非線形バネSATを用いた一脚ロボットの開発

○白井達也 田中駿一 伊藤敬宏 冨岡　巧 (鈴鹿高専)

Development of One–Legged Robot Using Non–Linear Spring SAT.

*Tatsuya SHIRAI, Shunichi TANAKA, Takahiro ITOU,
Takumi TOMIOKA (Suzuka National College of Tech.)

Abstract— A wire–driven system is in danger of breaking down when it receive a strong impulse force, since most of robots generally utilize a reduction gear that has high reduction gear ratio. If the power transmission mechanism has 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, Landing Machine

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に姿勢を制御することで衝撃力を軽減できることを実験により示した [1]．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．安全性の問題だけではなく，機構的に硬いロボットは，駆動時にリンクに作用する重力や慣性力を有効利用するのが難しいためエネルギ効率が悪い [2]．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．

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 [3][4]．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 装置に応用して有用性を確認している [5]．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$SAT(StiffnessAdjustableTendon)$を開発した [6][7]．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$SAT$の仕組みを説明する．さらに$SAT$をワイヤ駆動式ロボットの動力伝達機構に用いることで，ロボットの関節剛性を制御可能であること及び衝撃力を伴う着地動作を実現可能であることを実験により示す．

2.　非線形バネ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ーンゴムスポンジ製の丸棒を挿入し，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入手は容易かつ加工/組立てのために特別な装置や器具も不要である．

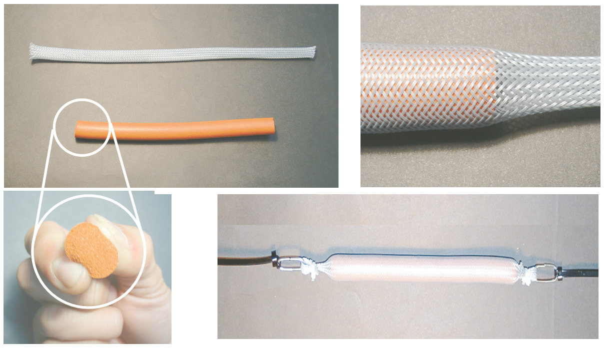


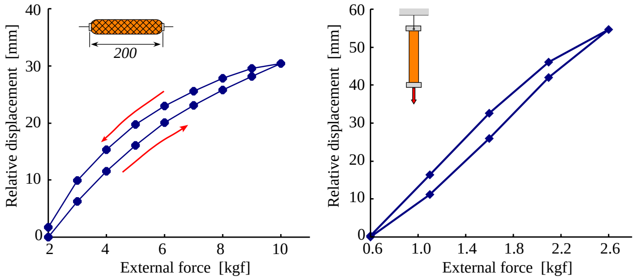
Fig.1 Structure of SAT.

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エータ [8] と似ているが，ラバチュ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く，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．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．編みチューブは直径が最大 $\phi 8$ から最小 $\phi 20$ まで変化するものを使用した．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 $2 \rightarrow 10 \rightarrow 2$[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 に生じたヒステリシス特性の主要因であると予想される．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．

伸びれば伸びるほど剛性が大きくなる SAT の特徴は，



(a) SAT. (b) Elastic body.

Fig.2 Relationship between external force and displacement.

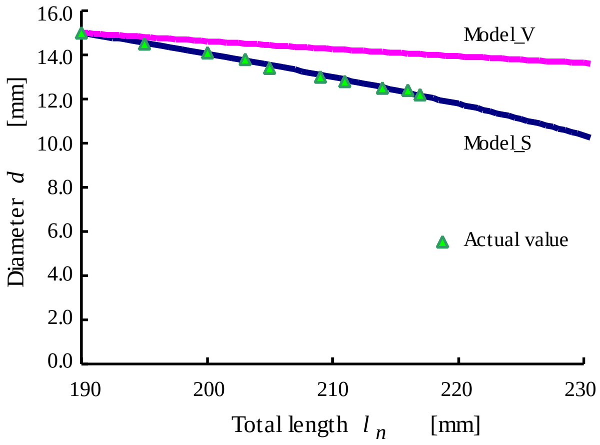


Fig.3 Simulation results.

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．Fig.3は SAT の全長 l_n と断面の直径 d の関係を表すコンピュータシミュレーションの結果である．横軸は l_n，縦軸は d である．グラフ中の Model_S は SAT の被覆である網チューブの幾何学的拘束をモデル化して求めたシミュレーション結果，Model_V は SAT 内部の体積 V が l_n の変化とは無関係に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．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のメカニズムである．Fig.3中の記号△は Fig.1の SAT の全長 l_n の変化に対する直径 d の変化量をノギスで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.　一脚ロボット／ランディングマシン

3·1　SAT による関節剛性調整機能の検証

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]，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

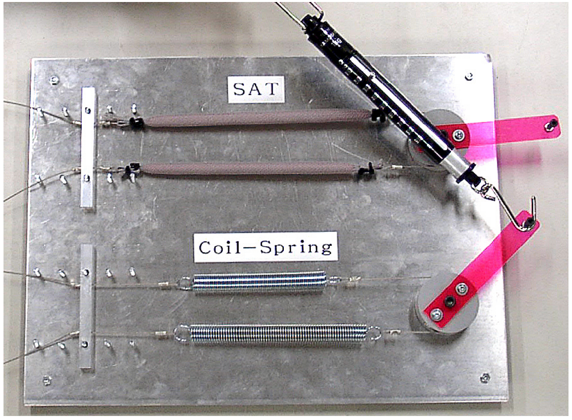
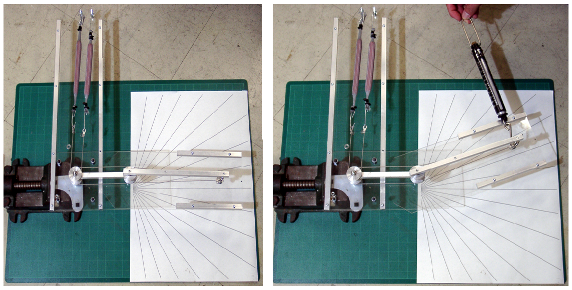


Fig.4 Verification that the joint stiffness can be adjusted by using SAT.

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，コイルプス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．

SATを用いたワイヤ駆動式動力伝達機構の静特性を計測するためにFig.5のような実験装置を製作した．一対のSATを拮抗させた一関節二リンクの機構である．SATの初期張力を一定に固定したFig.5(a)の初期姿勢からリンクと垂直な方向にバネばかりで外力F_{ext}を印加してFig.5(b)のように回転した時のF_{ext}と関節角度θ_jを計測する．Fig.6はリンクを10[deg]ごとCW方向，



(a) Initial posture.　　(b) Adding external force.

Fig.5 Two dimensional experimental model.

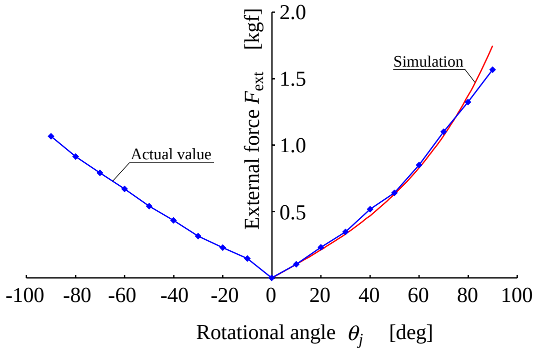


Fig.6 Verification of two dimensional model.

CCW方向へ回転させた時のθ_jとF_{ext}の関係を計測した結果である．実験結果は三試行の平均値である．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が確認できる．また，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近似的に求めたSAT単体の静特性の近似式$f = 0.517e^{0.0884x}$を用いて設計したワイヤ駆動機構の静力学モデルのシミュレーション結果とほぼ一致している．

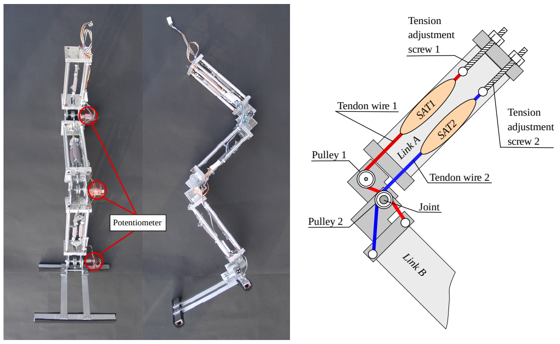
3·2　ランディングマシン１による着地動作検証実験

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.7(a)のような三関節一本脚のロボット（ランディングマシン１．以下，$LM1$）を製作した．$LM1$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.7(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．関節の回転角度は各関節に内蔵したポテンショメータで計測可能である．

高さ500[mm]から落下した時の$LM1$の挙動をFig.8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．この結果より，SATを用いたワイヤ駆動機構は，摩擦あるいは粘性特性を持つことが分かる．

3·3　ランディングマシン２の開発

Fig.7の$LM1$はモータを搭載しない一脚ロボットである．それに対して，現在，Fig.9に示すような$LM1$よりもサイズが大きく，アクチュエータを搭載したラ



(a) Landing machine.　　(b) Wire-driven system

Fig.7 Structure of $LM1$.

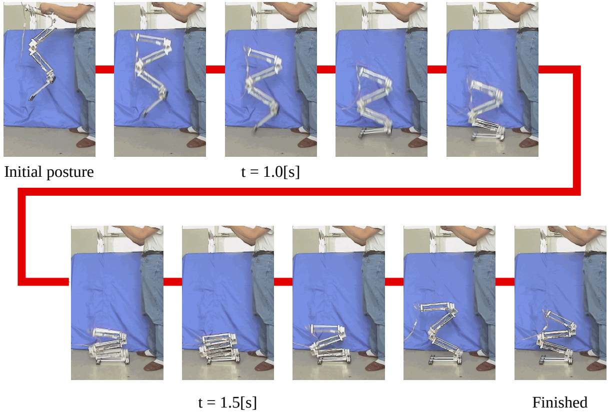


Fig.8 Landing experiment by $LM1$.

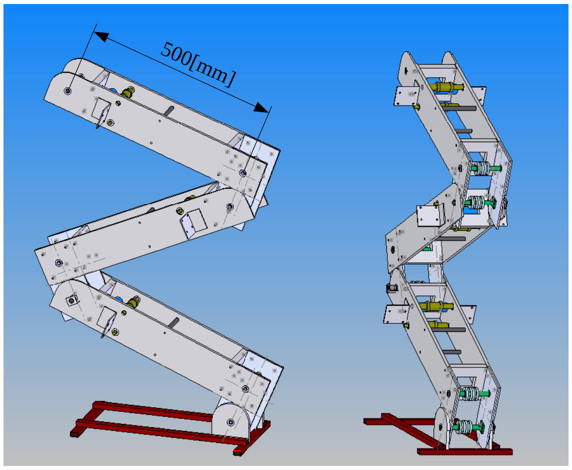


Fig.9 Design image of Landing machine2.

ンディングマシン２（以下，$LM2$）を設計中である．$LM1$ のリンク長が $300[mm]$ であったの対して $LM2$ のリンク長は $500[mm]$，ほぼ成人男性と同じ大きさの比較的大型の一脚ロボットである．各関節には二つのギアード DC モータを搭載し，一対の SAT を拮抗させる．各関節に設置したポテンショメータで関節角度，各ギアード DC モータに内蔵したエンコーダで各 SAT の変位量を計測することで，関節剛性・関節角度・関節トルクのうち二つを動的に制御できる．従来のロボットがノイズの影響を受けやすいトルクセンサで関節トルクを計測していたのに対し，比較的ロバストな角度センサで力制御を実現できるのも非線形バネを用いたワイヤ駆動機構の特徴である．

$LM2$ の製作目的は，$LM1$ 同様に (1) 受動的に衝撃力を吸収して安全な着地動作が実現可能であることを検証するのに加え，(2) 高剛性な状態における位置決め精度の確認，(3) 非線形バネ SAT に運動エネルギーを蓄積・放出することで小さなアクチュエータによる能動的なダイナミックな動作（跳躍動作など）の実現可能性の検証の三点である．

4.　まとめと今後の課題

SAT が非線形バネ特性を持つことを実験的に示した．編みチューブの幾何学的拘束をモデル化し，SAT の持つ非線形バネ特性発生のメカニズムを説明した．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，関節剛性に関しても非線形バネ特性を持つことを実験により検証した．また，SAT を用いたワイヤ駆動機構の関節部の静力学モデルを導出し，実験結果と一致することを確認した．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．

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．反応を速くするために制御ゲインを高めるとセンサ出力へのノイズ重畳の影響を受けやすくなり，誤動作，暴走を引き起こす可能性が高くなる．今後普及が予想され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．現在開発中の $LM2$ はセンサ入力に依存しない機構的な柔らかさを実現できるシステムである．$LM2$ で得られる知見を元に，ヒトと接しても安全なロボットの実現を目指す．

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，冨岡: “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，冨岡: “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.