

# 非線形バネSATを用いた三リンク柔軟関節ロボットの開発

## Development of a Three-Link Robot by using Non-Linear Spring SAT

○正 白井達也 (鈴鹿高専) 外 廣瀬岳士 (中川製作所)  
正 富岡 巧 (鈴鹿高専)

Tatsuya SHIRAI, Suzuka National College of Technology, shirai@mech.suzuka-ct.ac.jp  
Takeshi HIROSE, Nakagawa co.  
Takumi TOMIOKA, Suzuka National College of Technology

When most of conventional robot receives impact force, its power transmission mechanism such as gears and wires is damaged. The cause is that the robot has stiff joint so that the robot equips reduction gear which has high-reduction gear ratio. We aim to solve the problem. If the power transmission mechanism has flexibility, the impact force will be safely absorbed however, a precise positional control becomes difficult. Therefore, it is desirable that the joint stiffness can be adjusted according to the situation. We have developed a three-linked robot which has the mechanical joint stiffness adjustment mechanism by using non-linear spring named SAT(Stiffness Adjustable Tendon). The three-linked robot has three joints which are able to adjust joint stiffness by using two motors at each joint. We verified that the joint stiffness at each joint can be adjusted mechanically by using the robot. Furthermore we verified the stiffness at finger tip can be controlled by utilizing SAT for the power transmission system of wire-driven robot.

**Key Words:** Flexible mechanism, Non-linear spring, Stiffness Adjustable Tendon, Wire-driven system

### 1. 緒言

近年, さまざまな企業, 団体や個人によって高度な動作を実現可能な多種多様なヒューマノイドロボットが開発されている. しかし, これらのヒューマノイドロボットはヒトのように走ったり, 跳んだりといったダイナミックな動作は苦手である. 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モータを使用する. 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, 減速比の高い減速器を使用する必要がある. 減速比の高い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走ったり, 跳んだりといったダイナミックな動作に伴う大きな衝撃力を吸収できず, 動力伝達機構やフレームを破損する可能性が高い. ヒトは作業目的に応じて無意識のうちに各関節の剛性を調整していることが実験的に明らかとされている[1]. 従来のロボットも, 力センサやトルクセンサ等のセンサ出力を用いて力制御を行うことで外力に追従して滑らかな動作を実現できるが, 対象物に衝突した後に反応するため, 瞬間的な外力の変化には対応できない. 現在のロボットが共通に抱える問題点を解決するために, 近年, 電子的な制御技術に頼らず, ロボットの関節剛性を機構的に調整する研究が活発に行われるようになってきた[2]-[4].

### 2. 研究の目的

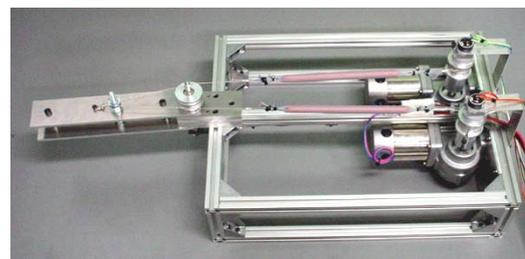
本研究では, ダイナミックな動作を得意とする“機構的に柔らかいロボット”を実現するために, シンプルな構造を特徴とする全く新しい動作原理の非線形バネ要素, SAT (Stiffness Adjustable Tendon) を用いた機構的関節剛性調整機構の実用化を目指す. 筆者らは, 図 1(a)に示すような一関節ロボットを製作し, 関節角度, 関節トルク, 関節剛性が調整可能であることを確認している[5]. 本研究では図 1(b)に示すような平面三関節ロボットを開発し, 手先のメカニカルコンプライアンスの調整が可能か, 実用上十分な精度を持つ位置制御が可能かを検証する. また各関節剛性および姿勢と手先のメカニカルコンプライアンスの関係を解析し, 実験的に検証する.

### 3. 非線形バネ SAT を用いた関節剛性調整機構

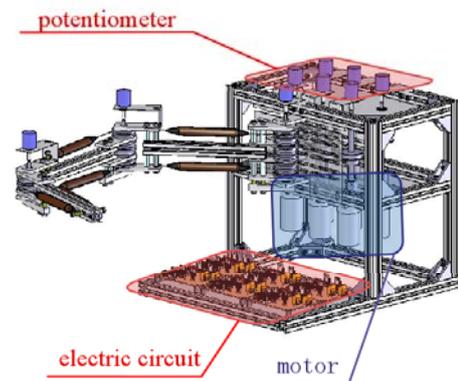
#### 3.1. SAT の構造と特徴

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張りバネだが, 構造・原理・特性が全く異なる新しいバネ要素である. 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も変位量と張力の関係が非線形な特性を持つ非線形バネ要素の一つだが, 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する.

SAT は図2に示すように, ポリエチレン製の編みチューブでシリコーンゴムスポンジ丸棒の弾性材を覆い, 両端をタイラップで封止した



(a) One-link robot



(b) Three-link robot

Fig. Link robots which have mechanical joint compliance

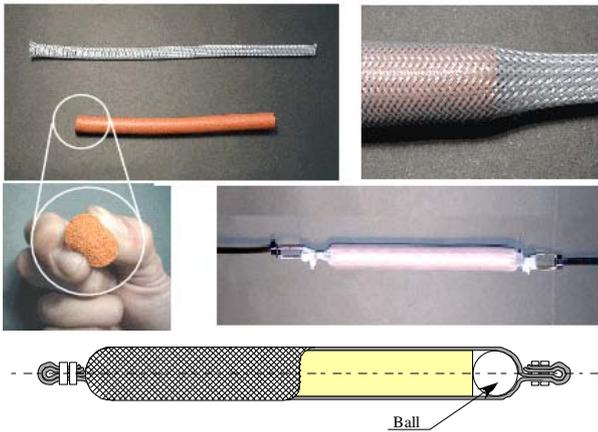


Fig.2 Structure of SAT.

ソーセージ状のシンプルな構造を持つ。弾性体の両端には木製やガラス製の硬い球体を配置し、弾性体端部に極端な変形が生じるのを防止する。いずれの素材も特殊なものではなく、加工・組立てのために特別な装置は不要である。SATはコイルスプリングのように伸縮時に隙間に異物が挟まる危険性が無いためケーシング等の部品が不要、金属製の部品を使っていないため錆びる心配が不要といった特徴も持つ。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。これがSATの動作原理である。

図3に今回製作した三リンクロボットに使用したSATの静特性を示す。使用した弾性体は断面直径φ15[mm]、長さ50[mm]のシリコンゴムスポンジ丸棒である。横軸はSATの変位量、縦軸は印加した引張力である。測定結果は、SATに2[N] から170[N]までの張力を10往復印加した結果を平均したものである。各点における傾きはバネ係数を意味する。変位量が増すとバネ係数が増加していく非線形バネ特性を持つことが分かる。

### 3.2. 関節剛性調整のメカニズム

図4(a)に示すように一般的な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機構では一関節あたり一個のモータを用いるのに対して、今回使用した関節剛性調整機構では図4(b)に示すように一関節あたり二個のモータを用いる。プーリに一对のSATを拮抗させ、その両端のワイヤをそれぞれ別の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。トルクセンサを用いる一

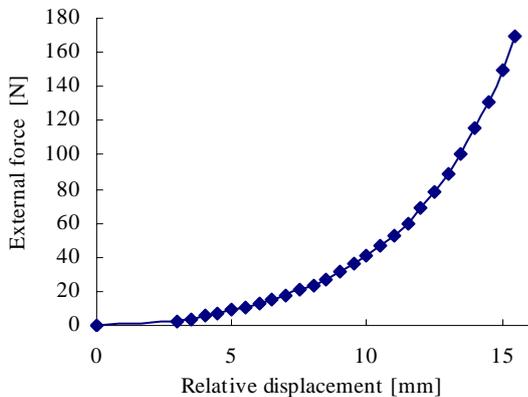


Fig.3 Static displacement of SAT

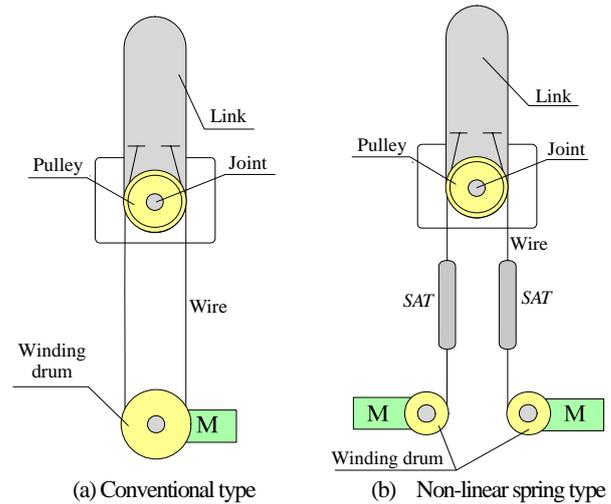


Fig.4 Power transmission mechanism

般的なワイヤ駆動機構とは異なり、機構的に関節剛性を調整可能な本機構はノイズの影響を受けるなど誤作動の原因になり易いトルクセンサではなく、電気的にも取り扱いの容易なポテンショメータを用いて力制御を実現可能である点で特に優れている。

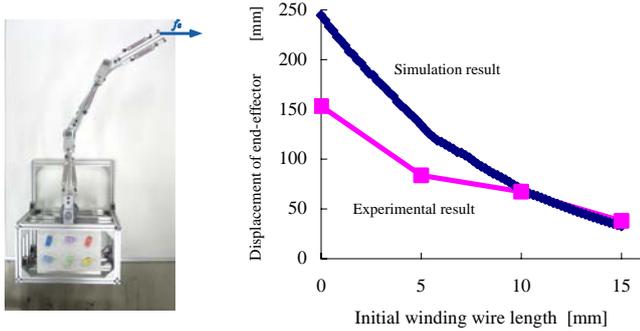
## 4. 三リンク柔軟関節ロボット

### 4.1. 三リンク柔軟関節ロボットの構造

今回製作した三リンクロボットは各関節あたり2個、合計6個のDCギヤードモータ (540K150, タミヤ製) を用いる。第一リンク、第二リンクの長さはそれぞれ270[mm]、手先の第三リンクの長さは235[mm]である。第一関節のプーリ直径はφ56、第二関節および第三関節のプーリ直径はφ36である。モータ部のワイヤ巻き取りドラムの直径は、第一関節用および第二関節用ドラムがφ16、第三関節用ドラムがφ36である。SATのシリコンゴムスポンジ丸棒はφ15、長さ50[mm]で、各関節あたり2本、合計6本を用いている。各関節およびワイヤ巻き取りドラムには各1個ずつ、合計9個のポテンショメータが取り付けられており、関節角度およびワイヤ巻き取り長を計測可能である。各関節の角度は反時計方向を正とする。根元の第一関節から第三関節までの角度をそれぞれ $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$ とし、 $\theta_1$ は水平方向をゼロ、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$ はそれぞれ各リンク間の相対角度とする。

### 4.2. 三関節柔軟関節ロボットの解析

柔軟関節三関節ロボットの外力と姿勢変形の関係シミュレーションおよび実験により解析する。三関節ロボットは拮抗するSATを同時に引っ張ることにより、姿勢を変えることなく関節剛性を自由に制御可能である。シミュレーションソフトウェアでは、SATの特性にFig.3に示す実測値を用いた。図5(a)に示す初期姿勢 ( $\theta_1 = 90[\text{deg}]$ ,  $\theta_2 = -30[\text{deg}]$ ,  $\theta_3 = -30[\text{deg}]$ ) 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の初期変位量、x軸方向への手先の変位量である。SATの初期変位量はワイヤの張力がゼロとなる巻き取り量を原点とする。実験による実験では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]まで初期変位量を変化させた。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の初期変位量を同時に増やして張力を増やすと、手先の剛性が非線形に高くなっていく傾向は一致した。



(a) Initial posture (b) Simulation and Experimental results

Fig.5 Relationship between Initial winding length and displacement

図6は三リンク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コンピュータシミュレーションにより求めた結果である。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には手先の剛性が低いことを表している。外力の大きさが大きくなるに従って変位量は大きくなるが、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7は各モータのSAT初期引張り量は同一、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コンピュータシミュレーションにより求め、グラフにしたものである。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。第二、第三関節角度が小さくなるにつれ、第一関節角度方向に高剛性になり、第一関節角度に垂直な方向に低剛性になる。

図8はロボットの姿勢を図5(a)の初期姿勢に固定し、SAT初期引張り量を各関節ごとに变化させたシミュレーション結果である。図8(a)から図8(j)は、それぞれ第一関節、第二関節、第三関節の初期引張り量を (a) 5[mm], 5[mm], 10[mm], (b) 5[mm], 10[mm], 5[mm], (c) 10[mm], 5[mm], 5[mm], (d) 5[mm], 10[mm], 10[mm], (e) 10[mm], 10[mm], 5[mm], (f) 10[mm], 5[mm], 10[mm], (g) 5[mm], 10[mm], 15[mm], (h) 15[mm], 10[mm], 5[mm], (i) 10[mm], 8[mm], 5[mm], (j) 10[mm], 15[mm], 5[mm] に設定した。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8(g)と図8(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

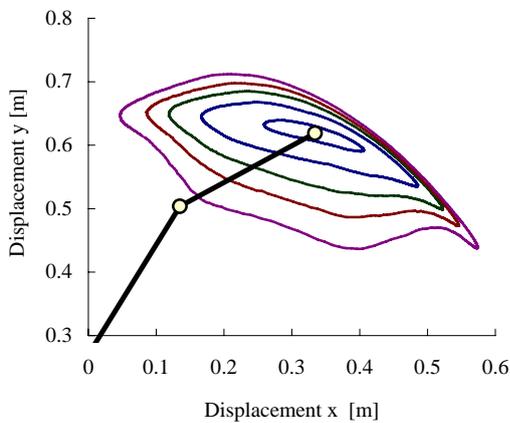


Fig.6 Simulation results (Same posture)

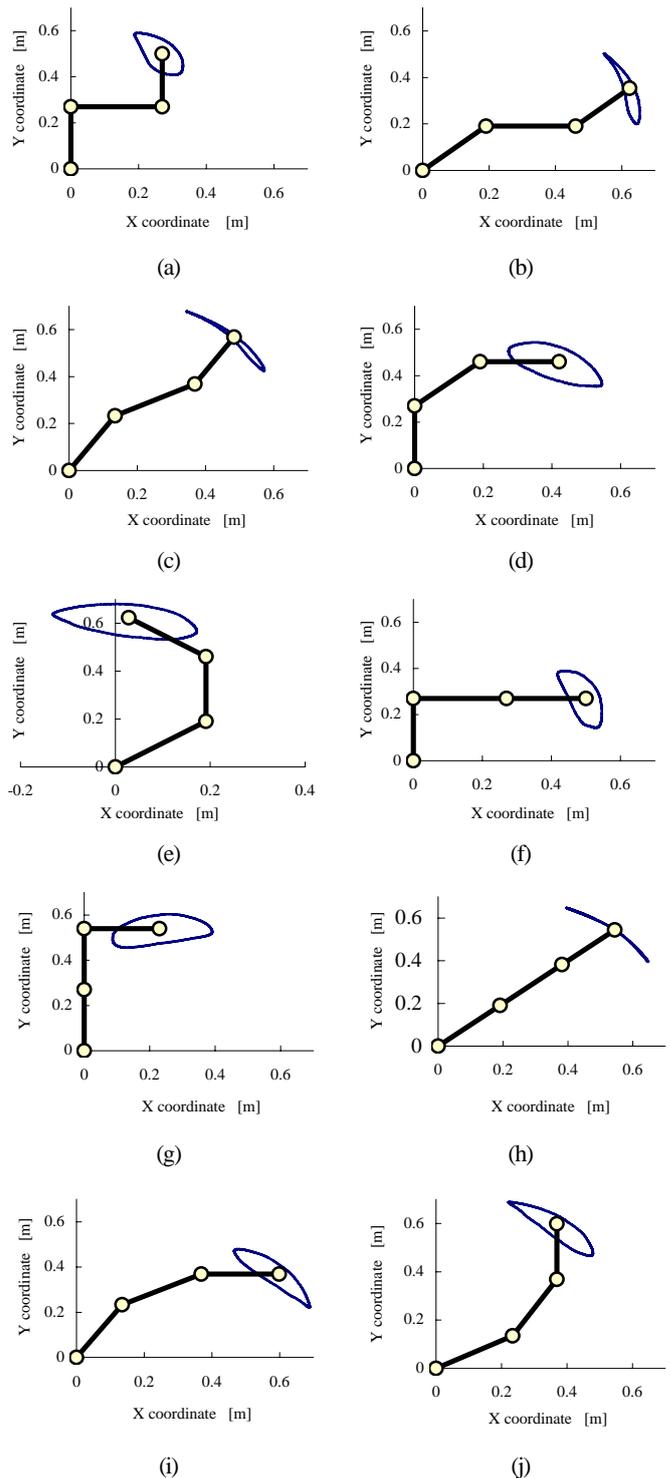


Fig.7 Relationship between posture and mechanical compliance

くなり、逆に第一関節を硬く、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。

図9は図6の実験結果と同じ図9(a)の初期姿勢およびSAT初期引張り量の条件で3[N]の外力を印加した結果である。図9(b)は、三関節ロボットの手先に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9(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コンピュータ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。

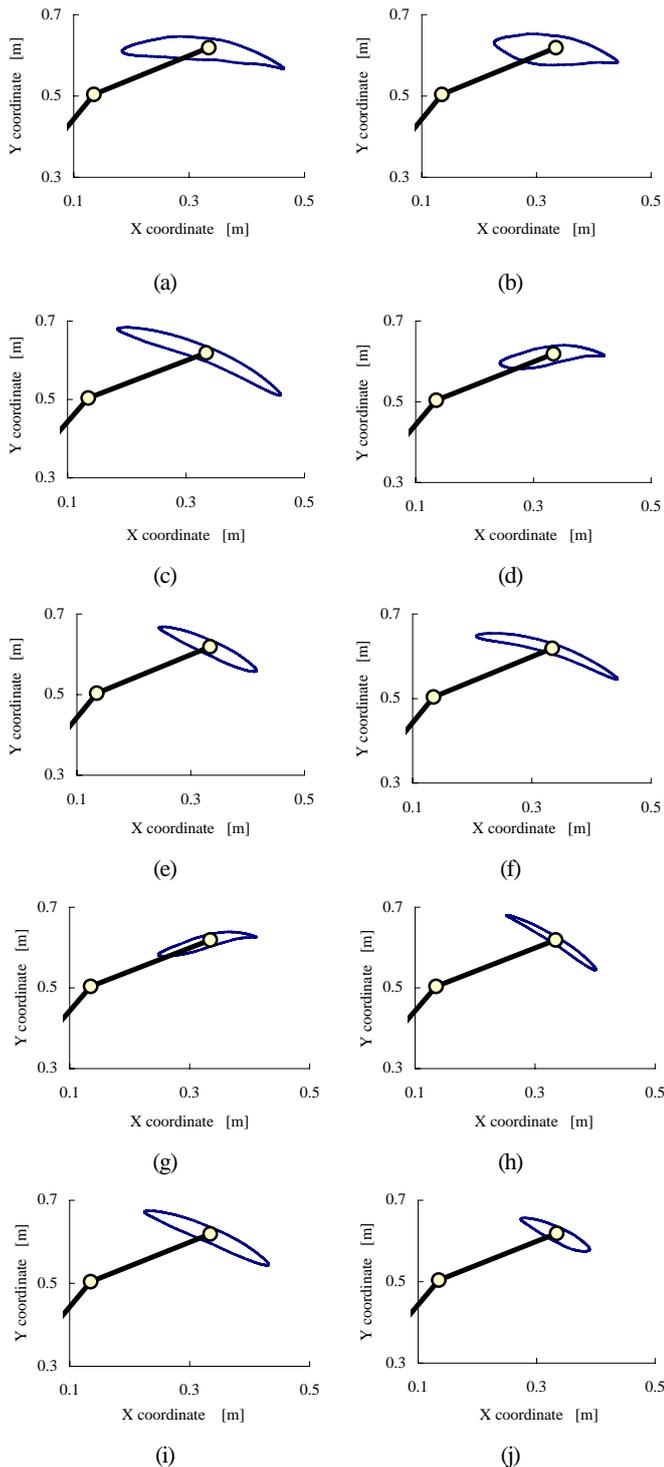


Fig.8 Relationship between initial winding length and mechanical compliance

## 5. 結言

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可能とする柔軟関節ロボットの実現に向け、非線形バネ SAT を用いた機械的関節剛性調整機構を備えた平面三関節ロボットを開発した。SAT の特性をモデル化したコンピュータシミュレーションを開発し、実機による実験結果と定性的な傾向が一致することを確認した。開発した三関節ロボットおよびコンピュータシミュレーションを用いて、SAT を用いた三関節ロボットが SAT の初期張力を調

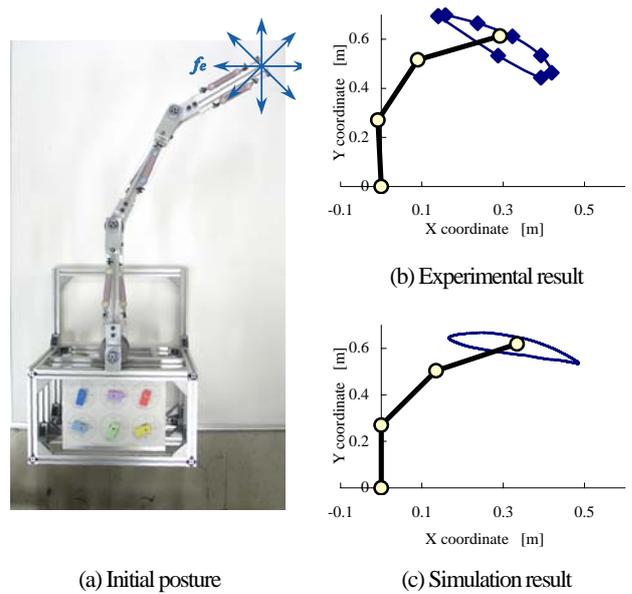


Fig.9 Comparison between experimental result and simulation result

整することで関節の剛性を制御可能なこと、各関節の剛性やリンク姿勢を調整することで手先の機械的な剛性を制御可能なことを示した。

今後の課題は手先のメカニカルコンプライアンスを望んだように設定するための各関節剛性の制御則を導き出すことと、実機実験結果とコンピュータシミュレーションの結果が定量的に一致するように、SAT のモデル化をより厳密化すること、静特性だけではなくダイナミクスも考慮に入れたコンピュータシミュレーションの開発および実機の制御則を開発することである。実機に関しては、手先の剛性をさらに高めるための改良を行う必要がある。

## 6. 参考文献

- [1] 澄田康光, 大園健朗, 辻 敏夫, 金子 真: “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] 猪俣 博, 小金沢鋼一: “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, 2004.
- [3] 林原靖男, 箱木北斗, 渡辺浩太郎: “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.
- [4] 山野郁男・前野隆司, “超音波モータと弾性要素を用いた 5 指ロボットハンドの開発”, 日本ロボット学会誌, Vol. 23, No. 8, pp. 59-67, 2005.
- [5] 白井達也, 伊藤敬宏, 田中駿一, 富岡 巧: “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 講演論文集, 2005