倒立振り子型アシストロボット用軽量双腕マニピュレータの開発 — 機構設計と制御システム構築 —

Development of a Light-Weight Dual Manipulator for an Inverted Pendulum Type Assist Robot
— Mechanism Design and Control System Integration —

○正 鄭 聖熹, 木村 直, 安沢 孝太 (福島大学), 正 佐々木 裕之 (鶴岡高専), 正 高橋隆行 (福島大学)

Seonghee JEONG, Fukushima Univ., jeong@sss.fukushima-u.ac.jp

Sunao KIMURA, Fukushima Univ.

Kouta ANZAWA, Fukushima Univ.

Hiroyuki SASAKI, Tsuruoka National College of Technology

Takayuki TAKAHASHI, Fukushima Univ., taka@sss.fukushima-u.ac.jp

This paper proposes a light-weight dual manipulators with multi-D.O.F for an inverted pendulum type assist robot. The manipulator has been designed to be a light-weight one, 3[kg], to assure safety and work ability, even it has 8 D.O.F and 1.75[kg] weight capacity. In order to realize various tasks by an inverted pendulum type robot some unique mechanisms are installed such as an extendable joint, a mechanical hinge stopper, and a wrist omni wheel. By using motion control with the mechanisms, the robot can achieve various motions such as standing up and sitting down, picking an object on the ground, static traveling, handling a small object, and lifting an heavy object. A prototype manipulator and a control system was integrated and a basic operation experiment was performed.

Key Words: Dual Manipulator, Light-Weight Manipulator, Inverted Pendulum type Assist Robot

1. はじめに

1.1 背景

人間共存型ロボットにおいては、人間や環境に対する高い安全性と、軽作業から重作業まで多様なサービスが効率よく実行できる高い作業能力の両立が強く求められる。しかし、両機能は一般的に相反する性質を持ち、一つのシステムでそれらを同時に実現することは困難な課題である。この課題に対して、車輪駆動式倒立振り子機構のロボットへの導入は、その機構的特徴から両機能の両立を可能にする一つの有効な手段であると考えられる [1]。

これまでの車輪駆動式倒立振り子ロボットに関する研究は主に移動能力や倒立安定性に関するものが多く [2][3][4]、対人サービスの提供を目的とした研究は少ない。近年、Robovie-III [5]、Emiew-1, 2 [6] のような移動機構として車輪型倒立振り子機構を用い、上半身に腰や多自由度マニピュレータを搭載した倒立振り子型ヒューマノイドロボットが開発されている。Robovie-III は倒立振り子のバランス動作の対人効果の評価等を目的としており、マニピュレータは主に印象評価用のジェスチャーを生成するのに用いられる。Emiew の場合は高速移動や案内を主に行うが、多自由度マニピュレータを使って軽量物の運びなどの作業も実行できる。しかし、これらのロボットに搭載されているマニピュレータは、産業用ロボットや4輪移動マニピュレータ等静的に安定なロボット用と類似のものであり、機構的に不安定なロボットに適したメカニズムであるとは限らない。

1.2 本研究の目的

本研究では、機構的に不安定な倒立振り子型ロボットが静的に安定なロボットと同等、又は、その機構的不安定性を活用した特有の作業を安全かつスムーズに実行できるように適したマニピュレータの開発を目的とする。本稿では、開発中の倒立振り子型アシストロボット I-PENTAR [1][7][8] への搭載を前提とした、安全性及び作業性を考慮した「倒立振り子型アシストロボット用軽量8自由度双腕マニピュレータ」について機構設計及び制御システムについて述べる。

Fig. 1 Representative goal tasks by I-PENTAR

2. マニピュレータの必要機能

本研究で開発するマニピュレータは対人サービスの提供を目的とするため、安全性と作業能力は基本的に備えるべき機能である。本研究では、マニピュレータの設計において、安全性に関しては軽量化 [9] 及び非力化、作業能力に関しては多自由度化 [10] 手段を用いる。軽量化及び非力化は、マニピュレータの潜在的危険源を減らし、リスクをできる限り低減する本質安全設計の思想に基づいた手法であり、多自由度化はタスク実行において、機構による自由度及び作業領域の制約をできる限り受けけないための手法である。

倒立振り子型ロボットは、その不安定さゆえに静的に安定なロボットに比べ、実行が制約されるタスクが多い。例えば、振動の影響を受ける細かな作業や、長時間の待機等が不安定さやバランス制御の影響を受ける代表的な作業である。倒立振り子型ロボットに搭載されるマニピュレータは、これらの倒立振り子型ロボットの特性上実行が困難なタスクを可能な限り実行可能にするメカニズムを持つことが望ましい。図1は、本研究の一環で開発中の倒立振り子型アシストロボット I-PENTAR が実現目標とするタスクの代表的な例であり、

Fig. 2 Light-weight 8 D.O.F dual manipulator

Table 1 Basic specification of the manipulator

Weight	[kg]	3
Length	[mm]	569(Extended:669)
D.O.F		8 (Arm:5, Wrist:3)
Pay load	[kg]	1.75

Table 2 Link parameters

Link	l_s	l_0	l_2	l_4	l_6
Lenth[m]	0.161	0.031	0.273	0.207	0.058

起立・着座切替え動作、床上の物拾い、小物のハンドリング、重量物の持ち上げ等一般的な機構を持つマニピュレータを用いては実行が困難なタスクである。本研究で開発するマニピュレータは、これらのタスクが実現できるメカニズムを有することが要求される。

3. 軽量高機能8自由度マニピュレータ

3.1 基本仕様

図2に開発したマニピュレータの概観を、表1にその基本仕様を示す。各マニピュレータはアーム5自由度、手首3自由度の総8自由度を有し、上腕には伸縮可能な直動関節が設けられ、通常時0.569[m]、伸長時0.669[m]の全長を持つ。各関節は、メンテナンス及びハーネス処理を容易にするためにアクチュエータを含めて全関節のパーツがモジュール化されており、本体がシンプルな構成になっている。アクチュエータは手先の動作精度を高めるために、DCモータとハーモニックギアの組み合わせを採用した。各マニピュレータの全重量は根元アクチュエータを含めて3[kg]であり、可搬重量1.75[kg]が実現できるようにモータと減速機を組み合わせアクチュエータを構成した。図3にその軸構成を、表2にリンクパラメータを示す。

以降、前述したI-PENTARの代表的なタスクを実行するために設けられたマニピュレータの特徴的なメカニズムについて述べる。

3.2 伸縮自由度

空間中の対象物の位置及び姿勢を決めるためにマニピュレータに必要な自由度は6自由度であるが、衝突回避や最適ブレーキ、器用な動作等を実現するためには冗長自由度が必要である。I-PENTARにおいても、一般的な生活支援タスクに関しては1自由度の冗長自由度を含む7自由度のマニピュレータで十分である。しかし、倒立機構の特性上、

Fig. 3 Joint configuration of the manipulator

Fig. 4 Model for the decision of the arm length

Table 3 Parameter values for the model

Parameter	Num.(1,2,3,4)
l Length of arm [m]	(0.2, 0.4, -, 0.15)
l_g Dist. of CoG [m]	(5l/6, 5l/6, 0.4, 1/2)
m Mass [kg]	(3.5, 15, 6, 1.5)
θ Joint angle [deg]	(90, 0, -180, 0)
$\theta_{\max}$ Max angle [deg]	(180, 0, -, -)
$\theta_{\min}$ Min angle [deg]	(90, -110, -, -)
l_{wh} Wheel radius [m]	0.1

起立・着座、重量物の持ち上げ、床面上のごみ拾いなど、腰を大きく曲げるタスクや地面にハンドを接地する動作においては、腕の長さを自由に調節できる自由度を有した方がより効率的かつ確実に作業が実行できると考えられる。

伸縮自由度の設計においては、マニピュレータに要求される機能を考慮して伸縮量を選定する必要がある。本研究で開発するマニピュレータは、上記の動作を実現するためにも、バランス状態、つまり、ロボットが重心を倒立付近に維持しながら手首を接地することが可能な腕の長さを持つ必要がある。また、直立状態で腕を伸ばした際に、先端に装着されたハンドが地面に接する等移動に邪魔にならないように、ハンドの先端が地面から一定距離離れる腕の長さが望ましい。本研究では、前者を伸縮自由度の最長長さ、後者を最短長さとして、シミュレーションにより伸長量を選定した。

図4にシミュレーションで用いた倒立振り子型ロボットのモデルを、表3に各パラメータを示す。同モデルは、車軸上

Fig. 5 Maximum extension length of the arm

Fig. 6 Extendable mechanism

に腰関節及び肩関節を持つ3リンク機構である。まず、腕の最短長さの選定において、ハンド長さ及びハンド先端の地面からのオフセット距離の合計を0.2[m]と仮定すると、ロボットの直立状態での肩の高さから腕の最短長さは0.5[m]が妥当である。

次に、最長長さを選定するためのシミュレーションを行う。シミュレーションでは、モデルの合成重心を車軸上に維持し、アームの先端(手首)を地面に固定した状態で腰関節を限界角度まで回転させた場合の肩関節からアーム先端までの距離を求めた。図5にシミュレーション結果を示す。図5(上)において、点1は、腰関節が可動限界の場合であり、この時のアームの長さが0.48[m]であることが分かる。これは、0.48[m]の長さのアームの場合でもロボットがバランスを維持しながら手首を接地することが可能であることを意味する。しかし、実際の運用を想定した場合、腰関節を可動限界まで回転させることはバランス制御及び腰関節への負荷上好ましくないため、グラフ上の点2の状態を選択する。この場合、肩と腰関節が各々134[deg]、-71[deg]であり、腕の長さは0.6[m]となる。したがって、腕の最短長0.5[m]から直動関節を0.1[m]伸ばすことで腰を大きく曲げることなく手首の接地が可能となる。

図6に製作したマニピュレータの伸縮関節の外観及び構造を示す。伸縮駆動用のアクチュエータは上腕リンク内の上部に位置し、2本のボールネジを回転させることで上腕を伸縮する機構となっている。

3.3 肘ストッパー

開発したマニピュレータは安全性を高めるために基本的に低パワーのモータを採用している。特に肘関節はアク

Fig. 7 Hinge stopper for a heavy task

Fig. 8 Omni wheel on the wrist

チュエータの重量増加によるマニピュレータの慣性質量の増加を避けるために、可搬重量を考慮した低パワーのアクチュエータを装着している。一方、I-PENTARはマニピュレータを用いたロボット本体の押し上げ、重心を用いた重量物持ち上げ等の重作業を想定している。このような作業の場合、図7の上図に示すように、肘関節には大きな曲げモーメントが発生するため、低パワーの肘関節では動作の実行が困難となる。この問題に対処するために、マニピュレータの肘関節に図7の下図に示す重作業用のメカニカルストッパーを設けている。ロボットは、肘関節に大きなモーメントがかかるような重作業を実行する際、肘関節をメカニカルストッパーに固定した状態で、肩関節のみの1リンクマニピュレータとして作業を行う。

3.4 手首オムニホイール

倒立振り子型ロボットは移動したり待機したりするためには動的安定制御を常に行わなければならない。したがって、テーブル上の小物のハンドリングや待機状態、不整地などの移動等実環境での導入を想定した場合、実用上大きなデメリットを持つ。この問題に対処するために、マニピュレータの手首に図8に示すオムニホイールを設けたユニークな機構を採り入れた。これにより、I-PENTARは、図8に示すように、車輪と手首ローラを用いた4輪安定走行、静的状態での重心移動のための手首スライディング等の動作が行える。また、小物の安定なハンドリング等細かな作業の場合は、手首ローラをテーブル上に載せ、車輪と手首ローラの3点支持の安定状態で作業を行うことが可能である。

Fig. 9 Structure of a control system

4. 制御システム

図9にマニピュレータの制御システムの構成図を示す。制御システムは、リアルタイム linux である ARTLinux を OS として、FPGA に PWM 発生器とカウンターを実装し、外部のモータドライバやエンコーダ等と通信を行う構成となっている。内部コントローラは、TCP/IP 通信により外部のクライアントから指令値を取得し各関節の制御を行う。

マニピュレータの基本制御は、PID 制御を適用した関節空間における角度制御を基本とし、制御式は次式で表される。

$$\tau = K_p(\theta_d - \theta) + K_v(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) + K_i \int (\theta_d - \theta) dt \quad (1)$$

ここで、 τ は制御入力、 K_p 、 K_v 、 K_i はそれぞれ比例、微分、積分ゲインである。また、 θ_d 、 θ は目標関節角度、関節角度を表す。一方、作業空間における位置・姿勢の制御法に関しては、次式で示すヤコビアン疑似逆行列を用いた冗長制御法を適用する。

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_d &= J^{\#} \dot{x}_d \\ \theta_d &= \int \dot{\theta}_d \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 $J^{\#} = J J^{-1}$ 、 $\dot{x}_d$ は作業空間における目標位置及び速度指令値である。図10に、上記の制御システム及び制御法を用いて、各関節ごとの動きを撮影した動画のスナップ画像を示す。

5. 終わりに

本論文では、倒立振り機構を持つ人間共存型ロボットへの導入を目的として開発した軽量多機能双腕マニピュレータについて述べた。開発したマニピュレータは、8自由度を有しながら全重量が3[kg]の軽量であり、可搬重量1.75[kg]が実現できるコンパクトな設計となっている。さらに、伸縮機構、メカニカルストッパー、手首オムニホイールなどの機構を有し、倒立振り型アシストロボットによる多様なタスク実行を可能にする。本研究で開発したマニピュレータは、これまで移動プラットフォームに留まった倒立振りロボットを様々な人間支援が実行できる人間共存型ロボットへ活躍の場を広げるのに貢献すると期待できる。

Fig. 10 Motion of the prototype manipulator

文献

- [1] SeongHee Jeong and Takahashi Takayuki, "Wheeled Inverted Pendulum Type Assistant Robot: Design Concept and Mobile Control," Intelligent Service Robotics, vol.1, no.4, pp.313-320, 2007.
- [2] Kazuo Ymafumi, Takashi Kawamura, Postural Control of a Monoaxial Bicycle, JRSJ, 7-4, 74/79 (1988)
- [3] Osamu Matsumoto, Shuuji Kajita et. al, Estimation and Control of Attitude of a Dynamic Mobile Robot Using Internal Sensors, JRSJ, 8-5, 37/46 (1990)
- [4] Yunsu Ha, Shinichi Yuta, Indoor Navigation of an Inverse Pendulum Type Autonomous Mobile Robot with Adaptive Stabilization Control System, 4th International Symposium on Experimental Robotics' 95, 331/336 (1995)
- [5] Robovie 3, ATR, Ltd., <http://www.irc.atr.jp/product/Robovie/robovie-2.html>
- [6] EMIEW, Hitachi, Ltd., <http://www.hqrd.hitachi.co.jp/merl/emiew.cfm>
- [7] SeongHee Jeong and Takayuki Takahashi, "Wheeled Inverted Pendulum Type Assistant Robot: Inverted Mobile, Standing, and Sitting Motions," Proc. 2007 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems IROS2007, WeB6.4(CDROM), pp.1932-1937, 2007.
- [8] SeongHee Jeong and Takayuki Takahashi, "Standing and sitting motion of inverted pendulum type assist robot using whole-body motion with force control," Proc. of The 2007 Int. Conf. on Mechatronics and Information Technologies, 2007.
- [9] Alessandro De Luca, Alin Albu-Schaffer, Sami Haddadin, Gerd Hirzinger, "Collision Detection and Safe Reaction with the DLR-3 Lightweight Manipulator Arm", Proc. of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1623-1630, 2006.
- [10] Yoshihiko Nakamura, Hideo Hanafusa, Tsuneo Yoshikawa, "Task Priority Based Redundancy Control of Robot Manipulators," The International Journal of Robotics Research", Vol.6, No.2, pp.3-15, 1987.
- [11] 鄭聖熹, 佐々木裕之, 高橋隆行, "倒立振り型アシストロボット I-PENTAR 用の 8 自由度双腕マニピュレータの開発", 第 240 回 SICE 東北支部研究集会, no.240-16, pp.1-8, 2007.