

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第5362158号
(P5362158)

(45) 発行日 平成25年12月11日 (2013.12.11)

(24) 登録日 平成25年9月13日 (2013.9.13)

(51) Int.Cl.

F I

B 6 6 F 9/24 (2006.01)
B 6 6 F 9/22 (2006.01)
B 6 6 F 11/04 (2006.01)
E O 6 C 5/00 (2006.01)
E O 6 C 5/06 (2006.01)

B 6 6 F 9/24 S
 B 6 6 F 9/22 R
 B 6 6 F 11/04
 E O 6 C 5/00
 E O 6 C 5/06

請求項の数 10 外国語出願 (全 40 頁)

(21) 出願番号 特願2001-137911 (P2001-137911)
 (22) 出願日 平成13年3月30日 (2001.3.30)
 (65) 公開番号 特開2002-29696 (P2002-29696A)
 (43) 公開日 平成14年1月29日 (2002.1.29)
 審査請求日 平成20年3月10日 (2008.3.10)
 (31) 優先権主張番号 10016137.5
 (32) 優先日 平成12年3月31日 (2000.3.31)
 (33) 優先権主張国 ドイツ (DE)

(73) 特許権者 501184238
 イヴェコ・マギルス・アー・ゲー
 IVECO MAGIRUS AG
 ドイツ連邦共和国 デー-89079 ウ
 ルム ニコラウス-オットー-シュトラ
 セ 25-27
 NICOLAUS-OTTO-STR.
 25-27, D-89079 ULM,
 BUNDESREPUBLIK DEU
 T SCHLAND
 (74) 代理人 100107308
 弁理士 北村 修一郎

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 ターンテーブル梯子装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

端部に取り付けられたケージを有し、梯子の移動のためのコントローラを備えたターンテーブル梯子装置であって、前記ケージが移動するとき、梯子の振動を抑制し、ケージを前設定された経路で案内するようにコントローラが設計され、

梯子の理想化された移動挙動が、ケージ位置、ケージ速度、ケージ加速、ケージジャック、及び、ケージジャックの微分の時間関数の形の微分方程式に基づく動的モデルで計画されるとともに前記コントローラに送られ、前記コントローラが、梯子の実質的に無振動の移動のために梯子の駆動の制御変数を動的モデルにもとづいて計算し、

ケージジャックの定関数から、前記ケージ加速、ケージ速度およびケージ位置の時間関数が積分によって求められることを特徴とする装置。 10

【請求項 2】

前記時間関数は、経路計画モジュールによって生成され、前記経路計画モジュールが、ケージ位置、ケージ速度、ケージ加速およびケージジャックの時間関数のために運動学的制約の入力を許容することを特徴とする請求項 1 に記載のターンテーブル梯子装置。

【請求項 3】

前記経路計画モジュールが運動学的制約を考慮に入れるための傾斜リミッタを含むことを特徴とする請求項 2 に記載のターンテーブル梯子装置。

【請求項 4】

前記経路計画モジュールは、緊急停止の際に前記ケージの継続移動を抑える更なる傾斜 20

リミッタを備えることを特徴とする請求項 3 に記載のターンテーブル梯子装置。

【請求項 5】

前記コントローラが梯子駆動用の油圧比例弁を制御する電気制御信号を供給することを特徴とする請求項 1 から 4 のいずれかに記載のターンテーブル梯子装置。

【請求項 6】

梯子を上げ下げし、その長さ方向に昇降し伸縮させるために、梯子を垂直軸心まわりで回転させる駆動が与えられることを特徴とする請求項 5 に記載のターンテーブル梯子装置。

【請求項 7】

パイロット制御ブロックと経路計画モジュールに加えて、計測された変数に加重し、梯子側の制御変数にフィードバックすることによって、梯子ユニットの振動を補償する状態コントローラが設けられていることを特徴とする請求項 1 から 6 のいずれかに記載のターンテーブル梯子装置。

10

【請求項 8】

状態コントローラが、梯子の回転角度、上昇角度、伸長長さおよび／または水平面および垂直方向の梯子の湾曲の計測された変数の少なくとも 1 つを受け、これらに適当に加重して、梯子の制御入力にフィードバックすることを特徴とする請求項 7 に記載のターンテーブル梯子装置。

【請求項 9】

状態コントローラが、計測された変数の計測値を定数の利得によって増幅することを特徴とする請求項 8 に記載のターンテーブル梯子装置。

20

【請求項 10】

状態コントローラが、計測された変数の計測値を可変の順応的の増幅値で増幅することを特徴とする請求項 8 に記載のターンテーブル梯子装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、請求項 1 の前提部分に記載された、梯子部品の移動のための制御手段を備えたターンテーブル梯子装置に関する。特に、発明は、ターンテーブル梯子、例えば、関節式、或いは、伸縮式支柱作業台、ターンテーブル梯子装置等の消防用梯子装置に関する。

30

【背景技術】

【0002】

そのような装置は一般的に、垂直軸心まわりに回転可能で、さらに水平面に対して上昇可能に車両に取付けられる。ターンテーブル梯子、特にターンテーブル梯子の端部に取り付けられたケージは、操作装置によって移動され、これにより作業環境へ移動される。もちろん、ケージが目標位置にできるだけ早く達することが望ましい。ケージの比較的速い移動速度は、対応する加速および減速段階を必要とする。その結果、そして風荷重などの影響のために、梯子が振幅運動したり、振動することがある。

ここで検討される、この種のターンテーブル梯子の操作装置は、一般的にハンドレバーを備え、個々の梯子部品の移動を電気油圧式または油圧式に直接制御することができる。純粋な油圧制御の場合、ハンドレバーの方向変位が、対応する駆動系の比例制御弁への比例制御信号に直接変換される。この場合、減衰弁が移動をそれほどガタつかず、より滑らかに移動するのに役立つ。これは、しばしば遅い応答挙動を伴う強く減衰された調節となる。

40

電気油圧制御では、マイクロプロセッサを備える制御装置でさらに処理され、油圧比例弁の制御に最終的に使用される電気信号が、初めにハンドレバーによって生成される。この場合、ターンテーブル梯子の移動がそれほどガタつかず、より滑らかになるように、電気信号をランプ関数で減衰させることができる。ランプ関数の傾きが減衰挙動を決定し、他方では応答挙動の尺度になる。

公知の梯子が減衰要素を持つ場合、大まかに言うと、これは振動を防ぎたいという要求

50

と急速な応答挙動の要求の間での比較的粗い妥協を意味している。

【発明が解決しようとする課題】

【0003】

本発明の目的は、梯子のケージが前設定された経路を比較的早く移動させる経路コントロールを有し、またアクティブな防振を行える上記種類のターンテーブル梯子装置を提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【0004】

この目的は、本発明によれば、上記種類のターンテーブル梯子装置であって、梯子の理想化された移動挙動が微分方程式に基づく動的モデルで計画され、コントロールが、梯子の実質的に無振動の移動のために梯子部品の駆動の制御変数を動的モデルにもとづいて計算するよう制御がデザインされていること特徴とする装置によって達成される。

10

【0005】

コントロールの一部として経路計画モジュールとパイロット制御ブロックが設けられることが望ましい。経路計画モジュールは作業環境での梯子の移動経路をつくり、ケージ位置、ケージ速度、ケージ加速、ケージジャーク、及び、ケージジャークの微分の時間関数の形で移動経路を、梯子部品の駆動を制御するパイロット制御ブロックに送る。

【0006】

経路計画モジュールが、ケージ位置、ケージ速度、ケージ加速およびケージジャーク用の時間関数のために運動学的制限の入力を許容することが望ましい。経路計画モジュールはジャークの微分を計算することも可能である。

20

【0007】

経路計画モジュールが運動学的制限を考慮に入れるための傾きリミッタを含むことが望ましい。

経路計画モジュールがジャークの定関数を生成し、これらからケージ加速、ケージ速度およびケージ位置の時間関数を積分によって求めることが望ましい。ジャークが梯子の移動において重要な状態を決定するため、ジャークの関数を決定し、このジャークから他の関数を求める際に、許容できる、全体として振動のない梯子の移動となることが確実にされる。

【0008】

30

発明によれば、個々の梯子部品の駆動は、電気制御される油圧比例弁による。これらの駆動は、垂直軸心まわりに梯子を回転させ、梯子を上下させ、その長さ方向に伸縮させ、梯子を支持する車両が斜面に停車している場合に任意に傾斜補償するよう機能する。

経路コントロールはモジュール状に設計される。それは、経路計画モジュールと軸心コントローラモジュールを備える。軸心コントローラモジュールは種々の拡張段階に設けることができる。基本的な拡張段階はパイロット制御だけを備える。次の拡張段階では、パイロットコントローラが状態コントローラと組み合わせられる。

【0009】

経路計画モジュールとして2つの代替手段が可能である。ターンテーブル梯子は作動状態のハンドレバーによって操作される半自動動作の経路計画モジュールと、ターンテーブル梯子がオペレータの介入なしで行列で定義された設定経路を独立してたどる全自動動作の経路計画モジュールである。

40

【発明を実施するための形態】

【0010】

発明の好適な実施例を添付図を参照してさらに詳細に説明する。

図1はターンテーブル梯子や同様の装置の基本的な機械的構造を示す。ターンテーブル梯子は一般的に車両1に取り付けられる。ケージ3を作業環境に位置させるために、梯子ユニット5の上昇・傾斜軸心7を角度 ϕ_A に傾けることができる。梯子長さ1は伸縮軸心9で変えることができる。回転軸心11は垂直軸心まわりで角度 ϕ_D への方向付けを許容する。水平でない車両の場合、梯子ユニットの回転時に梯子機構15を角度 ϕ_N に傾ける

50

ことによって、水平軸心 13 で望ましくない追加の傾斜を補償することができる。

【0011】

一般的に、ターンテーブル梯子は油圧駆動システム 21 を有する。それは推進モータによって駆動される油圧ポンプ 23、比例弁 25、油圧モータ 27 および油圧シリンダ 29 からなる。油圧コントロールは大体、負荷感知特性を持つ油圧回路のための補助伝達力制御付きのシステムを備えている。この場合、比例弁の制御電圧 u_{StD} 、 u_{StA} 、 u_{StN} 、 u_{StE} が補助伝達力制御によって、対応する油圧回路での比例伝達力 Q_{FD} 、 Q_{FA} 、 Q_{FN} 、 Q_F に変換されることが不可欠である。

【0012】

従って、比例弁の制御電圧のための時間関数が、例えばランプ関数によって直接ハンドレバーから得られて、制御入力部へ与えられるのではなく、作業環境で梯子が動かされてケージが所期の経路をたどる際に振動が生じないように、経路コントロール 31 で計算されることが不可欠である。

【0013】

この根拠は、ターンテーブル梯子システムのダイナミックモデルであり、これにより、この目的が変数 w_v 、 w_h 、 l 、 ϕ_D 、 ϕ_N の少なくとも 1 つに関するセンサデータとガイドプリセット $(d\mathbf{q}/dt)_{target}$ または $\mathbf{q}_{target}$ に基づいて達成される。

初めに、経路コントロール 31 の全体構成 (図 3) を以下で説明する。

オペレータは、操作パネルのハンドレバー 35 または前回のターンテーブル操作でコンピュータに格納された設定行列 37 を介して、目標速度または到達先を前選択する。ターンテーブル梯子の運動学的制約 (最高速度、加速、およびジャーク) を考慮に入れることによって、全自動または半自動の経路計画モジュール (39 または 41) が、ベクトル ϕ_{KDref} 、 ϕ_{KAref} 、 $\mathbf{l}_{ref}$ に組み合わされる、回転、上昇、伸長軸心とそれらの微分に対する設定ケージ位置の時間関数を計算する。設定位置ベクトルは軸心コントローラ 43、45、47 および 49 に与えられ、コントローラはセンサ値 w_v 、 w_h 、 l 、 ϕ_A 、 ϕ_D 、 ϕ_N の少なくとも 1 つを評価することによって、油圧駆動システム 21 の比例弁 25 用としてベクトルから制御関数 u_{StD} 、 u_{StA} 、 u_{StE} 、 u_{StN} を算出する。

以下、経路コントロールの個々の構成要素を詳細に説明する。

【0014】

図 4 は経路計画モジュール 39 または 41 のインタフェースを示す。全自動の経路計画モジュール 39 の場合、ケージ中心の目標位置ベクトルが座標 $\mathbf{q}_{target} = [\phi_{KDtarget}, \phi_{KAtarget}, l_{target}]^T$ の形で入力される。 $\phi_{KDtarget}$ はケージ中心の回転軸心 11 の方向の目標角度座標である。 $\phi_{KAtarget}$ はケージ中心の上昇・傾斜軸心 7 の方向の目標角度座標である。 l_{target} はケージ中心の伸縮軸心 9 の方向の目標位置である。半自動の経路計画モジュール 41 の場合、目標速度ベクトル $(d\mathbf{q}/dt)_{target} = [(d\phi_{KD}/dt)_{target}, (d\phi_{KA}/dt)_{target}, (dl/dt)_{target}]^T$ が入力変数である。目標速度ベクトルの要素は目標位置のベクトルのものと同様である。つまり、回転軸心方向の目標速度 $(d\phi_{KD}/dt)_{target}$ 、上昇・傾斜軸心の目標速度 $(d\phi_{KA}/dt)_{target}$ 、梯子ユニットの伸長または短縮速度 $(dl/dt)_{target}$ である。経路計画モジュール 39 または 41 で、回転角度とその微分 ϕ_{KDref} と関連したケージ位置、上昇角座標とその微分 ϕ_{KAref} と関連したケージ位置、そして伸長長さとその微分 $\mathbf{l}_{Kref}$ と関連したケージ位置の時間関数ベクトルが、これらの前設定された変数から計算される。各ベクトルは第 4 微分まで最大 5 つの要素を備える。上昇・傾斜軸心の場合、個々の要素は以下の通りである。

ϕ_{KAref} : 上昇角方向のケージ中心の設定角度位置

$d(\phi_{KAref})/dt$: 上昇角方向のケージ中心の設定角速度

$d^2(\phi_{KAref})/dt^2$: 上昇角方向のケージ中心の設定角加速度

$d^3(\phi_{KAref})/dt^3$: 上昇角方向のケージ中心の設定ジャーク

$d^4(\phi_{KAref})/dt^4$: 上昇角方向のケージ中心の設定ジャークの微分

【0015】

回転および伸長軸心用のベクトルも同様に設定される。

回転および上昇・傾斜軸心に関して、出発点 $\phi_{KDstart} = 0^0$ 、 $\phi_{KAstart} = 0^0$ から目標点 $\phi_{KDtarget} = 90^0$ 、 $\phi_{KAtarget} = 20^0$ へ移動する際の、全自動の経路計画モジュールから生成される、設定角度位置 ϕ_{KD} 、 ϕ_{KA} 、角速度 $d(\phi_{KD})/dt$ 、 $d(\phi_{KA})/dt$ 、設定角加速度 $d^2(\phi_{KD})/dt^2$ 、 $d^2(\phi_{KA})/dt^2$ および設定ジャーク $d^3(\phi_{KD})/dt^3$ 、 $d^3(\phi_{KA})/dt^3$ の時間関数を、図5で例示する。この場合、最大角速度 $(d\phi_D/dt)_{max}$ 、 $(d\phi_A/dt)_{max}$ 、最大角加速度 $(d^2\phi_D/dt^2)_{max}$ 、 $(d^2\phi_A/dt^2)_{max}$ または最大ジャーク $(d^3\phi_D/dt^3)_{max}$ 、 $(d^3\phi_A/dt^3)_{max}$ などの前設定された運動学的制約を超えないように時間関数が計算される。この目的のために、移動は、加速段階Ⅰ、定速段階Ⅱ（これは省くこともできる）および減速段階Ⅲの3段階に分割される。ジャークの時間関数として段階ⅠおよびⅢに三次多項式を想定する。段階Ⅱの時間関数としては定速度が常に想定される。ジャーク関数を積分することによって、加速、速度および位置の欠けている時間関数が計算される。時間関数のまだ設定されていない係数は、移動開始時、次のまたは前の移動段階への移行点、または目標点での境界条件と、すべての運動学的条件を各軸心と関連してチェックした上での運動学的制約によって決定される。図5の例の場合、回転軸心での最大加速 $(d^2\phi_D/dt^2)_{max}$ の運動学的制約は、段階ⅠおよびⅢで限定的に作用し、段階Ⅱでは、回転軸心での最高速度 $(d\phi_D/dt)_{max}$ がこれを行う。他の軸心は、移動の持続時間から見て、移動を制限する軸心に同調される。移動全体に対する加・減速段階の割合を変えることによって、最適化シーケンスで移動の最短総持続時間を決定することから、移動の時間最適性が達成される。

【0016】

図6は回転軸心に関する半自動経路計画部の構成の詳細を示す。まず、ケージの目標速度 $(d\phi_{KD}/dt)_{target}$ が、操作パネルのハンドレバーによって、達成可能な最高速度 $(d\phi_D/dt)_{max}$ の値の範囲に標準化される。したがって、その最高速度を超えられない。半自動経路計画部は、1本の軸心について、常動作用61に1個と即時停止用63に1個の、2つの二次傾斜リミッタからなり、それらの間で切換えロジック67を切り換えることができる。出力における時間関数が積分部65によって形成される。次に、図6を参照して半自動経路計画部での信号流れを説明する。

【0017】

まず、目標速度 $(d\phi_{KD}/dt)_{target}$ と現在の設定速度 $d(\phi_{KDref})/dt$ との設定値・実際値差が、通常動作61用の傾斜リミッタで形成される。その差が定数 K_{S1} （ブロック73）によって増大され、目標加速度 $(d^2\phi_{KD}/dt^2)_{target}$ をつくる。下流につながれた制限部材69が値を最大加速度 $\pm(d^2\phi_D/dt^2)_{max}$ に制限する。動的挙動を向上させるため、目標速度と現在の設定速度との設定値・実際値差を形成するとき、現在の設定速度 $d^2(\phi_{KDref})/dt^2$ でのジャーク制限 $\pm(d^3\phi_D/dt^3)_{max}$ のために、ブロック71で計算される

【数1】

$$\Delta\dot{\phi}_{Dmax} = \frac{\ddot{\phi}_{KDref}|\ddot{\phi}_{KDref}|}{2\ddot{\phi}_{Dmax}}$$

の最大速度変化だけが達成できることが考慮に入れられる。したがって、この値が現在の設定速度 $d(\phi_{KDref})/dt$ に加えられて、システム全体の運動特性（ダイナミクス）が向上する。そして、目標加速 $(d^2\phi_{KD}/dt^2)_{target}$ が制限要素69の後ろに存在する。今度は、設定・実際値差が現在の設定加速度 $d^2(\phi_{KDref})/dt^2$ で形成される。これより特性ブロック75で、

【数 2】

$$\ddot{\phi}_{KDref} = \begin{cases} +\ddot{\phi}_{Dmax} & \text{for } \ddot{\phi}_{KDtarget} - \ddot{\phi}_{KDref} > 0 \\ 0 & \text{for } \ddot{\phi}_{KDtarget} - \ddot{\phi}_{KDref} = 0 \\ -\ddot{\phi}_{Dmax} & \text{for } \ddot{\phi}_{KDtarget} - \ddot{\phi}_{KDref} < 0 \end{cases}$$

より設定ジャーク $d^3(\phi_{KDref})/dt^3$ が形成される。この関数のブロック形特性はフィルタによって減衰する。計算されたジャーク関数 $d^3(\phi_{KDref})/dt^3$ から、設定加

10

【0018】

通常の動作時に、ターンテーブル梯子が作動するとき、ケージに乗った者にとって快く滑らかな動的挙動となるように、運動学的制限 $(d^2\phi_D/dt^2)_{max}$ および $(d^3\phi_D/dt^3)_{max}$ と比例強化値 K_{S1} が入力される。これは、機械的システムが許容するよりもいくらか低い最大ジャークおよび加速が設定されることを意味する。しかし、システムの アフターラン (after-run) は、特に高速移動のときに大きい。言い換えれば、全速時にオペレータが目標速度 0 を入力した場合、ターンテーブル梯子が停止するまで数秒を必要とする。特に衝突の恐れある非常時に、そのような入力を行うと、第 2 作動モードが開始され、ターンテーブル梯子を瞬時に停止させる。この目的のために、構造が同じ設計の第 2 傾斜リミッタ 63 が、通常動作の傾斜リミッタ 61 と並列に接続されている。しかし、アフターラン を決定するパラメータは、ターンテーブル梯子の機械的耐性限界まで増加される。したがって、この傾斜リミッタには、最大即時停止加速度 $(d^2\phi_D/dt^2)_{max2}$ 、最大即時停止ジャーク $(d^3\phi_D/dt^3)_{max2}$ および即時停止比例強化値 K_{S2} のパラメータが与えられる。切換えロジック 67 は 2 つの傾斜リミッタ間で切り換わり、その回路はハンドレバー信号から非常停止を確認する。通常動作の傾斜リミッタと同様に、即時停止用傾斜リミッタ 63 の出力は設定ジャーク $d^3(\phi_{KDref})/dt^3$ である。他の時間関数はブロック 65 で通常動作と同様に計算される。

20

30

【0019】

したがって、運動学的制約を考慮に入れることによって、回転方向のケージ設定位置の時間関数とその微分が、全自動の経路計画部と同様に半自動の経路計画部の出力に生じる。

時間関数は軸心コントローラに与えられる。最初に、図 7 を参照して、回転軸心用の軸心コントローラの構成を説明する。

経路計画モジュールの、回転方向の設定ケージ位置の形の出力関数とその微分（速度、加速、ジャークおよびジャークの微分）がパイロット制御ブロック 71 に与えられる。動的モードの最適な前提条件下で振動のない梯子の正確な経路の移動が行われるように、パイロット制御ブロックでこれらの関数が強化される。パイロット制御強化値を決定するためのベースは、回転軸心のための後続部分で得られる動的モデルである。したがって、最適な前提条件下で、ターンテーブル梯子の振動が抑えられ、ケージは発生された経路をたどる。

40

【0020】

しかし、風の影響などの外乱がターンテーブル梯子に作用し、理想化されたモデルは、存在する真の動的条件を部分的にしか再現することができないので、パイロット制御に状態コントローラブロック 73 を任意に補うことができる。回転角度 ϕ_D 、回転角速度 $d\phi_D/dt$ 、水平方向（回転方向）の梯子ユニットの曲がり w_h 、または曲りの微分 dw_h/dt などの計測変数の少なくとも 1 つをこのブロックで強化して、制御入力に再びフィード

50

バックする。計測変数 ϕ_D および w_h の微分はマイクロプロセッサ制御によって数値で形成される。

【0021】

油圧駆動装置は非線形の動的特性（ヒステリシス、遊び）によって特徴づけられるから、パイロット制御そして、オプションとしての状態コントローラ出力から形成される制御入力用の値 u_{Dref} は、システム全体の線形の挙動を想定できるように、油圧補償ブロック 75 で変更される。ブロック 75 の出力（油圧補償）は補正制御変数 u_{std} である。そして、この値は油圧回路の回転軸心用の比例弁に与えられる。

【0022】

回転軸心用の動的モデルを導き出すことにより、動作モードの詳細を説明するが、この導き出し過程が、パイロット制御強化値の計算と状態コントローラのベースになる。

この目的のために、図 8 はモデル変数の定義の説明図である。そこで示された、単位ベクトル $\underline{e}_{11} \sim \underline{e}_{13}$ を持つ慣性系と関連した梯子機構の回転位置 ϕ_D と、湾曲 w_h のために曲がり小さい場合の以下の式で計算されるケージの回転位置 ϕ_{KD} との関係はこの場合不可欠である。

【数 3】

$$\phi_{KD} = \phi_D - \frac{w_h}{l}$$

式中、 l は梯子の長さである。この動的システムは以下の微分方程式で説明することができる。

【数 4】

$$\begin{aligned} (J_D(l) + m_k l^2) \cos^2 \varphi_A \cdot \ddot{\phi}_D - m l \cos \varphi_A \cdot \ddot{w}_h &= M_{MD} - b_D \dot{\phi}_D \\ - m l \cos \varphi_A \cdot \ddot{\phi}_D + m \cdot \ddot{w}_h + b_{DL} \cdot \dot{w}_h + c_{DL}(l) \cdot w_h &= 0 \end{aligned}$$

J_D は回転軸心まわりの梯子機構と梯子ユニットの慣性モーメントである。 m_k はケージの質量であり、 m は換算質量であり、これは梯子ユニットの均等の質量分布が 2 点質量に換算されるというモデル観察から生じる。第 1 の点質量が梯子機構の回転中心に換算され、第 2 の点質量はケージ中心である。従って、換算質量は $m = m_L \alpha$ によって梯子ユニット m_L の総質量から計算される。パラメータ α は周波数応答測定値から求められる。 M_{MD} は駆動モータトルクである。 b_D はターンテーブル駆動の粘性摩擦である。数 4 の最初の式はターンテーブル梯子機構の運動方程式を実質的に表し、ターンテーブル梯子機構上の梯子ユニットの曲がりによる反応が考慮されている。数 4 の 2 番目の式は湾曲 w_h を表す運動方程式で、湾曲振動の刺激がターンテーブル梯子機構の角加速または外乱を通して梯子ユニットの回転で引き起こされ、これらの微分方程式の初期条件によって表される。数 4 の 2 番目の式で、パラメータ c_{DL} は梯子ユニットの剛性であり、 b_{DL} は梯子振動の減衰定数である。この剛性は梯子ユニットの伸長状態 l に大きく依存するから、剛性の関数が l の関数として FEM（有限要素法）シミュレーションから計算される。したがって、 c_{DL} として $c_{DL}(l)$ が以下で常に想定される。また、これは l に依存する関数でもある構造上のデータから計算された慣性モーメント J_D にも当てはまる。

【0023】

油圧駆動は以下の式で表される。

【数 5】

$$M_{MD} = i_D \frac{V}{2\pi} \Delta p_D \quad \Delta \dot{p}_D = K_{compr} \dot{Q}_{CD}$$

$$Q_{CD} = Q_{FD} - i_D \frac{V}{2\pi} \dot{\phi}_D$$

$$Q_{FD} = K_{PD} u_{SD} \quad K_{compr} = \frac{1}{V\beta}$$

10

i_D は梯子機構のモータ速度と回転速度の間の伝動比である。 V は油圧モータの吸収容量である。 ΔP_D は油圧駆動モータでの圧力低下である。 β は油の圧縮性である。 Q_{CD} は圧縮性動力である。 Q_{FD} は回転のための油圧回路の伝達力である。 K_{PD} は比例弁の伝達力と制御電圧との関係をつくる比例定数である。補助伝達力制御の動的影響は無視される。

【0 0 2 4】

そして、式を状態表現に変えることができる。(0. Foellinger: Regelungstechnik, [Control Engineering], 7th Edition, Huethig Verlag, Heidelberg, 1992も参照)

20

システムの以下の状態表現が作られる：

状態表現：

【数 6】

$$\dot{\underline{x}}_D = \underline{A}_D \underline{x}_D + \underline{B}_D \underline{u}_D$$

$$\underline{y}_D = \underline{C}_D \underline{x}_D$$

30

ここで、

状態ベクトル：

【数 7】

$$\underline{x}_D = \begin{bmatrix} w_k \\ \dot{w}_k \\ \varphi_D \\ \dot{\varphi}_D \\ M_{MD} \end{bmatrix}$$

40

制御変数：

【数 8】

$$u_D = u_{\text{std}}$$

出力変数：

【数 9】

$$Y_D = \varphi_{KD}$$

10

システム行列：

【数 10】

$$\underline{A}_D = \begin{bmatrix} -\frac{c_{DL}J_{DK}}{m(J_{DK}-ml^2)} & -\frac{b_{DL}J_{DK}}{m(J_{DK}-ml^2)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{c_{DL}l}{\cos\varphi_A(J_{DK}-ml^2)} & \frac{b_{DL}l}{\cos\varphi_A(J_{DK}-ml^2)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

20

30

40

$$J_{DK}(l) = J_D(l) + m_K l^2$$

制御ベクトル：

【数 1 1】

$$\underline{B}_D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{i_D K_{PD}}{2\pi\beta} \end{bmatrix}$$

10

【0 0 2 5】

出力ベクトル：

【数 1 2】

$$\underline{C}_D = \begin{bmatrix} -\frac{1}{I} & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

20

【0 0 2 6】

回転軸心の動的モデルは、伸長長さ l および上昇角 ϕ_A と関連した可変パラメータシステムと見なされる。数 6 ～ 1 2 は以下で説明するパイロットコントロール 7 1 と状態コントローラ 7 3 の設計のベースとなる。

パイロット制御ブロック 7 1 の入力変数は、設定角度位置 ϕ_{KDref} 、設定角速度 $d(\phi_{KDref})/dt$ 、設定角加速 $d^2(\phi_{KDref})/dt^2$ 、設定ジャーク $d^3(\phi_{KDref})/dt^3$ および、オプションとして、設定ジャークの微分である。したがって、基準変数の $\underline{w}_D$ は以下の通りである。

30

【0 0 2 7】

【数 1 3】

$$\underline{w}_D = \begin{bmatrix} \phi_{KDref} \\ \dot{\phi}_{KDref} \\ \ddot{\phi}_{KDref} \\ \dddot{\phi}_{KDref} \\ (\ddot{\phi}_{KDref}) \end{bmatrix}$$

40

$\underline{w}_D$ の要素は、パイロット制御ブロック 7 1 において、パイロット制御強化値 $K_{VD0} \sim K_{VD4}$ で加重され、それらの合計が制御入力部に与えられる。回転軸心の軸心コントローラが状態コントローラ 7 3 を備えない場合は、パイロット制御ブロックからの変数 u_{Dpilot} は参照制御電圧 u_{Dref} となり、それは油圧非線形性の補償後に制御電圧 u_{std} として比例弁に与えられる。その結果、状態表現 数 6 は、数 1 5 のパイロット制御行列によって以下のように展開される。

50

【数 1 4】

$$\begin{aligned}\dot{\underline{x}}_D &= \underline{A}_D \underline{x}_D + \underline{B}_D \underline{S}_D w_D \\ \underline{y}_D &= \underline{C}_D \underline{x}_D\end{aligned}$$

【0 0 2 8】

【数 1 5】

10

$$\underline{S}_D = [K_{VD0} \quad k_{VD1} \quad K_{VD2} \quad K_{VD3} \quad K_{VD4}]$$

行列式 数 1 4 の数値を求めれば、パイロット制御ブロックのための代数式としてそれを書くことができ、 u_{Dpilot} は理想的モデルに基づく比例弁用の非修正設定制御電圧である。

【数 1 6】

20

$$u_{Dpilot} = K_{VD0}\phi_{KDref} + K_{VD1}\dot{\phi}_{KDref} + K_{VD2}\ddot{\phi}_{KDref} + K_{VD3}\ddot{\phi}_{KDref} (+K_{VD4}\ddot{\phi}_{KDref})$$

$K_{VD0} \sim K_{VD4}$ はパイロット制御強化値であり、それらは、ケージが振動なしで設定軌道経路を正確にたどるように、梯子ユニットの現在の上昇角 ϕ_A と伸長長さ l の関数として計算される。

30

【0 0 2 9】

パイロット制御強化値 $K_{VD0} \sim K_{VD4}$ は次のように計算される。ケージ角度 ϕ_{KD} の制御変数と関連して、パイロット制御ブロックなしで、透過関数を状態式 数 6 ～ 1 2 から以下のように計算することができる。

【数 1 7】

$$G(s) = \frac{\phi_{KD}(s)}{u_{Dpilot}(s)} = \underline{C}_D (s\underline{I} - \underline{A}_D)^{-1} \underline{B}_D$$

40

【0 0 3 0】

透過関数に関して、上記式から以下の式が得られる。

【数 1 8】

$$G(s) = \frac{\frac{K_{PD}i_D}{\beta 2\pi} (m(1 - \cos \varphi_A)s^2 + b_{DL}s + c_{DL})}{m \cos^2 \varphi_A (J_D - ml^2 + m_K l^2)s^5 + (b_{DL} \cos^2 \varphi_A (J_D + m_K l^2) + mb_D)s^4 + (c_{DL} \cos^2 \varphi_A (J_D + m_K l^2) + b_D b_{DL} + m \frac{i_D^2 V}{\beta 4\pi^2})s^3 + (b_D c_{DL} + b_{DL} \frac{i_D^2 V}{\beta 4\pi^2})s^2} \cdot \frac{i_D^2 V}{c_{DL} \frac{\beta 4\pi^2}{s}}$$

ここで、透過関数にパイロット制御ブロックを考慮しなければならない。その結果、
【数 1 9】

$$G_{vd}(s) = \frac{\varphi_{xd}}{\varphi K D_{ref}} = G(s) \cdot (K_{vd0} + K_{vd1}s + K_{vd2}s^2 + K_{vd3}s^3 + K_{vd4}s^4)$$

が数 1 8 から作られる。

【0 0 3 1】

この式を掛け合わせると以下の構成になる：

【数 2 0】

$$\frac{\varphi_{KD}}{\varphi_{KDref}} = \frac{...b_2(K_{VDi}) \cdot s^2 + b_1(K_{VDi}) \cdot s + b_0(K_{VDi})}{...a_2 \cdot s^2 + a_1 \cdot s + a_0}.$$

強化値 K_{VDi} ($K_{VD0} \sim K_{VD4}$) の計算では、係数 $b_4 \sim b_0$ と $a_4 \sim a_0$ だけが意味を持つ。
 数 1 9 および 数 2 0 によるパイロット制御のシステム全体の透過関数とターンテーブル梯子の回転軸心の透過関数とその係数 b_i と a_i における以下の条件を満たすとき、位置、速度、加速、ジャークおよび任意のジャーク微分と関連した最適なシステム挙動が正確に達成される。

10

【0 0 3 2】

【数 2 1】

$$\frac{b_0}{a_0} = 1$$

$$\frac{b_1}{a_1} = 1$$

20

$$\frac{b_2}{a_2} = 1$$

$$\frac{b_3}{a_3} = 1$$

$$\frac{b_4}{a_4} = 1$$

30

【0 0 3 3】

この一次方程式システムを、求めたいパイロット制御強化値 $K_{VD0} \sim K_{VD4}$ に関して分析的に解くことができる。

一例として、これを数 6 ～ 数 1 2 によるモデルの場合で示す。数 1 9 の評価は係数 b_i と a_i について以下を作る。

【数 2 2】

$$a_0 = 0$$

$$b_0 = K_{VD0} \frac{K_{PD} i_D}{2\pi\beta}$$

$$a_1 = \frac{c_{DL} i_D^2 V}{4\pi^2 \beta}$$

$$b_1 = (c_{DL} K_{VD1} + b_{DL} K_{VD0}) \frac{K_{PD} i_D}{2\pi\beta}$$

$$a_2 = \frac{b_{DL} i_D^2 V}{4\pi^2 \beta} + c_{DL} b_D$$

$$b_2 = (m(\cos \varphi_A - 1) K_{VD0} + b_{DL} K_{VD1} + c_{DL} K_{VD2}) \frac{K_{PD} i_D}{2\pi\beta}$$

$$a_3 = J_{DK} c_{DL} \cos^2 \varphi_A + b_{DL} b_D + m \frac{i_D^2 V}{4\pi^2 \beta}$$

$$b_3 = (m(\cos \varphi_A - 1) K_{VD1} + b_{DL} K_{VD2} + c_{DL} K_{VD3}) \frac{K_{PD} i_D}{2\pi\beta}$$

$$a_4 = J_{DK} b_{DL} \cos^2 \varphi_A + m b_D$$

$$b_4 = (m(\cos \varphi_A - 1) K_{VD2} + b_{DL} K_{VD3} + c_{DL} K_{VD4}) \frac{K_{PD} i_D}{2\pi\beta}$$

【0 0 3 4】

方程式システム 数 2 2 はパイロット制御強化値 $K_{VD0} \sim K_{VD4}$ に関して一次式であり、 $K_{VD0} \sim K_{VD4}$ に関してこれを解くことができる。その結果、以下のパイロット制御強化値 $K_{VD0} \sim K_{VD4}$ が得られる。

【0 0 3 5】

【数 2 3】

$$K_{VD0} = 0$$

$$K_{VD1} = \frac{i_D V}{2\pi K_{PD}}$$

$$K_{VD2} = \frac{b_D 2\pi\beta}{i_D K_{PD}}$$

$$K_{VD3} = \frac{(4c_{DL}\beta\pi^2 \cos^2 \varphi_A (J_D + m_K l^2) + \cos \varphi_A m i_D^2 V)}{2\pi c_{DL} i_D K_{PD}}$$

$$K_{VD4} = \frac{m \cos \varphi_A (-b_{DL} \frac{i_D^2 V}{4\pi^2 \beta} + c_{DL} b_D) \beta 2\pi}{c_{DL}^2 i_D K_{PD}}$$

10

20

30

40

50

【0036】

これは、これらのパイロット制御強化値がモデルパラメータに依存するという利点がある。数6～12に従ったモデルの場合、システムパラメータは K_{PD} 、 i_D 、 V 、 l 、 ϕ_A 、 β 、 J_D 、 m 、 m_K 、 C_{DL} 、 b_{DL} 、 b_D である。

上昇角 ϕ_A と梯子長さ l などのモデルパラメータの変化は、パイロット制御強化値の変化に即座に入れることができる。したがって、これらは、 ϕ_A と l の計測値の関数として常に追跡することができる。言い換えれば、梯子ユニットの異なる伸長長さ l が伸縮軸心で開始されると、その結果、回転軸心のパイロット制御強化値が自動的に変化し、ケージの移動時にパイロット制御の制振挙動が維持される。

【0037】

10

さらに、異なる技術的データ（例えば m などが変更された）が異なる種類のターンテーブル梯子に換えられた場合、パイロット制御強化値を即座に適合させることができる。

パラメータ K_{PD} 、 i_D 、 V 、 β 、 m 、 m_K は、技術的データに関する情報シートに記載される。平均値またはセンサデータから得られる計測値がケージの質量用として想定される。原則として、パラメータ l 、 ϕ_A は変化するシステムパラメータとしてセンサデータから求められる。パラメータの J_D および C_{DL} はFEMテストから分かる。減衰（ダンピング）パラメータ b_{DL} 、 b_D は周波数応答測定値から求められる。

【0038】

数6～12に従った動的モデルの理想化条件のもとで、回転軸心の移動時にケージの振動が起こらず、ケージが経路計画モジュールで生成された経路を正確にたどるように、パイロット制御ブロックでターンテーブル梯子の回転軸心を制御することが可能になる。しかし、動的モデルは真の動的状態の抽象的な再現にすぎない。さらに、外乱（強風など）がターンテーブル梯子に作用することがある。

20

したがって、パイロット制御ブロック71は状態コントローラ73によって支援される。計測変数 w_h 、 dw_h/dt 、 ϕ_D 、 $d\phi_D/dt$ 、 M_{MD} の少なくとも1つが状態コントローラにおいて強化値で加重され、制御入力部にフィードバックされる。そこでは、パイロット制御ブロック71の出力値と状態コントローラブロック73の出力値の差が形成される。状態コントローラブロックが設けられている場合、パイロット制御強化値を計算するとき、これを考慮に入れられなければならない。

フィードバックのために、数14は次のように変化する。

30

【数24】

$$\begin{aligned}\dot{\underline{x}}_D &= (\underline{A}_D - \underline{B}_D \underline{K}_D) \underline{x}_D + \underline{B}_D \underline{S}_D w_D \\ \underline{y}_D &= \underline{C}_D \underline{x}_D\end{aligned}$$

$\underline{K}_D$ は状態コントローラの制御強化値の行列である。従って、パイロット制御強化値の計算の根拠である記述透過関数も、数17に応じて以下のように変化する。

【数25】

40

$$G_{DR}(s) = \frac{\varphi_{KD}(s)}{u_{Dpilot}(s)} = \underline{C}_D (s\underline{I} - \underline{A}_D + \underline{B}_D \underline{K}_D)^{-1} \underline{B}_D$$

【0039】

回転軸心の場合で、変数 w_h 、 dw_h/dt 、 ϕ_D 、 $d\phi_D/dt$ のフィードバックの場合、透過関数は以下になる。

【数 2 6】

$$\begin{aligned}
 G_{DR}(s) = & \frac{2\pi K_{PD}i_D(m(\cos\varphi_A - 1)s^2 + b_{DL}s + c_{DL})}{4\pi^2\beta m \cos^2\varphi_A(J_D - ml^2 + m_Kl^2)s^5 + 4\pi^2\beta(b_{DL}\cos^2\varphi_A(J_D + m_Kl^2) + mb_D)s^4 +} \\
 & \frac{\beta 4\pi^2(c_{DL}\cos^2\varphi_A(J_D + m_Kl^2) + b_D b_{DL} + m \frac{i_D^2 V}{\beta 4\pi^2} + \frac{mi_D K_{PD}(k_{4D} + k_{2D}\cos\varphi_A)}{2\pi\beta})s^3}{\beta 4\pi^2(c_{DL}\cos^2\varphi_A(J_D + m_Kl^2) + b_D b_{DL} + m \frac{i_D^2 V}{\beta 4\pi^2} + \frac{mi_D K_{PD}(k_{4D} + k_{2D}\cos\varphi_A)}{2\pi\beta})s^3} \\
 & \frac{+ 4\pi^2\beta(b_D c_{DL} + b_{DL} \frac{i_D^2 V}{\beta 4\pi^2} + \frac{K_{PD}i_D(b_{DL}k_{4D} + l m \cos\varphi_A k_{1D} + m k_{3D})s^2 +}{2\pi\beta}}{+ 4\pi^2\beta(b_D c_{DL} + b_{DL} \frac{i_D^2 V}{\beta 4\pi^2} + \frac{K_{PD}i_D(b_{DL}k_{4D} + l m \cos\varphi_A k_{1D} + m k_{3D})s^2 +}{2\pi\beta}} \\
 & \frac{(c_{DL}i_D^2 V + 2\pi K_{PD}i_D(b_{DL}k_{3D} + c_{DL}k_{4D})s + 2\pi K_{PD}i_D c_{DL}k_{3D})}{(c_{DL}i_D^2 V + 2\pi K_{PD}i_D(b_{DL}k_{3D} + c_{DL}k_{4D})s + 2\pi K_{PD}i_D c_{DL}k_{3D})}
 \end{aligned}$$

10

20

30

変数 k_{1D} 、 k_{2D} 、 k_{3D} 、 k_{4D} は状態コントローラの制御強化値であり、それにより変数 w_h 、 dw_h/dt 、 ϕ_D 、 $d\phi_D/dt$ が適当に加重されて制御入力部にフィードバックされる。

40

【0040】

パイロット制御強化値 K_{Vdi} ($K_{VD0} \sim K_{VD4}$) を計算するには、数 26 が先ず参照変数の積によって展開される。

【数 2 7】

$$G_{VDR}(s) = \frac{\varphi_{KD}}{\varphi_{KDref}} = G_{DR}(s) \cdot (K_{VD0} + K_{VD1}s + K_{VD2}s^2 + K_{VD3}s^3 + K_{VD4}s^4)$$

この式は、 K_{VDi} ($K_{VD0} \sim K_{VD4}$) に関して、数 2 0 と同じ構成である。数 2 7 によるパイロット制御のシステム全体の透過関数とターンテーブル梯子の回転軸心の透過関数とその係数 b_i と a_i における条件 数 2 1 を満たすとき、位置、速度、加速、ジャークおよび任意のジャーク微分と関連した最適なシステム挙動が正確に達成される。

10

【0 0 4 1】

ここでも、数 2 2 と同様な一次方程式システムになり、求めたいパイロット制御に従って強化値 $K_{VD0} \sim K_{VD4}$ に従って分析形で解くことができる。しかし、求めたいパイロット制御強化値 $K_{VD0} \sim K_{VD4}$ に加えて、係数 b_i および a_i も、状態コントローラの既知の制御強化値 k_{1D} 、 k_{2D} 、 k_{3D} 、 k_{4D} に依存する。その導き出し方を以下で説明する。

状態コントローラブロック 7 3 を考慮に入れたパイロット制御ブロック 7 1 のパイロット制御強化値 $K_{VD0} \sim K_{VD4}$ 用として、以下が得られる。

【数 28】

$$\begin{aligned}
K_{VD0} &= k_{3D} \\
K_{VD1} &= \frac{i_D V}{2\pi K_{PD}} + k_{4D} \\
K_{VD2} &= \frac{b_D 2\pi\beta}{i_D K_{PD}} + \frac{m \cos \varphi_A}{c_{DL}} (l \cdot k_{1D} + k_{3D}) \\
K_{VD3} &= \frac{(4c_{DL}\beta\pi^2 \cos^2 \varphi_A (J_D + m_K l^2) + \cos \varphi_A m i_D^2 V)}{2\pi c_{DL} i_D K_{PD}} + \\
&\quad \frac{m \cos \varphi_A}{c_{DL}^2} (c_{DL} (lk_{2D} + k_{4D}) - b_{DL} (lk_{1D} + k_{3D})) \\
K_{VD4} &= \frac{m \cos \varphi_A (-b_{DL} i_D^2 V + 4\pi^2 \beta c_{DL} b_D)}{2c_{DL}^2 i_D K_{PD} \pi} - \frac{m \cos \varphi_A}{c_{DL}^3} (c_{DL} m (\cos \varphi_A - 1) (lk_{1D} + k_{3D}) + \\
&\quad - c_{DL} b_{DL} (lk_{2D} + k_{4D}) + b_{DL}^2 (k_{3D} + lk_{1D}))
\end{aligned}$$

10

20

30

【0042】

したがって、理想化モデルにもとづく回転方向での、振動なしの、経路が正確なケージの移動を保証するパイロット制御強化値は、数23と同様の方法で数28から得られる。しかし、状態制御強化値 k_{1D} 、 k_{2D} 、 k_{3D} 、 k_{4D} を求めなければならない。これを以下で説明する。

40

【0043】

コントローラフィードバック73は状態コントローラとして設計される。状態コントローラは、あらゆる状態変数、つまり状態ベクトル $\underline{x}_D$ のあらゆる要素、が制御強化値 k_{iD} で加重されて、パスの制御入力部にフィードバックされるという特徴がある。制御強化値 k_{iD} が組み合わされて制御ベクトル $\underline{k}_D$ を形成する。

【0044】

「Unbehauen, Regelungstechnik 2 [Control Engineering 2], loc cit」によれば、システムの動的挙動はシステム行列 $\underline{A}_D$ の固有値の位置によって決まり、それらは同時に周波数範囲の透過関数の極点である。行列の固有値は、以下の特性多項式の変数 s と関連したゼロ位置を計算することによって、行列式から求めることができる。

50

【数 2 9】

$$\det(s\mathbf{I}-\mathbf{A}_0) \equiv 0$$

$\mathbf{I}$ は単位行列である。数 6 ～ 数 1 2 による選択された状態モデルの場合、数 2 9 の評価は以下のような 5 次の多項式を作る：

【数 3 0】

$$s^5 + a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0 \equiv 0$$

10

【0 0 4 5】

固有値の位置が以下の行列式の評価によって求めることができるから、状態変数をコントローラ行列 $\mathbf{K}_D$ を介して制御入力部へフィードバックすることによって、これらの固有値を明確に置き換えることができる。

【数 3 1】

$$\det(s\mathbf{I} - \mathbf{A}_0 + \mathbf{B}_0 \cdot \mathbf{K}_D) \equiv 0$$

20

【0 0 4 6】

数 3 1 の評価も 5 次の多項式を作るが、それは制御強化値 k_{iD} ($i = 1 \sim 5$) に依存する。数 6 ～ 数 1 2 によるモデルの場合、数 3 0 は以下になる。

【数 3 2】

$$s^5 + a_4(k_{5D}) s^4 + a_3(k_{5D}, k_{4D}, k_{2D}) s^3 + a_2(k_{5D}, k_{4D}, k_{3D}, k_{1D}) s^2 + a_1(k_{5D}, k_{4D}, k_{3D}) s + a_0(k_{3D}) \equiv 0$$

30

【0 0 4 7】

目標とする方法でシステムの動作に影響するために、制御強化値 k_{iD} のために、数 3 1 および数 3 2 があるゼロ位置を取ることが要求され、その動作がこの多項式のゼロ位置に反映される。その結果、この多項式のための以下の入力を作られる。

【数 3 3】

$$p(s) = \prod_{i=1}^n (s-r_i)$$

40

n は状態ベクトルの大きさと等しいシステムの次数である。数 6 ～ 1 2 によるモデルの場合、 $n = 5$ で、したがって、 $p(s)$ は以下になる。

【数 3 4】

$$p(s) = (s-r_1)(s-r_2)(s-r_3)(s-r_4)(s-r_5) = s^5 + p_4 s^4 + p_3 s^3 + p_2 s^2 + p_1 s + p_0$$

r_i は、システムが安定し、よい制振効果をもって十分早く制御が働き、通常生じる制御の逸脱で制御変数の制限が起らないように選択される。 r_i は、シミュレーションでの

50

試運転の前に、これらの評価基準に従って決定することができる。

【0048】

制御強化値を数31および数33の多項式の係数比較で求めることができる。

【数35】

$$\det(s\mathbf{I} - \mathbf{A}_0 + \mathbf{B}_0 \cdot \mathbf{K}_0) = \prod_{i=1}^n (s - r_i)$$

【0049】

10

数6～数12によるモデルの場合、以下の一次方程式システムが制御強化値 k_{iD} の関数として作られる：

【数36】

$$\begin{aligned} a_4(k_{5D}) - p_4 &= 0 \\ a_3(k_{5D}, k_{4D}, k_{2D}) - p_3 &= 0 \\ a_2(k_{5D}, k_{4D}, k_{3D}, k_{1D}) - p_2 &= 0 \\ a_1(k_{5D}, k_{4D}, k_{3D}) - p_1 &= 0 \\ a_0(k_{3D}) - p_0 &= 0 \end{aligned}$$

20

【0050】

上記方程式システム 数36の評価は、所望の極点 r_i とシステムパラメータの関数として分析的数式を制御強化値に与える。数6～数12によるモデルの場合、システムパラメータは K_{PD} 、 i_D 、 V 、 l 、 ϕ_A 、 β 、 J_D 、 m 、 m_K 、 c_{DL} 、 b_{DL} 、 b_D である。このコントローラ設計の利点は、伸長長さ l や上昇角 ϕ_A のようなシステムにおけるパラメータ変化が、変更された制御強化値に即座にとり入れられることである。これは最適化された制御挙動に極めて重要である。

30

【0051】

完全な状態コントローラは、すべての状態変数に関する知識を要求するから、状態観察者の代わりに出力フィードバックとして制御を設計することが有利である。これは、すべての状態変数がコントローラを介してフィードバックされるのではなく、計測によって検出されたものだけがフィードバックされることを意味する。したがって、個々の k_{iD} がゼロのものがある。式6～12によるモデルの場合、例えば回転軸心モータの駆動モーメントの計測を省略できる。したがって、 $k_{5D} = 0$ になる。これにもかかわらず、 $k_{1D} \sim k_{4D}$ を数36によって計算することができる。さらに、かなり複雑な計算のため、単一の作動ポイントに対してコントローラパラメータを計算することが賢明な場合がある。しかし、その後で、以下のコントローラ行列を持つシステムの実際の固有値位置を、数31の計算によって数値的チェックをしなければならない。

40

【数37】

$$\mathbf{K}_0 = [k_{1D} \ k_{2D} \ k_{3D} \ k_{4D} \ 0]$$

【0052】

これは数値的にしか行えないから、変化するシステムパラメータでカバーされる全体広がりを取り入れられなければならない。この場合、変化するシステムパラメータは l と ϕ

50

A であろう。これらのパラメータは間隔 $[l_{\min}, l_{\max}]$ および $[\phi_{A\min}, \phi_{A\max}]$ で変動する。言い換えれば、これらの間隔で複数の支点 l_i および ϕ_{A_j} を選択し、これらの変化するシステムパラメータの考え得るすべての組合せに対して、システム行列 $\underline{A}_{ij}$ (l_i 、 ϕ_{A_j}) を計算して数 3 1 に挿入し、数 3 7 から $\underline{K}_D$ で評価しなければならない。
すべての i と j に関して、

【数 3 8】

$$\det(s\underline{I} - \underline{A}_{ij} + \underline{B} \cdot \underline{K}_D) = 0$$

【0 0 5 3】

10

数 3 8 のすべてのゼロ位置が常にゼロ未満なら、システムの安定性を確実にし、最初を選択された極点 r_i を保持することができる。そうでない場合は、数 3 3 による極点 r_i の補正が必要であるかもしれない。

【0 0 5 4】

w_h 、 dw_h/dt 、 ϕ_D 、 $d\phi_D/dt$ のフィードバックにより、状態コントローラブロック 7 3 の出力は以下になる。

【数 3 9】

$$u_{Djerk} = k_{1D} w_h + k_{2D} \dot{w}_h + k_{3D} \phi_D + k_{4D} \dot{\phi}_D$$

20

【0 0 5 5】

そして、パイロットコントロール 7 1 を考慮に入れた回転軸心用の比例弁の設定制御電圧は以下になる。

【数 4 0】

$$u_{Dref} = u_{Dpilot} - u_{Djerk}$$

【0 0 5 6】

30

数 6 ～ 数 1 2 による状態モデルでは、線形のシステム部分だけを考慮に入れることができから、線形のシステム挙動がシステム入力に関連して作られるような方法で、油圧補償ブロック 7 5 の油圧の静的非線形性をオプション的に考慮に入れることができる。油圧の最も重要な非線形効果は、比例弁のゼロ点まわり遊びと補助伝達動力制御のヒステリシス効果である。この目的のために、比例弁の制御電圧 u_{Std} とその結果生じる伝達動力 Q_{FD} の間の静的特性曲線が実験的に記録される。その特性曲線は以下の数学関数で表すことができる。

【数 4 1】

$$Q_{FD} = f(u_{Std})$$

40

そして、システム入力に関連して線形性が要求される。言い換えれば。比例弁と油圧補償ブロックは、数 5 によって要約される以下の挙動を持つことになる。

【数 4 2】

$$Q_{FD} = K_{FD} u_{Std}$$

【0 0 5 7】

50

補償ブロック 75 が
【数 43】

$$u_{\text{Std}} = h(u_{\text{Dref}})$$

の静的特性曲線を有する場合、静的補償特性曲線として
【数 44】

$$h(u_{\text{Dref}}) = f^{-1}(K_{\text{PD}} u_{\text{Dref}})$$

10

が選択されると、条件 数 42 が正確に満たされる。
【0058】

このようにして、回転軸心の軸心コントローラの個々の要素が記載される。結論として、経路計画モジュールと回転軸心コントローラの組合せが、回転軸心での振動なしの、経路が正確な移動の要求にこたえる。

これらの結果に基づいて、上昇・傾斜軸心 7 用の軸心コントローラを説明する。図 9 は軸心コントローラの上昇・傾斜の基本構成を示す。

上昇・傾斜軸心の方向の設定ケージ位置と微分（速度、加速、ジャークおよびジャークの微分）の形の経路計画モジュールの出力関数がパイロット制御ブロック 91（回転軸心のブロック 71）に与えられる。これらの関数は、動的モデルの理想化された前提条件の下で、振動のない、経路に正確な梯子の移動が作られるように、パイロット制御ブロックにおいて強化される。パイロット制御強化値を決定するためのベースは、上昇・傾斜軸心のために以下の部分で説明される動的モデルとなる。したがって、ターンテーブル梯子の振動はこれらの理想化された前提条件の下で抑制され、ケージは生成される経路をたどる。

20

回転軸心の場合のように、外乱（例えば、風の影響）のむらをなくし、モデル誤差を補償するために、パイロット制御を状態コントローラブロック 93（回転 73 の軸心と比較）で任意に補うことができる。このブロックで、上昇角 ϕ_A 、上昇角速度 $d\phi_A/dt$ 、梯子ユニットの縦方向の湾曲 w_V 、縦方向湾曲の微分 dw_V/dt 等の計測変数の少なくとも 1 つが強化され、制御入力部にフィードバックされる。計測変数 ϕ_A と w_V の微分はマイクロプロセッサ制御で数値的に形成される。

30

【0059】

油圧駆動ユニットの強い静的非線形性（ヒステリシス、遊び）のために、パイロット制御 u_{Apilot} と任意の状態コントローラ出力 u_{Ajerk} から形成された値は、システム全体の線形挙動を想定できるように、油圧補償ブロック 95（ブロック 75 と同様）で制御入力 u_{Aref} 用に変えられる。ブロック 95（油圧補償）の出力は補正制御変数 u_{StA} である。そして、この値は上昇・傾斜軸心のシリンダ用の油圧回路の比例弁に与えられる。

【0060】

上昇軸心のための動的モデルの導き出しは、以下で動作モードを詳細に説明するのに役立つ。その導き出しは、パイロット制御強化値と状態コントローラの計算のベースになる。

40

この目的のために、図 10 はモデル変数の定義の説明図である。そこで示された、単位ベクトル $\underline{e}_{11} \sim \underline{e}_{13}$ を持つ慣性系と関連した梯子機構の上昇位置の角度 ϕ_A と、湾曲 w_V のために曲がり小さい場合の以下の式で計算されるケージの上昇位置の角度 ϕ_{KA} との関係はこの場合不可欠である。

【数 45】

$$\phi_{KA} = \phi_A - \frac{w_V}{l}$$

50

【0061】

この動的システムは以下の微分方程式で説明することができる。

【数46】

$$\begin{aligned} (J_A(1) + m_k l^2) \cdot \ddot{\phi}_A - m l \cdot \ddot{w}_v &= M_{MA} + m l \cdot g \cos \phi_A - b_A \dot{\phi}_A \\ - m l \cdot \ddot{\phi}_A + m \cdot \ddot{w}_v + b_{AL} \cdot \dot{w}_v + c_{AL}(1) \cdot w_v &= 0 \end{aligned}$$

J_A は上昇軸心まわりの梯子ユニットの慣性モーメントである。 M_{MA} は梯子に対する油圧シリンダの駆動トルクである。 b_A は油圧シリンダの粘性摩擦である。数4の最初の式は梯子の駆動油圧シリンダの上昇作動に関する運動方程式を実質的に表し、梯子ユニットの曲がりによる反応が考慮されている。数4の2番目の式は湾曲 w_v を表す運動方程式で、湾曲振動の刺激が角加速または外乱を通して梯子ユニットの上昇または傾斜で引き起こされ、これらの微分方程式の初期条件によって表される。数4の2番目の式で、パラメータ c_{AL} は梯子ユニットの剛性であり、 b_{AL} は上昇・傾斜軸心方向の梯子振動の減衰定数である。この剛性は梯子ユニットの伸長状態1に大きく依存するから、剛性の関数が1の関数としてFEMシミュレーションから計算される。したがって、 c_{AL} として $c_{AL}(1)$ が以下で常に想定される。また、これは1に依存する関数でもある構造上のデータから計算された慣性モーメント J_A にも当てはまる。言及されていないパラメータは、回転軸心の式数4に関する詳細から推定することができる。

10

20

【0062】

油圧駆動は以下の式で表される。

【数47】

$$\begin{aligned} M_{MA} &= F_{cyl} d_b \cos \phi_p(\phi_A) \\ F_{cyl} &= p_{cyl} A_{cyl} \\ \dot{p}_{cyl} &= \frac{2}{\beta V_{cyl}} (Q_{FA} - A_{cyl} \dot{z}_{cyl}(\phi_A, \dot{\phi}_A)) \\ Q_{FA} &= K_{PA} u_{SIA} \end{aligned}$$

30

F_{cyl} はピストンロッドへの油圧シリンダの力である。 p_{cyl} はシリンダにおける圧力である（ピストンまたはリング側での移動方向に依存する）。 A_{cyl} はシリンダの横断面である（ピストンまたはリング側での移動方向に依存する）。 β は油の圧縮性である。 V_{cyl} はシリンダ容量である。 Q_{FA} は上昇と傾斜のための油圧回路の伝達力である。 K_{PA} は比例弁の伝達力と制御電圧との関係をつくる比例定数である。補助伝達力制御の動的影響は無視される。シリンダにおける油の圧縮で、油圧シリンダの全容量の半分が関連シリンダ容量として想定される。 z_{cyl} 、 $d(z_{cyl})/dt$ はシリンダロッドの位置と速度である。これら幾何学上のパラメータの d_b と ϕ_p は上昇運動に依存している。

40

【0063】

図11は上昇軸心の上昇運動を示す。油圧シリンダはターンテーブル梯子機構の下側端に据えつけられる。この点と上昇軸心まわりの梯子ユニットの支点との間隔 d_a は構造データから推定できる。油圧シリンダのピストンロッドは間隔 d_b でもって梯子ユニットに固定される。 ϕ_0 も構造データから分かる。そこから上昇角 ϕ_A と油圧シリンダ位置 z_{cyl} との以下の関係が得られる。

【数 4 8】

$$z_{cyl} = \sqrt{d_a^2 + d_b^2 - 2d_b d_a \cos(\varphi_A + \varphi_0)}$$

【0 0 6 4】

上昇角 φ_A だけが計測変数であるから、数 4 8 の逆関係と、ピストンロッド速度 $d(z_{cyl}) / dt$ と上昇速度 $d\varphi_A / dt$ との間の依存が意味を持つ。

【数 4 9】

10

$$\varphi_A = \arccos\left(\frac{d_a^2 + d_b^2 - z_{cyl}^2}{2d_a d_b}\right) - \varphi_0$$

【数 5 0】

$$\dot{\varphi}_A = \frac{\partial \varphi_A}{\partial z_{cyl}} \dot{z}_{cyl} = \frac{\sqrt{d_a^2 + d_b^2 - 2d_b d_a \cos(\varphi_A + \varphi_0)}}{d_b d_a \sin(\varphi_A + \varphi_0)} \dot{z}_{cyl}$$

20

【0 0 6 5】

梯子ユニットに対する作用モーメントを計算するために、投影角 φ_p も計算しなければならない。

【0 0 6 6】

【数 5 1】

$$\cos \varphi_p = \frac{d_a \sin(\varphi_A + \varphi_0)}{\sqrt{d_a^2 + d_b^2 - 2d_b d_a \cos(\varphi_A + \varphi_0)}} = \frac{h_1}{h_2}$$

30

その結果、数 4 6 ～ 数 5 1 に記述された上昇軸心の動的モデルを状態表現に変えることができる (0. Foellinger: Regelungstechnik, [Control Engineering], 7th Edition, H uethig Verlag, Heidelberg, 1992 も参照)。システムの以下の状態表現が作られる：

状態表現：

【数 5 2】

$$\begin{aligned} \dot{\underline{x}}_A &= \underline{A}_A \underline{x}_A + \underline{B}_A u_A \\ \underline{y}_A &= \underline{C}_A \underline{x}_A \end{aligned}$$

40

ここで、
状態ベクトル：

【数 5 3】

$$\underline{x}_A = \begin{bmatrix} w_v \\ \dot{w}_v \\ \varphi_A \\ \dot{\varphi}_A \\ M_{MA} \end{bmatrix}$$

10

制御変数：

【数 5 4】

$$u_A = u_{StA}$$

出力変数：

【数 5 5】

$$Y_A = \varphi_{KA}$$

20

システム行列：

【数 5 6】

$$\begin{aligned}
 \underline{A}_A = & \begin{bmatrix}
 -\frac{c_{AL}J_{AK}}{m(J_{AK}-ml^2)} & \frac{1}{b_{AL}J_{AK}} & 0 & 0 \\
 0 & \frac{m(J_{AK}-ml^2)}{0} & 0 & 0 \\
 -\frac{c_{AL}l}{(J_{AK}-ml^2)} & \frac{b_{AL}l}{(J_{AK}-ml^2)} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & -\frac{2A_{zy}^2}{\beta V_{zy}l(d_a^2+d_b^2-2d_b d_a \cos(\varphi_A+\varphi_0))}
 \end{bmatrix} \\
 & \begin{bmatrix}
 0 & \frac{b_{Al}}{(J_{AK}-ml^2)} & 0 & 0 \\
 1 & \frac{1}{b_A} & 0 & 0 \\
 0 & \frac{1}{b_A} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0
 \end{bmatrix} \\
 J_{AK}(l) = & J_A(l) + m_K l^2
 \end{aligned}$$

制御ベクトル：

10

20

30

【数 5 7】

$$\underline{B}_A = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{2A_{Zyl}d_b d_a \sin(\varphi_A + \varphi_0)K_{PA}}{V_{Zyl}\beta\sqrt{d_a^2 + d_b^2 - 2d_b d_a \cos(\varphi_A + \varphi_0)}} \end{bmatrix} \quad 10$$

出力ベクトル：

【数 5 8】

$$\underline{C}_A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{l} & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad 20$$

【0 0 6 7】

回転軸心の動的モデルは、伸長長さ l および上昇角 φ_A の三角関数部分と関連した可変パラメータシステムと見なされる。数 5 2～数 5 8 は以下で説明するパイロットコントロール 9 1 と状態コントローラ 9 3 の設計のベースとなる。

パイロット制御ブロック 9 1 の入力変数は、設定角度位置 φ_{KA} 、設定角速度 $d(\varphi_{KA})/dt$ 、設定角加速 $d^2(\varphi_{KA})/dt^2$ 、設定ジャーク $d^3(\varphi_{KA})/dt^3$ および任意の設定ジャークの微分である。したがって、基準変数の $\underline{w}_A$ は数 1 3 と同様である。

【数 5 9】

$$\underline{w}_A = \begin{bmatrix} \varphi_{KAref} \\ \dot{\varphi}_{KAref} \\ \ddot{\varphi}_{KAref} \\ \ddot{\varphi}_{KAref} \\ \left(\ddot{\varphi}_{KAref} \right) \end{bmatrix} \quad 40$$

【0 0 6 8】

$\underline{w}_A$ の要素は、パイロット制御ブロック 9 1 において、パイロット制御強化値 $K_{VA0} \sim K_{VA4}$ で加重され、それらの合計が制御入力部に与えられる。上昇軸心の軸心コントローラが状態コントローラ 9 3 を備えない場合は、パイロット制御ブロックからの変数 u_{Apilot} は参照制御電圧 u_{Aref} となり、それは油圧非線形性の補償後に制御電圧 u_{sta} として比例弁に与えられる。その結果、状態表現 数 5 2 は数 6 1 のパイロット制御行列によって、数 1 4 と同様に以下のように展開される。

【数 6 0】

$$\begin{aligned}\dot{\underline{x}}_A &= \underline{A}_A \underline{x}_A + \underline{B}_A \underline{S}_A \underline{w}_A \\ \underline{y}_A &= \underline{C}_A \underline{x}_A\end{aligned}$$

【数 6 1】

$$\underline{S}_A = [K_{VA0} \ K_{VA1} \ K_{VA2} \ K_{VA3} \ K_{VA4}]$$

10

【0 0 6 9】

行列式 数 6 0 の数値を求めれば、パイロット制御ブロックのための代数式としてそれを書くことができ、 u_{Apilot} は理想的なモデルに基づく比例・微分の非修正設定制御電圧である。

【数 6 2】

$$u_{\text{Apilot}} = K_{VA0} \phi_{K\text{Aref}} + K_{VA1} \dot{\phi}_{K\text{Aref}} + K_{VA2} \ddot{\phi}_{K\text{Aref}} + K_{VA3} \dddot{\phi}_{K\text{Aref}} (+K_{VA4} \ddot{\phi}_{K\text{Aref}})$$

20

$K_{VA0} \sim K_{VA4}$ はパイロット制御強化値であり、それらは、ケージが振動なしで設定軌道経路を正確にたどるように、梯子ユニットの現在の上昇角 ϕ_A と伸長長さ l の関数として計算される。

パイロット制御強化値 $K_{VA0} \sim K_{VA4}$ は次のように計算される。ケージ角度 ϕ_{KA} の制御変数と関連して、パイロット制御ブロックなしで、透過関数を状態式 数 5 2 ～ 数 5 8 から以下のように計算することができる。

【数 6 3】

30

$$G(s) = \frac{\varphi_{KA}(s)}{u_{\text{Apilot}}(s)} = \underline{C}_A (s\underline{I} - \underline{A}_A + \underline{B}_A \underline{K}_A)^{-1} \underline{B}_A$$

出力パイロットブロックとケージ位置間の透過関数は、数 1 8 と同様に数 6 3 で計算できる。数 6 3 のパイロット制御ブロック 9 1 を考慮に入れることにより、数 1 9 と同様な関係が得られ、これを掛けると以下の構成になる：

【数 6 4】

40

$$\frac{\varphi_{KA}}{\varphi_{K\text{Aref}}} = \frac{b_2(K_{VAi}) \cdot s^2 + b_1(K_{VAi}) \cdot s + b_0(K_{VAi})}{a_2 \cdot s^2 + a_1 \cdot s + a_0}$$

【0 0 7 0】

強化値 K_{VAi} ($K_{VA0} \sim K_{VA4}$) の計算では、係数 $b_4 \sim b_0$ と $a_4 \sim a_0$ だけが意味を持つ。パイロット制御のシステム全体の透過関数とターンテーブル梯子の上昇軸心の透過関数

50

が係数 b_i と a_i についての数 2 1 の条件を満たすとき、位置、速度、加速、ジャークおよび任意のジャーク微分と関連した最適なシステム挙動が正確に達成される。

【0071】

ここでも一次方程式システムになり、それは、求めたいパイロット制御強化値 $K_{VA0} \sim K_{VA4}$ に関して分析形で解くことができる。

数 5 2 ～ 5 8 によるモデルの場合、回転軸心と同様に計算すると（数 1 8 ～ 数 2 3）、
【数 6 5】

$$\begin{aligned} K_{VA0} &= 0 \\ K_{VA1} &= \frac{A_{Cyl} d_b h_2}{K_{PA} h_1} \\ K_{VA2} &= \frac{b_A \beta V_{Cyl} h_1}{2 d_b A_{Cyl} K_{PA} h_2} \\ K_{VA3} &= \frac{J_A K_{CAL} \beta V_{Cyl} h_1^2 + 2 m A_{Cyl}^2 d_b^2 h_2^2}{2 d_b c_{AL} A_{Cyl} K_{PA} h_2 h_1} \\ K_{VA4} &= \frac{m c_{AL} b_A \beta V_{Cyl} h_1^2 - 2 m A_{Cyl}^2 b_{AL} d_b^2 h_2^2}{2 d_b c_{AL}^2 A_{Cyl} K_{PA} h_2 h_1} \end{aligned}$$

がパイロット制御強化値として作られ、

【数 6 6】

$$\begin{aligned} h_1 &= \sqrt{d_a^2 + d_b^2 - 2 d_b d_a \cos(\varphi_A + \varphi_0)} \\ h_2 &= d_a \sin(\varphi_A + \varphi_0) \end{aligned}$$

【0072】

が得られる。

【0073】

回転軸心との関連で既に述べたように、これは、パイロット制御強化値がモデルパラメータの関数として作られるという利点がある。数 5 2 ～ 数 5 8 に従ったモデルの場合、システムパラメータは K_{PA} 、 A_{cyl} 、 V_{cyl} 、 ϕ_A 、 β 、 J_A 、 m 、 m_K 、 c_{AL} 、 b_{AL} 、 b_A 、 d_b 、 d_a である。パラメータ 1 への依存も、梯子長さに対するパラメータ J_A と C_{AL} の依存を通して与えられる。

その結果、上昇角 ϕ_A と梯子長さ l などのモデルパラメータの変化は、パイロット制御強化値の変化に即座に入れることができる。したがって、これらは、 ϕ_A と l の計測値の関数として常に追跡することができる。言い換えれば、梯子ユニットの異なる伸長長さ l が伸縮軸心で開始されると、その結果、回転軸心のパイロット制御強化値が自動的に変化し、ケージの移動時にパイロット制御の制振挙動が維持される。

【0074】

さらに、異なる技術的データ（例えば m などが変更された）異なる種類のターンテーブル梯子に換えられた場合、パイロット制御強化値を即座に適合させることができる。

パラメータ K_{PA} 、 A_{cyl} 、 V_{cyl} 、 β 、 m 、 m_K 、 d_b 、 d_a は、技術的データに関する情

10

20

30

40

50

報シートに記載される。平均値またはセンサデータから得られる計測値がケージの質量用として想定される。原則として、パラメータ 1、 ϕ_A は変化するシステムパラメータとしてセンサデータから求められる。パラメータの J_A および C_{AL} は F E M テストから分かる。減衰（ダンピング）パラメータ b_{AL} 、 b_A は周波数応答測定値から求められる。

【0075】

数 6 ～ 数 12 に従った動的モデルの理想化条件のもとで、上昇軸心の移動時にケージの振動が起こらず、ケージが経路計画モジュールで生成された経路を正確にたどるように、パイロット制御ブロックでターンテーブル梯子の上昇軸心を制御することが可能になる。しかし、動的モデルは真の動的状態の抽象的な再現にすぎない。さらに、外乱（強風など）がターンテーブル梯子に作用することがある。

10

したがって、パイロット制御ブロック 91 は状態コントローラ 93 によって支援される。計測変数 w_v 、 dw_v/dt 、 ϕ_A 、 $d\phi_A/dt$ 、 M_{MA} の少なくとも 1 つが状態コントローラにおいて強化値で加重され、制御入力部にフィードバックされる。そこでは、パイロット制御ブロック 91 の出力値と状態コントローラブロック 93 の出力値の差が形成される。状態コントローラブロックが設けられている場合、パイロット制御強化値を計算するとき、これを考慮に入れられなければならない。

【0076】

フィードバックのために、数 60 は次のように変化する。

【数 67】

20

$$\begin{aligned}\dot{\underline{x}}_A &= (\underline{A}_A - \underline{B}_A \underline{K}_A) \underline{x}_A + \underline{B}_A \underline{S}_A w_A \\ \underline{y}_A &= \underline{C}_A \underline{x}_A\end{aligned}$$

$\underline{K}_A$ は、回転軸心のコントローラ行列 $\underline{K}_D$ と同様な、上昇軸心の状態コントローラの制御強化値の行列である。回転軸心の数 25 ～ 数 28 と同様に計算することにより、記述透過関数は以下のように変化する。

【数 68】

30

$$G_{AR}(s) = \frac{\varphi_{KA}(s)}{u_{Apilat}(s)} = \underline{C}_A (s\underline{I} - \underline{A}_A + \underline{B}_A \underline{K}_A)^{-1} \underline{B}_A$$

【0077】

上昇軸心の場合、例えば変数 w_v 、 dw_v/dt 、 ϕ_A 、 $d\phi_A/dt$ をフィードバックできる。この目的のための、 $\underline{K}_4$ の対応する制御強化値は k_{1A} 、 k_{2A} 、 k_{3A} 、 k_{4A} である。

数 68 のパイロットコントロール 91 を考慮に入れて、パイロット制御強化値 K_{VAi} ($K_{VA0} \sim K_{VA4}$) を数 21 の条件に従って計算できる。

40

ここでも、数 22 と同様な一次方程式システムになり、求めたいパイロット制御に従って強化値 $K_{VA0} \sim K_{VA4}$ に従って分析形で解くことができる。しかし、求めたいパイロット制御強化値 $K_{VA0} \sim K_{VA4}$ に加えて、係数 b_i および a_i も、状態コントローラの既知の制御強化値 k_{1A} 、 k_{2A} 、 k_{3A} 、 k_{4A} に依存する。

【0078】

回転軸心の数 28 と同様に、状態コントローラブロック 93 を考慮に入れることによって、

【0079】

【数 6 9】

$$\begin{aligned}
K_{VA0} &= k_{3A} \\
K_{VA1} &= \frac{A_{Cyl} h_2 d_b}{K_{PA} h_1} + k_{4A} \\
K_{VA2} &= \frac{b_A \beta V_{Cyl} h_1}{2 d_b A_{Cyl} K_{PA} h_2} - \frac{m}{c_{AL}} k_{3A} + \frac{m l}{c_{AL}} k_{1A} \\
K_{VA3} &= \frac{J_{AK} c_{AL} \beta V_{Cyl} h_1^2 - 2 m A_{Cyl}^2 d_b^2 h_2^2}{2 c_{AL} A_{Cyl} K_{PA} h_2 h_1 d_b} + \frac{m (l k_{2A} - k_{4A})}{c_{AL}} + \frac{m b_{AL} (-l k_{1A} + k_{3A})}{c_{AL}^2} \\
K_{VA4} &= \frac{-m c_{AL} b_A \beta V_{Cyl} h_1^2 + 2 m A_{Cyl}^2 d_b^2 h_2^2 b_{AL}}{2 c_{AL}^2 A_{Cyl} K_{PA} h_2 d_b h_1} + \frac{2 m^2 (k_{3A} - l k_{1A})}{c_{AL}^2} + \frac{m b_{AL} (k_{4A} - l k_{2A})}{c_{AL}^2} + \frac{m b_{AL}^2 (l k_{1A} - k_{3A})}{c_{AL}^3}
\end{aligned}$$

10

20

30

がパイロット制御ブロック 9 1 のパイロット制御強化値 $K_{VA0} \sim K_{VA4}$ 用として得られる。 40

数 6 9 で、理想化モデルにもとづき、状態コントローラブロック 9 3 を考慮に入れた、回転方向での、振動なしの、経路が正確なケージの移動を保証するパイロット制御強化値も得られる。しかし、状態制御強化値 k_{1A} 、 k_{2A} 、 k_{3A} 、 k_{4A} を求めなければならない。これを以下で説明する。

【0080】

コントローラフィードバック 9 3 は状態コントローラとして設計される。制御強化値は回転軸心の場合の数 2 9 ～ 3 9 と同様に計算される。

状態ベクトル $\underline{x}_A$ の要素がコントローラ行列 $\underline{K}_4$ の制御強化値 k_{iA} で加重されて、パスの制御入力部にフィードバックされる。

回転軸心の場合と同様に、制御強化値を多項式の係数比較で求める。 50

【数 7 0】

$$\det(s\mathbf{I} - \mathbf{A}_A + \mathbf{B}_A \cdot \mathbf{K}_A) \equiv \prod_{i=1}^n (s-r_i)$$

【0 0 8 1】

回転軸心の場合と同様に、上昇軸心のモデルも位数が $n = 5$ であるから、数 7 0（英語原文の式 6 9 a）の多項式も 5 次式である。数 5 2～数 5 8 によるモデルの場合、制御強化値 k_{iA} の関数として以下の一次方程式システムが作られる：

【数 7 1】

$$\begin{aligned} a_4(k_{5A}) - p_4 &= 0 \\ a_3(k_{5A}, k_{4A}, k_{2A}) - p_3 &= 0 \\ a_2(k_{5A}, k_{4A}, k_{3A}, k_{1A}) - p_2 &= 0 \\ a_1(k_{5A}, k_{4A}, k_{3A}) - p_1 &= 0 \\ a_0(k_{3A}) - p_0 &= 0 \end{aligned}$$

式中、 p_i ($p_0 \sim p_4$) はゼロ位置 r_i によって定義される多項式の係数である。

r_i は、システムが安定し、よい制振効果をもって十分早く制御が働き、通常生じる制御の逸脱で制御変数の制限が起こらないように選択される。 r_i は、シミュレーションでの試運転の前に、これらの評価基準に従って決定することができる。

【0 0 8 2】

上記方程式システム数 7 1（英語原文の式 7 0）の評価は、所望の極点 r_i とシステムパラメータの関数として分析的数式を制御強化値に与える。数 5 2～数 5 8 によるモデルの場合、システムパラメータは K_{PA} 、 A_{cyl} 、 V_{cyl} 、 ϕ_A 、 β 、 J_A 、 m 、 m_K 、 c_{AL} 、 b_{AL} 、 b_A 、 d_b 、 d_a である。パラメータ 1 への依存は、梯子長さに対するパラメータ J_A と C_{AL} の依存を通して与えられる。伸長長さ l や上昇角 ϕ_A のようなシステムにおけるパラメータ変化が、変更された制御強化値に即座にとり入れられることである。これは最適化された制御挙動に極めて重要である。

【0 0 8 3】

回転軸心の場合と同様に、状態コントローラは出力フィードバックとして設計することもできる。この場合、計測によって検出された状態変数だけがフィードバックされる。したがって、個々の k_{iA} がゼロのものがある。数 5 2～数 5 8 によるモデルの場合、例えば油圧シリンダの駆動モーメントの計測を省略できる。したがって、 $k_{5A} = 0$ になる。これにもかかわらず、 $k_{1A} \sim k_{4A}$ を数 7 1 によって計算することができる。さらに、かなり複雑な計算のため、一定の作動ポイントに対してコントローラパラメータを計算し、この作動ポイントからの逸脱が生じたら、上昇角と伸長長さの関数としてのコントローラパラメータの追跡を無視することが賢明な場合がある。しかし、いずれの場合も、以下のコントローラ行列を持つシステムの実際の固有値位置を、数 3 1 と同じの数 7 2（英語原文の式 7 1）の計算によって数値的チェックをしなければならない。

【数 7 2】

$$\mathbf{K}_A = [k_{1A} \ k_{2A} \ k_{3A} \ k_{4A} \ 0]$$

これは数値的にしか行えないから、変化するシステムパラメータ l と ϕ_A でカバーされ

る全範囲を取り入れられなければならない。これらのパラメータは間隔 $[l_{\min}, l_{\max}]$ および $[\phi_{A\min}, \phi_{A\max}]$ で変動する。これらの間隔で複数の支点 l_i および ϕ_{Aj} を選択し、これらの変化するシステムパラメータの考え得るすべての組合せに対して、システム行列 $\underline{A}_{Aij}$ (l_i, ϕ_{Aj}) を計算して、数 3 1 と同様に挿入し、数 7 2 (英語原文の式 7 1) から $\underline{K}_A$ で評価する。

すべての i と j に関して、

【数 7 3】

$$\det(s\underline{I} - \underline{A}_{Aij} + \underline{B}_A \cdot \underline{K}_A) \equiv 0$$

10

【0084】

数 7 3 (英語原文の式 7 2) のすべてのゼロ点がゼロ未満なら、システムの安定性を確実にし、最初に選択された極点 r_i を保持することができる。そうでない場合は、数 6 9 による極点 r_i の補正が必要であるかもしれない。

w_v 、 dw_v/dt 、 ϕ_A 、 $d\phi_A/dt$ のフィードバックにより、状態コントローラブロック 9 3 の出力は以下になる。

【数 7 4】

$$u_{A\text{jerk}} = k_{1A} w_v + k_{2A} \dot{w}_v + k_{3A} \phi_A + k_{4D} \dot{\phi}_A$$

20

【0085】

そして、パイロットコントロール 9 1 を考慮に入れた回転軸心用の比例弁の設定制御電圧は、数 4 0 と同様に以下になる。

【数 7 5】

$$u_{A\text{ref}} = u_{A\text{pilot}} - u_{A\text{jerk}}$$

【0086】

回転軸心の場合と同様に、線形のシステム挙動がシステム入力に関連して作られるように、油圧補償ブロック 9 5 の油圧の任意の非線形性を補償できる。上昇軸心の場合、弁の遊びとヒステリシスに加えて、伸長長さ l と上昇角 ϕ_A と関連して制御電圧に、そして強化係数 K_{PA} と関連シリンダ直径 A_{cy1} に補正係数が与えられる。その結果、軸心コントローラ方向依存性の構造転換を回避できる。

30

【0087】

必要な補償関数を計算するために、比例弁の制御電圧 u_{StD} とその結果生じる伝達動力 Q_{FD} の間の静的特性曲線が、ここでも l と ϕ_A の関数として、実験的に記録される。その特性曲線は以下の数学関数で表すことができる。

【数 7 6】

$$Q_{FA} = f(u_{StA}, l, \phi_A)$$

40

【0088】

そして、システム入力に関連して線形性が要求される。言い換えれば。比例弁と油圧補償ブロックは、数 4 7 によって要約される以下の挙動を持つことになる。

【数 7 7】

$$Q_{FA} = K_{PA} u_{StA}$$

50

補償ブロック 95 が
【数 78】

$$u_{StA} = h(u_{Aref}, l, \varphi_A)$$

の静的特性曲線を有する場合、静的補償特性曲線として
【数 79】

$$h(u_{Aref}) = f^{-1}(K_{PA}u_{Aref}, l, \varphi_A)$$

10

が選択されると、条件 数 77（英語原文の式 76）が正確に満たされる。

このようにして、上昇軸心の軸心コントローラの個々の要素が記載される。したがって、経路計画モジュールと上昇・傾斜軸心コントローラの組み合わせが、上昇および傾斜時の振動なしの、経路が正確なケージ移動の要求にこたえる。

以下、梯子の伸縮軸心のための軸心コントローラの構造を説明する。図 12 はその軸心コントローラの構造を示す。回転および上昇・傾斜軸心コントローラ 43、45 と異なり、伸縮軸心の軸心コントローラ 47 は、この軸心が振動する傾向は少ないことから、位置用の外部制御ループと速度用の内部制御ループを持った従来のカスケード制御を備えている。

20

【0089】

軸心コントローラを制御するために、経路計画モジュール 39 および 41 は、伸縮軸心の設定位置 l_{ref} と設定速度 $d(l_{ref})/dt$ の時間関数だけを必要とする。これらは、静止しているとき位置と関連して正確な応答の早いシステム挙動が生じるように、パイロット制御ブロック 121 で加重される。基準変数 l_{ref} と計測変数 l の実際の比較がパイロット制御ブロックの直後で行われるから、位置 l に対するパイロット制御強化の場合、位置と関連した安定状態が得られる。設定速度 $d(l_{ref})/dt$ のためのパイロット制御強化は、ハンドレバーが操作されたとき、主観的に迅速だが十分に減衰された応答挙動が生じるように決定される。位置の制御ループのコントローラ 123 は比例コントローラ（P コントローラ）として設計することができる。その制御強化は、閉鎖制御回路の評価基準安定性と十分な減衰によって決定される。コントローラ 123 の出力変数は比例弁の最適な制御電圧である。回転および上昇・傾斜軸心コントローラ 43、45 の場合と同様に、油圧の非線形性が補償ブロック 125 で補償される。回転軸心の場合と同様な計算が行われる（数 42～44）。出力変数は比例弁の補正制御電圧 u_{StE} である。速度の内側制御ループは油圧回路の補助伝達力制御である。

30

【0090】

ターンテーブル梯子の最後の軸心は水平軸心であり、それは、車両が斜面にあるときでも、梯子機構が回転時に常に水平のままであることを確実にする。車両の傾斜を検出するために、電解液センサがターンテーブル梯子機構に取り付けられ、それは直交する 2 方向の慣性システムと関連したターンテーブル梯子機構の傾斜度を示す。これらの 2 つの角度は ϕ_{Nx} および ϕ_{Ny} とされる。2 番目の方向角度は上昇・傾斜軸心に対応しているから、梯子を常に垂直に保つためには角度 ϕ_{Nx} だけが重要である。傾斜を補償するために、駆動リングとターンテーブル梯子機構の間に 2 個の油圧シリンダが取り付けられ、それらは車両に対してターンテーブル梯子機構を角度 ϕ_{Nrel} に傾けることができる。制御の目的は、回転時に慣性システムに対する角度 ϕ_{Nx} を常にゼロに維持すること、言い換えれば、慣性システムと平行に整列させることにある。梯子を寝かす前には、再び車両に平行にしなければならない。この目的のために、梯子の伸長前の寝かし状態で角度センサ ϕ_{Nx} および ϕ_{Ny} が読み取られ、この値が車両傾斜 ϕ_{FNx} および ϕ_{Fny} として記憶される。したがって、値 ϕ_{FNx} は前後方向軸心まわりの車両の傾斜であり、 ϕ_{Fny} は移動方向を横切る軸心まわりの傾斜である。梯子を寝かす前に再び車両に平行にするためにこれらの値が使用される。

40

50

【0091】

図13は水平軸心のための軸心コントローラの構造を示す。位置用の外部制御ループと速度用の内部制御ループを持ったカスケードコントローラを備える構造は伸縮軸心のものと対応している。

パイロットコントロール131は基本的な構造段階では省かれる。アクティブな水平調整による梯子の動作時に、設定値は ϕ_{Nx} に関してゼロであると常に仮定される。コントローラ133は現在の計測値 ϕ_{Nx} と設定値ゼロとの設定対実際値差を制御電圧 u_{Nref} に変換する。コントローラは比例コントローラとして設計される。コントローラ強化は、閉鎖制御回路の評価基準安定性と十分な減衰によって決定される。コントローラ133の出力変数は比例弁の最適な制御電圧である。他の軸心コントローラと同様に、油圧の非線形性が補償ブロック135で補償される。回転軸心の場合と同様な計算が行われる（数42～数44）。出力変数は比例弁の補正制御電圧 u_{StN} である。油圧回路の補助伝達力制御は速度の内側制御ループである。

10

【0092】

軸心コントローラの動作を向上させる場合は、パイロットコントロール131で軸心コントローラを補うことができる。経路計画モジュールは、水平軸心に関連する回転軸心の時間関数 ϕ_{KDref} と設定速度 $\dot{\phi}_{KDref}$ をパイロット制御で必要とする。これらはパイロットコントロールにおいて先ず、以下の式によって、傾斜角の設定値 ϕ_{Nrel} に変換される。

【数80】

20

$$\phi_{Nrelset} = -\phi_{Nx} \cos\phi_{KDref} - \phi_{Ny} \sin\phi_{KDref}$$

【0093】

したがって、

【数81】

$$\dot{\phi}_{Nrelset} = (\phi_{Nx} \sin\phi_{KDref} - \phi_{Ny} \cos\phi_{KDref}) \dot{\phi}_{KDref}$$

30

【0094】

良い近似値として、これは水平軸心の油圧回路用に以下のように単純化できる。

【数82】

$$\dot{\phi}_{Nrel} = K_{PNtot} u_{StN}$$

式中、 K_{PNges} は傾斜速度 $d(\phi_{Nrel})/dt$ と制御電圧と透過関数の合計強化値である。

【数83】

40

$$u_{StN} = \frac{1}{K_{PNtot}} \dot{\phi}_{Nrelset}$$

か選択された場合、コントローラ133を補うこのパイロット制御によって、動的挙動がさらに向上する。梯子を寝かせる前に、車両の傾斜角 ϕ_{FNx} が、慣性システムに関連する傾斜角の設定値に与えられる。したがって、水平軸心は回転軸心との組み合わせで、ある車両傾斜での回転時に梯子が常に水平であることを確実にする。

したがって、経路制御によって、すべての軸心でケージの経路に正確な移動を可能にし

50

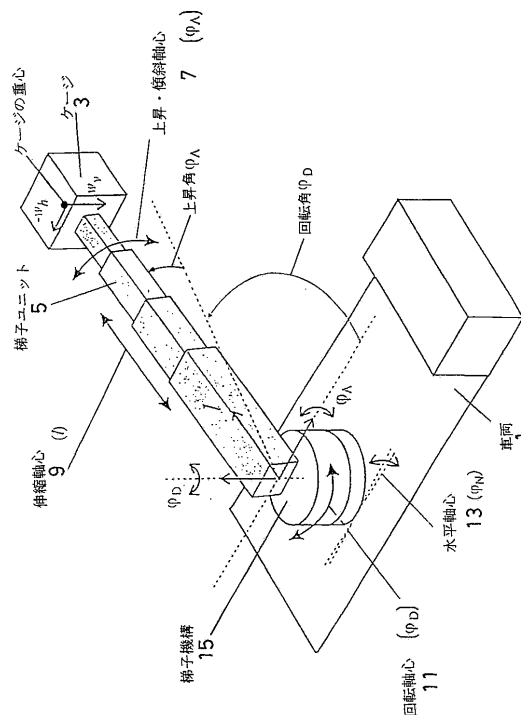
、その過程における梯子ユニットのアクティブな振動を抑制するターンテーブル梯子装置が達成される。

【図面の簡単な説明】

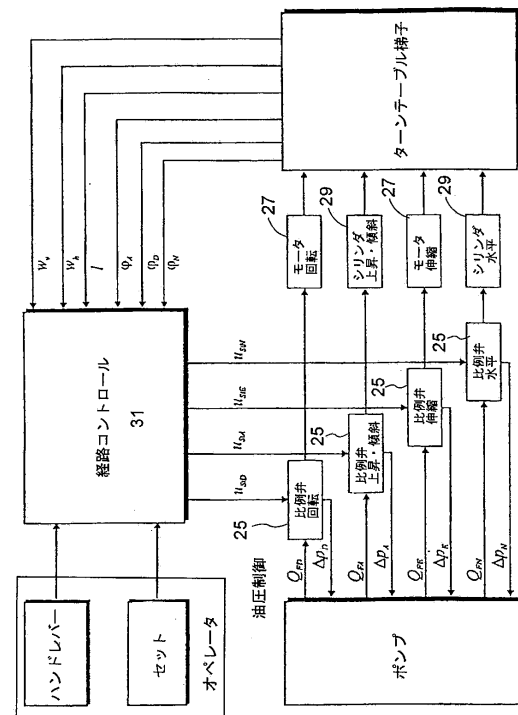
- 【図 1】 ターンテーブル梯子装置の基本的な機械的構造を示す一例
- 【図 2】 油圧コントロールと経路コントロールの相互作用を示す図
- 【図 3】 経路コントロールの全体構成示す図
- 【図 4】 経路計画モジュールの構造を示す図
- 【図 5】 全自動の経路計画モジュールでの経路生成を例示する図
- 【図 6】 半自動の経路計画モジュールの構造を示す図
- 【図 7】 回転軸心用の軸心コントローラの構造を示す図
- 【図 8】 回転軸心の機械的構造とモデル変数の定義を示す図
- 【図 9】 上昇軸心の軸心コントロールの構成を示す図
- 【図 10】 上昇軸心の機械的構造とモデル変数の定義を示す図
- 【図 11】 上昇軸心の上昇運動を示す図
- 【図 12】 伸長軸心の軸心コントローラの構造を示す図
- 【図 13】 水平軸心の軸心コントローラの構造を示す図

10

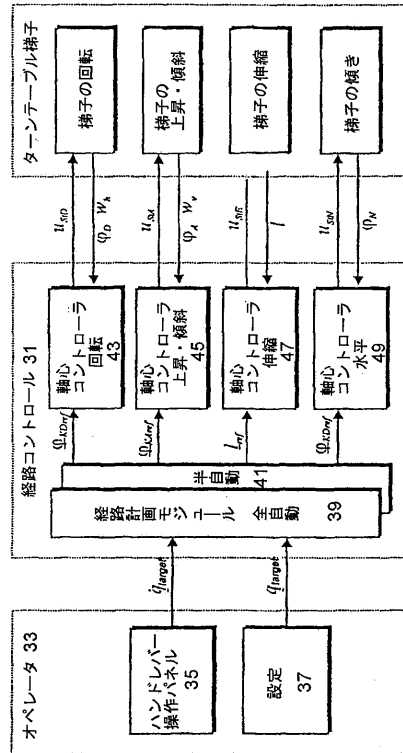
【図 1】



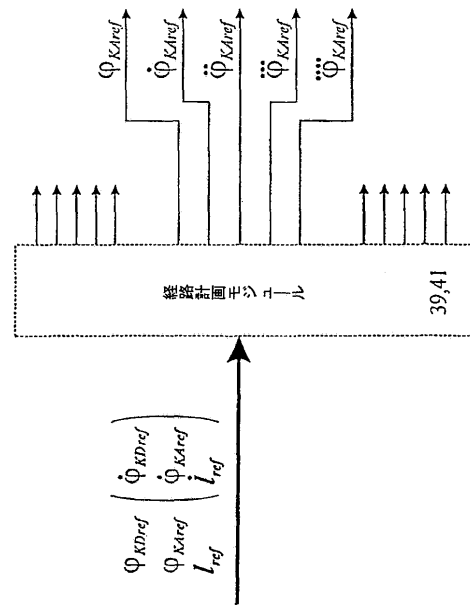
【図 2】



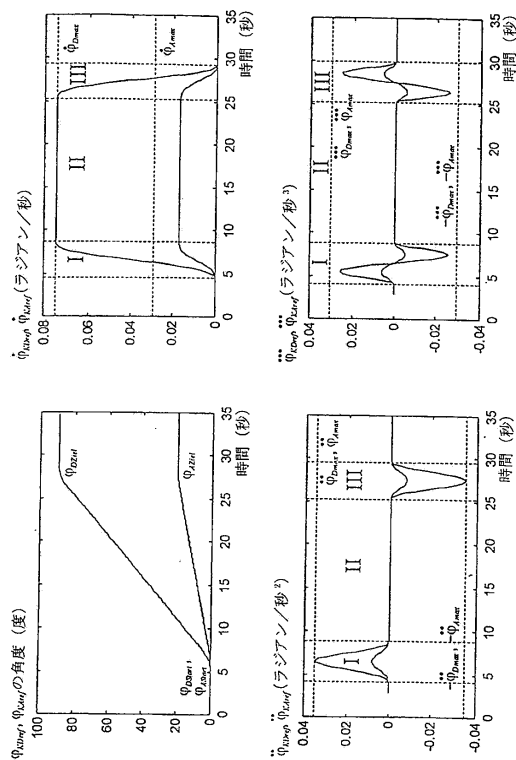
【図 3】



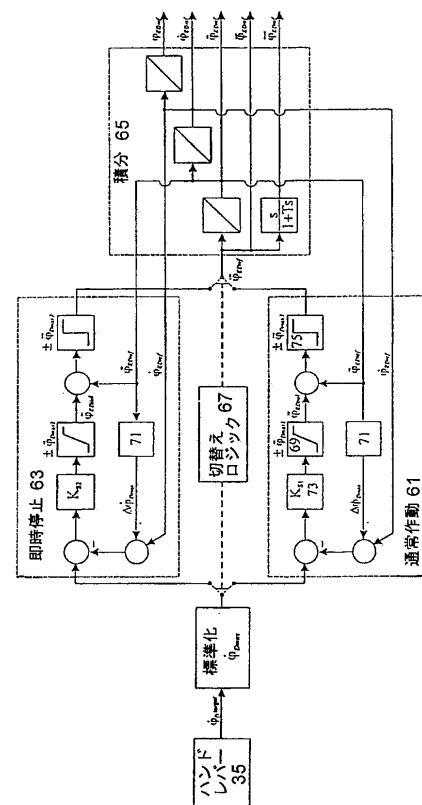
【図 4】



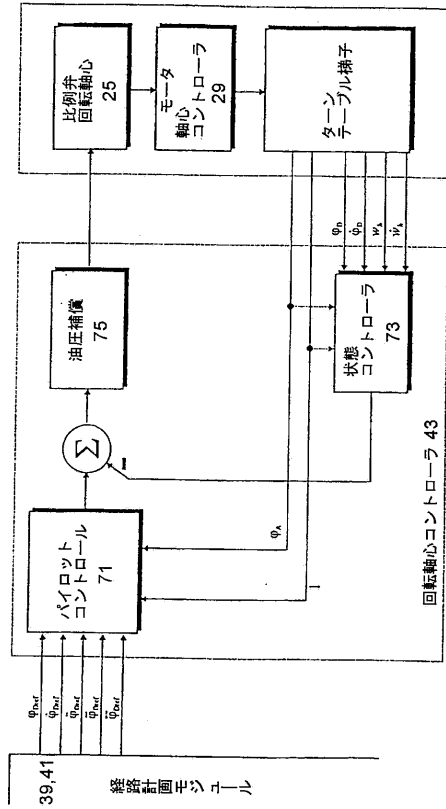
【図 5】



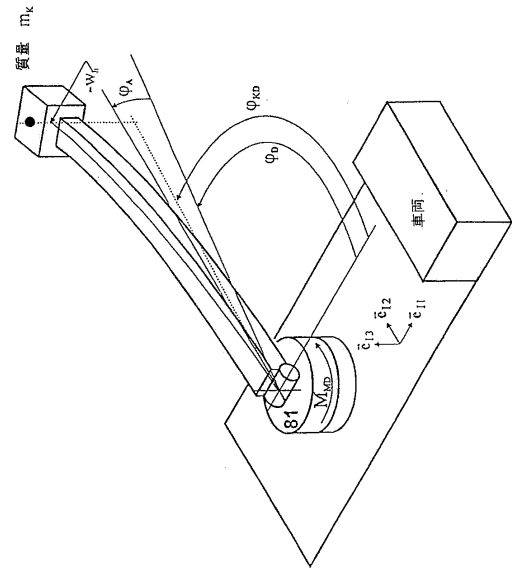
【図 6】



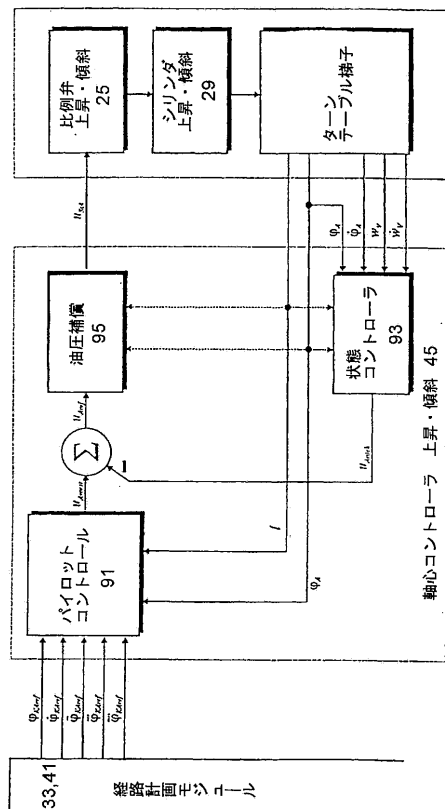
【図 7】



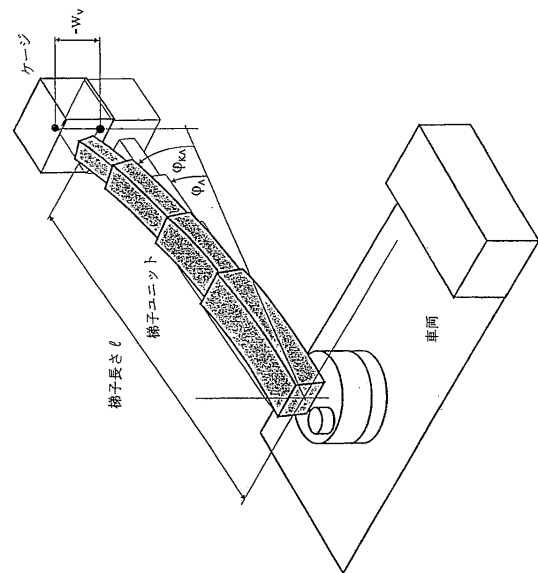
【図 8】



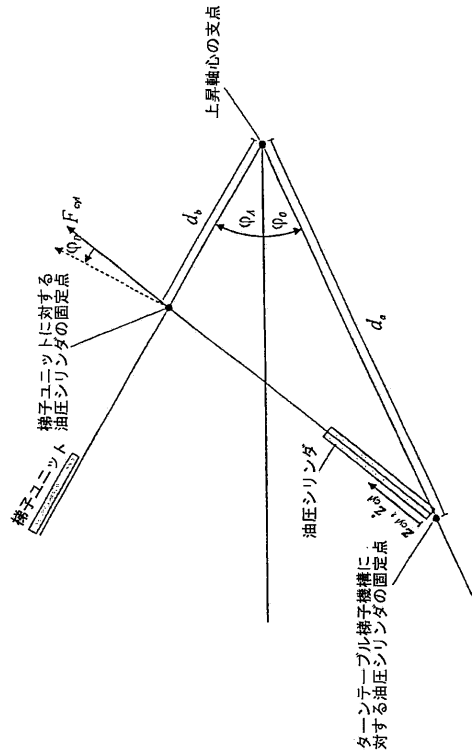
【図 9】



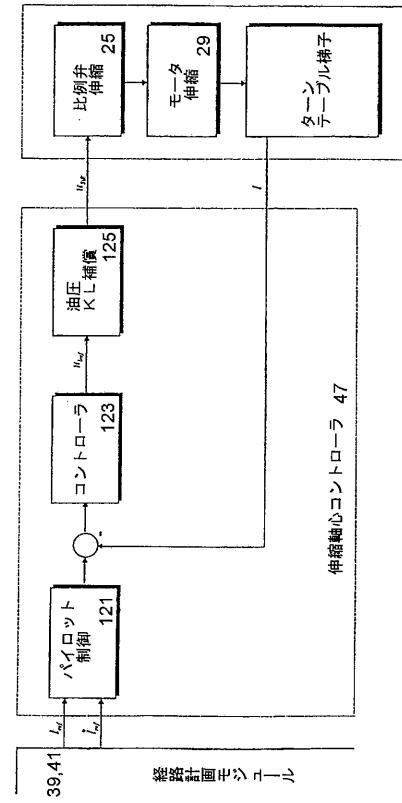
【図 10】



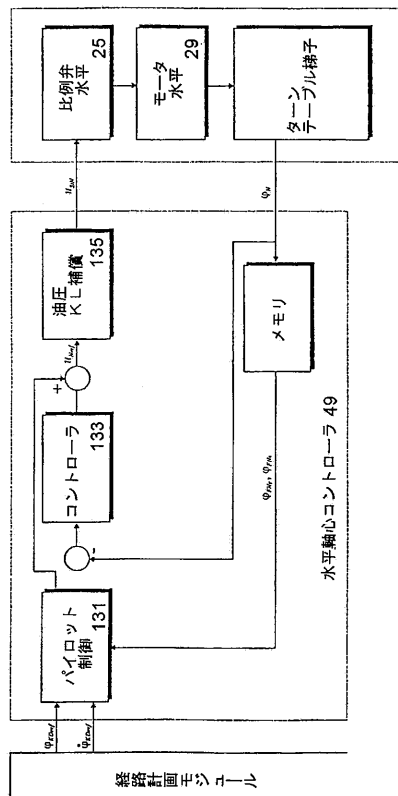
【図 1 1】



【図 1 2】



【図 1 3】



フロントページの続き

- (72)発明者 オリヴァー・ザヴォドニー
ドイツ連邦共和国 デー89278 ネルジンゲン ウルリッヒシュトラッセ 36
- (72)発明者 ハラルト・アッシュェマン
ドイツ連邦共和国 デー73340 アムシュテッテン タールシュトラッセ 2
- (72)発明者 エー・ペー・ホーファー
ドイツ連邦共和国 デー89173 ロンゼー ゾンネンシュトラッセ 4

審査官 本庄 亮太郎

- (56)参考文献 特開平09-315798 (JP, A)
特開2000-007274 (JP, A)
特開平09-100098 (JP, A)
特公平04-057599 (JP, B2)
特開昭61-273500 (JP, A)
実開平07-012399 (JP, U)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
- | | |
|------|-------|
| B66F | 9/24 |
| B66F | 9/22 |
| B66F | 11/04 |
| E06C | 5/00 |
| E06C | 5/06 |