

# 関節剛性調整機構 SAT の応用 － 1 脚式ロボットの開発 －

## Application of Joint Stiffness Adjustment Mechanism SAT - Development of a 1-Legged Robot -

○ 学 田中 駿一（鈴鹿高専） 正 白井 達也（鈴鹿高専） 学 田中 信行 正 富岡 巧（鈴鹿高専）

Shun-ichi TANAKA, Suzuka National College of Technology, Shiroko, Suzuka-shi, Mie

Tatsuya SHIRAI, Suzuka National College of Technology

Nobuyuki TANAKA, Hiroshima University

Takumi TOMIOKA, Suzuka National College of Technology

**Abstract**— The wire utilized in the wire-driven system is broken when it is received the impulse force, since the motor used for robots has the reduce gear which has high reduce gear ratio. If the power transmission mechanism has the mechanical compliance, the impulse force should be absorbed. We had proposed a nonlinear spring device SAT (*Stiffness Adjustable Tendon*). In this paper, we examine the relationship between the tension and the displacement of SAT in order to make clear the non-linear spring characteristic of SAT. We show experimentally that the wire-driven system using SAT can control its joint stiffness. We also verify that the robots can achieve the dynamic motion by using SAT.

**Key Words** : SAT, Joint Stiffness, Wire-Driven System, Non-Linear Spring

### 1 はじめに

現在、様々な企業、団体や個人によって多種多様なヒューマノイドロボットが開発されている。(独法)産業技術総合研究所と川田工業(株)は、等身大ヒューマノイドロボットの転倒時の姿勢を制御することで転倒時の衝撃を軽減できることを実験により示した<sup>1)</sup>。この例から分かるように従来のロボットは走ったり、跳んだりといったダイナミックな動作を苦手としており、転倒すると大半のロボットは特別な制御手法を用いない限り破損する危険性が高い。実用化された大型のヒューマノイドロボットの大半は、トルク/重量比に優れて技術的に成熟した小型軽量の電気モータを動力として用いている。小型軽量のモータからロボットが重力に抗して動作するのに必要な十分に大きなトルクを得るには、高減速比を持つ減速器を用いる必要がある。減速比が高いと、ロボットの腕や脚などに外力が加わっても外力はモータまで伝わらない機構的に硬いロボットとなる。機構的に硬いロボットは、走ったり跳んだり、あるいは転倒した際に制御可能な範囲を超える外力を受けると、外力をモータへ逃すことができず、動力伝達機構(ギア、ワイヤ等)を破損する恐れがある。また、機構的に硬いロボットの歩行は、ヒトが二足歩行する場合に比べてエネルギー効率が悪い<sup>2)</sup>。これはロボットの関節が機構的に硬い場合、脚の運動をすべてアクチュエータが発生するトルクに頼らなければならないためである。これが現在のヒューマノイドロボットが抱えている問題であり、今後、運動能力の向上を計る上で解

決すべき課題である。制御技術によって機構的な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(=ヒト)に衝突した後に関節剛性を柔軟化するため反応が遅い。センサ入力と制御システムに強く依存したアプローチは構成要素(センサ、信号伝達系、コントローラなど)の故障や動作不良により安全に動作しない可能性も高い。サービスロボットや介護・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。

このような背景から、近年、機構的な柔らかさをロボットに付加するための非線形バネ機構の研究が活発になってきた<sup>3)4)</sup>。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<sup>5)</sup>。筆者らも非線形バネ特性をもち、取り扱いが容易な引っ張りバネ式の新しいバネ要素SAT(*Stiffness Adjustable Tendon*)を開発した<sup>6)7)</sup>。本稿ではSATの物理的な特性と伸びれば伸びるほど剛性が硬くなるSATの仕組みを説明し、SATを用いることでワイヤ駆動式ロボットの関節剛性が調整可能であることを実験的に検証する。さらにSATをワイヤ駆動式ロボットに用いることで、関節剛性を制御可能であることを静力学モデルおよび実験によって示す。

### 2 SATの構造と原理

Fig.1にSATの構造を示す。SATは被覆である編みチューブ内に弾性体としてシリコンゴムスポンジ製の丸

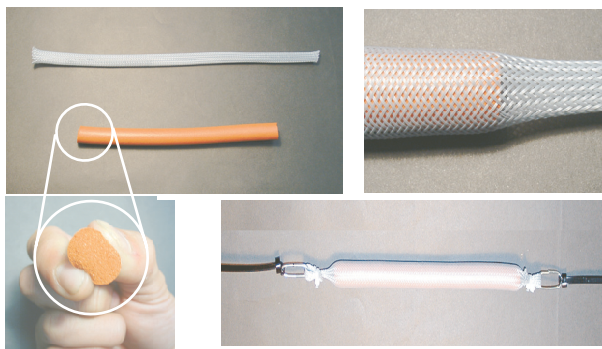


Fig.1 Structure of SAT.

棒を挿入し、その両端を閉じたソーセージ状の構造をしている。編みチューブはポリウレタン製の細い素線を編んだもので、チューブ全長の変化に応じて内径が変化する（たとえば $\phi 8 \sim \phi 20$ ）。いずれの素材も特殊なものではなく市販されており、加工/組立てのために特別な装置や器具も必要ない。

SATの両端に張力をかけて引っ張ると、編みチューブは伸びると同時に内径が縮まり、内部の弾性体を圧縮する。圧縮された弾性体であるスポンジは元の形状に戻ろうとして編みチューブを押し広げる。この圧縮力と復元力が釣り合う長さまでSATは伸びる。これがSATが弾性体として機能する基本的なメカニズムである。

SATの構造は編みチューブを用いる点でラバチューエータ<sup>8)</sup>と似ているが、ラバチューエータは編みチューブ内に高圧の流体（主に高圧エア）を流し込むことでアクチュエータとして用いられるのに対して、SATは固体の弾性体を挿入して受動的なバネ要素として用いる。固体の弾性体を用いているため、高い圧力が発生しても内部の弾性体が漏洩する危険性がないため、漏洩防止のシールを施す必要がない。さらにSATは引張バネとして用いられることから、圧縮バネのような座屈を防ぐためのカバー等が不要であり、構成部品が少なく破損し難い。コイルスプリングのように伸縮する際にコイル空隙が変化して隙間に異物が挟まることもない。

Fig.2はSATの静特性を調べた結果である。Fig.2の横軸はワイヤ張力、縦軸は変位量、傾きが剛性の逆数を表す。編みチューブは $\phi 10$ 、弾性体は $\phi 15$ 、SATの全長は無負荷状態で200[mm]である。Fig.2(a)は張力を2→10→2[kgf]と変化させた時のSATの変位量を5回分平均した結果である。張力と変位量の関係が非線形であり、張力の増加に従って剛性が高くなっていくことが分かる。今回製作したSATは張力を増やす過程と戻す過程とで特性が異なるヒステリシス特性を持つ。Fig.2(b)は表面を編みチューブで覆わずに、弾性体単体の張力と変位量の関係を調べた結果である。弾性体のみでは非線形特性が現れないこと、SAT同様にヒステリシス特性を持つことが分かる。シリコーンゴムスポンジ丸棒は外力が減少した際の復元速度が遅く、これが今回製作したSATに生じたヒステリ

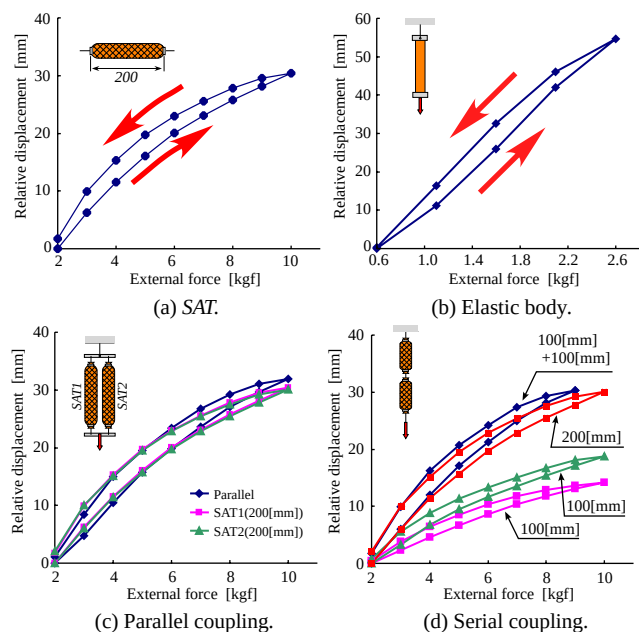


Fig.2 Static characteristic of SAT.

シス特性の主要因であり、弾性体の材質を工夫することでヒステリシスの低減が期待できる。

Fig.2(c)は長さ200[mm]の2本のSATを並列に接続した時の特性である。1本1本のSATの特性（SAT1, SAT2）と、それを並列接続したSATの特性（Parallel）が、ほぼ同一である。コイルスプリングなどの線形バネの場合は、それぞれのバネ定数を単純に足し合わせた特性となり、単体の状態よりも硬くなるはずである。変位量が増えるほど剛性の高くなる非線形バネは線形バネと異なり、必ずしも硬くなるとは限らない。それに対してFig.2(d)のように、長さ100[mm]の2本のSATを直列接続した場合は、線形バネ同様に長さ200[mm]のSATとほぼ等しい特性を持つ。

伸びれば伸びるほど剛性が大きくなる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に由来する。確かに、SATが伸びるのに合わせて編みチューブ内の弾性体も張力方向に伸びるが、Fig.2(b)の実験結果からも分かるように、特性は線形かつ張力に対する反力の内の約1/5を占めるに過ぎない。編みチューブは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 $d$ 、1本の素線の巻き数を $N$ 回、素線の全長を $L_{sn}$ とする。素線は左右方向に同数巻かれているため、SATが伸縮しても振れず、巻き数 $N$ は常に一定である。同様に、素線全長 $L_{sn}$ もSATの変位量とは無関係に一定なので、 $l_n$ と $d$ の間には次式の関係が成り立つ。

$$d = \frac{\sqrt{L_{sn}^2 - l_n^2}}{N\pi} \quad (1)$$

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

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

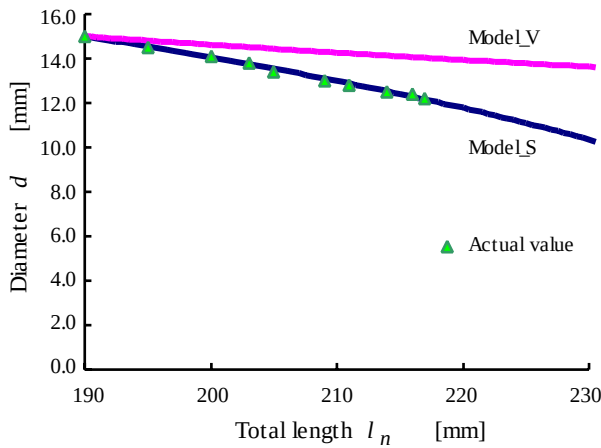


Fig.3 Simulation results.

Fig.3は(1)式に実際のSATの係数を代入して求めたSATの全長 $l_n$ と断面の直径 $d$ の関係を表すグラフである。横軸は $l_n$ 、縦軸は $d$ である。グラフ中のModel.Sは(1)式より求めたグラフで、Model.VはSAT内部の体積 $V$ が $l_n$ の変化とは無関係に常に一定であると仮定したモデルのグラフである。このシミュレーション結果より、Model.Vに比べて、編みチューブの幾何学的拘束の条件を考慮に入れたModel.Sの方が、SATの全長が伸びるに従って断面の直径 $d$ が小さくなっていることが分かる。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。これがSATの非線形バネ特性発生メカニズムである。Fig.3中の記号 $\triangle$ はFig.1のSATを実測した結果である。Model.Sの結果とほぼ一致していることが分かる。

### 3 SATを用いた1脚式ロボットの開発

#### 3.1 SATを用いたワイヤ駆動式ロボットの関節剛性調整機能の検証実験

Fig.4はSATを用いて関節剛性が調整可能であることを検証する実験装置である。上はSAT、下は一般的な金属製のコイルスプリングを拮抗させた関節機構である。無負荷状態から拮抗しているそれぞれのバネに対して20[mm]、

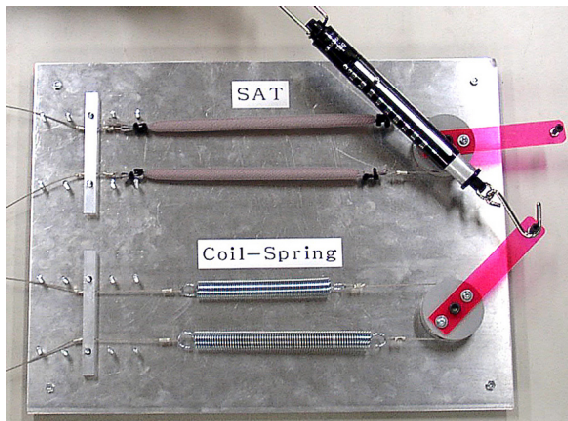


Fig.4 Verification that the joint stiffness can be adjusted by using SAT.

60[mm]の相対変位を加えてワイヤの初期張力を変え、アームに対して直角に0.25[kgf]の外力を加えた時のアームの回転角度を計測した。バネ部の張力が弱い(20[mm])時、SATとコイルスプリングはそれぞれ35[deg]、32[deg]の角度まで回転した。張力を強めた(60[mm])時、コイルスプリングはバネ部の張力が弱い時とほぼ同じ30[deg]回転したのに対して、SATは8[deg]しか回転しない。この結果より一対の非線形バネ(SAT)を用いることでロボットの関節剛性を調整可能であることが実証された。

#### 3.2 SATによるダイナミックな動作の実現

モータ等のアクチュエータを用いて衝撃力を吸収するのではなく、SATの持つ受動的な衝撃吸収能力のみを用いてロボットがダイナミックな動作を実現可能か検証するために、Fig.5(a)のような三関節一本脚のロボット(以下、ランディングマシン)を製作した。ランディングマシンの総重量は2.1[kgf]、モータは一切持たない。各リンク長は300[mm]で、それぞれの関節は人間の腰、膝、足首に相当する。Fig.5(b)のように各関節は一対のSATを拮抗させて剛性を付与する。ネジ式のワイヤ張力調整機構でワイヤ長を変化させることでSATに掛かる初期張力を調整し、初期姿勢および関節剛性を設定する。各関節あたり2箇所、合計で6箇所のワイヤ張力を調整する。

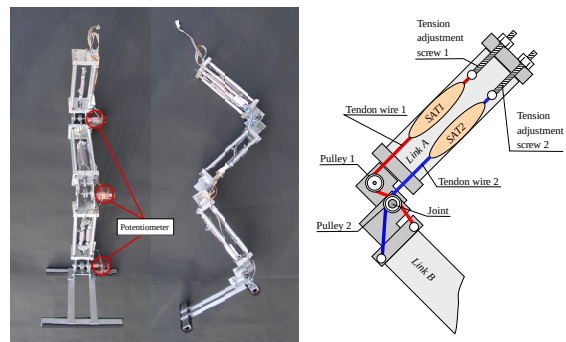
高さ500[mm]から落下した時のランディングマシンの挙動をFig.6に示す。脚先が接地してから姿勢が安定するまで約2[s]弱を要し、途中で一度だけ大きく伸び上がるが、その後は小刻みに振動しながら衝撃力を吸収して安定な姿勢に落ち着く。SATのもつ摩擦および粘性特性による効果が表れた結果である。

#### 3.3 ランディングマシンの関節部の静力学モデル

Fig.2(a)のSATの変位量 $x$ と張力 $f$ の実験データを元にして、次式の実験式を近似的に求めた。

$$f = 0.517e^{0.0884x} \quad (3)$$

Fig.5(b)の関節モデルにおいて、Link-BにJointからの距離 $L_f$ の点に力 $F_{ext}$ が加わったとする。関節に発生



(a) Landing machine.

(b) Wire-driven system

Fig.5 Landing machine.



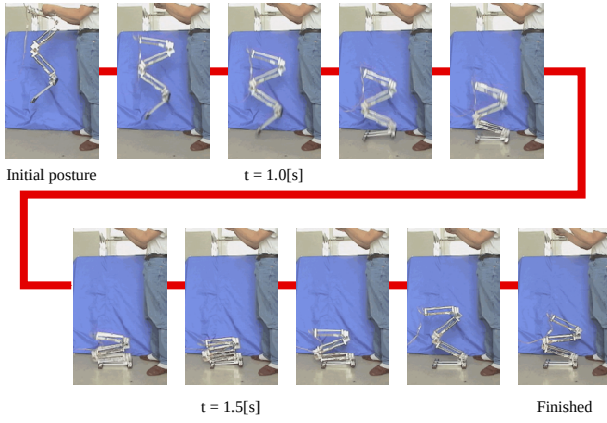


Fig.6 Experiment by Landing machine.

するトルクを  $\tau_j$ , 関節の回転角度を  $\theta_j$ , プーリ 1, 2 の半径を  $r_p$ , SAT1 と SAT2 の張力を  $f_1, f_2$  とすると,

$$\tau_j = F_{ext}L_f = r_p(-f_1 + f_2) \quad (4)$$

の関係式が成り立つ.  $Link - B$  が  $\theta_j$  回転した時, SAT1, SAT2 は  $x_1 = -r_p\theta_j$ ,  $x_2 = r_p\theta_j$  だけ変位する. この関係式と (3) 式を (4) 式に代入すると, ランディングマシンの関節部の静力学モデルは次式のように求まる.

$$\tau_j = r_p(-0.517e^{0.0884(x_{10}-r_p\theta_j)} + 0.517e^{0.0884(x_{20}+r_p\theta_j)}) \quad (5)$$

ここで  $x_{10}$ ,  $x_{20}$  は, それぞれ SAT1, SAT2 の初期変位量である.

SAT の静特性の近似式 (3) と関節部の静力学モデル式 (5) の正当性を検証するために, Fig.7 のような実験装置を製作した.  $L_f = 290[\text{mm}]$ ,  $x_{10} = x_{20} = 20[\text{mm}]$ ,  $r_p = 15[\text{mm}]$  である. Fig.8 は実際の実験結果と (5) 式のシミュレーション結果である. 横軸は関節の回転角度, 縦軸は外力  $F_{ext}$  である. Fig.7(a) の初期姿勢から Fig.7(b) のように, バネばかりでリンクと直交する方向へ引っ張り,  $10[\text{deg}]$  ごと CW 方向, CCW 方向へ回転させ, その時のバネばかりの値を計測する. 実験結果は三試行の平均値である. 二つのグラフがほぼ一致していることから, モデルの正当性が検証された. また, 回転角度が大きくなるほど関節剛性が高くなっていくことも分かる.

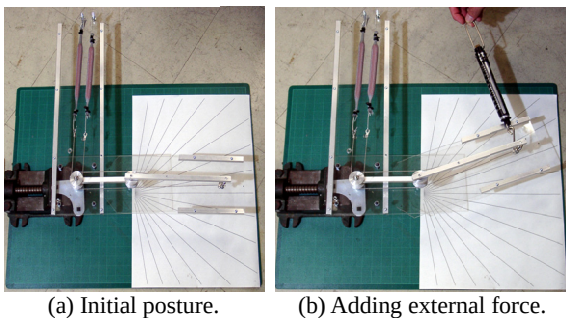


Fig.7 Two dimensional experimental model.

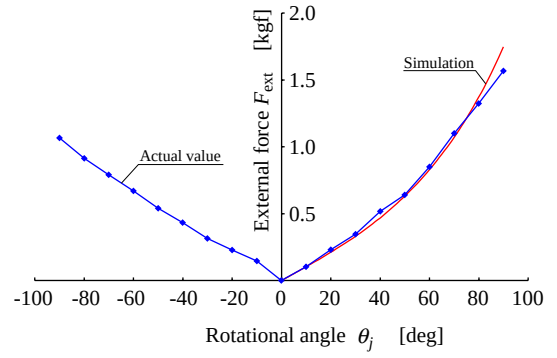


Fig.8 Verification of two dimensional model.

## 4 まとめと今後の課題

実験により, SAT は非線形バネ特性を持つこと, 特に並列接続した際に線形バネとは明確に異なる特性を持つことを示した. 編みチューブの幾何学的拘束をモデル化することで, SAT の持つ非線形バネ特性発生メカニズムを明らかにした. SAT を拮抗型のワイヤ駆動式ロボットに用いることで, 機構的に関節剛性を制御可能であることを実験により検証した. 着地動作に特化した検証用ロボット (ランディングマシン) を製作し, 比較的大きなロボットであっても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検証した. ランディングマシンの関節部の静力学モデルを導出し, 実験により正当性を確認した. 今後は, 現在のランディングマシンよりも大型かつモータを搭載した脚式ロボットを製作し, SAT を用いることで着地動作だけではなく跳躍動作も実現可能であることを示す.

## 参考文献

- 1) 藤原, 兼弘, 梶田, 横井, 齋藤, 原田, 比留川, 五十棲: “等身大ヒューマノイドロボットによる転倒制御”, 第 21 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2003.
- 2) 小坂: “二足歩行ロボットのエネルギー効率の考察”, 第 20 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2002.
- 3) 森田, 菅野: “メカニカルソフトネスとコンプライアンス調整”, 日本ロボット学会誌, Vol. 17, No. 6, pp. 790-794, 1999.
- 4) 小金澤, 山崎, 石川: “剛性可変機構を有する拮抗筋型腱駆動システムとその制御”, 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 7, pp. 1003-1010, 2000.
- 5) 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.
- 6) 白井, 富岡: “ワイヤ駆動式ロボットの関節剛性調整機構 SAT の提案”, “ロボティクス・メカトロニクス講演会'03 講演論文集”, 2003.
- 7) 白井, 田中, 富岡: “非線形バネ SAT の原理と特性”, 第 21 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2003.
- 8) 松下, 相良, 山下, 谷口: “ラバチュエータを用いた一軸ロボットハンドの力制御の適用”, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No. 3, pp. 461-467, 1993.