

# 非線形ばね機構を用いた四脚ロボットの運動制御 —構造的特異性による硬さと柔らかさの両立—

## Motion Control of Quadruped Robot using Nonlinear Stiffness

-Simultaneous Realization of Softness and Stiffness based on Mechanical Singularity-

○菅谷侑司(東工大) 岡田昌史(東工大)

\*Yuji SUGAYA, Tokyo Institute of Technology

Masafumi OKADA, Tokyo Institute of Technology

**Abstract**— For designing a safe robot, to introduce soft mechanisms on joint or elastic members is an effective way. However, softness caused by elasticity also brings some disadvantages, i.e. oscillation of the end effector and low power transmission for task execution. So far, a torsional spring mechanism with nonlinear stiffness has been developed. The stiffness of this mechanism changes from zero to extremely high based on mechanical singularity. In this paper, we develop a quadruped robot with this mechanism on knee joints and evaluate the impact absorption and high power transmission, which means the simultaneous realization of softness and stiffness.

**Key Words:** Nonlinear Stiffness, Mechanical Singularity, Quadruped Robot

### 1. はじめに

衝撃力の吸収効果や未知環境への柔軟性を目的とした、移動ロボットの設計や制御に柔らかさを導入する研究が多くなされている [1]-[3]. 柔らかさをもたらす衝撃力の吸収効果はロボットの対人・対物安全性の確保に非常に効果的であり、また移動ロボットにおける周囲環境の複雑化・多様化に対応するためにも柔らかさの導入は必須であると言えるであろう。しかし、柔らかさの導入はタスク実行能力の低下や身体の振動特性の発生といった実用上の問題を引き起こす面もあり、柔らかさと硬さを両立することが重要な課題であると言える。

主な柔らかさの導入方法、および、それらの一般的な特徴を以下に示す。(1) 機構に弾性素材を組み込むパッシブ・コンプライアンスは即応性および信頼性に優れるが、剛性が固定であるため、柔らかさと硬さの両立は難しい。(2) アクチュエータの力制御によって仮想的に柔らかさを実現するアクティブ・コンプライアンス [4] では剛性が可変であるため、硬さと柔らかさの両方が実現可能であるが即応性と信頼性に欠ける。また、(3) アクチュエータによって弾性素材の剛性を変化させるプログラマブル・パッシブ・コンプライアンス [5], [6] は機構が複雑になり、重量などの点からロボットに組み込むにあたって問題点があるなど、どの手法もロボットにおいて柔らかさと硬さの両立を実現する手段として問題点があった。これに対し、パッシブコンプライアンスに非線形ばねを用いて剛性を変化させる方法が考えられる。これはパッシブ・コンプライアンスの利点である即応性と信頼性を実現し、さらに剛性が変化することによって柔らかさと硬さの両立を実現している。剛性の変化が受動的であるが、目的に合った剛性変化の設計により、この問題は解決される。

大きな非線形剛性を持つねじりばね機構が紀らによって開発されてきた [7]. 機構の写真および機構図を Fig.1 に示す。この機構は5つの回転対偶によって構成されており、閉リンク構造をなす。上下の円盤がねじれることによって円盤の間に張られた3本のリンクが引張変形を起こし、復元力が発生する。閉リンク系を構成す

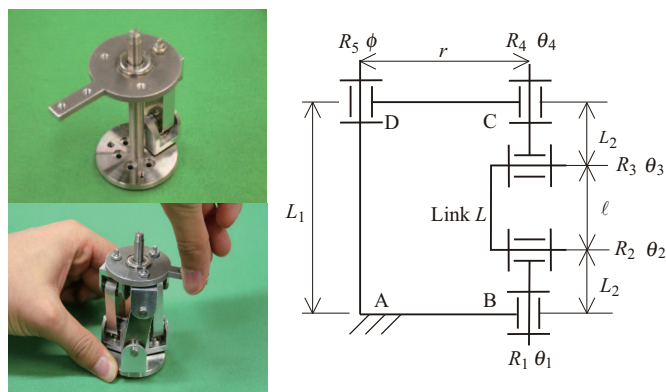


Fig.1 Nonlinear stiffness joint

るための機構の拘束条件の特異性を利用し、零剛性から極高剛性まで非線形に変化する剛性を持つ。その剛性  $K_\phi$  は次式で与えられる。

$$K_\phi = K_L \left( r^2 \cos \phi - \frac{r^2 \ell \cos \phi}{\sqrt{2r^2(1 - \cos \phi) + \ell^2}} + \frac{r^4 \ell \sin^2 \phi}{(\sqrt{2r^2(1 - \cos \phi) + \ell^2})^3} \right) \quad (1)$$

これは Fig.2 のような特性で表され、剛性が零から大きく変化する様子が分かる。また、この機構を用いた四脚ロボットが開発されており、これを Fig.3 に示す。体高約 50[cm] 重さは約 20[kg] で、自由度は 12 あり、膝関節に前述の機構が組み込まれている。

本研究では、前述の非線形ばね特性を有する関節機構について、本機構を四脚ロボットに組み込んだ際の柔らかさと硬さの両立を、線形ばねの場合と比較することにより実証し、非線形ばね特性をもたらす優位性を明らかにする。また、実際にロボットの歩行実験を行い、その有効性を示す。

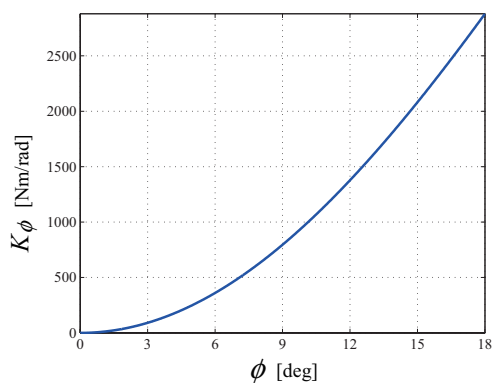


Fig.2 Nonlinear stiffness

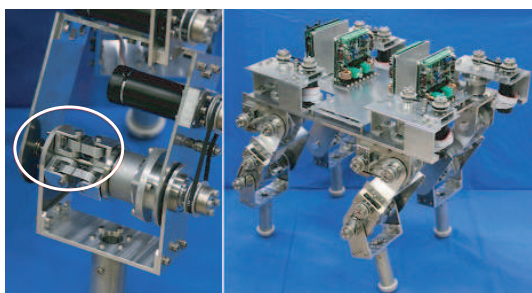


Fig.3 Designed quadruped robot

## 2. 制御系の構築

研究対象とした四脚ロボットにおいて駆動制御系の構築を行った。ロボットに搭載した6台のモータドライバより、12軸のモータのサーボ制御をローカルで行い、指令値を外部のPCより与えている。外部PCとの通信にはメモリ共有型通信のCU-Netを用いている[8]。この通信方式は高速かつ信頼性に優れ、なおかつマルチドロップ式の配線であるため、配線量を大幅に削減可能である。また、PC側の制御では、パラメータの量が多いことなどからGUIを採用し、マルチメディアタイマを用いて制御周期の精度の向上を図った。

## 3. 非線形特性の有効性の実証

### 3.1 柔らかさの実証

非線形ばね関節のもたらす柔らかさ、すなわち衝撃力の吸収効果についての検証を行うために、シミュレーションによる計算を行った。ここでいう衝撃力の吸収効果とは、脚先端に加えられた短時間の強い外力がばねの効果によって弱められて胴体に伝達される効果と言う。例えばFig.4に示すように、脚リンクが障害物と衝突を起こしたときを考える。このとき、関節が剛体に近い硬さを持っていた場合は脚リンクに加わった衝撃力がそのまま胴体に伝わり、破壊や変形をもたらすことが予想される。一方、関節にばねが入っていた場合は、脚リンクに加わった衝撃力は弱められて胴体に伝わるため、衝突箇所にかかる負荷が軽減されると考えられる。そこで脚の先端に、リンクに対して直角に加ええられる瞬間的な外力  $F$  を考え、胴体に伝達される

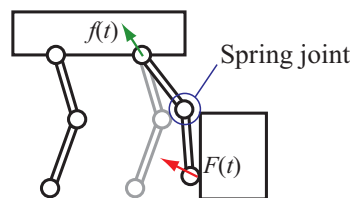


Fig.4 Collision with obstacle

力  $f$  の時間積分、すなわち力積  $P(t)$

$$P(t) = \int_0^t f(\tau) d\tau$$

について最大値  $\max P(t)$  を求め、その値を衝撃力の伝達の指標とする。つまり力積の最大値が小さいほど、衝撃力が吸収されて伝達されていると考える。

そこで、動力学モデルに基づき脚リンクについて運動方程式を求め、ルンゲ・クッタ法を用いて数値計算を行った。その結果をFig.5に示す。横軸は線形ばねを用いた場合のばね定数である。青線は線形ばねの力積の最大値のプロットで、赤線は非線形ばねの最大値を示している。2つの線の交点が約10[Nm/rad]であることから、この非線形ばね関節の衝撃力の吸収効果は約10[Nm/rad]の線形ばねを関節に使用した場合と同程度であるといえる。

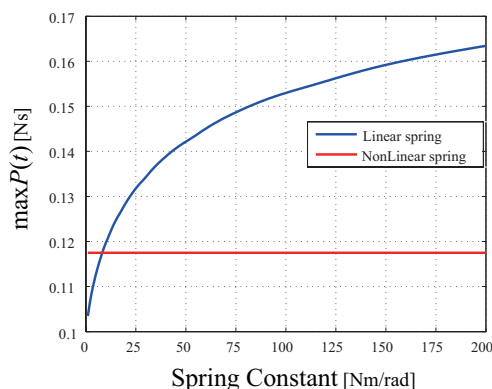


Fig.5 Maximum impulse by collision

### 3.2 硬さの有効性の実証

非線形ばね特性の優位性を示すために、Fig.6に示す様にロボットの自重による体のしずみ量について線形ばねと非線形ばねとで比較を行う。シミュレーションは前節のものをそのまま用い、入力  $F(t)$  を地面に鉛直方向でロボットの自重による5[kgf]のステップ入力としたときの最終変位をロボットの体のしずみ量  $x$  として算出する。シミュレーションの結果をFig.7に示す。2つの線の交点は約80[Nm/rad]であり、この非線形ばねの硬さはロボットが直立している場合、約80[Nm/rad]の線形ばねを関節に使用した場合と同程度であるといえる。また前章において同程度の柔らかさとした約10[Nm/rad]の線形ばねの場合は体の沈み量は約20[cm]程度と非常に大きく、制御が困難になることが予想できる。

この結果より、線形ばねに対する非線形ばねの柔らかさと硬さの両立による優位性が示されたといえる。

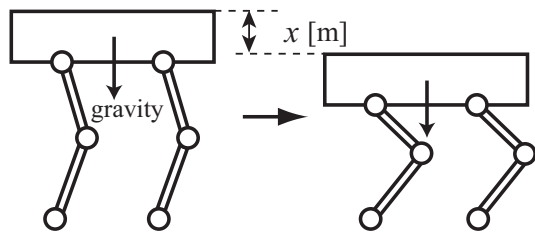


Fig.6 Displacement of body

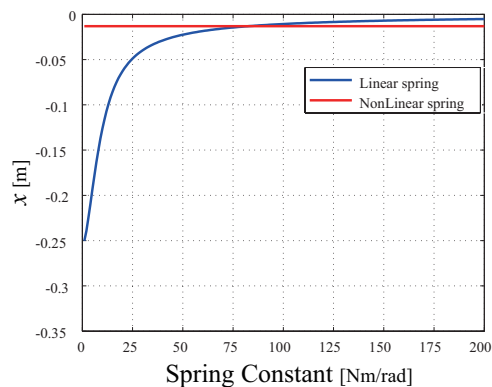


Fig.7 Displacement of body with respect to spring constant

#### 4. 歩行実験

ロボットの制御時における硬さの有効性について実証するために、歩行実験を行い、実験時のロボットの体高の上下動を測定し、上下動が抑制されていることを示す。

歩行動作として、静歩行動作と蹴り出し歩行動作の二種類の固定軌道を逆運動学の式に基づいて作成した。静歩行動作は、重心が常に接地する3本の脚で作られる3角形の中にあるように重心移動を行って歩く方法であり、脚が柔らかさを持つ場合、4本接地から3本接地へ移行した際のばねのたわみ量の変化による重心の沈み込みや重心の水平移動によって転倒することが考えられるが、非線形ばね特性を持つことによってそれらが起こりにくくなることによって安定した歩行が行えると予想される。モーションキャプチャによって静歩行動作中のロボットの体の一点における上下運動を取得した結果をFig.8に示す。はじめの直立状態から姿勢を低くする動作ののち、静歩行による約20[s]の周期的な上下運動が読み取れる。また、上下方向の振動が3cm程度のごく少量で収まっていることが分かる。

続いて、より動作が激しくより大きい振動を引き起こす歩行動作について実験を行った。脚先の指令値の軌道をFig.9のように定義した。

この軌道は半円型の軌道に地面を蹴る動作のための指令値を付け加えた形となっている。地面を蹴り出すことによってロボットの体に角運動量を与え、それによってロボットが傾いている間に脚を前に出すことが可能となる。A-B間とB-C-B'-A間の時間比は3:1で、各脚ごとに周期をずらすことにより歩行動作を行っている。この歩行においてロボットがかなりの振動を引き起こすことが予想されるが、これについても非線形

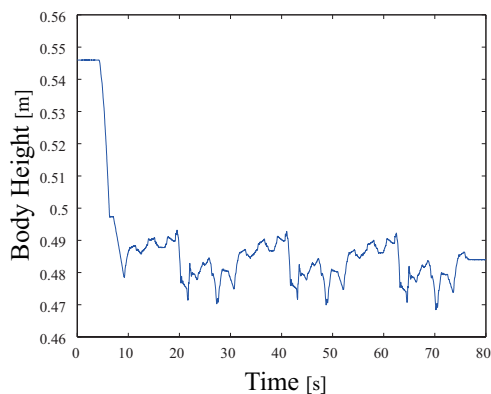


Fig.8 Vertical Swing on Static Walk

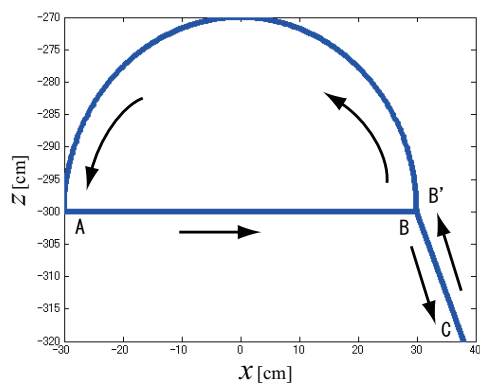


Fig.9 Trajectory of Kicking Walk

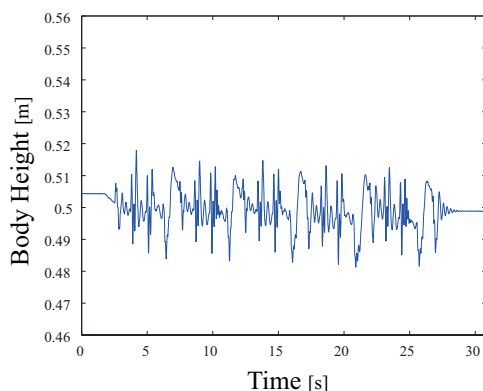


Fig.10 Vertical Swing on Kicking Walk

ばね特性によって上下振動が抑制される効果が期待できる。また、ロボットの脚が剛体であった場合にこの制御方法では地面を蹴り出す際に一本接地を引き起こし、転倒することが考えられる。したがってこの制御方法はロボットの柔らかさを十分に活用しているといえる。この歩行について同様に上下振動を取得した結果をFig.10に示す。静歩行の結果と比較して約5[s]程度の周期的な細かい振動が発生しているが、この制御方法についても上下方向の振動が4cm程度に収まっていることが分かる。

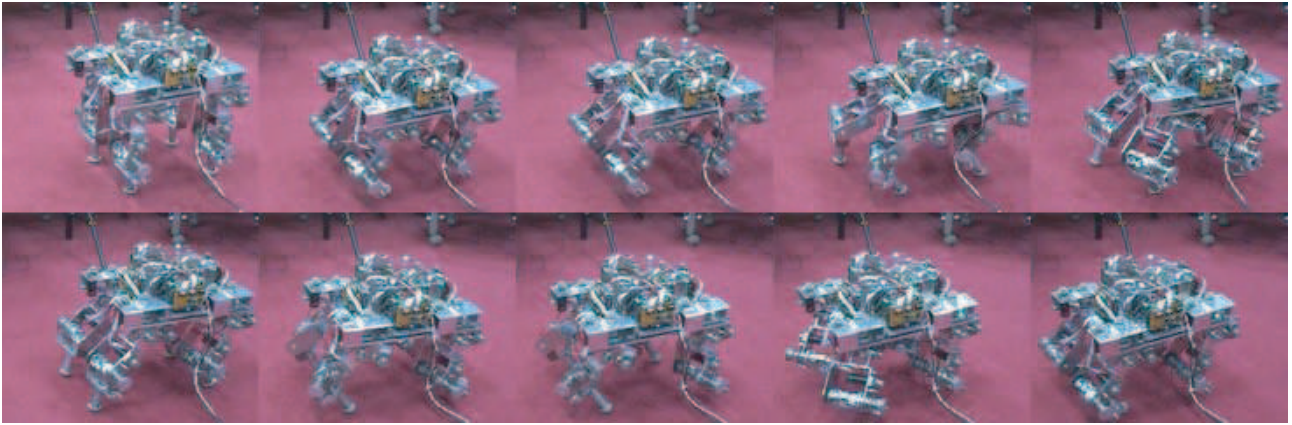


Fig.11 Motion of Static Walk

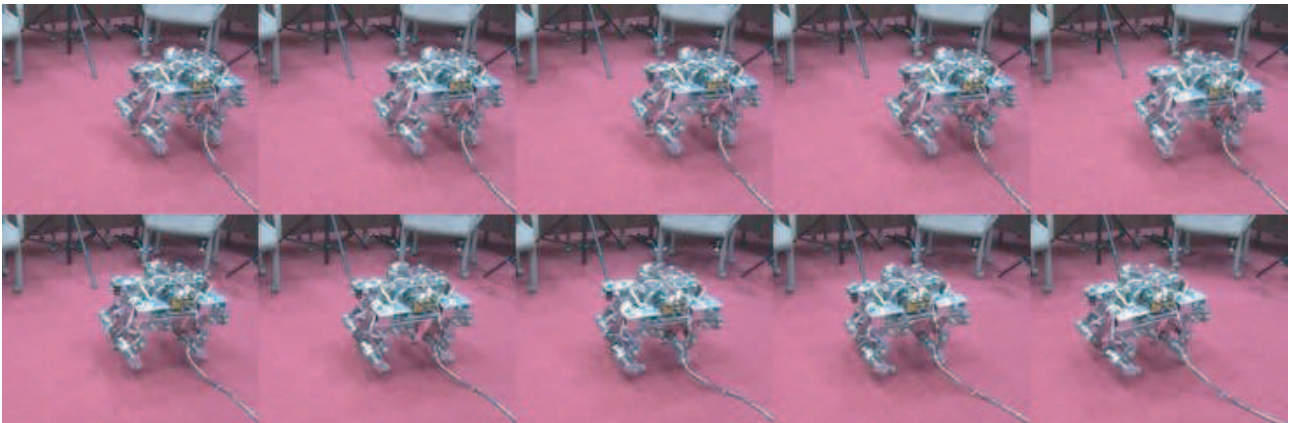


Fig.12 Motion of Kicking Walk

以上の結果より、非線形ばね特性を持つ関節機構を四脚ロボットに組み込んだ際の制御上の有効性が示されたといえる。各歩行の動作の様子を Fig.11 と Fig.12 に示す。

## 5. おわりに

本研究では非線形ばね特性を有する関節機構およびそれを用いたロボットにおいて非線形ばね特性の有効性を示した。研究の結果を以下に示す。

1. 非線形ばね特性による柔らかさの有効性についてシミュレーションを用いて示した。
2. 非線形ばね特性による硬さの有効性についてシミュレーションおよび実験により線形ばねに対する優位性を示した。
3. 歩行実験を行い、非線形ばね特性の制御時における有効性を示した。

## 謝辞

本研究は文部科学省科学研究補助金若手研究(A)「力学的観点に立ったロボットの身体と知能の相互発達と運動の創発」の支援を受けた。

## 参考文献

- [1] Didier Papadopoulos, Martin Buehler : Stable Running in a Quadruped Robot with Compliant Legs, Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2000.
- [2] Yangsheng Xu, Richard P.Paul : A robot compliant wrist system for automated assembly, Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol.3 pp.1750-1755, 1990.
- [3] 尾上知道, 岩附信行 : 負荷に対する剛性を考慮した柔軟リンクのワイヤ駆動制御, 日本機械学会 2006 年度年次大会講演論文集 (4), (2007), pp.115-116.
- [4] N.Hogan : Impedance Control: An Approach to Manipulation: Part 1~3, ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol.107, pp.1-24, 1985.
- [5] 森田, 富田, 植田, 菅野 : 関節のインピーダンスを調節可能な力制御ロボットアームの開発, 日本ロボット学会誌, Vol.16, No.7, pp.1001-1006, 1998.
- [6] 兵頭, 小林 : 非線形バネ要素を持つ腱制御手首機構の研究, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.8, pp.1244-1251, 1993.
- [7] 岡田昌史, 紀 晋太郎: 構造的の特異性を利用した受動可変剛性を持つトルク伝達機構, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'07 講演論文集, 1A2-H03, (2007), pp.1-4.
- [8] 山本, 杉原, 中村 : 小型ロボットのためのポータブル制御ユニット AnimatoCore の開発, 第 23 回日本ロボット学会学術講演会, 1E32, 2005.