

氏 名 前田 太郎

所属機関 大阪大学

研究題目 操作者の行動意図を推定することで複雑な機器を直観的に操作することを可能にする
ヒューマン・マシン・インタフェース技術の実現

1. 研究の目的

近年「人に優しいインタフェース」への要求が高まってきているが、デジタルディバイドの例を見るまでもなく装置ごとに異なる操作法の習得の負荷自体が「人に優しくないインタフェース」を増産している現実がある。本研究では人が機械の操作を憶えるのではなく、機械が人の意識下応答を憶えることで操作意図を認識する「つもりインタフェース」技術を提案し、直観的な随意性を維持したまま複雑な機器を実時間で操作することを可能にするヒューマン・マシン・インタフェース技術の実現を狙う。この技術を用いればユーザーは複雑で膨大な数のコマンドを意識して理解し記憶するのではなく、行動をイメージするだけで直観的に操作することを可能となるばかりでなく、脳卒中や身体障害などで既存の操作器を扱うことが難しいユーザーに対しても個々に可能な形での入力動作に適応する形で生活支援機器の随意的な操作を可能にできるものと期待されている。

2. 研究の内容（手法、経過、評価など）

随意性を維持する直観的インタフェースの必要性

近年「人に優しいインタフェース」への要求が高まってきているが、デジタルディバイドの例を見るまでもなく装置ごとに異なる操作法を習得する負担を増やしてしまうことで「人に優しくないインタフェース」を増産している現実がある。本研究では人が機械の操作を憶えるのではなく、機械が人の意識下応答を憶えることで操作意図を認識する「つもりインタフェース」技術を提案し、直観的な随意性を維持したまま複雑な機器を実時間で操作することを可能にするヒューマン・マシン・インタフェース技術の実現を狙った。この技術を用いればユーザーは複雑で膨大な数のコマンドを意識して理解し記憶するのではなく、行動をイメージするだけで直観的に操作することが可能となるばかりでなく、脳卒中などで既存の操作器を扱うことが難しいユーザーに対しても個々に可能な形での入力動作に適応する形で生活支援機器の随意的な操作を可能とすることが期待できる。

知覚－運動系に見られる時間的連続性と離散性：行動分節に対応した行動意図としての「つもり」

ヒトの随意運動は分節構造を持つとされている。これは物理現象が時間的に常に連続であるのに対して、随意系の基盤である意識を形作る想起記憶上の情報は時間的に離散化されている必要があることを反映している（図1）。このためにヒトの神経系は感覚によって外界の物理現象を計測するとともに時間的に離散化することで意識上に認識をもたらし、離散化された意識上の行動意図を実現するために時間的に連続な運動を生成する。この連続→離散→連続のプロセスを経ることがヒトの情報処理の特徴であり、このために離散化される時間単位は行動生成においては行動分節として定義され、知覚においてもこれに対応するように見まね学習時に見られるような行動認識における分節化区間を定義することができる。この知覚と運動を繋ぐ行動分節の離散性から、本研究ではヒトが随意的に行動を分節単位で意図することを「つもり」と呼び、この情報の実体は時間離散的に扱えるものとみなす。我々はこうした離散化行動分節の構造

2. 研究の内容（続き）（書ききれない場合には、同一形態のページを追加しても結構です）

を見まねによる他者への動作伝達の様式から「つもり」の情動的実在についての検証を行ってきた(図2)。本研究提案ではこの「つもり」を抽出・伝送することで直観的な随意性を維持したまま複雑な機器を実時間で操作することを可能にするヒューマン・マシン・インタフェース技術の実現を狙う。では、「つもり」を伝送することで「直観的な随意性を失わない伝達系」とはどのようなものであろうか。

直観的な操作入力からの行動意図としての「つもり」の同定：「つもり制御」と「つもり抽出」

図3に示した「つもり制御」系の実現について考える。先述のロボット制御における自由度数の対応でいえば、一般にはヒト身体の自由度数はロボットの自由度数を凌駕しており、テレグジスタンスや見まね認識を活用して指示行動を自己の身体運動として生成するならば計測自由度数が制御自由度数を下回る不良設定問題ということになる。しかし、一方でヒトが随意的に行動を観測・生成する過程でこれだけの自由度数の動きについて一つ一つを同時に意識しているとは考えにくい。また実際に自身の身体で全運動を実施するのではなく、先述のように限定された自由度の操縦桿操作にその対応関係を求められる場合にも、ヒトは比較的容易に対応動作を選択している。これを先ほどとは逆に今度は高度な自由度数縮退の計算課題を実現していると捉えるよりも、分節化された「つもり」レベルの意図の自由度数は身体の実運動自由度数に比してもともと少ないものとするのが妥当である。ならば自由度数の少ない「つもり」分節レベルでの対応関係を獲得することによって、行動意図の抽出と伝達をより容易に行えるものと期待される。この抽出の方法論としては「子供が見慣れて憶えてしまったロボットの動きに合わせて自分が操縦しているつもりになって操縦桿を動かしている」状況、すなわち主客が反転した状態で擬似的につもり制御が成立している状態を実験室的に作り出すことで、ロボット操作時の「つもり」と入力動作の対応関係を抽出する。この「つもり抽出」の手順を以下の様に提案する。

1. ロボットの行動をあらかじめ分節化しておく、
2. その分節の組み合わせとして記述された一連の行動を視覚的に提示することによって、
3. ヒトが見まね観察によってその動作に対応した「つもり」を再分節化し
4. 獲得した「つもり」に直観的に対応した挙動を低自由度の操縦桿に対して行わせることで、
5. ヒトの行動分節とあらかじめ設定されていたロボットの行動文節の対応付けを行う。

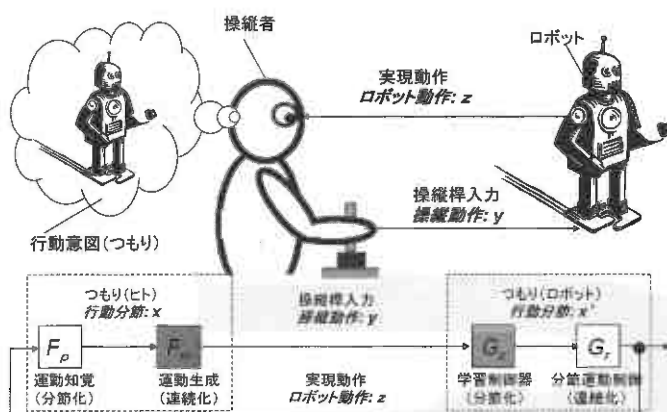


図3 ロボット操縦時の随意性と行動意図・行動文節：随意操縦「 $x \rightarrow y \rightarrow x' \rightarrow z$ 」。従来型の操縦では「 $y \rightarrow z$ 」の対応関係をヒトが憶えることで F_m に「 $x \rightarrow y$ 」を学習する。「つもり」制御では「 $y \rightarrow x'$ 」の対応関係を G_c に機械学習することで直観的な操縦を可能にする

意図的に記憶することが困難な数であるため、操作者自身でも個々の行動分節をイメージした際の操作入力パターンを明示的に想起することはできない。実際に操作者が入力するのは操作者自身の行動分節へのイメージに対してある意味自由勝手に「えいや」と決められた直観的な応答動作である。にもかかわらず

このヒトとロボットの行動分節間の対応付けによって隠れた主観変数である「つもり」の抽出と伝達を等価的に実現することで「あらかじめ分節化された限定的な半定型動作しか出来ないロボットを随意に動かす」という前述の「鉄人28号の操縦」の例のような「つもり制御」を実現できるものと考えられる。現在までに被験者を用いた実験において17自由度のヒト型ロボットで127種の行動分節の操作意図を70%程度の中率で認識・操作させることに成功している。この分節種数はコマンド数として

得られる的中率の高さは、明確な行動意図に対応した意識下での応答パターンには操作入力インタフェースに用いるに十分なだけの再現性があることが確認されたことを意味している。

本研究提案ではこの人が機械の操作を憶えるのではなく、機械が人の意識下応答を憶えることで操作意図を認識する「つもり制御」技術を一般化し、直観的な随意性を維持したまま複雑な機器を実時間で操作することを可能にするヒューマン・マシン・インタフェース技術の実現を狙った。

「つもり制御」の応用に関する要素技術の展開

1. 非人型ロボットへの適用可能性

提案段階において「つもり制御」は人型ロボットに対してのみ適用実績がある段階であったため、「運動イメージとしてのつमりの形成」がヒト身体の運動イメージに限定されるか否かについては結論が出ていなかった。このため当初介護支援用に採用予定であった株式会社川渕機械技術研究所製の伸縮型直動アームロボットを制御対象に据えた「非ヒト型構造に対するつもり制御」の検証を行った。その結果、構造がヒト型で無いこと自体は運動イメージ再現としてのつमりの形成には直接影響せず、あくまで十分に運動イメージを再現可能なまでにその動きを観察しイメージすることに熟練したか否かの問題であり、これにはヒト型ロボットと同程度の習得時間しか要しないことが判明した。この成果は最終的に同伸縮型直動アームロボットの開発提供がプロジェクト期間中に間に合わないことが判明したために、急速ソフトバンク製のPepperを導入し制御対象としたことによって本研究における一義的な制御対象がヒト類似型となったことによって本研究において直接的な寄与はなくなったものの、つもり制御の一般化応用のための知見としては大きな貢献となった。

2. 外耳道壁変形を用いた頭部動作応答の抽出

本研究では「身体に不自由のある被介護者の意図を抽出する操縦手段」として最も随意運動障害の生じにくい頭部内の意識下随意活動応答を計測する手段として「外耳道に挿入された加速度センサ」を用いることを想定したつもり制御用の機械学習系を構築して分節化動作対応習得の検証を進めた。この意図検出手法は、本研究室で開発されたICAによる検出手法によって顔面内での17の随意動作を弁別することに成功した実績があり（前年度報告書参照：鳥居ほか、2015）、今回はこれをつもり制御における操縦桿の代替入力手段として使用する。この入力方式は四肢不自由者に対する有効性だけではなく、無音声発話時の意識下応答入力による特徴抽出の可能性も孕んでおり、計測再現性の改善によって応用に高い将来性が期待されるものである。

3. 深層学習を用いた「つもり制御」の実時間対応化

入力手段の自在性と自由度制限の緩和を実現するつもり制御において大きな問題であったのが入力時の分節認識に伴う時間遅れであった。入力のパターン判別によって意図する分節を推定する必要性から、通常のパターンマッチングを用いる従来のつもり制御ではロボットの制御開始までに一分節分の時間遅れが生じていた。本研究では限定的ながらこの問題を改善し、ほぼ実時間での制御応答を実現している。ここで利用したのが「つもり入力の2分節文脈依存性」である（岡田ほか、2010）。「つもり分節の推定においては一分節分前の分節種類に依存した入力の変形が生じる」という現象であり、この発見自体はつもり意図の推定率向上のために計測された結果であった。しかしこの現象は「ヒトの運動計画における時間的な非独立性」を示しており、これはLibet（1999）らによる「意識に先行する運動計画の決定論」にも呼応するものである。そこで、機械学習系として深層学習を用いた予測器を構築し、過去二分節分の入力信号に対して現在と次の分節の二文節を出力するように予測器に学習させた。これはつもり抽出過程においてロボットの動きを見たヒトの操縦応答をオフライン学習することによって可能な対応関係であ

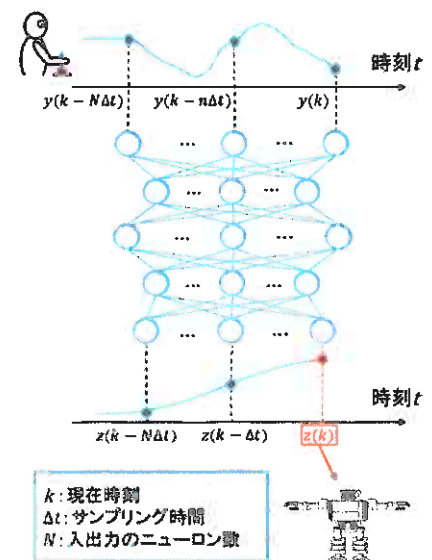


図2 深層学習を用いたつもり学習器の構成：FIFO型の入出力データセット間の対応関係を学習することで現在までの入力によって次分節意図の予測を行う。

って、この学習結果を実際につもり制御に用いる場合、この予測器はそこまでの操縦者の入力からこれから入力されるはずの一分節分の未来を予測することになる。一見不可能事案に見えるこの予測器であるが、この予測において限られた動作分節数（後述する「第3の腕」制御における5分節、およびPepper操縦における8分節とその伸縮分節）においてではあるが従来のつもり制御と同等以上（70%超）の予測を可能にしている。これはつもり制御で用いる意識下の身体応答は従来、脳波などのBCI・BMIでなければ取得できないとされていた運動予測情報であり、この結果からヒトの意識下応答には現在の行動分節だけではなく隣接する過去と未来の3分節にまたがる情報が含まれているものと考えられる。

実ロボットにつもり制御を用いた介護支援作業実験

ロボットを介護現場で利用する試みは「要求される作業の多様性」と「低コストへの要求」の二大問題からそれぞれ「ロボットの開発」と「大量生産・大量普及」の両側面から事態が進まないのが現状であるといえる。しかし高齢化に伴って介護の要求は喫緊の課題であり、技術開発にも対応可能な部分からの早期解決策の提示が求められている。そこで本研究では「介護全体はカバーしきれないものの介護者・被介護者の負担を軽減する介護補助を行う」ことによる介護支援を目指して「つもり制御」を応用することを提案する。

介護の現場において、自身でベッドから動けない要介護者は介護者に対して言語による依頼と代行を介して身の回りの要求を達成するしかない。これらの要求は本来多岐にわたるのが当然であり、介護者がこれら全てに答えることは不可能である。このことは要介護者も理解せざるを得ず、畢竟「介護者に気兼ねして」こうした依頼は必要最小限度のものにならざるを得ない。「飲み物を取る」「床に落ちた物を拾う」「日差しを加減する」といった緊急性の低い細かな欲求については介護者が優先して行う介護の際についてに行えるようになるまで後回しにして我慢するしかないのが現実的な選択となっている。

ここではロボットの「繰り返しや待つことを苦にしない」特性を活かして「気兼ねせずに自分で操縦できる手足の延長」として介護補助を行わせることを提案する。この用途であれば、現行のロボットには困難で介護者にしか行えないような高い専門性をもった力や技術が必要な作業は無理でも、ロボットにも肩代わりが可能な「介護者に頼むには簡単すぎてかえって気兼ねするような」日常作業の代行をさせること



図3 介護支援作業を目的としたPepperのつもり制御：Pepper本体（左図）を無改造のまま利用するために、外付けで「レーザーライン投光器」（上段中央左図）「把持サポート紐」（上段中央右図）「マジックハンド」（下段中央右図）の3つのパーツを装着する。これらは装着にあたってPepper本体を加工する必要が無く、また別途機能によって駆動する必要の無い「Pepperが使う道具」として機能するものを選択しているため、実運用を想定したとしてもその普及は容易なものを選択している。操縦は外耳道に挿入された加速度センサ（下段右図）によって検出された外耳道壁の意識下応答から「つもり制御」によって実施される（上段右図）。

によって、完全な介護を可能にするロボットの登場までの期間において介護者及び要介護者の負担を部分的に軽減することが出来るため喫緊の課題への有用性を発揮できる。

また、本研究ではこの際の指示インタフェースとしてあえて音声言語を使わないインタフェースを介することを提案する。これには「音声言語が介護者への依頼開始の合図である」ことから、これを利用することによる介護者の対応への混乱を避け、気兼ねなくロボットに指示を出すための配慮であると同時に「自身の身体の延長としてのロボット」としての親和性を向上させる狙いがある。

そこで最終年度では前年度までの要素技術を導入することで、現在最も普及しているコミュニケーションロボットである Pepper を利用することで可能となる範囲の作業支援の実現を検証した。Pepper 本体を無改造のまま利用するために、外付けで「レーザーライン投光器」「把持サポート紐」「マジックハンド」の3つを装着する。これらは装着にあたって Pepper 本体を加工する必要が無く、また別途機能によって駆動する必要の無い「Pepper が使う道具」として機能するものを選択しているため、実運用を想定したとしてもその普及が容易となるものを選択している。次に操縦デバイスについて示す。デバイスは重度の要介護者の利用を想定して「首から上の非言語動作」のみをターゲットとして外耳道壁の変位を計測する加速度センサを用いる。左右各3自由度からなる6自由度信号を操縦意図の入力とする。入力信号に対してロボットの動作は明示的な対応付けをされておらず「つもり抽出」過程を用いてこの対応関係を機械学習する。

Pepper で検証する動作は先に挙げた「飲み物を取る」「床に落ちた物を拾う」「日差しを加減する(カーテンの開閉)」の3つに限定した。これは同実験では学術的な価値としての多様性の検証よりも実用的に必要な動作を機械学習させるための最低限の学習コストを検証することを優先したためである。

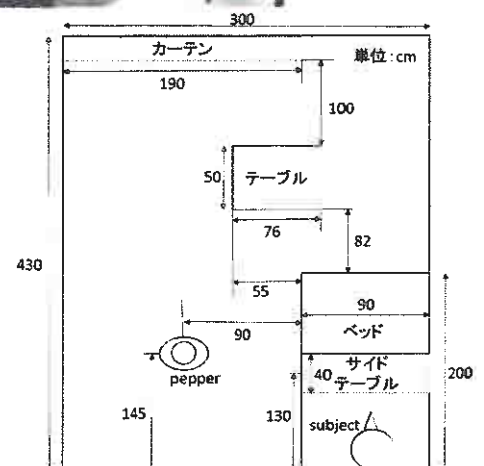


図4 Pepperによる介護支援作業実験:「日差しを加減する(カーテンの開閉)」(左上)「床に落ちた物を拾う」(右上)「飲み物を取る」(左下)の3つ作業を検証する。これらは操縦者としての患者の視界内において「ベッドから動けないために届かない」ことで随時の対応を我慢することが多くQOLを低下させている代表的な身の回り作業である。

ここまでの成果を踏まえつつ、ディープラーニングを用いた意図推定の実用化に向けて、今回は検証すべき要素を絞り込んだ。まず目標を逐次修正応答と行動達成率の改善に特化した。このために推定分節を最小限の数に限定した。さらに推定要素を次分節の推定とその開始・終了時刻、すなわち時間伸縮の推定に特化することで実用性を向上させた。外耳道の実時間応答からの次分節の推定は事実上未来予測に相当するが、これを可能にするのが先述のヒト意識上の行動発現と意識下での行動計画との時間差である。ヒトが行動を意識上で決定するよりも先に実際には意識下において行動は計画・決定済みであるとする説であるが、これを裏付けるかのように2分節分の時間窓を設けた過去入力時系列と対応させることによって未来予測1分節分に対応した予測を十分な精度(75%超)で達成できることが確認された(※達成予定。現在実質稼働率の検証継続中。2月中には検証終了の予定。)

「つもり制御」を越えて：自己身体機能拡張技術「バーチャルサイボーグ」

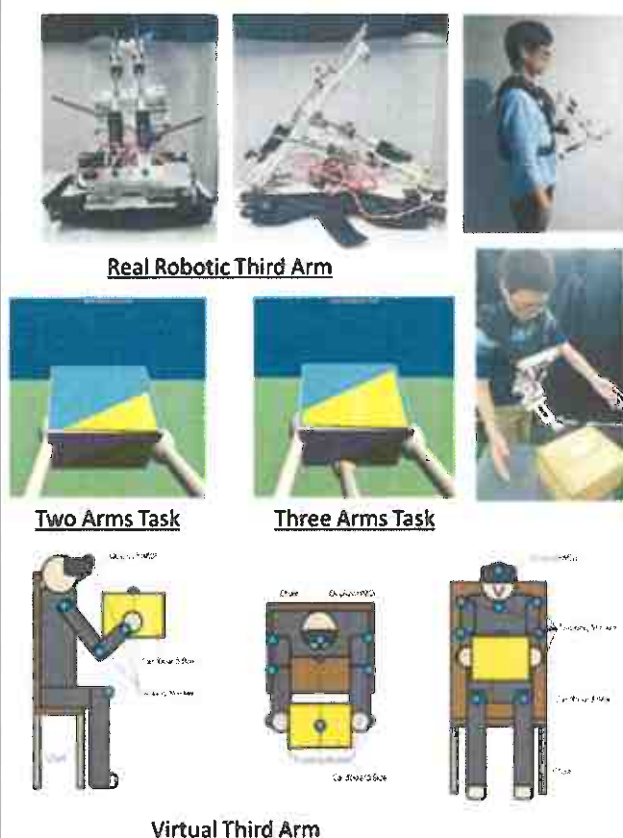


図5 第3の腕制御実験：身体機能拡張技術としてつもり制御を応用し第3の腕を制御する。ロボット開発に先行してバーチャルリアリティ上でつもり抽出実験を実施した。

は行動のイメージは異なり、身体の構えも異なってくる。これによって意識下の応答に差が出ることを検証し、「二本の手での作業」と「三本の手での作業」を使い分ける「つもり制御」を実現することに成功した。また、この際の身体応答を解析した結果、操縦者によって2つのパターンがあることが判明した。第3の腕を動かそうとする際に膝の動きに違いが出る操縦者と肩の動きに違いが出る操縦者に分類されたのである。この原因は主観報告と照合することで明らかになった。同実験では第3の腕はロボットではなくバーチャルリアリティの中で追加の腕を描画しており(図8)、その付け根の位置は視野の外であるために描画されておらず被験者によって解釈が曖昧だったことに起因している。膝に違いが出た操縦者は「腕の付け根は腰より下=骨盤と繋がっている」と、肩に違いが出た操縦者は「腕の付け根は腰より上=胸郭に繋がっている」と解釈していた。つまり両者の身体応答の違いは「第3の腕に還ってくる反力を受け止めることを想定した意識下の身体応答」だったものと考察される。実際にこの解釈を統一することによって操縦者の応答も統一されることが確認された。意識下の応答は予測不能なノイズではなく合理的な身体応答であったことの論拠となる発見であった。

つもり制御とは「脳波を使わない BCI (Brain Computing Interface)」の一種であると考えるのが妥当である。そもそも脳波自体、脳という処理系の出しているノイズのようなものであり BCI のアプローチが「ノイズ解析によるリバースエンジニアリング」であるなら LSI チップ解析の際と同様に「チップパッケージ上の電位変動」である脳波よりも「出力端子に出てくる不正規ノイズ」である意識下身体応答のほうが S/N 比が大きい情報が取れることは当然の帰結でもある。結果として「つもり制御」は究極的には「操縦しよう」と意識する必要すら無い「操縦方法になり得る。『操縦しようと思う必要すら無く動かせるもの』の代表格といえ自分自身の身体である。ヒューマンインタフェース技術の中でも人間の身体機能拡張技術の一つとして「第3の腕」というアイデアが知られている。誰しも器用に動くロボットの腕を見た時に、あんな腕が自分にももう一本あったなら便利に違いないと思うものの、もともとの腕を操縦に使ってしまったら本末転倒であるため、その腕を自在に操る手段が見いだせないのがこのアイデアの泣き所であった。

そこで本研究における操縦可能性を拡大する制御課題として「つもり制御」を用いて「第3の腕」を制御することを試みた。操縦入力としては意識下応答としての身体全体の動き、具体的には肩と膝の動きを計測した。肩は元々の二本の手を動かす時にも動くものであるし、膝は腕を動かす時には意識して動かしてはいない。しかしつもり制御での計測対象は意識下の身体応答であり、「二本の腕で作業を行っているつもり」の時と「三本の腕で作業を行っているつもり」の時

「つもり制御」を越えて：トレイグジスタンスを介した行動スキル習得・再現技術

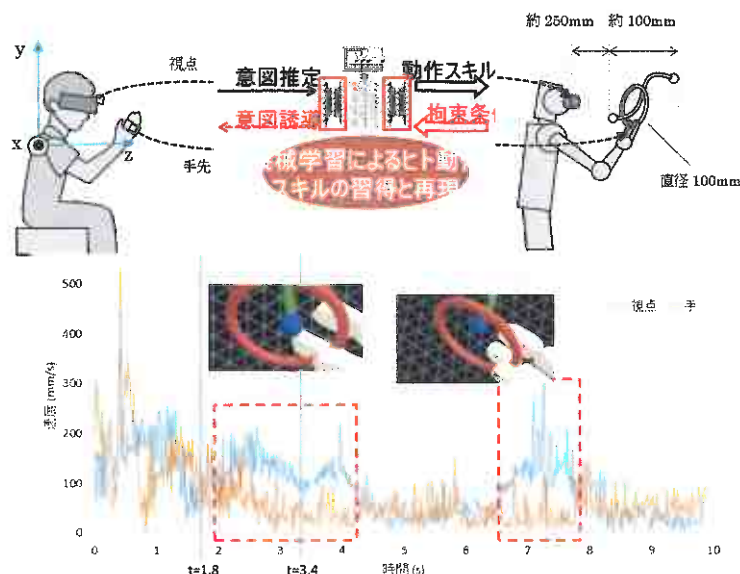


図6 テレイグジスタンスを介したヒト動作スキルの抽出と再利用を可能にする機械学習：感覚運動情報を伝送する過程において機械学習を行うことで「ヒトの技能を抽出・共有する制御機械」を構成する。

本研究の出発点は複雑化する工学システムに対して高度な知識や修練無しに自在に操れるインタフェース技術の必要性にあった。本研究では「つもり制御」技術を起点として「非ヒト型ロボット」「四肢を拘束しない操縦入力」「操縦していること自体を意識せず自己身体のように操る制御技術」に発展させることが出来た。この技術の発展形として、ここで用いた機械学習を発展させることによって「ヒト動作スキルの抽出と再利用を可能にする機械学習システム」を構築することもまた可能になる。ヒトの感覚運動情報を電子

化するインタフェースと強化学習を組み合わせることにより、行動の意図と対応したスキル動作自体を機械学習して「ヒトの意図する動作の代行」を可能にする自律制御システムを構成することが出来るようになる。本研究ではバーチャル環境においてトレイグジスタンス作業系を構築してイライラ棒課題を実施し、同作業スキルを自律的に実施可能な強化学習の実現を確認した(図6)。この課題では「与えられた立体的な曲線軌道に対して手に持ったリングを軌道に触れさせることなく始点から終点まで移動させる」ことが求められるがこのルールは操作者にのみ伝えられていて、機械学習システムには一切の事前情報は与えられていない。操作者はロボットに没入(トレイグジスタンス)してお手本となる作業を実施するだけでよく、その後機械学習系としてのロボットが操作者の行動を手本としてトライ&エラーを繰り返しての自律学習によってスキルを獲得するという手順となる。これは「徒弟学習」と呼ばれる強化学習の一種であるが、強化学習のロボット応用で多く苦戦している「言語化が困難で身体性の高い行動スキルを多自由度で連続な時空間運動として実行する課題」の代表格である。強化学習の結果、運動視差によって奥行き情報を得るための頭部並進運動スキルまで再現されるという破格の学習効果が確認されており、こうした難課題からの手本データの抽出におけるトレイグジスタンス技術のアドバンテージを再確認する結果となった。現在、バーチャル環境における学習に留まらず実空間内における実作業スキルの習得に向けて産業用パラレルリンクアームロボットを用いたトレイグジスタンスシステムの構築と応用のための研究を進めている。

3. 研究の結論、今後の課題

本研究では人が機械の操作を憶えるのではなく、機械が人の意識下応答を憶えることで操作意図を認識する「つもりインタフェース」技術を提案し、直観的な随意性を維持したまま複雑な機器を実時間で操作することを可能にするヒューマン・マシン・インタフェース技術の実現を狙った。この「脳波を用いないブレインインタフェース」に相当する技術によってユーザーは複雑で膨大な数のコマンドを意識して理解し記憶するのではなく、行動をイメージするだけで直観的に操作することが可能となり、脳卒中や身体障害などで既存の操作器を扱うことが難しいユーザーに対しても個々に可能な形での入力動作に適応する形で生活支援機器の随意的な操作を可能とすることが可能であると示すことが出来た。

本研究において操縦の随意性が最大限に発揮されているのが作業対象物の同定と接触動作の修正であることはヒトと機械の関係において大変象徴的である。この同定は同時に現在自律化を進めているAI技術が「対象物認識」と「自律行動計画」として最も重視している作業課題であり、ホームユースを目指すロボット全般、さらには本実験において採用したPepper自体にも実用にはほど遠いもののそれを企図した機能が付与されようとしている。これはホームユースにおける行動支援に要求される作業内容が「対象物を同定し」「定型の予定作業を調整して実現する」ことに集約されていることを意味しており、自律制御であれ随意操縦であれ、これらの情報を目的に合わせて供給することが出来るならば要求が完遂されることを意味している。これに対して本研究では現在成熟した段階にない自律認識制御技術を一切用いずともユーザーの随意的な操縦の範疇でホームロボットを操れる可能性について検討するという立場を取ったものである。本来これらは決して排他的な技術ではなく相補的な役割を担っていると言えるが、現行の技術動向においてはこれらの融合については主に車の自動運転の文脈において運転アシスト技術として限定的に語られるのみである。機械技術の高度化によって、ヒトと機械が相互に自律して機能することが可能となった時、ヒトと機械の間に随意的な干渉性をもった密なコミュニケーションを成立させるのか、それとも自律性に任せた不干渉を貫くのか。これはインタフェース工学に課せられた大きな命題であるとともに、ヒトと機械の関わり方を決めていく工学設計思想の分岐点ともなる命題である。

この観点から今後は本技術をヒトが歴史的に積み重ねてきた行動技能スキルの伝承を可能にするスキルの蓄積・再活用技術へと発展させていく所存である。願わくばヒトと寄り添う機械に幸せな未来のあらんことを。

4. 成果の価値（とくに判りやすく書いて下さい）

4. 1. 社会的価値

新技術に対する適応が難しいユーザーに対しても直観的な操作を可能にするためのインタフェースを提案した。一方的にユーザーの学習に頼らず、ユーザーの応答を機械が学習することでユーザーの要望を推定・利用するこの手法によって、徐々にユーザーの要望になじんでいくヒトと機械の関係を実現することができる。自身の動作を計測するセンサの装着以外に複雑な既存の入力装置の操作を陽に行う必要が無く、高齢者や要介護者や能動装具利用者にとっても優しい「人に寄り添う機械のためのインタフェース技術」としての活用が期待される。また、同技術は従来属人的な技術として伝承が容易ではなかった技能的な行動作業スキルの記録と再利用にも発展させることができる技術であり、近年人には理解しがたい方向へ独り歩きする可能性が危惧されている AI に代表される機械学習を人に寄り添わせる方法論を提供する。

4. 2. 学術的価値

操縦インタフェース技術の観点からヒトが認識している随意性や身体性に関して「自己所有感」と「自己主体感」の二大自己認識の関係性を踏まえた検証と考察を行い、「つもり制御」を発展させて「第3の腕」や「頭部内身体応答」などの新しい技術的決着点と設計手法を提案することができた。提唱している「つもり制御」に関連する要素技術を多数研究・開発して成果を学術発表するとともに、ロボット工学応用及び医療工学応用において新たな可能性を提示する検証実験を行った。ヒトの身体動作における意識下応答の持つ情報が行動意図の推定及び予測という評価軸においては従来知見では脳波やfMRIのような脳計測でしか得られなかった情報に匹敵することを示したことによって「脳波に頼らないブレインインタフェース」への可能性を示せたことは大きな成果であると言える。

4. 3. 成果論文（本研究で得られた論文等を年代順に書いて下さい。未発表のものは公表予定を書いて下さい）

- [1] 常 明, 飯塚 博幸, 成瀬 康, 安藤 英由樹, 前田 太郎: 無意識的なピッチ弁別能力の向上のためのニューロフィードバック手法, 第19回日本バーチャルリアリティ学会大会, 2014
- [2] 櫻井悟, 青山一真, 古川正紘, 安藤英由樹, 前田太郎, ”舌への電気刺激と温度刺激が五味へ及ぼす効果の検証”, 第19回日本バーチャルリアリティ学会大会, 2014
- [3] Yoshihiko Hatada, Masahiro Furukawa, Hideyuki Ando, Taro Maeda, “An investigation of the relationship between apparent motion velocity and illusion of agency”, Vision Sciences Society 2015
- [4] 松井和輝, 鳥居航, 古川正紘, 前田太郎, 安藤英由樹, ”風船膜上振動源推定手法の提案”, ヒューマン情報処理研究会(HIP), 2015
- [5] 松井和輝, 古川正紘, 前田太郎, 安藤英由樹, ”身体形状認識の変形を伴う身体像拡張手法の提案”, ヒューマン情報処理研究会(HIP), 2015
- [6] 松井和輝, 古川正紘, 安藤英由樹, 前田太郎: 生得的でない身体部位追加のための身体像の伸展, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.20, No.3, pp.243-252, 2015 【論文賞】
- [7] 和田康介, 古川正紘, 安藤英由樹, 前田太郎, ”バランス補償装置を用いたスケール変換トレイグジスタンスにおける歩行実験”, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2015
- [8] 鳥居航, 松井和輝, 古川正紘, 前田太郎, 安藤英由樹, ”風船膜に与えられた触刺激の異なるインピーダンス面上での再構成”, ヒューマン情報処理研究会(HIP), 2016
- [9] 古川 正紘, 近藤 大祐, 安藤 英由樹, 前田 太郎, 深層学習におけるロボットのvisio-motor 課題のためのトレイグジスタンスによる中間状態の獲得, 第21回日本バーチャルリアリティ学会大会, 2016
- [10] 堀部和也, 北尾太嗣, 古川正紘, 安藤英由樹, 前田太郎, 身体所有感領域の内外における物体の運動イメージの変容の検証, 第21回日本バーチャルリアリティ学会大会
- [11] 北尾太嗣, 松井和輝, 前田太郎, ”自己身体拡張を実現する身体装着型三本目の腕の設計と制御”, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2016
- [12] 北尾太嗣, 根原直希, 古川正紘, 安藤英由樹, 前田太郎, ”ひろがりをもった触覚伝送装置の設計: 音響空間再現におけるウーハーとツイータの役割を転用し, 接触面内の触角の時空間パターンの再現を試みる”, 第21回日本バーチャルリアリティ学会大会, 2016
- [13] 秋山隼人, 北尾太嗣, 古川正紘, 安藤英由樹, 前田太郎, ”時間補正可能な「つもり」制御系の実現と3本目の腕の制御への応用”, 第21回日本バーチャルリアリティ学会大会, 2016
(※ただし[9]はさきがけ, [6, 10-13]は科研基盤Aの研究成果としても併記発表したものである。)