

JAERI - M
91-197

二足歩行ロボットWL-12 (Waseda Leg-12) の
設計に関する調査報告

1991年11月

高西 淳夫*・加藤 一郎*・久米 悦雄

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-
mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1991

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 いばらき印刷㈱

二足歩行ロボットWL-12(Waseda Leg-12)の設計に関する調査報告

日本原子力研究所東海研究所情報システムセンター

高西 淳夫*・加藤 一郎*・久米 悦雄

(1991年10月18日受理)

日本原子力研究所では、原子力知能化システム技術の研究テーマのもとで、二足歩行ロボットの研究を行っている。これまでにヴコプラトビッチの人体モデルを用いて直進定常歩行及び発進・停止歩行の完全歩行シミュレーションを実現した。今後は、シミュレーション結果の妥当性の検証と機械モデルの機構や特性等ハードウェアに関する問題点を明らかにするために、実際のハードウェアを試作する必要があり、現在ハードウェア化を目的としたモデル開発を進めている。そのため、二足歩行ロボットの設計に関する調査を実施した。

本報告書は、早稲田大学における二足歩行ロボットWL-12の設計に関する調査報告であり、定常歩行、発進、停止動作を行う二足歩行ロボットの機械モデル及び制御システムの設計について述べたものである。

A Survey Report for the Design of Biped Locomotion Robot:
the WL-12 (Waseda Leg-12)

Atsuo TAKANISHI*, Ichiro KATO* and Etsuo KUME

Computing and Information Systems Center
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received October 18, 1991)

A mechanical design study of biped locomotion robots is going on at JAERI within the scope of the Human Acts Simulation Program (HASP). The design study at JAERI is of an arbitrarily mobile robot for inspection of nuclear facilities. A survey has been performed for collecting useful information from already existing biped locomotion robots.

This is a survey report of the biped locomotion robot: the WL-12 designed and developed at Waseda University. This report includes the mechanical model and control system designs.

Keywords: HASP (Human Acts Simulation Program), Robot, Robot Design, Biped Locomotion, Mechanical Model, Control System, Actuator, Structural Materials, Sensor, Compensating Motion

* Waseda University

目 次

1. はじめに	1
2. 機械モデル	1
2.1 WL-12	2
2.2 WL-12R	15
2.3 WL-12RⅡ	22
2.4 WL-12RⅢ	22
3. 制御システム	26
3.1 WL-12	26
3.2 WL-12R	30
3.3 WL-12RⅢ	32
4. おわりに	36
謝 辞	36
参考文献	37
付 録	38

Contents

1. Introduction	1
2. Mechanical Model	1
2.1 WL-12	2
2.2 WL-12R	15
2.3 WL-12RⅡ	22
2.4 WL-12RⅢ	22
3. Control System	26
3.1 WL-12	26
3.2 WL-12R	30
3.3 WL-12RⅢ	32
4. Concluding Remarks	36
Acknowledgements	36
References	37
Appendix	38

1. はじめに

われわれは、1986年に歩容安定化のための補償器として上体機構部を有する2足歩行ロボットWL-12 (Waseda Leg-12)を開発した¹⁾。以後、WL-12を用いて2足歩行ロボットの環境適応能力に関する研究を行ってきた。現在までに、外乱のない水平、平坦路上で0.8 [sec/step] , 0.3 [m/step] の動完全歩行、リアルタイム制御装置を搭載した2足歩行ロボットWL-12RⅢ (Waseda Leg-12 Refined Ⅲ) で腰部、進行方向後方に最大で、大きさ100 [N] , 時間幅0.3 [S] の矩形の外力が加わる環境下で0.64 [sec/step] の動的足踏み状態を実現した²⁾。

本報告書では2足歩行ロボットの設計例としてWL-12を中心にその改良モデル、WL-12R³⁾、WL-12RⅡ⁴⁾ WL-12RⅢを取り上げ、その機械モデルおよび制御システムの設計と構成について述べる。

2. 機械モデル

2.1 WL-12

2足歩行機械モデルWL-12は、下肢の上に3自由度の上体部を有する。そのため重心の位置が高くなり、各部の微小なたわみやガタにより、重心の位置に大きな誤差が生じる恐れがある。この点を考慮し、次の方針に従って設計した。

- (1) 各部の軽量化を図る。
- (2) たわみ、ガタ等の機械的誤差を少なくする。

WL-12の組立図を図2.1に示し、全体図の写真を写真2.1に示す。また以下についてその構成について述べる。

2.1.1 自由度構成

下肢の軽量化を図るため足首部、膝部、股部の自由度はピッチのみとし、両足あわせて6自由度とした。上体部には、ピッチ、ロールおよび並進の3自由度を与え上下合計9自由度である。WL-12の自由度配置図を図2.2に示す。

2.1.2 WL-12の構成

足底板には、足首部アクチュエータが直結しており、足首部アクチュエータの出力軸は、L字部材、下腿部円筒部材を通して膝部アクチュエータにつながる。膝部アクチュエータの出力軸は、L

1. はじめに

われわれは、1986年に歩容安定化のための補償器として上体機構部を有する2足歩行ロボットWL-12 (Waseda Leg-12)を開発した¹⁾。以後、WL-12を用いて2足歩行ロボットの環境適応能力に関する研究を行ってきた。現在までに、外乱のない水平、平坦路上で0.8 [sec/step]、0.3 [m/step]の動完全歩行、リアルタイム制御装置を搭載した2足歩行ロボットWL-12RⅢ (Waseda Leg-12 Refined Ⅲ)で腰部、進行方向後方に最大で、大きさ100 [N]、時間幅0.3 [S]の矩形の外力加わる環境下で0.64 [sec/step]の動的足踏み状態を実現した²⁾。

本報告書では2足歩行ロボットの設計例としてWL-12を中心にその改良モデル、WL-12R³⁾、WL-12RⅡ⁴⁾ WL-12RⅢを取り上げ、その機械モデルおよび制御システムの設計と構成について述べる。

2. 機械モデル

2.1 WL-12

2足歩行機械モデルWL-12は、下肢の上に3自由度の上体部を有する。そのため重心の位置が高くなり、各部の微小なたわみやガタにより、重心の位置に大きな誤差が生じる恐れがある。この点を考慮し、次の方針に従って設計した。

- (1) 各部の軽量化を図る。
- (2) たわみ、ガタ等の機械的誤差を少なくする。

WL-12の組立図を図2.1に示し、全体図の写真を写真2.1に示す。また以下についてその構成について述べる。

2.1.1 自由度構成

下肢の軽量化を図るため足首部、膝部、股部の自由度はピッチのみとし、両足あわせて6自由度とした。上体部には、ピッチ、ロールおよび並進の3自由度を与え上下合計9自由度である。WL-12の自由度配置図を図2.2に示す。

2.1.2 WL-12の構成

足底板には、足首部アクチュエータが直結しており、足首部アクチュエータの出力軸は、L字部材、下腿部円筒部材を通して膝部アクチュエータにつながる。膝部アクチュエータの出力軸は、L

字部材、大腿部円筒部材を通して股部アクチュエータの出力軸につながり、股部アクチュエータは、骨盤に直結されている。ここで、アクチュエータの出力軸とL字部材は、キー締結により固定されている。(写真2.2) また、骨盤には、上部部ロール軸のアクチュエータも直結しており、その出力軸は、上部部ワク部材により、上部部ピッチ軸アクチュエータの出力軸につながる。(写真2.3) さらに、上部部ピッチ軸アクチュエータに直結されたL字部材により直動シリンダにつながっている。また、骨盤の両脇には、コンピュータボックスが取り付けられており、メンテナンス性を良くするため、取り外しが可能になっている。

2.1.3 アクチュエータ

前機械モデルWL-10RDでは12自由度のうち10自由度にDCモータとRSA(Rotary Servo Actuator)を使用していたが、この場合、DCモータからRSAの内部機構に至るまでの過程が複雑になり、位置の制御精度やトルクフィードバック制御時における安定性に問題があった。

そこで、上部部の1自由度に直動シリンダとサーボ弁、残りの8自由度には、RA(Rotary Actuator)とサーボ弁と組み合わせた電気油圧サーボシステムを採用し関節を直接制御できるようにした。

RAを設計するに当たり、次の方針に従って設計した。

- (1) RAの小型化、軽量化を図る。
- (2) 出力トルクは、すべて30 [kgf・m] とする。

RAの最適な出力トルクは動的項まで考慮すると複雑であり、しかも設計段階では、歩行パターンも明確でなく、理論的に求めることは難しい、前機械モデルWL-10RD⁵⁾ で使われていたRSAの出力トルクは、足首ピッチ、股ロールおよび膝で30 [kgf・m]、足首ロールと股ピッチで20 [kgf・m] であり、このモデルにより1歩1.5秒の平行型直進歩行を実現している。そこで、この研究結果を踏まえ、RAの出力トルクをすべて30 [kgf・m] とした。またこのRAには、トルク検出用の圧力センサを付加し歩行の際、RAに加わるトルクをモニタリングできるようにした。

各RAとも、可動角は90 [deg] 以上必要ないため、ベーン形状は、図2.3に示すようなダブルベーン型にした。さらに、小型化、軽量化のために外部油路とし使用圧力100 [kgf/cm²] とした。以上のことにより、決定したベーンの形状寸法を表2.1に示す。

無負荷状態における角速度 ω [deg/sec] は、サーボ弁の流量を Q [l/min] とすると、次式で表される。

$$\omega = \frac{720Q}{(h^2 - d^2)\pi b} \quad (2.1)$$

また、サーボ弁の流量 Q [l/min] は

$$Q = \frac{IQ_R}{I_R} \sqrt{\frac{P_S - P_L - P_T}{70}} \quad (2.2)$$

ただし、

$$\begin{aligned} Q_R &: \text{定格流量 [l/min]}, & I &: \text{入力電流 [mA]} \\ I_R &: \text{定格電流 [mA]}, & P_L &: \text{負荷圧力 [kgf/cm}^2\text{]} \end{aligned}$$

P_s : 供給圧力 [kgf/cm²] , P_T : 戻り圧力 [kgf/cm²]

となる。この場合、 $P_s - P_T = 100$ [kgf/cm²] , $P_L = 0$ [kgf/cm²] であり、サーボ弁の仕様により $Q_R = 7.0$ [l/min] である。そこで $I / I_R = 1$ とすると、

$$Q = 7.0 \times \sqrt{\frac{100}{70}} = 8.367 \text{ [l/min]} \quad (2.3)$$

となり、式(2.3)を式(2.1)に代入して求めた結果を表2.2に示す。

直動シリンダでは、使用圧力を 100 [kgf/cm²] とすると、逆に大型化してしまい重くなってしまふ。そこで直動シリンダだけは、使用圧力を減圧弁を通し、20 [kgf/cm²] とし、空気圧用のものを採用した。RAの仕様を付表2.1, 2.2, 2.3に直動シリンダの仕様を付表2.4に、サーボ弁の仕様を付表2.5, 2.6に示す。さらに、可動角図を図2.4に示し、RAシステムの油圧回路図を図2.5に示す。

2.1.4 構造部材

WL-12の構造部材は、L字部材、円筒部材、足底板、骨盤、コンピュータボックスには軽量かつ高強度なC. F. R. P (Carbon Fiber Reinforced Plastics)を使用し、アクチュエータ、マニホールド、上体部ワク部材、スパイク、その他細部にはジュラルミンを使用した。またアクチュエータの出力軸には、強度を考慮し、クロムモリブデン鋼を使用した。

2.1.5 状態検出部

WL-12は、状態検出部として、ポテンシオメータ、タコジェネレータ、速度センサおよび圧力センサを有している。

(1) ポテンシオメータ (角度センサ)

RAの出力角度、直動シリンダの移動距離を検出するためにポテンシオメータの出力軸に直結することにより(写真2.4)、バックラッシュがなく、正確な角度情報を得ることができる。

ポテンシオメータの仕様を付表2.7, 2.8, 2.9に示す。

(2) タコジェネレータ

従来は、角速度のフィードバックをソフトウェアでおこなっていたが、より制御性を高めるために、RAの出力軸にタコジェネレータを直結し(写真2.5)、直動シリンダには、リニア速度センサを直結して(写真2.6)、直接、角速度、速度を検出している。タコジェネレータ、速度センサの仕様を付表2.10, 2.11に示す。

(3) 圧力センサ

前機械モデルWL-10RDでは、アクチュエータに加わる力の検出にひずみゲージを用いていたが、温度ドリフト、メンテナンス性の面で問題があった。そこで全自由度に圧力センサを用いた。また圧力センサは、サーボ弁とともにRAに直結した構造にした。(写真2.7) これにより、圧力センサ、サーボ弁およびRA間の圧力損失がほとんどなくなり、正確なトルク情報も得られる。

圧力センサの仕様を付表2.12に示す。

2.1.6 重量配置

WL-12の重量配置図を図2.6に示す。

2.1.7 各部強度計算

(1) 上体のたわみ

上体部を図2.7のようにモデル化し、上体が ωt だけ傾き、頭部がA点から a だけ伸びたときを考える。このときA点にかかるモーメント M は、

$$M = W a \sin \omega t \quad (2.4)$$

頭部におけるたわみ v は

$$v = \frac{a^3}{3EI} W \sin \omega t \quad (2.5)$$

となる。また、圧縮力 P は、

$$P = W \cos \omega t \quad (2.6)$$

となり、A点における引張応力 σ_A は、

$$\sigma_A = \frac{32M}{\pi d^3} + \frac{4P}{\pi d^2} = \frac{32W \sin \omega t \times a}{\pi d^3} + \frac{4W \cos \omega t}{\pi d^2} \quad (2.7)$$

ここで、 $W=30$ [kgf]、 ωt はピッチ軸とロール軸の可動角が、 35 [deg] より、

$$\omega t = \tan^{-1} \frac{\sqrt{(\sin^2 35^\circ + \sin^2 35^\circ \cos^2 35^\circ)}}{\cos 35^\circ \cos 35^\circ} \approx 47.85 [\text{deg.}] \quad (2.8)$$

$a=325$ [mm]、 $d=20$ [mm] より、諸値を(2.5) (2.6) (2.7)に代入すると、

$$v = 1.39 [\text{mm}] \quad (2.9)$$

$$\sigma_A = 8.85 [\text{kgf/mm}^2]$$

そこで、ロッドの材料は、SS41なので安全率 f は、

$$f = \frac{\sigma_w}{\sigma_A} = \frac{41}{8.8456} = 4.635 \quad (2.10)$$

となる。

(2) 足首部L字部材のたわみ

L字部材は、2個で1個のコの字部材を形成している。そこで、この場合、1個のコの字部材として考える。

WL-12を図2.8のようにモデル化する。モデルが、鉛直方向より θ だけ傾いているとき、A点には、集中荷重 $W \sin \theta$ とモーメント荷重 $LW \sin \theta$ を受けていると考えることができる。

そこで、たわみ v は、

$$v = \frac{l^3}{3EI} W \sin \theta + \frac{l^2}{2EI} LW \sin \theta \quad (2.11)$$

となる。ここで、 $(L+1)$ は足首部アクチュエータの出力軸から重心までの距離であり、 $l=141$ [mm]、 $L=559$ [mm]、 $E=5000$ [kgf/mm²] (材料C. F. R. P.)、また、アクチュエー

タの可動角は ± 45 [deg] より $\theta = 45$ [deg] とする。さらに、コの字部材を水平面で切った時の断面図は図2.9のようになるので、この場合のIは、

$$I = b^3 \{h+t-(h-t)\} / 12 = b^3 t / 6 \quad (2.12)$$

となる。 $b = 80$ [mm] , $t = 11$ [mm] , $h = 127$ [mm] であるので、

$$I = 938666.67 \text{ [mm}^4\text{]} \quad (2.13)$$

したがって、 $W = 100$ [kgf] とし、諸値を式(2.11)に代入すると、

$$v = 9.78 \times 10^{-2} \text{ [mm]} \quad (2.14)$$

となる。

(3) キーの強度計算

アクチュエータの出力軸とL字部材はキー締結により固定されている。そこで、図2.10のように、キーの幅を b 、高さを h 、長さを l 、また、アクチュエータの出力軸の直径を d 、伝達トルクを T とすると、キーに生じるせん断応力 τ_k は、

$$\tau_k = 2T / (bld) \quad (2.15)$$

となる。ここで、軸がロール軸アクチュエータの場合、 $d = 20$ [mm] , $T = 30$ [kgf·m] , $b = 6$ [mm] , $l = 25$ [mm] であるから、 τ_k は、

$$\tau_k = 20 \text{ [kgf/mm}^2\text{]} \quad (2.16)$$

また、キー溝に生じる面圧 σ_c は、

$$\sigma_c = 4T / (hld) \quad (2.17)$$

であり、 $h = 6$ [mm] より、

$$\sigma_c = 40 \text{ [kgf/mm}^2\text{]} \quad (2.18)$$

ピッチ軸アクチュエータは出力軸が両振りなので、伝達トルク $T = 15$ [kgf·m] となる。また、この場合、 $d = 17$ [mm] , $b = 5$ [mm] , $l = 25$ [mm] であるので、

$$\tau_k = 14.12 \text{ [kgf/mm}^2\text{]} \quad (2.19)$$

$$\sigma_c = 28.24 \text{ [kgf/mm}^2\text{]} \quad (2.20)$$

となる。

(4) アクチュエータの出力軸の強度計算

図2.11のように、アクチュエータの出力軸は、キー溝を有しているので、許容応力を低く定めて設計しなければならない。そこで、キー溝がある場合の許容応力を τ_k 、キー溝が無い場合の許容応力を τ とすると、

$$\tau_k = a \tau \quad (2.21)$$

$$(a = 1.0 - 0.2b/d - 1.1t/d)$$

と表せられる。そこで、伝達トルクを T 、安全率を f とすると、

$$\frac{\tau_k}{f} = \frac{16d_1}{\pi(d_1^4 - d_2^4)} T \quad (2.22)$$

となる。ここで、軸の材質はSCM440を使用したので、引張強さ $\sigma_B = 180$ [kgf/mm²] なので、許容せん断応力は、その3分の1と考え $\tau = 60$ [kgf/mm²] とした。上部部ロール軸アクチュエー

タの場合, $T=30$ [kgf. m], $d_1=20$ [mm], $d_2=0$ [mm], $b=6$ [mm], $t=3.2$ [mm] なので, これらを (2.21) (2.22) に代入すると,

$$f=2.40 \quad (2.23)$$

また, 上体部ピッチ軸アクチュエータの場合は, $T=15$ [kgf. m], $d_1=17$ [mm], $d_2=6.5$ [mm], $b=5$ [mm], $t=3$ [mm] より,

$$f=2.89 \quad (2.24)$$

となる。

表2.1 各RAのベーンの形状寸法

アクチュエータ	d [mm]	h [mm]	b [mm]
足首部, 膝部, 股部 RA	24	54	55
上体部ピッチ軸 RA	24	54	55
上体部ロール軸 RA	27	55	55

表2.2 無負荷状態における各RAの角速度

アクチュエータ	角速度 ω [deg/sec]
足首部, 膝部, 股部 RA	248.3
上体部ピッチ軸 RA	248.3
上体部ロール軸 RA	253.1

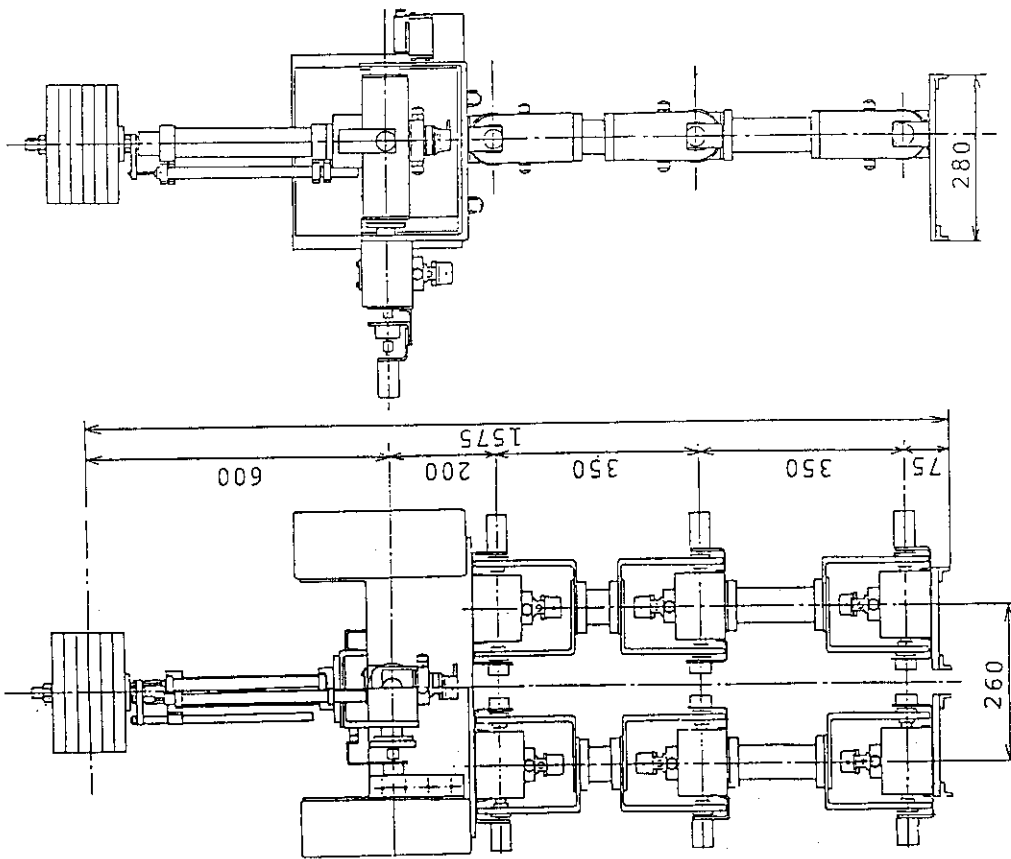
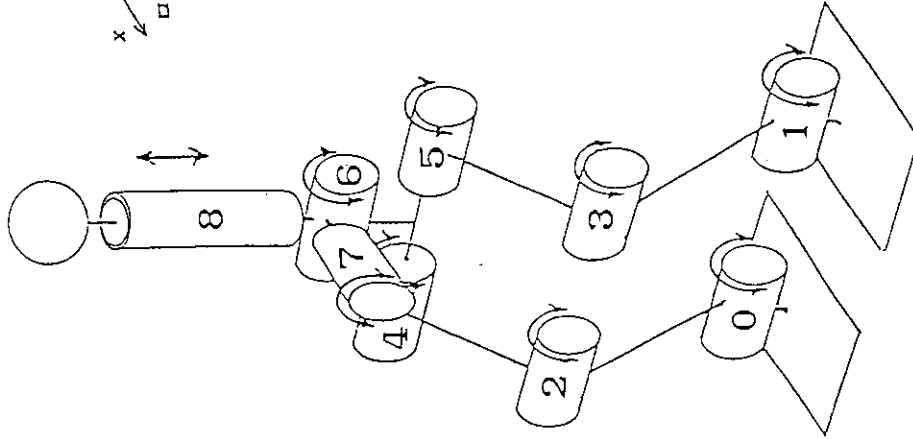
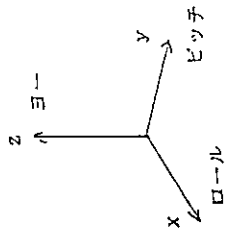


図2.2 自由度配置図

図2.1 WL-12組立図

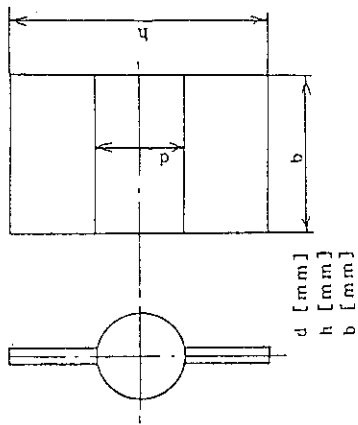
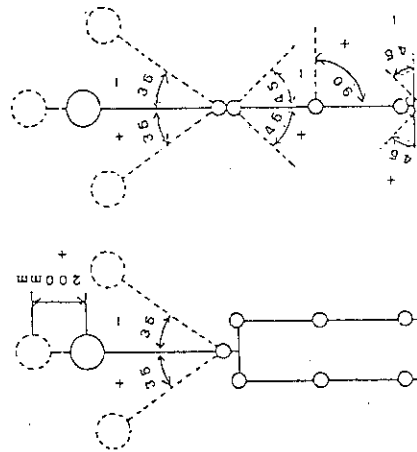


図2.3 ベーンの形状



(a) 前頭面 (b) 矢状面

図2.4 可動角図

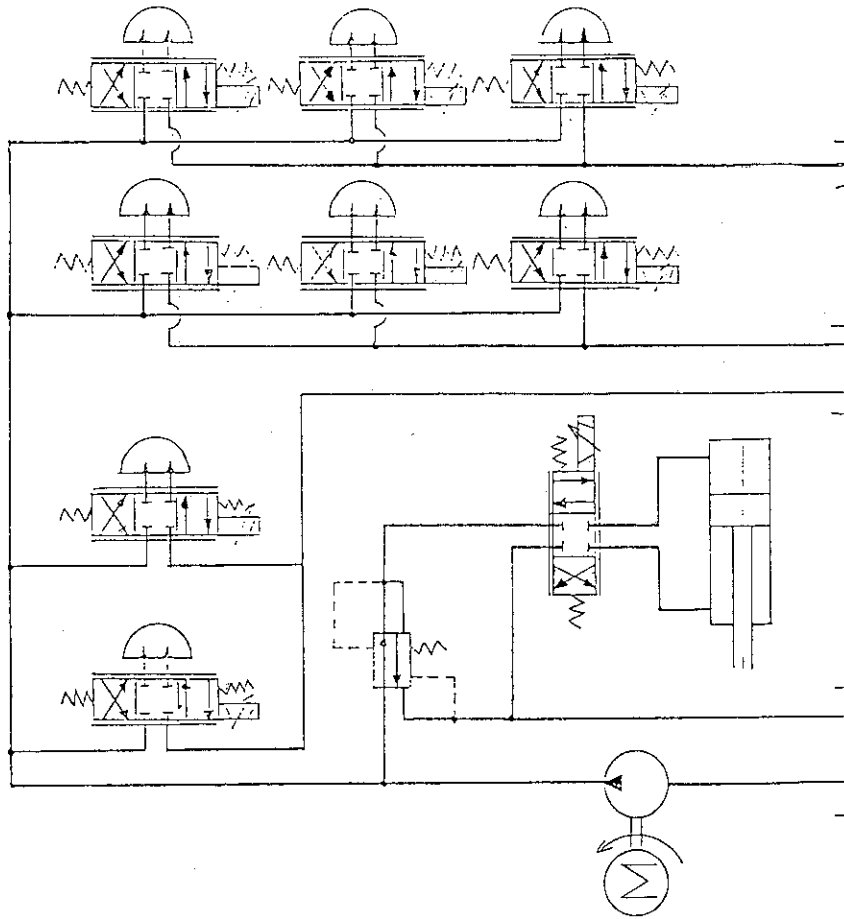
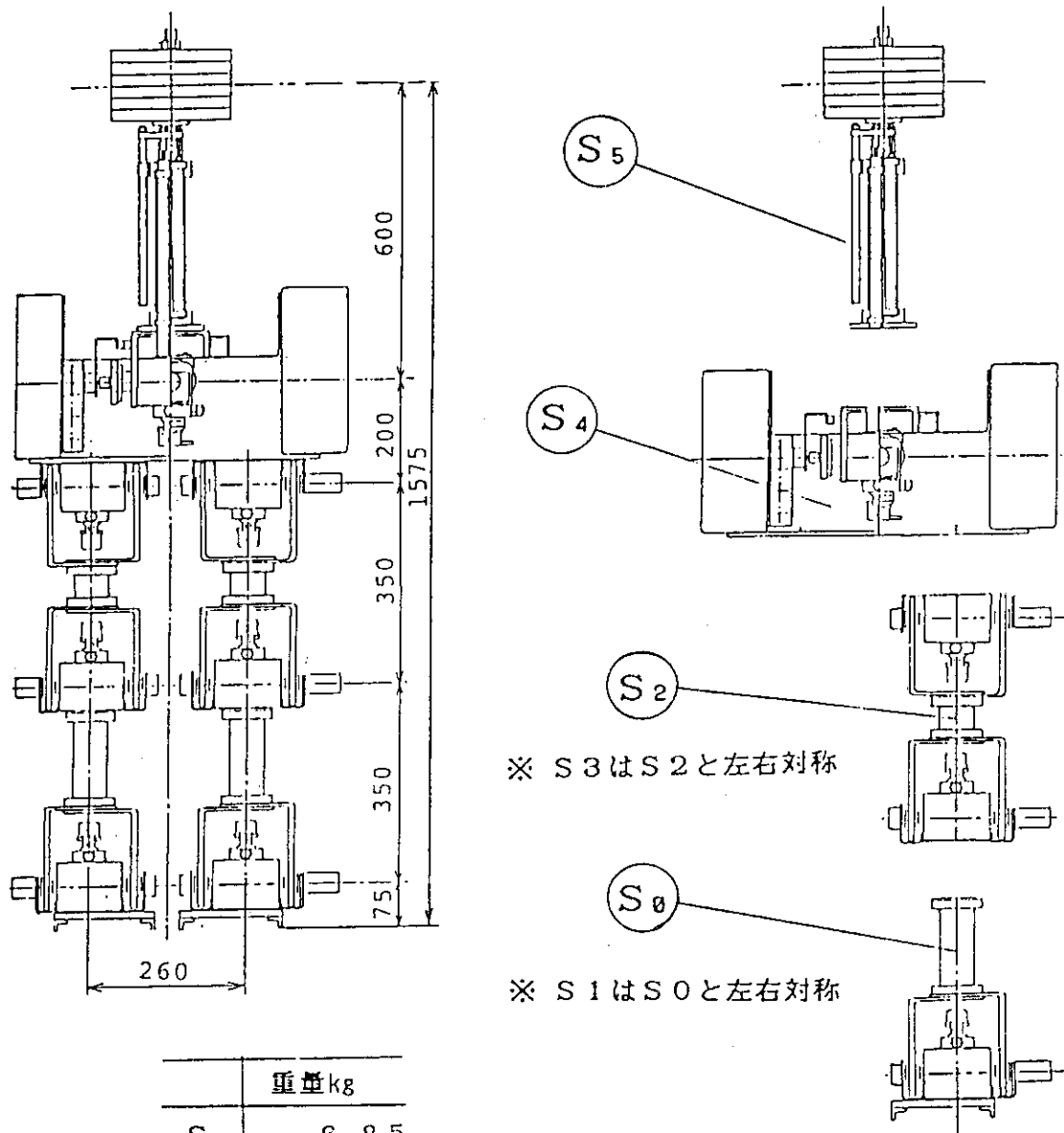


図2.5 油圧回路図



	重量kg
S ₀	6.85
S ₁	6.85
S ₂	13.15
S ₃	13.15
S ₄	20.00
S ₅	40.00
$\sum_{i=0}^5 S_i$	100.00

図2.6 重量配置図

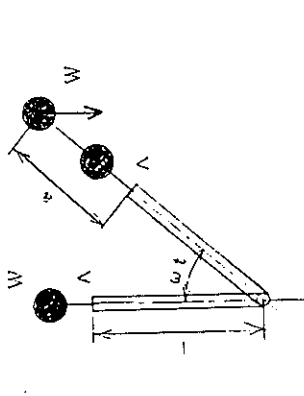


図2.7 上部部モデル

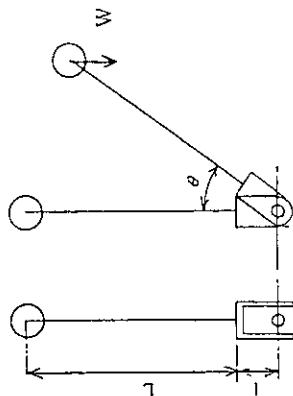


図2.8 コの字部材

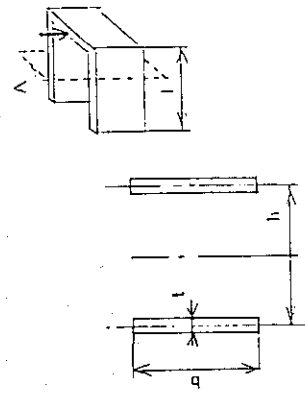


図2.9 コの字部材断面

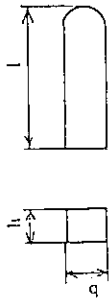


図2.10 キー形状

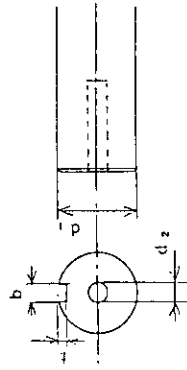
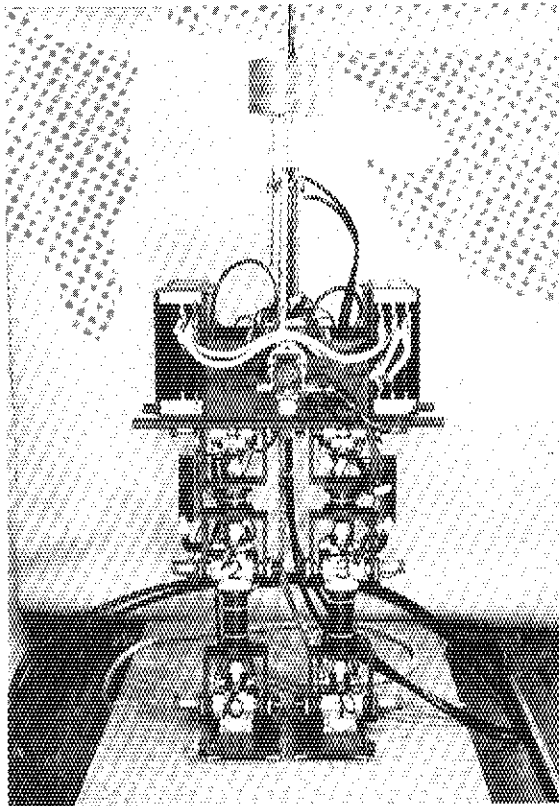
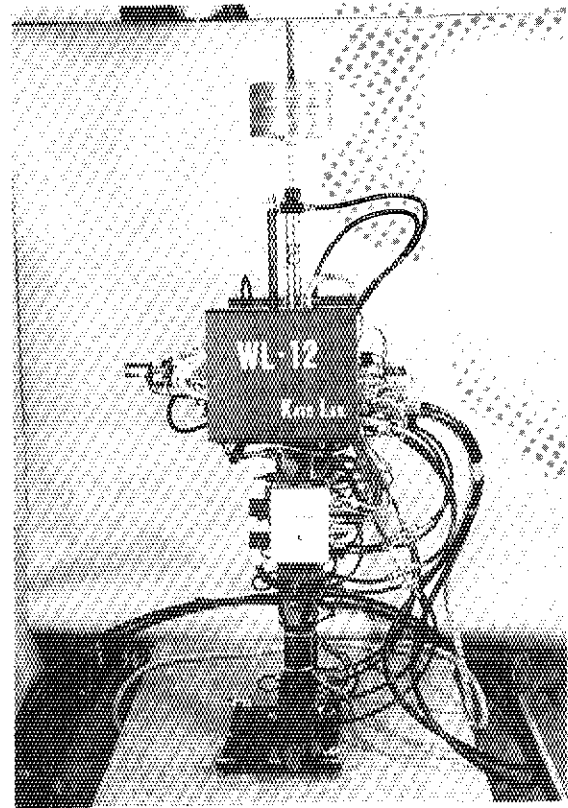


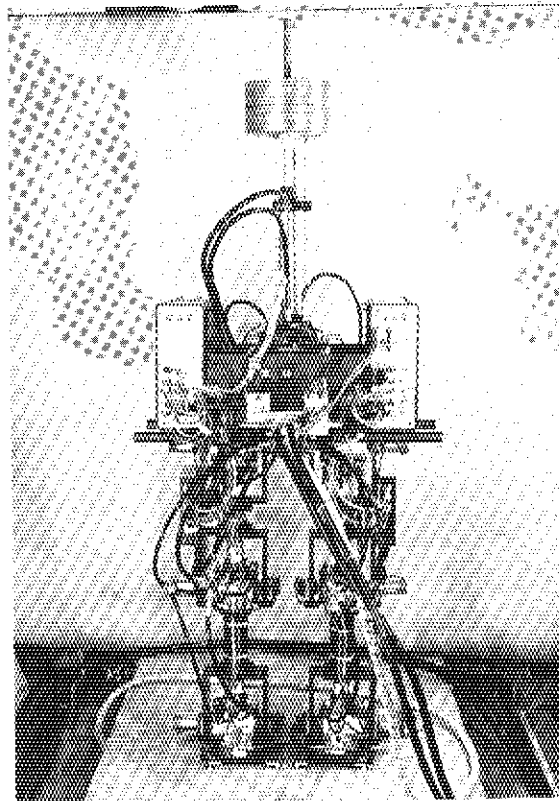
図2.11 出力軸形状



(a) 正面図



(b) 側面図



(c) 背面図

写真2.1 WL-12全体図

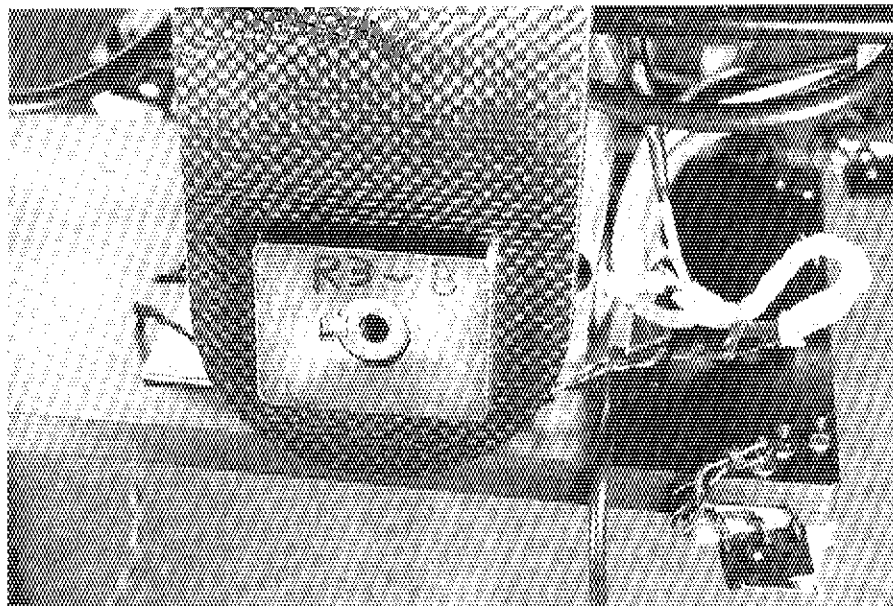


写真2.2 キー締結による固定

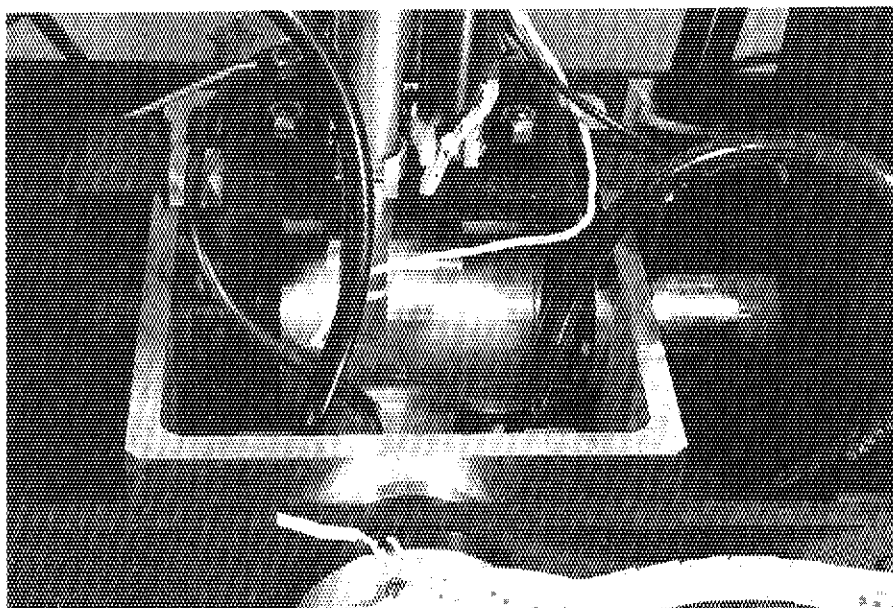


写真2.3 上部部ワク部材

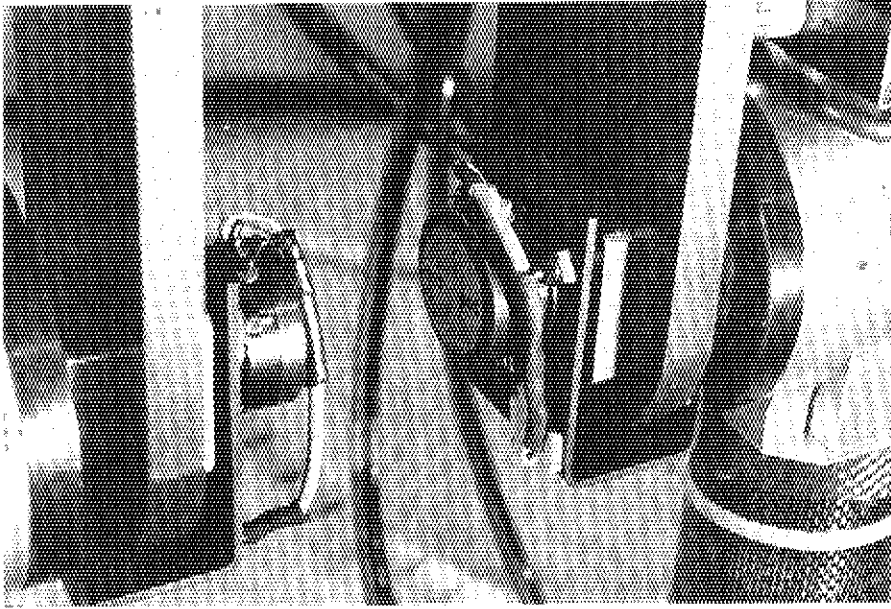


写真2.4 ポテンショメータ

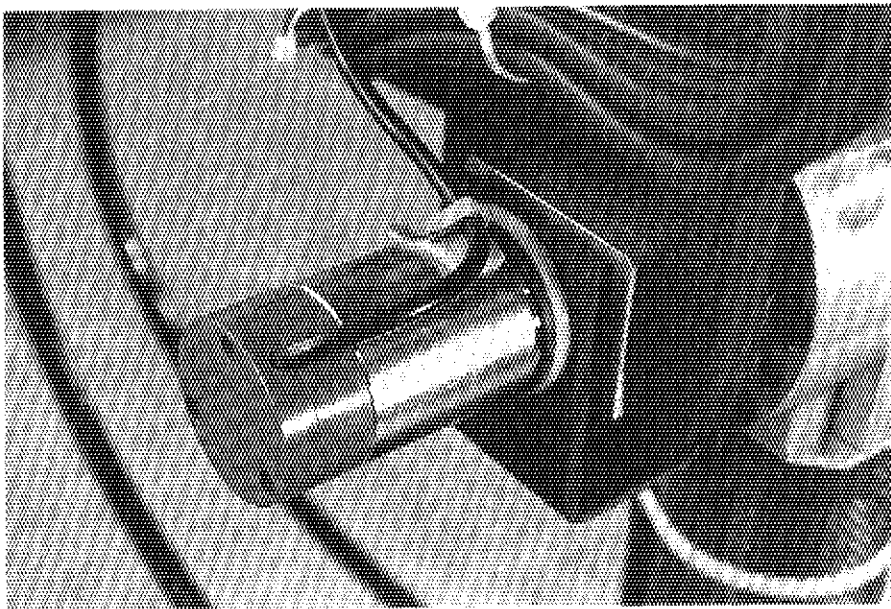


写真2.5 タコジェネレータ

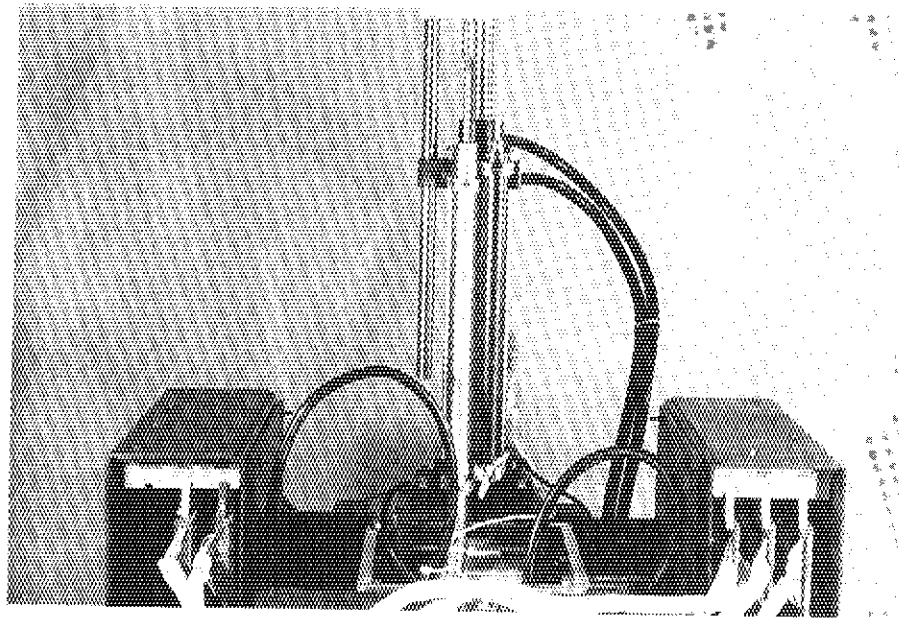


写真2.6 リニア速度センサ, ポテンショメータ

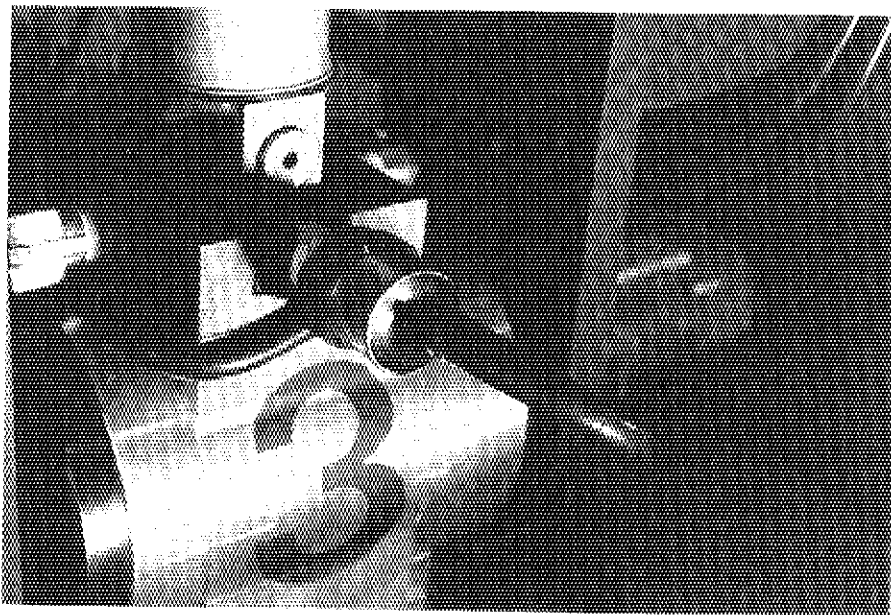


写真2.7 圧力センサ

2.2 WL-12R

2.2.1 機械モデルの改良点

WL-12には2つの大きな問題点があった。まず第一に機械モデルの構造部材全体の剛性が不足していた。よって、その影響により、歩行の際に2つの問題、すなわち、

- (1) Z軸まわりのひねり
- (2) 遊脚の高さのずれ

が生じ、安定な歩行実現の大きな障害となっていた。

第2に、本モデルは、当初の設計の予定に比べて、重量オーバーになっていた。つまり、本モデルは、ロボットの重量をアクチュエータの軸で支える構造になっている。そしてその軸を設計する際に、いちばん荷重のかかる足首部のアクチュエータで、ロボットの総重量を90 [kg]、安全率 1.3として計算した。しかし実際に製作した機械モデルは総重量が 107 [kg] になってしまい、アクチュエータ軸に降伏応力すれすれの力が作用していることとなり、非常に危険な状態となっていた。これらの問題点を克服すべく、以下のような機械モデルの改良をおこなった。

2.2.2 構造部材の改良

下肢部のL字部材は図2.12に示すような曲げとねじりに対する補強を目的として、同図のような補強板を張った。すなわち、曲げ荷重P [kgf]、ねじりモーメントM [kgf・mm]に対するたわみ量はそれぞれ、

$$v = AI^3P / (EI) \quad (3.1)$$

$$\phi = BIM / (GI') \quad (3.2)$$

ただし、

v : たわみ量 [mm]

ϕ : たわみ角 [rad]

E : 縦弾性係数 [kgf/mm²]

G : 横弾性係数 [kgf/mm²]

I : 断面2次モーメント [mm⁴]

I' : 有効断面2次モーメント [mm⁴] (A, Bは定数)

と表せられる、そこでEI, GI'を増すために①のC. F. R. P. の補強板をつけた。また、Iを小さくするために②の補強板(C. F. R. P.)をつけた。特に①の補強板についてはねじり方向に対する補強効果を大きくするために繊維を45度方向に張った。補強したL字部材を写真2.8に示す。

カーボン材の異方性や、部材に穴があいていることによる応力集中などのことで、v-p, ϕ -Mの関係の正確な理論値を求めることは一般に困難である。そこで実際にたわみ試験を行ったところ図2.13のような結果を得た。同図により、曲げ、ねじりに対する剛性はそれぞれ約2倍、4倍になった。

また、応答データより得られたトルク線図を図2.14に示す。この図により改良前後を比較すると、

- (1) トルクの変化が滑らかになり、振幅が小さくなった。
- (2) 歩行終了時の振幅の減衰率が大きくなった。

ことがわかる。

さらに、トルク線図を高速フーリエ変換して比較したものを図2.15に示す。

これにより、歩行中のロボットの揺れの振幅が小さくなっていることがわかる。

2.2.3 ロボットの軽量化

WL-12を製作する際、まだロボットの歩行アルゴリズムが確立されておらず、上体のおもりが3次元空間内の任意の軌道を動けるように、ピッチ方向、ロール方向の他に直動シリンダを取り付け、上体3自由度としていた。

しかし、ピッチとロールの2自由度でも、われわれが開発した繰り返し計算により非線形問題を解決する歩行パターン作成アルゴリズムを開発したことにより直動シリンダは不用となり、これをカーボンパイプに代え、ロボットの軽量化を図った。上体部の図を図2.16および写真2.9に示す。上体を設計するにあたっては、③のパイプは、30 [kg]のおもりをのせることを考え、直動シリンダのパイプ+ガイドロッドと断面2次モーメントIが等価になるようにその直径を決定した。①のパイプはおもりの形状から直径の制約があるので高剛性の材料を使用した。これにより上体部は、7 [kg]から2 [kg]になり、さらに1自由度減ったことにより、直動シリンダ用のサーボ弁、センサ、油圧ホースなどが不用になり、構造が非常に簡単になった。そのためマニホールドも4 [kg]から1 [kg]に軽量化された。ロボット全体では、107 [kg]から99 [kg]に軽量化されたことになる。これによりWL-12Rの自由度構成は上体2自由度、下肢6自由度、合計8自由度となった。WL-12Rの組立図、自由度配置図、重量配置図をそれぞれ図2.17、図2.18、図2.19に示す。

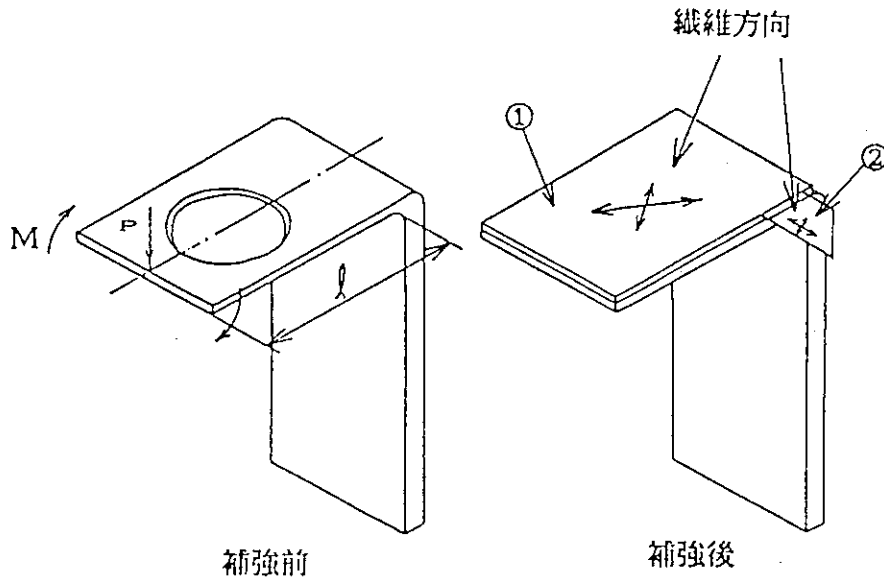


図2.12 下肢部L字部材の補強

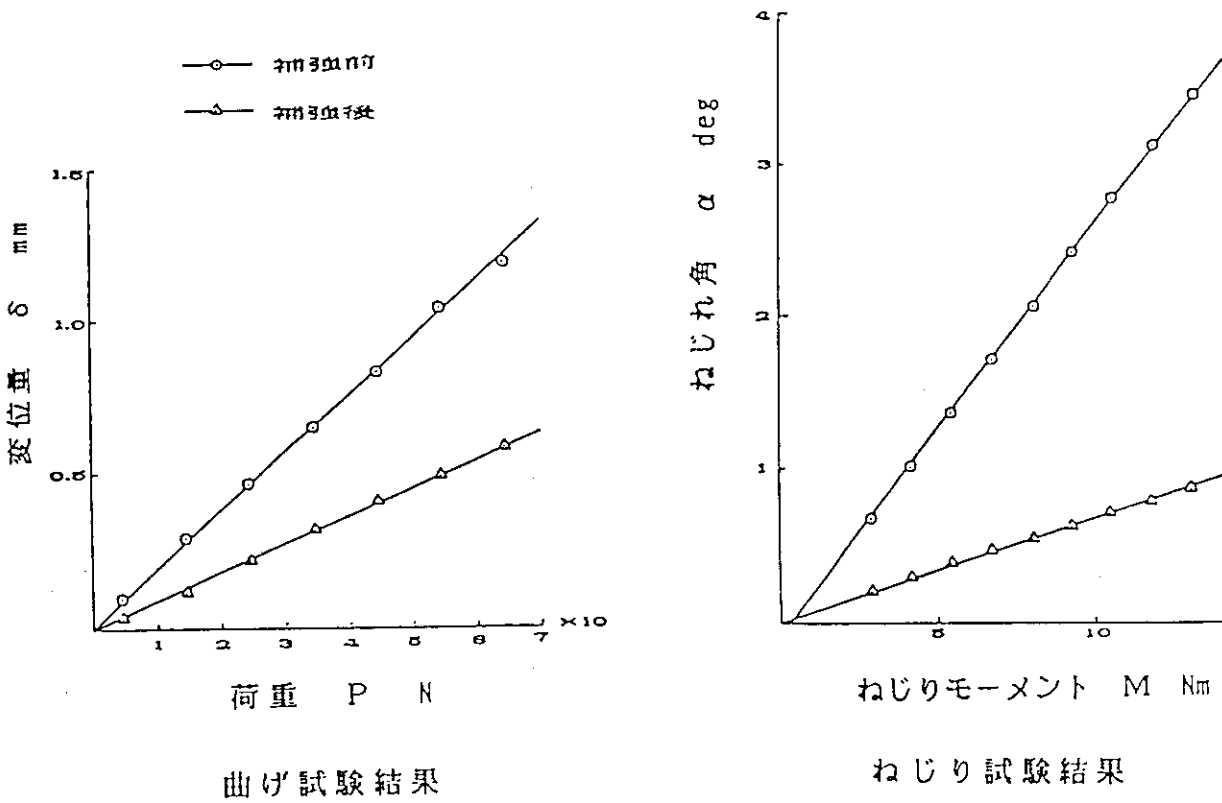


図2.13 たわみ試験結果

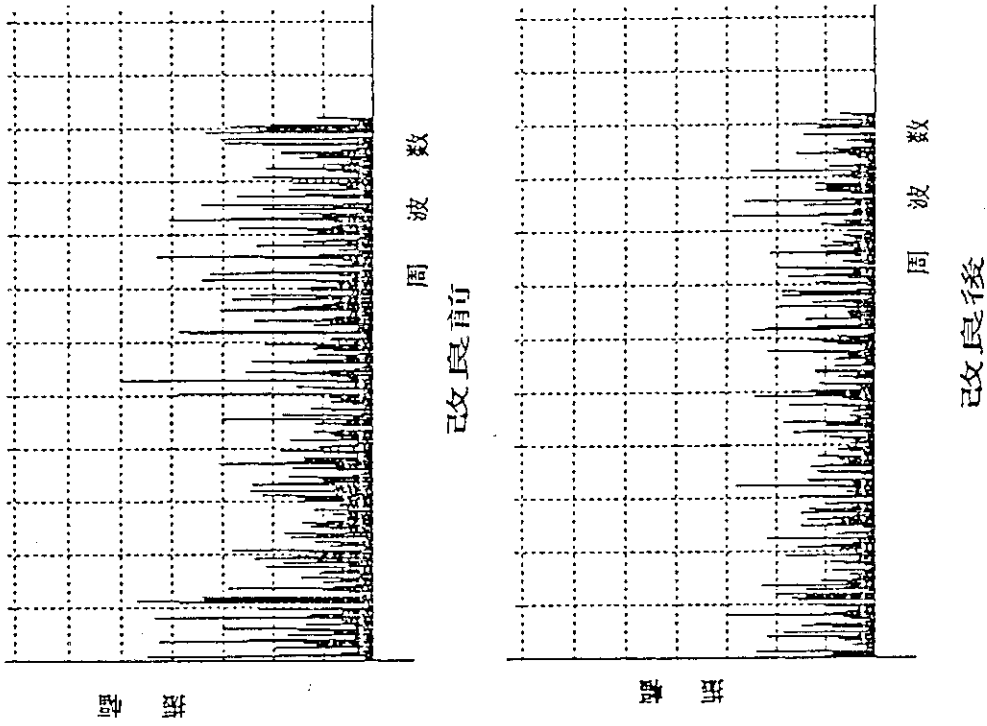
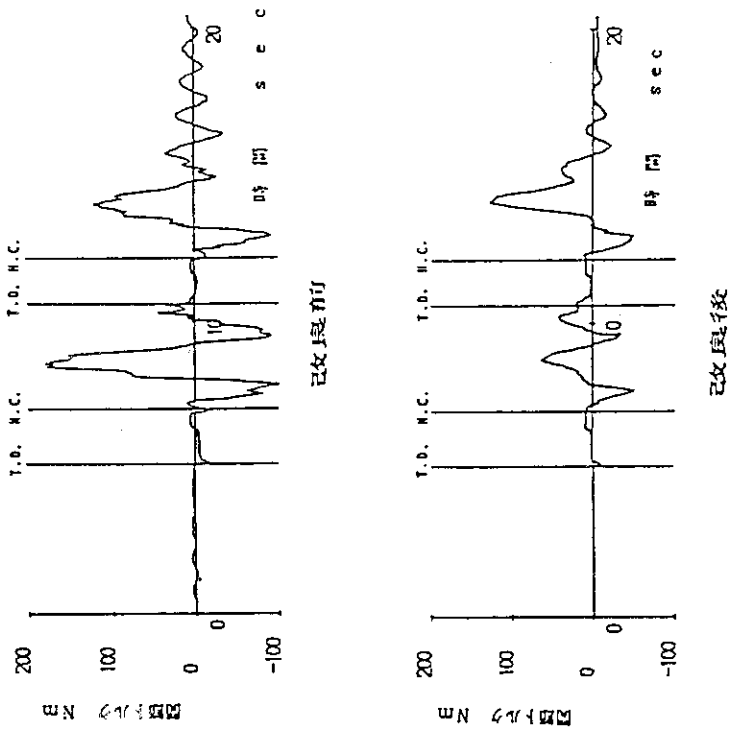


図2.15 トルク応答のFFTによる比較



(T.D.:Toe Detach, H.C.:Heel Contact)

図2.14 改良前後のRAのトルク応答の比較
(左足首部, 歩幅30 [cm], 1歩2.6 [sec])

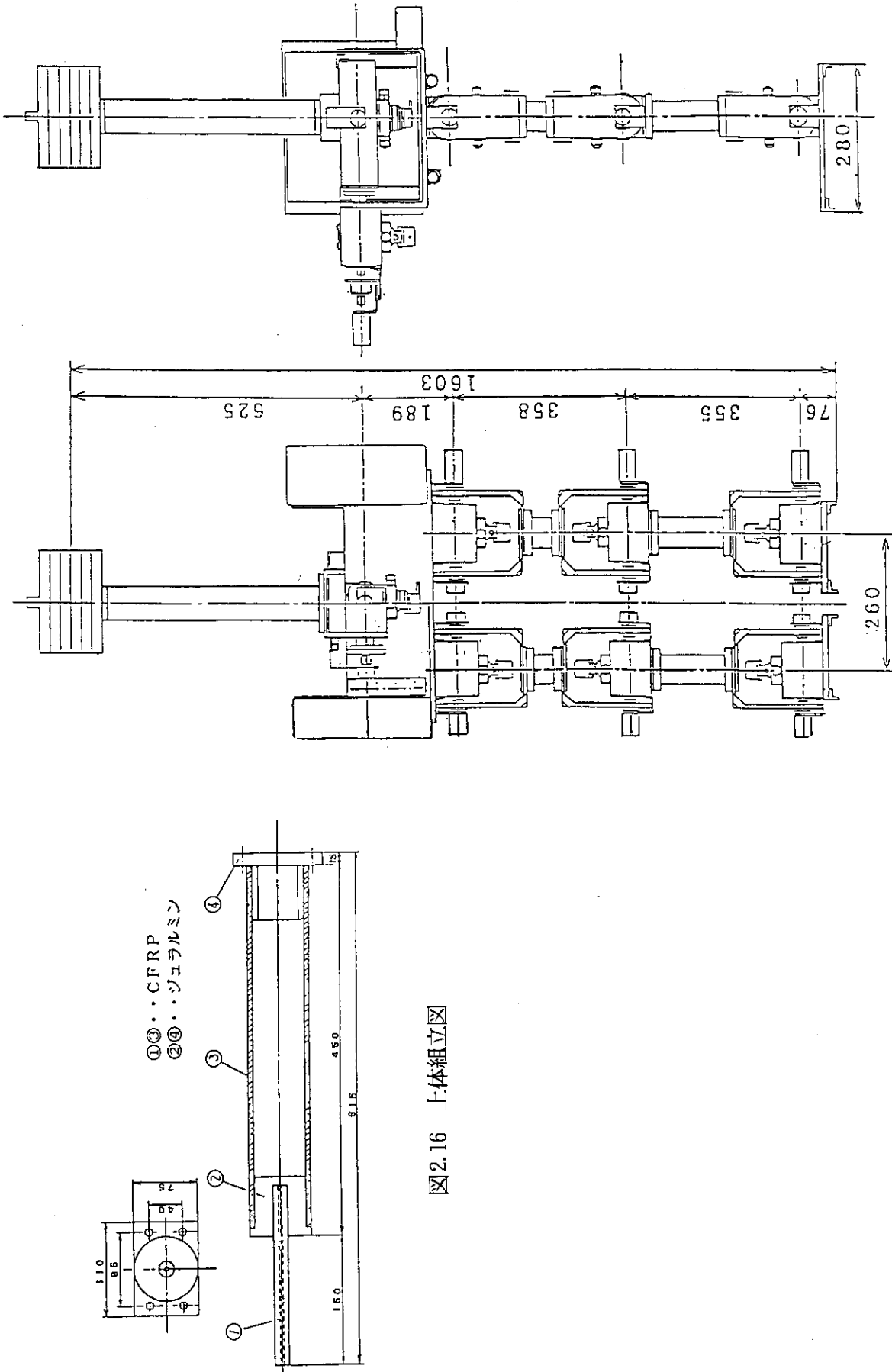


図2.16 上体組立図

図2.17 WL-12Rの組立図

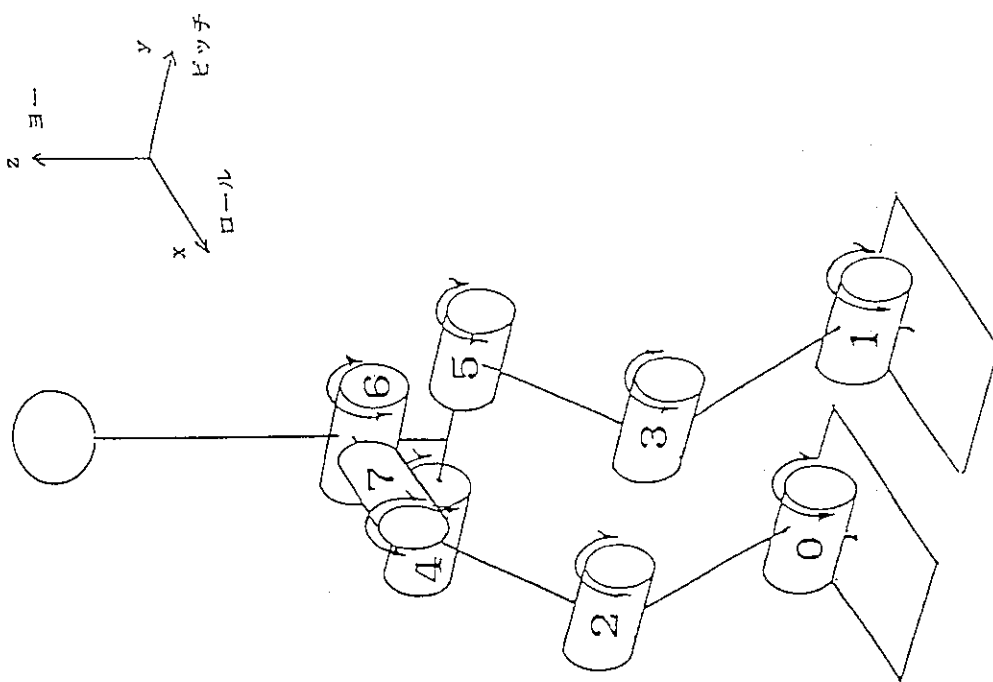
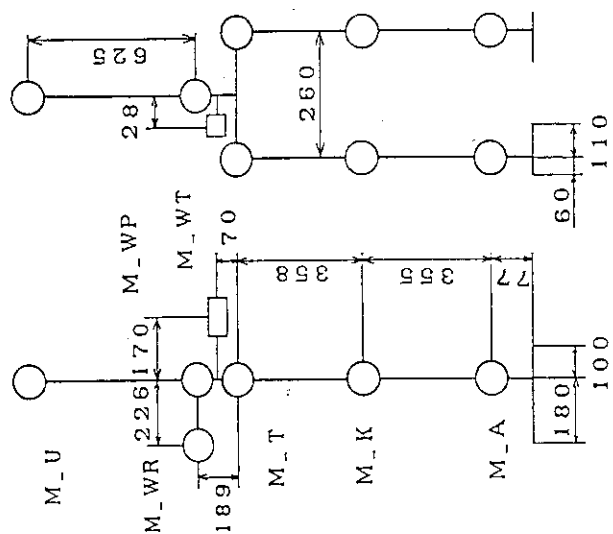


図2.18 自由度配置図



場所	質量 kg
M_U	30.5
M_WP	19.7
M_WR	4.7
M_WT	3.7
M_A	6.5 (X2)
M_K	6.9 (X2)
M_T	6.3 (X2)
合計	99.0

図2.19 重量配置図

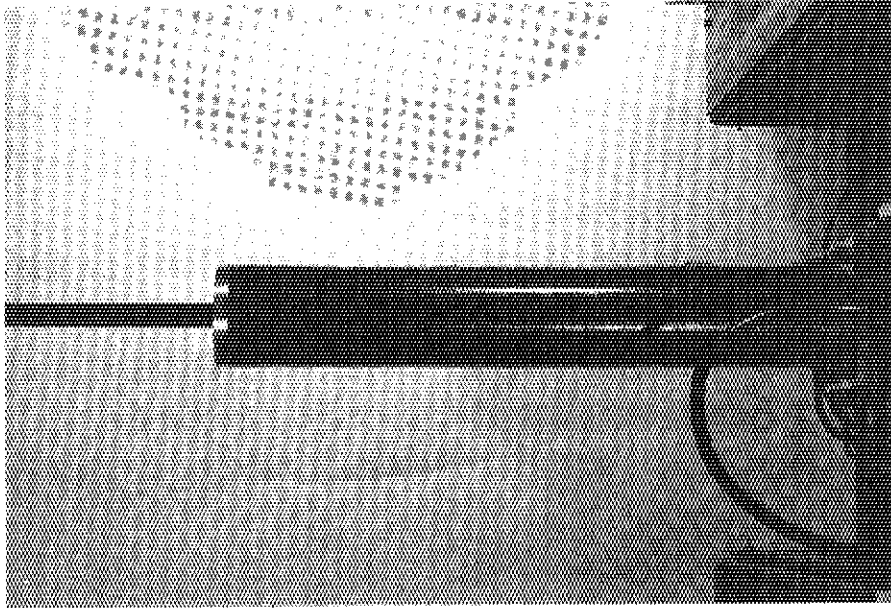


写真2.9 上体図

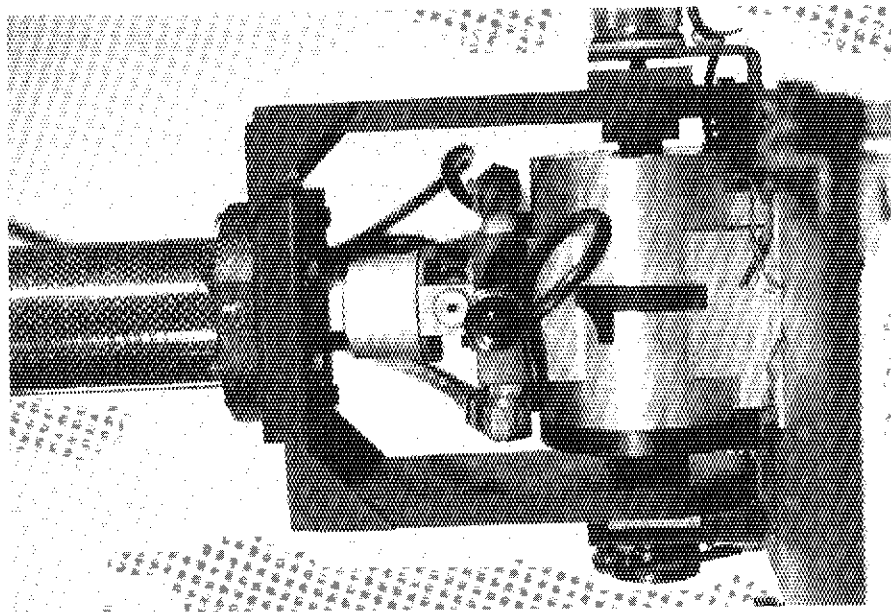


写真2.8 補強したL字部材

2.3 WL-12R II

2.3.1 機械モデルの改良点

足底板にも歩行中にたわみが生じる。そこで足底板の大きさと材質を変えることで、剛性を高め、たわみを少なくすることにした。

足底板の大きさは、長さを280 [mm] から222 [mm] へ短くし、幅はスパイク間の距離を変更せずに、170 [mm] から192 [mm]、厚さを11 [mm] から10 [mm] に変更した。また材質は剛性を高めるためにC. F. R. P. の代わりにジュラルミンを使用した。

ここで、足底板の長さを短くした理由は、安定領域の減少よりも剛性を高めることを優先したからである。

改良前と改良後のたわみ試験の結果を図2.20に示す。この図より、改良後の曲げ、ねじりに対する剛性は、改良前に比べてそれぞれ、約2倍、約5倍になっていることがわかる。

また、応答データより得られたトルク線図を図2.21に示す。この図より、改良前後を比較すると、

- (1) 振幅は小さく、トルクの変化が滑らかになった。
- (2) 歩行終了時の振動の減衰率が大きくなった。

ことが分かる。

2.4 WL-12R III

2.4.1 状態検出部の変更

歩行中、機械モデルの骨盤のたわみを少なくするためには、両脚間の間隔を狭くすることや、材料の剛性をあげる必要がある。

そこで、ポテンショメータ、タコジェネレータに代わる状態検出部として、レゾルバを採用した。レゾルバは、R/Dコンバータを通して、位置情報、速度情報の両方を得ることができる。

図2.22のように、レゾルバを配置することにより、両脚間の間隔を狭くすることができ、また機械モデルの機構を簡潔することができる。

レゾルバとR/Dコンバータの仕様を付表2.13、付表2.14に示す。

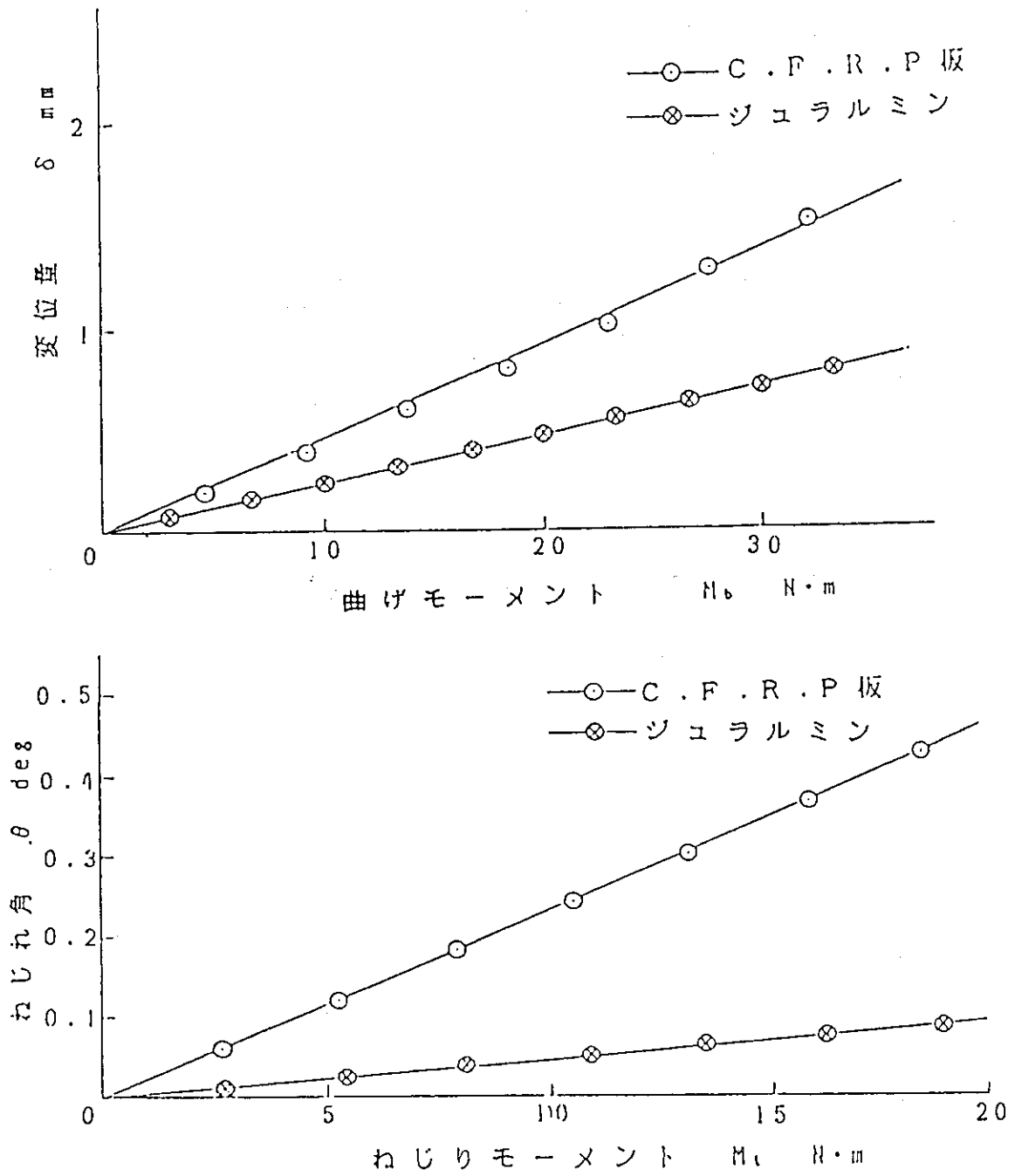
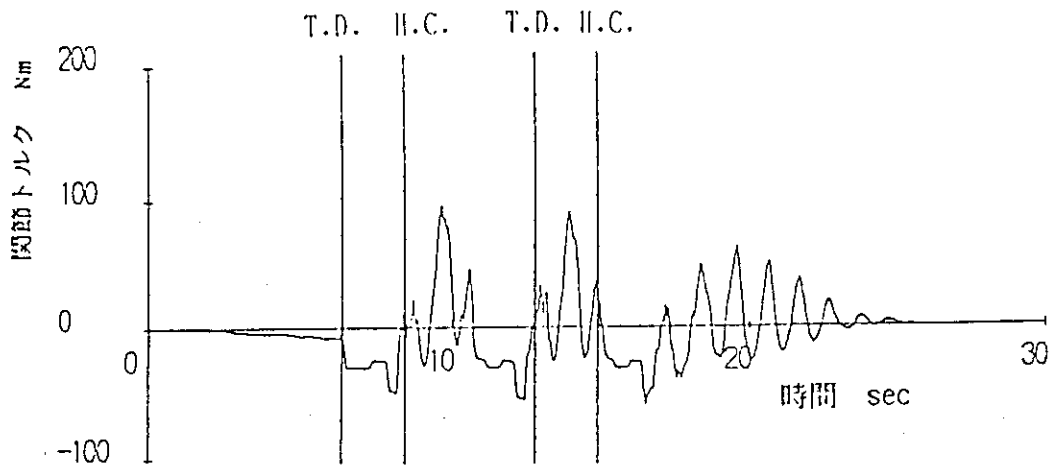
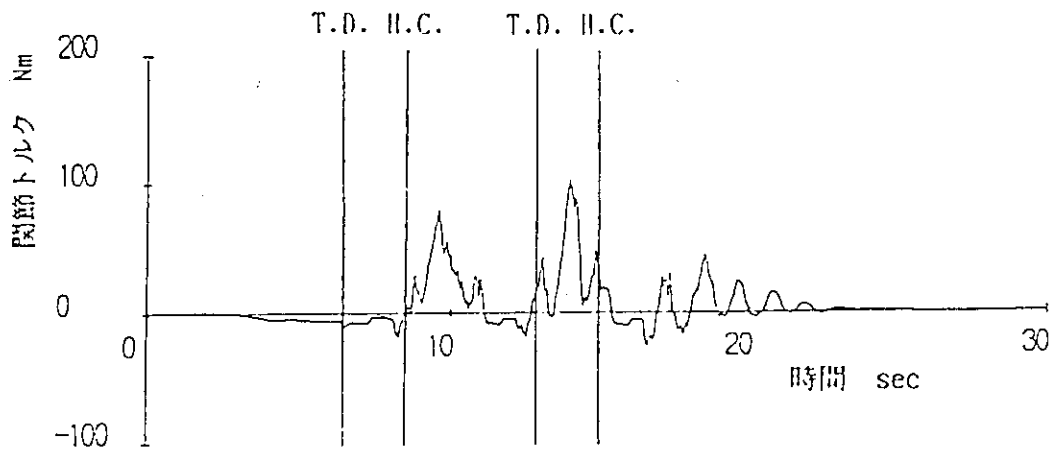


図2.20 たわみ試験



改良前



改良後

(T.D.:Toe Detach, H.C.:Heel Contact)

図2.21 改良前後のRAのトルク応答の比較
(左足首部, 歩幅30 [cm], 1歩2.1 [sec])

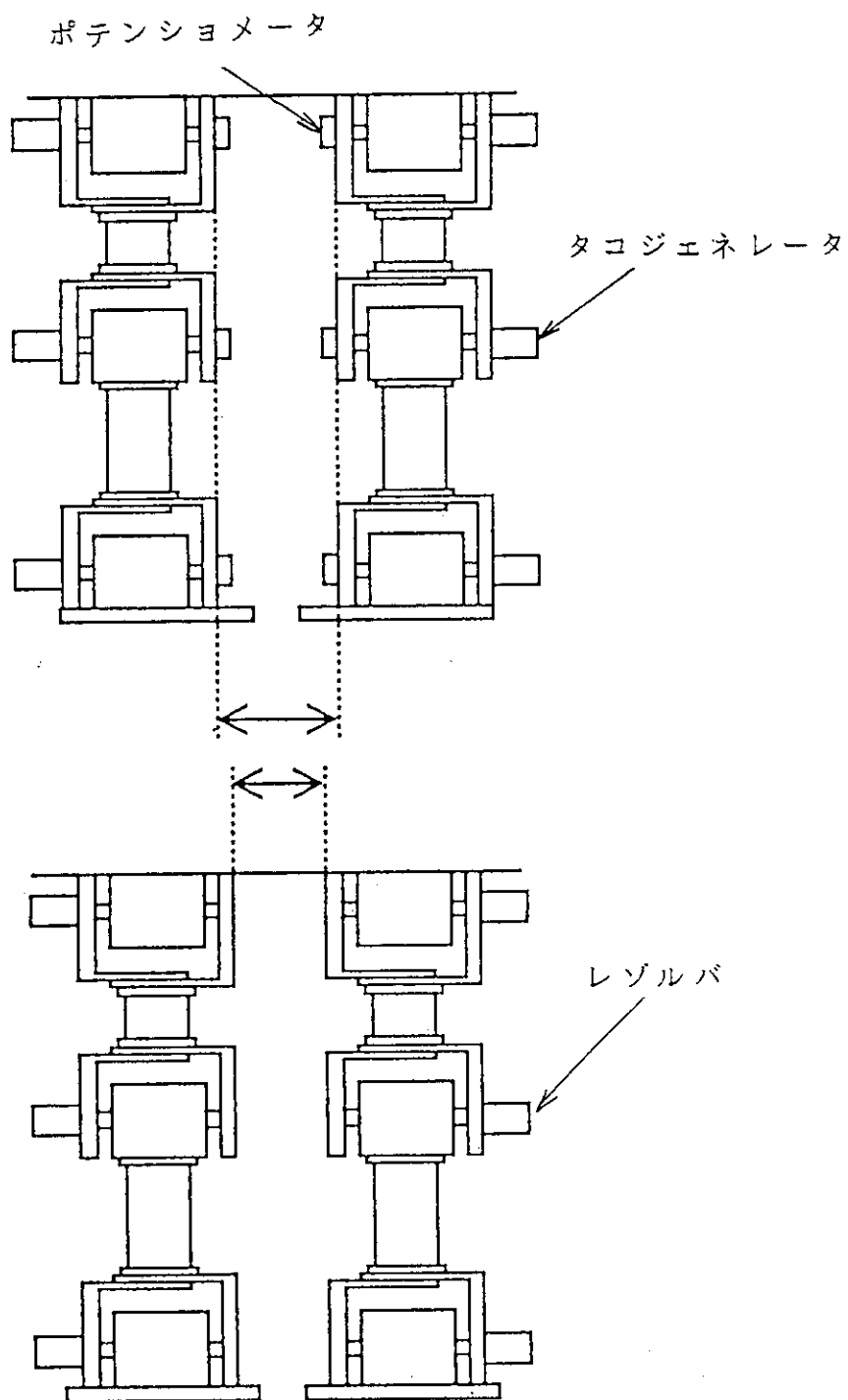


図2.22 両脚間の間隔

3. 制御システム

ここでは、2足歩行ロボットWL-12、WL-12Rの制御システムと、未知の外力下でリアルタイム制御するため大幅な改良が行われたWL-12RⅢの制御システムについて述べる

3.1 WL-12

3.1.1 制御システムの構成

WL-12は外部からの一切の補助なしに本体に搭載された制御システムのみによって自律的に制御される。

制御システムの構成図を図3.1に示す。本制御システムは、右脚、左脚、上体の3つのパートの関節（両脚各3自由度、上体3自由度）を個々に制御するサブボード3枚（サブボード1-3）、それらの上位でロボット全体を統括制御するメインボード1枚およびボード間の通信をおこなう2P-RAMボード1枚、合計5枚のボードから構成されている。

メインおよびサブボードには各々16 [bit] CPUが1台ずつ搭載されている。このようなマルチプロセッサ構成をとることにより、より高速で複雑な制御が可能になっている。

システム内部のボード間の通信は、ボードの内部バスの1部を延長した非同期8 [bit] パラレルデータ転送方式である。これらの転送バスには2P-RAMを配置し、メモリ空間を重ね合わせることによって、高速通信が可能である。

システム外部のコンソール、ホストコンピュータSystem8000との通信にはRS-232C規格に基いた9600 [bit/sec] のシリアル通信をおこなっている。

WL-12のボード間ネットワーク図を図3.2に示す。

3.1.2 メインボード

メインボードはマイクロコンピュータ部とデータストレージ部よりなる。マイクロコンピュータ部は、Z8002CPU、Z8030SCC、Z8036CIO、スタティックRAM、EPROMなどのLSI、MAX232Cおよび多数のゲートICよりなる。構成チップを表3.1に示す。

Z8002CPUは、16 [bit] のマイクロプロセッサでミニコン並の強力な命令セットを持っていることが特徴である。

Z8030SCC(Serial Communication Controller)は、2 [ch] の独立したシリアルI/Oを持っている。この2chシリアルI/Oは本体外部（コンソールおよびSystem8000）との通信に使用している。

Z8036CIO(Counter/Timer Input Output)は、パラレルI/Oとして、20 [bit] のボードを持ち、カウンタとタイマを内蔵している。このうち4 [bit] をデータストレージ部のバンク切り替えに、

8 [bit] をフットスイッチの入力ポートに使用している。さらに、制御システム全体の基準クロックにタイマの1chを使用している。

RAMは、32 [Kbyte] のスタティックRAMが2つで、そのうち48 [Kbyte] をデコードして使用している。

ROMは、8 [Kbyte] のEPROMが2つで、そのうち16 [Kbyte] をデコードして使用している。

MAX232Cは、RS232C用のトランスミッタ/レシーバであり、TTLレベルと、RS232Cレベルの変換を行う。

データストレージ部はマイクロコンピュータ部に接続され、その記憶機能を補強するための総容量512 [Kbyte] のメモリ郡である。

以下に制御システムの処理の概要を示す。

(1) 非歩行時

- ホストコンピュータであるSystem8000のデータストレージ部への歩行パターンのロード
- データストレージ部からSystem8000への応答データのセーブ
- 各種センサデータの補正

(2) 歩行時

- データストレージ部からサブボードへの、歩行パターンのリアルタイム出力
- サブボードを介したアクチュエータの応答データの収集と、そのデータストレージ部へのセーブ
- 足底の接地情報の収集と、そのデータストレージ部へのセーブ

3.1.3 サブボード

サブボードは、メインボードとほぼ同じ構成をとるマイクロコンピュータ部とアナログインターフェイス部よりなる。

アナログインターフェイス部の構成チップを表3.2に示す。

(1) A/D, D/Aコンバータ

A/DコンバータにはHDAS-16MCを、D/Aコンバータには、DAS-HK12を用いた。

(2) 電流アンプ

これはD/Aコンバータの出力である電圧信号を、サーボ弁を駆動するのに必要な電流信号に変換する回路である。

(3) ポテンショ用リファレンサ

これはポテンショメータに±10 [V] の基準電圧を供給するものである。

サブボードの機能を以下に示す。

- 応答データと歩行パターンに基いたRAのソフトウェアサーボ
- RAからの応答データの収集と、そのメインボードへのセーブ
- メインボードからの歩行パターンのリアルタイム入力
- メインボードからの制御プログラムのロード

3.1.4 2P-RAMボード

2P-RAMボードは、2P-RAMおよびゲートICより構成され、CPU ボード間のデータ転送を行うボードである。4枚の CPUボードからの延長バスは本ボード上に集まり、2P-RAMを介してお互いに接続しあっている。

表3.1 マイクロコンピュータ部を構成する主なチップ

項目	型名	詳細
CPU	Z8002	データバス16 [bit] 非セグメント型 クロック4 [MHz]
メモリ RAM ROM	TC55257PL-10 2764	32 [KByte] 8 [KByte]
I/O	Z8030SCC Z8036CIO	2 [ch] 独立シリアルポート 20 [bit] パラレルポート 3 [ch] カウント・タイマ

表3.2 アナログインターフェイス部の主なチップ

項目	型名	詳細
A/Dコンバータ	HDAS-16MC	解像度: 12 [bit] チャンネル: 16 [ch]
D/Aコンバータ	DAC-HK12	解像度: 12 [bit] チャンネル: 1 [ch]
電流アンプ	TL074	出力が25 [mA] を超えると保護回路が働く

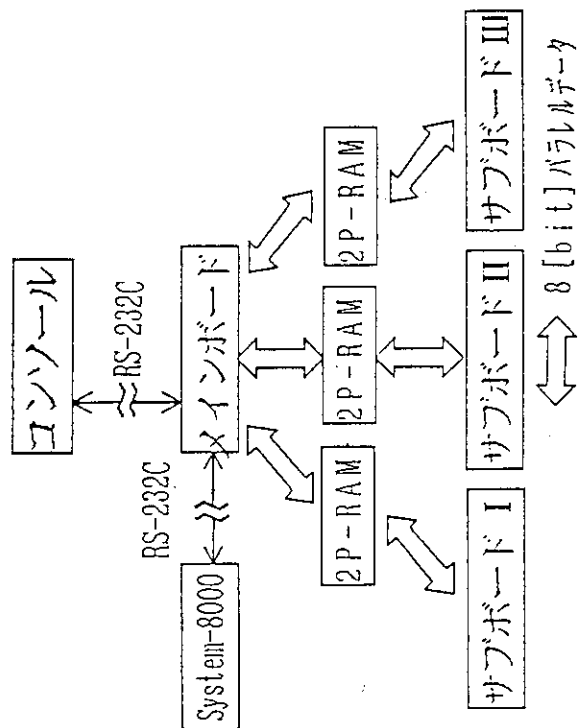


図3.2 ボード間ネットワーク図

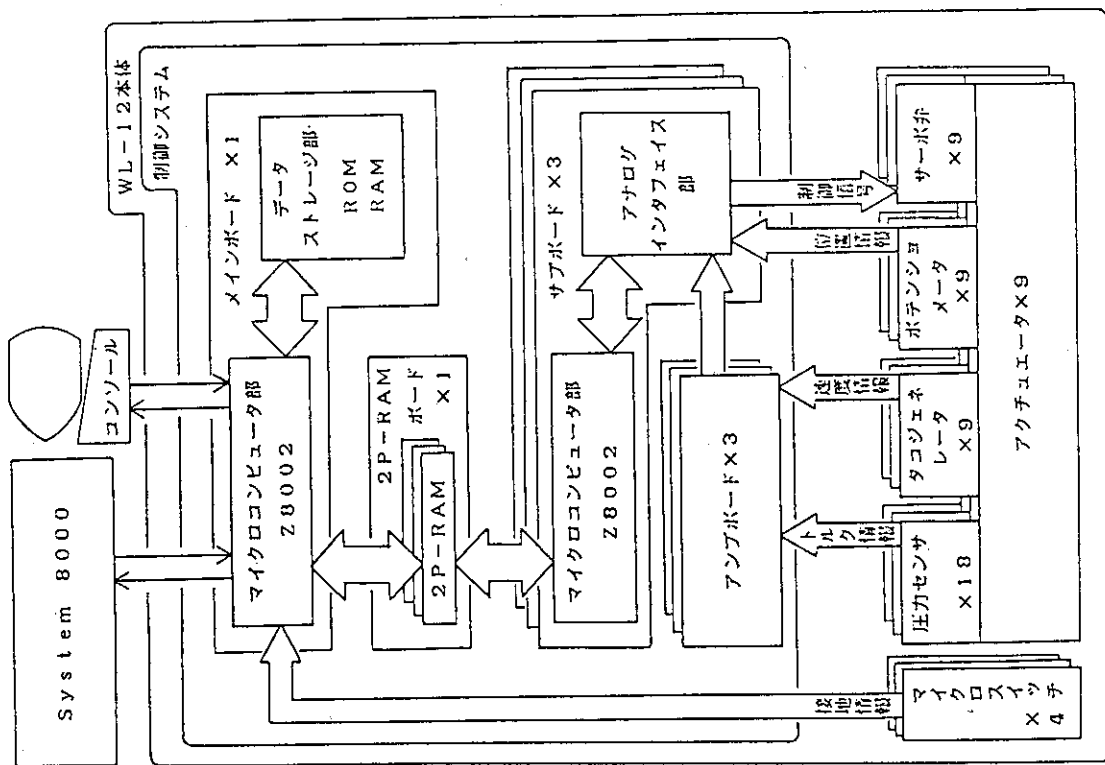


図3.1 WL-12の制御システム構成図

3.2 WL-12R

本システムにおいては、2足歩行ロボットを外力加わる環境下での実験を行うための外力発生装置（DDモータ、エンコーダ、タコジェネレータ等よりなる）を制御する制御ボード1枚（サブボード4）を付加した。

WL-12R本体および外力発生装置を含めた制御システム全体の構成図を図3.3に示す。

3.2.1 外力発生装置制御ボード（サブボード4）

外力発生装置制御ボード（サブボード4）はマイクロコンピュータ部とA/D変換部よりなる。

(1) マイクロコンピュータ部

マイクロコンピュータ部はメインボードとほぼ同じ構成をとる。シリアルI/Oを1個搭載しており、メインボードとコンソールとの通信をRS-232C規格で行っている。

(2) A/D変換部

A/D変換部は、HDAS-16MCおよび電流アンプよりなる。HDAS-16MCには、増幅された速度センサと力センサの出力が入力される。

3.2.2 力センサアンプボード

ロボットに実際に加わる力を正確に知るためには、力センサをロボットにできるだけ近い位置に取り付けなければならない。そして力センサは、出力レベルが小さいため、これを増幅するためのアンプボードをロボット本体に設置した。このアンプで増幅された出力値はシールド線を介しサブボード4上のA/D変換用のHDAS-16MCに取り込まれる。

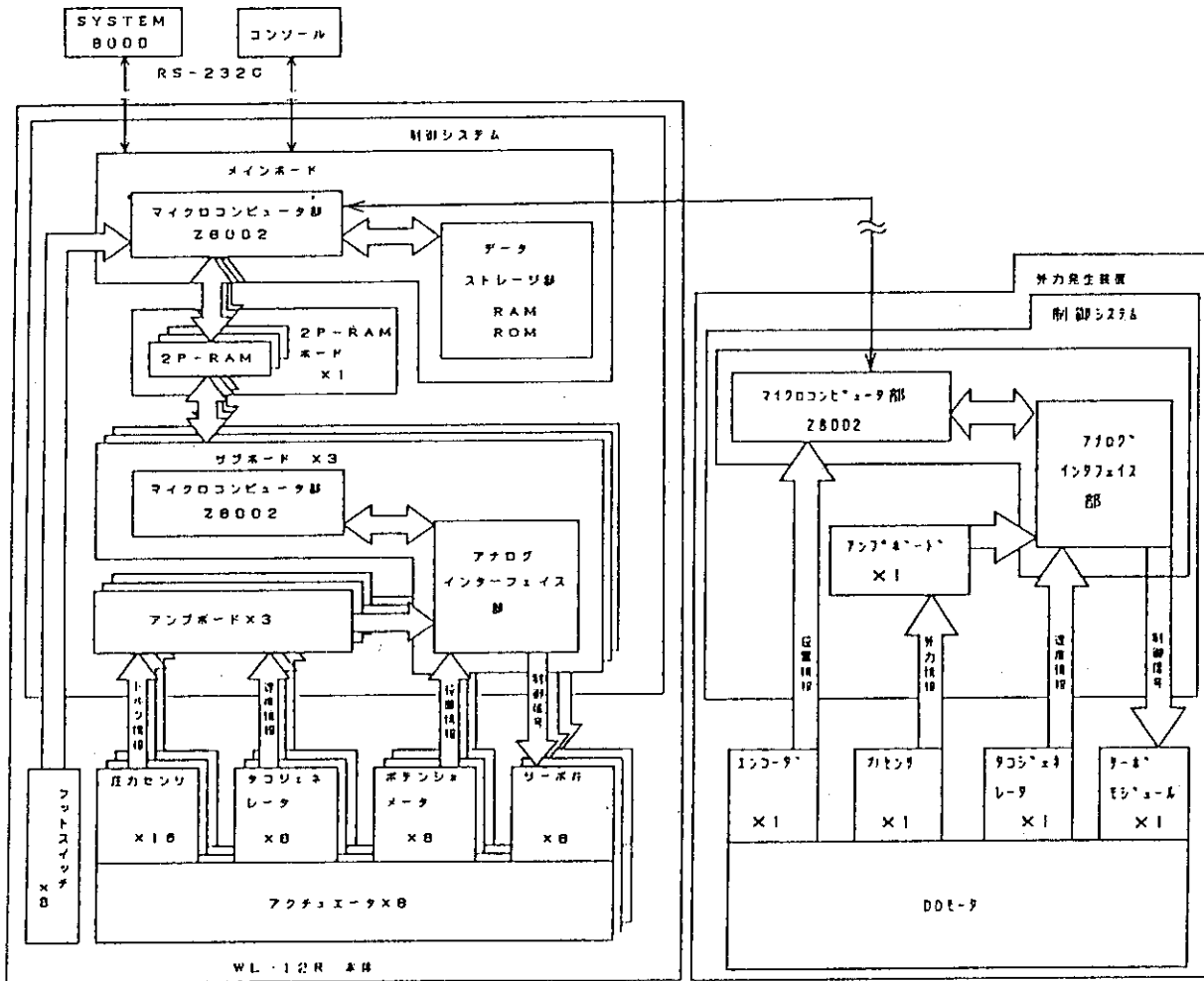


図3.3 外力発生装置を含めた制御システム

3.3 WL-12R III

3.3.1 高速演算システムの開発

未知の外力環境下でロボットをリアルタイム制御するための計算量はかなり多く、WL-12の制御システムでは、計算時間が間に合わなかった。そこで、外力に対する補償軌道計算用の高速演算システム（高速演算部、2P-RAMボード）をWL-12の制御システムに付加したリアルタイム制御装置を開発した。

高速演算部には、

- (1) 浮動小数点演算が高速である。(1.0 [MFLOPS] 以上)
- (2) 開発環境が整っており、ソフト開発が容易である。(パソコン上でC言語による開発可能)
- (3) 小型・軽量である。(ロボット本体に実装可能)

という理由により、INMOS社製32 [bit] CPU トランスペュータT800を搭載した小型軽量の市販ボードを採用した。また高速演算部と従来の制御システムとのデータ通信には、2P-RAMを使用し、通信の高速化を図った。

3.3.2 高速演算システムの構成

高速演算システムは、高速演算部（トランスペュータボード2枚）と2P-RAMボードから構成される。高速演算部は、そのホストコンピュータとしてEPSON社製のラップトップパソコンPC-386LSと、インターフェイスボードを介して、20 [Mbps] のINMOSシリアルリンクによって接続する。通信ケーブルの長さは10 [m] と長く、通信速度も高速であることから、通信ケーブルにはBNC規格の同軸ケーブルを使用した。高速演算部と従来の制御システムとのデータ通信には、2P-RAMを使用したパラレルデータ転送方式を採用した。

またサブボード4に取り込まれていた外力アンプからの出力をロボット本体にあるサブボード3のA/Dコンバータに入力した。これより力センサに加わった外力はアンプボードを介してサブボード3に取り込まれ、その値をもとに高速演算部で補償動作の計算がおこなわれ、その結果をサブボード1-3に送り、各関節に出力することにより、補償動作を行うわけである。

高速演算システムを付加したリアルタイム制御装置のボード間ネットワーク図、構成図を図3.4、図3.5に示す。

3.3.3 高速演算部（トランスペュータボード）

トランスペュータボードの仕様を付表3.1に示す。トランスペュータボードには、コンカレントシステムズ社製のTRP-002を使用した。

TRP-002は、32 [bit] RISCプロセッサ、トランスペュータボードT800を中心として2 [Mbyte] のDRAMなどから構成される。クロック周波数は、20 [MHz] で、20 [Mbps] のINMOSシリアルリンクを4 [ch] 持つ、このうち1 [ch] をインターフェイスボードを介して、ホストコンピュータPC-386LSとの通信に、1 [ch] をもう1枚のトランスペュータボードとの通信に使用している。トランスピ

ュータボードを2枚使用し、2個のT800間で並列処理を行うことにより、計算をより高速化できる。

3.3.4 2P-RAMボード

2P-RAMボードには、12個の512 [byte] 2P-RAM (IDT7130) を使用している。1枚のサブボードと高速演算部との通信には、4個の2P-RAMを使用している。高速演算部と2P-RAMボード間は、2P-RAMを並列に配置して32 [bit] のパラレル通信としている。2P-RAMボードとサブボード間は、4個の2P-RAMを2個ずつ、偶数アドレス用、奇数アドレス用に配置することによって、16 [bit] のパラレル通信としている。

3.3.5 状態検出部の変更

WL-12では、状態検出部として、ポテンショメータとタコジェネレータを使用し、各関節の位置情報、速度情報を得ていた。ポテンショメータ、タコジェネレータに代わる状態検出部として採用したレゾルバは、R/Dコンバータ (Resolver/Digital Converter) を通して、位置情報、速度情報の両方を得ることができる。レゾルバは多摩川精機社製のTS530N33E2をR/Dコンバータは、アナログデバイス社製の2S80RDを使用した。R/Dコンバータから得られる位置情報は、デジタル量で最大で、16 [bit] の分解能がある。速度情報はアナログ量で、速度に比例した出力が得られる。

3.3.6 R/D変換ボード

ロボット本体には、レゾルバのR/D変換ボードを両脚用で2枚、大腿部に取り付けたボックス内に、圧力センサ用アンプボード、上部部用の速度アンプとともに搭載した。

R/D変換ボードは、3個の2S80RDを搭載し、片脚、3関節に取り付けられたレゾルバからの出力を位置情報 (16 [bit] デジタル量)、速度情報 (アナログ量) に変換する。各関節用の2S80RDからの位置データ (12 [bit])は、その2S80RDを選択することで、共通バス上により、フラットケーブルを通して、サブボード1、2に付加したCIOに転送される。片脚3関節分の位置データを共通バス化することで、I/Oポート数およびケーブルのライン数を軽減できた。

また速度情報は、シールドケーブルを通して、サブボード上のA/Dコンバータ HDAS-16に送られる。

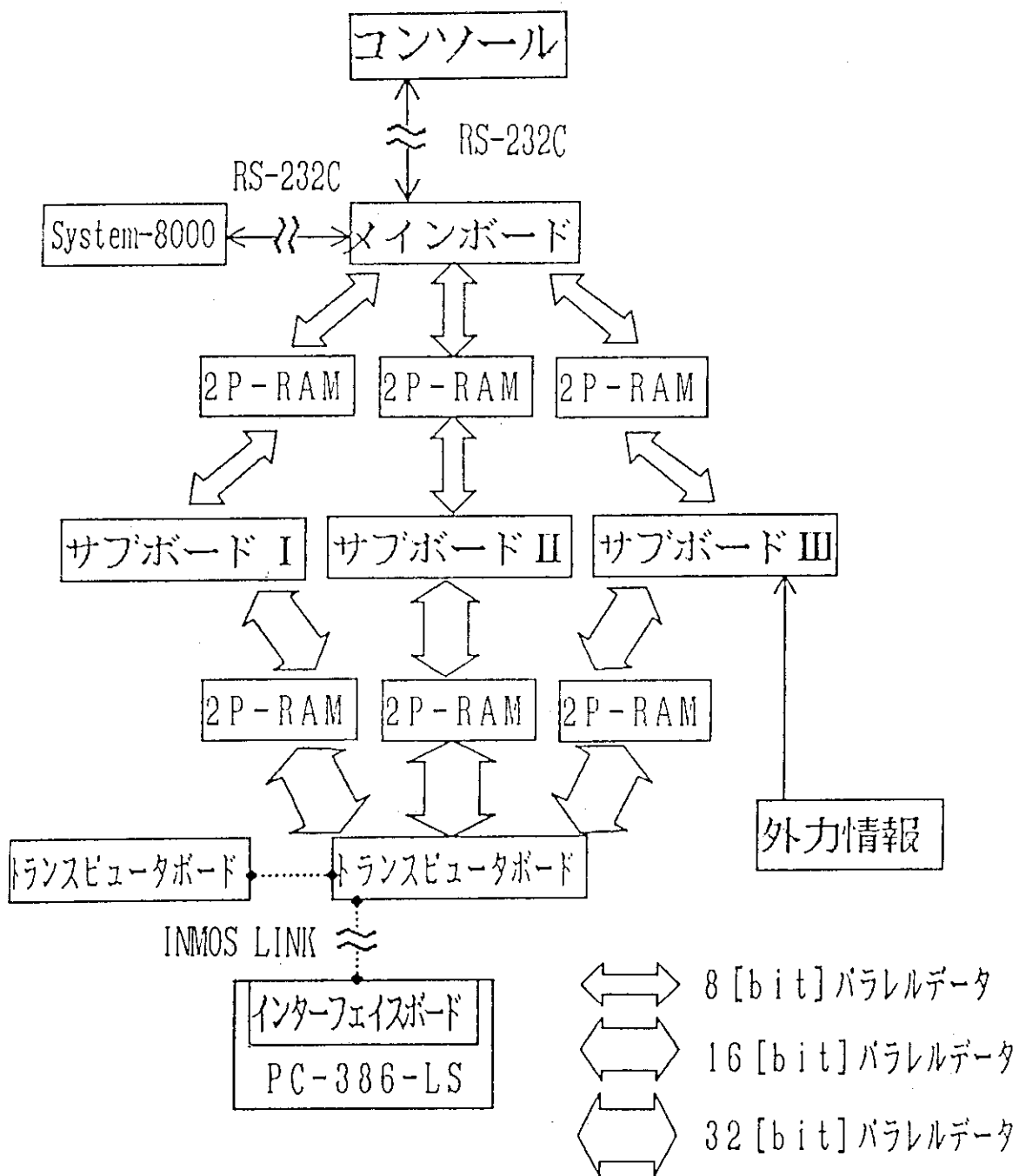


図3.4 高速演算システムを付加したボード間ネットワーク図

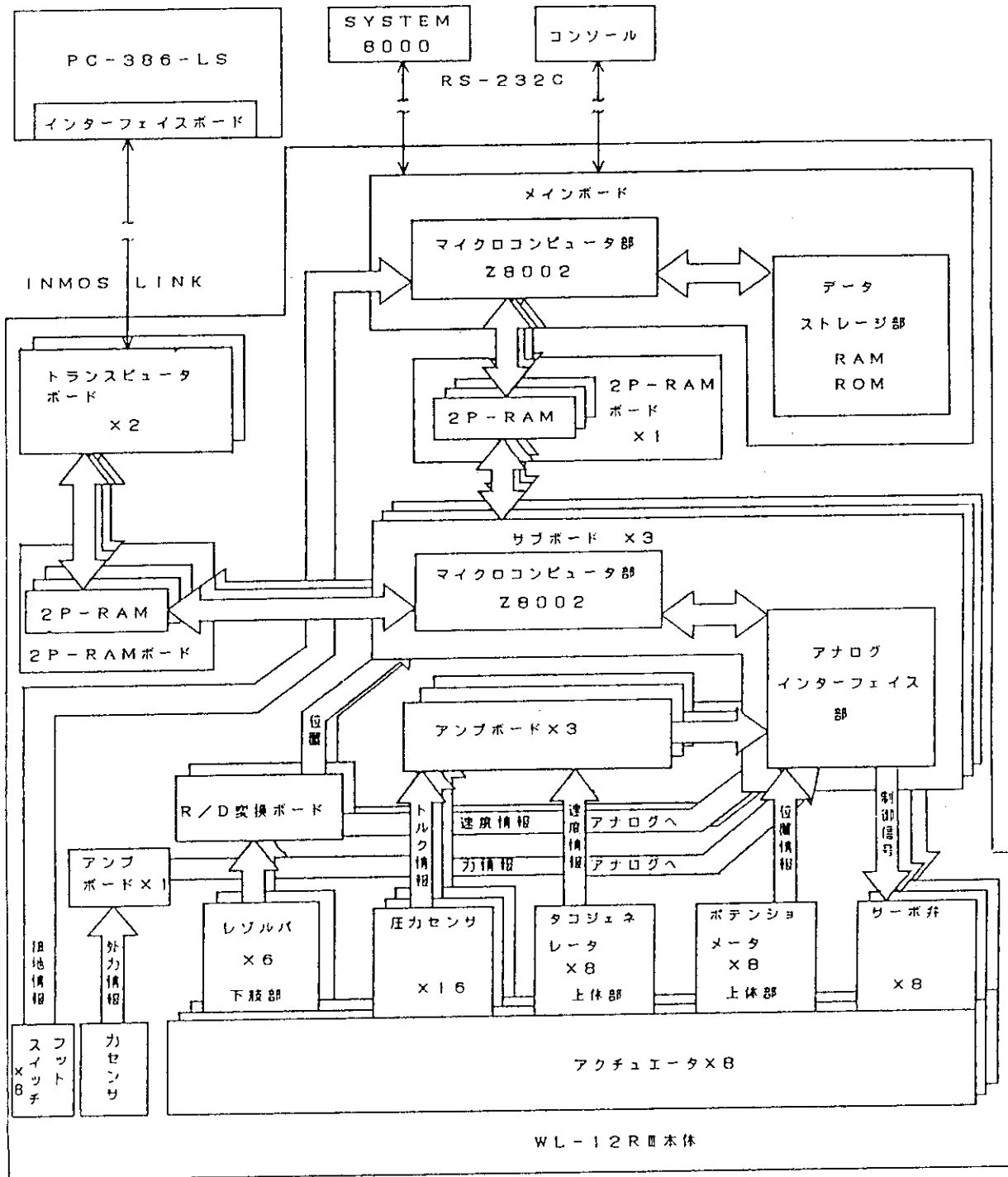


図3.5 高速演算システムを付加したコンピュータシステム構成図

4. おわりに

本報告では歩容安定化のための補償器として上体（胴）を有する二足歩行ロボットの機械モデル及び制御システムの設計と構成について、早稲田大学で開発した二足歩行ロボットWL-12とその改良モデルを用いて解説した。WL-12は上体補償型の二足歩行ロボットとして開発されたモデルであるが、環境適応能力の向上とモデルの機械的問題点（剛性不足、過重量）の解決のためにこれを改良し、改良モデルWL-12R, WL-12RⅡ, WL-12RⅢを開発し、本報告書では設計例としてこれらのモデルを取り上げて解説した。機械モデルについては、アクチュエータの出力軸や構造部材等の強度計算と剛性向上のための改良点（補強板の貼付、材質の変更等）、ロボットの軽量化に重点をおいた。制御システムについては、そのシステム構成とリアルタイム制御のための制御システムの改良（高速演算部の付加）について述べた。

本調査は、原子力知能化システム技術の研究⁶⁾において今後進めていく、二足歩行ロボットのハードウェア化に非常に有用なものである。

謝 辞

本報告書作成にあたり多大な御強力を頂きました、早稲田大学理工学部機械工学科加藤研究室及び高西研究室の皆様へ深く感謝します。

また、本報告書を書く機会を与えて頂きました情報システムセンター室長秋元正幸氏に深く感謝します。

4. おわりに

本報告では歩容安定化のための補償器として上体（胴）を有する二足歩行ロボットの機械モデル及び制御システムの設計と構成について、早稲田大学で開発した二足歩行ロボットWL-12とその改良モデルを用いて解説した。WL-12は上体補償型の二足歩行ロボットとして開発されたモデルであるが、環境適応能力の向上とモデルの機械的問題点（剛性不足，過重量）の解決のためにこれを改良し，改良モデルWL-12R，WL-12RⅡ，WL-12RⅢを開発し，本報告書では設計例としてこれらのモデルを取り上げて解説した。機械モデルについては，アクチュエータの出力軸や構造部材等の強度計算と剛性向上のための改良点（補強板の貼付，材質の変更等），ロボットの軽量化に重点をおいた。制御システムについては，そのシステム構成とリアルタイム制御のための制御システムの改良（高速演算部の付加）について述べた。

本調査は，原子力知能化システム技術の研究⁶⁾において今後進めていく，二足歩行ロボットのハードウェア化に非常に有用なものである。

謝 辞

本報告書作成にあたり多大な御強力を頂きました，早稲田大学理工学部機械工学科加藤研究室及び高西研究室の皆様へ深く感謝します。

また，本報告書を書く機会を与えて頂きました情報システムセンター室長秋元正幸氏に深く感謝します。

参 考 文 献

- 1) 高西淳夫 他：上体補償機構を有する2足歩行ロボットWL-12の開発，第5回日本ロボット学会学術講演会，PP. 579-582, 1987.
- 2) Takanishi, A., et al. : A CONTROL METHOD FOR DYNAMIC BIPED WALKING UNDER UNKNOWN EXTERNAL FORCE, IROS '90, PP. 795-801, 1990.
- 3) 高西淳夫 他：既知の外力下で歩行可能な2足歩行ロボットWL-12Rの開発 —システムの開発と上体の腰の協調動作による動歩行の実現—，第6回日本ロボット学会学術講演会，PP. 111-114, 1988.
- 4) 高西淳夫 他：未知の外力下における二足歩行 —プログラム制御を用いた歩行実験による制御方式の検討—，第7回ロボット学会学術講演会，PP. 695-698, 1989.
- 5) 高西淳夫・加藤一郎 他：二足歩行ロボットWL-10RDによる動歩行の実現，日本ロボット学会誌3巻4号，pp. 67-78, 1985.
- 6) 例えば，浅井清 他：原子力知能化システム技術の研究 —平成2年度作業報告—，JAERI-M 91-101, 1991.

付 録

付表2.1 RAの仕様(足首部, 膝部, 股部)

項目	諸元	
最高使用圧力	100	kgf/cm ²
最大揺動角度	90	deg
内部リーク	300	cm ³ /min
流入量(於最大揺動角度)	50.5	cm ³
1rad当りの流入量	32.1	cm ³ /rad
最大出力トルク	30	kgf.m (at 100kgf/cm ²)
重量	2.77	kgf
製造	黒田精工(株)	

付表2.2 RAの仕様(上体ピッチ軸)

項目	諸元	
最高使用圧力	100	kgf/cm ²
最大揺動角度	70	deg
内部リーク	300	cm ³ /min
流入量(最大揺動角度)	39.3	cm ³
1rad当りの流入量	32.2	cm ³ /rad
最大出力トルク	30	kgf.m (at 100kgf/cm ²)
重量	2.69	kgf
製造	黒田精工(株)	

付表2.3 RAの仕様(上体ロール軸)

項目	諸元	
最高使用圧力	100	kgf/cm ²
最大揺動角度	70	deg
内部リーク	300	cm ³ /min
流入量(最大揺動角度)	40.3	cm ³
1rad当りの流入量	32.9	cm ³ /rad
最大出力トルク	30	kgf.m (at 100kgf/cm ²)
重量	2.91	kgf
製造	黒田精工(株)	

付表2.4 直動シリンダの仕様

項目	諸元
チューブ内径	40 mm
ストローク長さ	200 mm
使用流体	油圧作動油
最高使用圧力	20 kgf/cm ²
使用速度範囲	50-300 mm/sec
周囲温度	5-60
重量	4.7 kgf
製造	黒田精工(株)

付表2.5 サーボ弁の仕様 (RA用)

項目	諸元	項目	諸元
型番	J077-049	中立点シフト	
定格流量 (於弁圧降下70kgf/cm ²)	38.0 l/min	温度変化	2% 以内
定格圧力	140 kgf/cm ²	加速度	2% 以内
使用圧力範囲	14-140 kgf/cm ²	圧力変化	2% 以内
供給側耐久圧力	140 kgf/cm ²	背圧	2% 以内
戻り側耐久圧力	140 kgf/cm ²	内部漏洩量 (於定格圧力)	3.3 l/min 以内
定格電流 (於コイル直列結線)	5 mA	使用温度範囲	-40-135
コイル抵抗	1000Ω/コイル	作動油	石油作動
中立点バイアス	±0.15mA以内	重量	1000 g
ヒステリシス	0.15 mA以内	製造	ムーグ社
スレッシュホールド	0.025 mA以内		

付表2.6 サーボ弁の仕様 (直動シリンダ用)

項目	諸元	項目	諸元
型番	J770-004	温度変化	2% 以内
定格流量 (於弁圧降下70kgf/cm ²)	7.0 l/min	加速度	3% 以内
定格圧力	210 kgf/cm ²	圧力変化	2% 以内
使用圧力範囲	14-210 kgf/cm ²	背圧	4% 以内
供給側耐久圧力	315 kgf/cm ²	内部漏洩量 (於定格圧力)	0.76 l/min 以内
戻り側耐久圧力	210 kgf/cm ²	使用温度範囲	-40-135°C
定格電流 (於コイル直列結線)	20 mA	作動油	石油作動油
コイル抵抗	80 Ω/コイル	重量	350 g
中立点バイアス	0.6 mA以内	製造	ムーグ社
スレッシュホールド	0.2 mA以内		

付表2.7 ポテンショメータ（上部部ロール軸，直動シリンダは除く）

項目	諸元	項目	諸元
型番	P4501-502	最大供給電圧	90 V
使用角度	350° ± 2	最大動作電流	10 μA
定格抵抗	5 kΩ	最大許容電流	2 mA
抵抗誤差	± 10%	絶縁抵抗	100 MΩ
分解度	0.02% (0.007°)	最大耐電	500 V
平滑度	0.015	リニアリティ	0.05 %
抵抗値	± 200 ppm/°C	重量	45 g
温度係数	± 300 ppm/°C	製造	日本バルーフ (株)

付表2.8 ポテンショメータ（上部部ロール軸）の仕様

項目	諸元	項目	諸元
型番	CCP-45B	耐電圧	AC 1000V 1 分間
有効電気角	350°	抵抗温度係数	± 400 ppm/°C
全抵抗値	5kΩ	出力スムーズネス	0.1% 以下
全抵抗値偏差	± 15%	中間ターミナル	最小角 20°
直線度	± 0.1%	回転トルク	18g・cm 以下
定格電力	3W/70°C	重量	60g
絶縁抵抗	100Ω 以上 1000V	製造	緑測器 (株)

付表2.9 ポテンショメータ（直動シリンダ用）の仕様

項目	諸元	項目	諸元
型番	LP-250F	絶縁抵抗	DC 500V 100MΩ 以上
有効ストローク	250mm	耐電圧	AC 500V 1分間
全抵抗値	5kΩ	抵抗温度係数	± 400 ppm/°C 以下
全抵抗値偏差	± 20%	機械的ストローク	253 ± 1mm
直線度	± 0.1%	フリクション	100g 以下
定格出力	4W/70°C	製造	緑測器 (株)
出力スムーズネス	0.1% 以下		

付表2.10 速度センサの仕様

項目	諸元
型番	LMV-05710
ストローク長さ	200 mm
コイル長さ	381 mm
コイル外径	φ19 mm
リード長さ	300 mm
ヒステリシス	0.1 % 以下
インピーダンス	1500 Ω 以下 (1 kHz)
帯電圧	500 VDC (コイルケース間)
直線性	±2 %
感度	2 mV/mm/sec
製造	G. L. コリンズ (株)

付表2.11 タコジェネレータの仕様

項目	諸元
形式	TS680NIE3
励磁方式	永久磁石
出力電圧	3V ± 10 % / 1000 rpm
直線性	0.2 %
リップル	1.5 _{p-p} %
リップル周波数	19 cycle/rev
方向性偏差	0.3 % 以内
電機子抵抗	135 Ω
出力電圧の温度係数	-0.01 % / °C
インダクタンス	4 mH
摩擦トルク	25 g. cm 以内
絶縁抵抗	10 MΩ
絶縁耐力	500 Vac 10 sec
電機子イナーシャ	4.7 × 10 ⁻³ g. cm. sec ²
速度範囲	1-3000 rpm
軸振れ	0.05 T. I. R
軸方向遊び	0.025-0.1 mm
径方向遊び	0.038 mm
寿命	10000 H
周囲温度	0-60 °C
相対湿度	30-80 °C
表面処理	リン酸塩処理クロムメッキ
電機子許容最高温度	135 °C
重量	220 g
製造	多摩川精機 (株)

付表2.12 圧力センサの仕様

項目	諸元	項目	諸元
形式	KH17-373	温度特性	±0.025% F.S/°C
圧力レンジ	0-100kgf/cm ²	使用温度特性	-20-70°C
電源	5VDC	耐衝撃性	100G
出力	70±25mV	応答速度	0.1-0.02ms以下
精度	±0.25%	重量	60g
入力インピーダンス	35±1.5kΩ	製造	長野計器製作所(株)

付表2.13 レゾルバの仕様

項目	仕様
信号処理方式	電圧検出(BRXタイプ)
変圧比	0.454
入力インピーダンス	1000 [Ω]
出力インピーダンス	590 [Ω]
慣性能力	3.6 [g. cm]
摩擦トルク	6 [g. cm] MAX
重量	110 [g]
名称	TS530N33E2
製造	多摩川精機

付表2.14 R/Dコンバータの仕様

項目	仕様
出力形式	位置(デジタル), 速度(アナログ)
位置出力分解能	10, 12, 14, 16 [bit]
最大トラッキング速度	1000 [rps]
名称	2S80RD
製造	アナログデバイス

付表3.1 TRP-002の仕様

クロック周波数	20 [MHz]
DRAM	2 [MByte]
シリアル通信	20 [Mbps]
シリアルポート	4 [ch]
ボードサイズ	115 [mm] × 125 [mm]