三リンク柔軟関節ロボットの開発と 重量物キャッチング動作への適用

白井 達也¹*, 別府 勇太², 冨岡 巧¹

1:機械工学科

2: 電子機械工学専攻²,

多くのロボットは動力伝達機構に高減速比の減速器を用いているためバックドライバビリティが低く、機構的に硬い.転倒時など、大きな衝撃力を受けた時に衝撃力をモータに逃がすことができず、ギアやワイヤなどの動力伝達機構を破損する危険性が高い.もしロボットが状況に応じて機構的に関節剛性を自由にコントロールできるならば、ロボットが得意とする高速かつ正確な位置制御に加えて、衝撃力を伴うダイナミックなタスクも実現可能となるだろう.筆者らは全く新しい構造の非線形バネ要素 SAT (Stiffness Adjustable Tendon)を動力伝達機構に組み込んだワイヤ駆動式ロボットを開発した.本論文では開発した三リンク柔軟関節ロボットによる自由落下する重量対象物のキャッチングについて報告する.非線形バネ要素を用いた関節剛性調整機構を備えた三リンクロボットの手先の剛性がコントロール可能であることを実験および数値解析に示した.さらに開発した柔軟関節ロボットを用いて、自由落下する対象物を関節の粘弾性のみを用いた受動的な把握戦略によって安全なキャッチングが実現可能であることを実験的に検証した.

Key Words:関節剛性, 非線形バネ要素 SAT, ワイヤ駆動式ロボット, キャッチング動作 ロボットアーム, 自由落下対象物

(受付日 2008 年 9 月 5 日; 受理日 2008 年 12 月 24 日)

1. 緒言

一般的にヒトと同程度以上のサイズのロボットは、ロ ボットの総重量を軽減するために小型軽量のギヤードモ ータを動力源として使用するが、高速回転する小出力の モータからヒトと同程度のサイズのロボットが必要とす る大きなトルクを得るには、高減速比の減速器を使用す る必要がある. 高減速比の減速器を用いたロボットは外 力をモータへ逃がすことができない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るため、跳んだり 走ったりといったダイナミックな動作が苦手である.た とえ力制御を行なうサーボ機構を備えていても、転倒時 など動作限界を超える急激な外力の変化が生じた場合に 動力伝達機構を損傷する恐れがある.跳躍ロボットなど のアクロバティックロボット1のように機械的に柔軟な 機構を備えていれば衝撃力を安全に吸収できるが、その 反面,精密な位置制御が困難になる.一方,ヒトは作業 目的に応じて無意識のうちに各関節の剛性や腕の姿勢を 調整して手先の見掛けの質量や粘弾性を制御しているこ とが実験的に明らかにされている². 正確な動作だけでは なくダイナミックな動作も実現可能とするには、ロボッ

トもヒトと同様に状況に応じて機構的に関節剛性を硬く も柔らかくも調整可能な機構を持つことが望ましい.

2. 重量物のキャッチング動作

図 1(a)の例のようにロボット同士が直接,瓦礫を手渡 しできない場合,一方のロボットが他方のロボットの近 くまで移動する必要があるため作業効率が悪い.図 1(b) の例のようにロボットであっても対象物へ近付けない危 険な環境の場合も,対象物を自由落下させて受け止めざ るを得ない.飛来する対象物をキャッチングする動作は, 静的に安定な状態での対象物の受け渡し動作に比べて受 け渡しの確実性が著しく減少する.さらに対象物やロボ ットの破損を防ぐには,移動する対象物の運動エネルギ ーをロボットアームで安全に吸収して対象物とハンドと の間の相対速度および対象物の絶対速度をゼロにする必 要がある.従来の機構的な柔らかさを持たないロボット で飛来する対象物を安全に捕獲するには,物体の正確な 軌道を追跡してロボットアームを高速に追従させるビジ ュアルサーボ技術が必須である³.





(a) Removing rubble Fig.1 Examples of catching tasks

(b) Fire rescue

本研究の特徴は、アクチュエータとセンサを組み合わせ た積極的な制御戦略で落下する対象物をキャッチングす るのではなく、柔軟関節ロボットの関節粘弾性のみを利 用した受動的な戦略によって安定的なキャッチングの実 現を目指す点である.なお、本研究では物体の慣性力が 動力伝達機構に及ぼす影響にのみ注目しているので、物 体の落下軌道を重力方向への自由落下のみに限定する.

3. 三リンク柔軟関節ロボット

3.1 非線形バネ要素 SAT を用いた関節剛性調整機構

ロボットの関節を機構的に柔らかくも硬くも調整可能 な機構(以下,関節剛性調整機構)を実現するために, アクチュエータや動力伝達機構の柔らかさを利用する機 構がいままでにも開発されてきたが、高圧エアを用いる など構造が比較的大掛かりなものが大半である 45. それに 対して本研究では構造がシンプルかつ軽量な非線形バネ 要素 SAT (Stiffness Adjustable Tendon, 特許第 3769615 号「ば ね装置」)を利用する 67. SAT は図 2(a)に示すような伸縮 自在な編みチューブで弾性素材(シリコンゴムスポンジ 製)の丸棒を覆い、両端を結束バンドで封止したシンプ ルな構造の非線形バネである. SAT の静力学的特性を測定 した結果を図2(b)に示す. 横軸は伸び量, 縦軸は張力であ る. 理論的なバネは伸縮量に関係なくバネ定数が一定で あるのに対して、一般的な金属製のコイルスプリングは 荷重が増すにつれて剛性が低下していき、弾性限界を超 えると塑性変形してしまう.SATも同様にバネ係数は一定 ではないが、コイルスプリングとは逆に伸び量が増加す るに従いバネ係数は増加して高剛性化し、ある長さより 長く伸びることはない. SAT の静的な特性には, SAT 内部 の弾性体として用いているシリコンゴムスポンジの変形 に対する復元速度の遅さに由来するヒステリシス特性が 存在する.精密な制御を行なう上では好ましくない特性 だが、キャッチングのようなダイナミックな動作を行な う際には衝撃力を吸収して振動を減衰させる効果を生む.



一般的なワイヤ駆動式ロボットは1関節あたり1個の モータを用いて関節角度を制御する. ワイヤ自体の柔ら かさは微小なため、ロボットの動作に柔らかさを与える コンプライアンス制御などの力制御を行なうには、ワイ ヤ張力センサや関節トルクセンサを用いてリアルタイム に関節トルクを測定しながらモータを能動的に制御し続 ける必要がある. それに対し、ワイヤ駆動式ロボットの 動力伝達系に非線形バネ要素を組み込むことでロボット の関節剛性を調整可能であることが知られている⁸⁹.図3 は開発した柔軟関節ロボットに用いた非線形バネ要素 SAT を用いた関節剛性調整機構の動作原理を示した図で ある.1関節あたり2個のモータを必要とするが、ノイ ズに弱いひずみゲージを用いた関節トルクセンサを用い ることなく, 関節角度, 関節剛性, 関節トルクを制御可 能である.たとえば右側のワイヤを巻き取り、左側のワ



Fig.3 Wire driven system with non-linear spring devices

イヤを同じ長さだけ緩めれば、機械的な関節剛性を保っ たままリンクは時計方向に回転する.図3(b)のように両方 のワイヤを同じだけ引っ張れば関節角度を変えることな く関節剛性だけを高剛性化することができ,図3(a)と同じ 外力を受けたとしてもリンクの変位量は減少する.また, 各モータの回転角度と関節の回転角度の関係から、関節 に発生しているトルクを推定できる.なお以後では、各 姿勢でリンクに働く外力および関節トルクが共にゼロの 状態のワイヤの巻取り量を SAT の初期引張り量と呼び, ワイヤ張力がゼロの時を初期引張り量のゼロとする.

3.2 三リンク柔軟関節ロボットの構造

図 4 に実際に製作した三リンク柔軟関節ロボットの外 観を示す.本柔軟関節ロボットはアルミフレームで構成 された本体に、三個の関節を持つ三リンクアームとワイ ヤを巻き取るための DC ギヤードモータ(タミヤ製, 540K300)を六個搭載している.アームは根元から順に第 一、第二、第三リンクとし、第一、第二リンクの長さは それぞれ 270[mm], 第三リンクの長さは 235[mm]である. リンクとモータの間の動力伝達用ワイヤには、関節剛性 を調節するための SAT が1関節あたり1対(2本),組み 込まれている.関節部プーリの直径は第1関節のみゅ56, 第二、第三関節はゅ36、モータに取り付けたワイヤ巻取 りドラムは全てゅ16 である.

使用する SAT は ϕ 15[mm],長さは第1リンク用が 30[mm],第二,第三リンク用が40[mm]である.各関節に はポテンショメータ,モータ軸にはロータリーエンコー ダを取り付けてあり,関節およびモータの回転角度を測 定可能である.先端部には重量物をキャッチするパーム を取り付ける.パームは内径 ϕ 90 のアルミ製円筒を使用 し,開口部の幅は65[mm],表面にはt=1のラバーシート を貼り付けた.関節角度は図4(c)に示すように根元から順 に θ_1 , θ_2 , θ_3 , パーム部の角度を θ_P とする. 各角度は CW を正とし, $\theta_1 \ge \theta_P$ は水平方向をゼロとする絶対角度, $\theta_2 \ge \theta_3$ は前後のリンク間の相対角度とする.

3.3 三リンク柔軟関節ロボットの特性解析

三リンク柔軟関節ロボットの外力と姿勢変形の関係をシ ミュレーションおよび実験により解析する.作成したシミ ュレーションソフトウェアでは、SATの特性に図2に示した 実測値を用いた.ただしヒステリシス特性を無視するため に、加圧時と減圧時の平均値を特性値とした.また、関節 剛性とリンクに作用する外力との関係のみに着目するため に重力の影響を無視して数値解析を行い、実機実験時はロ ボット全体を直角に倒して、リンクが水平面内を動作する 水平多関節ロボットの姿勢で実験を行なった.

三リンク柔軟関節ロボットの手先剛性が調整可能である ことを実験とシミュレーションによって確認した結果が図 5である.図5(a)は実機実験の環境を上方から撮影した写真 である.以下,水平姿勢では図5(a)に示すようにx-y軸を設 定する. 図5(a)に示す初期姿勢($\theta_1 = 0$ [deg], $\theta_2 = 30$ [deg], θ₃=30[deg])で, x軸方向に 1 [N] の外力をロボットの手 先に印加した時に手先がどれだけx軸方向に変位するかを 実験およびシミュレーションにより求めた結果が図5(b)で ある. 横軸, 縦軸はそれぞれ各関節のSATの初期引張り量, x軸方向への手先の変位量である.SATの初期引張り量はワ イヤの張力がゼロとなる巻取り量が原点であり、巻き取る ほど関節剛性は高くなる.実機による実験では0[mm]から 5[mm]単位で15[mm]まで、シミュレーションでは0[mm]から 0.2[mm]単位で15[mm]まで初期引張り量を変化させた. 実験 結果とシミュレーション結果の値は一致しなかったが、6 本のSATの初期引張り量を同時に増やして張力を増やすと 手先の剛性が高くなる傾向は一致した.





(c) Coordinate systems Fig.4 Overview of developed flexible joint robot

図6は図5の実験結果と同じ図5(a)の初期姿勢およびSAT 初期引張り量(5[mm])の条件で3[N]の外力を印加した結 果である.図6(b)は図6(a)に示すように三関節ロボットの



(a) Initial posture

(b) Simulation and Experimental results

Fig.5 Relationship between initial winding wire length and displacement of fingertip





(a) Initial posture (c) Simulation result Fig.6 Comparison between experimental result and simulation result

手先に 45[deg]単位で八方向に外力を印加したときの手先 の変位量を測定した実機による実験結果である. 図 6(c)は 全く同一の条件で、1[deg]単位で全方向に外力を印加した シミュレーション結果である.変位量の大きさは多少異な るが、手先の軌跡はほぼ同じ形の楕円を示した.

図7はロボットの初期姿勢を図5(a)と同じ姿勢に固定し、 手先に印加する外力を0[deg]から360[deg]まで1[deg]単位で 全方向に対して1[N], 3[N], 5[N], 7[N], 10[N]と増やした時の 手先の変位量をシミュレーションにより求めた結果である. 全ワイヤの初期引張り量は5[mm]である. 横軸, 縦軸はそれ ぞれ手先の変位量を表している.変位量が大きい方向は手 先の剛性が低いことを表している.外力が大きくなるにし たがって変位量は増加するが、手先先端の描く軌跡の形状 はほとんど変化しないことが分かる.

図8は各モータの初期引張り量は同一の5[mm], 姿勢のみ を変えて全方向に3[N]の外力を印加した時の手先の変位量 をシミュレーションにより求め、 グラフ化したものである.





Fig.8 Relationship between posture and mechanical compliance

同じ初期引張り量であっても、ロボットの姿勢によって手 先の剛性が変化することが分かる.

図9(a)から図9(h)はロボットの姿勢を図5(a)の初期姿勢に 固定し,第一関節,第二関節,第三関節のSAT初期引張り量 を関節ごとに変化させたシミュレーション結果である.外 力の大きさは3[N]である.同じ姿勢であっても,各関節の 初期引張り量を調整することで、手先の剛性を特定の方向 には硬く,別の方向には柔らかく設定できることが分かる. 例えばこの姿勢においては、図9(g)のように第一関節を柔ら かく, 第三関節を硬く設定すると手先は第三リンクの方向 に柔らかく、鉛直方向には硬くなり、逆に図9(h)のように第 一関節を硬く、第三関節を柔らかく設定すると手先は第三 リンク方向には硬く、鉛直方向には柔らかくなる.



and mechanical compliance

4. 実機による落下対象物キャッチング実験

前節のシミュレーションおよび実験結果より,開発した 三リンク柔軟関節ロボットは,各関節の剛性を調整するこ とで手先の剛性を制御可能であることが示された.この結 果は自由落下する対象物をキャッチングするタスクを実 現する上で重要な意味を持つ.対象物の運動エネルギーを 安全に吸収するには、パーム部は水平姿勢を保ちながら重 力方向にのみ運動することが望ましい.パームが傾いたり、 水平方向に動いてしまうと対象物がパーム内で転がって しまい、対象物を取り落とす危険性が増えるためである. 第三関節の剛性を高く設定し、第二リンク先端の水平方向 の剛性を高く、垂直方向の剛性を柔らかく設定すれば、パ ームを傾けない垂直方向の運動が実現できる.

0.3[m]の高さから質量0.52[kg],直径 φ 32,長さ0.083[m] の鉄製円柱対象物を落下させた際のロボットの挙動を図 10 に示す.ロボットの関節剛性の厳密な計測法が確立され ていないので,各関節の機械的剛性は先に述べたように, 第三関節は硬く,第二リンク先端は重力方向に柔らかくな るように第一,第二関節の剛性を手動で調整した.

対象物がハンド手先のパーム部に接触した瞬間を時間 t =0とした.図11は時間と共に各関節およびパームの角度 がどのように変化するのかを計測した結果である.駆動ワ イヤを巻き取る各モータは初期姿勢および関節剛性を設 定する時にのみ用い,落下対象物のキャッチング動作時に は一切,動かしていない.ギヤヘッドの減速比が1/300と 高減速比であるためバックドライバビリティが非常に低 く,落下対象物から受ける衝撃力によってモータが従動的 に回転していないことも確認している.



Fig. 10 Catching motion by robot arm



第一関節は対象物がアームに接触した直後に少しだけ動 くが、その後はほとんど動かない.第二関節は緩やかに一 定の周期で振動する.第三関節は対象物が接触した直後は 第二関節よりも短い周期で振動するが、その後は第二関節 よりも振幅の小さな長い周期で振動する.パームの絶対角 度は一時的に-10[deg]以上傾くが、その後は-10[deg]以内の 角度を維持している.全体の振動は約2秒でほぼ収束する. ビデオ画像を目視で調べた範囲では、対象物はパーム内で 転がりはするがバウンドしてパームから離れることは無 かった.このことから接触直後の短周期の振動は対象物の 運動エネルギーを柔軟関節ロボットが受け止めた際の衝 撃力によるものであると考えられる.

対象物は接触後にパーム内で転がる.転がることによる 重心位置の影響がロボットアームの振動に与える影響を 調べるために、パーム内に対象物を固定した場合と固定し ていない場合とで、パーム角度の挙動の違いを調べた.対 象物は落下させるのではなくパーム内に置いた状態で、ア ーム先端を手で下方に引っ張り、手を離してからの挙動の 違いを計測したが、パームの絶対角度の挙動の違いはグラ フ上からは判別できない程度に小さかった.したがって、 対象物がパームに衝突した後の長周期の振動はアーム自 体の固有振動によるものであると考えられる.

5. 結言

非線形バネ要素 SAT を用いた関節剛性調整機構をもつ三 リンク柔軟関節ロボットを開発した.実機を用いた実験に より,質量 0.5[kg]程度の対象物であれば能動的な関節力制 御を行なわないでも受動的な粘弾性のみで落下物をキャ ッチング可能であることを実験的に確認した.

動的な挙動かつ衝突を伴う現象であるため、アームの初 期姿勢と関節剛性、キャッチング成否の関係を解析的に調 べることは容易ではない.実験的に関係を明らかにするに は各パラメータを網羅的に試して、パラメータとキャッチ ング成否の関係性を導出することになる.関節角度と関節 剛性だけでなく、対象物の質量、落下高さもパラメータと すると実験条件は膨大な組み合わせになるため、実機の三 リンク柔軟関節ロボットを忠実にモデル化した運動解析 ソフトウェア (MSC-ADAM, MSC.Software Corporation 製) を用いたキャッチング動作のシミュレーションも行って いる.

今後の課題は、三リンク柔軟関節ロボットの関節剛性を 計測する手法を確立して実験の精度と再現性の向上を目 指すこと、ロボットの強度を上げて対象物の重量を増やす ことと、ダイナミクスを考慮したシミュレーション環境を 完成させて、各パラメータとキャッチング成否の関係を表 すマップを完成させ、そこから関係性を導き出すこと、そ こから得られた知見を元にして、解析的な手法も用いてキ ャッチングが成功するための各関節角度と剛性の範囲を 算出する関係式を得ることである.本研究の最終的な目標 は、落下してくる対象物の質量と落下高さを入力として、 最も安全かつ確実に対象物をキャッチングできる初期姿 勢と関節剛性を算出する関係式と制御戦略を確立するこ とである.

なお、本研究は科学研究費補助金・基盤研究(C)の助成を 受けて行ったものである.

References

- 中野,大久保,"跳躍ロボット全般について",日本ロボット 学会誌, Vol.11, No.3, pp.40-45, 1993.
- 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.
- 今井,並木,橋本,石川,金子,亀田,小山,"高速多指ハンドと高速視覚を用いたダイナミックキャッチング",第9回ロボティクス・シンポジア予稿集,pp.517-522,2004.
- 4. 則次,安藤,山中, "ゴム人工筋を用いたリハビリテーション支援ロボット,日本ロボット学会誌, Vol.13, No. 1, pp.141-148, 1995.
- 大島,藤川,熊本,"一関節筋および二関節筋を含む筋座標 系によるロボットアームの機能的特性",日本精密工学会誌, Vol. 66, No. 1, 2000.
- 白井,草川,冨岡: "非線形バネ SAT の特性の解析とロボットへの応用",鈴鹿工業高等専門学校紀要第 39 巻, p.63-68, 2006.
- 白井,田中,冨岡: "非線形バネ SAT の原理と特性",日本ロボット学会学術講演会'03,2003.
- 猪俣,小金澤: "非線形弾性要素を有するアクチュエータ (ANLES) を用いた拮抗駆動型手首関節とその剛性制御", 日本ロボット学会学術講演会 '04.
- 小金澤,清水: "非線形弾性システムを有するアクチュエー タを用いた腱駆動多自由度関節の機械式剛性制御",日本ロ ボット学会誌, Vol. 22, No.8, pp.1043~1049, 2004.

Development of Three-Linked Compliant Joint Robot and Application for Catching Task of Free Falling Heavy Object

Tatsuya Shirai¹*, Yuuta Beppu², Takumi Tomioka¹ 1: Dept. of Mechanical Engineering 2: Advanced Engineering Faculty,

When the most of robots which has rigid joints receives the large impact force, its power transmission mechanism such as gears and wires will be seriously damaged. If the robot is able to be controlled joint stiffness, it can absorb large impact force. We had proposed a non-linear spring device named *SAT* (Stiffness Adjustable Tendon) to equip mechanical compliance for the power transmission mechanism of robots. In this study we discuss that how the robot catches a free falling heavy object. We had developed a three linked flexible joint erobot that can adjust joint stiffness as compliant and stiff. We had verified that the joint stiffness at each joint can be adjusted mechanically by using the robot. We have also verified the stiffness at finger tip can be controlled by the robot and by simulation of the robot. Finally, we had experimentally verified that flexible joint robot can catch a free falling heavy object by adjust the joint parameters of the stiffness and the damping without dynamic servo control of actuators.

Key Words : Joint compliance, Stiffness Adjustable Tendon (SAT), Wire-driven robot, Capturing task, Robot arm, free falling object