

# 非線形バネ SAT の原理と特性

白井達也 (鈴鹿高専) 田中信行 (鈴鹿高専) 富岡 巧 (鈴鹿高専)

## Mechanism and Characteristic of Non-Linear Spring SAT

\*Tatsuya SHIRAI (Suzuka N.C.T.), Nobuyuki TANAKA, Takumi TOMIOKA

**Abstract**— The wire utilized in the wire-driven system is broken when it is received the impulse force, since most of 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 also verify that the robots can achieve the dynamic motion by using SAT.

**Key Words:** SAT, Non-Linear Spring, Mechanical Compliance, Wire-driven System

### 1. はじめに

現在のヒューマノイドロボットは、跳んだり、走ったり、転んだ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。小型のロボットは比較的容易に製作できるが、ロボットの大きさが  $n$  倍になると重量は  $n^3$  倍になってしまうため、小型軽量なモータと高減速比の減速器を組み合わせて重量の低減を図る必要がある。モータ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モータまで伝わらず、バックドライバビリティの低い”機構的に硬いロボット”になってしまう。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、動力伝達機構（ギア、ワイヤ等）を破損する恐れがある。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。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>1)2)3)</sup>。筆者らも非線形バネ特性をもつ新しいバネ要素 SAT (*Stiffness Adjustable Tendon*) を開発した<sup>4)</sup>。本稿では SAT の物理的な特性を実験的に示すと共に、伸びれば伸びるほど硬くなる SAT の仕組みを明らかにする。

### 2. SAT の構造と特性

Fig.1に SAT の構造を示す。SAT は被覆である編みチューブ中に弾性体としてシリコンゴムスポンジ丸棒（以下、弾性体）を挿入したソーセージ状のシンプルな構造である。編みチューブの内径はチューブ全長の変化に応じて  $\phi 8 \sim \phi 20$  の範囲で変化する。SAT 両端に張力をかけ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。弾性体では元の形状に戻る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 の動作原理である。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。横軸はワイヤ張力、縦軸は SAT の変異

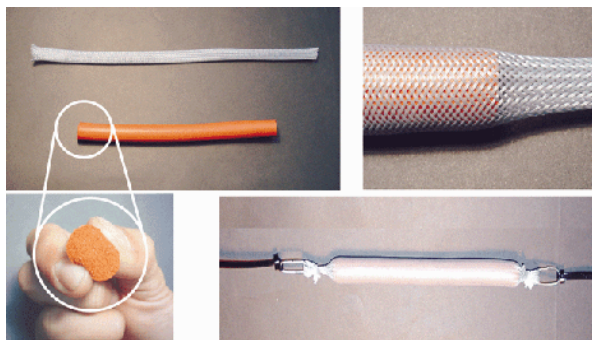


Fig.1 Structure of SAT.

量、傾きが剛性の逆数を表す。弾性体は  $\phi 15, \phi 13, \phi 11$  の 3 種類、SAT の全長は無負荷状態で 200[mm] である。張力と変位量の関係が非線形であり、張力の増加に応じて剛性が高くなっていくことが分かる。一般的なコイルスプリングとは異なり、直径が細くなるほど剛性が高くなることも分かる。今回製作した SAT は張力を増やしていく過程と戻していく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 ( $\phi 15$ ) 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と、ヒステリシス特性の発生が主に弾性体の特性に起因していることが分かる。Fig.3(a) は長さ 200[mm] の SAT1 と SAT2 を並列に 2 本接続した時の特性を調べたグラフである。線形バネと異なり、単純に 2 本のバネ係数を足し合わせた特性を持たないことが分かる。それに対して、Fig.3(b) のように 2 本の SAT (長さ 100[mm]) 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ことが分かる。

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に由来する。編みチューブは Fig.4(a-1) のように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

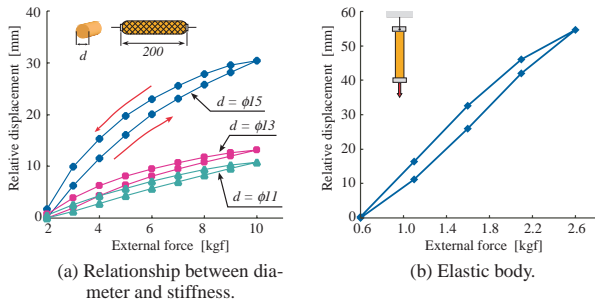


Fig.2 Static characteristic of SAT.

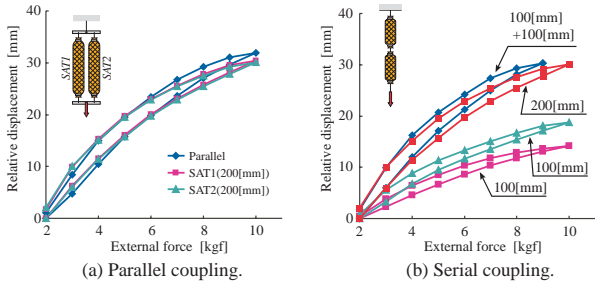


Fig.3 Parallel and Serial coupling of SAT.

巻かれているため、SATが伸縮しても擦れず、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である。ここで Fig.4(a-2) の素線一巻き分を展開すると Fig.4(a-3) となる。したがって一巻き分の素線の長さ  $L_{s1} = \sqrt{l_1^2 + (\pi d)^2}$  となるので、 $N$  巻き分の素線の長さ  $L_{sn} = N L_1$  より、 $l_n$  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.4(b) は  $l_{n0} = 190[\text{mm}]$ 、 $N = 3.8$ 、 $d_0 = 15[\text{mm}]$  の SAT に対して (1) 式より求めた 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。Model\_V は (3) 式で表される。

$$d_v = d_0 \sqrt{\frac{l_{n0}}{l_n}} \quad (3)$$

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.4中の記号  $\Delta$  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。

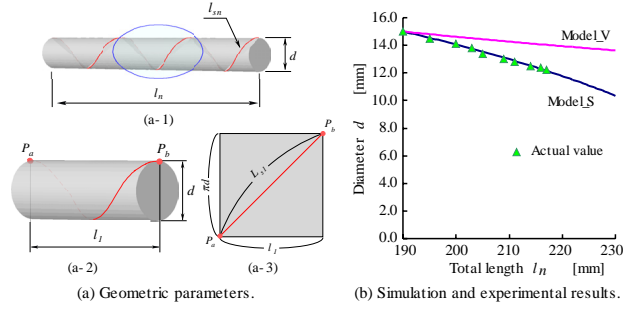


Fig.4 Simulation results.

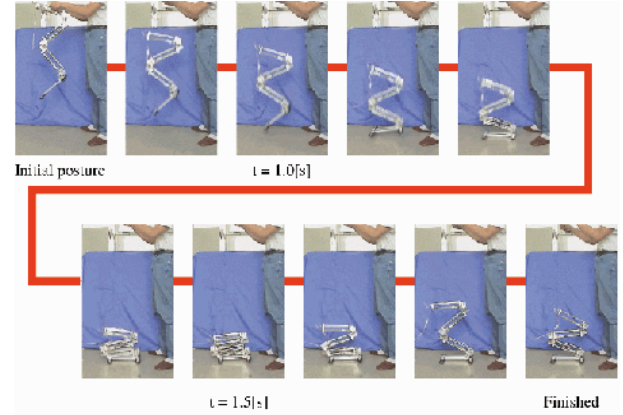


Fig.5 Simulation results.

Fig.5は SAT を用いることでダイナミックな動作（着地動作）が実現可能であることを検証した結果である。製作した三関節一本脚ロボットはモータを搭載しておらず、各関節に拮抗する形で設置した一対の SAT の初期張力を調整することで各関節の剛性を調整する。着地後、1、2回、大きく振動するが、約  $2[\text{s}]$  で振動は収束する。このことから SAT は単なる非線形バネ要素だけではなく、粘性要素も持つことが分かる。

### 3. まとめ

軽量かつシンプルな構造の非線形バネ SAT を提案し、実験により静特性を明らかにした。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。着地動作に特化した検証用ロボットを製作し、比較的大きなロボットでも SAT を用いることで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。

### 参考文献

- 1) 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.
- 2) 小金澤, 山崎, 石川: “剛性可変機構を有する拮抗筋型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.
- 3) 砂崎, 林原: “非線形ばねを用いた剛性可変機構の研究”, ロボティクス・メカトロニクス講演会'01 講演論文集, 2001.
- 4) 三浦, 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'02 講演論文集, 2002.