「先進的統合センシング技術」
平成 19 年度採択研究代表者

H22 年度
実績報告

前田　太郎

大阪大学大学院　情報科学研究科

パラサイトヒューマンネットによる五感情報通信と環境センシング・行動誘導

§1. 研究実施の概要

本年度は，前年度までに蓄えたノウハウと開発デバイスを用いてパラサイトヒューマン(PH)による感覚伝送技術を用いた実作業実験とその評価を中心に研究を進めた．リアルタイムの感覚伝送による行動支援だけではなく，体験の記録・再生による追体験利用コンテンツ化についても検証し，複数の応用側面からの同技術の社会実装の可能性を検討した．さらに，具象レベルの行動意図としての「つもり」の推定モデルを用いて装着者の身体動作から非言語的行動意図の推定と行動支援のための適切な情報提示の時間的タイミングの設計指針を探ることを試みており，頭部運動や上肢作業支援など具体的な行動支援手法への応用を検討した．また現在，本技術の社会的なアウトプットとなる作業課題を持つ協力先として，五感伝送技術を用いたスキル伝達については，記録・再生技術の応用先として救急救命法の実習教育を行う民間団体である MFA による CPR 作業指導，救急医療の現場である国立循環器病研究センターにおける超音波プローブ操作の五感伝送協調作業による遠隔計測画像取得を設定し，関係者を研究協力者に加え，これにフォーカスした評価実験と改良を行った．また，群への支援については支援の階層に応じた数理モデルによるシミュレーションと解析に基づいた行動の誘導効果の仮説を構築し，これを実地に適用・検証するアウトプット先として日本科学未来館との協力体制を構築した．来館者の混雑緩和・展示配置への効率的な群誘導を目的とし，同館と協力して計測実験を開始した．　また，中間審査の結果を踏まえて次年度以降の研究計画において社会実装を念頭に置いた計画の再構築を行い，各要素技術のモジュール化と，実装試験システムの開発，特に五感伝送技術については CPR 救命措置におけるスキル伝達システムとして PH システムの改良及び要素技術の開発にターゲットを絞る方針を固めた．

§2. 研究実施体制

(1)「阪大」グループ

①研究分担グループ長：前田　太郎(大阪大学大学院情報科学研究科、教授)

②研究項目

(1) 全体総括

(2) PHによる感覚伝送のための心理物理的要素実験

(3) 社会システムへの適用のための研究調査

(2)「玉川大」グループ

①研究分担グループ長:大森　隆司(玉川大学脳科学研究所、主任教授)

②研究項目

(1)前庭感覚刺激による人の行動誘導のモデル化

(2)視線計測による人のすれ違い時の行動決定のモデル化

(3)「東工大」グループ

①研究分担グループ長:岡田　昌史(東京工業大学大学院理工学研究科、准教授)

②研究項目

(1) 個体行動の要素化モデル構築と群のマクロな動的挙動および制御

(2) 行動の分節化にもとづく意図推定・行動誘導モデルの構築

(4)「NTT」グループ

① 研究分担グループ長:雨宮　智浩(日本電信電話株式会社コミュニケーション科学基礎研究所、研究員)

② 研究項目

(1) 「錯覚利用の行動支援インタフェース」における「擬似牽引力デバイス」の開発

(2) 同デバイスを用いた遠隔通信者間での牽引力の双方向伝送による強調作業実験

(3) 人間行動の分節化

(5)「産総研」グループ

① 研究分担グループ長:大山　英明(産業技術総合研究所知能システム研究部門、主任研究員)

② 研究項目

パラサイトヒューマン装着者の行動モデル獲得ならびにパラサイトヒューマン装着者による人の誘導に関する研究

(1)パラサイトヒューマン装着者のセンサデータ正規化手法の開発

(2)行動モデル検証のためのマスター・スレーブ方式ロボットシステムの構築

(3)行動モデルの開発

(4)災害時の避難シミュレータの開発

(5)パラサイトヒューマン装着者による人の避難誘導手法の開発

§3. 研究実施内容

(文中に番号がある場合は(4－1)に対応する)

「阪大」グループ

大阪大学は全体総括及び，基本型パラサイトヒューマンの基礎設計，五感情報伝送による協調動作と体験共有効果の実験的検証，感覚－記憶－運動過程の基本モデルの開発・検証を担当した．本年度は以下の研究実施項目について研究を行った．

(1)五感伝送型パラサイトヒューマンシステムの改良と最適化

本年度は前年度より開発中のパラサイトヒューマン(PH)を，記録再生型の実装と実時間伝送型の実装について構成を整理し，感覚要素の複合効果だけでなく実作業対応での評価実験への導入に応じて要求特性に特化した改良を行った[4-1 阪大-11]．特にHMDの安定的な固定と4極3自由度のGVS電極を備えた頭部装着装置，運動計測データの高速転送と実時間ビデオシースルーを実現するFPGA回路について開発を行った．また，各デバイスの詳細設計を決めるための各種基礎実験により五感伝送による体験共有システムの設計論を確立した．歩行移動の誘導・追従[4-1阪大-5]に始まり，協調作業時の頭部の運動追従については，4極3自由度GVSによる起立姿勢誘導や頭部運動追従の特性改善[4-1 阪大-7]，同様に注視点の追従における眼球運動の特性改善[4-1 阪大-13]，さらにオプティカルフローとして誘導刺激を提示する手法による頭部運動時の運動錯覚の発生条件と誘導効果を検証し[4-1 阪大-1]，上肢動作の誘導・追従によるスキル伝達については，位置・速度成分に関する追従特性と視野合成条件の検証[4-1 阪大-4]と作業種別による学習曲線の検証[4-1 阪大-8]によって効果的な体験共有のための視野共有デバイスの設計論を確立した．

また同技術の実社会応用を視野に入れてこの視野共有システムを検討・評価するために，救急救命における最初期の対応，すなわちバイスタンダーによるCPR(心肺蘇生法)作業をターゲットとして想定し，この作業の遠隔支援および技術教育用途での適用性を検討するために救急救命教育を専門とする国際企業であるMFA(Medic First Aide)の協力を得てその評価を行った．その結果，救急救命インストラクター(講習指導の専門家)から視野角が不十分でありそれが作業支援の妨げになっているのではないかとの指摘を受け，このデバイスにおけるVST-HMDの広視野角化と画像安定化を実装した[4-1 阪大-6]．さらにこの指摘の妥当性を実験によって検証した結果，著しく向上する場合と，あまり変化の見られない場合がタスクの種類によって存在することがわかり，用途に応じた設計指針に有力な手がかりを得ることができた．また，別の指摘として自分の環境画像と相手の環境画像との重ね合わせが，視認性を悪くしていることから，輪郭線などの特徴量を強調した合成方法を新たに開発し，これによる作業性向上の確認を行った[4-1 阪大-10]．また視覚に頼れない作業スキルを伝達するための触覚伝送のデバイスとして新型4自由度爪装着型振動子を用いた触覚伝送のための信号処理技術の開発を行った[4-1阪大-2]．昨年度までに図 阪大-2のように従来個別のデバイスとして開発を進めていたなぞり触覚提示と疑似牽引力提示を一つのデバイスで実現するとともに爪上に装着可能なサイズに小型化することに成功しており，本年度はこのような振動デバイスを用いた触覚伝送技術において，周波数数解析では明らかになっていなかった凹凸感に係わる指腹への刺激の要素特定を行ない，指腹の変形による移動方向の感覚情報が凹凸覚を生起する要因となることが明らかとし，指腹からの移動方向の感覚生成が効果的な凹凸覚の伝送に寄与することを明らかとするなど，実際の設計応用に繋がるインタフェース評価知見が得られた．また，偏加速度提示による疑似牽引力提示手法について，回転カム式とインパクト式の2つの新方式による小型軽量化への試みをNTTグループと連携して進めた[4-1阪大-3]．(「NTT」グループ参照)

図 阪大-1　装着性改良型 PH システム

図阪大-2「119 番的状況における PH の感覚伝送による作業支援」を実現する

(2)PH 個体間における五感伝送協調動作による体験共有作業実験と評価

昨年に続き各種感覚提示技術を用いて複数の被験者間の感覚伝送実験，および協調作業実験を行うことで個対個のスキル伝送効果を検証した．特にこの応用を目指した感覚・運動情報の記録による体験のコンテンツ化と，このコンテンツの追体験再生によるスキル情報の反復利用とその学習・伝達効果について，各方面でのスキル獲得形の指導トレーニング局面への応用とその学習効果をもって検証を進めた．この形態での応用は現在の制限の多い通信インフラにおいても具体的な実用性の評価を検証できると期待される．この観点から各種の具体的な作業において，昨年度に基礎的実験において確認された「位置を合わせる協調作業においては，自他の区別が可能かつ互いの視覚情報を同時に提示する手法が効果的である一方で，速度を合わせる協調作業には，互いに相手のみの運動を提示する手法が効果的である」ことを実証的に確認した[4-1 阪大-4]．さらに，位置・手順が重要であるスキル伝達への効果においても，従来の二人称視点よりも PH システムである一人称の視点が効果的であることを確認した[阪大-8]．これらの結果より，先述の視野共有のための頭部追従系における相互視点切り替えシステムの設計・実現に繋がった．さらに，開発した VST-HMD を用いて一人称視野共有を利用した協調作業支援手法を検討し，紐結びなどのタスクを題材とした心理物理実験によってスキル伝達・学習の効果があることを学習曲線の推移に基づいて確認し[4-1 阪大-10]，さらに空間探索タスクを行う実験によって空間把握に有効であること[4-1 阪大-6]を確認した．

さらに，ここまでの理論的側面を「119 番的状況における PH の感覚伝送による作業支援」の可能性の実践的側面にも重点を起き，これを実現するシステムを構築した（図 阪大-2）．そしてこのシステムを実社会応用に持ち込む手段としてインストラクター指導等の実習教育現場への応用を検討した．このために MEDIC FIRST AID のインストラクターをしておられる玉川大学の国見保夫准教授と同 MFA の小児用および成人用の CPR（心肺蘇生法），AED その他の応急手当に関するトレーニングプログラム訓練プログラムについて PH システムを介して実践する試みを行ない，その効果や改善点において知見を得ることができた．

また，3Dテレビなどの普及によって比較的一般人に理解されやすい視聴覚の伝送に比して，普及途上で理解されにくい触覚の伝送[阪大-2]についても，同様に実社会応用を念頭においた実践的側面を見出すために，一般的に普及している汎用通信端末であるスマートフォンのみを用いて，触覚情報を記録と共有サーバへのアップロード，共有サーバからのダウンロードと触覚の再現を行うことで，コンテンツ配信を視野に入れた体験共有の確立を試み，そのプロトタイプの制作を NTT グループと連携して進めた．（「NTT」グループ参照）

(3)直観的身体動作から行動意図の推定・伝達を狙う「つもり制御」の研究

昨年度より開始した直観的身体動作から行動意図の推定・伝達を狙う「つもり制御」についての研究を進めた．ヒトの身体性を反映して直観的行動に対応した非言語的な意図の推定とこれによる行動支援の定式化を狙う．昨年度実現した「つもり」の抽出・推定実験において，さらに高い精度を得るために，動作の前後関係である動作文脈に着目し，動作文脈が直観的入力にどのような影響を与えるのか解析を行なった結果，高々1 分節前までの行動履歴のみが動作文脈に影響を与えることを明らかにした．また，連続事象の認識・記憶による離散化仮説を実証するために，文節の半ばから随意操縦を行った場合の行動機序を計測し，文節の離散化クラスタの大きさを規定する方法を提案し，実験からこれを求めた．また，PHシステムにおける協調作業により直結する「協調者への没入」効果を説明するための高次機能のモデル化と検証を目的として，身体性の観点から「協調作業時における自己と他者の行動意図推定」のモデル化[4-1 阪大-9]と「自己運動と他者運動の推定」のモデル化[4-1 阪大-11]を行った．前者は一次元動作に簡略化された協調作業条件下における他者行動の分節化と解釈について，後者は自発性と他発性の「くすぐり動作」について発汗効果の差によってヒトの高次機能における自己の運動モデルと世界像の構成についてモデル化を行い，協調作業時の「自己解釈と他者解釈」の成立に関して基礎となる知見を得ることができた．

(4)研究代表者としての全体計画推進上の応用先の検討と対応する研究フォーカスの設定

研究代表者としての阪大グループを中心に各研究グループと協力して実際的な研究の推進と並行して全体計画推進上の応用例調査と対応する研究フォーカスの設定および対外発表の計画を進めた．特に本年度は救急救命用途への PH による五感の記録再生およびスキル伝達の観点から現段階での技術的な評価を進めた．

当該技術の適用先として，従来検討中であった救急救命法への応用について，臨床現場への拙速な適用ではなく，まずインストラクター指導等の実習教育現場への応用を検討した．このために実習教育を行う指導講座を開講する Medic First Aid (MFA)のインストラクターをしておられる玉川大学の国見保夫准教授の紹介で同 MFA の小児用および成人用の CPR(心肺蘇生法)，AED その他の応急手当に関するトレーニングプログラム訓練プログラムについて調査した．研究代表者の前田，分担者の大森，大山を含む 5 名が実際に同訓練プログラムに参加して MFA プロバイダー資格を得ることでその必要性と訓練の実際を修得した．このことで以下の様な研究の出口戦略の一つが明確になった．

その結果として本プロジェクトにおいて PH の五感伝送技術が「救急の安心安全」で目指す展開として，第一に実習教育への応用によって効果の周知と体験者の増加による普及を進め，その上で社会インフラとしての実装に向かうという以下の様な方法論が妥当である．

Step1. 「バイスタンダー数増加の支援 ＝ 救急救命実習教育への応用」
(1人称視点体験によるトレーニング効果の向上への応用)
事前訓練の効率化と誘導支援技術の認知・普及．
遠隔支援の周知・体験による実行のエンカレッジ．

Step2. 「バイスタンダーの能力強化 ＝ 救急救命現場への応用」
(遠隔協調作業による作業精度の向上)
AED などと同様に予防的社会インフラとしての普及による救急現場への応用．
感覚伝送による医師への遠隔情報収集効果．
実時間支援によるより適確な救急救命作業の実施．

現在，先述の MFA 人脈を介して，この普及シナリオをもとに救急救命実習教育において PH 学習の効果を評価してもらうための協力を取り付け，引き続き MFA Japan の協力のもと，共同研究を進めている．H21 年度では，MFA の主催している小児用及び成人用の CPR(心肺蘇生法)，AED そのための応急手当に関するトレーニングプログラム訓練プログラムに PH プロジェクトより 5 名が実際に参加し，研究の応用先として検討を行った．また，CPR スキルの記録・伝送・再生学習の実現にむけて，同作業の教示熟練者からのスキルデータの収集実験を行った後，それを基に教示用の一人称視点による体験再現プログラムを作成した．同スキルに未習熟の 8 名の一般被験者を募り，このプログラムをもとに教示学習効果の評価実験を行った． MFA インストラクター資格を持つ国見先生に研究協力者として参画してもらうことで，PH によるスキル伝達効果につい，MFA 基準対応での評価実験を実施した．(図　阪大-3 (a),(b))

また，新たな PH の技術の応用先として，超音波エコー診断の遠隔作業支援について検証中である．これは現在，救急病院でもある国立循環器病研究センタとの協力体制によって進められている．救急救命の応用先としては超音波エコー診断に限ることではないが， MFA からの紹介で救急現場における救急車へのテレメトリー技術など情報化救急医療の先駆者でもある野々木博士(国立循環器センター・心臓血管内科部門長)

(a)　　(b)　　(c)

図　阪大-3　PH の実社会応用：(a)MFA インストラクターによる救急救命実習教育実験での模範演技，(b)同実験での受講者による作業再現，(c)国立循環器センターにおける超音波エコー診断動作の計測実験

と，救急救命の局面での PH の実社会応用について議論した結果，現状最も当てはまる応用として超音波エコー診断の遠隔作業支援が提案された．このため超音波プローブ操作の熟練者として超音波検査学会理事でもある田中副検査技師長をはじめとして計4名から研究協力者としての参画を取り付けた．現在，超音波プローブ操作スキルの実時間記録・伝送・再生学習の実現にむけて熟練者からのスキルデータの収集実験を行った．このデータをもとに PH で開発した力触覚提示装置を用いたスキル教育及び遠隔作業支援の可能性について検討を進めた．(図　阪大-3 (c))

また，避難誘導・混雑緩和の観点からの群誘導に関して，前年度の小規模実験の結果をふまえて実験的に効果検証を行うための大規模施設の選定と交渉を開始した．この交渉先としては日本科学未来館との共同研究契約を結んで協力体制を構築した．来館者の混雑緩和・展示配置への効率的な群誘導を目的とし，同館と協力して計測実験を開始した．

これらの成果をもとに中間審査の結果を踏まえ，次年度以降の研究計画において社会実装を念頭に置いた計画の再構築を行った．各要素技術のモジュール化と，実装試験システムの開発，特に五感伝送技術については CPR 救命措置におけるスキル伝達システムとして PH システムの改良及び要素技術の開発にターゲットを絞る方針を固めた．

「玉川大」グループ

玉川大グループでは本年度は以下のように研究を進めた.

(1)前庭感覚刺激による人の行動誘導のモデル化

前年度から引き続き, 前庭感覚刺激による手先起動の誘導可能性の評価を行った. 円描画課題における実験結果から, 右側陽極で前庭感覚刺激を与える際, 刺激提示前の円の重心位置は徐々に左に寄っていく傾向があったが, 刺激から 2 周目に急に右に移動する傾向が有意に見られた. 更に手先起動の合成加速度変化を分析した結果, 2 周目以降に手先軌道が減速していないことが明らかになった(図玉川-1). 本実験結果から, 前庭感覚刺激により, 身体バランスを崩す方向が予測できず, バランスを取る運動信号を得られない. そのため, バランスを崩した方向と逆方向の運動は発生せず, 手先軌道の減速が起こらなかったのではないかという, 前庭感覚刺激の運動予測のトリガーモデルを提案した[4-1 玉川大-1].

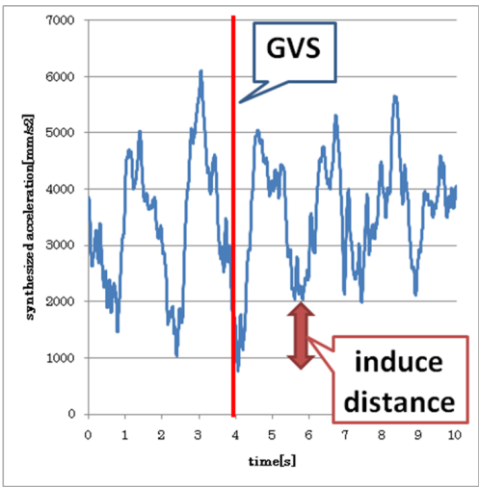


図 玉川-1 円描画課題における手先軌道の合成加速度結果

(2)視線計測による人のすれ違い時の行動決定のモデル化

人は協調作業を行う際に, 他者の行動を観察し, 場合によってはその意図を推定し, それに基づいて自己の行動を決定する. PH が目指している複数人協調のための相互作用場面での行動決定を理解するためには, 他者から得られる情報と同時に, 相互作用を行う自己の動作の分節化を行うモデルの開発が必要である. そこで我々は, 他者と自己の相互作用場面として対象を最も単純化した, 1 対 1 のすれ違い状況における, 人の行動決定過程を解明する実験を行った. 実験結果から, 我々がすれ違い回避行動を行う際には, 対向者が足の方向をコントロール可能な遊脚前後の状態では足元の情報から回避判断を行い, 対向者が足の方向をコントロールできない遊脚及び立脚時は対向者の頭及び胸元の向きによって判断するという, 対向者の歩行周期の影響が明らかになった. 更に歩行者の回避行動についても, 対向者との距離に加え, 歩行者の足が遊脚前期のタイミングで起きるという, 歩行周期の影響が確認された(図玉川-2).

更に歩行周期による行動決定モデルの妥当性の評価及び, モデルに基づいた行動誘導の実現を目指し, 視覚刺激を利用した歩行者の誘導実験を行った. 歩行者の進行方向と垂直にランダムドットパターンを一定方向に動かして提示し, 更に足元に振動刺激を与えて体性感覚フィードバックを抑えた時の, 歩行軌跡について評価した. 実験結果から, 視覚刺激を提示してから平均 1.35sec(2 歩目遊脚前期)において歩行者の足元が刺激と反対方向に移動し, それによる身体バランスを補正しようとすることで視覚刺激と同一方向に身体が誘導されるという結果が得られた(図玉川-3).

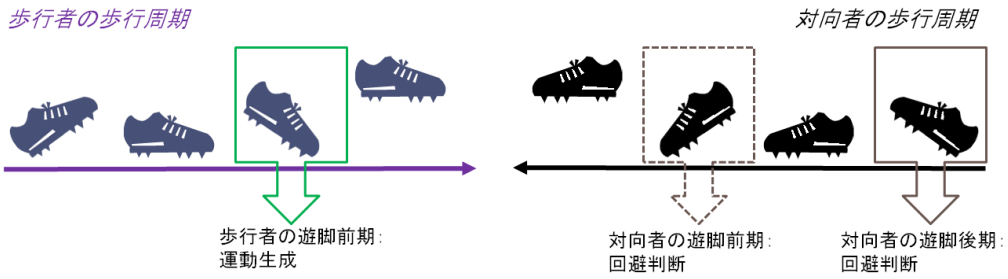


図 玉川-2　すれ違い行動決定過程における歩行者と対向者の歩行周期

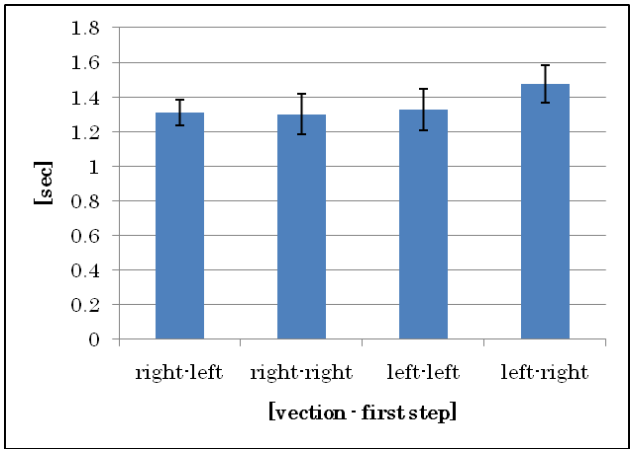


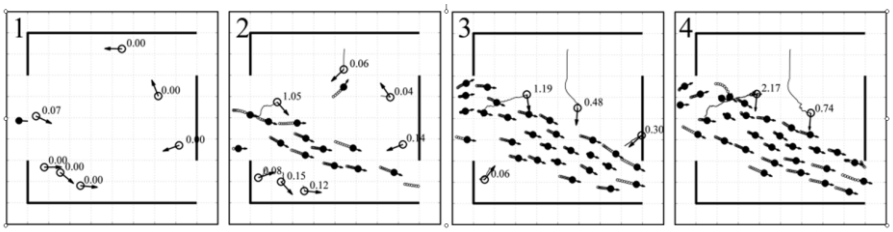
図 玉川-3　視覚刺激呈示から誘導開始までの潜時

「東工大」グループ

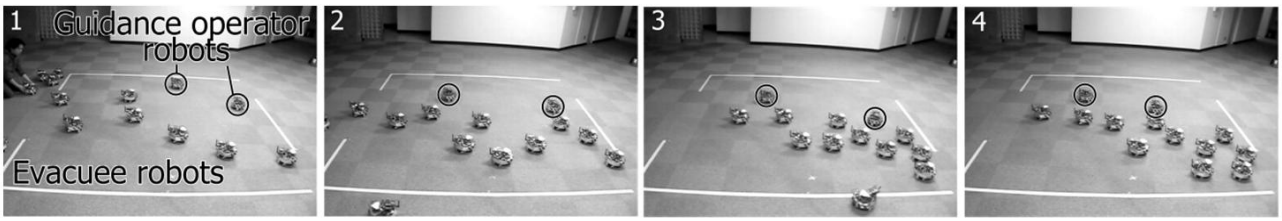
東工大グループでは本年度は以下のように研究を進めた.

(1) 個体行動の要素化モデル構築と群のマクロな動的挙動および制御

1. 群が避難する意思をベクトル場でモデル化することに加え，誘導員の誘導指示もベクトル場でモデル化することにより，群の個体の運動はこれらの場の重ね合わせで決定される. そこで，これらの最適化計算により，群を適切な出口へ誘導するための，誘導員の配置最適化オンラインアルゴリズムを提案した. また，誘導員の貢献度に基づいて，人数の最適化を行った. さらに，模擬的な人間環境として，自律移動ロボットを用いた実験により，提案手法の有効性を検証



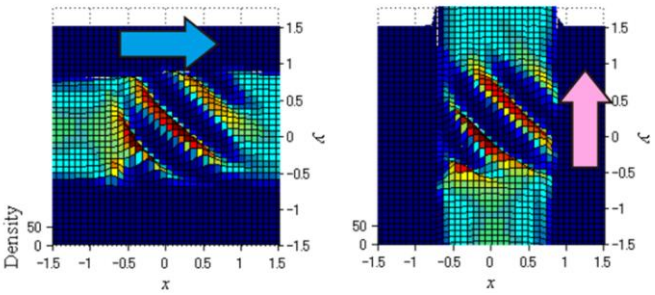
図東工 1 避難誘導における誘導員の配置と人数の最適化



図東工 2　自律移動ロボットによる避難誘導実験

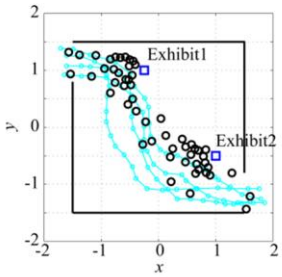
した. 図東工 1 は避難誘導のシミュレーション結果を表す. 左側に入口がひとつ, 右側に出口が二つある避難経路において, ●で表された避難者を○の誘導員によって下の出口へと誘導する. さらに, 誘導員の右肩にある数字は貢献度を示しており, この数字の小さい誘導員から除外されていく. 様々な初期配置から始めた多くのシミュレーションにおいて, ほぼ全ての場合に 4 に示される配置に収束することから, この解が最適解と判断できる. つぎに, 自律移動ロボットを用いて避難誘導実験を行った様子を図東工 2 に示す. 図東工 1 のシミュレーション結果と同様の位置に誘導員ロボットが配置される結果を得た.

2. 駅構内やスクランブル交差点など, 複数の人の流れが交差する状況が数多く存在する. これは交差流と呼ばれ, これをスムーズに流れるよう制御することは, 快適な環境を実現する上で重要な課題である. 本研究では, 上記 1. と同様の手法により, (a) 群の連続体モデルを用いることで, 図東工 4 に示されるように, 縞状の人の流れが現れることを確認した. これは土木・建築工学の研究分野において, 人の交差流に現れる現象として古くから報告がなされている結果であり, これを再現する連続体モデルが得られた. また, (b)誘導員を周期的に移動させることで, 流れの平均速度が上昇する場合があることに着目し, その最適な周波数を人の流れの時間的・空間的な周波数に基づいて求めるアルゴリズムを提案し, さらに, シミュレーションによって平均速度の向上を確認した.

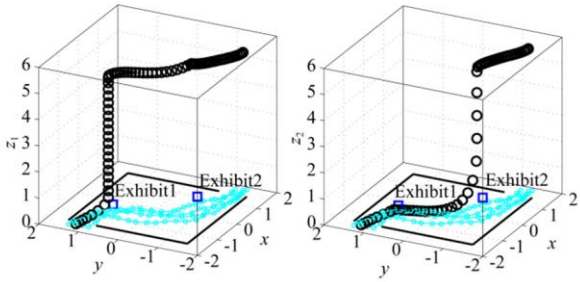


図東工 3 交差流のシミュレーション

3. 展示会における混雑は, 展示物の適切な配置によって解消可能であると考えられる. 前年度までに, 混雑緩和のための新たな障害物配置アルゴリズムの提案と, これまでに開発した群ロボット_ を用いた実験検証を行った[4-1 東工大-2]. 本年度は, 快適に展示物を鑑賞できるための展示物最適化アルゴリズムを開発するために, まず, 人の行動のモデル化を行った. (a) 人の鑑賞経路の個性をモデル化するため, マクロなモデルであるベクトル場と人間の観察結果から得られたデータの差を個性のダイナミクスとしてモデル化した. ここでは誤り近傍点法に基づいた拡張次元数の決定と, 主成分分析による低次元化法を用いている. また, (b) 人の鑑賞時間を表すために, 人の行動を表す力学系に鑑賞時間を加えた次元拡張を行い, 立ち止まる動作をモデルに取り入れた. 図東工 4 は多くの個体が展示物を鑑賞する様子をシミュレーションした結果であり, 展示物の前で鑑賞している様子を表している. 図東工 5 はその中の一つの個体の動きの例であり, 展示物 1, 2 の前で立ち止まり, 鑑賞を行っている様子を表している.

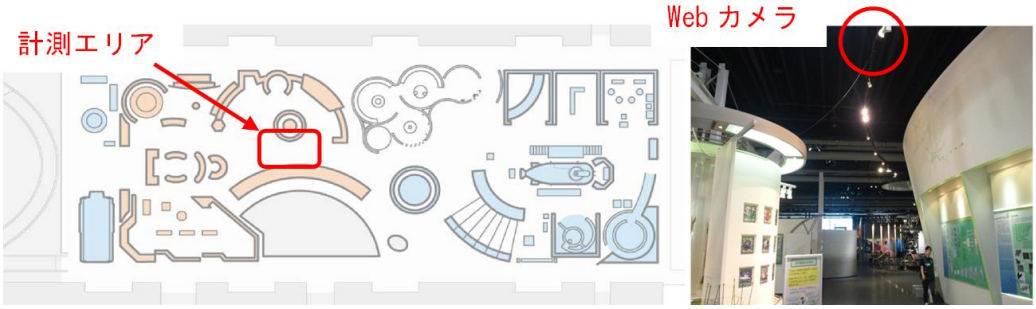


図東工 4 鑑賞のモデル



図東工 5 鑑賞時間のシミュレーション

4. 上記 3.のモデルの検証のため，日本科学未来館と共同研究を行い，展示物を鑑賞する人の動きを観察した．平成 22 年 9 月 20 日(月，敬老の日)に図東工 6 にある日本科学未来館の常設展示場(5 階)において，



図東工 6　日本科学未来館 5 階フロアマップ　　図東工 7 カメラの設置位置

図東工 7 のように天井に Web カメラを設置し，以下の条件で人の流れを計測した．(a)展示物がない場合，(b) 魅力的な展示物がある場合，(c)の展示物の配置場所を変えた場合の各計測において，640×360pixel，30 分(約 300MB 動画)を得た．今後，これらの結果を解析し，モデルの妥当性の検証を行っていく．

(2) 行動の分節化にもとづく意図推定・行動誘導モデルの構築

人間の運動方程式を

$$x[k+1] = f(x[k]) + g(x[k], u[k])$$

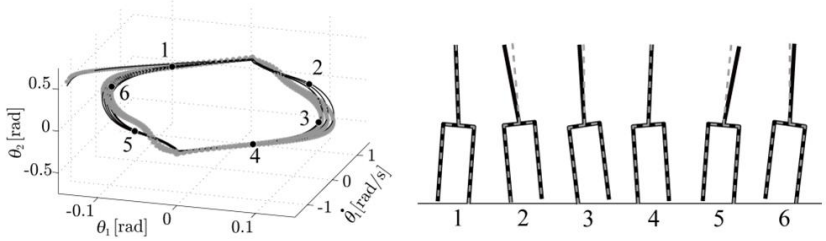
とする．xは状態変数であり，uは入力である．このとき，人間の運動は状態空間の中の 1 本の軌道Ξで表される．そこで，Ξに収束するような場を定める関数

$$u[k] = h(x[k])$$

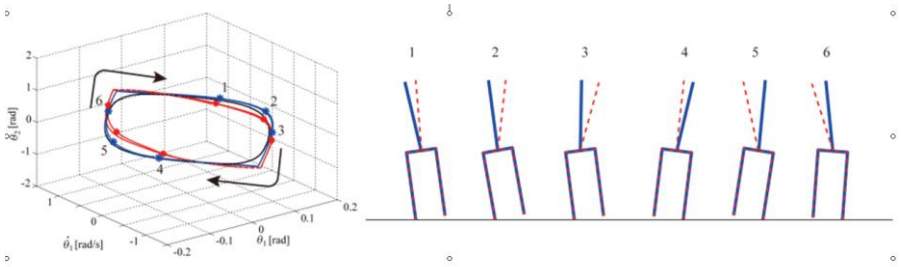
を求める．これは人間を運動Ξへと引き込ませるコントローラである一方，人間の運動を自律系でモデル化したことに相当する．この関数と，古典的な制御系との比較により，擬似目標値 x^{ref} は

$$x^{ref}[k] = -(\partial h/\partial x)^{\#} h(x[k]) + x[k]$$

によって得られる．すなわち，これは力学特性に基づき，運動を続けるために目指すべき姿勢を表したものである．本手法をタップダンスロボットのシミュレーションを用いて検証した[4-1 東工大 1，3]．このロボットは頭部を振りながら脚の踏み替えを行うものである．図東工 8 はロボットの運動とそのときの擬似目標値を表している．運動を継続するために，頭部の目標値が動いている．この結果は，擬似目標値が力



図東工 8 タップダンス運動における擬似目標値



図東工 9　タップダンスロボットの動的姿勢制御

を加えるタイミングとその大きさを示していることを表しており，このタイミングによって運動の文節化が可能である．さらに，先に得られた擬似目標値を再びロボットの目標値として用いることで，タップダンス運動が継続可能であることを検証している．

加えて，これまでの軌道アトラクタに基づくロボットの制御法を応用し，関節ローカルフィードバックを前提とし，直接目標値を生成するコントローラの設計法を提案した．簡単のため，ロボットの運動方程式を

$$x[k+1] = Ax[k]+Bu[k] \qquad (1)$$

で表される線形系とする．このとき，これまでの手法はロボットが運動Ξに引き込まれるようにコントローラ

$$u[k] = h(x[k])$$

を設計するものであった．ここで，ローカルフィードバック則を

$$u[k] = K(x^{ref}[k]-x[k]) \qquad (2)$$

とすると，式(1)，(2)から

$$x[k+1] = (A-BK)x[k]+BKx^{ref}[k] = A_\beta x[k]+B_\beta x^{ref}[k]$$

が得られる．すなわち，これは入力を x^{ref} とした運動方程式であり，従来と同様の考察から

$$x^{ref}[k] = H(x[k])$$

で表されるコントローラが設計可能である．図東工９はこの手法によりタップダンスロボットの運動を生成した様子である．関節の姿勢制御によって従来法と同様に動的なタップダンス運動が実現されている様子が理解できる．

(3) これまでの成果の社会実装に向けた検討

これまでに行ってきた研究の成果を社会実装に生かすべく，以下の検討を行った．

1. 簡単な感覚提示や行動誘導を目的とした，機構によるパッシブな PH 開発が可能であると考えられる．例えば，障がい者の運動を補助する下肢装具に非線形ばね機構を導入し，アトラクタの発想から，障がい者の運動を健常者の運動へと引き込ませるための機構開発が可能であると考えられる．
2. インストラクタの運動を PH 装着者へ五感伝送する際，その遅れから確実な運動伝送が難しい．そこで，これまでに開発した擬似目標値を利用した運動の強調提示が有効と考えられる．これにより，スキル伝達の向上が予想される．
3. 災害現場などでは，PH 装着者が複数存在し，それらの協調作業が必要となる．これを有効に行うために，これまでに開発した群制御法が有効と考えられる．PH だけからでは得られない環境情報をマクロにとらえたモデルを利用し，協調エージェント(PH 装着者)の配置を最適化することで，有効な協調作業が予想される．

「産総研」

産業技術総合研究所では本年度は以下のように研究を進めた．

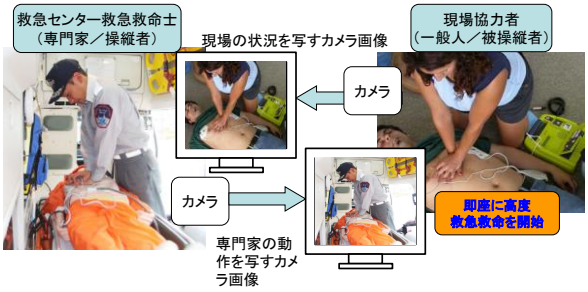
(1) パラサイトヒューマン装着者の行動モデル獲得に関する研究

(1-1)行動・運動推定のためのパラメータ正規化処理と簡易型パラサイトヒューマンシステムの開発

本年度は，これまでに開発した簡易型のパラサイトヒューマン（PH）システム（ウェアラブル行動誘導システム）[4-1 産総研-1]の比較対象として，既存の TV 会議システムを利用した遠隔行動誘導システムを構築し，応急措置の専門家（MFA Japan インストラクター）の協力を得て，評価実験を行った[4-1 産総研-2]．固定されたカメラが1台しか無いシステムでは，一般の応急措置を行うことは難しいが，緊急性が要求され，極めて重要な措置である救命措置（気道確保，人工呼吸，CPR（人工呼吸））を行うことは十分に可能であることを確認した．

図産総研 1 に遠隔行動誘導システムの概念図，図産総研 2 に評価実験の様子を示す．ノート PC を用いたシステムや携帯電話を用いたシステムも構築し，その有効性を確認している．

来年度は，家庭等の一般社会での普及を目指し，システムやインストラクション手法を改良するとともに，広報活動を強化する予定である．

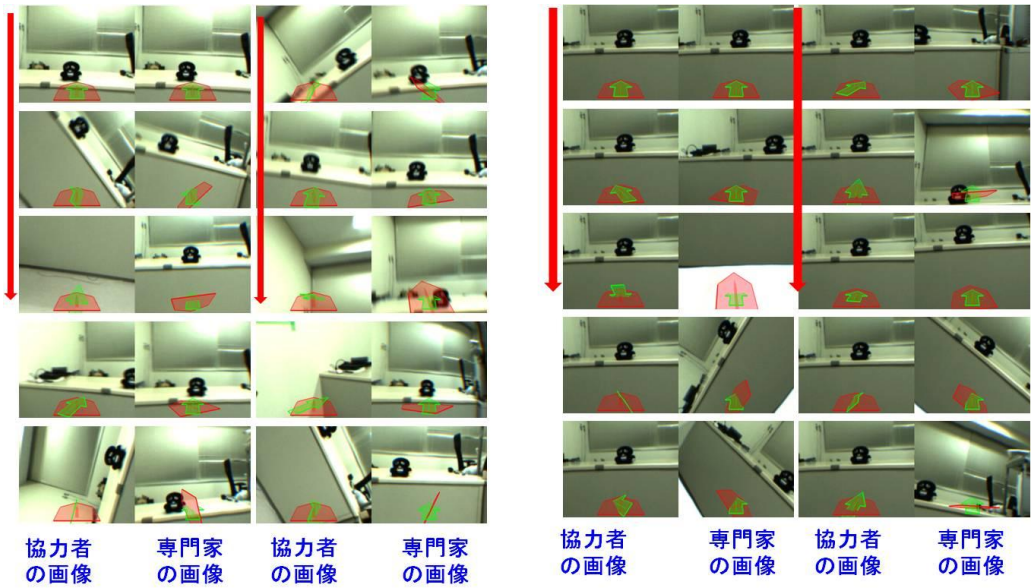


図産総研 1　TV 会議システムを利用した救命救急システム

図産総研 2　遠隔救命救急措置実験の様子

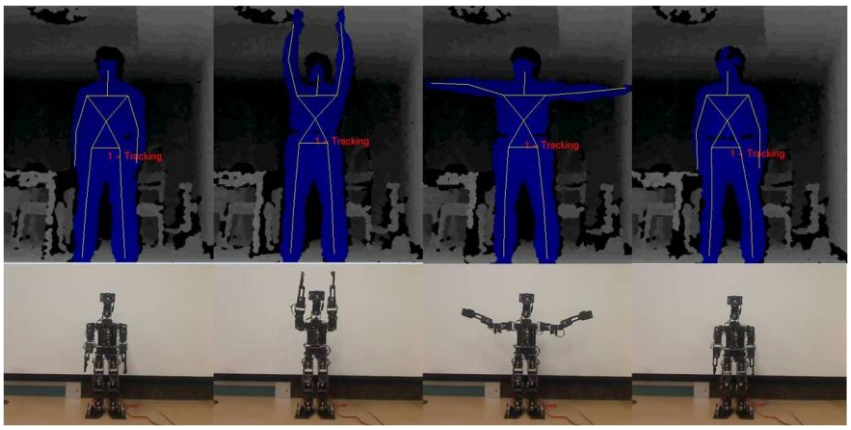
(1-2)画像安定化システムの開発

専門家による PH 装着者の行動誘導は，PH 装着者が出来る限り専門家の動作に追従することによって行われる．このような緊密な連携は，PH 装着者と専門家の双方に疲労をもたらす．それを防ぐために，前年度までに開発しているカメラの運動を補償する画像安定化システムを拡張し，必要の無い時は，専門家と PH 装着者が独立に動くことを可能とする非同期画像情報共有システム(Asynchronous Visual Information Sharing System)並びに仮想視線制御システム(Virtual Viewing Direction Operation System) を開発した[4-1 産総研-3, 4]．図産総研 3 に非同期画像共有システムの動作の様子を示す．



図産総研 3　非同期画像共有システムの動作の様子

各画像において，左側の画像が現場の PH 装着者の見ている画像であり，右側の画像が専門家の見ている画像である．非同期画像情報共有モードにおいては，PH 装着者が頭部を動かしても，専門家の見る画像は安定している．また，専門家は自由に頭部を動かすことが可能である．



図産総研 4　MicroSoft KINECT による小型ロボットの操縦

(1-3)行動モデルの開発

通信に問題がある状況下で，専門家から PH 装着者に安定して分かりやすい指示を送るために，専門家の行動・運動パターンを認識し，認識結果を PH 装着者に送る機能が有効である．そのような機能を実験的に検証するために，前年度までに，テレイグジスタンス型ロボット操縦システムを開発した．しかしながら，NEC/TOKIN の 3D モーションセンサを用いた運動計測システムについては，特に安定性に関して問題があった．そこで，オクルージョンにより，計測不可能となる身体部位が生じる場合があるものの，より簡便かつ安定に関節角情報を取得可能な，距離画像センサ MicroSoft KINECT を用いた簡易型の運動計測システムを構築した．MicroSoft KINECT は，ロボット・コミュニティに急速に浸透しつつある．図産総研 4 にオープンソースで KINECT を利用可能なソフトウェア OpenNI を利用して，抽出した操縦者の動作とロボットの動作を示す．

(2) パラサイトヒューマン装着者による人の誘導に関する研究

(2-1)シミュレータの高速化とより現実的なパラメータによるシミュレーション

昨年度までに構築したエージェントベースの避難誘導シミュレータは Java により，記述されていたが，本年度は C++に書き直して，シミュレーションの高速化を図った．また，エージェントのパラメータを，人流動の画像計測によって推定するプログラムを開発し，より現実的なパラメータによりシミュレーションを進めた．

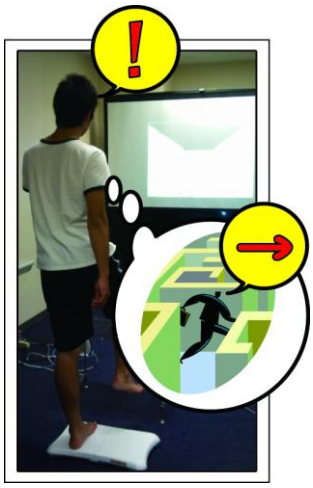
(2-2) 群集を対象とした誘導システムの研究

個人を対象とした行動誘導デバイスの開発が，進められているが，それを補助するものとして，群集を対象としたデバイスもしくはシステムの開発を目指して，研究を開始した．従来の直接的なコントロールとはことなり，「誘導」を意識させることなく「誘導」することを目的としたシステムを構築するため，光源や音源を活用した誘導システムの開発をめざしており，そのための基礎実験を行った．刺激提示による意思決定への影響を測るために，仮想空間内における移動シミュレーショタを作成し，シミュレータの有用性の予備調査を行った．また，小学生を対象としたデモを行い．約 100 名程度に迷路空間での誘導を体験してもらい，シミュレータの可用性を確認した．図産総研 5 に実験の様子を示し，図産総研 6 に提示する画像の一例を示す．

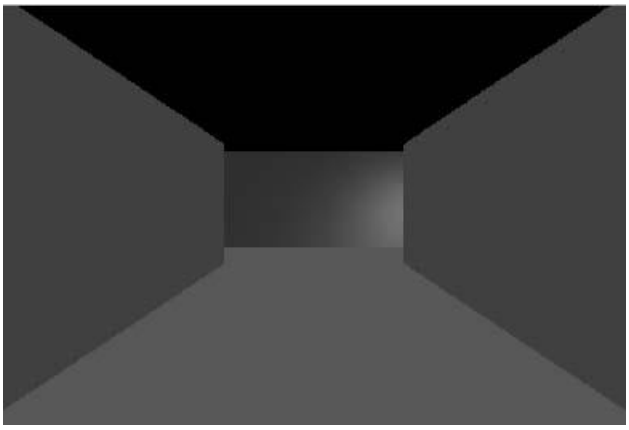
(2-3)日本科学未来館との共同研究

パラサイトヒューマン技術を用いた群集誘導の可能性・有用性を確認するためには，現実の群集を対象とし，手法の検証を行う必要がある．当該プロジェクトでは，日本未来科学館(以下，未来館と呼ぶ)の群集の流れを予測し，制御することを目指して，未来館との共同研究を行った．本年度は，博物館，美術館等の施設並びに，日

本科学未来館の現地調査を行い，展示や混雑の情報を蓄積した．



図産総研 5　仮想空間内移動シミュレータによる実験の様子



図産総研 6　被験者に提示する画像の一例

「NTT」グループ

NTT グループでは本年度は以下のように研究を進めた．

(1) 牽引力感覚生成のための打撃型の振動発生機構に関する研究

前年度までと同様，阪大グループと共に偏加速度型疑似牽引力提示手法について加速度波形に応じた牽引力錯覚の知覚特性の解析を進めた[4-2 NTT-1]．本年度は，PH 装着者が利用可能な寸法や重量となるよう，刺激生成機構の再設計とその刺激に対する人間の知覚特性の評価を行った[4-1 NTT-1]．具体的には，従来のおもりの並進運動による振動生成ではなく，アームの先端にとりつけられたおもりを柔軟物体に周期的に衝突させるような打撃型による振動生成を試みた．打撃方式によって衝突時に従来の機構よりも加速度変化が大きな振動を生成することができた．また，2 機の打撃機構を並べて配置し，平歯車によって鏡対称に駆動することで所望の方向以外に発生する加速度を相殺するような試作機を作成した．図 NTT-1 はその試作機の外観を表す．おもりと衝突する柔軟物体の種類を変え，発生する加速度のパルス幅を変化させたときの人間の感じた方向の割合を図 NTT-2 に示す．

(2)触覚コンテンツの UGC 化に関する検討

PH のような新しい技術やデバイスを一般ユーザに提供するための取り組みとして，既存のインフラデバイスを活用した触覚体験の機会の提供のためのソフトウェアを作成し，Web を通じてコンテンツ共有を行うことを視野に入れたサイトを，阪大グループと共に制作した[4-3 ②阪大 4, 9]．「既に普及しているハードウェア」として普及の進んでいるスマートフォンの Android 携帯や iOS 携帯の振動アクチュエータの触覚提示能力の検証と，物体をなぞる動画を再生したスマートフォンを指に乗せ，机をなぞりながら，その動画と同期した振動を与えることによって凹凸感を提示するソフトウェアの作成を行った．

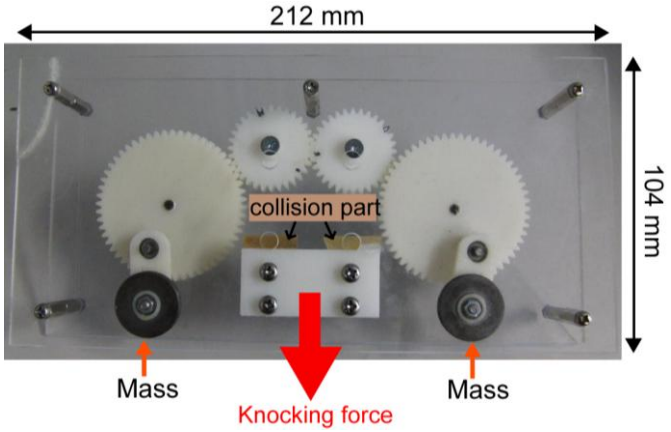


図 NTT-1 おもりと柔軟物体の衝突による急峻な加速度を発生させる打撃式機構の試作機

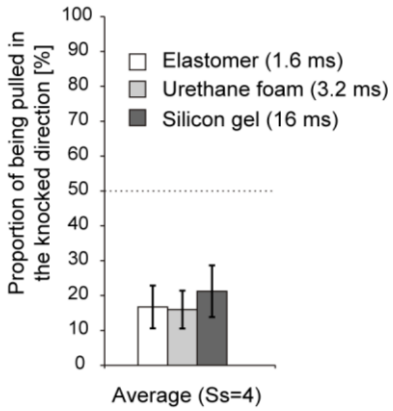


図 NTT-2 打撃型の試作機の衝突物体の素材を変えたときの牽引力の方向の知覚に関する実験結果

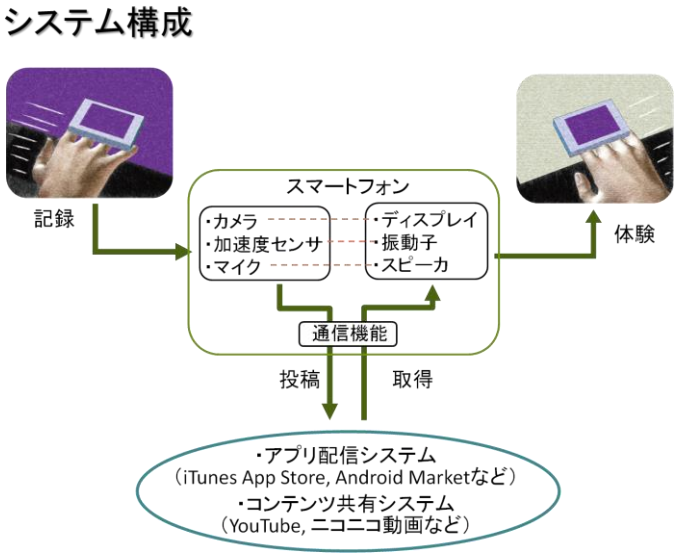


図 NTT-3 触覚コンテンツの共有システムの構成図

§4. 成果発表等

(4－1) 原著論文発表

●論文詳細情報

【阪大】

1. Shin Okamoto, Hiroki Kawasaki, Tomoko Yonemura , Daisuke Kondo, Hideyuki Ando, Taro Maeda：Proposing Optical Flow Manipulation Method to Induce Human Movement - Toward Head Movement Support in First-person Perspective View Sharing System, ASIAGRAPH 2010 in Shanghai, China, Jun 2010.
2. Masataka Niwa, Tomoko Nozaki, Taro Maeda, Hideyuki Ando :Nail-mounted Display of Attraction Force and Texture, EuroHaptics 2010 , The Netherlands, Jul 2010.
3. Hiroki Kawasaki, Hiroyuki Iizuka, Shin Okamoto, Hideyuki Ando, Taro Maeda: Collaboration and Skill Transmission by First-person Perspective View Sharing System, 19th IEEE International Symposium in Robot and Human Interactive Communication (IEEE RO-MAN 2010), Principe di Piemonte, Viareggio, Italy, Sep 2010.
4. Junji Watanabe, Hideyuki Ando, "Pace-Sync Shoes: Intuitive Walking-Pace Guidance Based on Cyclic Vibro-Tactile Stimulation for the Foot", Virtual Reality, Vol. 14, No. 3, pp. 213-219, September. 2010.
5. Daisuke Kondo, Kyo Hattori, Keitaro Kurosaki, Hiroki Kawasaki, Yuki Hashimoto, Tomoko Yonemura, Hiroyuki Iizuka, Hideyuki Ando and Taro Maeda: Effect of Wide FOV and Image Stabilization on Spatial Perception for View Sharing System , Proceedings of 20th International Conference on Artificial Reality and Telexistence, Australia, Dec 2010.
6. Taro Maeda, Yuki Miyata, Hiroyuki Iizuka and Hideyuki Ando: Multi-dimensional effects in galvanic vestibular stimulations through multiple current pathways International Conference on Artificial Reality and Telexistence, University of South Australia, City West Campus, Adelaide, Australia, Dec. 2010.
7. Keitaro Kurosaki, Hiroki Kawasaki, Daisuke Kondo, Hiroyuki Iizuka, Hideyuki Ando and Taro Maeda：Skill Transmission for Hand Positioning Task through View-sharing System, Augmented Human Conference,
   AIST, Tokyo, Japan, Mar 2011.
8. Hiroyuki Iizuka, Daisuke Kondo, Hiroki Kawasaki, Hideyuki Ando and Taro Maeda : Coordinated Behavior between Visually Coupled Dyads, AIST, Tokyo, Japan, Mar 2011.
9. Daisuke Kondo, Keitaro Kurosaki, Hiroyuki Iizuka, Hideyuki Ando and Taro Maeda: View Sharing System for Motion Transmission, Augmented Human Conference, AIST, Tokyo, Japan, Mar 2011.
10. Taro Maeda, Hideyuki Ando, Hiroyuki Iizuka, Tomoko Yonemura, Daisuke Kondo and Masataka Niwa: Parasitic Humanoid: The Wearable Robotics as a Behavioral Assist Interface like Oneness between Horse and Rider Augmented Human Conference, AIST, Tokyo, Japan, Mar 2011
11. Hiroyuki Iizuka, Shin Okamoto, Hiroki Kawasaki, Hideyuki Ando, Taro Maeda：Experimental Study of Distinction between Self- and Other-Produced Behavior in Tickle Sensation, 12th International Conference on Artificial Life, Denmark, Aug 2010.
12. Aru Sugisaki, Yuki Hashimotto, Tomoko Yonemura, Hiroyuki Iizuka : Effective Galvanic

Vestibular Stimulation in Synchronizing with Ocular Movement, Augmented Human Conference, AIST, Tokyo Japan, Mar 2011.

13. Shin Okamoto, Hiroki Kawasaki, Hiroyuki Iizuka, Takumi Yokosaka, Tomoko Yonemura, Yuki Hashimoto, Hideyuki Ando and Taro Maeda：Inducing Human Motion by Visual Manipulation, Augmented Human Conference, AIST, Tokyo, Japan, Mar 2011.

【玉川大】

1. N.Watanabe, T.Omori：Trigger Model for Guiding Arm Movement in Circle Drawing, Proc. IEEE&INNS/FUZZ'10(WCCI'10), pp.18-23, July 2010.

【東工大】

1. Masafumi Okada and Masaaki Watanabe(Tokyo TECH): Pseudo-reference for Motion Transfer based on Autonomous Control System with an Orbit Attractor, Proc. of the 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2010), pp.1297-1302, (CD-ROM), 2010
2. Masafumi Okada and Yoshiyuki Homma(Tokyo TECH)： Amenity Design for Congestion Reduction based on Continuum Model of Swarm, Proc. of 13th International Conference on Mechatronics Technology (ICMT 2009), CD-ROM, 2010.
3. Masaaki Watanabe and Masafumi Okada(Tokyo TECH)： Similarity Evaluation Of Motion Based On Orbit Attractor, Proc. of 13th International Conference on Mechatronics Technology (ICMT 2009), CD-ROM, 2010.

【産総研】

1. E. Oyama, N. Watanabe, T. Omori, K. Shinoda, I. Noda, N. Shiroma, A. Agah, K. Hamada, T. Yonemura, H. Ando and T. Maeda： A Study on Wearable Behavior Navigation System - Development of Simple Parasitic Humanoid System –, Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation (IEEE ICRA 2010), May 2010.
2. E. Oyama, N. Watanabe, H. Mikado, H. Araoka, J. Uchida, T. Omori, K. Shinoda, I. Noda, N. Shiroma, A. Agah, K. Hamada, T. Yonemura, H. Ando, D. Kondo and T. Maeda： "A Study on Wearable Behavior Navigation System (II) - A Comparative Study on Remote Behavior Navigation System for First Aid Treatment -", Proceedings of 19th IEEE International Symposium in Robot and Human Interactive Communication (IEEE Ro-Man 2010) , Sep 2010.
3. E. Oyama and N. Shiroma： Development of Virtual Viewing Direction Operation System with Image Stabilization for Asynchronous Visual Information Sharing, Proceedings of 19th IEEE International Symposium in Robot and Human Interactive Communication (IEEE Ro-Man 2010), Sep 2010.
4. N. Shiroma and E. Oyama： Asynchronous Visual Information Sharing System with Image Stabilization, Proceedings of 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2010), 2010.

【NTT】

1. Hidenori Hamaguchi, Tomohiro Amemiya, Taro Maeda, Hideyuki Ando：Desing of repetitive knocking force display for being-pulled illusion, 19th International Symposium in Robot nad

Human Interactive Communication(IEEE Ro-Man 2010), Principe di Piemonte, Italy, Sep 2010.

（4－2） 知財出願

① 平成22年度特許出願件数(国内 1 件)

② CREST 研究期間累積件数(国内 1 件)