

落下物を受動的にキャッチング可能な 三リンク柔軟関節ロボットアームの開発 — 非線形バネ要素の配置位置による構造の違い —

Development of Three Linked Compliant Joint Robot Arm which can Achieve Passive Catching Motion of Free Falling Object

- Difference of Structure According as Layout of Non-Linear Spring Device -

○正 白井 達也 (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
Takumi TOMIOKA, Suzuka National College of Technology

We had developed the three linked compliant joint robot. The robot can absorb large impact force that affect toward the robot from external environment when the robot try to do any dynamic actions, for example it try to land on ground, to catch heavy objects, or to tumble down without intention. The robot had equipped with mechanical joint stiffness adjustable mechanism using non-linear spring device named as SAT (Stiffness Adjustable Tendon). The three linked robot arm is not so compact since it has twelve pulleys to lead stainless wire for transmitting power from each motor toward target link. In this report, we had considered to try to reduce the number of idler pulley by re-arranging the layout of SAT. The robot arm which has new layout of power transmission system is simpler and stronger than old one's structure.

Key Words: Robot, Manipulator, Mechanical Flexible Joint, Non-Linear Spring, SAT

1. 緒言

近年、ロボットは工場等で使用される産業用途だけではなく、人とのコミュニケーションを目的とするロボット[1][2]、目的地まで自動的に移動する電動車椅子[3]、テーマパークの屋外清掃を行うロボット[4]など、日常生活の様々な場面で活躍し始めている。ロボット技術の高度化に伴い旧来のロボットでは困難だった滑らかかつ素早い動作は可能になったが、安全性と信頼性の点において憂慮すべき問題点がある。現在開発中の様々なヒューマノイドロボットの多くは小型軽量のモータから十分な大きさの動力を得るためにバックドライブビリティの低い高減速比のギヤヘッドを組み合わせた動力伝達機構を用いている。高減速比の減速器は構造的に硬く、設計仕様を超える大きな衝撃力が加わった場合に対応できない。ロボットの動力伝達系にバネ要素を組み込んだ緩衝装置を追加することで衝撃力は吸収できるが、単純に動力伝達部にバネやダンパを使用して各関節の剛性を柔らかくすると正確な位置制御が難しくなる。実用的に様々なタスクを実行可能とするにはロボットの関節剛性を硬くも、柔らかくも調節可能であることが必要である。

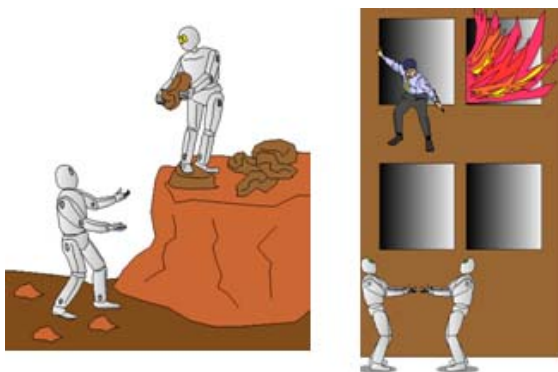
本研究ではロボットの動力伝達機構にダメージを与えるよ

うな重量物体のキャッチング動作を想定する。図 1(a)に示す災害現場など、足場が不安定な環境でロボットが瓦礫をバケツリレーする場合、ロボットが瓦礫を持って移動するのは効率が悪く、移動中に転倒する恐れがある。一方のロボットが瓦礫を投げて別のロボットがキャッチできれば作業効率の向上が期待できる。図 1(b)のようなロボットが対象物に直接近づけない場合はキャッチングによって対象物を受け止める以外に方法はない。これまでも飛来してくる物体をキャッチングする研究[5]は行われているが把握のタイミングや把持戦略に着目したものが大半であり、軽量物体のキャッチングを対象としている。本研究では特別なカメラ等を用いることなく、ロボットアームの機械的な柔軟性を利用した受動的なキャッチング動作を実現可能な三リンク柔軟関節ロボットアームを開発している[6][7]。特に本稿では動力伝達機構に追加する非線形バネ要素の配置位置の違いによる動力伝達機構の構造の違いについて考察する。

2. 三リンク柔軟関節ロボットアーム

2.1 三リンク柔軟関節ロボットアームの構造

製作した三リンク柔軟関節ロボットアームの外観を図 2 に示す。関節剛性調整機構には本研究室で開発した、伸びれば伸びるほど剛性が高くなる非線形バネ特性を持つバネ要素、SAT を用いている。本柔軟関節ロボットアームシステムはア



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

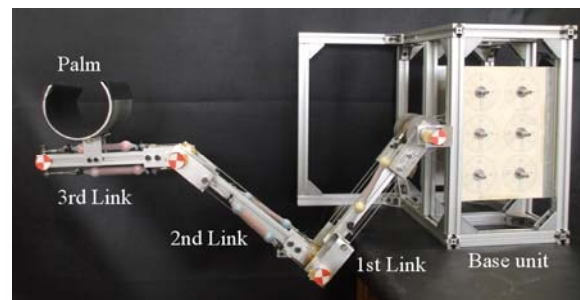


Fig.2 Overview of developed flexible three joints robot

ルミフレームで組まれたロボット本体と三関節ロボットアームからなる。ロボット体内にはワイヤを巻き取るための DC ギヤードモータを六個搭載している。ロボット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。リンクとモータ間の動力伝達用ステンレスワイヤには関節剛性を調節するための SAT が一リンクあたり二本ずつ対になるように組み込まれている。SAT の位置は図 3 に示すように最終的に力を伝達するリンクのワイヤ固定端側に配置した。内蔵した SAT の太さは全て $\phi 15$ だが、第一リンクに使用する SAT の長さ 30[mm]、第二、三リンクに使用する SAT の長さは 40[mm]である。SAT は一般的なコイルスプリング同様に全長が短いほど剛性が高い。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搭載し、関節角度およびモータの回転角度を測定可能である。ロボットアーム先端部には落下物をキャッチするためのパームを搭載する。パームは内径 $\phi 90$ のアルミ製円筒を用いている。開口部の幅は 65[mm]、表面には $t = 1$ [mm] のラバーシートを貼り付けた。

完成した三関節柔軟関節ロボットアームを用いて 0.3[m] の高さから質量 0.5[kg]、直径 $\phi 30$ 、長さ 0.008[m] の鉄製円柱をロボットアームのパームでキャッチングする実験を行った。図 4 にロボットアームの挙動を示す。対象物が手先のパーム部に接触した瞬間を時間 $t = 0$ とする。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水平方向より下側に 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[s]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アーム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。

2.2 非線形バネの配置変更による機構の簡略化

本稿では製作した三リンク柔軟関節ロボットアームの構造を簡略化する。図 5(a)は試作した三リンク柔軟関節ロボットアームの構造を上方から見た図である。右端が本体に接続する第一関節で、動力伝達のための中間プーリ（以下、プーリ）が 6 個も必要である。第二関節、第三関節にもそれぞれ 4 個、2 個のプーリが必要である。これらのプーリは関節軸にベア

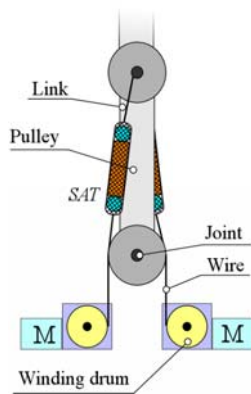


Fig.3 One link of three joints robot

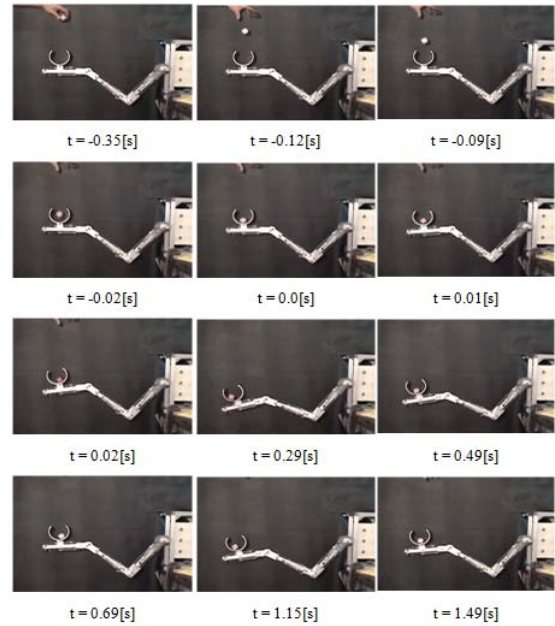


Fig.4 Catching motion by robot arm

リングを介して取り付けられているため、前後のリンク、関節軸および各プーリに対してそれぞれ構造的に独立して自由に回転可能である。図中では省略しているが、第一関節と第二関節間、第二関節と第三関節間、第三関節と手先間にそれぞれ動力伝達用ワイヤの中間に一对、計六本の SAT を配置した。

図 5(b)は SAT をロボットアームの関節間ではなく本体側に全て移動させた場合の三リンク柔軟関節ロボットアームの構造である。SAT の本数は同じく三対、計六本だが、第一関節から第三関節のプーリの個数は、それぞれ半分の三個、二個、一個の計六個に削減できる。

関節部が小型化することでロボットアーム全体の重量が軽くなるとともにガタツキの減少にも貢献する。オリジナルのロボットアームでは第二リンク、第三リンクの重量を支えるために第一関節には大きなトルクが必要だったため、第一関節駆動用ワイヤのためのプーリのみ直径の大きなプーリを必要としていた。旧来のリンク上に SAT を配置する構成の動力伝達系と比べて、SAT を本体側に全て集める新しい動力伝達系はロボットアームの軽量化を実現できるが、その反面、図 6 に示すように本体内に SAT が伸び縮みしてもモータのワイヤ巻き取りドラムと第一関節のプーリに干渉しないように十分な大きさの空間を確保する必要が生じる。

関節に柔らかさを付与する非線形バネ要素を本体内ではなく手先側に配置すると各関節に二倍の数のプーリが必要であった理由を図 7 に示す一リンク柔軟関節ロボットアームの構造を用いて説明する。図 7(a)が旧来の SAT の配置、図 7(b)が

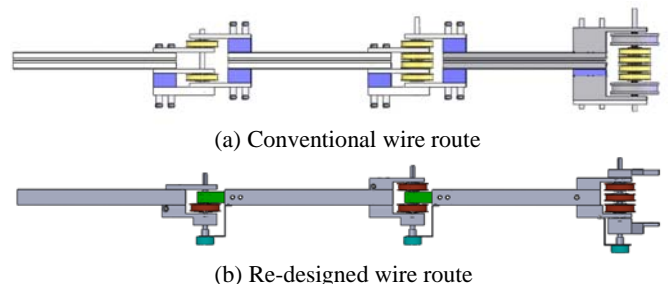


Fig.5 Top view of robot arms

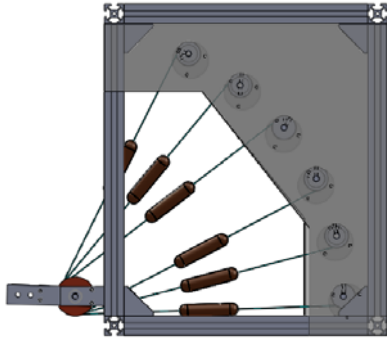


Fig.6 Side view of re-designed base unit

今回採用した SAT の配置である．いずれも初期姿勢は外力が作用していない状態において点線で表したリンク角度がゼロの姿勢，左右のワイヤには十分な大きさの初期張力が印加されているものとする．プーリはリンクとは独立して自由に回転するものとする．左右のモータを固定した状態でリンクに外力を受けても SAT などのバネ要素を持たないロボットアームの場合はリンク姿勢が変化しないのに対し，柔軟関節ロボットアームの場合は SAT の配置の違いとは無関係に図 7 のようにリンク姿勢が一定角度まで変化する．リンクが強制的に時計方向に回転させられる時に左側のワイヤの張力は増加し，右側のワイヤの張力は減少する．張力の変化に応じて左側の SAT の全長は伸び，右側の SAT の全長は縮む．この時，図 7(a)のレイアウトの場合，左右のワイヤの小区間に注目するとリンク先のワイヤ固定端から SAT までのワイヤ長は変化しないのに対して，SAT からプーリを介してモータまでの区間のワイヤ長が変化する．次にリンク先端のワイヤ固定端からモータまでの SAT を含む全体的なワイヤ長の変化に着目すると，左側のワイヤは全長が伸び，右側のワイヤは全長が縮む．SAT は非線形バネ要素であるため，左側のワイヤの伸び量と右側のワイヤの縮み量は一致しない．したがって関節部に設置したプーリを左右のワイヤで共有することはできず，二つのプーリが必要となる．それに対して図 7(b)の SAT 配置の場合は，外力が印加してワイヤに掛かる張力の変化による各ワイヤの全長が変化しても，その影響は関節部に SAT よりもモータ側の部分にしか影響しない．ワイヤ固定端から SAT までのワイヤ長は左右共に等しいため，リンク姿勢の変化によるワイヤ変位は左右で等しい．これは従来のバネ要素を動力伝達系に含まない“硬い関節”のロボットアームにおいてプーリが一つで構わないのと同じ理由である．

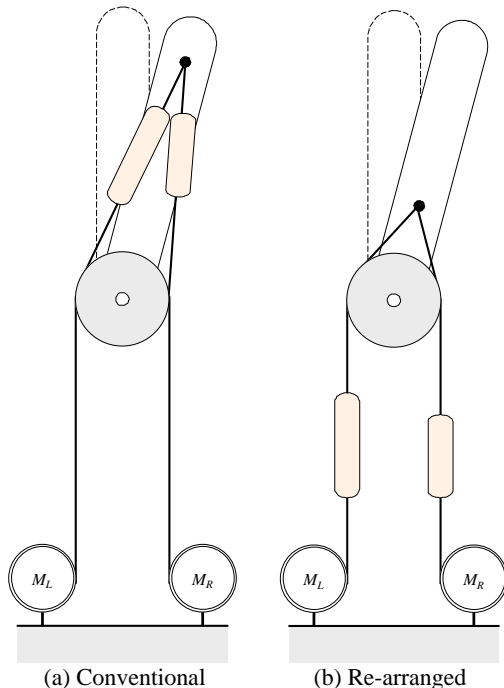


Fig. 7 One link model

ーリが必要となる．それに対して図 7(b)の SAT 配置の場合は，外力が印加してワイヤに掛かる張力の変化による各ワイヤの全長が変化しても，その影響は関節部に SAT よりもモータ側の部分にしか影響しない．ワイヤ固定端から SAT までのワイヤ長は左右共に等しいため，リンク姿勢の変化によるワイヤ変位は左右で等しい．これは従来のバネ要素を動力伝達系に含まない“硬い関節”のロボットアームにおいてプーリが一つで構わないのと同じ理由である．

3. まとめと今後の課題

非線形バネ SAT を用いた制御可能な機械的関節剛性調整機構を備えたワイヤ駆動式の三リンク柔軟関節ロボットアームを実際に製作した．製作した三リンク柔軟関節ロボットアームでは，SAT を本体側ではなく駆動するリンク直前の位置に配置したためプーリの数が多く必要であるという構造上の弱点があった．本稿で提案したように SAT を全て本体側に移動することでロボット本体側に要求する空間は広がるが，各関節に設けるワイヤ誘導用のプーリの数を半減できることを示した．プーリ数の減少に伴ってロボットアーム自体の構造がシンプルになることで，ロボットアーム全体の重量の軽減と高剛性化も実現できる．

現段階において再設計したロボットアームの製作が完了していない．実機完成後は落下物のキャッチング実験を行い，改良したロボットアームでどの程度の重量物まで特別なリアルタイムの制御なしにキャッチングできるかを調べる．並行して，安全なキャッチング動作を実現するために落下物の重量や速度に対して適切なロボットアームの初期姿勢を解析的に調べ，実験により検証する予定である．将来的には，ロボットアームが持つ機械的な柔軟性を生かした物体の効率的な投げ上げ動作についても研究の領域を広げる予定である．

なお，本研究は科研費(21560460)の助成を受けたものである．

文献

- [1] 藤田，“チャイルドケアロボット PaPeRo”，日本ロボット学会誌，Vol. 24, No. 2, pp. 16-17, 2006.
- [2] 中村，松崎，“4ヶ国語を操る接客ロボット・アクトロイド”，日本ロボット学会誌，Vol. 24, No. 2, pp. 13-15, 2006.
- [3] 畑瀬，戸田，松本，“インテリジェント車いすロボット TAO Aicle”，日本ロボット学会誌，Vol. 24, No. 2, pp. 18-20, 2006.
- [4] 青山，“屋外清掃ロボット スバルロボハイターRS1の開発”，日本ロボット学会誌，Vol. 24, No. 2, pp. 7-9, 2006.
- [5] 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・シンポジウム予稿集，pp. 517-522, 2004.
- [6] 白井，伊藤，田中，富岡，“非線形バネ SAT を用いた関節剛性，トルクおよび位置制御”，ロボティクス・メカトロニクス講演会 '05, 1A1-N-074, 2005.
- [7] 別府，白井，富岡，“柔軟関節ロボットによる自由落下する重量物のキャッチング”，ロボティクス・メカトロニクス学術講演会 '08, 2A1-G12, 2008.