

外力推定機能を有する弾性関節の開発

Development of an elastic joint having the ability to estimate external force

○梶川伸哉*

Shinya Kajikawa*

*東北学院大学

*Tohoku Gakuin University

キーワード： 弾性関節 (elastic joint), 外力推定 (force estimation), シリコンゴムクッション (silicon gum cushion), 圧力センサ (pressure sensor)

連絡先： 〒985-8537 多賀城市中央1-13-1 東北学院大学工学部 機械創成工学科
梶川伸哉, Tel./ Fax. : (022)368-7124, E-mail: kajikawa@tjcc.tohoku-gakuin.ac.jp

1. はじめに

人間との共存を指向するロボットにおいて、人間との接触や衝突は不可避である。逆に、介護におけるマッサージやスキンケアといった作業のようにロボットが積極的に人間の身体に接触することが望まれると考えられる。安全性確保上、人間身体の表面形状やその動きに即座に対応するためロボット関節等には柔軟性が求められる。また、効果的、効率的な作業の実現のためには柔らかさのみでなく人間のように作業中に関節の剛性を調節する機能も必要になる。特に、身体との接点となる指関節に関してはその重要性が増すと考えられる。

ロボット関節の剛性調節法についてはこれまでも様々な提案がなされている。例えば、拮抗筋型腱駆動構造を弾性特性を有するワイ

ヤーで構成し、その張力の制御により剛性調節を実現するものや、ペローズを利用しその空気圧制御により実現する方法などがある¹⁾²⁾。また、関節内部でリンクと板ばねを接続し、板ばねの支持位置の制御により剛性を調節するものも提案されている³⁾。しかしながら、これらの剛性調節方式は関節の回転方向のみを対象としたものであり、指先のように他方向から外力が作用する場合には、多方向への受動柔軟性を備えることが望ましい。しかしながら構造が複雑になり、サイズの増大化が懸念される。

一方、このような関節剛性を調節するためには関節にかかるトルク負荷をセンシングする必要もある。関節トルクセンサやトルク計測法についてはこれまでもいくつかの方式が提案されており⁴⁾⁵⁾、ロボットフィンガー関節への搭載が可能な小サイズのセンサやトル

ク計測法についても報告例がある6)7)8). しかし、これらは一軸方向のみを計測対象としており、多軸方向の計測は困難である。

そこで、本研究ではスキンケアなど人間身体へのソフトコンタクトを目的とするロボットフィンガーの実現を目指し、安全かつ安定した接触状態を維持するために必要な多軸方向の柔軟性と外力推定機能を備えた関節モジュールの開発を行う。提案する関節機構は、シリコーンゴムクッションを用いたクラッチ機構により回転運動を伝達するものであり、シリコーンゴムクッションの弾性により外力に対する柔軟性を実現し、シリコーンゴムクッションの内部の圧力変化から、外力トルクの推定を行うものである。また、クラッチ盤の押し付け力により関節剛性の調整が可能になると考えられる。本報告はその第一歩として関節機構の概要の説明と試作したモジュールを用いて行った基本特性の解析結果について報告する。

2. 関節の基本構造と機能

本研究で提案する関節モジュールの概要を図1に示す。運動伝達はシリコーンゴム製クッションを取り付けたリンク根元部を左右の円盤で挟みこみ、円盤の回転運動を摩擦によって伝達する方式である。シリコーンゴムの弾性により、図中の矢印で示す x, y, z 軸の3軸回りに対する弾性を有する。また、円盤の挟み込み力(円盤間距離)を制御することにより弾性特性を調整することも期待できる。

さらにシリコーンゴムクッションの弾性特性とその内部に設けた空気室内の圧力変化から3軸回りの外力トルクの推定を行う機能も併せ持つ。

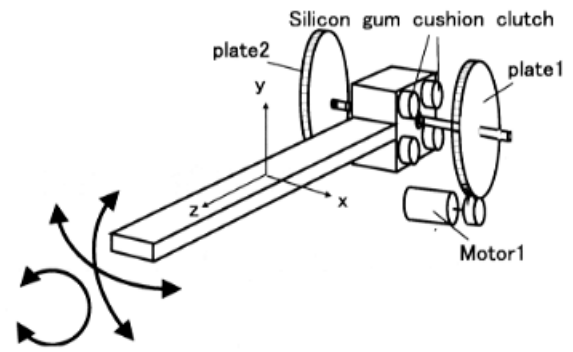


Fig. 1 Joint model

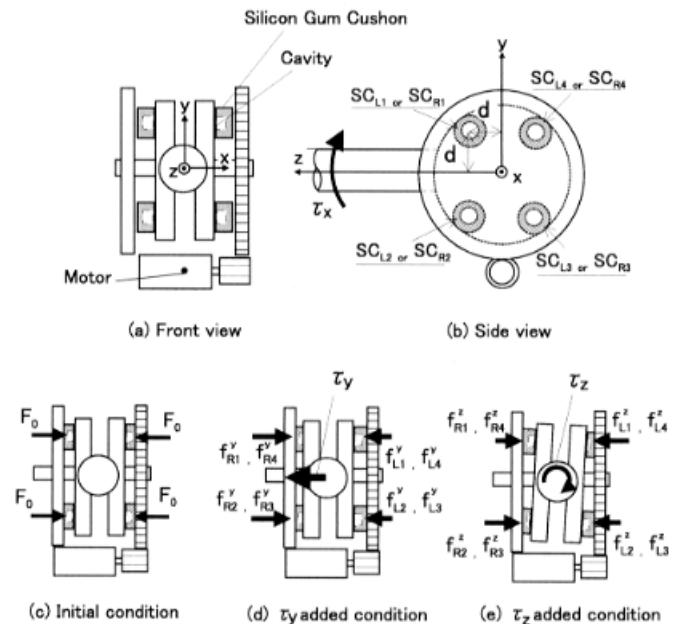


Fig. 2 Deformation model

3. 外力推定機能

リンク上に作用する任意の外力は、関節内部では図2に示す x, y, z 軸回りのトルク τ_x, τ_y, τ_z として作用する。よって、この3軸回りのトルクを計測対象とする。まず、図2に示すように左右のクラッチ円盤接触面上に4つずつ対称に計8個のシリコーンゴムクッションを設置する場合を考える。各面上のクッションの位置はリンク回転中心を原点とする座標系の y 軸, z 軸までの距離がともに d であるとする(図2(b)参照)。また、図中ではそれぞれのクッションを SC_{Li}, SC_{Ri} と表記している。ここで添え字の L, R はクラッチ円盤面の左右

設置面を表し、 i ($i = 1 \sim 4$) はそれぞれの設置面上の位置を表している。このようなクッションの配置を行うことで、クッション内部の圧力変化をもとに簡単な演算で y 軸、 z 軸回りの回転トルクを推定することができる。その方法を以降に示す。

また、 x 軸回りのトルク τ_x については、クッションのせん断変形が主として生じるため、内部の圧力変化は微小となることが予想される。そのため圧力情報からのトルク推定は困難と考えられる。そこで、こちらに関しては回転方向の外力に対する応答を解析し、リンクの回転角情報からのトルク推定を行うことにする。

3.1 y 軸、 z 軸回りのトルクの推定法

ここでは、まず、圧力変化による y 軸、 z 軸回りのトルク τ_y 、 τ_z の推定法について説明する。圧力変化を生じさせるクッションの圧縮力は、図2(c)に示すように初期状態でのクッションの挟み込み力 F_0 と、各軸回りの外力トルク負荷に起因するものの重ね合わせとなる。

そこで、図2に示すように各トルクにより生じるクッションの圧縮力を次のように表記することとする。

$$\begin{aligned} \tau_x \text{に起因する圧縮力} &\rightarrow f_{L_i}^x, f_{R_i}^x \\ \tau_y \text{に起因する圧縮力} &\rightarrow f_{L_i}^y, f_{R_i}^y \\ \tau_z \text{に起因する圧縮力} &\rightarrow f_{L_i}^z, f_{R_i}^z \end{aligned}$$

ここで、添え字の R 、 L は左右のクラッチ面、 i はクッションの位置($i = 1 \sim 4$)を表すものである。また、本来、 τ_x はクッションに対してせん断変形を及ぼすものであるが、この変形よっても内部に容積変化が生じると考えられる。この容積変化と同程度の変化を生じさせる圧縮力を $f_{L_i}^x$ 、 $f_{R_i}^x$ として挙げている。

以上の表記を基に各クッションの圧縮力の状態 F_{L_i} 、 F_{R_i} は以下のような各成分の重ね合

わせで表すことができるものとする。

$$F_{L_i} = F_0 + f_{L_i}^x + f_{L_i}^y + f_{L_i}^z \quad (1)$$

$$F_{R_i} = F_0 + f_{R_i}^x + f_{R_i}^y + f_{R_i}^z \quad (2)$$

$$(i = 1 \sim 4)$$

また、クッションの配置位置の対称性から各圧縮力の間には以下の関係が成り立つものとする。

$$f_{L_i}^x = f_{R_i}^x \quad (i = 1 \sim 4) \quad (3)$$

$$f_{L_1}^y = f_{L_2}^y = f_{R_3}^y = f_{R_4}^y \quad (4)$$

$$f_{L_3}^y = f_{L_4}^y = f_{R_1}^y = f_{R_2}^y \quad (5)$$

$$f_{L_1}^z = f_{L_4}^z = f_{R_2}^z = f_{R_3}^z \quad (6)$$

$$f_{L_2}^z = f_{L_3}^z = f_{R_1}^z = f_{R_4}^z \quad (7)$$

次に、外力トルクとクッションの弾性力により発生するトルクの釣り合い状態を考えると以下の二式が成立する。

- y 軸回りトルクの釣り合い

$$\begin{aligned} \tau_y = & d(F_{L_1} + F_{L_2} - F_{L_3} - F_{L_4}) + \\ & d(F_{R_1} + F_{R_2} - F_{R_3} - F_{R_4}) \quad (8) \end{aligned}$$

- z 軸回りトルクの対する釣り合い

$$\begin{aligned} \tau_z = & d(F_{L_1} + F_{L_4} - F_{L_2} - F_{L_3}) + \\ & d(F_{R_1} + F_{R_4} - F_{R_2} - F_{R_3}) \quad (9) \end{aligned}$$

上記の釣り合い式に(3)式～(7)式に示す関係とクラッチ左右面上の圧縮状態の対称性を考慮すると、次のように各トルク成分は、それに起因して発生するクラッチ左右面のいずれかの圧縮力のみによって表すことができる。

$$\tau_z = 2d(f_{L_1}^z + f_{L_4}^z - f_{L_2}^z - f_{L_3}^z) \quad (10)$$

$$\tau_y = 2d(f_{L_1}^y + f_{L_2}^y - f_{L_3}^y - f_{L_4}^y) \quad (11)$$

よって、クッション内部の圧力と圧縮力の関係を把握することにより、圧力情報を用いてトルクの推定を行うことができる。

3.2 x 軸回りのトルク推定法

次に x 軸回りに対するトルク τ_x によるクッションのせん断変形に伴う内部の容積変化は微小であると考えられる。そのため、外力変化を明確に反映する圧力変化は期待できないと考えられる。よって、この方向のトルクに関しては、関節の回転方向の外力応答特性を解析し、外力負荷に対するリンクの回転量からトルクを推定する方法が必要になると考えられる。

4. 関節モジュールの試作

ロボットフィンガーへの適用を想定し、提案する方式の関節モジュールの試作を行った。試作品の外観を図 3 に示す。全体のサイズは関節部が縦×横×高：60×37×40mm であり、リンク部の長さは 140mm である。全体の重量は 90g である。関節駆動用モータとして HS-GM21-DLG (STL JAPAN：定格 5V, 3.3Kgcm, 15~50rpm) を一段減速 (1:3) して利用している。シリコンゴムクッション (信越シリコン KE1300T, 10%希釈) は左右のクラッチ面上にリンク回転中心から半径 10mm の同心円状に 4 個ずつ放射状に配置した。また、圧力の計測には片面の 4 個のみを使用することとし開口部を圧力センサ PSM-001KPGW (Fujikura：定格 ± 1 kPa) に接続した。さらに、リンク回転軸にポテンシオメータ PVS1A103A01 (Murata) を取り付け回転角の検出が行えるようにした。

4.1 関節モジュールの基礎特性、性能の解析

以降では、試作した関節モジュールの基礎特性、性能検証の一つとして静的負荷に対す

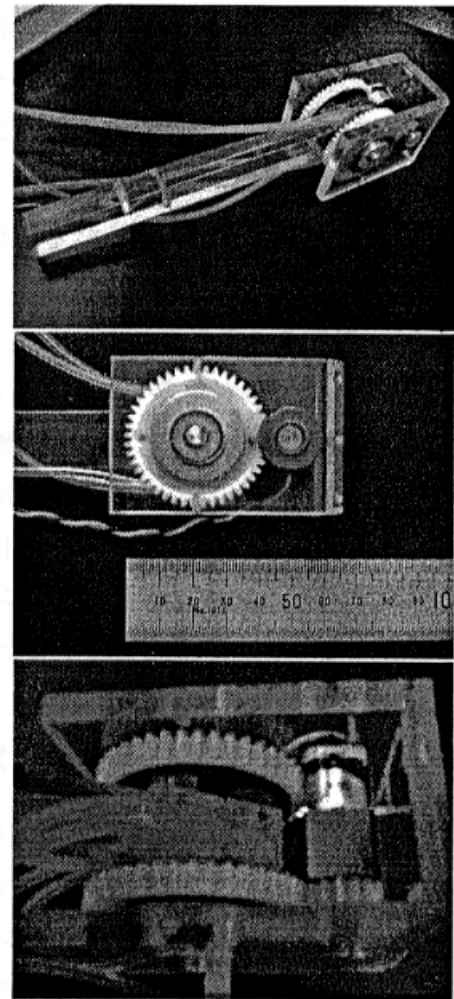


Fig. 3 Prototype of proposed joint module

るリンク回転方向の弾性特性と圧力変化を利用した外力推定機能の性能評価を行う。

4.1.1 シリコンゴムクッションの弾性特性

まず、トルク推定を行うためには圧力変化と圧縮力との関係を把握する必要がある。そこで、関節に用いたシリコンゴムクッションの弾性特性解析実験を行った。実験装置の概要は図 4 に示すようなものである。実験は電子秤の上に載せたクッション上部を精密ステージに取り付けたアームで圧縮負荷を変化させ、その際の荷重量と圧力センサ出力の変化量の関係を調べた。負荷のかけ方は、初期状態から 0.4mm ずつ押し込み量を増やし、事

前に設定した最大値 2.4mm に達した後は逆に 0.4mm ずつ圧縮量を減らし、初期状態まで戻すという手順で行った。

シリコンゴムクッションの外形は図 5 に示すものである。このタイプのクッション 3 個を計測対象とした。その結果を図 6 に示す。この図は初期負荷時の圧力センサの出力電圧を基準とし、負荷に対する出力電圧の変化分をプロットしたものである。

この結果から、クッションの圧縮力と圧力変化の関係はほぼ線形で近似できるのものと考えられる。しかしながら、最大負荷、最小負荷領域での計測値のばらつきが確認できる。これは、クッション弾性のヒステリシス特性が現れているものと考えられる。線形近似 ($F = 72.2\Delta V$) からの残差は最大で 3.0N 程度、残差平均値は 1.25N 程度であった。

また、最小負荷領域では出力電圧が負の領域に分布している点はいくつか確認される。これは最終到達点であり、当然初期状態に一致するはずである。この原因としてはヒステリシス特性に加え、負荷条件の違いが影響しているものと考えられる。負荷制御はステージの目盛りの目視により手動で行ったため、微小接触状態である初期状態と完全に一致する接触状態が再現できなかったことも一因として考えられる。

全体傾向を線形で近似できることは圧力へ

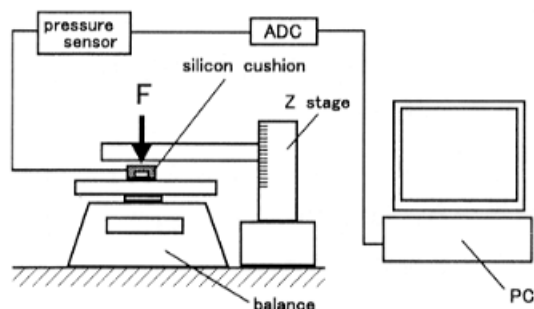


Fig. 4 Experimental Setup

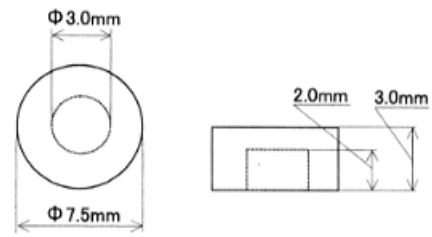


Fig. 5 Silicon gum cushion.

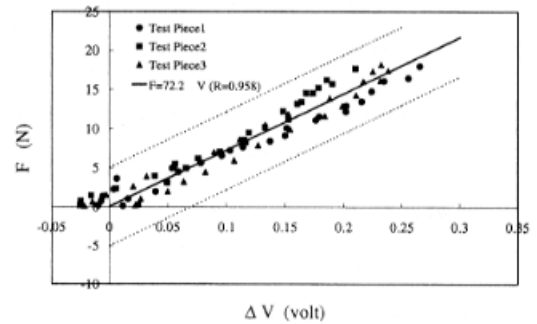


Fig. 6 Stiffness of silicon gum cushion.

の変換、およびトルク推定が非常に簡便となることから、以降では線形近似を用いたトルク推定を行うことにする。

4.1.2 リンク回転方向 (x 軸回り) の外力応答

関節の回転方向外力に対する応答を解析する実験を行った。実験はリンク先端に荷重を加え、リンクの回転が静止した時点の回転角度をポテンシオメータを用いて計測した。トルク負荷 τ_x はリンクの回転中心から 85mm の位置を左右に引く力を 100gf ずつ増加させて与えた。また、クッションを挟み込んでいる左右の回転円盤の距離 D (図 7 参照) を 15.0mm, 14.4mm, 13.8mm の 3 種類とし、挟み込み力の違いによる応答の変化について検討した。

その結果を図 8 に示す。図中の + 側は右側への回転、- 側は左側への回転を表している。この結果から、左右回転方向とも負荷トルク τ_x がほぼ $\pm 0.2\text{Nm}$ の範囲では大きな回転は生じず、トルク負荷が 0.2Nm を超える付近から回

転量が急激に増加することが確認された。応答特性の変化について、回転状況を目視で確認したところ負荷の小さい領域ではクッションにせん断変形が生じ小さな回転が生じており ($\pm 10\text{deg.}$ 未満), その後負荷が増えると円盤との間ですべりが生じ, 結果として大きな回転が発生していることが確認された。つまり, 外力に対して, クッションのせん断方向の弾性復元力と動摩擦力の二つの要素が作用するものと推測される。円盤間の距離 D を狭めるにつれ回転量が減少する傾向は, 動摩擦力の増大による減衰効果の上昇を表しているものと推察される。

いずれの領域についても外力とリンク回転角の関係は線形性が成り立つことが確認され, この関係を用いて外力の推定は行えるものと考えられる。

一方, ある程度の大きさの外力トルクが加わった後の応答は, すべり分のオフセットが残ることが予想され, 動的な外力に対する追従性能を高めるためにはソフトウェアによる補償動作が必要になると予想される。

4.1.3 外力推定機能の検証

次に, シリコンゴムクッション内部の圧力変化を用いた外力推定機能の検証実験を行った。実験は y 軸, z 軸回りのトルク τ_y, τ_z の計測である。

Table 1 Estimated Torque τ_y^*

τ_y (N·m)	τ_y^* (N·m)	Error (%)
0.055	0.054	-0.73
0.110	0.117	7.00
0.164	0.178	8.47
0.220	0.239	9.06
0.274	0.300	9.46

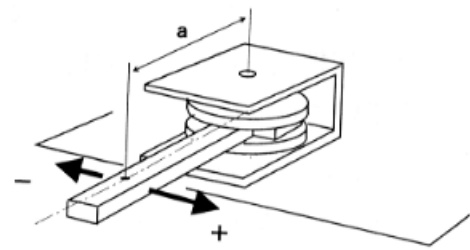


Fig. 7 Direction of external force.

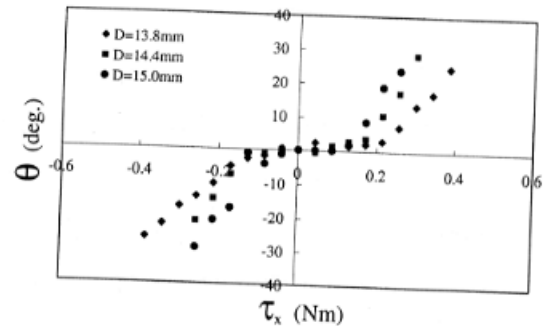


Fig. 8 Response to external force

(a) τ_y の計測

まず, y 軸回りのトルク計測について示す。実験は図9に示すようにリンク先端をベアリングで保持し, リンクの回転中心からの距離 $a=85\text{mm}$ の位置に水平方向に負荷を加えるためのバーを取り付けた。そのバーのリンク中心から距離 $b=28\text{mm}$ の位置に $200\text{g}\sim 1000\text{g}$ まで 200g 毎に重量を増やした錘を吊り下げ, y 軸回りのトルク τ_y を加えた。その時のシリコンクッションの圧力変化から (11) 式に従ってトルク負荷の計測を行った。その結果を図10に示す。図中の横軸が加えたトルク量 τ_y であり, 縦軸 τ_y^* が推定量である。なお, シリコンゴムクッションを挟む円盤間の距離 D は $D=14.4\text{mm}$ の一種類のみの結果である。また, 各負荷量に対するパーセント誤差を表1に示す。この結果から, ほぼ10%以内の誤差で計測を行えることが確認できる。

(b) τ_z の計測

次に z 軸回りのトルク計測について示す。

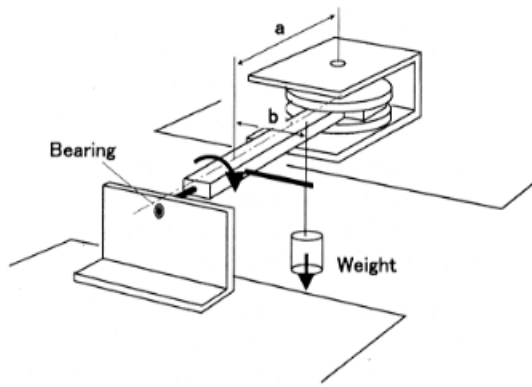


Fig. 9 Experimental System.

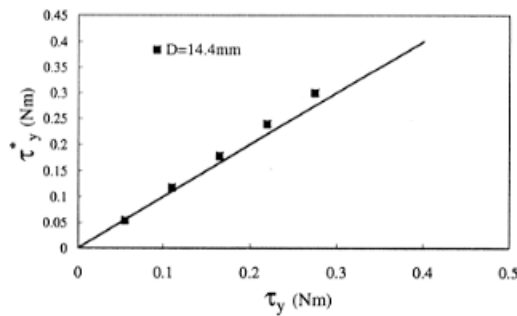


Fig. 10 Measurement result of torsion moment τ_y

実験は図9中に示すリンク先端のベアリング支持を外し、リンクの回転中心からの距離 $a=85\text{mm}$ の位置に $100\text{g}\sim 800\text{g}$ まで 100g ずつ重量を増やした錘を吊り下げることによってトルク負荷を加えた。また、クッションを挟む円盤間の距離 D を $D = 13.8, 14.4, 15.0\text{mm}$ の3種類とした。その結果を図11、表2に示す。この結果から、トルク負荷の増加に伴い推定精度が悪化する傾向がわかる。また、いずれも推定値が小さくなる傾向であり、その原因としては荷重によるクッションのつぶれ方が影響しているものと考えられる。鉛直方向の力による変形に関しては、図6に示すように荷重にほぼ比例した形で圧力変化が得られるが、この実験の場合はクッションの縁側から斜めに荷重が掛かることとなり、荷重に対する空気室内部の変形が減少したものと考えら

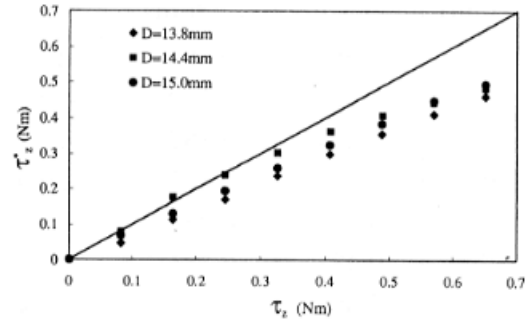


Fig. 11 Measurement result of bending moment τ_z

れる。そのため推定量が減少したものと考えられる。

5. おわりに

本論文では、シリコーンゴムクッションの弾性変形を利用し、外力推定を可能とする弾性関節機構を提案した。試作モジュールを用いた静的特性解析の結果、リンク回転方向の応答はクッション弾性力と動摩擦力の二つにより構成されること、また、クッションの弾性が支配的となる領域は外力トルクが 0.2Nm 未満の範囲であることがわかった。

次に外力推定機能については、 y 軸回りトルクに関しては 10% 程度、 z 軸回りのトルクについては最大で 30% 台の誤差が生じる可能性があることが確認された。クッションを圧縮する力の作用方向が誤差の増大と関連しているものと考えられる。

以上の解析結果から改良点として、リンク回転軸回りの弾性応答領域の拡大と y 軸、 z 軸回りのトルク推定結果の補正方法の構築が挙げられる。また、動的負荷に対する性能を検証した後、スキンケア動作等を目標として制御アルゴリズムを構築する予定である。

Table 2 Estimated Torque τ_z^*

D (mm)	τ_z (N·m)	τ_z^* (N·m)	Error (%)
13.8mm	0.081	0.068	-16.7
	0.162	0.129	-20.6
	0.244	0.192	-21.1
	0.325	0.257	-20.9
	0.407	0.324	-20.4
	0.488	0.384	-21.4
	0.569	0.448	-21.4
	0.651	0.494	-24.1
14.4mm	0.081	0.080	-2.2
	0.1626	0.175	7.5
	0.244	0.238	-2.3
	0.325	0.302	-7.2
	0.407	0.362	-11.2
	0.488	0.407	-16.8
	0.569	0.442	-22.3
	0.651	0.482	-25.9
15.0mm	0.084	0.046	-43.4
	0.162	0.113	-30.7
	0.244	0.169	-30.9
	0.325	0.236	-27.6
	0.407	0.298	-26.8
	0.488	0.355	-27.3
	0.569	0.410	-27.9
	0.651	0.460	-29.3

参考文献

- 1) 小金沢鋼一, 山崎政道, 石川夏男: 剛性可変機能を有する拮抗筋型腱駆動システムとその制御, 日本ロボット学会誌, **18-7**,1003/1010 (2000).
- 2) 早川恭弘, 川村貞夫: 空気圧ペローズアクチュエータの基本性能と力センサーへの応用, 日本ロボット学会誌, **11-5**,756/764 (1993).
- 3) 森田寿郎, 菅野重樹: メカニカルインピーダンス調節機構による関節制御 - 機構の提案とロボット指への適用 -, 日本ロボット学会誌, **14-1**,131/126 (1996).
- 4) M.Hashimoto, T.Ishitsuka, I.Godler and M.Horiuchi: Velocity dependance of the characteristics of harmonic drive built-in torque sensing, Proc. of IEEE Int. Conf.Trans. on Robotics and Automation, **2**, 1334/1339 (2000).

- 5) F.Aghili, M.Buehler and J.M.Hollerbach: Design of a hollow hexaform torque sensor for robot joints, International Journal of Robotics Research, **20-12**,967/976 (2001).
- 6) D.Vischer and O.Khatib: Design and development of high-performance torque-controlled joints, IEEE Trans. on Robotics and Automation, **11-4**, 537/544 (1995).
- 7) M.Kaneko, Y.Yokoi and K.Tanie: On a new torque sensor for tendon drive fingers, IEEE Trans. on Robotics and Automation, **6-4**, 501/507 (1990).
- 8) 余 永, 石塚 喬, 辻尾 昇三: 歪変形拡大メカニズムを用いた指関節トルクの高感度センシング, 日本ロボット学会誌, **20-5**,528/536 (2002).