

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

小林 貴訓^{1,2,a)} 高野 恵利衣¹ 金原 悠貴¹ 鈴木 亮太¹
久野 義徳¹ 小池 智哉¹ 山崎 晶子³ 山崎 敬一¹

受付日 2011年10月24日, 採録日 2012年4月2日

概要: 高齢化社会の進行にともない, 少ない人材で効率的な介護が行えるように, ある程度の自律移動を行う知的車椅子の開発が求められている. 本稿では, 同伴者と車椅子利用者が並んで移動できることがコミュニケーションの観点から重要であると考え, 同伴者とスムーズに併進できるロボット車椅子を提案する. 車椅子が同伴者と併進する状況では, 同伴者の車椅子側への進路変更を円滑に行うために, 同伴者の進みたい方向をすみやかに察知して車椅子を制御する必要がある. そこで, 本稿では, レーザ測域センサを用いて同伴者の行動を計測する手法を新たに開発し, 計測した同伴者の身体の向きの情報を車椅子の制御に利用することで, 同伴者とスムーズに併進できるロボット車椅子を開発した. 実際の高齢者施設での実験とアンケート調査により, 本システムの有用性を確認した.

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, 人物追跡, レーザ測域センサ

Robotic Wheelchair Moving Along Companions Based on Observations of Bodily Behaviors

YOSHINORI KOBAYASHI^{1,2,a)} ERII TAKANO¹ YUKI KINPARA¹ RYOTA SUZUKI¹
YOSHINORI KUNO¹ TOMOYA KOIKE¹ AKIKO YAMAZAKI³ KEIICHI YAMAZAKI¹

Received: October 24, 2011, Accepted: April 2, 2012

Abstract: Recently, several robotic wheelchairs have been proposed that employ user-friendly interfaces or autonomous functions. Although it is desirable for users to operate wheelchairs on their own, they are often accompanied by a companion. In designing wheelchairs, therefore, it is also important to reduce the companion load. In this paper we propose a new robotic wheelchair that can move with a companion side by side to support their communication. In contrast to a front-behind position, in a side-by-side position it is more difficult for wheelchairs to adjust its position when the companion makes a turn. To cope with this problem we present a new people tracking technique using a laser range sensor to observe the companion's bodily behaviors. A particle filter is employed to track the companion's position and orientation of body based on the range data. We confirm that our robotic wheelchair can move smoothly with a companion side by side by using a body orientation of the companion. We conducted the experiments at an actual elderly care facilities to confirm the effectiveness of our robotic wheelchair.

Keywords: robotic wheelchair, human robot interaction, human tracking, laser range sensor

¹ 埼玉大学
Saitama University, Saitama 338-8570, Japan

² 科学技術振興機構さきがけ
JST, PRESTO: Precursory Research for Embryonic Science and Technology, Kawaguchi, Saitama 332-0012, Japan

³ 東京工科大学
Tokyo University of Technology, Hachioji, Tokyo 192-0982, Japan

1. はじめに

近年の日本社会の少子高齢化の進行にともない, ヒューマンケアに対する工学的支援への要求が高まっている. 本稿では, 高齢者ケアを支援するロボット車椅子とその高齢

a) yosinori@cv.ics.saitama-u.ac.jp

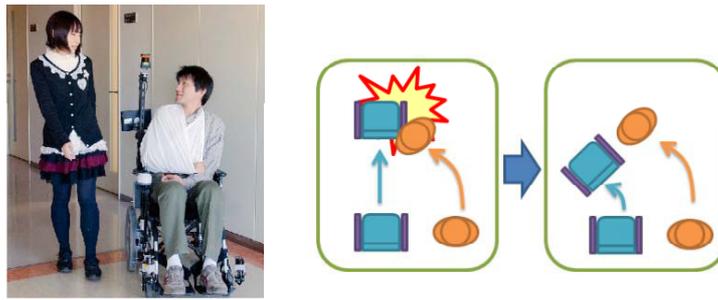


図 1 (左) 併進する車椅子. (右) 車椅子側への進路変更時の問題

Fig. 1 (Left) Wheelchair moving along a companion. (Right) Difficulty when the companion makes a turn to the direction of the wheelchair.

者施設での実証実験について述べる。車椅子需要の増加にともない、知的車椅子やロボット車椅子の研究が行われている。しかし、これらの多くは、障害物を避けながら目的地まで移動する自動走行機能や、車椅子の制御インタフェースの改善など、車椅子利用者に目が向けられた研究開発であった [1], [6], [7], [8], [10]。たとえば, Sato ら [10] は, 全方位ステレオカメラを開発し, 知的車椅子に導入することで, 前方の段差を検出して回避したり, モノを取ろうとする利用者の動きを察知して車椅子がこの動作を支援したりするなどの機能を提案している。

もちろん, 車椅子利用者が 1 人でどこへでも気軽に出かけてゆける社会が実現すれば理想的であるが, 実際には, 車椅子利用者は高齢者や歩行以外にも障害を持っている方が多く, 家族や友人, 同伴者などと一緒に出かけることが多い。また, 車椅子利用者やその関係者に話をうかがうと, そのような場合, 車椅子は同伴者が操作する場合がほとんどであるという。近年では, 老老介護が社会的な問題となっていることから, このような同伴者の負担を軽減することにも目を向ける必要があると考えられる。たとえば, Iwase ら [4] は, このような観点から, 同伴者に自動追従する車椅子を提案している。しかし, 彼らの手法では, 同伴者の位置情報に基づいて車椅子が自動的に追従するため, 同伴者と車椅子利用者の会話など, コミュニケーションへの配慮はなされていなかった。

社会学においては, すでに実際の車椅子利用者と同伴者のコミュニケーションのビデオを用いた詳細な分析がされている [12]。こうした分析の結果によれば, たとえば, 車椅子を押す同伴者が後ろにいる状況において, 車椅子利用者が買い物をするときには, 店員は車椅子利用者ではなく, 後ろにいる同伴者に視線を向け, 車椅子利用者から切り離れたコミュニケーションがなされてしまう。また, 同伴者が車椅子利用者とコミュニケーションを行う場合, 押しながら後ろからのぞき込む, または車椅子をいったん止めて横に立つなど, 身体配置を変更する。一方, 車椅子利用者が自ら車椅子を操作する, または後ろに別の補助者がいる場合には, 同伴者は車椅子利用者の横に立ち, 視界を共

有し, お互いに会話をするときには, 視線を向け合う。このように, 車椅子利用者のコミュニケーションを可能にする要件の 1 つは, 車椅子利用者と同伴者が, お互いに視線を向け合って会話をするのできる身体配置であろう。

これらのことから, 本稿では, 車椅子利用者と行動をともにする同伴者の横でスムーズに自動併走するロボット車椅子を提案する。このようなロボット車椅子は, 同伴者と車椅子利用者のコミュニケーションを促進するとともに, それによって周囲の人から介護する人と介護される人ではなく, 互いに独立してコミュニケーションをとっている者同士に見えるのではないかと考えたからである (図 1(左))。さらに, それによって, 先に述べた, 買い物をする場面でも店員が同伴者とだけコミュニケーションをすることが少なくなるかもしれないと考えたからである。

このように, 車椅子が同伴者と併進する状況では, 同伴者の進みたい方向をすみやかに察知して車椅子を制御する必要がある。特に, 同伴者と車椅子が横に並んでいる場合, 同伴者は車椅子が邪魔になって車椅子の方向に移動できない (図 1(右)) ので, どのようにして同伴者の行きたい方向を察知するかが問題となる。これに対して, 本稿では, レーザ測域センサを用いて, 同伴者の身体の位置と向きを追跡する手法を新たに開発し, 同伴者が進みたい方向を予測して車椅子を制御することで, 車椅子が同伴者と横に並んだまま, 進路変更を可能とするロボット車椅子を提案する。

レーザ測域センサを用いて人物を追跡する手法は, いくつか提案されている。たとえば, レーザ測域センサを壁際のユーザの足もと付近の高さに設置し, 両足の動きを計測することで, 人物の位置を追跡するものがある [2]。この手法は, レーザ測域センサを足もとに置いたため人同士の遮蔽が少なく, 駅のコンコースなど, 比較的広い空間で多数の人物の追跡を行うには適しているが, 人物の行動を詳細に計測することに主眼を置いたものではない。Glas ら [3] は, レーザ測域センサを人物の腰あたりの高さに設置し, 適応的人物形状モデルとパーティクルフィルタを用いることで, 人物の身体の動きを比較的詳細に追跡している。し

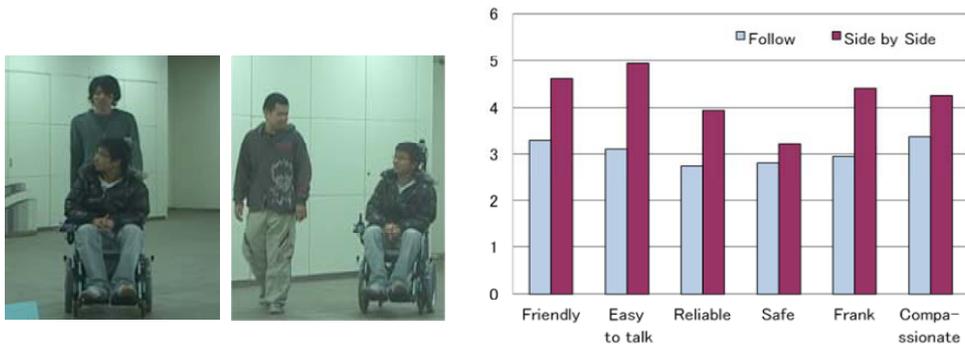


図 2 (左, 中) アンケート時のビデオ映像の例と, (右) アンケート結果
 Fig. 2 Questionnaire for robotic wheelchair moving along companion.



図 3 車椅子利用者を案内する同伴者の動きの観察
 Fig. 3 Observation of companion's behaviors when she guide a wheelchair user.

かし、彼らの手法は、ユーザを取り囲むように配置した、環境に固定した複数のレーザ測域センサを用いて、人物の形状をほぼ欠損なく全周計測したデータに基づいている。これに対して、本手法ではパーティクルフィルタ [5] を用いて、肩付近の高さに設置したレーザ測域センサから得られる人体の輪郭形状の一部から、追跡対象人物の体の位置と向きを頑健かつ高精度に追跡する。

本稿では、次章で、本提案のコンセプトの確認と、同伴者のどのような動きを計測すれば、進行方向を予測できるかという知見を得るために行った予備実験について述べる。そして、3章では同伴者の行動の計測手法について述べ、4章で開発したロボット車椅子システムについて述べる。5章では開発した車椅子による実験について述べ、6章では高齢者施設での実証実験について述べる。最後に7章でまとめる。

2. 予備実験

2.1 同伴者と車椅子の位置関係に関するアンケート

本稿で提案する同伴者と併進する車椅子のコンセプトを確認するために、第3者的視点からの同伴者の立ち位置に関するアンケートを行った。大学生 103 人に、同伴者が車椅子の背後でついてゆく場合のビデオ (図 2(左)) と本稿で提案するように同伴者と車椅子が併進する場合 (図 2(中)) とを見てもらい、“親近感がある”、“話しやすそう”などの各項目で 1~6 までの 6 段階 (非常にそう思う場合は 6, まったくそう思わない場合は 1) で評価してもらった。その結果、すべての項目で、併進する場合が有意に高いスコア ($p < 0.05$) となった (図 2)。また、「どちらが好きか」

という直接的な質問では、103 人中 86 人が併進する場合を選択した。これらのことから、併進する車椅子は周囲の人に好ましい印象を与え、受け入れられる可能性があることが分かった。

2.2 同伴者と車椅子の位置関係と同伴者の振舞いに関する観察実験

同伴者が車椅子利用者と並んで会話をしながら出歩く場合、同伴者はどのように振る舞うのだろうか。ここでは、同伴者が車椅子利用者をリードする状況を想定し、同伴者が車椅子利用者に大学構内を案内する様子をビデオ撮影し、同伴者がどのような動きをするかを調べた。この実験では、車椅子は、会話に参加しない第三者に手で押してもらい、押している人の判断で、同伴者との適切な位置関係を維持するようにした。すると、同伴者が案内している間は、車椅子は同伴者の横側の少し後ろで追従するように位置どられ、同伴者は、車椅子利用者の方を、たびたび振り向きながら、大学構内の建物を指差しなどを交えながら、1つ1つ案内していた。また、同伴者が進路を変えようとするときは、まず、これから向かう進行方向を見る視線の動きがあって、続いて肩、腰の回転が起き、最後に足を踏み出す位置が徐々に変化していることが分かった (図 3)。そこで、車椅子の制御方針として、直進している間は、同伴者の身体の横位置で追従し、進路変更する場合には、同伴者の身体の向きを手がかりとして、同伴者の進行方向を推定し、進行方向を妨げないように車椅子を制御することとした。

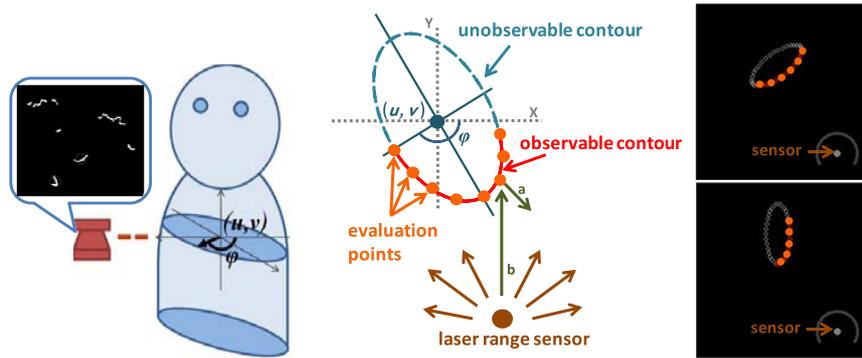


図 4 (左) 身体モデル. (右) センサとの位置関係に基づく追跡対象モデル
 Fig. 4 (Left) Human model for tracking. (Right) Observation model of body outline on laser images.

3. レーザ測域センサによる同伴者の追跡

本章では、レーザ測域センサを用いた人物の身体の位置と向きの追跡手法について述べる。追跡には運動モデルにランダムウォークを採用したパーティクルフィルタ [5] を用いる。紙面の都合上、パーティクルフィルタの枠組みについては、文献 [5] に譲り、ここでは、追跡対象である同伴者のモデル化と尤度評価のための観測モデルについて次に述べる。

3.1 同伴者のモデル化

同伴者の肩の形状が計測できるように、レーザ測域センサ（北陽電機製 UTM-30LX）を同伴者の肩付近の高さに水平に設置し、得られた距離データを 1 cm を 1 ピクセルとして画像上にマップする（これを本稿ではレーザ画像と呼ぶ）。このようにすると、図 4(左) に示すように同伴者の肩の輪郭の一部が観察される。このとき、同伴者の肩の輪郭を楕円形と仮定すると、観察される肩の輪郭部分は、レーザ測域センサとの位置関係により向きが変化する楕円形の一部として図 4(右) に示すように観察できると考えられる。そこで、本手法では、同伴者の身体の位置と向きを追跡するために、同伴者の肩あたりの高さを水平に切断したときに輪郭形状として予測される一定の大きさの楕円形を追跡対象のモデルとして用いる。

床面と平行に同伴者の肩の高さに XY 平面をとり、床面から垂直上方向を Z 軸とすると、追跡対象は楕円の中心位置 $[u, v]$ とその Z 軸回りの回転 ϕ で表すことができる（図 4(左)）。図 4(右) に示した楕円輪郭上の点は、後で述べる尤度評価の際に利用するモデルの楕円輪郭を等角度で分割した評価点のうち観測可能なものを表している。センサと反対側の楕円輪郭部分はセンサから観察できないため、観察できない評価点は尤度評価に用いない。観察の可否は、レーザ測域センサ位置と各評価点を結んだベクトル（たとえば図 4(右) の b）と、楕円輪郭を等分割した各点の

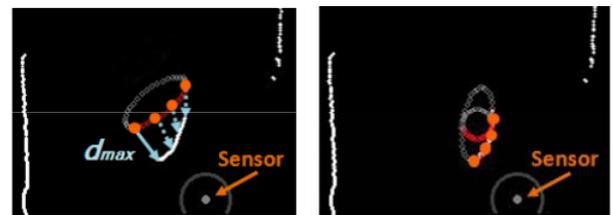


図 5 レーザ画像による尤度評価. (左) 最大距離に基づく評価. (右) 仮説とレーザ画像が完全に一致した例

Fig. 5 Likelihood evaluation by laser image. (Left) Evaluation based on maximum distance. (Right) Complete matching (minimum distance) case.

法線ベクトル（たとえば図 4(右) の a）の内積から判断する。内積が正であれば、観測不可能な点であり、負であれば、観測可能な点となる。

このように追跡対象をモデル化し、パーティクルフィルタにより、同伴者の上半身の位置と向き $\{u, v, \phi\}$ を追跡する。

3.2 観測モデル

観測による尤度評価は、満上ら [9] の評価式を参考に、各評価点と直近のレーザ測域センサによる観測データとの距離 d_n （ピクセル）のうち、最大のものをを用いて、以下の式 (1) で評価する。

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

ここで、 w_t^i は、時刻 t の i 番目のパーティクルのレーザ画像に基づいた重み（尤度スコア）であり、 d_{\max} は各評価点と直近のレーザ測域センサによる観測データとの最大距離を表す。なお、 σ_d は d_n の分散に基づいて決めるパラメータである。

評価プロセスの概念を図 5(左) に示す。各パーティクルの重みは図 5(左) に示すようにモデルの楕円輪郭上の観測可能な各評価点から直近のレーザ測域センサによる観測データの距離を計測し、その最大距離 d_{\max} を式 (1)

に代入して算出する．モデルとレーザ画像が完全に一致した場合に最大距離 d_{max} が 0 となり，重みが最大となる (図 5 (右))．このようにして評価した各パーティクルの重みから，期待値を求めることで，その時刻での同伴者の位置と向きとする．

実装では，各時刻で最初に 1 度だけ，レーザ画像を 2 値化し，距離画像変換を施しておくことで，モデルの楕円輪郭上の観測可能な各評価点における距離 d_n は，画素値を参照するだけで得ることができる．このように，レーザ測域センサから得られる距離データを画像として扱うことで，処理の容易さとそれともなう高速処理を実現している．

なお，本システムでは，同伴者の検出は行っておらず，追跡対象である同伴者の同定にはユーザによる入力を用いている．同伴者の同定のためのシステムの操作に関しては，4.4 節で述べる．

4. ロボット車椅子システム

本章では，開発したロボット車椅子システムについて述べる．

4.1 システム概観

ロボット車椅子の外観を図 6 に示す．ベースとなる電動車椅子には，ジョイスティック (操作レバー) で操作できるヤマハ製タウニジョイ X を用いた．前章で述べたように，同伴者を追跡するため，車椅子の背の支柱を延長した上部にレーザ測域センサ (北陽電機製 UTM-30LX) を取り付けている．また，支柱の途中には追跡状況の表示ためタッチパネルディスプレイを取り付けている．下方には，レーザ測域センサ (北陽電機製 URG-04LX) を 3 つ設置しており，車椅子周辺の障害物の検知に用いている．ノート PC を車椅子後ろのポケットに格納し，レーザ測域センサを USB で接続している．また，ジョイスティックはレバー部分を換装し，タッチセンサを組み込んでいる．

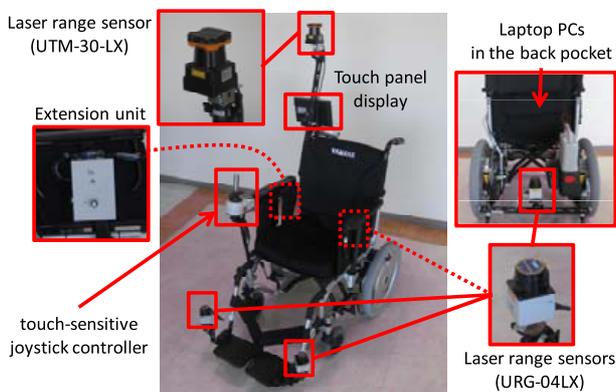


図 6 ロボット車椅子

Fig. 6 Overview of our robotic wheelchair.

4.2 車椅子の制御

車椅子の制御は表 1 に示すようにジョイスティックコントローラが出力する 2 系統の電圧を上書きすることで行う．たとえば，前後移動の電圧を 4.9V とすれば車椅子は最大速度で前進し，左右回転の電圧を 0.1V とすれば，車椅子は最大速度で右旋回する．電圧の制御は，ジョイスティックコントローラの出力電圧を上書きする拡張ユニットを取り付け，拡張ユニットの出力電圧をノート PC からマイコン (ネプラス製 USB Computer Solid I/O) を介してシリアル通信で操作する．本システムではこのようにジョイスティック操作信号を上書きしていることから，車椅子の制御において，ジョイスティックによる操作と同様の制約を受け，通常，電動車椅子をジョイスティックで操作する場合以上の加速度などの急激な変動は起きない．また，拡張ユニットの出力電圧は 0.1V-4.9V の範囲に収めるようにマイコンプログラム上で抑制している．

4.3 同伴者への追従

車椅子は通常，同伴者と横に並んで併進する．このとき，車椅子の速度と方向は，同伴者の観察結果に基づいて制御する．車椅子は，レーザ測域センサ位置を原点に X 軸を左右方向に，Y 軸を前後方向にとり，車椅子から見た同伴者の相対的な予定位置 (u_0, v_0) を維持するように移動する (図 7 左上)．車椅子の速度は，同伴者の相対的な位置と予定位置との差分 $(\Delta u, \Delta v)$ により決定する (図 7 左下)．具体的には以下の式 (2) のように，時刻 t における電動車椅子の前後移動制御電圧 $Vol_{v,t}$ を決定する．

$$\begin{cases} Vol_{v,t} = Vol_{v,t-1} + \alpha_v \cdot \Delta v & \text{if } |\Delta v| > \beta_v \\ Vol_{v,t} = Vol_{v,t-1} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

ここで， α_v は同伴者の差分位置を前後移動制御電圧に変換する係数であり， β_v は予定位置から一定以上離れるまでは速度変化を起こさないためのしきい値である．予定位置 $(|\Delta v| < \beta_v)$ にいる介護者の操作によって停止状態から制御を開始するため，初期電圧 $Vol_{v,0}$ は停止信号電圧である 2.5V とした．すなわち，Y 軸方向差分 (Δv) が正に大きければ加速し，負に大きければ減速する．差分が小さければ，これまでの速度を維持するように車椅子は移動する．

車椅子は非ホロノミック移動体であるため，左右方向への移動は旋回と前後移動を組み合わせる必要がある．本稿では，同伴者の横位置で車椅子を追従させるため，図 7 右のように，同伴者の位置によって制御電圧決定方法を切り替える平易な方法をとった．たとえば，図 7 右②⑦の領

表 1 車椅子の制御信号

Table 1 Wheelchair control signal.

電圧	0.1-2.1[v]	2.1-2.9[v]	2.9-4.9[v]
前後移動	後進	停止	前進
左右旋回	右旋回	停止	左旋回

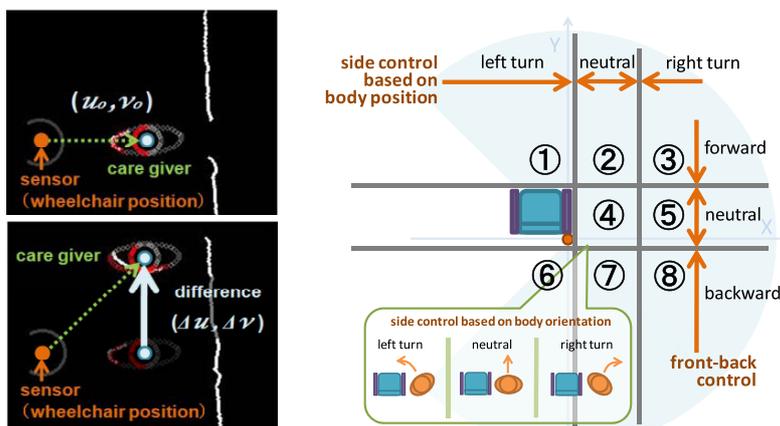


図 7 同伴者の相対位置による制御. (左上) 同伴者の予定位置. (左下) 予定位置との差分. (右) 同伴者の位置による制御の切替え

Fig. 7 Controlling wheelchair based on the difference between relative positions in present and previous frames.

域に同伴者がいる場合には式 (2) に基づく加減速を行えばよいが、図 7 右①③⑥⑧の領域に同伴者がいる場合には、式 (2) に基づく加減速と同時に、以下の式 (3) のように同伴者の位置に基づく旋回を行う。

$$\begin{cases} Vol_{r,t} = Vol_{r,0} + \alpha_h \cdot (\arctan(\Delta v / \Delta u)) & \text{if } \Delta v > 0 \\ Vol_{r,t} = Vol_{r,0} - \alpha_h \cdot (\arctan(\Delta v / \Delta u)) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 α_h は同伴者のいる方向に基づいて左右旋回制御電圧に変換する係数である。前後移動の場合と同様に、初期電圧 $Vol_{r,0}$ は停止信号電圧である 2.5 V とした。

同伴者が図 7 右④の領域にいる場合、移動方向は同伴者の身体の向きに基づいて制御する。同伴者が身体の向きを変えた場合、車椅子は同伴者と同じ方向を向くように自身の向きを制御する。具体的には以下の式 (3) のように、時刻 t の電動車椅子の左右旋回の制御電圧 $Vol_{r,t}$ を決定する。

$$\begin{cases} Vol_{r,t} = Vol_{r,0} + \alpha_r \cdot (\phi_t - \phi_0) & \text{if } |\phi_t - \phi_0| > \beta_r \\ Vol_{r,t} = Vol_{r,0} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 ϕ_0 は車椅子前方方向の角度であり、 ϕ_t は同伴者の身体の向きである。 α_r は同伴者の身体の向きと車椅子の前方方向の差分を出力電圧に変換する係数であり、 β_r は同伴者の予定角度から一定以上離れるまでは旋回を起こさないためのしきい値である。このとき、車椅子は同伴者の進行を妨げないように減速または後進しながら、同伴者と同じ方向を向く。また、同伴者が車椅子と逆の方向を向いた場合、車椅子は同伴者に追いつくために、加速しながら同伴者と同じ方向を向くように移動する。

4.4 車椅子システムの操作

車椅子システムの操作の流れを図 8 に示す。同伴者の操

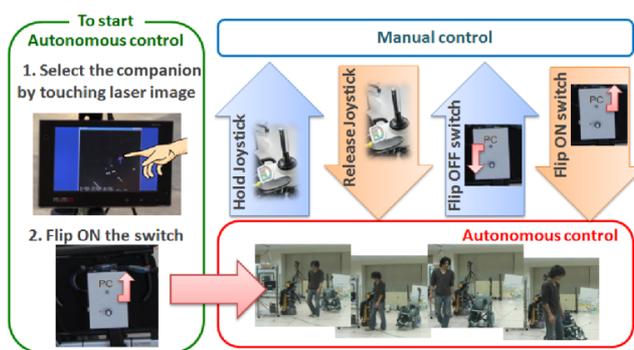


図 8 車椅子の操作の流れ

Fig. 8 How to use the robotic wheelchair.

作は、まずタッチパネル上に表示されているレーザ画像から自分の位置をタップすることによって、システムに追従対象人物を指示する。システムは、タップされた位置 (u, v) に同伴者がいるものとして、パーティクルフィルタを初期化し、追跡を開始する。このとき、同伴者の身体の向き ϕ は車椅子に正対している方向を仮定する。同伴者は、自身が追跡されていることを、肩を少し動かして確認した後、車椅子の正面と同じ方向を向いてから、スイッチを操作して車椅子を自動制御に切り替える。すると、車椅子が同伴者に自動併走する。自動併走している間は、車椅子利用者が操作レバー（ジョイスティック）に触れれば、タッチセンサが作動し、自動制御が OFF となる。また、自動併走を終了したいときは、自動制御のスイッチを OFF にする。自動制御が OFF の状態では、本車椅子は、市販の電動車椅子とまったく同等となり、操作をジョイスティックで行うことができる。

4.5 障害物の回避

本稿で提案する車椅子は同伴者と自動併走することの特徴とするが、たとえば、障害物が車椅子の進行方向に存在

する場合は、障害物を回避することを優先するべきである。また、廊下で前方からの対向人物がいる場面では同伴者と併進したままではすれ違いうことができず、通行の妨げになってしまう。そのため、併進移動中に車椅子の進行方向に障害物が存在する場合、その障害物を回避する必要がある。そこで、本システムでは、車椅子の下方に設置した3台のレーザ測域センサを利用して、車椅子の前方、すなわち進行方向の一定距離内に障害物がある場合には、同伴者と併進するのではなく、同伴者の後ろでついていくように制御を切り替えることで障害物を回避する。また、障害物の回避時には、ポテンシャルフィールド法により車椅子を制御し、障害物に接触しないような局所的な経路計画を立てている。車椅子へのポテンシャルフィールド法の適用には、Sekiらの手法[11]を用いた。

5. 実験

5.1 同伴者の追跡

同伴者の追跡性能を評価するために、車椅子ではなく、130 cmの高さに固定したカメラマウントにレーザ測域センサを取り付け、室内の平らな床面にあらかじめテープを貼って指示した経路上を身長165 cmの30代男性1名が歩行した際の軌跡を計測した。この人物はシステムを熟知しているが、普段の歩行と同様に、指示された直線の上をおよそ8.5 m、約25秒かけて歩行した。経路はセンサに対して斜めに設定されており、5回の進路変更を含んでいる。

追跡アルゴリズムとして用いているパーティクルフィルタは、パラメータによって追跡特性が変化するが、本実験では、人が早足で歩いた場合でも追跡が失敗しないことを条件に、なるべくユーザの位置と身体の向きが精度良く追跡できることを目標にパラメータの調整を行った。運動モデルにはランダムウォークを用い、各タイムステップ間の変位の標準偏差は5 cmとした。また、この目標性能を達成するため、実験による試行により評価パラメータ σ_d の値を5、パーティクル数を200と定めた。図9(左)に実験結果を示す。人物が身体の向きを変えながら移動した場合でも、精度良く追跡できていることが分かる。XY平面上で

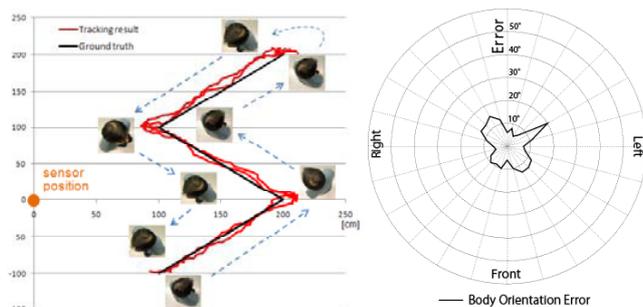


図9 センサを固定した場合の人物追跡実験

Fig. 9 Experiments to confirm tracking performance.

の追跡軌跡の平均誤差は、5.8 cmであった。また、この複合センサの正面1 m程度離れた場所で、身体を360°回転させた場合の身体の向きを計測性能を評価した。天井に取り付けたカメラ映像から手作業で抽出した身体の向きを正解として、追跡結果との乖離を求めた。その結果を図9(右)に示す。身体の向きの平均誤差は5.2度であり高精度に身体の向きを計測できている。処理速度に関しては、レーザ測域センサからの30 fpsの入力に対して、CPU Core i-5 2.4 GHz、メモリ2 GBのノートPCで、およそ25 fpsで追跡処理が可能であった。

5.2 同伴者と車椅子の併進

前節と同じ人物が、同伴者として本車椅子システムを用い、平らな床の室内で車椅子と併進した際の車椅子と人物の軌跡を図10に示す。レーザ測域センサは、車椅子の背の支柱を延長し、床面から130 cmの高さに水平に設置した。車椅子の制御パラメータ α_v は $|\Delta v| > 120$ cmのときに前後最高速となるように、 α_h は $|\arctan(\Delta v/\Delta u)| > 90^\circ$ のときに左右旋回が最高速となるように、 α_r は $|\phi_0 - \phi_t| > 90^\circ$ のときに左右旋回が最高速となるように調整した。また、 $\beta_v = 30$ cm、 $\beta_r = 10^\circ$ とした。図中の写真は点線で対応づけられた同時刻での同伴者と車椅子の位置と向きを示している。時刻#1では、スタート直後のため、車椅子は少し遅れて同伴者に追従しているが、#2では、時間の経過とともに介護者に追いついてきている。#3では、同伴者が身体を車椅子の方向へ向けており、車椅子も同伴者と同じ方向を向いている。さらに、#4では車椅子が減速し、同伴者が車椅子側に進路変更するスペースを確保している様子が分かる。その後、#5で同伴者は身体の向きを戻したので、車椅子も同じ方向を向いて加速し、#6で遅れを取り戻している。

本システムのプロトタイプシステムでは、同伴者の位置

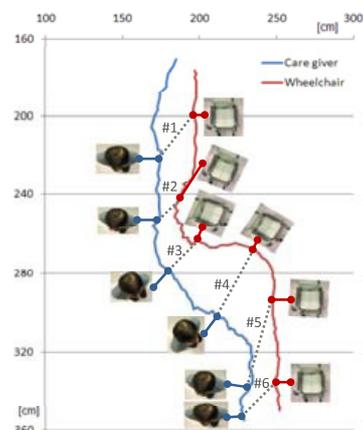


図10 車椅子側への進路変更

Fig. 10 Trajectories of companion and wheelchair when the companion turning toward the direction of the wheelchair.

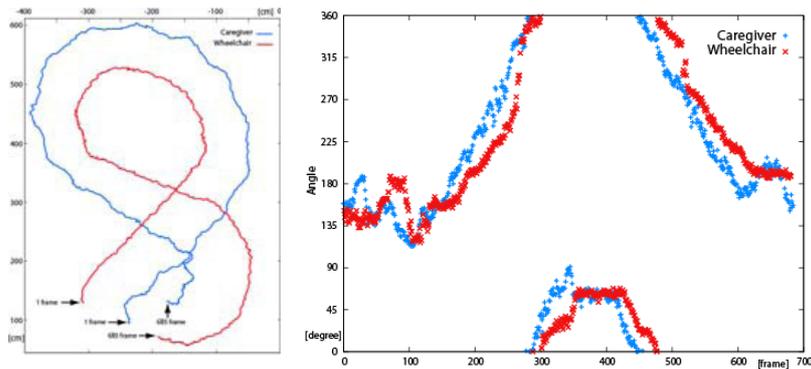


図 11 同伴者と併進する車椅子の軌跡. (左) 車椅子と同伴者の軌跡. (右) 同伴者と車椅子の向きの変化

Fig. 11 Trajectories and changes in orientation of companion and wheelchair while they are moving side by side.

情報のみを利用し、身体的位置が車椅子に近づいたら車椅子側へ曲がり、離れたら車椅子と反対側に曲がるというように、位置情報のみを用いて車椅子を制御することを試みた。しかし、このような方法では、同伴者が車椅子側へ進みたくても車椅子との間のスペースが少ないため、車椅子側への進路変更がスムーズにできなかった。これに対して、本システムでは、身体的位置だけでなく、向きも用いて車椅子を制御するため、車椅子側への進路変更に関しても円滑に行うことができている。

また、より複雑な移動として、同じ人物が、同じ室内の 6m × 4m の範囲で、約 30 秒かけて、8 の字を書くように移動した場合の同伴者と車椅子の軌跡とそれぞれの姿勢を計測した結果を図 11 に示す。複雑な動きをした場合でも、図 11(左) に示されているように、スムーズに同伴者の左側を併進している様子が分かる。向きに関しても、図 11(右) から分かるように、同伴者の身体の向きに少し遅れて車椅子が反応しているが、同伴者と車椅子の向きのグラフが非常に似ていることから、車椅子の向きが精度良く同伴者の身体の向きに追従できていることが分かる。

図 10 および、図 11 より、車椅子側への進路変更を含め、本車椅子システムが同伴者にスムーズに併進できていることが分かる。

6. 高齢者施設での実証実験

6.1 開発したロボット車椅子の体験とビデオによる観察

開発した車椅子を、日常的に車椅子を利用することの多い、奈良県の高齢者施設に持ち込み、16 名の職員に車椅子を、同伴者および車椅子利用者それぞれの役割で体験してもらい、意見を聴取した。被験者となってもらったのは、介護士、看護師、事務員、栄養士など、様々な立場で高齢者と関わる職員である。被験者には、食堂を出発して、2 つの曲がり角を含む幅 4m の廊下を通して、食堂にまた戻ってくるという約 50m のコースで車椅子を体験してもらっ



図 12 高齢者施設で実験の様子

Fig. 12 Experiments at an elderly day-care center.

た。このコースでは、1 周するのに約 90 秒かかった。実験の様子を図 12 に示す。また、図 13 は、実証実験での同伴者と車椅子利用者のコミュニケーションの実例である。

会話内容を示すトランスクリプトの表記法は、文献 [13] に準拠した。「。」は下降調子のイントネーションの部分を示し、「><」で挟まれた部分は発話速度が速まっていることを示す。「[]」は、2 名以上の参加者の発話の重なりが始まる時点を示し、「(7.0)」は 0.1 秒単位で数えた沈黙の長さを示している。3 行目の 7 秒間の沈黙の後、同伴者 (M1) は視線を車椅子利用者に向けて、「大丈夫ですか」と声を掛ける。車椅子利用者 (F1) は、「はい」と答える。同伴者が車椅子利用者に伴同して移動しながら視線を向けることができることで、同伴者は車椅子利用者へ声を掛けることができ、車椅子利用者も同伴者に対して応答することができている。このように、移動しながら同伴者が視線を車椅子利用者に向けてコミュニケーションをとっている場面がしばしば見られた。なお、後ろから車椅子を押す場合には、後ろから車椅子利用者に見えるように視線を向けることは難しく、同伴者が車椅子の横に位置取りすることで互いのコミュニケーションが支援されていることが分かる。

しかし、ビデオ分析から同伴者の行動が、自然な振舞いとは異なる点も見られた。具体的には、同伴者は、角を曲がる際に、右肩を引いて体が開いた状態から、右肩をあま

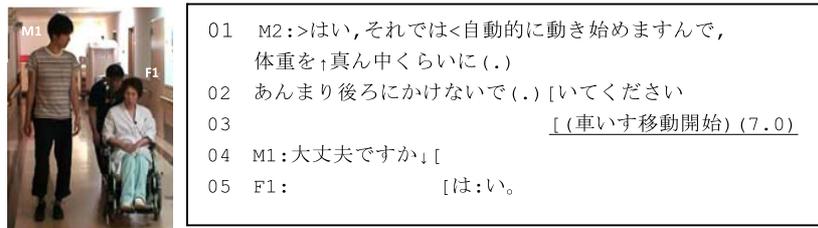


図 13 実験中の車椅子利用者と同僚者の会話の例
Fig. 13 Example of conversation in the experiment.

表 2 アンケート内容

Table 2 Questions in the questionnaire.

Q1	車椅子利用者と一緒に出掛ける際,どの程度の割合で同伴者が付添いますか?
Q2	同伴者が付き添う場合,車椅子の操作を同伴者が行う割合はどの程度ですか?
Q3	下図(図 14)に示す車椅子と同伴者の位置関係で好ましいものはどれですか?
Q4	実験の間,同伴者または車椅子利用者と会話をしましたか?
Q5	車椅子を体験している間,相手と話がしやすかったですか?
Q6	車椅子はあなたの思ったように走行しましたか?
Q7	この車椅子は普段の仕事に役に立つと思いますか?
Q8	このような車椅子があったら使いたいですか?

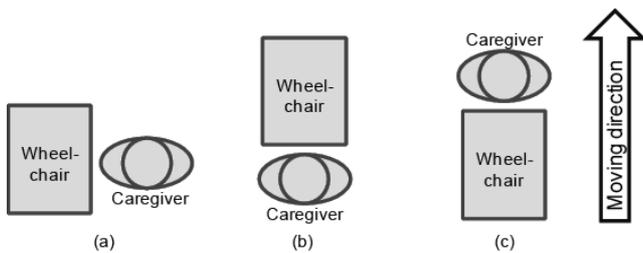


図 14 同伴者と車椅子の位置関係

Fig. 14 Relative positions between the companion and the wheelchair.

り動かさずに,角に対して垂直に曲がろうとしていた.腕に関しては,体の両脇からあまり離れることはなく,歩くときに自然に起こる「腕を振る」というような動きが少なかった.以上のことから,肩の動きをセンシングする際には,角を曲がる際の動きや,歩行の際に腕を振るといった人間の自然な振舞いを考慮する必要があることも分かった.

6.2 ロボット車椅子に関するアンケート評価

被験者には,車椅子の体験後,アンケートに答えてもらった.アンケート内容を表 2 および図 14 に示す.

Q1, Q2 の質問には, 0%, 10%, 20%, ... 100%の割合で答えてもらった. その結果 Q1 および Q2 ともに回答の平均は 80%以上であった. このことから, 少なくとも高齢者施設においては, 車椅子利用者が出かける際は, ほとんどの場合で同伴者が付き添い, 車椅子の操作も同伴者が行うことが分かった. さらに, Q3 では, 16 名中 13 名が (a) を選び, 2 名が (b) を選び, 1 名が未回答であった. (c) を

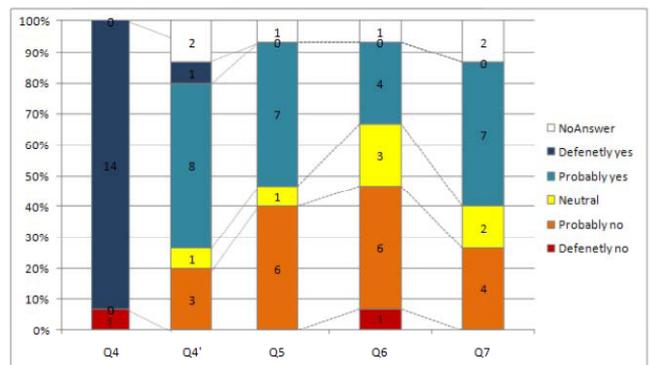


図 15 高齢者施設職員を対象としたアンケート結果
Fig. 15 Summary of a questionnaire for workers at an elderly day-care center.

選んだ人はいなかった.

さらに Q4~Q7 の各質問では, 1~5 までの 5 段階 (非常にそう思う場合は 5, まったくそう思わない場合は 1) で回答してもらった (ただし, Q4 のみ「はい/いいえ」で答えてもらい, 「はい」と答えた被験者にのみ Q4' の質問をした). 結果を図 15 に示す.

Q4 と Q4' より, ほとんどの被験者は, 併進する車椅子は話やすいと感じたようである. 前の質問 Q3 とともに, 併進する車椅子は, 高齢者施設においても好意的に受け取られたと考えられる. また, 実験後, 被験者から, 「話しかけ」は介護として重要なので, 横に並んで進めるのは話しかけやすく非常に良い, 「顔を見ながら話しかけられるのが良い」といった意見を得たことから, 併進するというコンセプトは受け入れられていると思われる.

一方 Q5, Q6, Q7 より, 実用化には, 解決すべき点も多

いことが分かった。特に、「車椅子が急に加速するので怖い」、「車椅子が急に曲がるので怖い」、「障害物が近付くと本当に避けてくれるか心配で怖い」といった意見を得たことから、車椅子の挙動が車椅子利用者に事前に伝わっていないことに起因して、自動走行する車椅子にユーザが不安を感じるということが分かった。これらのコメントは質問 Q5 の結果とも密接に関係していると思われる。今後は、車椅子の挙動を車椅子利用者にうまく伝えることで、不安を和らげる仕組みを取り入れてゆきたい。

7. おわりに

本稿では、同伴者の負担軽減と、同伴者と車椅子利用者のコミュニケーションに配慮した、同伴者に自動併走するロボット車椅子を提案した。同伴者が車椅子利用者を案内する場合の互いの位置関係と同伴者の身体的な振舞いの特性を観察実験により調査した。そして、得られた知見に基づいて、身体の向きを手がかりに同伴者の進行方向を予想し、これを妨げないように車椅子を制御する手法を提案した。同伴者の身体の位置と向きは、レーザ測域センサを用い、得られる同伴者の肩の輪郭の一部を、センサとの位置関係を考慮した楕円輪郭モデルを用いてパーティクルフィルタによって追跡した。車椅子から見た相対的な同伴者の身体の位置や向きに基づいて車椅子を制御することにより、従来、位置情報のみでは難しかった車椅子側への進路変更を含めたスムーズな併進を可能とした。また、高齢者施設での実験から、同伴者と自動併進する車椅子が車椅子利用者に関わる人々に好意的に受け入れられることを確認した。

今後は、高齢者施設やミュージアムなどで、実際の車椅子利用者による印象評価を行う予定である。また、周囲の障害物や歩行者の状況を考慮して、適応的な行動がとれるよう発展させたいと考えている。特に、現在は観測結果に基づいて、経験的に移動方向や速度を決めているため、今後はポテンシャルフィールド法などと組み合わせ、移動方向や速度の決定を自律的に行うよう改良し、同時に車椅子の挙動を利用者に伝えることで不安を和らげる仕組みを検討したいと考えている。また、本システムで用いているパーティクルフィルタは、追跡の失敗の判断が難しい。そこで、レーザ測域センサに加えて、カメラを用い、見えの情報を取得・併用することで、同伴者を見失ったことの判断を可能とし、見えの情報を手がかりに同伴者を再検出して、追跡を再開できるようにしたいと考えている。

謝辞 本研究の一部は、科学技術振興機構さがけおよび A-Step, 科研費 (22243037) の助成による。

参考文献

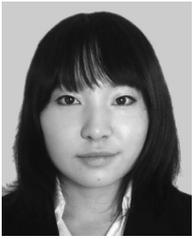
[1] Boy, E.S., Teo, C.L. and Burdet, E.: Collaborative Wheelchair Assistant, *Proc. International Conference*

- on Intelligent Robots and Systems*, Vol.2, pp.1511-1516 (2002).
- [2] Cui, J., Zha, H., Zhao, H. and Shibasaki, R.: Fusion of Detection and Matching Based Approaches for Laser Based Multiple People Tracking, *Proc. International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Vol.1, pp.642-649 (2006).
- [3] Glas, D.F., Miyashita, T., Ishiguro H. and Hagita, N.: Laser Tracking of Human Body Motion using Adaptive Shape Modeling, *Proc. International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.602-608 (2007).
- [4] Iwase, T., Zhang, R. and Kuno, Y.: Robotic Wheelchair Moving with the Caregiver, *Proc. SICE-ICASE International Joint Conference*, pp.238-243 (2006).
- [5] Isard, M. and Blake, A.: Condensation - Conditional Density Propagation for Visual Tracking, *International Journal of Computer Vision*, Vol.29, No.1, pp.5-28 (1998).
- [6] Kuno, Y., Shimada, N. and Shirai, Y.: Look Where You're Going: A Robotic Wheelchair Based on the Integration of Human and Environmental Observations, *IEEE Robotics and Automation*, Vol.10, No.1, pp.26-34 (2003).
- [7] Levine, S.P., Bell, D.A., Jaros, L.A., Simpson, R.C., Koren, Y. and Borenstein, J.: The NavChair Assistive Wheelchair Navigation System, *IEEE Trans. Rehabilitation Engineering*, Vol.7, pp.443-451 (1999).
- [8] Min, J., Lee, K., Lim, S. and Kwon, D.: Human-Friendly Interfaces of Wheelchair Robotic System for Handicapped Persons, *Proc. International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol.2, pp.1505-1510 (2002).
- [9] 満上育久, 角所 考, 美濃導彦: 非剛体物体の形状変化と運動変化の主成分分析に基づくパーティクルフィルタの効率化, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J92-D, No.8, pp.1270-1278 (2009).
- [10] Satoh, Y. and Sakaue, K.: An Omnidirectional Stereo Vision-Based Smart Wheelchair, *Journal on Image and Video Processing*, Vol.2007, 87646 (2007).
- [11] Seki, H., Shibayama, S., Kamiya, Y. and Hikizu, M.: Practical obstacle avoidance using potential field for a nonholonomic mobile robot with rectangular body, *Proc. International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, pp.326-332 (2008).
- [12] 山崎敬一: 社会理論としてのエスノメソドロジー, ハーベスト社 (2004).
- [13] 山崎敬一: 実践エスノメソドロジー入門, 有斐閣 (2004).



小林 貴訓 (正会員)

2000年電気通信大学大学院情報システム学研究所修士課程修了。2000～2004年三菱電機(株)設計システム技術センターで、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)。現在、埼玉大学理工学研究科助教。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。電子情報通信学会、映像情報メディア学会、IEEE、ACM各会員。



高野 恵利衣

2012年埼玉大学大学院理工学研究科修士課程修了。現在、(株)日立製作所日立研究所。



金原 悠貴

2011年埼玉大学大学院理工学研究科修士課程修了。現在、ヤマハ発動機(株)。



鈴木 亮太

2011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修士課程在学中。



久野 義徳 (正会員)

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、同大学大学院理工学研究科数理電子情報部門教授。工学博士。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。電子情報通信学会、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、IEEE、ACM各会員。



小池 智哉

2011年埼玉大学教養学部卒業。現在、埼玉大学大学院文化科学研究科文化環境研究専攻修士課程在学中。



山崎 晶子

東京都立大学大学院修士課程修了。2000年より公立ほ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。



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。