

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2009-37383
(P2009-37383A)

(43) 公開日 平成21年2月19日(2009.2.19)

(51) Int.Cl.
G05B 13/02 (2006.01)

F I
G05B 13/02

テーマコード(参考)
5H004

審査請求 未請求 請求項の数 6 O L (全 14 頁)

(21) 出願番号 特願2007-200574 (P2007-200574)
(22) 出願日 平成19年8月1日(2007.8.1)

(71) 出願人 000002358
新明和工業株式会社
兵庫県宝塚市新明和町1番1号
(74) 代理人 100077931
弁理士 前田 弘
(74) 代理人 100110939
弁理士 竹内 宏
(74) 代理人 100110940
弁理士 嶋田 高久
(74) 代理人 100113262
弁理士 竹内 祐二
(74) 代理人 100115059
弁理士 今江 克実
(74) 代理人 100115691
弁理士 藤田 篤史

最終頁に続く

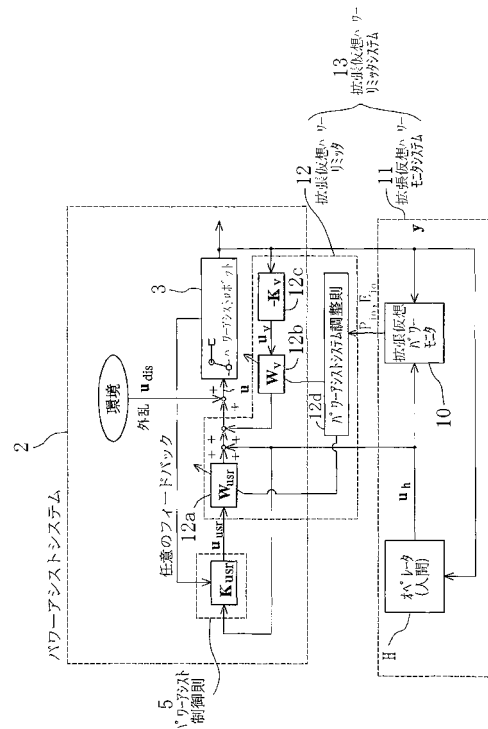
(54) 【発明の名称】 拡張仮想パワーモニタを備えることにより制御対象の安定性を評価解析する機能を備えた制御システム

(57) 【要約】

【課題】システムに対して流入する仮想パワーを観測することによって当該システムの安定性を評価解析する制御システム2に対して、その安定・不安定の判定を是正する。

【解決手段】ユーザ制御対象3と、ユーザ制御則5と、ユーザ制御対象3からのフィードバック信号を受けてユーザ制御対象3に操作量を入力し得る保守的な制御則Hと、保守的な制御則Hからユーザ制御対象3へ仮想的に伝達される仮想パワー及び保守的な制御則からの操作量の大きさ及びユーザ制御対象の出力の大きさを観測する拡張仮想パワーモニタ10と、を備える。拡張仮想パワーモニタ10は、仮想パワー $P_v(t)$ のa倍および保守的な制御則からの操作量の大きさを二乗したb倍及びユーザ制御対象の出力の大きさを二乗した-1倍を観測し、それによって安定性の評価関数 $E_x(t)$ に、ユーザ制御システムの入出力ゲインが小さいほど安定方向に移行させる項を含める。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

ユーザ制御対象と、
 前記ユーザ制御対象を制御するユーザ制御則と、
 前記ユーザ制御対象からのフィードバック信号を受けて前記ユーザ制御対象に操作量を入力し得る保守的な制御則と、
 前記保守的な制御則から前記ユーザ制御対象へ仮想的に伝達される拡張仮想パワーを観測する拡張仮想パワーモニタと、を備え、
 前記拡張仮想パワーモニタは、式(1)及び式(2)に基づいて、前記ユーザ制御対象とユーザ制御則を含むユーザ制御システムの出力の安定性を評価解析する制御システム。

10

【数 1】

$$E_x(t) = \int_0^t P_x(\tau) d\tau \geq -E_{x0} \quad \dots (1)$$

【数 2】

$$P_x(t) = a[y^T(t) \cdot u(t)] + b[u^T(t) \cdot u(t)] - [y^T(t) \cdot y(t)] \quad \dots (2)$$

但し、 $y(t)$ は前記ユーザ制御対象からのフィードバック信号、 $u(t)$ は前記保守的な制御則から出力される操作量、 E_{x0} は正の定数、 a は非負の定数、 b は正の定数である。

20

【請求項 2】

前記拡張仮想パワーモニタにおける拡張仮想パワーの観測に基づいて前記ユーザ制御システム内部において、前記ユーザ制御システム出力から前記ユーザ制御対象入力への負帰還量を調整することで前記ユーザ制御システムから拡張仮想パワーモニタシステムへの拡張仮想パワーの流出を制限する拡張仮想パワーリミッタを付加することにより、前記ユーザ制御システムからの出力の安定性を保証することを特徴とする請求項 1 に記載の制御システム。

【請求項 3】

前記拡張仮想パワーモニタにおける拡張仮想パワーの観測に基づいて前記ユーザ制御システム内部において、前記ユーザ制御則から前記ユーザ制御対象への操作量を調整することで前記ユーザ制御システムから拡張仮想パワーモニタシステムへの拡張仮想パワーの流出を制限する拡張仮想パワーリミッタを付加することにより、前記ユーザ制御システムからの出力の安定性を保証することを特徴とする請求項 1 又は 2 に記載の制御システム。

30

【請求項 4】

前記ユーザ制御対象は、オペレータによって制御され、
 前記ユーザ制御則は、前記ユーザ制御対象からのフィードバック信号を受けて前記オペレータから前記ユーザ制御対象への操作量の入力を補助するパワーアシスト制御則であり、
 前記ユーザ制御システムは、パワーアシストシステムであり、
 前記拡張仮想パワーモニタは、前記オペレータから前記ユーザ制御対象へ伝達される拡張仮想パワーを観測することを特徴とする請求項 1 に記載の制御システム。

【請求項 5】

前記拡張仮想パワーモニタにおける拡張仮想パワーの観測に基づいて前記パワーアシストシステム内部において、前記パワーアシストシステム出力から前記ユーザ制御対象入力への負帰還量を調整することで前記パワーアシストシステムから拡張仮想パワーモニタシステムへの拡張仮想パワーの流出を制限する拡張仮想パワーリミッタを付加することにより、前記パワーアシストシステムから前記オペレータに流出する拡張仮想パワーを制限して前記パワーアシストシステムからの出力の安定性を保証し、オペレータに対する安全性を確保することを特徴とする請求項 4 に記載の制御システム。

40

【請求項 6】

前記拡張仮想パワーモニタにおける拡張仮想パワーの観測に基づいて前記パワーアシストシステム内部において、前記パワーアシスト制御則から前記ユーザ制御対象への操作量

50

を調整することで前記パワーアシストシステムから拡張仮想パワーモニタシステムへの拡張仮想パワーの流出を制限する拡張仮想パワーリミッタを付加することにより、前記パワーアシストシステムから前記オペレータに流出する拡張仮想パワーを制限して前記パワーアシストシステムからの出力の安定性を保証し、オペレータに対する安全性を確保することを特徴とする請求項 4 又は 5 に記載の制御システム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、機械、電気・電子、又は化学等の各分野における制御システムに関する。

【背景技術】

【0002】

特許文献 1 には、保守的な制御則からユーザ制御対象へ仮想的に伝達されるパワー（仮想パワー）を観測してユーザ制御システムの安定性を評価解析する（仮想パワーモニタ）システムが開示されている。

【0003】

また、この特許文献 1 に開示されているシステムでは、仮想パワーモニタにおける仮想パワーの観測に基づいてユーザ制御システムを調整する仮想パワーリミッタを備えており、この仮想パワーリミッタによって、ユーザ制御システムからの仮想パワーの流出を制限し、ユーザ制御システムの安定性を保証するようにしている。

【0004】

具体的に前記の仮想パワーモニタは、式 (A) 及び式 (B) に従って、仮想パワーを観測すると共に、ユーザ制御システムの安定性を評価解析している。

【0005】

【数 3】

$$E_V(t) = \int_0^t P_V(\tau) d\tau \geq -E_{V0} \quad \dots (A)$$

$$P_V(t) = y^T(t) \cdot u(t) \quad \dots (B)$$

【0006】

ここで、 E_{V0} はシステムの初期時における内部エネルギーであって、ユーザが適宜設定する正の定数である。また、 $y(t)$ は、ユーザ制御システムの出力、 $u(t)$ は、保守的な制御則からの出力である。

【0007】

すなわち、仮想パワーモニタの観測量である $P_V(t)$ は前記仮想パワーを表し、仮想パワーモニタにおける安定性の評価関数である $E_V(t)$ は、ユーザ制御システム内部の蓄積エネルギーを表す。そうして、式 (A) が成立するときには、ユーザ制御システムは受動性を満足することになり、保守的（受動的）な制御則により、そのシステムの出力が安定となる。

【特許文献 1】特許第 3809614 号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0008】

しかしながら、前記公報に記載の制御システムを、例えばロボットアームを備えたパワーアシストロボット（ユーザ制御対象に対応）が、オペレータ（人間であり、保守的な制御則に対応）の操作力に応じて、人間の操作をアシストするパワーアシストシステムに適用した場合に、次のような不都合が生じる。

【0009】

つまり、パワーアシストロボットを用いて、ロボットアームによって把持している物体を、ゆっくりと下に降ろす動作を行うと仮定する。この場合、物体に作用する重力がロボ

10

20

30

40

50

ットアームに対して鉛直下向きに作用するため、これに対抗して人間の操作力（ロボットアームが物体に付与する力）は鉛直上向きとなる。その状態で、ロボットアームは下向きに移動することになる。このようにシステムの入出力の方向が互いに逆向きになるため、式（B）より、仮想パワー $P_v(t)$ の値はマイナスになる。従って、この状態が継続すれば、式（A）よりシステム内部の蓄積エネルギー E_v の値はマイナス側に大きくなり、式（A）が満たされなくなる。すなわち、パワーアシストシステムが不安定と判定されてしまうことになる。

【0010】

パワーアシストシステムが不安定であると判定されないように、把持している物体を下に降ろす動作を行うには、物体に鉛直下向きに力を加えて、重力加速度以上の加速度で移動させなければならない。しかしながらこうした動きは現実とはかけ離れている。

10

【0011】

本発明は、かかる点に鑑みてなされたものであり、その目的とするところは、システムに対して流入する仮想パワーを観測することによって当該システムの安定性を評価解析する制御システムに対して、その安定・不安定の判定を是正することにある。

【課題を解決するための手段】

【0012】

はじめに、「受動性」及び、本発明でもっとも重要な「弱受動性」と「強受動性」について定義する。

【0013】

20

$t=0$ を初期時刻、 t を現在時刻とし、あるシステムの入力ベクトル $u(t)$ と出力ベクトル $y(t)$ が同じ次元数であるとする（ともにスカラーであってもよい）。このとき、次式が成り立つならば、前記システムは受動性を満足する（あるいは、受動的である）という。ただし、下式において、 γ_0^2 はある有界な非負定数であり、一般にはシステムの初期時刻 $t=0$ における内部エネルギーを表す。

【0014】

【数4】

$$\int_0^t y^T(\tau) \cdot u(\tau) d\tau \geq -\gamma_0^2 \quad (\forall t \geq 0) \quad \dots (\text{ア})$$

30

【0015】

また、同様に $t, u(t), y(t)$ を定義したときに、ある正数 δ （ $\delta > 1$ ）に対して、次式が成り立つような非負数 a, γ_0^2 、及び正数 b_1 が存在するとき、前記システムは弱受動性を満足する（あるいは、弱受動的である）という。

【0016】

【数5】

$$a \int_0^t y^T(\tau) \cdot u(\tau) d\tau + b_1 \int_0^t u^T(\tau) \cdot u(\tau) d\tau - \int_0^t y^T(\tau) \cdot y(\tau) d\tau \geq -\gamma_0^2 \quad (\forall t \geq 0) \quad \dots (\text{イ})$$

かつ

40

$$b_1 + 1 < \delta \quad \dots (\text{ウ})$$

【0017】

さらに、ある正数 δ （ $\delta > 1$ ）に対して、次式が成り立つような非負数 a, γ_0^2 、 δ 、及び正数 b_2 が存在するとき、前記システムは強受動性を満足する（あるいは、強受動的である）という。

【0018】

【数 6】

$$a \int_0^t y^T(\tau) \bullet u(\tau) d\tau - b_2 \int_0^t u^T(\tau) \bullet u(\tau) d\tau + \int_0^t y^T(\tau) \bullet y(\tau) d\tau \geq -\gamma_0^2 \quad (\forall t \geq 0) \quad \dots (\text{エ})$$

かつ

$$\left[\int_0^t y^T(\tau) \bullet y(\tau) d\tau \right]^{1/2} \leq \xi \left[\int_0^t u^T(\tau) \bullet u(\tau) d\tau \right]^{1/2} + \eta \quad (\forall t \geq 0) \quad \dots (\text{オ})$$

かつ

$$\frac{b_2 + 1}{\xi^2} \geq \delta \quad \dots (\text{カ})$$

10

【0019】

本発明の一側面によると、制御システムは、ユーザ制御対象と、前記ユーザ制御対象を制御するユーザ制御則と、前記ユーザ制御対象からのフィードバック信号を受けて前記ユーザ制御対象に操作量を入力し得る保守的な制御則と、前記保守的な制御則から前記ユーザ制御対象へ仮想的に伝達される拡張仮想パワーを観測する拡張仮想パワーモニタと、を備え、前記拡張仮想パワーモニタは、式(1)及び式(2)に基づいて、前記ユーザ制御対象とユーザ制御則とを含むユーザ制御システムの出力の安定性を評価解析する。

【0020】

20

【数 7】

$$E_x(t) = \int_0^t P_x(\tau) d\tau \geq -E_{x0} \quad \dots (1)$$

【0021】

【数 8】

$$P_x(t) = a \left[y^T(t) \bullet u(t) \right] + b \left[u^T(t) \bullet u(t) \right] - \left[y^T(t) \bullet y(t) \right] \quad \dots (2)$$

【0022】

ここで、「ユーザ制御対象」とは、本発明のユーザが定める物理的なシステムである。共役パワー対を少なくとも一組の入出力として持つものであれば、任意のシステムをユーザ制御対象とすることができる。但し、ユーザ制御対象は必ずしも受動的及び弱受動的でなくてもよい。

30

【0023】

「共役パワー対」とは、あるシステムの入出力として受動性及び弱受動性・強受動性を定義し得る物理量の組である。共役パワー対の例としては、力と速度、トルクと角速度、或いは電圧と電流がある。本発明においては、システムが実際には必ずしも受動性及び弱受動的・強受動性を満足しなくとも、受動性及び弱受動性・強受動性を定義し得る物理量の組であれば共役パワー対と呼ぶこととする。

【0024】

40

「ユーザ制御則」とは、本発明のユーザがユーザ制御対象を制御するために任意に定める制御則である。ユーザ制御則とユーザ制御対象の間の入出力は、必ずしも共役パワー対でなくともよく、ユーザが任意の物理量を選択すればよい。

【0025】

「ユーザ制御システム」とは、保守的な制御則からユーザ制御対象への操作量を入力とし、ユーザ制御対象から保守的な制御則へのフィードバックを出力とするシステムである。ユーザ制御システムは、拡張仮想パワーモニタシステムによる観測対象となる。ユーザ制御システム内部には、任意の未知の外乱が入力され得る。

【0026】

「保守的な制御則」とは、本発明においては、弱受動性を満たす任意の制御対象に対

50

して安定性を保証し得る制御則、つまり 強受動性を満たす制御則である。弱受動性を満たす任意の制御対象に対して、強受動性を満たす制御則により制御系の安定性が保証されることは、受動定理およびスモールゲイン定理と同様に導くことができる。さらに、保守的な制御則はユーザ制御対象からの出力をフィードバックし、ユーザ制御対象に操作量を入力し得る（仮想接続）ものである。弱受動性及び強受動性に基づいて拡張仮想パワーリミッタシステムを設計した場合、保守的な制御則とユーザ制御対象の間の入出力は共役パワー対となるような物理量である。保守的な制御則は、ユーザ制御則とは別個に備えられるものである。

【0027】

尚、本発明で、「仮想的な（に）接続」とは、例えば拡張仮想パワーモニタシステムから見ると保守的な制御則からの操作量はユーザ制御システムに確かに接続されているように見えるのであるが、ユーザ制御システム内部では実は重みがかかっており、しかもそれは普段はゼロである（接続されていない）ことをとらえて、「仮想的」な接続であることをいっている。

10

【0028】

また、不安定な状況が生じ、かつユーザ制御則の制御機能を保守的な制御則が代替する必要が生じた場合のみ、この操作量は実際にユーザ制御対象に接続される。しかし、たとえ接続されても、重みが1にならない限り、拡張仮想パワーモニタで観測されるパワーと実際にユーザ制御対象に流入するパワーの量は異なる。そう言う意味でも、「仮想」という表現をしている。

20

【0029】

従って、上記「仮想接続」とは、必ずしも実際に操作量が入力されるかは不明であるが、少なくとも、実際に入力され得る状態に置かれていることを言っている。

【0030】

「仮想パワー」とは、保守的な制御則からユーザ制御対象へ仮想的に伝達されるパワー（単位時間当たりのエネルギー）をいう。

【0031】

「拡張仮想パワー」とは、保守的な制御則からユーザ制御対象へ仮想的に伝達されるパワー（単位時間当たりのエネルギー）のa倍と保守的な制御則からユーザ制御対象への操作量の大きさを二乗したb倍およびユーザ制御対象の出力の大きさを二乗した-1倍の和をいう。

30

【0032】

「拡張仮想パワーモニタ」とは、拡張仮想パワーモニタシステムとユーザ制御システムの間の入出力より、保守的な制御則からユーザ制御対象へ伝達されるパワーと保守的な制御則からユーザ制御対象への操作量の大きさおよびユーザ制御対象の出力の大きさを観測し、ユーザ制御システムの安定性を評価解析する手段である。

【0033】

前記の構成における式(2)と、従来の構成における式(B)とを比較すると、式(2)において拡張仮想パワーモニタの観測量 $P_x(t)$ は、仮想パワー $P_v(t)$ に対し、仮想パワーのa倍に、操作量の大きさを二乗したb倍およびユーザ制御対象の出力の大きさを二乗した-1倍を加えていることになる。従って、式(1)、式(2)及び式(B)より、この構成における評価関数は、次式(1')のように表すことができる。

40

【0034】

【数9】

$$\begin{aligned}
 E_x(t) &= a \int_0^t P_v(\tau) d\tau + b \int_0^t u^T(\tau) \bullet u(\tau) d\tau - \int_0^t y^T(\tau) \bullet y(\tau) d\tau \quad \dots (1') \\
 &= aE_v(t) + b \int_0^t \|u(t)\|^2 d\tau - \int_0^t \|y(t)\|^2 d\tau \geq -E_{x0}
 \end{aligned}$$

【0035】

50

このことは、 $a = 0$ のとき、単位時間あたり、保守的な制御則の操作量の大きさを二乗した b/a 倍とユーザ制御対象の出力を二乗した $-1/a$ 倍のエネルギーが、ユーザ制御対象から保守的な制御則へと流出することを許容していることと等価である。

【0036】

つまり、式(A)及び式(B)で示される従来の評価関数においては、ユーザ制御対象から保守的な制御則へエネルギーが流出する状態(仮想パワー $P_v(t) < 0$ となる状態)を許容していないといえることができる。なぜなら、 $P_v(t) < 0$ となる状態が継続すれば、式(A)が成立しなくなり安定と判定されなくなるためである。

【0037】

これに対し本構成では、前述したように単位時間あたり $b/a[u^T(t) \cdot u(t)] - 1/a[y^T(t) \cdot y(t)]$ だけのエネルギーがユーザ制御対象から保守的な制御則へと流出することを許容している。つまり、従来の安定性評価の観測量である仮想パワーが、例えば $P_v(t) < 0$ であっても、その絶対値 $ABS(P_v(t)) = b/a[u^T(t) \cdot u(t)] - 1/a[y^T(t) \cdot y(t)]$ であれば、その状態が継続しても、式(1)(及び式(1'))は成立し続けることになり、ユーザ制御システムは安定であると判定される。ここで、 $b[u^T(t) \cdot u(t)] - [y^T(t) \cdot y(t)]$ は、ユーザ制御システムの入出力ゲインを反映する値であり、ユーザ制御対象の出力の大きさに対して、保守的な制御則からの操作量が大きいと、この値も大きくなる。

10

【0038】

このことを、前述したように、パワーアシストシステムにおいて、ロボットアームによって把持した物体を下に降ろす動作を行う場合に当てはめて検討する。前述したように、この状態においては、仮想パワー $P_v(t)$ はマイナスの値となるが、その絶対値が $ABS(P_v(t)) = b/a[u^T(t) \cdot u(t)] - 1/a[y^T(t) \cdot y(t)]$ であれば、式(1')は成立し続けパワーアシストシステムの安定性が保証される。これは把持した物体の荷重に押されてアームが動いても、動く速度に比べて十分な力で人間が踏ん張っていれば、不安定と判定しないことを意味する。つまり、従来の観測量であるユーザ制御対象から保守的な制御則へと流出するパワーに、ユーザ制御システムの入出力ゲインを新たな評価指標として加えたことになる。また、 $a=0$ のときは反対に、新たな評価指標であるユーザ制御システムの入出力ゲインのみを観測することを意味する。

20

【0039】

以上により、現実合うように安定・不安定の判定を是正することができる。

30

【0040】

また、制御システムが、前記仮想パワーモニタによる仮想パワーの観測に基づいて、前記ユーザ制御システムの出力の安定性を保証する仮想パワーリミッタをさらに備えている場合、例えば、次のような不都合が生じ得る。

【0041】

ここで、「仮想パワーリミッタ」とは、仮想パワーモニタにおける仮想パワーの観測に基づいて何らかの手段でユーザ制御システムを調整することにより、ユーザ制御システムからの仮想パワーの流出を制限し、ユーザ制御システムからの出力の安定性を保証するシステム構成要素をいう。仮想パワーリミッタは、制御システムの少なくともいずれか一部分に何らかの制限を加えることにより、制御性能を出来るだけ高く保ちつつユーザ制御対象の出力の安定性を保証することに寄与する「ソフトウェアリミッタ」に相当する。

40

【0042】

すなわち、前述のパワーアシストシステムにおいて、そのパワーアシストシステムが不安定と判定されており、拡張仮想パワーリミッタにより、システムの動作が制限されているとする。

【0043】

把持した物体を降ろす動作の中で、一度不安定を検出してリミッタがはたらいた状態からリミッタを解除するには、従来の構成では、下向きに操作入力を加えて動かす以外になかった。これは、物体が重力によって落ちるのを助長しながら、リミッタを解除していくので、危険な状態となる。一方、本発明の構成では、リミッタがはたらいた状態で、降ろ

50

す速度を小さくすると安定性評価が安定へと変わりリミッタが解除される。これは非常に重要な意味があり、この機能によって把持した物体の荷重を上向きに支えた状態のまま、ゆっくり下へ降ろすことが可能となる。

【0044】

前述したように、この制御システムにおいて、前記ユーザ制御対象は、オペレータによって制御され、前記ユーザ制御対象は、前記ユーザ制御対象からのフィードバック信号を受けて前記オペレータから前記ユーザ制御対象への操作量の入力を補助するパワーアシスト制御であり、前記拡張仮想パワーモニタは、前記オペレータから前記ユーザ制御対象へ伝達される拡張仮想パワーを観測することによって、前記ユーザ制御システムとしてのパワーアシストシステムからの出力の安定性を評価解析する、とすることが特に有効である。

10

【0045】

また、このようなシステムに適用する場合、オペレータが保守的な制御則に対応するが、拡張仮想パワーリミッタシステムの入出力安定性を保証するためには、オペレータが強受動性を満たさなければならない。この強受動性の条件は、言い換えると、オペレータが操作意思からの位相遅れが少なく、十分な大きさの操作力を加えることができることを意味している。人の動特性は未知であるが、上手くロボットを操作できることが、強受動性を満たすことを意味するので、オペレータが強受動性を満たすことは、妥当な仮定である。反対に、オペレータが強受動性を満たさない場合、入出力安定性は保証されないが、少なくとも、オペレータへ流入してくるエネルギーは、 $\int_0^t b[u^T(\cdot) \cdot u(\cdot)] dt$ 以上にはならない。つまりオペレータ自身が発生させたエネルギー以外のエネルギーは、オペレータへは流入しないことが保証される。

20

【発明の効果】

【0046】

以上説明したように、本発明によると、対象システムに対して流入する仮想パワーを観測することによってその対象システムの安定性を評価解析する制御システムに対して、観測する仮想パワーを拡張仮想パワーとすることで、その安定・不安定の判定を是正することができる。

【0047】

また、拡張仮想パワーの観測に基づいて対象システムの出力の安定性を保証するリミッタを備えたシステムにおいて、リミッタの解除を適切にすることができる。

30

【発明を実施するための最良の形態】

【0048】

以下、本発明の実施形態を図面に基づいて説明する。尚、以下の好ましい実施形態の説明は、本質的に例示に過ぎず、本発明、その適用物或いはその用途を制限することを意図するものではない。

【0049】

図1は、本発明の実施形態に係る制御システムのブロック図を示している。この制御システムは、ロボットを用いて人間のパワーアシストを行うパワーアシストシステム2として構成されている。つまり、詳細な図示は省略するが、このパワーアシストシステム2は、ロボットアームを備えたパワーアシストロボット(ユーザ制御対象に対応)3を、人間であるオペレータHが直接操作をすると共に、その操作力に応じてパワーアシストロボット3がオペレータHの操作をアシストするシステムとなっている。尚、本実施形態では、オペレータHの操作力 u_h がパワーアシストロボット3に直接入力され、パワーアシストロボット3の出力 y がオペレータHに直接入力されるような、ロボットアーム(パワーアシストロボット3)とオペレータHとを直接的に接続した構成を前提としている。しかしながら、パワーアシストシステム2の構成は、これに限るものではない。例えばロボットアームとオペレータHとを、直接的に接続すると共に、間接的に(具体的には油圧機構等を介して機械的に又は電氣的に)接続して構成してもよい。また、ロボットアームとオペレータHとを、直接的に接続しないで、間接的にのみ接続して構成してもよい。

40

50

【 0 0 5 0 】

このパワーアシストシステム 2 は、ユーザ制御則に対応するパワーアシスト制御則 5 によってパワーアシストロボット 3 が制御される既存のパワーアシストシステム（ユーザ制御システム）2 に対し、パワーアシストロボット 3 に操作量（操作力） u_h を直接入力するオペレータ（人間）H と、パワーアシストシステム 2 の入出力からそのパワーアシストシステム 2 に流入する拡張仮想パワーを観測する拡張仮想パワーモニタ 1 0 とからなる拡張仮想パワーモニタシステム 1 1 を備えて構成される。オペレータ H は、このシステムにおいては保守的な制御則に対応する。

【 0 0 5 1 】

オペレータ H からの出力、具体的にはオペレータ H によるロボットアームの操作力は、例えば力センサによって検出され（測定値 u_h ）、その操作力は、パワーアシストロボット 3 に直接入力されると共に、パワーアシスト制御則 5 に入力される。また、オペレータ H の操作力は、後述するように、拡張仮想パワーモニタ 1 0 にも入力される。

【 0 0 5 2 】

パワーアシスト制御則 5 へは、前記オペレータ H からの操作力 u_h の他、パワーアシストロボット 3 からの任意のフィードバックが入力される。パワーアシスト制御則 5 は、それらの値と、制御則 K_{usr} とに基づいて操作量 u_{usr} を出力する。操作量 u_{usr} は、重み W_{usr} （ブロック 1 2 a）によって調整された後に、パワーアシストロボット 3 に入力される。

【 0 0 5 3 】

パワーアシストロボット 3 には、 $u_v(t) = -K_v y(t)$ からなる負の出力フィードバックが接続されている。ここで、 $y(t)$ は、パワーアシストシステム 2 の出力であり、一例としてロボットアームの関節速度を挙げることができるが、これに限るものではない。また、 K_v （ブロック 1 2 c）は、負の出力フィードバックのゲインであって、正の対角行列である。負の出力フィードバックは、重み W_v （ブロック 1 2 b）によって調整された後に、パワーアシストロボット 3 に入力される。

【 0 0 5 4 】

パワーアシストロボット 3 にはまた、外乱等の未知の入力 u_{dis} が入力される。従って、パワーアシストロボット 3 に加わる駆動力 u は式（3）のようになる。

【 0 0 5 5 】

【 数 1 0 】

$$u = u_h + W_{usr} K_{usr} u_h + u_{dis} + W_v u_v \quad \dots (3)$$

【 0 0 5 6 】

パワーアシストロボット 3 からの出力 y は、拡張仮想パワーモニタ 1 0 及びオペレータ H にそれぞれ入力される。

【 0 0 5 7 】

拡張仮想パワーモニタ 1 0 は、このシステム 2 においては、オペレータ H からパワーアシストロボット 3 へ仮想的に伝達されるパワー及び保守的な制御則からの操作量の大きさおよびユーザ制御対象出力の大きさを観測することによって、パワーアシストシステム 2 の安定性を評価するものである。この拡張仮想パワーモニタ 1 0 による安定性の評価についての詳細は後述する。

【 0 0 5 8 】

パワーアシストシステム 2 はさらに、拡張仮想パワーリミッタ 1 2 を含んでおり、拡張仮想パワーモニタシステム 1 1 を拡張仮想パワーリミッタ 1 2 とによって拡張仮想パワーリミッタシステム 1 3 が構成される。

【 0 0 5 9 】

拡張仮想パワーリミッタ 1 2 は、拡張仮想パワーモニタ 1 0 の観測量に基づいて、パワーアシストシステム 2 を調整することで、パワーアシストシステム 2 の安定性を保証するものである。拡張仮想パワーリミッタ 1 2 は、各重み W_{usr} 、 W_v （ブロック 1 2 a、1

10

20

30

40

50

2b)と、重みの調整則であるパワーアシストシステム調整則12dと、から構成されている。

【0060】

ここで図2に示すような従来の仮想パワーモニタ110は、前記の特許文献1に記載されているように、受動性の概念に基づき、被モニタシステム(ここではパワーアシストシステム102)の受動性が満足されているか否かによって、当該システムの安定性を評価する。

【0061】

前記仮想パワーモニタ110は、基本的には前記式(B)に基づいて(但し、 $u(t)=u_h(t)$)、オペレータ10Hからパワーアシストロボット103へ仮想的に伝達されるパワー(仮想パワー)を算出し、式(A)に基づいてパワーアシストシステム102の安定・不安定を評価する。つまり、式(A)が成立するときには、システム102は受動性が満足されることになるため、システム102の出力 y の安定性が保証されることになる。

10

【0062】

また、前記式(3)及び式(B)より、式(A)は次式(A')で表される。

【0063】

【数11】

$$\int_0^t y^T W_{usr} K_{usr} u_h d\tau + \int_0^t y^T u_{dis} d\tau \dots (A')$$

$$\leq E_{V0} + \int_0^t y^T u_h d\tau + \int_0^t y^T W_V K_V y d\tau$$

20

【0064】

式(A')より、例えば仮想パワーモニタ110による仮想パワー P_V の観測に基づいて、式(A')が満たされなくなる状況が検知されたときには、その不安定な状況が強いほど W_{usr} を0に近づけかつ、 W_V を1に近づけることによって、式(A')が成立する方向(安定方向)にシステムを調整可能なことになる。つまり、仮想パワーリミッタシステム113は、パワーアシストシステム102から人間(オペレータ10H)に流出するパワーを、仮想パワーリミッタ112によって制限することによって、人間に対する安全性を確保する。

30

【0065】

ところで、式(A)より、パワーアシストシステム102が不安定と判定され、それによってリミッタがかかった状態から、システム102が安定であると判定されるように回復させるには、オペレータ10Hが安定状態の操作を継続して行う、つまり、 $P_V(t) > 0$ となる状態を、式(A)が成立するまで継続させなければならない。このため、例えばパワーアシストロボット103が外力で動かされている状態を操作力で止める場合を考えると、操作力によって発生するパワーアシストロボット103の力が外力に負けている間、仮想パワー $P_V(t) < 0$ であり不安定と判定されてリミッタが働くようになる。リミッタが働いてからパワーアシストロボット103の動きを止めた場合、 $P_V(t) = 0$ となることから、パワーアシストロボット103の動きが止まっているにもかかわらず、不安定の判定がそのまま継続することになり、リミッタは解除されない。止まっているのに不安定と判定され続けることは、現実の感覚とは大きくずれている上に、リミッタが働いているとき W_{usr} が小さくなっていることから分かるように、前述の状態では、オペレータ10Hは外力の大きさを正確に感じるができない(問題点1)。

40

【0066】

また、ロボットアームによって把持した物体を、下に降ろす動作を行う場合を考える。この場合、システム102の入出力は互いに逆向きであるため、仮想パワー $P_V(t)$ はマイナスの値になる。このため、システム102の安定性の評価は不安定方向に移行することで、物体を下に降ろしている途中でリミッタがかかることになる(問題点2)。

【0067】

50

また例えば、外力によってロボットアームが振り回されていても、オペレータが操作入力が加わらないように操作していると、 $u_h(t)=0$ 、 $P_v(t)=0$ となり、不安定とは検出されない。これは、いくらロボット自体が暴走していても、人にさえエネルギーが流入しなければ、不安定を検出しないことを意味する（問題点3）。

【0068】

そこで、本実施形態に係るパワーアシストシステム2においては、前記拡張仮想パワーモニタ10において観測する拡張仮想パワー P_x 及び評価関数 E_x を、式(4)及び式(5)によって定義する。

【0069】

【数12】

$$E_x(t) = \int_0^t P_x(\tau) d\tau \geq -E_{x0} \quad \dots (4)$$

$$P_x(t) = a[y^T(t) \cdot u_h(t)] + b[u_h^T(t) \cdot u_h(t)] - [y^T(t) \cdot y(t)] \quad \dots (5)$$

【0070】

つまり、拡張仮想パワーモニタ10において観測する観測量 P_x は、その仮想パワー P_v のa倍に、オペレータ操作力の大きさを二乗したb倍とパワーアシストシステムの速度の大きさを二乗した-1倍を加えた量とする。bは、操作力の大きさに対して、どこまでパワーアシストシステムの速度が大きくなってもしよいかを表す比率であり、正の定数bはユーザによって適宜設定すればよい。また、aは従来の仮想パワーと新しく導入した指標のどちらの観測量をどれだけ考慮するかの割合を表す非負の定数で、ユーザによって適宜設定すればよい。

【0071】

すなわち、式(A)及び式(B)によって表される従来の構成においては、システム側から人間側にエネルギーが流入する状態は、評価関数がマイナス方向に蓄積される不安定な方向に移行する状態であるから、そのエネルギーの流入を許容しないのに対し、式(4)及び式(5)に表される本構成においては、ユーザ制御システムの入出力ゲインが小さいときに、システム側から人間側にエネルギーが流入する状態を許容している。

【0072】

こうすることによって、前記の問題点2にあるように、仮想パワー P_v の値はマイナスになったとしても、ユーザ制御システムの入出力ゲインが小さい、つまりパワーアシストシステムの速度の大きさに対して大きな操作力を加えている場合に、観測値 P_x はマイナスにならない。このため、システム2の安定性の評価は不安定方向に移行しない。従って、ロボットアームによって把持した物体をゆっくりと下に降ろすことができる（問題点2の解消）。

【0073】

また、システム2が不安定と判定されてリミッタがかかった状態で、パワーアシストアームの動きを止めたときには、 $y=0$ により $P_x(t)=b[u_h^T(t) \cdot u_h(t)]$ となる。bはユーザによって設定される正の定数であるので、操作入力の大きさが0でなければ $P_x(t)>0$ となってシステムの安定性の評価は安定方向に移行する。従って、外力に反発して操作入力を加えてパワーアシストアームを止めている場合、システムは安定と判定されリミッタが解除されるため、問題点1が解消される。

【0074】

また、オペレータHの操作力 $u_h(t)=0$ のとき、 $y=0$ であったとしても、 $P_x(t)=-[y^T(t) \cdot y(t)]$ となるので、安定性の評価は不安定方向へ移行して、リミッタがはたらくことになる。このため、ロボット自体の暴走を検出できるようになり、オペレータの安全性とロボット自体の安全性が確保できる（問題点3の解消）。

【0075】

10

20

30

40

50

本発明に係る制御システムは、前記のようなパワーアシストシステムに適用されることに限定されるものではない。本発明に係る制御システムは、例えば特許文献1において示されているように、各種の機械制御システム、電気・電子制御システム、及び、化学制御システムに対して、広く適用可能である。

【産業上の利用可能性】

【0076】

以上説明したように、本発明は、システムに対して流入する仮想パワーを観測することによって当該システムの安定性を評価解析するシステムに対して、拡張仮想パワーを観測することで、安定性判定を是正することができるため、各種の機械制御システム、電気・電子制御システム、及び、化学制御システム等に有用である。

10

【図面の簡単な説明】

【0077】

【図1】実施形態に係るパワーアシストシステムを示すブロック図である。

【図2】従来の構成でのパワーアシストシステムを示すブロック図である。

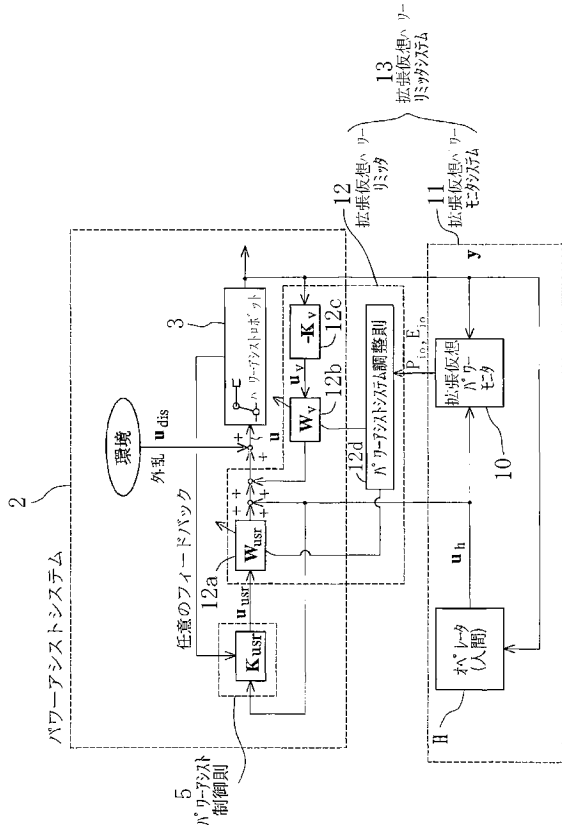
【符号の説明】

【0078】

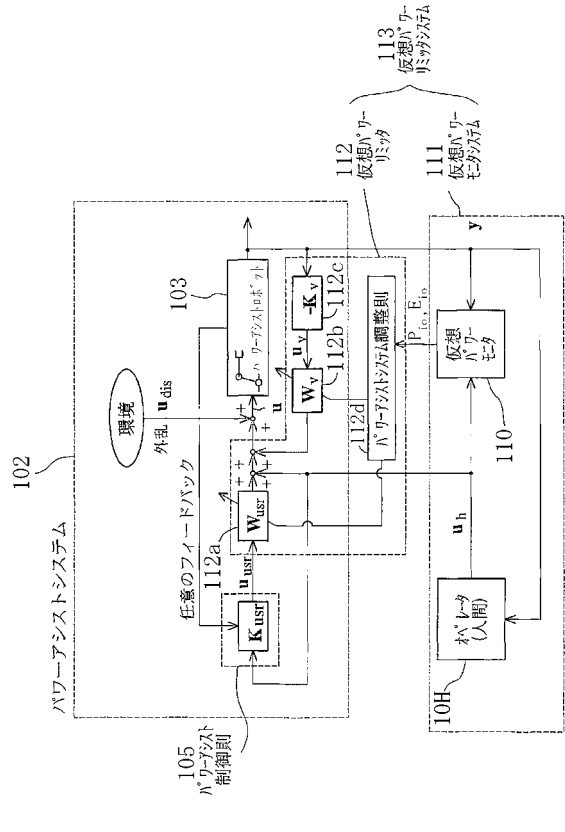
- 10 拡張仮想パワーモニタ
- 12 拡張仮想パワーリミッタ
- 2 パワーアシストシステム（ユーザ制御システム）
- 3 パワーアシストロボット（ユーザ制御対象）
- 5 パワーアシスト制御則（ユーザ制御則）
- H オペレータ（保守的な制御則）
- 110 仮想パワーモニタ
- 112 仮想パワーリミッタ
- 102 パワーアシストシステム
- 103 パワーアシストロボット
- 105 パワーアシスト制御則
- 10H オペレータ

20

【図 1】



【図 2】



フロントページの続き

(74)代理人 100117581

弁理士 二宮 克也

(74)代理人 100117710

弁理士 原田 智雄

(74)代理人 100121728

弁理士 井関 勝守

(74)代理人 100124671

弁理士 関 啓

(74)代理人 100131060

弁理士 杉浦 靖也

(72)発明者 國武 隆

兵庫県宝塚市新明和町 1 番 1 号 新明和工業株式会社開発センタ内

(72)発明者 加藤 淳志

兵庫県宝塚市新明和町 1 番 1 号 新明和工業株式会社開発センタ内

(72)発明者 亀井 均

兵庫県宝塚市新明和町 1 番 1 号 新明和工業株式会社開発センタ内

(72)発明者 金岡 克弥

滋賀県草津市野路東 1 - 1 - 1 立命館大学 びわこ・くさつキャンパス 理工学部内

Fターム(参考) 5H004 GA08 GB16 HA07 HA10 HB08 JA03 KA52 KC03 KC08