内骨格式 2 足歩行ロボットの制御アルゴリズム*

内海 真^{*1}, 加藤 隆^{*2}, 山川 新二^{*2}

Control Algorithm for Inner Skeleton Frame Type Biped Walking Robot

Makoto UTSUMI, Takashi KATO and Shinji YAMAKAWA

We developed inner skeleton type biped walking robot "ISR-1" to work as cooperating with a human being and instead of a human being. Force sensors installed in the actuator of ISR-1 measure the outside forces, which realizes the relaxation motion similarly to muscle of a human being. This system is composed of the easy mechanisms. When a relaxation motion works, there are characteristics that a restraint problem on the angle of the joint in double legs supporting phase is dissolved. This robot repeats stepping motion by the center of gravity movement for the robot on lateral plane. And swinging of the leg is added to this stepping motion and a walk action is done. This paper deals with walking control algorithm by sensors and the relaxation motion of the actuators.

Key Words: Inner Skeleton, Double Legs Supporting Phase, Relaxation Movement, Main Support Leg, Biped Walking Robot

1. 緒言

現在, 移動ロボットとして, 車輪型, 脚車型, 歩行型等のロボットがあり様々な開発がなされている. これらの移動ロボットの中で, 歩行ロボットは決して移動効率がよいとはいえない. しかしながら不整地や, 人間に都合よく作られた階段や不規則な段差が入り交じった場所での移動には, 他の方法よりも優れた移動が期待できる. 歩行ロボットの中でも 2 足歩行ロボットは非常に不安定な歩行となり, しかも重力の影響も大きく受けやすい. それゆえ歩行ロボットの開発を行うには, 本体重量の軽減が, 非常に重要なポイントになる. そこで著者らは, 人間の代わりあるいは人間と協力して作業を行うロボットの開発を目差し, 内骨格式 2 足歩行ロボット ISR-1(Inner Skeleton type Robot 1)を開発した⁽¹⁾⁽²⁾. このロボットは骨格の構造を人間と同様な内骨格として本体を軽量化し, アクチュ

エータの協調動作により関節の制御を行う.

2 足歩行ロボットの制御方法としては, さまざまな研究が行われている^{(3)~(7)}. 中でも動的モデルを用い, あらかじめ歩行パターンを生成して制御を行う方法が多い. また外界センサの情報を積極的に取り入れ, 特定の歩行パターンに拘束されない歩行の研究もなされている⁽⁸⁾.

2 足歩行ロボットは, 両脚支持相において閉ループリンク機構となり, 関節の動作に拘束が生じる. また足部が床面に固定されていないことにより, 系の力学状態に関して制約条件が生じる. この両脚支持相の力学的解析にはラグランジュの乗数を用いる方法やダランベールの原理を用いる方法など, さまざまな方法が用いられている. しかしながらこれらの方法は, 複雑な計算を必要とし, 事前にロボットの動作を決定する必要がある. この制約条件を無視して制御を行う場合, ロボットが無理な姿勢をとることとなり, 関節に負担を強いることになる.

一方, 人間は両脚支持相の拘束に対し, このような

* 原稿受付 1998 年 2 月 24 日.

^{*1} 正員, 工学院大学大学院 (〒192-0015 八王子市中野町2665-1).

^{*2} 正員, 工学院大学工学部.

E-mail: ad96001@ccs.kogakuin.ac.jp

計算を行わなくても無理な姿勢をとることはない。人間の筋肉では緊張（収縮）と弛緩の2つの動作があるためであると考えられる。人間の関節では筋肉が拮抗して働き、屈筋が緊張して収縮すると、その拮抗筋である伸筋が弛緩して関節が屈曲する。あるいはこの拮抗筋同士が緊張しあうことでコンプライアンスを持った動作などを実現している。また拮抗筋の両方を弛緩させれば関節を他動的に動かすことができる。人間はこの筋肉の緊張と弛緩を巧みに調整することで、複雑な構造条件に適合した行動をとる。特に関節を弛緩させると、どのような肢位であっても関節角の拘束問題などを解消できる。

ロボットの関節はアクチュエータの影響で他動的に動かすことが困難な場合がある。ロボットで弛緩や柔軟な動作に相当する動作を行わせるには何らかの機構や制御を付加する必要がある、いくつかの方法が考えられる。

- (1) 機構的に関節を自由回転にする⁽⁹⁾。
- (2) ワイヤ機構を用いることにより、人の腱に相当する動作を得るとともに、ワイヤのテンションで関節のコンプライアンスを調節する⁽¹⁰⁾。
- (3) 関節の運動方向に作用する外力を検出し、能動的にその外力の作用する方向に関節を駆動する。

これらの方法の中でISR-1は、アクチュエータに取付けた力センサから外力を計測し、筋肉と同様な弛緩動作を動的に実現している。この方法は他と比べ簡単な機構で構成でき、しかも弛緩動作時に両脚支持相における関節角の拘束問題を解消できる特徴がある。このような拘束問題に対して、佐野・古荘ら⁽⁴⁾は両脚支持相で矢状面に対し、幾何学的矛盾が生じないように2関節を自由回転状態にして外界に適応した制御を行っている。

本研究では、前額面の運動から重心移動を行い、歩行動作の実現を検討する。前額面に着目する理由は前額面の運動が矢状面と比較して左右脚の支持脚交代の運動を実現しやすいためである。この前額面の運動を

反復することによって足踏み動作を行わせることができる。さらに、この足踏み動作に振り出し動作を加えると歩行動作を行わせることができる。このような動作を実現させるために、ロボットのセンサ情報とアクチュエータの弛緩動作を利用した歩行制御アルゴリズムの構築方法について述べる。

2. 両脚支持相の拘束問題

この節では2足歩行ロボットの両脚支持相で問題となる拘束条件について論ずる。両脚支持相の拘束条件に関しては五十嵐・野飼ら⁽¹¹⁾が解析を行っている。本論ではこの拘束条件を前額面に置き換えて考える。

2.1 関節角の拘束 2足歩行ロボットでは、両脚支持相と単脚支持相の2つの支持状態がある。単脚支持相では遊脚を振り出して歩を進め、両脚支持相では支持脚の切り替えを行う。両脚支持相では両脚、腰部、地面により閉ループ機構となる。図1に閉ループリンク系を示す。図1における各リンクのパラメータは以下ようになる。

q_i : リンク $i-1$ とリンク i の相対角度, $u_i^s: q_i$ に対する一般化力, $u_i^s: u_i$ の静的成分, $u_i^d: u_i$ の動的成分, l_i : リンク i の全長, a_i : ジョイント i からリンク i の重心 $G_i(x_i, y_i)$ までの距離, m_i : リンク i の質量

一般的に閉ループリンク機構は軌道条件と構造条件が付加される。自由度 r のリンク系に対しては r 個の軌道条件が必要になる。閉ループリンク系を構成するための幾何学的条件として、構造条件の数を d とすれば $d \leq 2$ となり、エンドポイントをピンジョイントと仮定すると $d=2$ となる。

このときの構造条件は次のようになる。

$$x_{EP} = e_1, y_{EP} = e_2 \quad (1)$$

ここで x_{EP}, y_{EP} はそれぞれエンドポイントの x 座標, y 座標を表しており, e_1, e_2 は定数である。

軌道条件と構造条件には n リンク系（ただし、エンドポイントが接触する場合は $n+1$ とする）の場合、次

Fig.1 Closed loop links model

Fig.2 Closed loop links model of biped walking robot

の関係式が成立する.

$$r = n - d \quad (2)$$

ここで $d = 0$ は開ループリンク系を表す.

図1のような閉ループリンク系では, リンクが多角形を構成するために, その内角の和は

$$\sum_{i=1}^{n+1} \delta_i = (n+1)\pi / 2 \quad (3)$$

で表される. 前額面において2足歩行ロボットは地面と脚をピンジョイントとして考えると $d=2$, $n=3$ のリンク機構となり, 式(2)から系の自由度 $r=1$ となる. その内角の和は 2π となる. 一つの関節の関節角を決定すると他の関節は関節角の拘束を受けることになる.

2.2 静力学 図1のような2次元閉ループリンク機構において, 各リンクは次の静的平衡の式が成立する.

$$u_i^s = \sum_{j=i}^n (V_j + W_j) \quad (4)$$

ただし,

$$\begin{cases} V_j = \left\{ \left(N_{n+1}^s + \sum_{k=j+1}^n m_k g \right) l_j + m_j a_{jg} \right\} \\ \times \sin \left(\sum_{k=1}^j q_k \right) \\ W_j = F^s l_j \cos \left(\sum_{k=1}^j q_k \right) \end{cases} \quad (5)$$

$$(i = 1, 2, \dots, n)$$

上式において, その未知数は $n+d$ 個であるが静的平衡状態を保つために必要な一般化力の数は r 個である.

2.3 ジョイント抗力の動的成分 前節で各ジョイントおよびエンドポイントに作用する抗力の静的成分 (N_i^s , F_i^s) が求められるので, 本節では, その動的成分 (N_i^D , F_i^D) について考える. 図2に2足歩行ロボットの前額面の閉ループリンクモデルを示す. 図2において各リンクの重心座標 (x_i , y_i) は

$$\begin{cases} x_i = a_i \sin \left(\sum_{k=1}^i q_k \right) + \sum_{j=1}^{i-1} l_j \sin \left(\sum_{k=1}^j q_k \right) \\ y_i = a_i \cos \left(\sum_{k=1}^i q_k \right) + \sum_{j=1}^{i-1} l_j \cos \left(\sum_{k=1}^j q_k \right) \end{cases} \quad (6)$$

$$(i = 1, 2, \dots, n)$$

となり, リンク i に対して, 次の式が成立する.

$$\begin{cases} N_i^D - N_{i+1}^D = m_i \ddot{y}_i \\ F_i^D - F_{i+1}^D = m_i \ddot{x}_i \end{cases} \quad (7)$$

ただし, エンドポイントにおける床反力の動的成分は0になるので

$$N_{n+1}^D = F_{n+1}^D = 0 \quad (8)$$

となる.

また2足歩行を行う場合, 以下のような力学的制約条件を満たす必要がある.

$$(a) \quad -N_1 w_1 < u_1 < N_1 w_2, \quad -N_4 w_3 < u_4 < N_4 w_4$$

$$(b) \quad |F_1/N_1|, |F_4/N_4| < \mu_{max}$$

ただし, μ_{max} = 静止最大摩擦係数

$$(c) \quad N_1, N_4 > 0$$

ここで(a)は足部が外側あるいは内側回りに回転しないための条件である. (b)は足部が床面を滑らない条件である. また(c)は足部が床面から離れないための条件である.

図2の機構において重心の移動動作を行うとき, 低速の場合には, 運動の動的成分が無視することができる. 運動速度が速くなると, 運動の動的成分の影響が大きくなる. また動的成分の発生により左右脚にかかる負荷に違いを生じる. このことによって, 左右脚のアクチュエータの応答性に変化を生じる. この応答性の違いによって, 構造条件は満たされることなく, 結果として(b)の条件からはずれ, 足底の滑りや転倒現象を生じる場合がある.

3. 制御アルゴリズム

3.1 弛緩動作 両脚支持相における関節角の拘束などで生じる問題を回避するための方法として弛緩動作を行う概念を導入する.

弛緩動作とは人間の筋肉の弛緩状態と同じで, 外力に逆らわずに追従させる動作である. この弛緩動作を行う関節を弛緩関節, 動力を発生する関節を能動関節とする.

両脚支持状態では2章より2足歩行ロボットの自由度 $r=1$ であるから, 一つの関節の角度を決めると他の関節は制約を受ける. またこの静的平衡状態を維持する一般化力も r 個存在するために, 一つの軸にだけ動力を持たせることで, リンク機構全体を動かすことができる. つまり前額面における両脚支持相の運動に関して, 一つの能動関節と三つの弛緩関節を用いることで, 関節角の拘束問題を回避し無理のない姿勢をとることができる.

3.2 主支持脚による重心移動 前節において, 関節に弛緩関節と能動関節を使うことで, 両脚支持相における拘束問題の緩和を行えることを示した. そこで本節では, 両脚支持相において能動関節と弛緩関節の切り替えを行う方法を考える.

両脚支持相では, ロボットの重心位置の状態によって左右脚に作用する床反力に違いを生じる. 重心移動を行う場合に, 脚の滑りを回避するには, より大きく床反力が作用している方を主支持脚にする必要がある. したがって, 重心がより大きく作用している方の支持脚を主支持脚とし, 他方の支持脚を従属脚とする. 主支持脚では股関節を能動関節とし, 足関節を弛緩関節とする. 従属脚は股関節, 足関節の双方とも, 弛緩関

節とする。主支持脚により重心の移動が行われたとき、従属脚は主支持脚の駆動力と地面の摩擦力によって動作する。これにより前額面内の運動に対して、主支持脚のみの運動を考えるだけでよくなる。また足関節を弛緩関節とすることによって、 $u_1=0$, $u_4=0$ となるため、条件(b)を常に満たすことになる。また足部に作用する水平方向の静的力成分 F をなくすることができるため、足の滑りを抑制することが可能になる。

3・3 歩行方法 図3に歩行アルゴリズムを示す。このフローチャートは片足の前額面の動作を表す。まず、足底の接地センサのデータから足の接地を判断する。足が接地しているのであれば、立脚相となる。このとき他方の脚も接地している場合は両脚支持相となり、股関節の内転外転方向に作用する力から重心の偏りを計算する。他方の脚より内転方向に力が大きく作用しているのであれば主支持脚となる。主支持脚の股関節を抗力動作(Resist)とし、足関節は弛緩動作(Relaxation)にする。主支持脚の股関節によってロボットの重心移動を行う。従属脚となる場合は、股関節、足関節ともに弛緩動作を行う。足底が離地であれば、遊脚相であるため、股関節と足関節ともに位置制御(Position)を行い関節角を基本股位に固定する。このとき重心移動の制御系を振動させることによって重心が常に左右脚に振り分けられ、足踏み動作を行うことができる。矢状面では単脚支持相で立脚相の脚を引き、遊脚相の脚を前に振り出すことで前方に歩行する。

Fig.3 Control algorithm flow

4. 実験装置

4・1 ロボット本体 ISR-1 は人間の大人の 1/2 サイズを目安として開発を行った。ISR-1 の概観を図4に、そして外形寸法を図5にそれぞれ示す。骨格の構造は人間と同様で、骨格を細くしても比較的大きな負荷に耐えることができる内骨格構造を採用している。また、ある関節の1方向運動に対して複数のアクチュエータを駆動させ、アクチュエータの稼働効率を上げる。稼働効率を上げることで、ロボットの重量の大部分を占めるアクチュエータの小型化に工夫を施している。これら二つの方法により、ロボットの重量を大幅に軽量化することができた。身長 800mm, 本体重量約 34.3N[3.5kgf], 骨格の重量約 5.4N[0.55kgf]である。一脚の代表的部位の重量は大腿部 8.2N[0.84kgf], 下腿部 5.0N[0.51kgf], 足部 8.8N[0.9kgf]である。ISR-1 の骨格には、主にアルミニウムを使用する。自由度は片足に対して、それぞれ股関節 2, 膝関節 2, 足関節 2, 足部 2(母指, 子指)であり、全体で 18 自由度である。これらの関節を 16 個のアクチュエータで駆動する。ISR-1 の自由度とアクチュエータの構成を図6に、そして関節とアクチュエータの運動の関係を表1に示す。ただし、アクチュエータ③は回転型であるため、アクチュエータ③の回転がそのまま股関節の回旋運動につながる。

4・1・1 骨格構造と関節の駆動方法 ISR-1 では人間と同様な内骨格構造を用いている。これは骨格の周りにアクチュエータを配する方法であり、非常に軽量のロボットを作ることができる。内骨格機構は、アクチュエータと骨格をリンクに見立てることで、パラ

Fig.4 ISR-1

Fig.5 Assembly drawing of ISR-1

レルリンク機構として取り扱いを可能にし、その力学的な特性を解析することができる。

パラレルリンクの運動学は逆運動学を基本として求めることができる⁽¹²⁾。図7(a)におけるアクチュエータA, Bおよび骨格をそれぞれリンク1, 2, 3とする。各リンクとH点の基準座標での位置 $p_h = (p_{hx} \ p_{hy} \ p_{hz})^T$ との幾何学的関係は図7(b)に示すようになる。あるリンク*i*の長さを l_i 、リンク*i*とベースの結合点の位置ベクトルを p_i とする。この p_h から l_i ($i=1, 2, 3$)を求める。リンク*i*のリンクベクトルを w_i 、単位方向ベクトルを u_i とすると

$$\begin{aligned} w_i &= p_h - p_i \\ l_i &= |w_i| = (w_i \cdot w_i)^{1/2} \\ u_i &= \frac{w_i}{l_i} \end{aligned} \quad (9)$$

ここで記号 $\cdot$ はベクトルの内積を表している。なお、骨格であるリンク3の始点を座標の原点とっているため、 $w_3 = p_h$ であり $p_3 = (0 \ 0 \ 0)^T$ である。

$\delta l = (\delta l_1 \ \delta l_2 \ \delta l_3)^T$ とすると

Fig.6 Construction of actuators and skeleton

$$\delta l = J \delta p_h \quad (10)$$

$$J = [u_1 \ u_2 \ u_3]$$

となる。

式(10)で得られた J はシリアルリンクマニピュレータで定義されるヤコビ行列の逆行列である。速度に関する逆運動学は式(10)より求められる。

$$\dot{l}_i = J \dot{p}_h \quad (11)$$

各リンクで発生する力を t_i 、H点で発生する力を $F = (f_x \ f_y \ f_z)^T$ とする。ここで f_i はそれぞれベース座標系の*i*軸方向の力を表している。機構全体が平衡状態であると仮定して、仮想仕事の原理を用いるとリンクおよびH点がそれぞれ δl 、 δp_h だけ微小運動を行ったとき、機構全体が行う仕事は以下になる。

$$\delta p_h^T F - \sum_{i=1}^3 \delta l_i t_i = 0 \quad (12)$$

$$\delta p_h^T F - \delta l^T T = 0 \quad (13)$$

ここで $T = (t_1 \ t_2 \ t_3)^T$ である。式(10)を式(13)に代入することによりH点での発生力と各リンクでの発生力の関係式は次式のようにになる。

$$F = J^T T \quad (14)$$

また式(14)より各リンクに作用する力 T は次式のようにになる。

$$T = [J^T]^{-1} F \quad (15)$$

以上の式を用いることで、アクチュエータに作用する力から外力の方向を算出できる。

実際にロボットを制御する場合は、屈曲や内転といった関節の可動軸のトルクを考慮する必要がある。また、トルクの計算が複雑になると計算機に負荷がかか

Table 1 The driving method of each joint

+ : extension, - : contraction

joint	direction	actuator
Crotch	flexion	-①-②
	extension	+①+②
	abduction	+①-②
	adduction	-①+②
	inward rotation	③
	outward rotation	③
Knee	flexion	-④-⑤
	extension	+④+⑤
	inward rotation	+④-⑤
	outward rotation	-④+⑤
Ankle	flexion	+⑥-⑦-⑧
	extension	-⑥+⑦+⑧
	eversion	+⑦-⑧
	inversion	-⑦+⑧
Great toe	flexion	-⑧
	extension	+⑧
Little toe	flexion	-⑦
	extension	+⑦

Fig.7 Models of inner skeleton

りロボットの制御が困難となるため、簡易な近似式を考える。可動軸回りのトルクは、骨格と各アクチュエータのなす角と各アクチュエータに作用する力から求めることができる。本ロボットは構造的に骨格と各アクチュエータのなす角が十分に小さくなる。そのために、関節角の変化に関わらず可動軸回りに作用する力はアクチュエータに作用する力にほぼ比例するものと考えられる。そこで図6の股関節における屈曲伸展軸と内転外転軸のトルクを例にとる。アクチュエータ①、②に作用する力をそれぞれ T_1 、 T_2 、大腿部の長さを l 、比例係数を k_f 、 k_a とすると、屈曲伸展軸のトルク N_f は

$$N_f = k_f (T_1 + T_2) l \quad (16)$$

なり、内転外転軸トルク N_a は

$$N_a = k_a (T_1 - T_2) l \quad (17)$$

となる。

4.1.2 アクチュエータ 本ロボットは内骨格構造であるため、筋肉のように直動運動するアクチュエータが必要となる。そこで図8のようなネジシリンダ式直動アクチュエータを使用する。このアクチュエータはDCモータの回転運動を雌ネジを切ったシリンダとネジ棒の組み合わせによって直動運動に変換する。このアクチュエータは遮光型力覚センサ⁽¹²⁾を取り付けてあり、アクチュエータに作用する引張、圧縮力を直接計測できる。この負荷計測によって、負荷に対して押し返し、追従、あるいはアクチュエータにコンプライアンスを持たせた動作を行わせることができる。弛緩動作を行う場合には、この力と同方向にアクチュエータを動作させて、負荷が0に近づくように制御を

Fig.8 Construction of screw cylinder type actuator

行う。

使用するメインアクチュエータのDCモータの公称出力は、11W、アクチュエータの発生力は50N、伸縮速度は40mm/s、そして重量は2.06N[0.21kgf]である。

4.1.3 センサ 本ロボットには、アクチュエータの出力検出用のポテンシオメータを16個、負荷検出用の力センサ⁽¹³⁾を14個用いる。バランスをとるためのセンサとして、頭部にピッチ軸とロール軸の角速度を検出するジャイロセンサを取付ける。ジャイロセンサには圧電振動ジャイロを使用する。足底には脚の接地検出を行うために、踵、小指および母指の3点に導電性ゴムによる接地センサを装備している。本ロボットでは合計38個のセンサを使用している。

4.2 制御系の構成

4.2.1 各関節の制御 本ロボットでは、一つのアクチュエータが多数の関節軸を干渉するため、各アクチュエータを協調させ制御している。図9に本ロボットの股関節における制御系の構成を示す。弛緩動作等を実現するためには、以下の制御器で関節の制御を行う。

- (1) 弛緩制御器(Relaxation controller)：抗力制御とは逆に、負荷に逆らわずに負荷の方向と同じ向きに動作を行い、高ゲインの比例制御を用いる。
- (2) 抗力制御器(Resist controller)：アクチュエータが力センサのデータからその付加に逆らって動作をする。つまり屈曲方向に負荷が作用すれば、伸展し、外転方向に負荷が作用すれば内転するように制御する。PID制御を用いて重心の補正等を行う。
- (3) 位置制御器(Position controller)：アクチュエータのポテンシオメータのデータを用いた制御で、関節角度決定を比例制御で行う。

1 関節軸に対してこれら3つの制御出力を合成して関節を制御する。さらに関節の各運動方向に対して独立に3つの制御を行うことができる。たとえば、外転方向では抗力制御、内転方向では弛緩制御といった使い方も可能である。これら3つの制御は常に同時に行

Fig.9 Control system at joint

われるために、3つの制御出力の比率を調整することでよりさまざまな動作を行わせることができる。出力の切り替えは必要な制御出力のゲインを最大にし、他の出力を0とすることで行う。本実験では3つの制御出力をロボットの状態に応じて切り替えて使用する。全体としては関節の制御ブロックを階層的に構成している。

重心移動時には転倒防止のため、主支持脚にジャイロセンサのデータをフィードバックし抑制を行う。

4.2.2 脚の接地条件 ロボットの足底が1点でなく多点あるいは面である場合、様々な脚の接地状態が考えられる。したがって、遊脚相から立脚相あるいは、立脚相から遊脚相に移る際に足のどこまでが接地すれば足全体として接地したことになるのかを考慮する必要がある。たとえば、遊脚から足の指が地面に接触していても足が接地したといえる。しかし、この時点でこの足が主支持脚となった場合、非常に不安定な状態で重心の移動動作を行うことになる。

ISR-1では足の踵、母指、小指の3点に接地センサを取り付けてあるため、これらセンサのデータの組み合わせにより接地および離地の判断を行う。接地判定の条件は以下のようにする。

- (1) 遊脚相から立脚相へは、踵と小指または母指が接地したとき足の接地とする。
- (2) 立脚相から遊脚相へは、踵、母指、小指のすべてが離地したとき足の離地とする。

4.3 実験装置全体の構成 実験装置の構成を図10に示す。本ロボットは、本体の大きさが人間の約1/2であることから、ロボットへ搭載できるハードウェアに限りがある。そこで本ロボットでは、モータ駆動回路および制御用コンピュータを外装し、電源は外部より供給する。コンピュータは、上位と下位のコンピ

Fig.10 Experiment system

ュータをデュアルポートRAMで接続した階層制御システムで構成する。上位のコンピュータでは制御量の決定に使用し、下位のコンピュータで上位コンピュータとモータ制御およびA/D変換インターフェースボードとのデータ転送の仲介用を使用する。モータの制御はPWM制御で行う。

5. 歩行結果および考察

従属脚の弛緩動作と主支持脚による重心移動で生じる足踏み動作から歩行動作の実験を行う。このとき膝関節は固定し、膝関節の屈曲による足上げは行わない。実験に使用する床面は平面とする。また、ロボットにはモータ駆動信号とセンサデータのケーブルが付くが、一切の支えやガイドを用いない。

歩行実験の結果、ISR-1が従属脚の弛緩動作と主支持脚による重心移動のみで歩行動作を行えることを確認した。歩行動作時の接地状態を図11に、左股関節の屈曲角度を図12に、頭部ジャイロセンサのロール軸の角速度を図13に、歩行中の分解写真を図14にそれぞれ示す。図11で足が接地(contact)したときを1、離地のときを0として表している。図13で+方向の値に対しては左回りの回転を示す。このときの歩幅は最大約30mmである。歩行パターンを使用しないため、歩行周期がランダムになっている。図11より2種類の足踏み周期が存在することが理解できる。一つは動作開始3sから6s、もう一つは動作開始8sから12sまでの間である。前者に対する1周期は約1.0sとなり後者は約1.7sである。図12から股関節が動作開始8sまではあまり動かないため、ロボットの移動量はわずかである。動作開始8sから股関節が周期的運動を始め、ロボットは明確な歩行を始める。図13より頭部の振動は $\pm 45\text{deg/s}$ 程度に治まっている。重心移動時の振動に対してジャイロセンサによる抑制が作用している。この抑制によって歩行中の側方への転倒を防いでいることが理解できる。また、図14から大きな身体動揺をせずに歩行しているロボットの様子が分かる。

(a) Right foot

(b) Left foot

Fig. 11 Feet step state

Fig.12 Angle of left crotch

Fig.13 Radius velocity curve at head roll axis

Fig.14 A photographic of walking experiment

7. 結言

内骨格式2足歩行ロボットISR-1に、両脚支持期に関節の弛緩動作を行うことで次のような結論を得た。

- (1) 前額面内において、両脚支持相の閉ループリンクの拘束をなくすことができた。
- (2) 弛緩動作と主支持脚による重心移動によって歩行動作が行えることが分かった。
- (3) 歩行の周期はランダムではあるが十分な歩行を行える。

今後はより安定した歩行を行えるようにするとともに、歩幅の拡大と膝の曲げによる足上げ動作を行った上での歩行を行う必要がある。

参考文献

- (1) 内海・加藤・山川, 内骨格式2足歩行ロボットの制御アルゴリズム, 機講論, No.977-1(1997), 271-272.
- (2) 内海・加藤・山川, 内骨格式2足歩行ロボットの機構開発, 第14回日本ロボット学会学術講演会予稿集, (1996), 189-190.
- (3) 高西, 上体の運動によりモーメントを補償する2足歩行ロボット, 日本ロボット学会, 11-3(1993), 348-353.
- (4) 佐野・古荘, 角運動量制御による2足歩行ロボットの3次元動歩行, 計測自動制御学会論文集, 26-4(1990), 459-466.
- (5) 小笠原・笹田・川路, ロッキング運動を用いた動的2足歩行, 機講論 No.95-17(1995), 183-186.
- (6) 有本・宮崎, 二足歩行ロボットの階層制御, 日本ロボット学会誌, 1-3(1983), 167-175.
- (7) J.Furusuo and A.Sano, Sensor- Based Control of a Nine-Link Biped, The International Journal of Robotics Research, 9-2(1990), 83-98.
- (8) 熊谷・江村, センサ情報による人型2脚ロボットの動歩行に関する研究, 機講論, No.97-22(1997), 839-840.
- (9) 藤江・小金澤, 東海ロボ・ハビリス1の膝関節機構とその制御, 第15回日本ロボット学会学術講演会予稿集, (1997), 847-848.
- (10) 山口・中条・西野・井上・神・高西, 人間をモデルとした下肢機構を持つ2足歩行ロボットの開発ー非線形ばね機構を持つ拮抗駆動型1関節モデル, 第13回日本ロボット学会学術講演会予稿集, (1995), 211-212.
- (11) 五十嵐・野飼, 二足歩行運動における両脚支持相の力学解析と制御, 日本ロボット学会誌, 7-3(1989), 142-150.
- (12) 新井, 静力学に基づくパラレルリンクマニピュレータの解析と統合, 日本ロボット学会誌, 10-4, (1983), 526-533.
- (13) 内海・加藤・山川, 透過形赤外線センサを用いた遮光形圧覚センサの開発, 機講論, No.95-17(1995), 94-96.