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*

鄭 聖 熹^{*1}, 木 村 直^{*2}, 高 橋 隆 行^{*1}Development of a Light-Weight Dual Manipulator for
an Inverted Pendulum Type Assist RobotSeonghee JEONG^{*3}, Sunao KIMURA and Takayuki TAKAHASHI^{*3} Department of Symbiotic Systems Science, Fukushima University,
01 Kanayagawa, Fukushima-shi, Fukushima, 960-1296 Japan

This paper proposes a light-weight dual manipulator with 8 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 a heavy object. A prototype manipulator and a control system were integrated and a basic operation experiment was performed.

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

1. 緒 言

1.1 背景 近年、二足型ヒューマノイドロボットに代表される、人間の生活環境で様々な対人サービスの提供を目的とする人間共存型ロボットの研究・開発が活発に行われている。これらの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、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。例えば、車体に同機構を用いるロボットは、人間のように重心を傾けることで自重を有効に使った作業が可能であり、非力なマニピュレータでも高い可搬重量特性が実現できる。また、機構自体が他の移動方式に比べてシンプルであるため、安全性向上の基本方策である軽量化が容易である。さらに、常時バランス制御を行うので、比較的重心の高い人間型ロボットにおいて、予期しない衝突や接触に対する

転倒安全性が高く、小フットプリント、キャスターレス等の特徴から機敏な動作や高い段差登坂能力のメリットを持つ。これらの特徴から、車輪駆動式倒立振り子機構は、高安全性と高作業能力を必要とする人間共存型ロボットに適した移動機構であると考えられる。

1.2 関連研究 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⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾、対人サービスの提供を目的とした研究は少ない。その中で Bryan ら⁽⁴⁾は、倒立振り子型ロボットが静的安定なロボットより外部環境へ大きな力を発生できることを示し、松本ら⁽⁵⁾は、複数の倒立振り子型ロボットによる協調搬送方法を提案した。これらの研究においては、倒立振り子機構自体がアームの役割を果たすか、2自由度のシンプルなアームを同機構に搭載した構成である。これに対し、近年、Robovie-III⁽⁶⁾、Emiew-1, 2⁽⁷⁾のような移動機構として車輪式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も開発されている。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

* 原稿受付 2009年4月13日。

^{*1} 正員、福島大学共生システム理工学類(〒960-1296 福島市金谷川01)。^{*2} 福島大学共生システム理工学類。

E-mail: jeong@rb.sss.fukushima-u.ac.jp

Fig. 1 Representative goal tasks by I-PENTAR

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言い難い。

1.3 本研究の目的 本研究では、機構的に不安定な倒立振り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するための倒立振り型ロボットに適したマニピュレータの開発を目的とする。本稿では、開発中の倒立振り型アシストロボット I-PENTAR⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾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」について機構設計を中心に述べる。

以降、2章では、I-PENTARを含む不安定ロボット用に要求されるマニピュレータの機能について言及し、3章にそれらの機能を実現するためのメカニズムを持つマニピュレータについて機構を中心に述べる。4章では、開発したマニピュレータの動作制御システム及び簡単な動作実験を行った結果を述べる。

2. マニピュレータに必要される機能

人間共存環境下で対人サービスを行うことを目的とするマニピュレータには、人間を傷つけない高い安全性と多様なサービスが可能な高作業能力が要求されることは上述した。本研究で開発するマニピュレータも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。これらの機能の評価はマニピュレータの使用環境や実行タスクごと

に異なり、その実現方法も様々である。しかし、多くのマニピュレータシステムにおいて、両機能を実現するために共通的に用いられる手法は幾つか存在する。その中で、本研究では、安全性に関しては軽量化⁽¹¹⁾及び非力化、作業能力に関しては多自由度化⁽¹²⁾及び車体との協調動作を採用する。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時、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。これらの手法は、倒立振り型ロボットに搭載されるマニピュレータに限られたものではなく、人間支援を目的とするマニピュレータにおいて、両機能を実現するための重要な共通的な手段である。

倒立振り型ロボットは、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。倒立振り型ロボットに搭載されるマニピュレータは、倒立振り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る。同図において、I-PENTARは双腕を利用して起立・着座切替動作、床上の物拾い、小物のハンドリング、重量物の持ち上げ等を実現目標とするが、従来のマニピュレータ機構を用いてはこれらのタスクを実行することは困難である。本研究で開発するマニピュレータには、I-PENTARが上記のタスクを実行するのに適切なメカニズムを有することが求められる。

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、図3に開発した軽量8自由度双腕マニピュレータの外観及びその軸構成を、表1に基本仕様を示す。各マニピュレータはアーム5自由度($J_0 \sim J_4$)、手首3自由度($J_5 \sim J_7$)の総8自由度を有する。アームには肩2自由度(J_0, J_1)、肘2自由度(J_3, J_4)の他に上腕(upper arm)に伸縮自由度が設けられている。これにより、 $J_0 - J_4$ 間長さが通常時0.304[m]から伸長時0.404[m]まで可変する特徴を持つ。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、多関節にも係わらずマニピュレータ本体がシンプルな構成となっている。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

Fig. 2 A light-weight 8 D.O.F dual manipulator

Fig. 3 Joint configuration of the prototype 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

の組み合わせを採用した。各マニピュレータの全重量は3[kg]であり、可搬重量1.75[kg]が実現できるようにモータ及び減速機を組み合わせで各関節のアクチュエータを構成した。表2、3にアクチュエータ及び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

Table 2 Specification of actuators

Joint	Motor [W]	Reducer	$\tau_{\max}$ [Nm]	$\dot{\theta}_{\max}$ [rad/s]
J_0 (sh,p)	17.5	250(HD)	30	24
J_1 (sh,r)	17.5	250(HD)	30	24
J_2 (linear)	4.5	19(PL)	0.2	547
J_3 (hi,y)	12	100(HD)	8	70
J_4 (hi,p)	12	250(HD)	13	28
J_5 (wr,y)	3.5	129(PL)	3.1	50
J_6 (wr,p)	4	200(HD)	1.9	40
J_7 (wr,y)	4	157(PL)	1	50

HD: Harmonic gear, PL: Planetary gear

sh: shoulder, hi: hinge, wr: wrist

r: roll, p: pitch, y: yaw

Table 3 Link parameters

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

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があれば十分である。しかし、倒立機構の特性上、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、アーム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。特に、後述するが、重量物の持ち上げ作業等でマニピュレータの肘関節を固定する必要がある重作業時には、ハンドを対象物に拘束した状態でロボット全体の重心を動かせる必要があり、アームの伸縮自由度は必需的である。

伸縮自由度を設計する際には、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。まず、前述の着座や床面上のごみ拾い等の目標動作を実現するためにも、バランス状態、つまり、マニピュレータを含むロボット全体の合成重心を倒立付近に維持しながらアーム先端を接地することができるアーム全長が必要である。一方、直立姿勢(気をつけの姿勢)の場合は、手首先端に装着されるハンドが地面に接する等移動時邪魔にならないように、ハンド先端が地面から一定距離離れるアーム長さを持つことが望ましい。本研究では、前者に必要なアーム長を最長長さ、後者に必要な長さを最短長さとして、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腰付き倒立振子型

Fig. 4 An inverted pendulum type robot model for the decision of the length of an arm

Table 4 Parameter values for the model

Parametar		Value
l_{wh}	Wheel radius	[m] 0.1
l_{lb}	Length of a lower body	[m] 0.2
l_{ub}	Length of an upper body	[m] 0.4
l_a	Length of an arm	[m]
l_n	Length of a neck	[m] 0.15
$l_{lb,g}$	Dist. of CoG of a lower body	[m] 0.16
$l_{ub,g}$	Dist. of CoG of an upper body	[m] 0.33
$l_{a,g}$	Dist. of CoG of an arm	[m] 0.4
$l_{n,g}$	Dist. of CoG of a neck	[m] 0.075
m_{lb}	Mass of a lower body	[kg] 3.5
m_{ub}	Mass of un upper body	[kg] 15
m_a	Mass of an arm	[kg] 6
m_n	Mass of a neck	[kg] 1.5
θ_{kn}	angle of a knee	[deg]
θ_{wa}	angle of a waist	[deg]
θ_{sh}	angle of a shoulder	[deg]
θ_n	angle of a neck	[deg]

ロボットのモデルを、表4に各パラメータを示す。同モデルは車輪、ボディー、アーム、頭で構成され、ボディーは腰関節により上部ボディーと下部ボディーに分かれ、下部ボディーは車輪と軸を共有する。モデルでの θ_{sh} は図2において J_0 の回転角、アームの全長 l_a は J_0 から J_6 までの長さに対応する。

まず、アームの最短長さ $l_{a,min}$ の選定において、ハンド長さ l_h 及びハンド先端の地面からのオフセット距離 l_{offset} の合計を0.2[m]に仮定すると、ロボットの直

(a) Relation among l_a , θ_{wa} , and θ_{kn}

(b) Posture of the robot model at point 1 and 2

Fig. 5 Simulation results for the decision of extendable length of the arm

立姿勢 $(\theta_{kn}, \theta_{wa}, \theta_{sh}, \theta_n) = (90, 0, -180, 0)$ でハンド先端が地面に接しないためには、 $l_{a,min} = 0.5[m]$ が妥当である。

次に、アーム最長長さ $l_{a,max}$ 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、ロボットの合成重心を車軸上に維持し、アームの先端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。膝関節角 θ_{kn} 及び腰関節角 θ_{wa} の可動範囲はそれぞれ $(0, 180)$ 、 $(-110, 0)$ であり、首関節角 θ_n は頭部が常に地面に垂直になるように角度を設定した。図5にシミュレーション結果を示す。図5(a)において、点1は腰関節が可動限界の場合であり、この時の肩関節から地面までの距離が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アーム先端に位置する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。点2は膝と腰関節

Fig. 6 An extendable mechanism

Fig. 7 Workspace of the prototype manipulator with an extendable joint: $X-Z$ space(Up), $X-Y$ space(Down)

が各々 $134[\text{deg}]$, $-71[\text{deg}]$ の状態であり、腰関節が可動限界から $39[\text{deg}]$ 離れている。この時の肩から地面までの距離は $0.6[\text{m}]$ である。

これまでの検討結果を踏まえて、アームの長さを通常時 $0.5[\text{m}]$ 、伸長時 $0.6[\text{m}]$ になるように伸縮自由度の伸縮量を $0.1[\text{m}]$ に決定した。これにより、倒立振り子型ロボットは通常時の直立姿勢でもハンド先と地面が干渉せず、又、アームを伸ばすことで腰関節を可動限界まで曲げることなく手首の接地が必要な作業が実現できる。

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。上腕リンク内の上部に位置する伸縮駆動用のアクチュエータ(J_2)により2本のボールスク

Fig. 8 A hinge stopper for a heavy task

リューを回転させると、ボールスクリュー上のレールが移動し、 J_3 以降のアームが伸縮する機構となっている。

伸縮自由度を設けることで、接地等の動作の他に一般的作業におけるマニピュレータの作業空間の拡大も期待できる。図7に、開発したマニピュレータの各関節可動範囲とリンクパラメータから求めたマニピュレータ1本分の作業領域を示す。同図における点線は伸縮自由度がない通常時のマニピュレータの作業領域、実線は伸縮自由度を用いてマニピュレータを伸ばした時の作業領域である。両領域を合わせた領域がマニピュレータの総作業領域であり、伸縮自由度を持つことにより作業領域が大きく拡張されていることが確認できる。

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モ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8(上)に示すように、肘関節(J_4)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8(下)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(J_0)のみの1リンクマニピュレータとして作業を行う。通常、倒立振り子型ロボットの自重を用いた重量

Fig. 9 An omni wheel on the wrist

物持ち上げ作業において、搭載したマニピュレータが1リンクで、かつ、先端のハンドが対象物に固定されると、ロボットは閉リンク系となり重心を自由に動かすことができなくなる。このような場合でも、提案するマニピュレータは伸縮自由度をうまく用いることによりロボットの重心を移動することができ、自重の効率的利用が可能である。

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へ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 J_6 関節の回転軸と同一線上に図9(上)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9(下)に示すように、車輪とオムニホイールを用いた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、オムニホイールをテーブル上に載せ、車輪とオムニホイールの3点支持の安定状態で作業を行うことが可能である。

4. 制御システム

図10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

Fig. 10 A structure of a control system

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、 $J^{\#} = J^T (JJ^T)^{-1}$ 、 $\dot{x}_d$ は作業空間における速度指令値である。

上記の制御システム及び制御法を用いて簡単な動作実験を行った。動作実験では、各関節を J_0 から J_7 まで順次に目標角度まで稼働した。図11に各関節ごとの動きを撮影した動画のスナップ画像及び左マニピュレータの各関節の角度プロファイルを示す。各関節の最終目標角度は J_0 から順に、 $(-20, 20, 3000, -30, -30, -40, -30, 90)[\text{deg}]$ である。同実験結果から構築した制御システムにより各関節の角度制御がうまく行われていることが確認できる。

5. 結 語

本論文では、倒立振り子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

(a) Snap shot of the joint motion

(b) Profile of each joint angle of a left manipulator

Fig. 11 Experimental result of motion control

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。

文 献

- (1) Ymafujii, K., Kawamura, T., Postural Control of a Monoaxial Bicycle, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.7, No.4(1988), pp.74-79.
- (2) Matsumoto, O., Kajita, S., Estimation and Control of Attitude of a Dynamic Mobile Robot Using Internal Sensors, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.8, No.5(1990), pp.37-46.
- (3) Ha, Y., Yuta, S., Indoor Navigation of an Inverse Pendulum Type Autonomous Mobile Robot with Adaptive Stabilization Control System, *Proceedings of the 4th International Symposium on Experimental Robotics*, (1995), pp.331-336.
- (4) Bryan, J.T., Patrick, D., Roderic, G., Static Analysis of Contact Forces With a Mobile Manipulator, *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation*, (2006), pp.4007-4012.
- (5) Matsumoto, O., Kajita, S., and Tanie, K., Cooperative Behavior of a Mechanically Unstable Mobile Robot for Object Transportation, *Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.64(c), No.628(1998), pp.164-171.
- (6) Ishigura, H., Ono, T., Imai, M., Maeda, T., Kanda, T., and Nakatsu, R., Robovie: A robot generates episode chains in our daily life, *Proceedings of the International Symposium on Robotics*, Vol.28, No.6(2001), pp.1356-1361.
- (7) Hosoda, Y., Egawa, S., Tamamoto, J., Basic design of human-symbiotic robot EMIEW, *Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol.1-12, (2006-9), pp.5079-5084.
- (8) Jeong, S., Takahashi, T., Wheeled Inverted Pendulum Type Assistant Robot: Design Concept and Mobile Control, *Intelligent Service Robot*, Vol.1, No.4(2007), pp.313-320.
- (9) Jeong, S., Takahashi, T., Wheeled Inverted Pendulum Type Assistant Robot: Inverted Mobile, Standing, and Sitting Motions, *Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol.1-9, (2007-10), pp.1932-1937.
- (10) Jeong, S., Takahashi, T., Stable and Quick Standing Motion of I-PENTAR by Whole-body Motion with Force Control, *Proceedings of the 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol.1-3, (2008-9), pp.199-204.
- (11) Luca, A.D., Alin, A., Haddadin, S., and Hirzinger, G., Collision Detection and Safe Reaction with the DLR-3 Lightweight Manipulator Arm, *Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol.1-12, (2006-10), pp.1623-1630.
- (12) Nakamura, Y., Hanafusa, H., and Yoshikawa, T., Task Priority Based Redundancy Control of Robot Manipulators, *The International Journal of Robotics Research*, Vol.6, No.2(1987), pp.3-15.