

熟練技能中心設計： 電動パワーステアリング開発における イノベーションの創出

伊藤 英明^{†1} 榎田 美雄^{†2} 小松 真弓^{†3,*1}
中村 健信^{†3} 尾崎 史典^{†1}
齋藤 ゆみ^{†1} 川路 茂保^{†4}

自動車の電動パワーステアリングの開発時、モータアシストによる違和感を感じさせない操舵感の実現が重要とされる。この作業は、熟練のテストドライバが、操舵感の感性評価と ECU のパラメータ値の調整を試行錯誤的に繰り返すことで実施されてきた。しかし、より短期間で良い操舵感を実現することが事業上求められた。本稿では、様々な専門性を持つメンバが、電動パワーステアリングの評価・調整作業を支援することを目標として参加した開発プロジェクトにおいて、(1) 思いがけず熟練者が開発プロセスを主導することで、(2) 可視化された熟練者の技能に基づくインタラクションが活発になり、その結果、(3) 熟練者が実践する技能を新たな技術で適切に置換でき、イノベーションと呼ぶに値する意識および技術上の変革が達成された事例を報告する。

The Expert-skill-centered Design: A Trial Production for Innovation in the Development of an Electric Power Steering System

HIDEAKI ITO,^{†1} YOSHIO KASHIDA,^{†2}
MAYUMI KOMATSU,^{†3,*1} TAKENOBU NAKAMURA,^{†3}
FUMINORI OZAKI,^{†1} YUMI SAITOH^{†1}
and SHIGEYASU KAWAJI^{†4}

In the development of an automotive electric-power-steering (EPS) system, a natural feel in the steering wheel is an essential issue for manufacturers. An expert-test-driver has tuned up many parameters of a control-unit through trial

and error process to achieve better feel, in the past. Technologies was strongly required that could tune the parameters in shorter period of time and to achieve better steering feel. Toward that end, those who have various experties make a commitment to the R&D project which we report in this paper. Through the analysis of this case, we find that: (1) the expert-test-driver come to leads the development process, (2) he invigorate interaction among members of the project, which is based on the visualized skill of the expert, (3) the skill can be replaced reasonably by new technologies that we have developed in the project. It shows that there are not only technological progress, but unexpected changes in their mind, which seems worth being called 'innovation'.

1. はじめに

本稿では、熟練者が実践する技能を解明するため、熟練技能者/計算機科学の専門家/制御工学の専門家らが参加した約 2 年半にわたる開発プロジェクトを紹介する。また、エスノメソドロジストおよび開発に参加したメンバがその事例を分析したことで明らかになった、イノベーションと呼ぶに足る思わざる変化が生じた過程について述べる（図 1 参照）。

対象とする熟練者は、自動車に使用される電動パワーステアリング (Electric Power Steering. 以下、EPS と呼ぶ) のモータ制御ユニット (Electric Control Unit. 以下 ECU と呼ぶ。図 2 参照) を開発する部門において、EPS による操舵の違和感や安全上の問題がないかを評価する。またもし問題があれば、ECU 内のパラメータを調整することで、所望の操舵感となるような調整を行う。

もちろん、自動車メーカーや車のコンセプトごとに所望の操舵感は異なる。また、ECU 内のパラメータは数百にも及び、各パラメータと熟練者が評価する操舵感の関係は自明ではない。熟練者は、自身の経験に基づいて操舵感の感性評価と ECU のパラメータ値の調整を試行錯誤的に繰り返すことで、適切な EPS の操舵感を実現する。

^{†1} オムロン株式会社センシング&コントロール研究所
Sensing and Control Technology Laboratory, OMRON Corporation

^{†2} 徳島大学総合科学部
Faculty of Integrated Arts and Sciences, The University of Tokushima

^{†3} オムロン株式会社オートモーティブエレクトロニクスコンポーネンツカンパニー
AEC Company, OMRON Corporation

^{†4} 熊本大学大学院自然科学研究科
Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University

*1 現在、退職 (2006 年)
Retired in 2006

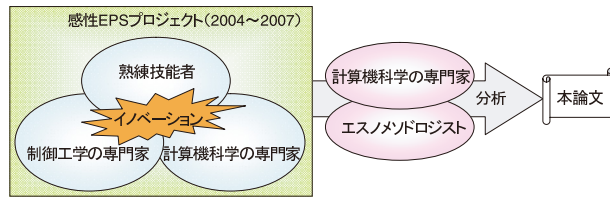


図 1 本稿の位置づけ
Fig. 1 Positioning of this paper.

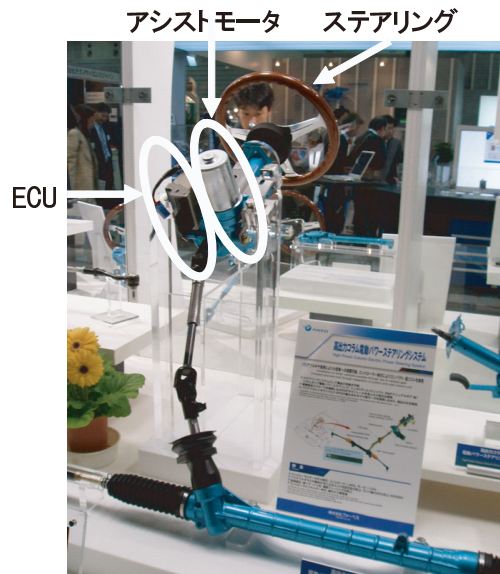


図 2 電動パワーステアリング概要図
Fig. 2 Conceptual figure of an electric power steering (EPS).

EPS における操舵感の評価および調整という作業を、本稿では「感性チューニング」と呼ぶ。感性チューニングは、EPS が製品として成立するために不可欠な作業であるが、その技能の取得には車両挙動に関する深い知識と長い年月の経験が必要であり、技能者の数は不足している。また工数の明確な見積りや短縮が難しいことが事業展開上課題となる。

こうした課題に対して、当初我々は、知識工学の手法を参照し、計算機科学の専門家が熟

練者の知識をルールとして外在化させることで、計算機によって操舵感の評価および調整を積極的に支援する仕組みを検討した。その際、人（熟練者）、車種、ECU は前提条件としてとらえた。いったん、知識を外在化する手法が確立されれば、前提条件が変わったとしても、小規模なシステムの変更で済むのではないかと、という期待に基づいた判断であった。

しかし、熟練者と共同で開発を進めるなかで、技術に対する期待の変化 熟練者の知識を外在化させるという当初の目的から、熟練技能の
実践自体を変革することへの、技術に対する思わざる期待の変化

期待に応える技術革新 熟練技能の実践に基づき設計された、革新的な制御アルゴリズムという、2つのイノベーションと呼ぶに値する成果が生まれ、熟練者の実践がより手順化されたものへと変革された。この結果、従来、知識工学的手法において指摘されてきた、「外在化された知識の状況依存性」¹³⁾という課題を回避して、目的を達成することができた。

本稿の残りでは、上記イノベーションが、プロジェクトチーム内でどのように達成されていったのかについて述べる。

2. 関連研究

従来から、熟練者が持つ知識や技能を分析する試みは数多い。これらの先行研究と本研究の関連を、以下にまとめる。

2.1 エキスパートシステム

エキスパートシステム（以下、ES と略す）は、悪構造問題と呼ばれる、解法の手順化がなされていない課題に対する解決システムを目的とする。抗生物質の投与助言システムである MYCIN⁵⁾をはじめ、ミニコンの構成作業支援システム R1³⁾のように、実用化されたシステムも多数存在する。

ES は、知識ベースと汎用の推論システムを組み合わせることで、解法手順が明確ではない悪構造問題への「アプローチを手順化」しているといえる。しかし、脱コンテキスト的に専門家の一般的知識を体系化することは困難であり¹³⁾、その結果、ルール作成時における想定外の状況へ対応することは難しいという課題があった¹²⁾。

本稿では、熟練知識をソフトウェアの形で外在化するのではなく、熟練者の実践をより手順化されたものへと変革できるように、熟練者との共同開発プロセスをデザインすることで、この課題を回避できることを示す。こうしたデザイン手法を、「熟練技能中心設計」と名付けた。

なお正直なところ、我々が、当初から熟練技能中心設計による開発を目指していたわけで

はない。知識工学的な非専門性という要因により、偶然の結果として得られたものであると考えている。この詳細は、事例を通じて後述する。

2.2 熟練者の動作に注目した研究

熟練者が技能を実践する際の身体的な動作をモデル化することによる熟練技能の解明が試みられてきた。モデリングのアプローチには、基本的な力学モデルを組み合わせたり、あるいはセンサにより実測した熟練者の動作データに対して計算機を使用したマイニング手法を適用したりすることなどが提案されている^{6),10)}。

他方、観察の手法やインタビューなどの定性的なアプローチを通じて熟練者の動作を分析した研究としては、クラシック・バレエにおける技能伝承過程の考察⁹⁾や、音で缶詰の不良検査を行う打検士の技に関する分析¹⁴⁾などがある。

こうした研究では、熟練者の技は第3者的視点から解明されている。一方、本研究において、熟練者は目標を共有するプロジェクトチームの一員であり、よって他のメンバは各自の専門性を活かして、熟練者が技能を実践する場へ積極的に介入している。

2.3 暗黙知と形式知

経営学の観点からは、組織内の知識やノウハウの活用について、「暗黙知」と「形式知」の相互変換プロセスに基づいた SECI モデル⁴⁾が提案されている。イノベーションに至る我々の経験は、この SECI モデルにあてはめて説明することも可能と考えられる。

しかし本稿では、暗黙知および形式知に関する議論を避け、当事者へのインタビューや議事録をエスノメソドロジの観点から分析することで、イノベーションに至る過程を考察した。なぜなら、我々は「熟練者による実践」に注目することによってイノベーションに至ったと考えている。よって、その事例を報告するという本稿の目的は、「知」を考察する枠組みを使用しなくて達成可能と判断したためである。

3. 事例の背景：感性 EPS プロジェクト

我々の開発プロジェクトは、車載電装部品の開発を行う事業部のメンバと研究所のメンバらによる、プロジェクト型組織として結成された。期間は2004年8月から、事業部への移管が行われた2007年3月までの2年半であり、メンバは総勢10名ほどである。

本章では、事例を述べる際の背景知識として、「感性 EPS」と名付けられたこのプロジェクトについての概要を説明する。

3.1 感性 EPS の目的

パワーステアリングは、アシスト力を発生させる仕組みによって油圧式と電動式の2つ

が存在し、以前は油圧式が主流であった。しかし近年では、小型化できることや、燃費の向上が見込めること、危険回避など先進的な操舵アシストを実現しやすいことなどの理由により、電動式のパワーステアリング (EPS) の需要が急増している。

しかし、自動車に EPS を採用する場合の大きな課題として、操舵時の違和感が発生しやすいことがあげられている。

油圧式の場合は、オイルを介してエンジンの力を伝達し、ステアリングのアシスト力を生み出す。その際、オイルが持つ粘性や圧縮率といった物理的性質がアシスト力の変化に適度な冗長性を与え、自然な操舵フィーリングが実現されている。一方、EPS では、ステアリング機構と連結したアシストモータを回すことでステアリングのアシスト力を生み出す。アシストモータの動きは、ECU によりコントロールされる。よって、ECU のモータ制御アルゴリズムが不適切であれば、ドライバの意図しないアシスト力が発生し、操舵時の違和感につながる。

こうした課題に対して、操舵感チューナは、実車を運転しながら、モータ制御アルゴリズム内の変数を適切に設定 (すなわち、感性チューニング) することで自然な操舵感を実現する。本プロジェクトは、ソフトウェアの支援により感性チューニングの期間を短縮し、操舵感を向上させることを目的としたものであった。

3.2 プロジェクトのメンバ

プロジェクトのメンバのうち、本稿で述べるイノベーションのプロセスで中心的な役割を果たしたものは、以下の3名である。

感性チューニングの熟練者 事業部において、長年の間、感性チューニングの業務に携わってきた熟練技能者。運転技術や車両のメカ構造にも詳しい。

計算機科学の専門家 統計学や AI のアルゴリズムを用いて、データ分析の実務を行う技術者。

制御工学の専門家 制御工学の知識・開発経験を持つ事業部の技術者。

ただし、つねに上記3者が積極的に関与したわけではなく、初期段階では熟練者と計算機科学の専門家が中心となり、その後、制御工学の専門家が関与するようになった。各自が実際に果たした役割については、各事例の中で考察する。

3.3 プロジェクトの進行

プロジェクトは、実車実験の現場を中心に進められた。実車実験には、全長1キロほどのテストコースが使用され、総日数は数十日間に及んだ。実験では、熟練者による操舵感の評価および調整に加え、開発ソフトウェアの検証が行われた。



図 3 実車試験の準備の様子

Fig.3 A preparation for the experiment with an automobile.

実験で取得したデータは主に、操舵感の評価値（+2 点～2 点で熟練者により点数付けされたもの）、車載センサの出力データ、ECU 内部の各種電流値、実験中の音声・映像記録である。図 3 は、車内でこうしたデータ取得の準備を行う様子である。

テストコースにはミーティングルームが併設されており、実車実験の合間にメンバー間で活発な議論がなされた。議論の内容は、技能について熟練者が他のメンバーの質問に答えるほか、実験計画の修正や、データ分析結果についての議論など多岐にわたった。ここでの議論をもとに、実験計画の作成やデータ分析などの作業を各自がデスクワークとして持ち帰り、次回の実験に向けた準備を行った。

4. イノベーションの事例とその分析

本章では、イノベーションがどのようなプロセスを経て達成されていったのかを、4 つのフェーズに分割して述べる。

全体をフェーズに分割する基準として、現場で生まれた「俗語」の使われ方に注目した。プロジェクトにおいては、新しい開発目標が設定されるごとに、その目標を指す多くの俗語が生まれ、使用された。その中には、次第に使われなくなった言葉も多いが、その言葉がプロジェクトにおいて有用であった場合には、その後も継続的に使用された。こうした新たな俗語の定着は、プロジェクトチーム内に俗語が指す先にある価値観や文化が秩序立てられたと考えられる¹¹⁾。

この観点から、記録された議事録や開発ドキュメントを分析した結果、次のように名付けた 4 つのフェーズが順次達成されることで、最終成果へと到達したことが明らかになった。「感性指標」の定義 代表的な俗語は「感性指標」「品質要素」「味付け要素」「感」など。「感性構造」の解明 代表的な俗語は「感性構造」「調整ツール」から「新制御系」への目標の変革 代表的な俗語は「新制御系」「ベストゲイン」「識別マップ」

「統合ツール」による熟練技能の新たな実践 代表的な俗語は「統合ツール」

本章の残りでは、上記の各フェーズの詳細な説明と、プロジェクト終了後にエスノメソドログリストを交えて行った考察を述べる。

4.1 「感性指標」の定義

4.1.1 背景

当初、熟練者は、操舵感を表現するための言葉をいくつか使用していた。しかし、それは網羅的なものでないことを熟練者が認めていた。そこで、熟練者が操舵感を評価する際に使用する観点の過不足ない（と、熟練者が納得できる）言語化を試み、その成果物を「感性指標」と名付けた。

4.1.2 詳細

熟練者の評価観点の言語化には、当初、評価グリッド法と呼ばれるインタビュー手法⁸⁾の使用を試みた。評価グリッド法は、マーケティングリサーチで使用されているインタビュー手法である。ある商品に対するモニタの評価構造をモニタ自身の言葉により抽出できるという特徴がある。

具体的には、熟練者が過去に運転したことのある具体的車名を起点としてインタビューを行った。すなわち、すでに熟練者によって言語化されていた各操舵感が「最も良かった車は何か？」を熟練者に尋ね、こうして得られた車名を用いて、その差異の理由付けや具体化を求めた。その結果、熟練者からの豊富な回答を得ることができた。

こうして得られた回答の多くは、評価グリッド法の説明にあるような階層的な記述ができるほど整理されたものではなかった。そこで、言語化された操舵感・各操舵感の具体的説明・EPS コントローラ内のパラメータがノードとして入りまじったネットワーク図（図 4 参照）として記述した。

その結果、操舵感の種類は、図 4 に示すように「中立感」や「フリクション感」、「しっとり感など」、合計 10 種類となった。これらは、熟練者の操舵感を過不足なく言語化したという意味で「感性指標」と名付けられた。

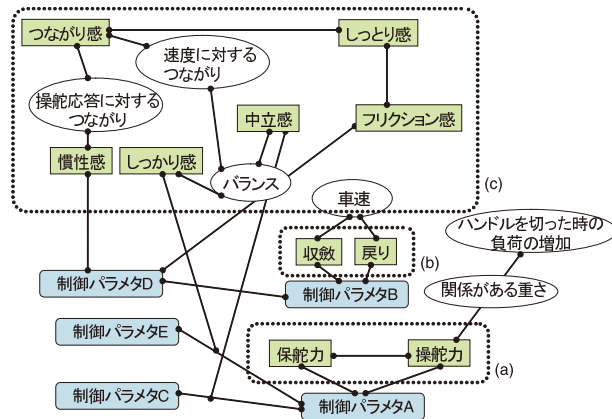


図4 インタビューから得られたネットワーク図(編集の上抜粋)
Fig.4 A network diagram derived from the interview.

この図において、制御パラメータ A~E は、既存の EPS コントローラに依存するものであり、熟練者が概念レベルで持っている操舵感の評価観点とは関係が薄いと見なすことができた。すると、感性指標は図4の破線で囲った、3つの独立した群に分けることができた。a)「操舵力」および「保舵力」からなる群、b)「収斂」および「戻り」からなる群、c)「中立感」「フリクション感」「しっとり感」「しっかり感」「慣性感」「つながり感」からなる群、の3群である。

この群が、何か意味を持つものか熟練者に尋ねたところ、

- 最も大きな c) 群は、運転中に何も感じない、すなわち違和感のない操舵感を目的とする、「品質要素」と考えられる。
- a) 群および b) 群は、「スポーティ」「高級感」など、操舵感の個性を出すために使用する、「味付け要素」と考えられる。

という、意見を得た。

4.1.3 事後の考察

感性指標は、その後のプロジェクトを通じて、メンバ全員の共通語として使われ続けた。最初に熟練者が持つ概念を言語化するという行為は、従来から知識工学者たちが対象ドメインを理解するために行ってきた試みと共通する。

感性指標が「品質要素」と「味付け要素」の2種類から構成されているという「発見」は、

熟練者自身が気づかずにいた感性チューニングの構造を明らかにするものであった。そして、この発見は、プロジェクト全体の工数を大幅に減らすことに貢献した点で、重要な発見であった。なぜなら、熟練者の経験や事業的観点から「品質要素」を満たす感性チューニングを最重要課題とする意思決定が可能となり、結果、6つの感性指標にのみ注力して、その後の開発を進めることができたためである。

4.2 「感性構造」の解明

4.2.1 背景

感性指標の関係図(図4)および熟練者の経験から、品質要素の6つの感性指標は完全に独立ではなく、何らかの関連性があることが考えられたため、実車実験を行い、定量的にその分析を行った。

なお、混乱を防ぐために明記すると、「感性指標」は熟練者が操舵感を評価する際の概念的な視点であり、EPSの実装には依存しない普遍的なものと定義している。一方、「感性構造」は、図4がEPSコントローラのパラメータをノードとして含むことから考えて、現在使用しているEPSにある程度依存することは避けられないととらえている。

4.2.2 詳細

感性指標間の関連性を定量的に検証するため、共分散構造分析⁷⁾を使用した。この統計手法では、感性指標間に仮説として設定した因果構造の妥当性を、適合度指標を用いて検討する。具体的な分析手順は以下のとおりである。

まず、感性指標間の関連を、一方の感性指標の変化がもう一方の感性指標へ影響を与える因果構造としてとらえ、感性指標間の因果構造仮説を設定する。この仮説の設定は、図4のノード間のつながりに対し、熟練者がその2ノード間の因果仮説を矢印の向きとして順次設定することで行った。この際の1つの基準として、操舵トルクや操舵角などの物理量を用いて表現しやすいものは原因に近く、より説明し難いものは結果に近くなるよう配置した。こうして得られた仮説を、図5に示す。

次に、品質要素に含まれる6つの感性指標ごとに、実車を用いて-2点から+2点の範囲で操舵感の点数付けを行うよう熟練者に依頼した*1。採点の基準として、商品として満たすべき最低限度の品質を0点とした。同時に、加速度センサや操舵トルク計などのセンサ類を車両に設置し、評価時の車の挙動を物理データとして記録した。

*1 感性指標が明確化する以前では、当然ながら、熟練者は感性指標を個別に評価していたわけではなく、「総合的に」評価した後、気になる部分をチューニングしていた。そのため実験に先立って、6つの感性指標それぞれに対して、その指標を個別に評価するための運転操作を熟練者が確立するための時間を必要とした。

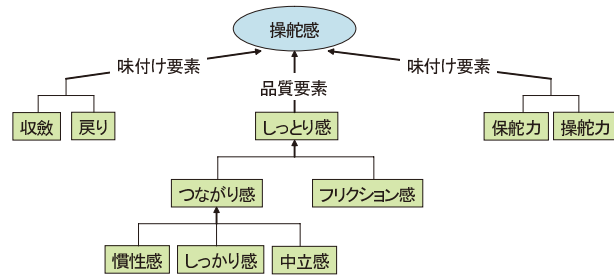


図 5 感性構造の因果仮説

Fig. 5 Hypothesis of cause-and-effect diagram about indexes of evaluation of steering feelings.

以後、ECU 内のパラメータを微修正後、1 回目同様、熟練者が感性指標ごとに点数付けを行うことを、数十回繰り返した。すなわち、数十パターン of ECU 内パラメータの設定値それぞれに対して、感性指標ごとに操舵感の評価点が付けられた。

こうして取得した評価点をもちいて、図 5 のうち、品質要素についての因果仮説を統計的に検証した。6 つの各感性指標を潜在変数^{*1}とし、感性指標ごとに実験で取得した評価点を観測変数^{*2}として、パス図^{*3}を作成する。パス図の作成には、SPSS 社の Amos6.0 を使用した。

次に、このパス図におけるモデル適合度指標^{*4}を計算した。さらに、取得データとの適合度がより良くなるよう、計算機科学の専門家が試行錯誤的にパス図を修正した。

その後、熟練者による仮説（図 6 左：仮説 1）および、モデル適合度指標の観点から作成した代案（図 6 右：仮説 2）の両方を、熟練者へ提示した。

熟練者はこの 2 つの仮説の図を見比べ、最初の仮説（図 6 左）では比較的独立していたフリクション感が、定量化手法による代案（図 6 右）では、中立感やしっかり感とともに、つながり感へ影響を与えていることに注目した。熟練者は、中立感とフリクション感の間のトレードオフ関係を経験的に感じており、仮説 2 のの方がそのイメージに近いと感じたためである。

そこで、中立感とフリクション感のトレードオフ関係をより直接的に表現した新たな仮説

*1 共分散構造分析において設定する、実際には観測不可能である構成概念
 *2 実際に観測可能な変数
 *3 変数間の因果関係を矢印として表現した図
 *4 パス図として記述したモデルが、実際の観測データにどの程度適合しているかを示す指標

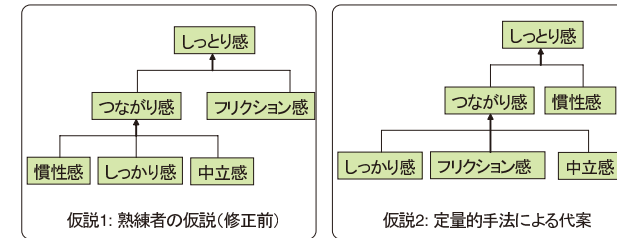


図 6 感性構造の仮説（左：1 版）（右：2 版）

Fig. 6 Hypothesis of cause-and-effect diagram about indexes of evaluation of steering feelings (left-side is 1st revision and right-side is 2nd one).

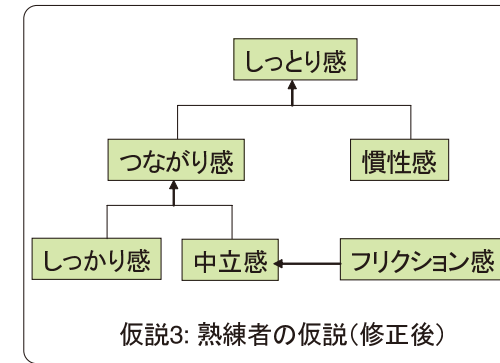


図 7 感性構造の仮説（3 版）

Fig. 7 3rd hypothesis of cause-and-effect diagram about indexes of evaluation of steering feelings.

（図 7）が熟練者から提案された。この仮説を再度パス図で表現し、共分散構造分析を行ったところ、以前の仮説よりも良いモデル適合度が得られた。すなわち、実験データによる説明性が高い仮説といえた。

また共分散構造分析を行うと、矢印（パス）で結ばれた感性指標間での影響度合いが数値として得られる^{*5}。図 7 において、フリクション感から中立感に向かうこの数値は、 -0.38 であった。負の数値は、フリクション感を良くすれば、中立感が悪くなることを示す。この

*5 重回帰分析における偏回帰係数にあたる。

結果は、熟練者が感じていたトレードオフ関係を、定量的に示すものであった。

以上の仮説設定および定量的分析の結果、図7に示す仮説が、感性指標間の関係を表す「感性構造」として定められた。

4.2.3 事後の考察

専門家へのインタビューからネットワーク図として知識を記述し、この図を用いたインタラクションにより、より明確な因果構造へと図を精練していく手法は、MORE²⁾のような先行研究でも使われている。

しかし我々は、本プロジェクトにおける「感性構造」が、従来の知識工学における因果構造とは異なる位置づけを持つと考えている。

すなわち、知識工学者が因果構造を獲得する際は、ルールという道具の使用を前提として知識工学者が対象を理解していったのに対し、我々の感性構造は(少なくとも計算機科学の専門家には、当初その意図はなかったものの)「熟練者自身が、定量化という観点から自分の技能を見直す」ための道具であった。

この件については、熟練者自身が、「感性構造(を分析するための実車実験)は自分が知りたいからやった」と明言している。一方、データ分析を担当した計算機科学の専門家は、当初から熟練者自身の理解のために感性構造の解明を試みたわけではない。率直に言えば、図4を整理することにより、調整手順の大まかなルール化ができることを、漠然と期待していたにすぎない。

だが、この計算機科学の専門家は知識工学の専門家ではなかったため、知識工学者としての目的意識や経験に裏付けられた、インタビューからルール記述までの「型」を持っていなかった。そのため、熟練者の知識をルール化できる形で効果的に引き出すよう明確に開発プロセスを進める意識があるわけではなかった。一方、熟練者は、「定量化することで自身の技能をより深めるきっかけになるかもしれない」と、明確な目的意識を持って実験に望んでいた。その結果、熟練者が開発プロセスを主導した。

結果的には、熟練者の技能を定量化し、その結果を熟練者自身が納得いくまで考察することが、我々が後に主張する「熟練者発のイノベーション」の必要条件であり、最終的に熟練技能の実践自体の変革につながった要因と考えている。「感性構造」を解明したこと自体はイノベーションと呼べるものではないが、「熟練者発のイノベーション」を特徴付ける最初のプロセスである。

4.3 「調整ツール」から「新制御系」への目標の変革

4.3.1 背景

「感性指標」や「感性構造」として熟練者の技能が可視化されたことにより、計算機を利用して技能を自動化することへの期待が高まった。具体的には、一定時間、車を運転することで取得した車載センサの値を入力とし、そのときの操舵感を感性指標ごとに得点化し、点数が低い場合にはどこを修正すればよいのかを出力するソフトウェア(=「調整ツール」)が期待されるようになった。

そこで、各種センサで取得した物理データから感性指標を識別することが試みられた。

4.3.2 詳細

感性指標の識別による調整ツール

当初は、熟練者の指先にかかる圧力を振動センサで取得し、熟練者が何を感じているのかを探ることを検討した。しかし、路面とタイヤとの振動ノイズが大きくなり、熟練者が感じている繊細な感覚を直接センシングすることは困難であるとの結論に達した。

そこで、すでに取得していた、感性指標ごとの評価点とそのときの車載センサ出力からなるデータセットをもとに、各感性指標が物理量によってどの程度識別できるのかを検証した。以下にその手順を示す。

- (1) 横方向の重力、ヨーレートなど、複数の車載センサで取得した時系列データを感性指標ごとに分類後、各データに対して評価点に応じたラベルを付与する(評価点が0以上のものを「OK」、それ未満のものを「NG」とした)。すなわち、センシングデータを、感性指標6種類×ラベル2種類の12グループに分類する。
- (2) 各時系列データごとに、波形分析で一般的に使われる時間領域および周波数領域の特徴量(ピーク値や歪み度など)を使用して特徴量を算出する。
- (3) サポートベクターマシーン(SVM)を使用した交差検定により、各感性指標のうちOKと評価されたデータの特徴量が、他の11グループに属するデータの特徴量から識別される割合を検証する。

この結果、平均して7割以上の精度で、OKラベルの各感性指標を識別することが可能であった。

分析を実施した計算機科学の専門家にとって、この結果は物理量で操舵感を定量化できる可能性を示すものであったため、今後は識別精度向上を目的とした特徴量開発に注力すべきであると主張した。しかし、熟練者からは、以下の理由により反論がなされた。

SVMでは高次元の特徴量空間における超平面を決定することで判別問題を解く。今回の

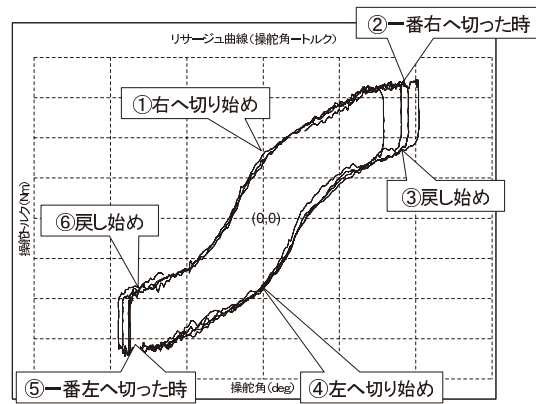


図 8 操舵のリサーチ曲線上
Fig. 8 Lissajous figure of steering.

分析では、10次元以上の特徴量空間を使用した。しかし熟練者にとっては、波形分析用特徴量を使用して計算された数字を「ただ並べた」分析結果と、自身の経験的知識とを関連付けることは困難であったため、結果の妥当性を判断できなかった。識別の精度よりも、「そもそも何をしているのかが見えなくなるの方が気がかり」との主張がなされた。

こうして、感性指標の識別精度を向上させることよりも、熟練者が自身の経験的知識と関連づけ、可能な形で各感性指標を定量化することが新たな課題として認識された。

一般に、操舵特性の最も基本的なパラメータは操舵トルクである。熟練者も、いくつかの感性指標を説明する際には、「(ステアリングを)切っていたときの(手に感じる)トルクの変化の山が」というような表現を使用していた。そこで、操舵トルクと操舵角によるリサーチ曲線上で感性指標を識別する案が熟練者から提案された。この案を、図8を用いて説明する。

図8は、熟練者が中立感の評価をした際に取得した操舵角および操舵トルクを、それぞれX軸/Y軸として記述したリサーチ曲線である。たとえば直進状態では操舵角0度(図の1番)であり、そこから右にステアリングを切り足していき、最も右へ切った状態が図の2番である。すなわち、ステアリングを右に切り、戻し、左に切り、戻すと、リサーチ曲線状で1周する。

操舵感を評価する際、熟練者は一定速度で車を走らせ、何度も左右交互にステアリングを



図 9 リサーチ曲線の比較図

Fig. 9 Comparative diagram of lissajous figures.

切る操作を行う。これはどの感性指標についても同様である。このときの舵角と、ステアリングにかかった操舵トルクの関係を図形として表したものが図8のリサーチ曲線である。熟練者からの提案は、この図形上の差異として感性指標を識別することができるのではないかと、いうものであった。

そこで、先の実験で取得したトルクセンサと操舵角の値を用いて、感性指標ごとにリサーチ曲線を描画した。その結果を図9に示す。

多数のデータを重ね合わせたため、操舵のぶれがリサーチ曲線上の幅となって表れているものの、感性指標ごとに明確な違いが見られている。この識別結果は熟練者にとって、SVMが用いられた際に感じたような「何をしているのかわからない」ものではなく、自らのステアリング操作と、その操作時に感じる感性指標との経験に基づいて妥当性を判断できるものであった。

ゲインスケジューリングによる新制御系

前述のリサーチ曲線による方法で、感性指標を識別できる手法が確立された。また、その後の分析により、同一の感性指標についても、良い評価と悪い評価では、異なるリサーチ曲線となることが分かった。そこで計算機科学の専門家は、熟練者の技能をソフトウェア化した「調整ツール」が実用化できると考えた。

しかし、プロジェクトチーム内には、「調整ツール」の価値に疑問が持たれるようになっていた。その原因は、「感性構造」(図7)の解明により、中立感とフリクション感のトレードオフが定量化されたためであった。このトレードオフは、中立感とフリクション感を両立することが困難であることを示す。よって、現行のEPSコントローラに特化した「調整ツール」を作るよりも、EPSコントローラ自体の設計を見直すことが先決ではないかという意見が、制御工学の専門家や熟練者から出された。

なお混乱を避けるため繰り返すと、「感性構造」は普遍的なものではない。現行の EPS コントローラのパラメータを含んだ構造（図 4）から仮説をつくり、その EPS を搭載した車で検証した以上、少なくとも部分的には EPS コントローラの設計に依存したものであると考えられる。したがって、中立感とフリクション感のトレードオフも、制御系の設計を改良することで解消できるのではないかと、というのが制御工学の専門家らの主張であった。

また、調整ツールの完成後に、ツールの対象である EPS コントローラの設計を変えた場合、調整ツールにも再度大幅な変更が必要となる可能性が高いことが熟練者から指摘された。さらに、トレードオフが解消されれば、感性チューニングが今よりも容易になり、調整ツールがなくても最終的な目的である作業の効率化が達成されると考えられた。

こうした理由により、プロジェクトにおける EPS コントローラの位置づけは、プロジェクトにおける「前提条件」から「開発対象」へと変化した。すなわち、感性指標間のトレードオフ関係を生まない EPS コントローラの設計が、新たな開発目標となった。

この目標に対して制御工学の専門家は、ゲインスケジューリングを使用した「新制御系」の設計手法を提案した。

ゲインスケジューリング（以下 GS と略す）は、近年提案されている制御アルゴリズムの 1 つであり、過度の環境変化や外乱が生じた際に、その変化に応じてシステムのゲインを変更することで、安定した制御を実現する¹⁾。制御工学の専門家の提案は、システムの安定性向上を目的に使用されてきた GS の手法を、感性指標間のトレードオフ解消に利用するというものであった。

制御工学の専門家がこのアイデアに至った経緯を以下に述べる。

図 10 は、EPS コントローラの 2 つのパラメータ（ゲイン A およびゲイン B）を軸として、熟練者による中立感およびフリクション感の評価得点をプロットしたものである。ゲイン A および B は、EPS コントローラが持つパラメータのうち代表的な 2 つである。またプロット点は 12 点であり、作図の際はその間を線形補間した。

左の図からは、ゲイン A を高く（図の右側）し、ゲイン B を低く（図の下側）すると、フリクション感が良くなることが読み取れる。一方、右の図からは、ゲイン A を低くし、ゲイン B をある程度高くすると、中立感が良くなることが読み取れる。

この図から明らかなように、中立感とフリクション感のトレードオフは、それぞれ最適なゲインの設定値の傾向が逆であるために生じていると制御工学の専門家は考えた。他の感性指標で同様の分析をした結果も、これほど明確な差はないものの、最適なゲインの設定値は異なっていた。よって、感性指標によってゲインを使い分けることができれば、調整の容易

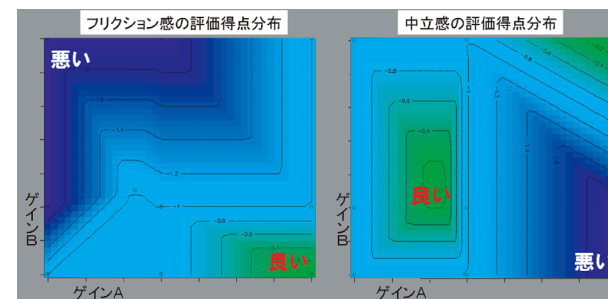


図 10 評価得点の分布図

Fig. 10 Distribution diagram of evaluation of the feelings.

な制御系ができると考えられた。このアイデアを具体的な制御系の設計へと結び付けるきっかけは、リサージュ曲線による熟練者からの提案（図 8）であった。

単に感性指標を物理データから識別するだけでよければ、SVM でも可能であったことはすでに述べた。後のインタビューによれば、制御工学の専門家は、SVM で感性指標を識別できることを知ったときに、GS の漠然としたアイデアが生まれたという。しかし、具体的な提案が制御工学の専門家からなされたのは、熟練者から提案された、リサージュ（図 8）を用いた感性指標の識別手法が検討されたときであった。

制御工学の専門家は、EPS コントローラの実装へ関連づけるための具体的手段を探すという観点から開発に参加しており、多数のセンサを使用し複雑な特徴量計算が必要となる識別方法では、EPS の制御へ活かすイメージが生まれなかった。しかし、リサージュを用いる識別方法は、トルクと舵角の 2 つの物理量のみを使用する。両者ともすでに EPS が内部で持つ物理量から推測することが可能であり、したがって具体的な制御系設計へとつなげることができた。

こうして、感性指標の識別結果に基づく GS 制御を行う ECU が開発されることになった。この制御系は「新制御系」と呼ばれた。図 11 に新制御系のブロック図を示す。熟練者からのアドバイスを受けて図 9 に示した識別手法の精度を高めたものが、ブロック図中の「感性指標識別部」に相当する。

新制御系のプロトタイプを実装し、テストコースで熟練者が評価試験を実施した結果、従来の ECU と比較して、短時間でより良い操舵感が実現可能であることが確認された。

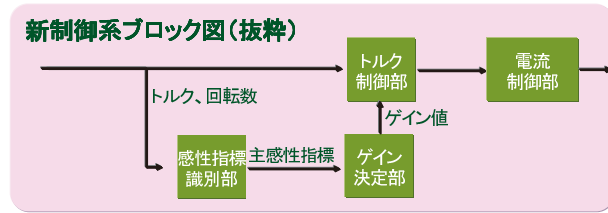


図 11 新制御系のブロック図
Fig. 11 Block diagram of the new control system.

4.3.3 事後の考察

「新制御系」は2つの意味でイノベーションとして位置づけられる。1つは、プロジェクトメンバー全員で共有される目的意識の思わざる変化としての位置づけである。

もちろん、制御工学者としては制御系の改良という課題意識をプロジェクト参加当時から持っていた。だがそれは、熟練技能を外在化する過程で得られるであろう知見への期待に基づくものであり、個人的業務としてとらえていたにすぎない。

プロジェクト全体の目的が、熟練技能の外在化から、熟練技能に基づいた ECU の設計へと変化したことは、意識のうえでのイノベーションであるといえる。それを可能にしたのは、熟練者から提案されたりサーージュ曲線による手法であった。

「新制御系」はまた、技術の意味でもイノベーションと呼ぶに値する。従来の制御系は、システムの安定性や精度向上という価値観に基づいて設計されてきた。よって、感性チューニングのように、人の感性に基づいて制御系を調整する用途において必要とされる、「感性とのマッチングの良い」制御系の設計手法は存在しなかった。だが「新制御系」では、熟練者が実践する感性チューニングに基づいた制御コントローラの実現した。

4.4 「統合ツール」による熟練技能の新たな実践

4.4.1 背景

新制御系以前において、熟練者は操舵の違和感を総合評価し、違和感があればそれを修正するという手順で感性チューニングを実施してきた。しかし、新制御系における感性チューニングでは、感性指標ごとに最適なゲイン（ベストゲインと呼ばれた）を探索する。したがって、新制御系を使用することは、熟練者が実践する技能に変更を要求する。その結果、熟練者から、感性チューニングに使用するソフトウェアに関する課題が指摘された。

熟練者は、感性チューニングでゲインを調整する際に、ECU に接続された専用のエクセル

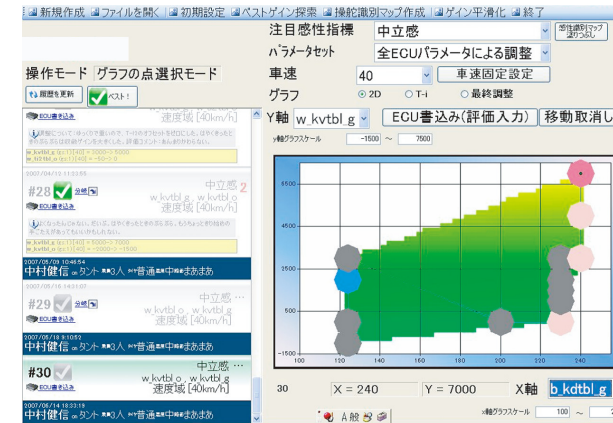


図 12 統合ツール画面イメージ

Fig. 12 A screenshot of 'TOUGOU tool': an integrated software to tune the feeling of EPS.

シートを使用していた。このエクセルシートは、ECU 内のゲイン値をセルに読み込み、またセルで指定したゲインの値を ECU へ書き込む機能を持つ。一部のゲイン値をグラフ表示する機能は持つものの、基本的にはゲインの値を変更する機能のみを持つ。

しかし、「新制御系」の感性チューニングでは、1) 各感性指標ごとのベストゲイン探索、2) 操舵の識別器の作成、3) 急激なゲイン変化を平滑化するための調整、という3つの手順を実施する必要がある。こうした手順を実施するためのソフトウェアは、個別に開発されていた。

そこで熟練者の要求により、感性チューニングにおいて熟練者が使用するための新しいソフトウェアを開発した。このソフトウェアは各手順に対応する3つの機能をあわせ持ち、「統合ツール」と名づけられた。

4.4.2 詳細

図 12 に、開発した統合ツールの画面イメージを示す。感性チューニングに必要な手順は、ウィンドウ最上部に「ベストゲイン探索」→「操舵識別マップ作成」→「ゲイン平滑化」という3つのタブごとにまとめられている。ゲインスケジューリングの採用により、各手順は作業として独立しており、後戻りは原則発生しない。また、各手順において生成されたデータは内部で管理され、自動的に次の手順で使用することができる。よって、タブを順に選択して、各作業を行うことで、感性チューニングをなしとげることができる。

この統合ツールの設計は、熟練者の賛同を得た後に実装された。評価のために、統合ツールが使われる様子を複数のビデオカメラおよびワイヤレスマイクによって記録した。現在、その詳細な分析を実施している。

4.4.3 事後の考察

「統合ツール」は、熟練者の発案により開発が行われている。すなわち、熟練者はGSを用いた感性チューニングにおいて、エクセルを使用した従来のやり方が「分割」されていると感じており、それゆえに「統合」された新しい道具が求められた。

このことから、「新制御系」として達成された技術面でのイノベーションが、この時点で熟練者自身に受け入れられており、その結果、熟練者が行う技能の実践にも変革が生じているといえる。

5. ま と め

本稿では、電動パワーステアリング調整における熟練技能の外在化という取り組みの中で生まれた、イノベーション事例を紹介した。この取り組みにおいて、思わざる開発目標の変化が生じ、最終的に熟練者の技能を変革するまでに至った理由は、熟練者発のイノベーションとなるよう開発プロセスが進められたためと考えている。

一般に、部外者によって作られた新しい技術を熟練者に受け入れてもらうことは困難である。しかし、熟練者が自身の技能についてどう意味づけているのかを共有し、その意味づけの範囲の中で、技能を別の技術に置き換えるアプローチにより、我々の開発技術は熟練者に受容された。こうした、熟練者発の変革となるような開発プロセスのデザインを、熟練技能中心設計と呼ぶことにする。

熟練技能中心設計の結果は、「技能の外在化」を試みる工学者の当初の思惑とは異なる方向へ進んでいくかもしれない。我々の場合、「感性構造」の解明を主導したのは、計算機科学の専門家ではなく、熟練者自身であった。その結果、既存制御系の「トレードオフ」が定量化され、プロジェクトの目標に対する意識の変革を促した。また「新制御系」へ至るプロセスにおいては、識別精度の向上という工学的観点ではなく、熟練者にとっての意味づけの容易さという観点からの技術開発を重視した。その結果、感性指標ごとに最適ゲインを探索するという、従来のやり方とは異なるチューニング手法が熟練者に受け入れられた。

*1 厳密にいうならば、熟練技能中心設計においても部外者が熟練者への介入を行っていることに違いはない。よって熟練者から提供される道具も、介入の影響を受けている可能性は否定できない。しかし、少なくとも開発技術を熟練者へ受容してもらい、その実践を変革するという目的において、提案手法は有効であると考えている。

上野ら¹³⁾は、知識工学者がエキスパートのドメインを理解する際には、(if-then ルールのような)システム開発上の「道具」を用いてインタラクションを組織化しており、よって得られた知識を用いる際は、こうした前提を考慮する必要があることを指摘している。

一方、熟練技能中心設計は、熟練者とのインタラクションを組織化する道具を(部外者の側ではなく)、熟練者の側から提供してもらうことを試みるアプローチといえる*1。

生産拠点の海外移転や団塊世代の大量退職などにより、ITによる技能やノウハウ継承の支援がますます重要となっている。本事例は、こうした課題に対する熟練技能中心設計の有効性を示したと考えている。

今後は、ビデオ映像や音声データを利用した、エスノメソドロジによる詳細な分析を加えていく予定である。

謝辞 オムロン株式会社技術本部センシング&コントロール研究所の荒尾真樹氏(現オムロンソフトウェア)、中嶋宏氏、長岡宏氏からは、研究方針に対する多大なご助言をいただきました。同、藤川正寛氏および、(AEC)開発事業部要素技術課の遠藤豪氏、鞍谷真一氏、藪口教定氏、植野弘氏からは実験において多大なご支援をいただきました。ソフトウェアの開発には、ソラン株式会社中出敦士氏、陽気なソフト吉村善郎氏、および長谷川清秀氏のご協力をいただきました。

参 考 文 献

- 1) Apkarian, P. and Adams, R.: Advanced Gain-Scheduling Techniques for Uncertain Systems, *IEEE Trans. Contr. Syst. Tech.*, Vol.6, No.1, pp.21-32 (1998).
- 2) Kahn, G., Nowlan, S. and McDermott, J.: Strategies for Knowledge Acquisition, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.PAMI-7, No.5, pp.512-522 (1985).
- 3) McDermott, J.: R1: A Rule-Based Configurer of Computer System, *Artificial Intelligence*, Vol.19, No.1, pp.39-88 (1982).
- 4) Nonaka, I.: The knowledge creating company, *Harvard Business Review*, pp.96-104 (1991).
- 5) Shortliffe, E.: *Computer-Based Medical Consultations, MYCIN*, Elsevier (1976).
- 6) 古川康一, 植野 研, 尾崎知伸, 神里志穂子ほか: 身体知研究の潮流—身体知の解明に向けて, *人工知能学会論文誌*, Vol.20, No.2, pp.117-128 (2005).
- 7) 豊田秀樹: 共分散構造分析 入門編, 朝倉書店 (1998).
- 8) 讃井純一郎, 乾 正雄: レポートリー・グリッド発展手法による住環境評価構造の抽出: 認知心理学に基づく住環境評価に関する研究(1), *日本建築学会計画系論文報告集*, Vol.367, pp.15-22 (1986).

1592 熟練技能中心設計：電動パワーステアリング開発におけるイノベーションの創出

- 9) 柴田庄一, 遠山仁美: 技能の習得過程と身体知の獲得—主体的関与の意義と「わざ言語」の機能, 名古屋大学大学院国際言語文化研究科言語文化論集, Vol.24, pp.77-93 (2003).
- 10) 多田昌裕, 大村 廉, 岡田昌也, 納谷 大, 野間春生, 鳥山朋二, 小暮 潔: 加速度センサを用いた行動計測に基づく運動動作解析手法, インタラクシオン 2007, pp.231-238 (2007).
- 11) 椎野信雄: エスノメソドロジーの可能性, 13 章, 春風社 (2007).
- 12) 人工知能学会 (編): 人工知能学事典, chapter 15, 共立出版 (2005).
- 13) 上野直樹, 西阪 仰: インタラクシオン: 人工知能と心, 大修館書店 (2000).
- 14) 岡田美智男, 三嶋博之, 佐々木正人 (編): 身体性とコンピュータ, chapter 2-5, 共立出版 (2000).

(平成 19 年 6 月 30 日受付)

(平成 20 年 1 月 8 日採録)



伊藤 英明 (正会員)

1976 年生。2004 年京都大学大学院情報学研究科社会情報学専攻博士課程修了。同年オムロン (株) 入社。博士 (情報学)。HCI, 知識工学, マルチエージェントシステムに興味を持つ。2004 年度電気通信普及財団テレコムシステム技術賞。ACM 会員。



櫻田 美雄

1961 年生。1991 年筑波大学大学院博士課程社会科学部研究科社会学専攻 (中退)。1996 年徳島大学総合科学部助教授。現在, 徳島大学総合科学部准教授。著訳書はダグラス W メイナード著『医療現場の会話分析—悪いニュースをどう伝えるか』(勤草書房)。山崎敬一編『実践エスノメソドロジー入門』(有斐閣) ほか。エスノメソドロジー, 組織研究, 制度的場面研究に興味を持つ。日本社会学会, エスノメソドロジー・会話分析研究会, 日本保健医療社会学会各会員。



小松 真弓

1976 年生。2001 年京都大学大学院情報学研究科システム科学専攻修士課程修了。同年オムロン (株) 入社。在職中は電動パワーステアリング制御に関する開発に従事。2006 年退職。計測自動制御学会会員。



中村 健信

現在, オムロン株式会社オートモーティブエレクトロニックコンポーネンツカンパニー開発事業部技術開発部要素技術課にて, 電動パワーステアリングシステムの開発に従事。



尾崎 史典

1975 年生。2000 年熊本大学大学院自然科学研究科数理学・情報システム専攻博士課程前期修了。同年オムロン (株) 入社。半導体製造装置制御, 電動パワーステアリング制御に関する研究に従事。



齊藤 ゆみ

1964 年生。1988 年京都大学工学部電気系卒業。同年立石電機 (株) (現オムロン (株)) 入社。知的制御系構築, 音声対話, 知識情報処理の研究・開発に従事。



川路 茂保

1944年生．1969年熊本大学大学院工学研究科電気工学専攻修了．同年同大学工学部助手．同大学院自然科学研究科教授．計測自動制御学会2003年度学術（技術賞），SI部門功績賞．工学博士（東京工業大学）．IEEJプロフェッショナル，電気学会上級会員，日本機械学会フェロー，計測自動制御学会フェロー．
