

機関番号：32657

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2008～2010

課題番号：20246071

研究課題名(和文) 熟達を考慮した人間システムモデリングとその支援

研究課題名(英文) Modeling of human system with consideration of skill and its assistance

研究代表者

原島 文雄 (HARASHIMA FUMIO)

東京電機大学・未来科学部・客員教授

研究者番号：60013116

研究成果の概要(和文)：機械が人間の熟達化を支援するシステムの設計論として、社会/計画/認知/動作/生体からなる階層的なスキル分類モデルを提案し、各階層のスキルに関する熟達定量化・支援法を研究し、6種の被験者実験でそれらの有効性を検証した。特に、社会スキルについてはチーム熟達・語用熟達・指示動作の解明、計画スキルについては人間の操作意図推定法の確立、生体スキルについては弁別度を考慮した操作支援法の実証などの成果が得られた。

研究成果の概要(英文)：To establish a system design methodology of intelligent mechatronics enhancing human skill, the five-level hierarchical skill model was presented. Based on the model concept, we studied methods of quantification, analysis, and assist of their skills, and their effectiveness were confirmed through six types of task experiments. Especially, social skills of team / pragmatics / pointing motion, were elucidated, and an estimation algorithm of operational intentions for the planning skill was established. And adaptive assistance control without awareness was demonstrated.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	7,200,000	2,160,000	9,360,000
2009年度	8,400,000	2,520,000	10,920,000
2010年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
年度			
年度			
総計	19,500,000	5,850,000	25,350,000

研究代表者の専門分野：インテリジェント・メカトロニクス

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：ヒューマトロニクス、熟達、操作支援、協調作業、コーパス、視線、意図推定

1. 研究開始当初の背景

21世紀COEプログラムにおいて「操作能力熟達に適應するメカトロニクス:Human Adaptive Mechatronics(HAM)」(平成15～平成19年度)の研究が進められたが、そこでの最終目標である“操作支援手法の確立”は十分でなく、また“熟達”の質と内容を体系的に取り扱う事に欠けていた。また、本研究代表者が研究統括を務めた、さきがけプロジェクト「相互作用と賢さ」(平成12～16年度)では、人間中心のメカトロニクスである「ヒューマトロニクス」を提唱し、これも人間と機械と

の関係向上を目指していたが、系全体の性能向上に重要な“適應性”が、主に人間側に委ねられている点が問題であった。これらの研究を発展的に展開するには、“人間らしさ”に関する本質的な特徴やその行動原理を、熟達支援という観点から体系的に捉え、具体的な熟達支援系の設計法を集積していくことが必要であった。

2. 研究の目的

そこで本研究は、機械が人間の熟達化を支援するシステムを設計するにあたって必要

な，“体系的な人間システムモデリング方法の確立”と“熟達支援法の集積”の2つを目標に進められた。前者については，熟達を考慮した人間モデルの検討と，その熟達度の定量化方法に関する研究を，後者では，前者の結果に基づいた支援系の設計手法やアルゴリズムに関する研究に取り組んだ。

人間システムモデリングについては，人間-機械系における“熟達”の意味と定義を明確にする事から始め，Norman のユーザ行為に関する7段階モデル，モデルヒューマンプロセッサ，Rasmussen のSRKモデルなどの人間の情報処理モデルの従来研究を参考に議論を進め，「熟達(スキル)にはレベルがあり，階層化すべき」との結論に達し，社会・計画・認知・動作・生体の5つからなる階層的なスキル分類法を提案した(図1)。そして各スキル(Skill)の階層毎に，支援(Assist)と人間への入力(Input)と出力(Output)情報を考える，5skill-SAIOモデル(図2)を人間システムモデリングの概念的スキームとして考案した。この階層分類に従って各レベルの熟達に関連する個別研究テーマを展開し，人間-機械支援系設計のための“熟達定量化”と“支援方法”を集積・確立を目指した。

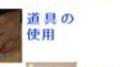
- 【S1】 社会スキル: Social skill**
Conversation, negotiation, division of roles, estimation of intentions. 
- 【S2】 計画スキル: Planning skill**
Task planning, optimization of work process, sequential dependencies, discrete movement. 
- 【S3】 認知スキル: Cognitive skill**
Recognition of circumstance, understanding of meanings subconscious awareness. 
- 【S4】 動作スキル: Motion skill**
Execution of segmented subtask, rule-base behavior. 
- 【S5】 生体スキル: Sensory-motor skill**
Voluntary motion, delay compensation in neural system, feedback-error learning control. 

図1 5階層スキル分類と具体例



図2 5skill-SAIOモデル

3. 研究の方法

本研究は，1)5階層スキル分類に関係した実験タスクを考案し，2)被験者実験により各タスクにおける人間の挙動・応答データを収集，そして3)集計データを元に熟達定量化手法の検討・解析を行い，4)得られた知見に基づいて支援系を提案，5)再度被験者実験で個々の支援方法の有効性を検証する，というプロセスで遂行した。先に各タスクの内容と目的を以下で説明する。

(1)協調運搬タスク [cooperative carrying (cc)-task]: 共同作業時の社会スキルに関する役割分担やコーパス・発話分析，作業遂行の計画スキルを分析する目的で考案したもので，3名同時に仮想ロボットの操作が可能なCG仮想空間シミュレータがその中核である(図3(a))。仮想空間内の箱を互いに協力して運ぶ作業を通して，共同作業時の会話やロボット操作，視線や脳賦活，脳波・心拍等の生体信号を計測し，各スキルの分析に用いた。



図3 協調作業実験(a)と収録画面例(b)

(2)遠隔操作タスク [remote radio control (rr)-task]: 遠隔操作可能なラジコン建機を用いて掘削作業ジオラマ(図4(a))を構築し，遠隔操作コンソール(図4(b))の操作者の環境認知スキルや作業計画スキルと，手や視線等の挙動との関係を解析するために考案した。



図4 建機ジオラマ(a)と遠隔卓(b)

(3)意図解釈タスク [intention interpretation (ii)-task]: 環境や事物の部分に対する人間の指示行動の速さ・強さなどの特性と，意図解釈の関係など，認知スキルを調べる為のタスクである。U型のボルト・ナットなどの名称と部位の関係に冗長性がある対象を用い，実験者の指示に対する被験者への意図伝達の内容を調べることで，認知分析を行う。

(4)語用タスク [pragmatics paradigm (pp)-task]: コミュニケーションには使用される言語自体の用法が重要であるが，言語以外の要素，特に“間(ま)”(会話における微少な無音の時間経過)の利用は，相手への意図伝達を円滑にするための社会スキルの一部である。そこで事物の部位と名称との対応を意図的に変えた不一致ラベル付けパラダイムを用いて，対話者の反応と意思疎通を調べるタスクを考案した(図5(a))。

(5)鏡映操作タスク [mirrored manipulation (mm)-task]: 非利き手かつ鏡像映像を用いることで，視覚方向と手の運動方向が一致しないという認知的負荷を被験者に課す。認知・生体スキルを調べるタスクである(図5(b))。

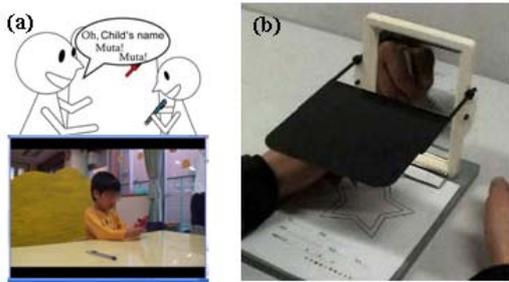


図5 語用タスク(a)と鏡映操作タスク(b)

(6)倒立安定化タスク [stick stabilization (ss)-task]: 被験者が力覚フィードバック付き入力装置を使ってCG倒立振子を安定化させる訓練課題である(図6(a)). 視覚と力覚情報を用いて人間がどのように手を使った機械の運動制御, すなわち生体スキルを獲得するかを, システム同定と脳計測(図6(b))を併用して調べるために用いた.

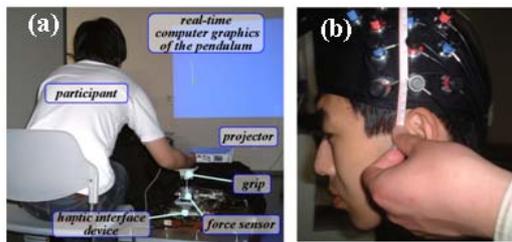


図6 倒立安定化タスク(a)と脳計測(b)

4. 研究成果

前章で説明した夫々のタスク実験を通して得られた成果を, 研究経緯を交えて, スキルレベル毎に述べる.

(1) 社会スキル

①チーム熟達: 複数名での共同作業時には, 各個人の社会性役割の分担がチームの熟達に関係している. CSCW (Computer Supported Cooperative Work)に代表される複数のユーザ作業アシストを試みた研究では, 主としてコミュニケーションの円滑化に主眼が置かれており, 直接的な作業支援や具体的なグループ作業を対象とする研究は少なかった.

そこで cc-task で共同作業時の操縦履歴から社会的特性(リーダー/フォロワー性など)を識別するための要因調査を行い, チームスキル要因として, 行動と観測の割合が適切であることを示せた. これらのスキル要因に基づく社会性役割分担指標と, チーム全体の作業効率とに相関があることが確認でき(図7), 社会スキルを定量化する一指標を定式化できた[14].

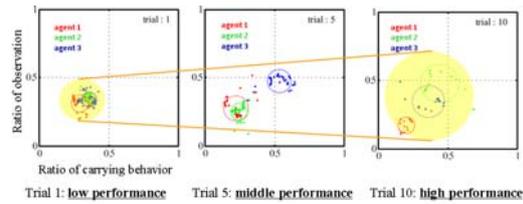


図7 チーム作業の行動・観測割合の変化

②語用熟達: 社会スキルとコミュニケーションは密接な関係があるので, cc-task 実験中の複数操作者間の発話コーパスを解析し, 発話と社会スキルの関係を分析した. その結果, 試行を重ねるにつれ, 使用コーパスの種類が収束し, 共通基盤(Common Ground)の獲得が起き, チーム熟達が向上することが, コミュニケーションの観点からも確認できた[11].

この知見を参考に, 機械による発話支援のあり方を模索するため, 言語発達期にある子どもの語彙獲得特性を調べた. 子どもの日常生活のビデオデータからコーパス解析したところ, 平均発話長は幼児期初期では1~2個, 前就学期では4個前後の語を使っており, 品詞使用割合は2歳では名詞が多く6歳では比較的動詞が多いことなど, 発達心理学上, 重要な知見が得られた(図8). これらの結果から, 機械による支援を行う際, タスクに関する情報が単純なら名詞, タスクに関する情報が複雑なら動詞も多く用いると好ましいという指針が得られた.

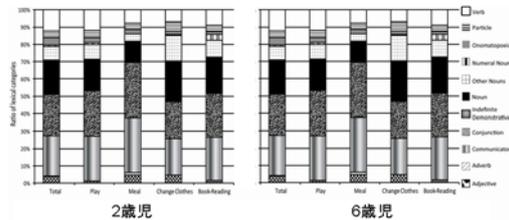


図8 子どもの品詞使用割合

さらに pp-task を用いて, 幼児の語用と視線の関係をビデオ分析したところ, 4歳児になると発話タイミングの“間”という時間の情報を意図解釈に用いることが確認された. 従来の認知スキルの概念には判断・記憶・言語能力などを含むが, 微少な時間の経過による語用論的要因は含まれていない. このことから, 新たに時間という概念を加えることで認知スキルのモデルがより適切になることが示唆された[12]. そこで本成果を考慮し, cc-task の共同運搬作業において, 相手に作業意図を正しく, かつ円滑に伝うためのロボット行動(運動経路, 発話タイミング)を決定する機構設計法を提案した. 本行動決定機は, 後述の4(2)節での意図推定アルゴリズムを基盤にしたもので, cc-task を改造した語用検証実験(図9)を通して, その有効性が確認できている.



図 9 cc-task を応用した語用検証実験

③指示動作：社会スキルが重要な共同作業時には、指示動作や意図伝達が重要であり、指示されたモノが何であるかを正しく理解できなければ適切に行動できない。そこで ii-task を用いて指さし行為などの非言語コミュニケーション要因を分析したところ、2歳児では指示された時の指の“動き”，4歳児では指さし時の対象物と指との“接触状況”を、大人では指示者の利き手と指さしの距離を“統合的”に判断して他者の意図を推定していることが分かり、指示動作と意思伝達率の複雑度との関係を明確にできた。さらに、指示動作を利き手と非利き手でを行った場合に、相手に伝わる意図動作の速さ・強さに違いが生じる(図 10)ことが判明し、ジェスチャコミュニケーション要素として新たな応用性を生む知見も得られた[13].

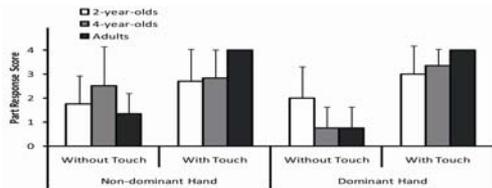


図 10 指示動作方法による解釈度の違い

(2) 計画スキル

rr-task を用いて、コンソール操作時のスイッチ切替時間(手や指を移動するためのリーチング動作の時間に相当)とスイッチ配置位置との関係を分析した結果、熟達が進んで作業熟達度(タスク遂行時間と操作ミスを反映した指標)が増すと、Fitts 則(手のリーチング距離と到達先精度に関する実験式)の困難度指数の分散が減少する事が有意に示された[4]. この成果は、特別な装置を必要とせず、単に機械スイッチの操作時系列データのみから、操作者の計画スキルを定量化できることを意味し、汎用性の高い熟達定量化手法を示せたと考えている。

また人間が行う一連の作業を機械が支援するには、その作業や操作内容を機械が識別できなくてはならない。そこで SOM(自己組織化マップ)を利用して、操作者の作業内容を自動的に識別する方法を提案した[3]. rr-task タスクを用いて提案手法の有効性を検証したところ、個々の操作モードを分類(図 11)できるだけでなく、分類されたクラス間距離

情報と操作熟達度との間に高い相関が認められた。人間動作の識別に関する国内外の研究は多いが、本成果のように動作の熟達度まで示せる方法は他になく、本成果は有用性が高いと考えている。

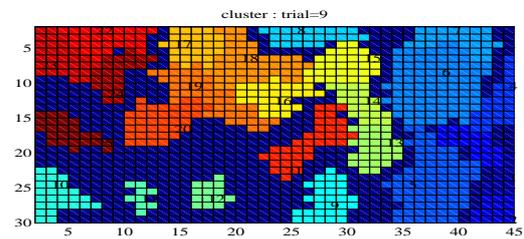


図 11 自動識別された操作モードマップ

本研究ではさらに本成果を発展させ、人間の操作履歴や環境変化、タスク進捗状況を加味して、操作意図を推定する手法を確立した。本手法は SOM でクラスタリングした操作意図規範を用い、ベイズ指定のアルゴリズムを用いて、主観確率的に意図を推定するもの(図 12)で、さらにペトリネットで作業内容の文脈性も考慮して推定精度の向上を図った。rr-task のデータを用いて提案アルゴリズムを検証したところ、人間解析者の推測能力に相当するレベルの意図推定が実現できていることが確認された[10]. 本成果は、近年 IT 分野で成功を収めているユーザの意図推定技術が、一般的な機械操作の場合にも可能となる事を示しており、今後さらに発展させたい。

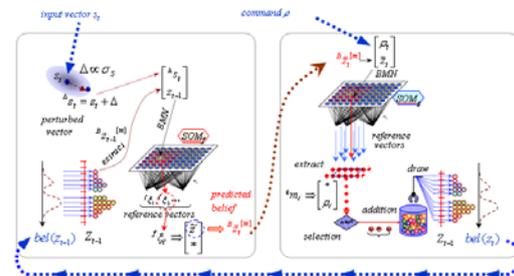


図 12 意図推定計算アルゴリズム模式図

(3) 認知スキル

環境を認知して自己の行動を決定する際には、環境やタスクに関する知識が必須であり、その程度の優劣が作業全体のパフォーマンスを左右する。そこでタスク遂行に必要な知識構造を Action Fast Method を用いてオントロジ(知識構造のネットワーク表現)化し、人間-機械系設計に反映させる方法論について研究を進めた。cc-task をケーススタディとして cc-task オントロジ(図 13)を構築し、上述の操作分類や意図推定に必要な SOM を得るための入力ベクトルの選定設計に活用した。本方法論は前 4(2)節の SOM 作成時に活用し、間接的ながらその有用性を確認している。

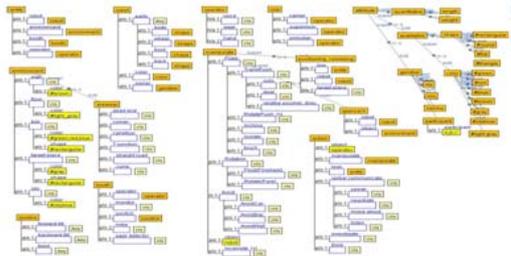


図 13 cc-task オントロジ(一部)

一方、環境認知の基礎研究として rr-task 遂行時の操作者の視線挙動を調べた。熟達すると環境認知の習熟化がおき、熟達初期段階では様々なモニタを見て操作対象物を主に見る傾向があるのに対し、熟達後期段階ではメインモニタから多くの情報を取得して空間や地面などを見る傾向があることがわかった。これらの認知学的分析から、熟達に伴い関係のある事物は潜在的に注意し、主に空間の位置関係を確認することに視覚が使われていることが示された[15]。

(4) 動作スキル

非熟達者の脳のワーキングメモリの活性は高く、熟達するにつれ脳活動は減少することを示した[6]。しかし、熟達後でも方策を変更するときには脳活動が増加することを mm-task を用いた脳血流量モニタリング(NIRS)と動作データとの相関解析で明らかにした。これはワーキングメモリの賦活増減だけで熟達度を単純に判断することは危険であることを示しており、NIRS による熟達判定法を検討する際の注意事項として、他の計測内容に反映させた。

(5) 生体スキル

①視線・制御特性分析：視覚と機械操作は密接な関係があり、視覚-運動系の適切な連携は生体スキルの本質である。そこで本スキルの熟達化要因を解明するため、ホバークラフトシミュレータを構築、操作訓練を被験者に課して、その視線挙動と操作制御特性を解析した。その結果、目標地点注視の早期化と、仮想3次元空間内の変化量に対する操縦ゲインの強化などが確認され、視線挙動から間接的に機械操作のスキルを推定できることを確認した[8]。

②不安定系の制御戦略分析：不安定系の安定化操作は機械操縦の基本的動作の一つであり、生体スキルに必要な機能である。そこで ss-task を用い、機械システムの安定化を試みている人間の操作と脳賦活状態を計測し、人間の制御器としての特性を、人間特有の遅延要素を考慮して分析した。その結果、位置情報に基づくフィードバックよりも、速度に基づく予測制御が支配的であり、そのために熟達者の脳では視覚処理系が運動系よりも活性していることが判明した。さらに人間の不安定系の制御特性である、オン-オフ間欠制

御(制御操作を間欠的に切替える戦略)は、2つの遅延要素を含む線形モデルで表現できることを示し、人間支援系を設計するときの人間制御モデルの指針を得ることができた[5,9]。

③弁別度考慮支援：機械を操るための入力装置(ハンドルなど)を適切に操作するために必要な生体スキルの獲得には、操作者が操作対象の動特性を内部モデルとして学習することが必要であることが知られている。そこで操縦対象の機械の動的特性を変化させて、操作者の内部モデル学習を促す、操作支援手法を研究した。機械の動的特性を急激に変化させてしまうと、操作者は違和感を覚え、学習が妨げられることが予備実験により示されたので、操作者が動特性の変化を知覚(弁別)できない範囲で動特性を修正する手法を提案し、実験検証を行った。その結果、被験者に操作対象の動特性の変化を気づかせることなく、操作精度の向上が可能であることを示した[7]。

(6)まとめと今後

以上述べたように、図1に示した各スキルの定量化法、分析法、支援系設計法などのいくつかを考案できた。実用を考えた場合、対象とするタスクの特徴を5階層スキル分類に準えて分析し、その主体的なスキルレベルに相当する支援系を実装することで、一定の熟達支援効果は上げられると推測される。その一方で各レベルのスキル毎の方法を集約し、統合的に支援系を構築するアプローチも有効であると思われる。そこで全スキルレベルを考慮した実験検証を行うため、遠隔操作型運搬ロボット3台を製作し、cc-task に似せた共同運搬タスクにおける支援系の評価実験システムの構築を進めている(図14)。本実験では、環境認識能力に優れる人間をリーダーに、自律的支援ロボットをフォローとした協調作業を想定し、リーダーである人間の操作支援を実装評価することが目的である。



図 14 実空間での共同運搬協調タスク検証

操作者の操作意図推定は4(2)節の手法で(計画スキル支援)、それを踏まえたフォローロボットの自律的行動決定と発話タイミングの最適化は4(1)節の手法(社会スキル支援)、人間のロボット運動制御の支援については4(5)節の手法(生体スキル支援)で、各々の

レベルのスキル支援の可否を実証する計画である。現時点(平成 23 年 5 月)では、これら手法を統合するための実装作業中であり、統合実験のデータ集積と解析を継続する。現実タスクにおける課題の抽出や、実空間での有効性の評価を進め、操作者支援のための人間モデルとその支援手法の体系化を目指す。

(7) 成果公開

本研究で得られた成果は、主に国際会議で企画した特別セッション(Ro-Man2009 で 3 件, Ro-Man2010 で 4 件, HSI 2011 で 3 件, Ro-Man2011 で 2 件発表予定)で発表し、他国際会議で計 20 件、招待講演 1 件、学会大会で計 10 件を発表した。研究成果は雑誌論文にまとめ、9 件が掲載された。特に、知的メカトロニクスと HAM に関する論文記事(内 2 件[1,2])は、IEEE Industrial Electronics Society の Magazine に掲載され、成果を広く公布することができた。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 9 件)

- [1] F. Harashima and S. Suzuki, "State-of-the-art intelligent mechatronics in human-machine interaction," IEEE Industrial Electronics Magazine, 査読有, vol. 4, issue 2, 2010, pp. 9-13.
- [2] S. Suzuki, "Human Adaptive Mecatronics," IEEE Industrial Electronics Magazine, 査読有, vol. 4, issue 2, 2010, pp. 28-35.
- [3] S. Suzuki, "Characteristics analysis of a task switching during console operation based on the self-organizing map," Int. J. of Advanced Mechatronics Systems, 査読有, vol.2, nos.5/6, 2010, pp.306-317.
- [4] S. Suzuki and F. Harashima, "Skill evaluation from observation of discrete hand movements during console operation," Journal of Robotics, 査読有, vol. 2010, 2010, ID 967379, 13 pages.
- [5] S. Suzuki, F. Harashima, and K. Furuta, "Human control law and brain activity of voluntary motion by utilizing a balancing task with an inverted pendulum," Advances in Human-Computer Interaction, 査読有, vol. 2010, ID215825, 16pages.
- [6] H. Kobayashi, "Performance types and activation of prefrontal cortex," Journal of Robotics and Mechatronics, 査読有, vol. 20, no. 5, 2008, pp.726-730.
- [7] H. Igarashi, "Human adaptive calibration for machine operation without awareness," Journal of Robotics and Mechatronics, 査読有, vol. 20, 2008, pp. 595-601.
- [8] F. Harashima, S. Suzuki, "Future of mechatronics and human machine operation skill and visual perception," SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 査読有, vol.1, 2008, pp.18-25.

[9] S. Suzuki, "Brain monitoring analysis of voluntary motion skills," The International Journal of Assistive Robotics and Mechatronics, 査読有, vol.9, no. 2, 2008, pp. 20-30.

[学会発表] (計 43 件)

- [10] S. Suzuki and F. Harashima, "Context-aware Bayesian intention estimator using Self-Organizing Map and Petri net," IEEE Int. Symp. on Robot and Human Interactive Communication (Ro-Man2011), July 31-Aug.3, Atlanta, USA, 査読有(採択済).
- [11] S. Nakata, H. Kobayashi, M. Kumata, and S. Suzuki, "Human speech ontology changes in virtual collaborative work," the 4th Int. Conf. on Human Sys. Interaction (HSI2011), May, 19-21, 2011, Yokohama, Japan, 査読有.
- [12] T. Yasuda, H. Kobayashi, "Influence of 10 Seconds Interval in Pragmatic Interpretation," Ro-Man2010, Sep. 12-15, 2010, Viareggio, Italy, 査読有.
- [13] H. Kobayashi, "Kansei to subtle finger movement knowing referential intentions of other people: comparison of dominant hand and non-dominant hand," Int. Conf. on Kansei Engineering and Emotion research, Mar. 3, 2010, Paris, France, 査読有.
- [14] H. Igarashi, S. Suzuki, H. Kobayashi and F. Harashima, "Role sharing analysis on multi-operator cooperative work," Ro-Man2009, Sep.27-Oct.2, 2009, Toyama, Japan, 査読有.
- [15] H. Kobayashi, "Relations between eye gaze and cognitive factors in a transportation task using remote control," RO-MAN09, Oct. 27, 2009, Toyama, Japan, 査読有.

[その他] <http://www.humachine.fr.dendai.ac.jp/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

原島 文雄 (HARASHIMA FUMIO)
東京電機大学・未来科学部・客員教授
研究者番号：6 0 0 1 3 1 1 6

(2)研究分担者

小林 春美 (KOBAYASHI HARUMI)
東京電機大学・理工学部・教授
研究者番号：6 0 3 3 3 5 3 0
鈴木 聡 (SUZUKI SATOSHI)
東京電機大学・未来科学部・准教授
研究者番号：2 0 3 2 8 5 3 7
五十嵐 洋 (IGARASHI HIROSHI)
東京電機大学・工学部・助教
研究者番号：2 0 4 0 8 6 5 2

(3)連携研究者

なし