

倒立振り子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

Development of 8DOF Dual Manipulator for Inverted Pendulum Type Assist Robot

○鄭聖熹*, 佐々木裕之**, 高橋隆行*

○Seonghee Jeong*, Hiroyuki Sasaki**, Takayuki Takahashi*

*福島大学, **鶴岡高専

*Fukushima University, **Turuoka National College of Technology

キーワード： 倒立振り子 (Inverted Pendulum), 双腕マニピュレータ (Dual Manipulator), アシストロボット (Assist Robot), 多自由度マニピュレータ (Multi D.O.F Manipulator), オムニホイール (Omni Wheel),

連絡先： 〒960-1296 福島県福島市金谷川01 福島大学 共生システム理工学類 高橋研究室
鄭聖熹, Tel.: (024)548-8428, Fax.: (024)548-8428, E-mail: jeong@sss.fukushima-u.ac.jp

1. はじめに

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様々なサービスを効率よく行え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。車輪駆動式倒立振り子機構を用いるロボットは、自重を用いた作業が可能であるため、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、機構自体もシンプルなので軽量化が容易である。さらに、常にバランス制

御を行うので、比較的重心の高いヒューマノイドロボットにおいて、予期しない衝突に対する転倒安全性が高く、小フットプリント、キャストを用いない等の特長から機敏な動作や高い段差登坂能力などのメリットを持つ。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。

現在までの車輪駆動式倒立振り子ロボットに関する研究は、主に移動能力の向上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のが現状である。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の協調搬送方法を提案し、人間とロボット間の協調搬送実験を行った。さらに、Robovie-3, Emiewのよう

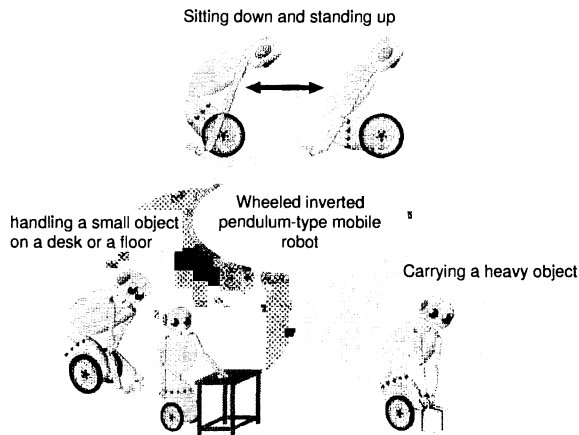


Fig. 1 Representative tasks by I-PENTAR

な移動機構として車輪式倒立振子を用いたヒューマノイドロボットも開発されている。Robovie-3は、倒立振子のバランス動作の対人効果の評価など主に対人印象評価用のジェスチャー生成を目的としており、Emiewは多自由度マニピュレータによる軽作業の提供は可能であるが、高速移動能力の向上が主な研究ターゲットである。これに対し、筆者らは安全性と作業性の両立を目的とした倒立振子型アシストロボットI-PENTAR⁶⁾を提案している。I-PENTARは、人間の生活空間の中で物理的な対人サービスを安全に提供することを目的としている。そのためには、目標とするタスクが実現できる安全に設計された高機能なマニピュレータ及びハンドが不可欠である。本稿では、上記目的を達成するために設計されたI-PENTARへ搭載予定の多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。

2. I-PENTARの目標タスク

Fig.1にI-PENTARが目標としている代表的なタスクを示す。I-PENTARは倒立振子型ロボットにとって重要な動作である起立・着座動作を基本に、自重を用いた重量物の運搬、床面上の物体の拾い、小物のハンドリングなど、軽作業は勿論、重作業や精密な作業をも目標タスクとしている。特に、

重量物の運搬などの重作業において、危険度の高いマニピュレータのパワーを利用するのではなく、自重と全身制御を有効に用いることで非力なマニピュレータで重作業を実行する安全な作業を目標としている。これらの目標を達成するためには、上記の代表的なタスクが実行できるように設計された安全で器用なマニピュレータが必要である。以降、マニピュレータの機構設計について詳しく述べる。

3. 双腕マニピュレータ

3.1 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となる。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.1での目標動作の中で、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タスクにおいては、腕の長さを自由に伸縮できる自由度を有したほうがより効率的かつ確実に作業が実行できる。なお、肘関節は大きな曲げモーメントが必要な重作業においては、メカニカルストッパー等を用いて固定し、手先の位置調節用としては用いない。したがって、I-PENTARのマニピュレータは一般的な冗長マニピュレータと同じ構成の7自由度に、上腕が伸縮する1自由度を合わせた8自由度で構成する。

3.2 マニピュレータの長さ及び伸縮量

マニピュレータの全長は、目標タスクが効率的に実現でき、かつ移動において邪魔にならないよう

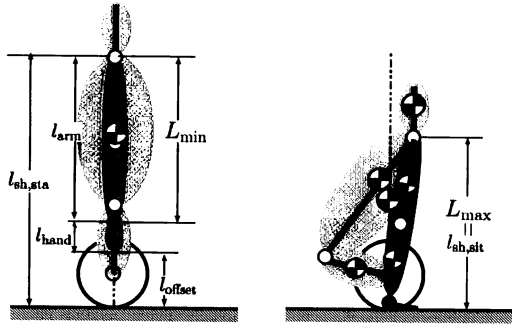


Fig. 2 Max. and min. length of a manipulator

に決めなければならない。I-PENTARのマニピュレータ全長の設計においては、直立状態でハンドの先端が地面からある程度離れて、移動時に邪魔にならないような長さを最短長さとして用いる。また、最長長さとしては、マニピュレータの長さが動作に大きく影響する起立・着座動作において、I-PENTARが静的状態から倒立制御切り替え場所まで体を押し上げるために必要とされる長さを用いる。上述したように、マニピュレータは伸縮自由度を有するので、最短長さとも最長長さの差が伸縮自由度の伸縮量となる。

マニピュレータの最短長さは、Fig.2 (左) に示す直立状態でのロボットの姿勢から、ハンドの先端が地面に接しないように、offsetより高い位置になるように決める。ロボットの身長を考慮して、ハンドの長さとおフセットの合計を0.2mに、地面から肩までの距離を0.7mとすると、モデルからマニピュレータの最短長さが0.5mより短い必要があることが分かる。次に、伸張時のマニピュレータの最長長さを決める。Fig.2 (右) にロボットの接地姿勢を示す。ロボットは着座動作時、バランスを維持しながら腰関節を曲げて手首を接地させるが、この場合の接地点は前方転倒を防止するために車軸の後方にあるのが望ましい⁶⁾。

ロボット着座姿勢に必要なマニピュレータの長さの範囲を決めるために、Fig.3のようなモデルを考える。ロボットの各パラメータはTable 1のように設定する。 Fig.4はロボットのバランスを維

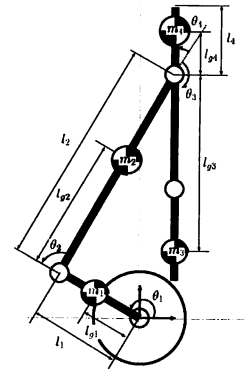


Fig. 3 A robot model for the calculation the length of the maximum and minimum length of arm

Table 1 Parameter values

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)
θ_{\max} Max angle [deg]	(180, 0, -, -)
θ_{\min} Min angle [deg]	(90, -110, -, -)
l_{wh} Wheel radius [m]	0.1

持しながら第1関節と第2関節を変化させた場合の車輪の接地点から肩までの距離を表したものであり、この距離がマニピュレータに必要とされる最長長さである。図から第2関節が最大、つまり、腰を最大に曲げた場合、マニピュレータは手首を車輪の接地点に接地するために0.48 mの長さが必要とするのが分かる。これは、前項で求めたマニピュレータの長さ0.5 mを用いた場合、腰関節を回転限界まで曲げないと手首を接地することができないことを意味する。したがって、腰曲げ動作にかかる時間の短縮と制御負荷の軽減、設計上の余裕などを考慮し、マニピュレータの最長長さを0.6 mと決める。そうすると、図から第1関節と第2関節が134 deg, -71 degで、直動関節を0.1 m伸ばすことで手首の接地が可能となる。なお、リンク2の重

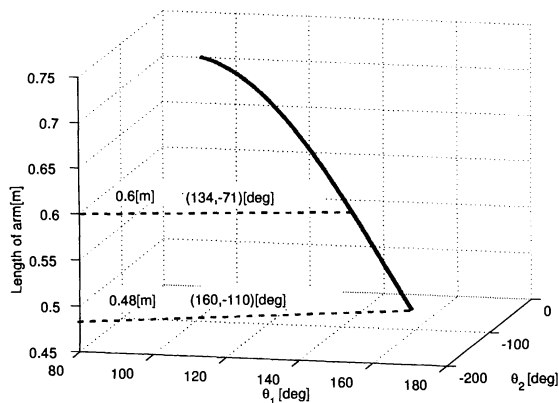


Fig. 4 Change of the manipulator's length according to the change of 1st and 2nd joint angle

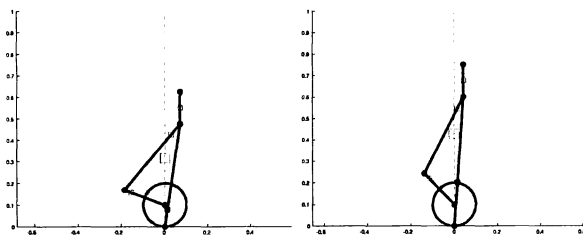


Fig. 5 $l_{arm}=0.48[m]$ Fig. 6 $l_{arm}=0.6[m]$

心の位置を変化した場合の接地に必要なマニピュレータの長さは、重心の位置がリンクの下部に位置するほど短くなる。

3.3 関節必要トルク

各関節の必要トルクの計算においては、アクチュエータを含む各リンクのすべての質点がリンクの重心に集中しているものと仮定し、可搬重量（ハンド重量を含む）1.75 kgの保持トルクが最大値となるマニピュレータの姿勢で、希望最大角速度を0.1 sで実現する加速度が発生できるトルク値をその関節の必要最大トルクと定める。ただし、肩関節に関しては、上記の可搬重量と起立・着座動作時の必要トルクの両方の観点から最大トルクを計算する。本稿では、肩関節の必要トルクの計算過程について簡単に述べる。

起立動作に必要な肩関節のトルクを求めるた

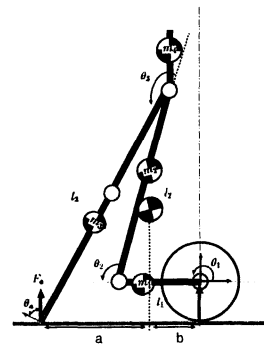


Fig. 7 Robot model for the torque calculation

めのモデルをFig.7に示す。ロボットは初期状態に、第一リンクが地面と水平に、第二リンクは可動限界まで曲がった姿勢で、マニピュレータが伸びきった状態で支えられている。この場合、ロボットの重心は車輪とマニピュレータで支持され、ロボットを支持するための肩関節トルクは次式で簡単に求められる。

$$\tau_3 = Mg(x_g/x_3) \cos(\sin^{-1}(y_2/l_3))l_3 \quad (1)$$

ここで、 y_2 は地面から肩までの距離、 M はロボットの重量、 x_3 と l_3 は各々手首の接地点と重心の水平距離である。マニピュレータの長さを0.6mとし、初期姿勢での肩関節に必要なトルクを計算すると一関節約17 Nmが必要となる。通常、起立のために肩関節を動かして手首を車軸までに移動させる場合、肩関節にかかるトルクは減少するので、起立初期姿勢でのトルクを肩関節の最大値とみなしても差し支えない。同じマニピュレータパラメータを用いて手先可搬重量の観点から肩関節の必要トルクを計算すると16 Nm程度であり、最終的な肩関節の必要トルクを17 Nmと決定する。

3.4 プロトタイプマニピュレータ

以上で求めた設計パラメータをベースに設計製作したマニピュレータの試作品をFig.8に、仕様をTable 2に示す。実機においては、上記で述べた設

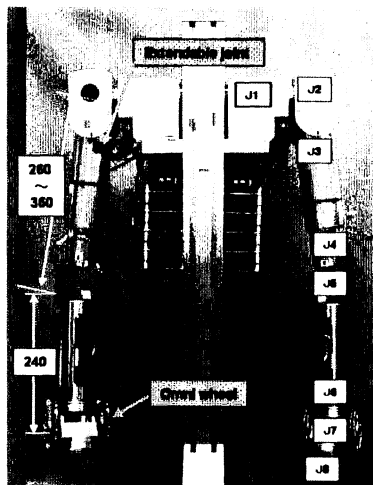
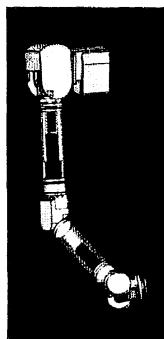


Fig. 8 The prototype of a 8DOF dual manipulator for I-PENTAR

計仕様の他に、着座・起立や着座状態での移動、手首による3点支持状態での作業を実現するために、手首に全方向移動可能なオムニホイールを装着されている。さらに、重作業における肘関節への大きな曲げモーメントを、非力なアクチュエータでも対処できるようにするため、肘関節にメカニカルストッパーを設けている。

4. おわりに

本論文では、物理的な対人サービスの提供を目的とする倒立振り子型アシストロボットI-PENTARへ装着するハンドマニピュレータシステムについて機構設計面を中心に述べた。マニピュレータは自由度、全長、関節トルクにおいて、I-PENTARによる安全で器用なサービスの提供が可能となるように設計された。今後、マニピュレータをI-PENTARへ装着し、多様な作業を実現する予定である。

参考文献

- 1) Kazuo Ymafuji, Takashi Kawamura, Postural Control of a Monoaxial Bicycle, JRSJ, 7-4, 74/79 (1988)
- 2) Osamu Matsumoto, Shuuji Kajita et. al, Estimation and Control of Attitude of a Dynamic Mobile

Table 2 Overall specification of the manipulator

Weight	[Kg]	3
Length	[mm]	500(Max.600)
D.O.F		8(arm 5, wrist 3)
Load	[Kg]	1.75(including hand)
Actuator		DC motor + Harmonic (J_1, J_2, J_4, J_5, J_7) DC motor + Planetary (J_3, J_6, J_8)
Torque (Max)	[Nm]	$J_1(17), J_2(15), J_3(0.1)$ $J_4(7), J_5(7), J_6(1.1)$ $J_7(1.1), J_8(0.6)$
Joint Limit (min,max)	[deg]	$J_1(-20, 250), J_2(-30, 90)$ $J_3(100[mm]), J_4(-135, 135)$ $J_5(-5, 90), J_6(-135, 135)$ $J_7(0, 90), J_8(-135, 135)$

Robot Using Internal Sensors, JRSJ, 8-5, 37/46 (1990)

- 3) 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)
- 4) Bryan J.Thibodeau, Patrick Deegan, Roderic Grunpen, Static Analysis of Contact Forces With a Mobile Manipulator, Proc. of International Conf. on Robotics and Automation, 4007/4012 (2006)
- 5) Osamu Matsumoto, Shuuji Kajita, Kazuo Tani, Cooperative Behavior of a Mechanically Unstable Mobile Robot for Object Transportation, JSME, 64(c)-628, 164/171 (1998)
- 6) SeongHee Jeong, Takahashi .Takahashi, Wheeled Inverted Pendulum Type Assistant Robot, - Realization of Inverted Mobile, Standing, and Sitting Motion, Proc. Of JSME Conf. on Robotics and Mechatronics, 2A1-C04 (2007)