

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5488095号  
(P5488095)

(45) 発行日 平成26年5月14日(2014.5.14)

(24) 登録日 平成26年3月7日(2014.3.7)

(51) Int. Cl.		F 1	
<b>B 6 2 K</b> 17/00	(2006.01)	B 6 2 K	17/00
<b>G 0 5 D</b> 1/08	(2006.01)	G 0 5 D	1/08 Z
<b>B 6 2 K</b> 3/00	(2006.01)	B 6 2 K	3/00
<b>B 6 2 D</b> 63/02	(2006.01)	B 6 2 D	63/02

請求項の数 20 (全 21 頁)

(21) 出願番号	特願2010-65996 (P2010-65996)	(73) 特許権者	000003207 トヨタ自動車株式会社
(22) 出願日	平成22年3月23日 (2010.3.23)		愛知県豊田市トヨタ町1番地
(65) 公開番号	特開2011-195079 (P2011-195079A)	(74) 代理人	100103894 弁理士 冢入 健
(43) 公開日	平成23年10月6日 (2011.10.6)	(72) 発明者	安藤 玄 愛知県豊田市トヨタ町1番地 トヨタ自動車株式会社内
審査請求日	平成24年12月17日 (2012.12.17)	審査官	谷治 和文

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 倒立型移動体及びその制御方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

少なくとも1つの車輪と、当該車輪に回転可能に連結された負荷体とを備え、前記車輪を駆動することで前記負荷体の倒立制御を行う倒立型移動体であって、

前記負荷体の傾斜角度である負荷角度を検出する負荷角度検出器と、

前記負荷角度検出器により検出された負荷角度に基づいて、前記車輪を駆動するためのトルク指令を生成し、前記倒立制御を行う制御器と、

前記倒立型移動体の数式モデルに基づいて導出される推定器を用いて、前記負荷角度検出器により検出された負荷角度と、前記制御器により生成されたトルク指令と、に基づいて、前記負荷角度の推定値を算出し、当該算出した推定値と前記負荷角度検出器により検出された負荷角度との誤差である負荷角度推定誤差を算出する負荷角度推定誤差演算部と、

前記負荷角度推定誤差演算部により算出された負荷角度推定誤差が発散するか否かを判別する状態判別器と、

前記状態判別器により前記負荷角度推定誤差が発散すると判別された場合には、前記制御器による制御を切り替えて所定の安全確保制御を実施させる制御切替器と、を備える倒立型移動体。

【請求項2】

前記負荷角度推定誤差演算部は、

前記負荷角度検出器により検出された負荷角度と、前記制御器により生成されたトルク

指令と、に基づいて、前記推定器のゲインを算出する推定器ゲイン演算器と、

前記推定器を用いて、前記推定器ゲイン演算器により算出されたゲインと、前記負荷角度検出器により検出された負荷角度と、前記制御器により生成されたトルク指令と、に基づいて、前記負荷角度推定誤差を算出する負荷角度推定誤差演算器と、を備える

ことを特徴とする請求項 1 に記載の倒立型移動体。

【請求項 3】

前記車輪の回転角度を検出する車輪角度検出器を更に備え、

前記状態判別器は、

前記負荷角度推定誤差演算部により算出された負荷角度推定誤差が発散するか否かを判別すると共に、当該負荷角度推定誤差と、前記負荷角度検出器により検出された負荷角度と、前記車輪角度検出器により算出された車輪角度と、に基づいて、前記倒立型移動体について予め定めた複数の状態のうちのいずれの状態であるかを判別し、

前記制御切替器は、

前記状態判別器により前記負荷角度推定誤差が発散すると判別された場合には、前記制御器による制御を切り替えて、前記判別された状態に応じた所定の安全確保制御を実施させ、

前記状態判別器により前記負荷角度推定誤差が発散しないと判別された場合には、前記倒立制御の開始、継続、再開のいずれか 1 の制御を前記制御器に実施させる

ことを特徴とする請求項 1 に記載の倒立型移動体。

【請求項 4】

前記状態判別器は、

前記負荷角度推定誤差が発散すると判別した場合に、当該負荷角度推定誤差に基づいて、前記倒立型移動体の移動中に搭乗物体が飛び降りた後の状態であるか否かを判別する

ことを特徴とする請求項 3 に記載の倒立型移動体。

【請求項 5】

前記制御切替器は、

前記状態判別器により前記負荷角度推定誤差が発散すると判別され、かつ、前記倒立型移動体の移動中に搭乗物体が飛び降りた後の状態であると判別された場合に、前記制御器による制御を、前記搭乗物体の飛び降り後、所定のペースで徐々に減速し停止する制御に切り替えて実施させる

ことを特徴とする請求項 4 に記載の倒立型移動体。

【請求項 6】

前記状態判別器は、

前記負荷角度推定誤差が発散すると判別した場合に、前記負荷角度に基づいて、搭乗物体の搭乗前または搭乗後に外部物体により前記倒立型移動体が支えられている状態であるか否かを判別する

ことを特徴とする請求項 3 に記載の倒立型移動体。

【請求項 7】

前記制御切替器は、

前記状態判別器により前記負荷角度推定誤差が発散すると判別され、かつ、前記搭乗物体の搭乗前または搭乗後に外部物体により前記倒立型移動体が支えられている状態であると判別された場合に、前記制御器による制御を、前記トルク指令を 0 とする制御に切り替えて実施させる

ことを特徴とする請求項 6 に記載の倒立型移動体。

【請求項 8】

前記状態判別器は、

前記負荷角度推定誤差が発散すると判別した場合に、前記負荷角度推定誤差に基づいて、移動中に前記倒立型移動体が物体と衝突した瞬間から後の状態であるか否かを判別する

ことを特徴とする請求項 3 に記載の倒立型移動体。

【請求項 9】

10

20

30

40

50

前記制御切替器は、

前記状態判別器により前記負荷角度推定誤差が発散すると判別され、かつ、移動中に前記倒立型移動体が物体と衝突した瞬間から後の状態であると判別された場合に、前記制御器による制御を、前記車輪を衝突時と反対方向に所定の短い時間回転させ、減速停止する制御に切り替えて実施させる

ことを特徴とする請求項 8 に記載の倒立型移動体。

【請求項 10】

前記状態判別器は、

前記負荷角度推定誤差が発散すると判別した場合に、前記車輪角度に基づいて、前記車輪が溝または段差に挟まれて、少なくとも 1 方向に回転できなくなった状態であるか否かを判別する

10

ことを特徴とする請求項 3 に記載の倒立型移動体。

【請求項 11】

前記制御切替器は、

前記状態判別器により前記負荷角度推定誤差が発散すると判別され、かつ、前記車輪が溝または段差に挟まれて、少なくとも 1 方向に回転できなくなった状態であると判別された場合に、前記制御器による制御を、前記トルク指令を 0 とする制御に切り替えて実施させる

ことを特徴とする請求項 10 に記載の倒立型移動体。

【請求項 12】

20

前記状態判別器は、

前記負荷角度推定誤差が発散すると判別した場合に、前記車輪角度と、前記負荷角度推定誤差と、に基づいて、路面との摩擦が小さく前記車輪が空転している状態であるか否かを判別する

ことを特徴とする請求項 3 に記載の倒立型移動体。

【請求項 13】

前記制御切替器は、

前記状態判別器により前記負荷角度推定誤差が発散すると判別され、かつ、路面との摩擦が小さく前記車輪が空転している状態であると判別された場合に、前記制御器による制御を、前記負荷角度検出器により検出される負荷角度が  $\theta/2$  [rad] に近づくまでの間、比較的低いモータトルクで、前記倒立型移動体の進行方向に前記車輪を回転させた後、当該検出される負荷角度が  $\theta/2$  [rad] に近付いた以降は、前記モータトルクを連続的に 0 に変化させる制御に切り替えて実施させる

30

ことを特徴とする請求項 12 に記載の倒立型移動体。

【請求項 14】

前記状態判別器は、

前記負荷角度推定誤差が発散すると判別した場合に、前記負荷角度と、前記負荷角度推定誤差と、に基づいて、搭乗物体の搭乗時に、当該搭乗物体の一部が地面に残っている状態であるか否かを判別する

ことを特徴とする請求項 3 に記載の倒立型移動体。

40

【請求項 15】

前記制御切替器は、

前記状態判別器により前記負荷角度推定誤差が発散すると判別され、かつ、搭乗物体の搭乗時に、当該搭乗物体の一部が地面に残っている状態であると判別された場合に、前記制御器による制御を、当該搭乗物体が完全に前記倒立型移動体に搭乗するまでの間、前記制御器が用いる制御ゲインを比較的低い値に設定する制御に切替えて実施させる

ことを特徴とする請求項 14 に記載の倒立型移動体。

【請求項 16】

前記状態判別器は、

前記負荷角度推定誤差が発散しないと判別した場合に、前記負荷角度に基づいて、搭乗

50

物体が搭乗したまま移動している状態であるか否かを判別することを特徴とする請求項 3 に記載の倒立型移動体。

【請求項 17】

前記制御切替器は、

前記状態判別器により前記負荷角度推定誤差が発散しないと判別され、かつ、搭乗物体が搭乗したまま移動している状態であると判別された場合に、前記制御器による制御を、前記倒立型移動体を倒立走行させる制御に切り替えて実施させる

ことを特徴とする請求項 16 に記載の倒立型移動体。

【請求項 18】

前記状態判別器は、

前記負荷角度推定誤差が発散しないと判別した場合に、前記負荷角度に基づいて、搭乗物体が搭乗せずに前記倒立型移動体がある場で倒立している状態であるか否かを判別することを特徴とする請求項 3 に記載の倒立型移動体。

10

【請求項 19】

前記制御切替器は、

前記状態判別器により前記負荷角度推定誤差が発散しないと判別され、かつ、搭乗物体が搭乗せずに前記倒立型移動体がある場で倒立している状態であると判別された場合に、前記制御器による制御を、前記倒立型移動体をその場で倒立させる制御に切り替えて実施させる

ことを特徴とする請求項 18 に記載の倒立型移動体。

20

【請求項 20】

少なくとも 1 つの車輪と、当該車輪に回転可能に連結された負荷体とを備え、前記車輪を駆動することで前記負荷体の倒立制御を行う倒立型移動体の制御方法であって、

前記負荷体の傾斜角度である負荷角度を検出するステップと、

検出された負荷角度に基づいて、前記車輪を駆動するためのトルク指令を生成し、前記倒立制御を行うステップと、

前記倒立型移動体の数式モデルに基づいて導出される推定器を用いて、検出された負荷角度と、生成された前記トルク指令と、に基づいて、前記負荷角度の推定値を算出するステップと、

算出された前記負荷角度の推定値と検出された前記負荷角度との誤差である負荷角度推定誤差を算出するステップと、

30

算出された前記負荷角度推定誤差が発散するか否かを判別するステップと、

前記判別の結果、前記負荷角度推定誤差が発散する場合に、前記倒立制御を切り替えて所定の安全確保制御を実施させるステップと、を備える

倒立型移動体の制御方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、倒立型移動体及びその制御方法に関する。

【背景技術】

40

【0002】

倒立制御を行って移動する移動体が開発されている。このような倒立型移動体を具現化するには、転倒や暴走などを防止し、安全に操作できるようにすることが重要となる。ここで、「倒立型移動体」とは、車輪などの移動手段と、人や荷物などの負荷体を載せるステップと、を備えた移動体であって、車輪を駆動動作させることにより負荷体が倒立した状態を保ちながら移動する移動体を意味する。

【0003】

図 5 に、「倒立型移動体」の例を示す。図 5 に示す例は、ホイール 501 と、プラットフォーム 502 と、ハンドル 503 と、グリップ 504 とを備えて構成され、ユーザ 505 を搬送する 2 輪倒立ロボットであり、倒立型移動体の典型である。

50

## 【 0 0 0 4 】

特許文献 1 乃至 4 には、倒立制御を行って移動する移動体が開示されている。例えば、特許文献 1 には、倒立型移動体に設けられた近接検出器を用いて搭乗者の存在の有無を検出し、搭乗者の存在が確認できなかった場合に、安全スイッチを用いて、車輪を有する地面接地モジュールの操作を阻止する倒立型移動体が開示されている（第 4 1 頁、第 1 図など）。

## 【 先行技術文献 】

## 【 特許文献 】

## 【 0 0 0 5 】

【 特許文献 1 】 特表 2 0 0 3 - 5 0 2 0 0 2 号公報

10

【 特許文献 2 】 特開 2 0 0 9 - 2 8 0 1 3 2 号公報

【 特許文献 3 】 特開 2 0 0 9 - 1 4 2 1 2 7 号公報

【 特許文献 4 】 特開 2 0 0 9 - 1 0 1 8 9 9 号公報

## 【 発明の概要 】

## 【 発明が解決しようとする課題 】

## 【 0 0 0 6 】

例えば、倒立型移動体の搭乗者が存在しない場合において、安全に操作可能とすることを目的として、倒立型移動体の操作を安全スイッチにより阻止する技術は、従来から知られていた（例えば、特許文献 1）。

しかしながら、倒立型移動体の危険な挙動（転倒、暴走など）は、搭乗者の有無のみに依存するわけではなく、他の複数の要因にも起因して引き起こされる。倒立型移動体の危険な状態としては、例えば、以下の状態が考えられる。

20

（ 1 ） 走行中に搭乗者が倒立型移動体から飛び降りた後の状態、

（ 2 ） 搭乗者の搭乗前または搭乗後に、搭乗者が手で倒立型移動体を支えている状態、

（ 3 ） 走行中に倒立型移動体が物体と衝突した瞬間から後の状態、

（ 4 ） 倒立型移動体の車輪が溝または段差に挟まれて、少なくとも 1 車輪が、少なくとも 1 方向に回転できなくなった状態、

（ 5 ） 路面との摩擦が小さく、車輪が空転している状態、

（ 6 ） 搭乗者の搭乗時に、その片足が地面に残っている状態、など。

従って、倒立型移動体を安全に操作するためには、このような危険な状態であるか否かを判別可能として、危険な状態であると判別される場合には、転倒や暴走などを防止するように安全に制御することが強く求められている。

30

## 【 0 0 0 7 】

従って、本発明は、上述した課題を解決して、倒立制御を実施すると危険な状態であるかを判別して、倒立型移動体を安全に制御させることが可能な倒立型移動体及びその制御方法を提供することを目的とする。

## 【 課題を解決するための手段 】

## 【 0 0 0 8 】

本発明に係る倒立型移動体は、少なくとも 1 つの車輪と、当該車輪に回転可能に連結された負荷体とを備え、前記車輪を駆動することで前記負荷体の倒立制御を行う倒立型移動体であって、前記負荷体の傾斜角度である負荷角度を検出する負荷角度検出器と、前記負荷角度検出器により検出された負荷角度に基づいて、前記車輪を駆動するためのトルク指令を生成し、前記倒立制御を行う制御器と、前記倒立型移動体の数式モデルに基づいて導出される推定器を用いて、前記負荷角度検出器により検出された負荷角度と、前記制御器により生成されたトルク指令と、に基づいて、前記負荷角度の推定値を算出し、当該算出した推定値と前記負荷角度検出器により検出された負荷角度との誤差である負荷角度推定誤差を算出する負荷角度推定誤差演算部と、前記負荷角度推定誤差演算部により算出された負荷角度推定誤差が発散するか否かを判別する状態判別器と、前記状態判別器により前記負荷角度推定誤差が発散すると判別された場合には、前記制御器による制御を切り替えて所定の安全確保制御を実施させる制御切替器と、を備えるものである。

40

50

## 【0009】

これにより、倒立型移動体の負荷角度と車輪のトルク指令とに基づいて、負荷角度推定誤差を算出し、負荷角度推定誤差が発散するか否かを判別することができ、判別結果に応じて、倒立型移動体は安全確保制御に切り替えることのできるため、危険な状態を判別して、転倒や暴走などを防止することができる。

## 【0010】

また、前記負荷角度推定誤差演算部は、前記負荷角度検出器により検出された負荷角度と、前記制御器により生成されたトルク指令と、に基づいて、前記推定器のゲインを算出する推定器ゲイン演算器と、前記推定器を用いて、前記推定器ゲイン演算器により算出されたゲインと、前記負荷角度検出器により検出された負荷角度と、前記制御器により生成されたトルク指令と、に基づいて、前記負荷角度推定誤差を算出する負荷角度推定誤差演算器と、を備えるようにしてもよい。

10

## 【0011】

さらにまた、前記車輪の回転角度を検出する車輪角度検出器を更に備え、前記状態判別器は、前記負荷角度推定誤差演算部により算出された負荷角度推定誤差が発散するか否かを判別すると共に、当該負荷角度推定誤差と、前記負荷角度検出器により検出された負荷角度と、前記車輪角度検出器により算出された車輪角度と、に基づいて、前記倒立型移動体について予め定めた複数の状態のうちのいずれの状態であるかを判別し、前記制御切替器は、前記状態判別器により前記負荷角度推定誤差が発散すると判別された場合には、前記制御器による制御を切り替えて、前記判別された状態に応じた所定の安全確保制御を実施させ、前記状態判別器により前記負荷角度推定誤差が発散しないと判別された場合には、前記倒立制御の開始、継続、再開のいずれか1の制御を前記制御器に実施させるようにしてもよい。

20

## 【0012】

また、前記状態判別器は、前記負荷角度推定誤差が発散すると判別した場合に、当該負荷角度推定誤差に基づいて、前記倒立型移動体の移動中に搭乗物体が飛び降りた後の状態であるか否かを判別するようにしてもよい。前記制御切替器は、前記状態判別器により前記負荷角度推定誤差が発散すると判別され、かつ、前記倒立型移動体の移動中に搭乗物体が飛び降りた後の状態であると判別された場合に、前記制御器による制御を、前記搭乗物体の飛び降り後、所定のペースで徐々に減速し停止する制御に切り替えて実施させると好適である。

30

## 【0013】

さらにまた、前記状態判別器は、前記負荷角度推定誤差が発散すると判別した場合に、前記負荷角度に基づいて、搭乗物体の搭乗前または搭乗後に外部物体により前記倒立型移動体が支えられている状態であるか否かを判別するようにしてもよい。前記制御切替器は、前記状態判別器により前記負荷角度推定誤差が発散すると判別され、かつ、前記搭乗物体の搭乗前または搭乗後に外部物体により前記倒立型移動体が支えられている状態であると判別された場合に、前記制御器による制御を、前記トルク指令を0とする制御に切り替えて実施させると好適である。

## 【0014】

また、前記状態判別器は、前記負荷角度推定誤差が発散すると判別した場合に、前記負荷角度推定誤差に基づいて、移動中に前記倒立型移動体が物体と衝突した瞬間から後の状態であるか否かを判別するようにしてもよい。前記制御切替器は、前記状態判別器により前記負荷角度推定誤差が発散すると判別され、かつ、移動中に前記倒立型移動体が物体と衝突した瞬間から後の状態であると判別された場合に、前記制御器による制御を、前記車輪を衝突時と反対方向に所定の短い時間回転させ、減速停止する制御に切り替えて実施させると好適である。

40

## 【0015】

さらにまた、前記状態判別器は、前記負荷角度推定誤差が発散すると判別した場合に、前記車輪角度に基づいて、前記車輪が溝または段差に挟まれて、少なくとも1方向に回転

50

できなくなった状態であるか否かを判別するようにしてもよい。前記制御切替器は、前記状態判別器により前記負荷角度推定誤差が発散すると判別され、かつ、前記車輪が溝または段差に挟まれて、少なくとも1方向に回転できなくなった状態であると判別された場合に、前記制御器による制御を、前記トルク指令を0とする制御に切り替えて実施させると好適である。

【0016】

また、前記状態判別器は、前記負荷角度推定誤差が発散すると判別した場合に、前記車輪角度と、前記負荷角度推定誤差と、に基づいて、路面との摩擦が小さく前記車輪が空転している状態であるか否かを判別するようにしてもよい。前記制御切替器は、前記状態判別器により前記負荷角度推定誤差が発散すると判別され、かつ、路面との摩擦が小さく前記車輪が空転している状態であると判別された場合に、前記制御器による制御を、前記負荷角度検出器により検出される負荷角度が  $\theta/2$  [rad] に近付くまでの間、比較的低いモータトルクで、前記倒立型移動体の進行方向に前記車輪を回転させた後、当該検出される負荷角度が  $\theta/2$  [rad] に近付いた以降は、前記モータトルクを連続的に0に変化させる制御に切り替えて実施させると好適である。

10

【0017】

さらにまた、前記状態判別器は、前記負荷角度推定誤差が発散すると判別した場合に、前記負荷角度と、前記負荷角度推定誤差と、に基づいて、搭乗物体の搭乗時に、当該搭乗物体の一部が地面に残っている状態であるか否かを判別するようにしてもよい。前記制御切替器は、前記状態判別器により前記負荷角度推定誤差が発散すると判別され、かつ、搭乗物体の搭乗時に、当該搭乗物体の一部が地面に残っている状態であると判別された場合に、前記制御器による制御を、当該搭乗物体が完全に前記倒立型移動体に搭乗するまでの間、前記制御器が用いる制御ゲインを比較的低い値に設定する制御に切替えて実施させると好適である。

20

【0018】

また、前記状態判別器は、前記負荷角度推定誤差が発散しないと判別した場合に、前記負荷角度に基づいて、搭乗物体が搭乗したまま移動している状態であるか否かを判別するようにしてもよい。前記制御切替器は、前記状態判別器により前記負荷角度推定誤差が発散しないと判別され、かつ、搭乗物体が搭乗したまま移動している状態であると判別された場合に、前記制御器による制御を、前記倒立型移動体を倒立走行させる制御に切り替えて実施させると好適である。

30

【0019】

さらにまた、前記状態判別器は、前記負荷角度推定誤差が発散しないと判別した場合に、前記負荷角度に基づいて、搭乗物体が搭乗せずに前記倒立型移動体がある場で倒立している状態であるか否かを判別するようにしてもよい。前記制御切替器は、前記状態判別器により前記負荷角度推定誤差が発散しないと判別され、かつ、搭乗物体が搭乗せずに前記倒立型移動体がある場で倒立している状態であると判別された場合に、前記制御器による制御を、前記倒立型移動体をその場で倒立させる制御に切り替えて実施させると好適である。

【0020】

本発明に係る倒立型移動体の制御方法は、少なくとも1つの車輪と、当該車輪に回転可能に連結された負荷体とを備え、前記車輪を駆動することで前記負荷体の倒立制御を行う倒立型移動体の制御方法であって、前記負荷体の傾斜角度である負荷角度を検出するステップと、検出された負荷角度に基づいて、前記車輪を駆動するためのトルク指令を生成し、前記倒立制御を行うステップと、前記倒立型移動体の数式モデルに基づいて導出される推定器を用いて、検出された負荷角度と、生成された前記トルク指令と、に基づいて、前記負荷角度の推定値を算出するステップと、算出された前記負荷角度の推定値と検出された前記負荷角度との誤差である負荷角度推定誤差を算出するステップと、算出された前記負荷角度推定誤差が発散するか否かを判別するステップと、前記判別の結果、前記負荷角度推定誤差が発散する場合には、前記倒立制御を切り替えて所定の安全確保制御を実施させ

40

50

るステップと、を備えるものである。

【0021】

これにより、倒立型移動体の負荷角度と車輪のトルク指令とに基づいて、負荷角度推定誤差を算出し、負荷角度推定誤差が発散するか否かを判別することができ、判別結果に応じて、倒立型移動体は安全確保制御に切り替えることができるため、危険な状態を判別して、転倒や暴走などを防止することができる。

【発明の効果】

【0022】

本発明によれば、倒立制御を実施すると危険な状態であるかを判別して、倒立型移動体を安全に制御させることが可能な倒立型移動体及びその制御方法を提供することができる。

10

【図面の簡単な説明】

【0023】

【図1】実施の形態1にかかる倒立型移動体の制御システムの構成を示す図である。

【図3】実施の形態1にかかる倒立型移動体の模式的側面図である。

【図2】実施の形態1にかかる倒立型移動体の制御方法を示すフローチャートである。

【図4】実施の形態1にかかる倒立型移動体の危険又は安全な状態を判定する効果を確かめるシミュレーション結果を示す図である。

【図5】本発明に関連する倒立型移動体を示す図である。

【発明を実施するための形態】

20

【0024】

実施の形態1.

以下、図面を参照して本発明の実施の形態について説明する。

図1は、本実施の形態に係る倒立型移動体の制御システムの構成図である。制御システム100は、指令入力装置101と、制御器102と、倒立型移動体103と、負荷角度検出器104と、負荷角度推定誤差演算部105と、状態判別器108と、制御切替器109と、を備えている。

【0025】

指令入力装置101は、例えば、搭乗者による走行操作（ハンドル操作、スイッチ操作、重心移動操作等）に応じて、移動体103が所望の走行状態（前後進、加減速、左右旋回、停止等）となる指令値を生成する。指令入力装置101は、例えば、負荷角度指令や倒立型移動体103の移動速度指令などを指令入力として生成する。

30

【0026】

制御器102は、倒立型移動体103の負荷角度が、入力された指令に追従するように倒立型移動体103の倒立制御を実施する。また、制御器102は、制御切替器109からの制御切替指示に応じて、退避走行または停止などの所定の安全確保のための制御を実施する。制御器102は、これらの制御を行うため、トルク指令を生成する。

【0027】

負荷角度検出器104は、制御器102が倒立制御に使用する負荷角度として、倒立型移動体103の鉛直線に対する傾斜角度を検出する。負荷角度検出器104は、倒立型移動体103に設置されている。負荷角度検出器104は、例えば、ジャイロセンサや加速度センサを用いて構成される姿勢センサである。

40

【0028】

負荷角度推定誤差演算部105は、推定器ゲイン演算器105と、負荷角度推定誤差演算器106と、を備えている。負荷角度推定誤差演算部105は、倒立型移動体103の数式モデルにより導出される推定器（オブザーバ）を用いて、制御器102が出力するトルク指令と、負荷角度検出器104により検出される負荷角度と、に基づいて、負荷角度の推定値を算出し、算出した負荷角度の推定値と検出された負荷角度との誤差である負荷角度推定誤差を算出する。

【0029】

50

推定器ゲイン演算器 106 は、制御器 102 が出力するトルク指令と、負荷角度検出器 104 により検出される負荷角度と、に基づいて、推定器（オブザーバ）を用いて、負荷角度推定値、負荷角速度推定値、負荷角加速度推定値などを推定する。さらに、推定器ゲイン演算器 105 は、制御器 102 が出力するトルク指令と、負荷角度検出器 104 により検出される負荷角度と、負荷角度推定値と、に基づいて、推定器ゲインを算出する。

【0030】

負荷角度推定誤差演算器 107 は、推定器（オブザーバ）を用いて、トルク指令と、検出される負荷角度と、算出された推定器ゲインと、に基づいて、算出した負荷角度の推定値と検出された負荷角度との誤差である負荷角度推定誤差を算出する。

【0031】

状態判別器 108 は、算出した負荷角度推定誤差が発散するか否かを判別する。また、状態判別器 108 は、算出した負荷角度推定誤差の波形形状に基づいて、倒立型移動体 103 の複数の状態のいずれの状態であるかを判別する。

【0032】

制御切替器 109 は、状態判別器 108 による判別結果に基づいて、制御器 102 による倒立制御を切替えて、退避走行または停止するなどの所定の安全性確保制御を、制御器 102 に実施させる。制御切替器 109 は、状態判別器 108 により負荷角度推定誤差が発散すると判別された場合には、さらに、判別された状態に応じて、制御器 102 による制御を切り替えて、その判別された状態に対応する安全確保制御を、制御器 102 に実施させる。また、制御切替器 109 は、状態判別器 108 により負荷角度推定誤差が発散し

【0033】

次に、図 2 を参照して倒立型移動体が、その状態に応じて倒立制御を切り替える仕組みについて詳細に説明する。図 2 は、本実施の形態にかかる倒立型移動体の模式的側面図である。

【0034】

図 2 に示すように、倒立型移動体 103 は、同軸上に配置した 2 つの車輪 202 と、車輪に連結された負荷体 201 と、を備えている。負荷体 201 は、車輪 202 の回転軸を回転の中心として、回転可能に連結されている。負荷体 201 は、搭乗者や荷物などの搭乗物体、さらには、搭乗物体を支持するステップを含んで構成される。負荷角度とは、鉛直方向に対する負荷体 201 の傾斜角度を示す。倒立型移動体 103 は、負荷体 201 の倒立状態を維持し、かつ、進行方向（例えば、図の左右方向）に所望の速度で移動するように、車輪 202 を回転させるものである。移動体 103 は、例えば、負荷体 201 を前傾又は後傾させたときの傾斜角度に応じて、前進又は後進するように構成されている。なお、図示は省略するが、倒立型移動体 103 は、車輪 202 を回転させるモータトルクを伝達する減速機と、該モータトルクを発生するモータと、該モータを駆動するサーボアンプと、車輪 202 の回転角度を検出する車輪角度検出器と、モータに所望の回転速度指令を入力する入力装置と、を備えている。

【0035】

ここで、倒立型移動体の状態とは、具体的には以下に定める状態を含む。なお、以下の状態 1 ~ 8 のうち、状態 1 及び状態 2 は、搭乗者にとって安全な状態の例を示す。また、状態 3 から状態 8 は、危険な状態の例を示す。

状態 1：搭乗物体が搭乗したまま走行している状態

状態 2：搭乗物体が搭乗せずに倒立型移動体がある場で倒立している状態

状態 3：走行中に搭乗物体が倒立型移動体 103 から飛び降りた後の状態

状態 4：搭乗物体の搭乗前または搭乗後に、搭乗者の手などの外部物体によって倒立型移動体 103 が支えられている状態

状態 5：走行中に倒立型移動体 103 が物体と衝突した瞬間から後の状態

状態 6：倒立型移動体の車輪 202 が溝または段差に挟まれて、少なくとも 1 方向に回

10

20

30

40

50

転できなくなった状態

状態 7：路面との摩擦が小さく、車輪 202 が空転している状態

状態 8：搭乗物体の搭乗時に、搭乗者の片足などその一部が地面に残っている状態

【0036】

危険状態（状態 3 から状態 8）の詳細を以下に説明する。

状態 3 では、搭乗者が飛び降りた後、倒立型移動体 103 と搭乗者とが接触する可能性がある。例えば、跳ね上がってきたハンドル（例えば、図 5 のハンドル 503）と接触する可能性がある。

状態 4 では、搭乗者に向かってハンドル（例えば、図 5 のハンドル 503）が傾斜する角度で、搭乗者が倒立型移動体 103 を支えると、倒立型移動体 103 が搭乗者に向かって走行して、搭乗者と接触する可能性がある。

10

状態 5 では、搭乗者による制御が実施できずに倒立型移動体 103 が暴走してしまう可能性がある。

状態 6 では、倒立型移動体 103 が、車輪 202 が回転できなくなった方向に回転させようとすることで、車輪 202 が溝または段差からわずかに外れた瞬間に最大トルクで回転して、結果として、倒立型移動体 103 が大きく転倒してしまう可能性がある。

状態 7 では、車輪 202 は床から小さな反力しか受けられないため、負荷角度を所望の角度にするために最大トルクで車輪 202 が回転してしまい、その結果、路面の摩擦が変化すると、倒立型移動体 103 が大きく振れてしまう可能性がある。

状態 8 では、状態 4 と同様に、ハンドルの角度に応じて、搭乗者の地面に残っている足と、倒立型移動体 103 やその車輪 202 と、が接触する可能性がある。

20

【0037】

図 2 に例示した倒立型移動体を数式モデルによりモデル化するため、倒立型移動体の運動方程式を説明する。以下、解析力学の手法を用いて運動方程式を導出する。

まず、運動エネルギー  $T$  とポテンシャルエネルギー  $V$  は、以下の（数 1）と（数 2）を用いてそれぞれ表される。

【0038】

【数 1】

$$T = \frac{1}{2} m_1 \left[ (r\dot{\theta}_2 + l \cos \theta_1 \dot{\theta}_1)^2 + (-l \sin \theta_1 \dot{\theta}_1)^2 \right] + \frac{1}{2} J_1 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 (r\dot{\theta}_2)^2 + \frac{1}{2} J_2 \dot{\theta}_2^2 \dots (1)$$

30

【0039】

【数 2】

$$V = m_1 g l \cos \theta_1 \dots (2)$$

40

【0040】

なお、（数 1）及び（数 2）で用いた記号の意味は次の通りである。

- $\theta_1$ ：負荷角度
- $\theta_2$ ：車輪角度
- $m_1$ ：負荷質量
- $J_1$ ：負荷慣性モーメント
- $m_2$ ：車輪質量
- $J_2$ ：車輪慣性モーメント
- $l$ ：負荷重心と車軸の距離
- $r$ ：車輪半径

50

g : 重力加速度

【 0 0 4 1 】

次に、(数1)と(数2)を用いてラグランジアン  $L = T - V$  を算出し、オイラー・ラグランジュ方程式を用いると、運動方程式は、以下の(数3)及び(数4)として求められる。

【 0 0 4 2 】

【数3】

$$(m_1 l^2 + J_1) \ddot{\theta}_1 + m_1 r l \cos \theta_1 \ddot{\theta}_2 - m_1 g l \sin \theta_1 = -T_m \cdots (3)$$

10

なお、(数3)で用いた記号の意味は次の通りである。

$T_m$  : モータトルク

【 0 0 4 3 】

【数4】

$$(m_1 r l \cos \theta_1 + J_1 + m_1 l^2) \ddot{\theta}_1 + (r m_1 l \cos \theta_1 + J_2 + m_2 r^2 + m_1 r^2) \ddot{\theta}_2 - m_1 l r \dot{\theta}_1^2 \sin \theta_1 - m_1 g l \sin \theta_1 = 0 \cdots (4)$$

【 0 0 4 4 】

20

次に、上述した状態1から状態8を検出し、検出した各状態に応じて倒立制御を切り替える原理を説明する。まず(数3)と(数4)から、車輪角度  $\theta_2$  の2階時間微分値(式中では、 $\theta_2$  の上部に2つのドットを付して示す変数)を消去することで、以下の(数5)を得る。

【 0 0 4 5 】

【数5】

$$\ddot{\theta}_1 + f(\theta_1) = g(\theta_1) T_m \cdots (5)$$

$$f(\theta_1) = \frac{N_f}{D},$$

30

$$g(\theta_1) = \frac{N_g}{D},$$

$$N_f = m_1 r l \cos \theta_1 (m_1 l r \dot{\theta}_1^2 \sin \theta_1 + m_1 g l \sin \theta_1) - m_1 g l \sin \theta_1 (m_1 l r \cos \theta_1 + J_2 + m_2 r^2 + m_1 r^2),$$

$$N_g = -(r m_1 l \cos \theta_1 + J_2 + m_2 r^2 + m_1 r^2),$$

40

$$D = (m_1 l^2 + J_1) (r m_1 l \cos \theta_1 + J_2 + m_2 r^2 + m_1 r^2) - m_1 r l \cos \theta_1 (m_1 r l \cos \theta_1 + J_1 + m_1 l^2)$$

【 0 0 4 6 】

負荷角度  $\theta_1$  を推定する推定器(オブザーバ)を、(数5)に基づいて、以下の(数6)の構成で設計する。推定器(オブザーバ)は、検出される負荷角度  $\theta_1$  と、トルク指令  $T_m$  と、から、負荷角度推定値、負荷角速度推定値、負荷角加速度推定値などを推定する

50

ことができる。なお、詳細は後述するが、(数6)において、後述する(数9)で示す推定器ゲインLを設定することで、負荷角度推定値が負荷角度に収束する。

【数6】

$$\ddot{\hat{\theta}}_1 + f(\hat{\theta}_1) = g(\hat{\theta}_1)T_m + L \operatorname{sgn}(s) \cdots (6)$$

$$\tilde{\theta}_1 = \theta_1 - \hat{\theta}_1$$

$$s = \dot{\tilde{\theta}}_1 + c\tilde{\theta}_1$$

10

【0047】

なお、(数6)で用いた記号の意味は次の通りである。

L：推定器ゲイン

$\operatorname{sgn}(\cdot)$ ：シグナム関数(符号関数)

$\hat{\theta}_1$ ：負荷角度推定値(式中では、 $\theta_1$ の上部にハット(^)を付して示す変数)

$\tilde{\theta}_1$ ：負荷角度推定誤差(式中では、 $\theta_1$ の上部にチルダ(~)を付して示す変数)

s：中間変数

c：負荷角度推定誤差の収束の速さ

【0048】

20

次に、負荷角度推定誤差 $\tilde{\theta}_1$ を0に収束させる推定器ゲインLの十分条件を、(数6)の推定器を用いて導出する。(数6)において負荷角度推定誤差 $\tilde{\theta}_1$ を0に収束させるためには、中間変数sを0に収束させればよいので、リアプノフ関数の候補として以下の(数7)を用いる。

【0049】

【数7】

$$V = \frac{1}{2}s^2 > 0, \quad \forall s \neq 0 \cdots (7)$$

【0050】

30

(数7)において、全ての $s \neq 0$ において $V > 0$ である。リアプノフ関数候補Vの1階時間微分が、全ての $s \neq 0$ において負となれば、中間変数sは0に収束する。すなわち、以下の(数8)が成り立てばよい。

【0051】

【数8】

$$\dot{V} = s\dot{s}$$

$$= s \left( \ddot{\tilde{\theta}}_1 + c\dot{\tilde{\theta}}_1 \right)$$

$$= s \left\{ -f(\theta_1) + f(\hat{\theta}_1) + [g(\theta_1) - g(\hat{\theta}_1)]T_m - L \operatorname{sgn} s + c\dot{\tilde{\theta}}_1 \right\}$$

$$< 0, \quad \forall s \neq 0 \cdots (8)$$

40

【0052】

(数8)の十分条件は、以下の(数9)となる。

【数9】

$$L = \left| -f(\theta_1) + f(\hat{\theta}_1) + [g(\theta_1) - g(\hat{\theta}_1)]T_m + c\dot{\tilde{\theta}}_1 \right| + \delta, \quad \delta \in \mathbb{R}^+ \cdots (9)$$

【0053】

50

なお、(数9)に用いた記号の意味は次の通りである。

: 倒立型移動体103の状態判定指標

【0054】

検出器ゲインLを(数9)のように設定することで(数8)が成立し、中間変数sは、0に収束する。sが0に収束すると(数6)より負荷角度推定誤差 $\tilde{\theta}_1$ はcの速さで収束し、負荷角度推定値 $\hat{\theta}_1$ は負荷角度 $\theta_1$ に収束することになる。

【0055】

ここで、倒立型移動体103に対して、(数3)及び(数4)で示した運動方程式に含まれない外力が加わった状況を想定する。かかる状況において、その外力の絶対値が(数9)の状態判定指標よりも大きくなった場合には(数9)が成立しなくなり、負荷角度推定誤差 $\tilde{\theta}_1$ が発散する。

10

【0056】

従って、負荷角度推定誤差 $\tilde{\theta}_1$ の発散または収束状況に応じて、倒立型移動体103に対して、状態判定指標よりも大きな外力が加わったか否かを判定することができる。上述した複数の危険状態のうち、状態1及び状態2の場合には負荷角度推定誤差 $\tilde{\theta}_1$ は0に収束するのに対して、状態3から状態8の場合には、負荷角度推定誤差 $\tilde{\theta}_1$ は発散する。

【0057】

以上説明した原理に基づいて、図1に示した推定器ゲイン演算器106は、(数9)を用いて推定器ゲインLを算出する。負荷角度推定誤差演算器107は、(数5)及び(数6)に基づいて、負荷角度推定誤差 $\tilde{\theta}_1$ を算出する。状態判別器108は、算出された負荷角度推定誤差 $\tilde{\theta}_1$ が発散するか否かを判別する。判別の結果、負荷角度推定誤差 $\tilde{\theta}_1$ が0に収束している間は、倒立型移動体103は安全な状態にあると判定し、倒立制御を継続する。一方で、判別の結果、負荷角度推定誤差 $\tilde{\theta}_1$ が発散する場合には、上述した状態3から状態8のような危険な状態であるため、倒立型移動体103を退避走行または停止させる制御を実施する。さらに、後述するように、状態判別器108は、倒立型移動体103が上述した状態1から状態8のいずれであるかを判別することもできる。

20

【0058】

負荷角度推定誤差 $\tilde{\theta}_1$ を用いて、上述した状態1から状態8を、以下の条件に基づいて判別する。この判別は、状態判別器108により行う。なお、以下の判別条件において、dは負荷角度推定誤差 $\tilde{\theta}_1$ の収束・発散を判定する閾値であり、 $c_{51}$ 、 $c_{52}$ 、 $c_{61}$ 、 $c_{62}$ 、 $c_{71}$ 、 $c_{72}$ は一定値とする。

30

【0059】

(状態1の判別条件)

【数10】

$$\left| \tilde{\theta}_1 \right| \leq d \wedge \theta_1 \neq 0 \cdots (10)$$

状態1の判別条件(数10)は、走行中の倒立型移動体103の負荷角度 $\theta_1$ は、進行方向に非零値を取ることに基づいて導出した。

40

【0060】

(状態2の判別条件)

【数11】

$$\left| \tilde{\theta}_1 \right| \leq d \wedge \theta_1 = 0 \cdots (11)$$

状態2の判別条件(数11)は、搭乗者が搭乗せずに倒立型移動体103がその場で倒立している場合には、負荷角度 $\theta_1$ が0であることに基づいて導出した。

50

【 0 0 6 1 】

( 状態 3 の 判別 条件 )

【 数 1 2 】

$$\left| \tilde{\theta}_1 \right| > d \wedge \tilde{\theta}_1 \text{が} -\text{sgn}(\theta_1) \text{方向にオーバーシュート} \dots (12)$$

状態 3 の判別条件 ( 数 1 2 ) は、搭乗者が飛び降りた場合には、負荷慣性モーメントが突然減少して、図 2 に例示した負荷体 2 0 1 を起き上がらせる方向に、負荷角度推定誤差  $\tilde{\theta}_1$  がオーバーシュートすることに基づいて導出した。

【 0 0 6 2 】

( 状態 4 の 判別 条件 )

【 数 1 3 】

$$\left| \tilde{\theta}_1 \right| > d \wedge \theta_1 \text{が一定値} \wedge \tilde{\theta}_1 \text{が} 2 \text{次曲線的に発散} \dots (13)$$

状態 4 の判別条件 ( 数 1 3 ) は、負荷体 2 0 1 を外から手で支えている場合には、負荷角度  $\theta_1$  が一定値を取り、モータトルク  $T_m$  が飽和して一定値を取ることに基づいて導出した。

【 0 0 6 3 】

( 状態 5 の 判別 条件 )

【 数 1 4 】

$$\left| \tilde{\theta}_1 \right| > d \wedge \tilde{\theta}_1 \text{が} \sin^{-1}(c_{51}t) + c_{52}t^2 \text{の曲線を描いて発散} \dots (14)$$

状態 5 の判別条件 ( 数 1 4 ) は、倒立型移動体 1 0 3 が一定速度で移動中に物体と衝突した場合には、衝突の直後の所定の短い時間の間、一定速度で移動し、モータトルク  $T_m$  が飽和することに基づいて導出した。

【 0 0 6 4 】

( 状態 6 の 判別 条件 )

【 数 1 5 】

$$\left| \tilde{\theta}_1 \right| > d \wedge \dot{\theta}_2 = 0$$

$$\wedge \tilde{\theta}_1 \text{が} \cos^{-1}(c_{61}t^2) + c_{62}t^2 \text{の曲線を描いて発散} \dots (15)$$

状態 6 の判別条件 ( 数 1 5 ) は、図 2 に例示した車輪 2 0 2 が少なくとも片方に動かなくなった場合には、車輪速度  $d_2 / dt$  が 0 となり、モータトルク  $T_m$  が飽和し、負荷体 2 0 1 が自由落下することに基づいて導出した。

【 0 0 6 5 】

( 状態 7 の 判別 条件 )

【 数 1 6 】

$$\left| \tilde{\theta}_1 \right| > d \wedge \dot{\theta}_2 \neq 0$$

$$\wedge \tilde{\theta}_1 \text{が} \cos^{-1}(c_{71}t^2) + c_{72}t^2 \text{の曲線を描いて発散} \dots (16)$$

状態 7 の判別条件 ( 数 1 6 ) は、車輪 2 0 2 が空転する場合には、車輪速度  $d_2 / dt$  が非零となり、負荷体 2 0 1 を起き上がらせるためにモータトルク  $T_m$  が飽和し、路面からの反力が得られないために負荷体 2 0 1 が自由落下することに基づいて導出した。

10

20

30

40

50

## 【 0 0 6 6 】

( 状態 8 の判別条件 )

## 【 数 1 7 】

$$|\tilde{\theta}_1| > d \wedge \theta_1 \text{が増加するにつれ} |\tilde{\theta}_1| \text{が減少} \dots (17)$$

状態 8 の判別条件 ( 数 1 7 ) は、搭乗者が倒立型移動体 1 0 3 に片足を乗せており、且つ、倒立型移動体 1 0 3 が搭乗者側に傾いている状態では、路面に着いている足に搭乗者の体重がより多く掛かっており、搭乗者から遠い側に傾いている状態では、倒立型移動体 1 0 3 に載せている足に搭乗者の体重がより多く掛かっていることに基づいて導出した。

10

## 【 0 0 6 7 】

上述した判別条件により状態判別器 1 0 8 が状態の判別を行い、判別結果が制御切替器 1 0 9 に出力される。制御切替器 1 0 9 は、状態判別器 1 0 8 から入力された状態が状態 1 または状態 2 である場合には、制御器 1 0 2 が倒立制御を開始 / 継続 / 再開するように切り替える。制御切替器 1 0 9 は、状態判別器 1 0 8 から入力された状態が状態 3 から状態 8 のいずれかの状態である場合には、その状態に応じて、制御器 1 0 2 が退避走行または停止する制御を実施するように切り替える。

## 【 0 0 6 8 】

状態 3 ~ 状態 8 のいずれかの危険状態であると判別された場合の、制御器 1 0 2 による退避走行または停止の具体例、およびその効果を説明する。

20

## 【 0 0 6 9 】

( 状態 3 の場合 )

走行中に搭乗者が倒立型移動体 1 0 3 から飛び降りた後の状態では、所定のペースで徐々に減速して停止させる。これにより、飛び降りた搭乗者と倒立型移動体 1 0 3 とが接触する危険を低減することができる。

## 【 0 0 7 0 】

( 状態 4 の場合 )

搭乗前または搭乗後に、搭乗者が手で倒立型移動体 1 0 3 を支えている状態では、モータトルク  $T_m$  を 0 にする。これにより、倒立型移動体 1 0 3 が暴走して周囲の物体と接触する危険性を低減することができる。

30

## 【 0 0 7 1 】

( 状態 5 の場合 )

走行中に倒立型移動体 1 0 3 が物体と衝突した瞬間から後の状態では、衝突時と反対方向に車輪 2 0 2 を所定の短い時間回転させ、その後、減速して停止させる。これにより、搭乗者及び衝突した物体への被害を低減することができる。

## 【 0 0 7 2 】

( 状態 6 の場合 )

倒立型移動体の車輪 2 0 2 が溝または段差に挟まれて、少なくとも 1 方向に回転できなくなった状態では、モータトルク  $T_m$  を 0 にする。これにより、車輪 2 0 2 が溝などから突然外れた場合に、倒立型移動体 1 0 3 が急発進する危険性を低減することができる。

40

## 【 0 0 7 3 】

( 状態 7 の場合 )

路面との摩擦が小さく、車輪 2 0 2 が空転している状態では、検出される負荷角度  $\theta_1$  が  $\theta_1 / 2 [rad]$  に近づくまでの間、比較的低いモータトルク  $T_m$  で、倒立型移動体 1 0 3 の進行方向に車輪 2 0 2 を回転させ、そして、負荷角度  $\theta_1$  が  $\theta_1 / 2 [rad]$  に近付いたら、モータトルク  $T_m$  を連続的に 0 に変化させる。これにより、倒立型移動体 1 0 3 が転倒するような場合には、搭乗者への衝撃を低減できる可能性がある。

## 【 0 0 7 4 】

( 状態 8 の場合 )

50

搭乗者の搭乗時に、その片足が地面に残っている状態では、搭乗者の両脚が倒立型移動体 103 に乗るまでの間、制御ゲインを比較的低い値に設定する。例えば、制御帯域が 10 [Hz] 程度となるようにする。これにより、路面に残っている搭乗者の足が倒立型移動体 103 と接触する危険性を低減することができ、同時に、搭乗時に搭乗者はバランスをとりやすくなることから、安全に乗車できるようになるという効果がある。

【0075】

図3を参照して、倒立型移動体の倒立制御と、退避走行または停止させる制御と、を切り替える処理を説明する。図3は倒立型移動体の制御方法のフローチャートである。

まず、搭乗者が、所望の負荷角度、移動速度などの指令を、指令入力装置 101 を用いて入力する (S301)。負荷角度検出器 104 は、一定周期で、負荷角度を検出する (S302)。

10

【0076】

負荷角度推定誤差演算部 105 (推定器ゲイン演算器 106 及び負荷角度推定誤差演算器 107) は、上述したようにして、負荷角度推定誤差  $\hat{\theta}_1$  を算出する (S303)。状態判別器 108 は、負荷角度推定誤差  $\hat{\theta}_1$  が発散しているか否かを判別し、また、負荷角度推定誤差  $\hat{\theta}_1$  の波形形状に基づいて、上述の状態 1 から状態 8 のいずれであるかを判別する (S304)。

【0077】

制御切替器 109 は、負荷角度推定誤差  $\hat{\theta}_1$  が収束する場合 (状態 1 または状態 2) には、倒立制御を開始 / 継続 / 再開させるように、制御器 102 の制御を切り替える (S305)。一方で、制御切替器 109 は、負荷角度推定誤差  $\hat{\theta}_1$  が発散する場合 (状態 3 から状態 8 のいずれか) には、指令入力に応じた制御を中止させ、判別した状態に応じて、退避走行または停止させるように制御器 102 の制御を切り替える (S306)。指令入力に応じた制御を制御器 102 に中止させるためには、制御切替器 109 は、例えば、指令入力装置 101 からの入力指令に基づいて制御器 102 が制御指令を算出する際に用いるゲインについて、そのゲインの値を 0 に設定すればよい。以降、S301 から S306 の処理が再び繰り返される。

20

【0078】

次に、図4を参照して、本発明の効果を説明する。ここでは、(数6)の推定器を用いて倒立型移動体 103 の安全または危険な状態を判定するシミュレーションを行い、図4にその結果を示す。なお、シミュレーションに用いた数値は以下の通りである。

30

$$m_1 = 70 \text{ [kg]}$$

$$J_1 = 25.2 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2 \text{]}$$

$$m_2 = 15 \text{ [kg]}$$

$$J_2 = 0.075 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2 \text{]}$$

$$l = 0.9 \text{ [m]}$$

$$r = 0.1 \text{ [m]}$$

$$g = 9.8 \text{ [m/s}^2 \text{]}$$

$$D = 1 \times 10^{-6} \text{ [N} \cdot \text{s/m]} \text{ (D: 車輪と路面の間の粘性摩擦係数)}$$

$$c = 500 \text{ [rad/s]}$$

$$= 0.01$$

$$K_p = 50 \text{ [s}^{-1} \text{]} \text{ (Kp: 負荷角度比例制御ゲイン)}$$

$$K_v = 50 \text{ (2)} \text{ [s}^{-1} \text{]} \text{ (Kv: 負荷速度比例制御ゲイン)}$$

$$T = 1 \times 10^{-3} \text{ [s]} \text{ (T: 制御周期)}$$

40

【0079】

本シミュレーションでは、制御器 102 は、負荷角度  $\theta_1$  及び車輪速度  $\dot{\theta}_2$  を、上記ゲイン (Kp、Kv) を用いてそれぞれ比例制御する。そして、車輪 202 が接触する路面が、滑らない状態 (状態 1) から滑る状態 (状態 7) へと変化する場合に、(数6)の推定器が算出する負荷角度推定誤差  $\hat{\theta}_1$  に基づいて、倒立型移動体 103 の倒立型移動体 103 の状態を判別した。

50

## 【 0 0 8 0 】

図 4 ( a ) に示すように、時間 2 [ s ] において、車輪 2 0 2 と路面とが滑らない状態 ( 縦軸の値 1 で示す、stick ) から滑る状態 ( 0 で示す、slip ) へと路面状態が変化する。

図 4 ( b ) では、与えられる負荷角度指令を破線で示し、検出される負荷角度  $\theta_1$  を実線で示している。このとき、図 4 ( a ) で示した状況下において、図 4 ( b ) に示すような負荷角度指令を与えた場合には、検出される負荷角度  $\theta_1$  により示されよう、滑っている間制御不能となり、負荷体 2 0 1 が発散していることが分かる。

## 【 0 0 8 1 】

図 4 ( c ) では、負荷角度推定誤差演算器 1 0 7 が出力する負荷角度推定誤差  $\tilde{\theta}_1$  を実線で示している。図 4 ( a )、( b ) に示した状況の下で、負荷角度推定誤差演算器 1 0 7 が出力する負荷角度推定誤差  $\tilde{\theta}_1$  は、図 4 ( c ) に示すように変化する。すなわち、外力に起因して上述した運動方程式が成立しなくなることで、負荷角度推定誤差  $\tilde{\theta}_1$  が閾値を超えて変化する。

10

## 【 0 0 8 2 】

図 4 ( c ) において、状態判別器 1 0 8 は、負荷角度推定誤差  $\tilde{\theta}_1$  が所定の範囲に収まっている時間区間のうち、負荷角度  $\theta_1 = 0$  である区間 ( 0 [ s ] から 1 [ s ] ) では、状態 2 と判別し、負荷角度  $\theta_1 > 0$  である区間 ( 1 [ s ] 以降 ) では、状態 1 であると判別する。そして、状態判別器 1 0 8 は、負荷角度推定誤差  $\tilde{\theta}_1$  が破線の範囲を超えている時間区間において、負荷角度推定誤差  $\tilde{\theta}_1$  が 2 次曲線的に発散していること、及び、車輪角速度 ( 車輪角度  $\theta_2$  の 2 階時間微分値 ) が非零であること ( 不図示 ) に基づいて、状態 7 であると判別する。なお、図 4 ( c ) では、破線により所定の範囲を示す。また、所定の範囲は、上述した  $\tilde{\theta}_1$  に基づいて定められ、当該閾値  $\theta_{th}$  は、ユーザにより予め適切な値が設定される。

20

## 【 0 0 8 3 】

制御切替器 1 0 9 は、状態の判別結果に基づいて、状態 2 及び状態 1 である間は、上述した制御ゲインを用いた比例制御を制御器 1 0 2 に実施させることで、倒立型移動体 1 0 3 の倒立状態を維持させる。そして、状態 7 に変化した後は、負荷角度  $\theta_1$  が  $\theta_{th} / 2$  [ rad ] に近づくまでの間、比較的低いモータトルク  $T_m$  で倒立型移動体 1 0 3 の進行方向に車輪 2 0 2 を回転させ、負荷角度  $\theta_1$  が  $\theta_{th} / 2$  [ rad ] に近付いた後は、モータトルク  $T_m$  を連続的に 0 に変化させる。このようにモータトルク  $T_m$  を変化させることにより、車輪 2 0 2 と路面との間の小さな摩擦 ( 粘性摩擦係数  $D$  ) によって、負荷体 2 0 1 を起き上がらせる方向に力が働くことになるため、倒立型移動体 1 0 3 が転倒した場合においても、搭乗者への衝撃を低減することができる。

30

## 【 0 0 8 4 】

以上説明したように、倒立型移動体 1 0 3 は、2 つの非線形運動方程式 ( 数 3、数 4 ) を用いて記述される。これら 2 つの運動方程式を変形することで、負荷角度のみを含む 1 つの非線形微分方程式 ( 数 5 ) を得る。この非線形微分方程式に基づいて、負荷角度を推定する非線形推定器 ( 数 6 ) を設計する。

そして、負荷角度と負荷角度推定値との差を負荷角度推定誤差として、負荷角度推定誤差の所望のダイナミクスを表す 1 階微分関数を中間変数として定義し、その中間変数の 2 次関数であるリアプノフ関数候補 ( 数 7 ) を導入する。

40

このリアプノフ関数候補は上記中間変数が非ゼロの場合に正となり、リアプノフ関数候補の 1 階時間微分 ( 数 8 ) が負となるように、上記非線形推定器の推定器ゲインを設定する ( 数 9 )。これにより、倒立型移動体 1 0 3 が、上記非線形運動方程式に含まれない大きな外力を受けていない場合には、負荷角度推定誤差は 0 に収束し、そのような外力を受けた場合には、負荷角度推定誤差は発散する。

## 【 0 0 8 5 】

負荷角度推定誤差が 0 に収束している間は、倒立型移動体 1 0 3 は安全な状態にあると判定することができるため、この間は倒立制御を継続する。一方で、負荷角度推定誤差が発散した場合には、倒立型移動体 1 0 3 は危険な状態にあると判定することができるため

50

、退避走行または停止などの安全確保のための制御を行う。

さらに、負荷角度推定誤差が発散した場合には、その時の負荷角度推定誤差の波形の特徴に基づいて、複数の危険な状態を判別することができるため、それぞれの状態に応じた退避走行または停止させる制御を実施する。

【 0 0 8 6 】

従来の倒立型移動体では、危険状態であるか否かの自動判別は困難であった。

これに対して本発明では、検出される負荷角度のみを用いて非線形推定器の推定誤差の発散または収束を検出することで、危険状態であるか否かを判別可能とし、倒立型移動体 1 0 3 を安全に制御させることを可能とした。

さらに、負荷角度推定誤差の波形の特徴に基づいて、危険な状態を正確に判別可能とし、各危険状態に応じた安全な制御を実施可能とした。

従って、本発明によれば、危険な状態を判別して、安全となるように制御を行うことで、転倒または暴走を防止することができる。

【 0 0 8 7 】

なお、本発明は上記実施の形態に限られたものではなく、趣旨を逸脱しない範囲で適宜変更することが可能である。例えば、上述した 8 の状態は例示であり、搭乗者にとって安全な状態及び危険な状態として、他の状態を定めるものとしてもよい。危険な状態としては、倒立型移動体のモデル化の際に想定されていなかった外力に起因して、搭乗者にとって倒立型移動体の挙動が危険となる状態であればよい。

【 0 0 8 8 】

また、上述した実施の形態 1 では、2つの車輪 2 0 2 を備える倒立型移動体について例示したが、本発明はこれに限定されず、1以上の車輪 2 0 2 を駆動することで倒立制御を行う倒立型移動体であればよい。

【 0 0 8 9 】

また、制御システムの各要素は、各種演算器として動作する論理素子等のハードウェアで構成されたものに限らず、CPU（中央処理装置）、メモリ（記憶装置）等を備えたコンピュータによって構成されていてもよい。そして、このコンピュータに所定のプログラムを組み込んで制御器 1 0 2、推定器ゲイン演算器 1 0 6、負荷角度推定誤差演算器 1 0 7、状態判別器 1 0 8、制御切替器 1 0 9 等の各機能を実現させるようにしてもよい。

【 符号の説明 】

【 0 0 9 0 】

- 1 0 0 : 制御システム、
- 1 0 1 : 指令入力装置、
- 1 0 2 : 制御器、
- 1 0 3 : 倒立型移動体、
- 1 0 4 : 負荷角度検出器、
- 1 0 5 : 負荷角度推定誤差演算部、
- 1 0 6 : 推定器ゲイン演算器、
- 1 0 7 : 負荷角度推定誤差演算器、
- 1 0 8 : 状態判別器、
- 1 0 9 : 制御切替器、
- 2 0 1 : 負荷体、
- 2 0 2 : 車輪、
- 5 0 1 : ホイール、
- 5 0 2 : プラットホーム、
- 5 0 3 : ハンドル、
- 5 0 4 : グリップ、
- 5 0 5 : ユーザ

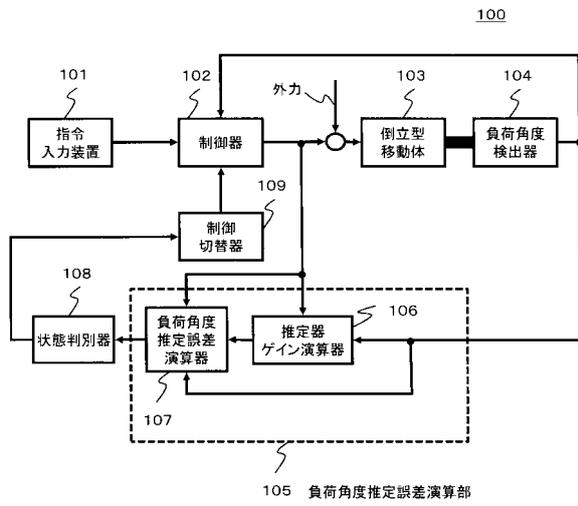
10

20

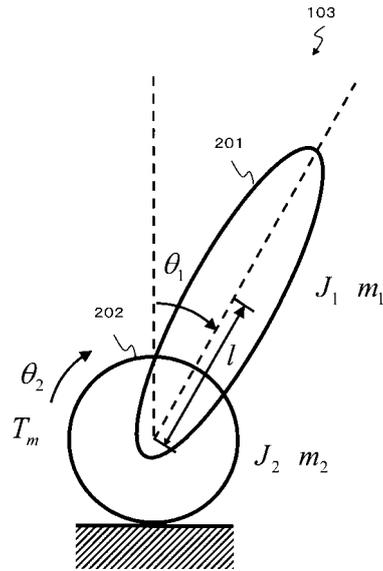
30

40

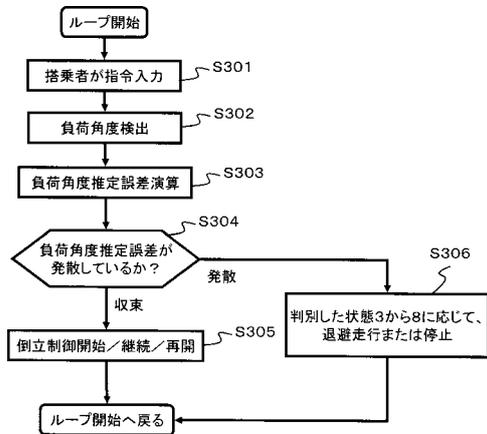
【図1】



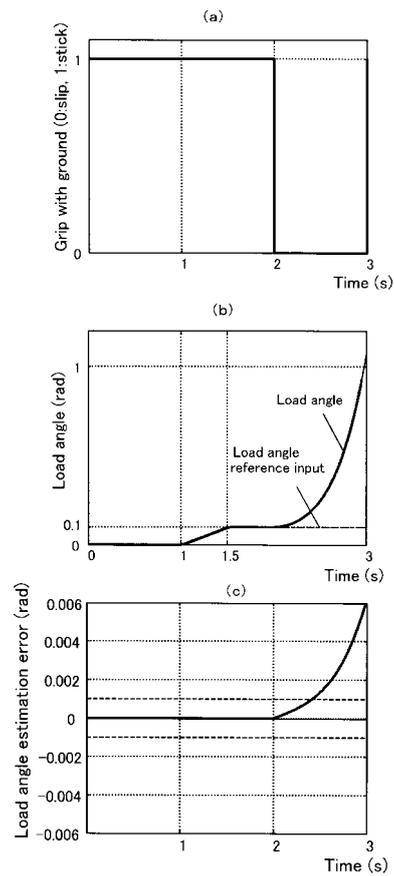
【図2】



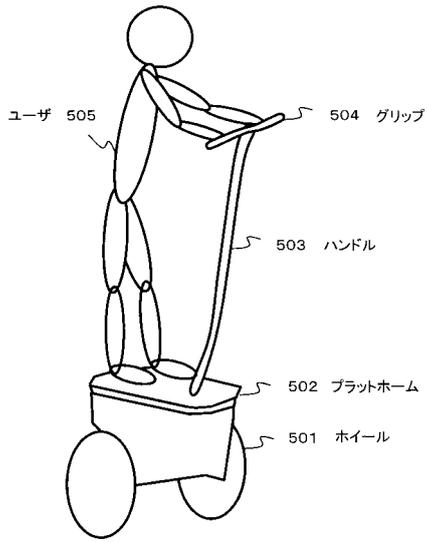
【図3】



【図4】



【図5】



---

フロントページの続き

- (56)参考文献 特開2010-208530(JP,A)  
特開2009-104360(JP,A)  
国際公開第2011/033592(WO,A1)  
特開2008-189089(JP,A)  
特開2010-030438(JP,A)  
特表2003-502002(JP,A)  
特開2009-280132(JP,A)  
特開2009-142127(JP,A)  
特開2009-101899(JP,A)  
特開2008-089531(JP,A)  
特開2010-152460(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

B62K 17/00  
B62K 3/00  
G05D 1/08  
B62D 63/02