

プロアクティブインターフェースロボット“PICO-2”

九州大学 倉爪亮 内田誠一 谷口倫一郎 長谷川勉

Embodied Proactive Human Interface “PICO-2”

Kyushu University Ryo Kurazume Seiichi Uchida Rinichiro Taniguchi Tsutomu Hasegawa

Abstract— We are conducting research on “Embodied Proactive Human Interface”. The aim of this research is to develop a new human-friendly active interface based on two key technologies, an estimation mechanism of human intention for supporting natural communication named ”Proactive Interface”, and a tangible device using robot technology. This paper introduces the humanoid-type Two-legged robot named “PICO-2”, which was developed as a tangible telecommunication device for the proactive human interface. In order to achieve the embodied telecommunication with PICO-2, we propose new tracking technique of human gestures using a monocular video camera mounted on PICO-2, and natural gesture reproduction by PICO-2 which absorbs the difference of body structure between the user and the robot.

Key Words: Human interface, Tele-Communication, Gesture imitation, Humanoid, Motion tracking

1. はじめに

コンピュータの低価格化と高速なインターネットの整備に伴い、多くの個人的、社会的な活動がコンピュータを通して行えるようになってきている。しかし、現実にはデジタル・デバイドという言葉に象徴されるように、コンピュータシステムを使いこなせる人とそうでない人の間に格差が生じ始めている。

このデジタル・デバイドの根底にある本質的な問題は、以下の2つに集約されると考えられる。

1. コンピュータを通した活動の多くはキーボードやディスプレーなどを通した情報のやり取りであり、実世界で行われる自然な活動との乖離が起こっている。
2. コンピュータシステムを通して活動を行うためには、どのような作業や処理を行うかの詳細なデマンドを人間がシステムに正確かつ陽に与えなければならない。

上述した問題に対処するため、本論文ではコンピュータと人間を結ぶ新たなヒューマンインターフェースの枠組みとして「プロアクティブヒューマンインターフェース」を提案する。この研究の目的は、”人間からの詳細なデマンドに寄らない新たな駆動原理（プロアクティブ技術）”に基づき、従来の仮想メディアだけではなく”実体としてのロボット技術”的活用することで、人とコンピュータシステムに存在する垣根を低減化し、様々な人にとって自然で使いやすいヒューマンインターフェースの枠組みを提供しようというものである。

提案するプロアクティブインターフェースの実現例をFig.1に示す。この例では、遠隔地にいる2人の人がネットワークを介してコミュニケーションを行うとき、相手側のヒューマノイドロボットを自分の分身として使い、音声だけではなく、身振りや視線、表情なども伝送、再現することで、相手に自分の身体を意識させ、コミュニケーション能力を増強しようというものである。このとき、例えば会話や行動の履歴から話者の意図を推定し、相手方のロボットでその意図にあう行動を再現できれば（例えその行動が実際には成

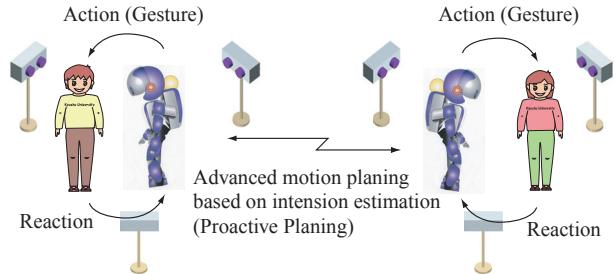


Fig.1 Concept of proactive human interface

されなかったとしても）自分の意図をより正確に伝えるための有効な手段となる。さらに話者の意図を先読みし、予測した意図情報を実際の行動が生じる前に相手方に伝えて次時刻での再現に備えることができれば、実体を通したヒューマンインターフェースを遅れやギャップの少ないより自然な動きに近づけることができると考えられる。

また上述の例だけではなく、例えばコンピュータの入力装置に意図推定に基づく能動的な補助運動を利用することで、操作に不慣れな人や肢体に障害がある人にとって使いやすい入力装置が実現できる。技能伝達のための新たなメディアとしてのロボットの利用^{1) 2)}や、操作者の意図推定を基にした動作補助^{4) 5) 6)}、うなずきや身振りなど身体的リズムの引き込みを利用した身体的コミュニケーションシステム⁷⁾など、本研究には多くの先行研究があるが、特にコミュニケーション能力の補強を中心とし、先読みした意図による行動選択と実体を感じさせるヒューマンインターフェースの結びつけが本研究の特徴である。

我々はこれまでに、ジェスチャネットワークとDPマッチングを用いた人間の意図推定システムを提案している⁸⁾。本論文では、提案するプロアクティブヒューマンインターフェースの一例として、Fig.1で示した実体を伴う遠隔コミュニケーション実現のために、新たに開発した人間型プロアクティブインターフェース“PICO-2”的紹介と、搭載した単眼カメラによる人間動作の計測と再現手法について述べる。

Table 1 Specification of PICO-2

Height	640 [mm]
Weight	8.7 [Kg]
Number of actuators	23
Number of joints	6 for each leg
	4 for each arm
	1 for each gripper
	1 for waist joint

2. 人間型プロアクティブインターフェース “PICO-2”

Fig.1に示した実体を伴う遠隔コミュニケーションの実現のための新たな情報提示ハードウェアの開発を目的として、遠隔コミュニケーションのための人間型アクティブランジング “PICO-2 (Proactive Interface for Communication)” を試作した。このロボットは人間型ロボット (HOAP-2, 富士通オートメーション) をベースに、LCD やスピーカー、マイク、小型 IEEE1394 カメラを装備したものである (Fig.2, Table 1)。ロボットが装着した液晶モニタやデジタルカメラは、遠隔地の話者の表情の計測と表示、または会話内容に関連したデータや会話そのものを表示するのに使用される。この PICO-2 により、遠隔地の話者の会話や表情、行動を計測、伝送し、リアルタイムでヒューマノイドロボットにより歩行も含めた全身行動を再現することが可能となる。

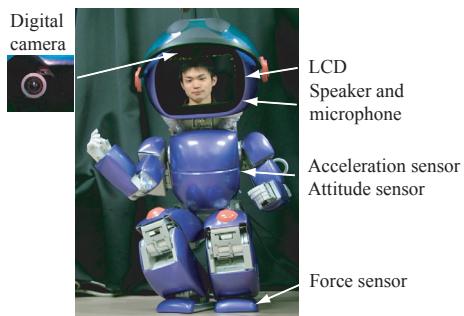


Fig.2 Embodied proactive human interface, “PICO-2”

歩行制御システムには、これまでに著者らが開発した膝関節伸展歩容システム⁹⁾、および躍度フォードバック制御系¹⁰⁾を採用し、膝関節を伸ばした人間に近い歩行動作だけではなく、静歩行と動歩行を組み合わせたダンスステップ動作なども実現可能である (Fig.3)。

3. 単眼カメラを用いた人間動作の計測と再現

本章では、PICO-2 に搭載した単眼カメラ (Fig.2) を用いた人間動作の計測・再現手法について述べる。この手法は、人間の 3 次元幾何モデルとシルエット画像を用い、シルエット画像輪郭線の 2 次元距離場を用いて 3 次元モデルの投影像とシルエット画像を比較し、人間動作を推定するものである¹¹⁾。

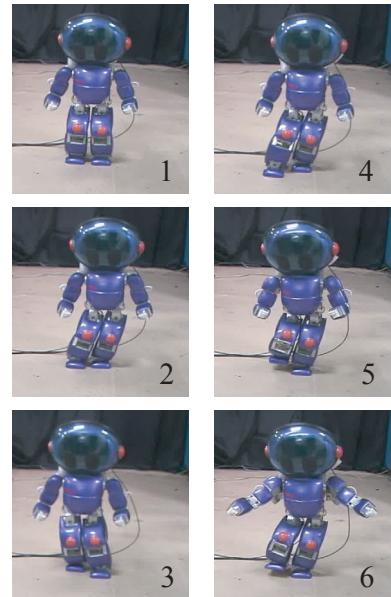


Fig.3 Dance step by combining dynamic and stable gaits

3.1 シルエット画像と 2 次元距離場を用いた人間動作の計測

単眼カメラを用いた人間動作の計測は、ステレオ画像やマーカーを用いた手法のように奥行き情報が得られないことから ill-posed な問題であり、手や腕の 3 次元的な姿勢を求めるには何らかの拘束条件を設定する必要がある。これまでに 2 次元ビデオ画像から手や腕の動きを推定する多くの手法が提案してきた^{12) 13) 14)}が、これらはイメージベースとモデルベースの 2 つに大別できる。

イメージベースの手法は、まず事前に多くの画像を取得し、実行時にはそれらと獲得された画像と比較することでジェスチャを認識する手法である^{15) 16)}。一般に疎な画像列を PCA などの手法を用いて圧縮し、サンプル画像とするため、高精度な手や腕の姿勢推定は困難である。また計算量も多く、実時間処理には不向きである。一方、モデルベースの手法は、人体の 3 次元幾何モデル¹⁷⁾を単純なスケルトンモデル^{18) 19)}や精巧な人体 3D モデル^{20) 21) 22) 23) 24) 25)}を用いて構築し、画像と一致する 3 次元幾何モデルの姿勢を見つけることで動作を追跡する手法である。

本論文で提案する手法は、モデルベースの手法に分類され、2 次元シルエット画像と 3 次元幾何モデルの比較に、2 次元距離場¹¹⁾を用いるものである。本手法の概要を以下に示す。

1. Active Contour Model (Snakes や Level Set Method^{26) 27)}を用いて、2 次元画像から人体のシルエット輪郭線を抽出する。
2. Fast Marching Method²⁶⁾を用い、得られたシルエット輪郭線からの 2 次元距離場を構築する (Fig.4)。
3. 3 角パッチで記述された人体の 3 次元幾何モデルを適当な初期姿勢、位置に配置し、その像を 2 次元画像上に投影する。
4. 3 次元幾何モデルの投影像の輪郭線に対応する 3 角パッチを求める。

5. 得られた 3 次元幾何モデルの輪郭線上の 3 角パッチ i の重心に対し , 2 次元距離場を用いて計算した力 f_i を加える . この力 f_i は視線方向ベクトル v に垂直であり , また画像平面への投影は次式で得られるベクトル f_{D_i} と一致する (Fig.5) .

$$f_{D_i} = D_{s,t} \frac{\nabla D_{s,t}}{|\nabla D_{s,t}|} \quad (1)$$

ここで , $D_{s,t}$ は 2 次元画像上の座標 (s, t) での距離場の値である .

6. 3 次元幾何モデルの肘と肩関節周りのモーメントを 3.3 章の方法で決定する .
7. 腕と胴体の姿勢を得られた力とモーメントを元に変更する .
8. 1-7 を 3 次元幾何モデルの投影像と 2 次元画像が一致するまで繰り返す .

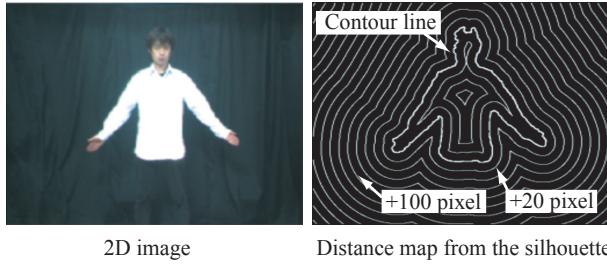


Fig.4 Distance map from the contour of the silhouette

これまでにもシルエット画像を用いた 2 次元画像と 3 次元モデルの位置あわせ手法が数多く提案されている^{28) 29) 30) 22) 31) 25)} . このうちシルエット画像の輪郭線を用いる手法^{29) 22)} は , 誤差を輪郭線上の点と 3 次元幾何モデルの投影像の最近傍点間の距離の総和と定義し , これを最小化することで姿勢を推定するものである . この手法は繰り返し計算ごとに輪郭線上の点の最近傍点を探査する必要があるため , 計算コストが高いことが問題となる .

一方 , 本手法は位置あわせ誤差の評価に 2 次元距離場を利用するものである . つまり一度距離場を構築すれば , 2 つの輪郭線上での点対応計算が不要となり , 従来手法と比較して高速に 3 次元幾何モデルの位置姿勢を推定することができる . さらに 2 次元距離場も Level Set Method の一手法である Fast Marching Method²⁶⁾ を用いることで高速に構築でき , 本手法は移動物体の実時間追跡も可能である¹¹⁾ .

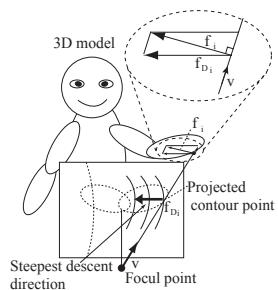


Fig.5 Force applied to each patch.

3.2 人体の 3 次元幾何モデルの作成

前節で提案した姿勢推定手法では , 人間の形状に近く , 関節部分が回転可能な正確な人体の 3 次元幾何モデルが必要となる . そこでレーザーレンジファインダを用いて , 人間全身の 3 次元幾何モデルを作成した .

まず , レーザーレンジファインダ (Minolta 社製 , VIVID700) を用いて 16 の視点から人間全身の距離画像データを計測し , 16 の部分距離データを得た . 次に計測した距離画像データを ICP 法³²⁾ を用いて位置あわせを行い , 人体全身の 3 次元幾何モデルを作成した . さらに , 作成した全身の幾何モデルを胴体 , 上腕部 , 前腕部 , 大腿部 , 下腿部に分割し , それぞれの間に 1 自由度の肘関節 , 3 自由度の肩関節を設定した . 作成された人体の 3 次元幾何モデルを Fig.6 に示す .



Fig.6 3D Geometric model of human

3.3 単眼カメラを用いた動作計測

上述した処理の 6. で , 前腕と上腕に加えられた力から肘と肩関節周りのモーメントを計算する手法を示す .

まず上腕 , 前腕部の 3 次元幾何モデルを 2 次元画像に投影し , その投影像の輪郭線と輪郭線に対応する 3 角パッチ i を求める . 次にその 3 角パッチ i の重心に対し , 距離場を用いて計算した力 f_i を加える . ここで , 上腕・前腕部の輪郭線に対応する 3 角パッチをそれぞれ P_{u_i} , P_{f_j} とし , 肩関節から P_{u_i} までのベクトルを r_{u_i} , 肘関節から P_{f_j} までのベクトルを r_{f_j} , 肩関節から肘関節までのベクトルを r_{se} とすると , 肩関節・肘関節周りのモーメントはそれぞれ次のように表される .

$$M_u = \sum_{i \in P_u} \rho(r_{u_i} \times f_{u_i}) \quad (2)$$

$$+ g_1 \sum_{j \in P_f} \rho \{ (r_{se} + r_{f_j}) \times f_{f_j} \} \quad (3)$$

$$M_f = \sum_{j \in P_f} \rho(r_{f_j} \times f_{f_j}) \quad (4)$$

ここで g_1 は適当なゲイン , $\rho(z)$ は適当な推定関数である . 輪郭線の隠れに対処するため , 本手法ではロバスト推定法の一手法である M 推定法を用い , 推定関数として以下の式で表されるローレンツ関数を用いている .

$$\rho(z) = \frac{\sigma^2}{2} \log(1 + (z/\sigma)^2) \quad (5)$$

また , 手先が胴体の輪郭線内部に入った場合などにも安定して動作計測が可能なように , 2 次元画像上に

肌色領域として抽出される手先点と、3次元幾何モデルの手先点を2次元画像に投影した投影手先点を求め、それらが一致する方向のモーメントも追加した。これにより、3次元幾何モデルの投影手先点から2次元画像上の手先点へ向かう力を \mathbf{f}_e 、肘関節から手先点までのベクトルを \mathbf{r}_{eh} 、肩関節から手先点までのベクトルを \mathbf{r}_{sh} とすると、肩関節・肘関節周りのモーメントはそれぞれ次のようになる。

$$\mathbf{M}_u = \sum_{i \in P_u} \rho(\mathbf{r}_{u_i} \times \mathbf{f}_{u_i}) \quad (6)$$

$$+ g_1 \sum_{j \in P_f} \rho\{(\mathbf{r}_{se} + \mathbf{r}_{f_j}) \times \mathbf{f}_{f_j}\} \quad (7)$$

$$+ g_2 \rho(\mathbf{r}_{sh} \times \mathbf{f}_e) \quad (8)$$

$$\mathbf{M}_f = \sum_{j \in P_f} \rho(\mathbf{r}_{f_j} \times \mathbf{f}_{f_j}) + g_3 \rho(\mathbf{r}_{eh} \times \mathbf{f}_e) \quad (9)$$

ここで g_2, g_3 は適当なゲインである。

次に、求めた関節周りのモーメントと各関節の回転軸との内積を計算し、関節角度の微小変化 $\Delta\phi$ を求める。ただし、作成したモデル及びPICO-2の腕の自由度は肩関節が3自由度、肘関節が1自由度の計4自由度である。従って、肩関節の3方向の回転軸を s_r, s_p, s_y 、肘関節の回転軸を s_e とすると、各関節の微小変化は次式で表される。

$$\Delta\phi_{roll} = \mathbf{M}_u \cdot \mathbf{s}_r \quad (10)$$

$$\Delta\phi_{pitch} = \mathbf{M}_u \cdot \mathbf{s}_p \quad (11)$$

$$\Delta\phi_{yaw} = \mathbf{M}_u \cdot \mathbf{s}_y \quad (12)$$

$$\Delta\phi_{elbow} = \mathbf{M}_f \cdot \mathbf{s}_e \quad (13)$$

ただし肩関節の回転軸を s_r, s_p, s_y 、肘関節の回転軸を s_e としている。

式10から式13で求めた関節の微小変化分を現在の関節角度に加え、新たな関節角度指令値とすることで、人間の動作を3次元幾何モデルで追跡し、関節角度を推定できる。

3.4 手先および前腕方向指示による動作の再現

人間とPICO-2では関節自由度やリンク長が異なることから、計測された関節角度をPICO-2に直接与えることは不適切である。そこで人間らしい動作を人間型ロボットにより再現するために^{33), 34)}、我々は肘から手先への方向ベクトル \mathbf{r}_{eh} と肩から手先への方向ベクトル \mathbf{r}_{sh} が、人間とPICO-2の間でそれぞれ一致するように計測された動作を再現した。

Fig.7に示すように、PICO-2の肩から肘までのリンク長を L_1 、肘から手先までのリンク長を L_2 、肩から手先までの距離を k 、 \mathbf{r}_{eh} 、 \mathbf{r}_{sh} を正規化したベクトルをそれぞれ \mathbf{n}_{eh} 、 \mathbf{n}_{sh} とする。

このとき肩から肘までのベクトル \mathbf{P}_{el} は

$$\mathbf{P}_{el} = k\mathbf{n}_{sh} - L_2\mathbf{n}_{eh} \quad (14)$$

と表現できる。両辺の内積をとると

$$|\mathbf{P}_{el}|^2 = k^2 - 2kL_2\mathbf{n}_{sh} \cdot \mathbf{n}_{eh} + L_2^2 = L_1^2 \quad (15)$$

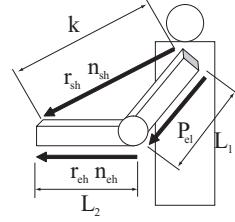


Fig.7 Gesture reproduction by directing hand and forearm directions.

となる。可動範囲に注意し、 k について式15を解くと

$$k = L_2\mathbf{n}_{sh} \cdot \mathbf{n}_{eh} + \sqrt{L_2^2(\mathbf{n}_{sh} \cdot \mathbf{n}_{eh})^2 - (L_2^2 - L_1^2)} \quad (16)$$

が得られる。これと式14より肘位置が求まり、これにより、肩から手先の方向ベクトルと肘から手先の方向ベクトルが、人間とPICO-2間でそれぞれ一致するように、PICO-2により人間動作の再現を行うことができる。ただし、動作が再現できるのは、式15の解が存在する場合である。式15の解の存在条件は

$$L_2^2(\mathbf{n}_{sh} \cdot \mathbf{n}_{eh})^2 - (L_2^2 - L_1^2) > 0 \quad (17)$$

であり、 \mathbf{n}_{sh} と \mathbf{n}_{eh} のなす角を θ とし、式17を整理すると

$$\frac{L_1}{L_2} > \sin\theta \quad (18)$$

が得られる。従って、 θ がこの条件を満たすとき動作の再現が可能である。

4. 人間動作の追跡と再現実験

人間の上半身の動きをPICO-2に搭載された単眼カメラにより計測し、前章で紹介した手法を用いて、同様の動作をPICO-2によりオンラインで行わせるシステムを構築し、動作再現実験を行った。

4.1 単眼カメラと2次元距離場を用いた動作追跡実験

まず単眼カメラにより計測した人間の動作を、3次元幾何モデルで再現させる実験を行った。実験の様子をFig.8に示す。Fig.8の左側は入力された画像、右側は3次元幾何モデルである。これより、入力画像に近い動作を3次元幾何モデルによって再現可能であることが確認できた。

4.2 PICO-2を用いた動作再現実験

次にPICO-2を用いた見えベースの動作再現実験を行った。まず上述した手法により人間の動作計測を行い、次に手と上腕の方向が一致するように、PICO-2で人間動作の見えを再現した。実験の様子をFig.9に示す。画像獲得からモータ指令の生成までの処理時間は30ms以下である。これらの実験によりユーザの動作を計測し、同様の動作をPICO-2によってリアルタイムで再現できることが確認できた。

4.3 遠隔コミュニケーション実験

九州大学箱崎キャンパスおよび筑紫キャンパス間をNTTのIP公衆回線で結び、2台のPICO-2を用いた遠

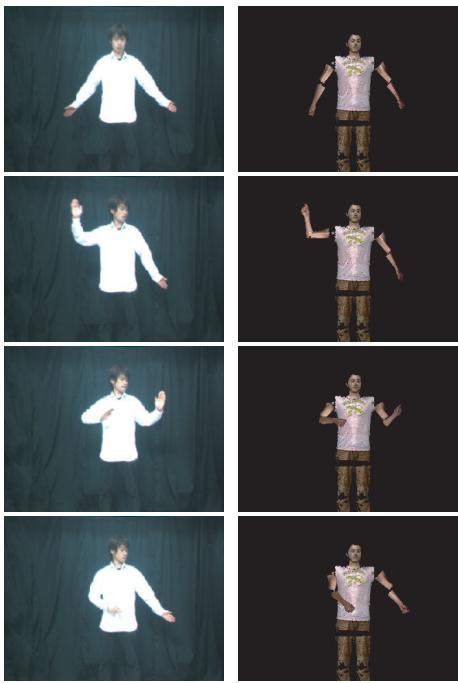


Fig.8 Imitation of human motion by 3D model

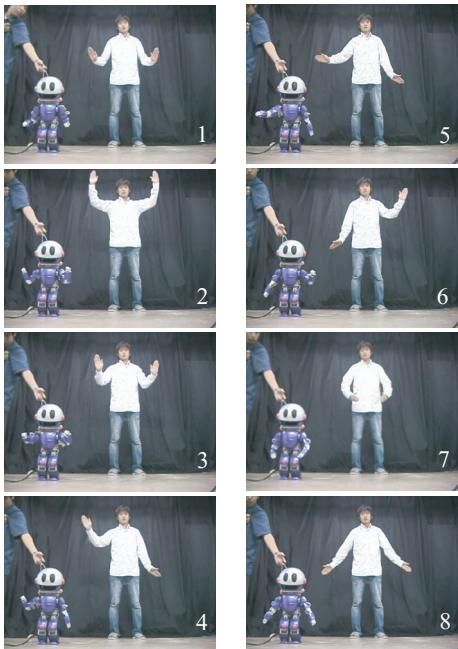


Fig.9 Imitation of human motion by PICO-2

隔コミュニケーション実験を行った。実験では単眼カメラ、マイクにより話者の発話、顔の表情、動作を計測、伝送し、PICO-2 の頭部ディスプレイやスピーカー、さらに前述した手法を用いて話者の動作を双方の PICO-2 により再現した。実験の様子を Fig.10 に示す。今後はロボットの動作や意図推定による動作補間の有無などの意図伝達の精度、効率へ与える影響について、検討を進める予定である。

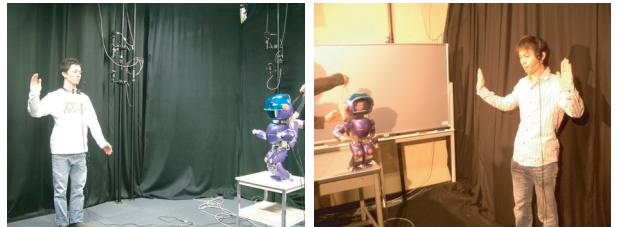


Fig.10 Remote communication experiment by PICO-2s

5. おわりに

本論文では、現在我々が進めている「プロアクティブヒューマンインターフェース」の研究について紹介した。「プロアクティブ」とは、人間からの直接的なコマンドではなく、意図の理解と予測に基づく動作原理であり、本研究ではこれとロボティクス技術を組み合わせ、様々な人にとって自然で使いやすいヒューマンインターフェースの枠組みとして「プロアクティブヒューマンインターフェース」を実現しようというものである。

本論文では、提案するプロアクティブヒューマンインターフェースの一例として、遠隔コミュニケーション実験のために開発した人間型プロアクティブインターフェース“PICO-2”の紹介と搭載した単眼カメラによる人間動作の計測と自然な動作の再現手法および2台のPICO-2を用いた遠隔コミュニケーション実験について紹介した。

今後は現在開発している全身人間動作計測システム^{35), 36)}との統合やより長い周期での意図先読み手法の開発、フィードフォワード動作とセンサフィードバック制御の適切な切り替え、および複数ヒューマノイドロボットを用いた多方向遠隔コミュニケーションシステムの開発を行う予定である。

謝辞

本研究は、21世紀COEプログラム「システム情報科学での社会基盤システム形成」の一環として実施され、総務省戦略的情報通信研究開発推進制度の支援を受けた。

参考文献

- 1) Shinichiro Nakaoka, Atsushi Nakazawa, Fumio Kanehiro, Kenji Kaneko Mitsuhiro Morisawa, and Katsushi Ikeuchi. Task model of lower body motion for a biped humanoid robot to imitate human dances. In *Proceedings of the IEEE 2004 International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2769–2774, 2005.
- 2) 横小路. テレオペレーションから機械メディアへの展開. システム/情報/制御, Vol. 44, No. 12, pp. 702–709, 2000.
- 3) 平松, 八木, 橋本, 谷内田. 対話者方向からのアピアランスに基づくロボットアバターのためのジェスチャ生成. 日本国ロボット学会誌, Vol. 21, No. 3, pp. 265–272, 2003.

- 4) Y. Inagaki, H. Aisu, H. Sugie, and T. Unemi. A study of a method for intention inference from human's behavior. In *Proceedings of the IEEE International Workshop on Robot and Human Communication*, pp. 142–145, 1993.
- 5) Tomomasa Sato, Yoshifumi Nishida, Junri Ichikawa, Yotaro Hatamura, and Hiroshi Mizoguchi. Active understanding of human intention by a robot through monitoring of human behavior. In *In Proceedings of the 1994 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 405–414, 1994.
- 6) 山田, 山本, 酒井, 森園, 梅谷. メンテナブルな人間／ロボット共存システムによるヒューマン・エラー・リカバリー. 日本ロボット学会論文誌, Vol. 21, No. 4, pp. 86–92, 2003.
- 7) Tomio Watanabe, Masashi Okubo, Mutsuhiro Nakashige, and Ryusei Danbara. Interactor: Speech-driven embodied interactive actor. *International Journal of Human-Computer Interaction*, Vol. 16, No. 1, pp. 43–60, 2004.
- 8) 森明慧, 内田誠一, 倉爪亮, 長谷川勉, 谷口倫一郎, 追江博昭. プロアクティブヒューマンインターフェースの研究 - 第5報 ジェスチャネットワークの利用による予測駆動の高精度化 -. 第23回日本ロボット学会学術講演会講演予稿集, 2005.
- 9) Ryo Kurazume, Shuntaro Tanaka, Masahiro Yamashita, and Tsutomu Hasegawa. Straight legged walking of a biped robot. In *Proc. 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. pp.3095–3101, 2005.
- 10) 大政, 倉爪, 田中, 長谷川. プロアクティブヒューマンインターフェースの研究 - 第2報 ヒューマノイド型コミュニケーションロボット PICO の運動制御 -. 日本ロボット学会学術講演会講演予稿集, p. 1K27, 2004.
- 11) Y. Iwashita, R. Kurazume, K. Konishi, M. Nakamoto, M. Hashizume, and T. Hasegawa. Fast 2d-3d registration for navigation system of surgical robot. In *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. pp.909–915, 2005.
- 12) Liang Wan, Weiming Hu, and Tieniu Tan. Recent developments in human motion analysis. *Pattern Recognition*, Vol. 36, pp. 585–601, 2003.
- 13) Thomas B. Moeslund and Erik Granum. A survey of computer vision-based human motion capture. *Computer Vision and Image Understanding: CVIU*, Vol. 81, No. 3, pp. 231–268, 2001.
- 14) J. K. Aggarwal and Q. Cai. Human motion analysis: A review. *Computer Vision and Image Understanding: CVIU*, Vol. 73, No. 3, pp. 428–440, 1999.
- 15) T. Starner and A. Pentland. Visual recognition of american sign language using hidden markov models. In *International Workshop on Automatic Face and Gesture Recognition*, pp. 189–194, 1995.
- 16) J. Martin and J.L. Crowley. An appearance-based approach to gesture recognition. In *Proceedings of the International Conference on Image Analysis and Processing*, pp. 340–347, 1997.
- 17) Y. Guo, G. Xu, and S. Tsuji. Tracking human body motion based on a stick-figure model. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, Vol. 5, No. 1, pp. 1–9, 1994.
- 18) Z. Chen and H. J. Lee. Knowledge-guided visual perception of 3-d human gait from a single image sequence. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 22, No. 2, pp. 336–342, 1992.
- 19) C. Orrite-Urunuela, J.M. del Rincon, J.E. Herrero-Jaraba, and G. Rogez. 2d silhouette and 3d skeletal models for human detection and tracking. In *Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition*, pp. 244–247, 2004.
- 20) L. Campbell and A. Bobick. Recognition of human body motion using phase space constraints. In *Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision*, pp. 624–630, 1995.
- 21) D. M. Gavrila and L. S. Davis. Towards 3-d model-based tracking and recognition of human movement: a multi-view approach. In *International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition*, pp. 272–277, 1995.
- 22) Q. Delamarre and O. Faugeras. 3d articulated models and multi-view tracking with silhouettes,. In *In Proc. IEEE International Conference on Computer Vision*, pp. pp.716–721, 1999.
- 23) J. Deutscher, A. Blake, and I. Reid. Articulated body motion capture by annealed particle filtering. In *Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 2126–2133, 2000.
- 24) H. Sidenbladh, M. J. Black, and D. Fleet. Stochastic tracking of 3d human figures using 2d image motion. In *Proceedings of European Conference on Computer Vision*, pp. 702–718, 2000.
- 25) J. Carranza, C. Theobalt, M. Magnor, and H.P. Seidel. Free-viewpoint of human actors. In *Proceedings of SIGGRAPH 2000*, pp. 569–577, 2003.
- 26) J. Sethian. *Level Set Methods and Fast Marching Methods, second edition*. Cambridge University Press, UK, 1999.
- 27) Yumi Iwashita, Ryo Kurazume, Tokuo Tsuji, Kenji Hara, and Tsutomu. Fast implementation of level set method and its realtime applications. In *Proc. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics 2004*, pp. pp.6302–6307, 2004.
- 28) H. Lensch, W. Heidrich, and H.-P. Seidel. Automated texture registration and stitching for real world models. In *In Pacific Graphics '00*, pp. 317–326, 2000.
- 29) K. Matsushita and T. Kaneko. Efficient and handy texture mapping on 3d surfaces. In *Comput. Graphics Forum 18*, pp. 349–358, 1999.
- 30) P. J. Neugebauer and K. Klein. Texturing 3d models of real world objects from multiple unregistered photographic views. In *Computer Graphics Forum 18*, pp. 245–256, 1999.
- 31) R. Plaenkers and P. Fua. Tracking and modeling people in video sequences. *Computer Vision and Image Understanding: CVIU*, Vol. 81, No. 3, pp. 285–302, 2001.
- 32) P. J. Besl and N. D. McKay. A method for registration of 3-d shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 14, No. 2, pp. 239–256, 1992.
- 33) T. Asfour and R. Dillmann. Human-like motion of a humanoid robot arm based on a closed-form solution of the inverse kinematics problem. In *Proceedings of International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1047–1412, 2003.
- 34) A. Ude, C. Mann, M. Riley, and C. Atkeson. Automatic generation of kinematic models for the conversion of human motion capture data into humanoid robot motion. In *In Proceeding of the First IEEE-RAS International Conference on Humanoids Robots*, pp. 2223–2228, 2000.
- 35) H. Yoshimoto, N. Date, D. Arita, and R. Taniguchi. Vision-based latency-free real-time human motion sensing. In *Proc. 10th Korea-Japan Joint Workshop on Frontiers of Computer Vision*, pp. 244–249, 2004.
- 36) 岩下, 倉爪, 辻, 原, 長谷川. Fast level set method を用いた複数移動物体の実時間追跡. 第9回ロボティクスシンポジア講演会講演予稿集, p. 5B1, 2004.