多自由度ロボットにおける機構自由度の縮退を利用した アクチュエータの選択的利用

琴 坂 信 哉* 大 滝 英 征*

Selective Utilization of Actuator for a Humanoid Robot by Singular Configuration

Shinya Kotosaka* and Hideyuki Ohtaki*

In general, robot should not be operated while it is in a singular configuration since operation degenerates its degrees of freedom. However, humanoid robots are capable of performing tasks while in a state of singular configuration because humanoid robots have many degrees of freedom. In this paper, new task method is proposed for humanoid robots, featuring selective utilization of their actuators while in the singular configuration. First, we define the effective singular configuration for a task and introduce a classification for joints. Next, we propose a method to identify the joint as effectively having a singular configuration. Finally, we demonstrate physical simulation results that include leading a robot in the singular configuration through the task. The advantages of the proposed method are that it supports economizing the robot's energy consumption and applies more power to the hand.

Key Words: Humanoid Robot, Singular Configuration, Redundant Manipulator, Trajectory Generation

1. は じ め に

近年、ヒューマノイドロボットに代表されるような数十自由度を持つ多自由度ロボットが実現可能になってきた[1]~[4]。また、これらのロボットを有効に活用するための運動制御、運動軌道生成手法の研究が行われている[5][6]。しかし、多数ある自由度は、作業内容に応じて分割されて用いられることが多い。例えば、下半身の自由度は歩行に、腕は手先による作業にと特化して用いられることが多い。そのため、自由度の利用という観点から見ると、従来のロボットマニピュレータと変わりがなく、多自由度であることを積極的に活用しているとは言えないのが現状である。また、これらの多自由度ロボットは、人間が行っているような作業を行わせるには、まだ手先発生力が不十分であることや、独立したエネルギー供給源のみしか利用できない場合には、稼働時間が短いなどの問題点がある。本研究では、これらの問題点を解決するために、多自由度ロボットにおいて関節機構の縮退を用いたアクチュエータの選択的利用を提案する。

2. これまでの多自由度ロボットの運動軌道生成に関する関連研究

これまでヒューマノイドロボットにおける運動軌道生成に関する研究では、主に歩行運動生成が注目を集めてきた[7]~[9]。最

近では、多数の自由度を活用して安定な作業姿勢を維持するための手法[10][11]などが提案されるようになってきた。しかし、これらは関節の縮退状態を考慮した手法ではない。また、人間の運動を観測することにより、多自由度ロボット（特にヒューマノイドロボット）の運動軌道生成を行おうとする研究もある[12][13]。これらの研究では、関節レベルで運動軌道を生成していることが多く、ロボットの関節が縮退することも許容している。しかし、これらは関節の縮退状態を作業に用いようとするものではない。

また、これまでのロボット工学における縮退に関する研究は、主に縮退状態を回避するための運動生成手法や縮退状態付近でも手先の軌道制御を可能にするための手法の開発であった。例えば、冗長自由度を活用した障害物回避運動軌道計画や縮退状態を許容することのできる運動制御[14][15]、近年では縮退状態のコンフィギュレーションを考慮した運動軌道生成手法の提案[16][17]など多数の研究がある。しかし、これらも関節の縮退状態の特性を積極的に作業実行に用いる手法ではない。他に多自由度ロボットの運動軌道生成で縮退を考慮した研究としては、山根らの研究[18]がある。この研究は、縮退状態になることを許容しつつ運動軌道生成を可能とした研究であるが、主眼は多様な運動軌道生成におかれており関節縮退を作業に活用することを提案しているわけではない。また、縮退状態におけるロボットの機構特性についての研究も行われているが、一部の研究者によってのみ研究が行われているのが現状である[19]~[22]。

そのほかにも、多数の自由度を持った超冗長自由度機構の運動制御に関する研究も行われてきている。古くは、Salisburyの

原稿受付 2006年10月3日

*埼玉大学

*Saitama University

研究に始まり [23], 多数の研究者が逆運動学解法の研究 [24], 目的形状への形状制御方法 [25] [26] の研究等が行われてきた。これらも運動軌道生成, 運動制御方法の提案であって, 縮退を用いた作業方法の提案ではなかった。

3. 多自由度ロボットにおける関節自由度の縮退を用いた作業方法の提案

人間が行う日常的な動作の中には, 肘をのばして押し動作を行ったり, 足を伸ばした状態で立位姿勢を維持したりといった動作が多く見受けられる。例えば, Fig. 1 のように, 手のひらで押し動作を行う場合, 手首関節, 肘関節を縮退させることにより, 出力の小さな手首関節や肘関節に大きな負荷トルクを発生させることなく, 体幹部の大きな出力を持つ筋肉を用いて手先力を発生させている。縮退している関節部では, 関節負荷を関節の機構で支えているため, 筋肉に大きな負担をかけることがない。このような関節自由度の縮退を用いたアクチュエータの選択的利用は, 多自由度ロボットシステムにおいてロボットシステムの持つ能力を最大限に活用するために非常に有用であると考えられる。

一般に, 関節自由度の縮退は, 逆運動学計算が不能になる, 手先の運動自由度が減少するなどの問題を引き起こすことから, ロボットの動作には積極的には用いられてこなかった。しかし, 非常に多くの自由度を持つロボットでは, 一部の関節が縮退したとしても, 手先もしくは足先の運動自由度が減少するとは限らない。すなわち, 一部の関節の縮退により関節自由度が減少したとしても, 全体の動作は他の関節を駆動することにより続行できる場合が多いと考えられる。

以上により, 本研究では, 作業方向への関節縮退を利用したアクチュエータの選択的利用による作業方法を提案する。本手法では, ロボットのリンク機構の自由度を積極的に縮退させることにより, 負荷トルクを負担するアクチュエータを選択する。例えば, 出力の小さな関節を縮退させ, 出力の大きな関節によ

Fig. 1 Pushing task with singular configuration

り手先出力を発生させるなどの使い方が考えられる。Fig. 2 に関節縮退を用いてアクチュエータの選択的利用を行った場合の模式図を示す。図では, 手首関節, 肘関節を縮退させることにより, それらの関節に大きな負荷をかけることなく体幹部の大出力のアクチュエータを用いて大きな手先押しつけ力を発生させている。通常のひじを曲げたような姿勢で作業を行う場合には, 手首および肘関節の出力トルクが飽和することがないように手先押しつけ力を制限することが必要である。しかし, 両関節を縮退させれば, 手首関節, 肘関節の出力飽和を考慮することなく, 手先押しつけ力を体幹部のアクチュエータで発生させることができる。このとき, 体幹部のアクチュエータ出力が十分に大きければ, 従来方法よりも, 大きな手先押しつけ力を発生させることができる。すなわち, 本手法を用いることにより, 多自由度ロボットにおいて出力の小さな関節を考慮せず手先で大きな力を発生したり, 縮退させた関節負荷の低減化により消費エネルギーを低減化できる可能性がある。

なお, 本研究で提案する手法は, ヒューマノイドロボットに代表されるような分岐構造を持つ多リンク, 多自由度構成のロボットを対象とする。すなわち, 出力の異なるアクチュエータや, 異なるリンク長を持つ複数のリンク機構から構成されているロボットを対象とする。これらのロボットでは, 通常, 体幹部に相当する部分に, 大出力のアクチュエータを配置していることが多い。このようなロボットでは, 作業方向への関節縮退を用いたアクチュエータの選択的利用法が有効であると考えられる。よって, 本手法では, 同じリンク長, 同じアクチュエータから構成されているような蛇型, 超冗長マニピュレータのような構造のロボットは対象としない。もちろん, これらのロボットでも同様に関節自由度の選択的利用は可能ではあるが, 上記のように手先出力の増加や関節負荷の低減化が期待できない。例えば, 手先負荷を負担するアクチュエータを縮退させても, 同じ出力の別のアクチュエータに負担させるしかない場合は, 手先出力の増加が実現できない。そのため, 本手法が有効ではないからである。

4 章では, アクチュエータの選択的利用を行うための縮退可能関節の抽出方法について述べる。実際に 2 種類の機構に関し

Fig. 2 Selective utilization of actuator by singular configuration

て、縮退可能関節の抽出を行う。5章では、関節縮退によるアクチュエータの選択的利用の有効性をシミュレーションにより確認する。

4. 縮退させる関節の選択手法

4.1 関節自由度の縮退を用いた作業方法に有効な関節縮退

多自由度ロボットでは、縮退を発生する関節の組み合わせは無数に存在する。また、その縮退の形態も様々である。しかし、そのすべてが前章で提案した縮退を利用した動作に有効に働くわけではない。例えば、Fig. 2 に示した縮退姿勢において、図中に矢印で示した方向から力を受ける場合には、縮退を用いた動作は有効に働く。それに対し、矢印で示した方向に直交する方向から力を受けた場合には、関節を縮退させることの利点は失われてしまう。また、Fig. 3 (a) にあるような姿勢では、重力による負荷の方向と縮退の方向がまったく一致しないため、負荷トルクは低減化されない。また、Fig. 3 (b) の姿勢では、自由度の縮退が離れたリンク間で発生しているため、構造で外力を支えることができないため、縮退を用いることは有効ではない。これらを考慮して、本研究では有効な関節自由度の縮退を次のように定義する。

縮退を用いた作業方法に有効な関節自由度の縮退の定義

ロボットの効果器で発生すべき力（モーメント力は含まない）の方向と縮退した関節を含む連続したリンクの方向ベクトルが一致するような関節縮退。

4.2 関節機構の分類

有効な関節縮退を用いたアクチュエータの選択的利用法を作業計画、運動軌道計画に活用するためには、どの関節がどのような関節角度のときに「有効な縮退」を起こすかを網羅的に調べる必要がある。そのような情報があれば、例えば、縮退をさせたい関節の角度を縮退状態で固定し、他の関節を用いて運動軌道計画を行うことによって、アクチュエータの選択的利用が

可能になる。そこで、まず次のような仮定をおき関節機構の分類を行う。

仮定 1：それぞれの関節は、1 自由度の回転対偶関節を持つものとする。

仮定 2：関節間のオフセットは、各座標軸方向にのみ存在するとする。

仮定 3：関節間のねじれ角は、0 [deg] もしくは ± 90 [deg] とする。

以上のように仮定すると、関節の種類は Fig. 4 にある 4 種類に分類される。

4.3 リンク間の力とモーメント伝達関係の導出

二つのリンクが一つの関節で接続されているときに、何らかの力もしくは、モーメント力が片方のリンクに加わったときに、もう一方のリンクにどのような力もしくはモーメント力が伝達されるのか、関節にどのような負荷トルクが発生するのかを導出した。ここでは、リンクが剛体であることを仮定する。

Fig. 4 のように、入力側リンク (X_{in} , Y_{in} ...), 出力側リンク (X_{out} , Y_{out} ...) を仮定すると、入力側リンクの各座標軸方向に力もしくはモーメント力が働くとなると、Fig. 4 に示した関節の種類により、次のように伝達されることが分かる。

(1) F 型関節の力伝達関係

F 型関節の力伝達関係を Table 1 (a) に示す。Table 1 (a) では、入力側リンクの各座標軸方向ごとに、関節に負荷トルクが発生するかどうか、出力側リンクに力もしくはモーメント力が伝達されるかどうかを示されている。関節角度（リンク間の相対角度）に依存する場合は、その角度範囲を示した。Fx, Fy, Fz は、Fig. 4 にある各座標軸方向の力を表し、Mx, My, Mz は、各座標軸周りのモーメント力を表す。表中、出力側リンク

Fig. 3 Ineffective singular configuration

Fig. 4 Classification of joints

Table 1 Classification of force transmission for each type of joint

(a) F type joint

Input link	moment of force	Output link												notes
		joint angle non-depended						joint angle depended						
		Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz	
Fx	nothing	0	-	-	0	-	-	-	$\theta \neq 0, \pi$	$\theta \neq \pi/2$	-	$\theta \neq 0, \pi$	$\theta \neq \pi/2$	
Fy	nothing	0	-	-	0	-	-	-	$\theta \neq \pi/2$	$\theta \neq 0, \pi$	-	$\theta \neq \pi/2$	$\theta \neq 0, \pi$	
Fz	nothing	all	0	0	0	all	0	-	-	-	-	-	-	
Mx	nothing	-	-	-	0	-	-	$\theta \neq 0, \pi$	$\theta \neq \pi/2$	$\theta \neq 0, \pi$	-	$\theta \neq 0, \pi$	$\theta \neq \pi/2$	
My	nothing	-	-	-	0	-	-	$\theta \neq \pi/2$	$\theta \neq 0, \pi$	$\theta \neq \pi/2$	-	$\theta \neq \pi/2$	$\theta \neq 0, \pi$	
Mz	always exist	0	all	0	all	0	0	-	-	-	-	-	-	

(b) T type joint

Input link	moment of force	Output link												notes
		joint angle non-depended						joint angle depended						
		Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz	
Fx	nothing	0	0	all	-	-	0	-	-	-	$\theta \neq 0, \pi$	$\theta \neq \pi/2$	-	
Fy	always exist	-	-	0	0	0	all	$\theta \neq 0, \pi$	$\theta \neq \pi/2$	-	-	-	-	
Fz	nothing	-	-	0	-	-	0	$\theta \neq \pi/2$	$\theta \neq 0, \pi$	-	$\theta \neq 0, \pi$	$\theta \neq \pi/2$	-	
Mx	always exist	-	-	0	0	0	all	$\theta \neq 0, \pi$	$\theta \neq \pi/2$	-	-	-	-	
My	nothing	-	-	0	-	-	0	$\theta \neq \pi/2$	$\theta \neq 0, \pi$	-	$\theta \neq 0, \pi$	$\theta \neq \pi/2$	-	
Mz	nothing	-	-	0	-	-	0	$\theta \neq 0, \pi$	$\theta \neq \pi/2$	-	$\theta \neq \pi/2$	$\theta \neq 0, \pi$	-	

(c) R type joint

Input link	moment of force	Output link												notes
		joint angle non-depended						joint angle depended						
		Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz	
Fx	nothing	-	-	0	-	-	0	$\theta \neq \pi/2$	$\theta \neq 0, \pi$	-	$\theta \neq 0, \pi$	$\theta \neq \pi/2$	-	
Fy	nothing	-	-	0	-	-	0	$\theta \neq 0, \pi$	$\theta \neq \pi/2$	-	$\theta \neq \pi/2$	$\theta \neq 0, \pi$	-	
Fz	nothing	0	0	all	0	0	0	-	-	-	-	-	-	
Mx	nothing	-	-	0	-	-	0	$\theta \neq 0, \pi$	$\theta \neq \pi/2$	-	$\theta \neq \pi/2$	$\theta \neq 0, \pi$	-	
My	nothing	-	-	0	-	-	0	$\theta \neq \pi/2$	$\theta \neq 0, \pi$	-	$\theta \neq 0, \pi$	$\theta \neq \pi/2$	-	
Mz	always exist	0	0	0	0	0	all	-	-	-	-	-	-	

(d) P type joint

Input link	moment of force	Output link												notes
		joint angle non-depended						joint angle depended						
		Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz	
Fx	nothing	all	0	0	0	-	-	-	-	-	-	$\theta \neq \pi$	$\theta \neq 0, \pi$	My, Mz : if the length of moment arm is same.
Fy	always exist	0	-	-	-	0	0	-	$\theta \neq \pi/2$	$\theta \neq 0, \pi$	$\theta \neq \pi$	-	-	Mx : if the length of moment arm is same.
Fz	depends on the angle	0	-	-	-	0	0	-	$\theta \neq 0, \pi$	$\theta \neq \pi/2$	$\theta \neq 0, \pi$	-	-	Under degenerated condition, Fy and Mx=0
Mx	always exist	0	0	-	all	0	0	-	-	$\theta \neq 0, \pi$	-	-	-	Fy : if the length of moment arm is same.
My	nothing	-	0	0	0	-	-	$\theta \neq \pi$	-	-	-	$\theta \neq \pi/2$	$\theta \neq 0, \pi$	Fx : if the length of moment arm is same.
Mz	nothing	-	0	0	0	-	-	$\theta \neq 0, \pi$	-	-	-	$\theta \neq 0, \pi$	$\theta \neq \pi/2$	Fx, My($\theta \neq \pi$) : if the length of moment arm is same.

“joint angle non-depended” の列で、“0”と書かれた部分は、入力側の力もしくはモーメント力それぞれを伝達しないことを表しており、また“-”は、関節角に依存して力もしくはモーメント力が伝達されることを示している。“all”と書かれている部分は、関節角に依存せずに力もしくはモーメント力が伝達されることを示している。“joint angle depended”の列では、“-”が伝達されないことを、または伝達される場合の関節角 θ の条件を記入してある。なお、入力側と出力側のリンクの座標系の関係は、Fig.4に示す通りである。また、関節角 θ は、Fig.4に示した状態を0度として定義している。

F型関節では、入力側リンクのZ軸周りのモーメント力:Mzが加わった場合、関節角に依存せずに関節負荷トルクが発生する。それ以外では、関節に負荷トルクは発生しない。また、入力側Fx方向に力が加わった場合、出力側リンクのFx方向、Mx方向には力、モーメント力は伝達されない。そして、Fy、Fz方向、My、Mz方向には関節角に依存して伝達が行われる。入力リンクのFz方向に力が加わった場合には、出力側リンクのFx方向もしくはMy方向に常に力もしくはモーメント力として伝

達される。入力側Mz方向のモーメント力は、出力側Mx方向のモーメント力として伝達される。

また、以上のことから、F型関節は本研究で定義するところの有効な縮退を起こさないことが分かる。この特徴は、次に述べるT型関節でも同様で、オフセットを持つ関節は有効な縮退を発生しない。

(2) T型関節の力伝達関係

同様に、T型関節の力伝達関係をTable 1(b)に示す。Table 1(a)と同様に、T型関節の場合には、入力側リンクのy軸方向に力:Fyが加わった場合、および入力側リンクのZ軸周りのモーメント力:Mzが加わった場合に関節角に依存せずに関節負荷トルクが発生する。それ以外では、関節に負荷トルクは発生しない。また、入力側リンクに加わる力、モーメント力は、Table 1(b)に示したように出力側リンクに伝達される。

先に述べたように、T型関節では有効な縮退を発生しない。

(3) R型関節の力伝達関係

次に、R型関節の力伝達関係をTable 1(c)に示す。R型関節の場合には、入力側リンクのZ軸周りのモーメント力:Mzが

加わった場合に、関節角に依存せずに関節負荷トルクが発生する。それ以外では、関節に負荷トルクは発生しない。また、入力側リンクに加わる力、モーメント力は、Table 1(c) に示したように出力側リンクに伝達される。

R 型関節でも同様に有効な縮退が発生しない。

(4) P 型関節の力伝達関係

最後に P 型関節の力伝達関係を Table 1(d) に示す。P 型関節の場合には、入力側リンクの y 軸方向に力： F_y が加わった場合、および入力側リンクの Z 軸周りのモーメント力： M_x が加わった場合に関節角に依存せずに関節負荷トルクが発生する。また、入力側リンクに加わる力、モーメント力は、Table 1(d) に示したように出力側リンクに伝達される。

P 型関節で特徴的なのは、入力側リンクの z 軸方向に力： F_z が加わった場合に、関節角に依存した関節負荷トルクが発生する点である。この関節は、4.1 節で定義した有効な縮退が発生する関節である。この種類の関節では、縮退を発生させることにより手先に力が加わっていたとしても関節に負荷トルクを発生させないことが可能となる。

4.4 力伝達関係を用いた縮退可能関節の探索方法

縮退可能な関節の探索は、4.3 節で求めた力伝達関係を用いて、押しつけ力等を発生させる手先から順に次のリンクにどのような力が伝達されるかを調べることによって行う。

まず、手先に加わる力のベクトルから、力伝達関係の表から関節負荷トルクが発生するかどうかを調べる。関節負荷トルクが発生しない場合には、表から次のリンクへ伝達される力、モーメント力を調べる。次のリンクへ伝達される力、モーメント力から、同様に次のリンクで関節負荷トルクが発生するか、さらに次のリンクに伝達される力、モーメント力を調査する。これを繰り返すことにより、関節に負荷トルクが発生するかどうかを調べていく。この探索の途中で、関節角に依存して関節負荷トルクが発生する関節（基本的に P 型関節）があった場合には、そこが縮退可能関節であることになる。もし、探索の過程で関節角に依存せずに負荷トルクが発生する関節があった場合には、その関節で負荷を必ず受ける必要がある。この探索は、最終的にロボット全体の負荷を支える場所に達するまで行われる。通常のマニピュレータであれば、土台部分、ヒューマノイドロボットであれば、足首関節まで探索を行うことになる。

Fig. 5 に 8 自由度を持つシリアルリンクマニピュレータを示す。これは、ヒューマノイドロボットの胴体 1 自由度 (T_1 関節) + 腕 7 自由度 (R_1 から R_4 関節まで) を想定したマニピュレータである。このマニピュレータを例に、手先から縮退可能な関節の探索を実際に行った。

手先関節の z 軸方向から力： F_z が加えられるとする。手先の第一関節（ここでは、 R_1 関節と呼ぶ）は、R 型関節であるため、Table 1(c) より関節負荷トルクが発生しないことが分かる。また、次のリンクには、力： F_y , F_z およびモーメント力： M_x を伝達することが分かる。次の第二関節 (P_1 関節と呼ぶ) では、力： F_y , モーメント力： M_x は、 P_1 関節の関節負荷トルクには何の影響もないことが Table 1(d) から分かる。また、力： F_z は関節角に依存して負荷トルクを発生させることから、 P_1 関節は、縮退可能関節の候補となることが分かる。同様に、 P_1

Fig. 5 Serial link manipulator with 8 D.O.F.

Fig. 6 Serial link manipulator with 6 D.O.F.

関節に加わった力： F_y , F_z およびモーメント力： M_x が、次の R 型関節 (R_2 関節と呼ぶ) にどのように伝達されるかを力伝達関係の表から調べる。すると、 P_1 関節が縮退した場合には、力： F_z のみが次の R_2 関節に伝達されることが分かる。これを繰り返すことにより、最終的にマニピュレータのすべての P 型関節が縮退により関節負荷を発生させることなく、手先負荷を支えることができることが分かる。

同様に、**Fig. 6** に示す 6 自由度マニピュレータ（安川電機社製 YR-SV3X の関節構成）でも縮退可能関節を探索した。手先関節の z 軸方向から力： F_z が加えられるとする。手先の第一関節 (R_1 関節と呼ぶ) では、次のリンクに力： F_z を伝達する。次の P 型関節 (P_1 関節) では、縮退を利用することができる。次の F 型関節 (F_1 関節と呼ぶ) では、x 軸方向の力： F_x , モーメント力： M_y として伝達される。さらに次の P 型関節 (P_2 関節と呼ぶ) では、力： F_y , モーメント力： M_x , M_z として伝達される。このとき、 P_2 関節では、力： F_y により関節角依存せずに負荷トルクが発生することが分かる。以降同様に繰り返すことにより、このマニピュレータでは P_1 関節のみが縮退を利用可能であることが分かる。

5. 関節縮退によるアクチュエータの選択的利用を用いた押し動作

関節縮退を用いたアクチュエータの選択的利用の有効性を評価するために、シミュレーションによる評価を行った。シミュレーションでは、静的な状態において手先に与えられる外力により発生する関節負荷トルクの算出を行った。**Fig. 7** にシミュレーションに用いたリンク機構モデルを示す。簡単化のために平面 3 自由度のリンク機構に胴体を模擬した回転の 1 自由度を付加した 4 自由度機構とした。上半身のみヒューマノイドロボットを想定している。4.4 節で用いた 8 自由度マニピュレータの手首、肩部等の自由度 (R_1 , R_2 , R_3 , P_3 関節) を取り除いたもので、今回の作業内容では力学的に等価な機構となる。ま

Fig. 7 Upper body of Humanoid robot for simulation

Fig. 8 Comparison of joint torque under singular configuration and non-singular configuration

た, Fig. 7 の機構では, 手首, 肘関節が縮退可能関節となる. 重力の影響は, シミュレーション結果には大きく影響を与えないため無視した.

Fig. 8 に, 各関節の負荷トルクを棒グラフで示した. 手先に 10 [N] の水平方向の外力が加わったときの, 手首, 肘関節を縮退させた場合と縮退させなかった場合の 2 通りを示してある. リンク機構の姿勢は, 手首, 肘関節が縮退した状態では, Fig. 1 のように腕をまっすぐ伸ばした状態になる. 手首, 肘関節が縮退状態ではない姿勢は, 手首関節が肩関節と同じ高さになるように, 肘関節が $\pi/2$ [rad] となるような姿勢を選んだ. なお, Fig. 8 では, 横軸に縮退状態と非縮退状態のそれぞれの関節を表し, 縦軸に関節負荷トルクを示した.

図より分かるように, 関節縮退を行った場合と行わなかった場合とでは, 胴体部, 手首, 肩関節の負荷トルクには変化はないが, 肘関節に加わる負荷トルクは縮退状態で 0 [Nm] となっている. また, 手首関節も縮退状態では, 関節負荷トルクが 0 [Nm] となっている. ただし, 今回の作業姿勢では, 外力の方向ベクトルと手首関節, 肩関節が一直線上に並んでいるので, 手首, 肩関節ともに縮退状態でない状態でも負荷トルクが 0 [Nm] になっている. 一方, 胴体部の関節には, どちらの姿勢でも同じ負荷トルクがかかっている.

以上より, 縮退状態では手先に加わる外力を胴体部の関節で負担していることが分かる. また, 手首, 肘関節では, 手先に加わる外力の大きさにかかわらず, 縮退状態では負荷トルクは発生しない. これらのことから, アクチュエータの選択的利用

が可能であることが分かる. 本論文では, 押し動作を取り上げたが, 引張力を発生させる場合でも同様の効果が期待できる.

6. おわりに

本研究では, ヒューマノイドロボットに代表されるような多自由度ロボットにおいて, 関節縮退を積極的に活用し, アクチュエータを選択的に利用する作業方法を提案した. そして, 関節縮退を用いた作業に有効な関節の導出手法を提案し, 力学シミュレーションにより関節縮退によりアクチュエータの選択的利用が可能であることを確認した.

本手法では, 手先には力のみが加わるとし, モーメント力が加わる場合を想定していない. これは, 通常大きな出力が要求されるような作業では, レンチ, ハンドル等, モーメント力を力に変換する道具を用いて行われることが多い. また, 手先の 1 自由度をレンチ等と同様に考えれば, 手先に加わるモーメント力を力に変換することもできる. そのため, 大きなモーメント力を手先に要求する作業は少ないと考え, 対象から外した. しかし, モーメント力が加わる場合でも, 本手法と同様に縮退を利用したアクチュエータの選択的利用が可能である. 今後, より一般的な拡張を目指してモーメント力も含めた手法を検討していきたいと考えている.

また, 本手法を有効に活用するためには, さらにロボットの動作計画, 作業計画にまで踏み込んだ手法が必要とされる. という意味では, まだ未完成の手法ではあるが, ロボットの自由度の有効活用する方法の一つとして提案したい.

謝辞 本研究は, 科学研究費補助金「基盤研究 (C): 課題番号 16500100」の支援を受けて実施された.

参考文献

- [1] K. Hirai, M. Hirose, Y. Haikawa and T. Takenaka: "The Development of Honda Humanoid Robot," Proc. of the 1998 ICRA, pp.1321-1326, 1998.
- [2] K. Nishiwaki, S. Kagami, J.J. Kuffner, M. Inaba and H. Inoue: "Humanoid 'JSK-H7': Research Platform for Autonomous Behavior and Whole Body Motion," Proceedings of the Third IARP International Workshop on Humanoid and Human Friendly Robotics, pp.2-9, 2002.
- [3] K. Kaneko, F. Kanehiro, S. Kajita, K. Yokoyama, K. Akachi, T. Kawasaki, S. Ota and T. Isozumi: "Design of Prototype Humanoid Robotics Platform for HRP," Proc. of IROS 2002, pp.2431-2436, 2002.
- [4] H. Hirukawa, F. Kanehiro, K. Kaneko, S. Kajita, K. Fujiwara, Y. Kawai, F. Tomita, S. Hirai, K. Tanie, T. Isozumi et al.: "Humanoid robotics platforms developed in HRP," Robotics and Autonomous Systems, vol.48, issue 4, pp.165-175, 2004.
- [5] 蓮沼仁志, 中嶋勝己, 小林政己, 御松文里, 宮原啓造, 鷹取正夫, 森山尚, 家中良太, 横井一仁: "人間型ロボットのための遠隔操縦システムの開発—人間型ロボットによる産業車両の代行運転への適用—", 日本ロボット学会誌, vol.22, no.1, pp.46-54, 2004.
- [6] 梶田秀司, 金広文男, 金子健二, 藤原清司, 原田研介, 横井一仁, 比留川博久: "分解運動量制御: 運動量と角運動量に基づくヒューマノイドロボットの全身運動生成", 日本ロボット学会誌, vol.22, no.6, pp.772-779, 2004.
- [7] 梶田秀司, 谷和男: "実時間路面形状計測に基づく動的 2 足歩行の制御", 日本ロボット学会誌, vol.14, no.7, pp.1062-1069, 1996.
- [8] 古田貴之, 大和秀彰, 永野雅邦, 富山健: "多リンク仮想倒立振り子を規範とした二脚移動ロボットの 실시간歩容生成法", 電気学会論文誌, vol.120-C, no.2, pp.208-214, 2000.

- [9] 山口仁一, 木下昇, 高西淳夫, 加藤一郎: “路面形状に偏差のある環境に対する適応能力を持つ2足歩行ロボットの開発”, 日本ロボット学会誌, vol.14, no.4, pp.546-559, 1996.
- [10] 吉田晴行, 井上健司, 新井健生, 前泰志: “人間型ロボットの作業移動—作業移動に要求される脚機能の分析—”, 日本ロボット学会誌, vol.19, no.5, pp.660-666, 2001.
- [11] 原田研介, 梶田秀司, 金広文男, 藤原清司, 金子健二, 横井一仁, 比留川博久: “ヒューマノイドロボットの脚腕協調におけるZMP解析”, 日本ロボット学会誌, vol.22, no.1, pp.28-36, 2004.
- [12] A. Ude, C.G. Atkeson and M. Riley: “Programming Full-Body Movements for Humanoid Robots by Observation,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol.47, issues 2-3, pp.93-108, 2004.
- [13] J. Nakanishi, J. Morimoto, G. Endo, G. Cheng, S. Schaal and M. Kawato: “Learning from demonstration and adaptation of biped locomotion,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol.47, issues 2-3, pp.79-91, 2004.
- [14] 中村仁彦 他: “関節型ロボットアームの特異点低感度運動分解”, 計測自動制御学会論文集, vol.20, no.5, pp.453-459, 1984.
- [15] Y. Nakamura and H. Hanafusa: “Task Priority Based Redundancy Control of Robot Manipulators,” *International Journal of Robotics Research*, vol.6, no.2, pp.3-15, 1987.
- [16] K. Nakai, K. Kosuge and Y. Hirata: “Control of Robot in Singular Configurations for Human-Robot Coordination,” *Proc. of the 2002 IEEE Int. Workshop on Robot and Human Interactive Communication*, pp.356-361, 2002.
- [17] K. Nakai, K. Kosuge and Y. Hirata: “Configurations for Human-Robot Coordination,” *Proc. of the 2002 IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication*, pp.356-361, 2002.
- [18] K. Yamane and Y. Nakamura: “Dynamic Filter—Concept and Implementation of Online Motion Generator for Human Figures,” *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol.19, no.3, pp.421-432, 2003.
- [19] 杉本浩一: “機構の特異点に関する考察”, 日本ロボット学会誌, vol.11, no.4, pp.550-556, 1993.
- [20] 杉本浩一: “直列機構の特異点での運動解析”, 日本ロボット学会誌, vol.12, no.4, pp.616-620, 1994.
- [21] S. Narasimhan and V. Kumar: “A Second Order Analysis of Manipulator Kinematics in Singular Configurations,” 23rd Biennial ASME Mechanisms Conference, ASME Publication Mechanism Synthesis and Analysis, pp.477-484, 1994.
- [22] C. Mavroidis and B. Roth: “Method to Determine Uncertain Configurations of 6R Manipulators,” *Proc. of the 9th World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms (IFToMM)*, vol.3, pp.1987-1992, 1995.
- [23] J.K. Salisbury: “Whole Arm Manipulation,” *Proc. of the 4th Int. Sympo. Robotics Research*, pp.183-189, 1988.
- [24] 小金澤鋼一: “冗長自由度を有するマニピュレータの逆運動学の高速かつ安定な解法”, 日本ロボット学会誌, vol.16, no.5, pp.721-727, 1998.
- [25] 望山洋, 示村悦二郎, 小林尚登: “超多自由度シリアルリンクマニピュレータの制御”, 日本ロボット学会誌, vol.15, no.1, pp.109-117, 1997.
- [26] 広瀬茂男, 佐藤幹夫: “多自由度ロボットの干渉駆動”, 日本ロボット学会誌, vol.7, no.2, pp.128-135, 1989.

琴坂信哉 (Shinya Kotosaka)

1963年7月18日生。1996年埼玉大学大学院博士(工学)取得, 理化学研究所奨励研究員, (株)ATR人間情報通信研究所滞在研究員, 科学技術振興事業団川人学習動態脳プロジェクト研究員を経て, 現在, 埼玉大学大学院理工学研究科人間支援・生産科学部門所属。日本機械学会会員。

(日本ロボット学会正会員)

大滝英征 (Hideyuki Ohtaki)

1943年9月27日生。1972年東京大学大学院工学研究科博士課程修了, 同年, 工業技術院機械技術研究所入所。1983年埼玉大学工学部助教授, 1987年同大学教授。現在, 埼玉大学大学院理工学研究科人間支援・生産科学部門所属。工学博士。日本機械学会会員。