原著論文

小型電動自動車および電動車椅子の自動運転/遠隔操縦運転における乗員の視線・不安感に関する研究

大門 樹 [1)], 大前 学 [2)], 田 容旭 [3, 4)], 岡野 清紀 [1)]
[1)]慶應義塾大学理工学部 [2)]慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科
[3)]亜洲大学工学部産業情報システム工学科 [4)]慶應義塾先端科学技術研究センター

Study on driver's eye direction and feeling of anxiety on small electric car and electric wheel chair in automated driving and remote operated driving

Tatsuru DAIMON[1)], Manbu OMAE[2)], YongWook JEON[3,4)], Kiyonori OKANO[1)]
[1)]Faculty of Science and Technology, Keio University
[2)]Graduate School of Media and Governance, Keio University
[3)]Division of Industrial and Information Systems Engineering, Ajou University, Korea
[4)] Keio Leading-edge Laboratory of Science and Technology, Keio University

Abstract: This paper describes driver's eye direction and feeling of anxiety on a small electric car and an electric wheel chair when travelling based on automated driving and remote operated driving This study is one of many researches of Co-Mobility Society Project advanced by Keio University and it is a fundamental research to collect various technical requirements needed to design Co-Mobility Simulator to research and develop human machine interface of advanced personal electric vehicle, Co-Mobility electric Vehicle (CMV). The experiment used a small electric car and an electric wheel chair which can travel based on either automated driving or remote operated driving. The experiment was conducted in a test track, which had various road surface sections such as tarmac, bump, gravel and slope sections. The young and elderly subjects participated in the experiment and experienced automated driving and remote operated driving of small electric car and electric wheel char. The data of subject's eye direction and vehicle behavior were collected during travelling from start to goal on the experiment course. After experiencing each experimental condition, they were instructed to answer some questionnaires. The driver's eye direction and anxiety feeling were discussed based on various conditions of road surface, car type and automated/remote operated driving, and moreover the technical specification of Co-Mobility simulator to analyze and evaluate driver's human factors and human machine interface of CMV was also discussed.

Keywords: automated driving, eye direction, anxiety feeling, small electric vehicle, electric wheelchair

キーワード: 自動運転, 視認行動, 不安感, 小型電動自動車, 電動車椅子

1. はじめに

子供からお年寄りまですべての人が, 自由に安全に移動ができ, 交流が容易になり, 暮らしやすく, 創造的・文化的な社会を目指して, 慶應義塾大学コ・モビリティ社会研究センターでは, 協働研究プロジェクト「コ・モビリティ社会の創成」の下, 最先端の情報・通信・移動体の技術による新しい発想の"移動"や, それに伴う空間の再構築による近未来社会の「複合型コミュニティ(現実空間のコミュニティ×情報空間のコミュニティ)」などに関する研究・開発を進めている[1]. この「コ・モビリティ社会の創成」では, 人やモノの移動を支援するために, 自動運転や遠隔操縦が可能な小型の電動移動体に関する研究開発を進めており, それらを基盤として, 移動中の乗員の観点に基づいた安全・安心の向上, 様々な情報提供や通信による利便性の向上, さらには移動中における様々なコミュニケーション機能の導入による活発な交流や活動の実現などが期待さ

2010 年 8 月 12 日受理. 2010 年 3 月 11 日シンポジウム「モバイル'10」にて発表

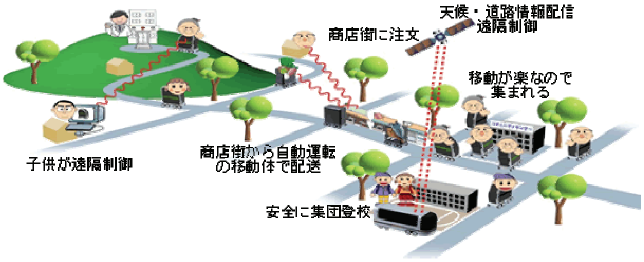


図 1 コ・モビリティ社会での人やモノの移動

れている．そこで本研究では，このような自動運転や遠隔操縦が可能な小型の移動体における乗員の不安感や道路環境，移動体の仕様や制御方式などの関係を明らかにすることを目的とした．また，今後このような小型の電動移動体について，乗員が移動中に関わる様々なインタラクション，特に他の交通参加者とのインタラクションやコミュニケーション，移動体内のヒューマンインタフェース仕様などを検討可能な実験用シミュレータを製作することを目的として，映像スクリーンの仕様などを検討するために乗員の視線に関する基礎データを収集した．

2. 実 験

2.1 実験装置

本研究では，自動運転および遠隔操縦が可能な小型の電動移動体における乗員の様々なデータを収集するために，大前らが既に開発した自動運転機能付きの小型電動自動車[2][3]と遠隔操縦可能な電動車椅子[4]を使用した．本研究で使用した小型電動自動車の外観を図 2 に示す．小型電動自動車（コムスロング，トヨタ車体株式会社製）はステアバイワイヤー化され，ハンドル部に反力用モーターとハンドル角センサが組み込まれた，操舵コントローラが取り付けられ，ステアリングシャフトに，操舵を行う AC サーボモータが組み込まれた．自動運転においては，反力用モーターは操舵反力の発生ではなく，車線追従に必要なハンドル角を実現するようにサーボ制御された．車線追従のための計測については，車両運動の速度，ヨーレート，進行方向加速度，横加速度が計測され，また車線との相対位置検出については，RTK-GPS の測位情報と車両運動状態量を用いて推定した車両絶対位置と，予め車両に格納された車線の絶対位置情報を比較することにより行われた．本研究で用いた自動運転のアルゴリズムにおける目標操舵角の算出方法については，車両と目標車線の相対位置から，将来横偏差をゼロにするために必要なヨーレートが算出され，そのヨーレートを発生する操舵角と制御時の目標車線に対する誤差から目標操舵角が算出された．

図 2 実験で使用した小型電動自動車の外観

図 3 実験で使用した電動車椅子の外観

本研究で使用した電動車椅子の外観を図 3 に示す．電動車椅子（GoChair, Pride Mobility Products Corp 製）は，遠隔操縦が可能となるように改造された．電動車椅子には制御用 PC が搭載され，PC からの指令に基づいて速度とヨーレートが制御された．周囲物体の距離情報や映像情報の取得については，操作範囲 270 度の走査式レーザーレーダー3 台やカメラ 5 台が搭載された．遠隔操縦のための通信については，無線 LAN を利用して，電動車椅子側よりレーザーレーダーからの周囲物体の距離情報，加速度，角加速度情報，バッテリー電圧，駆動輪の回転量センサの情報，カメラからの情報が送信され，また遠隔操縦クライアント PC よりヨーレートや速度の制御が行われた．遠隔操縦のための操作系は，大前らが既に開発した操作系のうち，アナログスティックという小型ジョイスティックを搭載したゲームパッドを利用した[4]．アナログスティックにおいては，左右方向を X 軸に，上下方向を Y 軸に設定し，X の値に比例して電動車椅子の目標ヨーレートを，Y の値に比例して目標速度をそれぞれ決定した．実験では，操作者がアナログスティックを上下左右に操作して遠隔操縦を行い，電動車椅子を制御した．

2.2 実験コース

実験コースは，図 4 に示されるような慶應義塾大学新川崎タウンキャンパス内の平坦な駐車場および通路を使用した．実験コース上の A から C の地点には，悪路（図 5）や段差（図 6），傾斜（図 7）をそれぞれ設定した．小型電動自動車および電動車椅子での自動運転，遠隔操縦は，S 地点をスタートして，A 地点の悪路区間，B 地点の段差区間，C 地点の傾斜区間を通過し，G 地点に戻る経路であった．

2.3 被験者

被験者は，若年被験者 5 名（年齢 22～24 歳，男子学生），高齢被験者 5 名（年齢 66～70 歳，男性 4 名女性 1 名）であった．被験者には，実験実施前に実験内容に関する説明を行い，実験参加への同意を得た．実験に参加した若年被験者は全員が運転免許保有者であったが，年間走行距離は 5,000km 未満，高齢被験者は 2 名が運転免許保有者であり，年間走行距離は 5,000km 以上であった．

2.4 計測項目

(1) 車速および加速度

車速については，小型電動自動車および電動車椅子で収集されるデータを 20Hz で記録した．小型電動自動車では，駆

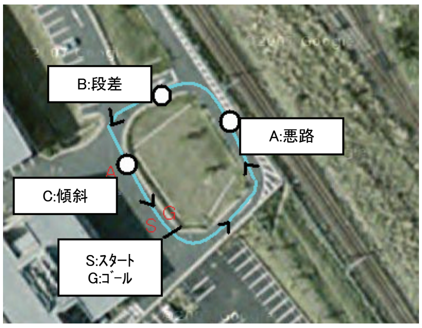


図 4　実験コース

図 6　実験コース内に設置された段差区間（B 地点）

図 5　実験コース内に設置された悪路区間（A 地点）

図 7　実験コース内に設置された傾斜区間（C 地点）

動用モーターのインバータからの速度信号を利用した．速度の分解能は 0.333km/h，フィルタ等によりある程度滑らかな値が抽出された．一方，電動車椅子では，左右各車輪に取り付けられた 3,000 パルス/rev のロータリーエンコーダから 50msec ごとのパルス量に基づいて算出されたが，小径なタイヤのため，滑りが発生した場合には，速度の精度に影響を及ぼす可能性があった．加速度については，3 軸の加速度センサ（CXL02LF3，クロスボー株式会社製）により計測されるデータを 100Hz でデータレコーダに記録し，さらに上下方向の加速度について抽出を行うこととした．

(2) 視認行動

小型電動自動車および電動車椅子に乗車する乗員の視認行動をアイカメラ（モバイルアイ，ASL 社製）により計測した．アイカメラの出力映像は，本体装備の小型 CCD カメラから撮影された前景映像に乗員の注視点がインポーズされた映像であるが，そのインポーズされた注視点が前景映像のどこに存在するかを 1 秒 30 コマの精度でビデオ解析することで乗員の視認方向を推定・抽出した．抽出された視認行動は，悪路や障害物，傾斜などの障害物への視認，路面方向への視認，その他への視認に分類した．路面方向への視認について，本研究では，各車体の先端から約 3m 前方までの路面上に乗員の注視点が存在する場合を路面方向への視認とし，アイカメラの出力映像において，当該範囲が映像領域のどこに該当するかを確認した．

(3) 主観評価

被験者に対して主観評価を行った．小型電動自動車・電動車椅子，自動運転・遠隔操縦，悪路・段差・傾斜の組合せに基づいて，不安感の度合い，不安感の要因を回答させた．不安感の度合いについては，「不安はなかった」から「非常に不安だった」までの 5 段階で評価させた．

2.5 実験手続き

小型電動自動車と電動車椅子の車両 2 種類，自動運転と遠隔操縦の制御方式 2 種類の組合せからなる 4 つの実験条件を被験者に対して実施した．実際には，小型電動自動車は自動運転のみを，電動車椅子は遠隔操縦のみを装備しているが，小型電動自動車の遠隔操縦の実験条件では，自動運転の設定のまま，被験者には遠隔操縦の実験条件であると説明し，同様に，電動車椅子の自動運転の実験条件では，遠隔操縦の設定のまま，被験者には自動運転の実験条件であると説明して，それぞれの実験を実施した．各実験条件は，若年被験者と高齢被験者にそれぞれ 1 回ずつ，ある程度，順序効果に配慮して実施した．電動車椅子の遠隔操縦については，実験実施前に操作者に十分な練習を行わせ習熟させた．

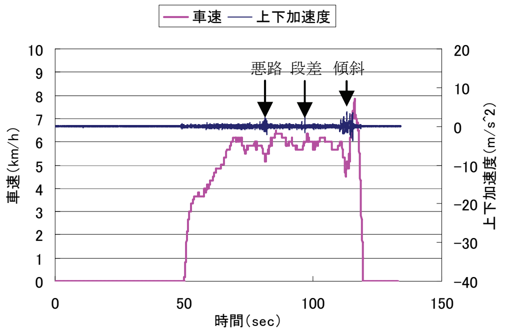
3. 実験結果

3.1 各車両の車速および上下加速度の変化

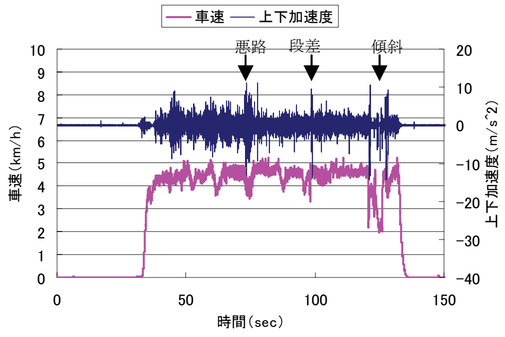
実験コース走行時における各車両の車速および上下加速度の変化を図 8 に示す．また A, B, C 地点での車速を表 1 にそれぞれ示す．車速については，悪路，段差，傾斜などの各地点において車速の低下が見られたが，小型電動自動車の方が安定した車速で走行していたのに対して，電動車椅子はやや低く，変動の大きな車速で走行していた．速度低下の原因に関して，目標速度に対する各車両での制御は，小型電動

表 1　各地点における車速

	小型電動自動車	電動車椅子
最大速度	7.8km/h	5.5km/h
A 地点（悪路）	5.2km/h	3.4km/h
B 地点（段差）	5.7km/h	3.3km/h
C 地点（傾斜）	4.5km/h	2.0km/h



(a) 小型電動自動車



(b) 電動車椅子

図 8　各車両における車速および上下加速度の変化

自動車では固定値(6km/h)に対するPI制御，電動車椅子ではジョイスティック倒し量に対する PI 制御となっていることから，各車両に対して一定速度を指令している場合であっても段差や坂道等の外乱が存在すると，その外乱により速度低下が発生することが挙げられる．また，電動車椅子については，姿勢修正時の車両の横運動を左右各車輪の差動により制御するため，左右各車輪の速度が変わることによっても速度低下が発生する．一方，電動車椅子では，操作者は遠隔操縦により車両を制御するが，多くの場合，ヨー運動の安定化などが自動制御で行われているため，操作者がスティックを小刻みに操作している状況はほとんどないと考えられる．以上のことを考慮すると，小型電動自動車，電動車椅子ともに，車両に外乱が入り，目標速度を維持できなくなり，速度低下が発生したものと考えられる．上下加速度については，小型電動自動車は非常に変動の小さい，ほぼ安定した加速度値を示していたのに対して，電動車椅子は非常に変動の大きい加速度値を示していた．本研究で使用した電動車椅子は，室内・室外向けであったが，小型電動自動車よりもタイヤ径が小さく，またサスペンション等の緩衝装置が装備されていないことから，電動

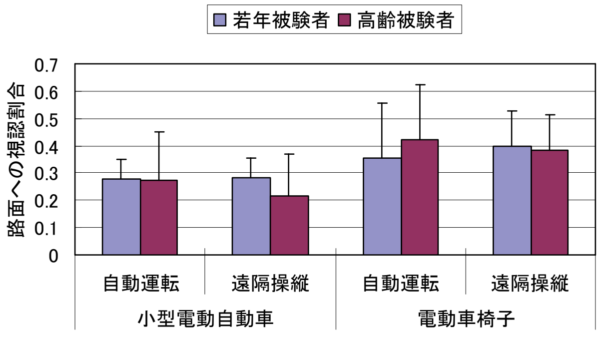


図 9　各車両における乗員の路面への視認割合

車椅子の方が小型電動自動車と比較してより大きな加速度の変動をもたらす結果となった．乗員に加わる上下振動という点では，小型電動自動車よりも電動車椅子の方が振動の大きい傾向が見られた．また，悪路や段差などの路面では，通常の路面に比較して，振動が大きくなる傾向が見られた．

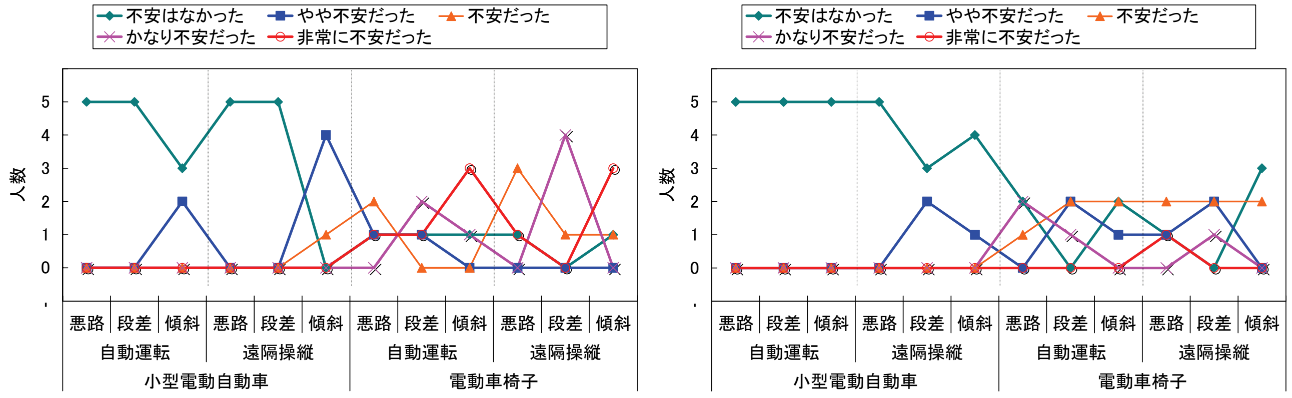
3.2 各車両における乗員の路面への視認割合

各車両において S 地点から G 地点までの走行時間に対して，乗員が路面を視認していた割合の結果を図 9 に示す．乗員が路面を視認する割合は，小型電動自動車で 2 割から 3 割程度，電動車椅子では 3 割から 4 割程度と，小型電動自動車よりも電動車椅子の方が高い傾向が見られた．しかしながら制御方式や年齢による違いはほとんど見られなかった．

3.3 各車両における乗員の不安感

実験コースの各地点を走行する際に乗員が感じた不安感の程度を分類した結果を図 10 に示す．また乗員の不安感に関する全体的な傾向を把握するために，「不安はなかった」から「非常に不安だった」までの 5 段階に対して 0 点から 4 点を割り当てて評点化し，条件ごとに平均値を算出した．その結果を図 11 に示す．

小型電動自動車における不安感は， 若年被験者，高齢被験者に関わりなく，悪路や段差の区間においてほぼ「不安はなかった」もしくは「やや不安を感じた」と評価する結果となり，全体的にも不安をほとんど感じていない傾向が見られた．しかしながら，傾斜の区間においては「やや不安だった」「不安だった」と評価する被験者数がやや増加し，特に遠隔操縦で走行する場合に若年被験者で「やや不安だった」と評価する人数が最も多い結果となった．一方，電動車椅子の場合は，小型電動自動車と比較して，自動運転，遠隔操縦に関わりなく，どの区間においても不安を感じる被験者が多く見られた．電動車椅子について若年被験者と高齢被験者を比較すると，悪路の区間では両者に不安感の差がほとんど見られなかったが，段差の区間では若年被験者でやや不安感が高まったのに対して，高齢被験者では悪路の区間での不安感とほぼ同様であり，両者にやや差が見られた．さらに傾斜の区間では若年被験者の不安感は他の 2 つの区間よりも高いものとなったのに



(a) 若年被験者　　(b) 高齢被験者

図 10　各車両における乗員の不安感とその人数

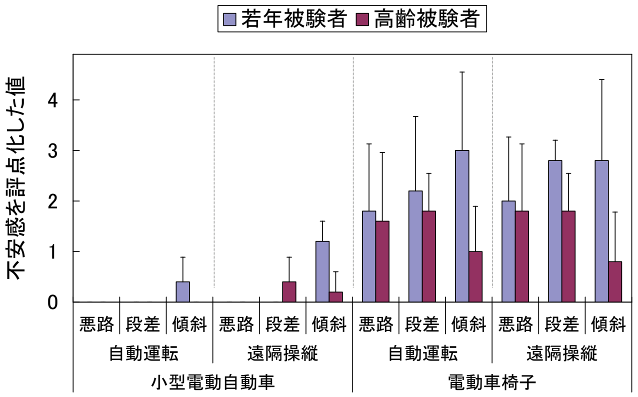


図 11　各車両に乗員の不安感に対する評点化

対し，高齢被験者では他の 2 つの区間よりも低いものとなった．実験終了後，不安を抱いた理由として，小型電動自動車では「傾斜への進入に成功するかどうか疑問」「進路を予測できない」，電動車椅子では「車体や走行が不安定」「振動が大きい」「走行中，路肩付近で車体が傾く」などのコメントが得られた．

4. 考　察

小型電動自動車と電動車椅子では，乗員の不安感に与える影響が異なる結果となった．この点について，本研究で使用した電動車椅子は，小型電動自動車と比較して，車体自体やタイヤ径が小さく，また緩衝装置も十分機能していないことから，悪路や段差，傾斜などの路面の影響，特に振動を受け易い状況であった．被験者のコメントも考慮すると，乗員の不安感は走行時の安定や振動，姿勢といった走行時の車両挙動に大きく影響されていると考えられ，乗員の不安感を低減させるには，車両の振動や姿勢などの車両挙動をより安定な状態に改善することが有効であると示唆される．

一方，乗員の不安感は，小型電動自動車や電動車椅子といった移動体の仕様だけでなく，自動運転や遠隔操縦といった制御方式，悪路や段差，傾斜といった道路環境，若年や高齢といった乗員の年齢などの要素の組合せによっても特徴付けられる傾向が見られた．先述の通り，全体的には車両挙動が安定していない電動車椅子において不安を感じている乗員が多く，またその不安感も高い傾向が見られたが，悪路の区間における不安感を基準にすると，傾斜の区間では若年者はより高い不安を感じ，逆に高齢者は不安をほとんど感じない結果となったから，電動車椅子に乗車する若年者は路面から受ける振動よりも，傾斜などによる姿勢の変化に不安を感じ，逆に高齢者は姿勢の変化にはほとんど不安を感じない傾向があるものと考えられる．

車両の制御方式に関して，電動車椅子における若年者の段差の区間において，自動運転と遠隔操縦にやや不安感の差が見られたが，全体的には電動車椅子における制御方式の違いでは不安感の差は見られなかった．これに対して，小型電動自動車では，自動運転と遠隔操縦の間で不安を感じる被験者数やその不安感にやや違いが見られ，特に遠隔操縦での段差や傾斜の区間で，若年者，高齢者ともに自動運転と遠隔操縦の違いに不安感の差が見られた．このことから，電動車椅子のように，走行時の振動や姿勢の変化が大きい状況では，走行中の不安感が高まって飽和した状態に至っていると考えられ，車両の制御方式による不安についてはほとんど感じられないものと考えられる．一方，小型電動自動車のように，走行時の振動や姿勢の変化などによる不安感が小さい状況では，走行中の不安感が飽和していない状態であると考えられることから，車両の制御方式に対する不安を感じてしまうものと考えられる．

走行時の車両の振動や姿勢などの車両挙動が乗員の不安感に影響を与えている点について考慮すると，走行中に路面から受ける突発的な車両挙動に対して，乗員は心構えや準備行動を取るために，進行方向の路面の凸凹などの状態を把握する必要があり，そのため，路面への視認割合が高まったものと考えられる．特に電動車椅子では，路面から受ける振動などの車両挙動が大きいことから，視線をより路面に向けて情報収

集を行う必要があったものと推察されるが，電動車椅子では乗員を覆うボディがないこともあり，足元に近い路面を視認することで，より詳細な路面の状況を把握していたことも考えられる．

一方，自動運転と遠隔操縦の車両挙動は，実験の設定上，車両が同一であればほぼ同様なものであったが，実際には，乗員が自動運転と思うか遠隔操縦と思うかで，少なからず，乗員の不安感に影響を与える結果となり，小型電動自動車のように走行時の振動など車両挙動が小さい場合にはその差が大きい結果となった．本研究では，遠隔操縦する操作者と乗員の間にほとんど面識がないことなどもあり，乗員が車両の制御に対して信頼を置くことができなかった点や，そのような操作者によって制御される車両の予定進路が乗員に情報提供されない点などもその原因となっている可能性がある．小型電動自動車の場合は，傾斜の区間における操作者の遠隔操縦により脱輪や転落などの不安感が少なからず生じているものと考えられるが，それでも電動車椅子ほどではなく，先述の通り，不安感がある程度飽和状態に至ると，自動運転や遠隔操縦による違いは乗員にほとんど影響しないものと考えられる．移動体の制御方式に関して，乗員の不安感を低減するためには，遠隔操縦や自動運転に対する乗員の信頼感を高めることや，予定進路の情報を提供するなどの工夫が必要であると考えられる．

5. まとめ

本研究では，小型電動自動車や電動車椅子を利用して，自動運転や遠隔操縦が可能な移動体における乗員の不安感や道路環境，移動体の仕様や制御方式などとの関係を検討し，走行時の乗員の不安感に与える要因や視線の特徴を明らかにした．今後は，小型の電動移動体に装備する様々なヒューマンインタフェース仕様の評価や，乗員が移動中に関わる様々なインタラクションを分析するための実験用シミュレータを製作するが，本研究で得られた様々なデータに基づいて，実験用シミュレータの仕様検討を進める予定である．

謝　辞

本研究は，文部科学省科学技術振興調整費による委託業務「先端融合領域イノベーション創出拠点の形成「コ・モビリティ社会の創成」により実施されたものです．研究を進めるに当たり，ご協力頂いた多くの方々に感謝致します．

参考文献

[1]　慶應義塾大学コ・モビリティ社会研究センター: コ・モビリティ社会の創成, http://www.co-mobility.com/, (2010 年 2 月 8 日アクセス).

[2]　Omae, M., Hashimoto, N., Shimizu, H.: Automatic Driving System for Light Vehicle with Easy Setup Feature, Proceedings of the 21st International electric Vehicle Symposium (CD-ROM) (2005).

[3]　大前, 小木津, 清水: 高精度 GPS を用いた構内の自動運転における走行可能領域情報を利用した操舵制御に関する研究, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.69-09, pp.13-18 (2009).

[4]　大前, 平野, 井上, 本間, 清水: 電動車椅子の遠隔操縦における操縦系に関する研究, アドバンティ 2008 シンポジウム講演論文集, pp.51-54 (2001).

著者紹介

大門　樹（正会員）

1995　慶應義塾大学大学院理工学研究科後期博士課程修了，博士（工学）．1997　慶應義塾大学理工学部専任講師を経て，現在，理工学部准教授に至る．主に，ITS　や安全支援システムなど車載情報機器に関わるドライバの行動特性やモビリティ機器のヒューマンファクタやヒューマンインタフェースの研究に従事。モバイル学会　理事．

大前　学（非会員）

2000　東京大学大学院工学系研究科博士課程修了，博士（工学）．2000　慶應義塾大学環境情報学部助手，専任講師を経て，現在，慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科准教授に至る．主に，自動車の自動運転・遠隔操縦，電気自動車の研究に従事．

田　容旭（正会員）

2008　慶應義塾大学大学院理工学研究科後期博士課程修了，博士（工学）．2008　慶應義塾大学慶應義塾先端科学技術研究センター研究員および先導研究センター研究員として着任，現在は韓国　亜洲大学工学部産業情報システム工学科特別研究教授．主に，高度道路交通システムに関わる情報利用時のドライバ行動特性やヒューマンインタフェースの研究に従事．モバイル学会　正会員．

岡野　清紀（非会員）

2008　慶應義塾大学理工学部管理工学科卒業．2008　日本ユニシス株式会社入社．現在に至る．