

研究用プラットフォームとしての日常活動型ロボット “Robovie” の開発

神田 崇行[†] 石黒 浩^{††} 小野 哲雄[†] 今井 倫太[†]
 前田 武志[†] 中津 良平[†]

Development of “Robovie” as platform of everyday-robot research

Takayuki KANDA[†], Hiroshi ISHIGURO^{††}, Tetsuo ONO[†], Michita IMAI[†], Takeshi MAEDA[†], and Ryohei NAKATSU[†]

あらまし 日常生活の中で人間と関わりながら活動する日常活動型のロボットにおいては、自然で円滑なコミュニケーションのために相互作用と関係性を重視してロボットを設計することが必要である。我々の開発した Robovie はこのために豊富なセンサ、擬人化しやすい外見、人間と同様のゼスチャ表現能力といったコミュニケーションに適したハードウェア機構を持つ。さらに、相互作用機能を容易に実現するため考案したソフトウェアアーキテクチャに基づきプログラムを行う。このような特徴から、Robovie はロボットと人間とのコミュニケーションやロボットの身体性に関する研究といったヒューマノイドロボットを用いた研究のプラットフォームとしての利用に適している。本稿では、Robovie のハードウェアおよびソフトウェアアーキテクチャについて報告し、相互作用機能の実証実験について報告することで、Robovie の研究用プラットフォームとしての有用性を示す。

キーワード 日常活動型ロボット, 研究用プラットフォーム, ヒューマンロボットコミュニケーション

1. はじめに

近年、パーソナルコンピュータの普及が広がり、GUI の利用が一般的になる中で、ユーザインターフェースの拡張としての実体をもったインターフェースが実用化されつつある。さらに、犬型エンターテイメントロボット [1] や家庭用のパーソナルロボット [2] といった、コミュニケーション用途のロボット開発が進んでいる。このような、日常生活の中で人間と関わりながら活動する日常活動型ロボットは、将来的にはコンピュータの行う情動的な支援のみならず荷物の運搬や災害時の救援活動などの物理的な支援が可能であることから人々の期待は大きい。また、WWW のようにいったん普及が始まると、非常に速い速度で研究開発が進み、やがては家事手伝いや介護等の機能ももつ高機能の知能ロボットが実現されると考える。

一方で、ロボットと人間との間での自然で円滑なコ

ミュニケーションはいまだ実現されていない。我々はこの原因として、以下の2つを考える。第1に、このような日常活動型ロボットを産業用ロボットと同様の、人間に与えられた命令を正確に実行するだけの存在であるとみなしていること、がある。このようなアプローチでは人間同士のような自然なコミュニケーションは実現されない。これに対して、対等で自然なコミュニケーションを目指し、音声対話ロボット [3]、複数話者対話ロボット [4]、幼児とその介護者のようなインタラクションを行うロボット [5] などが開発されてきた。われわれは日常活動型ロボットを実現するために、どちらか一方が命令を与えるという主従関係ではなく、対等の立場での双方向のコミュニケーションを実現すべきであると考え。

第2に、ロボットの内部の計算機構だけで人間と同様の「賢さ」を実現しようとする「個体能力主義」とらわれてきたことがある。しかし、実際の人間も頭のなかですべてを計算しているわけではなく、むしろその「賢さ」は環境との相互作用から生まれていると考えるべきである。たとえば、蟻や蜂などの複雑な行動は環境との相互作用により生じる。また、われわれの研究結果から、コミュニケーションにおける「関係性」の重要性が明らかになってきた [6]。つまり、同

[†] ATR 知能映像通信研究所, 京都府

ATR Media Integration & Communications Research Laboratories, 2-2-2 Hikaridai, Seika-cho, Soraku-gun, Kyoto, 619-0288, Japan

^{††} 和歌山大学, 和歌山県

Wakayama University, 930 Sakae-dani, Wakayama, 640-8510, Japan

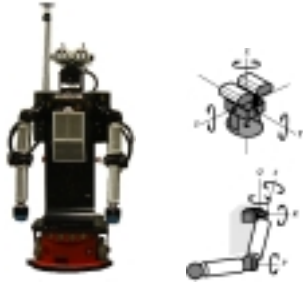


図1 開発したロボット Robovie
Fig. 1 Developed robot "Robovie"

じ音声信号であっても、2個体間に関係が構築されているとき（互いにコミュニケーションの対象とみなしているとき）はその音声を理解できるが、この関係が構築されていないときは理解できない。

このように、人と円滑にコミュニケーションする日常活動型ロボットを実現するためには、相互作用と関係性を重視した設計が必要となる。また、ロボットが環境に適応した視線や腕の動きをすることにより、人はこのロボットを自然にコミュニケーションの対象とみなす。そして、これまで実現が難しかった、人本来の状況に依存したコミュニケーションが可能となる。このような観点から、我々は日常活動型ロボットの研究用プラットフォームとして Robovie を設計、構築した。Robovie は身体表現のために人間と同様に動く頭部や腕を持ち、擬人化しやすい外見と、豊富なセンサを搭載している。また、相互作用機能を容易に実現するための新しい知能ロボットアーキテクチャに基づきソフトウェアが実装されている。このような特徴により、相互作用に基づく関係性の構築が容易であるため、Robovie はヒューマンロボットコミュニケーションや、ロボットの身体性、ロボットの実世界での学習などのような日常活動型ロボットに向けた様々な研究を行うプラットフォームに適している。

研究用プラットフォームとしてのロボットは、これまでも山彦 [7] や、Pioneer2 [8] といった様々な移動ロボットが開発・販売されている。しかし、ヒューマノイドロボットに関しては、早稲田大学 [9] やホンダ [10] における開発事例はあるものの、ハードウェアのメカニズムが研究の関心であったり、専用の実験設備が必要になるという問題からプラットフォームとしての利用は進んでこなかった。つまり、従来はロボティクス分野に関する十分な知識や技術とノウハウが無い限り

ヒューマノイドロボットを用いた研究は出来なかった。

我々は Robovie のような研究用プラットフォームの開発が幅広い分野からのロボット研究を進め、日常生活型のロボットの実現・普及を進めることになると考える。本稿では、開発したロボット Robovie のハードウェアおよびソフトウェアアーキテクチャについて報告し、この Robovie を用いた相互作用に関する実験についても報告を行う。実験結果は、Robovie が人間との相互作用によって関係性をつくり出すための十分な性能を持つことを確信させる内容であった。このように、優れた相互作用機能を容易に開発することが出来ることは、Robovie の研究用プラットフォームとしての有用性を示すものであると考える。

2. ハードウェア構成

2.1 機械機構

Robovie (図1) はコミュニケーション機能に重点を置き擬人化しやすい外見を持つ上半身人型のヒューマノイドロボットである。人間に威圧感を与えないために人間よりもひとまわり以上小さいサイズとなるように設計され、すべての制御系を本体内に内蔵している。

Robovie の高さは 1.2 m、半径 0.5 m、重量約 40kg である。カメラとスピーカの取り付けられた頭部は 3 自由度で回転可能である。さらに、4 自由度で回転可能な腕が両肩に前方オフセット角をつけて取り付けられており、ゼスチャによるコミュニケーションにおいて高い表現能力をもつ。

移動機構は 2 輪独立駆動方式の車輪およびキャスターである。このような車輪による移動機構は歩行によるものに比べ取扱が容易であり転倒などの恐れもないため、現時点ではコミュニケーション用途のものには車輪方式の移動機構が適していると考えられる。Robovie の両腕には電極が取り付けられており、日常活動型ロボットの持つべき機能のデモの一環として、視覚情報を用いて自動充電できる機能を持つ。また、バッテリーにより約 4 時間の連続動作が可能である。

2.2 センサ

Robovie は視覚、聴覚、触覚といった人間とのコミュニケーションに必要なセンサを持つ。頭部には立体視が可能な 2 台のカメラが取り付けられている。これらのカメラはズームなどのパラメータ調節が可能であり、カメラを固定した状態において、カメラ内部の稼働部が上下左右方向の 2 自由度の注視制御能力を持つ。さらに、2 台のカメラの側面に左右各 1 台のマイ

クロフォンが取り付けられている。このカメラ、マイククロフォンはスピーカとともに頭部に取り付けられている。背面から上方に延びる棒の先端には全方位視覚センサが取り付けられている。この全方位視覚センサによって、頭部によるゼスチャを行っている際にも安定して視覚情報を取得できる。接触センサはほぼ全身を覆うように、感圧導電性ゴムタイプのものが16個とりつけられている。また、両手首部にもスイッチ式の接触センサが取り付けられている。胴体下部には車輪を取り囲むように10個のバンパー兼用の接触センサが取り付けられている。超音波センサは胴体下部にほぼ等間隔に16台が取り付けられ、胴体上部にも8台が取り付けられている。

2.3 制御機構

Robovieは制御用のコンピュータとしてCPUにPentiumIII 850MHzを搭載したPCを内蔵している。OSには安定性が高く、十分な実時間性を実現できるLinuxを採用した。腕及び頭部姿勢は、モータコントローラボードに各関節の位置指令を送ることで制御する。移動機構および超音波センサはシリアルポート経由で台車部として採用したPioneer2を通してアクセスする。また、PCには無線LANが接続されており、他の端末からのログインや、インターネットのアクセス、遠隔制御などにも利用できる。

3. ソフトウェア構成

3.1 相互作用のためのソフトウェアアーキテクチャ

人間とロボットとのコミュニケーションにおいては、人間の行動に即座に応じるといった即応的な行動とコミュニケーションのコンテキストを保持した計画的な行動の双方が必要とされる。本研究では漸時的な行動モジュール追加によってこれらの両者の行動が容易に実現できる、石黒らの提案する状況依存モジュールを用いた開発手法[11]を基に相互作用機能を容易に実現するためのアーキテクチャを提案する。我々が以前提案した手法と本手法との違いは、相互作用機能を実現するための基本要素行動 (Elemental behavior) が認知科学的知見に基づき追加されることにある。知能ロボットのアーキテクチャとしては、これまでもサブサンクションアーキテクチャ[12]など様々な提案が行われている。しかし、これまでに提案されたアーキテクチャは我々が以前提案した手法も含め、いずれもいかにしてロボットの自律行動を実現するかに関心があつたため、人間とロボットとの相互作用機能を容易

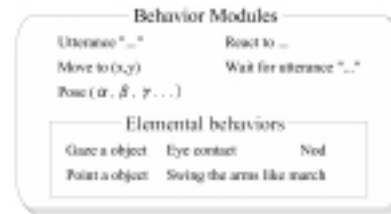


図2 基本要素行動と行動モジュール
Fig. 2 The relationships between robot's behavior and elemental behavior modules



図3 基本行動モジュールによる行動の実現
Fig. 3 An example of robot's behavior based on elemental behavior modules

に実現することはできなかった。

本稿ではこれまでに得られた心理学・認知科学的研究による知見[6],[13],[14]をもとに、人間との相互作用には以下の要素が必要であるとの仮説を立てる。

- 視線を合わせることにより、人間とコミュニケーションしようとしている意図を伝える。
- 物を指さし注視するといった注意表現行動により、ロボットの注目点を示す。
- 豊かで適切な身体表現行動や、視点の共有により、ロボットの発話や意図の理解を容易にする。

提案するアーキテクチャにおいては、このような要素を実現する相互作用のための基本要素行動 (Elemental behaviors) が基本要素となる。具体的には、「視線を合わせる」「物を指さす、注視する」「会話にうなづく」「歩くときに手を振る」といったコミュニケーションの基礎となる要素行動である。この基本要素行動 (Elemental behaviors) と、特定のタスク遂行のための行動 (身体表現やセンサに対する反応、特定の発話など) を組み合わせることにより、コミュニケーション等の特定のタスクを行う行動モジュール (Behavior modules) を容易に構成することができる (図2)。

図3はこのような行動モジュールの構成例で、灰色の四角形が「視線を合わせる」といった基本要素行動

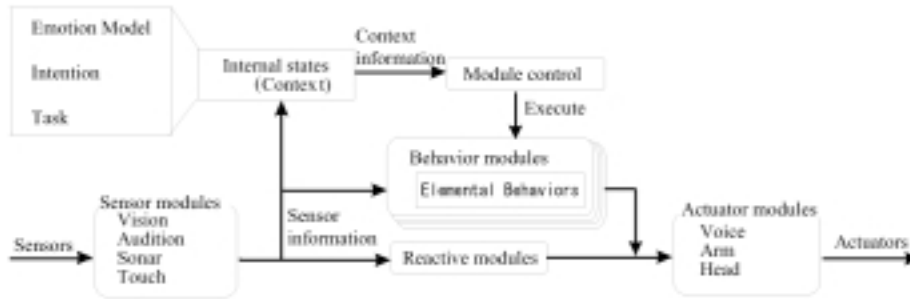


図4 提案するソフトウェアアーキテクチャ
Fig. 4 software architecture

を、白色が「ポスターを見て、と発話する」といった特定のタスク遂行行動を表す、さらに、このようにして構成される行動モジュールを組み合わせることによりロボットの様々な機能が実現される。(例えば、後述の図5に表示されるネットワークはこのような行動モジュールの組み合わせ例である。)

3.2 提案アーキテクチャに基づく実装

提案するアーキテクチャにしたがって Robovie の行動制御プログラムを実装した(図4)。図中の Sensor modules, Actuator modules, Reactive modules は、ロボットの基本的な行動機能を提供するモジュール群

```
int hands_shake(int mode){
  switch(mode){
  case INIT: /* 初期化部 */
    /* モーション "hands_shake" を再現
       以後、バックグラウンドで自動再生 */
    motion_start("hands_shake", 1);
    break;
  case END: /* 終了部 */
    motion_stop();
    break;
  case EXEC: /* 実行部: 終了まで繰り返し実行 */
    if ( touch_sensor == RIGHT_HANDS ||
        motion_end() ) ActionEnd();
    EyeContact(); /* 視線を合わせる基本行動 */
    break;
  }
  return True;
}
```

表1 行動モジュールのサンプルコード
Table 1 Sample program code of Behavior Module

である。Sensor modules には視覚情報を取得して処理する Vision モジュール、発話開始を検出して音声認識を行う Audition モジュールなどがある。Actuator modules には発話を行うための Voice モジュールと、腕および頭部のモータを制御する Arm/Head モジュールがある。衝突回避を行うための反射行動モジュール (Reactive modules) としては、腕や頭部の衝突検知・停止モジュールおよび台車の衝突検知・停止モジュールが実装されている。これらのモジュールはそれぞれ独立したスレッドとして実装されている。Audition モジュールにおいて行われる音声認識には Julius [15] を、音声合成には Chatr [16] を使用した。

ロボットの特定の機能は、行動モジュール (Behavior modules) を次々に追加することによって実現する(図5, 6)。例として、単純な行動モジュールのサンプルコードを示す(表1)。行動モジュールは初期化部 (INIT 部)、実行部 (EXEC 部)、終了部 (END 部) から構成される。モジュールの終了は、通常は各行動モジュール内部で判定する(例えば、「握手」する場合は人がロボットの手に触れたら終了する、など)。なお、サンプルコード中で、motion_start 関数が INIT 部で呼び出されるのは、3.4 節で説明されるように同関数が1度のみ呼び出せば良い関数だからであり、また EyeContact 関数が EXEC 部において繰り返し呼び出されるのは、同関数が呼び出されるたびに人の顔を発見して視線を向ける処理を行うように実装されているからである。

Module Control スレッドは毎周期1回ずつ行動モジュールを呼び出し、実行が終了するまで周期的に繰り返し switch 文中の EXEC 部を実行する。モジュール実行が終了した場合には現在実行中のモジュールの END 部を実行し、次モジュールへ遷移して次モジュール

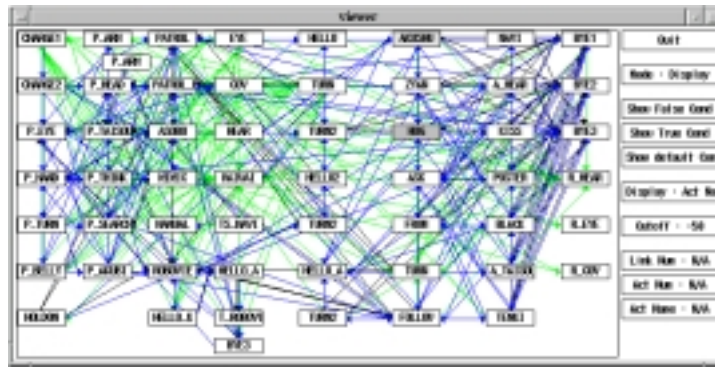


図 5 モジュールネットワーク管理ツール
Fig. 5 Software tool for Module Network administration



図 6 モジュールネットワークの作成
Fig. 6 Making of Module Network

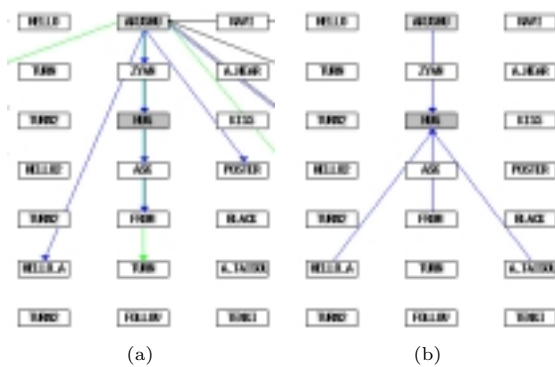


図 7 ネットワーク表示機能
Fig. 7 Function of displaying of Module Network

ルの INIT 部を実行する。さらに Module Control スレッドは、内部状態 (Internal status) に従ってモジュール実行のプランニングも行う。内部状態はロボットの感情 (Emotion Model), 意図 (Intention), 現在のタスク (Task) といったものを表現する複数の変数により構成される。この内部状態はセンサ情報やモジュールの実行結果により変化する。例えば、「人間と遊ぶ」タスクを実行していたロボットは、人間と握手する行動モジュール (AKUSHU) を周期的に呼び出して実行していたが、人間からの反応が無く同モジュールの実行

が終了し、END 部が実行される、結果的にロボットのタスクは「一人で遊ぶ」に変わり、腕組する行動モジュール (P_ARM) を実行する意図を持ちながらプランニングした結果、パイパイと手を振る行動モジュール (BYE1) を次に実行する。

なお、反射行動モジュールは衝突した障害物为了避免る、触られたところを見るといった非常に単純な反射行動を実現するものであり、通常は反射行動モジュールの反応が行動モジュールに優先する。しかし、開発者がモジュール作成の際に明示的に記述することで、反射行動モジュールの反応を抑制することが可能である。例えば、「握手する」行動モジュールでは握手の際に手先が触られるが、その間も人と視線をあわせておくために手先に関する「触られたところを見る」反射行動モジュールの反応を抑制する。

3.3 モジュールネットワーク管理ツール

行動制御プログラムにおいては、個々の行動モジュールがそれぞれ特定のロボットの行動を実現し、この行動モジュールを逐次的に実行することでロボットを制御する。行動モジュール間の実行順序関係はモジュールネットワークと呼ばれるネットワークにより表現される。このネットワーク管理ツールを開発した (図 5)。

ネットワーク作成機能

ネットワーク作成に関しては節点追加、枝追加、削除の 3 つの実行モードを持つ。節点追加モードでは、画面上をクリックすることで新しい節点が追加される (図 6 左)。ここで、追加された節点や既存の節点を選択することで、節点に対応する行動モジュール ID を変更することが可能である (図 6 中央)。枝追加モードでは画面上の節点を選択することで、モジュール間の実

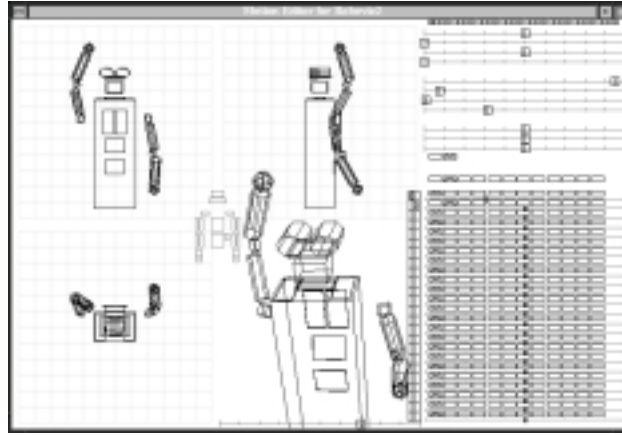


図 8 モーションエディタ
Fig. 8 Motion Editor

行順序を入力することができる。図 6 右ではモジュール AKUSHU から ZYAN, ZYAN から HUG に向かって枝の追加が行われている。これは、モジュール AKUSHU の次には ZYAN を実行し、ZYAN の次には HUG を実行することを意味する。個々の行動モジュールは固有の ID によって管理され、AKUSHU, ZYAN, HUG はモジュールの ID である。(なお、モジュール AKUSHU は人と握手する行動、ZYAN はじゃんけんする行動、HUG は抱擁する行動を実現する行動モジュールである)。

このような実行順序を定める上で重要となるのが、遷移の分岐制御である。このため、各行動モジュールは前提条件部と、戻り値を持つ。前提条件部は開発者によって行動モジュールと同時に作成され、この行動モジュールが実行可能であるかを判別する。戻り値は行動モジュールの実行結果を元に次に実行する行動モジュールを選ぶためのものであり、主に成功と失敗の 2 値が用いられる。

さらに開発者はモジュールネットワーク作成時に、このような逐次的遷移とは別に、即時的遷移を指定することもできる。この即時的遷移による実行が指定されると、現在の行動モジュールの実行中に常に次の行動モジュールの前提条件部が判定され、実行が可能になれば即座に次の行動モジュールへと遷移する。たとえば、「歩きまわる」行動モジュールを実行中に「肩をたたかれると振り向く」行動モジュールの前提条件部「肩をたたかれる」が真になれば、即座に「歩きまわる」行動モジュールを終了し、次の行動モジュール「肩をたたかれると振り向く」に遷移する。

ネットワーク表示機能

ネットワーク表示に関しては、ネットワーク全体表示、モジュール遷移先・遷移元表示などの機能がある。図 7(a) はモジュール遷移先表示の例で、モジュール AKUSHU から遷移可能なモジュールが矢印の先に表示されている。また、(b) ではモジュール ZYAN の遷移元が表示されている。さらに、ロボットの動作中には現在実行中の行動モジュールをリアルタイムに表示することが可能である。

3.4 モーションエディタ

モーションエディタ(図 8)はロボットの姿勢をプログラムするツールである。画面の右側上部にはロボットの姿勢を入力する領域があり、右側下部には姿勢の再現順序を入力することで連続動作(モーション)を作成する領域がある。画面の左側には、入力姿勢にしたがって変化する実ロボットの姿勢が表示される。

右側上部の姿勢入力部において入力される個々の姿勢は、右側中程の行方向にのびるチェックボックスに対応する。図 8 においては 2 番目のチェックボックスが選択されている。入力された姿勢はプログラム実行時に連続的に再現されるが、このときの再現順序は図 8 中の右側下半分に渡り行方向に延びるチェックボックス行(姿勢選択行)をそれぞれ選択することによって行われる。例えば図 8 においては第 1 行の動作としては第 1 列が、第 2 行の動作としては第 2 列(図 8 に示す姿勢)が選択されている。姿勢の再現はこの姿勢選択行を上から下に向かって次々に再現することによって行われる。また、姿勢の再現にかかる時間を姿勢選択

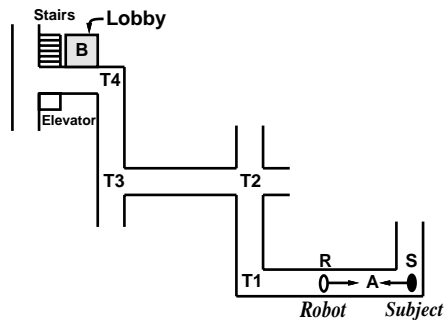


図9 実験環境

Fig. 9 Experimental setup: arrangement of subject, robot, destination, and turns.

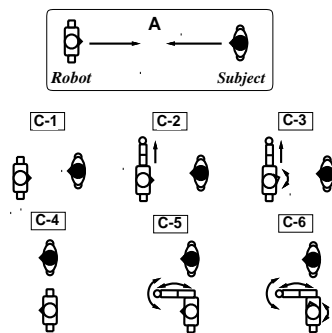


図10 6段階のゼスチャ表現

Fig. 10 Outline of experimental conditions under changing robot gesture

行の行間のスライダによって指定する．この時間が大きいほどロボットが腕や頭部を動かす速度は遅くなる．

作成されたモーションは、ロボットの行動制御プログラムから簡単に利用できる．表 1 のサンプルコードに行動制御プログラムからの利用例を示す．コード中の motion_start は第 1 引数で指示されたモーションを第 2 引数で指示された回数だけ繰り返し実行する回数であり、motion_stop は実行中のモーションを中止し、motion_end はモーション終了を判定する．

4. 相互作用機能の実証

開発した Robovie は十分な身体表現能力と豊富なセンサを持ち、相互作用に基づくコミュニケーションの実現が容易になる新しいアーキテクチャに基づいて実装が行われている．以下では、相互作用機能の実証実験について報告し、Robovie が相互作用に基づく関係を構築するための十分な能力を持つことを示す．

4.1 心理実験による実証

本稿では、ロボットのゼスチャを用いた道案内に関する心理学的実験 [17] を通して、Robovie の相互作用機能をほとんど発現させない条件から、全てを使う条件までを比較し、Robovie の相互作用能力の実証を試みる．このため、ロボットの身体表現能力が活用される空間情報の伝達タスクである道案内を実験の題材とした．このような空間情報伝達タスクにおいて開発したロボットの身体表現能力を活用し、身体に根ざした円滑なコミュニケーションの実現と、これに伴った正確な情報の伝達を試みる．

ここで、人間同士が道案内をする場合を考えると、まず身体の向きをそろえて視点を共有し、次に互いに手先や腕を用いて方向を示し、また視線を合わせながらコミュニケーションを行う．同様にロボットが十分な身体表現能力を基に「視点の共有」「腕による方向の指示」「アイコンタクト」の 3 要素のゼスチャを活用することで、人間がロボットの発話内容を理解する際の認知的負荷が低く、人間同士の行うような円滑なコミュニケーションが実現されると考えられる．また、これまでの我々の研究から、人間がロボットの発話を理解する際にも両者の間に構築される関係性が重要であることが示されている [6]．つまり、このようなゼスチャは双方の間にコミュニケーションのための関係性を構築し、正確な情報伝達を行う為にも必要となると考えられる．

実験

図 9 は実験環境の地図である．この環境を初めて訪れた 30 人 (6 条件各 5 人) の被験者により実験を行った．実験に際して被験者は「ロボットに道を尋ね、実際にそこまで歩く」ように教示された．

実験が始まるとロボットは R 地点から S 地点へと移動し、被験者は S 地点から A 地点へと移動し始める．A 地点において、ロボットの観察者 (被験者 (subject) と呼ぶ) は Robovie に「ロビーはどこですか?」と尋ねる．ここで Robovie はゼスチャを交えながら「まっすぐ行って、右に曲がって、左に曲がって、右に曲がって、左に曲がると到着です」と発話する．実験条件は図 10 に示すように 6 条件設置した．C-1, C-2, C-3 ではロボットは身体の向きを変えず、視点を共有することなしに発話し、C-4, C-5, C-6 では被験者と同じ視点を共有するように向きを反転して発話する．また、条件 C-1, C-4 ではロボットは腕によるゼスチャを行わず発話のみを行い、C-2, C-5 では腕のみを用いたゼスチャ、



図 11 道案内実験のための行動モジュール
Fig. 11 Behavior Modules for the experiment

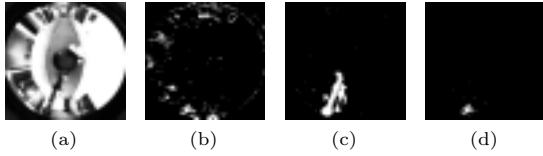


図 12 人の顔の発見処理
Fig. 12 Process of finding human face

| | C-1 | C-2 | C-3 | C-4 | C-5 | C-6 |
|------|------|------|------|------|------|------|
| 到達時間 | 69.5 | 71.3 | 67.7 | 70.2 | 66.8 | 65.4 |
| 失敗人数 | 1 | 2 | 2 | 0 | 0 | 0 |

表 2 目的地への平均到達時間および失敗人数
Table 2 Average time until the subjects' arrival at the destination, and number of subjects not arriving at the destination

C-3,C-6 では被験者と視線を合わせながら腕を用いたゼスチャを行う。

実験システムの開発

この道案内を題材にした心理実験を行うため、Robovie に 3 つの行動モジュールと 6 つのモーションを用意した。図 11 が実装された行動モジュールおよびそのネットワークである。ロボットは R 地点から移動を開始し、前方の超音波センサの一定距離内に人が近付くか、あるいはある音量以上の音声が入力されるまで廊下にそって移動する (Move along the corridor)。続いて、被験者の発話が終了するのをまって実験条件に応じてあらかじめ用意されたモーションを再生することによって道案内のゼスチャおよび発話を行う (Guide to the room)。最後にロボットは再び廊下にそって移動を行う (Move along the corridor)。

実験条件 C3,C6 において Robovie は被験者の顔の方に頭部を向けて発話を行うが、この機能は基本行動モジュールである EyeContact によって実現される。EyeContact においては全方位視覚センサから得られる画像 (図 12(a)) の肌色の領域 (図 12(b)) および時間差分 (図 12(c)) を計算することにより人間の顔位置を発見し (図 12(d))、その方向に頭部を向ける。

実験結果

図 13 はロボットの発話やゼスチャに同期的に発現した被験者の身体行動の内容とその人数を表す。被験

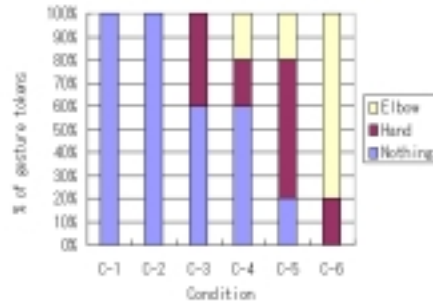


図 13 インタラクションにおける身体行動の発現
Fig. 13 Results of subjects' body movements in human-robot interaction



図 14 Robovie を用いた心理実験風景
Fig. 14 Scenes of human-robot interactions

者はこのような身体行動を無意識のうちにを行い、実験後も自らが身体行動を行ったことに気が付かない被験者もいた。我々は被験者の身体行動を、身体運動無し (Nothing)、図 14 左のように手先が動く (Hand)、図 14 右のように肘よりも上に腕が上がる (Elbow) の 3 つに分類した。セル内の人数が 5 以下でも検定可能なよう補正を行った上でカイ自乗検定を行ったところ、この身体運動の発現に関して実験条件の間には統計的に有意な差が存在した ($\chi^2 = 25.210, p < .01$)。つまり、実験条件が 1 から 6 に移るにつれて、ロボットは視線を合わせる機能を持つとともにゼスチャが豊富になり、それにつれて被験者の身体行動が増えた。

このような同調的身体動作は人間同士が道案内するときにも生じることから、ロボットの十分な身体能力を活用することで、人間同士の場合と同様の認知的負荷の少ない円滑なコミュニケーションが実現できた。

さらに、ロボットが被験者と身体の向きをそろえない C-1,C-2,C-3 条件では約 1/3 の被験者が目的地へと到達できなかった (表 2)。一方、ロボットが被験者と身体の向きをそろえる C-4,C-5,C-6 条件では被験者



図 15 自律行動による人間とのインタラクション
Fig. 15 Autonomous interaction with humans



図 16 ROBODEX2000 での Robovie の展示風景
Fig. 16 A scene of ROBODEX2000 (a exhibition of personal robots)

は容易に共通の視点を獲得し、ゼスチャを理解し、目的地向と到着することができた。これらの結果から、適切なゼスチャによって両者の間に身体による関係性が発現し、被験者は共通の視点を獲得できた。

本実験では、被験者が無意識のうちにロボットのゼスチャに同期した身体行動を行い、ロボットとの道案内の対話に適応し、人間同士のような円滑なコミュニケーションが生じた。特に、C3、C6 条件においてロボットが被験者と視線をあわせることで、この同期的身体行動が増加していることから、被験者にとってロボットとの相互作用が生じていたものと考えられる。

以上、実験結果は Robovie が人間との間にコミュニケーションのための関係を作り、身体に根ざした円滑なコミュニケーションを行うに十分な身体表現能力を持つことを示している。さらに、このような道案内対話を通して被験者に豊かな身体表現が発現したことは Robovie の優れた相互作用能力を示すものである。

4.2 自律インタラクション機能に関する社会実験

人間とロボットの間構築される関係性の解明といった心理学的アプローチと同時に、われわれは Robovie に自律的に人間とインタラクションを行う機能を実装している。この機能によってロボットは人間に親和感を与え、人間との間に関係性をつくり出す。このようなインタラクション機能は将来日常生活の場で活動するロボットには欠かせないものである。自律インタラクション機能の実験のために、「抱擁 (図 15(a))」「握

手 (図 15(b))」「じゃんけん (図 15(c))」「おじぎ」「キス」「簡単な会話」「物の指さし」「体操」といった 10 種類程度の人間との遊び行動および、「頭をかく」「腕組みする」といった 10 種類程度の待機行動、環境をランダムに歩くパトロール行動を実装した。各遊び行動は発話内容等にそれぞれ 3 種類程度のバリエーションを持つ。これらの行動モジュールは、「視線を合わせる」「会話にうなづく」といった数種類の基本行動モジュールを利用して作成されている。この約 40 の行動モジュールによるネットワークは図 5 のネットワーク管理ツールの画面に表示されている。

Robovie の自律インタラクション機能は数々のロボット展示会の場で一般公開され、来場者の反応や意見も参考にしながら徐々にインタラクション行動の追加や改良による機能拡張が行われて来た。図 16 は 2000 年に開催されたパーソナルロボットの展示会である ROBODEX2000 での Robovie の展示風景である。Robovie は「抱擁」などのインタラクション機能が親しみやすい印象を与えることから特に子供たちの人気を集めた。このような親近感は、十分な身体表現機能を持つ頭部や腕、親しみやすい外見や声、「視線を合わせる」といった基本相互作用行動、また度々出展された展示会を通して機能拡張された豊富なインタラクション機能によって引き起こされたものとする。

5. おわりに

開発した Robovie は、インタラクションのための十分な表現能力を持つハードウェア機構と、容易に相互作用に基づくコミュニケーションを実現できるソフトウェア機構を持つ。相互作用の実証結果から、開発したハードウェアと提案アーキテクチャは人間との間に相互作用に基づいた関係性を作り出すことが十分可能な能力を持つことがわかった。今後、このような研究用プラットフォームの開発・利用が進み、ハードウェア技術の進歩とともに低コスト化が進むことで、知能ロボットの普及がよりいっそう進むことが期待される。

文献

- [1] 藤田雅博, “Robot Entertainment System AIBO の開発,” 情報処理, Vol.41, No.2, 2000.
- [2] 藤田善弘, “パーソナルロボット R100,” 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.2, pp.198-199, 2000.
- [3] 小林哲則, 白井克彦, “ヒューマノイドロボットにおけるマルチモーダル会話インターフェース,” 信学技報, SP99-113, pp.121-126, 1999.
- [4] 松阪要佐, 東條剛史, 小林哲則, “グループ会話に参与する対話ロボットの構築,” 信学論 D-II, Vol.J84-DII, NO.6,

- pp.898-908, 2001.
- [5] C. Breazeal, B. Scassellati, "How to build robots that make friends and influence people," Proc.IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems, 1999.
- [6] T. Ono, M. Imai, R. Nakatsu, "Reading a robot's mind, a model of utterance understanding based on the theory of mind mechanism," Advanced Robotics, Vol.14, No.4, pp.311-326, 2000.
- [7] 油田信一, "移動ロボットの研究のためのプラットフォーム," 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.1, pp14-17, 1996.
- [8] ActivMedia Robotics LLC, "Pioneer Robots from ActivMedia Robotics," <http://www.activrobots.com/>
- [9] 橋本周司, 成田誠之助, 白井克彦, 小林哲則, 高西淳夫, 菅野重樹, 笠原博徳, "ヒューマノイド-人間型高度情報処理ロボット-," 情報処理, Vol.38, No.11, pp.959-969, 1997.
- [10] 広瀬真人, 竹中透, 五味洋, 小澤信明, "人間型ロボット," 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.7, pp.983-985, 1997.
- [11] Hiroshi Ishiguro, Takayuki Kanda, Katsumi Kimoto, Toru Ishida, "A Robot Architecture Based on Situated Modules," Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems, 1999.
- [12] R. A. Brooks, "A robust layered control system for a Mobile Robot," IEEE J. of Robotics and Automation, 1986.
- [13] D. Sperber and D. Wilson, "Relevance: Communication and Cognition," Oxford: Basil Blackwell, 1986.
- [14] 今井倫太, 開一夫, 安西祐一郎, "注意機構を利用したヒューマン・ロボットインターフェース," 信学論 D-II, Vol.J77-D-II, No.8, pp.1447-1456, 1994.
- [15] 河原達也, 李晃伸, 小林哲則, 武田一哉, 峯松信明, 伊藤克巨, 伊藤彰則, 山本 幹雄, 山田篤, 宇津呂武仁, 鹿野清宏, "日本語ディクテーション基本ソフトウェア (97年度版)," 日本音響学会誌, Vol.55, No.3, pp.175-180, 1999.
- [16] N.Campbell, A.Black; "CHATR:自然音声波形接続型任意音声合成システム," 信学技報, SP96-7, pp.45-52, 1996.
- [17] 小野哲雄, 今井倫太, 石黒浩, 中津良平, "身体表現を用いた人とロボットの共創対話," 情処学論, Vol.42, No.6, pp.1348-1358, 2001.

(平成年月日受付, 月日再受付)

神田 崇行

2000年京都大学大学院情報学研究科社会情報学専攻修士課程修了。現在, ATR 知能映像通信研究所研究技術員。京都大学大学院情報学研究科社会情報学専攻博士後期課程在学中。人間ロボットインタラクション, 視覚移動ロボットに興味を持つ。人工知能学会, 日本ロボット学会各会員。

石黒 浩

1991年大阪大学大学院基礎工学研究科物理系専攻博士課程修了。工学博士。同年山梨大学工学部情報工学科助手, 1992年大阪大学基礎工学部システム工学科助手。1994年京都大学大学院情報学研究科社会情報学専攻助教授。現在, 和歌山大学システム工学部情報通信システム学科教授。人工知能学会, 日本ロボット学会, 情報処理学会, IEEE, AAAI 各会員。

小野 哲雄

1997年北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程修了。同年よりATR 知能映像通信研究所客員研究員。博士(情報科学)。感情の計算モデル, マルチエージェントモデルによる共通言語の組織化, ヒューマンロボットコミュニケーションに関する研究に従事。認知科学会, 人工知能学会各会員。

今井 倫太 (正員)

1992年慶應義塾大学理工学部電気工学科卒業。1994年同大学大学院計算機科学専攻修士課程修了。同年, NTT ヒューマンインターフェース研究所入社。現在, ATR 知能映像通信研究所研究員。ロボットとの対話, センサを用いた状況知覚に興味を持つ。

前田 武志

1995年大阪大学基礎工学研究科制御工学分野修士課程修了。在学中に設立したゲームのつば(有)に同年より勤務, 2000年ATR 知能映像通信研究所にて日常活動型ロボットの研究に従事。同年, ヴィストン(株)設立。全方位視覚センサを用いたアプリケーションに興味を持つ。日本ロボット学会会員。

中津 良平 (正員)

1971年京都大学大学院工学研究科電子工学専攻修士課程修了。同年日本電信電話公社武蔵野電気通信研究所入所。1980年横須賀電気通信研究所。主として音声認識の基礎研究, 応用研究に従事。1990年NTT 基礎研究所研究企画部長。1994年よりATRに移り, 現在(株)ATR 知能映像通信研究所代表取締役社長。工学博士(京大)。