

身体活用インターフェイス  
—パラサイトヒューマンの研究—

前田 太郎

NTT コミュニケーション科学基礎研究所

Human body use interface  
—The study of parasitic humanoid—

Taro MAEDA

NTT Communication Science Laboratories\*

The Parasitic Humanoid (PH) is a wearable robot for modeling of nonverbal human behavior. The PH can be also one of the best media as behavioral interface because the PH has the advantage of embodiment and adaptation. In this report, we refer to the usage of wearable robotics as behavioral interface. The PH assists the wearer with not power but behavioral induction. The behavioral induction is driven by sensory stimulus synchronous to the behavior. The stimuli are designed to induce entailment cyclic motions unconsciously and to correct one-shot motions consciously. The concept of PH is very effective as the design philosophy in the interface that uses the human body resources.

**Key words:** wearable, nonverbal interface, behavior, induction, humanoid.

1. はじめに

情報化社会が我々の生活にもたらしたものは、一見すると便利さ・快適さを象徴している。しかし、その実態として、我々はより多くの情報を流し込まれ、より多くの判断・応答を強いられている。結局のところ従来の情報化技術は情報の入り口を広げて判断の材料を増やすばかりで、その判断と実行まではサポートしてはくれず、増加した情報の量とスピードにユーザーの意識や注意への負荷は増える一方である。人が情報を使うはずが「人が情報に使われている」時代。結果として現代人は忙しい。最新の情報機器を増やすより、もう一つ体が欲しい、とは誰もが思うことである。そこで『分身』の創り方を考えたときに、まず期待されるのは近年注目を集める人型ロボット技術であるが、確かに人間の生活空間に入り込んでその活動を支援するための試みは多くなされて

いるものの、想定されている応用はあくまで手足の延長としての機能である。しかもユーザーの手を煩わせることなくその行動を支援する活動ができるかといえば、その段階からはほど遠く、むしろ多くの認識・判断と行動の選択はユーザーの負担となるため、ロボットが人間を手伝うというよりこれまた人間がロボットを手伝っている状況が多いのが現行技術の実態であると言える。身体よりも意識への負荷の大きいこの状況で欲しい『分身』とは、面倒を見なければいけない手や足ではなくて、面倒を分かち合う眼や頭のほうである。全てとは言わないが、定番の判断や定番の行動を肩代わりしてこなしてくれる眼と頭があれば、意識や注意の負荷を下げたり、もっと他の必要なことに割けるようになるはずだ。こんな『分身』を創るにはどうしたら良いだろう？ これは自分の行動パターンのコピーをどうやって取るかという問題になってくる。このためのデバイスとして我々が提案するのが身体行動を支援してくれる共生体としてのウェアラブルロボット、パラサイトヒューマン（“Parasitic Humanoid=PH”）である。

\* NTT Communication Science Laboratories, 3-1 Morinosato, Wakamiya, Atsugi 243-0198

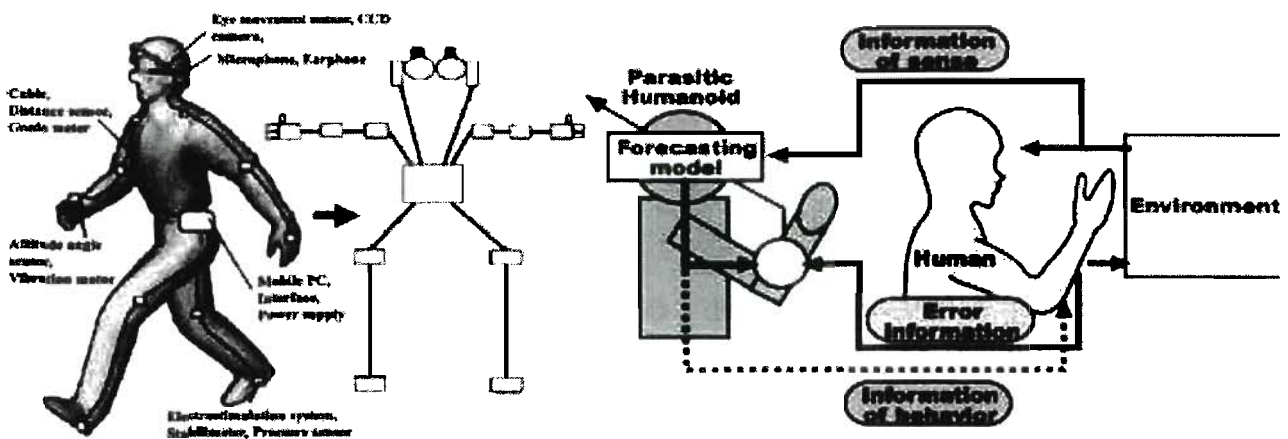


Figure 1. Composition of PH and acquisition process of behavior model.

近年、計算機の小型化・高機能化に伴ってウェアラブルコンピューティングの研究が開始されている。この技術は利用者にとって携帯しているという存在を気にせずに済む利便性はあるものの、その目的意識は通常の計算機端末を身につけて持ち歩くというモバイルコンピューティングの域を脱していない。このため、従来の文字・映像といった言語的情報を入出力できるウェアラブルデバイスの開発がその主流となっている。しかし、ウェアラブルデバイスの構成は人間の身体性に基づいた情報を扱うという観点から見れば本来的に最適な構成であり、この利点を生かしたインターフェイスを技術を開発することで、従来の言語情報によらない身体性を利用した非言語インターフェイス技術を確立することができる。この観点からウェアラブル技術とロボティクスを融合させたウェアラブルロボティクスの試みがなされ始めている。しかし、これらの多くはいまだにパワードスーツに代表される装着型力増大システムやVRの力覚提示系のウェアラブル化などに端を発するものが主流であり運動系・力覚系に特化している。一方で少数ながら感覚系のロボティクスとして主にモバイル視点からの外界センサ系による移動ロボット技術を適用する試みなどがなされているが、いずれの研究も人間に装着するための工夫という要素技術的な問題解決の段階にとどまっており、人間の形態や機能を積極的に研究・利用するという観点に欠けていた。本研究で提唱するPHはウェアラブル技術によって全身に装着されたセンサ群が、装着者の感覚-運動過程において装着者自身と同一視点からの計測を可能とすることに着目し、これに軽量・小出力のアクチュエータを加えることで人間に装着されたまま安全に稼働する人間類似型ロボットシステムを構成するものである。PHは人間の非言語的(nonverbal)な知覚-行動モデルを獲得し、これをもって人間の行動を支援す

ることを目的とする。本研究の効果としては人間機能の工学的解明という自然科学的な基礎研究に寄与する側面に加えて、同技術の工学的応用として、こうした新しい設計思想による適応型マンマシンインターフェイスとしての利用の側面において大きな成果と将来性が期待される。

## 2. パラサイトヒューマンの実装

### 2.1 パラサイトヒューマンの構成概念

本研究で提唱するPHはウェアラブルコンピューティングの技術を用いて製作される。オペレータに着込まれる形で装着されるその感覚系は運動覚・視覚・聴覚・触覚など、人間のサブセットとなる知覚情報を人間と同様の次元数・スケールで外界情報を獲得し、自ら動くことができない代わりに人間という機能単位の入出力に追従してその入出力関係を記録・学習し、これに適応した入力・行動要求をもって、装着者の行動を補完するような一種の共生関係を作り出す。これはある種の寄生型の人工生命のように作用するシステムである。Figure 1左にその最も単純な構成となる第1世代PHの概念図を示す。用いている実装技術・センサ技術といった各要素技術自体は既存の普及技術であり、その構成自体はごくシンプルなものである。同装置の狙いは同次元・同スケールのセンサと効果器を持ち、同構造・同空間配置から得られた情報の統合機能によって、人間の情報処理上の行動原理の第一次近似としてのモデルを得ることであり、人間の行動解析において、シミュレーションや特定局面での一時的な行動記録では特定しにくい環境との複雑なインタラクションを持った取得情報や対応する行動を、装着者と同一視点で常時計測し続けることで、人間の身体的な構造に起因するスキルや行動ロジックを解析する一助とする。このモデル獲得過程をFigure 1右に示す。

PHは人間に装着されることで人間と同相の感覚情報と運動情報を得ることができ、この情報を元に以下の2つの段階を経て人間の行動モデルを獲得することを目指す。

- 1) PHが内部に持つ行動モデルが学習前の状態の場合、直前までの感覚-行動履歴と現在状態からモデルを用いて次の行動を予測し、その正誤に基づいて内部モデルの修正を繰り返す(Figure 1 右実線)。この段階のPHは受動的に情報を観測し予測と修正を繰り返す。
- 2) 上記予測モデルが十分な予測性を持つに至った時点で、PHはその予測に外れた装着者の運動に対して直接的に自分の運動出力をもって異を唱えることを始める(Figure 1 右点線)。このとき、装着者がその出力を妥当だと判断すればそれに従い、そうでないとすれば行動を修正しない。この新たな行動結果をもとにPHもまた内部モデルの修正の有無を決定する。こうして人間とPH双方において行動の内部モデルを修正・整理することを繰り返す共生系を確立する。同段階においてPHと装着者の間にはある種の非言語コミュニケーションが確立されることになり、装着者がこの共生的なプロセスに馴染んでいくことによってPHによる行動支援の様式が身体学習的に獲得されていくことになる。

## 2.2 運動誘導による行動支援インターフェイス

この段階で鍵となるのが運動誘導による行動支援という考え方である。従来、「人間の行動を決定する要因は当人の自由意志によるものでありこの変更は個々の人格の意志決定・判断によってのみ可能である」という思想が主流である。しかしながらこの結果、先述したような意識への判断負荷を過剰にしてしまう形でインターフェイス技術が発展するという結果を招いたといえる。これに対して心理物理学の近年の知見によれば、実際の人間の情報処理系において知覚から行動に至る情報処理のプロセスの中では、意識上の言語的な判断処理を要求されるデータフロー以上に、意識下において半自動的に非言語的な情報が処理されるデータフローが大きな役割を果たしていることが示唆されている。強制的な意志や行動への介入ではなく、感覚入力に働きかけることによって、この意識下で機能する処理系を介して利用者の行動を自然に誘導することを狙うのが運動誘導の考え方である。PHは身体性を利用した計測とモデル化を行うことでその情報を元にこうした非言語的な装着者の行動を予測し誘導する行動支援インターフェイスとして機能する。従

来、ウェアラブルコンピューティングの観点からの行動支援インターフェイスは小型HMDや音声指示を用いた言語的(verbal)な手段に限られており、人間の言語理解を介している点で、身体行動を実行中の装着者にとっては注意を分散する負担が大きい上に、装着型の利点である身体性を全くといってよいほど利用していなかった。PHでは身体性を利用した運動誘導の考え方によって、nonverbalでより直観的な行動支援インターフェイスとして機能することが可能である。

運動誘導は機能的電気刺激(FES)などに代表されるような運動自体への直接介入ではなく、感覚に対する誘導刺激の付与による感覚-運動サイクルへの干渉をその基礎とする。その形態は意識への関与の仕方によって、以下の2つに分類される。

- 1) 歩行や船漕ぎ、指揮動作など、反復する周期運動においては意識下刺激を利用した運動誘導が有効である。一般に長時間継続する運動はこうした周期運動が主体である。これは同時に他の動作や活動を並行して行うことが必要とされる動作が多く、このため運動自体には意識的に注意を割くことなくその反復運動を行使し続けられることが必須である。この場合、誘導刺激もまた注意をひくことなくこの感覚-運動プロセスに作用することが要求される。このため、継続的な周期刺激による引き込みなどを用いた半無意識的な運動誘導手段がこの適用となる。また、この場合に期待される効果は誘導開始による即時的なものではなく次周期以降に位相や周期の変化を実現するというのが誘導戦略となる。
- 2) 一方、周期運動に対してリーチングに代表される単発の運動においては、運動自体が短時間のうちに終了するため、この場合の誘導は動作終了直後か動作中に効果を現す即時的なものである必要がある。また、動作主の注意も主としてその単発運動自体に向けられているために、対応体部位に関する意識上への運動教示がその適用となる。

## 2.3 パラサイトヒューマンの各部構成

PHは全身に装着されて機能するセンサ系と運動誘導刺激系を持ち、これらがそれぞれ人間の感覚系・運動系に相当するように構成される。この試作3号機とその各部構成をFigure 2に示す。これら装着装置系の総重量は計算機とバッテリーを除けば中継基板や配線を含めても500g以下の構成となっている。これらのデバイスはウェアラブルな実装のために小型軽量化を図るだけでなく、身体性に基づいたPH特有の要素デバイスがいく

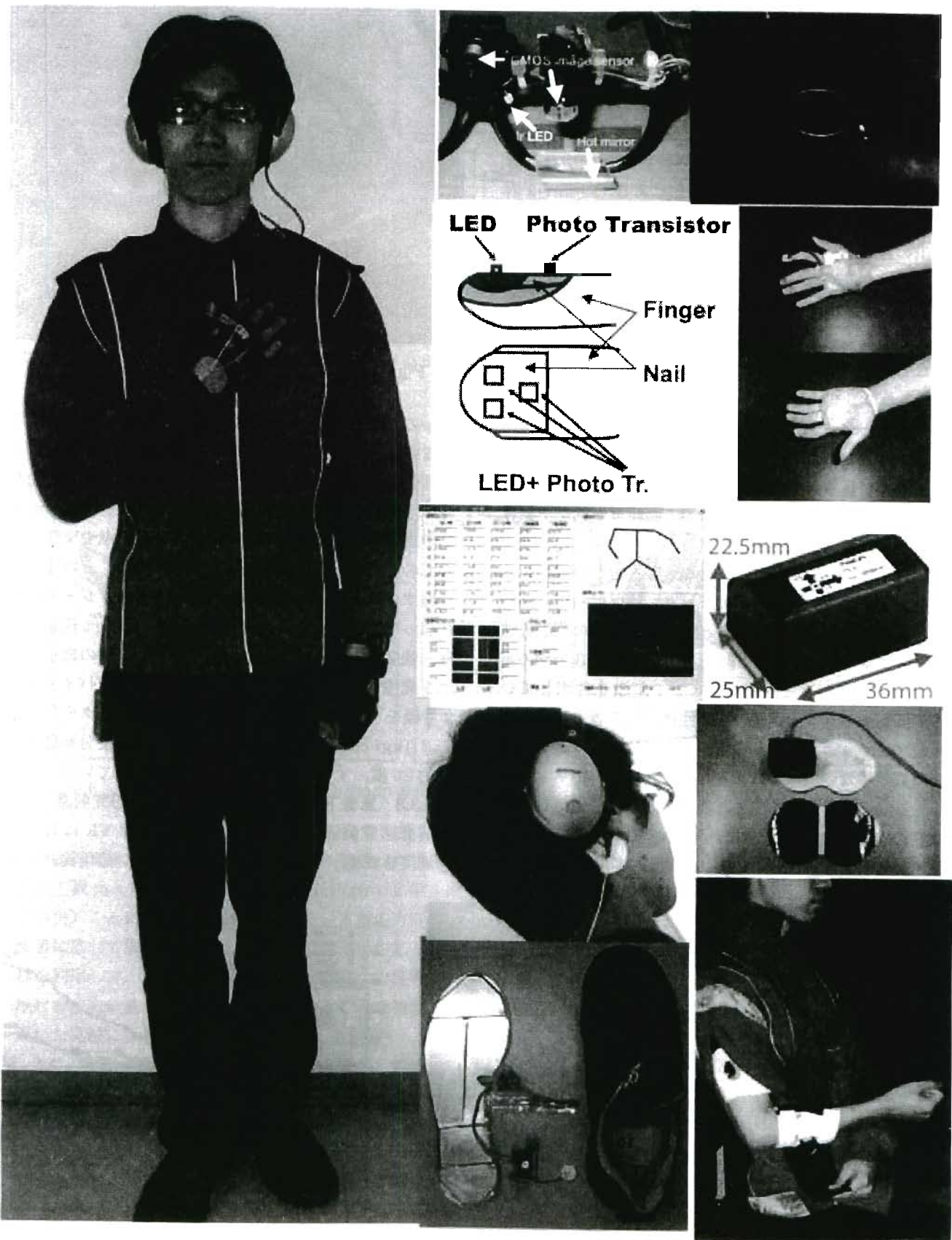


Figure 2. The third prototype and each part composition of PH



つも提案・開発されている。以下にその構成上、特に特徴的なデバイスの実装について説明する。

2.3.1 爪センサによる指行動の計測

PHにおいて採用された爪センサは装着者の手掌部の活動を妨げることなく計測を行うために開発されたセンサである。その特徴はセンサが指の腹側に一切存在せず、全て爪の上に装着されている点にある (Figure 2 右側上2列目)。原理的には指先端の接触や指の屈曲に伴う爪の色の分布と変化を爪上から光計測するものであり、これは爪直下の血行の分布を計測していることに相当する。この構成によって装着者はセンサの存在を意識することなく通常の行動スキルによって手掌部動作を行うことができる。現段階ではICAによる解析の結果、指1本あたり3組のフォトリフレクタを配した状態で、簡単なキャリブレーションのみで指先端での3軸接触力ベクトルおよび指の曲げ角に関して3~4 bit程度の有効分解能が得られている。

2.3.2 意識上運動誘導デバイス: 回転モーメント型提示デバイス

PHにおける運動誘導のための感覚入力としては、その開発段階において音、振動モータ、腱反射利用、回転モーメント提示、電気刺激などの各種感覚への刺激方法を試みている。Figure 2に示したPH試作3号機の実装では、電気刺激と回転モーメント刺激を併用している。回転モーメント刺激の必要性は、装着者自身のセンサ&アクチュエータである筋への弱電気刺激は最も軽量かつ高効率な刺激法ではあるものの装着毎時のキャリブレーション負荷が高く、また表面電極による電気刺激では筋の全てに対して任意に刺激可能なわけではないこと、装着者の意識上においては、個別の筋の活動は表象

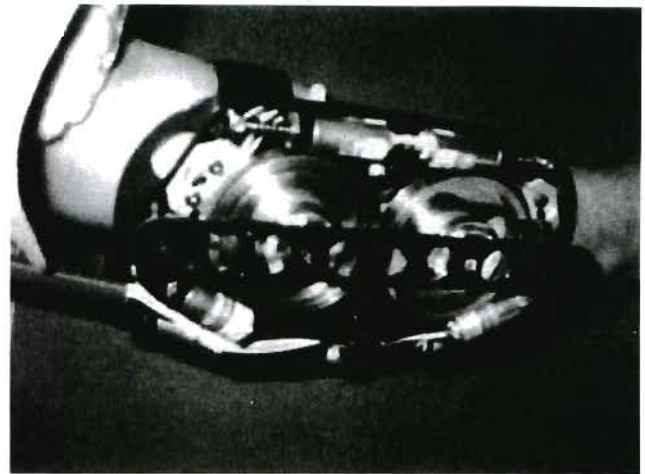


Figure 3. Wearable moment display device.

として捉えられていないことに起因する。そこで併用される刺激方法として開発されたのが回転モーメントによる運動方向提示デバイスである。このデバイスは自由な身体活動を保証するために、従来型のパワーアシストや力覚提示デバイスで問題となった外部固定点や反作用点なしの純粋なトルク提示を可能としている。その原理は回転するホイールに蓄積された角運動量をブレーキ機構によって装着フレームに伝達することによって任意の方向・強度・タイミングをもったインパルス状の教示トルクを発生させる方式にある。Figure 3に同デバイス試作2号機を示す。この装置においては合成トルクの最大値を3 [kgf-cm]とした場合、有効な提示角度分解能として約20度、すなわち4bit程度が確保されている。

2.3.3 意識下運動誘導デバイス: 前庭感覚刺激

前庭感覚刺激による方向誘導の手法はVRにおける加速度感覚提示などへの応用も含めて広い応用範囲が期

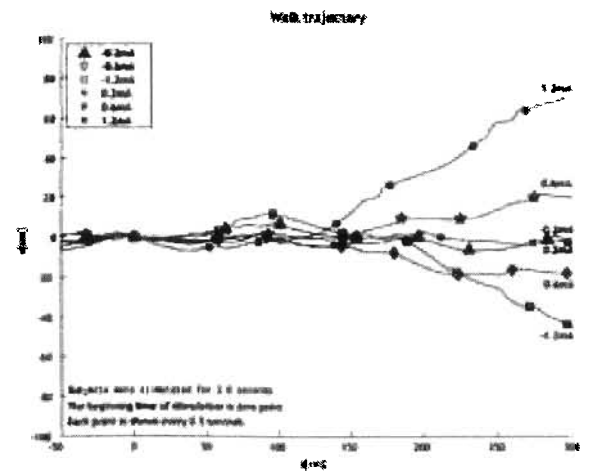
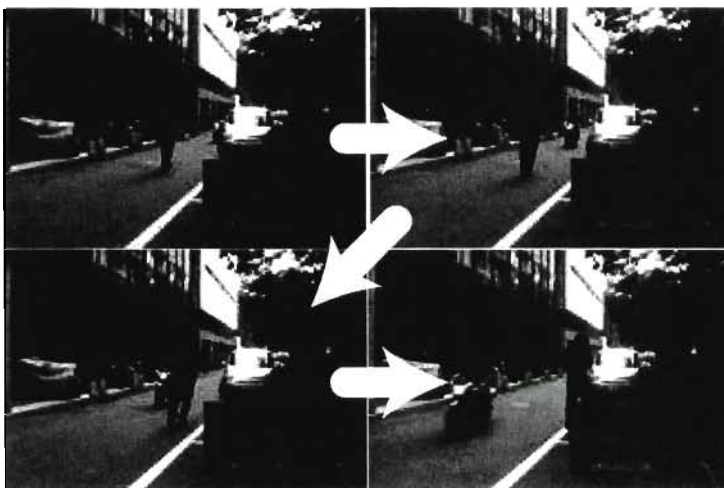


Figure 4. Walking inducement experiment (Left) by galvanic vestibular stimulation and walking trajectories (Top View) (Right).

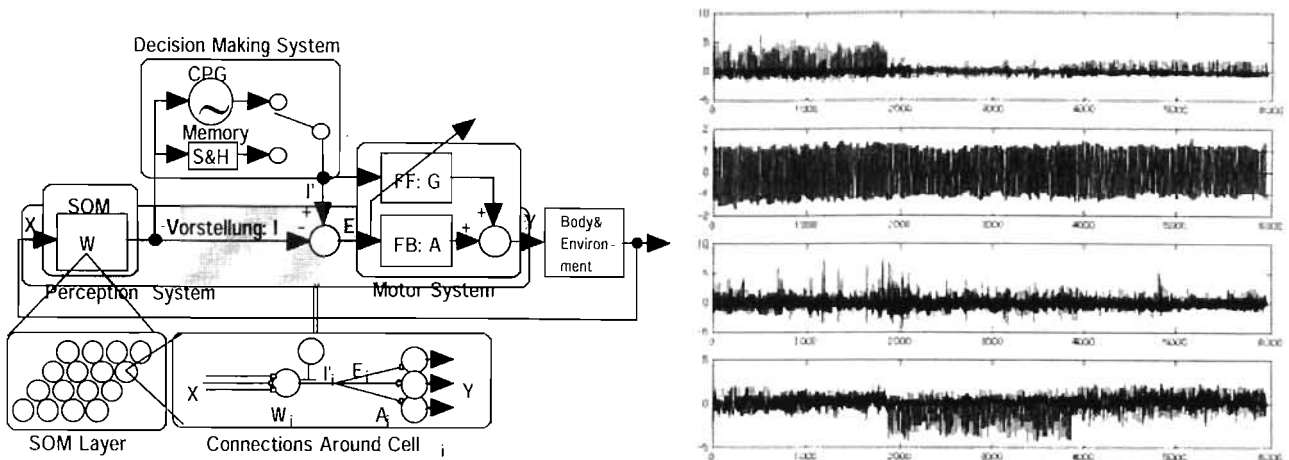


Figure 5. The diagram of sensory-motion system (Left) and the example of pattern recognition with ICA in the Janken task (Right).

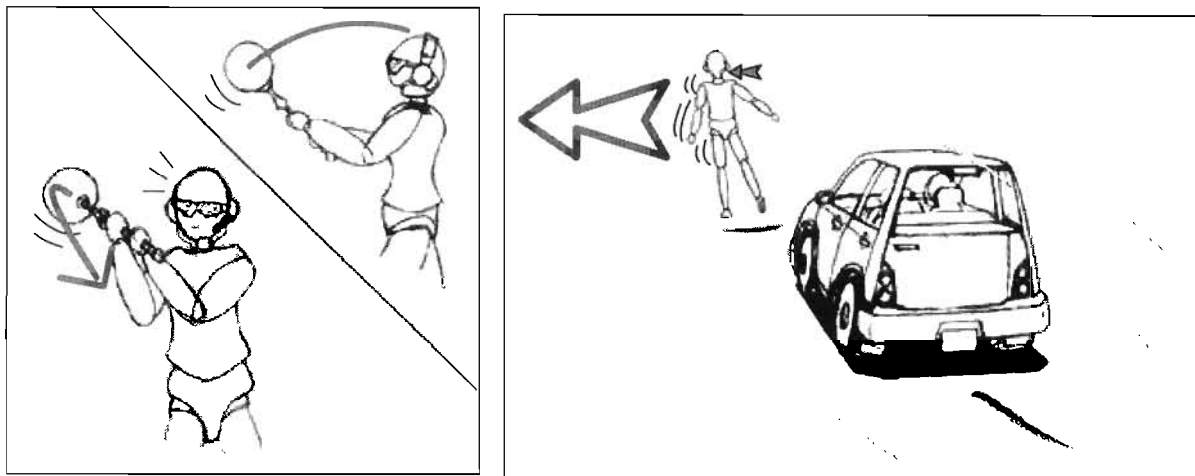


Figure 6. Examples of supporting human behavior with PH: Capture & playback of training action (Left) and walking inducement (Right).

待される刺激方法である。左右両耳後に装着した電極を介して数 mA 程度の直流電流を流す (Figure 2 中 4 段目中央) ことにより、装着者の感じている重力方向を電流値に応じて陽極側へとシフトさせる効果が生じる。これを利用して、Figure 4 のように歩行移動中の装着者の歩行を左右に誘導することが可能であることを被験者を用いた実験により確認している。

2.4 感覚-運動モデルの獲得と行動支援のための行動予測

以上のような運動誘導を有効に行うためには、装着者の行動を同定し、予測する感覚-運動プロセスのモデルが必須である。PH ではこのモデル化において観測・学習・誘導に身体性を利用したウェアラブルシステムならではの利点が生かされる。行動情報からの学習・分類を行う同システムの構成には Figure 5 左のように SOM (自己組織化マッピング) をはじめとした神経回路モデ

ルが概念上用いられているが、実際のデータの処理には神経回路網モデルの等価的な線形近似解として ICA (独立成分分析) を用いて学習の安定性と近似精度のトレードオフを図っている。ジャンケン動作を用いた評価実験 (Figure 5 右参照。時系列左からチョキ・グー・パー各 60 回分に対応) においては、肘角度+手の甲の姿勢 3 自由度の合計 4 関節軸の情報から、特定装着者の出し手動作に関して、平均所要時間 0.3 [s] の全行程中、1/3 行程段階で 85%、2/3 行程段階で 95% の確率で、出し手のリアルタイム予測に成功している。PH では予測によって稼ぎ出される猶予時間 (このケースでは 100~200 [ms]) を用いてヒトの応答遅延時間 (動作ごとに違うがおおむね 150~300 [ms] 程度) を補償することで、運動誘導による教示を実動作の修正に利用する戦略をとっている。

Table 1  
Composition of sensor system in the third prototype of PH

センサ種別	検出情報	検出信号数
3軸方向センサ	頭部 1, 胸部 3, 各四肢 3カ所	$16 \times 3 = 48$
爪上部センサ	各手 3 指の曲げ & 接触点の検出	$3 \times 3 \times 2 = 18$
眼球運動センサ	各眼球 2 自由度 + 瞳孔径検出	$3 \times 2 = 6$
足裏圧力センサ	各足 5 点計測 + 衝撃センサ 1	$6 \times 2 = 12$
視聴覚センサ	両眼カメラ + 両耳マイク	2 画像 + 2 音響

### 3. おわりに

身体性を利用したウェアラブル技術としての PH の開発理念と現状について報告した。行動支援インターフェイスとしての PH 利用の端的な具体例としては以下のようなものが考えられる。

- 1) 歩行誘導: 最適な歩行経路をたどるようにガイドする。未知ポイントへの GPS 情報による経路の誘導や、交通情報による混雑する経路の自動回避、後方センサによって検出された接近中の車の自動回避など、前庭感覚刺激を用いた半無意識誘導によって特に注意を払う必要もなく最適な歩行経路をたどることができる (Figure 6 右)。
- 2) 行動のキャプチャ & プレイバック: 行動の記録・再生による特定行動の再利用。例えば偶然に打ったベストショットの再生による繰り返しトレーニング、スポーツやダンスなどの身体行動の「型」の交換によるコミュニケーション等 (タイガークワッツのスイング、イチローの走行フォームのダウンロードなど) (Figure 6 左)。

こうした直接的に身体性を介した行動支援を通して常時装着と装着者個人への適応を実現することで、PH は装着者にとっての補助意識として機能する理想のインタフェースの一形態を示唆している。今後の課題としては、現段階の試作装置で確保された時間的・強度的には高分解能である一方で空間分解能としては 4 bit 程度の教示方式によってどの程度の運動予測・誘導及び、行動の記録・再生が可能となるかの実証例の蓄積と、複数の

装着者による常時装着実験によって PH を介した装着者間の行動情報の共有の可能性、装着者間の非言語的コミュニケーションなどについても検証していく予定である。

### 引用文献

- Jacobsen, S. 2001 Wearable Energetically Autonomous Robots: DARPA Exoskeletons for Human Performance Kick Off Meeting.
- Mayol, W. W., Tordoff, B., & Murray, D. W. 2000 Wearable Visual Robots, International Symposium on Wearable Computing.
- 渡邊淳司・安藤英由樹・前田太郎 2001 腕部と脚部の相関に着目した歩行運動の解析 計測自動制御学会第 16 回生体・生理工学シンポジウム論文集, 419-420.
- 財津義貴・稲見昌彦・前田太郎・舘 暲 2001 腱反射を利用した新たな運動方向提示装置の提案 VRSJ 論文誌, 6, 99-105.
- 尾花和俊・安藤英由樹・前田太郎・川上直樹・舘 暲 2002 回転モーメントを利用した機械ブレーキ式力覚提示装置の開発 人工現実感 (第 18 回ヒューマンインタフェース学会研究会), 61-66.
- Maeda, T., Ando, H., Sugimoto, M., Watanabe, J., & Miki, T. 2002 Wearable Robotics as a Behavioral Interface—The Study of the Parasitic Humanoid—, International Symposium on Wearable Computing.
- Severac Cauquil, A., Martinez, P., Ouaknine, M., & Tardy-Gervet, M. F. 2000 Orientation of the body response to galvanic stimulation as a function of the inter-vestibular imbalance. *Exp. Brain Res.*, 133 (4), 501-505.