簡易な入力装置を用いた ヒューマノイドロボットの全身遠隔操作システム

Neo Ee Sian^{*1*2} 横井 一 仁^{*2} 梶 田 秀 司^{*2}
金 広 文 男^{*2} 谷 江 和 雄^{*1*2}

Whole Body Teleoperation of a Humanoid Robot Development of a Simple Master Device using Joysticks

Neo Ee Sian^{*1*2}, Kazuhito Yokoi^{*2}, Shuuji Kajita^{*2},
Fumio Kanehiro^{*2} and Kazuo Tanie^{*1*2}

This paper presents a novel method for the whole body teleoperation of a humanoid robot using simple input device. A typical humanoid robot would have more than 20 DOF. Due to the complexity, it requires an effective way for whole body teleoperation. Getting hints from the shifting of locus of attention for body motions between the joints of human body during task executions, this paper proposes a switching command based whole body teleoperation method. Instead of giving command to all joints all the time, the operator selects only the necessary point of the humanoid robot for teleoperation. This switching teleoperation method enables flexible teleoperation of humanoid robots using only simple input devices. The proposed method is implemented as a teleoperation system using two 3 DOF joysticks to operate a real 30 DOF humanoid robot, HRP-1S, which is developed in the Humanoid Robotics Project of the Ministry of Economy, Trade and Industry of Japan. The effectiveness of the proposed method is confirmed with experiments teleoperating HRP-1S.

Key Words: Humanoid Robot, Teleoperation, Joystick, HRP

1. 緒 言

これまで産官学の様々な研究機関で、ヒューマノイドロボットが研究開発され、いくつかのヒューマノイドロボットは商用化されている[1]~[14]。さらに近年は、視覚認識機能や音声認識・合成機能を追加し、ヒューマノイドロボットの自律(知的)能力を高めていく試みが盛んになってきている[15]~[18]。しかし、これらの自律機能は、まだまだ限定的なものに留まっており、人にとっては過酷な非整備環境における非定形的な作業へのヒューマノイドロボットの導入も含め、「働くヒューマノイドロボット」の実現を図っていくためには、ヒューマノイドロボットの全身動作を自在に遠隔操作できることが欠かせない[19]。

ヒューマノイドロボットは、従来の固定型や車輪移動型のロボットと大きく異なる以下の二つの特徴を有する。

- 少ないものでも 20 自由度以上、多いものでは 30 自由度以上の超多自由度を有する。

- 重心の高さに比して支持脚多角形の面積が狭いため、絶えず安定性に配慮した動作生成を行わなければならない。

このため、これらに対する配慮がなされていない固定型や車輪移動型のロボットに対する遠隔操作システムを、ヒューマノイドロボットに直接適用することは難しい。

ヒューマノイドロボットの遠隔操作については、これまでもいくつかの試みが行われているが、歩行動作を除けば、プリプログラミングされた動作を再生しているものや、胴体を静止させた姿勢において両腕部や頭部を操作するものがほとんどである[20]~[26]。HRP 代行運転分野では、マスタフットにより脚部を遠隔操作することに成功しているが、静的安定性が確保された着座姿勢にその使用は限定されている[27]。モーションキャプチャを用いて獲得した人の全身動作に基づきヒューマノイドロボットの全身運動を指令する試みもあるが、実時間性あるいは転倒に抗する安定性を満足するには至っていない[28][29]。

我々は、先に述べたヒューマノイドロボットと同じ二つの特徴を有する人が作業を行うときの意識の集中させ方を参考にしたヒューマノイドロボットの全身操作方式を提案してきた[30][31]。

本論文では、人が意識を集中する身体部位を切り替えるようにロボットを操作する部位を切り替えることで、簡単な入力装置を用いてヒューマノイドロボットの全身動作を遠隔操作する

原稿受付 2003 年 5 月 8 日

^{*1}筑波大学

^{*2}産業技術総合研究所知能システム研究部門

^{*1}University of Tsukuba

^{*2}Intelligent Systems Institute, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

Fig. 1 Shifting of locus of attention

手法を提案し、その有効性を実ヒューマノイドロボットを用いた遠隔操作実験により示す。まず、次章で提案手法の概念について述べる。次に、実ヒューマノイドロボットへの実装手法について述べる。最後に、開発した全身遠隔操作システムを用いた動作実験の様子を示し、その有効性を検証する。

2. ヒューマノイドロボットの操作部位切り換え全身操作法

一般の人々は、一度に数多くの身体部位に意識を集中させることはできず、絶えず一つの身体部位に意識を集中させて動作・作業を行っている [32]。そして、行おうとする動作・作業に応じて、その意識を集中させる身体部位を切り替えて動作・作業を遂行する。例えば、正面のテーブルの上のボトルを取る作業では、我々は利き手に意識を集中する。椅子に腰掛けるときは、腰（臀部）に意識を集中させ胴体を沈めようとする。ボールを蹴飛ばすときは、利き足に意識を集中する（Fig. 1）。

また、人がある動作・作業を行うときには、意識的に動かし、無意識的に動かしている身体部位がある。作業の実行に際し、意識を集中させる身体部位に望みの運動を生成するために、身体の一部を意識的に動かす。身体に残りの部位は、転倒に抗する安定性の確保や、全身の負荷を軽減するために、無意識的（自律的）に動かしている（Fig. 1）。

このような人の動作実行方法と同様の考え方に基づき、ヒューマノイドロボットの遠隔操作システムを構築することを提案する。つまり、「遠隔操作者が行わせたい動作に基づき、遠隔操作者はヒューマノイドロボットの遠隔操作する身体部位を切り替え、その身体部位への運動のみを、簡単な入力装置を用いて指令する。ヒューマノイドロボットの残りの身体部位の運動は、転倒に抗する安定性の確保や可到達領域の拡大など作業の実施に適切な評価指標に基づきヒューマノイドロボットが自律的に生成する」ヒューマノイドロボットのための遠隔操作システム

[†]井上らは、手先の操作を優先し、足位置を変更せずに到達できる手先可到達範囲の端に近づいたら、足を踏み出すという手法を提案している [33]。しかし、手先を斜め前方に出すときに、手先を伸ばした方向の足に重心が乗ってしまった場合、そちらの足を持ち上げて踏み出すことは困難である。我々、人間はこのような場合、クロスステップを踏むことにより反対側の足を踏み出すことができるが、多くのヒューマノイドロボットでは、左右の脚の機構的な干渉により、クロスステップを踏むことはできない。このため、手先を伸ばす方向によってロボットの挙動が変わったり、いつ歩き出すかが操作者に分かり難いことから、我々は立ち作業モードと歩行モードの2種類のモードを切り替えて使うこととする。

Fig. 2 A switching command based whole body operation

である。提案する遠隔操作システムを Fig. 2 に示す。本システムを用いることで、遠隔操作者は、ヒューマノイドロボットの全ての自由度に対して責任を持って絶えず指令を行うことから開放される。

提案手法を用いることにより、非常に簡易な入力装置（例えば3自由度のジョイスティック）によりヒューマノイドロボットの全身運動を遠隔操作することが可能となるため、従来のモーションキャプチャ装置や外骨格型のマスター装置を用いる遠隔操作手法より、システム構築にかかるコストや可搬性の面で大きなメリットがある。

2.1 遠隔操作モードと操作対象部位、参照座標

ヒューマノイドロボットを遠隔操作して作業を行う場合には、ヒューマノイドロボットの接地脚の位置を変更しないで作業を行う場合と、移動等、接地脚の位置を積極的に変更して作業を行う場合がある。そこで、立ち作業モードおよび歩行モードの2種類の操作モードを切り替えて使用する[†]。

立ち作業モードでは、操作者はヒューマノイドロボットの頭、手、腰、足等の代表的な身体部位を操作対象部位として選択し、その操作対象部位に対し、並進と回転の指令を与える。ただし、それぞれの部位の運動は、支持脚の接地点を変えずにすむ可動範囲内に制限される。

一方、歩行モードでは、操作者が進行方向、歩幅等の歩行パラメータを指令することにより、実時間歩行を行う。また、歩行中にも、頭や手等の歩行に大きな影響を与えない身体部位については操作対象として選択し、並進と回転の指令を与える。

また、どのような座標系に基づいて、ヒューマノイドロボットの身体部位への運動指令を与えるかは、スムーズな遠隔操作を行う上で、とても重要である。適切な座標系は、作業によって異なるため、操作者が、その作業に応じた最も適切な参照座標系を簡便に選択できるシステムが望ましい。我々は、代表的な参照座標系として、床面に固定された絶対座標系 Σ_W 、ヒューマノイドロボットの腰部に固定された胴体座標系 Σ_B 、操作者が選択した身体部位に固定された操作点座標系 Σ_{eftri} の3種類の座標系を自由に選択できるようにする。

2.2 ヒューマノイドロボット

ヒューマノイドロボットは、6自由度の胴体に固定された四つの開リンクによる木構造で表現できる（Fig. 3）。ここで、 Σ_B を胴体に固定された胴体座標系、 ${}^w\mathbf{v}_B$ 、 ${}^w\boldsymbol{\omega}_B$ を、それぞれ床面に固定された絶対座標系 Σ_W に対する胴体座標系の並進速度と回転速度と定義する。また、 Σ_{eftri} ($i = 1, 2, 3, 4$) を選択した操作点に固定された操作点座標系、 ${}^w\mathbf{v}_{eftri}$ 、 ${}^w\boldsymbol{\omega}_{eftri}$ を、絶対座標系 Σ_W に対する操作点座標系の並進および回転速度と定義

Fig. 3 Humanoid robot modeled as a tree structure mechanism with four open links

する。

ロボットの全関節角度を、各リンクに対応する四つの組 θ_{eftri} ($i = 1, 2, 3, 4$) にグループ化すると、ロボットの全関節角速度は、次式で定義される。

$$\dot{\theta} = [\dot{\theta}_{eftr1}^T \quad \dot{\theta}_{eftr2}^T \quad \dot{\theta}_{eftr3}^T \quad \dot{\theta}_{eftr4}^T]^T \quad (1)$$

ここで、 $\dot{\theta}$ は、全関節角速度を要素とする列ベクトル、 $\dot{\theta}_{eftri}$ は、各リンクを構成する関節の角速度ベクトルである。

各リンクの目標関節角速度 $\dot{\theta}_{eftri}^{ref}$ は、次式によって計算される。

$$\dot{\theta}_{eftri}^{ref} = J_{eftri}^{-1} \left\{ {}^w \xi_{eftri}^{ref} - \begin{pmatrix} E & -{}^w \hat{r}_{B \rightarrow eftri} \\ 0 & E \end{pmatrix} {}^w \xi_B^{ref} \right\} \quad (2)$$

ここで

$$\begin{aligned} {}^r \xi_B^{ref} &\equiv [{}^r v_B^{refT} \quad {}^r \omega_B^{refT}]^T \\ {}^w \xi_B^{ref} &\equiv {}^w T^r \xi_B^{ref} \\ {}^r \xi_{eftri}^{ref} &\equiv [{}^r v_{eftri}^{refT} \quad {}^r \omega_{eftri}^{refT}]^T \\ {}^w \xi_{eftri}^{ref} &\equiv {}^w T^r \xi_{eftri}^{ref} \end{aligned}$$

であり、 ${}^w \xi_B^{ref}$ は、絶対座標系で表した胴体座標系の目標速度、 ${}^w \xi_{eftri}^{ref}$ は、絶対座標系で表した対応する操作点座標系の目標速度、 ${}^r v_B^{ref}$ 、 ${}^r \omega_B^{ref}$ は、それぞれ参照座標系で表した胴体座標系の目標並進速度と目標角速度、 ${}^r v_{eftri}^{ref}$ 、 ${}^r \omega_{eftri}^{ref}$ は、参照座標系で表した対応する操作点座標系の目標並進速度と目標角速度、 ${}^w T^r$ は、参照座標系から絶対座標系への変換行列をそれぞれ表す。また、 J_{eftri}^{-1} は、対応するリンクの全関節角度から計算されるヤコビ行列の一般化逆行列、 ${}^w r_{B \rightarrow eftri}$ は、絶対座標系で表した胴体座標系原点から対応する操作点座標系原点への位置ベクトル、記号 $\sim$ は 3×1 のベクトルを外積と等価な 3×3 の歪対称行列に変換する操作を、それぞれ表す。

3. 実ヒューマノイドロボットへの実装

本論文で提案する注目身体部位の切り替え方式によるヒューマノイドロボットの全身遠隔操作法を用いることにより、簡単な入力装置を用いても、ヒューマノイドロボットの全身動作を

Fig. 4 Minimum set of control hardware of HRP-1S

Fig. 5 Hardware configurations of master system

指令することができる。そこで、本章では、提案する遠隔操作手法を、実ヒューマノイドロボットを対象として実装する手法について述べる。

3.1 ヒューマノイドロボット HRP-1S

提案手法を実装する実ヒューマノイドロボットとしてヒューマノイドロボット HRP-1S [34] を用いた。ヒューマノイドロボット HRP-1S は、身長 160 [cm]、各脚 6 自由度、各腕 7 自由度、各ハンド 1 自由度、頭部 2 自由度の合計 30 自由度を有する。また、頭部には 2 台の CCD カメラが搭載されており、撮影された画像は遠隔操作者に提示される。

HRP-1S では、VMIC 社製の VME バス CPU ボード VMIVME-7740-877 (Intel Pentium III 850 MHz) により全身動作の制御ソフトウェアを実行している。Fig. 4 に全軸サーボモデル HRP-1S の最小ハードウェア構成を示す。Honda I/O ボードは、HRP-1S の体内に装備されている前述の各種センサからの入力や、各軸のモータを駆動するサーボドライバへの出力を司るもので、制御用 CPU は、Honda I/O ボードを介してセンサ情報を得、また各軸モータへの指令値を送る。なお、HRP-1S では、各軸のサーボは、各軸用のサーボドライバによって行われている。

3.2 遠隔操作装置

2本の3自由度ジョイスティック (Microsoft SideWinder Precision 2TM)、ロボットの頭部搭載カメラの映像を提示する三次元ディスプレイ、ロボットの内部状態を表示する状態表示ディスプレイによって遠隔操作装置を構成した (Fig. 5)。各ジョイスティックは、前後、左右、捻りの3自由度を持つレバーと、1自由度のシリンダ、レバーの先端に取り付けられた一つのスイッチおよび、8個のボタンを有している。状態表示ディスプレイには、ロボットの全センサデータおよび現在の指令全関節角に基づいたロボットの3Dソリッドモデルが表示される。各脚の

Fig. 6 Software system overview

力センサ情報より計算した各脚の実 ZMP の値も、本状態表示ディスプレイに提示される。

3.3 ソフトウェア構成

提案する遠隔制御システムを、CORBA を使用した分散システムとして実装した。本システムは、Fig. 6 に示すように、主に“Input Device Server”、“Whole Body Motion Generator”、“Stabilizer”という三つのサブシステムから構成される。なお、図中の I/O ボードは、メイン PC から HRP-1S の各軸サーボドライバへ運動指令を、また全センサからメイン PC にセンサデータを受け渡すものである。

Input Device Server は、遠隔操作側の Linux PC に、Whole Body Motion Generator と Stabilizer は、HRP-1S の体内のメイン PC に、それぞれ実装した。ロボット体内に実装する処理は、実時間性が必要なため、OS としては ART-Linux を採用した。なお、制御サイクルは 5 [msec] である。

3.3.1 Input Device Server

操作者は、操作対象部位および、参照座標座標系をジョイスティックに付属するボタンを押すことにより選択し、ジョイスティックを倒す・捻ることにより、操作対象部位への参照座標系における目標速度または目標角速度を指令する。Input Device Server は、ジョイスティックのボタンの状態を調べ、対応する参照座標系を選択し、その参照座標系で記述された操作対象部位の運動指令あるいは、歩行動作パラメータにレバーの変位を変換する。ジョイスティックの 8 個のボタンには、頭、左右ハンド、左右手首、胴体、左右足先の 8 個の身体部位および絶対座標系、胴体座標系、操作点座標系の 3 種類の参照座標系が、Fig. 7 に示すように割り振られている。なお、ジョイスティックのレバーは、3 自由度を有するのみであるため、目標速度と目標角速度は別々に指令する必要がある。

例えば、絶対座標系における右手首の並進運動と回転運動は、

Fig. 7 Button allocations for control mode selections

Fig. 8 Right wrist translational and rotational motion controls using joysticks

Fig. 8 に示すように指令される。デフォルトの参照座標系は、絶対座標系であるが、対応したボタンを押すことにより、胴体座標系、操作点座標系に自在に切り替えることができる。

歩行動作についても、ジョイスティックを用いて指令することができる (Fig. 9)。Fig. 9 において、 SX は絶対座標系の x 方向への歩幅、 DSY は y 方向への歩幅、 SY は両脚の開き幅、 TH は胴体の回転角を、それぞれ指定するパラメータである。

3.3.2 Whole Body Motion Generation

ヒューマノイドロボットの全身動作は、ロボット体内の PC に実装された Whole Body Motion Generator によって生成される。各制御周期 (5 [msec]) ごとに、Whole Body Motion Generator は Input Device Server の各種パラメータを獲得しに行く。

立ち作業モードでは、最初に、参照座標系を規定するパラメー

Fig. 9 Walking motion controls using joysticks

Fig. 10 An example of data flow of the algorithm

タを確認し、参照座標系を決定した後、参照座標系で記述された操作対象部位への指令速度・角速度を、胴体座標系の値に一次フィルタ（カットオフ周波数約 32 [Hz]）を通して変換し、それらの値を用いて式（2）で表した計算式で全身運動を生成する。

歩行指令モードでは、両脚の目標速度は、Input Device Server から獲得した歩行パラメータに基づいて、我々が開発した 2 足歩行パターンジェネレータによって生成される [35]。

Input Device Server から Whole Body Motion Generator へのデータの流れの一例を Fig. 10 に示す。

3.3.3 Stabilizer

全身動作の転倒に抗する安定性は、Stabilizer によって保証される。ジョイスティックからの指令に基づいて、全身動作が生成された後、目標胴体姿勢と目標 ZMP が計算され、Stabilizer に渡される。一方、実胴体姿勢は、HRP-1S の胴体に備えられた角速度センサと加速度センサの値から、実 ZMP は、HRP-1S の足に備えられた力覚センサデータより、それぞれ推定される。目標胴体姿勢と実胴体姿勢との偏差ならびに、目標 ZMP と実 ZMP との偏差に基づき、Stabilizer は両足の位置・姿勢の修正値を求める [34]。

Stabilizer による両足の位置・姿勢の修正値と Motion Generator により生成された頭部姿勢、胴体姿勢ならびに両手の目標位置・姿勢の値から、逆運動学計算により全関節の目標角度を求める。これらの目標角度は、Honda I/O ボードを介して、各モータのサーボドライバに送られ、安定性が保証された全身運動が生成される。

Fig. 11 Snapshots of basic experiment on switching command

4. 実験

提案手法の有効性を検証するために、いくつかの実験を行った。

4.1 遠隔操作実験 1

本実験では、参照座標系として絶対座標系を選び、

- (1) 右手首を x 軸方向前方へ並進移動させる、
 - (2) 右手首を y 軸（ピッチ軸）回り正回転へ回転移動させる、
 - (3) 胴体を x 軸方向前方へ並進移動させる、
- といった順に遠隔操作するよう操作者に指示した。このとき、操作者は、以下のシーケンスに沿ってジョイスティックを操作した。

- (1) どのボタンも押さずに右ジョイスティックのレバーを前方に傾ける
- (2) 右ジョイスティックのボタン 1 を押しながら右ジョイスティックのレバーを前方に傾ける
- (3) 左ジョイスティックのボタン 3 を押しながら右ジョイスティックのレバーを前方に傾ける

実験結果を、Fig. 11, 12 に示す。操作者のジョイスティック操作により、HRP-1S は、Fig. 11 に示すように動作した。図中の長い白矢印は、操作者がジョイスティックを操作している方向を表し、短い白矢印は、操作者が押しているボタンを示している。

Fig. 12 は、最上段から、

- 右ジョイスティックのレバー入力、ボタン入力、
- ヒューマノイドロボット右手首の並進速度指令値、同回転速度指令値、
- ヒューマノイドロボット胴体の並進速度指令値、同回転速度指令値、
- ヒューマノイドロボット右手首の実位置、同実姿勢角、
- ヒューマノイドロボット胴体の実位置、同実姿勢角、

の時間履歴をそれぞれ示している。

Fig. 12 より、右ジョイスティックのレバー入力 RY は、どのボタンも押されていないときには、右手首の X 方向の並進速度指令に、右ジョイスティックのボタン R1 が押されると、右手首のピッチ軸回りの回転速度指令に、左ジョイスティックのボタ

Fig. 12 Experimental data of basic experiment on switching command

ン L3 が押されると、胴体の並進運動指令にそれぞれ変換されている。これと同時に並行的に、右手首の X 方向の位置が初めに変化し、次に右手はピッチ軸回りに回転し、最後に腰の X 方向

Fig. 13 Snapshots of switching command basic experiment: various reference frame

の位置が変化している。このように右手首の実位置・姿勢ならびに胴体の実位置は、各指令値に沿った運動を行っている。なお、約 14.6 秒から 15.2 秒までの間は、操作ミスにより R1 と L3 が同時にアクティブとなってしまったため、レバー入力 RY は、胴体のピッチ軸回りの回転運動指令に変換され、胴体の実姿勢もピッチ軸回りに変化している。

4.2 遠隔操作実験 2

参照座標系を切り替える実験を次に行った。操作者は、右ジョイスティックのレバーを前方に倒し、参照座標系の x 方向への並進速度指令を絶えず与えながら、次に示すように 3 種類の参照座標系を切り替えてヒューマノイドロボットの右手首を遠隔操作した。

- (1) 右側のジョイスティックのボタン R8 を押すことにより、右手首に固定された右手首座標系を参照座標系に選択する。
- (2) 右側のジョイスティックのボタン R7 を押すことにより、胴体に固定された胴体座標系を参照座標系に選択する。
- (3) 右側のジョイスティックのいずれのボタンも押さないことにより、床面に固定された絶対座標系を参照座標系に選択する。

Fig. 13, 14 に、実験結果を示す。Fig. 14 は、最上段から、

- 右ジョイスティックのボタン入力、
- 右手首の並進速度指令値、
- 右手首座標系で表した右手首の実位置、
- 胴体座標系で表した右手首の実位置、
- 絶対座標系で表した右手首の実位置、

の時間履歴をそれぞれ示している。ジョイスティックの指定されたボタンを押すことにより、同じレバーの操作でも HRP-1S の右手首の移動軌跡は、選択した参照座標系に沿ったものとなっている。

4.3 遠隔操作実験 3

他のヒューマノイドロボットの遠隔操作システムとして、HRP で川崎重工業が開発した 6 自由度のマスタアーム [36] を取り上げ、操作者に直方体のプラスチックブロック (W45 [mm]×D45 [mm]×H90 [mm]) を操作する次の 2 種類の pick and place 作業を行わせた：

- (1) ロボットの右手を遠隔操作して、テーブルの上に長手方向

Fig. 14 Experimental data of switching command basic experiment: various reference frame

Fig. 15 Pick and place task 1

Fig. 16 Pick and place task 2

に2段重ねで置かれた上のブロックを持ち上げて、絶対座標系のy軸正方向に150 [mm] 離れて置かれた直立ブロックの上に向きを変えずに置く (Fig. 15 参照)。

- (2) ロボットの右手を遠隔操作して、テーブルの上に長手方向に2段重ねで置かれた上のブロックを持ち上げて、絶対座標系のy軸負方向に172.5 [mm] 離れて置かれた二つの直立ブロックの上に絶対座標系のx軸回りに90度向きを変えて置く (Fig. 16 参照)。

作業1は並進移動のみで遂行できるが、作業2は並進移動と回転移動が必要である。両作業の実験結果を Table 1 に示す。

実験結果より、並進操作のみの作業1では、3自由度の操作装置の方が、回転に関する指令を同時に出すことがないので、6自由度の装置よりもわずかながら短い時間で作業を行うことができた。一方、並進と回転操作が必要な作業2では、当然のこ

Table 1 Operational time comparisons

Task	3 DOF Joystick	6 DOF Master Arm
Task 1	49.5[s]	51.5[s]
Task 2	81.5[s]	64[s]

Fig. 17 Snapshots of forward walking command

とながら同時に両者の指示が行える6自由度の操作装置の方が時間の面からは有利である。しかしながら、3自由度のデバイスを用いても、回転移動が必要な作業も十分実行することが可能であることが判明した。

4.4 遠隔操作実験4

Fig. 17 は、遠隔操作により HRP-1S に前進歩行を行わせている様子を示す。このように、歩行動作に関しても、開発した遠隔操作装置により実時間指令することができる。操作者は次の手順で前進歩行動作を指令した。

- (1) 両側のジョイスティックのボタン1を押しながら、同時に右側のジョイスティックのボタンR4を押すことにより、右足から踏み込みを開始させる。
- (2) 右ジョイスティックのレバーを前方に倒す。
- (3) 両側のジョイスティックのボタン1を押しながら、右側のジョイスティックのボタンR3を押すことにより、左脚で歩行を停止する。

図中の短い白矢印は操作者が押しているボタンを示し、長い白矢印は操作者がジョイスティックを操作している方向とロボットの歩行の向きを示す。白い点線の矢印は歩行の開始脚と停止脚を示す。

4.5 遠隔操作実験5

HRP-1S を遠隔操作し、床面の買い物かごを拾い上げる作業を行った。実験の様子を、Fig. 18 に示す。操作者は、ジョイスティックのボタンにより、以下のシーケンスで操作対象部位を切り替え、床に置かれた買い物かごを拾い上げる作業を行うことができた。

- (1) 操作対象部位を HRP-1S の頭に設定し、買い物かごの位置を探索する。
- (2) 操作対象部位を HRP-1S の右手首と腰へ交互に設定し、しゃがみこみ動作も含め、買い物かごの持ち手に届く位置まで

Fig. 18 Snapshots of experiment teleoperating humanoid robot HRP-1S to pick up a basket on the floor

右手を下げる[†]。

- (3) 操作対象部位を HRP-1S の右手に設定し、買い物かごの持ち手を把握する。
- (4) 操作対象部位を HRP-1S の右手首に設定し、買い物かごを持ち上げる。
- (5) 操作対象部位を HRP-1S の腰に設定し、立ち上がる。

5. 結 言

本論文では、遠隔操作者が遠隔操作したいヒューマノイドロボットの身体部位を作業に応じ切り替え、その身体部位への運動のみを、簡単な入力装置を用いて指令するヒューマノイドロボットのための全身遠隔操作手法を提案した。本手法を用いることで、遠隔操作者は、意識を集中する身体部位へ例えばジョイスティックのような簡単な入力デバイスを用いて運動指令を与えるのみで、ヒューマノイドロボットの全身運動を柔軟に指令することができる。

提案手法の有効性を検証するために、2本の3自由度ジョイスティックを入力装置とする遠隔操作システムを構築し、実ヒューマノイドロボット HRP-1S を用いた遠隔操作実験を行った。その結果、本手法を用いることによって、2本の3自由度ジョイスティックという簡易な入力操作装置により、30自由度を有するヒューマノイドロボットを操作することが可能であることが判明した。モーションキャプチャ装置や、外骨格型の入力装置を用いる従来のシステムより、入力装置が簡易である分、本手法はシステム構築にかかるコストや可搬性の面で優れている。

現段階の実装では、操作者が選択できるロボットの身体部位は両手先、両足、腰と頭の6箇所のみである。ロボット身体の任意の部位を選択して操作できるように枠組みを構築することが、今後の課題である。また、ヒューマノイドロボットの手先

を遠隔操作した場合、腕だけで指令された動作を実現するのか、腰も同時に動かしてその動作を実現するのかは、ヒューマノイドロボットの全身動作生成法に関する大きな問題である。これに関しても、研究を進めていきたい。

謝 辞 本研究は、経済産業省／NEDOの「人間協調・共存型ロボットシステム」プロジェクトにおいて行われたものである。本研究の遂行に際しては、産業技術総合研究所知能システム研究部門の比留川博久氏、金子健二氏他、ヒューマノイド研究グループの諸氏に、貴重なコメントや実験の補助をいただいた。ここに記して感謝の意を表する。

参 考 文 献

- [1] 加藤：「2足歩行ロボット (WABOT-1) の開発」, バイオメカニズム 2, 東京大学出版会, pp.173-214, 1973.
- [2] 稲葉, 金広, 井上：「脳を持ち歩かない2足2腕ロボットの開発」, 第11回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.623-624, 1993.
- [3] 広瀬, 竹中, 五味, 小澤：「人間型ロボット」, 日本ロボット学会誌, vol.15, no.7, pp.983-985, 1997.
- [4] 村瀬, 安川, 境, 植木：「研究用小型ヒューマノイドの設計」, 第19回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, pp.789-799, 2001.
- [5] J. Yamaguchi, E. Soga, S. Inoue and A. Takanishi: "Development of a Bipedal Humanoid Robot - Control Method of Whole Body Cooperative Dynamic Biped Walking," Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.368-374, 1999.
- [6] T. Furuta, Y. Okumura and K. Tomiyama: "Design and Construction of a Series of Compact Humanoid Robots and Development of Biped Walk Control Strategies," Proc. IEEE-RAS Int. Conf. Humanoid Robots, 2000.
- [7] F. Yamasaki, T. Matsui, T. Miyashita and H. Kitano: "PINO—The Humanoid that Walks," Proc. IEEE-RAS Int. Conf. Humanoid Robots, 2000.
- [8] M. Gienger, K. Löffler and F. Pfeiffer: "Towards the Design of a Biped Jogging Robot," Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.4140-4145, 2001.
- [9] S. Kagami, K. Nishiwaki, T. Sugihara, J.J. Kuffner, M. Inaba and H. Inoue: "Design and Implementation of Software Research Platform for Humanoid Robotics: H6," Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.2431-2436, 2001.
- [10] T. Ishida, Y. Kuroki, J. Yamaguchi, M. Fujita and T. Doi: "Motion Entertainment by a Small Humanoid Robot based on Open-R," Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems, pp.1079-1086, 2001.
- [11] M. Hirose, Y. Haikawa, T. Takenaka and K. Hirai: "Development of Humanoid Robot ASIMO," Proc. Workshop on Explorations towards Humanoid Robot Applications of IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems, 2001.
- [12] S. Kagami, K. Nishiwaki, J.J. Kuffner, Y. Kuniyoshi, M. Inaba and H. Inoue: "Design and Implementation of Software Research Platform for Humanoid Robotics: H7," Proc. IEEE-RAS Int. Conf. Humanoid Robots, pp.253-258, 2001.
- [13] T. Furuta, Y. Okumura, T. Tawara and H. Kitano: "morph: A Small-size Humanoid Platform for Behavior Coordination Research," Proc. IEEE-RAS Int. Conf. Humanoid Robots, pp.165-171, 2001.
- [14] 人間協調・共存型ロボットシステムシンポジウム講演概要集, 2003.
- [15] Y. Sakagami, R. Watanabe, C. Aoyama, S. Matsunaga, N. Higaki and K. Fujiwara: "The Intelligent ASIMO: System Overview and Integration," Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems, pp.2478-2483, 2002.
- [16] 加賀美, Kuffner, 西脇, 稲葉, 井上：「ヒューマノイド H7 の足接地場所の2次元高速計画法」, 日本ロボット学会創立20周年記念学術講演会予稿集 CD-ROM, 1C24, 2002.
- [17] 友國, 沢崎, 内山：「ヒューマノイドロボットの視覚による自律化 (第

[†]本実装では、式(2)に示すように手先を動かすときに腕関節のみのヤコビ行列を使用している。このため腕の可動範囲を超えて手先を動かしたい場合には操作対象部位を腰に切り替えて腰を動かす必要がある。

- 2 報：視覚ナビゲーションによる自律歩行”，日本ロボット学会創立 20 周年記念学術講演会予稿集 CD-ROM, 3C26, 2002.
- [18] 黒木, 石田, 長阪, 山口: “高度統合運動制御機能を有する小型二足歩行エンターテインメントロボット SDR-4X”, 日本ロボット学会創立 20 周年記念学術講演会予稿集 CD-ROM, 1C17, 2002.
- [19] K. Yokoi, M. Kobayashi, H. Hasunuma, H. Moriyama, T. Itoko, Y. Yanagihara, T. Ueno and K. Ohya: “Application of Humanoid Robots for Teleoperations of Construction Machines,” Proc. Workshop on Explorations towards Humanoid Robot Applications of IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems, 2001.
- [20] H. Takanobu, H. Tabayashi, S. Narita, A. Takanishi, R. Guglielmelli and P. Dario: “Remote Interaction between Human and Humanoid Robot,” Proc. IARP First International Workshop on Humanoid and Human Friendly Robotics, 1998.
- [21] S. Kagami, J.J. Kuffner, K. Nishiwaki, T. Sugihara, M. Inaba, H. Inoue: “Design and Implementation of Remotely Operation Interface for Humanoid Robot,” Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.401-406, 2001.
- [22] 舘, 小森谷, 澤田, 井床, 井上: “HRP 遠隔操作プラットフォーム”, 日本ロボット学会誌, vol.19, no.1, pp.16-27, 2001.
- [23] 木野, 岡田, 稲葉, 井上: “物体操作データベースを用いた視覚主導型ヒューマノイド遠隔操縦システム”, 日本ロボット学会創立 20 周年記念学術講演会予稿集 CD-ROM, 3C23, 2002.
- [24] 星野, 西山, 澤田, 米田, 徳永: “対人サービス分野における遠隔操作システムの開発”, 日本ロボット学会創立 20 周年記念学術講演会予稿集 CD-ROM, 3D17, 2002.
- [25] 金澤, 川内, 佐々木, 浅野, 田村: “プラント点検向け人間型ロボットシステム (第 2 報) 自律と遠隔を融合したナビゲーションシステム”, 日本ロボット学会創立 20 周年記念学術講演会予稿集 CD-ROM, 3D14, 2002.
- [26] 沢崎, 白石, 中島: “人間協調・共存型ロボットシステムのビル・ホーム管理サービス応用 (第 5 報: 全体システムの試作と動作検証)”, 日本ロボット学会創立 20 周年記念学術講演会予稿集 CD-ROM, 3D18, 2002.
- [27] 横井, 中嶋, 小林, 蓮沼, 御松, 柳原, 上野, 遠藤, 後久: “人間型ロボットによる着座型産業車両の代行運転”, 第 8 回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp.264-269, 2003.
- [28] A. Ude, C. Man, M. Riley and C.G. Atkeson: “Automatic Generation of Kinematic Models for the Conversion of Human Motion Capture Data into Humanoid Robot Motion,” Proc. IEEE-RAS Int. Conf. Humanoid Robots, 2000.
- [29] 栗原, 鈴木, 丹下, 山根, 中村: “リアルタイムモーションキャプチャを用いたヒューマノイドのオブティカルコックピット”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, 2A1-L02, 2002.
- [30] E.S. Neo, 横井, 金広, 梶田, 谷江: “ヒューマノイドロボットの全身遠隔操作”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, 2P1-L08, 2002.
- [31] E.S. Neo, K. Yokoi, S. Kajita, F. Kanehiro, and K. Tanie: “Whole Body Teleoperation of a Humanoid Robot—Development of a Simple Master Device using Joysticks—,” Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems, pp.2569-2574, 2002.
- [32] V.B. Brooks: The Neural Basis of Motor Control. Oxford University Press, 1986.
- [33] 井上, 石井, 大川: “腕で作業をしながら移動する人間型ロボットの実時間制御 (Sagittal Plane 内の運動制御)”, 日本ロボット学会誌, vol.18, no.1, pp.75-86, 2000.
- [34] K. Yokoi, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Fujiwara, S. Kajita and H. Hirukawa: “A Honda Humanoid Robot Controlled by AIST Software,” Proc. IEEE-RAS Int. Conf. Humanoid Robots, pp.259-264, 2001.
- [35] S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Fujiwara, K. Yokoi and H. Hirukawa: “A Realtime Pattern Generator for Biped Walking,” Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.31-37, 2002.
- [36] 中嶋, 家中, 藤森, 加賀谷, 森山, 蓮沼, 久保田, 志子田: “可搬型遠隔制御装置の開発 (HRP 代行運転分野)”, 日本ロボット学会創立 20 周年記念学術講演会予稿集 CD-ROM, 2D16, 2002.

Neo Ee Sian

1975 年 7 月 27 日生。1998 年鈴鹿工業高等専門学校機械工学科卒業。2001 年筑波大学第三学群工学システム学類卒業。同年同大学大学院博士課程システム情報工学科に進学，現在に至る。ヒューマノイドロボットや遠隔操作システムなどに興味をもつ。IEEE 会員。（日本ロボット学会学生会員）

梶田秀司 (Shuji Kajita)

1961 年 1 月 26 日生。1985 年東京工業大学大学院修士課程修了 (制御工学専攻)。同年通産省工業技術院機械技術研究所に入所。2 足歩行ロボット等の動的制御技術の研究に従事。1996 年 2 月より 1 年間米国カリフォルニア工科大学客員研究員。2001 年より組織改編に伴い独立行政法人産業技術総合研究所主任研究員，現在に至る。1996 年 3 月東京工業大学より学位取得 (工学博士)。1996 年度計測自動制御学会論文賞受賞。計測自動制御学会，IEEE (Robotics and Automation Society) の会員。

(日本ロボット学会正会員)

谷江和雄 (Kazuo Tanie)

1946 年 11 月 6 日生。1971 年早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年 4 月通産省産業工業技術院機械技術研究所入所。2001 年産業技術総合研究所知能システム研究部門長。現在に至る。筑波大学大学院工学研究科教授。早稲田大学理工学総合研究センター客員教授等へ委任。工学博士。日本機械学会，計測自動制御学会，IEEE などの会員。

(日本ロボット学会正会員)

横井一仁 (Kazuhito Yokoi)

1961 年 11 月 11 日生。1986 年東京工業大学大学院機械物理工学専攻修了。博士 (工学)。1986 年工業技術院機械技術研究所に入所。1995～1996 年スタンフォード大学客員研究員。2001 年産業技術総合研究所知能システム研究部門主任研究員。現在に至る。神奈川工科大学連携大学院助教授，東京工業大学非常勤講師，電気通信大学非常勤講師併任。人間型ロボットシステムの研究に従事。IEEE，日本機械学会会員。（日本ロボット学会正会員）

金広文男 (Fumio Kanehiro)

1971 年 7 月 22 日生。1999 年東京大学大学院工学系研究科情報工学専攻博士課程修了。博士 (工学)。1998 年より日本学術振興会特別研究員。2000 年電子技術総合研究所入所。現在産業技術総合研究所知能システム研究部門研究員。ヒューマノイドロボットのシステム構成法，全身行動制御に興味がある。IEEE，人工知能学会，日本ソフトウェア科学会，情報処理学会の各会員。（日本ロボット学会正会員）