

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	倒立振子制御を利用した酸素ポンベ搬送用ロボティックフォロワの開発
Title	
著者(和文)	入部正継, 太才遼一, 遠藤玄, 田窪敏夫, 衣笠哲也, 大須賀公一
Authors	Masatsugu Iribe, Gen Endo, Toshio Takubo, Tetsuya Kinugasa, Koichi Osuka
出典 / Citation	日本ロボット学会学術講演会, , 2G1-2
Citation(English)	, , , 2G1-2
発行日 / Pub. date	2012, 9
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は日本ロボット学会に帰属します。 Copyright (c) 2012 The Robotics Society of Japan.

倒立振り子制御を利用した酸素ボンベ搬送用 ロボティックフォロワの開発

○入部 正継 (大阪電気通信大学) 太才 遼一 (大阪電気通信大学) ※

遠藤 玄 (東京工業大学) 田窪 敏夫 (東京女子医科大学)

衣笠 哲也 (岡山理科大学) 大須賀 公一 (大阪大学)

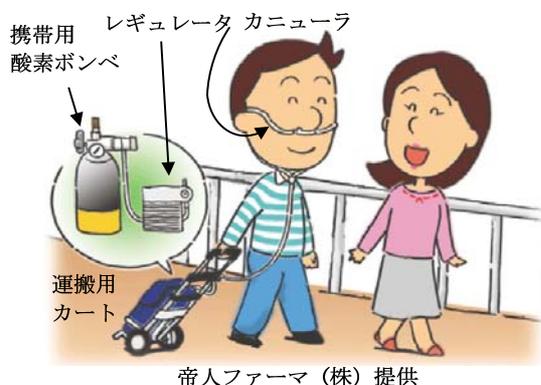
1. 緒言

在宅酸素療法(Home Oxygen Therapy, 以降 HOT)とは、主に慢性閉塞性肺疾患(Chronic Obstructive Pulmonary Disease, 以降 COPD)によって肺機能が低下した患者に対して行う対処療法である。COPD は主にタバコの煙に含まれる有害物質を吸引曝露することで肺に炎症が生じ、気流が慢性的に閉塞状態になる病気の総称で、回復が難しい進行性のものであり、患者数は日本で22 万人以上(2010年)である[1]。

COPD 患者の病状が進行すると、呼吸機能の低下に起因する血中の酸素不足を補うためカニューラと呼ばれるチューブを使用して鼻から高濃度の酸素を供給する必要がある。患者はこの治療 (HOT) を実施することで、入院することなく自宅で日常生活の質を保ったまま加療を続けることができる。そのためには酸素濃縮器を自室に置く必要があり、外出時には図 1 に示すように小型の携帯用酸素ボンベを搬送カートに乗せて持ち運ぶ必要がある。

また、COPD の治療では体力の維持を目的として適度な運動が有効とされ、散歩などが推奨されている。しかしながら現行の携帯用酸素ボンベは付属品と搬送カートとを合わせると約 5kg の質量となり、肺機能が低下した患者の肉体的な負担となる。それに加えて、外出時には常にカートを引き続けなければならないという精神的な負担にもなり、家に引きこもりがちになる患者も少なくない[2]。

そこで本研究では、HOT を実施している COPD 患者の外出支援を目的とした、携帯用酸素ボンベの運搬時の力を軽減する酸素ボンベ搬送用人間追従型ロボット (以降、ロボティックフォロワ [3]) の開発を試みる。



帝人ファーマ (株) 提供

図 1 HOT 患者の外出時の様子

※現在は日立造船(株)に異動

2. 倒立振り子制御による搬送カート

2.1 開発意図と動作原理

人間の生活環境内で実際に使用されることを想定して開発される人間追従型移動ロボットでは、種々の大きさの物体や人間・動物のように動的に位置が変化する障害物を回避する必要がある。この問題の解決のために、従来研究では高感度カメラや超音波センサ、レーザーレンジセンサなどのセンサを組み合わせた複雑なシステムをとることが多くみられる。

しかしこれらの研究例では高価なセンサ類を多用することとなり、ロボット自体のコストが高価となる。またシステムが複雑になることで動作の信頼性が犠牲になるなどの問題点も発生し易くなる。

一方、本研究の目的から普及しやすさを念頭におくと、可能な限り低コストかつ単純で信頼性の高い構造・構成であることが望ましい。また、カニューラを装着している患者にはロボティックフォロワとの距離が大きくなることは使用上の不安要素となるため、使用時は常にロボットの一部と接触することが望ましいと考えられる。

著者らはそれらの条件を達成すべく、ハイパーテザー型ロボティックフォロワを開発し、実機評価を行っているが[4][5]、本稿ではそれらに加えて倒立振り子制御によるロボティックフォロワの実現を試みる。

図 2 にその搬送動作の原理を示す。ユーザである患者が搬送カートを引き出す際には進行方向へカートを倒すため、必ず走行路面の鉛直方向に対して角度変位が生じる。そのとき倒立振り子は進行方向へ移動して平衡点に復帰しようとする性質があるため、牽引時には常に進行方向へ駆動力が発生する。この性質を提案するロボティックフォロワに適用することで、牽引するユーザの運搬時の負担を軽減することが可能であると考えられる。

(1)平衡点を維持 (2)ユーザ牽引により傾く (3)移動して平衡点を維持する運動を利用

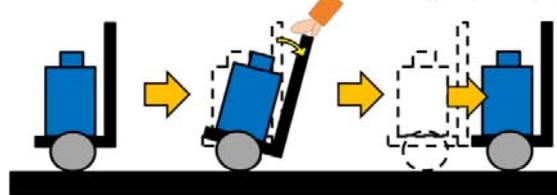


図 2 倒立振り子制御を利用した搬送の原理

次に旋回時の動作について述べる．ユーザは提案するロボティックフォロワのハンドル部を常に把持しているため，旋回時は自動的にロボティックフォロワ本体を牽引しつつ旋回動作を行うことになる．

従来の車輪型倒立振子では車輪2つにそれぞれアクチュエータを設けて左右の車輪の角速度を能動的に制御して旋回動作を行う．しかし本研究ではコストを意識した構造とするために，アクチュエータ1個で2つの車輪を駆動することを試みる．そして，アクチュエータ数を減らす代わりに，駆動輪の回転差を吸収することが可能なディファレンシャルギアを駆動部の減速器として採用し，旋回動作時には受動的にその動作方向に追従するようにする．これにより，アクチュエータ1個で直進方向だけでなく，搬送動作も実現が可能となる．

2.2 制御系設計と安定性の評価

提案するロボティックフォロワのユーザ追従制御のための車輪型倒立振子の制御について述べる．図3に制御対象の力学モデルを，各種パラメータを表1に示す．設定した力学モデルの状態変数を $\mathbf{X} = [x, \dot{x}, \theta, \dot{\theta}]^T$ と定義し， $\mathbf{X} = [0, 0, 0, 0]^T$ の近傍で線形化を施した状態方程式を

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}u \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}^T \mathbf{X} \end{cases} \quad (1)$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{23} & a_{24} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0 \\ b_2 \\ 0 \\ b_4 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix},$$

$$a_{23} = \frac{m^2 g l^2}{m^2 l^2 - (ml^2 + I)\left(m + M + \frac{J}{r^2}\right)}, \quad a_{24} = \frac{-mlC}{m^2 l^2 - (ml^2 + I)\left(m + M + \frac{J}{r^2}\right)},$$

$$a_{43} = \frac{-\left(m + M + \frac{J}{r^2}\right) mgl}{m^2 l^2 - (ml^2 + I)\left(m + M + \frac{J}{r^2}\right)}, \quad a_{44} = \frac{\left(m + M + \frac{J}{r^2}\right) C}{m^2 l^2 - (ml^2 + I)\left(m + M + \frac{J}{r^2}\right)},$$

$$b_2 = \frac{-(ml^2 + I)}{m^2 l^2 - (ml^2 + I)\left(m + M + \frac{J}{r^2}\right)}, \quad b_4 = \frac{ml^2}{m^2 l^2 - (ml^2 + I)\left(m + M + \frac{J}{r^2}\right)}.$$

とする．

ここで u : 制御入力 [N-m]， x : 位置 [m]， \dot{x} : 車体の速度 [m/s]， θ : 振子の角度 [rad]， $\dot{\theta}$: 振子の角速度 [rad/s]である．

この系の安定化のために状態フィードバックゲイン \mathbf{k} を設定し，制御入力 u を $u = -\mathbf{k}\mathbf{X}$ として加える．この \mathbf{k} の値を適切な値に設計することで安定化を行う．このフィードバックゲイン \mathbf{k} は最適レギュレータ法を用いて設計するものとし，具体的には Matlab の lqr 関数を使用して求める．その結果，フィードバックゲイン \mathbf{k} は

$$\mathbf{k} = [-100.00, -155.23, -710.65, -159.33]$$

となった．

これにより，図3の xy 平面内に拘束された車輪型倒立振子が起立し続けるための制御系が設計できた．したがってユーザが携帯用酸素ポンペを搭載して使用するとき，立ち止まる場合にユーザに荷物を持つ負担を軽減することが可能となる．

ところで，本研究で提案しているロボティックフォロワではユーザからの牽引による受動的な旋回を実現するために車輪型倒立振子の駆動部にディファレンシャルギアを採用している．そのため，直進移動時には車輪と路面摩擦のばらつき等によって左右の車輪の回転差が発生し，また受動的な旋回動作時にも同様に左右の車輪の回転差が発生する．

これらの左右の車輪の回転差は図3中の y 軸回りのモーメント成分となり，制御系へのトルク外乱として作用することになる．しかし，提案するロボティックフォロワではこのモーメント成分を補償する自由度を持たないため，目的の平衡点へ収束することは不可能である．

しかしながら，このトルク外乱を図4に示すように駆動系への入力部に印加される外乱と解釈し，その外乱の感度関数のゲインを計算すると，外乱から振子部の傾斜角度への感度関数の最大ゲインは -40[dB]，外乱から車体の位置への感度関数の最大ゲインは -55[dB]以下となることがわかる．これは，設計したフィードバックゲイン \mathbf{k} による外乱耐性の高さを示している．したがって，ディファレンシャルギアを駆動系に採用することが原因で倒立振子系の安定性を損なう可能性は非常に低いと考えられる．

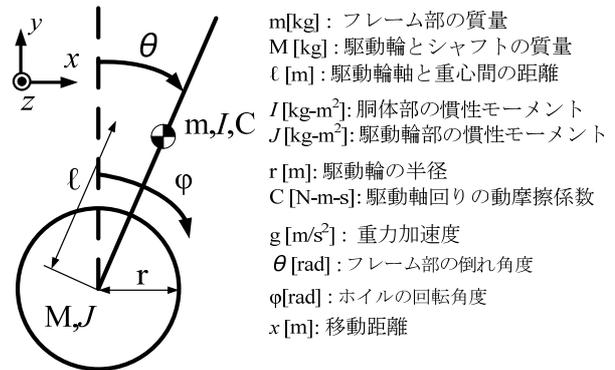


図3 車輪型倒立振子の力学モデル

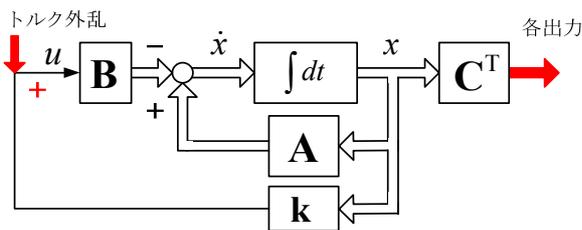
表1 力学モデルのパラメータ一覧

パラメータ	単位	値
m	[kg]	3.85
M	[kg]	2.25
l	[m]	0.1
I	[kg-m ²]	0.0878
J	[kg-m ²]	0.849×10^{-3}
r	[m]	0.0725
C	[N-m-s]	0.0586
g	[m/s ²]	9.8

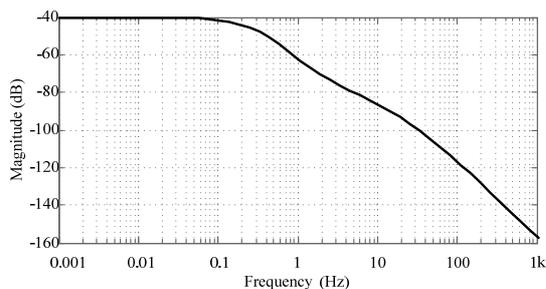
次にユーザが牽引して移動する場合を考える。このとき倒立振り子制御系は、ユーザが機体に加える力によって発生する傾斜角度を平衡点である 0 [rad] に復帰しようと作用する。これは制御系にとっては外乱の印加になるため、ロバスト性が高いほど大きな力で復帰動作を行うことになる。

また移動距離に関する制御については、位置 x に対して目標位置の更新が必要となるが、ユーザがどのような動作を行って移動するかはその都度異なるため、目標位置を与えることが困難である。それに加えて、マイコンなどのデバイスに制御器を実装することを想定するとユーザの移動距離がどこまで増えるのか予測できないため、有限のカウンタ値以下でしか動作が出来ないデバイスでは位置計測を行うことが同じく困難である。

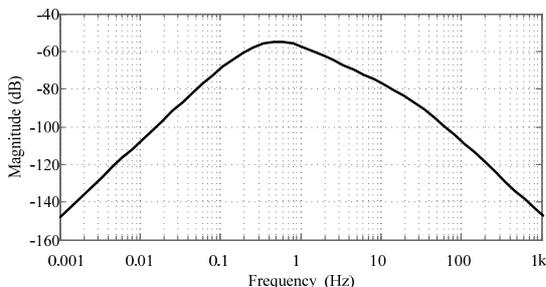
これらの性質に対応するため、本研究では移動時に通常の倒立振り子系と異なる制御系へと切り替えて使用する。具体的には図 5 に示すように状態フィードバック中の機体の位置に関するフィードバックを取りやめ、さらに振り子の角度に関するフィードバックゲインを小さくして感度を下げようとする。この操作により振り子の制御系の安定性が損なわれないかどうか、フィードバック後の系の固有値（特性根）の値を調べた結果を図 6 に示す。



(a) 制御系ブロック図とトルク外乱の入出力関係



(b) トルク外乱一車体角度の感度関数のゲイン



(c) トルク外乱一車体位置の感度関数のゲイン

図 4 制御系ブロック図とトルク外乱の入出力関係

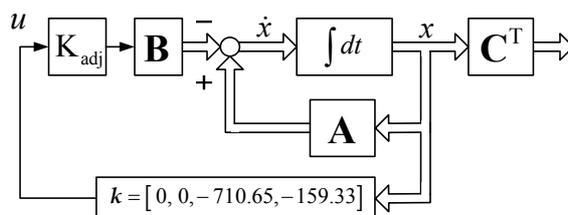


図 5 牽引による移動時に使用する倒立振り子制御系

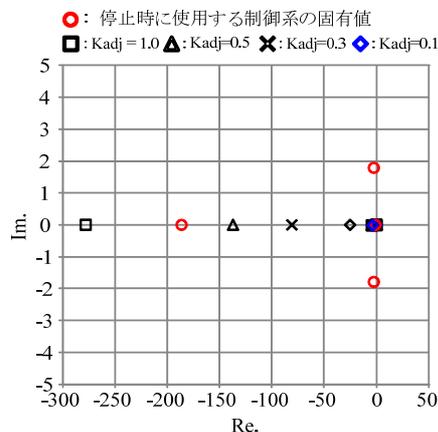


図 6 図 5 の制御系の固有値（特性根）

移動時に使用する制御系の固有値では、位置制御のモードの固有値が安定限界（零点）に配置されていることが分かる。一方で角度制御のモードの固有値は、フィードバックの感度を調整するゲイン K_{adj} の値の大小で固有値の値が変化するが、全て実軸上の左半平面に配置されていることより、系は安定であることが確認できる。

以上より、提案する倒立振り子型ロボティックフォロワでは、上述の制御系 2 つを動作によって選択して使用する。

2.3 試作機の開発概要

図 7 に提案する車輪型倒立振り子型のロボティックフォロワの試作機の概要を示す。フレーム部はアルミ製の押し出し材で構成されており、フレーム下部にアクチュエータとギアで構成された駆動部を、上部に電子回路部を搭載している。搬送すべき携帯酸素ボンベは、電子回路部のさらに上部に搭載する。ハンドル部分の両端には非常停止スイッチと制御モードの切替えスイッチを設置している。

駆動部には減速器付 DC モータ（中津製作所製 NS-60-HGM-15-24NKS5BA2, 減速比 1/15, 60W）をアクチュエータとして採用し、駆動力のさらなる減速と機体の受動的な旋回動作の実現を目的として減速比 1/2.5 のディファレンシャルギアを採用している。また車体の位置を検知することを目的として、ロータリーエンコーダをディファレンシャルギアに取り付け、車輪部の回転角度が測定できるようにしている。その詳細を図 8 に示す。

試作機の姿勢角速度の計測にはジャイロセンサを使用し、姿勢角度の計測にはジャイロセンサで計

測した角速度値を積分した値と加速度センサを制御モードによって使い分けている。

制御器は AT 互換機 PC に Ferora8 を OS として採用し、信号の入出力はインターフェースボード（ジャストウェア(株)製 JIF-171）を使用する。この制御器のシステム構成の詳細を図 9 に示す。

3. 制御実験による性能評価

外乱に対する耐性の評価と牽引時の挙動の評価を実験により行う。外乱耐性の評価実験では試作機を起立させた状態でハンドル部分をひねり、図 3 の y 軸まわりの外乱を与えた時の挙動を確認する。図 10 にその実験結果を示す。

牽引時の挙動の評価実験では、試作機を起立させた状態から制御モードの切り替えを行って 8 の字の軌道を描きながら被験者が牽引し、牽引終了後には再度モード切り替えを行い起立した状態に戻すという一連の動作時の挙動を確認する。図 11 にその実験結果を示す。これら 2 つの実験結果より、所望の動作が実現可能であることを確認した。

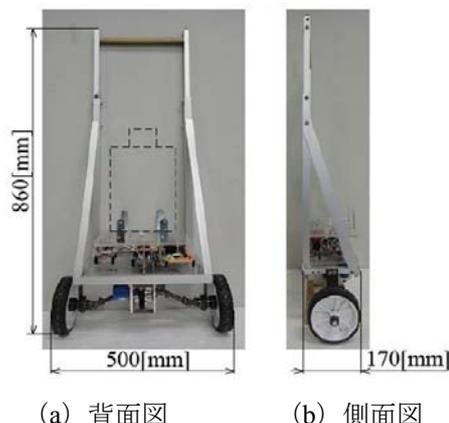


図 7 倒立振り子型ロボティックフォロワ試作機

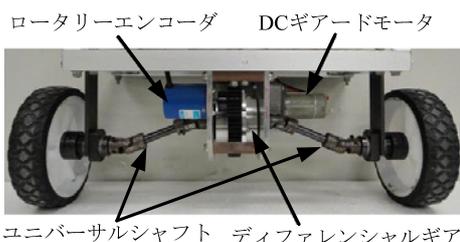


図 8 駆動部の詳細

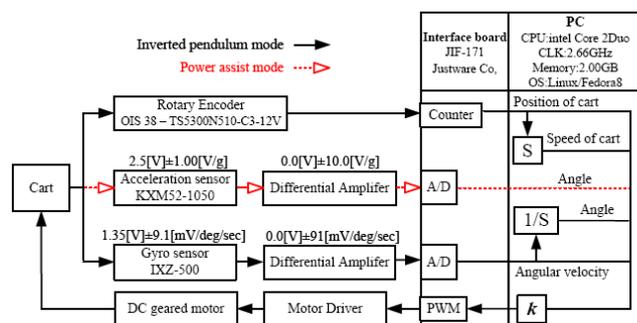


図 9 制御器のシステム構成の詳細

4. 結言

本稿では HOT 患者の外出支援を目的として、車輪型倒立振り子制御を利用したロボティックフォロワの実現を試みた。その結果、想定した支援動作を実現可能であることを確認した。

参考文献

- [1] 厚生労働省健康局生活習慣病対策室, “慢性閉塞性肺疾患(COPD)の現状について”, 2010 年.
- [2] 日本呼吸器学会肺生理専門委員会在宅呼吸ケア白書ワーキンググループ, “在宅呼吸ケア白書 2010”, 社団法人 日本呼吸器学会, pp.58-59, 2010.
- [3] 遠藤, 田窪, 福島, 入部, 広瀬, “日常生活支援のための実用的ロボティックフォロワの研究 -第 1 報: ハイパー・テザーを用いた在宅酸素療法用ポンプ運搬移動体の提案-”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2008, 2P2-F08, 2008.
- [4] M. Iribe, H. Matsuda, H. Aizawa, G. Endo, T. Takubo, “Study on a Practical Robotic Follower to Support Daily Life - A mobile robot development for Home Oxygen Therapy patients with the ‘Hyper Tether’-”, J. of Robotics and Mechatronics. Vol.23. No.2. 2011. pp.316-323.
- [5] A. Tani, G. Endo, E. F. Fukushima, S. Hirose, M. Iribe, T. Takubo, “Study on a Practical Robotic Follower to Support Home Oxygen Therapy Patients -Development and Control of a Mobile Platform-”, Proc. of the 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2011.

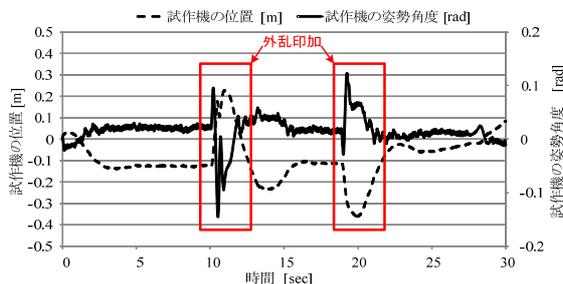


図 10 外乱耐性の評価実験結果

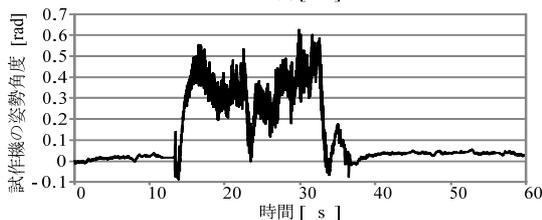
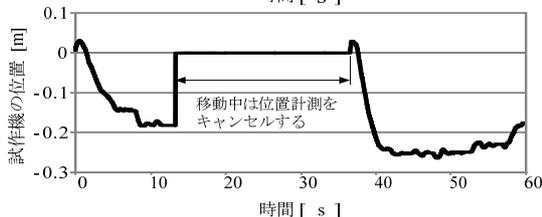
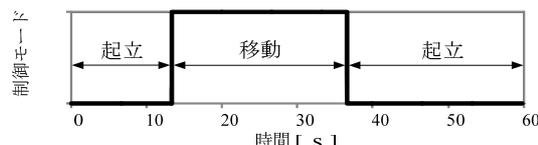


図 11 牽引時の挙動の評価実験