

令和元年6月4日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K12470

研究課題名(和文) 運転支援システムと人の調和を実現する行為主体感喚起手法の研究

研究課題名(英文) Research on The Method for Evoking Sense of Agency Over Autonomous Driving

研究代表者

鳴海 拓志 (NARUMI, Takuji)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・講師

研究者番号：70614353

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、自律型運転システムから運転支援を受けるドライバーに対し、自らが操作しているという感覚である行為主体感を強く生起させることで、自動化に伴う油断や人と機械の不調和に基づく事故を防ぎ、運転中の安心・安全・快適を向上させる手法を明らかにすることである。この目的に対し、行為主体感が行為結果の予測と身体知覚を通じて得られる実際の結果の整合性から生じることが考慮し、(1)システムの状態に応じてプライミングとなる感覚刺激を与え予測を変化させる手法、(2)運動錯覚によって身体知覚を変化させる手法の両面から行為主体感を生起・増幅させる手法を構築し、それが安心・安全に貢献することを検証できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

自動運転システムや高度運転支援システムが盛んに開発され実用化されている中で、ユーザはそれらのシステムを自分から切り離されたものとして捉え、過度に信頼して不適切な使用をおこなってしまうことが問題視されている。自動化に伴う油断や人と機械の不調和は事故に繋がるため、これを防ぐ手段の実現は急務である。本研究では、自律型システムによって運転支援を受ける人が、システムの自律動作に対しても自らがやっているものであるかのように感じられ、必要時に適切な介入を促進する、人と機械の協調を図るシステムを開発した。これらは自動運転システムに対する安心・安全・快適を向上させる意義を持つ研究である。

研究成果の概要(英文)：The sense of agency is evoked based on the consistency of the prediction of the result of the action and the actual result obtained through body perception. Based on this knowledge, we investigated and realized the two methods: (1) The method which gives a multisensory stimulus to evoke priming effect based on the state of the autonomous driving car and (2) the method which evokes motion illusion to modify our body perception and evoke the strong sense of agency during riding on the car. We confirmed that these contribute to safety and security of autonomous driving systems.

研究分野：ヒューマンインタフェース・インタラクション

キーワード：行為主体感 ヒューマンインタフェース 自動運転 認知科学 人間機械協調

1. 研究開始当初の背景

衝突を予測しブレーキの強さを変えるブレーキアシストや、車間距離や走行レーンをキープするように制御するクルーズコントロール等、システムが自律的に車を制御する運転支援システムが登場している。完全自動運転の実用も見込まれつつあり、IEEE は 2040 年には 75% が自律型自動運転車になるとの見解を示した。しかし技術的には可能でも、ドライバの心理的障壁、賠償責任、法的責任、社会制度等の問題から、完全自動運転の社会受容には時間を要すると見られている。

自動運転システムにおいて 100% 事故が起こらない保証がされていない以上、人にシステムを過信も不信もさせず、人とシステムが協調し、最終的には人の判断で安全性を確保させることが望ましい。例えば、自動運転や運転支援システムを過信し、自らが運転しているという感覚を失い、油断してしまうと、事故に繋がる。また、クルーズコントロール等の緊急性の低い運転支援システムが車の制御に介入する際、自らの操作と車の挙動の違いが強く感じられると、ドライバはシステムへの不安や不快を感じる。この不安や不快は自動運転に対する不信を生み、ドライバが適切に支援を受け入れなくなってしまうことも考えられる。そのため、運転支援システムによる安心・安全を適切に受け入れてもらうには、人の適切な関与を引き出す新規技術が必要である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、自律型運転システムから運転支援を受けるドライバに対し、自らが操作しているという感覚である「行為主体感」を強く生起させることで、自動化に伴う油断や人と機械の不調和に基づく事故を防ぎ、運転中の安心・安全・快適を向上させる手法を明らかにすることである。絶対安全な自動運転が実現されていない以上、人にシステムを過信も不信もさせず、最終的には自らの判断で安全性を確保させることが望ましい。行為主体感が行為結果の予測と身体知覚を通じて得られる実際の結果の整合性から生じることを考慮し、(1) システムの状態に応じてプライミングとなる多感覚刺激を与え予測を変化させる手法、(2) 固有感覚を刺激し、運動錯覚を生起させることで身体知覚を変化させる手法の両面から行為主体感を増幅させる手法を構築する。

3. 研究の方法

上記課題に対し、自律型運転支援を受けるドライバに対し、自らが操作しているという感覚である「行為主体感」を増幅または生起させるアプローチから解決を図る。行為主体感の増幅・生起によって、機械的制御介入の不快感を低減させ、油断や人と機械の不調和に基づく事故を防ぐ手法を明らかにする。行為主体感とは行為結果の予測と身体知覚を通じて得られる実際の結果の整合性から生じる。本研究では、(1) システムの状態に応じてプライミングとなる多感覚刺激を与え予測を変化させる手法、(2) 運動錯覚を生起させることで身体知覚を変化させる手法の両面から行為主体感喚起手法を明らかにする(図 1)。これら知見を統合し、(3) 運転支援システムがドライバの制御に介入しても、ドライバが自らが制御している感覚とそこから生じる安心さ・快適さを維持できる手法を明らかにし、人と自動運転の協調を実現する。

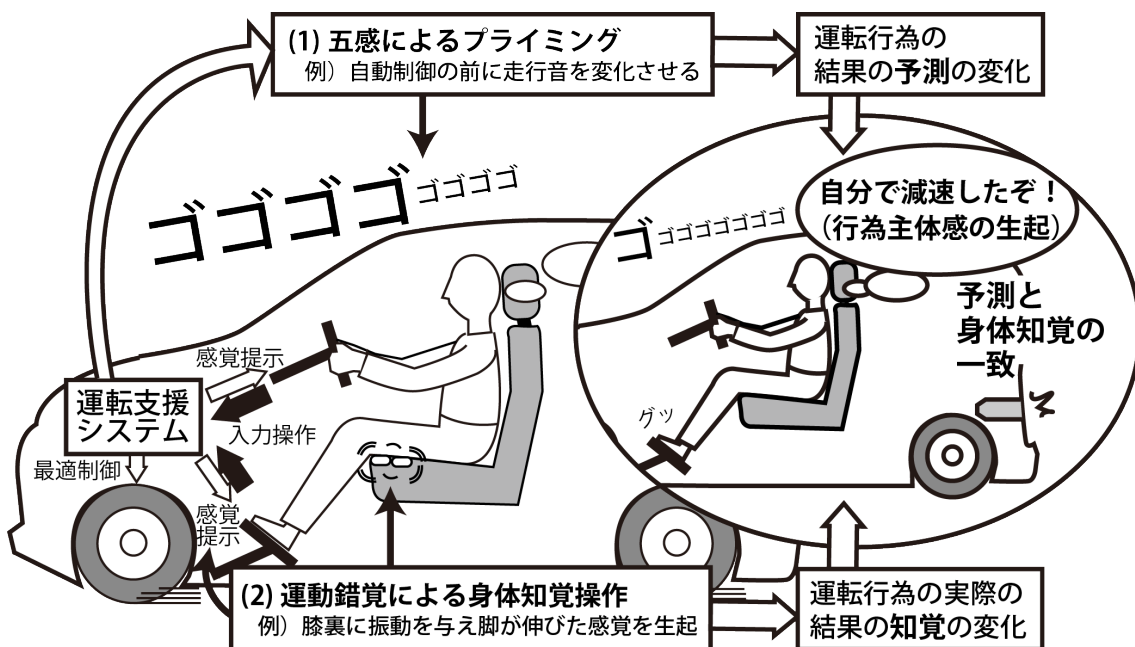


図 1 人間機械協調のための行為主体感生起に関する二つのアプローチ

4. 研究成果

(1) システムの状態に応じてプライミングとなる多感覚刺激を与え予測を変化させる手法の提案

レベル3の自動運転システムにおいては、システムによる自動走行が不可能になった場合には、システムがドライバーに対して操作介入を要求する。この要求に対してドライバーは即座に反応し、減速や操舵などの適切な対応を行わなければならない。このため、そのような対応を目的とした多くのインタフェースが研究されている。しかしながら、システム側からの操作介入要求に頼るのみでは、そもそもシステムが前方障害物等を認識できていない場合には警告などを発することができないため、ドライバーがシステムの判断や介入要求のみによらず、能動的に操作介入を行う必要がある。

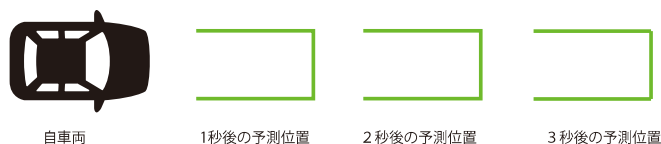


図2 予測位置提示

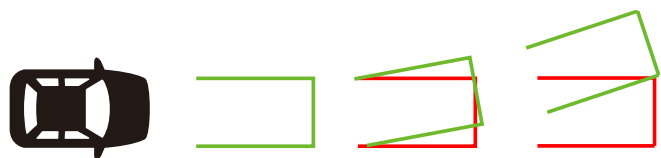


図3 介入の有効性フィードバック

ドライバーが必要な場面で適切な介入を行うためには、ドライバーがシステムが何を把握できており何が把握できていないのか、そして次に何をこなおうとしているかといった状態を正確に把握する必要がある。システムの情報提示方法には、例えば車両の周辺監視センサの認識結果（歩行者、他車両など）を常時ドライバーに示す手法があるが、一部の情報を認識できていない場合であってもすぐに介入が必要になる訳ではないため、ドライバーの適切な操作介入を実現する情報とはならないと考える。そこで本研究では行為主体感に着目した上で、車両が今後取る行動をプライミング刺激を通じて伝える手法を提案した（図2）。この手法では、自動運転システムがあらかじめ持つプランを、ヘッドアップディスプレイ（HUD）を用いて路面上に重畳提示する。表示は、速度・加速度を表現するため、時間的に等間隔な3つ以上の車体枠とした。これにより、ドライバーがシステムの動作を直観的に理解し、必要時には即座に回避操作等の介入をおこなうことができると予想した。

ところで、提案システムは視覚情報による提示であるため、ドライバーが自発的に監視行動を行わなければその有効性は発揮されない。そこでドライバーの操作介入時、予測位置の表示を一定時間残して表示する手法を導入した（図3）。これはドライバーの操作とシステムの操作の差を明確にし、ドライバーに操作介入の有効性をフィードバックするものである。これにより介入の有効性を理解したドライバーは、それ以降も自発的に監視や介入行動を行うと予想した。

(2) 運動錯覚を生起させることで身体知覚を変化させる手法の提案

体を動かしていない状態において自分で体を動かしているような感覚を生成し、車による移動を自らの身体運動による移動であると知覚させる手法を構築するために、フットレストを移動させることで歩行時の足の身体動作と近い動作を提示可能なシステム（歩行提示システム、図10）を用いる。歩行提示システムは、座位姿勢で歩行に伴う運動感覚を知覚できる下肢の前後の動き及び腰の水平面内での前後左右の揺動に加え、地面への足裏の着地に伴い感じる振動を体験者に提示するシステムであり、既存研究においては他者の歩行運動の追体験を目的として制作された。本研究で



図4 主体的運動感覚提示のための歩行提示システム

は、自動運転車両の乗車時を想定し、受動運動の生成を通じて能動的に運動している感覚を生起するために本システムを用いる。ここでは、車両走行時の映像（走行映像）をフィードバックするとともに、歩行提示システムによる下肢および腰への揺動提示により、運動錯覚を生起させて行為主体感を生起させることを試みた。そのために、まず本研究では、自動車の走行時に撮影された一人称視点の映像とともに、取得した加速度センサでの速度データをシステムに同期させる手法の設計・構築を行った。そして、本手法によって行為主体感が生起するのか、また行為主体感が生起した場合に乗車時の快適性の向上につながるのか、という点を検証した。

歩行提示システムは、体験者を揺動させる水平2自由度のモーションベース（腰部運動提示台）と、足の前後の動きを提示する左右各1自由度の移動機構（下肢運動提示台）から成る。体験者は腰部運動提示台に固定された椅子に座ることで、腰部に揺動が提示される。また、台

の上に接地された下肢運動提示台により、腰部に対する足の相対的な運動が提示される。下肢運動提示台には、着地における足裏への振動を提示するデバイス（着地振動提示デバイス）を備える。それぞれのデバイスにマッピングするデータは加速度データから取得した速度を、歩行パターンの計算式に代入し、求める。車の速度を歩行提示に対応させるには「歩く」という動作を要素分解する必要がある。そこで、「歩く」速さ v を歩幅及びピッチに比例するものとして考え、歩幅 $\propto \sqrt{v}$ 、ピッチ $\propto \sqrt{v}$ となるようにマッピングした。腰部運動の表現については、既存研究で加速度センサを用いて取得した位相のデータをもとに、sin 波で近似したものをを用いた。走行映像との同期については、歩行提示システムの動作と走行スピードの同期、走行映像と歩行提示システムの稼働の時間的同期を行った。まず、加速度センサで取得した、8 コラム分 10Hz のデータを構造体配列として読み込み、速度のデータを歩行提示システムに出力する 200Hz の周波数に対応させるために、3 次曲線を用いて、間の 19 個分のデータを補完した。

(3) 上記提案手法による安心さ・快適さの評価

(a) プライミングに基づく行為主体感生起手法の評価

提案手法によって、ドライバが正しくシステムの状態を理解できるか、信頼感が変化するかを検証する実験を、ドライビングシミュレータを用いておこなった。

実験条件として、予測位置の表示をおこなわないものとおこなうもの、予測位置の表示に加えて介入後に有効性のフィードバックを行うものの計 3 条件を用意した。シミュレータは基本的に自動運転でコースを走行する。コース内には評価場面として、赤信号 5 箇所、カーブ 10 箇所、障害物 3 箇所を用意した。これらの中からランダムに、失敗箇所として赤信号 2 箇所、カーブ 2 箇所、障害物 1 箇所を選択した。これらの評価場面を含め実験中、実験参加者が必要と判断した場合、各コントローラによって操作介入を行うことができる。また、実際の自動運転中の作業を想定し、実験参加者には実験中、コントローラの右に固定されたタブレット上で探索ゲームを行わせた。自動運転に対する操作介入の研究で広く利用されている SuRT を利用した。実験参加者には道路状況を確認しながら常にゲームを行うよう指示した。3 条件間での評価場面における操作介入割合（介入数 / 場面数）、試行後のシステムに対するアンケート評価を比較した。実験参加者は男女 12 名で、全員が 3 条件の試行を行なった。

説明、実験試行、アンケートを含めた被験者 1 名あたりの実験時間は約 45 分であった。被験者は実験室に入室後、運転経験についてのアンケートに回答し、実験の説明を受けた。各条件の試行前には練習走行を行わせた。各試行の終了後、使用した自動運転システムについてのアンケートに回答した。

用意した評価場面について、条件間でフィッシャーの正確確率検定を行なったところ、赤信号の介入不要場面について、有意差が得られた ($p < .05$)。予測位置の表示を行わない場合、本来は自動運転車が停止するにもかかわらず、ブレーキを踏んで介入する回数が多かった。システムに対するアンケート結果を図 5 に示す。予測位置の表示有無についてウィルコクソンの符号順位検定を行なったところ有意差が得られ

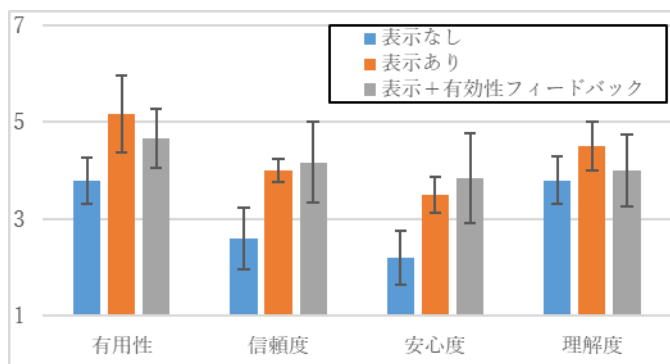


図 5 システムに対するアンケート評価

れ ($p < .10$)、提案手法ではいずれの項目も評価が向上することが示唆された。これらの結果から、プライミング情報を与えることで行為主体感が生起され、不要な介入操作回数を減らし、システムに対する有用性、信頼性、安心、理解の評価を高めることができることが示唆された。

(b) 運動錯覚に基づく行為主体感生起手法の評価

運動錯覚を利用した場合に、自動運転車両による運動に行為主体感を生起させることが可能かを検証する実験をおこなった。

実験では、歩行提示システムによる歩行感覚提示のみ、走行映像提示のみ、歩行感覚提示と映像の同時提示の計 3 条件に関して、アンケートに基づいて行為主体感を評定する。各試行では、ある条件において 30 分被験者に歩行提示システムに着席してもらい、実験刺激を提示する。これを一人の実験参加者が全ての条件を体験するよう 3 回繰り返した。試行間は 1 時間以上時間を空けて実施した。実験参加者は 6 名であった。実験中は実験参加者にはノイズキャンセリングイヤフォンを着けてもらい、ホワイトノイズを提示し、システム駆動等によって生じる雑音による影響を排除した。行為主体感は、前進感覚があったか、自分で動いている感覚があったか、体の動きに違和感を覚えたか、システムの動きが自分の体の一部のように感じたかの 4 項目に加え、4 種類のダミーの質問を用意し、それぞれについて Visual Analog Scale (VAS) 法を用いて評価した。

「前進感覚があったか」の評価値の平均を図 6 に示す。走行映像の効果に関して有意差が得られた ($p = 0.0069$)。また、歩行提示システムの効果に関しては有意な差が見られなかった ($p = 0.1071$)。このことから、前進感覚については走行映像の有無による違いのみが確認できた。

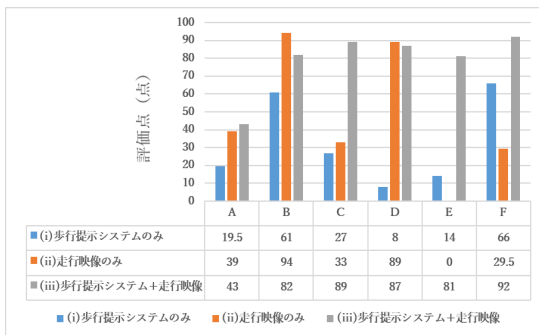


図 6 前進感覚の評価

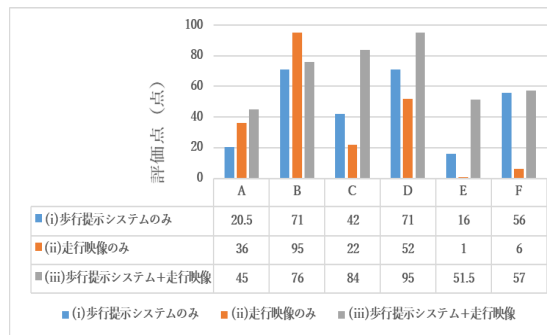


図 7 自己運動感覚の評価

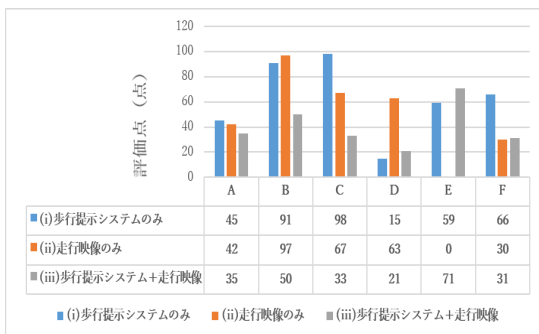


図 8 違和感の評価

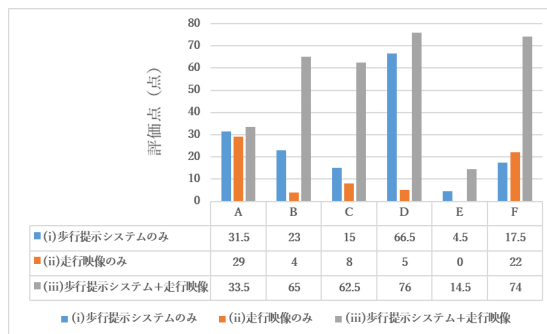


図 9 身体運動感覚の評価

「自分で動いている感覚があったか」の評価値の平均を図 7 に示す。走行映像の効果について有意差が得られた ($p=0.0211$)。また、歩行提示システムの効果について有意差が得られた ($p=0.0497$)。このことから、走行映像と歩行提示システムがそれぞれ本評価値に影響していることが示された。

「体の動きに違和感がなかったか」の評価値の平均を図 8 に示す。本項目については、体の動きに違和感がないことが本来の評価点となるため、満点から得られた得点を引いた数値を解析に用いる得点として扱う。走行映像の効果については有意差は得られなかった ($p=0.1288$)。歩行提示システムの効果についても有意差は得られなかった ($p=0.6131$)。

「システムの動きが自分の体の一部のように感じたか」の評価値の平均を図 9 に示す。走行映像の効果について有意差が得られた ($p=0.0327$)。また、歩行提示システムの効果に有意差が得られた ($p=0.0113$)。このことから、走行映像と歩行提示システムがそれぞれ本評価値に影響することが示された。

以上の結果から、歩行提示システムを用いることで自らが動いている感覚と、自動運転車両の動きが自分の体の一部のものであるかのような感覚が向上することが確かめられ、提案手法によって自動運転車両乗車中に行為主体感を生起させることができることを確認した。

酔いの研究においては、運転行為も含んだ自己運動をおこなっている際にはその運動主体には酔いが生じにくい、他者の運動時の映像をそれと合致した自己運動をしない人に見せると良いが生じやすいことが知られている。これは人間が能動運動時に、自己運動感覚に基づいて身体から得られる感覚情報を予測し、良いに影響を与える成分 w お減衰させて知覚しているためであると考えられる。そのため、提案手法で自動運転車両の運動に行為主体感を生起させることは、自動運転車両乗車中の酔いを低減させ、より安心して快適な自動運転システムの実現に貢献する可能性もある。今後はこうした可能性についても検証していきたい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

鳴海拓志, ゴーストエンジニアリング: 身体変容による認知拡張の活用に向けて, 認知科学, Vol.26, No.1, pp.14-29, 2019年3月.

小川奈美, 鳴海拓志, 伴祐樹, 櫻井翔, 谷川智洋, 廣瀬通孝: えくす手: パーチャルな拡張身体を用いたピアノとのインタラクション, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.23, No.3, pp.91-101, 2018年9月.

〔学会発表〕(計 2 件)

Sayaka Ono, Haruto Sasaki, Kumon, Yoshitaka Fuwamoto, Shunsuke Kondo, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa & Michitaka Hirose: Improvement of driver active interventions during Autonomous driving by displaying trajectory pointers - A driving simulator study, 26th ESV Conference, 2019.

近藤駿介, 鳴海拓志, 小野佐弥香, 不破本義孝, 谷川智洋, 廣瀬通孝: 自動運転シス

テムにおける未来予測位置提示手法の基礎検討, 信学技報 Vol. 118 No.95, pp. 155-159, 2018.

〔図書〕(計1件)

廣瀬 通孝 (監修), 東京大学バーチャルリアリティ教育研究センター (編集), トコトンやさしいVRの本, 日刊工業新聞社, 2019. (分担執筆: 鳴海拓志他)

〔産業財産権〕

出願状況 (計1件)

名称: 情報提示装置および情報提示方法

発明者: 小野佐弥香, 不破本義孝, 久門仁, 岩本貴之, 森大樹, 鳴海拓志, 近藤駿介, 谷川智洋, 廣瀬通孝

権利者: トヨタ自動車株式会社・国立大学法人東京大学

種類: 特許

番号: 特願 2018-022473

出願年: 2018

中国出願番号: 21910022889.6

中国出願年: 2019

米国出願番号: 16/270926

米国出願年: 2019

国内外の別: 国内および国外 (中国, 米国)

取得状況 (計0件)

〔その他〕

特になし

6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 連携研究者

連携研究者氏名: 廣瀬通孝

ローマ字氏名: HIROSE, Michitaka

連携研究者氏名: 谷川智洋

ローマ字氏名: TANIKAWA, Tomohiro

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。