

# 非線形バネ SAT を用いた 関節剛性，トルクおよび位置制御

## Control of Joint Stiffness, Torque and Joint Angle by Using Non-Linear Spring SAT

正 白井 達也 (鈴鹿高専) 学 伊藤 敬宏 (三重大学)  
学 田中 駿一 (鈴鹿高専) 正 富岡 巧 (鈴鹿高専)

Tatsuya SHIRAI, Suzuka National College of Technology, shirai@mech.suzuka-ct.ac.jp  
Shun-ichi TANAKA, Takumi TOMIOKA, Suzuka N.C.T.  
Takahiro Ito, Mie university

**Abstract**— The wire utilized in the wire-driven system is broken when it is 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 should be absorbed. We had proposed a non-linear spring device SAT (*Stiffness Adjustable Tendon*) to equip mechanical compliance for the power transmission mechanism of robots. In this paper, we show experimentaly 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.

**Key Words** : Non-Linear Spring, Stiffness Adjustable Tendon,

## 1 はじめに

ヒトは作業目的に応じて無意識のうちに，体中の各関節の剛性を調整していることが実験的に明らかにされている<sup>1)</sup>．飛んでくるボール受け止めるには，手の指の関節を硬くすることでボールを確実に拘束し，腕全体が柔らかくなるように腕の姿勢および関節剛性を調節してボールの勢いを吸収する．一方，現在のヒューマノイドロボットは衝撃力を伴うダイナミックな動作が苦手である．(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>2)</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．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するには小型軽量のモータを用いる．小型軽量のモータからロボットを動かすのに十分な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，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，Fig.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．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>3)</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

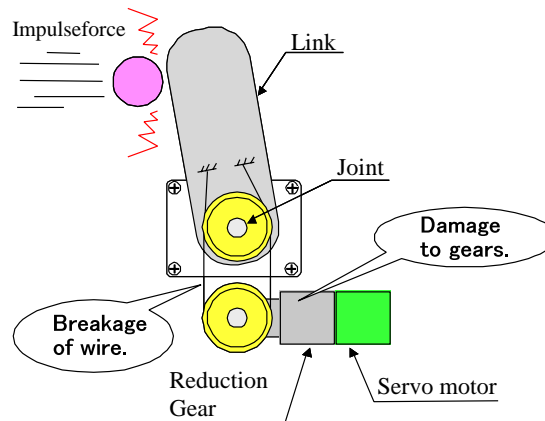


Fig.1 Wire driven system.

トが対象物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危険な挙動を生じる恐れがある．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．機械的に柔軟な機構であれば、衝撃力を安全に吸収できるが、その反面、精密な位置制御が難しくなる．したがって、状況に応じて関節の機構的な硬さ（＝関節剛性）を硬くも柔らかくも調節できる機構が望ましい．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>4)5)</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>6)</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>7)8)</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、実用上十分な精度を持つ位置制御とダイナミックな動作を安全に実現できる力制御およびメカニカルに関節剛性の制御が実現できることを実機実験により検証する．

## 2 非線形バネ要素 SAT

SATは従来から産業界はもとより日常生活でも広く用いられているコイルスプリングと同じ引っ張りバネであるが、構造・原理・特性まったく異なる新しいバネ要素である．変位量が少ないうちは剛性が低く、伸びるのに従って剛性が増加する非線形バネ特性を持つ．Fig.2はSATの構造を表した図である．SATは弾性素材である円筒形状のシリコンスポンジ丸棒外周を編みチューブで覆い、両端を結束バンドで封止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が小さくなり、弾性体は周

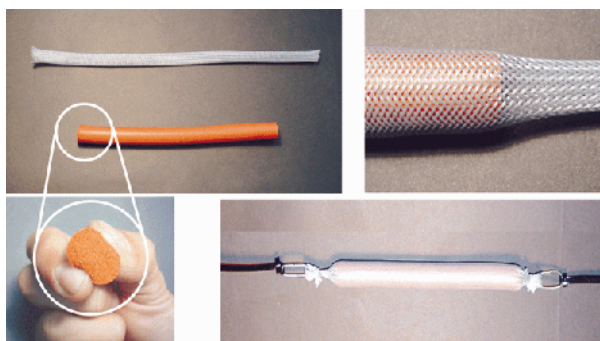


Fig.2 Structure of SAT.

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>9)</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压の流体（主に高压エア）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．金属製の部品を使っていないため動作音が静かで水分の多い雰囲気中でも使用可能である．また、特殊な材料や特殊な加工装置を必要としないため、簡単に製作できる点も大きな特徴である．

Fig.3はSATの静特性を調べた結果である．Fig.3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.3(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.3(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．

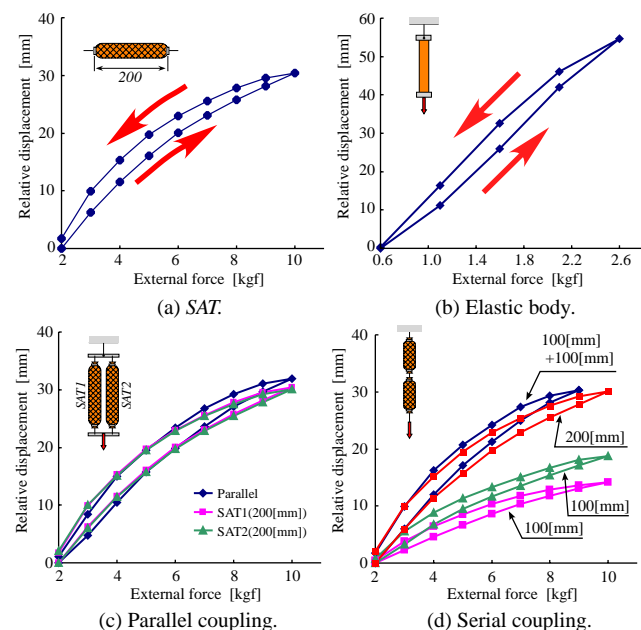


Fig.3 Static characteristic of SAT.

シリコ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.3(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.3(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。

### 3 一関節ロボット

#### 3.1 一関節ロボットの構造

Fig.4に、今回製作したSATを用いたメカニカルな関節剛性調整機構の検証用一関節ロボットの全体図を示す。ヒューマノイドロボットの関節部分を模したプーリに一对のSATを拮抗させ、その両端のワイヤをモータで巻き取ることにより、関節の回転角の制御および関節剛性の調節を行う。アルミフレームで組まれた本体に、180度回転可能な関節を有する長さ250[mm]のアームと、ワイヤを巻き取るためのDCギヤードモータ(SS32G, 澤村電気)を二つ搭載したロボットである。関節部分のプーリ(φ36)を介して2本のワイヤ経路の一端をリンクに固定し、反対側をDCギヤードモータに取り付けられたドラム(φ34)に巻き付け、固定する。ワイヤの途中には、関節剛性を調節するためのSAT(φ15, 長さ150[mm])が組み込まれている。Fig.5は一関節ロボットのシステム構成図である。トルクセンサなどの力センサを用いて力制御を実現する一般的な多関節ロボットが一関節あたり一つのモータを用いるのに対して本機構では二つのモータを要する。その代わりに、ノイズの影響を受け易い力センサおよびセンサアンプではなく、電気的に取り扱いが容易なポテンショメータで関節トルクを間接的に計測可能である。左右のモータ

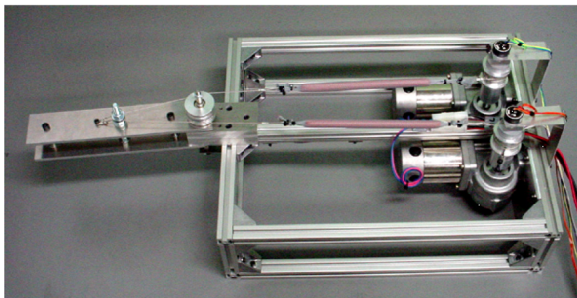


Fig.4 Overview of the one-link robot.

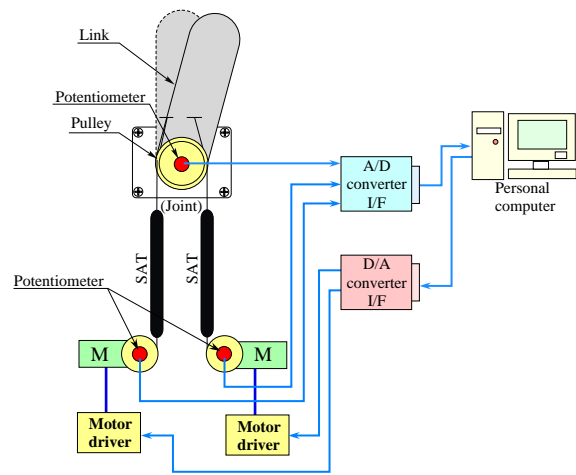


Fig.5 Structure of the one-link robot.

タはパーソナルコンピュータ(PC-9821Xs, NEC)に内蔵したD/A変換I/F(AD12-12TA(98)H, コンテック)を介して出力される電圧指令により、モータドライバで正逆方向に自由に回転する。DCギヤードモータには1:64のウォームギア式の減速機が取り付けられている。左右のモータおよび関節部にはポテンショメータが取り付けられており、A/D変換I/Fを介(DA12-8, コンテック)してパーソナルコンピュータに左右のドラムの回転角度およびリンクの回転角度を計測できる。

#### 3.2 関節剛性の非線形特性の確認

一对の非線形バネ要素(SAT)を動力伝達経路中に含むワイヤ駆動式のリンクロボット機構が非線形な関節剛性特性を持つことを実験により示す。Fig.6は、SATに初期張力を印加した状態で、ばねばかりを用いてアームの先端に徐々に力を加えてアームを回転させ、力と回転角の関係を調べた結果である。縦軸はリンクの回転角度、横軸はリンク先端に掛けた張力である。モータは固定、リンク先端に印加する外力は中立点を中心に左右方向へ五

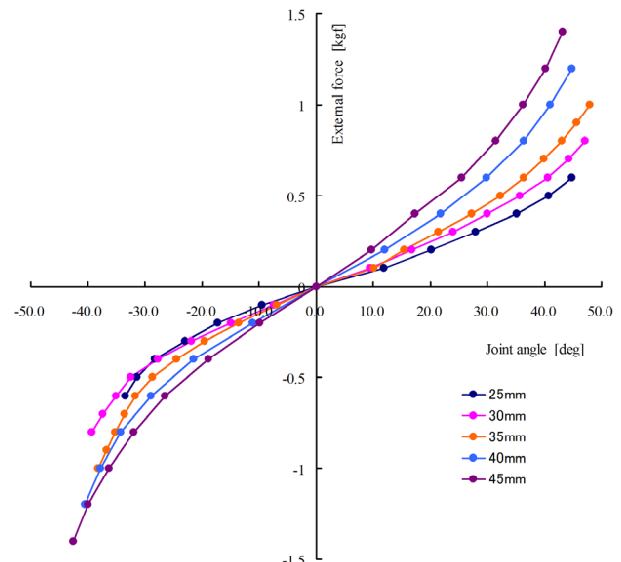


Fig.6 Static characteristic of the one-link robot.

往復分印加したときの平均値である．左右の *SAT* のワイヤの巻取り量を  $5[mm]$  ずつ  $25[mm] \sim 45[mm]$  まで増加させた．関節剛性が静的に非線形バネ特性を持つこと，左右の *SAT* に印加する張力が増加すると関節剛性が増加することが分かる．

### 3.3 関節剛性，角度，トルク制御実験

一関節ロボットを用いた関節剛性制御の様子を Fig.7 に示す．Fig.7(a) は外力を全く加えない初期状態でのアームの位置である．初期張力の状態でバネばかりを用いて  $50[N]$  の力でアームの先端を引っ張ったときのアームの回転角を Fig.7(b) に示す．初期張力状態から左右のワイヤをそれぞれ  $30[mm]$  ずつ巻き取り *SAT* の張力を増加させ，同様に  $50[N]$  の力でアームの先端を引っ張ったときのアームの回転角を Fig.7(c) に示す．両者の関節回転角度の違いから，左右のモータを制御することで関節剛性を調節可能であることが分かる．

一関節ロボットを用いた関節角度制御の様子を Fig.8 に示す．Fig.8(a) は初期姿勢であり，左右の *SAT* には初期張力が印加されており，関節剛性を高い状態に設定しているこの状態から左右のモータに同じ角度ずつ CW, CCW 方向に回転させることで，Fig.8(b),(c) に示すようにアームの回転角度を制御できることが確認できた．

一関節ロボットを用いた関節トルク制御の様子を Fig.9 に示す．Fig.9(a) の初期姿勢において，目標トルクをゼロに設定した状態が Fig.9(b) である．関節トルクがゼロになるように左右のモータが回転してトルクを逃がしていることが分かる．Fig.9(c) は一定トルクを目標トルクとして設定したトルク制御である．ばねばかりの数値はほぼ一定の値を維持していることが分かる．トルクセンサなどの力センサは一切使用していない点が非線形バネ要素を用いた動力伝達系の特徴である．

## 4 まとめと今後の課題

現在のヒューマノイドロボットでは実現困難な衝撃力を伴うダイナミックな動作を行うために必要な関節剛性

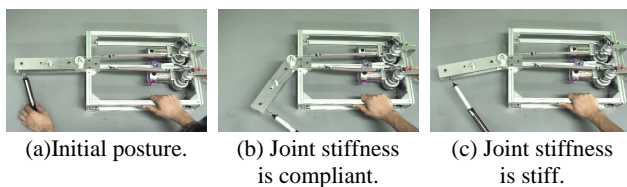


Fig.7 Experimental results (Control of joint stiffness).

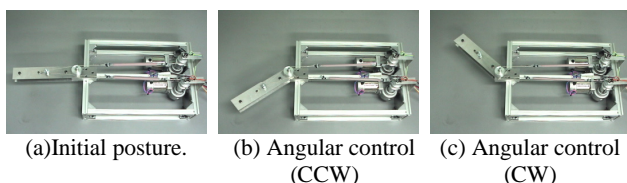


Fig.8 Experimental results (Control of joint angle).

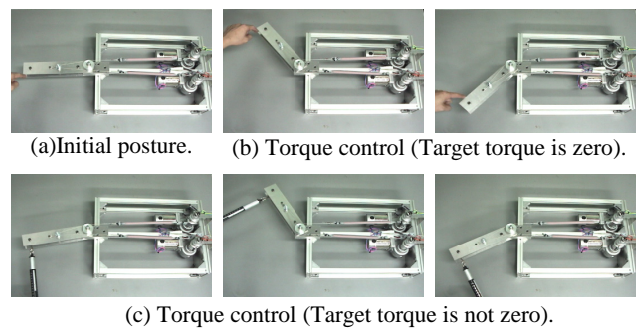


Fig.9 Experimental results (Control of joint torque).

の調節が非線形バネ要素 *SAT* を用いたワイヤ式動力伝達機構により実現可能であることを示すために，一関節ロボットを製作した．製作した一関節ロボットを用いた予備実験で，動力伝達系に非線形バネ要素を持つワイヤ駆動式動力伝達機構は構造的に非線形な関節剛性を持つことを確認した．アクチュエータをコンピュータで制御することにより，一関節ロボットの関節剛性，関節角度，関節トルクを制御できることを実機で検証した．今回行った実機実験では *SAT* の物理的な特性を正確にモデル化した制御則を用いていない簡易的な関節剛性および関節トルク制御を行っている．今後の課題は，*SAT* の特性を正確にモデル化した制御則を用いた制御実験を行い，実際に望んだ関節剛性および関節トルクを実現できているか確認することである．

なお，本研究は独立行政法人・科学技術振興機構のデータ補助助成を受けて行われたものである．

## 参考文献

- 1) 澄田，大園，辻，金子：“仮想エアホッケーシステムを用いた人間の運動特性の解析”，ロボティクス・メカトロニクス講演会'01 講演論文集，2001.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 砂崎，林原：“剛性可変機構を用いたリハビリ用 C P M 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.