

# ワイヤ駆動式ロボットの関節剛性調整機構 SAT の提案

- SAT の特性の解析とモデル化 -

## Proposal of Joint Stiffness Adjustment Mechanism SAT - Analysis and Modeling of SAT -

正 白井 達也 (鈴鹿高専) 正 富岡 巧 (鈴鹿高専)

Tatsuya Shirai

Takumi Tomioka

Suzuka National College of Technology, Shiroko, Suzuka, Mie 910-0294

**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 also verify that the robots can achieve the dynamic motion by using SAT.

**Key Words** : SAT, Joint Stiffness, 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  $n$  倍になると体積は  $n^3$  倍になってしまうため、小型軽量のモータと高減速比の減速器を組み合わせると重量の低減を図る必要がある。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、“機構的に硬いロボット” となってしまう。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、“機構的に柔らかいロボット” 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バネ要素 SAT (*Stiffness Adjustable Tendon*) を開発した<sup>4)</sup>。本稿では SAT が持つ伸びれば伸びるほど硬くなる非線形バネ特性の仕組みを明らかにすると同時に、SAT を用いることでダイナミックな動作を実現可能であることを実験により実証する。

### 2 SAT の構造と原理

Fig.1 に SAT の構造を示す。編みチューブ中にウレタンスポンジ製の丸棒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。ウレタンスポンジは  $\phi 16$ 、SAT の全長は無負荷状態で  $190[\text{mm}]$  である。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、内部のスポンジを圧縮する。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つり合う長さまで SAT は伸びる。これが SAT の動作原理である。

Fig.2 は、張力を  $0 \quad 5 \quad 1 \quad 5[\text{kgf}]$  と変化させた時の SAT の変位量の測定を 5 回分平均した結果である。横

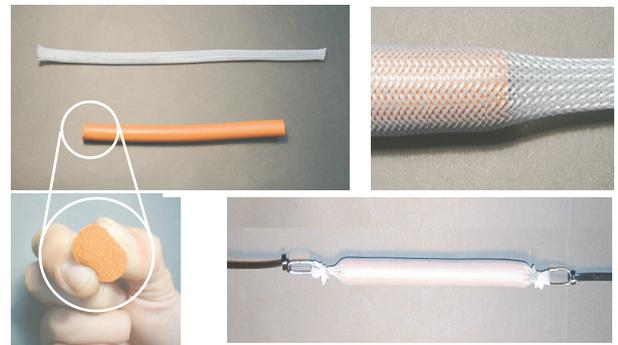


Fig.1 Structure of SAT.

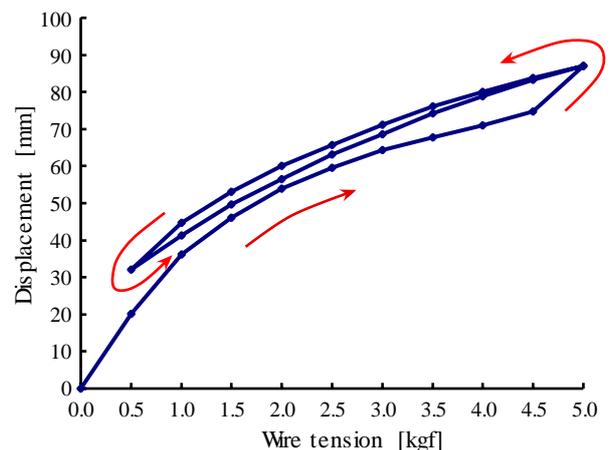


Fig.2 Static characteristic of SAT.

軸はワイヤ張力、縦軸は変位量、傾きが剛性の逆数を表す。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。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ことが分かる。注目すべき点は、張力が  $5[\text{kgf}]$  から  $1[\text{kgf}]$  に戻る時の軌跡と、 $1[\text{kgf}]$  から  $5[\text{kgf}]$  に増加する軌跡がほぼ一致しており、ヒステリシス特性がほとんど見られない点である。非線形バネ要素を用いたワイヤ駆動式の関節剛性調整機構では、一對のバネ要素

素を拮抗した状態で用いるので、初期荷重を常時1[kgf]以上掛け続けていけばヒステリシスの影響を無視できる。

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 が伸縮しても捩れず、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.1 の SAT を実測すると、 $N = 3.8$ 、 $l_{n0} = 190[mm]$ 、 $d_0 = 15[mm]$  である。したがって (2) 式より、 $L_{sn} = 268[mm]$  である。Fig.3 はこれらの係数を用いて (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.3 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。

### 3 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。本稿ではダイナミックな動作の一例として、高所からの着地動作に着目する。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。各関節は一对の 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.4 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

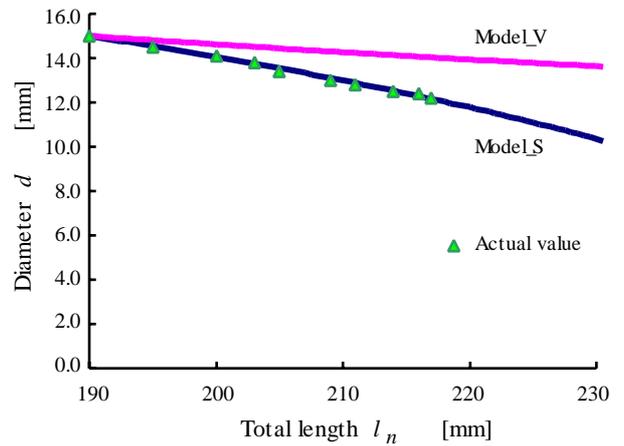


Fig.3 Simulation results.

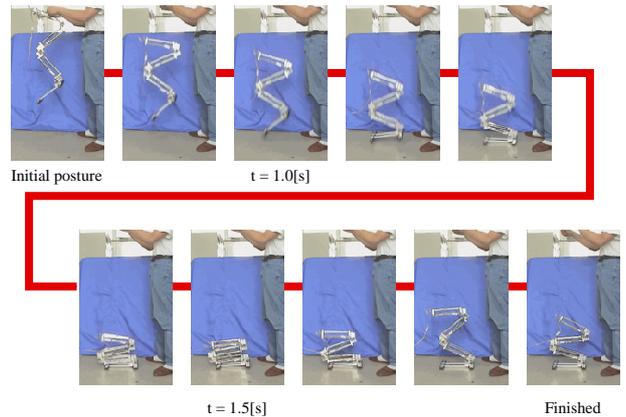


Fig.4 Experiment by Landing machine.

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。

### 4 まとめと今後の課題

実験結果より、SAT は非線形バネ特性を持つこと、SAT は常に荷重の掛かった状態で用いればヒステリシスの影響をほとんど受けないことが明らかになった。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。今後は、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なく跳躍動作も実現可能であることを示す。

### 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腿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.