

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

Catching a Free Falling Heavy Object by using Flexible Joint Robot

○学 別府 勇太 (鈴鹿高専専攻科) 正 白井 達也 (鈴鹿高専)
正 富岡 巧 (鈴鹿高専)

Yuta BEPPU, Suzuka N.C.T
Tatsuya SHIRAI, Suzuka N.C.T, shirai@mech.suzuka-ct.ac.jp
Takumi TOMIOKA, Suzuka N.C.T

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. In this study we discuss that how the robot catches a free falling heavy object. We had developed a three linked flexible jointed robot that can adjust joint stiffness as compliant and stiff. We had analyzed the catching motion by using a dynamic motion analysis software (MSC.ADAMS). We had 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.

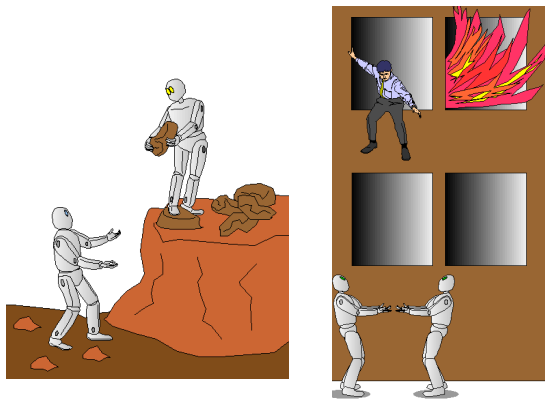
Key Words: Non-Linear spring, Mechanical joint stiffness, Catching motion

1. 緒言

現在、団体や企業、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。これらのロボットは動力伝達部が機構的な柔らかさを持たないため、飛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。機構的に固いロボットは、動作限界を超える急激な外力の変化が生じた場合、動力伝達機構を損傷する恐れがある。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、状況に応じて関節剛性を硬くも柔らかくも調整可能な機構が望ましい[1][2]。人は作業目的に応じて、拮抗する筋肉の張力および姿勢を変更することで手先における剛性や見かけの質量を調整していることが実験により明らかにされている[3]。本研究では関節剛性を調節可能な柔軟関節ロボットを開発し、飛来してくる物体を安全に捕獲、保持できるロボットアーム機構の実現可能性を検証する。

2. 重量物のキャッチング動作

いままでも空中を高速で移動する物体をキャッチングするロボットなどの研究[4]は行われているが、把握のタイミン



(a) Removing rubble

(b) Fire rescue

Fig.1 Examples of catching tasks

グや把持戦略を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。本研究ではロボットの動力伝達機構にダメージを加えることが可能な程度に重い対象物をキャッチングする状況を想定する。重量物をロボットでキャッチングするメリットを図1に示す。図1(a)のようにロボット同士が直接、瓦礫などの重量物を手渡しできない場合、どちらかのロボットが相手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くことができない危険な環境の場合も、対象物は自由落下させて受け止めざるを得ない。

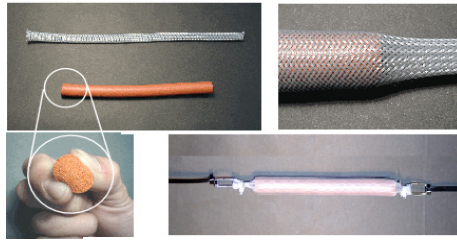
飛来する対象物をキャッチングする動作は、静的に安定な状態での受け渡しに比べて受け渡しの確実性が著しく減少することに加え、移動する対象物の運動エネルギーをロボットアームで安全に吸収して対象物とハンドとの間の相対速度および対象物の絶対速度をゼロにする必要がある。その際に対象物やロボットに過大な衝撃力が発生して、破損してしまう危険性もある。

飛来してくる物体を捕獲するには、物体の正確な軌道を追跡する位置計測技術と正確にタイミングを合わせてロボットアームを追従させるビジュアルサーボ技術が重要である。しかし、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ため、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。キャッチング動作はアクチュエータとセンサを組み合わせた能動的な制御戦略ではなく、柔軟関節ロボットの関節粘弾性のみを用いた受動的な戦略での安定的なキャッチングの実現を目指す。

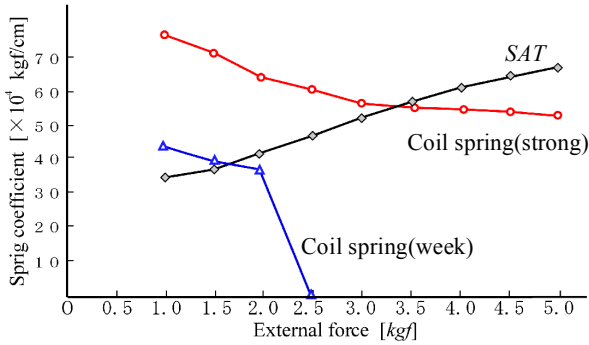
3. 三リンク柔軟関節ロボット

3. 1 非線形バネ要素 SAT を用いた関節剛性調整機構

非線形バネ要素 SAT (Stiffness Adjustable Tendon) を関節部に組み込んだ三リンク柔軟関節ロボットを開発した。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の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。一般的な金属製のコイルスプリングと SAT の静力学的特性を比較した結果を図2(b)に示す。横軸は荷重、縦軸はバネ定数である。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、



(a) Structure of SAT



(b) Spring coefficients

Fig.2 SAT(Stiffness Adjustable Tendon)

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、高剛性化する。図3に示すように非線形バネ要素 SAT をワイヤ駆動式動力伝達機構に組み込むことで、ロボットの関節剛性の調整が可能となる。一対のモータの内の右側のモータでワイヤを巻き取るとリンクは時計方向に回転する。図3(a)の状態から図3(b)のように左右のワイヤを同時に巻き取り SAT を引き伸ばすと、関節は高剛性化する。

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組まれた本体に、三個の関節を持つアームと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。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。リンクとモータと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 が組み込まれている。

使用する SAT は $\phi 15$ [mm]、長さは 30[mm]である。各関節

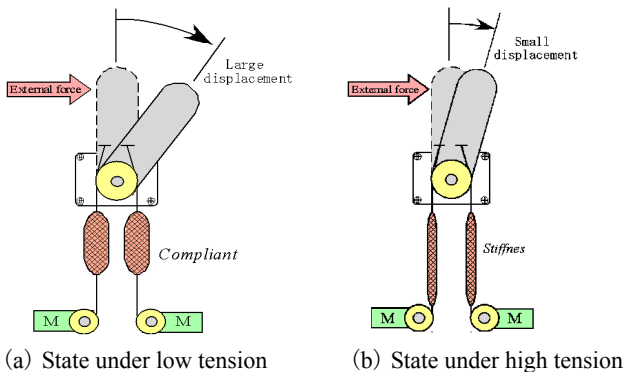


Fig.3 Wire driven system

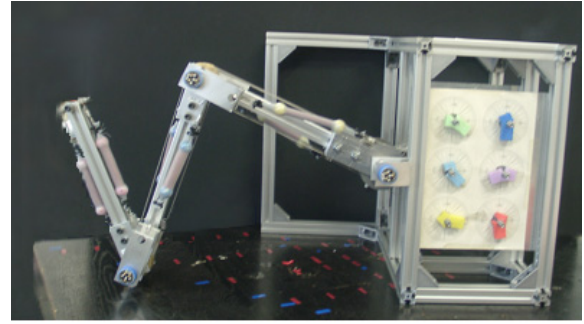


Fig.4 Overview of developed flexible joint robot

およびモータ軸にはポテンシオメータを取り付けてあり、関節角度およびモータの回転角や回転速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。

4. 運動解析ソフトウェアによるシミュレーション

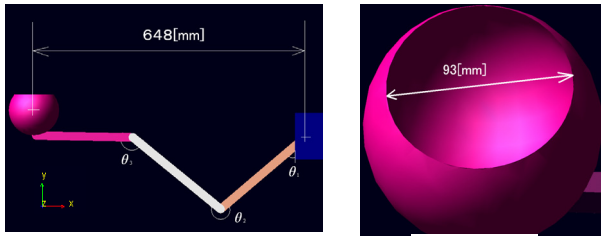
4.1 シミュレーションの目的

実機による実験に先立って、運動解析ソフトウェアを用いたキャッチング動作のシミュレーションを行った。運動解析ソフトウェアは MSC.ADAMS (MSC Software Corporation 製、以下、ADAMS) を用いた。キャッチングの成功条件は、重量物がパーム部内に存在し続け、最終的にアームと重量物の運動が有限時間内に停止することとする。安全なキャッチングとは、キャッチング開始から終了までの全期間において、アームおよび対象物が破損するような大きな力を受けないこと、対象物を取り落とす恐れのある不安定なアームおよび対象物の挙動が無いことである。

4.2 シミュレーション環境

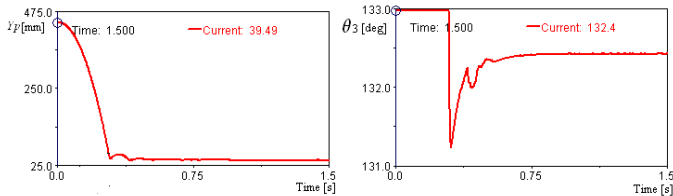
ADAMS 上に作成したキャッチング動作検証用モデルを図5(a)に示す。根元から順に第一リンク、第二リンク、第三リンクとし、第一リンクと第二リンクの長さはそれぞれ 270[mm]、第三リンクの長さは 230[mm]である。初期状態における本体からパームの捕獲部中心までの距離を 648[mm]、各関節の初期角度は根元から順に θ_1 、 θ_2 、 θ_3 とし、それぞれ 49.6[deg]、260.6[deg]、141.8[deg] とする。図5(b)に示すように、パーム部は $\phi 100$ の球を繰り抜き、開口部の直径を 93[mm] とした。落下させる対象物の形状は球とし、直径は 80[mm]、材質は鋼、質量は 2.1[kg] である。アームは x 、 y 方向の二次元平面内に運動方向を固定してあるが、力の計算や球の運動は z 方向についても行う。シミュレーションを開始するとリンクは自重により初期姿勢からアーム全体が安定する位置まで下降し始める。アームの姿勢が安定するタイミングを待って、球を落下させる。本シミュレーションでは、球が落下し、パームに接触してから 1[s] 後までの挙動を 0.002[s] ステップで解析した。今回は簡単のために、各関節を非線形バネ要素ではなく線形のパネ特性を持つ巻きバネとした。巻きバネの物理パラメータはバネ係数 K_i と減衰係数 C_i で表される。球が落下後にパームからこぼれ落ちない値を探索し、その結果から各関節のバネ係数 K_{11} 、 K_{12} 、 K_{13} を 10^7 [N · mm/deg]、 10^6 [N · mm/deg]、 10^4 [N · mm/deg]、巻きバネ減衰係数 C_{11} 、 C_{12} 、 C_{13} は全て 1000 [N · mm · s/deg] を基準値とした。計測する値は、球の中心とパーム底面間の相対距離 Y_p 、第三関節の角度 θ_3 の変化である。 θ_3 は第二リンクと第三リンクが一直線上にあるとき $\theta_3 = 180$ [deg] とし、半時計方向を正とする。

例として K_{11} 、 K_{12} 、 K_{13} が 10^7 [N · mm/deg]、 10^6 [N · mm/deg]、 10^4 [N · mm/deg] の場合の Y_p と θ_3 の変化を図6のグラフに示す。



(a) Parameters of model (b) Palm

Fig.5 Model of three linked robot



(a) Relative displacement Y_p between center of object and surface of palm (b) Angular displacement of third link

Fig.6 Simulation result

横軸は時間である。このとき、 Y_p のグラフで一度、球がパームに接触してからバウンドしている。 Y_p の値が大きすぎると対象物はパーム部から外へ飛び出してしまう可能性が高くな

る。パーム部開口部のフチよりも球の中心座標が高い位置まで対象物が跳ね上がった時は安全なキャッチングの条件を満たさない、とした。

5. 結言

現在のロボットでは実現が困難な重量物のキャッチング動作を可能とするため、非線形バネ要素 SAT を関節部に組み込んだ関節剛性を調整可能な三リンク柔軟関節ロボットを開発した。運動解析ソフトウェアを用いて三リンク柔軟関節ロボットによる重量物のキャッチング動作の実現可能性について検証した。

今後の課題は三リンク柔軟関節ロボットの対象物キャッチング機構を完成させ、実際にアクチュエータのダイナミックな制御なしに重量物のキャッチングが可能であることを確認する。シミュレーションモデルの関節部の粘弾性モデルを実際の SAT を用いた関節剛性調整機構と同一にして、実機の実験結果と比較を行う。モデルの正当性が確認されたら、シミュレーションを用いて安全に重量物のキャッチングが可能な関節粘弾性および初期姿勢の関係を探索的に探す。

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。

文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.