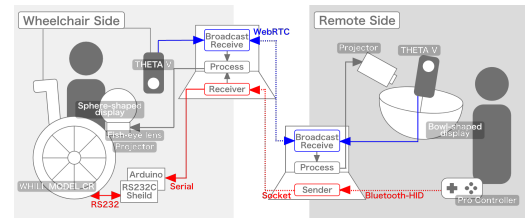


図 4. システム構成図

われる正距方位図法で, 直感的な車椅子周囲の観察に使いやすく, 遠隔操作に適している (図 3, 左). TPV は, お椀の前面と背面を同時に観察することで, 遠隔介助者が車椅子使用者と周囲を観察でき, コミュニケーションに最適な視野となる (図 3, 右).

車椅子側: 遠隔介助者の顔や一部の映像等を車椅子使用者や周囲に提示するため, 遠隔側の全天周映像も撮影する必要がある. 全天周により, 複数介助者が会話に参加できる等, 柔軟性を持てる.

第三者の介入 周囲とのコミュニケーションを容易にするため, 車椅子に球体ディスプレイ (図 2, 左) を導入する. 球体ディスプレイ [4, 15, 28] はその形状特徴から, どの位置からでも歪みのない映像を見られる. そのため, 車椅子使用者だけでなく, 周囲に情報を伝えるディスプレイとして適している. また, 球体に顔を表示することでより自然な遠隔コミュニケーションが可能になるという従来の考察 [18, 20, 21] から, 球体ディスプレイは遠隔介助者の顔を表示し存在感を示すのにも適している.

5 プロトタイプの実装

遠隔介助者側 天井等不要な情報を排除するため, 車椅子全天周映像の正距円筒図法のうち地面から 5/8 部分を取得し, プロジェクタ (BenQ HT3550) からお椀型ディスプレイ (直径 30cm) に投影することで (図 5, b), 遠隔介助者に対し, 車椅子使用者や第三者, 周囲の環境の観察を支援する (図 4, 右).

また, お椀型ディスプレイ中央の全天周カメラ (RICOH THETA V) で撮影した遠隔側環境 (図 5, b) は, USB で遠隔 PC に接続され, WebRTC 通信により車椅子 PC に配信される (図 4, 青).

車椅子側 車椅子 (WHILL MODEL CR) の操作では, コントローラ (Nintendo Switch Pro Con-



図 5. ハードウェア設計: (a) 車椅子側, (b) 遠隔側.

troller) のスティックからの操作信号を Bluetooth-HID プロファイルで遠隔 PC に認識させ、UDP 通信で車椅子 PC に送信する。そして、RS232C 通信を用いて車椅子を操作する (図 4, 赤)。

車椅子上の全天周カメラ (RICOH THETA V) で周辺と車椅子使用者を撮影し、WebRTC 通信で遠隔側 PC に映像を配信する (図 4, 左)。運転のために車椅子周辺を観察する場合、車椅子使用者が視界の妨げにならないため、カメラの位置は頭上が最適となる。しかし、操作だけでなく車椅子周囲の会話も重視するため、車椅子の背面は若干見にくくなるが、方向感覚を失わず顔を観察できるよう、カメラは顔の前方上部に設置する (図 5, a)。

また、プロジェクタ (ASUS S1) と魚眼レンズ (OPT-0.2X-37) から、遠隔側の映像を加工し、球体ディスプレイ (直径 12 cm) に投影する (図 2, 左)。

5.1 基本機能

視線共有 視線共有は他者の意図を理解する上で重要な役割を担う。安藤ら [1] は、アイトラッカーを使用して車椅子使用者の視線情報を遠隔操作者に共有した。本機能は、全天周映像から車椅子使用者の視線を推定し、コミュニケーション円滑化を目指す。

車椅子上の全天周カメラで暗黙的興味領域を検出し、遠隔ディスプレイに送信する (図 6)。遠隔介助者は、TPV を通して注視点領域 (緑丸: 注視点から一定面積) と顔を同時に観察し、無意識の興味による操作や新たな遠隔コミュニケーションに繋げる。視線位置検出方法は以下の通りである。車椅子上カメラで撮影した全天周映像を Unity の仮想球にマッピングする。球の中心に仮想カメラを配置し、車椅子使用者の顔を MediaPipe¹ により撮影する。得られた顔のランドマークから、比較的動きの少ない鼻先と両鼻孔の位置を抽出し、3次元空間に変換し、これらの値の差から方向を求める。そして、顔位置と視線方向から球面との交点 (注視点) を求め、お椀型ディスプレイに緑丸で表示させる。

対面式コミュニケーション 遠隔介助者が第三者に直接話しかけたいときは、お椀型ディスプレイを回転させ、目の前に第三者を映し出す (図 7, b,d)。そ

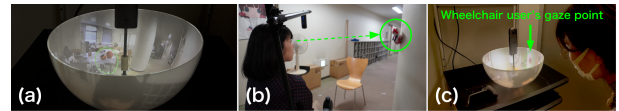


図 6. 視線共有: (a) 手前に顔、奥に視線方向を示すお椀型ディスプレイ, (b) 物体を見る車椅子使用者, (c) 車椅子使用者の視線、顔、周囲を見る遠隔者。

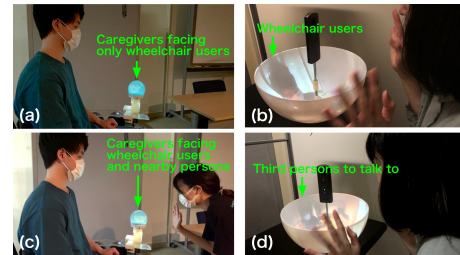


図 7. 対面式コミュニケーション: (a)(b) 遠隔者が車椅子使用者のみを見て会話をする, (c)(d) 遠隔者が車椅子使用者と第三者を見て会話をする。

れに伴い、遠隔介助者の顔が第三者の方を向き、対面した会話が可能になる (図 7, c,d)。

お椀型ディスプレイの回転角度は、底面に取り付けた導電プラスチック角度センサー (MIDORI PRECISIONS, CP-2FB) を使って計測される。取得回転角に応じて投影映像を回転させ、全天周映像がお椀型ディスプレイに張り付いた表示、球体ディスプレイ上で介助者が方向を変えた表示を可能とする。

対面コミュニケーションやアイコンタクトは、会話の中で相手を理解し心地よく感じるため必要不可欠であり、遠隔介助者と第三者に対してこの機能を実装することで、両者のコミュニケーションを円滑にできる。特に、車椅子使用者がコミュニケーションを取りたくない場合や、関わる必要がない場合に有効である。また、遠隔介助者が仲介役となることで、介助者、第三者、車椅子使用者の3者の対等コミュニケーションに有効となる (図 7, c,d)。

6 システム評価

6.1 技術評価

全天周画像からの視線推定精度を測定するため技術評価を行った。頭部に設置したセンサーで頭部角度を計測し、車椅子上のカメラで車椅子使用者含む全天周映像を撮影した。人間の頭部の可動範囲や負担を考慮し、ヨー $-60^\circ \sim 60^\circ$ 、ピッチ $-30^\circ \sim 30^\circ$ で測定し、推定角度と実際の角度の差を分析した。

結果と考察 誤差を図 8 に示す。カラースケールは誤差の大きさを可視化したもので、誤差角 0 の青色から、誤差角が大きくなるにつれ黄色に変化する。

ヨー、ピッチ共に端に向く程誤差が大きくなるが、

¹ <https://google.github.io/mediapipe/>

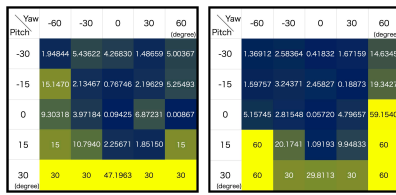


図 8. 推定角と実角度の誤差: (左) ピッチ, (右) ヨー.

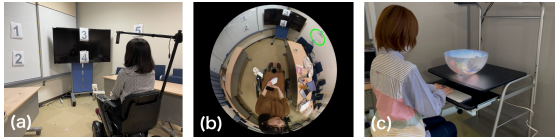


図 9. 実験設計: (a) 使用する全天周映像撮影環境, (b) 平面ディスプレイ, (c) お椀型ディスプレイ.

これはカメラから顔が検出できないためである. 特に下方向は誤差が大きく, この技術的誤差を何かで補う必要がある. この問題は, お椀型ディスプレイをTPVで観察することで解決可能であると考ええる. 以下のユーザー実験でこの考察を証明する.

6.2 ユーザー実験

方向表示におけるお椀型ディスプレイの有用性を実証するため, 平面正距方位図法ディスプレイとの比較ユーザー実験を行った. 地元の大学から21歳から30歳 ($M = 24.6$, $SD = 2.59$) の10名 (女性3名, 男性7名) の, お椀型ディスプレイの経験のない参加者 (P1-P10) を募集した.

実験設計とタスク 参加者は, 車椅子使用者の視線を遠隔介助者として判断することを求められた. 車椅子の前方に1~6の数字を配置し (図 9, a), 車椅子上的のカメラで画像を撮影した. 各画像に大まかな視線情報 (左右のみ正しい等) を緑丸で描画した.

これらの画像は, 被験者が観察した2種類のディスプレイに表示された. **平面正距方位図法ディスプレイ:** 全天周映像は正距方位図法により平面にマッピングされ, 中央には車椅子足元, 上部には車椅子前方, 下部には車椅子後方と車椅子使用者の顔が表示される (図 9, b). **お椀型ディスプレイ:** 図 9 (c) は, 被験者がお椀型ディスプレイを見ながらタスクを行っている様子で, 背面には車椅子正面, 前面には車椅子背面と使用者の顔が映し出される.

参加者は全天周画像を観察し, 誤差を含む視線情報 (緑丸) と車椅子使用者の顔や表情を考慮し, 正しい注視点を推定するタスクを行った.

1. タスクは, 実験者の合図で開始される.
2. 全天周画像と補助点がランダムに表示される.
3. 車椅子使用者の向いている方向を1~6の中から選択したら, キーボード入力を行う.

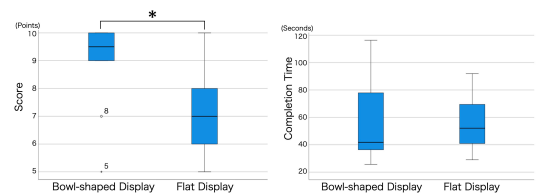


図 10. 各測定の定量的評価: (左) 視線方向の推測のスコア. ‘*’ は p 値が0.05未満であることを示す ($p < 0.05$). (右) タスク完了時間.

4. 以上の作業を10枚の画像で繰り返す.

1つ目のディスプレイが終了した後, 2つ目が行われる. 順番は参加者間でカウンターバランスをとった.

測定 車椅子使用者の視線推定に成功した回数を「スコア」として計測した. 正解を1点, 誤答を0点とし, 10点満点で計算した. また, 最初の画像表示から最後の画像の視線方向に反応するまでの「タスク完了時間」を測定した. さらに, 定性的なフィードバックと主観的な尺度を測定するため, 短い半構造化インタビューを実施し, タスク内での各ディスプレイの長所と短所を答えてもらった.

仮説 お椀型ディスプレイの特徴が全天周映像の方向性理解に役立つと考え, 以下の仮説が導かれた.

H1: お椀型ディスプレイの使用は, 平面ディスプレイ使用時よりも誤差を低減させられる.

H2: お椀型ディスプレイの使用は, 平面ディスプレイ使用時よりも速度を向上させられる.

定量結果 客観的指標として, スコアと実行時間を記録し, 仮説の検討に利用した.

H1: 図 10 (左) に示すように, お椀型ディスプレイ条件 ($M = 8.9$, $SD = 1.58$) の方が平面ディスプレイ条件 ($M = 7.2$, $SD = 1.47$) より高いスコアを獲得した. Shapiro-Wilk 検定の結果, お椀型ディスプレイ条件では正規性が仮定されていないことが分かった ($p = 0.002 < 0.05$). そこで, Wilcoxon Signed-rank 検定を用いて効果を確認し, 条件間で統計的に有意な差があることが分かり [$Z = -2.083$, $p = 0.042 < 0.05$], 仮説 H1 が確認された.

H2: 条件間でタスク完了時間に差があるかどうかを調べるため, paired t-test を実施し, お椀型ディスプレイ ($M = 55.25$, $SD = 28.3$) と平面ディスプレイの条件 ($M = 55.31$, $SD = 18.6$) では, 有意差がないことが分かり [$t(20) = -0.011$, $p = 0.99 > 0.05$] (図 10, 右), 仮説 H2 は棄却された.

定性結果 10人中9人が, お椀型ディスプレイの方が平面ディスプレイよりもどこを見ているか推測しやすいと述べていた. また, 表示される映像は同じだが, 「車椅子使用者の視線の高さと顔の傾きを同じ

高さで確認できた」(P2)という参加者もあり、視線の共有が起きていることが分かった。

平面ディスプレイでは大まかな方向は分かりやすいが(P3,P6,P7)、鉛直判断は難しく(P1,P2,P3,P6,P7,P9)、正しい推測が難しい(10名中9名)。

考察 技術評価で分かったように、システムのシンプル化のため1台の全天周カメラを使用しており、視線や顔の向きを推定できない場合も存在する。このような際に、お椀型ディスプレイを使用すると、視線推定スコアが向上することから、より正確な視線推定が可能となる。特にインタビューにより、お椀型ディスプレイは平面ディスプレイよりも空間の上下方向が把握しやすく(10名中4名)、視線を直感的に把握しやすい(10名中8名)ことが分かった。

ユーザー実験の結果、平面ディスプレイとお椀型ディスプレイには、視線推定に時間差は見られなかった。しかし、インタビューから我々の主張を裏付ける結果が得られた。平面正距方位図法ディスプレイは、視線の移動が少なく画像全体を一度に把握できるが(P6)、方向性が定まらない(P3,P6,P7,P9)。一方、お椀型ディスプレイは前面と背面を同時に見る必要があり、初めて使うには難しいが(P3,P5,P6,P8)、ユーザーは上下などの正しい方向感覚や車椅子使用者を直感的に認識することができる(P1,P6,P7,P9)。

7 考察

本研究では、新しい遠隔全天周操作・コミュニケーション車椅子システムを提案し、既存研究で実現されなかった、遠隔での会話支援も実現し、車椅子外出手段のオプションを増やす貢献をした。本章では、インタビューで明らかになった3つの要求に関して、本研究の特徴や利点、制約等について考察する。

周囲の状況把握 本システムは、全天周カメラとお椀型ディスプレイを用いて全天周観察を実現し、車椅子の遠隔操作・コミュニケーションに有用となるシステムとなった。車椅子に全天周カメラを搭載した研究はいくつかあるが[7, 8, 9]、操作とコミュニケーション両面に最適なカメラ位置を考慮し、1台のカメラで周囲環境、車椅子使用者、第三者を観察できる。ユーザー実験の結果、車椅子遠隔操作時の周囲の一貫観察にはTDV、正確な方向認識にはTPVが適切であることが分かった。お椀型ディスプレイを採用することでこれら両面を実現し、車椅子外出に必要な「周囲の状況把握」のサポートを行う。

本研究では、車椅子周囲の簡単な観察のため、1台の全天周カメラを設置したが、使用者の体が周囲観察の妨げになっている。今後はより視野を広げるため、ドライブレコーダーのように背面に180度カメラを搭載したり、1台の全天周カメラを可動式にする[16]等の改善を行いたいと考えている。

周囲の人とのコミュニケーション 2つのディスプレイで「周囲の人とのコミュニケーション」に寄与する。ユーザー実験の結果、お椀型ディスプレイは周囲位置の正確な理解を促し、第三者の位置等の正確な状況を直感的に感じ取れるため、遠隔側にお椀型ディスプレイを搭載することで、話しかける相手を決断したり、直接的に介助情報を提示したりと、第三者とのコミュニケーションに有効となる。さらに、全周囲から観察できる球体ディスプレイを車椅子に設置し、車椅子使用者だけでなく、周囲の第三者にも遠隔介助者の存在や情報を提示することで、従来研究では実現できなかった、第三者を含めた三角形のコミュニケーションの実現を可能にする。

本研究では、車椅子外出の要求を探るため、車椅子に関わる人々にインタビューを行い、システムの視線推定に対するユーザー実験を行いフィードバックを得た。今後は、実際にターゲットとするユーザーが車椅子で遠隔外出するシナリオを想定し、第三者の介入によるコミュニケーションの変化や行動の変化に着目したフィールド実験を行いたい。

車椅子使用者の意思の尊重 ユーザー実験では、お椀型ディスプレイにより車椅子使用者を直感的に見て、使用者と同一の視点で観察できることが実証された。P2が語ったように、前面に使用者が投影されることで、同じ高さで周囲を観察することができる。これは、介助者に求められる要素でもある(C4)。このように、車椅子使用者の興味を正確に認識できるため、遠隔介助者は意思に気付きやすくなり、「車椅子使用者の意思の尊重」を考慮しやすくなる。

8 むすびと展望

全天周映像を用いて、車椅子使用者と近くにいる第三者や遠隔介助者を繋いでサポートを行う、新しい遠隔操作・コミュニケーションシステムを提案し、実装した。遠隔介助者はお椀型ディスプレイで車椅子使用者とその周辺を観察し、車椅子側では球体ディスプレイで介助者の存在を車椅子使用者や第三者が認識し、コミュニケーションの促進となりうる。そして、視線情報や対面コミュニケーションの基本機能を実装し、技術評価とユーザー実験を行いシステムの有効性を評価し、考察を述べた。

今回実装したプロトタイプでは、無線通信と投影(583 ms)、スモーキングのための回転取得に遅延が発生している。しかし、遅延は操作性や会話の弊害となってしまうため、屋外での実装に5G通信、回転のノイズ軽減フィルターにより遅延は軽減できる。

謝辞

本研究はJSPS科研費JP20K23321の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] R. Ando, K. Minamizawa, and M. Y. Saraiji. SlideFusion: Surrogacy Wheelchair with Implicit Eyegaze Modality Sharing. In *ACM SIGGRAPH 2020 Emerging Technologies*, SIGGRAPH '20, New York, NY, USA, 2020. ACM.
- [2] J. M. Araujo, G. Zhang, J. P. P. Hansen, and S. Puthusserypady. Exploring Eye-Gaze Wheelchair Control. In *ACM Symposium on Eye Tracking Research and Applications*, ETRA '20 Adjunct, New York, NY, USA, 2020. ACM.
- [3] Y. Asai, Y. Ueda, R. Enomoto, D. Iwai, and K. Sato. ExtendedHand on Wheelchair. In *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '16 Adjunct, p. 147–148, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [4] H. Benko, A. D. Wilson, and R. Balakrishnan. Sphere: Multi-Touch Interactions on a Spherical Display. In *Proceedings of the 21st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '08, p. 77–86, New York, NY, USA, 2008. ACM.
- [5] P. Boissy, H. Corriveau, F. Michaud, D. Labonte, and M.-P. Royer. A qualitative study of in-home robotic telepresence for home care of community-living elderly subjects. *Journal of telemedicine and telecare*, 13:79–84, 02 2007.
- [6] H. Fukuda, K. Yamazaki, A. Yamazaki, Y. Saito, E. Iiyama, S. Yamazaki, Y. Kobayashi, Y. Kuno, and K. Ikeda. Enhancing Multiparty Cooperative Movements: A Robotic Wheelchair That Assists in Predicting Next Actions. In *Proceedings of the 20th ACM International Conference on Multimodal Interaction*, ICMI '18, p. 409–417, New York, NY, USA, 2018. ACM.
- [7] R. Gunderson, S. Smith, and B. Abbott. Applications of virtual reality technology to wheelchair remote steering systems. *Proceedings of the 1st European Conference on Disability, Virtual Reality and Associated Technologies (ECDVRAT'96)*, Maidenhead, UK, pp. 8–10, 01 1996.
- [8] S. Hashizume, I. Suzuki, K. Takazawa, R. Sasaki, Y. Hashimoto, and Y. Ochiai. Telewheelchair: A Demonstration of the Intelligent Electric Wheelchair System towards Human-Machine. In *SIGGRAPH Asia 2017 Emerging Technologies*, SA '17, New York, NY, USA, 2017. ACM.
- [9] S. Hashizume, I. Suzuki, K. Takazawa, R. Sasaki, and Y. Ochiai. Telewheelchair: The Remote Controllable Electric Wheelchair System Combined Human and Machine Intelligence. In *Proceedings of the 9th Augmented Human International Conference*, AH '18, New York, NY, USA, 2018. ACM.
- [10] J. B. Hinkel. Head-Guided Wheelchair Control System. In *Proceedings of the 12th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*, ASSETS '10, p. 313–314, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [11] Y. Kobayashi, Y. Kinpara, E. Takano, Y. Kuno, K. Yamazaki, and A. Yamazaki. Robotic Wheelchair Moving with Caregiver Collaboratively Depending on Circumstances. In *CHI '11 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '11, p. 2239–2244, New York, NY, USA, 2011. ACM.
- [12] Y. Kobayashi, Y. Kinpara, E. Takano, Y. Kuno, K. Yamazaki, and A. Yamazaki. A Wheelchair Which Can Automatically Move alongside a Caregiver. In *Proceedings of the 6th International Conference on Human-Robot Interaction*, HRI '11, p. 407–408, New York, NY, USA, 2011. ACM.
- [13] Y. Kobayashi, R. Suzuki, Y. Sato, M. Arai, Y. Kuno, A. Yamazaki, and K. Yamazaki. Robotic Wheelchair Easy to Move and Communicate with Companions. In *CHI '13 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '13, p. 3079–3082, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [14] M. Kutbi, X. Du, Y. Chang, B. Sun, N. Agadacos, H. Li, G. Hua, and P. Mordohai. Usability Studies of an Egocentric Vision-Based Robotic Wheelchair. *J. Hum.-Robot Interact.*, 10(1), Jul 2020.
- [15] Z. Li, S. Miyafuji, E. Wu, H. Kuzuoka, N. Yamashita, and H. Koike. OmniGlobe: An Interactive I/O System For Symmetric 360-Degree Video Communication. In *Proceedings of the 2019 on Designing Interactive Systems Conference*, DIS '19, p. 1427–1438, New York, NY, USA, 2019. ACM.
- [16] A. Matsuda, T. Miyaki, and J. Rekimoto. ScalableBody: A Telepresence Robot That Supports Face Position Matching Using a Vertical Actuator. In *Proceedings of the 8th Augmented Human International Conference*, AH '17, New York, NY, USA, 2017. ACM.
- [17] S. Miyafuji, F. Perteneder, T. Sato, H. Koike, and G. Klinker. A Bowl-Shaped Display for Controlling Remote Vehicles. In *The 17th International Conference on Virtual-Reality Continuum and Its Applications in Industry*, VRCAI '19, New York, NY, USA, 2019. ACM.
- [18] S. Miyafuji, T. Sato, Z. Li, and H. Koike. Qoom: An Interactive Omnidirectional Ball Display. In *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '17, p. 599–609, New York, NY, USA, 2017. ACM.
- [19] S. Miyafuji, S. Toyohara, T. Sato, and H. Koike. DisplayBowl: A Bowl-Shaped Display for Omnidirectional Videos. In *The 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology Adjunct Proceedings*, UIST '18 Adjunct, p. 99–101, New York, NY, USA, 2018. ACM.
- [20] O. Oyekoya, W. Steptoe, and A. Steed. SphereAvatar: A Situated Display to Represent a Remote Collaborator. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '12, p. 2551–2560, New York, NY, USA, 2012. ACM.

- [21] Y. Pan, W. Steptoe, and A. Steed. Comparing Flat and Spherical Displays in a Trust Scenario in Avatar-Mediated Interaction. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '14, p. 1397–1406, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [22] N. Sahadat, N. Sebkhi, and M. ghovanloo. Simultaneous Multimodal Access to Wheelchair and Computer for People with Tetraplegia. In *Proceedings of the 20th ACM International Conference on Multimodal Interaction*, ICMI '18, p. 393–399, New York, NY, USA, 2018. ACM.
- [23] M. Sarabia and Y. Demiris. A Humanoid Robot Companion for Wheelchair Users. In G. Herrmann, M. J. Pearson, A. Lenz, P. Bremner, A. Spiers, and U. Leonards eds., *Social Robotics*, pp. 432–441, Cham, 2013. Springer International Publishing.
- [24] Y. Sato, M. Arai, R. Suzuki, Y. Kobayashi, Y. Kuno, K. Yamazaki, and A. Yamazaki. A maneuverable robotic wheelchair able to move adaptively with a caregiver by considering the situation. In *2013 IEEE RO-MAN*, pp. 282–287, Aug 2013.
- [25] J. Shen, B. Xu, M. Pei, and Y. Jia. A low-cost tele-presence wheelchair system. In *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 2452–2457, 2016.
- [26] C. C. Singer and B. Hartmann. See-Thru: Towards Minimally Obstructive Eye-Controlled Wheelchair Interfaces. In *The 21st International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*, ASSETS '19, p. 459–469, New York, NY, USA, 2019. ACM.
- [27] C. Wang, A. S. Matveev, A. V. Savkin, T. N. Nguyen, and H. T. Nguyen. A collision avoidance strategy for safe autonomous navigation of an intelligent electric-powered wheelchair in dynamic uncertain environments with moving obstacles. In *2013 European Control Conference (ECC)*, pp. 4382–4387, 2013.
- [28] J. Williamson, J. Williamson, D. Sundén, and J. Bradley. Multi-Player Gaming on Spherical Displays. pp. 355–358, 04 2015.
- [29] I. Yoda, K. Sakaue, and T. Inoue. Development of Head Gesture Interface for Electric Wheelchair. In *Proceedings of the 1st International Convention on Rehabilitation Engineering & Assistive Technology: In Conjunction with 1st Tan Tock Seng Hospital Neurorehabilitation Meeting*, i-CREATE '07, p. 77–80, New York, NY, USA, 2007. ACM.
- [30] B. Zhang, G. Barbareschi, R. Ramirez Herrera, T. Carlson, and C. Holloway. Understanding Interactions for Smart Wheelchair Navigation in Crowds. In *Proceedings of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '22, New York, NY, USA, 2022. ACM.

未来ビジョン

本論文では、車椅子使用者と周囲の人、介助者を繋ぐ遠隔車椅子システムを提案した。車椅子使用者数増加に伴い、介助者数が少なくなり続ける今後の社会において、遠隔での操作性だけでなく、既存研究では組み込まれてこなかった遠隔コミュニケーション性を実現することで、離れていても信頼関係のある介助者、友達、家族等と共に車椅子での生活を過ごすことができるようになる。

今後は更なる技術的革新を図り、車椅子社会に貢献していきたい。遠隔ではどうしても伝わりづらい地面の凹凸や、車椅子周囲の人等の動的な周囲環境等を把握するサポート、実感を感じづらいゲームコントローラーではなく操作のリアルを伝えるコントローラー、自走と他走の最適な切り替え制御、遠隔コミュニ

ケーションの質を改善させるための遅延改善、介助者一人で車椅子複数人の対応、車椅子一人に対し介助者複数でのサポート等、更なる技術的改変を行うことで、将来の車椅子社会において、本システムを多様なシナリオで利用できるようになる。

本システムの更なる発展により、車椅子使用による潜在的な課題を解決する手助けになる。車椅子に関わる人達へ行ったインタビューを通して、車椅子を使用せざるを得ない方達は、現状のシステムや技術、社会環境での生活に適応しなければならないため、認識能力やコミュニケーション、意思の我慢等、車椅子未使用者が抱えなくても良い負担を抱えてしまっていることが分かった。提案システムがより進歩すれば、車椅子使用者の「あたりまえ」を覆すきっかけとなり得る。