内骨格式 2 足歩行ロボットの機構開発

内 海 真* 加 藤 隆* 山 川 新 二*

Mechanisms of Inner Skeleton Frame Type Biped Walking Robot

Makoto Utsumi*, Takashi Kato* and Shinji Yamakawa*

In this study, we report about mechanisms of a biped walking robot ISR-1 (Inner Skeleton type Robot 1). We have developed a light weight robot applied the inner skeleton frames and cooperative motion of two or three actuators for one degree of freedom. Total degrees of freedom are 18 degrees. Each joint of the robot is driven by 16 actuators. Main actuator is screw cylinder type actuator that gives liner motion. This robot equips with two gyros on head and six force sensors at feet for balance control. We have confirmed walking possibility of the robot.

Key Words: Inner Skeleton, Cooperation Actuator, 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なかで、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で、他の方法よりも優れた移動を期待できる。つまり普段は人間が活動を行っている場所で事故が起きた場合の事故処理作業や、あるいは人間と一緒に作業を行うことを想定した場合、人型のロボットのほうが他のロボットに比べ活動しやすいと考えられる。そこで本研究では、将来、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標とし、その移動機能である 2 足歩行機構の開発を行う。

2 足歩行ロボットの研究は、従来から制御、機構等の様々な観点から研究が行われている [1]~[5]。こうしたなかで人型の 2 足歩行ロボットでは本体の重量が重くなりやすいという問題がある。歩行ロボットのなかでも 2 足歩行ロボットは非常に不安定な歩行を行うものであり、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、本体の重量軽減が、非常に重要なポイントとなる。本体の軽量化を行うことができれば、運動能力（動作速度）、出力の向上、本体への機械的負荷の軽減、さらにエネルギー消費の軽減が可能となる。

ロボットの構成要素のなかで、重量に直接影響する部分は、主に骨格とアクチュエータである。一般的に軽量化の方法としては、本体を軽量の素材で構成するか、あるいは小型で強力なアクチュエータを使用するなどの方法をとる。これらの方法は

効果的ではあるが、コスト面で問題がある。そこで筆者らは、ロボットの構成方法やアクチュエータの運用方法を見直し、軽量化の方法として以下の方法を考えた。

- (1) ロボットの構造を人間と同様な内骨格構造とする。
- (2) 1 方向の自由度に対して複数のアクチュエータを協調動作させる。

これらの方法を適用することにより、特殊素材やアクチュエータを用いることなく、軽量の 2 足歩行ロボットの開発を行うことができる。本研究で開発したロボットを筆者らはその骨格構造から ISR-1 (Inner Skeleton type Robot 1) [6] と名付ける。

2. ロボットの基本構造

2.1 骨格の構造

ロボットの骨格構造としてはアクチュエータなどの外側に骨格を形成する外骨格構造が一般的である [3]。Fig. 1 (a) に示すように外骨格構造では、外殻が梁となりモーメントなどの負荷がかかる。しかも骨格のスパンが長くなるほど負荷の影響が大きくなる。外骨格構造では、胴体の重量が増えると、それを支えるための外殻部分を厚くしなければならない。そのために骨格の重量が増加し、全重量はさらに増加する結果となる。Fig. 1 (b) のような内骨格構造では、骨に相当する支柱と筋に相当するアクチュエータに引張りと圧縮性負荷が主に作用する。このような構造は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、骨格のスパンが長くなっても骨格への影響を少なくできる特徴がある。もし内骨格と同じ重量の部材で外骨格を形成する場合、十分な肉厚を取ることはできない。このような内骨格構造は、ロボットのサイズが大きくなるほど効果を発揮する。逆にマイクロマシンなどの小型ロボットでは、骨格そのものを構成できないため、外骨格構造のほうが有利であると考えられる。これは

原稿受付 1997 年 2 月 27 日

*工学院大学工学部

*Faculty of Engineering, Kogakuin University

Fig. 1 Difference of skeletal construction

自然界において、大型の動物は内骨格構造を小型の動物は外骨格構造を形成していることから理解できよう。そこで ISR-1 は内骨格構造を採用することにより、軽量の骨格構造にする。

2.2 関節の駆動方法

通常ロボットの関節軸は、1 軸に対して、一つのアクチュエータが対応し駆動する。この場合、ある関節の 1 方向軸が駆動されている間は、他の方向軸の駆動用アクチュエータは単なる負荷となる。一方、人体では多数の筋が協調して活動することによって、一つの筋にかかる負荷を減らし、効率のよい筋の運用をしていると考えられる。そこで ISR-1 でもこの利点を生かし、ある関節の 1 方向の運動に対して多数のアクチュエータを駆動させる。したがって、ある一つのアクチュエータが多方向の運動に関連することとなる。このようにすることによって、制御が複雑になるが、ある特定方向に対するアクチュエータの稼働効率を上げることができる。稼働効率が上がれば、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も可能になり、ロボットの大幅な軽量化を図ることができる。

2.3 内骨格構造の解析

この内骨格構造と協調駆動の特徴を内骨格機構の解析を行うことで明らかにする。協調駆動による内骨格構造は、アクチュエータと骨格をリンクに見立てることで、パラレルリンク機構としてその力学的な特性を解析することができる。

2.3.1 運動学

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 [7]。Fig. 1 (b) 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 $\mathbf{p}_h = (p_{hx}, p_{hy}, p_{hz})^T$ との幾何学的関係を Fig. 2 (a) に示す。あるリンク i の長さを l_i 、リンク i と

(a) Geometry of the inner skeleton

(b) Model of the outer skeleton

Fig. 2 Models of two types skeleton

ベースの結合点の位置ベクトルを $\mathbf{p}_i$ とする。この $\mathbf{p}_h$ 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 $\mathbf{w}_i$ 、単位方向ベクトルを $\mathbf{u}_i$ とすると

$$\mathbf{w}_i = \mathbf{p}_h - \mathbf{p}_i \quad (1)$$

$$l_i = |\mathbf{w}_i| = (\mathbf{w}_i \cdot \mathbf{w}_i)^{1/2} \quad (2)$$

$$\mathbf{u}_i = \frac{\mathbf{w}_i}{l_i} \quad (3)$$

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にしているため、 $\mathbf{w}_3 = \mathbf{p}_h$ であり $\mathbf{p}_3 = (0, 0, 0)^T$ である。

次に微小運動学を用いてリンク変位から H 点の変位を求める。

2.3.2 微小運動学

リンク i の微小変位を δl_i 、 H 点の微小並進運動を $\delta \mathbf{p}_h$ とすると、

$$l_i \mathbf{u}_i = \mathbf{p}_h - \mathbf{p}_i \quad (4)$$

式 (4) の両辺を微分する。

$$\delta l_i \mathbf{u}_i + l_i \delta \mathbf{u}_i = \delta \mathbf{p}_h - \delta \mathbf{p}_i \quad (5)$$

ここで $\delta \mathbf{p}_i = 0$ であり、式 (5) の両辺と $\mathbf{u}_i$ との内積をとると次のようになる。

$$\delta l_i + l_i \mathbf{u}_i \cdot \delta \mathbf{u}_i = \mathbf{u}_i \cdot \delta \mathbf{p}_h \quad (6)$$

$\mathbf{u}_i$ は単位ベクトルであるから $\mathbf{u}_i \cdot \delta \mathbf{u}_i = 0$ が成立するので式 (6) は以下になる。

$$\delta l_i = \mathbf{u}_i \cdot \delta \mathbf{p}_h \quad (7)$$

$\delta \mathbf{l} = (\delta l_1, \delta l_2, \delta l_3)^T$ とし式 (7) をベクトルと行列で表現すると、

$$\delta \mathbf{l} = \mathbf{J} \delta \mathbf{p}_h \quad (8)$$

$$\mathbf{J} = [\mathbf{u}_1 \mathbf{u}_2 \mathbf{u}_3]^T \quad (9)$$

となる。

式(9)で得られた $\mathbf{J}$ 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(8)より求められる。

$$\dot{\mathbf{l}}_i = \mathbf{J} \dot{\mathbf{p}}_h \quad (10)$$

2.3.3 静力学

各リンクで発生する力を $\mathbf{t}_i$ 、 H 点で発生する力を $\mathbf{F} = (f_x, f_y, f_z)^T$ 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 $\delta \mathbf{l}, \delta \mathbf{p}_h$ だけ微小運動を行ったとき、機構全体が行う仕事は以下ようになる。

$$\delta \mathbf{p}_h^T \mathbf{F} - \sum_{i=1}^3 \delta \mathbf{l}_i^T \mathbf{t}_i = 0 \quad (11)$$

$$\delta \mathbf{p}_h^T \mathbf{F} - \delta \mathbf{l}^T \mathbf{T} = 0 \quad (12)$$

ここで $\mathbf{T} = (t_1, t_2, t_3)^T$ である。

式(8)を式(12)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。

$$\mathbf{F} = \mathbf{J}^T \mathbf{T} \quad (13)$$

2.3.4 骨格のたわみ

H 点に作用する外力によるベース座標系 i 軸方向に対する骨格のたわみ、つまり H 点の変位を考える。

H 点の変位は $\delta \mathbf{p}_h$ として得られるため、式(8)より

$$\delta \mathbf{p}_h = \mathbf{J}^{-1} \delta \mathbf{l} \quad (14)$$

となる。リンク i の微小変位 $\delta \mathbf{l}_i$ は次式のようにになる。

$$\delta \mathbf{l}_i = \mathbf{D}_i \mathbf{t}_i \quad (15)$$

$$\mathbf{D}_i = \frac{\mathbf{l}_i}{A_i E_i} \quad (16)$$

ここで、 A_i, E_i はそれぞれリンク i の断面積、縦弾性係数を表す。よって、 $\delta \mathbf{l}$ は

$$\delta \mathbf{l} = \mathbf{D} \mathbf{T} \quad (17)$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} D_1 & 0 & 0 \\ 0 & D_2 & 0 \\ 0 & 0 & D_3 \end{bmatrix} \quad (18)$$

となる。

式(13)より各リンクに作用する力 $\mathbf{T}$ は次式のようにになる。

$$\mathbf{T} = [\mathbf{J}^T]^{-1} \mathbf{F} \quad (19)$$

式(19)を式(17)に代入し式(14)とまとめると骨格のたわみによる H 点の変位 $\delta \mathbf{p}_h$ は

$$\delta \mathbf{p}_h = \mathbf{J}^{-1} \mathbf{D} [\mathbf{J}^T]^{-1} \mathbf{F} \quad (20)$$

となる。

2.3.5 発生出力

H 点で発生する出力 W を求める。

H 点で発生する出力 W は、

$$W = \mathbf{F}^T \dot{\mathbf{p}}_h \quad (21)$$

となり、式(10)から H 点での速度 $\dot{\mathbf{p}}_h$ は次式のようにになる。

$$\dot{\mathbf{p}}_h = \mathbf{J}^{-1} \dot{\mathbf{l}} \quad (22)$$

式(13)と式(22)を式(21)に代入し、整理すると

$$W = \mathbf{T}^T \dot{\mathbf{J}} \quad (23)$$

となる。アクチュエータA、Bの出力をそれぞれ P_A, P_B とすると $P_A = \mathbf{t}_1^T \dot{\mathbf{l}}_1, P_B = \mathbf{t}_2^T \dot{\mathbf{l}}_2$ から

$$W = P_A + P_B \quad (24)$$

となる。

2.3.6 内骨格構造の機構評価

内骨格構造の有効性を検討するために、特定のモデルを想定した外骨格構造のモデルと比較を行う。内骨格、外骨格それぞれの H 点に外力を作用させ、その外力の方向に対する骨格のたわみを比較する。内骨格、外骨格の双方とも同一素材、同一スパンとし、その質量が等しくなるように各部の寸法を決定する。ただし、内骨格構造ではアクチュエータもその強度の一部となるが、外骨格構造でもアクチュエータは当然存在するため、アクチュエータの質量は内骨格機構の質量に含めない。

内骨格構造では、アクチュエータA、Bおよび骨格を同一直径、同一素材の丸棒構造部材と仮定する。Fig.2(a)で、 $\mathbf{p}_h = (l, 0, 0)^T$ とする。リンク1、2の配置を $\mathbf{p}_1 = (0, -a, a)^T, \mathbf{p}_2 = (0, a, a)^T$ とし、骨格(リンク3)の長さを $l = 200$ [mm], $a = 20$ [mm]とする。リンクの直径 $d = 6$ [mm], 断面積 $A = 28.26$ [mm²]とする。内骨格構造のたわみ $\delta \mathbf{p}_h$ は式(20)から求める。

外骨格構造では、Fig.1(a)の骨格構造を想定し中空丸棒とする。外骨格構造のモデルをFig.2(b)に示す。 H 点の位置 $\mathbf{p}_{h0}$ は骨格の中心を通り、その座標は $\delta \mathbf{p}_{h0} = (l, 0, 0)^T$ とする。パイプ各部の寸法は $l = 200$ [mm], $d_1 = 8$ [mm], $d_2 = 10$ [mm]とする。外骨格のたわみ $\delta \mathbf{p}_{h0}$ は、以下の式により求める。

$$\delta \mathbf{p}_{h0} = \frac{F l^3}{E I_z} \quad (25)$$

ここで I_z は断面二次モーメントを表す。

内骨格、外骨格双方ともに素材はアルミニウムとし、 $E = 7.2 \times 10^3$ [kgf/mm²]とする。外力 $F = 1$ [kgf]としFig.2(c)に示すように z - y 平面に平行に y 軸に対して F を、角度 θ で作用させる。これらの条件で、式(20)(25)により行った計算結果をFig.3に示す。パイプによる外骨格構造の場合、負荷の方向によらず、たわみは一定である。内骨格構造では、負荷の方向によってたわみ量が異なるが、いずれの場合も外骨格構造よりもはるかに小さいたわみである。このことから内骨格構造が有効であるといえる。

2.3.7 協調駆動の有効性の評価

協調駆動の有効性の評価には、広瀬らの用いた「稼働率(actuation index) η_p 」という評価基準を用いる[8]。稼働率 η_p は、ロボットが目的の動作で出力可能なパワー P に対する装備したすべてのアクチュエータ $i(i = 0, n)$ の最大出力パワーの総和 $\sum P_{\max i}$ の比率、

$$\eta_p = \frac{P}{\sum P_{\max i}} \quad (26)$$

で示される。

Fig. 3 Deflection curves of two types skeleton

y 軸回りの運動に関して、協調駆動と分離駆動の双方の稼働率を比較する。エンドエフェクタの座標は $p_{hy} = 0$ に固定する。アクチュエータは DC モータとするため、その出力は負荷により大きく変化し複雑な特性となる。ここでは、アクチュエータの出力は一定であると仮定し解析を行う。

Fig. 1 (b) のような協調駆動方式で、 y 軸回りの運動を行う場合、アクチュエータ A, B を同方向へ同速度で駆動すればよい。アクチュエータ A, B が最大出力 $P_{\max}$ で動作すると仮定すると式 (24) より、 H 点での出力 $W = 2P_{\max}$ となるため、稼働率 η_p は、

$$\eta_p = \frac{2P_{\max}}{2P_{\max}} = 1.0$$

これに対して Fig. 1 (a) のような分散駆動方式では y 軸回りの運動に関して、一つのアクチュエータ A のみが動作する。このアクチュエータが最大出力 $P_{\max}$ で動作した場合、稼働率 η_p は、

$$\eta_p = \frac{P_{\max}}{2P_{\max}} = 0.5$$

である。

この結果から、協調駆動のほうが y 軸回りの運動に関して分散駆動よりも効率が良いことが分かる。この y 軸を 2 足歩行ロボットの運動のなかで最も使用頻度が多い屈伸軸に合わせれば、ロボットの運動効率を上げることができる。また、アクチュエータを異方向に最大出力で作用させた場合も、その稼働率 $\eta_p = 1.0$ となる。このとき、運動方向は外内転軸とはほぼ一致する。

このことから協調駆動は特定の使用量の多い方向に対して効率が良いといえる。

2.4 アクチュエータ

内骨格構造で関節を協調駆動するために、アクチュエータは筋肉のように直動運動するネジシリンダ式アクチュエータを使用する。Fig. 4 にネジシリンダ式アクチュエータの動作原理を示す。このアクチュエータの動力源には DC モータを使用し、その回転運動を雌ネジを切ったシリンダとネジ棒によって直動運動に変換する。このアクチュエータには遮光形の力覚センサ [9] を取り付け、アクチュエータに作用する負荷を計測できるようにする。このような工夫を施すことで、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。シリンダの出力計測には、スライド式ポテンシオメータを使用する。股関節の内旋および外旋駆動用アクチュエータにはギアヘッド付きの DC モータを使用し、負荷の計測は行わない。

Fig. 4 Construction of screw cylinder type actuator

Fig. 5 Degrees of freedom

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、11 [W]、アクチュエータの発生力は 5 [kgf]、伸縮速度は 40 [mm/s]、そして重量は 210 [g] である。

2.5 各部の構成

ISR-1 の骨格には、主にアルミニウムを使用した。自由度は片足に対して、それぞれ股関節 3、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 の自由度の構成を Fig. 5 に示す。各関節の駆動方法を以下に示す。

(a) 股関節

Fig. 6 のように股関節では、三つの自由度に対して三つのアクチュエータを用いる。①、②のアクチュエータがともに伸縮することによって屈曲伸展を行い、①、②のアクチュエータの伸縮量の差によって外転内転を行う。内旋外旋は③のアクチュエータ単独で行う。

(b) 膝関節

膝関節では、2 自由度に対して、二つのアクチュエータを用いる。④、⑤のアクチュエータがともに伸縮することによって、屈伸を行い、④、⑤のアクチュエータの伸縮量の差によって回旋動作を行う。この膝関節の軸回旋は Fig. 7 (a) のように、膝

Fig. 6 Actuator driving method

Fig. 7 Action of link A for rotation at knee joint

関節伸展位るとき、④、⑤のアクチュエータの伸縮量の差にかかわらず、固定されない問題を生じる。そこで同図 (b) のように、リンク A とクランク B を取り付ける。伸展位ではアクチュエータ④、⑤の出力差によってクランク B が回転し、リンク A の作用によって回転する。同図 (c) の屈曲位では、アクチュエータ④、⑤の出力差がそのまま作用し回転する。このとき、クランク B が回転するが、アクチュエータ④、⑤の死点にあたるため影響を及ぼさない。

(c) 足関節および足部

足関節の 2 自由度に対して三つのアクチュエータを用いる。足部の 2 自由度に対しては二つのアクチュエータを用い⑥のアクチュエータが伸展し、⑦、⑧のアクチュエータが収縮すると、足関節の屈曲を行い、この逆の動作では伸展を行う。⑦、⑧のアクチュエータの伸縮の差によって、足関節の内返しおよび外返しを行う。このとき母指と子指の屈伸は、足関節の内返し外返しと連動で行う。ただし、接地時に⑦あるいは⑧のアクチュエータを単独で動作した場合、母指あるいは子指の屈曲が生じる。また⑦、⑧のアクチュエータを固定して、⑥のアクチュエータのみを駆動した場合、母指と子指の屈曲を行う。

2.6 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、負荷検出用の力覚センサを 14 個使用する。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り付ける。足底には、ロボットの重心検出を行うため、踵、小指および母指の 3 点

Fig. 8 Control system

に炭素シートを利用した力覚センサを取り付ける。本ロボットでは合計、38 個のセンサを使用する。

3. 制御系の構成

3.1 協調制御

本ロボットでは 1 関節を複数のアクチュエータで駆動するため、外乱等の影響で各アクチュエータの動作が不均一になり、関節部の動作軌道を乱すという問題が発生する。これは遊脚時には問題にはならないが、両脚支持期で閉ループリンクとなり関節角が拘束を受けるときに問題となる。特に股関節を屈曲させるお辞儀動作などでこの問題を生じ、最悪の場合にはロボットの転倒を引き起こす。

そこで、通常の PID 制御に加え、組となるアクチュエータの誤差を考慮した協調制御を行うとともに、アクチュエータに取り付けた圧覚センサからの負荷のデータを取り入れることでこの問題を回避する。Fig. 8 に制御系の構成を示す。入力 (Input) は各アクチュエータ (Actuator) に対して個別に与える。PID 制御器 (PID controller) で基本的な位置制御を行う。協調制御器 (Cooperate controller) で組となるアクチュエータの誤差の絶対値を取り入れ、自己の誤差の絶対値と比較する。このとき自己の誤差が大きい場合には、PID 出力に加算し、相手方の誤差が大きい場合には、PID 出力から減じる。外部からの負荷 (Force) は調節器 (Tuner) で調整する。この負荷によってアクチュエータのネジ部には負荷の方向とアクチュエータの進行方向にかかわらず、摩擦力が発生する。そこで調節器内では力の絶対値を取り、係数をかけて、アクチュエータの運動方向に出力を付加する。

アクチュエータの誤差を E 、制御器の出力を P とすると制御式は以下のようになる。 $E_n \neq 0$ のとき

$$P_n = K_p E_n + \sum K_i E_n + K_d (E_n - E_{n-1}) + (K_f |F_n| + K_{co} (|E_n| - |E_{pa}|)) E_n / |E_n| \quad (27)$$

$E_n = 0$ のとき

$$P_n = 0 \quad (28)$$

ただし、

Fig. 9 Balance control system

Fig. 10 Experiment system

K_p : 比例ゲイン, K_i : 積分項ゲイン, K_d : 微分項ゲイン,
 E_{pa} : 相手方の誤差, F : 外力, K_f : 負荷項ゲイン,
 K_{co} : 協調項ゲイン, 添え字 n はサンプリング時点を表す.

3.2 バランス制御

バランス制御系の構成を Fig. 9 に示す. 重心位置はロボットの足底の力覚センサを用いて検出する. 重心のずれを PID 制御器に入力し, その出力をあらかじめ与えた目標値に加算することで重心の補正を行う. 重心位置の補正は, ピッチ軸回りのみ行う, 足関節の屈曲で補正する.

4. 実験方法

4.1 実験装置

実験装置は, ロボット本体, 各種回路, 制御用コンピュータからなる. 実験装置の構成を Fig. 10 に示す. ISR-1 のサイズは人間の大人の約 1/2 程度とした. 本ロボットの外観を Fig. 11 に外形寸法を Fig. 12 に示す. 身長 800 [mm], 本体重量約 3.5 [kg] (ダミーロード付加時約 5.0 [kg]), 骨格の重量約 0.55 [kg] である. 一脚の代表的部位の重量は大腿部 0.84 [kg], 下腿部 0.51 [kg], 足部 0.09 [kg] である. 各関節の可動範囲は人間より狭いが, 十分な動作が得られる. ロボットの各関節の動作範囲と参考として人間の関節の可動範囲を Table 1 に示す. 人間の可動範囲は, 解剖学的自然位を基準としたものである [10]. ロボットの可動範囲は, Fig. 12 の肢位を基準としている.

本ロボットは, 本体の大きさが人間の約 1/2 であるため, ロボットに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を行い, 下位

Fig. 11 ISR-1

Fig. 12 Assembly drawing of ISR-1

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 変換インタフェースボードとのデータ転送の仲介を行う. このようにすることで, データ転送時におけるハードウェアの待ち時間を最小に押さえられるため, 計算処理の高速化が行える. モータの制御は PWM で行い, A/D 変換の分解能は 10 [bit] である.

4.2 実験方法

実験は, アクチュエータの協調制御の有効性と, 足底の重心検出用センサの有効性の確認について行う. そのため製作したロボットを実際に地上で動作させる. このときの動作としては,

Table 1 Motion range at each joint

joint	direction	angle of motion [deg]	
		ISR-1	Human
Crotch	flexion	90	125
	extension	5	15
	abduction	20	45
	adduction	20	20
	inward rotation	20	45
	outward rotation	20	45
Knee	flexion	90	130
	extension	0	0
	inward rotation	10	10
	outward rotation	10	20
Ankle	flexion	50	45
	extension	20	20
	eversion	20	20
	inversion	20	30
Great toe	flexion	15	35
	extension	15	60
Little toe	flexion	15	35
	extension	15	40

人間のお辞儀に相当する動作を採用する。人間の場合のお辞儀は、腰部の屈曲も含めて行われるが、本ロボットでは自由度の関係から股関節部の屈曲のみとする。このときの目標角度は直立位から 27° である。このお辞儀動作を行うことにより、股関節駆動用アクチュエータの内側部と外側部に異なる負荷が掛かり、協調制御の検証を行いやすい。またこのときロボットの重心は前方向に崩れるため、足関節部で補正を行わせる。このとき足関節の目標値は与えずに、重心検出用センサの情報をもとにバランス制御を行い自動的に重心位置の補正を行わせる。なお、この実験の際、ロボットの両肩にダミーロードを取り付けることにより、ロボットの重心を崩れやすくする。

5. 実験結果および考察

ロボットを地上において、お辞儀動作を行わせたときの、股関節における PID のみで制御を行った場合の動作結果を Fig. 13 に示す。同動作で協調制御を付加した場合の動作結果を Fig. 14 に、足関節における動作結果を Fig. 15 に示し、ロボットの重心の推移を Fig. 16 にそれぞれ示す。各図中において Length は、Fig. 13, 14 では大腿部アクチュエータ (Fig. 6, ①, ②), Fig. 15 では、脛部アクチュエータ (Fig. 6, ⑥, ⑦, ⑧) の直動運動に伴う出力ストロークである。Balance は、前後の重心位置であり、前方に重心が傾くと + 方向になるように軸を取っている。ロボットの全重量が母指と小指の力覚センサに静的に作用した状態を +100%、踵の力覚センサに作用した状態を -100% とする。

Fig. 13 から分かるように、PID 制御のみで関節の駆動を行った場合、アクチュエータの伸展動作時に、目標値に対する測定値の誤差が大きくなる。誤差は屈曲方向に最大 2° 、外転方向には最大 9° となる。これは体幹の屈曲動作を行う際、大腿部内側 (Fig. 6, ②) と外側 (Fig. 6, ①) のアクチュエータに作用する負荷が異なるためであると考えられる。PID 制御に協調制御を付加すると、Fig. 14 から分かるように目標値に対する誤差は非常に少なくなっている。関節角における誤差は 1° 以

Fig. 13 PID control at right crotch

Fig. 14 PID with cooperate control at right crotch

下になる。Fig. 15 のように足関節においてわずかの長さではあるが、背側部 (Fig. 6, ⑥) のアクチュエータでは収縮、外側 (Fig. 6, ⑦)、内側部 (Fig. 6, ⑧) のアクチュエータでは伸展が生じている。これにより足関節では伸展が生じていることが分かる。体幹の前屈によって生ずる重心のずれに対し、目標値と関係なく、重心の補正を行っている。この補正によって Fig. 16 の重心のずれは、動作に伴う振動成分のみとなっている。

6. 結 言

2 足歩行ロボットにおいて、軽量化は非常に重要な問題であるため、筆者らは軽量化の方策として内骨格構造とアクチュエータの協調動作を考えた。これら 2 点を取り入れた 2 足歩行ロボットを製作し、人間におけるお辞儀に相当する動作を行った。これらの実験により以下のことが明らかになった。

Fig. 15 PID with cooperate control at right ankle

Fig. 16 Balance state at feet

(1) 内骨格式の骨格構造を採用し、一つのアクチュエータを多自由度に対応させることで、非常に軽量の2足歩行ロボットが構成できた。

(2) アクチュエータを協調制御することで、安定した動作が得られた。

(3) 足底の力覚センサにより、重心の計測を行うことで、静的安定を得ることができた。

今後は、アクチュエータに取り付けた力覚センサや頭部に取り付けたジャイロセンサの情報を適切に利用し、歩行動作用プログラムの開発を行う予定である。

参考文献

- [1] 山口仁一, 高西淳夫, 加藤一郎: “上体運動により3軸モーメントを補償する2足歩行ロボットの開発”, 日本ロボット学会誌, vol.11, no.4, pp.581-586, 1993.
- [2] 山口仁一, 小林恒孝, 井上貞敏, 西野大助, 神剛志, 高西淳夫: “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—非線形ばね機構を持つ拮抗駆動型機械モデルの全体設計—”, 第13回日本ロボット学会学術講演会予稿集, no.1, pp.213-214, 1996.
- [3] すずきえいすけ, 野飼享: “二足歩行ロボットの三次元動作歩行に関する研究”, ROBOMECH'97 講演論文集, pp.845-846, 1997.
- [4] 藤江亮, 小金沢銅一: “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, pp.847-848, 1997.
- [5] 五十嵐越朗, 野飼享: “二足歩行ロボットによるSagittal plane内の下位レベル適応制御に関する研究”, 日本ロボット学会誌, vol.7, no.6, pp.656-666, 1994.
- [6] 内海真, 加藤隆, 山川新二: “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, pp.189-190, 1996.
- [7] 新井健生: “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, vol.10, no.4, pp.526-533, 1983.
- [8] 有川敬輔, 広瀬茂男: “3D 荒地地用歩行ロボットの研究 (GDAと干渉駆動に基づく最適化歩行)”, 日本ロボット学会誌, vol.13, no.5, pp.720-726, 1995.
- [9] 内海真, 加藤隆, 山川新二: “透過形赤外線センサを用いた遮光形圧覚センサの開発”, ROBOMECH'95 講演論文集, pp.94-96, 1995.
- [10] 中村隆一, 斎藤宏: 基礎運動学, pp.426-427, 医歯薬出版株式会社, 1992.
- [11] I.A. KAPANDJI 著, 島田智明 訳: カバンディ関節の生理学II 下肢, 医歯薬出版株式会社, 1986.

内海 真 (Makoto Utsumi)

1971年6月29日生。1996年工学院大学大学院機械工学専攻前期博士課程修了。現在、同大学後期博士課程在学中。主に2足歩行ロボットの研究に従事。日本機械学会の会員。

(日本ロボット学会学生会員)

山川新二 (Shinji Yamakawa)

1932年4月30日生。1955年東京大学工学部機械工学科卒業。工学博士。主に不規則振動データ処理の解析、非線形振動系の同定などの研究に従事。1987年および1997年に日本機械学会および自動車技術会より功労賞受賞。現在、工学院大学教授。日本機械学会、日本設計工学会、自動車技術会などの会員。

(日本ロボット学会正会員)

加藤 隆 (Takashi Kato)

1945年1月18日生。1973年工学院大学大学院機械工学専攻修了。工学博士。主に自立形移動ロボットおよびハンドの開発研究、図形処理に関する研究に従事。現在、工学院大学助教授。日本機械学会、精密工学会などの会員。(日本ロボット学会正会員)