手作業を目的とした人間型ロボットの全身動作生成

井 上 健 司^{*1} 西 濱 祐 介^{*2} 坂 田 幸 太 郎^{*3}
新 井 健 生^{*1} 前 泰 志^{*4}

Generating Whole Body Motion of Humanoid Robots for Manipulation Tasks

Kenji Inoue^{*1}, Yusuke Nishihama^{*2}, Kotaro Sakata^{*3},
Tatsuo Arai^{*1} and Yasushi Mae^{*4}

A control method for humanoid robots of mobile manipulation is proposed. A robot autonomously generates its whole body motion and steps so as to increase arm manipulability and robot stability, while performing various manipulation tasks with its hands; that enables dexterous and stable manipulation. An objective manipulation task is given as the desired trajectories of both hands, and external forces may be applied to the hands. For carrying out this task, the hands are always controlled along their desired trajectories by impedance control. Coordinating with this motion of the hands, the robot controls its body and legs so that the hands may be easy to perform the task. It determines the next foothold by evaluating manipulabilities of both arms, direction of stable region and moving direction. An evaluation function consisting of manipulabilities of both arms and static stability of the robot is defined, and the robot steps if the new double support state is better than the current one. Both in double and single support states, the robot controls its body pose using the support leg/legs so that this evaluation function may be optimal. The swing leg is moved to the next foothold in single support state. Various motions of humanoid robot "HRP-1" by the proposed method are simulated using dynamic simulator "OpenHRP".

Key Words: Humanoid Robot, Mobile Manipulation, Manipulability, Stability

1. は じ め に

近年になり、人間型ロボットのハードウェア面での実現可能性が示されたことで、その実用化に向けたハードウェアのさらなる高度化・システム化 [1]~[6], 動作制御 [7] [8], 移動経路生成 [9] [10], 全身動作生成 [11]~[14], 転倒や起き上がり動作 [15]~[17], 遠隔操作 [18]~[20], ソフトウェアやシミュレーション技術 [21]~[24] などに関する研究が数多くなされている。ところで、人間型ロボットは単に歩行するだけでなく、両手で作業を行うことができるのも大きな特徴である。対地適応性に優れ、接地面積や移動に要する空間が小さくてすむという利点を持った人間型ロボットは、人が生活する空間を移動したり、人と協調作業を行ったりするのに有効といえる。こうした理由から、近い将来、

人間型ロボットは、オフィスや家庭といった環境で様々な作業を行い、人々の日常生活を支援することが期待されている。井上 [25] や比留川 [26] は、人間支援を含めた人間型ロボットの将来の応用分野について展望している。我々も、インターネットによるアンケート調査により、身の回りで働くロボットとしての人間型ロボットに対する人々の期待が大きいこと、特にホームサービスやセキュリティといった分野への応用が求められていることを確認している [27]。しかし、作業を行うロボットという視点から人間型ロボットの汎用的な動作生成を行う研究は少ない。HRP プロジェクト [28] [29] では、具体的作業を取り上げて人間型ロボットの適用可能性を示している。最近では、重量物を押すなどの力作業に人間型ロボットを適用する研究が行われている [30]~[32]。

人間型ロボットへの応用が期待されている作業には、人がそうであるように本質的に手を使って行うものが多いと考えられる。人間型ロボットが手作業を行う場合には、腕と脚を切り離して制御するのではなく、作業を行う腕の動作と協調させて胴体・脚を動かすことで、腕の手作業の能力を補完・増強することができる。我々は、このような手作業を目的とする全身動作を「作業移動」と呼び、人間型ロボットに作業移動を実現させる研究を行っている [33]~[38]。

原稿受付 2004 年 8 月 13 日

^{*1}大阪大学大学院基礎工学研究科

^{*2}日本電気株式会社

^{*3}松下電器産業株式会社

^{*4}福井大学工学部

^{*1}Graduate School of Engineering Science, Osaka University

^{*2}NEC Corporation

^{*3}Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.

^{*4}Faculty of Engineering, University of Fukui

文献 [34] では, sagittal plane 内の運動に限定し, 歩幅を固定した場合の作業移動の一手法を提案した. 本研究ではこれを発展させ, 二次元平面上での踏みかえを行う人間型ロボットの作業移動制御法を提案する. この方法は, 単なる歩行とは異なり, 手作業を目的とする全身制御法である. すなわち, 「手で様々な作業を遂行しながら, それに合わせてその場での胴体姿勢制御や踏みかえを自律的に切り替えることで, 腕の手作業の能力やロボットの安定性を高め, 器用かつ安定な手作業を可能にする」人間型ロボットの全身動作を生成する. そして, 仮想プラットフォーム OpenHRP [21]~[23] を用いて提案した作業移動制御法による人間型ロボット HRP-1 の様々な動作のシミュレーションを行い, その有効性を検証する.

2. 人間型ロボットの作業移動

Fig. 1 は, 人間型ロボットで想定される作業例を示したものである. Fig. 1 (a) は人との協調による物体運搬・組み付け作業で, 人が物体を押したり引いたりすることで, 人間型ロボットの手に運搬方向等の指示が直接与えられる. 人間型ロボットは, 手を指示通りに動かしながら, 手の動きに合わせて腕や体全体を上下動させる, 前後左右に移動する, その場で回転するといった脚動作を行わなければならない. Fig. 1 (b) は掃除などに見られる動作で, 手で機器を動かすのが目的なので作業の主体は手であり, 手の動きに合わせた移動が求められる. 加えて, 機器を介して手に作用する外力 (外乱) に対しても対応できる必要

がある. Fig. 1 (c) のように高さの異なる場所で手作業する場合には, 大きな移動は伴わないものの, 背伸びしたりひざまずいたりして, 手が作業しやすいように姿勢を調整したり, 立つ位置を変更することが重要となる.

以上の例に限らず, 人間型ロボットが行う作業には, 手を使ったものが多いと考えられる. その際, 作業を行う腕の動作と協調させて, 上で述べたような胴体の高さや姿勢の変更, 移動・旋回・立ち位置の調整といった胴体・脚動作を行うことで, 腕の手作業の能力を補完・増強することができる. 本論文では, このような手作業を目的とする全身動作を「作業移動 (Mobile Manipulation)」と呼ぶ.

3. 人間型ロボットのモデル

本研究では, 胴体に 2 本の腕と 2 本の脚がついた構造の人間型ロボットを対象とする. 胴体に自由度はなく, 脚は, 胴体に対して足の位置・姿勢を制御できる 6 自由度を持つとする. 腕は, 作業に必要な自由度 m を持つ. 空間の位置だけなら $m = 3$, 位置と姿勢が必要なら $m = 6$ となる.

Fig. 2 に, 人間型ロボットの関節構成の一例 ($m = 6$) を示す. 左右の腕の関節変数を $q_{al}, q_{ar} \in R^m$, 左右の脚の関節変数を $q_{ll}, q_{lr} \in R^6$ とする. また, 地面に固定された座標系から見た左右の手的位置・姿勢を $r_{hl}, r_{hr} \in R^m$, 左右の足の位置・姿勢を $r_{fl}, r_{fr} \in R^6$, 肩 (Fig. 2 の点 S) の位置・姿勢を $r_s \in R^6$ とする. このとき, 腕・脚の逆運動学は, 次のような形に表すことができる.

$$q_{ai} = g_{ai}(r_s, r_{hi}) \quad (i = l, r) \quad (1)$$

$$q_{li} = g_{li}(r_s, r_{fi}) \quad (i = l, r) \quad (2)$$

上式より, 両手, 両足, 肩の位置・姿勢を計画できれば, ロボットの全関節の目標角が計算できる. これを各関節の位置フィードバック・コントローラに入力してロボットを動かす. そこで, 次章では両手, 両足, 肩の位置・姿勢の生成法を提案する.

本研究では, 手作業する際に対象物から手に力・モーメントが作用する状況も考えるため, 左右の手に作用する力・モーメントを $f_{hl}, f_{hr} \in R^m$ と表す.

Fig. 1 Examples of tasks which humanoid robots are expected to do

Fig. 2 Example of humanoid robot model

4. 作業移動制御法

4.1 作業移動制御法の概要

作業移動制御法の概要を Fig. 3 に示す。

手作業を目的とする作業移動では、作業によって決まる手の目標位置・姿勢や目標軌道が与えられる。また、対象物から手に力・モーメントが作用する状況では、作業によって決まる手の目標力・モーメントも与えられることになる。作業を遂行するためには、この与えられた目標運動に従って手を動かすことが、第一の目標となる。本研究では、未来の目標運動があらかじめ分かっているのではなく、実時間で与えられる目標運動に応じて全身動作を生成することを考える。

手を目標運動に従って動かすという制約条件のもとで、胴体の位置・姿勢やロボットの立つ位置は、冗長自由度である。この冗長自由度を用いることで、腕の手作業の能力を高めることができる。まず、手作業を遂行するためには、手で器用に作業できること、手に働く外力の変化にも腕が即座に対応できることが求められる。また、細かい手作業は踏みかえずに腕を使って実現することが望ましい。そこで、作業を行う手の位置・姿勢に対し、両腕の操作性を高い状態に保つように肩の位置・姿勢を移動させ

る。そして、手の細かい運動や突然の外力の変化には腕だけが応答するようにすれば、効率よい手作業が可能となる。言い換えれば、腕の動作領域が手の周囲に広がるように肩の位置・姿勢を調整し、腕の手作業の能力を高める。さらに、要求される手作業の範囲が広い場合は踏みかえて、腕の動作領域を移動させる (Fig. 4 (a))。器用さと同時に、安定した手作業を維持するためには、ロボットが転倒しないことも重要である。よって、ZMP を安定領域内に保つことが求められる (Fig. 4 (b))。以上のことから、作業を遂行する両手の運動に対し、これら二つの評価指標 (両腕操作性とロボット安定性) を高めるように胴体・脚を制御すれば、器用かつ安定な手作業が実現できる (Fig. 3 (a))。

よって、作業移動制御法の基本的な考え方は、「作業によって決まる目標運動に両手を追従させながら、それにあわせて作業を行う両腕の操作性およびロボット全体の安定性を高く維持するように胴体・脚を制御する」ことである。車輪式移動ロボットと違い、人間型ロボットを含めた脚式移動ロボットでは、移動のために踏みかえる必要がある。したがって、胴体・脚の制御は、Fig. 3 (b) のように着地点候補の決定、踏みかえの判断、両脚支持状態での胴体姿勢制御、踏みかえ動作の制御からなり、ロボットは自律的に判断して両脚支持状態と踏みかえ動作を切り替える。なお、本研究では、高さが既知の地面に着地する場合を扱う。

作業移動制御法の手順を以下にまとめる。(1)～(5)は、Fig. 3中の番号に対応している。

- (1) 作業によって決まる目標運動に常に追従させるように、両手を制御する。
- (2) 踏みかえ後の安定領域の方向と両腕操作性、および進行方向を考慮して、着地点候補を決定する。

(a) Basic idea of mobile manipulation

(b) Body and leg control for optimizing arm manipulability and robot stability

Fig. 3 Outline of mobile manipulation control for humanoid robot

(a) For dexterous manipulation

(b) For dexterous and stable manipulation

Fig. 4 Optimal pose of humanoid robot for mobile manipulation

- (3) 両腕操作性とロボット安定性を評価する作業移動評価関数を定義し、現在の両脚支持状態よりも踏みかえ後の両脚支持状態の評価値がよければ、踏みかえと判断する。
- (4) 踏みかえない場合は、現在の両脚支持状態で作業移動評価関数を最適にするように肩の位置・姿勢を制御する。
- (5) 踏みかえる場合は、遊脚を着地点に向かって移動させながら、支持脚を使って作業移動評価関数を最適にするように肩の位置・姿勢を制御する。

作業を遂行するため、胴体・脚の状態によらず (1) は常に行う。両脚支持中は (2)～(4) を繰り返し行って着地点候補を逐次更新し、踏みかえるかどうかを判断する。踏みかえを開始したら (2), (3) は行わず、求めた着地点に踏みかえて新しい両脚支持状態に移る。

以上の方法により、器用かつ安定な手作業を実現する。

4.2 両手のインピーダンス制御

両手には、作業によって決まる目標位置・姿勢 $\mathbf{r}_{hid}(i=l, r)$ と目標外力・モーメント $\mathbf{f}_{hid}(i=l, r)$ が与えられる。作業を遂行するためには、この目標運動に従って両手を動かす必要がある。そこで、インピーダンス制御により常に両手を制御する。

$$\begin{aligned} M_{hi}\ddot{\mathbf{r}}_{hi} + D_{hi}(\dot{\mathbf{r}}_{hi} - \dot{\mathbf{r}}_{hid}) + K_{hi}(\mathbf{r}_{hi} - \mathbf{r}_{hid}) \\ = \mathbf{f}_{hi} - \mathbf{f}_{hid} \quad (i=l, r) \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 M_{hi} , D_{hi} , K_{hi} は、両手の理想インピーダンスである。式 (3) より導かれる次式により両手の理想加速度を求め、サンプリング時間 Δt だけ積分して両手の位置・姿勢の指令値を生成する。

$$\begin{aligned} \ddot{\mathbf{r}}_{hi}(t) = M_{hi}^{-1}\{\mathbf{f}_{hi}(t) - \mathbf{f}_{hid}(t) - D_{hi}(\dot{\mathbf{r}}_{hi}(t) - \dot{\mathbf{r}}_{hid}(t)) \\ - K_{hi}(\mathbf{r}_{hi}(t) - \mathbf{r}_{hid}(t))\} \quad (i=l, r) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_{hi}(t + \Delta t) = \mathbf{r}_{hi}(t) + \dot{\mathbf{r}}_{hi}(t)\Delta t + \frac{1}{2}\ddot{\mathbf{r}}_{hi}(t)\Delta t^2 \\ (i=l, r) \end{aligned} \quad (5)$$

4.3 着地点候補の決定

着地点候補は、踏みかえ後の安定領域の方向と両腕操作性、および進行方向を考慮した評価関数 V を用いて決定する。以下、左足を踏みかえる場合で説明する。Fig. 5 の $\mathbf{r}_{fi}(i=l, r)$ は現在の両足接地点、 $\hat{\mathbf{r}}_{fl}$ は決定すべき踏みかえ後の左足着地点を表す。

多脚ロボットとは異なる大きな特徴として、2足で立つ人間型ロボットは両脚支持状態における安定領域が細長い。したがって、あらゆる方向に同等な安定領域を確保することはできないので、安定に手作業を遂行するためには、着地後の安定領域の長手方向が ZMP の変動しやすい方向になるように着地点を決定する必要がある。つまり、支持脚である右足の接地点 $\mathbf{r}_{fr}$ を通り ZMP の変動しやすい方向を向く地面上の直線 (Fig. 5 (a) の L_1) 上に左足を着地することが望ましい。そこで、安定領域の方向に関する評価関数を次のように定義する。

$$V_1 = d_1^2 \quad (6)$$

d_1 は L_1 と左足着地点 $\hat{\mathbf{r}}_{fl}$ との距離で、 V_1 が小さいほど L_1 近

(a) Evaluation of stable region after step

(b) Predicted shoulder pose after step

(c) Evaluation of arm manipulability after step and moving direction

Fig. 5 Next foothold determination

くに左足を着地することを意味する。ZMP の変動しやすい方向としては、両手の移動方向または両手に作用する外力の方向にとる。

両手で作業することを考えると、作業によって決まる踏みかえ後の両手の位置・姿勢に対し、着地後の両腕の可操作度が高く、両手が胴体正面にあることが望ましい。ただし、本研究では未来の両手目標軌道はあらかじめ与えられていないとしている。そこで、あらかじめ設定された踏みかえ時間 t_s と現在の両手の位置・姿勢 $\mathbf{r}_{hi}(i=l, r)$ およびその速度 $\dot{\mathbf{r}}_{hi}$ から、現在の速度で等速運動を続けると想定して踏みかえ後の両手の予測位置・姿勢 $\hat{\mathbf{r}}_{hi}$ を求める。

$$\hat{\mathbf{r}}_{hi} = \mathbf{r}_{hi} + \dot{\mathbf{r}}_{hi}t_s \quad (i=l, r) \quad (7)$$

この $\hat{\mathbf{r}}_{hi}$ に対して、両腕操作性を最大にする肩の予測位置・姿勢 $\hat{\mathbf{r}}_s$ を求める。例えば手の位置だけを考えた場合、左右の腕の可操作度をそれぞれ最大にする腕の付け根の位置は、Fig. 5 (b) のような破線上にある (この曲線は、腕の関節構成によって異なる)。さらに、両手を胴体正面にすることを考慮すると、両手の中点を通り、両手を結ぶ線分に垂直で地面に水平な直線 (図の一点鎖線) 上に肩があればよい。よって、 $\hat{\mathbf{r}}_s$ は図のように求

められる。左足は、踏みかえ後の胴体正面から見て $\hat{\mathbf{r}}_s$ が両脚の中央になるように着地する。すなわち、Fig. 5 (c) のように、 $\hat{\mathbf{r}}_s$ を通り胴体に垂直な直線を地面に投影した直線 L_b と右足接地点 $\mathbf{r}_{fr}$ との距離を求め、 L_b に平行で右足とは反対側に同距離だけ離れた地面上の直線を L_2 とすると、 L_2 上に左足を着地させればよい。そこで、両腕操作性に関する評価関数を次のように定義する。

$$V_2 = d_2^2 \quad (8)$$

ここで、 d_2 は直線 L_2 と左足着地点 $\hat{\mathbf{r}}_{fl}$ との距離である。

さらに、進行方向に踏み出すためには、踏みかえ後の肩の予測位置・姿勢 $\hat{\mathbf{r}}_s$ に対して右足接地点 $\mathbf{r}_{fr}$ と点対称の点 (Fig. 5 (c) の点 P_3) に左足を着地するのがよい。そこで、進行方向に関する評価関数を次のように定義する。

$$V_3 = d_3^2 \quad (9)$$

ここで、 d_3 は点 P_3 と左足着地点 $\hat{\mathbf{r}}_{fl}$ との距離である。

着地点評価関数 V は、これらの重み付き和で定義する。

$$V = w_1 V_1 + w_2 V_2 + w_3 V_3 \rightarrow \min. \quad (10)$$

ここで、 $w_1, w_2, w_3 (> 0)$ は各評価値の重みである。ロボットの機構上の制約などによって決まる着地可能領域内で、 V を最小にする着地点を左足の最適着地点とする。足首の向きは、胴体正面方向にそろえる (Fig. 5 (c) 参照)。

右足、左足を踏みかえる場合それぞれについて、最適着地点とそのときの評価値 V を計算し、両者を比較して評価値が小さいほうを遊脚およびその着地点候補とする。以下では、左足を遊脚に決定したとし、その着地点候補を $\hat{\mathbf{r}}_{fl}$ とする。

4.4 作業移動評価関数

4.1 節で述べたように、手作業中心の作業移動では両腕の操作性の高い状態に保つことが求められる。そこで、両手の位置・姿勢 $\mathbf{r}_{hi} (i = l, r)$ に対し、4.3 節の $\hat{\mathbf{r}}_s$ と同様にして両腕操作性を最大にする肩の理想位置・姿勢 $\mathbf{r}_{sd}$ を求め、肩の位置・姿勢 $\mathbf{r}_s$ と $\mathbf{r}_{sd}$ との偏差で両腕操作性の評価値 U_a を定義する。

$$\mathbf{r}_{sd} = \mathbf{r}_{sd}(\mathbf{r}_{hl}, \mathbf{r}_{hr}) \quad (11)$$

$$U_a \equiv (\mathbf{r}_s - \mathbf{r}_{sd})^T \frac{K_a}{2} (\mathbf{r}_s - \mathbf{r}_{sd}) \quad (12)$$

$K_a (> 0)$ は評価関数の重み行列で、 U_a が小さいほど両腕操作性が高いことを意味する。

次に、ロボットを安定した状態に保つことも重要なので、ロボット安定性の評価値 U_z を次式で定義する。

$$\mathbf{r}_z = \mathbf{r}_z(\mathbf{r}_{hl}, \mathbf{r}_{hr}, \mathbf{r}_s, \mathbf{r}_{fl}, \mathbf{r}_{fr}, \mathbf{f}_{hl}, \mathbf{f}_{hr}) \quad (13)$$

$$U_z \equiv (\mathbf{r}_z - \mathbf{r}_{zd})^T \frac{K_z}{2} (\mathbf{r}_z - \mathbf{r}_{zd}) \quad (14)$$

ここで、 $\mathbf{r}_z$ は慣性力を無視した ZMP (静的 ZMP と呼ぶ)、 $\mathbf{r}_{zd}$ は目標 ZMP で、両脚支持状態では安定領域中央に設定する。静的 ZMP は、両手、両足、肩の位置・姿勢の関数であるロボット全身の姿勢と両手に作用する外力・モーメントによって決まる。この外力・モーメントを考慮している点で地面への重心投

影点とは異なる。本研究で考える作業移動は、両脚支持状態での作業を基本とし、両脚で立つ位置を切り替えていくという考え方である。後述のように、両脚支持状態では手の速い動きに対しては質量の小さい腕で対応し、胴体・脚はゆっくり動かす。したがって、運動による慣性力の影響は小さいため、静的 ZMP を用いた。 $K_z (> 0)$ は評価関数の重み行列である。 U_z が小さいほど $\mathbf{r}_z$ が $\mathbf{r}_{zd}$ に近づき、ロボットは安定となる。

作業移動評価関数 U は、これらの和で定義する。

$$U(\mathbf{r}_{hl}, \mathbf{r}_{hr}, \mathbf{r}_s, \mathbf{r}_{fl}, \mathbf{r}_{fr}, \mathbf{f}_{hl}, \mathbf{f}_{hr}) \equiv U_a + U_z \quad (15)$$

U は両手、両足、肩の位置・姿勢と両手に作用する外力・モーメントの関数である。

4.5 踏みかえの判断

着地点候補 $\hat{\mathbf{r}}_{fl}$ に踏みかえるかどうかは、作業移動評価関数 U を用いて判断する。

まず、踏みかえにはあらかじめ設定した踏みかえ時間 t_s を要する。両手が現在の速度を保つと仮定して、現在の両手の位置・姿勢 $\mathbf{r}_{hi}$ から t_s の半分の時間だけ未来の両手の予測位置・姿勢 $\tilde{\mathbf{r}}_{hi}$ を求める。また、両手には現在の外力・モーメント $\mathbf{f}_{hi}$ が作用しつづけるとして、予測外力・モーメント $\tilde{\mathbf{f}}_{hi}$ を求める。

$$\tilde{\mathbf{r}}_{hi} = \mathbf{r}_{hi} + \dot{\mathbf{r}}_{hi} t_s / 2, \quad \tilde{\mathbf{f}}_{hi} = \mathbf{f}_{hi} \quad (i = l, r) \quad (16)$$

$\tilde{\mathbf{r}}_{hi}, \tilde{\mathbf{f}}_{hi}$ に対し、現在の両脚支持状態 (両足の位置・姿勢 $\mathbf{r}_{fl}, \mathbf{r}_{fr}$) において肩を最適位置・姿勢にしたときの U の最小値 U_{m1} 、踏みかえたと仮定したときの両脚支持状態 ($\hat{\mathbf{r}}_{fl}, \mathbf{r}_{fr}$) での U の最小値 U_{m2} を計算する。

$$U_{m1} = \min_{\mathbf{r}_s} U(\tilde{\mathbf{r}}_{hl}, \tilde{\mathbf{r}}_{hr}, \mathbf{r}_s, \mathbf{r}_{fl}, \mathbf{r}_{fr}, \tilde{\mathbf{f}}_{hl}, \tilde{\mathbf{f}}_{hr}) \quad (17)$$

$$U_{m2} = \min_{\mathbf{r}_s} U(\tilde{\mathbf{r}}_{hl}, \tilde{\mathbf{r}}_{hr}, \mathbf{r}_s, \hat{\mathbf{r}}_{fl}, \mathbf{r}_{fr}, \tilde{\mathbf{f}}_{hl}, \tilde{\mathbf{f}}_{hr}) \quad (18)$$

現在より踏みかえ後の評価がよいと判断したら、ロボットは踏みかえを開始して新しい両脚支持状態に移ればよい。すなわち、踏みかえ開始条件は次式となる。

$$U_{m1} > U_{m2} \quad (19)$$

4.6 両脚支持状態の制御

踏みかえないと判断した場合は、現在の両脚支持状態を維持する。よって、両足の位置・姿勢 $\mathbf{r}_{fi} (i = l, r)$ は定数となるので、作業移動評価関数 U を最小にするように肩の位置・姿勢 $\mathbf{r}_s$ を制御する。具体的には、ロボットが最も安定となる安定領域中央に目標 ZMP $\mathbf{r}_{zd}$ を設定し、両手の位置・姿勢 $\mathbf{r}_{hi} (i = l, r)$ と外力・モーメント $\mathbf{f}_{hi} (i = l, r)$ に応じて $\mathbf{r}_s$ を次式でインピーダンス制御する。

$$M_s \ddot{\mathbf{r}}_s + D_s \dot{\mathbf{r}}_s = - \frac{\partial U}{\partial \mathbf{r}_s} \quad (20)$$

ここで、 M_s, D_s は肩の理想インピーダンスである。右辺は U をポテンシャルエネルギーとみなしたときの仮想的な力に相当し、上式により $\mathbf{r}_s$ は $\partial U / \partial \mathbf{r}_s = 0$ の点に向かって制御される。式 (20) より導かれる次式により肩の理想加速度を求め、サンプリング時間 Δt だけ積分して肩の位置・姿勢の指令値を生成

する.

$$\ddot{\mathbf{r}}_s(t) = M_s^{-1} \left\{ -\frac{\partial U}{\partial \mathbf{r}_s}(t) - D_s \dot{\mathbf{r}}_s(t) \right\} \quad (21)$$

$$\mathbf{r}_s(t + \Delta t) = \mathbf{r}_s(t) + \dot{\mathbf{r}}_s(t)\Delta t + \frac{1}{2}\ddot{\mathbf{r}}_s(t)\Delta t^2 \quad (22)$$

式 (3) で設定された両手の理想インピーダンスの応答性に比べて肩の理想インピーダンスの応答性を低く設定することで、両手の速い動きには腕だけが動作し、ゆっくりした動きには肩から動かして対応させることが可能となる.

4.7 踏みかえ制御

作業移動における踏みかえは、移動を目的とする連続的な歩行とは異なる. 本研究で考える作業移動は、両脚支持状態での手作業を基本とし、手作業がしやすい場所に両脚で立つ位置を一步步切り替えていくという考え方である. したがって、動歩行のように連続かつ高速に脚を動かすよりも、一步一步確実な踏みかえが重要となる. そこで、以下のように作業移動評価関数 U を用いた静歩行による踏みかえを行う.

まず、Fig. 6 のように踏みかえは三つのフェーズからなる. 各フェーズ k の時間 t_k ($k = 1, 2, 3$) と総踏みかえ時間 $t_s = t_1 + t_2 + t_3$ は、あらかじめ設定する.

肩の制御: フェーズ 1 で、目標 ZMP_{rd} を現在の両脚支持状態の安定領域中央から支持脚の足底中央に移動させる. フェーズ 2 は単脚支持期で、 $\mathbf{r}_{zd}$ を支持脚の足底中央に保つ. 着地後のフェーズ 3 で、 $\mathbf{r}_{zd}$ を新しい両脚支持状態の安定領域中央に移動させる. この間、両脚支持状態と同じ式 (20) で肩の位置・姿勢 $\mathbf{r}_s$ を制御すると、ロボット安定性の評価値 U_z の効果で $\mathbf{r}_{zd}$ に応じて $\mathbf{r}_s$ が動き、踏みかえに必要な体重移動が実現される.

遊脚の制御: 単脚支持期 (フェーズ 2) の遊脚足先 $\mathbf{r}_{fl}$ は、楕円軌道に沿って着地点 $\hat{\mathbf{r}}_{fl}$ まで移動させる. 足底で地面を蹴る動作は行わない.

4.8 作業移動制御法の特徴

以上の方法により、両手で目的作業を遂行しながら、その動きに応じて両腕操作性・ロボット安定性を高めるように胴体・脚を制御することが可能となる. 胴体・脚制御は両脚支持状態での胴体姿勢制御と踏みかえ動作からなり、それらを自律的に切り替えることで、器用かつ安定な手作業を可能にする. 両手が大きく移動すると、それに合わせて連続踏みかえが起こる. これは、通常の歩行とは異なり、手作業がしやすい場所に両脚で

立つ位置を一步步切り替えていく、手作業を主体とする作業移動といえる.

着地点候補の決定や踏みかえの判断では、踏みかえ中、両手は現在の速度で等速運動を続けると想定している. よって、手の運動が予測した軌道と異なると、求めた着地点は最適点から外れてしまう. しかし、踏みかえの途中で着地点を変更して遊脚の動きを変えることは、安定性の面から困難である. そこで、提案手法では、いったん着地し、着地後の両脚支持状態であらためて着地点候補を求め、必要ならば踏みかえ直すという戦略をとる (4.1 節参照).

提案手法では作業によって決まる目標運動を両手に与えるだけで、それに応じた腕・胴体・脚の全身運動が自律的に生成される. この運動はオフラインで生成しておくものではなく、現在の両手の運動に応じて実時間で作り出されるものである.

5. 人間型ロボットの作業移動シミュレーション

5.1 シミュレーションの設定

提案する作業移動制御法の有効性を検証するため、動力学シミュレータとして OpenHRP を使い、人間型ロボットの作業移動シミュレーションを行った.

シミュレーションに使用した人間型ロボットは、Fig. 7 に示す HRP-1 モデル (全長約 1.6 [m], 全重量約 116 [kg]) [6] [29] である. このロボットは、各腕 7 自由度、各手の開閉 1 自由度、各脚 6 自由度、頭部 2 自由度の合計 30 自由度を持つ. ここでは簡単のため手の姿勢は考えないとし、手首 3 自由度と腕の冗長 1 自由度を固定して腕を 3 自由度とした. また、手の開閉は行わず、頭部自由度も固定した. このとき、ロボットの関節構成は、Fig. 2 の手首 3 自由度を固定したものと同じになる.

Fig. 7 のように、初期姿勢で両手は同じ高さにあり、水平な地面に両足接地している. 地面に固定された世界座標系は、地面上に原点を取り、両手を結ぶ直線に平行な方向を Y 軸、それと直角で水平な方向を X 軸 (前方为正)、鉛直方向を Z 軸 (上方为正) とする. 初期姿勢における両手の位置と両足の位置・姿勢を Table 1 にまとめる.

手の位置だけを考えるので、両手の理想インピーダンス M_{hi} , D_{hi} , K_{hi} ($i = l, r$) と作業移動評価関数 U の重み行列 K_a は 3×3 行列となる. また、重み行列 K_z は 2×2 行列である. こ

Fig. 6 3 phases in step motion

Fig. 7 Humanoid robot HRP-1 and global coordinate system in simulation

Table 1 Initial pose of robot

Left hand position	(0.47, 0.21, 1.0) [m]
Right hand position	(0.47, -0.21, 1.0) [m]
Left foot position	(0.15, 0.10, 0.0) [m]
Right foot position	(-0.05, -0.10, 0.0) [m]
Left foot orientation	parallel to X axis
Right foot orientation	parallel to X axis

Table 2 Parameters of mobile manipulation control

Hand impedance	$m_h = 1.0$ [kg], $d_h = 60.0$ [Ns/m], $k_h = 1000.0$ [N/m]
Weight of evaluation U	$k_a = 600.0$, $k_{zx} = 5000.0$, $k_{zy} = 6000.0$
Shoulder impedance	$m_{sp} = 0.9$ [kg], $d_{sp} = 1500.0$ [Ns/m], $m_{sz} = 0.9$ [kgm ²], $d_{sz} = 1500.0$ [Nsm]
Weight of evaluation V	$V_1 = 10.0$, $V_2 = 10.0$, $V_3 = 100.0$
Stepping time	$t_1 = 1.0$ [s], $t_2 = 1.0$ [s], $t_3 = 1.5$ [s]
Sampling time	$dt = 0.001$ [s]
Minimum distance between feet	$w_{ymin} = 0.15$ [m]

れらは、次式の対角行列とする。

$$\begin{cases} M_{hl} = M_{hr} = \text{diag}(m_h, m_h, m_h) \\ D_{hl} = D_{hr} = \text{diag}(d_h, d_h, d_h) \\ K_{hl} = K_{hr} = \text{diag}(k_h, k_h, k_h) \end{cases} \quad (23)$$

$$\begin{cases} K_a = \text{diag}(k_a, k_a, k_a) \\ K_z = \text{diag}(k_{zx}, k_{zy}) \end{cases} \quad (24)$$

肩の運動は並進 3 方向と Z 軸回りの回転を考え、並進運動に関する理想インピーダンスを M_{sp} , $D_{sp} \in R^{3 \times 3}$, Z 軸回りの理想インピーダンスを m_{sz} , d_{sz} とする。 M_{sp} , D_{sp} は次の対角行列とする。

$$\begin{cases} M_{sp} = \text{diag}(m_{sp}, m_{sp}, m_{sp}) \\ D_{sp} = \text{diag}(d_{sp}, d_{sp}, d_{sp}) \end{cases} \quad (25)$$

これら対角成分を含めた作業移動制御法の各パラメータは、**Table 2** のように設定した。ここで、 w_{ymin} は、ロボットの機構によって決まる両足の横方向の最小接近可能距離である。ZMP の変動しやすい方向は両手の移動方向とし、肩の予測位置・姿勢や理想位置・姿勢は、4.3 節で述べたように決定する。各関節の位置フィードバック・コントローラには、関節角が目標値に一致するようにフィードバックゲインを十分大きく設定したハイゲイン・コントローラを用いた。

提案手法では、式 (3) に両手の目標位置 $\mathbf{r}_{hid}$ ・目標速度 $\dot{\mathbf{r}}_{hid}(i=l, r)$ を与えるだけで、それに応じた全身動作が自律的に生成される。そこで、様々な両手の目標軌道 $\mathbf{r}_{hid}(t)$ を考え、シミュレーションを行った。両手の目標外力は $\mathbf{f}_{hid} = 0$ とした。

5.2 両手の上下運動に伴う膝曲げ動作

両手を上下に移動させる目標軌道 $\mathbf{r}_{hid}(t)$ を与えたときのシミュレーションの結果を **Fig. 8** に示す。図から、腕だけを動かして両手を下げるのではなく、両手の動きに合わせて膝を曲げ、体全体を沈みこませていることが分かる。これは、両腕操作性を高く保つ、すなわち肘を曲げた状態を保つためである。

Fig. 8 Bending knees when both hands are going down **Fig. 9** Twisting body when both hands are moving back obliquely

5.3 両手の斜め後方運動に伴う胴体捻り動作

両手を斜め後方 ($-Y$ & $-X$ 方向) に移動させる目標軌道 $\mathbf{r}_{hid}(t)$ を与えたときのシミュレーションの結果を **Fig. 9** に示す。この場合も、腕だけを動かすのではなく、両腕操作性を高く保つために体全体を捻り、両手を胴体の正面に持ってくる動作が生成されている。

5.4 両手の前方運動に伴う前進移動

両手を初期位置から一定速度 0.05 [m/s] で前方 ($+X$ 方向) に水平移動させる目標軌道 $\mathbf{r}_{hid}(t)$ を与えた結果、**Fig. 10** (a) のように両手の運動にあわせた連続踏みかえが起り、前方へ移動した。このときの手の X 方向の軌道を **Fig. 10** (b) に示す。図から、作業移動の目的である「手を目標軌道に沿って動かす」ことが実現できている。

5.5 両手の横運動に伴う横移動

両手を初期位置から一定速度 0.02 [m/s] で真横 ($-Y$ 方向) に水平移動させる目標軌道 $\mathbf{r}_{hid}(t)$ を与えたときのシミュレーションの結果を **Fig. 11** (a) に示す。まず、両腕操作性を高く保つために両手を胴体正面に持ってくる必要から、胴体は向きを変えずに横移動する。その結果、左足を内側に寄せ、右足を外側に開き、再び左足を寄せることを繰り返す両脚の横移動 (連続踏みかえ) が生成された。この動作は、例えば人間同士が机の左右両端を持って前後に移動させるときの動きに似ている。このときの両着地点の変化を **Fig. 11** (b) に示す。図から、着地点は横方向 (Y 方向) に変化しているだけでなく、前後方向 (X 方向) にも変化していることが分かる。これは、着地点を決定する際に、安定領域の方向を考慮しているためである。この運動では、ZMP は横方向に変動しやすい。よって、安定領域の長手方向が横向きになるように、すなわち両足が真横にそろうように着地点が生成されている。最初の左足の横方向移動量が少

ないのは、両足の横方向の最小接近可能距離が 0.15 [m] に制限されているためである。作業移動評価関数 U を構成する両腕操作性の評価値 U_a とロボット安定性の評価値 U_z が相反する関係にある場合は、設定した重み行列 K_a, K_z によって一方の評価値が優先される。このシミュレーションでは、 U_z の重みを大きくとることで、踏みかえ時 (Fig. 11 (a) の 5.0 [s] や 8.5 [s]) の体重移動を実現している。その反面、踏みかえ中は両腕が少し伸び、両腕操作性は下がっている。

5.6 パネル立て掛け作業

作業移動制御法では、手に外力が作用する状況でも、ロボット安定性を維持するように全身動作を生成する。HRP プロジェクトの屋外共同作業におけるパネル運搬・組み付けはこのような作業の一例であり、作業移動制御法を適用できる。

そこで、パネル立て掛け作業のシミュレーションを行った。パネルのサイズは 1.6 [m] × 0.8 [m] × 0.06 [m] で、重量は 4.0 [kg] である。パネルの下端を床と壁で支え、パネル上部を手で押すように両手に目標水平軌道 $r_{hid}(t)$ (高さ 0.93 [m], 速度 0.05 [m/s]) を与えた。シミュレーション結果を Fig. 12 に示す。図のよう

(a) Motion of robot

(b) Hand trajectory in X-direction

Fig. 10 Forward stepping when both hands are moving forward

に、作業移動制御法により自律的に 2 歩踏みかえ、約 7.5 [s] でパネル立て掛けに成功した。

5.7 考察

以上のシミュレーション結果から、開発した制御手法により、両手の運動に応じた平面上での人間型ロボットの作業移動が実現できることが確認できた。踏みかえを伴うシミュレーションでは、遊脚の移動にかかる時間が 1 [s] 強であった。これは、作業移動が高速歩行を目指したものではなく、「手作業を遂行する

(a) Motion of robot

(b) Footholds in side stepping

Fig. 11 Side stepping when both hands are moving sideward

Fig. 12 Leaning panel against wall

のに最もよい両脚支持状態へ、一歩ずつ安定に踏みかえる」という考え方に立っているためである。

手による目的作業の遂行と踏みかえに必要な体重移動を同時に実現しようとする、手の移動方向と肩の移動方向が必ずしも一致しないため、踏みかえ中に腕が可動限界に近くなることがある。Fig. 11 の横移動は、両者が反対向きになる顕著な場合といえる。一方、Fig. 10 の前進移動では、腕の姿勢はあまり変わらない。この現象は、人間型ロボットが踏みかえのために体重移動しなければならない以上、避けられない。腕が可動限界に達した場合は、手作業を一時中断して踏みかえ、作業を再開するといった戦略をとる必要がある。これは、作業と移動を切り離して行うことになるので、本研究では扱っていない。

パネル立て掛け作業のシミュレーションでは、ロボットの自重に比べてパネルが軽いため立て掛けに成功した。しかし、本研究で提案した作業移動制御法は、ロボットが自重を使って押さなければならないほどの重量物を扱う状況は想定していない。我々は、作業移動制御法をベースとしてより大きな外力が手に作用する場合にも対処できる手法を提案し、現在、人間サイズの人間型ロボット HRP-2 [5] に実装して重量物押し作業実験を行っている。

6. お わ り に

本研究では、手作業を目的とした人間型ロボットの作業移動制御法を提案した。この方法では、両手で目的作業を遂行しながら、その動きに応じて両腕操作性・ロボット安定性を高めるように胴体・脚を制御する。胴体・脚制御は両脚支持状態での胴体姿勢制御と踏みかえ動作からなり、それらを自律的に切り替えることで、器用かつ安定な手作業を可能にする。両手が大きく運動すると連続踏みかえが起こり、手作業を主体とする移動が実現される。OpenHRP を用いて人間型ロボット HRP-1 の動作シミュレーションを行い、提案手法により作業移動が実現できることを確認した。また、HRP-1 によるパネル立て掛け作業のシミュレーションも行い、提案手法が実作業に応用可能であることを示した。作業移動は単なる歩行とは異なり、「手作業を行う」という視点に立った人間型ロボットの新しい応用の可能性を示唆するものといえよう。

本論文で提案した方法は作業移動の一形態であり、歩行しながらの作業や跪いた姿勢での作業など、人間型ロボットが作業を行う方法はいろいろ考えられる。様々な作業方法を実現するアルゴリズムを開発し、それらを人間型ロボット HRP-2 に実装して実験、検証することが今後の課題である。

謝 辞 本研究は、経済産業省産業科学技術研究開発制度「人間協調・共存型ロボットシステム研究開発」(平成 12~14 年度)の一環として行われた。

参 考 文 献

- [1] 平井, 仲山: “ロボットプラットフォームの製作および高機能ハンドの開発”, 日本ロボット学会誌, vol.19, no.1, pp.8-15, 2001.
- [2] T. Ishida, Y. Kuroki and J. Yamaguchi: “Mechanical System of a Small Biped Entertainment Robot,” Proc. IROS2003, pp.1129-1134, 2003.
- [3] Y. Ogura, et al.: “Development of a Human-like Walking Robot Having Two 7-DOF Legs and a 2-DOF Waist,” Proc. IEEE ICRA2004, pp.134-139, 2004.
- [4] J. Kim and J. Oh: “Walking Control of the Humanoid Platform KHR-1 based on Torque Feedback Control,” Proc. IEEE ICRA2004, pp.623-628, 2004.
- [5] K. Kaneko, et al.: “Humanoid Robot HRP-2,” Proc. IEEE ICRA2004, pp.1083-1090, 2004.
- [6] 金広 他: “ヒューマノイドロボット (HRP-1S) の全身運動制御システム”, 日本ロボット学会誌, vol.22, no.1, pp.20-27, 2004.
- [7] S. Kajita, et al.: “Resolved Momentum Control: Humanoid Motion Planning based on the Linear and Angular Momentum,” Proc. IROS2003, pp.1644-1650, 2003.
- [8] K. Nagasaka, et al.: “Integrated Motion Control for Walking, Jumping and Running on a Small Bipedal Entertainment Robot,” Proc. IEEE ICRA2004, pp.3189-3194, 2004.
- [9] K. Okada, M. Inaba and H. Inoue: “Walking Navigation System of Humanoid Robot using Stereo Vision based Floor Recognition and Path Planning with Multi-Layered Body Image,” Proc. IROS2003, pp.2155-2160, 2003.
- [10] K. Sabe, et al.: “Obstacle Avoidance and Path Planning for Humanoid Robots using Stereo Vision,” Proc. IEEE ICRA2004, pp.592-597, 2004.
- [11] F. Kanehiro, et al.: “Locomotion Planning of Humanoid Robots to Pass through Narrow Spaces,” Proc. IEEE ICRA2004, pp.604-609, 2004.
- [12] M. Fujita, et al.: “Autonomous Behavior Control Architecture of Entertainment Humanoid Robot SDR-4X,” Proc. IROS2003, pp.960-967, 2003.
- [13] Y. Kuroki, et al.: “Motion Creating System for a Small Biped Entertainment Robot,” Proc. IROS2003, pp.1394-1399, 2003.
- [14] S. Kagami, et al.: “Humanoid Arm Motion Planning using Stereo Vision and RRT Search,” Proc. IROS2003, pp.2167-2172, 2003.
- [15] K. Terada, Y. Ohmura and Y. Kuniyoshi: “Analysis and Control of Whole Body Dynamic Humanoid Motion -Towards Experiments on a Roll-and-Rise Motion,” Proc. IROS2003, pp.1382-1387, 2003.
- [16] K. Fujiwara, et al.: “Falling Motion Control of a Humanoid Robot Trained by Virtual Supplementary Tests,” Proc. IEEE ICRA2004, pp.1077-1082, 2004.
- [17] 金広 他: “ヒューマノイドの転倒回復機能の実現”, 日本ロボット学会誌, vol.22, no.1, pp.37-45, 2004.
- [18] 館 他: “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.
- [19] K. Yokoi, et al.: “A Tele-operated Humanoid Robot Drives a Backhoe in the Open Air,” Proc. IROS2003, pp.1117-1122, 2003.
- [20] N.E. Sian, et al.: “Whole Body Teleoperation of a Humanoid Robot Integrating Operator's Intention and Robot's Autonomy -An Experimental Verification,” Proc. IROS2003, pp.1651-1656, 2003.
- [21] 比留川 他: “HRP 仮想プラットフォームにおける幾何計算サーバ”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロクス講演会'99 講演論文集, 2p2-78-094, 1999.
- [22] Y. Nakamura, et al.: “Dynamics Computation of Structure-Varying Kinematic Chains and Its Application to Human Figures,” IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol.16, no.2, pp.124-134, 2000.
- [23] 中村 他: “仮想ロボットプラットフォーム”, 日本ロボット学会誌, vol.19, no.1, pp.28-36, 2001.
- [24] K. Okada, et al.: “Integrated System Software for HRP2 Humanoid,” Proc. IEEE ICRA2004, pp.3207-3212, 2004.
- [25] 井上: “人間型ロボットが拓く未来社会と新産業の創成”, 日本ロボット学会誌, vol.22, no.1, pp.2-5, 2004.
- [26] 比留川: “人間型ロボットの近未来応用”, 日本ロボット学会誌, vol.22, no.1, pp.6-9, 2004.
- [27] K. Sakata, K. Inoue, T. Takubo, T. Arai and Y. Mae: “Pro-

- posal of Wheelchair Support System Using Humanoid Robots for Creating SSR Society," Proc. SSR2003, pp.53-58, 2003.
- [28] 井上, 比留川: "人間協調・共存型ロボットシステム研究開発プロジェクト", 日本ロボット学会誌, vol.19, no.1, pp.2-7, 2001.
- [29] 新エネルギー・産業技術総合開発機構: 人間協調・共存型ロボットシステム研究開発成果報告書, 2003.
- [30] Y. Hwang, A. Konno and M. Uchiyama: "Whole Body Cooperative Tasks and Static Stability Evaluations for a Humanoid Robot," Proc. IROS2003, pp.1901-1906, 2003.
- [31] 原田 他: "ヒューマノイドロボットの脚腕協調における ZMP 解析", 日本ロボット学会誌, vol.22, no.1, pp.28-36, 2004.
- [32] K. Harada, et al.: "Real-time Planning of Humanoid Robot's Gait for Force Controlled Manipulation," Proc. IEEE ICRA2004, pp.616-622, 2004.
- [33] 井上, 石井, 大川: "手先で作業をしながら移動する腕付 2 足歩行ロボットの制御", 第 16 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.1095-1096, 1998.
- [34] 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 内の運動の制御)", 日本ロボット学会誌, vol.18, no.1, pp.75-86, 2000.
- [35] 井上, 吉田, 新井, 前: "手先の遠隔操作によるヒューマノイドの作業移動", 第 5 回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp.333-338, 2000.
- [36] K. Inoue, H. Yoshida, T. Arai and Y. Mae: "Mobile Manipulation of Humanoids: Real-Time Control Based on Manipulability and Stability," Proc. IEEE ICRA2000, pp.2217-2222, 2000.
- [37] H. Yoshida, K. Inoue, T. Arai and Y. Mae: "Mobile Manipulation of Humanoid Robots: Analysis of Manipulability and Stability in Mobile Manipulation," Proc. IROS2000, pp.1924-1929, 2000.
- [38] 吉田, 井上, 新井, 前: "人間型ロボットの作業移動 (作業移動に要求される脚機能の分析)", 日本ロボット学会誌, vol.19, no.5, pp.660-666, 2001.

井上健司 (Kenji Inoue)

1963 年 10 月 10 日生。1988 年東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。同年東京大学工学部助手。大阪大学工学部助手, 同学部講師, 大阪大学大学院基礎工学研究科講師を経て, 2001 年同研究科助教授となり現在に至る。人間型ロボット, ハプティック・デバイス, レスキューロボット, 作業移動型ロボットなどの研究に従事。博士 (工学)。日本機械学会, 計測自動制御学会, 日本バーチャルリアリティ学会, 精密工学会の会員。(日本ロボット学会正会員)

坂田幸太郎 (Kotaro Sakata)

1980 年 1 月 5 日生。2003 年大阪大学基礎工学部システム科学科卒業。2005 年同大学大学院基礎工学研究科システム創成専攻博士前期課程修了。同年, 松下電器産業株式会社入社。現在, 同社本社 R&D 部門 AV コア技術開発センターに所属。在学中, 人間型ロボットの研究に従事。

前 泰志 (Yasushi Mae)

1971 年 3 月 11 日生。1993 年大阪大学工学部電子制御機械工学科卒業, 1998 年同大学大学院工学研究科電子制御機械工学専攻博士課程修了, 博士 (工学)。同年, 同大学大学院基礎工学研究科助手。2004 年福井大学工学部助教授。ロボットビジョン, 作業移動型ロボット, 環境の知能化などの研究に従事。情報処理学会, 日本バーチャルリアリティ学会の会員。(日本ロボット学会正会員)

西濱祐介 (Yusuke Nishihama)

1977 年 10 月 22 日生。2001 年大阪大学基礎工学部システム科学科卒業。2003 年同大学大学院基礎工学研究科システム創成専攻博士前期課程修了。同年, 日本電気株式会社入社。現在, 同社 MC ビジネスユニット NW ソフトウェア事業本部に所属。在学中, 人間型ロボットの研究に従事。

新井健生 (Tatsuo Arai)

1952 年 1 月 6 日生。1977 年東京大学大学院工学系修士課程修了。工業技術院機械技術研究所を経て, 現在大阪大学大学院基礎工学研究科教授。パラレルメカニズム, マイクロマニピュレーション, 作業移動型ロボット等の研究に従事。1986~1987 年 MIT 客員研究員。日本機械学会, 計測自動制御学会, IEEE 等の会員。(日本ロボット学会正会員)