



人間機械系の相互作用特性の理解に基づく行動学習支援に関する研究

著者	廣川 暢一
内容記述	この博士論文は内容の要約のみ公表しています
発行年	2014
学位授与大学	筑波大学 (University of Tsukuba)
学位授与年度	2013
報告番号	12102甲第6883号
URL	http://hdl.handle.net/2241/00123488

人間機械系の相互作用特性の理解に基づく行動学習支援に関する研究

A Study on Comprehensive Human-Machine Interaction for Assistance of Behavior Learning

廣川 暢一

2014年3月

1 緒言

人の行動学習は一般に、環境の認知に基づく行動の選択とその結果の評価を繰り返すことで行う。このような人の行動学習メカニズムを抽象化し、計算機で再現する試みが強化学習に代表される機械系の行動学習理論であり、日常生活の様々な場面にロボットに代表される大規模で複雑な計算に基づく学習メカニズムを実装した機械システムが普及しつつあることから、機械系の自律的な行動学習手法の重要性が高まっている。しかしながら、環境認知の不確実性や次元数の増加に伴う探索空間の増大、Heuristicな評価関数設計など、既存の行動学習手法の実問題への応用には課題が多い。一方、人は高次元の複雑な状況認知や抽象的・主観的な価値に基づく判断など、機械には非常に困難な処理を素早く正確に行うことができるが、高速で精密な動作や計算速度では機械には及ばず、認知的・身体的な入出力特性による制約も持つ。このように、人や機械システムの行動学習特性にはそれぞれ長所と短所があることから、人がシステムの制御系内に物理的・情動的に介入し相互作用によって互いの長所を有効活用する問題解決のアプローチは妥当である。具体的には、複雑な環境下での行動学習に必要な認知的処理を人が補うことで機械系の行動学習を支援することや、一方で適切な行動が直観的に判断しづらい場合や、障害などによって身体的な動作に制約のある場合には、システムによる人の運動の物理的な支援が有効である。これは、従来の人と機械の間の単純な作業分担ではなく、学習過程への介入によって学習機能そのものを支援する「行動学習支援」であり、人の認知的、身体的、社会的特性や行動学習メカニズムの理解に基づく、新しい人間機械協調 (Human-Machine Cooperation) の枠組みであるといえる。

人が機械系の行動学習を支援する先行研究として、行動学習における評価のプロセスを人が代行することで学習を効率化させる手法 [Nakatani et al., 2003] [Riley et al., 2006] [Lockerd and Breazeal, 2004] や、人の主観的な好みをモデル化する試みなどがある [Takagi, 2001]。一方、人と機械システムの物理的な相互作用によって、人の運動機能

の学習・再学習を支援する手法として、MIT-Manus [Aisen et al., 1997] や、外骨格型支援機器 [Sawicki et al., 2005] [Yamawaki et al., 2012] があり、事故や病気で身体機能に障害を抱えた人のリハビリテーションなどで実用的に用いられている。また、自閉症スペクトラム障害を持つ児童との社会的なインタラクションを通じて、社会的行動やソーシャルスキルの学習を支援する療育ロボット [Pioggia et al., 2007] [Robins et al., 2009] も、人間機械系の相互作用に基づく行動学習支援と考えることが出来る。しかしながら、行動学習に関する人と機械の相互作用特性について様々な人間機械系のシステムを扱い横断的に検証している取り組みは少なく、円滑な行動学習支援に求められるシステムの機能やインタラクションの特性は依然として知られていない。

本研究では、動学習に関する人と機械の相互作用の一般的な特性や条件を明らかにすることを目的とし、それによって環境やインタラクション形態の異なる様々な人間機械系のシステムにおける、行動学習支援の実装を容易にする統一的な方法論の確立を目指す。また、得られた知見をフィードバックすることで既存の機械学習手法の改善や、行動学習に関する人の特性についての更なる理解に貢献することも期待出来る。ここでは、人の行動学習メカニズムを説明する行動分析学の知見や [Cooper et al., 2007]、機械学習の分野で広く用いられる Temporal Difference 法 (TD 法) の概念に着想を得て [Sutton and Barto, 1998]、随伴性 (Contingency) と一貫性 (Consistency) という二つの特性が重要であると考える。相互作用の随伴性とは、行動学習過程への介入とそれに対する応答が実時間で非同期的に行われる特性を意味し、任意の時点で必要な介入を行うことや、介入による学習への影響を時間的な因果関係を用いて評価するために必要である。また、一貫性とは相互作用の文脈に時間的な整合性が保たれている特性のことであり、やり取りされる情報の信頼性を評価することにつながると考えられる。本研究では、検証のための事例研究としてインタラクションの形態や目的が異なる複数の実問題に取り組み、随伴性と一貫性を持つ人と機械の相互作用に基づく行動学習支援による解決を試みる。

はじめに、第2章では強化学習を実装したロボットに人が教示者として直感的で簡便な教示を実時間で与えることで、行動学習を支援するためのアルゴリズムを考案した。その際、人の認知判断に関する誤りや時間遅れといった認知的特性の理解に基づく、頑健な人の教示意图推定と報酬関数の更新手法を考案した。この手法により、既存の強化学習による学習効率を改善するとともに、設計者による報酬関数設計の負担を削減出来ることを実験によって明らかにした。

第3章では、2章とは逆に人の行動学習過程に対してシステムが介入した場合の事例研究として自動車の運転に着目し、後ろ向き駐車のための運転技量を育成する運転支援システムについて述べる。ここでは、後ろ向き駐車に関する人の運転特性と駐車技量との関係を明らかにするため実車を用いた実験を行い、それによって得られた知見に基づき力覚呈示によってステアリング操作を実時間で支援するシステムを開発するとともに、このシステムを用いることで人の運転技量の習熟を有意に促進出来ることを被験者実験によって示した。

第4章では、自閉症スペクトラム障害をもつ児童のためのロボット介在活動について述べる。自閉症児の社会的行動と情動の関係に着目し、快情動を誘発することで他者に対する自発的なコミュニケーションを促すことで社会的スキルの獲得を支援する試みである。ここでは、自閉性傾向や現有スキルの様々に異なる個々の児童に合わせたロボット介在活動を実施するための環境として、療育者や保護者のための直観的なロボットの行動制御手法を開発した。同時に、表情筋活動から笑顔を検出する装着型デバイスや客観的な行動指標を計測するシステムを開発し、自閉症児とロボットのインタラクションに関する予備実験の定量的・定性的解析に基づく行動学習支援の可能性について考察を行う。さらに、計測した人の情動反応をロボットの行動学習に対する実時間フィードバックとして用いることで、情動に基づく双方向の行動学習支援の可能性についても述べる。

最後に、以上の事例研究を通じて得られた人間機械系における行動学習支援のための相互作用特性についてまとめと考察を行うとともに、人にとって直観的で察しのよい機械システムを実現するための個人適応制御につながる今後の展望を第5章で述べる。

2 人による機械系の行動学習支援

2.1 既存の行動学習手法の問題点

一般に機械系の行動学習手法は、行動選択 評価パラメータの更新という一連の処理を繰り返し、試行錯誤によって段階的に行動を学習する。その際、現在の状態や選択した行動が目標の達成に適切かどうかを評価

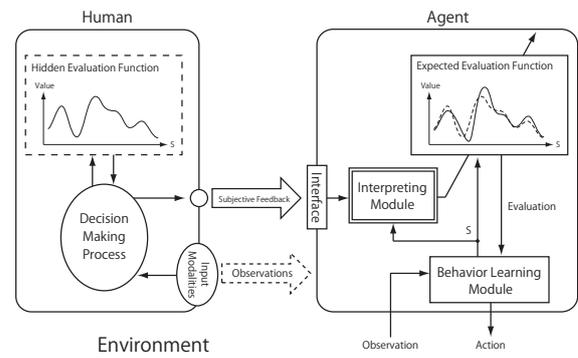


図 2.1: Behavior learning assistance based on human subjective cues.

する方法として評価関数を用いるのが一般的であるが、目標とする状態に到るまでの適切な手順や方策は予め自明でない場合が多く、エージェントの取り得る全ての状態に対して事前に正しく評価関数を設計することは困難である。さらに評価関数は原則的にタスク依存であり、エージェントによって学習可能であると共に収束が保証される評価関数を作成する統一的な方法論は未だ確立されておらず、そのため現状ではタスクや使用する学習手法に応じた評価関数を人が手作業で経験的に設定することが必要不可欠となっている。

2.2 人の主観評価に基づく行動学習支援

この問題を解決するため、人が教示者として機械系の学習を監督し対話的にフィードバックを与えることで、評価関数を動的に修正する行動学習支援手法を提案する。これにより、評価関数の設計に関する従来の方法論における問題点を解決するとともに、学習効率の改善や設計者の負担軽減が見込める。ここでは、図 2.2 に示すように人が機械系の学習主体であるエージェントの振る舞いを観察しながら主観的な評価を教示として実時間で与える学習モデルを考案する。学習エージェントは、与えられた教示と観測される周囲の環境や状態の変化を関連付けることで人の教示意图を推定し、行動学習に用いる評価関数を動的に修正する。

教示者がエージェントに与えるフィードバックには、「良い/悪い」という主観的な2値の評価を用いる [Nakatani et al., 2003] [Riley et al., 2006]。これは、正負の評価を表す基準として単純かつ幅広いタスクに対して意味を持つ指標であり、原理的には人が「良い」もしくは「悪い」と判断出来るタスクに対して、教示の種類やインタラクションの枠組みを変更することなく提案手法を適用することが可能となる。また、内容を細かく指定する必要が無いため素早く直観的な判断が容易であることから、随伴性と一貫性の条件を満たす実時間でのインタラクションに適した指標であるといえる。

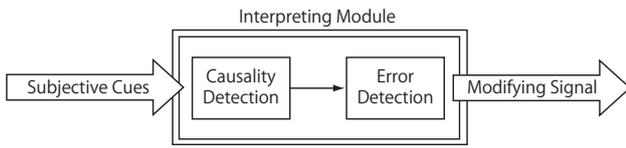


図 2.2: Causality detection and Error detection.

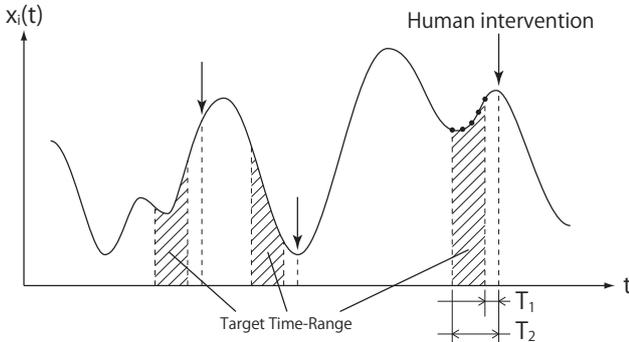


図 2.3: Time-consistency based human intention estimation.

2.3 人の認知判断特性の理解に基づく教示意图推定

「良い・悪い」という単純な二種類の教示に基づいて、多次元の状態空間上に定義される評価関数を更新するために、その教示が与えられた時のエージェントの行動や状態から人の教示意图を推定して評価関数に反映させる必要がある。そのとき、人の認知判断過程で生じる時間遅れや、誤認知や誤判断により間違った教示が与えられる可能性があることから、図 2.3 に示すように人の認知判断特性を考慮した起因の特定と誤り検出によって、人からの教示を評価関数の学習に利用可能な情報として「解釈」するメカニズムを実装する。

始めに教示の時間遅れを測定する実験を複数人の被験者(20代男性4名)による協力の下行った。ここでは、エージェントによる連続した動作の中から特定の動作の連なりを認識した時点で入力を行い、そのときの時間遅れを測定する。その結果、いずれの被験者においても対象動作の観測から1秒以内に教示動作を行っており、個人差はあるが平均的な時間遅れはどの被験者も同程度であることが分かった。そこで、教示との共時性が成立する時間区間の上限・下限を示す時間遅れ定数を T_1, T_2 とし、教示が与えられた時これらの時定数に基づき、図 2.3 に示すように時間的に限定された範囲内で教示の対象となる行動の候補を特定するために用いる。これによって、学習中に教示者から評価が与えられたときエージェントは過去の全ての状態を参照する必要が無く、計算コストを削減することが出来る。また、過去の教示の履歴の参照により教示の一貫性を検証することで、誤教示による外乱も抑制することが出来る。

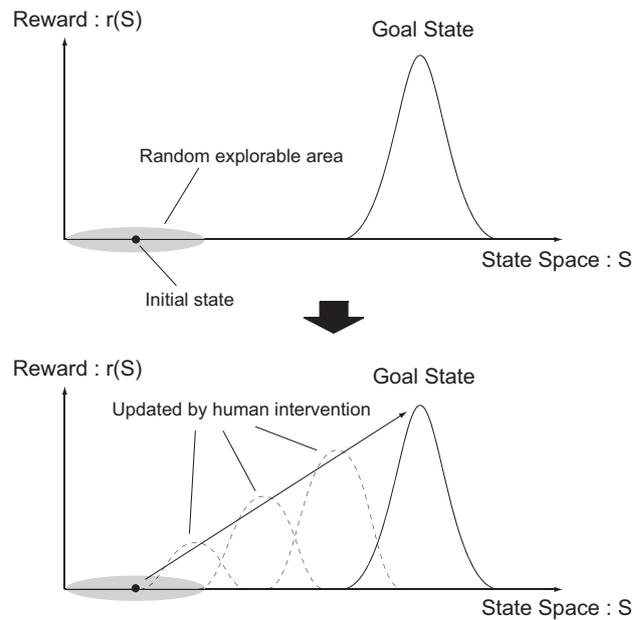


図 2.4: Approach of behavior learning assistance for reinforcement learning agent.

2.4 行動学習支援のアプローチ

図 2.4 に、評価関数の動的更新によるエージェントの行動学習支援のアプローチを示す。ここでは、機械系の行動学習手法として広く用いられている強化学習に適用することとする [Sutton and Barto, 1998]。図の上段は、強化学習の枠組みにおける評価関数に相当する報酬関数が目標状態付近のみ定義され、エージェントが初期状態から探索可能な範囲内で報酬を得られず学習が困難な状況を表している。このようなケースに対し、教示者がエージェントの学習状況に応じた適切な教示を行うことで、図の下段のように初期状態から目標とする状態まで連続的で滑らかに増加する報酬関数を作成することができる。これにより、様々な問題に対して予め最適な報酬関数を設計する必要なく強化学習による行動学習メカニズムを実装できるとともに、環境やタスクの変化にもその都度教示者が介入することで柔軟に対応することが出来る。

2.5 検証実験

実験タスクは、図 2.5 に示すような6自由度のロボットアームの手先に取り付けた1リンクの振り子の振り上げと倒立維持とし、振り子が鉛直下向きの状態から始めて1回30秒の試行中に倒立状態から $\pm 5^\circ$ の範囲にあった合計時間を評価する。実験は提案手法による行動学習支援と通常の強化学習との比較実験とし、図 2.5 の環境を模して開発したシミュレーションソフトウェアを用いて行った。

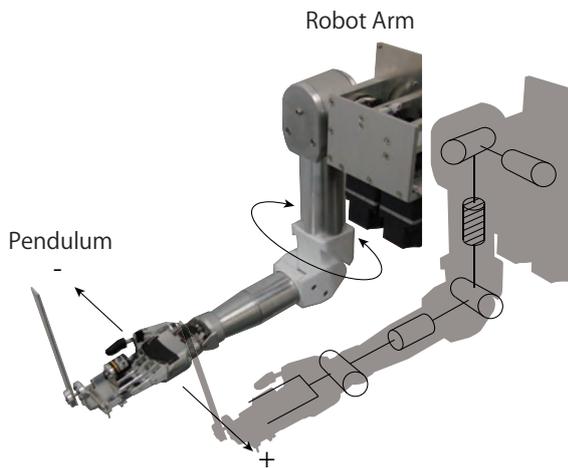


図 2.5: 6 DOF robot arm.

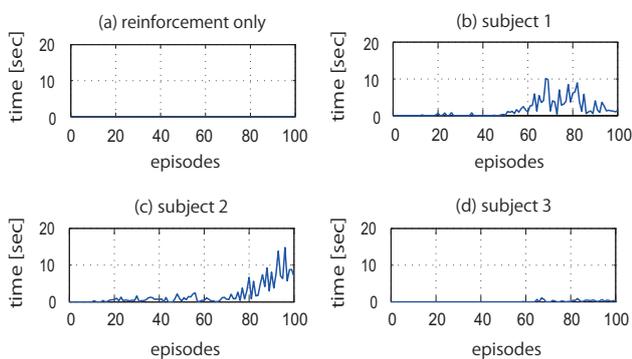


図 2.6: Results of simulation experiment.

図 2.5 に、通常の強化学習での結果と、3名の被験者が支援を行った場合の結果を示す。各グラフの横軸がエピソード数、縦軸が倒立状態の時間を表している。まず、提案手法による支援の無い場合では、全試行を通して振り子を目標角度まで振り上げることが出来なかったのに対し、提案手法では3人中2人の被験者で学習結果に大幅な改善が見られた。一方、図中右下のグラフで示す被験者では学習効率に目立った改善は見られなかった。その理由としては、振り子を振り上げる動作を獲得させるために「勢いよく振り上げる」動作に対して「良い」評価を集中的に与えた結果、振り子を何度も回転させる動作を繰り返す過学習によって、倒立の維持が困難となっていたことが原因であると考えられる。このような場合を想定して、提案手法では教示者の判断で負の教示を与えることで以前に与えられた教示による学習効果を低減させることが可能であり、実際に本実験の際にもそのような教示者による教示行動が見られた。このように提案手法では、教示者によって報酬関数を動的に更新可能なため、学習の開始時に報酬関数を固定する従来の手法と比較して、エージェントにより柔軟な学習を行わせることが可能であると考えられる。また、提案手法によって作成された報酬関数の時間的な推移についても検証を行った結果、図 2.4 に示すよう

に初期状態から目標状態まで連続的に報酬関数が作成されていることを確認した。このことから、教示者による主観的な評価に基づく行動学習支援のアプローチ、および報酬関数の動的生成手法の有効性が証明出来た。

3 機械系による人の行動学習支援

3.1 従来の運転支援システムの問題点と運転技量育成の意義

自動車の運転は日常生活で最も身近な人間機械系の協調作業の一つであり [Billings, 1996]、事故時の被害の甚大さから安全性を向上させるための運転支援システムの重要性は高い [Navarro et al., 2011]。しかしながら、運転者への視聴覚情報提示や車両の自動制御に基づく従来の運転支援システムでは、過度な依存による運転への注意力低下や [Inagaki, 2006]、自動制御による運転者が予期しない車両の動作に対する驚き・恐怖 (オートメーション・サプライズ)、システム作動中に人的物的な被害が発生した場合の責任の所在といった、悪影響や問題点も指摘される [Endsley and Kiris, 1995]。一方、人と機械系の協調作業を必要としない完全自動運転が可能な車の実用化には、あらゆる場面での安全な走行を実現するための技術的な困難だけでなく、必要な環境インフラの整備・普及といった法制度的な観点からも相当時間がかかることが予想される。また、安全性の面からもステアリングやペダルといった旧来のインターフェースが撤廃されることは考えにくいことから、本研究では車を運転する人の能力、すなわち運転技量に着目し、安全・安心な運転を実現する運転技量の習得をシステムが支援することを試みる。ここでは、様々な運転シーンの中でも比較的難易度が高く、かつ日常的に必要となる場面の多い後ろ向き駐車を対象とした運転技量育成システムの開発を通して、運転時における人の行動特性やシステムとの協調動作による学習効果について検証を行う。

3.2 力覚呈示に基づくステアリング操作支援

ステアリングを介した力覚呈示により適切な操作を直接的に運転者に教示し、人に自然な認知を促すと共に主体的な操作を誘発することで駐車運転技量の習熟を促進させる支援手法を提案する。これは、運転者が認知する環境や車両の状態に随伴してシステムが必要な操作を適切なタイミングで呈示する、人とシステムの物理的な相互作用に基づく人の行動学習支援の枠組みである。また、腕部動作であるステアリング操作と同じ感覚様相へ直接的に教示するため、従来の視聴覚への情報提示に比べて認知的負荷が少なくかつ直観的な支援

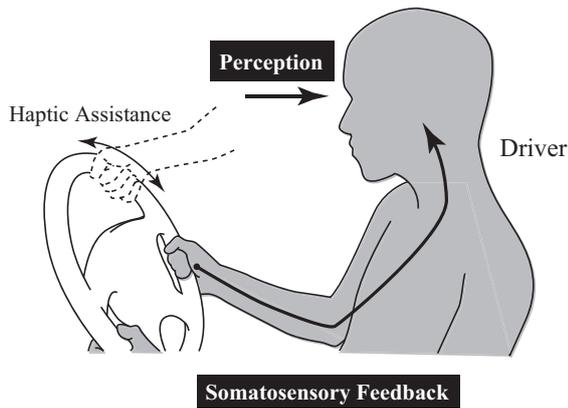


図 3.1: Haptic guidance for steering operation assistance.

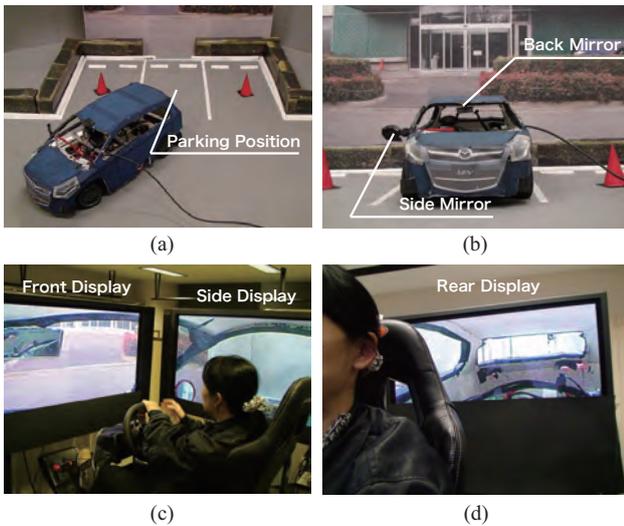


図 3.2: Overview of Scale car simulator.

が実現出来る．また，目標角度からの誤差に応じた反力を呈示する Soft-Guidance [van Asseldonk et al., 2009] によって高い学習効果を得られるとともに，人の主体的なステアリング操作を阻害しない程度の支援強度にすることでシステムの予測しない緊急時の安全性を確保する．

3.3 スケールカーシミュレータ

図 3.3 に，提案手法の実装するためのプラットフォームとして開発したスケールカーシミュレータの概要を示す．これは，実車の 1/10 スケールのモデルカーの運転席部分に小型の全方位カメラを搭載し，得られた画像を運転席周囲に配置した画面に映し出すことでモデルカーの運転席視点での運転体験を可能とするシステムである．運転席にはステアリングとペダル，シフトレバーなど通常の車両と同じインタフェースを実装しており，モデルカーは運転者の操作入力に基づき無線通信で遠隔操作される．また，バックミラー・サイドミラー等の内・外装も実装しており，周囲に実環境を模したジ



図 3.3: Measurement of human driving behavior.

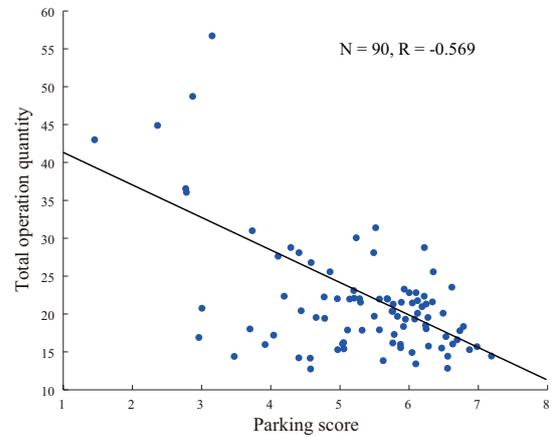


図 3.4: Correlation between parking score and total operation.

オラマを配置することで異なる運転環境を再現することや，実画像を用いることによる臨場感のある運転シミュレーションが可能となる．車両および駐車目標位置は実験環境を俯瞰するように設置した天井カメラによって，車両と駐車位置に取り付けたマーカを認識することで取得する．

3.4 駐車運転行動計測実験

はじめに，後ろ向き駐車時の人の運転特性に関する知見を得るために，実車を用いた人の駐車運転行動の計測実験を行った．実験は図 3.4 に示すような駐車環境で実施し，普通自動車免許を持つ男女 10 人の被験者に左右の開始位置から交互に 5 回ずつ駐車を行ってもらった．駐車結果は実験環境を俯瞰するように設置したビデオカメラにより撮影した車両の駐車位置および角度に基づいて 3 人の実験者が評点化し，駐車に要した時間と合わせて総合的に点数化した．図 3.4 中央および右の写真は，駐車時の車両の位置・姿勢に対する点数の例を示している．これによって得られた駐車成績と，ステアリング，アクセル，ブレーキの操作特性との関係を分析した結果，平均的な駐車成績の高い，すなわち運転技量の高いドライバーほど，全体の操作量が少なくかつ車両の加減速に合わせて滑らかにステアリング操作を行っていることが明らかになった (図 3.4)，図 3.4．この実験によって得られた運転操作に関する知見に基づき，上記の操作特性を満たしつつ任意の切返し位置から

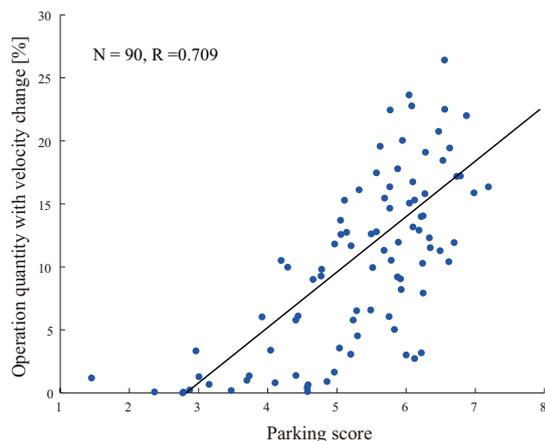


図 3.5: Correlation between parking score and operation with velocity change.

表 3.1: Assistance conditions

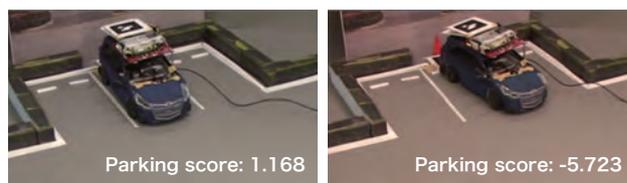
	1st set (1~5 trials)	2 nd set (6~10 trials)	3 rd set (11~15 trials)
Group A	non-assist	non-assist	non-assist
Group B	non-assist	assist	non-assist

の駐車を可能とする制御手法および力覚呈示アルゴリズムを開発し、スケールカーシミュレータに実装した。

3.5 支援効果検証実験

提案手法による駐車運転技量の学習支援効果を検証するため、3.3 節で述べたシミュレータを用いた被験者実験を行った。はじめに、今回参加してもらった 10 名の被験者を運転歴が均等になるように二つのグループに振り分け、一方をシステムによる支援対象群 (B 群)、もう一方を支援を行わないコントロール群 (A 群) とした。実験タスクは右バック駐車とし、5 回の駐車試行を 1 セットとして 3 セット (15 回) の駐車を行うよう指示した。システムによる運転支援は表 3.1 に示すように B 群の第 2 セットでのみ実施し、第 1 セットをベースラインとした第 3 セットでの駐車成績の向上度合いを二つの被験者群で比較することで、提案手法による介入の有無が人の学習過程に与える影響を評価する。

図 3.5 に各被験者群の第 1, 第 3 セットにおける平均駐車成績を示す。駐車成績は図 3.5 に例として示すように、3.4 節と同様に駐車位置の並進・回転誤差および、駐りに要した時間から定量的に算出した。この図から、第 1 セットでは両群の駐車成績に有意な差は見られなかったにも関わらず、第 3 セットでは支援を行った B 群の駐車成績が、支援を行わなかった A 群の駐車成績に比べて向上していることが見て取れ、t 検定を用いた有意差検定でも危険率 1% 未満で有意であることが示され



(a) Successful parking (b) Failed parking

図 3.6: Examples of successful/failed parking.

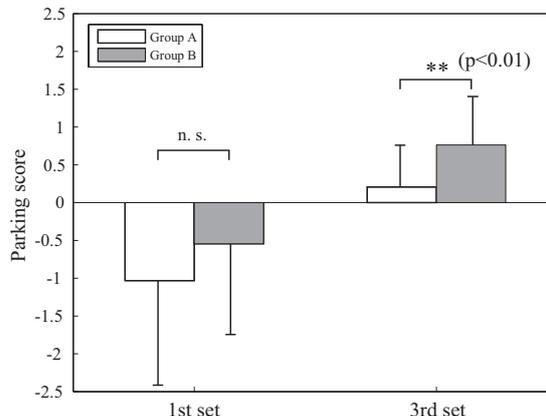


図 3.7: Comparison analysis of parking score.

た。他にも、切返し位置の収束や幾何学的に困難な切返し位置からの駐車の成功率について、両被験者群の間に有意な違いが見られたことから、提案手法によって被験者の運転行動の学習を有意に促進できたと言える。

4 自閉症スペクトラム障害を持つ児童のためのロボット介在活動

4.1 快情動に基づく ASD 児の行動学習支援とロボット介在活動

自閉症スペクトラム障害 (以下 ASD) とは、主に社会性やコミュニケーション能力に困難をもたらす広汎性発達障害であり [Wing, 1996], ASD を持つ児童 (以下 ASD 児) のための様々な療育の手法が提案されている。特に近年では動物介在活動 [Martin and Farnum, 2002] や SCERTS モデル [Prizant, 2005] など、ASD 児の情動と行動の關係に着目した療育のアプローチが注目されている。これは、ASD 児が快情動を感じることで他者との触れ合いやコミュニケーションに安心や楽しさといったポジティブな主観的価値を見出し、それが他者との社会的交流のモチベーションにつながることを目指す児童主体の療育の取り組みである。これは、快情動に基づく ASD 児のための社会的な行動学習支援であり、ここでは ASD 児とロボットとの社会的インタラクションによって実現することを目的とする。

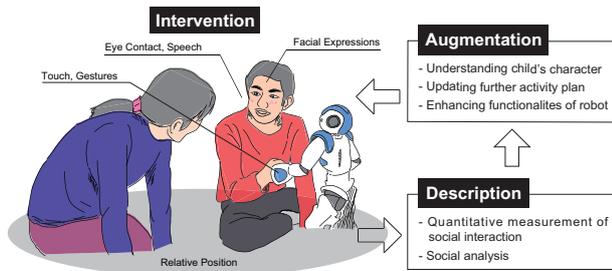


図 4.1: Proposed Robot-Assisted Activity.

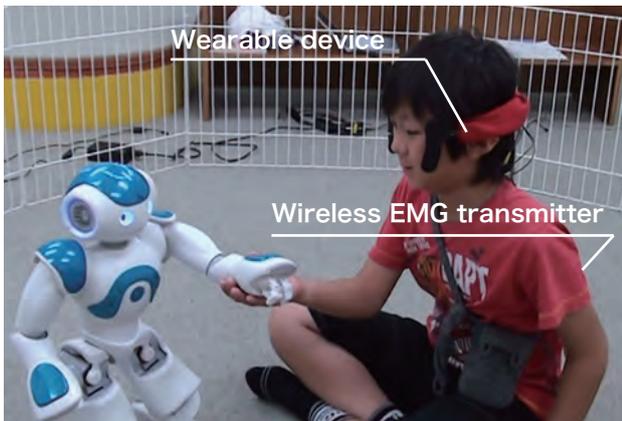


図 4.2: Experiment overview.

ASD 児のための療育利用を目的としたロボットや機械システムの研究は近年盛んに行われており、その有用性が認知されつつある [Pioggia et al., 2007] [Robins et al., 2009] [Ricks and Colton, 2010]. ASD 児の一般的な性質として人や動物に対しては関心が低い、または忌避するが、機械など単純な動作を繰り返すものには逆に強い興味を示すことが知られている [Bekele et al., 2013]. このことから、ASD 児の療育活動への積極的に参加を促すためにロボットを取り入れることは有効であり、また動作の制御や再現が行えることから療育者の負担軽減や ASD 研究のための統制された条件下での実験が実施し易いといった利点もある。しかしながら、これらの先行研究では療育を行う主体としてロボットを用い人間の療育者がその補助を行う方式であるため、ロボットに対して獲得した社会的スキルが人に対しても同様に用いることが出来るかどうか議論の余地がある。また、社会的な文脈から切り離れた状況で標的行動を繰り返すロボットとのインタラクションによって獲得した行動が、他の社会的な場面へも汎用的に応用できるかという点についても疑問が残る。そこで、自由なふれあいと遊びを通じてロボットが ASD 児と療育者・保護者との間に介在し、その関係を仲介する “Social Pivot” として働くことで ASD 児の快情動を誘発するとともに、他者との社会的交流の支援を目的とする動物介在活動に着想を得たロボット介在活動を提案する。

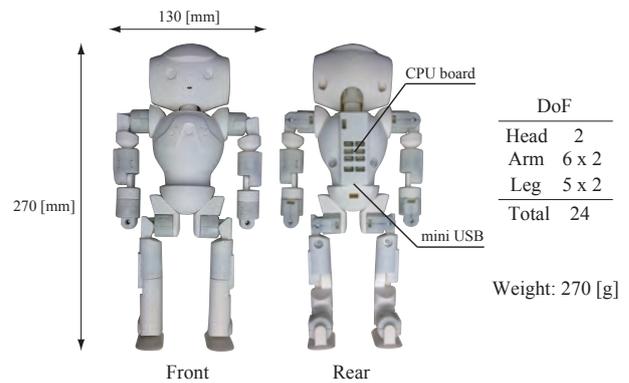


図 4.3: A doll-type robot control interface.

「自閉症スペクトラム」といわれるように個々の児童の自閉性傾向や現有スキルは様々に異なり、そのため ASD を持つ児童のための療育プログラムは対象児童を良く知る医者やセラピストなど複数の専門家によって個別に策定されるのが通常である。しかしながら、複雑多自由度なロボットの行動を実時間で任意に制御することは非常に困難であり、また行動パターンの拡充や変更は専門家によって事前に入念な調整が必要であることから、一般にロボットを用いた療育プログラムはインタラクションの内容やロボットの行動が固定された画一的なプログラムで実施されることが多い。そこで、児童ごとの特徴に合わせたロボット介在活動を工学の専門家ではない療育者や保護者が実施するためのアプローチとして、ロボットの行動パターンを事前に作り込むのではなく、児童の反応や学習進度に応じて療育者が任意にロボットの振る舞いをデザイン出来るフレームワークを提案する。そのために必要となる要素技術として、1) 実時間で即興的な介入を実現するロボットの行動制御手法、2) ロボットによる介入効果の定量的計測、3) 介入のアプローチやプロトコルを修正・拡張するための手掛かりとなるインタラクションの分析・評価手法を開発する。

4.2 システム構成

ロボットの非専門家でも直観的に扱え、かつ任意性の高い実時間での行動制御のための入力機器として、制御対象のロボットと同様の身体性を有する人形型インタフェースを用いた全身行動制御手法を開発する。今回、操作対象のロボットとして小型のヒューマノイドロボット (NAO, Aldebaran Robotics) を用いることとし、構築する人形型インタフェースの自由度数および関節の

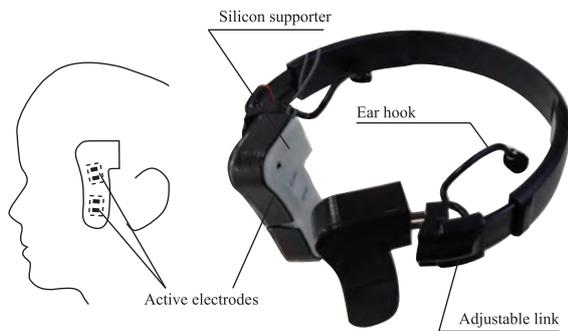


図 4.4: A wearable device for facial expression detection.

軸配置は実際のロボットと等しく成るように設計した。関節部には角度センサを内蔵しており、全身の関節角度情報を約 100 [ms] 周期で取得可能である。これにより、複数の関節を連動させた複雑な四肢の動作も直観的に入力することができる。また、操作者の入力を直接反映させるだけでは転倒の可能性や同時に操作できる関節数に限界があるため、バランス制御や人の操作意図推定に基づく半自律制御も実装する。

また、ASD 児の情動を推定する指標としてロボット介在活動中の児童の表情に着目する。表情は情動と密接に関連する生理的な反応であり、特に笑顔はポジティブな感情の状態を表すことから、療育の効果や対象児童にとっての適性を評価するために計測されることが多い [Funahashi et al., 2013]。今回、図 4.2 に示す表情計測のための装着型デバイスを用いる [Gruebler and Suzuki, 2010]。これは、表情を表出するための表情筋活動のパターンから特定の表情を識別することが可能であり、ロボットや療育者とのインタラクションの間の笑顔の時間やその経時的変化、および他の行動指標との関係性を解析することで、個々の児童に合わせた適切な介入方法を検討するための重要な有益な情報が得られる。

4.3 検証実験

提案するロボット介在活動における ASD 児の反応を予備実験として、自閉症スペクトラム障害と診断され動物介在活動に一年以上参加している児童 6 名と、コントロールとして健常発達児 4 名を対象に行った。実験は動物介在活動のセッションが終了した後のポストセッションとして約 10~15 分程度とし、1~1.5ヶ月間隔で複数回実施した。実験環境は図 4.3 に示すようなプレイルーム内で行い、児童とロボットのインタラクションの様子を天井四隅に設置したカメラとプレイルーム内の実験者の持つビデオカメラによって撮影する。プレイルームには観察室が併設されており、ハーフミラーや天井カメラの映像を通してプレイルーム内の様子を観察するこ

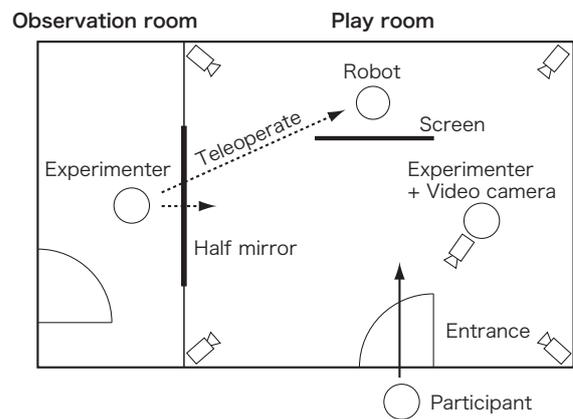


図 4.5: Experiment field.

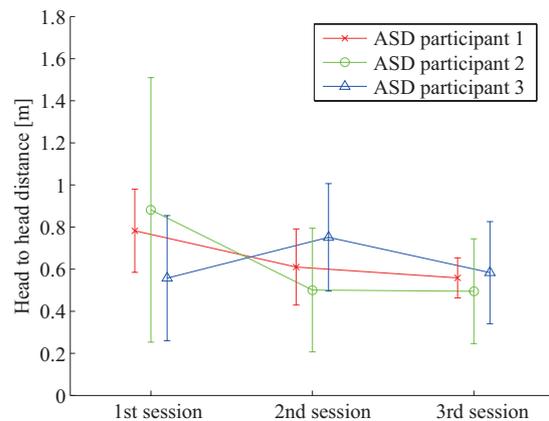


図 4.6: Result of head-to-head distance.

とができる。ロボットは 4.4 節で述べた遠隔操作手法を用いて観察室内の実験者が操作し、児童の働きかけに対する応答や保護者とのインタラクションを促す。

4.4 実験結果

はじめに、動物介在活動では動物に対してネガティブな情動反応を示した ASD 児数名を含む全ての被験者がロボットに対して積極的に興味を示し、挨拶や握手といった社会的な行動も自発的に見られた。このため、生き物を用いる通常の動物介在活動への参加が困難な児童でも参加出来る利点を確認するとともに、事前に想定していなかった児童の行動に対しても柔軟に対応できたことから、インタラクションの方式を限定しないロボット介在活動における提案するロボット制御手法の有用性も確認した。

次に、ASD 児とロボットとの相対位置関係に着目し、天井カメラから得られた映像を用いて ASD 児とロボットの頭部間距離の解析を行った。図 4.4 に 3 名の ASD 児について解析した結果を示す。この図から、3 名中 2 名の児童でセッションを経るにつれ頭部間距離に減少傾向が見られるとともに、最初から近い距離でインタラ

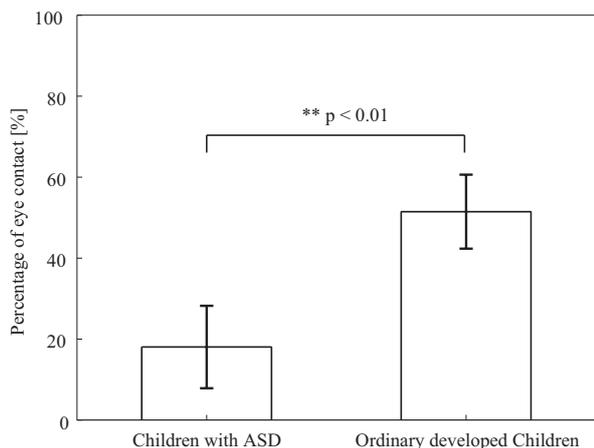


図 4.7: Result of time of face-to-face.

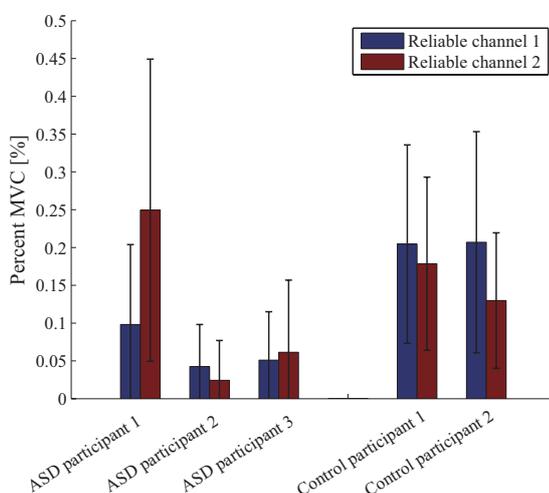


図 4.8: Result of facial muscle activities.

クションする傾向にあった児童も同じような距離を保つ結果となった。

また、ロボットの頭部に搭載されたカメラの映像を用いて、ロボットの顔に対して児童が顔を正対させていた時間 (Face-to-Face) に対する、ロボットの顔を見つめていた割合 (Eye-contact) の時間割合を解析した結果を図 4.4 に示す。この図から、他者とのアイコンタクトを避ける自閉症特有の傾向が観察されながらも、一定の割合でアイコンタクトを行っていることが分かる。このことから、ASD 児にとってロボットは初対面においても比較的受け入れ易い存在として認知されていたと考えられ、アイコンタクトやそれを起点とした社会的インタラクションを促進する役割を果たすことが出来ることが期待される。

最後に、表情計測デバイスから取得した表情筋活動量について、各被験者の解析区間中の最大値を 100%とした平均活動量を示したものが図 4.4 である。ここでは、計測した 4 チャンネルの信号の内、相関値の最も高い二

つのチャンネルの組み合わせを信頼性の高い信号として用いる。この図から、健常児に比べて ASD 児の表情筋活動は少ないものの計測できており、また映像からも時折笑顔を浮かべていることが確認できることから、介入の効果を定量的に評価する客観的な指標として用いることは十分に可能である。また、笑顔と他の行動指標やインタラクションの文脈との関係を見ることで、快情動を引き出すための介入のアプローチを個々の児童に合わせて最適化する一助にもなる。

5 結言

本論文は、人間機械系の相互作用に基づく行動学習支援に関する事例研究の取り組みと、それによって得られた成果と知見をまとめたものである。ここでは、人や機械系の行動学習メカニズム知見に基づき、行動学習を効率的に支援するための相互作用特性として随伴性と一貫性を重視したシステムの設計やインタラクションデザインを行った。

2章では、教示者の主観評価に基づくロボットの行動学習支援手法を考案し、教示の時間遅れや誤判断などシステムとの実時間相互作用の認知的特性を考慮した機械系の学習アルゴリズムを開発した。3章では、力覚呈示を用いた駐車運転技量育成システムの開発を通じて、人と機械システムの物理的な相互作用によって人の学習過程を促進出来ることを明らかにするとともに、個々人の技量や特性のバラつきを考慮した個人適応的な支援手法に関する重要な示唆を得た。4章では、人とロボットのインタラクションの社会的側面に着目し、自閉症スペクトラム障害を持つ児童の社会的性向上やソーシャルスキルの学習を支援するロボット介在活動の提案と、予備実験によって得られた自閉症児の社会的特性についての検証を行った。

これらの事例研究を通じて得た今後の課題として、人には認知的・身体的・生理的・社会的特性のバラつきがあり、人間機械系の相互作用に基づく行動学習支援を実装するためには人の主観性や個人差も考慮する必要がある。例えば、2章では人の教示入力にかかる時間遅れを計測しその上限と下限の値を教示意図を推定するための時定数として用いたが、年齢性別の異なる被験者で同様の数値が得られるとは限らない。また、ロボットのどのような行動を重視して報酬を与えるかという、被験者ごとの主観的価値に基づくロボットへの教示方略の違いも実験結果に現れている。3章で述べた運転技量育成システムでも、支援パラメータを運転者の既存の技量や腕力などの身体的な特性を考慮せず一定としていたことから、被験者によって支援効果に違いがみられた。そのため、このような事前に知ることでできない人

の主観的価値や個人差を，人間機械系の相互作用を通してシステムが理解し動作に反映させる個人適応的なメカニズムを実装することで，個々人の主観や個人差に寄り添った効果的な行動学習支援が実現出来ると考える．これは，4章で述べたように自閉症スペクトラム障害を持つ児童の療育プログラムを策定する上でも非常に重要なアプローチであり，そのため提案したロボット介在活動では予めロボットの行動パターンを作り込むのではなく，対象の児童を良く知る療育者が状況や場面に応じて必要な介入を直観的に行える操作手法を開発した．

今後の展望としては，まず4章での実験結果について詳細な分析を行い，自閉症児の表情とロボットの行動やインタラクションの文脈との関係を調べることで，快情動を誘発するロボットの行動特性を児童ごとに比較し個人適応的な介入の必要性を明らかにする．また，得られた結果に基づき各児童に対して適切な応答を自律的に行うロボットの行動プログラムの開発や，装着型デバイスによって計測した表情を実時間フィードバックとしてロボットの行動学習に用いることも検討している [Gruebler et al., 2011]．これにより，インタラクションを介した人と機械の双方向的な行動学習支援を実現するとともに，情動という主観的な価値に根差した個人適応的な機械系の学習手法に関する研究を行いたい．

参考文献

- [Aisen et al., 1997] Aisen, M., Krebs, S. H., Hogan, N., McDowell, F., and Volpe, B. (1997). The effect of robot-assisted therapy and rehabilitative training on motor recovery following stroke. *Archives of Neurology*, 54(4):443–446.
- [Bekele et al., 2013] Bekele, E., Lahiri, U., Swanson, A., Crittendon, J., Warren, Z., and Sarkar, N. (2013). A step towards developing adaptive robot-mediated intervention architecture (aria) for children with autism. *Neural Systems and Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions on*, 21(2):289–299.
- [Billings, 1996] Billings, C. (1996). *Aviation automation: the search for a human-centered approach*. Human factors in transportation. Lawrence Erlbaum Associates Publishers.
- [Cooper et al., 2007] Cooper, J. O., Heron, T. E., Heward, W. L., et al. (2007). Applied behavior analysis.
- [Endsley and Kiris, 1995] Endsley, M. R. and Kiris, E. O. (1995). The out-of-the-loop performance problem and level of control in automation. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 37(2):381–394.
- [Funahashi et al., 2013] Funahashi, A., Gruebler, A., Aoki, T., Kadone, H., and Suzuki, K. (2013). Brief report: The smiles of a child with autism spectrum disorder during an animal-assisted activity may facilitate social positive behaviors quantitative analysis with smile-detecting interface. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, pages 1–9.
- [Gruebler et al., 2011] Gruebler, A., Berenz, V., and Suzuki, K. (2011). Coaching robot behavior using continuous physiological affective feedback. In *Humanoid Robots (Humanoids), 2011 11th IEEE-RAS International Conference on*, pages 466–471.
- [Gruebler and Suzuki, 2010] Gruebler, A. and Suzuki, K. (2010). Measurement of distal emg signals using a wearable device for reading facial expressions. In *Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2010 Annual International Conference of the IEEE*, pages 4594–4597.
- [Inagaki, 2006] Inagaki, T. (2006). Design of human-machine interactions in light of domain-dependence of human-centered automation. *Cognition, Technology and Work*, 8(3):161–167.
- [Lockerd and Breazeal, 2004] Lockerd, A. and Breazeal, C. (2004). Tutelage and socially guided robot learning. In *Intelligent Robots and Systems, 2004. (IROS 2004). Proceedings. 2004 IEEE/R.S.J International Conference on*, volume 4, pages 3475–3480 vol.4.
- [Martin and Farnum, 2002] Martin, F. and Farnum, J. (2002). Animal-assisted therapy for children with pervasive developmental disorders. *Western Journal of Nursing Research*, 24(6):657–670.
- [Nakatani et al., 2003] Nakatani, M., Suzuki, K., and Hashimoto, S. (2003). Subjective-evaluation oriented teaching scheme for a biped humanoid robot. In *2003 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids2003)*.
- [Navarro et al., 2011] Navarro, J., Mars, F., and Young, M. S. (2011). Lateral control assistance in car driving: classification, review and future prospects. *Intelligent Transport Systems, IET*, 5(3):207–220.
- [Pioggia et al., 2007] Pioggia, G., Sica, M., Ferro, M., Iglizoi, R., Muratori, F., Ahluwalia, A., and De Rossi, D. (2007). Human-robot interaction in autism: Face, an android-based social therapy. In *Robot and Human interactive Communication, 2007. RO-MAN 2007. The 16th IEEE International Symposium on*, pages 605–612.
- [Prizant, 2005] Prizant, B. (2005). *The SCERTS Manual: A Comprehensive Educational Approach for Young Children with Autism Spectrum Disorders*. Paul H. Brookes.
- [Ricks and Colton, 2010] Ricks, D. and Colton, M. (2010). Trends and considerations in robot-assisted autism therapy. In *Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on*, pages 4354–4359.
- [Riley et al., 2006] Riley, M., Ude, A., Atkeson, C., and Cheng, G. (2006). Coaching: An approach to efficiently and intuitively create humanoid robot behaviors. In *Humanoid Robots, 2006 6th IEEE-RAS International Conference on*, pages 567–574.
- [Robins et al., 2009] Robins, B., Dautenhahn, K., and Dickerson, P. (2009). From isolation to communication: A case study evaluation of robot assisted play for children with autism with a minimally expressive humanoid robot. In *Advances in Computer-Human Interactions, 2009. ACHI '09. Second International Conferences on*, pages 205–211.
- [Sawicki et al., 2005] Sawicki, G., Gordon, K., and Ferris, D. (2005). Powered lower limb orthoses: applications in motor adaptation and rehabilitation. In *Rehabilitation Robotics, 2005. ICORR 2005. 9th International Conference on*, pages 206–211.
- [Sutton and Barto, 1998] Sutton, R. S. and Barto, A. G. (1998). *Reinforcement learning: An introduction*, volume 28. MIT press.
- [Takagi, 2001] Takagi, H. (2001). Interactive evolutionary computation: fusion of the capabilities of ec optimization and human evaluation. *Proceedings of the IEEE*, 89(9):1275–1296.
- [van Asseldonk et al., 2009] van Asseldonk, E. H., Wessels, M., Stienen, A. H., van der Helm, F. C., and van der Kooij, H. (2009). Influence of haptic guidance in learning a novel visuomotor task. *Journal of Physiology-Paris*, 103(35):276–285.
- [Wing, 1996] Wing, L. (1996). Autistic spectrum disorders. *BMJ: British Medical Journal*, 312(7027):327.
- [Yamawaki et al., 2012] Yamawaki, K., Ariyasu, R., Kubota, S., Kawamoto, H., Nakata, Y., Kamibayashi, K., Sankai, Y., Eguchi, K., and Ochiai, N. (2012). Application of robot suit hal to gait rehabilitation of stroke patients: A case study. In Miesenberger, K., Karshmer, A., Penaz, P., and Zagler, W., editors, *Computers Helping People with Special Needs*, volume 7383 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 184–187. Springer Berlin Heidelberg.