

バランスローダの無重力制御

Weightless Control for Balance Loader

In developing a man/machine-type labor-saving machine for material handling work covering transportation, loading, unloading, precise assembling of medium-weight materials, etc., the authors succeeded in imparting two functions of servo balance and weightless balance. The first function is to keep the load suspended in a balanced condition and the second is to acquire balance between the load and the motor torque. Also, for obtaining stabilized weightless balance the authors developed a weightless control system featuring smooth operation, by incorporating a circuit which adds the frictional loss of the mechanism on a simulation basis.

常楽雅美* Masami Jôraku
米倉清治* Seiji Yonekura
山内光次* Kôji Yamauchi
上野雅弘** Masahiro Ueno

1 緒 言

従来、市場には中重量物のハンドリング機器としてホイスト、モートルブロックがあり、また数年前から工業用ロボットが現われ始めている。

しかし前者は汎用性に富むものの、高能率、高精度作業に適さず、さらには動きに対して方向性が限定されていることから市場の要求を満たしていない分野が多い。後者はパターン認識などの高機能な技術が実用化されていないことから主として単純なくり返し作業に適用できるだけであり、さらに経済性の面からも市場の不満が大きい。

このような背景から、従来の機器にはなかった機能、すな

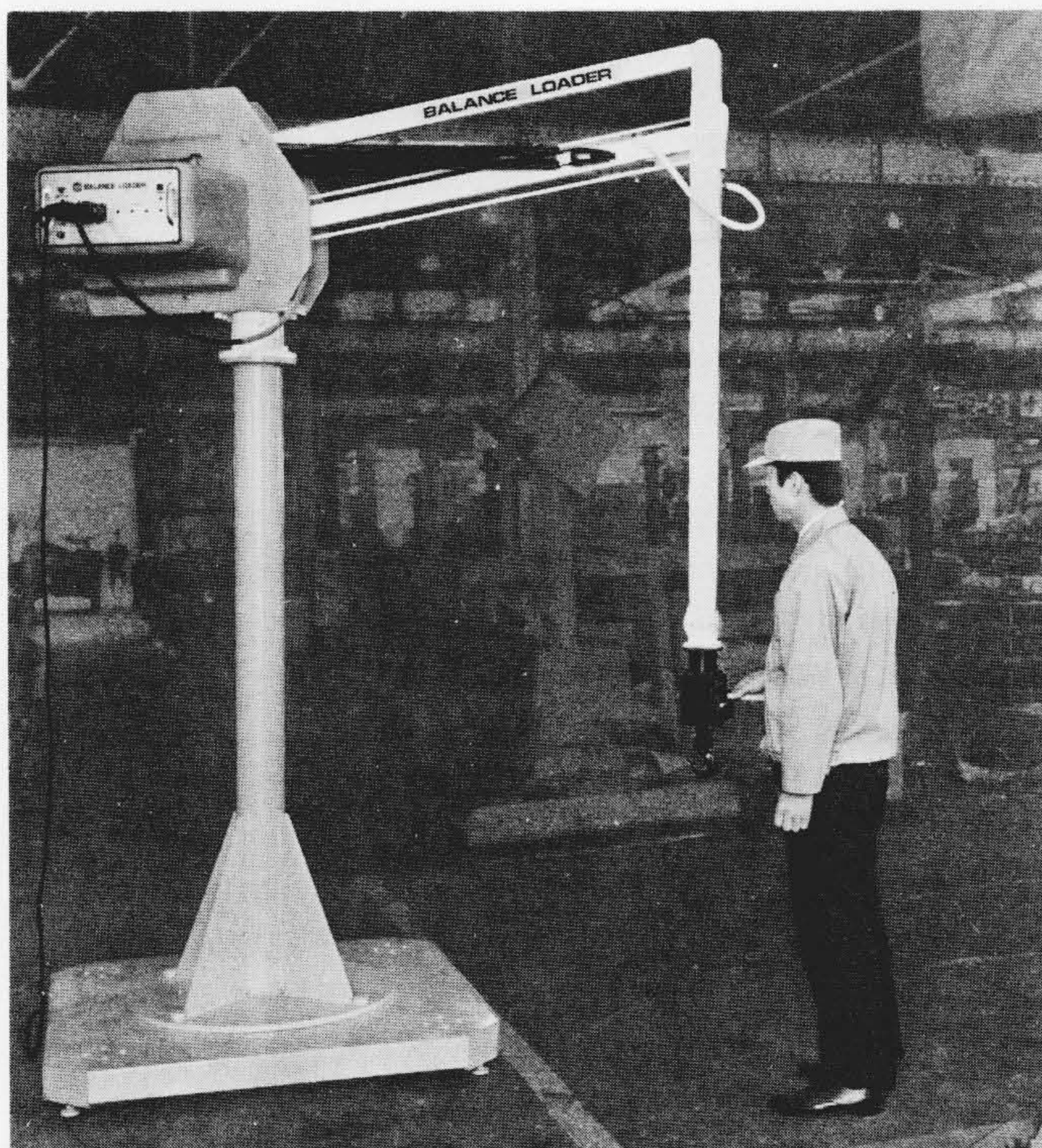


図1 床上移動形バランスローダ 床上移動形バランスローダの全体外観を示す。

Fig. 1 Pole Caster Type Balance Loader

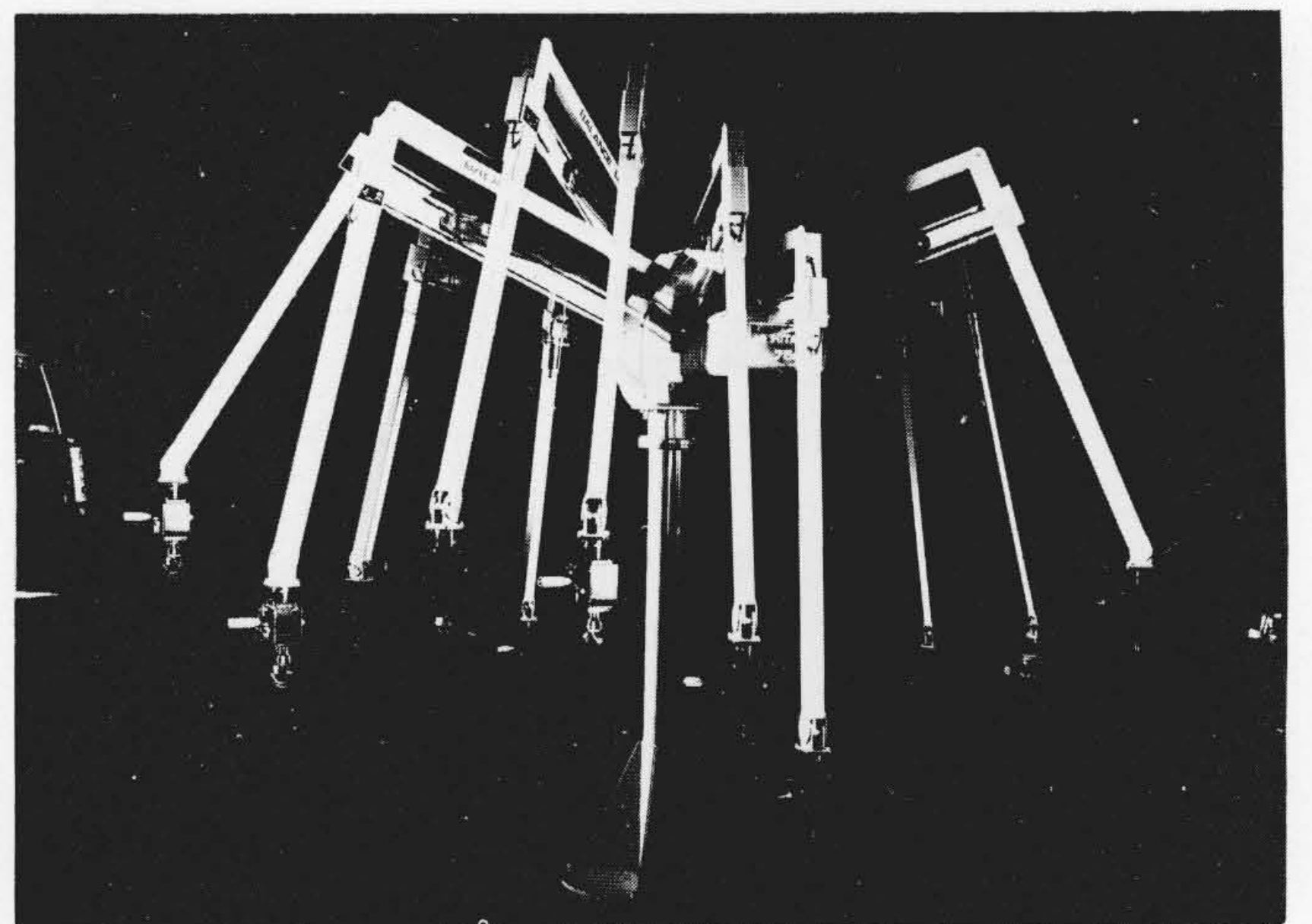


図2 アームの動作(多重露出による撮影) アームが、三次元空間内を自由に動き回る様子を多重露出撮影により示す。

Fig. 2 Movement of the Arm (Picture Exposed Several Times)

わち認識や判断は人間が行ない、中重量物のハンドリングは機械が行なうマン・マシン形機器としてバランスローダを開発した。

人間の腕に似た平行四辺形リンク機構を用い、中重量物の移載などの高能率なハンドリングには押しボタン操作による可変速運転を行ない、機械へのローディング、アンローディングおよび組立などの高精度作業には無重力バランスにより、人間が荷物に直接操作力を加えて運転できるようにした。この種の電気機器は新しい製品分野として市場に出始めている段階であるが、人間が直接荷物を持ち人間の感覚を利用して微妙な作業を行なえる機能は全く新しいものである。

以下、無重力バランスが得られる無重力制御装置の実用化に関する検討結果について述べる。

2 装置の概要

図1は、緒言において述べた背景から設計したバランスローダの外観を示すものである。さらにバランスローダのアー

* 日立製作所多賀工場 ** 日立製作所日立研究所

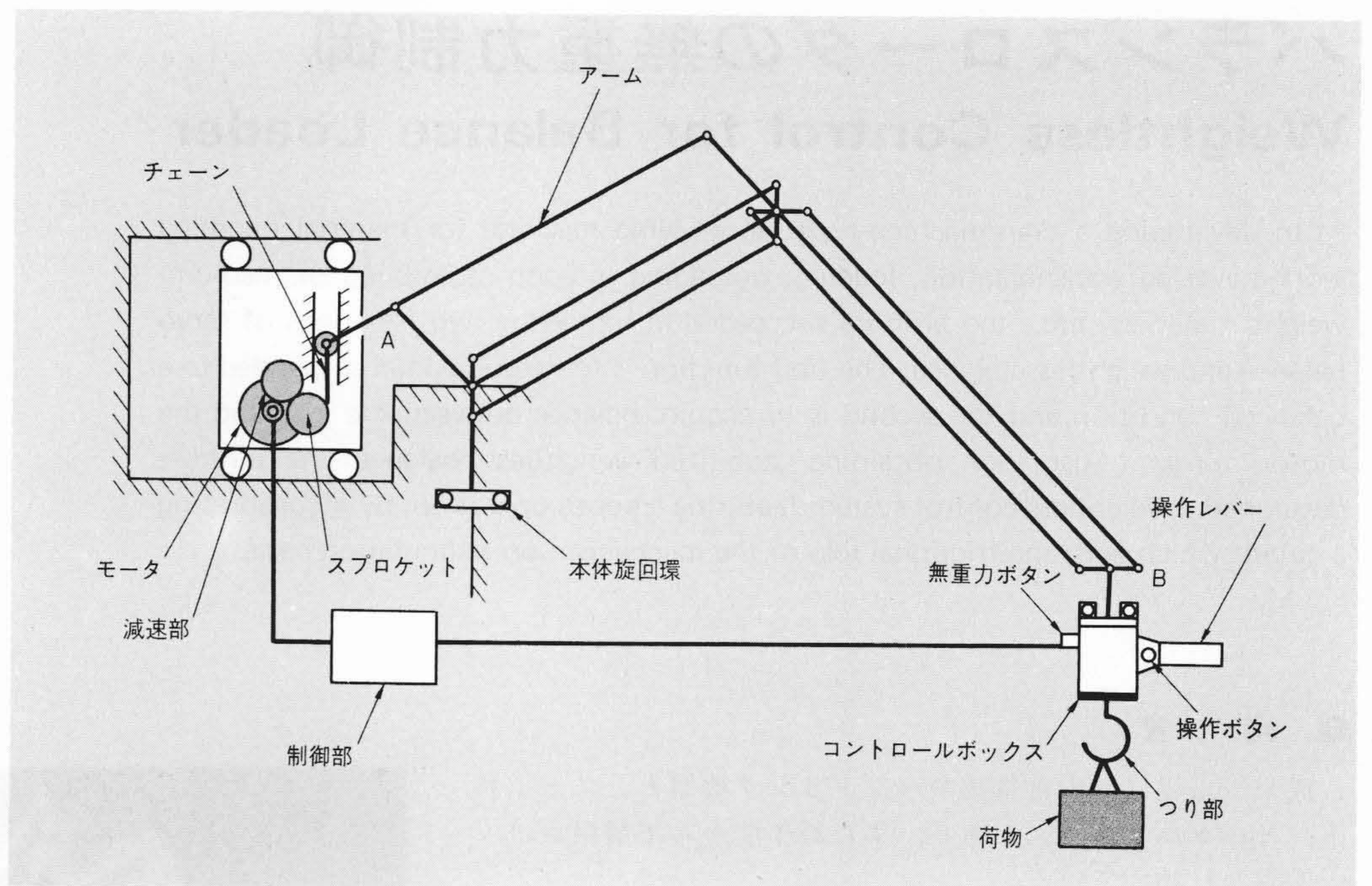


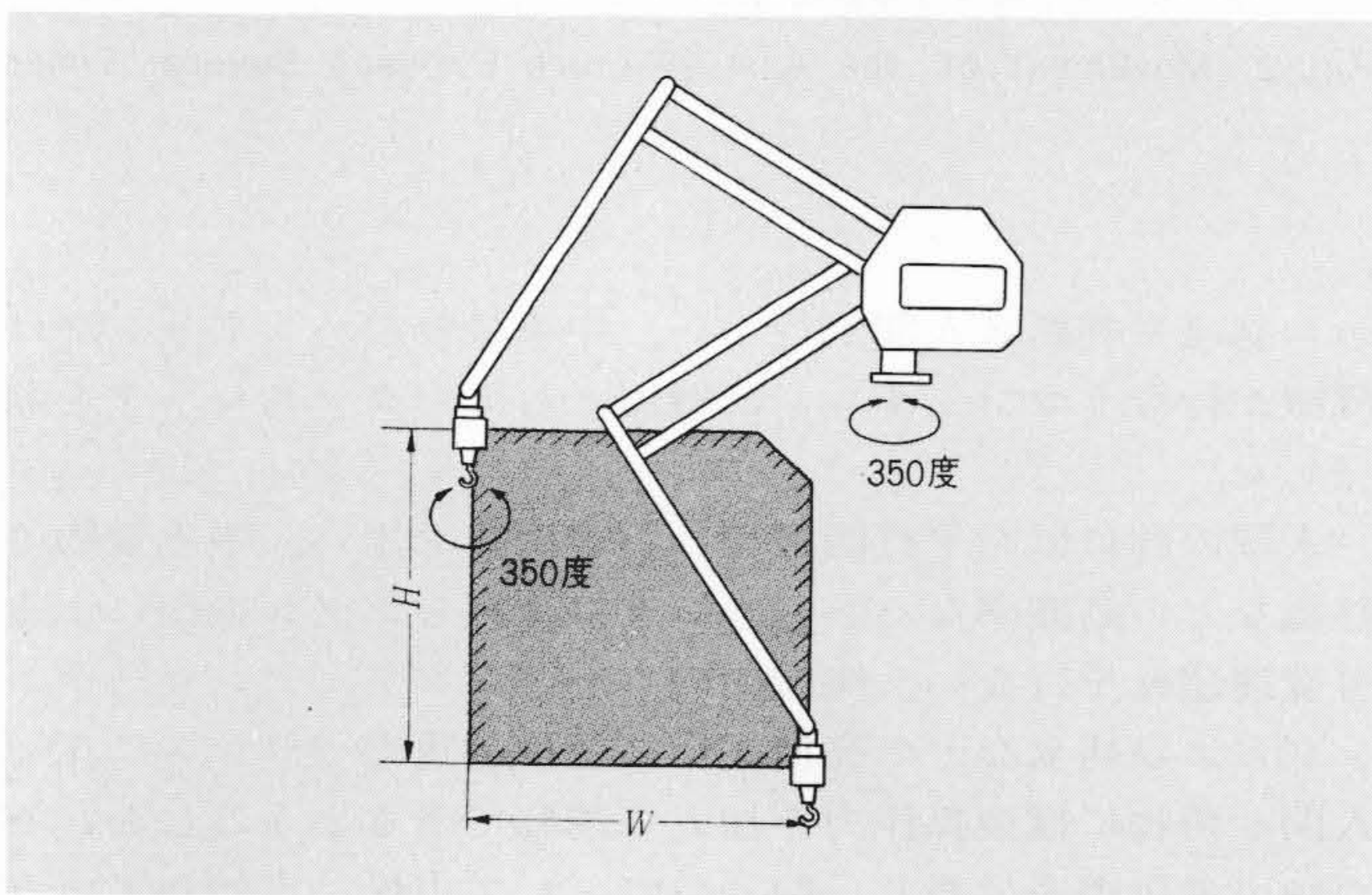
図3 バランスローダ機構図
バランスローダの全体機構を示す概略図である。

Fig. 3 Structure Diagram of the Balance Loader

ムは図2に示すように人間の指令に基づいて三次元空間内を自由に動き、中重量物のハンドリングを行なうものである。図3は、バランスローダの全体機構を、表1は、仕様を示すものである。すなわち、荷物の上下方向の駆動はモータのトルクを制御部でコントロールして行ない、水平、旋回の動作は人間の操作力で行なう。

表1 バランスローダ(HBL-75A)の仕様 バランスローダの一般仕様を示す。

Table 1 Specifications of the HBL-75A Balance Loader



仕様	形式	HBL-75A
容量 (kg)		75
上下速度 (m/min)		0~18 無段変速
動作範囲	H [上下方向] (mm)	1,400
	W [水平方向] (mm)	"
	本体旋回角 (度)	350
	グリップ旋回角 (度)	"
電源		AC1φ 200V 50/60Hz
モータ		直流分巻 200W
概略重量 (kg)		130

3 バランスの原理

3.1 要求される機能

操作者からの指令を機構部へ伝達する制御装置としては、

- (1) 操作する人の意のままに荷物を移動できるよう速度制御機能を有すること。
- (2) 荷物の重量変化に見合った巻上力を自動制御系により作り出し、荷物を任意の場所で宙づり保持できる機能を有すること。
- (3) 組立、型合わせなど人間の手の感覚を必要とする作業を行なわせるために荷物の重量を検出し、その状態を記憶保持することによって荷物をわずかな外部操作力で昇降できる機能を有すること。

これら三つの基本的機能が要求される。このような能力のあるサーボ系には速度制御系、位置制御系、トルク制御系の3種が考えられる。

本装置では図4に示すように、積分増幅器を用いた速度制御系とマイナーループにトルク制御系を採用した。図5は、制御装置の外観を示すものである。

3.2 制御の原理

制御の原理は速度指令 N_p とモータ軸に直結した速度発電機PGにより検出されたモータ回転速度 N との差を積分し、そのずれ(速度偏差)をゼロにするような向きのトルクをモータに発生させるものである。したがって、いま操作者が速度指令ノブを動かして速度指令 N_p を与えると速度偏差 $N_p - N$ が生じ、その偏差は比例と積分動作を行なう速度制御回路(以下、PI増幅器という)に入力される。さらに、その出力 τ_p はモータトルク指令としてモータの電流を検出する変流器(CT)よりもどされるモータトルク信号 τ と比較され、その差信号 $\Delta\tau$ はトルク制御回路に導かれ、モータ駆動電流を調整し、モータのトルク τ を制御して、その速度 N を設定値 N_p に一致させるように働く。

以上の説明よりサーボ系信号の相関関係を式で表わすと、トルク制御系によって

$$\tau \doteq \tau_p \dots \dots \dots (1)$$

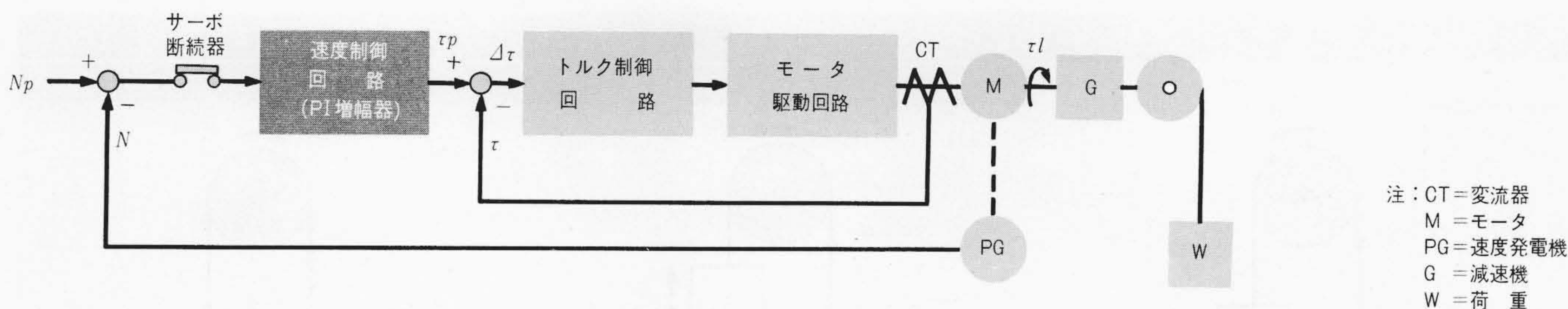


図4 サーボ系主要回路のブロック図 速度制御系に積分形増幅器を採用したものである。

Fig. 4 Block Diagram of Main Circuit in the Servo System

に制御され、速度制御系によって

$$Kp(Np - N) + \frac{1}{T_i} \int_0^\infty (Np - N) dt = \tau_p \doteq \tau \quad \dots\dots\dots(2)$$

ただし、 Kp ：速度制御回路の比例ゲイン

T_i ：速度制御回路の積分時定数

$$\text{また } Kp(Np - N) + \frac{1}{T_i} (Sp - S) \doteq \tau \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$N = \frac{1}{T_A} \int_0^\infty (\tau - \tau_l) dt \quad \dots\dots\dots(4)$$

ただし、 T_A ：モータの慣性時定数

$Sp = \int_0^\infty Np dt$ ： Np の積分で与えられる角移動量指令

$S = \int_0^\infty Nd t$ ：実際の角移動量

τ_l ：負荷トルク

となる。すなわち、モータトルク τ は速度偏差 ($Np - N$) と角移動量偏差 ($Sp - S$) に比例するが、一方、積分器の性質から偏差入力のあるかぎり偏差をゼロにする方向に動作するので、定常状態では必ず $Np - N = 0$ となる。そのため定常時には (静止状態 $Np = 0$ を含む)、

$$\tau = \tau_l \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$Sp - S = T_i \tau = T_i \tau_l \quad \dots\dots\dots(6)$$

となり、位置サーボ系が構成される。したがって、速度指令 $Np = 0$ となっても荷物 W の位置は保持される。この状態をサーボバランスと呼ぶ。

次に無重力バランスについて述べる。サーボ運転により荷物をつり上げ静止させたサーボバランス状態では前述したように負荷トルク τ_l とモータトルク τ がバランスして(1)式の関係が成りたち、速度偏差は 0 である。したがって、この状態

でPI増幅器の入力信号をサーボ断続器でしゃ断しても積分器のホールド特性によりその出力 τ_p は変化せず、したがって荷物の位置も変化しない。この状態を無重力バランスと呼び、モータトルク τ は負荷トルク τ_l と等しく一定に保たれるため直接荷物を操作者が持ってわずかな外力を加えると、上下自在に荷物を動かせるわけである。

しかしながら、実際には減速機など機械系に摩擦損失 (以下、摩擦トルクという) が存在し、かなり大きな操作力を加えないと動かないことが考えられる。

4 無重力制御の補償方式

4.1 摩擦トルクの影響

まず、摩擦トルクが無重力運転時の操作力にどのような影響を与えるか考えてみる。図6にそれを分析するためのモデルを示す。(a)はモータにより荷物を上昇後静止させた図である。このとき、摩擦トルク τ_{fw} はモータに対して反対方向に働くため、モータの必要保持トルクは τ_{fw} だけ余分に必要となり $\tau_w + \tau_{fw}$ である (ここに τ_w は摩擦のない理想状態の負荷トルクで、真負荷トルクと呼ぶ)。この状態で、荷物を直接持って上昇させる場合(a1)の操作力はゼロでよいことになる。

一方、(a2)に示すように下降させようとした場合は、摩擦トルク τ_{fw} の作用する方向が反転するため $2\tau_{fw}$ に相当する力を操作力として要することがわかる。

また、下降後静止させた場合(b)についても、摩擦トルクの作用する方向が反転する場合(b1)においては同様に $2\tau_{fw}$ に相当する力が必要となる。

次に、実際の巻上機構部に存在する摩擦トルクについて予備検討を行なった。図7は巻上機構の負荷トルク特性の一例を示すものである。これは 0 kg、35 kg、75 kg と 3 種類の荷重を上下する際に、モータが必要とするトルク τ の定常値 (等速運動時の値) の推移を示すもので、摩擦トルク τ_{fw} は総負荷重量に対して比例し、速度に対してほぼ一定とみなせる。

ここで、摩擦トルク分析モデルにおいて考察した結果よりサーボバランス時におけるモータの必要保持トルクは上昇後静止および下降後静止の場合それぞれ $\tau_w + \tau_{fw}$ 、 $\tau_w - \tau_{fw}$ となるので、負荷トルク特性上の点 a および点 b 付近に分布することになる。したがって、主要回路のみによる構成では無重力運転時の操作力は、摩擦トルクの作用する方向が反転する場合に $2\tau_{fw}$ に相当する値になり、直接荷物を操作する力に換算すると 26 kg (75 kg 負荷時) にもなる。

以上のことより主要回路のみによる構成では、摩擦トルクがサーボバランス時の必要保持トルク中に介入して、PI増幅器のホールド値をばらつかせ、無重力運転時の操作力を増大させることが考えられる。そこで、その影響を除くためになんらかの補償を加える必要がある。

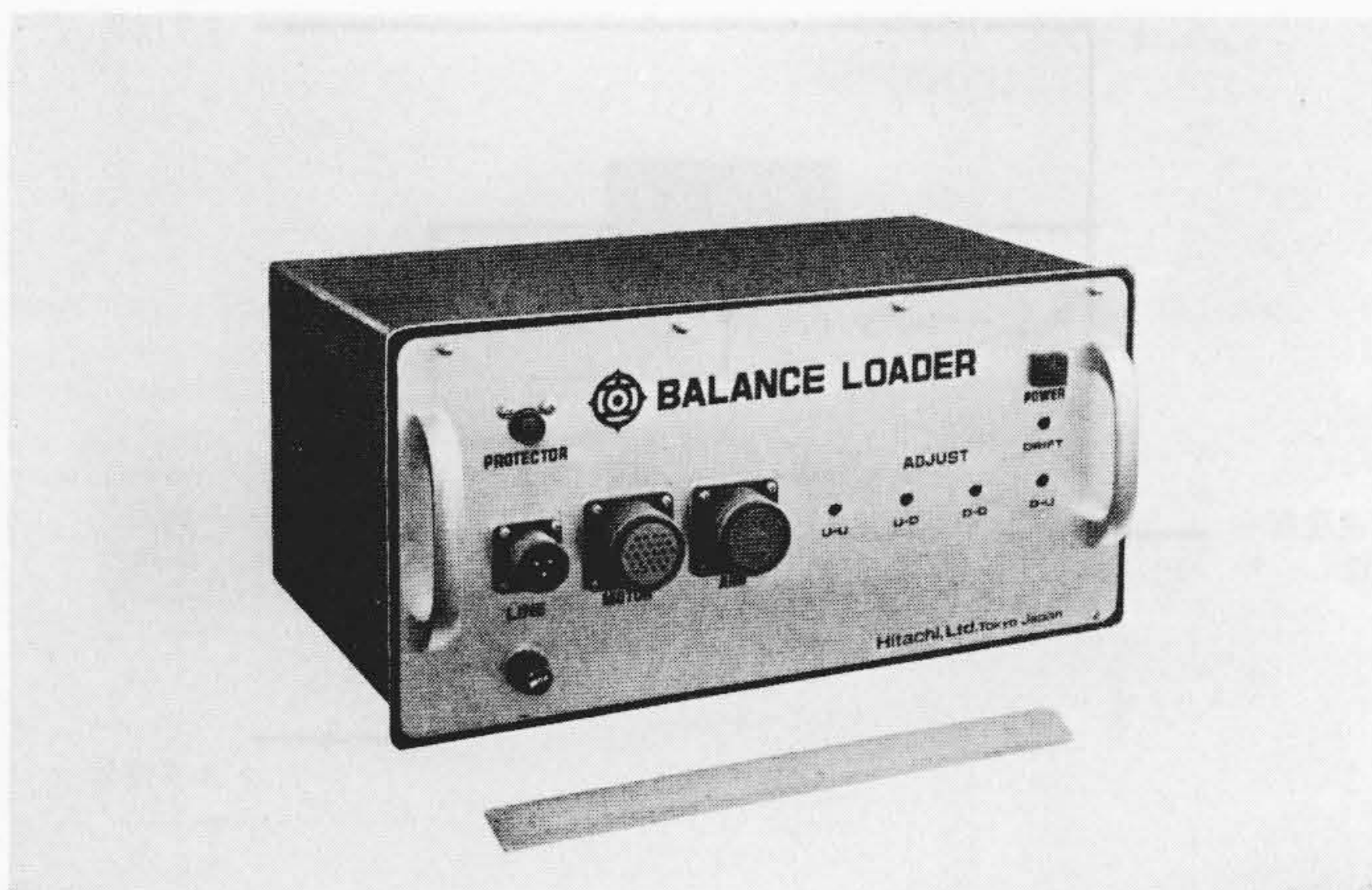


図5 バランスローダ制御装置 バランスローダ本体より簡単に着脱可能な構造とした。

Fig. 5 Controller of the Balance Loader

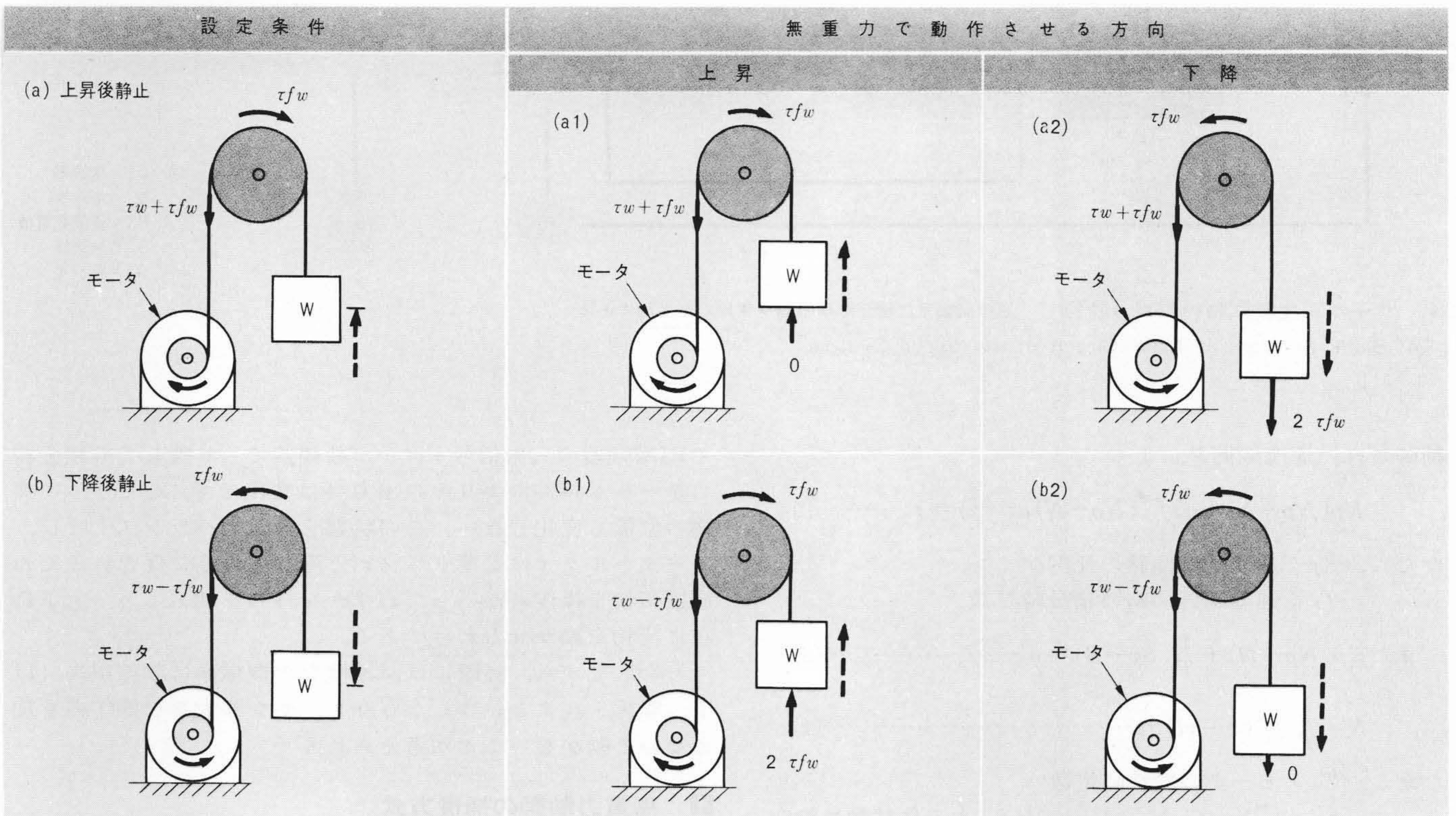


図6 摩擦トルク分析モデル 摩擦トルクが外部操作力に影響を与える様子を图示した。

Fig. 6 Models to Analyze the Frictional Torque

4.2 摩擦トルク補償回路

図8は、摩擦トルク補償回路を示すものである。

摩擦トルクをPI増幅器に負担させないためには、負荷トルク特性においてサーボバランス時の摩擦トルクの負担源をPI増幅器から分離してやればよい。すなわち、サーボ運転時に摩擦トルクを補償する模擬回路を付加しその出力を τ_{fc} とすれば、

$$\tau_p \pm \tau_{fc} = \tau = \tau_l \quad (7)$$

の関係が得られる。

一方、負荷トルク τ_l は、

$$\tau_l = \tau_w \pm \tau_{fw} \quad (8)$$

の関係があるから、 $\tau_{fc} = \tau_{fw}$ となるように摩擦トルクの補償をかけてやれば、

$$\tau_p = \tau_w \quad (9)$$

なる関係が得られ、PI増幅器の出力は真負荷トルク τ_w に等しい値を τ_p としてホールドする。このとき、無重力バランス運転に切り換え、同様に摩擦トルク補償をかけてやれば前述の関係が成立し、モータトルク τ は負荷トルク τ_l に等しくなり、理想的な無重力バランス運転ができる。

図9は、摩擦トルク補償回路を含めた制御回路構成を示すものである。主要回路の構成、動作は前述のとおりであるが、摩擦トルク補償回路は $\tau_{fc} = \tau_{fw}$ なる補償を速度信号 N により

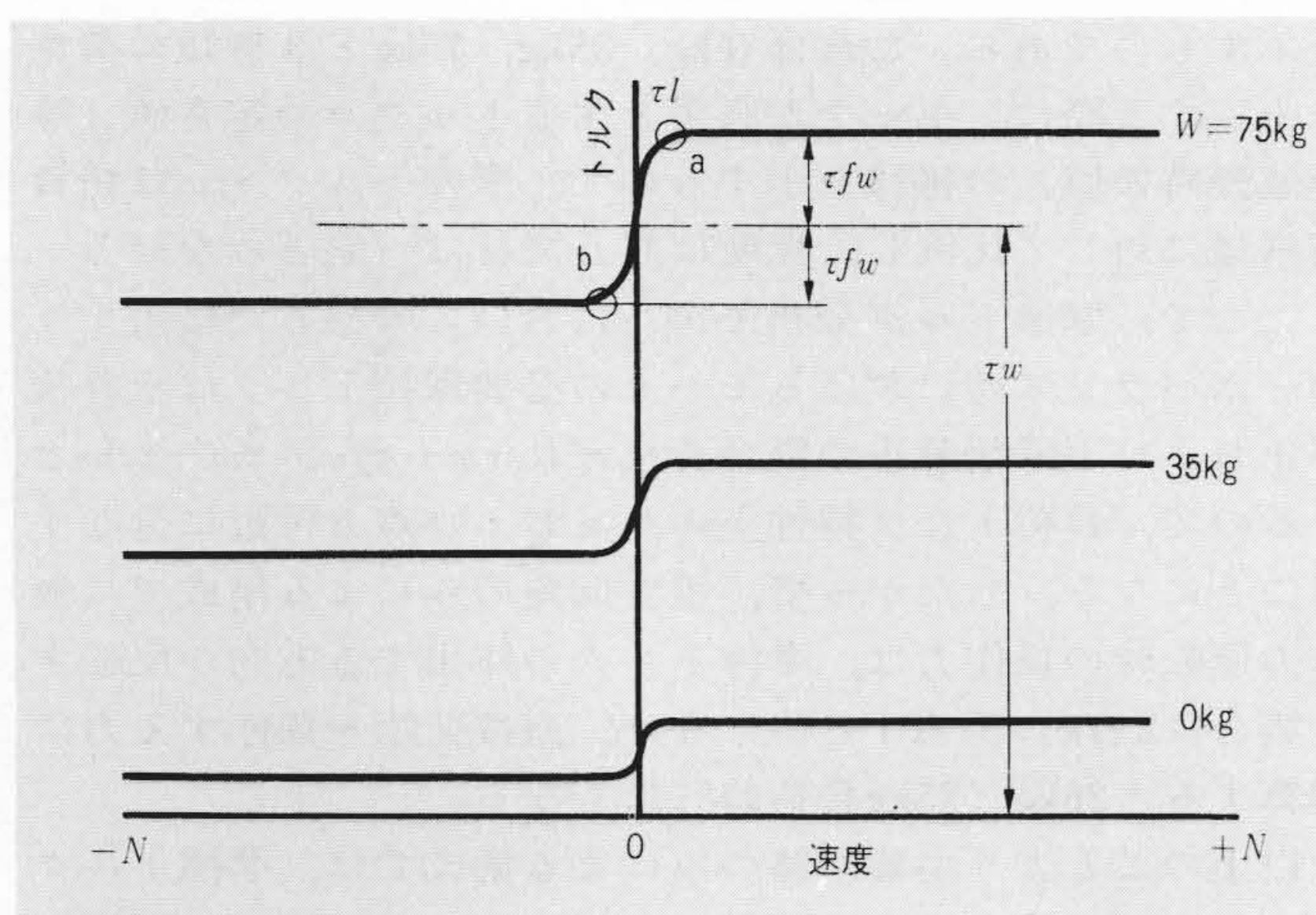


図7 負荷トルク特性 荷重を上昇、下降する際にモータが必要とするトルクの定常値の推移を示す。

Fig. 7 Characteristic Curves of the Loading Torque

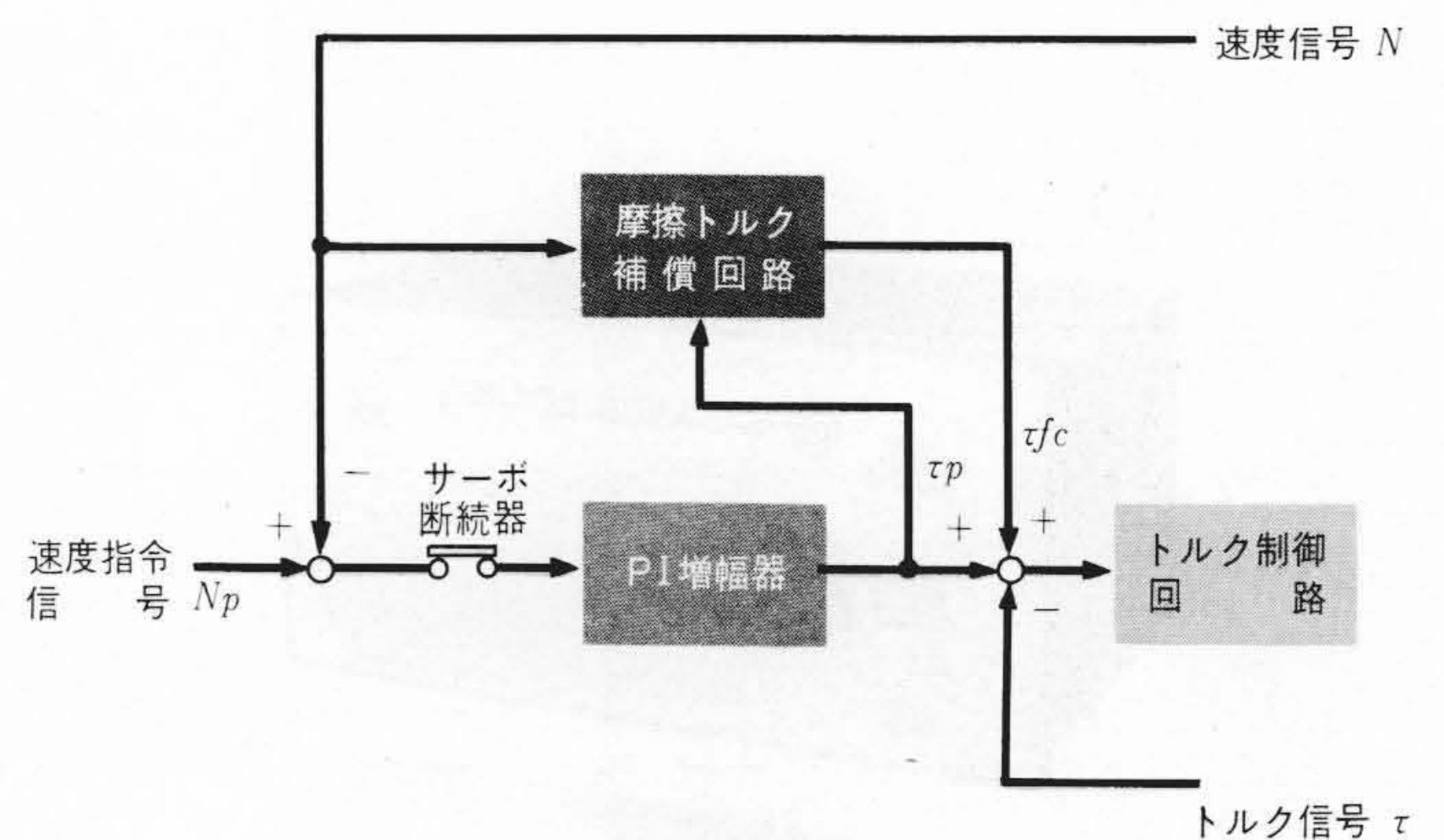


図8 摩擦トルク補償回路 摩擦トルクをPI増幅器より分担する構成を示す。

Fig. 8 Circuit to Compensate the Frictional Torque

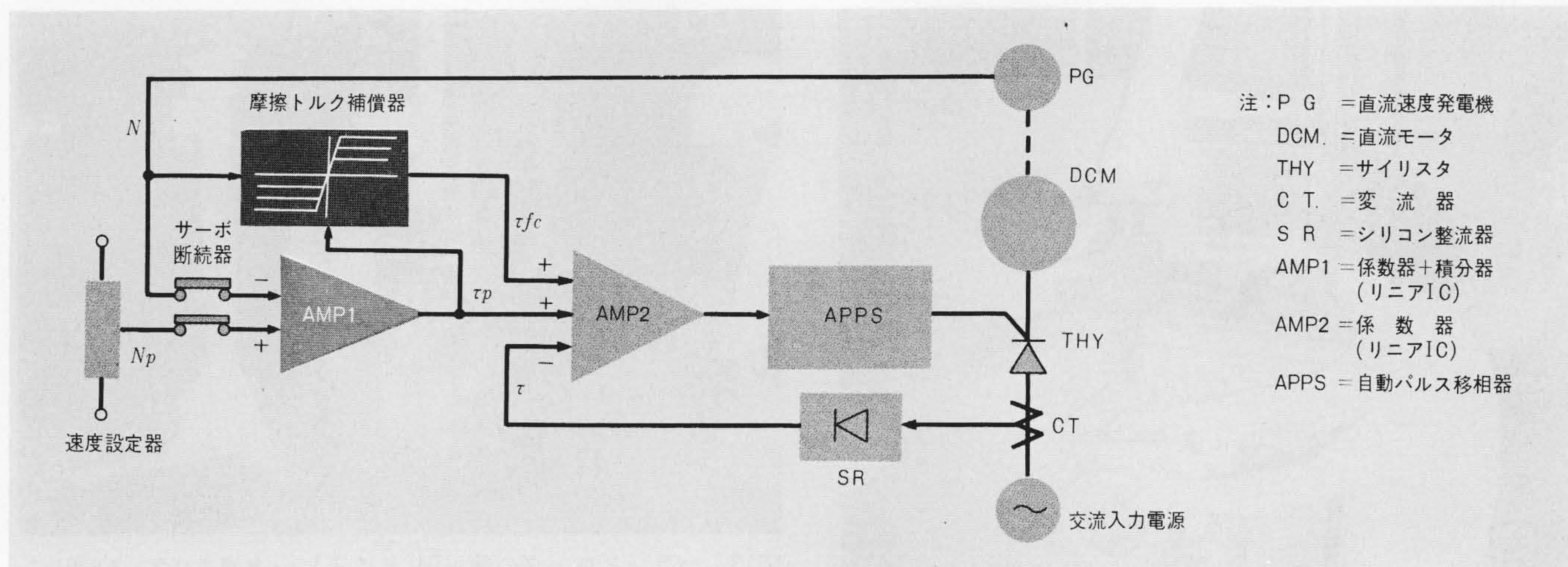


図9 制御回路の全体構成 摩擦トルク補償回路を含めた制御回路の全体を示す。

Fig. 9 Weightless Control System of the Balance Loader

モータの回転方向を判別して出力 τ_{fc} の極性を定め、また総負荷重量に比例した信号であるPI増幅器の出力 τ_p によりその大きさを決定する。サーボ運転時および無重力運転時ともに摩擦トルク補償出力はPI増幅器の出力とともに加え合わせ、トルク制御増幅器に入力し、モータトルクと負荷トルクをバランスさせるので操作性の良好な安定した無重力バランス運転ができる。

5 制御装置の特性

5.1 サーボ系の特性

図10はサーボ運転時の制御回路各部の応答波形を示したものである。速度制御系の動作は安定であり、PI増幅器の出力も摩擦トルクの影響を受けず、上昇後静止時と下降後静止時のホールド値の差はほとんどなく、摩擦トルク補償回路の効果が十分に表われている。

5.2 摩擦トルク補償特性

図11は無重力運転時のモータ発生トルク τ を負荷トルク特性上に重ねて表示したもので、摩擦トルク補償回路の付加効果を示すものである。サーボバランス時のモータトルクは、

真負荷トルク τ_w に一致しており、PI増幅器のホールド値が摩擦トルクを負担していないことがわかる。

また、無重力運転時にモータトルクが負荷トルクにほぼ一致しており、外部から加える操作力がかなり軽減されていることがわかる。

ここで完全に摩擦トルク成分を補償することも可能であるが、そのような状態では、物体は完全な慣性体の運動をする。したがって、一度動き出したらそのままでは止まらず等速運動を続けるので、止めるために逆方向の力を加えなければならない。そのため実際には完全に無重力状態にすることは操作性が悪く不便なことが多い。しかも、しばしば危険なことさえあるので、本装置においては実用上適当と思われる操作力として3～8kg(75kg負荷)になるようにしてある。

6 応用例

バランスローダはそのすぐれた機能が認められ、すでに各種のハンドリング作業に使用されるようになった。中でも無重力バランス機能を用いて、機械へのローディング、アンローディングや組立、合わせなどの人間の微妙な感覚で行なう

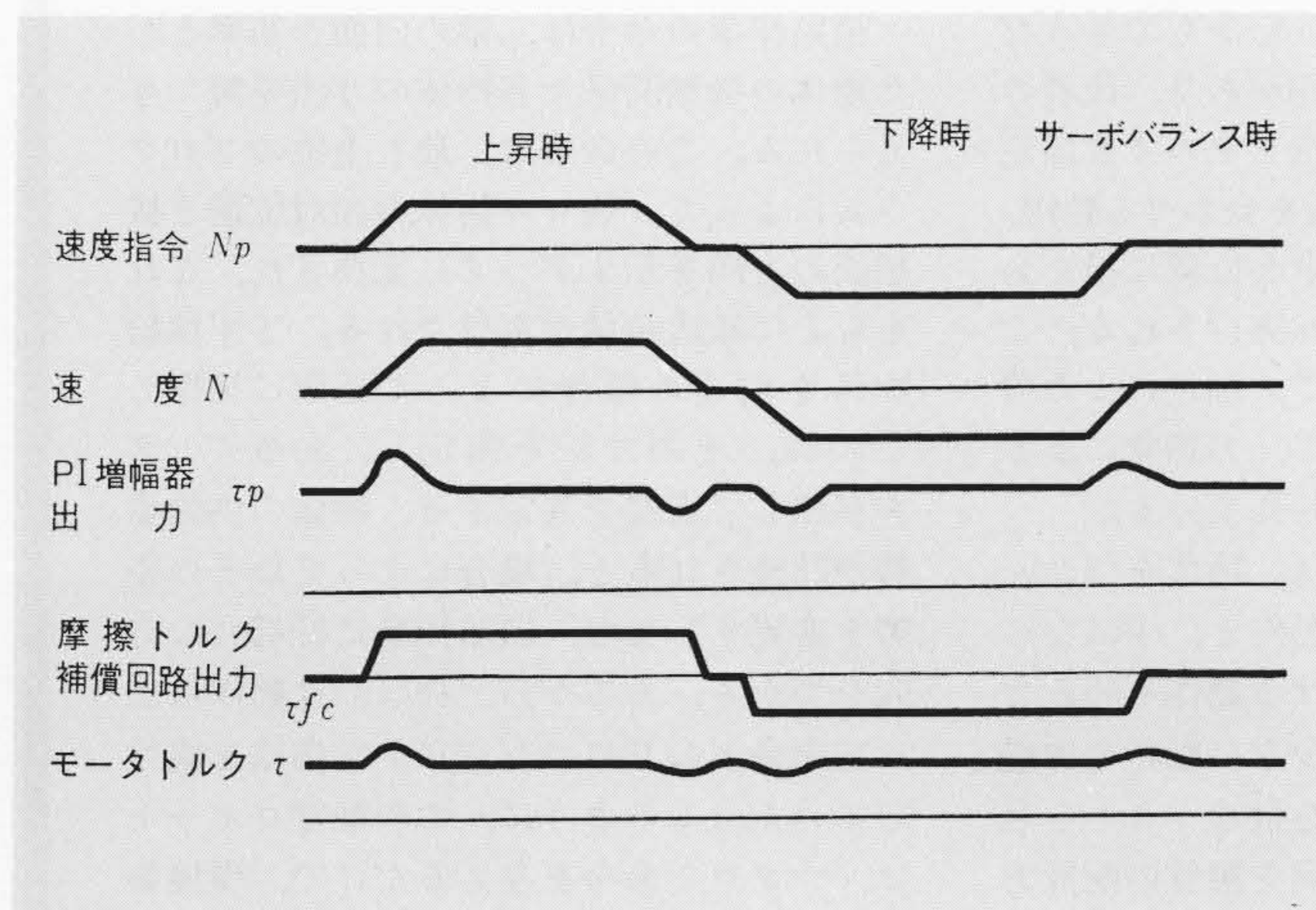


図10 制御回路各部の波形 サーボ運転時の制御回路各部の応答波形を示す。

Fig. 10 Response Charts in the Controlled Circuit

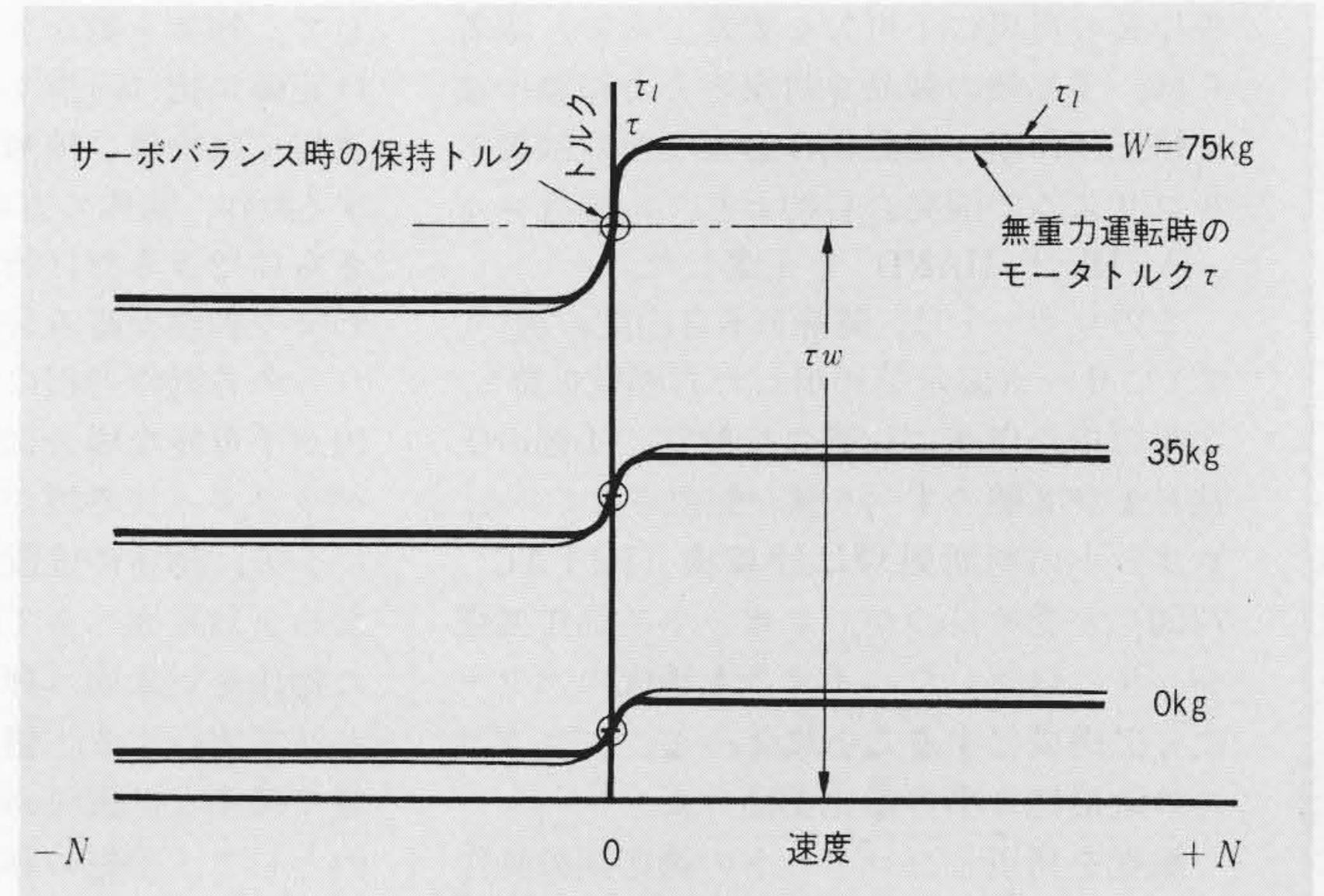


図11 摩擦トルク補償特性 無重力バランス運転時のモータトルクの推移を示す。

Fig. 11 Characteristic Curves with the Compensating Circuit

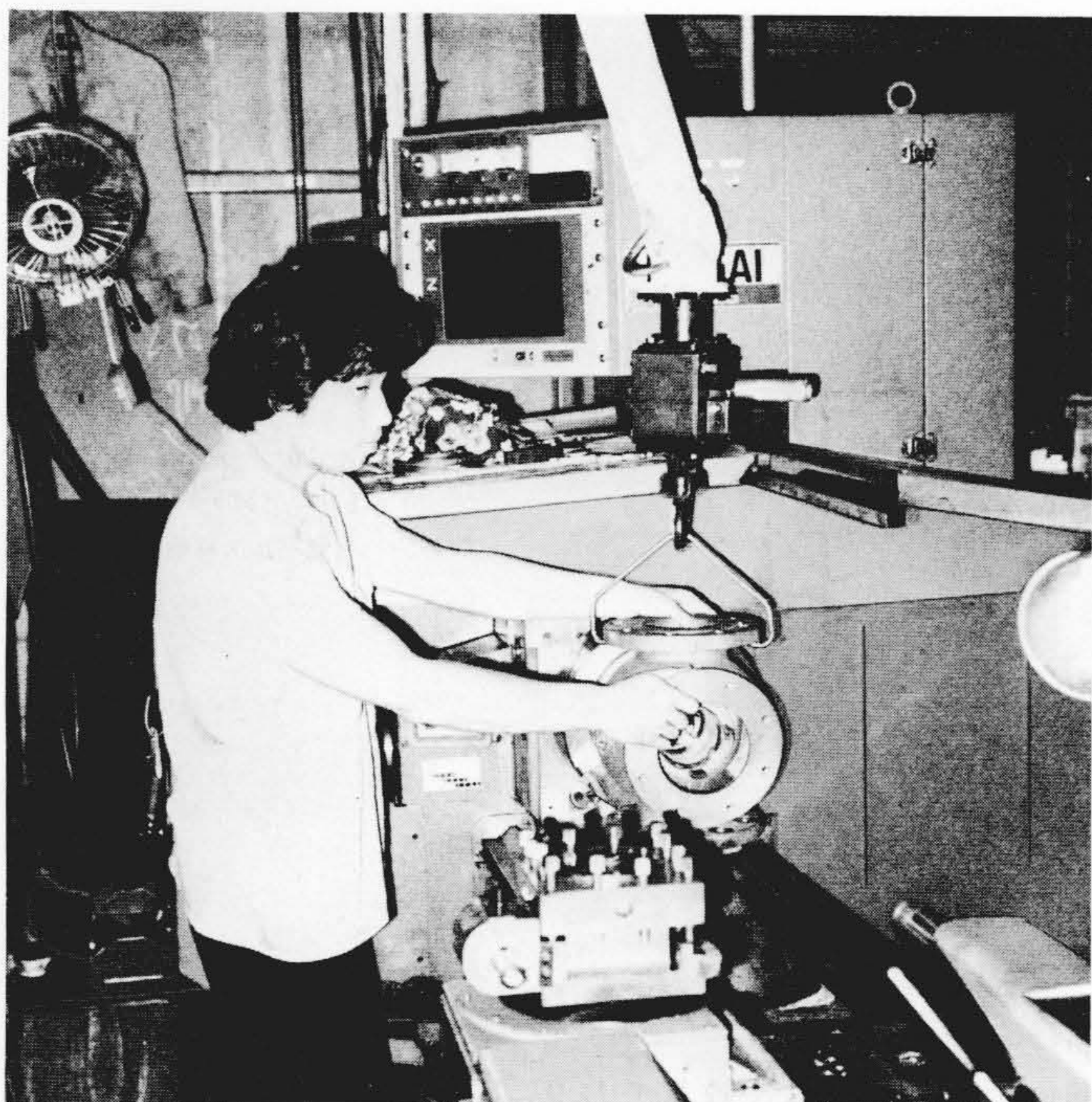


図12 バランスローダの使用例(その1) 無重力バランスを用いて旋盤へのローディング、アンローディングを行なった例を示す。

Fig. 12 Example (1) Using the Balance Loader Application

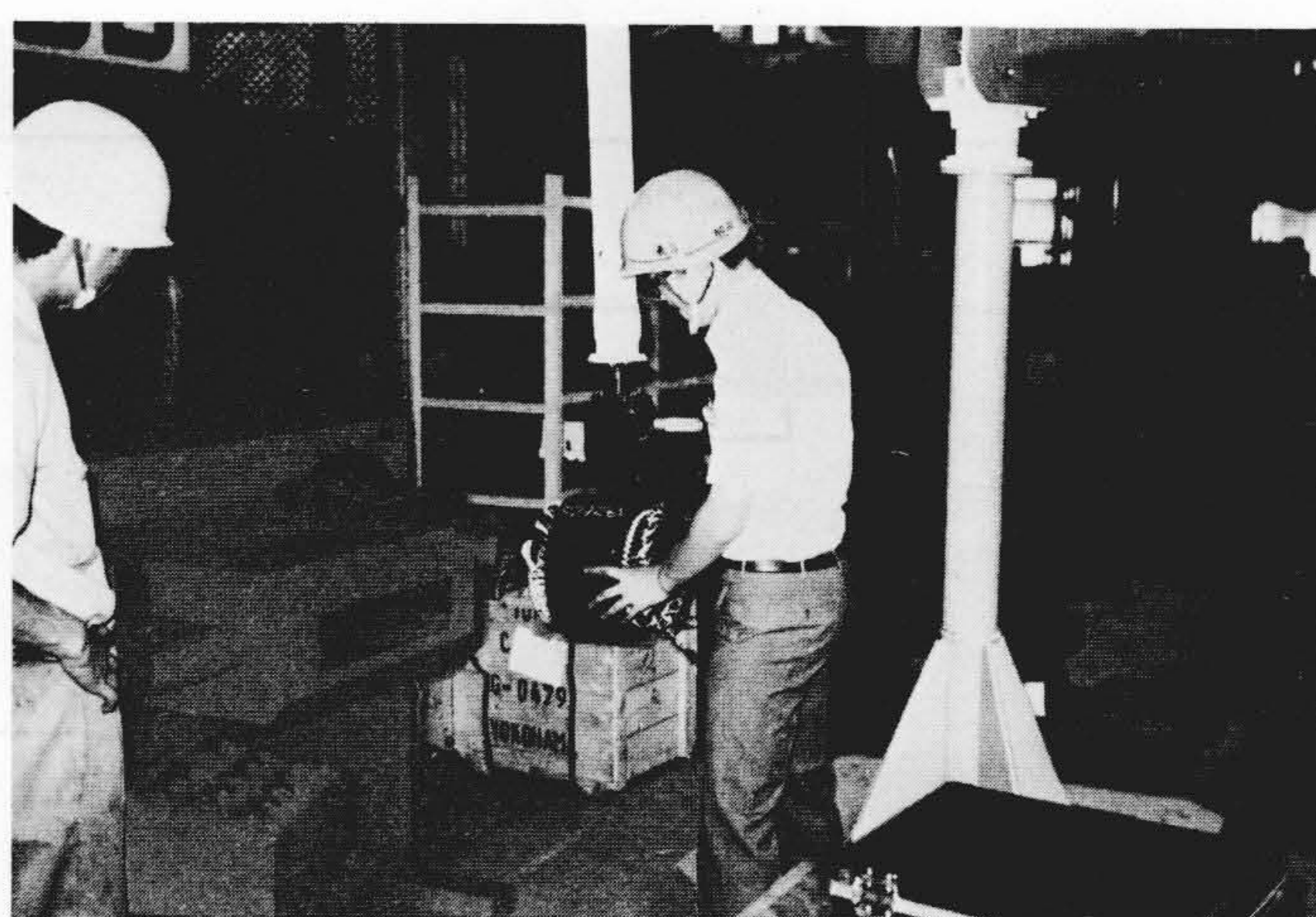


図13 バランスローダの使用例(その2) 無重力バランスを用いて巻線機へのステータそう入作業を行なった例を示す。

Fig. 13 Example (2) Using the Balance Loader Application

7 結 言

以上、バランスローダの無重力制御の概要について述べたが、これを要約すると下記のとおりである。

- (1) バランスローダ制御装置として積分形速度制御方式を採用し、サーボバランスと無重力バランスの両機能を持たせることができた。
- (2) 機械系の摩擦損失が無重力運転時の操作に及ぼす影響を明らかにし、それを補償する回路を付加し、操作性の良好な安定した無重力制御装置を実用化することができた。

作業に用いられている。図12、13はその使用例を示すものである。今後もその応用範囲は、ますます拡大していくものと思われる。

論文抄録

触覚ロボットの制御方式

日立製作所 武安清雄・猪山忠男、他2名

計測自動制御学会論文集 9-1, 51 (昭48-2)

労働力の減少を反映して、適度な判断能力と認識能力を持つフレキシビリティの高い知能ロボットへの関心が高まっている。特に触覚認識機能は、人間に代わる器用な手作業の実現に不可欠な要素である。筆者らは、多品種の製品を対象とした箱詰作業や積上げ作業の自動化に必要な触覚制御アルゴリズムの開発を目的として、触覚ロボット“HI-T-HAND”を完成した。

このロボットは、関節形6自由度の腕(うで)にサーボ偏差を利用した力感覚を持ち、2本の指の周囲に12個の接触覚、4個の圧覚および2個のすべり覚が配置されている。ロボットの判断処理は計算機(HITAC 7250)が受け持つが、ロボットの動作処理レベルに対応したハイアラキ構成のソフトウェア構成とすることによって、プログラムの融通性と小容量化を図った。

触覚を利用したロボットの適応制御動作は、つかみ機能と位置決め機能に別れる。このうち、つかみ機能には、一定範囲内に

任意の姿勢で供給された物体を、指の先端の触覚を利用して探索し、物体を捕捉(そく)可能な位置状態に手の位置を修正する過程と、この状態から、指の内面の触覚を利用して、物体を動かさずに、しかもできるだけ正確に把(は)握する過程があり、後者の過程では物体に接触した指をそのまま固定する動作、物体の方向に指を合わせる動作、さらにできるだけ物体の中心位置に指を合わせる動作が組み合わされ実行される。これらの各動作過程において、触覚による検出が不可能な場合に備えて、力感覚によるバックアップ処理が加えられている。

一方、物体の位置決めは、物体をつかんだまま対象面へあてがう動作と、手ばなしの物体を対象面へ押しつける動作を組み合わせ実行する。個数の少ない触覚や力感覚で確実な位置決め作業を行なうことを目的として、手先の移動方向を触覚の配置方向に対応した3方向だけに限定している。対象面と手先や物体との接触状態に応じて、

これらの3方向の移動条件を選択する動作制御方式の採用によって、触覚情報処理および状況の判定処理も簡単化することができた。

箱詰作業の命令は、箱の内面を基準とした物体の接触関係と各物体の寸法姿勢で与えられる。この命令は、最も上位のプログラムによって、個々の物体の相対位置と接触面の方向を示すデータに変換され、これをもとに順次箱詰が実行される。まず供給物体を前述の機能によって正確に把握したのち、その寸法を測定し、命令データを参照して姿勢を判定する。物体の供給姿勢が認識されると、場合によってはその姿勢を変更するなど、箱詰作業に好都合な方向をつかみ、あてがい、押しつけ動作によって命令どおりにコンパクトな箱詰を実行していく。このように、この触覚ロボットは、マクロな命令を与えるだけで、環境条件に適応しながら、自ら作業手順を決定し作業の目的を達成していくことができる。