可変剛性を有する関節機構*

船川 幸寛^{*1}, 近野 敦^{*1}, 内山 勝^{*2}

A Joint Mechanism with Variable Stiffness

Yukihiro FUNAKAWA^{*3}, Atsushi KONNO and Masaru UCHIYAMA^{*3} Department of Aerospace Engineering, Tohoku University,
6-6-01 Aramaki-aza-Aoba, Aoba-ku, Sendai-shi, Miyagi, 980-8579 Japan

In the future, it is expected that robots will be able to play an active role in the real life alongside humans. Then, the softness of the robot is enumerated as one of the mechanical performances demanded for robots that coexist and cooperate with humans. Because, in case of a robot receives impact forces from an object, actuators may receive unpredictable damage by the impact forces. If the robot has mechanical softness, it is possible to reduce the impact forces. In such cases it is necessary to adjust the stiffness of the joint. Then, the reaction forces at the time of impact can be passively absorbed by lowering the joint stiffness. On the other hand, when torque requirement is high, a variable stiffness design helps raise the joint stiffness. Design of such a variable stiffness mechanism is proposed in this paper. The stiffness characteristics are evaluated. Analysis is conducted to verify feasibility of mounting it on actual robots.

Key Words: Robot, Mechanism, Variable Stiffness, Linear Spring, Mechanical Engineering

1. は じ め に

将来, 人間とロボットが共存する環境は増加していくと考えられている。そこで, 人間との共存, 協調を行う環境下でロボットに要求される機構的性能の一つとして, ロボットが持つ柔らかさが挙げられる。このことは, ロボット自身の破壊防止はもちろん, 人間に対する安全性も包含している。まず, 共存という見地では人間との衝突安全性が要求される。これは人間に危害を及ぼす危険性を軽減させるだけでなく, ロボット自身の破壊を防止することも含まれている。さらに人間との作業協調の場面においても機械的柔軟性は必要である。機械的に柔軟性を持たないロボットは一連の動作が不連続であり, 人間との作業応答性や作業効率の面で劣る。また, 能動的に衝撃を伴う作業においてもアクチュエータ破損を危惧して, 本来出し得る能力を抑制した状態で作業を行うことになり, 作業効率の低下を招く。この衝撃動作の解析と対策に関する様々な研究⁽¹⁾⁽²⁾が行われている。

このように衝突安全性, 作業協調性を考慮した場合, 制御系のアプローチでは外部からの予測不能な衝撃に

対して, サーボ周期による時間遅れが原因となり, 瞬間的な衝撃力を緩和できずロボットの破損を招く。そこで, 機構系であらかじめロボットに弾性要素を組み込むことで, 常に外部からの衝撃に対して受動的に緩和とさせることができる。

これらの諸問題を解決するために機械的な柔らかさを機構に付与させる研究が行われている。アクチュエータとリンク間に弾性要素を介した腱駆動によるもの⁽³⁾⁽⁴⁾, 板ばね⁽⁵⁾, 円環状のジュラルミン⁽⁶⁾を用いてこれら弾性体の支持点によって弾性率変化を発生させるもの, 動滑車を用い拮抗型によってばねを連結させるもの⁽⁷⁾, リンク部材の荷重方向に対して垂直に溝が設けられ, リンクのたわみによって機械的柔らかさを発生させるもの⁽⁸⁾など, 機構系において様々なアプローチが行われている。これらは小型・軽量という観点からは優れているが, 主要な部分となる弾性要素の加工や設計が難しく, メンテナンスの面で苦慮する。

そこで, 著者は簡素な弾性要素を用いた可変剛性機構を提案する。衝撃を伴う環境下では低剛性にすることで衝撃力を緩和し, 力の要する作業では高剛性にすることで目標とするタスクをこなすことができる機構である。また, 用いる弾性要素として線形ばね単体では剛性を変化させることができないため, あらかじめ弾性要素に非線形特性を有する部材を挿入することで

* 原稿受付 2007年12月17日。

^{*1} 正員, 東北大学大学院工学研究科(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-01)。^{*2} 正員, フェロー, 東北大学大学院工学研究科。
E-mail: funakawa@space.mech.tohoku.ac.jp

Fig. 1 An overview of mechanism with adjustable stiffness.

Table 1 Specification of mechanism with adjustable stiffness.

Size L×W×H	[mm]	410×134×132
Weight	[g]	2555
Range of movement (Elbow joint)	[°]	0~135

可変剛性を実現させている^{(9)~(11)}が、用いた弾性要素自体に非線形性を帯びているために、時間や使用による材質劣化が直接、可変剛性の変化範囲の低下に影響を及ぼす。そこで、本機構では線形ばねを用いて、さらに見かけの剛性を変化させることで非線形特性を発生させ、可変剛性を実現させた。また、線形ばねは材質が劣化しても直接可変剛性の変化範囲を損なうことがほとんどないため、機構としての信頼性も高い。

本論文では、2章で開発した可変剛性機構の仕組みと機構の可動部について詳述し、3章で本機構の剛性変化についてモデル式を導出する。次に4章で剛性変化の評価実験として、おもりによる荷重に対して機構の剛性を調べる基礎実験を行い、3章で導出した理論値と4章で得られた実測値とを比較・検討する。最後に5章で本論文のまとめと展望について述べる。

2. 可変剛性機構

2.1 機構の仕組み 機構の開発について著者は人間の環境への共存、協調性が期待されているロボットの中で、多種多様な機能を有するヒューマノイドロボットへの実装を一つのモデルとして考えた。そこで、上肢の中でも関節に機械的な柔らかさを付与する必要性および比較的、伸張・屈曲の動作が多い肘関節に着眼し、肘関節モデルを通して機構の有用性を検証する。

考案した機構の概観を図1に示す。本機構の主要部

Fig. 2 Main component of spring mechanism.

分であるばね機構は上腕および簡素なモデルとしてパイプ状の前腕からなる肘関節部に組み込まれ、上腕、肘関節、前腕で一つのコンポーネントをなす機構であり、二基のアクチュエータで肘関節一軸の剛性と関節角度を制御する拮抗駆動型である。ここに本機構の仕様を表1に示す。表1中の機構のサイズを示すLは図1中の座標系のX軸方向にあたり、前腕を水平にした時の前腕端面から上腕端面の最大長さで410[mm]となる。同様にWは機構の幅の寸法でY軸方向に対応し134[mm]である。また、Hは機構の高さを表しZ軸方向に対応しており、その寸法は132[mm]となっている。また、本機構の肘関節屈曲角度の範囲は人間の肘関節屈曲角度の範囲と同等とし、0[°]から135[°]まで前腕を屈曲させることができる。

さらに本機構の主要部分であるばね機構を図2に示す。まず、左右で対をなすスライダガイドがある。このスライダガイドは互いが独立して回転運動を行う。本機構に搭載されているDCサーボモータと減速機の組み合わせからなるアクチュエータの動力により、スライダガイド一つに対し一基のアクチュエータで作動し、タイミングプーリを介して回転運動することによって左右のスライダガイドに同位相あるいは、逆位相となるような相対的な回転角を生成する。また、ばね自身は垂直方向にしか変位しないために、回転変位を並進変位に変換する必要がある。そこでスライダによって、スライダガイドの回転運動を直線運動に変換する。スライダには左右にローラとしてベアリングが用いられており、前腕パーツにはこのスライダによる直線運動が円滑に行えるようレール上の溝が設けられており、その溝に対しにローラが直線運動する。なお、前腕パーツにはパイプ状の前腕が取り付けく。

スライダガイドによる回転運動でスライダが回転方

Table 2 Specification of spring for SWM20-25 type.

Outer diameter	[mm]	20
Inner diameter	[mm]	10
Natural length	[mm]	25
Displacement magnitude	[mm]	8
Constant of spring	[N/mm]	98.1

向に直線運動し、それに伴いばねが圧縮する形でばね長が変位する。このスライダは一つのスライダガイドに対し上下二つあり、計四つがばねと共に実装されている。このスライダがばねの圧縮により前腕パーツに対して加圧する機械要素となる。上下のスライダによって加圧された前腕パーツは、左右のスライダガイドの回転による位相差によって加圧の度合が変化する。つまり、位相差が大きければ加圧が強くなり、前腕パーツは頑強にスライダによって支持される。逆に位相差が小さい時スライダの加圧が弱いので前腕パーツは柔軟な支持となる。この相対的な位相変化が可変剛性として生成され、本機構で実現される。よって本機構はばねを媒体として、スライダガイドによる回転変位という物理量を利用し見かけの剛性を変化させており、ハードウェアの視点で言えば線形圧縮ばねを用いて間接的に非線形特性を生成させている。

二つのスライダガイドの回転角を θ_1 , θ_2 とする。前腕が静止状態にあり、外力（前腕の自重を含む）が作用していない状態では肘関節角度は二つのスライダガイドの回転角の平均値 $(\theta_1 + \theta_2)/2$ となる。またその姿勢での肘関節の回転方向の剛性は、 $(\theta_1 - \theta_2)/2$ の非線形関数となる。 $\theta_1 = \theta_2 = 0$ の状態を初期状態とする。詳細については4章で述べる。

2.2 各主要部品の仕様 本機構の動力源となるアクチュエータは、DC サーボモータにマクソンジャパン株式会社製 maxon DC motor RE25 を、減速機に株式会社ハーモニック・ドライブ・システムズ製のギアヘッドタイプ CSF-8-100-2XH-J の組み合わせを使用する。また、モータの回転角検出にはエンコーダを用いる。

使用するばねは前述の通り扱いやすく、劣化による特性変化が少ない線形圧縮ばねを選定する。ばね定数が本機構の非線形剛性特性（図 11）を決定する。ここではばね定数が 98.1 [N/mm] のものを選定した。選定したばねの仕様を表 2 に示す。

2.3 機構の可動部 本機構の挙動を図 3 に示す。両矢印は正方向、逆方向時の駆動を表し、番号順に動力が伝達、駆動していく。

Fig. 3 Order of motion for the mechanism.

ここで、図 3 の番号に対応して、各機構が駆動する様子について説明する。

1. モータからの動力が減速機を介し、小プーリに減速後のトルクとして動力が伝達される。
2. その小プーリからタイミングベルトによってスライダガイドの大プーリへと動力が伝達される。
3. 大プーリはスライダガイド本体と直接取り付いているので大プーリの動力が直接、スライダガイド本体に対して回転運動を与える。
4. スライダガイドの回転運動はスライダでローラを経て、直線運動に変換される。
5. スライダガイドからの回転運動とスライダの直線運動より、ばねが自身の垂直方向に変位する。
6. 左右対になっているスライダガイドの回転角が互いに同位相、あるいは逆位相の状態（剛性を有した状態）のまま更にモータが回転することで肘関節まわりに前腕が駆動する。

以上、機構の仕組みについて述べた。次章からは本機構の剛性のモデル式について導出する。

3. 可変剛性機構のモデル式導出

まず、図 4 に示すようにアームの水平状態での基本座標系を $s-t$ 座標系とする。またその座標系の原点は、肘関節軸であり O とする。その座標系を基に肘の回転角を θ 、左右のスライダガイド 1 とスライダガイド 2 の回転角をそれぞれ、 θ_1 , θ_2 とする。ここで θ の回転方向を正の方向とする。

3.1 スライダガイドによるばねが作用する力 ばねが前腕リンクに対して垂直に与える力 F_1 を求める。図 5 に示す通り、前腕が t 軸から θ 回転した時の前腕に垂直な軸を n 、スライダガイドが t 軸から θ_1 回転した時のばねの直動軸を n' とする。また、肘の回転中心軸 O からローラの中心軸までのオフセットを a とす

Fig. 4 The conceptual diagram of mechanism.

Fig. 6 Relation of offset and spring deflection.

Fig. 5 Relation of force for rotation angle.

る。この時のローラが肘関節とスライダガイド1の回転に対してスライドする量 L_1 は、次式で表される。

$$L_1 = a \tan(\theta_1 - \theta) \quad (1)$$

次に、ばねが作用する力 F_1' を考える。 F_1' は、ばね定数 k 、ばねの変位量 ℓ より、

$$F_1' = k\ell \quad (2)$$

である。ばねの変位量 ℓ は図6より、

$$\ell = b - a \quad (3)$$

である。 b はこの n 軸から n' 軸まで回転した時のばねに対する垂直方向のオフセットであり、

$$b = \frac{a}{\cos(\theta_1 - \theta)} \quad (4)$$

と求められる。式(3)、式(4)から回転角に対するばねの変位量は

$$\ell = a \left[\frac{1}{\cos(\theta_1 - \theta)} - 1 \right] \quad (5)$$

となる。よって、式(2)、式(5)から F_1' を回転角を変数とする式に書き換えると、

$$F_1' = ka \left[\frac{1}{\cos(\theta_1 - \theta)} - 1 \right] \quad (6)$$

となる。更にローラが前腕リンクを垂直方向に対して作用する(押さえる)力を F_1 とすると図5より、

$$F_1 = F_1' \cos(\theta_1 - \theta) \quad (7)$$

となる。ゆえに、式(6)、式(7)より F_1 を回転角を変数とする式に書き換えると、

$$F_1 = ka[1 - \cos(\theta_1 - \theta)] \quad (8)$$

となる。これより、ばねが前腕リンクに対して垂直に与える力 F_1 が導出された。

スライダガイド2が前腕リンクに対して垂直に与える力 F_2 も同様に、

$$\begin{aligned} F_2 &= ka[1 - \cos(\theta - \theta_2)] \\ &= ka[1 - \cos(\theta_2 - \theta)] \end{aligned} \quad (9)$$

となる。ただし、スライダガイド2は n 軸を挟んでスライダガイド1とは逆側に回転するため、スライド量 L_2 は

$$\begin{aligned} L_2 &= a \tan(\theta - \theta_2) \\ &= -a \tan(\theta_2 - \theta) \end{aligned} \quad (10)$$

となる。

Fig. 7 Equilibrium of momentum.

3.2 モーメントのつりあい ここで図7より回転中心のO点周りのモーメントを考える。O点周りのモーメントのつりあいは、 θ 方向を正として、

$$2F_1L_1 - 2F_2L_2 = \tau \quad (11)$$

となる。式(11)の右辺 τ は F_1 と F_2 がアームをO点周りに回転させるトルクである。ここで式(1)、式(8)、式(9)、式(10)を式(11)に代入して整理すると、

$$\begin{aligned} \tau = & 2ka^2[\tan(\theta_1 - \theta) - \sin(\theta_1 - \theta)] \\ & + 2ka^2[\tan(\theta_2 - \theta) - \sin(\theta_2 - \theta)] \end{aligned} \quad (12)$$

と表される。また、アームが静止状態にあり、外力がアームに全く作用しない状態を考える。アームの質量も十分小さく無視できるものとし、このときの θ を θ_s とする。このとき式(12)は

$$\begin{aligned} 0 = & 2ka^2[\tan(\theta_1 - \theta_s) + \tan(\theta_2 - \theta_s) \\ & - \sin(\theta_1 - \theta_s) - \sin(\theta_2 - \theta_s)] \end{aligned} \quad (13)$$

となる。これを解くと、

$$\theta_s = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \quad (14)$$

が得られる。

3.3 可変剛性係数の算出 $\Delta\theta = \theta_s - \theta$ とし、式(12)から式(13)を減じると、

$$\begin{aligned} \tau = & \{2ka^2[\tan(\theta_1 - \theta_s + \Delta\theta) - \sin(\theta_1 - \theta_s + \Delta\theta)] \\ & + 2ka^2[\tan(\theta_2 - \theta_s + \Delta\theta) - \sin(\theta_2 - \theta_s + \Delta\theta)]\} \\ & - \{2ka^2[\tan(\theta_1 - \theta_s) - \sin(\theta_1 - \theta_s)] \\ & + 2ka^2[\tan(\theta_2 - \theta_s) - \sin(\theta_2 - \theta_s)]\} \end{aligned} \quad (15)$$

Fig. 8 Generation of same phase for gravity.

となる。ここで加法定理を用いて式(15)を展開し、 $\sin\Delta\theta \approx \Delta\theta$, $\cos\Delta\theta \approx 1$, $\Delta\theta^2 \approx 0$ として近似して式を整理すると、

$$\tau = K(\varphi)\Delta\theta \quad (16)$$

$$K(\varphi) = 4ka^2(1 + \tan^2\varphi - \cos\varphi) \quad (17)$$

$$\varphi = \frac{\theta_1 - \theta_2}{2} \quad (18)$$

と表される。この $K(\varphi)$ がスライダガイドの回転角に依存する可変剛性係数を表す。本論文において可変剛性係数とは、ばね定数およびスライダと機構本体の回転中心軸のオフセットによる機構的定数を含み、更に双方のスライダガイドの回転角を変数にもつものとして定義する。なお、肘の回転角 θ は外力、ばねがスライダに与える力、アームの慣性力などで決まる変数である。

4. 評価実験

4.1 非線形剛性の測定 本機構の入力を θ_1 と θ_2 の2自由度と考えると、 $\theta_s (= \frac{\theta_1 + \theta_2}{2})$, $\varphi (= \frac{\theta_1 - \theta_2}{2})$ を独立に制御できるので、 θ_s と $K(\varphi)$ を独立に設定できる。今、図8のように回転中心Oから L_a だけ離れたアーム先端におもりの負荷 mg の力を作用させ、 $\theta=0$ となるように、 $\theta_s = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2}$ を制御する。外トルク mgL_a が作用していないとき、アームの中立軸 s' 軸は s 軸に一致するので肘関節角度が $-\theta_s$ 変形することで発生するトルクが、外トルク mgL_a とつり合っているとみなせる。よって、O点まわりのモーメントのつり合いは、

$$K_{exp}(\varphi)[0 - (-\theta_s)] - mgL_a = 0 \quad (19)$$

Fig. 9 Overview of experiment.

となり、このときの中立点を s 軸とした O 点まわりの回転剛性 $K_{exp}(\varphi)$ は、

$$K_{exp}(\varphi) = \frac{mgL_a}{\theta_s} \quad (20)$$

で求められる。 φ を様々に変化させた時の $K_{exp}(\varphi)$ を測定し、式 (17) で求められる理論値と比較する。

4.2 実験方法 前節を踏まえ、剛性測定を行った。その実験の概観を図 9 に示す。前腕の端面に糸を吊り下げ、その先に地面に対して垂直になる様におもりを乗せる。スライダガイドの回転角位相差 φ を 5° から 35° まで 5° 刻みで変化させる。それぞれの位相差 φ においておもりの質量 m を変化させ、そのときに前腕を水平にするために与える θ_s を計測する。なお、ここではおもりを吊るす位置を $L_a=0.22$ [m] としている。おもりによる負荷は $\varphi=5, 10, 15^\circ$ に対しては、 0.05 [kg] から 0.5 [kg] まで 0.05 [kg] 刻みで、 $\varphi=20, 25, 30, 35^\circ$ に対しては 0.25 [kg] から 3.0 [kg] まで 0.25 [kg] 刻みで変化させる。

おもりを吊るす補助具および前腕部の質量により、 $\theta_1 = \theta_2 = 0$ としたときに前腕部は水平とはならない。 φ をある一定値に固定したときに前腕部を水平にする補正量 θ_s と、おもりによる外トルク mgL_a の関係は線形となるため、おもりを吊るさない場合 ($m=0$) のときの補正量 $\theta_{s0}(\varphi)$ をあらかじめ計測しておき、それからの偏差を記録していく。

4.3 実験結果と考察 実験結果を図 10, 11 に示す。図 10 はスライダガイド位相差 φ のときの、おもりの質量 m によって発生する外トルク mgL_a と、そのときに前腕を水平にするために与える θ_s の関係をプロットしたものであり、実線は理論値である。各位相差におけるグラフの傾きが、非線形な関係を線形近似したときの平均剛性値である。

図 11 は図 10 にプロットした各位相差 φ に対する

Fig. 10 Relation of torque by weight and joint angle.

Fig. 11 Changing of stiffness for each phase difference.

実験結果から得られた傾き (回転剛性) をプロットしたものである。図 10 同様、実線は理論値である。

$\varphi=5, 10^\circ$ のときは、理論値から外れた結果となっている。これは本機構が発生するばねの加圧力 F_1, F_2 が小さく、図 2 に示すように本機構は間接駆動であり、機構の持つガタによってその剛性の効果が正確に現れなかったものと考えられる。また $\varphi=35^\circ$ のときは、 $m=2.50, 2.75, 3.00$ [kg] に対してプーリベルト機構の歯飛びが発生し、データを取得できなかった。他の点では概ね理論値と実験値は一致している。

以上より、スライダガイド回転角の位相差 φ によって、回転剛性を非線形に変化させられることが明らかになった。

5. おわりに

本論文では肘関節に実装可能な可変剛性機構を提案した。まずはじめに、本機構の仕組みや使用する主要部品について詳述し、機構の一連の挙動を可動部を交えて述べた。次にスライダガイドの回転角度を変数に

持つ、剛性のモデル式を導出した。これにより、次の章で実測値と理論値によって比較・検討が行える。最後に実機を用いて剛性変化の実験を行い、その効果を理論値と比較し検証した。これより検証結果から考察を行い、ヒューマノイドロボットのアームモデルを通じて、本機構によって回転剛性の非線形変化を確認できた。

本論文で提案した機構は肘関節に着眼したが、他の関節部においても同様に実装可能であるか否かを検証し、同時に有効性があるか否かを検討することも今後の課題である。また、今回の実験を通して明らかになった機構の不備や、更なる小型・軽量化、剛性の範囲拡張などを含め改良を進めていく。

文 献

- (1) Nagata, K., Ogasawara, T. and Omata, T., Optimum Velocity Vector of Articulated Robot for Soft Bumping, In *Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers*, Vol. 26, No. 4 (1990), pp. 435–442.
- (2) Huang, W.H., Krotkov, E.P. and Mason, M.T., Impulsive Manipulation, In *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, (1995–5), pp. 120–125.
- (3) Yamaguchi, J. and Takanishi, A., Design of Biped Walking Robots Having Antagonistic Driven Joints Using Nonlinear Spring Mechanism, In *Proc. of IEEE/RSJ Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems*, (1997–9), pp. 251–259.
- (4) Kino, H., Okamura, N. and Yabe, S., Basic Characteristics of Tendon-driven Manipulator Using Belt Pulleys, In *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, (2004–9), pp. 1287–1292.
- (5) Morita, T. and Sugano, S., Design and Development of a new Robot Joint using a Mechanical Impedance Adjuster, In *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, (1995–5), pp. 2469–2475.
- (6) Umedachi, T. and Ishiguro, A., A Development of a Fully Self-contained Real-time Tunable Spring, In *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, (2006–10), pp. 1662–1667.
- (7) Hurst, J.W., Chestnutt, J.E. and Rizzi, A.A., An Actuator with Physically Variable Stiffness for Highly Dynamic Legged Locomotion, In *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, (2004–5), pp. 4662–4667.
- (8) Okada, M., Nakamura, Y. and Ban, S., Design of Programmable Passive Compliance Shoulder Mechanism, In *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, (2001–5), pp. 348–353.
- (9) Shirai, T., Miura, F. and Tomioka, T., “Spring Implement”, Japanese Patent Disclosure H16-169795 (2004)
- (10) Murata, S. and Matsuda, T., “Nonlinear Elastic Element Using Noncircular Gears”, Japanese Patent Disclosure H19-078036 (2007)
- (11) Hayashibara, Y., “Driving Implement”, Japanese Patent Disclosure H16-105609 (2004)