学術・技術論文

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)

井上 健 司^{*1} 石井 晃 弘^{*2} 大川 善 邦^{*3}

Real-Time Control of Anthropomorphic Robot Which Moves While Working by Arms (Motion Control in Sagittal Plane)

Kenji Inoue^{*1}, Akihiro Ishii^{*2} and Yoshikuni Okawa^{*3}

A real-time control method of an anthropomorphic robot which moves with its legs while doing a given task by its arm is proposed. The robot has two legs and one arm because the motion in sagittal plane is discussed; the unknown external force acts on the arm tip. The arm controls its tip by impedance control so that the tip can always follow the desired position or external force prescribed by the given task. The legs change two control modes according to the current arm tip position and external force: 1) When the external force is small or the arm tip moves in narrow space, the robot keeps double support state and controls its shoulder in order to keep the robot stable against the force and to make the arm easy to do the task. 2) If the large force acts or the arm tip must be moved in wide range, the robot steps in order to prevent it from tumbling, thus recovering the robot's stability and the arm tip's manipulability shifted in new double support state. Furthermore, the robot can cope with the sudden change in the external force and the moving direction of the arm tip. The effectiveness and usefulness of the proposed method are ascertained by computer simulation and experiment.

Key Words: Anthropomorphic Robot, Biped Walking Robot, Integrated Locomotion and Manipulation, Real-Time Control, Zero Moment Point

1. は じ め に

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2足歩行ロボットは、人間が行動することを前提として作られた空間を移動したり、災害地等で多くの障害物を乗り越える必要がある場合には、理想的な移動機構といえる。そのため、2足歩行ロボットの実用化が期待されているが、2足歩行ロボットは多脚ロボットと違い本質的に不安定であるため、その制御則は複雑なものが必要となる。このような理由から、例えば上体の運動によりバランスを保ちながら歩行する方法[1]~[6]や、歩行は倒立振子が前方へ倒れ込む動作を繰り返すことで行われると考え、支持脚足首まわりの角運動量を制御する歩行[7]~[10]など、現在までに2足歩行ロボットの歩行の制御に関する多くの研究がなされている。

しかしながら、将来の2足歩行ロボットは単に歩行するだけでなく、上体に腕を有する人間型の構造を持ち、その手先で作

業を行うことが要求される。一般に、移動機構にマニピュレータを搭載した作業移動型ロボットは、移動しながらマニピュレータにより作業を行うことができるため広い作業領域を有しており、移動できることでロボットが冗長自由度を持つことになるので複雑な作業への適応性や動作の柔軟性といった面でも優れている。人間型ロボットも作業移動型ロボットの一つとして分類できるが、先に述べた2脚構造の持つ移動の特徴から、人間の存在する環境で、人間の手助けや人間と共同作業を行うロボットとして、その実現に対する期待は大きい。実際、近年になって、人間と同じ2腕2脚を有し、平地・不整地の歩行や階段昇降、台車押し作業などを行うことができる自立型ロボットが開発されたことで、人間型ロボットの実現可能性は飛躍的に増大したといえよう[11][12]。井上・稲葉ら[13]~[15]も、ラジコンのサーボを利用した遠隔操作の小型人間型ロボットを使って、歩行や起き上がり動作、荷物の運搬といった作業を実現している。

一般に、人間型ロボットが手先で何らかの作業を行う場合、手先の位置は作業が進むにつれて変化し、作業対象から手先に外力を受けることも考えられる。その際、ロボットは、手先に作用する外力が小さいときや手先の動かす範囲が狭いときは、両脚支持状態のまま手先で作業を行いながら、転倒しないか

原稿受付 1998年11月18日

^{*1}大阪大学大学院基礎工学研究科

^{*2}三菱電機(株)

^{*3}日本大学工学部

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

^{*2}Mitsubishi Electric Co., Ltd.

^{*3}College of Engineering, Nihon University

つ手先の操作性を高めるように脚部の姿勢を変化させなければならない。また、手先の位置が大きく変化したり、急激な外力の変化により転倒しそうになったときには、そのままの両脚支持状態を維持するのではなく、踏み換えを行うことにより転倒を回避するとともに、新しい両脚支持状態に移って安定性や手先の操作性をよくする必要がある。さらに、これからのロボットはあらかじめ決められた軌道上を動くのではなく、その場の状況に応じて行動しなければならないので、未来の手先の目標軌道や外力は未知であると考えなければならない。したがって、ロボットの動きをオフラインで計算しておくことはできず、手先に作用する外力と手先の位置からロボットの動きを実時間で求めることが要求される。

そこで本研究では、手先で目的作業を遂行しながら、それに合わせて脚部を自律的に移動させる人間型ロボットの実時間制御法を提案する。手先に未知外力が作用する場合を考え、腕部は、手先が常に目的作業によって決まる目標位置や目標外力に追従するように制御する。一方、脚部は、ロボットが転倒しないと同時に、手先が作業を遂行できるように手先の操作性を高く保つことを制御目標とする。そこで、現在の手先に作用する外力と手先の位置に対してロボットの安定性と手先の操作性が最もよくなるように脚部を制御する。すなわち、1) 外力が小さいときや手先の動かす範囲が狭いときは、両脚支持状態のまま脚部を最適姿勢に動かす。2) 手先の位置が大きく変化したり大きな外力が作用したときには、踏み換えを行って新しい両脚支持状態に移り、ロボットの安定性や手先の操作性を回復する。

以下、第2章で本研究において扱う人間型ロボットをモデル化し、第3章で提案する制御アルゴリズムを説明する。第4章、第5章では、提案する手法の有効性を検証するために行ったシミュレーションと実験の結果を示す。ここでは、製作した小型の実験用ロボットに関するシミュレーションと実験の結果について述べるとともに、人間用に作られた環境への適用性が高いことが人間型ロボットの大きな利点であることから、人間大のロボット（身長1.6[m]、総重量130[kg]）に対するシミュレーション結果についても考察する。

2. 人間型ロボットのモデル

はじめに、本研究ではロボットの sagittal plane（進行方向を含む床に垂直な平面）のみの運動を考え、lateral plane（進行方向に垂直な平面）の運動は考慮しないものとする。また、足底と地面の間には十分な摩擦が働くものとし、足底が地面に対して滑らないものとする。

本研究で扱う人間型ロボットのモデルを Fig. 1 に示す。図のように、ロボットは2本の脚と胴体（以後、脚部と呼ぶ）および1本の腕を有する。2本の脚はそれぞれ腰・膝・足首の3関節を、腕は肩・肘・手首の3関節を持ち、これらはすべて駆動関節とする。各関節およびリンクには図に示す記号を付け、関節 J_i の関節変数を $q_i (i = 1, \dots, 9)$ とする。

地面に固定された静止座標系は水平方向を x 軸、鉛直方向を y 軸に取り、この座標系で表した手先の位置・姿勢を $\mathbf{r}_e = [x_e, y_e, \theta_e]^T$ 、肩の位置・姿勢を $\mathbf{r}_s = [x_s, y_s, \theta_s]^T$ 、単脚支持状態の遊脚足先の位置・姿勢を $\mathbf{r}_w = [x_w, y_w, \theta_w]^T$ 、手先

Fig. 1 Anthropomorphic robot and its variables

に作用する外力・モーメントを $\mathbf{f} = [f_x, f_y, n]^T$ とする。なお、以下では位置・姿勢をまとめて“位置”，力・モーメントをまとめて“力”と表現することにする。

支持脚足首の位置を既知とすると、Fig. 1 から明らかなように、2本の脚の関節変数 $[q_1, q_2, q_3]^T$ と $[q_4, q_5, q_6]^T$ は、両脚支持状態では $\mathbf{r}_s$ が、単脚支持状態では $\mathbf{r}_s$ と $\mathbf{r}_w$ が決まれば一意に決まる。また、 $\mathbf{r}_s$ と $\mathbf{r}_e$ が決まれば腕の関節変数 $[q_7, q_8, q_9]^T$ は一意に決まる。そこで、以下の章では、手先の位置 $\mathbf{r}_e$ 、肩の位置 $\mathbf{r}_s$ 、および単脚支持状態の遊脚足先の位置 $\mathbf{r}_w$ をどのように動かすかについて述べる。

3. 制御アルゴリズム

3.1 制御アルゴリズムの概要

本研究では両脚支持状態を基本とし、現在の両脚支持状態から1歩動かし新しい両脚支持状態になるまでの一連の動作を「踏み換え」と呼ぶことにする。

制御アルゴリズムの概要を以下に示す。

- (1) 腕部の制御：腕部は、常に手先で目的作業を遂行するように制御する。すなわち、手先の位置 $\mathbf{r}_e$ または手先に作用する外力 $\mathbf{f}$ を目的作業によって決まる目標値に追従させるように制御する。
- (2) 脚部の制御：脚部の制御の基本は、手先の位置 $\mathbf{r}_e$ や手先に作用する外力 $\mathbf{f}$ に応じて以下の制御則（制御モード）を切り替えることである（Fig. 2）。
 - (a) 手先に作用する外力が小さいときや手先の動かす範囲が狭いときは、両脚支持状態を維持しながら、転倒しないでかつ手先の操作性を高めるように脚部の姿勢を変化させる。
 - (b) 手先の位置が大きく変化したり、急激な外力の変化により転倒しそうになったときには、踏み換えを行うことにより転倒を回避するとともに、新しい両脚支持状態に移って安定性や手先の操作性をよくする。

踏み換えは静歩行を基本とし、一部分動歩行を用いる。し

Fig. 2 Basic idea of proposed control method

たがって、脚部の制御則は以下ようになる。

- (a) 両脚支持状態では、まず、ロボットの安定性すなわち転倒のしにくさと手先の操作性、および脚部の理想姿勢からのずれを評価する評価関数 Q を設定する。そして、現在の手先の位置 $\mathbf{r}_e$ と手先に作用する外力 $\mathbf{f}$ に対して Q を最適にする肩の最適位置 $\mathbf{r}_{sd}$ を求め、肩の位置 $\mathbf{r}_s$ が $\mathbf{r}_{sd}$ に追従するように脚部を制御する。以後、肩が最適位置 $\mathbf{r}_{sd}$ となったときの脚部全体の姿勢を脚部の最適姿勢と呼ぶ。上記のように、脚部の最適姿勢は、現在の $\mathbf{r}_e$ と $\mathbf{f}$ に応じて変化する。
- (b) 踏み換えの判断は、評価関数 Q を用いて行う。すなわち、現在の両脚支持状態を維持し続けたと仮定したときの脚部の最適姿勢での評価値 Q と、踏み換えたと仮定したときの踏み換え後の両脚支持状態における最適姿勢での評価値 Q とを比較し、踏み換えを行った方が Q がよくなる場合には踏み換える。
- (c) 踏み換えは、1) ロボットの ZMP が支持脚となる脚の足底内に入るように肩の位置 $\mathbf{r}_s$ を移動させ、2) 支持脚足首角を動かして静的バランスを保ちながら遊脚足先の位置 $\mathbf{r}_w$ をあらかじめ定めた軌道に沿って動かし、3) 脚部全体が倒れ込むようにして遊脚を着地させることで達成される。
- (d) 踏み換え中に手先の速度 $\dot{\mathbf{r}}_e$ が変化して、踏み換え後すぐに元の両脚支持状態に戻らなければならないことが予測される場合には、踏み換え方向を変更して元の両脚支持状態に戻る。
- (e) 手先に急激な外力 $\mathbf{f}$ が作用した場合には、踏み換えることにより転倒を回避する。

次節以降では、各制御則について順に説明する。

3.2 手先のインピーダンス制御

本研究では手先に外力 $\mathbf{f}$ が作用する場合を想定し、手先に対して目的作業によって決まる目標位置 $\mathbf{r}_{ed} = [x_{ed}, y_{ed}, \theta_{ed}]^T$ と目標外力 $\mathbf{f}_d = [f_{xd}, f_{yd}, n_d]^T$ が与えられるとする。この目標を達成するため、手先の位置 $\mathbf{r}_e$ は、常に次式の理想インピーダンスに基づいて制御する (Fig. 3)。

$$M_e \ddot{\mathbf{r}}_e + D_e (\dot{\mathbf{r}}_e - \dot{\mathbf{r}}_{ed}) + K_e (\mathbf{r}_e - \mathbf{r}_{ed}) = \mathbf{f} - \mathbf{f}_d \quad (1)$$

Fig. 3 Desired impedance of robot in double support state (x direction)

また、目標外力 $\mathbf{f}_d$ のみが与えられる場合には、手先の理想インピーダンスを次式に設定する。

$$M_e \ddot{\mathbf{r}}_e + D_e \dot{\mathbf{r}}_e = \mathbf{f} - \mathbf{f}_d \quad (2)$$

ここで、 $M_e \in R^{3 \times 3}$ 、 $D_e \in R^{3 \times 3}$ 、 $K_e \in R^{3 \times 3}$ は、それぞれ手先の理想質量マトリックス、理想粘性係数マトリックス、理想剛性マトリックスである。

3.3 両脚支持状態における脚部の制御則

3.3.1 肩のインピーダンス制御

両脚支持状態における脚部は、肩の位置 $\mathbf{r}_s$ がその最適値 $\mathbf{r}_{sd} = [x_{sd}, y_{sd}, \theta_{sd}]^T$ に対して Fig. 3 に示す理想インピーダンスを持つように制御する。

$$M_s \ddot{\mathbf{r}}_s + D_s (\dot{\mathbf{r}}_s - \dot{\mathbf{r}}_{sd}) + K_s (\mathbf{r}_s - \mathbf{r}_{sd}) = 0 \quad (3)$$

ここで、 $M_s \in R^{3 \times 3}$ 、 $D_s \in R^{3 \times 3}$ 、 $K_s \in R^{3 \times 3}$ は、それぞれ肩の理想質量マトリックス、理想粘性係数マトリックス、理想剛性マトリックスである。肩の最適位置 $\mathbf{r}_{sd}$ については次項で述べる。

ここで、肩および手先の理想インピーダンスと実際のロボットの性能との関係について触れておく。まず、脚部をできるだけ速くその最適姿勢にもっていくため、肩の理想インピーダンスは、実際の脚部の性能の範囲内でできるだけ速い応答性が得られるように設定する。すると、一般に腕部の応答性は脚部の応答性に比べて速いので、上で設定した肩の理想インピーダンスの応答性を超える目標値の高周波成分に対する追従は腕部が担当することになる。したがって、手先の理想インピーダンスは実際の腕部の性能の範囲内で設定する。

3.3.2 肩の最適位置

両脚支持状態における肩の最適位置 $\mathbf{r}_{sd}$ は、以下の評価値の重み付き線形和をとった評価関数 Q を最小にするように決定する。

【ロボットの安定性の評価値】

人間型ロボットの重要な能力の一つは安定に立つ、すなわち転倒しないことである。そこで、ZMP 規範を用いてロボットの安定性を評価する。ZMP とは、ロボットに作用する重力、外力、慣性力によるモーメントの総和が 0 とな

る床面上の点のことで、この ZMP が足底接地点の形成する支持多角形の内側に存在すれば安定であるとするのが ZMP 規範である。本研究では、慣性力を無視した ZMP を静的 ZMP と呼ぶことにする。静的 ZMP は床面上への重心投影点と似ているが、手先に作用する外力を考慮している点異なる。

さて、静的 ZMP x_z は手先に作用する外力 $\mathbf{f}$ とロボット全体の姿勢の関数であるが、2 章で述べたように、両脚支持状態におけるロボットの姿勢は手先の位置 $\mathbf{r}_e$ と肩の位置 $\mathbf{r}_s$ の関数となっている。よって、 x_z は $\mathbf{r}_s, \mathbf{r}_e, \mathbf{f}$ の関数となる。次に、両脚支持状態における安定領域は後足カかと前足爪先の間となり、本研究では、その幅 w_z を常に一定とする。さらに、静的 ZMP x_z がこの安定領域の中央にあるときロボットは最も安定といえるので、両脚支持状態での静的 ZMP の目標値 x_{zd} を安定領域中央に設定する。このとき、両脚支持状態におけるロボットの安定性の評価値 Q_z は、静的 ZMP x_z とその目標値 x_{zd} の偏差を用いて次のように定義する。

$$Q_z(\mathbf{r}_s, \mathbf{r}_e, \mathbf{f}) \equiv \frac{(x_z - x_{zd})^2}{w_z^2} \rightarrow \min \quad (4)$$

[手先の操作性の評価値]

人間型ロボットが手先で目的作業を遂行できるためには、手先の操作性を高め、かつ腕が特異姿勢になるのを防がなければならない。そこで、腕の可操作度 [16] ω_a を用いた手先の操作性の評価値 Q_a を次のように定義する。

$$Q_a(\mathbf{r}_s, \mathbf{r}_e) \equiv \frac{\omega_{am}^2 - \omega_a^2}{\omega_{am}^2} \rightarrow \min \quad (5)$$

ここで、 ω_{am} は腕の可操作度の最大値である。 ω_a は腕の姿勢の関数であるが、腕の姿勢は手先の位置 $\mathbf{r}_e$ と肩の位置 $\mathbf{r}_s$ の関数なので、 Q_a は $\mathbf{r}_s$ と $\mathbf{r}_e$ の関数となっている。

[脚部の姿勢の評価値]

2 本の脚も特異姿勢になってはならないので、それぞれの可操作度 ω_{lf} , ω_{lb} を用いた評価値 Q_{l1} を腕と同様に定義する。

$$Q_{l1}(\mathbf{r}_s) \equiv \frac{\omega_{lfm}^2 - \omega_{lf}^2}{\omega_{lfm}^2} + \frac{\omega_{lbm}^2 - \omega_{lb}^2}{\omega_{lbm}^2} \rightarrow \min \quad (6)$$

ここで、 ω_{lfm} , ω_{lbm} は 2 本の脚の可操作度の最大値である。両脚支持状態における 2 本の脚の姿勢は肩の位置 $\mathbf{r}_s$ の関数なので、 Q_{l1} は $\mathbf{r}_s$ の関数となる。さらに、胴体が極端に上下したり傾いたりするのを防ぐために、肩の高さ y_s とその理想値 y_{sr} の偏差、および肩の傾き θ_s とその理想値 θ_{sr} の偏差を評価する二つの評価値 Q_{l2} , Q_{l3} を、次のように定義する。

$$Q_{l2}(\mathbf{r}_s) \equiv \frac{(y_s - y_{sr})^2}{y_{sr}^2} \rightarrow \min \quad (7)$$

$$Q_{l3}(\mathbf{r}_s) \equiv \frac{(\theta_s - \theta_{sr})^2}{\theta_{sr}^2} \rightarrow \min \quad (8)$$

全体の評価関数 Q は、これらの評価値の重み付き線形和で定義する。

$$Q(\mathbf{r}_s, \mathbf{r}_e, \mathbf{f}) \equiv C_z Q_z + C_a Q_a + C_{l1} Q_{l1} + C_{l2} Q_{l2} + C_{l3} Q_{l3} \rightarrow \min \quad (9)$$

ただし、 $C_z, C_a, C_{l1}, C_{l2}, C_{l3} (> 0)$ は重みである。

上式に示すように、評価関数 Q は肩の位置 $\mathbf{r}_s$ 、手先の位置 $\mathbf{r}_e$ 、手先に作用する外力 $\mathbf{f}$ の関数となる。このうち、 $\mathbf{r}_e$ と $\mathbf{f}$ は目的作業によって規定されるので、ロボットが勝手に動かせる変数は $\mathbf{r}_s$ だけである。そこで、現在の手先の位置 $\mathbf{r}_e$ と手先に作用する外力 $\mathbf{f}$ に対して評価関数 Q を最小にする肩の最適位置 $\mathbf{r}_{sd}$ を求め、式 (3) により肩の実際の位置 $\mathbf{r}_s$ をこの最適値 $\mathbf{r}_{sd}$ に制御することで、脚部を最適な状態にすることができる。

なお、安定性の評価値 Q_z に慣性力を無視した静的 ZMP を用いたのは、脚部を式 (3) の理想インピーダンスに基づいてゆっくり動かすことにより、慣性力の影響を少なくしているためである。その結果、静的 ZMP と ZMP はほぼ等しくなるので、静的 ZMP を安定領域内に保つように制御することで ZMP も安定領域内に保つことが可能となる。

3.3.3 肩の最適位置の計算法

評価関数 Q は非線形なので、 Q を最小にする肩の最適位置 $\mathbf{r}_{sd}$ は数値計算で求めざるを得ない。そこで、最適化法に最急降下法を用いることにする。このとき問題となるのは、実時間制御を可能にするためには、最適化計算に要する計算量をできるだけ減らさなければならないことである。

ところで、脚部は式 (3) の理想インピーダンスによって制御するので、実際の肩の位置 $\mathbf{r}_s$ はその目標値である $\mathbf{r}_{sd}$ の高周波成分には追従できない。よって、 $\mathbf{r}_{sd}$ の低周波成分が求められれば、式 (3) の制御に用いるには十分である。そこで、手先の位置 $\mathbf{r}_e$ と手先に作用する外力 $\mathbf{f}$ をローパスフィルタに通してそれらの低周波成分 $\hat{\mathbf{r}}_e = [\hat{x}_e, \hat{y}_e, \hat{\theta}_e]^T$, $\hat{\mathbf{f}} = [\hat{f}_x, \hat{f}_y, \hat{n}]^T$ を取り出し、これらに対して評価関数 Q を最小にする肩の最適位置 $\mathbf{r}_{sd}$ を求めることにする。

$$Q(\mathbf{r}_{sd}, \hat{\mathbf{r}}_e, \hat{\mathbf{f}}) = \min_{\mathbf{r}_s} Q(\mathbf{r}_s, \hat{\mathbf{r}}_e, \hat{\mathbf{f}}) \quad (10)$$

こうすることで、 $\mathbf{r}_{sd}$ の低周波成分が得られるだけでなく、1 サンプル周期前の最適解を最急降下法の初期値とすることにより、最適化計算の収束を速めることができる。

本研究では、外力に対しては一次のローパスフィルタを、手先の位置に対しては二次のローパスフィルタを用いた。

3.4 踏み換えの判断

sagittal plane のみの運動を考える場合、踏み換えには、両脚支持状態の後脚を遊脚にして前方に動かす前方踏み換えと、前脚を後方に動かす後方踏み換えとがある。後方踏み換えは前方踏み換えにおける遊脚の移動方向を逆にするだけなので、本節および次節では、前方踏み換えの場合のみを説明する。

踏み換えをするかしないかは、評価関数 Q を用いて判断する。まず、Fig. 4 に示すように、現在の両脚支持状態で脚部が最適姿勢となったときの評価値 Q を Q_{m1} とし、踏み換えた

Fig. 4 Minimum evaluation before and after step

Fig. 5 The relationship between arm tip position x_e and minimum evaluation Q_{m1} and Q_{m2}

仮定したときの踏み換え後の両脚支持状態で脚部が最適姿勢となったときの値を Q_{m2} とする。式 (10) から、 Q_{m1} は手先の位置と手先に作用する外力の低周波成分 $\hat{r}_e, \hat{f}$ の関数となる。

$$Q_{m1}(\hat{r}_e, \hat{f}) = \min_{\mathbf{r}_s} Q(\mathbf{r}_s, \hat{r}_e, \hat{f}) \quad (11)$$

また、 Q_{m2} は Q_{m1} を歩幅 w_s の分だけずらしたものとなる。

$$Q_{m2}(\hat{r}_e, \hat{f}) = Q_{m1}(\hat{r}_e - w_s, \hat{f}) \quad (12)$$

ここで、前方へ踏み換えるときは $\mathbf{w}_s = [w_s, 0, 0]^T$ である。

例えば、 x 方向の手先の位置 $\hat{x}_e$ のみを変化させたときの評価値 Q_{m1} および Q_{m2} の変化を Fig. 5 に示す。ここで、手先が前方に移動しているとすると、図から、手先が Q_{m1} と Q_{m2} の交点 a より手前にあるときは $Q_{m1} < Q_{m2}$ なので現在の両脚支持状態のままがよく、手先が a 点を通りすぎたら $Q_{m1} > Q_{m2}$ となるので前方へ踏み換えて新しい両脚支持状態に移ったほうがよいことが分かる。実際には、 a 点で瞬時に踏み換えることはできず、踏み換えには踏み換え時間 t_s を要する。そこで、 a 点よりも $t_s/2$ 時間分だけ手前の b 点に手先が到達したときに踏み換えを開始すればよい。次節で述べるように、踏み換え中の遊脚足先はおおむねあらかじめ定めた楕円軌道に沿って動くことになるので、 t_s のおよその時間はあらかじめ計算できる。

以下に、踏み換えの判断のアルゴリズムを示す。

(1) $t_s/2$ 時間後の手先の位置および手先に作用する外力の予測

Fig. 6 3 modes in step motion

値 $\hat{r}_e, \hat{f}$ を、現在の手先の位置、手先の速度、手先に作用する外力の低周波成分 $\hat{r}_e, \dot{\hat{r}}_e, \hat{f}$ から次式で計算する。

$$\tilde{r}_e = \hat{r}_e + \dot{\hat{r}}_e \frac{t_s}{2} \quad (13)$$

$$\tilde{f} = \hat{f} \quad (14)$$

(2) $\tilde{r}_e, \tilde{f}$ に対して評価値 $Q_{m1}(\tilde{r}_e, \tilde{f})$ と $Q_{m2}(\tilde{r}_e, \tilde{f})$ を計算する。

(3) $Q_{m1} \leq Q_{m2}$ ならば踏み換えをせず、 $Q_{m1} > Q_{m2}$ ならば踏み換えを開始する。

3.5 踏み換えにおける脚部の制御則

3.5.1 踏み換えにおけるモードの切り替え

前節から分かるように、本研究では両脚支持状態を基本とし、現在の両脚支持状態から1歩動かしによりよい両脚支持状態になることが、踏み換えの目的となる。そこで、踏み換え中は単脚支持状態をいつまでも維持しようとはせず、一度脚を上げたら遊脚足先をあらかじめ定めた軌道に沿って動かし、できるだけ早く両脚支持状態に戻ることを目指す。

以上のような観点から、本研究では以下の三つのモードを行くことで、踏み換え動作を実現することにする (Fig. 6)。

〔単脚支持への移行モード〕

遊脚となる方の脚の足底が床から受ける反力を0とするため、ZMPを支持脚となる脚の足底内に移動させるモードである。本研究では、足底で地面を蹴る動作は行わない。

〔単脚支持静的モード〕

支持脚足首角を動かして静的バランスを保ちながら、遊脚を踏み換え方向に移動させるモードである。遊脚足先は、あらかじめ定めた軌道に沿って動かす。

〔単脚支持動的モード〕

脚部全体が倒れ込むようにして遊脚を着地させるモードである。単脚支持静的モードでは、静的バランスを保つため、遊脚が踏み換え方向に移動していくと肩はそれとは逆方向に移動する。したがって、このモードにならずに着地すると不自然な踏み換えとなる。

以下にそれぞれのモードの制御則を示す。

3.5.2 単脚支持への移行モードにおける制御則

単脚支持状態となるために、ZMPを支持脚足底内に移動させるモードである。

Fig. 7 Parameters in single support state

両脚支持状態における脚部の制御則でロボットの安定性の評価値 Q_z に用いた静的 ZMP の目標値 x_{zd} を、両脚支持状態の安定領域中央からあらかじめ定めた速さ $\dot{x}_{zd}(>0)$ で支持脚足首に向かって移動させる。また、それ以外の部分は両脚支持状態と同じ制御を行う。その結果、肩が踏み換え方向に移動して静的 ZMP x_z が支持脚に向かって動く。ここでも両脚支持状態と同様に慣性力の影響を少なくしているため、ZMP は静的 ZMP とほぼ一致している。

後で述べるように、単脚支持静的モードにおける静的 ZMP の目標値 x_{zd} は支持脚足底内に設定してある。したがって、静的 ZMP x_z がこの値になったら遊脚を持ち上げ、単脚支持静的モードに移る。

3.5.3 単脚支持静的モードにおける制御則

本研究では、単脚支持状態を両脚支持状態間の移行期と考えているので、その時間は短く、簡単な制御が望ましい。そこで、単脚支持状態では支持脚の膝・腰関節は動かさないものとし、遊脚足先の位置は Fig. 7 のようにあらかじめ定めた楕円軌道上を動かすものとする。したがって、歩幅 w_s は常に一定となる。また、遊脚足先の姿勢は常に床面と平行に保つことにする。よって、決定すべき変数は支持脚足首角 θ_a と遊脚足先の軌道上の位置を表すパラメータ θ_b の二つとなり、肩の位置 $\mathbf{r}_s$ と遊脚足先の位置 $\mathbf{r}_w$ はこれらの関数として与えられる。

$$\mathbf{r}_s = \mathbf{r}_s(\theta_a) \quad (15)$$

$$\mathbf{r}_w = \mathbf{r}_w(\theta_b) \quad (16)$$

以下では、これら二つの変数 θ_a , θ_b をどのように決めるかを説明する。

まず、単脚支持静的モードでは、あらかじめ定めた目標速さ $\dot{\theta}_{bd}(>0)$ で遊脚足先を楕円軌道に沿って動かす。すなわち、単脚支持開始時点を時刻 $t=0$ にとると、前方踏み換えでは

$$\theta_b = \pi - \dot{\theta}_{bd}t \quad (17)$$

また、支持脚足首角 θ_a は、静的 ZMP x_z が支持脚足底内に設定した目標値 x_{zd} となるように制御する。単脚支持状態の場合、 x_z は、肩の位置 $\mathbf{r}_s$ 、遊脚足先の位置 $\mathbf{r}_w$ 、手先の位置 $\mathbf{r}_e$ 、手先に作用する外力 $\mathbf{f}$ の関数だが、式 (15)(16) の関係があるので、 x_z は θ_a , θ_b , $\mathbf{r}_e$, $\mathbf{f}$ の関数となっている。

$$x_z = x_z(\theta_a, \theta_b, \mathbf{r}_e, \mathbf{f}) \quad (18)$$

このうち、 θ_b は式 (17) によって決まり、 $\mathbf{r}_e$, $\mathbf{f}$ にはその低周波成分 $\hat{\mathbf{r}}_e$, $\hat{\mathbf{f}}$ を用いることにすると、ロボットが勝手に動かせる変数は θ_a だけである。そこで、 $x_z = x_{zd}$ とする支持脚足首角の目標値 θ_{ad} を求め、支持脚足首角 θ_a が θ_{ad} に対して以下の理想インピーダンスを持つように制御する。

$$m_a \ddot{\theta}_a + d_a \dot{\theta}_a + k_a(\theta_a - \theta_{ad}) = 0 \quad (19)$$

ただし、 m_a , d_a , k_a は、それぞれ支持脚足首まわりの理想質量、理想粘性係数、理想剛性である。単脚支持静的モードでもロボットは準静的に動作するので、ZMP は静的 ZMP とほぼ一致し、ロボットを安定な状態に制御することができる。

単脚支持静的モードから単脚支持動的モードへの切り替えの判断は、次のように行う。もしこの切り替えが早すぎれば、動的モードにおいて遊脚足先を目標速さ $\dot{\theta}_{bd}$ よりも速く動かさなければならなくなる。そこで、静的モードの現在の状態から動的モードに切り替えたときと仮定し、次項で述べる制御則により動的モードでの遊脚足先の推定移動速度 $\dot{\theta}_{be}$ を計算する。そして、

$$\begin{aligned} |\dot{\theta}_{be}| < \dot{\theta}_{bd} &\implies \text{モードを切り替える} \\ |\dot{\theta}_{be}| > \dot{\theta}_{bd} &\implies \text{モードを切り替えない} \end{aligned}$$

3.5.4 単脚支持動的モードにおける制御則

単脚支持静的モードでは、静的 ZMP を支持脚足底内に保つように脚部を制御するため、遊脚が踏み換え方向に移動していくと肩はそれとは逆方向に移動することになり、不自然な踏み換えとなる。そこで、単脚支持状態の途中から単脚支持動的モードに切り替え、脚部全体を踏み換え方向に倒れ込ませながら遊脚を着地させることにする。

今まで述べてきた両脚支持状態(モード)、単脚支持への移行モード、単脚支持静的モードでは、脚部を理想インピーダンスに基づいてゆっくり動かして慣性力の影響を少なくすることにより、静的 ZMP を用いた安定性の評価を可能にしてきた。ところが、単脚支持動的モードでは、脚部全体がある加速度で倒れ込むので、慣性力の影響を無視することはできない。そこで、慣性力も考慮した ZMP x_{z2} を支持脚足底内に設定した目標値 x_{zd} に保つことを目指す。

まず、単脚支持動的モードの時間は短いので、Fig. 8 のようにロボット全体を一つの剛体とみなし、この剛体の質量を M_c 、目標 ZMP x_{zd} まわりの慣性モーメントを I_c 、 x_{zd} から重心までの距離を l_c 、 x_{zd} から重心を見た仰角を θ_c とする。ZMP x_{z2} が x_{zd} に一致するためには、ロボットに作用する重力、外力、慣性力による x_{zd} まわりのモーメントの総和が 0 になればよい。よって、重力と慣性力を上の剛体を用いて近似すれば、 $x_{z2} = x_{zd}$ となるための $\ddot{\theta}_c$ が次式で与えられる。

$$\ddot{\theta}_c = \frac{-M_c g l_c \cos \theta_c - y_e f_x + (x_e - x_{zd}) f_y}{I_c} \quad (20)$$

ここで、 g は重力加速度を表す。 x_{zd} は支持脚足底内にあるので、一般に l_c に比べて小さい。したがって、支持脚足首の角加速度 $\ddot{\theta}_a \approx \ddot{\theta}_c$ とみなせるので、 θ_a は次式に従って動かすことにする。

$$\ddot{\theta}_a = \ddot{\theta}_c = \frac{-M_c g l_c \cos \theta_c - y_e f_x + (x_e - x_{zd}) f_y}{I_c} \quad (21)$$

測された着地の瞬間での踏み換えの判断を行った結果、このまま着地しても、着地後すぐに元の方向へ踏み換えなければならないことが予測された場合。

また、Fig. 9 中の細い実線は、踏み換え方向を変更する場合のモードの切り替えを示しており、次の2種類がある。

- (9), (12) は、単脚支持への移行モードにおいて踏み換える必要がなくなり、元の両脚支持状態に戻るときのモードの切り替えである。この場合、移行モードの制御則で踏み換え方向に移動させていた目標 ZMP x_{zd} を、両脚支持状態の安定領域中央方向に移動させればよい。
- (10), (11) は、単脚支持静的モードにおいて踏み換え方向を変更するときのモードの切り替えである。この場合、静的モードの制御則における遊脚足先の目標移動速度 $\dot{\theta}_{bd}$ の符号を反対にすればよい。

なお、単脚支持動的モードでは、脚部全体が踏み換え方向に倒れ込んでいくため、踏み換え方向を変更するのは難しい。そこで、いったん着地した後、あらためて元の方向に踏み換えることにする。

3.8 急激な外力が作用したとき

手先に作用する外力が急激に変化した場合、ZMP が安定領域外となり、足底が浮き上がって転倒することが考えられる。この転倒を回避するには、外力の変化を慣性力により打ち消して ZMP を安定領域内に保つため、動的に倒れ込みながら踏み換えを行う単脚支持動的モードに切り替えなければならない。このモードの切り替えは、次の2種類に大別できる。

- Fig. 9 中の太い点線は、両脚支持モード、単脚支持への移行モード、単脚支持静的モードにおいて、急激な外力が作用したことにより静的 ZMP が安定領域外となったとき、静的 ZMP が外れた方向、すなわち外力が作用する方向に倒れ込む単脚支持動的モードに切り替えることで転倒を回避する場合である。
- 細い点線は、単脚支持動的モードにおいて踏み換え方向と逆向きに外力が作用したときの切り替えを表す。この場合、脚部を式 (21) に従って制御した結果、脚部が踏み換え方向と逆向きに倒れ込むようになって、踏み換え方向が切り替わる。

4. シミュレーション

4.1 パラメータの設定

提案したアルゴリズムの有効性を検証するため、シミュレーションを行った。

シミュレーションに用いたロボットの主なパラメータの値を Table 1 に示す。これらは、次章で述べる実験装置と同じ値を用いている。ただし、実験装置には手首関節 (Fig. 1 の J_9) がついていないので、手先の姿勢 θ_e と手先に作用するモーメント n は考えないことにする。

手先には、手先の目標位置入力 $\mathbf{r}_{ed}$ から次式によって決まる外力 $\mathbf{f}$ が作用するとし、手先の理想インピーダンスには式 (2) を用いた。

$$\mathbf{f} - \mathbf{f}_d = K(\mathbf{r}_{ed} - \mathbf{r}_e) \quad (25)$$

Table 1 Parameters of robot

Link No.	length [m]	weight [kg]
0	0.214	1.30
1 & 4	0.180	0.90
2 & 5	0.170	0.65
3 & 6	0.040	0.00
7	0.130	0.00
8	0.185	0.00

Table 2 Desired impedance

	mass [kg]	viscous frictional [Ns/m] coefficient	stiffness [N/m]
arm tip	$m_e = 0.2$	$d_e = 5.0$	$k = 50.0$
shoulder	$m_s = 3.0$	$d_s = 20.0$	$k_s = 50.0$
ankle	$m_a = 3.0$	$d_a = 20.0$	$k_a = 250.0$

Table 3 Parameters of evaluation Q

weight	$C_z = 196$ $C_{l1} = 1$ $C_{l3} = 135$	$C_a = 100$ $C_{l2} = 15.7$
length of stable region	$w_z = 0.14$ [m]	
desired height of shoulder	$y_{sr} = 0.45$ [m]	
desired angle of shoulder	$\theta_{sr} = \pi/2$ [rad]	

Table 4 Parameters of step motion

step length	$w_s = 0.1$	[m]
ideal step time	$t_s = 4.0$	[s]
desired speed of swing leg	$\dot{\theta}_{bd} = \pi/2.0$	[rad/s]

ここで、 $K \in R^{2 \times 2}$ は環境の剛性マトリックスであり、手先の目標外力 $\mathbf{f}_d = 0$ とする。

式 (2) の手先の理想インピーダンス M_e , D_e , 式 (3) の肩の理想インピーダンス M_s , D_s , K_s および環境の剛性マトリックス K はすべて対角行列で、各行列の対角成分はすべて等しいとする。シミュレーションおよび実験に用いた各行列の対角成分、式 (19) の支持脚足首回りの理想インピーダンス m_a , d_a , k_a を Table 2 に示す。ここで、 m_e は M_e の対角成分を表しており、他の記号の意味も同様である。また、手先の位置および手先に作用する外力にかかるローパスフィルタのカットオフ角周波数は 2.24 [rad/s] とした。

最後に、評価関数 Q に用いたパラメータおよび踏み換えにおける主なパラメータを、それぞれ Table 3, Table 4 に示す。

4.2 両脚支持状態のシミュレーション

両脚支持状態において、手先の目標位置入力 $\mathbf{r}_{ed}$ に角周波数 $\omega_1 = 0.628$ [rad/s] の低周波正弦入力および角周波数 $\omega_2 = 12.6$ [rad/s] の高周波正弦入力を与えた場合のシミュレーションを行った。入力の振幅は、どちらの場合も 0.0707 [m] とした。ロボットの姿勢の変化を Fig. 10 に、ZMP の変化を Fig. 11 に示す。Fig. 11 で、縦軸の範囲はロボットの歩幅 w_s に相当し、目標 ZMP x_{zd} はその中央の 0.05 [m] である。

図から分かるように、低周波入力では腕部と脚部の両方が応答しているのに対し、高周波入力では腕部のみが応答している。このため、低周波入力の場合には脚部がロボットを安定に保つ

Fig. 10 Response of robot for sinusoidal input in double support state

Fig. 11 Change of ZMP for sinusoidal input in double support state

ように動くので ZMP はそれほど振動していないが、高周波入力の場合には大きく振動している。

3.3.1 項で述べたように、脚部の応答性を決める脚部の理想インピーダンスは、脚部の性能の範囲内でできるだけ速い応答性が得られるように設定する。したがって、脚部が追従できないほどの高周波入力に対してロボットの安定性が低下するのはやむを得ない。

4.3 踏み換えのシミュレーション

手先の目標位置 r_{ed} を一定速度で水平に前方移動させたときの、前方踏み換えにおける ZMP の変化を Fig. 12 に示す。図において、薄く塗ってある領域が ZMP の安定領域で、座標系原点は最初の両脚支持状態の後脚接地点に設定してある。また、このときのロボットの姿勢の変化を Fig. 13 に示す。

まず、ロボットが転倒しないためには ZMP x_{z2} を安定領域内に保たなければならないが、Fig. 12 から分かるように、提案する制御則により、踏み換え動作全般にわたってそれが実現できている。

両脚支持状態、単脚支持への移行モード、単脚支持静的モードでは、静的 ZMP x_z と ZMP x_{z2} の両方をほぼ目標 ZMP x_{zd} に制御できている。 x_z と x_{z2} が等しくなるのは、これらのモードではロボットを準静的に動かして慣性力の影響を少なくしているためである。したがって、 x_z を安定領域内に保つように制御することで x_{z2} も安定領域内に保つことが可能となる。両脚支持状態から単脚支持への移行モードへ切り替えた瞬間、静的 ZMP x_z と ZMP x_{z2} が少しずれているが、これは、両脚支持状

Fig. 12 Change of ZMP in forward step

Fig. 13 Motion of robot in forward step

態で安定領域中央に静止させていた目標 ZMP x_{zd} を移行モードへ切り替えた途端、急にその速度で移動させ始めたので、脚部が加速度運動して慣性力が働いたためである。同様に、移行モードから単脚支持静的モードに切り替えたときも、ある速度で移動させていた x_{zd} を急に静止させたことと支持脚の膝・腰関節を急に固定したことから脚部が加速度運動し、 x_z と x_{z2} がずれたものと思われる。

単脚支持動的モードでは、脚部全体がある加速度で倒れ込む

ために大きな慣性力が働き、静的 ZMP x_z と ZMP x_{z2} は一致しない。そこで、 x_z ではなく直接 x_{z2} を安定領域内に保つように制御している。ただし、ロボット全体を Fig. 8 のような一つの剛体とみなして制御しているため、目標 ZMP x_{zd} と x_{z2} の間に若干の誤差が生じている。

単脚支持動的モードでは肩が加速度運動しているため、遊脚が着地して両脚支持状態となった瞬間の肩の速度は大きくなっている。したがって、着地後、式 (3) のインピーダンス制御により肩を引き戻すように制御すると、肩を減速する方向に加速度が働いて ZMP x_{z2} が少し前にずれている。しかしながら、両脚支持状態の安定領域は広いので、十分安定領域内に保つことができています。

一方、Fig. 13 (a) の踏み換え前の両脚支持状態におけるロボットの動きを見ると、手先が前方に移動するにつれて脚部は少ししゃがみこむように動いている。これは、手先の操作性を高めるためと考えられる。(b) の単脚支持への移行モードに切り替わると、静的 ZMP を前方に移動させるため、肩と腰が前に動いている。このとき肩は高くなっていくが、これも手先の操作性を高めるためと考えられる。(c) の単脚支持静的モードでは、踏み換えのために遊脚を前方に移動させている。このとき、静的 ZMP を支持脚足底中央に保つためには、遊脚の持つ質量の前方移動分を打ち消すように肩の質量を後方に移動させなければならない。したがって、このモードでは踏み換え方向と逆方向に肩が移動するので、あまり望ましくない状態である。(d) の単脚支持動的モードに移ると、遊脚足先をはば等速で動かしながら支持脚がある加速度で倒れ込んでいき、着地する。したがって、着地した瞬間の肩の速度は大きいですが、着地後の両脚支持状態 (e) で徐々に減速していることが分かる。

4.4 急激な外力が作用する場合のシミュレーション

踏み換え中の単脚支持静的モードにおいて、手先に作用する外力が急激に変化して静的 ZMP が安定領域を外れそうになったとき、単脚支持動的モードに切り替えて元の両脚支持状態に戻る場合の ZMP の変化を Fig. 14 に示す。また、このときのロボットの姿勢の変化を Fig. 15 に示す。

急激な外力が作用した瞬間、静的 ZMP x_z は安定領域外となっているが、ロボットは、単脚支持動的モードに切り替えることにより慣性力を利用して外力の変化を打ち消し、ZMP x_{z2} を安定領域内に保つことができています。よって、ロボットは転倒しない。

このとき、単脚支持動的モードでの遊脚足先の移動速度は、単脚支持静的モードにおける目標移動速度に比べかなり速くなっていることが確認できる。もしも、式 (24) で求められる単脚支持動的モードでの遊脚足先の移動速度に実際の遊脚が追従できない場合には、ロボットのアクチュエータの能力不足であり、このような外力の変化には対応できない。

4.5 人間大ロボットの踏み換えのシミュレーション

人間用に作られた環境への適用性が高いことが人間型ロボットの大きな利点であることから、本節では、人間大のロボットのシミュレーション結果を示す。ロボットが大きくなると慣性力の影響が大きくなり、転倒する危険性が増す。特に、単脚支持状態では安定領域が小さいため、その可能性は高い。そこで、

Fig. 14 Change of ZMP when external force suddenly changes

Fig. 15 Motion of robot when external force suddenly changes

人間大ロボットの踏み換えのシミュレーションを行った。

Table 1 に示したリンクの長さや質量の比率を保ったまま、身長 1.6 [m]、総重量 130 [kg] に拡大した人間大ロボットを考える。ただし、足底の長さは人間と同じ 0.26 [m] とする。Table 3 の両脚支持状態における肩の理想高さ y_{sr} と Table 4 の歩幅 w_s もリンク長の拡大率と同じ比率で拡大し、理想踏み換え時間 t_s を変えてシミュレーションを行う。その他のパラメータの設定は 4.1 節の通りとする。

4.3 節と同様に、手先の目標位置 r_{ed} を一定速度で水平に前方移動させたときの ZMP の変化を Fig. 16 に示す。Fig. 16 (a) は、4.3 節のシミュレーションとほぼ同じ踏み換え時間で踏み換えた場合で、ZMP およびロボットの姿勢の時間変化の様子は 4.3 節の結果と同様であった。4.3 節のシミュレーションに比べて単脚支持状態の時間を長くしているため、単脚支持状態での慣性力の影響が押さえられ、ZMP x_{z2} を安定領域中央に制御できている。その反面、単脚支持への移行モードの時間を短くしたので、両脚支持状態から移行モードへ切り替えた瞬間に x_{z2} が安定領域中央から大きく外れているが、両脚支持状態の安定領域は広いので転倒することはない。

Fig. 16 (b) は (a) よりも短い時間で踏み換えた場合の結果で、横軸の時間のスケールは 1/2 で表示している。図から分かるように、単脚支持状態の早い時期から動的モードに移り、慣

性力の影響を考慮した制御が行われている。ただし、動的モードにおける $ZMP_{x_{z2}}$ と目標 $ZMP_{x_{zd}}$ との誤差は (a) の場合に比べて大きい。この理由は、(a) では遊脚が静的モードで着地点付近まで移動したのち動的モードに移っているため、動的モードでの遊脚の移動量が少なく移動速度も遅いのに対し、(b) では遊脚を持ち上げた直後ぐらいから動的モードに移ったので、遊脚の移動速度が速く、その慣性力の影響が大きいのである。また、踏み換えが高速になったために、遊脚が着地した瞬間の肩の速度が増し、着地直後の両脚支持状態における x_{z2} の前方へのずれも大きくなっている。しかしながら、図から分かるように、1.20 [s] の踏み換え時間でも ZMP を安定領域内に保つことができています。

本研究では、従来の2足歩行ロボットの研究で行われてきた定常歩行が目的ではなく、両脚支持状態を基本とし、現在の両脚支持状態から新しい両脚支持状態に移るために踏み換えを行う。したがって、踏み換え中は ZMP を安定領域内に保つことができればよく、安定性の回復、すなわち ZMP を安定領域中央に制御することは主として両脚支持状態で行われる。しかしながら、手先の移動速度が速くなって踏み換えを連続して行うようになると、両脚支持期よりも単脚支持期の時間が長くなるため、単脚支持状態の安定性が重要になってくると考えられる。

(a) step time: 3.68[s]

(b) step time: 1.20[s]

Fig. 16 Change of ZMP in forward step of human-size robot

5. 実験

5.1 実験装置

実験用ロボットは、Fig. 1 の手首関節を除いた構造を持つ。各関節は、ハーモニックドライブ減速機付 DC サーボモータで駆動され、関節角はモータに取り付けたエンコーダで計測する。脚部は、大腿部にあるモータで腰関節を、脛にある二つのモータで膝関節と足首関節を動かす。これらの関節では、かさ歯車を介して動力を伝達している。また、腕は平行リンク機構をしており、肩にある二つのモータで肩関節と肘関節を駆動する。手先には平行板バネを利用した力センサを取り付け、手先に作用する外力を測定する。なお、踏み換えの際に横方向に倒れるのを防ぐため、足底は体の中心より内側まで張り出させてある。

一般に、ロボットの関節はハーモニックドライブのような減速比の大きい減速機を介してモータにより駆動されるので、関節ごとの位置フィードバック制御により、関節角をその目標値に制御できる。このロボットでも、第3章で述べたアルゴリズムにより求めた手先の位置 r_e 、肩の位置 r_s 、および単脚支持状態の遊脚足先の位置 r_w からロボットの逆運動学を解いて各関節 $J_i (i = 1, \dots, 8)$ の関節角目標値 q_{id} を計算し、これを関節ごとの位置フィードバックコントローラに入力して実際の関節角 q_i を $q_i \approx q_{id}$ に制御する。その結果、 r_e 、 r_s 、 r_w の運動が実現できる。

Fig. 17 Experimental result of arm tip position

Fig. 18 Experimental robot stepping forward