

非線形バネ SAT の特性の解析とロボットへの応用

白井 達也*・草川 祐樹**・富岡 巧*

A Study on Characteristic Analysis of a Non-Linear Spring SAT and its Application for Robots

Tatsuya SHIRAI*, Yuuki KUSAGAWA** and Takumi TOMIOKA*

The wire utilized in the wire-driven system is broken when it's received a strong impulse force, since the most of motors used for humanoid robots have the reduce gear which has high reduce gear ratio. If the power transmission mechanism has the mechanical compliance, the impulse force will be absorbed. We had proposed a non-linear spring device named SAT (Stiffness Adjustable Tendon) to equip mechanical compliance for the power transmission mechanism of robots. In this paper, we had examined the relationship between the tension and the displacement of SAT in order to make clear the non-linear spring characteristics of SAT. We had developed the one legged robot to verify that the robot which is equipped with the mechanical compliance can achieve the dynamic motion such as the landing motion. We also had shown experimentally that the wire-driven system using SAT can control its joint stiffness, joint angle and joint torque. For the purpose we had developed a one joint robot system with mechanical compliant joint.

(Received September 30, 2005)

Key Words : Mechanical compliance, Non-linear Spring, Stiffness Adjustable Tendon, Wire-Driven System

1 はじめに

近年、様々なヒューマノイドロボットが開発されてきたが、その大半は、ヒトのように跳んだり、走ったりといった衝撃力を伴うダイナミックな動作が苦手である。小型のヒューマノイドロボットやペットロボットの中にはダイナミックな動作を実現しているものも存在する。この違いはロボットのスケールに依存している。ロボットの多くは、電気モータを動力として用いている。ロボットのサイズが n 倍になると重量は n^3 倍になるが、アクチュエータは体積が n 倍になったとしても能力が単純に n^3 倍になるとは限らない。ロボットの重量を軽減し、かつロボットを動かすのに十分な大きさのトルクを得るには小型軽量のサーボモータに高減速比を持つ減速器を組み合わせる必要がある。サーボモータの減速器の減速比が高いと、外部からロボットの腕や脚などに外力を加えても外力はサーボモータまで伝わらず、“機構的に硬いロボット”となる。機構的に硬いロボットは制御によって柔らかく振る舞っているに

過ぎず、動作限界を超える急激な外力の変化（衝撃力）が生じた場合、図1のように動力伝達機構（ギア、ワイヤ等）を破損する恐れがある。藤原らはヒトと同程度の大きさのヒューマノイドロボットを用い、転倒時の運動を制御することでロボットへのダメージを抑制するための制御手法を提案している[1]。しかし、事前に衝撃力を受けるタイミングを予測している場合を除き、制御技術によって関節の柔らかさを実現しているシステムでは、ロボットが対象物に衝突した後に関節剛性を柔軟化させるため対応が遅い。センサの故障、配線の破断などのトラブルにより危険な挙動を起こす可能性もある。今後活躍が期待されるサービスロ

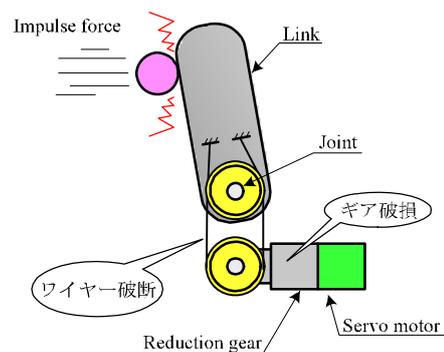


図 1 機構的に硬い動力伝達機構の問題点

*機械工学科

[Department of Mechanical Engineering]

**専攻科（電子機械工学専攻）

[Advanced Engineering Faculty (Advanced Electronic and Mechanical Engineering Course)]

ボットや介護・リハビリロボットなどヒトと接する機会の多いロボットは、衝突安全性の観点からセンサを用いずに関節剛性を調節できることが期待されている。近年、機構的な柔らかさをロボットに付加するための研究が活発になってきた。兵頭らは急激な外力の変化に対する応答遅れを機構的に補うために、非線形バネ要素 NST(Nonlinear Spring Tensioner)を開発し、腱制御手首機構へ応用した[2]。小金澤らは非線形な弾性特性を持つ非線形弾性特性機構 NLEM (Non-Linear Elastic Module)および NLEM にアクチュエータを組み込んだ非線形弾性システムを有するアクチュエータ ANLES (Actuator with Non-Linear Elastic System)を提案している[3]。林原らは開発した剛性可変機構を関節抗縮などのリハビリテーションで用いられる CPM 装置に応用し、有用性を確認している[4]。

本論文では、ワイヤ駆動式動力伝達機構のために考案した非線形バネ要素 SAT(Stiffness Adjustable Tendon)[5]の物理的特性を明らかにする。さらに関節剛性調整機構を搭載したロボットを製作し、従来のロボットが苦手としていたダイナミックな動作を実現できることを実験的に検証する。

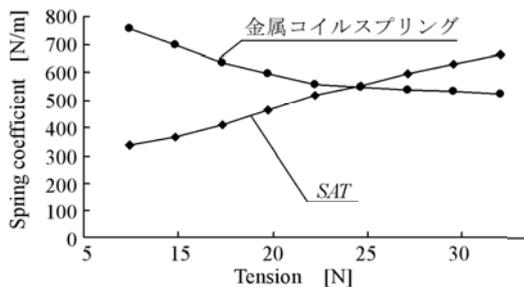
2 非線形バネ要素 SAT

2.1 SAT の構造と動作原理

SAT は従来から広く産業界で用いられているコイルスプリングと同じ引張りバネだが、構造・原理・特性がまったく異なる。図 2 (a)は SAT の構造を表した図である。SAT は、弾性素材のシリコンスポンジ製の丸棒を編みチューブで覆い、両端を封止したシンプルな構造である。SAT 両端を左右方向に引っ張ると編みチューブは伸びると同時に内径



(a) Structure of SAT



(b) Characteristics of a spring coefficient

図 2 非線形バネ要素 SAT

が小さくなる。編みチューブの内径が小さくなると弾性体は周囲から圧縮される。圧縮された弾性体は元の形状に戻ろうとして反発力を発生し、編みチューブの内径を押し広げようとする。この圧縮力と反発力が釣り合う長さまで SAT は伸びる。SAT は(1)圧縮バネではなく引っ張りバネであるため座屈を防ぐためのケーシング等の部品が不要、(2)金属製の部品は用いないため錆びない、(3)伸縮する際にコイルスプリングのように隙間に物が挟まることが無い、(4)特殊な素材を用いていない上に、製造するための特別な設備を必要としないと言った特徴を持つ。図 2 (b)は一般的な金属製のコイルスプリングと SAT の静力学的特性を比較した実験結果である。横軸は荷重、縦軸はバネ係数である。理論的なバネは伸縮量に関係なくバネ係数は一定であるのに対して、一般的な金属製のコイルスプリングは荷重が増すにつれて剛性が低下していき、弾性限界を超えると塑性変形してしまう。SAT も同様にバネ係数は一定ではないが、コイルスプリングとは逆に伸び量が増加するとバネ係数は増加(高剛性化)する。

伸びれば伸びるほどバネ係数が大きくなる SAT の特徴は伸びるに従って断面積の減少する編みチューブの特性由来する。ここで SAT の直線変位量と断面直径の関係をモデル化する。SAT の外周を覆う編みチューブは図 3 (a)のような螺旋状に巻かれた素線の集まりである。ここで SAT 全長を l_n 、断面の直径を d 、一本の素線の巻数を n 回とする。素線は右回りと左回りに同数巻かかれているため、SAT は伸張しても右回りにも左回りにも振れない。したがって巻数 n は常に一定である。ここで特に、図 3 (b)のように SAT 全長の内、素線 1 巻分に当たる長さ l_1 の区間に着目する。巻線の開始点を P_a 、終了点を P_b とすると展開図は図 3 (c)のようになり、素線 1 巻分の長さ L_{s1} は(1)式となる。

$$L_{s1} = \sqrt{l_1^2 + (\pi d)^2} \quad (1)$$

したがって、素線全長 $L_{sn} = nL_{s1}$ より、

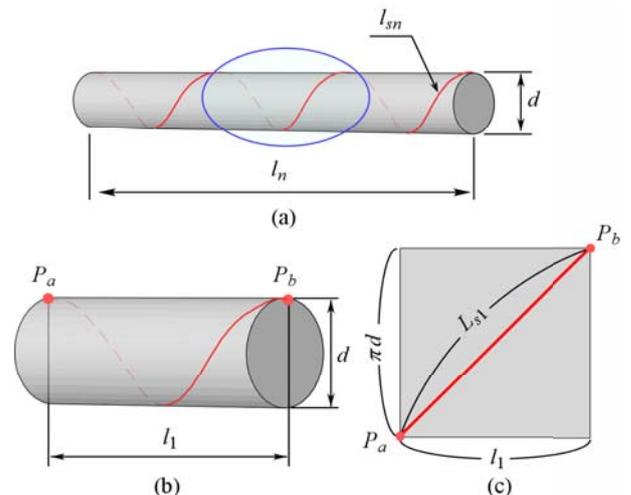


図 3 SAT の幾何学的モデル化

$$L_{sn} = n\sqrt{l_1^2 + (\pi d)^2} \quad (2)$$

となる。素線全長は SAT に張力が作用して伸長したとしても変化しないと仮定すると、 L_{sn} は定数となる。(2)式に素線 1 巻分の SAT の長さ $l_1 = l_n / n$ を代入すると、SAT の全長 l_n と、その時の断面の直径 d の関係を表す(3)式が求まる。

$$d = \frac{\sqrt{L_{sn}^2 - l_n^2}}{n\pi} \quad (3)$$

なお、素線全長 L_{sn} は次式より求まる。ここで d_0 は、SAT の全長がある長さ L_{n0} の時の断面の直径である。

$$L_{sn} = \sqrt{l_{n0}^2 + (n\pi d_0)^2} \quad (4)$$

製作した SAT を実測すると、 $n = 4$, $l_{n0} = 190[\text{mm}]$, $d_0 = 15[\text{mm}]$ したがって、 $L_{sn} = 268[\text{mm}]$ である。図 4 は、この係数を用いて(3)式より求めた SAT 断面直径の変化を表したグラフである。横軸は SAT 全長 l_n ，縦軸は SAT 断面の直径 d である。グラフ中の Model_S は本モデルのシミュレーション結果、Model_V は SAT 内部の体積 V が l_n の変化によらず常に一定であると仮定したモデルのシミュレーション結果である。シミュレーション結果より、Model_V に比べ、編みチューブの特性を考慮に入れた Model_S の方が、SAT 全長が伸びるのに応じて断面の直径が小さくなっていくことが分かる。つまり編みチューブは伸びると同時に単に断面面積が小さくなるのではなく、内部の体積が徐々に減少していくことが分かる。図 4 中の記号 ▲ は実際の SAT の長さ l_n と直径 d を計測した結果である。シミュレーション結果とほぼ一致している。

2.2 関節剛性調整機構

図 5 は SAT を用いることでワイヤ駆動式ロボットの関節剛性が機械的に調整可能であることを示した図である。SAT は変位量が小さい時は柔らかく、変位量が大きくなると高剛性化する非線形バネ係数を持つ。したがって図 5 (a)

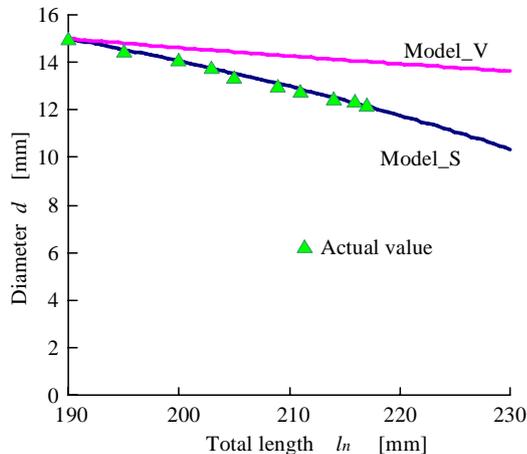


図 4 シミュレーション結果

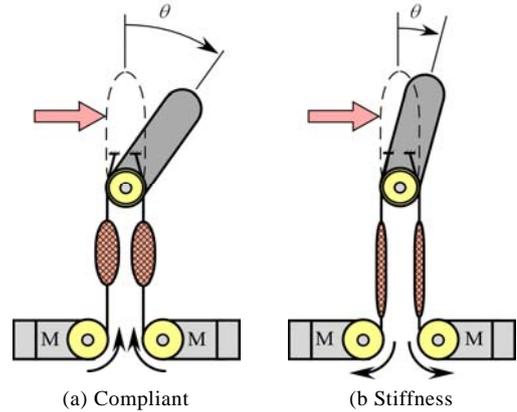


図 5 関節剛性調整機構の原理

のように両方の SAT のワイヤを緩めた状態で外力が加わるとリンクは大きく回転する。それに対して図 5 (b)のように左右のワイヤをモータで引っ張って初期変位量を大きくすると関節剛性は硬くなり、同じ大きさの外力でもリンクの回転角度は小さくなる。また、一方のモータでワイヤを緩め、反対のモータで同じ量のワイヤを巻き取れば、関節剛性を維持したままリンク角度を制御できる。さらに関節角度を計測することで関節に発生しているトルクの推定も可能である。

3 SAT の物理的特性

3.1 SAT の静特性

SAT の物理的特性を正確に計測するために図 6 に示す自動バネ特性測定装置を開発した。自動バネ特性測定装置はフォースゲージ(ZP-200N/(株)イマダ製)および電動スライダ(MV-500N-SUZUKA-CT/(株)イマダ製)からなる。フォースゲージは最大許容荷重 200[N]，精度 $\pm 0.2\% \text{F.S.} \pm 1[\text{digit}]$ ，サンプリング周期 1000[回/s]，表示更新周期 10[回/s] である。電動スライダは最大許容荷重 500[N]，最大ストローク 850[mm]，上下方向の移動速度は 20~600[mm/min] の範囲で変更可能である。フォースゲージのアナログ出力および電動スライダのエンコーダ出力を A/D 変換インター

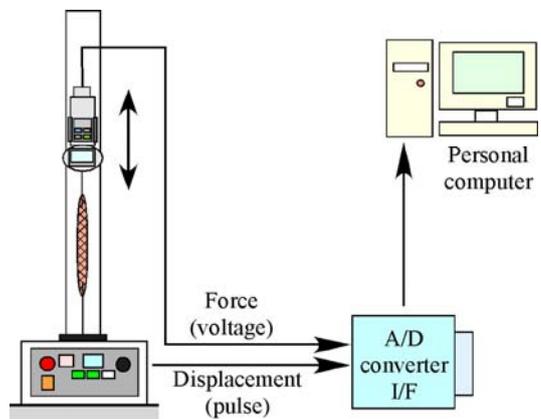


図 6 自動バネ特性測定装置

フェース(パルスカウンタ内蔵, PCI-320416/(株)インターフェース製)を介してパーソナルコンピュータに取り込むことで、電動スライダの変位量とフォースゲージに作用する張力を同期入力する。

図7から図10は自動バネ特性測定装置を用いてSATの静特性を測定した結果である。各グラフはSATに印加する張力を20[N]→100[N]→20[N]と1往復したデータである。グラフはそれぞれ横軸がSATの変位量、縦軸が張力を表す。各点におけるグラフの傾きがバネ係数である。本実験で使用するSATはφ156[mm]のシリコンスポンジ丸棒(弾性体)とφ10[mm]の編みチューブを用いた。引張り速度は約50[mm/sec]である。

図7は7本のSAT(全長200[mm])の特性を比較したグラフである。個体ごとに多少ばらつきはあるが全てのSATが伸び始めは軟らかく、伸びるにしたがって硬くなる非線形バネ特性を持つことが分かる。また、荷重を印加する過程と緩める過程とで特性の異なるヒステリシス特性を持つことも分かる。

図8は全長100[mm]のSATを直列に接続したときの特性を調べたグラフである。100[mm]のSATを2本直列に接続した構成の特性は全長200[mm]の1本のSATとほぼ等しい特性を持つ。100[mm]のSATと200[mm]のSATを比較すると200[mm]のSATは100[mm]のSATのほぼ倍の変位が生じている。SATを直列接続した場合、SATは線形バネと同様に単純に足し合わせた特性を持つことが分かる。

図9は全長200[mm]のSATを並列接続し、印加する張力を0[N]→100[N]→0[N]と往復させた時の特性を示すグラフ

である。50[mm]の変位を与えるのに、SATが1本の場合は約19[N]、SATを2本並列接続した場合は約40[N]、3本を並列に接続した場合は約55[N]の荷重を与える必要がある。1本のSATと比較して、並列に接続した場合、2倍、3倍の荷重が必要であることから、並列接続の場合も直列接続時と同様にバネ係数を足し合わせた特性を持つことが分かる。

ところが図10のように、印加する張力を完全に0[N]まで戻さず20[N]→100[N]→20[N]と往復させた場合、SATを並列に接続しても1本のSATと同じような特性を示した。この原因について図11のモデルデータを用いて説明する。図11(a)は1本の非線形バネ(以下,SAT-S)と、それと同一の特性を持つ非線形バネを2本並列に接続したバネ(以下,SAT-P)の特性をシミュレートした結果である。非線形バネはヒステリシス特性を持たないものとする。また、SAT-Pの特性は、線形バネ同様にSAT-Sと同じ変位量だけ伸びるのに2倍の張力が必要であると仮定している。これは図9に相当する。図11(a)において荷重20[N]におけるSAT-P、SAT-Sの変位量をそれぞれa、bとし、それぞれの原点をa、bとしたグラフが図11(b)である。これは図10に相当する。このシミュレーション結果から分かるように、一定の初期張力を印加した状態を基準にすると、同一特性の非線形バネを並列接続しても単体の非線形バネより硬くなるとは限らないという非線形バネ特有の特徴が現れる。引張りバネであるSATは多くの場合、一定の大きさの張力が常に印加した状態で用いられる。したがってこのような前提の上ではSATは線形バネとは全く異なる特性を持つバネ要素として考える必要がある。

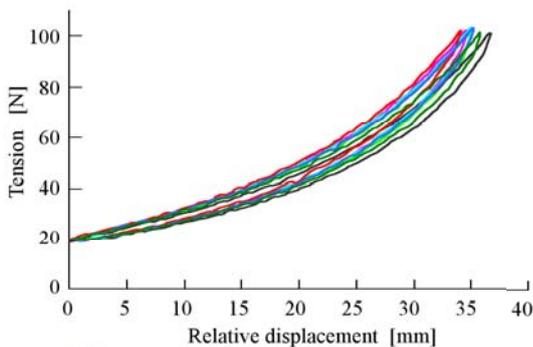


図7 SATの静特性(個体間の特性のバラツキ)

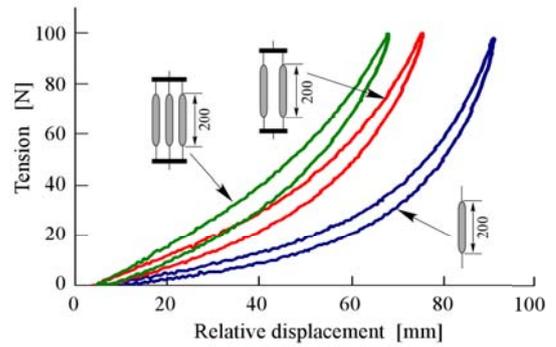


図9 並列接続(初期張力 = 0 [N])

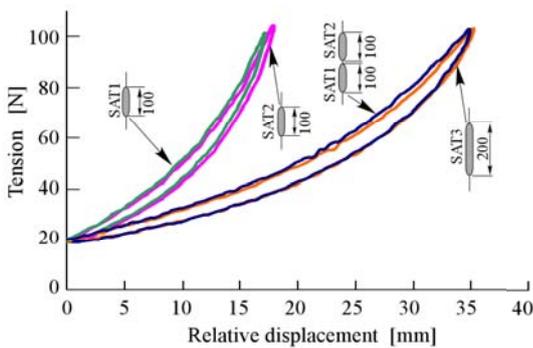


図8 直列接続

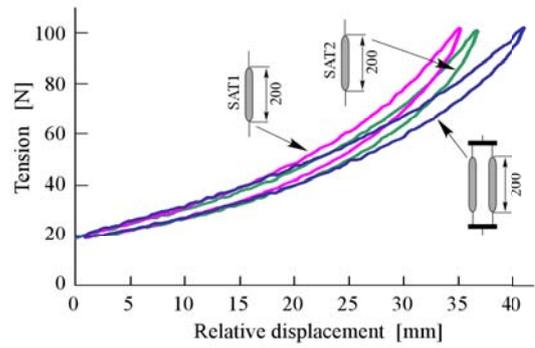
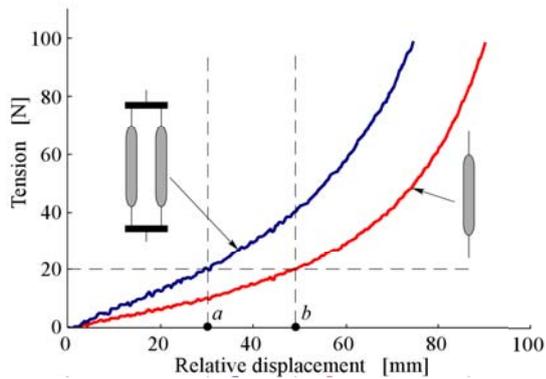
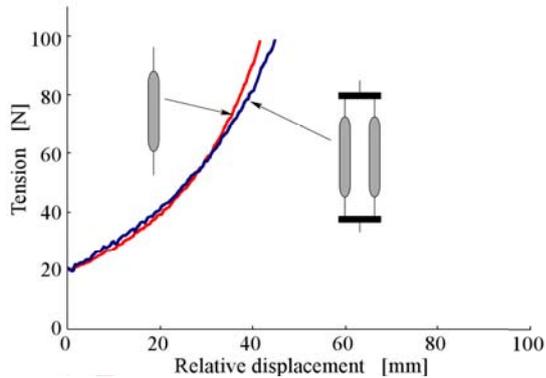


図10 並列接続(初期張力 = 20[N])



(a) Initial tension = 0 [N]



(b) Initial tension = 20 [N]

図 11 並列接続シミュレーション

4 SAT のロボットへの応用

4.1 ランディングマシン

ヒューマノイドロボットが苦手とするダイナミックな動作の一つとして、高所からの飛び降り動作が挙げられる。関節トルクセンサ等を用いたフィードバック制御では着地に伴う衝撃力を安全に吸収できないためである。SAT を組み込んだ関節剛性調整機構を用いることで着地動作が実現可能であることを検証するために、図 1 2 に示すような三関節一本脚ロボット（以下、LM: Landing Machine）を製作した。図 1 2 (a) は外観である。LM の総重量は 20.6 [N]、モータは一切搭載していない。各リンク長は 300 [mm] で、それぞれの関節はヒトの腰、膝、足首に相当する。各関節の角度は関節に内蔵したポテンシオメータにより計測可能である。図 1 2 (b) は、図 1 2 (c) のように 500 [mm] の高さから LM を落下させた際の各関節角度の相対変位量である。脚先が地面に接地してから姿勢が安定するまで約 2 [s] 弱、途中で一度だけ大きく伸び上がるが、その後は小刻みに振動しながら衝撃力を吸収して安定な姿勢に落ち着くことを確認した。

4.2 一関節ロボット

非線形バネを用いた関節剛性調整機構は、関節剛性だけでなく、拮抗させたワイヤの変位量を個別に調整すること

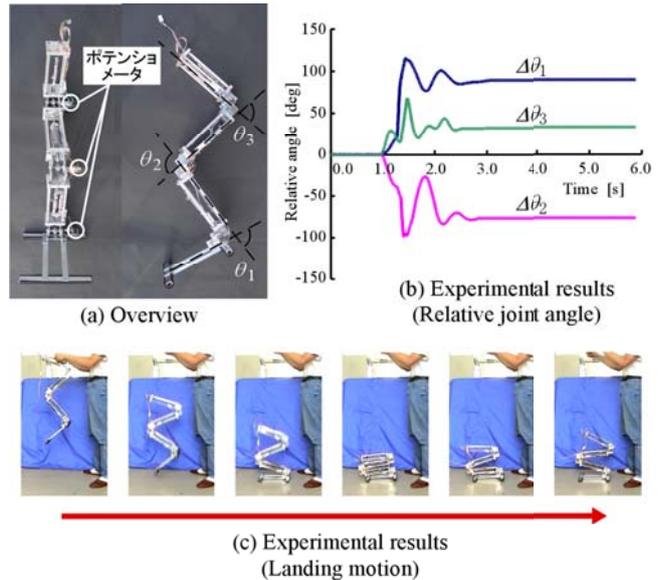


図 12 ランディングマシン

で、関節角度、関節トルクも制御可能であることを検証するために、図 1 3 に示す一関節ロボットを製作した。LM がモータを搭載していないのに対して、本ロボットは二つの DC ギヤードモータで拮抗する 1 組の SAT を駆動して長さ 250 [mm] のアームを回転させる。モータに直結した $\phi 34$ のワイヤ巻取りドラムと関節部に回転角度を計測するためのポテンシオメータを計 3 個搭載している。力センサは一切搭載していない。ポテンシオメータの出力は A/D 変換 I/F を介してパーソナルコンピュータに入力し、モータドライバへは D/A 変換 I/F を介して速度指令値を出力する。

図 1 4 は一関節ロボットの関節剛性の非線形バネ特性を確認した実験結果である。横軸はアーム先端に印加した外力、縦軸はアームの回転角度である。傾きが大きいほど関節剛性が高いことを意味する。張力ゼロの状態を基準として、左右のモータでワイヤを同時に $x_{off} = 10$ [mm] から $x_{off} = 80$ [mm] まで 5 [mm] 単位で巻き取った。各ワイヤ初期張力において関節剛性が非線形バネ特性を持つこと、初期張力を増やすと関節剛性が高くなることが確認された。

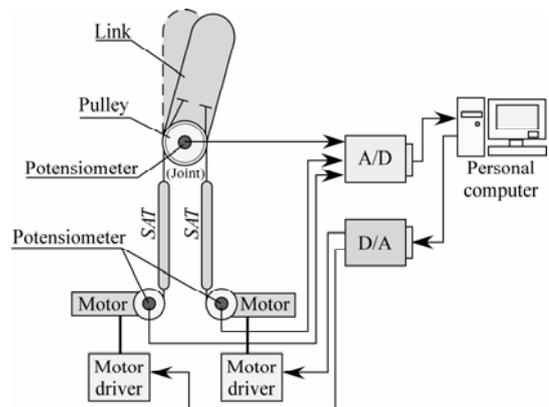


図 13. 一関節ロボットの構成

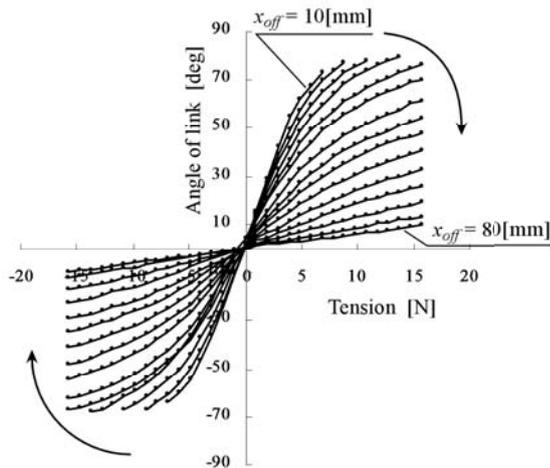


図 14 実験結果(関節剛性の制御)

図 1 5 は一関節ロボットの関節トルクの制御実験の結果である。図 1 5 (a)の初期姿勢から目標トルクをゼロトルクに設定してトルク制御を行うと、図 1 5 (b)のように外力に対して関節トルクがゼロになるようにアームは回転する。一定の関節トルクを目標トルクとして設定すると、図 1 5 (c)のように常に一定の外力と釣り合うようにアームは回転する。重要な点は、本ロボットは外来ノイズの影響を受けやすい力センサの類を一切搭載していない点である。電氣的に安定かつシンプルで安価なポテンショメータだけで力制御が実現できるのは、動力伝達機構に非線形バネ要素を持つ関節剛性調整機構の優れた特徴の一つである。

図 1 6 は一関節ロボットの関節角度の制御実験の結果

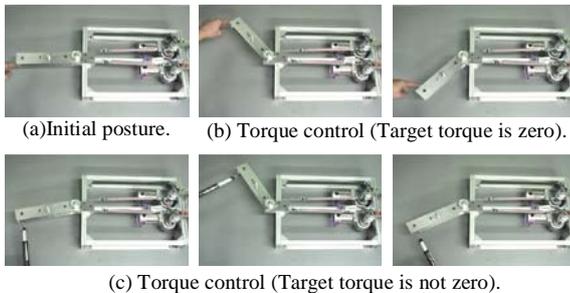


図 15 関節トルクの制御

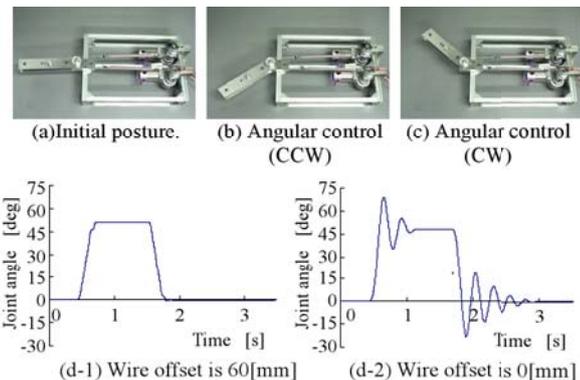


図 16 関節角度の制御

である。図 1 6 (a)の初期姿勢から図 1 6 (b),(c)のようにアームの角度を位置制御できる。図 1 6 (d-1),(d-2)は関節剛性の硬さが位置制御時のリンクの挙動に与える影響を調べた実験結果である。それぞれ関節剛性を高く設定した状態 ($X_{off} = 60[\text{mm}]$) と関節剛性を低く設定した状態 ($X_{off} = 0[\text{mm}]$) で、アームを反時計方向に $50[\text{deg}]$ 回転させて再び初期姿勢に戻した。横軸は時間、縦軸はリンクの回転角度である。図 1 6 (d-1)のように関節剛性が高い場合は問題ないが、図 1 6 (d-2)のように関節剛性が低い場合はアームが大きく振動してしまうため、ワイヤ巻取りドラム部のポテンショメータを用いた開制御を行っている。

5 まとめと今後の課題

現在のロボットが走ったり、跳んだりといったダイナミックな動作を苦手とする原因は旧来から用いられてきた高減速比の減速器を用いた高剛性な動力伝達系にある。この問題に対するブレークスルーとして、ワイヤ駆動式動力伝達機構に適したシンプルな構造の非線形バネ要素 SAT を開発した。幾何学モデルを用いて SAT の動作原理を解析すると同時に、SAT の静力学的特性を実験により明らかにした。SAT を用いた着地動作検証用ロボット(LM)を開発し、大きな衝撃力の伴うダイナミックな動作が実現可能であることを実験により示した。モータを搭載した一関節ロボットを開発し、非線形バネ要素を組み込んだ動力伝達機構は角度センサのみを用いて関節剛性、関節トルク、関節角度を制御可能であることも示した。

SAT がもつヒステリシス特性は弾性材として用いているシリコンスポンジに起因する。ヒステリシス特性は、正確な関節剛性/関節トルク制御を行う上で障害となるため弾性材の材質を改善する必要がある。機械的な剛性が低い状態での位置制御の不安定性を改善するために、フィードフォワード制御などの制御則を導入する必要がある。

参考文献

- [1]藤原, 金弘, 梶田他: “等身大ヒューマノイドロボットの後方転倒制御の実現”, 日本ロボット学会誌, Vol.23, No.4, pp.427-434, 2005.
- [2]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.
- [3]小金澤, 清水: “非線形弾性システムを有するアクチュエータを用いた腱駆動多自由度関節の機械式剛性制御”, 日本ロボット学会誌, Vol. 22, No.8, pp.1043-1049, 2004.
- [4]砂崎, 林原: “剛性可変機構を用いたリハビリ用 CPM 装置の開発”, ロボティクス・メカトロニクス講演会'03 講演論文集, 2003.
- [5]白井, 田中, 富岡: “非線形バネ SAT の原理と特性”, 日本ロボット学会学術講演会'03, 2003.