

## 2. 重量物組立支援のための重量物搬送システムの開発

杉本 旭\*, 池田 博康\*

## 2. Development of Safety Control System of Heavy Work Handling by the Cooperative Control of Crane and Manipulator

by Noboru SUGIMOTO\* and Hiroyasu IKEDA\*

**Abstract;** The handling of a heavy work, for example, an operation to change heavy dies of a large press machine or injection machine, is a dangerous task. A crane is one of the suitable mechanisms to handle the heavy work, but it makes the suspended work vibration. In construction sites of building, many aged workers engage in handling a crane-loaded heavy work and they suffer from accidents of impact or crushing with the heavy work.

This report proposes a heavy work handling system which consists of crane and manipulator remote-operated by workers. To secure safety of operator against misoperation, the manipulator is controlled to move with compliant motion by pneumatic actuators. An operation to decrease the sway and to secure the work at the position proposed to be held, is conducted by an electromagnetic brake element which is installed at each joint of manipulator.

The kinetic energy of swaying work dissipated in slip condition of the brake generates the possibility of turnover of the manipulator. The turnover mechanism is modelled in the manipulator. Based on this model, a cooperative control system between crane and manipulator is designed for decreasing a work sway and securing safe handling and positioning.

This paper describes the practical load handling, especially, a newly developed position control method of pneumatic manipulator. In general, a pneumatic manipulator is hard to achieve an accurate positioning. To improve the low performance in operation of pneumatic manipulator, an effective control method is introduced to settle the unsteady behavior of the manipulator by friction control. An electromagnetic brake is used for this purpose. This element produces prompt damping force to fix their posture, and an inching motion control achieves the highly accurate control of the manipulator by this element. Consequently, this system realizes anti-sway handling operation of a heavy load in high efficiency and safety.

**Keywords;** Handling, Heavy work, Cooperative control, Crane, Robot, Positioning, Electromagnetic brake, Ballance control, Pneumatic actuator

### 1. はじめに

大型プレス機械や射出成型機の金型の交換, または大型機械の組み付け・組み立て作業などでは, 数トンあるいは数十トンに及ぶ重量物のハンドリングが行われている。建設現場では, 鉄骨の組み付け等のように巨大重量

物がむしろ通常作業の中で扱われている。また, 近年, ビル建設において新しい工法が開発され, コンクリート打設・ハツリ作業, 溶接, 塗装, あるいはボルト締結などの作業に高度の自動化技術が導入されている。しかし, 大型の部材を移動した後で行う正確な位置合わせは自動化が難しく, 依然としてクレーン操作による熟練作業でなされている。

これらの大型部材のハンドリングは概ね次のような方

\*機械システム安全研究部 Mechanical and System Safety  
Research Division

法で行われる。①部材をクレーンで搬送し、②できるだけ揺れを防ぎながら作業位置の近くに部材を移動させる。次いで、③作業位置で待機している作業者が、クレーン操縦者に合図しながら正確な組み付け位置へ誘導する。この時、意志疎通の乱れや操作ミスなどで作業者が部材と壁などとの間に挟まれたり、突き飛ばされる危険性があり、そのため、組み付け作業の自動化が強く求められているが、人間の作業が含まれるため、完全な自動化は大変難しい。

このような重量物のハンドリングを行う場合、数トンから数十トンに及ぶ可搬重量、数 m から数十 m に及ぶ可動範囲、そして数 mm 以下の位置決め精度という仕様が要求され、これらの仕様を満たすにはクレーンの利用が不可欠である。しかし、クレーンによる重量物ハンドリングは荷振れを生じやすく、高い位置決め精度が要求される組み付け作業をクレーンを操作して行うことは困難な場合が多い。そのため、作業者が部材を保持して揺れを防いだり、部材を手で回転するなど直接部材を扱うことが現に行われており、このような不安全行動が原因となって、すでに述べたような災害が多く発生している。

危険作業の自動化が難しい場合、遠隔で操作できるマニピュレータ（人間が遠隔操縦する汎用機械）の利用が考えられる。この場合、重量物の組み付けを行うために、クレーンによって大きな可搬重量と広範な可動範囲を確保し、高位置決め精度をマニピュレータで実現するための協調システムが有力と考えられる。これまでクレーンとロボットとの協調制御に関するいくつかの研究<sup>1)~3)</sup>が見られる。固い関節のロボットのままでは、クレーンとの間で協調制御を行うことはほとんど不可能である。そのため、バネ特性を持つ柔軟なアームを取り付けて過大な力の発生を回避しようとしているが、この方法では、十分な位置決め精度が得られない。このように安全上の問題が指摘されていながらも、これまでのいずれの方法も十分な機能が得られないまま、依然として人の危険作業に委ねられている。

本研究では、大型重量物ハンドリングの安全化を目的としたクレーン・マニピュレータ協調制御システムを提案し、試作システムを用いた制御実験によりその有効性を調べた。ただし、従来の制御方式ではこの協調制御が困難なので、本研究では新しい方式（バランスサーボ方式）を提案し、適用した。大型重量物のハンドリングは産業一般に広く存在する危険作業であり、特に高齢者が従事する機会が多いので、本研究の成果の応用範囲は広いと考えられる。

## 2. 重量物のハンドリングの作業形態

重量物のハンドリングは基本的にはクレーンによる作業であると言ってよい。クレーンは、用途が拡大し、設置台数が年々増加しているが、その一方で、年々、使用条件が厳しくなり、また、マイクロエレクトロニクス (ME) の導入によって機能の高度化・複雑化が著しく進展してきており、そのため作業者の教育で十分な技能を修得できない状況となっている。

クレーン等による災害は、本体の構造や機能の欠陥によるものよりも、むしろ運転操作及び玉掛け方法の誤り、合図の不徹底などによるつり荷の落下、つり荷の激突、挟圧によるものが特に多いことが指摘されている<sup>4)</sup>。しかも、これらクレーン関連の作業者の高齢化が著しいことから、これらの人為的な要因で起こる災害はますます問題になると予想される。

有資格者が行う玉掛け作業ではあるが、クレーン運転中に荷がバランスを失ったり、落下する危険性があるため、もともと、つり荷の下方や側方に作業者が立ち入ることは避けるべきである。しかし現実には、つり荷を直接保持して揺れを防いだり、つり荷を回転させる作業が行われていることは想像に難くない。しかも、急にバランスを失った荷から逃げることは、高齢者には期待できない。

本研究では、上記のような人の作業を高齢者が行う場合、作業負担を軽減すると共に、高齢者による荷扱いを安全に行えるようなマニピュレータの操作方式について検討した。

## 3. 重量物搬送システムの条件

クレーンで吊り下げられている荷を人間が直接扱う代わりにマニピュレータによって行う場合、次のような作業の手順が考えられる。

- (1) 人間による玉掛け作業、
- (2) クレーン単体による移送（グロスモーション）  
ここまでは従来の人間の作業として行う。さらに、
- (3) マニピュレータを操作して荷をつかむ、
- (4) マニピュレータを操作して荷振れ停止させる、
- (5) マニピュレータとクレーンの協調制御による位置決めを行う（ファインモーション）、
- (6) マニピュレータを操作して待避させる。

まず、(1)の玉掛け作業、さらに(2)のクレーン操作は従来通り有資格者によって行われる。クレーン操作には荷振れを生じないための技能が必要である。荷振れの制御は理論的にはほぼ解決されているが<sup>5)</sup>、人間がクレーンを操作して荷振れを停止させることは大変難しい。言

うまでもなく、荷を手で保持して荷振れを停止させる行動は許されない。そのため、(4)のマニピュレータによる荷振れ停止が求められる。さらに(5)の人間とクレーンとの協調制御は、精密な位置決めをマニピュレータによって行うべきことを求めている。(6)は、単独でアームを制御するためのマニピュレータ技術を必要とする。

一般に、2つの機構間に相対的に位置決め誤差が発生すると過大な反力が発生する。それは、2つの機構が共にサーボ剛性を含めた機構の剛性が高い場合に、位置決め誤差を修正しようとして互いに過大な力を発生させるためである。クレーンとロボットとの協調制御についてすでに振れたが、ロボットは高歯車比の減速機を持ち、コントローラの無駄時間が大きい等の影響でサーボ剛性が高い。そのため、ソフトウェアによる仮想コンプライアンスで柔らかさを実現することは難しい。本研究におけるマニピュレータにおいてはこの欠点を補うため、各関節部に摩擦ブレーキを組み込み、これに供給する電流によって剛性を調整できるようにしている。ただし、摩擦ブレーキの最大摩擦力が許容限界となるよう電流を設定する。すなわち、これを超える外力に対して摩擦板が滑ることによって力の伝達を阻止する構造である(いわゆる過大な外力に対するヒューズ的な機能を持つ)。

本研究では、このマニピュレータについて、荷の把握から位置決めまでの作業を行うための安全条件を明らかにし、さらに、これら一連の作業の内、実用上の重要な機能である荷振れ停止機能、及び、つり荷の高精度位置決めを実現するため、電磁ブレーキと空気圧アクチュエータとを連動する新しい制御方式(バランスサーボ方式)を提案している。

#### 4. 重量物ハンドリングの手順

本研究におけるマニピュレータシステムの外観をPhoto 1に示す。本システムは、クレーンのつり荷を把握する機構(把持機構)を持ち、遠隔操作で荷振れの停止と位置決めを行うマニピュレータ/台車システムである。Photo 1のように、各関節部に取り付けられているアクチュエータは空気圧シリンダである。空気圧アクチュエータを採用した理由は、力出力が大きいばかりでなく、低剛性の状態が容易に得られるためである。しかし、空気圧アクチュエータは位置決めが大変難しいため、本研究で提案するバランスサーボ方式では、確実な位置決めを関節部に取り付けた電磁(摩擦)ブレーキによって行う。ここに、摩擦ブレーキの役割は、①空気圧アクチュエータの停止位置を確実に保持すること、②電磁ブレーキの電流を調整して見かけ上の固さを変化すること、また、③電流を下げて滑り状態を生成して、制動



Photo 1 The Heavy work Handling Manipulator System. 重量物搬送用マニピュレータ外観

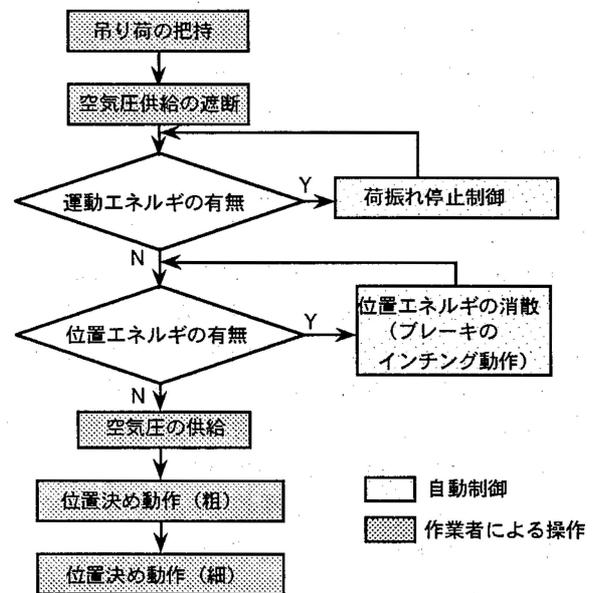


Fig. 1 The procedure of work handling operation. 吊り荷ハンドリングの操作手順

状態を制御することである。

重量物は、荷振れによって大きな機械的エネルギーを蓄積する。そのため、荷の動きに対していわゆる急ブレーキをかけると大きな反力を生じて台車が転倒する恐れがある。転倒しない条件で荷振れ停止を行うため、本システムは関節部の電磁ブレーキの電流を調整して上記③により摩擦状態とし、転倒する恐れがあるとき電流を遮断して転倒を防止する構成としている。ただし、この時、マニピュレータの能動的な力出力は必要としないので、マニピュレータの側から誤って危険な出力が生ずることはない。

つり荷の運動エネルギーを消散した後、マニピュレータはつり荷を所定の位置に動かす作業を行う。実験機は、動きを空気圧アクチュエータで、また、停止を電磁ブレーキで行うバランスサーボ方式によって空気圧アクチュエータの高い停止精度を得ている。

従来、電磁ブレーキは非線形摩擦特性を持つことから、線形制御を基本とするこれまでの自動制御システムでは利用を避けてきた。本マニピュレータにおける電磁ブレーキは、転倒に対する安全確保、荷振れ停止、及び、高精度位置決めのための3つの目的を実現するための基本制御要素となっている。具体的な作業手順を Fig. 1 に示す。

### 5. マニピュレータの構造

本研究で用いるマニピュレータは、移動台車の上にマニピュレータを据え付けた構造であり、システム構成を Fig. 2 に示す。台車はバッテリーによる電動機で走行し、ハンドリング作業時には4か所に配置されたアウトリガを降ろして台車を安定させる。アウトリガにはそれぞれに負荷の状況を読みとるためのロードセルが取り付けられてあり、作業時の転倒に対して安全状態を維持するための信号を生成する。

マニピュレータ部は、肩回転、肩上下、及び肘回転の3自由度を持ち、それぞれに空気圧シリンダと電磁ブレーキが取り付けられている。肩部の関節及び肘関節の構造をそれぞれ Fig. 3, Fig. 4 に示す。共に、電磁ブレーキが取り付けられており、肩部は回転型、肘部は直動型のブレーキである。空気圧シリンダの圧力を抜くと各関節はフリーになるが、電磁ブレーキに電流を供給することによって発生する静摩擦によって関節軸を固定することができる。電流を調節することによって、安全条件を維持しながらの荷振れ停止と位置決めを行う。

マニピュレータの手首部は従動型の自在軸受で接続されており、荷の動きに順応できる。また、手（ハンド部）は、荷物の横面に板状の部分を当て、空気圧シリンダで爪をスライドさせて吊り荷のワイヤを掴んで固定する機構である。ハンド部は、Photo 1 に示すマニピュレータの先端部に固定されている。

腕の長さは、前腕が手先から肘までで1.8m、上腕の長さは肘から肩までが1.7mである。手先の到達範囲は肩回転軸を基準に1.0~3.4m、全可動角56.5degである。

マニピュレータの基本構成を Fig. 2 に示す。マニピュレータの操作方法は、①操作レバーで空気圧弁を手動で開閉する方法と、②操作レバーで動作/停止の指令をスイッチで操作し、後は自動制御に任せるという2つの方法で行うようにした。ただし、①の操作方法は、空気圧弁を手で操作してマニピュレータを動かすもので

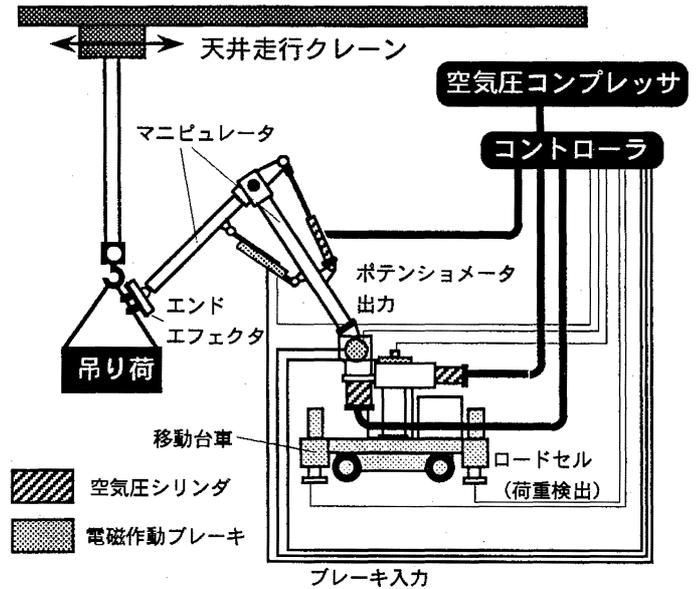


Fig. 2 Construction of Work Handling Manipulator System. マニピュレータシステムの構成

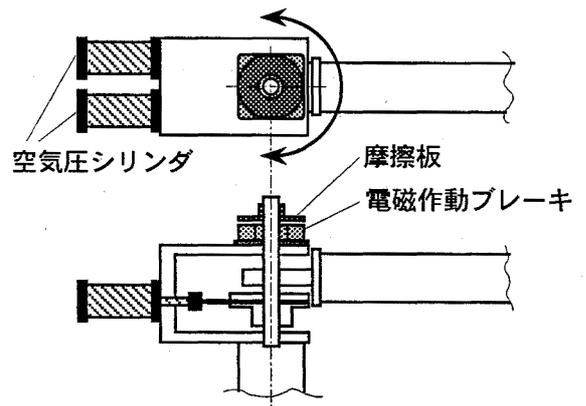


Fig. 3 Construction of the shoulder joint. 肩関節部の構造

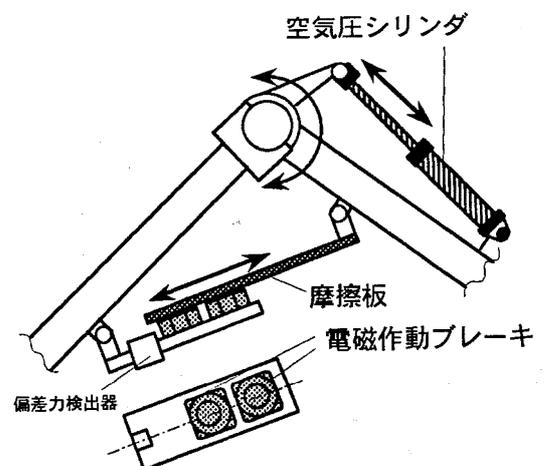


Fig. 4 Construction of the elbow joint. 肘関節部の構造

あり、電磁ブレーキは用いていない。ここでは詳しく述べないが、実際に操作実験を行ったところ、人間が圧力調節を行ってマニピュレータを動かすことは、全く不可能であった。これは、人間の目による限り、位置情報しか獲得できず、力のバランスを保つには力センサが必要であるが、これを人間は持っていないためである。これに対して②の方法は、力のアンバランス状態を力センサで検出しており、その信号で電磁ブレーキを利用して自動的にバランスを取るようになっている。そのため、①による操作とは比較にならないほど、容易に位置決め操作(制御)を行うことができた。②の方式によって、これまで不可能とされてきた空気圧アクチュエータによるマニピュレータの手動操作が可能となったと言える。この新しい空気圧サーボ方式については第7節に詳しく述べる。

## 6. 荷振れ停止作業

荷を掴んでから荷振れを停止させるまでの作業は、荷の位置を示す信号によって電磁ブレーキの電流を制御することで行われる。この場合、各関節は空気圧を抜いて自由に動くようにしておく。制御方法としては、アウトリガのロードセルによる荷重信号に比例した電流を電磁ブレーキに供給し、アウトリガが地面から浮いた場合(荷重出力0)を危険とみなし、そこに至る手前で電磁ブレーキをオフするようになっている。

### 6.1 転倒に対する力学的条件

荷振れ停止の制御を行う場合、マニピュレータ本体の転倒を防止するための力学的条件が存在する。転倒条件は、振動する荷がマニピュレータの手先に及ぼす力によって発生するトルクと、マニピュレータと台車の重量によって2つのアウトリガを結ぶ直線の周りに発生するトルクのつり合いによって求められる。前者はマニピュレータの姿勢によって変化するもので、関節角の関数で表される。後者は、マニピュレータの動きによる重心の移動が十分小さいと考えれば構造的に一定で、転倒の方向(前後、左右)によって2通りの数値が与えられる。以下に、荷振れの方向を左右と前後の2通りに分けて、それぞれについてモデル化を行う。

Fig. 5 にマニピュレータの構造モデルを示す。まず、手先の位置を各部の寸法と関節角を用いて表す。手先の地面からの高さを  $H$ 、肩(旋回軸)からの距離を  $L$  とすると、それぞれ次のようになる。

$$H = h + I_b \sin \theta_b - I_c \sin(\theta_c - \theta_b) \quad (1)$$

$$L = I_a + I_b \cos \theta_b + I_c \cos(\theta_c - \theta_b) \quad (2)$$

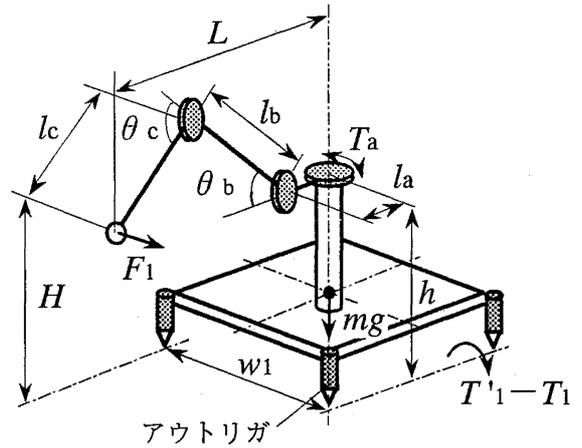


Fig. 5 Schematic model of anti-sway control (1)  
荷振れ停止制御モデル (1)

#### 6.1.1 左右方向の振動

荷が左右に振動する場合の力学的モデルを Fig. 5 に示す。ここでは肘と肩の上下の動きをフリーとして、肩旋回軸トルクについて論じる。運動する荷が手先に及ぼす力を  $F_1$  とすると、肩(旋回軸)に発生するトルク  $T_a$  は次式で与えられる。

$$T_a = F_1 \cdot L \quad (3)$$

この時、台車の転倒は側部の2つのアウトリガをつなぐ直線の周りの方向である。アウトリガの左右間隔を  $w_1$ 、マニピュレータ/台車システムの総重量を  $m$ 、重心は常に台車の中心にあるとして、重力によって台車を地面に押しつけているトルクを  $T_1$ 、台車を転倒させようとするトルクを  $T_1'$  とすると転倒に対する安全条件は  $T_1' < T_1$  となる。これに各部の数値を代入すると次の条件式が得られる。

$$F_1 H < \frac{mgw_1}{2} \quad (4)$$

$T_a$  を用いて  $F_1$  を消去すると次となる。

$$T_a < \frac{mgw_1 L}{2H} \quad (5)$$

$L$ 、 $H$  を書き換えると、条件式は次の形で得られる。

$$T_2 < \frac{mgw_1}{2} \frac{\{I_a + I_b \cos \theta_b + I_c \cos(\theta_c - \theta_b)\}}{\{h + I_b \sin \theta_b - I_c \sin(\theta_c - \theta_b)\}} \quad (6)$$

#### 6.1.2 前後方向の振動

荷振れが本体に対して前後方向である場合の力学的モデルを Fig. 6 に示す。この作業で、荷の運動によって動かされるのは肩(上下動軸)と肘(上下動軸)の2か所

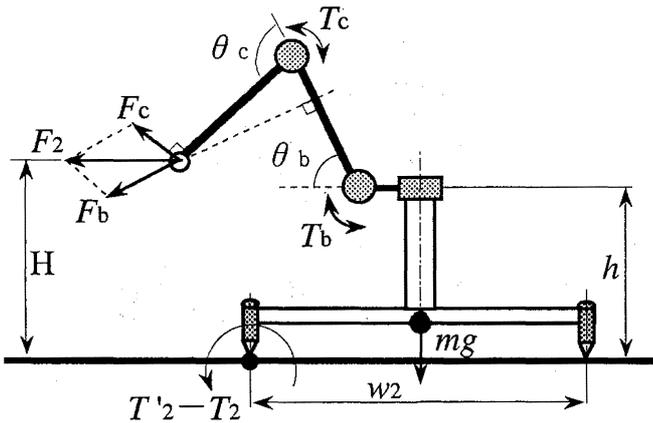


Fig. 6 Schematic model of anti-sway control (2)  
荷振れ停止制御モデル (2)

であるので、転倒条件は2つの電磁ブレーキについての式で表される。

まず左右方向の振れの場合と同様に、荷が手先に及ぼす力と関節に発生するトルクとの関係を求める。この場合、2か所の関節についての問題となるので、力入力  $F_2$  を上腕と前腕それぞれに垂直な方向に働く力  $F_b$  及び  $F_c$  に分解する。

$$F_b = F_2 \frac{\sin(90^\circ + \theta_b - \theta_c)}{\sin \theta_c} = F_2 \left( \frac{\cos \theta_b}{\tan \theta_c} + \sin \theta_b \right) \quad (7)$$

$$F_c = F_2 \frac{\sin(90^\circ - \theta_b)}{\sin \theta_c} = F_2 \frac{\cos \theta_b}{\sin \theta_c} \quad (8)$$

これらを用いると、肩上下関節及び肘関節に発生するトルク  $T_b, T_c$  はそれぞれ次のようになる。

$$T_b < l_b \left( \frac{\cos \theta_b}{\tan \theta_c} + \sin \theta_b \right) \frac{mgw_2}{2H} \quad (9)$$

$$T_c < l_c \frac{\cos \theta_b}{\sin \theta_c} \frac{mgw_2}{2H} \quad (10)$$

転倒の方向は前後の2通りが考えられるが、マニピュレータの姿勢に関係なく本体の重心が中央にあると考えれば、前後とも同じ条件式が適用できる。

左右方向の振動の場合と同様に、台車を地面に押しつけるトルク  $T_2$  と外力によるトルク  $T_2'$  の関係は  $T_2 > T_2'$  になるようにする。これを考慮すると、次の条件が成り立つ。

$$F_2 H < \frac{mgw_2}{2} \quad (11)$$

これを  $T_b, T_c$  の式に代入する。

$$T_b < l_b \left( \frac{\cos \theta_b}{\tan \theta_c} + \sin \theta_b \right) \frac{mgw_2}{2H} \quad (12)$$

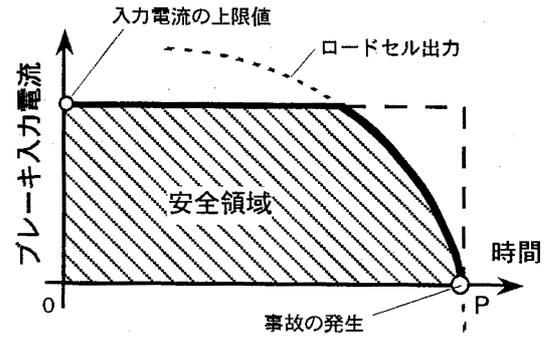


Fig. 7 Safe zone of anti-sway control.  
荷振れ停止制御の実行範囲

$H, L$  を書き換えると、次の条件式が得られる。

$$T_b < l_b \left( \frac{\cos \theta_b}{\tan \theta_c} + \sin \theta_b \right) \frac{mgw_2}{2\{h + l_b \sin \theta_b - l_c \sin(\theta_c - \theta_b)\}} \quad (14)$$

$$T_c < l_c \frac{\cos \theta_b}{\sin \theta_c} \frac{mgw_2}{2\{h + l_b \sin \theta_b - l_c \sin(\theta_c - \theta_b)\}} \quad (15)$$

以上により、荷振れ停止作業における転倒防止条件が関節角の関数として得られる。

## 6.2 荷の移動による転倒条件

実際のシステムの場合、上の条件 (式 (14),(15)) は安全確保の限界の判断として用い、摩擦トルクを制御するための指令値としては台車の偏荷重を直接読み取って利用する。

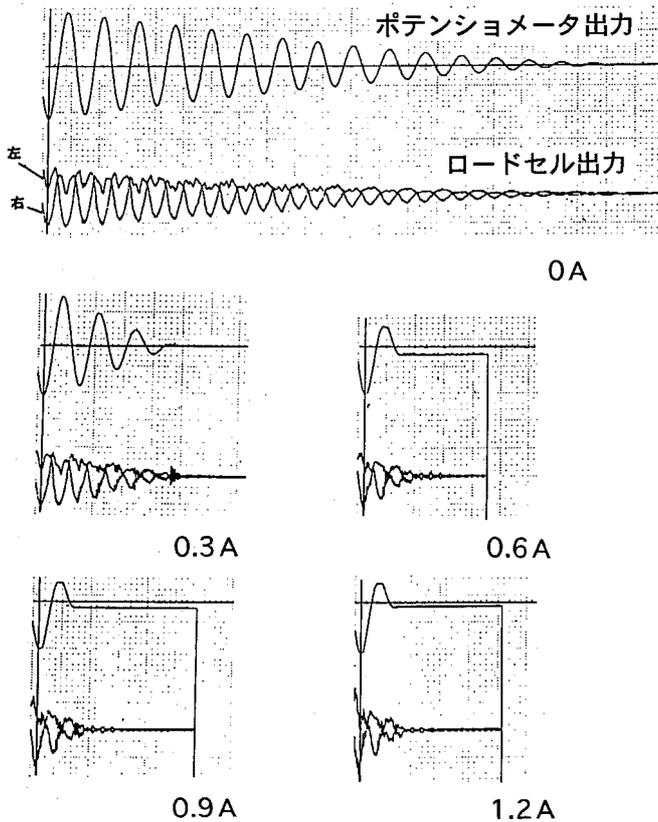
ロードセルの信号を安全条件として観察する方法は、転倒時、アウトリガの荷重が減少するという現象を直接読み取るものである。従って、荷重に比例するように摩擦ブレーキに電流を供給してやれば、安全条件を維持する制御系が容易に構成できる。また、電磁ブレーキの摩擦トルクの増減は、作業に付随して起きる現象に比較して十分に短い時間で応答するので、転倒を予測して回避するためのフィードフォワードは特に必要ではない。転倒の発生時刻とロードセルの信号及び入力電流の関係を示したのが Fig. 7 である。斜線で表した範囲が安全領域 (電磁ブレーキを操作しても転倒しない範囲) で与えられるので、この範囲内で摩擦トルクの制御を行い、点 P の右側では電流を遮断する。

## 6.3 荷振れ停止の実験

この実験では、マニピュレータによって左右方向の荷物の振動を停止させる様子が観察される。Fig. 8 は、電磁ブレーキの入力電流を関節角に無関係に一定とした場

合の減衰パターンを示している。摩擦抵抗が回転速度に無関係な固体摩擦であると見なすと、減衰は等差級数的になり、振動波形の包絡線は直線となる。Fig. 8によると、電流が小さいものでは減衰波形の包絡線がほぼ直線となっていることが確認できる。電流が大きくなると、減衰力が大きくなり振動している時間が短くなるため、包絡線の様子がわかりにくい。このデータから、この系が理想的な固体摩擦振動系かどうかを判断することは難しい。また、荷重の変化はピークがつぶれている様子がみられる。これは、腕の振れ角が大きい位置では荷物の位置が高くなり、結果として腕がクレーンに吊り上げられるような状態になって、その分だけ腕が軽くなったためと考えられる。

これらの波形から読みとった、各入力電流に対する振動停止までの時間と、減衰率の変化を Fig. 9 に示す。電磁ブレーキの摩擦トルクは入力電流の 2 乗に比例するため、これらの曲線は理論上 2 次曲線を描くが、実際には減衰率は定格の半分にあたる 0.6A 程度を境に上昇が抑えられている。これより、電磁ブレーキの発生する摩



縦軸：電圧 (200 mv/div) 横軸：時間 (5s/div)

Fig. 8 Damping effect in constant brake-current. 一定ブレーキ電流におけるダンピング効果

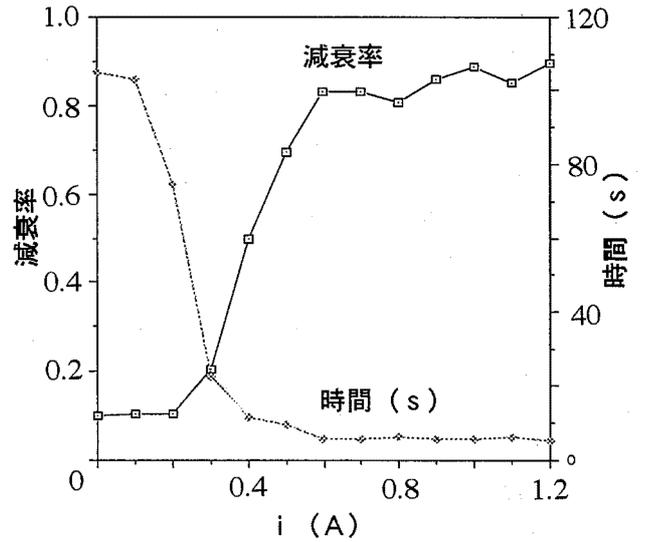


Fig. 9 Damping ratio and damping time. 減衰率と減衰時間

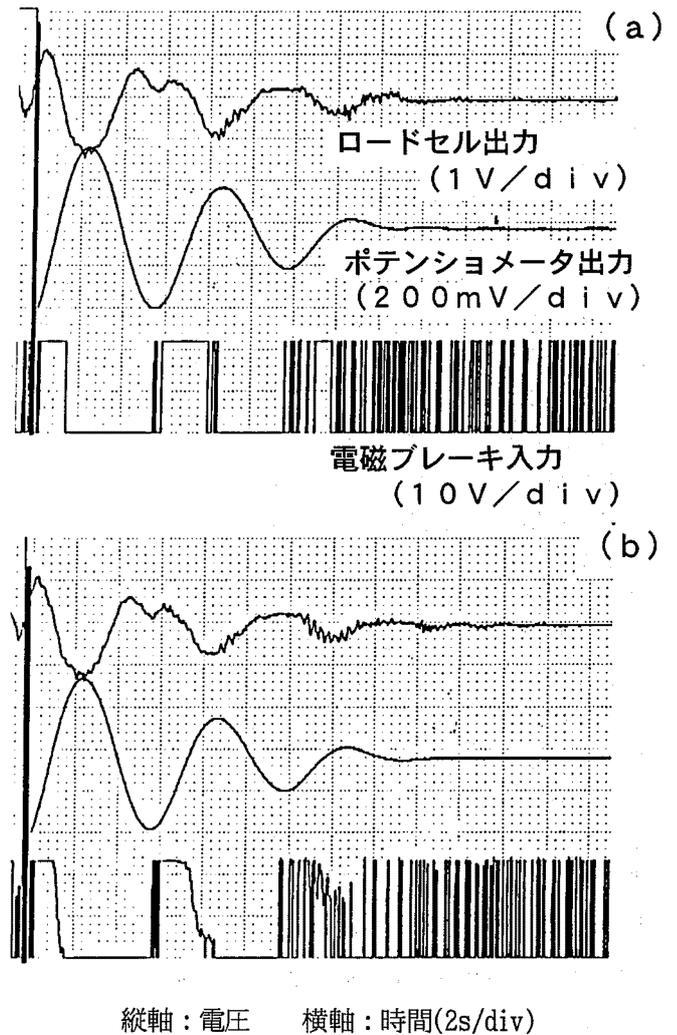


Fig. 10 Damping effect in anti-sway control. 荷振れ停止制御による減衰効果

擦トルクがこの点で飽和し、定格に達していることが伺える。制動時間特性は減衰率より先に飽和している様子がみられるが、これは関節角度の残留偏差が影響しているためと考えられる。この偏差は、摩擦トルクが大きくなり、荷物とクレーンによる振り子の復元力に打ち勝って、初期位置に達する前に振動を停止させるために生じるもので、この偏差の分だけ制動時間が短くなったと思われる。

Fig. 10 は、ロードセルの荷重の変化に応じて電磁ブレーキの摩擦トルクを変化させた場合の波形である。①はロードセルの荷重が減少するときに一定の入力電流を印加した場合、②はロードセルの出力に比例した電流を印加した場合である。この結果からは両者の波形に顕著な相違は見られないが、②の方法は、荷振れが停止したとき自動的に電流が停止するので、作業を自動的に行う②の方法が有効である。

## 7. 位置決め作業

次に、荷物の振動停止作業を終了した後の位置決めの方法について考える。このマニピュレータには、前述の柔らかい動きを必要とする場面があるため、空気圧シリンダを使用している。これまで空気圧アクチュエータによるサーボ機構はラパチュエータ<sup>6)~7)</sup>など幾つかの試みはあるが、ほとんど実用化されていない。このように、空気圧アクチュエータは、スティックスリップなど非線形特性の影響のためサーボ機構を実現することは従来から困難であると見なされてきた。すでに述べたように、本マニピュレータにおいても位置決め操作を従来の方法で行ってみたが、暴走状態となり、安定な位置決めが実現できなかった。このことから、本マニピュレータが空気圧による駆動方式を採る限り、従来のサーボ制御方式を採用することを断念せざるを得なかった。そこで、ここでは、関節の電磁ブレーキの制動特性を利用して精密位置決めを行う新しい方法について検討した。

システムの位置決め動作は、位置決め精度によって3つの段階に分けられる。最も大まかなものがクレーンの操作による位置決め、次が空気圧シリンダのバランス制御と電磁ブレーキの摩擦トルクの組み合わせで姿勢を静定させる動作、最も高精度なのが電磁ブレーキのオン/オフを微小な間隔で繰り返す寸動（インチング）動作である。

### 7.1 バランスサーボ方式による姿勢制御

まず、圧力バランスによるマニピュレータ操作の原理について説明する。マニピュレータは、空気圧弁のレバーを操作することで任意の方向に力を発生し、それに従っ

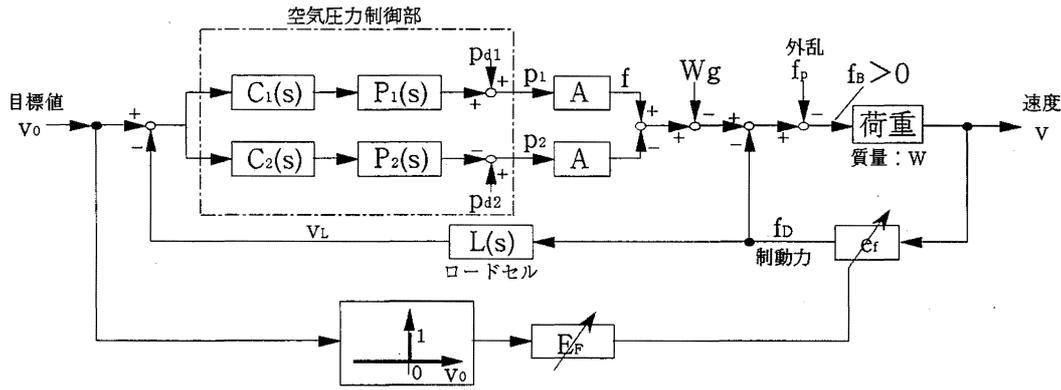
て関節を動かすことができる。厳密な意味で、力のバランスをとって停止状態を確保するためには、外乱（外力）が加わったときアンバランスを生じないための高応答の力制御が必要である。油圧シリンダでは、油が非圧縮性であるため、外力に対して直ちに内圧を生じて容易には変位を生じない。電気モータは、高歯車比の減速機構があり、これも外力に対してもともと固い特性を持っている。しかし、空気圧アクチュエータは柔らかさを持つことを最大の特徴としており、物体をある一定の位置に保持する能力は持たない。そこで、物を動かすのに空気圧を利用するが、停止は電磁ブレーキの摩擦力で行う方式が考えられる。そこで、停止位置を摩擦ブレーキで保持した状態で、後から空気圧でバランスを取ることによって、バランスの取れた停止状態が空気圧シリンダによって実現する方式を、改めて、バランスサーボ方式と呼ぶことにする。

この圧力バランスを伴う位置決めは、関節軸にかかる力を Fig. 4 に示すように力検出器で測定し、力のアンバランス信号が0になるようフィードバックシステムを構成することで容易に実現できる。すなわち、摩擦ブレーキで停止している状態は静止摩擦によって強制的にバランスがとられているのであって、もし、摩擦ブレーキを外したらアンバランスとなってどのように暴走するか分からないので、静止摩擦による停止状態で力を検出し、改めて空気圧を調整してバランス状態となるようにしている。この方法でマニピュレータを操作する場合、操作する人は、空気圧弁によってマニピュレータを動かし、停止させたい位置で、摩擦ブレーキに電流を供給すればよい。この操作はいわゆる PTP (Point-to-Point) 制御と見なされるが、さらにこの操作を自動的に小刻みに行ったのが、後で説明する寸動動作であり、これまでの空気圧アクチュエータでは考えられない分解能 (1mm 以下) で高精度位置決めが実現できる。

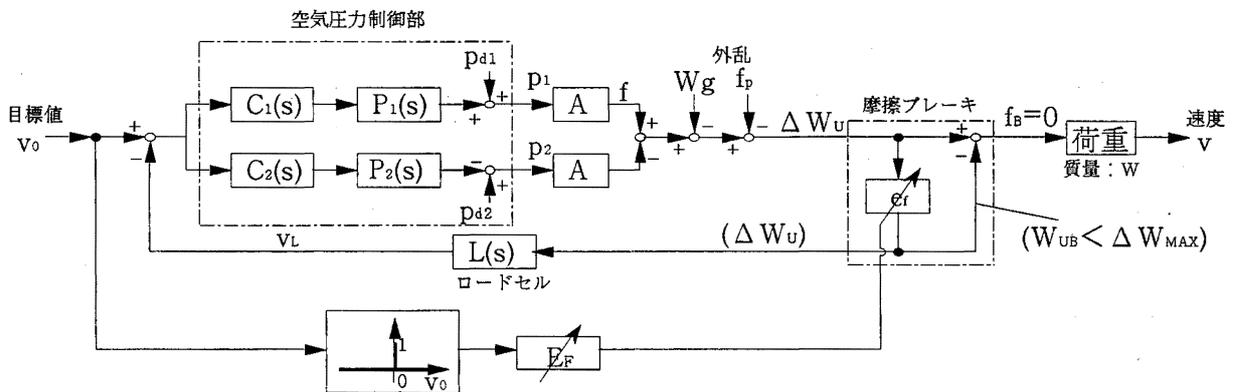
### 7.2 空気圧のバランスサーボ方式の制御システム

Fig. 11 は空気圧アクチュエータで位置決めを行うためのバランスサーボ方式の制御システムである。

Fig. 11 の制御システムのブロック線図のうち、Fig. 11(a) は加減速過程における制御システムを示している。操作レバーにはスイッチがあり、レバーを上昇側に回すとレバーの上昇側のスイッチが ON になる。これにより上昇側速度 $+v_0$ （記号+は上昇側、 $v_0$ は速度を示す）が設定され、この信号は3方向空気圧弁によって上昇側の空気圧を上昇させ、下降側の空気圧を減少させる。図における圧力制御部  $C_1(s)$ 、 $C_2(s)$  はそれぞれ上昇側、下降側の弁を開く電気信号の処理を示す伝達関数を示し、ま



(a) Blockdiagram of speed control.  
速度制御システムのブロック線図



(b) Balance control in a hold-state at  $x_{st}$   
位置  $x_{st}$  での停止状態におけるバランス制御

Fig. 11 Balance-servo system applied to a pneumatic actuator.  
空気圧アクチュエータによるバランスサーボシステム

た、 $P_1(s)$ ,  $P_2(s)$  は 3 方向弁のそれぞれ上昇側，下降側の弁の動作を示す伝達関数である。

Fig. 11(a) の  $E_F$  は、 $+v_0$  が 0 に変化するとき電磁ブレーキに電流を供給するスイッチング電源である。マニピュレータのアームが上昇中には  $E_F = 0$  となって電磁ブレーキに電流が供給されないので制動係数  $e_f$  は 0 であり、このとき偏差力検出器の出力はゼロであるのでフィードバックがないままアームは上昇し続ける。ただし、ここに制動係数  $e_f$  とは、制動力  $F_D$  の速度の影響を示す関数で、静摩擦の場合は速度がゼロでないとき速度の大きさに無関係に一定の制動力 (図中の  $f_{DS}$ ) を生ずるといふ特性を示す。すなわち、制動力  $f_D$  は次式で表される。

$$\begin{aligned} f_D &= f_{DS} & ; dx/dt > 0 & \text{ (ただし, } E_F > 0 \text{)} \\ f_D &= 0 & ; dx/dt = 0 & \end{aligned} \quad (16)$$

この時、操作者がレバーで停止を指示すると (レバーの水平位置)、 $+v_0 \rightarrow 0$  となって 3 方向弁はすべて閉じ

る。しかし、このままだと圧力がアンバランスであるためマニピュレータのアームは上昇し続けるが、一方で、フィードフォワードのラインが同時に  $+v_0 \rightarrow 0$  となるため、 $E_F = 1$  となって電磁ブレーキに電流が供給され、制動係数  $e_f (> 0)$  によって制動力  $f_D$  が発生する。この制動力  $f_D$  は、直接アームの動きを止めようとするだけでなく、力検出器でアンバランスな力を検出し、その出力で上昇側の圧力を低下、下降側の圧力を上昇側の制御を積極的に行うことで、より急速な停止を実現する。さらに、アームが完全に停止すると、制御システムは Fig. 11(a) から Fig. 11(b)、すなわち減速過程から停止過程に自動的に切り替えられる。

Fig. 11(b) は、摩擦による位置の保持の下で力のバランスサーボを行うシステムを示す。静止摩擦による停止状態は外乱に左右されない最も安定したバランス状態を確保するが、空気圧によるバランスが完全に取られていれどもとも静止摩擦は必要がない。すなわち、Fig.

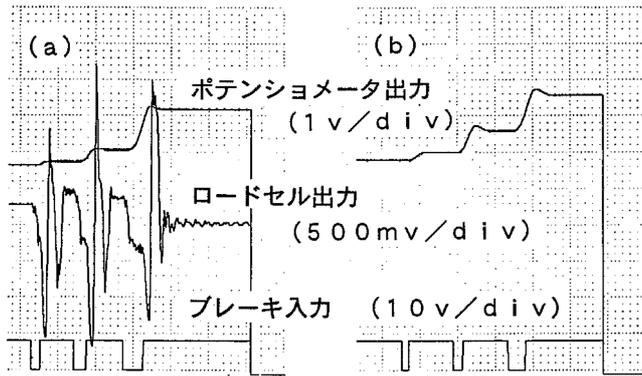


Fig. 12 Positioning operation of manipulator.  
マニピュレータによる位置決め制御

11(b)の制御システムでは、偏差力検出器の出力で示されるアンバランスを0とするように空気圧が制御される。これまでの空気圧マニピュレータは、動かすのは容易であるが、安定した停止とその保持ができなかった。この方式によれば、確実なバランスで停止するので、起動と停止を任意に繰り返し行っても、安定した繰り返し動作が実現される。

この位置決めの様子を実際に観察したものが Fig. 12 (a)であり、任意の位置で、振動を生じない安定した停止特性を確認することができた。逆に、このバランスサーボ方式を採用しない場合は、マニピュレータは同図 (b)のようにオーバーシュートを生じて実際には正しい位置で停止することはほとんど不可能であった。

### 7.3 寸動による位置決め

電磁ブレーキの入力を連続する ON/OFF の切り換え信号とすることによって、高精度な位置決めを実現することができる。まず、つり荷を振り子運動の最下点に運動エネルギー0の状態では停止させる場合について考察する。つり荷の振り子運動の復元力がブレーキの制動力より小さくなると振動は停止する。ここでは、つり荷は最下点で停止しているとは限らないので、電磁ブレーキのトルクを0にすると再び振動を開始することが考えられる。このような場合のエネルギー消散方法として、ブレーキのインチング動作、すなわちある微小な時間ブレーキを解除する動作を連続的に繰り返す方法を試みた。まず、関節軸の応力を偏差力検出器で測定し、つり荷の位置エネルギーの有無（すなわちバランス状態）を判断する。次に、適当な周期でブレーキ電源の ON/OFF を繰り返すと、つり荷は重力によって最下点に向かって少しずつ変位しながらエネルギーを消散する。これを関節軸の応力が消えるまで続けると、つり荷は自動的に最下点で停止す

る。このときのつり荷の運動は微小な寸動の繰り返しであり、ブレーキを解除する時間を充分小さく設定しておけば、それぞれの微小区間で発生する運動エネルギーは無視できるほど小さく、再び振動を開始することはない。

同様の方法で、つり荷を任意の位置へ移動させる動作が実現できる。関節のブレーキをロックさせた状態で、つり荷を動かしたい方向へ空気圧シリンダで力を加える。このとき、上述の方法と同様にブレーキの ON/OFF を繰り返すと、つり荷は微小な速度で移動する。操作者はこの過程の任意の位置でブレーキを固定することにより、運動エネルギーを発生させずにつり荷を任意の位置に固定することができる。位置が決定したら、関節軸の偏差力検出器の信号を見ながら空気圧シリンダの圧力を制御し、圧力と位置エネルギーが拮抗した点でブレーキの入力電圧を小さくすると、つり荷は外力に対してある程度の柔らかさを持った状態で任意の位置に静止する。

この作業における有効なインチング間隔について考える。実現可能なインチング間隔の最小値は、ブレーキ動作の制御系の応答速度で与えられる。この場合、遅れを生じる要因として最も影響するのはブレーキの磁力特性であると考えられる。電磁ブレーキの性能として記載されている時定数は、摩擦板の間隙を一定に保つバネ機構などの機械要素が存在する場合の値であるが、本研究では応答性の向上のためにこのような機構を取り外し、摩擦板同士が常に密着するようにしてある。

実験機を用いて、インチング動作によるマニピュレータの手先の移動量を観察した。肩上下動関節に空気圧アクチュエータで力を加えながら、電磁ブレーキをある時間だけ解除する。このときの関節の変位をポテンショメータで観察する。ブレーキの解除に要する時間（開放時間）を何通りかに変化させ、それぞれの動作を検討する。

実験の結果、関節の動きの最小応答速度は約 300ms、このときの関節の角度変位は 0.07deg、手先の変位としては 2.5mm 程度の精度が得られた。これは、クレーンのつり荷の位置決め精度としては十分な値であると考えられる。

Fig. 13 にインチング動作の様子を示す。電磁ブレーキの微小区間だけ OFF する動作を繰り返すと、移動量が階段状の曲線として現れる。Fig. 14 はインチング時間と1回のインチングで発生する移動量の特性である。ブレーキを含む制御系が応答するインチング時間の最小の値は 270ms であるが、この値では位置の変化はほとんど見られない。また、インチング時の移動量が時間の経過と共に大きくなっていることが分かる。これはマニピュレータの姿勢の変化による重力の影響によるものである。関節角に係わらず、常に一定のインチング量を保

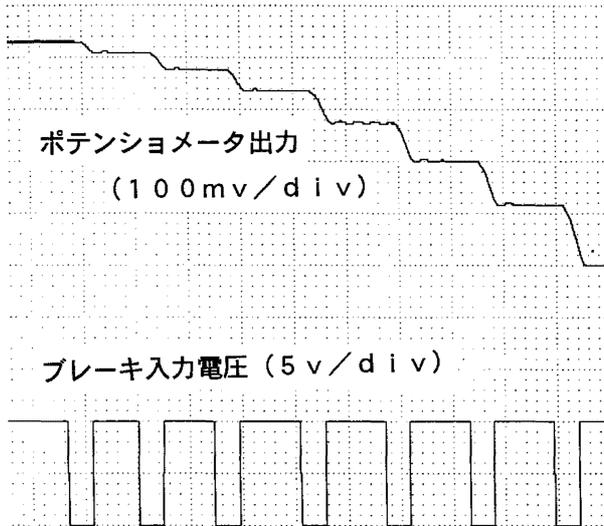


Fig. 13 Inching operation of manipulator.  
マニピュレータのイン칭動作

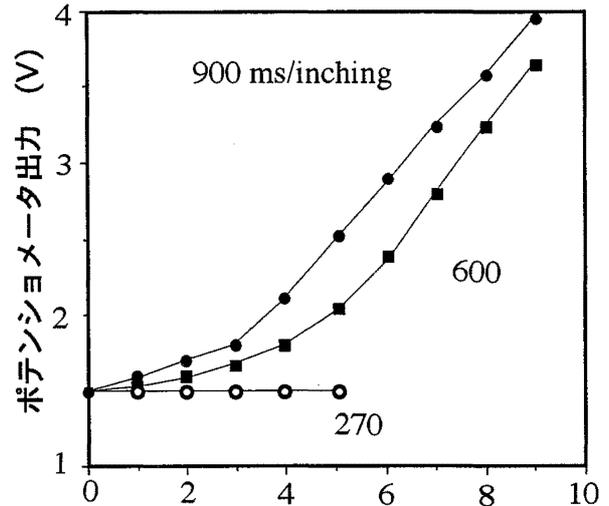


Fig. 14 Angular displacement per one inching.  
単位イン칭当たりの角度変位

つには、前述のような空気圧のバランス制御との組み合わせる必要がある。

### 8. 結 論

つり荷ハンドリングマニピュレータの具体的な作業手順について考察し、空気圧シリンダと電磁ブレーキの組み合わせによる精密位置決めの手法を提案した。空気圧を用いたアクチュエータは外力に対する柔軟性を有する反面、位置決めが困難であるという欠点がある。ここで提案した位置決め方法は、剛体に対する順応性と高精度位置決め両方の矛盾する要求に応えるものである。この手法は、ロボットシステムに対して安全性と機能性の両面を求めようとするとき特に期待されるころは大きい。

本報告は、作業者の高齢化著しい重量物ハンドリング作業の安全化・自動化を目的として、クレーンと遠隔操作型マニピュレータからなる作業システムを提案し、その試作、協調制御実験を行った。本研究は完了したわけではないが、この段階で、次のような結論を得ることができた。

- (1) マニピュレータと外界の力の伝達に電磁ブレーキを介在させ、過大な力が伝達されるおそれのある場合は、ブレーキを一種のヒューズとして用いることにより、人間に伝達される力を本質的に回避できる。
- (2) バランスサーボ方式を提案し、従来できなかった空気圧マニピュレータの高位置決めが可能となった。これは、従来の操作方式と実際に比較して確認された。

### 参 考 文 献

- 1) 新井, 大隅, クレーンとロボットの協調制御による重量物ハンドリング, 精密工学会誌 JSPE-57-3, (1991-3) pp.467-472.
- 2) 大隅, 村上, 新井, 浅間, 嘉悦, 遠藤, 産業用ロボットとクレーンの協調制御, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'93 講演予稿集 [No.930-49](1993-7) pp.960-963.
- 3) Osumi et al., "Development of a Crane Type Robot with Three Wires", Proc. 23rd Int. Symp. on ISSR, (1992) pp.561-566.
- 4) 労働省労働基準局安全衛生部安全課監修, クレーン災害事例とその対策, (社)日本クレーン協会, (1971-6) pp.3-8.
- 5) 例えば, 吉本, 鉱石アンローダの自動化, 機械の研究, 23, 1 (1971) pp.40-47.
- 6) 武内, 奥野, 大塚, 山下, 相良, ゴム人工筋を用いた1リンクのコンプライアンス制御, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'93 講演予稿集 [No.930-40] (1993-7) pp.62-65.
- 7) 香川, 清水, 龍前, 花壇, 山中, 人工筋アクチュエータによるパワーアシスト回路の動特性, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 '92 講演予稿集 [No.920-33] (1992) pp.769-772.

(平成 8 年 3 月 15 日受理)