

THE IEICE TRANSACTIONS ON FUNDAMENTALS OF ELECTRONICS, COMMUNICATIONS AND COMPUTER SCIENCES (JAPANESE EDITION)

IEICE | **電子情報通信学会**
A | **論文誌** 基礎・境界

VOL. J98-A NO. 1
JANUARY 2015

本PDFの扱いは、電子情報通信学会著作権規定に従うこと。
なお、本PDFは研究教育目的（非営利）に限り、著者が第三者に直接配布することができる。著者以外からの配布は禁じられている。

基礎・境界ソサイエティ

一般社団法人 **電子情報通信学会**

THE ENGINEERING SCIENCES SOCIETY

THE INSTITUTE OF ELECTRONICS, INFORMATION AND COMMUNICATION ENGINEERS

複数同伴者とのグループコミュニケーションを考慮した 複数ロボット車椅子システム

鈴木 亮太^{†a)} 新井 雅也[†] 佐藤 慶尚[†] 山田 大地[†]
 小林 貴訓^{†,††} 久野 義徳[†] 宮澤 怜^{†††} 福島三穂子^{†††}
 山崎 敬一^{†††} 山崎 晶子^{†††}

Robotic Wheelchair System Allowing Group Communication among Multiple Wheelchair Users and Companions

Ryota SUZUKI^{†a)}, Masaya ARAI[†], Yoshihisa SATO[†], Taichi YAMADA[†],
 Yoshinori KOBAYASHI^{†,††}, Yoshinori KUNO[†], Satoshi MIYAZAWA^{†††},
 Mihoko FUKUSHIMA^{†††}, Keiichi YAMAZAKI^{†††}, and Akiko YAMAZAKI^{†††}

あらまし 車椅子の潜在的需要の増加にともない、多くのロボット車椅子が研究されている。高齢者介護施設では、「話しかけ」が心身の健康維持に重要であることから、施設利用者とのコミュニケーションを重要視している。一方で、高齢者介護施設では人手不足により一人の介護士が複数の車椅子を移動させざるを得ない状況がある。そこで、本論文では、複数のロボット車椅子と複数の同伴者がグループで移動する場合に着目し、グループコミュニケーションに配慮したフォーメーションを維持して移動する複数ロボット車椅子システムを提案する。コミュニケーションに適切なフォーメーションは、社会学のエスノメソドロジーの手法を用いて、グループ内コミュニケーションを観察・分析した結果から導く。車椅子に設置したレーザ測域センサにより、複数の同伴者の位置と姿勢を実時間で追跡する。また、あらかじめ作成した環境地図を用いて各車椅子の位置と姿勢の推定を行う。得られた情報を地図上で統合・共有することにより、任意のフォーメーションを維持して各車椅子が協調移動する。実際の高齢者介護施設にて、介護士及び施設利用者により利用頂き、提案の有効性を確認した。

キーワード ロボット車椅子, ヒューマンロボットインタラクション, グループコミュニケーション, エスノメソドロジー, レーザ測域センサ

1. ま え が き

少子高齢化による車椅子の需要の増加にともない、

多くの知的車椅子や、ロボット車椅子の研究が行われている。例えば、Okugawaらは生体信号から車椅子利用者の意図を読み取り自動走行を行うロボット車椅子を提案している[10]。また、Satohらは、全方位ステレオカメラを用いることで、段差や障害物の回避を行っている[12]。このように、車椅子の操作インタフェースの改善や、車椅子利用者の独力での行動範囲を広げる支援をするロボット車椅子が数多く研究されている[1], [2], [16]。しかし、車椅子利用者は歩行以外の障害をもっている方も多く、家族や友人などと一緒に出かける事が多い。また、車椅子利用者やその関係者に話をうかがうと、そのような場面では、車椅子は同伴者が後ろから手で押すなどの操作をする場合がほとんどであるという。更に、老老介護や介護士不足と

[†] 埼玉大学大学院理工学研究科, さいたま市

Graduate School of Science and Engineering, Saitama University, 255 Shimo-okubo, Sakura-ku, Saitama-shi, 338-8570 Japan

^{††} 科学技術振興機構さきがけ, 川口市

Japan Science and Technology Agency (JST), PRESTO, 4-1-8 Hon-cho, Kawaguchi-shi, 332-0012 Japan

^{†††} 埼玉大学教養学部, さいたま市

Faculty of Liberal Arts, Saitama University, 255 Shimo-okubo, Sakura-ku, Saitama-shi, 338-8570 Japan

^{††††} 東京工科大学メディア学部, 八王子市

School of Media Science, Tokyo University of Technology, 1404-1 Katakura-cho, Hachioji-shi, 192-0982 Japan

a) E-mail: suzuryo@cv.ics.saitama-u.ac.jp



図 1 同伴者に自動併走するロボット車椅子

Fig. 1 A robotic wheelchair moving alongside a caregiver automatically.



図 2 一人の介護士が複数の車椅子を移動する様子

Fig. 2 A caregiver moves two wheelchairs in an elderly care facility.

いった社会的な問題もあることから、車椅子利用者のみならず、同伴者への配慮や支援も重要であると考えられる。

小林らは、同伴者の横で自動併走するロボット車椅子(図 1)を提案している [7]。このロボット車椅子は、同伴者の肩の高さに設置したレーザ測域センサの観測データに基づいて同伴者の身体の位置と向きを頑健かつ高精度に追跡し、追跡結果から同伴者の進路を予測して、横並びの位置を維持したまま自動的に同伴者に追従できる。これにより、車椅子を操作する必要がなくなり、同伴者の負担を軽減することができる。また、互いの横の位置で併進できるため、視線を向けあったり相手の視線方向を読み取りやすくなり、両者のコミュニケーションを円滑にする。このロボット車椅子は、走行中に車椅子利用者への「話しかけ」を行えるため、介護士からも支持されている。一方、効率や安全の面から、高齢者介護施設では、車椅子を用いて被介護者を移動させることがしばしばあり、図 2 のように、一人の介護士が複数の被介護者を車椅子に乗せて移動させざるを得ない状況もあるという。複数の車椅子を一人で操作することについて介護士の方に話をうかがうと、“介護では心のケアも重視されるが、複数の車椅子を操作するような状況では「話しかけ」も困難で、十分に心を配ったケアを行えない”という。こ

のことから、車椅子利用者と同伴者がグループで会話しながら移動できるシステムは潜在的な需要があるといえる。

そこで、本論文では、小林らのロボット車椅子を拡張し、複数の車椅子利用者と複数の同伴者のグループコミュニケーションを考慮した協調移動を行える複数ロボット車椅子システムを提案する。なお、グループコミュニケーションという異なるグループ間のコミュニケーションも考えられるが、ここでは、一つのグループを形成するメンバーの中のコミュニケーションのことをいう。

複数の同伴者との協調移動を行う移動ロボットは多数提案されてきた。例えば、Urcola らは複数のロボットが複数人を引率する場合の実践的手法を提案している [17]。また、同伴者との社会的行動のできるロボットを目指した例として、Murakami らは、人間行動の観察結果を反映した進路推定モデルにより、同伴者の目的地を知らないロボットが同伴者と協調移動する手法を提案している [9]。しかし、これらの既存の協調移動に関する研究では、ロボットに人が乗っておらず、ロボットの搭乗者と周囲の同伴者とのコミュニケーションに着目した移動ロボットの研究はほとんど報告されていない。そこで、本論文ではグループコミュニケーションを考慮したロボット車椅子の協調移動方法を新たに検討する。

移動においては、障害物の回避や道幅などの周辺環境がもちろん優先されるべきである。しかし、道幅に余裕があり、フォーメーションの構築に多少の自由度がある場合は、コミュニケーションに配慮したフォーメーションで移動すべきである。そこで、社会学のエスノメソドロジーの手法を用いて、移動しながら会話する場面において、同伴者が車椅子に対してどのような身体配置をとるか調査・分析する。そして、グループを構成している移動中の同伴者及び車椅子の位置を取得し、得られた知見に基づいて適切なフォーメーションを維持して移動できる複数ロボット車椅子システムを提案する。

2. 車椅子利用者と同伴者によるグループコミュニケーションの社会的分析

本章では、複数の同伴者と複数の車椅子が、コミュニケーションに配慮して移動をする際に考慮すべきフォーメーションについて検討する。小林らは、同伴者と車椅子を横に並べると良いと主張した。しかし、

それは第三者視点での評価によるものであった。では、第一者・第二者視点で、フォーメーションはどのようにユーザによって構成されるだろうか。また、グループの参加人数が増加すると、コミュニケーションとフォーメーションはどのように影響し合うのだろうか。以降では、グループを構成するメンバの身体配置と会話状況に注目して、社会学のエスノメソドロジーによる分析を行った結果について述べる。

2.1 身体配置とコミュニケーションの関係

社会学の分野では、会話分析の研究が数多く行われてきた。Goodwin は、ビデオ分析の中で、視線が受け手性の表示の要素であると主張した [3]。会話の中で、話し手は、注意を引く行動により受け手の視線を獲得しようとする。受け手も、話し手に視線を向けて聞いている事を示そうとする。つまり、話の受け手が視線を聞き手に向けることで、話を受ける事ができることを示し（受け手性の表示）、話し手に発話を促すという行為を行っているという。また、Kendon は、人や物に対する身体位置や方向に着目し、操作領域や F-Formation という概念を提唱した [6]。人々は、ある行為を共有するときに、個人行動を遮らない空間（操作領域）を複数人で重ね合わせた空間（O-Space）を形成するという。この O-Space を含むグループフォーメーションを F-Formation と定義づけた。更に、Schegloff は、身体ひねりが会話と連携していることを示した [11]。身体各部位の向きが、人がどの活動にどの程度関与しようとしているかを表しているという。そして、身体ひねりは会話と関連している事も示した。

これらの社会的な知見を、グループと一緒に自律移動する車椅子へ適用することを考えよう。移動中は、グループメンバ全員は基本的に進行方向を向く事になる。特に、車椅子はその構造上必ず進行方向を向く必要がある。したがって、各グループメンバは相対することはできず、Goodwin の示した視線による受け手性の表示が行われるには、身体ひねりを行う必要がある。車椅子利用者は、腰から下がほぼ固定されているために、後方などの進行方向から離れた身体ひねりを行うことは難しく、上半身のみの身体ひねりが関与の程度を示すことになる。また、同伴者は車椅子利用者による受け手性の表示を獲得できるような位置に身体を配置し、会話に適した身体ひねりを行い、F-Formation を形成すると考えられる。つまり、グループ内のそれぞれの身体配置とそれに付随する視線配布・獲得のしやすさが、会話の発生に重要であると考えられる。



(a) 会話が必要な場合 (b) 会話が必要な場合

図 3 同伴者が車椅子を遠隔操作した場合の実験風景
Fig.3 Example scenes of the experiment when the wheelchair is remotely controlled.

これらの社会的知見が、車椅子・同伴者間で実際に成立するかを確認するために実験を行った [14]。この実験では、一人の同伴者がリモコンにより一台の車椅子を遠隔操作しつつ随伴移動を行った。また、会話による同伴者と車椅子利用者の身体配置の差異を調べるため、被験者のペアを二つに分け、一方に会話タスクを与えた。その結果、同伴者は、会話が必要な状況においては、操作が困難であるにもかかわらず車椅子の横位置で操作し、会話をしやすかった (図 3(a))。一方で会話の必要が無ければ、遠隔操作をしやすいため車椅子の後ろで操作を行った (図 3(b))。これらのことから、車椅子利用者とのコミュニケーションに、身体配置が強く関係している事が分かった。

2.2 複数車椅子と複数同伴者のフォーメーションとコミュニケーションの関係

前節では、一人の同伴者と一人の車椅子利用者によるコミュニケーションとフォーメーションの関係性を調査した。では、複数の車椅子利用者が複数の同伴者とともに会話しながら移動する場合、コミュニケーションとフォーメーションにはどのような関係があるのだろうか。本節では、複数人と複数台による例として、2台のロボット車椅子が自動的に移動するとき、グループでの会話タスクを与えると2人の同伴者がどのような身体配置を取り、車椅子利用者との同伴者がどのようにコミュニケーションを行うかを分析した結果について述べる。

実験は19～30歳の男女学生40人を対象とし、一回の実験につき車椅子利用者2人と同伴者2人の合計4人のグループで行った。2台の車椅子はWoZ法により、定められたコースを図4に示す三つのフォーメーションを維持しながら移動する。移動するコースの幅は4mで全員が広く横に並んで移動するのが難しい道幅とした。また、実験中、被験者には会話タスクを与

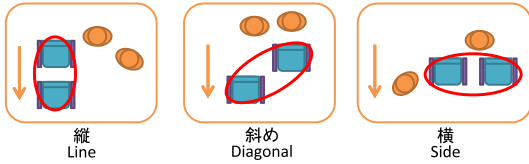


図 4 2 台の車椅子のフォーメーション

Fig. 4 Three types of formations for two wheelchairs.

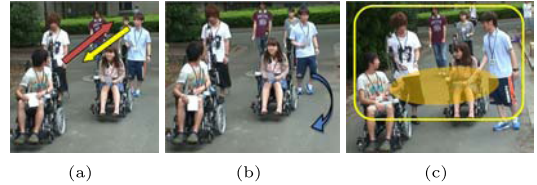


図 6 斜めのフォーメーションの場合

Fig. 6 Experimental scenes in the case of two wheelchairs moving in diagonal formation.

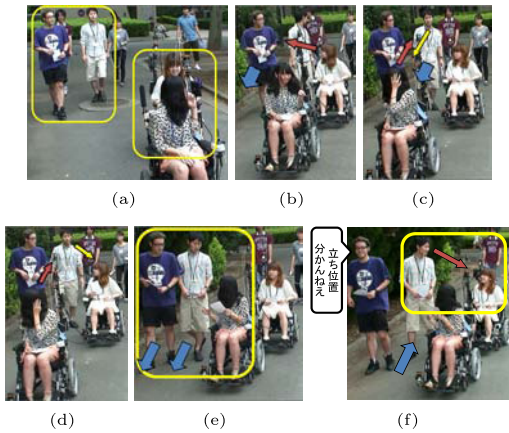


図 5 縦のフォーメーションの場合

Fig. 5 Experimental scenes in the case of two wheelchairs moving in line formation.

えた。被験者には、実験開始時にそれぞれ異なる食材が示されたカードが配られる。また、コースの折り返し地点には、調味料の示された4枚のカードが伏せて置かれ、各グループで1枚を選ぶ。4人の被験者は、スタート地点に戻ってくるまでにそれぞれのカードに示された食材と調味料を用いた献立を相談して決定する。実験の様子を2台のビデオカメラで撮影し、三つのフォーメーションそれぞれの場合で被験者の様子を分析した。

縦のフォーメーション

図4左側のように車椅子が縦に並んだフォーメーションの場合、4人全員が会話に参加する場面が観察されなかった。移動開始直後、前方の車椅子利用者が後方の車椅子利用者の方を振り返り、互いに視線を交わしながら2者で会話をしている。このとき、同伴者2人は車椅子後方で横に並んで歩いており、車椅子利用者同士の会話に参加していない(図5(a))。ここでは、車椅子利用者同士、同伴者同士の二つの参与の枠組みが発生している。その後、同伴者の一人が前方の車椅子利用者の方に歩み寄り発話する。振り返りやすい位置にいた後方の車椅子利用者は、その同伴者の方に振

り向き、受け手性の表示を行う(図5(b))。前方の車椅子利用者も会話への参与のために後ろを振り返り、発話をしていない方の同伴者と目が合う(図5(c))が、その同伴者は後方の車椅子利用者の方に視線を向ける。その結果、後方の車椅子利用者と2人の同伴者の3者で会話がなされ、もう一人は会話に参加できず傍観者となる参与の枠組みが形成される(図5(d))。その後、会話の話題が前方の車椅子利用者の食材に移ると、同伴者2人は前方の車椅子利用者の方に視線を向け、3者での会話を始める(図5(e))。このとき、今度は後方の車椅子利用者が傍観者となっている。更にその後、もう一人の同伴者と横並びになっていた同伴者の一人がやや後ろに下がり、後方の車椅子と横並びになる。これは、これまで会話に参加できなかった車椅子利用者を参与させるための行動であると思われる。しかし、その同伴者と2人の車椅子利用者との会話が始まると、今度はもう一人の同伴者が参与の枠組みから外れてしまう(図5(f))。これは、2人の同伴者が縦に並ぶようになったことから、相手の様子が確認できず、受け手性の表示が難しくなったためと考えられる。このとき、会話から外れた同伴者は、“立ち位置が分からない”と発言をしている。このように、実験中には移動しながら4者が一体となってコミュニケーションが行われる様子は見られず、縦列の関係によってコミュニケーションが分断されてしまった。

斜めのフォーメーション

図4中央の車椅子が斜めに並んだフォーメーションの場合、被験者4人全員が会話に参加している様子が見られた。移動開始後、前方の車椅子利用者は左後ろを振り返り、受け手性の表示を行う。そこで、同伴者の一人と視線を交わしあい、互いが受け手性を獲得した(図6(a))。そして、2者の会話を開始するために、同伴者は前方に移動し、横並びになる様子が見られる(図6(b))。そして、同伴者2人がカードを見せつつ車椅子に接近し、被験者4人による会話が行われた

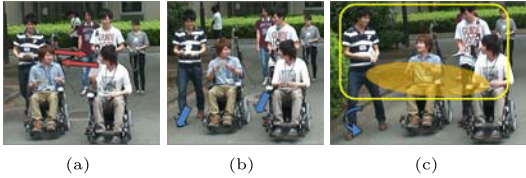


図 7 横のフォーメーションの場合

Fig. 7 Experimental scenes in the case of two wheelchairs moving in side formation.

(図 6(c)). このとき、操作領域を共有する O-Space が形作られ、円形の F-Formation が形成されていることが分かる。

横のフォーメーション

図 4 右側のように車椅子が横に並んだフォーメーションの場合も、斜めに並んだ場合と同じ様子が見られた。移動開始前から、車椅子は横並びであり、2 者は顔を横に向けるだけで、互いに受け手性の表示を行うことができている (図 7(a)). 移動開始後、車椅子の後方にいた 2 人の同伴者が、会話に参加するためにそれぞれ横並びの位置に移動する (図 7(b)). グループの横に位置する同伴者は、更に体をグループの内側にひねりつつ 1 歩前を出て、グループに対し視線を配りやすく、受け手性の表示を行いやすくした (図 7(c)). これにより、被験者 4 人による O-Space が形成され、全員による会話が行われた。

以上の三つの実験ケースの分析結果から、車椅子同士が縦列になって移動した場合、車椅子利用者同士のコミュニケーションが行いにくく、また同伴者がグループ全体を会話に参加させるための身体配置を取りにくいことが分かった。一方で、横や斜めに並んだ場合、車椅子利用者は体ないし首を回すことで車椅子利用者同士の様子がうかがいやすく、また同伴者はグループ内の全員が互いの様子をうかがいやすいような配置をとれるため、会話を誘発しやすいくことが分かった。したがって、グループコミュニケーションに配慮した移動を行うためには、車椅子利用者同士の視線を獲得できるように縦一列は避け、できるだけ斜め並びか横並びにするなどの位置関係を維持して移動する必要があるといえる。

3. 複数台ロボット車椅子システム

車椅子同士が障害物や道幅を考慮した上でなるべく斜め並びないし横並びのフォーメーションを保ちつつ、同伴者と協調的に移動する複数台ロボット車椅子シ

テムを目指す。そのためには、複数台の車椅子の位置と向き、複数人の同伴者の身体的位置を取得し、それらが車椅子間で共有される必要がある。また、適切な経路設計のための周辺環境情報の共有も必要である。

本論文では、車椅子に設置されたレーザ測域センサにより複数同伴者の追跡をする。また、レーザ測域センサによる位置・姿勢推定システムを利用して、車椅子の位置・姿勢と地図情報を得る。そして、それらを統合し、フォーメーションを維持しつつ協調移動を行う。

3.1 同伴者と併走するロボット車椅子

本論文で提案するロボットシステムは、小林らの同伴者と併走するロボット車椅子 [7] をプラットフォームとして開発する。このロボット車椅子は、同伴者の肩の位置に設置された、同高度の水平面上にある物体までの距離を観測できるレーザ測域センサを用いて、同伴者の身体的位置 x, y と向き θ をパーティクルフィルタ [4] により追跡する。同伴者の肩の輪郭形状をだ円でモデル化し、パーティクルフィルタの仮説はだ円をサンプリングした点で評価する。ここで、センサからは身体に隠れて観測されないはずの位置の点は評価点からは除外する。除外判定は、サンプリングされた評価候補点でのだ円モデルの法線ベクトルと、レーザ測域センサの位置からその点までのベクトルとの内積により計算できる。仮説 i の各評価点のうち、最も観測点と遠い評価点を選び、2 者の距離を d_{\max}^i とする。そして、式 (1) により、仮説 i のゆう度 w^i を得る。

$$w^i = \exp\left(\frac{-(d_{\max}^i)^2}{\sigma_d}\right). \quad (1)$$

ここで、 σ_d は d^i の分散によるパラメータである。 d_{\max}^i を得るためには評価点と観測点の距離を計算する必要があるが、レーザ測域センサからのデータを画像上に射影し、更にその画像を距離画像へ変換しておくことで、観測点までのそれぞれの距離が、距離画像上の対応する画素値を読みだすことで簡単に参照できる。アルゴリズムの概要を Algorithm 1 及び図 8 に示す。また、この同伴者位置情報を基に、ポテンシャルフィールド法により車椅子を移動させる [13]. 紙面の都合上、同伴者追跡及び車椅子制御方法の詳細は [7] に委ねる。

3.2 複数同伴者の追跡

目的のシステムを実現するためには、車椅子と一緒に移動する複数同伴者の位置を調べる必要がある。しかし、前述の同伴者追跡手法をそのまま複数人追跡に応用すると、必要となる仮説の数が追跡人数に比例し

Algorithm 1 同伴者追跡

```

1: センサからデータを取得
2: 距離データを画像に射影
3: 距離画像変換する
4: 仮説ゆう度に応じて, 新しく仮説を生成する
5: 運動モデルにしたがい, 各仮説を移動させる
6: for all 仮説 do
7:   評価候補点の位置を計算
8:   for all 評価候補点 do
9:     評価候補点におけるだ円の法線ベクトルとレーザセン
      サから評価候補点へのベクトルの内積を計算する
10:    if 内積 < 0 then
11:      この評価候補点を評価点とする
12:    end if
13:  end for
14: 全ての評価点について距離画像から距離を読みだし, 最大
    のものを  $d_{max}$  とする
15: 式 (1) によりこの仮説のゆう度を計算する
16: end for
17: 仮説により同伴者の現状態とする

```

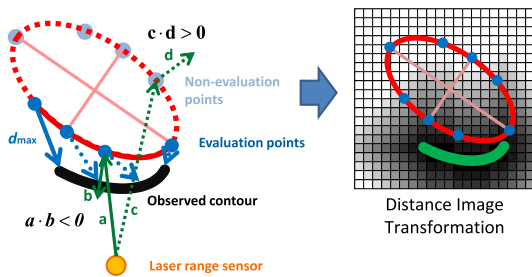


図 8 同伴者追跡の概要

Fig. 8 Overview of companion tracking.

て多くなり, 計算量が増大する. パーティクルフィルタは, その計算過程で, 生成した仮説ごとにゆう度計算を行う必要がある. パーティクルフィルタにより精度よく追跡を行うには仮説数を多くするとよいが, 直列にゆう度計算を行った場合, 仮説数が増えるにつれて計算時間が増大し, 次の時刻での状態予測が困難となる. したがって, パーティクルフィルタの仮説数と追跡精度は単純には比例しない. 一方, パーティクルフィルタの仮説ゆう度評価は, 仮説ごとにそれぞれ独立に行われるため, 並列計算が可能である [8]. そこで並列計算を高速に行える GPGPU (General-Purpose computing on Graphics Processing Units) により仮説ゆう度評価を並列に行うことで, パーティクルフィルタによる追跡を高速化する. 本論文では, Algorithm 1 のうち, ゆう度計算にあたる 6~16 行目の処理を並列計算する. GPGPU による処理時間の高速化の結果を図 9 に示す. 破線は CPU による直列計算, 実線は GPU による並列計算である. 1 人の追跡対象につき,

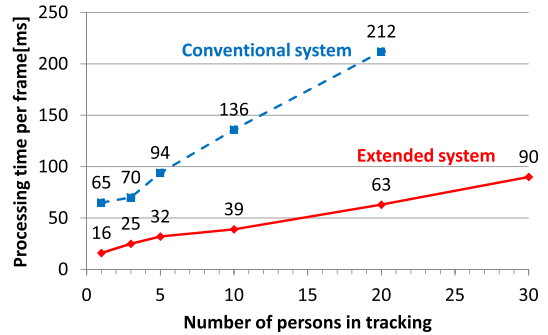


図 9 計算時間の比較

Fig. 9 Comparison on computing time.

100 個の仮説を生成している. CPU の計算で 1 人の追跡にかかる 1 フレームの計算時間は 65ms であるのに対し, GPGPU を用いると同じ時間で 20 人の追跡を行うことができる.

3.3 車椅子の位置・姿勢の把握

フォーメーションを維持するためには, グループで移動する複数の車椅子の相互位置を把握する必要がある. そのため, 本システムでは SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) に基づく自己位置・姿勢推定を行う. SLAM とは, センサからの情報を基に自己位置・姿勢推定と環境地図作成を同時に行う手法である (例えば, [5] など). 本システムでは, レーザ測域センサを用いることで地図の事前生成と自己位置・姿勢の推定を行える ICHIDAS (日立産機システム製) を用いる. また, 地面の傾斜の影響を低減しつつ地形情報を得やすいように, 車椅子の手すりの位置に地図作成及び自己位置・姿勢推定用のレーザ測域センサを設置している (図 10).

3.4 統合システム

統合した複数台車椅子システムの全体の構成を図 10 に示す. 3.2, 3.3 に示した手法により, 本システムは複数車椅子の地図上の位置と姿勢及び車椅子から見た複数同伴者の位置をそれぞれ得る. ここで, 地図上の車椅子の位置・姿勢情報に基づいて, 各車椅子に取り付けられたレーザ測域センサによる同伴者追跡結果を地図上に射影することで, 地図上で車椅子・同伴者の相互位置関係が得られる. グループ内の同伴者位置及び車椅子位置から, 各車椅子が任意の適切なフォーメーションを取るような目的地を設計する. 各車椅子は, ポテンシャルフィールド法 [13] により障害物などの周辺環境に配慮しながら目的地に達するよう左右駆

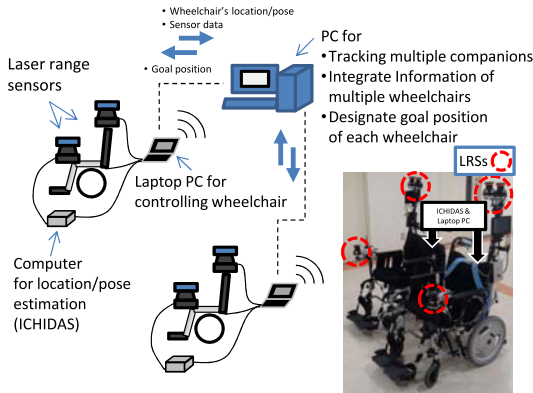


図 10 システム構成
Fig. 10 Overview of whole system.

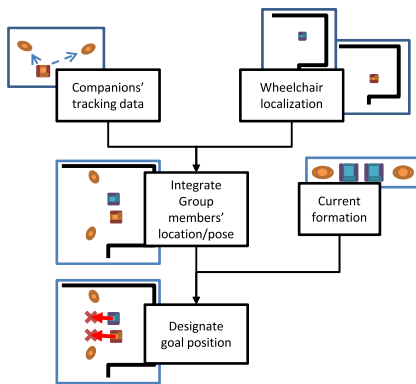


図 11 データ統合と目的地設計の流れ
Fig. 11 Overview of data integration.

動輪を操作する。データ統合及び目的地設計の流れを図 11 に示す。

3.5 フォーメーション決定アルゴリズム

前節の情報統合により、グループメンバーの位置が分かるようになる。そこで、それらの情報を用いてフォーメーションを決定する。フォーメーション決定の方法は様々なものが考えられるが、介護現場では浴場やホールへの移動などの目的地があらかじめ分かっている場合と、散歩をするときのように目的地があらかじめ分かっている場合がある。その両方に対応するため、本システムでは、同伴者の進路が未知である場合と、既知である場合の二つのフォーメーション決定アルゴリズムを実装した。なお、本論文では、複数人同伴者と複数台車椅子のグループの例として、同伴者 2 人・車椅子 2 台によるフォーメーションを取り扱う。

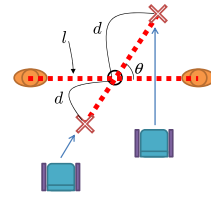


図 12 進路が未知の場合のアルゴリズム
Fig. 12 Controlling multiple wheelchairs while keeping formation (path-unknown case).

3.5.1 進路が未知の場合

進路が未知である場合、逐次同伴者の情報を用いて車椅子の動きを決定する必要がある。そこで、同伴者の間に車椅子がいるような場合に、同伴者に対して任意のフォーメーションを維持するようなアルゴリズムを実装した。アルゴリズムの概略を図 12 に示す。まず、同伴者を線分 l で結ぶ。線分 l の中心を通り、線分 l とのなす角 θ である直線上に、線分 l の中心から等距離 d にある 2 点を、それぞれの車椅子の目的地とする。ここで、 θ は線分 l の垂直方向を進行方向と仮定した場合の、進行方向に対する車椅子の縦列・横列などの並び方を決定するフォーメーションステアリング角である。例えば、 90° である場合、フォーメーションは縦並びになり、 0° である場合、フォーメーションは横並びになる。また、 d は車椅子間の間隔を決定する。これらの二つのパラメータにより、フォーメーションを決定できる。

このフォーメーション決定アルゴリズムにより、2 人の同伴者の間にいるように 2 台の車椅子を随伴移動させ、システムの動作評価を行った。横一列のフォーメーションを形成するために、 $\theta = 0^\circ$ 、 $d = 100\text{cm}$ とした。その様子を外部の 3 か所に設置したレーザ測域センサを用いて、3.2 で示した複数人同伴者追跡手法を適用し、4 者を追跡した。車椅子にはマーカを付け、追跡できるようにした。その軌跡を図 13 に示す。同伴者の蛇行に対応しつつ、各車椅子がフォーメーションを維持しながら移動をする様子が見られる。

3.5.2 進路が既知の場合

進路が既知である場合、目的地に向かう経路に対して車椅子配置を決める事でフォーメーションを決定できる。アルゴリズムの概略を図 14 に示す。このアルゴリズムは 2 ステップに大別される。

第一のステップでは、経路に沿った車椅子間フォーメーションを決定する。直線の経路 pl を設計し、2 台

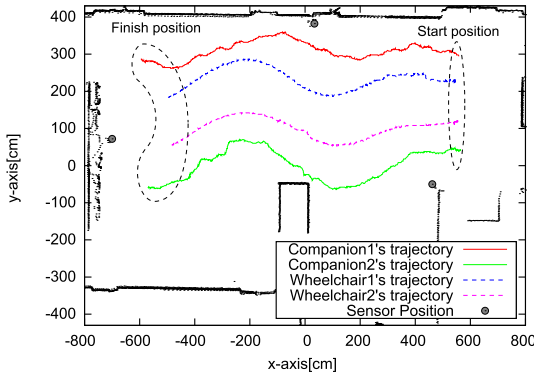


図 13 4者による移動の軌跡

Fig. 13 Trajectories of companions and wheelchairs.

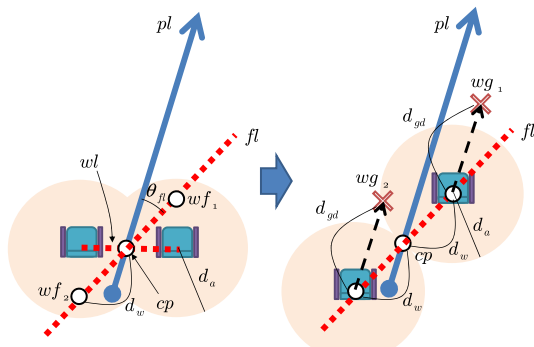


図 14 進路が既知の場合のアルゴリズム

Fig. 14 Controlling multiple wheelchairs while keeping formation (path-known case).

の車椅子車軸中心を通る直線を wl とする. pl と wl が交わる点を cp とする. pl とのなす角が θ_{fl} であり, cp を通るような直線 fl 上, cp から等距離 d_w にある点を wf_1, wf_2 とする. この wf_1, wf_2 が, 各車椅子がフォーメーションを維持するための制御点である. これらを車椅子の目的地とすることで, フォーメーションを形成したままその場に留まる事ができる. なお, θ_{fl} は進路に対しての車椅子の並び方を決定するフォーメーションステアリング角である. そして, d_w は車椅子間の距離を決定する. これら二つのパラメータにより, フォーメーションを決定できる.

第二のステップでは, 同伴者の両者が2台の車椅子の車軸中心のどちらかの一定距離 d_a 以内にいる場合に, 距離 d_{gd} だけ経路に沿った前方に局所目的地 wg_1, wg_2 を置く. すると, 同伴者全員が車椅子に近い場合のみ, 車椅子がフォーメーションを維持したまま経路方向に進むことができる. 逆に, 同伴者の少なく

とも一人が車椅子の近くにいない場合は, wf_1, wf_2 に目的地を設定することでその場に留まることができる.

このアルゴリズムは, 同伴者が近づくか, 遠ざかるかのどちらかだけの操作で, 同伴者にとってより簡単に車椅子とのグループ移動ができる. 次章のデイケアサービスセンターでの評価実験ではこちらを利用して

4. 評価実験

デイケアサービスセンターだんらん上柴 (埼玉県深谷市) で, 介護士及び施設利用者を対象とした本システムの評価実験を行った. 本実験では, 2人の同伴者と2人の車椅子利用者による移動を行った. 本実験では, 3.5.2の進路が既知の場合のフォーメーション決定アルゴリズムを適用した. ここで, $\theta_{gl} = 35^\circ$, $d_w = 120\text{cm}$, $d_a = 100\text{cm}$, $d_{gd} = 100\text{cm}$ とした. なお, 車椅子の形状は幅約 55cm , 奥行き約 110cm である. 実験は, 女性介護士5人, 施設利用者(高齢者)6人(女性4人, 男性2人)を対象に, 全5ケース行った. 被験者は, 実験開始時に“同伴者の両方が車椅子に近づくと目的地に向かって車椅子が動きます. 一緒に移動してください.”とだけ説明され, 設定された経路を移動した. 実験では, 主に介護士の方が同伴者役, 施設利用者の方が車椅子利用者役となったが, 入れ替わって実験を行うケースもあった.

実験中の様子を図15に示す. 図15(a)のように, グループ全体が簡単な振り向きのみで視線配布が可能なフォーメーションを維持して移動をしている. 図15(b)では, 同伴者がグループから離れた場合にも車椅子はフォーメーションを維持したまま停止するので, 距離が離れていても会話が続いている. また, 実験において, 施設利用者(高齢者)が車椅子同伴者となった場合でも, 図15(c)のように移動できており, 誰でもそばに立って一緒に移動できるシステムとなっていることが分かる.

更に, 一つの実験ケースについて詳細に分析した. 図16(a)-(d)に示す実験ケースでは, 車椅子は横並びの状態からスタートし, 斜めのフォーメーションで移動する. ここで, 図16中の破線の四角は, それぞれ車椅子の位置を画像に投影したものである. まず, 移動開始前の横並びの状態では, 2.2で得られた観察結果と同様に, 車椅子利用者同士は顔を横に向けるだけで互いに受け手性の表示ができるため, 2者での参与の



図 15 複数の車椅子のフォーメーションを維持した移動
 Fig. 15 Experimental scenes of moving on keeping formation between wheelchairs.

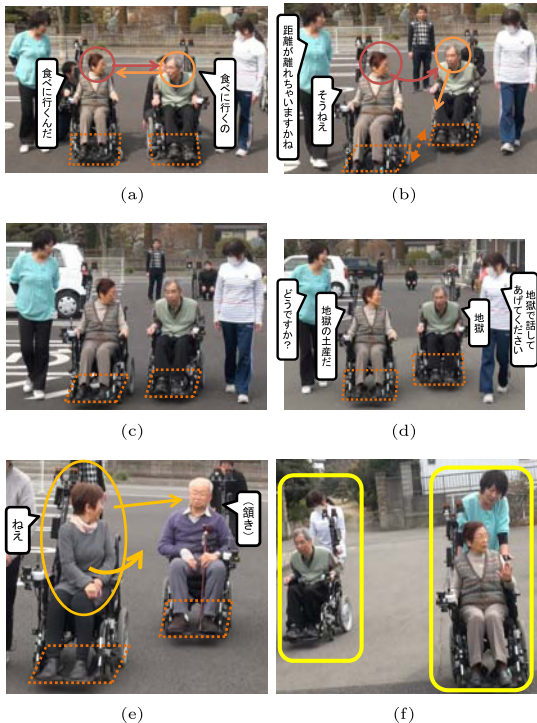


図 16 フォーメーションと会話の関係性の詳細な分析
 Fig. 16 Detailed analysis of relationship between formation and conversation.

枠組みが形成され、会話が行われていた (図 16(a)).
 そして、移動が始まると斜めのフォーメーションに移行するが、その際に車椅子利用者同士の会話がいっ
 たん終了した (図 16(b)). その後、しばらくして、車
 椅子のフォーメーションが安定し、2 台の車椅子が横

並びに近い斜めのフォーメーションになる (図 16(c))
 と、左の介護士を発端に、4 人の発話が連続して起
 きた (図 16(d)). まず、左の介護士の“どうですか?”
 という問いかけに対して、左の車椅子利用者が“(こ
 の経験は良い) 地獄の土産だ”と発話する。このとき、
 視線方向は、右の車椅子利用者に向けられている。そ
 れを受けて右の車椅子利用者が“地獄……”と発話す
 る。そして、これを更に受けて、右の介護士が“地獄
 で話してあげてください”と発話している。このとき、
 両側の介護士は、身体をひねることによって、身体
 の前面の個人の操作領域を車椅子利用者の操作領域と重
 ね合わせて O-Space を作り出している。このように、
 本システムにより、高齢者と介護士をユーザとした場
 合においても、自動的に動く車椅子に乗ったという経
 験を話題とした 4 人全員による会話が行われ、4 者
 による参与の枠組みが形成されることが確認できた。

なお、斜めのフォーメーションに移行した際に、車
 椅子利用者同士の会話がいったん終了しているが、こ
 れは、首のひねりのみでは左の車椅子利用者が右の車
 椅子利用者と視線を合わせることが難しくなり、受け
 手性の表示が行えないために会話終了したと考えら
 れる。2.2 にて述べた観察では、斜めのフォーメ
 ーションでも車椅子利用者同士の会話が行われたが、こ
 れは、被験者が容易に上体をひねることができる学生
 であったためと考えられる。実際に、介護施設での実
 験においても、学生と同様に身体動作に制限のない介
 護士が車椅子に搭乗した場合には、図 16(e) のよう
 に、上体をひねり、斜め後方の車椅子利用者と会話す
 ることができていた。

また、介護士が車椅子を手押しした場合と比較す
 ると、図 16(f) のように同伴者一車椅子のペアで会話
 が分かれてしまい、4 者が一体となって移動や会話を
 する様子は見られなかった。介護士の方からは、本シ
 ステムについて“反対側の人ともおしゃべりできる”
 という意見も得ており、提案するグループコミュニケ
 ーションに配慮したフォーメーションについて、一定
 の評価を得られたと考えられる。

これらのことから、本システムを用いた場合でも 4
 人全員が参与する会話が成立することが確認できた。
 一方で、高齢者が車椅子利用者となった場合には大き
 く上体をひねることが難しいため、周囲の人と視線を
 合わせることがより難しくなることが分かった。車
 椅子利用者の身体的特性に応じたフォーメーションにつ
 いて、今後、更に検討を重ねる必要がある。

5. む す び

一人の同伴者に併走移動するロボット車椅子が提案されている。本論文では、介護現場でのグループ移動の需要から、そのシステムを拡張し、グループコミュニケーションに適したフォーメーションを維持しながら複数同伴者との協調移動を行う複数ロボット車椅子システムを提案した。まず、人間の行動観察から、車椅子で移動中の身体配置が会話の発生に影響することを明らかにした。その結果から、斜め並びや横並びのような適切なフォーメーションを維持して移動するためのロボット車椅子システムを開発した。この実現のため、本論文では、同伴者追跡手法を拡張した複数同伴者追跡システムを開発し、地図情報を利用した車椅子の位置・姿勢推定を行い、それらを統合した複数ロボット車椅子の協調移動手法を提案した。開発したシステムを用いて、介護施設で実験を行い、その有効性を確認した。

今後は、介護施設での評価実験と分析を重ね、車椅子利用者の身体的特性の考慮など、より実際の利用者 に即したシステムの精緻化を進める必要があると考えている。現在は、同伴者をあらかじめ指定する必要があるが、今後は、同伴者のグループを自動判別し、事前指定を不要としたい。また、同伴者の体の向きを利用したより円滑な車椅子の移動制御を検討する予定である。

謝辞 本研究の遂行に際し、貴重なデータをご提供いただきました埼玉大学世古陽子氏、大山貴也氏、白田優氏、また、だんらん上柴の皆様深く感謝致します。本研究の一部は科学技術振興機構さきかけ、A-STEP 及び科研費（24700157, 22243037, 23252001）の助成による。

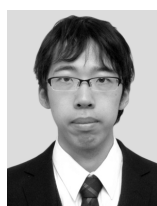
文 献

- [1] R. Blatt, M. Matteucci, S. Ceriani, G. Fontana, B.D. Seno, and D. Migliore, "Brain control of a smart wheelchair," Proc. International Conference on Intelligent Autonomous Systems (IAS10), pp.221–228, July 2008.
- [2] R.A.M. Braga, M. Petry, L.P. Reis, and A.P. Moreira, "IntellWheels: Modular development platform for intelligent wheelchairs," J. Rehabilitation Research and Development, vol.48, no.9, pp.1061–1076, Dec. 2011.
- [3] C. Goodwin, Conversational Organization: Interaction between Speakers and Hearers, Academic Press, Waltham, 1981.
- [4] M. Isard and A. Blake, "CONDENSATION – Conditional density propagation for visual tracking," Int. J. Comput. Vis., vol.29, no.1, pp.5–28, 1998. DOI:10.1023/A:1008078328650
- [5] H. Kawata, T. Ueda, T. Tomizawa, A. Ohya, and S. Yuta, "A method for accurate map construction using time registration from a moving SOKUIKI sensor," J. Advanced Robot, vol.24, no.1–2, pp.69–83, Jan. 2010. DOI:10.1163/016918609X12585536415780
- [6] A. Kendon, Conductin Interaction: Patterns of Behavior in Focused Encounters, Cambridge University Press, Cambridge, 1990.
- [7] 小林貴訓, 高野恵利衣, 金原悠貴, 鈴木亮太, 久野義徳, 小池智哉, 山崎晶子, 山崎敬一, "同伴者の振舞いの観察に基づいて自動併走するロボット車椅子," 情処学論, vol.53, no.7, pp.1687–1697, July 2012.
- [8] O.M. Lazono and K. Otsuka, "Real-time visual tracker by stream processing," J. Signal Processing System, vol.57, no.2, pp.285–295, Nov. 2009. DOI:10.1007/s11265-008-0250-2
- [9] R. Murakami, L.Y.M. Saiki, S. Satake, T. Kanda, and H. Ishiguro, "Destination unknown: Walking side-by-side without knowledge the goal," Proc. ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI2014), pp.471–478, Feb. 2014. DOI:10.1145/2559636.2559665
- [10] K. Okugawa, M. Nakanishi, Y. Mitsukura, and M. Takahashi, "Driving control of a powered wheelchair by voluntary eye blinking and with environment recognition," J. Applied Mechanics and Materials, vols.490–491, pp.1764–1768, 2014. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.490-491.1764
- [11] H. Sacks, E.A. Schegloff, and G. Jefferson, "A simplest systematics for the organization of turn-taking in conversation," in Studies in the Organization of Conversational Intereaction, ed. J. Scheklein, pp.695–735, Academic Press, Waltham, 1974/1978.
- [12] Y. Satoh and K. Sakaue, "An omni-directional stereo vision-based smart wheelchair," J. Image and Video Processing, vol.2007, pp.1–11, July 2007. DOI:10.1155/2007/87646
- [13] 関 啓明, 柴山智志, 神谷好承, 正津正利, "非ホロノミック移動体の形状を考慮した実用的な障害物回避—ポテンシャル法の長方形車体への適用," 精密工学会誌, vol.74, no.8, pp.853–858, Aug. 2008. DOI:10.2493/jjspe.74.853
- [14] R. Suzuki, E. Takano, Y. Kobayashi, Y. Kuno, K. Yamazaki, and A. Yamazaki, "Robotic wheelchair easy to move and communicate with companions," Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2012) Workshop, Aug. 2012.
- [15] E. Takano, Y. Kobayashi, and Y. Kuno, "Multiple robotic wheelchair system based on the observation of circumstance," Proc. Korea-Japan Joint Workshop on Frontiers of Computer Vision (FCV2012), pp.222–

226, Feb. 2012.

- [16] R. Tomari, Y. Kobayashi, and Y. Kuno, "A framework for controlling wheelchair motion by using gaze information," Int. J. Integrated Engineering, vol.5, no.3, pp.40-45, 2014.
- [17] P. Urcola and L. Montano, "Adapting robot team behavior from interaction with a group of people," Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2011), pp.2887-2894, Sept. 2011. DOI:10.1109/IROS.2011.6094961

(平成 26 年 4 月 10 日受付, 8 月 16 日再受付)



鈴木 亮太 (学生員)

2013 年埼玉大学大学院理工学研究科博士前期課程修了。現在, 埼玉大学大学院理工学研究科博士後期課程在学中。



新井 雅也 (学生員)

2012 年東京工科大学メディア学部卒業。現在, 埼玉大学大学院理工学研究科博士前期課程在学中。



佐藤 慶尚 (学生員)

2012 年埼玉大学工学部卒業。現在, 埼玉大学大学院理工学研究科博士前期課程在学中。



山田 大地

2008 年徳島大学大学院先端技術科学教育部博士前期課程修了。2008~2011 年富士ソフト株式会社で, 移動ロボットのソフトウェアモジュールの開発に従事。2014 年筑波大学システム情報工学研究科博士後期課程修了。博士(工学)。現在, 埼玉大学理工学研究科研究員, 移動ロボットの自律ナビゲーションに関する研究に従事。



小林 貴訓 (正員)

2000 年電気通信大学大学院情報システム学研究科修士課程修了。2000~2004 年三菱電機(株)設計システム技術センターにて, ソフトウェア生産技術の開発に従事。2007 年東京大学大学院情報理工学系研究科博士課程修了。博士(情報理工学)。埼玉大学理工学研究科助教を経て, 現在, 埼玉大学理工学研究科准教授。コンピュータビジョン, ヒューマン・コンピュータ・インタラクションに関する研究に従事。情報処理学会, 映像情報メディア学会, IEEE, ACM 各会員。



久野 義徳 (正員)

1977 年東京大学工学部電気工学科卒業。1982 年同大学大学院工学系研究科博士課程修了。同年(株)東芝入社。1987~1988 年カーネギーメロン大学計算機科学科客員研究員。1993 年大阪大学工学部電子制御機械工学科助教授。2000 年より埼玉大学工学部情報システム工学科教授。現在, 埼玉大学大学院理工学研究科戦略的研究部門/数理電子情報部門教授。コンピュータビジョン, 知能ロボット, ヒューマンインタフェースの研究に従事。情報処理学会, 日本ロボット学会, 計測自動制御学会, 人工知能学会, 電気学会, 日本機械学会, 画像電子学会, IEEE, ACM 各会員。



宮澤 怜

2014 年埼玉大学教養学部現代社会専修社会学専攻卒業。現在, かどや製油(株)勤務。



福島三穂子

MA, Ph.D. を英国エセックス大学社会学部で取得。埼玉大学ヒューマンロボットインタラクションセンター研究員を経て, 2014 年より宮崎大学工学部国際教育センター助教。会話分析やエスノメソドロジーを使って, 日本語での日常会話(ユーモアやジェンダー)を分析することで, 日本の社会・文化を紐解くことに興味をもつ。



山崎 敬一

埼玉大学教養学部教授。専門は社会学、エスノメソドロジー、会話分析、CSCW、CHI、ロボットヒューマンインタラクション。主な著書として、『モバイルコミュニケーション』（編著、大修館、2006年）、『社会理論としてのエスノメソドロジー』（ハーベスト社、2004年）、『実践エスノメソドロジー入門』（編著、有斐閣、2004年）。ACM 会員。



山崎 晶子

東京都立大学大学院修士課程修了。2000年より公立はこだて未来大学情報システム科学部講師、2006年助教授、2007年准教授、2008年4月より東京工科大学メディア学部教授。専門は社会学、相互行為分析、ヒューマンインタラクション、ヒューマンコンピュータインタラクション。ACM 会員。